

DOI: 10.20103/j.stxb.202306031178

童跃伟, 屈利利, 符庆响, 陈雨蓓, 项小燕, 朱卫东, 齐光, 代力民. 大别山南坡森林植物群落物种多样性及其与海拔因子的关系. 生态学报, 2024, 44(12): 5307-5317.

Tong Y W, Qu L L, Fu Q X, Chen Y B, Xiang X Y, Zhu W D, Qi G, Dai L M. Species diversity of forest plant communities on the southern slope of the Dabie Mountains and its relationship with altitude factors. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(12): 5307-5317.

大别山南坡森林植物群落物种多样性及其与海拔因子的关系

童跃伟^{1,2,*}, 屈利利^{1,2}, 符庆响^{1,2}, 陈雨蓓^{1,2}, 项小燕^{1,2}, 朱卫东³, 齐光⁴, 代力民⁵

1 安庆师范大学生命科学学院, 安庆 246133

2 皖西南生物多样性研究与生态保护安徽省重点实验室, 安庆 246133

3 岳西古井园自然保护区管理中心, 安庆 246670

4 平顶山学院, 平顶山 467000

5 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016

摘要: 大别山地区植物资源丰富, 区系组成复杂且起源古老, 为连接华东、华北和华中三大植物区系的纽带, 也是我国重要的生物多样性保护和水源涵养生态功能区。采用样方法, 在大别山南坡的多枝尖、庵基坪和麒麟沟 3 个地区, 沿着不同海拔高度选取了具有代表性的森林植物群落进行研究, 从不同植物群落类型和层次的物种多样性、均匀度和丰富度及其与海拔因子的关系等方面, 对大别山南坡的森林植物群落物种多样性进行综合分析。结果表明: 1. 共记录有植物 108 科 270 属 449 种, 划分为 20 个森林植物群落类型; 2. 森林植物群落各层次物种丰富度表现为草本>乔木>灌木; Shannon-Wiener 多样性指数和 Simpson 多样性指数呈现出乔木>灌木>草本; Pielou 均匀度指数变化较为复杂; 3. 森林植物群落各层次的物种丰富度随海拔升高而下降; Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数也表现为随着海拔升高而下降, 但草本层在 1400m 之后有上升的趋势。Pielou 指数在乔木层中表现为随着海拔的升高而下降, 在草本层中表现为先下降后出现上升, 在灌木层中则随着海拔的升高而上升, 但其波动更为剧烈。本研究对大别山南坡森林植被大范围的采样观测研究, 能够全面的展现大别山南坡森林植物的种类分布、空间组成等整体概况及其与海拔因子的关系, 能为以后大别山南坡生物多样性的保护提供较为全面真实的数据, 从而为大别山地区生物多样性的保护和可持续利用提供理论依据和实践意义。

关键词: 大别山; 森林植物群落; 物种丰富度; 物种多样性指数; 海拔

Species diversity of forest plant communities on the southern slope of the Dabie Mountains and its relationship with altitude factors

TONG Yuewei^{1,2,*}, QU Lili^{1,2}, FU Qingxiang^{1,2}, CHEN Yubei^{1,2}, XIANG Xiaoyan^{1,2}, ZHU Weidong³, QI Guang⁴, DAI Limin⁵

1 School of Life Science, Anqing Normal University, Anqing 246133, China

2 Province Key Laboratory of the Biodiversity and Ecological Conservation of Southwest Anhui, Anqing 246133, China

3 Management Center of Gujingyuan National Nature Reserve, Anqing 246670, China

4 Pingdingshan University, Pingdingshan 467000, China

5 Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

Abstract: The Dabie Mountains region is rich in plant resources, with complex floristic composition and ancient origin. It is

基金项目: 安徽省自然科学基金青年项目 (2208085QC72); 安徽省自然科学基金面上项目 (1908085MC58); 河南省科技攻关项目 (212102310840)

收稿日期: 2023-06-03; **网络出版日期:** 2024-04-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tongyuewei@aqnu.edu.cn

a link connecting the three major flora in East, North, and Central China, and is also an important ecologically functional area for biodiversity protection and water conservation in China. In this study, the representative forest plant communities were selected along different altitudes in Duozhijian, Anjiping and Qilingou areas on the south slope of Dabie Mountains. The biodiversity of forest plant communities on the south slope of Dabie Mountains was comprehensively analyzed from the aspects of species diversity, evenness and richness of different plant community types and levels and their relationship with altitude factors. The results showed that: 1) The southern Dabie Mountains were divided into 20 forest plant community types, with a total of 449 species of plants belonging to 108 families and 270 genera. 2) The species richness index of each level of forest plant community was herb>tree>shrub; The Shannon Wiener index and Simpson index showed trees>shrubs>herbs; The changes in the Pielou index were complex. 3) The species richness of each level of forest plant community decreased with the increase of altitude; The Shannon Wiener index and Simpson index also showed a downward trend with the increasing altitude, but the herb layer showed an upward trend after 1400 m. In the tree layer, the Pielou index decreased with the elevation; in the herb layer, it decreased first and then rose; and in the shrub layer, it increased with the elevation, but its fluctuation was more intense. The large-scale sampling and observation of forest vegetation on the south slope of Dabie Mountains can comprehensively show the overall situation of species distribution, the spatial composition of forest plants, and their relationship with altitude factors. It can provide more comprehensive and real data for the protection of biodiversity on the south slope of Dabie Mountains in the future, so as to provide theoretical basis and practical significance for the protection and sustainable utilization of biodiversity in Dabie Mountains.

Key Words: Dabie Mountains; forest plant community; species richness; species diversity index; altitude

生物多样性是生物及其与环境形成的生态复合体以及与此相关的各种生态过程的总和,是人类赖以生存的物质基础,其包括生态系统多样性、遗传多样性和物种多样性三个层次^[1]。而物种多样性则反映了生物群落在组成、结构、功能和动态方面的异质性,是最简单有效的描述群落和区域多样性的方法^[2-3]。植物群落是不同植物在长期环境变化中相互作用、相互适应而形成的一个组合。它提供着人类赖以生存的主要物质资源,是人类生存和发展不可或缺的物质基础,具有不可替代的作用^[4]。因此,植物群落多样性的研究是群落生态研究中十分重要的内容^[5-6]。国内外对植物群落物种多样性的研究主要集中于森林植物群落内物种组成和结构^[7-8];物种多样性随环境^[9-11]和群落演替过程^[12-14]的变化以及植物群落多样性对环境因子^[15-16]和人为因子的响应^[17-19]等。同时,这些研究大多是以热带和亚热带地区的森林植物群落为研究对象,反应其地区的植物群落多样性及其与环境因子和人为因子的相关关系。

