

网络出版时间:2025-06-12 13:24 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2025.12.007
网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1390.S.20250612.0924.006

庐山不同林分植物群落结构及环境因子特征

向泽宇, 习丹, 张昭臣, 张佳鑫, 王静轩, 周赛霞

(江西省、中国科学院庐山植物园 碳中和与生态系统碳汇江西省重点实验室, 江西 九江 332900)

【摘要】【目的】阐明不同林分在维持群落多样性和土壤养分方面的差异, 为保护亚热带山地植物多样性和提升森林生态系统功能提供理论指导。【方法】以枞栎石灰花楸落叶阔叶林、四照花短毛槭落叶阔叶林、黄山松林和竹阔混交林为对象, 研究其群落特征和土壤环境特征。【结果】①黄山松林的树高、胸径和密度远大于其他林分; 群落 α 多样性表现为落叶阔叶林 > 黄山松林 > 竹阔混交林, β 多样性则相反。②土壤养分含量表现为竹阔混交林最大, 落叶阔叶林居中, 黄山松林最小, 土壤碳氮磷化学计量比和凋落物生物量表现则相反。③林分群落的树高、胸径和密度与土壤养分含量呈负相关; 土壤养分含量与多样性指数 E 呈正相关, 而与多样性指数 R 和 M 呈负相关。【结论】落叶阔叶林对群落多样性的维持和土壤养分的投入更优, 群落更稳定; 今后在亚热带山地森林保护中要更多关注阔叶林林分群落。

【关键词】庐山; 不同林分; 群落结构; 环境因子; 冗余分析

【中图分类号】S718.51

【文献标志码】A

【文章编号】1671-9387(2025)12-0060-10

Characteristics of plant community structure and environmental factors in different forest stands of Lushan Mountain

XIANG Zeyu, XI Dan, ZHANG Zhaochen, ZHANG Jiaxin,
WANG Jingxuan, ZHOU Saixia

(Jiangxi Provincial Key Laboratory of Carbon Neutrality and Ecosystem Carbon Sink, Lushan Botanical Garden
Jiangxi Province and Chinese Academy of Sciences, Jiujiang, Jiangxi 332900, China)

Abstract: 【Objective】The purpose of this study is to clarify the differences forest stands in maintaining community diversity and soil nutrients, and to provide theoretical guidance for protecting plant diversity and improving forest ecosystem functions in subtropical forest. 【Method】The community characteristics and soil environmental characteristics of different forest stand communities were studied by *Quercus serrata* + *Sorbus folgneri* deciduous broadleaf forest, *Cornus kousa* subsp. *chinensis* + *Tilia chingiana* deciduous broadleaf forest, *Pinus hwangshanensis* forest and mixed *Phyllostachys reticulata*-broadleaf forest. 【Result】① The tree height, DBH and density of *P. hwangshanensis* forest were much larger than other forest stands. α diversity of community was the highest in deciduous broadleaf forest, followed by *P. hwangshanensis* forest, and the lowest in mixed *P. reticulata*-broadleaf forest, while β diversity was the opposite. ② The soil nutrient content was the highest in mixed *P. reticulata*-broadleaf forest, followed by deciduous broadleaf forest, and the lowest in *P. hwangshanensis* forest. The stoichiometric ratio of soil (carbon, nitrogen and phosphorus) and litter biomass were the opposite. ③ The tree height, DBH and density of forest stands were negatively correlated with soil nutrient content. The soil nutrient content was

【收稿日期】2024-06-25

【基金项目】江西省自然科学基金面上项目(20232BAB205020); 中国科学院庐山植物园庐山植物专项(2019ZWZX01)

【作者简介】向泽宇(1986—), 男, 湖北汉川人, 助理研究员, 主要从事群落生态研究。E-mail: xiangzy@lsbg.cn

【通信作者】周赛霞(1976—), 女, 湖北武汉人, 副研究员, 主要从事森林生态和生物多样性研究。E-mail: zhousx@lsbg.cn

positively correlated with the diversity index E , while negatively correlated with the diversity R and M_n .
【Conclusion】The deciduous broadleaf forest had better diversity maintenance and soil nutrient input and the community was more stable. In the future, more attention should be paid to the broadleaf forest community in subtropical mountain forest protection and management.

Key words: Lushan Mountain; different forest stands; community structure; environmental factors; redundancy analysis

物种组成和生物多样性及其与环境的关系一直是生态学关注的焦点^[1-2],而山地森林生态系统是生物多样性研究的热点地区^[3]。庐山是东亚山地森林生态系统的典型代表,其植被呈现出由暖温带落叶阔叶林向亚热带常绿阔叶林过渡的典型特征,是研究亚热带森林生态系统群落动态的天然实验室^[4]。在森林生态系统中,地上群落对地下环境的影响主要体现在物种组成变化、林木密度、凋落物生物量等差异会促进土壤性质的变化^[5-6];土壤是植物生长发育的物质基础,地下土壤环境对地上群落特征的影响主要体现在土壤养分变化会导致植物群落组成和物种多样性的响应^[7]。植物多样性是森林生物多样性的核心,在生态文明建设背景下具有较高的经济、社会和生态价值。如何提高和维持森林植物多样性,是实现森林可持续发展所面临的重要问题^[8]。因此,研究森林群落结构与土壤环境特征对森林生态系统地上和地下可持续管理具有重要意义^[1]。目前,关于庐山山地森林植被与环境特征方面的研究,仅有不同群落类型和林分结构会影响凋落物产量和土壤有机碳含量、柳杉林地上群落动态会驱动地下土壤环境特征的变化等少量报道^[9-10]。因此,对于庐山山地森林生态系统中不同植物群落的地上、地下特征及关系的理解仍然不足,尤其是关于不同林分在维持群落多样性和土壤养分投入方面的认识还不够。因此,本研究以庐山枹栎石灰花楸落叶阔叶林(I)、四照花短毛槲落叶阔叶林(II)、黄山松林(III)

和桂竹入侵形成的竹阔混交林(IV)4种常见山地林分类型为对象,研究不同林分植物的群落特征和土壤环境特征,探讨地上植物群落和地下土壤环境特征的关系,以及是否高的植物群落多样性与高土壤养分之间具有一致性,以期为保护庐山亚热带山地森林植物多样性和提升森林生态系统功能提供科学基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于江西省九江的庐山(115°52′—116°13′E, 29°22′—29°46′N),属于亚热带季风气候区,总面积约 800 km²,最高海拔 1 473.8 m,年平均气温 11.4℃,年平均降水量 1 929.2 mm,年雾时间多达 188 d。庐山是山地植物、常绿阔叶林和落叶阔叶林共存的生物多样性热点地区,森林覆盖面积达 76.6%;低海拔区域以常绿阔叶林为主,主要以壳斗科和樟科为优势树种,中高海拔区域包含以蔷薇科、山茱萸科、壳斗科和锦葵科为优势树种的落叶阔叶林,且山顶岭脊等局部有黄山松和柳杉针叶树等群落分布^[9-10]。

