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

金沙江干热河谷植物α多样性和群落谱系结构对环境因子的响应

魏总 杨朝磊 张秋雨 和峰 田瑜峰 郭佳晖 王列宁 黄勇

Responses of plant α-diversity and community lineage structure in the dry-hot valley of the Jinsha River to environmental factors

Wei Zong, Yang Chaolei, Zhang Qiuyu, He Feng, Tian Yufeng, Guo Jiahui, Wang Liening, Huang Yong

引用本文:
魏总, 杨朝磊, 张秋雨, 和峰, 田瑜峰, 郭佳晖, 王列宁, 黄勇. 金沙江干热河谷植物α多样性和群落谱系结构对环境因子的响应[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(5):135–145. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250113
Wei Zong, Yang Chaolei, Zhang Qiuyu, He Feng, Tian Yufeng, Guo Jiahui, Wang Liening, Huang Yong. Responses of plant α-diversity and community lineage structure in the dry-hot valley of the Jinsha River to environmental factors[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(5):135–145. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250113

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250113

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

金沙江干热河谷冲沟系统优先流影响下的土壤可蚀性

Soil erodibility under the influence of preferential flow in the gully system of the Jinsha River Dry Hot Valley

北京林业大学学报, 2023, 45(4): 101–113. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220135

大兴安岭双河保护区植物多样性和群落结构特征分析

Characteristics of plant diversity and community structure in Shuanghe Nature Reserve in Daxing’anling area of northeastern China

北京林业大学学报, 2021, 43(7): 79–87. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200029

晋西黄土区典型人工林与天然林林下植被物种多样性差异及其影响因素

Differences and influencing factors of understory vegetation species diversity between typical plantations and natural forests in the loess area of western Shanxi Province, northern China

北京林业大学学报, 2025, 47(4): 103–116. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240228

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

长白山典型天然林不同演替阶段物种多样性和结构多样性对生产力影响

Effects of species diversity and structural diversity on productivity in different succession stages of typical natural forest in Changbai Mountains of northeastern China

北京林业大学学报, 2021, 43(12): 1–8. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210071

青海省东北部森林林下物种多样性的驱动因素

Driving factors of understory species diversity in forest on the northeastern Qinghai Province of northwestern China

北京林业大学学报, 2024, 46(6): 28–37. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220334

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250113

金沙江干热河谷植物 α 多样性和群落谱系结构对环境因子的响应

魏 总[1,2] 杨朝磊[1,2] 张秋雨[1,2] 和 峰[1] 田瑜峰[1,2]
郭佳晖[2] 王列宁[1] 黄 勇[1]

（1. 金沙江高山峡谷区水土资源演化与固碳增汇效应云南省野外科学观测研究站，自然生态系统碳汇工程技术创新中心，中国地质调查局昆明自然资源综合调查中心，云南 昆明 650100；2. 自然资源要素耦合过程与效应重点实验室，北京 100055）

摘要:【目的】探究干热河谷植物物种 α 多样性和谱系结构的海拔梯度格局，定量识别与分析驱动植被垂直分布的关键环境因子，以期为中国干热河谷区的植被研究理论创新与生态环境保护恢复提供重要参考。**【方法】**在金沙江永仁段干热河谷典型地区石坎子大箐流域沿着 1 200 ~ 1 800 m 设置 7 条垂直海拔梯度样带，通过典型样地的植物群落、生境调查，结合云南永仁自然资源要素综合观测研究站气象等长期定位观测数据，从物种组成、群落 α 多样性和谱系结构 3 个维度来揭示干热河谷区植物多样性的海拔分布格局，并通过相关性分析和冗余分析进一步探究植物多样性和谱系结构对气候、地形、土壤等因子的响应机制。**【结果】**(1)样地植物物种共有 34 种，分属于 23 科 33 属，禾本科和豆科在研究区植物分布中占有重要地位，且在各海拔梯度的分布中均扮演重要角色。(2)群落总盖度、灌木层盖度和 海拔呈正相关关系，草本层盖度则呈相反趋势。这表明低海拔以耐旱草本为主，海拔升高改善了生境，灌木占比提升。(3)物种丰富度指数、Shannon-Wiener 物种多样性指数、Simpson 生态优势度指数和 Pielou 群落均匀度指数随着海拔梯度的增加均呈现先增加后减小的趋势，整体呈“中峰模式”，各指数均在 1 500 ~ 1 700 m 处出现峰值，中海拔生境最优，物种多样性最高。(4)净种间亲缘关系指数 NRI 在海拔 1 200 ~ 1 700 m 范围内均为正值，1 800 m 处为负值，表明随着海拔的升高群落谱系结构呈先聚集后发散的趋势，影响主导因素由生境过滤变成种间的竞争排斥作用。(5)气温年较差作为主导因子，对 α 物种多样性和谱系结构的解释度为 21.3%；另外，土壤 pH、土壤厚度也是影响 α 物种多样性和谱系结构的重要因子。**【结论】**干热河谷区植被整体稀少，木本植物中的豆科物种在各海拔段均广泛分布，可作为干热河谷植被恢复的先锋树种。谱系结构在低海拔的干热河谷区聚集，表明干热河谷植被群落的构建受生境过滤的控制，建议积极关注气温年较差、土壤 pH 和土壤厚度等关键因子变化，以服务于金沙江干热河谷区植被恢复。

关键词：金沙江干热河谷；物种多样性；谱系结构；生境因子；冗余分析；植被恢复
中图分类号：S718.5 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2026)05−0135−11
引文格式：魏总，杨朝磊，张秋雨，等. 金沙江干热河谷植物 α 多样性和群落谱系结构对环境因子的响应 [J]. 北京林业大学学报，2026，48(5)：135−145. Wei Zong, Yang Chaolei, Zhang Qiuyu, et al. Responses of plant α-diversity and community lineage structure in the dry-hot valley of the Jinsha River to environmental factors[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(5): 135−145.

Responses of plant α-diversity and community lineage structure in the dry-hot valley of the Jinsha River to environmental factors

Wei Zong[1,2] Yang Chaolei[1,2] Zhang Qiuyu[1,2] He Feng[1] Tian Yufeng[1,2] Guo Jiahui[2]
Wang Liening[1] Huang Yong[1]

收稿日期：2025−04−02 **修回日期：**2025−05−06
基金项目：中国地质调查局项目（DD20220888、DD20251144、DD20242312）。
第一作者：魏总，工程师。主要研究方向：自然资源要素综合观测。Email：578055158@qq.com 地址：650100 云南省昆明市西山区春雨路 1566 号。
责任作者：杨朝磊，工程师。主要研究方向：自然资源要素综合观测。Email：yangchaolei@email.cugb.edu.cn 地址：同上。
本刊网址：https://j.bjfu.edu.cn；https://journal.bjfu.edu.cn

(1. Kunming General Survey of Natural Resources Center, China Geological Survey/Yunnan Provincial Observation and Research Station for Soil and Water Resources and Carbon Sequestration in the Alpine Gorge Area of Jinsha River, Natural Ecosystem Carbon Sink engineering Technology Innovation Center, Kunming 650100, Yunnan, China;
2. Key Laboratory of Natural Resource Coupling Process and Effects, Beijing 100055, China)

