

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

肆秩芳华担使命 踔厉扬帆向未来
——庆祝厦门大学环境学科创立40周年



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年11月

第43卷 第11期
Vol.43 No.11

目次

厦门大学环境学科创立40周年专栏

新污染物共排放对生态环境监测和管理的挑战 王佩, 黄欣怡, 曹致纬, 吴朝阳, 吕永龙(4801)

河口-近海环境新污染物的环境过程、效应与风险 王新红, 于晓璇, 王思权, 殷笑晗, 钱韦旭, 林晓萍, 吴越, 刘畅(4810)

海水痕量营养盐和金属的分子光谱分析方法研究进展 袁东星, 黄勇明, 王婷(4822)

环境水体中硫化物的分析方法: 从实验室分析到原位监测 李鹏, 林坤德, 袁东星(4835)

环境水体中无机砷现场分析方法研究进展 薄光永, 陈钊英, 弓振斌, 马剑(4845)

海洋痕量元素采样技术和分析方法的发展及展望: 厦门大学痕量元素平台建设进展 黄勇明, 周宽波, 陈耀瑾, 张楠, 杨俊波, 戴民汉, 曹知勉, 蔡毅华(4858)

聚乙烯微塑料的微生物降解研究进展 骆苑蓉, 钱义谦, 齐雅楠(4869)

水稻土中氮素对微生物固砷的扰动及效应机制 王锋, 张静, 周少余, 王鸿辉, 李建, 赵聪媛, 黄鹏, 陈铮(4876)

中国海洋生态毒理学研究中的毒性测试生物 史天一, 洪海征, 王明华, 谭巧国, 史大林(4888)

中国油气系统甲烷逸散排放估算 陈春赐, 吕永龙, 贺桂珍(4905)

2015~2020年厦漳泉地区大气氨排放清单及分布特征 李香, 吴水平, 姜炳祺, 刘怡靖(4914)

九龙江口微塑料与抗生素抗性基因污染的分布特征 程宏, 陈荣(4924)

厦门湾沙滩沉积物微塑料污染特征 姚蕊, 刘花台, 李永玉, 刘潇雅, 吴海波, 王新红(4931)

九龙江口-厦门湾海域中溶解态痕量金属的时空分布特征与影响机制 戚柳倩, 岳新利, 钟灏文, 王棋, 王德利, 陈能汪(4939)

福建省流域-近海溶解氧时空格局与低氧调控机制 杨艾琳, 杨芳, 李少斌, 余其彪, 陈能汪(4950)

厦门西溪河口沉积物活性磷的分布特征及迁移转化机制 潘峰, 蔡宇, 郭占荣, 王新红(4961)

改性生物炭固定床对模拟湖水体中 Mn^{2+} 的吸附 赵浩, 叶志隆, 王佳妮, 蔡冠竟(4971)

基于表面增强拉曼光谱技术的饮用水中痕量恩诺沙星和环丙沙星快速检测 徐婧, 郑红, 卢江龙, 刘国坤(4982)

紫外驱动高级氧化法降解水体中的磷酸三苯酯 徐子文, 印红玲, 熊远明, 宋娇娇, 谯扬(4992)

研究报告

2019年秋季海南省4次臭氧污染过程特征及潜在源区分析 符传博, 陈红, 丹利, 徐文帅(5000)

伊犁河谷夏季 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中水溶性无机离子浓度特征和形成机制 陈巧, 谷超, 徐涛, 周春华, 张国涛, 赵雪艳, 吴丽萍, 李新琪, 杨文(5009)

城区与郊区 $PM_{2.5}$ 污染及传输特征差异性 齐鹏, 周颖, 程水源, 白伟超(5018)

南京北郊 BTEX 特征及健康风险评估 冯悦政, 安俊琳, 张玉欣, 王俊秀(5030)

我国陆域水体系统表层水中微塑料生态风险评估 孙晓楠, 陈浩, 贾其隆, 朱弈, 马长文, 叶建锋(5040)

东江流域不同空间尺度景观格局对水质影响分析 陈优良, 邹文敏, 刘星根, 曾金凤, 李丹, 郑汉奕(5053)

长江与黄河源丰水期地表水中汞的分布特征、赋存形态及来源解析 刘楠涛, 吴飞, 袁巍, 王训, 王定勇(5064)

青藏高原湖泊水环境特征及水质评价 刘智琦, 潘保柱, 韩语, 李刚, 王韬轶(5073)

基于水化学与硫同位素的卡林型金矿区岩溶水地球化学特征及控制因素 查学芳, 吴攀, 李学先, 陈世万, 黄家琰, 李清光, 陈思睿(5084)

丹江口水库真核浮游植物群落分布特征及其与环境因子的关系 贺玉晓, 买思婕, 任玉芬, 李卫国, 赵同谦, 马寅男(5096)

镉沸石对磷和重金属的吸附与底泥钝化性能 王哲, 朱俊, 李雯, 闫德馨, 董雯, 刘玉玲, 李家科(5106)

基于宏基因组与宏转录组分析石化废水生物处理系统脱氮功能菌群 章旭, 周佳佳, 周珉, 罗西子, 严新杰, 刘勇弟, 厉巍(5115)

寒冷地区 IFAS + 磁混凝污水厂菌群结构和抗生素抗性基因分析 杜文琰, 姚俊芹, 马辉英, 胡渊鑫, 张春雷, 陈银广(5123)

中国旱作农田一氧化氮排放及减排: Meta 分析 田政云, 吴雄伟, 吴媛媛, 魏佳楠, 白鹤, 顾江新(5131)

硝化抑制剂对我国蔬菜生产产量、氮肥利用率和氧化亚氮减排效应的影响: Meta 分析 刘发波, 马笑, 张芬, 梁涛, 黎亮武, 王军杰, 陈新平, 王孝忠(5140)

不同施肥措施对热带地区稻菜轮作体系土壤 CH_4 和 N_2O 排放的影响 邵晓辉, 汤水荣, 孟磊, 伍延正, 李金秋, 缙广林(5149)

不同水分条件下土地利用方式对我国热带地区土壤硝化过程及 NO 和 N_2O 排放的影响 唐瑞杰, 胡煜杰, 赵彩悦, 赵炎, 袁新生, 汤水荣, 伍延正, 孟磊(5159)

基于文献计量分析的长江经济带农田土壤重金属污染特征 刘孝严, 樊亚男, 刘鹏, 吴秋梅, 胡文友, 田康, 黄标(5169)

基于 EBK 插值预测和 GDM 模型的襄州区耕地土壤重金属时空分布及来源变化分析 高浩然, 周勇, 刘甲康, 程晓明, 郭嵩, 江衍, 谭恒鑫(5180)

基于 GIS 对宁夏某铜银矿区周边土壤重金属来源解析 张扣扣, 贺婧, 钟艳霞, 魏琪琪, 陈锋(5192)

老化作用对生物炭钝化白云鄂博矿区碱性土壤中 Cd^{2+} 的影响 王哲, 程俊丽, 卞园, 郑春丽, 王维大, 姜庆宏(5205)

磁性氧化铁/桑树杆生物炭的制备及其对砷污染土壤溶解性有机碳和砷形态的影响 芦琳, 颜利玲, 梁美娜, 成官文, 朱宗强, 朱义年, 王敦球(5214)

牡蛎壳粉和石灰改良酸性水稻土对磷有效性、形态和酶活性的影响 赵丽芳, 黄鹏武, 杨彩迪, 卢升高(5224)

磷、锌和镉交互作用对小白菜生长和镉累积的影响 帅祖革, 刘汉燧, 崔浩, 魏世强(5234)

重庆开州区菜地土壤抗生素污染特征及潜在生态环境风险评估 方林发, 叶莘莘, 方标, 范晓霞, 高坤鹏, 李士洋, 陈新平, 肖然(5244)

基于 InVEST 和 GeoSoS-FLUS 模型的黄河源区碳储量时空变化特征及其对未来不同情景模式的响应 侯建坤, 陈建军, 张凯琪, 周国清, 尤号田, 韩小文(5253)

黄土丘陵区不同恢复植被类型的固碳特征 许小明, 张晓萍, 何亮, 郭晋伟, 薛帆, 邹亚东, 易海杰, 贺洁, 王浩嘉(5263)

土壤多功能性对微生物多样性降低的响应 陈桂鲜, 吴传发, 葛体达, 陈剑平, 邓扬悟(5274)

氮添加对不同坡度退化高寒草甸土壤真菌多样性的影响 苏晓雪, 李希来, 李成一, 孙华方(5286)

碳减排背景下我国与世界主要能源消费国能源消费结构与模式对比 李辉, 庞博, 朱法华, 孙雪丽, 徐静馨, 王圣(5294)

中国能源消费碳排放的空间化与时空动态 郝瑞军, 魏伟, 刘春芳, 顾斌斌, 杜海波(5305)

京津冀及周边地区“2+26”城市结构性调整政策的 CO_2 协同减排效益评估 杨添祺, 王洪昌, 张辰, 朱金伟, 崔宇韬, 谭玉玲, 束樞(5315)

我国塑料污染防治政策分析与建议 李欢, 朱龙, 沈茜, 贺亚楠, 邓义祥, 安立会(5326)

《环境科学》征订启事(4821) 《环境科学》征稿简则(5213) 信息(5052, 5191, 5273)

不同水分条件下土地利用方式对我国热带地区土壤硝化过程及 NO 和 N₂O 排放的影响

唐瑞杰, 胡煜杰, 赵彩悦, 赵炎, 袁新生, 汤水荣, 伍延正*, 孟磊*

(海南大学热带作物学院, 海口 570228)

