

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第8期

Vol.36 No.8

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于16S rRNA 基因测序法分析北京霾污染过程中 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 细菌群落特征	王步英, 郎继东, 张丽娜, 方剑火, 曹晨, 郝吉明, 朱昕, 田埂, 蒋靖坤 (2727)
北京城区冬季降尘微量元素分布特征及来源分析	熊秋林, 赵文吉, 郭道宇, 陈凡涛, 束同同, 郑晓霞, 赵文慧 (2735)
北京市典型餐饮企业油烟中醛酮类化合物污染特征	程婧晨, 崔彤, 何万清, 聂磊, 王军玲, 潘涛 (2743)
基于实际道路交通流信息的北京市机动车排放特征	樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 曲松 (2750)
夏季珠江三角洲地区 PM _{2.5} 化学组分特征及其对大气能见度的影响	杨毅红, 瞿群, 刘随心, 李雄, 钟佩仪, 陶俊 (2758)
隧道工人的 PM ₁₀ 职业暴露特征调查分析及其健康风险评价	向华丽, 杨俊, 仇珍珍, 雷万雄, 曾婷婷, 兰志财 (2768)
基于在线监测的江苏省大型固定燃煤源排放清单及其时空分布特征	张英杰, 孔少飞, 汤莉莉, 赵天良, 韩永翔, 于红霞 (2775)
柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源	朱建佳, 陈辉, 巩国丽 (2784)
长江口-浙闽沿岸沉积色素的分布特征及其指示意义	李栋, 姚鹏, 赵彬, 王金鹏, 潘慧慧 (2791)
“引江济太”过程中长江-望虞河-贡湖氮、磷输入特征研究	潘晓雪, 马迎群, 秦延文, 邹华 (2800)
重庆市典型城镇区地表径流污染特征	王龙涛, 段丙政, 赵建伟, 华玉妹, 朱端卫 (2809)
调水调沙对黄河下游颗粒有机碳运输的影响	张婷婷, 姚鹏, 王金鹏, 潘慧慧, 高立蒙, 赵彬, 李栋 (2817)
青藏高原冰川区可溶性有机碳含量和来源研究	严芳萍, 康世昌, 陈鹏飞, 柏建坤, 李洋, 胡召富, 李潮流 (2827)
岩溶区地下水补给型水库表层无机碳时空变化特征及影响因素	李建鸿, 蒲俊兵, 袁道先, 刘文, 肖琼, 于爽, 张陶, 莫雪, 孙平安, 潘谋成 (2833)
室内模拟不同因子对岩溶作用与碳循环的影响	赵瑞一, 吕现福, 段逸凡 (2843)
新乡市地表水体 HCHs 和 DDTs 的分布特征及生态风险评价	冯精兰, 余浩, 刘书卉, 刘梦琳, 孙剑辉 (2849)
青木关地下河系统中不同含水介质下正构烷烃对比研究	梁作兵, 孙玉川, 王尊波, 江泽利, 廖昱, 谢正兰, 张媚 (2857)
三峡库区长寿湖水体不同形态汞的空间分布特征	白薇扬, 张成, 赵锋, 唐振亚, 王定勇 (2863)
燃煤电厂周围渔业养殖行为对水生生态环境中汞形态变化的影响	梁鹏, 王远娜, 尤琼智, 高雪飞, 何杉杉 (2870)
运用硫同位素、氮氧同位素示踪厘清湖地下河硫酸盐、硝酸盐来源	李瑞, 肖琼, 刘文, 郭芳, 潘谋成, 于爽 (2877)
藻华聚集的生态效应: 对凤眼莲叶绿素和光合作用的影响	刘国锋, 何俊, 杨轶中, 韩士群 (2887)
DOM 对被动采样技术的影响与应用	于尚云, 周岩梅 (2895)
蛋白质对 PVDF 超滤膜污染行为的界面微观作用力解析	王旭东, 周森, 孟晓荣, 王磊, 黄丹曦, 夏四清 (2900)
水环境中碳纳米管对沙丁胺醇降解的影响	汪祺, 韩佳芮, 魏博凡, 周磊, 张亚, 杨曦 (2906)
β -In ₂ S ₃ 的制备及其太阳光下降解土霉素	艾翠玲, 周丹丹, 张嵘嵘, 邵享文, 雷英杰 (2911)
排水管道沉淀物氮释放特性的研究	陈红, 卓琼芳, 许振成, 王劲松, 魏清伟 (2918)
生物膜 CANON 反应器中沉积物影响及其成因分析	付昆明, 王会芳, 左早荣, 仇付国 (2926)
ABR-MBR 一体化工艺节能降耗措施优化研究	吴鹏, 陆爽君, 徐乐中, 刘捷, 沈耀良 (2934)
两个 CANON 污水处理系统中氨氧化古菌的丰度和多样性研究	高景峰, 李婷, 张树军, 樊晓燕, 潘凯玲, 马谦, 袁亚林 (2939)
ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥形成机制及其除污效能研究	巫恺澄, 吴鹏, 徐乐中, 李月寒, 沈耀良 (2947)
珠江三角洲地区土壤有机氯农药分布特征及风险评价	窦磊, 杨国义 (2954)
广西都安县耕地土壤重金属污染风险评价	吴洋, 杨军, 周小勇, 雷梅, 高定, 乔鹏伟, 杜国栋 (2964)
开封市公园地表灰尘重金属污染及健康风险	段海静, 蔡晓强, 阮心玲, 全致琦, 马建华 (2972)
我国西南地区氮饱和马尾松林土壤和植物 ¹⁵ N 自然丰度对长期氮施加的响应	刘文静, 康荣华, 张婷, 朱婧, 段雷 (2981)
黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征	李婷, 邓强, 袁志友, 焦峰 (2988)
开顶式气室原位研究水稻根系对大气汞浓度升高的响应	陈剑, 王章玮, 张晓山, 秦普丰, 陆海军 (2997)
接种丛枝菌根真菌对蜈蚣草吸收砷的影响	郑文君, 王明元 (3004)
水稻种植对黑土微生物生物量和碳源代谢功能的影响	赵志瑞, 崔丙健, 侯彦林, 刘上千, 王岩 (3011)
固定化菌剂载体材料腐解产物对污染土壤中苈解吸的影响	全冬丽, 双生晴, 李晓军, 邓万荣, 赵然然, 贾春云, 巩宗强 (3018)
零价铁和碱激发矿渣稳定/固定化处理铬渣研究	陈忠林, 李金春子, 王斌远, 樊磊涛, 沈吉敏 (3026)
Fe ³⁺ 负载凹凸棒土 (Fe/ATP) 结构表征及其稳定化修复镉 (Cd) 机制研究	杨蓉, 李鸿博, 周永莉, 陈静, 王琳玲, 陆晓华 (3032)
原位生物修复提高多环芳烃污染土壤农用安全性	焦海华, 潘建刚, 徐圣君, 白志辉, 王栋, 黄占斌 (3038)
镉-八氯代二苯并呋喃复合污染土壤中紫茉莉对镉的修复能力	张杏丽, 邹威, 周启星 (3045)
不同水分条件对蜈蚣草修复砷污染土壤的影响	刘秋辛, 阎秀兰, 廖晓勇, 林龙勇, 杨静 (3056)
磷矿粉和腐熟水稻秸秆对土壤铅污染的钝化	汤帆, 胡红青, 苏小娟, 付庆灵, 朱俊 (3062)
洛克沙肿在青菜及土壤中的残留及降解特性	邵婷, 姚春霞, 沈源源, 张玉洁, 苏楠楠, 周守标 (3068)
3 种典型有机污染物对 2 种水生生物的急性毒性及安全评价	杨扬, 李雅洁, 崔益斌, 李梅 (3074)
石油污染物对海底微生物燃料电池性能的影响及加速降解效应	孟瑶, 付玉彬, 梁生康, 陈伟, 柳昭慧 (3080)
Cu-Mn-Ce/ 分子筛催化剂吸附甲苯后的微波原位再生及床层温度分布探究	虎雪姣, 卜龙利, 梁欣欣, 孟海龙 (3086)
热处理对猪粪高固厌氧消化产甲烷能力的影响	胡玉瑛, 吴静, 王士峰, 曹知平, 王凯军, 左剑恶 (3094)
磷石膏对麦田 CO ₂ 排放和小麦产量的影响及其经济环境效益分析	李季, 吴洪生, 高志球, 尚小厦, 郑培慧, 印进, Kakpa Didier, 任迁琪, Ogou Katchele Faustin, 陈素云, 徐亚, 姚童言, 李炜, 钱景珊, 马世杰 (3099)
全氟和多氟烷基化合物的环境风险评估研究现状、不确定性与趋势分析	郝薛文, 李力, 王杰, 曹燕, 刘建国 (3106)
《环境科学》征订启事 (2757)	
《环境科学》征稿简则 (2767)	
信息 (2734, 2783, 3073, 3079)	

