

目次

基于机器学习的珠三角秋季臭氧浓度预测 ..... 陈镇, 刘润, 罗征, 薛鑫, 汪瑶, 赵志军 ( 1 )

粤港澳大湾区大气PM<sub>2.5</sub>浓度的遥感估算模型 ..... 代园园, 龚绍琦, 张存杰, 闵爱莲, 王海君 ( 8 )

典型输送通道城市冬季PM<sub>2.5</sub>污染与传输变化特征 ..... 代武俊, 周颖, 王晓琦, 齐鹏 ( 23 )

郑州市夏季PM<sub>2.5</sub>中二次无机组分污染特征及其影响因素 ..... 和兵, 杨洁茹, 徐艺斐, 袁明浩, 翟诗婷, 赵长民, 王申博, 张瑞芹 ( 36 )

重庆典型城区冬季碳质气溶胶的污染特征及来源解析 ..... 彭超, 李振亮, 向英, 王晓宸, 汪凌韬, 张晟, 翟崇治, 陈阳, 杨复沫, 翟天宇 ( 48 )

2022年8月成渝两地臭氧污染差异影响因素分析 ..... 陈木兰, 李振亮, 彭超, 邓也, 宋丹林, 谭钦文 ( 61 )

2020年“三连击”台风对我国东部地区O<sub>3</sub>污染的影响分析 ..... 花丛, 尤媛, 王晴, 张碧辉 ( 71 )

北京城区夏季VOCs初始体积分数特征及来源解析 ..... 张博韬, 景宽, 王琴, 安欣欣, 鹿海峰, 王陈婧, 王友峰, 刘保献 ( 81 )

机动车减排降碳综合评价体系综述 ..... 范朝阳, 佟惠, 梁晓宇, 彭剑飞 ( 93 )

基于LEAP模型的长三角某市碳达峰情景 ..... 杨峰, 张贵驰, 孙伟, 谢放尖, 揣小伟, 孙瑞玲 ( 104 )

广东省船舶二氧化碳排放驱动因素与减排潜力 ..... 翁淑娟, 刘颖颖, 唐凤, 沙青娥, 彭勃, 王焯嘉, 陈诚, 张雪驰, 李京洁, 陈豪琪, 郑君瑜, 宋献中 ( 115 )

给水厂典型工艺碳排放特征与影响因素 ..... 张翔宇, 胡建坤, 马凯, 高欣慰, 魏月华, 韩宏大, 李克勋 ( 123 )

中国饮用水中砷的分布特征及基于伤残调整寿命年的健康风险评估 ..... 襄殿程, 齐媛, 肖淑敏, 苏高新, 郭宇新 ( 131 )

太湖水体和沉积物中有机磷酸酯的时空分布和风险评估 ..... 张成诺, 钟琴, 栾博文, 周涛, 顾帆, 李伟飞, 邹华 ( 140 )

水产养殖环境中农兽药物的污染暴露水平及其风险影响评价 ..... 张楷文, 张海燕, 孔聪, 顾润润, 田良良, 杨光昕, 王媛, 陈冈, 沈晓盛 ( 151 )

长江朱沱断面磷浓度与通量变化及来源解析 ..... 姜保峰, 谢卫民, 黄波, 刘旻璇 ( 159 )

珠江河口地表水锰氧化物对磷的“载-卸”作用 ..... 李睿, 梁作兵, 伍祺瑞, 杨晨晨, 田帝, 高磊, 陈建耀 ( 173 )

富春江水库浮游植物功能群变化的成因 ..... 张萍, 王炜, 朱梦圆, 国超旋, 邹伟, 许海, 朱广伟 ( 181 )

合浦盆地西部地区地下水水化学特征及形成机制 ..... 陈雯, 吴亚, 张宏鑫, 刘怀庆 ( 194 )

新疆车尔臣河流域绿洲带地下水咸化与污染主控因素 ..... 李军, 欧阳宏涛, 周金龙 ( 207 )

京津冀地区生态系统健康时空演变及其影响因素 ..... 李魁明, 王晓燕, 姚罗兰 ( 218 )

近30年辽河三角洲生态系统服务价值时空演变及影响因素分析 ..... 王耕, 张芙蓉 ( 228 )

光伏电站建设对陆地生态环境的影响: 研究进展与展望 ..... 田政卿, 张勇, 刘向, 陈生云, 柳本立, 吴纪华 ( 239 )

大兴安岭林草交错带植被NDVI时空演变及定量归因 ..... 石淞, 李文, 曲琛, 杨子仪 ( 248 )

西南地区不同类型植被NPP时空演变及影响因素探究 ..... 徐勇, 郑志威, 孟禹弛, 盘钰春, 郭振东, 张炎 ( 262 )

不同海拔梯度下极端气候事件对松花江流域植被NPP的影响 ..... 崔嵩, 贾朝阳, 郭亮, 付强, 刘东 ( 275 )

基于InVEST与CA-Markov模型的昆明市碳储量时空演变与预测 ..... 帕茹克·吾斯曼江, 艾东, 方一舒, 张益宾, 李牧, 郝晋珉 ( 287 )

基于PLUS-InVEST模型的酒泉市生态系统碳储量时空演变与预测 ..... 石晶, 石培基, 王梓洋, 程番苑 ( 300 )

长江下游沿江平原土壤发育过程中碳库分配动态 ..... 胡丹阳, 张欢, 宿宝巍, 张娅璐, 王永宏, 纪佳辰, 杨浩, 高超 ( 314 )

漓江流域喀斯特森林土壤有机碳空间分布格局及其驱动因子 ..... 申楷慧, 魏识广, 李林, 储小雪, 钟建军, 周景钢, 赵毅 ( 323 )

不同土地利用方式对岩溶区土壤有机碳组分稳定性的影响 ..... 陈坚淇, 贾亚男, 贺秋芳, 江可, 陈畅, 叶凯 ( 335 )

紫色土丘陵区坡地柑橘园土壤碳氮的空间分布特征 ..... 李子阳, 陈露, 赵鹏, 周明华, 郑静, 朱波 ( 343 )

氮添加与凋落物处理对橡胶林砖红壤有机碳组分及酶活性的影响 ..... 薛欣欣, 任常琦, 罗雪华, 王文斌, 赵春梅, 张永发 ( 354 )

重庆化肥投入驱动因素、减量潜力及环境效应分析 ..... 梁涛, 赵敬坤, 李红梅, 王妍, 曹中华, 张务帅, 王孝忠, 郭超仪, 石孝均, 陈新平 ( 364 )

中国土壤中全氟和多氟烷基物质的分布、迁移及管控研究进展 ..... 刘浩然, 邢静怡, 任文杰 ( 376 )

基于多源辅助变量和随机森林模型的耕地土壤重金属含量空间分布预测 ..... 解雪峰, 郭炜炜, 濮励杰, 缪源卿, 蒋国俊, 张建珍, 徐飞, 吴涛 ( 386 )

基于源导向的农用地土壤重金属健康风险评估及优先控制因子分析 ..... 马杰, 葛森, 王胜蓝, 邓力, 孙静, 蒋月, 周林 ( 396 )

铜陵某废弃硫铁矿矿区土壤重金属污染特征及来源解析 ..... 李如忠, 刘宇昊, 黄言欢, 吴鸿飞 ( 407 )

天水市主城区公交站地表灰尘重金属来源解析及污染评价 ..... 李春艳, 王新民, 王海, 吕晓斌 ( 417 )

基于大田试验的土壤-水稻镉对不同调理剂的响应 ..... 唐乐斌, 刘新彩, 宋波, 马丽钧, 黄凤艳 ( 429 )

腐殖质活性组分对土壤镉有效性的调控效应与水稻安全临界阈值 ..... 胡秀芝, 宋毅, 王天雨, 蒋珍茂, 魏世强 ( 439 )

生物质炭与铁钙材料对镉砷复合污染农田土壤的修复 ..... 吴秋产, 吴骥子, 赵科理, 连斌, 袁峰, 孙洪, 田欣 ( 450 )

人体微塑料污染特征及健康风险研究进展 ..... 马敏东, 赵洋尘, 朱龙, 王伟平, 康玉麟, 安立会 ( 459 )

聚苯乙烯微塑料联合镉污染对土壤理化性质和生菜(*Lactuca sativa*)生理生态的影响 ..... 牛佳瑞, 邹勇军, 简敏菲, 黄楚红, 李金燕, 穆霆, 刘淑丽 ( 470 )

转录组分析植物促生细菌缓解高粱微塑料和重金属复合污染胁迫机制 ..... 刘泳岐, 赵超禹, 任学敏, 李玉英, 张英君, 张浩, 韩辉, 陈兆进 ( 480 )

微塑料对土壤中养分和镉淋失的影响 ..... 赵群芳, 褚龙威, 丁原红, 王发园 ( 489 )

微塑料和非对土壤化学性质、酶活性及微生物群落的影响 ..... 刘沙沙, 秦建桥, 吴贤格 ( 496 )

民勤荒漠绿洲过渡带人工梭梭林土壤细菌群落结构及功能预测 ..... 王安林, 马瑞, 马彦军, 吕彦勋 ( 508 )

不同灌溉水盐度下土壤真菌群落对生物炭施用的响应 ..... 郑志玉, 郭晓雯, 闵伟 ( 520 )

厨余垃圾有机肥对土壤微生物活性及功能的影响 ..... 刘美灵, 汪益民, 金文豪, 王永冉, 王嘉和, 柴一博, 彭丽媛, 秦华 ( 530 )

土壤真菌群落结构对辣椒长期连作的响应特征 ..... 陈芬, 余高, 王谢丰, 李廷亮, 孙约兵 ( 543 )

叶面喷施硅肥对再生水灌溉水稻叶际细菌群落结构及功能基因的影响 ..... 梁胜贤, 刘春成, 胡超, 崔二革, 李中阳, 樊向阳, 崔丙健 ( 555 )

昌黎县海域细菌群落和抗生素抗性基因分析 ..... 王秋水, 程波, 刘悦, 邓婕, 徐岩, 孙朝徽, 袁立艳, 左嘉, 司飞, 高丽娟 ( 567 )

基于高通量定量PCR与高通量测序技术研究城市湿地公园抗生素抗性基因污染特征 ..... 黄福义, 周曙屹, 潘婷, 周昕原, 苏建强, 张娴 ( 576 )

城区第四系沉积柱中抗生素的垂向分布特征及环境影响因素 ..... 刘可, 童蕾, 甘翠, 王逸文, 张嘉越, 何军 ( 584 )

氢氧化钾改性玉米秸秆生物炭对水中土霉素的吸附特性及机制 ..... 刘总堂, 孙玉凤, 费正皓, 沙新龙, 温小菊, 钱彬彬, 陈建, 谷成刚 ( 594 )

CO<sub>2</sub>气氛热解与硝酸改性的生物炭Pb<sup>2+</sup>吸附性能对比 ..... 江豪, 陈瑞芝, 朱自洋, 王琳, 段文斌, 陈芳媛 ( 606 )

