

# 漓江流域喀斯特森林土壤碳氮磷储量分布特征及其影响因素

钟建军<sup>1,2</sup>, 李林<sup>3</sup>, 魏识广<sup>1,2</sup>, 申楷慧<sup>3</sup>, 周景钢<sup>1,2</sup>, 温智峰<sup>3</sup>, 赵毅<sup>3</sup>, 杨欣恬<sup>1,2</sup>

(1.广西师范大学珍稀濒危动植物生态与环境保护教育部重点实验室, 广西 桂林 541000;

2.广西漓江流域景观资源保育与可持续利用重点实验室, 广西 桂林 541000;

3.桂林电子科技大学生命与环境科学学院, 广西 桂林 541000)

**摘要:**以探明漓江流域喀斯特森林土壤的碳氮磷储量分布为目的,为保护漓江流域脆弱的喀斯特生态系统提供理论依据。在漓江上中下游各流域段的典型喀斯特森林共设置 20 m×20 m 的 15 块天然林样方,对森林植被进行每木检尺调查,采用五点采集法采集 0—20, 20—40 cm 土层土壤,分析土壤碳氮磷储量空间分布情况及驱动因子作用途径,量化各类生物和非生物因子对区域喀斯特森林土壤养分储量分布格局形成的作用贡献。结果表明:(1)漓江流域喀斯特森林土壤碳氮磷储量平均分布表现为上游>下游>中游,在漓江流域喀斯特森林土壤中碳、氮、磷储量分别为 55.8~192.0, 3.1~14.8, 6.0~12.0 kg/m<sup>2</sup>。在同一流域土壤中,0—20 cm 土层碳氮含量均显著高于同流域 20—40 cm 土层,磷元素在漓江流域不同深度土层中未表现出显著差异。(2)碳储量与 C/P、N/P、森林物种多样性 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数均呈现出显著正相关关系;氮储量与 C/P、N/P、Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数均呈现显著正相关关系,与 C/N 呈现显著负相关关系;磷储量与 C/N 呈现显著负相关关系,与森林物种多样性不存在显著相关关系。(3)漓江流域喀斯特森林土壤化学计量特征是驱动土壤碳氮磷储量分布的直接驱动因子,且深层土壤化学计量特征是最重要的直接驱动因子,其次森林物种多样性对于土壤养分的固定和输入起到重要作用,直接影响并驱动土壤碳氮储量分布格局,磷储量不受森林植被状况的影响。漓江流域喀斯特森林土壤中,化学计量特征与森林植物多样性对土壤碳氮磷储量起到重要影响,提倡通过提升漓江流域森林物种多样性,改善流域森林土壤蓄水保肥功能,以此保护漓江流域脆弱的喀斯特森林生态系统。

**关键词:** 养分储量; 生态化学计量特征; 驱动因子; 喀斯特森林土壤; 漓江流域

中图分类号: S714.2 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2023)06-0180-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.06.023

## Distribution Characteristics and Influencing Factors of Soil Carbon, Nitrogen and Phosphorus Storage in Karst Forest in the Lijiang River Basin

ZHONG Jianjun<sup>1,2</sup>, LI Lin<sup>3</sup>, WEI Shiguang<sup>1,2</sup>, SHEN Kaihui<sup>3</sup>,

ZHOU Jinggang<sup>1,2</sup>, WEN Zhifeng<sup>3</sup>, ZHAO Yi<sup>3</sup>, YANG Xintian<sup>1,2</sup>

(1. Guangxi Normal University, Key Laboratory of Ecology of Rare and Endangered Species and

Environmental Protection, Ministry of Education, Guilin, Guangxi 541000; 2. Guangxi Key Laboratory of

Landscape Resources Conservation and Sustainable Utilization in Lijiang River Basin, Guilin, Guangxi 541000;

3. College of Life and Environmental Science, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541000)

**Abstract:** In order to explore the distribution of soil carbon, nitrogen and phosphorus storage in Karst forest in the Lijiang River Basin, and to provide a theoretical basis for protecting the fragile Karst ecosystem in the Lijiang River Basin, a total of 15 natural forest quadrats of 20 m × 20 m were set up in the typical Karst forests in the upper, middle and lower reaches of the Lijiang River, and the forest vegetation was surveyed for each tree. The 0—20, 20—40 cm soil layers were collected by five-point collection method to analyze the

收稿日期: 2023-04-26

资助项目: 广西自然科学基金面上项目(2020GXNSFAA159108); 国家自然科学基金项目(32060305); 广西师范大学珍稀濒危动植物生态与环境保护教育部重点实验室研究基金项目(ERESEP2021Z06); 广西师范大学 2021 年自治区级大学生创新创业训练计划项目(202110602254)

第一作者: 钟建军(1997—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事流域森林土壤研究。E-mail: a987654321bca@163.com

通信作者: 魏识广(1980—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事森林生态学与数量生态研究。E-mail: argentriver@163.com