水稻种植对黑土微生物生物量和碳源代谢功能的影响

赵志瑞^{1,2,3}, 崔丙健³, 侯彦林^{4*}, 刘上千¹, 王岩¹

(1. 石家庄经济学院水资源与环境学院, 石家庄 050031; 2. 河北省水资源可持续利用与开发重点实验室, 石家庄 050031; 3. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 4. 农业部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘要: 采用磷脂脂肪酸方法和 Biolog-ECO 微平板检测法, 以吉林省长春市双阳区农业技术推广站实验区的土壤为对象, 研究了水稻种植对黑土微生物生态结构和功能的影响。结果表明空地中有机质含量最高, 其次为田间土, 根际土中有机质含量最低; 在夏季的样品中有机质含量最高, 土壤中全氮的变化趋势与土壤有机质比较相似。土壤微生物群落功能多样性指数则表现为夏季显著高于秋季和春季, 春、秋两季差异不明显, 冬季最低, 空地中微生物群落的 Shannon-Wiener 指数和 Pielou 均匀度指数高于田间和根际。全部样品微生物生长步入稳定期时间和碳源的颜色平均变化率变化范围不同, 时间分别为 216、192、216、120 h, 范围分别为 0.52~0.84、0.82~1.28、0.40~0.84、0.05~0.48, 表明春秋季微生物步入稳定期和对碳源的代谢量比较相似, 夏季最大, 冬季最小。研究结果为科学评价典型水稻种植黑土区土壤生境质量退化与恢复过程中微生物特征的变化提供参考。

关键词: 黑土; 磷脂脂肪酸; 平均颜色变化率; Biolog 方法; 微生物群落

中图分类号: X172 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2015)08-3011-07 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.2015.08.038

Impact on the Microbial Biomass and Metabolic Function of Carbon Source by Black Soil During Rice Cultivation

ZHAO Zhi-rui^{1,2,3}, CUI Bing-jian³, HOU Yan-lin^{4*}, LIU Shang-qian¹, WANG Yan¹

(1. College of Water Resources and Environment, Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang 050031, China; 2. Key Laboratory of Water Resources Sustainable Use and Development of Hebei, Shijiazhuang 050031, China; 3. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 4. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China)

Abstract: The effects of rice cultivation to the black soil microbial communities, which the experimentation area of Shuangyang District Agricultural Technology Extension Station in Changchun city, Jilin Province of northeastern China, were studied by using the method of phospholipid fatty acids and Biolog ECO-microplate culture. Results showed that the content of organic matter in space was the highest, fewer in the field, and the minimum in the rhizosphere, that change trend of total nitrogen and organic matter was similar in soil. The quantity of organic matter in summer sample was the highest. The microbial functional diversity was significantly higher in summer than that in spring and autumn and showed no significant difference between spring and autumn. For summer and the lowest in winter, Shannon-Wiener index and Pielou index of the space were higher than the field and the rhizosphere. The time of microbial growth into the stable period and peak value of the average well color development were different in all samples, that the time was 216 h, 192 h, 216 h, 120 h, which varied from 0.52-0.84, 0.82-1.28, 0.40-0.84, 0.05-0.48, respectively. The result showed that the time of microbial growth into the stable period was similar in spring and autumn, the highest was in summer and the lowest was in winter. Above all, these results would provide more important characteristics of microbial features in the degradation and restoration process of the quality of the black soil habitat scientifically.

Key words: black soil; phospholipid fatty acids (PLFA); the average well color development; Biolog method; microbial community

分布在我国东北部的黑土是世界上最大的黑沃土之一, 长期耕作^[1,2], 大量使用农药和化肥造成土壤中微生物种群的明显变化^[3,4], 而且不同植物种植也影响土壤化学组成和养分供应, 尤其是可利用碳氮的量, 最终影响到土壤生物群落。为了对土壤肥力进行科学评价, 研究微生物的量、多样性及丰度尤为重要^[5,6]。土壤资源可利用性, 尤其是有机质含量和类型与土壤微生物量和微生物多样性具有重要的联系, 高肥力土壤中比低肥力中微生物量要

高^[7], 而这些因素直接决定着微生物群落各参数的变化。目前为止绝大多数的研究是基于植物群落, 很少把土壤生态系统及微生物代谢活性作为研究对象^[8]。而对于土壤生态系统, 不同季节的微生物如何

收稿日期: 2013-10-29; 修订日期: 2015-03-13

基金项目: 中国科学院重点部署项目 (KZZD-EW-09-1); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07203-006); 河北省科技计划项目 (15274015D)

作者简介: 赵志瑞 (1975~), 女, 博士, 主要研究方向为环境修复及环境微生物, E-mail: zhiruizh@163.com

* 通讯联系人, E-mail: 2483977138@qq.com

变化? 对土壤微生物群落来说,不同碳源的代谢途径是怎样的,以及影响其活性的因素有哪些? 针对这些问题,以黑土为对象进行了研究,采集了吉林省长春市双阳区实验站的黑土,以长期种植水稻的水稻根际土,田间土和从未耕作的空白土为研究对象,以 PLFA 方法^[9,10]和 Biolog 微孔板碳源利用技术对黑土微生物种类和丰度进行分析^[11,12]. 试图揭示不同季节不同耕作条件下土壤细菌群落组成及可培养微生物数量的变化规律^[13],以期为科学评价典型黑土土壤耕作过程中微生物特征的变化提供参考.

