

DOI: 10.13324/j.cnki.jfcf.202505017

原始林转换对泥质红壤氮组分含量与酶活性的影响

罗小兰¹, 肖华翠¹, 张亮¹, 周萍², 薛毅³, 盛浩¹(1.湖南农业大学资源学院, 湖南长沙 410128; 2.中国科学院亚热带农业生态研究所
亚热带农业生态过程重点实验室, 湖南长沙 410125; 3.衡阳市农业技术服务中心, 湖南衡阳 421001)

摘要: 为探明原始林转换如何影响土壤氮组分含量, 选取湘西北本底条件一致、土地利用史清晰的原始常绿阔叶林及由此转换而来的杉木人工林、果园(柑橘或猕猴桃)、坡耕地和水田为研究对象, 分析0~20 cm土层的土壤物理性质和生物化学性质, 研究泥质红壤氮组分含量与相关酶活性对原始林转换的响应规律。原始林转换对泥质红壤氮组分含量、相关酶活性以及蛋白含量的降幅分别为15.83%~87.36%、20.04%~39.15%和30.97%~66.18%。土壤溶解性有机氮、微生物生物量氮和硝态氮的响应比值高于全氮的响应比值, 可以敏感地指示泥质红壤全氮含量的短期变化。原始林转换为人工林, 泥质红壤的氮组分含量及其相关酶活性的降幅较低, 有利于土壤氮的保存及其相关酶的稳定。原始林转换为其他土地利用方式, 泥质红壤氮组分含量及其酶活性总体呈下降趋势, 指示原始林转换对土壤健康具有负面作用。

关键词: 原始林转换; 泥质红壤; 土壤活性氮; 土地利用方式; 养分有效性; 红壤丘陵区; 酶活性

中图分类号: S153 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-0018(2025)06-0570-09



开放科学标识码
(OSID 码)

Effects of primary forest conversion on content of nitrogen components and enzyme activities in a red soil derived from slate

LUO Xiaolan¹, XIAO Huacui¹, ZHANG Liang¹, ZHOU Ping², XUE Yi³, SHENG Hao¹(1.College of Resources, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2.Key Laboratory of
Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences,
Changsha, Hunan 410125, China; 3.Hengyang Agricultural Technology Service Center, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: To explore how primary forest conversion affects soil nitrogen (N) fractions, this study selected a primary evergreen broad-leaved forest and a converted *Cunninghamia lanceolata* plantation, an orchard (*Citrus reticulata* or *Actinidia chinensis*), a sloping cropland, and a paddy with similar geographical background conditions and clear land use history in northwestern Hunan. The physicochemical and biochemical properties of 0–20 cm soil layer were analyzed to study the responses of N fraction content and the related enzyme activities in the red soil derived from slate to the primary forest conversion. Primary forest conversion significantly reduced nitrogen components, associated enzyme and protein content by 15.83% to 87.36%, 20.04% to 39.15% and 30.97% to 66.18% in the red soil derived from slate. The soil dissolved organic N, microbial biomass N, and nitrate N showed higher response ratios than the total N in soil, sensitively indicating the short-term changes of total N in the red soil derived from slate. The primary forest conversion to plantation showed lower reductions in content of N fractions and activities of associated enzymes in the red soil derived from slate than the primary forest conversion to other land use types, demonstrating the preservation of soil N content and the stabilization of associated enzymes. The conversion of primary forest to other land uses led to a decreasing trend in the content of N fractions and activities of related enzymes in the red soil derived from slate, suggesting the negative effect of primary forest conversion on soil health.

Key words: primary forest conversion; red soil derived from slate; soil active N; land use type; nutrient availability; red-soil hilly region; enzyme activities

原始林是陆地生态系统的重要组成部分之一, 在生物多样性保育与生态系统多功能服务方面扮演着不可替代的角色^[1]。然而, 由于全球人口增长和农业扩张, 大面积原始林已转换为农用地、人工林和草地。据估计, 2011—2015年, 仅热带地区因农业活动导致的原始林砍伐面积就高达6.4~8.8万km²·a⁻¹^[2]。

收稿日期: 2025-05-26 **修回日期:** 2025-07-06

基金项目: 湖南省重点研发计划项目“变更耕地地力快速提升关键技术研究与应用”(2023NK2026); 国家自然科学基金项目“亚热带丘陵区典型农林用地底土有机碳稳定机理研究”(41571234); 科技基础资源调查专项“长江中下游耕地质量要素收集与扩展”(2021FY100504)。

第一作者简介: 罗小兰(2002-), 女, 硕士研究生, 从事土地转换与土壤健康研究。Email: m19992629744@163.com。

通信作者: 盛浩(1982-), 男, 教授, 博士, 从事土壤资源利用与环境研究。Email: shenghao82@hunau.edu.cn。

大面积、高强度的森林转换不仅会改变地表植被覆盖度和生物多样性, 也显著影响土壤元素循环(如碳、氮储量)。土壤氮素作为关键养分和生态系统初级生产力的关键限制因子^[3], 其组分含量及其相关酶活性受土地利用方式转换的强烈影响^[4], 因此, 厘清土壤氮组分及其相关酶活性对原始林转换的响应规律, 对土地资源优化管理至关重要。

有关土壤氮组分含量对土地利用方式转换的响应规律和关键驱动因子的研究在喀斯特区^[5]、三峡消落带^[6]和纳帕海湿地^[7]已有报道, 但由于土壤、气候类型、管理措施等的差异, 不同区域和生态系统类型的土壤氮组分含量存在差异。中亚热带红壤丘陵区气候湿热, 土地利用类型多样且集约度高, 原始林转换对土壤氮组分含量的影响规律还有待进一步研究。土壤氮组分含量受土壤非生物(土壤有机质、水分、温度、铁铝氧化物、土壤酶活性)和生物(微生物群落组成)因子共同调控^[5]。据报道, 原始林转换可能通过调节凋落物氮归还、根系分泌的乙酰氨基葡萄糖苷酶和亮氨酸氨基肽酶活性、有机酸和质子分泌物, 以及改变根系形貌(比根长)的途径, 显著影响土壤氮组分含量^[3]。兰梦杰等^[8]的研究结果表明, 根系生物量是驱动土壤氮组分积累的主要因子。赵楚等^[5]研究发现, 土壤颗粒有机碳含量和土壤比表面积是影响不同土地利用方式土壤氮组分水平的关键要素。然而, 原始林转换如何调控土壤非生物和生物因子进而影响土壤氮组分含量, 目前仍不明确。土壤活性氮组分(溶解性有机氮、柠檬酸盐浸提蛋白)也是指示土壤健康的关键指标^[9], 哪种土壤活性氮组分能敏感、有效地指示高强度土地利用活动下土壤氮库的快速变化, 也有待明确。