Abstract: [**Objective**] To explore the spatial pattern changes of plant species α-diversity and lineage structure in dry-hot river valleys at altitude gradients, quantitatively identify and analyze the key environmental factors driving the vertical distribution of vegetation, with the aim of providing important references for theoretical innovation in vegetation research and ecological environment protection and restoration in dry-hot river valleys in China. [**Method**] Seven vertical altitude gradient sample zones were set up along 1 200 to 1 800 meters in the typical dry-hot river valley area of Shikanzi Daqing in the Yongren section of the Jinsha River. Through the investigation of plant communities and habitats in the typical sample plots, combined with long-term positioning observation data such as meteorology from the Yongren Comprehensive Observation and Research Station of Natural Resources Elements in Yunnan Province, this study investigated the altitudinal distribution patterns of plant diversity in the dry-hot valley from three perspectives: species composition, community α-diversity, and phylogenetic structure. Furthermore, correlation analysis and redundancy analysis were employed to explore the response mechanisms of plant diversity and phylogenetic structure to climatic, topographic, and soil factors. [**Result**] (1) There were a total of 34 plant species in the sample plot, belonging to 23 families and 33 genera. The Poaceae and leguminous families occupied an important position in the plant distribution of the study area and were significant across all altitude gradients. (2) The total community coverage, shrub layer coverage and altitude were positively correlated, while the herb layer coverage showed the opposite trend. This indicated that drought-tolerant herbs were dominant at low altitudes, while at higher altitudes, the habitat improved and the proportion of shrubs increased. (3) The species richness index, Shannon-Wiener species diversity index, Simpson ecological dominance index and Pielou community evenness index all showed a trend of increasing first and then decreasing with the increase of the altitude gradient. Overall, they presented a "mid-peak model", with peaks appearing at 1 500−1 700 m for each index. The mid-altitude habitat was the best and had the highest diversity. (4) The net relatedness index (NRI) was positive in the altitude range of 1 200−1 700 m and negative at 1 800 m, indicating that the community phylogenetic structure showed a trend of aggregation and divergence with the increase of altitude. Accordingly, the dominant driving force shifts from habitat filtering to interspecific competitive exclusion. (5) The annual temperature range was the dominant factor, explaining 21.3% of the species α-diversity and phylogenetic structure. In addition, soil pH and soil thickness were also important factors affecting species α-diversity and phylogenetic structure. [**Conclusion**] Vegetation in the dry-hot valley area is generally scarce. Among them, leguminous species of woody plants are widely distributed at all altitudes and can be used as pioneer tree species for the restoration of dry-hot valley vegetation. The phylogenetic structure is aggregated in the low-altitude dry-hot valley area, indicating that the construction of dry-hot valley vegetation communities is controlled by habitat filtering. It is suggested to pay close attention to the changes of key factors such as the annual temperature range, soil pH and soil thickness to serve the restoration of vegetation in the dry-hot valley area of the Jinsha River.

Key words: Jinsha River dry-hot valley; species diversity; phylogenetic structure; habitat factors; redundancy analysis; vegetation restoration

物种多样性和谱系结构特征对环境因子的响应一直是生物多样性空间分布格局研究的热点问题，相关研究成果可为区域生物多样性的保护和合理利用提供重要理论依据[1−2]。物种多样性通常包含 α 多样性、β 多样性和 γ 多样性，其中，α 多样性主要包括物种丰富度和均匀度，是反映群落结构的最直观指标。群落谱系结构是指根据不同物种亲缘关系的远近，在稳定群落中所表现出的组成方式[3]。影响生物 α 多样性和群落谱系结构的环境因子主要包含气候、地形、土壤和生物因子等，四者通过协同作用共

同调控植被分布格局。其中，气候因子通过光照强度、温度条件和降水格局等要素直接影响植被光合作用效率和水分利用特征；地形因子（海拔、坡度、坡向）通过改变太阳辐射接收量、局地小气候特征和物质迁移过程，间接调控热量分配、水分运移和养分再分布；土壤因子作为物质载体，其理化性质（pH 值、有机质含量、养分有效性）直接决定植物群落组成及演替进程[4]；生物因子如竞争、捕食、共生等种间相互作用，可直接影响群落的谱系结构。气候因子在区域尺度上影响植物群落结构和物种多样性格局变化[5]，而地形、土壤和生物因子通常被认为是小空间尺度上影响群落结构最重要的环境因素之一[6]。

干热河谷区温度和湿度等气候因子在垂直海拔梯度上的垂向变化比较剧烈，通常是纬度方向上的 1 000 倍[7]，这使得其物种多样性格局非常复杂。根据过往研究[8]，物种 α 多样性的海拔梯度格局通常表现为递减型、低高原型、中峰型及中峰低高原复合型 4 种典型分布模式，其中的中峰型分布展现出了较强的空间普适性。尽管随机过程可能在海拔梯度上的谱系结构产生一定影响[9]，但普遍认为生境过滤作用才是主导其形成的主要机制。在温度、水分等环境因子形成胁迫的特定海拔区间（如高寒地区），群落谱系结构常呈现聚集性格局；相比之下，在环境条件较为适宜的其他区域，谱系结构则倾向于呈现发散分布模式[10−11]。

中国干热河谷作为全球温带气候区内的非地带性热岛，是世界植被中萨王纳植被的干热河谷残存者，主要分布于我国西南横断山脉的金沙江、元江、澜沧江、怒江及其支流的高、中山峡谷内，其中，以金沙江干热河谷面积最大。独特的地理位置造就了干热河谷长期干旱高温少雨的气候特征，并在谷底（海拔约 1 100 m）形成具有热带性质的稀树灌草丛植被类型，其周围则被温带常绿阔叶林包围，表现出残余性和稀有性的特征，可为探究干旱高温环境下植被物种多样性动态及其生理生态响应机制提供天然实验室，对预测未来气候变化下的生态系统演变具有重要研究价值[12]。干热河谷植被具有较高保护价值，但区域内植被低矮稀疏、水土流失严重等一系列问题导致其生态系统十分脆弱敏感，且处于退化状态，如何实现干热河谷物种多样性的保护与生境的恢复，引起广泛的关注和研究[13]。目前，在环境因子对中国干热河谷植被多样性特征影响的研究中，高若允等[14]通过对云南东川蒋家沟流域干热河谷失稳性坡面上多样性特征与环境因子间关系的研究，发现坡向、土壤容重等显著影响了物种多样性指数。余娇娥等[15]发现云南元谋干热河谷植物物种多样性指数随着海拔的升高而增大。杜寿康等[16]发现海拔和坡向等立地环境会显著影响金沙江干热河谷各区段植物多样性。这些研究大多局限于海拔、坡向、坡度等地形因子，而关于水分−能量、土壤理化性质等主要因子与植被变化的关系研究鲜见报道。

在植被群落结构的成因方面，开展各类环境因子的定量分析，可全面深入地探究植被对环境因子的响应机制[17]。本文拟通过对金沙江永仁段典型干热河谷进行典型植物样方和生境调查，采集、计算和分析植物多样性相关数据，旨在从物种组成、群落 α 多样性和谱系结构 3 个维度来揭示干热河谷区植物多样性的海拔分布格局，并结合云南永仁自然资源要素综合观测研究站气象等长期定位观测数据，进一步探究植物多样性和谱系结构对气候、地形、土壤等因子的响应，该研究结果将为中国干热河谷区的植被研究理论创新与生态环境保护恢复提供重要参考。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

研究区位于云南楚雄彝族自治州永仁县东南部的金沙江高山峡谷区水土资源演化与固碳增汇效应云南省野外观测研究站（25°51′～26°07′N，101°33′30″～101°50′30″E），海拔 926～1 866 m，属南亚热带干热季风气候类型，具有典型干热河谷生态景观。年平均气温 22.93 ℃，日最高气温 43 ℃ 以上，≥10 ℃ 年积温 > 8 300 ℃。该地区干湿两季分明，雨季为 6—10 月，旱季为 11 月—次年 5 月，年平均降水量为 428.50 mm，其中 90% 以上的降水集中在雨季，年蒸发量较高，通常为年平均降水量的 3～6 倍[18]。土壤类型为紫色土，0～20 cm 土壤 pH 为 8.22，土壤密度为 1.31 g/cm^3，有机质含量为 1.92%。草本植物主要以黄茅（*Heteropogon contortus*）、拟金茅（*Eulaliopsis binate*）、橘草（*Cymbopogon goeringii*）、金茅（*Eulalia speciosa*）等为主，乔灌木植物包括余甘子（*Phyllanthus emblica*）、清香木（*Pistacia weinmannifolia*）、锥连栎（*Quercus franchetii*）、铁橡栎（*Quercus cocciferoides*）、车桑子（*Dodonaea viscosa*）、山合欢（*Albizia kalkora*）、华西小石积（*Osteomeles schwerinae*）、滇沙针（*Osyris wightiana*）、滇榄仁（*Terminalia franchetii*）等。

