北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

基于物种潜力评估的秋冬播野花混播群落构建

邵旭华 吴玮 倪康 刘姝怡 周家乐 胡文浩 徐文辉

Mixed-sowing community assembly of autumn-winter sown wildflowers based on species potential assessment

Shao Xuhua, Wu Wei, Ni Kang, Liu Shuyi, Zhou Jiale, Hu Wenhao, Xu Wenhui

引用本文:
邵旭华, 吴玮, 倪康, 刘姝怡, 周家乐, 胡文浩, 徐文辉. 基于物种潜力评估的秋冬播野花混播群落构建[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(11):137–146. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250023
Shao Xuhua, Wu Wei, Ni Kang, Liu Shuyi, Zhou Jiale, Hu Wenhao, Xu Wenhui. Mixed–sowing community assembly of autumn–winter sown wildflowers based on species potential assessment[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(11):137–146. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250023

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250023

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

基于邻体干扰模型的草花混播群落竞争模拟
Competition simulation of flower meadow community based on neighborhood interference model
北京林业大学学报, 2022, 44(3): 85–97. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200352

宁夏罗山5种典型林型多维度植物多样性及群落构建过程
Multidimensional plant diversity and community construction process of five typical forest types in Luo Mountain, Ningxia of northwestern China
北京林业大学学报, 2025, 47(9): 46–56. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250202

格氏栲林窗土壤微生物群落功能多样性季节动态特征
Seasonal dynamics of functional diversity of soil microbial communities in *Castanopsis kawakamii* forest gaps
北京林业大学学报, 2020, 42(7): 77–88. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200052

科尔沁沙地植物群落物种多样性及其主要影响因素
Species diversity of plant communities and its main influencing factors in Horqin Sandy Land, Inner Mongolia of northern China
北京林业大学学报, 2020, 42(5): 106–114. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190284

长白山阔叶红松林不同林层物种与结构多样性对群落生长的影响
Effects of species and structural diversity in different forest layers on community growth in broadleaved Korean pine forests in Changbai Mountain, northeastern China
北京林业大学学报, 2025, 47(8): 64–76. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240368

林分密度对云顶山柏木人工林群落结构和物种多样性的影响
Effects of stand density on community structure and species diversity of *Cupressus funebris* plantation in Yunding Mountain, southwestern China
北京林业大学学报, 2020, 42(1): 10–17. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190202

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250023

基于物种潜力评估的秋冬播野花混播群落构建

邵旭华 吴 玮 倪 康 刘姝怡 周家乐 胡文浩 徐文辉
（浙江农林大学风景园林与建筑学院，浙江 杭州 311300）

摘要:【目的】野花带作为缓解城乡生态景观退化的重要生态修复手段，在提升生物多样性与生态系统服务功能方面具有显著作用。然而，春播条件下建群的野花群落生物多样性往往低于预期。本研究旨在探讨秋冬播野花混播方式对群落构建的影响，分析不同物种的建群潜力及其相互作用，为城乡景观与农业生态系统的生态修复提供科学依据与实践参考。**【方法】**选取 25 种具有代表性的野花物种，设置单播与二元混合播种的控制实验，结合物种发芽率、早期生长表现及物种作用网络，系统分析播种方式与物种功能性状对秋冬播野花混播群落构建的影响。**【结果】**(1)与单播的条件相比，二元混播方式显著提高了多数物种的发芽率、植株高度与长势评分，增强了群落构建的潜力，且不同物种之间的生长表现存在显著差异。(2)物种作用网络分析表明，核心物种在秋冬播野花混播群落构建中对其他物种既有协同效应，也存在拮抗作用，其合理配置对群落优化效果至关重要。(3)不同物种组合展现出不同的协同效应和竞争关系，其中部分组合具有较强的促进多样性作用，另一些组合则表现出较高的潜在竞争优势。**【结论】**二元混播方式显著提升了秋冬播野花混播群落的构建效果，核心物种的合理搭配对生态效益具有关键意义。本研究为野花群落的科学构建提供了理论依据，并为城乡景观和农业生态系统的生态修复提供了实践指导。

关键词：秋冬播；野花多样性；种间互作；群落动态；生态修复；物种筛选
中图分类号：X176 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2025)11−0137−10
引文格式：邵旭华，吴玮，倪康，等. 基于物种潜力评估的秋冬播野花混播群落构建［J］. 北京林业大学学报，2025，47(11)：137−146. Shao Xuhua, Wu Wei, Ni Kang, et al. Mixed-sowing community assembly of autumn-winter sown wildflowers based on species potential assessment[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(11): 137−146.

Mixed-sowing community assembly of autumn-winter sown wildflowers based on species potential assessment

Shao Xuhua Wu Wei Ni Kang Liu Shuyi Zhou Jiale Hu Wenhao Xu Wenhui
(College of Landscape and Architecture, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

Abstract:［**Objective**］Wildflower strips, as an ecological restoration measure to address the degradation of urban-rural ecological landscapes, demonstrate benefits in enhancing biodiversity and ecosystem services. However, spring-sown wildflower communities often exhibit lower than expected biodiversity. This paper aims to investigate the effects of autumn-winter sown wildflower mixtures on community assembly, analyze the assembly potential of different species and their interactions, and provide a scientific basis and practical references for ecological restoration in urban-rural landscapes and agricultural ecosystems.［**Method**］This study selected 25 representative wildflower species and established a controlled experiment with monoculture and binary mixture sowing treatments. By incorporating metrics such as species germination rates, early growth performance, and species interaction network analysis, this study systematically analyzed the effects of sowing methods and species functional traits on the assembly of autumn-winter sown

收稿日期: 2025−01−20 **修回日期:** 2025−03−15
基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(32401371)。
第一作者: 邵旭华。主要研究方向：景观生态与生物多样性。 Email: 1285831383@qq.com 地址：311300 浙江省杭州市临安区武肃街 666 号浙江农林大学风景园林与建筑学院。
责任作者: 徐文辉，教授。主要研究方向：风景园林规划与设计。 Email: 19930008@zafu.edu.cn 地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

wildflower mixed-sowing communities. [**Result**] (1) Compared with monoculture conditions, the binary mixed-sowing approach significantly enhanced germination rates, plant height, and growth vigor scores for most species, thereby improving the potential for community assembly, with marked variations in growth performance observed among species. (2) Species interaction network analysis revealed that core species exhibited dual roles, both synergistic and antagonistic effects, on different species during the assembly of autumn-winter sown wildflower mixed-sowing communities, highlighting their pivotal role in optimizing community outcomes. [**Conclusion**] The binary mixed-sowing enhances community assembly, and the rational combination of core species is critical for ecological benefits. This study provides a scientific basis for wildflower community assembly and offers practical guidance for ecological restoration strategies in urban landscapes and agricultural ecosystems.

