



南岭国家级自然保护区南坡乔木层物种多样性的垂直分布特征

李志鹏, 李旭, 骆金初, 李跃林, 陈红锋, 唐旭利

引用本文:

李志鹏, 李旭, 骆金初, 等. 南岭国家级自然保护区南坡乔木层物种多样性的垂直分布特征[J]. 热带亚热带植物学报, 2025, 33(5): 483–494.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4924>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[草海国家级自然保护区华山松群落特征及物种多样性研究](#)

热带亚热带植物学报. 2020, 28(1): 44–52 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4063>

[广西中部7种典型灌丛群落的物种多样性特征](#)

Species Biodiversity of Seven Typical Shrub Communities in the Middle of Guangxi Zhuang Autonomous Region

热带亚热带植物学报. 2018, 26(2): 157–163 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3841>

[人为干扰对栲树次生林群落物种多样性和土壤理化性质的影响](#)

Effect of Human Disturbance on Species Diversity and Soil Physiochemical Properties of Castanopsis fargesii Secondary Forest

热带亚热带植物学报. 2018, 26(4): 355–362 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3843>

[不同样方尺度下鄱阳湖湿地典型草洲植物种间关联性](#)

Species Relationship among Typical Marshland Plants in Poyang Lake Region on Different Sample Scale

热带亚热带植物学报. 2018, 26(5): 449–456 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3862>

[广州市植物多样性现状调查与分析](#)

Investigation and Analysis of Plant Diversity in Guangzhou

热带亚热带植物学报. 2021, 29(3): 229–243 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4241>

向下翻页，浏览PDF全文

南岭国家级自然保护区南坡乔木层物种多样性的垂直分布特征

李志鹏^{1a,2}, 李旭^{1a,2}, 骆金初^{1b,2}, 李跃林^{1a}, 陈红锋^{1b}, 唐旭利^{1a*}

(1. 中国科学院华南植物园, a. 退化生态系统植被恢复与管理重点实验室, b. 中国科学院植物资源保护与可持续利用重点实验室, 广州 510650; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为探究植物多样性随海拔梯度的变化趋势, 了解群落间物种更替规律, 以南岭国家自然保护区南坡的植被群落为研究对象, 于 2018 年 7 月—8 月以 100 m 为梯度沿海拔建立样地进行每木调查, 分析 300~1 800 m 海拔梯度范围内的乔木层植被物种组成、物种多样性和物种更新速率的垂直分布特征。结果表明, 随海拔的升高, 乔木层物种多样性呈双峰曲线变化, 群落间相异性也增大, 且随着海拔差值扩大而逐渐增大, 而在研究区内, 物种更新速率在垂直梯度上表现出不明显的变化。不同海拔区域的群落生产策略有所不同, 低海拔地区以中物种数+少个体数+高单株生物量为主, 中海拔地区以多物种数+中个体数+中生物量为主, 高海拔地区则以少物种数+多个体数+低单株生物量为主。提高物种多样性能为生态系统提高更多生态位和更高的抵抗力稳定性, 有益于保护对环境变化敏感的珍稀濒危植物和重点保护植物。

关键词: 南亚热带; 生物多样性; 海拔梯度; 群落结构; 群落稳定性

doi: 10.11926/jtsb.4924

CSTR:32235.14.jtsb.4924

Vertical Distribution Characteristics of Species Diversity in Canopy Layer in Southern Slope of Nanling National Nature Reserve

LI Zhipeng^{1a,2}, LI Xu^{1a,2}, LUO Jinchu^{1b,2}, LI Yuelin^{1a}, CHEN Hongfeng^{1b}, TANG Xuli^{1a*}

(1a. Key Laboratory of Vegetation Restoration and Management of Degraded Ecosystems; 1b. Key Laboratory of Plant Resources Conservation and Sustainable Utilization, South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To investigate the changing trend in plant diversity along the altitude gradient and understand the species replacement rules among communities, the vegetation communities on the southern slope of Nanling National Nature Reserve were selected as the research object. From July to August 2018, plots were established at 100 m intervals along the altitude for individual tree surveys. The vertical distribution characteristics of the species composition, species diversity and species renewal rate of the tree layer vegetation within the altitude range of 300–1 800 m were analyzed. The results showed that with the increase of altitude, the species diversity of the tree layer presented a double-peak curve change, and the dissimilarity among communities also increased, gradually increasing with the expansion of the altitude difference. In the study area, the species renewal rate showed no obvious change along the vertical gradient. The production strategies of communities at different altitudes were different. In the low-altitude area, it was mainly characterized by medium species number + few individuals + high individual biomass; in the medium-altitude area, it was mainly characterized by many species +

收稿日期: 2024-04-29

接受日期: 2024-07-24

基金项目: 广东省基础与应用基础研究旗舰项目(2023B0303050001)资助

This work was supported by the Flagship Project for Basic and Applied Basic Research in Guangdong (Grant No. 2023B0303050001).

作者简介: 李志鹏(2000 年生), 男, 硕士研究生, 主要从事森林生态学研究。E-mail: lizhipeng@scbg.ac.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xltang@scbg.ac.cn

medium individuals + medium biomass; and in the high-altitude area, it was mainly characterized by few species + many individuals + low individual biomass. Increasing species diversity can provide more ecological niches and higher resistance stability for the ecosystem, which is beneficial to the protection of rare and endangered plants and key protected plants that are sensitive to environmental changes.

Key words: South subtropical; Biodiversity; Elevation gradient; Community structure; Community stability

生物多样性的分布格局是群落物种在不同尺度下变化特征的综合反映^[1], 群落发育和物种演变过程是地理差异和环境梯度等各类生态过程的综合产物^[2-3]。探究生物多样性的分布特征和维持机制一直是群落生态学的热点与核心问题, 测算群落内部的 α 多样性指数和群落间的 β 多样性指数是监测群落内部和群落之间动态变化的重要手段^[4-6], 对揭示群落和生态系统的结构和功能演变, 具有重要意义^[7]。

海拔梯度对植被群落的影响是纬度梯度的缩影, 温度、水分等气象因子随海拔梯度的变化比随纬度的变化快 1 000 倍^[8], 这导致在山地生态系统中, 植被对环境变化的响应更敏感^[9-10], 因此, 在生态系统中设置海拔梯度对植物群落多样性的变化规律进行研究, 是丰富生物多样性理论的必要手段之一。既往的研究表明, 随海拔梯度的上升, 植被群落的物种多样性往往呈现出单峰曲线、单调上升、单调递减、先上升后动态稳定等变化趋势^[8,11-12]。也有研究表明多样性随海拔梯度变化的分布格局与环境因子之间的互作有显著相关^[13]。同时, 植物多样性的变化往往还影响着群落生物量的积累, 即群落生产力的变化, 以及濒危物种的生存^[14], 那么对植物多样性在不同条件下的变化趋势进行研究就显得尤为必要。然而, 以往对海拔梯度与多样性的相关研究可能由于梯度设置的不同而使得多样性变化规律出现差异^[15]。因此对不同的海拔梯度范围内 α 多样性及 β 多样性进行研究, 能够更好地阐述生物多样性和种群更替随海拔梯度变化的特征与规律。

目前, 国内外对生物多样性的垂直分布特征由于研究区域的地理位置、气候条件和样地设置的不同, 导致研究结果差异很大^[16-23]。例如, 郝占庆等^[18]对长白山北坡 700~2 600 m 海拔梯度范围内 β 多样性进行研究, 结果表明群落间 β 多样性随海拔差值的增大而增大; 高辉等^[24]对西藏色季拉山森林群落沿海拔梯度变化格局进行研究, 认为在 3 000~4 700 m 范围内, 环境距离对森林群落构建和

生物多样性变化的解释力大于空间距离, 不同群落对空间和环境变量的响应差异会促成不同海拔植物群落的构建模式差异; 同时也有研究表明随海拔梯度的升高, 植被的多样性呈现下降趋势^[25]。可见, 在不同地理环境状况下进行植被多样性调查, 对植物区系的动态研究有十分重要的补充意义。