本研究选择湘西北丘陵区成土环境一致、土地利用史清晰且毗邻分布的原始林、人工林、果园、坡耕地和水田作为研究对象, 研究0~20 cm 土层泥质红壤的氮组分、酶活性及其相关性, 旨在阐明原始林转换为其他土地利用方式后泥质红壤氮组分的动态变化特征, 解析泥质红壤的氮素各组分及其相关酶活性之间的相互关系, 评估泥质红壤氮组分含量和酶活性对原始林转换的响应程度及其敏感性。

1 试验地概况与研究方法

1.1 试验地概况

选取湘西北永顺县的小溪国家级自然保护区及其邻近区域作为试验样地(28°42'~28°53'N, 110°06'~110°21'E), 该地区年平均气温12~14℃, 年平均降水量1300~1600mm。该自然保护区位于低山丘陵区, 分布着大面积低海拔的原始常绿阔叶林, 被誉为“世界少有、中国独有、中南13省唯一幸存的免遭第四纪冰川侵袭的低海拔常绿阔叶原始次生林”^[10]。试验地土壤为板岩风化物发育的酸性泥质红壤, 土层厚度一般超过1m。选取小溪镇泉溪、田溶和小溪3个自然村内的3个小流域, 在小流域同侧选取土地利用史清晰的地块, 包括原始林及其毗邻的由原始林转换而来的人工林、果园、坡耕地和水田作为研究对象。原始林为当地典型地带性植被常绿阔叶林, 自然演替时间超过300a, 受人类活动干扰微弱, 乔、灌层次分明, 少量藤本, 草本稀疏, 乔木层以樟科(Lauraceae)植物利川润楠(*Machilus lichuanensis*)为其优势树种。人工林是原始林经砍伐、炼山后, 移栽杉木(*Cunninghamia lanceolata*)幼苗形成的, 幼林阶段有轻度管理(抚育、除草等)。果园主要种植柑橘(*Citrus reticulata*)或猕猴桃(*Actinidia chinensis*), 坡耕地种植双季玉米(*Zea mays*), 水田种植一季水稻(*Oryza sativa*)。基于坡改梯技术, 营建果园、坡耕地和水田。试验地的土地利用史、人为施肥管理措施与肖华翠等^[10]、XIAO *et al*^[11]一致。试验地0~20 cm 土层的基本理化性质如表1所示。

表1 试验地0~20 cm 土层的基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of 0-20 cm soil layer in the experimental sites

土地利用方式 Land use type	土壤容重 SBD/(g·cm ⁻³)	pH 值 pH value	土壤有机碳含量 SOC content/(g·kg ⁻¹)	全磷含量 TP content/(g·kg ⁻¹)	有效磷含量 AP content/(mg·kg ⁻¹)
原始林 Primary forest	1.02±0.06b	4.68±0.36b	54.79±6.76a	1.17±0.15a	9.17±1.53ab
人工林 Plantation	1.26±0.12a	4.80±0.73b	52.07±4.93a	0.44±0.25bc	8.37±1.57b
果园 Orchard	1.23±0.01ab	4.68±0.38b	18.39±6.74c	0.28±0.07c	7.66±4.08b
坡耕地 Sloping cropland	1.15±0.11ab	5.41±0.26a	18.99±6.32c	0.51±0.14bc	12.89±1.32a
水田 Paddy	1.14±0.31ab	5.45±0.16a	31.78±1.99b	0.63±0.07b	13.39±2.20a

注: SBD. 土壤容重; SOC. 土壤有机碳; TP. 全磷; AP. 有效磷; 表中数据均为平均值±标准差; 同列数据后不同小写字母表示不同土地利用方式之间存在显著差异($P<0.05$)。Note: SBD. soil buck density; SOC. soil organic carbon; TP. total phosphorus; AP. available phosphorus; data in the table are means ± standard deviation; different lowercase letters in the same column indicate significant differences between different land use types ($P<0.05$).

1.2 样品采集

2023年冬季,分别在原始林、人工林、果园、坡耕地、水田5种土地利用方式试验地内,随机布设3块30 m×30 m样地,每块样地内随机选取9~15个取样点。采样时,先移除土壤表面的异物,使用自制钢制土钻(直径3.5 cm),采集0~20 cm土层土样。将同一块样地钻取的土样混匀,用“四分法”分取约500 g土样装袋密封。新鲜土样带回室内,清理去杂,每个样方样品分成两份,一份土样经自然风干,进行压碎、研磨,分别过2.00、0.25、0.15 mm孔径的尼龙筛,完成上述预处理步骤的样品,经分装并密封后保存,以备土壤理化性质检测;另一份土样过2.00 mm孔径的尼龙筛,混匀后贮藏在4℃冰箱内,用于土壤中酶活性和土壤微生物生物量氮(microbial biomass nitrogen, MBN)含量的测定。

