

吉林省一级期刊
吉林省科技期刊30强
“中国知网”上网期刊
《中国学术期刊网络出版总库》收录期刊
《中文科技期刊数据库》收录期刊
《中国核心期刊(遴选)数据库》收录期刊
“万方数据—数字化期刊群”全文上网期刊
《CAJ—规范》执行优秀期刊

ISSN 1005-7129
CN 22-1106/S

吉林林业科技

JOURNAL OF
JILIN FORESTRY SCIENCE AND TECHNOLOGY

第55卷 总第300期
2026 **2**
JILIN LINYE KEJI

目 次

白车轴草种质资源表型多样性分析	赵佳丽等(1)
长白山区不同櫟木种质资源调查与种子质量分析	李成龙等(7)
3种羊草种子萌发期的耐盐碱性评价	李海静等(14)
不同大青杨无性系光合特性比较研究	邹建军等(19)
耦合环境因子的长白落叶松林叶面积指数遥感精细化反演	刘 婷等(27)
基于不同替代寄主繁育的松毛虫赤眼蜂对落叶松毛虫卵的寄生能力的比较	宋丽威(33)
三色堇花色及环境因子对意大利蜜蜂访花行为的影响	刘国良等(38)
辽东绿色经济区生态环境-社会-经济耦合协调分析	夏书豪等(43)
本刊声明	(26)

CONTENTS

Phenotypic Diversity Analysis of <i>Trifolium repens</i> Germplasm Resources	ZHAO Jiali et al. (1)
Survey on Germplasm Resources and Analysis on Seed Quality of <i>Aralia elata</i> from Changbai Mountain Region	LI Chenglong et al. (7)
Evaluation of Saline-alkali Tolerance of Three Kinds of <i>Leymus chinensis</i> During Seed Germination	LI Haijing et al. (14)
Comparative Study on Photosynthetic Characteristics of Different <i>Populus ussuriensis</i> Clones	ZOU Jianjun et al. (19)
Refined Remote Sensing Inversion of Leaf Area Index Coupled with Environmental Factors for <i>Larix Olgensis</i> Forest	LIU Ting et al. (27)
Comparison of Parasitic Capacity of <i>Trichogramma dendrolimi</i> Reared on Different Alternative Host to <i>Dendrolimus superans</i> Eggs	SONG Liwei(33)
Influence of Flower Colors of <i>Viola tricolor</i> and Environmental Factors on Visiting Behaviors of <i>Apis mellifera ligustica</i>	Liu Guoliang et al. (38)
Analysis of Coupling and Coordination of Ecological Environment, Society, and Economy in Liaodong Green Economic Zone	XIA Shuhao et al. (43)
Statement	(26)

DOI:10.16115/j.cnki.issn.1005-7129.2026.02.001

文章编号:1005-7129(2026)02-0001-06 中图分类号:S541.9 文献标识码:A

白车轴草种质资源表型多样性分析

赵佳丽¹, 章林¹, 周勇¹, 赵永重², 朴雪飞³, 王晓娜¹

(1. 吉林省林业科学研究院, 吉林 长春 130033; 2. 通榆县公路管理段, 吉林 白城 137200; 3. 吉林省林业调查规划院, 吉林 长春 130022)

摘要:本研究以 14 个地点的白车轴草种质为材料, 采用变异分析、相关性分析、主成分分析方法对白车轴草株高、叶长、叶宽等 6 个表型性状进行分析与评价。结果表明, 14 个种质的 6 个表型性状变异系数范围为 15.33% ~ 38.62%, 其中茎长变异最显著, 表明其具有遗传改良潜力。相关性分析发现, 株高与叶长、叶宽等营养性状呈极显著正相关。主成分分析提取出 3 个主成分, 累计贡献率 81.795%, 反映了营养生长、繁殖等关键特征。本研究为白车轴草优良种质的选育与利用提供了理论依据。

关键词: 白车轴草; 表型性状; 相关性分析; 主成分分析

Phenotypic Diversity Analysis of *Trifolium repens* Germplasm Resources

ZHAO Jiali¹, ZHANG Lin¹, ZHOU Yong¹, ZHAO Yongchong², PIAO Xuefei³, WANG Xiaona¹

(1. Jilin Provincial Academy of Forestry Sciences, Changchun 130033, China; 2. Highway Administration Sector of Tongyu County, Baicheng 137200, China; 3. Forestry Investigation and Planning Institution of Jilin Province, Changchun 130022, China)

Abstract: *Trifolium repens* collected from 14 locations was taken as the object in this study. Six phenotypic traits such as plant height, leaf length, and leaf width were analyzed and evaluated by variation analysis, correlation analysis, and principal component analysis. The results showed that the coefficient of variation of 6 phenotypic traits of 14 germplasms ranged from 15.33% to 38.62%. The stem length variation was the most significant. That indicated that it had the potential for genetic improvement. Correlation analysis showed that plant height was very significantly positively correlated with nutritional traits such as leaf length and leaf width. Three principal components reflecting key characteristics such as nutritional growth and reproduction were extracted by principal component analysis, and the cumulative contribution rate was 81.795%. This study would provide the theoretical basis for the breeding and utilization of excellent germplasm of *Trifolium repens*.

Keywords: *Trifolium repens*; phenotypic traits; correlation analysis; principal component analysis

收稿日期:2025-11-13

基金项目:吉林省科技发展计划项目(20230202097NC)

第一作者:赵佳丽(1990—),女,助理研究员,主要从事林木育种与遗传改良研究工作,E-mail:Zhaojl_1990@126.com。

通信作者:王晓娜(1979—),女,高级工程师,主要从事林木育种与遗传改良研究工作,E-mail:1121095200@qq.com。

白车轴草 (*Trifolium repens*) 为豆科车轴草属多年生草本植物,在我国新疆、内蒙古和东北等地均有分布,是全球温带地区广泛栽培的重要豆科牧草^[1,2]。其茎叶丰富、草质细软、营养价值高,粗蛋白含量可达 17.3%,且适口性佳、产量高,具有很高的饲用价值^[3,4]。其绿期长,具有强大的抗逆性、耐践踏性和快速恢复能力,是园林绿化、护坡固土的理想选择,在生态修复中扮演着关键角色^[5]。

种质资源是遗传信息的载体,也是新品种选育与遗传改良不可或缺的物质基础^[6]。种质资源的多样性是长期自然选择与人工选择的结果,是育种工作得以持续创新的基础^[7]。遗传多样性直接体现了物种内部基因的丰富程度与变异水平,在揭示物种起源与演化、预测不同种源的环境适应潜力以及精准评估基因资源的分布格局等方面均具有至关重要的理论意义与应用价值^[8,9]。遗传多样性分析是种质资源鉴定、评价与利用的核心环节,通常从植物学性状(形态标记)与分子生物学两个层面系统展开^[10]。其中,表型性状能够直观反映性状的遗传变异,可为品种选育和基因资源研究提供重要参考^[11]。目前,对白车轴草的研究多集中于

种子萌发特性、生理生态等方面^[12,13],关于其形态结构特征的系统研究相对较少。因此,开展白车轴草形态性状的评价对其种质资源利用与遗传改良工作具有重要意义。

本研究以 14 个地点的白车轴草种质为材料,测定其表型性状,从形态学角度揭示该物种的变异特征,分析其变异来源,同时进行遗传多样性综合评价,旨在了解白车轴草种质资源遗传背景与遗传多样性状况,为其优良种源选育、利用与开发等提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

2023 年 7 月在 14 个地点系统开展了野生白车轴草种质资源的调查与单株采集工作,采集地点信息见表 1。参试 14 份白车轴草种质保存于吉林省林业科学研究院净月实验基地苗圃(地理位置 125°27'38.51" E、43°47'56.95" N),海拔 220 m,属温带大陆性半湿润季风气候,年平均气温 6.9℃,无霜期 120 d 左右,年均日照时数 2 407 h,年均降水量 768.2 mm,降雨以 7—8 月为主,土壤类型为黑土、草甸土和黑钙土,pH 6.0~7.4,试验地具备良好灌溉条件。

表 1 白车轴草采集地点信息

Tab. 1 Collection location information of *T. repens*

编号	采集地点	海拔/m	地理位置
1	吉林省吉林市桦甸市	263	126°44' E、42°58' N
2	吉林省吉林市蛟河市	295	127°20' E、43°43' N
3	吉林省吉林市舒兰市	220	126°57' E、44°24' N
4	吉林省延边朝鲜族自治州珲春市	35	130°22' E、42°52' N
5	吉林省延边朝鲜族自治州敦化市	523	128°13' E、43°22' N
6	吉林省延边朝鲜族自治州汪清县	242	129°46' E、43°19' N
7	吉林省通化市辉南县	300	126°02' E、42°41' N
8	吉林省通化市集安市	180	126°11' E、41°07' N
9	吉林省白山市临江市	332	126°55' E、41°48' N
10	吉林省白山市长白朝鲜族自治县	740	128°07' E、42°25' N
11	吉林省白山市江源区	549	126°35' E、42°03' N
12	吉林省白山市抚松县	736	127°47' E、42°40' N
13	黑龙江省哈尔滨市尚志市	190	127°57' E、45°12' N
14	内蒙古自治区呼伦贝尔市牙克石市	660	120°42' E、49°17' N

1.2 调查方法

2024年4月采用分株育苗方式育苗30 d左右,单株移栽进行田间试验。每个种质随机选择生长健康、无病虫害的5个植株,在高生长停止且开花旺盛期对其表型性状进行测定,用米尺测量株高(地面至植株生长的最高部位)及茎长,选取中上部顶生小叶,用游标卡尺测量叶片的长度和叶片最宽处的宽度,在茎段中部位位置测量茎粗,统计每个花序上的所有小花数量。

1.3 数据标准化处理

本研究的评价对象为14个,每个对象有6个表型指标。由于各性状指标数值单位不一,在进行多变量分析前,对所有数据进行了标准化预处理。

第*i*个评价对象的第*j*个指标的取值为 x_{ij} ,将各指标值转换成标准化指标值 X_{ij} 。

$$X_{ij} = (x_{ij} - \bar{x}_j) / s_j$$

式中: \bar{x}_j 为第*j*个指标的均值; s_j 为第*j*个指标的标准差。

1.4 主成分分析及综合评价

将标准化的数据用SPSS软件处理,选取累计贡献率 $\geq 80\%$ 的前*p*个主成分,然后建立*p*个主成分和标准化变量的关系。

$$Y_k = \sum (u_{kj} \times X_j)$$

式中: Y_k 为第*k*个主成分得分; u_{kj} 为第*k*

个主成分第*j*个指标的因子荷载。

用第*k*个主成分的贡献率与选取的*p*个主成分的总贡献率的比值来确定每个主成分的权重。

$$w_k = \lambda_k / \sum \lambda_k$$

式中: w_k 为第*k*个主成分的权重; λ_k 第*k*个主成分的贡献率。

构建综合评价函数,表型性状的综合评价得分 $Y = \sum (w_k \times Y_k)$ 。

1.5 数据统计分析

本研究采用Excel 2016软件进行数据整理与基本统计,使用SPSS 25.0软件进行相关性分析及主成分分析。

2 结果与分析

2.1 白车轴草表型性状变异分析

白车轴草表型性状指标如表2所示,各性状变异系数为15.33%~38.62%,反映出种质资源在表型层面具有较为丰富的多样性。其中,小花数量的变异程度最低,茎长最高。在6个表型性状中,株高和茎长的变异系数均超过30%,表明这2个性状在不同种质间差异较大,具有较高的遗传变异潜力,可用于特异性状筛选育种。另一方面,茎粗和小花数量的变异系数均低于20%,显示这2个性状在供试种质中表现相对稳定。

表2 白车轴草表型性状

Tab. 2 Phenotypic traits of *T. repens*

序号	性状	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数/%
1	株高/cm	35.80	4.40	15.25	5.69	37.28
2	叶长/cm	3.70	1.18	2.13	0.47	22.24
3	叶宽/cm	3.50	1.04	1.96	0.48	24.30
4	茎粗/mm	3.64	2.00	2.63	0.43	16.27
5	茎长/cm	30.33	6.67	17.74	6.85	38.62
6	小花数量/个	63.33	31.67	48.94	7.50	15.33

2.2 白车轴草表型性状相关性分析

对白车轴草6个表型性状进行相关性分析,其中呈极显著相关的有8对(见表3)。株高与叶长、叶宽、茎粗均呈极显著正相关,叶长

与叶宽、茎粗、小花数量均呈极显著正相关,叶宽与茎粗呈极显著正相关,茎粗与小花数量呈极显著正相关。

表 3 表型性状相关性分析

Tab. 3 Correlation analysis among phenotypic traits

性状	株高	叶长	叶宽	茎粗	茎长	小花数量
株高	1					
叶长	0.643**	1				
叶宽	0.689**	0.532**	1			
茎粗	0.467**	0.750**	0.377**	1		
茎长	-0.085	-0.070	0.009	-0.070	1	
小花数量	0.232	0.431**	0.235	0.436**	-0.065	1

注:**表示相关性极显著($P < 0.01$)。

2.3 主成分分析及综合评价

对白车轴草 6 个表型性状进行主成分分析前,首先对原始数据进行了标准化处理,并以标准化后的数据作为变量开展分析(见表 4)。根据累计方差贡献率阈值 $\geq 80\%$ 选择主成分,本研究提取 3 个主成分,其累计方差贡献率为 81.795%,能够较好地代表原有 6 个性状的大部分信息。其中,第 1 主成分特征值为 2.970,

贡献率为 49.508%,在所有成分中贡献最大。该成分在株高、叶长、叶宽和茎粗上具有较高的特征向量绝对值,主要反映了白车轴草的营养生长特征。第 2 主成分贡献率为 16.972%,主要关联茎长,其特征值为 1.018,反应了白车轴草的生殖生长特征。第 3 主成分贡献率为 15.315%,主要性状为小花数量,其特征值为 0.919,反映了白车轴草的繁殖特征。

表 4 主成分特征值和贡献率

Tab. 4 Characteristic values and contribution rates of principal components

成分	特征值	方差百分比/%	累计方差贡献率/%
1	2.970	49.508	49.508
2	1.018	16.972	66.480
3	0.919	15.315	81.795
4	0.588	9.799	91.594
5	0.295	4.918	96.512
6	0.209	3.488	100.000

为进一步对白车轴草种质进行综合评价,将标准化后的数据代入各主成分表达式,得到各主成分得分函数。 $Y_1 = 0.471X_1 + 0.518X_2 + 0.431X_3 + 0.465X_4 - 0.064X_5 + 0.323X_6$, $Y_2 = 0.170X_1 - 0.015X_2 + 0.305X_3 - 0.121X_4 + 0.885X_5 - 0.283X_6$, $Y_3 = -0.397X_1 + 0.080X_2 -$

$$0.381X_3 + 0.288X_4 + 0.452X_5 + 0.635X_6。$$

以 3 个主成分方差贡献率占累计方差贡献率的比例作为权重,构建种质综合评价模型,计算不同白车轴草种质的综合评价得分, $Y = 0.605Y_1 + 0.208Y_2 + 0.187Y_3$ 。结果显示,汪清种质的表型性状综合得分最高(见表 5)。

表 5 综合得分

Tab. 5 Comprehensive score

采集地	主成分 1	主成分 2	主成分 3	综合得分	排名
吉林省延边朝鲜族自治州汪清县	3.263	-0.951	0.686	1.905	1
吉林省吉林市桦甸市	1.156	-0.122	0.569	0.780	2
吉林省吉林市蛟河市	1.211	-0.559	-0.665	0.492	3
吉林省白山市江源区	0.551	0.716	-0.402	0.407	4
吉林省吉林市舒兰市	0.444	1.001	-0.699	0.346	5
吉林省白山市临江市	0.908	-0.643	-0.503	0.322	6
吉林省通化市辉南县	0.223	0.796	0.065	0.313	7
吉林省白山市长白朝鲜族自治县	-0.551	0.961	0.823	0.020	8
吉林省白山市抚松县	0.085	-0.612	0.409	0.001	9
吉林省通化市集安市	-0.836	0.603	-0.136	-0.406	10
黑龙江省哈尔滨市尚志市	-0.990	0.128	0.315	-0.513	11
吉林省延边朝鲜族自治州敦化市	-1.414	0.074	0.631	-0.722	12
吉林省延边朝鲜族自治州珲春市	-1.982	-0.530	0.033	-1.303	13
内蒙古自治区呼伦贝尔市牙克石市	-2.067	-0.862	-1.127	-1.641	14

3 讨论

植物表型性状是适应不同环境所呈现的外部特征,能够直观反映植物的形态结构。遗传多样性往往体现为表型性状的丰富变异,对表型性状的系统分析可更清晰地揭示种质资源的遗传多样性水平,为种质资源的有效保护与可持续利用提供理论支撑^[14-16]。目前,表型性状分析已广泛用于杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)等植物的评价与筛选中^[17, 18],但在草业种质资源研究中报道较少。已有研究指出,变异系数大于 10%即可表示样本间差异较大^[19],本研究中白车轴草各种质表型性状的变异系数均高于 15%,供试的种质间存在显著差异,具有较高的遗传变异,表明白车轴草种质资源在表型性状上具有丰富的遗传多样性,这与何俊^[20]的研究结果较为相似。其中,茎长变异最显著(38.62%),小花数量的变异程度最低(15.33%)。变异系数越大表明不同材料间的变异程度越高,其表型性状的重复性则越低,这种特性有助于从种质资源中筛选出特异性状并加以利用。

表型性状相关性分析是研究植物表型多样

性内在规律的重要方法,可揭示性状间的遗传联系与协同演化规律,这对阐明物种的遗传基础、推动种质资源的精准利用具有重要价值,对高效鉴定与利用优异种质资源具有重要意义^[21]。本研究相关性分析发现,株高与叶长、叶宽、茎粗均呈极显著正相关,表明这些性状间存在紧密的协同生长关系,植株在垂直生长过程中,这种协同性可能源于相同的生理或发育机制。同时,叶长与叶宽、茎粗也呈极显著正相关,表明叶片的扩展与茎秆的增粗在生长过程中具有同步性。这一结果与植物整体结构协同发育理论相符,可能源于植物体内激素等对细胞生长的共同调控,也是植物体机械支撑需求在形态上的表现^[22, 23]。有研究表明,株高和叶宽可作为生物量的关键筛选指标,优先选择株高较高品系,有利于提高其生物产量,同时,叶宽数据可为生长模型的建立提供支持^[24, 25]。因此,白车轴草营养生长性状间稳定的协同发育关系可以为间接选择提供可靠依据,在育种过程中,可通过对株高或叶宽等易于测量性状的选择,高效选育出生物量高、结构健壮的理想株型。

主成分分析可以克服人为主观误差,将多

个指标降维处理成少量的反映较多信息的综合指标,清晰地反映造成群体差异的主要原因^[9]。本研究通过主成分分析将6个表型性状提取3个主成分,累计方差贡献率达到81.795%。这一分析能够较为客观地评价白车轴草的营养生长特征,从而为针对不同育种目标的白车轴草品种选育提供依据。

4 结论

本研究对14个地点的白车轴草种质资源6个表型性状进行遗传多样性分析与评价,表明白车轴草种质资源表型性状变异丰富。茎长变异程度最大,具有遗传改良潜力;小花数量变异程度最小,性状最稳定。通过构建综合评价指标,筛选出综合性状表现最优的汪清种质。

参考文献

[1]朱邦长. 中国的白三叶草资源[J]. 中国草原与牧草, 1986, 3(1): 4-9.

[2]潘奥, 王玉祥, 李陈建, 等. 新疆白三叶的形态特征及坪用性状[J]. 草业科学, 2013, 30(12): 1960-1967.

[3]陈宝书. 牧草饲料作物栽培学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001.

[4]张飞龙, 杨燕梅. 白三叶的特性及栽培要点[J]. 云南农业, 2005(11): 7.

[5]张志飞, 武建新, 曾宁波, 等. 66份白三叶种质资源萌发期耐盐性综合评价[J]. 草业科学, 2018, 35(9): 2157-2165.

[6]张家健, 刘海平, 蒋龙, 等. 赣南地方大禾谷种质资源表型遗传多样性分析[J]. 江西农业学报, 2025, 37(10): 14-21.

[7]穆生奇, 曾雄, 曾剑波. 西瓜种质的遗传多样性研究[J]. 北京农业, 2009(27): 4-8.

[8]李海霞, 范玉明, 李正华, 等. 不同种源紫椴表型性状多样性分析与综合评价[J]. 中南林业科技大学学报, 2025, 45(7): 13-22.

[9]李红莉, 王澎, 李雪, 等. 黑龙江野生软枣猕猴桃种质资源表型性状的遗传多样性[J]. 经济林研究, 2022, 40(1): 150-158.

[10]艾喆, 徐婷婷, 周兆娜, 等. 小叶锦鸡儿天然居群叶形态性状变异研究[J]. 西北植物学报, 2020, 40(9): 1595-1604.

[11]林针懿, 邬静, 刘乐, 等. 实生黄皮种质资源收集与表型性状遗传多样性分析[J]. 分子植物育

种, 2022, 20(16): 5415-5428.

[12]郭城峰, 曲娜. 盐胁迫对5份三叶草材料种子萌发特性的影响[J]. 内蒙古林业调查设计, 2024, 47(2): 88-92.

[13]李州, 彭燕, 苏星源. 不同叶型白三叶抗氧化保护及渗透调节生理对干旱胁迫的响应[J]. 草业学报, 2013, 22(2): 257-263.

[14]胡标林, 万勇, 李霞, 等. 水稻核心种质表型性状遗传多样性分析及综合评价[J]. 作物学报, 2012, 38(5): 829-839.

[15]刘嘉伟, 郝新艳, 杜雨芊, 等. 高加索三叶草与白三叶杂种F1代表型遗传变异研究[J]. 中国草地学报, 2024, 46(8): 37-44.

[16]颀刚刚, 欧阳丽婷, 谢军, 等. 新疆地区欧洲李叶片表型性状多样性及亲缘关系分析[J]. 植物资源与环境学报, 2018, 27(3): 72-78.

[17]程琳, 戴俊, 罗启亮, 等. 14个杉木家系主要用材性状表型多样性分析与评价[J]. 热带亚热带植物学报, 2022, 30(6): 874-883.

[18]方玉凤, 徐连峰, 张强, 等. 黑龙江省不同种源胡桃楸表型多样性[J]. 植物研究, 2025, 45(1): 57-65.

[19]孙铭, 符开欣, 范彦, 等. 15份多花黑麦草优良种质的表型变异分析[J]. 植物遗传资源学报, 2016, 17(4): 655-662.

[20]何俊. 62份白三叶草种质资源遗传多样性初步研究与评价[D]. 贵阳: 贵州大学, 2008.

[21]于香杰, 侯钰荣, 徐雪娇, 等. 冰草种质资源种子表型多样性及萌发特性分析[J]. 种子, 2025, 44(8): 30-39.

[22]Kuchen E E, Fox S, de Reuille P B, et al. Generation of leaf shape through early patterns of growth and tissue polarity [J]. *Science*, 2012, 335(6072): 1092-1096.

[23]Gonzalez N, Vanhaeren H, Inzé D. Leaf size control: complex coordination of cell division and expansion [J]. *Trends in Plant Science*, 2012, 17(6): 332-340.

[24]鲁珊, 毛彩云, 岳金生, 等. 14个青贮玉米品种主要农艺性状与生物产量的相关及通径分析[J]. 黑龙江农业科学, 2017(8): 1-3.

[25]聂守军. 黑龙江省水稻主栽品种农艺性状与产量的相关性研究[J]. 中国农学通报, 2005, 21(12): 147-150.