Key words: autumn-winter sown; wildflower diversity; interspecific interaction; community dynamics; ecological restoration; species selection

随着全球集约化和城镇化进程的加快，城乡生态景观，尤其是包含大量开花植物的生境，正面临显著减少和退化[1]。这种变化不仅对区域生物多样性造成冲击，还削弱了包括传粉在内的生态系统服务功能[2]。因此，如何通过科学合理的生态工程手段恢复此类生境，提升区域生物多样性与景观生态功能，已成为城乡景观建设中的重要议题[3]。近年来，通过在野外环境中混播多种野花种子，营造兼具高观赏性和生态价值的富花群落，即野花带，已在欧美国家得到验证，被认为是一种行之有效的技术途径[4−6]。富花群落不仅能够提供潜在栖息地[7]，增强区域生物多样性，还能改善景观的生态服务功能[8]，尤其在农业景观中的应用成果显著。例如，Aviron 等[9]发现树篱中的野花使传粉者访问频率提高 42%；Staton 等[10]在农林复合系统中发现野花带能够增加寄生蜂丰度，并有效降低蚜虫种群密度。已有研究表明，野花带通过提升农田植物多样性，可显著增加传粉者和天敌昆虫的生物多样性，正逐渐成为农业景观生态修复的重要策略之一[11−13]。

尽管物种多样性被普遍认为是野花带提升生态效益的核心要素，但在实际应用中，预期的群落生物多样性与构建后的实际多样性往往存在显著差异[3, 12]。现有研究通常选择十余种甚至二十余种野花种子进行混播[14]，期望通过物种间的功能互补性促进群落稳定性与生物多样性，然而结果表明，并非所有物种均能成功建群，部分物种甚至完全丧失竞争力。例如，Jachowicz 等[15]研究发现，播种 20 种野花后，实际建群物种仅占 30% ~ 50%，矢车菊（*Centaurea cyanus*）等稀有物种萌发率小于 15%；这种现象可能归因于物种间复杂的交互作用，包括竞争、独立和共生等关系[16]。此外，物种间复杂的化感作用[17]也可能进一步加剧种子库构建与群落构建之间的不确定性。

当前研究多数集中于野花带对传粉昆虫或与自然天敌多样性提升方面，对幼苗阶段的互作机制与物种建群潜力的系统研究仍相对不足[18]。所谓物种潜力，指在群落构建过程中，物种通过发芽能力、生长表现与他种互作等方面展现出的适应性和应用价值[19]。现有研究大多采用春播方式，但春播缺乏低温诱导过程，常导致种子萌发率低、生长不均衡。相比之下，秋冬播不仅可通过春化作用促进萌发与早期建群[20−21]，还能够减少杂草干扰，为越冬节肢动物提供栖息地，从而在提升群落多样性和生态功能方面具有独特优势[22−24]。然而，关于秋冬播条件下野花物种建群潜力及互作机制的系统研究仍相对缺乏。

基于此，本研究选取 25 种具有代表性的野花物种，设置单播与二元混合播种（以下简称“双播”）的控制实验，系统分析物种在秋冬播条件下的发芽率、生长表现及互作关系。通过建立物种互作网络[25]，揭示核心物种在群落构建中的正负效应，探索适用于不同场景的高生物多样性野花组合策略，为城乡景观与农业生态系统的生态修复提供科学依据与实践参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

本研究的实验场地位于中国浙江省杭州市临安区锦北街道浙江农林大学校内盆景园（30°15′22″N，119°43′39″E，海拔 43 m）。场地如图 1 所示。该地属典型亚热带季风气候区，四季分明，年均温适宜。试验期（2024 年 1 月 8 日—4 月 17 日）气温范围为−3 ~ 27 ℃，平均相对湿度 80%[26]。研究地面积约 400 m^2，地势平坦，冬季为空闲地，植被覆盖率低于 20%，光照充足，受干扰程度低，适合模拟农业景观缓冲带和生态廊道环境。该场地条件为野花种群建群和群落构建提供了良好的参照。



a 单播与双播　　b 单播

图 1　秋冬播野花混播建群实验场地

Fig. 1　Experimental sites for mixed-sowing community assembly of autumn-winter sown wildflowers

1.2　物种选择

优先选用前期在当地开展的野花缓冲带冬播实验中经过检验的物种[27]，同时参考在国内外野花缓冲带建设实践中应用广泛且生态效益明确的物种，本研究筛选了 25 种代表性野花物种（表 1）。筛选原则包括以下几点。（1）生态功能性：选择具有明确生态功能的物种，例如促进传粉昆虫活动[28−30]、为害虫天敌提供栖息地[31−33]、增加景观的观赏价值等。（2）应用频率：在国内外野花缓冲带建设中使用广泛、生态效益已被验证[3]。（3）种质资源可获取性：选择种质资源易于获取、种子质量和繁殖率较高的物种，确保实验可重复性。物种涵盖外来与本地物种，兼顾生态功能与环境适应性[34−36]。

1.3　实验设计

本实验采用穴盘法。穴盘法[37−38]是一种能够精确控制实验条件、有效隔离干扰的种植方法，适用于种子发芽率与初期竞争过程的高精度定量化测定。本实验使用 50 格标准穴盘，分别设置单播与双播两组处理。单播实验旨在测定各物种的基础发芽率与生长数据，每种种子单独播种于 10 × 2 格的区域，每穴播 4 粒种子，每种重复 20 格。双播实验则将 25 个物种两两配对，研究种间互作效应，每个组合同样占用 10 × 2 格区域，每穴播 8 粒种子（两种种子各 4 粒），每个组合重复 20 格。穴盘内使用营养土作为基质，基质为腐叶土、有机蚯蚓粪、草木灰、蛭石、珍珠岩混合物，pH 为 6.8 ~ 7.2，有机质含量 35% ~ 45%，氮磷钾质量比为 1.2∶0.8∶2.0。这是市场主流的营养土配比，能够有效控制土质对物种的影响，且在前期实验已验证其有效性。播种后覆薄土、平整表面并适度灌溉，所有处理均保持一致的基质与环境条件。

