

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

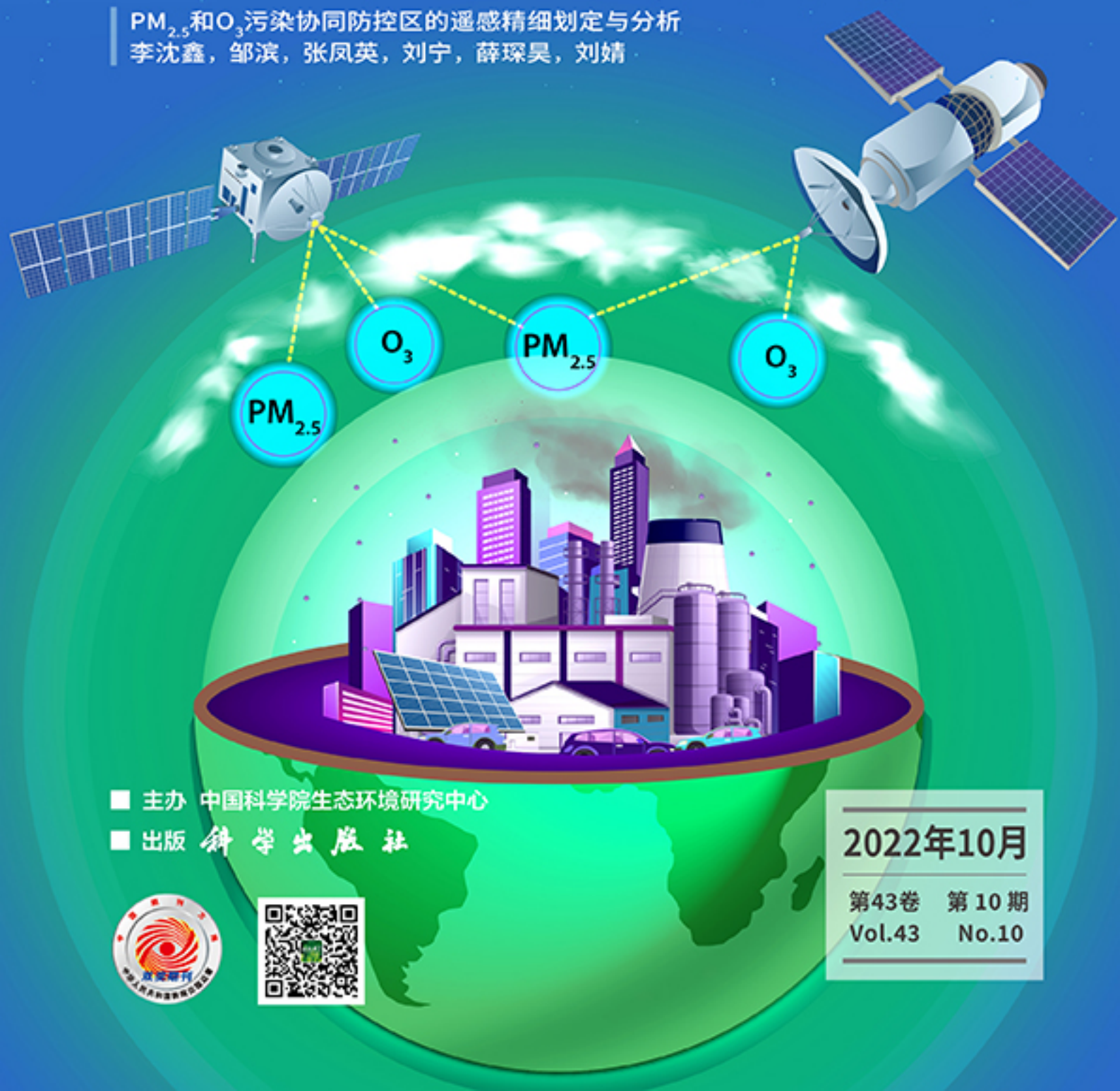
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

PM_{2.5}和O₃污染协同防控区的遥感精细划定与分析
李沈鑫, 邹滨, 张凤英, 刘宁, 薛琛昊, 刘婧



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年10月

第43卷 第10期
Vol.43 No.10

目次

PM _{2.5} 和O ₃ 污染协同防控区的遥感精细划定与分析	李沈鑫, 邹滨, 张凤英, 刘宁, 薛琛昊, 刘婧 (4293)
广州市冬季一次典型臭氧污染过程分析	裴成磊, 谢雨彤, 陈希, 张涛, 邱晓暖, 王瑜, 王在华, 李梅 (4305)
佛山臭氧浓度预报方程的建立与应用	陈辰, 洪莹莹, 谭浩波, 司徒淑婷, 程银琳, 步巧利, 吴蒙, 潘巧英 (4316)
乌海市高分辨率大气污染源排放清单构建及其在臭氧污染成因探究中的应用	张瑞欣, 楚波, 尚春林, 曹喜萍, 李光耀, 朱玉凡, 刘晓, 夏佳琦, 陈强 (4327)
结合在线监测和自动识别系统分析东海沿岸船舶排放特征	邱浩, 刘丹彤, 吴杨周, 李思远, 丁朔, 胡康, 张家乐, 陈梅汀 (4338)
机动车制动磨损颗粒物及挥发性有机物的组分特征	门正宇, 刘笃优, 郭全有, 张静, 彭剑飞, 吴琳, 毛洪钧 (4348)
笼养鸡舍冬季挥发性有机物排放特征	曹甜甜, 郑云昊, 张羽, 王悦, 丛群欣, 王源昊, 董红敏 (4357)
上海市生活垃圾房气溶胶中可培养细菌污染状况及种群特征	卢冰洁, 张翔, 王川, 邱俊, 李丹 (4367)
浙江省2008~2018年人为源氨排放清单及分布特征	方利江, 杨一群, 叶观琼 (4380)
“双碳”目标下钢铁行业控煤降碳路线图	薛英岚, 张静, 刘宇, 陈瑜, 孙健, 蒋洪强, 张伟, 曹东 (4392)
空间关联网络结构特征的减排效应: 基于城市群视角	郑航, 叶阿忠 (4401)
中国对外直接投资的减污降碳效应及其实现机制	白梓函, 吕连宏, 赵明轩, 张楠, 罗宏 (4408)
近年全国地表水水质变化特征	嵇晓燕, 侯欢欢, 王姗姗, 杨凯 (4419)
湟水河流域地表水体微塑料分布、风险及影响因素	范梦苑, 黄懿梅, 张海鑫, 李好好, 黄倩 (4430)
汾河流域地表水化学同位素特征及其影响因素	赵春红, 申豪勇, 王志恒, 梁永平, 赵一, 谢浩, 唐春雷 (4440)
城镇化进程中珠江三角洲高锰地下水赋存特征及成因	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 朱亮, 李海军 (4449)
喀什噶尔河下游平原区地下水咸化特征及成因分析	鲁涵, 曾妍妍, 周金龙, 孙英 (4459)
重庆市老龙洞地下河流域硝酸盐来源和生物地球化学过程的识别	王雨畅, 杨平恒, 张洁茹 (4470)
蓝藻水华过程中优势种群演替模式、效应及驱动因子分析	欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李佳欣, 李玉鑫, 施军琼, 吴忠兴 (4480)
珠海市磨刀门水道输水水源水库群浮游植物群落特征及其环境驱动因子	张茉莉, 王思瑞, 昌盛, 王山军, 金德才, 樊月婷, 张坤峰, 谢琼, 付青 (4489)
营养物质对铜绿微囊藻生长和藻际细菌的影响	吕萍, 李慧莉, 徐勇, 郑效旭, 黄振华, 王聪, 徐圣君, 庄绪亮 (4502)
老化作用对微塑料吸附四环素的影响及其机制	王林, 王姝歆, 曾祥英, 何杨, 黄雯, 郑世界, 张建强 (4511)
沉积物和土壤中胶体对氯霉素吸附行为的影响	晏彩霞, 罗燕清, 聂明华, 周旋, 丁明军 (4522)
历史抗生素胁迫改变磺胺甲噁唑和甲氧苄啶对活性污泥的影响: ARGs及其潜在宿主	张忠兴, 樊晓燕, 李星, 高玉玺, 赵君如 (4536)
阳朔典型铅锌矿区流域土壤重金属空间分布特征及来源解析	陈盟, 潘泳兴, 黄奕翔, 王耀耀, 张睿东 (4545)
白洋淀及周边土壤重金属的分布特征及生态风险评估	郑飞, 郭欣, 汤名扬, 朱冬, 董四君, 康乐, 陈兵 (4556)
基于地理探测器的镇域尺度土壤重金属含量空间分异及其影响因素分析	龚仓, 王亮, 王顺祥, 张志翔, 董航, 刘玖芬, 王德伟, 严步青, 陈映 (4566)
燃煤电厂重金属排放与周边土壤中重金属污染特征及健康风险	车凯, 陈崇明, 郑庆宇, 范辉, 魏明磊, 罗蓬, 郁金星 (4578)
海南岛半干旱区农用地土壤重金属富集因素、健康风险及来源识别	杨剑洲, 龚晶晶, 王振亮, 高健翁, 杨建坤, 胡树起, 唐世新 (4590)
九龙江口红树林表层沉积物重金属赋存形态及污染评价	张华兰, 于瑞莲, 万瑞安, 胡恭任, 黄华斌, 吴雅清 (4601)
我国茶叶主产区有机肥重金属含量现状	伊晓云, 方丽, 杨向德, 马立峰, 刘美雅, 张群峰, 倪康, 石元值 (4613)
甘肃省农业土壤邻苯二甲酸酯累积特征及来源分析	陈玉玉, 张光全, 张杨, 李明凯, 郝佳欣, 熊有才, 李崇霄, 曹靖 (4622)
三峡库区澎溪河不同高程消落带土壤磷形态及磷酸酶活性分布特征	高艺伦, 方芳, 唐子超, 张蕊, 蒋艳雪, 郭劲松 (4630)
塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳组分特征及其与理化因子的相关性	李昕竹, 贡璐, 唐军虎, 罗艳, 丁肇龙, 朱海强, 张涵, 李蕊希 (4639)
黄土丘陵区柠条人工林不同深度土壤呼吸速率对土壤湿度的响应	孙亚荣, 王亚娟, 赵敏, 薛文艳, 梁思琦, 刘乐, 刘超, 陈云明 (4648)
基于Meta-analysis的生物炭对土壤硝态氮淋失和磷酸盐固持影响	姜志翔, 崔爽, 张鑫, 郝敏, 孙德茂 (4658)
低分子有机酸强化植物修复重金属污染土壤的作用与机制	方治国, 谢俊婷, 杨青, 卢烨桢, 黄海, 朱芸娟, 尹思敏, 吴鑫涛, 都韶婷 (4669)
无机钝化剂对镉污染酸性水稻土的修复效果及其机制	张剑, 孔繁艺, 卢升高 (4679)
改良铅锌矿渣对栎树幼苗铅锌富集与耐性机制	谢天志, 陈永华, 苏荣葵, 刘慧, 姚海松 (4687)
CaO ₂ /FA复合材料富集磷效能及其回收物对土壤改良作用	岳薇, 李大鹏, 吴玲予, 王璐, 汤尧禹, 朱企, 黄勇 (4697)
早稻秸秆还田和减钾对晚稻产量和土壤肥力的影响	黄巧义, 黄建凤, 黄旭, 吴永沛, 李苹, 付弘婷, 唐拴虎, 刘一峰, 徐培智 (4706)
秸秆连续还田配施化肥对稻-油轮作土壤碳库及作物产量的影响	蔡影, 付思伟, 张博睿, 胡宏祥, 刘文雯, 俞金涛, 贾临东, 刘运峰 (4716)
化肥减量配施秸秆对双季稻田固氮微生物群落的影响	陈凯鹏, 韦菊娟, 陈丹, 王聪, 沈健林, 李勇, 吴金水 (4725)
化肥减量与有机物料添加对华北潮土微生物氮循环功能基因丰度和氮转化遗传潜力的影响	李胜君, 胡荷, 李刚, 王蕊, 赵建宁, 张贵龙, 修伟明 (4735)
长期覆膜条件下农田土壤微生物群落的响应特征	胡志娥, 肖谋良, 丁济娜, 李剑虹, 陈剑平, 葛体达, 鲁顺保 (4745)
长期秸秆还田对潮土真菌群落、酶活性和小麦产量的影响	马垒, 李燕, 魏建林, 李子双, 周晓琳, 郑福丽, 吴小宾, 王利, 刘兆辉, 谭德水 (4755)
土壤改良剂对再生水滴灌根际土壤菌群多样性及病原菌和抗生素抗性基因丰度的影响	崔丙健, 崔二革, 刘春成, 胡超, 樊向阳, 李中阳, 高峰 (4765)
氮素对苜蓿植物修复垃圾堆场镉-多环芳烃复合污染土壤及土壤细菌群落结构的影响	李怡佳, 马俊伟, 李玉倩, 肖琛, 沈心怡, 牛云, 陈家军 (4779)
抗生素降解剂对猪粪堆肥腐熟和细菌群落演替的影响	李琳琳, 张昕, 马军伟, 孙万春, 成琪璐, 林辉 (4789)
《环境科学》征订启事 (4337) 《环境科学》征稿简则 (4407) 信息 (4521, 4705, 4800)	