摘要: 热带地区雨热条件丰富, 硝化过程产生的硝态氮不利于氮素养分的保持, 同时会带来氮氧化物排放等环境负面效应. 橡胶树和茶树在热带地区广泛种植, 不同土地利用方式土壤硝化速率和氮氧化物排放的差异尚不清楚. 以海南白沙地区典型橡胶林和茶园土壤为研究对象, 分别采集 5 a (T5) 和 15 a (T15) 茶园土壤和附近橡胶林 (XJ) 土壤, 设置低 (50% WFPS-L) 和高 (80% WFPS-H) 两种不同水分含量, 在 25℃ 进行 71d 室内培养试验, 探究不同土地利用方式和不同水分含量对土壤净硝化速率、NO 和 N₂O 排放的影响. 结果表明: ① 橡胶林改为茶园后, 在高含水量条件下, 显著降低了土壤净硝化速率、NO 和 N₂O 排放, 整体呈现 XJH > T15H > T5H 的趋势, XJH 处理土壤净硝化速率、NO 和 N₂O 排放分别高达 4.2 mg·(kg·d)⁻¹、1.4 mg·kg⁻¹ 和 14.3 mg·kg⁻¹ (以 N 计); 在低含水量条件下, 茶园土壤显著降低了土壤 NO 排放, N₂O 排放在各土壤间差异不显著, 净硝化速率在 XJ 和 T15 处理之间无显著差异; 土壤 NO 排放和净硝化速率呈极显著正相关 ($P < 0.01$). ② XJH 净硝化速率高于 XJL, 茶园土壤呈相反趋势; XJ 和 T15 的 NO 排放对水分的响应和净硝化速率趋势一致, 高硝化速率促进 NO 排放, 而 T5 处理 NO 排放受含水量影响不显著; 相比低含水量处理, 高含水量各处理显著促进 N₂O 排放. 结果表明, 土壤有机质 (SOM)、全氮 (TN)、pH 和含水量是影响土壤净硝化速率、NO 和 N₂O 排放的关键因子, 高含水量条件下橡胶林转为茶园的种植模式显著降低了土壤净硝化速率和对环境的负面影响.

关键词: 土地利用方式; 植茶年限; 含水量; 硝化速率; NO; N₂O

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)11-5159-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.202112302

Effects of Land-use Conversion on Soil Nitrification and NO & N₂O Emissions in Tropical China Under Different Moisture Conditions

TANG Rui-jie, HU Yu-jie, ZHAO Cai-yue, ZHAO Yan, YUAN Xin-sheng, TANG Shui-rong, WU Yan-zheng*, MENG Lei*

(College of Tropical Crops, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: Rain and heat conditions are abundant in tropical areas, and rubber and tea are widely planted in this region; the nitrification process produces nitrate content, which is not conducive to the maintenance of nitrogen nutrients, and has negative environmental effects (nitrogen oxide emissions). The characteristics of soil nitrification rate and nitrogen oxide emission under different land use patterns remain unclear. An incubation experiment was conducted under the 5 a (T5) and 15 a (T15) tea plantation soils and the nearby typical rubber plantation (XJ) soils in Baisha county of Hainan province under two moisture contents (50% WFPS-L and 80% WFPS-H) for 71 d at 25°C. The results showed that: ① after the rubber plantation was converted to a tea plantation, the net nitrification and soil NO and N₂O emissions were significantly reduced under high moisture content. The overall trend was in the order of XJH > T15H > T5H, and the values of soil net nitrification and NO and N₂O emissions were as high as 4.2 mg·(kg·d)⁻¹, 1.4 mg·kg⁻¹, and 14.3 mg·kg⁻¹ in the XJH treatment, respectively. Under the low moisture content, soil NO emissions in tea field soil were significantly reduced relative to those in rubber plantation soil, N₂O emissions had no significant difference among different treatments, and net nitrification had no significant difference between the XJ and T15 treatments. There was a significant positive correlation between NO emissions and net nitrification rate ($P < 0.01$). ② The net nitrification of XJH was higher than that of XJL, but the net nitrification values under different moisture contents in tea field soil was in contrast to that in rubber plantation soil. The NO emissions of XJ and T15 under different moisture contents were consistent with the trend of net nitrification, and the high nitrification promoted NO emissions, whereas NO emissions of T5 were not significantly affected by moisture content. The high moisture content treatment significantly promoted N₂O emissions relative to those under the low moisture content treatment. The results showed that SOM, TN, pH, and moisture content were the key factors affecting soil net nitrification rate, NO, and N₂O emissions. The conversion of the rubber plantation to a tea plantation significantly reduced the net nitrification rate and negative impact on the environment under high moisture content.

Key words: land use conversion; tea plantation age; moisture content; nitrification rate; NO; N₂O

氮素是一种重要的生命元素, 对于维持生态系统的组成、功能和健康等具有重要的作用^[1]. 硝化作用是土壤氮转化的关键过程, 不仅关系到土壤中 NH₄⁺-N 的进一步转化, 还和土壤氮素损失密切相关, 涉及到土壤酸化和氮氧化物 (NO 和 N₂O) 排放等环境问题^[2,3]. 土壤碳氮含量、pH、含水量和土地利用方式等都是影响土壤硝化速率的重要因素^[4~6]. 土地利用方式变化可能会影响有机物质的输入输出

平衡, 引起土壤有机碳含量的显著变化^[7]; 影响土壤 pH、微生物群落和结构等, 进而影响硝化作用^[8]; 影响氮转化的功能微生物和微生物对土壤硝

收稿日期: 2021-12-30; 修订日期: 2022-03-17

基金项目: 海南省自然科学基金青年基金项目 (320QN196); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (41807044, 41671243); 海南省自然科学基金高层次人才项目 (320RC493)

作者简介: 唐瑞杰 (1997~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤氮循环和环境效应, E-mail: 15737132010@163.com

* 通信作者, E-mail: wyz198712@163.com; menglei94@sohu.com

化作用的相对贡献,进而影响氮转化速率^[9]。

海南岛地处热带,雨热条件丰富,橡胶林是此地区重要的人工林生态系统,种植总面积约 52.7 万 hm^2 ,占海南人工林面积的 84%^[10],每年施用氮肥在 11 万 t 以上^[11]。橡胶林改为茶园是此地区典型的土地利用措施之一,茶叶是我国重要的经济作物,成为很多地区支柱产业^[12]。我国茶叶种植面积占世界茶园 70%,种植面积和产量均居世界首位^[13],施肥量(以 N 计)高达 450 ~ 1 200 $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 不等^[14],海南省茶叶种植主要集中在白沙和五指山等市县,全省茶叶面积为 2 400 hm^2 ^[15]。橡胶林改为茶园的耕作措施势必会对土壤硝化过程、微生物种类和丰度产生影响,进而影响土壤的氮素有效性^[16,17]。橡胶林改为茶园后,随着植茶年限的增加,土壤理化性质,如土壤 pH 值下降,钙和镁等盐基离子和微量元素相对缺乏,可能导致微生物活性和数量下降,因而抑制硝化作用并降低氮氧化物排放^[18],但长期大量施用氮肥又很可能促进氨氧化细菌的生长和改善磷素营养状况,进而显著地促进硝化作用并提高氮氧化物排放^[19]。Nanang 等^[20]的研究发现不同土地利用方式对红壤 N_2O 排放速率影响显著,旱地红壤 N_2O 排放速率最低,竹林和茶园较高。Zhang 等^[21]的研究发现茶园土壤总硝化速率在 8 ~ 36 a 内随种植年限的增加而增加,但在 105 a 时降低。目前,热带地区橡胶林改为茶园后对土壤硝化过程的影响仍不清楚,丰富的雨热条件更容易导致氮素特别是硝态氮的淋溶损失,因此,明确土地利用方式对土壤硝化作用的影响,对于制定相应的氮素调控措施,应对日益严重的环境问题具有重要的意义。

施入土壤中的大量氮素会通过淋溶、径流、氨挥发或通过硝化-反硝化作用以 N_2O 和 NO_x (NO 、 NO_2) 等形式流失^[11]。 NO 作为一种重要的大气化学活性气体^[22],在对流层中和挥发性烷烃反应产生臭氧而影响全球温室效应,或进一步转化为亚硝酸和硝酸,通过干湿沉降导致生态系统的酸化和富营养化。 N_2O 作为大气中最主要的 3 种温室气体之一,能通过光化学反应来损耗大气中的臭氧而破坏臭氧层,还能产生光化学烟雾等^[23]。 NO 和 N_2O 这两种人为排放到大气中的重要氮氧化物,能够直接或间接地导致全球变暖和大气污染。农业土壤是 NO 和 N_2O 的重要排放源,分别占全球人为排放的 10% 和 60%^[24]。目前相关研究主要在蔬菜地、小麦、玉米地和水稻田等陆地生态系统中,而有关热带地区橡胶林和茶园这些多年生作物在独特酸性土壤条件下含氮气体排放的研究较少。热带森林土壤是重要的

N_2O 排放源^[25]。中国茶园土壤 N_2O 平均排放系数为 2.72%,是旱地土壤排放系数(1.05%)的两倍以上^[26],少量关于茶园土壤 NO 排放的研究中发现, NO 直接排放系数更是高达 3.15% ~ 3.68%^[27]。硝化过程是 NO 产生的主要过程,同时硝化过程以及产生的硝态氮而产生的反硝化过程也会带来 N_2O 的排放^[22]。不同土地利用方式很可能带来相应的氮氧化物排放的变化,因此,迫切需要深化橡胶林和茶园土壤氮氧化物排放的环境效应的研究。

