

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

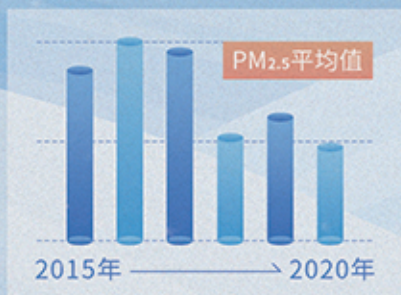
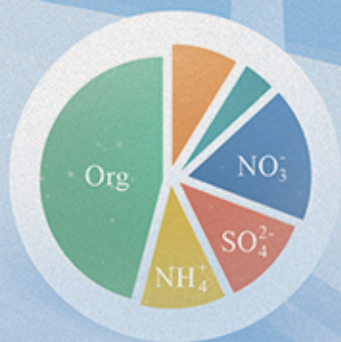
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

北京冬季奥运会历史同期大气PM_{2.5}污染特征分析

刘玥晨, 满睿琪, 裴彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意,
曾立民, 吴志军, 胡敏



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2022年8月

第43卷 第8期
Vol.43 No.8

目次

北京冬季奥运会历史同期大气 PM _{2.5} 污染特征分析·····	刘玥晨, 满睿琪, 袁彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意, 曾立民, 吴志军, 胡敏 (3895)
天津城区 2019 年 2~3 月气溶胶粒径分布特征观测分析·····	郝团, 蔡子颖, 刘敬乐, 王晓佳, 姚青 (3903)
长江中游地区 PM _{2.5} 重污染过程的典型天气环流分型及区域传输影响·····	王莹, 智协飞, 白永清, 董甫, 张玲 (3913)
滇中典型工矿城市大气干湿沉降重金属等元素特征及健康风险评价·····	范晨子, 刘永兵, 袁继海, 郭威, 孙冬阳, 刘成海 (3923)
典型工业城市夏季 VOCs 污染特征及反应活性·····	秦涛, 李丽明, 王信梧, 杨文, 王晓丽, 徐勃, 耿春梅 (3934)
大连市夏季 VOCs 化学反应活性及来源·····	朱轲欣, 刘立忠, 刘焕武, 罗静期, 高冉冉 (3944)
河南省 18 个城市大气污染物分布特征、区域来源和传输路径·····	刘光瑾, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 王克 (3953)
京津冀臭氧污染特征、气象影响及基于神经网络的预报效果评估·····	朱媛媛, 刘冰, 桂海林, 李健军, 汪巍 (3966)
2006~2020 年中国大气本底站 BC 气溶胶的时空分布特征·····	王红磊, 颜雪, 沈利娟, 柳竞先, 赵天良, 管小彬, 赵德龙 (3977)
钢铁生产行业二噁英污染特征变化及其排放因子·····	杨艳艳, 谢丹平, 付建平, 陈晓燕, 尹文华, 韩静磊, 张素坤, 张璐, 肖滔 (3990)
长江流域着生藻类群落结构的格局及其生态评价·····	胡愈忻, 曹亮, 屈仁超, 黄杰, 胡圣, 周正, 王英才, 张静 (3998)
基于蒙特卡洛模拟与 PMF 模型的黄河流域沉积物重金属污染评价及源解析·····	庞阔, 李敏, 刘璐, 杨璐, 赵洪军 (4008)
梯级拦河堰对典型山地城市河流重金属元素的滞留效应: 以重庆市梁滩河为例·····	王超, 贾伯阳, 潘成勇, 何文战, 叶秋, 罗杉山, 张夏武 (4018)
基于土壤流失的农业面源 TN 和 TP 排海系数估算·····	王有霄, 黄翀, 刘高焕, 赵忠贺, 李贺, 刘庆生 (4032)
河湟谷地不同时空尺度下土地利用及空间格局对水质的影响·····	李好好, 黄懿梅, 郭威, 侯宏洋, 范梦苑, 齐照平, 贾鹏辉, 郭庆波 (4042)
联合 PMF 模型与稳定同位素的地下水污染溯源·····	张涵, 杜昕宇, 高菲, 曾卓, 程思茜, 许懿 (4054)
江西锦江流域抗生素污染特征与生态风险评价·····	李佳乐, 王萌, 胡发旺, 董一慧, 孙占学, 王瑶, 卫承芳, 燕雯 (4064)
天津市地表水中新型优先污染物筛选与管控对策·····	吴颜岐, 宋帅, 史雅娟, 刘莹, 杨胜杰 (4074)
宁夏第三排水沟中药物和个人护理品 (PPCPs) 的污染特征与生态风险评估·····	李富娟, 高礼, 李凌云, 郑兰香, 马兰, 杨桂钦 (4087)
再生水河道浮游生物多样性季节变化分析: 以北运河为例·····	袁训超, 王敏, 郭道宇, 吴东丽 (4097)
太湖草、藻湖区沉积物 WSOM 组成和分子结构分析·····	杜瑛珣, 戴家如, 张巧颖, 刘静静, 黄秀琳, 安世林, 文帅龙 (4108)
太湖氧化亚氮 (N ₂ O) 排放特征及潜在驱动因素·····	刘朝荣, 朱俊羽, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 杨艳, 周永强 (4118)
海绵城市生物滞留带重金属污染特征及风险评价·····	雷晓玲, 邱丽娜, 魏泽军, 杨程, 何博 (4127)
玉米芯和稻草秸秆强化潜流人工湿地对低 C/N 污水的处理效果·····	胡曼利, 郝庆菊, 马容真, 陈柯沁, 罗师旭, 江长胜 (4136)
环境 pH 条件下 Fe ²⁺ 活化过二硫酸盐降解有机污染物的效能与影响因素·····	刘颖, 郭依玮, 乔俊莲, 孙远奎 (4146)
新疆沙雅县不同植物类型农田环境中典型农药残留及其风险评价·····	谢宣宣, 艾力江·努尔拉, 买合木提·巴拉提, 仲乃福, 李南鑫 (4154)
宁夏养鸡场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征·····	沈聪, 张俊华, 刘吉利, 韩新宁, 尚天浩, 代金霞 (4166)
宁夏石嘴山市农用地土壤硒的富集因素·····	王莹, 刘海燕, 王泽晶, 张晓东, 王登红 (4179)
地块尺度重金属污染风险耕地安全利用区划方法·····	王锐, 余京, 李瑜, 周蛟, 贾中民, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲 (4190)
姜湖贡米产地土壤重金属空间分布、源解析及生态风险评价·····	于林松, 万方, 范海印, 康桂玲, 刘辉, 王东平, 徐佳 (4199)
基于特定源风险评估模型的小麦籽粒铅超标风险预测·····	杨阳, 李艳玲, 牛硕, 陈卫平, 王天齐, 王美娥 (4212)
柳州地源性镉异常区稻米重金属累积效应与健康风险·····	朱亮亮, 王佛鹏, 唐乐斌, 肖乃川, 董心月, 韦美溜, 宋波 (4219)
不同玉米品种 Cd、Pb、Zn 和 As 积累与转运特性·····	任超, 肖建辉, 李竞天, 杜倩倩, 朱利文, 王浩, 朱瑞颖, 赵海洋 (4232)
橡胶草 (TKS) 对铅镉污染农田土壤的修复潜力·····	张恒, 熊明彪, 王乾鑫, 孙博文, 饶逸驰, 程章, 徐小逊, 杨占彪, 鲜骏仁, 朱雪梅, 杨绍平, 杨远祥 (4253)
3 种地被竹对重金属复合污染农田土壤的修复潜力·····	张颖, 赵欣, 张圣虎, 漆丹, 王博, 陈引, 陆建刚 (4262)
连续施肥对双季稻镉硅累积效应的影响·····	彭华, 邓凯, 石宇, 魏维, 柳赛花, 纪雄辉 (4271)
改性壳聚糖负载氧化硅调控水稻对砷吸收与转运的影响·····	杨嘉仪, 孙梦强, 肖羽堂, 韦行, 张建强, 陈志良 (4282)
不同螯合剂和有机酸对苍耳修复镉复合污染土壤的影响·····	张雅睿, 黄益宗, 保琼莉, 魏祥东, 铁柏清, 张盛楠, 韩甘, 黄永春 (4292)
水分管理对稻田土壤铁氧化物形态转化的影响及其与酶活性变化的耦合关系·····	李明远, 张小婷, 刘汉斌, 魏世强 (4301)
外源 Fe 调控根系微生物群落结构和功能对水稻 Cd 积累的影响·····	郑沈, 黄道友, 李波, 马天池, 许超, 朱奇宏, 朱捍华, 张泉 (4313)
不同降水下覆盖与缓释肥减量对油菜土壤微生物群落结构的影响·····	冯军, 石超, Hafiz Athar Hussain, 刘永波, 刘天朋, 李永洪, 刘俊峰, 王龙昌 (4322)
基于高通量测序和代谢组学解析重金属污染对农田微生物群落组成和功能的影响·····	庞发虎, 李晓琦, 段莉阳, 陈彦, 姬明飞, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (4333)
汞矿区周边农田土壤微生物群落结构特征及其环境驱动因子·····	陈芬, 余高, 孙约兵, 张红丽, 田霞, 夏蓓 (4342)
岩溶湿地与稻田土壤团聚体细菌群落结构的比较·····	冷蒙, 靳振江, 肖筱怡, 熊丽媛, 李雪松 (4353)
戴云山土壤微生物碳源利用效率的海拔变异规律及影响因素·····	吕坤, 王晶晶, 吴国朋, 林思诺, 苏延桂, 黄刚 (4364)
长期秸秆还田对水稻根系碳矿化与激发效应的影响·····	刘峰, 王云秋, 张昀, 祝贞科, 吴金水, 葛体达, 李宇虹 (4372)
秸秆还田配施生物炭对关中平原夏玉米产量和土壤 N ₂ O 排放的影响·····	白金泽, 刘镇远, 宋佳杰, 李娜, 于琦, 郝嘉琪, 许宏伟, 程博豪, 王兴, 冯永忠 (4379)
聚苯乙烯纳米塑料对大蒜生长生理的影响·····	邱陈陈, 李国新, 李青松, 颜昌宙 (4387)
微塑料对土壤水分入渗和蒸发的影响·····	王志超, 张博文, 倪嘉轩, 杨文焕, 李卫平 (4394)
氢燃料电池汽车动力系统生命周期评价及关键参数对比·····	陈轶嵩, 兰利波, 郝卓, 付佩 (4402)
《环境科学》征订启事 (4211) 《环境科学》征稿简则 (4312) 信息 (3922, 4031, 4107)	

