

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcb.2024.05.035

陆其伟, 脱云飞, 冯永钰, 等. 栗子坪自然保护区林分类型对土壤化学计量特征、微生物及其季节动态响应[J]. 水土保持学报, 2024, 38(5): 285-295.

LU Qiwei, TUO Yunfei, FENG Yongyu, et al. Response of forest stand types to soil stoichiometric characteristics, microorganisms and their seasonal dynamics in Liziping nature reserve[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(5): 285-295.

## 栗子坪自然保护区林分类型对土壤化学计量特征、微生物及其季节动态响应

陆其伟<sup>1,2</sup>, 脱云飞<sup>1,2</sup>, 冯永钰<sup>1,2</sup>, 黎建强<sup>1,2</sup>,  
施蕊<sup>1,2</sup>, 王澍<sup>1,2</sup>, 朱雪虎<sup>3</sup>, 何霞红<sup>1,2</sup>

(1. 西南林业大学水土保持学院, 昆明 650224; 2. 云南省林下资源保护与利用重点实验室, 昆明 650224; 3. 四川栗子坪国家级自然保护区管理局, 四川 石棉 625400)

**摘要:** [目的] 为揭示栗子坪自然保护区林分类型对土壤有机碳、氮、磷含量的垂直分布特征、土壤化学计量特征(C/N、C/P、N/P)、酶活性、微生物及其季节响应。[方法] 选取旱季、雨季的青冈-川杨阔叶混交林、栓皮栎落叶阔叶林、冷杉-云杉针叶混交林和石棉玉山竹竹林土壤为研究对象, 阐明林分类型对土壤化学计量特征、酶活性、微生物及其季节动态响应特征。[结果] (1) 4 个林分类型土壤理化性质和酶活性均表现为雨季大于旱季; (2) C/N 在青冈-川杨阔叶混交林、冷杉-云杉针叶混交林表现为旱季大于雨季, 其余 2 个林分反之; N/P 在栓皮栎落叶阔叶林、冷杉-云杉针叶混交林表现为旱季大于雨季, 其余 2 个林分反之; (3) 不同林分类型土壤 C/N、C/P、N/P 比值旱季时依次为 17.00~37.33, 62.72~114.5, 3.09~5.18, 雨季时依次为 17.72~39.16, 63.21~90.72, 2.39~5.80; (4) 旱季、雨季 C/N 和 C/P 均高于全国平均水平(11.90, 61.00), 表明养分循环过程中氮受限, 且释放 P 的潜力较低; 2 个季节 N/P 均低于全国土壤平均水平(5.20), 表明土壤更容易受到 N 限制; (5) 4 个林分类型土壤微生物活性在雨季均优于旱季, 且土壤生态化学计量特征主要受到酶活性及微生物影响。[结论] 研究结果可为探究区域土壤养分分解、供应和限制及其循环过程对季节响应机制提供重要理论依据。

**关键词:** 林分类型; 化学计量特征; 酶活性; 微生物指数; 季节动态

中图分类号: S714.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)05-0285-11

## Response of Forest Stand Types to Soil Stoichiometric Characteristics, Microorganisms and Their Seasonal Dynamics in Liziping Nature Reserve

LU Qiwei<sup>1,2</sup>, TUO Yunfei<sup>1,2</sup>, FENG Yongyu<sup>1,2</sup>, LI Jianqiang<sup>1,2</sup>,  
SHI Rui<sup>1,2</sup>, WANG Shu<sup>1,2</sup>, ZHU Xuehu<sup>3</sup>, HE Xiaohong<sup>1,2</sup>

(1. School of Soil and Water Conservation, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China;  
2. Key Laboratory of Forestry Resources Protection and Utilization in Yunnan Province, Kunming 650224, China;  
3. Sichuan Liziping National Nature Reserve Management Bureau, Shimian, Sichuan 625400, China)

**Abstract:** [Objective] To reveal the vertical distribution characteristics of soil organic carbon, nitrogen, and phosphorus content, soil stoichiometric characteristics (C/N, C/P, N/P), enzyme activity, microorganisms, and their seasonal responses of forest stand types in Liziping Nature Reserve. [Methods] The soils of *Cyclobalanopsis* and *populus szechuanica* broad-leaved mixed forest, *Oriental oak deciduous*

收稿日期: 2024-06-02 修回日期: 2024-06-26 录用日期: 2024-07-18 网络首发日期(www.cnki.net): 2024-07-15

资助项目: 国家自然科学基金面上项目(52379041); 云南省基础研究面上项目(202301AU070061); 2021 年度云南省农业联合专项面上项目(202101BD070001-077); 国家中药材产业技术体系岗位项目(CARS-21-05B); 昆明市科技揭榜制项目(2021JH002); 云南省临翔区林下中药材产业科技特派团项目(云南省科技特派团 202204BI090003); 四川省栗子坪国家级自然保护区陆生动物生境调查项目(2021ZD0125)

第一作者: 陆其伟(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事自然保护区生态保护研究。E-mail: xnyluqiwei@163.com

通信作者: 脱云飞(1976—), 男, 副教授, 博士, 主要从事农业水土资源规划与利用研究。E-mail: tyunfei@163.com

http://stbcb.alljournal.com.cn

*broad-leaved forest*, *Fir-spruce coniferous mixed forest*, and *Yushania lineolata forest* in the dry and rainy seasons were selected as the study objects to elucidate the effects of forest stand types on the stoichiometric characteristics of the soils, the enzyme activities, the microorganisms, and their seasonal dynamic response characteristics. [Results] (1) The soil physicochemical properties and enzyme activity of the four forest stand types are higher in the rainy season than in the dry season. (2) The soil C/N in the *Cyclobalanopsis-populus szechuanica* broad-leaved mixed forest is higher in the dry season than in the rainy season, while the other three stands show the opposite trend. Dry season's C/P are higher than the rainy season in *Cyclobalanopsis* and *populus szechuanica* broad-leaved mixed forest and *Fir-spruce coniferous mixed forest*, while the other two stands are the opposite. Dry season's N/P are higher than the rainy season in *Oriental oak deciduous broad-leaved forest* and *Fir-spruce coniferous mixed forest*, while the other two stands are the opposite. (3) Different forest types' value variation of soil C/N, C/P, and N/P are 17.00~37.33, 62.72~114.50, 3.09~5.18 in the dry season, and 17.72~39.16, 63.21~90.72, 2.39~5.80 in the rainy season. (4) The C/N and C/P values during the dry and rainy seasons are higher than the national average (11.90, 61.00), indicating that nitrogen is limited during nutrient cycling and the potential for releasing P is low; The N/P values for both seasons were lower than the national average soil level (5.20), indicating that the soil is more susceptible to N limitation; (5) The soil microbial activity of the four forest stand types is better in the rainy season than in the dry season, and the soil ecological stoichiometric characteristics are mainly influenced by enzyme activity and microorganisms. [Conclusion] The results of this study can provide important theoretical basis for exploring the seasonal response mechanisms of regional soil nutrient decomposition, supply and limitation, as well as nutrient cycling processes.

**Keywords:** forest stand type; stoichiometric characteristics; enzyme activity; microbial index; seasonal dynamics

Received: 2024-06-02

Revised: 2024-06-26

Accepted: 2024-07-18

Online(www.cnki.net): 2024-07-15

森林生态系统中,植被类型、海拔和季节等因素是影响土壤养分及微生物活性的重要因素。土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)及其化学计量特征是反映土壤质量状况及养分供给和限制能力的重要指标<sup>[1]</sup>;土壤C/N、C/P、N/P分别反映土壤矿化能力和有机质分解速率预测<sup>[2]</sup>、磷矿化能力及衡量P释放和固定潜力及元素的限制性特征<sup>[3]</sup>。土壤酶及微生物作为生物化学循环的积极参与者,与土壤养分矿化、硝化分解循环、微生物代谢速率等紧密联系在一起,在物质循环和能量流动等生态系统过程中发挥重要作用<sup>[4]</sup>。因此,研究土壤化学计量特征、酶活性和微生物对厘清森林土壤生态系统养分平衡、植物养分受限机制和化学循环过程的影响具有重要意义。

