DOI: 10.20103/j.stxb.202504220962

张殷波,韩怡璇,孟庆欣,秦浩,张晓龙.太行山森林群落物种、谱系和功能多样性的空间格局分析.生态学报,2026,46(2):973-982.

Zhang Y B, Han Y X, Meng Q X, Qin H, Zhang X L.Spatial patterns analysis of taxonomic, phylogenetic and functional diversity for forest communities in Taihang Mountain.Acta Ecologica Sinica,2026,46(2):973-982.

太行山森林群落物种、谱系和功能多样性的空间格局分析

张殷波[1,*],韩怡璇[1],孟庆欣[2],秦 浩[3],张晓龙[1]

1 山西财经大学资源环境学院,太原 030012

2 山西大学环境与资源学院,太原 030012

3 山西财经大学统计学院,太原 030012

摘要:太行山是我国东部重要的山脉,也是中国 35 个生物多样性优先保护区域之一。基于广义太行山范围内的 309 个森林群落样地数据,采用物种、谱系和功能多样性的 9 个指数分析了多样性空间格局及其影响因素。结果表明:太行山森林群落海拔空间格局较为明显,即物种丰富度(*R*)、谱系多样性(*PD*)和功能丰富度(FRic)指数整体上随着海拔升高均呈上升趋势,但纬度空间格局表现不明显。进一步分析各指数之间的相关性得到 *R*、*PD* 和 FRic 三个不同维度的指数均呈极显著正相关,表明群落既存在谱系进化的保守性,又通过增加功能性状特征来提高对资源的利用。影响群落三个维度多样性的关键因子主要是海拔(ALT)和年平均温度(BIO1),此外坡位(SLOP)和最湿月降水量(BIO13)也是主要的影响因子。研究对揭示太行山森林群落组成-结构-功能的构建机制具有理论意义,同时可为群落结构的优化配置和调控提供科学依据。

关键词:森林群落;谱系多样性;功能多样性;地理分布格局;太行山

Spatial patterns analysis of taxonomic, phylogenetic and functional diversity for forest communities in Taihang Mountain

ZHANG Yinbo[1,*], HAN Yixuan[1], MENG Qingxin[2], QIN Hao[3], ZHANG Xiaolong[1]

1 *College of Resources and Environment, Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan* 030012, *China*

2 *School of Environmental & Resource Sciences, Shanxi University, Taiyuan* 030012, *China*

3 *School of Statistics, Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan* 030012, *China*

Abstract: The Taihang Mountain represented an important mountain range in eastern China and one of the country's 35 priority biodiversity conservation areas. This study analyzed spatial patterns of forest community diversity across the Taihang Mountain using 309 forest plots and nine indices encompassing species, phylogenetic and functional diversity. The results showed that the altitude patterns of forest communities in Taihang Mountain showed significant diversity. Species richness index (*R*), phylogenetic diversity (*PD*), and functional richness (FRic) increased significantly with elevation, whereas latitudinal trends remained indistinct. Further correlation analysis revealed highly significant positive relationships among the three multidimensional indices (*R*, *PD*, and FRic), indicating that communities exhibited both phylogenetic conservatism and enhanced resource utilization through functional trait diversification. The key factors influencing the three-dimensional diversity of the community were primarily altitude (ALT) and mean annual temperature (BIO1), with slope position (SLOP) and precipitation of the wettest month (BIO13) emerging as additional significant drivers. This study provided

基金项目:国家自然科学基金项目(32171658);山西财经大学"山财学者"支持计划;山西省留学人员科技活动择优资助项目(20200021)

收稿日期:2025-04-22; **网络出版日期**:2025-10-15

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhangyinbo@ sxu.edu.cn

theoretical insights into the assembly mechanisms governing composition-structure-function relationships in Taihang Mountain forest communities, while offering a scientific basis for optimizing and regulating community configurations.

Key Words: forest communities; phylogenetic diversity; functional diversity; geographical distribution pattern; Taihang Mountain

揭示森林群落多样性空间格局及其构建机制是群落生态学和生物地理学的经典议题之一[1]。大量相关研究以物种为基本单元,采用 Shannon-Weiner、Simpson 等物种多样性指数来探讨山地森林群落随海拔梯度变化的多样性空间格局[2—3]。研究结果显示物种多样性受到水分、光照、温度、热量等水热条件的影响,随海拔升高通常呈现单峰或者递减的空间格局[4—5]。物种多样性的空间格局是在历史演变过程中物种通过生态位分化形成的环境适应性综合特征[6—7]。而传统研究通常将所有物种视为独立进化的生态等价物,这种基于物种层面的多样性未能考虑物种进化的功能属性特征以及物种之间的亲缘关系,从而使得物种谱系与功能性状的重要信息被忽略[8—9]。

随着现代分子生物学和生物信息学的快速发展,反映物种亲缘关系的谱系信息逐渐受到了重视[10]。Webb 等突破传统的群落生态学理论框架,构建了基于群落谱系多样性的量化体系[6]。谱系多样性将生物多样性从静态的"数量统计"提升到动态的"进化-功能"整合层面,以进化与生态的视角为物种多样性研究提供谱系信息,并解释环境因子和生物因子对群落物种的影响[11]。研究结果普遍发现[12—13]:如果谱系结构呈发散型模式,可表明竞争排斥作用和生态位进化理论在植物群落内占据主导地位;如果谱系结构呈聚集型模式,可表明生境过滤作用和生态位保守性在植物群落内占据主导地位;而随机的谱系结构可能是竞争排斥和生境过滤两种生态过程共同作用的综合结果。

除谱系结构外,功能性状作为生物与环境之间的桥梁,可进一步反映物种对环境变化的响应以及适应策略[14]。功能多样性可以看作是群落内全部物种所表现出来的所有性状的类型、大小及分布现状[15—16]。相关研究已证实功能多样性可以在一定程度上预测群落的稳定性[17—19],即群落的功能多样性越高,物种通过性状分化占据更多的生态位,使得群落拥有更强的抗干扰和恢复能力保障物种稳定共存[20]。因此,将谱系结构和功能性状结合起来进行研究,可以更好地揭示群落构建的成因[8]。这一理论观点受到了我国生态学家的高度重视,已经在南亚热带常绿阔叶林[21]、关帝山温带森林[22]、哀牢山亚热带森林[23]、霸王岭热带云雾林[24]等森林群落类型内开展了相关实践研究。