不同利用方式的土壤由于水分状况变化会导致土壤微生态环境产生不同变化^[28,29],土壤水分含量是影响硝化过程的敏感环境因子,继而影响土壤中 NO 和 N_2O 的产生和排放^[30,31]。当可利用的水分低时,微生物活性受到抑制,产生 NO 的量很少,而水分过高会导致厌氧环境增加,促进微生物反硝化过程,气态氮的损失以 N_2O 和 N_2 为主,可能会削弱 NO 排放^[32]。我国热带地区雨热条件充沛,导致土壤含水量会有较大变化,不同土地利用方式和水分会如何影响土壤硝化速率尚不清楚,因此,充分了解土壤水分状况对土壤环境变化的影响,能够更好地阐明不同水分含量条件下土壤硝化过程、 NO 和 N_2O 排放变化机制。

本文以我国热带地区典型橡胶林土壤和茶园土壤为研究对象,采取室内培养试验,探究不同土地利用方式和不同水分含量对土壤硝化过程、 NO 和 N_2O 排放的影响和潜在影响因素,能够有效补充热带地区橡胶林和茶园土壤 NO 和 N_2O 排放研究的不足,对于制定合理的利用规划和农业管理措施,减少氮素的负面环境影响具有重要的意义。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤取自海南省白沙县(109°28'18"E, 19°11'56"N),当地属热带季风气候,高温多雨,年均降雨量 1 725 mm,年均气温 22.7℃,分别采集了植茶年限为 5 a 和 15 a 的茶园土壤和附近的橡胶林土壤(分别记为 T5、T15 和 XJ)。每种土壤取 5 个空间重复样品之后混匀,采样深度为 0 ~ 20 cm。新鲜样品采集后,剔除枯枝落叶和石子,自然风干并过 2 mm 筛,经处理后,一部分土样用于测定土壤基础理化性质,一部分用于室内培养。供试土壤基本理化性质见表 1。

1.2 试验设计

采用室内恒温培养法,称 150 g(以干土计)土壤置于 500 mL 培养瓶中,并调节土壤含水量至 50% WFPS 后置于 25℃ 恒温培养箱中培养 7 d,以

表 1 供试土壤的理化性质¹⁾
Table 1 Physico-chemical properties of tested soils

供试土壤	pH	ω (有机质) /g·kg ⁻¹	ω (全氮) /g·kg ⁻¹	ω (速效磷) /mg·kg ⁻¹	ω (速效钾) /mg·kg ⁻¹	CEC /cmol·kg ⁻¹
XJ	5.18 ± 0.08a	13.19 ± 0.00a	1.38 ± 0.10a	19.89 ± 2.77b	70.07 ± 3.00b	7.38 ± 0.10b
T5	5.07 ± 0.04a	5.29 ± 0.83c	0.60 ± 0.09b	161.24 ± 4.00a	116.70 ± 11.30a	2.98 ± 0.19c
T15	4.80 ± 0.01b	10.45 ± 0.12b	1.25 ± 0.04a	124.51 ± 34.63a	145.40 ± 16.83a	8.14 ± 0.16a

1) 同一列中不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)

激活土壤微生物和消除干湿效应。活化结束后按照试验设计以 200 mg·kg⁻¹ 尿素(含 N 46.4%)装入培养瓶中混匀,设置两个不同的水分含量 50% WFPS(L) 和 80% WFPS(H),即 6 个处理: XJL、XJH、T5L、T5H、T15L 和 T15H,每个处理均设置采集气体和采集土壤样品的重复。每隔 1 d 通过称重法补充水分,用保鲜膜封住培养瓶瓶口,并用针扎小孔,以进空气,于 25℃ 恒温培养箱内培养 71 d。

1.3 样品采集和测定

土壤样品培养后,分别于 1、3、5、7、9、11、13、15、19、23、27、31、35、43、47、51、55、63、67 和 71 d 采集气体样品。采样前,先向瓶内吹入 10 min 空气以驱除瓶内气体,随后迅速塞住瓶口并密封。分别在密封培养瓶后 0 min 和 40 min 用带三通阀的注射器采集瓶中的气体 10 mL,直接注入气相色谱仪(GC; 7890A GC System, Agilent Technologies, USA)测定气体样品中 N₂O 浓度,所用检测器为 ECD 检测器,检测所用标准气体由中国计量科学研究院提供。分别在密封培养瓶后 0 min 和 6 h 用带三通阀的注射器采集瓶中的气体 20 mL 注入 2 L 气袋,再注入 1.2 L 高纯氮气稀释后用 42 i 型 NO-NO₂-NO_x 分析仪(Thermo Environmental Instruments Inc., Franklin, MA, USA)分析 NO 的样品浓度。

土壤 pH、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 用土分别于培养 7、15、23、31、47 和 63 d 采样。土壤 pH 用 pH 计(Mettler Toledo, FiveEasy, FE 20)测定;土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 用 2 mol·L⁻¹ KCl 浸提(液土比 10:1),过滤后用连续流动分析仪(Skalar Analytical, Breda, the Netherlands)测定;土壤净硝化速率为培养结束时和开始时 NO₃⁻-N 浓度的差值除以培养天数;土壤基本理化测定方法如下:有机质重铬酸钾-硫酸外加热容量法;全氮采用半微量凯氏法;有效磷采用氟化铵-盐酸浸提-钼蓝比色法测定;速效钾采用 1 mol·L⁻¹ 乙酸铵溶液(pH = 7)浸提、火焰光度计测定;阳离子交换量采用乙酸铵交换-蒸馏法测定^[33]。

1.4 数据处理与分析

NO 和 N₂O 排放速率计算公式为:

$$F = \rho \times \frac{v}{w} \times \frac{\Delta c}{\Delta t} \times \frac{273.15}{273.15 + T}$$

式中, F 为 NO 和 N₂O 排放通量 [$\mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$]; ρ 为标准状态下的气体密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); v 为培养瓶内气体体积 (mL); w 为风干土质量 (kg); $\Delta c/\Delta t$ 为采气过程瓶内气体摩尔分数变化速率; T 为采样时瓶内平均温度 (°C)。

累积排放量计算公式如下:

$$f = \sum_{i=1}^n (F_i \times 24) + \sum_{i=1}^n \left[\frac{F_i + F_{i+1}}{2} \times (t_{i+1} - t_i - 1) \times 24 \right]$$

式中, f 为累积排放量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), n 和 i 为采样次数, $t_{i+1} - t_i$ 为两次采样间隔天数 (d)。

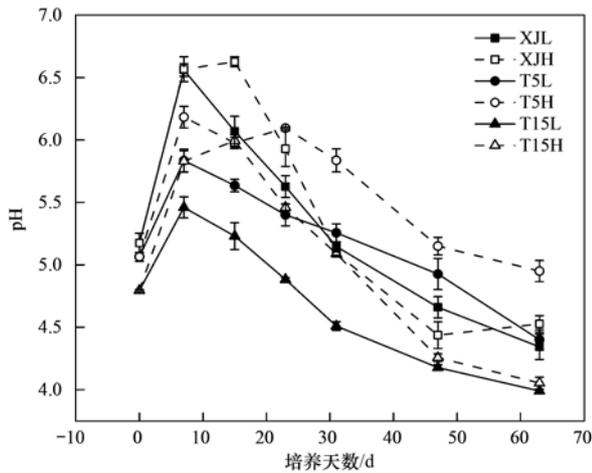
应用 SPSS 26.0 软件对数据进行统计分析,所有变量均进行了正态性和方差齐性检验。采用 Pearson 法对各变量间相关性进行分析,显著水平为 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$,处理间差异用 Duncan 多重比较法,采用双因素方差分析土地利用方式、含水量及其交互作用对土壤净硝化速率、NO 和 N₂O 累积排放量的影响,用 Origin 8.0 进行绘图,用 Canoco 4.5 进行主成分分析。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质变化和硝化速率

橡胶林转为茶园后,土壤 pH 降低,植茶年限越长 pH 越低。添加尿素后,土壤 pH 相对培养前约升高 1 个单位,培养期间茶园土壤 pH 为低含水量处理低于高含水量处理,而橡胶林土壤在培养 47 d 时土壤 pH 为 XJH < XJL,呈相反趋势。培养结束时,所有处理土壤 pH 均显著下降, T15L 最低为 3.99 (图 1)。

培养过程中,土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 呈现此消彼长的变化趋势。低含水量条件下观察到更高的 NH₄⁺-N 含量,相同含水量条件下呈现 XJ < T15 < T5 的趋势。培养期间茶园土壤 NO₃⁻-N 含量为低含水量处理高于高含水量处理,橡胶林土壤在培养前期呈现一致趋势,但在培养结束时呈现 XJH > XJL 的相反趋势, XJH 高达 238.1 mg·kg⁻¹。在低含水量条件



L 表示 50% WFPS, H 表示 80% WFPS, 下同

图 1 不同处理 pH 变化

Fig. 1 Dynamic of pH in different treatments

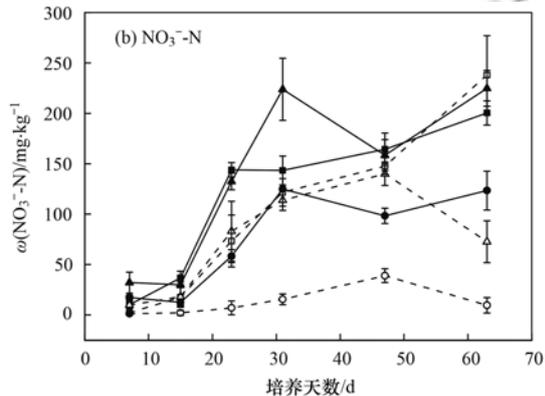
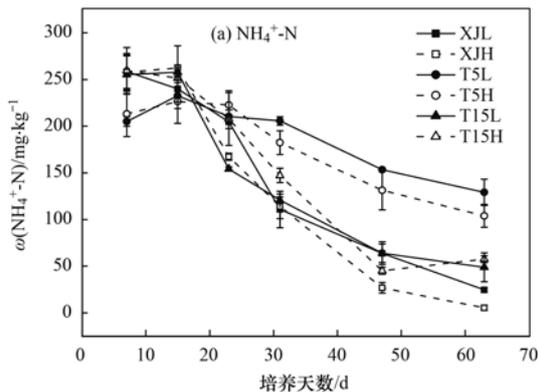
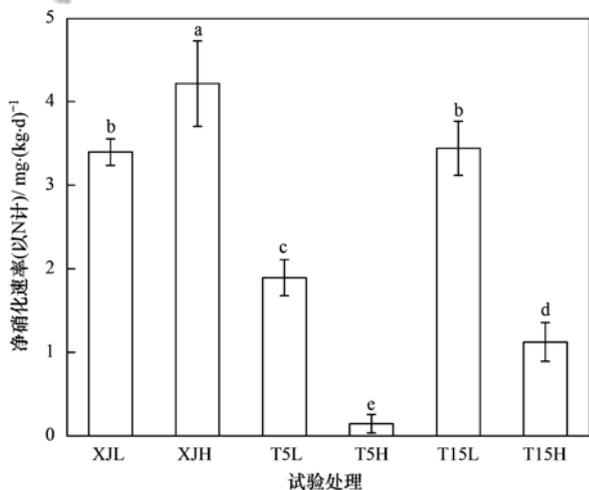


