

广西大瑶山国家级自然保护区不同海拔森林土壤碳氮磷储量及生态化学计量比特征

张凌睿¹, 黄远泽¹, 胡彬¹, 蒙检^{2,3}, 卢峰^{2,4},
徐武¹, 张敬¹, 金恒⁵, 覃林¹

(1. 广西大学 林学院广西森林生态与保育重点实验室, 南宁 530004;

2. 广西壮族自治区森林资源与生态环境监测中心, 南宁 520020; 3. 来宾金秀大瑶山森林生态系统

广西野外科学观测研究站, 广西 来宾 546100; 4. 广西大瑶山森林生态系统定位观测研究站,

广西 来宾 546100; 5. 广西大瑶山国家级自然保护区管理局, 广西 金秀 545700)

摘要: [目的] 探究森林土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)储量及其生态化学计量比在南亚热带与中亚热带过渡区海拔分异规律及其驱动机制, 为山地生态系统养分循环响应提供关键科学依据。 [方法] 以广西大瑶山国家级自然保护区低海拔(600 m)常绿阔叶林、中海拔(1 430 m)针阔混交林和高海拔(1 750 m)高山矮林为对象, 测定和计算土壤(0—10 cm)的各项土壤理化性质和C、N、P储量及其生态化学计量比。 [结果] 土壤有机碳储量(C_s)呈U型分布(中海拔最低, 24.75 t/hm²), 氮储量(N_s)随海拔显著递增(从1.15至4.69 t/hm²), 磷储量(P_s)无显著差异(0.09~0.11 t/hm²)。随机森林模型揭示 C_s 受有机碳(SOC)和可溶性有机碳(DOC)主导, N_s 由全氮(TN)驱动, P_s 受土壤容重(SBD)和全磷(TP)协同调控。另外, 土壤C/N随海拔降低(从37.78至8.13), 指示中高海拔氮矿化能力增强; C/P呈U型分布(252~425), 反映磷有效性整体较低(均大于200); N/P随海拔阶梯式上升(从11.04至55.20), 表明磷限制强度随海拔剧增。Mantel检验与随机森林模型证实, TN是C/N和N/P的主控因子, 而C/P受SOC、DOC和TP共同调控。 [结论] 磷有效性是限制亚热带山地森林生产力的关键因子, 该气候过渡带森林土壤C、N、P储量及生态化学计量比的海拔格局受多重因子非线性互作驱动, 气候带背景对土壤养分海拔分布格局具有重要的调控作用。

关键词: 森林土壤; 海拔; 碳氮磷储量; 生态化学计量比; 广西大瑶山国家自然保护区

中图分类号: S714.7; S718.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)03-0191-08

Characteristics of soil carbon, nitrogen, and phosphorus stocks and ecological stoichiometric ratios in forests at different altitudes in Guangxi Dayaoshan National Nature Reserve

Zhang Lingrui¹, Huang Yuanze¹, Hu Bin¹, Meng Jian^{2,3}, Lu Feng^{2,4},
Xu Wu¹, Zhang Jing¹, Jin Heng⁵, Qin Lin¹

(1. Guangxi Key Laboratory of Forest Ecology and Conservation, College of Forestry, Guangxi University,

Nanning 530004, China; 2. Forest Resources and Ecological Environment Monitoring Center of Guangxi Zhuang Autonomous

Region, Nanning 520020, China; 3. Laibin Jinxiu Dayaoshan Forest Ecosystem Observation and Research Station of Guangxi,

Laibin, Guangxi 546100, China; 4. Guangxi Dayaoshan Forest Ecosystem Observation and Research Station, Laibin, Guangxi

546100, China; 5. Management Office for Dayaoshan National Nature Reserve of Guangxi, Jinxiu, Guangxi 545700, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the altitudinal differentiation patterns of forest soil carbon

收稿日期: 2025-07-27

修回日期: 2025-08-06

接受日期: 2025-09-14

资助项目: 广西高校大学生创新训练计划项目(202310593540); 国家自然科学基金项目(31560109)

第一作者: 张凌睿(2002—), 男, 贵州省毕节市人, 学士, 主要研究方向为森林土壤生态。E-mail: 3231124169@qq.com

通信作者: 覃林(1967—), 男, 湖北宣恩人, 博士, 副教授, 主要从事森林生态研究。E-mail: nilniq@gxu.edu.cn.

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

(C), nitrogen (N), and phosphorus (P) stocks and their ecological stoichiometric ratios (C/N, C/P, N/P) in the transition zone between the southern subtropical and central subtropical regions, and to elucidate their driving mechanisms. These findings provide crucial scientific evidence for understanding nutrient cycling responses in mountain ecosystems. [Methods] This study focused on three forest types in the Guangxi Dayaoshan National Nature Reserve: low-altitude (600 m) evergreen broadleaf forests (EBF), mid-altitude (1 430 m) mixed coniferous-broadleaf forests (MCF), and high-altitude (1 750 m) alpine dwarf forests (ADF). Soil physicochemical properties, C, N, and P stocks, and their ecological stoichiometric ratios in the surface soil layer (0–10 cm) were measured and calculated. [Results] Soil organic carbon stock (C_s) exhibited a U-shaped pattern with altitude, reaching its lowest value (24.75 t/hm²) at MCF. Soil nitrogen stock (N_s) significantly increased with rising altitude (from 1.15 to 4.69 t/hm²), while soil phosphorus stock (P_s) showed no significant differences across altitudes (range: 0.09~0.11 t/hm²). Random forest modeling revealed that C_s was primarily driven by soil organic carbon (SOC) and dissolved organic carbon (DOC) content. N_s was predominantly controlled by total nitrogen (TN) content, while P_s was co-regulated by soil bulk density (SBD) and total phosphorus (TP) content. Additionally, soil C/N ratio decreased significantly with altitude (from 37.78 to 8.13), indicating enhanced nitrogen mineralization potential at mid- and high-altitudes. Soil C/P ratio displayed a U-shaped pattern (range: 252~425), reflecting relatively low phosphorus availability overall (all forests > 200). Soil N/P ratio increased stepwise with altitude (from 11.04 to 55.20), demonstrating a sharp intensification of phosphorus limitation with higher altitudes. Mantel tests and random forest modeling confirmed that TN was the dominant factor controlling both C/N and N/P ratios, while the C/P ratio was jointly regulated by SOC, DOC, and TP content. [Conclusion] Phosphorus availability is a key factor limiting the productivity of subtropical montane forests. The altitudinal patterns of soil C, N, and P stocks and their ecological stoichiometric ratios in these transitional climate zone forests are driven by nonlinear interactions among multiple factors, with the climatic zone context playing a critical regulatory role in shaping the altitudinal distribution patterns of soil nutrients.

