

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

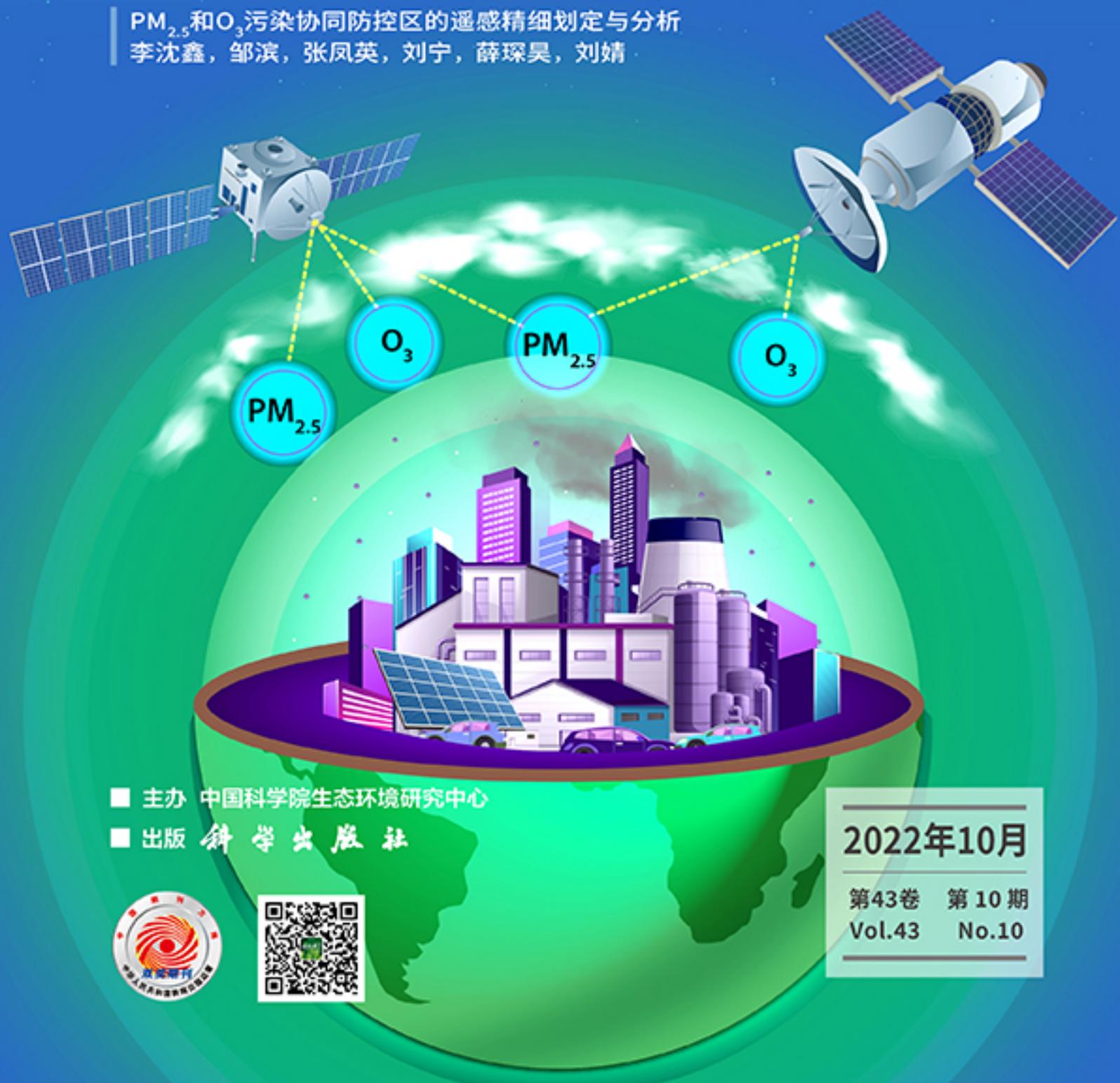
环境科学

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(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 王雨吻, 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, 张坤锋, 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, 王樞潼, 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, 马立锋, 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 陈王玉, 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, 卢焯桢, 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)

CaO₂/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, 季剑虹, 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 李玮琳, 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)

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¹, 韦菊娴^{1,2}, 陈丹³, 王聪^{1,2*}, 沈健林^{2*}, 李勇², 吴金水²

(1. 广西大学林学院, 广西森林生态与保育重点实验室, 南宁 530004; 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. 南宁师范大学北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室, 南宁 530001)

摘要: 基于3 a田间定位试验,研究了双季稻田化肥减量配施秸秆后第3 a对水稻产量、土壤肥力属性和固氮微生物群落结构特征的影响. 设置了3种施肥模式:常规施化肥(CF)、化肥减量配施3 t·hm⁻²干重秸秆(CFLS)和化肥减量配施6 t·hm⁻²干重秸秆(CFHS). 结果表明,在化肥减量配施秸秆后第3 a, CFLS和CFHS在没有显著减少水稻籽粒产量($P > 0.05$)的情况下显著中和土壤酸化并提高土壤微生物量碳和氮、可溶性有机碳和有机碳含量($P < 0.05$),同时显著减少了土壤氧化还原电位、铵态氮和硝态氮含量($P < 0.05$),更有利于提高土壤氮素利用率. 与CF处理相比,CFLS和CFHS的天然固氮功能群由于土壤碳储量增加和酸化程度降低等条件的改善而增加了Shannon、PD和Evenness指数($P < 0.05$). 化肥减量配施秸秆使*Ferrigenium*、*Sulfurivermis*、*Methylomonas*、*Methylovulum*、*Ectothiorhodospira*和*Nostoc*等固氮、固碳和植物促生功能微生物类群相对丰度显著提高($P < 0.05$). 综上所述,化肥减量配施3 t·hm⁻²和6 t·hm⁻²秸秆是改善土壤固氮微生物群落结构和提高土壤固氮潜力的有效措施.

关键词: 稻田; 秸秆; 减量施化肥; 固氮菌; 群落结构

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)10-4725-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202110132

Effects of Chemical Fertilizer Reduction Combined with Straw Application on Diazotrophic Communities in a Double Rice Cropping System

CHEN Kai-peng¹, WEI Ju-xian^{1,2}, CHEN Dan³, WANG Cong^{1,2*}, SHEN Jian-lin^{2*}, LI Yong², WU Jin-shui²

(1. Guangxi Key Laboratory of Forest Ecology and Conservation, College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 3. Key Laboratory of Environment Change and Resources Use in Beibu Gulf Ministry of Education and Guangxi Key Laboratory of Earth Surface Processes and Intelligent Simulation, Nanning Normal University, Nanning 530001, China)

Abstract: Based on a three-year field experiment, the effects of reduced chemical fertilizer combined with straw application on paddy yield, soil fertility properties, and community structure of diazotrophs in a double-rice cropping field three years after straw application were examined. Three treatments were applied: conventional fertilizer application (CF), chemical fertilizer reduction combined with a low straw application rate (CFLS, 3 t·hm⁻²), and a high straw application rate (CFHS, 6 t·hm⁻²). The results showed that CFLS and CFHS did not significantly reduce rice grain yield ($P > 0.05$); significantly neutralized soil acidification; increased soil microbial biomass carbon and nitrogen, dissolved organic carbon, and organic carbon content ($P < 0.05$); and significantly reduced soil redox potential, ammonium nitrogen, and nitrate nitrogen contents ($P < 0.05$). This was more conducive to improve soil nitrogen use efficiency. Compared with those under the CF treatment, the natural nitrogen fixation functional communities of CFLS and CFHS increased the Shannon, PD, and Evenness indexes ($P < 0.05$) due to the improvement of conditions such as the increase in soil carbon storage and the decrease in acidification degree. The relative abundance of microbial communities with nitrogen fixation, carbon fixation, and plant growth promotion functions such as *Ferrigenium*, *Sulfurivermis*, *Methylomonas*, *Methylovulum*, *Ectothiorhodospira*, and *Nostoc* increased significantly ($P < 0.05$). In conclusion, the reduction in chemical fertilizer combined with 3 t·hm⁻² and 6 t·hm⁻² straw application was an effective measure to improve the community structure of soil diazotrophs and the potential of soil nitrogen fixation.