spatial distribution of soil carbon, nitrogen and phosphorus storage and driving factors, and to quantify the contribution of various biological and abiotic factors to the formation of soil nutrient storage pattern in karst forest. The results showed that: (1) The average distribution of soil carbon, nitrogen and phosphorus storage in the Karst forest in the Lijiang River Basin was upstream > downstream > midstream. In the Karst forest soil of the Lijiang River Basin, the storage of carbon, nitrogen and phosphorus was 55.8~192.0, 3.1~14.8, and 6.0~12.0 kg/m<sup>2</sup>, respectively. The storage of carbon and nitrogen in 20 cm soil layer in the same watershed was significantly higher than that in 20—40 cm soil layer, while phosphorus storage did not show significant difference in the soil layers of different depth in the Lijiang River Basin. (2) Carbon storage showed a significant positive correlation with C/P, N/P, Shannon-Wiener index and Simpson index of forest species diversity; nitrogen storage had a significant positive correlation with C/P, N/P, Shannon Wiener index and Simpson index, while a significant negative correlation with C/N; the phosphorus storage had a significant negative correlation with C/N, and there was no significant correlation with forest species diversity. (3) The stoichiometric characteristics of Karst forest soil chemistry in the Lijiang River Basin were the direct driving factors driving the distribution of soil carbon, nitrogen and phosphorus storages, and the stoichiometric characteristics of deep soil were the most important direct driving factors. Secondly, forest species diversity played an important role in the immobilization and input of soil nutrients, directly affecting and driving the formation of soil carbon and nitrogen storage distribution pattern. The formation of phosphorus storage was not driven by the impact of forest vegetation conditions. In the Karst forest soil in the Lijiang River basin, the stoichiometric characteristics and the diversity of forest plants had played an important role in the formation and decomposition of soil carbon, nitrogen and phosphorus reserves. It is advocated to improve the water and fertilizer storage functions of forest soil in the Lijiang River Basin by improving the species diversity of forest vegetation in the Lijiang River Basin, while protecting the fragile karst forest ecosystem in the Lijiang River Basin.

**Keywords:** nutrient storage; ecostochiometric characteristics; driving factors; Karst forest soil; Lijiang River Basin

土壤是陆地生态系统物质循环、能量流动、信息交换的重要场所<sup>[1]</sup>,是森林生态系统的物质基础,对森林固碳、储碳、蓄水、保肥等功能起到关键作用。土壤营养状态及理化性质直接影响到森林生态系统功能的发挥<sup>[2]</sup>,其中,土壤碳氮磷储量是评价森林生态系统服务功能的重要指标。土壤碳氮磷储量在不同森林类型中的分布存在空间异质性<sup>[3]</sup>。我国热带常绿阔叶林中,土壤养分在地形因子影响下表现出强空间异质性,随着海拔升高土壤碳氮磷储量增大;亚热带常绿阔叶林和混交林中,碳氮磷分布随着林型和植物物种的变化也存在空间异质性<sup>[4]</sup>;温带落叶阔叶林中,土壤碳氮磷分布受到植被类型和植被覆盖率的影响,同样存在着空间异质性。但目前研究<sup>[3-4]</sup>多集中描述土壤碳氮磷储量空间分布的异质性现象,有必要引入随机森林模型的 MSE 重要值,比较分析碳氮磷储量空间异质性的相对大小。

森林土壤碳氮磷储量及其分布受到多种因素影响。近年来,森林土壤碳氮磷储量、生态化学计量特征与森林植被之间的关联开始受到关注<sup>[5]</sup>。土壤碳氮磷储量

受到化学计量特征的影响,二者存在着显著的相关关系。土壤中 C/N 是土壤氮矿化的重要指标,决定有机碳分解速率<sup>[6]</sup>,一般情况下,土壤 C/N 越低,有机质分解作用越快。土壤 C/P 常被用来衡量微生物矿化土壤有机物质释放磷或从环境中吸收固持磷的潜力,土壤 N/P 可有效预测养分限制类型<sup>[7]</sup>。此外,土壤碳氮磷养分分布还受到植被影响,高植被覆盖能促进土壤养分的累积,从而形成较高的森林土壤碳氮磷储量<sup>[8]</sup>,植被覆盖度高的土壤养分含量高于植被覆盖度低的土壤。且森林植物多样性也影响土壤碳氮磷的分布,往往森林物种多样性高的森林,其土壤碳氮磷含量显著高于多样性低的森林<sup>[9]</sup>。已有研究<sup>[6-9]</sup>多集中于定性的分析,目前,对于量化各驱动因子对森林土壤碳氮磷储量分布作用贡献的报道较少。

喀斯特石漠化是全球碳酸盐岩地区面临的最严峻的生态环境问题之一。由于喀斯特地貌的地上地下二元结构发育,土层浅薄,土壤营养条件分布不均,表现为高度异质性,其森林生态系统生境脆弱,导致土壤空间异质性较强。有研究<sup>[10]</sup>表明,喀斯特土壤

养分含量高于非喀斯特土壤,且受到土壤化学计量特征的调控和影响;另外喀斯特地区植被恢复状况也显著影响土壤养分,对于喀斯特土壤碳氮磷储量形成的路径和各因子作用贡献还未明确,喀斯特森林土壤营养元素空间分布及驱动因子的研究较少,且已有研究<sup>[11]</sup>主要集中在云贵喀斯特地区。漓江流域属于典型喀斯特地区,漓江喀斯特森林的碳氮磷储量分布特征及其形成机制的研究目前还较少。

综上所述,以漓江流域喀斯特森林土壤为研究对象,分析不同流域段的土壤碳氮磷储量差异,并且基于随机森林模型的 MSE 评分,对碳氮磷储量在流域上中下游的空间异质性进行深入分析;研究土壤碳氮磷储量与生态化学计量特征和森林物种多样性之间的关系;明确土壤碳氮磷储量的直接和间接驱动因子,构建土壤碳氮磷储量与直接驱动因子的多元回归方程,量化各驱动因子的相对作用。从以上 3 个方面研究漓江流域喀斯特森林的土壤碳氮磷储量空间分布情况及驱动因子作用。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

漓江流域(24°18′—25°41′N, 109°45′—110°40′

E)位于广西壮族自治区东北部,发源于猫儿山,属于珠江水系西江一级支流桂江的上游,全长 229 km,流域总面积约 5 960 km<sup>2</sup>。研究区属于亚热带季风气候,全年光照充足、四季分明,年平均气温为 17~20℃,年降水量为 1 814~1 941 mm,由北至南逐渐减少,年蒸发量为 137~1 857 mm,3—8 月为汛期,9 月至翌年 2 月为旱季。漓江流域是典型的喀斯特溶岩地貌,土层薄,石砾含量高,土被不连续,森林分布不均,具有分段特征。

