

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第12期

Vol.39 No.12

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

中国燃煤电厂大气污染物排放的健康影响特征 秦雨, 张强, 李鑫, 赵红艳, 同丹, 郑逸璇, 耿冠楠, 贺克斌 (5289)
基于 LUR 模型的中国 PM_{2.5} 时空变化分析 刘炳杰, 彭晓敏, 李继红 (5296)
长三角淳安地区二次颗粒物污染形成机制
..... 黄丹丹, 周敏, 余传冠, 朱书慧, 王裕成, 乔利平, 楼晟荣, 陶士康, 杨强, 李莉 (5308)
春季沙尘过程北京市不同粒径大气气溶胶污染特征及来源分析 杨阳, 李杏茹, 陈曦, 刘水桥, 刘雨思, 徐静, 王莉莉, 陶明辉, 王格慧 (5315)
成都双流夏秋季环境中 VOCs 污染特征 邓媛元, 李晶, 李亚琦, 吴蓉蓉, 谢绍东 (5323)
佛山市典型铝型材行业表面涂装 VOCs 排放组成
..... 李霞, 苏伟健, 黎碧霞, 龙森, 黎丽莉, 张洲, 于跃刚, 王云鹏, 王新明 (5334)
四川省人为源大气污染物排放清单及特征 周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 杨欣悦, 周小玲 (5344)
炼焦工序颗粒物排放特征 王彦辉, 赵亮, 孙文强, 叶竹, 蔡九菊 (5359)
小流域大气氮干湿沉降特征 王焕晓, 庞树江, 王晓燕, 樊彦波 (5365)
流域氮素主要输出途径及变化特征 李文超, 雷秋良, 翟丽梅, 刘宏斌, 胡万里, 刘申, 任天志 (5375)
生物炭配施缓控释肥对稻田田面水氮素动态变化及径流流失的影响 斯林林, 周静杰, 吴良欢, 胡兆平 (5383)
长江上游农业源溪流雨季中 N₂O 间接排放特征 田琳琳, 王正, 朱波 (5391)
不同氮污染特征河流 NO₃⁻ 浓度、释放通量与排放系数 王森, 李亚峰, 雷坤, 杨丽标 (5400)
多种同位素手段的硝酸盐污染源解析, 以会仙湿地为例 彭聪, 潘晓东, 焦友军, 任坤, 曾洁 (5410)
典型岩溶槽谷区土壤水 δD 和 δ¹⁸O 时空分布特征: 以重庆市中梁山岩溶槽谷为例
..... 吴韦, 蒋勇军, 贾亚男, 彭学义, 段世辉, 刘九缠, 王正雄 (5418)
沁河冲洪积扇地下水水化学特征及成因分析 刘江涛, 蔡五田, 曹月婷, 蔡月梅, 边超, 吕永高, 陈远铭 (5428)
2017 年最大降水对再生水受水河道径流组成的影响 廖安然, 宋献方, 张应华, 杨丽虎, 卜红梅, 马英, 韩冬梅, 秦文婧, 杨胜天 (5440)
周村水库主库区水体热分层形成过程中沉积物间隙水 DOM 的光谱演变特征
..... 周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 李再兴, 罗晓 (5451)
三峡库区沉积物中镍污染特征评价 张伟杰, 殷淑华, 徐东昱, 高丽, 高博 (5464)
四面山大洪湖底泥/水界面汞的迁移转化规律 郭攀, 孙涛, 杨光, 马明 (5473)
大兴安岭南麓河湿地类型对土壤中甲基汞分布的影响 周心功, 刘玉荣, 李晶, 周志峰 (5480)
模拟三峡库区消落带土壤有机磷酸酯类水释放特征 杨婷, 何明靖, 杨志豪, 魏世强 (5487)
典型旅游城市河流水体及污水厂出水中全氟烷基酸类化合物的空间分布及其前体物的转化
..... 王世亮, 孙建树, 杨月伟, 张敏 (5494)
4 种不同工况生物滤池净化效能与微生物特性分析 江肖良, 李孟, 张少辉, 张世羊 (5503)
微量元素锰对威氏海链藻生长及叶绿素荧光的影响 王木兰, 姜玥璐 (5514)
广东省水库拟柱孢藻 (*Cylindrospermopsis raciborskii*) 的分布特征及影响因子分析 雷敏婷, 彭亮, 韩博平, 雷腊梅 (5523)
磁性壳聚糖接枝聚丙烯酰胺去除水体中腐殖酸 尤雯, 刘海成, 曹家玮, 沈耀良, 陈卫 (5532)
臭氧-生物活性炭对微污染原水中典型持久性有机物的去除效果 兰亚琼, 刘锐, 马正杰, 陈吕军 (5541)
水解酸化/AO 组合工艺处理印染废水色度去除与脱氮性能 顾梦琪, 尹启东, 刘爱科, 吴光学 (5550)
“异养-硫自养”组合工艺去除高浓度高氯酸盐特性 刘颖男, 陶华强, 宋圆圆, 张春青, 逯彩彩, 韩懿, 李海波, 郭建博 (5558)
静压快速启动亚硝酸盐依赖型甲烷厌氧氧化反应 王一因, 胡振, 茹东云, 姜丽萍, 刘华清 (5565)
多级 AO 耦合流离生化工艺流量分配比优化及脱氮机制 王帆, 李军, 边德军, 聂泽兵, 张莉, 孙艺齐 (5572)
主流条件下两级式 PN-ANAMMOX 工艺的高效能脱氮过程 刘文如, 杨殿海, 沈耀良, 王建芳, 吴鹏, 钱飞跃, 陈重军 (5580)
不同基质浓度对 ANAMMOX 菌短期储存的影响 高雪健, 张杰, 李冬, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (5587)
主流厌氧氨氧化工艺的运行优化及其微生物的群落变迁 付昆明, 付冀, 李慧, 姜姍, 仇付国, 曹秀芹 (5596)
厌氧氨氧化污泥恢复过程中的颗粒特性 陈方敏, 顾澄伟, 胡羽婷, 黄勇, 李祥, 陆明羽, 方文辉, 金润 (5605)
低温反硝化菌——施氏假单胞菌 N3 的筛选及脱氮性能 路俊玲, 陈慧萍, 肖琳 (5612)
复垦工业场地土壤和周边河道沉积物重金属污染及潜在生态风险 吴健, 王敏, 张辉鹏, 黄宇驰, 徐志豪, 李青青, 陈昊, 黄沈发 (5620)
不同土地利用类型土壤重金属生态风险与人体健康风险 李春芳, 曹见飞, 吕建树, 姚磊, 吴泉源 (5628)
某大型神渣场地土壤 As 污染特征及生态风险评价 刘庚, 石瑛, 田海金, 李豪, 张蕾, 牛俊杰, 郭观林, 张朝 (5639)
亚热带典型岩溶水库细菌丰度和细菌生产力及其与环境因子的关系 辛胜林, 梁月明, 彭文杰, 宋昂, 靳振江, 朱美娜, 李强 (5647)
岩溶区典型灌丛植物根系从枝菌根真菌群落结构解析 梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧 (5657)
模拟氮沉降对干旱半干旱温带草原土壤细菌群落结构的影响 李宗明, 沈菊培, 张丽梅, 刘国平, 白文明, 贺纪正 (5665)
添加磷素对低磷稻田根际土壤固碳自养微生物数量的影响 柏菁, 李奕霏, 刘守龙, 祝贞科, 李科林, 彭佩钦, 吴小红, 葛体达, 吴金水 (5672)
长期不同施肥对稻田土壤有机碳矿化及激发效应的影响 马欣, 魏亮, 唐美玲, 徐福利, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (5680)
黄土丘陵区撂荒恢复过程中植物群落组成与土壤养分及酶活性变化的关系 乔文静, 戴银月, 张伟, 付淑月, 杨改河, 韩新辉, 陈正兴, 高德新, 冯永忠 (5687)
生活垃圾不同填埋阶段的富里酸对五氯苯酚的降解 刘思佳, 何小松, 张慧, 祖国峰, 席北斗, 李丹, 党秋玲 (5699)
CO₂ 倍增条件下不同生育期水稻碳氮磷含量及其计量比特征 唐美玲, 肖谋良, 袁红朝, 王光军, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (5708)
基于层次分析法的医疗废物处置技术评价 许晓芳, 谭全银, 刘丽丽, 李金惠 (5717)
中国农田畜禽粪尿氮负荷量及其还田潜力 刘晓永, 王秀斌, 李书田 (5723)
《环境科学》第 39 卷(2018 年) 总目录 (5740)
《环境科学》征订启事 (5343) 《环境科学》征稿简则 (5439) 信息 (5595, 5619, 5638)