1.2 研究方法

选取庐山山地落叶阔叶林带内的I(115°56′1.26″E, 29°31′32.90″N)、II(115°56′10.19″E, 29°31′22.44″N)、III(115°56′17.13″E, 29°31′24.46″N)和IV(115°56′04.89″E, 29°31′21.73″N)4种林分群落类型,各林分群落类型基本信息见表 1。

表 1 4 种林分类型的基本信息

Table 1 Basic information of four forest stands

林分类型 Forest stand type	海拔/m Altitude	坡度/(°) Slope gradient	郁闭度 Crown density	主要物种 Main species
I	980	34	0.85	枹栎、石灰花楸、庐山花楸、江南花楸、黄丹木姜子、格药铃、杜鹃、丁香杜鹃 <i>Q. serrata</i> , <i>S. folgeneri</i> , <i>Sorbus lushanensis</i> , <i>Sorbus hemsleyi</i> , <i>Litsea elongata</i> , <i>Eurya muricata</i> , <i>Rhododendron simsii</i> , <i>Rhododendron farrerae</i>
II	1 113	32	0.80	四照花、灯台树、短毛槲、江南花楸、中华石楠、莢蒾、杜鹃 <i>C. kousa</i> subsp. <i>chinensis</i> , <i>Cornus controversa</i> , <i>T. chingiana</i> , <i>Sorbus hemsleyi</i> , <i>Photinia beauverdiana</i> , <i>Viburnum dilatatum</i> , <i>Rhododendron simsii</i>
III	1 166	19	0.90	黄山松、四照花、灯台树、杜鹃、小叶石楠、丁香杜鹃 <i>P. hwangshanensis</i> , <i>C. kousa</i> subsp. <i>chinensis</i> , <i>Cornus controversa</i> , <i>Rhododendron simsii</i> , <i>Photinia parvifolia</i> , <i>Rhododendron farrerae</i>
IV	1 067	27	0.70	桂竹、四照花、灯台树、山胡椒、杜鹃、牯岭山梅花 <i>P. reticulata</i> , <i>C. kousa</i> subsp. <i>chinensis</i> , <i>Cornus controversa</i> , <i>Lindera glauca</i> , <i>Rhododendron simsii</i> , <i>Philadelphus sericanthus</i> var. <i>kulingensis</i>

在每个林分群落类型中,设置 10 个调查样地 (20 m×20 m)。对每个样地内所有胸径(DBH)大于 1 cm 的本木进行每木检尺,记录树种名称、胸径、树高等信息。每个样地分为 4 个 10 m×10 m 的方格,在每个方格的中心及样地的中心点各设置 1 个 50 cm×50 cm 的凋落物采集样方,共 5 个样方,凋落物采集完成后,用直径为 5 cm 的土钻采集 0~20 cm 深度的土壤,并将其混合成 1 个样品带回实验室,每个林分群落类型共 10 份土壤样品;同时,在每个样地的中心点用 100 cm³ 的环刀采集环刀土样。

1.3 土壤理化性质测定

采集的凋落物样品经烘箱干燥(65 ℃)48 h,计算凋落物生物量。土壤密度用环刀法测定,含水量用烘干法(105 ℃,24 h)测定^[11]。采集的土样经过筛(孔径<2 mm),分离细根,清除杂质,风干土样;细根在 65 ℃下烘干 48 h 并称质量,以计算细根生物量。土壤全碳和全氮含量用元素分析仪(Thermo Fisher Scientific)测定,pH 用电位测定法(水土比为 2.5:1)测定,碱解氮含量用碱解扩散法测定,全磷和有效磷含量用钼锑抗比色法测定,全钾和速效钾含量用火焰光度法测定^[12]。

1.4 多样性指数计算

植物群落中树种重要值计算公式为^[13]:重要值=(相对密度+相对优势度+相对频度)/3。计算物种丰富度指数(R)、Margalef 指数(M_a)、Shannon-Wiener 指数(H)、Simpson 指数(D)、Pielou 均匀度指数(E)等 5 个 α 多样性指数^[14],以衡量植物物种丰富性、多样性、优势度和分布状况。计算 β 多样性(β_{sor})、物种周转组分(β_{sim})和物种嵌套组分(β_{sne})^[15],对不同林分群落类型的 β 多样性进行量化分析。

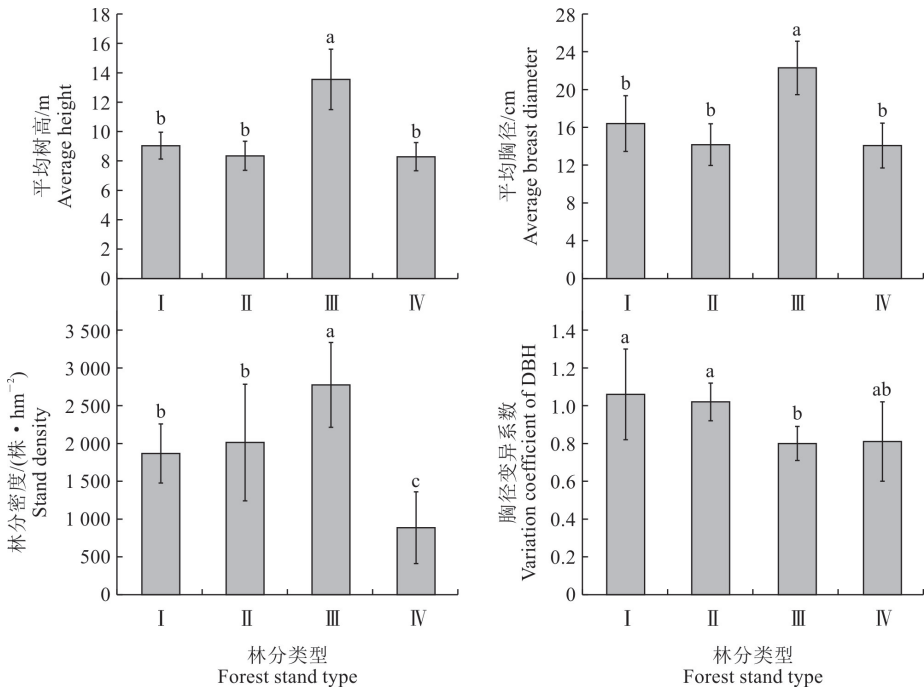
1.5 数据处理与分析

用 Excel 2010 进行数据整理分析,用 SPSS 27.0 对不同林分群落间的群落数量特征和土壤环境因子特征的差异显著性进行单因素方差分析(one-way ANOVA),并用 Origin 进行绘图;用 Canoco 5.0 中的冗余分析(redundancy analysis, RDA)解释林分群落特征与环境因子之间的关系并绘图。

2 结果与分析

2.1 不同林分群落类型的基本林分特征

4 种林分类型的基本特征见图 1。



不同字母表示不同林分类型之间差异显著($P<0.05$)。下同。

Different letters represent significant differences among forest stands ($P<0.05$). The same below.

