Eco-Environmental Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2020
Vol.41 No.5
第41卷 第5期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第41卷 第5期
2020年5月15日

目 次

上海大气 $PM_{2.5}$ 来源解析对比:基于在线数据运用3种受体模型 …… 周敏(1997)
不同浓度臭氧对单颗粒气溶胶化学组成的影响 …… 吴梦曦, 成春雷, 黄渤, 李梅, 陈多宏(2006)
二次有机气溶胶壳对氯化钠核吸湿性的影响:基于单颗粒微观尺度 …… 张淑佳, 徐亮, 郭新梅, 黄道, 李卫军(2017)
城区与县区不同空气质量下碳组分污染特征对比分析 …… 李欣悦, 张凯山, 邓林俐, 向锌鹏, 武文琪, 殷子渊(2026)
临沂市 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中元素分布特征及来源解析 …… 陆平, 赵雪艳, 殷宝辉, 张楠, 王歆华, 余浩, 杨文, 王晓丽(2036)
西安市秋冬季市区与山区微生物气溶胶组成特征及来源 …… 谢雯文, 路瑞, 慕飞飞, 戚玉珍, 白文艳, 李彦鹏(2044)
北京市典型餐饮企业大气污染物排放特征 …… 何万清, 王天意, 邵霞, 聂磊, 石爱军(2050)
基于随机森林模型的中国 $PM_{2.5}$ 浓度影响因素分析 …… 夏晓圣, 陈菁菁, 王佳佳, 程先富(2057)
大气污染联合治理分区视角下的中国 $PM_{2.5}$ 关联关系时空变异特征分析 …… 杨文涛, 黄慧坤, 魏东升, 赵斌, 彭焕华(2066)
基于地-空观测数据的粤港澳大湾区大气污染调查及时空演变特征 …… 王耀庭, 梁加成, 郑祚芳, 李青春, 李威, 窦有俊(2075)
龙子祠泉域岩溶地下水水化学特征及成因 …… 唐春雷, 郑秀清, 梁永平(2087)
三峡水库总磷时空变化特征及滞留效应分析 …… 唐小娅, 童思陈, 黄国鲜, 许光祥, 李丹(2096)
三峡水库汛后蓄水期典型支流溶解氧与叶绿素a垂向分布特征 …… 杨凡, 纪道斌, 王丽婧, 李虹, 李莹杰(2107)
汉丰湖正式运行年水体营养盐分布特征 …… 付适, 倪九派, 何丙辉, 李天阳, 唐毅, 钱田, 向可翠(2116)
白洋淀水体富营养化和沉积物污染时空变化特征 …… 刘鑫, 史斌, 孟晶, 周云桥, 可欣, 王铁宇(2127)
新安江水库悬浮颗粒物时空分布、沉降通量及其营养盐效应 …… 史鹏程, 朱广伟, 杨文斌, 许海, 朱梦圆, 刘明亮, 虞左明, 吴志旭, 郑文婷, 王裕成, 笪文怡, 胡林娜(2137)
不同水文情景下高邮湖、南四湖和东平湖有色可溶性有机物的生物可利用性特征 …… 张柳青, 石玉, 李元鹏, 郭燕妮, 周蕾, 周永强, 张运林, 杨艳(2149)
水源水库藻类功能群落演替特征及水质评价 …… 李衍庆, 黄廷林, 张海涵, 温成成, 杨尚业, 林子深, 高欣(2158)
人工强制混合对金盆水库水体藻类群落结构时空演替的影响 …… 王晨旭, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 徐金兰, 司凡, 张晗, 路林超(2166)
雄安新区-白洋淀冬季冰封期水体好氧反硝化菌群落空间分布特征及驱动因素 …… 周石磊, 孙悦, 岳哿丞, 张航, 王周强, 刘世崇, 彭瑞哲, 苑世超, 李再兴, 崔建升(2177)
分层型水库水体好氧不产氧光合细菌时空演替特征 …… 张海涵, 王燕, 黄廷林, 王晨旭, 路林超, 司凡, 李楠, 刘凯文, 闫苗苗, 苗雨甜(2188)
大型通江湖泊有色可溶性有机物对不同水文情景的响应 …… 郭燕妮, 李元鹏, 石玉, 张柳青, 周蕾, 周永强, 张运林, 韩龙飞(2198)
秦岭北麓河流夏季有色溶解有机物分布特征及影响因素 …… 林子深, 黄廷林, 杨尚业, 温成成, 李衍庆, 周石磊, 宋选社(2210)
长江下游支流水体中多环芳烃的分布及生态风险评估 …… 贾天琪, 雷荣荣, 武小琳, 倪涛涛, 孙树睿, 郭伟, 刘文彬(2221)
太湖水体中NSAIDs的时空分布规律和生态风险评价 …… 廉杰, 李祎飞, 王晓暄, 叶彬, 邹华, 史红星(2229)
8种典型PhACs在水中的赋存、生态风险及其对大型溞的影响 …… 徐鑫磊, 刘建超, 陆光华(2239)
我国南方桉树人工林区水库沉积物污染物的分布特征及迁移规律 …… 朱雅, 李一平, 罗凡, 李荣辉, 黄列, 程一鑫, 蒋裕丰(2247)
基于连续监测的城市内河返黑返臭机制初探:以南宁市二坑溪为例 …… 李永新, 王威, 何姝, 申泰铭(2257)
城郊流域源汇景观格局与水体抗生素的关系 …… 李敏, 唐剑锋, 陈利顶, 赵方凯, 冯青郁, 杨磊(2264)
城市雨水径流中溶解性有机物的分子化学多样性 …… 聂云汉, 陈浩, 李磊, 朱弈, 赵昕, 贾其隆, 徐慧婷, 叶建锋(2272)
方解石/氯磷灰石混合物添加对水体内源磷迁移转化的调控效应和机制 …… 柏晓云, 林建伟, 詹艳慧, 常明玥, 吴俊麟, 辛慧敏, 黄良君(2281)
不同环境条件下水铁矿和针铁矿纳米颗粒稳定性 …… 王智巧, 马杰, 陈雅丽, 翁莉萍, 顾亚陶, 李永涛(2292)
向日葵秸秆生物炭强化Fe(Ⅲ)/$S_2O_8^{2-}$ 体系降解苯甲酸 …… 孙鹏, 张凯凯, 张玉, 张延荣(2301)
非活化单过硫酸盐降解柳氮磺胺吡啶:动力学及机制 …… 丁曦, 张学维, 周润生, 宋哲, 严佳颖, 周磊, 修光利(2310)
贵州某规模化养猪场废水中抗生素的污染特征及去除效果 …… 杨钊, 李江, 向福亮, 李彦澄, 马凯, 谢锋(2320)
新型填料A/O生物滤池处理低碳氮比农村污水脱氮 …… 赵远哲, 杨永哲, 王海燕, 储昭升, 常洋, 董伟羊, 闫国凯, 王欢, 李丛宇(2329)
贫营养好氧反硝化菌株的脱氮特性及氮/碳平衡分析 …… 文刚, 王彤, 黄廷林, 万琪琪, 曹瑞华, 寇莉青, 杨尚业(2339)
连续流SNAD工艺处理猪场沼液启动过程中微生物种群演变及脱氮性能 …… 秦嘉伟, 信欣, 鲁航, 张萍萍, 王露蓉, 邹长武, 郭俊元(2349)
不同培养条件厌氧氨氧化颗粒污泥性质及微生物群落结构差异 …… 姜滢, 郭萌蕾, 谢军祥, 常尧枫, 谢嘉玮, 陈重军, 沈耀良(2358)
反硝化除磷耦合部分亚硝化-厌氧氨氧化一体式工艺的启动 …… 陈亚, 印雯, 张星星, 张钰, 宋吟玲, 吴鹏, 徐乐中(2367)
土壤环境承载力评价体系构建与应用 …… 李笑诺, 丁寿康, 陈卫平, 王夏晖, 吕斯丹, 刘睿(2373)
磁性生物炭的合成及对土壤重金属污染的钝化效果 …… 王俊楠, 程珊珊, 展文豪, 任强, 马晓宇, 王洋洋(2381)
还原增溶强化EGTA淋洗修复重金属污染土壤 …… 张金永, 朱玉婷, 王明新, 韩莹, 葛嘉琦(2390)
不同价态铬和土壤理化性质对大麦根系毒性阈值的影响 …… 付平南, 贡晓飞, 罗丽韵, 王琪, 李花粉(2398)
生物炭施用对紫色土旱坡地土壤氮流失形态及通量的影响 …… 王舒, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 慈恩, 徐国鑫, 李娇, 高明(2406)
长期撂荒恢复土壤团聚体组成与有机碳分布关系 …… 王兴, 钟泽坤, 张欣怡, 吴少君, 卢绪巧, 杨改河, 任成杰, 韩新辉(2416)
施用生物炭对墁土土壤微生物代谢养分限制和碳利用效率的影响 …… 王强, 耿增超, 许晨阳, 郭靖宇, 李倩倩, 刘莉丽, 赵汉红, 杜旭光(2425)
间种高粱及施用大颗粒尿素对茶园 N_2O 排放的影响 …… 张珂彬, 刘新亮, 康曼, 王毅, 沈健林, 李勇(2434)
缙云山森林植被类型对土壤产 N_2O 相关功能微生物的影响 …… 王鋆燕, 王富华, 罗东海, 吕盛, 王子芳, 高明(2445)
咸水滴灌对棉田土壤 N_2O 排放和反硝化细菌群落结构的影响 …… 郭慧楠, 马丽娟, 黄志杰, 李美琪, 侯振安, 闵伟(2455)
有机质提升对酸性红壤氮循环功能基因及功能微生物的影响 …… 储成, 吴赵越, 黄欠如, 韩成, 钟文辉(2468)
模拟酸雨对毛竹阔叶林过渡带土壤真菌结构及其多样性的影响 …… 王楠, 潘小承, 王传宽, 白尚斌(2476)
海洋沉积物中细菌DNA和RNA水平群落差异 …… 李明月, 杨雨虹, 米铁柱, 贺惠, 甄毓(2485)
2003~2013年中国湿地变化的空间格局与关联性 …… 周婷, 马姣娇, 徐颂军(2496)
《环境科学》征订启事(2086) 《环境科学》征稿简则(2187) 信息(2209, 2263, 2309)

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第41卷第5期 2020年5月
Vol.41, No.5 May, 2020