长期不同施肥对稻田土壤有机碳矿化及激发效应的影响

马欣^{1,2}, 魏亮², 唐美玲^{2,3}, 徐福利^{1,4*}, 祝贞科², 葛体达², 吴金水²

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100; 2. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125; 3. 中南林业科技大学生命科学与技术学院, 长沙 410004; 4. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100)

摘要: 通过室内模拟培养实验, 结合¹⁴C同位素标记技术, 研究了不施肥(CK)、单施化肥(NPK)、秸秆还田+化肥(ST)这3种施肥处理下稻田耕层土壤有机碳矿化特征及其对添加外源葡萄糖的响应特征. 结果表明, 56 d培养实验结束时, CK处理土壤累积矿化率(土壤原有有机碳累积矿化量/土壤总有机碳含量)达到1.64%, 而NPK和ST处理较CK处理显著降低了0.34%和0.39% ($P < 0.05$), 表明长期施肥对土壤碳有一定的固持作用. 长期不同施肥处理土壤对添加外源葡萄糖的响应有所不同, 表现出了不同程度的激发效应. 随着培养时间的推移, 3种处理土壤碳矿化的激发效应由负激发效应逐渐转为正激发效应. 56 d时, ST和NPK处理土壤的负累积激发效应比CK分别显著提高了22.07和9.05倍 ($P < 0.05$). 结构方程模型分析表明, 土壤 NH_4^+ -N和DOC含量主要通过影响土壤MBC和MBN含量间接影响土壤累积激发效应, 且 NH_4^+ -N对土壤累积激发效应有直接的显著负影响. 综上所述, 长期施肥降低了稻田土壤原有有机碳累积矿化率, 有利于增强稻田土壤碳的固持和积累, 秸秆还田加化肥效果更加明显.

关键词: 水稻土; 长期施肥; 同位素标记; 有机碳矿化; 激发效应

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)12-5680-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201805050

Effects of Varying Long-term Fertilization on Organic Carbon Mineralization and Priming Effect of Paddy Soil

MA Xin^{1,2}, WEI Liang², TANG Mei-ling^{2,3}, XU Fu-li^{1,4*}, ZHU Zhen-ke², GE Ti-da², WU Jin-shui²

(1. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Key Laboratory of Subtropical Agriculture Ecology, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 3. College of Life Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China; 4. Institute of Soil and Water Conservation of Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

Abstract: A laboratory incubation experiment was conducted using the ¹⁴C isotope labeling technique to study the characteristics of organic carbon mineralization and their response to glucose addition when treated with a combination of straw and chemical fertilizer (ST), inorganic fertilizer (NPK), and non-fertilization (CK). The cumulative mineralization rate (ratio of accumulated mineralization amount to total organic carbon content) in CK reaches 1.64% at the end of incubation (56 days). The cumulative mineralization rate during NPK and ST treatments is significantly lower than that in CK (by 0.34% and 0.39%, respectively). This indicates that long-term fertilization affects the soil carbon sequestration. Varying long-term fertilization influences the response of paddy soil to glucose addition and leads to different levels of the priming effect. The priming effect on soil organic carbon mineralization of the three treatments gradually changes from negative to positive with increasing incubation time. The significantly negative cumulative priming effect in ST and NPK after 56 d is 22.07 and 9.05 times higher than that in CK, respectively. The results of the structural equation model indicate that the NH_4^+ -N and DOC contents indirectly influence the cumulative priming effect on soil organic carbon by affecting the MBC and MBN contents. The NH_4^+ -N concentration has a direct and significant negative effect on the cumulative priming effect. In conclusion, long-term fertilization treatments reduce the cumulative organic carbon mineralization rate of paddy soil. Fertilizer, especially the combination of straw and chemical fertilizer, enhances the soil carbon sequestration and accumulation.

Key words: paddy soils; long-term fertilization; isotope labeling technique; organic carbon mineralization; priming effect

土壤有机碳作为陆地生态系统中最大的碳库, 是表征土壤肥力的主要因子^[1]. 土壤有机碳库输入来源有根际脱落、根系分泌物、植物凋落物和施肥等自然或人为方式, 而土壤微生物驱动的有机碳矿化过程是碳输出的主要途径^[2,3]. 碳的固持和释放可直接影响土壤养分元素的释放、土壤质量的维持, 同时土壤碳库的微小变化对温室气体排放具有

显著影响^[4]. 外源有机物的添加引起土壤原有有机碳矿化发生改变的现象称为激发效应^[5-7], 可表征

收稿日期: 2018-05-06; 修订日期: 2018-05-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41501321); 政府间国际科技合作重点专项(S2016G0053)

作者简介: 马欣(1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤生态, E-mail: 2539393041@qq.com

* 通信作者, E-mail: xfl@nwsuaf.edu.cn

外源物质刺激土壤原有有机碳矿化的作用强度, 是反映土壤养分盈亏和平衡状况的重要指标^[8]。

长期施肥改变了土壤氧化还原环境和养分含量, 进而影响土壤有机碳矿化^[9]。目前国内外关于长期施肥对土壤有机碳矿化的影响已有大量报道^[10~14], 然而长期施肥对土壤原有有机碳激发效应的影响研究很少且尚未有统一定论。李梦雅等^[12]的研究表明, 长期施有机肥或有机无机配施显著提高了红壤中微生物活性, 从而促进了土壤有机碳矿化。马天娥等^[15]在黄土高原区的研究表明长期施化肥及有机无机配施显著促进了旱地土壤有机碳矿化。在戚瑞敏等^[16]对长期施用有机、无机及其配施的土壤研究中, 虽然表明添加牛粪促进土壤有机碳矿化, 即产生了正激发效应, 但其忽略了外源添加物自身有机碳的矿化。同位素示踪技术是研究土壤碳循环最科学有效的方法之一, 通过检测土壤矿化释放的^{13/14}C₂O₂区分外源有机物料分解的碳和土壤有机质分解的碳, 能够有效量化土壤原有有机碳矿化激发效应的方向和强度^[17]。Zhu 等^[18]通过添加标记的秸秆, 很好地探讨了不同施肥方式对稻田土壤碳矿化及激发效应的影响, 表明了秸秆还田加氮磷配施可调节土壤微生物及胞外酶活性, 从而促进外源碳和土壤原有有机碳的共同代谢。