图 1 4 种林分类型的基本特征

Fig. 1 Basic characteristics of four forest stands

由图 1 可知,4 种林分的平均树高和平均胸径都表现为Ⅲ>Ⅰ>Ⅱ>Ⅳ,且黄山松林的平均树高

和平均胸径显著大于其他 3 种林分($P<0.05$),而落叶阔叶林和竹阔混交林之间的差异不显著($P>$

0.05)。林分密度表现为Ⅲ>Ⅱ>Ⅰ>Ⅳ,黄山松林的林分密度显著大于其他林分($P<0.05$),而竹阔混交林的林分密度显著比其他3种林分小($P<0.05$),落叶阔叶林之间差异不显著($P>0.05$)。胸径变异系数表现为Ⅰ>Ⅱ>Ⅳ>Ⅲ,落叶阔叶林的胸径变异系数显著大于黄山松林($P<0.05$),而与竹阔混交林差异不显著($P>0.05$)。

2.2 不同林分群落类型的多样性特征

由图2可知,不同林分群落类型间 α 多样性有显著差异。其中,多样性指数 M_a 和 H 均表现为Ⅰ>Ⅱ>Ⅲ>Ⅳ,且竹阔混交林的 M_a 指数显著小于其他3种林分($P<0.05$),其他3种林分之间差异不显著($P>0.05$);Ⅱ与其他3种林分的 H 指数差异不显著($P>0.05$),Ⅰ的 H 显著大于Ⅲ和Ⅳ($P<0.05$); E 表现为Ⅰ>Ⅳ>Ⅱ>Ⅲ,黄山松林的 E 显著最小($P<0.05$),其他3种林分之间差异不

显著($P>0.05$); D 表现为Ⅰ>Ⅱ>Ⅳ>Ⅲ,黄山松林的 D 显著小于其他3种林分($P<0.05$),而Ⅰ与Ⅱ、Ⅳ之间均无显著差异。综合 α 多样性指数看,总体上不同林分群落类型间多样性表现为Ⅰ>Ⅱ>Ⅲ>Ⅳ,落叶阔叶林多样性最高,黄山松林多样性居中,竹阔混交林多样性最小。不同林分群落类型间 β 多样性也有显著差异。其中,代表群落间物种组成差异的 β_{sor} 表现为Ⅳ>Ⅲ>Ⅱ>Ⅰ,且4种林分间差异均显著($P<0.05$),代表群落间物种周转组分的 β_{sim} 表现为Ⅲ>Ⅳ>Ⅱ>Ⅰ,即竹阔混交林和黄山松林的群落间物种差异和物种周转要大于2种落叶阔叶林($P<0.05$)。代表物种丰富度差异的嵌套组分 β_{sne} 表现为Ⅳ>Ⅰ>Ⅱ>Ⅲ,即竹阔混交林的群落间物种丰富度差异显著大于其他3种林分($P<0.05$),黄山松林群落间物种丰富度差异最小。

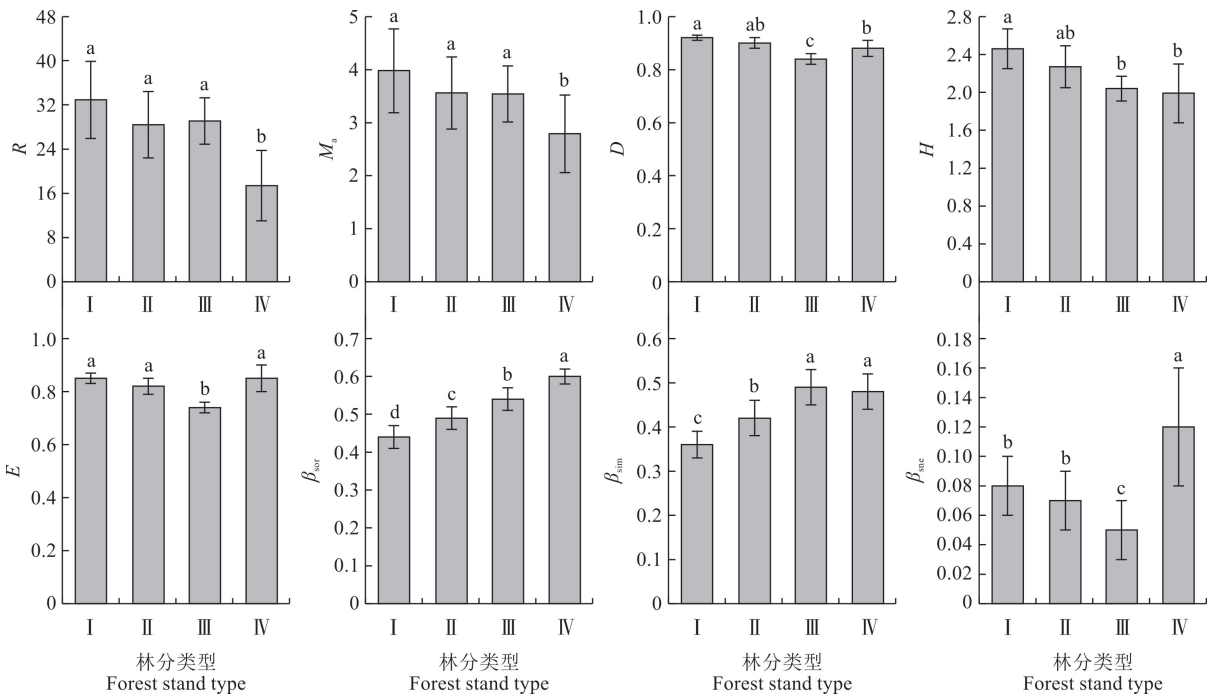


图2 4种林分类型的多样性特征
Fig.2 Community diversity of four forest stands

2.3 不同林分类型的土壤性质特征

4种林分类型的土壤性质特征如表2所示。由表2可知,4种不同林分类型的土壤性质有显著差异。土壤含水量表现为Ⅱ>Ⅳ>Ⅲ>Ⅰ,枹栎石灰花楸落叶阔叶林和黄山松林间的差异不显著($P>0.05$),其他林分类型间差异显著($P<0.05$)。pH和碱解氮均表现为Ⅳ>Ⅱ>Ⅲ>Ⅰ,竹阔混交林显著高于其他3种林分($P<0.05$),其他3种林分间

差异不显著($P>0.05$)。土壤密度表现为Ⅲ>Ⅰ>Ⅳ>Ⅱ,黄山松林明显大于其他3种林分($P<0.05$)。

土壤全碳、全氮、全磷、全钾、有效磷、速效钾含量均表现为Ⅳ>Ⅱ>Ⅰ>Ⅲ,且竹阔混交林的全氮、全钾、有效磷、速效钾含量显著大于其他3种林分($P<0.05$),而四照花短毛楸落叶阔叶林的全氮、全钾、速效钾含量又显著大于枹栎石灰花楸落叶阔叶