太行山作为我国东部地区重要的山脉之一,它既是华北平原和黄土高原的分界线,也是中国 35 个生物多样性优先保护区域之一[25]。广义的太行山横跨我国第二、三级阶梯,植物区系成分复杂多样,以热带分布和温带分布占优势,是研究群落物种多样性对不同环境梯度响应的理想场所。过去有关太行山的研究主要在局部范围内进行[26],且以传统的群落组成和物种多样性分析为主,并未考虑群落的谱系结构和功能性状[27]。本研究从区域尺度上基于物种、谱系和功能三个多样性维度来探究太行山森林群落的空间格局及其与环境的关系,具体回答以下几个问题:①群落的物种、谱系和功能多样性沿海拔、纬度梯度分别是如何变化的?②不同维度多样性的空间格局是否一致?③影响多样性空间格局的关键环境因子有哪些?

1 材料与方法

1.1 研究区概况

广义太行山涵盖了山西、河北、河南和北京三省一市,经纬度为 34°34′—40°47′N,110°14′—116°35′E。区域内地势北高南低,呈北北东-南南西方向延伸,从北向南包括的山脉有北京西山、百花山;河北小五台山(主峰,2882 m);山西恒山、五台山(最高峰,3061 m)、系舟山、太岳山、太行山、中条山;河南王屋山、云台山等。该区年均温 9—11 ℃,年降水量 500—520 mm,主要植被类型为油松(*Pinus tabuliformis*)群落、华北落叶松

(*Larix principis-rupprechtii*)群落、辽东栎(*Quercus liaotungensis*)群落等[25]。

1.2　森林样地调查

依据我国植物群落清查技术规范[28],2012—2019 年期间在研究区范围内共设立了 309 个野外森林样地,样地设置遵循系统布点、全面调查与重点精查相结合的原则。样地大小设置为 20 m×30 m,在样地的对角线两端位置设立 2 个 10 m×10 m 的样格,以及在样地的四角和中心位置设立 5 个 1 m×1 m 的小样格。调查并记录内容包括:样地的地理经纬度和海拔、坡度、坡向和坡位等地形数据;样地内所有乔木(胸径≥3 cm)的种名、胸径、高度和多度等数据;样格内所有灌木的种名、基径、高度和多度等数据,并将胸径<3 cm 的乔木计入灌木调查;小样格内所有草本的种名、盖度、多度和平均高度等数据。309 个样地的布设分布点参考张殷波等的图 1[27],其中每间隔 500 m 的海拔梯度分别布置 57、146、84、22 个样地;每间隔 1°的纬度梯度分别布置 7、71、73、51、65、38、4 个样地。

1.3　物种多样性指数

选取物种丰富度 Patrick 指数(*R*)、物种多样性 Simpson 指数(*D*)和物种均匀度 Pielou 指数(*J*)3 个指数来评价群落物种多样性[29]。

1.4　谱系多样性指数

首先按照被子植物分类系统 IV(APGIV)对样地内所有物种的科属种信息进行校正[30],然后基于 Zanne 2014 利用 Phylomatic 平台(https://phylodiversity.net/phylomatic/)构建群落谱系树。

选取 Faith′s 谱系多样性指数(*PD*)、平均谱系距离(MPD)和净亲缘关系指数(NRI)[6]3 个指数来评价群落谱系多样性。其中,*PD* 指数为群落内物种进化分支长度占全部物种进化分枝长度之和的比例;MPD 指数为群落内所有物种对间的平均谱系距离。NRI 指数是将 MPD 与零模型结果进行比较,反映了谱系结构。当 NRI>0 时表征群落中物种亲缘关系比随机预期更紧密,谱系结构为聚集型;当 NRI<0 时表征群落中物种亲缘关系比随机预期更远,谱系结构为发散型;当 NRI 趋于 0 时表征群落内物种组成是随机的。

1.5　功能多样性指数

1.5.1　功能性状选取

参考相关文献[31]选取形态性状、物候性状和生理性状 3 个功能类型的 10 个功能性状,见图 1。用于反映植物在环境适应、资源竞争和生长发育方面的功能性状特征。

1.5.2　功能多样性指数

选取功能丰富度指数(FRic)、功能均匀度指数(FEve)和功能离散度指数(FDiv)3 个指数来评价群落功能多样性[32]。其中,FRic 指数表征群落内物种占据的生态位大小;FEve 指数表征物种功能性状分布的均匀程度;FDiv 指数表征物种功能性状分布的离散程度。

1.6　数据统计与分析

首先提取研究区域内的 19 个生物气候因子数据(www.worldclim.org),空间分辨率选择 30″。通过 Spearman 秩相关分析筛选相关系数<0.75 的因子进行数据分析,分别是年平均温度(BIO1)、平均温度日较差(BIO2)、等温性(BIO3)、温度季节性(BIO4)、年均降水量(BIO12)、最湿月降水量(BIO13)、最干月降水量(BIO14)共 7 个。进而采用 R 语言的 vegan、picante 和 FD 软件包分别计算物种多样性、谱系多样性和功能多样性指数。最后以海拔和纬度作为解释变量,以 9 个多样性指数作为响应变量,采用多元回归法分析不同维度多样性指数随海拔和纬度梯度变化的空间格局,分析不同多样性指数之间以及多样性指数与环境因子之间的相关性。