早稻秸秆还田和减钾对晚稻产量和土壤肥力的影响

黄巧义¹, 黄建凤¹, 黄旭¹, 吴永沛¹, 李苹¹, 付弘婷¹, 唐拴虎¹, 刘一锋^{2*}, 徐培智^{1*}

(1. 广东省农业科学院农业资源与环境研究所, 农业部南方植物营养与肥料重点实验室, 广东省养分资源循环利用与耕地保育重点实验室, 广州 510640; 2. 广东省农业环境与耕地质量保护中心, 广州 510500)

摘要: 水稻秸秆是华南双季稻区重要的有机肥资源, 为探讨早稻秸秆还田条件下钾肥减量施用对晚稻产量和土壤肥力的影响, 于广东省白云区和惠阳区开展大田试验, 设置常规施肥(CK)、秸秆还田+常规施肥处理(RS)和秸秆还田+钾肥减施20%(RS-K)这3个处理, 分析不同处理的晚稻生物量、钾含量和产量, 及土壤速效钾、有机碳、细菌多样性和群落结构等土壤肥力性质的变化。结果表明, RS-K处理的水稻生物量和产量与CK处理无显著差异。与CK相比, RS处理的水稻植株钾含量平均提高了3.97%(白云)和6.91%(惠阳)。RS-K处理的植株钾含量在水稻生长前期显著低于CK处理, 但在水稻生长后期两者无显著差异。与CK相比, RS处理显著提高了土壤速效钾含量, 平均增幅达13.90%(白云)和21.67%(惠阳); RS-K处理的土壤速效钾也较CK处理提高了3.56%(白云)和4.23%(惠阳)。秸秆还田处理显著提高了土壤可溶性有机碳含量, 但对土壤pH值、有机碳、微生物量碳、硝态氮、铵态氮和有效磷含量无显著影响。与CK相比, 秸秆还田处理显著提高了土壤细菌的Chao1和Shannon指数; 秸秆还田处理还显著提升了变形菌门、放线菌门和硝化螺旋菌门的相对丰度, 而降低了酸杆菌门、拟杆菌门和厚壁菌门的相对丰度; 冗余分析表明, 土壤有机碳、可溶性有机碳、微生物量碳、有效磷和速效钾含量是驱动土壤细菌结构群落变化的主要环境因素。综上, 早稻秸秆还田可提高土壤速效钾含量和晚稻钾含量, 在早稻秸秆还田条件下钾肥减施20%对晚稻钾营养水平和产量均没有产生明显负面影响, 且能提高土壤有机碳和细菌多样性。因此, 在华南双季稻区, 早稻秸秆还田配合钾肥减施20%有利于化肥减施、粮食稳产和培肥地力, 对农业绿色发展具有重要意义。

关键词: 秸秆还田; 水稻; 钾肥减施; 产量; 土壤肥力; 土壤微生物

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)10-4706-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202112315

Effects of Early Rice Straw Returning with Reducing Potassium Fertilizer on Late Rice Yield and Soil Fertility

HUANG Qiao-yi¹, HUANG Jian-feng¹, HUANG Xu¹, WU Yong-pei¹, LI Ping¹, FU Hong-ting¹, TANG Shuan-hu¹, LIU Yi-feng^{2*}, XU Pei-zhi^{1*}

(1. Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer in South Region, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangdong Key Laboratory of Nutrient Cycling and Farmland Conservation, Institute of Agricultural Resources and Environment, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. Protection Center of Agricultural Environment and Cultivated Land Quality of Guangdong Province, Guangzhou 510500, China)

Abstract: Rice straw is an important organic fertilizer in the region for double-cropping rice in South China. To reveal the effects of early rice returning with reducing potassium fertilizer on the yield of late rice and soil fertility, field experiments were carried out in Baiyun and Huiyang district in Guangdong province. The biomass, K content, and yield of late rice and the soil fertility properties, such as soil available potassium, soil organic carbon, bacterial diversity, and bacterial community structure were analyzed under three treatments (CK, conventional fertilization; RS, straw returning with conventional fertilization; RS-K, straw returning with reducing 20% potassium fertilizer). The results showed no significant differences in the biomass and yield of late rice between the RS-K treatment and CK treatment. Compared with that in CK, the RS treatment significantly increased the K contents of rice by 3.97% (Baiyun) and 6.91% (Huiyang). The K contents of late rice under the RS-K treatment were significantly lower than that under the CK treatment during the early growth period in rice, but there was no significant difference between them during the late growth period. Compared with that in CK, the soil available K in the RS treatment increased by 13.90% (Baiyun) and 21.67% (Huiyang) ($P < 0.05$), and the soil available K in the RS-K treatment also increased by 3.56% (Baiyun) and 4.23% (Huiyang). Compared with that in the CK treatment, the soil dissolved organic carbon increased significantly in the RS and RS-K treatments ($P < 0.05$). Compared with that in CK, the straw returning treatments (RS and RS-K) significantly improved the Chao1 and Shannon indexes of soil bacteria ($P < 0.05$). Straw returning treatments (RS and RS-K) increased the relative abundance of Proteobacteria, Actinobacteria, and Nitrospirae compared with that in CK, whereas they decreased the relative abundance of Acidobacteria, Bacteroidetes, and Firmicutes. Redundancy analysis showed that the soil bacterial community was mainly influenced by soil organic carbon, dissolved organic carbon, microbial biomass carbon, available P, and available K. In summary, early rice returning could increase soil available K and K content in late rice. Early rice straw returning with reducing potassium fertilizer had no negative impacts on the growth and yield of late rice and could also improve soil organic carbon and the diversity of soil bacteria. Therefore, early rice straw returning with reducing potassium fertilizer can guarantee the grain yield of late rice and improve soil fertility.

Key words: straw returning; rice; potassium fertilizer substitution; yield; soil fertility; soil microorganism

秸秆是宝贵的有机肥资源, 富含有机质和氮、磷、钾等矿质营养成分, 是培肥耕地土壤和提高粮食产量的主要措施之一^[1~3]。水稻秸秆的钾含量高, 还田的钾肥理论替代潜力大, 可在一定程度上填补我国钾矿资源不足短板^[1,4]。据估算, 我国水稻秸秆

收稿日期: 2021-12-31; 修订日期: 2022-02-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1901601); 广东省自然科学基金项目(2020A1515011089); 广东省农业农村厅项目

作者简介: 黄巧义(1985~), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为秸秆综合利用、土壤培肥和植物营养, E-mail: huangqiaoyi@gdaas.cn

* 通信作者, E-mail: pzxx007@163.com; 109279800@qq.com

钾养分资源储量达 0.43×10^7 t, 秸秆全量还田带入的钾养分量相当于水稻种植过程中钾肥用量的 129.0%, 理论上可完全替代钾肥^[1]. 钾作为调控元素主要参与水稻体内多种生理生化过程, 对水稻抗病、抗旱和品质形成等具有重要作用, 是水稻生长发育所必需的关键矿质营养元素之一^[5,6]. 华南双季稻区耕地土壤普遍存在缺钾现象, 增施钾肥是水稻增产和稳产的关键措施, 对钾肥需求量大^[6,7]. 研究秸秆还田替代化学钾肥的可行性对华南双季稻区化肥减施增效和农业绿色发展具有重要参考意义.

有研究表明, 在稻-油轮作系统中, 秸秆还田可实现冬油菜和水稻种植过程中钾肥用量减施 31.2% 和 42.2%^[8]; 稻-麦轮作系统中, 小麦秸秆还田条件下钾肥减施 10%~20% 未引起水稻显著减产, 且综合效益高^[9]; 东北单季稻区秸秆还田条件下, 施用 K_2O $60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 即可实现增产和土壤钾素营养平衡^[10]; 华南双季稻区秸秆还田条件下减钾 10%~30% 对水稻产量无显著影响, 有助于提高钾素利用效率^[7]. 由此可见, 不同种植系统秸秆还田替代钾肥的潜力存在差异, 以钾肥减施 20% 较为稳健.

