

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2025.03.001

殷凡, 马妤昕, 陈洋溢, 等. 西南山地几种典型植被类型的土壤养分特征 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2025, 47(3): 1-9.

西南山地几种典型植被类型的土壤养分特征

殷凡, 马妤昕, 陈洋溢, 郑杰, 耿倩雯, 李昌晓

西南大学 生命科学学院/三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715

摘要: 植被对于防治土壤侵蚀、提高土壤质量、改善土壤养分等方面具有重要作用。土壤生态化学计量特征能反映土壤养分元素的循环机制。当前针对西南山地不同植被类型下土壤养分及其生态化学计量特征的相关研究较少, 以重庆市垫江县 3 种典型植被类型(针叶林、针阔混交林、阔叶林)的实生土壤为研究对象, 对表层土壤 C、N、P、K 质量分数及其生态化学计量特征进行分析, 得到以下结论: ① 土壤全 C、全 N 质量分数呈极显著正相关, 且均为针叶林最高; 土壤全 P 质量分数为针阔混交林最高, 全 K 质量分数为针阔混交林最低。② 不同植被类型下土壤 C/N、P/K 的值差异无统计学意义, 植被生长主要受到 N 和 P 的限制。③ 土壤全 C、全 N 质量分数分别与 C/N、C/P、C/K、N/P、N/K 的值存在显著正相关关系; C/N、C/P、C/K、N/P、N/K 的值之间均存在显著正相关关系, P/K 与 N/K 的值存在显著正相关关系。

关键词: 生态化学计量; 土壤养分; 植被类型

中图分类号: S154.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2025)03-0001-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Soil Nutrient Characteristics of Several Typical Vegetation Types in the Southwestern Mountainous Region

YIN Fan, MA Yuxin, CHEN Yangyi,
ZHENG Jie, GENG Qianwen, LI Changxiao

School of Life Sciences, Southwest University/Key Laboratory of Eco-Environments in the
Three Gorges Reservoir Region (Ministry of Education), Chongqing 400715, China

Abstract: Vegetation plays an important role in preventing soil erosion, improving soil quality, and enhancing soil nutrient cycling. Soil ecological stoichiometric characteristics can reflect the mechanism of soil

收稿日期: 2024-03-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(31960038); 重庆市建设科技计划项目(城科学 2022-6-3); 重庆市科技兴林项目(2021-9); 中央林业改革发展资金科技推广示范项目(渝林科推 2023-8)。

作者简介: 殷凡, 硕士研究生, 主要从事环境生态学研究。

通信作者: 李昌晓, 博士, 教授。

nutrient element cycling. However, little research is available on soil nutrient stoichiometry characteristics under different vegetation types of southwest China. In this study, three vegetation types (coniferous forest, mixed coniferous and broad-leaved forest, and broad-leaved forest) in Dianjiang County of Chongqing Municipality, were selected to analyze their soil C, N, P, K and their ecological stoichiometric characteristics. Results showed that: ① Soil total C and total N contents were significantly positively correlated, and the highest contents of both were in coniferous forests. The highest soil total P content was in mixed coniferous and broad-leaved forests, and the lowest total K content was in mixed coniferous and broad-leaved forests. ② The ratios of soil C/N and P/K under different vegetation types were significantly different, and the growth of vegetation was mainly limited by N and P. ③ There were significant positive correlations between soil total C and total N content with the ratio of C/N, C/P, C/K, N/P and N/K, respectively. There were significant positive correlations between the ratios of C/N, C/P, C/K, N/P, N/K and between the ratios of P/K and N/K.

Key words: ecological stoichiometry; soil nutrients; vegetation types

近年来,由于人为因素的强烈干扰,环境中的 N、P、C 元素通量均大幅增加^[1],N、P、C 元素间的相互关系遭到破坏,严重威胁着人类生存与社会经济的可持续发展,如何保证碳汇及各元素循环过程的稳定性已成为全球学者关注的焦点问题^[2]。森林生态系统作为全球生态系统的重要组成部分,既会因为气候变化导致其分布范围缩减、生产力降低、群落结构发生改变等问题^[3],又凭借其碳汇功能强大、碳储量丰富等特点,成为开展优化环境气候、维持全球碳循环和平衡等研究中的侧重点^[4]。在全球气候变化背景下,研究森林生态系统的最重要的问题之一是生态系统中 C、N、P 等元素的循环。在植物生长发育过程中 N 和 P 元素是十分重要的营养元素,二者同时也是限制植物生长的常见因素^[5]。N 和 P 元素在植物体内既各自发挥独特的功能,又互相制约,从而对植物产生相互作用^[6]。C 元素作为植物的结构基础,有时也会成为限制元素^[7],并且 C、N、P 等元素在生态系统中循环时又会互相作用。因此,生态系统中其他元素的循环在这种耦合关系下会对 C 循环产生影响^[8]。

