

闽西常绿阔叶林区壳斗科物种丰富度的空间分异格局及关键环境影响因子驱动机制

周宏骏¹, 谢文心², 曹正金³, 张润生¹, 郑楚涛¹, 莫雨璐¹, 甘转魏¹, 邓传远^{1,①}

(1. 福建农林大学风景园林与艺术学院, 福建 福州 350002; 2. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083;
3. 长汀县水土保持中心, 福建 长汀 366300)

摘要: 为探究小区域尺度下闽西常绿阔叶林区壳斗科(Fagaceae)物种丰富度的空间分异格局及关键环境影响因子驱动机制,采用二次多项式回归模型、Jaccard 相似系数等对 3 km×3 km 网格单元的壳斗科植物进行分析。结果表明:随着海拔升高,该区域壳斗科物种丰富度呈单峰型变化趋势,峰值位于海拔>600~900 m 区域,并且,海拔梯度差距越大,Jaccard 相似系数越小。在水平空间上,该区域壳斗科物种丰富度以北纬 25.2°、东经 117.0°附近最高。根据 Spearman 秩相关系数和一元线性回归分析结果,壳斗科物种丰富度与海拔、年降水量、最湿月降水量、最干月降水量、干燥指数、距道路距离及降水量空间差异呈显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)正相关,与地形湿度指数、年均温、最热月均温、最冷月均温、气温年较差、降水季节性、实际蒸散量、土壤质地、景观生态风险指数、景观干扰度指数、夜间灯光指数及气温空间差异呈显著或极显著负相关。层次分割分析结果显示:剔除共线性较强的环境因子后,筛选出的 11 个环境因子对壳斗科物种丰富度的独立贡献率合计 13.58%,其中,最热月均温、气温空间差异和景观干扰度指数的独立贡献率较高。分段结构方程模型显示:能量因子、水分因子、人为驱动因子、生境异质性因子对壳斗科物种丰富度有直接影响,地形因子和土壤因子对壳斗科物种丰富度有间接影响,人为驱动因子和生境异质性因子还起到枢纽作用。综合分析认为,闽西常绿阔叶林区壳斗科物种丰富度的垂直分异格局符合中域效应理论,其水平空间分异格局呈随机分布状态。该区域壳斗科物种丰富度主要受水分-能量平衡机制调控,同时受生境异质性和人为驱动介导,其他环境因子则通过该路径产生间接效应。

关键词: 壳斗科; 闽西; 物种丰富度; 空间分异格局; 关键环境影响因子; 分段结构方程模型

中图分类号: Q948.1; S718.5 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2026)02-0043-11

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2026.02.05

Spatial differentiation patterns of Fagaceae species richness and the driving mechanisms of key environmental impact factors in evergreen broad-leaved forest region of western Fujian, China ZHOU Hongjun¹, XIE Wenxin², CAO Zhengjin³, ZHANG Runsheng¹, ZHENG Chutao¹, MO Yulu¹, GAN Zhuanwei¹, DENG Chuanyuan^{1,①} (1. College of Landscape Architecture and Art, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. Changting County Soil and Water Conservation Center, Changting 366300, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2026, 35(2): 43-53

Abstract: To investigate the spatial differentiation patterns of Fagaceae species richness and the driving mechanisms of key environmental impact factors in evergreen broad-leaved forest region of western Fujian at a small regional scale, the analyses of Fagaceae plants in 3 km×3 km grid units were conducted by using quadratic polynomial regression models, Jaccard similarity coefficient, etc. The results show that

收稿日期: 2025-06-21

基金项目: 长汀县林木种质资源普查项目(KH190263A)

作者简介: 周宏骏(2002—),男,福建三明人,硕士研究生,主要从事生物多样性保护研究工作。

①通信作者 E-mail: dengchuanyuan@fafu.edu.cn

引用格式: 周宏骏, 谢文心, 曹正金, 等. 闽西常绿阔叶林区壳斗科物种丰富度的空间分异格局及关键环境影响因子驱动机制[J]. 植物资源与环境学报, 2026, 35(2): 43-53.

with the increase of elevation, Fagaceae species richness in this region exhibits a unimodal variation tendency, and the peak value is in >600–900 m elevation zone, in addition, the larger elevation gradient differences, the smaller the Jaccard similarity coefficient. In the horizontal space, the Fagaceae species richness in this region is the highest near N25.2°, E117.0°. According to the Spearman rank correlation coefficients and simple linear regression analysis results, Fagaceae species richness shows significant ($P < 0.05$) or extremely significant ($P < 0.01$) positive correlations with elevation, annual precipitation, precipitation of the wettest month, precipitation of the driest month, aridity index, distance to road, and precipitation spatial difference, while demonstrating significant or extremely significant negative correlations with topographic wetness index, mean annual temperature, mean temperature of the warmest month, mean temperature of the coldest month, annual temperature range, precipitation seasonality, actual evapotranspiration, soil texture, landscape ecological risk index, landscape disturbance index, nighttime light index, and temperature spatial difference. The hierarchical partitioning analysis result shows that after removing environmental factors with strong collinearity, 11 selected environmental factors collectively explained 13.58% of the independent contribution rate in Fagaceae species richness, among which, the independent contribution rates of mean temperature of the warmest month, temperature spatial difference, and landscape disturbance index are relatively high. The piecewise structural equation model indicates that energy factor, water factor, anthropogenic driven factor, and habitat heterogeneity factor have direct effects on Fagaceae species richness, terrain factor and soil factor have indirect effects, and anthropogenic driven factors and habitat heterogeneity factors additionally serve as pivotal mediators. Comprehensive analysis suggests that the vertical differentiation pattern of Fagaceae species richness in evergreen broad-leaved forest region of western Fujian conforms to the mid-domain effect theory, while its horizontal spatial differentiation pattern exhibits random distribution characteristics. Fagaceae species richness in this region is mainly regulated by mediated water-energy balance mechanisms, and simultaneously regulated by habitat heterogeneity and anthropogenic driven factors, while other environmental factors exert indirect effects through this pathway.

Key words: Fagaceae; western Fujian; species richness; spatial differentiation pattern; key environmental impact factor; piecewise structural equation model

物种丰富度的空间分布格局及其形成机制是宏观生态学和生物地理学研究的核心议题,不仅能区分不同区域的物种丰富度,而且能揭示物种分布与气候、地形、物种迁移、地质历史等因子间的关系^[1]。然而,全球气候变化和人类活动正在不断加速生物多样性丧失^[2],使得物种丰富度在生态系统功能维持和自然资源可持续管理上的作用越来越重要^[3-4]。

物种丰富度的空间分异格局是多种环境因子协同作用的结果^[1]。能量因子、水分因子、地形因子、土壤因子及人为干扰等环境因子均对植物物种丰富度分布格局的影响显著^[5-9]。目前,虽然关于环境因子对物种丰富度分布格局影响机制的假说已有 100 多个,但由于物种丰富度分布格局形成机制复杂,尚未发现通用于不同尺度的假说^[9]。通常情况下,环境过滤(指气候、土壤类型、水资源等环境条件对物种功能性状的选择性压力)在大尺度上是群落构建的核心驱动力^[10],而生物互作(指不同物种的个体或种群在自然环境中发生的直接或间接的相互影响)则在小尺度上作用显著^[10-11]。相关研究结果显示:

大尺度区域的环境异质性往往较大,导致环境过滤成为大尺度区域物种多样性分布的主要决定因子^[12];而在小尺度区域内,环境过滤对群落构建仍存在一定的影响,但其作用模式与大尺度区域有所不同^[11]。

壳斗科(Fagaceae)植物为北半球暖温带至亚热带阔叶林的重要建群种^[13-14],其物种多样性模式和驱动机制对于理解区域生物地理学和生物多样性保护具有重要意义^[5]。目前关于壳斗科物种丰富度分布格局及环境影响因子的研究大多集中在大尺度上^[5-15],关于小尺度下环境过滤对壳斗科物种丰富度分布格局的驱动机制尚缺乏深入探讨。

闽西地区处在中亚热带与南亚热带的过渡地带,区内的常绿阔叶林是中国东半部湿润森林生态系统的重要组成部分,使得该区域成为研究植物区系地理格局及生态适应机制的典型区域^[16-17]。因此,解析闽西地区壳斗科物种丰富度分布格局形成的驱动机制,将有助于揭示环境过滤和生物互作在不同尺度上的重要性,从而检验相关理论的尺度依赖性,为制定小尺度下亚热带山地常绿阔叶林的生物多样性保护

策略提供更具体的生态学依据。鉴于此,笔者综合野外观测数据、气候数据库及地理信息系统(GIS)空间分析技术,利用 $3\text{ km}\times 3\text{ km}$ 网格单元探究闽西常绿阔叶林区壳斗科物种丰富度的水平和垂直分异格局,并分析了该区域壳斗科物种丰富度与25个环境因子的关系,旨在揭示闽西常绿阔叶林区壳斗科物种多样性的空间分布特征,明确影响该区域壳斗科物种丰富度分布格局的关键环境因子,阐明不同环境因子对该区域壳斗科物种丰富度分布的驱动机制。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

闽西地区位于北纬 $24^{\circ}23'$ ~ $26^{\circ}40'$ 、东经 $115^{\circ}51'$ ~ $117^{\circ}45'$ 之间,地貌以中、低山丘陵为主,由武夷山脉南段与玳瑁山脉构成区域骨架。全域面积 $19\,050\text{ km}^2$,平均海拔 652 m ,海拔高于 $1\,000\text{ m}$ 的山峰有571个,最高点为玳瑁山脉的主峰狗子脑(海拔 $1\,811\text{ m}$),最低点位于永定河下游河谷(海拔 69 m)。该区域属亚热带海洋性季风气候,年平均气温 $20.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,年降水量 $1\,479\text{ mm}$,气候温和,四季分明。区内地势总体呈东高西低、北高南低的特征;土壤类型以红壤和黄壤为主。闽西地区为福建省三大林区之一,属中国东部湿润森林区的中亚热带阔叶林区,主要植被类型有常绿针叶林、常绿针阔叶混交林、常绿落叶阔叶林等。本研究调查区域为福建省龙岩市全境(北纬 $24^{\circ}23'$ ~ $26^{\circ}02'$ 、东经 $115^{\circ}51'$ ~ $117^{\circ}45'$),该区域为闽西山地的主体组成部分,囊括玳瑁山、博平岭等武夷山南延支脉,海拔 $69\sim 1\,811\text{ m}$ 。

1.2 数据来源

闽西常绿阔叶林区壳斗科物种数据来源有4个:1)野外调查及观测数据,即2017年5月至2021年9月期间,在长汀县开展的专项样线调查结果(样线长 $1\sim 4\text{ km}$,共310条样线),以及新罗区、永定区、漳平市、武平县、上杭县、连城县林业局提供的观测记录;2)标本数据库,包括中国数字植物标本馆(CVH, <https://www.cvh.ac.cn/>)、国家标本资源共享平台(NSII, <http://www.nsii.org.cn/>)、国际植物标本数据库(JSTOR Global Plants, <https://plants.jstor.org/>);3)全球生物多样性信息服务网络平台(GBIF, <https://www.gbif.org/>)的开放存取记录;4)文献数据,在中国知网和万方数据知识服务平台中组合检索“物种丰

度”、“闽西”、“植物群落”、“物种分布”、“物种多样性”、“生物多样性”、“壳斗科”、“栎属”、“青冈属”关键词,系统收集闽西地区相关期刊论文、学术专著及研究报告中的壳斗科物种分布数据^[7-17],并对这些数据进行规范化整理,仔细校对每种植物的中文名、拉丁名等信息。最终得到闽西地区壳斗科植物有效记录15 198条,涵盖5属61种(附录I)。

1.3 研究方法

1.3.1 物种丰富度的空间量化方法 利用物种数量对壳斗科物种丰富度进行空间量化。首先,利用ArcGIS 10.8.1软件,采用等面积圆锥投影(albers equal-area conic projection)的方法将闽西地图进行投影转换^[18];其次,在闽西地区建立 $3\text{ km}\times 3\text{ km}$ 的规则网格,剔除面积不足规则网格75%的单元格,提取各网格的中心坐标,依据中心坐标点将每个网格与壳斗科物种分布记录进行关联;然后,以每个格网内的点数量作为物种丰富度;最后,采用自然间断点分级法(natural breaks method)对物种丰富度进行分级^[19]。

1.3.2 物种丰富度的空间分异格局分析 基于 $3\text{ km}\times 3\text{ km}$ 网格单元进行物种丰富度空间分异格局分析。以 300 m 为间距,将海拔分成6个梯度,并以 0.5° 为间距,将经度和纬度各分成5个梯度,统计各海拔、经度和纬度梯度的物种丰富度,并计算占比。每个梯度只包含上限值,不包含下限值。分别以每个网格中心点的海拔、经度和纬度为自变量,物种丰富度为因变量,构建二次多项式回归模型,并进行显著性检验;参考林阳等^[20]的方法计算各海拔、经度和纬度梯度间物种的Jaccard相似系数。以上操作通过Origin 2024和EXCEL 2019软件完成。

1.3.3 环境因子的选取及数据来源 参照文献^[21-24]选取植物物种丰富度研究常用的25个环境因子,涵盖地形因子、能量因子、水分因子、土壤因子、人为驱动因子及生境异质性因子7类。其中,地形因子包括海拔、坡度、坡向、地形湿度指数;能量因子包括年均温、最热月均温、最冷月均温、气温年较差;水分因子包括年降水量、最湿月降水量、最干月降水量、降水季节性、实际蒸散量、干燥指数;土壤因子包括土壤全氮含量、土壤质地、土壤有机质含量、土壤pH值;人为驱动因子包括景观生态风险指数、景观干扰度指数、夜间灯光指数、距道路距离;生境异质性因子包括海拔变幅、气温空间差异、降水量空间差异。