穴盘放置后，在实验场地周边设置格挡与标识。种植期间保持基质适度湿润，每周浇水 2 次，采用轻柔水流或喷雾方式。每周进行一次生长监测，记录萌发情况、环境干扰、场地破坏及水分状况。

实验播种时间为 2024 年 1 月 8—29 日，监测时间为 2024 年 2 月 1 日—4 月 17 日。

1.4　发芽率与长势统计

当幼苗进入生长稳定阶段，针对种子发芽及早期生长情况，重点采集发芽率和植株高度数据，以便对单播和双播条件下的野花生长表现进行系统评估。

（1）发芽率。发芽率是评估种子发芽表现的核心指标，计算公式如下所示。

$$P = \frac{N}{a} \times 100\%$$

式中：N 为穴盘内发芽植株数量，a 为穴盘内播撒种子数量。

采用人工计数法逐穴记录发芽植株数量，每个穴的发芽情况单独统计，避免整体记录导致的误差。

（2）发芽植株高度。植株高度的数据将用于评估生长速率和生长均衡性，并为物种间竞争效应的分析提供依据。发芽后记录植株的生长高度（mm）。为提高数据的代表性，每个穴中随机选择至少 3 株发芽植株，测量其高度并记录。

（3）长势评分。植物长势评分能够快速量化植株的生长表现，是评价物种与物种组合竞争效果及生长潜力的重要手段。植株的总体长势采用评分方法进行评价，评分标准详见表 2。实验中每个穴的发芽植株均采用以下标准进行综合打分，以反映植株的发芽状态和生长质量。

1.5　数据分析

研究统计了不同播种方式下每个物种的发芽率、幼苗平均高度和长势评分，作为衡量播种方式建群潜力的指标，并使用混合效应模型分析不同播种方式下秋冬播野花植株生长状态的差异。广义线性混

表 1 野花植物材料名录

Tab. 1 List of wildflower plant materials

物种	科	属
春黄菊 *Anthemis tinctoria*	菊科 Asteraceae	春黄菊属 *Anthemis*
蓝蓟 *Echium vulgare*	紫草科 Boraginaceae	蓝蓟属 *Echium*
滨菊 *Leucanthemum vulgare*	菊科 Asteraceae	滨菊属 *Leucanthemum*
黄木樨草 *Reseda lutea*	木樨草科 Resedaceae	木樨草属 *Reseda*
金盏花 *Calendula officinalis*	菊科 Asteraceae	金盏花属 *Calendula*
玻璃苣 *Borago officinalis*	紫草科 Boraginaceae	玻璃苣属 *Borago*
茴香 *Foeniculum vulgare*	伞形科 Apiaceae	茴香属 *Foeniculum*
百脉根 *Lotus corniculatus*	豆科 Fabaceae	百脉根属 *Lotus*
红车轴草 *Trifolium pratense*	豆科 Fabaceae	车轴草属 *Trifolium*
花菱草 *Eschscholzia californica*	罂粟科 Papaveraceae	花菱草属 *Eschscholzia*
白车轴草 *Trifolium repens*	豆科 Fabaceae	车轴草属 *Trifolium*
柳穿鱼 *Linaria maroccana*	车前科 Plantaginaceae	柳穿鱼属 *Linaria*
蓍 *Achillea millefolium*	菊科 Asteraceae	蓍属 *Achillea*
矢车菊 *Centaurea cyanus*	菊科 Asteraceae	疆矢车菊属 *Centaurea*
荞麦 *Fagopyrum esculentum*	蓼科 Polygonaceae	荞麦属 *Fagopyrum*
虞美人 *Papaver rhoeas*	罂粟科 Papaveraceae	罂粟属 *Papaver*
苜蓿 *Medicago sativa*	豆科 Fabaceae	苜蓿属 *Medicago*
亚麻 *Linum usitatissimum*	亚麻科 Linaceae	亚麻属 *Linum*
夏枯草 *Prunella vulgaris*	唇形科 Lamiaceae	夏枯草属 *Prunella*
蒲公英 *Taraxacum mongolicum*	菊科 Asteraceae	蒲公英属 *Taraxacum*
蛇床 *Cnidium monnieri*	伞形科 Apiaceae	蛇床属 *Cnidium*
鼠尾草 *Salvia japonica*	唇形科 Lamiaceae	鼠尾草属 *Salvia*
小冠花 *Securigera varia*	豆科 Fabaceae	斧荚豆属 *Securigera*
益母草 *Leonurus japonicus*	唇形科 Lamiaceae	益母草属 *Leonurus*
油菜 *Brassica rapa*	十字花科 Brassicaceae	芸薹属 *Brassica*

表 2 野花长势评分指标

Tab. 2 Wildflower growth rating indexes

长势评分	描述
0	完全未发芽，植株未显示任何发芽迹象[39]
1	发芽差，几乎没有植株发芽，表现出明显的发育问题[39]
2	发芽较慢，仅有少数植株发芽，发芽速度较为缓慢，长势差，叶片呈现枯黄或萎蔫迹象[40]
3	适中，部分植株已发芽，但发芽较为不同步[41]，长势较为瘦弱，叶片稀疏[39]
4	良好，大多数植株已经发芽，发芽速度较为一致，长势健康，叶片茂盛[39]
5	优秀，所有植株均匀发芽，发芽速度快，长势旺盛[42]，叶片丰满、翠绿[40]

合模型（GLMM）适用于非正态分布离散型变量，如二分类数据；线性混合模型（LMM）[43]适用于连续型变量，如植物高度和生物量，且数据近似服从正态分布。由于发芽率服从二项分布，因此采用 GLMM 模型进行分析，使用 logit 链接函数，固定效应为播种方式（单播和双播），随机效应为植物种类，*x* 轴为播种方式，*y* 轴为发芽率。对于二分类结果的 GLMM 模型，我们通过计算优势比（odds ratio，OR）来量化播种方式对发芽率的影响程度，OR 是用于量化两个二分类变量之间关联强度的统计指标，可表示双播与单播条件下发芽发生比的比值。由于幼苗平均高度和长势评分为连续型变量且服从正态分布，因此采用 LMM 模型，固定效应为播种方式，随机效应为植物种类，*x* 轴为播种方式，*y* 轴为植株高度和长势

