

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第5期

Vol.39 No.5

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

餐饮行业细颗粒物(PM _{2.5})排放测算方法:以上海市为例	王红丽, 景盛翱, 楼晟荣, 陶士康, 乔利平, 李莉, 黄成, 林立, 陈长虹 (1971)
上海夏季PM _{2.5} 中有机物的组分特征、空间分布和来源	高雅琴, 王红丽, 景盛翱, 乔利平, 李莉, 朱书慧, 楼晟荣, 陶士康, 冯加良, 李想, 陈长虹 (1978)
北京南郊区PM _{2.5} 中水溶性无机盐季节变化及来源分析	高韩钰, 魏静, 王跃思 (1987)
基于样方法的天津市春季道路扬尘PM ₁₀ 中水溶性离子特征及来源解析	赵静琦, 姬亚芹, 张蕾, 王士宝, 李越洋 (1994)
广州秋季HONO污染特征及夜间来源分析	田智林, 杨闻达, 虞小芳, 张曼曼, 张贺伟, 程丁, 程鹏, 王伯光 (2000)
基于硫氧同位素研究南京北郊夏季大气中硫酸盐来源及氧化途径	韩珣, 任杰, 陈善莉, 王瑾瑾, 沈潇雨, 魏英, 郭照冰, 朱彬 (2010)
区县尺度机动车高分辨率排放清单建立方法及应用	樊守彬, 郭津津, 李雪峰 (2015)
典型工业生物质锅炉多环芳烃排放特征	林玉君, 白莉, 王焕香, 肖文, 刘军, 向运荣, 张春林 (2023)
多时间尺度HSPF模型参数不确定性研究	庞树江, 王晓燕, 马文静 (2030)
氮氧同位素联合稳定同位素模型解析水源地氮源	金赞芳, 张文辽, 郑奇, 朱晨阳, 李非里 (2039)
白洋淀水体挥发性有机物污染特征与风险评价	高秋生, 赵永辉, 焦立新, 田自强, 杨柳, 杨苏文, 崔志丹, 郝子峰 (2048)
太湖颗粒态有机质的荧光特征及环境指示意义	吕伟伟, 姚昕, 张保华, 刘延龙, 李元鹏 (2056)
长江口滩涂表层沉积物中微塑料的分布及沉降特点	朱晓桐, 衣俊, 强丽媛, 程金平 (2067)
桂林五里峡水库丰水期溶解有机碳特征	卢晓漩, 李强, 靳振江, 彭文杰, 房君佳, 黄炳惠, 宋昂 (2075)
青藏高原多年冻土区典型植被下河流溶解性有机碳的生物可利用性	马小亮, 刘桂民, 吴晓东, 徐海燕, 叶琳琳, 张晓兰, 白炜 (2086)
城郊与城镇河流中溶解性有机质与重金属的相关性	梁梦琦, 邵美玲, 曹昌丽, 纵亚男, 唐剑锋 (2095)
溶解性有机质在岩溶水系统中的迁移转化及影响因素分析	张连凯, 刘朋雨, 覃小群, 单晓静, 刘文, 赵振华, 姚昕, 邵明玉 (2104)
三峡库区澎溪河回水区溶解态金属离子来源和时空分布特征分析	赵晓松, 蔚建军, 付莉, 姜伟, 周川, 李波, Douglas Haffner, Christopher Weisener, 张磊 (2117)
澜沧江流域沉积物间隙水-上覆水营养盐特征与交换通量分析	望雪, 程豹, 杨正健, 刘德富, 徐雅倩 (2126)
蓄水期三峡水库香溪河沉积物-水系统营养盐分布特征	苏青青, 刘德富, 纪道斌, 宋林旭, 崔玉洁, 李欣, 陈秀秀, 刘心愿 (2135)
两种沉水植物对上覆水和间隙水中各形态磷的影响	杨文斌, 高顺峰, 万锐, 孙祥, 王赢 (2145)
于桥水库沉积物-水界面氮磷剖面特征及交换通量	文帅龙, 龚琬晴, 吴涛, 郑小兰, 江雪, 李鑫, 钟继承 (2154)
岷江干流表层沉积物中磷形态空间分布特征	杨耿, 秦延文, 韩超南, 马迎群, 刘志超, 杨晨晨 (2165)
农业排水沟渠硝态氮吸收动力学特征及相关性分析	李如忠, 殷齐贺, 高苏蒂, 陈广洲 (2174)
不同合成条件对ZnAl-LDHs覆膜改性生物陶粒除磷效果的影响	向洋, 张翔凌, 雷雨, 方晨佳, 袁野, 姜应和, 徐舟影 (2184)
真空紫外/过二硫酸盐去除饮用水中嗅味物质	孙昕, 史路肖, 张燧, 杨煜, 唐晓 (2195)
石墨烯负载铁锰氧化物活化过一硫酸盐降解金橙G	夏文君, 刘峰, 郝尚斌, 黄天寅, 王忠明, 陈家斌 (2202)
载铜或铈生物炭吸附水体中As(V)的作用机制	李锦, 祖艳群, 李刚, 孙国新 (2211)