不同林分类型和季节等因素差异导致土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)反馈特征有所差异,林分类型影响枯枝落叶、动物尸体分解产物和土壤根系活性等,造成养分循环差异<sup>[5]</sup>。有研究<sup>[6]</sup>表明,阔叶林的土壤C、N、P高于针叶林;许宛孜等<sup>[7]</sup>研究发现,土壤C/N在林分类型间无显著差异,土壤C/P、N/P均以针阔混交林最高,并且显著高于阔叶林和针叶林;刘慧丽等<sup>[8]</sup>研究发现,青海云杉土壤C、N和AN均高于其

他林分,且C/P、N/P均低于中国陆地土壤平均水平;秦海龙等<sup>[9]</sup>研究发现,天然次生林土壤SOC、TN高于人工林;金裕华等<sup>[10]</sup>研究发现,土壤酶活性均在高山草甸植被带最大,秋季酸性磷酸酶与其他季节存在差异,脲酶、蔗糖酶及过氧化氢酶在季节间无显著差异;CHEN等<sup>[11]</sup>研究发现,林分类型显著影响土壤酶及其化学计量特征。而土壤酶作为森林土壤生态系统较重要的组成部分,其活性高低反映物质能量循环的速率<sup>[12]</sup>,对土壤有机质的矿化分解和无机物的转化起促进作用,在养分循环和能量转化过程中发挥着重要作用。因此,土壤酶活性被作为评价土壤质量和土壤微生物功能的重要指标<sup>[13]</sup>。

目前,已有许多关于土壤生态化学计量特征、酶活性及微生物等方面的研究,但关于四川栗子坪自然保护区土壤化学计量特征及微生物等研究仍属于起步阶段,需展开进一步研究。

本文以栗子坪自然保护区青冈-川杨阔叶混交林、栓皮栎落叶阔叶林、冷杉-云杉针叶混交林、石棉玉山竹竹林土壤为研究对象,探究不同林分类型下旱季和雨季土壤生态化学计量特征、土壤酶活性及微生物指数等对林分类型响应情况,厘清栗子坪自然保护

区土壤生态化学循环过程对林分类型和季节响应机制,为森林土壤养分供应及限制情况、提高物种多样性及森林生态环境管理提供研究基础和一定理论依据。

### 1 材料与方法

#### 1.1 研究区概况

四川栗子坪国家级自然保护区(102°10′33″—102°29′07″E,28°51′02″—29°08′42″N)由南向北纵越 23.0 km,自东向西横跨 17.8 km,占地面积 47 940 hm<sup>2</sup>,位于横断山区东缘部分、四川盆地西南

缘的大渡河中上游,贡嘎山东南面石棉县境内,属于亚热带季风气候,年平均气温 11.7~14.4 ℃,年平均降水量 800~1 250 mm,海拔越高,降水量越多。海拔相对高差大,垂直地带性明显,最高海拔达 4 310 m;土壤类型以山地黄棕壤、山地棕壤、山地暗棕壤、棕色森林土及亚高山草甸土为主;植被类型以亚高山灌丛、亚高山寒温带针叶林、高山灌丛草甸、山地针阔叶混交林,以及山地常绿针叶林为主。其中各采样点林分类型及相关信息见表 1。

表 1 样地基本特征

Table 1 Basic characteristics of sample plots

| 林分类型       | 海拔/m  | 土壤类型  | 经度(E)     | 纬度(N)      | 郁闭度/% | 坡向 | 坡度/(°) |
|------------|-------|-------|-----------|------------|-------|----|--------|
| 青冈-川杨阔叶混交林 | 1 800 | 山地黄棕壤 | 28°52′58″ | 102°21′36″ | 50~60 | 东南 | 6      |
| 栓皮栎落叶阔叶林   | 2 100 | 山地棕壤  | 29°02′56″ | 102°16′38″ | 50~60 | 东南 | 6      |
| 冷杉-云杉针叶混交林 | 2 400 | 山地棕壤  | 29°00′07″ | 102°23′34″ | 50~60 | 东南 | 6      |
| 石棉玉山竹竹林    | 2 700 | 山地暗棕壤 | 28°59′40″ | 102°24′15″ | 60~70 | 东南 | 6      |

#### 1.2 样品采集与测定

2022 年于栗子坪国家级自然保护区选取青冈-川杨阔叶混交林、栓皮栎落叶阔叶林、冷杉-云杉针叶混交林、石棉玉山竹竹林 4 个林分类型样地(图 1),每个样地布设 3 个 20 m×20 m 大样方,共计 12 个,且各样方间地形、地貌及坡向等基本一致。每个大样方内按“S”形均匀布设 5 个 1 m×1 m 小样方作为土壤试验采样点,共计 60 个采样点。采样频次为旱季、雨季各 1 次。环刀采样时先除去土壤表面枯枝落叶,采集好后贴好标签用保鲜膜密封,用于测定土壤含水率、孔隙度和体积质量等物理指标。散土采样,先将采样点石砾和根系等杂物剔除,然后将土壤采入自封袋中,土样均避光保存,并尽快带回实验室。鲜土带回实验室后,取 300 g 新鲜土样冷藏于 4 ℃冰箱,用于微生物及酶活性测定,将 1 000 g 自然风干土壤研磨过筛子用于测定全氮、全磷和有机碳等指标。

土壤理化指标测定参照《土壤农化分析与环境监测》<sup>[14]</sup>,土壤酶活性参照《土壤酶及其研究法》<sup>[15]</sup>测定,土壤细菌和真菌送至美吉生物公司进行检测,其采用高通量测序法测定<sup>[16]</sup>。具体步骤为:(1)从新鲜土壤完成基因组 DNA 抽提后,利用 1%琼脂糖凝胶电泳检测 DNA 抽提质量;(2)按指定测序区域,合成带有 barcode 的特异引物,每个样本 3 个重复,将同一样本的 PCR 产物进行纯化、定量和均一化后检测,利用 AxyPrepDNA-Seq Kit 进行纯化,Tris-HCl 洗脱;2%琼脂糖电泳检测;(3)参照电泳初步定量结果,将 PCR 产物用 QuantiFluor™-ST 蓝色荧光定量系统进行检测定量,之后按照每个样本的测序量要求,进行相应比例的混合;(4)Miseq 测序得到的

PEreads,区分样本后进行 OTU 聚类分析和物种分类学分析,基于 OTU 可以进行多种多样性指数分析,以及对测序深度的检测;基于分类学信息,可以在各个分类水平上进行群落结构的统计分析。

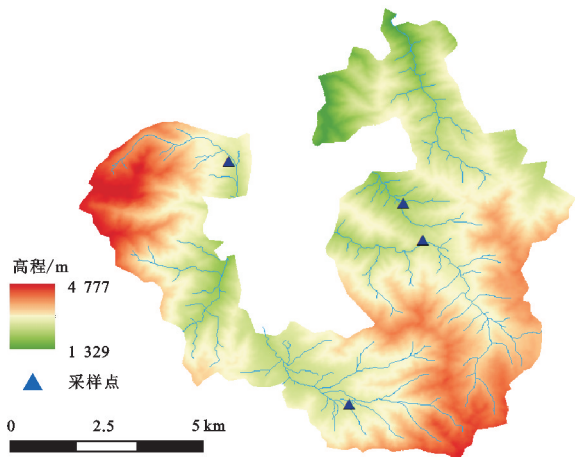


图 1 栗子坪自然保护区采样点示意

Fig. 1 Schematic diagram of sampling points in Liziping

#### 1.3 数据分析

本试验数据使用 Excel 2016 对土壤养分、酶活性及微生物指数等进行统计和计算;SPSS Statistics 27 软件对土壤养分等指标进行检验,确认是否符合正态分布,运用 Pearson 相关分析得出相关性热图;Origin 2021 软件对土壤养分特征、酶活性及微生物指数等进行绘图;Canoco 5 软件对各林分土壤数据进行冗余分析,量化林分类型土壤养分之间的解释程度,确定酶活性及微生物指数对化学计量特征的影响程度。

### 2 结果与分析

#### 2.1 土壤理化特征及季节动态

不同林分类型土壤理化性质见表 2。旱季,冷杉-

云杉针叶混交林土壤体积质量显著小于其他 3 个林分;石棉玉山竹竹林含水率显著大于冷杉-云杉针叶混交林,土壤孔隙度则与含水率相反;pH 在各林分间无显著差异;冷杉-云杉针叶混交林 SOC 显著大于青冈-川杨阔叶混交林和栓皮栎落叶阔叶林;石棉玉山竹竹林 TN 显著大于冷杉-云杉针叶混交林;石棉玉山竹竹林 TP 显著大于其他 3 个林分。雨季,石棉玉山竹竹林土壤体积质量显著大于冷杉-云杉针叶混交林;含水率和 pH 在各林分间差异不显著;冷杉-云