《环境科学》征订启事(70) 《环境科学》征稿简则(193) 信息(334,554,605)

# 氮添加与凋落物处理对橡胶林砖红壤有机碳组分及酶活性的影响

薛欣欣<sup>1,2</sup>, 任常琦<sup>1</sup>, 罗雪华<sup>1</sup>, 王文斌<sup>1</sup>, 赵春梅<sup>1</sup>, 张永发<sup>1</sup>

(1. 中国热带农业科学院橡胶研究所, 海口 571101; 2. 海南天然橡胶与热带林木研究院, 海口 571101)

**摘要:** 研究氮添加与凋落物处理对土壤有机碳组分及酶活性的影响对调控人工林生态系统恢复具有重要意义。于海南岛西部橡胶林地开展野外微区模拟试验, 采用二因素完全随机设计, 设置4个氮水平[不施氮(CK, 0 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>, 以N计, 下同), 低氮(LN, 50 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>), 中氮(MN, 100 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)和高氮(HN, 200 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)]以及2种凋落物处理[凋落物去除(LR), 凋落物保留(L)], 分析0~10 cm和10~20 cm土层的土壤理化性质、总有机碳(SOC)及其组分、酶活性等指标。结果表明, 土壤pH随N添加量增加以及凋落物的去除呈显著降低的趋势( $P < 0.05$ )。土壤NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N和NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量随N添加的增加显著增加, N添加和凋落物处理对NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N和NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量有显著的交互效应。与L处理相比, LR降低了土壤SOC及其各组分含量, 其中轻组有机碳(LFOC)含量降幅最大, 在0~10 cm和10~20 cm土层降幅分别为29.0%~81.4%和23.5%~58.4%。不同凋落物处理条件下, SOC及其各组分含量随N添加量的增加均呈先增加后降低的趋势, LN处理显著高于HN处理。N添加和凋落物处理对SOC、LFOC(0~10 cm)和重组有机碳(HFOC)含量有极显著的交互作用( $P < 0.01$ )。与L处理相比, LR处理在CK和LN处理条件下的土壤多酚氧化酶(PPO)活性显著降低, 而在MN和HN条件下, LR处理的PPO含量显著增加; 方差分析显示, N添加和凋落物处理对PPO和0~10 cm土层的纤维素酶(CBH)活性有极显著影响的交互作用, 土壤酶活性[β-葡萄糖苷酶(BG)、PPO、CBH]对N添加处理的响应程度均大于对凋落物处理的响应。相关性分析表明, SOC含量与微生物生物量碳(MBC)、颗粒态有机碳(POC)、LFOC以及HFOC含量之间呈极显著正相关关系。总体来看, 凋落物保留与低N输入对橡胶林地土壤碳库以及酶活性具有较好的协同作用。

**关键词:** 凋落物; 氮添加; 橡胶林; 有机碳组分; 酶活性

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)01-0354-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202301156

## Effects of Experimental Nitrogen Deposition and Litter Manipulation on Soil Organic Components and Enzyme Activity of Latosol in Tropical Rubber Plantations

XUE Xin-xin<sup>1,2</sup>, REN Chang-qi<sup>1</sup>, LUO Xue-hua<sup>1</sup>, WANG Wen-bin<sup>1</sup>, ZHAO Chun-mei<sup>1</sup>, ZHANG Yong-fa<sup>1</sup>

(1. Rubber Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou 571101, China; 2. Hainan Natural Rubber and Tropical Forest Research Institute, Haikou 571101, China)

**Abstract:** It is of great scientific significance in regulating plantation ecosystem restoration to investigate the effects of the nitrogen (N) deposition and litter manipulation on soil organic carbon components and enzyme activities. A micro-plot experiment was conducted with four nitrogen additions [CK (0 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>, calculated by N), LN (50 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>), MN (100 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>), and HN (200 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)] and two litter treatments [LR (litter removal) and L (litter retained)] for tropical rubber plantations in western Hainan Island. The soil physico-chemical properties, soil organic carbon components, and enzyme activities in 0-10 cm and 10-20 cm depths were analyzed. The results showed that soil pH significantly decreased with elevated N addition and litter removal. The contents of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N significantly increased with elevated N addition. Moreover, there was a significant interaction between N addition and litter treatment on the contents of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N ( $P < 0.05$ ). Compared to that with L, LR reduced SOC and its component contents; particularly, the largest decrease was in LFOC by 29.0%-81.4% in the 0-10 cm depth and 23.5%-58.4% in 10-20 cm, respectively. The contents of SOC and its components presented a trend of increasing first and then decreasing with elevated N addition irrespective of litter treatment, and those contents were significantly higher at LN than those at HN. There was a significant interaction between N addition and litter treatment on SOC, LFOC (0-10 cm), and HFOC contents. Compared with that under L, PPO activity was significantly reduced at LR under CK and LN but was significantly increased at LR under MN and HN, respectively. Variance analysis showed significant interactive effects between N addition and litter treatment on PPO and CBH (0-10 cm) activities, and the soil enzyme activity (BG, PPO, and CBH) responding to N addition was greater than that to the litter treatment. Pearson correlation analysis showed that SOC content was extremely positively correlated with MBC, POC, LFOC, and HFOC contents. To summarize, litter retained combined with low N deposition played an important synergistic role of improving SOC pool and soil enzyme activities for tropical rubber plantation systems.

**Key words:** litter; N addition; rubber plantation; organic carbon components; enzyme activity

陆地生态系统碳固存在缓解全球气候变化方面发挥着重要作用, 其中热带森林生态系统作为陆地生态系统中重要的碳库, 在陆地碳循环及碳汇功能中扮演着重要的角色<sup>[1,2]</sup>。凋落物作为森林碳库的重要组成部分, 是森林土壤有机碳(SOC)形成、稳定和周转的重要影响因子<sup>[3-6]</sup>。全球范围内, N是植物生长

最普遍的限制性营养元素, N沉降输入可能通过改变

收稿日期: 2023-01-30; 修订日期: 2023-03-30

基金项目: 海南省自然科学基金项目(320QN377); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(1630022022002); 国家天然橡胶产业技术体系项目(CARS-33-ZP-2); 海南省自然科学基金项目(320QN351)

作者简介: 薛欣欣(1986~), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为橡胶园养分资源管理, E-mail: xuexinxin\_2010@163.com

降解酶活性、微生物群落组成等来改变土壤 SOC 的分解,进而影响土壤 SOC 的积累和损耗过程<sup>[7]</sup>. 有研究发现,在全球氮沉降急剧增加的背景下,热带地区将是氮沉降的重点区域<sup>[2-8]</sup>. 有研究表明,氮沉降对土壤 SOC 库的影响受凋落物输入的调控<sup>[9,10]</sup>. 综上所述,凋落物 C 和沉降 N 的变化是全球变化影响森林生态系统碳循环的重要途径和因素. 因此,研究凋落物调控与氮沉降输入的互作效应对土壤 SOC 的影响,有利于正确评估热带森林生态系统 C 循环过程及其对全球气候变化的响应.

据估算,全球范围内 N 沉降目前使森林碳汇(以 C 计)增加 276 ~ 448 Tg·a<sup>-1</sup>,其中约 60% 保留在树木中,40% 保留在土壤中<sup>[11]</sup>. 长期双倍添加凋落物处理后,土壤 SOC 含量表现为降低<sup>[12]</sup>、不变<sup>[13]</sup>和增加<sup>[14]</sup>这 3 种情况,而凋落物去除都会引起表层土壤有机质含量降低<sup>[15]</sup>. 吴越等<sup>[9]</sup>研究发现,保留凋落物和外源 N 输入通过影响化学稳定性不同的土壤组分碳氮变化来改变土壤碳氮过程. 陈灿灿等<sup>[16]</sup>对中亚热带常绿阔叶林的研究表明,N 添加和凋落物处理对土壤 SOC 含量的影响具有显著的交互作用. 郭晓伟等<sup>[17]</sup>对油松-辽东栎混交林的研究表明,高质量和数量凋落物的输入及 N 添加量的增加显著提升土壤不同 C、N 组分含量. Peng 等<sup>[18]</sup>对亚热带森林的研究表明,高 N 沉降背景下,森林表层土壤 SOC 含量对地上凋落物输入量的变化变得更加敏感. 由此可见,凋落物 C 不仅是森林生态系统土壤 C 的重要来源,还调节着大气氮沉降对土壤 C 的影响. 土壤 SOC 背景值相对较高,短期内的反应较为滞后,不能较好地反映短时间土壤质量的变化<sup>[19]</sup>. 土壤 SOC 中活性有机碳组分可作为土壤有机碳早期变化的指示物,通常由土壤水溶性有机碳(DOC)、颗粒有机碳(POC)和轻组有机碳(LFOC)等表示;而非活性有机碳则表征土壤有机碳的积累和保持能力,如重组有机碳(HFOC)<sup>[20]</sup>. 目前,关于 N 添加与凋落物调控的交互效应如何影响热带地区土壤 SOC 组分的报道较少.

巴西橡胶树(*Hevea brasiliensis* Mull. Arg.)是我国热带地区最重要的人工林生态系统,主要分布在海南、云南和广东省部分地区,其中海南是我国主要的橡胶生产基地之一. 砖红壤是海南岛占地面积大、发育典型的地带性土壤,关注橡胶林砖红壤的碳管理有助于加强对热带地区人工林碳汇能力的理解. 本研究选取海南西部典型橡胶林,采用野外微区模拟试验,探讨 N 添加和凋落物处理对橡胶林砖红壤理化性状、SOC 及其组分、相关酶活性的影响,分析 N 沉降与凋落物对土壤生态过程的互作效应,以期深入研究森林生态系统 C 循环及响应 N 沉降提供科

学依据;同时,为全球变化背景下橡胶林的科学经营提供理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

本试验于 2019 年 5 月至 2020 年 7 月在海南省儋州市的中国热带农业科学院试验场(N19°20'05", E109°17'39")橡胶林中进行. 试验区平均海拔 114 m,属热带海岛季风气候,年均气温 21.5 ~ 28.5℃,太阳辐射 4.857×10<sup>5</sup> J·cm<sup>-2</sup>,全年日照时数 2 100 h,年降雨量 1 607 mm,其中全年 70% 的降雨量分布在 7 ~ 9 月,年平均相对湿度约 83%. 土壤类型为花岗岩发育的砖红壤.