间种高粱及施用大颗粒尿素对茶园N_2O排放的影响

张珂彬[1,2,3], 刘新亮[1,2*], 康曼[4], 王毅[1,2], 沈健林[1,2], 李勇[1,2*]
(1. 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, 长沙 410125; 2. 中国科学院长沙农业环境观测研究站, 长沙 410125; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128)

摘要: 茶园施肥量大、氧化亚氮(N_2O)排放系数高,且近年来我国茶园面积不断扩大,使茶园成为重要的农业N_2O排放源,亟需有效的茶园N_2O减排措施. 本研究在我国中亚热带典型丘陵茶园,通过设置间种高粱、施用大颗粒尿素和常规施肥 3 种管理措施,观测不同管理措施下茶园土壤N_2O及相关环境因子动态,旨在解析茶园土壤N_2O排放的主控因子和明确提出的减排措施的有效性. 2 a 的田间试验结果表明:① 茶园土壤N_2O排放通量与土壤化学性质、温度及降雨有显著的相关性,土壤物理性质和土壤化学性质的交互作用对N_2O排放影响最大,土壤化学性质中的NO_3^--N含量是决定N_2O排放量大小的最主要因素,茶园土壤N_2O减排研究的工作重点在于如何减小土壤中的NO_3^--N含量;② 间种高粱在未影响茶叶产量的前提下减少了 51.2% 的N_2O排放,从缓解全球气候变暖角度看,间种高粱是本研究中最佳的茶园管理措施;③ 施用大颗粒尿素在提高 29.5% 的茶叶产量同时减少了 34.7% 的N_2O排放,从兼顾经济效益及缓解全球气候变暖的角度看,茶园中施用大颗粒尿素则是本研究中最佳的施肥措施.

关键词:茶园; 氧化亚氮(N_2O); 生物硝化抑制剂; 高粱; 缓释氮肥; 大颗粒尿素
中图分类号: X144; X16 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2020)05-2434-11 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201911090

N_2O Emissions from Tea Plantations with Sorghum Intercropping and Application of Big Urea Pills

ZHANG Ke-bin[1,2,3], LIU Xin-liang[1,2*], KANG Man[4], WANG Yi[1,2], SHEN Jian-lin[1,2], LI Yong[1,2*]
(1. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Regions, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2. Changsha Research Station for Agricultural & Environmental Monitoring, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. College of Resources and Environmental Science, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: A large amount of fertilizers are applied to the tea plantations resulting in high nitrous oxide (N_2O) emissions. The area of Chinese tea plantations has been expanding in recent years, making them an important source of agricultural N_2O emissions. There is an urgent need for effective mitigation measures for N_2O emissions from tea plantations. In this study, the N_2O emission flux and related environmental factors are measured in Chinese mid-subtropical typical hilly tea plantation under three kinds of management measures, namely intercropping sorghum, applying big urea pills, and under conventional fertilization conditions. The aim of this experiment is to determine the main factors controlling N_2O emissions from the soils of the tea plantation and confirm the true effectiveness of the proposed N_2O emission mitigation measures. The results of a 2-year field experiment show that: ① N_2O emissions were significantly correlated with soil chemical properties, temperature and rainfall, interaction between soil physical and chemical properties; soil chemical properties have the greatest impact on soil N_2O emissions. The concentration of soil NO_3^--N is the most important factor determining the size of N_2O flux in the tea plantation. The most important task of N_2O emission mitigation research in the tea plantation is to reduce the concentration of soil NO_3^--N; ②sorghum intercropping reduces N_2O emissions by 51.2% while not affecting the tea yield. From the perspective of mitigating global warming, sorghum intercropping is the best tea plantation management measure per the results of this study; ③ applying big urea pills effectively increases tea yield while simultaneously reducing the N_2O emissions by 34.7%. From the perspective of balancing economic benefits as well as mitigating global warming, application of big urea pills is undoubtedly the best tea plantation management measure as indicated by this study.

Key words:tea plantation; nitrous oxide (N_2O); biological nitrification inhibitor; sorghum; controlled release of nitrogen fertilizer; big urea pill

N_2O是继 CO_2 和 CH_4 之后又一具有重要影响的温室气体,其百年尺度单位质量的增温潜势是 CO_2 的 265 倍[1],此外,有研究显示 21 世纪臭氧层的破坏与其紧密相关[2]. 农田土壤是大气中N_2O主要来源,占N_2O人为排放源的 59.4%[1]. 土壤N_2O排放主要来源于土壤微生物参与的硝化和反硝化过程[3],但茶园土壤反硝化作用引起的N_2O排放更多[4]. 氮肥过量施用是茶园土壤N_2O过高的重要原因[5,6],且

收稿日期: 2019-11-11; **修订日期**: 2019-12-05
基金项目: 国家自然科学基金项目(41671243)
作者简介: 张珂彬(1995~),男,硕士研究生,主要研究方向为茶园温室气体N_2O减排,E-mail: 1398549789@qq.com
* 通信作者,E-mail:xlliu@isa.ac.cn; yli@isa.ac.cn

茶园土壤N_2O排放系数远高于其他土地利用方式土壤，如：水稻、菜地及其他旱地土壤[7,8]. 因此，茶园合理施用氮肥及选择适宜的管理措施对减少茶园土壤N_2O十分重要.

我国是世界上最大的茶叶生产国，2017 年我国茶叶种植面积及年产量分别占到世界的 54.6% 和 40.5%[9,10]. 近年来，由于市场对茶叶需求量的急剧增加，茶农为了提高产量，在施肥过程中惯于过量施用氮肥，氮肥的施用量一般为 450 ~ 1 200 $kg·hm^{-2}$[11,12]，在某些地区甚至高达 2 600 $kg·hm^{-2}$[7]. 2013 年我国茶园N_2O-N估计排放量约为 40.90 Gg，占全球茶园N_2O排放量的 85.0%[13]，已成为重要的排放源. 因此，寻求合理的茶园N_2O减排措施对我国茶产业的绿色发展具有重要意义.

硝化抑制剂及氮肥类型对氮素在土壤-植物-大气间的循环具有重要影响. 硝化抑制剂能够抑制氨氧化细菌和氨氧化古菌活性，延缓硝化过程，被称为氮肥增效剂. 目前已被广泛研究的化学硝化抑制剂（DCD、DMPP 及 Nitrapyrin 等）由于其价格昂贵及具有一定毒性限制了其在农业生产中的应用[14,15]. 近年来，发现某些植物根系分泌物对土壤硝化微生物活性具有特定抑制能力，科学家将具有这种效应的化合物或植物称为生物硝化抑制剂（BNIs），在目前所研究的作物中，高粱显示出较高的生物硝化抑制能力[16~18]，Zhang 等[19]2 a 的蔬菜田间试验显示施尿素同时间种高粱比单施尿素每年减少 18.1% 的N_2O. 与其他作物相比，茶园氮肥利用率明显偏低，在我国，茶园氮肥利用率仅有 30% 左右[20]，氮肥利用率有较大的提升空间，与常规氮肥相比，缓控释氮肥由于氮素释放速率较低能够有效提高氮肥利用率，从而可能减少土壤氮素以N_2O等气体形式的损失. Deng 等[21]的研究表明施用硫包衣尿素茶园土壤N_2O排放量仅为施用有机肥的 51.1%，有巨大的N_2O减排潜力. 大颗粒尿素由于其直径较大，与常规尿素相比其氮素释放速率较低，但其生产使用多见于美国等发达国家，国内目前罕见其使用. 然而，目前有关在茶园中使用生物硝化抑制剂高粱及缓释氮肥大颗粒尿素对茶园土壤N_2O排放的影响还鲜见报道. 本文以中亚热带典型丘陵茶园为研究对象，设置间种高粱（SGM）、施用大颗粒尿素（UBDP）及施用常规尿素（CON）这 3 种措施，开展 3 种不同管理措施下茶园土壤N_2O排放周年观测，并同步观测土壤理化性质、气候因子和茶叶产量，明确 3 种措施茶园土壤N_2O排放通量，解析影响茶园土壤N_2O排放的主要影响因素，以期为开展进一步的茶园土壤N_2O减排研究提供实践参考.

1　材料与方法

1.1　研究区概况

试验于中国科学院长沙农业环境观测研究站（113°18′ ~ 113°26′E，28°30′ ~ 28°39′N，海拔 186 m）进行，试验地位于湖南长沙市长沙县百里茶廊产业带上，所选供试茶园地势平坦，利于不同措施重复处理设计. 气候为亚热带季风气候，年均气温 17℃ 左右，年均降雨量1 300 mm 左右，降雨多集中在每年 4 ~ 6 月，无霜期 274 d，年日照时数1 663 h. 土壤为花岗岩母质的红壤，为沙壤土（黏粒含量为 24.5%），0 ~ 20 cm 土壤基本理化性质为：全氮含量 0.74 $g·kg^{-1}$，全磷含量 0.35 $g·kg^{-1}$，有机碳含量 9.65 $g·kg^{-1}$，容重 1.25 $g·cm^{-3}$，pH 为 4.16.

1.2　试验设计

本试验共设置 3 个处理，分别为间种生物硝化抑制剂高粱（SGM）、施用缓释氮肥大颗粒尿素（UBDP）及施用常规尿素（CON），见图 1. 每个处理 3 个重复，共 9 个小区，每个小区面积 60 m^2（10 m × 6 m），不同处理茶园小区随机区组设计. 3 个处理氮肥施用量均为 450 $kg·hm^{-2}$，分两次施肥，一次为 12 月底施入底肥菜籽饼（100 $kg·hm^{-2}$），另一次在 3 月中旬左右施入化肥（350 $kg·hm^{-2}$），其中，SGM 和 CON 施入常规尿素，UBDP 施入大颗粒尿素，施肥方式为茶垄单侧沟施，深度为 10 cm. 前期预试验发现

图 1　试验中使用的高粱、大颗粒尿素及常规尿素

Fig. 1　Application of sorghum intercropping, big urea pills, and conventional urea in the study

高粱种子在茶园酸性土壤中不易萌发,长势较差,故在随后试验中高粱改为移栽方式进行间种,移栽日期选择高粱幼苗已较为粗壮时期,为每年 5 月上旬左右,移栽点位于施肥沟上,株距 30 cm;待秋季高粱死亡后将其植株体进行还田处理. 茶垄宽 1 m,每条茶垄间隔 0.5 m,茶垄上种植 2 行茶树,每年采茶 4 次.