图 2 不同处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 变化

Fig. 2 Dynamic of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ in different treatments



不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

图 3 不同处理土壤净硝化速率

Fig. 3 Soil net nitrification rate in different treatments

理 NO 排放逐渐高于高含水量处理, 而 XJ 反之. 其中 XJ 和 T15L 处理 NO 排放量较高, 峰值出现在培养的 43 ~ 47 d, 其他处理日均排放量较低. 从 NO 排放总量看, 橡胶林土壤 NO 排放高于 15 a 和 5 a 茶

下, 土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量呈现 $\text{T15} > \text{XJ} > \text{T5}$ 的趋势, 在高含水量条件下, 土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量呈现 $\text{XJ} > \text{T15} > \text{T5}$ 的趋势 (图 2).

橡胶林土壤中, 土壤净硝化速率为 $\text{XJH} > \text{XJL}$. 在茶园土壤中, 土壤净硝化速率为低含水量处理高于高含水量处理且 $\text{T15} > \text{T5}$. 高含水量条件下, 土壤净硝化速率为: $\text{XJ} > \text{T15} > \text{T5}$, XJH 最高达 $4.2 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ (以 N 计, 下同). 低含水量条件下, XJL 和 T15L 净硝化速率无显著差异, T5L 净硝化速率最低为 $1.9 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ (图 3).

2.2 土壤 NO 和 N_2O 排放

培养期间 NO 排放整体呈现先上升后下降的趋势 [图 4(a)]. T5 和 T15 在培养初期均为高含水量处理 NO 排放高, 随着培养时间的增加, 低含水量处

园土壤, 呈现出 $\text{XJ} > \text{T15} > \text{T5}$ 的趋势, 茶园土壤中 T15L 处理排放量最高为 $0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (以 N 计, 下同), 而 XJH 和 XJL 排放总量分别高达 $1.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 是 T15L 排放量的两倍 [图 5(a)].

土壤 N_2O 排放均表现为高含水量处理高于低含水量处理, T5H 和 T15H 在培养的 47 ~ 55 d 出现排放高峰, 而 XJH 则在培养的 27 d 达到峰值, 随后下降至培养结束 [图 4(b)]. 从 N_2O 排放总量看, 各处理 N_2O 排放总量由大到小依次为: $\text{XJH} > \text{T15H} > \text{T5H} > \text{XJL} > \text{T15L} > \text{T5L}$ [图 5(b)]. 整体上, 各土壤 N_2O 排在低含水量条件下无显著性差异, 两种气体排放均为橡胶林土壤高于茶园土壤, 低含水量处理 NO 排放占比高, 而高含水量处理 N_2O 排放为主要占比, 高达 91.0% ~ 98.1% [图 5(c)].

2.3 气体排放和土壤理化性质的相关性

本试验中 XJL、XJH 和 T15L 处理土壤 NO 排放与 pH 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 呈极显著负相关, 与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 呈极显著正相关 ($P < 0.01$). 茶园土壤 T5H 和 T15H 处理的 N_2O 排放与 pH 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 呈极显著负相关, 与

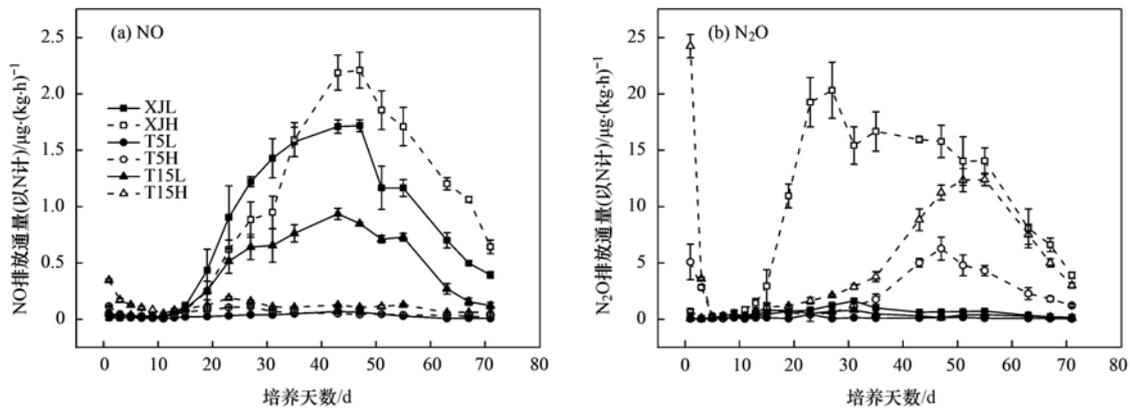
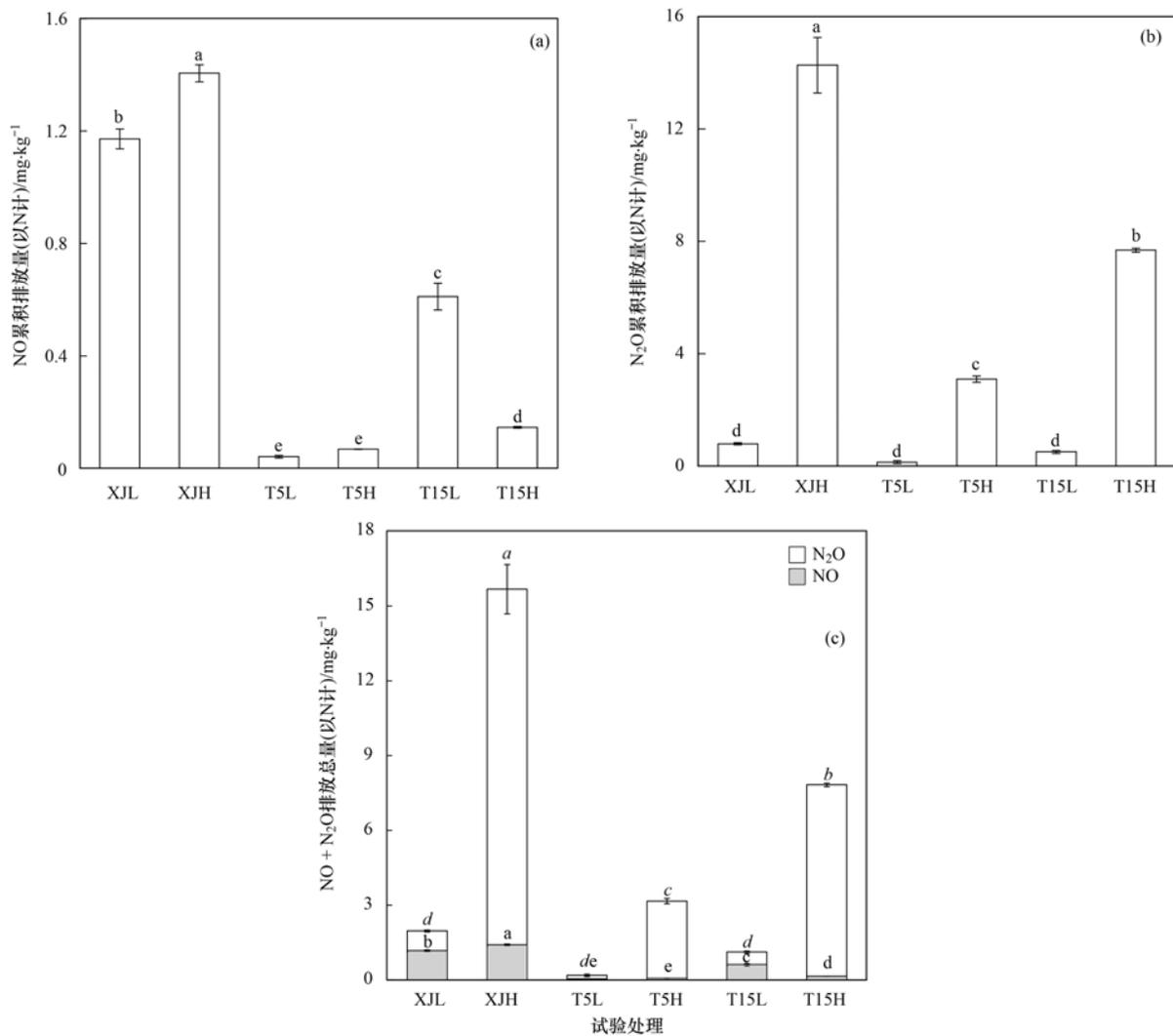


图 4 不同处理 NO 和 N₂O 排放通量变化

Fig. 4 Dynamic of NO and N₂O emissions in different treatments



不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

图 5 不同处理 NO 和 N₂O 排放总量

Fig. 5 Cumulative emissions of NO and N₂O in different treatments

NO₃⁻-N呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 而橡胶林土壤 XJH 处理的 N₂O 排放仅与 pH 和 NH₄⁺-N 呈显著负相关 ($P < 0.05$), 低含水量下的橡胶林和茶园土壤 N₂O 排放与 pH、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 相关性不显著 (表 2). 土

壤净硝化速率、NO 和 N₂O 排放在不同含水量之间和不同土地利用方式之间均存在统计学差异, 含水量、土地利用方式及其交互作用对土壤净硝化速率、NO 和 N₂O 累积排放量有显著影响 ($P < 0.001$, 表 3).

