

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第1期

Vol.39 No.1

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2006~2015年北京市不同地区 O ₃ 浓度变化	王占山, 李云婷, 安欣欣, 李倩, 孙乃迪, 王步英, 潘锦秀 (1)
南京北郊黑碳气溶胶的来源解析	肖思略, 于兴娜, 朱彬, 何稼祺, 吕睿, 沙丹丹 (9)
电镀厂周边大气 PM ₁₀ 中重金属季节性分布特征及生态风险评价	赵珍丽, 赵委托, 黄庭, 程胜高, 余葱葱, 尹伊梦 (18)
广西玉林市大气 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 中有机碳和元素碳污染特征分析	黄炯丽, 陈志明, 莫招育, 李宏姣, 杨俊超, 刘慧琳, 毛敬英, 梁桂云, 张达标, 吴熊平, 郝爽 (27)
青岛近海及黄渤海大气气溶胶中不同形态氮磷质量浓度及组成特征	张瑞峰, 祁建华, 丁雪, 谢丹丹 (38)
大气环境分区管理: 以广东省为例	杨柳林, 李敏辉, 廖程浩, 曾武涛, 张晖, 张永波 (49)
基于高分影像的城市黑臭水体遥感识别: 以南京为例	温爽, 王桥, 李云梅, 朱利, 吕恒, 雷少华, 丁萧蕾, 苗松 (57)
基于 SWAT 模型的流域河道硝酸盐 δ ¹⁵ N 和 δ ¹⁸ O 模拟	王康, 冉宁, 林忠兵, 周祖昊 (68)
程海流域非点源污染负荷估算及其控制对策	陈学凯, 刘晓波, 彭文启, 董飞, 黄智华, 冯顺新, 王若男 (77)
陆浑水库饮用水源地水体中金属元素分布特征及健康风险评价	余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 谢地, 马鹏途 (89)
天津供水系统中抗生素分布变化特征与健康风险评价	张新波, 宋姿, 张丹, 刘楠楠, 李楠, 温海涛 (99)
西南丘陵区村镇典型供水水源有机物分布特征及对饮水水质的影响	王琼, 李乃稳, 李磊, 李龙国, 苟思, 杨凌肖 (109)
北京市地下水有机氯和有机磷农药健康风险评价	陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (117)
黄河岸边土壤中类二噁英类多氯联苯污染现状及风险	姚宏, 卢双, 张旭, 裴晋, 鲁垠涛 (123)
淹水落干下三峡水库消落带土壤无机磷形态转化特征	周健, 李春辉, 张志永, 胡红青, 万成炎, 胡莲, 潘晓洁 (130)
磷酸盐对铁锰复合氧化膜去除地表水中氨氮的影响	卓瑞双, 黄廷林, 张瑞峰, 文刚 (137)
K ₂ S ₂ O ₈ 强化 g-C ₃ N ₄ 薄膜电极光电催化降解 Cu(CN) ₂ ⁻ 并同步回收 Cu	党聪哲, 李一兵, 王彦斌, 赵旭 (145)
以 HKUST-1 为模板制备铜氧化物活化过一硫酸氢钾降解罗丹明 B	蒲嘉懿, 万金泉, 王艳, 马邕文, 武书彬 (152)
氨化松香基交联聚合树脂对水中诺氟沙星的吸附性能	马亚红, 黄婉婷, 刁开盛, 李鹏飞, 谭学才, 董慧岭, 覃方夸, 雷福厚, 刘绍刚 (161)
铁锰泥除砷颗粒吸附剂对 As(V) 的吸附去除	曾辉平, 吕赛赛, 杨航, 尹灿, 曹瑞华, 王艳菊, 李冬, 张杰 (170)
水铁矿及其胶体对砷的吸附与吸附形态	马玉玲, 马杰, 陈雅丽, 雷梅, 郭华明, 翁莉萍, 李永涛 (179)
阳(阴)离子复配修饰两性磁性膨润土的表面特征差异及对苯酚吸附的影响	任爽, 孟昭福, 王腾, 张洋, 田凯, 刘伟, 闫东旭 (187)
典型城市污水中对羟基苯甲酸酯的污染特征	赵雪, 张子峰, 祝富杰, 李一凡, 马万里 (195)
水力停留时间对活性炭生物转盘处理污水的影响	许雯佳, 成小英 (202)
环丙沙星对膜生物反应器运行效能的影响及其去除特性	戴琦, 刘锐, 舒小铭, 张永明, 陈吕军 (212)
AAO 工艺低氧条件下的运行及其模拟	曹特特, 王林, 李咏梅 (219)
磷酸盐对亚硝化系统的抑制及恢复	顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 张程锦 (227)
碳源对污水处理厂 SAD 工艺小试的影响	李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (232)
容积负荷对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷性能的影响	吕亮, 尤雯, 韦佳敏, 吴鹏, 沈耀良 (239)
DNBF-O ₃ -GAC 组合工艺深度脱除氮磷及代谢产物	钟丽燕, 郝瑞霞, 王卫东, 万京京, 朱晓霞 (247)
交替好氧/缺氧运行模式对生物脱氮效能及活性污泥胞外聚合物的影响	孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (256)
纳米零价铁对升流式颗粒污泥床反硝化性能的影响	周丰, 王翻翻, 钱飞跃, 黄慧敏, 沈耀良, 周建民 (263)
高含固污泥厌氧消化中 Fe/S 及 pH 对原位抑硫效率影响及其交互作用	韩芸, 曹玉芹, 卓杨, 王晓飞, 韩雅婷, 彭党聪 (269)
浑河流域贮存污泥成分特征及演变规律分析	刘甜甜, 崔崇威, 赫俊国, 唐建 (276)
去除城市生活污泥中有机络合态金属强化其厌氧生物制气	卢怡清, 许颖, 董滨, 戴晓虎 (284)
污泥飞灰中重金属不同浸出方法比较及综合毒性评价	王丰, 李润东, 李彦龙, 赵云斌, 杨天华 (292)
初冬时期闽江河口区养殖塘排水后的 CH ₄ 和 N ₂ O 通量日变化特征	杨平, 谭立山, 黄佳芳, 何清华, 全川 (300)
3 种土壤改良剂对河套灌区玉米田温室气体排放的影响	武岩, 红梅, 林立龙, 刘梅, 刘宇杰 (310)
有机氮替代比例对冬小麦/夏玉米轮作体系作物产量及 N ₂ O 排放的影响	侯苗苗, 吕凤莲, 张弘毅, 周应田, 路国艳, Ayaz Muhammad, 黎青慧, 杨学云, 张树兰 (321)
拔节期水稻光合碳输入的动态变化及其对施氮的响应: ¹³ C-CO ₂ 脉冲标记	陈珊, 祝贞科, 袁红朝, 王久荣, 彭佩钦, 葛体达, 吴金水 (331)
陕北黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤碳剖面分布特征	兰志龙, 赵英, 张建国, 李会杰, 司炳成, 焦瑞, Muhammad Numan Khan, Tanveer Ali Sial (339)
不同地表条件下生物炭对土壤氮挥发的影响	邹娟, 胡学玉, 张阳阳, 陈窃君, 王向前, 刘扬 (348)
秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响	徐国鑫, 王子芳, 高明, 田冬, 黄容, 刘江, 黎嘉成 (355)
县域尺度土壤铜的有效性及相关影响因素评估	李锦芬, 瞿明凯, 刘刚, 黄标 (363)
基于改进 LUR 模型的区域土壤重金属空间分布预测	曾菁菁, 沈春竹, 周生路, 陆春峰, 金志丰, 朱雁 (371)
沈北新区土壤中多环芳烃污染特征及源解析	李嘉康, 宋雪英, 魏建兵, 王颖怡, 李玉双, 郑学昊 (379)
磷酸盐、腐殖酸与粉煤灰联合钝化处理模拟铅镉污染土壤	赵庆圆, 李小明, 杨麒, 陈灿, 钟振宇, 钟宇, 陈飞, 陈寻峰, 王祥 (389)
控源及改良措施对稻田土壤和水稻镉累积的影响	封文利, 郭朝晖, 史磊, 肖细元, 韩晓晴, 冉洪珍, 薛清华 (399)
典型土壤双季稻对 Cd 吸收累积差异	李欣阳, 龙坚, 王树兵, 陈齐, 董霞, 蒋凯, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (406)
松花江上游夹皮沟金矿开采区芦苇叶片汞分布特征	张曼胤, 李梦洁, 崔丽娟, 王贺年, 郭子良, 徐卫刚, 魏圆云, 杨思, 肖红叶 (415)
硝酸盐对土壤反硝化活性及厌氧降解的影响	代军帅, 左小虎, 王明霞, 姚炎红, 周志峰 (422)
长期施肥对稻田土壤微生物量、群落结构和活性的影响	王伟华, 刘毅, 唐海明, 孙志龙, 李宝珍, 葛体达, 吴金水 (430)
海洋沉积物中硫酸盐还原菌和硫酸化菌群落分析方法的比较	张玉, 米铁柱, 甄毓, 陈烨, 付璐璐, 王勋功 (438)
鄱阳湖微囊藻毒素时空分布格局及其与理化及生物因子的关系	袁丽娟, 廖旦根, 张莉, 张大文, 罗林广, 刘聚涛 (450)
畜禽粪便中多重耐药细菌及耐药基因分布特征	张昊, 王盼亮, 杨清香, 俞宁 (460)
烟气净化工艺和焚烧炉类型对生活垃圾焚烧灰灰性质的影响	章骅, 于思源, 邵立明, 何品晶 (467)