1.2　研究方法

1.2.1　植被调查

通过采用样方调查法获取植被多样性数据。2023 年 5—7 月，在研究区 1 200～1 800 m 的垂直海拔梯度内，每隔 100 m 设置 3 个 20 m × 20 m 的乔木样地，共设置 7 个环境梯度，在每个乔木样地内再

设置 3 个 2 m × 2 m 灌木样方和 3 个 1 m × 1 m 的草本样方(图 1)。乔木层记录所有胸径(DBH) > 1 cm 的物种及其胸径、株数、树高、枝下高、冠幅和盖度，灌木层和草本层记录所有种的株数、高度和盖度。胸径用围尺测量，枝下高、高度、冠幅和盖度利用花杆测量，盖度在 10 m × 10 m 样方内采用目测法估算。其中，总盖度为样方内所有植物垂直投影面积占样方面积的比例，灌木层盖度为样方内灌木植物垂直投影面积所占的比例，草本层盖度为样方内草本植物垂直投影面积所占的比例，总盖度≤分层盖度加和值。

1.2.2 环境因子调查

样地生境调查工作主要包含地形的测量提取和土壤样品的采集以及气候因子数据的获取。地形因子包含海拔高度、坡向、坡度、粗糙度、凹凸度、土壤厚度等。其中，海拔高度采用海星达实时动态测量仪器(RTK)测定，坡向和坡度利用手持罗盘仪测量(坡向为坡的朝向与正北的夹角)，凹凸度和粗糙度运用 ArcGIS 软件从永仁县 DEM 数据(来源为地理空间数据云平台 https://www.gscloud.cn/)中按样方网格提取，土壤厚度根据土壤剖面调查获得。在每个 20 m × 20 m 的样地内，选取 4 个角和中心点共 5 个采样点，采集表层(0 ~ 20 cm)土壤形成混合样，去除植物根系、石块、虫体等杂质，装入棉布样袋中，置于阴凉、通风、无污染处晾干，并在 4 ℃ 条件下保存，测定土壤密度和含水率，采用激光粒度仪法测定黏粒、粉粒、砂粒含量，确定土壤质地。土壤有机质采用重铬酸钾容量法，总氮采用凯氏蒸馏−容量法，全钾和全磷采用电感耦合等离子体原子发射光谱法测定。气候因子包括年均温、气温年较差、年平均相对湿度、湿度年较差，来源于金沙江观测站试验场不同海拔梯度的气象实时观测数据，主要提取办法为在 ArcGIS 中运用反距离权重法生成研究区的湿度、温度空间分布图，然后根据样地坐标提取样地的温度、湿度等数据。

1.2.3 群落 α 多样性表征指数

群落 α 多样性采用物种丰富度指数(S)、Shannon-Wiener 物种多样性指数(H)、Pielou 群落均匀度指数(J)、Simpson 生态优势度指数(D)来表征，具体计算公式如下。

$$S = N$$

$$H = -\sum_{i=1}^{S} p_i \log_2 p_i$$

$$J = 1 - \sum_{i=1}^{s} p_i^2$$

$$D = H / \ln S$$

式中：N 为群落中的物种数；p_i 为种 i 个体占全部个体的比例。

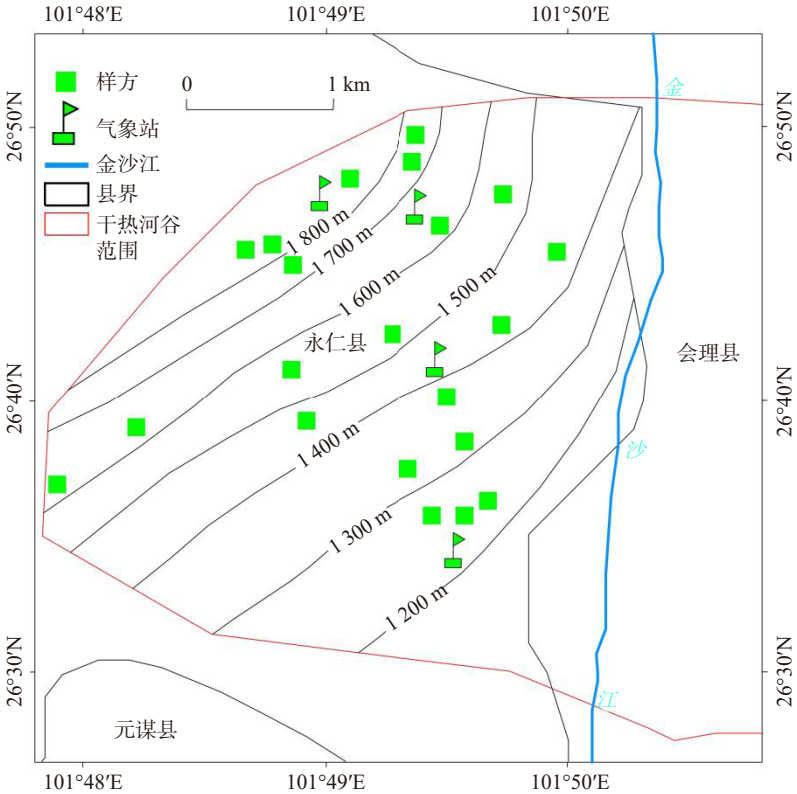


图 1 研究区位置及样方分布

Fig. 1 Location of the study area and distribution of plot

1.2.4　群落的谱系结构分析

本研究采用净种间亲缘关系指数（NRI）分析群落的谱系结构，即谱系多样性[19]。该指数反映的是物种间的平均谱系距离较零模型的离散程度，是群落谱系结构的平均状态。若 NRI > 0，则表明物种谱系结构聚集，生境过滤主导现有群落的谱系结构；NRI < 0，则表明物种谱系结构发散，种间的竞争排斥作用占据主导地位；NRI = 0，则谱系随机。该指数的计算基于 R 语言的 Picante 包“ses.mpd”函数，随机打乱谱系树上的物种位置，通过零模型计算物种间平均谱系距离后标准化，重复计算 999 次[20]。

1.2.5　冗余分析

通过冗余分析（redundancy analysis，RDA）探究环境因子对物种 α 多样性及谱系结构的综合驱动效应。RDA 是一种基于线性模型的典范排序方法，通过多元回归将物种数据（响应变量）对环境因子（解释变量）进行回归，再对回归值进行主成分分析（PCA），从而量化环境变量对物种多样性的解释程度。

首先，对物种与环境数据进行标准化处理，即利用 SPSS 26 相关性分析完成环境因子的独立性校验与空间自相关检验，剔除高度共线性的变量以消除模型干扰，保障因子独立性。最终选取物种丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数、Simpson 优势度指数及谱系多样性指数 NRI 作为响应变量（生物因子），并选取海拔、气温年较差、年均温、湿度因子、地形因子及土壤理化因子等 12 项环境因子作为解释变量。在冗余分析过程中，运用蒙特卡罗检验分析评价环境因子对物种多样性变化的显著影响程度。最终依据特征值、方差解释率及排序图进行结果解读：排序图中生物因子与环境因子的投影关系反映二者的相关性与贡献度，环境因子箭头之间的夹角表征其相关性，其中锐角为正相关，钝角为负相关，直角为无相关关系；环境因子箭头长度，对应该因子与排序轴的相关系数大小，长度越长，相关性越强，对群落格局的影响程度越大。