大别山南坡拥有大面积的天然次生林^[20],群落结构稳定^[21],物种多样性丰富。其地带性植被为落叶阔叶与常绿阔叶混交林^[22]。以往有关大别山南坡的研究主要集中在植被和植物区系^[23-24]、植物群落多样性保护^[25]、乔木物种多样性和种间联结^[26]、以及部分区域如皖西大别山植物物种多样性分析^[27]和皖南大别山吊罐井物种分布格局与种间关联的多尺度^[28]研究等方面。这些研究不足以展现大别山地区整体的森林植物群落物种多样性。同时,由于研究区域内山体较高,地形复杂,并且随着山体海拔高度的上升,光照、气温、湿度、土壤等都相应发生变化,植物种类分布和植被类型也不断发生变化。因此,本研究在大别山南坡的多枝尖、吊罐井和麒麟沟3个地区不同海拔高度选取了具有代表性的森林植物群落进行研究,并探讨其与海拔因子的相关关系。在对大别山南坡植物群落充分调查的基础上,采用样方法和三种物种多样性指数(Shannon-Wiener指数、Simpson指数和Pielou指数),来分析该区域的群落结构、物种组成和物种多样性及其与海拔因子之间的相关关系,从而进一步加深对大别山南坡森林植物群落性质的认识,为该地区生物多样性的保护和持续利用提供理论依据,也为其他地区不同森林类型的群落物种多样性保护提供参考依据。

1 研究区概况

大别山南坡地处于皖西南地区,主要位于安徽省安庆市岳西县、六安市霍山县和湖北省黄冈市英山县境

内(图 1),该区年日照时间为 1580—1900 h,年均温 12.7 °C,无霜期约 220 d,空气相对湿度大,约 80%。降水量受季风影响较大,全年降水量约 1400—2000 mm,季节分配不均匀,夏季降水量最多,春季次之,冬季最少。最高海拔位于多枝尖 1721.5 m,最低处鲤鱼尾海拔 500 m。气候上属于北亚热带季风气候区与暖温带大陆气候区交界处^[29—30]。该区土壤在 800—900 m 以下为山地黄棕壤,在此以上为山地棕壤,局部地区有草甸土、沼泽土分布^[22]。森林植被类型丰富,在植物区划上属于北亚热带常绿-落叶阔叶林交错带的一部分^[31],基部森林植被类型为北亚热带常绿阔叶林,沿海拔梯度向上植被类型呈现出向暖温带落叶阔叶林变化的趋势^[32],在其海拔 1000 m 以上的区域保存有典型的山地落叶阔叶林,是研究山地落叶阔叶林组成、结构与功能特征变化规律的理想区域^[33]。

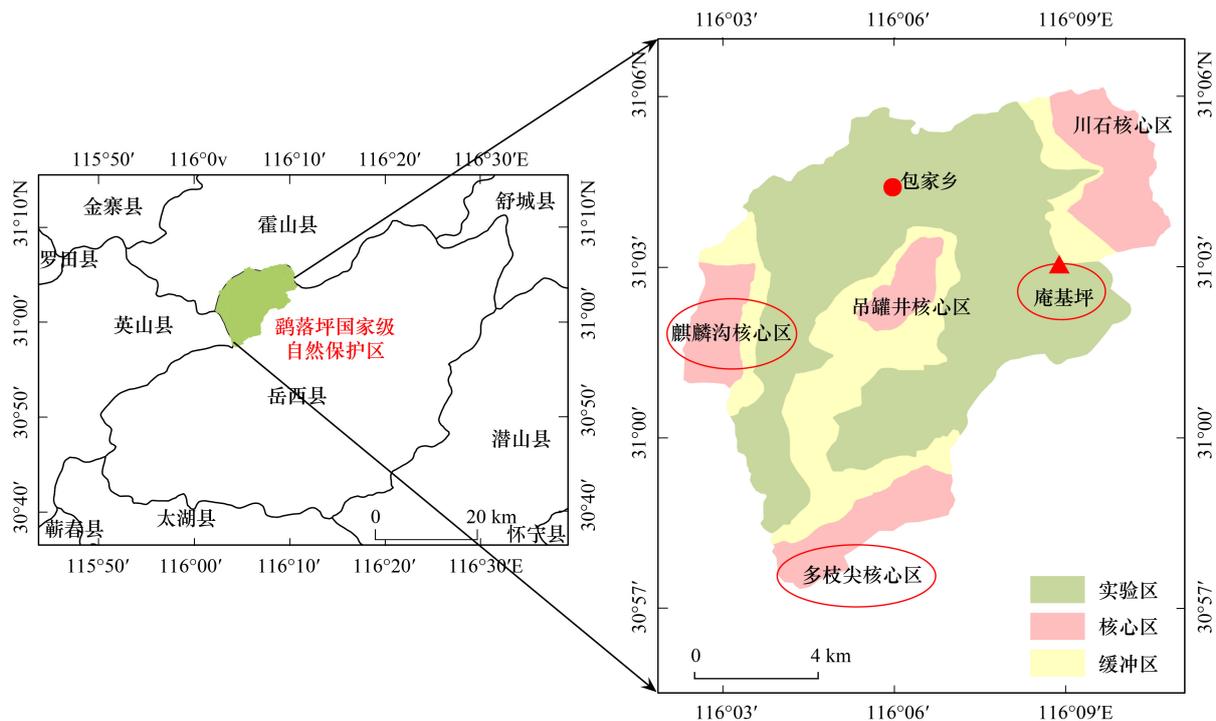


图 1 大别山南坡地理位置图及样地设置图

Fig.1 Geographical location map and site map of the southern slope in the Dabie Mountains

2 研究方法

2.1 样地设置与调查方法

在对大别山南坡进行全面考查的基础上,在多枝尖,麒麟沟,庵基坪三个区域(见图 1),沿着海拔 800—1700 m 的范围内设置 4 个海拔梯度(800—1000 m;1000—1200 m;1200—1400 m;1400—1700 m),每个海拔梯度设置 3 个样地,共计 36 个样地,同时记录样地经纬度、海拔、坡度、坡向、坡位等生境因子(见表 1)。

样方调查包括样方内乔木层、灌木层、草本层的植被调查等。每个样地中,设置 1 个 20 m×20 m 的乔木样方,2 个 5 m×5 m 的灌木样方和 4 个 1 m×1 m 的草本样方,共计乔灌草样方 252 个。在乔木样方中对胸径大于 5 cm 的乔木进行每木检尺,记录其种名、高度、枝下高、胸径、冠幅等;在灌木样方和草本样方中记录每种植物的种名、高度、盖度、多度、株数等。