(本篇专家编审:杨雨春)

DOI:10.16115/j.cnki.issn.1005-7129.2026.02.002

文章编号:1005-7129(2026)02-0007-07 中图分类号:S792.99 文献标识码:A

长白山区不同椴木种质资源调查与种子质量分析

李成龙¹, 戴维², 金桂香², 冯博², 吕梦燕²

(1. 长春市净月潭实验林场, 吉林 长春 130117; 2. 吉林省林业科学研究院, 吉林 长春 130033)

摘要:为探究长白山区椴木种子质量特征与生境状况、土壤理化性质的关系,本研究调查了长白山区 9 个椴木种质资源的生境,分析了其土壤理化性质,测定了种子长度、宽度、千粒重、含水量等种子质量指标。结果表明,长白山区椴木种质资源的地理分布范围较宽,多生长在海拔 300~800 m、郁闭度 0.3~0.6 的针阔混交林或落叶阔叶林下。其土壤 pH 为 5.13~6.33,说明椴木正常生长需要一定的酸性条件。不同产地的椴木种子质量指标间有一定相关性,种子长度与种子宽度呈极显著正相关。土壤全氮含量、有机质含量、碱解氮含量和土壤含水量等土壤理化性质指标对种子质量有一定影响。蛟河与敦化产地土壤全氮含量、全钾含量等养分状况指标相对较高,其种子千粒重相对较高,且含水量较低,种子相对较饱满,具有较高的发芽潜力,种子质量相对较好。本研究为长白山区椴木种子质量评价与种源早期选择提供了理论依据。

关键词:长白山区;椴木;种质资源;土壤理化性质;种子质量

Survey on Germplasm Resources and Analysis on Seed Quality of *Aralia elata* from Changbai Mountain Region

LI Chenglong¹, DAI Wei², JIN Guixiang², FENG Bo², LYU Mengyan²

(1. Jingyuetan Experimental Forest Farm of Changchun City, Changchun 130117, China; 2. Jilin Provincial Academy of Forestry Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to explore the relationships between the seed quality characteristics of *Aralia elata* in Changbai Mountain region and the habitat conditions and soil physicochemical properties, the habitats of nine *A. elata* germplasm resources were investigated, the soil physicochemical properties were analyzed, and the seed quality indicators, such as the seed length, the seed width, the thousand-seed weight, and the water content, were measured. The results showed that the geographical distribution of *A. elata* germplasm resources in the region was relatively broad, and most germplasms grew under the coniferous and broad-leaved mixed forest or deciduous broad-leaved forest with the altitude of 300-800 m and the canopy density of 0.3-0.6. The soil pH was 5.13-6.33. The certain acidic condition was required for its normal growth. There was the certain correlation between seed quality traits of *A. elata* from different provenances. The seed length was extremely significantly positively correlated with the seed width. The soil physicochemical properties, such as total nitrogen content, organic matter content, alkali-hydrolyzable nitrogen content, and moisture content, had certain effects on the seed quality. The soil nutrients indexes such as total nitrogen content and total potassium content in the original habitats of *A.*

收稿日期:2025-12-08

基金项目:吉林省自然科学基金自由探索一般项目(YDZJ202301ZYTS328)

第一作者:李成龙(1988—),男,工程师,主要从事果树与林下经济植物培育工作,E-mail:278103614@qq.com。

通信作者:冯博(1988—),男,副研究员,博士研究生,主要从事林下经济植物栽培与开发利用的研究,E-mail:fengbo8854@163.com。

elata from Jiaohe and Dunhua provenances were relatively high. Seeds from these two sites exhibited higher thousand-seed weight, lower water content, greater plumpness, higher germination potential, and better quality. This study provided the theoretical basis for seed quality evaluation and early provenance selection of *A. elata* in Changbai Mountain region.

Keywords: Changbai Mountain region; *Aralia elata*; germplasm resources; soil physicochemical properties; seed quality

椴木(*Aralia elata*)又名少刺辽东椴木、龙牙椴木、刺龙牙、刺嫩芽等,五加科(*Araliaceae*)椴木属(*Aralia*)多年生落叶小乔木或灌木,广泛分布于我国及日本、韩国、俄罗斯等国家,在国内主要分布于东北地区与山东、河北等地,尤其是长白山区^[1]。椴木的嫩芽口感香甜、野味浓郁,具有独特的风味,是长白山区著名的山野菜,具有“山野菜之王”的美誉^[2]。其根、茎、叶、皮与嫩芽富含多种矿物质元素、蛋白质、氨基酸、维生素、多糖、皂苷、三萜类化合物等营养物质与活性成分,具有一定的抗氧化、抗炎、抗消化性溃疡、抗糖尿病、降低胆固醇与抗癌等作用^[3-7],其开发利用前景广阔,经济效益可观。

近年来,随着人们对椴木食用与药用价值的认识不断提高,其市场需求急剧增加,相关研究也逐渐受到国内外学者关注。目前对椴木种质资源的研究主要集中在种群分布、活性成分、果实品质、种子质量、光合作用与产量差异比较等方面^[8-13],其种质资源收集保存研究仅有兰士波等^[14]在黄檗母树林内开展的椴木种质资源保存研究,针对长白山区椴木种质资源的调查、收集与保存相关研究则少见报道。本研究对长山区椴木种质资源进行调查,分析椴木产地的生境状况、土壤理化性质与种子质量性状特征,初步明确长白山区椴木种质资源基本状况,为长白山区椴木种质资源评价与优良种源选择提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 椴木种质资源生境状况调查

经查阅相关文献资料并访问行业主管部门与种植户,将长白山区蛟河市、安图县、抚松县、长白朝鲜族自治县、集安市、敦化市、和龙市、柳河县与桦甸市的椴木典型分布区域确定为种质资源调查与收集区。在每个收集区查找椴木种群分布的地点,在其中选取1个具有代表性的椴木种群,分别记录各种群的地理坐标、海拔高度、上层林分状况与郁闭度,并将每个调查的种

群分别记录为相应产地的材料。

1.2 不同椴木材料土壤理化性质分析

在每个种群中选取5个样点,用环刀取距地表10 cm处的土壤样本,带回实验室后测定土壤含水量。在每个样点附近挖取50 cm(长)×50 cm(宽)×10 cm(深)的土壤样品,然后将每个地点的所有土壤样品充分混合,带回实验室后用四分法去除多余部分,保留1 kg制成混合土样,去除杂质并风干过筛,依据相关标准分别测定土壤pH及全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾、有机质含量^[15-19],重复5次。

1.3 不同椴木材料种子质量分析

在每个种群进行种子采集,种子采集方式为种群内随机混合采样。随后将采集的椴木种子带回实验室,用清水淘洗干净并去除杂质与瘪粒,将保留的较饱满的种子捞出并晾干后,观察种子形态,测定种子长度、宽度,计算种子长宽比,并按照相关国家标准测定种子含水量与千粒重^[20],重复3次。

1.4 数据分析

采用SPSS 22.0对各材料的所有质量指标进行方差分析、多重比较(多重比较方法为Duncan新复极差法)及Pearson相关分析,利用Excel 2016制表。

2 结果与分析

2.1 不同椴木材料生境状况

本研究调查的长白山区9个椴木材料的生境状况如表1所示。

长白山区椴木种质资源的种群数量差异较大,地理分布范围较宽,在125°~128° E和41°~43° N均有分布。这些椴木材料分布的海拔范围也较宽,海拔300~800 m均可生长。抚松、长白与和龙材料分布的海拔相对较高,为600~800 m。其他6个材料分布的海拔主要为300~600 m,其中安图、集安、桦甸与柳河材料分布的海拔主要为400~500 m,为本研究中椴

木种群分布最集中的海拔范围。

上层林分状况对长白山区椴木种群分布的影响并不明显,本研究调查的长白山区椴木材料多生长在郁闭度 0.3~0.6 的针阔混交林或落叶阔叶林下,但在落叶阔叶林与针叶纯林疏林地内也可生长,其伴生树种多为红松(*Pinus koraiensis*)、长白落叶松(*Larix olgensis*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、

胡桃楸(*Juglans mandshurica*)、榆(*Ulmus pumila*)、色木槭(*Acer pictum* subsp. *mono*)、茶条槭(*Acer tataricum* subsp. *ginnala*)、红皮云杉(*Picea koraiensis*)、辽东冷杉(*Abies holophylla*)、金银忍冬(*Lonicera maackii*)、板栗(*Castanea mollissima*)、白桦(*Betula platyphylla*)、榛(*Corylus heterophylla*)、钻天柳(*Salix arbutifolia*)等长白山区分布较广泛的乡土树种。

表 1 长白山区 9 个椴木材料生境状况

Tab. 1 Habitat conditions of nine *A. elata* materials from Changbai Mountain region

材料名称	地理坐标	海拔/m	种群数量/株	上层林分类型	主要伴生树种	郁闭度
安图	128°59'26" E、43°09'29" N	472.06	<100	落叶阔叶林	蒙古栎、茶条槭	0.4
蛟河	127°26'32" E、43°21'17" N	371.43	4 000~5 000	针阔混交林	红松、紫椴、色木槭、胡桃楸	0.6
抚松	127°22'16" E、42°13'03" N	727.94	70~80	针叶纯林	红皮云杉、辽东冷杉	0.5
长白	127°51'42" E、41°25'51" N	616.57	800~1 000	针阔混交林	红松、紫椴、金银忍冬	0.6
集安	126°22'54" E、41°23'30" N	463.77	300~500	针阔混交林	红松、板栗	0.3
敦化	128°02'36" E、43°10'23" N	582.23	30~50	针叶纯林	红松	0.2
和龙	128°27'07" E、42°17'45" N	748.36	约 1 000	落叶阔叶林	白桦、榛	0.1
桦甸	126°44'36" E、43°20'01" N	439.40	20~30	针阔混交林	长白落叶松、榆、胡桃楸、钻天柳	0.4
柳河	125°33'46" E、42°04'19" N	439.00	约 1 000	针阔混交林	长白落叶松、蒙古栎、紫椴、色木槭	0.6

2.2 不同椴木材料土壤理化性质

本研究调查的 9 个长白山区椴木材料土壤理化性质差异显著 ($P < 0.05$), 各指标如表 2 所示。

长白山区椴木可生长在具有一定酸性的土壤环境下,各材料的土壤 pH 为 5.13~6.33,柳河材料的土壤 pH 显著高于其他材料,集安材料显著低于其他材料。各材料的土壤含水量为 13.41%~32.58%,安图与抚松材料的土壤含水量分别为 32.58%与 29.79%,显著高于其他材料,集安、桦甸与蛟河材料的土壤含水量均低于 20%,集安材料的土壤含水量仅为 13.41%,显著低于其他材料。

各材料的土壤全氮含量为 2.134~11.476 $g \cdot kg^{-1}$,敦化材料的土壤全氮含量显著高于其他材料,集安材料显著低于其他材料。各材料的土壤全磷含量为 0.381~1.864 $g \cdot kg^{-1}$,长

白材料的土壤全磷含量显著高于其他材料,和龙材料显著低于其他材料。各材料的土壤全钾含量为 4.787~9.678 $g \cdot kg^{-1}$,长白与集安材料的土壤全钾含量显著高于其他材料,敦化材料显著低于其他材料。各材料的土壤有机质含量为 38.160~264.826 $g \cdot kg^{-1}$,敦化材料的土壤有机质含量显著高于其他材料,集安材料显著低于其他材料。各材料的碱解氮含量为 88.920~983.006 $mg \cdot kg^{-1}$,敦化材料的土壤碱解氮含量显著高于其他材料,集安材料显著低于其他材料。各材料的有效磷含量为 2.646~79.654 $mg \cdot kg^{-1}$,敦化材料的土壤有效磷含量显著高于其他材料,抚松材料显著低于其他材料。各材料的速效钾含量为 77.946~492.942 $mg \cdot kg^{-1}$,桦甸材料的土壤速效钾含量显著高于其他材料,抚松材料显著低于其他材料。

表2 长白山区9个辽东椴木材料主要土壤理化性质

Tab. 2 Soil physicochemical properties of nine *A. elata* materials from Changbai Mountain region

材料名称	全氮含量/(g·kg ⁻¹)	全磷含量/(g·kg ⁻¹)	全钾含量/(g·kg ⁻¹)	有机质含量/(g·kg ⁻¹)	pH
安图	7.208 ± 0.022 b	0.996 ± 0.001 b	5.994 ± 0.014 e	154.200 ± 0.200 b	5.71 d
蛟河	3.072 ± 0.016 g	0.731 ± 0.006 cd	8.716 ± 0.011 c	62.240 ± 0.172 g	5.26 e
抚松	4.716 ± 0.032 e	0.923 ± 0.004 b	9.390 ± 0.007 b	85.620 ± 0.373 f	5.97 c
长白	4.998 ± 0.037 d	1.864 ± 0.008 a	9.678 ± 0.012 a	106.800 ± 0.200 d	6.22 b
集安	2.134 ± 0.014 h	0.762 ± 0.007 c	9.674 ± 0.025 a	38.160 ± 0.201 i	5.13 f
敦化	11.476 ± 0.090 a	0.652 ± 0.006 d	4.787 ± 0.101 h	264.826 ± 1.215 a	5.22 e
和龙	3.386 ± 0.030 f	0.381 ± 0.082 e	6.704 ± 0.053 d	57.731 ± 0.240 h	5.72 d
桦甸	4.619 ± 0.056 e	0.972 ± 0.001 b	5.686 ± 0.038 f	92.588 ± 0.508 e	6.21 b
柳河	6.719 ± 0.095 c	0.711 ± 0.002 cd	5.169 ± 0.080 g	119.639 ± 0.911 c	6.33 a

材料名称	碱解氮含量/(mg·kg ⁻¹)	有效磷含量/(mg·kg ⁻¹)	速效钾含量/(mg·kg ⁻¹)	含水量/%
安图	255.200 ± 5.132 e	4.048 ± 0.052 g	249.612 ± 1.098 f	32.58 ± 3.03 a
蛟河	121.400 ± 2.249 g	8.786 ± 0.074 e	197.000 ± 1.301 h	19.54 ± 0.78 cd
抚松	184.200 ± 3.734 f	2.646 ± 0.033 h	77.946 ± 0.853 i	29.79 ± 1.27 a
长白	189.200 ± 3.455 f	33.620 ± 0.329 c	358.210 ± 1.018 b	24.29 ± 1.16 bc
集安	88.920 ± 1.377 h	35.500 ± 0.261 b	282.736 ± 1.311 d	13.41 ± 0.19 e
敦化	983.006 ± 9.093 a	79.654 ± 0.444 a	336.272 ± 2.364 c	22.31 ± 0.40 bcd
和龙	348.790 ± 1.742 d	9.292 ± 0.083 e	270.445 ± 2.037 e	24.68 ± 1.31 b
桦甸	379.354 ± 6.572 c	19.443 ± 0.211 d	492.942 ± 2.435 a	18.03 ± 0.60 d
柳河	487.059 ± 4.631 b	7.337 ± 0.052 f	233.659 ± 2.154 g	22.43 ± 2.72 bcd

注:同列不同小写字母表示不同材料间土壤理化性质差异显著($P < 0.05$)。

2.3 长白山区椴木材料种子质量

各材料的种子长度为1.00~1.28 mm,安

图材料的种子长度最高,显著高于集安材料种子质量如表3所示。

图材料的种子长度最高,显著高于集安材料($P < 0.05$),与其他材料差异不显著($P > 0.05$)。

表3 长白山区9个椴木材料种子质量分析

Tab. 3 Seed quality analysis of nine *A. elata* materials from Changbai Mountain region

材料名称	长度/mm	宽度/mm	长宽比	千粒重/g	含水量/%
安图	1.28 ± 0.03 a	0.76 ± 0.03 a	1.68 ± 0.04 ab	1.09 ± 0.03 c	8.97 d
蛟河	1.25 ± 0.02 a	0.74 ± 0.03 a	1.69 ± 0.03 ab	1.20 ± 0.02 a	8.93 d
抚松	1.17 ± 0.05 a	0.74 ± 0.04 a	1.59 ± 0.01 ab	1.15 ± 0.01 ab	8.78 d
长白	1.25 ± 0.05 a	0.73 ± 0.03 a	1.71 ± 0.13 a	1.15 ± 0.03 ab	12.44 a
集安	1.00 ± 0.02 b	0.59 ± 0.01 b	1.69 ± 0.02 ab	0.84 ± 0.01 d	10.03 c
敦化	1.14 ± 0.07 ab	0.76 ± 0.04 a	1.50 ± 0.02 b	1.20 ± 0.01 a	7.82 e
和龙	1.26 ± 0.06 a	0.75 ± 0.01 a	1.68 ± 0.07 ab	0.80 ± 0.02 d	11.67 b
桦甸	1.14 ± 0.05 ab	0.70 ± 0.01 a	1.63 ± 0.09 ab	1.17 ± 0.01 a	10.31 c
柳河	1.20 ± 0.04 a	0.74 ± 0.03 a	1.64 ± 0.04 ab	1.10 ± 0.01 bc	7.09 f

注:同列不同小写字母表示不同材料间种子质量差异显著($P < 0.05$)。

各材料的种子宽度为 0.59~0.76 mm,安图与敦化材料的种子宽度最高,集安材料的种子宽度显著低于其他材料($P < 0.05$)。

各材料的种子长宽比为 1.50~1.71,长白材料的种子长宽比最高,显著高于敦化材料($P < 0.05$),与其他材料差异不显著($P > 0.05$)。

各材料的种子千粒重为 0.80~1.20 g,差异较大。敦化与蛟河材料的种子千粒重最高,和龙与集安材料的种子千粒重显著低于其他材料($P < 0.05$)。

各材料的种子含水量为 7.09%~12.44%,差异显著($P < 0.05$)。长白材料的种子含水量显著高于其他材料,敦化与柳河材料显著低于其他材料。

2.4 生境因子、土壤理化性质与种子质量指标间的相关性

生境因子、土壤理化性质与种子质量指标间的相关分析结果如表 4 所示。土壤全氮含量与土壤有机质含量、碱解氮含量均呈极显著正相关,与土壤全钾含量、种子长宽比均呈显著负相关;土壤全钾含量与碱解氮含量呈显著负相关;土壤有机质含量与碱解氮含量呈极显著正相关,与种子长宽比呈显著负相关;土壤碱解氮含量与种子长宽比呈极显著负相关,与土壤有效磷含量呈显著正相关;土壤含水量与种子长度、种子宽度均呈显著正相关;种子长度与种子宽度呈极显著正相关。

表 4 生境因子、土壤理化性质与种子质量指标间的相关分析

Tab. 4 Correlation coefficients among the habitat factors, the soil physicochemical properties, and the seed quality indicators of *A. elata*

	海拔	郁闭度	土壤 pH	土壤全氮含量	土壤全磷含量	土壤全钾含量	土壤有机质含量	土壤碱解氮含量	土壤有效磷含量	土壤速效钾含量	土壤含水量	种子长度	种子宽度	种子长宽比	种子千粒重	种子含水量
海拔	1															
郁闭度	-0.420	1														
土壤 pH	0.153	0.456	1													
土壤全氮含量	0.047	-0.153	0	1												
土壤全磷含量	0.009	0.569	0.453	-0.017	1											
土壤全钾含量	0.178	0.330	-0.154	-0.685*	0.427	1										
土壤有机质含量	0.029	-0.187	-0.093	0.989**	0.018	-0.635	1									
土壤碱解氮含量	0.105	-0.413	-0.075	0.874**	-0.304	-0.778*	0.862**	1								
土壤有效磷含量	0.045	-0.394	-0.433	0.577	0.053	-0.194	0.653	0.682*	1							
土壤速效钾含量	-0.262	-0.231	0.174	0.143	0.255	-0.368	0.194	0.307	0.44	1						
土壤含水量	0.464	0.085	0.326	0.359	0.171	-0.136	0.313	0.031	-0.357	-0.446	1					
种子长度	0.164	0.250	0.355	0.121	0.181	-0.167	0.096	-0.057	-0.441	-0.175	0.687*	1				
种子宽度	0.284	0.098	0.296	0.550	-0.011	-0.457	0.512	0.416	-0.127	-0.197	0.734*	0.832**	1			
种子长宽比	-0.218	0.303	0.135	-0.754*	0.315	0.503	-0.743*	-0.824**	-0.572	0.001	-0.099	0.273	-0.304	1		
种子千粒重	-0.297	0.600	0.241	0.498	0.403	-0.171	0.508	0.280	0.147	0.058	0.218	0.25	0.484	-0.412	1	
种子含水量	0.388	-0.179	0.154	-0.524	0.456	0.474	-0.463	-0.441	-0.055	0.384	-0.088	0.148	-0.21	0.577	-0.395	1

注: * 表示显著相关($P < 0.05$), ** 表示极显著相关($P < 0.01$)。

3 讨论

3.1 柃木种质资源的生境状况与土壤理化性质

本研究对长白山区具有代表性的柃木种质

资源进行了较系统的调查与研究,结果表明,长白山区柃木的地理分布范围较宽($125^{\circ} \sim 128^{\circ} E$ 、 $41^{\circ} \sim 43^{\circ} N$),多生长在海拔 300~800 m、郁闭度 0.3~0.6 的沟谷地、林缘、林间空地或林下。

说明椴木在长白山区的分布范围较广,生长的海拔相对较低,并具有一定耐阴性。

研究表明,9个长白山区椴木材料的土壤pH为5.13~6.33,均低于7.0,说明椴木的正常生长需要一定的酸性条件,与程瑶等^[9]得到的椴木适宜生长在pH 6.0~7.0的酸性土壤中这一研究结果有一定差异,可能与研究对象不同有关,本研究的对象为吉林省长白山区的椴木种源,而程瑶等^[9]的研究对象为黑龙江省的椴木种源。各材料的土壤含水量为13.41%~32.58%,过高或过低的土壤含水量可能对其生长不利^[21]。各材料的土壤氮、磷、钾与有机质含量等化学性状的差异也较大,说明长白山区椴木对土壤养分状况的要求不严格。

3.2 椴木种质资源的种子质量差异

种子的萌发是植物生长的第一个阶段,是培育良种壮苗的基础,种子的大小是种子外观形态的直接反映^[22-24]。本研究中,除集安材料外,其他材料的种子长度与宽度差异不显著,说明产地生境状况对长白山区椴木种子大小无显著影响,可能是因为本研究选取的椴木材料均来自长白山区,虽然其经纬度与海拔分布范围较大,但其上层林分多为针阔混交林或落叶阔叶林,其原始生境的小气候状况无显著差异。

种子的千粒重与含水量能够直接表现种子质量,是播种繁育时必须关注的指标。各材料的椴木种子千粒重与含水量差异较大,说明不同产地椴木存在一定程度的遗传变异,其遗传多样性较高,对环境的适应能力较强。本研究中,蛟河与敦化材料的种子千粒重较大,种子含水量较低,说明其种子相对较饱满,内含物质含量较高,有较高的发芽潜力,可为种子萌发与幼苗生长提供充足的物质与能量,播种品质相对较好。而其他产地种子具有相对较低的千粒重或相对较高的种子含水量,在一定程度上影响了这些产地种子的饱满程度,并进一步影响了其播种品质。

3.3 生境因子、土壤理化性质与椴木种子质量的关系

不同产地的椴木种子质量指标间有一定相关性,种子长度与种子宽度呈极显著正相关,说

明这2个种子质量指标的关系较密切,保持了椴木种子形状的稳定性,这与姜欣华等^[25]的研究结果相似。但其他种子质量指标间均未表现出较显著的相关性,说明种子长度、宽度、长宽比、千粒重与含水量指标中的某一个或几个指标不能全面而准确地反映长白山区椴木种子的质量特征。

植物种子质量性状受基因与环境因素共同影响,产生了较复杂的变异^[26, 27]。本研究发现,海拔与郁闭度对长白山区椴木种子质量的影响不明显。但土壤理化性质对种子质量指标的影响较明显,较高的土壤含水量对种子长度与宽度的增加均有促进作用,但对种子长宽比的影响不明显,而土壤氮素含量(包括全氮与碱解氮含量)、有机质含量均与种子长宽比呈显著负相关,说明在较高的土壤氮素与有机质水平下,椴木的种子长度与宽度更为接近,从而进一步影响了其种子形态与质量。在本研究中,蛟河与敦化产地的椴木种子具有较高的种子千粒重与相对较低的种子含水量,这2个产地土壤全氮、全钾含量等养分状况指标也相对较高,可能是因为土壤养分状况较好的条件下,植物可利用的资源、空间较充足,各个器官均能够分配到较多的环境资源,其种子的质量也相对较高。

综合以上分析表明,长白山区椴木种子质量(尤其是种子形态)受土壤养分状况的影响,土壤全氮含量、碱解氮含量、有机质含量与土壤含水量对长白山区椴木种子形态的影响相对较大,但种子千粒重与种子含水量受土壤状况的影响较小,其原因有待于进一步研究。本研究主要侧重于对生境因子、土壤理化性质和长白山区椴木种子质量间的关系进行研究,今后可进一步开展有关长白山区椴木适应性、发芽率、发芽整齐度、种子生活力、幼苗生长表现等方面的研究。