### 1.2 样品采集与分析

于 2021 年 10—11 月进行野外调查和土壤样品采集,在漓江上、中、下游段的典型喀斯特森林分布区设置 15 块 20 m×20 m 调查样方。对各样方进行每木检尺,记录胸径>1 cm 的所有乔木和高度>1 m 的灌木的基本信息,样地基本情况见表 1。在每个样方设置 10 m×10 m 小样方中清除枯落物层后,挖掘 40 cm 土层土壤剖面,按 0—20(表层土壤),20—40 cm(深层土壤)深度分层收集土壤样品,混匀带回实验室。环刀采集的土壤样品用于测定土壤容重,土壤样品经过预处理,研磨后过 100 目筛。有机碳含量采用重铬酸钾外加热法,全氮采用微量凯式法,全磷分析采用钼锑抗比色法,土壤含水量采用烘干法,土壤容重测定采用环刀法<sup>[12]</sup>。

表 1 各样地概况

流域	样地号	海拔/m	含水量/ (g·g <sup>-1</sup> )	容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	物种数/ 种	优势树种
上游	1	540	0.25±0.116	0.79±0.119	62	垂叶榕( <i>Ficus benjamina</i> L.)
	2	660	0.24±0.026	0.74±0.024	37	润楠[ <i>Machilus nanmu</i> (Oliver) Hemsley]和木莓( <i>Rubus swinhoi</i> Hance)
	3	400	0.31±0.024	0.73±0.097	61	芬芳安息香( <i>Styrax odoratissimus</i> Champ.)
	4	150	0.29±0.021	1.21±0.011	19	杉木[ <i>Cunninghamia lanceolata</i> (Lamb.) Hook.]和缺萼枫香( <i>Liquidambar acalycina</i> Chang)
	5	160	0.16±0.029	1.12±0.146	30	润楠
	6	160	0.16±0.029	1.09±0.114	14	牛耳枫( <i>Daphniphyllum calycinum</i> Benth.)和朴树( <i>Celtis sinensis</i> Pers.)
中游	7	160	0.17±0.086	1.12±0.061	9	枸树( <i>Broussonetia papyrifera</i> )和川桂( <i>Cinnamomum wilsonii</i> Gamble)
	8	160	0.11±0.058	1.25±0.199	12	毛桂( <i>Cinnamomum appelianum</i> Schewe)
	9	160	0.17±0.035	1.19±0.123	14	朴树
	10	160	0.11±0.033	1.14±0.087	30	盐肤木( <i>Rhus chinensis</i> Mill.)、苦槠[ <i>Castanopsis sclerophylla</i> (Lindl.) Schott.]
	11	150	0.24±0.031	0.89±0.054	25	榿木[ <i>Loropetalum chinense</i> (R. Br.) Oliver]和光皮柞木( <i>Cornus wilsoniana</i> Wangerin)
	12	150	0.28±0.026	0.86±0.069	33	光皮柞木
下游	13	130	0.19±0.012	1.30±0.105	29	榿木
	14	150	0.24±0.033	0.90±0.082	31	榿木和青冈[ <i>Cyclobalanopsis glauca</i> (Thunb) Oersted]
	15	150	0.25±0.056	0.62±0.126	22	榿木和粗糠柴( <i>Mallotus philippensis</i> )

注:表中数据为平均值±标准差。

### 1.3 数据分析

土壤有机碳储量(以下称碳储量)、氮储量、磷储量的计算公式为:

$$S_{C(NP)_i} = C_i \rho_i d_i / 10 \quad (1)$$

$$T_{C(NP)} = \sum_{i=1}^n C_i \rho_i d_i / 10 \quad (2)$$

式中: $S_{C(NP)_i}$ 为第*i*层土壤碳(氮或磷)储量(kg/m<sup>2</sup>); $C_i$

为第*i*层土壤碳(氮或磷)质量分数(g/kg); $\rho_i$ 为第*i*层土壤密度(g/cm<sup>3</sup>); $d_i$ 为第*i*层土层厚度(cm); $T_{C(NP)}$ 为 0—40 cm 土层土壤碳(氮或磷)总储量(kg/m<sup>2</sup>)。

采用随机森林(random forest)模型的 MSE 重要性评分,对碳氮磷储量基于流域空间的差异性排序。MSE 重要性评分越大表示某物质基于不同地理环境因素的变异差异性越大,计算公式为:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (3)$$

式中:  $y_i$  为测试集数据;  $\hat{y}_i$  为拟合数据;  $n$  为样本的个数。

森林物种多样性指数选取  $\alpha$  多样性指数中的 Shannon-Wiener 指数  $H'$ , Simpson 优势度指数  $D$ , Pielou 均匀度指数  $J$ , 相关的计算公式为:

$$H' = -\sum_{i=1}^s (p_i \log p_i) \quad (4)$$

$$D = 1 - \sum p_i^2 \quad (5)$$

$$J = (e^{-\sum p_i \log p_i} - 1) / (S - 1) \quad (6)$$

式中: 任意 2 个个体为不同物种的概率  $p$  时,  $p_i$  为各个物种  $i$  的相对多度;  $S$  为目标样地中的总物种数。

通过 R 4.1.2 和 Origin 2022 软件对数据进行统计分析和绘图, 运用单因素方差分析法分析不同流域碳氮磷储量间差异(显著性水平  $p < 0.05$ ), 采用多因素相关分析碳氮磷储量与生态化学计量特征和物种多样性指数间的相关性, 使用路径分析得到碳氮磷储量的直接驱动因子, 并且构建多元回归方程。