地形因子数据来自地理空间数据云(<https://>

www.gscloud.cn/), 参照文献[25]对坡向进行量化, 即以正北向为基准点(0°), 每45°为一个坡向, 共分成北坡(337.5°~22.5°)、东北坡(22.5°~67.5°)、西北坡(292.5°~337.5°)、东坡(67.5°~112.5°)、西坡(247.5°~292.5°)、东南坡(112.5°~157.5°)、西南坡(202.5°~247.5°)、南坡(157.5°~202.5°)8个坡向, 分别记为1、2、3、4、5、6、7、8, 每个坡向的角度范围只包含上限值、不包含下限值。地形湿度指数采用 ArcMap 10.8.1 软件中的水文分析工具, 基于地理空间数据云的数字高程模型计算。能量因子数据来自 WorldClim 数据库 (<https://worldclim.org/version2>)。水分因子数据来自 WorldClim 数据库和 Figshare 平台 (<https://figshare.com/>)。土壤因子数据来自全球农业生态区划数据平台 (<https://gaez.fao.org/>), 其中, 土壤质地类型采用 USDA 土壤质地三角分类系统进行分类, 共分成12个类型并赋值: 1为砂土, 2为壤质砂土, 3为砂质壤土, 4为壤土, 5为粉砂壤土, 6为砂质黏壤土, 7为黏壤土, 8为粉砂黏壤土, 9为砂质黏土, 10为粉砂黏土, 11为黏土, 12为重黏土。人为驱动因子中, 距道路距离基于 OSM 官网 (<https://www.openstreetmap.org/>) 的城市内部路网数据, 采用 ArcMap 10.8.1 软件中的欧氏距离工具计算; 夜间灯光数据来自 Harvard Dataverse 数据平台 (<https://dataverse.harvard.edu/>); 景观生态风险指数和景观干扰度指数均基于从国家科技基础条件平台中心 (<https://www.escience.org.cn/>) 获取的中国30m年度土地覆盖数据集, 利用 Fragstats 4.2 软件计算。生境异质性因子均通过计算得出, 即每个网格内栅格值的最大值与最小值的差值。

1.3.4 物种丰富度与环境因子的关系分析 首先, 对物种丰富度及非正态分布环境因子数据进行对数转换, 并对网格内的物种丰富度与25个环境因子进行 Spearman 秩相关性分析; 其次, 对存在显著相关性的环境因子进行一元线性回归分析; 然后, 对初筛的环境因子进行方差膨胀因子(VIF)检验, 剔除共线性较强的环境因子, 采用 rdacca.hp 包进行层次分割分析, 量化各环境因子对物种丰富度的影响程度; 最后, 针对这些环境因子的非正态分布特征及间接影响路径特性^[26], 采用分段结构方程模型(piecewiseSEM)分析其对物种丰富度的影响机制。在构建分段结构方程模型前, 参照孟敬慈等^[7]的方法, 计算土壤质地分类变量的 Gower 距离, 采用 FD 包和 ape 包通过主

坐标分析(PCoA)提取主成分作为替代变量, 使用 nlme 包和 lme4 包构建分段结构方程模型。以上操作通过 Origin 2024 和 R 4.4.0 软件完成。

2 结果和分析

2.1 壳斗科物种丰富度的空间分异格局

2.1.1 垂直分异格局 结果(表1)显示: 随着海拔升高, 壳斗科物种丰富度呈现单峰型变化。海拔600~900m区域的物种丰富度最高, 占比高达93.4%; 海拔300~600、900~1200和1200~1500m区域的物种丰富度较高, 占比较海拔600~900m区域分别低13.1、6.5和18.0百分点。

从二次多项式回归模型(图1)看, 闽西常绿阔叶林区壳斗科物种丰富度随海拔升高呈现微弱的单峰型变化。统计检验显示: 虽然此模型通过了显著性检验($P < 0.05$), 但解释力极低($R^2 = 0.00480$)。

表1 闽西常绿阔叶林区不同海拔梯度的壳斗科物种丰富度比较
Table 1 Comparison of Fagaceae species richness along different elevation gradients in evergreen broad-leaved forest region of western Fujian

海拔梯度/m ¹⁾ Elevation gradient ¹⁾	物种丰富度 Species richness	占比/% Proportion
0-300	37	60.7
300-600	49	80.3
600-900	57	93.4
900-1200	53	86.9
1200-1500	46	75.4
1500-1800	26	42.6

¹⁾ 每个梯度只包含上限值, 不包含下限值 Each gradient includes only the upper limit, not the lower limit.

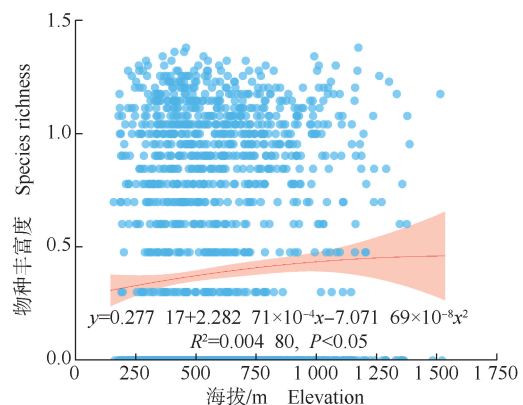


图1 闽西常绿阔叶林区壳斗科物种丰富度与海拔的二次多项式回归模型

Fig. 1 Quadratic polynomial regression model of Fagaceae species richness with elevation in evergreen broad-leaved forest region of western Fujian

从 Jaccard 相似系数(表 2)看,海拔 0~300 m 区域与海拔 1 500~1 800 m 区域间的物种相似性最低,说明这 2 个海拔梯度间壳斗科物种组成差异最大。海拔 300~1 200 m 内 3 个梯度间的物种相似性较高(Jaccard 相似系数均在 0.80 以上),说明中、低海拔梯度间壳斗科物种组成较为相似。总体来看,海拔梯度差距越大,Jaccard 相似系数越小,说明壳斗科物种组成相似性沿海拔梯度升高而递减。

2.1.2 水平分异格局 结果(表 3)显示:随着纬度和

经度升高,壳斗科物种丰富度均呈现单峰型变化。北纬 25.0°~25.5°和东经 116.5°~117.0°区域的物种丰富度最高,占比分别为 91.8% 和 95.1%;北纬 24.5°~25.0°、北纬 25.5°~26.0°、北纬 26.0°~26.5°区域的物种丰富度较高,占比较北纬 25.0°~25.5°区域分别低 13.1、6.6、18.0 百分点;东经 116.0°~116.5°、东经 117.0°~117.5°区域的物种丰富度也较高,占比较东经 116.5°~117.0°区域分别低 16.4 和 14.8 百分点。

从二次多项式回归模型(图 2)看,随着纬度和经

表 2 闽西常绿阔叶林区不同海拔梯度间壳斗科物种的 Jaccard 相似系数

Table 2 Jaccard similarity coefficient of Fagaceae species between different elevation gradients in evergreen broad-leaved forest region of western Fujian

海拔梯度/m ¹⁾ Elevation gradient ¹⁾	不同海拔梯度间的 Jaccard 相似系数 Jaccard similarity coefficient between different elevation gradients					
	0-300 m	300-600 m	600-900 m	900-1 200 m	1 200-1 500 m	1 500-1 800 m
0-300	1.00	0.62	0.62	0.61	0.51	0.37
300-600		1.00	0.83	0.82	0.67	0.39
600-900			1.00	0.83	0.72	0.43
900-1 200				1.00	0.71	0.44
1 200-1 500					1.00	0.53
1 500-1 800						1.00

¹⁾ 每个梯度只包含上限值,不包含下限值 Each gradient includes only the upper limit, not the lower limit.

表 3 闽西常绿阔叶林区不同纬度和经度壳斗科物种丰富度比较

Table 3 Comparison of Fagaceae species richness along different latitude and longitude gradients in evergreen broad-leaved forest region of western Fujian

纬度梯度 ¹⁾ Latitude gradient ¹⁾	物种丰富度 Species richness	占比/% Proportion	经度梯度 ¹⁾ Longitude gradient ¹⁾	物种丰富度 Species richness	占比/% Proportion
N24.0°-24.5°	26	42.6	E115.5°-116.0°	38	62.3
N24.5°-25.0°	48	78.7	E116.0°-116.5°	48	78.7
N25.0°-25.5°	56	91.8	E116.5°-117.0°	58	95.1
N25.5°-26.0°	52	85.2	E117.0°-117.5°	49	80.3
N26.0°-26.5°	45	73.8	E117.5°-118.0°	39	63.9

¹⁾ 每个梯度只包含上限值,不包含下限值 Each gradient includes only the upper limit, not the lower limit.

