

DOI: 10.11766/trxb202506030256

CSTR: 32215.14.trxb202506030256

杨倩, 刘目兴, 徐加盼, 易军, 王传涛, 丁淑婷. 不同土地利用方式下土壤团聚体对养分及化学计量特征的影响[J]. 土壤学报, 2026, YANG Qian, LIU Muxing, XU Jiapan, YI Jun, WANG Chuantao, DING Shuting. Effect of Soil Aggregates on Stoichiometry Characteristics Nutrient Under Different Land Use Types [J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,

不同土地利用方式下土壤团聚体对养分及化学计量特征的影响*

杨倩^{1,2}, 刘目兴^{1,2†}, 徐加盼^{1,2}, 易军^{1,2}, 王传涛^{1,2,3}, 丁淑婷^{1,2}

(1. 地理过程分析与模拟湖北省重点实验室, 武汉 430079; 2. 华中师范大学城市与环境科学学院, 武汉 430079; 3. 鲁东大学资源与环境工程学院, 山东烟台 264025)

摘要: 土壤团聚体稳定性与养分生态化学计量特征是评估生态修复与土壤质量的重要指标。为探究亚热带丘陵区典型土地利用方式通过改变土壤团聚体的分布特征, 从而影响土壤养分差异的机制, 以湖北省英山县 3 种典型土地利用方式(林地、茶园和耕地)的土壤为研究对象, 结合化学计量方法和多元统计模型, 解析团聚体稳定性水平与土壤有机碳、全氮、全磷的分布特征。结果表明: (1) 林地>5 mm 粒径含量分别为茶园和耕地的 4.11 倍和 1.89 倍, 平均质量直径(MWD)与几何平均直径(GMD)表现为林地>耕地>茶园, 茶园的可蚀性 K 值和分形维数 D 值最高; (2) 林地土壤有机碳含量显著高于其他样地, 达 $10.22 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮含量表现为林地>茶园>耕地, 全磷含量则呈相反趋势; C:P 与 N:P 均表现为林地>耕地>茶园; (3) 团聚体特征与养分指标显著相关 ($P<0.05$), > 5 mm 团聚体对 C:P 和 N:P 起主要作用; 偏最小二乘路径模型(PLS-PM)拟合优度均高于 0.61, 路径系数表明不同土地利用方式下团聚体粒径对化学计量特征的影响路径存在差异, 尤以林地的直接影响最为显著。综上, 林地作为土地利用方式可以有效提高团聚体稳定性, 促进养分固存和平衡, 是亚热带丘陵区提升土壤质量、实现可持续发展的有效措施。

关键词: 亚热带丘陵区; 土壤稳定性; 土壤可蚀性; 化学计量特征; 偏最小二乘路径模型

中图分类号: S153

文献标志码: A

Effect of Soil Aggregates on Stoichiometry Characteristics Nutrient Under Different Land Use Types

YANG Qian^{1,2}, LIU Muxing^{1,2†}, XU Jiapan^{1,2}, YI Jun^{1,2}, WANG Chuantao^{1,2,3}, DING Shuting^{1,2}

(1. Key Laboratory for Geographical Process Analysis & Simulation, Wuhan 430079, China; 2. College of Urban and Environmental Sciences, Central China Normal University, Wuhan 430079, China; 3. School of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai, Shandong 264025, China)

Abstract: 【Objective】 Land-use change is a primary driver of soil structure alteration and nutrient cycling in ecosystems. In subtropical hilly areas of China, which are ecologically fragile and experience significant land-use pressure, understanding the interplay between soil physical structure and biogeochemical cycles is crucial for sustainable land management. The stability of soil aggregates and the ecological stoichiometry of nutrients serve as critical indicators for evaluating ecological restoration and soil quality. Thus, this study aims to elucidate the mechanism by which typical land use practices in subtropical

* 国家自然科学基金项目(42471045, 41771261)和湖北省自然科学基金项目(2015CFA141)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos.42471045, 41771261) and the Natural Science Foundation of Hubei Province (No. 2015CFA141)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: liumuxing@ccnu.edu.cn

作者简介: 杨倩(1996-), 女, 贵州铜仁人, 博士研究生, 主要从事土壤物理研究。E-mail: yangqian_97@163.com

收稿日期: 2025-06-03; 收到修改稿日期: 2025-12-05; 网络首发日期(www.cnki.net):

hilly areas influence nutrient variations through alterations in the distribution characteristics of soil aggregates. **【Method】** We examined soils from three representative land use types (forestland, tea garden, and cultivated land) in Yingshan County, Hubei Province. Key stability indices, including the mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD), soil erodibility (K), and fractal dimension (D), were calculated. Utilizing both stoichiometric methods and multivariate statistical models, we analyzed the relationship between aggregate stability levels and the distribution patterns of soil organic carbon, total nitrogen, and total phosphorus. **【Result】** The results revealed that: (1) The content of >5 mm aggregates in forestland soils was 4.11 and 1.89 times higher than that in tea garden and cultivated land, respectively. Both the mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) followed the order: forestland $>$ cultivated land $>$ tea garden. The tea garden soil exhibited the highest erodibility (K) value and fractal dimension (D) value. (2) The soil organic carbon content in forest land was significantly higher than in other plots, reaching $10.22 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. Total nitrogen content followed the order of forest land $>$ tea garden $>$ cultivated land, while total phosphorus content exhibited the opposite trend. Both C:P and N:P ratios were highest in forestland soils, followed by cultivated land and tea garden. (3) Aggregate characteristics were significantly correlated with nutrient indicators ($P < 0.05$), with the macroaggregates (> 5 mm) playing a major role in shaping C:P and N:P ratios. Also, the partial least squares path modeling (PLS-PM) showed good fit (goodness-of-fit > 0.61) and the path coefficients indicated that the influence pathways of aggregate particle size on nutrient stoichiometric ratios varied under different land use types, with the direct effect being most pronounced in forested areas. **【Conclusion】** This study illustrates that changes in land use significantly affect the relationship between soil structure and nutrient cycling. Forestland, which experiences minimal disturbance, encourages the creation of stable macroaggregates. This process enhances long-term nutrient sequestration and maintains a balanced stoichiometric environment. On the other hand, intensive management practices in tea gardens and cultivated lands can disrupt aggregate stability. This disturbance leads to structural degradation and a notable stoichiometric imbalance. Therefore, it is crucial to preserve forestland and implement sustainable soil practices in managed lands. This approach will significantly improve soil quality and promote ecological sustainability in subtropical hilly areas.