有研究还表明, 农作物秸秆还田可提高土壤钾含量, 缓解土壤钾缺乏^[11,12], 改善土壤结构, 提升土壤养分含量和土壤微生物多样性, 优化土壤微生物群落结构^[2,3,13]. 因此, 我国高度重视农作物秸秆还

田工作, 将其作为农业绿色发展的主要内容之一, 在各大粮食主产区大力推广应用. 已有研究多关注秸秆还田对作物产量或土壤钾平衡的影响, 而系统探讨双季稻种植系统下早稻秸秆还田条件下钾肥减施对晚稻产量、钾营养水平和土壤微生物群落结构的影响研究仍鲜见. 为此, 本文在华南双季稻区开展田间试验研究, 拟分析早稻秸秆还田条件下钾肥减施 20% 对晚稻产量、植株钾含量、土壤钾含量、土壤理化性质和微生物群落结构等的综合影响, 通过探明秸秆还田条件下钾肥减施对作物产量和土壤肥力的影响, 以期水稻秸秆科学还田和化肥减施提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验在广东省农业科学院试验基地(位于广州市白云区钟落潭镇, $23^{\circ}39'N$, $113^{\circ}43'E$, 白云点)和惠州市惠阳区农业农村综合服务中心试验基地(位于惠州市惠阳区平潭镇, $23^{\circ}05'N$, $115^{\circ}00'E$, 惠阳点)进行. 白云点年平均气温 $24.0^{\circ}C$, 年降雨量 $1\,778 \text{ mm}$, 无霜期长达 350 d, 土壤类型为水稻土, 土壤质地为砂壤土. 惠阳点年平均气温 $22.0^{\circ}C$, 年降雨量 $1\,770 \text{ mm}$, 无霜期长达 350 d, 土壤类型为水稻土, 土壤质地为黏壤土. 试验前土壤理化性质见表 1.

表 1 土壤理化性质

Table 1 Basic chemical properties of soil

地点	pH	ω (有机碳) $/\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	ω (全氮) $/\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{NO}_3^- - \text{N})$ $/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ $/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	ω (速效磷) $/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	ω (速效钾) $/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
白云	5.62	13.89	1.07	1.40	21.36	37.48	81.4
惠阳	6.03	16.18	1.58	5.09	26.30	48.14	59.3

1.2 试验设计

本试验在 2020 年 8~12 月期间进行. 试验共设 3 个处理, 分别为: 常规施肥(CK)、秸秆还田 + 常规施肥处理(RS)和秸秆还田 + 钾肥减施 20% 处理(RS-K), 各 3 个重复, 共 9 个小区, 小区面积 30 m^2 ($5.0 \text{ m} \times 6.0 \text{ m}$), 随机区组排列. 小区间筑埂后用塑料薄膜包覆隔离, 实行单独排灌, 防止水、肥渗透. CK 处理将早稻秸秆全部移除; RS 和 RS-K 处理将早稻秸秆切短(长度为 8~12 cm), 均匀撒施于土表, 然后采用微耕机将秸秆翻耕入土, 秸秆还田量根据广东省早稻秸秆产量水平进行施用 ($6\,000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); 早稻秸秆钾含量为 ω (钾) $17.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 常规施肥处理的施肥量为 N $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 P_2O_5 $46 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 K_2O $130 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 氮、磷和钾肥分别采用腐殖酸尿素(N 46%)、过磷酸钙(P_2O_5 12%)

和氯化钾(K_2O 60%); 钾肥减施 20% 处理的施肥量为 N $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 P_2O_5 $46 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 K_2O $104 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 所有肥料做基肥在水稻移栽前 1 d 全部施用.

白云点和惠阳点的水稻品种分别为华航丝苗和柳优香. 采用水育秧方式育苗, 分别于 7 月 15 日和 7 月 1 日播种, 8 月 1 日和 7 月 17 日插秧, 11 月 15 日和 10 月 28 日收获. 采用人工插秧, 插秧密度为 $14 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$, 每穴 2 株; 水稻生长期采用当地高产栽培技术进行水分管理、病虫害防治及其它农事操作.

1.3 测定内容与方法

1.3.1 干物质及产量

分别于水稻移栽后 15、30、45、60、75 d 和收获期(惠阳点 103 d, 白云点 106 d), 每小区随机采

集 3 株水稻植株样品,洗净后放入烘箱 105℃ 杀青 30 min,然后 80℃ 烘至恒重,称重得到水稻干物质.在水稻收获期,调查每个小区的有效穗数、穗粒数、实粒数、千粒重等产量构成因子.采用人工实割测产,整个小区水稻收割、脱粒和称重,然后随机取 1 kg 稻谷晾晒测定折干率,计算每个小区的水稻产量.

1.3.2 植株钾含量

将水稻植株样品烘干称重后,粉碎研磨,过 0.25 mm 筛,采用火焰分光光度计法测定植株全钾含量^[14].

1.3.3 土壤性质

分别于移栽后 15、30、45、60、75 d 和收获期(惠阳点 103 d,白云点 106 d)采集土壤样品,采用取土器在每个小区随机取 4 个点次的耕层土壤样品(0~20 cm),混匀成一个样品,然后,带回实验室风干后过 2 mm 筛,用于测定土壤速效钾含量.收获期采多一份耕层土壤样品(0~20 cm),去除秸秆、根系、沙砾等杂质,取一部分土壤样品装于放有冰袋的保温箱中立即带回实验室,保存于 -80℃ 冰箱,用于分析土壤细菌多样性;再取一部分样品保存于 4℃ 冰箱,用于分析土壤微生物量碳、NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N;剩余样品自然风干后过 2 mm 筛和 1 mm 筛,用于分析土壤理化性状.土壤 pH 值采用玻璃电极法测定,有机碳采用重铬酸钾氧化-分光光度法测定,可溶性有机碳采用水浸提-总有机碳分析仪测定,易氧化有机碳采用高锰酸钾氧化法测定,微生物量碳采用氯仿熏蒸法测定,NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 采用流动分析仪测定,有效磷采用 Olsen 法测定,速效钾采用 NH₄OAc 浸提-火焰光度计法测定^[14].

1.3.4 土壤 DNA 提取和高通量测序

土壤微生物组总 DNA 提取、PCR 扩增和建库测序工作委托上海派森诺生物科技有限公司完成.称取约 0.5 g 新鲜土壤样品,采用 Mo Bio/QIAGEN 公司的试剂盒(DNeasy PowerSoil Kit)提取土壤 DNA,采用荧光分光光度计和琼脂糖凝胶电泳检测 DNA 的浓度和质量.采用细菌 16S rRNA 基因的 V3-V4 区序列引物(5'-ACTCCTAGGGAGGGCAGCAG-3'和 5'-GGACTACHVGGGTWTTCTAAT-3')^[15]进行 PCR 扩增,使用 AxyPrep DNA 凝胶回收试剂盒切割回收目标条带获得纯化样本,利用 BioTek 酶标仪(BioTek Flx800 酶标仪)对 PCR 产物进行定量检测,构建上机文库,然后采用 Illumina NovaSeq 6000 平台进行建库测序.

1.4 数据处理与分析

采用 R 软件(4.05)对数据进行统计分析和绘

图,差异显著性采用单因素方差分析(One-way ANOVA),LSD ($P < 0.05$) 进行差异比较;采用 QIIME2 (2019.4) 软件对土壤 DNA 测序原始序列进行质控、去噪、拼接、去嵌合体;采用 Vsearch (v2.13.4_linux_x86_64) 软件按照序列 97% 的相似性进行 OTU 聚类;利用 RDP classifier 软件(<http://rdp.cme.msu.edu/>) 对每条序列进行物种分类注释,根据 Silva (Release115, <http://www.arb-silva.de>) 数据库比对序列(比对阈值为 70%),获得细菌群落的分类学信息;采用 QIIME 2 (2019.4) 软件计算 16S 序列测序覆盖度(Coverage)、Chao 1 指数、Shannon 指数和 Simpson 指数等土壤细菌 α 多样性指数;将相对丰度 $\geq 0.5\%$ 的 OTU 定义为优势 OTU,并将相对丰度排在前 10 位的细菌门定义为优势细菌门,利用 R 软件(4.05)的 ggplot2 包绘制土壤细菌群落组成图;采用 QIIME2 (2019.4) 软件计算土壤细菌 Bray-Curtis 距离矩阵,利用 R 软件(4.05)的 vegan 包并基于 Bray-curtis 距离的冗余分析法计算不同土壤理化性质对微生物群落结构的影响,最后采用 R 软件(4.05)的 ggplot2 包绘制冗余分析图.

2 结果与分析

2.1 水稻生物量积累和产量

从图 1 可知,随着水稻生育期的发展,水稻地上部分生物量不断增加,且不同处理间的生物量差距逐渐扩大.在收获期,RS 处理的生物量较 CK 处理提高了 4.80% (白云点) 和 8.80% (惠阳点);RS-K 处理的生物量较 CK 处理提高了 0.92% (白云点) 和 0.36% (惠阳点).从表 2 可知,与 CK 处理相比,RS 和 RS-K 处理的产量和产量构成因子均无显著差异.

2.2 水稻植株钾含量

从图 2 可见,随着水稻生长生育期的发展,水稻植株的钾含量逐渐降低.不同处理显著影响水稻植株钾含量.与 CK 处理相比,RS 处理的植株钾含量分别提高了 0.91%~8.51% (白云) 和 2.08%~10.44% (惠阳),平均增幅为 3.97% (白云) 和 6.91% (惠阳),其中,惠阳试验点 75DAP(移栽后天数,Days after planting)植株钾含量显著提高,增幅达 10.44%.与 RS 处理相比,RS-K 处理的植株钾含量降低了 3.40%~9.30% (白云) 和 3.41%~13.58% (惠阳),其中白云试验点的 45 DAP 和 60 DAP 植株钾含量显著降低,降幅分别达 8.86% 和 9.30%,惠阳试验点的 15 DAP 和 30 DAP 植株钾含量显著降低($P < 0.05$),降幅分别达 13.31% 和 13.58%.与 CK 处理相比,RS-K 处理的植株钾含量基本没有显

著差异,只有惠阳试验点 15 DAP 植株钾含量显著降低 ($P < 0.05$),降幅为 10.91%; 在水稻生长期,RS-K 处理的植株钾含量低于 CK 处理,但在水稻生长后期,两者基本没有差异.