2　结果与分的

2.1　太行山森林群落不同维度多样性的海拔空间格局

基于 9 个多样性指数分析海拔空间格局得出,太行山森林群落在物种多样性、谱系多样性和功能多样性

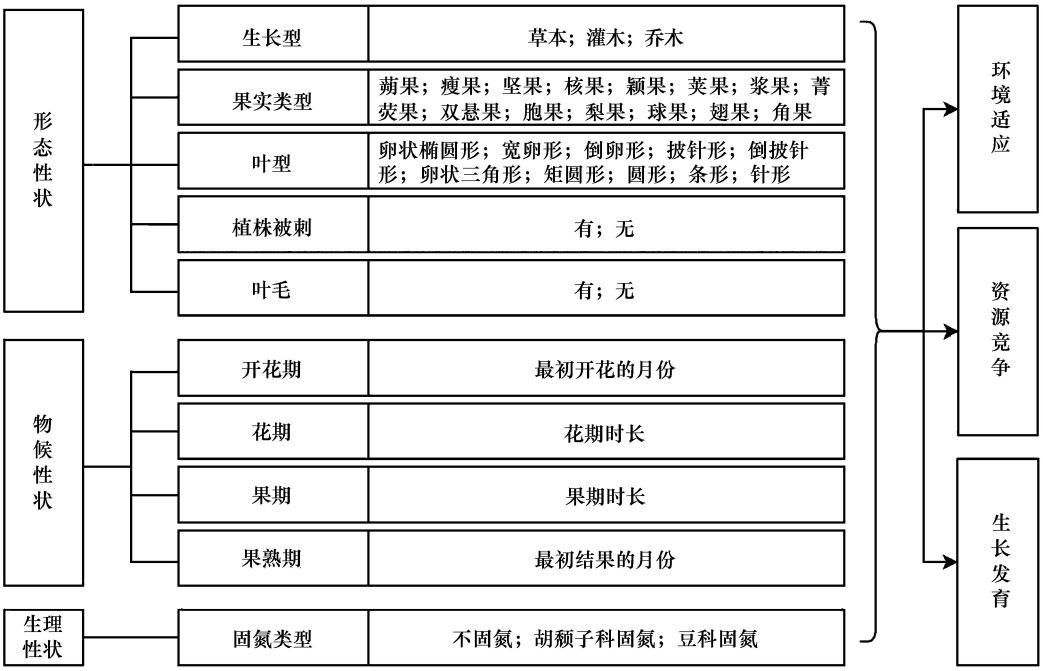

图 1 植物功能性状的选取

Fig.1 Selection of plants functional traits

三个维度上均具有较显著的海拔空间格局,但不同指数表现的结果不完全一致(图 2)。

总体来看,随着海拔升高,*R*、*PD* 和 FRic 这 3 个代表不同维度的多样性指数均呈上升趋势,表征三个维度多样性的海拔空间格局一致。具体来看,物种多样性维度的 3 个指数表现出一致的海拔空间格局,均呈显著上升趋势;谱系多样性维度的 3 个指数则表现不一致,其中 *PD* 和 MPD2 个指数呈显著上升趋势,NRI 呈逐渐下降趋势,群落谱系结构由聚集逐渐转为发散;功能多样性维度的 3 个指数也表现不一致,其中 FRic 呈显著上升趋势,FEve 呈先增大后减小的单峰格局,FDiv 呈先减小后增大的变化趋势。

2.2 太行山森林群落不同维度多样性的纬度空间格局

基于 9 个多样性指数分析纬度空间格局得出,太行山森林群落在物种多样性、谱系多样性和功能多样性三个维度上的纬度空间格局均不明显(图 3)。

总体来看,9 个多样性指数中有 5 个指数随着纬度变化均无显著变化,分别是 *D*、*J*、*PD*、FRic 和 FEve。具体来看,每个维度内多样性指数的纬度空间格局并不一致,物种多样性维度的 *R* 呈先减小后增大的变化趋势,*D* 和 *J*2 个指数的变化趋势不明显;谱系多样性维度的 MPD 呈先增大后减小的单峰格局,NRI 呈先减小后增大的变化趋势,*PD* 无显著变化;功能多样性维度的 FDiv 呈逐渐增大的变化趋势,FRic 和 FEve 无显著变化。因此,在不同维度上太行山森林群落多样性的纬度空间格局均不明显。

2.3 物种、谱系和功能多样性指数之间的相关性

分析每一维度内不同指数的相关性为(图 4):物种多样性的三个指数之间均呈极显著正相关;谱系多样性的 NRI 与 *PD* 和 MPD 均呈显著负相关;功能多样性的 FRic 与 FEve 呈显著负相关。

分析不同维度之间的相关性(图 4):物种多样性与谱系多样性相关性一致,物种多样性维度的 3 个指数均与 *PD* 呈极显著正相关;物种多样性与功能多样性相关性不一致,其中 *R* 和 *D*2 个指数与 FRic 呈极显著正相关,*J* 与 FEve 呈极显著正相关,而 *R* 与 FEve 极显著负相关;谱系多样性与功能多样性相关性不一致,*PD* 与 FRic 呈显著正相关,*PD* 与 FEve 呈显著负相关,MPD 与 FRic 呈显著负相关。在分析不同维度之间相关性同时还需要考虑同一维度内不同指数相关性,两者可以互相印证结果。