1.3 气样采集及N_2O排放通量分析

气样通过静态密闭箱采集,N_2O浓度通过气相色谱仪进行测定. 每个小区设置两个采样箱,一个采样箱罩住 1/2 施肥侧垄间土壤和茶垄单侧茶树,另一采样箱罩住 1/2 未施肥侧垄间土壤和茶垄另一侧茶树[22]. 于 2017 年 4 月中旬开始进行气样采集,至 2019 年 4 月中旬气样采集结束. 气样采集时间为上午 09:00 ~ 11:00[23],采集频率每周 1 次,施肥后加密采集,为每周 2 次,加密采样时间为 1 个月. 采样箱罩住底座后每隔 8 min 采集一个样品,共采集 5 个样品,持续 40 min,根据此时间段采样箱内N_2O浓度线性增加的速率确定N_2O小时排放通量. 使用气相色谱仪(Agilent 7890D,美国)测定气样中N_2O浓度,年累积N_2O-N排放量($kg\cdot hm^{-2}$)采用式(1)计算:

$$F = \left(\sum_{i=1}^{n-1} \left[f_i + \frac{(f_i + f_{i+1}) \times (t_{i+1} - t_i - 1)}{2} \right] + f_n \right) \times 24 \times \frac{365}{t_n} \times \frac{10^4}{10^9} \quad (1)$$

式中,f 表示N_2O-N排放通量[$\mu g\cdot(m^2\cdot h)^{-1}$],$t$ 表示试验期间所经历的天数(d),1,…,n 表示采样顺序. N_2O排放系数(emission factor, EF)的计算公式见式(2):

$$EF = \frac{E - E_0}{N} \quad (2)$$

式中,E 为施肥土壤N_2O-N年累积排放总量,E_0 表示茶园土壤N_2O-N背景排放总量,N 表示茶园单位面积施氮量.

1.4 土壤样品采集及测定

土壤样品为混合样品,采集时用直径 5 cm 的土钻在静态箱底座外 3 ~ 4 m 内采集 3 个 0 ~ 20 cm 表层土壤样品,混合为一个土壤样品,土样采集点分别为与施肥点、垄上和垄间. 采集土样过 2 mm 筛后进行土壤理化性质测定,分为两部分,一部分用来测定土壤铵态氮(NH_4^+-N)、硝态氮(NO_3^--N)和土壤可溶性有机碳(DOC),另一部分用来测定土壤重量含水率. 土壤经 0.5 $mol\cdot L^{-1}$ K_2SO_4 浸提,振荡 1 h 后用定性滤纸过滤,用 AA3 流动分析仪(Fiastar 5000, FOSS, Hillerød, 丹麦)测定滤液中NH_4^+-N和NO_3^--N浓度,用岛津 TOC-TN 分析仪(Shimadzu Corp., Kyoto, 日本)测定滤液中 DOC 浓度,随后将其转换为土壤中NH_4^+-N 含量($mg\cdot kg^{-1}$)、NO_3^--N 含量($mg\cdot kg^{-1}$)和 DOC 含量($mg\cdot kg^{-1}$). 将新鲜土壤在 105℃烘箱内烘 24 h 计算土壤重量含水率,采用式(3)计算土壤充水孔隙度(WFPS)[24]:

$$WFPS(\%) = \frac{SWC}{\text{土壤总孔隙度}} \times 100 \quad (3)$$

式中,SWC = 土壤重量含水率 × 土壤容重,土壤总孔隙度 = 1 − 土壤容重/2.65.

1.5 气象数据采集

利用小型自动气象站长期观测空气温度和降水量,采用水银温度计测定土壤温度.

1.6 数据分析

使用数据分析软件 R 对数据进行统计分析和可视化,主要分析方法包括相关性分析、单因素方差分析、逐步多元线性回归、方差分解及分类与回归树分析;使用 R 基础包和 ggplot2 包等相关包进行作图[25~28].

分类与回归树是一种二元递归分解方法,可以产生树的模型,能够模拟预测变量之间的相互作用,具有层次结构特点,可以用来识别对响应变量具有显著贡献的变量.

2 结果与分析

2.1 气象因子与土壤理化性质动态

年际间降雨量变化明显,第一年(2017-04-16 ~ 2018-04-15)年降雨量为1 427.02 mm,第二年(2018-04-16 ~ 2019-04-15)年降雨量为 906.30 mm,第二年年降雨量仅为第一年降雨量的 63.5%. 降雨量季节分布不均,两年间雨季(4 ~ 9 月)降雨量分别占全年总降雨量的 71.2% 和 30.5%;第二年雨季前期(2 个月)具有明显降雨,但在后期(4 个月)处于干旱期,基本无降雨,第二年旱季(10 月 ~ 次年 3 月)降雨较多,主要集中在后 4 个月(图 2).

不同管理措施土壤温度具有明显的季节变化趋势(图 3),每年 7 ~ 8 月为最热月份, 12 月 ~ 次年 1 月为最冷月份, 1 月底天气逐渐变暖, 8 月末气温开始回落,逐渐进入湿冷冬季. SGM、UBDP 及 CON 土壤平均温度分别为 16.91、16.97 和 16.92℃,各措施间土壤平均温度无显著差异,年际间差异较小.

WFPS 呈现明显的季节变化趋势,每年 4 月前后出现明显波峰,每年 9 月前后出现明显波谷;不同管理措施间 WFPS 动态变化趋势相近(图 4),各措施间平均 WFPS 无显著差异.

土壤NH_4^+-N、NO_3^--N和 DOC 含量动态变化见图

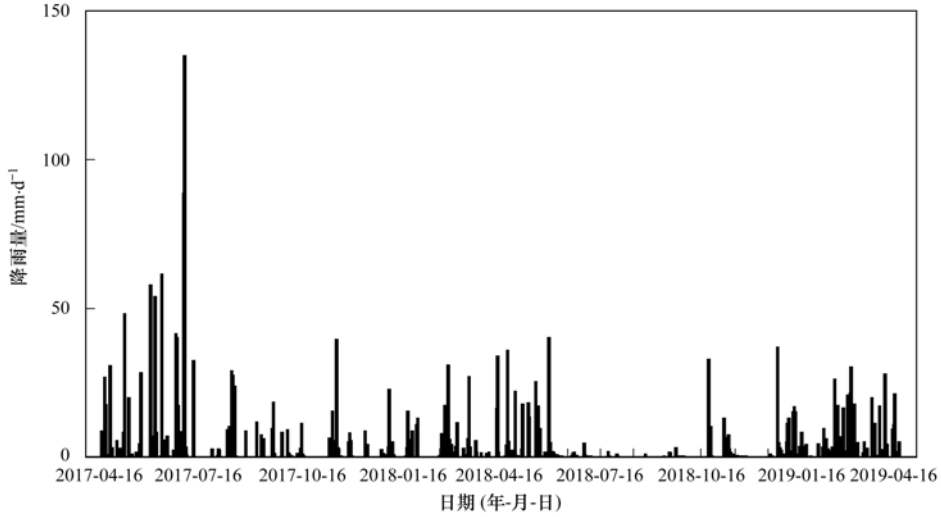

图 2　2017 ~ 2019 年日降雨量

Fig. 2　Dynamics of daily precipitation from 2017 to 2019

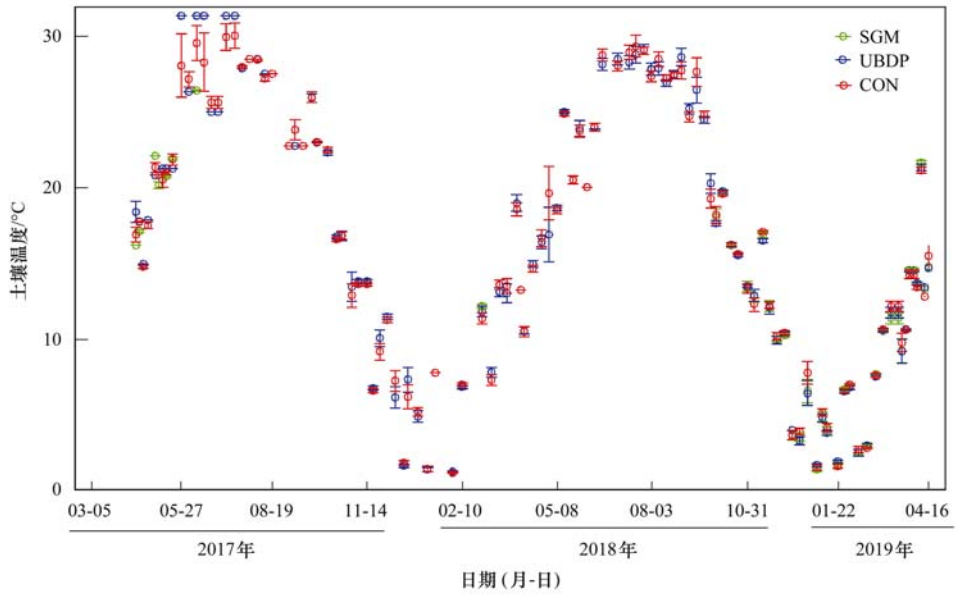

图 3　2017 ~ 2019 年不同管理措施土壤温度动态变化

Fig. 3　Dynamics of soil temperature under different management measures from 2017 to 2019