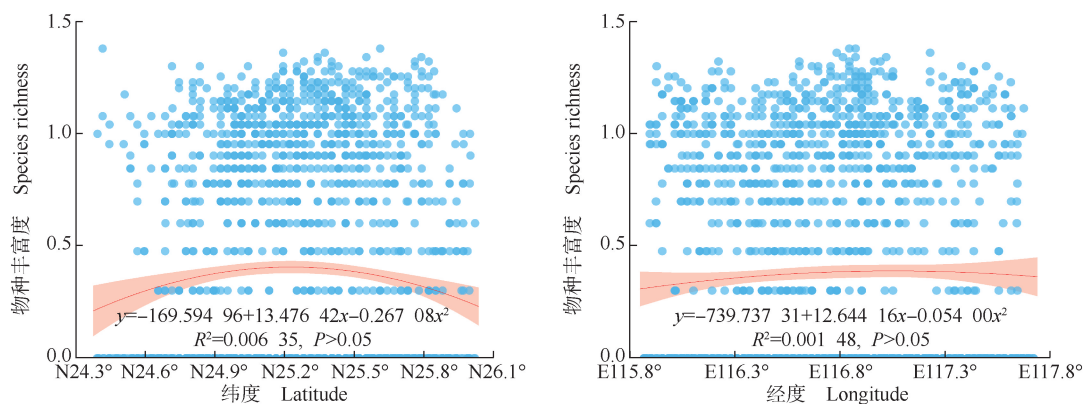


图 2 闽西常绿阔叶林区壳斗科物种丰富度与纬度和经度的二次多项式回归模型
Fig. 2 Quadratic polynomial regression models of Fagaceae species richness with latitude and longitude in evergreen broad-leaved forest region of western Fujian

度升高,闽西常绿阔叶林区壳斗科物种丰富度呈现微弱的单峰型变化。根据模型推算,壳斗科物种丰富度在北纬 25.2°和东经 117.0°附近最高,并由此向东西和南北方向递减。统计检验显示:这 2 个模型均未达到显著水平 ($P>0.05$),且解释力极低 ($R^2<0.01$)。

从 Jaccard 相似系数(表 4)看,北纬 24.0°~24.5°与北纬 26.0°~26.5°区域间的物种相似性最低,说明这 2 个纬度梯度间壳斗科物种组成差异最大;东经

115.5°~116.0°和东经 117.0°~117.5°区域间的物种相似性最低,说明这 2 个经度梯度间壳斗科物种组成差异最大。北纬 24.5°~26.0°内 3 个梯度间的 Jaccard 相似系数较高,相邻梯度间的 Jaccard 相似系数均高于 0.80,说明这 3 个纬度梯度间壳斗科物种组成较为相似。5 个经度梯度中,相邻梯度间的 Jaccard 相似系数在 0.72~0.80 之间,说明相邻经度梯度间的物种组成较为相似。

表 4 闽西常绿阔叶林区不同纬度和经度梯度间壳斗科物种的 Jaccard 相似系数¹⁾

Table 4 Jaccard similarity coefficient of Fagaceae species between different latitude and longitude gradients in evergreen broad-leaved forest region of western Fujian¹⁾

纬度梯度/(°) Latitude gradient	纬度梯度间的 Jaccard 相似系数 Jaccard similarity coefficient between latitude gradients					经度梯度/(°) Longitude gradient	经度梯度间的 Jaccard 相似系数 Jaccard similarity coefficient between longitude gradients				
	N1	N2	N3	N4	N5		E1	E2	E3	E4	E5
N1	1.00	0.62	0.61	0.60	0.50	E1	1.00	0.72	0.66	0.64	0.79
N2		1.00	0.82	0.82	0.66	E2		1.00	0.80	0.73	0.74
N3			1.00	0.83	0.71	E3			1.00	0.75	0.67
N4				1.00	0.70	E4				1.00	0.73
N5					1.00	E5					1.00

¹⁾ N1: N24.0°~24.5°; N2: N24.5°~25.0°; N3: N25.0°~25.5°; N4: N25.5°~26.0°; N5: N26.0°~26.5°; E1: E115.5°~116.0°; E2: E116.0°~116.5°; E3: E116.5°~117.0°; E4: E117.0°~117.5°; E5: E117.5°~118.0°。每个梯度只包含上限值,不包含下限值 Each gradient includes only the upper limit, not the lower limit.

2.2 壳斗科物种丰富度与环境因子的关系

闽西常绿阔叶林区壳斗科物种丰富度随海拔梯度、纬度和经度升高呈现微弱变化,说明该地区壳斗科物种丰富度的空间分异并不是单一因子作用的结果,而是多种因子综合作用的结果。

2.2.1 Spearman 秩相关性分析 从 Spearman 秩相关系数(表 5)看,闽西常绿阔叶林区壳斗科物种丰富度与海拔、地形湿度指数、年均温、最热月均温、最冷月均温、气温年较差、年降水量、最湿月降水量、最干月降水量、降水季节性、实际蒸散量、干燥指数、土壤质地、景观生态风险指数、景观干扰度指数、夜间灯光指数、距道路距离、气温空间差异、降水量空间差异 19

个环境因子的相关性达到显著水平 ($P<0.05$),与坡度等 6 个环境因子的相关性不显著。

2.2.2 一元线性回归分析 以与物种丰富度存在显著相关性的环境因子为自变量、物种丰富度为因变量,进行一元线性回归分析,结果(表 5)显示:闽西壳斗科物种丰富度与海拔、年降水量、最湿月降水量、最干月降水量、干燥指数、距道路距离、降水量空间差异呈显著或极显著 ($P<0.01$) 正相关,与地形湿度指数、年均温、最热月均温、最冷月均温、气温年较差、降水季节性、实际蒸散量、土壤质地、景观生态风险指数、景观干扰度指数、夜间灯光指数、气温空间差异呈显著或极显著负相关。

表 5 闽西常绿阔叶林区壳斗科物种丰富度与环境因子的 Spearman 秩相关系数和一元线性回归分析

Table 5 Spearman's rank correlation coefficient and simple linear regression analysis between Fagaceae species richness and environmental factors of evergreen broad-leaved forest region of western Fujian

环境因子 Environmental factor	Spearman 秩相关系数 ¹⁾ Spearman's rank correlation coefficient ¹⁾	一元线性回归分析 Simple linear regression analysis		
		回归方程 Regression equation	R^2	P
海拔 Elevation	0.068 72 *	$y=0.305\ 24+0.000\ 13x$	0.004 72	2.05×10^{-3}
坡度 Slope	0.028 00			
坡向 Aspect	0.033 88			
地形湿度指数 Topographic wetness index	-0.068 00 *	$y=0.480\ 68-0.016\ 71x$	0.004 62	2.28×10^{-3}
年均温 Mean annual temperature	-0.306 13 *	$y=2.495\ 51-0.117\ 03x$	0.093 71	6.85×10^{-45}

续表5 Table 5 (Continued)