Key words: Subtropical hilly region; Soil stability; Soil erodibility; Stoichiometric characteristics; Partial least squares path modeling

亚热带丘陵区作为我国重要的生态与农业产区，其独特的气候条件和地形地貌在我国“两屏三带”生态格局中占据重要地位。然而，受人类活动和强降雨的影响^[1]，该区域面临着地表水蚀加剧、水土流失和土壤肥力退化等诸多挑战^[2]，严重威胁着区域生态平衡和农业生产的可持续性^[3]。近年来，该区实施了一系列生态修复和综合治理措施，生态环境逐步恢复与改善^[4]。土地利用方式的改变是生态修复的核心策略，然而不同的土地利用方式对土壤的影响存在显著差异^[5]。在亚热带地区，土地利用方式显著影响土壤团聚体孔隙特征，土壤大团聚体的增加，加强了对土壤的保护作用，进而影响土壤养分保持能力^[6]。因此，研究土壤团聚体特征和土壤养分化学计量比的差异，探讨团聚体相关指标对土壤养分的影响路径，对深入理解生态系统养分循环平衡机制以及区域治理策略优化具有重要意义。

土壤团聚体是土壤结构的基本单元，在维持土壤稳定性、调控土壤养分循环和水分保持等方面发挥着关键作用^[7]。团聚体稳定性是衡量土壤抗侵蚀能力及区域生态系统恢复成效的核心指标^[8]，它不仅影响土壤养分的储存和供应，还与养分的化学计量特征紧密关联^[9]。化学计量特征聚焦于生态系统和元素平衡的相互作用^[10]，其中，土壤中的碳氮比（C:N）可用于表征土壤有机质矿化速率，碳磷比（C:P）反映磷元素的有效性，氮磷比（N:P）则指示土壤养分供应水平。剖析养分间的耦合关系，能深入揭示土壤养分循环和转化机制^[11]，是探究土壤养分平衡和微生物活性的重要指标。土壤团聚体通过物理保护作用、改变微环境及调节微生物活动等，对土壤养分的储存、分布和有效性产生深远影响^[12]，这些影响最终导致土壤生态系统中碳、氮、磷等关键养分元素的化学计量特征的差异。

生态恢复对土壤团聚体特征和土壤养分含量的影响是退化生态系统研究的热点。Chen 等^[13]认为在亚热带森林生态系统中，天然林较草地更有利于提高团聚体稳定性，进而影响土壤有机碳和氮的

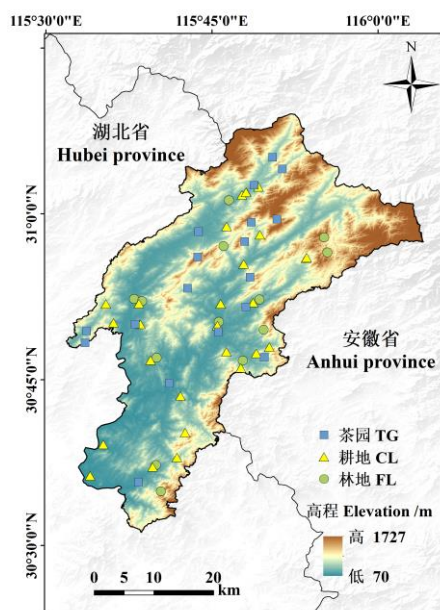
含量。区域环境差异、成土过程及人类活动等因素导致碳氮磷化学计量比存在显著的空间变异性^[10]。全球表层土壤碳氮磷化学计量比均值约为 186:13:1^[14]。我国表层土壤的 C:N、C:P、N:P 分别为 12.3、52.7 和 4.3^[15]。王超等^[16]指出,碳氮磷化学计量比可作为敏感性指标,表征耕作层养分变化及化学计量特征。研究显示,亚热带地区天然阔叶林向次生林转变时,土壤的碳、氮和磷含量呈下降趋势,土地利用方式和土壤深度对土壤的 C:N 影响显著^[17]。同时,大团聚体的增加还有利于维持养分的长期稳定^[12]。然而在同一气候带内,刘顺等^[18]认为森林演替对土壤养分和 C:P、N:P 影响显著,但对 C:N 影响并不显著,土地利用方式的变化对土壤养分及生态化学计量特征的影响仍然存在分歧。

已有研究多聚焦于单一植被类型或特定土地利用方式下的养分化学计量特征^[19-21],对多种土地利用方式的对比研究较少。在亚热带丘陵区林地、茶园和耕地等典型土地利用方式下,土壤团聚体对养分化学计量特征影响机制尚不明确。因此,本研究以亚热带丘陵区林地、茶园和耕地为研究对象,结合大范围实地采样与室内实验分析,探究不同土地利用方式下土壤团聚体对土壤养分及其化学计量比特征的调控,重点关注:(1)亚热带丘陵区土壤团聚体结构稳定性水平;(2)团聚体结构如何影响土壤养分含量变化及生态化学计量特征。通过研究明确土壤团聚体稳定性在不同土地利用方式下的变化趋势,以及土壤碳、氮、磷的分布和平衡关系,揭示土地利用方式与土壤质量提升之间的内在联系,为改善亚热带丘陵区土壤质量和生态恢复实践提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究在湖北省英山县域内(30°31′ 00″—31°08′ 58″ N, 115°31′ 53″—116°04′ 02″ E)进行(图 1),研究区内海拔 70~1 727 m,地形以山地丘陵为主,位于大别山南麓,气候类型为亚热带湿润季风气候,年均温 17 °C,多年平均降水量为 1 398 mm,降雨充沛但分布不均,4—8 月降水量约占全年总降水量的 70 %。土壤类型以黄棕壤和水稻土为主,其中黄棕壤占比约为 86.97 %。传统的土地利用类型主要为林地和耕地,20 世纪 80 年代以来,受经济利益驱动,南方山地丘陵区林地改植茶园的现象普遍,茶园种植规模不断扩大,逐渐成为该地区重要的土地利用方式^[22]。



注 Note: TG- Tea garden, CL-Cultivated land, FL-Forestland

图 1 研究区及样点分布

Fig. 1 Study area and sample distribution

1.2 样品采集与指标测定

根据实地调查结果,结合研究区土地利用现状,选取了具有代表性的林地、茶园和耕地为研究对象。于 2024 年 7—8 月在区内布设 61 个样点并完成样品采集,其中林地天然形成的针阔混交林,优势树种为马尾松和樟树,茶园建植年限在 10~20 年之间,耕地主要作物为玉米和油菜。清除地表草本植物和腐殖质层后,根据样点实地情况和耕作层深度,采用体积为 100 cm³ 的环刀统一采集 0~20 cm 未扰动土壤,以测定土壤容重 (Bulk density, BD)。此外,每个采样点进行 3 次重复采样,混合构成 2 kg 样品,置于密封袋中。样品在室内自然风干后剔除石子和植物根系,研磨过筛后测定土壤 pH、土壤机械组成、水稳性团聚体和土壤有机碳、全氮和全磷。采样点基本信息和土壤机械组成见表 1。

表 1 采样点基本信息和土壤机械组成

Table 1 Basic information and soil mechanical composition of the sampling sites

样地类型 Sample plot type	样点数量 Sample number	海拔 Elevation/m	容重 Bulk density/(g·cm ⁻³)	pH	砂粒 Sand/%	粉粒 Silt/%	黏粒 Clay/%
林地 ^①	14	304.36±217.89A	1.25±0.12A	5.46±0.36A	72.96±2.23B	16.24±0.55A	10.80±0.91A
茶园 ^②	20	306.42±208.98A	1.36±0.11A	5.36±0.47A	70.28±1.62B	18.86±0.8A	10.86±0.80A
耕地 ^③	27	211.74±75.79B	1.28±0.15A	5.35±0.47A	75.93±1.45A	15.24±0.93A	8.83±0.76A

① Forestland (FL) ② Tea garden (TG) ③ Cultivated land (CL)

注:不同大写字母表示同一指标不同土地利用方式间差异显著 ($P<0.05$),下同。Note: Different capital letters indicate significant differences ($P<0.05$) among various land use types for the same indicator. The same below.