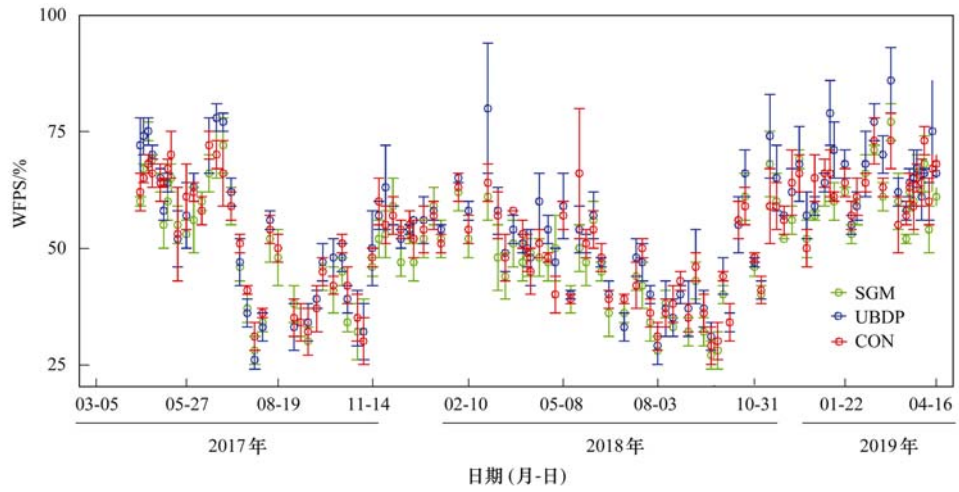

图 4　2017 ~ 2019 年不同管理措施 WFPS 动态变化

Fig. 4　Dynamics of WFPS at different management measures from 2017 to 2019

5. 土壤NH_4^+-N和NO_3^--N含量受施用化肥活动影响较大,化肥施用后,土壤NH_4^+-N和NO_3^--N含量显著增加. SGM 土壤NH_4^+-N含量 2 a 变化范围为 1.94 ~ 255.78 mg·kg^{-1},均值为 21.19 mg·kg^{-1},UBDP 土壤NH_4^+-N 含量 2 a 变化范围为 1.46 ~ 147.2 mg·kg^{-1},均值为 18.11 mg·kg^{-1},CON 土壤NH_4^+-N 含量 2 a 变化范围为 1.14 ~ 150.27 mg·kg^{-1},均值为 22.38 mg·kg^{-1};CON 土壤NH_4^+-N含量均值高于其他两个措施,SGM 土壤NH_4^+-N含量 2 a 的峰值均高于 UBDP 和 CON,UBDP 第一年土壤NH_4^+-N含量峰值低于 CON,但第二年峰值高于 CON. 施入化肥后,土壤能维持 2 个月左右的高NH_4^+-N含量状态. 与土壤NH_4^+-N含量所受化肥施用的影响不同,土壤NO_3^--N含量出现峰值的时间较晚,土壤高NO_3^--N含量能够维持更长的时间,大约为 5 个月左右. SGM 土壤NO_3^--N 含量 2 a 变化范围为 0.72 ~ 27.12 mg·kg^{-1},均值为 8.13 mg·kg^{-1},UBDP 土壤NO_3^--N 含量 2 a 变化范围为 1.11 ~ 35.68 mg·kg^{-1},均值为 9.97 mg·kg^{-1},CON 土壤NO_3^--N含量 2 a 变化范围为 1.25 ~ 38.98 mg·kg^{-1},均值为 10.50 mg·kg^{-1};土

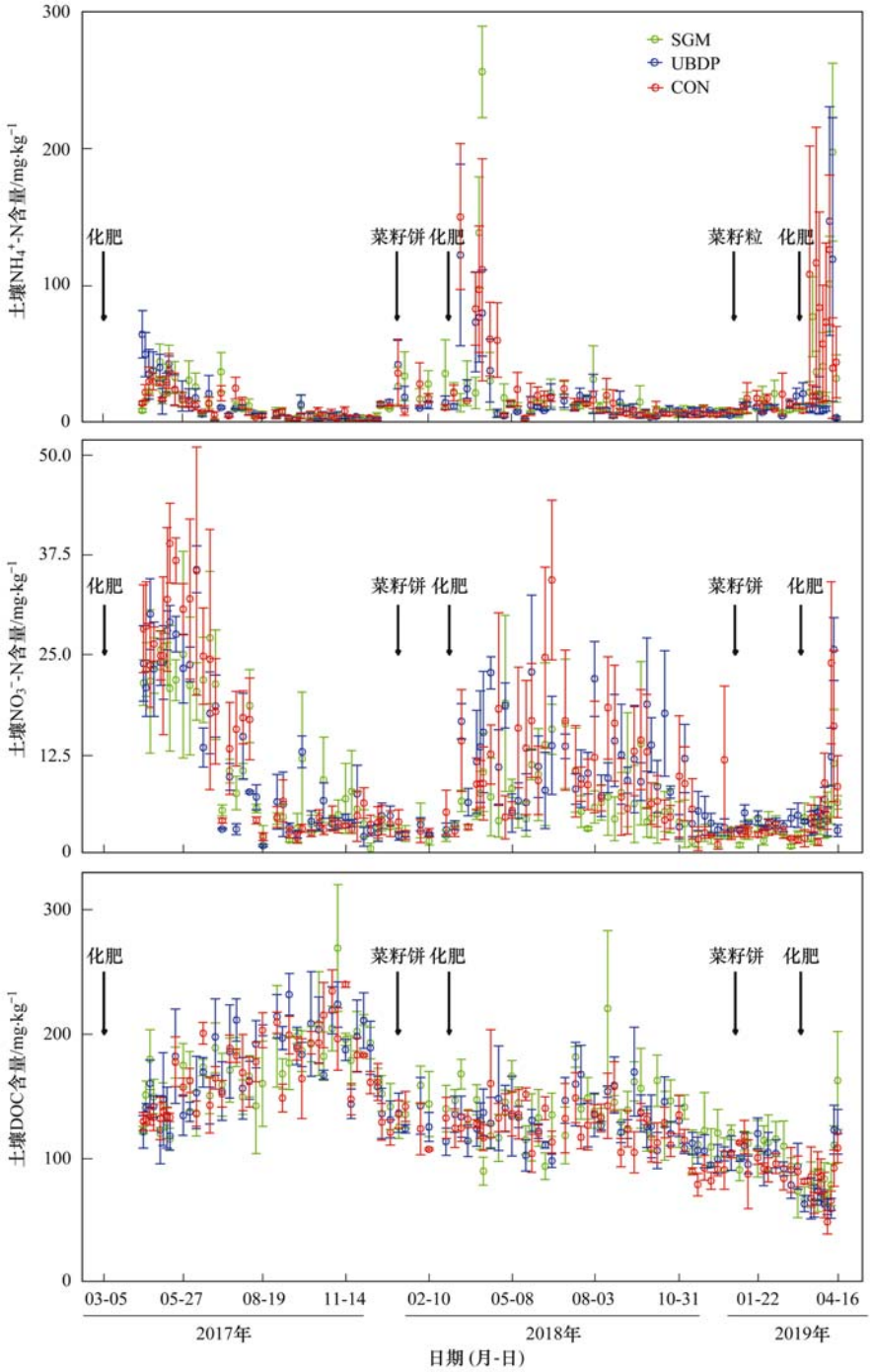

图 5 2017 ~ 2019 年不同管理措施土壤NH_4^+-N、NO_3^--N及 DOC 含量动态变化

Fig. 5 Dynamics of soil NH_4^+-N, NO_3^--N, and DOC contents under different management measures from 2017 to 2019

壤NO_3^--N含量 2 a 均值在 SGM、UBDP 和 CON 中依次升高. SGM、UBDP 及 CON 年均土壤 DOC 含量分别为 141.16、136.46 和 132.91 mg·kg^{-1},各措施间平均 DOC 含量无显著差异. 各措施土壤 DOC 含量从年尺度观察具有下降的趋势,SGM 的 2a 年均土壤 DOC 含量分别为 162.45 mg·kg^{-1} 和 121.03 mg·kg^{-1},UBDP 分别为 153.60 mg·kg^{-1} 和 110.92 mg·kg^{-1},CON 分别为 158.80 mg·kg^{-1} 和 108.41 mg·kg^{-1},各处理第一年年均 DOC 含量明显高于第二年,产生如此差异的主要原因可能在于 2018 年降雨过少,土壤中有机质不能被有效分解所致.

2.2　N_2O排放通量动态及主控因子分析

3 种不同管理措施茶园土壤N_2O排放呈现明显的季节变化特征,高排放期为每年 4 月至 8 月上旬,从 8 月中下旬至次年 3 月为低排放期. 茶园每年施化肥日期为 3 月中旬左右;施入化肥后N_2O排放不会迅速上升,一般经过半个月左右进入高排放期;但施用基肥菜籽饼不会对茶园土壤N_2O排放产生较大影响(图 6). SGM 土壤N_2O排放通量 2 a 变化范围为 15.13 ~ 609.68 μg·(m^2·h)$^{-1}$,均值为 95.52 μg·(m^2·h)$^{-1}$,UBDP 土壤N_2O排放通量 2 a 变化范围为 6.08 ~ 943.14 μg·(m^2·h)$^{-1}$,均值为 130.24 μg·(m^2·h)$^{-1}$,CON 土壤N_2O排放通量 2 a 变化范围为 3.55 ~ 1 276.02 μg·(m^2·h)$^{-1}$,均值为 185.55 μg·(m^2·h)$^{-1}$. 每年土壤N_2O排放通量均值在 SGM、UBDP 和 CON 中依次升高.

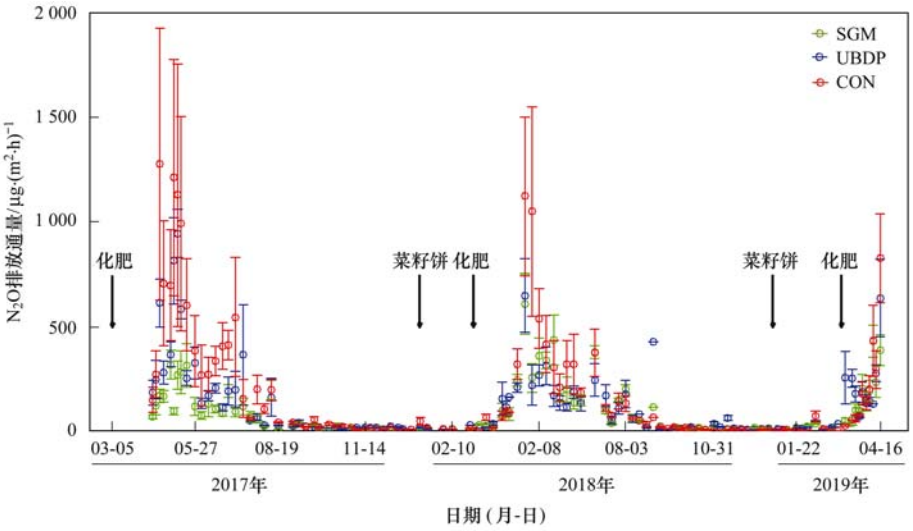

图 6　2017 ~ 2019 年不同管理措施土壤N_2O排放动态变化

Fig. 6　Dynamics of soil N_2O emission under different management measures from 2017 to 2019