参考文献

- [1] 侯集瑞, 杨世海, 孙晓波, 等. 辽东椴木的研究进展[J]. 特产研究, 2000, 22(4): 51-55.
- [2] 郝燕芳, 高德武, 范丽莉. 辽东椴木的人工繁殖研

- 究进展[J]. 中国农学通报, 2018, 34(18): 36-42.
- [3] Hernandez D E, Hancke J L, Wikman G. Evaluation of the anti-ulcer and antisecretory activity of extracts of *Aralia elata* root and *Schizandra chinensis* fruit in the rat[J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 1988, 23(1): 109-114.
- [4] Otsuka H, Gotoh Y, Komeno T, et al. Aralin, a type II ribosome-inactivating protein from *Aralia elata*, exhibits selective anticancer activity through the processed form of a 110-kDa high-density lipoprotein-binding protein: a promising anticancer drug[J]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2014, 453(1): 117-123.
- [5] 齐明明, 李紫薇, 阎秀峰, 等. 龙牙楸木繁育技术与药理活性成分的研究进展[J]. 林业科学, 2015, 51(12): 96-102.
- [6] Yagi-Chaves S N, Liu G, Yamashita K, et al. Effect of five triterpenoid compounds isolated from root bark of *Aralia elata* on stimulus-induced superoxide generation, tyrosyl or serine/threonine phosphorylation and translocation of p47^{phox}, p67^{phox}, and rac to cell membrane in human neutrophils[J]. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 2006, 446(1): 84-90.
- [7] Lee E Y, Lee S W, Adam G O, et al. Anti-inflammatory effects of *Aralia elata* extract against dextran sodium sulfate-induced colitis in mice and raw 264.7 macrophage cells exposed to lipopolysaccharide: first report[J]. *Natural Product Communications*, 2022, 17(9): 1-11.
- [8] Wei Hongxu, Chen Guoshuang, Chen Xin, et al. Geographical distribution of *Aralia elata* characteristics correlated with topography and forest structure in Heilongjiang and Jilin Provinces, Northeast China[J]. *Journal of Forestry Research*, 2021, 32(3): 1115-1125.
- [9] 程瑶, 于锡宏, 佟雪姣, 等. 辽东楸木活性成分与生态因子的相关性研究[J]. 生态环境学报, 2019, 28(8): 1507-1513.
- [10] Tian Yaqin, Zhang Xiuling, Liu Heng, et al. Comparison of the nutritional and phytochemical composition and antioxidant activities of *Aralia elata* (Miq.) Seem fruits in Northeast China[J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2021, 14(12): 103448.
- [11] 荆丽敏, 陈广, 高明刚, 等. 不同种源刺龙芽重要播种品质的比较试验[J]. 农家之友(理论版), 2010(9): 110-111.
- [12] 林晓坤. 不同种源刺龙芽生长及光合特性研究[J]. 辽宁林业科技, 2024(6): 16-19.
- [13] 刘洪柳, 颜廷武, 朱健, 等. 不同种源辽东楸木芽菜产量差异研究[J]. 辽宁林业科技, 2024(3): 34-36.
- [14] 兰士波, 张海峰, 王福德, 等. 黄菠萝母树林内龙牙楸木种质资源的保存技术[J]. 中国林副特产, 2006(3): 19-21.
- [15] NY/T 1377—2007 土壤 pH 的测定[S].
- [16] LY/T 1228—2015 森林土壤氮的测定[S].
- [17] LY/T 1232—2015 森林土壤磷的测定[S].
- [18] LY/T 1234—2015 森林土壤钾的测定[S].
- [19] NY/T 1121.6—2006 土壤检测 第6部分: 土壤有机质的测定[S].
- [20] GB 2772—1999 林木种子检验规程[S].
- [21] 王超. 仿野生生态环境对老山芹等四种山野菜生长的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017.
- [22] 谭利平, 曹莹, 彭培好. 不同种源地四川牡丹种子质量差异[J]. 中国野生植物资源, 2023, 42(8): 1-9.
- [23] 田瑞杰, 巩合德, 雷晨雨, 等. 不同种源高山栲种子性状特征及其变异[J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(9): 88-95, 126.
- [24] 秦义杰, 王浩, 刘美娟, 等. 不同种源防风种子质量分析[J]. 种子, 2023, 42(7): 138-144.
- [25] 姜欣华, 热沙, 夏苗, 等. 5个种源楸木种子性状的比较研究[J]. 四川林业科技, 2022, 43(6): 103-108.
- [26] 郝向春, 周帅, 韩丽君, 等. 不同种源辽东栎种子和幼树指标变异及相关分析[J]. 植物资源与环境学报, 2021, 30(4): 1-11.
- [27] 钟军弟, 陈燕, 刘锴栋, 等. 不同生境下假臭草的种子特性分析[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(9): 87-91.

(本篇专家编审: 杨雨春)

DOI:10.16115/j.cnki.issn.1005-7129.2026.02.003

文章编号:1005-7129(2026)02-0014-05 中图分类号:S543.9 文献标识码:A

3 种羊草种子萌发期的耐盐碱性评价

李海静¹, 潘艳艳¹, 李鸿¹, 钟鑫¹, 唐伟建², 张义飞¹

(1. 吉林省林业科学研究院, 吉林 长春 130033; 2. 大安市自然资源局, 吉林 白城 131399)

摘要:为筛选适合吉林省西部盐碱地种植的羊草品种,本研究选取了林科 1 号羊草、中科 1 号羊草以及野生羊草作为试验材料,采用 0 mmol · L⁻¹、50 mmol · L⁻¹、100 mmol · L⁻¹、150 mmol · L⁻¹ 和 200 mmol · L⁻¹ 的 NaCl 与 Na₂CO₃ 混合溶液(摩尔比为 2 : 1)进行盐碱胁迫试验,测定了各处理下羊草种子的发芽率、发芽势和发芽指数。结果表明,随着盐碱胁迫强度的提高,3 种羊草的萌发指标均呈下降趋势。在发芽率和发芽势方面,中科 1 号羊草在各处理下均表现最优。轻度盐碱胁迫下,中科 1 号羊草发芽指数高于林科 1 号羊草,但二者差异不显著;中度及中重度盐碱胁迫下,林科 1 号羊草发芽指数表现最优。隶属函数综合评价结果显示,3 种羊草的耐盐碱性为中科 1 号羊草>林科 1 号羊草>野生羊草。综上,中科 1 号羊草和林科 1 号羊草品种在盐碱环境中具有较高的萌发稳定性与综合耐盐碱能力,适宜在吉林省西部盐碱地推广应用。本研究可为当地草地生态修复与利用提供理论支持和实践依据。

关键词: 羊草;盐碱胁迫;种子萌发;耐盐碱性

Evaluation of Saline-alkali Tolerance of Three Kinds of *Leymus chinensis* During Seed Germination

LI Haijing¹, PAN Yanyan¹, LI Hong¹, ZHONG Xin¹, TANG Weijian², ZHANG Yifei¹

(1. Jilin Provincial Academy of Forestry Sciences, Changchun 130033, China; 2. Natural Resources Bureau of Da'an City, Baicheng 131399, China)

Abstract: In order to screen *Leymus chinensis* varieties suitable for planting in saline-alkali land in western Jilin Province, *L. chinensis* 'Linke 1', *L. chinensis* 'Zhongke 1', and wild *L. chinensis* were used as materials in this study. The mixed solution of NaCl and Na₂CO₃ (molar ratio of 2 : 1) was used for saline-alkali stress experiment. Five treatments with the solution concentration of 0 mmol · L⁻¹, 50 mmol · L⁻¹, 100 mmol · L⁻¹, 150 mmol · L⁻¹ and 200 mmol · L⁻¹ were set up. The germination rate, germination potential, and germination index were measured. The results showed that the germination rate, germination potential, and germination index showed the downward trend with the increase of saline-alkali stress intensity. In terms of germination rate and germination potential, *L. chinensis* 'Zhongke 1' showed the best performance under each treatment. Under mild saline-alkali stress, the germination index of *L. chinensis* 'Zhongke 1' was higher than that of *L. chinensis* 'Linke 1', but the difference was not significant. Under moderate and moderate-severe saline-alkali stress, the germination index of *L. chinensis* 'Linke 1' showed the best performance. The comprehensive evaluation results

收稿日期:2026-01-04

基金项目:吉林省发展和改革委员会项目(2024C016-13)

第一作者:李海静(1996—),女,研究实习员,硕士研究生,主要从事草原生态系统修复研究工作,E-mail:1554995232@qq.com。

通信作者:张义飞(1972—),男,研究员,博士研究生,主要从事林草生态系统修复工作,E-mail:yifei@hotmail.com。

of the membership function showed that the saline-alkali tolerance was as follow: *L. chinensis* 'Zhongke 1' > *L. chinensis* 'Linke 1' > wild *L. chinensis*. In summary, *L. chinensis* 'Zhongke 1' and *L. chinensis* 'Linke 1' had high germination stability and comprehensive saline-alkali tolerance in saline-alkali environment and were suitable for promotion and application in saline-alkali land in western Jilin Province. This study could provide theoretical support and practical basis for local grassland ecological restoration and utilization.

Keywords: *Leymus chinensis*; saline-alkali stress; seed germination; saline-alkali tolerance

土地盐碱荒漠化是导致我国东北地区特别是吉林省西部地区草地退化和生态环境恶化的重要原因之一^[1]。盐碱胁迫抑制种子萌发和幼苗建植,通过渗透胁迫和离子毒害等途径严重制约牧草生产^[2]。羊草(*Leymus chinensis*)是典型的多年生优质牧草,在东北草原地区分布广泛,其依靠发达的地下横走根茎形成密集网络,能有效固土防沙、改善土壤理化性质^[3,4],同时可稳定产出优质饲草,是草地恢复和改良的重要建群种^[5]。

种子萌发期是植物整个生长过程中对外部环境最敏感的阶段之一^[6]。研究不同盐碱胁迫下羊草种子萌发特性,对其耐盐碱性进行评价,有助于筛选出适应吉林省西部盐碱地的优良品种。本研究以林科 1 号羊草(*L. chinensis* 'Linke 1')、中科 1 号羊草(*L. chinensis* 'Zhongke 1')和野生羊草的种子为研究对象,比较 3 种羊草在种子萌发期的特点,筛选能够在吉林省西部盐碱地推广应用的优势草种,为当地草地修复与利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2025 年 3 月在吉林省林业科学研究院净月实验基地温室内进行,供试材料为林科 1 号羊草、中科 1 号羊草和野生羊草种子。林科 1 号羊草种子来源于吉林省林业科学研究院审定品种(品种编号:吉 S-BV-LCHI-006-2024),中科 1 号羊草种子购买自内蒙古科塔中科羊草种业有限公司,野生羊草种子采集于吉林省松原市前郭尔罗斯蒙古族自治县野外羊草地。

1.2 试验设计

试验选取籽粒饱满的羊草种子,用 300 mmol · L⁻¹ 的赤霉素浸泡 48 h 后,放在阴凉处阴干。育苗盘中填入灭菌后的田园土,每穴体积约为 35 ml,在育苗盘每穴撒入 10 粒羊

草种子,随后盖上一层覆土。以每行 10 穴为一个处理,每个处理重复 3 次。NaCl 与 Na₂CO₃ 按摩尔比 2 : 1 混合配制溶液,浓度梯度分别为 0 mmol · L⁻¹(pH 7.0,对照)、50 mmol · L⁻¹(pH 8.4,轻度胁迫)、100 mmol · L⁻¹(pH 9.2,中度胁迫)、150 mmol · L⁻¹(pH 9.5,中重度胁迫)和 200 mmol · L⁻¹(pH 10,重度胁迫)。在覆土后以每穴 10 ml 混合盐碱溶液进行浇灌且每天 1 次,在 25 °C 无间断光照条件下进行培养,持续观察 25 d,从第 2 天起每隔 24 h 记录发芽情况。

1.3 测定指标

发芽率 $G_R = (G/N) \times 100\%$ 。式中: G 为最终发芽种子数量/粒; N 为供试种子数量/粒。

发芽势 $G_p = (G_7/N) \times 100\%$ 。式中: G_7 为试验前 7 天发芽种子数量/粒。

发芽指数 $G_i = \sum(G_t/D_t)$ 。式中: G_t 为第 t 天发芽种子数量/粒; D_t 为相应的发芽时间/d。

1.4 数据处理

采用 Excel 2021 和 SPSS 26.0 软件进行数据整理与统计分析。在进行方差分析前,采用 Shapiro-Wilk 检验对各项萌发指标数据进行正态性检验,并利用 Levene 检验进行方差齐性验证,确认数据符合参数检验的前提假设。在此基础上,进行单因素方差分析(ANOVA)。

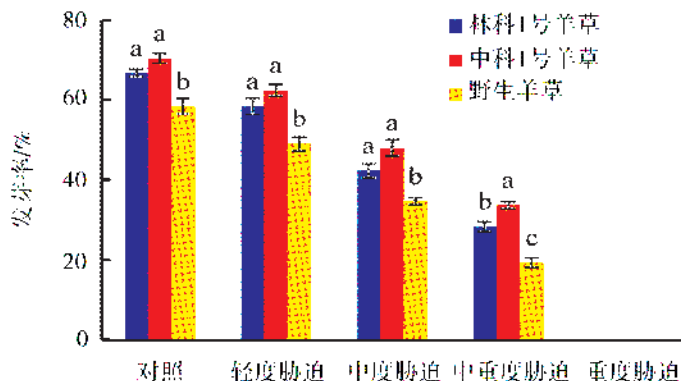
2 结果与分析

2.1 盐碱胁迫处理对 3 种羊草种子发芽率的作用效应

如图 1 所示,盐碱胁迫对各羊草萌发产生抑制,随着盐碱胁迫强度的提高,所有供试羊草的发芽率均呈下降趋势。对照条件下,中科 1 号羊草发芽率最高(70.33%),林科 1 号羊草次之(66.67%),二者均显著高于野生羊草(58.33%)。轻度胁迫和中度胁迫条件下,中科 1 号羊草发芽率最高(分别为 62.33% 和 47.00%),与林科 1 号羊草均无显著差异,二

者显著高于野生羊草。中重度胁迫条件下,中科1号羊草发芽率最高,林科1号羊草次之,野生羊草最低,三者之间差异显著。重度胁迫条

件下,所有种子均未萌发。总的来说,在种子发芽率方面,中科1号和林科1号羊草表现出优于野生羊草的耐受性。



注:图中不同小写字母表示相同处理下各羊草之间差异显著($P < 0.05$)。下同。

图1 盐碱胁迫下3种羊草发芽率

Fig. 1 Germination rates of three kinds of *L. chinensis* under salt-alkali stress

2.2 盐碱胁迫处理对3种羊草种子发芽势的调控作用

如图2所示,随着盐碱胁迫强度的提高,所有供试羊草的发芽势均呈下降趋势。对照条件和轻度胁迫条件下,中科1号羊草与林科1号羊草发芽势之间无显著差异,但均显著高于野生羊草。中度胁迫条件下,中科1号羊草发芽势最高(22.33%),林科1号羊草次之

(17.67%),野生羊草最低(13.67%),三者之间显著差异。中重度胁迫条件下,三种羊草的发芽势均降至较低水平,林科1号羊草与中科1号羊草、野生羊草之间均差异不显著,中科1号羊草显著高于野生羊草。重度胁迫条件下,所有羊草发芽势均为0。总的来看,在盐碱胁迫下,林科1号羊草与中科1号羊草在萌发初期活力的维持上均优于野生羊草。

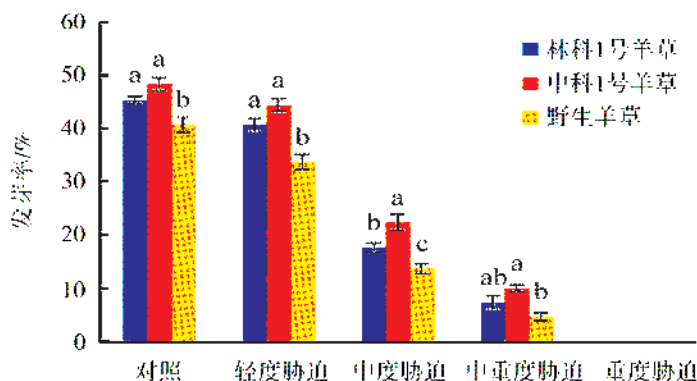


图2 盐碱胁迫下3种羊草发芽势

Fig. 2 Germination potentials of three kinds *L. chinensis* under salt-alkali stress

2.3 盐碱胁迫处理对3种羊草种子发芽指数的影响

如图3所示,随着盐碱胁迫强度的提高,所有供试羊草的发芽指数均呈下降趋势。对照条件和轻度胁迫条件下,中科1号羊草发芽指数最高,与林科1号羊草均无显著差异,二者显著高于野生羊草。中度胁迫条件下,林科1号羊

草发芽指数高于中科1号羊草,但二者之间差异不显著。中重度胁迫条件下,林科1号羊草发芽指数(9.75)显著高于中科1号羊草(7.80)和野生羊草(5.36)。这表明在中度胁迫和中重度胁迫下,林科1号羊草在萌发速度和整齐度上具有显著优势。

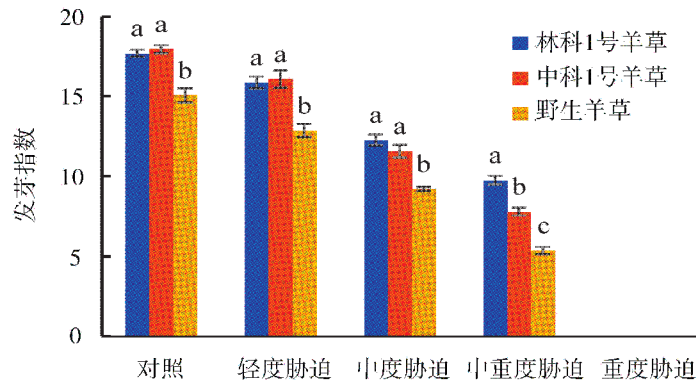


图3 盐碱胁迫下3种羊草发芽指数

Fig. 3 Germination indexes of three kinds of *L. chinensis* under salt-alkali stress

2.4 耐盐碱性综合评价

基于各萌发指标计算的隶属函数值显示, 林科1号羊草、中科1号羊草、野生羊草的平均性为中科1号羊草>林科1号羊草>野生羊草。

隶属函数值分别为0.530、0.559和0.426(见表1)。据此综合排序,3种羊草种子的耐盐碱性为中科1号羊草>林科1号羊草>野生羊草。

表1 盐碱胁迫处理下3种羊草种子萌发指标的隶属函数值

Tab. 1 Membership function values of germination indicators of three kinds of *L. chinensis* under salt-alkali stress

指标	隶属函数值			
	发芽率	发芽势	发芽指数	平均值
林科1号羊草	0.542	0.440	0.608	0.530
中科1号羊草	0.597	0.500	0.579	0.559
野生羊草	0.447	0.373	0.459	0.426

3 结论与讨论

盐碱胁迫是制约植物种子萌发及幼苗定植的关键环境因子,其致害机制主要体现在两个维度。一是降低溶液渗透势,导致种子吸水困难,阻断萌发过程所需的水分供应;二是离子毒害效应,Na⁺、Cl⁻及CO₃²⁻等盐碱离子进入细胞后,会破坏原有的离子平衡状态,干扰正常的生理代谢活动^[7,8]。除此之外,盐碱胁迫还会诱发活性氧(ROS)在细胞内过量累积,引发膜脂过氧化反应并造成细胞结构损伤,从而进一步抑制种子萌发及胚根伸长^[9]。

本研究结果表明,随着盐碱胁迫强度的提高,3种羊草的发芽率、发芽指数和发芽势均呈下降趋势,说明盐碱胁迫对羊草种子萌发具有明显的抑制作用,这一结果与禹婷^[9]对禾本科牧草种子萌发的研究、陈奕霖等^[10]对白羊草种子萌发的研究和牟林林等^[11]对羊草种子萌发的研究结果一致。植物品种间在萌发阶段对盐

碱逆境的耐受能力往往存在显著差异。本研究中,在发芽率和发芽势方面,中科1号羊草在各处理下均表现最优。中度及中重度盐碱胁迫下,林科1号羊草发芽指数表现最优,表现出更优的稳定性,林科1号羊草可能具备更有效的机制以维持萌发初期的代谢活力和生长速度。总的来说,不同品种之间耐盐碱的抗逆性表现存在明显差异,其中耐盐碱性较强的品种在高浓度处理下仍能保持一定的萌发率和较高的发芽指数,说明其具备较强的渗透调节和离子耐受能力。这种品种间的抗性差异,为盐碱地植被恢复工程中的品种筛选提供了重要的理论依据和实践参考^[12]。

从生理意义来看,发芽率主要反映种子萌发的最终成效,而发芽势与发芽指数则更能体现种子萌发初期活力及萌发的速度和整齐度。已有研究证实,发芽势对环境逆境的变化反应更为敏感,因此可作为评价种子萌发期抗逆性的关键指标之一^[6]。在本研究中,中科1号羊

草耐盐碱性较强,林科 1 号羊草也展示出了良好的耐盐碱表现,在发芽势上受抑制较小,表明二者在萌发早期能更快突破渗透压力限制,及时完成胚根伸长,从而在自然群落中具备更强的竞争优势。

盐碱胁迫是一个多因子协同作用的复杂过程,其对植物造成的伤害具有多维度特征,不同植物对盐碱胁迫的抗性响应机制也存在显著差异^[13, 14]。基于单一指标进行耐盐碱性评价往往难以全面、准确地反映植物的真实抗性水平,多指标综合评价更为客观可靠。隶属函数法作为植物抗性综合评价的经典方法之一,在相关研究中得到广泛应用^[15]。刘朝荣等^[16]采用隶属函数法对 5 份羊草材料的耐盐碱性进行综合分析评价,得到耐盐碱性为灰色羊草>黄岗梁羊草>中科 1 号羊草>赤峰羊草>东北羊草。亓雯雯等^[17]对松嫩平原西部盐碱草地 14 个羊草种群在不同浓度盐碱胁迫下的萌发及幼苗生长指标进行分析,通过隶属函数法结合耐盐综合评价 *D* 值计算得出各种群综合耐盐能力排序。本研究采用隶属函数法对 3 种羊草种子萌发期耐盐碱性进行综合评估,最终确定其耐盐碱性为中科 1 号羊草>林科 1 号羊草>野生羊草。

综上所述,本研究采用发芽率、发芽指数和发芽势作为评价羊草耐盐碱性的有效指标,揭示了 3 种羊草在盐碱胁迫下萌发特性的差异。耐盐碱性较强的品种在盐碱地推广有助于提升牧草生产力、推动草地生态系统的恢复与稳定,中科 1 号羊草和林科 1 号羊草均有潜力成为适宜在吉林省西部盐碱地推广的优良品种。

参考文献

[1]李取生,庞治国,宋玉祥. 立法与治理并重,改善吉林西部地区盐碱荒漠化[J]. 农村生态环境, 2000(2): 53-55.

[2]Flowers T J, Colmer T D. Salinity tolerance in halophytes [J]. *New Phytologist*, 2008, 179 (4): 945-963.

[3]王介繁,董笛,张然,等. 不同区域 100 份羊草种质结实性状的综合评价[J]. 中国草地学报, 2025,

47(10): 11-21.

[4]孙世贤,杜华,哈斯巴特尔,等. 切根+施肥对羊草人工草地草产量及其芽库的影响[J]. 中国草地学报, 2024, 46(6): 77-85.

[5]宋家敏,初丽爽,李海燕,等. 松嫩平原人工草地两种生态型羊草种群生殖株数量特征的比较[J/OL]. 草业科学, 2025-12-12. <https://link.cnki.net/urlid/62.1069.S.20251212.1358.005>.

[6]徐恒恒,黎妮,刘树君,等. 种子萌发及其调控的研究进展[J]. 作物学报, 2014, 40(7): 1141-1156.

[7]Munns R, Tester M. Mechanisms of salinity tolerance[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2008, 59: 651-681.

[8]Zhu Jiankang. Abiotic stress signaling and responses in plants[J]. *Cell*, 2016, 167(2): 313-324.

[9]禹婷. 盐胁迫对 6 种禾本科牧草种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 种子, 2014, 33(6): 89-90.

[10]陈奕霖,赵萍,王勃,等. 不同盐碱胁迫对白羊草种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 畜牧与饲料科学, 2022, 43(3): 96-101, 121.