### 1.2 试验设计

选取未被破坏、能代表该区域整体情况的成龄橡胶林,树龄为 15 a. 在橡胶林行间选取 8 块面积为 7 m(宽)×30 m(长)的固定样地. 在每个固定样地中随机设置 3 个面积为 2 m×2 m 的样方作为微区,每个微区用 PVC 板围成,PVC 板高出地面 10 cm,各微区之间间隔 3 m 以上,防止互相干扰,共 24 个微区. 试验采用凋落物和 N 两因素完全区组设计,凋落物处理包括凋落物去除(LR)和凋落物保留(L),其中,凋落物去除为:清除微区内土壤表面凋落物及可见腐殖质,并于每月定期清除新鲜凋落物;凋落物保留为:保持微区的原始状态,减少对其干扰. N 处理采用人工模拟 N 沉降方法,设置 4 个 N 水平[不施氮(CK, 0 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,以 N 计,下同),低氮(LN, 50 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>),中氮(MN, 100 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)和高氮(HN, 200 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)]<sup>[21]</sup>. 模拟 N 沉降采用人工喷 N 的方式进行,使用 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>作为 N 源. 自 2019 年 5 月开始,在每年雨季(5 ~ 10 月)的每月月底以溶液的形式给样地喷洒. 各微区每月施 N 量按照施 N 水平和施 N 月份进行平均,将需要喷施的 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>溶解在 2 L 水中,用高压喷壶在微区内均匀喷洒;对照微区喷施等量的纯水. 本试验共设置 8 个处理,3 次重复.

### 1.3 土壤样品采集

于 2020 年 7 月下旬进行采样,分别采集 0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm 土层样品,各微区选取 3 个代表性点位混合,去除根系、石块和其他杂物后过 2 mm 筛,装入封口袋中置于冰盒中低温保存带回实验室. 一部分土自然风干用于 pH、SOC 及其组分(DOC、POC、LFOC 和 HFOC)、全氮(TN)等指标分析;另一部分土于 4℃冷藏保鲜,用于分析土壤含水率(SWC)、微生物生物量碳(MBC)和微生物生物量氮(MBN)含量,β-葡萄糖苷酶(BG)、多酚氧化酶(PPO)和纤维素酶(CBH)活性,硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)和铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)含量.

#### 1.4 土壤样品分析

土壤理化性质测定参考鲍士旦的方法<sup>[22]</sup>. SWC 采用 105℃ 烘干称重法测定; pH 采用土水比 1:2.5 浸提, pH 计测定; SOC 采用重铬酸钾容量法测定; TN 采用半微量凯氏定氮法测定; MBC 和 MBN 均采用氯仿熏蒸直接浸提法测定;  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  采用  $2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  氯化钾浸提, 连续流动分析仪(AA3 型, 德国 Seal 公司)测定.

土壤有机碳组分测定. DOC 采用土水比 1:5 提取, 利用总有机碳/总氮分析仪(multi N/C 3100 TOC, 德国 jena 公司)测定<sup>[23]</sup>; POC 采用偏磷酸钠浸提法测定<sup>[24]</sup>; LFOC 采用重液分离法<sup>[25]</sup>; HFOC 采用土壤 SOC 含量与 LFOC 含量的差值计算得到.

土壤酶活性测定. BG 活性测定以对硝基苯  $\beta$ -D 吡喃葡萄糖苷为基质, 以 pH 12.0 Tris 为缓冲液<sup>[26]</sup>; CBH 活性测定以对硝基苯纤维二糖苷为底物, 缓冲液为 pH 5.0 MUB<sup>[27]</sup>; PPO 活性测定分别以左旋多巴(DOPA)为底物, 缓冲溶液为 pH 5.0 的醋酸缓冲液<sup>[28]</sup>, 均采用荧光微型板法测定.

#### 1.5 数据处理

利用 Excel 2010 软件计算数据, OriginPro 2021 软件进行绘图、主成分分析(principal component analysis, PCA)和相关性分析(Pearson), SPSS 20.0 软件统计分析, 单因素方差分析(ANOVA)分析不同 N 水平处理对土壤理化性质、SOC 及其组分和酶活性的影响; 独立样本 t 检验分析相同氮水平下调落物处理对土壤理化性质、有机碳组分和酶活性的影响; 双因素方差分析(two-way ANOVA)研究 N 添加和凋落物处理及其二者交互作用对土壤理化性质、SOC 及其组分和酶活性的影响; 最小显著差异法(LSD)进行差异显著性检验( $P < 0.05$ ).

## 2 结果与分析

### 2.1 氮添加和凋落物处理的土壤理化性质

由表 1 可知, 与 L 处理相比, LR 处理在不同 N 水平下均显著降低了各层土壤 SWC 含量, 0~10 cm 和 10~20 cm 降幅分别为 13.5%~15.4% 和 11.1%~14.4%, 0~10 cm 降幅大于 10~20 cm. 与 L 处理相比, LR 处理造成土壤 pH 不同程度下降, 其中, 在 CK 和 LN 处理条件下, LR 和 L 处理间 pH 差异显著. pH 随 N 添加量的增加呈下降的趋势, 在 L 处理条件下, HN 处理 pH 显著低于 CK 和 LN 处理( $P < 0.05$ ).

L 和 LR 处理间 SOC 差异显著, LR 处理显著低于 L 处理, 0~10 cm 和 10~20 cm 降幅分别为 11.4%~22.7% 和 1.1%~15.7%, 0~10 cm 降幅高于 10~20 cm. SOC 随 N 添加量的增加呈先增加后降低的趋势,

在 LN 处理水平下最高, 且显著高于 HN 处理; SOC 随土壤深度增加呈下降的趋势. 与 L 处理相比, LR 处理在不同 N 水平下的土壤 TN 含量均有所降低, 0~10 cm 和 10~20 cm 降幅分别为 4.3%~20.4% 和 7.4%~27.1%; 而随 N 添加量的增加, 土壤 TN 含量呈先增加后降低的趋势.

与 L 处理相比, LR 处理下的土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量均有所增加, 其中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层平均增幅为 33.0% 和 29.3%,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量平均增幅分别为 54.1% 和 74.6%, 明显高于  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  增幅; 随 N 添加量的增加,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量均呈显著增加的趋势. 方差分析显示, 凋落物处理对土壤各理化指标均有极显著影响( $P < 0.01$ ), 而氮添加处理除对土壤 pH 无显著影响外, 对其他各理化指标均有极显著影响( $P < 0.01$ ), 二者的交互作用对 SOC、C/N(0~10 cm)、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量均有显著或极显著影响.

### 2.2 氮添加和凋落物处理的土壤有机碳组分

与 L 相比, LR 处理下的土壤 DOC[图 1(a)和 1(b)]、POC[图 1(c)和 1(d)]、LFOC[图 1(e)和 1(f)]和 HFOC[图 1(g)和 1(h)]含量均有不同程度下降, 其中 LFOC 降幅最大, 0~10 cm 降幅为 29.0%~81.4%, 10~20 cm 降幅为 23.5%~58.4%, 0~10 cm 降幅明显大于 10~20 cm. 随 N 添加量的增加, DOC 在 0~10 cm 土层表现为显著下降的趋势, 而在 10~20 cm 则表现为显著增加的趋势. POC 含量在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层均随 N 添加量的增加呈现先增加后降低的趋势, 在 LN 水平下较高. 在 L 处理条件下, LFOC 含量随 N 添加量的增加呈现先增加后降低趋势, 0~10 cm 土层 MN 处理最高, 10~20 cm 土层 LN 处理最高, 而 LR 处理条件下, LFOC 含量则在 0~10 cm 土层随 N 添加量的增加呈下降趋势, 而在 10~20 cm 土层呈增加趋势. HFOC 含量均随 N 添加量的增加呈先增加后降低的趋势, 在 LN 处理下达到最高, 且显著高于 CK 和 HN 处理. 方差分析显示, N 添加处理和凋落物处理对有机碳各组分均有显著( $P < 0.05$ )或极显著影响( $P < 0.01$ ), 二者交互作用则对 0~10 cm 土层的 LFOC 含量以及各土层的 HFOC 含量有极显著影响.

### 2.3 氮添加和凋落物处理的土壤微生物生物量碳氮

与 L 处理相比, LR 处理不同程度降低了 MBC 和 MBN 含量, 在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层, MBC 降幅分别为 7.2%~13.1% 和 8.8%~15.9%, MBN 降幅分别为 2.2%~33.1% 和 11.9%~37.7%, 凋落物处理对 MBN 的影响程度大于对 MBC 的影响(表 2). MBC 和 MBN 含量均随 N 添加量的增加呈先增加后降低的

表 1 不同氮添加水平和凋落物处理下的土壤理化性质<sup>1)</sup>

Table 1 Soil physico-chemical properties with different N addition levels and litter treatment

处理	$\omega(\text{SWC})/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$		pH		$\omega(\text{SOC})/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$		$\omega(\text{TN})/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$		
	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	
LR	CK	1.32 ± 0.08aB	1.37 ± 0.03abB	5.10 ± 0.27aA	4.99 ± 0.12aB	8.30 ± 0.22abB	7.24 ± 0.08cA	0.56 ± 0.03bB	0.45 ± 0.03cB
	LN	1.30 ± 0.05aB	1.44 ± 0.04aB	4.84 ± 0.11aB	4.78 ± 0.05aB	8.68 ± 0.31aB	8.39 ± 0.21aB	0.64 ± 0.01aB	0.50 ± 0.03bcB
	MN	1.21 ± 0.04aB	1.35 ± 0.07abB	4.90 ± 0.27aA	4.75 ± 0.11aA	8.16 ± 0.20abB	7.84 ± 0.14bB	0.61 ± 0.06abB	0.61 ± 0.07abA
	HN	1.23 ± 0.06aB	1.31 ± 0.03bB	4.88 ± 0.26aA	4.87 ± 0.32aA	7.92 ± 0.44bB	7.72 ± 0.23bA	0.62 ± 0.03abA	0.55 ± 0.04abA
L	CK	1.52 ± 0.00aA	1.55 ± 0.08abA	5.37 ± 0.09aA	5.29 ± 0.13abA	9.46 ± 0.09bA	7.72 ± 0.44cA	0.70 ± 0.02abA	0.62 ± 0.05abA
	LN	1.53 ± 0.07aA	1.68 ± 0.10aA	5.30 ± 0.10aA	5.37 ± 0.31aA	11.24 ± 0.59aA	9.95 ± 0.18aA	0.77 ± 0.06aA	0.66 ± 0.06aA
	MN	1.43 ± 0.06bA	1.51 ± 0.08bA	5.18 ± 0.08abA	5.20 ± 0.29abA	10.41 ± 0.75aA	8.73 ± 0.19bA	0.75 ± 0.04aA	0.70 ± 0.07aA
	HN	1.43 ± 0.04bA	1.51 ± 0.07bA	5.07 ± 0.15bA	4.86 ± 0.20bA	8.94 ± 0.22bA	7.81 ± 0.22cA	0.65 ± 0.04bA	0.59 ± 0.05bA
方差分析									
L	0.000**	0.000**	0.001**	0.001**	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**	
N	0.005**	0.006**	0.135	0.174	0.000**	0.000**	0.009**	0.009**	
L×N	0.936	0.798	0.636	0.138	0.010**	0.004**	0.061	0.161	