1 材料与方法

1.1 土壤样品的采集和处理

研究地点位于吉林省长春市双阳区农业技术推广站实验区 (125°38' ~ 125°47'E, 43°32' ~ 43°45' N, 区域内土壤类型以黏化湿润均腐土为主,属典型黑土区), 实验区长期种植水稻 10 年以上未使用有机肥,耕作区近 3 年平均每亩施氮肥 9 kg. 气候属于典型中温带大陆性季风气候,年平均气温 4.5℃,年平均积温 2 852℃,年均日照时数为 2 695 h. 于 2013 年分四次采集土壤样品,第一次春季(5 月 20 日)、第二次夏季(8 月 4 日)、第三次秋季(9 月 17 日)、第四次冬季(10 月 20 日). 采集土样分别为长期种植水稻的根际土壤,采集时连根拔下整根水稻,在水稻根际抖落的土即为根际土,田间土以及从未耕作土壤(空地),样地海拔为 211 m. 采用“Z”型五点取样法,采样 5 点混合,作为 1 个土壤样品. 采集表层(0 ~ 20 cm)新鲜土样,样品一份用于 Biolog 和 PLFA 的测定;另一份风干过筛测定土壤理化性质.

1.2 实验方法

1.2.1 理化性质分析方法

采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法测定有机质,半微量凯氏法测定全氮.

1.2.2 磷脂脂肪酸(PLFAs)分析

磷脂脂肪酸(phospholipid fatty acids, PLFA)是活体微生物细胞结构的重要组成部分^[14,15],可准确地显示环境微生物的类群及生物量的变化^[16,17],在自然条件下其含量相对稳定,不同类群的微生物含有不同数量和种类的 PLFAs,因此 PLFAs 可以作为微生物生物量和群落结构变化的生物分子尺^[18].

实验采用修正的 Bligh-Dyer 方法^[19],称取 6 g (准确至 0.01 g)经冷冻干燥处理的新鲜土壤样品提取 PLFAs. 分析方法以总碳数;双键数和双键距

离子分子末端位置命名,t 表示反式,c 表示顺式,br 表示甲基的位置未知,a 和 i 分别表示支链的异型(anteiso)和同型(iso),10Me 表示甲基团在距分子末端第 10 个碳原子上, α 和 β 代表羟基脂肪酸的—OH 分别第 2 和第 3 位 C 原子上,环丙烷脂肪酸用 cy 表示.

根据标准数据库和质谱图对检测到的磷脂脂肪酸进行识别,采用十九烷酸脂肪酸甲酯为内标,浓度为 33 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$,计算每种磷脂脂肪酸的相对含量. 进行分析时先将单体 PLFAs 的摩尔分数进行对数转换. 采用 Shannon-Wiener 指数(H')来评价样品微生物群落结构多样性,群落中微生物种类增多代表了群落的复杂程度增高,即 H' 值愈大,群落所含的信息量愈大. Pielou 均匀度指数估计该群落物种分布的均匀度(E).

计算公式为:

$$H' = - \sum p_i \ln(p_i)$$

$$p_i = n_i/N$$

$$E = H'/H'_{\max}$$

式中, H' 为实际观察的物种多样性指数, $H'_{\max}$ 为最大的物种多样性指数, $H'_{\max} = \ln S$ (S 为群落中的总物种数), n_i 为第 i 个种的个体数目, N 为群落中所有种的个体总数^[20].

1.2.3 Biolog 分析

可培养微生物数量是反映土壤微生物群落的重要指标,而微生物群落功能多样性(Biolog)反映了微生物群落活性与代谢功能,是表征土壤微生物群落状态与功能的重要指标^[21]. 土壤微生物群落结构与底物利用能力的变化主要受自然环境、湿度、作物种植等的影响^[22].

Biolog 方法是使用 96 孔微孔板^[23,24],根据不同用途在每个孔中加入不同碳源的微孔板,用于群落多样性分析的是生态板(Eco),每个板上只有 31 种碳源,设置了 3 个重复,另 3 个为空白直接加双蒸水,以微生物对三大营养物质的代谢途径为基本划分原则,将 Biolog EcoPlate™ 的 31 种碳源底物分为五大类:单糖类及其衍生物;二糖、多糖底物;氨基酸及其衍生物;脂肪酸和脂类、代谢中产物和次生代谢物^[25],如表 1.

实验方法称取 10 g 去除了根系和石块的保鲜土壤,加入 90 mL 灭过菌的去离子水,振荡(150 次 $\cdot\text{min}^{-1}$) 60 min,然后取混浊液 5 mL 稀释 100 倍. 将混浊液静置 5 min,用排枪取上清液接种到 Biolog

表 1 31 种碳源分类

Table 1 Classification of 31 kinds of carbon sources

碳源分类	碳源名称
二糖、多糖底物	D-纤维二糖、α-D-乳糖、α-环糊精、糖原
糖类及其衍生物	β-甲基-D-葡萄糖苷、D-木糖、i-赤藓糖醇、D-甘露醇、N-乙酰基-D-葡萄糖胺、D-葡萄糖胺、D-半乳糖酸-γ-内酯、D-半乳糖醛酸、
脂肪酸和脂类	丙酮酸甲酯、土温-40、土温-80、γ-羟基丁酸、衣康酸
氨基酸及其衍生物	L-精氨酸、L-天冬酰胺酸、L-苯甲基丙氨酸、L-丝氨酸、L-苏氨酸、葡萄糖-L-谷氨酸
代谢中间产物及次生代谢产物	葡萄糖-1-磷酸、D,L-α-磷酸甘油、α-丁酮酸、2-羟基苯甲酸、4-羟基苯甲酸、苯基乙胺、D-苹果酸、腐胺

EcoPlate™的微孔内,每孔 150 μL. 当可培养的微生物生长时,可以通过显色剂的颜色变化而定量,碳源被氧化的量与相应微生物的活性成正比,这些可培养的土壤细菌代谢活性和代谢多样性可以用来评价土壤的密度和功能多样性. 将接种土壤细菌的微平板在培养箱中 25℃ 避光培养,每隔 24 h 用 Biolog Reader 于 590 nm 读数 (Multiskan MK3 LABSYSTEMS Finland),孔中的微生物利用其中的碳源发生氧化还原作用,孔中一旦有电子转移四唑染料就会变为紫红色,然后根据颜色反应的深浅读出每孔的光密度值,获得不同孔中碳源被接种微生物所利用的程度. 连续读数 10 d 左右直到微孔板颜色不再变化为止. 计算是利用 Biolog EcoPlate™的单孔颜色平均值 (average well color development, AWCD),首先把含有相同碳源的单孔在 590 nm 的光密度值取平均值,然后将不同的碳源在 590 nm 的光密度平均值减去对照孔的光密度平均值,最后把得到的 31 种碳源的所有平均值求平均值即为平均颜色变化率.