水稳性团聚体通过湿筛法进行测定^[23],取 500 g 自然风干土壤样品,放入 10 mm、5 mm、2 mm、1 mm、0.5 mm、0.25 mm 土壤标准套筛,以 300 r·min⁻¹ 的转速震荡筛分 5 min 后,获取各级粒径占总土壤质量的百分比。根据干筛法结果,按相应比例配置 3 份 50 g 的样品,置于 XY-100 型土壤团聚体分析仪中,以 30~40 r·min⁻¹ 的转速进行震荡筛分,30 min 后对土样进行烘干称重,获取各级水稳性土壤团聚体的质量 (精确至 0.01 g)。土壤 pH 采用 Delta FE 20 pH 计测定,有机碳采用油浴-重铬酸钾加热法测定,全氮采用自动定氮仪测定,全磷采用硫酸-高氯酸消解—钼锑抗分光光度法测定^[24]。

1.3 数据处理与分析

基于团聚体粒径组成计算出土壤团聚体稳定性指标:平均质量直径 (Mean Weight Diameter, MWD)^[25]、几何平均直径 (Geometric Mean Diameter, GMD)^[26]、可蚀性因子 K 值^[27]和分形特征 D 值^[28]。

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n W_i \bar{X}_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (1)$$

$$GMD = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n W_i \ln \bar{X}_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \right] \quad (2)$$

$$K = 7.954 \times \left\{ 0.0017 + 0.0494 \times \exp \left[-0.5 \times \left(\frac{\log GMD + 1.675}{0.6986} \right)^2 \right] \right\} \quad (3)$$

式中, X_i 为团聚体的平均直径 (mm); W_i 为相应粒级的团聚体质量 (g)。

$$D = 3 - \frac{\log [W(\delta < R_i) / W_0]}{\log (R_i / R_{\max})} \quad (4)$$

式中, R_i 为相邻两个粒径的均值 (mm), $R_{\max}$ 为最大粒径团聚体的均值 (mm)。

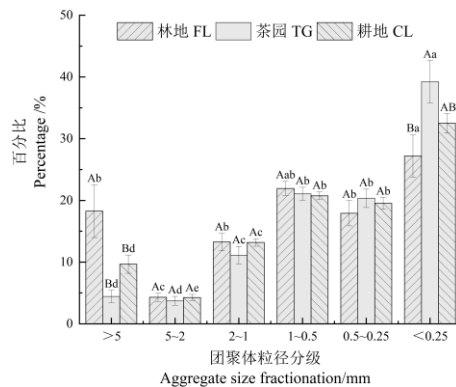
采用 Excel 2019 和 SPSS 26 软件对数据进行处理和分析。单因素方差分析 (one-way analysis of variance, one-way ANOVA) 和 Duncan 法对土壤团聚体粒径分布、稳定性指标和土壤碳氮磷含量进行方差分析和多重比较。运用 Pearson 相关性分析评价土壤团聚体稳定性与土壤养分特征之间的相关性。冗余分析 (redundancy analysis, RDA) 用于定量评价土壤团聚体及环境因子对土壤养分特征的影响。数据分析和制图分别在 SPSS 26、Origin 2022 中完成, 冗余分析在 R 4.3.2 中利用 “rdacca.hp” 包进行。

将土壤团聚体粒径、土壤性质、MWD、GMD、 K 值和土壤养分计量特征纳入偏最小二乘路径模型 (Partial least squares path modeling, PLS-PM)。PLS-PM 模型是一种探索多因素间复杂因果关系的综合分析模型, 适用于小样本、非正态分布和多维结构的数据。为了更好地评估模型的预测效能, 采用拟合优度 (Goodness-of-fit index, GOF) 统计量对模型的整体预测性能进行评价。PLS-PM 分析在 R 4.3.2 中利用 “plsmp” 包进行。

2 结果

2.1 土壤团聚体特征

土壤水稳性团聚体组分在不同土地利用方式下表现出显著差异 ($P<0.05$) (图 2)。在 >5 mm 粒径中, 林地 (18.29%) 显著高于茶园 (4.45%) 和耕地 (9.69%), 分别为茶园和耕地的 4.11 倍和 1.89 倍。而在 <0.25 mm 粒径中, 呈现出茶园 (39.23%) $>$ 耕地 (32.52%) $>$ 林地 (27.22%) 的变化趋势, 其中茶园显著高于林地 ($P<0.05$), 为林地的 1.44 倍, 其余粒径大小中未呈现明显差异。三种土地利用方式土壤均以微团聚体占比最高 (<0.25 mm), 并表现出随着团聚体粒径减小, 含量逐渐增加的变化趋势。其中茶园 <0.25 mm 粒径含量显著高于其余粒径, 相比 >5 mm 和 $5\sim2$ mm 粒径含量分别增加了 34.78% 和 35.48%; 相较于茶园, 耕地 <0.25 mm 粒径含量降低使大团聚体含量相对增加; 不同于耕地和茶园, 林地团聚体含量在不同粒径之间分布较为均匀。

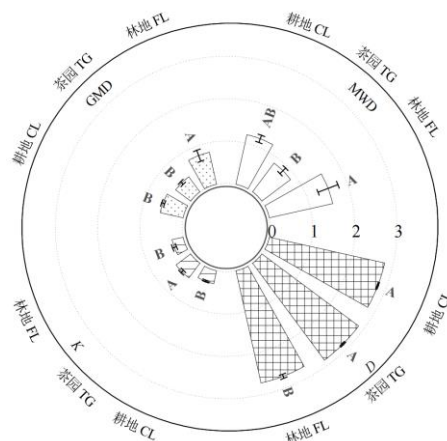


注: 不同大写字母表示同一粒径不同土地利用方式间差异显著 ($P<0.05$), 不同小写字母表示同一土地利用方式不同粒径大小间差异显著 ($P<0.05$)。Note: Different capital letters indicate significant differences ($P<0.05$) between land use types with the same particle size, while different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) between land use types with different particle sizes.