1.3 土壤性质测定

参考《土壤农化分析》^[12]测定土壤容重(soil bulk density, SBD)、pH值、土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)、全氮(total nitrogen, TN)、碱解氮(available nitrogen, AN)、MBN、铵态氮(ammonium nitrogen, $\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝态氮(nitrate nitrogen, $\text{NO}_3^-\text{-N}$)、全磷(total phosphorus, TP)、有效磷(available phosphorus, AP)含量。土壤溶解性有机氮(dissolved organic nitrogen, DON)含量通过去离子水浸提,用流动分析仪测定。参考SAIYA-CORK *et al*^[13]的方法测定 β -N-乙酰氨基葡萄糖苷酶(β -N-acetylglucosaminidase, NAG)和亮氨酸氨基肽酶(leucine aminopeptidase, LAP)的活性。土壤柠檬酸盐浸提(autoclaved citrate extractable, ACE)蛋白含量采用柠檬酸盐浸提法;易提取态球囊霉素相关土壤蛋白(easily extracted glomalin-related soil protein, EE-GRSP)和总球囊霉素相关土壤蛋白(total glomalin-related soil protein, T-GRSP)采用柠檬酸钠溶液浸提,考马斯亮蓝比色法测定^[14]。

1.4 数据处理与分析

采用SPSS 27.0软件计算土壤指标的平均数和标准差,用单因素方差分析(one-way ANOVA)比较5种土地利用方式土壤性质的差异性,用Origin 2024软件作图。土壤氮组分和酶活性对原始林转换的响应比(R)计算公式如下:

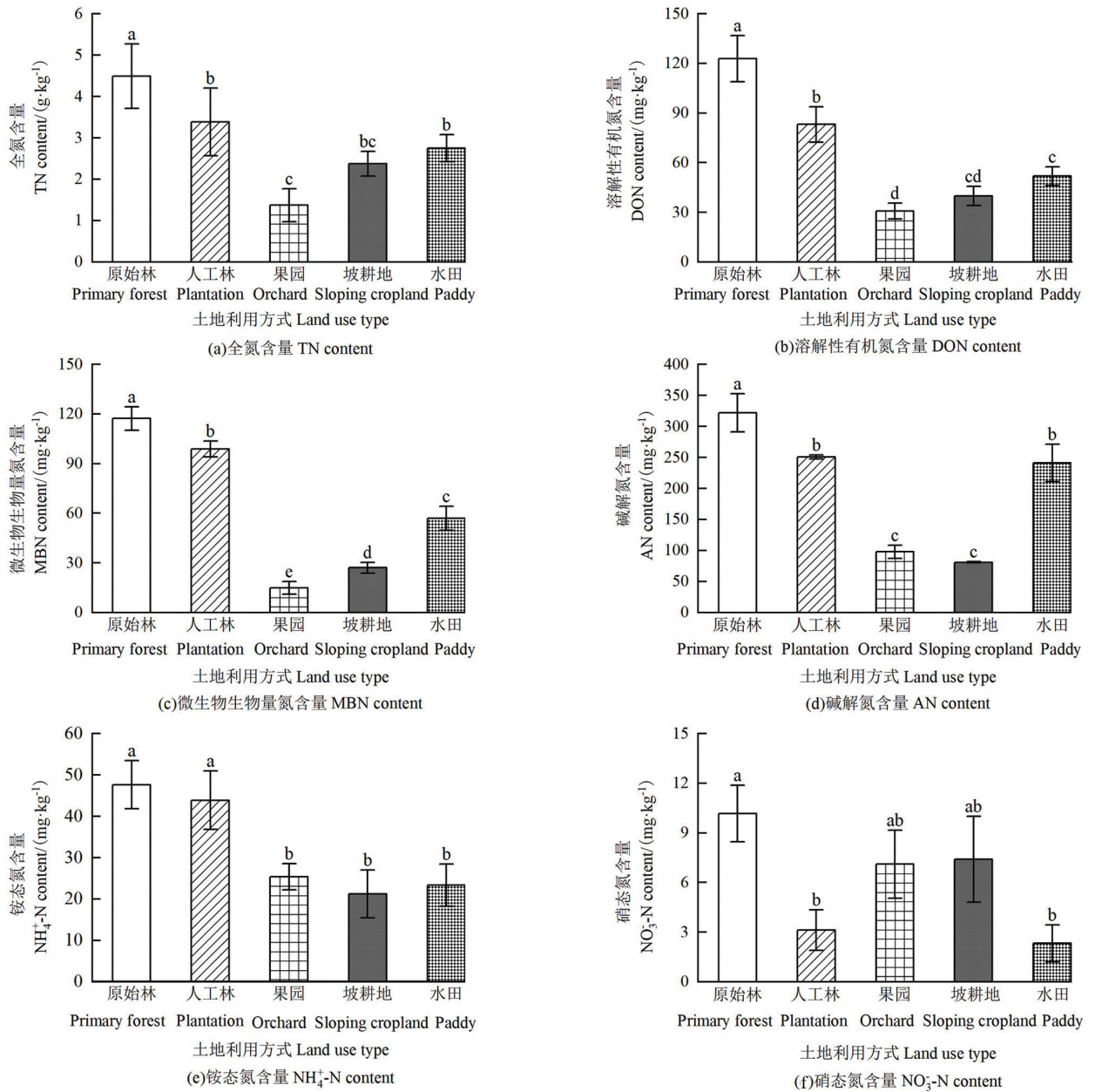
$$R/\% = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_1} \times 100 \quad (1)$$

式中: Q_1 为对照(原始林)的土壤理化指标; Q_2 为转换后土地利用方式的土壤理化指标。

2 结果与分析

2.1 原始林转换对土壤氮组分含量的影响

不同土地利用方式土壤氮组分含量如图1所示。不同土地利用方式下,土壤TN、DON、MBN和AN含量分别为1.4~4.5 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、30.7~122.9 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、27.1~117.3 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和81.0~322.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。与原始林相比,人工林、果园、坡耕地和水田土壤TN含量分别降低24.69%、69.54%、47.00%和38.88% ($P<0.05$)。与土壤TN含量类似,原始林转换后,人工林、果园、坡耕地和水田土壤的DON含量分别降低32.38%、75.00%、67.53%和57.84%; MBN含量分别降低15.83%、87.36%、76.91%和51.40%。果园土壤TN、DON、MBN的含量降幅最大,而且显著低于人工林和水田($P<0.05$)。与原始林相比,人工林、果园、坡耕地和水田土壤AN含量分别降低22.12%、69.60%、74.87%和25.20%,且差异显著($P<0.05$); 与人工林相比,果园和坡耕地土壤AN含量分别降低60.96%、67.74%,且差异显著($P<0.05$)。土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量为21.2~47.6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,果园、坡耕地和水田的土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量比原始林分别降低46.69%、55.39%和50.94%,且差异显著($P<0.05$),比人工林分别降低42.18%、51.61%和46.78%,且差异显著($P<0.05$),原始林和人工林土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量无显著差异。不同土地利用方式,土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量为2.3~10.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,人工林和水田土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量低于原始林、果园和坡耕地,比原始林分别降低69.24%和77.21%,且差异显著($P<0.05$); 与土壤其他氮组分含量变化不同的是,果园和坡耕地土壤的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量与原始林无显著差异。



