

广西大瑶山森林土壤养分随海拔梯度的变化

罗蔚生^{1,3}, 唐秋月^{1,2}, 蔡会德^{1,2}, 卢峰^{1,3}, 蒙检^{1,2}, 柳雄辉^{1,3}, 莫奇京^{1,2}

(1.广西壮族自治区森林资源与生态环境监测中心, 广西 南宁 530028; 2.广西大瑶山森林生态系统定位观测研究站, 广西 来宾 545700; 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 545700)

摘要: [目的] 分析广西大瑶山森林土壤养分随海拔梯度的变化规律及各因子之间的相关性, 为亚热带山地森林群落分布格局和森林水文机制研究提供科学指导。[方法] 采用单因素方差分析、多重比较等方法对大瑶山不同海拔梯度的表层土壤(0—10 cm, 10—20 cm)养分进行分析。[结果] ①大瑶山森林土壤理化性质沿海拔梯度表现出明显的空间异质性变化规律。土壤最大持水量、有机质、全氮及水解氮含量随海拔升高呈波动性递增趋势, 变异系数均超过 40%, 显示强空间变异特征; 而土壤容重与 pH 值则随海拔梯度上升呈波动性下降趋势, 全磷、全钾含量在海拔梯度上未表现出显著差异。②在垂直剖面上, 0—10 cm 土壤层有机质、全氮及水解氮含量较 10—20 cm 土壤层分别高出 65.21%, 57.07% 和 55.24%, 呈现典型的“表聚性”特征。③相关性分析结果表明, 土壤有机质与容重、全氮、水解氮等指标均呈极显著相关性 ($p < 0.01$), 表明有机质通过降低土壤紧实度、增强胶体吸附及微生物矿化作用提升团聚体稳定性与养分有效性, 可有效改良土壤结构和促进物质循环。[结论] 大瑶山森林土壤理化性质沿海拔梯度呈现显著的空间异质性特征, 有机质、全氮及水解氮含量沿海拔梯度显著增加(变异系数 $> 40%$), 在 0—10 cm 土壤层较 10—20 cm 土壤层均高出 50% 以上, 呈典型“表聚性”。有机质与容重、氮素等指标显著相关, 表明其通过改善土壤结构可有效促进土壤养分循环。

关键词: 土壤养分; 海拔; 差异性分析; 广西大瑶山

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)05-0091-12

中图分类号: S718.5, S158.3

文献参数: 罗蔚生, 唐秋月, 蔡会德, 等. 广西大瑶山森林土壤养分随海拔梯度的变化[J]. 水土保持通报, 2025, 45(5): 91-102. Luo Weisheng, Tang Qiuyue, Cai Huide, et al. Variation of forest soil nutrients with altitude gradient in Dayao Mountains of Guangxi [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(5): 91-102. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.05.009; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.05.009.

Variation of forest soil nutrients with altitude gradient in Dayao Mountains of Guangxi

Luo Weisheng^{1,3}, Tang Qiuyue^{1,2}, Cai Huide^{1,2}, Lu Feng^{1,3}, Meng Jian^{1,2}, Liu Xionghui^{1,3}, Mo Qijing^{1,2}

(1. Guangxi Forest Resources and Environment Monitoring

Center, Nanning, Guangxi 530028, China; 2. Guangxi Dayaoshan Forest Ecosystem

Observation and Research Station, Laibin, Guangxi 545700, China; 3. Laibin Jinxiu Dayaoshan

Forest Ecosystem Observation and Research Station of Guangxi, Laibin, Guangxi 545700, China)

Abstract: [Objective] The variation pattern of soil nutrients along the altitude gradient and the correlation between various factors in Dayao Mountains of Guangxi Zhuang Autonomous Region were analyzed in order to provide scientific guidance for study of the distribution pattern of subtropical montane forest communities and forest hydrological mechanisms. [Methods] The nutrients of the surface soils (0—10 cm and 10—20 cm) at different altitude gradients in Dayao Mountain were analyzed using One-way ANOVA and multiple comparisons. [Results] ① The physical and chemical properties of forest soils in Dayao Mountain showed significant spatial

收稿日期: 2025-04-23

修回日期: 2025-06-02

采用日期: 2025-06-04

资助项目: 广西重点研发计划项目“广西典型森林及其优势树种碳循环监测关键技术研究与应用示范”(桂科 AB24010012); 广西自筹经费林业科技项目(桂科[2022ZC]第10号); 广西自筹经费林业科技项目(2023GXZCLK67); 广西科技基地和人才专项(桂科 22-035-130-01)

第一作者: 罗蔚生(1984—), 男(汉族), 广西壮族自治区岑溪市人, 硕士, 高级工程师, 主要从事林业生态环境监测评估及长期定位观测研究工作。Email: 17945999@qq.com。

通信作者: 莫奇京(1979—), 男(汉族), 广西壮族自治区平乐县人, 硕士, 高级工程师, 主要从事森林资源监测方面的研究。Email: egis@163.com。

heterogeneity along the altitude gradient. The maximum water holding capacity, soil organic matter, total nitrogen, and hydrolyzed nitrogen content of the soil showed a fluctuating increasing trend with altitude, with their coefficients of variation all exceeding 40%, indicating pronounced spatial heterogeneity. The soil bulk density and pH value showed a fluctuating decreasing trend along the altitude gradient, while the total phosphorus and total potassium contents showed no significant difference along the altitude gradient. ② In the vertical profile, the soil organic matter, total nitrogen, and hydrolyzed nitrogen contents in the 0—10 cm soil layer were 65.21%, 57.07%, and 55.24% higher than those in the 10—20 cm soil layer, respectively, showing a typical “surface accumulation” pattern. ③ Correlation analysis showed highly significant correlations ($p < 0.01$) between soil organic matter and indicators such as soil bulk density, total nitrogen, and hydrolyzed nitrogen, suggesting that soil organic matter can effectively improve soil structure and promoting material cycling by reducing soil compactness, enhancing colloid adsorption, and stimulating microbial mineralization, thereby improving aggregate stability and nutrient availability. [Conclusion] The physical and chemical properties of forest soils in Dayao Mountain show significant spatial heterogeneity along the altitude gradient. Organic matter, total nitrogen, and hydrolyzed nitrogen contents increase significantly along the altitude gradient (the coefficient of variation $> 40\%$), and are more than 50% higher in the 0—10 cm soil layer than in the 10—20 cm soil layer, showing a typical “surface accumulation” pattern. Organic matter is significantly correlated with bulk density, nitrogen, and other soil indicators, indicating that it can effectively promote soil nutrient cycling by improving soil structure.

Keywords: soil nutrients; altitude; variability analysis; Dayao Mountain of Guangxi

作为陆地生态系统的关键构成单元,森林土壤通过其物理化学特性调控着物质循环与能量流动,其养分有效性更是显著影响植物生产力及生态系统过程^[1]。森林凋落物与有机质共同形成的养分储库,既是生态系统物质循环的核心环节,也是维持森林土壤长期生产力的基础^[2]。随着多源数据融合技术的应用,研究人员对土壤养分空间变化的研究逐步深入^[3]。该技术的快速发展显著提升了土壤养分空间异质性研究的精度和维度。通过整合土壤采样数据、遥感影像、神经网络和高精度曲面建模等方法,能够更全面地揭示土壤养分的空间分布规律及其影响机制。党坤良等^[4]对秦岭南坡不同海拔土壤肥力的研究表明,土壤有机质的积累与转化过程随海拔升高呈现显著变化。熊凯等^[5]研究土壤养分空间异质性中发现,地形、微生物、地上植被等多种因子共同影响了土壤养分空间异质性变化。Nottingham等^[6]研究表明,土壤C:N, C:P和N:P化学计量比均呈现随海拔梯度升高的趋势,且C:P和N:P表现出更强的空间变异特征。杜芳芳等^[7]发现土壤养分参数呈现典型的地理空间异质性变化规律,其中海拔和容重分别对有机碳库和氮素总量空间格局具有主导性调控作用。可见,土壤养分的空间异质性格局源于多维度生态过程耦合作用,不同区域土壤养分的空间分布特征具有特异性,开展土壤养分空间异质性的研究对了解土壤形成机制、结构功能特征及其与植被的互作关系提供了重要理论依据。