图 2 不同土地利用方式下土壤水稳性团聚体粒径组成的百分比

Fig. 2 The percentage of soil water-stable aggregate fractions under different land use types

由图 3 可知, 林地的 MWD 和 GMD 最高, 而茶园最低, 相较于耕地和茶园, 林地的 MWD 分别提升了 0.34 和 0.69, GMD 提升了 0.22 和 0.33; 相反, 茶园和耕地的可蚀性 K 值显著高于林地 ($P<0.05$), 分别为林地的 1.61 倍和 1.17 倍; 不同土地利用方式下分形维数 D 的范围为 2.72~2.86, 林地显著低于茶园和耕地 ($P<0.05$)。



注: MWD 表示平均质量直径, GMD 表示几何平均直径, K 表示土壤可蚀性因子, D 表示分形特征, 不同大写字母表示同一指标不同土地利用方式间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。Note: MWD represents mean weight diameter, GMD represents geometric mean diameter, K represents soil erodibility, D represents fractal dimension. Different capital letters indicate significant differences ($P < 0.05$) between the same indicator and different land use patterns. The same below.

图 3 不同土地利用方式下土壤团聚体的稳定性

Fig. 3 Stability of soil aggregates under different land use types

2.2 土壤养分含量变化及其化学计量特征

土壤有机碳和全氮、全磷含量表现出不同程度的变化。如图 4a~图 4c 所示, 各样地有机碳含量呈现出林地 ($10.22 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 茶园 ($9.49 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 耕地 ($8.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的变化趋势; 全氮含量表现为林地 ($0.92 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 茶园 ($0.86 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 耕地 ($0.77 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$); 全磷含量表现为耕地 ($0.74 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 茶园 ($0.63 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 林地 ($0.61 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。有机碳和全氮含量均表现出林地和茶园显著高于耕地 ($P < 0.05$), 全磷含量在三类样地中未表现出显著差异。

不同土地利用方式下土壤养分化学计量特征如图 4c、图 4d 所示, C:N、C:P、N:P 的均值变化范围分别为 10.93~11.60、20.13~24.42、1.66~2.14。整体而言, 茶园的 C:N 值最高 (11.60), 与林地和耕地的比值差异不明显; 林地的 C:P 值和 N:P 值显著高于耕地和茶园, 分别为茶园的 1.21 倍和 1.29 倍。

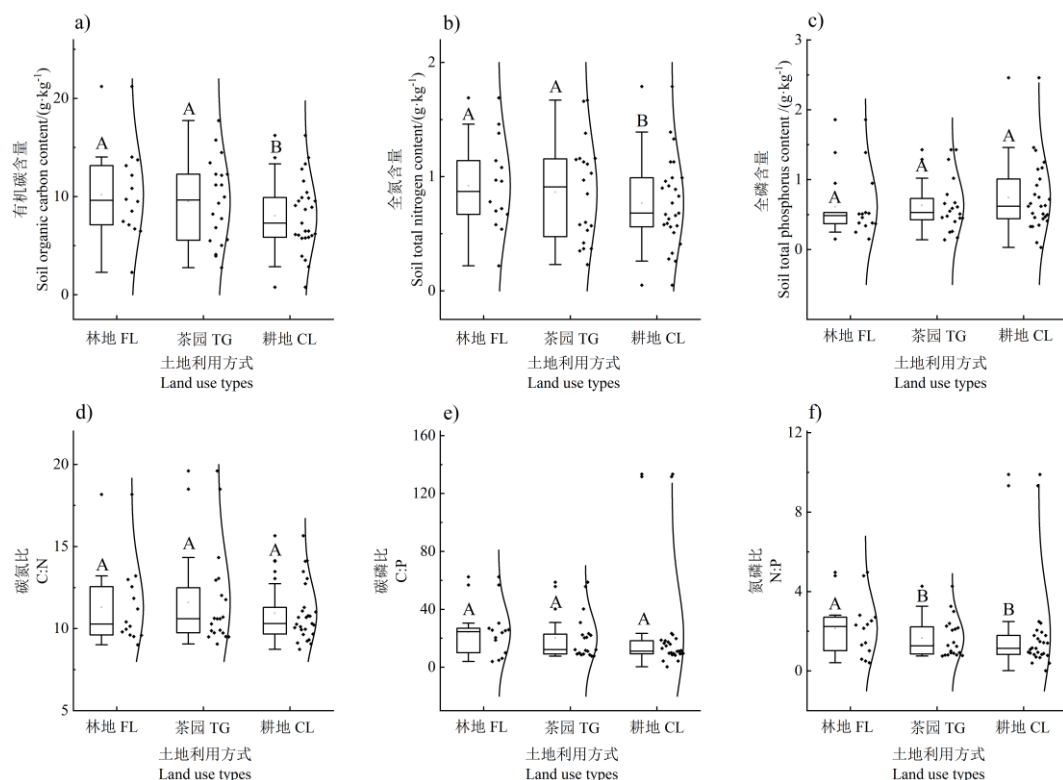


图 4 不同土地利用方式下土壤有机碳、全氮、全磷含量及其化学计量特征

Fig. 4 Soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus content and their stoichiometric ratios under different land use types

2.3 土壤团聚体与土壤养分特征的相关性

对不同土地利用方式下土壤团聚体特征和养分特征进行 Pearson 相关系数评价 (表 3), 结果显示, 有机碳含量与 2~1 mm 团聚体粒径、砂粒呈极显著负相关 ($P<0.01$), 与粉粒呈极显著正相关 ($P<0.01$); 全氮含量与粉粒呈极显著正相关 ($P<0.01$), 却与 2~1 mm 粒径、砂粒和 5~2 mm 粒径分别呈极显著负相关 ($P<0.01$) 和显著负相关 ($P<0.05$); 碳氮含量与砂粒含量之间呈极显著负相关 ($P<0.01$), 与粉粒含量之间呈极显著正相关 ($P<0.01$), C:P 和 N:P 则与黏粒含量呈极显著正相关 ($P<0.01$)。C:N、N:P 与土壤 > 5 mm 粒径团聚体、MWD 值、GMD 值之间为正相关关系, 相关程度达到显著水平 ($P<0.05$); C:N、N:P 分别与 0.5~0.25 mm 粒径团聚体、分形维数 D 值呈显著负相关 ($P<0.05$)。

表 3 土壤因子与土壤养分特征的相关系数

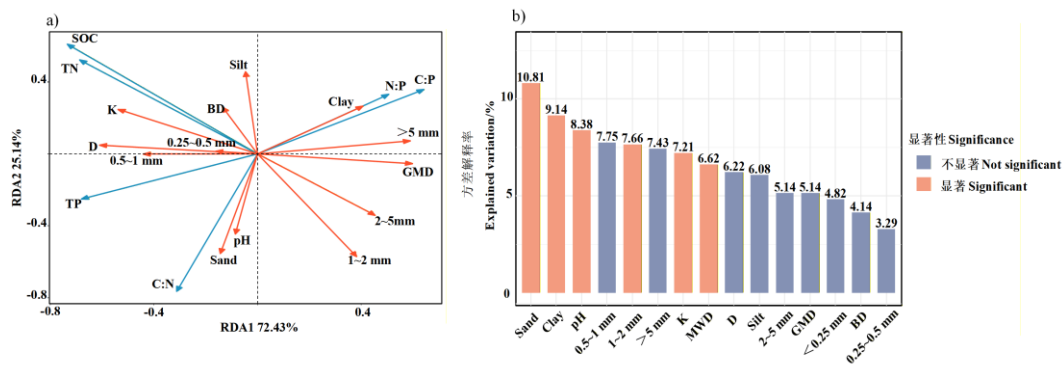
Table 3 Correlation coefficient between soil factors and soil nutrient characteristics