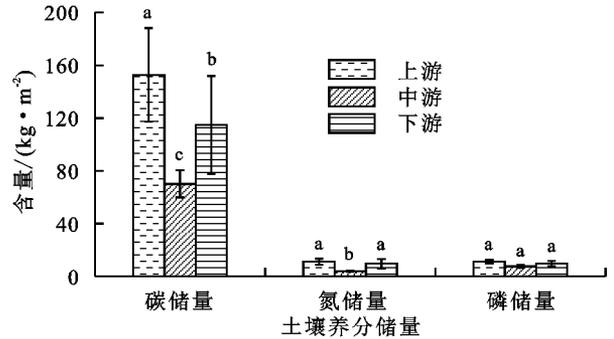
## 2 结果与分析

### 2.1 漓江流域喀斯特森林土壤养分分布情况及空间差异

2.1.1 土壤碳氮磷储量水平空间分布特征 漓江流域喀斯特森林 0—40 cm 土层土壤单位面积有机碳、氮、磷储量分布存在差异(图 1)。上游、中游、下游流域段碳储量分别为 152.63, 70.11, 114.83 kg/m<sup>2</sup>; 氮储量分别为 11.19, 4.08, 9.71 kg/m<sup>2</sup>; 磷储量分别为 11.30, 7.63, 9.78 kg/m<sup>2</sup>。上游碳储量显著高于中游和下游, 下游显著高于中游; 上游和下游氮储量显著高于中游; 磷储量在上中下游差异不显著。

基于随机森林模型中 MSE 重要性评分(图 2)显示, 在漓江流域喀斯特森林土壤中, 氮储量 MSE 重要性评分大于碳储量, 磷储量评分为 0, 说明碳氮元素在漓

江流域喀斯特森林土壤中呈现出空间差异性, 氮储量差异性高于碳, 而磷储量在整个漓江上中下游森林土壤中不具备统计学意义的空间变异性。



注: 图柱上方不同小写字母表示相同营养元素不同流域段间差异显著 ( $p < 0.05$ )。

图 1 漓江流域森林土壤碳氮磷储量

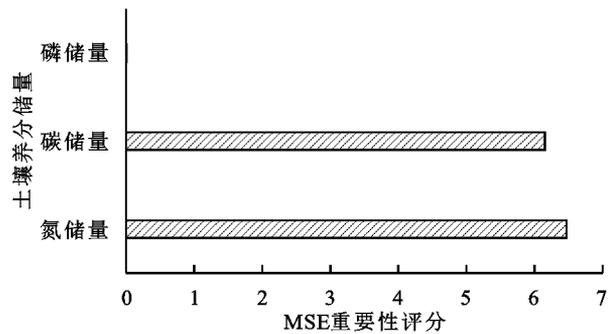
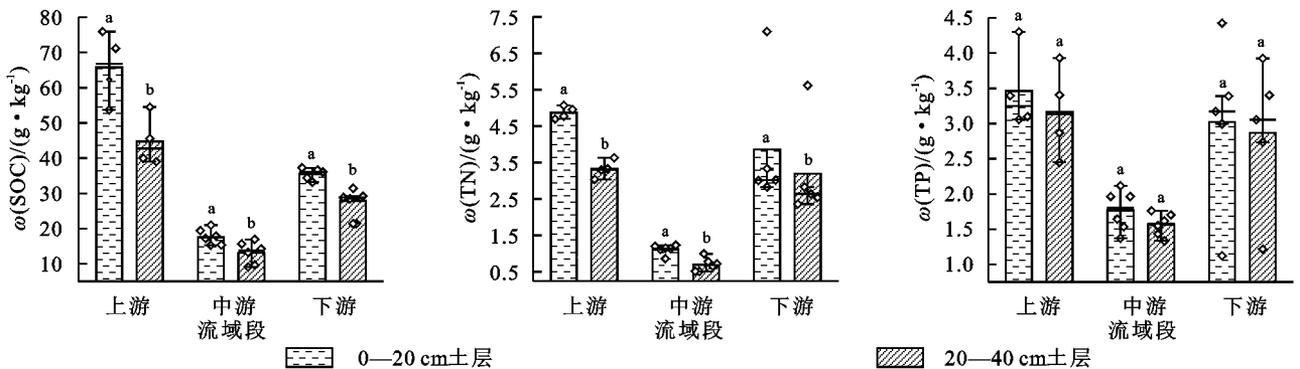


图 2 漓江森林土壤碳氮磷储量差异性重要性评分

2.1.2 土壤碳氮磷养分垂直分布特征 漓江流域喀斯特森林土壤在垂直空间上差异显著, 从不同深度土层养分角度来看, 0—20 cm 土层土壤碳氮磷平均含量均高于 20—40 cm 土层, 漓江上中下游 0—20 cm 土层土壤有机碳含量均显著高于同流域 20—40 cm 土层, 0—20 cm 土层土壤有机碳含量比同流域 20—40 cm 土层平均高 31%; 且同流域 0—20 cm 土层土壤全氮含量显著高于 20—40 cm 土层; 而磷元素在漓江流域不同深度土层中未表现出显著差异(图 3)。