处理	C/N		$\omega(\text{NH}_4^+\text{-N})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		$\omega(\text{NO}_3^-\text{-N})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		
	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	
LR	CK	14.87 ± 0.54aA	16.11 ± 1.28aA	14.46 ± 1.57cA	15.17 ± 1.84bA	10.85 ± 0.36bA	8.73 ± 1.01dA
	LN	13.51 ± 0.50abB	16.68 ± 1.12aA	18.12 ± 1.13cA	16.41 ± 1.69bA	15.53 ± 0.97aA	15.43 ± 1.48cA
	MN	13.51 ± 1.13abA	13.00 ± 1.53bA	24.25 ± 2.63bA	16.92 ± 0.82bA	15.63 ± 1.24aA	17.55 ± 1.24bA
	HN	12.86 ± 1.27bA	14.22 ± 1.25abA	35.86 ± 2.37aA	21.8 ± 1.86aA	14.16 ± 1.28aA	28.91 ± 0.51aA
L	CK	13.46 ± 0.36bB	12.56 ± 1.47bB	13.81 ± 0.24bA	11.17 ± 0.30cB	7.37 ± 0.89cB	4.24 ± 0.35cB
	LN	14.56 ± 0.32aA	15.07 ± 1.32aA	18.35 ± 2.36aA	13.97 ± 0.51bB	7.62 ± 0.20cB	9.10 ± 0.53bB
	MN	13.82 ± 0.51abA	12.62 ± 1.04bA	19.45 ± 2.20aB	14.12 ± 0.86abB	10.11 ± 0.68bB	9.52 ± 1.02bB
	HN	13.89 ± 0.82abA	13.34 ± 1.17abA	17.6 ± 0.24aB	15.13 ± 0.44aB	12.8 ± 0.42aA	20.86 ± 1.13aB
方差分析							
L	0.445	0.007**	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**	
N	0.295	0.006**	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**	
L×N	0.040*	0.193	0.000**	0.032*	0.000**	0.018*	

1) 数值为平均值 ± 标准差 ( $n=3$ ); 不同小写字母表示相同凋落物处理下不同 N 水平间差异达 0.05 显著水平; 不同大写字母表示相同 N 水平条件下不同凋落物处理间差异达 0.05 显著水平; 双因素方差分析结果以 P 值表示, \* 和 \*\* 分别表示凋落物处理或 N 添加处理或二者交互作用对某一指标影响显著 ( $P < 0.05$ ) 和极显著 ( $P < 0.01$ ), 下同

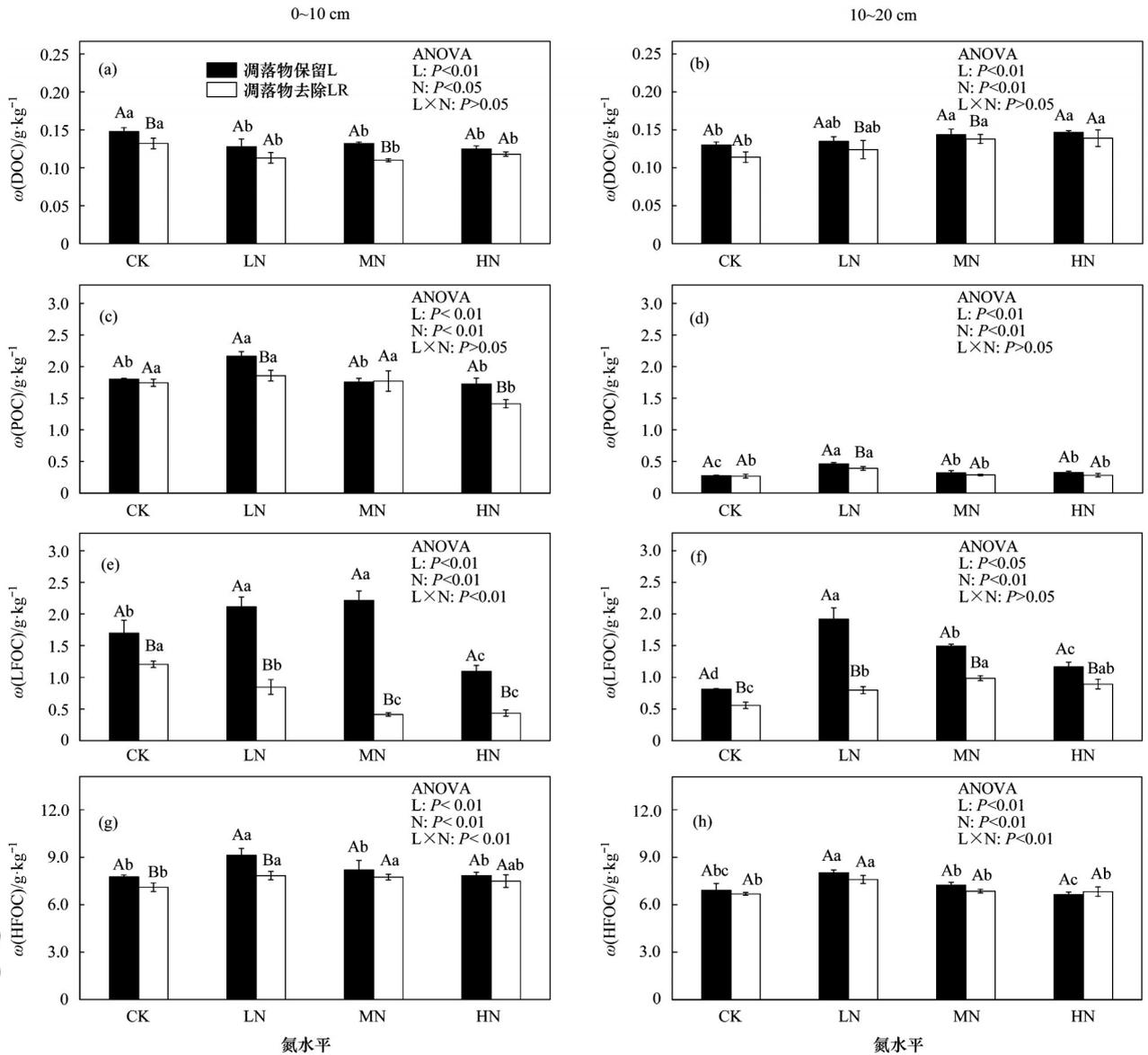
趋势, 在 MN 水平下基本达到最大值, 且显著高于 CK 和 HN 水平, N 添加处理对 MBN 的影响程度大于对 MBC 的影响. MBC/MBN 在 CK 处理条件下均最高, 而在 MN 处理下基本处于较低水平. 方差分析显示, N

添加处理和凋落物处理对 MBC 和 MBN 含量以及 MBC/MBN 均具有显著 ( $P < 0.05$ ) 或极显著 ( $P < 0.01$ ) 影响, 而二者交互作用则对 MBN 以及 MBC/MBN 具有极显著影响.

表 2 不同氮添加水平和凋落物处理下的土壤微生物生物量碳氮

Table 2 Soil microbial biomass C and N with different N addition levels and litter treatments

处理	$\omega(\text{MBC})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		$\omega(\text{MBN})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		$\omega(\text{MBC})/\omega(\text{MBN})$		
	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	
LR	CK	172.67 ± 7.37aA	159.88 ± 6.62abB	74.29 ± 7.99cA	69.44 ± 4.19dB	2.34 ± 0.15aA	2.31 ± 0.16aA
	LN	194.56 ± 11.88aA	163.56 ± 9.71abB	104.94 ± 9.14bA	114.37 ± 5.02bB	1.86 ± 0.08bA	1.43 ± 0.04cB
	MN	190.89 ± 18.72aA	171.04 ± 7.44aB	144.25 ± 11.67aA	127.27 ± 6.54aB	1.32 ± 0.07cA	1.35 ± 0.09cB
	HN	175.01 ± 8.33aA	155.63 ± 2.58bB	94.75 ± 5.04bB	80.54 ± 6.48cB	1.85 ± 0.05bA	1.94 ± 0.18bA
L	CK	191.34 ± 9.99bA	175.29 ± 8.92bA	88.26 ± 8.11dA	108.31 ± 7.00bA	2.18 ± 0.24aA	1.63 ± 0.18aA
	LN	209.73 ± 6.34abA	182.32 ± 6.46abA	107.33 ± 8.74cA	129.87 ± 4.53aA	1.96 ± 0.21aA	1.40 ± 0.05abA
	MN	219.72 ± 5.31abA	191.61 ± 5.62aA	161.53 ± 7.03aA	145.06 ± 10.67aA	1.36 ± 0.06bA	1.33 ± 0.12bA
	HN	193.91 ± 13.87bA	184.96 ± 10.85abA	141.60 ± 5.74bA	129.21 ± 12.81aA	1.37 ± 0.07bA	1.44 ± 0.16abA
方差分析							
L	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**	0.040*	0.000**	
N	0.003**	0.037*	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**	
L×N	0.737	0.464	0.002**	0.004**	0.008**	0.001**	



不同小写字母表示相同凋落物处理下不同N水平间差异达0.05显著水平;不同大写字母表示相同N水平条件下不同凋落物处理间差异达0.05显著水平;双因素方差分析结果以P值表示

图1 不同氮添加水平和凋落物处理下的土壤有机碳组分

Fig. 1 Soil organic carbon components with different N addition levels and litter treatments