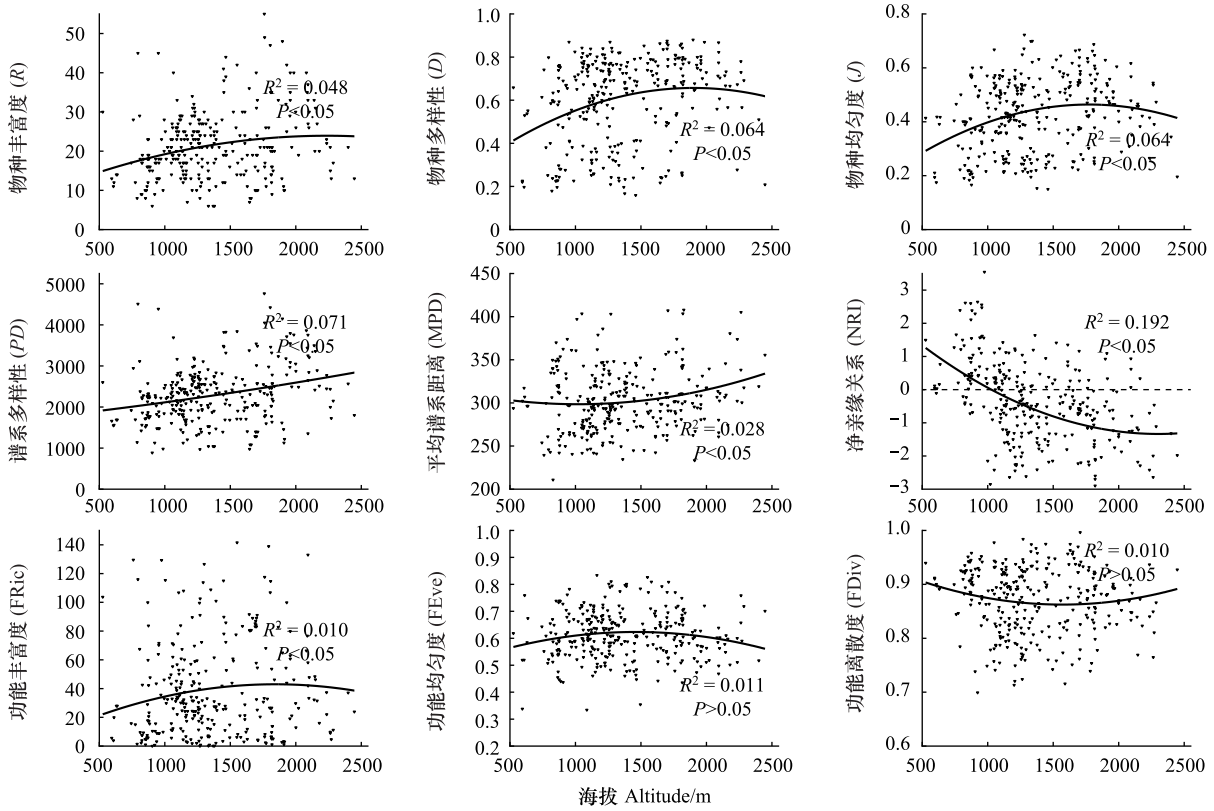

图 2　太行山森林群落的海拔空间格局

Fig.2　Altitudinal spatial patterns of forest communities in Taihang Mountain

R:物种丰富度 Patrick 指数 Patrick′s species richness index; *D*:物种多样性 Simpson 指数 Simpson′s diversity index;*J*:物种均匀度 Pielou 指数 Pielou′s evenness index;*PD*:Faith′s 谱系多样性指数 Faith′s phylogenetic diversity;MPD:平均谱系距离 Mean phylogenetic distance;NRI:净亲缘关系指数 Net relatedness index;FRic:功能丰富度指数 Functional richness index;FEve:功能均匀度指数 Functional evenness index;FDiv:功能离散度指数 Functional divergence index

2.4　环境因子对不同维度多样性的影响

不同维度多样性指数与环境因子相关性研究结果显示(图 5):(1)对于物种多样性,ALT 与 *R*、*D* 和 *J*3 个指数均呈极显著正相关;BIO1 与 *R* 呈极显著正相关、与 *D* 和 *J* 呈显著正相关。因此,ALT 和 BIO1 是影响群落物种多样性的关键因子。此外,ASP 与 *D* 和 *J* 呈显著负相关;BIO3 与 *R* 和 *D* 呈显著正相关;BIO4 与 *R* 呈极显著正相关;BIO12 与 *R* 和 *J* 呈显著正相关。(2)对于谱系多样性,ALT 与 *PD* 和 MPD2 个指数呈极显著正相关、与 NRI 呈显著负相关;BIO1 与 *PD* 呈极显著正相关、与 MPD 呈显著负相关、与 NRI 呈显著正相关;SLOP 与 MPD 和 NRI2 个指数呈极显著负相关。因此,ALT、BIO1 和 SLOP 是影响群落谱系多样性的关键因子。此外,BIO2 与 *PD* 呈显著正相关;BIO3 与 *PD* 呈显著正相关;BIO4 与 NRI 呈显著负相关;BIO13 与 MPD 呈显著负相关。(3)对于功能多样性,BIO1 和 BIO13 与 FRic 呈极显著正相关;ALT 和 BIO12 与 FRic 呈显著正相关;BIO4 与 FRic 呈显著负相关;ASP 与 FDiv 呈显著负相关。因此,ALT、BIO1 和 BIO13 是影响群落功能多样性的关键因子。

总体来看,影响群落三个维度多样性的关键环境因子是 ALT 和 BIO1,此外 SLOP 和 BIO13 也是影响群落谱系和功能多样性的主要环境因子。

进而采用方差分解分析得出气候因子对物种、谱系和功能多样性指数的解释率均最高,分别为 25.5%、18.8%和 35.2%;地形因子次之,分别为 10.7%、8.2%和 9.6%。而环境因子的总解释率分别为 45.6%、34.1%和 53.5%,其中对功能多样性指数的解释率最高,占据主导地位。