林和黄山松林($P<0.05$), 枹栎石灰花楸落叶阔叶林和黄山松林间差异不显著($P>0.05$)。土壤碳氮比表现为Ⅲ>Ⅰ>Ⅱ>Ⅳ, 黄山松林和枹栎石灰花楸落叶阔叶林间差异不显著($P>0.05$), 它们与四照花短毛楸落叶阔叶林和竹阔混交林间有显著差异($P<0.05$)。土壤碳磷比表现为Ⅲ>Ⅰ>Ⅳ>Ⅱ, 土壤氮磷比表现为Ⅳ>Ⅲ>Ⅰ>Ⅱ。凋落物生物量

表现为Ⅲ>Ⅰ>Ⅱ>Ⅳ, 黄山松林的凋落物生物量显著高于其他林分($P<0.05$)。细根生物量表现为Ⅳ>Ⅲ>Ⅰ>Ⅱ, 竹阔混交林的细根生物量显著大于其他林分($P<0.05$), 其他 3 种林分间差异不显著($P>0.05$)。整体而言, 竹阔混交林的土壤养分含量最高。

表 2 4 种林分类型的土壤性质特征
Table 2 Characteristics of soil properties of four forest stands

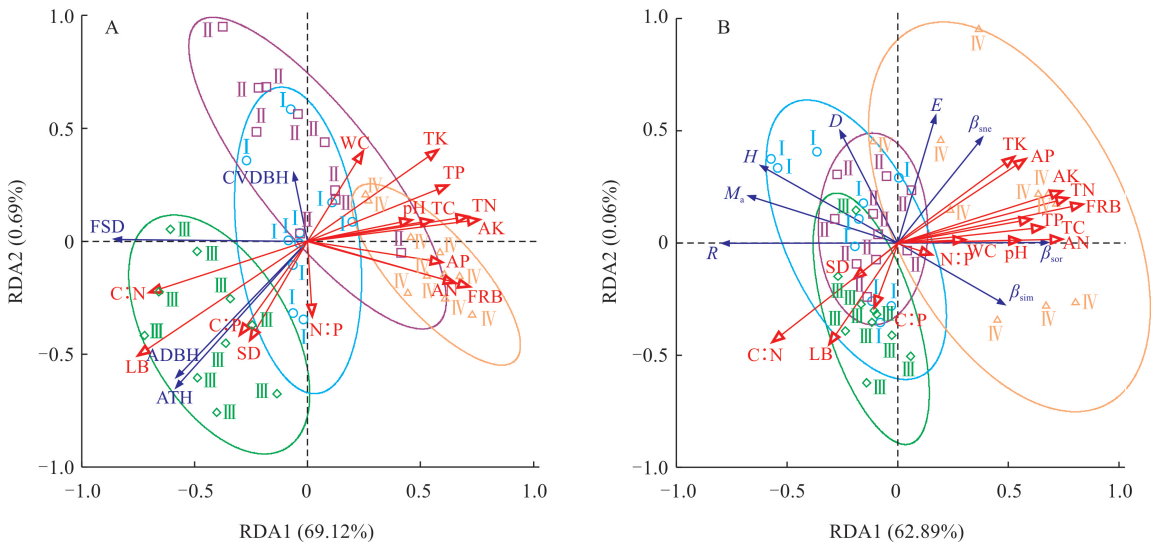
参数 Index	林分Ⅰ Forest stand Ⅰ	林分Ⅱ Forest stand Ⅱ	林分Ⅲ Forest stand Ⅲ	林分Ⅳ Forest stand Ⅳ
含水量/% Water content	26.63±3.01 c	33.00±2.83 a	27.35±1.71 c	30.00±2.28 b
pH	4.01±0.12 b	4.09±0.16 b	4.01±0.08 b	4.41±0.28 a
土壤密度/(g·cm ⁻³) Soil density	1.33±0.12 b	1.20±0.12 c	1.44±0.13 a	1.28±0.11 bc
全碳/(g·kg ⁻¹) Total carbon	47.77±13.54 bc	57.37±9.40 ab	45.06±9.96 c	67.29±10.59 a
全氮/(g·kg ⁻¹) Total nitrogen	3.07±0.70 c	4.37±0.85 b	2.83±0.60 c	5.74±1.11 a
全磷/(g·kg ⁻¹) Total phosphorus	0.37±0.09 b	0.55±0.10 a	0.31±0.06 b	0.68±0.26 a
全钾/(g·kg ⁻¹) Total potassium	9.21±1.65 c	10.97±2.43 b	7.50±2.02 c	13.73±1.26 a
碱解氮/(mg·kg ⁻¹) Available nitrogen	299.19±93.35 b	342.10±77.48 b	299.51±49.18 b	529.35±155.68 a
有效磷/(mg·kg ⁻¹) Available phosphorus	4.43±1.40 b	5.48±2.10 b	4.12±0.87 b	12.34±6.38 a
速效钾/(mg·kg ⁻¹) Available potassium	73.74±23.16 c	102.77±27.20 b	53.06±15.19 c	189.15±31.07 a
碳氮比 C:N	15.47±1.54 a	13.23±0.92 b	15.90±0.71 a	11.83±0.87 c
碳磷比 C:P	134.95±39.20 ab	105.89±15.93 b	146.73±37.60 a	112.19±42.73 b
氮磷比 N:P	8.73±2.43 a	8.03±1.34 a	9.22±2.37 a	9.34±3.05 a
凋落物生物量/(g·m ⁻²) Litter biomass	323.15±153.53 b	226.19±90.74 bc	874.01±187.03 a	167.49±110.07 c
细根生物量/(g·m ⁻²) Fine root biomass	143.14±61.69 b	141.67±30.54 b	163.60±39.24 b	582.69±253.95 a

注:同行数据后标不同小写字母表示 4 种林分类型间差异显著($P<0.05$)。
Note:Different lowercase letters after data in same row indicate significant differences among forest stands ($P<0.05$).