2 结果与分析

2.1 土壤有机质和全氮结果分析

不同水稻生长期样品中有机质和全氮的含量如图 1 和 2. 结果表明空地中有机质含量最高,其次为田间土,根际土中有机质含量最低,在夏季的样品中有机质含量最高,土壤中全氮的变化趋势与土壤有机质比较相似.

2.2 PLFAs 结果分析

实验共检测到从 C13 ~ C18 之间的 23 种 PLFAs,包括饱和、单不饱和、多不饱和、支链、环丙烷、直链等多种类型脂肪酸,各样品所含单体 PLFAs 个数差别明显,所有阶段未经耕作的空地土中含有的单体 PLFAs 个数最多,田间土次之,根际土所含的种类最少. 土壤中的微生物的量依次为:空地土 > 田间土 > 根际土,在夏季样品中微生物的量最高,冬季的样品中微生物的量最低,春季和秋季

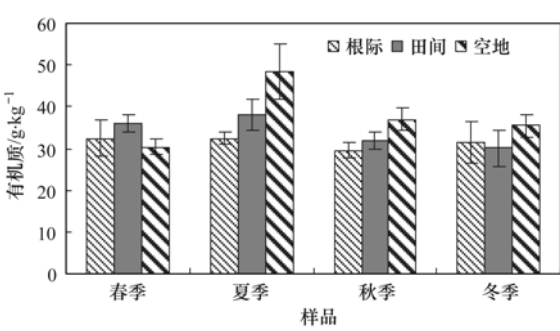


图 1 水稻各生长期土壤中有有机质含量

Fig. 1 Organic matter content of different rice cultivation periods in soil

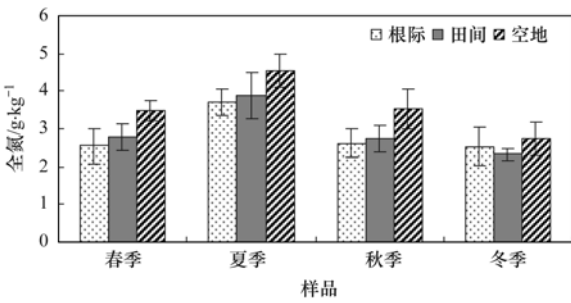


图 2 水稻各生长期土壤中全氮含量

Fig. 2 Total nitrogen content of different rice cultivation periods in soil

的样品中微生物的量差别不是很明显如图 3. 采用 Shannon-Wiener 指数 (H') 来评价土壤微生物群落结构多样性, Pielou 均匀度指数来评价微生物的均匀度,结果如表 2.

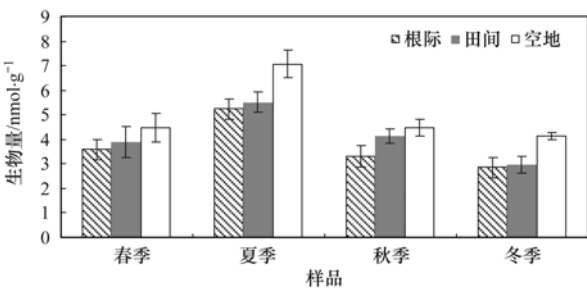


图 3 水稻各生长期土壤中微生物的量

Fig. 3 Microbial content of different rice cultivation periods in soil

表 2 各样品多样性指数与均匀度指数比较

样品	春季		夏季		秋季		冬季	
	H'	E	H'	E	H'	E	H'	E
根际	0.50	0.725	0.633	0.917	0.563	0.815	0.463	0.67
田间	0.46	0.667	0.693	1.004	0.633	0.917	0.467	0.677
空地	0.563	0.815	0.698	1.011	0.649	0.94	0.519	0.752

由表 2 显示春季样品空地土壤中微生物的多样性指数为 0.563,是根际和田间土壤的 1.12 和 1.22 倍;夏季样品田间微生物多样性增加比较明显,空地土壤微生物的多样性最丰富为 0.698,是根际和田间土壤的 1.10 和 1.0 倍,夏季样品中所有土壤的多样性指数和均匀度指数都有所增加,根际、田间、空地土壤中微生物多样性差距减小;秋季和冬季样品中所有的土壤微生物的多样指数和均匀度指数都逐渐减小,但仍是空地最高,秋季空地是 0.649,分别是根际和田间土壤的 1.15 和 1.02,冬季空地是 0.519,分别是根际和田间土壤的 1.12 和 1.11 倍.分析表明:土壤微生物群落的 Shannon-Wiener 指数和 Pielou 均匀度指数均表现为空地高于根际和田间土壤,根际土的 Shannon-Wiener 指数和 Pielou 最小.所有空地、田间和根际土壤都表现出夏季与其它季节间存在明显差异,差异达显著性水平($P < 0.05$).

2.3 Biolog 结果分析

土壤微生物群落中能利用碳源的微生物的数目和种类与微生物整体活性有关,AWCD 可作为该活性的有效指标,反映微生物群落对碳源利用的总体

能力^[26]. 由图 4 可以看出,在所有样品中土壤微生物 AWCD 的总体变化规律一致,微生物整体活性均表现出随着培养时间的延长而逐渐增加的趋势;但不同培养时段内的变化幅度有所不同,所有样品接种培养 24 h 后 AWCD 无明显变化,表明该阶段微生物代谢碳源比较微弱;但不同时期的样品在继续培养后,AWCD 值的变化不同,并且同一时期的样品由于在田间的来源不同快速增长的频率也不一样.在春季的样品中田间样品 AWCD 增长速度较快,空白变化最慢;而在夏季样品中空白样品 AWCD 增长速度较快,田间和根际在培养 120 h 后 AWCD 变化趋势几乎一致.在秋季采样中仍是空白样品 AWCD 增长速度较快,田间次之,根际最慢.冬季采样中根际样品 AWCD 增长速度较快田间最慢.全部样品微生物生长步入稳定期时间和 AWCD 的变化范围不同,时间分别为 216、192、216、120 h,范围分别为 0.52 ~ 0.84、0.82 ~ 1.28、0.40 ~ 0.84、0.05 ~ 0.48,表明春秋季节微生物步入稳定期和对碳源的代谢量比较相似、夏季最大,冬季最小.土壤微生物群落功能多样性指数则表现为夏季显著