Key words: paddy field; straw; reduced chemical fertilizer; diazotrophs; community structure

水稻是世界上最重要的谷类作物之一,全球种植面积超过1.62亿hm²,是全球50%以上人口的主食^[1,2]. 中国是世界上最大的水稻生产国,耕地面积约3000万hm²^[1]. 为了满足快速发展的社会和不断增加的人口对粮食日益增长的需求,中国已成为世界上最大的化肥消费国,2002~2019年,合成氮(N)、磷(P)和钾(K)肥料使用量分别占全球农业总量的29%、30%和26%^[1]. 然而,长期过度使用化肥会导致温室气体排放增加^[3~5],氮磷水污染^[6,7],土壤退化(例如,pH值、土壤有机质和微生物多样性降低)^[6,8,9],化肥使用效率和作物产量的

降低^[10,11],严重威胁农业的可持续发展. 在当前我国大力倡导节肥增效的新形势下,如何化肥减施并保持土壤肥力已成为农业生产的热点问题.

我国秸秆资源丰富,2015年全国农作物秸秆总产量达10.4亿t,其中可收集资源量为9亿t,秸秆肥料化利用率为43.2%^[12]. 因为秸秆富含碳(C)、

收稿日期: 2021-10-18; 修订日期: 2022-02-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1700801); 广西科技计划项目(AD19245194); 国家自然科学基金项目(42077104)

作者简介: 陈凯鹏(1996~),男,硕士研究生,主要研究方向为土壤氮循环, E-mail: Kaigoodale9797@163.com

* 通信作者, E-mail: wangcuriel@foxmail.com; jshen@isa.ac.cn

N、P 和 K 等养分元素^[13,14],所以秸秆还田可补充土壤养分元素,提高土壤肥力.化肥减量配施秸秆对土壤肥力的影响已有不少研究^[15,16].吴立鹏等^[15]的研究发现,与常规施化肥相比,秸秆还田配施减量氮肥使单季稻土壤有机碳(SOC)、可溶性有机碳(DOC)、土壤微生物量碳(MBC)和微生物量氮(MBN)含量显著增加.王学敏等^[16]的研究发现,与常规施化肥相比,秸秆还田配施减量化肥对玉米产量没有影响,对土壤 pH 值和 SOC 均有一定幅度的提升.吴玉红等^[17]的研究发现,与常规施化肥相比,秸秆还田配施减量化肥处理对小麦产量无负面影响.因此,化肥减量配施秸秆是实现农业生产中减少化肥施用量的有效措施.

生物固氮通过固氮微生物体内的固氮酶系统,将大气中的氮气(N₂)催化转化为植物可利用的形式,每年可为农田生态系统提供氮素 40 ~ 70 Tg,是农业生态系统中氮素的重要来源之一^[18~21].Herridge 等^[21]的研究发现,生物固氮可为水稻贡献高达 22 ~ 30 kg·(hm²·a)⁻¹的氮素,是水稻生长的重要且持续的氮源.固氮微生物体内存在一种具有催化功能的固氮酶,编码固氮酶中结构基因的 *nifH* 基因具有高度保守性,已被广泛用作证明环境中固氮菌群落结构的标记基因^[22].Kanungo 等^[23]的研究发现,水稻土壤在较低的土壤氧化还原电位(Eh 值)条件下,更有利于固氮微生物生长.靳振江等^[24]的研究发现,在油菜-水稻轮作土壤中施用化肥降低了固氮菌群落多样性.这可能是因为土壤中施用氮肥后,充足的可利用氮[如铵态氮(NH₄⁺)和硝态氮(NO₃⁻)]抑制了部分固氮微生物生长所致^[25,26].Tang 等^[27]利用末端限制性片段长度多样性技术研究了长期秸秆还田配施化肥对双季稻土壤固氮菌群落结构的影响,发现秸秆还田增加了固氮菌多样性指数.杨滨娟等^[28]利用平板稀释涂布法,研究了秸秆还田配施不同比例化肥

对单季稻土壤根际微生物的影响,发现秸秆还田处理能够增加固氮菌的数量.这可能是因为秸秆还田处理带来大量的有机碳源和能量,提高了 SOC 含量,其能为固氮微生物生长提供必要的碳源^[29,30].李旭等^[31]采用室内培养试验,通过高通量测序法分析不同秸秆添加量对土壤固氮微生物群落结构的影响,发现添加 4.0 mg·g⁻¹ 较 2.0 mg·g⁻¹ 秸秆增加了慢生根瘤菌(*Bradyrhizobium*)的相对丰度.这可能是因为秸秆添加降低了土壤 NO₃⁻ 含量,低 NO₃⁻ 含量的环境更有利于 *Bradyrhizobium* 生长.因此, NH₄⁺、NO₃⁻、SOC 含量和土壤 Eh 值等土壤理化性质是影响固氮微生物群落结构的重要因素.

虽然秸秆还田对土壤固氮微生物群落结构影响的研究已有不少,但双季稻田土壤固氮微生物群落结构对化肥减量配施秸秆的响应却鲜有报道.由于双季稻田化肥减量配施秸秆可能会增加 SOC 含量、减少 NH₄⁺ 及 NO₃⁻ 含量和降低土壤 Eh 值.因此,双季稻田化肥减量配施秸秆可能会增加土壤固氮菌多样性,并改善其群落组成结构.为了验证该假设,本研究运用高通量测序技术研究了化肥减量配施不同比例秸秆下双季稻田土壤固氮菌群落结构特征及其与土壤理化性质间的关系,以期对稻田合理施肥提供科学依据,从而使水稻生产可持续发展.

1 材料与方法

1.1 试验田概况

本试验田位于湖南省长沙县中国科学院亚热带农业生态研究所长沙农业环境观测研究站(28.55°N, 113.33°E),海拔 80 m.本研究区域属于亚热带湿润季风气候,年均降雨量为 1 330 mm,年均气温为 17.5℃,无霜期约 300 d.土壤为花岗岩发育的铁聚水耕人为土.供试土壤基本理化性质见表 1.

表 1 土壤基本理化性质

Table 1 Basic properties of soil in the experimental field

项目	ω(有机碳) /g·kg ⁻¹	ω(全氮) /g·kg ⁻¹	ω(全磷) /g·kg ⁻¹	ω(全钾) /g·kg ⁻¹	pH 值	容重 /g·cm ⁻³	ω(砂粒) /%	ω(粉粒) /%	ω(黏粒) /%
数值	17.5	1.6	0.6	28.4	5.1	1.3	42.4	30.4	27.2

1.2 试验设置

本田间定位试验始于 2012 年,采用随机区组设计,小区面积为 35 m² (5 m × 7 m). 设置 3 个处理,每个处理 3 个重复. 处理设置为: ① 常规施肥, CF; ② 化肥减量配施 3 t·hm⁻² (干重) 秸秆, CFLS; ③ 化肥减量配施 6 t·hm⁻² (干重) 秸秆, CFHS. 常规

施肥处理施肥用量为: 氮肥(尿素,以 N 计),早稻 120 kg·hm⁻²,晚稻 150 kg·hm⁻²,按基肥:分蘖肥:穗肥比例 5:3:2 施用;磷肥(过磷酸钙,以 P₂O₅ 计)和钾肥(氯化钾,以 K₂O 计)在早晚稻季施用量相同,分别为 40 kg·hm⁻² 和 100 kg·hm⁻²,以基肥形式一次性施入.还田秸秆来自上一水稻季的水稻.施用基

肥时,通过翻耕机将切为 3~5 cm 的水稻秸秆均匀混入土壤。通过施用化肥来补充施用秸秆处理不足的营养(表 2)。秸秆处理氮肥按照基肥:分蘖肥:穗

肥比例 5:3:2 施用,磷钾肥以基肥形式一次性施入。病虫害杂草防治及其他田间管理措施采用当地常规管理方式。

表 2 化肥减量配施秸秆处理化肥和秸秆施用量及秸秆养分含量¹⁾

Table 2 Application amounts of mineral fertilizers, straw (dry matter) and its nutrient input, and the basic properties of straw for the straw plus reduced mineral fertilizer treatment