2　结果与分析

2.1　植物物种组成及其随海拔的变化

基于植物调查结果，金沙江干热河谷（永仁段）物种共有 34 种，分属于 23 科 33 属。其中禾本科（Poaceae）植物最多，共计 5 种，占所有植物种类的 14.71%；豆科（Leguminosae）植物种类次之，为 4 种，占所有植物种类的 11.76%；蔷薇科（Rosaceae）植物 3 种，占所有植物种类的 7.89%；壳斗科（Fagaceae）、木樨科（Oleaceae）、松科（Pinaceae）、茜草科（Rubiaceae）、莎草科（Cyperaceae）的植物种类都为 2 种；瑞香科（Thymelaeaceae）、使君子科（Combretaceae）、檀香科（Santalaceae）、叶下珠科（Phyllanthaceae）、爵床科（Acanthaceae）、漆树科（Anacardiaceae）、无患子科（Sapindaceae）、菊科（Asteraceae）、唇形科（Lamiaceae）、马桑科（Coriariaceae）、鼠李科（Rhamnaceae）、卫矛科（Celastraceae）、柿科（Ebenaceae）、报春花科（Primulaceae）、棕榈科（Arecaceae）的植物种类仅为 1 种。结果表明，禾本科和豆科植物在研究区植物分布中占有重要地位。

海拔梯度上植物群落的物种分布也存在差异。海拔 1 200 m 处，共发现植物 12 科 15 属 15 种，木樨科、禾本科和蔷薇科分别为 2 种（16.67%）；海拔 1 300 m 处，共发现植物 11 科 16 属 16 种，禾本科、蔷薇科和豆科的数量最多，分别为 3 种（27.27%）、2 种（18.18%）、2 种（18.18%）；海拔 1 400 m 处，共发现植物 12 科 14 属 14 种，禾本科、豆科的数量最多，都为 2 种（16.67%）；海拔 1 500 m 处，共发现植物 15 科 19 属 21 种，禾本科数量最多，为 4 种（26.67%）；海拔 1 600m 处，共发现植物 13 科 17 属 18 种，豆科数量最多，为 3 种（23.08%）；海拔 1 700 m 处，共发现植物 14 科 18 属 19 种，禾本科数量最多，为 3 种（21.43%）；1 800 m 处，共发现植物 16 科 18 属 18 种，禾本科数量最多，为 3 种（18.75%）。禾本科和豆科分别作为草本和木本的优势科植物，在各海拔的分布上均扮演重要角色。

2.2　植被盖度随海拔的变化

在植被盖度方面，研究区群落总盖度、木本植物盖度和海拔总体呈正相关关系，草本层盖度则相反（图 2）。随着海拔的升高，总盖度总体呈上升趋势，并在海拔 1 500 m 位置达到峰值（0.90），表明该地段植被最为茂密。木本植物盖度则随着海拔的上升而线性增大，在海拔 1 200 m 处为最小值（0.032），在海拔 1 800 m 处达到最大值（0.33）。草本层盖度总体随海拔的上升而逐渐变小，在海拔 1 200 m 处最大（0.84），海拔 1 700 m 处最小（0.76），在海拔 1 500 m 和 1 800 m 处则出现阶段性异常增大。这表明海拔通过调控木本与草本生长格局，深刻影响研究区植被盖度分布及群落垂直结构分化。

2.3　物种多样性的海拔分布格局

2.3.1　群落 α 多样性的变化趋势

图 3 显示：物种丰富度指数随海拔的升高整体呈增加趋势，在海拔 1 200 ~ 1 400 m 处，物种丰富度指数相对较为稳定（14 ~ 16），在中海拔（1 500 m）处达到最大值（21）；Pielou 均匀度指数无明显变化趋

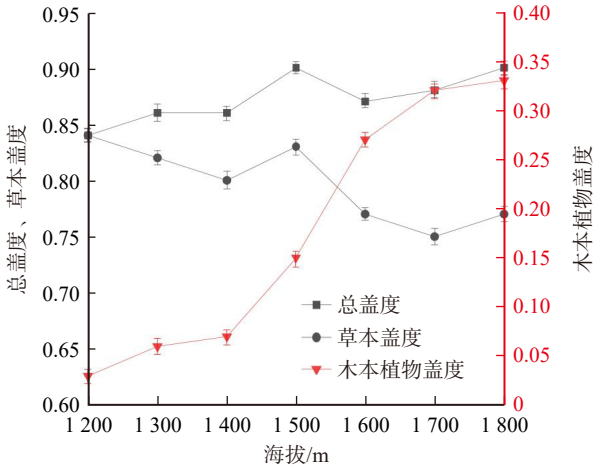


图 2 植被盖度随海拔变化趋势

Fig. 2 Variation trend of vegetation coverage with altitude

势，整体先增大再减小，在 1 700 m 处最大，在 1 800 m 处最小；Shannon-Wienner 多样性指数、Simpson 优势度指数则与海拔无明显线性关系，且二者变化趋势大致相似，在 1 500 ~ 1 700 m 处显著升高，在 1 700 ~ 1 800 m 处显著降低。最小且均在海拔 1 700 m 处达到峰值。物种丰富度、Shannon-Wienner 多样性指数、Simpson 优势度指数、Pielou 均匀度指数在不同海拔梯度上总体上均呈“中峰模式”，在中海拔段(1 500 ~ 1 700 m)最大，这表明中海拔区域最适宜植物生长，物种多样性最高。

2.3.2 群落谱系结构随海拔的变化

不同海拔净种间亲缘关系指数(NRI)结果(图 4)显示：1 200 ~ 1 700 m 范围内样方的净种间亲缘关系指数都大于 0，占比 87.5%，表明这些样方所在的群落物种谱系结构是聚集的；该海拔范围内整体上呈现三峰模式，3 个峰值对应的海拔分别是 1 300、1 500 和 1 700 m，其中海拔 1 500 m 处的 NRI 指数最大，表明该海拔梯度下，生境过滤对植物群落的影响更为显著；1 800 m 处样方的净种间亲缘关系指数小于 0，占比 12.5%，表明其所在的群落物种谱系结构是发散的，该区域物种间的竞争排斥作用激烈，种间关系对群落的影响更为重要。

2.4 影响物种多样性的生境解释

根据生境调查数据，样方内各类环境因子的调查结果如表 1 所示。将物种 α 多样性、谱系结构和环境因子(海拔、坡度、粗糙度、年均温、气温年较差、年平均相对湿度、湿度年较差、土壤含水率、土壤厚度、土壤 pH、土壤黏粒、土壤总氮)进行 RDA 分析。结果(图 5)显示，第一 RDA 轴和第二 RDA 轴的特征值分别为 73.36% 和 26.12%，物种丰富度指数与土壤厚度、土壤含水率、海拔、年平均相对湿度、粗糙度正相关，与坡度、土壤黏粒、土壤 pH、湿度年较差、气温年较差、土壤总氮负相关；Shannon-Wiener 物种多样性指数和 Simpson 生态优势度指数与土壤黏粒、坡度、粗糙度、土壤含水率、土壤厚度、海拔、年平均相对湿度正相关，与土壤总氮、气温年较差、湿度年较差、土壤 pH 负相关；Pielon 群落均匀度指数与土壤含水率、粗糙度、坡度、土壤黏粒、土壤 pH、湿度年较差、气温年较差、土壤总氮正相关，与土壤厚度、海拔、年平均相对湿度负相关；NRI 指数与土壤含水率、粗糙度、坡度、土壤黏粒、土壤 pH、年平均相对湿度、气温年较差、土壤总氮正相关，与土壤厚度、海拔、年平均相对湿度负相关。总体来看，气温年较差、土壤厚度、海拔、年平均相对湿度、土壤总氮、湿度年较差及酸碱度是物种丰富度、多样性优势度、均匀度与谱系结构的关键影响因子。这表明不同多样性与谱系结构指数受环境因子的调控方向与强度存在明显分异，各指标对水热、土壤、地形因子的响应方向差异显著，共同反映出干热河谷植被群落受多重环境因子协同约束的特征。