杉针叶混交林总孔隙度和 SOC 显著大于其他 3 个林分;冷杉-云杉针叶混交林 TN 显著小于石棉玉山竹竹林和青冈-川杨阔叶混交林;土壤 TP 在各林分间没有显著差异。

季节动态规律上,4 个林分类型均呈现出雨季土壤体积质量、含水率、总孔隙度、pH、有机碳、全氮和全磷等大于旱季;土壤物理指标(体积质量、含水率、总孔隙度)和 pH 在季节变化上差异不显著,而化学指标(SOC、TN、TP)差异显著。

表 2 不同林分类型土壤理化性质季节特征

Table 2 Seasonal characteristics of soil physical and chemical properties of different forest types

| 季节 | 林分类型       | 体积质量/<br>( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) | 含水率/%                     | 总孔隙度/%                   | pH                      | 有机碳/<br>( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | 全氮/<br>( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | 全磷/<br>( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) |
|----|------------|----------------------------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 旱季 | 青冈-川杨阔叶混交林 | $1.17 \pm 0.07\text{a}$                      | $17.81 \pm 0.07\text{ab}$ | $55.78 \pm 0.02\text{b}$ | $5.52 \pm 0.22\text{a}$ | $14.41 \pm 3.44\text{b}$                    | $0.80 \pm 0.53\text{ab}$                   | $0.16 \pm 0.03\text{b}$                    |
|    | 栓皮栎落叶阔叶林   | $1.17 \pm 0.06\text{a}$                      | $18.69 \pm 0.05\text{ab}$ | $55.95 \pm 0.02\text{b}$ | $5.52 \pm 0.24\text{a}$ | $12.38 \pm 2.96\text{b}$                    | $0.78 \pm 0.30\text{ab}$                   | $0.20 \pm 0.03\text{b}$                    |
|    | 冷杉-云杉针叶混交林 | $1.06 \pm 0.12\text{b}$                      | $15.22 \pm 0.04\text{b}$  | $59.88 \pm 0.05\text{a}$ | $5.54 \pm 0.43\text{a}$ | $18.28 \pm 3.33\text{a}$                    | $0.50 \pm 0.08\text{b}$                    | $0.17 \pm 0.05\text{b}$                    |
|    | 石棉玉山竹竹林    | $1.22 \pm 0.09\text{a}$                      | $22.01 \pm 0.05\text{a}$  | $53.97 \pm 0.03\text{b}$ | $5.64 \pm 0.34\text{a}$ | $15.10 \pm 3.59\text{ab}$                   | $0.93 \pm 0.25\text{a}$                    | $0.27 \pm 0.10\text{a}$                    |
| 雨季 | 青冈-川杨阔叶混交林 | $1.19 \pm 0.11\text{ab}$                     | $26.49 \pm 0.10\text{a}$  | $60.33 \pm 0.03\text{b}$ | $5.80 \pm 0.24\text{a}$ | $19.53 \pm 4.65\text{b}$                    | $1.29 \pm 0.46\text{a}$                    | $0.25 \pm 0.07\text{a}$                    |
|    | 栓皮栎落叶阔叶林   | $1.17 \pm 0.09\text{ab}$                     | $26.04 \pm 0.04\text{a}$  | $60.52 \pm 0.03\text{b}$ | $5.80 \pm 0.25\text{a}$ | $20.51 \pm 4.84\text{b}$                    | $1.00 \pm 0.28\text{ab}$                   | $0.32 \pm 0.04\text{a}$                    |
|    | 冷杉-云杉针叶混交林 | $1.09 \pm 0.12\text{b}$                      | $23.21 \pm 0.04\text{a}$  | $64.76 \pm 0.05\text{a}$ | $5.83 \pm 0.46\text{a}$ | $27.22 \pm 7.69\text{a}$                    | $0.73 \pm 0.22\text{b}$                    | $0.32 \pm 0.11\text{a}$                    |
|    | 石棉玉山竹竹林    | $1.22 \pm 0.08\text{a}$                      | $28.09 \pm 0.11\text{a}$  | $58.37 \pm 0.04\text{b}$ | $5.93 \pm 0.35\text{a}$ | $19.44 \pm 3.86\text{b}$                    | $1.21 \pm 0.39\text{a}$                    | $0.29 \pm 0.09\text{a}$                    |

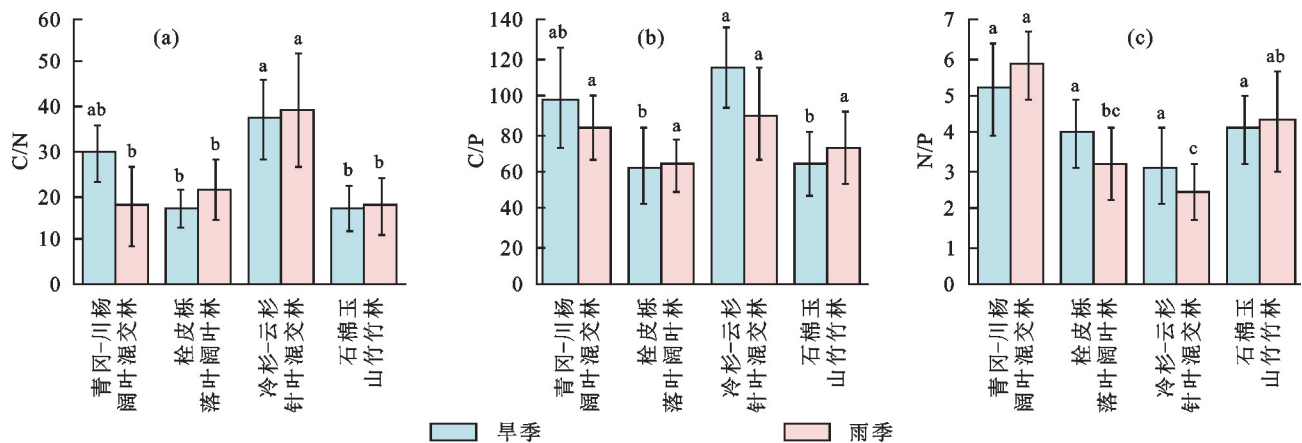
注:表中数据为平均值±标准差;同列不同字母表示在同一季节不同林分类型间差异显著( $p < 0.05$ )。下同。

## 2.2 土壤化学计量特征及季节动态

不同林分类型及季节动态对土壤生态化学计量特征有较大影响(图 2)。

旱季时,不同林分类型土壤 C/N、C/P、N/P 分别为 17.00~37.33, 62.72~114.50, 3.09~5.18, 平均值分

别为 25.23, 85.15, 4.09, 变异系数分别为 40.56%, 30.29%, 20.78%;雨季时,不同林分类型土壤 C/N、C/P、N/P 分别为 17.72~39.16, 63.21~90.72, 2.39~5.80, 平均值分别为 24.05, 77.52, 3.91, 变异系数分别为 41.58%, 15.21%, 38.08%。



注:图柱上方不同字母表示不同林分类型间差异显著( $p < 0.05$ )。下同。

图 2 不同林分类型土壤 C/N、C/P、N/P 季节变化特征

Fig. 2 Seasonal variation characteristics of soil C/N, C/P and N/P in different forest types

不同林分类型土壤 C/N、C/P、N/P 平均值均呈现出旱季大于雨季。C/N、N/P 变异系数雨季大于旱季,而 C/P 变异系数则是旱季大于雨季。旱季时,不同林分类型土壤 C/N 大小为冷杉-云杉针叶混交林>青冈-川杨阔叶混交林>石棉玉山竹竹林>栓皮栎落叶阔叶林,其中冷杉-云杉针叶混交林 C/N 显著大于栓皮栎落叶阔叶林和石棉玉山竹竹林。雨季时,不同林分类型土壤

C/N 大小为冷杉-云杉针叶混交林>栓皮栎落叶阔叶林>青冈-川杨阔叶混交林>石棉玉山竹竹林,其中,冷杉-云杉针叶混交林 C/N 显著大于其他 3 个林分。不同林分类型土壤 C/P 呈现规律与旱季 C/N 一致,但雨季时 4 个林分间 C/P 无显著差异。N/P 大小于旱季、雨季均呈青冈-川杨阔叶混交林>石棉玉山竹竹林>冷杉-云杉针叶混交林;其中,旱季时各林分间 N/P 差异不显著,