[11]牟林林,庄煦,张冬梅,等. 混合盐碱胁迫对羊草种子萌发的影响[J/OL]. 黑龙江畜牧兽医, 2025-10-28. <https://doi.org/10.13881/j.cnki.hljxmsy.2025.07.0108>.

[12]徐树刚,王薇,王渴诚,等. NaCl 胁迫对藜麦菜种子萌发的影响[J]. 吉林蔬菜, 2025(3): 16-20.

[13]张岩. 盐碱胁迫下兴安落叶松菌根苗生长及生理响应机制的研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2024: 2-3.

[14]关秀玲,申健. 植物响应盐碱胁迫的生理和分子机制研究进展[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(21): 10-16.

[15]李英博,马盈慧,杜鹃,等. PEG-6000 处理下 3 种藜草种子萌发期的耐旱性评价[J]. 吉林林业科技, 2024, 53(4): 1-4, 48.

[16]刘朝荣,陈永成,陈莹,等. 新疆盐碱化土壤下不同羊草的耐盐碱性差异研究[J]. 草业学报, 2026, 35(4): 29-41.

[17]亓雯雯,李亚晓,马红媛,等. 盐胁迫下羊草种子萌发特性的种内变异及其影响因素[J]. 生态学报, 2025, 45(11): 5481-5496.

(本篇专家编审:陶晶)

DOI:10.16115/j.cnki.issn.1005-7129.2026.02.004

文章编号:1005-7129(2026)02-0019-08 中图分类号:S792.113 文献标识码:A

不同大青杨无性系光合特性比较研究

邹建军¹, 任生², 马弘宇³, 赵佳丽¹, 吕梦燕¹, 戴维¹

(1. 吉林省林业科学研究院, 吉林 长春 130033; 2. 吉林省林业调查规划院, 吉林 长春 130022; 3. 中国吉林森林工业集团有限责任公司, 吉林 长春 130022)

摘要:为探究不同大青杨无性系光合特性,本研究以 8 个大青杨无性系为研究对象,利用便携式光合仪 LI-6800 测定其生态环境因子及光合生理指标。结果表明,不同大青杨无性系光合生理指标变化存在差异。相关性分析显示,所有无性系净光合速率均与光合有效辐射、大气 CO₂ 浓度及蒸腾速率呈极显著正相关,与空气温度、水分利用效率无显著相关。通过建立各无性系净光合速率多元回归方程,进一步发现影响大青杨无性系净光合速率的关键生理生态因子存在差异,蒸腾速率是大部分大青杨无性系净光合速率的主要影响因子。通过对光合指标综合分析发现,辉南 1 号和辉南 3 号作为高净光合速率、高蒸腾速率无性系,具有较强的适应光能力,可用于高光合品种选育;临江 1 号属高水分利用效率、低蒸腾速率无性系,耐干旱能力强,可用于耐旱品种选育。

关键词:大青杨;光合特性;净光合速率;环境因子

Comparative Study on Photosynthetic Characteristics of Different *Populus ussuriensis* Clones

ZOU Jianjun¹, REN Sheng², MA Hongyu³, ZHAO Jiali¹, LYU Mengyan¹, DAI Wei¹

(1. Jilin Provincial Academy of Forestry Sciences, Changchun 130033, China; 2. Forestry Investigation and Planning Institution of Jilin Province, Changchun 130022, China; 3. China Jilin Forest Industry Group Limited Company, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to explore the photosynthetic characteristics of different *Populus ussuriensis* clones, eight *P. ussuriensis* clones were used as the research objects in this study, and the ecological environmental factors and photosynthetic physiological indexes were measured by portable photosynthesis instrument LI-6800. The results showed that there were differences in the changes of photosynthetic physiological indexes of different *P. ussuriensis* clones. Correlation analysis showed that the net photosynthetic rate of all clones was significantly positively correlated with photosynthetic active radiation, atmospheric CO₂ concentration and transpiration rate, but not significantly correlated with air temperature and water use efficiency. By establishing the multiple regression equation of net photosynthetic rate of each clone, it was further found that the key physiological and ecological factors affecting the net photosynthetic rate of *P. ussuriensis* clones were different, and the transpiration rate was the main influencing factor of the net photosynthetic rate of most *P. ussuriensis* clones. Because of high net photosynthetic rate and high transpiration rate, *P. ussuriensis* 'Huinan 1' and *P. ussuriensis* 'Huinan 3' had strong adaptability to light and were suitable for breeding high photosynthetic varieties. Because of high water use efficiency and low transpiration rate, *P. ussuriensis* 'Linjiang 1' had strong drought tolerance and was suitable for breeding drought tolerant varieties.

Keywords: *Populus ussuriensis*; photosynthetic characteristic; net photosynthetic rate; environmental factors

收稿日期:2025-12-16

基金项目:吉林省科技发展计划项目(20220202092NC)

第一作者:邹建军(1977—),男,研究员,硕士研究生,主要从事林木育种与遗传改良研究,E-mail:lkyzjj@126.com。

大青杨(*Populus ussuriensis*)是我国东北地区东部山地森林更新的主要树种,具有抗寒性强、生长快且轮伐期短等优良特性,在提升林地生产力方面发挥重要作用。其木材材质优良,广泛用于建筑、铁路等重要领域,具有一定的经济价值^[1]。其根系发达,具有涵养水源、保持水土等生态功能,具有重要的生态效益^[2]。光合作用是植物将光能转化为化学能进而合成有机物的核心生物过程,为植物生长发育提供了必不可少的物质与能量基础^[3]。光合特性是揭示其生态环境适应性机理从而选育高适应性优良品种的重要依据^[4-6]。目前,大青杨的研究多集中于育苗栽培技术、木材材性分析及抗逆生理等方面^[7-9],对光合生理特性的研究较少。本研究以8个大青杨无性系为试验材料,系统比较其光合特性差异,分析净光合速率与生理生态因子的相关性,旨在为选育大青杨新品种及确定其适宜栽培区域提供理论依据。

1 试验地概况

试验地位于吉林省长春市净月潭实验林场,地理位置 125°50' E、43°73' N,海拔 220 m。年平均气温 4.6 °C,年降水量 768.2 mm 左右,年均日照时数 2 407 h,无霜期 180 d 左右,土壤类型为暗棕壤。

2 材料与方法

2.1 试验材料

8 个大青杨无性系分别为辉南 1 号、辉南 2 号、辉南 3 号、临江 1 号、银山 7 号、银山 8 号、松江 14 号和普通大青杨,选取生长健壮且长势一致的 1 年生扦插苗(株高 2.0 m 左右,地径 1.6~1.8 cm)作为试验材料。

2.2 指标测定方法

2024 年 8 月试验在晴朗无云天气条件下进行,试验时间为 8:00—17:00。选择上部无遮挡、受光条件好的完全功能叶,使用便携式光合仪 LI-6800 测定相关指标。生态环境因子包括空气温度、空气相对湿度、大气 CO₂ 浓度、光合有效辐射,光合生理指标包括净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、水分利用效率。每个无性系测定 3 株,每小时测定 1 次,重复 3 次读数,取平均值。

2.3 数据处理

采用 Excel 2016 进行数据初步处理,SPSS 22.0 进行统计分析,Origin 2025 进行绘图。

3 结果与分析

3.1 主要生态环境因子日动态变化特征

主要生态环境因子日动态变化如图 1 所示。

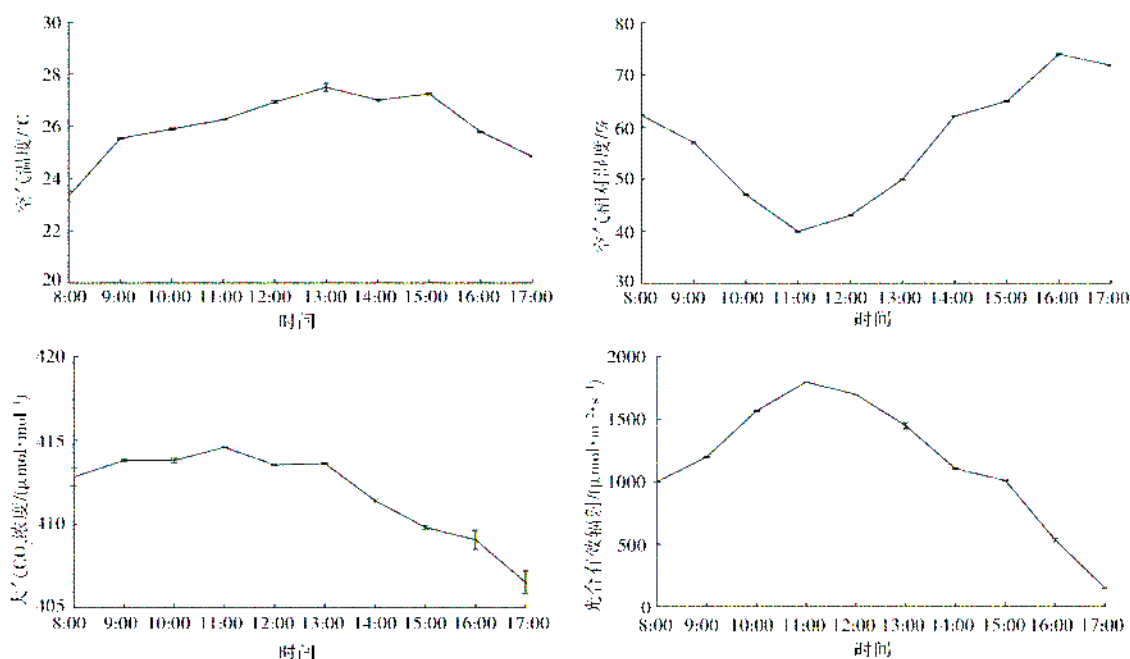


图 1 主要生态环境因子日动态变化

Fig. 1 Diurnal variation of the main ecological environment factors

空气温度日均值为 26.03 ℃,清晨较低,随着时间的推移逐渐上升,13:00 时达到最高值 27.50 ℃,之后开始下降,17:00 时降至 24.85 ℃。空气相对湿度呈“V”型变化曲线,中午较低,日均值为 57.21 %。大气 CO₂ 浓度为 406.50~414.58 μmol·mol⁻¹,8:00—13:00 略有变化,但变化幅度不大,相对稳定,13:00 之后开始下降,17:00 时降至最小值。光合有效辐射为 150~1 800 μmol·m⁻²·s⁻¹,上午相对较高,11:00 时达到峰值,之后呈下降趋势,随着光照强度的降低,17:00 时降至最小值。

3.2 光合生理指标的日动态变化特征

3.2.1 净光合速率日变化

从图 2 可以看出,不同大青杨无性系净光合速率日变化存在差异,反映了光合能力的强弱。辉南 1 号、辉南 2 号、临江 1 号、松江 14 号和普通大青杨为单峰型;辉南 3 号、银山 7 号和银山 8 号为双峰型,光合作用具有明显“午休”现象。8 个大青杨无性系日均净光合速率由大到小依次为辉南 3 号、辉南 1 号、普通大青杨、临江 1 号、辉南 2 号、松江 14 号、银山 8 号、银山 7 号。

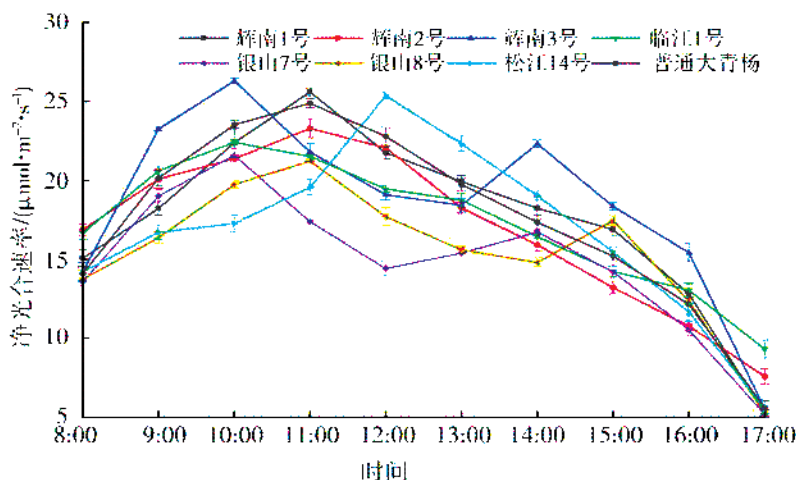


图 2 大青杨净光合速率日变化

Fig. 2 Diurnal variation of net photosynthetic rate of *P. ussuriensis*

3.2.2 蒸腾速率日变化

根据图 3 所示,不同大青杨无性系蒸腾速率的日变化存在差异,主要受光照与温度等环境因子影响。银山 8 号呈双峰型且处于较低水平,表明该无性系可能通过光合“午休”现象降

低气孔导度以限制水分过度散失;其余 7 个无性系的蒸腾速率呈单峰型。8 个大青杨无性系日均蒸腾速率由大到小依次为辉南 1 号、银山 7 号、辉南 3 号、辉南 2 号、松江 14 号、普通大青杨、银山 8 号、临江 1 号。

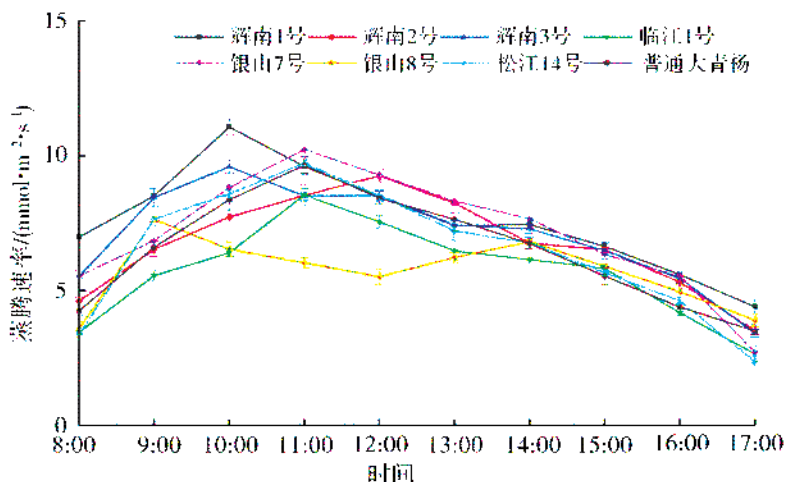


图 3 大青杨蒸腾速率日变化

Fig. 3 Diurnal variation of transpiration rate of *P. ussuriensis*

3.2.3 胞间 CO₂ 浓度日变化

如图4所示,不同大青杨无性系胞间 CO₂ 浓度日变化总体呈“V”型曲线,清晨较高,之后逐渐下降,最低值出现在 12:00 前后,之后逐渐回升。该变化主要受呼吸作用与光合作用动态平衡的影响。夜间叶片呼吸作用持续释放 CO₂, 同时清晨光合速率较低,CO₂ 同化能力有限,导

致胞间 CO₂ 浓度较高;随着光照增强,净光合速率提升,CO₂ 同化加快,胞间 CO₂ 浓度随之下降;午后光合作用逐渐减弱,CO₂ 消耗减少,浓度因而再次回升。8 个大青杨无性系日均胞间 CO₂ 浓度由大到小依次为银山 7 号、松江 14 号、辉南 1 号、普通大青杨、辉南 2 号、临江 1 号、银山 8 号、辉南 3 号。

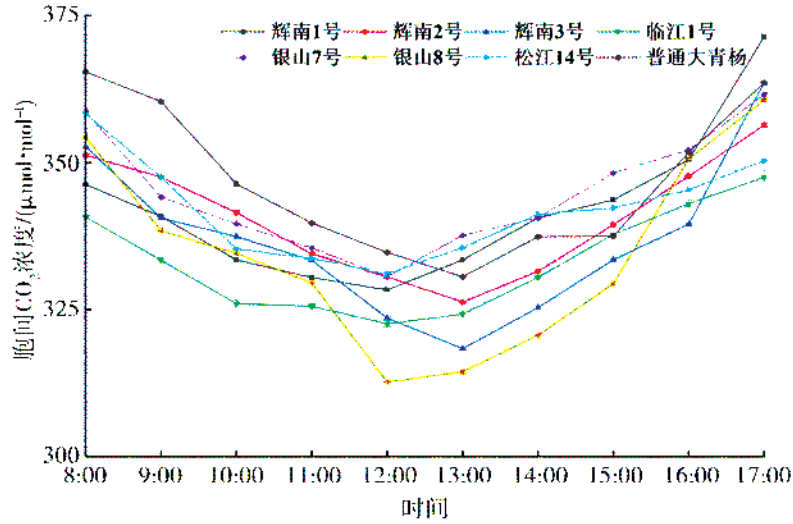


图4 大青杨胞间 CO₂ 浓度日变化

Fig. 4 Diurnal variation of intercellular CO₂ concentration of *P. ussuriensis*

3.2.4 气孔导度日变化

根据图5所示,不同大青杨无性系气孔导度日变化趋势与净光合速率相似。辉南 1 号、辉南 2 号、临江 1 号、松江 14 号和普通大青杨为单峰型,辉南 3 号、银山 7 号与银山 8 号为双峰型。这可能是由于上午空气温度与光线强度

逐渐升高,气孔打开程度较高,大部分呈现上升趋势,随着时间推移,植物为了维持体内水分平衡,会产生不同程度的气孔关闭。8 个大青杨无性系日均气孔导度由大到小依次为辉南 1 号、松江 14 号、辉南 3 号、辉南 2 号、银山 7 号、普通大青杨、银山 8 号、临江 1 号。

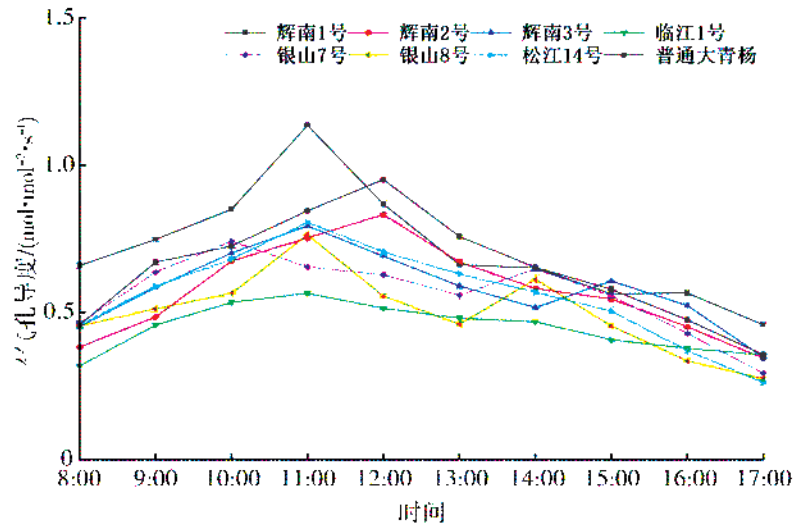


图5 大青杨气孔导度日变化特征

Fig. 5 Diurnal variation of stomatal conductivity of *P. ussuriensis*

3.2.5 水分利用效率日变化

水分利用效率是衡量植物能否高效协调碳吸收与水分消耗的关键指标,其水平高低可有效反映植物对环境条件的适应能力强弱^[10]。各无性系的水分利用效率日变化存在差异,呈

现不同峰型变化,总体呈先下降后上升趋势(见图6)。8个大青杨无性系日均水分利用效率由大到小依次为临江1号、银山8号、普通大青杨、辉南3号、辉南2号、辉南1号、银山7号、松江14号。

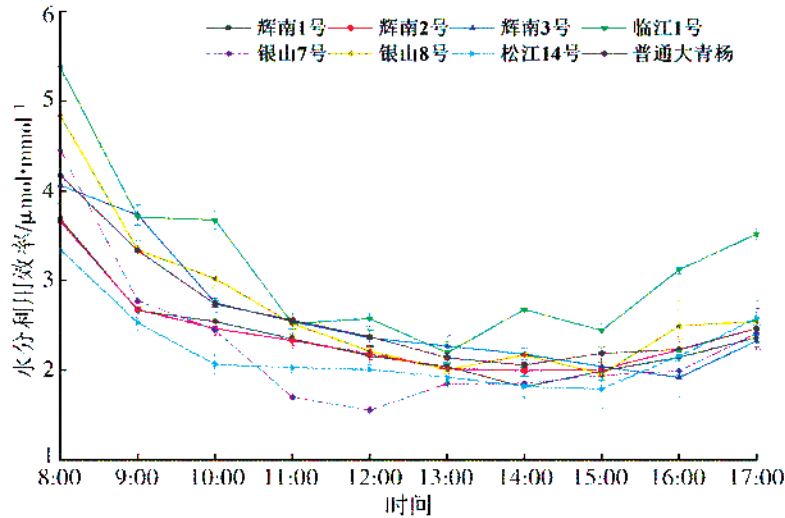


图6 大青杨水分利用效率日动态变化特征

Fig. 6 Diurnal variation of water use efficiency of *P. ussuriensis*

3.3 不同大青杨无性系净光合速率与生理生态因子的相关性分析

在植物光合作用过程中,生理生态因子会对净光合速率产生不同效应,其相关性表现也各不相同^[11]。由表1可知,所有大青杨无性系净光合速率与大气CO₂浓度、光合有效辐射、蒸腾速率均呈极显著正相关,与空气温度、水分利用效率无显著相关性。辉南3号、银山7号的净光合速率与空气相对湿度呈显著负相关,其余6个无性系的净光合速率与空气相对湿度呈极显著负相关。辉南1号净光合速率与胞间CO₂浓度呈极显著负相关,辉南2号净光合速率与胞间CO₂浓度无显著相关性,其余6个无性系的净光合速率与胞间CO₂浓度呈显著负相关。辉南1号、银山8号、松江14号的净光合速率与气孔导度无相关性,其余5个无性系的净光合速率与气孔导度均呈极显著正相关。

在复杂多变的自然条件下,影响植物净光合速率的因素有很多,简单的相关性分析不能很好地反映多因子影响下的相关性^[12]。为了进一步探究影响净光合速率的关键生理生态因

子,以空气温度、空气相对湿度、大气CO₂浓度、光合有效辐射、蒸腾速率、胞间CO₂浓度、气孔导度、水分利用效率为主要影响因子,采用多元逐步回归方法分析上述因子与8个大青杨无性系净光合速率的关系,建立回归方程(见表2)。

结果表明,不同无性系影响净光合速率的主要因子不同。辉南1号主要因子为蒸腾速率、胞间CO₂浓度、光合有效辐射,辉南2号主要因子为气孔导度、蒸腾速率,辉南3号主要因子为蒸腾速率、空气相对湿度,临江1号主要因子为气孔导度、蒸腾速率、光合有效辐射,银山7号主要因子为气孔导度、胞间CO₂浓度,银山8号主要因子为蒸腾速率、胞间CO₂浓度,松江14号主要因子为胞间CO₂浓度、光合有效辐射,普通大青杨主要因子为气孔导度、蒸腾速率、光合有效辐射。多元逐步回归分析表明,影响大青杨无性系净光合速率的关键生理生态因子存在差异,揭示了其光合作用调控机制的多样性,蒸腾速率是大部分大青杨无性系净光合速率的主要影响因子。

表 1 不同大青杨无性系净光合速率与生理生态因子的相关性分析

Tab. 1 Correlation analysis between net photosynthetic rate and physiological-ecological factors in different *P. ussuriensis* clones

无性系	空气温度	空气相对湿度	大气 CO ₂ 浓度	光合有效辐射	蒸腾速率	胞间 CO ₂ 浓度	气孔导度	水分利用效率
辉南 1 号	0.466	-0.889**	0.897**	0.949**	0.889**	-0.852**	0.554	-0.113
辉南 2 号	0.222	-0.937**	0.968**	0.908**	0.829**	-0.267	0.949**	0.059
辉南 3 号	0.436	-0.632*	0.771**	0.796**	0.938**	-0.652*	0.863**	0.109
临江 1 号	0.188	-0.847**	0.915**	0.832**	0.815**	-0.723*	0.863**	-0.024
银山 7 号	0.288	-0.676*	0.843**	0.805**	0.780**	-0.755*	0.859**	-0.045
银山 8 号	0.427	-0.790**	0.828**	0.879**	0.850**	-0.685*	0.332	-0.083
松江 14 号	0.607	-0.808**	0.804**	0.839**	0.824**	-0.720*	0.458	-0.544
普通大青杨	0.432	-0.918**	0.920**	0.968**	0.963**	-0.655*	0.978**	-0.015

