

DOI: 10.20103/j.stxb.202505111128

胡文浩,倪康,刘姝怡,黄璐,徐文辉.基于不同生态系统服务功能的野花带群落特征及营建策略分析.生态学报,2025,45(22): - .

Hu W H, Ni K, Liu S Y, Huang L, Xu W H. Analysis of community characteristics and construction strategies of wildflower strips based on different ecosystem service functions. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(22): - .

基于不同生态系统服务功能的野花带群落特征及营建策略分析

胡文浩¹, 倪康¹, 刘姝怡¹, 黄璐², 徐文辉^{1,*}

¹ 浙江农林大学风景园林与建筑学院, 杭州 311300

² 浙江大学新农村发展研究院, 杭州 310058

摘要:近年来,通过在农田边缘构建野花混合群落的野花带技术在全球被广泛用于农业景观生物多样性与生态系统服务功能修复,被认为是最具代表性的农业景观生态修复技术,但这一方法在群落构建与生态系统服务功能耦合的关联机制上尚不明确。通过构建全球野花带设计数据库,基于全球 84 项野花带设计与实施的研究,系统综述了 161 个野花带方案,探讨了不同生态系统服务功能下的野花带群落特征和构建策略。结果显示,全球野花带共涉及 43 个科、265 个属共计 473 个物种,在群落组成上呈现出明显的区域差异性特征,以传粉功能为目标的野花带和欧洲地区的野花带具有更高的生物多样性水平;在 β 多样性水平上,不同生态系统服务功能目标的野花带总体并未发现显著分化特征;在区域水平上,其分化特征随科-属-种分类单元分化程度依次增加,这与其形成过程中的自由扩散-生态位分化过程结果相似;在驱动机制上,物种来源、功能特征和功能多样性水平是野花带群落组成的主要驱动因子,对于野花带群落组成均具有较高的贡献率,三者总体解释率对不同分类水平的 α 和 β 多样性解释率均超过 50%;通过选择具有较大功能特征差异的物种,以确保在每个功能特征上均具有较高的功能多样性供给水平可能是野花带生态系统服务功能供给的关键策略。本研究揭示了在农业景观的复杂背景中野花带植物群落构建的异质性特征及其驱动因素,该研究为我国及其他地区在农田生态修复和生态景观营造过程中实施野花带技术提供了科学依据与操作指南,具有重要的理论意义和实践价值。通过明确野花带群落构建的机制,可以为农业景观生态修复技术的优化提供理论支持,推动生态农业的可持续发展,促进生物多样性保护与农业生产的协调共赢。

关键词:农业景观;生物多样性;生态系统服务;野花带;群落构建;生态修复

Analysis of community characteristics and construction strategies of wildflower strips based on different ecosystem service functions

HU Wenhao¹, NI Kang¹, LIU Shuyi¹, HUANG Lu², XU Wenhui¹

¹ College of Landscape Architecture, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, China

² Institute of New Rural Development, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

Abstract: Wildflower strips—diverse plant mixtures established along field margins—have been widely adopted worldwide as a representative and effective method for restoring biodiversity and ecosystem functions in agricultural landscapes. However, the characteristics linking community assembly of wildflower strips to ecosystem service outcomes remain poorly understood. In this study, we compiled a global database of wildflower strip designs, synthesizing data from 84 studies encompassing 161 wildflower strip cases. We systematically reviewed community assembly strategies under varying characteristic ecosystem service objectives and analyzed the functional traits of plant species of different functioning wild

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(32401371);浙江农林大学科研发展基金项目(2021LFR054)

收稿日期:2025-05-11; **网络出版日期:**2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 19930008@zafu.edu.cn

strip. Our results indicate that wildflower strips globally encompass 473 species from 265 genera and 43 families, with pronounced regional differences in community composition. Strips targeting pollination services and those implemented in Europe exhibited the highest levels of biodiversity. At the β -diversity level, we found no significant differentiation among wildflower strips designed for different ecosystem services. Regionally, taxonomic differentiation increased progressively from family to genus to species level, a pattern reminiscent of processes driven by free dispersal and niche differentiation. Species origin, functional traits, and functional diversity emerged as the primary drivers for wild strip vegetation community composition construction, together explaining more than 50% of variation in both α - and β -diversity across taxonomic levels. Selecting species with distinct functional traits to ensure high functional diversity across trait axes appears to be a key strategy for optimizing ecosystem service provision in wildflower strips. This study reveals the composition characteristics and underlying drivers of wildflower strip community assembly in complex agricultural landscapes. Our findings provide scientific evidence and practical guidelines for implementing wildflower strip technology in ecological restoration and landscape design in China and beyond, and also offering theoretical support for optimizing agroecological restoration techniques, promoting sustainable agriculture, and achieving synergy between biodiversity conservation and agricultural productivity.

Key Words: agricultural landscape; biodiversity; ecosystem services; wildflower strips; vegetation community; ecological restoration

农业景观在保障粮食安全和维持生态系统稳定方面具有不可替代的作用^[1-2]。然而,受气候变化和人类活动强度不断上升的影响^[3-4],农业景观生物多样性呈现持续下降趋势,引发了全球广泛关注。如何平衡农业产能与包括天敌^[5]与传粉昆虫^[6]在内的多类关键功能群体的多样性,成为农业可持续发展的重大挑战。研究表明,半自然生境的丧失^[7]与景观结构的简化^[8]是导致农业生物多样性衰退的核心因素,提升花源供给和景观复杂性成为生态修复关键,野花带技术因此受到广泛关注。

野花带作为一种在农田边缘播种本地野花的人工生境构建技术^[9-10],通过增加花源资源丰富度和可持续性,显著改善传粉者与天敌类群的栖息条件,还通过优化景观空间格局,促进农业生态系统服务功能的恢复^[11-12]。然而,当前的实证研究表明,野花带的生态效益在不同地区表现出显著差异,不同植物组合所产生的生态功能差异较大^[13-14]。实验研究进一步证实,功能性状的合理配置是其能否发挥预期生态效益的决定性因素^[15]。但目前关于野花带植物群落构建的理论尚不成熟,相关研究成果存在显著碎片化现象,缺乏系统性总结与理论整合,亟需从全球范围内总结现有野花带的植物配置特征,提炼关键功能性状,探索不同生态系统服务导向下的构建机制^[16-17]。

此外,野花带技术在全球推广过程中也面临本地化挑战。一些地区因盲目引种外来植物而导致景观结构同质化、入侵风险上升等问题^[18]。我国部分早期实践显示,未经筛选的外来野花混播并未实现预期的生物多样性提升目标^[14]。因此,基于本地物种适应性构建野花带,探索其不同区域情境下的生态功能潜力,优化植物群落的构成与空间配置至关重要。积极总结现有研究宝贵经验,通过提取取得相关生态效益野花带配置方案构建规律,对于完善野花带营建策略具有重要意义。

基于此,本研究拟系统梳理全球已公开发表的野花带构建方案,结合群落生态学与数量生态学方法,从不同生态系统服务功能目标出发,分析野花带植物组成、关键功能性状与物种来源等特征,旨在回答以下科学问题:

- (1) 在全球尺度上,野花带技术的应用区域及侧重的生态系统功能是什么?
- (2) 不同地区与服务目标下,野花带群落构建策略有何差异,受哪些关键因素影响?
- (3) 不同区域与功能需求下,野花带物种选择的关键属性是什么,如何影响群落构建原则?