南岭国家级自然保护区是粤北地区重要的生态屏障, 其丰富的植被群落对当地水文和气候等起着至关重要的调节作用^[26-27]。南岭地区有着十分丰富的森林资源, 是中国东南地区常绿阔叶林的典型代表蓄存区域之一和十分珍贵的生物多样性保护区域之一^[28]。虽然该地区已有不同海拔的植物多样性研究, 但仅仅是以线性拟合的方式探讨了 α 多样性随海拔梯度的总体变化^[29], 而本研究结合 α 多样性和 β 多样性指标, 并纳入物种数、个体数及生物量的变化, 采用不同的拟合方式, 更好地展现了其在不同海拔区域内的变化趋势。因此, 本研究对南岭自然保护区不同区域进行的进一步植被科学研究, 能够更进一步了解不同海拔植被群落结构的变化和趋势, 促进对该区域群落结构、生物多样性、珍稀植被保护等的认识, 为将来南岭自然保护区的生物多样性保护、生态建设、珍稀濒危物种保护提供科学的参考依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区地处南岭国家自然保护区南部, 位于粤北南岭山脉中心地带, 属韶关、清远的交界区域, 地理坐标为 113°56'41.7"~112°52'18.3" E, 24°55'65.2"~24°51'72.4" N。该地处于典型的亚热带季风气候区, 年平均温度约为 20 °C, 最高温度超过 34 °C, 最低温度可到零下, 冬季偶有霜期。其年降水量普遍在 1 700 mm 以上, 有记录以来最高年份达 2 495 mm^[30]。该地土壤类型为山地黄壤, 有机质含量较低, 土壤质地包含砂质土、黏质土、壤土等, 同时, 该区域因地势较高较陡, 海拔高度差较大, 因而具有典型

的山地气候特点^[31]。

该区域内林地 在历史中曾遭受破坏, 后经自然恢复, 目前已形成多种优势树种共存的次生林地, 包含分布于整个山地区域的亚热带常绿阔叶林、亚热带常绿与落叶阔叶混交林以及海拔 1 000 m 以上极少区域存在的亚热带常绿针叶林等群落类型。在不同海拔范围内的林地中, 由多种强适应性树种率先定殖, 形成优势种, 主要包括: 光叶红豆(*Ormosia glaberrima*)、红鳞蒲桃(*Syzygium hancei*)、白背厚壳桂(*Cryptocarya maclurei*)、虎皮楠(*Daphniphyllum oldhamii*)、观光木(*Michelia odora*)、罗浮锥(*Castanopsis faberi*)、猴欢喜(*Sloanea sinensis*)、栲(*C. fargesii*)、广东木莲(*Manglietia kwangtungensis*)、蜡瓣花(*Corylopsis sinensis*)、甜槠(*Castanopsis eyrei*)、水青冈(*Fagus longipetiolata*)、鹿角杜鹃(*Rhododendron latoucheae*)、红楠(*Machilus thunbergii*)、青榨槭(*Acer davidii*)、福建柏(*Fokienia hodginsii*)、青茶香(*Ilex hanceana*)、五列木(*Pentaphylax euryoides*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、猴头杜鹃(*R. simiarum*)、褐叶青冈(*Quercus stewardiana*)、光叶山矾(*Sym-*

plocos lancifolia)、硬壳柯(*Lithocarpus hancei*)、桂南木莲(*Manglietia conifera*)、木荷(*Schima superba*)、浙江尖连蕊茶(*Camellia cuspidata*)、宽叶粗榧(*Cephalotaxus latifolia*)、青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)、西藏钓樟(*Lindera pulcherrima*)、小蜡(*Ligustrum sinense*)等。

1.2 样地的选取

研究区的群落多位于陡峭山坡, 本研究在保证地形、土壤质地、坡度、坡向等因素相同的前提下, 于 2018 年 7 月—8 月, 以 100 m 为海拔梯度, 选取 16 个代表样地, 不重叠地在每个样地内设置 3 个 20 m×30 m 样方, 每个样地的间距大于 1 km, 且所有样方距林缘大于 100 m。在每个样方乔木层中, 对高度大于 4 m 或胸径大于 2 cm 的所有乔木进行种类记录及高度、胸径和冠幅测量^[32], 样地分布见图 1。

1.3 多样性指标的测度

根据调查数据, 本研究选取物种丰富度(*S*)、Shannon-Wiener 指数(*H'*)、Simpson 指数(*D*)和 Pielou 指数(*E*)对不同海拔梯度样地的 α 多样性指数进行计算。物种丰富度 $S=R$; Shannon-Wiener 多样性指数

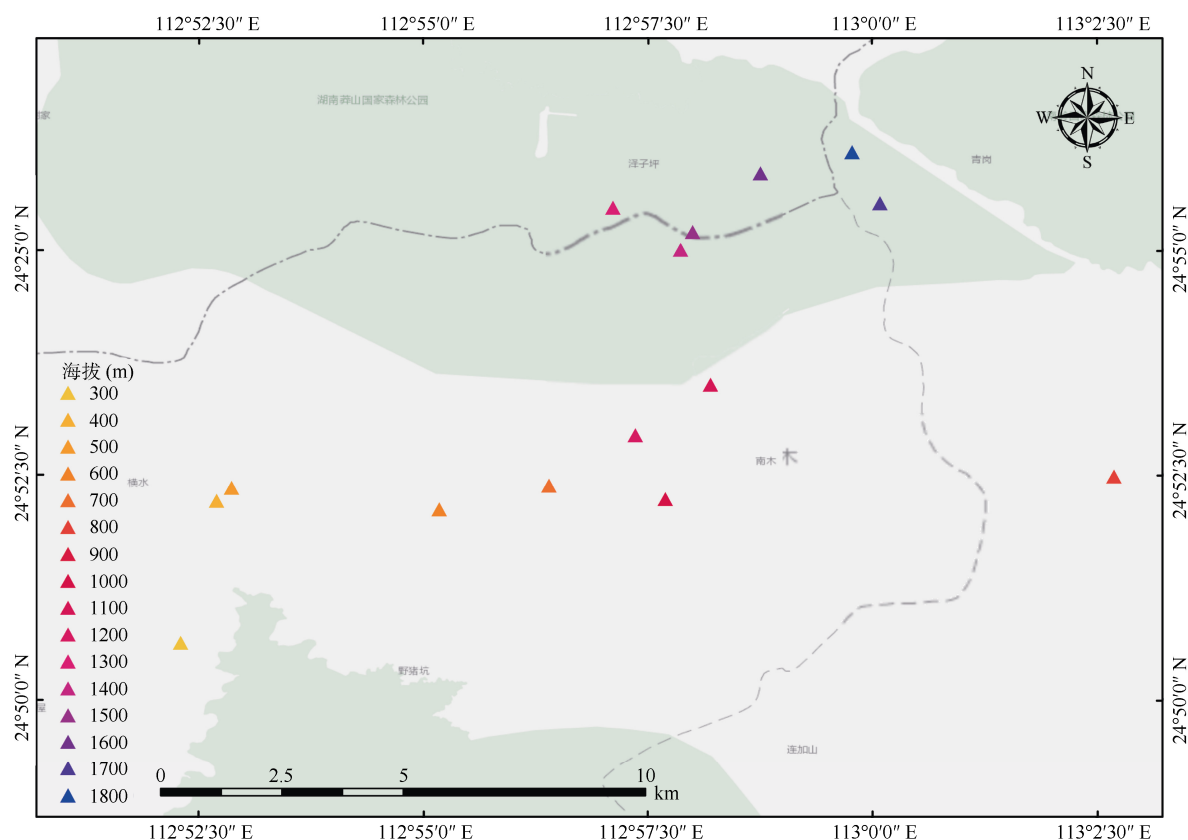


图1 样地分布

Fig. 1 Distribution of plots

$H' = -\sum_{i=1}^S (P_i \ln P_i)$; Simpson 指数 $D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$; Pielou 均匀度指数 $E = H'/\ln S$; 式中, P_i 为第 i 个物种个体数占总个体数的比例^[33], R 为物种数。同时, 乔木层的物种重要值(importance value, IV)=(相对频度+相对密度+相对优势度)/3。