Keywords: forest soil; altitude; carbon, nitrogen, and phosphorus stocks; ecological stoichiometric ratios; Guangxi Dayaoshan National Nature Reserve

土壤是陆地生态系统中物质循环、能量流动和信息交换的核心场所^[1]。其中,土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)储量是评估森林生态系统服务功能的关键指标^[2]。土壤P储量的维持主要依赖于岩石风化和大气干湿沉降^[3],其动态过程受到气候、地形地貌、土壤发育阶段、微生物活动等多重因子的综合调控,深刻影响着生态系统P库的输入与输出平衡^[4]。同时,土壤的生物化学过程及植物自身的遗传特性共同调节着P在土壤与植被间的转移效率^[5]。海拔作为山地生态系统的关键地形因子,通过显著改变局地微气候(如温度、湿度),直接或间接地调控植物生长、土壤物理性质(通气透水性)、养分供应状况^[6]。这种调控作用深刻影响着土壤C, N, P养分库的积累与转化过程。海拔梯度对土壤C, N储量影响的研究结论尚存分歧。部分研究表明森林土壤C, N储量随海拔升高呈线性增加趋势^[7];然而,熊小玲等^[8]在武夷山国家公园的观测则发现其沿海拔并非线性增长;亦有研究发现土壤C储量随海拔升高呈现减少趋势^[9]。

上述研究结果的不一致性表明不同气候带森林土壤C, N储量沿海拔梯度的变化模式存在显著差异。此外,关于不同气候带森林土壤P储量如何响应海拔变化的系统性研究,目前仍非常缺乏。

土壤C, N, P的生态化学计量特征是揭示土壤养分循环过程、养分有效性与平衡机制的关键指标^[10],对于评估不同森林类型间土壤养分供给能力的差异具有重要作用。具体而言,土壤C/N是表征土壤氮矿化能力和有机碳分解速率的核心指标^[11]; C/P常用于评估微生物矿化有机质释放磷素或从环境中吸收固持磷素的潜力, N/P是诊断生态系统养分限制类型(如氮限制或磷限制)的有效预测因子^[12]。因此,研究特定区域内不同海拔梯度下典型森林类型的土壤C, N生态化学计量特征,对于揭示区域森林土壤的养分供给能力及其限制状况,深入理解该区域森林生态系统对气候变化的响应与适应机制具有重要的理论和实践意义。

广西大瑶山国家级自然保护区地处北回归线北

侧,是南亚热带向中亚热带气候的典型过渡区域。该区域地形复杂,海拔高差显著,孕育明显的植被垂直分布带谱。目前,针对该保护区的研究主要集中于森林涵养水源效益^[13]、蕨类植物区系特征^[14]、森林群落植物多样性^[15]和不同海拔森林土壤有机碳矿化特征^[16]。然而,关于该区域不同海拔典型森林类型(如常绿阔叶林、针阔混交林、高山矮林)土壤C, N, P储量及其生态化学计量比的空间分布特征,尚缺乏研究。鉴于此,本研究以保护区内3个典型海拔梯度(低、中、高)的森林类型(常绿阔叶林、针阔混交林、高山矮林)为对象,系统探究:(1)土壤C, N, P储量的变化特征;(2)土壤C/N, C/P, N/P等生态化学计量比的变化特征;(3)影响上述特征的关键环境因子。本研究旨在填补该区域在土壤养分储量与化学计量特征海拔格局方面的知识空白。研究结果将为深入理解全球变化背景下,气候过渡带山地森林土壤C, N, P循环的响应特征及其区域差异提供重要的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究地及森林土壤样品采集

研究区域位于广西大瑶山国家级自然保护区(110°01′—110°22′E, 23°52′—24°22′N)。该保护区地处广西中东部金秀、荔浦和蒙山三县交界,紧邻北回归线北侧,地形复杂,最高峰圣堂山海拔达1 979 m,区域内相对高差达1 600 m。该区域气候属南亚热带向中亚热带过渡的季风气候,具有典型的亚热带山地气候特征,年均气温、降水量和相对湿度分别为17.0℃, 1 824.0 mm(降水主要集中于4—10月)和83%,地带性土壤以山地黄壤为主^[17]。

