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

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

郭邵华 杨天宇 兰少伟 李春霞 徐雪蕾 杨君珑

Multidimensional plant diversity and community construction process of five typical forest types in Luo Mountain, Ningxia of northwestern China

Guo Shaohua, Yang Tianyu, Lan Shaowei, Li Chunxia, Xu Xuelei, Yang Junlong

引用本文:
郭邵华, 杨天宇, 兰少伟, 李春霞, 徐雪蕾, 杨君珑. 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[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(9):46–56. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250202
Guo Shaohua, Yang Tianyu, Lan Shaowei, Li Chunxia, Xu Xuelei, Yang Junlong. Multidimensional plant diversity and community construction process of five typical forest types in Luo Mountain, Ningxia of northwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(9):46–56. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250202

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250202

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

毛乌素沙地不同林龄樟子松人工林土壤真菌组成与群落构建过程

Soil fungal composition and community construction process of different aged *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations in the Mu Us Desert, Shaanxi Province of northwestern China

北京林业大学学报, 2025, 47(5): 83–91. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240392

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

不同火烈度下山西太岳山油松林灌木层物种多样性和叶功能性状

Species diversity and leaf functional traits of shrub layer in *Pinus tabuliformis* forest under different fire intensities in Taiyue Mountain, Shanxi Province of northern China

北京林业大学学报, 2024, 46(6): 38–47. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230324

兰州市典型夏花树种功能性状对城市异质生境的响应

Responses of typical plant functional traits among summer–flowering tree species in heterogeneous city habitats in Lanzhou City of northwestern China

北京林业大学学报, 2023, 45(10): 90–99. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210476

环境因子对长白山自然保护区森林群落分布的影响

Effects of environmental factors on forest community distribution in Changbai Mountain Nature Reserve of northeastern China

北京林业大学学报, 2023, 45(8): 57–64. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220086

青岛崂山次生植物群落物种分布及多样性特征

Species distribution and diversity characteristics of secondary plant communities in Laoshan Mountain of Qingdao, Shandong Province of eastern China

北京林业大学学报, 2020, 42(8): 22–33. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190414

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250202

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

郭邵华[1] 杨天宇[2] 兰少伟[3] 李春霞[1] 徐雪蕾[1] 杨君珑[1]

（1. 宁夏大学林业与草业学院林木资源高效生产全国重点实验室，宁夏 银川 750000；2. 宁夏沙坡头国家级自然保护区管理局，宁夏 中卫 755000；3. 彭阳县林业和草原局，宁夏 固原 756000）

摘要:【目的】为探究宁夏罗山森林植物多维（物种、系统发育及功能）多样性的变化及关联，揭示驱动群落构建的主导作用。**【方法】**以青海云杉纯林、青海云杉油松混交林、油松纯林、油松山杨混交林和山杨纯林 5 种典型森林群落为对象，采用生物多样性多维度指标，结合功能性状与环境因子，解析多维多样性间的相关关系以及群落构建过程。**【结果】**（1）青海云杉纯林的物种多样性（Simpson 指数、Margalef 丰富度指数）和功能多样性显著低于混交林（$P < 0.05$），各林型的系统发育多样性无显著差异（$P > 0.05$）。（2）物种多样性指数分别与功能多样性和系统发育多样性指数显著正相关（$P < 0.05$），而功能多样性与系统发育多样性之间无相关关系（$P > 0.05$）。（3）青海云杉纯林和油松纯林系统发育结构和功能性状结构均发散，群落构建由竞争排斥主导；青海云杉油松混交林系统发育结构局部聚集与整体发散，油松山杨混交林功能性状结构局部聚集与整体发散，二者群落构建均由竞争排斥和环境过滤共同主导；山杨纯林系统发育结构和功能性状结构均聚集，群落构建由环境过滤主导。（4）7 个叶功能性状的系统发育信号均小于 1，表明功能性状结构和系统发育结构不具有一致性，其变异主要由环境异质性驱动。海拔、土壤 pH、有机碳和全氮是影响功能性状分异的关键环境因子。**【结论】**宁夏罗山物种多样性分别与功能多样性和系统发育多样性正相关，但功能性状与系统发育呈现解耦关系。群落构建过程由生态位理论主导，但不同林型主要驱动作用不同，针叶纯林群落构建由竞争排斥主导，阔叶纯林群落构建由环境过滤主导，混交林群落构建由竞争排斥和环境过滤共同主导。

关键词：宁夏罗山；多维多样性；群落构建；功能性状；环境因子

中图分类号：S731 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2025)09−0046−11

引文格式：郭邵华，杨天宇，兰少伟，等. 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［J］. 北京林业大学学报，2025，47(9)：46−56. Guo Shaohua, Yang Tianyu, Lan Shaowei, et al. Multidimensional plant diversity and community construction process of five typical forest types in Luo Mountain, Ningxia of northwestern China［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(9): 46−56.

Multidimensional plant diversity and community construction process of five typical forest types in Luo Mountain, Ningxia of northwestern China

Guo Shaohua[1] Yang Tianyu[2] Lan Shaowei[3] Li Chunxia[1] Xu Xuelei[1] Yang Junlong[1]

(1. College of Forestry and Prataculture, State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Ningxia University, Yinchuan 750000, Ningxia, China;
2. Administration Bureau of Ningxia Shapotou National Nature Reserve, Zhongwei 755000, Ningxia, China;
3. Pengyang County Forestry and Grassland Bureau, Guyuan 756000, Ningxia, China)

Abstract: ［**Objective**］ This paper aims to explore the changes and associations of multidimensional diversity of forest plants in Luo Mountain, Ningxia of northwestern China, and reveal the dominant drivers

收稿日期: 2025−06−06 **修回日期:** 2025−07−04

基金项目: 国家自然科学基金项目（32260421），宁夏青年科技托举人才培养项目。

第一作者: 郭邵华。主要研究方向：森林生态。Email: 2605437698@qq.com 地址：750000 宁夏回族自治区银川市西夏区文萃北街 216 号宁夏大学林业与草业学院。

责任作者: 徐雪蕾，副教授。主要研究方向：植物群落生态学、森林植被恢复。Email: xuxuelei@nxu.edu.cn 地址：同上。

本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

of community construction. [**Method**] Five typical forest communities were studied, including *Picea crassifolia* pure forest, *Picea crassifolia* × *Pinus tabuliformis* mixed forest, *Pinus tabuliformis* pure forest, *Pinus tabuliformis* × *Populus davidiana* mixed forest, and *Populus davidiana* pure forest. This study employed multidimensional indices of biodiversity combined with functional traits and environmental factors, and systematically analyzed the correlations among multidimensional diversity and community construction processes. [**Result**] (1) Species diversity (Simpson index, Margalef richness index) and functional diversity of *Picea crassifolia* pure forest were significantly lower than those of mixed forests ($P < 0.05$), while there was no significant difference in phylogenetic diversity among different forest types ($P > 0.05$). (2) Species diversity index was significantly positively correlated with functional diversity index and phylogenetic diversity index, respectively ($P < 0.05$), while there was no correlation between functional and phylogenetic diversity ($P > 0.05$). (3) *Picea crassifolia* and *Pinus tabuliformis* pure forest exhibited divergent phylogenetic and functional trait structure, indicating community construction dominated by competitive exclusion. *Picea crassifolia* × *Pinus tabuliformis* mixed forest showed local aggregation with overall divergence in phylogenetic structure, and *Pinus tabuliformis* × *Populus davidiana* mixed forest showed local aggregation with overall divergence in functional trait structure, which both suggested community construction co-driven by competitive exclusion and environmental filtering. *Populus davidiana* pure forest displayed aggregated phylogenetic and functional trait structure, indicating community construction dominated by environmental filtering. (4) The phylogenetic signals of seven leaf functional traits were all less than 1, indicating inconsistency between functional traits and phylogenetic structure and their variations were mainly driven by environmental heterogeneity. Altitude, soil pH, organic carbon, and total nitrogen were identified as the key environmental factors affecting functional trait differentiation. [**Conclusion**] Species diversity is positively correlated with functional diversity and phylogenetic diversity, while functional traits show a decoupled relationship with phylogeny in Luo Mountain, Ningxia of northwestern China. Community construction process is primarily governed by niche theory, with dominant drivers varying among different forest types. Specifically, pure coniferous forest is dominated by competitive exclusion, pure broadleaved forest is dominated by environmental filtering, and mixed forests are co-driven by these two processes.