土壤因子 Soil factor	有机碳 SOC	全氮 TN	全磷 TP	碳氮比 C:N	碳磷比 C:P	氮磷比 N:P
>5 mm	0.075	0.001	-0.200	0.117	0.322*	0.324*
5~2 mm	-0.236	-0.287*	-0.195	0.072	0.210	0.188
2~1 mm	-0.350**	-0.331**	-0.192	0.011	0.021	0.031
1~0.5 mm	0.039	0.066	0.227	-0.143	-0.076	-0.067
0.5~0.25 mm	-0.121	-0.059	-0.082	-0.139	-0.281*	-0.257*
<0.25 mm	0.176	0.201	0.244	0.001	-0.148	-0.163
容重	0.210	0.223	0.022	-0.057	-0.059	-0.043

砂粒	-0.439**	-0.378**	0.023	-0.125	-0.214	-0.220
粉粒	0.358**	0.334**	-0.002	0.039	0.045	0.062
黏粒	0.221	0.137	-0.045	0.194	0.375**	0.351**
pH	-0.079	-0.031	0.106	0.050	-0.074	-0.050
MWD	-0.004	-0.075	-0.223	0.109	0.316*	0.316*
GMD	-0.031	-0.095	-0.231	0.097	0.278*	0.280*
K	0.141	0.186	0.220	-0.058	-0.214	-0.218
D	0.018	0.084	0.228	-0.096	-0.292*	-0.295*

注: *表示显著相关 ($P<0.05$), **表示极显著相关 ($P<0.01$)。Note: * indicates significant correlation ($P<0.05$); ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

冗余分析和层次分割结果解释了土壤养分特征的主要驱动因素 (图 5), RDA1 和 RDA2 分别解释了 72.43 % 和 25.14 %, 总解释率达到 97.57 % (图 5a), 其中有机碳、全氮和容重、可蚀性方向一致, 且夹角较小, 表明两者之间具有正向作用, 2~1 mm 团聚体粒径是影响有机碳和全氮的负向因子, 全磷含量与 1~0.5 mm、0.5~0.25 mm 粒径方向一致, >5 mm 粒径团聚体和黏粒含量则对全磷含量产生负作用, pH 和砂粒在影响 C:N 值中起着主要作用, >5 mm 粒径团聚体则在影响 C:P 和 N:P 比值中起着主要作用。层次分割结果解释了各单变量的重要性 (图 5b), 其中砂粒、黏粒、pH、2~1 mm 粒径、K 值和 MWD 值对变异的解释率显著, 所有的土壤因子中, 砂粒的解释率最高, 为 10.81 %。



注: BD: 容重, Sand: 砂粒, Clay: 黏粒, Silt: 粉粒。Note: BD: Bulk density, Sand: Sand particles, Clay: Clay particles, Silt: Silt particles.

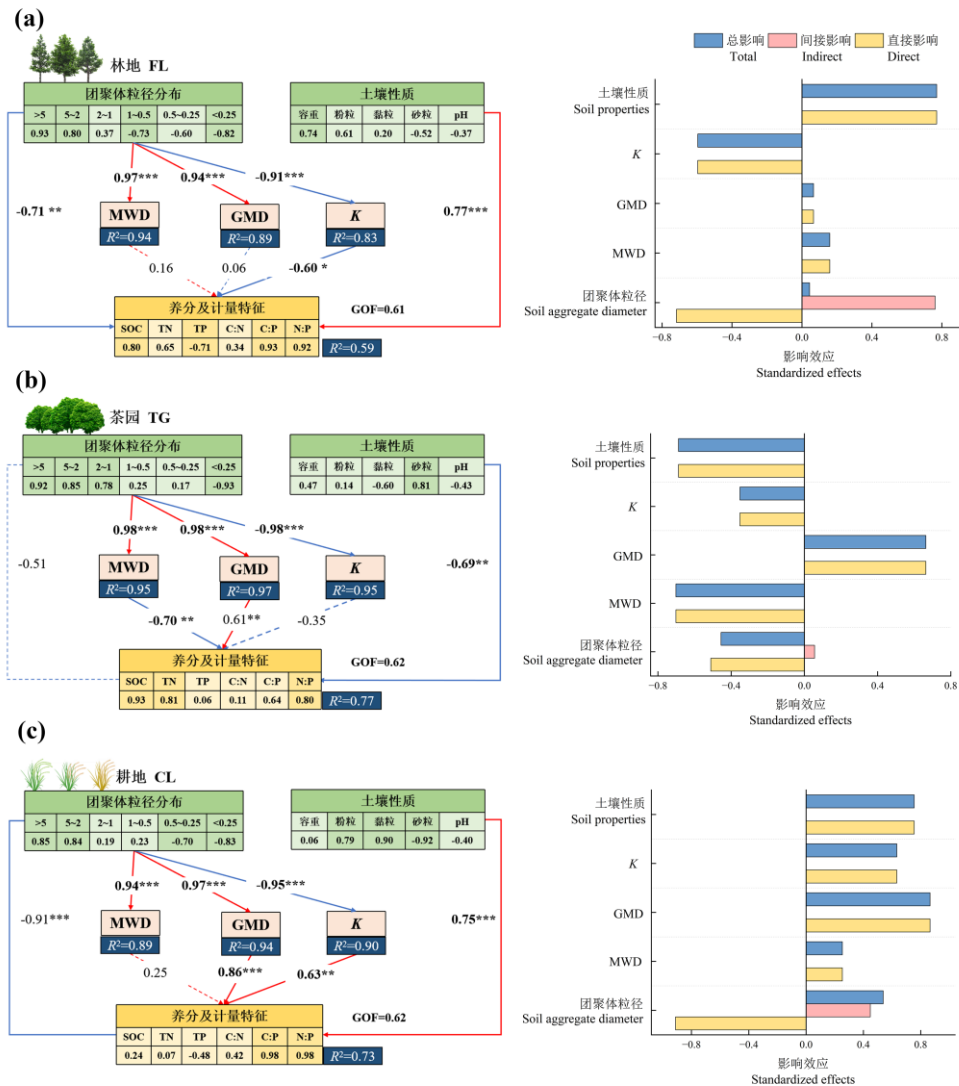
图 5 土壤团聚体与土壤养分特征的冗余分析 (a) 与层次分割分析 (b)

Fig. 5 Redundancy analysis of soil aggregates and soil nutrient characteristics (a) and hierarchical partitioning (b)