2.4 林分类型群落特征与环境因子的 RDA 分析

从林分基本特征与环境因子 RDA 排序(图 3-A)和林分群落多样性与环境因子 RDA 排序(图 3-B)可知,整体上 4 种林分类型在排序中被分开,特别是林分Ⅲ和林分Ⅳ,而 2 种阔叶林在排序中的分布重合较多。由表 3 可知,林分基本特征与环境因子 RDA 排序的第 1 轴和第 2 轴累计解释了 69.81%的群落特征变化信息;林分群落多样性与环境因子 RDA 排序的第 1 轴和第 2 轴累计解释了 62.95%的群落特征变化信息,且 2 个排序主要都是第 1 排序轴贡献的解释变量。在林分基本特征与环

境因子 RDA 排序中,第 1 轴($F=64.1, P=0.002$)和所有轴($F=4.4, P=0.002$)的蒙特卡罗检验结果显著($P<0.05$),第 1 轴中群落特征与环境因子相关系数为 0.838 6;在林分群落多样性与环境因子 RDA 排序图中,第 1 轴($F=40.7, P=0.012$)和所有轴($F=2.7, P=0.012$)的蒙特卡罗检验结果显著($P<0.05$),第 1 轴中群落特征与环境因子相关系数为 0.793 8。2 个排序图的排序结果均可靠,土壤环境因子与群落特征之间具有较好的相关性。



A. 林分基本特征与环境因子;B. 林分群落多样性与环境因子。ATH. 平均树高;ADBH. 平均胸径;FSD. 林分密度; CVDBH. 胸径变异系数;R. 物种丰富度; M_s . Margalef 指数;H. Shannon-Wiener 指数;D. Simpson 指数; E. Pielou 均匀度指数; β_{sor} . β 多样性; β_{sim} . 物种周转组分; β_{sne} . 物种嵌套组分;WC. 含水量; SD. 土壤密度;TC. 全碳;TN. 全氮;TP. 全磷;TK. 全钾;AN. 碱解氮;AP. 有效磷;AK. 速效钾;C : N. 碳氮比; C : P. 碳磷比;N : P. 氮磷比;LB. 凋落物生物量;FRB. 细根生物量。

A. Forest stand basic characteristics and environmental factors;B. Forest stand community diversity and environmental factors. ATH. Average tree height;ADBH. Average diameter at breast height;FSD. Forest stand density;CVDBH. Coefficient of variation of DBH;R. Species richness; M_s . Margalef index;H. Shannon-Wiener index;D. Simpson index;E. Pielou index; β_{sor} . β diversity; β_{sim} . Species turnover; β_{sne} . Species nestedness;WC. Water content;SD. Soil density; TC. Total carbon;TN. Total nitrogen;TP. Total phosphorus;TK. Total potassium;AN. Hydrol nitrogen; AP. Available phosphorus;AK. Available potassium;C : N. Carbon-nitrogen ratio;C : P. Carbon-phosphorus ratio; N : P. Nitrogen-phosphorus ratio;LB. Litter biomass;FRB. Fine root biomass.

图 3 林分群落特征与环境因子的 RDA 排序图

Fig. 3 RDA ordination plot of forest community characteristics and environmental factors

表 3 林分群落特征与环境因子的 RDA 排序

Table 3 RDA ordination of forest community characteristics and environmental factors

项目 Item	林分基本特征与环境因子 Forest stand basic characteristics and environmental factors				林分群落多样性与环境因子 Forest stand community diversity and environmental factors			
	第 1 轴 Axis 1	第 2 轴 Axis 2	第 3 轴 Axis 3	第 4 轴 Axis 4	第 1 轴 Axis 1	第 2 轴 Axis 2	第 3 轴 Axis 3	第 4 轴 Axis 4
特征值 Eigenvalues	0.691 2	0.006 9	0.000 3	0.000 0	0.628 9	0.000 6	0.000 2	0.000 0
累计解释变量/% Explained variation (cumulative)	69.12	69.81	69.84	69.84	62.89	62.95	62.97	62.97
非典型相关 Pseudo-canonical correlation	0.838 6	0.670 7	0.422 9	0.632 5	0.793 8	0.614 2	0.695 9	0.680 5
累计解释拟合变量 Explained fitted variation (cumulative)	98.96	99.95	100.00	100.00	99.87	99.96	99.99	100.00
第 1 轴蒙特卡罗检验 Monte Carlo test on first axis	$F=64.1, P=0.002$				$F=40.7, P=0.012$			
所有轴蒙特卡罗检验 Monte Carlo test on all axis	$F=4.4, P=0.002$				$F=2.7, P=0.012$			

3 讨 论

3.1 林分类型对群落结构特征与多样性的影响

林分结构(树种、胸径、树高、密度等)和树木多样性是森林生长的一个重要方面,是影响森林生态

系统功能的主要林分属性,能表征不同林分群落的主要特征,也是森林管理研究的主要因素^[16-18]。本研究中,不同林分类型的林分结构差异表现为黄山松林的平均树高、胸径和林分密度均远大于其他林分类型,与王文杰等^[19]的研究结果中针叶林的平均

树高、胸径和密度高于阔叶林相似。而竹阔混交林的平均树高和胸径比阔叶林的平均树高和胸径小,尤其是其林分密度明显小于阔叶林。这可能是竹林向阔叶林入侵扩张,对阔叶林群落结构有一定抑制作用,导致阔叶林群落乔木密度明显减少,林分胸径和树高降低,使群落结构简单化^[20]。不同林分类型的群落多样性和以往研究结果相似,整体上也表现出针叶林群落的多样性低于阔叶林^[21-24],特别是黄山松林群落的 Simpson 指数(D)和 Pielou 均匀度指数(E)明显小于其他林分。然而,竹林入侵会导致阔叶林群落多样性下降^[25-26],特别是竹阔混交林群落的物种丰富度(R)和 Margalef 指数(M_a)明显小于阔叶林。这可能是因为阔叶林生境因子更为复杂^[23],落叶阔叶林的胸径变异明显大于黄山松林,具有更丰富复杂的林分结构^[24],且针叶林和竹阔混交林更容易形成单优群落^[22],特别是竹林的扩张通过地上遮阴、机械损伤等物理作用和地下根系、养分竞争等生物化学过程逐步占据阔叶树的空间生态位,威胁其他阔叶树生长,使群落物种多样性下降^[25-26],因而针叶林和竹阔混交林的群落多样性低于阔叶林。同时,本研究中不同林分类型间群落 β 多样性总体表现为竹阔混交林和黄山松林的群落间差异(β_{sor})和物种周转(β_{sim})明显大于落叶阔叶林,这与王晓荣等^[20]和张栋^[23]的研究结果相似,即不同林分类型群落间差异表现为针叶林大于阔叶林,竹阔混交林大于阔叶林。因此,阔叶林群落物种组成更稳定,在区域生物多样性保护中发挥主要作用^[21]。

3.2 林分类型对土壤环境特征的影响

林分类型是影响森林土壤理化性质的重要因素,不同林分因其植物组成的不同而具有不同的凋落物组成、植物根系结构、土壤渗透性、微生物特性等,进而导致林下土壤理化性质等特征不同^[27-29]。本研究中土壤含水量表现为林分Ⅱ最大,林分Ⅳ次之,林分Ⅲ和Ⅰ最小。黄山松林的林分密度最大,树冠对降水的截留作用较强,土壤中水分补充不足,加之高密度林分耗水较大,导致土壤含水量下降^[30]。因此林分Ⅲ的土壤含水量较林分Ⅱ和Ⅳ要小;而林分Ⅰ的土壤含水量也较小,可能是由于其郁闭度较大,对降雨的截留作用较强,同时其坡度较陡,降雨时水流快、下渗少,导致土壤蓄存水分不足。不同林分类型的土壤密度表现为林分Ⅲ明显高于林分Ⅰ、Ⅱ和Ⅳ,与阔叶林相比,针叶林凋落物分解缓慢,根系释放酸性物质多,土壤易板结,因此针叶林土壤密