野外采样于2023年10月10—18日在广西大瑶山国家级自然保护区内进行。根据海拔梯度,典型选取3个代表性森林类型作为研究样地:低海拔常绿阔叶林(海拔660 m;优势树种栲树(*Castanopsis fargesii*)和铁锥栲(*C. lamontii*))、中海拔针阔混交林(1 430 m;长苞铁杉(*Tsuga longibracteata*)和金毛柯(*Lithocarpus chrysocomus*)和高海拔高山矮林(1 750 m;红岩杜鹃(*Rhododendron haofui*)和变色杜鹃(*R. versicolor*))。在每个森林类型样地内,随机布设5个10 m×10 m的调查样方,且相邻样方间距至少20 m。在每个样方内,随机选取3个采样点;使用不锈钢土铲,采集0—10 cm深度的表层土壤,将同一样方内3个采样点的土壤混合均匀,构成1份混合代表样品,装入无菌采样袋置于生物冰袋中低温保存,并尽快运送回实验室。此外,在采样点使用环刀(100 cm³)采集原状土,用于测定土壤容重(Soil Bulk Density,

SBD)。土壤样品运抵实验室后,剔除可见根系、石块等杂物,将新鲜土壤过2 mm标准筛。过筛后的土壤分为两份:一份保存于4℃冰箱中,用于测定硝态氮(NO₃⁻-N)、铵态氮(NH₄⁺-N)和可溶性有机碳(Dissolved Organic Carbon, DOC);另一份置于阴凉通风处自然风干后研磨过0.149 mm(100目)标准土壤筛,用于测定其他土壤化学性质。

1.2 土壤理化性质测试分析

土壤容重(SBD)用环刀法测定,含水量(Soil Water Content, SWC)用烘干法测定,土壤pH值采用pH计法(土:水比为1:2.5)测定,土壤有机碳(Soil Organic Carbon, SOC)采用K₂CrO₇外加热法测定^[18]。可溶性有机碳(DOC)去离子水浸提后用TOC自动分析仪(Phoenix 8000, TeledyneTekmar, America)测定。全磷(Total Phosphorus, TP)用HClO₄-H₂SO₄,速效磷(Available Phosphorus, AP)用HCl-H₂SO₄浸提后,用酶标仪(INFINITE M200 PRO, TECAN, Switzerland)测定。土壤全氮(Total Nitrogen, TN)经H₂SO₄消煮后,用间断分析仪(SMARTCHEM200, AMS, Italy)测定;硝态氮(NO₃⁻-N)用KCl浸提(土:水比为1:5),用连续流动分析仪(AutoAnalyzer3, SEAL, Germany)测定;铵态氮(NH₄⁺-N)用KCl浸提(土:水比为1:5)后,用间断分析仪(SMARTCHEM200, AMS, Italy)测定。

1.3 数据处理

土壤碳氮磷的储量分别为^[19]:

$$C_s = \sum_{i=1}^n 0.1 \times E_i \times D_i \times C_i \times (1 - G_i) \quad (1)$$

$$N_s = \sum_{i=1}^n 0.1 \times E_i \times D_i \times N_i \times (1 - G_i) \quad (2)$$

$$P_s = \sum_{i=1}^n 0.1 \times E_i \times D_i \times P_i \times (1 - G_i) \quad (3)$$

式中: C_s , N_s 和 P_s 分别代表土壤碳储量(t/hm²)、氮储量(t/hm²)和磷储量(t/hm²); C_i , N_i 和 P_i 分别表示第*i*土层的SOC, TN和TP含量(g/kg); E_i 代表第*i*土层厚度(cm); D_i 代表第*i*土层的容重(g/cm³); G_i 代表第*i*土层直径大于2 mm的石砾所占的体积百分比(%); n 代表土层数;0.1为单位换算系数。

采用单因素方差分析(One-way ANOVA)检验3个海拔森林类型(低海拔常绿阔叶林、中海拔针阔混交林、高海拔高山矮林)在土壤理化性质、碳氮磷储量和化学计量比上的整体差异显著性。若ANOVA结果显示存在显著差异($p < 0.05$),则进一步使用Duncan多重比较检验(Duncan's Multiple Range Test)进行两两海拔组间的差异显著性比较。所有ANOVA及Duncan检验均在SPSS 24.0 (IBM

SPSS Inc., Chicago, IL, USA)软件中完成。使用 Mantel test 评估土壤碳氮磷储量和化学计量比与土壤理化因子之间的相关关系,该分析由 R 语言的 linkET 程序包执行。采用随机森林模型(Random Forest Modeling)量化各土壤理化性质因子对土壤碳氮磷储量和化学计量比的相对重要性(贡献率);为评估因子重要性统计量的显著性,模型分析结合了置换检验(Permutation Test);此分析利用 R 语言的 rfpermute 程序包完成。