时期	处理	N		P ₂ O ₅		K ₂ O	
		秸秆	尿素	秸秆	过磷酸钙	秸秆	氯化钾
早稻季	CFLS	25 (0.84)	95	16 (0.52)	24	50 (1.65)	50
	CFHS	50 (0.84)	70	31 (0.52)	9	99 (1.65)	1
晚稻季	CFLS	23 (0.77)	127	17 (0.55)	23	49 (1.63)	51
	CFHS	46 (0.77)	104	33 (0.55)	7	98 (1.63)	2

1) 括号外数值表示施用量,单位为 kg·hm⁻², 括号内数值表示养分含量,单位为 %

1.3 植物和土壤样品的采集

在施用秸秆后第 3 a(2014 年)早稻和晚稻收获期,每个小区中采集长势中等的 5 个 1 m² 水稻植株样品用于测定水稻产量。于施用秸秆后第 3 a(2014 年)早稻季分蘖期采集各小区鲜土样。使用灭菌土钻按照“S”形在每个小区采集 5 钻 0~20 cm 土壤于塑料封口袋中,挑出肉眼可见的动植物残体和砂粒,充分混匀成一个土样,每个土样分成两份:①一份用于土壤性质的测定,将土壤样品迅速带回实验室,保存在 4℃ 冷库中,于一周之内测定土壤 DOC、NH₄⁺、NO₃⁻、MBC 和 MBN 含量。剩余土壤样品自然风干后用于 SOC 含量和 pH 值的测定。②另一份样品迅速用锡箔纸包好,放入纤维袋子,投入到液氮中,运送至实验室,-80℃ 冰箱保存,用于分子生物学试验。

1.4 水稻产量与土壤样品肥力属性的测定

将采集的 5 m² 植物样品先统一风干,然后采用烘箱烘干至恒重测定其含水量,进而换算每个小区水稻籽粒产量(13.5% 水分含量)。耕层 5 cm 深度氧化还原电位使用 Eh 计(RM-30P, DKK-TOA, 日本)测定。土壤含水量采用烘箱 105℃ 烘干称重法测定^[32]。使用 K₂SO₄ 溶液浸提,滤液使用连续流动测定仪(Fiastar 5000, 瑞典)测定 NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 含量,使用 TOC 仪(TOC-VWP, Shimadzu Corporation, 日本)测定土壤中的 DOC 含量。SOC 采用重铬酸钾容量法(外加热法)测定。使用 pH 计(Metro-pH320, Mettler-Toledo Instruments Ltd. 瑞士)测定土壤 pH 值^[32]。采用氯仿熏蒸-K₂SO₄ 提取法测定 MBC 和 MBN^[33]。

1.5 土壤 DNA 的提取与 PCR 扩增

采用 FastDNA Spin Kit for Soil 试剂盒(MP Biomedicals, USA)提取土壤 DNA,操作步骤按照说明书进行。提取的土壤总 DNA 采用微量紫外分光光度计(NanoDrop 1000, Wilmington, DE, USA)测定 DNA 质量和浓度, DNA 样品存放于 -20℃ 保存待

用。采用 *nifH* 基因的引物 PolF (TGCGAYCCSAA RGCBGACTC)/PolR (ATSGCCATCATYTCRCCGA)^[34]对 DNA 样品进行扩增。在设计 PolF/PolR 测序引物时,在引物序列 5'端添加 6 个碱基的 barcode 序列以在测序数据中区分各个样品数据。PCR 产物用 2% 琼脂糖凝胶电泳检测。PCR 产物的纯化按照纯化试剂盒(GeneJET, Thermo Scientific)操作说明,纯化产物由微量紫外分光光度计(NanoDrop 1000, Wilmington, DE, USA)测定浓度。

1.6 高通量测序和生物信息分析

各样品纯化后的 DNA 等浓度混合,混合液由北京诺禾致源生物信息科技有限公司进行 Illumina-HiSeq 测序。序列数据处理通过 QIIME2 软件实现,采用高标准 Illumina-HiSeq 数据质量条件(每个碱基质量 *Q* 值 > 30)对所有序列进行过滤质控。然后采用 Framebot 软件将测序核酸序列翻译为蛋白序列来除去非 *nifH* 基因序列和可能存在的错误拼装序列。再去除嵌合体及出现频率低于两次的序列后,使用 QIIME2 软件 DADA2 插件产生扩增序列变体(amplicon sequence variant, ASV)。选取 DADA2 产生的核酸代表序列通过 MEGAN 软件在 NCBI 数据库(<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>)进行序列比对,鉴定出代表序列相应的微生物分类。为保证各样品数据的可比性,后续数据分析均采用所有样中测序深度最低的数据量,即每个样本 6 691 条序列。本研究所用原始序列数据已上传 NCBI 数据库(编号: PRJNA648668)。

1.7 统计分析

所有数据统计分析与作图均采用 R 软件^[35]。处理间的多重比较(统计显著水平为 $P < 0.05$)采用邓肯法。使用 FastTree 软件^[36]对固氮菌进行建树。采用香农(Shannon)指数^[37]、系统发育多样性(Phylogenetic diversity, PD)指数^[38]、群落均匀度(Evenness)指数来表征固氮菌的 α 多样性。采用基

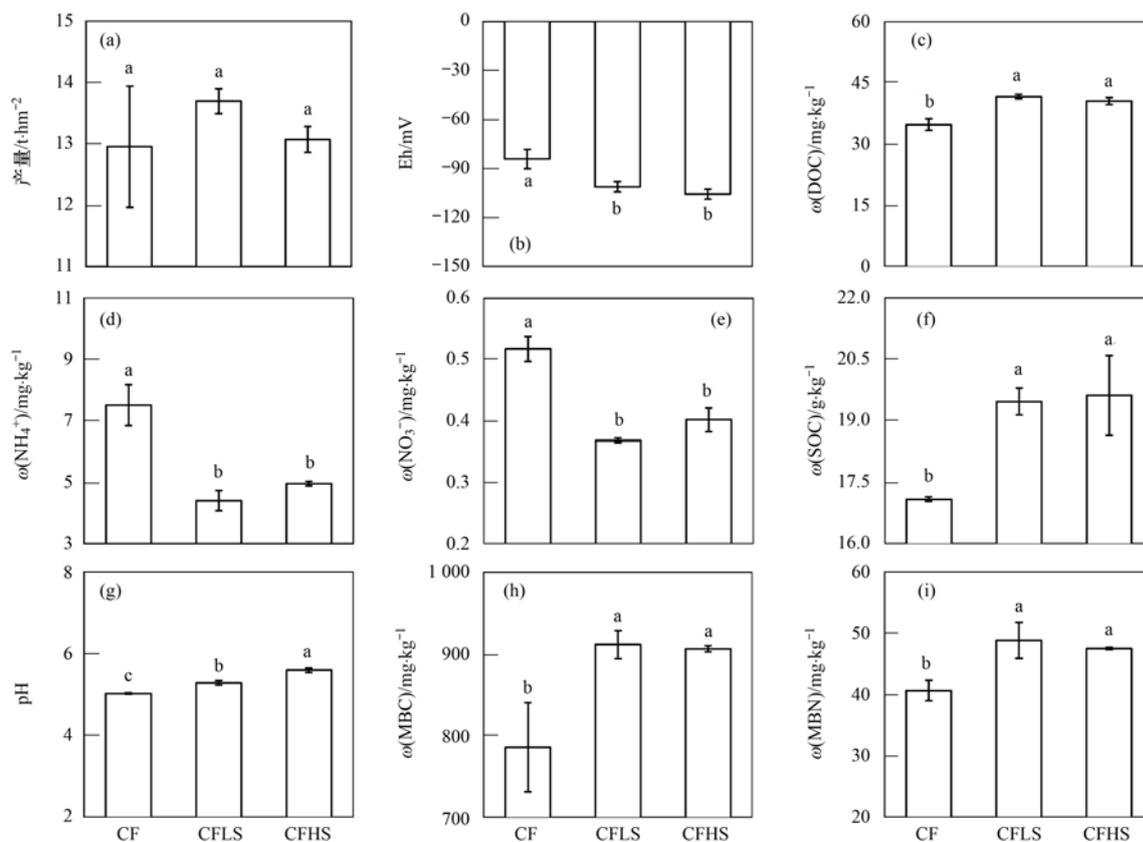
于 Bray-Curtis 距离的主坐标分析 (principal coordinates analysis, PCoA) 和相似性分析 (analysis of similarities, ANOSIM) 对各处理固氮菌群落结构差异进行分析. 运用 Pearson 相关分析来分析固氮微生物群落与土壤性质间的关系. 图表数据为平均值 \pm 标准误.