环境因子 Environmental factor	Spearman 秩相关系数 ¹⁾ Spearman's rank correlation coefficient ¹⁾	一元线性回归分析 Simple linear regression analysis		
		回归方程 Regression equation	R ²	P
最热月均温 Mean temperature of the warmest month	-0.337 54 *	y=3.585 88-0.105 24x	0.003 93	8.92×10 ⁻⁵⁵
最冷月均温 Mean temperature of the coldest month	-0.208 40 *	y=0.748 92-0.084 80x	0.043 43	3.60×10 ⁻²¹
气温年较差 Annual temperature range	-0.230 71 *	y=2.818 83-0.093 31x	0.053 23	1.05×10 ⁻²⁵
年降水量 Annual precipitation	0.234 77 *	y=-1.596 59+0.001 26x	0.055 12	1.39×10 ⁻²⁶
最湿月降水量 Precipitation of the wettest month	0.210 71 *	y=-1.494 66+0.007 44x	0.044 40	1.29×10 ⁻²¹
最干月降水量 Precipitation of the driest month	0.077 36 *	y=-0.029 66+0.011 71x	0.005 98	5.16×10 ⁻⁴
降水季节性 Precipitation seasonality	-0.091 75 *	y=4.503 79-0.071 02x	0.008 42	3.78×10 ⁻⁵
实际蒸散量 Actual evapotranspiration	-0.308 17 *	y=3.682 23-0.002 56x	0.094 97	1.69×10 ⁻⁴⁵
干燥指数 Aridity index	0.282 32 *	y=-0.955 52+0.000 11x	0.079 70	3.66×10 ⁻³⁸
土壤全氮含量 Soil total nitrogen content	-0.007 92			
土壤质地 Soil texture	-0.069 39 *	y=0.492 13-0.046 44x	0.004 82	1.85×10 ⁻³
土壤有机质含量 Soil organic matter content	0.011 20			
土壤 pH 值 Soil pH value	-0.022 71			
景观生态风险指数 Landscape ecological risk index	-0.125 20 *	y=0.398 80-0.001 98x	0.015 67	1.77×10 ⁻⁸
景观干扰度指数 Landscape disturbance index	-0.125 33 *	y=0.400 47-0.013 88x	0.015 71	1.71×10 ⁻⁸
夜间灯光指数 Nighttime light index	-0.113 37 *	y=0.396 46-0.029 46x	0.012 85	3.44×10 ⁻⁷
距道路距离 Distance to road	0.183 17 *	y=0.295 00+5.714 77x	0.033 55	1.24×10 ⁻¹⁶
海拔变幅 Elevation range	0.018 56			
气温空间差异 Temperature spatial difference	-0.230 71 *	y=2.818 83-0.093 31x	0.053 23	1.05×10 ⁻²⁵
降水量空间差异 Precipitation spatial difference	0.236 14 *	y=-1.836 49+0.010 21x	0.055 76	6.98×10 ⁻²⁷

¹⁾ * : P<0.05.

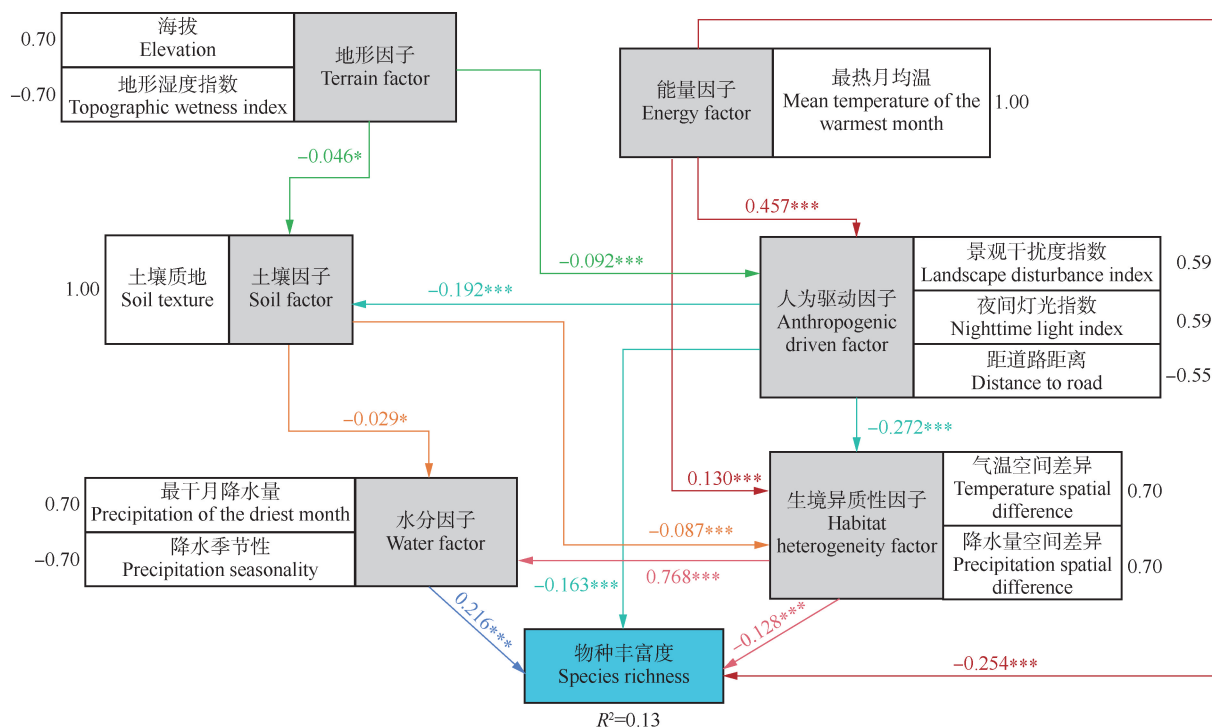
2.2.3 层次分割分析 对显著影响闽西常绿阔叶林区壳斗科物种丰富度的环境因子进行进一步筛选,剔除共线性较强的 8 个环境因子,对剩余的 11 个环境因子进行层次分割分析。结果(表 6)显示:这 11 个环境因子对闽西常绿阔叶林区壳斗科物种丰富度的独立贡献率合计 13.58%。其中,最热月均温、气温空间差异和景观干扰度指数的独立贡献率明显高于其他环境因子,海拔和地形湿度指数的独立贡献率相近且明显低于其他环境因子。

2.2.4 分段结构方程模型分析 分段结构方程模型分析结果(图 3)显示:地形因子、能量因子、土壤因子、人为驱动因子、水分因子、生境异质性因子能够共同解释闽西山地区常绿阔叶林区壳斗科物种丰富度的 13%。能量因子(只有最热月均温)和水分因子(包括最干月降水量和降水季节性)是直接影响物种丰富度的重要环境因子,分别在 0.001 水平与物种丰富度呈显著的负相关和正相关,其中,能量因子还能够通过改变人为驱动因子和生境异质性因子间接影响物种丰富度。其次,人为驱动因子(包括景观干扰指数、夜间灯光指数、距道路距离)和生境异质性因子(包括气温空间差异和降水量空间差异)也能够直接影响物种丰富度,均在 0.001 水平与物种丰富度呈显

著负相关。其中,人为驱动因子还能够通过影响土壤因子和生境异质性因子间接影响物种丰富度;生境异质性因子则能够通过影响水分因子间接影响物种丰富度。地形因子(包括海拔和地形湿度指数)和土壤因子(只有土壤质地)对物种丰富度均无直接影响,