度高于阔叶林^[30-31]。本研究中 pH 变化和以往的有关研究类似,竹林入侵增加了土壤 pH 值,可能是竹林入侵后,其凋落物盐基离子含量较高,在分解过程中为土壤提供了更多的阳离子,导致土壤 pH 值升高^[32-34]。在土壤养分方面,整体上表现为林分Ⅳ的养分含量最大,林分Ⅰ和Ⅱ居中,林分Ⅲ最小。特别是林分Ⅳ的全氮(TN)、全钾(TK)和碱解氮(AN)、有效磷(AP)、速效钾(AK)显著高于其他林分。虽然林分Ⅳ的凋落物生物量低于其他 3 种林分,但其细根生物量比其他林分平均高出近 4 倍,林分Ⅳ中较高的土壤全碳含量可能是由于竹林较大的根系生物量碳输入所致^[32,35]。同时,竹林入侵导致土壤微生物多样性增加,改变了土壤微生物群落组成,使土壤微生物群落结构的真菌与细菌比值降低,增加了凋落物分解和氮、磷等土壤养分的释放,所以竹林入侵增加了土壤养分含量^[36-38]。然而,针叶林因为凋落物中含大量单宁和木质素等物质,其分解较差,减缓了土壤对养分含量的累积^[30,39],导致林分Ⅲ的土壤养分含量明显低于其他林分。森林土壤碳氮磷生态化学计量比是反映其土壤养分均衡性的重要指标。本研究中 4 种林分的土壤碳氮比均高于国内森林均值(8.43)^[40],4 种林分土壤有机质矿化分解速率均低于平均水平。其中,竹林入侵降低了土壤碳氮比^[36,41],导致林分Ⅳ的土壤碳氮比最低,有机质分解最快。林分Ⅲ的土壤碳氮比最高,有机质分解最慢。4 种林分的土壤碳磷比均高于国内森林均值(92.54)^[40],有机质矿化释放磷的潜力均低于平均水平,其中,林分Ⅲ的土壤碳磷比最高,其有机质矿化释放磷的潜力最低,土壤磷含量也最低。而 4 种林分土壤的氮磷比均低于国内森林均值(13.83)^[40],且不同林分间土壤氮磷比差异均不显著,表明 4 种林分土壤氮、磷养分供应比较平衡。整体上看,林分Ⅳ的土壤矿化分解最快,释放氮、磷等养分最多;林分Ⅰ和Ⅱ居中;林分Ⅲ最小。

3.3 林分群落特征与环境因子的耦合关系

林分群落特征与环境因子之间存在耦合关系,由林分基本特征与土壤环境因子的 RDA 分析可知,不同林分类型下林分密度与土壤养分含量负相关,这与 BO 等^[42]的研究结果一致,同时不同林分类型下林分胸径、树高与土壤养分含量也呈负相关,这可能是因为林分密度、胸径和树高最大的林分Ⅲ郁闭度较高,对降水的截留作用较强,同时受凋落物组成成分影响,导致林分Ⅲ凋落物分解的条件不利,土壤养分积累缓慢^[30,39]。土壤碳、氮、磷、钾养分是

影响植物群落多样性的主要环境因子^[43-46]。本研究中林分群落的 Pielou 均匀度指数(E)与全氮、全磷、全钾、有效磷、速效钾含量呈正相关,而林分群落的物种丰富度(R)和 Margalef 指数(M_a)与全碳、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾含量呈负相关,这与以往研究的群落多样性与土壤养分(碳、氮、磷、钾)呈正相关的结果^[47-48]有所不同,可能是因为 4 种林分中,林分Ⅳ的群落多样性最低,但其土壤养分含量最高,从而导致整体的林分群落多样性与土壤养分呈负相关。因此,林分Ⅳ由于受竹林入侵干扰,导致群落结构和生境发生剧烈异质性变化,阔叶林群落的发展过程和结果还有待长期观测研究。综合分析不同林分的群落特征和环境因子关系,阔叶林群落更稳定,更适合进一步保护和有效维持植物群落多样性,能为庐山提供更好的森林生态系统服务功能。

4 结 论

1)不同林分类型的基本林分特征表现为黄山松林的树高、胸径和密度远大于其他林分;不同林分类型的群落 α 多样性表现为落叶阔叶林>黄山松林>竹阔混交林,而群落 β 多样性则相反,表现为竹阔混交林>黄山松林>落叶阔叶林。

2)不同林分类型的土壤养分含量表现为竹阔混交林>落叶阔叶林>黄山松林,而土壤碳、氮、磷化学计量比和凋落物生物量则相反,表现为黄山松林>落叶阔叶林>竹阔混交林。

3)林分群落特征与环境因子之间存在耦合关系,总体上林分群落的树高、胸径和密度与土壤养分含量呈负相关,林分群落的 Pielou 均匀度指数(E)与土壤养分含量呈正相关,而林分群落的物种丰富度(R)和 Margalef 指数(M_a)与土壤养分含量呈负相关。

4)落叶阔叶林群落对多样性的维持和对土壤养分的投入更优,群落更稳定;今后庐山自然保护区在森林保护中要注意对竹林入侵干扰的管理控制,同时更多关注和保护阔叶林群落,以最优的林分组成实现最大化的生物多样性和生态功能。

[参考文献]

[1] AUBERT M,MARGERIE P,TRAP J,et al. Aboveground-belowground relationships in temperate forests: plant litter composes and microbiota orchestrates [J]. Forest Ecology and Management,2010,259(3):563-572.

[2] POMARA L Y,RUOKOLAINEN K,TUOMISTO H,et al.

Avian composition co-varies with floristic composition and soil nutrient concentration in Amazonian upland forests [J]. Biotropica,2012,44(4):545-553.

[3] VERGARA-TABARES D L,CORDIER J M,LANDI M A,et al. Global trends of habitat destruction and consequences for parrot conservation [J]. Global Change Biology,2020,26(8):4251-4262.

[4] 刘信中,王琅. 江西省庐山自然保护区生物多样性考察与研究 [M]. 北京:科学出版社,2010:8-12.

LIU X Z,WANG L. Scientific survey and study of biodiversity on the Lushan Nature Reserve in Jiangxi Province [M]. Beijing:Science Press,2010:8-12.

[5] DE GODOY FERNANDES P H,DE SOUZA A L T,TANAKA M O,et al. Decomposition and stabilization of organic matter in an old-growth tropical riparian forest: effects of soil properties and vegetation structure [J]. Forest Ecosystems,2021,8:13.