1 材料与方法

1.1 文献检索

本研究基于 Web of Science 核心合集数据库(网址:<http://www.webofscience.com/>)开展系统性文献检索,旨在全面收集与野花带(wildflower strips)构建及其生态系统服务功能相关的实证研究。检索过程中结合主题词与关键词策略,检索策略首先对“wildflower strip”、“wildflower mixture”、“wildflower combination”、“flower strip”及“floral strip”五组前期研究发现野花带设计、物种组合相关的术语分别检索,逻辑运算符采用“OR”形式,随后将各次检索结果进行合并,确保检索范围的广泛性与代表性。实践表明,此方法较复杂复合策略检索更能获取全面文献,尽管会产生一定数量的无关文献,但可通过人工筛选加以排除,从而满足研究对数据来源广泛性与全面性的需求,并确保检索结果的可重复性。

为了提高筛选的科学性与一致性,本研究设立了三级纳入标准:第一层为主题相关性,要求研究必须明确涉及农业景观中条带状野花种植;第二层为内容完整性,需提供野花带的植物组成数据(如物种清单与配比方案);第三层为数据有效性,要求包含生态系统服务的定量或定性评估(如传粉昆虫多样性、害虫控制效果等)。在标题与摘要初筛阶段,依据第一层标准剔除 452 篇与主题不符的文献,保留 617 篇;随后对这 617 篇文献进行全文精读,按照第二层与第三层标准进一步排除 533 篇信息不全或未提供评估数据的研究,最终有 84 篇文献符合全部纳入标准。

在数据提取阶段,研究团队设计统一的数据提取表格,涵盖研究所在国家或地区、研究持续时间、实验设计类型、植物选择依据及生态系统服务评估方法等关键信息。为确保提取结果的准确性与客观性,文献筛选与数据提取均由两位研究人员独立完成,若遇分歧则通过讨论解决,必要时引入第三位研究人员裁决。最终,从 84 篇高质量文献中共提取了 161 条野花带群落组成及生态服务评估数据,为后续系统分析提供了坚实的数据基础。完整的筛选与提取流程示于图 1。

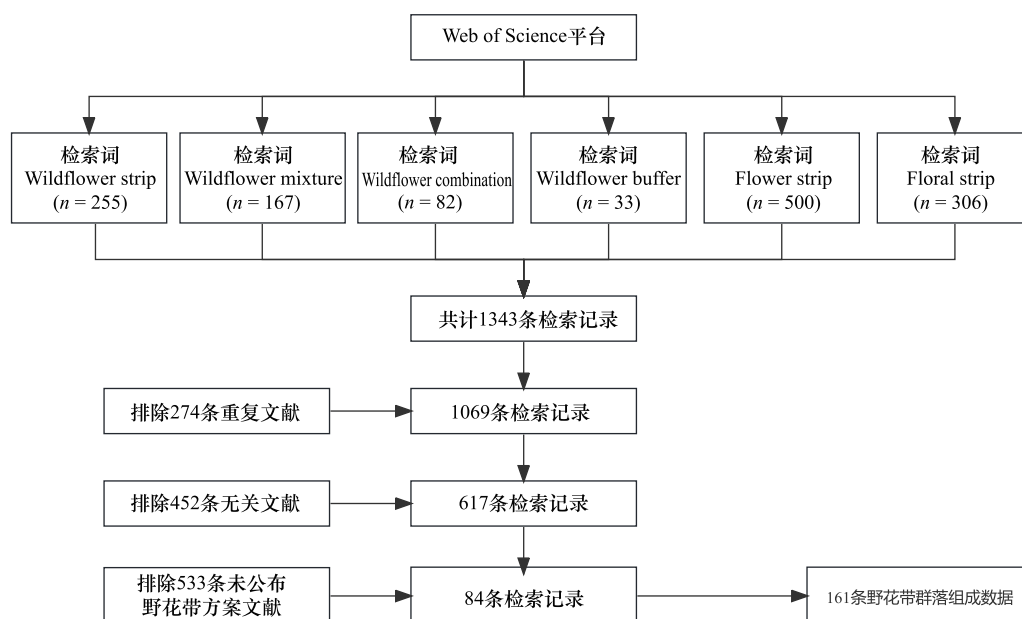


图 1 野花带研究文献检索流程

Fig.1 Literature search process of wildflower strip research

1.2 野花带群落组成信息提取

本研究通过对前述 84 篇有效纳入文献的材料与方法、结果等部分及其补充材料(Supplementary

Materials) 进行人工查阅与逐条整理,系统提取了野花带的群落构建信息,共收集到 161 组具代表性的野花带植物组合数据。需要指出的是,并非所有研究中的缓冲带设计方案均提供了完整的植物群落组成信息,因此,最终形成的数据主要表现为二元变量(0—1),即以是否包含特定植物种类作为判定依据,用于描述各组合方案中物种的出现情况。为确保物种命名的科学性与规范性,对所有涉及植物种的分类信息进行了统一标准化处理,具体流程为:首先结合文献提供的英文名与拉丁学名进行交叉验证,通过比对权威数据库(如邱园全球植物名录 Plants of the World Online,链接为 <https://powo.science.kew.org/>)修正可能存在的拼写或分类学错误;若相关数据库未收录该物种,则进一步检索涉及到该物种的相关文献,通过阅读原始研究获取准确分类信息。以确保学名的规范性与数据溯源的可靠性。在此基础上,进一步对每个野花带组合的地理分布区域、所属国家、建植时间以及研究文献中提及的生态系统服务功能类型等背景信息进行了整理。

1.3 野花带群落物种特征信息提取与功能多样性计算

结合已有关于野花带构建理念的相关文献,本研究重点提取并分析影响野花带设计的三类核心要素:物种来源、功能性状组成与功能多样性,以期深入揭示其群落构建的关键特征。相关指标的选取主要基于两点考量:其一,现有文献普遍强调本土物种来源对群落稳定性的关键作用,以及功能性状(如花型、花期)和功能多样性在生态服务供给中的核心价值,本研究旨在验证该主流观点;其二,当前学界对野花带吸引传粉生物与提供害虫控制服务的机制尚存争议,从物种功能属性切入可更直接解析群落构建逻辑。虽然环境与景观变量(如气候带、地块类型)亦可能影响野花带功能,但鉴于现有研究多集中于气候带差异较小的欧洲与北美,且景观背景信息难以标准化提取,本阶段未将其纳入;后续将在生态效益验证研究中进一步补充和完善。物种来源与功能性状相关数据主要来源于植物野外识别手册及权威植物学文献。所有数据由第一作者与第二作者分别独立检索,并由具有相关专业背景的植物分类学专家进行复核,确保数据的科学性与准确性。

在物种来源信息的提取方面,研究参考多部植物区系数据库与物种分布文献,获取各植物种类的原生分布区域,并将其划分为六个大类区域:欧亚大陆(包括广布种)、北美洲、南美洲、非洲与中东地区、欧洲以及中国与东亚地区。基于物种原生分布区域是否与研究地重合,将其划分为“本地种”与“非本地种”。本地植物的利用比例被用作衡量野花带植物来源特征的重要指标,反映其在生态适应性与地方性保护中的意义。

在功能性状组成的提取方面,依据前人研究成果,选取与野花带核心生态过程密切相关的关键性植物性状,包括:花序类型、花色、平均植株高度、初花时间、花期持续时间及最大寿命。这些性状被认为与吸引传粉者、调控物候期和增强群落稳定性等生态功能密切相关,是评估野花带设计适宜性的重要参数。

为综合评估野花带群落中不同功能性状的整合情况,本研究进一步引入并计算了以下功能多样性指数:① 功能属性多样性(Functional Attribute Diversity, FAD),衡量物种功能性状在群落中的分布广度;② Rao 二次熵指数(Rao's Quadratic Entropy, RaoQ),评估物种间功能性状的整体差异程度;③ 功能丰富度(Functional Richness, FRic),反映群落在功能性状空间中所占据的体积;④ 功能均匀度(Functional Evenness, FEve),衡量物种在功能空间中的分布均匀性。