2.2 数据处理

本研究以重要值作为多样性指数的测度依据,乔木层、灌木层和草本层重要值的计算方法如下:

$$\text{乔木重要值} = (\text{相对密度} + \text{相对频度} + \text{相对优势度}) / 3$$

表 1 样地概况

Table 1 Overview of sample plots

| 样地编号 Plot No. | 位置 Location | 纬度 Latitude(N) | 经度 Longitude(E) | 坡度 Slope/(°) | 坡向 Aspect | 海拔 Altitude/m |
|------------------|----------------|-------------------|--------------------|-----------------|--------------|------------------|
| 1 | 多枝尖 | 30°59'1.56" | 116°6'14.93" | 30 | WS | 1137 |
| 2 | 多枝尖 | 30°58'57.1" | 116°6'23.43" | 35 | WS | 1177 |
| 3 | 多枝尖 | 30°58'49.73" | 116°6'48.3" | 25 | WS | 1295 |
| 4 | 多枝尖 | 30°58'54.77" | 116°7'18.54" | 30 | W | 1544 |
| 5 | 多枝尖 | 30°58'52.64" | 116°7'20.35" | 20 | N | 1570 |
| 6 | 多枝尖 | 30°58'48.03" | 116°6'51.6" | 40 | WS | 1350 |
| 7 | 多枝尖 | 30°58'31.35" | 116°7'16.22" | 40 | N | 1678 |
| 8 | 多枝尖 | 30°58'31.35" | 116°7'16.22" | 40 | S | 1390 |
| 9 | 多枝尖 | 30°58'54.44" | 116°5'23.58" | 35 | W | 1076 |
| 10 | 多枝尖 | 31°3'9.46" | 116°6'55.59" | 25 | WS | 825 |
| 11 | 多枝尖 | 31°3'10.88" | 116°6'58.33" | 30 | W | 879 |
| 12 | 多枝尖 | 31°3'8.82" | 116°6'59.96" | 20 | ES | 947 |
| 13 | 庵基坪 | 31°3'3.87" | 116°8'49.5" | 35 | WS | 1290 |
| 14 | 庵基坪 | 31°3'7.5" | 116°8'52.11" | 40 | WN | 1351 |
| 15 | 庵基坪 | 31°3'2.58" | 116°8'58.39" | 45 | WN | 1516 |
| 16 | 庵基坪 | 31°3'3.21" | 116°8'52.63" | 30 | WS | 1333 |
| 17 | 庵基坪 | 31°2'41.73" | 116°8'2.18" | 40 | N | 924 |
| 18 | 庵基坪 | 31°2'43.97" | 116°8'7.76" | 15 | N | 954 |
| 19 | 庵基坪 | 31°2'49.64" | 116°8'12.17" | 35 | WS | 1073 |
| 20 | 庵基坪 | 31°2'53.63" | 116°8'21.06" | 25 | W | 1104 |
| 21 | 庵基坪 | 31°2'54.24" | 116°8'23.96" | 30 | W | 1135 |
| 22 | 庵基坪 | 31°2'38.59" | 116°8'0.48" | 30 | W | 894 |
| 23 | 庵基坪 | 31°2'57.8" | 116°9'10.73" | 45 | WN | 1560 |
| 24 | 庵基坪 | 31°2'56.13" | 116°9'15.16" | 40 | W | 1650 |
| 25 | 麒麟沟 | 31°0'51.37" | 116°3'27.41" | 40 | W | 1665 |
| 26 | 麒麟沟 | 31°0'54.47" | 116°3'25.31" | 35 | W | 1623 |
| 27 | 麒麟沟 | 31°0'57.06" | 116°3'22.85" | 35 | WN | 1578 |
| 28 | 麒麟沟 | 31°1'10.61" | 116°3'20.06" | 30 | N | 1382 |
| 29 | 麒麟沟 | 31°1'19.53" | 116°3'21.41" | 25 | N | 1320 |
| 30 | 麒麟沟 | 31°1'35.3" | 116°3'18.64" | 30 | WN | 1148 |
| 31 | 麒麟沟 | 31°1'34.23" | 116°3'19.04" | 35 | W | 1244 |
| 32 | 麒麟沟 | 31°1'36.78" | 116°3'17.67" | 35 | WN | 1127 |
| 33 | 麒麟沟 | 31°1'43.84" | 116°3'14.65" | 40 | WS | 1031 |
| 34 | 麒麟沟 | 31°1'49.91" | 116°3'12.21" | 30 | W | 990 |
| 35 | 麒麟沟 | 31°1'54.27" | 116°3'12.22" | 20 | WN | 963 |
| 36 | 麒麟沟 | 31°2'18.93" | 116°3'24.7" | 25 | N | 862 |

灌木重要值 = (相对密度 + 相对频度 + 相对盖度) / 3

草本重要值 = (相对密度 + 相对频度 + 相对盖度) / 3

分别选用物种丰富度指数 (S)、Shannon-Wiener 多样性指数 (H)、Simpson 多样性指数 (D) 和 Pielou 均匀度指数 (J) 测算群落内物种多样性^[34-35], 具体计算公式如下:

物种丰富度指数为样地中出现的物种数 S ;

Shannon-Wiener 多样性指数:
$$H = - \sum_{i=1}^s p_i \ln p_i$$

Simpson 多样性指数:
$$D = 1 - \sum_{i=1}^s p_i^2$$

Pielou 均匀度指数:
$$J = H/\ln S$$

式中: S 即为样地内出现的物种数, p_i 为物种 i 在群落内的相对重要值。

2.3 数据分析

用 Excel 软件完成数据计算整理,利用 Origin2018, ArcGIS10.8 和 SPSS 26.0 完成本文所需图表的绘制以及趋势分析。

3 结果与分析

3.1 森林植物群落种类组成

通过样方调查结果显示,整个大别山南坡共有植物 109 科 272 属 458 种。被子植物种类占比 95.2%,有 97 科 258 属 436 种。其中双子叶植物 81 科 217 属 386 种,占大别山南坡全部植物种类的 84.2%;单子叶植物 16 科 41 属 50 种,占大别山南坡全部植物种类的 11%。裸子植物种类占比 0.8%,有 3 科 4 属 4 种。蕨类植物种类占比 4%,有 9 科 10 属 18 种。

分别统计多枝尖、庵基坪和麒麟沟三个调查地区的植物种类数目,如表 2 所示。其中多枝尖的植物物种偏多,占整个大别山南坡植物种类 38.86%;麒麟沟居中,占比 36.46%;庵基坪较少,占比 32.97%。由此可见,多枝尖的植物种类较丰富,庵基坪的物种丰富度偏低。在此基础上,分别对大别山南坡森林植物群落的划分、森林植物群落物种多样性及其与海拔因子的关系进行分析。

表 2 不同海拔梯度的植物种类组成

Table 2 Composition of plant species in different altitudes

| 海拔梯度 Altitude gradient/m | 全部植物种类 All plant species | | | 被子植物 Angiosperm | | | 裸子植物 Gymnosperm | | | 蕨类植物 Fern | | |
|--------------------------------|-----------------------------|------------|--------------|--------------------|------------|--------------|--------------------|------------|--------------|--------------|------------|--------------|
| | 科 Family | 属 Genus | 种 Species | 科 Family | 属 Genus | 种 Species | 科 Family | 属 Genus | 种 Species | 科 Family | 属 Genus | 种 Species |
| | 800—1000 | 93 | 244 | 424 | 86 | 237 | 415 | 2 | 2 | 2 | 5 | 5 |
| 1000—1200 | 70 | 182 | 315 | 63 | 175 | 307 | 2 | 2 | 2 | 5 | 5 | 6 |
| 1200—1400 | 66 | 172 | 296 | 61 | 167 | 290 | 1 | 1 | 1 | 4 | 4 | 5 |
| 1400—1700 | 54 | 140 | 243 | 50 | 136 | 240 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 |