注: 图中◇为土壤碳、氮、磷含量; 图柱上方不同小写字母表示相同流域段不同土层间差异显著 ( $p < 0.05$ )。下同。

图 3 漓江不同流域段森林不同土层土壤碳、氮、磷含量

### 2.2 漓江流域喀斯特森林土壤碳氮磷储量与其影响因素相关性分析

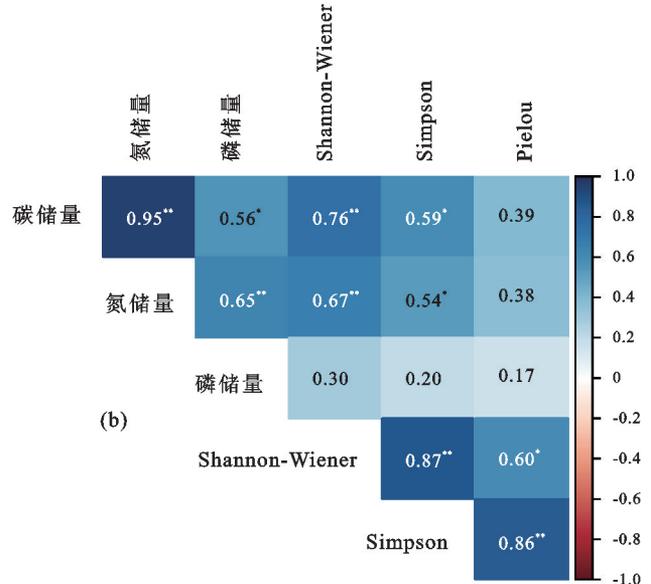
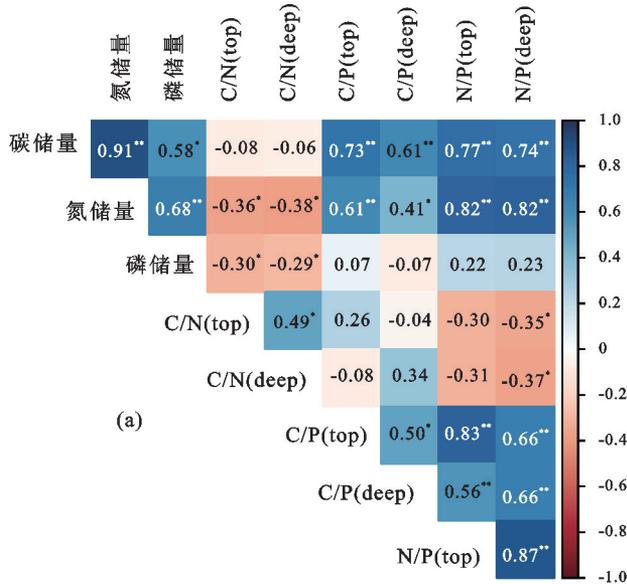
多因素相关分析(图 4a)显示, 漓江流域喀斯特森林

土壤碳氮磷储量受土壤生态化学计量比影响。土壤碳储量与 C/P 和 N/P 呈极显著正相关 ( $p < 0.01$ ), 且与 0—20 cm 土层相关性更高; 氮储量与 C/P 和 N/P 均呈

显著正相关( $p < 0.05$ ),与 0—20 cm 土层相关性更高,与 C/N 呈显著负相关( $p < 0.05$ );磷储量则与 C/N 呈显著负相关( $p < 0.05$ )。碳储量与 C/N 之间无显著相关性,磷储量与 C/P 和 N/P 相关性不显著。

漓江上中下游森林土壤碳氮磷储量亦受到物种多样性的影响(图 4b),碳储量与 Shannon-Wiener 指数呈极显著正相关( $p < 0.01$ ),其相关系数为 0.76,与

Simpson 指数呈显著正相关( $p < 0.05$ ),相关系数为 0.59,氮储量与 Shannon-Wiener 指数呈极显著正相关( $p < 0.01$ ),相关系数为 0.67,与 Simpson 指数呈显著正相关( $p < 0.05$ ),相关系数为 0.54。所以,土壤碳氮储量与森林物种多样性均有相关性,且与 Shannon-Wiener 指数相关性更强,而磷储量与森林物种多样性指数不存在显著相关性。



注:图中\*表示  $p < 0.05$ , \*\*表示  $p < 0.01$ 。下同。

图 4 碳氮磷储量与其影响因子的相关性

### 2.3 漓江流域喀斯特森林土壤碳氮磷储量分布的驱动因子作用

#### 2.3.1 土壤碳氮磷储量分布驱动因子作用路径分析

基于土壤化学计量特征和森林物种多样性指数对土壤碳氮磷进行路径分析(图 5),碳储量分布的直接驱动因子是 C/P(top)、N/P(deep) 和森林物种多样性(Shannon-Wiener 指数);氮储量分布的直接驱动

因子是 C/P(deep)、N/P(deep) 和森林物种多样性(Shannon-Wiener 指数);磷储量的直接驱动因子是 C/P(deep)、N/P(deep)。因此,土壤化学计量特征中 C/P 和 N/P 对土壤养分储量形成有重要贡献,碳氮储量受到森林植被的影响,并且在土壤碳氮磷储量三者之间,氮储量直接驱动碳储量和磷储量,同时碳储量也直接影响驱动土壤氮储量。

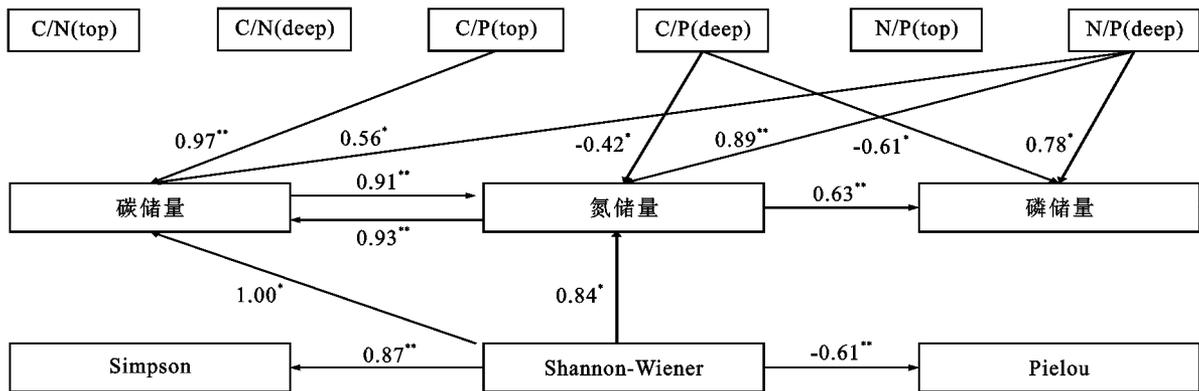


图 5 土壤碳氮磷储量直接驱动因子路径

#### 2.3.2 土壤碳氮磷储量分布的直接驱动因子作用

将碳氮磷储量基于直接驱动因子分别构造多元回归方程(表 2),即构造碳储量基于植被 Shannon-Wiener 指数、C/P(top) 和 N/P(deep) 的多元回归方程;构造氮储量基于植被的 Shannon-Wiener 指数、C/P(deep) 和 N/P