2 结果与分析

2.1 不同海拔森林土壤理化性质的差异

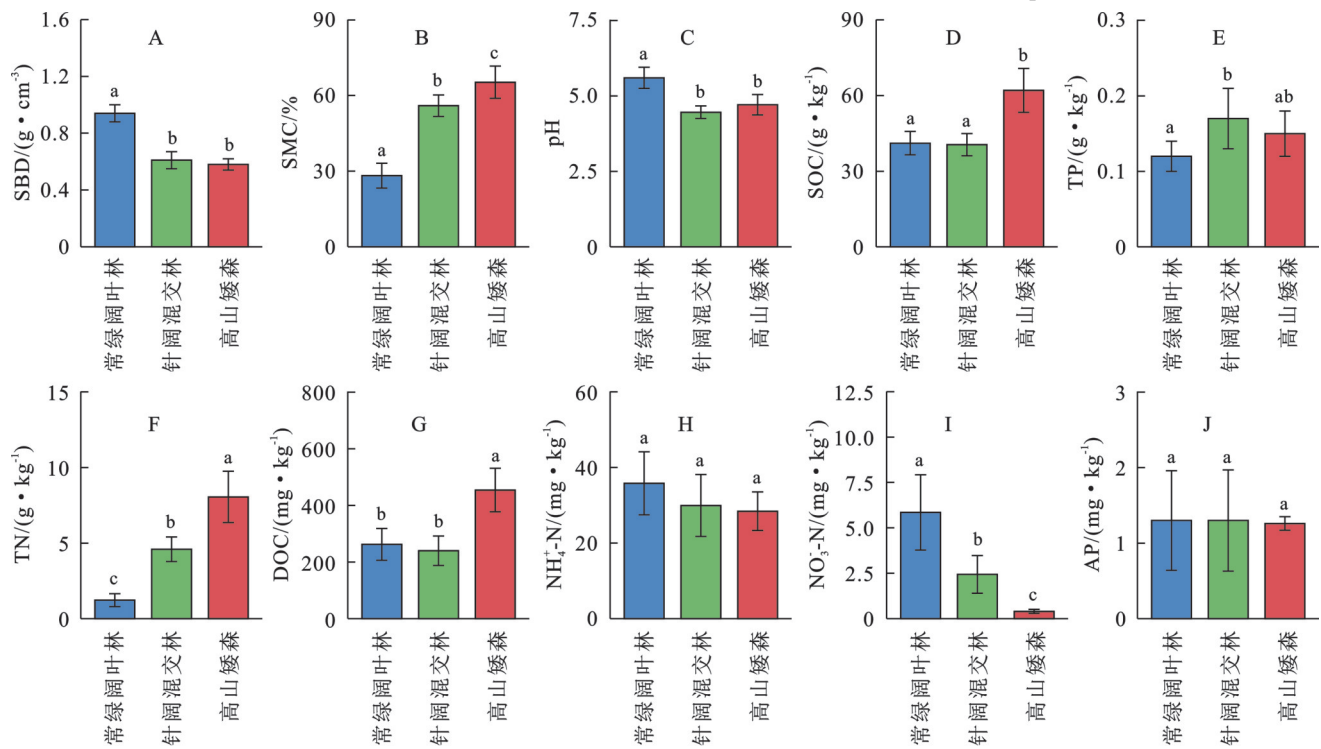
不同林型间土壤理化性质存在明显差异(图 1)。常绿阔叶林的 SBD, pH 和 TP 显著大于针阔混交林与高山矮林($p < 0.05$),但后两个林分间未呈现统计学差异($p > 0.05$)。然而, SOC 和 DOC 在常绿阔叶林

与针阔混交林间无显著区别,但二者均显著低于高山矮林。SWC 和 TN 随海拔升高而显著增加,而 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 则呈逆向分布趋势($p < 0.05$)。同时, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 AP 在 3 个林分中未达显著差异水平($p > 0.05$)。

2.2 不同海拔土壤碳氮磷储量和化学计量比的变化

针阔混交林的土壤 C_s 显著低于常绿阔叶林和高山矮林($p < 0.05$),较常绿阔叶林和高山矮林分别降低 36.0% 和 30.8%。 N_s 呈现明显海拔依赖性,随高程上升递增 2.5~3.3 倍,而 P_s 在不同海拔森林间未达显著差异($p > 0.05$),但总体呈现递减趋势(表 1)。

生态化学计量比显示(表 1),常绿阔叶林的土壤 C/N 显著高于另外 2 个森林的 38.8~41.3 倍($p < 0.05$); C/P 却表现为针阔混交林(252.45)显著低于常绿阔叶林(350.47)和高山矮林(425.35); N/P 随海拔上升呈阶梯式增长,高山矮林较针阔混交林和常绿阔叶林分别提高 93.0% 和 400% ($p < 0.05$)。



注: SBD 表示土壤容重; SWC 表示土壤含水量; pH 表示 pH 值; SOC 表示有机碳; DOC 表示可溶性有机碳; TP 表示全磷; AP 表示速效磷; TN 表示全氮; $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 表示硝态氮; $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 表示铵态氮。图中数据为平均值±标准差。不同小写字母表示相同指标不同森林间差异显著($p < 0.05$)。

图 1 不同海拔森林类型土壤理化性质的差异比较

Fig. 1 Comparison of soil physicochemical properties of forest types at different altitudes

2.3 土壤碳氮磷储量与化学计量比的影响因素

Mantel test 结果显示(图 2), 3 个不同海拔森林土壤 C_s 和 P_s 与全部土壤理化性质因子的直接统计关联较弱($p > 0.05$); 与之相反, N_s 与 TN, $\text{NO}_3^- \text{-N}$, SWC, SBD 和 pH 显著正相关($p < 0.01$)。此外, C/N 和 N/P 分别与 SBD, SWC, pH, TN 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 显著正相关($p < 0.01$), 而 C/P 与 SOC 和 DOC ($p < 0.05$)

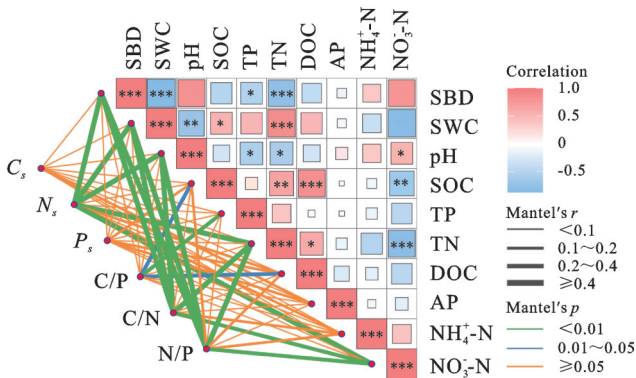
及 TP ($p < 0.01$) 显著正相关。

随机森林模型(n tree=100, m try=8, leave one out 交叉验证方法)进一步发现, C_s 的分布主要受 SOC 和 DOC 调控(图 3), 而 N_s 的变异则由 TN 主导, P_s 的驱动则以 SBD 和 TP 为核心因子。在化学计量中, TN 是 C/N 的关键驱动因子(图 3D), 而 C/P 的主控因子为 SOC, DOC 和 TP, N/P 主要受 TN 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 影响。