3.2 不同海拔梯度的植物群落类型特征

采用群落乔木层的重要值作为划分群落类型的依据^[36],然后根据植物群落分类和优势种命名原则,结合野外调查结果,最终将大别山南坡的 36 个乔木样方划分为 20 个主要群落类型(如表 3 所示)。根据海拔梯度来分,分别是处在 800—1000m 的山胡椒林(Form. *Lindera glauca*)、化香树林(Form. *Platycarya strobilacea*)、化香树+山胡椒混交林(Form. *Platycarya strobilacea*+*Lindera glauca*)、茅栗+山胡椒混交林(Form. *Castanea seguinii*+*Lindera glauca*)、化香树+四照花混交林(Form. *Platycarya strobilacea*+*Cornus kousa*)、化香树+杉木混交林(Form. *Platycarya strobilacea*+*Cornus kousa*);1000—1200m 的山胡椒+山樱桃混交林(Form. *Lindera glauca*+*Prunus serrulata*)、化香树+茅栗混交林(Form. *Platycarya strobilacea*+*Castanea seguinii*)、四照花+槲栎混交林(Form. *Cornus kousa*+*Quercus aliena*)、化香树+柞栎混交林(Form. *Platycarya strobilacea*+*Quercus serrata*)、茅栗+柞栎混交林(Form. *Castanea seguinii*+*Quercus serrata*);1200—1400m 的杉木林(Form. *Cunninghamia lanceolata*)、茅栗+槲栎混交林(Form. *Castanea seguinii*+*Quercus aliena*)、茅栗林(Form. *Castanea seguinii*)、台湾松+茅栗混交林(Form. *Pinus taiwanensis*+*Castanea seguinii*)、台湾松+山胡椒混交林(Form. *Pinus taiwanensis*+*Lindera glauca*)、台湾松+柞栎混交林(Form. *Pinus taiwanensis*+*Quercus serrata*);以及 1400—1700m 的台湾松+黄山栎混交林(Form. *Pinus taiwanensis*+*Quercus stewardii*)、黄山栎林(Form. *Quercus stewardii*)、台湾松林

(*Form. Pinus taiwanensis*)。其中,山胡椒林、茅栗林、茅栗+桫欂混交林、化香树+茅栗混交林、台湾松林、台湾松+茅栗混交林和台湾松+黄山栎混交林为最常见的群落类型。

对 20 种群落类型物种多样性指数(见表 3)的分析表明,从不同群落类型来看,茅栗+桫欂混交林,山胡椒+山樱桃混交林,化香树+山胡椒混交林,台湾松+桫欂混交林,茅栗+山胡椒混交林,化香树+四照花混交林,化香树林和化香树+桫欂混交林的物种多样性指数较高,台湾松林和台湾松+黄山栎混交林的物种多样性低,而且这些群落类型的物种丰富度也很低。总体上看,森林植物群落各层次物种丰富度指数表现为草本>乔木>灌木;Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数呈现出乔木>灌木>草本;Pielou 指数变化则较为复杂。

表 3 不同海拔梯度植物群落类型的多样性指数

Table 3 Species diversity index of plant community types in different altitudes

| 海拔梯度 Altitude gradient/m | 群落类型 Community type | Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index(H) | | | Simpson 指数 Simpson index(D) | | | Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index(J) | | |
|--------------------------------|------------------------|--|-----------------------|----------------------|--------------------------------|-----------------------|----------------------|--|-----------------------|----------------------|
| | | 乔木层 Arbor layer | 灌木层 Shrub layer | 草本层 Herb layer | 乔木层 Arbor layer | 灌木层 Shrub layer | 草本层 Herb layer | 乔木层 Arbor layer | 灌木层 Shrub layer | 草本层 Herb layer |
| | | 800—1000 | 山胡椒林 | 2.502 | 1.291 | 1.610 | 0.897 | 0.641 | 0.767 | 0.924 |
| | 化香树林 | 2.698 | 1.505 | 1.674 | 0.925 | 0.732 | 0.785 | 0.952 | 0.882 | 0.914 |
| | 化香树+山胡椒混交林 | 2.589 | 1.642 | 1.570 | 0.899 | 0.778 | 0.758 | 0.981 | 0.916 | 0.900 |
| | 化香树+四照花混交林 | 2.616 | 1.679 | 1.527 | 0.918 | 0.790 | 0.747 | 0.944 | 0.937 | 0.899 |
| | 化香树+杉木混交林 | 2.300 | 1.742 | 1.496 | 0.892 | 0.802 | 0.740 | 0.959 | 0.934 | 0.904 |
| | 茅栗+山胡椒混交林 | 2.623 | 1.581 | 1.528 | 0.911 | 0.731 | 0.715 | 0.926 | 0.845 | 0.838 |
| 1000—1200 | 山胡椒+山樱桃混交林 | 2.609 | 1.536 | 1.507 | 0.920 | 0.737 | 0.747 | 0.964 | 0.857 | 0.917 |
| | 四照花+桫欂混交林 | 2.550 | 1.241 | 1.497 | 0.917 | 0.609 | 0.737 | 0.966 | 0.771 | 0.912 |
| | 化香树+桫欂混交林 | 2.776 | 1.550 | 1.492 | 0.931 | 0.704 | 0.740 | 0.960 | 0.797 | 0.902 |
| | 茅栗+桫欂混交林 | 1.995 | 1.565 | 1.286 | 0.843 | 0.730 | 0.672 | 0.931 | 0.844 | 0.892 |
| | 化香树+茅栗混交林 | 2.099 | 1.625 | 1.303 | 0.861 | 0.783 | 0.665 | 0.938 | 0.932 | 0.858 |
| 1200—1400 | 茅栗林 | 2.244 | 1.494 | 1.153 | 0.871 | 0.730 | 0.627 | 0.936 | 0.899 | 0.856 |
| | 茅栗+桫欂混交林 | 2.536 | 1.443 | 1.531 | 0.908 | 0.696 | 0.758 | 0.936 | 0.844 | 0.933 |
| | 杉木林 | 1.957 | 1.704 | 1.335 | 0.820 | 0.795 | 0.689 | 0.891 | 0.911 | 0.872 |
| | 台湾松+茅栗混交林 | 2.223 | 1.595 | 1.300 | 0.869 | 0.765 | 0.695 | 0.924 | 0.910 | 0.916 |
| | 台湾松+山胡椒混交林 | 1.779 | 1.491 | 1.492 | 0.817 | 0.756 | 0.750 | 0.914 | 0.940 | 0.934 |
| | 台湾松+桫欂混交林 | 2.615 | 1.548 | 1.649 | 0.916 | 0.714 | 0.778 | 0.943 | 0.831 | 0.925 |
| 1400—1700 | 台湾松林 | 1.446 | 1.256 | 1.078 | 0.703 | 0.669 | 0.603 | 0.867 | 0.905 | 0.846 |
| | 台湾松+黄山栎混交林 | 1.780 | 1.529 | 1.325 | 0.794 | 0.752 | 0.689 | 0.893 | 0.919 | 0.899 |
| | 黄山栎林 | 2.241 | 1.406 | 1.530 | 0.875 | 0.716 | 0.758 | 0.935 | 0.873 | 0.924 |