目前对于森林土壤养分研究的重点区域主要集中在北方温带林区(如长白山、秦岭)^[8-9]和热带雨林区(如西双版纳)^[10],而对于亚热带过渡带山地生态系统的研究相对较少。针对特定区域的土壤养分研究,可以更好地理解该区域土壤养分的空间变异情况和空间分布特征,为土壤养分管理提供科学依据。广西作为中国华南地区典型林区,其森林生态系统具有显著代表性。研究^[11]表明,该地区土壤属性存在显著的多尺度空间分异现象,这一特征已成为当前研究的重要方向。谭一波等^[12]对猫儿山森林群落的研究显示,海拔梯度与植被类型是决定土壤物理性质空间异质性的关键要素。刘璐等^[13]在木论自然保护区的相关分析进一步证实,除植被因素外,地形特征和微生物境异质性共同塑造了土壤养分的空间分布格局。

广西大瑶山作为典型亚热带森林生态系统,具有丰富的生物多样性和独特的地理环境,气候和植被垂直特征明显,其完整的赤红壤—红壤—黄壤垂直带谱为在较小区域内研究森林土壤养分空间异质性提供了理想环境^[14]。该区域的土壤养分数据集的建立和研究,为土壤养分含量特征和变化规律提供了基础参考数据,同时也为研究不同典型区域的森林生态系统结构与土壤功能的变化提供了重要资料^[15]。但是,关于该地区森林土壤养分组分空间格局及其驱动机制的系统研究相对有限,不仅缺乏对植被类型、土壤类型、地形、土壤母质、气候等因素影

响养分因子的深入探讨,也对其中耦合作用的驱动机制研究不足,同时还存在研究区域代表性不足等问题。另外,前人研究往往侧重于单个养分因子的空间分布特征,而忽视了不同养分因子之间的相互作用及其对土壤养分空间格局的影响。在大瑶山森林生态系统中,海拔差异驱动着水热配置格局、植被群落演替序列及成土母质空间分异的垂直地带性响应,且该区域生物地球化学循环特征与海拔梯度密切相关。

因此,揭示不同海拔梯度森林土壤各组分相互关系和空间变化规律,有助于深入认识有机质、氮、磷等生物地球化学循环的特征。鉴于此,本研究采用系统采样与实验室分析相结合的方法,探究大瑶山森林土壤养分在不同海拔梯度(150—1 150 m)的空间异质性变化规律及其与土壤类型及植被类型的空间分布特征,旨在为该区域生态系统保护与可持续经营提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

大瑶山主体位于广西壮族自治区中部偏东的金秀瑶族自治县,延伸至象州、蒙山、平南等县境内(110°01'—110°22'E, 23°52'—24°22'N),地处南亚热带与中亚热带的过渡区。主峰圣堂山海拔1 979 m,地形高差达1 600 m。该地区属南亚向中亚过渡的热带季风气候,年均温17.8℃,相对湿度92%,年降水量1 824 mm,蒸发量1 203 mm(占降水量的65.9%)。植被垂直带谱明显,以常绿阔叶林、常绿落叶阔叶混交林、常绿针阔混交林为主。大瑶山土壤成土母岩以砂页岩为主,次为页岩、花岗岩,多属砂壤型质地,土体中常夹杂大小岩石碎块,通透性良好。土壤垂直空间异质性显著,海拔梯度上依次发育山地红壤(海拔<500 m)、山地黄壤(500—700 m)、山地黄壤(700—1 300 m)、山地漂灰黄壤(>1 300 m)^[16]。试验样地基本情况详见表1。

表1 试验样地基本情况

Table 1 Basic information of the experimental plots

海拔梯度/m	样本数	坡向	坡度/(°)	坡位	植被类型	郁闭度
<300	4	阴坡、阳坡	20~40	中坡、上坡、下坡	阔叶林型、暖性针阔混交林、针阔混交林型	0.50~0.70
300—500	7	阴坡、阳坡	10~36	中坡、下坡	暖性针阔混交林、常绿阔叶林	0.40~0.70
500—700	13	阴坡、阳坡	20~60	上坡、中坡、下坡、脊	暖性针阔混交林、常绿阔叶林	0.30~0.80
700—900	11	阴坡、阳坡	20~45	上坡、中坡、下坡、脊	暖性针阔混交林、针叶林型	0.30~0.70
>900	8	阴坡、阳坡	25~85	上坡、中坡、下坡	暖性针阔混交林、常绿阔叶林、常绿落叶阔叶混交林	0.40~0.90

1.2 研究方法

1.2.1 土样采集

在研究区域沿不同海拔梯度(150—1 150 m)布设固定样地,采取其中的43个样地土壤样品(图1),并于2015年7—8月期间完成样品采集工作。采用“S”形取样法,在各样地随机选取5个采样点,移除表层的枯枝落叶和腐殖质后,采集表层(0—10 cm)及亚表层(10—20 cm)的环刀土样和散土土样,共计172个土样。将同一土层的土壤进行剔除碎石根茎等杂质,采用四分法混合均匀后分取1 kg左右带回实验室进行自然风干,研磨并分别过2.00, 0.25, 0.15 mm的尼龙筛后,密封保存供室内分析测定土壤pH值、有机质等理化性质。

1.2.2 样品处理及测定

依据国家标准方法测定土壤养分指标^[13]。土壤pH值通过电位法测定(土水比为1:2.5);有机质测定采用重铬酸钾外加法;全氮通过半微量凯氏定氮法完成测定;水解氮含量采用碱解扩散法测定;磷含量(全磷与有效磷)采用钼锑抗比色法测定;钾元素(全钾及速效钾)采用火焰光度法测定。

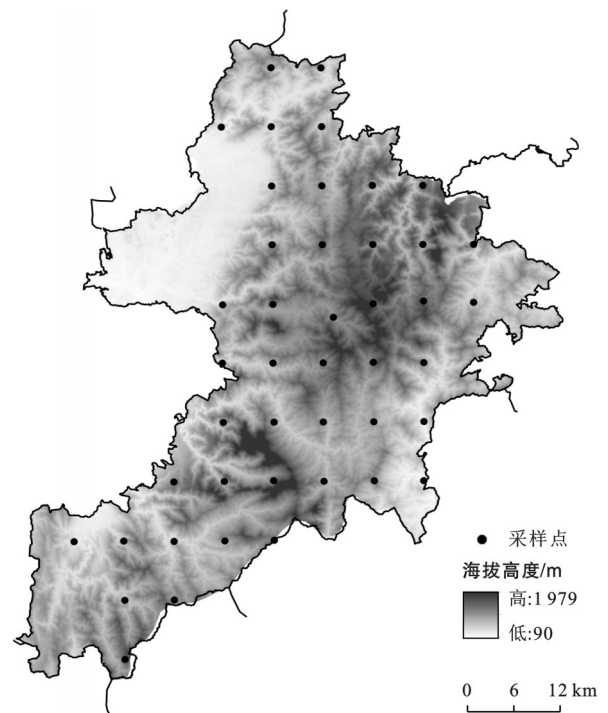


图1 研究区采样点分布

Fig.1 Distribution of sampling points in study area

1.2.3 数据处理与分析

采用 Excel 2019 和 SPSS 19 软件进行数据处理与分析。

不同海拔土壤理化性质差异性检验利用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 及 Duncan 多重比较。通过线性回归分析及 Pearson 相关分析揭示海拔梯度下土壤理化性质与养分指标之间的耦合关系。利用 Origin 2021 和 ArcGIS 10.8 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 大瑶山森林土壤物理性质差异性分析

统计分析表明 ($p < 0.05$), 海拔梯度显著改变了表层土壤 (0—10 cm) 的物理特性, 包括容重、孔隙状况、持水能力及酸碱度, 其影响程度显著高于亚表层 (10—20 cm)。如图 2 所示, 研究区土壤容重值域为 0.59~1.32 g/cm³, 且随海拔上升呈现递减规律。各土层容重的变异系数介于 55.76%~55.91%, 根据分类标准属于高等变异水平。土壤容重在 700 m 海拔以下各海拔组均与高海拔处呈显著差异 ($p < 0.05$), 说明海拔对土壤容重的影响较为明显。不同土壤层土壤总孔隙度随海拔变化的范围为 45.28%~67.56%, 均随海拔升高呈波动增加的变化趋势, 最大值均出现在 700—900 m 海拔处, 变异系数为 15.08%~18.04%, 表现为中等程度变异 (表 2)。随土壤层深度加深也存在显著变化, 土壤容重随深度增加而显著升高, 总孔隙度则表现为相反的变化趋势 (图 3)。