相比于¹³C标记, ¹⁴C具有灵敏、测定快捷等优势, 也是经典的示踪方法, 因此本实验选用¹⁴C标记葡萄糖作为外加碳源。依托湖南省宁乡县长期(32 a)定位施肥实验, 通过室内培养实验, 分析了长期不同施肥对稻田耕层土壤原有有机碳矿化的影响,

同时对激发效应进行定量化, 阐明了长期不同施肥条件下土壤碳矿化激发效应的影响因素, 以期深入了解稻田生态系统碳循环、优化该地区施肥模式以及温室气体减排提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

湖南省宁乡县长期定位施肥试验站(112°18' E, 28°07' N)始于1986年, 采用早稻-晚稻-冬闲种植制度。该地区为典型的亚热带湿润气候, 年均气温16.8℃, 年均降雨量1553.7 mm, 年蒸发量1353.9 mm, 年均无霜期为274 d左右, 平均海拔36.1 m。本研究选取田间试验中的3种长期施肥处理: ①零施肥处理(CK): 不添加任何肥料; ②单施化肥处理(NPK): 根据田间监测点土壤氮、磷、钾供应状况和作物预期需求量, 每公顷分别施用60 kg 氮[(NH₄)₂SO₄]、30 kg 磷(P₂O₅)和60 kg 钾(K₂O); ③秸秆还田+化肥配施处理(ST): 以NPK化肥处理的施氮量为标准, 早季稻秸秆还田量为2775 kg·hm⁻², 晚季稻秸秆还田量为3600 kg·hm⁻², 若总氮量不足用化肥补足。

1.2 实验设计与样品采集

2016年6月30日早稻收获后, 每个小区随机选取5个点, 按S型路线采集耕作层(0~20 cm)土壤, 充分混匀后剔除其中可见的动植物残体、石块等杂物。将采集的新鲜土样分成2份带回实验室, 一部分自然风干分别过2 mm和0.149 mm筛用于土壤基本理化性质(见表1)测定, 其余于25℃下淹水1~2 cm预培养14 d备用。

表1 供试土壤基础理化性质¹⁾

Table 1 Characteristics of the tested soils

处理	pH	有机碳 (SOC) /g·kg ⁻¹	总氮 (TN) /g·kg ⁻¹	碱解氮 /mg·kg ⁻¹	全磷 (TP) /g·kg ⁻¹	速效磷 (Olsen P) /mg·kg ⁻¹	黏粒 /%	粉粒 /%	砂粒 /%
不施肥(CK)	6.26a	21.87b	1.61c	161.41b	0.62c	4.45c	8.80b	74.09a	17.11c
全化肥(NPK)	6.59a	22.70b	1.66b	180.95b	0.70b	9.25b	10.09a	69.02b	20.89b
秸秆还田(ST)	5.85a	32.34a	2.46a	250.43a	1.72a	107.63a	7.25c	63.38c	29.37a

1) 不同小写字母表示不同处理在 $P < 0.05$ 水平上差异显著, 下同

1.3 土壤室内模拟培养实验

本实验以¹⁴C-葡萄糖(添加量为50 mg·kg⁻¹, 90 000 dpm)为外源碳源, 同时另设不添加葡萄糖的处理为对照组, 研究了3种长期不同施肥条件(CK、NPK、ST)对土壤有机碳矿化及其激发效应的影响。每个处理为3次重复, 并设置一个完全空白对照(只加水)。

称取充分搅匀的预培养土壤30 g(以干土计)

于500 mL厌氧瓶中, 加入一定量(土水比1:1.5)无菌水, 密封于恒温(25℃)黑暗条件下培养, 同时放入盛有15 mL 1 mol·L⁻¹ NaOH(去CO₂水配制)的玻璃血清瓶, 用于吸收产生的CO₂, 于加入碳源后的第0.25、1、3、7、14、21、27、35、42、49、56 d迅速更换碱液, 继续密封培养。同时在碳源添加后的第3、14、56 d进行破坏性采样测定土壤碳氮相关指标及其他。

1.4 测定指标与方法

土壤 pH 采用 Mettler-toledo 320 pH 计 (FE20K, 瑞士) 测定 (土水质量比 1:2.5); 土壤全氮 (TN) 和有机碳 (SOC) 采用 C/N 分析仪 (Vario MAX C/N, 德国) 测定^[19]; 土壤活性有机碳 (DOC) 采用 0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄ 溶液提取, 有机碳分析仪 (岛津 Vwp, 日本) 测定, 同时用流动注射仪 (Fiastar 5000, 瑞典福斯) 测定土壤碱解氮和硝、铵态氮 (NO₃⁻-N、NH₄⁺-N); 土壤全磷 (TP) 采用 NaOH 熔融法并用钼锑抗比色-紫外分光光度计 (UV-2450, 日本) 测定; 土壤速效磷 (Olsen-P) 采用 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 溶液浸提, 钼锑抗比色-紫外分光光度计测定; 土壤微生物生物量碳、氮 (MBC、MBN) 采用氯仿熏蒸培养法^[20], 用熏蒸土壤 DOC 或 NH₄⁺-N 减去未熏蒸土壤中对应含量, 换算系数为 K_c = 0.45. 碱性吸收液中 CO₂ 含量 (无机碳) 采用有机碳分析仪 (岛津 Vwp, 日本) 测定; ¹⁴CO₂ 直接用液体闪烁计数仪 (贝克曼 LS-6500, 德国) 测定.

1.5 数据处理与统计分析

(1) 添加 ¹⁴C-葡萄糖的土壤矿化产生的 CO₂ 来源于土壤原有有机碳和葡萄糖两部分, 计算公式:

$$CO_{2\text{Glu}} = C_{\text{Glu}} \times {}^{14}CO_{2\text{Glu}} / {}^{14}C_{\text{Glu}}$$

$$CO_{2\text{SOM}} = CO_{2\text{Total}} - CO_{2\text{Glu}}$$

式中, C_{Glu} 为添加的葡萄糖中碳的含量 (mg); ¹⁴C_{Glu} 为总 ¹⁴C 放射性活度 (dpm); ¹⁴CO₂_{Glu} 为吸收液中 ¹⁴C 放射性活度 (dpm).

(2) 在土壤培养期间, CO₂ 释放速率 [mg·(kg·d)⁻¹] = 培养时间内有机碳矿化释放 CO₂ 含量 (mg·kg⁻¹) / 培养天数 (d)

(3) 激发效应 (PE, mg·kg⁻¹) 计算公式为:

$$PE = CO_{2\text{SOM}} - CO_{2\text{SOM}}^*$$

式中, CO₂_{SOM} 为添加外源葡萄糖处理中来源于 SOM 的 CO₂ 量 (mg·kg⁻¹); CO₂_{SOM}^{*} 为相对应的不添加外源葡萄糖处理土壤矿化释放 CO₂ 量 (mg·kg⁻¹).