长期施肥对稻田土壤微生物量、群落结构和活性的影响

王伟华^{1,2}, 刘毅^{2*}, 唐海明³, 孙志龙⁴, 李宝珍², 葛体达², 吴金水^{1,2}

(1. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070; 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. 湖南省农业科学院土壤肥料研究所, 长沙 410125; 4. 宁乡县回龙铺镇农业服务中心, 长沙 410606)

摘要:以湖南省宁乡县长期定位施肥试验为平台,选取不施肥(CK)、全量化肥(NPK)、秸秆还田+化肥(ST)和有机肥+化肥(OM)这4种处理,采用磷脂脂肪酸(PLFA)技术和MicroRespTM方法,研究了长期施肥对水稻土微生物量、群落结构及活性的影响。结果表明,细菌、真菌、革兰氏阴性菌和革兰氏阳性菌PLFA含量均表现为OM>ST>NPK>CK; PLFA主成分分析表明,相比CK处理,NPK、ST和OM处理中微生物的群落结构均发生了改变,特别是ST和OM处理变化更为显著。MicroRespTM结果表明,相比CK处理(1.28 $\mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$),OM处理的土壤微生物对碳源平均利用率最高(1.81 $\mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$),ST处理(1.19 $\mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$)次之,NPK处理(0.95 $\mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$)最低。不同施肥处理土壤微生物对不同碳源利用的偏好情况存在明显差异。当碳源底物为酮戊二酸、半乳糖和赖氨酸时,不同施肥处理土壤微生物对不同碳源利用差异十分明显。因此,长期化肥配合秸秆还田或配施有机肥显著改善土壤养分含量和土壤微生物量、微生物群落结构和活性,对于培肥地力和优化土壤微生物群落极为重要。

关键词:水稻土; 长期施肥; 土壤微生物; 磷脂脂肪酸; MicroRespTM

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)01-0430-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201706039

Effects of Long-term Fertilization Regimes on Microbial Biomass, Community Structure and Activity in a Paddy Soil

WANG Wei-hua^{1,2}, LIU Yi^{2*}, TANG Hai-ming³, SUN Zhi-long⁴, LI Bao-zhen², GE Ti-da², WU Jin-shui^{1,2}

(1. College of Resources and Environment, Huazhong Agriculture University, Wuhan 430070, China; 2. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 3. Hunan Soil and Fertilizer Institute, Changsha 410125, China; 4. Integrated Service for Agriculture Ningxiang County Huilongpu Town, Changsha 410606, China)

Abstract: Four paddy soils were collected in Ningxiang County, Hunan province. These used with different long-term fertilization regimes, including a control without fertilizer (CK), chemical fertilization with nitrogen, phosphate, and kalium (NPK), straw fertilization combined with NPK (ST), and manure fertilization combined with NPK (OM). Phospholipid fatty acid (PLFA) technology and MicrorespTM method were used to study the effect of long-term fertilization on soil microorganism abundance, community structure, and activity. Results showed that the abundance of bacteria, fungi, gram-negative (G^-) bacteria, and gram-positive (G^+) bacteria in the soil from the OM treatment was generally higher than for the other treatments; these levels were lower in the ST and NPK treatments and lowest in the CK treatment. The principal components analysis (PCA) of PLFA showed that the community structure of microorganisms in NPK, ST, and OM treatments was altered in comparison with that in CK, especially in the case of the ST and OM treatments. MicroRespTM results revealed that compared to the CK treatment (1.28 $\mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$), soil microorganisms in the OM treatment had the highest average utilization rate of multiple carbon sources (1.81 $\mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$), followed by ST (1.19 $\mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$), CK (1.28 $\mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$), and NPK (0.95 $\mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$). Furthermore, different long-term fertilization regimes resulted in distinct carbon source preferences for the soil microorganisms and revealed a significant alteration in the microbial community. Conclusively, long-term fertilizer with straw or manure changes the microbial community and is a benefit for improving the biomass and activity of microorganism in rice paddy soils.

Key words: paddy soil; long-term fertilization; soil microbes; phospholipid fatty acids; MicroRespTM

土壤微生物不仅驱动着土壤物质转化和养分循环,还可作为土壤中植物有效养分的储备库^[1]。因此,土壤微生物在农业土壤生态系统中的作用日益受到关注。施肥不仅能显著增加土壤肥力、改善土壤容重、水分含量和团聚体含量等物理化学性质,同时对土壤微生物的数量、多样性和活性等也会产生显著影响^[2~6]。已有研究表明,化肥配施有

机肥和单施化肥均能增加土壤中微生物生物量碳的含量^[7]。李秀英等^[8]的研究发现化肥配施有机肥不

收稿日期: 2017-06-06; 修订日期: 2017-08-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41501321); 国家重点研发计划项目(2016YFE0101100); 湖南省自然科学基金项目(2016JJ3132)

作者简介: 王伟华(1992~),男,硕士研究生,主要研究方向为土壤生态, E-mail: gtd@isa.ac.cn

* 通信作者, E-mail: liuyi@isa.ac.cn

仅能增加土壤细菌、放线菌和真菌数量,还能促进固氮菌、氨化菌等功能菌的繁殖,对土壤氮素循环有重要作用. 陈晓芬等^[9]的研究表明施用有机肥能显著提高土壤有机碳、全氮及微生物量碳、氮的含量. 王晶等^[10]的研究也发现,施用化肥处理的土壤微生物量显著高于对照处理(不施肥处理);然而,长期施肥对稻田土壤微生物量、群落结构和活性的影响仍不明确.

随着研究的深入,越来越多的方法被应用到对土壤微生物的研究中. 其中磷脂脂肪酸(PLFA)分析技术以其能够快速、直接、有效地分析出微生物含量、组成及群落信息等优点而被广泛应用在对土壤微生物的研究中^[11~14]. 在对微生物群落水平生理特征的研究方面,可以同时分析土壤微生物群落结构、微生物活性的 MicroRespTM方法受到了越来越多研究者的欢迎,与传统微生物平板培养法、Biolog 微平板法和多重底物诱导呼吸(Multi-SIR)相比较, MicroRespTM方法具有分辨率高、原位性好、操作更为简便等优点,被认为是一种具有广阔应用前景的分析微生物活性和群落结构的方法^[15],目前已经在不同生态系统类型的研究中得到了广泛的应用. Macdonald^[16]等利用 MicroRespTM方法研究了土地利用方式的改变对草地土壤微生物的影响,发现土地利用、管理方式是影响草地土壤微生物代谢活性的关键因素. Wakelin 等^[17]的研究发现土壤类型比农业管理措施更能决定土壤微生物的代谢功能. Licona^[18]利用 MicroRespTM方法研究了耕地和草地土壤微生物群落对铬元素的反应,发现土壤微生物群落对添加的铬元素反应强烈.