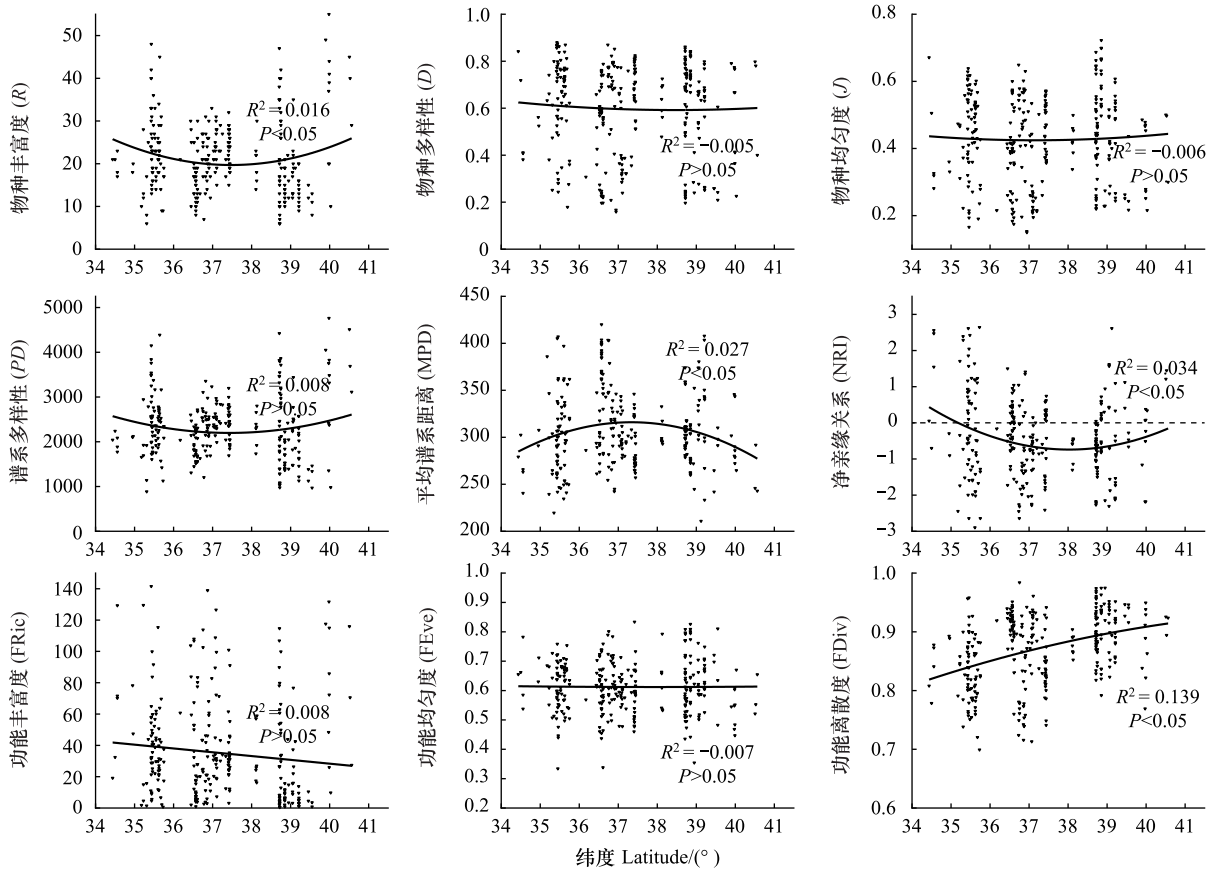

图 3 太行山森林群落的纬度空间格局

Fig.3 Latitude spatial patterns of forest communities in Taihang Mountain

3 讨论

3.1 不同维度多样性的空间格局

生物多样性空间格局是生物进化历史与环境因素共同作用的结果,可以综合反映物种长期适应环境形成的相互关系。其中,山地生物多样性的海拔格局及其形成机制一直以来是群落生态学研究的热点。对于太行山森林群落,已有研究证实了随着海拔升高其物种多样性呈现上升的趋势[13,27]。本研究进一步证实谱系多样性与物种多样性的海拔格局一致,即 *PD* 与 MPD 均随海拔升高呈逐渐上升的趋势,这与秦浩等人在山西关帝山的森林群落海拔格局的研究结论相一致[22]。但是对于功能多样性的海拔格局则存在一定差异,其中 FDiv 随海拔的变化趋势与向琳等人在井冈山的研究结果一致,但 FRic 和 FEve 的结果却存在差异[33]。

考虑到本研究区域选择的广义太行山纬度跨度可达 6°,因此区别于传统山地多样性研究只考虑海拔格局,本研究在实验设计中增加了纬度格局研究,并假设太行山森林群落多样性会呈较为显著的纬度空间格局。通过研究得出物种多样性和谱系多样性在整体上均无显著的纬度格局,因此验证了该假设不成立。究其原因,认为依然与研究尺度有关,在广义太行山纬度范围内的水热条件变化并未能使在纬度梯度上的气候因子对物种多样性和谱系多样性产生显著的影响。然而,功能多样性维度中的 FDiv 指数随着纬度增大呈逐渐增大的变化趋势。功能多样性是指生物群落中的物种通过其功能性状(包括特征、范围、大小及分布)影响群落生态功能的差异程度[15],是理解环境变化、群落组成与生态系统过程之间关系的关键因素[16]。太行山森林群落的功能多样性指数存在纬度空间格局,分析其原因可能是太行山地处亚热带气候向暖温带气候过渡的区域,植物区系成分复杂多样且兼具热带和温带成分为主[25],因此在功能性状上已表现出了多样的分化以适应不同的环境特征,从而提高对资源有效利用的程度。