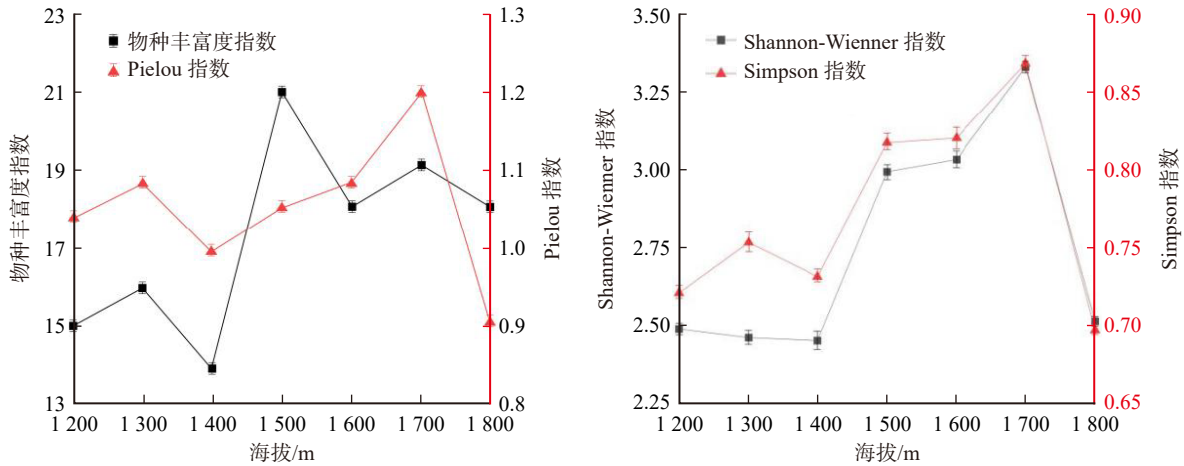


图 3 不同海拔梯度植被 α 多样性指数变化

Fig. 3 Changes of α-diversity indices of vegetation at different altitude gradients

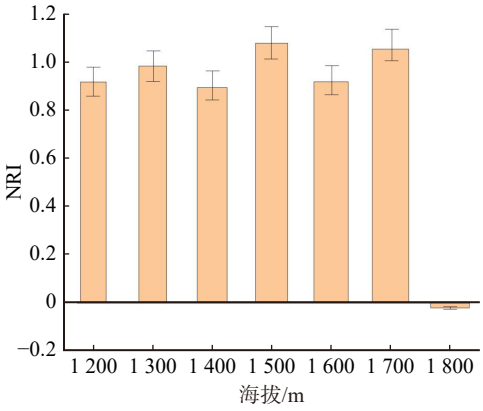


图 4　研究区净种间亲缘关系指数(NRI)垂向分布图

Fig. 4　NRI vertical variation map in study area

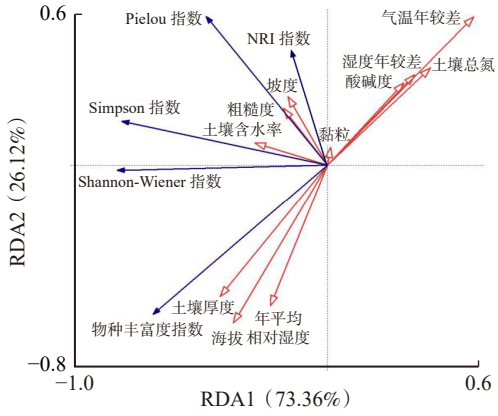


图 5　物种多样性与环境因子 RDA 分析

Fig. 5　RDA analysis of species diversity and environmental factors

表 1　研究区环境因子变量

Tab. 1　Environmental variables of the study area

	环境因子	最大值	最小值	平均值
地形因子	海拔/m	1 800	1 200	1 500
	坡度/m	28.39	2.48	15.05
	粗糙度	1.137	1.001	1.05
气候因子	年均温/℃	14.15	11.91	12.92
	气温年较差/℃	14.00	10.96	12.30
	年平均相对湿度/%	60.01	50.61	53.78
	湿度年较差/%	48.81	42.20	45.84
土壤因子	土壤含水率/%	3.18	2.18	2.68
	土壤厚度/cm	86.00	36.00	56.22
	土壤pH	8.34	5.24	7.20
	黏粒/%	22.97	9.67	16.78
	土壤总氮	1 328	408	854.83

表 2　各环境因子对 α 多样性分布和谱系结构组成的贡献

Tab. 2　Contribution of various environmental factors to α-diversity distribution and phylogenetic structure composition

指标	解释率/%	贡献率/%	*F*	*P*
气温年较差	21.3	30.5	5.2	0.006
土壤含水率	4.4	6.2	0.9	0.496
坡度	5.8	8.3	1.4	0.226
土壤厚度	9.9	14.1	2.7	0.222
海拔	2.3	3.3	0.6	0.522
土壤pH	14.1	20.2	4.7	0.034
湿度年较差	5.2	7.4	1.8	0.176
土壤总氮	4.1	5.8	1.5	0.066
粗糙度	1.7	2.4	0.6	0.538
土壤黏粒	1.1	1.5	0.4	0.654
年平均相对湿度	0.2	0.3	< 0.1	0.964

进一步量化发现，各环境因子对 α 物种多样性分布和谱系结构的总解释率为 69.9%，解释 力大小依次为气温年较差、土壤 pH、土壤厚度、坡度、湿度年较差、土壤含水率、土壤总氮、海拔(表 2)。其中，气温年较差(21.3%)、土壤 pH(14.1%)和土壤厚度(9.9%)共同解释了 45.3%，表明三者共同驱动了物种多样性 α 多样性分布和谱系结构的组成。气温年较差和土壤 pH 的影响分别达到极显著水平(P = 0.006)和显著(P = 0.034)水平。这表明气温年较差、土壤酸碱条件与土壤厚度是调控干热河谷植被群落构建与多样性格局的核心要素，三者的协同作用主导了区域植被垂直分布与群落谱系演化过程。

3　讨　　论

3.1　干热河谷 α 物种多样性的海拔分布格局

明晰 α 物种多样性的海拔梯度格局，是评估生态系统健康状况、表征环境胁迫与环境变化的核心基础。在全球山地生态系统的海拔梯度格局研究中，“先上升后下降”的“中峰模式”是物种多样性沿海拔分布最普遍的经典格局，因此该假说对物种丰富度的垂向分布具有较强的解释力[21−22]。中峰模式的核心优势在于揭示了几何(边界)限制与中性随机过程对物种分布和多样性格局的塑造作用，但其局限性也十分明显：该假说仅从几何边界与随机过程出发，忽略了气候、土壤、地形等非生物环境因子以及种间相互作用等生物过程的调控效应，因此在实际应用中，必须结合研究区的环境特征与物种的实际分布机制，对多样性格局的驱动因子进行针对性分析，才能更全面地阐释山地物种多样性的垂直分异规律。本研究中物种丰富度指数整体上随着海拔的上升呈先增加后减少的“中峰模式”，在 1 500 m 处达到最高值。同时，Shannon-Wiener 物种多样性指数随着海拔的上升也呈现“中峰模式”，表明在温度和湿度比较适宜的中海拔地段，能够生存的植物物