长期秸秆还田对水稻根系碳矿化与激发效应的影响

刘峰¹, 王云秋^{2,3}, 张昀^{1*}, 祝贞科², 吴金水^{2,3}, 葛体达², 李宇虹²

(1. 沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110866; 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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 长期秸秆还田改变水稻土环境条件, 从而会影响水稻残留根系碳在土壤中的矿化和激发效应, 其影响的方向和强度尚不明确。因此, 基于长期定位施肥试验, 采用¹³C-CO₂ 同位素标记技术, 结合室内模拟培养试验, 研究不施肥(CK)、单施化肥(CF)和秸秆还田配施化肥(CFS)这3种长期处理下, 水稻根系和土壤本身有机碳的矿化特征, 分析根系的激发效应的强度与方向, 以及各处理CO₂ 释放量的来源组成。结果表明, 经过120 d的室内淹水培养, 根系残留(R)将CO₂ 累积释放量增加了617.41~726.27 mg·kg⁻¹。CFS+R和CF+R处理根系来源CO₂ 累积释放量分别为470.82 mg·kg⁻¹和444.04 mg·kg⁻¹, 根系的矿化率分别为18.8%和17.8%, 均显著高于CK+R处理(384.19 mg·kg⁻¹, 15.4%)。3个处理的土壤本身有机碳产生的CO₂ 累积排放量无显著差异, 但CFS+R处理的土壤本身有机碳矿化率(4.2%)显著低于CF+R和CK+R处理(5.4%和5.8%)。CFS+R处理中根系的CO₂ 累积激发效应为29.6%, 显著低于CK+R处理的42.5%, 高于CF+R处理的14.4%。淹水水稻土CO₂ 累积释放量中23.47%~27.59%来源于根系, 其余来源于土壤, 其中, 激发效应引起的CO₂ 释放量占比在CFS+R处理中比CK+R处理小, 比CF+R处理大。综上, 淹水水稻土长期秸秆还田会提高根系碳的矿化潜力, 但是更有利于土壤本身有机碳的稳定。

关键词: 秸秆还田; 水稻土; ¹³C 同位素标记; 根系矿化; 激发效应

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)08-4372-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.202112040

Effect of Long-term Straw Returning on the Mineralization and Priming Effect of Rice Root-carbon

LIU Feng¹, WANG Yun-qiu^{2,3}, ZHANG Yun^{1*}, ZHU Zhen-ke², WU Jin-shui^{2,3}, GE Ti-da², LI Yu-hong²

(1. College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 2. Key Laboratory of Subtropical Agriculture Ecology, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Long-term straw returning to the field changes the environmental conditions of rice paddy soil, which affects the mineralization and priming effect of residual rice roots in the soil, but the direction and intensity of its influence is not clear. Therefore, based on a long-term fertilization field experiment, ¹³C-CO₂ isotopic labeling technology and laboratorial incubation were used to analyze the characteristics of mineralization of rice roots and native soil organic carbon, the intensity and direction of the priming effect, and the source partitioning of CO₂ emissions in three treatments, consisting of no fertilization (CK), chemical fertilizer (CF), and straw returning with chemical fertilizer (CFS). The results showed that after 120 days of flooding incubation, the root residue (R) increased the cumulative CO₂ emissions by 617.41-726.27 mg·kg⁻¹. The cumulative CO₂ emissions from roots and root mineralized proportions in the CFS+R and CF+R treatments were 470.82 and 444.04 mg·kg⁻¹, respectively, and 18.8% and 17.8%, respectively. These were significantly higher than those in the CK+R treatment (384.19 mg·kg⁻¹, 15.4%). There was no significant difference in the cumulative CO₂ emissions from native soil organic carbon among the three treatments. However, the mineralized proportion of native soil organic carbon in the CFS+R treatment (4.2%) was significantly lower than that in the CF+R and CK+R treatments (5.4% and 5.8%). The priming effect in the CFS+R treatment was 29.6%, which was significantly lower than that in the CK+R treatment (42.5%) and higher than that in the CF+R treatment (14.4%). A total of 23.47% to 27.59% of the cumulative CO₂ emission of the flooded paddy soil was from the roots, and the remainder was from the soil. In addition, the proportion of CO₂ emission caused by the priming effect was smaller in the CFS+R treatment than that in the CK+R treatment and larger than that in the CF+R treatment. In summary, the long-term straw returning in the flooded paddy soil will increase the mineralization potential of rice roots, but it is more conducive to the stability of the native soil organic carbon.