1.4 数据分析

为系统揭示全球范围内野花带的分布特征,首先对来自不同地域的野花带研究样地的时空分布特征进行了可视化分析。随后,基于相关文献中关于潜在生态系统服务功能及设计意图的描述,整理并提炼出核心关键词,并对其进行了可视化呈现。在此基础上,根据野花带的地理起源,将其划分为欧洲起源、北美起源及其他起源等类别。同时,依据生态系统服务功能的设计目标,进一步将野花带分为传粉服务功能组、害虫防治服务功能组、多生态系统服务功能组及其他生态系统服务功能组。

为进一步分析野花带的物种选择特征,本研究考察了不同功能特征组下野花带的物种组成及潜在多样性,其中,每个具体研究中所提到的每个具体的野花带物种组成方案作为一个独立的取样单元。物种选择按科、属、种三个层次进行分类,以更精细地识别野花带群落的组成特征。在 α 多样性分析中,采用物种丰富度(species richness)作为多样性指标。在比较不同分类组的丰富度差异前,对该指标进行了前期检验,结果显示

该指标未满足正态性与方差齐性假设,因此采用 Kruskal-Wallis 秩和检验 (K-W 检验)^[19]对组间差异进行比较,并使用经 Holm 校正的最小显著差异 (LSD) 检验进行多重比较^[20]。

在 β 多样性分析中,采用主坐标分析 (Principal Coordinates Analysis, PCoA)^[21]对野花带在科、属、种三个层次上的物种组成特征差异进行了可视化。为检验不同组别间物种组成差异的显著性,进行了基于 9999 次 Monte Carlo 置换的多元方差分析 (PERMANOVA)^[22]。在计算 β 多样性时,科与属层面采用 Bray-Curtis 距离矩阵,种层面采用 Jaccard 距离矩阵。为进一步阐明影响野花带物种组成的机制,本研究对野花带中物种的起源与功能特征进行了归属分析,并考察了物种起源、功能特征及功能多样性在野花带中的分布。通过计算群落加权平均值 (Community Weighted Mean, CWM)^[23],表征野花带中物种的功能性状组成,并结合基于距离的冗余分析 (distance-based redundancy analysis, db-RDA),采用分层划分模型 (hierarchical partitioning model) 量化物种起源、功能组成及功能多样性对 α 和 β 多样性的相对贡献^[24]。此外,构建了方差分解分析 (Variation Partitioning Analysis, VPA) 模型,用以解析上述三类属性对野花带群落的共同效应与独立效应^[25]。

所有分析均在 R 4.1.2 环境下完成。Kruskal-Wallis 检验及多重比较使用 agricolae 包^[26];PCoA 分析与 PERMANOVA 采用 vegan 包^[27];CWM 与功能多样性 (Functional Diversity, FD) 值计算采用 FD 包^[28];分层划分模型及方差分解分析 (VPA) 使用 rdacca.hp 包^[24]。本文中的所有图表均通过 ggplot2 包绘制完成。

2 结果

2.1 全球野花带研究报告分布概况

本研究共梳理并提取了来自 84 篇文献中的 161 项野花带设计方案,涵盖全球 19 个国家的 234 个研究样地 (图 2)。从地理分布情况来看,美国与西欧是野花带研究与应用最为集中的地区,特别是美国、德国、比利时和瑞士,构成了当前全球野花带分布的核心区域。除上述地区外,南美洲的智利 (4 项)、我国 (1 项) 以及非洲的南非 (1 项) 也各自呈现了少量的野花带设计案例。从时间维度来看,最早的野花带设计记录可追溯至 2012 年,自此之后,相关研究呈现出持续增长态势显示出全球对野花带生态功能关注度的不断提升。

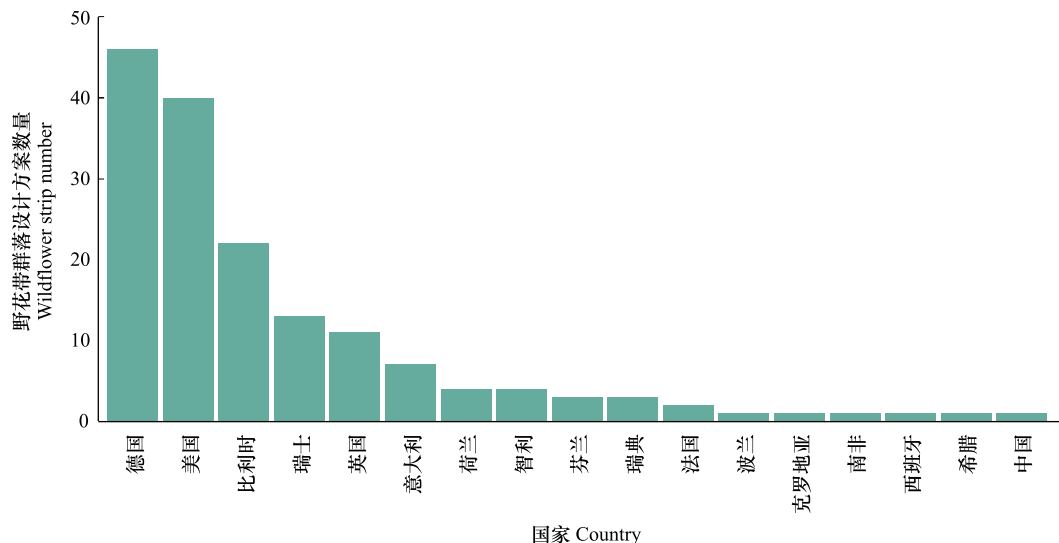


图 2 野花带空间分布特征

Fig.2 Spatial Distribution Trends of Wildflower Strips

2.2 各区域与生态服务类型下研究报告野花带的生物多样性

本研究共分析了 161 个公开报道的野花带配置方案,鉴定出隶属于 43 个科、265 个属的 473 种植物,呈现出高度的物种多样性。从物种在相关方案中的出现频率来看,优势科包括菊科 (Asteraceae, 28.42%)、豆科

(Fabaceae, 17.07%)、伞形科 (Apiaceae, 8.52%)、十字花科 (Brassicaceae, 6.53%)、唇形科 (Lamiaceae, 6.05%)、紫草科 (Boraginaceae, 4.58%) 和禾本科 (Poaceae, 4.34%)。在属的层面, 主要代表包括蓍草属 (*Achillea*, 5.23%)、矢车菊属 (*Centaurea*, 4.48%)、锦葵属 (*Malva*, 2.80%)、野豌豆属 (*Vicia*, 2.22%)、三叶草属 (*Trifolium*, 2.09%) 和酸模属 (*Rumex*, 2.09%)。在物种层面, 占优势的物种为蓍 (*Achillea millefolium*, 37.89%)、矢车菊 (*Centaurea cyanus*, 36.02%)、鸟足三叶草 (*Lotus corniculatus*, 34.78%)、荞麦 (*Fagopyrum esculentum*, 31.68%)、红车轴草 (*Trifolium pratense*, 31.68%) 及虞美人 (*Papaver rhoeas*, 31.06%)。

欧洲和北美不同功能目标野花带的物种组成呈现显著差异。在欧洲地区, 传粉功能野花带中, 矢车菊 (*C. cyanus*, 菊科) 和野胡萝卜 (*Daucus carota*, 伞形科) 出现频率最高, 分别为 31 次和 30 次; 绛车轴草 (*Trifolium incarnatum*, 豆科) 与玻璃苣 (*Borago officinalis*, 紫草科) 均为 29 次。害虫控制功能带中, 蓍 (*A. millefolium*, 菊科) 出现频率最高 (11 次), 红车轴草 (*T. pratense*, 豆科) 和滨菊 (*L. vulgare*, 菊科) 均为 10 次。多功能目标带里, 百脉根 (*L. corniculatus*, 豆科) 出现 19 次居首, 苋荳 (*C. sativum*, 伞形科) 17 次, 荞麦 (*F. esculentum*, 蓼科) 15 次。其他功能目标带中, 野胡萝卜 (*Daucus carota*, 伞形科) 出现 4 次为最高值, 白花蝇子草 (*Silene latifolia* subsp. *alba*, 石竹科)、虞美人 (*P. rhoeas*, 罂粟科) 等均为 3 次, 整体频率较低且分散。