对于 β 多样性, 采用 Bray-Curtis 指数和 Cody 指数对海拔梯度范围内样地间的相异性和变化速率进行测算和分析^[34-35]。Bray-Curtis 指数是一种用于衡量不同群落之间相似性的指数, 其值越大表示不同群落的相似性越低, 即共有物种越少; Cody 指数是对不同群落间变化速率或物种更新速率进行定量描述, 不同群落间物种更新速率越快, 则 Cody 指数越大, Bray-Curtis 指数 $B_N = 2jN/(N_a + N_b)$, 式中, N_a 和 N_b 分别为样地 a 和 b 中所有物种的个体数, jN 为共有种个体数最小者之和。Cody 指数 $C_N = (a+b)/2$, 式中, a 指 2 样地间前者独有的物种数, b 指 2 样地间后者独有的物种数^[36]。

1.4 生物量计算

通过对调查分类结果进行统计分析, 结合文献资料^[37], 对每个样地生物量进行计算。计算时使用对应树种的异速生长方程, 并参考对应林分的生物量计算规则对样地的生物量进行计算以减小误差。

1.5 数据处理和分析

根据不同海拔梯度的差异, 进行 α 多样性指数和 β 多样性指数的计算和分析。同时, 利用不同林分类型的径级生物量方程, 对分种生物量和总生物量进行计算, 并统计不同径级生物量的总和。采用 LOESS 局部加权散点平滑模型分别对乔木层不同海拔梯度与丰富度(S)、Shannon-Wiener 指数(H')、Simpson 指数(D)、Pielou 指数(E)、Bray-Curtis 指数和 Cody 指数之间的变化趋势和相关关系进行检验, 并分析 α 多样性指数与样地生物量间的相关关系, 通过不同群落内部结构特征的更替揭示多样性和生物量的垂直分布特征。

数据的处理和分析阶段使用了 Excel 2021 和 R 4.3.1 软件, 包括指标计算和绘图。指标的计算和图表的绘制则使用了 R 4.3.1 软件和 Origin 2021。

2 结果和分析

2.1 不同海拔梯度群落组成的变化特征

对样地的植被调查结果显示, 乔木层共有 61 科

115 属 238 种植物。其中, 壳斗科(Fagaceae)、樟科(Lauraceae)、山茶科(Theaceae)物种数占比最大, 均大于 10%, 总和大于 30%; 其次为冬青科(Aquifoliaceae)、蔷薇科(Rosaceae)、山矾科(Smylocaceae)、杜鹃花科(Ericaceae)、木兰科(Magnoliaceae)、五加科(Araliaceae)、大戟科(Euphorbiaceae)、杜英科(Elaeocarpaceae)、金缕梅科(Hamamelidaceae)、松科(Pinaceae), 种类占总数的 2%~6%, 总和达 30%; 而安息香科(Styracaceae)、蝶形花科(Papilionaceae)、槭树科(Aceraceae)、清风藤科(Sabiaceae)、天料木科(Samydaceae)、交让木科(Daphniphyllaceae)、马鞭草科(Verbenaceae)、漆树科(Anacardiaceae)、茜草科(Rubiaceae)、桃金娘科(Myrtaceae)、卫矛科(Celastraceae)、紫金牛科(Myrsinaceae)物种数占比均超过 1%, 共计 18%, 剩余科的植物种类数占比均小于 1%。将各海拔梯度中具有代表性的物种数排名前 5 的科进行统计分析可见, 樟科、壳斗科、山茶科植物分布最广, 从 300~1 800 m 均有大量物种分布, 而其他物种数排名靠前的科则仅在部分区域有物种分布(图 2)。同时, 随着海拔的升高, 各科物种数均呈现减少的趋势, 并逐渐由壳斗科和樟科植物为主的群落替换为以山茶科植物为主的群落, 再变换为壳斗科、樟科、山茶科的植物共同作为主要类群。

此外, 不同海拔梯度的优势种分布也存在差异。在低海拔, 樟科、壳斗科和金缕梅科植物往往拥有较高重要值; 在中海拔, 壳斗科、山茶科和杜鹃花科植物更占优势; 而在高海拔, 则是蔷薇科、山茶科植物具有更大重要值(附表 S1)。

2.2 不同海拔梯度乔木层 α 多样性的变化特征

乔木层物种丰富度(S)、Shannon-Wiener 指数(H')、Simpson 指数(D)、Pielou 指数(E)均随海拔上升呈现双峰曲线的变化趋势。第 1 峰值出现在 400~800 m 梯度内, 为最高峰值; 第 2 峰值出现在 1 400~1 600 m 梯度内, 相比第 1 峰值出现时, 4 种指数均降低了 10% (图 3)。其中, S 、 H' 和 D 的第 1 峰值均出现在 400 m 梯度, 分别为 61、3.66、0.97, 第 2 峰值均出现在 1 500 m 梯度, 分别为 56、3.19、0.93; 而 E 则在 800 m 出现第 1 峰值, 为 0.91, 在 1 600 m 出现第 2 峰值, 为 0.80, 总体来看呈现明显的下降趋势。

2.3 不同海拔梯度乔木层植被 β 多样性的变化特征

根据计算所得到的 Bray-Curtis 指数和 Cody 指数矩阵分析, 随着海拔的升高, 相邻海拔样地乔木

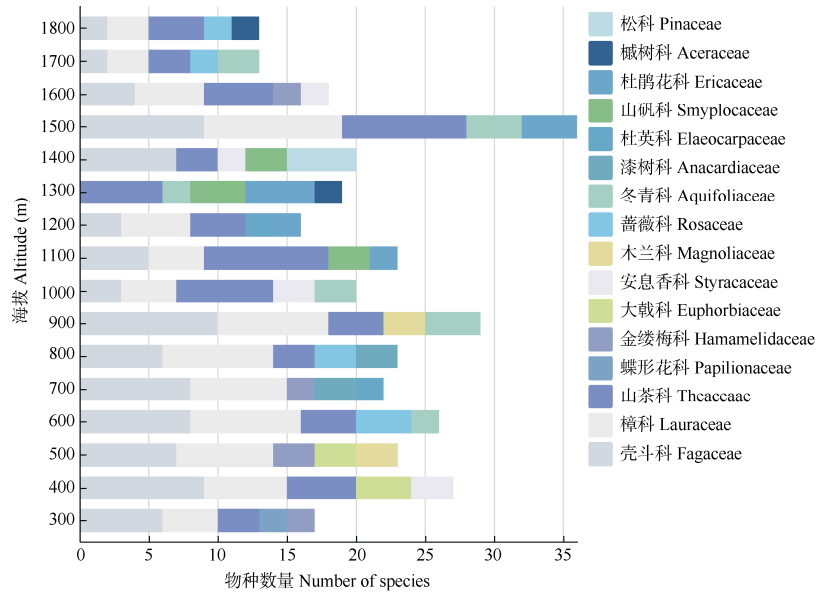


图 2 不同海拔梯度代表性科的物种数

Fig. 2 Number of species of representative families at different altitude

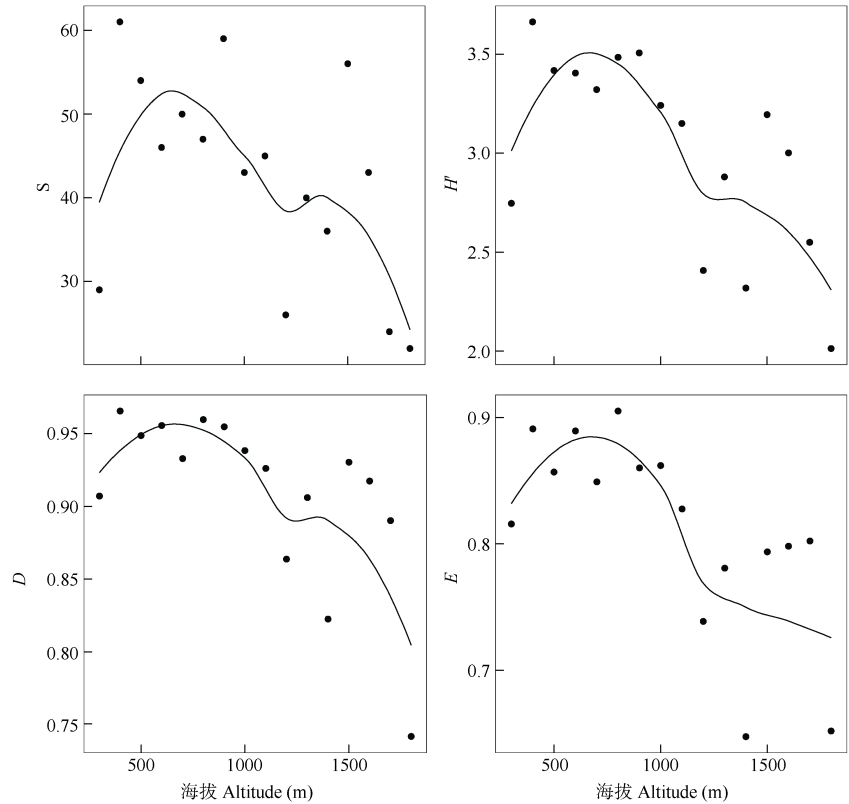


图 3 不同海拔梯度乔木层群落的 α 多样性。S: 丰富度; H' : Shannon-Wiener 指数; D : Simpson 指数; E : Pielou 均匀度指数。下同