表 2 秸秆还田和钾肥减施对水稻产量及其构成因素的影响¹⁾

Table 2 Effects of straw incorporation and potassium reduction on the yield of rice						
试验点	处理	有效穗数/穗	穗粒数/粒	千粒重/g	结实率/%	产量/kg·hm ⁻²
白云	CK	14.1 ± 0.4a	180.8 ± 1.3a	21.9 ± 0.7a	85.2 ± 1.8a	6 966.75 ± 354.24a
	RS	13.9 ± 0.4a	173.4 ± 3.1a	21.0 ± 0.5a	84.0 ± 2.3a	6 905.10 ± 425.81a
	RS-K	13.6 ± 0.2a	171.1 ± 2.7a	21.8 ± 0.5a	84.4 ± 2.5a	6 710.10 ± 403.54a
惠阳	CK	15.1 ± 0.1a	113.6 ± 5.3a	26.1 ± 0.2a	81.0 ± 1.7a	7 206.75 ± 524.14a
	RS	14.8 ± 0.2a	113.3 ± 7.7a	26.2 ± 0.5a	80.1 ± 0.6a	7 255.05 ± 481.61a
	RS-K	15.0 ± 0.7a	117.7 ± 8.1a	25.5 ± 0.3a	79.1 ± 0.7a	6 853.35 ± 553.29a

1) 同列数据后不同小写字母表示同一试验点不同处理间差异显著 ($P < 0.05$),下同

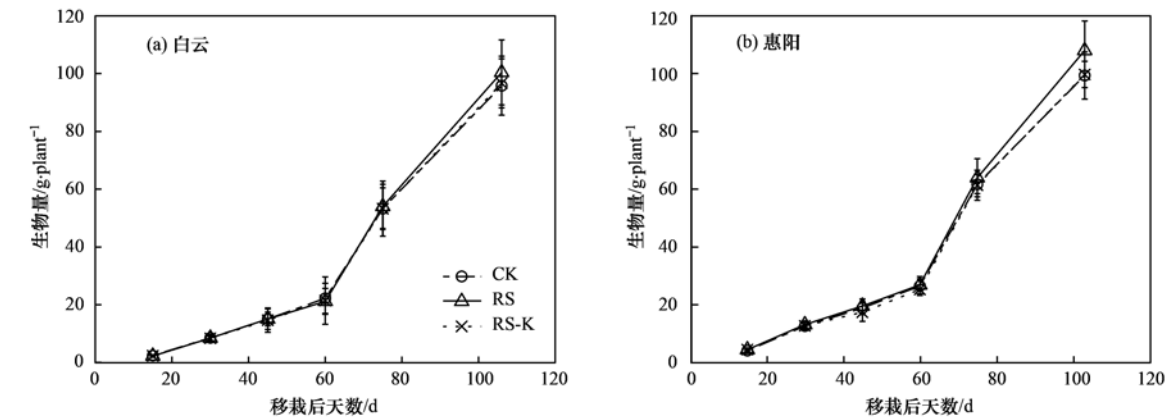
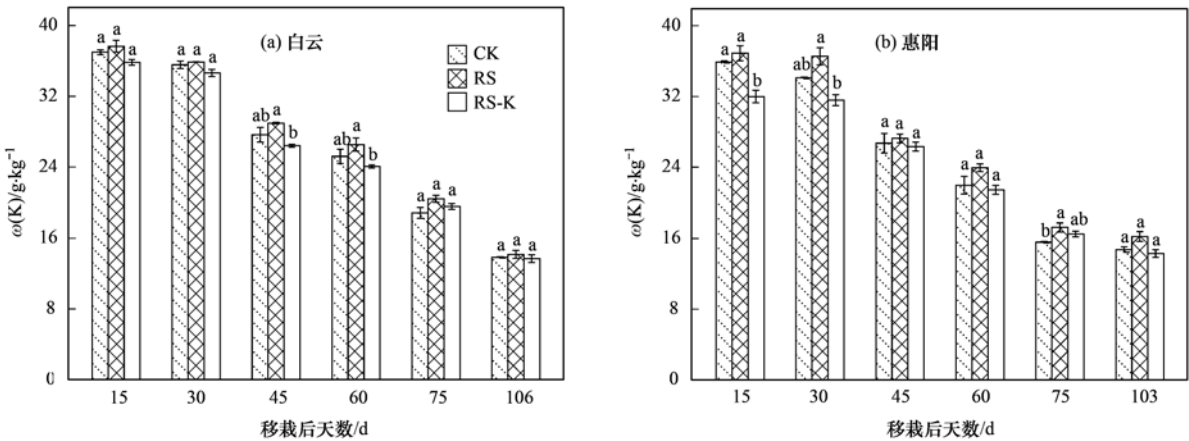


图 1 秸秆还田与钾肥减施对水稻地上部分干物质累积的影响

Fig. 1 Effects of straw incorporation and potassium reduction on the dynamic biomass accumulation of the above ground portion of rice



不同小写字母表示同一时期不同处理间差异显著 ($P < 0.05$),下同

图 2 秸秆还田与钾肥减施对水稻植株钾含量的影响

Fig. 2 Effects of straw incorporation and potassium reduction on the potassium content of rice

2.3 土壤速效钾含量

从图 3 可见,不同处理显著影响土壤速效钾含量.与 CK 处理相比,RS 处理的土壤速效钾含量提高了 3.96%~25.23% (白云)和 9.60%~45.16% (惠阳),平均增幅为 13.90% (白云)和 21.67% (惠阳);其中,在白云试验点,15 DAP 和 45 DAP 的土壤速效钾含量显著高于 CK 处理 ($P < 0.05$),增幅达 14.02% 和 25.23%;在惠阳试验点,15 DAP、30

DAP 和收获期的土壤速效钾含量显著高于 CK 处理 ($P < 0.05$),分别提高了 27.85%、22.84% 和 45.16%.与 CK 处理相比,RS-K 处理的土壤速效钾含量平均提高了 3.56% (白云)和 4.23% (惠阳);其中,惠阳试验点收获期土壤速效钾含量显著高于 CK 处理 ($P < 0.05$),增幅达 23.87%.

2.4 土壤理化性质

由表 3 可知,与 CK 处理相比,RS 和 RS-K 处理

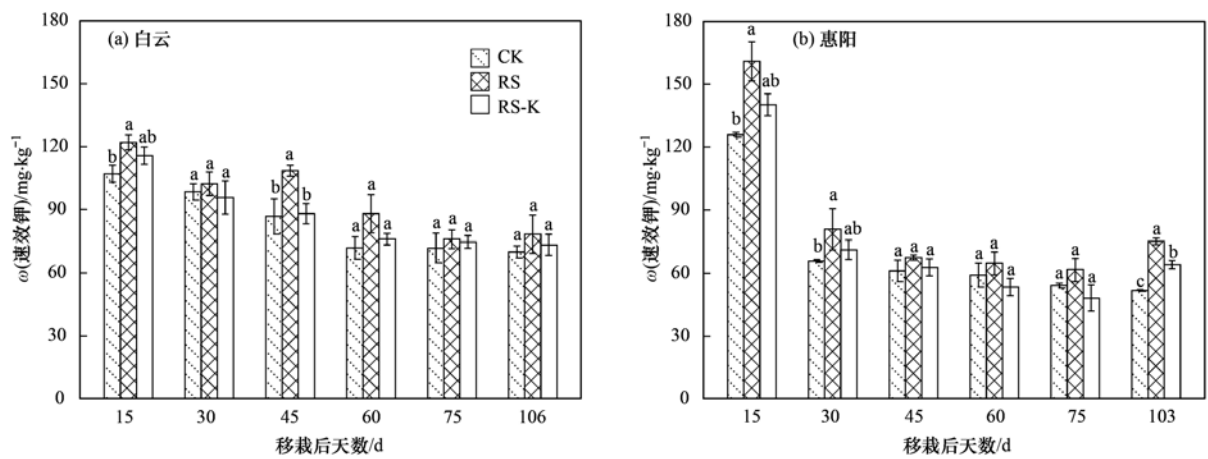


图3 秸秆还田与钾肥减施对土壤速效钾含量的影响

Fig. 3 Effects of straw incorporation and potassium reduction on the soil available potassium

均不同程度地提高了土壤有机碳和可溶性有机碳含量. 惠阳试验点 RS 和 RS-K 处理的土壤有机碳较 CK 处理提高了 17.62% 和 16.07% ($P < 0.05$), 可溶性有机碳提高了 10.50% 和 7.38%, 其中 RS 处理增幅明显, 显著高于 CK 处理 ($P < 0.05$). 白云试验点

RS 和 RS-K 处理的土壤可溶性有机碳含量均显著高于 CK 处理 ($P < 0.05$), 分别提高了 26.27% 和 27.77%. RS 和 RS-K 处理的易氧化有机碳、微生物量碳、有效磷均高于 CK 处理, 但差异不显著. 不同处理的 pH 值、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量均无明显变化.

表3 秸秆还田与钾肥减施处理土壤理化性质

Table 3 Soil properties as affected by rice straw return and potassium reduction

试验点	处理	pH	$\omega(\text{有机碳})$ / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{可溶性有机碳})$ / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{易氧化有机碳})$ / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{微生物量碳})$ / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{NO}_3^- \text{-N})$ / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{NH}_4^+ \text{-N})$ / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{有效磷})$ / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
白云	CK	$5.64 \pm 0.07\text{a}$	$14.43 \pm 1.52\text{a}$	$101.80 \pm 1.55\text{b}$	$2.89 \pm 0.80\text{a}$	$52.39 \pm 2.11\text{a}$	$1.07 \pm 0.16\text{a}$	$5.17 \pm 1.47\text{a}$	$33.78 \pm 3.99\text{a}$
	RS	$5.66 \pm 0.02\text{a}$	$16.37 \pm 0.88\text{a}$	$128.54 \pm 11.84\text{a}$	$3.29 \pm 0.64\text{a}$	$61.00 \pm 8.70\text{a}$	$1.15 \pm 0.14\text{a}$	$5.34 \pm 1.05\text{a}$	$37.72 \pm 3.05\text{a}$
	RS-K	$5.64 \pm 0.09\text{a}$	$15.98 \pm 1.14\text{a}$	$130.07 \pm 12.89\text{a}$	$3.53 \pm 0.58\text{a}$	$66.53 \pm 6.82\text{a}$	$1.14 \pm 0.08\text{a}$	$5.49 \pm 0.45\text{a}$	$35.22 \pm 3.75\text{a}$
惠阳	CK	$6.07 \pm 0.03\text{a}$	$14.54 \pm 0.16\text{b}$	$82.82 \pm 1.74\text{b}$	$2.40 \pm 0.44\text{a}$	$33.07 \pm 5.45\text{a}$	$1.14 \pm 0.07\text{a}$	$6.80 \pm 0.38\text{a}$	$47.22 \pm 4.55\text{a}$
	RS	$6.05 \pm 0.04\text{a}$	$17.10 \pm 0.10\text{a}$	$91.52 \pm 3.45\text{a}$	$3.42 \pm 0.60\text{a}$	$41.93 \pm 4.28\text{a}$	$1.18 \pm 0.01\text{a}$	$7.58 \pm 1.07\text{a}$	$51.65 \pm 3.12\text{a}$
	RS-K	$6.10 \pm 0.03\text{a}$	$16.87 \pm 0.17\text{a}$	$88.93 \pm 2.0\text{ab}$	$3.29 \pm 0.68\text{a}$	$39.91 \pm 3.28\text{a}$	$1.14 \pm 0.12\text{a}$	$7.02 \pm 0.87\text{a}$	$53.07 \pm 3.70\text{a}$

2.5 土壤细菌群落多样性及群落构成

从表4可知,白云试验点,RS 和 RS-K 处理的土壤细菌 Chao1 指数显著高于 CK 处理 ($P < 0.05$), 分别提高了 15.01% 和 18.19%; 16S 序列测序覆盖度和 Shannon 指数也分别较 CK 处理增加了 0.38% 和 0.11%、1.65% 和 2.20%, 但不同处理间差异不显著; 不同处理的 Simpson 指数基本接近. 惠阳试验点,RS 和 RS-K 处理的土壤细菌 Chao1 指数比 CK 处理增加了 12.78% 和 11.65%, 其中 RS 处理显著高于 CK 处理 ($P < 0.05$); 同时,RS 和 RS-K 处理的 Shannon 指数显著高于 CK 处理 ($P < 0.05$), 增幅分别达 8.12% 和 7.33%; 各处理 16S 序列测序覆盖度和 Simpson 指数均无显著差异.