Key words: straw returning; paddy soil; ¹³C isotope labeling; root mineralization; priming effect

稻田在我国粮食安全中占有举足轻重的地位, 总面积达3 400万 hm², 主要分布在亚热带地区, 该区稻田占全国总面积的31.4%^[1,2]。稻田土壤具有明显的碳汇功能, 开展稻田的固碳和温室气体排放研究, 对减缓温室气体排放和实现“双碳”计划具有重要意义^[3,4]。

长期秸秆还田可以有效地提高土壤的养分和有机碳含量, 改变土壤物理、化学和生物环境, 从而影响水稻土有机碳的周转和积累^[5,6], 因此在我国得

到大力推广, 且卓有成效。2000~2010年间我国水稻的秸秆还田比例由不足25%增长到近40%^[7]。Wang等^[8]的研究对长期(>10 a)秸秆还田试验的荟萃分析显示, 水稻秸秆还田的碳固定

收稿日期: 2021-12-04; 修订日期: 2021-12-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(42007097); 湖南省自然科学基金项目(2021JJ30766); 长沙市自然科学基金项目(kq2014184)

作者简介: 刘峰(1995~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为农田土壤有机碳矿化, E-mail: liufeng08262021@163.com

* 通信作者, E-mail: xingyun92757@163.com

效率为 9.4%,长期水稻秸秆还田可将土壤有机碳(SOC)含量提高约 12%. Wang 等^[9]的荟萃分析也显示长期水稻秸秆还田可将土壤有机碳含量提高 5.4%. 秸秆还田不仅对土壤有机碳库有所贡献,还会起到改良土壤物理结构,改善土壤通透性和蓄水能力的作用,其分解还会释放氮磷等养分元素^[5,6]. 然而,目前秸秆还田的相关研究多集中在其对土壤有机碳库库容、养分含量以及其他物理、化学和生物条件等造成的影响,以及秸秆在土壤中的分解、矿化和转化过程,缺乏对长期秸秆还田情况下其他外源有机物进入土壤后的矿化和转化过程的研究.

水稻根系是稻田土壤有机碳的重要来源之一^[10,11],水稻根系在土壤中的分解相当缓慢,与其他新鲜碳源如秸秆和叶片等相比,对土壤有机碳的贡献可能更大^[12,13]. 有研究显示,约 8.7%~20% 水稻根系碳会转化为土壤有机碳^[13,14]. 水稻根系进入土壤中不仅可以补充土壤有机碳库,还会增加土壤本身有机碳的矿化,即产生正激发效应^[14,15],且小于水稻地上部引起的激发效应^[16]. 有机物在土壤中的分解和矿化受土壤物理、化学和生物等环境因素的影响,如土壤肥力、水分条件和土壤质地等^[15,17,18]. 然而,目前关于外源有机物在土壤中的矿化研究多集中于秸秆和有机肥等有机物料或者单一小分子有机物,针对水稻根系残留的研究极其缺乏^[10],尤其长期秸秆还田改造下的土壤中根系矿化过程的研究很少,鉴于水稻根系碳在土壤有机碳中的重要贡献,其分解和矿化过程及其影响因素等方面亟待深入研究.

因此,本研究依托于湖南省宁乡县的长期定位试验,通过室内培养试验和¹³C 稳定同位素标记示踪技术,探讨和量化了长期秸秆还田对水稻根系矿化特征及其激发效应方向和强度的影响,以期为更好地了解稻田生态系统碳循环以及为稻田固碳减排提供理论指导.

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤采自湖南省宁乡县长期定位试验站(112°18'E, 28°07'N),种植制度为早稻-晚稻-冬闲模式,试验始于 1986 年,该地区属于典型的亚热带季风湿润气候,平均海拔 36.1 m,年均气温为 16.8℃,每年蒸发量均为 1 353.9 mm,每年无霜期 274 d 左右,年均降雨量是 1 553.7 mm. 采样点土壤氮、磷和钾供应状况根据作物预期需求量. 本试验选取田间 3 种长期不同施肥处理的土壤:①无施肥处理(CK);②化肥处理(CF),早稻施肥量为 142.5 kg·hm⁻²(以 N 计),54.0 kg·hm⁻²(以 P₂O₅ 计),63.0 kg·hm⁻²(以 K₂O 计),晚稻施肥量为 157.5 kg·hm⁻²(以 N 计),43.2 kg·hm⁻²(以 P₂O₅ 计),81.0 kg·hm⁻²(以 K₂O 计);③化肥+秸秆还田处理(CFS),早稻秸秆的还田量为 2 775 kg·hm⁻²,晚稻的还田量为 3 600 kg·hm⁻²,以 CF 处理的施氮量为标准,不足用化肥补足. 采集耕作层(0~20 cm)土壤样品,人工挑出石块和肉眼可见动植物残体和根系等杂物,过 10 目筛,充分混匀. 将混匀的土壤样品按照四分法取出一部分,经风干过筛后测定土壤样品的基本理化性质(表 1).

表 1 供试土壤基本理化性质¹⁾
Table 1 Physiochemical properties of the soil

处理	pH	ω[SOC(有机碳)] /g·kg ⁻¹	ω[TN(全氮)] /g·kg ⁻¹	ω[AN(碱解氮)] /mg·kg ⁻¹	ω[TP(全磷)] /g·kg ⁻¹	ω(黏粒) /%	ω(粉粒) /%	ω(砂粒) /%
不施肥(CK)	6.26a	21.87b	1.61c	161.4b	0.62c	8.80b	74.09a	17.11c
全化肥(CF)	6.59a	22.70b	1.66b	180.95b	0.70b	10.09b	69.02b	20.89b
秸秆还田(CFS)	5.85a	32.34a	2.46a	250.43a	1.72a	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

1.2 ¹³C 标记根系制备

在 PVC 盆中(直径 17.2 cm,高度 16.7 cm)移栽 25 日龄的水稻幼苗,每盆 3 株,置于密闭植物生长箱(长×宽×高:150 cm×100 cm×150 cm),连续不断地输入 CO₂ 维持含量 400 μL·L⁻¹. 在水稻营养生长期,包括水稻分蘖期和伸长期,对水稻连续输入¹³CO₂(¹³C 丰度 2.8%)进行标记,并在孕穗期开始时停止标记. 将生长箱置于稻田中,使标记植物和未标记对照物的环境条件相同. 于成熟期进行破坏性

采样,将水稻根系与土壤分离. 根系用水反复冲洗去除附着的土壤. 根系于 105℃ 杀青 0.5 h 后,置于 65℃ 的烘箱中烘干并粉碎保存. 最终制得根系的¹³C 丰度为 2.152%,含碳量为 37.75%.

1.3 土壤培养试验

对不同施肥土壤分别设置添加¹³C 标记根系(CK+R、CF+R 和 CFS+R)与不加根(CK、CF 和 CFS)处理,共 6 个处理,3 个重复,另外设置添加未标记根系的自然丰度对照组. 将风干土淹水

至水层深约 2~3 cm,置于 25℃ 的恒温培养暗室进行 10 d 预培养. 预培养结束后,将上清液倒掉,将土样与¹³C 标记根系按 2.5 g·kg⁻¹ (干土计) 的碳添加量均匀混合,称 20 g (干土计) 加入到 500 mL 的培养瓶中,淹水至水层约为 2~3 cm,盖子松开保持通气状态,置于 25℃ 的恒温培养室中遮光培养 120 d.

1.4 样品采集与分析

每隔 1~5 d 进行气体采集,用一次性针管注射器抽取培养瓶顶空气体 35 mL,注入已抽真空的 12 mL 贮藏玻璃瓶待测. 每次采气结束后,通过气泵将瓶中气体置换为新鲜空气,密封后放回 25℃ 恒温室继续培养. 气体 CO₂ 含量用气相色谱法-温室气体气相色谱仪 (7890A, 美国) 测定;¹³CO₂ 用稳定性同位素质谱仪 (MAT 253, 美国) 测定.