2.4 土壤团聚体对化学计量比特征的影响机制

为进一步阐明不同土地利用方式下土壤团聚体稳定性指标和可蚀性对土壤养分及其化学计量比特征的影响, 构建 PLS-PM 模型以评估不同土地利用方式下, 土壤团聚体粒径分布、土壤性质、MWD、GMD、K 等 5 个潜变量和养分及化学计量比特征之间的直接关系和间接关系。结果如图 6 所示, 三种土地利用方式的模型 GOF 值分别为 0.61、0.62 和 0.62, 表明模型均符合既定的精度要求。从影响效应结果可知, 团聚体指标对养分及计量比特征以直接影响为主, 三种土地利用方式下团聚体粒径分布特征均对 MWD、GMD 产生极显著正效应 (路径系数 ≥ 0.94 , $P<0.001$), 对 K 值产生极显著负效应 (路径系数 ≤ -0.91 , $P<0.001$)。在林地中, 团聚体粒径通过可蚀性对养分及化学计量比特征产生极显著负效应 (路径系数 -0.60, $P<0.01$), 同时直接对养分及化学计量比特征产生显著负效应 (路径系数 -0.71, $P<0.01$)。在茶园和耕地方式下, 团聚体粒径分布特征分别通过影响 MWD 和 GMD、GMD 和 K 值对养分及计量比特征产生极显著负效应 ($P<0.01$)。此外, 三种利用方式下, 林地和耕

地土壤性质对养分及计量比特征产生显著正效应（路径系数分别为 0.77 和 0.75, $P<0.001$ ），而茶园土壤性质中砂粒所占比重最高，对养分及计量比特征产生显著负效应（路径系数为-0.69, $P<0.01$ ）。



注：单头箭头表示因果关系的指示方向，红色箭头为正相关，蓝色箭头为负相关，直线为显著影响 ($P<0.05$)，虚线为不显著影响 ($P>0.05$)，*、**和***表示在 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 和 $P<0.001$ 水平关系显著，变量下的数值为各变量所占的权重值， R^2 表示模型中方差的解释比。Note: Single headed arrows indicate the direction of causal relationships, red arrows indicate positive correlations, blue arrows indicate negative correlations, straight lines indicate significant effects ($P<0.05$), dashed lines indicate insignificant effects ($P>0.05$), *, **, and *** indicate significant relationships at $P<0.05$, $P<0.01$, and $P<0.001$, and the values under the variables represent the weight values of each variable. R^2 represents the explanatory power of variance in the model.

图 6 团聚体粒径分布对养分及计量特征的影响机制

Fig. 6 The mechanism of aggregate influence on nutrients and quantitative characteristics

3 讨论

3.1 不同土地利用方式对土壤团聚体特征和养分含量的影响

土壤团聚体作为保持和供应土壤肥力的物质基础，其分布特征和稳定性水平对土壤抗侵蚀性和

保水性具有重要影响^[9], 是评估土壤结构和理化性质的有效手段^[1]。在本研究中, 林地的 MWD 和 GMD 值最大, 耕地次之, 而茶园最小 (图 3), 与 Hu 和 Lan^[29]、徐凡迪等^[21]在亚热带地区的研究结果一致, 由于森林植被根系发达, 能分泌多种有机物黏结微团聚体及矿物^[29], 同时茂密的植被枝叶和枯枝落叶物有效地截留降水, 减少侵蚀^[8], 从而促进土壤大团聚体的形成与稳定^[30]。林地分形维数 D 值显著低于茶园和耕地 (图 3), 进一步表明林地的土壤抗侵蚀能力最强, 土壤质量显著提高。相比之下, 耕地和茶园因人类活动频繁, 受作物自身物质循环及人工栽培管理措施影响^[14-15], 易使团聚体结构破碎, 微团聚体含量增加 (图 2), 茶园 MWD 和 GMD 值低于耕地 (图 3), 在茶园建设过程中, 挖沟和梯壁造成微地形的改变, 且茶园频繁的日常采摘造成土壤板结紧实^[19], 以及茶园微生物含量较低等因素^[21], 致使茶园的可蚀性 K 值显著高于林地和耕地。

土地利用方式的差异直接影响了土壤养分的储存与供应。除全磷含量外, 林地和茶园的有机碳含量和全氮含量显著高于耕地 (图 4)。耕地在作物生长中消耗大量养分, 而林地的根系分泌物、植物残体和微生物残体大量分解使其土壤养分含量更高^[31], 茶园有机碳和全氮含量高于耕地, 这与日常管理维护及土壤表层叶片等植物残留物分解有关^[19], 弥补了凋落物减少带来的碳氮含量的降低^[21]。

不同土地利用方式下, 土壤的养分化学计量特征 (C:N、C:P、N:P) 差异明显, 反映了土壤生态系统的养分平衡与微生物活动状况^[10]。与徐凡迪等^[21]研究不同的是, 研究区内茶园的 C:N 值最高, 茶树生长过程中对氮素的高效利用^[32], 导致土壤中有机碳相对增加。三种土地利用方式下的 C:P 值和 N:P 值低于全国水平, 研究区内可能存在养分限制^[33], 其中林地的 C:P 值和 N:P 值显著高于茶园和耕地, 分别为茶园的 1.21 倍和 1.29 倍, 表明林地生态系统在养分循环过程中能够更有效地富集和储存碳、氮等养分。此外, 林地植物种类丰富, 根系多样, 凋落物大量累积, 为土壤微生物提供了丰富的碳源和营养, 促进了微生物对磷的活化^[34], 使得土壤可利用磷含量相对稳定, 从而维持了较高的 C:P 比值。同时, 林下植被的多样性也使得植物对土壤养分的吸收具有互补性, 从而提高碳、氮、磷的利用效率。而耕地和茶园由于长期的农业活动^[35], 导致土壤养分大量流失, C:N、C:P 和 N:P 比值均处于较低水平, 进一步证实了林地恢复在亚热带丘陵区退化生态系统中的有效性。

3.2 不同土地利用方式下土壤养分化学计量特征及其对团聚体的响应差异

土地利用方式改变了土壤团聚体特征, 进一步影响土壤养分特征^[5]。相关性分析 (表 3) 显示, 有机碳含量与 2~1 mm 团聚体粒径和砂粒呈极显著负相关 ($P<0.01$), 而与粉粒呈极显著正相关 ($P<0.01$)。由于中等团聚体的结构相对不稳定^[31], 相较于微团聚体, 其缺乏更稳定的胶结保护作用, 易被微生物分解, 释放出有机碳^[13], 而土壤砂粒的减少会促进有机碳的迁移、转化和累积。全氮含量与粉粒含量呈极显著正相关 ($P<0.01$), 与砂粒含量、2~1 mm 和 5~2 mm 粒径团聚体呈显著负相关, 表明砂粒含量增加加速了氮素的溶解和迁移, 大粒径团聚体的孔隙空间和比表面积更大, 能够为氮素提供更多的吸附位点和保护空间, 减少氮的淋失和挥发^[2], 而中等粒径团聚体的增加, 导致氮素更易被植物吸收利用, 含量降低^[36]。然而, 与喀斯特地区^[37]不同的是, 全磷与团聚体粒径的相关性相对较弱, 这是由磷在土壤中的化学吸附和储存特性造成的, 其分布受土壤矿物组成的影响较大^[5,15]。C:N、N:P 与大团聚体、稳定性指标 MWD、GMD 之间为正相关关系, 证实了土壤结构越稳定, 计量特征比值随之增高。