对生态系统中 C、N、P 等元素之间的平衡与限制关系进行研究是分析各类植被类型养分循环机制的新兴手段^[9],有利于研究生态系统对全球变化的响应过程等问题,学者们开始用生态化学计量学对其进行深入研究^[10]。作为化学计量学的一个领域,生态化学计量学是分析生态系统中各组成部分相互作用的重要工具,用于揭示养分元素平衡与限制关系^[11],提供了研究有机体和完整生态系统的综合方法^[12]。对 C、N、P 元素质量分数特征以及它们之间的计量比关系进行研究,一方面能通过有效预测各养分元素的限制类型与阈值来指导生产实践^[13],另一方面又能通过揭示养分循环机制为资源管理提供参考依据^[14],同时能够作为揭示自然过程和人为干扰对土壤养分元素影响的指标,对生态系统的碳汇潜力及应对气候变化响应的举措等提出可行性建议^[15]。然而,我国土壤 C、N、P 元素生态化学计量特征的研究侧重点多集中于单一植被类型,对于同一区域内的不同植被类型研究较少。系统地研究不同演替阶段土壤化学计量性状及其关系有利于揭示植物群落土壤养分分布规律,对该地治理具有重要实践意义^[16]。

位于西南岩溶石漠化区的重庆市,是我国生态环境脆弱的地区之一^[17]。该地区地势复杂,山势险峻,地表支离破碎,岩石多裸露在地表,植物生存条件差,地表植被覆盖率低,加之人口负担严重,土地利用方式不合理,造成土层和土壤变薄、肥力下降、耕地减少、农作物减产、水土流失等生态环境问题逐渐加剧^[18]。为改善土壤质量、提升该地区的生态环境质量,采取森林保护和植被恢复重建的措施十分重要^[19]。因此,本研究以生态化学计量学为研究理论基础,选择处于不同演替阶段的 3 种植物群落,以探究 3 种不同植被类型下土壤 C、N、P、K 养分元素全量变化及其生态化学计量比,揭示该地区土壤养分计量特征及制衡规律,对该地区的植被恢复以及土壤质量的改善具有现实意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

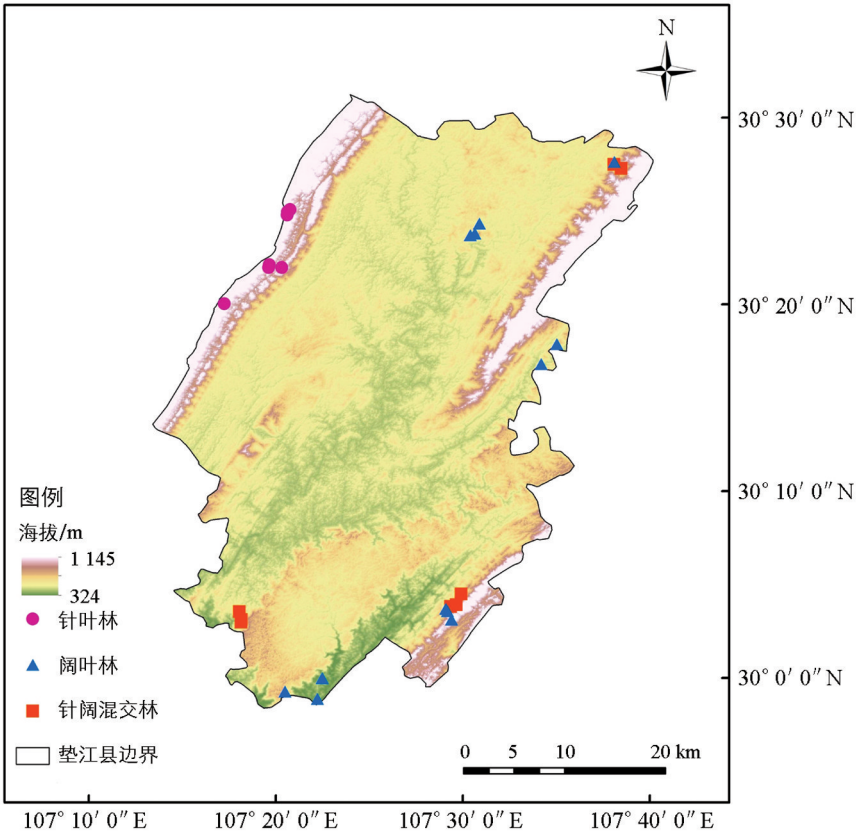
研究区设在重庆市垫江县, 地理坐标为 $29^{\circ}38' - 30^{\circ}31'N$, $107^{\circ}13' - 107^{\circ}40'E$, 地处西南丘陵地区, 海拔 320~1 183 m, 属亚热带季风性湿润气候, 雨季为每年 5—9 月, 年平均降水量 1 199 mm 左右, 年平均气温为 $17.0^{\circ}C$ 。研究区域的土壤为黄壤和紫色土, 土壤母岩包括页岩、砾岩、砂岩和石灰岩, 大部分区域坡度较大, 受人工干扰程度弱。

垫江县 3 种典型植物群落为针叶林、针阔混交林和常绿阔叶林。针叶林中最常见的群落为马尾松 (*Pinus massoniana*) 群落, 该群落类型分布广泛, 包含马尾松天然林和马尾松人工林, 郁闭度很高。混交林群落主要有以马尾松和杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 群落为主的针叶混交林、以小叶青冈 (*Cyclobalanopsis myrsinifolia*)、化香 (*Platycarya strobilacea*) 和黄连木 (*Pistacia chinensis Bunge*) 群落为主的阔叶混交林以及以马尾松与香叶树 (*Lindera communis*) 群落为主的针阔混交林等群落类型。常绿阔叶林主要有小叶青冈群落、桉树 (*Eucalyptus robusta*) 群落、油樟 (*Cinnamomum longepaniculatum*) 群落等。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集