N_2O排放通量与土壤NO_3^--N含量、温度(土壤温度和日均气温)及降雨呈现显著正相关关系,SGM 和 UBDP 与土壤NH_4^+-N含量呈现显著正相关性,但 CON 的N_2O排放通量与土壤NH_4^+-N含量却未呈现显著相关性,N_2O排放通量与土壤 DOC 含量未呈现显著相关关系,仅有 CON 的N_2O排放通量与 WFPS 呈现显著正相关性(表 1). 逐步多元线性回归分析结果见表2,WFPS对log(N_2Oflux)影响最为密切,气

表 1　不同处理N_2O排放与环境因子间斯皮尔曼相关系数[1)]

Table 1　Spearman correlation coefficients of N_2O fluxes and the environmental factors under different management measures

处理	环境因子						
	WFPS	T_{soil}	NH_4^+-N	NO_3^--N	DOC	T_{air}	Precip7
SGM	0.09	0.52 ***	0.44 ***	0.62 ***	−0.09	0.54 ***	0.22 *
UBDP	0.11	0.50 ***	0.41 ***	0.53 ***	0.02	0.50 ***	0.26 **
CON	0.26 **	0.28 ***	0.17	0.60 ***	0.04	0.30 ***	0.21 *

1) T_{soil}、T_{air}和 Precip7 分别表示土壤温度、日均气温和累计 7 d 总降雨量;* 表示 $P<0.05$,** 表示 $P<0.01$,*** 表示 $P<0.001$

表 2　不同管理措施N_2O排放与环境因子逐步回归方程参数[1)]

Table 2　Parameters of stepwise regression function for N_2O flux and environmental factors under different management measures

处理	方程参数								统计参数	
	截距	WFPS	log(T_{soil})	log(NH_4^+-N)	log(NO_3^--N)	log(DOC)	T_{air}	Precip7	R^2	P
SGM	4.84	2.23	NS	0.26	0.49	−1.04	0.08	NS	0.60	<0.001
UBDP	2.91	3.31	NS	0.18	0.44	−0.74	0.09	NS	0.54	<0.001
CON	−7.54	4.43	NS	0.60	0.59	1.02	0.09	NS	0.71	<0.001

1)逐步回归分析中,log(N_2O flux)为响应变量;R^2 为判定系数,$P<0.05$ 可进入回归方程,NS 表示环境因子影响不显著

温对 log(N_2O flux)影响较弱;土壤化学性质中,log(NO_3^--N)对 log(N_2O flux)影响程度最大,log(NH_4^+-N)影响程度较小;SGM 和 UBDP 中 log(DOC)对 log(N_2O flux)具有显著正影响,而 CON 中则相反. log(N_2O flux)方差分解结果表明,土壤物理性质[WFPS、log(T_{soil})]和土壤化学性质[log(NH_4^+-N)、log(NO_3^--N)及 log(DOC)]的交互作用对 log(N_2O flux)影响最大(表3).

表3 不同管理措施N_2O排放影响因素方差分解结果[1)]

Table 3 Variance in the decomposition results of influence factors controlling N_2O flux under different management measures

处理	影响因素						
	Phy	Che	Met	Phy&Che	Phy&Met	Che&Met	Phy&Che&Met
SGM	2.49	16.32	14.70	33.98	15.12	2.90	14.48
UBDP	4.79	15.14	14.05	31.44	15.54	5.18	13.85
CON	6.61	20.77	10.17	37.28	9.33	5.19	10.65

1)Phy、Che、Met 分别代表土壤物理性质[WFPS、log(T_{soil})]、土壤化学性质[log(NH_4^+-N)、log(NO_3^--N)及 log(DOC)]及气候因素(T_{air}和 Precip7),其中因子依据逐步多元回归分析结果选择,影响不显著的环境因子不进行方差分解;& 表示不同影响因素间的交互作用

土壤N_2O排放分类与回归树分析结果表明,土壤NO_3^--N含量对N_2O排放通量大小起着决定性的作用,土壤N_2O排放通量随土壤中NO_3^--N含量升高而增加;SGM 中降雨较多同时 DOC 较低或降雨较少但NH_4^+-N较高时容易引起高N_2O排放[图7(a)],UBDP 中气温及 WFPS 较高时会产生高N_2O排放[图7(b)],CON 显示只要NO_3^--N含量高,无论NH_4^+-N含量高低与否,都会产生高N_2O排放,并且NO_3^--N含量较低但气温和降雨较高时会刺激排放更多的N_2O[图7(c)].

2.3 N_2O累计排放量与茶叶产量

SGM 和 UBDP 与 CON 相比表现出较大的减排效果,其减排率分别为 51.2% 和 34.7%, 3 种不同管理措施的排放系数分别为 1.3%、1.8% 和 2.7%. 3 种不同管理措施N_2O 的 2 a 累计排放量未表现出显著差异($P > 0.05$),排放总量分别为 15.35、19.36 和 27.81 kg·hm^{-2}. 2 a 间 3 种不同管理措施N_2O年累计排放量间均未表现出显著差异,SGM 2017 年N_2O年累计排放量低于 2018 年,UBDP 和 CON 两年N_2O年累计排放量差别较小(表4).

3 种不同管理措施间 2 a 茶叶总产量未显示出显著差异,SGM、UBDP 和 CON 茶叶 2 a 总产量分别为 7.90、9.87 和 7.62 t,总量表现为 UBDP > SGM > CON,UBDP 提高了 29.5% 的茶叶产量;3 种措施年际间茶叶产量未显示出显著差异. 2 a 不同管理措施茶叶产量间均没有显著差异,但均表现出第一年产量高于第二年产量(表4).

3 种不同管理措施间 2 a 单位产量N_2O排放均值未显示出显著差异,由于 SGM、UBDP 与 CON 相比减少了N_2O排放,但增加了茶叶产量,所以均值表现为 SGM < UBDP < CON;3 种措施年际间茶叶产量未显示出显著差异. 2 a 间不同管理措施单位产量N_2O排放量间均没有显著差异,SGM 2017 年N_2O年累计排放量低于2018 年,UBDP 和 CON 两年单位产量N_2O排放量差别较小(表4).

表4 不同管理措施N_2O年累计排放量、茶叶产量及单位茶叶产量的N_2O年累计排放量[1)]

Table 4 Annually cumulative N_2O emissions, tea yield, and yield-scaled N_2O emissions under different management measures

测定指标	年份	处理		
		SGM	UBDP	CON
N_2O-N年累计排放量/kg·(hm^2·a)$^{-1}$	2017	5.76 ± 0.53^a	9.61 ± 0.72^a	14.98 ± 4.38^a
	2018	9.59 ± 0.55^a	9.75 ± 2.02^a	12.83 ± 2.52^a
	2 a 均值	7.68 ± 1.91	9.68 ± 0.07	13.90 ± 1.07
茶叶产量/t·a^{-1}	2017	4.01 ± 0.27^a	5.10 ± 1.00^a	3.89 ± 0.22^a
	2018	3.88 ± 0.40^a	4.77 ± 0.97^a	3.72 ± 0.38^a
	2 a 均值	3.95 ± 0.06	4.94 ± 0.17	3.81 ± 0.08
单位产量N_2O-N排放/kg·t^{-1}	2017	1.45 ± 0.21^a	2.12 ± 0.63^a	3.97 ± 1.29^a
	2018	2.54 ± 0.37^a	2.49 ± 1.13^a	3.63 ± 0.93^a
	2 a 均值	2.00 ± 0.54	2.31 ± 0.19	3.80 ± 0.17

1)同行相同字母表示差异不显著($P > 0.05$)

3 讨论

3.1 茶园土壤N_2O排放的主要影响因子

有研究表明土壤N_2O产生的主控因子有土壤温度、土壤NH_4^+-N含量、土壤NO_3^--N含量、土壤水分状况以及土壤中的有机物质含量[29],在本研究中,N_2O排放通量与环境因子斯皮尔曼相关分析同样表明,温度、降雨和土壤底物(NH_4^+-N、NO_3^--N和 DOC)含

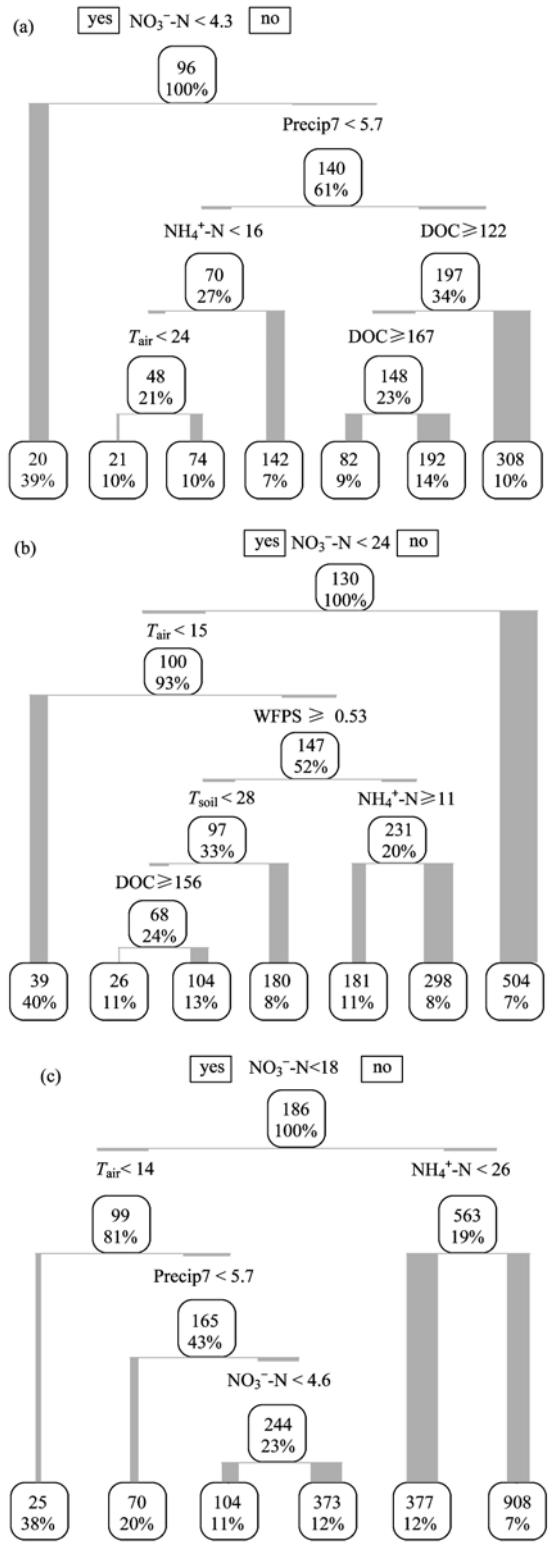

图 7　2017 ~ 2019 年不同管理措施土壤N_2O排放分类与回归树分析

Fig. 7　Classification and regression tree analysis of soil N_2O emission under different management measures from 2017 to 2019