评分，以控制不同植物种类对高度和评分的潜在影响。通过模型的卡方检验分析固定效应（播种方式）对这些指标的显著性影响。为探讨不同物种之间的协同和拮抗关系，采用共现网络分析（co-occurrence network analysis）进行可视化，并通过计算网络参数，包括节点数（nodes）、边数（edges）、平均度（mean degree）、网络密度（density）4 个指标，进一步明确物种间潜在的交互过程[44]。所有统计分析均在 R 4.2.1 中完成，图形绘制使用 igraph 包[45]、ggraph 包[46]和 ggplot2 包[47]。

2　结果与分析

2.1　野花总体生长参数分布情况

不同植物物种在单播与双播条件下的发芽率、幼苗高度和长势评分表现出显著差异，呈现物种特异性适应模式（图 2）。

在单播条件下，部分物种表现出较高的发芽潜力与生长潜力。例如，金盏花（*Calendula officinalis*）和黄木樨草（*Reseda lutea*）的发芽率、幼苗平均高度和长势评分较高，尤其是黄木樨草的幼苗平均高度显著高于其他物种，且长势评分达到 3 以上（图 2a、d、g）。这表明这些物种具有较强的独立生长能力。相比之下，鼠尾草（*Salvia japonica*）、蒲公英（*Taraxacum mongolicum*）和柳穿鱼（*Linaria maroccana*）等物种在单播条件下几乎不萌发或生长缓慢（图 2a、d、g），显示出独立建群能力有限。

在双播条件下，多数物种的发芽率与生长状态均显著改善。例如，白车轴草（*Trifolium repens*）和百脉根（*Lotus corniculatus*）的发芽率分别比单播提升 27 个百分点与 18 个百分点（图 2a～c）；蓝蓟（*Echium vulgare*）和茴香（*Foeniculum vulgare*）等物种也展现出较强的共存优势（图 2a～c）。在生长状态方面，矢车菊（*Centaurea cyanus*）、油菜（*Brassica rapa*）和花菱草（*Eschscholzia californica*）等物种的幼苗高度和长势评分均显著提升；亚麻（*Linum usitatissimum*）和花菱草等物种在双播条件下长势评分和幼苗平均高度均表现良好（图 2d～i）。这表明双播环境有效促进了部分物种的发芽和生长。然而，部分物种在两种处理下均表现出低发芽率与弱生长，如鼠尾草、夏枯草（*Prunella vulgaris*）、蛇床（*Cnidium monnieri*）及蒲公英。

总体而言，双播对多数物种的发芽率和幼苗生长指标提升效果显著，说明其在群落构建中具有更高潜力。但物种间的生长表现仍存在差异，部分物种如鼠尾草、夏枯草、蛇床子和蒲公英（图 2）在单双播条件下均表现不佳。

2.2　不同播种方式下野花生长状态差异

混合效应模型分析表明（表 3），双播条件对发芽率、长势评分和幼苗高度的影响均显著优于单播。具体而言，双播显著提高了发芽率（χ^2= 41.724，p < 0.001），通过对估计值取对数，得到发芽发生比为单播处理的 3.53 倍（OR = 3.53），即发芽发生比提高了约 253%。说明双播环境通过物种间的互作效应有效提升了种子的发芽表现；幼苗高度在双播条件下显著增加（χ^2 = 16.298，p < 0.001），平均高出 10.193 mm，显示植株生长更加旺盛；长势评分亦显著提升（χ^2 = 36.449，p < 0.001），平均高出 0.693 分，表明双播为植株提供了更有利的生长条件，可能平衡了竞争与共生关系，从而提升了植株的整体生长质量。总体来看，双播显著改善了种子萌发和早期生长质量。不同播种方式下野花生长状态差异如图 3 所示。

2.3　野花双播中的物种互作关系

在双播条件下，不同物种之间的发芽表现差异显著，既存在协同效应，也存在拮抗效应（图 4）。

对物种作用网络的分析（图 4）发现，不同物种之间的正负互作关系显著影响了群落的构建效果，这为野花混播的物种筛选与搭配策略提供了重要指导。研究发现，百脉根、茴香、蓍等核心物种在网络中占据重要地位，连接关系较多，既能与部分物种（如小冠花、油菜）形成正向协同效应，显著促进发芽率和早期生长，又与某些物种（如百脉根）存在强烈的负向拮抗效应，可能抑制彼此的生长。这种双面性表明核心物种在群落构建中具有不可忽视的影响，需要根据具体目标合理搭配。

对物种互作情况的进一步分析表明，不同物种在双播条件下表现出显著的相生性和相克性差异，这种差异反映了物种间的协同效应和竞争关系。在相生性方面，小冠花、茴香和花菱草表现出较高的相生特性，且具有较多的协同组合，如茴香 + 柳穿鱼、茴香 + 小冠花等组合，表现出物种间的互促作用（图 4）；而亚麻、百脉根等物种的相生性表现居中，能够与部分特定物种产生协同效应，如亚麻 + 蓍（图 4）。相对而言，蓝蓟、红车轴草和金花的相生性较弱，与其他物种的协同作用有限。在相克性方面，百脉根、玻璃苣等物种的相克性最高，显示出较强的拮抗效应，可能在双播条件下抑制其他物种的发芽和生长，如百脉根 + 蓍草、玻璃苣 + 益母草等组合（图 4）。此外，油菜和益母草的相克性相对较弱，但仍显示出一定的抑制作用。