表1 土壤碳氮磷储量和化学计量比在不同海拔森林的变化特征

Table 1 Variation characteristics of soil carbon, nitrogen, and phosphorus stocks and stoichiometric ratios in forests at different altitudes

指标	常绿阔叶林	针阔混交林	高山矮林
$C_s/(tC \cdot hm^{-2})$	38.67±5.32a	24.75±3.40b	35.75±4.25a
$N_s/(tN \cdot hm^{-2})$	1.15±0.38a	2.85±0.78b	4.69±1.24c
$P_s/(tP \cdot hm^{-2})$	0.11±0.02a	0.10±0.02a	0.09±0.02a
C/N	37.78±15.34a	8.99±1.64b	8.13±2.71b
C/P	350.47±39.46a	252.45±48.03b	425.35±102.11a
N/P	11.04±5.85a	28.61±6.54b	55.20±15.88c



注: *表示 $p < 0.05$; **表示 $p < 0.01$; ***表示 $p < 0.001$ 。

图2 土壤碳氮磷储量、化学计量比与土壤理化性质的 Mantel 检验

Fig. 2 Mantel test of soil carbon, nitrogen, and phosphorus stocks, stoichiometric ratios, and soil physicochemical properties

3 讨论

3.1 不同海拔森林土壤碳氮磷储量的变化规律

准确估算土壤碳库需深入理解 SOC 的垂直分布格局。海拔变化能直接或间接改变土壤理化性质、微生物活动、植被类型及气候等关键环境因子,进而显著影响 C 储量的垂直分布^[20]。现有研究揭示了 SOC 随着海拔升高,较低温度抑制微生物活性,导致凋落物积累增加,土壤 C 储量显著上升^[7]。然而,也有研究发现 C 储量随海拔升高而减少^[9]。值得注意的是,张雄志等^[21]在山西历山国家级自然保护区(海拔 890~2 200 m)观察到土壤 C 储量随海拔升高呈现先下降后上升的“U”型格局。这种研究结论的不一致性,很可能源于不同海拔梯度上植被类型、土壤类型及气候(尤其是水热条件)等因素的综合作用。也就是说,不同海拔处植被输入(凋落物数量与质量)与气候(温度、水分)对土壤 C 累积和分解的相对贡献可能存在显著差异^[8]。本研究发现,中海拔(1 430 m)针阔混交林的土壤 C 储量显著低于低海拔(660 m)常绿阔叶林和高海拔(1 750 m)高山矮林。这一变化趋势

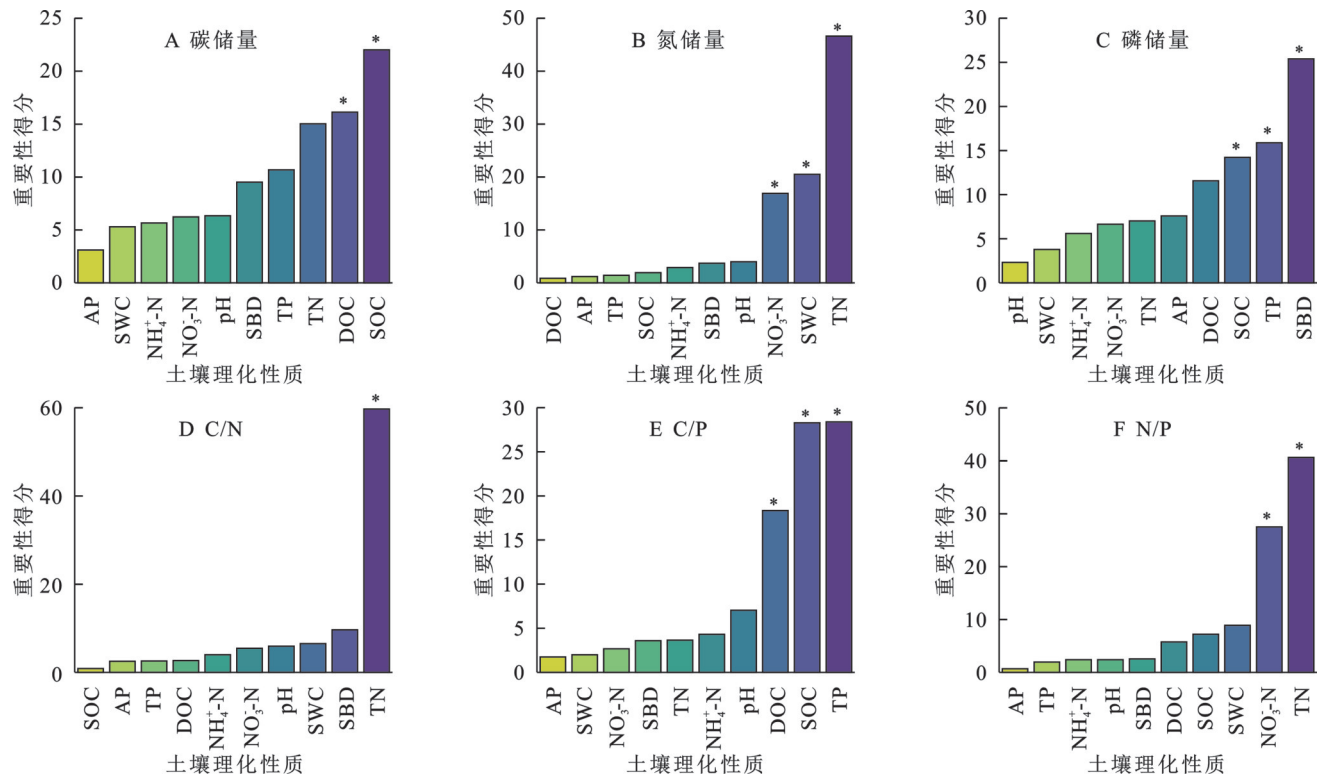
与历山国家级自然保护区观测到的“U”型格局基本吻合^[21]。随机森林模型分析进一步揭示, SOC, DOC 和 TN 含量是调控不同海拔森林土壤 C 储量变异的主导因子。虽然土壤 pH 常被认为是影响土壤 C 储量的重要因素^[22];但在本研究中, pH 对 3 个森林土壤 C 储量随海拔变化的影响未达到显著水平,这可能是由于研究区域内土壤 pH 变幅相对较窄(4.46~5.60),限制其效应的显现。