(deep) 的多元回归方程;构造磷储量基于 C/P(deep) 和 N/P(deep) 的多元回归方程。基于多元回归方程运算结果,对于碳储量影响的贡献排序依次是 N/P(deep)、Shannon-Wiener 指数和 C/P(top),N/P(deep) 对土壤碳储量的影响比 Shannon-Wiener 指数和 C/P(top) 两者共

同影响更大;氮储量影响的贡献排序依次是 N/P(deep)、Shannon-Wiener 指数,而 C/P(deep)促进氮储量的分

解;磷储量形成的驱动因子是 N/P(deep),而 C/P(deep)促进磷储量的分解。

表 2 土壤碳氮磷储量与驱动因子的多元回归方程

指标	多元回归方程	显著性
碳	碳储量 = $-25.34 + 0.25 \times \text{Shannon-Wiener 指数} + 0.24 \times \text{C/P(top)} + 0.53 \times \text{N/P(deep)}$	$p < 0.0001$
氮	氮储量 = $-1.67 + 0.21 \times \text{Shannon-Wiener 指数} - 0.32 \times \text{C/P(deep)} + 1.07 \times \text{N/P(deep)}$	$p < 0.0001$
磷	磷储量 = $8.67 - 0.40 \times \text{C/P(deep)} + 0.49 \times \text{N/P(deep)}$	$p < 0.05$

### 3 讨论

#### 3.1 土壤碳氮磷储量空间分布差异

土壤碳氮磷特征影响森林生态系统的结构和功能<sup>[2]</sup>。漓江流域喀斯特森林土壤碳氮储量在流域上中下游的分布存在差异,土壤碳氮储量整体表现为上游>下游>中游。漓江上游源头为猫儿山国家级自然保护区,主要为水源涵养森林,人为干扰较少,森林类型属于典型亚热带山地常绿落叶阔叶混交林。森林发育年限长,植被茂密,其植物生物量和凋落物均高于中游和下游。上游森林样地海拔高,随着海拔的升高,温度随之降低,土壤养分分解和形成在一定区域内具有一定的温度敏感性,导致上游土壤中有有机碳、氮元素分解缓慢,土壤中碳氮储量积累较多。因此,漓江上游森林土壤碳氮储量均显著高于中游和下游。漓江中游段贯穿桂林市,人为活动对流域森林干扰较大,由于城市发展导致原始的大面积森林被破坏,沿岸森林面积较小。且植被整体表现较为稀疏,森林郁闭度低,林下土壤受到阳光直射温度升高,土壤中有有机碳、氮元素的分解较快<sup>[13]</sup>,而且森林发育年限较短,使得漓江中游喀斯特森林土壤碳氮储量显著低于上游和下游。漓江下游森林属于典型亚热带山地常绿落叶阔叶混交林,森林发育年限明显低于上游猫儿山区域,且下游贯穿风景区和经济作物耕种区,旅游和耕种活动对森林生态系统产生干扰,人为干扰和土地利用的多元化加快该地区土壤矿质养分的淋溶,导致土壤出现成土慢、土层薄、土被不连续的特点,因此,漓江下游森林土壤单位面积上的碳氮储量显著低于上游森林碳氮储量。

根据 MSE 重要性排序得到,氮碳储量在漓江各流域段呈现空间异质性。氮元素是相较于其他营养元素更为活泼<sup>[14]</sup>,因此,氮储量空间异质性最大,在漓江流域喀斯特森林土壤研究中得到进一步验证。碳元素在土壤中主要以有机物形式存在,相较于氮元素性质更稳定<sup>[15]</sup>,但碳元素的丰缺易受到森林植物输入的影响,漓江上中下游森林植物量差异较大,故碳元素在漓江流域喀斯特森林中表现显著的空间异质性。磷元素在土壤中呈现稳定形态<sup>[16]</sup>,在漓江流域分布无显著差异,相较于碳氮储量,磷在漓江流域上中下游的空间分布异质性最小。

漓江流域喀斯特森林不同土层土壤养分存在显

著差异,在各流域段,其 0—20 cm 土层土壤碳元素和氮元素含量均高于 20—40 cm 土层,说明表层土壤碳、氮对土壤碳氮储量的形成起主要的贡献,土壤碳氮含量具有明显的“表聚作用”,主要原因是森林植物以凋落物形式回归土壤,首先聚集于表层,使得表层土壤的碳氮含量高于深层,同时表层土壤碳氮恢复较快,而深层土壤碳氮积累较慢<sup>[17]</sup>;全磷在不同土层中未表现出显著差异性,因为全磷主要是一种稳定的存在形态,主要受土壤母质发育的影响<sup>[18]</sup>。

#### 3.2 流域土壤碳氮磷储量与化学计量特征和森林物种多样性的耦合联系

土壤中养分储量受土壤化学计量特征影响<sup>[8]</sup>。土壤 C/N 是土壤有机质分解快慢的标志,影响土壤碳素和氮素的内部循环<sup>[6]</sup>,土壤 C/P 常被用来衡量微生物矿化土壤有机物质释放磷或从环境中吸收固持磷的潜力,N/P 主要与微生物的活性分解有机物有关<sup>[7]</sup>。本研究中,漓江流域喀斯特森林土壤碳氮磷储量与其化学计量特征显著相关,C/P 和 N/P 与土壤化学计量特征碳储量呈正相关,碳储量的主要影响因素来自自身的矿化与分解。氮储量与 C/P 和 N/P 均呈正相关,有研究<sup>[19]</sup>表明,C/P 和 N/P 与氮循环息息相关。本研究发现,土壤 C/P 和 N/P 促进土壤氮储量的形成,氮储量与 C/N 呈负相关关系,因为 C/N 是土壤有机质分解快慢的标志,影响土壤碳素和氮素的内部循环<sup>[6]</sup>,与何高迅等<sup>[20]</sup>研究结果一致,磷储量与 C/N 呈负相关,与陈晓旋等<sup>[21]</sup>研究结论一致。