注: 图中不同小写字母表示不同土地利用方式之间存在显著差异 ($P < 0.05$)。Note: different lowercase letters in the same column indicate significant differences between different land use types ($P < 0.05$).

图1 不同土地利用方式的土壤氮组分含量

Figure 1 Content of soil N fractions under various land use types

2.2 原始林转换对土壤氮组分比例的影响

不同土地利用方式土壤活性氮组分含量占土壤全氮含量的比例介于 0.08%~8.85% (表 2), 其中, 硝态氮含量占土壤全氮含量的比例 ($C_{NO_3-N/TN}$) 相对较小。原始林转换为果园后, 土壤 $C_{MBN/TN}$ 减小 58.96%, 而 $C_{NO_3-N/TN}$ 和铵态氮含量占土壤全氮含量的比例 ($C_{NH_4-N/TN}$) 分别显著增大 108.70% 和 85.05% ($P < 0.05$), 说明土壤相对稳定的有机态氮转化为活性高的无机态氮, 促进果园土壤无机氮的累积。与原始林相比, 坡耕地土壤溶解性有机氮含量占土壤全氮含量的比例 ($C_{DON/TN}$)、微生物生物量氮含量占土壤全氮含量的比例 ($C_{MBN/TN}$) 和碱解氮含量占土壤全氮含量的比例 ($C_{AN/TN}$) 分别显著减小 40.99%、57.09% 和 53.20% ($P < 0.05$), 其降幅均高于土壤 TN 含量的降幅, 表明土壤 AN 和 MBN 含量变化可以敏感地指示原始林转为坡耕地后土壤氮库的变化。水田土壤 $C_{DON/TN}$ 比原始林小 32.86%, 说明水田的淹水

条件可能促进土壤有机氮的转化。

表 2 不同土地利用方式土壤活性氮组分含量占土壤全氮含量的比例

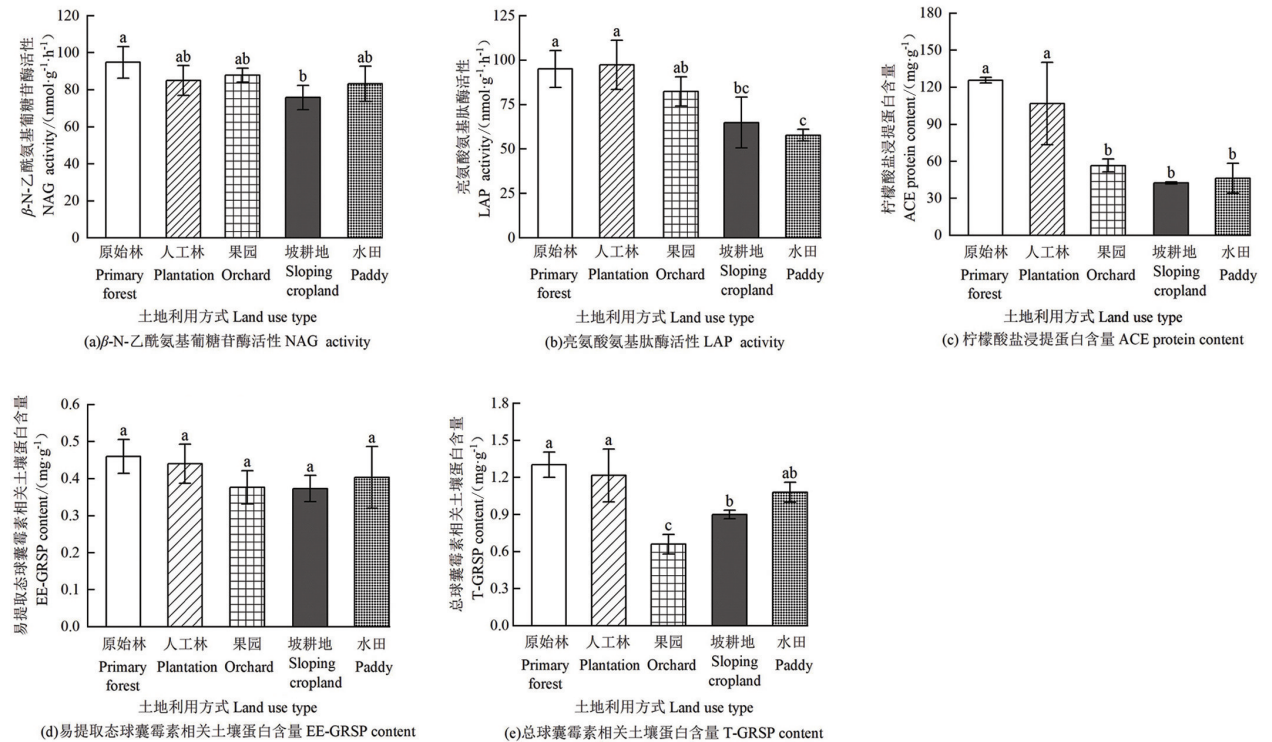
Table 2 Proportions of soil active N fractions in TN under different land use types