Key words: Luo Mountain in Ningxia; multidimensional diversity; community construction; functional traits; environmental factor

全球气候变化背景下，生物多样性丧失严重影响生态系统功能[1]，研究生物多样性格局及其驱动机制成为了群落生态学研究备受关注的领域，是保护生物多样性的重要基础[2−3]。生物多样性包括物种、系统发育和功能多样性多个维度，不同维度相互联系而非独立[4]。物种多样性是维系森林生态系统服务功能与生产能力的关键要素[5]，也是森林生态系统恢复进程的关键表征[6]。系统发育多样性从进化与生态维度出发，可弥补物种多样性研究的局限，其通过梳理特定时空尺度下物种的系统发育轨迹，评估类群整体的生态适应状态，进而为解析物种共存机制与演化规律提供全新的认知视角[7]。功能多样性可衡量功能性状空间，较好地反映竞争排斥或生境胁迫对群落结构和生态系统功能的影响[8]。综合考虑局域内物种、系统发育和功能多样性及其相关关系，可以深入揭示驱动生物互作规律的关键机制[9]。

群落构建始终是生物多样性与生态学领域的核心议题之一[10]。它主要研究生物群落形成、发展以及维持其结构和功能稳定的内在和外在因素[11−12]。群落构建过程涉及中性理论、竞争排斥、环境过滤等多种生态过程的综合作用，这些过程在不同时空尺度上塑造了群落的组成与结构[13]。生态学家为检验群落构建假说，基于系统发育关系推断物种间的亲缘程度，并通过功能性状测定量化物种的生态特征差异，分别从进化历史和现实生态位两个层面揭示群落构建机制[14]。但目前的研究多局限于系统发育或功能性状单一维度分析，例如，李非凡等[15]聚焦植物系统发育结构，对青藏高原东缘亚高山森林群落进行研究，结果表明其系统发育结构趋于发散，群落构建主要是竞争排斥起主导作用。王寅等[16]基于植物功能性状，研究中国西北干旱区内陆河流域的植物群落构建机制，发现该区域植物群落功能结构普遍呈现聚集分布特征，其群落构建过程主要受环境过滤效应驱动。单一维度的分析难以全面揭示生态

过程的协同作用机制，而整合两个维度的分析框架，通过系统发育结构与功能性状结构的双重表征，不仅能阐明森林群落的构建规律，更能从多维生态位理论视角揭示物种多样性维持的协同演化机制[14,17]。

罗山是宁夏中部干旱带上唯一的山地生态系统，与贺兰山、六盘山共同构成宁夏“三山”生态安全屏障，发挥着重要的水源涵养、水土保持和生态安全维护功能，其独特的地理气候条件孕育了丰富的植被类型和物种多样性[18]，为研究环境胁迫下群落构建机制提供了理想场所。但是由于自然气候干旱化加剧，加之人类活动对自然资源的不合理利用，使得保护区内的生态系统遭受严重破坏，生物多样性加剧丧失，整体生态环境呈现高度脆弱状态[19]。因此，亟需明确其群落构建机制以优化生物多样性保护策略。然而，目前关于该区域森林群落的研究多集中于物种组成或单一维度多样性分析[20–21]，对谱系结构、功能性状及其与环境因子的耦合关系缺乏系统性探讨，限制了对多维多样性以及群落构建机制的深入理解。因此，本研究以宁夏罗山 5 种典型林型为对象，整合物种多样性、系统发育多样性和功能多样性，结合植物的功能性状、环境因子，从进化历史和生态过程的角度，拟解决以下科学问题：(1)不同林型植物群落多维度生物多样性之间存在怎样的变化规律及相关关系?(2)主导不同林型的群落构建机制分别是什么?(3)群落系统发育结构和功能格局是否协同一致?旨在通过剖析多维度生物多样性的联动演变机制，为区域生态修复与生物多样性保护工作提供科学理论支撑。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏罗山国家级自然保护区(37°11′～37°25′N，106°04′～106°24′E)，属于宁夏吴忠市同心县和红寺堡开发区境内，位处草原与荒漠的过渡带，海拔 1 560～2 624 m，总面积 33 710 hm^2，由南北走向的大、小罗山两个山体构成。保护区土壤类型单一，以灰褐土和灰钙土为主，森林覆盖率为 9.6%，总蓄积量 2.03 × 10^5 m^3。植被类型以森林、灌丛、草甸和草原为主，主要森林类型有青海云杉(*Picea crassifolia*)、油松(*Pinus tabuliformis*)、山杨(*Populus davidiana*)等，林下植被有水栒子(*Cotoneaster multiflorus*)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)和干生薹草(*Carex aridula*)等。

1.2 样地布设和植被调查

2024 年 8 月，运用典型样地法开展野外调查，选取罗山 5 种典型的森林群落进行研究，分别是青海云杉纯林、青海云杉油松混交林、油松纯林、油松山杨混交林以及山杨纯林。每种森林类型均设置郁闭度相当、林相规整且具典型性的 3 个重复样地，样地规格为 20 m × 20 m，相邻样地相距 20 m 以上，共计 15 个样地。记录样地海拔、坡度和土壤类型等基本信息。样地基本概况如表 1。在每个样地内采用对角线法设置 5 个灌木样方(5 m × 5 m)，每个灌木样方中心设置 1 个草本样方(1 m × 1 m)，共计灌木样方 75 个、草本样方 75 个。调查记录每个样地中全部乔木的数量、株高(m)、胸径(cm)、冠幅(m)；调

表 1 罗山 5 种森林群落调查样地基本信息

Tab. 1 Basic information of survey sample plots of five forest communities in Luo Mountain

林型	样地编号	海拔/m	坡度/(°)	土壤类型
青海云杉纯林	YS1	2 546.18	28	灰褐土
青海云杉纯林	YS2	2 538.03	33	灰褐土
青海云杉纯林	YS3	2 525.21	35	灰褐土
青海云杉 × 油松混交林	YS × P1	2 335.17	19	灰褐土
青海云杉 × 油松混交林	YS × P2	2 327.85	25	灰褐土
青海云杉 × 油松混交林	YS × P3	2 307.57	29	灰褐土
油松纯林	P1	2 244.97	6	灰褐土
油松纯林	P2	2 242.18	27	灰褐土
油松纯林	P3	2 240.53	6	灰褐土
油松 × 山杨混交林	SY × P1	2 219.27	14	灰褐土
油松 × 山杨混交林	SY × P2	2 143.09	6	灰褐土
油松 × 山杨混交林	SY × P3	2 124.04	6	灰褐土
山杨纯林	SY1	2 113.04	21	灰褐土
山杨纯林	SY2	2 111.21	20	灰褐土
山杨纯林	SY3	2 023.56	15	灰褐土