北美地区的传粉服务功能野花带以菊科植物为主, 黑心菊 (*Rudbeckia hirta*, 菊科) 出现频率最高 (14 次), 剑叶金鸡菊 (*Coreopsis lanceolata*, 菊科) 12 次, 松果菊 (*Echinacea purpurea*, 菊科) 和两色金鸡菊 (*Coreopsis tinctoria*, 菊科) 均为 9 次。害虫控制功能带中, 串叶松香草 (*Silphium perfoliatum*, 菊科)、大蓝半边莲 (*Lobelia siphilitica*, 桔梗科) 等多种科属植物出现频率均为 2 次, 分布均匀且频率低。多功能目标带同样以菊科为主, 黑心菊 (*R. hirta*) 出现 10 次居首, 天人菊 (*G. pulchella*) 8 次, 剑叶金鸡菊 (*C. lanceolata*) 7 次。全球其他地区的多功能野花带以菊科植物为主 (占比约 71%), 如 *E. lux* (*Erigeron luxurians*, 菊科)、*E. pan* (*Eryngium paniculatum*, 伞形科) 等出现频率均为 4 次, *S. obt* (*Sphaeralcea obtusiloba*, 锦葵科)、*L. chi* (*Lycium chilense*, 茄科) 均为 3 次, 整体物种频率低且分布均匀。

2.2.1 Alpha 多样性

如图 3 所示, 野花带的平均物种丰富度为 18.16 ± 1.12 。在科、属与种的三个分类层级中, 不同生态服务功能类别的野花带在物种丰富度上存在显著差异。授粉功能类及其他生态服务类野花带在三个分类层级的丰富度均显著高于病虫害控制类与多功能类野花带。然而, 在授粉类与其他服务类之间, 以及病虫害控制类与多功能类之间, 科、属、种层面的丰富度差异均不显著。此外, 不同地理来源的野花带也表现出显著的生物多样性差异。来自欧洲的野花带在科、属与种层面上物种丰富度显著高于来自北美及其他地区的野花带。而北美与其他地区野花带之间在各分类层级的丰富度差异则不具有统计学意义。

2.2.2 Beta 多样性

如图 4 所示, 主坐标分析 (PCoA) 与基于置换的多变量方差分析 (PERMANOVA) 结果表明, 野花带之间的物种组成在统计学上存在显著差异。首先, 在生态服务功能维度上, 尽管不同功能类型 (如授粉、防治害虫及多功能) 间的物种组成差异并不十分显著, 但仍呈现出一定程度的分化趋势。在地理区划层面, 野花带植物组成在属与种两个分类层级上展现出更为显著的区域差异。值得注意的是, 从科到属再到种的分类层级逐步细化, 区域间物种组成的差异性亦愈发明显。此外, 主坐标轴上的“其他地区”在物种组成上处于欧洲与北美之间的位置, 反映出这类地区在物种选取上可能融合了两大主要区域的物种资源, 呈现一定的混合配置特征, 体现出野花带设计过程中的全球本地化趋势。

2.2.3 功能特征多样性

不同功能组的植物特征存在显著差异。在开花物候与株高方面, 传粉组、多功能组和害虫控制组的开花起始时间集中在 5 月中下旬 (5.43—5.50), 其他功能组略晚 (5.77); 害虫控制组的开花持续时间最长 (4.01 个月), 株高显著高于其他组 (147.54 cm), 传粉组、多功能组和其他功能组的花期为 3.75—3.93 个月, 株高接近 (69.31—72.93 cm)。花色分布上, 传粉组橙黄色系占比最高 (33.31%), 蓝紫色系占比 16.27% (各组最高);

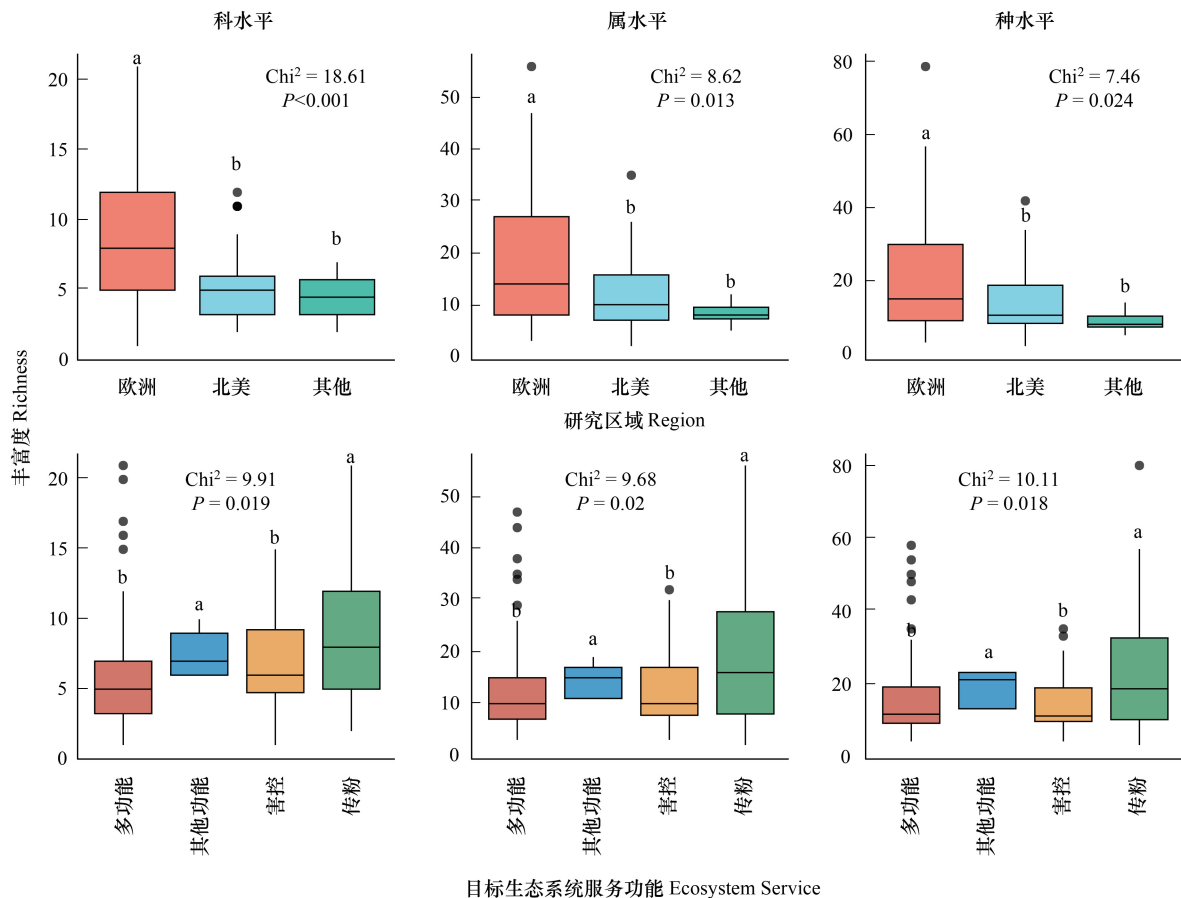


图3 基于 k-w 分析的不同区域与生态系统服务功能目标野花带 α 多样性分布

Fig.3 The distribution of alpha diversity of wildflower strips in different regions and for the objectives of ecosystem service functions based on k-w analysis

害虫控制组粉白色系 (26.79%) 和黄绿色系 (3.43%) 占比突出; 多功能组粉白色系与橙黄色系比例接近 (25.22%、32.72%)。植物寿命以多年生为主, 其中害虫控制组占比最高 (68.22%), 传粉组占 54.64%。花序类型中, 头状花序和伞形花序为各功能组主导, 传粉组总状花序占比 21.97% (高于其他组), 害虫控制组圆锥花序占比 11.53% (显著高于其他组)。