森林土壤氮储量是陆地生态系统氮循环的核心要素,其空间分布格局显著受海拔梯度调控。海拔变化驱动植被类型变化,进而通过改变凋落物质量和输入量深刻影响土壤性质^[23]。本研究发现,土壤氮储量呈现出随海拔升高而显著增加的趋势($p < 0.05$):高山矮林(4.69 t/hm²) > 针阔混交林(2.85 t/hm²) > 常绿阔叶林(1.15 t/hm²) (表 1)。这一分布格局与王艳丽等^[24]在青海省森林以及任玉连等^[25]在南滚河国家级自然保护区的研究结论一致。其原因在于高海拔地区的低温环境显著抑制土壤有机质的矿化分解和硝化作用^[8],导致氮素在土壤中累积。尽管土壤 NO₃⁻-N 含量随海拔升高而显著降低(图 1),但土壤 SWC 和 TN 含量均呈现显著增加趋势(图 1)。结构方程模型分析(图 3)表明,土壤 TN 和 SWC 对氮储量的正向驱动效应占主导地位,综合作用可掩盖对 NO₃⁻-N 减少的影响,最终导致土壤氮储量整体随海拔升高而增加。

磷是生命必需的关键元素,其陆地储量主要赋存于土壤,对生态系统生产力和稳定性至关重要。在全球气候变化背景下,土壤磷循环如何响应气候变暖已成为重要研究议题。唐立涛等^[26]报道青海省森林土壤磷储量呈现“中低海拔(2 200~3 000 m)随海拔升高递减,高海拔(3 300~3 900 m)转为递增”的海拔分布模式,并将其归因于不同海拔上植物吸收策略(低温促进吸磷)和土壤固持能力(根系生物量增加、黏粒吸附增强)的变化。然而,本研究在 3 个不同海拔森林并未观测到土壤磷储量存在显著的海拔梯度差异($p > 0.05$) (表 1)。随机森林模型分析揭示, SBD, TP 和 SOC 含量是协同调控土壤磷储量的关键因子(图 3C)。同时也发现,低海拔常绿阔叶林的 SBD 显著高于中、高海拔森林($p < 0.05$),高海拔高山矮林的 SOC 则显著高于其他 2 个森林类型,常绿阔叶林与针阔混交林的土壤 TP 含量存在显著差异,但两者均与高山矮山林的 TP 无显著差异($p > 0.05$)。这些结果表明,不同海拔上关键土壤属性(如 SBD, SOC, TP)的差异及其复杂的交互作用,可能抵消海拔本身带来的潜在影响,导致磷储量在统计上无显著海拔差异。

综上,当前关于土壤磷储量海拔分布规律及其驱动机制的认识仍存在不一致性。深入揭示多因子(物理、化学、生物)协同调控土壤磷储量的过程

与机制,对于准确预测全球变化下磷循环的响应,并最终实现土壤磷资源的可持续管理,具有重要的理论支撑意义。



注:*表示 $p < 0.05$ 。

图3 土壤碳氮磷储量、化学计量比与土壤理化性质的随机森林模型分析

Fig. 3 Random forest model analysis of soil carbon, nitrogen, and phosphorus stocks, stoichiometric ratios, and soil physicochemical properties

3.2 不同海拔森林土壤碳氮磷化学计量比特征

土壤C/N是表征土壤有机质分解速率的关键指标,深刻影响着土壤碳、氮养分的内部循环^[27]。较低的C/N值(通常 $C/N < 25$)指示着较强的土壤氮矿化能力,意味着有机氮向无机氮(铵态氮、硝态氮)的转化效率高,从而更有利于土壤微生物活动和植物对氮素的吸收利用^[28]。本研究显示,针阔混交林($C/N = 8.99$)和高山矮林($C/N = 8.13$)的土壤C/N均明显低于25,而常绿阔叶林($C/N = 37.78$)则高于此阈值。这一结果清晰地表明:相较于常绿阔叶林,针阔混交林和高山矮林具有更快的土壤有机质分解速率和更强的氮矿化作用,因此其土壤氮素供应更为充足。这与观测结果高度一致——针阔混交林和高山矮林的土壤氮储量显著高于常绿阔叶林。进一步通过Mantel test和随机森林模型分析发现,土壤TN含量是调控C/N的关键驱动因子(图2,图3)。值得注意的是,土壤TN含量随海拔升高呈现显著增加的趋势($p < 0.05$)(图1)。这意味着海拔梯度可能通过影响土壤TN积累,进而对土壤C/N及其相关的有机质分解和氮矿化过程产生重要调控作用。