Fig. 3 Alpha diversity of canopy layer communities in different altitude. S: Richness; H' : Shannon-Wiener index; D : Simpson index; E : Pielou evenness index. The same below

层的 Bray-Curtis 指数呈现先升高后下降再升高的趋势, 表明随海拔梯度上升, 相邻样地间的总体差异将随着海拔的升高而逐渐增大, 而相邻样地 Cody

指数则随海拔梯度的增大呈现出双峰曲线的变化趋势, 但其值始终保持一定水平(>20), 这印证了相邻样地间的总体差异变化趋势。不同海拔差值的

样地之间,随着海拔差值的增大,2个样地乔木层的 Bray-Curtis 指数大致呈现出快速的单调递增趋势,当海拔差大于 1 000 m 后,样地差异性水平则在 0.95~1.00 内波动,表现出显著差异;而对于 Cody 指数则随着海拔差值的增大,其值在一定范围(>24)内呈现出双峰曲线的变化趋势,但其图形总体呈现中间高两边低的形式,意味着在不同海拔差值的样地间物种更新速率总体呈现出先上升后下降的趋势,很好地解释了 Bray-Curtis 指数在不同海拔差值条件下的变化趋势(图 4)。

2.4 不同海拔梯度植物多样性和生物量的关系

群落生产力与植物多样性之间的关系是生态学研究中的一个核心话题,植物多样性增加通常会提升群落的总体生产力,生物量则是体现群落生产力大小的重要指标,由表 1 可见,在低海拔区域,群落生物量主要来源于高径级植株,而中高海拔区域则逐渐转变为低径级植株提供群落的大部分生物

量。同时,随着海拔的逐渐升高,群落总生物量的变化也呈现出减少趋势,这种趋势在高径级植株的生物量蓄积上得到了更直观的体现。

结合表 1 和图 5 对不同群落中占据 50%以上生物量的前 3 个物种进行统计分析发现,随着海拔的升高,各科物种数减少,植被单株平均生物量也随之减少。在低海拔区域,主要的群落生物量积累模式为中物种数+少个体数+高单株生物量;而在高海拔区域则相反,以少物种数+多个个体数+低单株生物量来提供高海拔区域群落的绝大部分生物量,在 1 400 m 海拔区域,群落生物量积累充分呈现该种模式:众多小型个体共同贡献了该区域超过 50%的生物量;中海拔地区以多物种数+中个体数+中生物量为主。这二者不仅揭示了水热等环境条件随海拔梯度的剧烈变化,还在一定程度上从丰度和种群密度角度解释了多样性的双峰曲线变化规律。

物种多样性对群落生产力和生物量的积累也

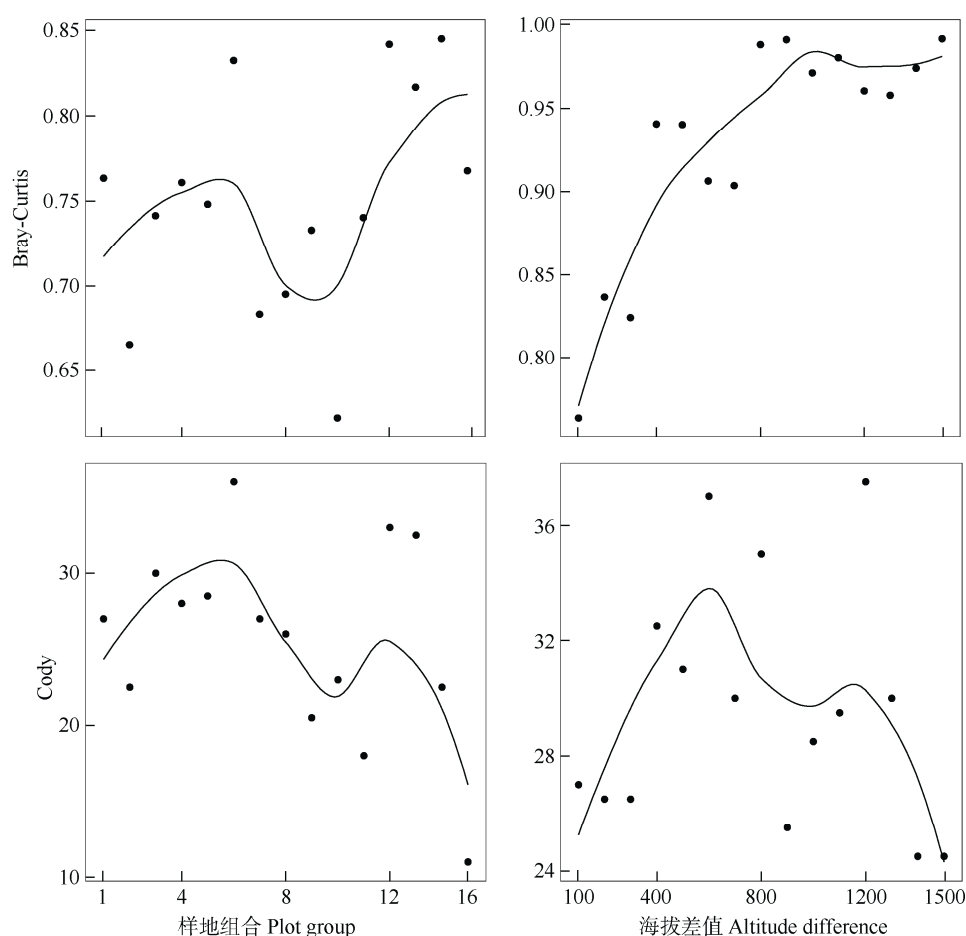


图 4 不同海拔梯度乔木层群落的 Bray-Curtis 和 Cody 指数。样地组合 1~16 分别指海拔 300~400 m、400~500 m、...、1700~1800 m。

Fig. 4 Bray-Curtis index and Cody index of tree-layer communities in different altitude. Plot group 1-16 refers to 300-400 m, 400-500 m, ..., 1700-1800 m. respectively.

表 1 不同海拔梯度内不同径级植物生物量(kg)分布

海拔 Altitude (m)	径级 Diameter at breast height class (cm)					总计 Total
	1~10	10~20	20~30	30~40	>40	
300	1 783.66	11 363.84	5 445.17	4 792.74	5 372.48	28 757.89
400	2 428.61	17 591.24	5 608.16	3 923.41	5 892.85	35 444.26
500	1 440.90	10 041.74	10 697.86	11 134.70	2 544.07	35 859.28
600	1 250.65	7 771.13	4 905.50	14 803.28	39 877.36	68 607.92
700	1 597.94	9 997.02	7 370.64	3 201.71	0.00	22 167.31
800	2 115.73	11 521.81	3 171.22	970.89	23 615.40	41 395.05
900	1 870.95	1 054.53	4 990.67	8 642.73	3 444.43	29 003.32
1000	1 948.84	6 979.32	4 074.82	4 082.20	7 448.25	24 533.43
1100	1 932.75	10 773.48	1 496.46	1 622.74	0.00	15 825.42
1200	2 538.74	14 460.72	3 806.21	3 119.90	0.00	23 925.57
1300	2 187.92	6 825.37	4 480.70	0.00	0.00	13 493.99
1400	1 843.91	155.50	0.00	0.00	0.00	1 999.42
1500	5 865.14	24 881.48	11 032.31	6 591.19	8 235.41	56 605.53
1600	1 816.91	8 829.96	775.24	0.00	0.00	11 422.11
1700	4 602.34	20 070.70	4 539.21	3 520.23	0.00	32 732.47
1800	3 314.84	11 426.56	2 011.74	992.02	2 093.77	19 838.93