DOM不同相对分子质量组分在无机矿物上的吸附及其对卡马西平吸附的影响实验	梁雨, 何江涛, 张思 (2219)
污水处理厂中有机磷阻燃剂的污染特征	孙佳薇, 丁炜楠, 张占恩, 王俊霞, 顾海东 (2230)
低温污水前置强化混凝	刘海龙, 任宇霞, 张忠民 (2239)
印染废水反渗透脱盐系统运行性能及膜污堵特性	谭玉琨, 张泽田, 吴乾元, 姚颖, 胡洪营, 丘培文 (2249)
生物膜CANON反应器性能的优化:从FBBR到MBBR	付昆明, 李慧, 周厚田, 仇付国 (2256)
两次污泥颗粒化过程中微生物群落的动态变化	高景峰, 张丽芳, 张树军, 高永青, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲 (2265)
铝、铁、钛3种金属盐基混凝剂调理污泥的性能比较	王晓萌, 王鑫, 杨明辉, 张淑娟 (2274)
热、热碱处理对污泥溶胞和溶解性有机物的影响	代勤, 张文哲, 于潘芬, 易皓, 刘俊新, 肖本益 (2283)
曝气时间比对亚硝化颗粒污泥形成的影响	李冬, 郭跃洲, 曹美忠, 劳会妹, 李帅, 张杰 (2289)
中国城市污泥中汞含量的时空分布特征	王宁, 刘清伟, 职音, 程柳, 麻冰涓, 毛宇翔 (2296)
夏季太湖湖/藻型湖区N ₂ O生成与迁移特征及其影响因素	郑小兰, 文帅龙, 李鑫, 龚琬晴, 刘德鸿, 钟继承 (2306)
太湖藻型湖区CH ₄ 、CO ₂ 排放特征及其影响因素分析	贾磊, 蒲旖旎, 杨诗俊, 苏荣明珠, 秦志昊, 张弥 (2316)
内蒙古典型草原季节性冻土区土壤剖面CO ₂ 、N ₂ O特征	李晋波, 姚楠, 李秀, 赵英, 张阿凤, 兰志龙, 范庭 (2330)
黄土高原成龄苹果园生态系统CO ₂ 通量特征	杨剑锋, 杨小妮, 王俊花, 段宇敏, 祁香宁, 张林森 (2339)
生物炭施用对紫色水稻土温室气体排放的影响	祁乐, 高明, 郭晓敏, 牛海东, 李婷, 孙涛, 曹群岭, 汤铭豪 (2351)
不同施肥处理对东北黑土温室气体排放的短期影响	李平, 郎漫, 李森, 魏玮, 李凯凯 (2360)
ITS高通量测序研究黄海微型真核浮游生物多样性及分布特征	张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 张晓娇 (2368)
不同排海方式城市尾水微生物扩散规律	郎秀璐, 宋志文, 徐爱玲, 牛成洁, 郭明月 (2380)
旅游活动对岩溶洞穴地下水中细菌群落的影响:以重庆丰都两个洞穴为例	吕现福, 贺秋芳, 王凤康, 赵瑞一, 张弘 (2389)
不同沼灌年限稻田土壤微生物群落分析	朱金山, 张慧, 马连杰, 廖敦秀, 杨星勇, 王龙昌, 王定勇 (2400)
生物炭对褐土理化特性及真菌群落结构的影响	阎海涛, 殷金玉, 丁松爽, 任天宝, 许家来, 宗浩, 高强, 刘国顺 (2412)
铅锌尾矿砂污染下的岩溶土壤微生物群落碳源代谢特征	房君佳, 李强, 刘畅, 靳振江, 梁月明, 黄炳惠, 卢晓漩, 彭文杰 (2420)
湖库沉积物好氧反硝化菌群脱氮特性及种群结构	康鹏亮, 张海涵, 黄廷林, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾亮宇 (2431)
反硝化菌群的氮代谢与反硝化偶联机制	张泽宇, 王明霞, 程永毅, 周志峰 (2438)
广西西江流域土壤铅空间分布与污染评价	张云霞, 宋波, 陈同斌, 伏凤艳, 黄飞, 庞瑞, 潘惠妹 (2446)
三峡库区消落带农业活动对土壤汞变化的影响	陈秋禹, 孙松, 尹德良, 王永敏, 张成, 王定勇 (2456)
水稻不同生长时期不同组织中抗肿内生菌的筛选与鉴定	王伯勋, 王学东, 段桂兰 (2464)
汞在酸性紫色水稻土的转化与水稻汞富集特征	李雨岑, 孙涛, 邓晗, 张成, 王永敏, 王定勇 (2472)
华北平原不同生产模式设施蔬菜生命周期环境影响评价	徐强, 胡克林, 李季, 韩卉, 杨合法 (2480)
基于细菌毒性测试与小鼠肺基因转录分析的PM _{2.5} 健康效应	宋鹏程, 陆书玉, 魏永杰, 陈倩倩, 罗丽娟 (2489)
中国PM _{2.5} 污染空间分布的社会经济影响因素分析	段杰雄, 翟卫欣, 程承旗, 陈波 (2498)