不同处理土壤细菌群落在门水平上的组成如图4所示. 白云试验点土壤以变形菌门 (Proteobacteria)、绿弯菌门 (Chloroflexi)、酸杆菌门 (Acidobacteria) 和放线菌门 (Actinobacteria) 为主要优势菌门 (相对丰度 $> 10\%$), 相对丰度分别

为 26.82% ~ 31.30%、21.28% ~ 26.99%、11.02% ~ 15.09% 和 8.15% ~ 14.49%, 占总细菌的 68.22% ~ 83.09%. 惠阳试验点土壤以变形菌门 (Proteobacteria)、绿弯菌门 (Chloroflexi) 和酸杆菌门 (Acidobacteria) 为主要优势菌门 (相对丰度 $> 10\%$), 相对丰度分别为 31.32% ~ 36.24%、21.70% ~ 24.35% 和 10.69% ~ 14.50%, 占总细菌的 68.21% ~ 71.29%. 秸秆还田改变了土壤细菌群落结构. 与 CK 处理相比,白云试验点 RS 和 RS-K 处理显著提高了变形菌门、绿弯菌门、放线菌门和硝化螺旋菌门的相对丰度 ($P < 0.05$), 分别平均提高了 7.78%、17.54%、32.23% 和 43.32%, 显著降低了拟杆菌门 (Bacteroidetes) 和厚壁菌门 (Firmicutes) 的相对丰度 ($P < 0.05$), 分别平均降低了 59.97% 和 65.14%; 惠阳试验点 RS 和 RS-K 处理显著提高了变形菌门、放线菌门和硝化螺旋菌门的相对丰度 ($P < 0.05$), 分别平均提高了 10.26%、44.39% 和 82.14%, 显著降低了酸杆菌

门、拟杆菌门和厚壁菌门的相对丰度 ($P < 0.05$)，分别平均降低了 18.37%、24.62% 和 67.02%。RS 和 RS-K 之间各细菌门相对丰度均无显著差异。

表 4 秸秆还田与钾肥减施处理土壤细菌多样性指数

Table 4 Diversity indices of soil bacterial community as affected by rice straw return and potassium reduction					
试验点	处理	16S 序列测序覆盖度	Chao 1 指数	Shannon 指数	Simpson 指数
白云	CK	0.971 7 ± 0.001 6a	2 355. 72 ± 153. 04b	10. 92 ± 0. 28a	0. 009 1 ± 0. 000 5a
	RS	0.975 4 ± 0. 003 7a	2 709. 37 ± 37. 98a	11. 10 ± 0. 12a	0. 009 0 ± 0. 000 1a
	RS-K	0.972 8 ± 0. 015 5a	2 784. 31 ± 75. 22a	11. 16 ± 0. 25a	0. 009 0 ± 0. 000 7a
惠阳	CK	0.960 0 ± 0. 005 8a	2 778. 96 ± 201. 38b	10. 22 ± 0. 20b	0. 009 5 ± 0. 000 8a
	RS	0.960 0 ± 0. 007 2a	3 134. 31 ± 26. 40a	11. 05 ± 0. 15a	0. 009 5 ± 0. 000 1a
	RS-K	0.961 1 ± 0. 004 5a	3 102. 68 ± 62. 11ab	10. 97 ± 0. 02a	0. 009 5 ± 0. 000 2a

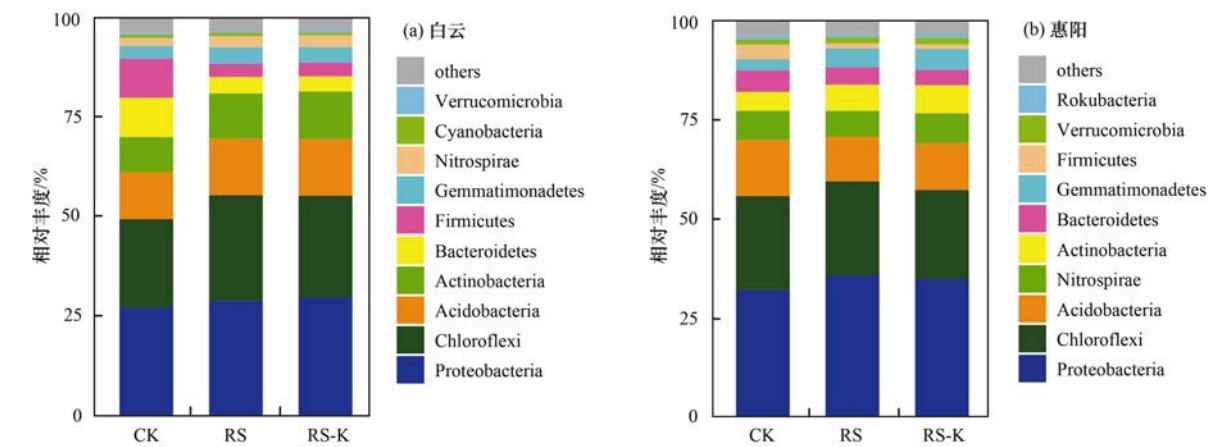
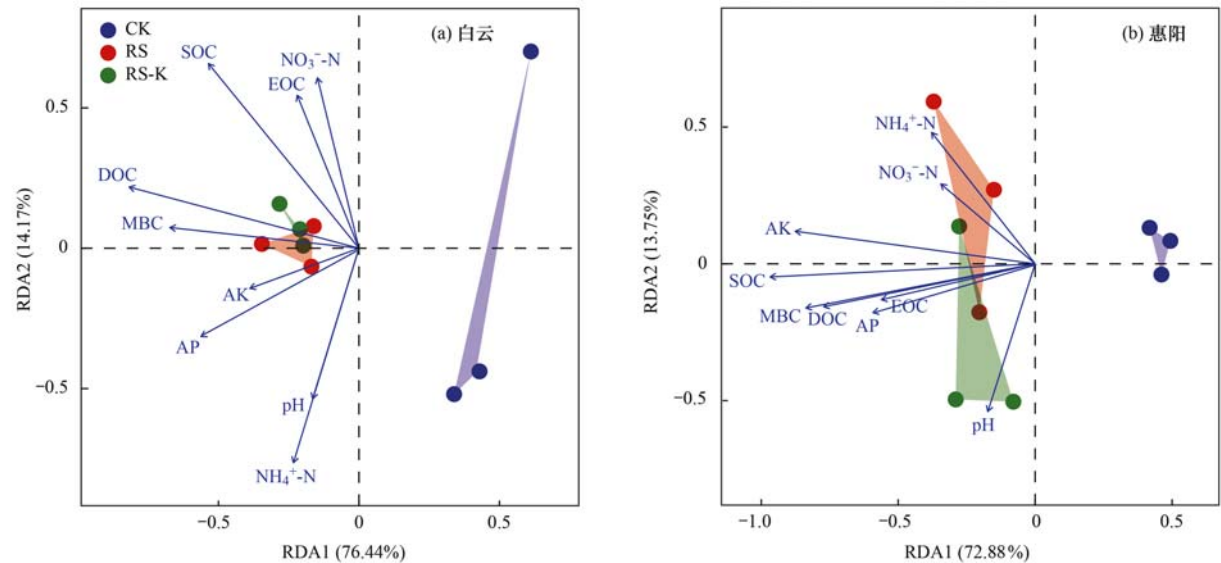


图 4 不同处理土壤细菌在门分类水平上的群落组成
Fig. 4 Soil bacterial composition at the phylum level in different treatments

2.6 土壤理化性质与土壤细菌群落结构的关系

为进一步分析不同土壤理化性质对细菌门水平群落结构的影响,对细菌群落结构与土壤环境因子进行 RDA 分析(图 5)。结果表明,RDA1 和 RDA2 分别解释了白云试验点土壤细菌群落结构总变异的

76.44% 和 14.17%,惠阳试验点土壤细菌群落结构总变异的 72.88% 和 13.75%。细菌门水平上,RS 和 RS-K 处理沿 RDA1 轴方向与 CK 处理明显分离,而 RS 和 RS-K 处理间相互交叉,分离不明显,表明秸秆还田措施显著改变土壤细菌群落结构。白云试验



SOC 表示土壤有机碳(soil organic carbon); DOC 表示可溶性有机碳(dissolved organic carbon); EOC 表示易氧化态有机碳(easily oxidizable C); MBC 表示微生物量碳(microbial biomass carbon); AK 表示有效钾(soil available potassium); AP 表示有效磷(soil available phosphorus)

图 5 不同处理基于微生物群落和土壤理化性质的冗余分析

Fig. 5 Redundancy analysis based on bacterial community and soil physical and chemical properties of different treatments

点和惠阳试验点的结果均表明,RS 和 RS-K 处理分布在 SOC、DOC、MBC、EOC、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、AP、AK 和 pH 投影的正方向上,白云试验点 SOC、DOC 和 MBC 在 RDA1 轴上的投影长度较大,惠阳试验点 SOC、AK、MBC 和 DOC 在 RDA1 轴上的投影长度较大,表明 RS 和 RS-K 处理通过改变土壤有机碳、可溶性有机碳、微生物量碳、有效钾和有效磷含量,从而驱动土壤细菌群落结构的改变。

3 讨论

3.1 早稻秸秆还田条件下钾肥减施对晚稻生长和产量的影响

本研究结果表明,RS-K 处理的晚稻植株钾含量在生长前期显著低于 CK 处理,但在晚稻生长后期,RS-K 处理的植株钾含量基本与 CK 处理持平(图 2),这与曾研华等^[16]在江西开展的田间试验结果一致,这可能是与秸秆还田后钾的释放特征及其作物有效性有关。RS-K 处理的秸秆钾表观总输入量(以 K_2O 计)为 $102 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,相当于 CK 处理化学钾肥用量的 78.46%,且钾素的当季释放率高达 95% 以上^[17~19],RS-K 处理的总钾投入量远高于 CK 处理。但是,秸秆还田后常集中分布,分布不均匀,秸秆钾养分的释放速率滞后,无法快速到达水稻根际范围,以致钾养分的作物有效性低于化肥^[17,20];而另一方面,水稻秸秆还田后的钾养分释放期长达 30 d,秸秆钾的养分释放期和供应期较长^[21],从而保证了水稻生长后期钾素营养供应。