表 2 大瑶山森林土壤不同层次不同海拔土壤物理性质指标特征

Table 2 Characteristics of soil physical property indices at different altitudes across different layers in forest of Dayao Mountain

土壤层/ cm	项目	容重/ (g·cm ⁻³)	总孔隙 度/%	最大持 水量/%	pH 值
0—10	极小值	0.59	47.43	36.08	3.81
	极大值	1.32	67.56	86.30	5.73
	均值	0.93	56.09	62.91	4.52
	标准差	0.52	10.11	24.76	0.36
	变异系数/%	55.91	18.04	39.37	7.94
10—20	极小值	0.64	45.28	36.99	4.18
	极大值	1.31	65.82	81.80	5.38
	均值	1.04	54.81	55.03	4.73
	标准差	0.58	8.27	7.75	0.30
	变异系数/%	55.76	15.08	14.09	6.34

不同海拔梯度的土壤最大持水量变化范围为 36.08%~86.30%, 且随海拔升高均呈增加趋势, 且表

现为在 0—10 cm 土层中土壤最大持水在各海拔之间均差异显著 ($p < 0.01$)。土壤最大持水量表现为 0—10 cm 土壤层大于 10—20 cm, 且随着海拔升高, 两个土层间的持水量差异越大。研究区土壤 pH 随海拔变化范围为 3.81~5.83, 变异系数分别为 7.93% 和 6.33%, 表现出较低的变异强度。同一土层 pH 值随海拔的升高呈波动性降低的趋势, 均呈现为弱酸性。随着海拔升高, 降水量增加, 淋溶作用增强, 导致土壤中碱性离子流失, 氢离子和铝离子相对富集, 使土壤 pH 值降低^[17]。

2.2 大瑶山森林土壤化学性质差异性分析

2.2.1 土壤有机质、全磷随海拔变化特征

不同海拔之间的有机质含量变化存在显著差异 ($p < 0.05$), 两个土层深度的有机质含量范围分别为 13.53~177.81 g/kg 和 7.26~162.22 g/kg, 变异系数分别为 61.25% 和 74.23%, 表现为高度变异 (表 3)。在 0—10 cm 深度中有机质含量随海拔升高呈波动增加, 低海拔组 (<300 m) 有机质含量较低, 均值分别为 35.94 g/kg, 且与 500—700 m 海拔处的有机质含量差异不显著 ($p > 0.05$), 表明在低海拔范围内, 有机质含量的变化可能受其他环境因素影响。当海拔高于 900 m 时, 有机质含量显著增加, 最大值出现在 975 m 海拔处。说明高海拔环境可能更有利于有机质的积累。在同一海拔梯度中, 有机质含量随土壤层深度增加而降低, 0—10 cm 土壤层的有机质含量较 10—20 cm 土壤层高出 65.21%, 且呈显著的“表聚性”特征, 随着海拔梯度升高, 两个土壤层之间的有机质含量差异也越来越显著 (图 4—5)。相同采样深度不同海拔处的全磷含量随海拔升高呈波动上升趋势, 但各海拔组间无显著差异 ($p > 0.05$)。这可能是由于植物对磷的吸收和凋落物的归还可能在海拔梯度上形成一种平衡, 从而导致全磷含量在各海拔组间无显著差异。

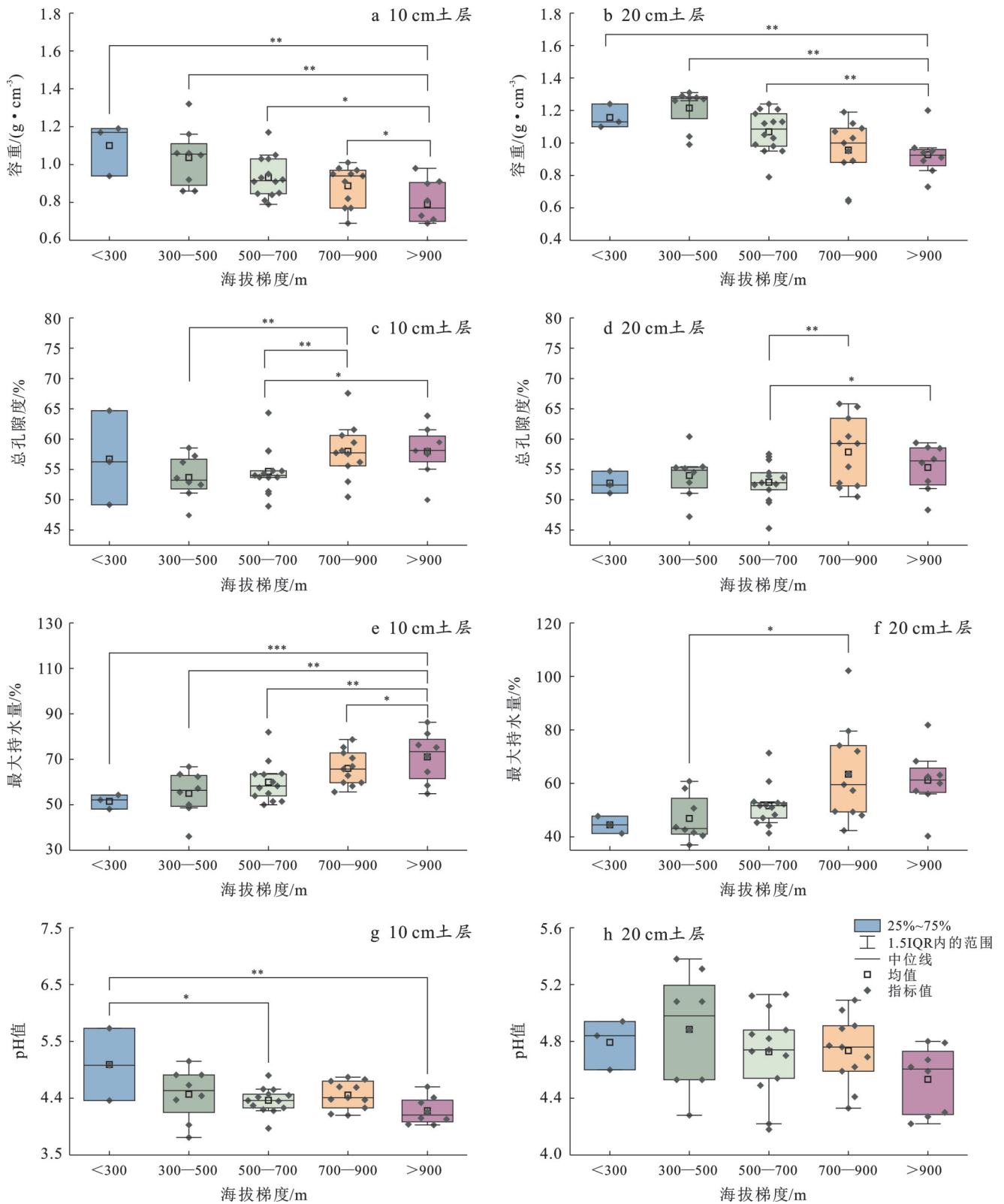
2.2.2 大瑶山森林土壤全氮、水解氮随海拔变化特征

相同土层不同海拔处的土壤全氮差异显著 ($p < 0.01$), 两个土层土壤全氮均随海拔升高呈增加的趋势。由差异性结果可知 (图 6), 两个土壤层高海拔组 (海拔 > 900 m) 的全氮均值显著高于其他组 ($p < 0.05$)。随着土壤采样深度的增加, 不同海拔组的全氮含量均表现为 0—10 cm 土壤层高于 10—20 cm 土壤层, 表层全氮含量较亚表层高出 57.07%。主要因为植物凋落物、根系分泌物及死亡根系主要集中于 0—10 cm 表层, 其分解形成的有机质是土壤全氮的主要来源。土壤水解氮随海拔的变化趋势与全氮一致, 两个土壤层高海拔组 (海拔 > 900 m) 的水解氮均

值分别为 430.80 和 251.66 mg/kg, 显著高于其他各海拔组 ($p < 0.01$)。

随着土壤采样深度的增加, 不同海拔组的水解

氮含量均表现为 0—10 cm 土壤层高于 10—20 cm 土壤层。表层水解氮含量较亚表层高出 55.24%, 在海拔 >900 m 处两个土壤层的水解氮含量差异最大。