铅锌尾矿砂污染下的岩溶土壤微生物群落碳源代谢特征

房君佳^{1,2,3}, 李强^{2,3*}, 刘畅^{2,3}, 靳振江^{4*}, 梁月明^{2,3}, 黄炳惠^{2,3,4}, 卢晓漩^{1,2,3}, 彭文杰^{2,3,4}

(1. 西南大学地理科学学院, 重庆市岩溶环境重点实验室, 重庆 400715; 2. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 国土资源部/广西岩溶动力学重点实验室, 桂林 541004; 3. 联合国教科文组织国际岩溶研究中心, 桂林 541004; 4. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 桂林 541006)

摘要: 以广西阳朔思的村铅锌矿尾砂污染的水稻田、玉米地、柑橘园以及对照(旱地)土壤为研究对象, 采用碳素利用法和 18S rRNA 变性梯度凝胶电泳技术探究岩溶区重金属污染下土壤微生物群落碳源代谢特征以及土壤真菌与土壤有机碳的交互关系。结果表明, 广西阳朔思的村铅锌矿尾砂污染区土壤重金属总体含量(Pb、Zn、Cu、Cd)依次为: 水稻田 > 玉米地 > 柑橘园 > 对照; 同时地累积综合指数显示该区重金属污染以 Pb、Cd 为主, 其中 Cd 带来的环境风险最高。受 Pb、Zn、Cu、Cd 等重金属复合污染影响, 土壤微生物生物量碳、微生物熵和碳源代谢速率表现出随总体重金属质量分数增加而降低的变化规律, 但土壤总有机碳质量分数却表现为: 水稻田 > 对照 > 柑橘园或玉米地。DGGE 结果进一步显示对照组土壤存在担子菌门多孔菌目 *Pycnoporus* sp. ZW02.30, 柑橘园和玉米地土壤存在镰刀菌属 *Fusarium solani* 和 *Fusarium oxysporum* 以及柑橘园土壤存在青霉菌 *Penicillium decumbens*。然而, 上述参与淀粉、纤维素、半纤维素、木质素等糖类降解过程的真菌没有在水稻田土壤检出。加之, 水稻田土壤微生物功能多样性指数和微生物熵最低而土壤有机碳质量分数最高, 说明铅锌尾矿砂通过影响不同样地土壤微生物糖类代谢过程, 进而调节土壤碳在微生物特别是真菌作用下的矿化速率。

关键词: 铅锌尾矿砂; 土壤微生物; 土地利用类型; 碳素利用法; 变性梯度凝胶电泳

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)05-2420-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201709093