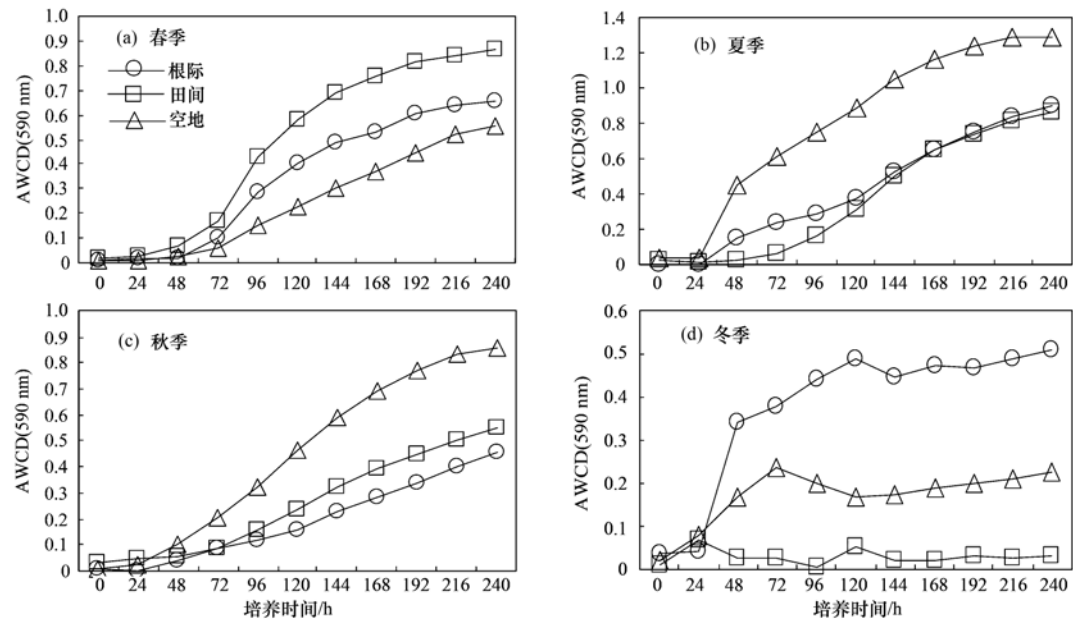


图 4 4 个季节微生物群落 AWCD 随着培养时间的变化

Fig. 4 AWCD of microbial community with culture time in four seasons respectively

高于秋季和春季,而春、秋两季差异不明显,冬季最低,且空地的 Shannon-Wiener 指数和 Pielou 均匀度指数高于田间和根际。

根据微生物对三大营养物质的代谢途径为基本划分原则,把 Biolog EcoPlate™ 的 31 种碳源底物分为五大类:单糖类及其衍生物,二糖、多糖底物,氨基酸及其衍生物,脂肪酸和脂类,代谢中产物和次生代谢物^[27]。下面就不同样品微生物对不同类型的碳源的利用情况来讨论各土壤样品中微生物结构上的差异性,由上讨论可知土壤微生物群落功能多样性表现为夏季最高,因此以夏季为例对不同营养物质的代谢情况进行研究,如图 5 所示。

从图 5 可以看出不同土壤样品对碳源的利用情况不同。其中,对单糖及其衍生物的利用能力的大

小为:空地>根际>田间;对于二糖和多糖的利用能力:空地最大,田间次之,根际较小;而对于氨基酸底物及其衍生物的利用能力:空地最高,田间和根际相当接近,在 192 h 后甚至重合,说明一段时间后根际和田间对该种碳源的利用能力相等;对于脂肪酸和脂类而言:空地、田间和根际的利用能力比较接近,在 192 h 后根际样品对该种碳源的利用微高于其它两个样品;对于代谢产物和次生代谢产物的利用情况:空地最大,田间最小,根际与田间比较接近。这可以在一定的程度上说明不同类型的土壤在微生物结构上存在一定的差异。

3 讨论

黑土作为中国典型的土壤在自然发育过程中形成了深厚的腐殖质层,含有丰富的有机质和营养物质,但随着黑土的不同程度的开垦,原有土壤的结构发生了明显的变化。有研究认为黑土的肥力变化可分为活化、熟化和培肥这 3 个阶段,这 3 个阶段主要是黑土有机质的变化,土壤有机质可以作为黑土养分方面的综合质量指标^[28]。由图 1 和图 2 可以看出空地中有机质含量最高,其次为田间土,根际土中有机质含量最低,表明随着水稻的种植改变了土壤有机质的含量,根际土中含量最低,由于水稻的长期种植,使土壤的有机质发生了明显的改变。同样土壤中全氮的变化趋势与土壤有机质比较相似从空地到根际逐渐降低。在夏季的样品中有机质含量最高,土壤有机质与微生物密切相关,而土壤微生物群落的变化受众多因子的综合影响,例如土壤营养状况、质地、水分、温度、根系分泌物、植物残体等,这些因子会随着季节的变化而变化,进而导致土壤中有机质与土壤微生物群落在空间和时间上的差异性。Liu 等^[29]研究表明在新墨西哥州北部沙漠牧场中微生物的功能多样性在夏季最高,春季最低;孟庆杰等^[30]研究也表明草地和农田土壤微生物群落代谢活性的高峰均出现在夏季。在夏季由于根系分泌物、动植物残体增加也导致土壤中的有机质增加。比较不同样品的总 PLFAs 可以发现,空地土壤的总生物量在所有时期都有明显的差别,由于天气变化温度升高,适合微生物的代谢生长,周围环境没有对微生物产生影响,导致微生物的量增加。根际土与田间土在不同时期生物量略有不同,尤其根际土中的微生物的量变化很小,由于水稻根际一些分泌物和植物残体等影响了微生物的代谢活性^[31]。由表 2 分析表明,空地土的多样性指数和均匀度指