雨季时各林分间 N/P 存在较大差异,说明降雨对研究区土壤 N/P 存在较大影响。季节动态规律特征,在同一林分不同季节中,C/N 在青冈-川杨阔叶混交林呈旱季大于雨季,而其他 3 个林分均呈雨季大于旱季;C/P 在青冈-川杨阔叶混交林和冷杉-云杉针叶混交林出雨季小于旱季,而栓皮栎落叶阔叶林和石棉玉山竹竹林则呈雨季大于旱季;N/P 于青冈-川杨阔叶混交林和石棉玉山竹竹林呈旱季小于雨季,而栓皮栎落叶阔叶林和冷杉-云杉针叶混交林则呈旱季大于雨季。

### 2.3 土壤酶活性及季节动态

因林分类型和季节不同,导致土壤酶活性存在较大差异(图 3)。土壤过氧化氢酶(CAT)、脲酶(URE)、蔗糖

酶(SUC)和酸性磷酸酶(ACP))活性在季节动态特征 4 个林分类型土壤酶活性均呈雨季大于旱季。各林分间的差异性呈旱季与雨季变化规律一致,其中过氧化氢酶(CAT)活性,青冈-川杨阔叶混交林、栓皮栎落叶阔叶林显著大于石棉玉山竹竹林,总体呈土壤酶活性随着森林垂直带升高而降低的趋势;脲酶(URE)活性,栓皮栎落叶阔叶林和石棉玉山竹竹林显著大于青冈-川杨阔叶混交林和冷杉-云杉针叶混交林,4 个林分间脲酶(URE)活性变化规律不明显;蔗糖酶(SUC)活性,4 个林分间均存在显著差异,说明林分类型对蔗糖酶活性影响比较显著;酸性磷酸酶(ACP)活性,青冈-川杨阔叶混交林和石棉玉山竹竹林显著大于栓皮栎落叶阔叶林和冷杉-云杉针叶混交林。

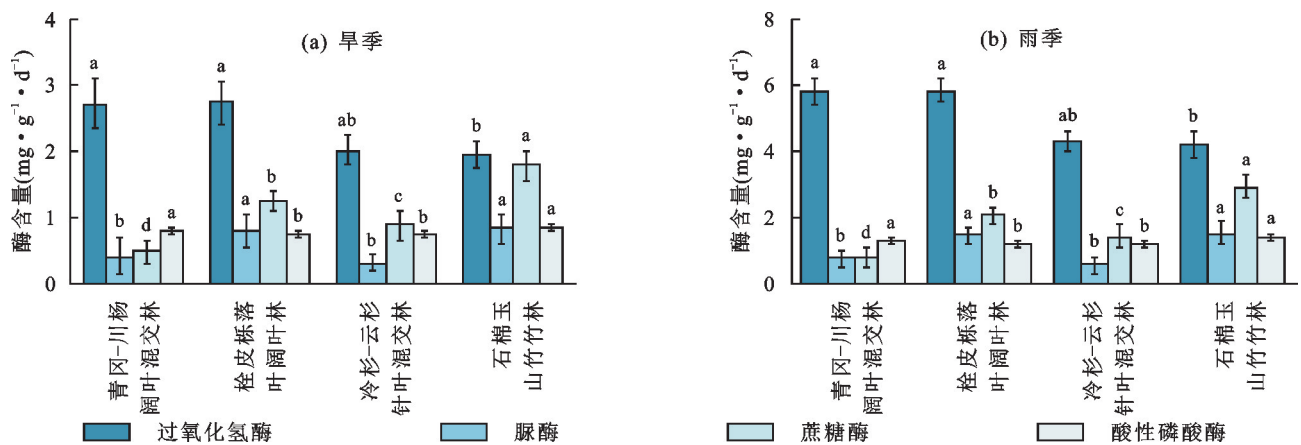


图 3 不同林分类型土壤酶活性季节特征

Fig. 3 Seasonal characteristics of soil enzyme activities in different forest types

### 2.4 不同林分类型土壤微生物指数及季节动态

不同林分类型及季节动态的土壤微生物指数信息见表 3。不同林分类型土壤细菌、真菌的覆盖率为 98.17%~99.99%,表明现有的细菌、真菌测序深度能够真实地反映栗子坪保护区不同林分类型土壤细菌、真菌群落的变化特征。旱季时,土壤细菌 ACE、Chao1、Simpson 和 Shannon 等指数在 4 个林分之间没有显著差异;土壤真菌丰富度(ACE 和 Chao1 指数)在石棉玉山竹竹林最大,并且显著大于其他 3 个林分,而真菌多样性(Simpson 和 Shannon 指数)在 4 个林分间差异不显著。雨季时,冷杉-云杉针叶混交林土壤细菌丰富度最大,与其他 3 个林分差异显著;栓皮栎落叶阔叶林土壤真菌 ACE、Chao1 和 Shannon 指数显著小于其他 3 个林分。结果表明,季节变化使土壤微生物相对丰度存在显著差异,4 个林分类型土壤细菌 ACE、Chao1 指数均呈雨季大于旱季,表明雨季土壤微生物群落丰富度均大于旱季;Simpson 指数则均呈旱季大于雨季,表明旱季物种较集中,群落物种多样性较雨季低。

### 2.5 土壤酶活性及微生物对化学计量特征的相关性分析

森林生态系统中,土壤有机碳、氮、磷受到林分类型

及季节等因子共同作用导致土壤养分存在差异。为探究不同林分土壤理化性质、酶活性及微生物指数等因子对土壤有机碳、氮、磷及其化学计量特征的影响。采用相关性分析(图 4),其中 ACE、Chao1、Simpson、Shannon 为土壤细菌指数;ACE-、Chao1-、Simpson-、Shannon-为土壤真菌指数。旱季时,土壤 C/N 与细菌 Shannon 指数、真菌 Simpson 和 Shannon 指数及脲酶活性呈显著负相关( $p < 0.05$ ),与 C/P 呈极显著正相关( $p < 0.01$ );C/P 与细菌 Shannon 指数和真菌 Simpson 和 Shannon 指数呈显著负相关( $p < 0.05$ ),与脲酶活性呈极显著负相关( $p < 0.01$ );雨季时,土壤 C/N 与体积质量和真菌 Shannon 指数呈显著负相关( $p < 0.05$ ),与土壤孔隙度呈显著正相关( $p < 0.05$ ),与真菌 Simpson 指数和土壤有机碳(SOC)呈极显著正相关( $p < 0.01$ ),其余环境因子与土壤生态化学计量特征无显著相关性。通过相关性分析发现,主要是土壤酶活性及微生物对生态化学计量特征产生影响。

### 2.6 环境因子对土壤化学计量特征冗余分析

为直观表达环境因子与土壤生态化学计量特征的关系,以土壤生态化学计量特征为因变量,环境因子为自变量进行冗余分析(图 5)。旱季时,第 1 轴贡献度为 69.78%,第 2 轴贡献度为 30.20%;雨季时,第 1 轴贡献度

为 67.85%,第 2 轴贡献度为 31.82%;旱季和雨季均是第 1 轴为解释不同林分土壤生态化学计量特征变化的主体。通过冗余分析发现,环境因子与土壤化学计量特征之间的相关性与相关性分析结果基本一致。旱季时,Shannon、Shannon-、URE、Simpson-、BD、SP、TN 等

环境因子对土壤化学计量特征变化的解释率依次为 69.0%,66.2%,65.2%,63.9%,60.4%,59.1%,58.2%。雨季时 SOC、TN、BD、SP、SMC、Shannon 及 ACE 一 等 环 境 因子对土壤化学计量特征变化的解释率依次为 66.4%,62.1%,60.0%,58.7%,55.9%,55.0%,49.7%。