表 6 筛选出的 11 个对闽西常绿阔叶林区壳斗科物种丰富度影响显著的环境因子的层次分割分析
Table 6 Hierarchical partitioning analysis on eleven selected environmental factors significantly affecting Fagaceae species richness in evergreen broad-leaved forest region of western Fujian

环境因子 Environmental factor	独立贡献率/% Independent contribution rate
海拔 Elevation	0.06
地形湿度指数 Topographic wetness index	0.07
最热月均温 Mean temperature of the warmest month	3.64
最干月降水量 Precipitation of the driest month	0.71
降水季节性 Precipitation seasonality	0.30
土壤质地 Soil texture	0.21
景观干扰度指数 Landscape disturbance index	2.17
夜间灯光指数 Nighttime light index	1.51
距道路距离 Distance to road	1.19
气温空间差异 Temperature spatial difference	2.17
降水量空间差异 Precipitation spatial difference	1.55
合计 Total	13.58



R^2 : 该模型中所有环境因子能够共同解释的壳斗科物种丰富度的比例 The proportion of Fagaceae species richness explained collectively by all environmental factors in the model; 白色和灰色方框中分别为测量变量和复合变量 The white and gray boxes represent the measured variables and composite variables, respectively; 彩色箭头指向受影响的复合变量 The colored arrows point to the affected composite variables; 彩色数值为路径系数 The colored values represent the path coefficients; 黑色数值为测量变量与复合变量之间的系数 The black values represent the coefficients between the measured variables and the composite variables. *: $P<0.05$; ***: $P<0.001$.

图3 影响闽西常绿阔叶林区壳斗科物种丰富度的环境因子驱动机制的分段结构方程模型

Fig. 3 Piecewise structural equation model for driving mechanism of environmental factors affecting Fagaceae species richness in evergreen broad-leaved forest region of western Fujian

但地形因子可通过影响人为驱动因子和土壤因子间接影响物种丰富度,土壤因子则可通过影响水分因子和生境异质性因子间接影响物种丰富度。

3 讨论和结论

3.1 闽西常绿阔叶林区壳斗科物种丰富度的分布特征

闽西常绿阔叶林区壳斗科物种丰富度随海拔升高呈现典型的单峰型分布特征,峰值出现在海拔 600~900 m 区域,该研究结果符合物种丰富度-海拔关系 4 类典型模式中的单峰分布格局^[27-30]。此类分布格局主要由地理几何约束效应驱动,根据中域效应 (mid-domain effect, MDE) 理论,当物种分布范围受限于有限海拔范围时,物种丰富度会在海拔梯度的中部达到峰值,与生境条件无关^[31]。闽西常绿阔叶林区壳斗科植物的物种丰富度在海拔 600~900 m 区域达

到峰值,显示了垂直梯度中部的物种积累优势。Jaccard 相似性分析结果显示中、低海拔梯度(海拔 0~1 200 m)间的壳斗科物种相似性较高,说明闽西常绿阔叶林区的壳斗科物种组成稳定,符合中域效应理论预测的几何约束效应。然而,物种丰富度与海拔的二次多项式回归模型却显示虽然该模型通过了显著性检验,但解释力极低,暗示在 3 km×3 km 尺度上,该区域壳斗科物种丰富度沿海拔升高整体呈显著的单峰变化,并受到其他环境因子的干扰。

虽然生态学研究领域学者公认在全球尺度上物种多样性从赤道开始随着纬度升高而递减^[32],但是这一规律在不同区域及研究尺度上却存在较大差异^[8]。闽西常绿阔叶林区壳斗科物种丰富度在水平空间上呈随机分布状态,且与经度和纬度无显著相关性,说明全球物种多样性分布规律在不同区域尺度上的适用性存在限制,凸显了小区域尺度下山地生态系统驱动因子的尺度依赖性,这与 Bertuzzo 等^[33]提出

的假说(纬度效应虽然在全球尺度上对物种丰富度有显著影响,但在局部尺度上被复杂的地形分割所稀释)相契合。Weiser等^[34]指出,物种丰富度随着纬度增加而递减的关系存在不确定性,可能因区域尺度而异。另有研究发现,尺度差异会导致结论分化。例如:在大区域尺度上,中国壳斗科物种丰富度与经度和纬度具有显著相关性,表现为明显的水平地带性^[35];在中区域尺度上,西南地区和川渝地区的低纬度区域物种丰富度均更高^[5-15],但物种丰富度分布格局的显著性和强度却与大尺度研究结果有所不同。可见,随着研究尺度的缩小,壳斗科物种丰富度的纬度效应会逐渐减弱甚至消失,提示研究尺度是导致壳斗科物种丰富度纬度分布格局不一致的关键因子之一。事实上,这种尺度依赖性分布格局并非壳斗科特有,在其他类群研究中亦有体现^[7,9,36]。Hillebrand^[37]证实,物种丰富度的纬度梯度具有高度的普遍性,并且在大区域尺度上的变化比小区域尺度更为明显。说明经度和纬度并非导致物种丰富度变化的直接原因,而是通过多种环境因子和生物因子间接影响物种丰富度^[38]。只在小区域尺度上基于经度和纬度的简单气候梯度对物种丰富度进行预测,其结果准确性有限。若想深刻了解区域物种分布特征,必须综合考虑更直接的局域环境因子和空间尺度。

3.2 能量和水分因子对闽西常绿阔叶林区壳斗科植物分布的核心限制作用

分段结构方程模型显示:能量和水分因子是影响闽西地区壳斗科物种丰富度的关键因子。物种-能量假说(species-energy hypothesis)认为,能量输入(如温度、净初级生产力)是驱动物种丰富度的核心因子,通常表现为正相关关系^[39-40]。然而,一元线性回归分析结果却与此假说相悖,表现为闽西常绿阔叶林区壳斗科物种丰富度与能量因子最热月均温在0.001水平呈显著负相关。推测这可能与环境因子发挥作用的尺度依赖性有关,气候、地形等环境因子在大区域尺度上主导群落构建,而生物互作(如竞争、互利)则在小区域尺度上的作用更显著^[10-11]。具体而言,在大区域尺度上,环境因子通过资源分配与胁迫筛选并主导群落构建,通常表现为温度与物种丰富度正相关^[10];在小区域尺度上,生物互作的权重增大,此时极端温度条件(如高温加剧水分胁迫、低温限制植物生长)可能激化种间竞争,导致温度与物种丰富度呈负相关^[11,38]。孔祥海^[17]指出,闽西常绿阔叶林植物

区系具有显著的中亚热带植物区系向南亚热带植物区系过渡的特点,且随着纬度降低,樟科(Lauraceae)植物将逐渐取代壳斗科植物的主导地位。由此推断,最热月均温升高后,闽西常绿阔叶林区的壳斗科植物可能在很大程度上受到高温和水分胁迫的影响,同时,能够适应高温、高湿环境的热带性植物(如樟科)在群落中的竞争力会明显增强,这种双重作用可能导致壳斗科物种的种间竞争力减弱,生态位下降。

水分-能量动态假说(water-energy dynamic hypothesis)能够进一步阐释水热协同机制,强调水分和能量共同决定了生物多样性的空间分布格局^[41]。分段结构方程模型分析结果表明:能量因子对闽西常绿阔叶林区壳斗科物种丰富度存在直接且显著的负向调控效应,水分因子则对壳斗科物种丰富度表现出直接的正向促进效应,这一结果印证了水分能在能量胁迫中发挥缓冲作用。综上,能量因子和水分因子通过直接调控(能量抑制)与直接促进(水分增益)的协同路径形成水分-能量平衡机制,构成了闽西常绿阔叶林区壳斗科物种丰富度的核心驱动力。