量对茶园土壤N_2O排放具有显著影响. Tokuda 等[6]提出反硝化作用是茶园土壤N_2O产生的主要过程. 且有研究表明,茶园中反硝化菌的数量明显高于土豆地和针叶林,并且氮矿化和土壤硝化过程也比其他类型土壤更为活跃[31]. Huang 等[32]的研究结果表明,铵态氮肥添加硝化抑制剂显著减少茶园土壤N_2O排放,并且茶园土壤施用硝态氮肥较铵态氮肥会排放更多的N_2O,同样表明以NO_3^--N为反应底物的反硝化过程是茶园土壤N_2O产生的主要途径,并且可能主要来源于真菌反硝化过程[4]. 本研究中不同管理措施茶园土壤N_2O排放主控因子分析也发现在影响N_2O排放的主要环境因子中,土壤中的NO_3^--N含量扮演着最重要的角色(图 7). 茶园土壤中高NO_3^--N含量之所以能够促使排放更多的N_2O,可能有两个主要原因,其一是茶园土壤本身属于酸性土壤,而氧化亚氮还原酶对 pH 较为敏感,较低的 pH 会降低反硝化微生物的氧化亚氮还原酶活性[6],其二可能是因为土壤中较高的NO_3^--N含量同样也会使反硝化微生物的氧化亚氮还原酶活性降低[31].

尽管反硝化过程是茶园土壤N_2O产生的主要途径,但以NH_4^+-N为底物的硝化过程同样也会产生N_2O. Jumadi 等[33]表明添加铵态氮和尿素的土壤能够排放更多的N_2O. Hirono 等[12]研究也表明茶园土壤N_2O排放通量与土壤NH_4^+-N含量呈现显著正相关. 在本研究中,SGM 和 CON 中高NH_4^+-N也更倾向于排放更多的N_2O,但在 UBDP 中则表现出相反的现象(图 7). 原因可能在于 UBDP 中施用的缓释肥大颗粒尿素氮素释放速率慢,NH_4^+-N含量较低时可能正表现出较高的硝化速率,土壤中NO_3^--N较高,而引起高N_2O排放,NH_4^+-N含量较高时情况则相反.

参与土壤硝化反应的主要是自养型微生物,而参与反硝化过程的主要是异养型微生物[34~36]. 土壤中 DOC 是异养型微生物的主要能量来源,DOC 含量高则表示土壤反硝化微生物活性高,则更容易产生更多的N_2O,但在本研究中,SGM 和 UBDP 在土壤 DOC 含量较低时容易引起高N_2O排放[图 7(a)和 7(b)]. 酸性条件下 NO_2^- 能与某些有机物质(如酚类化合物、腐殖质等)通过化学反硝化途径反应生成N_2O[37~39]. 尽管在低 pH 时的化学反硝化被视为N_2O的一个产生源加以考虑,但该过程产生的N_2O量远小于硝化和反硝化过程产生的N_2O量,对土壤N_2O排放的贡献量很小,一般情况也不会将其考虑为土壤N_2O的产生途径[36, 40]. SGM 和 UBDP 由于施入化肥而具有充足的底物进行硝化和反硝化过程,土壤 DOC 含量到达一定数值后也不会成为反硝化过程的限制性因子,此时,硝化和反硝化反应的中间物质 NO_2^- 与 DOC 反应进行的化学反硝化可能比一般情况下产生更多的N_2O,从而 SGM 和 UBDP 表现出 DOC 含量较低时容易引起高N_2O排放.

土壤N_2O主要产生于土壤微生物的代谢活动,而土壤温度则会对土壤微生物种群繁殖及体内各种生化反应所需的各种酶活性产生重要影响,蔡延江等[3]的研究表明一定温度范围内,N_2O排放速率随土壤温度升高而增加. 本研究显示气温和土壤温度与茶园土壤N_2O排放通量存在显著的中等相关关系,在不同管理措施中,较高的气温均容易引起N_2O高排放(图7),而气温升高会间接引起土壤温度升高. Fu 等[5]的研究表明茶园土壤N_2O排放通量与采样前 5d 的累计降雨量有明显的相关性. Hirono 等[12]的研究结果显示, 强降雨后茶园土壤排放更多的N_2O. 本研究中同样发现降雨量影响茶园土壤N_2O排放量,N_2O排放通量与累计 7 日总降雨量间有显著的弱相关性,并且在累计 7 日总降雨量较高时,SGM 和 CON 容易产生高N_2O排放[图 7(a)和 7(c)],尽管降雨会明显影响到 WFPS 数值高低,但本研究并未发现N_2O排放通量与 WFPS 间存在显著的相关关系,不过,逐步多元回归分析表明,WFPS 对 log(N_2O flux)影响最大.

3.2 间种生物硝化抑制剂高粱、施用缓释氮肥大颗粒尿素对茶园N_2O排放的影响

茶树是一种喜铵厌硝植物,在供应铵态氮肥的情况下,生长状况更佳[41]. 土壤中的NO_3^--N由于带负电荷不易被土壤微粒吸附而容易从土壤中淋失,其次,NO_3^--N作为茶园土壤N_2O主要产生过程(反硝化反应)的直接底物,其在土壤中的含量大小直接决定了土壤N_2O排放量. 生物硝化抑制剂高粱及缓释氮肥大颗粒尿素理论上能够延缓土壤中的硝化过程,这不仅能够延长对茶树的氮素供应,还能够减少因NO_3^--N淋失造成的水体污染以及由反硝化过程引起的N_2O排放. 本试验也检验了理论的有效性,SGM 和 UBDP 显示出显著的N_2O减排效应,其中 UBDP 有效提高了茶叶产量,但 SGM 并未显著影响茶叶产量.

Zhang 等[19]的研究结果表明,间种高粱能够提高蔬菜产量并且具有 18.1% 的N_2O减排效应. 本研究中,SGM 提高了土壤中NH_4^+-N含量而有效降低了土壤中的NO_3^--N含量,减少了 51.2% 的N_2O排放,是 Zhang 等[19]研究结果的两倍多,但试验结果存在较大误差,因为两年间N_2O减排效果存在较大差异,2017 年较大, 2018 年与 UBDP 相当,因此茶园中应用生物硝化抑制剂高粱的更准确减排结果尚需更长期的观测. 此外,根据王劲松等[42]的研究结果分析,在土壤营养元素供给充足时,单株高粱氮素累计量约为 3.22×10^{-3} kg·hm^{-2},按本研究试验设计估算,则茶园中间种的高粱的氮素年累计量约为 70.85 kg·hm^{-2},因研究中 SGM N_2O 年排放量为 7.68 kg·hm^{-2},CON N_2O年排放量为 13.90 kg·hm^{-2},高粱氮素吸收量远大于 SGM 和 UBDP 的N_2O年排放量,故本研究中间种高粱的生物硝化抑制机制尚需进一步研究;不过,在常规施肥量条件下间种高粱并未导致茶叶产量减少,且有效减小了N_2O排放,因此,SGM 仍可被视为一种茶园N_2O减排的有效措施. 生物硝化抑制剂的概念由 Subbarao 等[43]首次提出,且高粱显示出较高的生物硝化抑制能力[17, 44]. 但是,目前有关生物硝化抑制剂的田间应用报导较少,本研究首次将生物硝化抑制剂高粱应用于茶园N_2O减排研究中,并取得了较好的研究结果. 除高粱外,水稻、花生及草莓等植物均显示出一定的生物硝化抑制能力[15, 16, 18],但有关这些植物的田间应用研究目前鲜见报导. 生物硝化抑制剂同时还具有其他功能,如除草、杀虫剂及改良土壤等[19]. 本研究表明,为促进茶产业的绿色发展,在茶园中使用生物硝化抑制剂是一种强有力的管理措施,但是,不同种类生物硝化抑制剂的硝化抑制差异及对茶园N_2O排放的影响尚需进一步研究.

Deng 等[21]的研究显示茶园中施用控释肥硫包衣尿素与施用有机肥相比能减少 51.1% 的N_2O排放. Wu 等[22]的研究表明茶园中减量施用缓释氮肥与常规施肥相比在减少 26.2% 的N_2O排放同时提高了 31.3% 的茶叶产量. 本研究中,UBDP 与常规施肥相比减少了 34.7% 的N_2O排放,茶叶产量提高了 29.7%,与 Wu 等[22]研究的减排结果较为相近,不过,本研究并未减少缓释氮肥施用量. 大颗粒尿素由于氮素释放速率慢,使土壤中NH_4^+-N两年均值低于 CON,可能更满足茶树的需肥规律,从而促进茶叶产量增加. 两年间 UBDP N_2O排放量相近,N_2O减排效果相近.

4 结论

本研究通过 2 a 田间试验表明,中亚热带茶园土壤N_2O排放量与土壤化学性质、温度及降雨有显著的相关关系,土壤物理性质和土壤化学性质的交互作用对土壤N_2O排放影响最大,土壤化学性质中的NO_3^--N含量是决定茶园N_2O排放量大小的最主要因素,说明茶园土壤N_2O减排研究重点在于如何减小土壤中的NO_3^--N含量. 间种生物硝化抑制剂高粱在未保证茶叶产量的前提下有效减少了茶园N_2O排放,从缓解全球气候变暖角度看,间种高粱是本研究中最佳的茶园管理措施;施用缓释氮肥大颗粒尿素在有效提高茶叶产量的同时也有效减少了土壤N_2O

排放，但减排效应与间种高粱相比较弱，从兼顾经济效益及缓解全球气候变暖的角度看，茶园中施用缓释氮肥大颗粒尿素无疑是本研究中最佳的施肥措施.

参考文献：

[1] IPCC. Climate change 2013：the physical science basis[M]. Cambridge，UK and New York，USA：Cambridge University Press，2013. 714.

[2] Ravishankara A R，Daniel J S，Portmann R W. Nitrous oxide (N_2O)：the dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century[J]. Science，2009，**326**(5949)：123-125.

[3] 蔡延江，丁维新，项剑. 农田土壤N_2O和NO排放的影响因素及其作用机制[J]. 土壤，2012，**44**(6)：881-887.
Cai Y J，Ding W X，Xiang J. Factors controlling N_2O and NO emissions from agricultural soils and their influencing mechanisms a review[J]. Soils，2012，**44**(6)：881-887.