注: *表示不同海拔之间的指标含量变化存在显著差异水平($*p < 0.05$, $**p < 0.01$, $***p < 0.001$)。下同。

图2 大瑶山森林土壤物理性质随海拔梯度的变化

Fig.2 Variation of soil physical properties along altitude gradient in Dayao Mountain

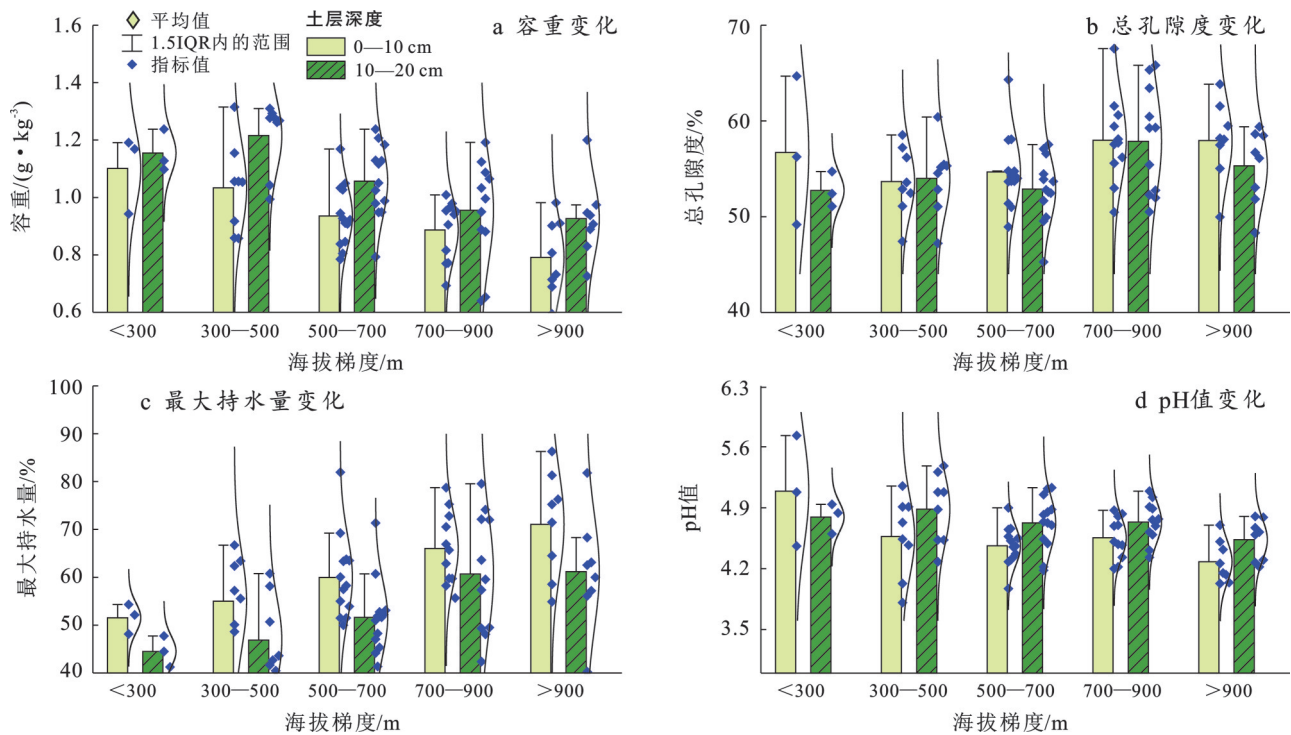


图3 大瑶山森林不同土层土壤物理指标含量变化

Fig.3 Variations in soil physical indicators across different layers in Dayao Mountain

表3 大瑶山森林2个土层不同海拔土壤化学性质指标特征

Table 3 Characteristics of chemical property indices in two soil horizons at different altitudes of forest in Dayao Mountain

土壤层/cm	项目	有机质/ ($g \cdot kg^{-1}$)	全氮/ ($g \cdot kg^{-1}$)	全磷/ ($g \cdot kg^{-1}$)	全钾/ ($g \cdot kg^{-1}$)	水解氮/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	速效钾/ ($mg \cdot kg^{-1}$)
0—10	极小值	13.53	0.58	0.26	9.87	52.70	20.92
	极大值	177.81	6.08	0.98	36.35	630.4	289.08
	均值	70.90	2.73	0.48	18.41	264.87	97.97
	标准差	43.42	1.55	0.05	1.22	133.11	46.26
	变异系数/%	61.25	56.78	10.41	6.64	50.26	47.22
10—20	极小值	7.26	0.36	0.16	5.98	34.6	20.71
	极大值	162.22	5.67	0.81	35.55	572.6	226.63
	均值	42.78	1.73	0.38	19.31	170.16	67.06
	标准差	31.76	1.10	0.03	0.89	114.31	5.97
	变异系数/%	74.23	63.58	7.79	4.61	67.18	8.81

2.2.3 大瑶山森林土壤全钾、速效钾随海拔变化特征

不同土壤层的全钾含量随海拔升高呈波动降低的变化趋势(图7),但各组间的差异并不显著($p > 0.05$),且表现为10—20 cm土壤层的全钾含量高于0—10 cm土层。土壤全钾含量主要来源于母岩矿物的风化,其空间分布更多受区域地质背景控制,而非短期生物地球化学过程影响。研究区可能具有均质化的母质来源或相似风化强度,导致全钾垂直空间

异质性不显著。不同土层速效钾含量随海拔升高而增加,在0—10 cm土层中,速效钾随海拔变化差异显著($p < 0.01$),低海拔组(海拔<300 m)与中高海拔组(300—900 m)处的速效钾含量无显著组间差异,但最高海拔组呈现数值上的富集趋势。0—20 cm土层深度的土壤速效钾含量随海拔变化趋势与0—10 cm土层一致,随海拔升高而增加,变异系数为8.81%,为低等程度变异,随海拔升高无显著差异。10—20 cm土层深度速效钾含量变化范围为20.71~226.63 mg/kg,