表 3 不同林分类型土壤微生物指数季节特征

Table 3 Seasonal characteristics of soil microbial index in different forest types

| 季节 | 种类 | 林分类型       | Coverage    | ACE              | Chao1            | Simpson     | Shannon    |
|----|----|------------|-------------|------------------|------------------|-------------|------------|
| 旱季 | 细菌 | 青冈-川杨阔叶混交林 | 0.999 8±0a  | 1 473.20±417.83a | 1 470.07±418.19a | 0.996±0a    | 9.21±0.52a |
|    |    | 栓皮栎落叶阔叶林   | 0.999 8±0a  | 1 216.00±307.29a | 1 212.14±306.28a | 0.996±0a    | 8.93±0.50a |
|    |    | 冷杉-云杉针叶混交林 | 0.999 7±0a  | 1 317.23±90.60a  | 1 312.54±89.10a  | 0.997±0a    | 9.24±0.15a |
|    |    | 石棉玉山竹竹林    | 0.999 7±0a  | 1 239.97±310.18a | 1 235.82±309.98a | 0.996±0a    | 9.09±0.47a |
|    |    | 青冈-川杨阔叶混交林 | 0.999 7±0b  | 815.87±25.56ab   | 811.25±26.53ab   | 0.961±0a    | 6.42±0.07a |
|    | 真菌 | 栓皮栎落叶阔叶林   | 0.999 9±0a  | 518.39±75.44b    | 516.56±74.74b    | 0.886±0.04a | 5.46±0.51a |
|    |    | 冷杉-云杉针叶混交林 | 0.999 9±0a  | 599.71±213.69b   | 597.87±215.06b   | 0.966±0.02a | 6.67±0.80a |
|    |    | 石棉玉山竹竹林    | 0.999 8±0ab | 1 141.87±303.42a | 1 139.62±304.14a | 0.895±0.09a | 5.85±1.11a |
|    |    | 青冈-川杨阔叶混交林 | 0.985 7±0b  | 2 453.25±90.92b  | 2 438.49±100.94b | 0.014±0ab   | 5.63±0.06b |
|    |    | 栓皮栎落叶阔叶林   | 0.990 8±0a  | 1 771.55±62.98c  | 1 751.22±62.32c  | 0.015±0a    | 5.32±0.16c |
| 雨季 | 细菌 | 冷杉-云杉针叶混交林 | 0.981 7±0c  | 3 108.76±193.88a | 3 118.29±205.89a | 0.011±0bc   | 6.06±0.06a |
|    |    | 石棉玉山竹竹林    | 0.984 1±0bc | 2 531.19±161.42b | 2 531.05±184.51b | 0.007±0c    | 6.19±0.16a |
|    |    | 青冈-川杨阔叶混交林 | 0.997 5±0b  | 849.86±27.75a    | 841.19±26.24a    | 0.026±0b    | 4.50±0.12a |
|    | 真菌 | 栓皮栎落叶阔叶林   | 0.998 5±0a  | 506.26±129.21b   | 513.87±110.96b   | 0.240±0.17a | 2.71±0.95b |
|    |    | 冷杉-云杉针叶混交林 | 0.997 6±0b  | 1 037.33±195.24a | 1 035.93±193.41a | 0.039±0.01b | 4.50±0.24a |
|    |    | 石棉玉山竹竹林    | 0.998 8±0a  | 901.31±120.28a   | 908.41±118.49a   | 0.02±0b     | 4.88±0.18a |

### 3 讨论

#### 3.1 土壤 C、N、P 变化特征及其影响因素

林分类型和季节通过影响水热条件等环境因子和土壤性质从而间接影响森林土壤养分含量。研究结果(表 2)表明,土壤有机碳(SOC)在旱季和雨季总体上均随林分类型的垂直带升高呈增长趋势;土壤全氮(TN)在旱季和雨季均随森林垂直带升高呈先下降后升高趋势;全磷(TP)在旱季总体上随森林垂直带升高呈增长趋势,雨季时在森林垂直带无显著差异。刘慧丽等<sup>[8]</sup>、秦海龙等<sup>[9]</sup>、张广帅等<sup>[17]</sup>研究发现,土壤有机碳(SOC)和全氮(TN)均随森林分布的垂直带升高呈增加趋势,与本研究结果一致;同时,秦海龙等<sup>[9]</sup>研究发现,土壤全磷(TP)随森林垂直带升高呈先增后降趋势;张广帅等<sup>[17]</sup>研究发现,全磷(TP)随森林垂直带升高而降低,与本研究结果存在一定差异。是因为林分类型不同,地表凋落物储量、乔木及植被根系活力情况和凋落物分解速率的差异,导致不同林分土壤养分质量分数差异<sup>[18]</sup>。冷杉-云杉针叶混交林土壤有机碳(SOC)最高,表明该林分地表枯枝落叶矿化分解速率较慢,导致有机碳在土壤中赋存。

冷杉-云杉针叶混交林土壤全氮(TN)远低于青

冈-川杨阔叶混交林和石棉玉山竹竹林(表 2);而雨季时冷杉-云杉针叶混交林土壤微生物丰富度(ACE、Chao1 指数)显著高于青冈-川杨阔叶混交林和石棉玉山竹竹林(表 3),从而其地表凋落物分解速率较快,氮素的矿化和硝化速率较高。土壤全氮(TN)主要受氮素的矿化、硝化与反硝化和植被根系吸收等因素影响<sup>[19]</sup>,其中土壤微生物是氮素转化过程的关键因子;土壤微生物活性强,地表枯枝落叶及动物残骸等分解速率较快,土壤中有有机碳、有机氮难以累积储存,从而导致氮素在土壤中储存能量较低。土壤全磷(TP)受气候、降雨量、地表土壤对磷的吸附作用<sup>[20]</sup>,土壤的风化速率及成土母质中的磷<sup>[21]</sup>及游离氧化铁对磷素的吸附能力也影响土壤磷素。高温及充沛的降雨量促进土壤风化,进而导致土壤母质对磷素释放速率增加<sup>[22]</sup>,而研究区森林垂直带越高则降雨量充沛,土壤含水率森林垂直带升高而增加(表 2),导致较高森林垂直带林分土壤母质中磷素释放速率高,未被植物利用的部分磷素在土壤中储蓄,从而使得不同林分类型土壤全磷(TP)总体上呈现出随森林垂直带升高而增加。然而,土壤 C、N 主要受生物小循环影响<sup>[23]</sup>,空间变异性较大,而土壤 P 主要受土壤矿物风化影响<sup>[21]</sup>;由于林分类型不同,引起生物小循环影响及土壤矿物风化等养分循环过程,导致研究区不同林分间土壤 C、N、P 差异显著。