土地利用方式 Land use type	土壤活性氮组分含量占土壤全氮含量的比例 Proportions of soil active N fractions in TN/%				
	$C_{NO_3^-N/TN}$	$C_{NH_4^+N/TN}$	$C_{DON/TN}$	$C_{MBN/TN}$	$C_{AN/TN}$
原始林 Primary forest	0.23±0.10b	1.07±0.09b	2.83±0.85a	2.68±0.57a	7.35±1.63a
人工林 Plantation	0.10±0.05b	1.34±0.33ab	2.50±0.31ab	3.04±0.76a	7.74±2.02a
果园 Orchard	0.48±0.19a	1.98±0.66a	2.32±0.41ab	1.10±0.08b	7.51±1.84a
坡耕地 Sloping cropland	0.31±0.18ab	0.89±0.16b	1.67±0.06b	1.15±0.21b	3.44±0.47b
水田 Paddy	0.08±0.03b	0.86±0.19b	1.90±0.21b	2.12±0.53a	8.85±1.38a

注：同列数据后不同小写字母表示不同土地利用方式之间存在显著差异 ($P<0.05$)。Note: different lowercase letters in the same column indicate significant differences between different land use types ($P<0.05$)。

2.3 原始林转换对土壤酶活性与蛋白含量的影响

不同土地利用方式土壤酶活性和蛋白含量如图 2 所示，原始林与人工林的土壤酶活性和蛋白含量均无显著差异。与原始林相比，坡耕地土壤 NAG 和 LAP 活性分别降低 20.04%、31.69%，且差异显著 ($P<0.05$)。水田土壤 LAP 活性比原始林降低 39.15% ($P<0.05$)，坡耕地和水田土壤 LAP 活性比人工林分别降低 33.35% 和 40.63% ($P<0.05$)。土壤 ACE 蛋白含量介于 42.5~125.7 $mg \cdot g^{-1}$ ，果园、坡耕地和水田土壤 ACE 蛋白含量比原始林降低 55.01%、66.18% 和 63.21%，比人工林降低 47.01%、60.17% 和 56.68%，且差异显著 ($P<0.05$)。原始林转换对 EE-GRSP 含量无显著影响。土壤 T-GRSP 含量为 0.7~1.3 $mg \cdot g^{-1}$ ，与原始林相比，果园和坡耕地土壤 T-GRSP 含量分别显著降低 49.43% 和 30.97% ($P<0.05$)；与人工林相比，果园和坡耕地土壤 T-GRSP 含量分别显著降低 45.70% 和 25.88% ($P<0.05$)，水田土壤 T-GRSP 含量与原始林、人工林和坡耕地无显著差异。



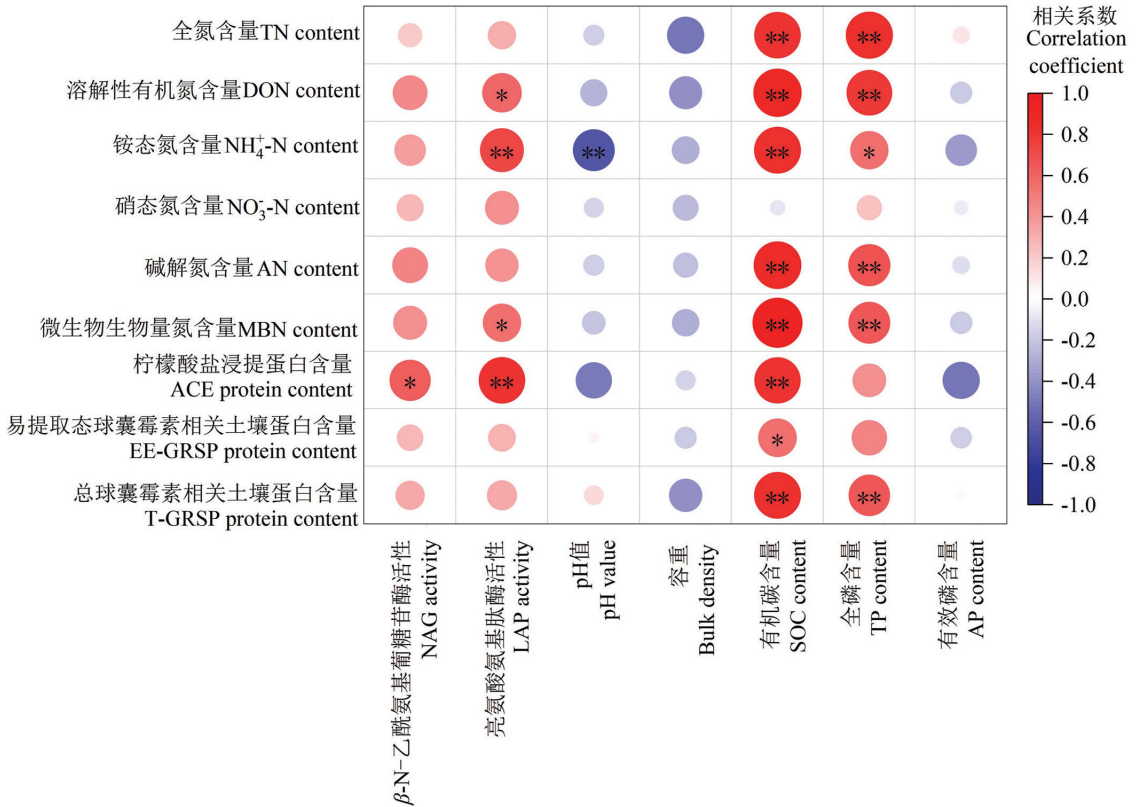
注：图中不同小写字母表示不同土地利用方式之间存在显著差异 ($P<0.05$)。Note: different lowercase letters in the same column indicate significant differences between different land use types ($P<0.05$)。