低于 0—10 cm 土层深度中的速效钾含量,植物细根及枯落物等物质主要分布于上表层中,而凋落物分解

过程中,钾因水溶性高而快速释放^[18],导致 0—10 cm 土壤层的速效钾含量高于 10—20 cm 土壤层。

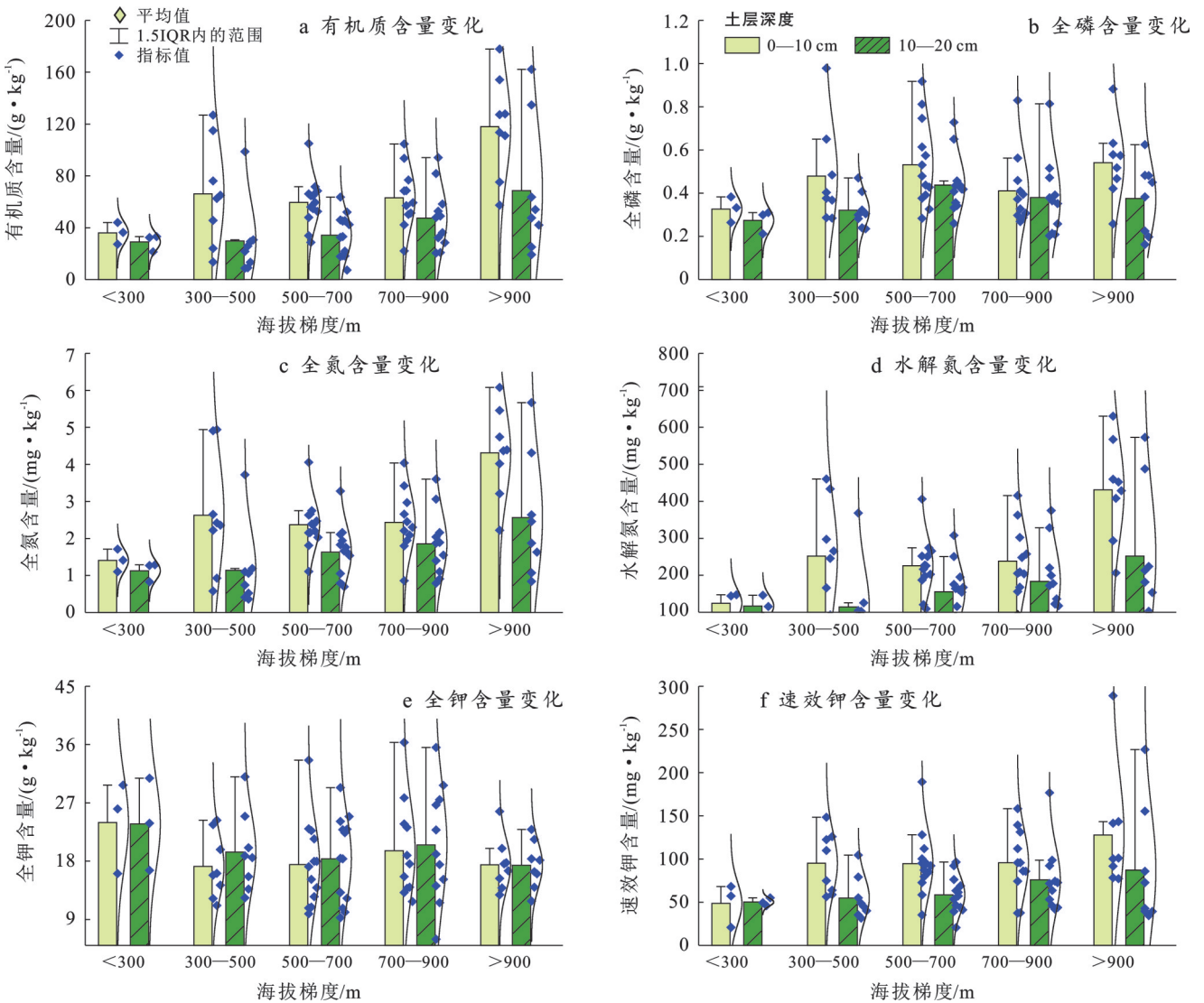


图 4 大瑶山森林不同土壤层土壤化学指标含量变化

Fig.4 Variations in soil chemical indicators across different layers of forest in Dayao Mountain

2.3 土壤理化性质与海拔梯度的相关性分析

研究通过 Pearson 相关分析揭示了海拔梯度下土壤理化性质与养分指标的耦合关系(表 4)。海拔升高与土壤容重、pH 值呈极显著负相关,与最大持水量、有机质、全氮及水解氮呈极显著正相关 ($p < 0.01$), 相关系数分别为 0.561, 0.737, 0.558 和 0.542, 表明高海拔区域因低温抑制有机质分解和人为扰动减少, 促进了土壤结构疏松化及碳氮库的协同积累。土壤容重作为关键物理参数, 与最大持水量、总孔隙度、有机质、全氮、水解氮呈显著负相关, 与 pH 值、全钾的正相关, 说明较低容重的土壤普遍具有更优的孔隙结构和更活跃的有机质—氮循环过程。有机质

与全氮、水解氮和速效钾的极显著正相关, 相关系数分别为 0.961, 0.976 和 0.767, 与 pH 值呈极显著负相关, 有机质可通过腐殖质络合作用促进氮素形态转化, 还能通过释放有机酸活化磷钾元素, 同时酸性代谢产物的持续输入导致 pH 值降低。全氮与水解氮、速效钾呈显著正相关性, 相关系数分别为 0.981 和 0.716, 全磷与多数指标无显著相关性 ($p > 0.05$), 仅与最大持水量、全钾呈弱正相关 ($p < 0.05$), 相关系数分别为 0.328 和 0.355; 全钾与速效钾无直接相关关系。分析结果系统阐明了高海拔生态系统土壤理化性质的协同演化规律, 为大瑶山森林土壤碳氮固存机制解析及养分管理策略优化提供了理论依据。

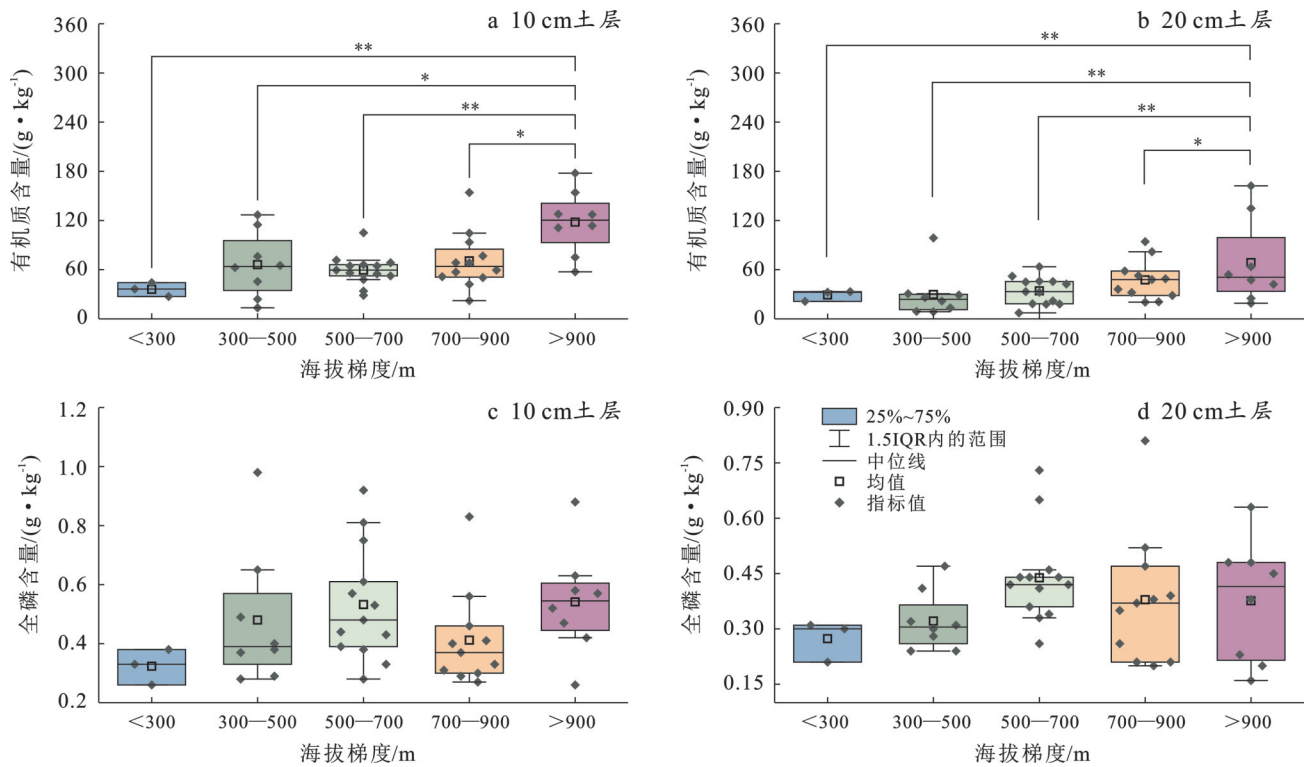


图 5 大瑶山森林土壤有机质、全磷随海拔梯度的变化

Fig.5 Variations in soil organic matter and total phosphorus along altitude gradient of forest in Dayao Mountain

表 4 大瑶山森林土壤理化性之间及其与海拔梯度的相关性分析

Table. 4 Correlation analysis among soil physicochemical properties and with altitude gradient in Dayao Mountain

指标	海拔 梯度/m	容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	总孔隙 度/%	最大持水 量/%	pH 值	有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	水解氮/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全磷/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全钾/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
容重	-0.631**									
总孔隙度	0.275	-0.349*								
最大持水量	0.561**	-0.882**	0.621**							
pH 值	-0.416**	0.322*	-0.033	-0.188						
有机质	0.737**	-0.417**	0.170	0.377*	-0.531**					
全氮	0.558**	-0.424**	0.148	0.390**	-0.543**	0.961**				
水解氮	0.542**	-0.409**	0.166	0.367*	-0.557**	0.976**	0.981**			
全磷	0.117	-0.215	0.172	0.328*	-0.020	0.127	0.202	0.103		
全钾	-0.176	0.201	0.415**	0.000	0.172	-0.112	-0.122	-0.106	0.355*	
速效钾	0.336*	-0.357*	0.241	0.411**	-0.322*	0.767**	0.716**	0.740**	0.265	0.205