2 结果与分析

2.1 水稻产量与土壤肥力属性

在化肥减量配施秸秆后第 3 a, 如图 1 所示,

CF、CFLS 和 CFHS 处理间水稻籽粒产量没有显著差异 ($P > 0.05$). 与 CF 处理相比, CFLS 和 CFHS 处理分别显著增加了 19.5% 和 16.4% 的 DOC 含量, 13.8% 和 14.7% 的 SOC, 5.2% 和 11.4% 的 pH 值, 15.9% 和 15.2% 的 MBC 含量, 20.0% 和 16.8% 的 MBN 含量 ($P < 0.05$). CFHS 处理较 CFLS 处理显著增加了 6.0% 的 pH 值. 然而, 与 CF 处理相比, CFLS 和 CFHS 处理分别显著减少了 41.1% 和 33.7% 的 NH_4^+ 含量, 28.7% 和 22.2% 的 NO_3^- 含量, 20.1% 和 25.4% 的土壤 Eh 值 ($P < 0.05$).



不同小写字母表示处理间在 $P < 0.05$ 水平差异显著

图 1 水稻产量和土壤肥力属性

Fig. 1 Rice grain yields and soil fertility properties for the three treatments

2.2 固氮微生物群落多样性与群落结构

施用秸秆后第 3 a 各处理固氮菌 Shannon、PD 和 Evenness 指数如表 3 所示. 在 3 个处理中, CFHS 处理的 Shannon 和 PD 指数最高, CFLS 处理次之, 而 CF 处理的 Shannon 和 PD 指数最低. CFLS 和 CFHS

处理的固氮菌 Shannon、PD 和 Evenness 指数均较 CF 处理显著增加 ($P < 0.05$).

各处理的土壤固氮菌群落主坐标分析表明, 施用秸秆后第 3 a, 各处理间土壤固氮菌群落结构存在巨大差异, 尤其是在 CF 和化肥减量配施秸秆处理之间 ($P < 0.05$, 图 2). 第一主坐标解释量为 51.0%, 第二主坐标解释量为 13.5%, 两个轴总解释量为 64.5%. 该结果被 ANOSIM 分析所验证 ($R = 0.827$; $P < 0.01$).

如图 3 所示, 在纲水平, 施用秸秆后第 3 a 所有处理土壤固氮菌的优势种群为: α -变形菌纲 (α -Proteobacteria)、 β -变形菌纲 (β -Proteobacteria)、 γ -

表 3 各处理稻田土壤固氮菌群落 α 多样性指数¹⁾

Table 3 The α diversity index of the three treatments for diazotrophic community in the rice paddy soils

处理	Shannon 指数	PD 指数	Evenness 指数
CF	8.43 \pm 0.10b	38.0 \pm 3.8b	0.88 \pm 0.00b
CFLS	8.73 \pm 0.03a	71.9 \pm 6.9a	0.91 \pm 0.00a
CFHS	8.85 \pm 0.04a	83.6 \pm 1.5a	0.91 \pm 0.00a

1) 不同列小写字母表示处理间在 $P < 0.05$ 水平差异显著

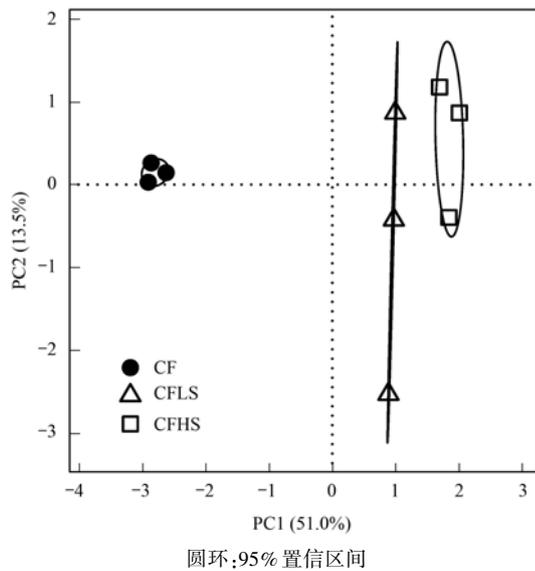


图2 稻田固氮菌 ASV 群落结构主坐标分析 (PCoA)
Fig. 2 Principal coordinates analysis (PCoA)
of diazotrophic communities in the paddy field

变形菌纲 (γ -Proteobacteria)、 δ -变形菌纲 (δ -Proteobacteria)、蓝藻纲 (Cyanophyceae)、Negativicutes、梭菌纲 (Clostridia)、放线菌纲 (Actinobacteria)、甲烷微菌纲 (Methanomicrobia) 和杆菌纲 (Bacilli), 占据 88.6% ~ 92.1%。 α -Proteobacteria 的相对丰度最大, 占据 59.7% ~ 68.7%。与 CF 处理相比, CFLS 和 CFHS 处理的 α -Proteobacteria 分别显著减少了 6% 和 13% ($P < 0.05$)。与 CFLS 处理相比, CFHS 处理的 α -Proteobacteria 显著减少了 7% ($P < 0.05$)。与 CF 处理相比, CFLS 和 CFHS 处理分别显著增加了 32% 和 42% 的 β -Proteobacteria、87% 和 108% 的 γ -Proteobacteria、465% 和 430% 的 Cyanophyceae 以及 358% 和 270% 的 Negativicutes ($P < 0.05$)。与 CF 处理相比, CFLS 和 CFHS 处理的 Methanomicrobia 分别显著增加了 420% 和 800% ($P < 0.05$)。与 CFLS 处理相比, CFHS 处理的 Methanomicrobia 显著增加了 73% ($P < 0.05$)。

在属水平上, 去除一些未被归类 and 相对丰度较小的序列, 各处理不同固氮菌属的相对丰度见图 4。施用秸秆后第 3 a, *Bradyrhizobium* 是所有处理土壤中最优势的属, 其次为铁氧化菌属 (*Sideroxydans*)、固氮螺菌属 (*Azospirillum*)、*Ferrigenium*、*Citrifermentans*、硫氧化菌属 (*Sulfurivermis*)、甲基单胞菌属 (*Methylomonas*)、*Methylovulum*、外硫红螺菌属 (*Ectothiorhodospira*) 和念珠藻属 (*Nostoc*), 占据 77.8% ~ 80.9%。与 CF 处理相比, CFLS 和 CFHS 处理分别显著减少了 55% 和 56% 的 *Azospirillum* 相对丰度 ($P < 0.05$)。CFLS 和 CFHS 处理较 CF 处理分

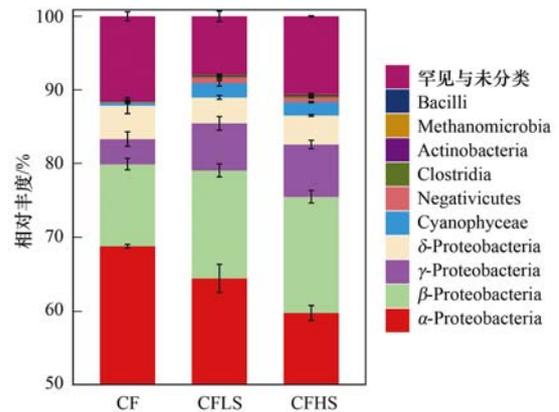
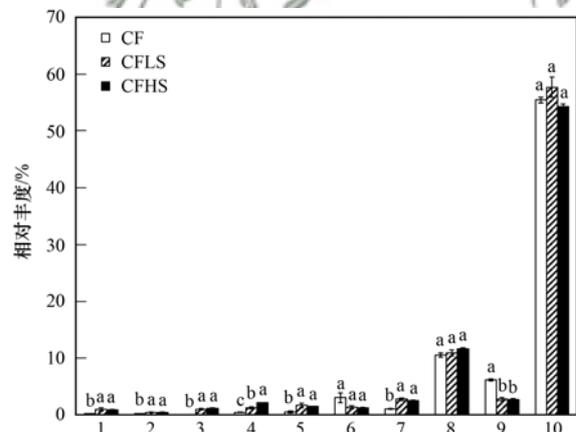