本研究以湖南宁乡稻田长期定位试验为平台,采用长期不同施肥处理的定位试验土壤,经相同淹

水处理(9 d)后,采用 PLFA 和 MicroRespTM技术对土壤微生物量、群落结构和活性进行分析,通过明确长期不同施肥处理的土壤微生物量、群落结构和活性的差异,以期为提高该地区土壤肥力、促进土壤养分良性循环提供有效的科学支撑.

1 材料与方法

1.1 试验地点

田间试验于 1986 年设立,位于湖南省宁乡县农技中心(112°18'E, 28°07' N),该地区是典型的双季稻主产区,平均海拔 36.1 m,年均气温 16.8℃,年均降雨量 1 553.70 mm,年蒸发量 1 353.9 mm,年均无霜期在 274 d 左右. 本文所用土样均采自排灌条件良好的河沙泥水稻土,肥力中等.

1.2 试验设计与土壤样品的采集

田间试验共设 4 个施肥处理(表 1):①全化肥处理(NPK):仅施氮磷钾化肥;②秸秆还田+化肥处理(ST):施用上一年度晚稻收割的秸秆和化肥;③30%有机肥+70%化肥(OM):施用的有机肥含有的氮素含量占总氮肥施用量的 30%,剩余的 70%由含氮化肥补充;④无肥对照(CK):不施加任何肥料.

土壤样品于 2016 年 6 月 30 日采集,采用蛇形采样法,每个小区分 5 点采样,采集耕作层(0~20 cm)土壤约 4 kg 并混匀. 从采集的新鲜土样中取 2 份. 一份 200 g 风干磨碎过 100 目筛用于土壤基本理化性质的测定. 一份 500 g 过 2 mm 筛后混匀,淹水 2~3 cm 培养 9 d 后重新采样,取其中 300 g 用于土壤微生物生物量的测定和 MicroRespTM分析;剩下的经冷冻干燥后于 -70℃ 冰箱保存,用于 PLFA 的测定. 每种施肥处理做 3 个重复.

表 1 4 种不同施肥处理土壤的基本性质¹⁾

不同处理	pH	速效磷 /mg·kg ⁻¹	有机质 /g·kg ⁻¹	总氮 /g·kg ⁻¹	总碳 /g·kg ⁻¹	全磷 /g·kg ⁻¹	硝态氮 /mg·kg ⁻¹	铵态氮 /mg·kg ⁻¹	微生物量碳 /mg·kg ⁻¹
不施肥处理(CK)	5.35 ± 0.17c	0.26 ± 0.05d	39.75 ± 0.45c	2.16 ± 0.06c	19.70 ± 0.07d	0.44 ± 0c	26.86 ± 3.18a	32.25 ± 2.82bc	574.33 ± 39.13b
秸秆还田处理(ST)	5.96 ± 0.02a	5.85 ± 0.2c	43.85 ± 1.3b	2.40 ± 0.06b	23.10 ± 0.06b	0.67 ± 0.02b	31.93 ± 1.68a	28.45 ± 3.44c	877.21 ± 64.20a
全化肥处理(NPK)	5.52 ± 0.02bc	8.23 ± 0.81b	39.56 ± 1.31c	2.17 ± 0.06c	20.50 ± 0.07c	1.599 ± 0a	28.21 ± 3.66a	36.93 ± 1.17a	639.92 ± 38.13b
30%有机肥+70% 化肥处理(OM)	5.70 ± 0.13b	25.02 ± 0.41a	55.13 ± 0.39a	3.15 ± 0.05a	29.90 ± 0.06a	0.67 ± 0.03b	28.28 ± 3.26a	38.23 ± 7.82a	944.50 ± 43.86a

1) 不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)

1.3 样品分析

1.3.1 样品基本理化性质的测定

pH 测定以水为浸提剂,水土比为 2.5:1,土壤全磷的测定是采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色

法^[19]. 土壤总碳和总氮采用碳氮元素分析仪(VARIO MAX C/N, Germany)测定(干烧法). 土壤微生物量碳(MBC)采用氯仿熏蒸提取-碳自动分析法测定^[20]. 称取 4 份新鲜土样,每一份土壤 25.00 g(烘

干基),其中2份作为未熏蒸对照直接加入0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄ 溶液,振荡(3 000 r·min⁻¹)30 min 后提取.另2份在真空干燥器内用氯仿熏蒸(24 h),除去氯仿后立即同上提取.取10.00 mL 提取液与10.00 mL 六偏磷酸钠溶液(*c* = 50 g·L⁻¹, pH = 2.0)混合后以碳自动分析仪(Phoenix 8000)测定提取的有机碳.以熏蒸土样与不熏蒸土样提取的有机碳的差值乘以转换系数 *K_C* (2.22) 计算土壤 MBC 含量.

1.3.2 磷脂脂肪酸(PLFA)的测定

磷脂脂肪酸是按照改进后的 Bligh-Dyer 方法进行提取^[21],使用美国 MIDI 公司的磷脂脂肪酸数据库对提取物进行定量和定性分析^[22].具体步骤如下:首先,称取2.00 g 经过冷冻干燥的土样,用氯仿:甲醇:柠檬酸缓冲液(*c* = 0.15 mol·L⁻¹, pH =

4.0) = 1:2:0.8 (体积比)共22.8 mL 分两次提取,通过 SPE 柱洗脱分离得到磷脂,添加内标十九烷酸甲酯后,采用温和甲基化方法甲酯化后用气相色谱仪(N6890, Agilent, USA)分离后由与其相连的火焰离子检测器(FID)进行定性和定量分析.含量用其中脂肪酸甲酯的摩尔百分比表示.

一般脂肪酸的命名格式为(a/i)*X*:*YwZ*(*c/t*),其中*X*表示碳原子数,*Y*表示双键数,中间以冒号隔开;*w*为自甲基端起双键的位置,*Z*表示双键所在的碳原子位置;*c/t*表示顺/反式脂肪酸;*a/i*表示反式/异支链脂肪酸;*cy*为环状脂肪酸,10Me表示距离羧基末端第10个碳原子上有一个甲基团.

本文中表示不同类群土壤微生物的特征磷脂脂肪酸见表2.

表2 表征土壤微生物类型的特征磷脂脂肪酸

Table 2 PLFA characterizing microbes

名称	定义	文献
细菌	15:0, 17:0, i15:0, i16:0, i17:0, a15:0, a17:0, 16:1w7, 18:1w7, cy17:0, cy19:0,	[23,24]
真菌	18:2w6, 18:1w9	[23,25]
革氏阴性菌 G ⁻	16:1w5c, 16:1w7c, 16:1w9c, 17:1w8c, 18:1w5c, 18:1w7c, 19:1w11c, cy17:0, cy19:0	[23,26]
革氏阳性菌 G ⁺	i14:0, i15:0, i16:0, i17:0, a15:0, a17:0,	[23,26]

1.3.3 MicroResp™ 分析

配制质量分数为3%的琼脂粉混合液在121℃下灭菌30 min 后与甲酚红溶液(18.75 mg·L⁻¹甲酚红,16.77 g·L⁻¹氯化钾,0.315 g·L⁻¹碳酸氢钠)按照1:2(体积比)的比例充分混匀后放置在60℃的水浴锅中;将混合液加到96孔透明酶标板中,每孔150 μL,作为检测板,用保鲜膜包好放在装有生石灰的干燥器中备用.