本研究结果表明,与 CK 处理相比,RS-K 处理对晚稻生物量、籽粒产量和产量构成因子均未产生明显的负面影响(表 2)。钾是水稻生长发育所必需的矿质元素,在水稻产量形成、抗倒伏、抗病害和稻米品质提升方面发挥着重要作用。水稻秸秆是重要的有机钾肥资源,双季稻种植系统下早稻秸秆还田替代化学钾肥的理论潜力高达 92.70%^[1]。但是,还田后秸秆释放的钾养分容易受到淋洗、径流和下渗等影响,钾素利用效率低^[17,20],实际生产中,秸秆全量还田替代 10%~30% 化学钾肥的可行性较大^[4,7,9,22~24]。水稻秸秆还田可能还存在农机作业难度加大、与作物争夺氮营养和作物病虫害加重等不利影响,危害下一茬水稻生长,导致稻谷减产^[25,26]。本试验中 RS-K 处理未出现明显减产现象,可能是由于秸秆还田后采用了一次性施肥技术,将全部氮肥作基肥进行施用,缓解了早稻秸秆还田后腐解过程中氮素不足问题。同时,在秸秆还田后,本试验采用了深翻和淹水等农事操作,将秸秆与土壤充分混匀,并保持一段时间的淹水还原状态,实现了一定的

灭菌、杀虫和促腐效果^[27,28]。另外,在水稻生长中期,采用干湿交替的水分管理方式,可进一步改善水稻根际微生态,可能在一定程度上抵消了秸秆还田产生的不利影响^[29]。

3.2 早稻秸秆还田条件下钾肥减施对土壤肥力的影响

本研究结果表明,RS 处理的土壤速效钾含量显著高于 CK 处理(图 3),这主要是由于早稻秸秆含有丰富的钾营养,秸秆还田后在微生物作用下,逐渐释放出钾营养到土壤环境中,从而提高土壤速效钾含量。RS-K 处理的土壤速效钾含量也高于 CK 处理(图 3),这主要是由于 RS-K 处理的总钾输入量高于 CK 处理,而且秆还田后还会释放出有机酸,进一步促进土壤矿物中钾的释放^[17],因此,RS-K 处理的土壤速效钾含量显著高于 CK 处理。试验前,惠阳点的土壤速效钾含量显著低于白云点(表 1),但在试验初期惠阳点的土壤速效钾含量显著高于白云点,且惠阳点 RS 和 RS-K 对土壤速效钾含量的提升幅度也大于白云点(图 3),这可能是由于两个试验点的土壤质地不同。惠阳点的土壤为黏壤土,白云点为砂壤土,惠阳点的土壤保肥能力比惠阳试验点强。由于秸秆和化学钾均以基肥形式施用,施入土壤后均能快速溶解进入土壤溶液中,水稻生长前期处于淹水状态,灌溉频率高,可能加大白云试验点的养分淋溶流失,以致其土壤速效钾含量显著低于惠阳试验点。

本研究结果表明,RS 和 RS-K 处理的土壤有机碳和可溶性有机碳含量显著高于 CK 处理,但易氧化态碳和微生物量碳含量差异不显著(表 3)。早稻秸秆含有丰富的有机碳,还田可提高土壤有机碳含量,且还田年限越长,其增碳作用越显著^[30,31]。可溶性有机碳是土壤中最活跃的有机碳组分,转化周期短,对土壤环境变化的响应较强烈,因此,两个试验点秸秆还田处理的可溶性有机碳含量均显著高于 CK 处理,该结果与前人的研究结果一致^[32,33]。秸秆还田为土壤微生物提供丰富碳源,并改善土壤微生物生活环境,促进土壤微生物的生长和繁殖,可提高土壤微生物量碳含量^[13,34]。本试验中秸秆还田处理对土壤微生物量碳的影响不显著,可能是由于本试验周期较短,土壤微生物量碳的提升效果尚不明显。

土壤微生物参与土壤养分循环、有机质形成和团聚体形成等关键土壤培肥过程,也是秸秆在土壤中腐解过程的主要分解者,是秸秆还田措施影响土壤肥力的重要参与者^[34~36]。本研究结果表明,RS 和 RS-K 处理的 Chao1 指数和 Shannon 指数显著高于 CK 处理(表 4),提高了晚稻土壤细菌多样性和丰富度。早稻秸秆还田为土壤微生物提供了丰富的碳源、

能源和营养物质,改善了土壤微生物生境,从而有助于提高土壤细菌丰度和多样性^[34~36]。本研究结果表明,早稻秸秆还田导致土壤细菌群落结构发生显著变化,提高了土壤变形菌门、放线菌门和硝化螺旋菌门的相对丰度,这与前人研究结果一致^[13,36]。变形菌门、放线菌门和硝化螺旋菌门参与了秸秆纤维素、半纤维素、可溶性糖等组分的降解和腐殖化过程,因而对秸秆还田措施的响应较明显^[31,36]。通过 RDA 分析结果表明,土壤有机碳、可溶性有机碳、微生物量有机碳、有效钾和有效磷含量是秸秆还田处理中土壤细菌群落结构变异的主要环境驱动因子(图 5)。前人研究结果表明,变形菌门广泛参与土壤中碳、氮等元素的生物化学循环过程,在秸秆还田的农田土壤中丰度较高,其中 α -变形菌与土壤有机碳含量显著正相关^[37~39]。早稻秸秆还田处理为晚稻土壤输入丰富的有机质,提高了土壤有机碳含量,进而驱动变形菌门中相关功能种群的繁殖,从而提高了晚稻土壤变形菌门的相对丰度。放线菌门可分泌降解有机质的活性酶,在秸秆降解和腐殖化过程中发挥关键作用^[37,40,41]。已有研究表明,秸秆还田处理通过提高土壤有机碳、有效磷和有效钾含量,为土壤放线菌种群创造了良好的生长条件,从而提升了放线菌门的相对丰度^[41~43]。硝化螺旋菌门主要参与土壤中氮元素的生物化学循环过程,可利用秸秆矿化过程中的有机氮^[44]。因此,早稻秸秆还田可提高土壤有机氮含量,为硝化螺旋菌门的生长提供充足的氮素营养,土壤中较高的有机碳和有效氮含量可能解释了硝化螺旋菌门的相对丰度提高^[44,45]。白云试验点秸秆还田处理还显著提高了土壤中绿弯菌门的相对丰度,绿弯菌门属于贫营养型菌,可将秸秆中的大分子有机质降解至小分子,在秸秆降解后期发挥重要作用^[13,40]。早稻秸秆还田输入大量有机物,显著提高了土壤有机碳含量,可能驱动了绿弯菌门丰度的提高。总的来说,早稻秸秆还田输入了大量有机质,提高了土壤微生物多样性;并改变了土壤碳、磷和钾等土壤理化性质,驱动了细菌群落结构的改变。

4 结论

(1) 双季稻种植制度下,早稻秸秆还田条件下钾肥用量减施 20% 对晚稻植株钾含量和籽粒产量未造成明显负面影响,且有助于提高土壤速效钾含量,是晚稻钾肥减施的有效栽培管理方式。

(2) 早稻秸秆还田处理显著提高了土壤有机碳和速效钾含量,显著提高土壤细菌多样性,并驱动微生物群落结构发生显著改变,有助于提升双季稻区

耕地土壤肥力。

参考文献:

- [1] 宋大利,侯胜鹏,王秀斌,等. 中国秸秆养分资源数量及替代化肥潜力[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, **24**(1): 1-21.
Song D L, Hou S P, Wang X B, *et al.* Nutrient resource quantity of crop straw and its potential of substituting[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, **24**(1): 1-21.
- [2] 刘颖颖,卜容燕,唐杉,等. 连续秸秆-紫云英协同还田对双季稻产量、养分积累及土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, **26**(6): 1008-1016.
Liu Y Y, Bu R Y, Tang S, *et al.* Effect of continuous straw-Chinese milk vetch synergistic return to the field on yield, nutrient accumulation and soil fertility of double cropping rice[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, **26**(6): 1008-1016.
- [3] 杨竣皓,骆永丽,陈金,等. 秸秆还田对我国主要粮食作物产量效应的整合(Meta)分析[J]. 中国农业科学, 2020, **53**(21): 4415-4429.
Yang J H, Luo Y L, Chen J, *et al.* Effects of main food yield under straw return in China: a Meta-analysis[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, **53**(21): 4415-4429.
- [4] 程文龙,韩上,武际,等. 连续秸秆还田替代钾肥对作物产量及土壤钾素平衡的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019, (5): 72-78.
Cheng W L, Han S, Wu J, *et al.* Effect of continuous straw incorporation substitute for K-fertilizer on crop yield and soil potassium balance[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2019, (5): 72-78.
- [5] 叶青,曹国军,耿玉辉. 长期施钾和秸秆还田对水稻产量的影响[J]. 中国稻米, 2016, **22**(3): 34-38, 42.
Ye Q, Cao G J, Geng Y H. Effects of long-term application of potassium fertilizer and straw returning on rice yield[J]. Chinese Rice, 2016, **22**(3): 34-38, 42.
- [6] 赵鹏妹,杨顺瑛,郝东利,等. 水稻钾素营养的基因型特征及分子机制初探[J]. 土壤, 2021, **53**(1): 37-46.
Zhao P S, Yang S Y, Hao D L, *et al.* Genotypic characteristics and molecular mechanism of potassium nutrition in rice[J]. Soils, 2021, **53**(1): 37-46.
- [7] 袁伟,王子阳,马贤超,等. 双季稻秸秆还田下减施钾肥对水稻生长和产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021, (5): 83-88.
Yuan W, Wang Z Y, Ma X C, *et al.* Effect of double-season rice straw returning to the field and reducing potassium fertilizer on rice growth and yield[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2021, (5): 83-88.
- [8] 李继福,薛欣欣,李小坤,等. 水稻-油菜轮作模式下秸秆还田替代钾肥的效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, **22**(2): 317-325.
Li J F, Xue X X, Li X K *et al.* Substituting effect of crop residues for potassium fertilizer in rice-rapeseed rotation system[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2016, **22**(2): 317-325.
- [9] 朱远芃,史燕捷,管浩,等. 小麦秸秆还田条件下钾肥减量对水稻产量及养分利用的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, **39**(11): 2596-2605.
Zhu Y P, Shi Y J, Guan H, *et al.* Influence of potassium fertilizer reduction on rice yield and potassium utilization efficiency under wheat straw incorporation condition[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, **39**(11): 2596-2605.
- [10] 侯云鹏,刘志全,尹彩侠,等. 长期秸秆还田下基于东北水