图3 各处理稻田土壤固氮菌纲水平上前十的菌种相对丰度
Fig. 3 Relative abundance of the ten most abundant diazotrophic class under the three treatment regimes

别显著增加了 158% 和 137% 的 *Ferrigenium*、232% 和 193% 的 *Sulfurivermis*、192% 和 400% 的 *Methylomonas*、1736% 和 2045% 的 *Methylovulum*、86% 和 89% 的 *Ectothiorhodospira* 以及 367% 和 331% 的 *Nostoc* 相对丰度 ($P < 0.05$)。与 CFLS 处理相比, CFHS 处理显著增加了 71% 的 *Methylomonas* 相对丰度 ($P < 0.05$)。



1. 念珠藻属 (*Nostoc*), 2. 外硫红螺菌属 (*Ectothiorhodospira*), 3. *Methylovulum*, 4. 甲基单胞菌属 (*Methylomonas*), 5. 硫氧化菌属 (*Sulfurivermis*), 6. *Citrifermentans*, 7. *Ferrigenium*, 8. 铁氧化菌属 (*Sideroxydans*), 9. 固氮螺菌属 (*Azospirillum*), 10. 慢生根瘤菌属 (*Bradyrhizobium*); 不同小写字母表示处理间在 $P < 0.05$ 水平差异显著

图4 各处理稻田土壤固氮菌属水平上前十的菌种相对丰度
Fig. 4 Relative abundance of the ten most abundant diazotrophic genera under the three treatment regimes

2.3 土壤肥力属性与固氮微生物群落的关系

如图 5 所示, 运用皮尔逊相关性分析发现, 土壤 Eh 值、 NH_4^+ 浓度和 NO_3^- 浓度与 *Azospirillum* 和 *Citrifermentans* 显著正相关 ($P < 0.05$), 与 *Ferrigenium*、*Sulfurivermis*、*Methylovulum*、*Ectothiorhodospira*、*Nostoc*、Shannon 指数、PD 指数和 Evenness 指数显著负相关 ($P < 0.05$)。Eh 值与

Methylomonas 显著负相关 ($P < 0.05$). 土壤 DOC 浓度与 *Ferrigenium* 和 *Sulfurivermis* 显著正相关 ($P < 0.05$), 与 *Azospirillum* 显著负相关 ($P < 0.01$). pH 值与 *Sideroxydans* 和 *Ferrigenium* 显著正相关, 与 *Azospirillum* 和 *Citrifermentans* 显著负相关 ($P < 0.05$). 土壤 DOC 浓度和 pH 值与 *Methylomonas*、*Methylovulum*、*Ectothiorhodospira*、*Nostoc*、Shannon 指数、PD 指数和 Evenness 指数显著正相关 ($P < 0.05$). SOC 含量与 *Ferrigenium*、*Sulfurivermis*、*Methylomonas*、*Methylovulum*、*Ectothiorhodospira*、*Nostoc*、PD 指数和 Evenness 指数显著正相关, 与 *Azospirillum* 显著负相关 ($P < 0.05$). MBC 含量与 *Methylovulum* 和 *Nostoc* 显著正相关 ($P < 0.05$). MBN 含量与 *Ferrigenium*、Shannon 指数、PD 指数和 Evenness 指数显著正相关 ($P < 0.05$). MBC 含量和 MBN 含量与 *Azospirillum* 属显著负相关 ($P < 0.05$).

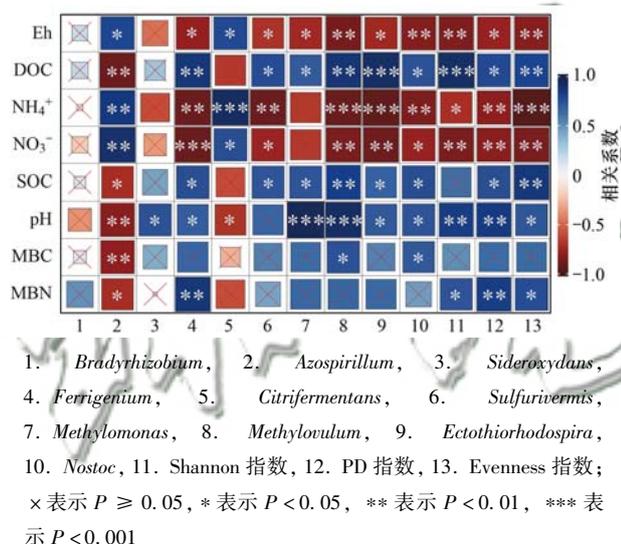


图5 稻田土壤肥力属性和固氮菌群落间的皮尔逊相关性分析矩阵

Fig. 5 Matrix of Pearson's correlation analysis of soil fertility property and diazotrophic community in the paddy field

3 讨论

3.1 秸秆替代化肥对水稻籽粒产量和土壤肥力属性的影响

有研究表明秸秆还田配施化肥对水稻产量没有不良影响^[39,40]. 曾研华等^[41]的研究发现, 与稻草不还田和单施化肥相比, 稻草还田减施化肥(早稻稻草还田替代部分化肥)可稳定晚稻产量. 徐云连等^[42]的研究发现, 减少 50% 磷肥或减少 30% 氮肥配施秸秆后第 10 a 对水稻产量有增产作用, 但增产不显著. 与已有的研究结果相似, 本研究结果表明, 在化肥减量配施秸秆后第 3 a, 各处理间水稻籽粒产量没有显著差异 ($P > 0.05$). 因为秸秆还田后在土

壤中会腐解释放养分^[13,14], 所以化肥减量配施低量和高量秸秆处理能够在不影响水稻产量的前提下减少化肥用量(图 1).

秸秆还田配施化肥措施可以改善土壤养分循环^[43,44]. 化肥减量配施秸秆降低了土壤 Eh 值(图 1), 可能是由于水稻秸秆在稻田土壤中腐解, 消耗了大量的氧化性物质, 进而使土壤 Eh 值下降^[45]. 与 CF 处理相比, CFLS 和 CFHS 处理分别使土壤 pH 值、DOC 和 SOC 含量增加(图 1), 该结果与吴立鹏等^[15]和王学敏等^[16]的研究结果一致. 由于秸秆含有大量的碳(约 50%)^[13]和盐基离子, 且减少了化肥施用量, 减弱了化肥对土壤酸化的作用, 因此秸秆还田处理增加了 DOC、SOC 含量和 pH 值. 与 CF 处理相比, CFLS 和 CFHS 处理分别显著增加了 MBC 和 MBN 含量(图 1), 因为施用的秸秆所带入的大量有机物质为微生物提供了充足底物, 增加了微生物数量, 因此 MBC 和 MBN 含量显著增加^[46]. 黄容等^[47]的研究发现, 短期(7 个月)秸秆与化肥减量配施处理较常规施肥处理显著降低菜地土壤 NH_4^+ 含量. 与其研究结果相似, 本研究结果表明, 化肥减量配施秸秆减少了土壤 NH_4^+ 和 NO_3^- 含量(图 1). 这可能是由于秸秆的高碳氮比(17~21)^[48], 使微生物固定了部分矿态氮为 MBN, 以及氮化肥施用量的减少所导致的(表 2). MBN 是土壤中 N 素养分活性库, 当土壤矿态氮含量较高时, 作物首先利用矿态氮, 而当土壤矿态氮含量不足时, 植物与微生物产生竞争, 促使部分 MBN 通过矿化释放供作物吸收利用^[49]. 因此, 秸秆替代部分化肥后通过增加 MBN 含量, 降低 NH_4^+ 和 NO_3^- 含量, 增强了作物需氮与土壤供氮的同步性, 降低了氮素损失. 综上所述, 双季稻田化肥减量配施 $3 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 秸秆均能够在不影响产量的前提下, 减少施用化肥、有效利用秸秆和改善土壤养分循环与肥力属性.