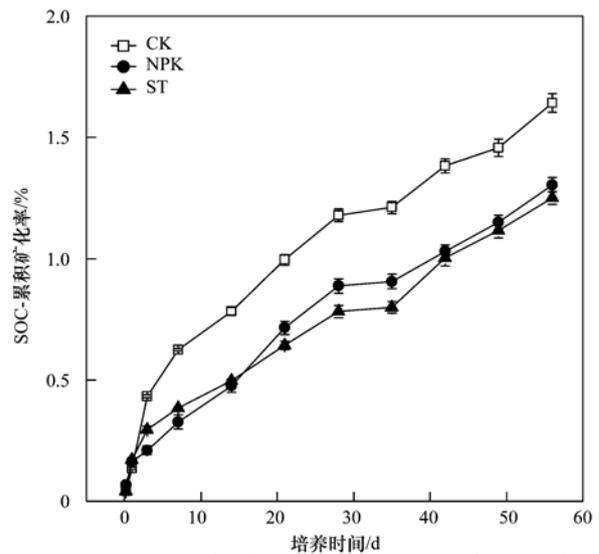
所有数据用 Microsoft Excel 2010 整理, Origin 8.5 绘图分析. 用 SPSS 21.0 检验数据的正态性, 不同处理显著性用 One-way ANOVA (单因素方差分析) 进行检验 (P < 0.05), 方差分解通过 Canoco 5 实现, 结构方程模型由 Amos 21 完成.

2 结果与分析

2.1 长期不同施肥条件下稻田土壤有机碳的矿化特征

不同施肥条件对土壤原有有机碳矿化的影响程度在整个培养阶段内存在差异 (图 1). 56 d 培养实

验结束时, 有 1.25% ~ 1.64% 土壤原有有机碳矿化. 施肥减少了土壤原有有机碳矿化, NPK、ST 处理土壤累积矿化率分别比 CK 处理显著降低了 0.34%、0.39% (P < 0.05). 在矿化速率显著增加阶段 (1 ~ 14 d), NPK 处理累积矿化率高于 ST 处理; 矿化速率平稳阶段 (14 ~ 56 d), ST 处理累积矿化率超过 NPK 处理土壤.



CK: 不施肥, NPK: 单施化肥, ST: 秸秆还田配施化肥, 下同

图 1 长期不同施肥处理下土壤原有有机碳累积矿化率

Fig. 1 Cumulative mineralization rate of soil organic carbon under varying long-term fertilization

2.2 长期不同施肥条件下土壤有机碳矿化的激发效应

外源葡萄糖添加引起土壤原有有机碳矿化的激发效应 (图 2), 不同施肥处理土壤的激发效应又存

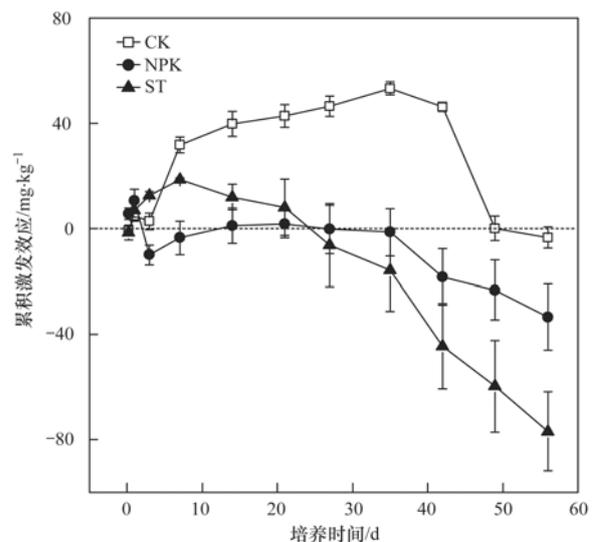


图 2 长期不同施肥处理下土壤原有 SOC 的累积激发效应

Fig. 2 Cumulative priming effect of soil organic carbon under varying long-term fertilization

在差异. 添加外源葡萄糖后, 不施肥土壤在培养 0 ~ 35 d 内产生了明显的正激发效应, 在培养后期 (35 ~ 56 d) 则为负激发. 施肥显著缩短了正激发效应的持续时间. ST 处理土壤矿化前期 (0 ~ 7 d) 表现为正激发, 第 14 d 开始到培养结束表现为负激发; NPK 处理土壤负激发效应出现的时间为第 28 d 即晚于 ST 处理, 且 ST 处理土壤负激发效应始终强于 NPK 处理. 方差分析结果显示, 培养实验结束时 ST、NPK 处理土壤的负累积激发效应比 CK 处理分别提高了 22.07、9.05 倍 ($P < 0.05$).

2.3 长期不同施肥条件对稻田土壤环境因子的影响

长期施肥 (32 a) 可改变稻田耕作层土壤养分状况, 改善土壤生态环境. 在不同培养阶段, 秸秆还田处理土壤碳、氮含量始终显著高于单施化肥和不施肥土壤 (图 3). 与不施肥处理土壤相比, 秸秆还田处理土壤的 DOC、MBC、MBN、 NH_4^+ -N 含量分别提高了 5.6% ~ 65.8%、39.8% ~ 96.2%、46.3% ~ 373.5%、54.2% ~ 78.9%; 与不施肥处理土壤相比, 单施化肥处理土壤 DOC、MBC、MBN、 NH_4^+ -N 含量分别提高 7.5% ~ 64.6%、3.4% ~ 20.8%、

14.8% ~ 44.8%、11.7% ~ 95%. 总体而言, 土壤碳、氮含量表现为 ST 处理 > NPK 处理 > ST 处理.

2.4 长期不同施肥条件下稻田土壤环境因子对有机碳矿化及激发效应的影响

为分析培养时间和不同施肥处理对土壤累积矿化率及累积激发效应的影响效果, 进行了方差分解 (图 4). 得到培养时间、不同施肥处理对土壤累积激发效应解释率分别为 39.8%、13.4%, 而培养时间对土壤累积矿化率的解释率为 98.5%.

进一步对影响累积激发效应的可利用态养分含量进行结构方程模型分析 (图 5), 结果表明在自由度为 5 条件下 ($P < 0.05$), χ^2 值为 5.01 (< 11.07 , 临界值) 即该模型能够代表自变量和因变量的关系. 同时用通径系数来估计自变量对因变量直接影响效应的大小, 比较其相对重要性, 即土壤 NH_4^+ -N 和 DOC 含量主要通过影响土壤 MBC 和 MBN 含量进而影响土壤累积激发效应, 且 NH_4^+ -N 对土壤累积激发效应具有直接显著负影响, MBC 和 MBN 含量之间具有显著负相关关系, 该模型解释了土壤累积激发效应 87% 的变异.