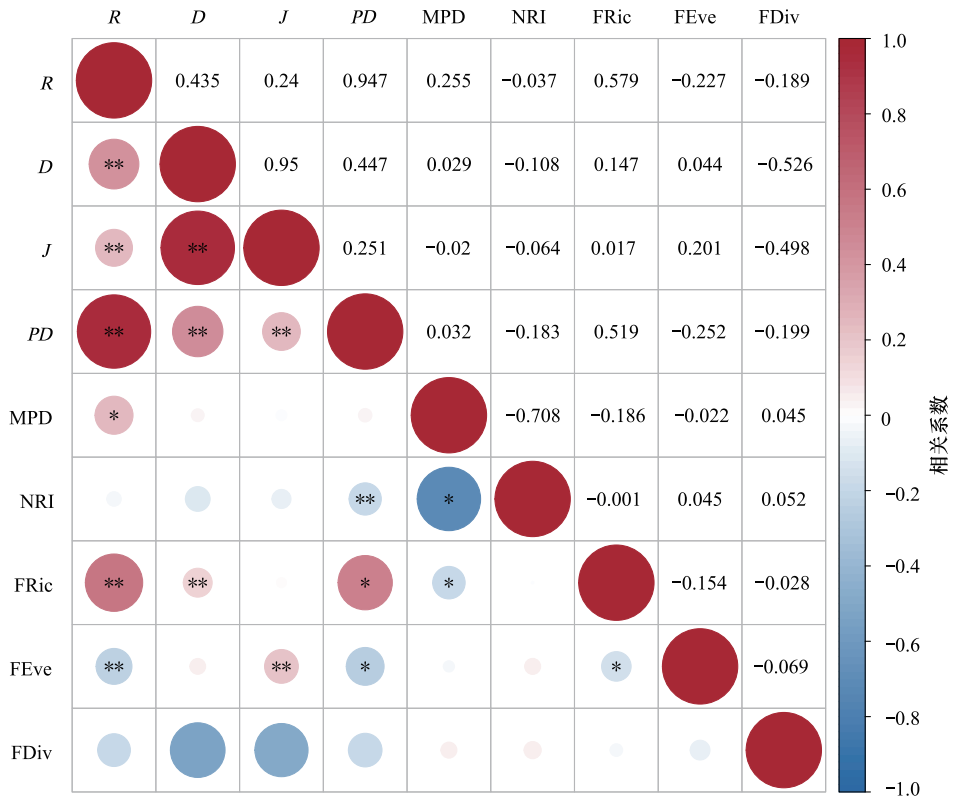

图 4　不同维度多样性指数之间的相关性

Fig.4　The correlation among different diversity indices

$*P \leqslant 0.05$, $**P \leqslant 0.01$

3.2　不同维度多样性指数之间的相关性

通过分析不同指数之间的相关性,显示群落物种多样性的 3 个指数均与谱系多样性维度的 *PD* 指数呈极显著正相关关系。表明太行山植物群落内的物种经历了长期稳定的进化过程,通过生态位分化实现共存,在历史演化过程中具有生态位保守性和谱系特征。相关研究表明,如果研究区物种生态位保守,即物种在长期的进化过程中其相关性状特征倾向于保持先祖的生态特征,则能够利用群落谱系多样性解释群落谱系结构及其构建机制[34]。

同时,群落物种多样性的 *R* 指数与功能多样性的 FRic 指数呈极显著正相关,表明太行山森林群落中的物种之间存在功能互补性。物种丰富度促进了物种通过增加功能性状多样化来提高物种适应环境和竞争资源的能力,致使群落功能多样性随之提升[35]。得出物种多样性的 *J* 指数与功能多样性的 FEve 指数呈极显著正相关,这表明物种个体数量的均衡分布有助于维持物种间的相互作用,进而通过功能互补促进功能性状的均衡利用。同时本研究发现 *R* 和 *PD* 这 2 个指数均与 FEve 指数呈显著负相关,这可能是由于受到外界干扰导致物种丰富度下降后物种的功能互补性反而会提高。FRic 指数与 *PD* 指数呈显著正相关,与 MPD 指数呈显著负相关,表明物种间的亲缘关系越远则功能性状特征越为多样,但过于分散且缺乏必要的互补性。相比而言,功能多样性指标更能解释生态系统的功能,并可在一定程度上预测生态系统的稳定性[36]。已有研究得出群落功能多样性越高、物种间功能性状的趋异性就越显著,这会使得群落具有复杂的功能网络、高效的资源利用机制和较强的抗干扰能力,保障物种长期稳定共存[37]。因此研究森林群落的功能多样性十分必要。

3.3　太行山森林群落不同维度多样性的影响因素

相关性分析结果显示太行山森林群落的物种多样性与 ALT、BIO1 和 BIO4 这 3 个因子极显著相关,与 BIO3、BIO12 和 ASP 这 3 个因子显著相关,该结果与太行山其他有关研究具有一致性[26,27]。本研究结果进一

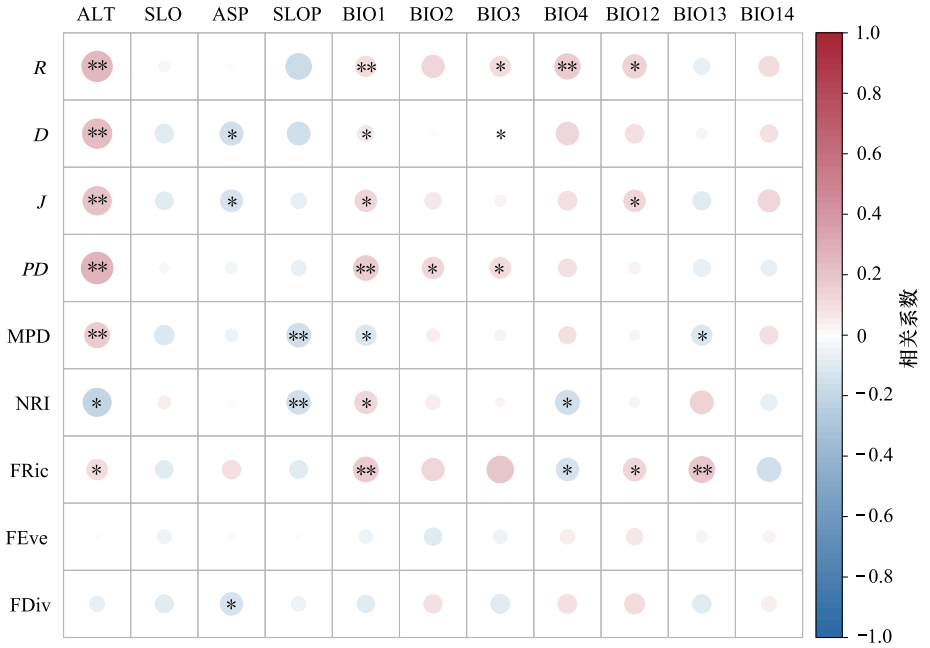

图 5 不同维度多样性指数与环境因子的相关性

Fig.5 The correlation of diversity index and environmental factors

ALT:海拔 Altitude;SLO:坡度 Slope;ASP:坡向 Aspect;SLOP:坡位 Slope position;BIO1:年平均温度 Mean annual temperature;BIO2:平均温度日较差 Mean diurnal range;BIO3:等温性 Isothermality;BIO4:温度季节性 Temperature seasonality;BIO12:年均降水量 Annual precipitation;BIO13:最湿月降水量 Annual precipitation;BIO14:最干月降水量 Precipitation of driest month