种最多。上述结果一定程度上证明了中域效应，但是需要指出的是，研究区位于干热河谷区，气候的垂直变化导致物种在温湿适宜的中海拔地段表现出明显的聚集效应。因此，在未来的研究中，可进一步通过回归模型等方法，量化中域效应与气候因子对物种多样性的具体影响程度。

3.2 干热河谷谱系结构对海拔的响应

群落构建过程是解析物种共存机制、阐释物种多样性格局形成原因的核心理论框架，其研究成果能够为区域环境保护政策制定、生态系统管理与修复实践提供关键的科学依据与理论支撑。其中，群落谱系结构的构建有助于推演群落构建的主要生态过程，即谱系距离越小，物种的亲缘关系越近，生态特征可能越近似，适应的环境越类似，即生态位趋于相同[23]。在解释群落现有谱系结构的理论中，影响比较大的是中性理论和生态位理论。中性理论主要反映的是物种形成、出生、死亡、迁移和有限扩散等随机过程在群落构建中的作用；而生态位理论则强调在区域研究尺度上探究确定性过程（物种生态位分化）和随机过程（生态漂变）在植物群落构建过程的贡献，并揭示 pH、温度、水分、物种相互作用等确定性因素的主导作用[24]。通过计算分析植物群落谱系结构指数，可以很好地表征研究区域内的物种间亲缘关系的远近，进而判断确定性过程和随机过程在植物群落构建和生物多样性维持过程中的相对贡献。对不同海拔梯度上的 21 个样方的谱系结构进行分析，发现植物群落 NRI 指数都为非零值，表现出一定的谱系结构，与中性理论中的物种随机分布假说相违背，表明群落的构建主要受生态位机制的影响。具体而言，在海拔 1 200 ~ 1 700 m，群落谱系结构是聚集的（NRI 为正值），表明生境过滤主导现有群落的谱系结构。这是由于海拔 1 200 ~ 1 700 m 地段多位于干热河谷内，环境条件恶劣，且生境异质性较高，全年气温较高（1 200 m 处的年平均温度为 22.69 ℃），土层较薄，粉砂含量较低导致持水性差，强烈的环境胁迫迫使具有相似生物学特性的近缘种聚集。而海拔 1 800 m 处群落的谱系结构则表现为发散，这主要是因为海拔 1 800 m 为最高地段，属于分水岭，年平均相对湿度相对较高，地势较为平坦，土层较厚，土壤黏粒含量高，持水性较好，环境胁迫压力相对较小，适宜的生境使其可以容纳更多的物种生长和生存，种间的竞争排斥作用占据主导地位。随着海拔的上升，干热河谷植物谱系结构发生转变，表现出环境压力逐渐减弱而竞争排斥作用逐渐增强的趋势，这使得种间亲缘关系由聚集趋于发散。该研究结果和黄建雄等[25]在古田山大样地，孟庆欣[26]在太行山的研究结论一致，即群落谱系呈现低海拔聚集、高海拔发散的分布格局，生物谱系结构主要受生态位的控制。但也和一些研究[27−30]结果相悖，这主要是因为不同研究区的生境异质性导致的。在其他研究区，低海拔地段水热条件相对良好，亲缘相近的物种在较高的生态位重叠度下相互间竞争排斥作用较强，使得谱系趋于发散；而高海拔地段生境较为恶劣，低温成为植物生存的限制因子，仅少数耐寒物种能生存下来，使得谱系趋于集中。

3.3 干热河谷物种多样性对环境因子的响应

本研究发现生境过滤主导了金沙江干热河谷 1 200 ~ 1 700 m 植被的谱系结构，因而可以进一步分析土壤、气候、地形等因子对于植物群落的影响。冗余分析结果显示，气温年较差对植物 α 多样性和谱系结构的解释度最高，且达到极显著水平（21.3%，$P < 0.01$），表明气温年较差主导了干热河谷区植物群落的构建。这一结果和李富利等[31]在高黎贡山北段，徐翔等[32]在西双版纳得出的研究结果相似，三者均发现温度对物种多样性的解释度最高。气候作为能量假说的基础，对物种多样性的空间分布格局有着重要影响[33]。前人[34−35]多采用年均温来解释物种多样性格局，但是在极端高温环境中，气温年较差更能精确反映生态幅的变化，对于植被群落结构的影响也较为显著。海拔梯度上水热因子的垂直变化速度大约是纬度梯度带上的 1 000 倍，宽广的水热梯度使得海拔梯度上物种多样性的变化格局常被视作大尺度纬向格局的缩影[36−37]。干热河谷地区全年气温较高，气温年较差范围较大（10.96 ~ 14.00 ℃）。低海拔地区（1 200 ~ 1 400 m）气温年较差最大（14 ℃），平均气温（22.63 ℃）较周围的非河谷地带高 4 ℃，极端高温环境导致能生存的物种较少；而随着海拔的升高，气温年较差变小，生态位较窄的物种得以进入并生存下来，物种的多样性增加；到中海拔（1 500 m）地段时，气温年较差达到最小（10.96 ℃），物种丰富度指数也达最大值；而后随着海拔的进一步上升，气温年较差又逐渐增大，丰富度指数减小。

土壤 pH 对 α 多样性和谱系结构的解释度为 14.1%（$P < 0.05$），在土壤因子中该因素对物种多样性影响最大。这和李婷婷[38]、Xu 等[39]研究结论相似。究其原因，极端的 pH 环境会强化土壤中重金属毒性，并降低养分元素的有效性[40]。例如在强酸环境下，铝和锰元素活性大幅加强，并毒害植物根系的发育；无机磷易与铁、铝的氢氧化物及其离子结合并沉淀，导致磷素的有效性降低，从而限制了植物的生存发育[41−42]。土壤厚度对研究区植物 α 多样性和谱系结构的解释度排第 3（9.9%），表明其对金沙江干热河

谷物种多样性的分布格局有不可忽视的作用，这与桂伟峰等[43]在绿汁江下段天然灌草丛群落研究结论相似，即土层厚度能较好地解释本地群落的分布格局。土壤厚度也决定了植物的可利用土壤空间，当土层较薄时，根系较浅的草本植物相对容易生长，而木本植物较难生长扎根；随着土壤厚度的增加，物种地下生长空间逐渐变大，具有不同深度根系的物种得以共存。在研究区的高海拔位置，坡度较小，土壤厚度较大，木本植物明显增多，物种丰富度、多样性指数、优势度指数总体增大。同时，土壤厚度决定了植物所需的水分和养分总量，并直接影响物种多样性，这在生境恶劣的喀斯特岩溶地区[44]被广泛证明。干热河谷位于高、中山峡谷内，坡度较陡，有大面积的冲沟，易引发干热河谷大规模的水土流失，并导致区内土层普遍较薄，且持水性差，这在一定程度上限制了干热河谷植被的生长发育[45]。

本研究量化分析了气温年较差、土壤 pH 与土壤厚度对干热河谷植被 α 多样性及谱系结构的影响，并探讨了其潜在的驱动机制，发现气温年较差、土壤 pH 与土壤厚度是驱动干热河谷植被 α 多样性及谱系结构的三大关键环境因子。随着海拔升高，群落谱系结构由低海拔的生境过滤主导（NRI > 0，谱系聚集）转变为高海拔的竞争排斥主导（NRI < 0，谱系发散），表明环境胁迫的减弱与种间竞争的增强共同塑造了植被的垂直分布格局。这些发现深化了对干热河谷极端生境下群落构建机制的理解，明确了气温年较差作为能量限制因子的核心作用，以及土壤 pH 和土壤厚度在调控养分有效性及根系生长空间中的功能。研究结果可为生物多样性保护、群落演替方向预测以及应对气候变化影响提供理论基础。例如，豆科植物在各海拔段的广泛分布表明其可作为先锋物种用于植被恢复；而在谱系聚集区域应优先关注生境过滤效应，采取改善土壤厚度和土壤 pH 的修复措施。然而，本研究受限于金沙江干热河谷永仁段的小流域尺度，所得结论的普适性有待进一步检验。未来可将研究拓展至整个金沙江干热河谷流域，并与元江、怒江等干热河谷开展跨区域对比研究，通过设置涵盖更大环境梯度的样带，验证当前发现的群落构建机制（如环境过滤或竞争排斥的相对重要性）在不同地理尺度下的稳健性与变异规律。