不同地区的植物特征亦呈现明显差异。在寿命类型上, 欧洲、北美和其他地区的多年生植物占比分别为 56.13%、62.95% 和 84.91%, 北美一年生植物占比最高 (31.40%), 欧洲二年生植物占比相对较高 (18.93%)。物候方面, 其他地区花期最长 (4.51 个月), 北美开花起始时间最晚 (5.96)。花色以橙黄色系和粉白色系为主, 北美橙黄色系占比最高 (38.93%), 其他地区混合色系占 35.85%。花序类型中, 北美头状花序 (46.78%) 和穗状花序 (9.58%) 比例最高, 其他地区头状花序占比达 56.60% (最高), 欧洲总状花序占比 20.50%。

2.3 野花带群落组成分化特征因子

2.3.1 物种来源

物种来源比例在决定野花带植物群落组成及其多样性方面具有显著作用。研究结果表明, 物种来源对群落组成变异的解释度分别为科水平 34.3%、属水平 31.2%、种水平 21.6%; 对群落丰富度的解释度分别为科水平 17.1%、属水平 14.3%、种水平 13.0%。

2.3.2 功能性状

植物功能性状在野花带群落结构构建中发挥着关键作用。研究显示, 群落加权均值 (Community Weighted

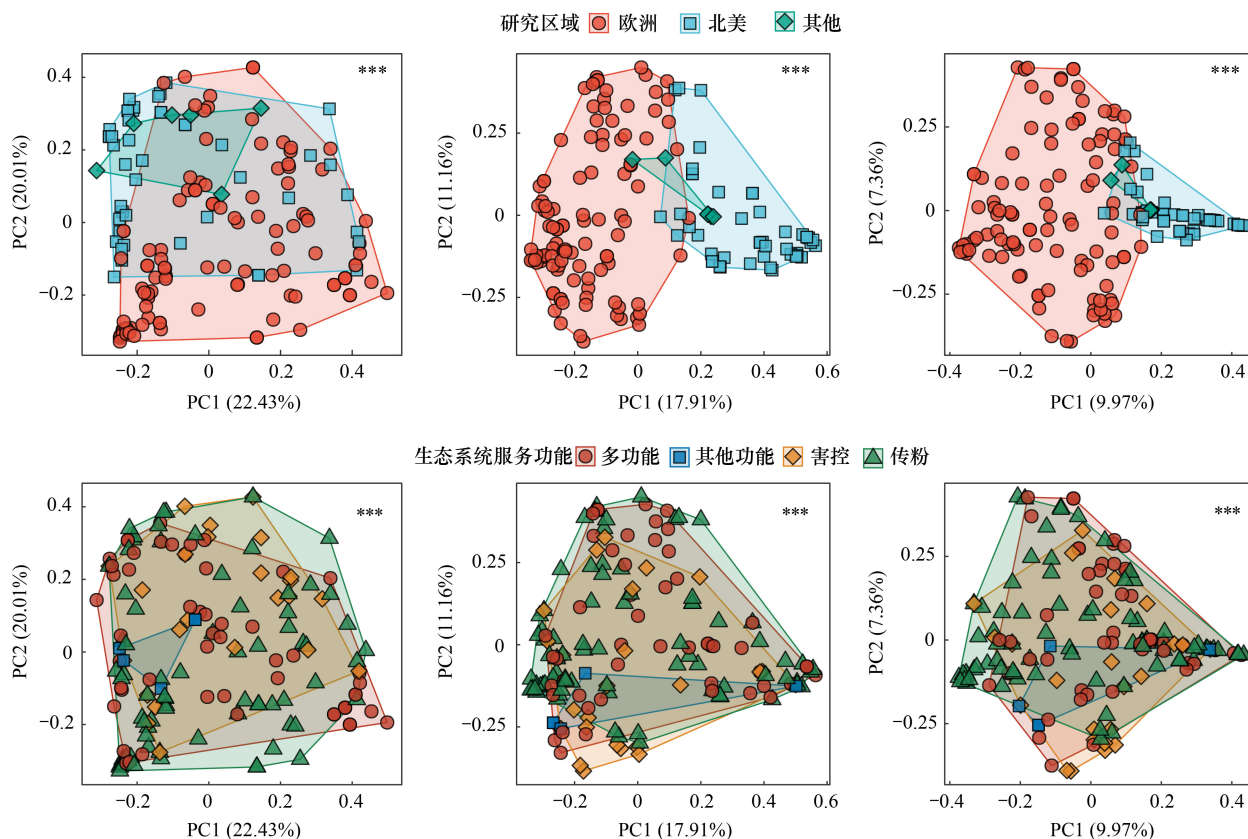


图4 不同区域与生态系统服务功能目标野花带 beta 多样性分布

Fig.4 The distribution of beta diversity of wildflower strips in different regions and for the objectives of ecosystem service functions

Mean, CWM) 分别对科、属、种水平的群落组成解释了 43.5%、33.7% 和 23.1% 的变异。在科水平上,影响最大的是与花序和花冠相关的性状,解释度达 14.55%;其次为花色 (8.67%)、开花始期 (8.06%) 和生命周期 (7.02%);而花期持续时间 (2.13%) 及平均植株高度 (1.45%) 的影响相对较弱。

在属水平上,主要影响性状依次为花序类型 (8.36%)、生命周期 (8.07%)、花色 (6.52%) 与开花始期 (6.43%);而花期持续时间和植株高度的解释度较低,分别为 3.57% 与 0.8%。在种水平上,花序 (6.13%)、花色 (5.48%)、生命周期 (5.13%) 与开花始期 (3.5%) 仍为主要变量,而花期持续时间与植株高度解释力分别下降至 2.17% 与 0.7%。综上所述,不同分类水平上植物功能性状的重要性存在差异,且花部性状 (如花序、花色) 普遍具有较高的解释能力。

2.3.3 功能多样性

功能多样性作为群落生态结构和过程的核心属性,对野花带的群落组成及物种丰富度均具有决定性影响。在群落组成方面,功能多样性指数在科、属、种三个层次上分别解释了 21.9%、14.2% 和 10.3% 的变异;相较而言,对物种丰富度的影响更为显著,分别达到 85.3% (科水平)、98.5% (属水平) 和 99.9% (种水平),几近完全解释。在各类功能多样性指标中,功能属性多样性 (Functional Attribute Diversity, FAD) 为影响最显著者,分别对科、属、种水平的群落组成解释 12.2%、6.12%、4.55% 的变异。其次为功能丰富度 (Functional Richness, FRic) 与功能均匀度 (Functional Evenness, FEve),而 Rao's 二次熵 (Rao's Quadratic Entropy, RaoQ) 指数的解释能力相对较弱。就物种丰富度而言,FAD 在各分类层次均为最强解释因子,贡献率超过 50%;FRic 次之,贡献超过 20%;FEve 与 RaoQ 贡献较低,均不超过 10%。上述结果说明,功能属性维度的多样化在野花带植物群落的构建与维持中具有核心地位。

2.3.4 影响因子综合贡献

如图 5 所示,方差分解分析结果显示,野花带群落结构和物种丰富度在不同分类层级上受到物种来源 (Species Origin)、功能性状组成 (Functional Trait Composition, FTC) 与功能多样性 (Functional Diversity, FD) 的共同影响,且呈现明显的尺度依赖性。在群落组成方面,科层级上,FTC 贡献最大 (28.5%),其次为乡土物种比例 (21.3%),两者交互作用为 12.1%,三者总共解释 61.9% 的变异;属层级结果相似,总解释率为 60.1%;而在种层级,FD 的独立贡献显著上升至 30.2%,并与乡土物种比例 (18.9%) 及其交互项 (15.4%) 共同解释了 64.5% 的变异,显示出细尺度上群落组成对功能多样性更为敏感。在物种丰富度方面,科与属层级中 FTC 分别贡献 35.6% 和 33.2%,为主要解释因子,而在种层级,FD 占据主导地位,贡献达 38.7%,表明功能多样性对物种丰富度的提升具有关键作用。尽管三者合计可解释大部分变异,但仍存未解释部分,提示尚有其他生态与环境因素可能参与群落构建过程。