将土样过10目筛后均匀地加入到96孔深孔板中并记录平均每孔样品重,将25 μL 不同碳源加入到对应深孔中,碳源种类和浓度如表3所示,将做好的检测板倒扣在深孔板上,中间用橡胶垫片隔开,使孔与孔一一相对扣紧,用夹具固定后放在25℃,避光条件下培养6 h.根据微孔板检测指示剂对特定波长光的吸收情况来计算土壤中的微生物在6 h 内 CO₂ 的产生率(%).

CO₂ 产生率和指示剂对特定波长光的吸收值变化的标准曲线根据以下公式进行计算^[15]:

$$CO_2(\%) = A + B / (1 + D \times Ai_j)$$

式中,*A* = -0.226 5, *B* = -1.606, *D* = -6.771.

采用下述公式将数据规范化:

$$Ai_6 = (At_6 / At_0) \times \text{Mean}(At_0)$$

$$Ai_0 = (At_0 / At_0) \times \text{Mean}(At_0)$$

式中,*At₆*为样品添加碳源并培养6 h 后检测板的吸光值;*At₀*为样品未添加碳源培养时检测板的吸光值

CO₂ 产生率[μg·(g·h)⁻¹]根据下式计算:

$$CO_2 \text{ 产生率} = (CO_2 \times 100\%) \times L \times (44/22.4) \times (12/44) \times [273/(273 + T)] / (W \times U) / t$$

式中,*T*为培养温度(25℃),*L*为检测板孔体积(945 μL),*W*为土壤鲜重,*U*为土壤含水率,*t*为培养时间(6 h)

表3 MicroResp™ 深孔板中所添加的碳源种类和含量

Table 3 Concentrations of different carbon sources added into the deep-well of MicroResp™

碳源	空白 (水)	丙氨酸	半乳糖	阿拉伯糖	葡萄糖	草酸	精氨酸	原儿茶酸	苯甲酸	柠檬酸	酮戊二酸	海藻糖	半胱氨酸	赖氨酸	果糖	苹果酸
含量/mg·g ⁻¹	0	30	30	30	30	30	30	7.5	30	30	30	30	7.5	30	30	30

1.4 数据处理

试验数据采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS20.0

统计软件处理和分析;多重比较采用 Duncan 法计算检验差异显著性(3次重复).不同处理差异显著

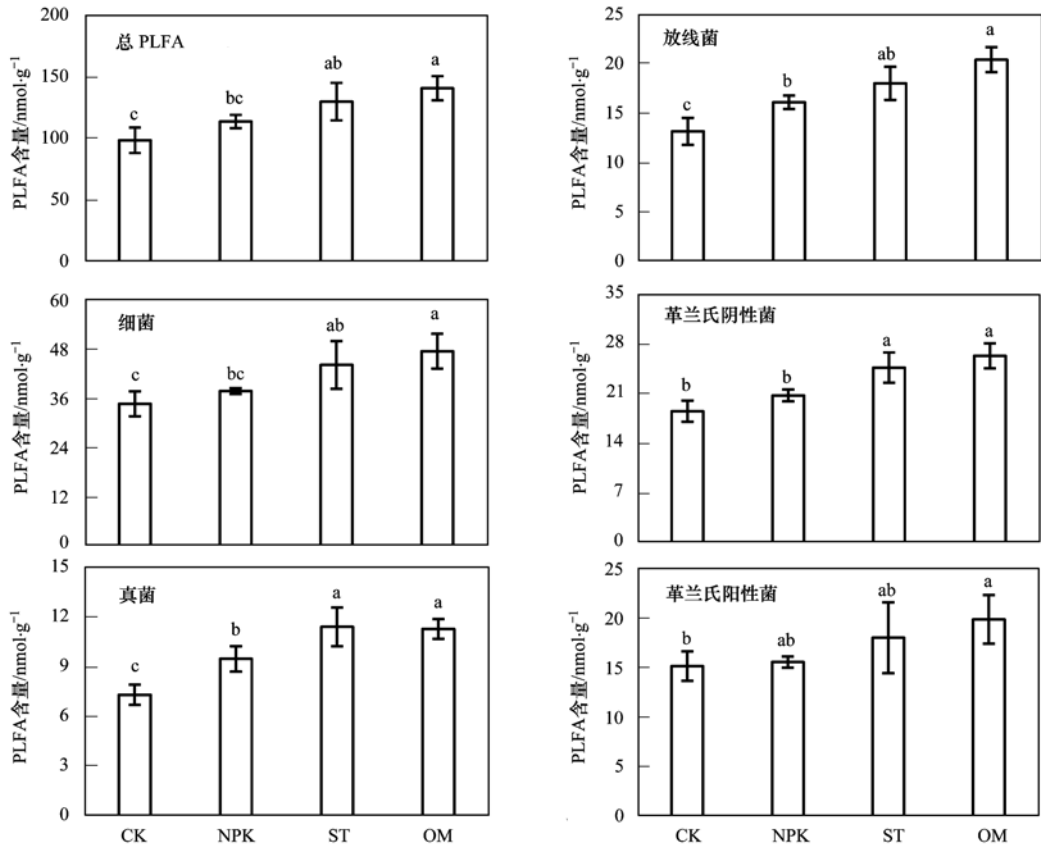
性用 One-wayANOVA (单因素方差分析) 检验,用 Canoco4.5 做磷脂脂肪酸主成分分析.

2 结果与分析

2.1 土壤各菌群磷脂脂肪酸含量的变化

4 种不同施肥处理的土壤总 PLFA 含量之间存在显著差异 (图 1), OM 处理的土壤总 PLFA 含量最高 ($140.98 \text{ nmol} \cdot \text{g}^{-1}$), ST 处理 (130.11

$\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1}$) 和 NPK 处理 ($113.94 \text{ nmol} \cdot \text{g}^{-1}$) 的次之; CK 处理 ($98.71 \text{ nmol} \cdot \text{g}^{-1}$) 的土壤总 PLFA 最低. 相比 CK 处理, 细菌、真菌、放线菌、革兰氏阳性菌、革兰氏阴性菌在 3 个施肥处理中均有一定幅度的增加, 尤其在 ST 和 OM 处理中显著增加. 说明长期施肥促进土壤微生物的生长, 尤其是长期秸秆还田和施加有机肥显著促进土壤微生物的繁殖.



CK 代表不施肥处理, ST 代表秸秆还田 + 化肥处理, NPK 代表全量化肥处理, OM 代表 30% 有机肥 + 70% 化肥处理, 下同

图 1 4 种不同处理土壤特征磷脂脂肪酸含量

Fig. 1 PLFA contents of four different fertilized paddy soils

2.2 土壤微生物群落结构分析

利用 PCA 对 4 种不同施肥处理的稻田土壤微生物群落结构进行分析后发现 (图 2), 相比 CK 处理, NPK、ST 和 OM 处理中微生物群落结构均发生了改变, 特别是 ST 和 OM 处理变化更为显著, 表明化肥配合秸秆还田或配施有机肥能够显著改变微生物的群落结构.