3.3 其他环境因子对闽西常绿阔叶林区壳斗科植物分布的驱动机制

分段结构方程模型分析结果显示:除能量与水分因子的核心作用外,闽西常绿阔叶林区壳斗科物种丰富度还受到人为驱动因子、生境异质性因子、土壤因子及地形因子的综合调控。其中,生境异质性因子扮演关键的枢纽角色,能量因子、人为驱动因子和土壤因子可通过改变生境异质性因子间接影响壳斗科物种丰富度,且人为驱动因子和土壤因子均对生境异质性因子表现出极强的抑制作用。

影响闽西常绿阔叶林区壳斗科物种丰富度的生境异质性因子为气温空间差异和降水量空间差异,而海拔变幅在Spearman相关性分析中即被证实对物种丰富度无显著影响,因而未作为生境异质性因子纳入分段结构方程模型。这与海拔能够显著提升川渝地区壳斗科物种丰富度^[15]明显不同,这种差异可能是环境因子的尺度依赖效应与区域生态特殊性双重作用的结果。一方面,本研究采用的3 km×3 km精细网格尺度放大了局部环境噪声(如微地形温差、短期降水波动),使地形变化的累积效应被遮蔽;另一方面,闽西地区为南岭山地向武夷山脉过渡的生态廊道,其地貌本身具有明显的破碎化特征^[17],加上长期、强烈的人类活动干扰^[42],共同削弱了海拔变幅作

为生境异质性因子的解释力。具体而言,该区域地形复杂、斑块化明显,导致水热条件在局域尺度上产生高度异质性,其影响远超海拔变化所能形成的规律性生态梯度。因此,在本研究构建的生境异质性因子中,气温与降水量的空间差异成为该区域壳斗科物种丰富度的主要影响因子,而海拔梯度在统计上未能体现出对壳斗科物种丰富度的显著影响。生境异质性假说认为,环境的空间异质性能通过增加生态位维度促进物种共存^[43]。在闽西地区,气温与降水量的空间差异塑造了多维资源梯度(如阳坡-阴坡的干湿分异、沟谷-山脊的水热再分配),从而为壳斗科植物生长提供了互补性的生态位。

值得注意的是,人为驱动因子在闽西常绿阔叶林区壳斗科物种丰富度中起关键中介作用,主要通过调节水分-能量动态平衡产生间接影响。具体而言,能量因子显著促进人为驱动因子,而地形因子则呈现抑制作用,二者共同调控人为驱动因子的作用强度;受此调控,人为驱动因子进一步通过土壤因子和生境异质性因子间接调节水分因子,在维持水分-能量动态平衡中发挥中介作用,最终通过直接和间接途径共同影响该区域壳斗科物种丰富度。

3.4 结论

总体来看,闽西常绿阔叶林区壳斗科植物的物种丰富度沿海拔梯度呈单峰型变化,其垂直分异特征符合中域效应理论,且主要受地理几何约束效应调控;在水平尺度上呈随机分布状态,且与经度和纬度无显著相关性。该区域壳斗科物种丰富度主要受水分-能量平衡机制调控,同时受生境异质性和人为驱动介导,其他环境因子通过该路径产生间接效应。

参考文献:

- [1] 陈胜东,徐海根,曹铭昌,等.物种丰富度格局研究进展[J].生态与农村环境学报,2011,27(3):1-9.
- [2] 刘端,赵莉娜,鲁丽敏,等.广西生物多样性保护优先区筛选[J].植物资源与环境学报,2022,31(2):1-9.
- [3] STORCH D, ŠÍMOVÁ I, SMYČKA J, et al. Biodiversity dynamics in the Anthropocene: how human activities change equilibria of species richness[J]. Ecography, 2022, 2022(4): e05778.
- [4] ZHANG R, TIAN D, WANG J, et al. Critical role of multidimensional biodiversity in contributing to ecosystem sustainability under global change[J]. Geography and Sustainability, 2023, 4: 232-243.
- [5] 张凤英,廖梓延,潘开文,等.西南地区壳斗科物种丰富度和特有性分布格局模拟及其环境解释[J].应用生态学报,2021,32(7):2290-2300.
- [6] 王思齐,朱章明.中国蔷薇属植物物种丰富度分布格局及其与环境因子的关系[J].生态学报,2022,42(1):209-219.
- [7] 孟敬慈,王国栋,曹光兰,等.中国芦苇沼泽植物物种丰富度分布格局及其驱动因素[J].生物多样性,2024,32(2):32194.
- [8] 王健铭,王文娟,李景文,等.中国西北荒漠区植物物种丰富度分布格局及其环境解释[J].生物多样性,2017,25(11):1192-1201.
- [9] 王文晓,黄文广,杨君珑,等.宁夏草原物种丰富度分布格局及其水热解释[J].干旱区资源与环境,2019,33(5):158-163.
- [10] KING T W, VYNNE C, MILLER D, et al. The influence of spatial and temporal scale on the relative importance of biotic vs. abiotic factors for species distributions[J]. Diversity and Distributions, 2021, 27(2):327-343.
- [11] MOD H K, CHEVALIER M, LUOTO M, et al. Scale dependence of ecological assembly rules: insights from empirical datasets and joint species distribution modelling[J]. Journal of Ecology, 2020, 108(5):1967-1977.
- [12] ZHENG J, ARIF M, HE X, et al. Plant community assembly is jointly shaped by environmental and dispersal filtering along elevation gradients in a semiarid area, China[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 1041742.
- [13] 杨玉盛,郭剑芬,王健,等.我国南方植物生态学研究述评[J].地理学报,2009,64(9):1048-1057.
- [14] JIANG N, VOGLMAYR H, XUE H, et al. Morphology and phylogeny of *Pestalotiopsis* (Sporocadaceae, Amphisphaerales) from fagaceae leaves in China[J]. Microbiology Spectrum, 2022, 10(6): e0327222.
- [15] 张凤英,冯毅,廖梓延,等.生态因子对川渝地区壳斗科植物物种丰富度的影响[J].应用与环境生物学报,2020,26(3):689-696.
- [16] 丘喜昭,林鹏.闽西梅花山自然保护区的常绿阔叶林[J].厦门大学学报(自然科学版),1989,28(4):406-409.
- [17] 孔祥海.闽西常绿阔叶林植物区系分析[J].广西植物,2010,30(1):95-101.
- [18] 李恒民,陈永波,李娜,等.基于 ArcGIS engine 的地图投影与坐标转换的研究与实现[J].城市勘测,2012(5):105-108.
- [19] JENKS G F, CASPALL F C. Error on choroplethic maps: definition, measurement, reduction[J]. Annals of the Association of American Geographers, 1971, 61(2):217-244.
- [20] 林阳,李时轩,周伟龙,等.百山祖国家公园植物群落 α 和 β 多样性对海拔梯度的响应[J].生态学报,2024,44(17):7700-7712.
- [21] MOSER D, DULLINGER S, ENGLISCH T, et al. Environmental determinants of vascular plant species richness in the Austrian Alps[J]. Journal of Biogeography, 2005, 32(7):1117-1127.
- [22] TSUJINO R, YUMOTO T. Vascular plant species richness along environmental gradients in a cool temperate to sub-alpine mountainous zone in central Japan[J]. Journal of Plant Research, 2013, 126(2):203-214.