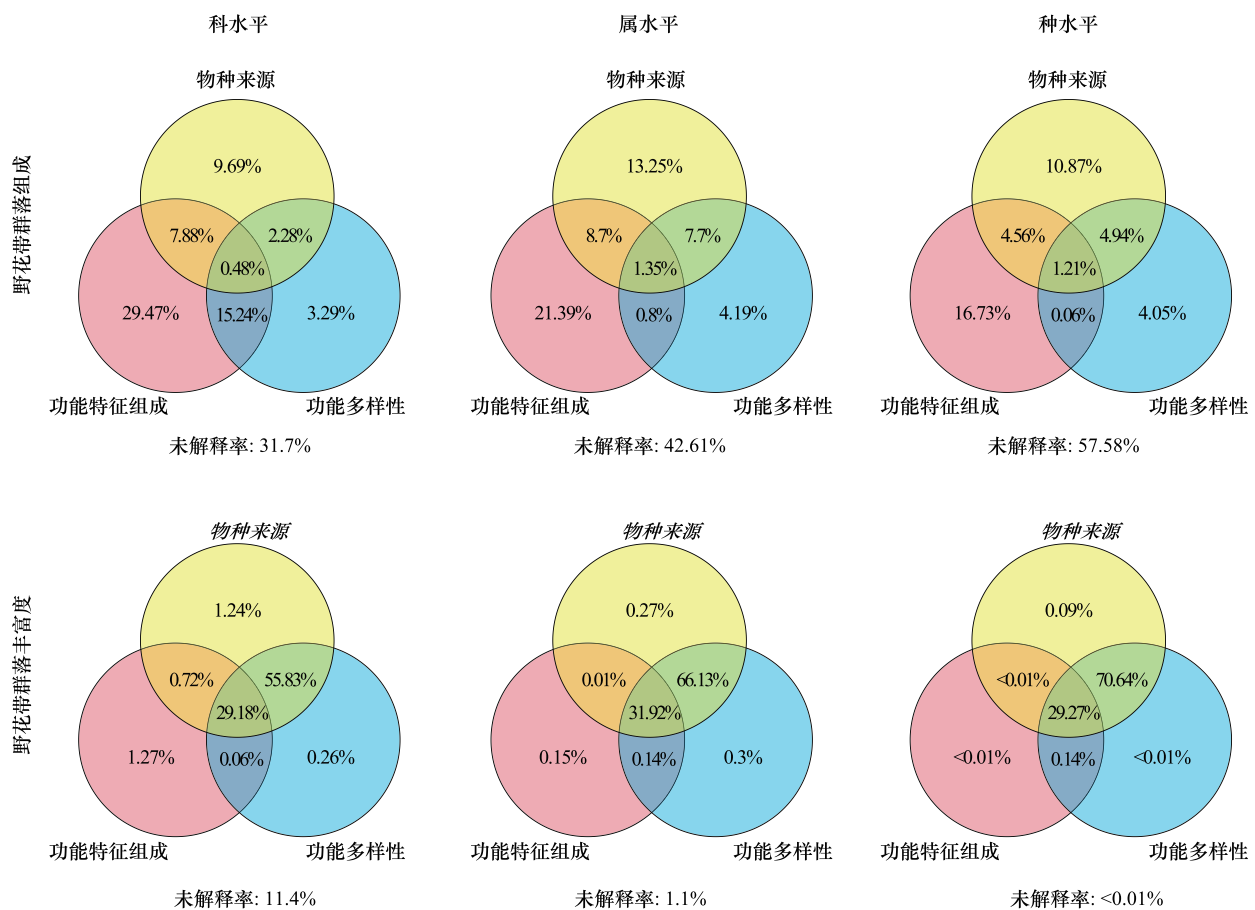


图 5 基于方差分解 (VPA) 的物种特征对野花带组成与多样性水平的贡献率分析

Fig.5 Analysis of the contribution rate of species traits to the composition and diversity level of wildflower strips based on vpa

3 讨论

3.1 基于不同生态系统服务功能的野花带群落组成异质性特征

本研究发现,针对传粉和害虫控制功能的野花带,在不同地理区域其物种组成的分化特征均不明显,提示在物种选择上,同样的野花带可能具有同时发挥包括传粉、害虫控制等多项生态系统服务功能的潜质。这种现象可能与多类群目标生物对野花带不同物种的趋同性互动过程,以及景观水平上对原有景观格局的改变和生境营造有关。首先,野花带提供的资源多类群生物均可利用,可能存在不同营养级之间的资源共享,从而支

持了多类功能性昆虫的活动,例如荞麦不仅为蜜蜂等授粉者提供花粉和花蜜,还为瓢虫等天敌提供资源^[29];其次,从多类群生物的生活史角度看,寄生蜂和食蚜蝇等对野花带响应敏感的节肢动物同时可以提供传粉与害虫控制等服务功能^[30],且普遍依赖于野花带提供的蜜源、栖息地与幼虫发育条件^[31];在景观尺度上,野花带作为生态廊道,改变了农业景观单一化与生境破碎化的现状,可同时促进授粉者与天敌在破碎化栖息地间的迁移与基因交流^[32]。考虑到国土生态化整治中需要通过尽可能小的面积比例实现多样化的生态系统服务功能,野花带生态系统服务功能多样性的特点决定其具有未来成为农业景观生态修复核心技术的潜力。

区域差异方面,欧洲野花带在物种丰富度和属水平丰富度上显著高于北美,这可能与两地农业景观的集约化程度、物种库差异以及野花带建设的不同目标有关。相对而言,欧洲偏重提升农业生态服务,而北美则侧重生境恢复,但在科水平上,不同区域野花带物种组成之间的分化特征并不明显,这可能是在分类单元水平上相似物种具有相似生态系统服务功能^[33]。例如,豆科多种植物可改善土壤质量,菊科的开放花型提供丰富的蜜源,而伞形科支持多种天敌昆虫的活动^[34],因此,在功能目标导向下,参考成熟案例的科水平配置,采用近缘科属异种植物完成本土化野花群落构建,或是中国等本土植物资源丰富国家推进野花带在地化的关键路径。

3.2 野花带群落组成异质性特征的潜在效应

物种来源对野花带群落结构塑造起核心作用。研究显示,不同地区野花带群落在科、属、种水平均存在显著空间异质性且分化趋势一致,其结构变化与功能多样性高度相关,凸显本地物种在功能性生态系统构建中的重要性^[35–36]。本地植物因与区域生物长期共进化,在物候协调、根系结构及养分利用等功能性状上具高度适应性^[37–38],可支持更广泛生态位占据,促进授粉、营养循环等关键生态过程持续进行,增强生态系统稳定性与多功能性。其与本地传粉者、土壤微生物形成的互利关系(如稳定花期资源供给与化感调节机制),优化了传粉网络效率并调控种间竞争,维护了生物多样性与群落稳定性^[39];根系功能互补亦提升了土壤结构与养分循环能力,增强系统抗干扰能力。相比之下,欧美建植方案直接移植至其他地区可能因生态适配性不足降低服务效率,外来植物常因与本地传粉者互动缺失、资源不匹配导致生态网络效率下降^[40],甚至通过竞争排斥等机制破坏本地群落,引发生物同质化与功能多样性丧失^[41]。因此,未来需聚焦本地种质资源挖掘及其生态功能性状识别,以提升野花带生态适应性与服务效能。目前,我国乡土植物在相关领域应用仍有不足,存在物种选择趋同,乡土植物应用率过低的问题,建立完整的乡土野花筛选、培育与生态应用的完整路径是未来相关领域的研究与应用重点。