图 2 不同土地利用方式土壤酶活性与蛋白含量

Figure 2 Soil enzyme activity and protein content under various land use types

2.4 土壤氮组分和蛋白含量与土壤性质的关系

土壤氮组分含量与土壤性质的相关性分析结果如图 3 所示, 土壤 DON、MBN 含量与 LAP 活性均呈显著正相关($P<0.05$), 与 SOC、TP 含量均呈极显著正相关($P<0.01$), 而土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量与 TP 含量呈显著正相关($P<0.05$), 与 LAP 活性、SOC 含量呈极显著正相关($P<0.01$), 与 pH 值呈极显著负相关($P<0.01$)。土壤 TN、AN、T-GRSP 含量均与 SOC、TP 含量呈极显著正相关($P<0.01$); 土壤 EE-GRSP 含量与 SOC 含量呈显著正相关($P<0.05$)。此外, 土壤 ACE 蛋白含量与 NAG 含量呈显著正相关($P<0.05$), 与 LAP、SOC 含量呈极显著正相关($P<0.01$)。氮素不同形态(DON、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、MBN、TN、AN)的含量、GRSP 含量与 SOC、TP 含量的变化同步, 说明土壤碳、氮、磷存在耦合作用, SOC 是驱动土壤氮转化和累积的关键因子。



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

图 3 土壤氮组分及蛋白含量与土壤性质的相关性

Figure 3 Correlation coefficients of soil physicochemical properties with soil N and protein content

2.5 土壤氮组分与酶活性对原始林转换的响应敏感性

原始林转换后, 不同土地利用方式土壤氮组分与酶活性对原始林转换的响应比值(图 4)分别介于 $-87.44\% \sim -8.08\%$ 和 $-38.49\% \sim 3.31\%$; 其中, 土壤氮组分含量的响应比均为负值, 且其绝对值均大于酶活性的响应比绝对值。土壤氮组分与酶活性对原始林转换的响应比值范围取决于转换后的土地利用类型。原始林转换为其他 4 种土地利用方式, 土壤 DON 含量的响应比绝对值均大于 TN 含量的响应比绝对值, 土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 MBN 含量的响应比绝对值也相对较大。原始林转换为人工林、果园、坡耕地和水田的响应比的平均值分别为 -18.33% 、 -47.57% 、 -47.04% 和 -39.55% , 响应比值变化范围分别为 $-68.90\% \sim 3.01\%$ 、 $-87.44\% \sim -7.01\%$ 、 $-76.74\% \sim -17.41\%$ 和 $-72.22\% \sim -10.87\%$ 。原始林转换为坡耕地和水田, 响应比的变化范围相对较窄。

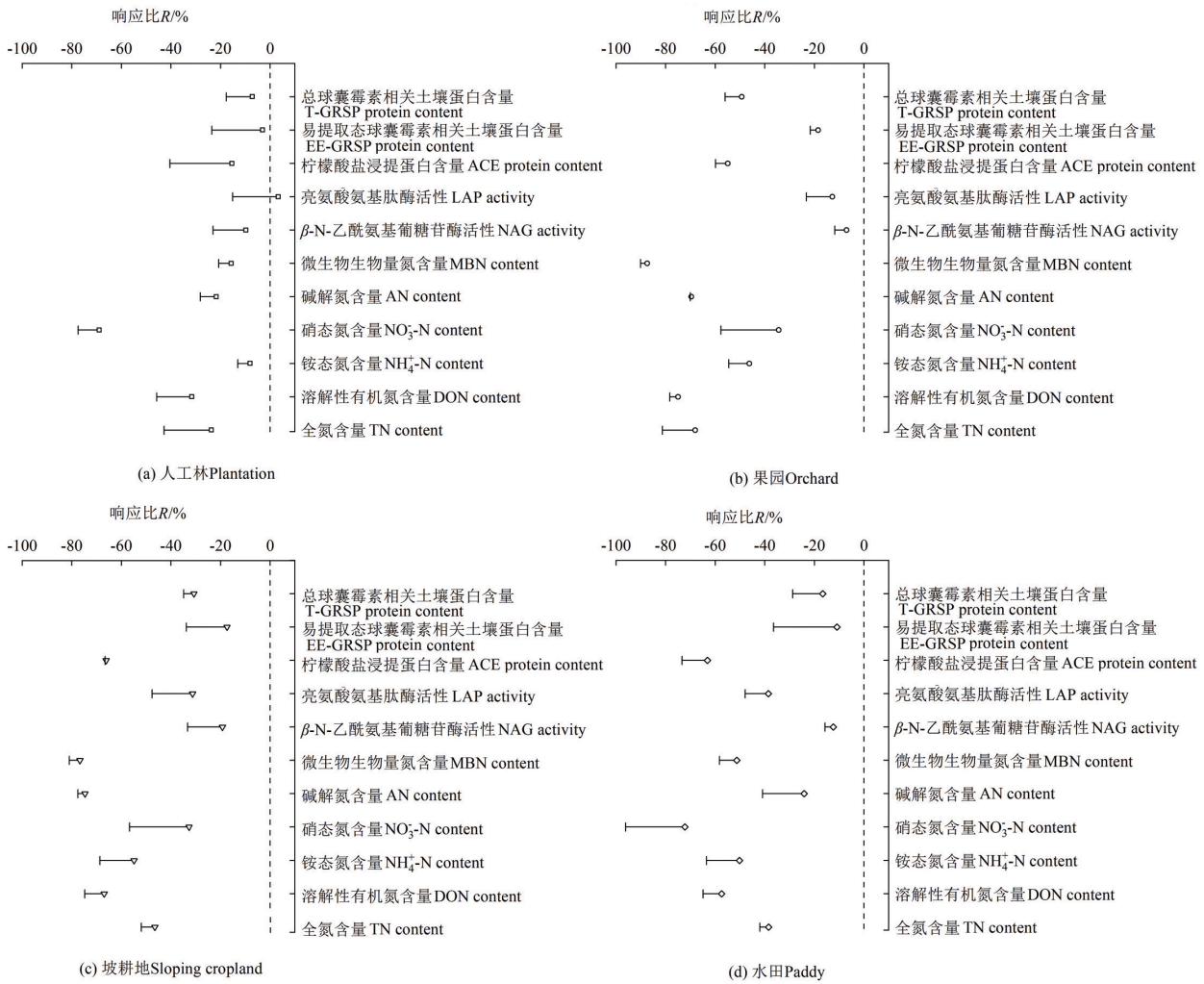


图 4 土壤氮组分与酶活性对原始林转换的响应比

Figure 4 Response ratios of soil N fractions and enzyme activities to the primary forest conversion