3.3 森林植物群落物种多样性与海拔因子的关系

综合分析表 4 到表 6,乔木层的物种丰富度指数、Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数和 Pielou 指数在 1400—1700 m 的海拔梯度显著低于 800—1000 m 的海拔梯度。灌木层的物种丰富度指数在 1400—1700 m 的海拔梯度显著低于 800—1000 m 的海拔梯度,而灌木层的 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数和 Pielou 指数在不同海拔梯度间的差异不显著。草本层的物种丰富度指数、Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数和 Pielou 指数在 1400—1700 m 的海拔梯度显著低于 800—1000 m 的海拔梯度;而草本层的物种丰富度指数、Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数在 1000—1200 m 海拔梯度与 1200—1400 m 海拔梯度之间差异不显著。

大别山南坡森林植物群落 36 个样地乔木层、灌木层和草本层的丰富度指数、多样性指数和均匀度指数在海拔梯度上的变化趋势及其多项式拟和效果如图 2 至图 5 所示。

由图 2 可知物种丰富度指数表现为草本>乔木>灌木。植物群落各层次物种丰富度指数随着海拔升高都呈现出明显的下降趋势,但草本层在海拔 1400m 以后出现了上升的趋势。乔木层、灌木层和草本层的丰富度

指数按海拔高度排序得到的曲线拟合效果极其显著 ($P < 0.01$)。随着海拔的升高,生存条件变的恶劣,不适合大多数物种生存,所以物种丰富度逐渐降低。

表 4 乔木层植物物种多样性沿海拔梯度的变化

Table 4 Changes of plant species diversity in the tree layer along the altitude gradient

| 海拔梯度 Altitude gradient/m | 物种丰富度指数 Species richness index (S) | Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index (H) | Simpson 指数 Simpson index (D) | Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index (J) |
|-----------------------------|---------------------------------------|---|---------------------------------|---|
| 800—1000 | 14.5556±2.2973a | 2.5221±0.1548a | 0.9055±0.0144a | 0.9463±0.0177a |
| 1000—1200 | 11.1111±3.9826b | 2.2139±0.3795b | 0.8699±0.0483a | 0.9397±0.0233a |
| 1200—1400 | 11.0000±2.0000b | 2.2195±0.1879b | 0.8678±0.0270a | 0.9308±0.0211a |
| 1400—1700 | 7.1111±2.6667c | 1.6894±0.4007c | 0.7640±0.0968b | 0.8848±0.0400b |

均值±方差,同列不同字母表示在 0.05 水平差异显著 ($P < 0.05$)

表 5 灌木植物物种多样性沿海拔梯度的变化

Table 5 Changes of plant species diversity in the shrub layer along the altitude gradient

| 海拔梯度 Altitude gradient/m | 物种丰富度指数 Species richness index (S) | Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index (H) | Simpson 指数 Simpson index (D) | Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index (J) |
|-----------------------------|---------------------------------------|---|---------------------------------|---|
| 800—1000 | 11.1110±1.2693a | 1.5680±0.1331a | 0.7452±0.0514a | 0.8821±0.0645a |
| 1000—1200 | 10.2220±1.9221ab | 1.5425±0.1779a | 0.7254±0.0693a | 0.8492±0.0752a |
| 1200—1400 | 9.4444±1.5092bc | 1.5300±0.1745a | 0.7417±0.0568a | 0.8954±0.0675a |
| 1400—1700 | 8.0000±1.8028c | 1.3960±0.2460a | 0.7137±0.0787a | 0.9122±0.0296a |

均值±方差,同列不同字母表示在 0.05 水平差异显著 ($P < 0.05$)

表 6 草本植物物种多样性沿海拔梯度的变化

Table 6 Changes of plant species diversity in the herb layer along the altitude gradient

| 海拔梯度 Altitude gradient/m | 物种丰富度指数 Species richness index (S) | Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index (H) | Simpson 指数 Simpson index (D) | Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index (J) |
|-----------------------------|---------------------------------------|---|---------------------------------|---|
| 800—1000 | 21.444±1.4240a | 1.5846±0.0594a | 0.7613±0.0235a | 0.9074±0.0321a |
| 1000—1200 | 13.666±2.5981b | 1.357±0.1882b | 0.7025±0.0634ab | 0.9079±0.0230a |
| 1200—1400 | 12.444±2.2973b | 1.2203±0.1795b | 0.6463±0.0690b | 0.8567±0.0614b |
| 1400—1700 | 11.8889±3.9511b | 1.2191±0.2414b | 0.6549±0.0810b | 0.8812±0.0475ab |

均值±方差,同列不同字母表示在 0.05 水平差异显著 ($P < 0.05$)

Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数关系图见图 3 和图 4,其表现为乔木>灌木>草本。乔木层、灌木层和草本层的 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数随着海拔的升高也都表现出下降的趋势,而草本层的 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数在海拔 1400m 之后和丰富度指数表现一样,也出现了上升的趋势。主要由于 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数的变化主要与物种丰富度有关,所以其变化趋势与草本的物种丰富度指数变化趋势相似。乔木和草本的 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数按海拔高度排序得到的曲线拟合效果都极其显著 ($P < 0.01$),而灌木的曲线拟合效果都不显著 ($P > 0.05$)。

Pielou 指数关系见图 5。乔木层的 Pielou 指数较高,灌木层和草本层的 Pielou 指数较为相近,从 1500m 之后,乔木层的均匀度较低。Pielou 指数与海拔梯度的变化关系表现为:乔木层随着海拔的升高而下降,草本层随着海拔的升高先下降后出现上升的趋势,灌木层则随着海拔的升高而上升,但其变化趋势较其他两个层次显得更剧烈。Pielou 指数的拟合效果只有乔木的极其显著 ($P < 0.01$),灌木和草本的都不太显著 ($P > 0.05$)。因此,乔木层、灌木层和草本层中,对环境梯度变化最敏感的是灌木层,其次是草本层,乔木层的敏感程度较小。

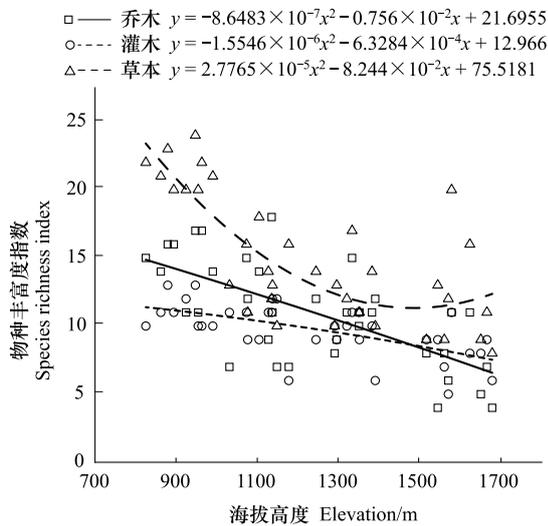


图2 植物群落各层次丰富度指数随海拔高度的变化趋势
Fig.2 The changing trend of richness index of different layer of plant community with altitude