查记录每个灌木样方中灌木的种类、数量、株高(m)、基径(cm)、冠幅(m)以及盖度(%); 调查记录每个草本样方中草本的种类、数量、株高(m)以及盖度(%)。

1.3　植物功能性状测定

选取每个样地内的优势物种 5 ~ 7 株进行采样, 每株采集 5 ~ 7 片完整、健康且无病虫害的成熟叶片, 采集时注意保持叶片平整。本研究分析植物叶片的叶面积、比叶面积、比叶重、叶干物质含量、叶有机碳含量、叶片氮含量、叶片磷含量 7 个功能性状。叶面积用叶面积仪测定; 比叶面积为叶片单面面积与其干质量的比值; 比叶重为单位叶面积的叶片质量, 即叶片干质量/叶面积; 叶干物质含量为叶干质量与叶鲜质量的比值; 叶有机碳含量和叶氮含量采用碳氮元素分析仪测定; 叶磷含量采用钼锑抗比色法测定。

1.4　土壤样品采集及各指标的测定

在样地对角线两端和中心点, 用土钻采集 0 ~ 30 cm 土层的土样, 每个样地混合 5 个点的土样装袋带回实验室。风干去除杂质后, 研磨并过筛, 用于土壤理化性质分析[22]。同时, 在每个样方内, 土壤容重和土壤含水量使用环刀法测定; 土壤 pH 值采用 pH 计测定; 土壤有机碳含量用重铬酸钾–外加热法测定, 土壤全氮含量用凯氏定氮法测定[23]。

2　数据处理

2.1　多样性指数计算

针对物种多样性、系统发育多样性、功能多样性 3 个维度分别选择多样性、均匀度和丰富度 3 个方面的指数进行度量, 指标选择见表 2。

2.1.1　物种多样性指数计算

由于不同生活型的物种个体大小、多度、高度、盖度等对群落的贡献权重存在差异, 本研究用相对高度、相对优势度、相对盖度和相对频度分不同层次分别计算了各物种的重要值, 并采用相对重要值代替相对多度来计算物种多样性指数[24−25]。物种多样性选取 Simpson 指数(D)、Pielou 均匀度指数(J)和 Margalef 丰富度指数(M)。

$$D = 1 - \sum P_i^2 \tag{1}$$

$$J = -\sum P_i \ln P_i / \ln S \tag{2}$$

$$M = (S - 1)/\ln N \tag{3}$$

式中: P_i 为第 i 种物种的相对重要值; S 为物种数; N 为所有物种个体总数。

2.1.2　系统发育多样性指数和系统发育结构指数计算

研究区内共有 38 种植物, 使用 R 构建系统发育树。基于系统发育树计算系统发育多样性和系统发育结构指数。其中, 选择平均谱系距离(mean pairwise nodal distance, MPD)、系统发育物种均匀度(phylogenetic species evenness, PSE)和谱系多样性(phylogenetic diversity, PD)度量系统发育多样性[26]。系统发育结构选用净谱系亲缘关系指数 NRI(R)和净最近种间亲缘关系指数 NTI(T)度量, 其中 NRI 指数侧重于物种之间相似度, NTI 指数侧重于相似物种间的影响[27]。

$$R = -1 \times \frac{X_{\mathrm{mpd}} - M_{\mathrm{mpd}}}{S_{\mathrm{mpd}}} \tag{4}$$

$$T = -1 \times \frac{X_{\mathrm{mntd}} - M_{\mathrm{mntd}}}{S_{\mathrm{mntd}}} \tag{5}$$

式中: X_{mpd} 和 X_{mntd} 分别为平均谱系距离观测值和最近相邻谱系距离平均观测值, M_{mpd} 和 M_{mntd} 分别为通过软件随机 999 次模拟出平均谱系距离和最近相邻谱系距离的平均值, S_{mpd} 和 S_{mntd} 为对应随机模拟值的标准差[28]。NRI 和 NTI 的正负值可表征群落系统发育结构特征及其驱动机制: 当两指数大于 0 时, 系统发育显著聚集, 反映近缘物种同域分布, 指示环境过滤主导; 小于 0 时系统发育显著分散, 体现远缘物种共存, 由竞争排斥主导; 趋近于 0 则呈现随机结构, 支持中性过程主导。

2.1.3　功能多样性指数和功能性状结构指数计算

基于本研究选取的 7 个功能性状计算功能多样性指数, 用群落加权平均值表示群落的叶片功能性状值[15]。选取 RaoQ 二次熵指数(Rao's quadratic entropy index, RaoQ)、功能均匀度指数(functional evenness index, FEve)和功能丰富度指数(functional richness index, FRic)来衡量功能多样性[15,29]。功能性状结构指数选用平均配对性状距离的标准效应值 traitSESMPD(Z_{MPD})和平均最近相邻性状距离的标

表 2　生物多样性指数选择

Tab. 2　Selection of biodiversity indices

指标	多样性指数	均匀度指数	丰富度指数
物种多样性	Simpson指数(D)	Pielou均匀度指数(J)	Margalef丰富度指数(M)
系统发育多样性	平均谱系距离(MPD)	系统发育物种均匀度(PSE)	谱系多样性(PD)
功能多样性	RaoQ二次熵指数(RaoQ)	功能均匀度指数(FEve)	功能丰富度指数(FRic)

准效应值 traitSESMNTD(Z_{MNTD})，其基于功能性状聚类树计算求得[17]。

$$Z_{MPD} = -1 \times \frac{O_{mpd} - \mu_{mpd}}{\sigma_{mpd}} \quad (6)$$

$$Z_{MNTD} = -1 \times \frac{O_{mntd} - \mu_{mntd}}{\sigma_{mntd}} \quad (7)$$

式中：O_{mpd}、O_{mntd} 分别为实际观测到的 traitMPD 和 traitMNTD 值，μ_{mpd}、μ_{mntd} 为零模型下随机零群落 traitMPD 和 traitMNTD 的均值，σ_{mpd}、σ_{mntd} 为零模型下随机零群落 traitMPD 和 traitMNTD 的标准差。功能性状结构指数(traitSESMPD 和 traitSESMNTD)大于 0 时，表示功能性状结构聚集；小于 0 时，表示功能性状结构发散；等于 0 时，表示功能性状结构自由扩散。

2.2 功能性状的系统发育信号检测

功能性状的系统发育信号评估借助布朗运动随机进化模型的 K 值实现。当 $K = 1$ 时，功能性状与进化历史无显著关联，说明功能性状结构和系统发育结构之间不存在统计学意义的关系。当 $K > 1$ 时，说明功能性状与系统发育结构一致。当 $K < 1$ 时，功能性状结构与系统发育结构并不完全一致[30]。由此可得，K 值越大，物种特征越遵循进化谱系；K 值越小，环境等因素对特征的影响越显著。