- 稻高产和钾素平衡的钾肥用量研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, **26**(11): 2020-2031.
- Hou Y P, Liu Z Q, Yin C X, *et al.* Optimum amount of potassium fertilizer based on high yield and soil potassium balance under straw return in rice production region of northeast China [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, **26**(11): 2020-2031.
- [11] 刘磊, 廖萍, 邵华, 等. 施石灰和秸秆还田对双季稻田土壤钾素表观平衡的互作效应[J]. 作物学报, 2022, **48**(1): 226-237.
- Liu L, Liao P, Shao H, *et al.* Interactive effects of liming and straw return on apparent soil potassium balance in a double rice cropping system [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, **48**(1): 226-237.
- [12] 姜超强, 郑青松, 祖朝龙. 秸秆还田对土壤钾素的影响及其替代钾肥效应研究进展[J]. 生态学杂志, 2015, **34**(4): 1158-1165.
- Jiang C Q, Zheng Q S, Zu C L. Research progress on effects of straw returning on soil potassium and its substitute for potassium fertilizer [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, **34**(4): 1158-1165.
- [13] 张翰林, 白娜玲, 郑宪清, 等. 秸秆还田与施肥方式对稻麦轮作土壤细菌和真菌群落结构与多样性的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, **29**(3): 531-539.
- Zhang H L, Bai N L, Zheng X Q, *et al.* Effects of straw returning and fertilization on soil bacterial and fungal community structures and diversities in rice-wheat rotation soil [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, **29**(3): 531-539.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [15] Zhou J Z, Wu L Y, Deng Y, *et al.* Reproducibility and quantitation of amplicon sequencing-based detection [J]. *The ISME Journal*, 2011, **5**(8): 1303-1313.
- [16] 曾研华, 吴建富, 曾勇军, 等. 机收稻草全量还田减施化肥对双季晚稻养分吸收利用及产量的影响[J]. 作物学报, 2018, **44**(3): 454-462.
- Zeng Y H, Wu J F, Zeng Y J, *et al.* Effects of straw incorporation with reducing chemical fertilizers on nutrient absorption and utilization and grain yield of double-cropping late rice under mechanical harvest [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, **44**(3): 454-462.
- [17] 李继福, 任涛, 鲁剑巍, 等. 水稻秸秆钾与化肥钾释放与分布特征模拟研究[J]. 土壤, 2013, **45**(6): 1017-1022.
- Li J F, Ren T, Lu J W, *et al.* Study on characteristics of release and distribution of rice straw potassium and chemical potassium by lab simulation [J]. *Soils*, 2013, **45**(6): 1017-1022.
- [18] 柴如山, 王擎运, 叶新新, 等. 我国主要粮食作物秸秆还田替代化学氮肥潜力[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(11): 2583-2593.
- Chai R S, Wang Q Y, Ye X X, *et al.* Nitrogen resource quantity of main grain crop straw in China and the potential of synthetic nitrogen substitution under straw returning [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(11): 2583-2593.
- [19] Li J F, Lu J W, Li X K, *et al.* Dynamics of potassium release and adsorption on rice straw residue [J]. *PLoS One*, 2014, **9**(2), doi: 10.1371/journal.pone.0090440.
- [20] 谭德水, 金继运, 黄绍文, 等. 长期施钾与秸秆还田对华北潮土和褐土区作物产量及土壤钾素的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, **14**(1): 106-112.
- Tan D S, Jin J Y, Huang S W, *et al.* Effect of long-term application of potassium fertilizer and wheat straw to soil on yield of crops and soil potassium in fluvo-aquic soil and brown soil of northcentral China [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2008, **14**(1): 106-112.
- [21] 代文才, 高明, 兰木玲, 等. 不同作物秸秆在旱地和水田中的腐解特性及养分释放规律[J]. 中国生态农业学报, 2017, **25**(2): 188-199.
- Dai W C, Gao M, Lan M L, *et al.* Nutrient release patterns and decomposition characteristics of different crop straws in drylands and paddy fields [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, **25**(2): 188-199.
- [22] 李继福, 鲁剑巍, 任涛, 等. 稻田不同供钾能力条件下秸秆还田替代钾肥效果[J]. 中国农业科学, 2014, **47**(2): 292-302.
- Li J F, Lu J W, Ren T, *et al.* Effect of straw incorporation substitute for K-fertilizer under different paddy soil K supply capacities [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, **47**(2): 292-302.
- [23] 孙志祥, 韩上, 武际, 等. 秸秆还田对双季稻产量和土壤钾素平衡的影响[J]. 中国农学通报, 2020, **36**(9): 9-13.
- Sun Z X, Han S, Wu J, *et al.* Effect of straw returning on yield and soil potassium balance of double cropping rice [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, **36**(9): 9-13.
- [24] Huang S, Zeng Y J, Wu J F, *et al.* Effect of crop residue retention on rice yield in China: a meta-analysis [J]. *Field Crops Research*, 2013, **154**: 188-194.
- [25] 王如芳, 张吉旺, 董树亭, 等. 我国玉米主产区秸秆资源利用现状及其效果[J]. 应用生态学报, 2011, **22**(6): 1504-1510.
- Wang R F, Zhang J W, Dong S T, *et al.* Present situation of maize straw resource utilization and its effect in main maize production regions of China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, **22**(6): 1504-1510.
- [26] 胡蓉, 郑露, 刘浩, 等. 秸秆还田对水稻根际微生物多样性和水稻纹枯病发生的影响[J]. 植物保护学报, 2020, **47**(6): 1261-1269.
- Hu R, Zheng L, Liu H, *et al.* Effects of straw returning on microbial diversity in rice rhizosphere and occurrence of rice sheath blight [J]. *Journal of Plant Protection*, 2020, **47**(6): 1261-1269.
- [27] 曹明, 张雪彬, 陶凯, 等. 强还原条件下秸秆还田量对南繁水稻土壤肥力和微生物数量的影响[J]. 热带农业科学, 2019, **39**(10): 95-99.
- Cao M, Zhang X B, Tao K, *et al.* Effect of amount of paddy straw forced incorporated into paddy field on soil fertility and number of microorganisms in paddy soil in winter [J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2019, **39**(10): 95-99.
- [28] 陈喜靖, 喻曼, 王强, 等. 浙江省稻田系统秸秆还田问题及对策[J]. 浙江农业学报, 2018, **30**(10): 1765-1774.
- Chen X J, Yu M, Wang Q, *et al.* Problems and countermeasures of straw returning in paddy field system in Zhejiang Province [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2018, **30**(10): 1765-1774.
- [29] 赵雪涵, 王麒, 曾宪楠, 等. 秸秆还田下灌溉方式对水稻生长发育的影响研究现状及展望[J]. 黑龙江农业科学, 2019, (11): 137-141.
- Zhao X H, Wang Q, Zeng X N, *et al.* Current situation and prospect of the research on the effects of irrigation modes on the growth and development of rice under straw return [J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2019, (11): 137-141.
- [30] 高洪军, 彭畅, 张秀芝, 等. 秸秆还田量对黑土区土壤及团聚体有机碳变化特征和固碳效率的影响[J]. 中国农业科学, 2020, **53**(22): 4613-4622.

- Gao H J, Peng C, Zhang X Z, *et al.* Effects of corn straw returning amounts on carbon sequestration efficiency and organic carbon change of soil and aggregate in the black soil area[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, **53**(22): 4613-4622.
- [31] 杨艳华, 苏瑶, 何振超, 等. 还田秸秆碳在土壤中的转化分配及对土壤有机碳库影响的研究进展[J]. *应用生态学报*, 2019, **30**(2): 668-676.
- Yang Y H, Su Y, He Z C, *et al.* Transformation and distribution of straw-derived carbon in soil and the effects on soil organic carbon pool: a review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(2): 668-676.
- [32] 王丹丹, 周亮, 黄胜奇, 等. 耕作方式与秸秆还田对表层土壤活性有机碳组分与产量的短期影响[J]. *农业环境科学学报*, 2013, **32**(4): 735-740.
- Wang D D, Zhou L, Huang S Q, *et al.* Short-term effects of tillage practices and wheat-straw returned to the field on topsoil labile organic carbon fractions and yields in central China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, **32**(4): 735-740.
- [33] 王虎, 王旭东, 田霄鸿. 秸秆还田对土壤有机碳不同活性组分储量及分配的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, **25**(12): 3491-3498.
- Wang H, Wang X D, Tian X H. Effect of straw-returning on the storage and distribution of different active fractions of soil organic carbon[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, **25**(12): 3491-3498.
- [34] 张鑫, 周卫, 艾超, 等. 秸秆还田下氮肥运筹对夏玉米不同时期土壤酶活性及细菌群落结构的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, **26**(2): 295-306.
- Zhang X, Zhou W, Ai C, *et al.* Effects of nitrogen management on soil enzyme activities and bacterial community structure in summer maize growing stages under straw incorporation[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, **26**(2): 295-306.
- [35] 栾璐, 郑洁, 程梦华, 等. 不同秸秆还田方式对旱地红壤细菌多样性及群落结构的影响[J]. *土壤*, 2021, **53**(5): 991-997.
- Luan L, Zheng J, Cheng M H, *et al.* Effects of different types of straw returning on bacterial diversity and community structure in dryland red soils[J]. *Soils*, 2021, **53**(5): 991-997.
- [36] 靳玉婷, 李先藩, 蔡影, 等. 秸秆还田配施化肥对稻-油轮作土壤酶活性及微生物群落结构的影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(8): 3985-3996.
- Jin Y T, Li X F, Cai Y, *et al.* Effects of straw returning with chemical fertilizer on soil enzyme activities and microbial community structure in rice-rape rotation[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(8): 3985-3996.
- [37] Fan F L, Yin C, Tang Y J, *et al.* Probing potential microbial coupling of carbon and nitrogen cycling during decomposition of maize residue by ^{13}C -DNA-SIP [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, **70**: 12-21.
- [38] Zhou G X, Zhang J B, Zhang C Z, *et al.* Effects of changes in straw chemical properties and alkaline soils on bacterial communities engaged in straw decomposition at different temperatures[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**, doi: 10.1038/srep22186.
- [39] Hao M M, Hu H Y, Liu Z, *et al.* Shifts in microbial community and carbon sequestration in farmland soil under long-term conservation tillage and straw returning [J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, **136**: 43-54.
- [40] 王西亚, 吕继龙, 何萍, 等. 玉米秸秆分解过程中细菌群落组成演化特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, **27**(1): 45-53.
- Wang X Y, Lü J L, He P, *et al.* Succession in bacterial community during maize straw decomposition [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, **27**(1): 45-53.
- [41] 商丽荣, 万里强, 李向林. 有机肥对羊草草原土壤细菌群落多样性的影响[J]. *中国农业科学*, 2020, **53**(13): 2614-2624.
- Shang L R, Wan L Q, Li X L. Effects of organic fertilizer on soil bacterial community diversity in *Leymus chinensis* steppe [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, **53**(13): 2614-2624.
- [42] 孔培君, 郑洁, 栾璐, 等. 不同秸秆还田方式对旱地红壤细菌群落、有机碳矿化及玉米产量的影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(12): 6047-6057.
- Kong P J, Zheng J, Luan L, *et al.* Effects of different types of straw returning on the bacterial community, organic carbon mineralization and maize yield in upland red soil [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(12): 6047-6057.
- [43] Yan S S, Song J M, Fan J S, *et al.* Changes in soil organic carbon fractions and microbial community under rice straw return in Northeast China[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2020, **22**, doi: 10.1016/j.gecco.2020.e00962.
- [44] Lourenço K S, Suleiman A K A, Pijl A, *et al.* Resilience of the resident soil microbiome to organic and inorganic amendment disturbances and to temporary bacterial invasion [J]. *Microbiome*, 2018, **6**, doi: 10.1186/s40168-018-0525-1.
- [45] 陈金, 庞党伟, 韩明明, 等. 耕作模式对土壤生物活性与养分有效性及冬小麦产量的影响[J]. *作物学报*, 2017, **43**(8): 1245-1253.
- Chen J, Pang D W, Han M M, *et al.* Effects of tillage patterns on soil biological activity, availability of soil nutrients and grain yield of winter wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2017, **43**(8): 1245-1253.