[6] BŁOŃSKA E,LASOTA J,SZUSZKIEWICZ M,et al. Assessment of forest soil contamination in Krakow surroundings in relation to the type of stand [J]. Environmental Earth Sciences,2016,75(16):1205.

[7] 梁少民,吕宇豪,李雅,等. 黄河中下游过渡区河岸植物多样性与土壤因子的关系 [J]. 西北植物学报,2024,44(6):968-976.

LIANG S M,LÜ Y H,LI Y,et al. Relationship between riparian plant diversity and soil factors in the middle and lower reaches of the Yellow River [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2024,44(6):968-976.

[8] 王琴,王芳,何宇婷,等. 林分因子对神木垒不同森林群落林下植物多样性的影响 [J]. 西北植物学报,2023,43(11):1950-1958.

WANG Q,WANG F,HE Y T,et al. Effects of stand factors on understory plant species diversity in different forest communities in Shennmulei forest area [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2023,43(11):1950-1958.

[9] YU F Z,ZHANG Z Q,CHEN L Q,et al. Spatial distribution characteristics of soil organic carbon in subtropical forests of mountain Lushan, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment,2018,190(9):545.

[10] QIU L B,XIAO T Q,BAI T J,et al. Seasonal dynamics and influencing factors of litterfall production and carbon input in typical forest community types in Lushan Mountain, China [J]. Forests,2023,14(2):341.

[11] 王洁茹,石文凯,吴会峰,等. 晋北典型针叶人工林叶功能性状特征及其与土壤因子的关系 [J]. 西北植物学报,2023,43(5):835-845.

WANG J R,SHI W K,WU H F,et al. Characteristics of leaf functional traits of typical coniferous plantations in northern Shanxi and their relationship with soil factors [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2023,43(5):835-845.

[12] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,2000.

BAO S D. Soil agricultural chemistry analysis [M]. 3rd ed. Beijing:China Agriculture Press,2000.

[13] 薛卫星,郭秋菊,艾训儒,等. 鄂西南天然林主要乔木树种物种

- 组成及林分空间结构动态变化研究 [J]. 西北植物学报, 2021, 41(6): 1051-1061.
- XUE W X, GUO Q J, AI X R, et al. Study on the dynamic changes of main tree species composition and stand spatial structure of natural forest in southwest Hubei [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2021, 41(6): 1051-1061.
- [14] 曾润娟, 王群, 杨小波, 等. 环境因子对橡胶林下植物多样性的影响 [J]. 西北植物学报, 2023, 43(12): 2130-2139.
- ZENG R J, WANG Q, YANG X B, et al. Effects of environmental factors on the biodiversity of understory vegetation in rubber plantations [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2023, 43(12): 2130-2139.
- [15] BASELGA A. Partitioning the turnover and nestedness components of beta diversity [J]. Global Ecology and Biogeography, 2010, 19(1): 134-143.
- [16] FELIPE-LUCIA M R, SOLIVERES S, PENONE C, et al. Multiple forest attributes underpin the supply of multiple ecosystem services [J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 4839.
- [17] SCHALL P, GOSSNER M M, HEINRICHS S, et al. The impact of even-aged and uneven-aged forest management on regional biodiversity of multiple taxa in European beech forests [J]. Journal of Applied Ecology, 2018, 55(1): 267-278.
- [18] YUAN Z Q, ALI A, RUIZ-BENITO P, et al. Above-and below-ground biodiversity jointly regulate temperate forest multifunctionality along a local-scale environmental gradient [J]. Journal of Ecology, 2020, 108(5): 2012-2024.
- [19] 王文杰, 杜红居, 肖路, 等. 凉水自然保护区 3 种森林类型的植物组成和林分结构特征 [J]. 林业科学, 2019, 55(9): 166-176.
- WANG W J, DU H J, XIAO L, et al. Differences in plant composition and forest structure among of 3 forest types in Liangshui national nature reserve [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(9): 166-176.
- [20] 王晓荣, 胡兴宜, 庞宏东, 等. 毛竹扩展对杉木林和阔叶林群落结构与多样性的影响 [J]. 森林与环境学报, 2022, 42(5): 474-482.
- WANG X R, HU X Y, PANG H D, et al. Effects of moso bamboo expansion on community structure and diversity of artificial forests, Chinese fir stands, and broad-leaved forest [J]. Journal of Forest and Environment, 2022, 42(5): 474-482.
- [21] 钱海源, 张田田, 陈声文, 等. 古田山自然保护区阔叶林与两种人工林的群落结构和生物多样性 [J]. 广西植物, 2018, 38(10): 1371-1381.
- QIAN H Y, ZHANG T T, CHEN S W, et al. Community structures and biodiversities of broad-leaved forest and two types of plantations in Gutianshan National Nature Reserve, Zhejiang Province [J]. Guihaia, 2018, 38(10): 1371-1381.
- [22] 盛海燕, 陈伟杰, 李伟成. 铜铃山国家森林公园不同林型群落及植被多样性研究 [J]. 杭州师范大学学报(自然科学版), 2019, 18(4): 402-410.
- SHENG H Y, CHEN W J, LI W C. Studies on community diversity of different forest types and vegetation in Tonglingshan National Forest Park [J]. Journal of Hangzhou Normal University (Natural Science Edition), 2019, 18(4): 402-410.
- [23] 张栋. 不同类型森林植被群落多样性与土壤养分的关联分析 [J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2022, 53(2): 271-277.
- ZHANG D. Correlation analysis of vegetation community diversity and soil nutrients in different forest types [J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2022, 53(2): 271-277.
- [24] 楼晨阳, 任海保, 陈小南, 等. 钱江源国家公园森林群落的物种多样性、结构多样性及其对黑麂出现概率的影响 [J]. 生物多样性, 2023, 31(6): 60-71.
- LOU C Y, REN H B, CHEN X N, et al. Species and structural diversity of forest communities in Qianjiangyuan National Park and their impacts on the occurrence of black muntjac (*Muntiacus reevesi*) [J]. Biodiversity Science, 2023, 31(6): 60-71.
- [25] 欧阳明, 杨清培, 陈昕, 等. 毛竹扩张对次生常绿阔叶林物种组成、结构与多样性的影响 [J]. 生物多样性, 2016, 24(6): 649-657.
- OUYANG M, YANG Q P, CHEN X, et al. Effects of the expansion of *Phyllostachys edulis* on species composition, structure and diversity of the secondary evergreen broad-leaved forests [J]. Biodiversity Science, 2016, 24(6): 649-657.
- [26] 张玮, 何玉友, 郭子武, 等. 毛竹林演替过程中乔木树种群落结构和多样性特征 [J]. 林业科学, 2022, 58(12): 12-20.
- ZHANG W, HE Y Y, GUO Z W, et al. Characteristics of arbor species community structure and diversity in the succession of out-of-management *Phyllostachys edulis* forest [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2022, 58(12): 12-20.
- [27] 赵伟文, 梁文俊, 魏曦. 不同林分类型对土壤理化性质特征的影响 [J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2019, 39(2): 61-68.
- ZHAO W W, LIANG W J, WEI X. Effects of different forest types on soil characteristics [J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2019, 39(2): 61-68.
- [28] 李惠萍, 郑子龙, 刘小林, 等. 小陇山林区 3 种林分类型对土壤理化性质的影响 [J]. 甘肃农业大学学报, 2021, 56(2): 121-128.
- LI H P, ZHENG Z L, LIU X L, et al. The influence of 3 forest stands on soil physical and chemical properties in Xiaolongshan forest region [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2021, 56(2): 121-128.
- [29] WANG D, NIU J Z, MIAO Y B, et al. Predicting soil saturated water conductivity using pedo-transfer functions for rocky mountain forests in Northern China [J]. Forests, 2023, 14(6): 1097.
- [30] SUN M M, ZHAI B C, CHEN Q W, et al. Response of density-related fine root production to soil and leaf traits in coniferous and broad-leaved plantations in the semiarid Loess Hilly Region of China [J]. Journal of Forestry Research, 2022, 33(3): 1071-1082.
- [31] 周云, 白英辰, 姚兰, 等. 鄂西南 5 种典型林分枯落物与土壤的持水性 [J]. 水土保持通报, 2023, 43(2): 77-86.
- ZHOU Y, BAI Y C, YAO L, et al. Litter and soil water-holding capacity of five typical forest stands in southwest Hubei Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,