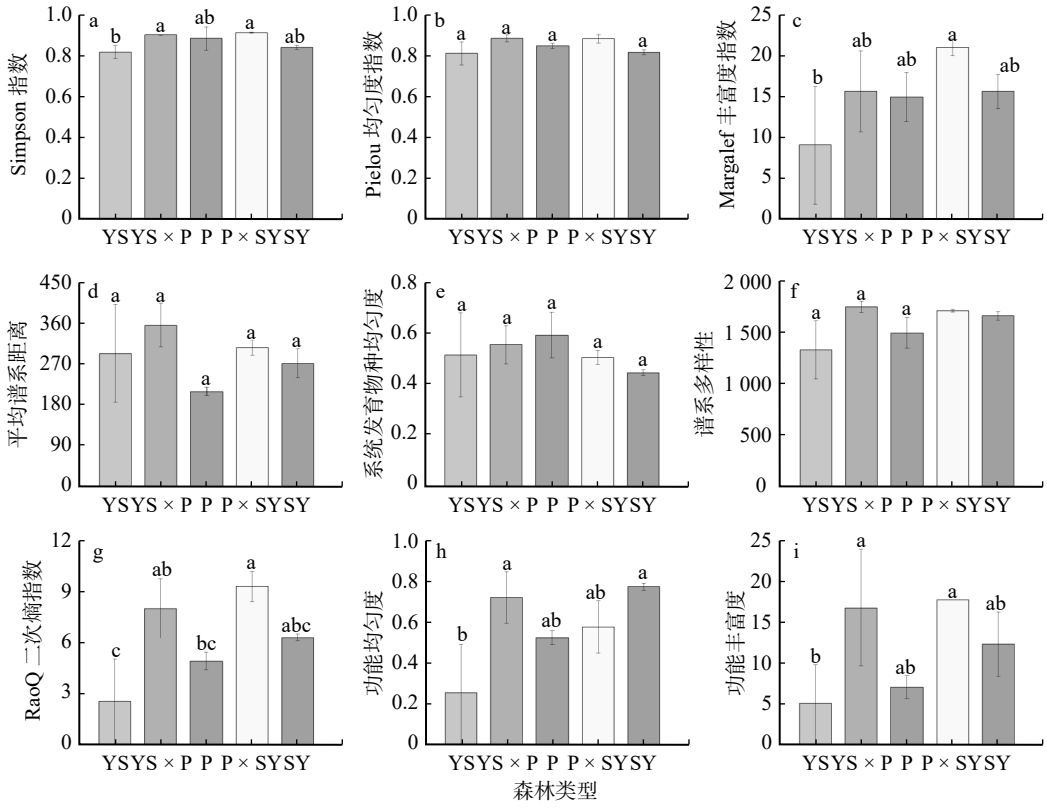
2.3 数据统计与分析

使用 Excel 2003 对数据和物种多样性指数进行整理与计算。系统发育树采用 R 4.4.2 软件中的“plantlist”和“V.PhyloMaker2”包来构建，系统发育多样性指数和系统发育结构指数用 R 4.4.2 中的“picante”包进行计算。功能多样性指数和功能性状结构指数使用 R 4.4.2 软件中的“FD”包进行计算。单因素方差分析用于分析不同林型之间生物多样性指数、系统发育结构指数和功能性状结构指数的差异显著性，该分析采用 origin 2024 软件完成并绘图。功能性状的系统发育信号 K 用 R 4.4.2 软件内的“multiphylosignal”包进行计算。生物多样性指数间的相关关系分析采用 origin 2024 软件进行 Pearson 相关性分析后绘图。功能性状与环境因子之间的关联采用第四角分析，用 R 4.4.2 软件的“vegan”包完成。

3 结果与分析

3.1 不同林型物种、系统发育和功能多样性分析

不同林型的物种多样性(Simpson 指数、Margalef 丰富度指数)和功能多样性(RaoQ 二次熵指数、功能均匀度、功能丰富度)差异显著($P < 0.05$，图 1)。在物种多样性维度(图 1a ~ c)中，青海云杉纯林的 Simpson 指数(0.82)显著低于两种混交林(YS × P：



不同小写字母表示组间差异显著($P < 0.05$)。YS. 青海云杉林；P. 油松林；SY.山杨林。

图 1 不同林型植物群落物种(a、b、c)、系统发育(d、e、f)及功能(g、h、i)多样性

Fig. 1 Species (a,b, c), phylogenetic (d, e,f) and functional (g, h, i) diversity of plant communities in different forest types

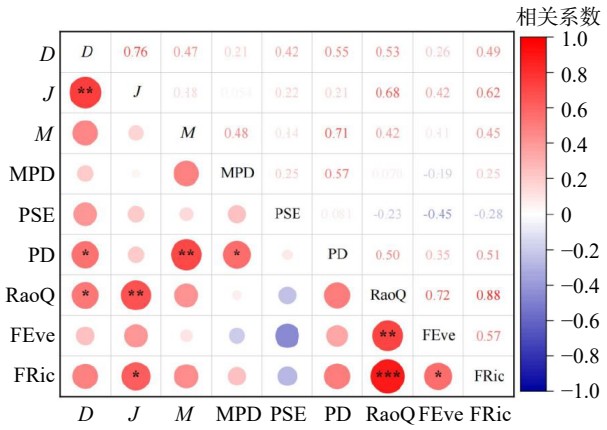
0.90、P × SY：0.91），Margalef 丰富度指数（8.99）显著低于油松山杨混交林（20.84），而各林型 Pielou 均匀度指数无显著差异（$P > 0.05$）。这说明青海云杉纯林的物种多样性和物种数目均低于混交林，而各林型的物种分布均匀程度无显著差异。

在系统发育多样性维度（图 1d ~ f）中，不同林型的系统发育多样性差异不显著（$P > 0.05$），说明 5 种林型物种间的进化关系、谱系结构及演化历史关联性较为接近，其在进化过程中可能受相似的环境筛选或生物作用影响。

在功能多样性维度（图 1g ~ i）中，青海云杉纯林的 RaoQ 二次熵指数（2.54）显著低于两种混交林（YS × P：7.98、P × SY：9.26），功能均匀度指数（0.26）显著低于油松山杨混交林（0.72）和山杨纯林（0.77），功能丰富度指数（5.06）显著低于两种混交林（YS × P：16.70、P × SY：17.69）。这表明青海云杉纯林内物种的功能性状组合范围狭窄，功能多样性较低，功能性状分布不均，关键生态位存在空缺或冗余。相比之下，混交林物种的功能性状覆盖更均衡，减少了生态位重叠。

3.2　生物多样性指数间的相关性分析

宁夏罗山不同林型群落物种多样性（*D*、*M*）与系统发育多样性（PD）显著正相关，物种多样性（*D*、*J*）与功能多样性（RaoQ）显著正相关，而系统发育多样性与功能多样性无显著相关性（图 2）。这表明物种多样性的增加会同步提升系统发育多样性和功能多样性，但系统发育多样性与功能多样性的变化并不一致，反映出群落中系统发育关系与功能特征解耦。



D. Simpson 指数；*J*. Pielou 均匀度指数；*M*. 物种丰富度指数；MPD. 平均谱系距离；PSE. 系统发育物种均匀度；PD. 系统发育多样性指数；RaoQ. RaoQ 二次熵指数；FEve. 功能均匀度指数；FRic. 功能丰富度指数。红色表示正相关，蓝色表示负相关；图形大小表示相关性强弱；*$P < 0.05$，**$P < 0.01$，***$P < 0.001$。

图 2　生物多样性指数间的 Pearson 相关性分析

Fig. 2　Pearson correlation analysis among biodiversity indices

3.3　不同林型植物系统发育和功能性状结构分析

宁夏罗山 5 种林型所选样地中共调查到 38 个物种，隶属于 19 科 29 属，其中以蔷薇科植物为主。物种的进化历史由各分支长度所代表，图 3 呈现了 38 种植物的亲缘关系与演化分支，分支越近的物种，亲缘关系越近。