1.5 数据处理

根系和土壤本身有机碳 (SOC) 的 CO₂ 释放量计算公式:

$$A_{\text{root}} = \frac{\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{total}}}{\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{root}}} \times A_{\text{total}} \quad (1)$$

$$A_{\text{SOC}} = A_{\text{total}} - A_{\text{root}} \quad (2)$$

式中, A_{total} 为各处理的 CO₂-C 总释放量 (mg·kg⁻¹); $\delta^{13}\text{C}_{\text{total}}$ 为总释放量中¹³C 丰度; A_{SOC} 为来源于 SOC 的 CO₂ 释放量; $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 为 SOC 的¹³C 丰度 (自然丰度对照); $\delta^{13}\text{C}_{\text{root}}$ 为根系的¹³C 丰度; A_{root} 为根系的 CO₂ 释放量. 根系的矿化率是根系 CO₂ 累积释放量与根系添加碳量的比值 (质量分数).

激发效应和相对激发效应计算公式:

$$\text{PE} = A_{\text{SOC}} - A_{\text{Nonroot}} \quad (3)$$

$$\text{RPE} = (A_{\text{SOC}} - A_{\text{Nonroot}}) / A_{\text{Nonroot}} \times 100\% \quad (4)$$

式中, A_{Nonroot} 为不加根处理的 CO₂ 累积释放量.

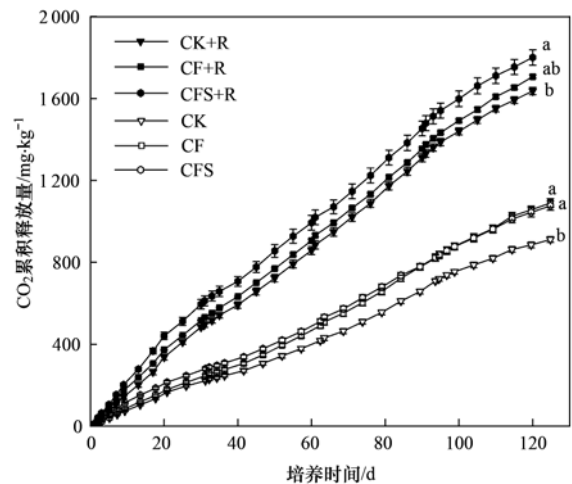
所有数据计算均为 3 次重复的平均值,运用 Microsoft Excel 2010 进行整理,用 Origin 2018 绘图分析. 用 SPSS 21.0 进行不同处理间的单因素方差分析 (One-way ANOVA), 显著性水平为 $P < 0.05$, 并用 Tukey 法进行多重比较.

2 结果与分析

2.1 水稻土 CO₂ 累积释放特征

在 0~120 d 培养期间,不同施肥处理土壤前期 CO₂ 累积释放量快速增长,之后增速逐渐减缓 (图 1). 添加根系土壤 CO₂ 的累积释放量显著高于不添加根系的土壤, 120 d 时相较于 CK、CF 和 CFS 处理, 加根处理累积矿化量分别增加了 726.3、617.4 和 724.5 mg·kg⁻¹. 不添加根系的土壤中, 培养前期 (0~30 d) CFS 处理的 CO₂ 累积释放量显著高于 CK

和 CF 处理,之后 CFS 和 CF 处理间 CO₂ 累积释放量的差距逐渐减小至无显著差异,在 120 d 时 CF 和 CFS 处理的 CO₂ 累积释放量分别比 CK 处理增加了 19.6% 和 18.2% ($P < 0.05$). 添加根系的土壤中,培养期间 CFS+R 和 CF+R 处理的 CO₂ 累积释放量高于 CK+R 处理,在培养结束时, CFS+R、CF+R 和 CK+R 处理的 CO₂ 累积释放量分别为 1 800.3、1 706.8 和 1 636.9 mg·kg⁻¹.



CK: 不施肥, CF: 化肥, CFS: 秸秆还田配施化肥, CK+R: 不施肥+根系, CF+R: 化肥+根系, CFS+R: 秸秆还田配施化肥+根系; 不同小写字母表示 120 d 各不加根处理间或各加根处理间差异的显著性 ($P < 0.05$), 下同

图 1 不同长期施肥处理水稻土添加和不添加根系条件下 CO₂ 累积释放量

Fig. 1 Cumulative CO₂ emission with and without root addition under different fertilization

2.2 水稻根系和土壤本身有机碳的矿化规律

相较于不施肥处理,单施化肥和添加秸秆处理中根系矿化生成 CO₂ 的比例明显增加 (图 2). 培养前 40 d, CFS+R 处理的根系 CO₂ 累积释放量显著高于 CK+R 和 CF+R 处理,之后 3 个处理的根系

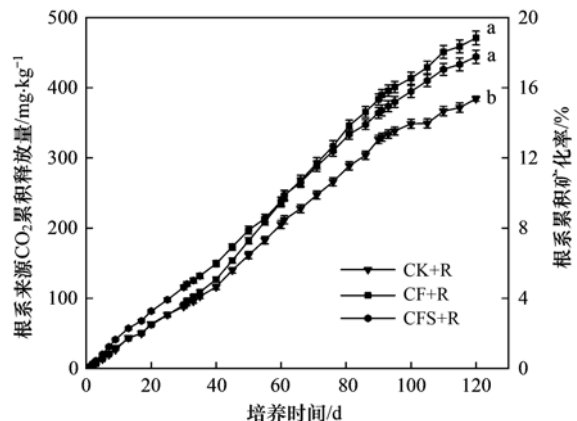


图 2 不同长期施肥水稻土根系来源的 CO₂ 累积释放量及其矿化率

Fig. 2 Cumulative CO₂ emission from root and mineralized proportion of root under different long-term fertilization

CO₂ 释放速率同时加快,且 CF + R 处理的 CO₂ 释放速率最快,其根系 CO₂ 累积释放量与 CFS + R 处理的差距逐渐缩小,并在 76 d 以后逐渐超过 CFS + R 处理的 CO₂ 累积释放量,但是差异不显著. 在 90 ~ 120 d 时各处理根系 CO₂ 释放速率变缓. 在培养 120 d 结束时,CF + R、CFS + R 和 CK + R 处理中根系 CO₂ 累积释放量分别为 470.8、444.0 和 384.2 mg·kg⁻¹,CF + R 处理和 CFS + R 处理根系 CO₂ 累积释放量显著高于 CK + R,三者根系的矿化率分别

为 18.8%、17.8% 和 15.4%.

SOC 矿化生成的 CO₂ 累积释放量在前期 0 ~ 20 d 内快速升高,后期释放速率逐渐变缓. CFS + R 处理的 SOC 来源 CO₂ 累积释放量略高于 CK + R 和 CF + R 处理,但差异不显著[图 3(a)]. 但因 CFS + R 土壤的 SOC 含量较高,其 SOC 的累积矿化率显著低于 CK + R 和 CF + R 处理. 120 d 时,CK + R、CF + R 和 CFS + R 处理的 SOC 累积矿化率分别为 5.8%、5.4% 和 4.2% [图 3(b)].