注: * 表述在 0.05 水平上显著, ** 表示在 0.01 水平上极显著。

表 2 不同大青杨无性系净光合速率与生理生态因子间多元线性回归方程

Tab. 2 Multiple linear regression equations between net photosynthetic rate and physio-ecological factors in different *P. ussuriensis* clones

无性系	回归方程	R ²
辉南 1 号	$P_n = 5.267 + 2.441T_r - 0.171C_i + 0.011R_{pA}$	0.900
辉南 2 号	$P_n = 16.109 + 20.033G_s + 3.033T_r$	0.945
辉南 3 号	$P_n = -25.815 + 4.251T_r + 0.249R_h$	0.957
临江 1 号	$P_n = -7.963 + 51.532G_s + 1.938T_r + 0.005R_{pA}$	0.837
银山 7 号	$P_n = 101.950 + 20.891G_s - 0.285C_i$	0.872
银山 8 号	$P_n = 6.504 + 2.20T_r - 0.118C_i$	0.974
松江 14 号	$P_n = 73.422 - 0.215C_i + 0.007R_{pA}$	0.910
普通大青杨	$P_n = 1.101 + 12.054G_s + 0.901T_r + 0.003R_{pA}$	0.994

注: P_n 为净光合速率; R_h 为空气相对湿度; R_{pA} 为光合有效辐射; T_r 为蒸腾速率; C_i 为胞间 CO₂ 浓度; G_s 为气孔导度。

4 结论与讨论

光合作用是植物生长发育过程中物质与能量产生的基础,净光合速率高低直接反映其光合作用强弱^[13, 14]。本研究中,8 个大青杨无性系的净光合速率存在显著差异,其中辉南 3 号相较于其他无性系表现出较高的净光合速率,

日均值为 18.47 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,光合作用能力更强,在适宜条件下可能具有更快的生长速度和更高的生物量积累潜力。不同无性系蒸腾速率日变化存在差异,其中辉南 1 号的日平均蒸腾速率较大,日均值为 7.62 $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,表明其耗水强度高,适宜在水资源丰富地区种植。这种差异反映出不同无性系自身对环境的适应性不

同,这与王兴胜等^[15]的研究结论相符。此外,气孔导度作为衡量气孔开闭程度的关键指标,是影响植物蒸腾作用的重要因子^[16]。Farquhar等^[17]研究指出,光合速率与气孔导度之间存在协同变化关系,二者常表现为同步上升或下降的趋势。本研究中,辉南1号和辉南3号气孔导度较高、净光合速率较大,这与苏春桃等^[18]的研究结果一致,气孔导度越大,植物的光合作用能力越强,可作为高光合优良种质资源进行选育。植物的水分利用效率可反映植物的能量转化效率,其值越高表明植物对环境条件的适应能力越强,本研究中临江1号的水分利用效率日均值最高,表明其在同等水分条件下产生的有机物越多,表现出更强的抗旱能力和对干旱环境的适应潜力^[19]。

本研究发现,大青杨无性系净光合速率对关键生理生态因子的响应存在共性同时也表现出明显差异。8个大青杨无性系的净光合速率均与光合有效辐射、大气CO₂浓度呈极显著正相关,说明光能与碳源供应是决定其光合能力的重要因素。8个大青杨无性系的净光合速率均与蒸腾速率呈极显著正相关,与王虹等^[20]的研究结果一致,因此在大青杨高光效品种选育中,可将蒸腾速率作为一项重要的筛选指标。然而,在与水分相关的因子及内部生理方面,不同无性系间表现出差异。6个无性系净光合速率与空气相对湿度呈极显著负相关,2个无性系表现为显著负相关,表明大青杨无性系叶片气孔对空气湿度的敏感性上存在差异。辉南1号净光合速率与胞间CO₂浓度呈极显著负相关,表明其叶肉光合能力较强、对CO₂的利用效率较高。已有研究表明,光合作用受生态因子与生理因子的协同调控,各因子之间存在复杂的交互关系,通过调节其中一个或多个生态生理因子可有效提升植物的光合效率。本研究通过对8个大青杨无性系的生态生理因子进行相关分析,构建了净光合速率与生态生理因子之间的多元线性回归模型。结果表明,影响大青杨无性系净光合速率的关键生态生理因子存

在差异,揭示了大青杨无性系在光合作用调控机制上具有多样性。其中,蒸腾速率是大部分大青杨无性系净光合速率的主要影响因子。

净光合速率、蒸腾速率和水分利用效率等气体交换参数是评价植物光合性能的核心指标,能够有效揭示植物在多变环境中的光合与蒸腾特性及其协同调控机制,反映植物对逆境条件的适应能力,因此可作为筛选高光合、高水分利用效率、抗逆性强的优良植物品种的关键依据^[21,22]。本研究综合比较分析发现,辉南1号和辉南3号属于高净光合速率、高蒸腾速率无性系,在栽培管理中可通过协同水肥调控措施、适度提高水肥投入,以充分发挥其高光合特性优势^[8]。临江1号的净光合速率虽非最高,但其具有较高水分利用效率,表明该无性系对干旱生境适应性较强,表现为高水分利用效率、低蒸腾速率的特征,这一结果与刁凯等^[11]和郭佳宝等^[23]在枣树和文冠果光合生理特性研究中的发现一致。

在自然条件下,环境因子复杂多变,大青杨种质具有丰富的光合遗传基础,根据光合特性指标进行综合分析,有助于理解大青杨在不同生境下的生存机制,更可为在适宜地区选育高光合、高水分利用效率以及强抗逆性的优良品种提供关键理论依据。

参考文献

- [1]沈乐,褚延广,张伟溪,等.香杨和大青杨木材挥发性化合物对比分析[J].林业科学,2024,60(1):103-110.
- [2]赵佳丽,张志文,徐亮,等.松江36号杨选育的研究[J].吉林林业科技,2025,54(4):1-5,35.
- [3]杨丽冉,和明珠,周大鹏,等.9个茶树品种的光合特性研究[J].热带作物学报,2023,44(1):143-153.
- [4]柴成武,王方琳,赵鹏,等.干旱胁迫对沙蒿叶片水分含量、光合特性及抗氧化酶的影响[J].西北林学院学报,2025,40(1):42-50.
- [5]沈立明,戴中武,钟惠,等.3种独蒜兰属植物的光合特性[J].热带作物学报,2021,42(5):1355-1360.

- [6]木合塔尔·扎热,哈地尔·依沙克,艾海提·克然木,等. 新疆落叶松 40 个无性系光合特性的综合评价[J]. 西北林学院学报, 2025, 40(3): 1-10.
- [7]贾庆彬,王晓伟,邹建军,等. 大青杨无性系材性分析与优良无性系选择[J]. 森林工程, 2020, 36(2): 12-19.
- [8]谢丽琼. 大青杨人工栽培技术[J]. 现代园艺, 2025, 48(6): 66-67, 70.
- [9]张馨,马苗苗,吕婉秋,等. 大青杨 *PuZFP103* 基因的序列特征及逆境胁迫的表达分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45(1): 36-44.
- [10]杨海洋,朱宁华. 喀斯特石漠化地区光皮树的光合特性[J]. 现代园艺, 2024, 47(19): 24-27.
- [11]刁凯,李宏,程平,等. 不同枣树品种光合特性日变化测定与分析[J]. 西南农业学报, 2016, 29(6): 1296-1301.
- [12]张秀芳,姚爱敏,孙曦,等. 3 个引种一串红品种光合特性研究[J]. 北京农学院学报, 2015, 30(4): 94-98.
- [13]胡跃,余跃辉,刘卫国,等. 弱光对不同耐荫大豆苗期根系以及光合特性的影响[J]. 四川农业大学学报, 2018, 36(2): 145-151.
- [14]肖妮洁,史艳财,韦霄,等. 三种藤本药食同源植物光响应模型拟合及光合特性研究[J]. 热带农业科学, 2023, 43(9): 13-21.
- [15]王兴胜,李斌,陈勇,等. 不同派系杨树品种(系)光合特性评价[J]. 南方农业学报, 2018, 49(12): 2476-2485.
- [16]朱梅,栗昕羽,刘硕硕,等. 远红光辐照环境水稻幼苗气孔导度模型拟合及修正[J]. 农业工程, 2025, 15(1): 56-62.
- [17]Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1982, 33: 317-345.
- [18]苏春桃,杨浩,高秀梅,等. 高光效甘薯种质筛选及光合特性分析[J]. 热带作物学报, 2020, 41(12): 2462-2466.
- [19]曹生奎,冯起,司建华,等. 植物叶片水分利用效率研究综述[J]. 生态学报, 2009, 29(7): 3882-3892.
- [20]王虹,贾毛毛,李金玲,等. 朝天椒苗期光合指标杂种优势分析[J]. 中国农学通报, 2025, 41(16): 35-39.
- [21]张宇鹏,周国模,周宇峰,等. 5 个常见绿化树种对极端高温的光合响应特征[J]. 浙江农林大学学报, 2017, 34(2): 301-309.
- [22]冯延芝,赵阳,王保平,等. 干旱复水对楸叶泡桐幼苗光合和叶绿素荧光的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(4): 1-8.
- [23]邬佳宝,马明科,张刚,等. 文冠果对干旱胁迫的光合生理响应[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(5): 55-60.

(本篇专家编审:林士杰)

著作权声明

本刊已许可《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司分别在中国知网、万方数据—数字化期刊群、维普资讯—中文科技期刊数据库、超星期刊域出版平台及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。相关著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意上述声明。

《吉林林业科技》编辑部

DOI:10.16115/j.cnki.issn.1005-7129.2026.02.005

文章编号:1005-7129(2026)02-0027-06 中图分类号:TP79 文献标识码:A

耦合环境因子的长白落叶松林叶面积指数遥感精细化反演

刘婷^{1,2,3}, 潘艳艳^{1,2,3}, 包颖⁴, 丁铭铭¹, 姜雪菲¹, 包广道^{1,2,3}

(1. 吉林省林业科学研究院, 吉林 长春 130033; 2. 吉林省退化森林生态系统恢复与重建跨区域合作科技创新中心, 吉林 长春 130033; 3. 吉林省森林可持续经营国际联合研究中心, 吉林 长春 130033; 4. 吉林省林业技术推广站, 吉林 长春 130022)

摘要:叶面积指数(LAI)是表征林分长势和预测森林生产力的重要指标,遥感技术为快速获取大尺度 LAI 提供了有效途径。本研究以吉林省东部山区通化市境内分布的长白落叶松人工林为研究对象,基于手持激光雷达点云数据和 Sentinel-2A 遥感影像,通过分析海拔、坡度、坡向、山体阴影、粗糙度、地形位置指数、年均气温、年均降水量、胸径、树高、郁闭度等因子与 LAI 的关系,筛选关键环境因子,构建植被指数耦合关键环境因子的长白落叶松林 LAI 遥感精细化反演模型。结果表明,在 5 个植被指数中,反红边叶绿素指数(IRECI)与有效叶面积指数(LAI_e)相关性最高($r = 0.76$)。不同环境因子对长白落叶松林 LAI 的影响具有差异,年均气温、海拔、粗糙度和树高是构建长白落叶松林 LAI 的关键环境因子。最终构建的耦合环境因子的长白落叶松 LAI 反演模型($R^2 = 0.89$)较单一植被指数模型($R^2 = 0.79$)精度得到较好提升,表明耦合环境因子可有效弥补遥感数据的局限性。本研究将为今后利用遥感数据精细化反演林木生长态势提供技术支撑和理论支持。

关键词:叶面积指数;长白落叶松;环境因子;遥感

Refined Remote Sensing Inversion of Leaf Area Index Coupled with Environmental Factors for *Larix Olgensis* Forest

LIU Ting^{1,2,3}, PAN Yanyan^{1,2,3}, BAO Ying⁴, DING Mingming¹, JIANG Xuefei¹, BAO Guangdao^{1,2,3}

(1. Jilin Provincial Academy of Forestry Sciences, Changchun 130033, China; 2. Jilin Province Cross-regional Cooperation Science and Technology Innovation Center of Degraded Forest Ecosystem Restoration and Reconstruction, Changchun 130033, China; 3. Jilin Province International Joint Research Center for Sustainable Forest Management, Changchun 130033, China; 4. Jilin Provincial Forestry Technology Popularizing Station, Changchun 130022, China)

Abstract: The leaf area index (LAI) was the critical index for characterizing forest stand growth and predicting forest productivity. The remote sensing technology provided the effective way for rapidly acquiring LAI over large scale. This study focused on *Larix olgensis* plantation in Tonghua City in the eastern mountainous region of Jilin Province. Based on point cloud data of handheld LiDAR and remote sensing image of Sentinel-2A, the relationships between LAI and multiple environmental factors including elevation, slope, aspect, terrain shading, roughness, topographic position index, mean annual

收稿日期:2025-09-22

基金项目:吉林省科技发展计划项目(YDZJ202201ZYTS446)

第一作者:刘婷(1987—),女,副研究员,主要从事林业资源利用与数字林业研究,E-mail:158862738@qq.com。

通信作者:包广道(1985—),男,副研究员,主要从事林业遥感与地理信息系统方面的研究,E-mail:bao-gd@126.com。

temperature, mean annual precipitation, diameter at breast height, tree height, canopy density were analyzed to screen the key environmental factors. The refined remote sensing inversion model of LAI coupled with the vegetation index and key environmental factors for *L. Olgensis* forest was constructed. The results showed that the inverse red edge chlorophyll index (IRECI) exhibited the highest correlation ($r = 0.76$) with the effective leaf area index (LAI_e) among the five vegetation indices. The effects of different environmental factors on LAI were different. The mean annual temperature, elevation, roughness, and tree height were the key environmental factors. The final remote sensing inversion model of LAI coupled with key environmental factors ($R^2 = 0.89$) was better than the model with the single vegetation index ($R^2 = 0.79$). That indicated that the model coupled environmental factors could effectively compensate for the limitations of remote sensing data. This study would provide technical support and theoretical foundation for the refined remote sensing inversion of forest growth dynamics.

Keywords: leaf area index; *Larix olgensis*; environmental factors; remote sensing

长白落叶松(*Larix Olgensis*)具有较强的环境适应性,是我国东北地区造林的主要树种之一,多为人工纯林,存在物种结构单一、林分密度大、生态抗性弱等问题。受气候和人为因素影响,长白落叶松林出现了不同程度的退化,生态灾害频发,严重威胁我省森林资源和生态安全,在省级尺度准确掌握长白落叶松林生长态势对指导森林经营及生态评估等工作具有重要意义。

叶面积指数(LAI)是总叶面积(单面计算)与单位土地面积的比值^[1],是冠层结构的重要参数之一,能够直观反映林木生长态势。传统LAI测量方法虽具有较高精度,但费时费力,仅能提供离散分布数据^[2,3]。遥感技术具有周期短、范围广和成本低等优势,是获取大尺度LAI的重要手段^[4-6]。以往LAI遥感反演模型一般通过植被指数及实测LAI的线性关系进行构建,普遍存在指数饱和及垂直结构信息缺失的问题,易造成LAI被低估的现象^[7]。因此,探讨精细化反演LAI的遥感模型显得尤为重要。

本研究构建耦合环境因子的长白落叶松林LAI精细化反演模型,以期有效提升LAI计算水平,为我省林区开展大尺度遥感监测奠定基础,为病虫害监测与防治提供有效手段,为模拟森林生态系统碳汇模型提供更为精准的关键参数。

1 研究区概况

研究区位于吉林省东部山区通化市境内(地

理位置 $125^{\circ}15' \sim 126^{\circ}44' E, 40^{\circ}52' \sim 42^{\circ}49' N$),属北温带大陆性季风气候。针叶树种主要为长白落叶松、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、红松(*Pinus koraiensis*)等,阔叶树种主要为蒙古栎(*Quercus mongolica*)、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)、山杨(*Populus davidiana*)、春榆(*Ulmus davidiana* var. *japonica*)等。

2 数据与方法

2.1 数据获取

2022年7月,依据环境因子在研究区长白落叶松人工纯林随机布设97块 $15\text{ m} \times 15\text{ m}$ 的样地,确保样地空间范围能够完整覆盖遥感像元。调查记录样地基本特征及胸径 $\geq 5\text{ cm}$ 植被的树种、胸径、树高。

利用Geo-slam手持式三维激光扫描仪以S型路线在每个样地内采集长白落叶松点云数据,使用LiDAR 360软件对点云数据进行提取、去噪、重采样、归一化、分类、单木分割等预处理,将计算得到的数据取3/5作为训练样本,2/5作为验证样本。

以欧空局10 m分辨率的Sentinel-2A多光谱遥感影像为主要数据源(<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>),成像时间为2022年7月19日。为准确获取森林冠层反射率的数据,降低地形及大气效应对反射光谱的影响,利用Sentinel应用平台(SNAP)对数据进行预处理。选取经过几何精校正的吉林一号卫星影像为空间参考数据,并结合高程模型对影像进行几何校正,校正后像元残差均值为0.36。在

Sen2cor 模块下,进行大气校正,将各波段进行 10 m 空间分辨率的重采样。

海拔、坡向、坡度、山体阴影、粗糙度、地形位置指数等因子来源于 GEE 平台获取的 NASA

SRTM 产品,年均气温、年均降水量因子来源于地球资源数据云平台,郁闭度因子来源当地森林资源数据库。

各样地环境因子特征统计如表 1 所示。

表 1 环境因子特征统计

Tab. 1 Statistical analysis of environmental factor characteristics

环境因子	最小值	最大值	平均值	环境因子	最小值	最大值	平均值
海拔/m	393	1 127	727	年均气温/℃	3.96	6.29	5.29
坡度/°	3.04	37.94	16.45	年均降水量/mm	891	991	933
坡向/°	0	357	167	胸径/cm	6.0	21.0	12.5
山体阴影	97	255	177	树高/m	11.0	29.0	23.1
粗糙度	5.19	28.80	14.97	郁闭度	0.30	0.90	0.65
地形位置指数	-8.22	8.76	0.72				

2.2 研究方法

2.2.1 植被指数计算

植被指数是利用植被在不同光谱波段的光谱特性差异,通过卫星遥感数据的线性或非线性组合计算得出的指数,用于有效反映植被的

覆盖度、生长状况和生物量等信息。在参考相关研究^[8,9]及本研究区的植被特征后,选取 5 个与 LAI 高度相关的植被指数(见表 2)进行建模指数筛选。

表 2 基于 Sentinel-2A 数据的植被指数

Tab. 2 Vegetation indices based on Sentinel-2A

植被指数	公式
抗大气植被指数(ARVI) ^[10]	$(B8 - 2 \times B4 + B2) / (B8 + 2 \times B4 - B2)$
反红边叶绿素指数(IRECI) ^[11]	$(B7 - B4) / (B5 + B6)$
改良土壤调节植被指数(MSAVI) ^[12]	$\{2 \times B8 + 1 - [(2 \times B8 + 1)^2 - 8 \times B8 \times B4]^{1/2}\} / 2$
归一化植被指数(NDVI) ^[13]	$(B8 - B4) / (B8 + B4)$
绿色归一化差异植被指数(GNDVI) ^[14]	$(B8 - B3) / (B8 + B3)$

注:公式中 B2、B3、B4、B5、B6、B7、B8 分别代表 Sentinel-2A 遥感图像的波段编号。

2.2.2 融合点云的有效叶面积指数(LAI_e)多参数反演模型构建

融合机载与地面激光扫描点云的多参数 LAI_e 反演模型在点直径设为 0.1 cm 时最优提取冠层开放度、间隙率与冠层闭合度等内部结构参数,通过构建区分森林类型的非线性回归关系,显著提升 LAI_e 估算精度,其结果更贴近 1:1 参考线,优于传统体素模型,能有效克服光学仪器效率低与被动遥感精度不足的局限^[6]。

2.2.3 相关性分析

使用 SPSS 19 对 LAI_e 和不同波段反射率值进行皮尔逊相关性双侧检验,通过分析相关

系数和显著性水平,筛选出与 LAI_e 相关性较好的变量。

2.2.4 耦合环境因子的 LAI_e 精细化反演模型构建

为减少复杂模型结构增加带来的机理解释难度,突出引入环境因子对 LAI_e 反演的影响,采用多元线性方法进行模型构建。多元线性回归模型(MLR)是一种用于预测因变量与多个自变量之间关系的统计模型。在多元线性回归模型中,因变量与自变量之间的关系被描述为一个线性方程,其中自变量的系数表示他们对因变量的影响。具体公式为:

$$y = \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \dots + \alpha_i x_i + \varepsilon$$

式中: y 为 LAI_e ; α_i 为回归系数; x_i 为特征变量; ε 为误差。

2.2.5 模型精度评价

为保证模型可信程度,本文采用保留样本交叉验证方式,将 LAI_e 实测数据按 3:2 的比例随机划分为建模集和验证集两部分,同时为了提高模型泛化能力,降低随机划分样本对泛化能力指标的影响,对建模验证过程重复 20 次,取建模参数与评价指标的平均值进行对比。评价指标上,采用决定系数 (R^2)、均方根误差 (RMSE)、平均相对误差 (MAE) 3 个指标进行评价。

各评价指标中 R^2 越大、RMSE 和 MAE 越小,表明模型预测值精度越可靠。最后为了验证不同模型在 LAI_e 估算中的精度,利用调查数

据中的验证样本代入已经构建的单一植被指数模型、耦合环境因子模型中,绘制模型 LAI_e 实测值和预测值的 1:1 关系线,综合对比不同模型的反演能力表现。

3 结果与分析

3.1 最优植被指数确定

从表 3 可以看出,5 种植被指数与长白落叶松林 LAI_e 均呈极显著正相关 ($P < 0.01$),相关系数为 0.60~0.76。 LAI_e 与 IRECI 的相关性最高,对比植被指数公式发现,IRECI 采用红边等 4 个波段组合,对冠层三维结构变化更为敏感,在高 LAI_e (>4) 时仍保持良好的线性关系。因此,IRECI 对长白落叶松 LAI_e 的变化比较敏感,更适合构建经验回归模型。

表 3 植被指数与 LAI_e 的相关关系

Tab. 3 Correlation relationships between vegetation indices and LAI_e

指标	相关系数				
	GNDVI	IRECI	NDVI	MSAVI	ARVI
LAI_e	0.60**	0.76**	0.72**	0.71**	0.64**

注:**表示极显著相关 ($P < 0.01$)。

3.2 激光雷达 LAI_e 的统计特征分析

基于手持激光雷达扫描仪实测的 97 块样地点云数据,利用融合点云的 LAI_e 多参数反演模型计算,得到研究区各样地长白落叶松林的 LAI_e 数据。研究区长白落叶松林 LAI_e 实测值为 2.776~5.994,平均值为 4.357,整体分布呈现“右偏态”特征(偏度-0.282,峰度-1.231),数据变异性程度适中(标准差为 0.888)。通过混淆矩阵法验证,长白落叶松林样地 LAI_e 模型整体精度为 91.3%,Kappa 系数为 0.86,显著优于传统测量方法,符合本次研究需求。

3.3 环境因子与 LAI_e 的相关性分析

从表 4 可以看出,除地形位置指数与 LAI_e 呈负相关,其他影响因子与其均呈正相关。郁闭度、坡度、胸径和年均降水量与长白落叶松实测 LAI_e 呈显著正相关 ($P < 0.05$),年均气温、粗糙度、海拔和树高与长白落叶松实测 LAI_e 的相关系数大于 0.51,呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。长白落叶松 LAI_e 受地形因子(粗糙度、海拔、坡度)、气候因子(气温、降水量)和生物

因子(郁闭度、树高、胸径)的调控。气候因子通过水热条件影响光合作用与资源分配,海拔通过间接改变气候和生境异质性发挥作用,生物因子反映树木生长状况和群落结构。年均气温是所有环境因子中与 LAI_e 相关性最高的因子,达到了 0.79。主要是由于气温通过影响光合作用效率和生长季长度,直接促进长白落叶松叶片生长,增加叶面积累积。粗糙度与 LAI_e 也表现出较强的相关性,达到了 0.57。表明复杂的地形能够增加生境多样性,为长白落叶松提供了更多适宜生长的微环境(如局部水肥聚集),直接影响 LAI_e 。海拔与 LAI_e 同样也表现出较强的相关性,为 0.55,随着海拔的升高导致温度降低,直接抑制了光合效率与叶片的扩张。作为反映林分生长状况的树高,同样也表现出较强的相关性(0.51)。高大树木通常具有更发达的冠层结构,叶面积总量更大。综上,粗糙度、海拔、年均气温和树高能够较好的反映长白落叶松林的 LAI_e ,可作为构建长白落叶松 LAI_e 反演模型的关键环境因子。