用主成分分析(PCA)来分析培养结束时与累积NO和N₂O排放相关的土壤性质,第一主成分解释了约83.60%的观测变异,而第二主成分解释了16.30%的观测变异,土壤净硝化速率、NO和N₂O排

放与土壤有机质(SOM)和土壤全氮(TN)呈正相关,与土壤速效磷(AP)、速效钾(AK)和pH呈负相关(图6).土壤净硝化速率和NO累积排放量呈极显著正相关关系($P < 0.01$,图7).

表2 NO和N₂O排放通量与土壤pH和矿质氮的相关性¹⁾

Table 2 Correlations of NO and N₂O fluxes with soil pH and mineral nitrogen

处理	NO			N ₂ O		
	pH	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	pH	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N
XJL	-0.699**	-0.675**	0.740**	-0.279	-0.259	0.386
XJH	-0.910**	-0.886**	0.729**	-0.548*	-0.517*	0.402
T5L	-0.110	-0.108	0.337	0.081	0.209	-0.019
T5H	0.394	0.468	-0.140	-0.741**	-0.639**	0.872**
T15L	-0.634**	-0.688**	0.644**	0.254	0.355	-0.033
T15H	0.377	0.361	0.142	-0.909**	-0.935**	0.699**

1)**表示在0.01级别(双尾)相关性显著,*表示在0.05级别(双尾)相关性显著

表3 土地利用方式、含水量及其交互作用对土壤净硝化速率、NO和N₂O累积排放量的影响¹⁾

Table 3 Effects of the soil land-use, moisture and their interactions on the net nitrification rate and cumulative NO and N₂O emissions

	净硝化速率	NO	N ₂ O
土地利用方式	138.67***	3277.91***	316.76***
含水量	62.56***	27.86***	1667.13***
土地利用方式 × 含水量	49.73***	258.09***	251.51***

1)***表示 $P < 0.001$

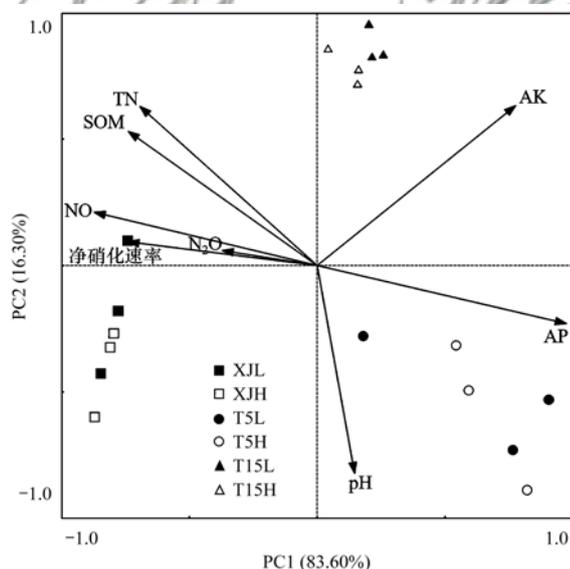


图6 土壤净硝化速率、NO和N₂O累积排放量与土壤性质的主成分分析

Fig. 6 Correlation triplot based on a principal component analysis (PCA) using net nitrification rate, cumulative emissions of NO and N₂O and soil properties

3 讨论

3.1 不同土地利用方式对土壤净硝化速率及NO和N₂O排放的影响

土地利用方式的改变会对土壤理化性质、硝化过程、微生物数量和活性等产生显著影响^[34].本试验在相同含水量条件下,不同土地利用方式土壤净

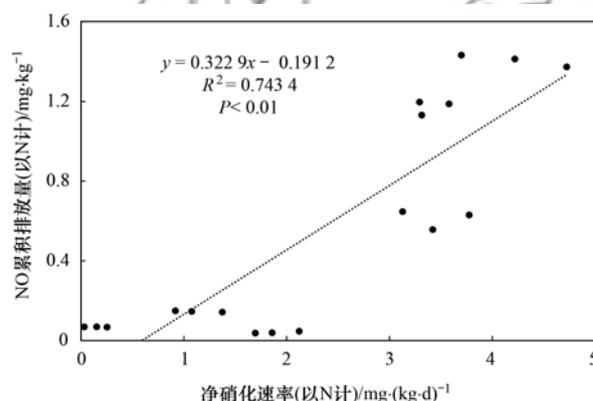


图7 土壤净硝化速率和NO排放的相关性
Fig. 7 Correlations of soil net nitrification and NO cumulative emissions

硝化速率、NO和N₂O排放差异显著(图3和图5),在高含水量条件下,均表现出橡胶林土壤高于茶园土壤.土壤硝化速率主要取决于pH和SOM^[35,36].Zhang等^[37]的研究表明土壤pH是影响硝化作用的关键因子,即提高土壤pH可以激发硝化作用而酸化则抑制硝化作用.橡胶林转为茶园后,土壤pH降低(表1),这主要是因为茶树具有喜铵聚铝的特性,茶树吸收铵态氮后,根系会释放大量的H⁺,同时茶叶能够吸收和累积大量的铝,铝的生物地球化学循环也能够导致土壤酸化^[38].植茶年限越长pH越低(表1),这印证了随着植茶年限增加,土壤富集的铝和有机酸含量增加等一系列原因而

出现的土壤酸化问题^[39]. 本研究中 T15 的 pH 低于 T5 处理(表 1), 但净硝化速率却呈相反的趋势(图 3), 硝化过程主要分自养硝化和异养硝化, 高含水量条件下自养硝化过程受到一定程度的抑制, 而异养硝化过程主要受土壤碳源的影响^[40,41]; Zhu 等^[42]的研究表明, 林地转茶园之后, 增加了土壤的异养硝化, 而异养硝化速率受 SOM 含量的影响, 所以推测, 相比 T5 处理, 在高含水量条件下, T15 处理可能增加了异养硝化速率, 所以整体上硝化速率高于 T5 处理. 在低含水量条件下, 酸性土壤中自养硝化过程主要由 AOA 主导, 而 pH 越低, 越有利于 AOA 的活性, 而 AOA 的活性受到有机氮矿化氮的影响, 与土壤的 SOM 含量有一定的关联. 但同时, Yang 等^[43]的研究表明酸性茶园土壤也存在活性较强的 AOB, 所以热区茶园的自养硝化过程也可能由 AOA 和 AOB 共同驱动, 导致低含水量条件下 15a 的茶园土壤的净硝化速率与橡胶林无显著性差异, 并稍高于橡胶林的情况.

硝化和反硝化是土壤 NO 的主要产生过程^[27,44], 本试验在高含水量条件下, 橡胶林和茶园 NO 累积排放的趋势与净硝化速率一致[图 3 和图 5(a)], 此结果说明在高含水量条件下, 不同土地利用方式 NO 排放主要受硝化作用影响; 在低含水量条件下, 15 a 茶园土壤净硝化速率比橡胶林土壤略高, 而 NO 排放量却显著低于橡胶林土壤. Pilegard 等^[45]的研究表明 NO 排在低含水量条件下主要受硝化过程控制, 自养硝化和异养硝化都可能产生 NO, 同时硝化菌的反硝化过程也是 NO 排放的一个重要过程^[46], 在森林土壤中异养硝化菌也能进行反硝化过程, 从而产生 NO 排放^[45], 而异养硝化和硝化菌的反硝化与土壤中的碳源关系密切, 考虑到橡胶林的有机质含量显著高于茶园土壤, 因此推测在低含水量条件下异养硝化和硝化菌的反硝化在不同土地利用类型中 NO 排放占主导过程. 高含水量条件下, N₂O 排放较高, 且与净硝化速率一致[图 3 和图 5(b)], 考虑到硝化作用产生的 N₂O 有限, 所以推测在高含水量条件下 N₂O 主要来自于反硝化过程, 硝化产生的硝态氮对反硝化底物有重要影响, 所以高含水量条件下 N₂O 排放也与硝化速率有一定的关联^[47]. 低含水量条件下 N₂O 排放趋势与净硝化速率则不一致[图 3 和图 5(b)], 不同土地利用类型 N₂O 排放都相对较低, 说明可能是在热带地区不同土地利用类型硝化作用产生的 N₂O 有限^[36]. PCA 结果显示土壤 N₂O 排放与 SOM 显著正相关(图 6), SOM 可以为反硝化过程提供碳源, 促进反硝化过程产生 N₂O 的排放^[40,41].

3.2 不同水分含量对土壤净硝化速率及 NO 和 N₂O 排放的影响

一般认为, 土壤水分改变土壤氧气状况, 影响底物扩散和气体扩散, 是调节硝化和反硝化过程及 NO 和 N₂O 排放的关键. 土壤硝化速率在一定范围内随水分含量增加而增加^[28], 相较于高含水量条件, 低含水量条件下更有利于硝化过程, 所以能看到茶园土壤在低含水量条件下比高含水量有更好的净硝化速率(图 3). 于淑华等^[48]的研究发现 60% WHC 为茶园最适硝化作用含水量. 本试验中橡胶林土壤净硝化速率表现为 XJH > XJL(图 3), Lan 等^[49]在不同林地的研究也表明, 土壤总硝化速率随着水分的增加而增加, 随着水分的增加促进了有机碳矿化过程, 橡胶林有更高的有机碳含量, 可能更有利于促进异养硝化过程^[50,51].