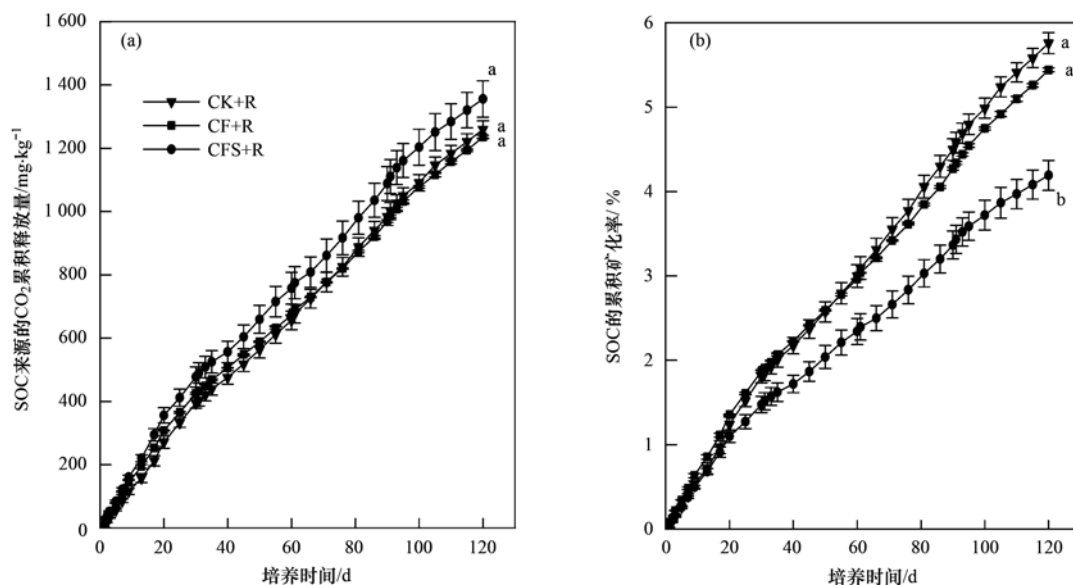


图3 不同长期施肥水稻土本身有机碳(SOC)来源的 CO₂ 累积释放量及其矿化率

Fig. 3 Cumulative CO₂ emission and mineralized proportion of soil organic carbon (SOC) under different long-term fertilization

2.3 水稻根系的激发效应

水稻根系导致土壤 CO₂ 累积释放的正激发效应. 培养前期(0 ~ 40 d), 3 个处理的正 CO₂ 累积激发效应迅速增长,且 CFS + R 处理最快, 40 d 时 CK + R、CF + R 和 CFS + R 处理的 CO₂ 累积激发效应分别为 234.2、184.9 和 256.8 mg·kg⁻¹. 随后 CK +

R 和 CFS + R 处理的 CO₂ 累积激发效应增速减缓, CF + R 处理的正 CO₂ 累积激发效应逐渐降低. 在 120 d 培养结束后,CK + R、CF + R 和 CFS + R 处理的 CO₂ 累积激发效应分别为 386.8、156.2 和 316.5 mg·kg⁻¹ [图 4(a)]. 水稻根系导致的 CO₂ 相对累积激发效应 [图 4(a)] 与 CO₂ 累积激发效应 [图 4

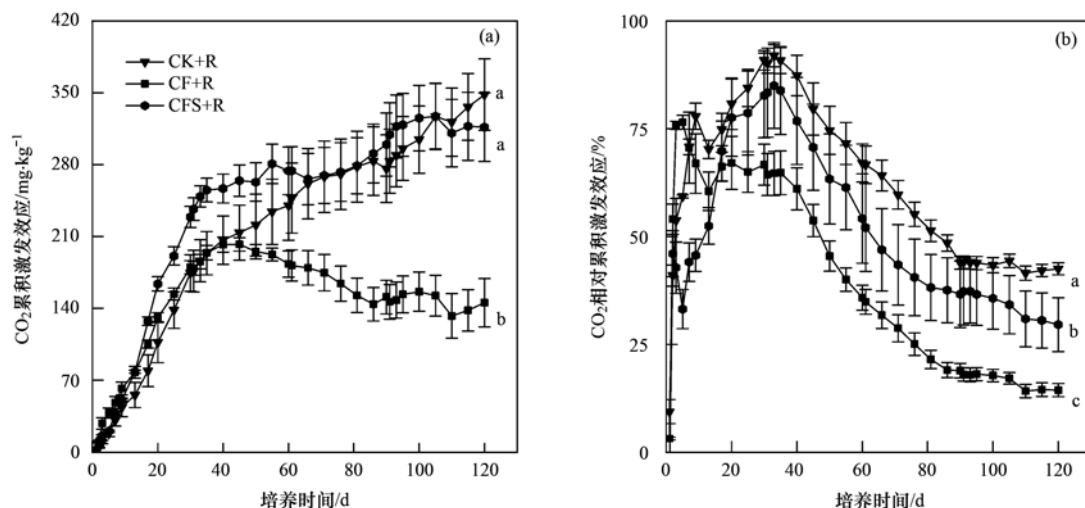


图4 不同长期施肥水稻土中根系的 CO₂ 累积激发效应和 CO₂ 相对累积激发效应

Fig. 4 Cumulative and relative cumulative priming effects of roots in paddy soils with different long-term fertilization

(b)]不同, 3 个处理的 CO_2 相对累积激发效应 0 ~ 40 d 迅速增长, 之后均逐渐下降, 且 40 ~ 120 d 呈现出: $\text{CK} + \text{R} > \text{CFS} + \text{R} > \text{CF} + \text{R}$, 在 120 d 时, 3 种处理的 CO_2 相对累积激发效应分别为 42.5%、29.6% 和 14.4%。

2.4 添加根系水稻土 CO_2 排放源分布特征

培养结束时, CO_2 累积排放量 23.5% ~ 27.6% 来源于根系, 72.4% ~ 76.5% 来源于 SOC, 其中, 因

根系引起的正 CO_2 累积激发效应贡献了 CO_2 累积排放量的 8.6% ~ 20.9% (图 5)。CF + R 处理的根系来源 CO_2 累积排放量占比最高, CFS + R 处理次之。CF + R 处理的 SOC 来源 CO_2 累积排放量占比为 72.4%, 其中 8.6% 源于根系引起的正 CO_2 累积激发效应。CFS + R 处理的正 CO_2 累积激发效应占比是 CF + R 处理的近两倍 (15.6%), 且低于 CK + R 处理 (20.9%), 见图 5。

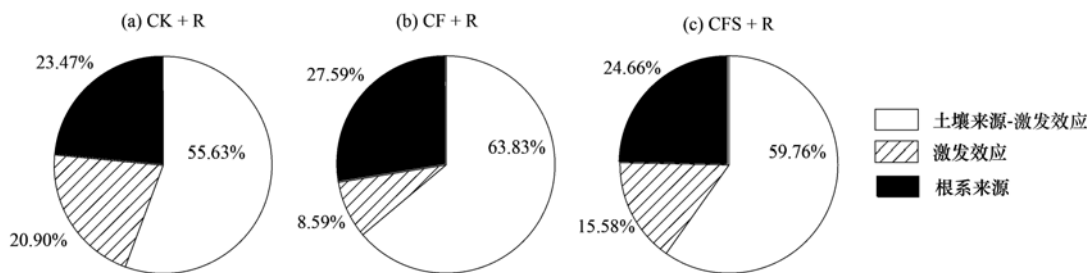


图 5 120 d 添加根系水稻土 CO_2 排放来源与比例

Fig. 5 Partitioning of C sources for CO_2 emissions in paddy soil with added roots at 120 d

3 讨论

3.1 水稻根系的矿化和激发效应特征

农业土壤中土壤有机碳的积累对维持土壤肥力和作物生产力至关重要, 水稻根系是稻田土壤有机碳碳库中重要的输入碳源^[11]。Liu 等^[11]总结了连续标记和脉冲标记试验结果, 发现水稻光合碳约 10% ~ 13% 分配在根系之中。其中 8.7%^[13] 或 20%^[14] 水稻根系碳会转化为土壤有机碳, 取决于土壤水分条件。根系中木质素和软木脂等难分解有机碳组分的含量较高, 因此根系的矿化率普遍低于秸秆或叶片等作物其他部位的残留物^[10,12,19,20]。本文经过 120 d 淹水培养, 15.4% ~ 18.8% 的根系碳矿化为 CO_2 (图 2)。类似地, Kramer 等^[21]经过 32 d 培养, 玉米根系矿化率约为 12%, 小于玉米叶片矿化率 (45%)。Viswanath 等^[22]在保持田间持水量的情况下, 室内培养 150 d 后, 水稻秸秆和小麦秸秆的矿化率分别为 81% 和 73%, 均高于本文和 Kramer 等^[21]的根系矿化率, 虽然矿化率一定程度上与培养时间和土壤水分状况有关, 但仍能显示出根系矿化率普遍低于秸秆矿化率。Zhu 等^[16]的研究中, 虽然水稻根系矿化率为 45.4%, 高于秸秆 31.9%, 但是其根系碳的平均滞留时间大于秸秆碳。刘晖等^[23]的室外培养试验显示, 在培养 5 个月时, 水稻根系累积矿化率低于秸秆碳, 培养 1 a 时, 水稻根系和秸秆碳累积矿化率相近。根系产生 CO_2 在总释放量中的占比也小于水稻秸秆的 CO_2 占比。本文根系产生 CO_2 累积释放量不足总释放量的 30% (图 5), 这与 Guo