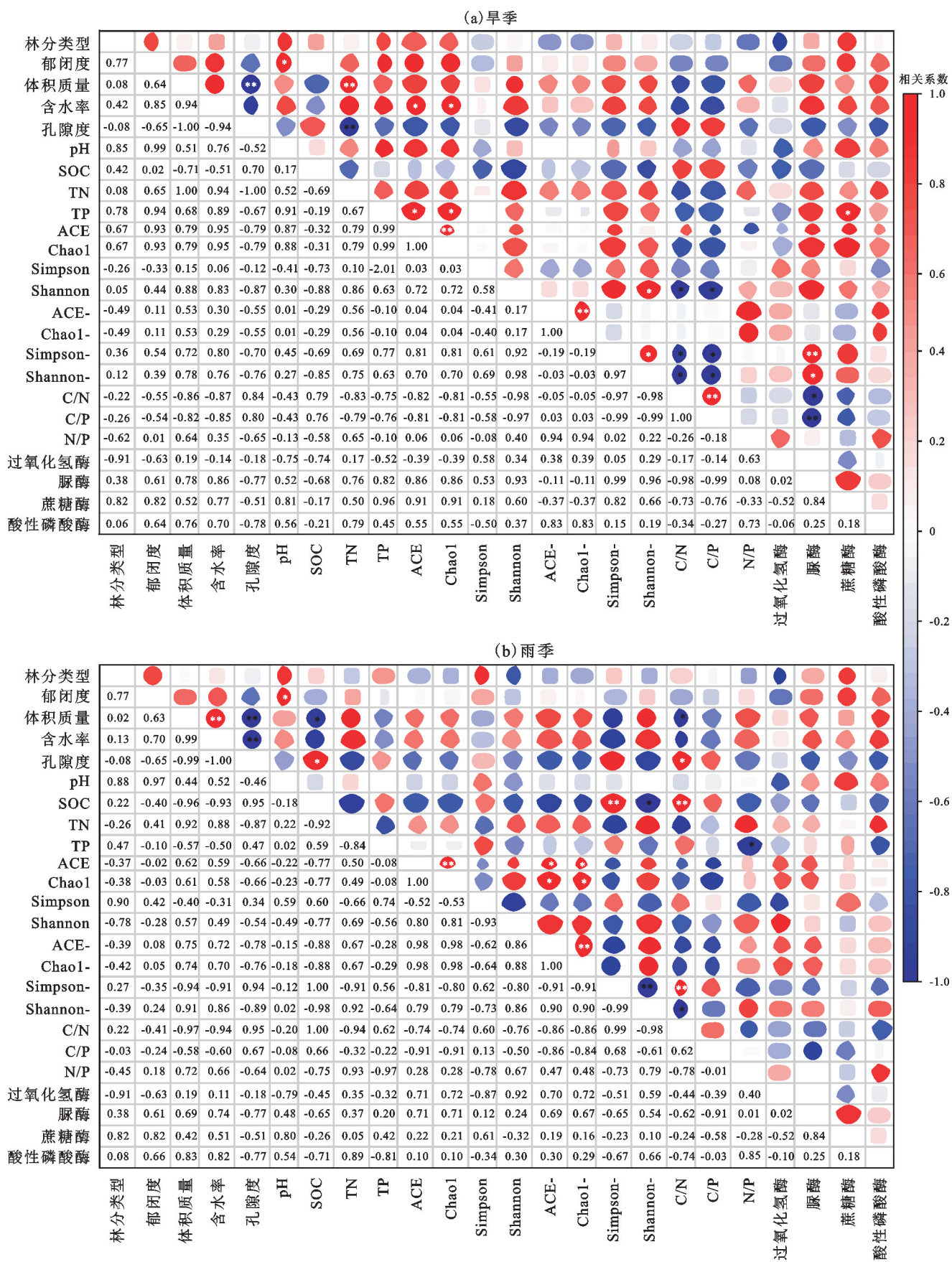
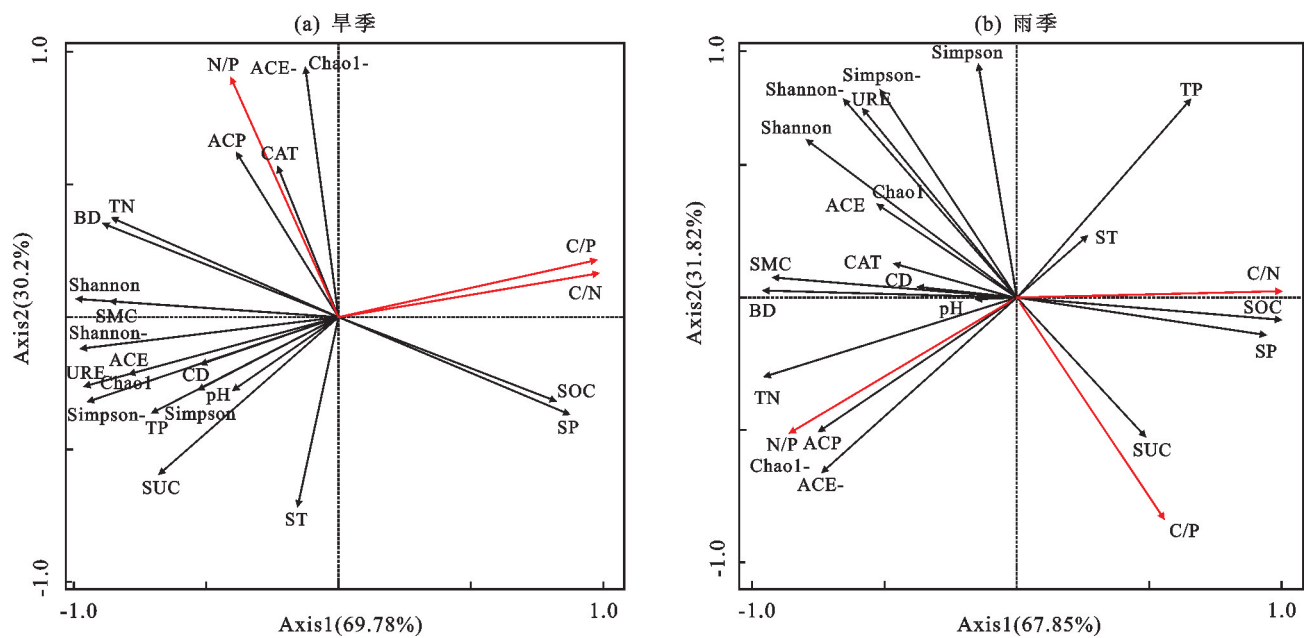


图4 旱季、雨季不同林分类型环境因子与土壤化学计量特征相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis between environmental factors and soil stoichiometric characteristics of different forest types in dry season and rainy season



注:ST 为林分类型;CD 为郁闭度;BD 为体积质量;SMC 为含水量;SP 为孔隙度;CAT 为过氧化氢酶;URE 为脲酶;SUC 为蔗糖酶;ACP 为酸性磷酸酶;ACE;Chaol;Simpson;Shannon 为细菌指数;ACE-、Chaol-、Simpson-、Shannon- 为真菌指数。

图 5 旱季、雨季不同林分土壤化学计量特征冗余分析

Fig. 5 Redundancy analysis of soil stoichiometry characteristics of different forest stands in dry season and rainy season

### 3.2 土壤化学计量特征及其影响因素

土壤生态化学计量特征作为评价土壤养分固定、维持与分解释放的重要指标,其在土壤养分循环与限制作用的研究中被广泛应用。C/N 是土壤氮素矿化能力的标志,C/P 可以衡量土壤有机碳矿化释放磷或吸收磷的潜力,而 N/P 常被用于养分限制的诊断<sup>[24]</sup>。本研究结果(图 2)表明,旱季时不同林分类型土壤 C/N 为 17.00~37.33,平均值为 25.23,雨季时为 17.72~39.16,平均值为 24.05;我国土壤 C/N 平均值<sup>[25]</sup>为 11.9,旱季和雨季 C/N 均显著高于全国平均水平,表明研究区土壤有机质矿化分解速率越慢,有机质分解过程中氮受限,硝酸盐淋溶风险较高,N 流失程度较强<sup>[26]</sup>。有研究<sup>[27]</sup>表明,土壤 C/N 与有机质分解速度呈反比关系;在相关性分析中,土壤 C/N 与土壤微生物指数存在显著负相关,说明土壤微生物分解有机质的速率低于土壤有机氮矿化速率,使土壤中氮积累量减少。C/P 是分析土壤磷有效性的重要指标,能够反映土壤磷的矿化能力,当土壤中 C/P 越低,越有利于有机质分解过程中 P 的释放,土壤磷活性越强<sup>[28]</sup>。旱季时,土壤 C/P 为 62.72~114.50,平均值为 85.15;雨季时,为 63.21~90.72,平均值为 77.52;2 个季节 C/P 均高于全国土壤 C/P 平均水平(61.00),表明研究区森林土壤磷活性较低且有机磷矿化速率低,旱季时冷杉-云杉针叶混交林土壤 C/P 明显大于其他 3 个林分,表明旱季该林分土壤中有有效磷被植物及微生物吸收利用,从而提高土壤对磷的固定作用。旱季 N/P 为 3.09~5.18,平均值为 4.09;雨季 N/P 为

2.39~5.80,平均值为 3.91;2 个季节 N/P 均低于全国土壤 N/P 平均水平(5.20),当土壤 N/P 低于 14.00 时,认为土壤受到 N 的限制;当土壤 N/P 比高于 16.00 时,认为土壤受到 P 的限制<sup>[28]</sup>。通过研究发现该研究区森林土壤更容易受到 N 限制。旱季时 N/P 在各林分间无显著差异,说明 4 个林分类型土壤受到 N 限制的状况基本一致;雨季时,N/P 在森林垂直带间呈先下降后上升趋势,在冷杉-云杉针叶混交林出现最小值,表明该林分受到土壤 N 限制的状况比青冈-川杨阔叶混交林、栓皮栎落叶阔叶林和石棉玉山竹竹林更严重。研究结果显示,林分间化学计量特征空间变异大,一方面是不同植被类型、海拔、气候和土壤特性具有差异性,加上地形因子、微生物群落等因素的共同作用对土壤养分分解、矿化作用及养分循环等存在不同程度影响<sup>[29]</sup>。另一方面,地形和植被等因子影响土壤阳离子交换量<sup>[30]</sup>,使得土壤 C、N、P 变化大,导致不同林分类型间土壤化学计量特征在空间上有较大变异性。