土壤C/P是评估土壤有机质分解过程中磷素释放潜力与固存风险的重要指标^[2]。本研究中,3个不同海拔森林类型(常绿阔叶林、针阔混交林、高山矮林)的土壤C/P均显著高于200(表1),远超出全国土壤(0—10 cm)平均水平(136)^[29]。这一结果表明,研究区土壤中潜在的植物可利用性磷素相对匮乏^[27]。进一步分析发现,土壤C/P随海拔升高呈现显著的U型分布格局。值得注意的是,这种U型变化模式与土壤碳储量的海拔分布特征高度相似。Mantel检验结合随机森林模型分析揭示,土壤TP, SOC和DOC含量是正向驱动C/P的主导因子。然而,各因子在不同海拔林型间的分布存在差异。尽管中海拔针阔混交林的土壤TP含量显著高于低海拔常绿阔叶林,但其SOC和DOC含量又显著低于高海拔高山矮林(图1)。这表明C/P的海拔U型分布是由TP, SOC和DOC这3个关键因子复杂的、非同步的海拔变化共同作用的结果。

土壤N/P是评估植被生产力受养分限制类型的关键指标:通常 $N/P < 10$ 指示氮素限制, $N/P > 20$ 则指示磷素限制^[30]。本研究中,3个海拔森林的土壤N/P存在显著差异($p < 0.05$),低海拔常绿阔叶林($N/P =$

11.04) < 中海拔针阔混交林 (N/P=28.61) < 高海拔高山矮林 (N/P=55.20) (表1)。所有森林类型的土壤 N/P 均高于全国土壤 (0—10 cm) 平均值 (9.3)^[29], 表明研究区域整体上存在磷限制潜力, 且这种限制强度随海拔升高而急剧增强 (从常绿阔叶林的潜在磷限制到高山矮林的强烈磷限制)。Mantel 检验结合随机森林模型分析进一步揭示, 土壤 TN 和 NO₃⁻-N 含量是正向调控 N/P 的主导因子。然而, 随海拔升高观察到一个关键现象: 土壤 TN 含量呈现显著增加趋势, 而 NO₃⁻-N 含量却显著下降 (图1)。这一此消彼长的变化格局明确表明, 在驱动 N/P 升高的过程中, TN 的正向贡献效应显著大于 NO₃⁻-N 的负向变化效应。因此, 海拔梯度上森林土壤 N/P 的升高主要归因于 TN 积累的主导作用。

4 结论

碳储量呈“U型”海拔分布 (中海拔最低), 而氮储量随海拔升高而线性增加, 磷储量无显著海拔差异。C/N 在中、高海拔较低 (<25), N/P 在高海拔较高 (>55), 而 C/P 呈“U型”海拔分布。中海拔土壤有机碳 (SOC) 和溶解性有机碳 (DOC) 的协同消耗共同导致碳储量最低, 形成碳“U型”变化。氮线性递增, 低温抑制了有机氮的矿化过程, 导致全氮 (TN) 在高海拔累积。磷无明显差异, 土壤容重 (SBD)、全磷 (TP) 和 SOC 之间的拮抗作用, 抵消了单一因素的海拔效应。氮矿化增强, 低 C/N 比表明随海拔升高, 氮有效性增加。磷限制加剧, 高 N/P 比证实高海拔地区磷成为植物生长的主要限制因子。土壤全氮 (TN) 是调控 C/N 和 N/P 比的关键, 其海拔依赖性主导了氮循环过程。C/P“U型”由 TP (中海拔最高) 与 SOC 及 DOC (高海拔最高) 的非同步变化共同塑造。

参考文献 (References):

- [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] 钟建军, 李林, 魏识广, 等. 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 [J]. *水土保持学报*, 2023, 37(6): 180-186, 193.
Zhong J J, Li L, Wei S G, et al. Distribution characteristics and influencing factors of soil carbon, nitrogen and phosphorus storage in karst forest in the Lijiang River Basin [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(6): 180-186, 193.
- [3] Ruttenger K C. The global phosphorus cycle [M] // *Treatise On Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 2014: 499-558.
- [4] Ippolito J A, Blecker S W, Freeman C L, et al. Phosphorus biogeochemistry across a precipitation gradient in grasslands of central North America [J]. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74(8): 954-961.
- [5] Wei L L, Chen C R, Xu Z H. Citric acid enhances the mobilization of organic phosphorus in subtropical and tropical forest soils [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2010, 46(7): 765-769.
- [6] 李相楹, 张维勇, 刘峰, 等. 不同海拔高度下梵净山土壤碳、氮、磷分布特征 [J]. *水土保持研究*, 2016, 23(3): 19-24.
Li X Y, Zhang W Y, Liu F, et al. The distribution characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus at different altitudes in Fanjingshan Mountain [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(3): 19-24.
- [7] 张彦军, 郁耀闯, 牛俊杰, 等. 秦岭太白山东坡土壤有机碳储量的海拔梯度格局 [J]. *生态学报*, 2020, 40(2): 629-639.
Zhang Y J, Yu Y C, Niu J J, et al. The elevational patterns of soil organic carbon storage on the northern slope of Taibai Mountain of Qinling [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(2): 629-639.
- [8] 熊小玲, 任寅榜, 吕茂奎, 等. 武夷山不同海拔典型森林土壤有机碳和全氮储量分布特征 [J]. *水土保持研究*, 2022, 29(4): 83-88.
Xiong X, Ren Y, Lu M, et al. Distribution characteristics of soil organic carbon and total nitrogen storage in typical forest soils at different altitudes in Wuyishan Mountain [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(4): 83-88.
- [9] Gutiérrez-Girón A, Díaz-Pinés E, Rubio A, et al. Both altitude and vegetation affect temperature sensitivity of soil organic matter decomposition in Mediterranean high mountain soils [J]. *Geoderma*, 2015, 237/238: 1-8.
- [10] Crovo O, Aburto F, Alborno M F, et al. Soil type modulates the response of C, N, P stocks and stoichiometry after native forest substitution by exotic plantations [J]. *Catena*, 2021, 197: 104997.
- [11] 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.
- [12] 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.
Ren L L, Zhang B X, Han F P, et al. Ecological stoichiometric characteristics of soils in *Robinia pseudoacacia* forests of different ages on the Loess Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(2): 339-344.
- [13] 黄承标, 黄俊杰, 谭学锋, 等. 大瑶山自然保护区森林涵养水源效益研究 [J]. *水土保持研究*, 2007, 14(6): 301-305.
Huang C B, Huang J J, Tan X F, et al. Study on water conservation benefit of forest in Dayaoshan natural