CONTENTS

Regionalization and Analysis of PM _{2.5} and O ₃ Synergetic Prevention and Control Areas Based on Remote Sensing Data	LI Shen-xin, ZOU Bin, ZHANG Feng-ying, <i>et al.</i>	(4293)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in Guangzhou in Winter	PEI Cheng-lei, XIE Yu-tong, CHEN Xi, <i>et al.</i>	(4305)
Establishment and Application of Foshan Ozone Concentration Forecast Equation	CHEN Chen, HONG Ying-ying, TAN Hao-bo, <i>et al.</i>	(4316)
Establishment of High-Resolution Emissions Inventory in Wuhai and Its Application in Exploring the Causes of Ozone Pollution	ZHANG Rui-xin, CHU Bo, SHANG Chun-lin, <i>et al.</i>	(4327)
Investigating the Pollutants of Marine Shipping Emissions Along the East China Sea by Combining in-situ Measurements and Automatic Identification System	QIU Hao, LIU Dan-tong, WU Yang-zhou, <i>et al.</i>	(4338)
Chemical Component of Particulate Matters and VOCs Characteristics During Vehicle Brake Processes	MEN Zheng-yu, LIU Du-you, GUO Quan-you, <i>et al.</i>	(4348)
Characterization of VOCs Emissions from Caged Broiler House in Winter	CAO Tian-tian, ZHENG Yun-hao, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(4357)
Concentrations and Community Structures of Culturable Bacteria in Aerosols of Household Garbage Stations in Shanghai	LU Bing-jie, ZHANG Xiang, WANG Chuan, <i>et al.</i>	(4367)
Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia Emissions in Zhejiang Province from 2008 to 2018	FANG Li-jiang, YANG Yi-qun, YE Guan-qiong	(4380)
Roadmap of Coal Control and Carbon Reduction in the Steel Industry Under the Carbon Peak and Neutralization Target	XUE Ying-lan, ZHANG Jing, LIU Yu, <i>et al.</i>	(4392)
Carbon Emission Reduction Effect of Spatial Correlation Network Structure Characteristics: From the Perspective of Urban Agglomeration	ZHENG Hang, YE A-zhong	(4401)
Pollution and Carbon Reduction Effect of OFDI in China and Its Mechanism	BAI Zi-han, LÜ Lian-hong, ZHAO Ming-xuan, <i>et al.</i>	(4408)
Variation Characteristics of Surface Water Quality in China in Recent Years	JI Xiao-yan, HOU Huan-huan, WANG Shan-shan, <i>et al.</i>	(4419)
Distribution, Risk, and Influencing Factors of Microplastics in Surface Water of Huangshui River Basin	FAN Meng-yuan, HUANG Yi-mei, ZHANG Hai-xin, <i>et al.</i>	(4430)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Surface Water of the Fenhe River Basin and Influence Factors	ZHAO Chun-hong, SHEN Hao-yong, WANG Zhi-heng, <i>et al.</i>	(4440)
Characteristics and Causes of High-manganese Groundwater in Pearl River Delta During Urbanization	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i>	(4449)
Characteristics and Causes of Groundwater Salinization in the Plain Area of the Lower Kashgar River	LU Han, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i>	(4459)
Sources and Biogeochemical Processes of Nitrate in the Laolongdong Karst Underground River Basin, Chongqing	WANG Yu-yang, YANG Ping-heng, ZHANG Jie-ru	(4470)
Succession Pattern and Consequences of the Dominant Species During Cyanobacterial Bloom and Its Influencing Factors	OUYANG Tian, ZHAO Lu, JI Lu-lu, <i>et al.</i>	(4480)
Structural Characteristics of Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in a Group of Drinking Water Reservoirs by Water Transmission from Modaomen Waterway in Zhuhai	ZHANG Mo-li, WANG En-rui, CHANG Sheng, <i>et al.</i>	(4489)
Effects of Nutrients on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i> and Bacteria in the Phycosphere	LÜ Ping, LI Hui-li, XU Yong, <i>et al.</i>	(4502)
Effect of Aging on Adsorption of Tetracycline by Microplastics and the Mechanisms	WANG Lin, WANG Shu-xin, ZENG Xiang-ying, <i>et al.</i>	(4511)
Effect of Colloids in Sediment and Soil on Their Sorption Behavior of Chloramphenicol	YAN Cai-xia, LUO Yan-qing, NIE Ming-hua, <i>et al.</i>	(4522)
Historical Antibiotic Stress Changed the Effects of Sulfamethoxazole and Trimethoprim on Activated Sludge: ARGs and Potential Hosts	ZHANG Zhong-xing, FAN Xiao-yan, LI Xing, <i>et al.</i>	(4536)
Spatial Distribution and Sources of Heavy Metals in Soil of a Typical Lead-Zinc Mining Area, Yangshuo	CHEN Meng, PAN Yong-xing, HUANG Yi-xiang, <i>et al.</i>	(4545)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Baiyangdian Lake	ZHENG Fei, GUO Xin, TANG Ming-yang, <i>et al.</i>	(4556)
Spatial Differentiation and Influencing Factor Analysis of Soil Heavy Metal Content at Town Level Based on Geographic Detector	GONG Cang, WANG Liang, WANG Shun-xiang, <i>et al.</i>	(4566)
Heavy Metal Emissions from Coal-fired Power Plants and Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risks in Surrounding Soils	CHE Kai, CHEN Chong-ming, ZHENG Qing-yu, <i>et al.</i>	(4578)
Enrichment Factors, Health Risk, and Source Identification of Heavy Metals in Agricultural Soils in Semi-arid Region of Hainan Island	YANG Jian-zhou, GONG Jing-jing, WANG Zhen-liang, <i>et al.</i>	(4590)
Speciation and Pollution Assessment of Heavy Metals in Mangrove Surface Sediments in Jiulong River Estuary	ZHANG Hua-lan, YU Rui-lian, WAN Rui-an, <i>et al.</i>	(4601)
Status of Heavy Metal in Organic Fertilizers in Main Tea Growing Regions of China	YI Xiao-yun, FANG Li, YANG Xiang-de, <i>et al.</i>	(4613)
Accumulation Characteristics and Sources of PAEs in Agricultural Soils in Gansu Province	CHEN Yu-yu, ZHANG Guang-quan, ZHANG Yang, <i>et al.</i>	(4622)
Distribution Characteristics of Soil Phosphorus Forms and Phosphatase Activity at Different Altitudes in the Soil of Water-Level-Fluctuation Zone in Pengxi River, Three Gorges Reservoir	GAO Yi-lun, FANG Fang, TANG Zi-chao, <i>et al.</i>	(4630)
Characteristics of Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Other Soil Physical and Chemical Factors in Cotton Fields with Different Continuous Cropping Years in the Oasis on the Northern Edge of Tarim Basin	LI Xin-zhu, GONG Lu, TANG Jun-hu, <i>et al.</i>	(4639)
Response of Soil Respiration Rates to Soil Temperature and Moisture at Different Soil Depths of <i>Caragana korshinskii</i> Plantation in the Loess-Hilly Region	SUN Ya-rong, WANG Ya-juan, ZHAO Min, <i>et al.</i>	(4648)
Influence of Biochar Application on Soil Nitrate Leaching and Phosphate Retention: A Synthetic Meta-analysis	JIANG Zhi-xiang, CUI Shuang, ZHANG Xin, <i>et al.</i>	(4658)
Role and Mechanism of Low Molecular-Weight-Organic Acids in Enhanced Phytoremediation of Heavy Metal Contaminated Soil	FANG Zhi-guo, XIE Jun-ting, YANG Qing, <i>et al.</i>	(4669)
Remediation Effect and Mechanism of Inorganic Passivators on Cadmium Contaminated Acidic Paddy Soil	ZHANG Jian, KONG Fan-yi, LU Sheng-gao	(4679)
Mechanism of Lead-zinc Enrichment and Resistance of Spent Mushroom Compost to Lead-Zinc Slag in <i>Koeleria paniculata</i>	XIE Tian-zhi, CHEN Yong-hua, SU Rong-kui, <i>et al.</i>	(4687)
Phosphorus Enrichment Efficiency of CaO ₂ @FA Composites and the Effect of Its Recovered Material on Soil Improvement	YUE Wei, LI Da-peng, WU Ling-yu, <i>et al.</i>	(4697)
Effects of Early Rice Straw Returning with Reducing Potassium Fertilizer on Late Rice Yield and Soil Fertility	HUANG Qiao-yi, HUANG Jian-feng, HUANG Xu, <i>et al.</i>	(4706)
Effects of Continuous Straw Returning with Chemical Fertilizer on the Carbon Pool and Crop Yield of Rice-Rape Rotation Soils	CAI Ying, FU Si-wei, ZHANG Bo-rui, <i>et al.</i>	(4716)
Effects of Chemical Fertilizer Reduction Combined with Straw Application on Diazotrophic Communities in a Double Rice Cropping System	CHEN Kai-peng, WEI Ju-xian, CHEN Dan, <i>et al.</i>	(4725)
Impacts of Co-application of Chemical Fertilizer Reduction and Organic Material Amendment on Fluvio-aquic Soil Microbial N-cycling Functional Gene Abundances and N-converting Genetic Potentials in Northern China	LI Sheng-jun, HU He, LI Gang, <i>et al.</i>	(4735)
Response Characteristics of Soil Microbial Community Under Long-term Film Mulching	HU Zhi-e, XIAO Mou-liang, DING Ji-na, <i>et al.</i>	(4745)
Effects of Long-term Straw Returning on Fungal Community, Enzyme Activity and Wheat Yield in Fluvio-aquic Soil	MA Lei, LI Yan, WEI Jian-lin, <i>et al.</i>	(4755)
Effects of Soil Amendments on the Bacterial Diversity and Abundances of Pathogens and Antibiotic Resistance Genes in Rhizosphere Soil Under Drip Irrigation with Reclaimed Water	CUI Bing-jian, CUI Er-ping, LIU Chun-cheng, <i>et al.</i>	(4765)
Effect of Nitrogen on the Phytoremediation of Cd-PAHs Co-contaminated Dumpsite Soil by Alfalfa (<i>Medicago sativa</i> L.) and on the Soil Bacterial Community Structure	LI Yi-jia, MA Jun-wei, LI Yu-qian, <i>et al.</i>	(4779)
Effect of Antibiotic-Degrading Bacteria on Maturity and Bacterial Community Succession During Pig Manure Composting	LI Wei-lin, ZHANG Xin, MA Jun-wei, <i>et al.</i>	(4789)