Carbon Metabolism Characteristics of the Karst Soil Microbial Community for Pb-Zn Mine Tailings

FANG Jun-jia^{1,2,3}, LI Qiang^{2,3*}, LIU Chang^{2,3}, JIN Zhen-jiang^{4*}, LIANG Yue-ming^{2,3}, HUANG Bing-hui^{2,3,4}, LU Xiao-xuan^{1,2,3}, PENG Wen-jie^{2,3,4}

(1. Chongqing Key Laboratory of Karst Environment, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Land and Resources & Guangxi, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China; 3. International Research Center on Karst under the Auspices of UNESCO, Guilin 541004, China; 4. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China)

Abstract: BIOLOG and 18S rRNA PCR-DGGE methods were used to estimate the characteristics of carbon source metabolism of the soil microbial community as well as the relationship between soil fungi and soil organic carbon in different karst land use types (corn field, citrus field, and paddy field) contaminated by Pb-Zn tailings at Sidi Village, Yangshuo, Guangxi Zhuang Autonomous Region, SW China. It was found that the concentrations of Pb, Zn, Cu, and Cd were highest in the paddy field, followed by the corn field, citrus field, and control group (dry field). In addition, the geo-accumulation index indicated that the heavy metal pollution at this area was caused by Pb and Cd and that Cd was the key environmental risk factor. With the Pb-Zn tailings, there was low microbial biomass carbon, biological entropy, and microbial carbon source metabolism in the soil samples. The highest soil organic carbon and heavy metal concentrations were found in the paddy field, followed by the corn field and citrus field. According to the DDGE results, it was found that *Pycnoporus* sp. ZW02.30 was found in control group soils, *Fusarium solani* and *Fusarium oxysporum* were found in the corn field and citrus field, and *Penicillium decumbens* was found in citrus field. These were involved in the degradation of sugars, such as starch, cellulose, hemicellulose, and lignin. However, the fungi were not found in the paddy field. Based on the low functional diversity of the soil microbial community and biological entropy as well as the high soil organic carbon concentration in the paddy field, it was concluded that soil microbial carbohydrate metabolism and the mineralization rate of the soil organic carbon was controlled by soil microorganisms, especially fungi, in different land use soils in the karst area contaminated by Pb-Zn tailings.

Key words: Lead-Zinc tailings; soil microorganism; land use type; BIOLOG; denatured gradient gel electrophoresis

土壤有机碳库是全球碳循环的重要组成部分, 其库容受气候、植被、土壤理化特性以及人类活动

收稿日期: 2017-09-11; 修订日期: 2017-11-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41641026, 41361054)

作者简介: 房君佳(1991~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为岩溶生物地球化学, E-mail: liqiang@karst.ac.cn

* 通信作者, E-mail: glqiangli@163.com; zhenjiangjin@163.com

等诸多因素影响,进而影响全球碳平衡^[1]。土壤微生物通过参与土壤中 C、N、P、S 等生物地球化学循环过程,不但在维持土壤功能方面具有至关重要的作用,而且还能敏感地反映土壤质量的变化^[2]。因此,土壤微生物可以作为土壤碳循环的评价指标^[3]。

然而,社会经济发展过程中产生的重金属污染造成土壤理化性质以及土壤微生物活性的改变^[2]。如李小林等^[4]的结果发现铅锌矿区土壤微生物总数随土壤重金属污染程度而下降,王秀丽等^[5]发现浙江省富阳市环山乡铜锌冶炼厂附近的水稻田有效铜、锌、镉、铅与微生物生物量碳、微生物熵、微生物生物量显著负相关,并且重金属污染还能降低微生物的数量,李强等^[6,7]发现铅锌尾矿砂污染造成岩溶土壤微生物分泌的土壤酶活性降低。由于细菌、真菌和放线菌构成的土壤微生物对重金属敏感程度各不相同,因此有研究指出:重金属污染能够明显降低细菌和放线菌的数量,对真菌数量却没有影响^[8],并呈现出真菌/细菌数量比值上升的趋势^[9],这可能与真菌对重金属的耐受性超过了细菌和放线菌对重金属的耐受性有关。此外,土壤真菌的碳利用效率高于细菌,同化相同量的碳,真菌对新生的稳定有机碳贡献高于细菌^[10]。因此,研究重金属污染土壤微生物群落碳源代谢特征以及土壤真菌与土壤有机碳的交互关系对了解土壤有机碳的生物地球化学循环过程具有重要的意义。