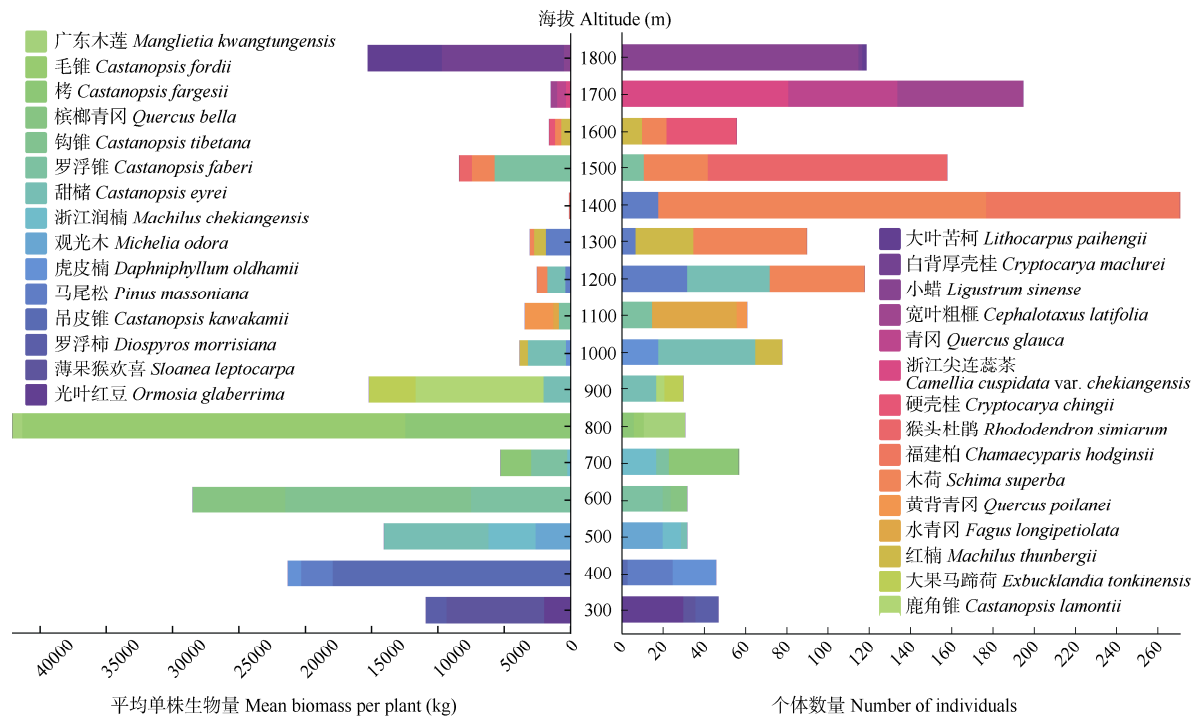


图 5 不同海拔梯度平均单株植株生物量和物种个体数

Fig. 5 Mean biomass per plant and number of individuals at different altitudes

同样具有十分显著的影响,对 α 多样性指数和对应样地生物量进行局部加权散点平滑拟合,呈现出向右倾斜的“S”型(图 6)。随物种多样性的变化,样地生物量出现先缓慢减少,后急速增大,再急速减少的趋势,这与海拔的升高导致生态因子的变化以及物种多样性的变化趋势相一致,但值得注意的是,

从现有数据的总体变化趋势来看仍是物种多样性的升高,样地生物量也将增加。同时,结合图 7 来看,样地生物量随海拔梯度的变化与 α 多样性指标的变化趋势相近,为双峰曲线,但其总体则是随海拔升高呈现下降的趋势,与 α 多样性指标的总变化一致。因此,不同海拔的群落生产策略可总结为:

低海拔地区以中物种数+少个体数+高单株生物量为主、中海拔地区以多物种数+中个体数+中生物量为主、高海拔地区则以少物种数+多个体数+低单株生物量为主。

此外,在对这部分数据进行分析表明,濒危物种或野生保护物种在物种多样性高或生物量较大

的群落中也更容易生存,如重要值表和濒危及重点保护植物表(附表 S2)所示,珍稀濒危植物和重点保护野生植物多存在于中低海拔区域,且在部分区域内形成优势种群,如光叶红豆、观光木、福建柏分别在 300、500、1400 m 区域有大量分布,这与群落物种多样性的变化十分密切。

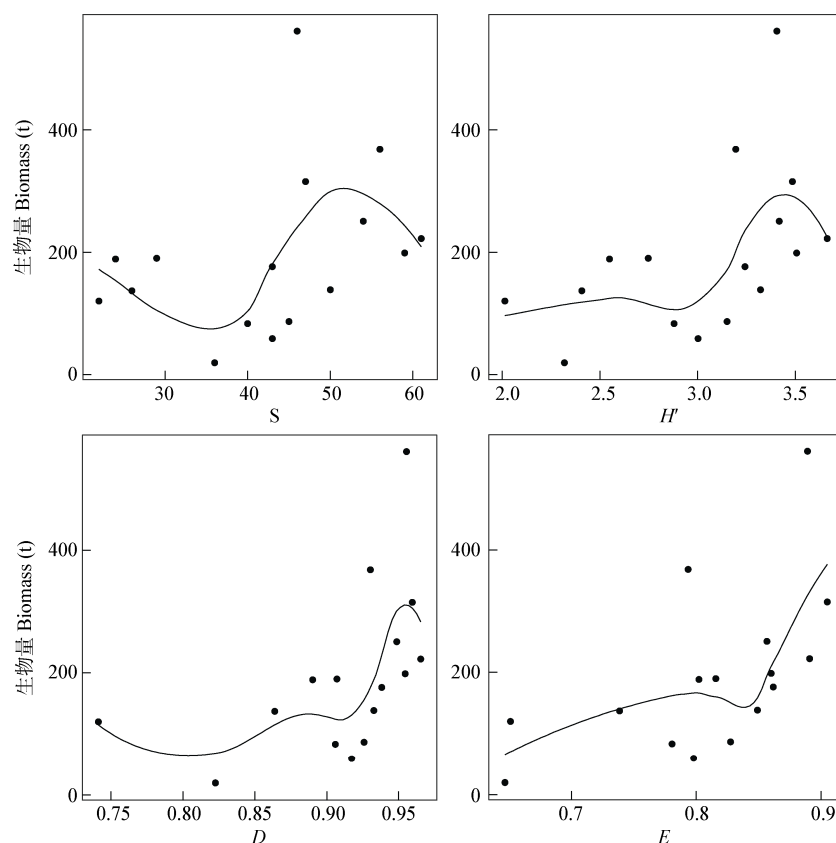


图 6 样地生物量随 α 多样性的变化

Fig. 6 Changes in biomass with α -diversity

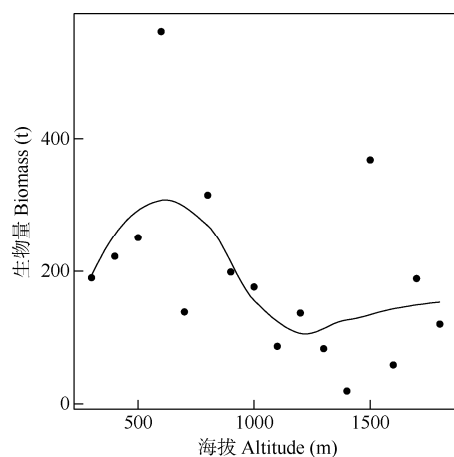


图 7 样地生物量随海拔的变化

Fig. 7 Changes in biomass with altitude

3 讨论和结论

3.1 群落物种多样性沿海拔梯度的变化

本研究结果表明乔木层物种丰富度、Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数和优势度随海拔升高呈现双峰曲线的变化趋势,表明群落物种多样性的垂直分布特征在群落的发育过程中,可能并不会呈现出严格的线性关系^[38]。双峰现象出现在 300~800 m 和 800~1500 m 梯度内,其原因在于样地间海拔与地形的变化,促使水热条件改变,随着环境因子逐渐达到群落树种的耐受限度,将导致群落结构出现明显变化^[39]。另一方面,山地生态系统因其复杂的地理条件和群落结构会在局部形成独特的小气候,