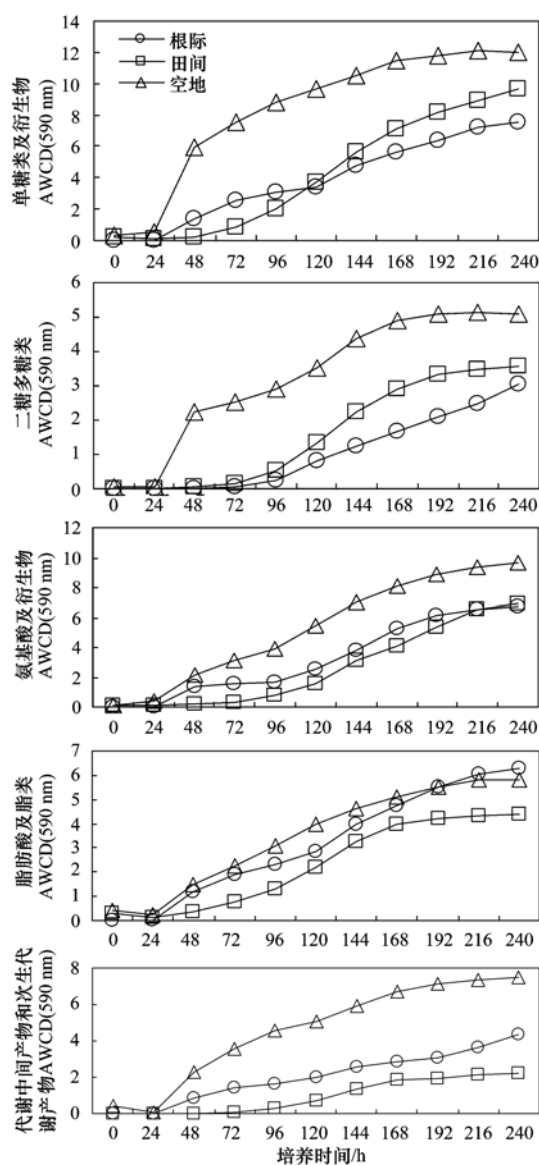


图 5 不同样品碳源利用情况比较

Fig. 5 Comparison of carbon utilization of different samples

数明显高于田间土和根际土,说明夏季土壤微生物群落物种的丰富度和均一性,以及群落中常见物种的优势度都高于其它季节,而田间土又高于其它土样. Biolog-ECO 微平板检测结果表明,全部样品微生物生长步入稳定期时间和 AWCD 的变化范围不同,时间分别为 216、192、216、120 h,范围分别为 0.52 ~ 0.84、0.82 ~ 1.28、0.40 ~ 0.84、0.05 ~ 0.48,表明空地土微生物对相同碳量碳源的利用,以夏季碳源消耗量最大、速率最高,春秋季节次之,冬季消耗量最小且速率最低,因为夏季土壤微生物较春季和秋季代谢快、活性强,主要由于夏季温度高、降雨量多、植物生长旺盛,使进入土壤的植物残体和根系分泌物数量多,进而导致土壤的有机物质含量高,其分解产物可为微生物提供更多的碳源和养分,促进了土壤中微生物的生长和繁殖,提高了土壤微生物代谢的活性^[32]. 在春季样品中空地土 AWCD 变化最小,由于春季田间和根际土地的翻耕使土壤中的好氧微生物代谢增强,碳源消耗量增加. 在夏季由于水稻的生长消耗了大量的氮源和有机物,使微生物代谢的能源不足生长受到抑制,致使田间土和根际土的 AWCD 变化较低;而空地土中由于进入土壤的植物残体数量多,土壤的有机物质含量高,为微生物提供足够的碳氮源和养分,因此土壤中微生物的生长和繁殖都有很高的代谢活性. 在秋季样品中根际土的 AWCD 变化最低,由于水稻正处于成熟期需要大量的养分,致使土壤中的碳源减少,土壤中的微生物由于能源不足受到抑制,代谢活性降低;而田间受到影响较小,代谢活性降低较少^[33]. 在冬季样品中,根际土的 AWCD 变化最高,由于水稻收割后大量须根残留在土壤中,为微生物的生长提供了充足的养分,土壤中微生物的生长和繁殖代谢活性都很高;而田间土壤中由于水稻的生长从田间吸收了大量有机质,导致微生物生长能量缺乏代谢活性大大降低;而空白地的营养受外界影响较小,微生物的代谢活性影响不明显,只是随着温度的降低表现出代谢活性减弱. 季节气候以及水稻的种植对黑土中微生物的代谢活性影响显著,而秸秆还田对保持土壤养分起到了重要作用,在农业生产中提倡秸秆还田,使农业可持续发展. 不同土壤样品对碳源的利用情况不同,说明不同类型的土壤在微生物结构上存在一定的差异,人为的耕作改变了微生物的结构和土壤的性质^[34,35],同时减弱了微生物对碳源的利用能力.

4 结 论

(1) 空地中有机质含量最高,其次为田间土,根际土中有机质含量最低,夏季样品中有机质含量最高,土壤中全氮的变化趋势与土壤有机质相似.

(2) 土壤微生物群落功能多样性指数则表现为夏季显著高于秋季和春季,春、秋两季差异不明显,冬季最低,且空地的 Shannon-Wiener 指数和 Pielou 均匀度指数高于田间和根际.

(3) 对单糖及其衍生物的利用能力的大小为:空地 > 根际 > 田间;对于二糖和多糖的利用能力:空地最大,田间次之,根际较小;而对于氨基酸底物及其衍生物的利用能力:空地最高,田间和根际相当接近;对于脂肪酸和脂类而言:空地、田间和根际的利用能力比较接近;对于代谢产物和次生代谢产物的利用情况:空地最大,田间最小,根际与田间比较接近,说明不同类型的土壤在微生物结构上存在一定的差异.

参考文献:

- [1] Shen J P, Zhang L M, Guo J F, *et al.* Impact of long-term fertilization practices on the abundance and composition of soil bacterial communities in Northeast China [J]. *Applied Soil Ecology*, 2010, **46**(1): 119-124.
- [2] Wu M N, Qin H L, Chen Z, *et al.* Effect of long-term fertilization on bacterial composition in rice paddy soil [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, **47**(4): 397-405.
- [3] 剧成欣, 张耗, 王志琴, 等. 水稻高产和氮肥高效利用研究进展 [J]. *中国稻米*, 2013, **19**(1): 16-21.
- [4] 朱德峰, 张玉屏, 陈惠哲. 2011 年国内外水稻产业及技术发展概述 [J]. *中国稻米*, 2012, **18**(1): 15-8.
- [5] Hu H W, Zhang L M, Yuan C L, *et al.* Contrasting Euryarchaeota communities between upland and paddy soils exhibited similar pH-impacted biogeographic patterns [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, **64**: 18-27.
- [6] Dooley S R, Treseder K K. The effect of fire on microbial biomass: a meta-analysis of field studies [J]. *Biogeochemistry*, 2012, **109**(1-3): 49-61.
- [7] Grayston S J, Griffith G S, Mawdsley J L, *et al.* Accounting for variability in soil microbial communities of temperate upland grassland ecosystems [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, **33**(4-5): 533-551.
- [8] Wertz S, Degrange V, Prosser J I, *et al.* Decline of soil microbial diversity does not influence the resistance and resilience of key soil microbial functional groups following a model disturbance [J]. *Environmental Microbiology*, 2007, **9**(9): 2211-2219.
- [9] Ma J, Ji Y, Zhang G B, *et al.* Timing of midseason aeration to reduce CH₄ and N₂O emissions from double rice cultivation in China [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2013, **59**(1): 35-