本研究取样工作于 2021 年 9 月完成。为全面真实地代表重庆市垫江县实际情况, 在依据典型性和代表性原则的前提下, 选取研究区域内 3 种不同植被类型(阔叶林、针阔混交林、针叶林)共 10 条样线、30 个样点进行研究(图 1)。其中, 针叶林样线为明月山区, 针阔混交林样线包括包家、迎风湖和黄草山, 阔叶林样线包括檀香村、白沙镇、三溪镇和宝鼎山。对于每条样线中的同一种森林类型, 设立 3 个具有相同坡度、方向和海拔的 10 m×10 m 的样地, 并在每个样地中随机设立样方以采集调查物种信息。样地分布概况如表 1 所示。利用五点取样法采集林下表层土(0~20 cm), 混合均匀后现场编号并装入自封袋, 低温冷藏运回实验室, 用于土壤元素质量分数的测定。



审图号: 渝 S(2024)035 号
图 1 研究区域概况

表 1 研究区域样地概况

群落类型	样线	样本	经度	纬度	海拔/ m	土壤 类型	干扰 程度	建群种
针叶林	明月山 1(MYS1)	3	107°20'E	30°24'—30°25'N	853~880	黄壤	弱	马尾松
	明月山 2(MYS2)	3	107°19'—107°20'E	30°21'—30°22'N	680~700	紫色土	弱	
	明月山 3(MYS3)	3	107°17'15"E	30°20'3"N	844	黄壤	弱	
针阔混交林	包家(BJ)	3	107°18'E	30°2'—30°3'N	350~450	紫色土	弱	马尾松、香叶树
	迎风湖(YFH)	3	107°38'E	30°27'N	495~540	黄壤	无	
	黄草山(HCS)	3	107°29'E	30°3'—30°4'N	490~530	紫色土	中度	
阔叶林	檀香村(TXC)	3	107°30'E	30°23'—30°24'N	419~467	黄壤	中度	小叶青冈、桉树、油樟
	白沙镇(BSZ)	3	107°22'—107°23'E	29°58'—29°59'N	290	黄壤	中度	
	三溪镇(SXZ)	3	107°29'E	30°3'N	449	黄壤	弱	
	宝鼎山(BDS)	3	107°34'—107°38'E	30°16'—30°17'N	648~665	黄壤	弱	

1.2.2 样品测试

参考《土壤分析技术规范(第二版)》，采用环刀法测定土壤容重(BD)；采用水浸提液电位测定法(水土比为 1：5)测定土壤 pH 值；采用元素分析仪(elementar vario EL cube，德国)测定全氮(N)和全碳(C)；采用电感耦合等离子体发射光谱法测定全磷(P)和全钾(K)。

1.2.3 数据分析

测定并记录 C、N、P、K 元素的质量分数，质量分数比用 C/N、C/P、C/K、N/P、N/K、P/K 表示。采用 SPSS 22.0 软件对数据进行统计分析，通过单因素方差分析(One-way ANOVA)并进行 Tukey 检验，显著性水平设为 0.05，用以比较针叶林、针阔混交林、阔叶林 3 种植被类型下土壤养分特征及其土壤化学计量之间的差异。采用 Perason 相关系数分析土壤养分特征以及生态化学计量比的相关性。原始数据的整理工作通过 Excel 2019 完成，所有图片均用 Origin 2021 软件制作。