- reseve [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2007, 14(6):301-305.
- [14] 朱宏光, 林建勇, 温远光, 等. 广西大瑶山国家级自然保护区蕨类植物区系研究[J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(33): 16708-16710.
- Zhu H G, Lin J Y, Wen Y G, et al. Study on the pteridophyte flora in Dayaoshan national nature reserve of Guangxi [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(33):16708-16710.
- [15] 严理, 王磊, 罗保庭, 等. 大瑶山国家级自然保护区中山针阔混交林的植物多样性[J]. *广西科学*, 2015, 22(6): 600-605, 611.
- Yan L, Wang L, Luo B T, et al. Plant species diversity of mixed broadleaf-conifer forest in mid mountain region of Dayaoshan state natural reserve, Guangxi [J]. *Guangxi Sciences*, 2015, 22(6):600-605, 611.
- [16] 黄远泽, 胡彬, 张凌睿, 等. 广西大瑶山国家级自然保护区不同海拔森林土壤有机碳矿化特征[J]. *环境生态学*, 2025, 7(1):46-52, 130.
- Huang Y Z, Hu B, Zhang L R, et al. Characteristics of soil organic carbon mineralization under different altitude forest types in Dayaoshan National Nature Reserve of Guangxi, China [J]. *Environmental Ecology*, 2025, 7(1):46-52, 130.
- [17] 谭伟福, 罗保庭. 广西大瑶山自然保护区生物多样性研究及保护[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010.
- Tan W F, Luo B T. Research and conservation of biodiversity in Guangxi Dayaoshan natural reserve [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2010.
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2020.
- Lou R. Soil agricultural chemical analysis methods [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2020.
- [19] 王薇菡, 虞依娜, 谢嘉淇, 等. 中国南亚热带不同造林模式碳汇林土壤碳、氮、磷的积累及化学计量特征[J]. *生态学报*, 2023, 43(5):1793-1803.
- Wang W H, Yu Y N, Xie J Q, et al. Characteristics of soil carbon, nitrogen, phosphorus accumulation and their ecological stoichiometry in Chinese subtropical forest under different afforestation patterns [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(5):1793-1803.
- [20] 邱思慧, 林少颖, 王维奇. 中国东部地区不同海拔梯度土壤有机碳库特征及其影响因素综述[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2022, 20(3):142-150.
- Qiu S H, Lin S Y, Wang W Q. Characteristics of soil organic carbon pool at different altitude gradients in Eastern China and its influencing factors: a review [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2022, 20(3): 142-150.
- [21] 张雄志, 张慧芳, 王晨林, 等. 暖温带森林土壤有机碳含量和碳储量的海拔梯度格局及环境解释[J]. *生态学报*, 2024, 43(10):2979-2987.
- Zhang X Z, Zhang H F, Wang C L, et al. Elevational patterns and environmental drivers of soil organic carbon content and storage in a warm-temperate forest [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, 43(10):2979-2987.
- [22] Wiesmeier M, Urbanski L, Hobley E, et al. Soil organic carbon storage as a key function of soils: a review of drivers and indicators at various scales [J]. *Geoderma*, 2019, 333:149-162.
- [23] 马志良, 顾国军, 赵文强, 等. 青藏高原东缘乔灌交错带地被物和土壤碳氮储量特征[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(5):17-23.
- Ma Z L, Gu G J, Zhao W Q, et al. Carbon and nitrogen storage of ground covers and soils in the forest-shrub ecotone of eastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(5):17-23.
- [24] 王艳丽, 字洪标, 程瑞希, 等. 青海省森林土壤有机碳氮储量及其垂直分布特征[J]. *生态学报*, 2019, 39(11): 4096-4105.
- Wang Y L, Zi H B, Cheng R X, et al. Forest soil organic carbon and nitrogen storage and characteristics of vertical distribution in Qinghai Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(11):4096-4105.
- [25] 任玉连, 陆梅, 曹乾斌, 等. 南滚河国家级自然保护区典型植被类型土壤有机碳及全氮储量的空间分布特征[J]. *北京林业大学学报*, 2019, 41(11):104-115.
- Ren Y L, Lu M, Cao Q B, et al. Spatial distribution characteristics of soil organic carbon and total nitrogen stocks across the different typical vegetation types in Nangunhe National Nature Reserve, southwestern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2019, 41(11):104-115.
- [26] 唐立涛, 刘丹, 罗雪萍, 等. 青海省森林土壤磷储量及其分布格局[J]. *植物生态学报*, 2019, 43(12):1091-1103.
- Tang L T, Liu D, Luo X P, et al. Forest soil phosphorus stocks and distribution patterns in Qinghai, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2019, 43(12): 1091-1103.
- [27] 周方, 叶兰华, 童冉, 等. 浙西南低山丘陵区林分类型对土壤碳氮磷化学计量特征的影响[J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2025, 49(5):29-37.
- Zhou F, Ye L H, Tong R, et al. Impacts of forest stand types on the stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in low hilly region of southwest Zhejiang Province [J]. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2025, 49(5):29-37.
- [28] Deng J J, Yin Y, Zhu W X, et al. Variations in soil bacterial community diversity and structures among different revegetation types in the Baishilazi nature reserve [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2018, 9:2874.