从群落搭配策略来看，应优先选择具有正向协同效应的物种组合，例如蓍与亚麻或茴香与小冠花，

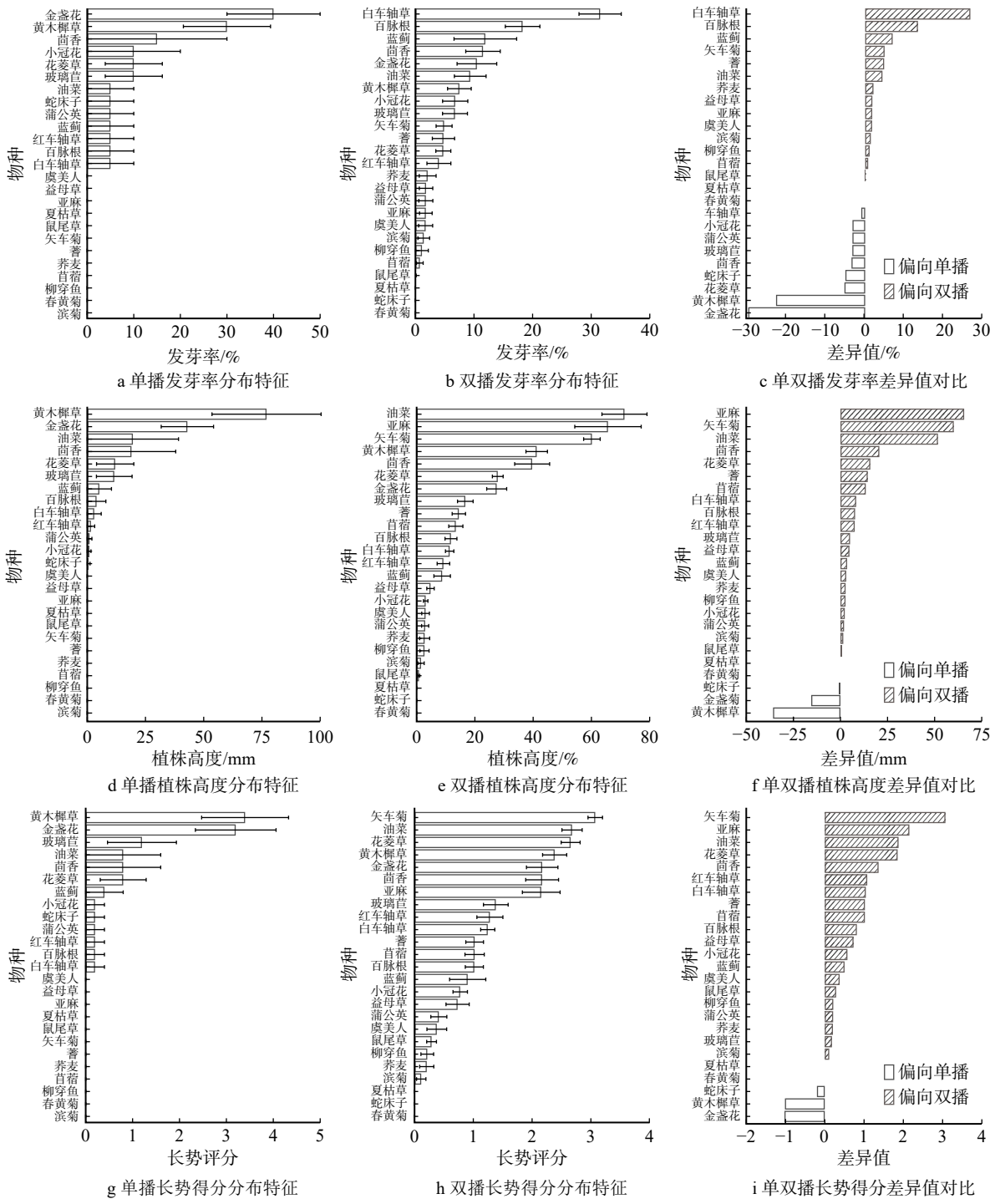


图 2 秋冬播野花混播建群物种生长参数分布特征

Fig. 2 Distributing characteristics of growth parameters of mixed-sowing community assembly for autumn-winter sown wildflowers

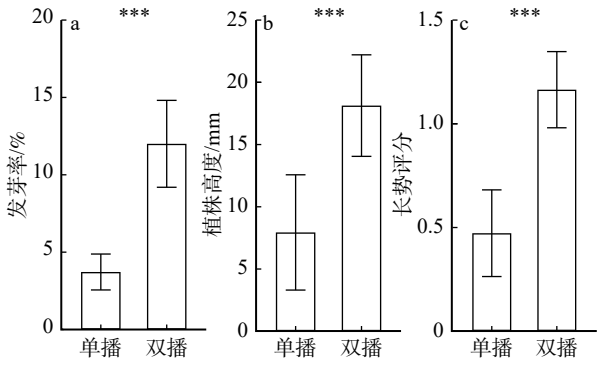
通过利用物种间的功能互补性，提升群落的整体稳定性和构建效率。同时，对于具有显著负向拮抗作用的物种组合（如蓍与百脉根或益母草与玻璃苣），应尽量避免，以减少竞争对群落功能的负面影响。此外，核心物种在网络中表现出的复杂互作关系需要在搭配中灵活应用，优先结合协同性较强的物种，同时尽量降低潜在的负向效应。这种基于物种作用网络的搭配策略，为构建稳定、高效的野花群落提供了科学依据。具体搭配方案如表 4 所示。

柳穿鱼、小冠花、百脉根与虞美人的组合以及益母草、亚麻和蓍的组合在物种作用网络中展现出较长的正向协同效益连线，表明这两组物种组合在促进野花物种多样性方面具有较大的潜力。而另一方面，茴香、小冠花、花菱草的组合与油菜、亚麻的组合在网络中的相关度高，拮抗性连线少，显示了强大的竞争优势，表明它们在抑制杂草生长方面具有潜在的能力，因此可组成潜在竞争优势组合。通过这种物种搭配的优化设计，能够实现野花生态系统的

表 3　不同播种方式对秋冬播植物生长指标的混合效应模型

Tab. 3　Mixed effect model of different sowing methods on growth indicators of autumn-winter sown plants

指标	χ^2	p值	对比	估计值	标准误	t/z 值	p值
发芽率	41.724	< 0.001	双播 vs. 单播	1.262	0.195	6.459	< 0.001
植株高度	16.298	< 0.001	双播 vs. 单播	10.193	2.525	4.037	< 0.001
长势评分	36.449	< 0.001	双播 vs. 单播	0.693	0.115	6.037	< 0.001



***表示在 $p < 0.001$ 水平上差异显著。

图 3　不同播种方式下秋冬播野花植株生长状态差异

Fig. 3　Differences in growth status of wildflower plants sown in autumn-winter under different sowing methods

多样化目标，为农业生态修复及野花栽培提供了可行的物种选择依据。

3　讨　　论

本研究在穴盘环境中实施分组混播实验，有效减少了土壤微生物干扰与水分空间异质性等复杂变量，同时保持了接近自然的条件。这一折中设计为解析可控条件下物种互作机制提供了可行途径，其结论可为真实生态系统的群落构建提供借鉴[48]。本研究从群落构建机制的角度，探讨了秋冬播野花混播条件下物种的建群潜力，为理解物种间互作关系及其生态效应提供了实证依据。结果表明，播种方式和物种间的正负互作是群落构建成效的关键因素。