4　结　　论

本研究以金沙江干热河谷典型样地为研究对象，通过开展植物群落与生境调查，并结合云南永仁自然资源要素综合观测研究站气象等长期定位观测数据，系统分析了植物 α 多样性、群落谱系结构的海拔分布格局及其驱动机制，明确了关键生境因子与群落构建过程的耦合关系，为干热河谷生物多样性维持机制与生态修复提供了科学依据。研究得到以下结论。

（1）干热河谷区植被群落在长期高温、干旱环境的胁迫下，物种较少，木本植物中豆科物种在干热河谷各海拔段均有分布，表现出极强的干热环境适应性，可作为金沙江干热河谷植被恢复的优先先锋树种。

（2）群落总盖度、灌木层盖度随海拔升高显著上升，草本层盖度则呈相反趋势；物种丰富度、Shannon-Wiener 多样性、Simpson 优势度与 Pielou 均匀度指数均随海拔升高先增后减，呈“中峰模式”，在 1 500 ~ 1 700 m 达到峰值，揭示了中海拔水热组合最适宜物种共存。

（3）净种间亲缘关系指数（NRI）在 1 200 ~ 1 700 m 为正值，群落谱系聚集，以生境过滤为核心影响因素；1 800 m 处 NRI 为负值，群落谱系发散，环境胁迫缓解，种间竞争排斥占主导。这整体反映出随海拔上升，环境胁迫减弱、生物互作增强的生态过程转换规律。该格局区别于常规山地“低海拔发散、高海拔聚集”规律，体现出干热河谷极端生境下独特的生物多样性维持机制。

（4）环境因子对 α 多样性与谱系结构的总解释率较高，气温年较差、土壤 pH、土壤厚度为三大核心驱动因子，共同决定了干热河谷植被垂直分布与群落组建过程。建议后续重点监测气温年较差、土壤 pH 及土壤厚度等关键因子的动态变化，从而为金沙江干热河谷区的植被恢复提供科学依据。

参　考　文　献

[1] 唐志尧, 方精云. 植物物种多样性的垂直分布格局 [J]. 生物多样性, 2004, 12(1): 20−28.
Tang Z Y, Fang J Y. A review on the elevational patterns of plant species diversity [J]. Biodiversity Science, 2004, 12(1): 20−28.

[2] 薛成, 李波卡, 雷天宇, 等. 生物多样性起源与进化研究进展 [J]. 生物多样性, 2022, 30(10): 38−51.
Xue C, Li B K, Lei T Y, et al. Advances on the origin and evolution of biodiversity [J]. Biodiversity Science, 2022, 30(10): 38−51.

[3] Vamosi S M, Heard S B, Vamosi J C, et al. Emerg ing patterns in the comparative analysis of phylogenetic community structure [J]. Molecular Ecology, 2009, 18: 572−592.

[4] Swanson F J, Kratz T K, Caine N, et al. Landform effects on ecosystem patterns and processes [J]. BioScience, 1988, 38: 92−98.

[5] 张树斌, 王襄平, 吴鹏, 等. 吉林灌木群落物种多样性与气候和局域环境因子的关系 [J]. 生态学报, 2018, 38 (22): 7990-8000.
Zhang S B, Wang X P, Wu P, et al Relationship between shrub

species diversity and climate and local environmental factors across Jilin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(22): 7990–8000.

[6] Karlen D L, Ditzler C A, Andrews S S. Soil quality: why and how? [J]. Geoderma, 2003, 114: 145−156.

[7] Walter H, Breckle S W. Walter's vegetation of the earth [J]. Journal of the American Society of Nephrology, 1966, 16(7): 1966−1976.

[8] 郑智, 龚大洁, 张乾, 等. 白水江自然保护区植物物种多样性的垂直格局: 面积、气候、边界限制的解释 [J]. 应用生态学报, 2014, 25: 3390−3398.
Zheng Z, Gong D J, Zhang Q, et al. Vertical patterns of plant species diversity in the Baishuijiang Nature Reserve: explanation of area, climate and boundary constraint [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25: 3390−3398.

[9] Kembel S W, Hubbell S P. The phylogenetic structure of a neotropical forest tree community [J]. Ecology, 2006, 87: 86−99.

[10] Li X H, Zhu X X, Niu Y, et al. Phylogenetic clustering and overdispersion for alpine plants along elevational gradient in the Hengduan Mountains Region, southwest China [J]. Journal of Systematics and Evolution, 2014, 52: 280−288.

[11] Kluge J, Kessler M. Phylogenetic diversity, trait diver sity and niches: species assembly of ferns along a tropical elevational gradient [J]. Journal of Biogeography, 2011, 38: 394−405.

[12] 杨济达, 张志明, 沈泽昊, 等. 云南干热河谷植被与环境研究进展 [J]. 生物多样性, 2016, 24(4): 462−474.
Yang J D, Zhang Z M, Shen Z H, et al. Review of research on the vegetation and environment of dry-hot valleys in Yunnan [J]. Biodiversity Science, 2016, 24(4): 462−474.

[13] 柴宗新, 范建容. 金沙江干热河谷植被恢复的思考 [J]. 山地学报, 2001, 19: 381−384.
Chai Z X, Fan J R. Study on the restoration of vegetationin arid-hot valleys along the Jinshajiang River [J]. Mountain Research, 2001, 19: 381−384.

[14] 高若允, 杨柳生, 田雪, 等. 干热河谷阴、阳坡失稳性坡面植被与环境因子关系的冗余分析 [J]. 山地学报, 2022, 40(6): 835−846.
Gao R Y, Yang L S, Tian X, et al. Redundancy analysis of the relationship between plant and environmental factors on shady and sunny unstable slope in dry-hot valley [J]. Mountain Research, 2022, 40(6): 835−846.

[15] 余娇娥, 司宏敏, 吴雪涛, 等. 海拔梯度下元谋干热河谷植物群落特征 [J]. 生态环境学报, 2018, 27(11): 2017−2022.
Yu J E, Si H M, Wu X T, et al. Characteristics of plant communities in Yuanmou dry-hot valley under different elevation gradients [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(11): 2017−2022.

[16] 杜寿康, 唐国勇, 刘云根, 等. 不同立地环境下金沙江干热河谷各区段植物多样性 [J]. 浙江农林大学学报, 2022, 39(4): 742−749.
Du S K, Tang G Y, Liu Y G, et al. Plant diversity in various sections of Jinsha River dry-hot valley under different site environments [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2022, 39(4): 742−749.

[17] 何永彬, 卢培泽, 朱彤. 横断山–云南高原干热河谷形成原因研究 [J]. 资源科学, 2000, 22: 69−72.
He Y B, Lu P Z, Zhu T. Causes for the formation of dry-hot valleys in Hengduan Mountain-Yunnan Plateau [J]. Resources Science, 2000, 22: 69−72.

[18] Haston E, Richardson J E, Stevens P F, et al. The linear angiosperm phylogeny group (LAPG) III: a linear sequence of the families in APG III [J]. Botanical Journal of the Linnean Society, 2009, 161: 128−131.