2 结果与分析

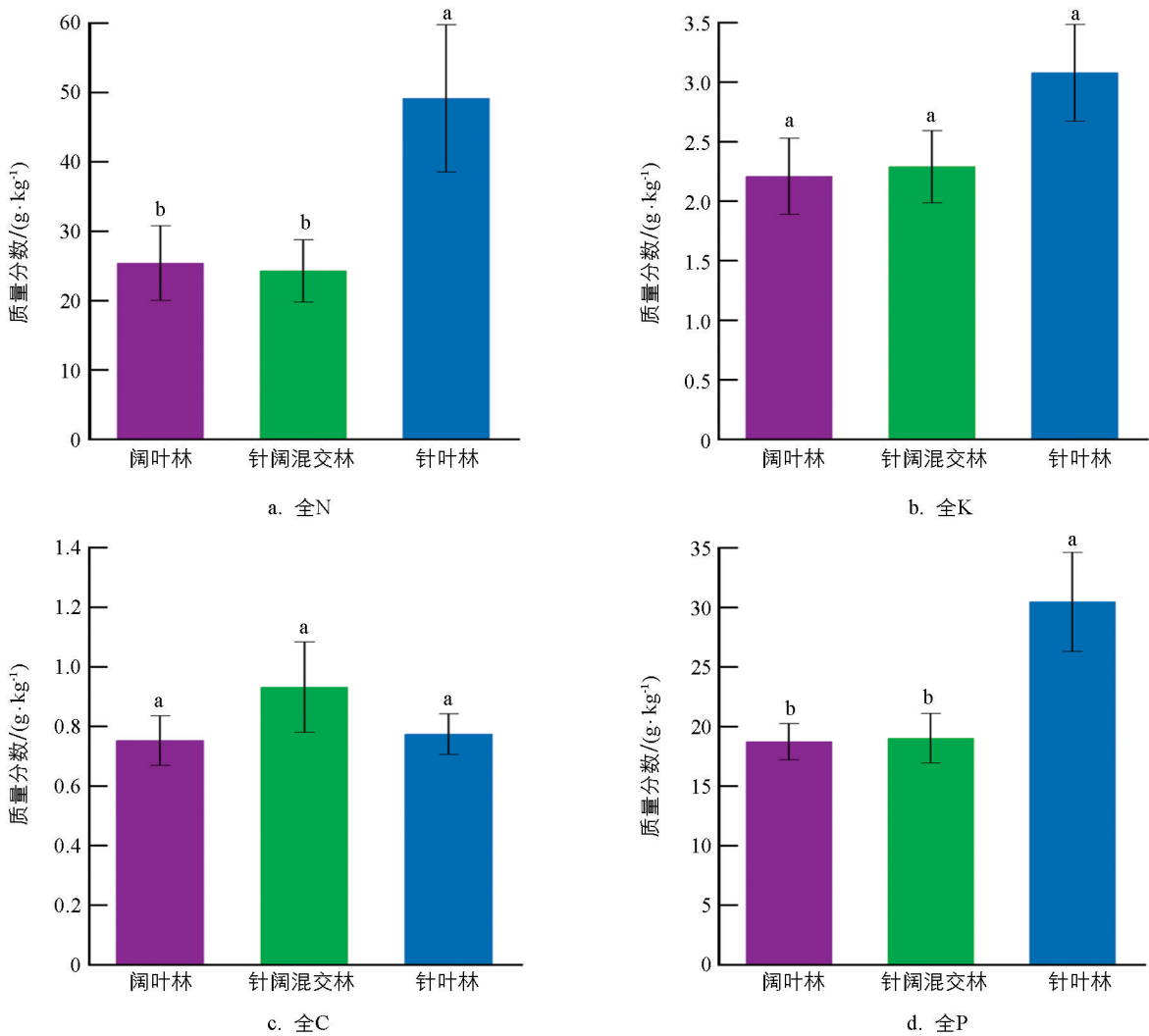
2.1 不同植被类型下土壤养分特征

阔叶林、针阔混交林和针叶林 3 种植被类型下表层土壤全 N 质量分数的平均值分别为 25.39、24.28、49.13 g/kg，表现为针叶林最高，针阔混交林最低；土壤全 C 质量分数的平均值分别为 0.75、0.93、0.77 g/kg，表现为针阔混交林最高，阔叶林最低；土壤全 P 和全 K 质量分数分布趋势相同，从高到低分别为针叶林、针阔混交林、阔叶林(图 2)。

对不同植被类型下的土壤 C、N、P、K 元素质量分数进行比较(图 2)，发现阔叶林、针阔混交林、针叶林 3 种植被类型下表层土壤全 K 及全 C 质量分数差异无统计学意义($p>0.05$)，土壤全 N 及全 P 质量分数在总体上差异有统计学意义($p<0.05$)，具体表现为针叶林显著高于阔叶林和针阔混交林($p<0.05$)，而阔叶林和针阔混交林之间差异无统计学意义($p>0.05$)。

2.2 不同植被类型下土壤生态化学计量特征

如图 3 所示，随着演替的进行，不同植被类型下土壤 C、N、P、K 化学计量特征 C/N、C/P、C/K、N/P、N/K、P/K 值具有不同的变化规律，其间差异也不同。对不同植被类型下的土壤生态化学计量特征进行比较发现(图 3)，土壤 C/N 在不同植被类型间表现为针叶林显著高于阔叶林($p<0.05$)，而针阔混交林与针叶林、阔叶林之间差异均无统计学意义($p>0.05$)；土壤 P/K 在不同植被类型间表现为针阔混交林显著高于针叶林和阔叶林($p<0.05$)，而针叶林与阔叶林间差异无统计学意义($p>0.05$)。土壤 C/P、C/K、N/P、N/K 值在不同植被类型间均表现为差异无统计学意义($p>0.05$)。