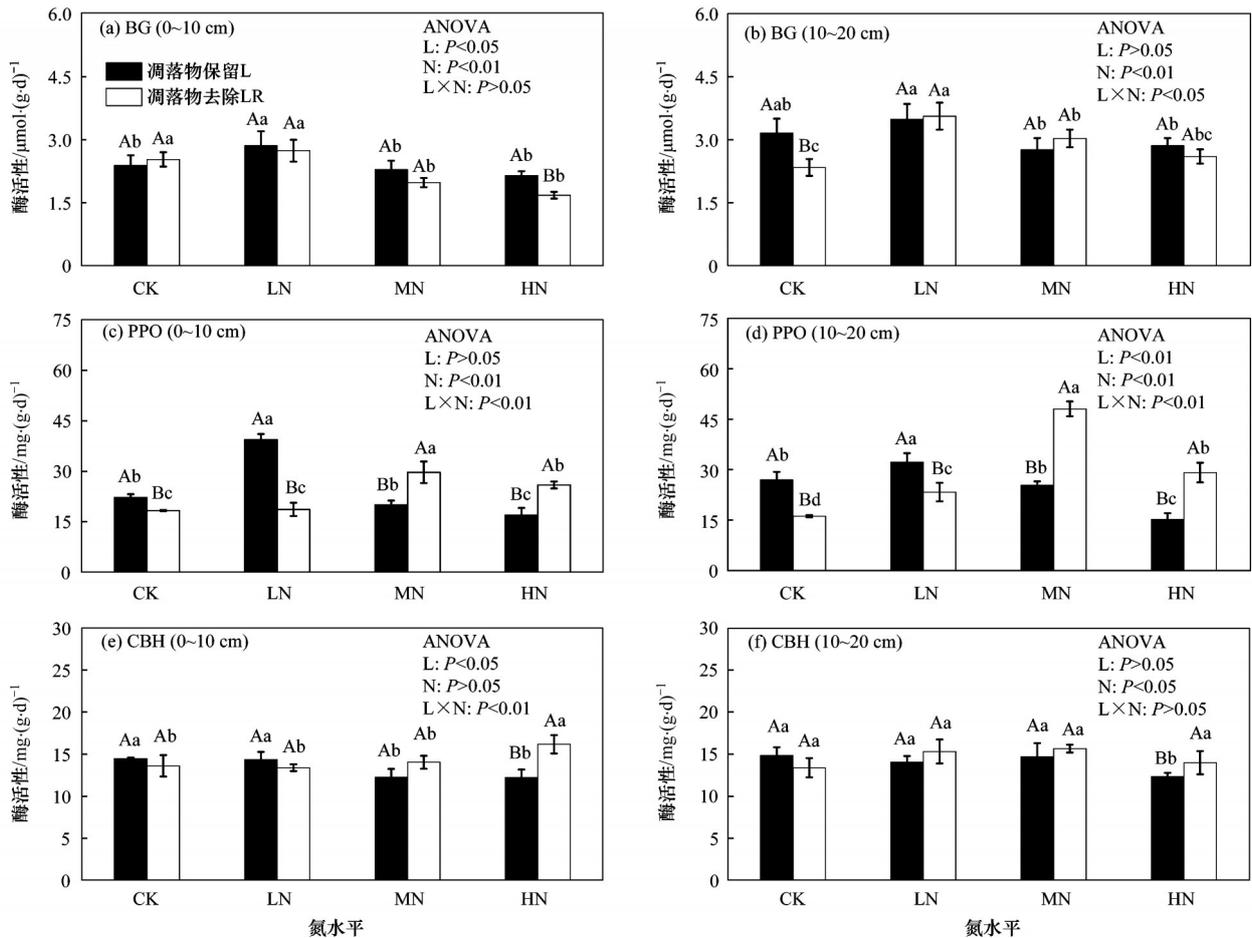
## 2.4 氮添加和凋落物处理的土壤酶活性

BG酶活性随N添加量的增加呈先增加后降低的趋势[图2(a)和2(b)],在LN处理水平下最高,且显著高于HN处理,方差分析显示,凋落物处理对0~10 cm土层的BG含量有显著影响( $P < 0.05$ ),而N添加处理则对0~10 cm和10~20 cm土层BG含量均有极显著影响( $P < 0.01$ ),二者交互作用对10~20 cm土层的BG含量具有显著影响。PPO含量在不同凋落物处理间差异显著[图2(c)和2(d)],在CK和LN条件下LR处理的PPO含量显著低于LR处理,而在MN和HN条件下,LR处理的PPO含量则均显著高于L处理;PPO含量随N添加量的增加呈先增加后降低的趋势,在L处理条件下LN处理的PPO含量最高,而在LR处理条件下则以MN

处理的PPO含量最高。方差分析显示,氮添加处理和凋落物处理的交互作用对PPO含量有极显著影响( $P < 0.01$ )。在L处理条件下,CBH含量随N添加量的增加呈降低的趋势[图2(e)和2(f)],而在LR处理条件下,CBH含量则随N添加量的增加呈增加趋势;与L处理相比,LR处理的CBH含量在HN处理条件下显著增加,而在其他N水平下,L和LR处理间无显著差异。方差分析显示,氮添加处理和凋落物处理对0~10 cm土层的CBH含量有极显著影响( $P < 0.01$ )。

## 2.5 土壤有机碳组分及土壤酶活性与土壤理化性质的关系

综合所有处理的土壤理化性质、有机碳组分、酶活性等数据进行主成分分析(PCA)发现(图3),0~



不同小写字母表示相同凋落物处理下不同N水平间差异达0.05显著水平;不同大写字母表示相同N水平条件下不同凋落物处理间差异达0.05显著水平;双因素方差分析结果以P值表示

图2 不同氮添加水平和凋落物处理下的土壤酶活性

Fig. 2 Soil enzyme activity with different N addition levels and litter treatments

10 cm 土层[图 3(a)],前两个轴(PC1和PC2)共同解释了61.0%的变异,第一主成分贡献率为43.7%;L处理下的大部分处在PC1的正轴,而LR处理下均处在PC1负轴,可见,L处理对土壤SOC各组分和酶活性的贡献较大,LR条件下,N添加对土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的贡献较大.10~20 cm 土层[图 3(b)],前两个轴(PC1和PC2)共同解释了55.7%的变异,第一主成分贡献率为38.1%;与0~10 cm 相似,L处理基本处在PC1正轴,而LR处理则处在PC1负轴.相关性分析表明(图4),SOC与其各组分(LFOC、HFOC、POC、MBC)含量、pH、SWC以及TN含量间呈极显著正相关关系( $P < 0.01$ ),MBC与其他SOC组分(POC、LFOC、HFOC)含量间呈极显著正相关关系,DOC含量与BG酶活性呈显著正相关( $P < 0.05$ ),而POC含量与BG酶活性呈极显著负相关.

### 3 讨论

#### 3.1 氮添加和凋落物处理对土壤理化性状的影响

本研究发现,在经过一年多的凋落物处理之后,

凋落物去除显著降低了0~20 cm 土层土壤的含水率,其中,上层0~10 cm 的降幅大于下层10~20 cm,主要因为0~10 cm 土层与凋落物层直接接触,因而受影响较大,这与笔者前期研究的结果相似<sup>[29]</sup>;由此也进一步证实了橡胶林凋落物在缓解雨滴溅蚀力、消减水土流失的过程中发挥着重要作用<sup>[30]</sup>.氮添加、凋落物去除均加剧了土壤酸化,本研究采用 $\text{NH}_4\text{NO}_3$ 作为氮沉降的氮源,发现土壤铵态氮和硝态氮含量均与土壤pH呈显著的负相关关系,这也说明了氮沉降的增加造成了土壤酸化的加剧<sup>[21]</sup>.另外,在凋落物保留条件下,凋落物的分解释放丰富的阳离子,对改善土壤pH起到关键作用<sup>[29]</sup>.本研究发现,凋落物去除对土壤pH的影响大于氮添加的影响,Maes等<sup>[31]</sup>在温带落叶林的研究也有类似的结果,说明除氮沉降输入外,凋落叶可能也是影响土壤酸化的主要驱动因素之一.本研究结果与唐佐芯等<sup>[32]</sup>在针阔混交林中的研究有所不同,其研究表明土壤pH不受氮添加和凋落物处理的影响,产生以上差异可能与研究区域的植被类型、土壤地力等因素有关. $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、

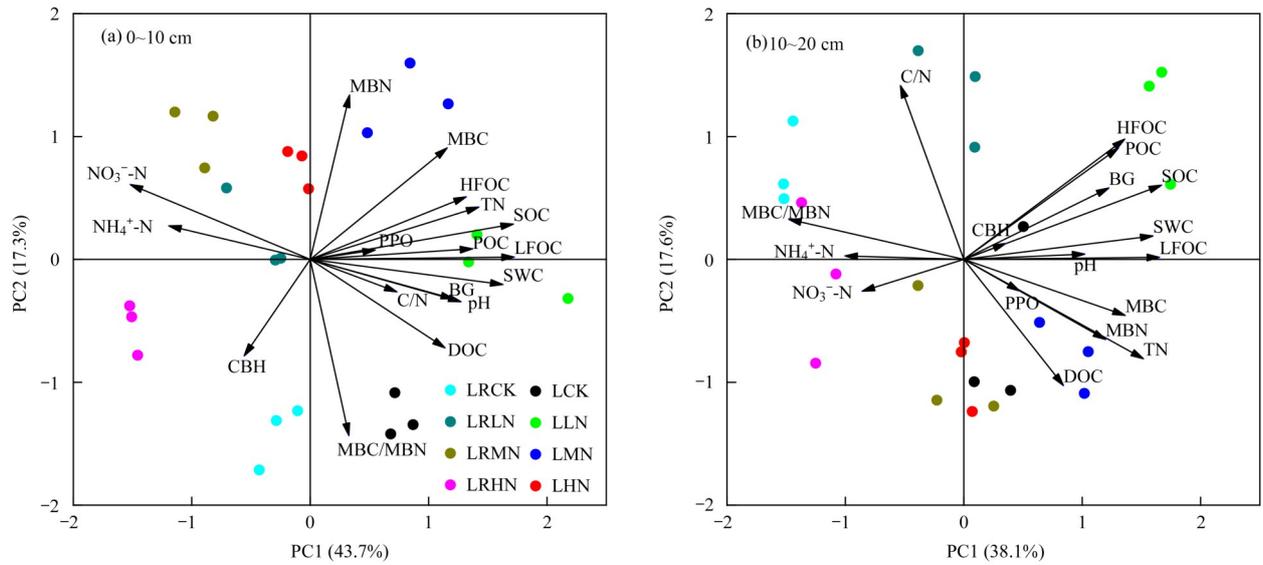
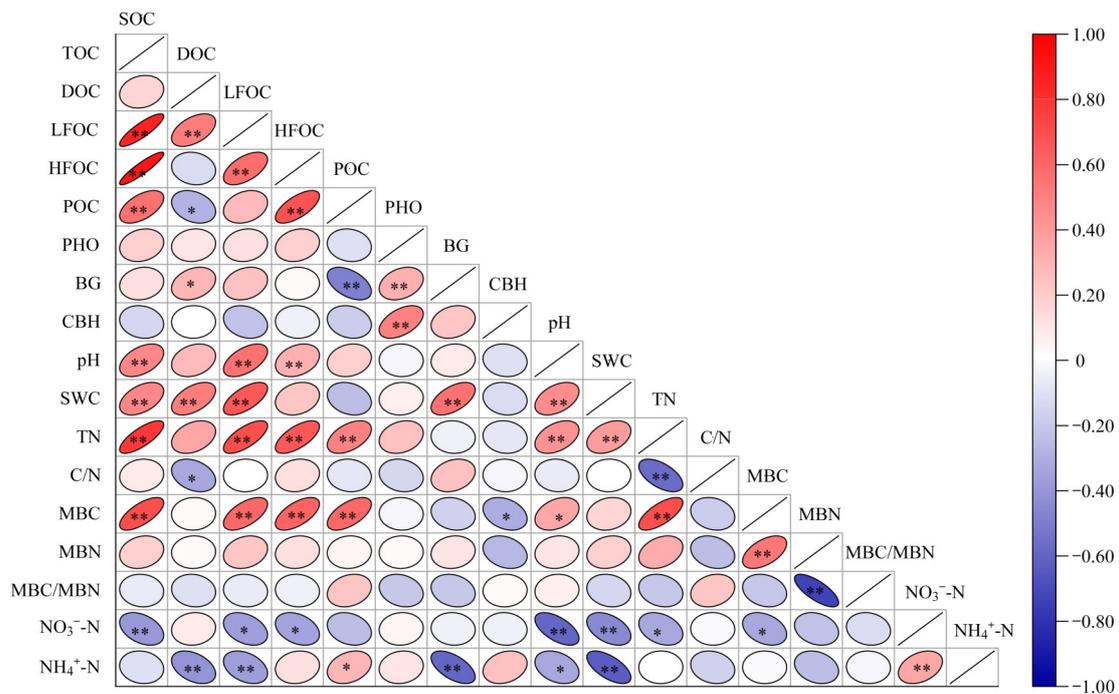