[4] Huang Y，Long X E，Chapman S J，*et al*. Acidophilic denitrifiers dominate the N_2O production in a 100-year-old tea orchard soil[J]. Environmental Science and Pollution Research，2015，**22**(6)：4173-4182.

[5] Fu X Q，Li Y，Su W J，*et al*. Annual dynamics of N_2O emissions from a tea field in southern subtropical China[J]. Plant，Soil and Environment，2012，**58**(8)：373-378.

[6] Tokuda S I，Hayatsu M. Nitrous oxide flux from a tea field amended with a large amount of nitrogen fertilizer and soil environmental factors controlling the flux[J]. Soil Science and Plant Nutrition，2004，**50**(3)：365-374.

[7] Han W Y，Xu J M，Wei K，*et al*. Estimation of N_2O emission from tea garden soils，their adjacent vegetable garden and forest soils in eastern China[J]. Environmental Earth Sciences，2013，**70**(6)：2495-2500.

[8] Akiyama H，Yan X Y，Yagi K. Estimations of emission factors for fertilizer-induced direct N_2O emissions from agricultural soils in Japan：summary of available data[J]. Soil Science and Plant Nutrition，2006，**52**(6)：774-787.

[9] FAO. Faostat-fao's corporate database[EB/OL]. http://www.fao.org/statistics/databases/en/，2019-04-09.

[10] 中华人民共和国国家统计局. 2018中国统计年鉴[EB/OL]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2018/indexch.htm，2019-04-09.

[11] Yao Z，Wei Y，Liu C，*et al*. Organically fertilized tea plantation stimulates N_2O emissions and lowers NO fluxes in subtropical China[J]. Biogeosciences，2015，**12**(20)：5915-5928.

[12] Hirono Y，Nonaka K. Nitrous oxide emissions from green tea fields in Japan：contribution of emissions from soil between rows and soil under the canopy of tea plants[J]. Soil Science and Plant Nutrition，2012，**58**(3)：384-392.

[13] Li Y，Zheng X H，Fu X Q，*et al*. Is green tea still 'green'?[J]. Geo Geography and Environment，2016，**3**(2)：e00021.

[14] Datta A，Adhya T K. Effects of organic nitrification inhibitors on methane and nitrous oxide emission from tropical rice paddy[J]. Atmospheric Environment，2014，**92**：533-545.

[15] 王国强，孙焕明，彭婧，等. 生物硝化抑制剂应用研究进展[J]. 安徽农业科学，2016，**44**(11)：66-69，78.
Wang G Q，Sun H M，Peng J，*et al*. Research progress of the application of biological nitrification inhibitors[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences，2016，**44**(11)：66-69，78.

[16] 张洋，李雅颖，郑宁国，等. 生物硝化抑制剂的抑制原理及其研究进展[J]. 江苏农业科学，2019，**47**(1)：21-26.

[17] Zakir H A K M，Subbarao G V，Pearse S J，*et al*. Detection，isolation and characterization of a root-exuded compound，methyl 3-(4-hydroxyphenyl) propionate，responsible for biological nitrification inhibition by sorghum (*Sorghum bicolor*)[J]. New Phytologist，2008，**180**(2)：442-451.

[18] 曾后清，朱毅勇，王火焰，等. 生物硝化抑制剂——一种控制农田氮素流失的新策略[J]. 土壤学报，2012，**49**(2)：382-388.
Zeng H Q，Zhu Y Y，Wang H Y，*et al*. Biological nitrification inhibitor—a new strategy for controlling nitrogen loss from farmland[J]. Acta Pedologica Sinica，2012，**49**(2)：382-388.

[19] Zhang M，Fan C H，Li Q L，*et al*. A 2-yr field assessment of the effects of chemical and biological nitrification inhibitors on nitrous oxide emissions and nitrogen use efficiency in an intensively managed vegetable cropping system[J]. Agriculture，Ecosystems & Environment，2015，**201**：43-50.

[20] Han W Y，Ma L F，Shi Y Z，*et al*. Nitrogen release dynamics and transformation of slow release fertiliser products and their effects on tea yield and quality[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture，2008，**88**(5)：839-846.

[21] Deng M H，Hou M D，Ohkama-ohtsu N，*et al*. Nitrous oxide emission from organic fertilizer and controlled release fertilizer in tea fields[J]. Agriculture，2017，**7**(3)：29-36.

[22] Wu Y Z，Li Y，Fu X Q，*et al*. Effect of controlled-release fertilizer on N_2O emissions and tea yield from a tea field in subtropical central China[J]. Environmental Science and Pollution Research，2018，**25**(25)：25580-25590.

[23] 陈丹. 茶园土壤N_2O和NO排放的原位观测与模型模拟[D]. 北京：中国科学院大学，2015. 13-26.

[24] Chen D，Li Y，Wang C Q，*et al*. Measurement and modeling of nitrous and nitric oxide emissions from a tea field in subtropical central China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems，2017，**107**(2)：157-173.

[25] R Core Team. R：A language and environment for statistical computing[EB/OL]. https://www.R-project.org/，2019-07-05.

[26] Wickham H. ggplot2：Elegant graphics for data analysis[M]. New York：Springer-Verlag，2016.

[27] Therneau T，Atkinson B. Rpart：recursive partitioning and regression trees[EB/OL]. https://CRAN.R-project.org/package=rpart，2019-04-10.

[28] Milborrow S. Rpart. plot：plot 'rpart' models：an enhanced version of plot. rpart[EB/OL]. https://CRAN.R-project.org/package=rpart.plot，2019-08-21.

[29] Hou M D，Ohkama-ohtsu N，Suzuki S，*et al*. Nitrous oxide emission from tea soil under different fertilizer managements in Japan[J]. CATENA，2015，**135**：304-312.

[30] Tokuda S I，Hayatsu M. Nitrous oxide production from strongly acid tea field soils[J]. Soil Science and Plant Nutrition，2000，**46**(4)：835-844.

[31] Oh K，Kato T，Li Z P，*et al*. Environmental problems from tea cultivation in Japan and a control measure using calcium cyanamide[J]. Pedosphere，2006，**16**(6)：770-777.

[32] Huang Y，Li Y Y，Yao H Y. Nitrate enhances N_2O emission more than ammonium in a highly acidic soil[J]. Journal of Soils and Sediments，2014，**14**(1)：146-154.

[33] Jumadi O，Hala Y，Inubushi K. Production and emission of nitrous oxide and responsible microorganisms in upland acid soil in indonesia[J]. Soil Science and Plant Nutrition，2005，**51**(5)：693-696.

[34] 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N_2O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 N_2O emission[J]. Soils, 2017, **49**(4): 738-744.

[35] 薛建福, 濮超, 张冉, 等. 农作措施对中国稻田氧化亚氮排放影响的研究进展[J]. 农业工程学报, 2015, **31**(11): 1-9.
Xue J F, Pu C, Zhang R, *et al*. Review on management-induced nitrous oxide emissions from paddy ecosystems[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, **31**(11): 1-9.

[36] 蔡延江, 丁维新, 项剑. 土壤N_2O和 NO 产生机制研究进展[J]. 土壤, 2012, **44**(5): 712-718.
Cai Y J, Ding W X, Xiang J. Mechanisms of nitrous oxide and nitric oxide production in soils: a review[J]. Soils, 2012, **44**(5): 712-718.

[37] Thorn K A, Mikita M A. Nitrite fixation by humic substances: nitrogen-15 nuclear magnetic resonance evidence for potential intermediates in chemodenitrification[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, **64**(2): 568-582.

[38] Van Cleemput O, Baert L. Nitrite: a key compound in N loss processes under acid conditions[J]. Plant and Soil, 1984, **76**(1-3): 233-241.

[39] Bremner J M, Blackmer A M, Waring S A. Formation of nitrous oxide and dinitrogen by chemical decomposition of hydroxylamine in soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1980, **12**(3): 263-269.

[40] Bremner J M. Sources of nitrous oxide in soils[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1997, **49**(1-3): 7-16.

[41] 李延升, 杨普香, 李琛, 等. 茶树施氮效应及茶园氮素流失特性、防治措施研究进展[J]. 蚕桑茶叶通讯, 2017, (2): 16-19.

[42] 王劲松, 焦晓燕, 丁玉川, 等. 粒用高粱养分吸收、产量及品质对氮磷钾营养的响应[J]. 作物学报, 2015, **41**(8): 1269-1278.
Wang J S, Jiao X Y, Ding Y C, *et al*. Response of nutrient uptake, yield and quality of grain sorghum to nutrition of nitrogen, phosphorus and potassium[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, **41**(8): 1269-1278.

[43] Subbarao G V, Ishikawa T, Ito O, *et al*. A bioluminescence assay to detect nitrification inhibitors released from plant roots: a case study with brachiaria humidicola[J]. Plant and Soil, 2006, **288**(1-2): 101-112.

[44] Subbarao G V, Nakahara K, Ishikawa T, *et al*. Biological nitrification inhibition (BNI) activity in sorghum and its characterization[J]. Plant and Soil, 2013, **366**(1-2): 243-259.