3.1　双播模式的优势与限制

双播在提升群落构建效率方面的优势得到了验证。与单播相比，双播显著改善了幼苗生长表现。例如，茴香、小冠花和油菜等物种在双播条件下，植株高度和长势评分显著高于单播。这一结果与 Tilman 等[49]关于物种多样性促进生态系统功能的理论一致，可能是因为不同物种在资源利用上的差异实现生态位互补，从而改善了种子萌发与早期生长。具体来说，双播组合中不同物种在光照、水分、养分等资源利用的分化减少了对有限资源的直接竞争。然而，

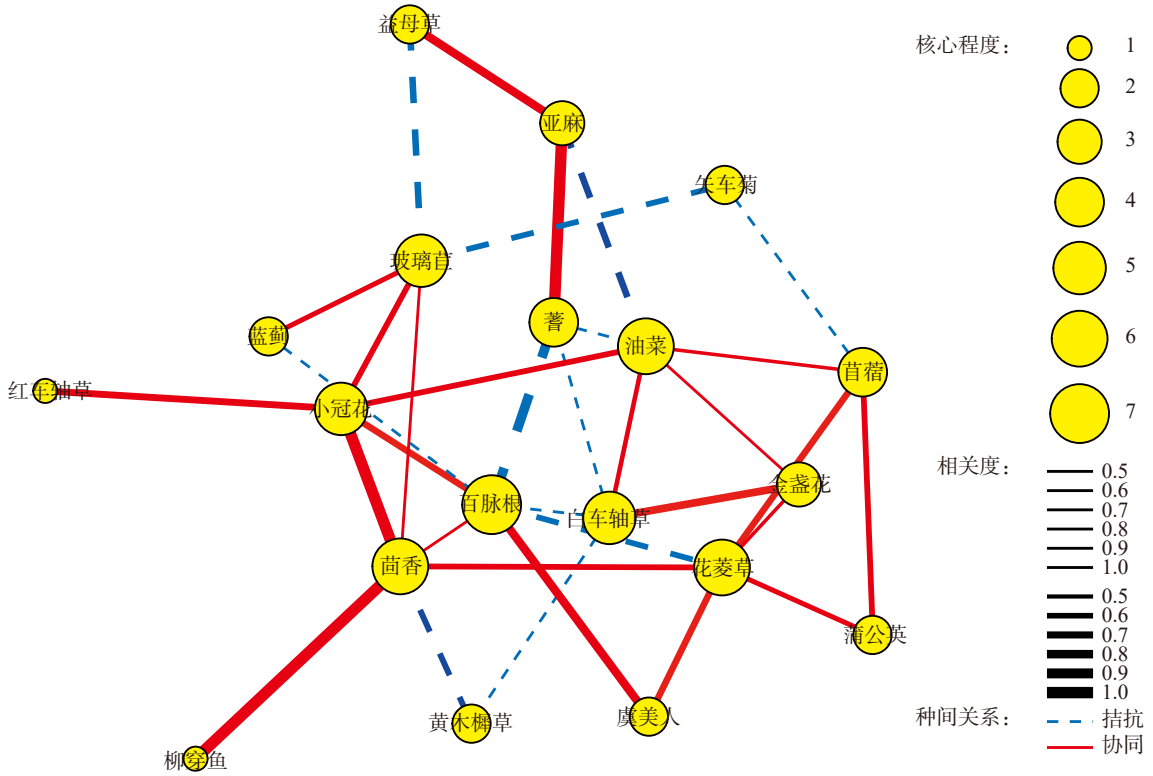


图 4　野花双播物种互作关系共现网络分析

Fig. 4　Co-occurrence network analysis of species interactions in binary mixture sowing wildflowers

表 4 具有潜力的野花物种组合方案

Tab. 4 Potential wildflower species combination schemes

类别属性	物种组合特征
相互促进多样性组合	柳穿鱼 + 小冠花 + 百脉根 + 虞美人; 益母草 + 亚麻 + 蓍 *Linaria maroccana* + *Achillea millefolium* + *Securigera varia* + *Lotus corniculatus* + *Papaver rhoeas*; *Leonurus japonicus* + *Linum usitatissimum* + *Achillea millefolium*
潜在竞争优势组合	茴香 + 小冠花 + 花菱草; 油菜 + 亚麻 *Foeniculum vulgare* + *Securigera varia* + *Eschscholzia californica*; *Brassica rapa* + *Linum usitatissimum*

部分物种如蒲公英和鼠尾草即使在双播条件下表现依然较差，这可能源于它们对竞争环境的敏感性，说明物种自身的生态策略及其对种间竞争的响应强度在一定程度上限制了群落构建的成功率[50]。

3.2 种间互作的双面效应

物种间的正负互作关系在群落构建中发挥了重要作用。一方面，本研究发现部分物种（如小冠花、茴香和花菱草）能够产生更多具有协同效应的组合。这些物种的相生性表现突出，增强了群落稳定性，提升群落构建效率，这与 Chesson[51]的平衡共存理论中的稳定化机制相一致。这不仅源于资源分配优化和生态位分化减少竞争[52−53]，还可能涉及更积极的互惠过程，如根系分泌物改善了土壤微环境或促进了特定养分的有效性，从而间接惠及搭配物种[48]，强化了协同效应。另一方面，某些物种（如百脉根、玻璃苣）与其他物种组合时表现出明显的拮抗效应，可能并不只由于资源竞争，也由于发生化感作用，通过释放特定的次生代谢物质抑制了其他种子萌发或幼苗根系发育，从而削弱了群落稳定性。

3.3 研究局限与未来展望

需要指出的是，本研究存在一定局限性。其一，双播设计通过维持单物种密度恒定（各物种 4 粒/穴）并加倍总密度，旨在优先确保种间互作的可观测性。然而，总密度的差异可能会对长势测定结果的差异性产生一定影响，因此对发芽及生长差异的解释需谨慎；其二，受限于标准化环境条件，穴盘条件无法完全满足不同物种的最适生长需求；其三，由于真实生态系统中无法实现分组隔离，穴盘环境的高可控性虽有利于机制解析，但可能高估物种在自然竞争中的适应性[54]，并受到气候波动、动物取食等附加因素的影响，其长期稳定性需在多场景的真实自然波动环境中进一步验证。为提升构建效率和群落稳定性，未来研究应结合多维度的环境变量和长期监测数据，探索功能性状差异，尤其是季节动态对群落功能和生物多样性效益的影响，以制定更加科学的群落构建与管理方案。