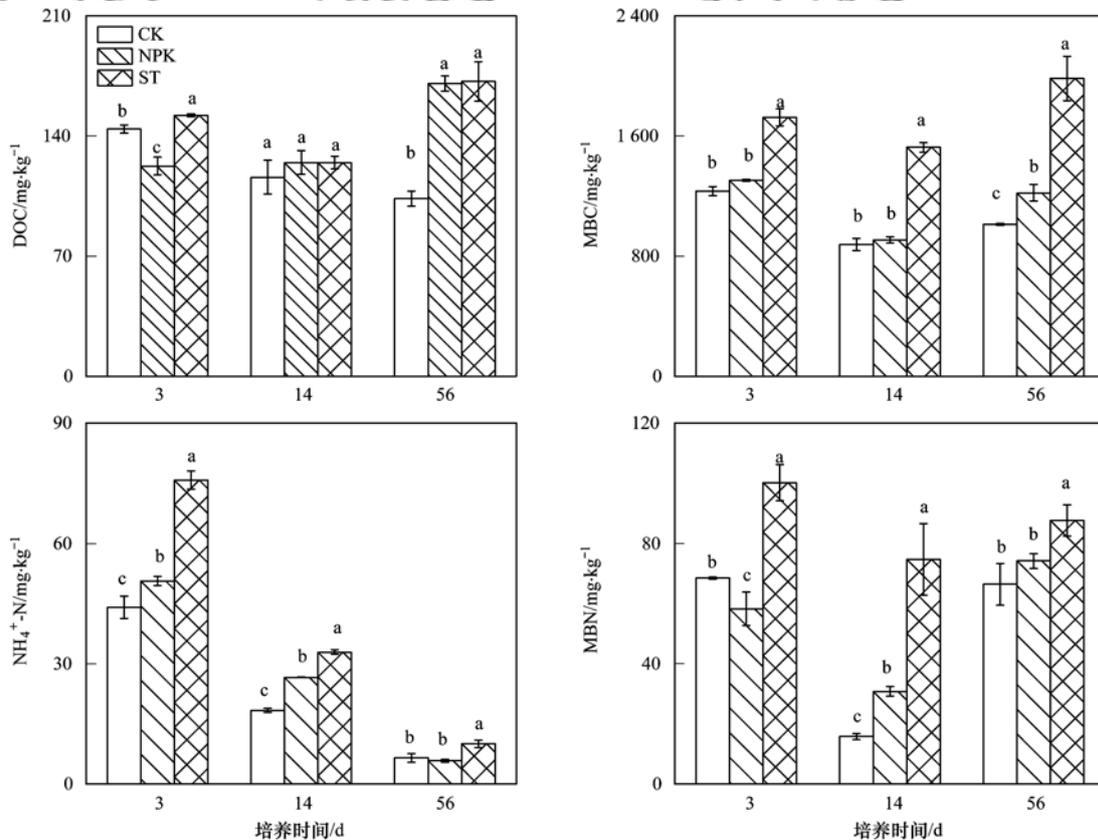


图 3 长期不同施肥处理土壤理化性质

Fig. 3 Characteristics of soil under varying long-term fertilization

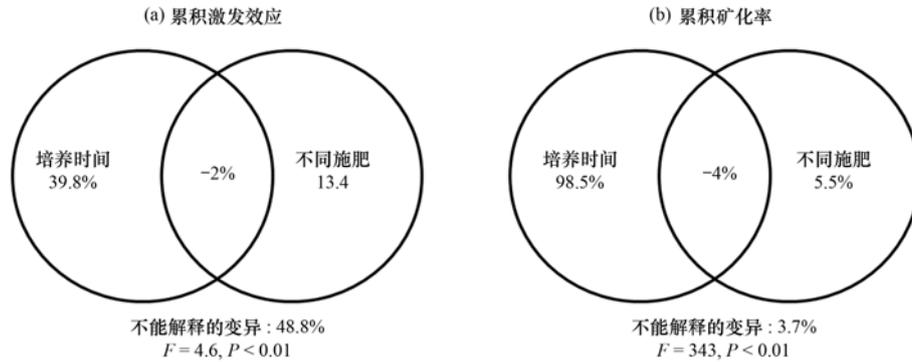


图 4 两组解释变量(培养时间、不同施肥)对土壤累积激发、累积矿化率贡献的韦恩图分析

Fig. 4 Venn diagrams describing the partitioning of the variation of the soil cumulative priming effect and cumulative mineralization rate between two sets of explanatory variables

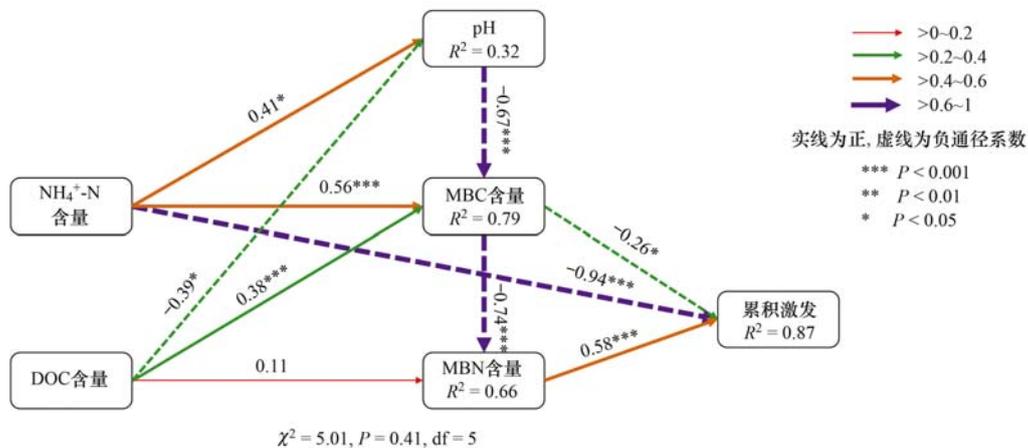


图 5 土壤累积激发效应影响因素的结构方程模型分析

Fig. 5 Structural equation model assessing multivariate effects on the cumulative priming effect

3 讨论

3.1 长期不同施肥对稻田土壤原有有机碳矿化的影响

土壤有机碳矿化过程由酶介导^[21]、微生物驱动,是土壤碳循环的关键环节^[4].郭振等^[10]对黄壤性水稻土有机碳矿化中提出土壤有机碳累积矿化率越低,表明土壤的固碳能力越强,反之,则固碳能力越弱.王朔林等^[13]的研究结果发现,长期施肥、有机肥虽然提高了有机碳矿化量,但却降低了土壤原有有机碳矿化率.本研究也发现,相比不施肥处理,单施化肥、秸秆还田加化肥处理均显著降低了土壤原有有机碳累积矿化率.这是由于长期施肥显著提高了土壤基本养分状况(表 1),使土壤有机碳转化过程中活性碳库以及 MBN、NH₄⁺-N 含量均有所提高(图 3),为微生物生长提供了充足的碳源和能源物质,故降低了对土壤原有有机碳的矿化分解,保护了原有有机碳的积累^[16].秸秆还田加化

肥处理土壤有机碳矿化率更低,可能与底物组分的复杂性有关.