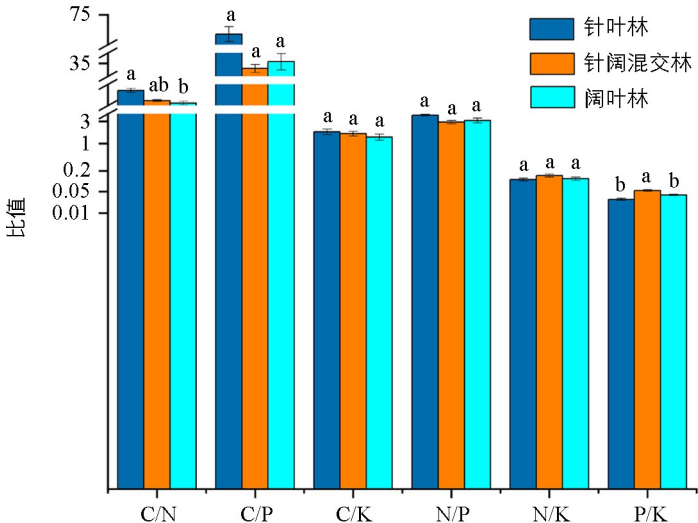


柱状图显示平均值±标准差, 柱状图中不同小写字母代表不同植被类型间差异具有统计学意义($p < 0.05$)。

图 2 不同植被类型下层土壤全 C、全 N、全 P、全 K 质量分数

2.3 土壤养分元素全量及其计量比的相关性

如图 4 所示, 土壤 C、N、P、K 4 种养分元素质量分数及其之间生态化学计量比的相关性受到植被类型影响而存在差异。土壤全 C 与全 N 质量分数在针叶林、针阔混交林、阔叶林以及总体中均具有极显著正相关关系 ($p < 0.01$), 说明研究区内植被下土壤全 C 与全 N 耦合程度非常高; 全 P 与全 C、全 N 之间仅在针叶林中表现为显著正相关 ($p < 0.05$); 全 K 与全 P 仅在阔叶林中有显著正相关特征 ($p < 0.05$)。土壤全 C、全 N 质量分数在阔叶林中均与 C/N、C/P、C/K、N/P、N/K 值极显著正相关 ($p < 0.01$); 在针叶林中, 全 N 与 C/N、C/K 值相关性无统计学意义 ($p >$

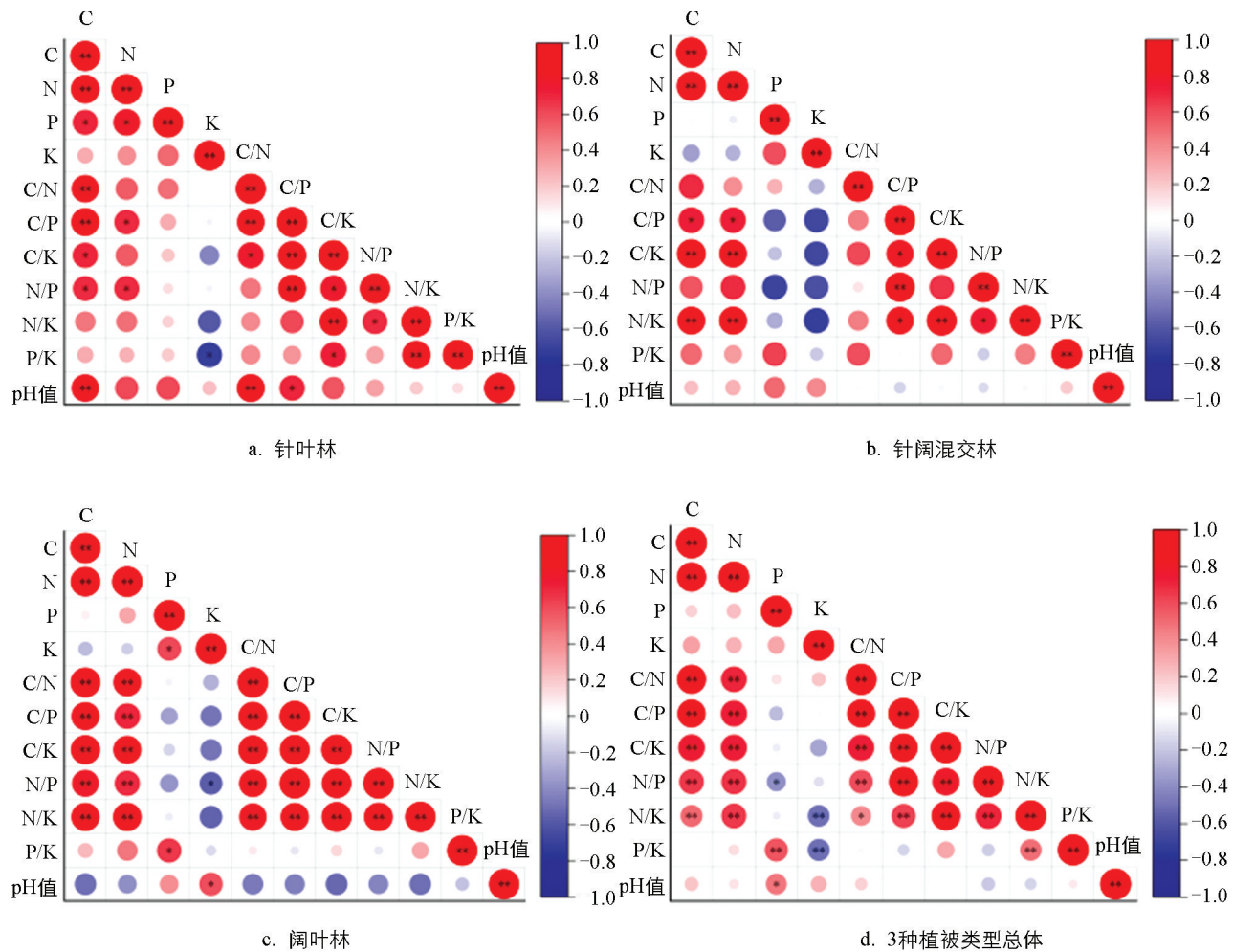


柱状图显示平均值±标准差, 不同小写字母代表不同植被类型间差异具有统计学意义($p < 0.05$)。

图 3 土壤生态化学计量特征

0.05); 在针阔混交林中, 全 C、全 N 与 C/N、N/P 相关性无统计学意义($p>0.05$)。土壤全 P 仅在阔叶林中与 P/K 显著正相关($p<0.05$); 土壤全 K 在针叶林中与 P/K 显著负相关, 在阔叶林中与 N/P 显著负相关($p<0.05$)。C/N、C/P、C/K、N/P、N/K 值在阔叶林中两两之间均呈现极显著正相关关系($p<0.01$), 而在针叶林中 C/N 与 N/P、N/K, C/P 与 N/K 值相关性均无统计学意义($p>0.05$), 针阔混交林中 C/N 与 C/P、C/K、N/P、N/K 值以及 C/K 与 N/P 值相关性均无统计学意义($p>0.05$)。