3.2 秸秆替代化肥对土壤固氮微生物群落结构的影响

目前关于双季稻田化肥减量配施秸秆如何影响土壤固氮微生物群落结构的研究较少. 本研究结果表明, 秸秆还田显著增加了固氮菌 α 多样性指数(表 3). 这可能是由于施用秸秆带入了更多的种类和数量的碳源^[29,30]、提高了土壤 pH 值, 降低了 NH_4^+ 含量和 NO_3^- 含量, 这些土壤理化性质的改变促进了更多种类固氮菌的生长^[50]. 以上结果在皮尔逊相关性分析中被验证: Shannon、PD 和 Evenness 指数与 DOC 含量和 pH 值显著正相关, 与 NH_4^+ 和 NO_3^- 含量显著负相关; PD 指数和 Evenness 指数与 SOC 含量显著正相关 ($P < 0.05$, 图 5).

秸秆还田后增加了 SOC 含量、DOC 含量和 pH 值等,进而改善了土壤理化性质,增加了微生物数量(MBC 含量和 MBN 含量增加,图 1),使更多微生物参与到养分循环过程,加速了养分周转^[51],因此秸秆还田处理增加了参与大量养分循环过程的 γ -Proteobacteria 纲相对丰度(图 3)。秸秆还田可能增加了土壤有机磷等,为 Cyanophyceae 纲微生物提供了更多底物,因此秸秆还田显著增加了 Cyanophyceae 纲的相对丰度;Cyanophyceae 纲中大部分微生物能够固定大气中的碳和氮,进而提高土壤肥力与产量,是很好的绿肥^[52]。秸秆还田增加了土壤 DOC 含量和 SOC 含量,降低了土壤 Eh 值为产甲烷菌生存提供了良好条件,因此,秸秆还田处理增加了 Methanomicrobia 纲相对丰度,且 Methanomicrobia 纲的相对丰度随着秸秆还田量的增加而增加^[53]。

与 CF 处理相比,CFLS 和 CFHS 处理使 *Ferrigenium*、*Sulfurivermis*、*Methylomonas*、*Methylovulum*、*Ectothiorhodospira* 和 *Nostoc* 属的相对丰度显著增加($P < 0.05$,图 4)。*Ferrigenium* 属一般生存在 pH 值约为 6.0 的环境^[54]。化肥减量配施秸秆增加了土壤 pH 值,可能是导致 *Ferrigenium* 属相对丰度增加的原因。结果在皮尔逊相关性分析中被验证:*Ferrigenium* 属与土壤 pH 值显著正相关($P < 0.05$,图 5)。*Sulfurivermis* 属一般适于生存在 Eh 较低的环境^[55,56],秸秆还田后土壤中秸秆腐解消耗了氧化性物质,降低了土壤 Eh 值,这可能是 *Sulfurivermis* 属相对丰度增加的原因。*Sulfurivermis* 属不仅具有固氮与硫循环作用,也具备自养固碳能力,有利于提高 SOC 含量^[55]。该结果在皮尔逊相关性分析中被验证:*Sulfurivermis* 属与 DOC 含量和 SOC 含量显著正相关,与 Eh 值显著负相关($P < 0.05$,图 5)。*Methylovulum* 和 *Methylomonas* 属都是好氧甲烷氧化菌,二者以甲烷和甲醇为碳和能量基质^[57]。*Methylovulum* 属一般适于生存在 pH 值约为 6.5 的环境中^[58]。秸秆还田会显著增加稻田 CH₄ 排放^[59]、DOC 含量和 pH 值(图 1),为 *Methylovulum* 和 *Methylomonas* 属提供了充足的生长基质和较为适宜的酸碱环境。因此,化肥减量配施秸秆后第 3 a, *Methylovulum* 和 *Methylomonas* 属的相对丰度增加(图 4)。该结果在皮尔逊相关性分析中被验证:*Methylovulum* 和 *Methylomonas* 属与土壤 pH 值和 DOC 显著正相关($P < 0.05$,图 5)。与之相似,*Ectothiorhodospira* 属较喜好高有机碳含量与碱性条件,且需要一些盐类来维持生存,因此秸秆还田处理增加了 *Ectothiorhodospira* 属相对丰度^[60]。

Ectothiorhodospira 属除了能够固氮外,还能够通过光合作用来增强土壤固碳能力^[60],进而增加 SOC 含量。该结果在皮尔逊相关性分析中被验证:*Ectothiorhodospira* 属与 pH 值、SOC 和 DOC 含量显著正相关($P < 0.05$,图 5)。化肥减量配施秸秆提高了土壤 pH 值,降低了矿态氮(NH₄⁺ 和 NO₃⁻)含量,这可能使 *Nostoc* 属相对丰度增加。因为 *Nostoc* 属一般较为适应低矿态氮、高 pH 值的条件^[61]。该结果在皮尔逊相关性分析中被验证:*Nostoc* 属与 pH 值正相关,而与 NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 负相关($P < 0.05$,图 5)。其次,*Nostoc* 属除能够固氮并促进植物生长外,还能够通过光合作用增强土壤固碳能力^[61]。其中 *Sulfurivermis*、*Methylomonas*、*Methylovulum* 和 *Ectothiorhodospira* 属相对丰度的增加是导致 γ -Proteobacteria 纲相对丰度增加的主要原因(图 3 和图 4)。与 CFLS 和 CFHS 处理相比,CF 处理使 *Azospirillum* 属的相对丰度显著减少($P < 0.05$,图 4),此结果可能由于 *Azospirillum* 属与其他微生物类群形成竞争所致^[62,63]。与 CF 处理相比,CFLS 和 CFHS 处理 *Azospirillum* 属的相对丰度减少是导致 α -Proteobacteria 纲的相对丰度较少的主要原因。综上所述,双季稻田化肥减量配施 3 t·hm⁻² 和 6 t·hm⁻² 秸秆均能够改善土壤固氮菌群落结构,有利于双季稻田土壤肥力的提高。

4 结论

(1) 双季稻田化肥减量配施 3 t·hm⁻² 和 6 t·hm⁻² 秸秆均能够在不影响产量的前提下减少氮、磷、钾化肥施用,并且改善土壤肥力属性。

(2) 双季稻田化肥减量配施 3 t·hm⁻² 和 6 t·hm⁻² 秸秆均能够增加双季稻田固氮菌 α 多样性,使: *Ferrigenium*、*Sulfurivermis*、*Methylomonas*、*Methylovulum*、*Ectothiorhodospira* 和 *Nostoc* 属等固氮、固碳和植物促生功能类群微生物相对丰度显著提高,改善了土壤天然固氮功能群结构。

(3) 在 3 a 试验中,施用 6 t·hm⁻² 秸秆废弃物替代化肥较施用 3 t·hm⁻² 秸秆在减少化肥用量方面更具优势。

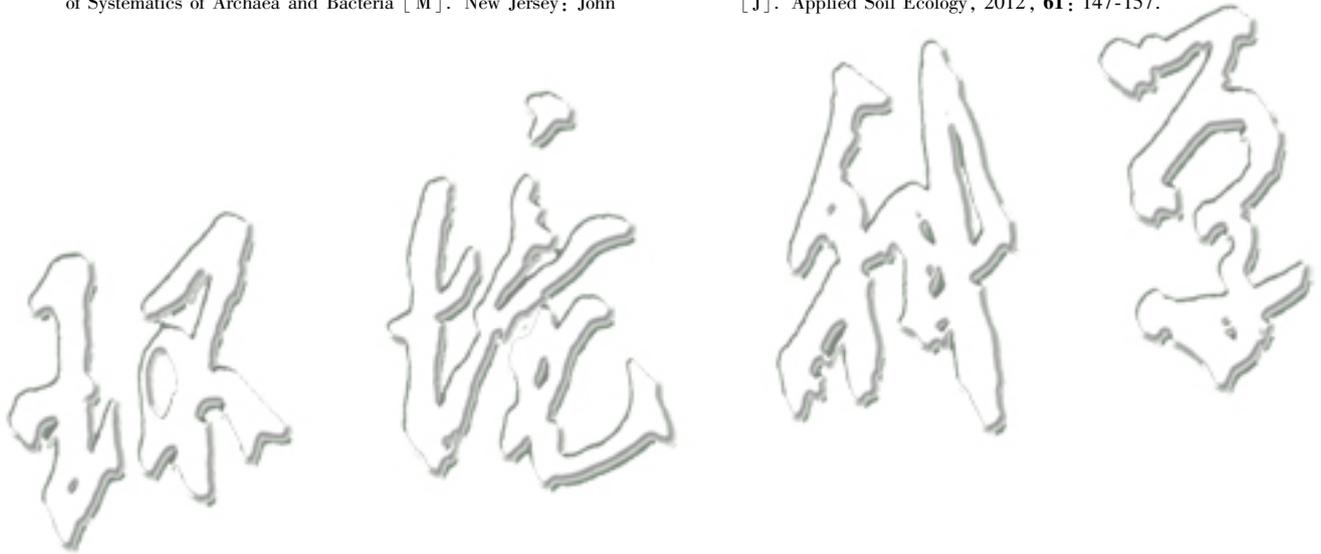
参考文献:

- [1] FAO. FAO FAOSTAT[EB/OL]. <https://www.fao.org/faostat/en/#home>, 2021-08-15.
- [2] Khush G S. What it will take to feed 5.0 billion rice consumers in 2030[J]. *Plant Molecular Biology*, 2005, **59**(1): 1-6.
- [3] Linquist B A, Adviento-Borbe M A, Pittelkow C M, et al. Fertilizer management practices and greenhouse gas emissions from rice systems: a quantitative review and analysis[J]. *Field Crops Research*, 2012, **135**: 10-21.
- [4] Walkiewicz A, Brzezińska M, Bieganski A. Methanotrophs are

- favored under hypoxia in ammonium-fertilized soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2018, **54**(7): 861-870.
- [5] Yao Z S, Zheng X H, Dong H B, *et al.* A 3-year record of N₂O and CH₄ emissions from a sandy loam paddy during rice seasons as affected by different nitrogen application rates [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, **152**: 1-9.
- [6] Liu J G, Diamond J. China's environment in a globalizing world [J]. *Nature*, 2005, **435**(7046): 1179-1186.
- [7] Liu J, Liu X L, Wang Y, *et al.* Landscape pattern at the class level regulates the stream water nitrogen and phosphorus levels in a Chinese subtropical agricultural catchment [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, **295**, doi: 10.1016/j.agee.2020.106897.
- [8] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, *et al.* Significant acidification in major Chinese croplands [J]. *Science*, 2010, **327** (5968): 1008-1010.
- [9] Islam M R, Chauhan P S, Kim Y, *et al.* Community level functional diversity and enzyme activities in paddy soils under different long-term fertilizer management practices [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, **47**(5): 599-604.
- [10] Kumar A, Yadav D S. Long-term effects of fertilizers on the soil fertility and productivity of a rice-wheat system [J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2001, **186**(1): 47-54.
- [11] Wu Y Y, Xi X C, Tang X, *et al.* Policy distortions, farm size, and the overuse of agricultural chemicals in China [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, **115**(27): 7010-7015.
- [12] 霍丽丽, 赵立欣, 孟海波, 等. 中国农作物秸秆综合利用潜力研究 [J]. *农业工程学报*, 2019, **35**(13): 218-224.
Huo L L, Zhao L X, Meng H B, *et al.* Study on straw multi-use potential in China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, **35**(13): 218-224.
- [13] Dobermann A, Fairhurst T H. Rice straw management [J]. *Better Crops International*, 2002, **16**(S1): 7-11.
- [14] Banik S, Nandi R. Effect of supplementation of rice straw with biogas residual slurry manure on the yield, protein and mineral contents of oyster mushroom [J]. *Industrial Crops and Products*, 2004, **20**(3): 311-319.
- [15] 吴立鹏, 张士荣, 娄金华, 等. 秸秆还田与优化施氮对稻田土壤碳氮含量及产量的影响 [J]. *华北农学报*, 2019, **34**(4): 158-166.
Wu L P, Zhang S R, Lou J H, *et al.* Effects of straw returning and nitrogen fertilizer on soil C and N content and yield of rice [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2019, **34**(4): 158-166.
- [16] 王学敏, 刘兴, 郝丽英, 等. 秸秆还田结合氮肥减施对玉米产量和土壤性质的影响 [J]. *生态学杂志*, 2020, **39**(2): 507-516.
Wang X M, Liu X, Hao L Y, *et al.* Effects of straw returning in conjunction with different nitrogen fertilizer dosages on corn yield and soil properties [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, **39**(2): 507-516.
- [17] 吴玉红, 郝兴顺, 田霄鸿, 等. 秸秆还田与化肥减量配施对稻茬土壤养分、酶活性及产量影响 [J]. *西南农业学报*, 2018, **31**(5): 998-1005.
Wu Y H, Hao X S, Tian X H, *et al.* Effects of reduction of NPK fertilizer application rates plus rice straw return on soil nutrient, enzyme activities and wheat yield in rice-wheat rotation system [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2018, **31**(5): 998-1005.
- [18] Vitousek P M, Menge D N L, Reed S C, *et al.* Biological nitrogen fixation: rates, patterns and ecological controls in terrestrial ecosystems [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2013, **368** (1621), doi: 10.1098/rstb.2013.0119.
- [19] Cleveland C C, Townsend A R, Schimel D S, *et al.* Global patterns of terrestrial biological nitrogen (N₂) fixation in natural ecosystems [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1999, **13**(2): 623-645.
- [20] Galloway J N, Townsend A R, Erisman J W, *et al.* Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions [J]. *Science*, 2008, **320** (5878): 889-892.
- [21] Herridge D F, Peoples M B, Boddey R M. Global inputs of biological nitrogen fixation in agricultural systems [J]. *Plant and Soil*, 2008, **311**(1-2): 1-18.
- [22] Yang S H, Chen W H, Wang E T, *et al.* Rhizobial biogeography and inoculation application to soybean in four regions across China [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2018, **125**(3): 853-866.
- [23] Kanungo P K, Ramakrishnan B, Rao V R. Placement effects of organic sources on nitrogenase activity and nitrogen-fixing bacteria in flooded rice soils [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1997, **25**(2): 103-108.
- [24] 靳振江, 潘根兴, 刘晓雨, 等. 太湖地区长期不同施肥水稻土 N₂ 和 CO₂ 固定细菌群落结构的特征与差异 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, **19**(1): 82-92.
Jin Z J, Pan G X, Liu X Y, *et al.* Community structure characters and differences of N₂-fixing and CO₂-fixing bacteria under long-term fertilization in paddy soils of Taihu Lake region, China [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, **19**(1): 82-92.
- [25] Halbleib C M, Ludden P W. Regulation of biological nitrogen fixation [J]. *The Journal of Nutrition*, 2000, **130**(5): 1081-1084.
- [26] Mirza B S, Potisap C, Nüsslein K, *et al.* Response of free-living nitrogen-fixing microorganisms to land use change in the Amazon rainforest [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2014, **80**(1): 281-288.
- [27] Tang Y F, Zhang M M, Chen A L, *et al.* Impact of fertilization regimes on diazotroph community compositions and N₂-fixation activity in paddy soil [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, **247**: 1-8.
- [28] 杨滨娟, 黄国勤, 钱海燕. 秸秆还田配施化肥对土壤温度、根际微生物及酶活性的影响 [J]. *土壤学报*, 2014, **51**(1): 150-157.
Yang B J, Huang G Q, Qian H Y. Effects of straw incorporation plus chemical fertilizer on soil temperature, root micro-organisms and enzyme activities [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, **51**(1): 150-157.
- [29] Yang H J, Ma J X, Rong Z Y, *et al.* Wheat straw return influences nitrogen-cycling and pathogen associated soil microbiota in a wheat-soybean rotation system [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2019, **10**, doi: 10.3389/fmicb.2019.01811.
- [30] 张苗苗, 刘毅, 盛荣, 等. 稻草还田对水稻土固氮基因 (*nifH*) 组成结构和多样性的影响 [J]. *应用生态学报*, 2013, **24**(8): 2339-2344.
Zhang M M, Liu Y, Sheng R, *et al.* Effects of rice straw returning on the community structure and diversity of nitrogen-fixing gene (*nifH*) in paddy soil [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, **24**(8): 2339-2344.
- [31] 李旭, 董炜灵, 宋阿琳, 等. 秸秆添加量对土壤生物固氮速率和固氮菌群落特征的影响 [J]. *中国农业科学*, 2021, **54**