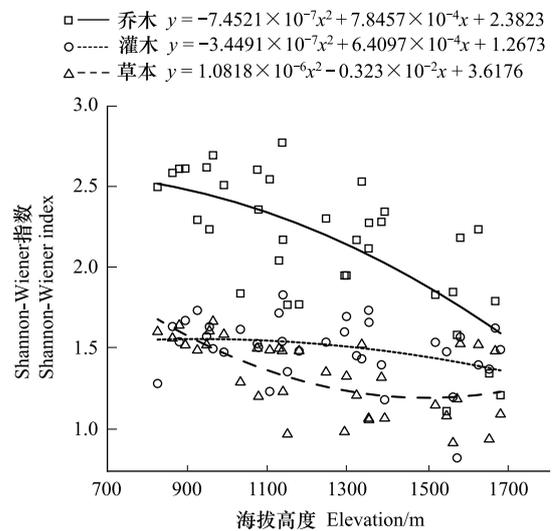


图3 植物群落各层次 Shannon-Wiener 指数随海拔高度的变化趋势
Fig.3 The Changing trend of Shannon-Wiener index of different layer of plant community with altitude

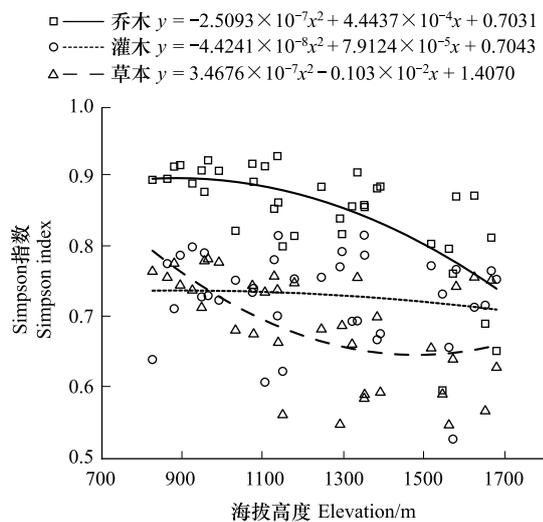


图4 植物群落各层次 Simpson 指数随海拔高度的变化趋势
Fig.4 The Changing trend of Simpson of different layer of plant community with altitude

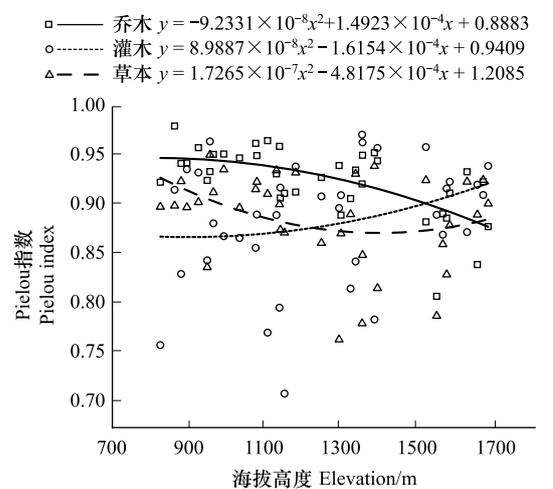


图5 植物群落各层次 Pielou 指数随海拔高度的变化趋势
Fig.5 The Changing trend of Pielou of different layer of plant community with altitude

4 讨论与结论

4.1 物种组成与分布

研究物种组成与空间分布是了解生态系统过程、形成及其维持机制的重要途径^[37-38],对植物群落研究具有重要意义。对多枝尖、庵基坪和麒麟沟等大别山南部地区的调查结果显示,共记录维管植物有 109 科 272 属 458 种。其中,多枝尖的植物物种偏多,有 69 科,129 属,178 种;麒麟沟居中,有 60 科,131 属,167 种;庵基坪较少,有 73 科,119 属,151 种。由此可见,本研究结果表明大别山南坡物种丰富,调查地区多枝尖的植物种类较丰富,庵基坪的物种丰富度偏低,主要由于多枝尖位于大别山腹地主峰分水岭的主段,其生态环境适宜植物生长,植物种类丰富。朱成琦^[27]关于皖西大别山区典型森林群落结构的研究结果也表明皖西地区植

物多样性较高,与本文在皖南地区的研究结果一致。

4.2 植物群落类型

大别山南坡主要群落类型有以下几种:山胡椒林、茅栗林、茅栗+桉栎混交林、化香树+茅栗混交林、台湾松林、台湾松+茅栗混交林和台湾松+黄山栎混交林等,其多为落叶阔叶林,少数为针叶林。它们在物种组成、垂直结构、分布区域等方面都有较大的差异。不同植物群落类型中的群落结构和物种多样性存在差异,而这种差异与各植物群落类型所处的生境、所处的演替阶段以及人为干扰程度等有关^[39]。在植物群落从针叶林和针阔混交林到阔叶林演替的不同阶段,其物种多样性指数依次升高,但植物群落在演替最高阶段,其物种多样性并不是最高^[40]。大别山南坡植被,其基部森林植被类型为北亚热带常绿阔叶林,沿海拔梯度向上植被类型呈现出向暖温带落叶阔叶林变化的趋势,大多数林分以矮小的乔木林和灌木林为主,正处于群落发育和演替的中期,森林群落类型多样,植物群落结构完整,物种多样性较高,植被恢复良好。

4.3 物种丰富度与多样性

20种植物群落类型中,茅栗+桉栎混交林,山胡椒+山樱桃混交林,化香树+山胡椒混交林,台湾松+桉栎混交林,茅栗+山胡椒混交林,化香树+四照花混交林,化香树林和化香树+桉栎混交林的物种多样性指数较高,主要由于这些群落分布在低海拔,加上人为干扰因素减少,各种环境因子适合植物生长,植物种类丰富,物种多样性高。台湾松林和台湾松+黄山栎混交林的物种丰富度和多样性低,主要由于这两个群落类型分布在高海拔 1600m 左右,适合植物的生存条件变的恶劣,大多数物种无法生存,物种丰富度降低,所以物种多样性低。在化香树+山胡椒混交林,化香树+杉木混交林,化香树+四照花混交林,山胡椒+山樱桃混交林,化香树林,化香树+茅栗混交林和台湾松+山胡椒混交林中植物物种分布比较均匀,这些群落类型都为阔叶落叶林,处于较低海拔,优势种不唯一,各层次物种组成较为丰富,所以导致这些群落类型的均匀度指数较高。

本研究表明所有植物群落类型中的乔木层物种多样性指数最高,这与卢鹏林^[41]和尹达^[42]等人对不同山体的研究结果草本>灌木>乔木的物种丰富度和物种多样性指数并不一致。根据对大别山南部地区的实地调查发现,其受人为干扰小,并且拥有大量的次生林,乔木层植物群落占绝对优势,多为阔叶落叶林,主要建群种的个体数量很多并有大量伴生乔木,所以乔木层的物种丰富度和物种多样性指数较高。大多数植物群落草本层的物种多样性指数较低,这些群落多为阔叶落叶林,乔木层物种丰富,在一些阔叶林下某些物种的优势度过大导致草本层植物稀少,如化香树+桉栎混交林,茅栗林,化香树+茅栗混交林和黄山栎林下灌木层中箬竹占绝对优势;杉木林下的中国绣球数量较多;化香树+四照花混交林中优势种为丁香杜鹃,都使得其群落草本层植物稀少,物种多样性较低。