由图 4 可知，青海云杉纯林和油松纯林的 NTI、NRI、traitSESMPD 和 traitSESMNTD 指数均小于 0，表明系统发育结构和功能性状结构均发散，群落构建过程由竞争排斥主导。青海云杉油松混交林的系统发育结构指数不一致，其中 NTI > 0，NRI < 0，说明系统发育结构整体聚集局部发散，功能性状结构指数 traitSESMPD 和 traitSESMNTD 均小于 0，说明功能性状结构发散，群落构建由竞争排斥和环境过滤共同主导。油松山杨混交林的功能性状结构指数不一致，其中 traitSESMPD > 0，traitSESMNTD < 0，说明功能性状结构整体聚集局部发散，系统发育结构指数 NTI 和 NRI 均小于 0，说明系统发育结构发散，竞争排斥和环境过滤共同主导群落构建。山杨纯林的 NTI、NRI、traitSESMPD 和 traitSESMNTD 均大于 0，表明系统发育结构和功能性状结构均聚集，环境过滤主导群落构建。

3.4　功能性状的系统发育信号检测

7 个叶功能性状的 *K* 值均小于 1，表明该地区森林群落叶片功能性状的系统发育保守性较弱，性状的变异主要受生境影响（表 3）。其中，比叶面积和叶干物质含量的系统发育信号达到显著水平，其余性状系统发育信号不显著，说明系统发育关系对比叶面积和叶干物质含量种间变异的影响程度相对较大。

图 5 显示：pH 与叶面积、叶片氮含量、叶片磷含量显著正相关（$P < 0.05$）；土壤有机碳与叶干物质含量显著正相关（$P < 0.05$），与叶片氮含量显著负相关（$P < 0.05$）；土壤全氮与叶干物质含量显著正相关（$P < 0.05$），与叶片氮含量显著负相关（$P < 0.05$）；海拔与叶面积、叶片氮含量、叶片磷含量显著正相关（$P < 0.05$），与叶干物质含量显著负相关（$P < 0.05$）。这些结果表明，叶片功能性状分异主要受海拔、土壤 pH、有机碳及全氮影响。

4　讨　　论

4.1　不同林型植物生物多样性特征及相关性

植物群落类型的变化伴随着生物多样性的变化。本研究表明，青海云杉纯林的物种多样性（Simpson 指数、Margalef 丰富度指数）和功能多样性（RaoQ 二次熵指数、功能均匀度、功能丰富度）显著低于两种混交林，这与金慧等[31]、胡玉昆等[32]、杨涛等[33]的研

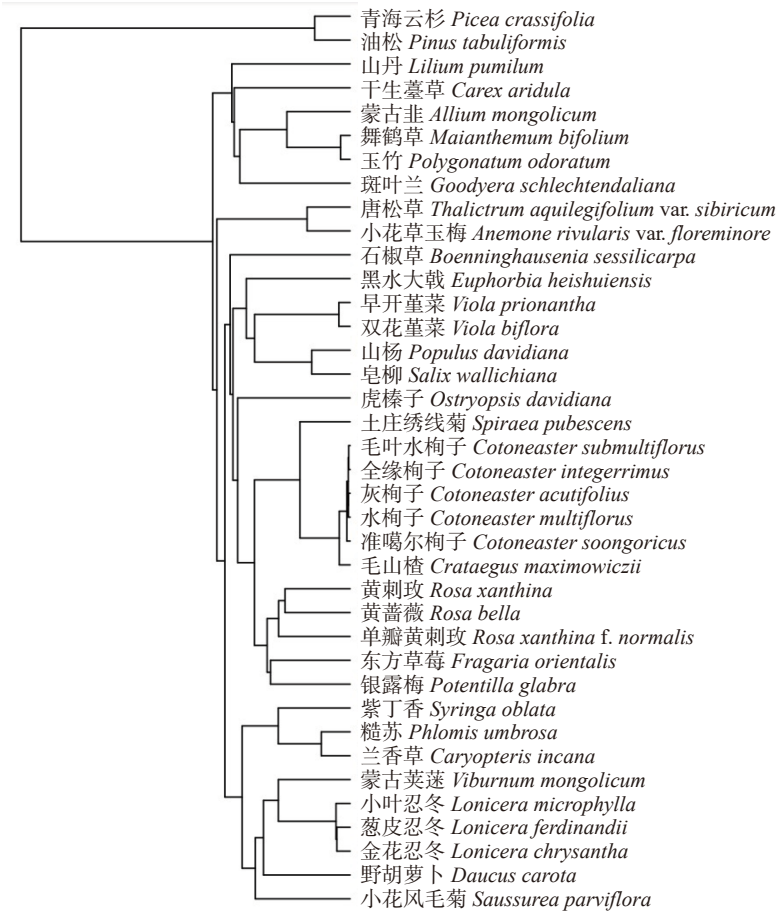
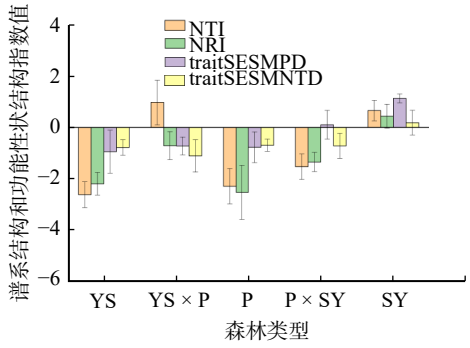


图 3 基于不同林型的 38 个物种构建的群落系统发育树

Fig. 3 A community phylogenetic tree constructed based on 38 species from different forest types



NTI. 净最近种间亲缘关系指数；NRI. 净谱系亲缘关系指数；traitSESMPD. 平均配对性状距离的标准效应值；traitSESMNTD. 平均最近相邻性状距离的标准效应值。

图 4 植物群落系统发育结构和功能性状结构

Fig. 4 Phylogenetic structure and functional trait structure of plant communities

表 3 功能性状的系统发育信号

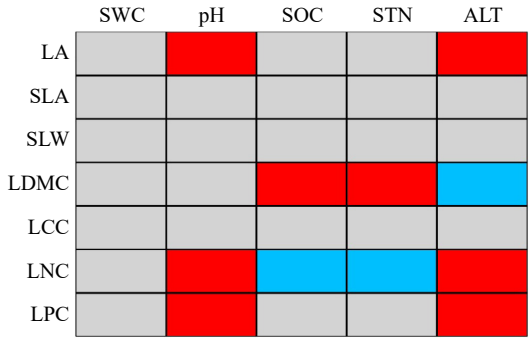
Tab. 3 Phylogenetic signals of functional traits

功能性状	*K*值	*P*
叶面积	0.236	0.093
比叶面积	0.218	0.035*
比叶重	0.193	0.338
叶干物质含量	0.199	0.019*
叶有机碳含量	0.202	0.097
叶片氮含量	0.143	0.151
叶片磷含量	0.229	0.068

注：*K*. 系统发育信号；*表示$P < 0.05$。

究结果一致，可能是因为青海云杉纯林的海拔较高，所处区域生境较其他森林类型恶劣，土壤养分含量低，而低海拔区域的生境异质性和资源可利用性更高，能够支持更多物种共存。同时混交林本身具有比纯林更加复杂的冠层及根系结构、更丰富多样的枯落物、更复杂的地上地下结构和更高的土壤肥力，这些因素显著增加了其林下植物的物种种类及丰富度，使功能生态位被更多物种占据[34]。此外，各林型的系统发育多样性没有显著差异，可能的原因是纯林保留了一些系统发育远缘的伴生种，如耐阴草本或灌木，其进化分支的贡献抵消了物种多样性方面的劣势，维持了系统发育多样性；而混交林中新增物种可能集中于某些进化支，如亲缘较近的物种，导致整体系统发育结构未显著改变。

通过分析可知，物种多样性（*D*）与功能多样性（RaoQ）呈显著正相关关系，这与李非凡等[15]，薛倩妮等[35]的研究结果一致，原因是物种多样性关注物种的数量和分布，功能多样性关注物种的功能特征，