### 3.3 土壤微生物变化特征及其影响因素

土壤微生物是陆地生态系统中最活跃的部分,在土壤养分生物化学循环和地表凋落物降解过程起着重要作用。由于森林垂直带存在显著区别,导致不同林分类型土壤微生物丰富度及多样性指数差异(表 3)。旱季时,土壤细菌指数在各林分间没有显著差异,说明此时土壤细菌对林分类型变化所导致环境因子变化的响应情况一致;土壤真菌多样性(Simpson 和 Shannon 指数)在林分间没有差异,说明林分类型对土壤真菌群落多样性的差异不显著;微生物丰富度

(ACE 和 Chao1 指数)数在林分间存在差异,石棉玉山竹竹林处显著大于其他 3 个林分。雨季时,冷杉-云杉针叶混交林土壤微生物丰富度(ACE 和 Chao1 指数)存在最大值,Simpson 指数存在最小值,说明此林分不仅微生物物种数量多且物种多样性丰富。4 个林分类型土壤微生物丰富度(ACE 和 Chao1 指数)均呈现出雨季大于旱季,Simpson 呈现出雨季小于旱季,表明雨季土壤微生物群落丰富度及物种多样性均大于旱季。同时,土壤酶活性也受土壤性质、水热条件及植被类型等因素制约<sup>[31]</sup>,因此,不同林分类型影响土壤酶活性。马剑等<sup>[32]</sup>研究发现,蔗糖酶活性随森林垂直带总体上增强,脲酶活性整体上呈减弱趋势;曹瑞等<sup>[4]</sup>研究发现,脲酶、蔗糖酶和酸性磷酸酶均呈现出先增大后减少再增大的趋势;斯贵才等<sup>[33]</sup>发现,土壤酶活性呈现随森林垂直带升高而下降的趋势,本研究结果与马剑等<sup>[32]</sup>、曹瑞等<sup>[4]</sup>和斯贵才等<sup>[33]</sup>研究结果一致。通过相关性分析发现,土壤酶活性和微生物指数与化学计量特征呈极显著相关关系(图 4),表明研究区土壤化学计量特征主要受到酶活性及微生物影响,而酶活性及微生物对环境因子变化响应较为敏感,从而导致不同林分土壤养分和酶活性等存在不同程度差异。有研究<sup>[34]</sup>表明,土壤蔗糖酶直接参与土壤有机质的代谢过程;脲酶可以表征土壤有机态氮的转化状况,而过氧化氢酶与植物根系有关,可以表征土壤的生化活性<sup>[35]</sup>。不同林分类型间由于水热条件等环境因素不一致,影响土壤酶对地表凋落物分解速率及氮素转化等养分循环过程,引起土壤 C、N、P 在林分间差异较大,导致不同林分类型间土壤化学计量特征在空间上有较大变异性。生物化学循环过程中土壤养分质量分数也影响土壤酶活性及微生物,它们之间相互影响机制,有待下一步研究确定。

## 4 结论

(1)栗子坪自然保护区不同林分类型土壤理化性质、酶活性在季节动态特征上均表现为雨季大于旱季。

(2)土壤 C/N 在青冈-川杨阔叶混交林表现为旱季大于雨季,其他 3 个林分均表现为雨季大于旱季;C/P 在青冈-川杨阔叶混交林、冷杉-云杉针叶混交林表现为旱季大于雨季,其余 2 个林分反之;N/P 在栓皮栎落叶阔叶林、冷杉-云杉针叶混交表现为旱季大于雨季,其余 2 个林分反之;旱季、雨季 C/N 和 C/P 均高于全国平均水平,表明研究区土壤有机质矿化分解速率较慢,分解过程中氮受限,且矿化释放 P 的潜力低于全国平均水平;2 个季节 N/P 均低于全国土壤平均水平表明研究区森林土壤更容易受到 N 限制。

(3)4 个林分类型土壤微生物 ACE 和 Chao1 指数

均呈雨季大于旱季,Simpson 呈雨季小于旱季,表明雨季土壤微生物群落丰富度及物种多样性均大于旱季。

(4)通过相关性分析和冗余分析发现,不同林分土壤生态化学计量特征主要是受酶活性及微生物的影响。

## 参考文献:

- [1] 陈胜伦,李天阳,何丙辉,等.三峡库区坡耕地典型香榧套种模式土壤碳氮磷及其生态化学计量特征[J].水土保持学报,2023,37(1):220-226.  
CHEN S L, LI T Y, HE B H, et al. Soil carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometric characteristics of typical *Torreya grandis* intercropping systems on sloping farmland in the Three Gorges Reservoir Area[J].Journal of Soil and Water Conservation,2023,37(1):220-226.
- [2] 黑杰,金强,杨文文,等.福州市不同种植年限茉莉花园土壤碳、氮、磷及生态化学计量比特征[J].水土保持学报,2022,36(1):288-296.  
HEI J, JIN Q, YANG W W, et al. Soil carbon, nitrogen, phosphorus and ecological stoichiometry in jasmine orchards with different planting years[J].Journal of Soil and Water Conservation,2022,36(1):288-296.
- [3] 张继辉,蔡道雄,卢立华,等.不同林龄柚木人工林土壤生态化学计量特征[J].生态学报,2020,40(16):5718-5728.  
ZHANG J H, CAI D X, LU L H, et al. Soil ecological stoichiometry of different aged teak (*Tectona grandis*) plantations[J].Acta Ecologica Sinica, 2020, 40 (16): 5718-5728.
- [4] 曹瑞,吴福忠,杨万勤,等.海拔对高山峡谷区土壤微生物生物量和酶活性的影响[J].应用生态学报,2016,27(4):1257-1264.  
CAO R, WU F Z, YANG W Q, et al. Effects of altitudes on soil microbial biomass and enzyme activity in alpine-gorge regions [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2016,27(4):1257-1264.
- [5] 聂阳意,王海华,李晓杰,等.武夷山低海拔和高海拔森林土壤有机碳的矿化特征[J].应用生态学报,2018,29(3):748-756.  
NIE Y Y, WANG H H, LI X J, et al. Characteristics of soil organic carbon mineralization in low altitude and high altitude forests in Wuyi Mountains, southeastern China[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2018,29(3):748-756.
- [6] 张雨鉴,王克勤,宋娅丽,等.滇中亚高山 5 种林型土壤碳氮磷生态化学计量特征[J].生态环境学报,2019,28(1):73-82.  
ZHANG Y J, WANG K Q, SONG Y L, et al. Ecological stoichiometry of soil carbon, nitrogen and phosphorus in five forest types in subalpine of middle Yunnan Province[J]. Ecology and Environmental Sciences,2019,28(1):73-82.