3.2 长期不同施肥对稻田土壤碳矿化激发效应的影响

外源有机质的输入可能会促进或延缓土壤中原有有机质的分解,从而产生正激发效应或负激发效应.而影响激发效应大小、方向的因素可分为:①外源有机质添加的数量、质量及其可利用率;②土壤本身性质,包括土壤 pH、温度、湿度、有机质含量及组成、养分含量、微生物数量及群落结构等^[22].本研究中采用室内培养实验,温度、湿度条件相同,且外源添加物均为等量的葡萄糖,因此导致激发效应差异的主要因素是长期不同施肥条件引起的土壤生物化学性质方面的差异,尤其是活性碳库、微生物群落结构的变化.在不施肥土壤中添加一定量的外源葡萄糖后,培养 0~49 d 内产生了明显的正激发效应,在培养后期(49~56 d)则表现为负激发效应.这是因为长期不施肥土壤中养分含量

相对较低(表 1), 使微生物长期处于“饥饿”状态^[23], 微生物活动所需的养分受到限制^[24], 而外源葡萄糖的添加使土壤中这部分微生物活化, 刺激微生物分泌更多的胞外酶, 同时加速对土壤原有有机碳的矿化, 产生了正激发效应. Fontaine 等^[25]也认为贫营养的土壤中微生物会分解更多的土壤有机质来获取营养物质, 更容易发生正激发效应; 随着前中期土壤原有有机质分解释放的 N、P 等养分元素在短时间内满足了微生物生长的需求, 微生物则减弱对土壤原有有机质的分解, 从而产生了负激发效应.

对于长期施肥土壤(NPK、ST 处理), 当加入上述等量外源葡萄糖后, ST 处理土壤在培养从第 14 d 开始产生负激发效应, 而 NPK 处理土壤从第 28 d 起产生负激发效应, 这表明长期秸秆还田加化肥处理土壤负激发效应出现最早, 且持续时间最长. 一方面是因为秸秆中大量的 C 有效性低, 不利于微生物利用, 使更多的秸秆 C 固定于土壤中; 对于单施化肥土壤, 随着 N 的投入越多, 可利用的碳源受到限制, 微生物为达到其生长适宜的 C/N 比^[26], 会优先通过分解本底有机质获得更多的碳; 另一方面长期秸秆还田加化肥处理土壤 SOC、TN、TP、Olsen-P 等含量均显著高于 NPK、CK 处理(表 1), 使 C、N、P 处于富营养状态, 抑制了土壤原有有机碳的矿化. 因此, 从时间上看 ST 处理土壤更早发生负激发效应, 表明秸秆还田加化肥处理更有利于土壤碳的固持. 土壤中可溶性有机碳含量作为激发效应的易利用态碳源, 其含量大小决定激发效应的强度^[27]. 本研究中, 56 d 培养结束时负累积激发效应大小表现为 ST 处理 > NPK 处理 > CK 处理. 产生的原因可归于秸秆还田加化肥处理土壤中 DOC 含量显著高于单施化肥处理(图 3), 从而 ST 处理土壤中微生物可利用的活性碳源多于 NPK 处理, CK 处理土壤最少. 因此, ST 处理土壤负累积激发效应最强烈. Kuzyakov 等^[22]也认为激发效应的强度与活性有机碳库组分变化特征密切相关, 且其活性组分的 C/N 决定激发效应的方向. 通过结构方程模型分析进一步得到, 土壤 DOC 含量主要通过影响土壤 MBN 含量进而影响土壤累积激发效应, NH_4^+ -N 对土壤累积激发效应具有直接的显著负影响, 也可通过影响 MBC 含量间接影响土壤累积激发效应(图 5).

4 结论

长期单施化肥、秸秆还田配施化肥降低了稻田

土壤原有有机碳累积矿化率, 即施肥增强了稻田土壤的固碳能力, 且秸秆还田配施化肥效果比单施化肥好. 添加相同的外源葡萄糖后, 秸秆还田加化肥处理土壤最早出现负激发效应, 单施化肥次之, 不施肥处理最晚, 表明秸秆还田配施化肥更有利于土壤碳的固持; 56 d 的培养实验结束时负累积激发效应强度以秸秆还田加化肥处理最大. 从长远角度来看, 长期秸秆还田配施化肥更有利于改善稻田耕层土壤肥力, 有利于稻田土壤碳循环的可持续发展, 可作为该地区稻田土壤碳库管理的有效施肥措施, 并为作物生长提供良好的土壤环境.

参考文献:

- [1] 徐明岗, 张旭博, 孙楠, 等. 农田土壤固碳与增产协同效应研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, **23**(6): 1441-1449.
- [2] Xu M G, Zhang X B, Sun N, *et al.* Advance in research of synergistic effects of soil carbon sequestration on crop yields improvement in croplands[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, **23**(6): 1441-1449.
- [3] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change[J]. Geoderma, 2004, **123**(1-2): 1-22.
- [4] Franzluebbers A J. Soil organic carbon sequestration and agricultural greenhouse gas emissions in the southeastern USA[J]. Soil and Tillage Research, 2005, **83**(1): 120-147.
- [5] 李忠佩, 张桃林, 陈碧云. 可溶性有机碳的含量动态及其与土壤有机碳矿化的关系[J]. 土壤学报, 2004, **41**(4): 544-552.
- [6] Li Z P, Zhang T L, Chen B Y. Dynamics of soluble organic carbon and its relation to mineralization of soil organic carbon[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, **41**(4): 544-552.
- [7] Kuzyakov Y, Friedel J K, Stahr K. Review of mechanisms and quantification of priming effects [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, **32**(11-12): 1485-1498.
- [8] Kuzyakov Y. Priming effects: interactions between living and dead organic matter[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, **42**(9): 1363-1371.
- [9] 张政, 蔡小真, 唐偲頔, 等. 可溶性有机质输入对杉木人工林表层土壤有机碳矿化的激发效应[J]. 生态学报, 2017, **37**(22): 7660-7667.
- [10] Zhang Z, Cai X Z, Tang C D, *et al.* Priming effect of dissolved organic matter in the surface soil of a *Cunninghamia lanceolata* Plantation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, **37**(22): 7660-7667.
- [11] 唐美玲, 魏亮, 祝贞科, 等. 稻田土壤有机碳矿化及其激发效应对磷添加的响应[J]. 应用生态学报, 2018, **29**(3): 857-864.
- [12] Tang M L, Wei L, Zhu Z K, *et al.* Responses of organic carbon mineralization and priming effect to phosphorus addition in paddy soils[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, **29**(3): 857-864.
- [13] 袁红朝, 秦红灵, 刘守龙, 等. 长期施肥对稻田土壤固碳功能菌群落结构和数量的影响[J]. 生态学报, 2012, **32**(1): 183-189.