冗余分析和层次分割结果揭示 2~1 mm 团聚体粒径是影响有机碳和全氮的负向因子, 与相关分析结果一致 (表 3), 团聚体粒径分布显著影响土壤养分特征。不同粒径团聚体在磷的固定和释放过程中发挥着不同作用^[14,22], 全磷含量与 1~0.5 mm、0.5~0.25 mm 粒径方向一致, 而 >5 mm 粒径团聚体则对全磷含量产生负作用。>5 mm 粒径团聚体则在影响 C:P 和 N:P 比值中起着主要作用。此外, 土壤酸碱度和团聚体粒径是调节土壤养分化学计量特征的重要因素。层次分割结果强调在不同土地利用方式下, 砂粒、黏粒、pH、2~1 mm 粒径、 K 值和 MWD 值对土壤养分特征及其化学计量特征的主导作用, 土地利用方式通过改变土壤的基本性质和土壤团聚体的组成特征, 影响着团聚体稳定性和土壤养分的分布与转化^[12]。

PLS-PM 模型显示, 土壤团聚体粒径分布特征对 MWD、GMD 产生极显著正效应, 对 K 值产生极显著负效应。良好的团聚体粒径分布能够增强土壤的稳定性, 提高其抗侵蚀能力, 减少养分流失。不同土地利用方式下土壤团聚体稳定性指标和可蚀性对土壤养分及其计量特性存在多途径的影响。三种利用方式下团聚体分布特征分别通过影响 K 值、MWD 和 K 值、GMD 和 K 值对养分及计量特征产生极显著负效应 ($P<0.01$), 表明三种利用类型均通过改变可蚀性影响养分变化, 而农业耕作和茶园种植破坏团聚体稳定性结构, 改变 GMD 和 MWD 值, 影响养分的保持和供应^[16]。在林地中, 团聚体分布特征对养分及计量特征产生显著负效应 (路径系数-0.71, $P<0.01$), 团聚体的形成将养分紧密包裹, 降低了其被微生物和酶接触分解的可能性^[38], 影响土壤养分的矿化速率和有效性。而茶园和耕地因团聚体稳定性相对较差, 对养分及其计量特征产生不同程度的影响。此外, 三种方式下土壤性质对养分及计量特征产生显著效应 (路径系数均在 0.65 以上, $P<0.01$), 受耕作活动、施肥管理等措施影响, 导致土壤的粒径组成、化学性质在调节养分状况方面发挥着重要作用^[22]。

总体而言, 林地的土壤团聚体粒径分布较为合理, 稳定性水平高, 土壤养分含量丰富, 养分化学计量比值协调, 利于土壤生态系统的稳定和养分的高效循环。虽然茶园土壤养分含量相对较高, 但受团聚体分布和稳定性的限制, 导致养分的化学计量特征失衡。耕地土壤团聚体稳定性较差, 养分含量较低, 化学计量特征显示出养分贫乏和失衡状态, 亟需通过调整土地利用方式和土壤管理措施来改善。在生态恢复实践中, 应根据利用方式的特点, 采取针对性的土壤管理策略, 以促进土壤团聚体的形成和稳定, 改善土壤养分状况, 实现土壤生态系统的可持续发展。

4 结 论

亚热带丘陵区不同土地利用方式下团聚体粒径分布差异显著, 林地的 MWD 和 GMD 值最高, 通过增加大团聚体含量显著提升土壤团聚体稳定性水平, 有效改善土壤抗蚀性和养分状况, 其 C:P 和 N:P 比值最高, 养分富集效率优于茶园和耕地。茶园虽保持一定的土壤养分, 但存在养分失衡问题; 耕地因频繁耕作导致团聚体结构被破坏和养分流失。相关性分析、冗余分析和 PLS-PM 模型结果表明, 土壤团聚体粒径分布对养分含量和化学计量特征具有重要影响, 此外, 土壤机械组成、pH 和容重亦是关键驱动因素, 在不同土地利用方式中发挥不同程度的作用。研究结果为亚热带丘陵区生态恢复工程和土地利用管理提供一定的参考。后续的研究应结合长期监测, 深入探讨不同土地利用方式, 特别是林茶复合生态系统下各级土壤团聚体与养分相互作用的机制, 以及降雨、土壤温度等对这一过程的影响, 这对区域生态恢复和土壤质量提升具有重要意义。

参考文献 (References)

- [1]Zhang Y T, Wu T N. Effects of water temperature on soil aggregate stability between soils developed from different parent materials in the subtropical hilly area of China[J]. Catena, 2024, 241:108080.
- [2]Cui Y F, Wen S L, Stegen J C, et al. Chemodiversity of riverine dissolved organic matter:effects of local environments and watershed characteristics[J]. Water Research, 2024, 250: 121054.
- [3]Liu Z, Wei Y J, Cui T T, et al. Spatial scaling effects of gully erosion in response to driving factors in southern China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2024, 34(5): 942-962.
- [4]Xu J P, Liu M X, Yi J, et al. Influence of vegetation restoration strategies on seasonal soil water deficit in a subtropical hilly catchment of southwest China[J]. Catena, 2025, 248: 108578.
- [5] Du Z, Zhou R, Chen Y, et al. Effects of long-term vegetation restoration on soil aggregate and aggregate-associated nutrient stoichiometry of desertified grassland on the eastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2025, 388: 109661.