- [23] ZELLWEGER F, BALTENSWEILER A, GINZLER C, et al. Environmental predictors of species richness in forest landscapes: abiotic factors versus vegetation structure [J]. *Journal of Biogeography*, 2016, 43(6): 1080–1090.
- [24] SONG C, CAO M. Relationships between plant species richness and terrain in middle sub-tropical Eastern China [J]. *Forests*, 2017, 8(9): 344.
- [25] 王春晓, 钱志军, 黄运腾, 等. 平潭岛不同林下草本层外来入侵植物多样性特征及环境因子解释[J]. *应用与环境生物学报*, 2025, 31(1): 12–22.
- [26] LEFCHECK J S. piecewiseSEM: piecewise structural equation modelling in R for ecology, evolution, and systematics [J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2016, 7(5): 573–579.
- [27] DANI R S, DIVAKAR P K, BANIYA C B. Diversity and composition of plants species along elevational gradient: research trends [J]. *Biodiversity and Conservation*, 2023, 32(8): 2961–2980.
- [28] HRIVNÁK R, GÖMÖRY D, SLEZÁK M, et al. Species richness pattern along altitudinal gradient in central European beech forests [J]. *Folia Geobotanica*, 2014, 49(3): 425–441.
- [29] WATKINS J E, Jr., CARDELÚS C, COLWELL R K, et al. Species richness and distribution of ferns along an elevational gradient in costa rica [J]. *American Journal of Botany*, 2006, 93(1): 73–83.
- [30] CHANG A, WU T, LI B, et al. Distribution pattern of species richness of endemic genera in mountainous areas of southwest China and its influencing factors [J]. *Sustainability*, 2024, 16(9): 3750.
- [31] 冯建孟, 王襄平, 李晶, 等. 面积和中间膨胀效应对丽江地区种子植物物种丰富度垂直分布格局的影响[J]. *生物多样性*, 2006, 14(2): 107–113.
- [32] 贺金生, 陈伟烈. 陆地植物群落物种多样性的梯度变化特征[J]. *生态学报*, 1997, 17(1): 91–99.
- [33] BERTUZZO E, CARRARA F, MARI L, et al. Geomorphic controls on elevational gradients of species richness [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(7): 1737–1742.
- [34] WEISER M D, ENQUIST B J, BOYLE B, et al. Latitudinal patterns of range size and species richness of New World woody plants [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2007, 16(5): 679–688.
- [35] 邱丽胤, 岳晓英, 赵晓月, 等. 中国壳斗科植物属的水平地带性及其成因研究[J]. *太原师范学院学报(自然科学版)*, 2024, 23(2): 72–78.
- [36] ZU K, ZHANG C, CHEN F, et al. Latitudinal gradients of angiosperm plant diversity and phylogenetic structure in China's nature reserves [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2023, 42: e02403.
- [37] HILLEBRAND H. On the generality of the latitudinal diversity gradient [J]. *The American Naturalist*, 2004, 163(2): 192–211.
- [38] HORN S, HEMPEL S, RISTOW M, et al. Plant community assembly at small scales: spatial vs. environmental factors in a european grassland [J]. *Acta Oecologica*, 2015, 63: 56–62.
- [39] EVANS K L, GREENWOOD J J D, GASTON K J. Dissecting the species-energy relationship [J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2005, 272: 2155–2163.
- [40] BONN A, STORCH D, GASTON K J. Structure of the species-energy relationship [J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2004, 271: 1685–1691.
- [41] 叶鹏程, 陈慧, 张光富, 等. 江苏东台野生草本植物多样性及其与环境因子的关系 [J]. *生态科学*, 2022, 41(3): 133–141.
- [42] 赖日文, 赖敏华, 苏艳琴. 长汀县水土流失敏感性时空分异研究 [J]. *生态科学*, 2021, 40(6): 116–124.
- [43] 王寅, 王键铭, 崔盼杰, 等. 科尔沁沙地植物物种丰富度格局及其与环境的关系 [J]. *植物科学学报*, 2018, 36(6): 794–803.

(责任编辑: 佟金凤)

附录 I Appendix I

栗属 <i>Castanea</i>	吊皮锥 <i>C. kawakamii</i>	美叶柯 <i>L. calophyllus</i>	紫玉盘柯 <i>L. wariifolius</i>	多脉青冈 <i>Q. multiervis</i>
锥栗 <i>C. henryi</i>	鹿角锥 <i>C. lamontii</i>	包果柯 <i>L. cleistocarpus</i>	永福柯 <i>L. yongfuensis</i>	小叶青冈 <i>Q. myrsinifolia</i>
栗 <i>C. mollissima</i>	大叶锥 <i>C. megaphylla</i>	烟斗柯 <i>L. corneus</i>	栎属 <i>Quercus</i>	倒卵叶青冈 <i>Q. arbutifolia</i>
茅栗 <i>C. seguinii</i>	黑叶锥 <i>C. nigrescens</i>	泥柯 <i>L. fenestratus</i>	岭南青冈 <i>Q. championii</i>	尖叶栎 <i>Q. oxyphylla</i>
锥属 <i>Castanopsis</i>	苦槠 <i>C. sclerophylla</i>	柯 <i>L. glaber</i>	福建青冈 <i>Q. chungii</i>	毛果青冈 <i>Q. pachyloma</i>
米槠 <i>C. carlesii</i>	钩锥 <i>C. tibetana</i>	庵耳柯 <i>L. haipinii</i>	突脉青冈 <i>Q. elevaticostata</i>	沼生栎 <i>Q. palustris</i>
锥 <i>C. chinensis</i>	淋漓锥 <i>C. uraiana</i>	硬壳柯 <i>L. hancei</i>	巴东栎 <i>Q. engleriana</i>	乌冈栎 <i>Q. phillyraeoides</i>
甜槠 <i>C. eyrei</i>	水青冈属 <i>Fagus</i>	港柯 <i>L. harlandii</i>	白栎 <i>Q. fabri</i>	栲栲 <i>Q. serrata</i>
罗浮锥 <i>C. fabri</i>	水青冈 <i>F. longipetiolata</i>	鼠刺叶柯 <i>L. iteaphyllus</i>	饭甗青冈 <i>Q. fleuryi</i>	云山青冈 <i>Q. sessilifolia</i>
栲 <i>C. fargesii</i>	光叶水青冈 <i>F. lucida</i>	木姜叶柯 <i>L. litseifolius</i>	青冈 <i>Q. glauca</i>	栓皮栎 <i>Q. variabilis</i>
蕙荊锥 <i>C. fissa</i>	柯属 <i>Lithocarpus</i>	榄叶柯 <i>L. oleifolius</i>	赤皮青冈 <i>Q. gilva</i>	
毛锥 <i>C. fordii</i>	榆柯 <i>L. amoenus</i>	大叶苦柯 <i>L. paihengii</i>	细叶青冈 <i>Q. gracilis</i>	
红锥 <i>C. hystrix</i>	杏叶柯 <i>L. amygdalifolius</i>	滑皮柯 <i>L. skanianus</i>	大叶青冈 <i>Q. jenseniana</i>	
秀丽锥 <i>C. jucunda</i>	短尾柯 <i>L. brevicaudatus</i>	菱果柯 <i>L. taitoensis</i>	闽西青冈 <i>Q. minxiensis</i>	