NO 排放主要来自于硝化过程^[27,44], 所以 XJ 和 T15 的 NO 排放对水分的响应和净硝化速率趋势一致, 在橡胶林土壤中 XJH 排放量高于 XJL, 在茶园土壤中 T15L 排放高于 T15H[图 5(a)], 这是由于高含水量条件导致厌氧环境增加, 促进微生物反硝化过程, 气态氮的损失以 N₂O 和 N₂ 为主, 削弱了 NO 排放, 这和水稻栽培 NO 排放量低于茶园的研究结果一致^[52]. 而在 T5 处理中, NO 在不同含水量条件下排放无显著性差异, 排放量都较低, T5L 的净硝化速率却显著高于 T5H[图 3 和图 5(a)], 从表 2 可以看出 T5L 和 T5H 处理 NO 排放与 pH 和矿质氮都无显著相关性, 且整个培养过程中排放量都处在较低水平, 说明在低含水量条件下, T5 处理硝化过程可能较少产生 NO 和 N₂O 等中间产物, 而更多产生硝态氮等硝化终产物为主^[33,53]. 通过图 5 也可以看出在高含水量条件下 N₂O 排在橡胶林和茶园中都显著高于低含水量处理, 低含水量条件下 N₂O 排放主要来自于硝化过程, 而高水量条件下 N₂O 排放主要来自于反硝化, 因此高含水量条件下可能是促进了反硝化过程, 从而导致 N₂O 的大量排放, 这和已有的研究结果一致^[54,55], 土壤的高 N₂O 排放主要来自于反硝化过程.

3.3 土地利用方式和水分对土壤净硝化速率及 NO 和 N₂O 排放的交互作用

土壤净硝化速率、NO 和 N₂O 排放在不同土地利用方式和含水量之间均存在统计学差异, 土地利用方式、含水量及其交互作用对土壤净硝化速率、NO 和 N₂O 累积排放量有显著影响($P < 0.001$, 表 3). 不同土地利用方式的改变导致土壤的基本理化性质发生改变, 例如土壤有机质, 土壤 pH 的改变等, 从而导致相关的氮循环微生物和相应的 NO 和 N₂O 排放

的改变^[56];与此同时,相比橡胶林,茶树在种植过程中分泌的酸性物质,铝在土壤中的富集,都能导致pH的不断降低和相应的微生物群落结构的变化,因此由于不同作物的种植导致相应的微生物群落结构的变化,也是导致不同土地利用方式下净硝化速率、NO和N₂O排放产生差异的一个重要原因^[57];另外土壤水分也是影响上述3个因素的重要影响因素,不同土地利用类型导致土壤的微生物类型产生差异,从而导致其对水分的响应也存在一定的变异性,例如橡胶林的净硝化速率和NO排放对水分的响应与T5的茶园土壤存在差异.总的来说,橡胶林转为茶园后在高含水量条件下显著降低了硝化速率、NO和N₂O排放,人们要更加注重热带地区橡胶林和中龄茶园土壤的硝化过程、NO和N₂O排放.在施氮肥的过程中增加硝化抑制剂或者缓释肥等,能提高氮肥利用率.

4 结论

(1)高含水量条件下,橡胶林土壤净硝化速率、NO和N₂O排放均显著高于茶园土壤,整体呈现XJ>T15>T5的趋势;低含水量条件下,橡胶林土壤NO排放显著高于茶园土壤,但净硝化速率和N₂O排放放在XJ和T15处理之间无显著差异.

(2)橡胶林土壤的净硝化速率为高水量处理显著高于低含水量处理,茶园土壤呈相反趋势;XJ和T15处理的NO排放对水分的响应和净硝化速率趋势一致,高硝化速率促进NO排放;土壤N₂O排放为高含水量处理显著高于低含水量处理.

参考文献:

- [1] Fan X W, Worrall F, Baldini L M, *et al.* A spatial total nitrogen budget for Great Britain[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **728**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138864.
- [2] Kuypers M M M, Marchant H K, Kartal B. The microbial nitrogen-cycling network [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2018, **16**(5): 263-276.
- [3] Hink L, Gubry-Rangin C, Nicol G W, *et al.* The consequences of niche and physiological differentiation of archaeal and bacterial ammonia oxidisers for nitrous oxide emissions [J]. *The ISME Journal*, 2018, **12**(4): 1084-1093.
- [4] 王帅, 张永发, 任常琦, 等. 早期不同施氮量下橡胶园土壤中无机氮的运移[J]. *热带作物学报*, 2021, **42**(12): 3514-3520.
- Wang S, Zhang Y F, Ren C Q, *et al.* Transport of inorganic nitrogen in the soil of rubber plantation under different nitrogen application rates at early stage[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2021, **42**(12): 3514-3520.
- [5] Krichels A, Delucia E H, Sanford R, *et al.* Historical soil drainage mediates the response of soil greenhouse gas emissions to intense precipitation events [J]. *Biogeochemistry*, 2019, **142**(3): 425-442.
- [6] 马瑞, 赵永鹏, 王智慧, 等. pH对水稻土全程氨氧化细菌丰度和群落结构组成影响[J]. *环境科学*, 2022, **43**(4): 2204-2208.
- Ma R, Zhao Y P, Wang Z H, *et al.* Effect of pH on the abundance and community structure of comammox nitrospira in paddy soils [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(4): 2204-2208.
- [7] 陈海, 朱大运, 陈浒. 石漠化地区土地利用方式对土壤团聚体稳定性及有机碳的影响[J]. *中国岩溶*, 2021, **40**(2): 346-354.
- Chen H, Zhu D Y, Chen H. Effects of land-use patterns on soil aggregate stability and organic carbon in rocky desertification areas [J]. *Carsologica Sinica*, 2021, **40**(2): 346-354.
- [8] 何宇, 盛茂银, 王轲, 等. 土地利用变化对西南喀斯特土壤团聚体组成、稳定性以及C、N、P化学计量特征的影响[J]. *环境科学*, 2022, **43**(7): 3752-3762.
- He Y, Sheng M Y, Wang K, *et al.* Effect of land use change to constitution, stability, and C, N, P stoichiometric characteristics of soil aggregates in Southwest China Karst [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(7): 3752-3762.
- [9] Xiao Z G, Rasmann S, Yue L, *et al.* The effect of biochar amendment on N-cycling genes in soils: a meta-analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **696**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133984.
- [10] Li S N, Zou F S, Zhang Q, *et al.* Species richness and guild composition in rubber plantations compared to secondary forest on Hainan Island, China [J]. *Agroforestry Systems*, 2013, **87**(5): 1117-1128.
- [11] 罗雪华, 吴小平, 王文斌. 砖红壤区橡胶林地土壤硝化作用研究初报[J]. *土壤通报*, 2006, **37**(5): 928-931.
- Luo X H, Wu X P, Wang W B. Nitrification of latosol under rubber plantation [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, **37**(5): 928-931.
- [12] 崔静雅, 颜明娟, 吴晓荣, 等. 林地改为茶园对土壤净硝化速率及N₂O排放的影响[J]. *土壤*, 2017, **49**(4): 738-744.
- Cui J Y, Yan M J, Wu X R, *et al.* Effects of woodland transforming into tea garden on soil net nitrification rate and N₂O emission [J]. *Soils*, 2017, **49**(4): 738-744.
- [13] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴-2014 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2014.
- [14] 倪康, 廖万有, 伊晓云, 等. 我国茶园施肥现状与减施潜力分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, **25**(3): 421-432.
- Ni K, Liao W Y, Yi X Y, *et al.* Fertilization status and reduction potential in tea gardens of China [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, **25**(3): 421-432.
- [15] 海南省统计局, 国家统计局海南调查总队. 海南统计年鉴-2019 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [16] 张坤, 包维楷, 杨兵, 等. 林下植被对土壤微生物群落组成与结构的影响 [J]. *应用与环境生物学报*, 2017, **23**(6): 1178-1184.
- Zhang K, Bao W K, Yang B, *et al.* The effects of understory vegetation on soil microbial community composition and structure [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2017, **23**(6): 1178-1184.
- [17] 楚海燕, 李若南, 李靖雯, 等. 中亚热带森林转换对土壤微生物群落结构的影响 [J]. *应用与环境生物学报*, 2019, **25**(1): 23-28.
- Chu H Y, Li R N, Li J W, *et al.* Effects of forest conversion on soil microbial community structure [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2019, **25**(1): 23-28.
- [18] Wang S Q, Ye S M. Dynamics of bacterial function characteristics in soil aggregates during the tea-planting process