等^[10]的研究结果一致。Guo 等^[10]的研究中培养前 14 d, 11% ~ 19% 的 CO_2 来源于根系, 28 d 以后不足 5%。类似地, 玉米根系产生 CO_2 占比为 12% ~ 17%^[21]。而水稻秸秆 CO_2 释放量占总释放量可达 30% ~ 80%^[24]。

水稻根系在土壤中会引起正激发效应。因为根系碳相对土壤有机碳更易被微生物利用, 当外源有机碳的可利用性较高时, 会刺激微生物群落为了达到碳氮平衡而对土壤本身有机碳进行矿化分解, 从而挖掘更多矿质氮, 因而产生正激发效应。本文根系 CO_2 相对累积激发效应为 14.4% ~ 42.5%, 且培养前 40 d CO_2 相对累积激发效应更高 (图 4)。Zhu 等^[16]的研究结果与本文相似, 水稻根系的激发效应在培养 50 d 后达到最大, 为 43%, 之后下降至 2.9%。然而, 秸秆的激发效应大于根系, 可达 52% ~ 378%^[16]。这与根系和秸秆的易利用和难利用等多种组分形态有关^[21]。

3.2 秸秆还田对水稻根系矿化和激发效应的影响

秸秆还田是提高土壤碳库和土壤肥力的重要措施, 一直以来得到大力推广。不同的荟萃分析研究显示长期水稻秸秆还田可将土壤有机碳含量提高 5.4% ~ 12%^[8,9]。本文土壤经过约 30 a 的秸秆还田, 土壤有机碳含量与 CK 相比提高了 48% (表 1)。有机质含量对土壤养分含量、微生物群落结构和活性和生物酶活性等具有显著影响^[14,25]。本文秸秆还田土壤较 CK 全氮、碱解氮和全磷含量分别增长了 53%、55% 和 177%。秸秆还田还会改良土壤物理结构, 改善土壤通透性, 本文秸秆还田土壤较 CK 的黏

粒和粉粒含量分别降低了 18% 和 14% (表 1)。因此,秸秆还田利于土壤微生物生长和对有机物的分解矿化。宁赵等^[26]的研究显示秸秆还田会增加土壤微生物生物量和生长速率,提高微生物对羧酸类、氨基酸和碳水化合物利用速率。因此,本文不加根的秸秆还田土壤 CO₂ 累积释放量比 CK 多 18.1% (图 1),加根的秸秆还田处理的根系产生 CO₂ 累积释放量比 CK 增加了 22.5% (图 2)。另外,水稻土中有机质的转化过程以真菌为主^[27,28],长期秸秆还田土壤中真菌含量显著高于无秸秆还田土壤^[27]。真菌相比于细菌更擅长和偏好分解难降解有机物^[27,28],因此秸秆还田处理相较于 CK 处理对根系的分解能力更强,根系产生 CO₂ 和矿化率更高(图 2)。

与单施化肥相比,本文秸秆还田处理在培养前期根系 CO₂ 释放量更高,之后因单施化肥处理的根系 CO₂ 释放速率更快,培养结束时二者根系 CO₂ 累积释放量无显著差异(图 2)。这可能是由于培养初期,如前面讨论所述,因秸秆还田土壤微生物生物量和活性更高,根系矿化更快,但由于矿化过程中对土壤养分如氮磷的消耗,导致养分计量比逐渐不平衡,限制了矿化速率,而化肥土壤相对秸秆还田土壤的氮磷养分占比更大^[5],因此根系的矿化能够持续高速进行,最终导致两个处理间的累积矿化率相近。宁赵等^[26]的研究也显示化肥和秸秆还田处理的外源碳代谢特征相似。

土壤本身有机碳的矿化率为 4.2%~5.8% (图 3),小于根系矿化率,表明土壤中难分解有机碳组分更多。秸秆还田土壤本身有机碳的 CO₂ 累积释放量略高于 CK 和化肥处理,但差异不显著。但因秸秆还田土壤有机碳含量较高,其累积矿化率显著低于 CK 和化肥处理(图 3),说明秸秆还田土壤有机碳的易矿化程度更低。秸秆还田处理的根系 CO₂ 相对累积激发效应小于 CK 处理(图 4),这可能是由于秸秆还田土壤养分含量相对更高,根系矿化过程中微生物通过分解土壤本身有机碳来获取速效氮磷养分的需求强度不如 CK 大。化肥处理的 CO₂ 累积激发效应小于秸秆还田处理(图 4),也是出于养分元素计量比的原因,化肥处理的土壤中氮磷养分的相对比例更高,因此分解土壤本身有机碳的强度不高。另外,因真菌分解难降解有机物的能力较强且秸秆还田土壤真菌含量更高^[27,28],即在外源有机碳刺激下对土壤本身有机碳的挖掘能力优于化肥土壤,这可能也是导致更大激发效应的原因之一。

4 结论

(1) 经过 120 d 的室内培养,秸秆还田和化肥处

理根系的矿化率分别为 18.8% 和 17.8%,显著高于 CK 处理的 15.4%。

(2) 3 个处理的土壤本身有机碳产生的 CO₂ 累积排放量无显著差异,但是对于土壤有机碳矿化率,秸秆还田处理显著低于化肥和 CK 处理。秸秆还田土壤中根系引发的 CO₂ 相对累积激发效应为 29.6%,显著低于 CK 处理的 42.5%,但高于化肥处理的 14.4%。

(3) 淹水水稻土 CO₂ 释放量中 23.47%~27.59% 来源于根系,其余来源于土壤,其中,激发效应引起的 CO₂ 释放量占比在 CK 处理中最大,秸秆还田处理次之,化肥处理最小。

参考文献:

- [1] Zhou P, Sheng H, Li Y, *et al.* Lower C sequestration and N use efficiency by straw incorporation than manure amendment on paddy soils[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, **219**: 93-100.
- [2] Liu S L, Huang D Y, Chen A L, *et al.* Differential responses of crop yields and soil organic carbon stock to fertilization and rice straw incorporation in three cropping systems in the subtropics [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, **184**: 51-58.
- [3] Mackay A. Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2008, **37**(6): 2407-2407.
- [4] Pan G X, Li L Q, Wu L S, *et al.* Storage and sequestration potential of topsoil organic carbon in China's paddy soils[J]. *Global Change Biology*, 2004, **10**(1): 79-92.
- [5] Young M D, Ros G H, De Vries W. Impacts of agronomic measures on crop, soil, and environmental indicators: a review and synthesis of meta-analysis[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, **319**, doi: 10.1016/j.agee.2021.107551.
- [6] Huang W, Wu J F, Pan X H, *et al.* Effects of long-term straw return on soil organic carbon fractions and enzyme activities in a double-cropped rice paddy in South China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2021, **20**(1): 236-247.
- [7] 赵永存, 徐胜祥, 王美艳, 等. 中国农田土壤固碳潜力与速率: 认识、挑战与研究建议[J]. *中国科学院院刊*, 2018, **33**(2): 191-197.
Zhao Y C, Xu S X, Wang M Y, *et al.* Carbon sequestration potential in chinese cropland soils: review, challenge, and research suggestion [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, **33**(2): 191-197.
- [8] Wang J Z, Wang X J, Xu M G, *et al.* Crop yield and soil organic matter after long-term straw return to soil in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2015, **102**(3): 371-381.
- [9] Wang Y L, Wu P N, Mei F J, *et al.* Does continuous straw returning keep China farmland soil organic carbon continued increase? a meta-analysis [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, **288**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112391.
- [10] Guo T F, Zhang Q, Ai C, *et al.* Microbial utilization of rice root residue-derived carbon explored by DNA stable-isotope probing [J]. *European Journal of Soil Science*, 2021, **72**(1): 460-473.