图3 土壤有机碳组分及土壤酶活性与土壤理化性质之间的主成分分析(PCA)

Fig. 3 Principal component analysis (PCA) of the relationships of the components of soil organic carbon and soil enzyme activities with soil physico-chemical properties



每个格子的颜色表示对于行与列的相关性,颜色越红表示正相关性越强,越蓝表示负相关性越强;

\*和\*\*分别表示两个指标之间相关性显著( $P < 0.05$ )和极显著( $P < 0.01$ )

图4 土壤有机碳组分、酶活性以及理化性质之间的皮尔逊相关分析

Fig. 4 Pearson correlation coefficients of soil organic components, enzyme activities, and soil physico-chemical properties

$\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量均随氮添加量的增加而增加,可见土壤的有效氮水平较大程度上取决于外源氮的添加量<sup>[33]</sup>.  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量垂直分布规律表现为下层>上层,这与土壤水分的分布规律一致,也说明  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  不易被土壤固定,易随土壤水分的下渗而淋溶损失;与  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  不同,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量表现为上层>下层,主要由于  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  在土壤中以吸附态存在,不易淋溶损失,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的迁移和分布不受水分供应的影响<sup>[34,35]</sup>. 本研究发现,凋落物处

理与氮添加的交互效应对土壤的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量均有显著或极显著的影响;凋落物去除条件下各土层  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量高于凋落物保留处理,这与凋落物保留条件下对部分外源 N 的截留有关,进而减缓土壤有效氮输出对水环境的负面影响<sup>[36]</sup>.

### 3.2 氮添加和凋落物处理对土壤有机碳及其组分的影响

植物凋落物(即地上部和根凋落物)和活根输入

是陆地生态系统中土壤有机质的主要来源,其中高达90%的植物光合产物以凋落物的形式进入土壤. 本研究发现,在相同凋落物处理条件下,低氮处理的SOC含量最高,其显著高于CK和高氮处理,有机碳各组分对不同氮水平的响应与SOC相似. 有研究认为氮添加量在一定范围内可以促进土壤有机碳的固存,减小有机碳的矿化分解<sup>[37]</sup>. 本研究结果表明,土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量与SOC含量呈负相关,以往研究认为土壤中有效氮含量随氮沉降量的增加而增加,且与SOC分解呈显著正相关,土壤氮有效性的增加可能激发微生物产生更多的碳降解酶,进而加速了SOC的分解<sup>[21,38]</sup>. 另外,还可能与高氮输入造成土壤酸化进而加速了土壤的碳损失有关<sup>[33]</sup>. 与凋落物保留相比,凋落物去除显著降低了SOC含量,凋落物去除后使林地土壤失去有机碳来源,同时,地表裸露加速了土壤中有机质的分解和流失,降低了土壤有机碳含量<sup>[39]</sup>. 凋落物对0~10 cm表层土壤有机碳含量的影响大于10~20 cm土层. 氮和凋落物处理交互作用对土壤有机碳有极显著影响,说明凋落物处理可以调节氮沉降对土壤有机碳的影响<sup>[31]</sup>.

LFOC作为土壤有机碳的活性组分,极易受环境条件、植物、人为因素的影响而发生变化,凋落物去除均不同程度降低了有机碳各组分含量,尤其是对LFOC影响最大,这与张玉岱等<sup>[25]</sup>的研究结果一致,其认为地上部凋落物输入土壤的有机物数量与质量等的不同,造成LFOC含量的变化剧烈,说明LFOC对地上部有机物质的输入响应敏感性较高. 氮沉降和凋落物处理对MBC和MBN以及C/N有显著或极显著影响,MBC对凋落物输入的响应比对氮沉降的响应更强烈,凋落物去除之后土壤含水率降低,土壤干燥导致微生物活性下降或微生物死亡,土壤中的微生物生物量降低,而在凋落物保留处理下调落物中含有较多的易分解的有机物质,从而增加了微生物生物量<sup>[40]</sup>. 另外,高氮处理降低了MBC和MBN,可能是因为高氮投入促进了微生物作用下 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 向 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的转化过程,使得土壤酸化加剧,进而抑制土壤微生物活性和生物量<sup>[21]</sup>,同时本研究中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量与MBC含量呈显著负相关也证实了上述的结果. 氮沉降和凋落物处理的交互作用对MBN具有极显著影响,说明MBN受氮添加水平和凋落物调控的共同影响. 本研究中,SOC与MBC、POC、LFOC以及HFOC之间呈极显著正相关关系,表明土壤有机碳组分在很大程度上依赖土壤有机碳含量,且均可作为反映土壤有机碳库的有效指标.

### 3.3 氮添加和凋落物处理对土壤酶活性的影响

土壤酶是土壤生态系统中生物化学反应的催化

剂,与土壤有机碳的分解速率及土壤有机碳库周转模式密切相关. 以往研究已证实,在易变的底物中添加氮可通过减轻微生物的氮限制来激发微生物的生长和酶活性<sup>[33]</sup>. 本研究发现,随氮添加量的增加,土壤酶活性总体呈先增加后降低的趋势,其中氮添加量在50~100  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 时酶活性较高,说明适度的氮添加可提高土壤酶活性,这与Guan等<sup>[33]</sup>认为的100  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 时酶活性处于较高水平接近. 值得注意的是,对于氮限制的生态系统,当土壤氮水平超出临界阈值时,过量的氮添加可能会对土壤酶活性产生负效应<sup>[1]</sup>. 另外,氮沉降对土壤酶活性有抑制作用可能还受季节等因素的影响<sup>[41]</sup>. 在不施氮和低氮条件下,凋落物去除处理显著降低PPO活性,而在中氮和高氮条件下,凋落物去除处理显著增加了PPO活性,氮添加和凋落物处理的交互作用对PPO活性有极显著影响,说明土壤酶活性受氮添加和凋落物的共同影响. Zhang等<sup>[1]</sup>研究表明,当氮素不足而碳源充足时,微生物会释放更多的胞外酶进而降解新鲜凋落物作为碳源来获取能量和营养物质,从而增加了土壤中酶活性;而当氮素充足,碳源不足时(凋落物去除),微生物会通过增加碳降解酶的产生增强对土壤有机质的分解. 另外,在高氮水平下,凋落物去除显著增加了纤维素分解酶活性,与上述的原因相同. 本研究中BG酶活性与SWC呈显著正相关,凋落物的保留改善土壤SWC并为微生物的生长提供了良好的水热环境,进而影响了土壤酶活性. BG、PPO和CBH酶活性与SOC的相关性总体较小,说明土壤酶活性易受到外界环境变化(水热条件等)的影响,具体的机制仍需进一步的研究.

## 4 结论

N添加和凋落物去除均加剧了橡胶林土壤酸化. 与凋落物保留相比,凋落物的去除减少了外源有机物的输入,造成土壤SOC及其组分含量降低,其中LFOC含量的降幅最大,0~10 cm和10~20 cm土层降幅分别为29.0%~81.4%和23.5%~58.4%. 土壤SOC及其组分含量随N添加量的增加呈先增加后降低的趋势,其中,高N添加造成土壤有机碳含量显著降低. 凋落物保留结合低N输入的管理措施有助于改善橡胶林土壤SOC库和土壤质量. N添加和凋落物处理的交互作用对PPO酶活性有极显著影响,说明PPO酶活性在参与碳循环中受凋落物和氮的共同作用. MBC、LFOC、POC以及HFOC含量与SOC含量均呈极显著正相关关系,上述组分均可以作为反映土壤SOC库的有效指标.