注:*表示相关性达到显著水平($p < 0.05$); **表示相关性达到极显著水平($p < 0.01$)。

3 讨论

土壤理化性质的空间异质性是由成土母质、地形及生物气候因素共同作用形成。当变异系数 $\leq 15\%$ 时表征属性呈现低度变异性,反映样本参数具有较高稳定性;变异系数介于 $16\% \sim 35\%$ 则表示中等变异特征,体现土壤要素的空间分布存在可观测差异;而变异系数 $\geq 36\%$ 时则被界定为强变异性,这通常

与人类活动干扰或复杂成土因素导致的显著空间异质特征相关^[19]。研究表明,0—20 cm 土壤层中,容重、有机质、氮素组分及速效钾的变异系数均超过 35% ,呈现高等强度变异;总孔隙度为中等强度变异,pH 值、全磷和全钾变异系数低于 15% ,表现为低等强度变异,这与魏强等^[20]在兴隆山森林生态系统的研究结论一致。土壤容重作为关键物理指标,与孔隙度协同调控水分保持效率。

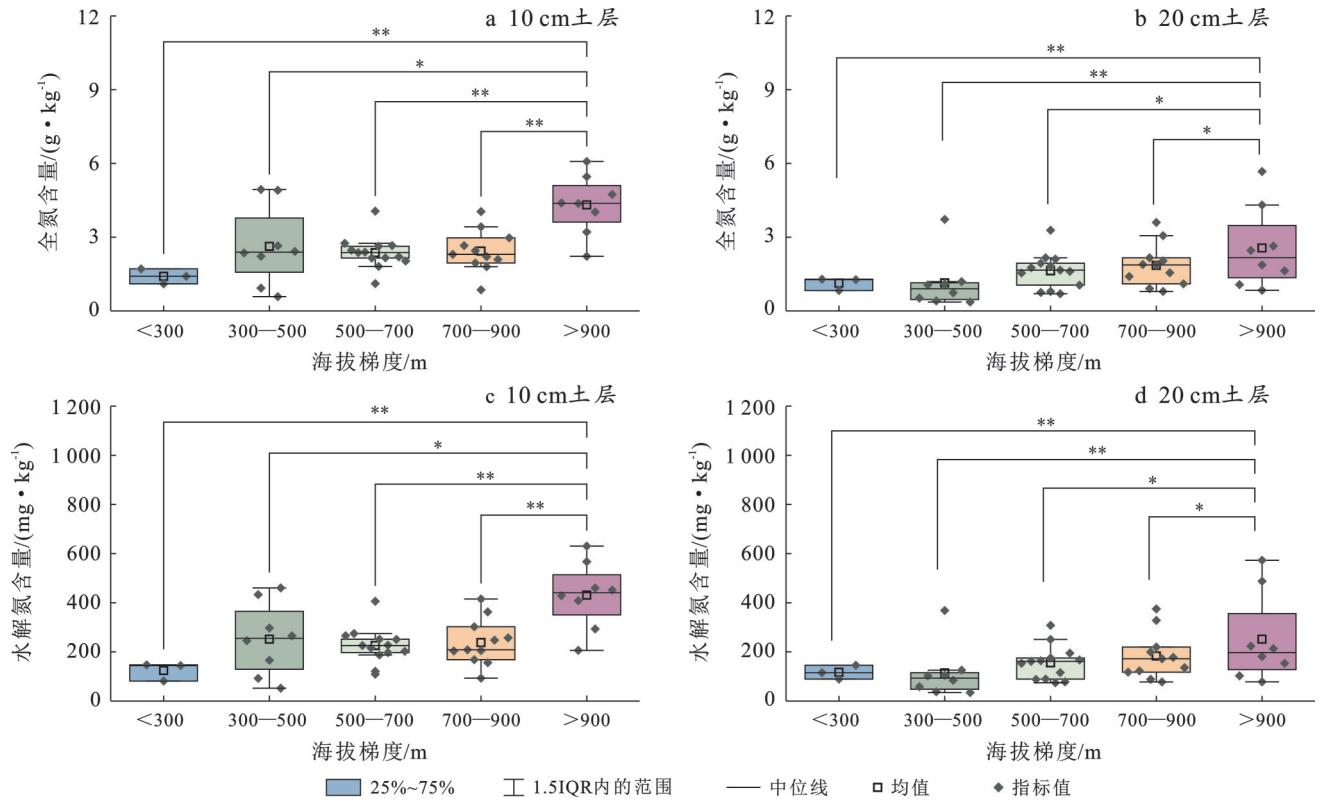


图 6 大瑶山森林土壤全氮、水解氮随海拔梯度的变化

Fig.6 Variations in soil total nitrogen and hydrolyzed nitrogen along altitude gradient in Dayao Mountain

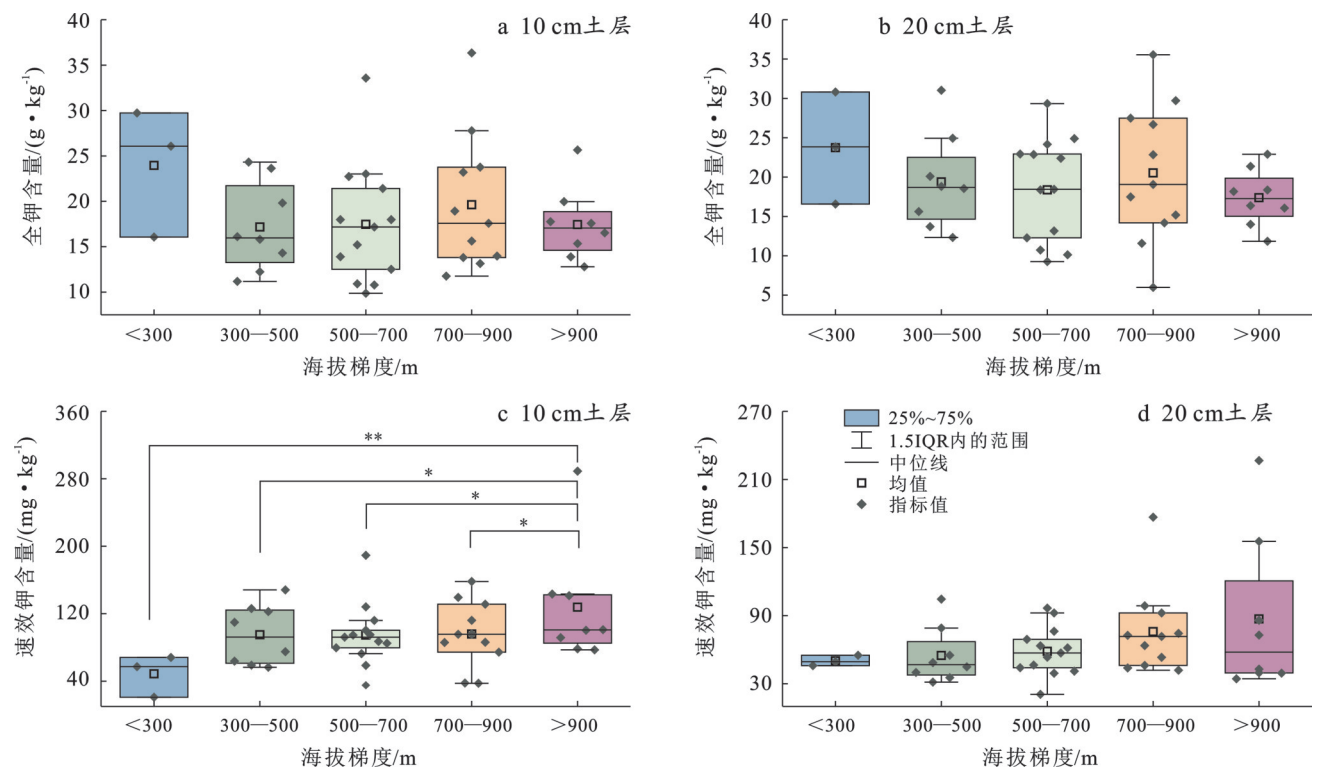


图 7 大瑶山森林土壤全钾、速效钾随海拔梯度的变化

Fig.7 Variations in soil total potassium and available potassium along altitude gradient in Dayao Mountain

在本研究中,随着海拔的升高,0—10 cm 土层土壤容重平均含量从 $1.10 g/cm^3$ 降低到 $0.79 g/cm^3$,总孔隙度增加 $4.31%$,最大持水量则从 $51.52%$ 增加到