使某些区域的环境达到更多物种的最适条件, 导致植被结构和多样性的分布出现大的波动^[40], 进而使该区域总体呈现双峰曲线的变化趋势。这与人研究中乔木层物种多样性常见的单峰曲线、单调上升、单调下降等变化趋势有极大的不同, 因此丰富了垂直梯度中乔木层物种多样性的分布特征。

本研究结果表明随着海拔梯度的升高, 相邻群落的相异性呈现增大的趋势, 同时, 两群落间的海拔差值增大, 相异性也迅速增大, 但在达到较高海拔区域之后, 相异性的变化逐渐减缓, 直至相对稳定; 然而, 不论是相邻群落还是不同海拔差值的群落, 物种更新速率保持在一定范围内, 并没有明显的上升或下降趋势。这是由于物种的更替是一个连续的过程, 该区域属于亚热带季风气候区, 保证了同等条件下物种更新速率的稳定, 同时, 植物的扩散能力有限, 只能在一定海拔变化范围内进行物种扩散和更新, 随着物种之间相互作用的出现, 这将保证物种更新速率也在一定范围内波动。但随着海拔的升高, 环境将对植被的生存适应提出更高的要求, 可能会使群落的物种数减少, 且群落间相同物种也随之减少, 导致了群落间差异随海拔升高而增大。这与前人^[18,34-35,41]的研究结果相似。

3.2 物种多样性及其结构与生物量之间的关系

物种多样性对群落的生态功能具有显著的影响, 生物多样性高的群落通常能够蓄积更多的生物量^[42]。然而, 高大植株单株虽能够达到更高的生物量, 但数量占比更大的低径级植株的生物量占比依旧能够达到 50% 以上, 且在不同海拔区域内, 群落生物量的蓄积策略有所不同, 这与水热条件及环境变量与微生物的互作强度有密切联系^[43]。低海拔区域蓄水过多, 且有大量山体阻挡阳光, 因此其生产力与物种多样性并非最高; 而在中海拔区域, 降水适宜, 阳光照射充足, 无冷空气的沉降影响, 土壤微生物活动更加频繁, 使土壤有机质得到充分分解以促进养分循环, 因此在该区域内会形成更加复杂的群落结构, 促使多样性峰值现象的出现; 高海拔区域则因温度过低和降水减少, 养分循环得不到充分的释放而生产力和物种多样性大幅降低^[14]。多样性高的群落通常能够提供更多的资源和良好的生存环境, 这意味着更多不同种类的物种可在该群落中占据生存和繁衍的环境。这些物种在资源利用、生长方式、生态角色等方面可能存在差异, 使生态系统内资源得到不同程度的利用, 产生生产力的大

小差异。这也是珍稀濒危物种和重点保护野生植物往往存在于物种多样性达到峰值或生物量蓄积较高的区域的重要原因之一, 杨礼旦等^[44]在贵州进行的珍稀植物和重点保护植物的优先级评价工作证明了这一论点。

3.3 对保护区内生态系统保护的一些建议

随着海拔梯度的升高, 各种环境因子, 如温度、水分、光照、养分等条件都在迅速发生变化, 综合生物因素和周边人类活动, 这些生态因子能够强烈地影响生态过程本身, 使群落的多样性发生改变^[45]。针对南岭国家级自然保护区森林管理和保护中存在的问题和全球气候变化大环境下对森林生态系统服务功能提出的需求和新变化, 我国对森林的管理策略正在进行调整。从单纯的恢复绿植面积提高森林蓄积量, 逐渐转变为提升森林生态系统的生态服务功能和价值, 深入实践可持续发展管理策略已占据主导地位^[46]。从森林生态系统管理的角度看, 对不同的海拔梯度区域实施不同的管理策略是必要的, 要充分利用地形对生态系统自然发育的影响, 促进森林生态系统的发育与生态服务功能的转变。以南岭国家级自然保护区南坡为例, 在低海拔区域, 群落内部物种多样性高, 虽受到一定的水热条件限制, 但在非核心区域, 更多的影响是周边人为扰动, 因此在对这部分森林进行保护时, 应侧重点关注人类活动对生态系统的影响; 在中海拔区域, 水热条件适宜, 土壤环境变量与微生物互作强烈, 因此有许多高大乔木形成对群落内部的高度郁闭, 抢占了更多的光照资源, 林中分布的干型细长且数量多的幼树, 将由于弱的光照竞争能力而生长缓慢甚至死亡, 进而导致林分的退化, 然而台风、雷电等极端天气通常对高大乔木具有破坏性, 其死亡后会打开更多的林窗, 使幼小或矮小的树木得到充足的资源分配, 进而增强其碳汇和生态景观等生态服务功能^[47]; 最后, 在高海拔区域鲜有高郁闭度的高大乔木, 多是干型细长的小乔木, 这是由于淋溶、土壤侵蚀、降雨减少和温度降低等条件的限制, 使得高海拔区域的水热条件贫乏, 生态环境脆弱, 区域内的资源利用性竞争加剧, 植株将更多的能量分配至抵御不良环境和提高自身对养分资源的抢夺能力, 进而导致生长缓慢等, 应着重关注保护原始生境不被破坏, 促进群落的自然恢复与更新。

综上, 通过对南岭国家级自然保护区的研究表明, 随着海拔梯度的升高, 木层物种多样性呈现出

明显的双峰现象。同时,群落间的相异性则随海拔升高显著增大,且海拔差值越大,群落差异越显著,但物种更新速率却因气候的恒定而表现出一定的稳定性。群落物种数随海拔上升逐渐减少,壳斗科、樟科和山茶科植物是主要的优势物种,遍布整个研究区,能为其他物种的定居提供更加适宜的条件,而群落生物量的主要来源则由低海拔的多单株生物量、少个体数量模式,转变为高海拔的低单株生物量、多个体数量模式,这二者在一定程度上解释了双峰现象的形成。研究表明复杂的群落结构具有更高的抵抗力稳定性,加强对自然保护区的保护可以提供更多的生存空间容纳珍稀濒危植物和重点保护野生植物等对环境变化敏感的物种。然而,生物多样性的关系较为复杂,如何通过生物多样性的研究来促进环境的改善和森林的可持续发展仍需进一步对不同生态系统类型以及不同尺度进行研究。