- (5): 980-991.
- Li X, Dong W L, Song A L, *et al.* Effects of straw addition on soil biological N₂-fixation rate and diazotroph community properties[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, **54**(5): 980-991.
- [32] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [33] 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.
- [34] Poly F, Monrozier L J, Bally R. Improvement in the RFLP procedure for studying the diversity of *nifH* genes in communities of nitrogen fixers in soil [J]. *Research in Microbiology*, 2001, **152**(1): 95-103.
- [35] R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing [EB/OL]. <https://www.gbif.org/tool/81287/r-a-language-and-environment-for-statistical-computing>, 2020-01-21.
- [36] Price M N, Dehal P S, Arkin A P. FastTree 2-approximately maximum-likelihood trees for large alignments [J]. *PLoS One*, 2010, **5**(3), doi: 10.1371/journal.pone.0009490.
- [37] Hill T C J, Walsh K A, Harris J A, *et al.* Using ecological diversity measures with bacterial communities [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2003, **43**(1): 1-11.
- [38] Faith D P. Conservation evaluation and phylogenetic diversity [J]. *Biological Conservation*, 1992, **61**(1): 1-10.
- [39] 石丽红, 李超, 唐海明, 等. 长期施肥方式对双季稻根系生理特性与产量的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2021, **26**(9): 18-29.
- Shi L H, Li C, Tang H M, *et al.* Effects of different long-term fertilizer management on physiological characteristic of root and yield of rice in double-cropping rice paddy field [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, **26**(9): 18-29.
- [40] 何如海, 薛中俊, 汪玉芳, 等. 油菜秸秆还田及化肥配施的水稻经济环境效益分析[J]. *中国农业资源与区划*, 2021, **42**(6): 42-49.
- He R H, Xue Z J, Wang Y F, *et al.* Analysis of economic and environmental benefits of rice with the application of rapeseed straw and chemical fertilizer [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2021, **42**(6): 42-49.
- [41] 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.
- [42] 徐云连, 马友华, 吴蔚君, 等. 长期减量化施肥对水稻产量和土壤肥力的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, **32**(6): 254-258.
- Xu Y L, Ma Y H, Wu W J, *et al.* Effects of long-term reducing fertilization on yield and soil fertility of rice [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, **32**(6): 254-258.
- [43] 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.
- [44] 黄容, 高明, 万毅林, 等. 秸秆还田与化肥减量配施对稻-菜轮作下土壤养分及酶活性的影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(11): 4446-4456.
- Huang R, Gao M, Wan Y L, *et al.* Effects of straw in combination with reducing fertilization rate on soil nutrients and enzyme activity in the paddy-vegetable rotation soils [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(11): 4446-4456.
- [45] 王红妮, 王学春, 黄晶, 等. 秸秆还田对土壤还原性和水稻根系生长及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, **33**(20): 116-126.
- Wang H N, Wang X C, Huang J, *et al.* Effect of straw incorporated into soil on reducibility in soil and root system and yield of rice [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, **33**(20): 116-126.
- [46] 何甜甜, 王静, 符云鹏, 等. 等碳量添加秸秆和生物炭对土壤呼吸及微生物生物量碳氮的影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 450-458.
- He T T, Wang J, Fu Y P, *et al.* Effects of adding straw and biochar with equal carbon content on soil respiration and microbial biomass carbon and nitrogen [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 450-458.
- [47] 黄容, 高明, 王莹燕, 等. 紫色土N₂O排放及氨氧化微生物群落结构对玉米秸秆与化肥减量配施的响应[J]. *环境科学*, 2019, **40**(1): 401-411.
- Huang R, Gao M, Wang Y Y, *et al.* Response of the soil N₂O emission and ammonia-oxidizing microorganism community to the maize straw return with reducing fertilizer in purple soil [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 401-411.
- [48] 李俊良, 韩琅丰, 江荣风, 等. 碳、氮比对有机肥料氮素释放和植物吸氮的影响[J]. *中国农业大学学报*, 1996, **1**(5): 57-61.
- Li J L, Han L F, Jiang R F, *et al.* Effects of C/N on the release of nitrogen from organic manures and of nitrogen absorbed by plant [J]. *Journal of China Agricultural University*, 1996, **1**(5): 57-61.
- [49] 陈香碧, 胡亚军, 秦红灵, 等. 稻作系统有机肥替代部分化肥的土壤氮循环特征及增产机制[J]. *应用生态学报*, 2020, **31**(3): 1033-1042.
- Chen X B, Hu Y J, Qin H L, *et al.* Characteristics of soil nitrogen cycle and mechanisms underlying the increase in rice yield with partial substitution of mineral fertilizers with organic manure in a paddy ecosystem; a review [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(3): 1033-1042.
- [50] Tanaka H, Kyaw K M, Toyota K, *et al.* Influence of application of rice straw, farmyard manure, and municipal biowastes on nitrogen fixation, soil microbial biomass N, and mineral N in a model paddy microcosm [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2006, **42**(6): 501-505.
- [51] Weber S, Lueders T, Friedrich M W, *et al.* Methanogenic populations involved in the degradation of rice straw in anoxic paddy soil [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2001, **38**(1): 11-20.
- [52] Salman J M, Abdul-Adel E. Potential use of cyanophyta species *Oscillatoria limnetica* in bioremediation of organophosphorus herbicide glyphosate [J]. *Mesopotamia Environmental Journal*, 2015, **1**(4): 15-26.
- [53] Tian L, Chang J J, Shi S H, *et al.* Comparison of methane metabolism in the rhizomicrobiomes of wild and related cultivated rice accessions reveals a strong impact of crop domestication [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **803**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150131.
- [54] Khalifa A, Nakasuji Y, Saka N, *et al.* *Ferrigenium kumadai*

- gen. nov., sp. nov., a microaerophilic iron-oxidizing bacterium isolated from a paddy field soil [J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2018, **68**(8): 2587-2592.
- [55] Kojima H, Watanabe M, Fukui M. *Sulfurivermis fontis* gen. nov., sp. nov., a sulfur-oxidizing autotroph, and proposal of *Thioprofundaceae* fam. nov. [J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2017, **67**(9): 3458-3461.
- [56] Yin S X, Chen D, Chen L M, *et al.* Dissimilatory nitrate reduction to ammonium and responsible microorganisms in two Chinese and Australian paddy soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, **34**(8): 1131-1137.
- [57] Bowman J P. *Methylomonas* [A]. In: Whitman W B, Rainey F, Kämpfer P (Eds.). *Bergey's Manual of Systematics of Archaea and Bacteria* [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2015.
- [58] Iguchi H, Yurimoto H, Sakai Y. *Methylovulum* [A]. In: Whitman W B, Rainey F, Kämpfer P (Eds.). *Bergey's Manual of Systematics of Archaea and Bacteria* [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2015.
- [59] Chen D, Wang C, Shen J L, *et al.* Response of CH₄ emissions to straw and biochar applications in double-rice cropping systems: Insights from observations and modeling [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **235**: 95-103.
- [60] Imhoff J F. *Ectothiorhodospira* [A]. In: Whitman W B, Rainey F, Kämpfer P (Eds.). *Bergey's Manual of Systematics of Archaea and Bacteria* [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2015.
- [61] Whitton B A, Potts M. Introduction to the cyanobacteria [A]. In: Whitton B A, Potts M (Eds.). *Ecology of Cyanobacteria* [M]. Dordrecht: Springer, 2012. 1-11.
- [62] Milcamps A, Dommelen A V, Stigter J, *et al.* The *Azospirillum brasilense rpoN* gene is involved in nitrogen fixation, nitrate assimilation, ammonium uptake, and flagellar biosynthesis [J]. *Canadian Journal of Microbiology*, 1996, **42**(5): 467-478.
- [63] Juge C, Prévost D, Bertrand A, *et al.* Growth and biochemical responses of soybean to double and triple microbial associations with *Bradyrhizobium*, *Azospirillum* and arbuscular mycorrhizae [J]. *Applied Soil Ecology*, 2012, **61**: 147-157.



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 Wuhan 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>Koeleruteria 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 Fluvo-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 Fluvo-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)