对 3 种植被类型总体进行分析表明, 全 N、全 P、全 K 质量分数两两之间均没有显著相关特征($p>0.05$), 全 C、全 N 均与 C/N、C/P、C/K、N/P、N/K 值之间具有极显著正相关关系($p<0.01$), 全 P、全 K 与 C/N、C/P、C/K 的相关性均无统计学意义($p>0.05$), C/N、C/P、C/K、N/P 值两两之间均具有极显著正相关特征($p<0.05$), N/K 与 C/N 存在显著正相关($p<0.05$), 并与 C/P、C/K、N/P 值之间均存在极显著的正相关($p<0.01$)。



* * 表示极有统计学意义($p<0.01$), * 表示有统计学意义($p<0.05$)。

图 4 土壤养分含量与化学计量比之间的相关性分析

3 讨论与结论

3.1 讨论

3.1.1 不同植被类型对土壤养分特征的影响

植物群落的不同组成、每个植物群落的不同根系活动度以及植物体对土壤养分的不同吸收都会导致土壤的不同养分特性^[20]。垫江县 3 种植被类型下表层土全 C 及全 N 平均质量分数均处于我国陆地土壤的中上水平^[21], 与西南其他地区土壤研究结果一致^[22], 这表明研究区土壤的 C、N 元素储积能力均较强。这可能是由于研究区降雨量远高于我国降雨量平均值, 降雨多会加强有机质的矿化速率^[23]。同时, 研究区降雨

类型主要为酸雨,由于酸雨的侵蚀而产生的凋落物相较于正常枯萎的凋落物养分元素质量分数更高,增加了土壤中 C 元素的输入量,且酸雨中的 NO_3^- 、 NH_4^+ 进入土壤后,增加了 N 元素的输入量^[24]。随着演替的进行,针叶林、针阔混交林和阔叶林的土壤下全 C、全 N 质量分数呈现递减趋势,这与胡宗达等^[25]对川西亚高山不同演替阶段天然次生林土壤碳氮质量分数研究结果相似。这是由于处于演替初期的针叶林凋落物量较少,随着针叶林向阔叶林演替的过程中,乔木的种类和数量均增多,土壤凋落物输入量逐渐增加,土壤原有有机质分解速率加快,同时植物根系数目增多促使土壤有机质分解^[26],导致针阔混交林、阔叶林的 C、N 质量分数降低。随着演替过程中土壤 C、N 质量分数的降低,土壤养分的调节功能下降,群落可吸收有机质减少,生物化学功能受到影响,可能会导致研究区内森林群落趋向于耐贫瘠和耐干旱的类型发展^[27],同时使大气中 CO_2 排放量增多,对改善全球变暖产生负面影响。

土壤表层的 P 是在基岩风化、成土过程中由土壤表层生物聚集或动植物残体通过表聚作用形成的^[28]。土壤 P 质量分数会受到土壤母质、气候因素、地形等地理因子的影响^[29]。土壤 K 的来源与 P 相似,并且也对土壤母质有较强的继承性,因此二者的空间异质性较小^[30]。3 种植被类型中针阔混交林下土壤全 P 质量分数最高,其次是针叶林,原因可能是植被所在土壤类型不同以及受到人类活动的影响不同。针阔混交林所在土壤类型主要为紫色土,而针叶林、阔叶林所在土壤类型主要为黄壤,紫色土相较于黄壤的黏粒质量分数高^[31],对土壤中 P 的吸附作用更好。针叶林受人类干扰程度相较于阔叶林小,人类干扰的加剧会导致群落内优势植被类型遭到破坏,使阔叶林 P 质量分数降低^[32]。

土壤全 C 质量分数与全 N 质量分数呈极显著正相关关系($p < 0.01$),说明土壤全 C 与全 N 之间存在耦合关系,这与前人研究结果一致^[33-34]。土壤全 C 和全 N 的高度相关性说明土壤中 C、N 对所处地表植物群落以及环境因子变化的响应趋于一致,表明不同植被类型下 C/N 处于稳定,空间异质性小^[35]。

3.1.2 不同植被类型对土壤生态化学计量特征的影响

土壤 C:N:P 值作为反映土壤有机质含量和土壤组成的重要指标,能够反映土壤的营养平衡,是衡量土壤 C、N、P 质量的主要参考依据^[36]。土壤 C/N 与有机质分解速率为反比关系,土壤 C/N 越小,有机质分解速率越快^[37]。土壤 C/N 的值沿着针叶林、针阔混交林、阔叶林呈现下降的趋势,这可能是由于随着演替的进行,群落生物多样性增强,土壤凋落物输入量增多,土壤中有有机质矿化作用增强,氮素积累过多。土壤 C/P 常作为土壤中微生物对 P 的分解释放和从环境中矿化贮存能力的指标,反映了土壤中 P 的矿化情况^[38]。垫江县 3 种植被类型下土壤 C/P 的值明显低于我国(5.7)及全球(72)陆地表层土壤的平均水平^[39],说明该地区土壤中微生物具有较大的释放 P 的潜力,能够提升土壤有效 P 的质量分数^[40],同时也反映出该地区土壤 P 矿化水平较低,供给植物吸收的 P 质量分数较少,植物的生存压力较大^[41]。