3 讨论

长期较少或未遭受人为扰动的原始林生态系统稳定，土壤有机质和氮素丰富。然而，原始林转换而来的人工林、果园、坡耕地和水田在长期人为扰动下，微气候条件与植被覆盖度均发生显著变化；加之频繁耕作和人工化学品投入，均不利于土壤有机质和氮素保存^[15]。本研究中，原始林转换导致土壤活性氮组分含量呈下降趋势。原始林转换后，植被类型单一化，地表枯落物现存量、凋落物和根系生物量锐减，土壤有机质输入量减少^[16]，这可能是原始林转换后土壤活性氮组分含量降低的原因之一。水田土壤 TN、DON、MBN 和 AN 含量均高于果园，可能是由于水田土壤长期淹水，形成厌氧环境，土壤 pH 值(5.5)显著高于果园(4.7)，有利于土壤氮素的保存；此外，湿润的土壤也为微生物的生长和繁殖提供良好的条件，从而提高 MBN 含量^[17]，而且淹水条件有利于土壤 DON 溶出，导致水田土壤 DON 含量比果园高^[7]。人工林与原始林土壤 NH₄⁺-N 含量无显著差异，这与高艳丽等^[18]在中亚热带米楮(*Castanopsis carlesii*)常绿阔叶林和人工林的研究结果基本一致。然而，人工林土壤 NO₃⁻-N 含量显著低于原始林，可能是由于中亚热带高温多雨，土壤 NO₃⁻-N 携带负电荷，原始林转换为人工林后，土壤 NO₃⁻-N 更容易淋失^[19]。

原始林与人工林土壤活性氮组分含量占土壤全氮含量的比例无显著差异，而且原始林转换为人工林土壤氮组分含量的降幅也相对较小，这表明人工林相对有利于保存土壤氮素，原因可能是人工林土壤凋落物输入量比果园、坡耕地和水田更高，而且杉木凋落物富含难分解的有机化合物(单宁、蜡质和树脂)，土壤有机氮的积累量相对更高^[16]。与土壤 C_{NO₃⁻-N/TN} 相比，土壤 C_{NH₄⁺-N/TN} 的值更大，表明土壤无机

氮是以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 形态为主, 这与西南岩溶农业区的研究结果^[20] 基本一致。原始林转为坡耕地, 土壤 $C_{\text{AN/TN}}$ 、 $C_{\text{MBN/TN}}$ 的降幅均高于土壤 TN 含量的降幅。因此, 土壤 AN 和 MBN 含量可以敏感地指示原始林转为坡耕地后土壤氮库的质量变化。原始林转换为果园, 土壤 $C_{\text{MBN/TN}}$ 减小, 而土壤 $C_{\text{NO}_3\text{-N/TN}}$ 和 $C_{\text{NH}_4\text{-N/TN}}$ 反而增大, 原因可能是, 果园管理措施(如频繁耕作、施肥)破坏土壤结构, 降低土壤微生物活性和 MBN 含量, 同时果园高强度的氮肥施入可能增强土壤硝化作用, 促进土壤有机态氮向无机态氮转化, 提高果园土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量^[10]。

土壤酶驱动土壤碳、氮、磷元素循环, 反映人类活动对土壤生态系统的干扰程度^[21]。原始林转为坡耕地, 土壤 NAG 和 LAP 活性大幅降低, 这可能与原始林转换后土壤根系和凋落物的减少有关。植物根系和凋落物数量下降, 减少向土壤微生物群落提供易分解的有机碳、氮源, 进而降低土壤酶活性^[22]。果园、坡耕地和水田土壤 ACE 蛋白含量也比原始林低, 原始林转换后, 土壤酶活性降低导致土壤有机质分解速率变慢^[10], 这限制了土壤 ACE 蛋白的合成和积累。果园和坡耕地土壤 T-GRSP 含量降低与土壤物理性质变化密切相关^[23]。原始林转换为果园和坡耕地, 土壤水分含量下降, 容重增大, 孔隙度减少, 强烈影响土壤丛枝菌根真菌呼吸速率和土壤真菌 GRSP 的释放量^[24]。土壤氮组分含量和酶活性呈显著正相关, 这进一步说明原始林转换导致土壤微生物群落活性和土壤氮库质量呈劣化的趋势。

土壤氮组分和酶活性对原始林转换的响应敏感性不同。土壤氮组分含量的响应比值范围比酶活性的响应比值范围大, 表明土壤氮组分含量更具有指示土壤健康质量变化的潜力。已有研究^[9]表明, 土壤活性氮组分对土壤健康变化具有重要指示作用。原始林转换为其他土地利用方式, 土壤 DON 含量的响应比绝对值均大于 TN 含量的响应比绝对值。土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 MBN 含量的响应比绝对值也相对较大, 表明土壤 DON、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 MBN 含量能较敏感地指示土壤 TN 含量的变化。原始林转为坡耕地和水田, 土壤 ACE 蛋白含量对原始林转换的响应比值大于 TN 含量的响应比值, 说明土壤 ACE 蛋白含量能够敏感地指示原始林转为坡耕地和水田后土壤 TN 含量的变化。此外, 土壤 DON 和 ACE 蛋白含量室内测定较简单, 用风干土即可测定, 成本较低, 较易于推广应用。

原始林转换导致土壤氮组分及其相关酶活性总体呈降低趋势, 表明土壤肥力质量退化。为了有效遏制土壤氮素含量降低及其有效性退化的趋势, 恢复土壤氮库功能, 有必要人工增施氮肥以补充土壤氮库损失, 应根据生产需求, 制定科学的氮素补充方案。若为作物快速补氮, 可适量增施化学氮肥; 若兼顾防止坡地氮流失, 可适量增施缓释或控释氮肥; 若兼顾长期生态效益, 可适量增施有机肥、选择豆科类固氮树种、坡耕地绿肥上山, 增加土壤有机氮库^[25-26]。在实际生产中, 应根据土壤氮素本底值、目标作物需氮量和环境承载力, 优化氮肥施用量, 分次深施, 降低氮素流失风险。