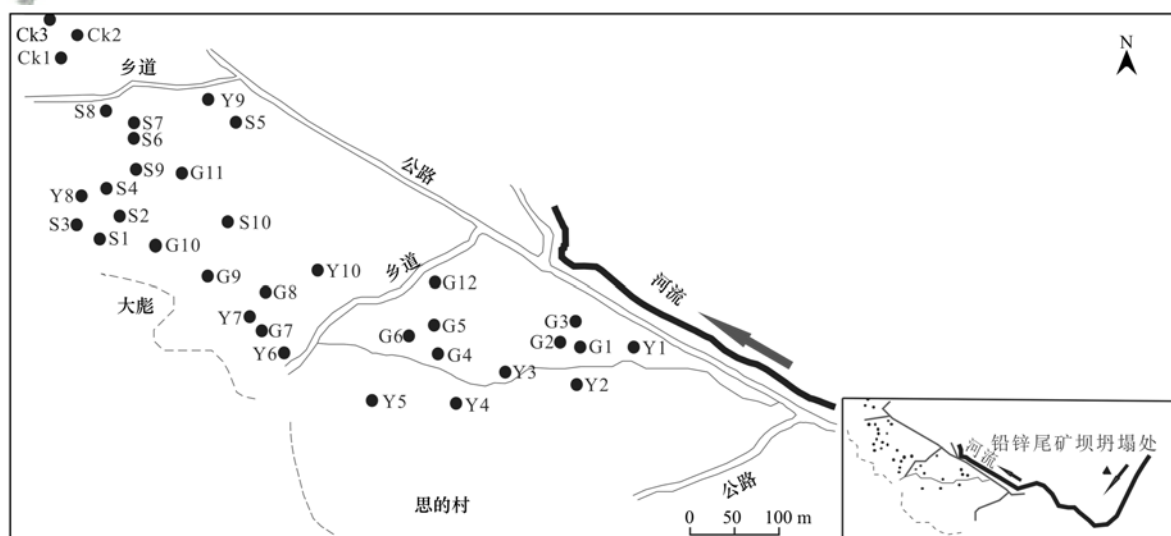
此外,以往关于重金属污染对土壤微生物多样性影响的研究,多采用重金属添加模拟实验^[11]或

者重金属污染灌溉土壤^[12]或者矿区或冶炼厂周围的土壤^[5],尽管可以反映重金属污染条件下土壤微生物多样性的变化,但由于缺乏对不同耕作方式土壤微生物的系统了解而不清楚污染区土壤微生物群落发生变化的驱动机制^[2]。尾矿砂作为一种特殊的重金属污染形式,尽管本研究团队对铅锌矿尾矿砂污染下的广西阳朔思的村土壤重金属与土壤理化性质、可培养微生物群落的关系进行了长期研究^[6,7,13~15],认识到土壤微生物群落的改变是影响土壤有机碳矿化过程的重要因素,但由于以往的研究没有涉及到不可培养微生物,而对微生物参与的土壤碳循环过程缺乏系统的了解。加之,过去认为岩溶生态系统具有较高的土壤碳库主要由于钙离子与腐殖质中的胡敏酸结合/螯合成稳定且不易分解的腐殖质有关^[16]。为此,本文选取岩溶区长期受铅锌尾矿砂污染的水稻田、柑橘园、玉米地以及对照(旱地)土壤,利用碳素利用法(BIOLOG)及变性梯度凝胶电泳技术探讨重金属污染下不同耕作方式岩溶土壤微生物群落碳源代谢特征以及真菌与土壤有机碳的交互关系,以期揭示重金属污染下的岩溶土壤碳循环过程提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与样品采集

思的村坐落在广西阳朔县东北一狭长的峰林平原上(图 1),周围地貌类型复杂,平均海拔 150 m,年平均温度 28.5℃,年均降雨量 1 000~2 000 mm。大约在 20 世纪 70 年代,一次强降雨将思的村东北