海拔梯度综合了温度、湿度、光照和土壤等多种环境因子,是物种多样性梯度格局研究的重要方面^[43-44]。而物种多样性具有多种海拔梯度分布格局,主要有与海拔高度呈负相关,正相关,随着海拔高度先降后升、先升后降和无明显格局^[45]。本研究表明大别山南部地区森林植物群落各层次物种丰富度和物种多样性与海拔呈负相关关系,即物种多样性随海拔升高而不断减少,许多山脉都存在这样的变化规律^[46-47],是最普遍的一种格局。但在海拔 1400m 以后草本层的物种丰富度和物种多样性出现了上升的趋势,主要是因为海拔 1400m 这个海拔高度,灌木层以箬竹等种类占绝对优势,导致草本种类很少甚至没有,之后随着海拔的升高,灌木优势降低,草本植物种类逐渐升高。Pielou 指数在乔木层、灌木层和草本层的变化比较复杂,从三个层次的多项式拟合曲线可以看出,乔木层、灌木层和草本层中,对环境梯度变化最敏感的是灌木层,其次是草本层,乔木层的敏感程度较小。

虽然物种丰富度与多样性主要受到海拔梯度的影响,但坡度坡向对其也会产生一定的影响。坡度坡向作为重要的地形因子,它们通过改变光照、温度等气象因子,从而影响土壤含水量的分布,进而对群落物种多样性、植被类型与生产力等产生重要影响^[48]。阳坡由于坡度增加,水分养分流失加剧,物种数量逐渐降低;阴坡受此影响相对更小^[49]。李成俊等^[50]研究道路边坡坡度对植被恢复中物种多样性的影响研究表明:边坡坡度对成都平原周边地区道路边坡的植物群落多样性具有显著影响;在坡度<35°的条件下,植被群落恢复效果较

好,群落的多样性高;而对 $>35^\circ$ 的边坡来说,多样性指数呈下降趋势。根据调查结果显示,多枝尖区域多属于阴坡,并且坡度多在 35° 以下,所以其物种多样性和丰富度较高;而麒麟沟居中,庵基坪最低。

4.4 结论

大别山南坡调查的 36 个样地共划分为 20 个森林群落类型,森林群落多样,物种多样性高,次生植被恢复很好。各植物群落的丰富度指数表现为草本 $>$ 乔木 $>$ 灌木;Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数呈现出乔木 $>$ 灌木 $>$ 草本的趋势;而均匀度指数在各层次中变化较为复杂,在灌木层中的波动较为剧烈。植物群落物种丰富度和物种多样性与海拔高度表现出明显的负相关关系。通过对大别山南坡森林植物群落物种组成和多样性调查分析及其与海拔因子关系的研究,揭示了大别山南坡各植物群落类型的物种多样性、海拔分布范围及其群落各层次物种多样性沿海拔梯度的变化情况,为大别山南坡森林生态系统生物多样性和生态环境的保护提供了科学的理论依据。

本研究在大别山南坡的多枝尖、庵基坪和麒麟沟 3 个地区共设置了 36 个样地,覆盖了保护区从 800m 到 1700m 的海拔区域,记录了海拔、坡度、坡向、经纬度等环境因子。尽管做了大量的调查取样工作,但相对广阔的大别山南坡来说仍显得有些少,再加上由于大别山南坡的地理环境特殊,区内物种和群落类型较多。所以,在后续研究中,应该选取更多的地区和样地以及更广的海拔范围,能在更大程度上覆盖南部地区内的物种和群落类型。另外,应该科学选取更多的环境因子,如土壤类型、土壤化学性质等,来综合分析群落物种分布和物种多样性,以更好的了解和解释大别山南坡植物群落的组成结构、分布特点及发展过程。

参考文献(References):

- [1] 马克平. 试论生物多样性的概念. 生物多样性, 1993, 1(1): 20-22.
- [2] Shaheen H, Ullah Z, Khan S M, Harper D M. Species composition and community structure of western Himalayan moist temperate forests in Kashmir. *Forest Ecology & Management*, 2012, 278: 138-145.
- [3] Coelho M T P, Barreto E, Rangel T F, Diniz-Filho J A F, Wüest R O, Bach W, Skeels A, McFadden I R, Roberts D W, Pellissier L, Zimmermann N E, Graham C H. The geography of climate and the global patterns of species diversity. *Nature*, 2023, 622:(7983) 537-544.
- [4] 岳永杰, 余新晓, 牛丽丽, 孙庆艳, 李金海, 武军. 北京雾灵山植物群落结构及物种多样性特征. *北京林业大学学报*, 2008, 30(S2): 165-170.
- [5] 张岩岩. 植物群落物种多样性与景观结构调查与分析. *分子植物育种*, 2023, 21(22): 7566-7570.
- [6] Qian H, Zhang J, Jiang M C. Global patterns of taxonomic and phylogenetic diversity of flowering plants; Biodiversity hotspots and coldspots. *Plant Diversity*, 2023, 45(3): 265-271.
- [7] Morris S J, Boerner R E J. Landscape patterns of nitrogen mineralization and nitrification in southern Ohio hardwood forests. *Landscape Ecology*, 1998, 13(4): 215-224.
- [8] 赵淑清, 方精云, 宗占江, 朱彪, 沈海花. 长白山北坡植物群落组成、结构及物种多样性的垂直分布. *生物多样性*, 2004, 12(1): 164-173.
- [9] Li X, Nie Y, Song X, Zhang R, Wang G. Patterns of species diversity and functional diversity along the south-to north-facing slope gradient in a sub-alpine meadow. *Community Ecology*, 2011, 12(2): 179-187.
- [10] Xu M H, Ma L, Jia Y Y, Liu M. Integrating the effects of latitude and altitude on the spatial differentiation of plant community diversity in a mountainous ecosystem in China. *PLoS One*, 2017, 12(3): e0174231.
- [11] 李林, 魏识广, 练璐愉, 曹洪麟. 亚热带不同纬度植物群落物种多样性分布规律. *生态学报*, 2020, 40(4): 1249-1257.
- [12] Zhang L P, Deng L, Sun T, Fei K, Song N, Wang X. Features of plant community and driving forces of plant community succession in the typical desert wetlands. *Sustainability*, 2022, 14(14): 8430.
- [13] 喻阳华, 钟欣平, 郑维, 陈志霞, 王俊贤. 喀斯特森林不同演替阶段植物群落物种多样性、功能性状、化学计量及其关联. *生态学报*, 2021, 41(6): 2408-2417.
- [14] 李其斌, 张春雨, 赵秀海. 长白山不同演替阶段针阔混交林群落物种多样性及其影响因子. *生态学报*, 2022, 42(17): 7147-7155.
- [15] Wehenkel C, Bergmann F, Gregorius H R. Is there a trade-off between species diversity and genetic diversity in forest tree communities? *Plant Ecology*, 2006, 185(1): 151-161.
- [16] 刘旻霞, 南笑宁, 张国娟, 李博文, 徐璐, 穆若兰, 李亮, 于瑞新. 高寒草甸不同坡向植物群落物种多样性与功能多样性的关系. *生态学报*, 2021, 41(13): 5398-5407.
- [17] Zhou M, Yang Q, Zhang H J, Yao X D, Zeng W J, Wang W. Plant community temporal stability in response to nitrogen addition among different