- [6] Wang Q K, Zhang X, Yang W, et al. Effects of different types of vegetation restoration on soil pore characteristics in benggang erosion areas[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62 (5): 1282-1293. [王乾坤,张歆,杨伟,等. 亚热带崩岗侵蚀区不同植被恢复类型对土壤团聚体孔隙特征的影响[J]. 土壤学报, 2025, 62 (5): 1282-1293.]
- [7] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2000, 32(14): 2099-2103.
- [8] Bi M F, Zhang S P, Xu Q X, et al. Coupling and synergistic relationships between soil aggregate stability and nutrient stoichiometric characteristics under different microtopographies on karst rocky desertification slopes[J]. Catena, 2024, 243: 108142.
- [9] Six J, Paustian K. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement Tool[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2014, 68(1): A4–A9.
- [10] 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. [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.]
- [11] Hu Q W, Nie L Q, Zheng Y M, et al. Effects of desertification intensity and stand age on leaf and soil carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry in *Pinus elliottii* plantation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(9): 2246-2255. [胡启武, 聂兰琴, 郑艳明, 等. 沙化程度和林龄对湿地松叶片及林下土壤 C、N、P 化学计量特征影响[J]. 生态学报, 2014, 34(9): 2246-2255.]
- [12] Cao S, Zeng B, Deng S F, et al. Effects of *Citrus* and soybean intercropping on soil aggregate structure, organic carbon and nitrogen distribution[J]. Soils, 2024, 56(4): 735-741. [曹胜, 曾斌, 邓素枫, 等. 柑橘大豆间作对土壤团聚体结构及其有机碳、氮分布的影响[J]. 土壤, 2024, 56(4): 735-741.]
- [13] Chen Y, Li Y Q, Zhou G Z, et al. Soil organic carbon content and stability of different cropping patterns depends on the distribution and stability of aggregates in the hilly area of central Sichuan basin[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2025, 390: 109714.
- [14] Cleveland C C, Liptzin D. C: N: P stoichiometry in soil: Is there a “Redfield ratio” for the microbial biomass?[J]. Biogeochemistry, 2007, 85(3): 235-252.
- [15] 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): 139-151.
- [16] Wang C, Xiong F, Lu Y, et al. Effect of land use on topsoil aggregate distribution and stoichiometric characteristics of C, N, and P in the Pearl River Delta[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2021, 38(3): 494-501. [王超, 熊凡, 卢瑛, 等. 利用方式对珠江三角洲耕层土壤团聚体分布及碳氮磷化学计量特征的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(3): 494-501.]
- [17] Wang Y, Zhang Q Z, Wang C K, et al. Effects of restoration approaches on forest soil carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry in eastern Northeast China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2024, 48(7): 943-954. [王燕, 张全智, 王传宽, 等. 恢复方式对东北东部森林土壤碳氮磷计量特征的影响[J]. 植物生态学报, 2024, 48(7): 943-954.]
- [18] Liu S, Chen M, Xing H S, et al. Effects of subalpine forest succession on soil carbon, nitrogen, phosphorus and stoichiometry in western Sichuan Province, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(13): 6256-6268. [刘顺, 陈淼, 邢红爽, 等. 川西亚高山森林演替对土壤碳氮磷及化学计量特征的影响[J]. 生态学报, 2025, 45(13): 6256-6268.]
- [19] Chen Y Z, Wang F, Wu Z D, et al. Effects of forestland to tea garden conversion on soil bacterial community and diversity[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2020, 48(4): 97-106. [陈玉真, 王峰, 吴志丹, 等. 林地转变为茶园对土壤细菌群落结构与多样性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(4): 97-106.]
- [20] Zhao Y, Han X Z, Qiu C, et al. The enhancements of pore morphology and size distribution by straw return are mediated by increases in aggregate-associated carbon and nitrogen[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2025, 24(4): 1562-1576.

- [21] Xu F D, Yang Y C, Chen Y X, et al. Effects of woodland use on soil aggregate composition and C, N and P stoichiometric characteristics in a southern subtropical region[J]. Forest Research, 2025, 38(1): 190-199. [徐凡迪, 杨玉春, 陈燕旋, 等. 南亚热带林地利用方式对土壤团聚体组成及碳、氮和磷化学计量的影响[J]. 林业科学研究, 2025, 38(1): 190-199.]
- [22] Min J, Ji R T, Wang X, et al. Changes in planting structure and nitrogen and phosphorus loss loads of farmland in Taihu Lake region[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(8): 1230-1238. [闵炬, 纪荣婷, 王霞, 等. 太湖地区种植结构及农田氮磷流失负荷变化[J]. 中国生态农业学报, 2020, 28(8): 1230-1238.]
- [23] Yoder R E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion Losses¹[J]. Agronomy Journal, 1936, 28(5): 337-351.
- [24] Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. [鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.]
- [25] van Bavel C H M. Mean weight-diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1950, 14(C): 20-23.
- [26] Gardner W R. Representation of soil aggregate-size distribution by a logarithmic-normal distribution[J]. Soil Science Society of America Journal, 1956, 20(2): 151-153.
- [27] Shirazi M A, Boersma L. A unifying quantitative analysis of soil texture[J]. Soil Science Society of America Journal, 1984, 48(1): 142-147.
- [28] Yang P L, Luo Y P, Shi Y C. Fractal characteristics of soil characterized by weight distribution of particle size[J]. Chinese Science Bulletin, 1993, 38(20): 1896-1899. [杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报, 1993, 38(20): 1896-1899.]
- [29] Hu N, Lan J C. Impact of vegetation restoration on soil organic carbon stocks and aggregates in a karst rocky desertification area in Southwest China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2020, 20(3): 1264-1275.
- [30] Tang K Z, Zhang J Y, Wu C, et al. Mineralization characteristics of mineral-associated organic carbon in *Citrus* orchards soil aggregates at different slope positions[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(6): 1639-1652. [唐开钊, 张君耀, 吴聪, 等. 不同坡位柑橘园土壤团聚体矿物结合态有机碳矿化特征[J]. 土壤学报, 2024, 61(6): 1639-1652.]
- [31] Wang B, Xu G C, Ma T T, et al. Effects of vegetation restoration on soil aggregates, organic carbon, and nitrogen in the Loess Plateau of China[J]. Catena, 2023, 231: 107340.
- [32] Wang D, Liu B J, Li F, et al. Status and influential factors of soil nutrients and acidification in Chinese tea plantations: A meta-analysis[J]. Soil, 2025, 11(1): 175-191.
- [33] Xiao Y, Huang Z G, Long J M, et al. Soil-microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus and their stoichiometric characteristics of different vegetation types in Danxia landform area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(14): 6783-6795. [肖烨, 黄志刚, 龙九妹, 等. 丹霞地貌区不同植被类型土壤-微生物量碳氮磷及其化学计量特征[J]. 生态学报, 2025, 45(14): 6783-6795.]
- [34] Chen M Y, Yang X, Shao M A, et al. Changes in soil C-N-P stoichiometry after 20 years of typical artificial vegetation restoration in semiarid continental climate zones[J]. Science of the Total Environment, 2022, 852: 158380.
- [35] Ou X L, Chen Z B, Chen Z Q, et al. Stoichiometric characteristics of soil aggregates in subtropical eroded red soil under vegetation restoration[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(5): 1156-1167. [区晓琳, 陈志彪, 陈志强, 等. 亚热带侵蚀红壤区植被恢复过程中土壤团聚体化学计量特征[J]. 土壤学报, 2018, 55(5): 1156-1167.]
- [36] Liu D D, Ju W L, Jin X L, et al. Associated soil aggregate nutrients and controlling factors on aggregate stability in semiarid grassland under different grazing prohibition timeframes[J]. Science of the Total Environment, 2021, 777: 146104.
- [37] Chen J, Zhu D Y, Chen H, et al. Soil aggregate stability and its stoichiometric characteristics in process of rocky desertification in plateau mountains[J]. Guihaia, 2021, 41(5): 715-725. [陈静, 朱大运, 陈浒, 等. 高原山地石漠化过程中土壤团聚体稳定性及其化学计量特征[J]. 广西植物, 2021, 41(5): 715-725.]

[38] Li W N, Li S, Guan H Y, et al. Effects of tillage methods and straw returning on soil physiochemical properties and enzyme activities in wheat-soybean rotation field[J]. *Soils*, 2024, 56(6): 1274-1282. [李文娜, 李爽, 关皓月, 等. 耕作方式和秸秆还田对麦-豆轮作田土壤理化特性和土壤酶活性的影响[J]. *土壤*, 2024, 56(6): 1274-1282.]

(责任编辑: 檀满枝)