- [11] Liu Y L, Ge T D, Zhu Z K, *et al.* Carbon input and allocation by rice into paddy soils: a review [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, **133**: 97-107.
- [12] Abiven S, Recous S, Reyes V, *et al.* Mineralisation of C and N from root, stem and leaf residues in soil and role of their biochemical quality[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2005, **42** (2): 119-128.
- [13] Lu Y H, Watanabe A, Kimura M. Carbon dynamics of rhizodeposits, root- and shoot-residues in a rice soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, **35**(9): 1223-1230.
- [14] Zhu Z K, Ge T D, Hu Y J, *et al.* Fate of rice shoot and root residues, rhizodeposits, and microbial assimilated carbon in paddy soil - part 2: turnover and microbial utilization[J]. *Plant and Soil*, 2017, **416**: 243-257.
- [15] Kuzyakov Y. Priming effects: interactions between living and dead organic matter[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, **42**(9): 1363-1371.
- [16] Zhu Z K, Zeng G J, Ge T D, *et al.* Fate of rice shoot and root residues, rhizodeposits, and microbe-assimilated carbon in paddy soil - Part 1: decomposition and priming effect [J]. *Biogeosciences*, 2016, **13**(15): 4481-4489.
- [17] Saidy A R, Smernik J A, Baldock K, *et al.* Effects of clay mineralogy and hydrous iron oxides on labile organic carbon stabilisation[J]. *Geoderma*, 2012, **173-174**: 104-110.
- [18] Sodano M, Said-Pullicino D, Fiori A F, *et al.* Sorption of paddy soil-derived dissolved organic matter on hydrous iron oxide-vermiculite mineral phases [J]. *Geoderma*, 2016, **261**: 169-177.
- [19] Amin B A Z, Chabbert B, Moorhead D, *et al.* Impact of fine litter chemistry on lignocellulolytic enzyme efficiency during decomposition of maize leaf and root in soil [J]. *Biogeochemistry*, 2014, **117**: 169-183.
- [20] Insalud N, Bell R W, Colmer T D, *et al.* Morphological and physiological responses of rice (*Oryza sativa*) to limited phosphorus supply in aerated and stagnant solution culture[J]. *Annals of Botany*, 2006, **98**(5): 995-1004.
- [21] Kramer S, Dibbern D, Moll J, *et al.* Resource partitioning between bacteria, fungi, and protists in the detritosphere of an agricultural soil [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2016, **7**, doi: 103389/fmicb.201601524.
- [22] Viswanath T, Pal D, Purakayastha T J. Elevated CO₂ reduces rate of decomposition of rice and wheat residues in soil [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, **139**(4): 557-564.
- [23] 刘晖, 刘杰, 张玉玲, 等. 外源水稻根系和茎叶碳氮在稻田土壤中释放的特征[J]. *土壤学报*, 2021, **58**(4): 989-997.
- [23] Liu H, Liu J, Zhang Y L, *et al.* Release of exogenous carbon and nitrogen in rice root, stem and leaf in paddy soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, **58**(4): 989-997.
- [24] Pan F X, Li Y Y, Chapman S J, *et al.* Microbial utilization of rice straw and its derived biochar in a paddy soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **559**: 15-23.
- [25] 战厚强, 颜双双, 王家睿, 等. 水稻秸秆还田对土壤磷酸酶活性及速效磷含量的影响[J]. *作物杂志*, 2015, (2): 78-83.
- [25] Zhan H Q, Yan S S, Wang J R, *et al.* Effects of rice straw returning on activities of soil phosphatase and available P values in soil [J]. *Crops*, 2015, (2): 78-83.
- [26] 宁赵, 程爱武, 唐海明, 等. 长期施肥下水稻根际和非根际土壤微生物碳源利用特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1475-1482.
- [26] Ning Z, Cheng A W, Tang H M, *et al.* Microbial carbon source metabolic profile in rice rhizosphere and non-rhizosphere soils with different long-term fertilization management [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1475-1482.
- [27] 宁赵, 陈香碧, 唐海明, 等. 不同施肥处理下水稻根际和非根际土壤中氨基糖积累特征[J]. *应用生态学报*, 2019, **30**(1): 189-197.
- [27] Ning Z, Cheng X B, Tang H M, *et al.* Characteristics of amino sugar accumulation in rhizosphere and non-rhizosphere soil of rice under different fertilization treatments [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(1): 189-197.
- [28] Luo Y, Xiao M L, Yuan H Z, *et al.* Rice rhizodeposition promotes the build-up of organic carbon in soil via fungal necromass [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, **160**, doi: 101016/j.soilbio.2021108345.