步得出 ALT 和 BIO1 是影响 3 个物种多样性指数的共同主导因子,而其它环境因子对不同物种多样性指数的影响存在差异。除了 ALT 和 BIO1 共同主导因子以外,对于 *R* 指数,BIO3 和 BIO4 也是主导因子;对于 *D* 指数,BIO3 和 ASP 也是主导因子;对于 *J* 指数,BIO12 和 ASP 也是主导因子。这在一定程度上解释了不同物种多样性指数空间格局存在差异的内在机制。

谱系多样性与 ALT、SLOP 和 BIO1 这 3 个因子极显著相关,与 BIO2、BIO4 和 BIO13 这 4 个因子显著相关。本研究结果进一步得出 ALT 和 BIO1 是影响 3 个谱系多样性指数的共同主导因子,而其他环境因子对不同谱系多样性指数的影响存在差异。除了 ALT 和 BIO1 共同主导因子以外,对于 *PD* 指数,BIO2 和 BIO3 也是主导因子;对于 MPD 指数,SLOP 和 BIO13 也是主导因子;对于 NRI 指数,SLOP 和 BIO4 也是主导因子。发现区别于物种多样性的影响因素,一些与热量有关的因子如 SLOP 和 BIO2 也是影响谱系多样性的主要环境因子,这一结论与他人在华北地区落叶阔叶林的研究结果相一致[38]。

对于功能多样性,FRic 指数与 BIO1、BIO13 等 6 个环境因子有相关性,FDiv 仅与 ASP 有相关性,而 FEve 没有相关性环境因子。可以认为森林群落的功能多样性空间格局的内在机制较为复杂,因此建议在开展功能多样性的进一步研究时,尽量选取更多能够反映植物对生长环境适应和响应的功能性状,以及在环境因子筛选时除气候、地形以外考虑更多的环境因素。

相比较于物种多样性和谱系多样性,方差分解的结果显示环境因子对功能多样性指数的解释率更高,这主要归因于功能性状的环境过滤效应[39]。植物的一些特殊功能性状对环境压力的响应更加敏感,如耐旱性、养分利用效率等,因此土壤、水文、以及土壤微生物等其它的环境因子也十分重要。尽管在本研究中未能设计更多的环境因子,只能作为未解释部分,但这些环境因子对多样性指数的贡献也不容忽视。针对典型生态系统开展跨营养级的级联效应,以及多尺度、多因子交互作用下的群落构建机制均是未来研究的趋势[40]。

4　结论

本文以广义太行山为研究区域,基于物种、谱系和功能多样性的 9 个指数对该区域森林群落多样性的空间格局进行了分析,得出以下主要结论:在海拔梯度上森林群落在不同维度多样性的海拔格局均较为明显,而在纬度梯度上物种多样性和谱系多样性的纬度格局不明显,仅功能多样性的功能离散度指数存在一定的纬度格局。物种、谱系和功能多样性格局三者具有一致性,表明群落受到生境过滤和竞争排斥的双重作用。海拔和年平均温度是影响群落物种、谱系和功能三个维度多样性的关键因子,而坡位和最湿月降水量也是影响群落谱系和功能多样性的主要因子。本研究为了解太行山群落多样性空间格局提供了不同维度的整体分析,对进一步探究其内在机制提供了研究基础,并且对该区域科学开展植被保护和修复工作提供了理论支持。

致谢:感谢北京大学城市与环境学院唐志尧教授对本研究的研究。

参考文献(References):

[1] Gaston K J. Global patterns in biodiversity. Nature, 2000, 405(6783): 220-227.

[2] 钱迎倩, 马克平. 生物多样性研究的原理与方法: 生物多样性研究系列专著. 北京: 中国科学技术出版社, 1994: 141-165.

[3] 唐志尧, 方精云. 植物物种多样性的垂直分布格局. 生物多样性, 2004, 12(1): 20-28.

[4] 朱珣之, 张金屯. 中国山地植物多样性的垂直变化格局. 西北植物学报, 2005, 25(7): 1480-1486.

[5] 张璐, 苏志尧, 陈北光. 山地森林群落物种多样性垂直格局研究进展. 山地学报, 2005, 23(6): 6736-6743.

[6] Webb C O, Ackerly D D, McPeek M A, Donoghue M J. Phylogenies and community ecology. Annual Review of Ecology and Systematics, 2002, 33: 475-505.

[7] Swenson N G, Erickson D L, Mi X C, Bourg N A, Forero-Montaña J, Ge X J, Howe R, Lake J K, Liu X J, Ma K P, Pei N C, Thompson J, Uriarte M, Wolf A, Wright S J, Ye W H, Zhang J L, Zimmerman J K, Kress W J. Phylogenetic and functional alpha and beta diversity in temperate and tropical tree communities. Ecology, 2012, 93(sp8): S112-S125.

[8] Cavender-Bares J, Kozak K H, Fine P V A, Kembel S W. The merging of community ecology and phylogenetic biology. Ecology Letters, 2009, 12(7): 693-715.

[9] Qian H, Sandel B. Phylogenetic relatedness of native and exotic plants along climate gradients in California, USA. Diversity and Distributions, 2017, 23(11): 1323-1333.

[10] Liu Z F, Ma H, Ci X Q, Li L, Song Y, Liu B, Li H W, Wang S L, Qu X J, Hu J L, Zhang X Y, Conran J G, Twyford A D, Yang J B, Hollingsworth P M, Li J. Can plastid genome sequencing be used for species identification in Lauraceae? Botanical Journal of the Linnean Society, 2021, 197(1): 1-14.

[11] 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. 植物生态学报, 2010, 34(3): 309-315.