LA. 叶面积; SLA. 比叶面积; SLW. 比叶重; LDMC. 叶干物质含量; LCC. 叶有机碳含量; LNC. 叶片氮含量; LPC. 叶片磷含量; SWC. 土壤含水量; SOC. 土壤有机碳; STN. 土壤全氮; ALT. 海拔。灰色表示相关性不显著; 红色表示显著正相关; 蓝色表示显著负相关($P < 0.05$)。

图 5　第四角分析

Fig. 5　Fourth-corner analysis

如果每个物种都有独特的功能，那么物种多样性的增加会导致功能多样性的提高，即正相关。因此，物种数的增加，使得功能性状的取值范围也相应扩大，最终物种占据的功能生态位也增加[15,36-37]。物种多样性(M)与系统发育多样性(PD)呈显著正相关，反映了罗山森林群落中物种丰富度与进化谱系丰富度的协同变化规律，这一结果与陈博等[38]对森林生态系统的研究结论一致，这是因为随着群落物种数量的增加，物种间生态位重叠加重，使种间竞争加剧，系统发育变异增加[21]，而系统发育多样性(MPD、PSE、PD)与功能多样性(RaoQ、FEve、FRic)无显著相关性，可能是因为功能性状在进化过程中表现出趋同进化，系统发育关系与功能特征解耦，且系统发育多样性是进化时间尺度上的分化，而功能多样性反映当前生态功能的空间分布，二者可能在不同时间维度上响应环境变化。

综上所述，宁夏罗山 5 种林型中，植物群落的多维多样性(物种多样性、系统发育多样性及功能性状多样性)之间存在一定关联。因此，在植物多样性保护工作中不仅需要关注物种数量，还应考量物种在系统发育进程中的关键作用[39–40]。从物种多样性、系统发育多样性与功能多样性多维度出发，更利于宁夏罗山国家级自然保护区生物多样性的保护。

4.2　罗山森林群落构建机制

本研究发现，青海云杉纯林和油松纯林植物群落的 NTI、NRI 指数和 traitSESMPD、traitSESMNTD 指数均小于 0，系统发育结构和功能性状结构呈现离散模式。这表明这些群落的物种亲缘关系较远，支持了竞争排斥在群落构建中的主导作用，即亲缘关系较远的物种因生态位分化而共存，从而减少资源竞争[41]。相比之下，山杨纯林植物群落 NTI、NRI 和 traitSESMPD、traitSESMNTD 均大于 0，系统发育结构和功能性状结构均聚集，表明其物种亲缘关系较近，说明环境过滤是主要的群落构建机制。在该群落中，相似生态位的近缘物种能够共存，可能是由于它们对特定环境条件，如光照、水分或土壤养分的共同适应[42]。而青海云杉油松混交林植物群落系统发育指数结果不一致，其中 NTI > 0，NRI < 0，功能性状结构指数 traitSESMPD 和 traitSESMNTD 均小于 0，这种不一致的原因在于，NRI 亲缘指数是基于群落整体水平的，反映的是整个系统发育树的发育模式，而 NTI 亲缘关系是基于系统进化树末端的最近的系统发育关系[17,27]。在局部尺度上，环境过滤驱动近缘物种(NTI > 0)聚集，而整体系统发育发散(NRI < 0)源于远缘物种通过生态位分化实现共存，这可能由趋同进化与弱系统发育信号(功能性状独立于进化历史)共同导致，该群落构建机制由竞争排斥与环境过滤共同作用。在油松山杨混交林中，植物群落系统发育结构指数 NTI 和 NRI 均小于 0，说明系统发育结构发散，但功能性状结构指数 traitSESMPD > 0，traitSESMNTD < 0，可能的原因是两树种在系统发育上距离较远，导致 NTI 和 NRI 为负，在功能性状上，比如叶片形态、生长速率等方面有较大的差异，使得 traitSESMPD 高，而某些其他性状如木材密度或耐荫性等可能相似，致使 traitSESMNTD 低。或者，混交林中的其他伴生植物可能在系统发育上分散，但在某些功能性状上趋同，该结果表明群落构建为竞争排斥和环境过滤共同主导。

森林群落的构建机制具有显著的类型依赖性，针叶纯林主要受环境过滤主导，阔叶纯林主要受竞争排斥主导，而混交林的构建过程可能更为复杂，涉及多种生态过程的交互作用。这一发现对理解森林生物多样性维持机制及生态系统管理具有重要意义。

4.3　功能性状的系统发育信号

分析物种演化历程与环境因素的相互关系时，检测植物功能性状的系统发育信号，对探究物种共存机制而言意义重大[43]。本研究在分析生物多样性特征时发现，系统发育多样性和功能多样性不具显著相关性，同时检测到 7 个功能性状的系统发育信号 K 值均小于 1，表明系统发育关系较近的物种间未呈现显著的性状趋同现象。功能性状结构与系统发育结构并不一致，这说明植物叶片功能属性的变异主要受环境异质性驱动，与物种进化历史关联较弱。这与李非凡等[15]在青藏高原东缘亚高山、苗乐乐[43]在甘南藏族自治州、车应弟等[44]在亚高寒草甸和王诗韵等[45]在艾比湖流域的研究结果一致。这种现象可能是由多种原因造成的，其一，研究区地理环

境的复杂性与植被类型的多样性，使得生境异质性水平明显提高，植物在长期适应过程中通过功能性状的趋同适应策略来实现对极端环境的生态响应。其二，从物种层面分析，系统发育的演化程度与功能性状的相似特征之间，不存在一致的对应关系[14]。其三，系统发育关系作为群落功能性状相似性的间接测度指标[46]，无法完整涵盖物种功能性状的全部信息，仅能反映部分进化历史信号。本研究中，虽然比叶面积和叶干物质含量的 K 值小于 1，但统计差异显著，说明系统发育关系对这两个性状的种间变异仍有部分解释力，类似的结论在对青藏高原东缘亚高山[15]和毛乌素沙地[28]的研究中均有出现，这是因为遗传调控机制在叶片功能性状的变异过程中起主导作用，环境筛选压力对比叶面积与叶干物质含量的影响相对较小，致使其展现出较弱的系统发育保守性。

5 结　　论

宁夏罗山 5 种林型中，青海云杉纯林的物种多样性和功能多样性显著低于混交林，而系统发育多样性在各林型间无显著差异。物种多样性分别与功能多样性和系统发育多样性正相关，但功能多样性与系统发育多样性之间呈现解耦关系，反映出功能趋同进化与生态–进化时间尺度差异共同影响群落组成。7 个功能性状均未检测到较强的系统发育信号，功能属性的变异主要受海拔、土壤 pH、有机碳及全氮等环境因子影响，与物种进化历史关联较弱。罗山森林群落构建主要由确定性过程控制，环境过滤和相似性限制为主要驱动作用，其中针叶纯林（青海云杉纯林、油松纯林）中竞争排斥起主导作用，阔叶纯林（山杨纯林）中环境过滤起主导作用，混交林（青海云杉油松混交林、油松山杨混交林）中竞争排斥与环境过滤协同作用。本研究丰富了干旱半干旱地区山地森林群落构建的理论框架，印证了生态位理论对物种共存的重要意义。

参 考 文 献

[1] 李奇, 朱建华, 肖文发. 生物多样性与生态系统服务：关系、权衡与管理 [J]. 生态学报, 2019, 39(8): 2655−2666.
Li Q, Zhu J H, Xiao W F. Relationships, trade-offs and management of biodiversity and ecosystem services[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(8): 2655−2666.