4 结 论

本研究通过秋冬播野花混播实验，系统分析了物种间的互作关系及其对群落构建的影响，揭示了播种方式对野花群落构建过程中建群物种生长状态的影响及不同物种的潜力。结果表明，双播对种子发芽率与生长状态提升显著。同时，秋冬季特有的资源稳定性和低竞争环境有效促进了物种间的协同效应，减少了竞争性互作对群落稳定性的负面影响。物种作用网络分析进一步表明，核心物种在群落构建中具有重要的双重作用。合理利用其正向协同效应并规避潜在的负向拮抗效应，是优化群落构建的重要策略。本研究为提升野花群落构建效率提供了科学依据，强调了秋冬播技术在促进生态系统多样性方面的潜力。未来的群落构建实践应考虑季节性环境特征与物种间互作模式，通过科学的物种筛选与搭配，制定更具适应性的生态修复策略，为城乡景观与农业生态系统的可持续发展提供支持。

参 考 文 献

[1] Kremen C. Ecological intensification and diversification approaches to maintain biodiversity, ecosystem services and food production in a changing world[J]. Emerging Topics in Life Sciences, 2020, 4(2): 229−240.

[2] Destek M A, Hossain M R, Khan Z. Premature deindustrialization and environmental degradation[J]. Gondwana Research, 2024, 127: 199−210.

[3] Rydgren K, Hagen D, Rosef L, et al. Designing seed mixtures for restoration on alpine soils: who should your neighbours be?[J]. Applied Vegetation Science, 2017, 20(3): 317−326.

[4] Serée L, Legras S, Chiron F, et al. People prefer arable fields and flower strips with continuous soil cover and diversified vegetation[J]. Ecology and Society, 2023, 28(2): 9.

[5] Schmidt A, Kirmer A, Hellwig N, et al. Evaluating CAP wildflower strips: high-quality seed mixtures significantly improve plant diversity and related pollen and nectar resources[J]. Journal of Applied Ecology, 2022, 59(3): 860−871.

[6] Uyttenbroeck R, Piqueray J, Hatt S, et al. Increasing plant functional diversity is not the key for supporting pollinators in wildflower strips[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2017, 249: 144−155.

[7] Hellwig N, Schubert L F, Kirmer A, et al. Effects of wildflower strips, landscape structure and agricultural practices on wild bee assemblages: a matter of data resolution and spatial scale?[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2022, 326: 107764.

[8] Gómez-Martínez C, González-Estévez M A, Cursach J, et al. Pollinator richness, pollination networks, and diet adjustment

along local and landscape gradients of resource diversity[J]. Ecological Applications, 2022, 32(6): 1−18.

[9] Aviron S, Berry T, Leroy D, et al. Wild plants in hedgerows and weeds in crop fields are important floral resources for wild flower-visiting insects, independently of the presence of intercrops[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2023, 348: 108410.

[10] Staton T, Walters R, Smith J, et al. Management to promote flowering understorys benefits natural enemy diversity, aphid suppression and income in an agroforestry system[J]. Agronomy-Basel, 2021, 11(4): 651.

[11] 胡文浩, 那书豪, 李学东, 等. 乡土野花组合在农业景观中的应用 [J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2019, 27(12): 1846−1856.
Hu W H, Na S H, Li X D, et al. Application of native wildflower mixtures in agricultural landscapes[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture (Chinese and English), 2019, 27(12): 1846−1856.

[12] Ganser D, Albrecht M, Knop E. Wildflower strips enhance wild bee reproductive success[J]. Journal of Applied Ecology, 2021, 58(3): 486−495.

[13] Bihaly Á D, Piross I S, Pellaton R, et al. Landscape-wide floral resource deficit enhances the importance of diverse wildflower plantings for pollinators in farmlands[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2024, 367: 108984.

[14] Arathi H S, Vandever M W, Cade B S. Diversity and abundance of wild bees in an agriculturally dominated landscape of eastern Colorado[J]. Journal of Insect Conservation, 2019, 23(1): 187−197.

[15] Jachowicz N, Sigsgaard L. Highly diverse flower strips promote natural enemies more in annual field crops: a review and meta-analysis[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2025, 381: 109412.

[16] Eckstein R L. Differential effects of interspecific interactions and water availability on survival, growth and fecundity of three congeneric grassland herbs[J]. New Phytologist, 2005, 166(2): 525–535.

[17] Kailasam S, Peiter E. A path toward concurrent biofortification and cadmium mitigation in plant-based foods[J]. New Phytologist, 2021, 232: 17−24.

[18] Weidenhamer J D, Cipollini D, Morris K, et al. Ecological realism and rigor in the study of plant-plant allelopathic interactions[J]. Plant and Soil, 2023, 489(1−2): 1−39.

[19] Benning J W, Moeller D A. Plant-soil interactions limit lifetime fitness outside a native plant's geographic range margin[J]. Ecology, 2021, 102(3): e03254.

[20] 胡巍, 侯喜林, 史公军. 植物春化特性及春化作用机理 [J]. 植物学通报, 2004, 21(1): 26−36.
Hu W, Hou X L, Shi G J. Characteristics and mechanism of plant vernalization[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2004, 21(1): 26−36.

[21] Gremer J R, Wilcox C J, Chiono A, et al. Germination timing and chilling exposure create contingency in life history and influence fitness in the native wildflower *Streptanthus tortuosus*[J]. Journal of Ecology, 2020, 108(1): 239−255.

[22] Raimondi G, Loddo D, Giannini V, et al. Unveiling the impact of winter cover crops and weedy fallow on the soil seedbank[J]. European Journal of Agronomy, 2024, 160: 127309.

[23] Boetzl F A, Krimmer E, Holzschuh A, et al. Arthropod overwintering in agri-environmental scheme flowering fields differs among pollinators and natural enemies[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2022, 330: 107890.

[24] Cardinale B J, Gross K, Fritschie K, et al. Biodiversity simultaneously enhances the production and stability of community biomass, but the effects are independent[J]. Ecology, 2013, 94(8): 1697−1707.