[19] Webb C O. Exploring the phylogenetic structure of ecological communities: an example for rain forest trees [J]. The American Naturalist, 2000, 156: 145−155.

[20] Webb C O, Ackerly D D, Kembel S W. Phylocom: software for the analysis of phylogenetic community structure and trait evolution [J]. Bioinformatics, 2008, 24: 2098−2100.

[21] 许强, 毕润成. 霍山植物物种多样性沿海拔梯度格局及环境解释 [D]. 太原: 山西师范大学, 2015.
Xu Q H, Bi R C. Patterns and environmental interpretation of species diversityalong elevation gradients on Huo mountain, in ShanXi [D]. Taiyuan: Shanxi Normal University, 2015.

[22] 王襄平, 方精云, 唐志尧. 中域效应假说: 模型、证据和局限性 [J]. 生物多样性, 2009, 17(6): 568−578.
Wang X P, Fang J Y, Tang Z Y. The mid-domain effect hypothesis: models, evidence and limitations [J]. Biodiversity Science, 2009, 17(6): 568−578.

[23] Swenson N G, Enquist B J, Thompson J, et al. The influence of spatial and size scale on phylogenetic relatedness in tropical forest communities [J]. Ecology, 2007, 88(7): 1770−1780.

[24] 牛克昌, 刘怿宁, 沈泽昊, 等. 群落构建的中性理论和生态位理论 [J]. 生物多样性, 2009, 17(6): 579−593.
Niu K C, Liu Y N, Shen Z H, et al. Community assembly: the relative importance of neutral theory and niche theory [J]. Biodiversity Science, 2009, 17(6): 579−593.

[25] 黄建雄, 郑凤英, 米湘成. 不同尺度上环境因子对常绿阔叶林群落的谱系结构的影响 [J]. 植物生态学报, 2010, 34(3): 309−315.
Huang J X, Zheng F Y, Mi X C. Influence of environmental factors on phylogenetic structure at multiple spatial scales in an evergreen broad-leaved forest of China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(3): 309−315.

[26] 孟庆欣. 太行山植物群落多样性分布格局及其对环境因子的响应 [D]. 太原: 山西大学, 2020.
Meng Q X. Distribution patterns and its response to environmental factors of plant communities in Taihang Mountains[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2020.

[27] Qian H, Hao Z, Zhang J. Phylogenetic structure and phylogenetic diversity of angiosperm assemblages in forests along an elevational gradient in Changbaishan, China [J]. Journal of Plant Ecology, 2014, 7: 154−165.

[28] 卢孟孟, 黄小翠, 慈秀芹, 等. 沿海拔梯度变化的哀牢山亚热带森林群落系统发育结构 [J]. 生物多样性, 2014, 22(4): 438−449.
Lu M M, Huang X C, Ci X Q, et al. Phylogenetic community structure of subtropical forests along elevational gradients in

Ailao Mountains of Southwest China [J]. Biodiversity Science, 2014, 22(4): 438−449.

[29] 姜小蕾. 决定崂山风景区植物群落组成结构异质性的环境因子分析 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2021.
Jiang X L. Analysis of the environmental factors determining the heterogeneity of plant communities in Laoshan Scenic Zone [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry Sciences, 2021.

[30] 赵鸣飞, 薛峰, 王宇航, 等. 山西芦芽山针叶林草本层群落谱系结构与多样性的海拔格局 [J]. 植物生态学报, 2017, 41(7): 707−715.
Zhao M F, Xue F, Wang Y H, et al. Phylogenetic structure and diversity of herbaceous communities in the conifer forests along an elevational gradient in Luya Mountain, Shanxi, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2017, 41(7): 707−715.

[31] 李富利. 云南北部山地植物物种多样性海拔格局特征及成因分析 [D]. 昆明: 云南大学, 2022.
Li F L. Plant species diversity partterns and its causes along altitudinal gradients in the mountains of northern Yunnan[D]. Kunming: Yunnan University, 2022.

[32] 徐翔, 张化永, 谢婷, 等. 西双版纳种子植物物种多样性的垂直格局及机制 [J]. 生物多样性, 2018, 26(7): 678−689.
Xu X, Zhang H Y, Xie T, et al. Elevational pattern of seed plant diversity in Xishuangbanna and its mechanisms [J]. Biodiversity Science, 2018, 26(7): 678−689.

[33] 王志恒, 唐志尧, 方精云. 物种多样性地理格局的能量假说. 生物多样性, 2009, 17: 613–624.
Wang Z H, Tang Z Y, Fang J Y. The species-energy hypothesis as a mechanism for species richness patterns [J]. Biodiversity Science, 2009, 17: 613–624.

[34] O'Brien E M. Climatic gradients in woody plant species richness: towards an explanation based on an analysis of southern Africa's woody flora [J]. Journal of Biogeography, 1993, 20: 181−198.

[35] Currie D J. Energy and large-scale patterns of animal-and plant-species richness [J]. The American Naturalist, 1991, 137: 27−49.

[36] Stevens G C. The elevational gradient in altitudinal range: an extension of Rapoport's latitudinal rule to altitude [J]. The American Naturalist, 1992, 140(6): 893−911.

[37] Stevens G C. The elevational gradient in altitudinal range: an extension of Rapoport's latitudinal rule to altitude [J]. The American Naturalist, 1992, 140: 893−911.

[38] 李婷婷, 唐永彬, 周润惠, 等. 云顶山不同人工林林下植物多样性及其与土壤理化性质的关系 [J]. 生态学报, 2021, 41(3): 1168−1177.
Li T T, Tang Y B, Zhou R H, et al. Understory plant diversity and its relationship with soil physicochemical properties in different plantations in Yunding Mountain [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(3): 1168−1177.

[39] Xu W M, Liu L, He T H, et al. Soil properties drive a negativecorrelation between species diversity and genetic diversity in a tropical seasonal rainforest [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 20652.

[40] Tyler G. Some ecophysiological and historical approaches to species richness and calcicole/calcifuge behaviou: contribution to a debate [J]. Folia Geobotanica, 2003, 38(4): 419−428.

[41] 赵天龙, 解光宁, 张晓霞, 等. 酸性土壤上植物应对铝胁迫的过程与机制 [J]. 应用生态学报, 2013, 24(10): 3003−3011.
Zhao T L, Xie G N, Zhang X X, et al. Process and mechanism of plants in overcoming acid soil aluminum stress [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(10): 3003−3011.

[42] 冯广. 鄂西南天然林群落木本植被多样性研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
Feng G. Study on the diversity of woody plants of natural forest communities in Southwest Hubei[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.

[43] 桂伟峰, 温庆忠. 绿汁江下段天然灌草丛群落分布格局及环境关系分析 [J]. 浙江农林大学学报, 2022, 39(1): 60−67.
Gui W F, Wen Q Z. Analysis on the distribution pattern and the environmental relationship of natural shrub-grassland communities in the lower section of Lüzhi River [J]. Journal of Zhejiang A& F University, 2022, 39(1): 60−67.

[44] 钟萍, 王光军, 刘绍华, 等. 桂北典型岩溶区植物 alpha 和 beta 多样性特征及影响因素 [J]. 生态学报, 2024, 44(7): 3016−3026.
Zhong P, Wang G J, Liu S H, et al. Characteristics and effects of plant alpha and beta diversity in typical karst area of northern Guangxi [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(7): 3016−3026.

[45] 杨丹, 熊东红, 张宝军, 等. 沟床草被对干热河谷冲沟产沙特性影响的野外模拟试验 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(15): 124−132.
Yang D, Xiong D H, Zhang B J, et al. Field experiment on impacts of grass belt length on characteristics of sediment yields and transport rates for gullies in Jinsha dry-hot valley region [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(15): 124−132.

（责任编辑　赵田芸
责任编委　臧润国）