- 45.
- [10] 赵志瑞, 马斌, 张树军, 等. 高氨氮废水与城市生活污水短程硝化系统菌群比较 [J]. 环境科学, 2013, **34**(4): 1448-1456.
- [11] 白震, 何红波, 解宏图, 等. 施肥与季节更替对黑土微生物群落的影响 [J]. 环境科学, 2008, **29**(11): 3230-3239.
- [12] 邵元元, 王志英, 邹莉, 等. 百菌清对落叶松人工防护林土壤微生物群落的影响 [J]. 生态学报, 2011, **31**(3): 819-829.
- [13] Zak D R, Pregitzer K S, Burton A J, *et al.* Microbial responses to a changing environment: implications for the future functioning of terrestrial ecosystems [J]. Fungal Ecology, 2011, **4**(6): 386-395.
- [14] Zelles L. Fatty acid patterns of phospholipids and lipopolysaccharides in the characterisation of microbial communities in soil: a review [J]. Biology and Fertility of Soils, 1999, **29**(2): 111-129.
- [15] Priha O, Grayston S J, Pennanen T, *et al.* Microbial activities related to C and N cycling and microbial community structure in the rhizospheres of *Pinus sylvestris*, *Picea abies* and *Betula pendula* seedlings in an organic and mineral soil [J]. FEMS Microbiology Ecology, 1999, **30**(2): 187-199.
- [16] 吴振斌, 王亚芬, 周巧红, 等. 利用磷脂脂肪酸表征人工湿地微生物群落结构 [J]. 中国环境科学, 2006, **26**(6): 737-741.
- [17] 廖敏, 陈雪花, 陈承利, 等. 土壤-青菜系统中铅污染对土壤微生物活性及多样性的影响 [J]. 环境科学学报, 2007, **27**(2): 220-227.
- [18] 白震, 张旭东, 何红波, 等. 长期氮肥施用对农田黑土 NLFA 与 PLFA 特性的影响 [J]. 土壤学报, 2007, **44**(4): 709-716.
- [19] Frostegård Å, Tunlid A, Bååth E. Microbial biomass measured as total lipid phosphate in soils of different organic content [J]. Journal of Microbiological Methods, 1991, **14**(3): 151-163.
- [20] 刘霞, 钱奎海, 谭国良, 等. 鄱阳湖阻隔湖泊浮游植物群落结构演化特征: 以军山湖为例 [J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2557-2564.
- [21] 曹成有, 姚金冬, 韩晓妹, 等. 科尔沁沙地小叶锦鸡儿固沙群落土壤微生物功能多样性 [J]. 应用生态学报, 2011, **22**(9): 2309-2315.
- [22] 胡婵娟, 刘国华, 陈利顶, 等. 黄土丘陵沟壑区坡面上土壤微生物生物量碳、氮的季节变化 [J]. 生态学杂志, 2011, **30**(10): 2227-2232.
- [23] Garland J L, Mills A L. Classification and characterization of heterotrophic microbial communities on the basis of patterns of community-level sole-carbon-source utilization [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1991, **57**(8): 2351-2359.
- [24] 席劲瑛, 胡洪营, 钱易. Biolog 方法在环境微生物群落研究中的应用 [J]. 微生物学报, 2003, **43**(1): 138-141.
- [25] 郑华, 欧阳志云, 方治国, 等. BIOLOG 在土壤微生物群落功能多样性研究中的应用 [J]. 土壤学报, 2004, **41**(3): 456-461.
- [26] 胡君利, 林先贵, 褚海燕, 等. 种植水稻对古水稻土与现代水稻土微生物功能多样性的影响 [J]. 土壤学报, 2007, **44**(2): 280-287.
- [27] 张燕燕, 曲来叶, 陈利顶. Biolog EcoPlate™ 实验信息提取方法改进 [J]. 微生物学通报, 2009, **36**(7): 1083-1091.
- [28] 丁瑞兴, 刘树桐. 黑土开垦后肥力演变的研究 [J]. 土壤学报, 1980, **17**(1): 20-30.
- [29] Liu X Y, Lindemann W C, Whitford W G, *et al.* Microbial diversity and activity of disturbed soil in the northern Chihuahuan Desert [J]. Biology and Fertility of Soils, 2000, **32**: 243-249.
- [30] 孟庆杰, 许艳丽, 李春杰, 等. 不同植被覆盖对黑土微生物功能多样性的影响 [J]. 生态学杂志, 2008, **27**(7): 1134-1140.
- [31] 孔滨, 孙波, 郑宪清, 等. 水热条件和施肥对黑土中微生物群落代谢特征的影响 [J]. 土壤学报, 2009, **46**(1): 100-106.
- [32] 刘开朗, 王加启, 卜登攀, 等. 环境微生物群落结构与功能多样性研究方法 [J]. 生态学报, 2010, **30**(4): 1074-1080.
- [33] 杨凯, 朱教君, 张金鑫, 等. 不同林龄落叶松人工林土壤微生物生物量碳氮的季节变化 [J]. 生态学报, 2009, **29**(10): 5500-5507.
- [34] 吴烈善, 曾东海, 莫小荣, 等. 不同钝化剂对重金属污染土壤稳定化效应的研究 [J]. 环境科学, 2015, **36**(1): 309-313.
- [35] 潘莹, 胡正华, 吴杨周, 等. 保护性耕作对后茬冬小麦土壤 CO₂ 和 N₂O 排放的影响 [J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2771-2775.