CK 代表对照; Y 代表玉米地; G 代表柑橘园; S 代表水稻田

图 1 思的村样品采集位置示意

Fig. 1 Map of the sampling sites in Sidi Village

部 15 km 以外的一铅锌尾矿砂坝冲垮,山洪裹挟着尾矿砂在河流转弯处将其倾泻到约 0.5 km² 的农田上^[14,15]. 由于该区地处岩溶区,耕地资源紧缺,人地关系紧张,当地农民及时清理了淤积的河道,并陆续将污染的农田平整,种植水稻、玉米、柑桔等^[14,15]. 此外,通过长期调查发现,毗邻农田的河水铜含量为 0.27 ~ 0.45 μg·L⁻¹、铅含量为 1.59 ~ 2.87 μg·L⁻¹、锌含量为 202 ~ 403 μg·L⁻¹以及镉含量为 3.02 ~ 6.42 μg·L⁻¹,符合生活饮用水卫生标准^[17]. 为此,在目前土地利用格局的基础上,本研究团队于 2016 年 7 月采集了水稻田、柑橘园、玉米地等 0 ~ 15 cm 层的土壤,其中水稻田样品 10 个、柑橘园样品 12 个、玉米地样品 10 个. 由于该区土地资源有限,为减少岩溶土壤空间异质性的影响,实验还选择 3 个毗邻研究区并且没有受到铅锌尾矿砂直接污染的旱地作为对照. 采集的土壤样品带回实验室后,按照研究团队以往的方法对土壤样品处理、保存以供后续分析^[14,15].

1.2 研究方法

1.2.1 土壤重金属及土壤碳指标分析

风干的土壤样品,其土壤重金属全量采用硝酸-氢氟酸-盐酸微波消解-火焰原子吸收光谱法测定^[18];土壤重金属有效态采用二乙烯三胺五乙酸(diethylene triamine pentacetate acid, DTPA)浸提-火焰原子吸收光谱法测定^[19].

新鲜的土壤样品,其土壤总有机碳含量(soil organic carbon, SOC)采用 TOC 仪测定法^[20];土壤微生物生物量碳(microbial biomass carbon, MBC)采用氯仿熏蒸法测定^[20]. 土壤微生物生物量碳计算公式为:

$$B_c = E_c / k(E_c)$$

式中, B_c 为微生物生物量碳质量分数, E_c 为熏蒸土样有机碳量与未熏蒸土样有机碳量之差, $k(E_c)$ 为转换系数,取值 0.45.

1.2.2 碳素利用法

BIOLOG-ECO 技术是通过测定微生物对 96 孔中 31 种碳源底物(单糖/糖苷/聚和糖类 7 种,氨基酸类 6 类,脂类 4 类,醇类 3 种,胺类 3 种,酸类 8 种)的分解情况来评估土壤微生物生理代谢特征. 本研究取 5.0 g 新鲜土样,置于 95 mL 0.9% NaCl 无菌溶液培养瓶中,180 r·min⁻¹ 振荡 30 min. 随后,在超净工作台上用 0.9% NaCl 无菌溶液通过 10 倍稀释法将土壤悬浊液稀释至浓度为 10⁻³,并用 8 通道加样器将土壤悬浊液接种到 BIOLOG-ECO

板(Biolog Inc., 美国)孔上,每孔添加 150 μL. 然后将 BIOLOG-ECO 板置于 25℃ 下连续培养 240 h. 培养期间,每隔 12 h 用 BIOLOG Microstation 光密度读数仪(Biolog Inc., 美国)在 590 nm 和 750 nm 处对 BIOLOG-ECO 板扫描计数^[13].

基于以上计数结果,可以获取土壤微生物群落整体代谢活性和功能多样性指数.

(1)土壤微生物群落整体代谢活性用平均颜色变化率(average well color development, AWCD)表示,并用来判断土壤微生物群落利用单一碳源能力. AWCD 计算公式如下.

$$AWCD = \sum [(C_i - R) / 31]$$

式中, C_i 为 BIOLOG-ECO 板各反应孔在 590 nm 和 750 nm 处所测光密度差值; R 为 BIOLOG-ECO 板 3 个对照孔在 750 nm 和 590 nm 处所测光密度差值的平均值. 通常 $C_i - R \geq 0$, 如果 $C_i - R < 0$, 按 0 计算.