[2] 王楠. 宁南山区柠条人工林生物多样性和生态系统多功能性的关系研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
Wang N. Study on the relationship between biodiversity and ecosystem multifunctionality of *Caragana korshinskii* plantation in southern Ningxia[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021.

[3] 陈雯妍, 慈秀芹, 陈筠灵, 等. 云南樟科植物的多维多样性格局及其环境驱动因子 [J]. 生物多样性, 2025, 33(6): 5−23.
Chen W Y, Ci X Q, Chen J L, et al. Multidimensional diversity patterns and their environmental drivers of Lauraceae plants in Yunnan[J]. Biodiversity Science, 2025, 33(6): 5−23.

[4] Yoann B L, Santiago S, Nicolas G, et al. Phylogenetic, functional, and taxonomic richness have both positive and negative effects on ecosystem multifunctionality[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019, 116(17): 8419−8424.

[5] 程瑞明, 许格希, 贾磊, 等. 百花山油松人工林动态监测样地物种组成与群落结构 [J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(8): 101−110.
Cheng R M, Xu G X, Jia L, et al. Species composition and community structure for a dynamic monitoring plot of *Pinus tabuliformis* plantation in Baihua Mountain of Beijing[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(8): 101−110.

[6] 姚杰, 丁易, 周超凡, 等. 海南热带天然林木本植物多样性对地上生物量的影响及其尺度效应 [J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(12): 1−10.
Yao J, Ding Y, Zhou C F, et al. Effects of woody plant diversity on aboveground biomass and its scale dependencein tropical natural forest in Hainan Island of southern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(12): 1−10.

[7] Zhichao P, Poonim D, Jiaqi T, et al. Phylogenetic diversity stabilizes community biomass[J]. Journal of Plant Ecology, 2014, 7(2): 176−187.

[8] Pakeman J R. Functional trait metrics are sensitive to the completeness of the species' trait data?[J]. Methods in Ecology and Evolution, 2014, 5(1): 9−15.

[9] Wang G, Yang L, Wu X, et al. Density-dependent selection effect of dominant species rather than species diversity increased aboveground biomass accumulation in a temperate oak forest[J]. Forest Ecology and Management, 2025, 582: 122563.

[10] van Kasteren S, Rozen D E. Using click chemistry to study microbial ecology and evolution[J]. ISME Communications, 2023, 3(1): 9.

[11] 张峰. 不同放牧强度下短花针茅荒漠草原植物群落构建及生产力形成机制 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
Zhang F. Mechanisms of plant community assembly and productivity formation under different grazing intensities in the *Stipa breviflora* desert steppe[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023.

[12] 范春雨. 吉林蚊河针阔混交林群落构建机制及其对采伐干扰的响应 [D]. 北京: 北京林业大学, 2018.
Fan C Y. The community assembly and its response to harvest disturbance in coniferous and broad-leaved mixed forest in Jiaohe, Jilin Province[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2018.

[13] 柴永福, 岳明. 植物群落构建机制研究进展 [J]. 生态学报, 2016, 36(15): 4557−4572.
Chai Y F, Yue M. Research advances in plant community

assembly mechanisms[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(15): 4557−4572.

[14] 马紫荆, 刘彬, 王军强, 等. 基于系统发育及功能性状的不同坡向荒漠植物群落构建研究: 以博湖县沙化封禁保护区为例 [J]. 生态学报, 2023, 43(10): 3946−3957.
Ma Z J, Liu B, Wang J Q, et al. Construction of desert plant communities with different slope orientations based on phylogenetic and functional traits: example of desertification closure reserve in Bohu County[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(10): 3946−3957.

[15] 李非凡, 陈淼, 刘顺, 等. 青藏高原东缘亚高山森林群落的多维度生物多样性 [J]. 应用生态学报, 2024, 35(6): 1447−1454.
Li F F, Chen M, Liu S, et al. Multidimensional biodiversity of subalpine forest communities on the eastern edge of the Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(6): 1447−1454.

[16] 王寅, 王健铭, 曲梦君, 等. 干旱内陆河流域植物群落构建过程及其关键驱动因素 [J]. 生物多样性, 2022, 30(2): 5−20.
Wang Y, Wang J M, Qu M J, et al. Plant community assembly processes and key drivers in an arid inland river basin[J]. Biodiversity Science, 2022, 30(2): 5−20.

[17] 税伟, 冯洁, 李慧, 等. 喀斯特退化天坑不同坡向植物群落系统发育与功能性状结构 [J]. 生态学报, 2022, 42(19): 8050−8060.
Shui W, Feng J, Li H, et al. Phylogeny and functional traits structure of plant communities with different slope aspects in the degraded karst Tiankeng[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(19): 8050−8060.

[18] 王广平, 李成, 王书砚, 等. 宁夏罗山青海云杉林空间分布特征研究 [J]. 农业科学研究, 2023, 44(3): 10−15, 23.
Wang G P, Li C, Wang S Y, et al. Spatial distribution characteristics of *Picea crassifolia* in Luoshan Mountain, Ningxia[J]. Journal of Agricultural Sciences, 2023, 44(3): 10−15, 23.

[19] 郝珉辉, 代莹, 岳庆敏, 等. 阔叶红松林功能多样性与森林碳汇功能关系 [J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(10): 68−76.
Hao M H, Dai Y, Yue Q M, et al. Effects of species diversity and structural diversity on productivity in different succession stages of typical natural forest in Changbai Mountains of northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(10): 68−76.

[20] 李尚玉, 刘超, 徐雪蕾, 等. 宁夏罗山国家级自然保护区主要森林类型群落结构特征与植物物种多样性 [J]. 农业科学研究, 2023, 44(4): 81−86.
Li S Y, Liu C, Xu X L, et al. Study on community structure characteristics and species diversity of main forest types in Luoshan national nature reserve of Ningxia[J]. Journal of Agricultural Sciences, 2023, 44(4): 81−86.

[21] 李千飞, 沈艳, 马红彬, 等. 宁夏罗山山地草原植物群落数量分类与生物多样性特征 [J]. 应用生态学报, 2024, 35(10): 2697−2706.
Li Q F, Shen Y, Ma H B, et al. Quantitative classification and biodiversity characteristics of plant communities in Luoshan Mountain steppe, Ningxia, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(10): 2697−2706.

[22] 周清格, 李邵宇, 白梅, 等. 内蒙古两种草地类型土壤微生物量氮、磷分布特征及影响因素 [J]. 草地学报, 2024, 23(9): 2854−2861.
Zhou Q G, Li S Y, Bai M, et al. Distribution characteristics and influencing factors of soil microbial biomass nitrogen and phosphorus in two grassland types in Inner Mongolia[J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 23(9): 2854−2861.

[23] 何建龙, 蒋齐, 吴旭东, 等. 哈巴湖国家级自然保护区固沙林地土壤颗粒分形特征 [J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(1): 217−222.
He J L, Jiang Q, Wu X D, et al. Fractal characteristics of soil particles in sand-fixing forests of Habahu National Nature Reserve[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(1): 217−222.

[24] 邓逸飞, 王郅臻, 段文标, 等. 小兴安岭地区不同演替阶段林下植物多样性及其优势种生态位特征 [J]. 生态学报, 2025, 45(12): 6000−6011.
Deng Y F, Wang Z Z, Duan W B, et al. Understory plant diversity and niche characteristics of dominant species at different succession stages in Xiaoxing'an Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(12): 6000−6011.