参考文献

- [1] RICKLEFS R E. A comprehensive framework for global patterns in biodiversity [J]. *Ecol Lett*, 2004, 7(1): 1–15. doi: 10.1046/j.1461-0248.2003.00554.x.
- [2] WILLIS K J, WHITTAKER R J. Species diversity: Scale matters [J]. *Science*, 2002, 295(5558): 1245–1248. doi: 10.1126/science.1067335.
- [3] WHITTAKER R J, WILLIS K J, FIELD R. Scale and species richness: Towards a general, hierarchical theory of species diversity [J]. *J Biogeogr*, 2001, 28(4): 453–470. doi: 10.1046/j.1365-2699.2001.00563.x.
- [4] WU A C, DENG X W, REN X L, et al. Biogeographic patterns and influencing factors of the species diversity of tree layer community in typical forest ecosystems in China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2018, 38(21): 7727–7738. [吴安驰, 邓湘雯, 任小丽, 等. 中国典型森林生态系统乔木层群落物种多样性的空间分布格局及其影响因素 [J]. *生态学报*, 2018, 38(21): 7727–7738. doi: 10.5846/stxb201710191882.]
- [5] ZOU L M. Spatial patterns of plant diversity in Chinese forest ecosystems [J]. *Guangxi For Sci*, 2015, 44(1): 36–43. [邹丽梅. 中国森林生态系统植物多样性的空间变化格局 [J]. *广西林业科学*, 2015, 44(1): 36–43. doi:10.3969/j.issn.1006-1126.2015.01.007.]
- [6] ZHANG Y B, QIN H, MENG Q X, et al. Spatial patterns of and factors influencing species diversity in the forest communities of China's Taihang Mountains [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2022, 28(2): 331–338. [张殷波, 秦浩, 孟庆欣, 等. 太行山森林群落物种多样性空间格局及其影响因素 [J]. *应用与环境生物学报*, 2022, 28(2): 331–338. doi: 10.19675/j.cnki.1006-687x.2020.11014.]
- [7] PANDEY S K, SHUKLA R P. Plant diversity in managed sal (*Shorea robusta* Gaertn.) forests of Gorakhpur, India: Species composition, regeneration and conservation [J]. *Biodiv Conserv*, 2003, 12(11): 2295–2319. doi: 10.1023/A:1024589230554.
- [8] CAI L, JIA C, PAN H L, et al. Biodiversity along different altitude gradients of ornamental plant community in Balang alpine meadow, Sichuan Province [J]. *J West China For Sci*, 2017, 46(5): 45–51. [蔡蕾, 贾程, 潘红丽, 等. 巴郎山高山草甸观赏植物物种多样性沿海拔梯度分布格局 [J]. *西部林业科学*, 2017, 46(5): 45–51. doi: 10.16473/j.cnki.xblykx1972.2017.05.009.]
- [9] WANG G X, LIU G H, SHEN Z H, et al. Research progress and future perspectives on the landscape ecology of mountainous areas [J]. *Acta Ecol Sin*, 2017, 37(12): 3967–3981. [王根绪, 刘国华, 沈泽昊, 等. 山地景观生态学研究进展 [J]. *生态学报*, 2017, 37(12): 3967–3981. doi: 10.5846/stxb201702100232.]
- [10] ZHANG X D, ZHU W B, CUI Y P, et al. The response of forest dynamics to hydro-thermal change in Funiu Mountain [J]. *Geogr Res*, 2016, 35(6): 1029–1040. [张晓东, 朱文博, 崔耀平, 等. 伏牛山地区森林植被动态变化对水热条件的响应 [J]. *地理研究*, 2016, 35(6): 1029–1040. doi: 10.11821/dlyj201606003.]
- [11] TANG Z Y, FANG J Y. Vertical distribution patterns of plant species diversity [J]. *Biodiv Sci*, 2004, 12(1): 20–28. [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. doi: 10.3321/j.issn:1005-0094.2004.01.004.]
- [12] NIE P X, ZHANG C C, LONG X B, et al. Altitude distribution pattern of plant species diversity in the Baima Snow Mountain Nature Reserve, Yunnan Province [J]. *J Sichuan For Sci Technol*, 2022, 43(2): 95–100. [聂佩潇, 张彩彩, 龙晓斌, 等. 白马雪山自然保护区植物物种多样性海拔分布格局 [J]. *四川林业科技*, 2022, 43(2): 95–100. doi: 10.12172/202107160001.]
- [13] LOMOLINO M V. Elevation gradients of species-density: Historical and prospective views [J]. *Global Ecol Biogeogr*, 2001, 10(1): 3–13. doi: 10.1046/j.1466-822x.2001.00229.x.
- [14] LOREAU M, NAEEM S, INCHAUSTI P, et al. Biodiversity and ecosystem functioning: Current knowledge and future challenges [J]. *Science*, 2001, 294(5543): 804–808. doi: 10.1126/science.1064088.
- [15] RAHBEC C. The role of spatial scale and the perception of large-scale species-richness patterns [J]. *Ecol Lett*, 2005, 8(2): 224–239. doi: 10.1111/j.1461-0248.2004.00701.x.
- [16] LIANG M Z, JIANG Z C, SHEN L N, et al. Altitudinal distribution patterns of plant functional group biodiversity in Longhushan, Guangxi [J]. *Carsol Sin*, 2011, 30(3): 308–312. [梁铭忠, 蒋忠诚, 沈利娜, 等.

- 广西龙虎山植物功能群物种多样性垂直格局 [J]. 中国岩溶, 2011, 30(3): 308–312. doi: 10.3969/j.issn.1001-4810.2011.03.012.]
- [17] GUO Z G, LIU H X, SUN X G, et al. Characteristics of species diversity of plant communities in the upper reaches of Bailong River [J]. Chin J Plant Ecol, 2003, 27(3): 388–395. [郭正刚, 刘慧霞, 孙学刚, 等. 白龙江上游地区森林植物群落物种多样性的研究 [J]. 植物生态学报, 2003, 27(3): 388–395. doi: 10.17521/cjpe.2003.0057.]
- [18] HAO Z Q, YU D Y, WU G, et al. Analysis on β diversity of plant communities on northern slope of Changbai Mountain [J]. Acta Ecol Sin, 2001, 21(12): 2018–2022. [郝占庆, 于德永, 吴钢, 等. 长白山北坡植物群落 β 多样性分析 [J]. 生态学报, 2001, 21(12): 2018–2022. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2001.12.008.]
- [19] LI W J, GAN X H, ZHANG W Q, et al. Analysis of species diversity of different forest types in Xinfengjiang Reservoir Area [J]. Guangdong Agric Sci, 2022, 49(4): 35–45. [李文娟, 甘先华, 张卫强, 等. 新丰江库区不同森林类型的物种多样性分析 [J]. 广东农业科学, 2022, 49(4): 35–45. doi: 10.16768/j.issn.1004-874X.2022.04.005.]
- [20] GU W Q, LIANG Y F, CHEN J, et al. Diversity of *Machilus* plant communities in Yinpingshan Forest Park [J]. For Environ Sci, 2021, 37(6): 176–181. [古文强, 梁燕飞, 陈进, 等. 银瓶山森林公园润楠属植物群落多样性研究 [J]. 林业与环境科学, 2021, 37(6): 176–181. doi: 10.3969/j.issn.1006-4427.2021.06.026.]
- [21] CHEN Y, LI Y H, SHAO Y N, et al. Study on species diversity and soil physical and chemical characteristics of broad-leaved *Pinus koraiensis* forest [J]. Ecol Environ Sci, 2022, 31(4): 679–687. [陈瑶, 李云红, 邵英男, 等. 阔叶红松林物种多样性与土壤理化特征研究 [J]. 生态环境学报, 2022, 31(4): 679–687. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2022.04.005.]
- [22] ZHANG X, TU Y X, LIU Y H, et al. Plant diversity response of forest community to altitude in Leigong Mountain Nature Reserve [J]. Guizhou For Sci Technol, 2022, 50(4): 44–49. [张旭, 涂阳新, 刘延惠, 等. 雷公山森林群落植物多样性对海拔高度的响应 [J]. 贵州林业科技, 2022, 50(4): 44–49. doi: 10.16709/j.cnki.gzlykj.2022.04.015.]
- [23] CONG X F, CHEN H, LI D, et al. Relationship between plant species diversity and elevation and slope aspect in middle and low altitude mountainous areas of Southern Shaanxi [J]. Ecol Sci, 2023, 42(4): 39–47. [丛晓峰, 陈昊, 李丹, 等. 陕南中低海拔山区植物物种多样性与海拔及坡向的关系 [J]. 生态科学, 2023, 42(4): 39–47. doi: 10.14108/j.cnki.1008-8873.2023.04.005.]
- [24] GAO H, LIU L J, FANG J P. Change pattern of forest community along altitude gradient in Sejila Mountain, Xizang, China [J]. J Guangxi Norm Univ (Nat Sci), 2020, 38(6): 122–130. [高辉, 刘丽娟, 方江平. 西藏色季拉山森林群落沿海拔梯度变化格局 [J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2020, 38(6): 122–130. doi: 10.16088/j.issn.1001-6600.2020.06.014.]
- [25] BHATTARAI K R, VETAAS O R. Variation in plant species richness of different life forms along a subtropical elevation gradient in the Himalayas, East Nepal [J]. Glob Ecol Biogeogr, 2003, 12(4): 327–340. doi: 10.1046/j.1466-822X.2003.00044.x.
- [26] DENG H Y, YAN S, WANG R H, et al. Study on water-holding capacity of soil layer and litter layer of Chinese fir plantations with different stand ages in northern Guangdong [J]. Guangdong Agric Sci, 2019, 46(2): 51–58. [邓厚银, 晏姝, 王润辉, 等. 粤北不同林龄杉木人工林下土壤层及枯落物层持水能力研究 [J]. 广东农业科学, 2019, 46(2): 51–58. doi: 10.16768/j.issn.1004-874X.2019.02.008.]
- [27] MIAO S Y, HUANG J L, LIU C. Plant diversity and its conservation values of Guangdong Nanling National Park [J]. Guangdong Landscape Archit, 2020, 42(5): 8–11. [缪绅裕, 黄金玲, 刘闯. 广东南岭国家公园植物多样性及其保护价值 [J]. 广东园林, 2020, 42(5): 8–11. doi: 10.3969/j.issn.1671-2641.2020.05.003.]
- [28] LIU M Y, HUANG F F, HUANG Y H, et al. Soil nutrient availability regulates microbial community composition and enzymatic activities at different soil depths along an elevation gradient in the Nanling Nature Reserve, China [J]. Forests, 2023, 14(8): 1514. doi: 10.3390/f14081514.
- [29] XU W, YANG T, LI Z H, et al. Distribution pattern of plant community species diversity along altitudinal gradients in Nanling Mountains, Guangdong [J]. For Environ Sci, 2022, 38(1): 9–17. [徐卫, 杨婷, 李泽华, 等. 广东南岭植物群落物种多样性沿海拔梯度分布格局 [J]. 林业与环境科学, 2022, 38(1): 9–17. doi: 10.3969/j.issn.1006-4427.2022.01.002.]
- [30] LI Y G. Utilization value and conservation of rare and endangered plants in Nanling National Nature Reserve [J]. For Environ Sci, 2016, 32(4): 80–83. [李耀光. 南岭国家级自然保护区珍稀濒危植物保护与利用 [J]. 林业与环境科学, 2016, 32(4): 80–83. doi: 10.3969/j.issn.1006-4427.2016.04.017.]
- [31] GONG Y N, LIU Z F, SHUI K C, et al. Spatial distribution and habitat characteristic of *Pinus kwangtungensis* in the Guangdong Nanling 20 hm² forest dynamics plot [J]. Guihaia, 2022, 42(7): 1204–1212. [龚粤宁, 刘志发, 水坤春, 等. 广东南岭 20 hm² 样地华南五针松空间分布与生境特征研究 [J]. 广西植物, 2022, 42(7): 1204–1212. doi: 10.11931/guihaia.gxzw202108019.]
- [32] LI X, AGUILA L C R, WU D H, et al. Carbon sequestration and storage capacity of Chinese fir at different stand ages [J]. Sci Total Environ, 2023, 904: 166962. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.166962.
- [33] FANG J Y, SHEN Z H, TANG Z Y, et al. The protocol for the survey plan for plant species diversity of China's mountains [J]. Biodiv Sci,