$71.01%$;10—20 cm 土层土壤容重从 $1.15 g/cm^3$ 降低到 $0.93 g/cm^3$,总孔隙度增加 $5.13%$,最大持水量则从 $44.50%$ 增加到 $61.17%$,可见,容重降低或孔隙度

增大均可显著提升土壤持水能力^[21]。高海拔区含水量增加,增加了枯落物及微生物量,提高土壤孔隙度并降低容重。垂直地带性发育使高海拔区以粗骨性土壤为主,>2 mm土壤颗粒比例达25%~35%,与低海拔区黏化层形成土壤结构差异显著,海拔每升高200 m,容重降低0.05~0.08 g/cm³^[22]。乔木根系生物量随海拔升高增加15%~30%,细根网络促进土壤孔隙发育^[23],叠加高海拔区昼夜温差与降雨淋溶作用,共同形成水热梯度调控的容重异质性机制。土壤pH值是衡量土壤酸碱程度的核心参数,对植被生长发育和微生物代谢过程具有显著调控作用。研究表明,土壤pH值沿海拔梯度呈规律性递减,主要受垂直植被带谱变化导致的凋落物输入增加与酸性物质淋溶增强影响^[24]。亚热带季风气候下的脱硅富铝化与淋溶作用使土壤普遍呈现弱酸性^[16]。在沿土壤剖面方向上,土壤pH值随土层深度增加而升高,因0—10 cm土壤层微生物活动旺盛促进有机酸生成导致表层酸化^[25]。

土壤有机质、全氮等养分随海拔升高而增加。同时,全球变暖背景下,高海拔森林土壤预计将释放更多CO₂,加剧气候变化。本研究显示,在垂直带谱上有机质、氮素组分(全氮、水解氮)及钾元素(全钾、速效钾)均随海拔升高而递增,其中有机质与氮素组分的海拔分异特征最为显著($p < 0.01$),空间变异系数达35%。全磷含量虽呈上升趋势,但海拔梯度上差异不显著($p > 0.05$)。何志祥等^[26]研究发现在高寒山地生境下,土壤热力学条件呈现显著递减趋势,直接导致异养微生物群落代谢活性呈指数衰减,限制微生物代谢速率,促使有机物质的积累和提高部分营养元素的有效性。王琳等^[27]研究也发现海拔升高致使土壤动物数量和活性随之降低,从而导致有机质分解速率降低。王平等^[28]研究北热带海拔梯度各山地土壤肥力分布特征时发现随海拔梯度增加枯落物不断增多,腐殖质累积作用不断加强,使得有机质质量分数增多。另外,海拔升高导致温度降低,进而减少土壤表面CO₂通量和不稳定有机质,使得有机质不断累积增多^[29],刘岳坤^[30]研究发现海拔由低到高,不同林型的土壤CO₂平均年通量有所降低,碳损失量减少直接提升土壤表层有机质储量。同一海拔梯度下不同土壤层有机质含量差异显著,0—10 cm土壤表层的有机质含量显著高于10—20 cm亚表层,呈现“表聚性”特征,主要因表层凋落物输入量大、根系密集且分解作用强,随土层加深根系减少导致SOM逐渐降低^[31]。森林土壤氮素分布由有机质积累与迁移作用共同调控。全氮和水解氮浓度优先在表层聚集

后,随降水或其他介质向下迁移扩散,形成自上而下递减趋势。全磷含量与海拔无显著相关性($p > 0.05$),这一现象可能与铁氧化物化学固定作用抑制其有效性有关^[32],全钾则因母质均一性(砂页岩风化作用)及气候条件一致性,不同海拔间未现显著差异(变异系数<15%)。

本研究显示,土壤理化性质与海拔及土层深度显著相关,且各指标间存在明显相互作用。有机质在海拔梯度上空间异质性最显著,因此本研究重点分析有机质与主要养分参数的关系。大瑶山森林土壤有机质含量与容重、pH值呈极显著负相关关系。有机质含量增加,促进腐殖质形成,改善土壤结构使其疏松,从而降低容重^[20]。同时,有机质积累经腐殖化生成腐殖酸等含酸性官能团物质,降低土壤pH值。有机质与全氮、水解氮、速效钾极显著正相关,与殷红慧等^[33]研究土壤有机质和氮含量相关关系时得出的结论一致。有机质增加为微生物提供丰富碳源,增强活性以加速有机氮矿化,提升全氮和水解氮含量;同时改善土壤结构,增加孔隙度与保水性以减少养分流失,从而提高速效钾有效性^[34]。此外,有机质分解产物可直接或间接促进矿物钾释放,增加速效钾含量以提升肥力。综上所述,有机质通过为微生物提供碳源及改善土壤团聚结构等促进土壤养分循环,维持森林土壤养分库的动态平衡和供给。因此,亟需加强对高海拔森林的保护和管理,通过采取禁止采集高海拔区域的枯落物等措施来平衡土壤中的有机碳、氮素形态和含量,提高森林的长期固土保肥效果。

4 结论

(1) 大瑶山森林土壤理化性质在海拔梯度上呈现显著空间异质性。土壤最大持水量、有机质、全氮及水解氮含量随海拔升高呈波动性递增趋势,变异系数均超过40%,显示强空间变异特征;而土壤容重与pH值则随海拔梯度上升呈波动性下降趋势,全磷、全钾含量在海拔梯度上未表现出显著差异($p > 0.05$)。

(2) 在垂直剖面上,0—10 cm土壤层的有机质、全氮及水解氮含量较10—20 cm土壤层分别高出65.21%,57.07%,55.24%($p < 0.05$),呈现典型的“表聚性”特征。

(3) 相关性分析表明,土壤有机质与容重、全氮、水解氮等指标均存在极显著相关性($p < 0.01$),揭示其在改善土壤结构、促进养分循环中的核心作用。

参考文献(References)

- [1] 贾鲁净,杨联安,封涌涛,等. 宝鸡市农耕区土壤养分空间变异及其影响因素分析[J]. 干旱区资源与环境, 2022,36(12):135-143.