2.3 各菌群特征磷脂脂肪酸含量与土壤性质的相关分析

各菌群 PLFA 含量与土壤性质的相关性分析如表 4 所示, 4 种不同施肥处理的土壤有机碳含量与总 PLFA、细菌 PLFA、革兰氏阴性菌和革兰氏阳性

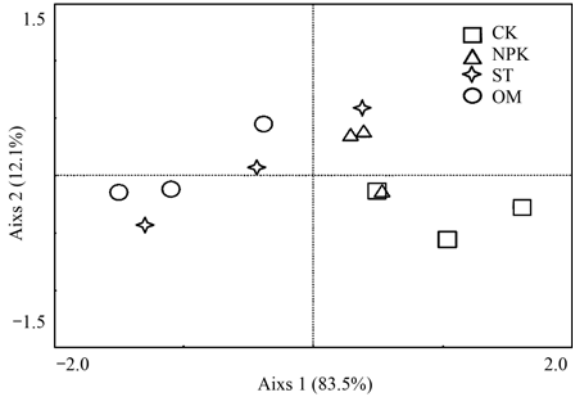


图 2 4 种不同施肥处理的土壤微生物特征磷脂脂肪酸主成分分析

Fig. 2 Principal component analysis of PLFAs structures in the four different fertilized paddy soils

表 4 各菌群 PLFA 和土壤理化性质的相关性分析

Table 4 Correlation between soil PLFAs and soil physiochemical properties

项目	土壤有机碳 SOC	全氮 TN	全磷 TP	速效磷 Olsen P	铵态氮	硝态氮	微生物量碳 MBC
总 PLFA	0.623 * (0.031)	0.474(0.119)	-0.029(0.928)	0.055(0.846)	0.176(0.584)	0.157(0.627)	0.097(0.764)
细菌 PLFA	0.600 * (0.039)	0.483(0.112)	-0.129(0.689)	-0.048(0.883)	0.162(0.614)	0.138(0.669)	0.006(0.986)
真菌 PLFA	0.446(0.146)	0.262(0.411)	0.080(0.805)	0.151(0.640)	0.205(0.522)	0.029(0.928)	0.346(0.270)
革兰氏阴性菌 PLFA	0.579 * (0.049)	0.474 (0.119)	-0.191(0.552)	-0.120(0.711)	0.145(0.653)	0.159(0.621)	0.072(0.842)
革兰氏阳性菌 PLFA	0.604 * (0.037)	0.494(0.102)	-0.115 (0.721)	-0.027 (0.932)	0.162 (0.616)	0.126 (0.697)	-0.148(0.647)
G ⁻ PLFA/G ⁺ PLFA	-0.014(0.966)	-0.023 (0.943)	0.177 (0.581)	0.203 (0.528)	0.035 (0.914)	-0.087 (0.787)	0.481 (0.114)
细菌/真菌	-0.033(0.918)	0.209 (0.515)	-0.472 (0.121)	-0.498 (0.099)	-0.193 (0.549)	0.086 (0.792)	-0.795 ** (0.002)

1) * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关, ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; 括号中的数值为 *P* 值

菌 PLFA 含量呈显著正相关 ($P < 0.05$), 说明土壤有机碳是 4 个施肥处理中微生物量和群落结构存在显著差异的核心驱动因子.

2.4 MicroResp™ 结果分析

MicroResp™ 结果如图 3 所示, 4 种不同处理的土壤微生物基础呼吸值分别为, CK 处理 $0.56 \mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$, NPK 处理 $0.50 \mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$, ST 处理 $0.60 \mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$, OM 处理 $0.98 \mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$, 表明化肥配合秸秆还田或配施有机肥能够促进土壤微生物的碳代谢活性. 添加 15 种不同碳源后, 在碳源为丙氨酸, 半

乳糖, 阿拉伯糖和果糖时, OM 处理的土壤碳源利用率显著高于其他 3 种施肥处理, 且 15 种碳源中只有精氨酸对土壤微生物呼吸起抑制作用, 其二氧化碳产生率小于基础呼吸值. 在 OM 和 CK 中, 碳源为酮戊二酸时的二氧化碳产生率最高, ST 处理土壤在碳源为赖氨酸时, 其二氧化碳产生率在全部的 15 种碳源中最高, 在碳源为果糖时, 全量化肥处理土壤的二氧化碳产生率最高, 说明不同施肥处理土壤微生物对不同碳源利用的偏好情况存在明显差异.

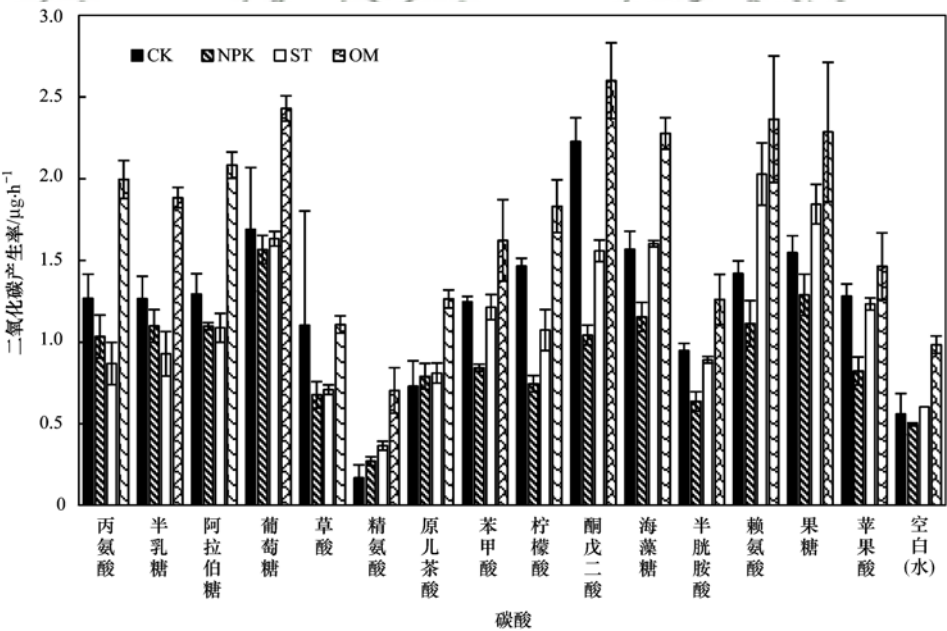


图 3 4 种不同处理土壤添加 15 种碳源和水在 6h 内的诱导产生 CO₂ 的平均速率和空白基础 CO₂ 产生的平均速率

Fig. 3 Respirometric evolution of carbon dioxide after 6 h with addition of 15 different C sources and 0 blank for the four different fertilized paddy soils

3 讨论

已有研究表明, 施肥能显著增加土壤微生物量^[27]. Hatch 等^[28]的研究认为无机肥和有机肥配施能够明显增加土壤微生物量. 本研究中, 相比于

CK 处理, 无论是 NPK 或 ST 处理还是 OM 处理, 长期施肥都不同程度地增加了土壤微生物量(图 1). 对于 NPK 处理来说, 一方面含 N、P、K 化肥的施入为土壤微生物的生长提供了直接而充足的矿质养分, 另一方面含 N、P、K 化肥的施入在促进水稻生

长的同时也增加了土壤中植物残留和根系分泌物,为土壤微生物的生长繁殖提供了更多的碳源和养分.对于ST和OM处理来说,在施入化肥的同时,配合秸秆还田(ST)或配施有机肥(OM)增加了土壤有机质和有效养分含量,为土壤微生物特别是异养微生物的生长和代谢提供物质和能量来源,从而有利于微生物的繁殖.这与之前的研究结果一致^[29,30].例如,孙瑞莲等^[31]的研究发现,化肥与有机肥长期配合施用能明显提高土壤有机质和氮磷钾养分含量,促进微生物代谢和繁育.朱海平等^[32]的研究也发现,不同培肥管理措施对土壤有机质养分含量和微生物生态特征有显著影响,其中施用猪厩肥产生的影响最大,化肥产生的影响最小.