4 结论

湘西北原始常绿阔叶林转换为人工林、果园、坡耕地和水田, 土壤氮组分含量均呈下降趋势, 其中, 土壤 TN、DON、AN 和 MBN 含量均显著降低。坡耕地和水田土壤 LAP 酶活性和 ACE 蛋白含量均显著降低。原始林转换为人工林, 土壤氮组分含量降幅较小, 比其他土地利用方式更有利于保存土壤氮。土壤氮组分和相关酶活性的响应敏感性取决于原始林转换后的土地利用方式, 原始林转为坡耕地和水田, 土壤氮组分和酶活性的响应比变化范围相对较小, 更有利于保存土壤氮素和维持酶的稳定。土壤 DON、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 MBN 含量对原始林转换最为敏感, 可有效指示土壤氮库的快速变化。原始林转换后, 土壤氮组分含量和土壤氮库质量降低, 与之相关的土壤酶活性也随之下降, 指示原始林转换导致土壤质量退化。

参考文献

- [1] HUA F Y, BRUIJNZEEL L A, MELI P, *et al.* The biodiversity and ecosystem service contributions and trade-offs of forest restoration approaches[J]. *Science*, 2022, 376(6 595): 839-844.
- [2] PENDRILL F, GARDNER T A, MEYFROIDT P, *et al.* Disentangling the numbers behind agriculture-driven tropical deforestation[J]. *Science*, 2022, 377(6 611): eabm9 267.
- [3] 刘婷, 雷志刚, 陈述, 等. 亚热带森林转换对土壤氮转化关键功能微生物群落的影响[J]. *生态学报*, 2024, 44(9): 3 636-3 647.

- [4] MA Z L, XU W J, CHEN Y M, *et al.* A study of the influence of the type of land use on the enzymatic activity of soils in southwestern China[J]. *Forests*, 2024, 15(4): 581.
- [5] 赵楚, 盛茂银, 白义鑫, 等. 喀斯特石漠化地区不同土地利用类型土壤氮磷有效性及其环境影响因子[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(4): 1 383-1 392.
- [6] 朱凯, 马茂华, 李文娟, 等. 三峡水库消落带不同土地利用对土壤团聚体稳定性及其碳氮分布的影响[J]. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(7): 1 503-1 513.
- [7] 李文韬, 胡尊英, 张昆, 等. 土地利用方式对纳帕海湿地土壤碳氮储量的影响[J]. *生态学杂志*, 2024, 43(6): 1 720-1 727.
- [8] 兰梦杰, 王邵军, 李瑞, 等. 丛枝菌根真菌接种介导石漠化植物-土壤性质变化对氮积累时空分布的影响[J]. *生态学报*, 2025, 45(1): 112-127.
- [9] GRANDY A S, DALY A B, BOWLES T M, *et al.* The nitrogen gap in soil health concepts and fertility measurements[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2022, 175: 108 856.
- [10] 肖华翠, 梁万栋, 李源钊, 等. 土壤碳氮磷和酶化学计量特征对原始林转换的响应[J]. *森林与环境学报*, 2024, 44(3): 225-232.
- [11] XIAO H C, SHENG H, ZHANG L N, *et al.* How does land-use change alter soil microbial diversity, composition, and network in subtropical China?[J]. *Catena*, 2023, 231: 107 335.
- [12] 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, 2000.
- [13] SAIYA-CORK K R, SINSABAUGH R L, ZAK D R. The effects of long term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an *Acer saccharum* forest soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(9): 1 309-1 315.
- [14] WRIGHT S F, UPADHYAYA A. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi[J]. *Plant and Soil*, 1998, 198(1): 97-107.
- [15] 王俊, 肖华翠, 盛浩, 等. 湘西北土壤物理健康对土地利用转换的响应[J]. *水土保持研究*, 2024, 31(6): 336-343.
- [16] SHENG H, ZHOU P, ZHANG Y Z, *et al.* Loss of labile organic carbon from subsoil due to land-use changes in subtropical China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 88: 148-157.
- [17] 杨东伟, 章明奎, 张鹏启, 等. 水田改果园后土壤微生物学特性演变[J]. *土壤学报*, 2018, 55(1): 182-193.
- [18] 高艳丽, 杨智杰, 张丽, 等. 不同更新方式对亚热带常绿阔叶林土壤氮矿化的影响[J]. *林业科学*, 2021, 57(4): 24-31.
- [19] 陈伏生, 曾德慧, 何兴元. 森林土壤氮素的转化与循环[J]. *生态学杂志*, 2004, 23(5): 126-133.
- [20] 田雨桐, 韩志伟, 赵然, 等. 西南岩溶农业区典型土地利用对土壤氮素特征的影响[J]. *中国农学通报*, 2022, 38(33): 89-96.
- [21] 刘爽, 王雅, 刘兵兵, 等. 晋西北不同土地管理方式对土壤碳氮、酶活性及微生物的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39(12): 4 376-4 389.
- [22] MEN X X, BAO Y, WU M H, *et al.* Soil enzyme activities responded differently to short-term litter input manipulation under coniferous and broad-leaved forests in the subalpine area of Southwest China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2023, 546: 121 360.
- [23] 徐其静, 侯磊, 汪丽, 等. 等高反坡阶措施下坡耕地球囊霉素相关土壤蛋白对土壤碳氮储量的贡献[J]. *生态学报*, 2024, 44(7): 2 919-2 930.
- [24] 宋雪红, 郑睿, 武燕. 西南喀斯特地区马尾松人工林土壤酶活性和 GRSP 含量特征分析[J]. *黑龙江农业科学*, 2024(11): 51-58.
- [25] 陈佳钰, 李永梅, 廖学圆, 等. 基施缓释肥等氮替代化肥对径流氮素流失和青贮玉米生长的影响[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(3): 188-194.
- [26] CHEN H H, LI X C, HU F, *et al.* Soil nitrous oxide emissions following crop residue addition: a meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(10): 2 956-2 964.

(责任编辑: 温凤英)