- Jia Lujing, Yang Lian'an, Feng Yongtao, et al. Spatial variation of soil nutrients and its influencing factors in Baoji City [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022, 36(12):135-143.
- [2] 董佳琦,张勇,傅伟军,等. 香榧主产区林地土壤养分空间异质性及其肥力评价[J]. *生态学报*, 2021, 41(6): 2292-2304.
- Dong Jiaqi, Zhang Yong, Fu Weijun, et al. Spatial variation of soil nutrients and evaluation of integrated soil fertility in *Torreya grandis* cv. *merrillii* region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(6):2292-2304.
- [3] 张忠华,胡刚,祝介东,等. 喀斯特森林土壤养分的空间异质性及其对树种分布的影响[J]. *植物生态学报*, 2011, 35(10):1038-1049.
- Zhang Zhonghua, Hu Gang, Zhu Jiedong, et al. Spatial heterogeneity of soil nutrients and its impact on tree species distribution in a karst forest of southwest China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(10):1038-1049.
- [4] 党坤良,张长录,陈海滨,等. 秦岭南坡不同海拔土壤肥力的空间分异规律[J]. *林业科学*, 2006, 42(1):16-21.
- Dang Kunliang, Zhang Changlu, Chen Haibin, et al. Spatial distribution and variation pattern of soil fertility at different altitude on south slope in Qinling Mountains [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42(1):16-21.
- [5] 熊凯,赵玉娟,陈健,等. 川西米亚罗亚高山暗针叶林土壤pH和养分空间异质性分析[J]. *北京林业大学学报*, 2022, 44(2):55-64.
- Xiong Kai, Zhao Yujuan, Chen Jian, et al. Spatial heterogeneity of soil pH and nutrients in Miyaluo subalpine dark coniferous forest of western Sichuan, southwestern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2022, 44(2):55-64.
- [6] Nottingham A T, Turner B L, Whitaker J, et al. Soil microbial nutrient constraints along a tropical forest elevation gradient: A belowground test of a biogeochemical paradigm [J]. *Biogeosciences*, 2015, 12(20):6071-6083.
- [7] 杜芳芳,童根平,郭瑞,等. 浙江亚热带自然保护区土壤养分空间异质性及其影响因素[J]. *浙江农林大学学报*, 2023, 40(1):145-154.
- Du Fangfang, Tong Genping, Guo Rui, et al. Spatial heterogeneity of soil nutrients and the influencing factors in Zhejiang subtropical nature reserve [J]. *Journal of Zhejiang A & F University*, 2023, 40(1):145-154.
- [8] 牟晨,王海燕,崔雪,等. 长白山天然针阔混交林土壤养分空间异质性及其影响因素[J]. *应用与环境生物学报*, 2024, 30(5):894-903.
- Mu Chen, Wang Haiyan, Cui Xue, et al. Spatial heterogeneity of soil nutrients and its influencing factors in natural coniferous and broad-leaved mixed forest in Changbai Mountain [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2024, 30(5):894-903.
- [9] 李丹,范拴喜,孙旻涵,等. 秦岭中段大白山以北不同海拔土壤碳·氮·磷生态化学计量特征[J]. *安徽农业科学*, 2023, 51(9):49-52.
- Li Dan, Fan Shuanxi, Sun Minhan, et al. Ecological stoichiometry characteristic of carbon, nitrogen and phosphorus at different altitudes in north of Taibai Mountain in the middle Qinling Mountains [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2023, 51(9):49-52.
- [10] 方丽娜,杨效东,杜杰. 土地利用方式对西双版纳热带森林土壤微生物生物量碳的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(4):837-844.
- Fang Lina, Yang Xiaodong, Du Jie. Effects of land use pattern on soil microbial biomass carbon in Xishuangbanna [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(4):837-844.
- [11] 杜虎,曾馥平,宋同清,等. 广西主要森林土壤有机碳空间分布及其影响因素[J]. *植物生态学报*, 2016, 40(4): 282-291.
- Du Hu, Zeng Fuping, Song Tongqing, et al. Spatial pattern of soil organic carbon of the main forest soils and its influencing factors in Guangxi, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2016, 40(4):282-291.
- [12] 谭一波,田红灯,郑威,等. 广西猫儿山森林群落土壤物理性质空间变异及其环境影响因素[J]. *广西林业科学*, 2017, 46(2):123-129.
- Tan Yibo, Tian Hongdeng, Zheng Wei, et al. Spatial variation of soil physical properties of forest community and its environmental impact factors on Mao'er mountain, Guangxi [J]. *Guangxi Forestry Science*, 2017, 46(2):123-129.
- [13] 刘璐,曾馥平,宋同清,等. 喀斯特木论自然保护区土壤养分的空间变异特征[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(7): 1667-1673.
- Liu Lu, Zeng Fuping, Song Tongqing, et al. Spatial heterogeneity of soil nutrients in karst area's Mulun National Nature Reserve [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(7):1667-1673.
- [14] 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.
- Huang Yuanze, Hu Bin, Zhang Lingrui, 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.
- [15] 颜萍,周平,苏雅丽,等. 2020年南岭山地典型森林生态系统土壤养分数据集[J]. *中国科学数据*, 2023, 8(4): 120-133.
- Yan Ping, Zhou Ping, Su Yali, et al. A dataset of soil

- nutrients of typical forest ecosystems in Nanling Mountain in 2020 [J]. *China Scientific Data*, 2023,8(4):120-133.
- [16] 陈平,叶栋,陆鸿材,等.大瑶山的土壤和森林资源特点[J].*广西农业科学*,1984,15(4):1-8.
Chen Ping, Ye Dong, Lu Hongcai, et al. Characteristics of soil and forest resources in Dayao Mountain [J]. *Guangxi Agricultural Sciences*, 1984,15(4):1-8.
- [17] Brady N C, Weil R R. The nature and properties of soils [M]. Upper Saddle River, N. J:Prentice Hall, 2008.
- [18] 汤萃文,苏研科,王国亚,等.甘肃迭部扎尕那地区山地土壤过程的垂直分带性研究[J].*冰川冻土*,2013,35(1):84-92.
Tang Cuiwen, Su Yanke, Wang Guoya, et al. Vertical zonation of alpine soil processes in Zhagana area of Diebu, Gansu Province [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013,35(1):84-92.
- [19] 管孝艳,王少丽,高占义,等.盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系[J].*生态学报*,2012,32(4):198-206.
Guan Xiaoyan, Wang Shaoli, Gao Zhanyi, et al. Spatio-temporal variability of soil salinity and its relationship with the depth to groundwater in salinization irrigation district [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(4):198-206.
- [20] 魏强,凌雷,王多锋,等.不同海拔甘肃兴隆山主要森林群落的土壤理化性质[J].*西北林学院学报*,2019,34(4):26-35.
Wei Qiang, Ling Lei, Wang Duofeng, et al. Soil physicochemical properties of three main forest communities at different altitudes in Xinglong Mountain of Gansu Province [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2019,34(4):26-35.
- [21] 李卓,吴普特,冯浩,等.容重对土壤水分蓄持能力影响模拟试验研究[J].*土壤学报*,2010,47(4):611-620.
Li Zhuo, Wu Pute, Feng Hao, et al. Simulated experiment on effects of soil bulk density on soil water holding capacity [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(4): 611-620.
- [22] 杨玉海,陈亚宁,陈亚鹏,等.伊犁河流域土壤分布规律及其对土地开发的意义[J].*新疆农业科学*,2008,45(S3):25-28.
Yang Yuhai, Chen Yaning, Chen Yapeng, et al. Soil distribution in the Ili River basin and its significance for land development [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2008,45(S3):25-28.
- [23] 连纲,郭旭东,傅伯杰,等.黄土高原小流域土壤容重及水分空间变异特征[J].*生态学报*,2006,26(3):647-654.
Lian Gang, Guo Xudong, Fu Bojie, et al. Spatial variability of bulk density and soil water in a small catchment of the Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006,26(3):647-654.
- [24] 王长庭,龙瑞军,王启基,等.高寒草甸不同海拔梯度土壤有机质氮磷的分布和生产力变化及其与环境因子的关系[J].*草业学报*,2005,14(4):15-20.
Wang Changting, Long Ruijun, Wang Qiji, et al. Distribution of organic matter nitrogen and phosphorus along an altitude gradient and productivity change and their relationships with environmental factors in the alpine meadow [J]. *Acta Pratacultural Science*, 2005,14(4): 15-20.
- [25] 胡小燕,段爱国,张建国,等.南亚热带杉木人工成熟林密度对土壤养分效应研究[J].*林业科学研究*,2018,31(3):15-23.
Hu Xiaoyan, Duan Aiguo, Zhang Jianguo, et al. Effect of stand density on soil nutrient of Chinese fir mature plantations in south Asia subtropical zone [J]. *Forest Research*, 2018,31(3):15-23.
- [26] 何志祥,朱凡.雪峰山不同海拔梯度土壤养分和微生物空间分布研究[J].*中国农学通报*,2011,27(31):73-78.
He Zhixiang, Zhu Fan. Spatial distribution of soil nutrient and soil microbes along altitude gradient in the Xuefeng Mountain [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011,27(31):73-78.
- [27] 王琳,欧阳华,周才平,等.贡嘎山东坡土壤有机质及氮素分布特征[J].*地理学报*,2004,59(6):1012-1019.
Wang Lin, Ouyang Hua, Zhou Caiping, et al. Distribution characteristics of soil organic matter and nitrogen on the eastern slope of Mt. Gongga [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004,59(6):1012-1019.
- [28] 王平,华红莲,丁智强,等.海拔梯度及典型土地利用类型对北热带山地土壤有机质和综合肥力的影响[J].*热带地理*,2023,43(1):144-154.
Wang Ping, Hua Honglian, Ding Zhiqiang, et al. The effects of altitude and land use on organic matter and integrated fertility of soils in the northern tropics mountain [J]. *Tropical Geography*, 2023,43(1):144-154.
- [29] Zhang Yongqiang, Ai Juanjuan, Sun Qiwi, et al. Soil organic carbon and total nitrogen stocks as affected by vegetation types and altitude across the mountainous regions in the Yunnan Province, south-western China [J]. *Catena*, 2021,196:104872.
- [30] 刘岳坤,庞军柱,宸凡,等.秦岭火地塘林区不同海拔不同林型土壤CO₂、CH₄、N₂O通量研究[J].*西北林学院学报*,2019,34(1):1-10.
Liu Yuekun, Pang Junzhu, Yi Fan, et al. Soil-atmosphere exchange of nitrous oxide, methane and carbon dioxide of different forest types at different elevations in huoditang forest region of Qinling Mountains [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2019,34(1):1-10.