## 参考文献:

- [ 1 ] Zhang J F, Zhou J G, Lambers H, *et al.* Nitrogen and phosphorus addition exerted different influences on litter and soil carbon release in a tropical forest[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **832**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.155049.
- [ 2 ] Lu X K, Vitousek P M, Mao Q G, *et al.* Nitrogen deposition accelerates soil carbon sequestration in tropical forests[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, **118**, doi: 10.1073/pnas.2020790118.
- [ 3 ] Kardol P, Wardle D A. How understanding aboveground-belowground linkages can assist restoration ecology[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2010, **25**(11): 670-679.
- [ 4 ] Berg B. Decomposition patterns for foliar litter—a theory for influencing factors[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, **78**: 222-232.
- [ 5 ] Zhou S X, Huang C D, Han B H, *et al.* Simulated nitrogen deposition significantly suppresses the decomposition of forest litter in a natural evergreen broad-leaved forest in the rainy area of Western China[J]. *Plant and Soil*, 2017, **420**(1-2): 135-145.
- [ 6 ] Dignac M F, Derrien D, Barré P, *et al.* Increasing soil carbon storage: mechanisms, effects of agricultural practices and proxies. A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2017, **37**(2), doi: 10.1007/s13593-017-0421-2.
- [ 7 ] 王楠, 钱少郁, 潘小承, 等. 模拟酸雨及氮沉降对马尾松林土壤细菌群落结构及其多样性的影响[J]. *环境科学*, 2023, **44**(4): 2315-2324.
- Wang N, Qian S Y, Pan X C, *et al.* Effects of simulated acid rain and nitrogen deposition on soil bacterial community structure and diversity in the Masson pine forest[J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(4): 2315-2324.
- [ 8 ] Zhang W, Cui Y H, Lu X K, *et al.* High nitrogen deposition decreases the contribution of fungal residues to soil carbon pools in a tropical forest ecosystem[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, **97**: 211-214.
- [ 9 ] 吴越, 马红亮, 尹云锋, 等. 凋落物去除和氮添加对亚热带阔叶林土壤不同组分碳、氮的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, **30**(9): 2923-2932.
- Wu Y, Ma H L, Yin Y F, *et al.* Effects of litter removal and nitrogen addition on carbon and nitrogen in different soil fractions in a subtropical broad-leaved forest[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(9): 2923-2932.
- [ 10 ] 李化山, 汪金松, 赵秀海, 等. 模拟氮沉降下去除凋落物对太岳山油松林土壤呼吸的影响[J]. *生态学杂志*, 2014, **33**(4): 857-866.
- Li H S, Wang J S, Zhao X H, *et al.* Effects of litter removal on soil respiration under simulated nitrogen deposition in a *Pinus tabulaeformis* forest in Taiyue Mountain, China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, **33**(4): 857-866.
- [ 11 ] de Vries W, Du E Z, Butterbach-Bahl K. Short and long-term impacts of nitrogen deposition on carbon sequestration by forest ecosystems[J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2014, **9-10**: 90-104.
- [ 12 ] Bowden R D, Deem L, Plante A F, *et al.* Litter input controls on soil carbon in a temperate deciduous forest[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, **78**(S1): S66-S75.
- [ 13 ] Pisani O, Lin L H, Lun O O Y, *et al.* Long-term doubling of litter inputs accelerates soil organic matter degradation and reduces soil carbon stocks[J]. *Biogeochemistry*, 2016, **127**(1): 1-14.
- [ 14 ] Fekete I, Kotrocó Z, Varga C, *et al.* Variability of organic matter inputs affects soil moisture and soil biological parameters in a European detritus manipulation experiment[J]. *Ecosystems*, 2012, **15**(5): 792-803.
- [ 15 ] Lajtha K, Bowden R D, Crow S, *et al.* The detrital input and removal treatment (DIRT) network: insights into soil carbon stabilization[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **640-641**: 1112-1120.
- [ 16 ] 陈灿灿, 马红亮, 高人, 等. 施氮与凋落物去除影响下中亚热带阔叶林土壤氮素矿化潜势和硝化潜势研究[J]. *生态环境学报*, 2021, **30**(3): 503-511.
- Chen C C, Ma H L, Gao R, *et al.* Study on the potential of nitrogen mineralization and nitrification in mid-subtropical broad-leaved forest soil already treated with nitrogen addition and litter removal[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, **30**(3): 503-511.
- [ 17 ] 郭晓伟, 张雨雪, 张潇, 等. 长期地上凋落物处理和氮添加对油松-辽东栎混交林表层土壤碳氮组分的影响[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(7): 2589-2598.
- Guo X W, Zhang Y X, Zhang X, *et al.* Effects of long-term aboveground litter treatment and nitrogen addition on top soil carbon and nitrogen fractions in a mixed *Pinus tabulaeformis-Quercus wutaishansea* forest[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(7): 2589-2598.
- [ 18 ] Peng Y, Song S Y, Li Z Y, *et al.* Influences of nitrogen addition and aboveground litter-input manipulations on soil respiration and biochemical properties in a subtropical forest[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, **142**, doi: 10.1016/j.soilbio.2019.107694.
- [ 19 ] 贺美, 王迎春, 王立刚, 等. 深松施肥对黑土活性有机碳氮组分及酶活性的影响[J]. *土壤学报*, 2020, **57**(2): 446-456.
- He M, Wang Y C, Wang L G, *et al.* Effects of subsoiling combined with fertilization on the fractions of soil active organic carbon and soil active nitrogen, and enzyme activities in black soil in northeast China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, **57**(2): 446-456.
- [ 20 ] 白义鑫, 盛茂银, 胡琪娟, 等. 西南喀斯特石漠化环境下土地利用变化对土壤有机碳及其组分的影响[J]. *应用生态学报*, 2020, **31**(5): 1607-1616.
- Bai Y X, Sheng M Y, Hu Q J, *et al.* Effects of land use change on soil organic carbon and its components in karst rocky desertification of southwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(5): 1607-1616.
- [ 21 ] Qu W D, Han G X, Eller F, *et al.* Nitrogen input in different chemical forms and levels stimulates soil organic carbon decomposition in a coastal wetland[J]. *CATENA*, 2020, **194**, doi: 10.1016/j.catena.2020.104672.
- [ 22 ] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [ 23 ] 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, 1999.
- [ 24 ] 雷利国, 江长胜, 郝庆菊. 缙云山土地利用方式对土壤轻组及颗粒态有机碳氮的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(7): 2669-2677.
- Lei L G, Jiang C S, Hao Q J. Impacts of land use changes on soil light fraction and particulate organic carbon and nitrogen in Jinyun Mountain[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(7): 2669-2677.
- [ 25 ] 张玉岱, 李同川, 张道勇, 等. 间作白三叶对苹果/白三叶复合系统土壤总有机碳及轻组有机碳的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, **33**(4): 810-818.
- Zhang Y D, Li T C, Zhang D Y, *et al.* Effects of interplanting white clover on soil total organic carbon and light organic carbon

- fraction in apple orchard [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, **33**(4): 810-818.
- [26] DeForest J L. The influence of time, storage temperature, and substrate age on potential soil enzyme activity in acidic forest soils using MUB-linked substrates and L-DOPA [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41**(6): 1180-1186.
- [27] Verchot L V, Borelli T. Application of *para*-nitrophenol (pNP) enzyme assays in degraded tropical soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, **37**(4): 625-633.
- [28] Hill B H, Elonen C M, Seifert L R, *et al.* Microbial enzyme stoichiometry and nutrient limitation in US streams and rivers [J]. *Ecological Indicators*, 2012, **18**: 540-551.
- [29] 薛欣欣, 吴小平, 罗微, 等. 橡胶凋落叶覆盖对胶园土壤部分理化性质的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, **34**(1): 301-306.  
Xue X X, Wu X P, Luo W, *et al.* Effects of leaf litter decomposition on soil partial physicochemical properties in the rubber plantation [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, **34**(1): 301-306.
- [30] Liu W J, Luo Q P, Lu H J, *et al.* The effect of litter layer on controlling surface runoff and erosion in rubber plantations on tropical mountain slopes, SW China [J]. *CATENA*, 2017, **149**: 167-175.
- [31] Maes S L, Blondeel H, Perring M P, *et al.* Litter quality, land-use history, and nitrogen deposition effects on topsoil conditions across European temperate deciduous forests [J]. *Forest Ecology and Management*, 2019, **433**: 405-418.
- [32] 唐佐芯, 赵静, 孙筱璐, 等. 氮添加和凋落物处理对油松-辽东栎混交林土壤氮的影响[J]. *生态学杂志*, 2018, **37**(1): 75-81.  
Tang Z X, Zhao J, Sun X L, *et al.* Effects of nitrogen addition and litter manipulation on soil nitrogen in a mixed *Pinus tabulaeformis* and *Quercus wutaishanica* forest [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, **37**(1): 75-81.
- [33] Guan B, Xie B H, Yang S S, *et al.* Effects of five years' nitrogen deposition on soil properties and plant growth in a salinized reed wetland of the Yellow River Delta [J]. *Ecological Engineering*, 2019, **136**: 160-166.
- [34] 左智天, 田昆, 向仕敏, 等. 澜沧江上游不同土地利用类型土壤氮含量与土壤酶活性研究[J]. *水土保持研究*, 2009, **16**(4): 280-285.  
Zuo Z T, Tian K, Xiang S M, *et al.* Soil nitrogen content and enzyme activity in different utilization types of land in the upper reaches of Lancang River [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2009, **16**(4): 280-285.
- [35] 宋海星, 李生秀. 根系的吸收作用及土壤水分对硝态氮、铵态氮分布的影响[J]. *中国农业科学*, 2005, **38**(1): 96-101.  
Song H X, Li S X. Effects of root uptake function and soil water on  $\text{NO}_3^-$ -N and  $\text{NH}_4^+$ -N distribution [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, **38**(1): 96-101.
- [36] 王梦思, 马红亮, 官晓辉, 等. 凋落物和铵态氮添加对亚热带罗浮栲和杉木林土壤碳氮淋溶的影响[J]. *林业科学研究*, 2022, **35**(6): 35-43.  
Wang M S, Ma H L, Guan X H, *et al.* Effects of litter and nitrogen addition on carbon and nitrogen in soil leaching solution of subtropical *Castanopsis fabric* and *Cunninghamia lanceolata* forest [J]. *Forest Research*, 2022, **35**(6): 35-43.
- [37] Xiao J N, Dong S K, Zhao Z Z, *et al.* Stabilization of soil organic carbon in the alpine meadow is dependent on the nitrogen deposition level on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Ecological Engineering*, 2021, **170**, doi: 10.1016/j.ecoeng.2021.106348.
- [38] 孙昭安, 张轩, 胡正江, 等. 秸秆与氮肥配比对农田土壤内外源碳释放的影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 459-466.  
Sun Z A, Zhang X, Hu Z J, *et al.* How different ratios of straw incorporation to nitrogen fertilization influence endogenous and exogenous carbon release from agricultural soils [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 459-466.
- [39] 吴传敬, 郭剑芬, 许恩兰, 等. 采伐残余物不同处理方式对杉木幼林土壤有机碳组分和相关酶活性的影响[J]. *土壤学报*, 2019, **56**(6): 1504-1513.  
Wu C J, Guo J F, Xu E L, *et al.* Effects of logging residue on composition of soil carbon and activity of related enzymes in soil of a young Chinese Fir plantation as affected by residue handling mode [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, **56**(6): 1504-1513.
- [40] Sun X L, Zhao J, You Y M, *et al.* Soil microbial responses to forest floor litter manipulation and nitrogen addition in a mixed-wood forest of northern China [J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**, doi: 10.1038/srep19536.
- [41] 曾清苹, 何丙辉, 李源, 等. 模拟氮沉降对重庆缙云山马尾松林土壤呼吸和酶活性的季节性影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(10): 3971-3978.  
Zeng Q P, He B H, Li Y, *et al.* Seasonal effect of simulated nitrogen deposition on soil respiration and soil enzyme activity in masson pine forest in Mt. Jinyun, Chongqing, China [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(10): 3971-3978.