本研究中,通过对4种不同施肥处理的土壤微生物磷脂脂肪酸相对含量进行主成分分析后发现:与CK相比,其他3个处理土壤微生物群落结构都发生了变化,其中ST和OM处理的群落结构改变尤为明显(图2),这可能与不同施肥处理中土壤有机质含量变化紧密相关(表1和3).施加N、P、K肥料能促进水稻根系生长,产生更多留田根茬和根系分泌物,能够诱导某些适应此类环境的微生物选择性地富集,从而土壤微生物的群落结构发生了改变.而秸秆还田或有机肥的施用则是直接增加了土壤有机质含量,调节和优化了土壤C/N,为土壤微生物的生长繁殖提供更多的能源、养分及适宜的土壤环境,导致土壤中微生物群落结构发生显著改变.孟庆杰等^[33]的研究也证实了施肥制度能够显著影响土壤微生物的多样性.武晓森等^[34]的研究结果表明秸秆还田和有机无机配施能够显著提高微生物活性.本研究的MicroRespTM结果显示,ST和OM处理的土壤微生物基础呼吸值均高于CK处理,表明无机化肥配合秸秆还田或配施有机肥能够促进土壤微生物对碳的代谢活性.而NPK处理相比CK处理略低.其原因可能是化肥的长期施用,尤其是含氮化肥,能够使土壤C/N比降低,使土壤中原有有机碳加速分解,导致土壤中积累的有机碳含量下降,因而影响了土壤微生物的活性.这与徐阳春等^[35]和李娟等^[36]的研究结果一致.另外,添加15种不同碳源后,发现不同施肥处理中土壤微生物对不同碳源利用的偏好情况存在明显差异,说明长期不同施肥处理针对某些特定土壤微生物进行了富集和驯化,导致不同的施肥处理中存在独特的土壤微生物群落,从而导致对不同碳源的代谢活性产生显著差异.张奇春等^[37]的研究发现施用有机肥可以迅速提高

土壤环境细菌和真菌的种类和数量,从而改善土壤的生态环境.郭隽馥^[38]的研究表明长期施用氮肥可以改变土壤细菌群落结构.武发思^[39]的研究也发现不同施肥处理对根际细菌群落结构影响不同,有机肥对细菌多样性的增加和群落结构的改变作用明显.

4 结论

长期不同施肥处理能够影响稻田土壤养分、土壤微生物量、微生物群落结构和活性.虽然单施化肥对土壤养分含量和土壤微生物量、微生物群落结构和活性的影响不显著,然而化肥配合秸秆还田或配施有机肥能显著改善土壤养分含量和土壤微生物量、微生物群落结构和活性,其中化肥配施有机肥的效果最好.可见,无机化肥合理配施有机肥对于培肥地力和优化土壤微生物群落极为重要.

致谢:感谢中国科学院城市环境研究所姚槐应老师在PLFA测定和MicroRespTM方面提供的理论支持和技术指导!

参考文献:

- [1] 谭周进,周卫军,张杨珠,等.不同施肥制度对稻田土壤微生物的影响研究[J].植物营养与肥料学报,2007,13(3):430-435.
Tan Z J, Zhou W J, Zhang Y Z, et al. Effect of fertilization systems on microbes in the paddy soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(3): 430-435.
- [2] 孙建,刘苗,李立军,等.不同施肥处理对土壤理化性质的影响[J].华北农学报,2010,25(4):221-225.
Sun J, Liu M, Li L J, et al. The effect of different fertilization treatments on soil physical and chemical property[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2010, 25(4): 221-225.
- [3] 杨学云,孙本华,古巧珍,等.黄土施肥效应与肥力演变的长期定位监测研究:II.长期施肥对土壤理化性质的影响[J].植物营养与肥料学报,2002,8(S1):71-74.
Yang X Y, Sun B H, Gu Q Z, et al. A study on the effect of fertilization and fertility evolution of loess soil in long-term stationary experiment: II. Effects of long-term fertilization on soil properties[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2002, 8(S1): 71-74.
- [4] 王改兰,段建南,贾宁凤,等.长期施肥对黄土丘陵区土壤理化性质的影响[J].水土保持学报,2006,20(4):82-85,89.
Wang G L, Duan J N, Jia N F, et al. Effect of long-term fertilization on soil physical property in loess hilly area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(4): 82-85, 89.
- [5] Abbott L K, Murphy D V. Soil biological fertility[M]. Netherlands: Springer, 2007. 607-627.
- [6] Ndayegamiye A, Côté D. Effect of long-term pig slurry and solid cattle manure application on soil chemical and biological properties[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1989, 69(1):

- 39-47.
- [7] 陈旻. 不同施肥处理对红壤水稻土微生物生物量的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2007.
- Chen Y. Effects of fertilization on microbial biomass in paddy soils of subtropical China [D]. Nanjing: Nanjing Agriculture University, 2007.
- [8] 李秀英, 赵秉强, 李絮花, 等. 不同施肥制度对土壤微生物的影响及其与土壤肥力的关系[J]. 中国农业科学, 2005, **38**(8): 1591-1599.
- Li X Y, Zhao B Q, Li X H, *et al.* Effects of different fertilization systems on soil microbe and its relation to soil fertility [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, **38**(8): 1591-1599.
- [9] 陈晓芬, 李忠佩, 刘明, 等. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳、氮分布和微生物生物量的影响[J]. 中国农业科学, 2013, **46**(5): 950-960.
- Chen X F, Li Z P, Liu M, *et al.* Effects of different fertilizations on organic carbon and nitrogen contents in water-stable aggregates and microbial biomass content in paddy soil of subtropical China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, **46**(5): 950-960.
- [10] 王晶, 解宏图, 张旭东, 等. 施肥对黑土土壤微生物生物量碳的作用研究[J]. 中国生态农业学报, 2004, **12**(2): 118-120.
- Wang J, Xie H T, Zhang X D, *et al.* Effect of fertilization on soil microbial biologic carbon in black soil [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2004, **12**(2): 118-120.
- [11] 王曙光, 侯彦林. 磷脂脂肪酸方法在土壤微生物分析中的应用[J]. 微生物学通报, 2004, **31**(1): 114-117.
- Wang S G, Hou Y L. Application of phospholipid fatty acid method in soil microbial analysis [J]. *Microbiology*, 2004, **31**(1): 114-117.
- [12] 白震, 何红波, 张威, 等. 磷脂脂肪酸技术及其在土壤微生物研究中的应用[J]. 生态学报, 2006, **26**(7): 2387-2394.
- Bai Z, He H B, Zhang W, *et al.* PLFAs technique and it's application in the study of soil microbiology [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, **26**(7): 2387-2394.
- [13] 颜慧, 蔡祖聪, 钟文辉. 磷脂脂肪酸分析方法及其在土壤微生物多样性研究中的应用[J]. 土壤学报, 2006, **43**(5): 851-859.
- Yan H, Cai Z C, Zhong W H. PLFA analysis and its applications in the study of soil microbial diversity [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, **43**(5): 851-859.
- [14] 赵帅, 张静妮, 赖欣, 等. 放牧与围栏内蒙古针茅草原土壤微生物生物量碳、氮变化及微生物群落结构 PLFA 分析[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(6): 1126-1134.
- Zhao S, Zhang J N, Lai X, *et al.* Analysis of microbial biomass C, N and soil Microbial community structure of stipasteppes using PLFA at grazing and fenced in Inner Mongolia, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, **30**(6): 1126-1134.
- [15] 钱美宇. MicroResp™方法研究土壤微生物群落水平生理特征 (CLPP) 进展 [EB/OL]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201103-2>, 2011-03-01.
- [16] Macdonald C A, Thomas N, Robinson L, *et al.* Physiological, biochemical and molecular responses of the soil microbial community after afforestation of pastures with *Pinus radiata* [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41**(8): 1642-1651.
- [17] Wakelin S A, Macdonald L M, Rogers S L, *et al.* Habitat selective factors influencing the structural composition and functional capacity of microbial communities in agricultural soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, **40**(3): 803-813.
- [18] Licona Manzur C G. A combined chemical and biological approach to the measurement of chromium speciation, availability and ecotoxicity in contaminated soils [D]. Edinburgh: University of Edinburgh, 2002.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000. 25-108.
- [20] Wu J, Joergensen R G, Pommerening B, *et al.* Measurement of soil microbial biomass C by fumigation-extraction—an automated procedure [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1990, **22**(8): 1167-1169.
- [21] Bligh EG, Dyer W J. A rapid method of total lipid extraction and purification [J]. *Canadian Journal of Biochemistry and Physiology*, 1959, **37**(8): 911-917.
- [22] 王娟. 稻田土壤碳氮转化与微生物群落结构及活性之间的联系机制 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015. 57-58.
- Wang J. The relationship of microbial community structure and activity to carbon and nitrogen transformations in paddy soil [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015. 57-58.
- [23] Frostegård A, Bååth E, Tunlid A. Shifts in the structure of soil microbial communities in limed forests as revealed by phospholipid fatty acid analysis [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1993, **25**(6): 723-730.
- [24] Tunlid A, Hoitink H A J, Low C, *et al.* Characterization of bacteria that suppress *Rhizoctonia* damping-off in bark compost media by analysis of fatty acid biomarkers [J]. *Applied and Environment Microbiology*, 1989, **55**(6): 1368-1374.
- [25] Salomonová S, Lamačová J, Rulík M, *et al.* Determination of phospholipid fatty acids in sediments [J]. *Acta Universitatis Palackianae Olomucensis Facultas Rerum Naturalium: Chemical*, 2003, **42**: 39-49.
- [26] Zelles L, Bai QY, Beck T, *et al.* Signature fatty acids in phospholipids and lipopolysaccharides as indicators of microbial biomass and community structure in agricultural soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1992, **24**(4): 317-323.
- [27] 郭萍, 文庭池, 董玲玲, 等. 施肥对土壤养分含量、微生物数量和酶活性的影响 [J]. 农业现代化研究, 2011, **32**(3): 362-366.
- Guo P, Wen T C, Dong L L, *et al.* Effect of fertilizer to content of soil nutrient, amount of soil microorganism and soil enzyme activities [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2011, **32**(3): 362-366.
- [28] Hatch D J, Lovell R D, Antil R S, *et al.* Nitrogen mineralization and microbial activity in permanent pastures amended with nitrogen fertilizer or dung [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, **30**(4): 288-293.
- [29] Ocio J A, Brookes P C, Jenkinson D S. Field incorporation of straw and its effects on soil microbial biomass and soil inorganic N [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1991, **23**(2): 171-176.
- [30] Gupta R K, Yadvinder-Singh, Ladha J K, *et al.* Yield and phosphorus transformations in a rice-wheat system with crop residue and phosphorus management [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, **71**(5): 1500-1507.
- [31] 孙瑞莲, 朱鲁生, 赵秉强, 等. 长期施肥对土壤微生物的影响及其在养分调控中的作用 [J]. 应用生态学报, 2004, **15**