- Yuan H Z, Qin H L, Liu S L, *et al.* Abundance and composition of CO₂ fixating bacteria in relation to long-term fertilization of paddy soils[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(1): 183-189.
- [10] 郭振, 王小利, 段建军, 等. 长期施肥对黄壤性水稻土有机碳矿化的影响[J]. *土壤学报*, 2018, **55**(1): 225-235.
Guo Z, Wang X L, Duan J J, *et al.* Long-term fertilization and mineralization of soil organic carbon in paddy soil from yellow earth[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, **55**(1): 225-235.
- [11] Ginting D, Kessavalou A, Eghball B, *et al.* Greenhouse gas emissions and soil indicators four years after manure and compost applications[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2003, **32**(1): 23-32.
- [12] 李梦雅, 王伯仁, 徐明岗, 等. 长期施肥对红壤有机碳矿化及微生物活性的影响[J]. *核农学报*, 2009, **23**(6): 1043-1049.
Li M Y, Wang B R, Xu M G, *et al.* Effect of long-term fertilization on mineralization of organic carbon and microbial activity in red soil[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2009, **23**(6): 1043-1049.
- [13] 王朔林, 杨艳菊, 王改兰, 等. 长期施肥对栗褐土有机碳矿化的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, **22**(5): 1278-1285.
Wang S L, Yang Y J, Wang G L, *et al.* Effect of long-term fertilization on organic carbon mineralization of cinnamon soil [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, **22**(5): 1278-1285.
- [14] 吴萌, 李忠佩, 冯有智, 等. 长期施肥处理下不同类型水稻土有机碳矿化的动态差异[J]. *中国农业科学*, 2016, **49**(9): 1705-1714.
Wu M, Li Z P, Feng Y Z, *et al.* Dynamic differences of organic carbon mineralization in different types of paddy soil under long-term located fertilization[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, **49**(9): 1705-1714.
- [15] 马天娥, 魏艳春, 杨宪龙, 等. 长期施肥措施下土壤有机碳矿化特征研究[J]. *中国生态农业学报*, 2016, **24**(1): 8-16.
Ma T E, Wei Y C, Yang X L, *et al.* Mineralization characteristics of soil organic carbon under long-term fertilization management[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, **24**(1): 8-16.
- [16] 戚瑞敏, 赵秉强, 李娟, 等. 添加牛粪对长期不同施肥潮土有机碳矿化的影响及激发效应[J]. *农业工程学报*, 2016, **32**(S2): 118-127.
Qi R M, Zhao B Q, Li J, *et al.* Effects of cattle manure addition on soil organic carbon mineralization and priming effects under long-term fertilization regimes [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, **32**(S2): 118-127.
- [17] 袁红朝, 王久荣, 刘守龙, 等. 稳定碳同位素技术在土壤根际激发效应研究中的应用[J]. *同位素*, 2018, **31**(1): 57-63.
Yuan H Z, Wang J R, Liu S L, *et al.* Application of stable carbon isotope technique in the research of soil rhizosphere priming effect[J]. *Journal of Isotopes*, 2018, **31**(1): 57-63.
- [18] Zhu Z K, Ge T D, Luo Y, *et al.* Microbial stoichiometric flexibility regulates rice straw mineralization and its priming effect in paddy soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, **121**: 67-76.
- [19] 鲍士旦. *土壤农化分析* [M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [20] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. *土壤微生物生物量测定方法及其应用* [M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [21] 魏亮, 汤珍珠, 祝贞科, 等. 水稻不同生育期根际与非根际土壤胞外酶对施氮的响应[J]. *环境科学*, 2017, **38**(8): 3489-3496.
Wei L, Tang Z Z, Zhu Z K, *et al.* Responses of extracellular enzymes to nitrogen application in rice of various ages with rhizosphere and bulk soil[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(8): 3489-3496.
- [22] Kuzyakov Y, Bol R. Sources and mechanisms of priming effect induced in two grassland soils amended with slurry and sugar [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**(4): 747-758.
- [23] 黄文昭, 赵秀兰, 朱建国, 等. 土壤碳库激发效应研究[J]. *土壤通报*, 2007, **38**(1): 149-154.
Huang W S, Zhao X L, Zhu J G, *et al.* Priming effect of soil carbon pools [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, **38**(1): 149-154.
- [24] 袁淑芬, 汪思龙, 张伟东. 外源有机碳和温度对土壤有机碳分解的影响[J]. *土壤通报*, 2015, **46**(4): 916-922.
Yuan S F, Wang S L, Zhang W D. Effect of external organic carbon and temperature on SOC decomposition [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, **46**(4): 916-922.
- [25] Fontaine S, Mariotti A, Abbadie L. The priming effect of organic matter: a question of microbial competition? [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, **35**(6): 837-843.
- [26] Spohn M, Kuzyakov Y. Phosphorus mineralization can be driven by microbial need for carbon[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, **61**: 69-75.
- [27] 廖畅, 田秋香, 汪东亚, 等. 外源碳输入对中亚热带森林深层土壤碳矿化和微生物决策群落的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, **27**(9): 2848-2854.
Liao C, Tian Q X, Wang D Y, *et al.* Effects of labile carbon addition on organic carbon mineralization and microbial growth strategies in subtropical forest soils [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(9): 2848-2854.