- [J]. *Geoderma*, 2020, **377**, doi: 10.1016/j.geoderma.2020.114609.
- [19] 郑翔, 曹敏敏, 纪小芳, 等. 森林土壤氧化亚氮排放对磷添加响应的研究进展[J]. *林业科学*, 2021, **57**(6): 150-157.
Zheng X, Cao M M, Ji X F, *et al.* Progress in studies of responses to phosphorus addition of soil nitrous oxide emissions from forest soil[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2021, **57**(6): 150-157.
- [20] Nanang Z, 程谊, 张金波. 不同利用方式红壤反硝化势和气态产物排放特征[J]. *土壤*, 2020, **52**(2): 348-355.
Nanang Z, Cheng Y, Zhang J B. Denitrification potential and gas emission in red soils under different land use types[J]. *Soils*, 2020, **52**(2): 348-355.
- [21] Zhang Y Y, Zhang J B, Chapman S J, *et al.* Tea plantation affects soil nitrogen transformations in subtropical China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2021, **21**(1): 441-451.
- [22] Chen D, Li Y, Wang C, *et al.* Dynamics and underlying mechanisms of N₂O and NO emissions in response to a transient land-use conversion of Masson pine forest to tea field [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **693**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.07.355.
- [23] Wang Y, Yao Z S, Pan Z L, *et al.* Tea-planted soils as global hotspots for N₂O emissions from croplands [J]. *Environmental Research Letters*, 2020, **15**(10), doi: 10.1088/1748-9326/aba5b2.
- [24] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). *Climate Change 2014: mitigation of climate change. Contribution of working group III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [25] Bai Z Z, Yang G, Chen H, *et al.* Nitrous oxide fluxes from three forest types of the tropical mountain rainforests on Hainan Island, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **92**: 469-477.
- [26] Li Y, Zheng X H, Fu X Q, *et al.* Is green tea still 'green'? [J]. *Geo: Geography and Environment*, 2016, **3**(2), doi: 10.1002/geo.2.21.
- [27] Yao Z, Wei Y, Liu C, *et al.* Organically fertilized tea plantation stimulates N₂O emissions and lowers NO fluxes in subtropical China [J]. *Biogeosciences*, 2015, **12**(20): 5915-5928.
- [28] Zhou S M, Zhang M, Zhang K K, *et al.* Effects of reduced nitrogen and suitable soil moisture on wheat (*Triticum aestivum* L.) rhizosphere soil microbiological, biochemical properties and yield in the Huanghuai Plain, China [J]. *Journal of Integrative Agriculture* 2020, **19**(1): 234-250.
- [29] Wang H, Yang J P, Yang S H, *et al.* Effect of a 10°C-elevated temperature under different water contents on the microbial community in a tea orchard soil [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2014, **62**: 113-120.
- [30] 王鸿浩, 谭梦怡, 王紫君, 等. 不同水分管理条件下添加生物炭对琼北地区水稻土 N₂O 排放的影响 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(8): 3943-3952.
Wang H H, Tan M Y, Wang Z J, *et al.* Effects of biochar addition under different water management conditions on N₂O emission from paddy soils in northern Hainan [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(8): 3943-3952.
- [31] 汤文广, 周璋, 林明献, 等. 热带森林土壤气态氮损失及其对水分添加的响应 [J]. *生态学杂志*, 2018, **37**(11): 3231-3236.
Tang W G, Zhou Z, Lin M X, *et al.* Nitrogen gaseous loss in tropical forest soil and its responses to water addition [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, **37**(11): 3231-3236.
- [32] Ji C, Li S Q, Geng Y J, *et al.* Decreased N₂O and NO emissions associated with stimulated denitrification following biochar amendment in subtropical tea plantations [J]. *Geoderma*, 2020, **365**, doi: 10.1016/j.geoderma.2020.114223.
- [33] 鲍士旦. *土壤农化分析* [M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [34] Ma R, Zhao W Y, Zhao Y P, *et al.* Land use pattern effects after 30 years of shifting cropland to fallow land on soil ammonia-oxidizer community [J]. *Applied Soil Ecology*, 2020, **156**, doi: 10.1016/j.apsoil.2020.103707.
- [35] Yang L Q, Zhu G D, Ju X T, *et al.* How nitrification-related N₂O is associated with soil ammonia oxidizers in two contrasting soils in China? [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **771**: 143212, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143212.
- [36] Anderson F L, Cooper J A, Amador J A. Laboratory-scale evaluation of the effects of water-filled pore space on emissions of CO₂, CH₄, N₂O, and N₂ from soil-based wastewater treatment [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2019, **230**(10), doi: 10.1007/s11270-019-4294-7.
- [37] Zhang Y, Dai S Y, Huang X Q, *et al.* pH-induced changes in fungal abundance and composition affects soil heterotrophic nitrification after 30 days of artificial pH manipulation [J]. *Geoderma*, 2020, **366**, doi: 10.1016/j.geoderma.2020.114255.
- [38] Ding Z J, Shi Y Z, Li G X, *et al.* Tease out the future: how tea research might enable crop breeding for acid soil tolerance [J]. *Plant Communications*, 2021, **2**(3), doi: 10.1016/j.xplc.2021.100182.
- [39] Ma L F, Yang X D, Shi Y Z, *et al.* Response of tea yield, quality and soil bacterial characteristics to long-term nitrogen fertilization in an eleven-year field experiment [J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, **166**, doi: 10.1016/j.apsoil.2021.103976.
- [40] Qiao C L, Xu B, Han Y T, *et al.* Synthetic nitrogen fertilizers alter the soil chemistry, production and quality of tea. A meta-analysis [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2018, **38**(1), doi: 10.1007/s13593-017-0485-z.
- [41] Wang S Q, Li T X, Zheng Z C. Effects of tea plantation age on soil aggregate-associated C-and N-cycling enzyme activities in the hilly areas of Western Sichuan, China [J]. *CATENA*, 2018, **171**: 145-153.
- [42] Zhu T B, Zhang J B, Meng T Z, *et al.* Tea plantation destroys soil retention of NO₃⁻ and increases N₂O emissions in subtropical China [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, **73**: 106-114.
- [43] Yang X D, Ni K, Shi Y Z, *et al.* Heavy nitrogen application increases soil nitrification through ammonia-oxidizing bacteria rather than archaea in acidic tea (*Camellia sinensis* L.) plantation soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **717**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137248.
- [44] Wang J, Tu X S, Zhang H M, *et al.* Effects of ammonium-based nitrogen addition on soil nitrification and nitrogen gas emissions depend on fertilizer-induced changes in pH in a tea plantation soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **747**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141340.
- [45] Pilegard K. Processes regulating nitric oxide emissions from soils [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2013, **368**(1621), doi: 10.1098/rstb.2013.0126.
- [46] Loick N, Dixon E R, Abalos D, *et al.* Denitrification as a source of nitric oxide emissions from incubated soil cores from a UK grassland soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, **95**: 1-7.

- [47] Kuang W N, Gao X P, Tenuta M, *et al.* Relationship between soil profile accumulation and surface emission of N_2O : effects of soil moisture and fertilizer nitrogen[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2019, **55**(2): 97-107.
- [48] 于淑华, 张丽霞, 谢雪迎, 等. 不同水分模式对山东茶园土壤氮素动态的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, **35**(4): 289-298.
Yu S H, Zhang L X, Xie X Y, *et al.* Effects of water regimes on soil nitrogen dynamics in tea garden in Shandong province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, **35**(4): 289-298.
- [49] Lan T, Liu R, Suter H, *et al.* Stimulation of heterotrophic nitrification and N_2O production, inhibition of autotrophic nitrification in soil by adding readily degradable carbon [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, **20**(1): 81-90.
- [50] Wu D, Cárdenas L M, Calvet S, *et al.* The effect of nitrification inhibitor on N_2O , NO and N_2 emissions under different soil moisture levels in a permanent grassland soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, **113**: 153-160.
- [51] Nadeem S, Bakken L R, Frostegård Å, *et al.* Contingent effects of liming on N_2O -emissions driven by autotrophic nitrification [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2020, **8**, doi: 10.3389/fenvs.2020.598513.
- [52] Yao Z S, Zheng X H, Liu C Y, *et al.* Stand age amplifies greenhouse gas and NO releases following conversion of rice paddy to tea plantations in subtropical China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, **248**: 386-396.
- [53] Arias-Navarro C, Díaz-Pinés E, Zuazo P, *et al.* Quantifying the contribution of land use to N_2O , NO and CO_2 fluxes in a montane forest ecosystem of Kenya [J]. *Biogeochemistry*, 2017, **134**(1-2): 95-114.
- [54] Huang Y, Xiao X, Long X E. Fungal denitrification contributes significantly to N_2O production in a highly acidic tea soil [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, **17**(6): 1599-1606.
- [55] Yu J L, Lin S, Shaaban M, *et al.* Nitrous oxide emissions from tea garden soil following the addition of urea and rapeseed cake [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, **20**(9): 3330-3339.
- [56] Lang M, Li P, Ti C P, *et al.* Soil gross nitrogen transformations are related to land-uses in two agroforestry systems [J]. *Ecological Engineering*, 2019, **127**: 431-439.
- [57] Gholoubi A, Emami H, Alizadeh A. Soil quality change 50 years after forestland conversion to tea farming [J]. *Soil Research*, 2018, **56**(5): 509-517.