HUANJING K0EXUE
Environmental Science (monthly)
Vol. 41 No. 5
May 15, 2020

CONTENTS

Comparison of Three Receptor Models for Source Apportionment of $PM_{2.5}$ in Shanghai: Using Hourly Resolved $PM_{2.5}$ Chemical Composition Data ····· ZHOU Min (1997)
Impact of Differents in the Concentrations of Ozone on the Chemical Composition of Single Particles ····· WU Meng-xi, CHENG Chun-lei, HUANG Bo, *et al.* (2006)
Influence of Secondary Organic Coating on Hygroscopicity of a Sodium Chloride Core: Based on Mircro-scale Single Particle Analysis ····· ZHANG Shu-jia, XU Liang, GUO Xin-mei, *et al.* (2017)
Comparative Analysis of Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosol Components in the Atmosphere Between Urban and Suburban Areas ····· LI Xin-yue, ZHANG Kai-shan, DENG Lin-li, *et al.* (2026)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Elements Bonded with $PM_{2.5}$ and PM_{10} in Linyi ····· LU Ping, ZHAO Xue-yan, YIN Bao-hui, *et al.* (2036)
Characteristics and Sources of Microbial Aerosols in Urban and Mountainous Areas in Autumn and Winter in Xi'an, China ····· XIE Wen-wen, LU Rui, MU Fei-fei, *et al.* (2044)
Pollution Characteristics of Cooking Fumes, Particulates, and Non-methane Hydrocarbons in the Exhaust of Typical Beijing Restaurants ····· HE Wan-qing, WANG Tian-yi, SHAO Xia, *et al.* (2050)
$PM_{2.5}$ Concentration Influencing Factors in China Based on the Random Forest Model ····· XIA Xiao-sheng, CHEN Jing-jing, WANG Jia-jia, *et al.* (2057)
Spatio-temporal Variation of $PM_{2.5}$ Related Relationships in China from the Perspective of Air Pollution Regional Linkage Control and Prevention ····· YANG Wen-tao, HUANG Hui-kun, WEI Dong-sheng, *et al.* (2066)
Characteristics of Spatial and Temporal Evolution and Investigation of Air Pollution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area Based on Ground-Space Observation Data ····· WANG Yao-ting, LIANG Jia-cheng, ZHENG Zuo-fang, *et al.* (2075)
Hydrochemical Characteristics and Formation Causes of Ground Karst Water Systems in the Longzici Spring Catchment ····· TANG Chun-lei, ZHENG Xiu-qing, LIANG Yong-ping (2087)
Tempo-spatial and Retention Analysis of Total Phosphorus in the Three Gorges Reservoir ····· TANG Xiao-ya, TONG Si-chen, HUANG Guo-xian, *et al.* (2096)
Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Chlorophyll a in Typical Tributaries During the Impoundment Period of the Three Gorges Reservoir ····· YANG Fan, JI Dao-bin, WANG Li-jing, *et al.* (2107)
Spatial-temporal Distribution of Nutrients in Hanfeng Lake After Official Operation ····· FU Shi, NI Jiu-pai, HE Bing-hui, *et al.* (2116)
Spatio-temporal Variations in the Characteristics of Water Eutrophication and Sediment Pollution in Baiyangdian Lake ····· LIU Xin, SHI Bin, MENG Jing, *et al.* (2127)
Spatial-temporal Distribution of Suspended Solids and Its Sedimentation Flux and Nutrients Effects in Xin'anjiang Reservoir, China ····· SHI Peng-cheng, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, *et al.* (2137)
Bioavailability Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Gaoyou, Lake Nansi, and Lake Dongping Under Different Hydrological Scenarios ····· ZHANG Liu-qing, SHI Yu, LI Yuan-peng, *et al.* (2149)
Succession Characteristics of Algae Functional Groups and Water Quality Assessment in a Drinking Water Reservoir ····· LI Yan-qing, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, *et al.* (2158)
Effect of Artificial Mixing on Temporal and Spatial Succession of Algae Community Structure in Jinpen Reservoir ····· WANG Chen-xu, HUANG Ting-lin, LI Nan, *et al.* (2166)
Spatial Distribution Characteristics and Driving Factors of Aerobic Denitrification Bacterial Community Structure from Baiyangdian Lake in Xiong'an New Area During the Winter Freezing Period ····· ZHOU Shi-lei, SUN Yue, YUE Ge-cheng, *et al.* (2177)
Spatial and Temporal Succession Characteristics of Aerobic Anoxygenic Photosynthesis Bacteria in a Stratified Reservoir ····· ZHANG Hai-han, WANG Yan, HUANG Ting-lin, *et al.* (2188)
Response of Chromophoric Dissolved Organic Matter Dynamics to Different Hydrological Scenarios in the Two Largest Freshwater Lakes Connected to the Yangtze River ····· GUO Yan-ni, LI Yuan-peng, SHI Yu, *et al.* (2198)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Northern-Side River of the Qinling Mountains in Summer ····· LIN Zi-shen, HUANG Ting-lin, YANG Shang-ye, *et al.* (2210)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Tributary Waters of the Lower Reaches of the Yangtze River, China ····· JIA Tian-qi, LEI Rong-rong, WU Xiao-lin, *et al.* (2221)
Temporal and Spatial Occurrence of NSAIDs in Taihu Lake and Relevant Risk Assessment ····· LIAN Jie, LI Yi-fei, WANG Xiao-xuan, *et al.* (2229)
Occurrence and Ecological Risk of Eight Typical PhACs in Surface Water and Its Impact on *Daphnia magna* ····· XU Xin-lei, LIU Jian-chao, LU Guang-hua (2239)
Distribution Characteristics and Migration Rules of Pollutants in Sediments of Reservoirs with *Eucalyptus* Plantation, Southern China ····· ZHU Ya, LI Yi-ping, LUO Fan, *et al.* (2247)
Mechanism of Urban Black Odorous Water Based on Continuous Monitoring: A Case Study of the Erkeng Stream in Nanning ····· LI Yong-xin, WANG Wei, HE Mei, *et al.* (2257)
Relationship Between Source-Sink Landscape Pattern and Antibiotics in Surface Water in Peri-urban Watershed ····· LI Min, TANG Jian-feng, CHEN Li-ding, *et al.* (2264)
Molecular Chemo-diversity of the Dissolved Organic Matter Occurring in Urban Stormwater Runoff ····· NIE Yun-han, CHEN Hao, LI Lei, *et al.* (2272)
Regulating Effect and Mechanism of Calcite/Chlorapatite Mixture Addition on Transformation and Transport of Phosphorus in Sediments ····· BAI Xiao-yun, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, *et al.* (2281)
Stability of Ferrihydrite and Goethite Nanoparticles Under Different Environmental Conditions ····· WANG Zhi-qiao, MA Jie, CHEN Ya-li, *et al.* (2292)
Sunflower-Straw-Derived Biochar-Enhanced Fe(Ⅲ)/$S_2O_8^-$ System for Degradation of Benzoic Acid ····· SUN Peng, ZHANG Kai-kai, ZHANG Yu, *et al.* (2301)
Non-activated Peroxymonosulfate-Induced Degradation of Sulfasalazine: Kinetics and Mechanism Investigations ····· DING Xi, ZHANG Xue-wei, ZHOU Run-sheng, *et al.* (2310)
Pollution Characteristics and Removal Effects of Antibiotics in Wastewater from Large-Scale Pig Farms in Guizhou ····· YANG Zhao, LI Jiang, XIANG Fu-liang, *et al.* (2320)
Nitrogen Removal in Low-C/N Rural Sewage Treatment by Anoxic/Oxic Biofilter Packed with New Types of Fillers ····· ZHAO Yuan-zhe, YANG Yong-zhe, WANG Hai-yan, *et al.* (2329)
Nitrogen Removal Performance and Nitrogen/Carbon Balance of Oligotrophic Aerobic Denitrifiers ····· WEN Gang, WANG Tong, HUANG Ting-lin, *et al.* (2339)
Bacterial Community Shifts and Nitrogen Removal Characteristics for a SNAD Process Treating Anaerobic Digester Liquor of Swine Wastewater (ADLSW) in a Continuous-Flow Biofilm Reactor (CFBR) ····· QIN Jia-wei, XIN Xin, LU Hang, *et al.* (2349)
Characteristics of ANAMMOX Granular Sludge and Differences in Microbial Community Structure Under Different Culture Conditions ··· JIANG Ying, GUO Meng-lei, XIE Jun-xiang, *et al.* (2358)
Start-up of an Integrated Process of Denitrifying Phosphorus Removal Coupled with Partial Nitritation and Anaerobic Ammonium Oxidation ····· CHEN Ya, YIN Wen, ZHANG Xing-xing, *et al.* (2367)
Construction and Application of an Evaluation System for Soil Environmental Carrying Capacity ····· LI Xiao-nuo, DING Shou-kang, CHEN Wei-ping, *et al.* (2373)
Synthesis of Magnetic Biochar and Its Application in the Remediation of Heavy-Metal-Contaminated Soils ····· WANG Jun-nan, CHENG Shan-shan, ZHAN Wen-hao, *et al.* (2381)
Remediation of Heavy-Metal-Contaminated Soil by EGTA Washing Enhanced with Reduction Solubilization ····· ZHANG Jin-yong, ZHU Yu-ting, WANG Ming-xin, *et al.* (2390)
Toxicity of Chromium to Root Growth of Barley as Affected by Chromium Speciation and Soil Properties ····· FU Ping-nan, GONG Xiao-fei, LUO Li-yun, *et al.* (2398)
Effect of Fertilizer Reduction and Biochar Application on Soil Nitrogen Loss in Purple Upland ····· WANG Shu, WANG Zi-fang, LONG Yi, *et al.* (2406)
Relationship Between the Composition of Soil Aggregates and the Distribution of Organic Carbon Under Long-Term Abandoned Restoration ····· WANG Xing, ZHONG Ze-kun, ZHANG Xin-yi, *et al.* (2416)
Effects of Biochar Application on Soil Microbial Nutrient Limitations and Carbon Use Efficiency in Lou Soil ····· WANG Qiang, GENG Zeng-chao, XU Chen-yang, *et al.* (2425)
N_2O Emissions from Tea Plantations with Sorghum Intercropping and Application of Big Urea Pills ····· ZHANG Ke-bin, LIU Xin-liang, KANG Man, *et al.* (2434)
Effects of Different Forest Vegetation Types on Soil Nitrogen-Related Microbial Communities and Functions in Jinyun Mountain ····· WANG Ying-yan, WANG Fu-hua, LUO Dong-hai, *et al.* (2445)
Nitrous Oxide Emission and Denitrifying Bacterial Communities as Affected by Drip Irrigation with Saline Water in Cotton Fields ····· GUO Hui-nan, MA Li-juan, HUANG Zhi-jie, *et al.* (2455)
Effect of Organic Matter Promotion on Nitrogen-Cycling Genes and Functional Microorganisms in Acidic Red Soils ····· CHU Cheng, WU Zhao-yue, HUANG Qian-ru, *et al.* (2468)
Effects of Simulated Acid Rain on Soil Fungi Diversity in the Transition Zone of Moso Bamboo and Broadleaf Forest ····· WANG Nan, PAN Xiao-cheng, WANG Chuan-kuan, *et al.* (2476)
Differences Between DNA- and RNA-Based Bacterial Communities in Marine Sediments ····· LI Ming-yue, YANG Yu-hong, MI Tie-zhu, *et al.* (2485)
Spatial Patterns and Spatial Autocorrelations of Wetland Changes in China During 2003-2013 ····· ZHOU Ting, MA Jiao-jiao, XU Song-jun (2496)