表 4 环境因子与 LAI₀ 的相关关系

Tab. 4 Correlation relationships between environmental factors and LAI₀

指标	相关系数					
	海拔	坡度	坡向	山体阴影	粗糙度	地形位置指数
LAI ₀	0.55 ^{**}	0.47 [*]	0.14	0.19	0.57 ^{**}	-0.38

指标	相关系数				
	年均气温	年均降水量	胸径	树高	郁闭度
LAI ₀	0.79 ^{**}	0.38 [*]	0.42 [*]	0.51 ^{**}	0.48 [*]

注: * 表示显著相关 ($P < 0.05$); ** 表示极显著相关 ($P < 0.01$)。

3.4 关键环境因子对 LAI₀ 的驱动分析

采用随机森林的方法, 探明关键环境因子对长白落叶松 LAI 的驱动关系及重要程度。所有关键环境因子均对长白落叶松 LAI₀ 产生不同程度的影响。树高和粗糙度对 LAI₀ 的影响相对较弱, 重要性评分分别为 27.32 和 38.71。海拔和年均气温对长白落叶松 LAI₀ 的影响显著, 重要性评分分别为 59.62 和 71.34, 均大于 50。其中, 年均气温对 LAI₀ 的影响最大, 在驱动因子中占据主导地位, 主要因为气温直接影响长白落叶松的生理活动, 如光合作用、呼吸作用和水分利用效率。在生理层面, 温度直接影响光合作用与代谢过程, 15~25 °C 的适宜温度能显著提升光合酶活性, 从而促进叶面积扩展。同时, 气温升高有助于延长生长季, 使春季物候期提前, 增加有效光合时间。

3.5 耦合环境因子的 LAI₀ 精细化反演模型构建

使用 SPSS 软件, 对 97 个激光雷达 LAI₀ 进行随机抽样, 选取 3/5 的样本作为训练样本 (58 个), 2/5 的样本作为验证样本 (39 个)。采用线性形式进行回归拟合, 结果如图 1 所示。耦合关键环境因子的模型, 凭借对年均气温、海拔、粗糙度、树高以及 IRECI 指数的综合考量, 大幅增强了模型对数据的适配度。决定系数 R^2 从单一指数模型的 0.79 提升至 0.89, 这意味着多因子模型对长白落叶松 LAI₀ 实际值变化的解释能力更强, 能够涵盖更多的数据变化信息。同时, RMSE 从 0.41 降至 0.30, MAE 由 0.34 降至 0.24。这些误差指标的显著降低, 直观地体现出多因子模型在预测值与实际值的契合度上更胜一筹。

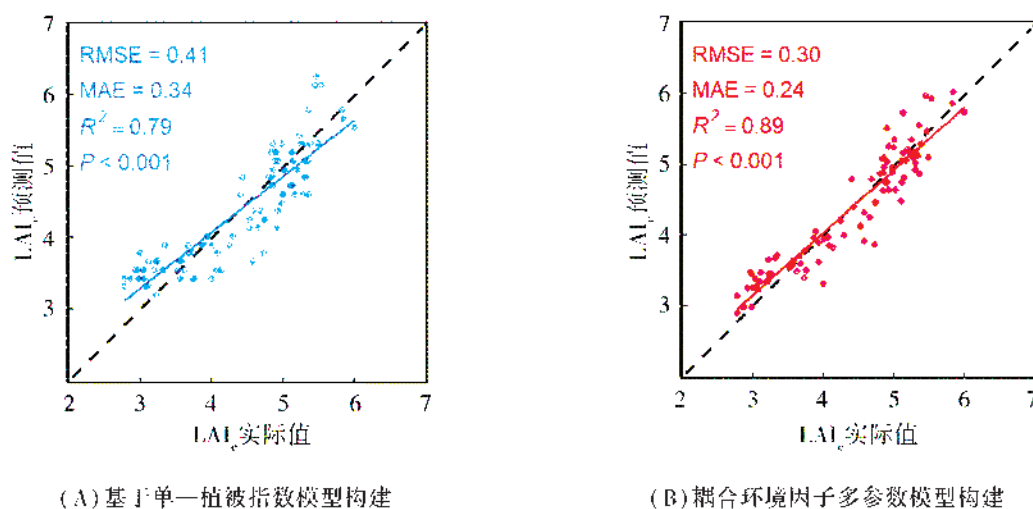


图 1 长白落叶松 LAI₀ 遥感反演

Fig. 1 Remote sensing inversion of LAI₀ for *L. olgensis*

4 结论与展望

本研究从 5 种植被指数中筛选出反红边叶绿素指数 (IRECI) 为最优植被指数, 其与 LAI 的相关性最高 ($r = 0.76$)。IRECI 采用红边等 4 个波段组合, 对冠层三维结构响应灵敏, 在高 LAI (>4) 时仍保持良好的线性关系。基于 IRECI 构建的多因子回归模型显著提升了 LAI 估算精度, 该结果与包广道等^[5]研究中 IRECI 在长白落叶松林 LAI 反演中的优越性结论一致。本研究对环境因子与 LAI 的相关性进行分析, 不同环境因子对长白落叶松林 LAI 的影响具有差异, 年均气温、海拔、粗糙度和树高是构建长白落叶松林 LAI 的关键环境因子。

本研究构建了一种融合年均气温、粗糙度、海拔与树高的长白落叶松林 LAI 反演模型, 通过将气候、地形与林分结构等非光谱变量协同引入遥感估算框架, 有效突破了传统单一植被指数模型的局限, 反演精度 R^2 由 0.79 提升至 0.89。

本研究验证了融合环境因子数据进行长白落叶松林 LAI 精细化反演的可行性, 为大尺度遥感监测提供了方法支持。本研究仍存在局限, 本次试验数据采集期为 2022 年 7 月, 缺乏不同物候期 (如落叶期) 的数据对比。未来可增加多期野外数据, 按树木生长阶段分类采集, 进一步验证模型的季节适用性与稳定性。本研究仅针对长白落叶松人工纯林开展, 未涵盖其他针叶林 (如樟子松、红松) 及阔叶林型。后续研究可扩展至不同树种与林分结构, 验证该方法是否具有普适性。通过以上改进, 可进一步增强长白落叶松林 LAI 反演模型的鲁棒性与推广应用价值, 为森林生长监测、碳汇模拟及生态安全维护提供更可靠的技术支撑。

参考文献

- [1] Chen J M, Black T A. Defining leaf area index for non-flat leaves [J]. *Plant, Cell & Environment*, 1992, 15(4): 421-429.
- [2] 冉佳璇, 罗光浪, 何世强, 等. 马尾松林叶面积指数季节动态的测定[J]. 中南林业科技大学学报, 2024, 44(5): 56-66.
- [3] 吴月娇, 胡振华. 六盘山华北落叶松人工林叶面积

指数的校准[J]. 森林与环境学报, 2024, 44(3): 308-316.

- [4] 何金有, 贾炜玮, 张小勇, 等. 应用 PROSAIL 模型对森林冠层叶面积指数遥感估测 [J]. 东北林业大学学报, 2023, 51(11): 86-94.
- [5] 包广道, 刘婷, 张忠辉, 等. 长白山区 4 种针叶林有效叶面积指数遥感精细反演及空间分布规律[J]. 林业科学, 2024, 60(5): 127-138.
- [6] Zhai Chang, Ding Mingming, Ren Zhibin, et al. A LiDAR-driven effective leaf area index inversion method of urban forests in northeast China [J]. *Forests*, 2023, 14(10): 2084.
- [7] 王晓冰, 范文义. 叶面积指数与植被指数饱和点分析及验证 [J]. 东北林业大学学报, 2023, 51(9): 83-94, 111.
- [8] Bhattarai R, Rahimzadeh-Bajgiran P, Weiskittel A, et al. Sentinel-2 based prediction of spruce budworm defoliation using red-edge spectral vegetation indices [J]. *Remote Sensing Letters*, 2020, 11(8): 777-786.
- [9] 刘婧怡, 汤旭光, 常守志, 等. 森林叶面积指数遥感反演模型构建及区域估算 [J]. 遥感技术与应用, 2014, 29(1): 18-25.
- [10] Sun Chao, Bai Xuelian, Wang Xiping, et al. Response of vegetation variation to climate change and human activities in the Shiyang River Basin of China during 2001-2022 [J]. *Journal of Arid Land*, 2024, 16(8): 1044-1061.
- [11] Fang H L, Baret F, Plummer S, et al. An overview of global leaf area index (LAI): methods, products, validation, and applications [J]. *Reviews of Geophysics*, 2019, 57(3): 739-799.
- [12] Castro Karen L, Sanchez-Azofeifa G A. Changes in spectral properties, chlorophyll content and internal mesophyll structure of senescing *Populus balsamifera* and *Populus tremuloides* leaves [J]. *Sensors*, 2008, 8(1): 51-69.
- [13] Priya K, Pranab K P, Mohammed L K, et al. A quick and simple method for estimating leaf area by leaf weight [J]. *International Journal of Botany Studies*, 2021, 6(6): 1286-1289.
- [14] Gitelson A A, Kaufman Y J, Merzlyak M N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 58(3): 289-298.

(本篇专家编审: 何怀江)

DOI:10.16115/j.cnki.issn.1005-7129.2026.02.006

文章编号:1005-7129(2026)02-0033-05 中图分类号:S792.25 文献标识码:A

基于不同替代寄主繁育的松毛虫赤眼蜂 对落叶松毛虫卵的寄生能力的比较

宋丽威

(长春市净月潭实验林场,吉林长春 130117)

摘要:松毛虫赤眼蜂是落叶松毛虫卵期重要的天敌之一,为了更好的利用松毛虫赤眼蜂防治落叶松毛虫,本研究系统比较了由柞蚕卵繁育的松毛虫赤眼蜂(AP-Td)和米蛾卵繁育的松毛虫赤眼蜂(CC-Td)对落叶松毛虫卵的寄生表现,为筛选落叶松毛虫卵寄生效果好的松毛虫赤眼蜂最佳替代寄主提供理论依据。结果表明,试管中落叶松毛虫卵数量不同时 AP-Td 和 CC-Td 均可以寄生。落叶松毛虫卵为 1 粒时,单头松毛虫赤眼蜂寄生率达 96% 以上。随着落叶松毛虫卵数量增加,寄生率逐渐下降。落叶松毛虫卵为 1~3 粒时,AP-Td 的寄生率和羽化蜂数量均高于 CC-Td。随着试管中 AP-Td、CC-Td 数量的增加,其寄生率、羽化率均逐渐下降。AP-Td、CC-Td 为 1~2 头时,AP-Td 的寄生率、羽化率、羽化蜂数量均高于 CC-Td。综上所述,AP-Td 对落叶松毛虫卵具有更强的寄生潜能。本研究可为松毛虫赤眼蜂规模化繁育提供理论依据。

关键词:松毛虫赤眼蜂;落叶松毛虫;替代寄主;寄生能力

Comparison of Parasitic Capacity of *Trichogramma dendrolimi* Reared on Different Alternative Host to *Dendrolimus superans* Eggs

SONG Liwei

(Jingyuetan Experimental Forest Farm of Changchun City, Changchun 130117, China)

Abstract: *Trichogramma dendrolimi* was one of the important natural enemies of *Dendrolimus superans* eggs. In order to make better use of *T. dendrolimi* to control *D. superans*, the parasitic performances of *T. dendrolimi* reared on *Antheraea pernyi* eggs (AP-Td) and *T. dendrolimi* reared on *Corcyra cephalonica* eggs (CC-Td) to *D. superans* eggs were systematically compared in this paper. That would provide the theoretical basis for screening the best alternative host of *T. dendrolimi* with good parasitic effect on *D. superans* eggs. The results showed that AP-Td and CC-Td could parasitize on *D. superans* eggs with the different number in the test tube. The parasitic rate was more than 96% when the number of *D. superans* egg was 1 and the number of *T. dendrolimi* was 1. With the increase of the number of *D. superans* eggs, the parasitic rate decreased gradually. The parasitic rate and emergence number of AP-Td were higher than those of CC-Td. With the increase of AP-Td and CC-Td number in the test tube, the parasitic rate and emergence rate decreased gradually. The parasitic rate, emergence rate and emergence number of AP-Td were higher than those of CC-Td with the number of 1-2. In summary, AP-Td had stronger parasitic potential to *D. superans* eggs. That would provide the theoretical basis for the mass rearing of *T. dendrolimi*.

Keywords: *Trichogramma dendrolimi*; *Dendrolimus superans*; alternative host; parasitic capacity

收稿日期:2025-11-19

作者简介:宋丽威(1987—),女,高级工程师,硕士研究生,从事森林保护工作,E-mail:1048209682@qq.com。

落叶松毛虫 *Dendrolimus superans* 属鳞翅目 Lepidoptera 枯叶蛾科 Lasiocampidae 松毛虫属^[1],广泛分布于亚洲东部,是一种常见的森林害虫,同时也是中国北方林区危害最大的食叶害虫之一^[2]。该虫主要以幼虫取食针叶,暴发时可吃光针叶,使枝干形同火烧,严重危害树木的生长,造成松林成片枯死^[3,4]。化学防治见效快、防治效果好,但对环境造成了一定的污染,杀灭非靶标生物,尤其是对天敌和蜜蜂等有益生物造成了不可逆的危害,严重破坏森林生态平衡^[5]。生物防治不污染环境,无农药残留,不杀伤天敌,不易产生抗药性,目前广泛应用于农林害虫的防治。

赤眼蜂 *Trichogramma* spp. 为卵寄生蜂,是目前世界上公认的应用面积最广的高效天敌昆虫,其寄主范围广,对害虫防治能力强^[6]。20世纪70年代,我国北方地区相继开始应用赤眼蜂大面积防治亚洲玉米螟 *Ostrinia furnacalis*、苹褐卷蛾 *Pandemis heparana*、稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* 等害虫,效果显著^[7]。研究发现,赤眼蜂对寄主卵的寄生能力因赤眼蜂蜂种和品系的不同而存在差异^[8-13]。选择适宜的蜂种或品系是利用赤眼蜂成功防治靶标害虫的前提,也是提高防治效果的关键。

松毛虫赤眼蜂 *Trichogramma dendrolimi* 是落叶松毛虫的主要寄生性天敌,关于松毛虫赤眼蜂对林间自然寄主落叶松毛虫卵寄生适应性的研究鲜有报道。目前我国用于大规模繁殖松毛虫赤眼蜂的替代寄主有米蛾 *Corcyra cephalonica*、麦蛾 *Sitotroga cerealella*、蓖麻蚕 *Samia ricini* 和柞蚕 *Antheraea pernyi* 的卵。其中,柞蚕卵是大规模饲养中最成功的替代寄主卵,具有繁殖率高、运输方便、成本低等优点。本研究以不同替代寄主柞蚕卵、米蛾卵繁育的松毛虫赤眼蜂为对象,探讨落叶松毛虫卵数量和松毛虫赤眼蜂数量对其寄生能力的影响,以期松毛虫赤眼蜂规模化繁育提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 供试替代寄主

秋蚕茧购自吉林省永吉县,在2~4℃冷库内存,室温条件下发育,待柞蚕蛾羽化后,剖腹取卵,并用0.1%苯扎溴铵消毒5min,室温晾干后去除绿卵,得到柞蚕卵以备试验使用。

米蛾在室内用玉米面饲养,建立稳定种群,成虫产卵后收集。米蛾卵用30W紫外灯照射30min,杀死胚胎,备用。

1.1.2 供试寄生蜂

松毛虫赤眼蜂于2023年采自黑龙江省尚志市,采用野外赤眼蜂种群人工分离获得,由吉林农业大学保存,并已通过分子生物学鉴定。

采用柞蚕卵、米蛾卵作为替代寄主繁育松毛虫赤眼蜂建立试验种群(分别为AP-Td和CC-Td),供试蜂种饲养于室内培养箱内(25℃±2℃、相对湿度60%~80%、光周期14L:10D),均连续繁殖5代以上。

1.1.3 供试自然寄主

2023年6月末开始,每天上午9:00于净月潭实验林场林间人工采集落叶松毛虫蛹,将采集的蛹带回室内置于25℃±1℃、相对湿度60%±5%、光周期14L:10D的标准环境条件下培养发育,待羽化出蛾后,将雌蛾、雄蛾成对放到透明杯中,每天收集新鲜的松毛虫受精卵供试验使用。

1.2 试验方法

在试管(直径1cm,长10cm)中分别接入1粒、2粒、3粒、4粒、5粒落叶松毛虫卵,每管引入1头当日羽化(<8h)并已交配的雌性松毛虫赤眼蜂,用棉布将试管口封好,试验在人工气候箱内进行(25℃±2℃,相对湿度60%~80%,光周期14L:10D),24h后移出松毛虫赤眼蜂,6d后调查落叶松毛虫卵被寄生情况。每个处理15次重复。

在备有1粒新鲜落叶松毛虫卵的试管中,分别引入当日羽化(<8h)并已交配的松毛虫赤眼蜂雌蜂1头、2头、3头、4头、5头,用棉布将试管口封好,试验在人工气候箱内进行(25℃±2℃,相对湿度60%~80%,光周期14L:10D),24h后移出松毛虫赤眼蜂,6d后调查落叶松毛虫卵被寄生情况。每个处理15次重复。

待蜂羽化后,每天记录羽化蜂数量,直到不再有羽化蜂出现为止,记录残留蜂数量(落叶松毛虫卵中解剖出的未羽化蜂数量)。计算寄生率、羽化率、子代雌性比,寄生率为寄生卵数量占卵总数的比例,羽化率为羽化卵数量占寄生卵数量的比例,子代雌性比为子代雌蜂数量占羽化蜂数量的比例。

1.3 数据分析

利用 DPS 进行数据处理及单因素方差分析,差异显著性以 Duncan 新复极差法进行检验。

2 结果与分析

2.1 AP-Td 和 CC-Td 对不同数量落叶松毛虫卵的寄生能力

落叶松毛虫卵数量不同时, AP-Td 和 CC-Td 的寄生率、羽化率、子代雌性比、羽化蜂数量和残留蜂数量见表 1。落叶松毛虫卵为 1~5 粒时, AP-Td 和 CC-Td 均可寄生,落叶松毛虫卵数量对 AP-Td 和 CC-Td 的寄生能力影响显著($P < 0.05$)。

随着落叶松毛虫卵数量增加, AP-Td 和 CC-Td 的寄生率显著下降。落叶松毛虫卵为 1 粒时, AP-Td 和 CC-Td 的寄生率最高,均达

96% 以上。随着落叶松毛虫卵数量的增加, AP-Td 和 CC-Td 的寄生率均呈下降趋势。落叶松毛虫卵为 1 粒、2 粒、3 粒时, AP-Td 的寄生率高于 Cc-Td 但差异不显著($P > 0.05$);落叶松毛虫卵为 4 粒时, Cc-Td 的寄生率显著高于 AP-Td ($P < 0.01$);落叶松毛虫卵为 5 粒时, Cc-Td 的寄生率高于 AP-Td 但差异不显著($P > 0.05$)。

AP-Td 和 CC-Td 寄生落叶松毛虫卵后均能完成发育,落叶松毛虫卵数量对 AP-Td 和 CC-Td 的羽化率、羽化蜂数量和残留蜂数量影响显著($P < 0.05$),对子代雌性比无显著影响($P > 0.05$)。Cc-Td 的羽化率随落叶松毛虫卵数量的增加逐渐降低。Cc-Td 的羽化蜂数量、AP-Td 的羽化率及羽化蜂数量随落叶松毛虫卵数量的增加呈先升后降的趋势,落叶松毛虫卵为 2 粒时达到峰值。落叶松毛虫卵为 2 粒、3 粒时, AP-Td 的羽化率显著高于 Cc-Td ($P < 0.05$),其他情况下则相反。落叶松毛虫卵数量相同时, AP-Td 的羽化蜂数量均显著高于 Cc-Td ($P < 0.05$)。落叶松毛虫卵为 1 粒、5 粒时, AP-Td 的残留蜂量低于 Cc-Td,其他情况下则相反。

表 1 AP-Td 和 CC-Td 对不同数量落叶松毛虫卵的寄生能力

Tab. 1 Parasitic capacity of AP-Td and CC-Td to *D. superans* eggs with different number

松毛虫 赤眼蜂	落叶松毛虫 卵数量/粒	寄生率	羽化率	子代雌性比	羽化蜂 数量/卵	残留蜂 数量/卵
Ap-Td	1	1.00 ± 0.01 a	0.80 ± 0.26 a	0.95 ± 0.01 a	69.13 ± 15.36 a	0.27 ± 0.12 b
	2	0.97 ± 0.03 a	0.97 ± 0.11 a	0.93 ± 0.01 a	101.60 ± 7.65 a	10.27 ± 4.15 ab
	3	0.67 ± 0.09 b	0.93 ± 0.07 a	0.92 ± 0.02 a	60.73 ± 5.45 a	19.00 ± 3.20 a
	4	0.10 ± 0.07 c	0.12 ± 0.5 b	0.92 ± 0.02 a	40.73 ± 9.54 bc	11.27 ± 4.61 ab
	5	0.05 ± 0.05 c	0.03 ± 0.03 b	0.92 ± 0.02 a	21.93 ± 7.65 c	3.80 ± 2.07 b
Cc-Td	1	0.96 ± 0.11 a	1.00 ± 0.01 a	0.93 ± 0.02 a	31.00 ± 6.06 b	27.33 ± 5.68 a
	2	0.80 ± 0.13 ab	0.79 ± 0.14 ab	0.95 ± 0.01 a	61.13 ± 7.01 a	2.47 ± 1.86 b
	3	0.57 ± 0.03 b	0.64 ± 0.11 ab	0.93 ± 0.02 a	43.40 ± 7.16 ab	2.60 ± 1.12 b
	4	0.50 ± 0.11 b	0.57 ± 0.13 ab	0.92 ± 0.02 a	9.60 ± 6.54 bc	3.47 ± 3.40 b
	5	0.11 ± 0.03 c	0.43 ± 0.14 b	0.90 ± 0.02 a	3.67 ± 3.67 c	4.07 ± 4.07 b

注:同列不同小写字母表示落叶松毛虫卵数量不同时 Ap-Td、Cc-Td 寄生能力差异显著($P < 0.05$)。

2.2 不同数量 AP-Td 和 CC-Td 对落叶松毛虫卵的寄生能力

AP-Td 和 CC-Td 数量不同时,其寄生率、羽化率、子代雌性比、羽化蜂数量和残留蜂数量见表 2。AP-Td 和 CC-Td 为 1~5 头时,其均能寄生。

随着 AP-Td 和 CC-Td 数量的增加,其寄生率、羽化率逐渐下降。Ap-Td 和 Cc-Td 为 1 头时,其寄生率、羽化率最大。Ap-Td 和 Cc-Td 数量相同时,其寄生率无显著差异($P > 0.05$)。

Ap-Td 数量增至 3 头时其无法羽化,Cc-Td 数量增至 5 头时其无法羽化。Ap-Td 和 Cc-Td 的子代雌性比不受自身数量的影响,无显著差异。

AP-Td 和 CC-Td 数量相同时,其羽化蜂数量、残留蜂数量均存在显著差异($P < 0.05$)。AP-Td 和 CC-Td 为 1 头、2 头时,Ap-Td 羽化蜂数显著高于 Cc-Td($P < 0.05$)。AP-Td 和 CC-Td 为 1 头、5 头时,Ap-Td 的残留蜂数量低于 Cc-Td,其他情况下则相反。

表 2 不同数量 AP-Td 和 CC-Td 对落叶松毛虫卵的寄生能力

Tab. 2 Parasitic capacity of AP-Td and CC-Td with different number to *D. superans* eggs

松毛虫 赤眼蜂	松毛虫赤眼 蜂数量/头	寄生率	羽化率	子代雌性比	羽化蜂 数量/卵	残留蜂 数量/卵
Ap-Td	1	1.00 ± 0.01 a	0.80 ± 0.26 a	0.95 ± 0.01 a	69.13 ± 15.36 a	0.27 ± 0.12 c
	2	0.80 ± 0.11 a	0.80 ± 0.11 a	0.90 ± 0.05 a	59.87 ± 4.63 a	32.93 ± 4.95 a
	3	0.74 ± 0.12 a	0		0	19.13 ± 4.65 b
	4	0.60 ± 0.13 a	0		0	13.60 ± 4.78 b
	5	0.13 ± 0.09 b	0		0	0.80 ± 0.58 c
Cc-Td	1	0.96 ± 0.11 a	1.00 ± 0.01 a	0.93 ± 0.02 a	31.00 ± 6.06 a	27.33 ± 5.68 a
	2	0.73 ± 0.12 ab	0.60 ± 0.13 ab	0.92 ± 0.02 a	30.53 ± 6.66 a	2.93 ± 1.95 c
	3	0.67 ± 0.13 bc	0.47 ± 0.13 bc	0.95 ± 0.01 a	30.27 ± 6.42 a	7.07 ± 2.93 b
	4	0.40 ± 0.13 cd	0.20 ± 0.11 cd	0.92 ± 0.02 a	14.53 ± 5.33 b	8.27 ± 4.58 b
	5	0.33 ± 0.13 d	0		0	4.67 ± 1.93 c

注:同列不同小写字母表示 Ap-Td、Cc-Td 自身数量不同时其寄生能力差异显著($P < 0.05$)。

3 讨论

赤眼蜂寄主范围广,其种间及种内在寄生能力等特性上有较大变异,选择对靶标寄主卵寄生率高的赤眼蜂品系是实现规模化放蜂防治害虫的关键^[14],在应用赤眼蜂防治靶标害虫的研究工作中首先应筛选出对靶标寄主适合度和选择度较高的赤眼蜂品系。松毛虫赤眼蜂作为松毛虫卵期重要寄生天敌之一,在落叶松毛虫卵期降低其种群密度,减少幼虫的数量,可有效遏制落叶松毛虫幼虫大暴发对松林的毁坏。近年来,我国在利用柞蚕卵、米蛾卵等替代寄主工厂化繁育松毛虫赤眼蜂方面取得了一定的成就。本研究在室内比较了 Ap-Td 和 Cc-Td 对

自然寄主落叶松毛虫卵的寄生能力,结果表明 Ap-Td 寄生效果更好,其对自然寄主落叶松毛虫的寄生能力具有一定优势性。已有研究证实赤眼蜂产卵能力与其寄主个体大小成正比,不同大小寄主卵能够影响寄生蜂子代的繁殖力^[15]。本研究得出柞蚕卵比米蛾卵繁育的松毛虫赤眼蜂寄生效果好,可能与柞蚕卵和落叶松毛虫卵形状、卵壳硬度相似有关。

本研究中落叶松毛虫卵为 1 粒时单头松毛虫赤眼蜂寄生率达 96% 以上,随着 AP-Td 和 CC-Td 数量的增加,其寄生率、羽化率逐渐下降,松毛虫赤眼蜂寄生能力受自身数量干扰较大。因此,淹没式的释放不仅达不到预期防治效果,反而造成人力物力的大量损耗。适宜的

寄主及释放量与防治效果息息相关^[16],且不同种群密度的干扰也会影响赤眼蜂对林间寄主的寻找效应^[17]。

4 结论

应用两种替代寄主繁育的松毛赤眼蜂对落叶松毛虫卵的寄生能力的比较表明,AP-Td 寄生能力较强,其寄生率、羽化率、羽化蜂数量均优于 Cc-Td,作为寄生性天敌 AP-Td 比 Cc-Td 具有更好的防治作用。

参考文献

[1]孙晨辉. 长白山原始林森林结构对落叶松毛虫数量影响研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2021.