- (10): 1907-1910.
- Sun R L, Zhu L S, Zhao B Q, *et al.* Effects of long-term fertilization on soil microorganism and its role in adjusting and controlling soil fertility[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, **15**(10): 1907-1910.
- [32] 朱海平, 姚槐应, 张勇勇, 等. 不同施肥管理措施对土壤微生物生态特征的影响[J]. 土壤通报, 2003, **34**(2): 140-142.
- Zhu H P, Yao H Y, Zhang Y Y, *et al.* Effect of fertilizer system on soil microbial ecology[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2003, **34**(2): 140-142.
- [33] 孟庆杰, 许艳丽, 李春杰, 等. 不同施肥/土地利用方式对黑土细菌多样性的影响[J]. 大豆科学, 2008, **27**(3): 480-486.
- Meng Q J, Xu Y L, Li C J, *et al.* Effects of different fertilization and landuse history on the bacterial diversity in black soils[J]. Soybean Science, 2008, **27**(3): 480-486.
- [34] 武晓森, 杜广红, 穆春雷, 等. 不同施肥处理对农田土壤微生物区系和功能的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, **20**(1): 99-109.
- Wu X S, Du G H, Mu C L, *et al.* Effects of different fertilization on structure and function of soil bacterial community[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, **20**(1): 99-109.
- [35] 徐阳春, 沈其荣, 雷宝坤, 等. 水旱轮作下长期免耕和施用有机肥对土壤某些肥力性状的影响[J]. 应用生态学报, 2000, **11**(4): 549-552.
- Xu Y C, Shen Q R, Lei B K, *et al.* Effect of long-term no-tillage and application of organic manure on some properties of soil fertility in rice/wheat rotation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, **11**(4): 549-552.
- [36] 李娟, 赵秉强, 李秀英, 等. 长期有机无机肥料配施对土壤微生物学特性及土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2008, **41**(1): 144-152.
- Li J, Zhao B Q, Li X Y, *et al.* Effects of long-term combined application of organic and mineral fertilizers on soil microbiological properties and soil fertility [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, **41**(1): 144-152.
- [37] 张奇春, 王雪芹, 时亚南, 等. 不同施肥处理对长期不施肥区稻田土壤微生物生态特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, **16**(1): 118-123.
- Zhang Q C, Wang X Q, Shi Y N, *et al.* Effects of different fertilizer treatments on ecological characteristics of microorganism in chemical fertilizer omission paddy soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, **16**(1): 118-123.
- [38] 郭隽馥. 长期定位施肥棕壤及西藏高原土壤微生物特性研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.
- Guo J F. Studies on soil microbial characteristics of brown soil under long-term fertilization experiment and Tibet plateau soil [D]. Shenyang: Northeastern University, 2008.
- [39] 武发思. 长期定位施肥对黄土高原土壤微生物群落结构的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2009.
- Wu F S. The effect of long-term fertilization on the soil microbial community in the Loess Plateau of China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2009.