CONTENTS

Characterizing Beijing's Airborne Bacterial Communities in PM _{2.5} and PM ₁₀ Samples During Haze Pollution Episodes Using 16S rRNA Gene Analysis Method	WANG Bu-ying, LANG Ji-dong, ZHANG Li-na, <i>et al.</i> (2727)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Dustfall Trace Elements During Winter in Beijing	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (2735)
Pollution Characteristics of Aldehydes and Ketones Compounds in the Exhaust of Beijing Typical Restaurants	CHENG Jing-chen, CUI Tong, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (2743)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Beijing Based on Actual Traffic Flow Information	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2750)
Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Visibility in Summer in Pearl River Delta, China	YANG Yi-hong, QU Qun, LIU Sui-xin, <i>et al.</i> (2758)
Health Risk Assessment of Tunnel Workers Based on the Investigation and Analysis of Occupational Exposure to PM ₁₀	XIANG Hua-li, YANG Jun, QIU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (2768)
Analysis on Emission Inventory and Temporal-Spatial Characteristics of Pollutants from Key Coal-Fired Stationary Sources in Jiangsu Province by On-Line Monitoring Data	ZHANG Ying-jie, KONG Shao-fei, TANG Li-li, <i>et al.</i> (2775)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation and Its Water Vapor Sources in Eastern Qaidam Basin	ZHU Jian-jia, CHEN Hui, GONG Guo-li (2784)
Distribution Characteristics of Sedimentary Pigments in the Changjiang Estuary and Zhe-Min Coast and Its Implications	LI Dong, YAO Peng, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (2791)
Nutrients Input Characteristics of the Yangtze River and Wangyu River During the "Water Transfers on Lake Taihu from the Yangtze River"	PAN Xiao-xue, MA Ying-qun, QIN Yan-wen, <i>et al.</i> (2800)
Pollution Characteristics of Surface Runoff of Typical Town in Chongqing City	WANG Long-tao, DUAN Bing-zheng, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (2809)
Effect of Water and Sediment Regulation on the Transport of Particulate Organic Carbon in the Lower Yellow River	ZHANG Ting-ting, YAO Peng, WANG Jin-peng, <i>et al.</i> (2817)
Concentration and Source of Dissolved Organic Carbon in Snowpits of the Tibetan Plateau	YAN Fang-ping, KANG Shi-chang, CHEN Peng-fei, <i>et al.</i> (2827)
Variations of Inorganic Carbon and Its Impact Factors in Surface-Layer Waters in a Groundwater-Fed Reservoir in Karst Area, SW China	LI Jian-hong, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2833)
Modeling the Influencing Factors of Karstification and Karst Carbon Cycle in Laboratory	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, DUAN Yi-fan (2843)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of HCHs and DDTs in Surface Water Bodies in Xinxiang	FENG Jing-lan, YU Hao, LIU Shu-hui, <i>et al.</i> (2849)
Comparison Study of the Alkanes in Different Aquifer Medium Under Qingmuguan Underground System	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (2857)
Spatial Distribution Characteristics of Different Species Mercury in Water Body of Changshou Lake in Three Gorges Reservoir Region	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2863)
Influence of Marine Aquaculture Around Coal Power Plant on Mercury Species Change in Aquatic Ecological Environment	LIANG Peng, WANG Yuan-na, YOU Qiong-zhi, <i>et al.</i> (2870)
Using $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ and $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$, $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ to Trace the Sources of Sulfur and Nitrate in Lihu Lake Underground Water, Guangxi, China	Li Rui, XIAO Qiong, LIU Wen, <i>et al.</i> (2877)
Ecological Effects of Algae Blooms Cluster: The Impact on Chlorophyll and Photosynthesis of the Water Hyacinth	LIU Guo-feng, HE Jun, YANG Yi-zhong, <i>et al.</i> (2887)
Influence of Natural Dissolved Organic Matter on the Passive Sampling Technique and Its Application	YU Shang-yun, ZHOU Yan-mei (2895)
Adhesion Force Analysis of Protein Fouling of PVDF Ultrafiltration Membrane Using Atomic Force Microscope	WANG Xu-dong, ZHOU Miao, MENG Xiao-rong, <i>et al.</i> (2900)
Influence of CNTs on Photodegradation of Salbutamol in Water Environment	WANG Qi, HAN Jia-rui, WEI Bo-fan, <i>et al.</i> (2906)
Preparation of $\beta\text{-In}_2\text{S}_3$ and Catalytic Degradation of Oxytetracycline Under Solar Light Irradiation	AI Cui-ling, ZHOU Dan-dan, ZHANG Rong-rong, <i>et al.</i> (2911)
Nitrogen Release Performance of Sediments in Drainage Pipeline	CHEN Hong, ZHUO Qiong-fang, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (2918)
Analysis of Precipitation Formation in Biofilm CANON Reactor and Its Effect on Nitrogen Removal	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (2926)
Optimization of Energy Saving Measures with ABR-MBR Integrated Process	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2934)
Abundance and Community Composition of Ammonia-Oxidizing Archaea in Two Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Systems	GAO Jing-feng, LI Ting, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2939)
Formation Mechanism of Aerobic Granular Sludge and Removal Efficiencies in Integrated ABR-CSTR Reactor	WU Kai-cheng, WU Peng, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2947)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Soil of Pearl River Delta Economic Zone	DOU Lei, YANG Guo-yi (2954)
Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil in Du'an Autonomous County of Guangxi Zhuang Autonomous Region, China	WU Yang, YANG Jun, ZHOU Xiao-yong, <i>et al.</i> (2964)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Its Health Risk of Surface Dusts from Parks of Kaifeng, China	DUAN Hai-jing, CAI Xiao-qiang, RUAN Xin-ling, <i>et al.</i> (2972)
Responses of Soil and Plant ^{15}N Natural Abundance to Long-term N Addition in an N-Saturated <i>Pinus massoniana</i> Forest in Southwest China	LIU Wen-jing, KANG Rong-hua, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (2981)
Latitudinal Changes in Plant Stoichiometric and Soil C, N, P Stoichiometry in Loess Plateau	LI Ting, DENG Qiang, YUAN Zhi-You, <i>et al.</i> (2988)
Open-top Chamber for <i>in situ</i> Research on Response of Mercury Enrichment in Rice to the Rising Gaseous Elemental Mercury in the Atmosphere	CHEN Jian, WANG Zhang-wei, ZHANG Xiao-shan, <i>et al.</i> (2997)
Influence of Uranium in <i>Pteris vittata</i> L. Inoculated by Arbuscular Mycorrhizal Fungus	ZHENG Wen-jun, WANG Ming-yuan (3004)
Impact on the Microbial Biomass and Metabolic Function of Carbon Source by Black Soil During Rice Cultivation	ZHAO Zhi-rui, CUI Bing-jian, HOU Yan-lin, <i>et al.</i> (3011)
Effect of Decomposing Products of Immobilized Carriers on Desorption of Pyrene in Contaminated Soil	TONG Dong-li, SHUANG Sheng-qing, LI Xiao-jun, <i>et al.</i> (3018)
Solidification/Stabilization of Chromite Ore Processing Residue (COPR) Using Zero-Valent Iron and Lime-Activated Ground Granulated Blast Furnace Slag	CHEN Zhong-lin, LI Jin-chunzi, WANG Bin-yuan, <i>et al.</i> (3026)
Stabilization of Cadmium Contaminated Soils by Ferric Ion Modified Attapulgite (Fe/ATP): Characterizations and Stabilization Mechanism	YANG Rong, LI Hong-bo, ZHOU Yong-li, <i>et al.</i> (3032)
Improving Agricultural Safety of Soils Contaminated with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by In Situ Bioremediation	JIAO Hai-hua, PAN Jian-gang, XU Sheng-jun, <i>et al.</i> (3038)
Competence of Cd Phytoremediation in Cd-OCDF Co-contaminated Soil Using <i>Mirabilis jalapa</i> L.	ZHANG Xing-li, ZOU Wei, ZHOU Qi-xing (3045)
Effects of Soil Moisture on Phytoremediation of As-Contaminated Soils Using As-Hyperaccumulator <i>Pteris vittata</i> L.	LIU Qiu-xin, YAN Xiu-lan, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (3056)
Effects of Phosphate Rock and Decomposed Rice Straw Application on Lead Immobilization in a Contaminated Soil	TANG Fan, HU Hong-qing, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3062)
Residue and Degradation of Roxarsone in the System of Soil-Vegetable	SHAO Ting, YAO Chun-xia, SHEN Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3068)
Acute Toxicity and Safety Assessment of Three Typical Organic Pollutants to Two Aquatic Organisms	YANG Yang, LI Ya-jie, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (3074)
Effects of Oil Pollutants on the Performance of Marine Benthonic Microbial Fuel Cells and Its Acceleration of Degradation	MENG Yao, FU Yu-bin, LIANG Sheng-kang, <i>et al.</i> (3080)
Microwave In-situ Regeneration of Cu-Mn-Ce/ZSM Catalyst Adsorbed Toluene and Distribution of Bed Temperature	HU Xue-jiao, BO Long-li, LIANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3086)
Impact of Thermal Treatment on Biogas Production by Anaerobic Digestion of High-solid-content Swine Manure	HU Yu-ying, WU Jing, WANG Shi-feng, <i>et al.</i> (3094)
Impact of Phosphogypsum Wastes on the Wheat Growth and CO ₂ Emissions and Evaluation of Economic-environmental Benefit	LI Ji, WU Hong-sheng, GAO Zhi-qiu, <i>et al.</i> (3099)
Status Quo, Uncertainties and Trends Analysis of Environmental Risk Assessment for PFASs	HAO Xue-wen, LI Li, WANG Jie, <i>et al.</i> (3106)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年8月15日 第36卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 8 Aug. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行