[25] Page M L, Williams N M. Evidence of exploitative competition between honey bees and native bees in two California landscapes[J]. Journal of Animal Ecology, 2023, 92(9): 1802−1814.

[26] 杭州市临安区气象局. 2024 年 1 月 8 日−4 月 17 日杭州市临安区气象监测数据 (城区)[Z]. 2024.
Hangzhou Lin'an District Meteorological Bureau. Meteorological monitoring data of Lin'an District, Hangzhou (urban area) from January 8 to April 17, 2024[Z]. 2024.

[27] 吴玮, 邵旭华, 胡文浩, 等. 野花景观公众认知评价及其影响因素 [J]. 中国城市林业, 2024, 22(6): 148−154.
Wu W, Shao X H, Hu W H, et al. Public perception evaluation of wildflower landscape and its influencing factors[J]. Journal of Chinese Urban Forestry, 2024, 22(6): 148−154.

[28] Wratten S D, Gillespie M, Decourtye A, et al. Pollinator habitat enhancement: benefits to other ecosystem services[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2012, 159: 112−122.

[29] Blüthgen N, Klein A. Functional complementarity and specialisation: the role of biodiversity in plant-pollinator interactions[J]. Basic and Applied Ecology, 2011, 12(4): 282−291.

[30] Medel R, González-Browne C, Salazar D, et al. The most effective pollinator principle applies to new invasive pollinators[J]. Biology Letters, 2018, 14(6): 20180132.

[31] Snyder W E. Give predators a complement: conserving natural enemy biodiversity to improve biocontrol[J]. Biological Control, 2019, 135: 73−82.

[32] Middleton E G, Macrae I V. Wildflower plantings in commercial agroecosystems promote generalist predators of Colorado potato beetle[J]. Biological Control, 2021, 152: 104463.

[33] Hatt S, Uyttenbroeck R, Lopes T, et al. Do flower mixtures with high functional diversity enhance aphid predators in wildflower strips?[J]. European Journal of Entomology, 2017, 114: 66−76.

[34] Kolkman A, Dopagne C, Piqueray J. Sown wildflower strips offer promising long term results for butterfly conservation[J]. Journal of Insect Conservation, 2022, 26(3): 387−400.

[35] 凌霄君, 胡雅琪. "野花组合"在杭州市园林绿化景观提升中的应用研究 [J]. 中国园林, 2024, 40(增刊 2): 137−140.
Ling X J, Hu Y Q. Research on the application of "Wildflower Combination" in landscape improvement in Hangzhou City[J]. Chinese Landscape Architecture, 2024, 40(Suppl. 2): 137−140.

[36] 刘莹, 岳桦, 夏斌. 三种植物应用于野花组合中的竞争与共存 [J]. 北方园艺, 2019(2): 94−102.
Liu Y, Yue H, Xia B. Competition and coexistence of three plant species in wildflower mixtures[J]. Northern Horticulture, 2019(2): 94−102.

[37] Yan Z Y, Zhao Y M, Luo W S, et al. Machine vision-based tomato plug tray missed seeding detection and empty cell

replanting[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 208: 107800.

[38] Ersson B T, Bergsten U, Lindroos O. Reloading mechanized tree planting devices faster using a seedling tray carousel[J]. Silva Fennica, 2014, 48(2): 1064.

[39] Wijewardana C, Hock M, Henry B, et al. Screening corn hybrids for cold tolerance using morphological traits for early-season seeding[J]. Crop Science, 2015, 55(2): 851−867.

[40] Rahman M A, Lee S H, Park H S, et al. Light quality plays a crucial role in regulating germination, photosynthetic efficiency, plant development, reactive oxygen species production, antioxidant enzyme activity, and nutrient acquisition in alfalfa[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2025, 26(1): 360.

[41] Aasim M, Akin F, Ali S A. Synergizing LED technology and hydropriming for intelligent modeling and mathematical expressions to optimize chickpea germination and growth indices[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2024, 43(7): 2340−2359.

[42] Ficken C D, Rooney R C. Linking plant conservatism scores to plant functional traits[J]. Ecological Indicators, 2020, 115: 106376.

[43] Bates D, Mächler M, Bolker B, et al. Fitting linear mixed-effects models using lme4[J]. Journal of Statistical Software, 2015, 67(1): 41−48.

[44] Barberán A, Bates S T, Casamayor E O, et al. Using network analysis to explore co-occurrence patterns in soil microbial communities[J]. ISME Journal, 2012, 6(2): 343−351.

[45] Csárdi G, Nepusz T. The igraph software package for complex network research[J]. InterJournal Complex Systems, 2005, 1695: 16923281.

[46] Pedersen T L. An implementation of grammar of graphics for graphs and networks [R package ggraph version 2.0. 4][Z/OL]. 2020[2025−01−16]. https://cran.r-project.org/web/packages/ggraph/ggraph.pdf.

[47] Ginestet C. ggplot2: elegant graphics for data analysis[J]. Journal of the Royal Statistical Society Series A: Statistics in Society, 2011, 174(1): 245−246.

[48] 李昂, 张鸣, 杜国祯. 物种组成、丰富度、播种密度和土壤养分对群落补偿效应的影响 [J]. 生态学杂志, 2012, 31(10): 2443−2448.
Li A, Zhang M, Du G Z. Impacts of species composition, richness, sowing density, and soil nutrients on the complementary effect of plant communities[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(10): 2443−2448.

[49] Tilman D, Isbell F, Cowles J M. Biodiversity and ecosystem functioning[J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2014, 45: 471−493.

[50] Goldberg D E, Novoplansky A. On the relative importance of competition in unproductive environments[J]. Journal of Ecology, 1997, 85: 409−418.

[51] Chesson P. Chesson's coexistence theory: comment[J]. Ecology, 2020, 101(11): e02851.

[52] Cadotte M W. Functional traits explain ecosystem function through opposing mechanisms[J]. Ecology Letters, 2017, 20(8): 989−996.

[53] Wang S, Isbell F, Deng W, et al. How complementarity and selection affect the relationship between ecosystem functioning and stability[J]. Ecology, 2021, 102(6): e3347.

[54] Rubio G, Walk T, Ge Z, et al. Root gravitropism and below-ground competition among neighbouring plants: a modelling approach[J]. Annals of Botany, 2001, 88(5): 929−940.

（责任编辑 范 娟
责任编委 李 雄）