CONTENTS

Variation of O ₃ Concentration in Different Regions of Beijing from 2006-2015	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, AN Xin-xin, <i>et al.</i>	(1)
Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in the North Suburb of Nanjing	XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i>	(9)
Seasonal Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM ₁₀ Around Electroplating Plants	ZHAO Zhen-li, ZHAO Wei-tuo, HUANG Ting, <i>et al.</i>	(18)
Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM ₁₀ and PM _{2.5} in Yulin City, Guangxi	HUANG Jiong-li, CHEN Zhi-ming, MO Zhao-yu, <i>et al.</i>	(27)
Concentrations and Compositions of Different Forms of Nitrogen and Phosphorus in Atmospheric Aerosols in the Qingdao Coastal Region and over the Yellow and Bohai Sea	ZHANG Rui-feng, QI Jian-hua, DING Xue, <i>et al.</i>	(38)
Air Quality Subarea Management: A case study of Guangdong Province	YANG Liu-lin, LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, <i>et al.</i>	(49)
Remote Sensing Identification of Urban Black-Odor Water Bodies Based on High-Resolution Images; A Case Study in Nanjing	WEN Shuang, WANG Qiao, LI Yun-mei, <i>et al.</i>	(57)
Simulation of Nitrate Isotopic ($\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$) by Coupling the Hydrology and Transport Processes Described by the SWAT Model	WANG Kang, RAN Ning, LIN Zhong-bing, <i>et al.</i>	(68)
Estimation of and Control Strategies for Pollution Loads from Non-point Sources in the Chenghai Watershed	CHEN Xue-kai, LIU Xiao-bo, PENG Wen-qi, <i>et al.</i>	(77)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metals in Drinking Water Sources from the Luhun Reservoir	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i>	(89)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Antibiotics in the Water Supply System in Tianjin	ZHANG Xin-bo, SONG Zi, ZHANG Dan, <i>et al.</i>	(99)
Organic Distribution Characteristics and Influence on Drinking Water Quality in the Typical Water Sources for Towns in the Southwest Hilly Area of China	WANG Qiong, LI Nai-wen, LI Lei, <i>et al.</i>	(109)
Health Risk Evaluation of Organochlorine and Organophosphorous Pesticides in Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i>	(117)
Pollution Status and Risks of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in the Soil of the Yellow River	YAO Hong, LU Shuang, ZHANG Xu, <i>et al.</i>	(123)
Effects of Flooding and Drying on the Transformation of Soil Inorganic Phosphorus in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir, China	ZHOU Jian, LI Chun-hui, ZHANG Zhi-yong, <i>et al.</i>	(130)
Effect of Phosphate on the Ammonium Removal Performance of Iron-Manganese Co-oxide Film in Surface Water Treatment	ZHUO Rui-shuang, HUANG Ting-lin, ZHANG Rui-feng, <i>et al.</i>	(137)
Enhanced Photoelectrocatalytic Oxidation of Cu(CN) ₃ ²⁻ and Synchronous Cathodic Deposition of Cu by Peroxydisulfate	DANG Cong-zhe, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i>	(145)
Using HKUST-1 as a Template for Copper Oxides Preparation to Activate Peroxymonosulfate for RhB Degradation	PU Jia-yi, WAN Jin-quan, WANG Yan, <i>et al.</i>	(152)
Evaluation of Performance of an Aminated Rosin-based Resin for Adsorption of Norfloxacin from Aqueous Solutions	MA Ya-hong, HUANG Wan-ting, DIAO Kai-sheng, <i>et al.</i>	(161)
Arsenic(V) Removal by Granular Adsorbents Made from Backwashing Residuals from Biofilters for Iron and Manganese Removal	ZENG Hui-ping, LÜ Sai-sai, YANG Hang, <i>et al.</i>	(170)
Arsenic Adsorption and Its Species on Ferrihydrite and Ferrihydrite Colloid	MA Yu-ling, MA Jie, CHEN Ya-li, <i>et al.</i>	(179)
Comparison of Amphoteric-Cationic and Amphoteric-Anionic Modified Magnetic Bentonites: Characterization and Sorption Capacity of Phenol	REN Shuang, MENG Zhao-fu, WANG Teng, <i>et al.</i>	(187)
Pollution Characteristics of Parabens in Typical Sewage Wastewater	ZHAO Xue, ZHANG Zi-feng, ZHU Fu-jie, <i>et al.</i>	(195)
Influence of Hydraulic Retention Time on the Treatment of Polluted River Water by an Activated Carbon Rotating Biological Contactor	XU Wen-jia, CHENG Xiao-ying, <i>et al.</i>	(202)
Removal and Influence of Ciprofloxacin in a Membrane Bioreactor	DAI Qi, LIU Rui, SHU Xiao-ming, <i>et al.</i>	(212)
Operation of the AAO Process Under Low Dissolved Oxygen Conditions and Its Simulation	CAO Te-te, WANG Lin, LI Yong-mei, <i>et al.</i>	(219)
Inhibitory Effects of Phosphate and Recovery on a Nitrification System	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i>	(227)
Effect of Carbon Source on Lab-scale SAD Process in a Wastewater Treatment Plant	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i>	(232)
Effect of Volume Loading Rate (VLR) on Denitrifying Phosphorus Removal by the ABR-MBR Process	LÜ Liang, YOU Wen, WEI Jia-min, <i>et al.</i>	(239)
Combined Process of DNB-F ₂ O ₃ -GAC for Nitrogen and Phosphorus and Metabolite Advanced Removal	ZHONG Li-yan, HAO Rui-xia, WANG Wei-dong, <i>et al.</i>	(247)
Influence of Operating Modes for the Alternating Anoxic/Oxic Process on Biological Nitrogen Removal and Extracellular Polymeric Substances of Activated Sludge	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i>	(256)
Effects of Nanoscale Zero-valent Iron (nZVI) on Denitrifying Performance of an Upflow Granular Sludge Bed Reactor	ZHOU Feng, WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i>	(263)
Influence on Desulfurization Efficiency and Interactions of Fe/S and pH During H ₂ S in situ Depression of High Solid Anaerobic Digestion	HAN Yun, CAO Yu-qin, ZHUO Yang, <i>et al.</i>	(269)
Analysis of Storage Sludge Composition Characteristics and Evolutionary Regularity in the Hunhe River Basin	LIU Tian-tian, CUI Chong-wei, HE Jun-guo, <i>et al.</i>	(276)
Enhancement of Anaerobic Methane Production by Removal of Organic-bonding Metals from Sewage Sludge	LU Yi-qing, XU Ying, DONG Bin, <i>et al.</i>	(284)
Comparison of Different Leaching Methods for Heavy Metals in Sludge Fly Ash and Comprehensive Toxicity Evaluation	WANG Feng, LI Run-dong, LI Yan-long, <i>et al.</i>	(292)
Diurnal Variations of CH ₄ and N ₂ O Fluxes from the Drained Aquaculture Pond in the Minjiang River Estuary During Early Winter	YANG Ping, TAN Li-shan, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i>	(300)
Effects of Three Soil Amendments on Greenhouse Gas Emissions From Corn Fields in the Hetao Irrigation District	WU Yan, HONG Mei, LIN Li-long, <i>et al.</i>	(310)
Effect of Organic Manure Substitution of Synthetic Nitrogen on Crop Yield and N ₂ O Emission in the Winter Wheat-Summer Maize Rotation System	HOU Miao-miao, LÜ Feng-lian, ZHANG Hong-tao, <i>et al.</i>	(321)
Dynamics of Rice Photosynthesized Carbon Input and Its Response to Nitrogen Fertilization at the Jointing Stage: ¹³ C-CO ₂ Pulse-labeling	CHEN Shan, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i>	(331)
Profile Distribution of Soil Organic and Inorganic Carbon Under Different Land Use Types in the Loess Plateau of Northern Shaanxi	LAN Zhi-long, ZHAO Ying, ZHANG Jian-guo, <i>et al.</i>	(339)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i>	(348)
Effects of Straw and Biochar Return in Soil on Soil Aggregate and Carbon Sequestration	XU Guo-xin, WANG Zi-fang, GAO Ming, <i>et al.</i>	(355)
Assessment of the Availability of Soil Copper and Related Influencing Factors at a County Scale	LI Jin-fen, QU Ming-kai, LIU Gang, <i>et al.</i>	(363)
Application of the LUR Model in the Prediction of Spatial Distributions of Soil Heavy Metals	ZENG Jing-jing, SHEN Chun-zhu, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i>	(371)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Shenyang North New Area	LI Jia-kang, SONG Xue-ying, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>	(379)
Passivation of Simulated Pb- and Cd-Contaminated Soil by Applying Combined Treatment of Phosphate, Humic Acid, and Fly Ash	ZHAO Qing-yuan, LI Xiao-ming, YANG Qi, <i>et al.</i>	(389)
Distribution and Accumulation of Cadmium in Paddy Soil and Rice Affected by Pollutant Sources Control and Improvement Measures	FENG Wen-li, GUO Zhao-hui, SHI Lei, <i>et al.</i>	(399)
Differences in Cd Accumulation in Typical Soils Under the Double Rice System	LI Xin-yang, LONG Jian, WANG Shu-bing, <i>et al.</i>	(406)
Distribution Characteristics of Mercury in Reed Leaves from the Jiapiougou Gold Mine in the Songhua River Upstream	ZHANG Man-yin, LI Meng-jie, CUI Li-juan, <i>et al.</i>	(415)
Effect of Nitrate Amendment on Soil Denitrification Activity and Anthracene Anaerobic Degradation	DAI Jun-shuai, ZUO Xiao-hu, WANG Ming-xia, <i>et al.</i>	(422)
Effects of Long-term Fertilization Regimes on Microbial Biomass, Community Structure and Activity in a Paddy Soil	WANG Wei-hua, LIU Yi, TANG Hai-ming, <i>et al.</i>	(430)
Analysis of Sulfate-Reducing and Sulfur-Oxidizing Prokaryote Community Structures in Marine Sediments with Different Sequencing Technologies	ZHANG Yu, MI Tie-zhu, ZHEN Yu, <i>et al.</i>	(438)
Seasonal and Spatial Variations of Microcystins and Their Relationships with Physicochemical and Biological Factors in Poyang Lake	YUAN Li-juan, LIAO Qie-gen, ZHANG Li, <i>et al.</i>	(450)
Distribution of Multidrug-Resistant Bacteria and Antibiotic-Resistant Genes in Livestock Manures	ZHANG Hao, WANG Pan-liang, YANG Qing-xiang, <i>et al.</i>	(460)
Influence of Air Pollution Control (APC) Systems and Furnace Type on the Characteristics of APC Residues from Municipal Solid Waste Incinerators	ZHANG Hua, YU Si-yuan, SHAO Li-ming, <i>et al.</i>	(467)