[12] Kembel S W, Hubbell S P. The phylogenetic structure of a neotropical forest tree community. Ecology, 2006, 87(7 Suppl): S86-S99.

[13] 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.

[14] Violle C, Navas M L, Vile D, Kazakou E, Fortunel C, Hummel I, Garnier E. Let the concept of trait be functional! Oikos, 2007, 116(5): 882-892.

[15] Lavorel S, Grigulis K, McIntyre S, Williams N S G, Garden D, Dorrough J, Berman S, Quétier F, Thébault A, Bonis A. Assessing functional diversity in the field-methodology matters! Functional Ecology, 2008, 22(1): 134-147.

[16] 韩涛涛, 唐玄, 任海, 王俊, 刘楠, 郭勤峰. 群落/生态系统功能多样性研究方法及展望. 生态学报, 2021, 41(8): 3286-3295.

[17] Petchey O L, Gaston K J. Functional diversity: back to basics and looking forward. Ecology Letters, 2006, 9(6): 741-758.

[18] Roscher C, Schumacher J, Lipowsky A, Gubsch M, Weigelt A, Pompe S, Kolle O, Buchmann N, Schmid B, Schulze E D. A functional trait-based approach to understand community assembly and diversity-productivity relationships over 7 years in experimental grasslands. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics, 2013, 15(3): 139-149.

[19] Roscher C, Schumacher J, Gubsch M, Lipowsky A, Weigelt A, Buchmann N, Schmid B, Schulze E D. Using plant functional traits to explain diversity-productivity relationships. PLoS One, 2012, 7(5): e36760.

[20] Spasojevic M J, Suding K N. Inferring community assembly mechanisms from functional diversity patterns: the importance of multiple assembly processes. Journal of Ecology, 2012, 100(3): 652-661.

[21] 阴宇航, 李林, 魏识广, 周景钢, 温智峰, 钟建军, 赵毅, 胡妍. 南亚热带常绿阔叶林物种多样性与谱系多样性的多重分形分析. 科学通报, 2024, 69(12): 1652-1662.

[22] 秦浩, 张殷波, 董刚, 张峰. 山西关帝山森林群落物种、谱系和功能多样性海拔格局. 植物生态学报, 2019, 43(9): 762-773.

[23] 卢孟孟, 黄小翠, 慈秀芹, 杨国平, 李捷. 沿海拔梯度变化的哀牢山亚热带森林群落系统发育结构. 生物多样性, 2014, 22(4): 438-449.

[24] 程毅康, 张辉, 王旭, 龙文兴, 李超, 方燕山, 符明期, 朱孔新. 功能多样性和谱系多样性对热带云雾林群落构建的影响. 植物生态学报, 2019, 43(3): 217-226.

[25] 张殷波, 孟庆欣, 秦浩, 唐志尧, 张峰. 太行山山地森林群落植物区系与地理格局——基于植物群落清查数据. 应用生态学报, 2019, 30(10): 3395-3402.

[26] 李军玲, 张金屯. 太行山中段植物群落物种多样性与环境的关系. 应用与环境生物学报, 2006, 12(6): 766-771.

[27] 张殷波, 秦浩, 孟庆欣, 张峰, 唐志尧. 太行山森林群落物种多样性空间格局及其影响因素. 应用与环境生物学报, 2022, 28(2): 331-338.

[28] 方精云, 王襄平, 沈泽昊, 唐志尧, 贺金生, 于丹, 江源, 王志恒, 郑成洋, 朱江玲, 郭兆迪. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范. 生物多样性, 2009, 17(6): 533-548.

[29] 方精云, 沈泽昊, 唐志尧, 王志恒. “中国山地植物物种多样性调查计划”及若干技术规范. 生物多样性, 2004, 12(1): 5-9.

[30] Group T A P. An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV. Botanical Journal of the Linnean Society, 2016, 181(1): 1-20.

[31] 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. 生态学报, 2015, 35(21): 7023-7032.

[32] 宋彦涛, 王平, 周道玮. 植物群落功能多样性计算方法. 生态学杂志, 2011, 30(9): 2053-2059.

[33] 向琳, 陈芳清, 官守鹏, 王玉兵, 吕坤. 井冈山鹿角杜鹃群落灌木层功能多样性及其随海拔梯度的变化. 生态学报, 2019, 39(21): 8144-8155.

[34] 牛红玉, 王峥峰, 练琚愉, 叶万辉, 沈浩. 群落构建研究的新进展: 进化和生态相结合的群落谱系结构研究. 生物多样性, 2011, 19(3): 275-283.

[35] Peco B, Carmona C P, de Pablos I, Azcúrate F M. Effects of grazing abandonment on functional and taxonomic diversity of Mediterranean grasslands. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2012, 152: 27-32.

[36] Roscher C, Schumacher J, Gubsch M, Lipowsky A, Weigelt A, Buchmann N, Schmid B, Schulze E D. Using plant functional traits to explain diversity-productivity relationships. PLoS One, 2012, 7(5): e36760.

[37] Spasojevic M J, Suding K N. Inferring community assembly mechanisms from functional diversity patterns: the importance of multiple assembly processes. Journal of Ecology, 2012, 100(3): 652-661.

[38] 许金石, 柴永福, 刘晓, 岳明, 郭垚鑫, 康慕谊, 刘全儒, 郑成洋, 吉成均, 闫明, 张峰, 高贤明, 王仁卿, 石福臣, 张钦弟, 王茂. 华北区域环境梯度上阔叶林构建模式及分布成因. 植物生态学报, 2019, 43(9): 732-741.

[39] 许驭丹, 董世魁, 李帅, 沈豪. 植物群落构建的生态过滤机制研究进展. 生态学报, 2019, 39(7): 2267-2281.

[40] 刘聪聪, 何念鹏, 李颖, 张佳慧, 闫镁, 王若梦, 王瑞丽. 宏观生态学中的植物功能性状研究: 历史与发展趋势. 植物生态学报, 2024, 48(1): 21-40.