CONTENTS

Challenges Regarding the Co-emission of Emerging Pollutants to Eco-environmental Monitoring and Management	WANG Pei, HUANG Xin-yi, CAO Zhi-wei, <i>et al.</i> (4801)
Environmental Process, Effects and Risks of Emerging Contaminants in the Estuary-Coastal Environment	WANG Xin-hong, YU Xiao-xuan, WANG Si-quan, <i>et al.</i> (4810)
Research Progress of Analytical Methods with Molecular Spectroscopy for Determination of Trace Nutrients and Metals in Seawaters	YUAN Dong-xing, HUANG Yong-ming, WANG Ting (4822)
Research Progress on the Determination of Sulfide in Natural Waters: From Laboratory Analysis to In-Situ Monitoring	LI Peng, LIN Kun-de, YUAN Dong-xing (4835)
Advances in On-site Analytical Methods for Inorganic Arsenic in Environmental Water	BO Guang-yong, CHEN Zhao-ying, GONG Zhen-bin, <i>et al.</i> (4845)
Advances and Prospect of Sampling Techniques and Analytical Methods for Trace Elements in the Ocean; Progress of Trace Element Platform Construction in Xiamen University .....	..... HUANG Yong-ming, ZHOU Kuan-bo, CHEN Yao-jin, <i>et al.</i> (4858)
Biodegradation of Polyethylene Microplastic: A Review .....	..... LUO Yuan-rong, QIAN Yi-qian, QI Ya-nan (4869)
Mechanism and Environmental Effect on Nitrogen Addition to Microbial Process of Arsenic Immobilization in Flooding Paddy Soils	WANG Feng, ZHANG Jing, ZHOU Shao-yu, <i>et al.</i> (4876)
Toxicity Testing Organisms for Marine Ecotoxicological Research in China	SHI Tian-yi, HONG Hai-zheng, WANG Ming-hua, <i>et al.</i> (4888)
Estimating Methane Fugitive Emissions from Oil and Natural Gas Systems in China	CHEN Chun-ci, LÜ Yong-long, HE Gui-zhen (4905)
Atmospheric NH ₃ Emission Inventory and Its Tempo-spatial Changes in Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou Region from 2015 to 2020	LI Xiang, WU Shui-ping, JIANG Bing-qi, <i>et al.</i> (4914)
Distribution of Microplastic and Antibiotic Resistance Gene Pollution in Jiulong River Estuary .....	..... CHENG Hong, CHEN Rong (4924)
Pollution Characteristics of Microplastics in Sediments of Xiamen Bay Beach .....	..... YAO Rui, LIU Hua-tai, LI Yong-yu, <i>et al.</i> (4931)
Spatial and Temporal Distribution and Influencing Factors of Dissolved Trace Metals in Jiulong River Estuary and Xiamen Bay .....	..... QI Liu-qian, YUE Xin-li, ZHONG Hao-wen, <i>et al.</i> (4939)
Spatiotemporal Characteristics of Dissolved Oxygen and Control Mechanism of Hypoxia (Low Oxygen) in the Watershed-Coastal System in Fujian Province .....	..... YANG Ai-lin, YANG Fang, LI Shao-bin, <i>et al.</i> (4950)
Distribution, Migration, and Transformation Mechanism of Labile Phosphorus in Sediments of Xixi River Estuary, Xiamen .....	..... PAN Feng, CAI Yu, GUO Zhan-rong, <i>et al.</i> (4961)
Adsorption of Mn ²⁺ by Modified Biochar Fixed Bed in Simulated Lakes and Reservoir Waters .....	..... ZHAO Jie, YE Zhi-long, WANG Jia-ni, <i>et al.</i> (4971)
Rapid Detection of Trace Enrofloxacin and Ciprofloxacin in Drinking Water by SERS .....	..... XU Jing, ZHENG Hong, LU Jiang-long, <i>et al.</i> (4982)
Degradation of Triphenyl Phosphate in Water by UV-driven Advanced Oxidation Processes .....	..... XU Zi-wen, YIN Hong-ling, XIONG Yuan-ming, <i>et al.</i> (4992)
Characteristics and Potential Sources of Four Ozone Pollution Processes in Hainan Province in Autumn of 2019 .....	..... FU Chuan-bo, CHEN Hong, DAN Li, <i>et al.</i> (5000)
Characterization and Formation Mechanism of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} and PM ₁₀ in Summer in the Urban Agglomeration of the Ili River Valley .....	..... CHEN Qiao, GU Chao, XU Tao, <i>et al.</i> (5009)
Difference in PM _{2.5} Pollution and Transport Characteristics Between Urban and Suburban Areas .....	..... QI Peng, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (5018)
Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Northern Suburbs of Nanjing .....	..... FENG Yue-zheng, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (5030)
Ecological Risk Assessment of Microplastics Occurring in Surface Water of Terrestrial Water Systems across China .....	..... SUN Xiao-nan, CHEN Hao, JIA Qi-long, <i>et al.</i> (5040)
Scale Effects of Landscape Pattern on Water Quality in Dongjiang River Source Watershed .....	..... CHEN You-liang, ZOU Wen-min, LIU Xing-gen, <i>et al.</i> (5053)
Mercury Speciation, Distribution, and Potential Sources in Surface Waters of the Yangtze and Yellow River Source Basins of Tibetan Plateau During Wet Season .....	..... LIU Nan-tao, WU Fei, YUAN Wei, <i>et al.</i> (5064)
Water Environmental Characteristics and Water Quality Assessment of Lakes in Tibetan Plateau .....	..... LIU Zhi-qi, PAN Bao-zhu, HAN Xu, <i>et al.</i> (5073)
Karst Hydrogeochemical Characteristics and Controlling Factors of Carlin-type Gold Mining Area Based on Hydrochemistry and Sulfur Isotope .....	..... ZHA Xue-fang, WU Pan, LI Xue-xian, <i>et al.</i> (5084)
Characteristics of Eukaryotic Phytoplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Danjiangkou Reservoir .....	..... HE Yu-xiao, MAI Si-jie, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (5096)
Adsorption of Phosphate and Heavy Metals by Lanthanum Modified Zeolite and Its Performance in Sediment Inactivation .....	..... WANG Zhe, ZHU Jun, LI Wen, <i>et al.</i> (5106)
Metagenomic and Metatranscriptomic Analysis of Nitrogen Removal Functional Microbial Community of Petrochemical Wastewater Biological Treatment Systems .....	..... ZHANG Xu, ZHOU Jia-jia, ZHOU Min, <i>et al.</i> (5115)
Bacterial Community Structure and Antibiotic Resistance Gene Changes in IFAS + Magnetic Coagulation Process Wastewater Treatment Plant in Cold Regions .....	..... DU Wen-yan, YAO Jun-qin, MA Hui-ying, <i>et al.</i> (5123)
Nitric Oxide Emissions from Chinese Upland Cropping Systems and Mitigation Strategies: A Meta-analysis .....	..... TIAN Zheng-yun, WU Xiong-wei, WU Yuan-yuan, <i>et al.</i> (5131)
Impact of Nitrification Inhibitors on Vegetable Production Yield, Nitrogen Fertilizer Use Efficiency and Nitrous Oxide Emission Reduction in China: Meta Analysis .....	..... LIU Fa-bo, MA Xiao, ZHANG Fen, <i>et al.</i> (5140)
Effect of Different Fertilization Treatments on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Rice-Vegetable Rotation in a Tropical Region, China .....	..... SHAO Xiao-hui, TANG Shui-rong, MENG Lei, <i>et al.</i> (5149)
Effects of Land-use Conversion on Soil Nitrification and NO & N ₂ O Emissions in Tropical China Under Different Moisture Conditions .....	..... TANG Rui-jie, HU Yu-jie, ZHAO Cai-yue, <i>et al.</i> (5159)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of the Yangtze River Economic Belt Based on Bibliometric Analysis .....	..... LIU Xiao-yan, FAN Ya-nan, LIU Peng, <i>et al.</i> (5169)
Spatial and Temporal Distribution and Source Variation of Heavy Metals in Cultivated Land Soil of Xiangzhou District Based on EBK Interpolation Prediction and GDM Model .....	..... GAO Hao-ran, ZHOU Yong, LIU Jia-kang, <i>et al.</i> (5180)
Identification of Soil Heavy Metal Sources Around a Copper-silver Mining Area in Ningxia Based on GIS .....	..... ZHANG Kou-kou, HE Jing, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (5192)
Effect of Aging on Stabilization of Cd ²⁺ Through Biochar Use in Alkaline Soil of Bayan Obo Mining Area .....	..... WANG Zhe, CHENG Jun-li, BIAN Yuan, <i>et al.</i> (5205)
Preparation of Magnetic Iron Oxide/Mulberry Stem Biochar and Its Effects on Dissolved Organic Carbon and Arsenic Speciation in Arsenic-Contaminated Soils .....	..... LU Lin, YAN Li-ling, LIANG Mei-na, <i>et al.</i> (5214)
Effects of Oyster Shell Powder and Lime on Availability and Forms of Phosphorus and Enzyme Activity in Acidic Paddy Soil .....	..... ZHAO Li-fang, HUANG Peng-wu, YANG Cai-di, <i>et al.</i> (5224)
Effects of Interaction of Zinc and Cadmium on Growth and Cadmium Accumulation of <i>Brassica campestris</i> L. ....	..... SHUAI Zu-ping, LIU Han-yi, CUI Hao, <i>et al.</i> (5234)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in Vegetable Field in Kaizhou, Chongqing .....	..... FANG Lin-fa, YE Ping-ping, FANG Biao, <i>et al.</i> (5244)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Carbon Storage in the Source Region of the Yellow River Based on InVEST and GeoSoS-FLUS Models and Its Response to Different Future Scenarios .....	..... HOU Jian-kun, CHEN Jian-jun, ZHANG Kai-qi, <i>et al.</i> (5253)
Carbon Sequestration Characteristics of Different Restored Vegetation Types in Loess Hilly Region .....	..... XU Xiao-ming, ZHANG Xiao-ping, HE Liang, <i>et al.</i> (5263)
Response of Soil Multifunctionality to Reduced Microbial Diversity .....	..... CHEN Gui-xian, WU Chuan-fa, GE Ti-da, <i>et al.</i> (5274)
Effect of Nitrogen Addition on Soil Fungal Diversity in a Degraded Alpine Meadow at Different Slopes .....	..... SU Xiao-xue, LI Xi-lai, LI Cheng-yi, <i>et al.</i> (5286)
Comparative Energy Consumption Structure and Mode between China and Major Energy-Consuming Countries Under the Background of Carbon Emission Reduction .....	..... LI Hui, PANG Bo, ZHU Fa-hua, <i>et al.</i> (5294)
Spatialization and Spatio-temporal Dynamics of Energy Consumption Carbon Emissions in China .....	..... HAO Rui-jun, WEI Wei, LIU Chun-fang, <i>et al.</i> (5305)
Carbon Dioxide Mitigation Co-effect Analysis of Structural Adjustment Measures in the "2+26" Cities in the Jing-Jin-Ji Region and Its Surroundings .....	..... YANG Tian-qi, WANG Hong-chang, ZHANG Chen, <i>et al.</i> (5315)
Policy Analysis in Plastic Pollution Governance and Recommendations in China .....	..... LI Huan, ZHU Long, SHEN Qian, <i>et al.</i> (5326)