在群落设计层面,植物功能性状被广泛认为是构建稳定生态系统的核心因素,但其作用并非由某一特定功能性状单独决定,而是依赖多种功能性状的整体多样化配置。开花物候被一致视为最关键的功能性状,因其直接决定资源供给的时空连续性,进而维持传粉者种群及其活动。研究表明,延长花期或分阶段提供花源的策略可显著提高作物授粉率和生态系统稳定性^[42]。花型结构对传粉者的选择行为具有重要影响,例如开放花冠更易吸引短舌类昆虫,而管状花冠则更适合长舌类蜜蜂访花^[43]。花色、生长期与茎数等其他性状对群落吸引力与功能冗余构建亦有一定作用,但其优先级相对低于开花物候和花型结构。在野花带设计中,功能多样性与功能冗余度具有更深远的生态意义。功能多样性通过涵盖不同生态位和资源利用策略,能够提升生态系统对环境波动的响应能力^[43]。不同功能性状在时间或空间上的差异可促成资源利用的互补性和服务冗余,如菊科与豆科植物的协同配置不仅能够增强传粉资源供给,还可通过固氮作用改善土壤肥力,进而形成更为稳健的生态互利网络。功能冗余作为一种“生态保险”机制,可确保在关键物种缺失时,生态系统仍能维持相应功能。研究发现,开花期冗余有助于缓解单一物种缺失导致的生态服务断层,增强服务连续性与系统韧性^[44]。尽管已有研究取得上述进展,当前关于功能性状、功能多样性与生态系统服务之间的直接联系仍存在知识空白。具体功能性状在不同农业背景下的作用机制、野花带对土壤微生物群落和作物产量的间接影响,以及跨营养级的多层交互效应,均需通过控制性实验进一步验证。此外,功能冗余的生态保险效应在不同生态系统类型与环境条件下的普适性,仍需长期、多地域的实证研究支持。

3.3 对未来农业景观生态修复与野花带建设的启示

野花带在生态化土地整治等领域具有广阔应用前景,凭借不占用农田资源且生态效益显著的优势,有望在我国生态农业与自然保护体系中发挥关键作用^[10]。其核心价值体现在平衡农业生态系统可持续性——既能提升生物多样性,又可在粮食安全与生态安全间建立有效协同,实现双赢。在物种设计层面,需遵循三项原则:一是优先选用本土物种,利用其区域适应性强化群落稳定性与服务功能;二是优化功能多样性配置,通过差异性功能性状物种组合提升群落多功能性;三是维持高生物多样性以保障生态冗余。物种筛选可在科水平参考全球规律,优先豆科、唇形科等高频类群,关注伞形科、紫草科潜力物种;种水平则需结合区域生态特征与入侵风险评估本地化调整,谨慎使用归化无入侵物种。推广层面,建议以本土物种组合培育推动育种技术发展,通过物种互作机制研究与长期监测形成循证设计指南,规避选择趋同与入侵风险^[45]。未来,野花带建设需构建科学实施体系。首先从试点入手,建立长期监测机制以动态优化生态效益;深入探索其在多元农田背景下对生物多样性的响应机制,为多场景推广提供理论支撑;同步建立本土种质资源库,规避外来物种风险并保障区域生态稳定。此外,需兼顾景观美学与生态功能协同,整合生态学、农业科学、景观设计等多学科方法,推动其在生态服务提升、农业资源优化及乡村振兴中的综合应用^[46]。未来研究应聚焦机理性探讨,通过系统化荟萃分析明确作用机制,形成精准指导体系,为政策制定与实践推广提供理论依据。

4 结论与展望

本研究通过分析全球 84 项野花带设计案例及 161 个群落构建方案,揭示了生态系统服务导向下野花带群落的组成特征与构建策略。研究发现,野花带构建存在显著地域性和功能导向差异:全球涉及 43 科 473 种植物,其中欧洲地区及以传粉为目标的群落生物多样性最丰富,物种组成在区域尺度呈现适应性分化。物种来源、功能性状和功能多样性共同驱动群落构建(解释率超 50%),需统筹考虑植物生态适应性、关键功能性状及群落功能冗余,通过优化花期、花色等配置实现多样性与生态功能协同提升。本研究首次构建全球尺度的野花带群落设计理论框架,证实其构建需融合生态学原理与功能配置,而非简单物种叠加。

当前研究数据主要集中于欧美地区,亚洲、非洲等区域覆盖不足。未来研究应重点关注:①不同气候带和管理制度下本地植物的适应性,推动技术在地化;②建立长期动态监测机制,评估传粉、害虫控制等生态服务的长期影响;③解析功能性状与群落稳定性的耦合机制;④探索野花带与农业生产系统的整合模式,实现生态修复与产量稳定协同发展。本研究为全球农业景观生态修复提供了理论依据和实践策略,对提升农田生物多样性、增强农业生态系统服务功能及推动农业可持续发展具有重要意义。

参考文献(References):

- [1] Fahrig L, Baudry J, Brotons L, Burel F G, Crist T O, Fuller R J, Sirami C, Siriwardena G M, Martin J L. Functional landscape heterogeneity and animal biodiversity in agricultural landscapes. *Ecology Letters*, 2011, 14(2): 101-112.
- [2] Jonsson M, Straub C S, Didham R K, Buckley H L, Case B S, Hale R J, Gratton C, Wratten S D. Experimental evidence that the effectiveness of conservation biological control depends on landscape complexity. *Journal of Applied Ecology*, 2015, 52(5): 1274-1282.
- [3] Henle K, Alard D, Clitherow J, Cobb P, Firbank L, Kull T, McCracken D, Moritz R F A, Niemelä J, Rebane M, Wascher D, Watt A, Young J. Identifying and managing the conflicts between agriculture and biodiversity conservation in Europe: a review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2008, 124(1/2): 60-71.
- [4] Potts S G, Imperatriz-Fonseca V, Ngo H T, Aizen M A, Biesmeijer J C, Breeze T D, Dicks L V, Garibaldi L A, Hill R, Settele J, Vanbergen A J. Safeguarding pollinators and their values to human well-being. *Nature*, 2016, 540(7632): 220-229.
- [5] Bianchi F J J A, Schellhorn N A, Cunningham S A. Habitat functionality for the ecosystem service of pest control: reproduction and feeding sites of pests and natural enemies. *Agricultural and Forest Entomology*, 2013, 15(1): 12-23.
- [6] Klein A M, Vaissière B E, Cane J H, Steffan-Dewenter I, Cunningham S A, Kremen C, Tscharntke T. Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings Biological Sciences*, 2007, 274(1608): 303-313.
- [7] Hietala-Koivu R, Lankoski J, Tarmi S. Loss of biodiversity and its social cost in an agricultural landscape. *Agriculture, Ecosystems & Environment*,