[25] 高贤明, 马克平, 陈灵芝. 暖温带若干落叶阔叶林群落物种多样性及其与群落动态的关系 [J]. 植物生态学报, 2001, 47(3): 283−290.
Gao X M, Ma K P, Chen L Z. Species diversity of some deciduous broad-leaved forests in the warm-temperaty zone and its relations to community stability[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2001, 47(3): 283−290.

[26] Bremer B, Bremer K, Chase M W, et al. An update of the angiosperm phylogeny group classification for the orders and families of flowering plants: APG III[J]. Botanical Journal of the Linnean Society, 2009, 161(2): 105−121.

[27] Webb C O, Ackerly D D, McPeek M A, et al. Phylogenies and community ecology[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 2002, 33：475−505.

[28] 姜晓燕, 高圣杰, 蒋燕, 等. 毛乌素沙地植被不同恢复阶段植物群落物种多样性、功能多样性和系统发育多样性 [J]. 生物多样性, 2022, 30(5): 18−28.
Jiang X Y, Gao S J, Jiang Y, et al. Species diversity, functional diversity, and phylogenetic diversity in plant communities at different phases of vegetation restoration in the Mu Us Sandy Grassland[J]. Biodiversity Science, 2022, 30(5): 18−28.

[29] 陈亚丫. 增温和降水变化对高寒草甸植物物候、群落生产力和稳定性的影响 [D]. 兰州: 兰州大学, 2023.
Chen Y Y. Effects of warming and precipitation change on alpine meadow plant phenology, community productivity and stability[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2023.

[30] 程毅康, 张辉, 王旭, 等. 功能多样性和谱系多样性对热带云雾林群落构建的影响 [J]. 植物生态学报, 2019, 43(3): 217−226.
Cheng Y K, Zhang H, Wang X, et al. Effects of functional

diversity and phylogenetic diversity on the tropical cloud forest community assembly[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2019, 43(3): 217−226.

[31] 金慧, 赵莹, 赵伟, 等. 长白山牛皮杜鹃群落物种多样性的海拔梯度变化及相似性. 生态学报, 2015, 35(1): 125−133.
Jin H, Zhao Y, Zhao W, et al. Elevational changes in species diversity and similarity analysis of a *Rhododendron chrysanthum* community on Changbai Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(1): 125−133.

[32] 胡玉昆, 李凯辉, 阿德力·麦地, 等. 天山南坡高寒草地海拔梯度上的植物多样性变化格局 [J]. 生态学杂志, 2007, 26(2): 182−186.
Hu Y K, Li K H, Adeli Maidi, et al. The variation pattern of plant diversity on the altitude gradient of the alpine grassland on the southern slope of the Tianshan Mountains[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(2): 182−186.

[33] 杨涛. 横断山区高山带不同生境植物群落系统发育多样性格局 [D]. 昆明: 西南林业大学, 2019.
Yang T. phylogenetic diversity patterns of plant communities in different habitats in alpine zone of Hengduan Mountains: a case study of Baima Snow Mountain[D]. Kunming: Southwest Forestry University, 2019.

[34] 牛亚平, 高晓霞, 姚世庭, 等. 退化高寒草地植物多样性和功能群组成与地上生产力的关系 [J]. 植物生态学报, 2025, 49(1): 83−92.
Niu Y P, Gao X X, Yao S T, et al. Linkages of plant diversity and functional groups to aboveground productivity upon alpine grassland degradation[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2025, 49(1): 83−92.

[35] 薛倩妮, 闫明, 毕润成. 山西五鹿山森林群落木本植物功能多样性 [J]. 生态学报, 2015, 35(21): 7023−7032.
Xue Q N, Yan M, Bi R C. Functional diversity research of tree and shrub layers in forest communities of the Wulu Mountains Nature Reserve in Shanxi, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(21): 7023−7032.

[36] 季飞龙, 李雪华, 李晓兰, 等. 退化草地物种种内和种间功能性状变异对放牧的响应 [J]. 应用生态学报, 2022, 33(9): 2371−2378.
Ji F L, Li X H, Li X L, et al. Responses of intraspecific and interspecific variations of plant functional traits to grazing in degraded grassland[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(9): 2371−2378.

[37] 刘旻霞, 南笑宁, 张国娟, 等. 高寒草甸不同坡向植物群落物种多样性与功能多样性的关系 [J]. 生态学报, 2021, 41(13): 5398−5407.
Liu M X, Nan X N, Zhang G J, et al. Relationship between species diversity and functional diversity of plant communities on different slopes in alpine meadow[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(13): 5398−5407.

[38] 陈博, 江蓝, 谢子扬, 等. 格氏栲天然林林窗植物物种多样性与系统发育多样性 [J]. 生物多样性, 2021, 29(4): 439−448.
Chen B, Jiang L, Xie Z Y, et al. Taxonomic and phylogenetic diversity of plants in a *Castanopsis kawakamii* natural forest[J]. Biodiversity Science, 2021, 29(4): 439−448.

[39] 陈瑶, 李云红, 田松岩, 等. 东北红豆杉林植物群落谱系结构特征 [J]. 森林与环境学报, 2022, 42(5): 498−505.
Chen Y, Li Y H, Tian S Y, et al. Phylogenetic structure and species diversity of a *Taxus cuspidata* community[J]. Journal of Forest and Environment, 2022, 42(5): 498−505.

[40] 彭丹晓, 鲁丽敏, 陈之端. 区域生命之树及其在植物区系研究中的应用 [J]. 生物多样性, 2017, 25(2): 156−162.
Peng D X, Lu L M, Chen Z D. Regional tree of life and its application in floristic studies[J]. Biodiversity Science, 2017, 25(2): 156−162.

[41] Whitfeld T J S, Kress W J, Erickson D L, et al. Change in community phylogenetic structure during tropical forest succession: evidence from New Guinea[J]. Ecography, 2012, 35(9): 821−830.

[42] 车盈, 金光泽. 物种多样性和系统发育多样性对阔叶红松林生产力的影响 [J]. 应用生态学报, 2019, 30(7): 2241−2248.
Che Y, Jin G Z. Effects of species diversity and phylogenetic diversity on productivity of a mixed broadleaved-Korean pine forest[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(7): 2241−2248.

[43] 苗乐乐, 刘旻霞, 肖音迪, 等. 不同纬度植物群落系统发育与功能性状结构研究 [J]. 生态学报, 2024, 44(1): 317−329.
Miao L L, Liu M X, Xiao Y D, et al. Studies on phylogeny and functional traits structure of plant communities at different latitudes[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(1): 317−329.

[44] 车应弟, 刘旻霞, 李俐蓉, 等. 基于功能性状及系统发育的亚高寒草甸群落构建 [J]. 植物生态学报, 2017, 41(11): 1157−1167.
Che Y D, Liu M X, Li L R, et al. Exploring the community assembly of subalpine meadow communities based on functional traits and community phylogeny[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2017, 41(11): 1157−1167.

[45] 王诗韵, 吕光辉, 蒋腊梅, 等. 不同尺度下艾比湖典型植物群落功能多样性和系统发育多样性研究 [J]. 生态环境学报, 2020, 29(5): 889−900.
Wang S Y, Lü G H, Jiang L M, et al. Multi-scale analysis on functional diversity and phylogenetic diversity of typical plant community in Ebinur Lake[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(5): 889−900.

[46] 程毅康. 热带云雾林植物功能多样性和谱系多样性对群落构建的影响 [D]. 海口: 海南大学, 2019.
Cheng Y K. Effects of plant functional diversity and phylogenetic diversity on community assembly in tropical cloud forests[D]. Haikou: Hainan University, 2019.

（责任编辑 孟 瑶
责任编委 臧润国）