[2]姜雪菲, 包广道, 翟畅, 等. 森林食叶害虫空间分布格局遥感定量反演研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2024, 44(1): 125-134.

[3]Jiang Xuefei, Liu Ting, Ding Mingming, et al. Changes in spatiotemporal pattern and its driving factors of suburban forest defoliating pest disasters[J]. *Forests*, 2024, 15(9): 1650.

[4]陈宏伟, 胡远满, 常禹, 等. 落叶松毛虫对大兴安岭呼中林区森林的景观长期影响模拟[J]. 应用生态学报, 2010, 21(5): 1090-1096.

[5]刘哲强, 焦玥, 王志英, 等. 落叶松毛虫 SOD 和 CAT 对 6 种农药的敏感性比较[J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(5): 136-139.

[6]刘思竹. 中国赤眼蜂科部分属的分类研究(膜翅目: 小蜂总科)[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2019.

[7]王勇, 李天昊, 王汐亚, 等. 中国赤眼蜂寄生生态学及工厂化繁殖应用新进展[J]. 植物保护, 2023, 49(5): 399-409.

[8]Song Liwei, Wen Xuanye, Zang Liansheng, et al. Parasitism and suitability of different egg ages of the *Leguminivora glycinivorella* (Lepidoptera: Tortricidae) for three indigenous *Trichogramma* species[J]. *Journal of Economic Entomology*, 2015, 108(3):

933-939.

[9]Hassan S A, Guo M F. Selection of effective strains of egg parasites of the genus *Trichogramma* (Hym., Trichogrammatidae) to control the European corn borer *Ostrinia nubilalis* Hb. (Lep., Pyralidae)[J]. *Journal of Applied Entomology*, 1991, 111(4): 335-341.

[10]Monje J C, Ohnesorge B, Zebitz C P W. Host and host age preference of *Trichogramma galloi* and *T. pretiosum* (Hymenoptera: Trichogrammatidae) reared on different hosts[J]. *Journal of Economic Entomology*, 1999, 92(1): 97-103.

[11]张帆, 王素琴, 张君明, 等. 半自然条件下几种赤眼蜂及品系对亚洲玉米螟卵寄生能力比较[J]. 植物保护, 2004, 30(4): 29-32.

[12]李莹, 董辉, 丛斌, 等. 温度对松毛虫赤眼蜂不同地理种群寄生潜能及种群参数的影响[J]. 中国生物防治学报, 2013, 29(1): 11-16.

[13]杜文梅, 臧连生, 张俊杰, 等. 两种不同地理种群松毛虫赤眼蜂对米蛾卵的寄生功能及数值反应[J]. 中国农业科学, 2016, 49(23): 4669-4676.

[14]Zhang Junjie, Zhang Xue, Zang Liansheng, et al. Advantages of diapause in *Trichogramma dendrolimi* mass production on eggs of the Chinese silkworm, *Antheraea pernyi* [J]. *Pest Management Science*, 2018, 74(4): 959-965.

[15]Martel V, Darrouzet E, Boiyin G. Phenotypic plasticity in the reproductive traits of a parasitoid[J]. *Journal of Insect Physiology*, 2011, 57(6): 682-687.

[16]Hassell M P. Host-parasitoid population dynamics[J]. *Journal of Animal Ecology*, 2000, 69(4): 543-566.

[17]童新旺, 倪乐湘, 劳先闵. 两种寄生蜂混放效果研究初报[J]. 林业科技开发, 1999, 13(5): 26-27.

(本篇专家编审:李立梅)

DOI:10.16115/j.cnki.issn.1005-7129.2026.02.007

文章编号:1005-7129(2026)02-0038-05 中图分类号:S718.7 文献标识码:A

三色堇花色及环境因子对意大利蜜蜂访花行为的影响

刘国良¹, 汤政泽¹, 杜志琦¹, 武飞岳¹, 冯立超², 孟庆繁²

(1. 吉林省林业调查规划院, 吉林 长春 130022; 2. 北华大学林学院, 吉林 吉林 132013)

摘要:本研究观察不同花色及环境因子下意大利蜜蜂对三色堇花的访问量,剖析其访花行为变化的重要驱动因素。结果表明,意大利蜜蜂访花行为受花色、时间、温度和光照强度影响。花色为紫色其访问量最高,花色为红色其访问量最低。从试验的3个时间段来看,10:00—10:40总访问量最多,10:41—11:20次之,11:21—12:00最少。各时间段,访问量在不同花色间均存在极显著差异($P < 0.01$)。在花色相同的情况下,除红蓝组合外访问量在不同时间段间均差异显著($P < 0.05$)。温度对访问量的影响呈单峰变化趋势,温度为22~<23℃时访问量最大。光照强度对访问量的影响呈单峰变化趋势,光照强度为100 000~<110 000 lx时访问量最大。综上所述,花色在意大利蜜蜂对三色堇的访花行为中扮演重要的角色,环境因子也有一定影响。

关键词:意大利蜜蜂;花色;温度;光照强度

Influence of Flower Colors of *Viola tricolor* and Environmental Factors on Visiting Behaviors of *Apis mellifera ligustica*

LIU Guoliang¹, TANG Zhengze¹, DU Zhiqi¹, WU Feiyue¹, FENG Lichao², MENG Qingfan²

(1. Forestry Investigation and Planning Institution of Jilin Province, Changchun 130022, China; 2. College of Forestry of Beihua University, Jilin 132013, China)

Abstract: In this study, the visiting number of *Apis mellifera ligustica* to *Viola tricolor* under different flower colors and environmental factors was observed, in order to analyze the important driving factors of the visiting behavior. The results showed that the visiting behavior was affected by flower color, time, temperature and illumination intensity. The visiting number was the highest when the flower color was purple, and the visiting number was the lowest when the flower color was red. In terms of the three time periods of the experiment, the visiting number was highest from 10:00 to 10:40, followed by 10:41 to 11:20, and that was lowest from 11:21 to 12:00. There was extremely significant difference in the visiting number among different flower colors in each time period ($P < 0.01$). When the flower color was the same, there was significant difference in the visiting number among the three time periods except for the red-blue combination ($P < 0.05$). The effect of the temperature on the visiting number exhibited the unimodal trend, and the visiting number was the highest when the temperatures was 22 - <23°C. The effect of the illumination intensity on the visiting number also exhibited the unimodal trend, and the visiting number was the highest when the illumination intensity was 100 000 - <110 000 lx. In summary, the flower color played the important role in the visiting behavior of *Apis mellifera ligustica* to *Viola tricolor*, and environmental factors also had the certain influence.

Keywords: *Apis mellifera ligustica*; flower color; temperature; illumination intensity

收稿日期:2026-01-04

第一作者:刘国良(1967—),男,正高级工程师,主要从事林业工作,E-mail:147226840@qq.com。

在植物与昆虫协同进化过程中,植物与昆虫之间建立的联系体现在化学限制、相互适应、相互调和等方面,植物对昆虫的生存产生决定性作用,同时昆虫的取食及刺激作用对植物的表现型及外部形态特征、生物学特性等都产生一定的助推作用^[1-3]。

植物与其传粉昆虫相互作用、相互适应、协同进化,形成了独特的互惠共生关系。植物通过单花特征(花冠颜色、花型、花香等)和花的群体特征(植株上开花的数量、开花类型和排列方式等)的进化影响传粉昆虫的行为,其向特定的传粉者传递花蜜、花粉等的视觉和嗅觉信号,引导昆虫采食,实现传粉^[4]。传粉昆虫则通过遗传和后天的学习行为利用这些信号找到食源,在访花过程中实现授粉^[5-8]。昆虫授粉使植物的受精机会增多、杂交优势扩大、果实和种子的产量和质量提高、植物的生存能力增强,传粉昆虫对于生态系统动态平衡的维持和相对稳定发挥了重要作用^[9]。

本研究采用意大利蜜蜂(*Apis mellifera ligustica*)作为传粉昆虫,选用不同花色的三色堇(*Viola tricolor*)作为蜜源植物,观察不同花色及环境因子下意大利蜜蜂对三色堇花的访问量,剖析其访花行为变化的重要驱动因素。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

磨盘山实验地位于吉林省吉林市丰满区前二道乡王相村境内(地理位置 126. 6875° E、43. 9875° N),为北温带大陆季风气候,夏季温热多雨,冬季寒冷漫长,年平均气温 4.5 °C,1 月平均气温-17.9 °C,年最低气温-40.2 °C,7 月平均气温 22.9 °C,年最高气温 33.6 °C。年均降水量 668 mm,相对湿度 70%,无霜期 130 d 左右。森林植被属于长白山植物区系,森林覆盖率高达 90%,林分多为天然次生林,主要乔木树种有胡桃楸(*Juglans mandshurica*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、山杨(*Populus davidiana*)、紫椴(*Tilia amurensis*)等,主要灌木树种有山葡萄(*Vitis amurensis*)、五味子(*Schisandra chinensis*)、主要草本植物有东北南

星(*Arisaema amurensis*)、和尚菜(*Adenocaulon himalaicum*)、莫石竹(*Moehringia lateriflora*)、铃兰(*Convallaria keiskei*)等^[10],野生植物丰富。

1.2 试验材料

试验用意大利蜜蜂购自吉林市龙潭区江密峰镇。意大利蜜蜂是我国主要饲养的酿蜜及传粉昆虫,其种群数量庞大、繁殖力和采集力强,且采集专一性较强^[11]。其常落在花瓣或者花蕊上直接采集花粉和花蜜,容易被观察记录。

试验用三色堇源自吉林市龙潭区江密峰镇百果花卉苗木培育基地。三色堇为多年生花卉^[12],较耐寒,喜凉爽,在昼温 15~25 °C、夜温 3~5 °C 的条件下发育良好。其花大,直径约 3.5~6 cm,每个茎上有 3~10 朵花,花色有紫、红、黄等。三色堇喜充足的日光照射,光照是开花的重要限制因子,日照长短比光照强度对开花的影响大^[13]。

1.3 试验方法

试验于 5 月下旬至 7 月上旬进行,在磨盘山实验地内设置 50 m × 20 m 带状试验区(试验区地势平坦,周围无其他蜜源植物,无农药残留干扰),各个组合间隔 2 m。距试验区 15 m 放置蜂箱,并进行遮阳处理。

花朵颜色采用 RHS 比色卡(2015 版)对比确认,试验区内放置不同颜色三色堇 100 盆。4 种纯色三色堇各 10 盆(5 次重复,每个重复 2 盆),计 40 盆,分别为黄色(G1)、红色(G5)、蓝色(G8)、紫色(G10);三色堇花色两两组合(组合比例 1:1)6 种,每种组合 10 盆(5 次重复,每个重复 2 盆),计 60 盆,分别为黄红组合(G2)、黄蓝组合(G3)、黄紫组合(G4)、红蓝组合(G6)、红紫组合(G7)、蓝紫组合(G9)。

温度设置 10 个水平,1 °C 为 1 个梯度,t1 为 15~<16 °C,以此类推,t10 为 24~<25 °C,采用 30 cm 水银玻璃棒温度计进行测量。

光照强度设置 10 个水平,10 000 lx 为 1 个梯度,k1 为 30 000~<40 000 lx,以此类推,k10 为 120 000~<130 000 lx,采用型号 SK8123 数字式照度计进行测量。

试验在晴天条件下进行(试验期间共有晴天 35 天),记录时间为上午 10:00—12:00^[14],

分3个采样时间段,每个时间段40 min¹⁵,即10:00—10:40(T1)、10:41—11:20(T2)、11:21—12:00(T3)。意大利蜜蜂落到花朵上记为1次访问,同时记录每次访问时的温度和光照强度。

采用SPSS 22.0软件对测定数据进行单因素方差分析和多重比较,采用Origin 22作图软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同花色组合和时间对意大利蜜蜂访问量影响

意大利蜜蜂对不同花色三色堇的访问量占

比如图1所示,G10花色访问量最高,占总访问量的26.06%,表现出其偏好紫色。G4、G9、G8和G3花色访问量占比均超过10%,分别为13.07%、12.41%、11.66%和11.32%。G1、G2、G5、G6和G7花色访问量占比均低于10%,G5花色访问量最低。

不同时间段意大利蜜蜂对三色堇的访问量见表1,T1时间段访问量最大,T2时间段次之,T3时间段最小。在各时间段,意大利蜜蜂对不同花色三色堇间的访问量均存在极显著差异($P < 0.01$)。在花色相同的情况下,除G6花色外,访问量在不同时间段均差异显著($P < 0.05$)。G10花色在各时间段访问量均最高。

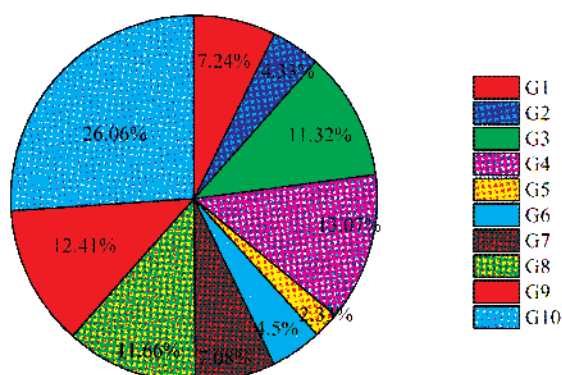


图1 意大利蜜蜂对不同花色三色堇的访问量占比

Fig. 1 Proportion of visiting number by *Apis mellifera ligustica* to *V. tricolor* with different colors

表1 不同花色和时间下意大利蜜蜂访问量差异比较

Tab. 1 Comparison of visits of *Apis mellifera ligustica* under different times and floral colors

花色	访问量/次		
	T1	T2	T3
G1	9.20 ± 0.58 D a	5.40 ± 0.75 E b	2.80 ± 0.66 DE e
G2	5.60 ± 0.51 E a	2.60 ± 0.51 G b	2.20 ± 0.37 EF b
G3	12.40 ± 1.21 C a	8.20 ± 0.58 C b	6.60 ± 1.17 C b
G4	18.60 ± 1.12 B a	6.00 ± 0.55 D b	6.80 ± 0.58 C b
G5	2.80 ± 0.37 G a	2.00 ± 0.55 G ab	0.80 ± 0.20 F b
G6	3.00 ± 0.32 G a	3.60 ± 0.24 F a	4.20 ± 0.58 D a
G7	4.80 ± 0.66 FG b	4.40 ± 0.75 EF b	7.80 ± 0.49 C a
G8	11.60 ± 0.68 C a	9.60 ± 1.08 C a	6.80 ± 0.73 C b
G9	7.60 ± 0.75 DE b	12.60 ± 1.03 B a	9.60 ± 0.40 B b
G10	24.40 ± 1.33 A a	21.00 ± 1.14 A b	17.20 ± 0.58 A c

注:表中数据为“平均值±标准误差”;同行不同小写字母表示相同花色不同时间段间访问量差异显著($P < 0.05$);同列不同大写字母表示相同时间段不同花色间访问量差异极显著($P < 0.01$)

2.2 不同环境条件下意大利蜜蜂对三色堇访问量的响应

从图2可以看出,不同温度下意大利蜜蜂访问量存在差异。总体上,温度对意大利蜜蜂

访问量的影响呈单峰变化趋势。t1 温度时访问量最小,随温度升高,意大利蜜蜂对三色堇的访问量呈上升趋势,t8 温度时达到峰值,随后呈下降趋势。

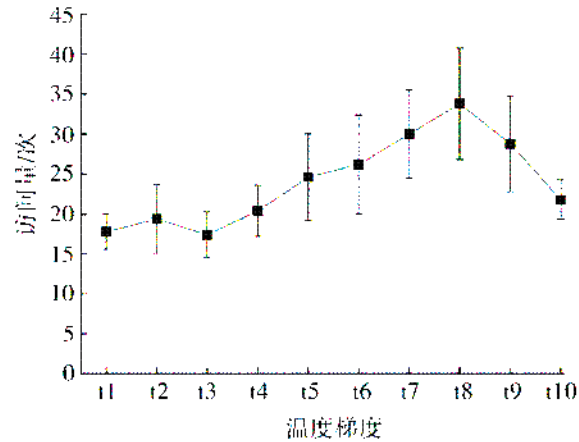


图2 不同温度梯度下意大利蜜蜂的访问量

Fig. 2 Visitation patterns of *Apis mellifera ligustica* under different temperature

从图3可以看出,不同光照强度下意大利蜜蜂访问量存在差异。总体上,光照强度对意大利蜜蜂访问量的影响呈单峰变化趋势。k1

光照强度时访问量最低,随光照强度升高,意大利蜜蜂的访问量呈上升趋势,k8 光照强度时达到峰值,随后呈下降趋势。

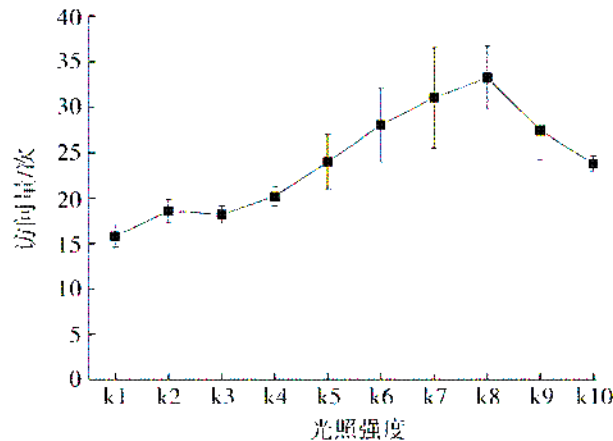


图3 不同光照强度下意大利蜜蜂的访问量

Fig. 3 Visitation patterns of *Apis mellifera ligustica* under different illumination intensities

3 结论与讨论

本试验共设置了10种花色,其中紫色(G10)访问量最多,占总访问量的26.06%,红色(G5)访问量最少,占总访问量的2.33%,表明意大利蜜蜂在试验时间段内更偏向于纯紫色的花朵。这与长白山地区访花昆虫对橙色的趋向性最强,对黄色、蓝色有明显偏好的结论不符^[16],可能与二者试验中传粉昆虫以及显花植物的选择有关。大多数花朵的颜色是为了吸引传粉者^[17, 18]。此外,一些花朵也具有特殊的纹

理(条纹或斑点)和形状(漏斗状或钟状),这些花朵的形态也可以吸引蜜蜂^[19]。总之,花朵的形态、颜色、香味和纹理等特征对蜜蜂的访问行为具有显著影响。

本试验中,温度为22~23℃(t8)时访问量最大,意大利蜜蜂最活跃,与陈上华等^[20]研究得出的蜜蜂活动的界限温度保持一致,这表明蜜蜂的活动与外界环境温度密切相关。温度对访问频率的影响呈单峰变化趋势,说明温度过高或过低都会影响蜜蜂的生活^[21, 22]。了解温度对蜂群的影响有助于提高蜜蜂的抗逆性,

降低蜜蜂的死亡率,提高蜂产品的产量和质量。

本试验中,意大利蜜蜂的访问量在光照强度为 100 000~<110 000 lx(k8)时达到最大值。光照强度影响意大利蜜蜂访问量,这与蜜蜂具有一定趋光性有关^[23]。

本文研究了三色堇花色及环境因子对意大利蜜蜂访花行为的影响,未来可增加动物、微生物等因子(参与植物生长或者影响土壤环境)的试验设计,进一步探明各因子对访花行为的影响。

参考文献

- [1] Whittle M, Barreaux A M G, Bonsall M B, et al. Insect-host control of obligate, intracellular symbiont density[J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2021, 288(1963): 20211993.
- [2] Ashra H, Nair S. Review: trait plasticity during plant-insect interactions: from molecular mechanisms to impact on community dynamics[J]. *Plant Science*, 2022, 317: 111188.
- [3] Stam J M, Kroes A, Li Y H, et al. Plant interactions with multiple insect herbivores: from community to genes[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2014, 65: 689-713.
- [4] 黄双全, 宋旒, 江泉, 等. 冠果草的性表达状态及其进化含义(英文)[J]. *植物学报*, 2000, 42(11): 1108-1114.
- [5] 唐璐璐, 韩冰. 开花式样对传粉者行为及花粉散布的影响[J]. *生物多样性*, 2007, 15(6): 680-686.
- [6] Makino T T, Ohashi K, Sakai S. How do floral display size and the density of surrounding flowers influence the likelihood of bumble bee revisitation to a plant? [J]. *Functional Ecology*, 2007, 21(1): 87-95.
- [7] Grindeland J M, Sletvold N, Ims R A. Effects of floral display size and plant density on pollinator visitation rate in a natural population of *Digitalis purpurea* [J]. *Functional Ecology*, 2005, 19(3): 383-390.
- [8] 周璟, 唐令, 张梦园, 等. 北京园林蜜粉源植物花部特征及其对传粉昆虫访花行为的影响[J]. *生态学报*, 2025, 45(18): 9037-9051.
- [9] 张立微, 张红玉. 传粉昆虫生态作用研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2015, 43(7): 9-13.
- [10] 项凤武, 郑金萍, 范春楠, 等. 吉林市磨盘山草本植物种类及其多样性[J]. *北华大学学报(自然科学版)*, 2006, 7(1): 75-78.
- [11] 董文滨, 马兰婷, 王颖, 等. 意大利蜜蜂春繁、产浆、越冬和发育阶段营养需要建议标准[J]. *动物营养学报*, 2014, 26(2): 342-347.
- [12] 王晓磊, 胡宝忠. 三色堇(*Viola tricolor* L.)生物学特性及栽培管理[J]. *东北农业大学学报*, 2008, 39(6): 132-135.
- [13] 丁玉洁. 三色堇的育苗与栽培养护技术[J]. *安徽农学通报*, 2010, 16(4): 115, 129.
- [14] 彭文君, 吴杰, 安建东, 等. 温室凯特杏园明亮熊蜂和意大利蜜蜂的传粉生物学比较[J]. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 2007, 36(3): 302-306.
- [15] 杨甫, 王凤鹤, 徐希莲. 明亮熊蜂·中华蜜蜂和意大利蜜蜂为温室草莓授粉的行为观察[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(20): 10711-10713.
- [16] 官昭瑛. 长白山地区访花昆虫访花机制研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2006.
- [17] Lusebrink I, Girling R D, Dobrindt L, et al. Investigating the effects of diesel exhaust and flower color on flower visitation by free-flying honey bees [J]. *Arthropod - Plant Interactions*, 2023, 17(1): 11-17.
- [18] Jones P, Agrawal A A. Caffeine and ethanol in nectar interact with flower color impacting bumblebee behavior[J]. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 2022, 76(7): 103.
- [19] Brunet J, Flick A J, Bauer A A. Phenotypic selection on flower color and floral display size by three bee species [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 11: 587528.
- [20] 陈士华, 王其林, 虞纪浩. 密山地区放蜂的气候资源——气温条件的分析[J]. *中国养蜂*, 2001, 52(1): 6-9.
- [21] 陶坤伶, 周建阳, 张小燕. 温度胁迫对蜜蜂生理行为影响研究进展[J]. *蜜蜂杂志*, 2022, 42(12): 6-12.
- [22] O' Neill K M, Delphia C M, Spendal R C. Effect of temperature on the post-diapause developmental rate, survival, and body mass of the solitary wasp *Isodontia elegans*: implications for rearing of trap nesting Hymenoptera [J]. *Journal of Thermal Biology*, 2023, 113: 103516.
- [23] 曾志将. 养蜂学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2009: 239-242.