土壤碳氮储量与森林物种多样性有紧密联系,植物以凋落物的形式回归到土壤中,经微生物分解,从而促进土壤元素积累。森林物种多样性与土壤碳氮磷含量及组成呈正相关<sup>[22]</sup>,漓江流域喀斯特森林土壤碳氮储量与森林物种多样性 Shannon-Wiener 指数的相关性最高,Shannon-Wiener 指数是森林群落中物种多样性指数的表征之一,更为偏重于群落中物种数的计量<sup>[23]</sup>,因此,促进森林土壤碳氮储量形成最关键的植被要素是物种数量。土壤碳氮储量与 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数呈显著正相关,与前人<sup>[22]</sup>研究结论一致,说明森林物种多样性高更有利于林下土壤碳氮元素积累。磷元素积累主要由成土母质和气候因子所影响<sup>[24]</sup>,森林植被状况对其影响不显著<sup>[18]</sup>。

### 3.3 漓江流域喀斯特森林土壤碳氮磷储量分布的驱动因子

漓江流域喀斯特森林土壤碳氮磷储量的形成受到土壤化学计量特征和森林植被共同影响驱动,漓江流域喀斯特森林土壤碳储量的直接驱动因子为 C/P(top)、N/P(deep)和森林物种多样性(Shannon-Wiener 指数),与杨桦等<sup>[25]</sup>研究结果相似。本研究表明,森林群落物种多样性作用于植被凋落物提升土壤碳储量,由此可知,驱动土壤碳储量形成的直接因子是森林物种数量。氮储量直接驱动因子为 C/P(deep)、N/P(deep)和森林物种多样性(Shannon-Wiener 指数),N/P(deep)驱动作用最大,C/P(deep)对土壤氮储量起负驱动,说明深层土壤 C/P 不是氮积累的驱动因子,而是促进氮分解的动力,与碳储量相似,直接驱动土壤氮储量形成的直接因子是森林物种数量。本研究发现,漓江流域喀斯特森林土壤中磷储量的直接驱动因子是 C/P(deep)和 N/P(deep),证明土壤磷元素较少受到植被影响<sup>[18]</sup>,证明森林植被不会直接驱动土壤磷储量的形成。漓江流域喀斯特森林土壤磷储量的直接驱动因子是深层土壤 C/P 和 N/P,C/P(deep)驱动磷的分解,N/P(deep)驱动磷的形成,二者作用贡献相近,可以根据 C/P(deep)和 N/P(deep)预测土壤磷的损失与积累。

## 4 结论

漓江流域喀斯特森林土壤碳氮磷储量在上中下游空间分布表现为上游>下游>中游。在同流域中,土壤碳氮磷基于土层的垂直分布,碳元素和氮元素含量均表现为表层土壤高于深层,磷元素在垂直坡面分布中表现为均匀分布。

漓江流域喀斯特森林土壤中,化学计量特征与森林群落物种多样性对土壤碳氮磷储量的形成和分解起重要影响;漓江流域喀斯特森林土壤化学计量特征是驱动土壤碳氮磷储量分布的直接驱动因子,且深层土壤化学计量特征是最重要的直接驱动因子,其次,森林物种多样性对于土壤养分的固定和输入起到重要作用,直接影响并驱动土壤碳氮磷储量分布格局的形成,磷储量的形成不受森林植被状况的影响驱动。提倡在漓江流域建立森林物种多样性保护机制,通过提升流域森林的森林物种多样性,改善流域森林土壤蓄水保肥功能,保护漓江流域脆弱的喀斯特森林生态系统。

#### 参考文献:

- [1] Elser J J, Fagan W F, Denno R F, et al. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs[J]. *Nature*, 2000, 408(6812): 578-580.
- [2] Finn D, Page K, Catton K, et al. Ecological stoichiometry

controls the transformation and retention of plant-derived organic matter to humus in response to nitrogen fertilisation [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 99: 117-127.

- [3] Hu Y F, Shu X Y, He J A, et al. Storage of C, N, and P affected by afforestation with *Salix cupularis* in an alpine semiarid desert ecosystem [J]. *Land Degradation and Development*, 2018, 29(1): 188-198.
- [4] Sardans J, Peñuelas J, Estiarte M. Changes in soil enzymes related to C and N cycle and in soil C and N content under prolonged warming and drought in a Mediterranean shrubland [J]. *Applied Soil Ecology*, 2008, 39(2): 223-235.
- [5] Steffens C, Beer C, Schelfhout S, et al. Do tree species affect decadal changes in soil organic carbon and total nitrogen stocks in Danish common garden experiments? [J]. *European Journal of Soil Science*, 2022, 73(1): e13206.
- [6] 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.
- [7] 任璐璐,张炳学,韩凤朋,等.黄土高原不同年限刺槐土壤化学计量特征分析[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(2): 339-344.
- [8] Gao Y, He N P, Yu G R, et al. Long-term effects of different land use types on C, N, and P stoichiometry and storage in subtropical ecosystems: A case study in China [J]. *Ecological Engineering*, 2014, 67: 171-181.
- [9] Yang Y, Tilman D, Furey G, et al. Soil carbon sequestration accelerated by restoration of grassland biodiversity [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): e718.
- [10] Li Y F, Yang R, Hu P L, et al. Lower sensitivity of soil carbon and nitrogen to regional temperature change in Karst forests than in non-karst forests [J]. *Forests*, 2023, 14(2): e355.
- [11] 吴小飘,周忠发,朱孟,等.典型喀斯特聚集区不同地貌类型干旱时空特征[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(1): 336-347.
- [12] 鲍士旦.土壤农化分析[M]. 3版.北京:中国农业出版社, 2000.
- [13] Yang L, Wei W, Chen L D, et al. Response of deep soil moisture to land use and afforestation in the semi-arid Loess Plateau, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 475: 111-122.
- [14] 曾祉祥,雷沛,张洪,等.丹江口水库典型消落区土壤氮磷赋存形态及释放特征研究[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(5): 1383-1392.
- [15] 刘文龙,谢文霞,赵全升,等.胶州湾芦苇滩涂土壤碳、氮和磷分布及生态化学计量学特征[J]. *湿地科学*, 2014, 12(3): 362-368.
- [16] 翟政,田野,秦广震,等.杨树人工林林下植被对非生长季土壤磷素形态与转化的影响[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(12): 3778-3787.