- degraded grasslands. *Science of the Total Environment*, 2020, 729: 138886.
- [18] Harrison S, Spasojevic M J, Li D J. Climate and plant community diversity in space and time. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(9): 4464-4470.
- [19] 侯星辰, 鲁绍伟, 向昌林, 李少宁, 赵娜, 徐晓天. 不同母质温带草地植物群落多样性对人为干扰的响应. *应用生态学报*, 2022, 33(8): 2153-2160.
- [20] 钱者东, 陈皓, 张昊楠, 张建亮, 高军, 秦鑫. 安徽鹞落坪自然保护区聚落用地适宜性评价. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(11): 1412-1419.
- [21] 王志高, 张中信, 汪文革, 储俊. 安徽岳西县鹞落坪国家级自然保护区森林群落结构的初步分析. *植物生态学报*, 2016, 40(6): 615-619.
- [22] 谢中稳, 吴国芳. 安徽省鹞落坪自然保护区的植被类型及其分布. *华东师范大学学报: 自然科学版*, 1995(3): 93-102.
- [23] 赵昕, 常锦利, 周守标, 王晓英, 王智. 鹞落坪自然保护区落叶阔叶林群落特征. *安徽师范大学学报: 自然科学版*, 2020, 43(3): 258-263.
- [24] 高林. 皖西南鹞落坪国家级自然保护区特有植物的调查研究. *安徽农业科学*, 2004, 32(6): 1184-1186.
- [25] 吉兴磊. 鹞落坪国家级自然保护区森林群落植物多样性保护研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2007.
- [26] 丁茂, 汪宇坤, 何煜然, 徐晓阳, 周守标, 王智. 安徽鹞落坪国家级自然保护区落叶阔叶林树种多样性、种间联结及群落稳定性变化. *生态学报*, 2023, 43(7): 2818-2830.
- [27] 朱成琦. 皖西大别山区典型森林群落结构与碳储量研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2020.
- [28] 王志高, 张中信, 段仁燕, 吴甘霖. 鹞落坪国家级自然保护区吊罐井物种分布格局与种间关联的多尺度分析. *植物科学学报*, 2016, 34(1): 21-26.
- [29] 徐耀粘, 刘检明, 万丹, 刘梦婷, 江明喜. 林冠结构和地形对亚热带常绿阔叶林林下幼苗物种多样性和功能多样性的影响. *植物科学学报*, 2020, 38(6): 733-742.
- [30] 韩也良. 安徽省境内亚热带常绿阔叶林带的北界问题(摘要). *植物生态学与地植物学丛刊*, 1981, 5(1): 54-57.
- [31] 李珍. 安徽鹞落坪自然保护区维管植物多样性研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2007.
- [32] 韩也良. 对安徽大别山南坡植被垂直带谱基带的讨论. *安徽师大学报: 自然科学版*, 1981, 4(2): 110-125.
- [33] 王丽, 常锦利, 周守标, 王晓英, 张佳期, 闫少凯, 张金铭, 陈鑫, 赵昕, 王智. 鹞落坪国家级自然保护区乔木物种多样性与种间联结. *生态学报*, 2019, 39(1): 309-319.
- [34] 马克平. 生物群落多样性的测度方法 I α 多样性的测度方法(上). *生物多样性*, 1994, 2(3): 162-168.
- [35] 马克平, 刘玉明. 生物群落多样性的测度方法 I α 多样性的测度方法(下). *生物多样性*, 1994, 2(4): 231-239.
- [36] 郭香瑶, 罗颖, 尹秋龙, 杨治春, 贾仕宏, 郝占庆. 秦岭皇冠暖温带落叶阔叶林灌木层结构与物种多样性. *应用生态学报*, 2022, 33(8): 2017-2026.
- [37] Hou J, Fanin N, Ni Z Z. A network prediction model to quantify relationship between biodiversity and ecosystem functioning (BEF). *Methods in Ecology and Evolution*, 2023, 14(12): 2907-2916.
- [38] 罗也, 及利, 杨雨春, 王君, 何怀江, 张丽杰, 祁永会. 东北地区胡桃楸次生混交林乔木物种组成和多样性. *生态学杂志*, 2020, 39(9): 2887-2895.
- [39] 梁栋栋, 彭杰, 高改利, 洪欣, 周守标, 储俊, 王智. 鹞落坪落叶阔叶林蔷薇科主要树种的空间分布格局及种间关联性. *生物多样性*, 2020, 28(8): 1008-1017.
- [40] 邓婷婷, 魏岩, 任思远, 祝燕. 北京东灵山暖温带落叶阔叶林地形和林分结构对林下草本植物物种多样性的影响. *生物多样性*, 2023, 31(7): 18-29.
- [41] 卢鹏林. 崂山森林植物群落物种多样性的垂直分布格局及影响因素分析[D]. 济南: 山东大学, 2013.
- [42] 尹达. 山东蒙山森林植物群落物种多样性及其与环境因子关系的研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- [43] 郝占庆, 邓红兵, 姜萍, 王战, 黄乃伟. 长白山北坡植物群落间物种共有度的海拔梯度变化. *生态学报*, 2001, 21(9): 1421-1426.
- [44] 张恒庆, 王海双, 焦悦, 刘静怡, 李佳欣. 步云山森林植物群落物种多样性及其与海拔因子的关系. *辽宁师范大学学报: 自然科学版*, 2021, 44(1): 57-65.
- [45] 潘婷婷, 陈林, 杨国栋, 伊贤贵, 王贤荣. 南京北部郊野森林群落物种多样性及其环境解释. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2020, 44(6): 48-54.
- [46] Gentry A H. Changes in plant community diversity and floristic composition on environmental and geographical gradients. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 1988, 75(1): 1-34.
- [47] Anderson M J, Walsh D C I, Sweatman W L, Punnett A J. Non-linear models of species' responses to environmental and spatial gradients. *Ecology Letters*, 2022, 25(12): 2739-2752.
- [48] 王凤娟, 丁福波. 植物群落物种多样性研究综述. *现代园艺*, 2015(8): 155.
- [49] 李志飞, 梁品航, 叶有华, 黄婉婷, 方蕴仪. 坡度对仲恺存留山地植物群落物种多样性的影响. *林业与环境科学*, 2023, 39(4): 94-104.
- [50] 李成俊, 孙琦, 陈璋, 庞亮, 胡兴, 龙凤. 道路边坡坡度对植被恢复中物种多样性的影响研究. *植物研究*, 2013, 33(4): 477-483.