(本篇专家编审:李兴鹏)

DOI:10.16115/j.cnki.issn.1005-7129.2026.02.008

文章编号:1005-7129(2026)02-0043-06 中图分类号:P901;X22 文献标识码:A

辽东绿色经济区生态环境-社会-经济耦合协调分析

夏书豪^{1,2}, 李 晔^{1,2}, 王泽豪^{1,2}, 姜鑫沂^{1,2}

(1. 沈阳大学环境学院, 辽宁 沈阳 110044; 2. 区域污染环境生态修复教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110044)

摘 要:本文以辽东绿色经济区为研究区域,构建了生态环境-社会-经济综合评价体系,采用耦合协调度模型分析了该区域 2003 年、2013 年及 2022 年多系统协调发展的时空格局与演变特征。结果表明,生态系统产品服务价值(EMPV)、生态系统调节服务价值(ERSV)、生态系统文化服务价值(ECSV)和生态系统生产总值(GEP)增长明显,综合生态环境质量总体良好,区域内空间分布呈现东高西低的特点,生态环境-社会-经济耦合协调关系逐步改善。本研究结果可为生态保护与社会发展、经济增长的融合提供参考依据。

关键词:辽东绿色经济区;综合生态环境质量指数;耦合协调度模型

Analysis of Coupling and Coordination of Ecological Environment, Society, and Economy in Liaodong Green Economic Zone

XIA Shuhao^{1,2}, LI Ye^{1,2}, WANG Zehao^{1,2}, JIANG Xinyi^{1,2}

(1. Environment College of Shenyang University, Shenyang 110044, China; 2. Key Laboratory of Eco-restoration of Regional Contaminated Environment of Ministry of Education, Shenyang 110044, China)

Abstract: The Liaodong Green Economic Zone was taken as the study area in this paper, the comprehensive evaluation system of ecological environment-society-economy was constructed. The coupling coordination degree analysis model was applied to analyze the spatiotemporal patterns and evolutionary features of multi-system coordinated development in 2003, 2013, 2022. The results indicated that ecosystem material product value (EMPV), ecosystem regulation service value (ERSV), ecosystem cultural service value (ECSV) and gross ecosystem product (GEP) increased significantly. The comprehensive ecological quality remained generally favorable. The spatial distribution pattern in the region was characterized by higher quality in the east and lower quality in the west. The coupling and coordination relationship of ecological environment-society-economy had gradually improved. The findings could provide the reference for integrating ecological conser-

收稿日期:2025-12-17

基金项目:辽宁省科学事业公益研究基金项目(2022JH4/10100053);辽宁省教育厅高校基本科研项目(LJ212512594004)

第一作者:夏书豪(2001—),男,在读硕士研究生,主要从事区域可持续发展研究,E-mail:3312437166@qq.com。

通信作者:李晔(1978—),女,教授,主要从事区域可持续发展研究,E-mail:sydxliye@syu.edu.cn。

vation with social development and economic growth.

Keywords: Liaodong Green Economic Zone; comprehensive ecological environment quality index; coupling coordination degree model

在我国高质量发展与“双碳”目标引领的背景下,推动绿色发展、促进人与自然和谐共生已成为区域发展的明确方向^[1]。辽东绿色经济区的建设,正是“绿水青山就是金山银山”理念的生动实践^[2],旨在统筹降碳、减污与扩绿,实现经济、社会与生态的协同共赢^[3]。这种协同,不是简单的叠加,而是系统间相互促进产生“1+1>2”整体效益的过程^[4],有助于提升区域发展的韧性与可持续性^[5]。

要从本质上理解这种协同,离不开对生态环境-社会-经济复合系统的深入剖析^[6]。近年来,耦合协调度模型已成为评估系统间相互作用的热门工具^[7],但多数研究仍停留在指标计算与静态评价层面,对背后复杂的互动机制与空间演化规律挖掘不足^[8]。在辽东绿色经济区,系统间是如何相互影响、如何随时间演变,这一问题尚待进一步解答。

本研究聚焦辽东绿色经济区,构建了一个社会、经济与生态因子的综合评价体系。通过耦合协调度模型,分析2003年、2013年及2022年多系统协调发展的时空格局与演变特征,以期揭示该区域绿色发展的内在逻辑与空间路径,为当地的生态安全与低碳转型提供参考,也为相似地区可持续发展带来一定启示。

1 研究区域概况与数据来源

1.1 研究区域概况

辽东绿色经济区包括丹东市的凤城市、宽甸县,鞍山市的岫岩满族自治县,抚顺市的抚顺县、新宾满族自治县、清原满族自治县,本溪市的本溪满族自治县、桓仁满族自治县、铁岭市的西丰县等辽宁东部9县(市)。其作为构建区

域发展格局的重要组成部分,既是探索产业融合发展的试验平台,更是辽宁省践行“两山”理念,深耕绿色产业发展的重要载体^[9,10]。

1.2 数据来源

基于数据的可靠性与完整性,本研究将研究时段确定为2003—2022年。各项指标数据主要来源于对应年份的各级统计年鉴。为获取充分数据支撑,通过检索政府官方网站、查阅相关部门统计公报与年度报告或直接向相关机构咨询等方式对统计年鉴中未收录的部分数据进行补充收集。2003—2022年植被净初级生产力(NPP)数据源自美国地质调查局提供的MOD17A3数据集(该数据空间分辨率为500 m),空间矢量数据影像数据下载自天地图国家地理信息公共服务平台(<https://www.tianditu.gov.cn/>),高程数据下载自地理空间数据云平台(<https://www.gscloud.cn/>),降水、温度和蒸散发等气候数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn/>)。

2 研究方法

2.1 生态环境-社会-经济综合评价体系构建

为科学评估辽东绿色经济区生态环境-经济-社会的耦合协调关系,本研究构建了包含生态、社会与经济三个系统的综合评价体系。其中,生态指标选取4项二级评价指标,社会指标选取7项二级评价指标,经济指标选取6项二级评价指标,各二级指标在一级指标中的权重通过熵权法计算得出(见表1)。熵权法是一种客观性强、可信度较高的权重确定方法,该方法首先对数据进行标准化、归一化处理,之后计算指标的熵值、信息冗余度,最后得出指标的权重。

表 1 生态环境-社会-经济综合评价体系

Tab. 1 Comprehensive evaluation system of ecological environment-society-economy

一级指标	二级指标	权重
生态指标	产品服务价值	0.249
	调节服务价值	0.367
	文化服务价值	0.205
	综合生态环境质量指数	0.179
社会指标	社会固定资产投资额	0.368
	一般公共预算收入	0.118
	农村居民人均可支配收入	0.175
	城市居民人均可支配收入	0.121
	人口密度	0.081
	人口自然增长率	0.069
	路网密度	0.068
经济指标	人均 GDP	0.154
	经济密度	0.172
	GDP 增长率	0.106
	第一产业产值	0.137
	第二产业产值	0.256
	第三产业产值	0.175

生态系统产品服务价值(EMPV)、生态系统调节服务价值(ERSV)和生态系统文化服务价值(ECSV)是生态系统生产总值(GEP)的三大核心部分,是对生态系统最终产出的物质产品与服务价值进行货币化综合核算的指标^[11]。产品服务价值的核算设置农产品、林产品、畜产品、水资源产品 4 项指标,调节服务价值的核算设置水源涵养、土壤保持、固碳释氧 3 项指标,文化服务价值仅选择旅游收入 1 项指标,各指标核算方法参考国家发展和改革委员会和国家统计局 2022 年联合印发的《生态产品总值核算规范(试行)》。

本文对蒋雨欣^[12]构建的模型进行改进计算综合生态环境质量指数,公式为:

$$Q = Q_{NF} \times Q_H$$

式中: Q 为综合生态环境质量指数; Q_{NF} 为归一化后的植被生态质量指数,根据钱拴等^[13]构建的植被生态质量指数模型计算; Q_H 为归一

化后的生境质量指数,采用 InVEST 模型中的生境质量模块计算(基于 InVEST 模型模拟研究区域生境质量)。

2.2 耦合协调关系分析

为深入剖析生态环境-社会-经济协调发展水平,本文通过构建耦合协调度模型对三个系统进行量化分析。

首先计算各系统的综合评价指数,公式为:

$$U = \sum (w_j \times X_{ij})$$

式中: w_j 为二级指标在一级指标中的权重; X_{ij} 为标准化处理后的数据。

之后建立系统间耦合函数,计算系统间的耦合度,公式为:

$$C = \left[\frac{U_1 \times U_2 \times U_3}{\left(\frac{U_1 + U_2 + U_3}{3} \right)^3} \right] \times \frac{1}{3}$$

式中: C 为三个系统间的耦合度, $0 \leq C \leq 1$;

U_1 为生态系统的综合评价指数; U_2 为社会系统的综合评价指数; U_3 为经济系统的综合评价指数。

为了更好地判断不同系统之间的协调发展程度,引入协调度 T ,计算公式为:

$$T = xU_1 + yU_2 + zU_3$$

式中: x, y, z 为特定系数, $x + y + z = 1$ 。本文认为在践行区域高质量发展的过程中,生态环境、社会、经济处于同等重要的地位,故而设定 x, y, z 权重相等,均取 1/3。

计算耦合协调度 D ,公式为:

$$D = \sqrt{C \times T}$$

D 的取值范围为 0~1, D 值大表明系统间相互协调程度紧密、耦合发展协调, D 值小表示系统间耦合协调程度差、耦合发展水平差。耦合协调等级的具体评价标准为: $D \geq 0.8$, 良好协调; $0.6 \leq D < 0.8$, 中度协调; $0.4 \leq D < 0.6$, 勉强协调; $0.2 \leq D < 0.4$, 中度失调; $D < 0.2$, 严重失调。

3 结果与分析

3.1 EMPV、ERSV、ECSV 和 GEP 演变特征

2003 年、2013 年及 2022 年研究区 EMPV、ERSV、ECSV 和 GEP 核算结果如表 2 所示。

表 2 EMPV、ERSV、ECSV 和 GEP 核算结果

Tab. 2 Accounting results of EMPV, ERSV, ECSV and GEP

地区	2003 年核算结果/亿元				2013 年核算结果/亿元				2022 年核算结果/亿元			
	EMPV	ERSV	ECSV	GEP	EMPV	ERSV	ECSV	GEP	EMPV	ERSV	ECSV	GEP
西丰县	26.18	10.09	21.00	57.27	52.14	25.70	41.00	118.84	46.88	31.44	51.00	129.32
清原县	15.93	20.12	23.00	59.05	66.44	55.53	50.00	171.97	39.83	64.04	59.00	162.87
抚顺县	16.29	11.61	3.00	30.90	44.68	28.80	41.00	114.48	30.31	36.11	53.00	119.42
新宾县	16.29	28.83	27.00	72.12	65.77	80.17	57.00	202.94	41.30	89.70	61.00	192.00
桓仁县	22.17	31.00	12.00	65.17	48.51	85.98	53.00	187.49	44.68	89.22	63.00	196.90
本溪县	19.35	24.16	11.00	54.51	40.31	61.60	48.00	149.91	40.68	70.08	67.00	177.76
宽甸县	11.12	53.72	11.00	75.84	45.40	23.86	71.00	140.26	50.20	157.10	37.00	244.30
凤城市	21.35	38.79	12.00	72.14	50.06	105.10	65.00	220.16	60.09	123.40	41.00	224.49
岫岩县	16.03	23.75	17.00	56.78	61.05	57.34	51.00	169.39	45.10	36.12	57.00	138.22

研究区 EMPV、ERSV、ECSV 和 GEP 增长显著,但具有明显的阶段性。2003 年分别为 164.71 亿元、242.07 亿元、137.00 亿元和 543.78 亿元; 2013 年分别为 474.36 亿元、524.08 亿元、477.00 亿元和 1475.4 亿元,较 2003 年分别增长 188.00%、116.50%、248.18% 和 171.33%, 大幅提升; 2022 年分别为 399.07 亿元、697.21 亿元、489.00 亿元和 1585.28 亿元,较 2013 年分别增长-15.87%、33.04%、2.52% 和 7.44%, 增速明显放缓,有的指标甚至出现了负增长。说明生态系统服务功能在快速增长后,已逐渐进入相对稳定的发

展阶段。各指标在各地区间存在明显的结构与空间差异性,不同类型生态系统服务的发展趋势也存在明显的差异,这为进一步制定差异化的生态保护与经济发展政策提供了重要的科学依据。

3.2 综合生态环境质量指数

2003 年、2013 年、2022 年研究区 Q_{II} 均值分别为 0.44、0.43、0.41, 研究区域的生境质量整体呈下降趋势。从空间上看,生境质量的分布集聚特征突出,且与地形起伏紧密相关,海拔较高的区域,生境状况普遍保持得较好。

2003 年、2013 年、2022 年研究区 Q 均值分

别为 0.48、0.52、0.52,处于稳定上升趋势,综合生态环境质量总体良好,空间上呈现东高西低的特点(见表 3)。本溪县和桓仁县总体平均

生态环境质量高于其他地区,岫岩县总体平均生态环境质量最低,区域内各县(市)综合生态环境质量指数总体呈现稳定上升趋势。

表 3 辽东绿色经济区各地区综合生态环境质量指数

Tab. 3 Comprehensive ecological environment quality index of different areas in Liaodong Green Economic Zone

年份	综合生态环境质量指数								
	西丰县	清原县	抚顺县	新宾县	桓仁县	本溪县	宽甸县	凤城市	岫岩县
2003 年	0.47	0.48	0.48	0.49	0.49	0.49	0.48	0.47	0.46
2013 年	0.51	0.51	0.52	0.52	0.53	0.53	0.52	0.51	0.51
2022 年	0.51	0.51	0.52	0.53	0.53	0.53	0.52	0.51	0.51

3.3 生态环境-社会-经济耦合协调关系分析

2003 年、2013 年、2022 年研究区环境-社会-经济耦合协调关系如表 4 所示。2003—2022 年,研究区各地区生态环境-社会-经济耦合协调关系总体明显改善。2003 年,绝大多数地区处于中度失调,仅桓仁县和凤城市达到勉强协调,显示系统间协同机制尚未形成。2013 年,桓仁县维持勉强协调,其余地区协调状态均提升,宽甸县达到勉强协调,西丰县、清原县、抚顺县、本溪县、凤城市和岫岩县达到中度协调,新宾县达到良好协调,表明生态保护与社会经济发展间的良性互动机制初步建立。2022 年,

协调格局进一步调整,清原县降至勉强协调,新宾县降至中度协调,桓仁县和宽甸县达到中度协调,其余地区维持中度协调。这说明协调状态并非单向提升,部分地区可能出现波动,呈现出一定的不稳定性与路径依赖。

整体来看,研究期间区域协调关系呈现“整体提升、局部波动”的演进特征。绝大多数地区从失调走向协调,反映了生态文明建设与可持续发展政策下系统协同效应的逐步显现。部分地区 2022 年较 2013 年协调度回落也提示,需长期关注系统间动态平衡,避免因单一系统滞后或过度开发而影响整体协调性。

表 4 生态环境-社会-经济耦合协调关系

Tab. 4 Coupling and coordination relationship of ecological environment-society-economy

地区	2003 年			2013 年			2022 年		
	C	D	耦合协调等级	C	D	耦合协调等级	C	D	耦合协调等级
西丰县	0.99	0.37	中度失调	0.98	0.61	中度协调	0.98	0.64	中度协调
清原县	0.99	0.36	中度失调	0.99	0.79	中度协调	0.81	0.58	勉强协调
抚顺县	0.92	0.25	中度失调	0.99	0.63	中度协调	0.99	0.61	中度协调
新宾县	0.95	0.39	中度失调	0.99	0.80	良好协调	0.96	0.73	中度协调
桓仁县	0.99	0.41	勉强协调	0.77	0.52	勉强协调	0.98	0.76	中度协调
本溪县	0.99	0.36	中度失调	0.99	0.73	中度协调	0.99	0.74	中度协调
宽甸县	0.99	0.39	中度失调	0.92	0.58	勉强协调	0.94	0.78	中度协调
凤城市	0.98	0.44	勉强协调	0.99	0.76	中度协调	0.98	0.74	中度协调
岫岩县	0.76	0.20	中度失调	0.97	0.74	中度协调	0.99	0.68	中度协调

4 讨论与结论

本文以辽东绿色经济区为研究区域,构建了生态环境-社会-经济综合评价体系,并运用耦合协调度模型,揭示了2003年、2013年、2022年区域多系统协调发展的时空格局与演变特征。研究表明,研究区生态系统产品服务价值(EMPV)、生态系统调节服务价值(ERSV)、生态系统文化服务价值(ECSV)和生态系统生产总值(GEP)增长明显,综合生态环境质量稳步改善、总体良好,区域内空间分布呈现东高西低的特点。耦合协调关系分析进一步显示,生态环境-社会-经济耦合协调关系逐步改善,大部分地区已从早期失调进入协调阶段,体现了“生态优先、绿色发展”政策的实效。

在理论上,本研究构建了适用于区域绿色发展的耦合分析框架,深化了对生态环境-社会-经济耦合协调关系的认识,也为生态、经济、社会协调发展提供了实证依据。在实践上,可为辽东绿色经济区优化生态补偿、推动产业绿色转型、实施差异化策略提供科学参考,也可为其他生态经济区在“双碳”目标下的发展路径提供方法与案例借鉴。

本研究也存在一定局限,耦合协调度模型虽能较好反映系统间整体互动与演进阶段,但对系统内部要素间复杂的非线性反馈、阈值效应及因果路径的解析仍显不足。未来可结合系统动力学、结构方程模型与机器学习等方法,进一步揭示系统内部作用机制,推动研究从宏观协调评价向微观机理解析深化。

参考文献

- [1]刘岳泽,刘培.黄河流域“富裕·生态·共享”三维耦合协调测度及时空演变[J].生态经济,2025,41(12):163-170.
- [2]周蕾,何秋,刘先国,等.生态环境治理投入的经济效应研究——基于重庆市社会核算矩阵乘数的

分析[J].安全与环境工程,2025,32(5):331-338.

- [3]Li Tiantian, Ye Azhong, Zhang Yuanye, et al. The spatial correlation network structure and its formation mechanism of urban high-quality economic development: a comparative analysis from the Yangtze River Economic Belt and the Yellow River Basin in China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2024, 31(16): 23728-23746.
- [4]孙梦丹.环境规制对区域经济高质量发展的影响策略研究[J].上海商业,2025(11):112-114.
- [5]Li Bingxin, Wang Hui. Comprehensive evaluation of urban high-quality development: a case study of Liaoning Province [J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2023, 25(2): 1809-1831.
- [6]赵晓燕,李永平,孙特生,等.沱江流域城镇化与生态环境质量近远程耦合协调度的时空演变格局[J].生态学报,2025,45(21):10564-10579.
- [7]胡西武,许静,张小义.青海省重点生态功能区生态-经济-民生复合系统空间冲突及影响因素研究[J].干旱区资源与环境,2025,39(11):67-78.
- [8]王淑佳,孔伟,任亮,等.国内耦合协调度模型的误区及修正[J].自然资源学报,2021,36(3):793-810.
- [9]王娇,王明友.辽东绿色经济区生态系统服务供需驱动因素研究[J].绿色科技,2025,27(17):252-257,274.
- [10]吕霞.辽东绿色经济区绿色产业发展研究[J].农业科技与装备,2024(4):94-96.
- [11]谢高地,鲁春霞,肖玉,等.青藏高原高寒草地生态系统服务价值评估[J].山地学报,2003,21(1):50-55.
- [12]蒋雨欣.“一带一路”内陆节点城市植被NPP时空演变及生态环境质量评价[D].南京:南京林业大学,2023.
- [13]钱拴,延昊,吴门新,等.植被综合生态质量时空变化动态监测评价模型[J].生态学报,2020,40(18):6573-6583.

(本篇专家编审:马琼芳)

《吉林林业科技》编辑委员会

主任委员 高海珠
副主任委员 李东友
执行委员 张建秋
委 员 (按姓氏笔画为序)

山昌林	王志明	王福维	邓 祥	尹子康
尹春梅	叶雅玲	史建伟	刘玉波	刘学芝
刘彦龙	刘晓龙	安丰云	孙广仁	孙长彬
孙文生	杜凤国	杨义波	杨世海	吴景才
宋丽文	张启昌	张忠辉	陆志民	陈万毅
陈建光	陈建军	单延龙	孟庆繁	赵 云
赵珊珊	姜贵全	郭忠玲	高金贵	高峻崇
陶 晶	黄祥童	曹长清	梁万君	董 然
程广有	焦为屹	温宇光	鞠志新	

《吉林林业科技》编辑部

主 编 张建秋
责任编辑 魏松艳
英文编译 陈 玲

吉林林业科技
双月刊, 1972年创刊
第55卷 第2期 (总第300期)

Journal of Jilin Forestry Science and Technology
Bimonthly, Started in 1972
Volume 55 Number 2 (No.300)

主管单位: 吉林省林业和草原局
主办单位: 吉林省林业科学研究院
(吉林省林业生物防治中心站)
编辑出版: 《吉林林业科技》编辑部
地 址: 吉林省长春市经开区临河街3528号
邮政编码: 130033
电 话: 0431-85850400
传 真: 0431-85850400
电子信箱: jlykj2004@sina.com
出版日期: 2026年3月15日
印 刷: 吉林省信诚印刷有限公司
发 行: 《吉林林业科技》编辑部

Administered by Forestry and Grassland Bureau of Jilin Province
Sponsored by Jilin Provincial Academy of Forestry Science (Forestry Biological Control Central Station of Jilin Province)
Published by Editorial Department of Journal of Jilin Forestry Science and Technology
Address No. 3528, Linhe Street, Jingkai District, Changchun 130033, Jilin, P. R. China
Telephone 0431-85850400 **Fax** 0431-85850400
E-mail jlykj2004@sina.com
Publication date Mar. 15th, 2026
Printed by Xincheng Printing Co., Ltd. of Jilin Province
Issued by Editorial Department of Journal of Jilin Forestry Science and Technology

公开发行

定价: 10.00元

ISSN 1005-7129