土壤 N/P 常用以判断土壤中 N、P 的饱和情况,也是衡量土壤养分限制的重要指标^[42]。相关性表明,总体土壤 N/P 与土壤全 N 之间的正相关关系在 0.01 水平上有统计学意义,而与全 P 之间的负相关关系仅在 0.05 水平上有统计学意义,说明现阶段随着演替的进行,植被的生长受到 N 的限制作用更大^[37]。另外,本研究结果表明土壤 C/P、C/K、N/P、N/K 的值在 3 种群落类型间差异均无统计学意义,这可能是因为土壤中 P、K 质量分数比较稳定。土壤 C/K、N/K 的值与土壤全 C、全 N 均呈极显著正相关关系,说明 C/K、N/K 的值在不同演替阶段的变化主要受全 C 和全 N 的影响,这与吴鹏等^[43]的研究结果相似。

本研究对垫江县针叶林、针阔混交林、阔叶林下土壤表层养分全量及生态化学计量特征的分析,对于该地区的植被恢复等具有一定参考价值。同时,生态化学计量比是一个庞大又复杂的研究内容,仅对表土层养分全量的探究不能全面说明垫江县不同群落类型下土壤生态化学计量特征,后续研究还应综合有效养分、不同土层、植物器官、植被凋落物、土壤微生物等众多因素进行。

3.2 结论

本研究分析了垫江县针叶林、针阔混交林和阔叶林 3 种植被类型下土壤的 4 种养分元素全量及其生态化学计量特征,得到以下结论:

(1) 不同植被类型下土壤全 C 和全 K 质量分数差异有统计学意义,全 N 和全 K 差异无统计学意义。土壤全 C 与全 N 耦合程度极高,随着演替进程在针叶林、针阔混交林、阔叶林中均逐渐降低,具有一致性。

(2) 不同植被类型下土壤 C/N、P/K 的值差异有统计学意义,C/P、C/K、N/P、N/K 的值差异无统计

学意义。植被生长主要受到 N 和 P 的限制。

(3) 土壤养分质量分数之间具有耦合关系。土壤全 C、全 N 质量分数与 C/N、C/P、C/K、N/P、N/K 的均值均存在显著正相关关系; C/N、C/P、C/K、N/P、N/K 的值之间均存在显著正相关关系, P/K 与 N/K 存在显著正相关关系。

参考文献:

- [1] 曾昭霞, 王克林, 刘孝利, 等. 桂西北喀斯特森林植物—凋落物—土壤生态化学计量特征 [J]. 植物生态学报, 2015, 39(7): 682-693.
- [2] 刘一麟, 任悦, 高广磊, 等. 樟子松林根际与非根际土壤碳氮磷化学计量特征 [J]. 应用生态学报, 2024, 35(3): 615-621.
- [3] 徐来仙, 何友均, 艾训儒, 等. 基于森林生态系统服务权衡与协同的森林可持续管理 [J]. 生态学报, 2024, 44(4): 1347-1359.
- [4] THOMSON A M, CÉSAR IZAURRALDE R, SMITH S J, et al. Integrated Estimates of Global Terrestrial Carbon Sequestration [J]. Global Environmental Change, 2008, 18(1): 192-203.
- [5] CHAPINI, VITOUSEK P M, VAN CLEVE K. The Nature of Nutrient Limitation in Plant Communities [J]. American Naturalist, 1986, 127(1): 48-58.
- [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] VITOUSEK P M, PORDER S, HOULTON B Z, et al. Terrestrial Phosphorus Limitation: Mechanisms, Implications, and Nitrogen - Phosphorus Interactions [J]. Ecological Applications, 2010, 20(1): 5-15.
- [8] 谭雪, 李留彬, 向国伟, 等. 三峡库区消落带落羽杉细根碳氮磷化学计量特征及其与土壤养分的关系研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(7): 14-23.
- [9] JIAO F, WEN Z M, AN S S, et al. Successional Changes in Soil Stoichiometry after Land Abandonment in Loess Plateau, China [J]. Ecological Engineering, 2013, 58: 249-254.
- [10] 杜家颖, 王霖娇, 盛茂银, 等. 喀斯特高原峡谷石漠化生态系统土壤 C、N、P 生态化学计量学特征 [J]. 四川农业大学学报, 2017, 35(1): 45-51.
- [11] ELSER J J. Ecological Stoichiometry: From Sea to Lake to Land [J]. Trends in Ecology and Evolution, 2000, 15(10): 393-394.
- [12] 贺金生, 韩兴国. 生态化学计量学: 探索从个体到生态系统的统一化理论 [J]. 植物生态学报, 2010, 34(1): 2-6.
- [13] 李欢, 魏雅丽, 闫帮国, 等. 元谋干热河谷沟蚀地区植被恢复对土壤养分和酶活性的影响 [J]. 土壤通报, 2020, 51(5): 1118-1126.
- [14] 马心雨, 田雪, 过怡婷, 等. 中国西南地区植被恢复对土壤化学计量特征的影响——基于 Meta 分析 [J]. 应用与环境生物学报, 2023, 29(5): 1058-1067.
- [15] 周正虎, 王传宽, 张全智. 土地利用变化对东北温带幼龄林土壤碳氮磷含量及其化学计量特征的影响 [J]. 生态学报, 2015, 35(20): 6694-6702.
- [16] 梁珂, 何丙辉. 紫色土区典型土地利用方式下土壤碳、氮、磷生态化学计量特征分析 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(10): 29-36.
- [17] 陈云, 李玉强, 王旭洋, 等. 中国典型生态脆弱区生态化学计量学研究进展 [J]. 生态学报, 2021, 41(10): 4213-4225.
- [18] 盘礼东, 李瑞, 张玉珊, 等. 西南喀斯特地区坡耕地秸秆覆盖对土壤生态化学计量特征及产量的影响 [J]. 生态学报, 2022, 42(11): 4428-4438.
- [19] 刘庆, 庞学勇, 向双, 等. 西南高山亚高山不同演替阶段退化森林生态系统的恢复重建 [J]. 应用与环境生物学报, 2021, 27(3): 513-518.
- [20] 魏孝荣, 邵明安. 黄土高原沟壑区小流域坡地土壤养分分布特征 [J]. 生态学报, 2007, 27(2): 603-612.
- [21] TIAN H Q, CHEN G S, 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.
- [22] 张耀华, 王勇, 张荣飞, 等. 喀斯特地区不同退耕类型对土壤碳氮的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2017, 39(4): 95-100.
- [23] 于耀泓, 刘悦, 顾晓娟, 等. 2 种人工林对土壤碳氮磷化学计量特征及阳离子交换量的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(6): 168-177.