- 2021,719(3):e032042.
- [12] Liu Z, Yu X. Coupled thermo-hydro-mechanical model for porous materials under frost action: Theory and implementation[J]. *Acta Geotechnica*, 2011, 6(2): 51-65.
- [13] 张明礼, 郭宗云, 韩晓斌, 等. 基于 COMSOL Multiphysics 数学模块的冻土水热耦合分析[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(33): 7-12.
- [14] Taylor G S, Luthin J N. A model for coupled heat and moisture transfer during soil freezing [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1978, 15(4): 548-555.
- [15] Philip J R, De Vries D A. Moisture movement in porous materials under temperature gradients [J]. *Transactions, American Geophysical Union*, 1957, 38(2): 222-232.
- [16] 白青波, 李旭, 田亚护, 等. 冻土水热耦合方程及数值模拟研究[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(增刊 2): 131-136.
- [17] 王晓刚. 冻土区桩土体系冻胀融沉特性研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2019.
- [18] 周家作, 谭龙, 韦昌富, 等. 土的冻结温度与过冷温度试验研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(3): 777-785.
- [19] 赵刚, 陶夏新, 刘兵. 原状土冻融过程中水分迁移试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2009, 31(12): 1952-1957.
- [20] 孙蕾, 王磊, 蔡冰, 等. 土壤水分测定方法简介[J]. *中国西部科技*, 2014, 13(11): 54-55.
- [21] 陶文铨. 传热学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006.
- [22] Lu N, Likos W J. 非饱和土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012: 269-287.
- [23] 徐学祖, 邓友生. 冻土中水分迁移的实验研究[M]. 北京: 科学出版社, 1991: 21-28.
- [24] 王刚, 安琳. COMSOL Multiphysics 工程实践与理论仿真: 多物理场数值分析技术[M]. 电子工业出版社, 2012: 167-194.
- [25] 顾汪明, 周金星, 王彬, 等. 冻融循环作用对黑土水稳性团聚体特征的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2020, 18(4): 45-52.
- [26] 李智明. 冻土水热力场耦合机理研究与工程应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [27] 王冲. 施用生物炭对土壤热导率的影响及机制研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.
- [28] Zhou J Z, Li D Q. Numerical analysis of coupled water, heat and stress in saturated freezing soil[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2012, 72: 43-49.
- [29] Huang X, Rudolph D L. Coupled model for water, vapour, heat, stress and strain fields in variably saturated freezing soils[J]. *Advances in Water Resources*, 2021, 154: e103945.
- [30] Lai Y M, Pei W S, Zhang M Y, et al. Study on theory model of hydro-thermal-mechanical interaction process in saturated freezing silty soil[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 78: 805-819.
- [31] 何瑞霞, 金会军, 赵淑萍, 等. 冻土导热系数研究现状及进展[J]. *冰川冻土*, 2018, 40(1): 116-126.
- [32] Bai R Q, Lai Y M, Zhang M Y, et al. Study on the coupled heat-water-vapor-mechanics process of unsaturated soils [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 585: e124784.
- [33] Li K Q, Li D Q, Liu Y. Meso-scale investigations on the effective thermal conductivity of multi-phase materials using the finite element method[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 151: e119383.
- (上接第 186 页)
- [17] 张浩, 吕茂奎, 江军, 等. 侵蚀红壤区植被恢复对表层与深层土壤有机碳矿化的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(1): 244-249, 314.
- [18] 梁振春, 李静, 吴靖, 等. 退耕还林还草对黄土高原坡地磷素的影响[J]. *南方农业学报*, 2018, 49(4): 688-694.
- [19] Liu R S, Wang D M. Soil C, N, P and K stoichiometry affected by vegetation restoration patterns in the alpine region of the Loess Plateau, Northwest China[J]. *PLoS One*, 2020, 15(11): e0241859.
- [20] 何高迅, 王越, 彭淑娟, 等. 滇中退化山地不同植被恢复下土壤碳氮磷储量与生态化学计量特征[J]. *生态学报*, 2020, 40(13): 4425-4435.
- [21] 陈晓旋, 陈淑云, 曾从盛, 等. 螃蟹对闽江河口湿地土壤碳氮磷含量及其生态化学计量学特征影响[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(3): 1179-1188.
- [22] Liang J J, Crowther T W, Picard N, et al. Positive biodiversity-productivity relationship predominant in global forests[J]. *Science*, 2016, 354(6309): 79-134.
- [23] 吴昊. 不同类型群落物种多样性指数的比较研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2015, 35(5): 84-89.
- [24] Stevens C J, Quinton J N, Bailey A P, et al. The effects of minimal tillage, contour cultivation and in-field vegetative barriers on soil erosion and phosphorus loss[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 106(1): 145-151.
- [25] 杨桦, 彭小瑜, 杨淑琪, 等. 滇南喀斯特断陷盆地土地利用方式对土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. *生态学报*, 2022, 42(17): 7105-7117.