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution in Beijing During the Historical Period of the 2022 Olympic Winter Games	LIU Yue-chen, MAN Rui-qi, QIU Yan-ting, <i>et al.</i> (3895)
Observation Analyses of Aerosol Size Distribution Properties from February to March, 2019 in Tianjin Urban Area	HAO Jian, CAI Zi-ying, LIU Jing-le, <i>et al.</i> (3903)
Analysis of Typical Weather Circulation Patterns of Heavy PM _{2.5} Pollution and the Transport Pattern in the Yangtze River Middle Basin	WANG Ying, ZHI Xie-fei, BAI Yong-qing, <i>et al.</i> (3913)
Characteristics of Heavy Metals and Other Elements in Atmospheric Dry and Wet Deposition and Health Risk Assessment of a Typical Industrial and Mining City in Central Yunnan	FAN Chen-zi, LIU Yong-bing, YUAN Ji-hai, <i>et al.</i> (3923)
Characteristics and Reactivity of VOCs in a Typical Industrial City in Summer	QIN Tao, LI Li-ming, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (3934)
Chemical Reaction Activity and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Summer in Dalian	ZHU Ke-xin, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3944)
One-year Simulation of Air Pollution in Central China, Characteristics, Distribution, Inner Region Cross-transmission, and Pathway Research in 18 Cities	LIU Guang-jin, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (3953)
Characteristics of Ozone Pollution, Meteorological Impact, and Evaluation of Forecasting Results Based on a Neural Network Model in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, GUI Hai-lin, <i>et al.</i> (3966)
Temporal and Spatial Variations in Black Carbon Aerosol in Different Atmospheric Background Stations in China from 2006 to 2020	WANG Hong-lei, YAN Xue, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (3977)
Pollution Characteristics and Emission Factors of PCDD/Fs from Iron and Steel Industry	YANG Yan-yan, XIE Dan-ping, FU Jian-ping, <i>et al.</i> (3990)
Community Composition and Assessment of the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae in the Yangtze River Basin	HU Yu-xin, CAO Liang, QU Ren-chao, <i>et al.</i> (3998)
Evaluation and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Sediments of the Yellow River Basin Based on Monte Carlo Simulation and PMF Model	PANG Kuo, LI Min, LIU Lu, <i>et al.</i> (4008)
Retention Effect of Heavy Metals in Rivers of a Typical Mountainous City by Cascade Weirs; A Case Study of Liangtan River in Chongqing	WANG Chao, JIA Bo-yang, PAN Cheng-yong, <i>et al.</i> (4018)
Estimation of Agricultural Non-point Source TN and TP Export Coefficients Based on Soil Loss	WANG You-xiao, HUANG Chong, LIU Gao-huan, <i>et al.</i> (4032)
Influence of Land Use and Land Cover Patterns on Water Quality at Different Spatio-temporal Scales in Hehuang Valley	LI Hao-hao, HUANG Yi-mei, GUO Wei, <i>et al.</i> (4042)
Groundwater Pollution Source Identification by Combination of PMF Model and Stable Isotope Technology	ZHANG Han, DU Xin-yu, GAO Fei, <i>et al.</i> (4054)
Antibiotic Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment in Jinjiang River Basin, Jiangxi Province	LI Jia-le, WANG Meng, HU Fa-wang, <i>et al.</i> (4064)
Screening and Control Measures for New Priority Pollutants in Surface Water of Tianjin	WU Yan-qi, SONG Shuai, SHI Ya-juan, <i>et al.</i> (4074)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) in the Third Drain of Ningxia	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i> (4087)
Analysis of the Seasonal Changes in Planktonic Microbial Diversity in Urban River Supplied with Reclaimed Water: A Case Study of the North Canal River	YUAN Xun-chao, WANG Min, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (4097)
Spectroscopic and Molecular Characterization of Water Soluble Organic Matter from Sediments in the Macrophyte-dominated and Algae-dominated Zones of Taihu Lake	DU Ying-xun, DAI Jia-ru, ZHANG Qiao-ying, <i>et al.</i> (4108)
Emission of Nitrous Oxide (N ₂ O) from Lake Taihu and the Corresponding Potential Driving Factors	LIU Chao-rong, ZHU Jun-yu, LI Yu-yang, <i>et al.</i> (4118)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Bioretention Systems of Sponge Cities	LEI Xiao-ling, QIU Li-na, WEI Ze-jun, <i>et al.</i> (4127)
Treatment Effect of Corncob and Rice Straw Enhanced Subsurface Flow Constructed Wetland on Low C/N Ratio Wastewater	HU Man-li, HAO Qing-ju, MA Rong-zhen, <i>et al.</i> (4136)
Investigation of the Performance of Organic Contaminant Degradation by Fe ²⁺ /PDS Under Environmentally Relevant pH Conditions	LIU Ying, GUO Yi-wei, QIAO Jun-lian, <i>et al.</i> (4146)
Typical Pesticide Residues and Their Risk Assessment in Farmland Environment of Different Plant Types in Shayu County, Xinjiang	XIE Xuan-xuan, NUERLA Ailijiang, BALATI Maihemuti, <i>et al.</i> (4154)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Poultry Farm in Ningxia	SHEN Cong, ZHANG Jun-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i> (4166)
Enrichment Factors of Soil-Se in the Farmland in Shizuishan City, Ningxia	WANG Ying, LIU Hai-yan, WANG Ze-jing, <i>et al.</i> (4179)
Zoning and Safe Utilization Method of Heavy Metal Contaminated Cultivated Land at Block Scale	WANG Rui, YU Jing, LI Yu, <i>et al.</i> (4190)
Spatial Distribution, Source Apportionment, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Jianghugongmi Producing Area, Shandong Province	YU Lin-song, WAN Fang, FAN Hai-yin, <i>et al.</i> (4199)
Assessing the Lead Accumulation Risks of Wheat Grain by Developing a Source-Specific Accumulation Risk Assessment Model	YANG Yang, LI Yan-ling, NIU Shuo, <i>et al.</i> (4212)
Accumulation Effects and Health Risks of Heavy Metals in Rice in Location-based Cadmium Anomaly Area in Liuzhou	ZHU Liang-liang, WANG Fu-peng, TANG Le-bin, <i>et al.</i> (4219)
Accumulation and Transport Characteristics of Cd, Pb, Zn, and As in Different Maize Varieties	REN Chao, XIAO Jian-hui, LI Jing-tian, <i>et al.</i> (4232)
Remediation Potential of <i>Taraxacum kok-saghyz</i> Rodin on Lead and Cadmium Contaminated Farmland Soil	ZHANG Heng, XIONG Ming-biao, WANG Qian-xin, <i>et al.</i> (4253)
Remediation Potential of Three Dwarf Bamboos on Farmland Soils Contaminated with Mixed Heavy Metals	ZHANG Ying, ZHAO Xin, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i> (4262)
Impacts of Uptake and Accumulation of Cd on Double Rice-Paddy Soil by Silicon Fertilizer Continuous Application	PENG Hua, DENG Kai, SHI Yu, <i>et al.</i> (4271)
Effect of Modified Chitosan Loaded with Silica on Arsenic Uptake and Transport in Rice	YANG Jia-yi, SUN Meng-qiang, XIAO Yu-tang, <i>et al.</i> (4282)
Effect of Chelating Agents and Organic Acids on Remediation of Cadmium and Arsenic Complex Contaminated Soil Using <i>Xanthium sibiricum</i>	ZHANG Ya-rui, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i> (4292)
Effects of Water Management on the Transformation of Iron Oxide Forms in Paddy Soils and Its Coupling with Changes in Cadmium Activity	LI Ming-yuan, ZHANG Xiao-ting, LIU Han-yi, <i>et al.</i> (4301)
Effects of Iron Intensity-regulated Root Microbial Community Structure and Function on Cadmium Accumulation in Rice	ZHENG Shen, HUANG Dao-you, LI Bo, <i>et al.</i> (4313)
Effects of Mulching and Slow-release Fertilizer Application Reduction on Soil Microbial Community Structure in Rapeseed Field Under Two Different Rainfall Conditions	FENG Jun, SHI Chao, Hafiz Athar Hussain, <i>et al.</i> (4322)
High-Throughput Sequencing Combined with Metabonomics to Analyze the Effect of Heavy Metal Contamination on Farmland Soil Microbial Community and Function	PANG Fa-hu, LI Xiao-qi, DUAN Li-yang, <i>et al.</i> (4333)
Characteristics of Microbial Community Structure in the Surrounding Farmlands of a Mercury Mining Area and Its Environmental Driving Factors	CHEN Fen, YU Gao, SUN Yue-bing, <i>et al.</i> (4342)
Comparison of Bacterial Community Structure in Soil Aggregates Between Natural Karst Wetland and Paddy Field	LENG Meng, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i> (4353)
Elevational Pattern and Control Factors of Soil Microbial Carbon Use Efficiency in the Daiyun Mountain	LÜ Kun, WANG Jing-jing, WU Guo-peng, <i>et al.</i> (4364)
Effect of Long-term Straw Returning on the Mineralization and Priming Effect of Rice Root-carbon	LIU Feng, WANG Yun-qi, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (4372)
Effects of Straw Returning and Biochar Application on Summer Maize Yield and Soil N ₂ O Emission in Guanzhong Plain	BAI Jin-ze, LIU Zhen-yuan, SONG Jia-jie, <i>et al.</i> (4379)
Effects of Polystyrene Nanoplastics (PS-NPs) on the Physiology of <i>Allium sativum</i> L.	QIU Chen-chen, LI Guo-xin, LI Qing-song, <i>et al.</i> (4387)
Effect of Microplastics on Soil Water Infiltration and Evaporation	WANG Zhi-chao, ZHANG Bo-wen, NI Jia-xuan, <i>et al.</i> (4394)
Life Cycle Assessment and Key Parameter Comparison of Hydrogen Fuel Cell Vehicles Power Systems	CHEN Yi-song, LAN Li-bo, HAO Zhuo, <i>et al.</i> (4402)