- 43(2):77-86.
- [32] LIU C X, ZHOU Y, QIN H, et al. Moso bamboo invasion has contrasting effects on soil bacterial and fungal abundances, co-occurrence networks and their associations with enzyme activities in three broadleaved forests across subtropical China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, 498: 119549.
- [33] FANG H F, LIU Y Q, BAI J, et al. Impact of moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) expansion into Japanese cedar plantations on soil fungal and bacterial community compositions [J]. *Forests*, 2022, 13(8): 1190.
- [34] 马鑫茹, 郑旭理, 郑春颖, 等. 毛竹扩张对常绿阔叶林土壤微生物群落的影响 [J]. *应用生态学报*, 2022, 33(4): 1091-1098.
- MA X R, ZHENG X L, ZHENG C Y, et al. Effects of moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) expansion on soil microbial community in evergreen broad-leaved forest [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(4): 1091-1098.
- [35] 于法展, 张忠启, 陈龙乾, 等. 庐山不同森林植被类型土壤碳库管理指数评价 [J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(3): 470-475.
- YU F Z, ZHANG Z Q, CHEN L Q, et al. Evaluation of carbon pool management index of different forest types in Lushan [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(3): 470-475.
- [36] ZHAO Y Z, LIANG C F, SHAO S, et al. Linkages of litter and soil C : N : P stoichiometry with soil microbial resource limitation and community structure in a subtropical broadleaf forest invaded by moso bamboo [J]. *Plant and Soil*, 2021, 465(1): 473-490.
- [37] CHEN Z D, XU X Y, WU Z Z, et al. Native bamboo (*Indosasa shibataeoides* McClure) invasion of broadleaved forests promotes soil organic carbon sequestration in South China Karst [J]. *Forests*, 2023, 14(11): 2135.
- [38] LIU C X, ZHENG C Y, WANG L, et al. Moso bamboo invasion changes the assembly process and interactive relationship of soil microbial communities in a subtropical broadleaf forest [J]. *Forest Ecology and Management*, 2023, 536: 120901.
- [39] 陈笑, 李远航, 左亚凡, 等. 林分特征和土壤养分对林下草本物种多样性的影响 [J]. *西北植物学报*, 2022, 42(8): 1396-1407.
- CHEN X, LI Y H, ZUO Y F, et al. Effects of stand characteristics and soil nutrient characteristics on herbaceous diversity [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2022, 42(8): 1396-1407.
- [40] PAN Y L, FANG F, TANG H P. Patterns and internal stability of carbon, nitrogen, and phosphorus in soils and soil microbial biomass in terrestrial ecosystems in China: a data synthesis [J]. *Forests*, 2021, 12(11): 1544.
- [41] LI Y C, LI Y F, CHANG S X, et al. Bamboo invasion of broadleaf forests altered soil fungal community closely linked to changes in soil organic C chemical composition and mineral N production [J]. *Plant and Soil*, 2017, 418(1): 507-521.
- [42] BO H J, WEN C Y, SONG L J, et al. Fine-root responses of *Po-pulus tomentosa* forests to stand density [J]. *Forests*, 2018, 9(9): 562.
- [43] ZHANG C S, LI X Y, CHEN L, et al. Effects of topographical and edaphic factors on tree community structure and diversity of subtropical mountain forests in the lower Lancang River Basin [J]. *Forests*, 2016, 7(10): 222.
- [44] 陈孙华. 衡阳紫色土丘陵坡地不同植被恢复阶段植物群落特征及其与土壤理化性质的耦合关系 [J]. *水土保持研究*, 2014, 21(5): 7-12.
- CHEN S H. Coupling relationship between plant community characteristics and soil physic-chemical properties at different revegetation stages on sloping lands with purple soil in Hengyang of Hu'nan Province, China [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(5): 7-12.
- [45] 徐武美, 宋彩云, 李巧明. 西双版纳热带季节雨林土壤养分空间异质性及对乔木树种多样性的影响 [J]. *生态学报*, 2015, 35(23): 7756-7762.
- XU W M, SONG C Y, LI Q M. Relationship between soil resource heterogeneity and tree diversity in Xishuangbanna Tropical Seasonal Rainforest, Southwest China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(23): 7756-7762.
- [46] 马紫荆, 张云玲, 刘彬. 天山中段南坡巴伦台地区不同海拔植物群落物种多样性与土壤因子的关系 [J]. *广西植物*, 2022, 42(7): 1116-1125.
- MA Z J, ZHANG Y L, LIU B. Relationship between species diversity of plant communities and soil factors at different elevations in Baluntai area, the southern slope of Mid-Tianshan Mountains [J]. *Guihaia*, 2022, 42(7): 1116-1125.
- [47] XU X N, WANG Q, SHIBATA H. Forest structure, productivity and soil properties in a subtropical evergreen broad-leaved forest in Okinawa, Japan [J]. *Journal of Forestry Research*, 2008, 19(4): 271-276.
- [48] 廖娇娇, 窦艳星, 安韶山. 黄土高原不同植被群落多样性与土壤有机碳密度关系研究 [J]. *水土保持研究*, 2022, 29(4): 75-82.
- LIAO J J, DOU Y X, AN S S. Relationship between vegetation community diversity and soil organic carbon density on the Loess Plateau [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(4): 75-82.

(责任编辑: 马秋明 刘茹)