- 2004, 103(1): 75-83.
- [8] Gámez-Virués S, Perović D J, Gossner M M, Börschig C, Blüthgen N, de Jong H, Simons N K, Klein A M, Krauss J, Maier G, Scherber C, Steckel J, Rothenwöhrer C, Steffan-Dewenter I, Weiner C N, Weisser W, Werner M, Tschamtk T, Westphal C. Landscape simplification filters species traits and drives biotic homogenization. *Nature Communications*, 2015, 6: 8568.
- [9] Korpela E L, Hyvönen T, Lindgren S, Kuussaari M. Can pollination services, species diversity and conservation be simultaneously promoted by sown wildflower strips on farmland Agriculture, *Ecosystems & Environment*, 2013, 179: 18-24.
- [10] 胡文浩, 那书豪, 李学东, 李想, 字振荣, 王文静, 段美春. 乡土野花组合在农业景观中的应用. *中国生态农业学报: 中英文*, 2019, 27(12): 1846-1856.
- [11] Korpela E L, Hyvönen T, Kuussaari M. Logging in boreal field-forest ecotones promotes flower-visiting insect diversity and modifies insect community composition. *Insect Conservation and Diversity*, 2015, 8(2): 152-162.
- [12] Wratten S D, Gillespie M, Decourtye A, Mader E, Desneux N. Pollinator habitat enhancement: Benefits to other ecosystem services. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 159: 112-122.
- [13] Quinn J D, Reed P M, Keller K. Direct policy search for robust multi-objective management of deeply uncertain socio-ecological tipping points. *Environmental Modelling & Software*, 2017, 92: 125-141.
- [14] 郭炳茹, 付道猛, 齐绍帆, 字振荣, 聂紫瑾, 朱莉. 野花带对京郊农田地表蜘蛛多样性的影响. *生态学杂志*, 2020, 39(8): 2663-2670.
- [15] Hatt S, Lopes T, Boeraeve F, Chen J L, Francis F. Pest regulation and support of natural enemies in agriculture: Experimental evidence of within field wildflower strips. *Ecological Engineering*, 2017, 98: 240-245.
- [16] Haaland C, Naisbit R E, Bersier L F. Sown wildflower strips for insect conservation: a review. *Insect Conservation and Diversity*, 2011, 4(1): 60-80.
- [17] Uyttenbroeck R, Piqueray J, Hatt S, Mahy G, Monty A. Increasing plant functional diversity is not the key for supporting pollinators in wildflower strips. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 249: 144-155.
- [18] Hu W H, Huang Y C, Duan Y, He L, Wu W, Kong Y M, Huang L, Zhang H J, Xu W H. Effect of convergence plant selection of wildflower mixtures in China on the plant invasion. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2024, 10: 171.
- [19] McKight P E, Najab J. Kruskal-wallis test. *The corsini encyclopedia of psychology*, 2010: 1.
- [20] Williams L J, Abdi H. Fisher's least significant difference (LSD) test. *Encyclopedia of research design*, 2010, 218(4): 840-853.
- [21] Gower J C. Principal coordinates analysis. *Wiley StatsRef: statistics reference online*, 2014: 1-7.
- [22] Anderson M J. Permutational multivariate analysis of variance (PERMANOVA). *Wiley statsref: statistics reference online*, 2014: 1-15.
- [23] Muscarella R, Uriarte M. Do community-weighted mean functional traits reflect optimal strategies *Proceedings Biological Sciences*, 2016, 283(1827): 20152434.
- [24] Lai J S, Zou Y, Zhang J L, Peres-Neto P R. Generalizing hierarchical and variation partitioning in multiple regression and canonical analyses using the *rdacca.hp* R package. *Methods in Ecology and Evolution*, 2022, 13(4): 782-788.
- [25] Peres-Neto P R, Legendre P, Dray S, Borcard D. Variation partitioning of species data matrices: estimation and comparison of fractions. *Ecology*, 2006, 87(10): 2614-2625.
- [26] de Mendiburu F, de Mendiburu M F. Package 'agricolae'. *R Package*, version, 2019, 1(3): 1143-1149.
- [27] Oksanen J, Kindt R, Legendre P, O Hara B, Stevens M H H, Oksanen M J, Suggests M. The *vegan* package. *Community ecology package*, 2007, 10(631-637): 719.
- [28] Laliberté E, Legendre P, Shipley B, Laliberté M E. Package 'fd'. Measuring functional diversity from multiple traits, and other tools for functional ecology, 2014, 1: 12.
- [29] 吴凌云, 黄双全. 虫媒传粉植物荞麦的生物学特性与研究进展. *生物多样性*, 2018, 26(4): 396-405.
- [30] Schmidt-Entling M H, Döbeli J. Sown wildflower areas to enhance spiders in arable fields. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, 133(1/2): 19-22.
- [31] Li H, Wyckhuys K A G, Wu K M. Hoverflies provide pollination and biological pest control in greenhouse-grown horticultural crops. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1118388.
- [32] Lundin O, Rundlöf M, Jonsson M, Bommarco R, Williams N M. Integrated pest and pollinator management - expanding the concept. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2021, 19(5): 283-291.
- [33] Delphia C M, O'Neill K M, Burkle L A. Wildflower seed sales as incentive for adopting flower strips for native bee conservation: a cost-benefit analysis. *Journal of Economic Entomology*, 2019, 112(6): 2534-2544.
- [34] 朱平阳, 吕仲贤, Geoff Gurr, 郑许松, Donna Read, 杨亚军, 徐红星. 显花植物在提高节肢动物天敌控制害虫中的生态功能. *中国生物防治学报*, 2012, 28(4): 583-588.

- [35] Gutierrez A, Brendel A S, Marinangeli P. New native species for extensive green roofs to enrich urban ecosystem services in semiarid regions. *Urban Ecosystems*, 2024, 28(1): 52.
- [36] Sharafatmandrad M, Khosravi Mashizi A. Evaluation of restoration success in arid rangelands of Iran based on the variation of ecosystem services. *Journal of Arid Land*, 2023, 15(11): 1290-1314.
- [37] Hevia V, Martín-López B, Palomo S, García-Llorente M, de Bello F, González J A. Trait-based approaches to analyze links between the drivers of change and ecosystem services: Synthesizing existing evidence and future challenges. *Ecology and Evolution*, 2017, 7(3): 831-844.
- [38] Vicente J R, Pinto A T, Araújo M B, Verburg P H, Lomba A, Randin C F, Guisan A, Honrado J P. Using life strategies to explore the vulnerability of ecosystem services to invasion by alien plants. *Ecosystems*, 2013, 16(4): 678-693.
- [39] Lang A C, von Oheimb G, Scherer-Lorenzen M, Yang B, Trogisch S, Bruehlheide H, Ma K P, Härdtle W. Mixed afforestation of young subtropical trees promotes nitrogen acquisition and retention. *Journal of Applied Ecology*, 2014, 51(1): 224-233.
- [40] 方强, 黄双全. 传粉网络的研究进展: 网络的结构和动态. *生物多样性*, 2012, 20(3): 300-307.
- [41] Peh K S H, Balmford A, Birch J C, Brown C, Butchart S H M, Daley J, Dawson J, Gray G, Hughes F M R, Mendes S, Millett J, Stattersfield A J, Thomas D H L, Walpole M, Bradbury R B. Potential impact of invasive alien species on ecosystem services provided by a tropical forested ecosystem: a case study from Montserrat. *Biological Invasions*, 2015, 17(1): 461-475.
- [42] Mei Z L, de Groot G A, Kleijn D, Dimmers W, van Gils S, Lammertsma D, van Kats R, Scheper J. Flower availability drives effects of wildflower strips on ground-dwelling natural enemies and crop yield. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 319: 107570.
- [43] Balzan M V. Flowering banker plants for the delivery of multiple agroecosystem services. *Arthropod-Plant Interactions*, 2017, 11(6): 743-754.
- [44] Burkle L A, Delphia C M, O'Neill K M. Redundancy in wildflower strip species helps support spatiotemporal variation in wild bee communities on diversified farms. *Basic and Applied Ecology*, 2020, 44: 1-13.
- [45] Williams N M, Ward K L, Pope N, Isaacs R, Wilson J, May E A, Ellis J, Daniels J, Pence A, Ullmann K, Peters J. Native wildflower plantings support wild bee abundance and diversity in agricultural landscapes across the United States. *Ecological Applications*, 2015, 25(8): 2119-2131.
- [46] 吴玮, 邵旭华, 胡文浩, 徐文辉. 野花景观公众认知评价及其影响因素. *中国城市林业*, 2024, 22(6): 148-154.