- [7] 许宛孜,叶彩红,张耕,等.北江中下游不同林分类型土壤 C、N、P 生态化学计量特征[J].应用生态学报,2023,34(4):962-968.  
XU T Z, YE C H, ZHANG G, et al. Soil C, N and P stoichiometry in different forest stand types in the middle and lower reaches of the Beijiang River, China[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2023,34(4):962-968.
- [8] 刘慧丽,马若石,赵晓玉,等.贺兰山不同林型植物碳氮磷与土壤养分及坡向关系[J/OL].生态学杂志:1-12 [2024-04-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20240319.1127.002.html>.  
LIU H L, MA R S, ZHAO X Y, et al. The relationships between plant carbon, nitrogen, phosphorus, soil nutrients and slope in different forest types in the Helan Mountains[J/OL]. Chinese Journal of Ecology: 1-12 [2024-04-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20240319.1127.002.html>.
- [9] 秦海龙,付旋旋,卢瑛,等.广西猫儿山不同海拔土壤碳氮磷生态化学计量特征[J].应用生态学报,2019,30(3):711-717.  
QIN H L, FU X X, LU Y, et al. Soil C : N : P stoichiometry at different altitudes in Mao'er Mountain, Guangxi, China[J].Chinese Journal of Applied Ecology, 2019,30(3):711-717.
- [10] 金裕华,汪家社,李黎光,等.武夷山不同海拔典型植被带土壤酶活性特征[J].生态学杂志,2011,30(9):1955-1961.  
JIN Y H, WANG J S, LI L G, et al. Soil enzyme activities in typical vegetation zones along an altitude gradient in Wuyi Mountains[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011,30(9):1955-1961.
- [11] CHEN X, DING Z J, TANG M, et al. Greater variations of rhizosphere effects within mycorrhizal group than between mycorrhizal group in a temperate forest[J].Soil Biology and Biochemistry,2018,126:237-246.
- [12] 王理德,王方琳,郭春秀,等.土壤酶学研究进展[J].土壤,2016,48(1):12-21.  
WANG L D, WANG F L, GUO C X, et al. Review: Progress of soil enzymology[J].Soils,2016,48(1):12-21.
- [13] XU Y X, DU A P, WANG Z C, et al. Effects of different rotation periods of *Eucalyptus* plantations on soil physiochemical properties, enzyme activities, microbial biomass and microbial community structure and diversity[J].Forest Ecology and Management,2020,456:e117683.
- [14] 杨剑虹,王成林,代亨林,等.土壤农化分析与环境监测[M].北京:中国大地出版社,2008.  
YANG J H, WANG C L, DAI H L, et al. Soil agrochemical analysis and environmental monitoring[M]. Beijing: China Land Press,2008.
- [15] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986:87-120.  
GUAN S Y. Soil enzyme and its research method[M]. Beijing: Agricultural Press,1986:87-120.
- [16] 刘艳娇,刘庆,贺合亮,等.亚高山粗枝云杉人工林土壤原核微生物群落结构与功能变化[J].应用生态学报,2023,34(12):3279-3290.  
LIU Y J, LIU Q, HE H L, et al. Changes in the structure and function of soil prokaryotic communities in sub-alpine *Picea asperata* plantations[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2023,34(12):3279-3290.
- [17] 张广帅,邓浩俊,杜锟,等.泥石流频发区山地不同海拔土壤化学计量特征:以云南省小江流域为例[J].生态学报,2016,36(3):675-687.  
ZHANG G S, DENG H J, DU K, et al. Soil stoichiometry characteristics at different elevation gradients of a mountain in an area with high frequency debris flow: A case study in Xiaojiang Watershed, Yunnan[J]. Acta Ecologica Sinica,2016,36(3):675-687.
- [18] 王维奇,徐玲琳,曾从盛,等.河口湿地植物活体-枯落物-土壤的碳氮磷生态化学计量特征[J].生态学报,2011,31(23):134-139.  
WANG W Q, XU L L, ZENG C S, et al. Carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometric ratios among live plant-litter-soil systems in estuarine wetland[J].Acta Ecologica Sinica,2011,31(23):134-139.
- [19] 冯冰聪,马杰,刘勇,等.氮素在农田土壤中迁移转化的研究进展[J/OL].农业资源与环境学报:1-15 [2024-06-21].<https://doi.org/10.13254/j.jare.2023.0825>.  
FENG B C, MA J, LIU Y, et al. Research progress of nitrogen transport and transformation in farmland soils. [J/OL]. Journal of Agricultural Resources and Environment: 1-15 [2024-06-21]. <https://doi.org/10.13254/j.jare.2023.0825>.
- [20] 马寰菲,解梦怡,胡汗,等.秦岭不同海拔森林土壤-植物凋落物化学计量特征对土壤氮组分的影响[J].生态学杂志,2020,39(3):749-757.  
MA H F, XIE M Y, HU H, et al. Effects of stoichiometric characteristics of soil-plant-litter on soil nitrogen components in different forests along an elevational gradient of Qinling Mountains[J].Chinese Journal of Ecology,2020,39(3):749-757.
- [21] 李常准,陈立新,段文标,等.凋落物处理对不同林型土壤有机碳全氮全磷的影响[J].中国水土保持科学,2020,18(1):100-109.  
LI C Z, CHEN L X, DUAN W B, et al. Effects of litter treatment on soil organic carbon, total nitrogen and total phosphorus in different forest types[J].Science of Soil and Water Conservation,2020,18(1):100-109.
- [22] REICH P B, OLEKSYN J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude[J].Proceedings of the National Academy of Sciences of the United

- States of America, 2004, 101(30): 11001-11006.
- [23] 张燕, 王平, 孟月, 等. 云南乌蒙山国家级自然保护区不同植被类型土壤养分特征[J]. 东北林业大学学报, 2023, 51(1): 94-100.
- ZHANG Y, WANG P, MENG Y, et al. Characteristics of soil nutrients of different vegetation types in the Wumeng national nature reserve, Yunnan[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2023, 51(1): 94-100.
- [24] 董廷发. 不同海拔云南松林土壤养分及其生态化学计量特征[J]. 生态学杂志, 2021, 40(3): 672-679.
- DONG T F. Soil nutrients and their ecological stoichiometry of *Pinus yunnanensis* forest along an elevation gradient[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(3): 672-679.
- [25] TIAN H, CHEN G, ZHANG C, et al. Pattern and variation of C : N : P ratios in China's soils: A synthesis of observational data[J]. Biogeochemistry, 2010, 98(1/3): 139-151.
- [26] 王传盈, 王凯月, 王浩然, 等. 黄河下游典型湿地土壤养分及其生态化学计量特征[J]. 环境科学, 2024, 45(3): 1674-1683.
- WANG C Y, WANG K Y, WANG H R, et al. Nutrients and ecological stoichiometry characteristics of typical wetland soils in the lower Yellow River[J]. Environmental Science, 2024, 45(3): 1674-1683.
- [27] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3937-3947.
- WANG S Q, YU G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8): 3937-3947.
- [28] 李洪杰, 刘军伟, 杨林, 等. 海拔梯度模拟气候变暖对高山森林土壤微生物生物量碳氮磷的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2016, 22(4): 599-605.
- LI H J, LIU J W, YANG L, et al. Effects of simulated climate warming on soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus of alpine forest[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2016, 22(4): 599-605.
- [29] 顾振宽, 杜国祯, 朱炜歆, 等. 青藏高原东部不同草地类型土壤养分的分布规律[J]. 草业科学, 2012, 29(4): 507-512.
- GU Z K, DU G Z, ZHU W X, et al. Distribution pattern of soil nutrients in different grassland types and soil depths in the eastern Tibetan Plateau[J]. Pratacultural Science, 2012, 29(4): 507-512.
- [30] 王文艳, 张丽萍, 刘俏. 黄土高原小流域土壤阳离子交换量分布特征及影响因子[J]. 水土保持学报, 2012, 26(5): 123-127.
- WANG W Y, ZHANG L P, LIU Q. Distribution and affecting factors of soil cation exchange capacity in watershed of the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(5): 123-127.
- [31] 谷晓楠, 贺红士, 陶岩, 等. 长白山土壤微生物群落结构及酶活性随海拔的分布特征与影响因子[J]. 生态学报, 2017, 37(24): 8374-8384.
- GU X N, HE H S, TAO Y, et al. Soil microbial community structure, enzyme activities, and their influencing factors along different altitudes of Changbai Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(24): 8374-8384.
- [32] 马剑, 刘贤德, 金铭, 等. 祁连山青海云杉林土壤理化性质和酶活性海拔分布特征[J]. 水土保持学报, 2019, 33(2): 207-213.
- MA J, LIU X D, JIN M, et al. Soil physicochemical properties and enzyme activities along the altitudinal gradients in *Picea crassifolia* of Qilian Mountains[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(2): 207-213.
- [33] 斯贵才, 王建, 夏燕青, 等. 念青唐古拉山沼泽土壤微生物群落和酶活性随海拔变化特征[J]. 湿地科学, 2014, 12(3): 340-348.
- SI G C, WANG J, XIA Y Q, et al. Change characteristics of microbial communities and enzyme activities in soils of marshes in Nyaiqentanglha mountains with heights above sea level[J]. Wetland Science, 2014, 12(3): 340-348.
- [34] 李海云, 张建贵, 姚拓, 等. 退化高寒草地土壤养分、酶活性及生态化学计量特征[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 287-295.
- LI H Y, ZHANG J G, YAO T, et al. Soil nutrients, enzyme activities and ecological stoichiometric characteristics in degraded alpine grasslands[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(5): 287-295.
- [35] 薛立, 邝立刚, 陈红跃, 等. 不同林分土壤养分、微生物与酶活性的研究[J]. 土壤学报, 2003, 40(2): 280-285.
- XUE L, KUANG L G, CHEN H Y, et al. Soil nutrients, microorganism and enzyme activities of different stands[J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(2): 280-285.