[24] 刘旭阳,安婉丽,金强,等. 模拟酸雨对福州平原水稻田土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量学特征影响 [J]. 水土保持学报, 2019, 33(3): 199-206.

[25] 胡宗达,刘世荣,罗明霞,等. 川西亚高山不同演替阶段天然次生林土壤碳氮含量及酶活性特征 [J]. 植物生态学报, 2020, 44(9): 973-985.

[26] 苏立城,陈晓珊,罗志忠,等. 氮添加对森林土壤有机碳库固存及 CO₂ 排放的影响研究进展 [J]. 生态学报, 2024, 44(7): 2717-2733.

[27] 魏晶,姜萍,于德永,等. 长白山高山冻原生态系统植被生物量分布和养分生物循环研究 [J]. 2007, 18(4): 271-278, 328-329.

[28] 方晰,陈金磊,王留芳,等. 亚热带森林土壤磷有效性及其影响因素的研究进展 [J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(12): 1-12.

[29] ADAMCZYK B, SIETIÖ O M, STRAKOVÁ P, et al. Plant Roots Increase both Decomposition and Stable Organic Matter Formation in Boreal Forest Soil [J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 3982.

[30] 舒向阳,胡玉福,蒋双龙,等. 川西北草地沙化对土壤颗粒组成和土壤磷钾养分的影响 [J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(8): 173-179.

[31] 袁红,傅瓦利,张洪,等. 农林利用方式下坡地紫色土黄壤基本性质研究 [J]. 西南农业大学学报(自然科学版), 2006, 28(1): 157-160.

[32] 王维奇,曾从盛,钟春棋,等. 人类干扰对闽江河口湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量学特征的影响 [J]. 环境科学, 2010, 31(10): 2411-2416.

[33] 陶晓,俞元春,张云彬,等. 城市森林土壤碳氮磷含量及其生态化学计量特征 [J]. 生态环境学报, 2020, 29(1): 88-96.

[34] 张富荣,柳洋,史常明,等. 不同恢复年限刺槐林土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量特征 [J]. 生态环境学报, 2021, 30(3): 485-491.

[35] 曾全超,李鑫,董扬红,等. 黄土高原延河流域不同植被类型下土壤生态化学计量学特征 [J]. 自然资源学报, 2016, 31(11): 1881-1891.

[36] 张珂,苏永中,王婷,等. 荒漠绿洲区不同种植年限人工梭梭林土壤化学计量特征 [J]. 生态学报, 2016, 36(11): 3235-3243.

[37] 朱平宗,张光辉,杨文利,等. 红壤区林地浅沟不同植被类型土壤生态化学计量特征 [J]. 水土保持研究, 2020, 27(6): 60-65.

[38] 刘帅楠,李广,杨传杰,等. 植被类型对黄土丘陵区土壤碳氮磷化学计量特征的季节变异 [J]. 水土保持学报, 2021, 35(6): 343-349, 360.

[39] 曾冬萍,蒋利玲,曾从盛,等. 生态化学计量学特征及其应用研究进展 [J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5484-5492.

[40] 王亚东,魏江生,周梅,等. 大兴安岭南段杨桦次生林土壤化学计量特征 [J]. 土壤通报, 2020, 51(5): 1056-1064.

[41] 喻阳华,钟欣平,郑维,等. 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 [J]. 生态学报, 2021, 41(6): 2408-2417.

[42] 黄智军,刘青青,颜耀,等. 不同郁闭度马尾松林土壤元素生态化学计量特征 [J]. 森林与环境学报, 2021, 41(5): 456-463.

[43] 吴鹏,崔迎春,赵文君,等. 喀斯特森林植被自然恢复过程中土壤化学计量特征 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(3): 80-92.

责任编辑 苏荣艳
包颖