- 2004, 12(1): 5–9. [方精云, 沈泽昊, 唐志尧, 等. “中国山地植物物种多样性调查计划”及若干技术规范 [J]. 生物多样性, 2004, 12(1): 5–9. doi: 10.17520/biods.2004002.]
- [34] LAN S A, SONG M, ZENG F P, et al. Altitudinal pattern of woody plant species diversity in the karst forest in Mulun, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, 36(22): 7374–7383. [兰斯安, 宋敏, 曾馥平, 等. 木论喀斯特森林木本植物多样性垂直格局 [J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7374–7383. doi: 10.5846/stxb201601080055.]
- [35] ZHANG X W. Community structure and species diversity near the forestline of different altitudes in Shunhuang Mountain, Hunan [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2019, 35(21): 66–69. [张晓文. 湖南舜皇山不同海拔森林线附近群落结构与物种多样性 [J]. 中国农学通报, 2019, 35(21): 66–69. doi: 10.11924/j.issn.1000-6850.casb18120076.]
- [36] ZHANG J, CHEN Z L, HOU X W, et al. Species diversity of *Juniperus przewalskii* community in Three River Headwater along altitude gradient [J]. *Acta Bot Boreali-Occid Sin*, 2020, 40(10): 1759–1767. [张静, 陈志林, 侯晓巍, 等. 三江源区祁连圆柏群落物种多样性沿海拔梯度的变化格局 [J]. 西北植物学报, 2020, 40(10): 1759–1767. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.2020.10.1759.]
- [37] ZHOU G Y, YIN G C, TANG X L, et al. China's Ecosystem Carbon Stocks: Biomass Equations [M]. Beijing: Science Press, 2023. [周国逸, 尹光彩, 唐旭利, 等. 中国森林生态系统碳储量——生物量方程 [M]. 北京: 科学出版社, 2023.]
- [38] STEFFAN-DEWENTER I, KESSLER M, BARKMANN J, et al. Tradeoffs between income, biodiversity, and ecosystem functioning during tropical rainforest conversion and agroforestry intensification [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2007, 104(12): 4973–4978. doi: 10.1073/pnas.0608409104.
- [39] YANG M M, WEI S M, WANG B M, et al. Horizontal distribution characteristics and environmental factors of shrubland species diversity in Hainan Island, China [J]. *Land*, 2022, 11(7): 1047. doi: 10.3390/land11071047.
- [40] LIU B R. Recent advances in altitudinal distribution patterns of biodiversity [J]. *Ecol Environ Sci*, 2021, 30(2): 438–444. [刘秉儒. 生物多样性的海拔分布格局研究及进展 [J]. 生态环境学报, 2021, 30(2): 438–444. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2021.02.0025.]
- [41] YU S J, WANG Z M, XU J H, et al. A study of the community biodiversity in the public welfare forests and the correlativity of them with the environment in Pujiang County [J]. *E China For Manage*, 2017, 31(2): 37–41, 52. [于姗君, 王震明, 徐季宏, 等. 浦江县公益林群落生物多样性及其与环境相关性研究 [J]. 华东森林经理, 2017, 31(2): 37–41, 52.]
- [42] CHEN F Q, GUO Y, HUANG M Z, et al. Community structure characteristics and management strategies of *Castanopsis hystrix* plantation with different restoration years [J]. *J Anhui Agric Univ*, 2022, 49(1): 48–55. [陈富强, 郭勇, 黄明智, 等. 不同恢复年限红锥人工林群落结构特征及经营策略 [J]. 安徽农业大学学报, 2022, 49(1): 48–55. doi: 10.13610/j.cnki.1672-352x.20220325.023.]
- [43] WANG L H, YU M X, YE S, et al. Seasonal patterns of carbon and water flux responses to precipitation and solar radiation variability in a subtropical evergreen forest, south China [J]. *Agric For Meteorol*, 2023, 342: 109760. doi: 10.1016/j.agrformet.2023.109760.
- [44] YANG L D, ZHANG D Q, CHEN Y Q. Priority conservation evaluation of key and rare plants in Taijiang County of Guizhou Province [J]. *J Hunan Ecol Sci*, 2023, 10(1): 55–67. [杨礼旦, 张德权, 陈应强. 贵州省台江县重点保护、珍稀植物优先保护评价 [J]. 湖南生态科学学报, 2023, 10(1): 55–67. doi: 10.3969/j.issn.2095-7300.2023.01.007.]
- [45] MA Q Q, HUANG J G. Join the ranks of observing plant phenology, focusing on climate change [J]. *China Nat*, 2019(1): 54–57. [马倩倩, 黄建国. 关注气候变化, 加入观测植物物候的行列 [J]. 大自然, 2019(1): 54–57. doi: 10.3969/j.issn.0255-7800.2019.01.016.]
- [46] ZHU H, TAN Y H. Community characteristics, research states, and problems of tropical rain forests in China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2023, 47(4): 447–468. [朱华, 谭运洪. 中国热带雨林的群落特征、研究现状及问题 [J]. 植物生态学报, 2023, 47(4): 447–468. doi: 10.17521/cjpe.2022.0260.]
- [47] LI X, LIU Y, WU G P, et al. Mixed plantations do not necessarily provide higher ecosystem multifunctionality than monoculture plantations [J]. *Sci Total Environ*, 2024, 914: 170156. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.170156.
- 附表 S1** 不同海拔梯度乔木层物种组成及重要值
- 附表 S2** 珍稀濒危植物和重点野生保护植物名录
- http://jtsb.ijournals.cn/ajax/common/download_attache_file.aspx?seq_id=20240827223316001&file_no