## CONTENTS

Prediction of Autumn Ozone Concentration in the Pearl River Delta Based on Machine Learning .....	CHEN Zhen, LIU Run, LUO Zheng, <i>et al.</i> ( 1 )
Remote Sensing Model for Estimating Atmospheric PM <sub>2.5</sub> Concentration in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area .....	DAI Yuan-yuan, GONG Shao-qi, ZHANG Cun-jie, <i>et al.</i> ( 8 )
Variation Characteristics of PM <sub>2.5</sub> Pollution and Transport in Typical Transport Channel Cities in Winter .....	DAI Wu-jun, ZHOU Ying, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> ( 23 )
Characteristics of Secondary Inorganic Ions in PM <sub>2.5</sub> and Its Influencing Factors in Summer in Zhengzhou .....	HE Bing, YANG Jie-ru, XU Yi-fei, <i>et al.</i> ( 36 )
Characteristics and Source Apportionment of Carbonaceous Aerosols in the Typical Urban Areas in Chongqing During Winter .....	PENG Chao, LI Zhen-liang, XIANG Ying, <i>et al.</i> ( 48 )
Analysis of Influencing Factors of Ozone Pollution Difference Between Chengdu and Chongqing in August 2022 .....	CHEN Mu-lan, LI Zhen-liang, PENG Chao, <i>et al.</i> ( 61 )
Analysis of O <sub>3</sub> Pollution Affected by a Succession of Three Landfall Typhoons in 2020 in Eastern China .....	HUA Cong, YOU Yuan, WANG Qian, <i>et al.</i> ( 71 )
Characteristics and Source Apportionment of VOCs Initial Mixing Ratio in Beijing During Summer .....	ZHANG Bo-tao, JING Kuan, WANG Qin, <i>et al.</i> ( 81 )
Review of Comprehensive Evaluation System of Vehicle Pollution and Carbon Synergistic Reduction .....	FAN Zhao-yang, TONG Hui, LIANG Xiao-yu, <i>et al.</i> ( 93 )
Study of Peak Carbon Emission of a City in Yangtze River Delta Based on LEAP Model .....	YANG Feng, ZHANG Gui-chi, SUN Ji, <i>et al.</i> ( 104 )
Driving Forces and Mitigation Potential of CO <sub>2</sub> Emissions for Ship Transportation in Guangdong Province, China .....	WENG Shu-juan, LIU Ying-ying, TANG Feng, <i>et al.</i> ( 115 )
Carbon Emission Characteristics and Influencing Factors of Typical Processes in Drinking Water Treatment Plant .....	ZHANG Xiang-yu, HU Jian-kun, MA Kai, <i>et al.</i> ( 123 )
Distribution Characteristics of Arsenic in Drinking Water in China and Its Health Risk Based on Disability-adjusted Life Years .....	DOU Dian-cheng, QI Rong, XIAO Shu-min, <i>et al.</i> ( 131 )
Spatiotemporal Occurrence of Organophosphate Esters in the Surface Water and Sediment of Taihu Lake and Relevant Risk Assessment .....	ZHANG Cheng-nuo, ZHONG Qin, LUAN Bo-wen, <i>et al.</i> ( 140 )
Exposure Level and Risk Impact Assessment of Pesticides and Veterinary Drugs in Aquaculture Environment .....	ZHANG Kai-wen, ZHANG Hai-yan, KONG Cong, <i>et al.</i> ( 151 )
Variation in Phosphorus Concentration and Flux at Zhutuo Section in the Yangtze River and Source Apportionment .....	LOU Bao-feng, XIE Wei-min, HUANG Bo, <i>et al.</i> ( 159 )
“Load-Unload” Effect of Manganese Oxides on Phosphorus in Surface Water of the Pearl River Estuary .....	LI Rui, LIANG Zuo-bing, WU Qi-ru, <i>et al.</i> ( 173 )
Factors Influencing the Variation in Phytoplankton Functional Groups in Fuchunjiang Reservoir .....	ZHANG Ping, WANG Wei, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> ( 181 )
Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanism of Groundwater in the Western Region of Hepu Basin, Beihai City .....	CHEN Wen, WU Ya, ZHANG Hong-xin, <i>et al.</i> ( 194 )
Controlling Factors of Groundwater Salinization and Pollution in the Oasis Zone of the Cherchen River Basin of Xinjiang .....	LI Jun, OUYANG Hong-tao, ZHOU Jin-long ( 207 )
Spatial-temporal Evolution of Ecosystem Health and Its Influencing Factors in Beijing-Tianjin-Hebei Region .....	LI Kui-ming, WANG Xiao-yan, YAO Luo-lan ( 218 )
Spatial and Temporal Evolution and Impact Factors Analysis of Ecosystem Service Value in the Liaohe River Delta over the Past 30 Years .....	WANG Geng, ZHANG Fu-rong ( 228 )
Effects of Photovoltaic Power Station Construction on Terrestrial Environment: Retrospect and Prospect .....	TIAN Zheng-qing, ZHANG Yong, LIU Xiang, <i>et al.</i> ( 239 )
Spatiotemporal Evolution and Quantitative Attribution Analysis of Vegetation NDVI in Greater Khingan Mountains Forest-Steppe Ecotone .....	SHI Song, LI Wen, QU Chen, <i>et al.</i> ( 248 )
Spatio-temporal Variation in Net Primary Productivity of Different Vegetation Types and Its Influencing Factors Exploration in Southwest China .....	XU Yong, ZHENG Zhi-wei, MENG Yu-chi, <i>et al.</i> ( 262 )
Impacts of Extreme Climate Events at Different Altitudinal Gradients on Vegetation NPP in Songhua River Basin .....	CUI Song, JIA Zhao-yang, GUO Liang, <i>et al.</i> ( 275 )
Spatial and Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Kunming City Based on INVEST and CA-Markov Model .....	Paruke Wusimanjiang, AI Dong, FANG Yi-shu, <i>et al.</i> ( 287 )
Spatial-Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Jiuquan City Ecosystem Based on PLUS-INVEST Model .....	SHI Jing, SHI Pei-ji, WANG Zi-yang, <i>et al.</i> ( 300 )
Soil Carbon Pool Allocation Dynamics During Soil Development in the Lower Yangtze River Alluvial Plain .....	HU Dan-yang, ZHANG Huan, SU Bao-wei, <i>et al.</i> ( 314 )
Spatial Distribution Patterns of Soil Organic Carbon in Karst Forests of the Lijiang River Basin and Its Driving Factors .....	SHEN Kai-hui, WEI Shi-guang, LI Lin, <i>et al.</i> ( 323 )
Effect of Land Use on the Stability of Soil Organic Carbon in a Karst Region .....	CHEN Jian-qi, JIA Ya-nan, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> ( 335 )
Spatial Distribution Characteristics of Soil Carbon and Nitrogen in Citrus Orchards on the Slope of Purple Soil Hilly Area .....	LI Zi-yang, CHEN Lu, ZHAO Peng, <i>et al.</i> ( 343 )
Effects of Experimental Nitrogen Deposition and Litter Manipulation on Soil Organic Components and Enzyme Activity of Latosol in Tropical Rubber Plantations .....	XUE Xin-xin, REN Chang-qi, LUO Xue-hua, <i>et al.</i> ( 354 )
Analysis on Driving Factors, Reduction Potential, and Environmental Effect of Inorganic Fertilizer Input in Chongqing .....	LIANG Tao, ZHAO Jing-kun, LI Hong-mei, <i>et al.</i> ( 364 )
Research Progress on Distribution, Transportation, and Control of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Chinese Soils .....	LIU Hao-ran, XING Jing-yi, REN Wen-jie ( 376 )
Prediction of Spatial Distribution of Heavy Metals in Cultivated Soil Based on Multi-source Auxiliary Variables and Random Forest Model .....	XIE Xue-feng, GUO Wei-wei, PU Li-jie, <i>et al.</i> ( 386 )
Health Risk Assessment and Priority Control Factors Analysis of Heavy Metals in Agricultural Soils Based on Source-oriented .....	MA Jie, GE Miao, WANG Sheng-lan, <i>et al.</i> ( 396 )
Contamination Characteristics and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in an Abandoned Pyrite Mining Area of Tongling City, China .....	LI Ru-zhong, LIU Yu-hao, HUANG Yan-huan, <i>et al.</i> ( 407 )
Source Apportionment and Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust in the Main District Bus Stops of Tianshui City .....	LI Chun-yan, WANG Xin-min, WANG Hai, <i>et al.</i> ( 417 )
Response of Cadmium in Soil-rice to Different Conditioners Based on Field Trials .....	TANG Le-bin, LIU Xin-cai, SONG Bo, <i>et al.</i> ( 429 )
Regulation Effects of Humus Active Components on Soil Cadmium Availability and Critical Threshold for Rice Safety .....	HU Xiu-zhi, SONG Yi, WANG Tian-yu, <i>et al.</i> ( 439 )
Using Biochar and Iron-calcium Material to Remediate Paddy Soil Contaminated by Cadmium and Arsenic .....	WU Qiu-chan, WU Ji-zi, ZHAO Ke-li, <i>et al.</i> ( 450 )
Research Progress on Characteristics of Human Microplastic Pollution and Health Risks .....	MA Min-dong, ZHAO Yang-chen, ZHU Long, <i>et al.</i> ( 459 )
Effects of Polystyrene Microplastics Combined with Cadmium Contamination on Soil Physicochemical Properties and Physiological Ecology of <i>Lactuca sativa</i> .....	NIU Jia-rui, ZOU Yong-jun, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> ( 470 )
Transcriptome Analysis of Plant Growth-promoting Bacteria Alleviating Microplastic and Heavy Metal Combined Pollution Stress in Sorghum .....	LIU Yong-qi, ZHAO Si-yu, REN Xue-min, <i>et al.</i> ( 480 )
Effects of Microplastics on the Leaching of Nutrients and Cadmium from Soil .....	ZHAO Qun-fang, CHU Long-wei, DING Yuan-hong, <i>et al.</i> ( 489 )
Effect of Microplastics and Phenanthrene on Soil Chemical Properties, Enzymatic Activities, and Microbial Communities .....	LIU Sha-sha, QIN Jian-qiao, WU Xian-ge ( 496 )
Prediction of Soil Bacterial Community Structure and Function in Minqin Desert-oasis Ecotone Artificial <i>Haloxylon ammodendron</i> Forest .....	WANG An-lin, MA Rui, MA Yan-jun, <i>et al.</i> ( 508 )
Response of Soil Fungal Community to Biochar Application Under Different Irrigation Water Salinity .....	ZHENG Zhi-yu, GUO Xiao-wen, MIN Wei ( 520 )
Effects of Organic Fertilizer of Kitchen Waste on Soil Microbial Activity and Function .....	LIU Mei-ling, WANG Yi-min, JIN Wen-hao, <i>et al.</i> ( 530 )
Response Characteristics of Soil Fungal Community Structure to Long-term Continuous Cropping of Pepper .....	CHEN Fen, YU Gao, WANG Xie-feng, <i>et al.</i> ( 543 )
Effects of Foliar Application of Silicon Fertilizers on Phyllosphere Bacterial Community and Functional Genes of Paddy Irrigated with Reclaimed Water .....	LIANG Sheng-xian, LIU Chun-cheng, HU Chao, <i>et al.</i> ( 555 )
Analysis of Bacterial Communities and Antibiotic Resistance Genes in the Aquaculture Area of Changli County .....	WANG Qiu-shui, CHENG Bo, LIU Yue, <i>et al.</i> ( 567 )
High-throughput qPCR and Amplicon Sequencing as Complementary Methods for Profiling Antibiotic Resistance Genes in Urban Wetland Parks .....	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, PAN Ting, <i>et al.</i> ( 576 )
Characteristics of Vertical Distribution and Environmental Factors of Antibiotics in Quaternary Sedimentary Column in Urban Areas .....	LIU Ke, TONG Lei, GAN Cui, <i>et al.</i> ( 584 )
Adsorption Performance and Mechanism of Oxytetracycline in Water by KOH Modified Biochar Derived from Corn Straw .....	LIU Zong-tang, SUN Yu-feng, FEI Zheng-hao, <i>et al.</i> ( 594 )
Comparison of Pb <sup>2+</sup> Adsorption Properties of Biochars Modified Through CO <sub>2</sub> Atmosphere Pyrolysis and Nitric Acid .....	JIANG Hao, CHEN Rui-zhi, ZHU Zi-yang, <i>et al.</i> ( 606 )