CONTENTS

Patterns of Mortality from Air Pollutant Emissions in China's Coal-fired Power Plants	QIN Yu, ZHANG Qiang, LI Xin, <i>et al.</i> (5289)
Analysis of the Temporal and Spatial Variation of PM _{2.5} in China Based on the LUR Model	LIU Bing-jie, PENG Xiao-min, LI Ji-hong (5296)
Physicochemical Properties of the Aerosol Particles and Their Impacts on Secondary Aerosol Formation at the Background Site of the Yangtze River Delta .....	..... HUANG Dan-dan, ZHOU Min, YU Chuan-guan, <i>et al.</i> (5308)
Analysis of Different Particle Sizes, Pollution Characteristics, and Sources of Atmospheric Aerosols During the Spring Dust Period in Beijing	YANG Yang, LI Xing-ru, CHEN Xi, <i>et al.</i> (5315)
Characteristics of Ambient VOCs at the Shuangliu Site in Chengdu, China, During Summer and Autumn	DENG Yuan-yuan, LI Jing, LI Ya-qi, <i>et al.</i> (5323)
Source Profiles and Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds from Surface Coating of Aluminum Products in Foshan, China	LI Xia, SU Wei-jian, LI Bi-xia, <i>et al.</i> (5334)
Emission Inventory and Characteristics of Anthropogenic Air Pollutant Sources in the Sichuan Province	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (5344)
Characteristics of Particulate Matter Emissions from the Coking Process	WANG Yan-hui, ZHAO Liang, SUN Wen-qiang, <i>et al.</i> (5359)
Dry and Wet Deposition of Atmospheric Nitrogen in Small Catchments	WANG Huan-xiao, PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, <i>et al.</i> (5365)
Seasonal Changes of the Pathways of Nitrogen Export from an Agricultural Watershed in China	LI Wen-chao, LEI Qiu-liang, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (5375)
Dynamics and Runoff Losses of Nitrogen in Paddy Field Surface Water Under Combined Application of Biochar and Slow/Controlled-Release Fertilizer .....	..... SI Lin-lin, ZHOU Jing-jie, WU Liang-huan, <i>et al.</i> (5383)
Indirect Nitrous Oxide Emissions from an Agricultural Headwater Stream During the Rainy Season in the Upper Reach of the Yangtze River	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, ZHU Bo (5391)
Concentration, Flux, and Emission Factor of N ₂ O in Rivers with Different Nitrogen Pollution Features	WANG Miao, LI Ya-feng, LEI Kun, <i>et al.</i> (5400)
Identification of Nitrate Pollution Sources Through Various Isotopic Methods: A Case Study of the Huixian Wetland	PENG Cong, PAN Xiao-dong, JIAO You-jun, <i>et al.</i> (5410)
Temporal and Spatial Distribution of the Soil Water δD and δ ¹⁸ O in a Typical Karst Valley: A Case Study of the Zhongliang Mountains, Chongqing City .....	..... WU Wei, JIANG Yong-jun, JIA Ya-nan, <i>et al.</i> (5418)
Hydrochemical Characteristics of Groundwater and the Origin in Alluvial-proluvial Fan of Qinhe River	LIU Jiang-tao, CAI Wu-tian, CAO Yue-ting, <i>et al.</i> (5428)
Impact of Maximum Precipitation in 2017 on the Runoff Component of Reclaimed Water-Intaking River	LIAO An-ran, SONG Xian-fang, ZHANG Ying-hua, <i>et al.</i> (5440)
Spectral Evolution Characteristics of DOM in Sediment Interstitial Water During the Formation Stage of Thermal Stratification in the Main Reservoir Area of the Zhoucun Reservoir .....	..... ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5451)
Pollution Characteristic of Ni in Sediments in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Wei-jie, YIN Shu-hua, XU Dong-yu, <i>et al.</i> (5464)
Migration and Transformation of Mercury at Sediment-Water Interface of the Dahong Lake Reservoir in the Simian Mountains	GUO Pan, SUN Tao, YANG Guang, <i>et al.</i> (5473)
Effects of Wetland Types on Distribution of Soil Methylmercury Based on the Region of Nanweng River in the Greater Xing'an Mountains	ZHOU Xin-quan, LIU Yu-rong, LI Jing, <i>et al.</i> (5480)
Simulation of the Migration and Release Characteristics of Organophosphate Esters in Fluctuation Zone Soil of the Three Gorges Reservoir During Flooding .....	..... YANG Ting, HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5487)
Spatial Distribution of Perfluoroalkyl Acids and Transformation of Their Precursors in River Water Samples and Effluents of Wastewater Treatment Plants in a Typical Tourism City .....	..... WANG Shi-liang, SUN Jian-shu, YANG Yue-wei, <i>et al.</i> (5494)
Purification Efficiency and Microbial Characteristics of Four Biofilters Operated Under Different Conditions	JIANG Xiao-liang, LI Meng, ZHANG Shao-hui, <i>et al.</i> (5503)
Effects of Manganese on the Growth and Fluorescence Induction Kinetics of <i>Conticribra weisflogii</i>	WANG Mu-lan, JIANG Yue-lu (5514)
Distribution and Factors Affecting <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i> in Guangdong Reservoirs	LEI Min-ting, PENG Liang, HAN Bo-ping, <i>et al.</i> (5523)
Removal of Humic Acid from Water by Magnetic Chitosan-Grafted Polyacrylamide	YOU Wen, LIU Hai-cheng, CAO Jia-wei, <i>et al.</i> (5532)
Ozone-Biological Activated Carbon for Advanced Removal of Typical Persistent Organic Pollutants from Micro-Polluted Source Water in the Yangtze Delta Region .....	..... LAN Ya-qiong, LIU Rui, MA Zheng-jie, <i>et al.</i> (5541)
Color and Nitrogen Removal from Synthetic Dye Wastewater in an Integrated Hydrolysis/Acidification and Anoxic/Aerobic Process	GU Meng-qi, YIN Qi-dong, LIU Ai-ke, <i>et al.</i> (5550)
Removal Characteristics of High Concentrations of Perchlorate Using a "Heterotrophic Sulfur Autotrophic" Combination Process	LIU Ying-nan, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (5558)
Rapid Start-up of a Nitrite-Dependent Methane Anaerobic Oxidation Reaction Under Static Pressure Conditions	WANG Yi-nan, HU Zhen, RU Dong-yun, <i>et al.</i> (5565)
Optimization of the Flow Distribution Ratio and Mechanism of Nitrogen Removal in a Multi-level AO Coupled Flow Biochemical Process	WANG Fan, LI Jun, BIAN De-jun, <i>et al.</i> (5572)
High-rate Nitrogen Removal in a Two-stage Partial Nitrification-ANAMMOX Process Under Mainstream Conditions	LIU Wen-ru, YANG Dian-hai, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (5580)
Effects of Different Substrate Concentrations on the Short-term Storage of ANAMMOX Bacteria	GAO Xue-jian, ZHANG Jie, LI Dong, <i>et al.</i> (5587)
Optimization of the Mainstream Anaerobic Ammonia Oxidation Process and Its Changes of the Microbial Community	FU Kun-ming, FU Chao, LI Hui, <i>et al.</i> (5596)
Granular Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Sludge During the Recovery Process	CHEN Fang-min, GU Cheng-wei, HU Yu-ting, <i>et al.</i> (5605)
Characterization of a Newly Isolated Strain <i>Pseudomonas</i> sp. N3 for Denitrification at Low Temperature	LU Jun-ling, CHEN Hui-ping, XIAO Lin (5612)
Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risk of Soil from Reclaimed Industrial Sites and Surrounding River Sediments	WU Jian, WANG Min, ZHANG Hui-peng, <i>et al.</i> (5620)
Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals for Different Types of Land Use and Evaluation of Human Health	LI Chun-fang, CAO Jian-fei, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (5628)
Soil Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of As at a Large-scale Arsenic Slag-contaminated Site	LIU Geng, SHI Ying, TIAN Hai-jin, <i>et al.</i> (5639)
Relationship Between the Bacterial Abundance and Production with Environmental Factors in a Subtropical Karst Reservoir	XIN Sheng-lin, LIANG Yue-ming, PENG Wen-jie, <i>et al.</i> (5647)
Structure Analysis of Arbuscular Mycorrhizal in Roots from Different Shrubs in Karst Regions	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (5657)
Effects of Stimulated Nitrogen Deposition on the Bacterial Community Structure of Semiarid Temperate Grassland	LI Zong-ming, SHEN Ju-pei, ZHANG Li-mei, <i>et al.</i> (5665)
Effect of Phosphorus Addition on the Abundance of Autotrophic CO ₂ -Fixation Microorganisms in Rhizospheric Soil from a Phosphorus-Limited Paddy Field .....	..... BAI Jing, LI Yi-fei, LIU Shou-long, <i>et al.</i> (5672)
Effects of Varying Long-term Fertilization on Organic Carbon Mineralization and Priming Effect of Paddy Soil	MA Xin, WEI Liang, TANG Mei-liang, <i>et al.</i> (5680)
Relationship Between the Vegetation Community and Soil Nutrient and Enzyme Activity During the Restoration of Abandoned Land in the Loess Hilly Region .....	..... QIAO Wen-jing, DAI Yin-yue, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (5687)
Degradation of Pentachlorophenol by Fulvic Acid in a Municipal Solid Waste Landfill	LIU Si-jia, HE Xiao-song, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (5699)
Effect of CO ₂ Doubling and Different Plant Growth Stages on Rice Carbon, Nitrogen, and Phosphorus and Their Stoichiometric Ratios .....	..... TANG Mei-ling, XIAO Mou-liang, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (5708)
Assessment of Medical Waste Disposal Technologies Based on the AHP	XU Xiao-fang, TAN Quan-yin, LIU Li-li, <i>et al.</i> (5717)
Livestock and Poultry Faeces Nitrogen Loading Rate and Its Potential Return to Farmland in China	LIU Xiao-yong, WANG Xiu-bin, LI Shu-tian (5723)