(2)土壤微生物群落功能多样性指数用群落丰富度指数(S)、Shannon 多样性指数(H')、Simpson 优势度指数(D)、Shannon 优势度指数(E)和 McIntosh 指数(U)^[13]表示. 计算公式如下.

$$H' = - \sum (P_i \times \ln P_i)$$

$$D = 1 / \sum P_i^2$$

$$E = H' / \ln S$$

$$U = \sum [(C_i - R)^2]^{1/2}$$

式中, $P_i = (C_i - R) / \sum (C_i - R)$, S 代表 BIOLOG-ECO 平板上微孔碳源代谢的数目(若 AWCD > 0.2, 代表该孔碳源被完全利用)^[20].

1.2.3 土壤微生物 DNA 提取

按照 MOBIO 土壤强力 DNA 提取试剂盒(Powersoil DNA isolation kit, 美国)说明要求提取土壤微生物总 DNA, 土壤微生物总 DNA 浓度和纯度用微量紫外分光光度计(Quawell5000, 美国)测定.

1.2.4 18S rRNA PCR-DGGE 实验

在参考本研究团队以往实验方法的基础上^[21,22], 18S rRNA PCR-DGGE 实验的正向引物设计为: Fungi-GC (5'-CCG CCG CGC GGC GGG CGG GGC GGG GGC ACG GGG ATT CCC CGT TAC CCG TTG-3'), 反向引物为: NSI (5'-GTA GTC ATA TGC TTG TCT C-3'). 实验采用 25 μL 扩体系, 即 DNA 模板(5 ng·μL⁻¹) 1 μL; TaqPCR Master Mix(生工生物工程(上海)股份有限公司) 12.5 μL, 去离子无

菌水 9.5 μL, 10 μmol·μL⁻¹的正向引物和反向引物各 1 μL; 扩增程序为:95℃ 预变性 15 min, 95℃ 变性 1 min, 56℃ 退火 1 min, 72℃ 延伸 1 min, 共 35 个循环, 然后在 68℃ 完全延伸 10 min. PCR 扩增产物用 1.0% 琼脂糖凝胶进行电泳检测, 检测条带清晰无拖尾表示扩增结果良好, 将 PCR 扩增产物进行变性梯度凝胶电泳分析. 18S rRNA PCR 扩增产物采用 8% 聚丙烯酰胺凝胶, 变性剂浓度自下至上为 15% ~ 35%, 在 60℃、100 V 恒定电压下电泳 9 h. 电泳结束后用银染液染色. 将染色后的凝胶用 BIO-RAD 公司 Image lab 分析软件对条带进行分析. 将 DGGE 图谱上不同土地利用类型间具有差异(不同迁移率的 DGGE 条带)的条带切胶回收, 用 Fungi(5'-ATT CCC CGT TAC CCG TTG-3')和 NSI 引物对按照上述方法进行 PCR 扩增, 扩增后的 PCR 产物与 pEASY® -T₃ Cloning Vector (北京全式金生物技术有限公司)连接, 并转化到大肠杆菌(*Escherichia coli*) DH5α 感受态细胞中, 筛选阳性克隆子送至生工生物工程(上海)股份有限公司进行序列测定. 测定的序列在 NCBI 数据库中进行比对.

1.3 数据处理

用 Microsoft Excel 2010 对土壤微生物群落水平

生理轮廓的测定结果进行作图分析; 用 SPSS 19.0 统计软件对所测定的数据进行单因素方差分析.

为消除指标之间的量纲影响, 以解决数据指标之间的可比性, 对 35 个土壤样品的重金属全量和有效态进行归一化处理. 具体方法是:将单个样品的平行样品进行归一化, 计算公式为^[23]:

$$x'_i = \frac{x_i}{\sum_{i=1}^{35} x_i} \quad (i = 1, 2, \dots, 35)$$

然后取每个样本平行样间的算术平均值, 即得到每个样本的归一化值.

为了解研究区土壤遭受的重金属污染风险状况, 本文采用地累积综合指数法(geo-accumulation index)评价. 地积累指数由德国海德堡大学 Muller 于 1969 年提出, 后被广泛应用于现代沉积物、土壤、灰尘中重金属污染评价^[24]. 计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 \left[\frac{C_n}{KB_n} \right]$$

式中, I_{geo} 表示地积累指数, C_n 为研究区重金属 n 在样品中的实测含量, B_n 为重金属 n 的背景值; K 为考虑到背景值波动而设定的常数, 一般取值 1.5. 根据 I_{geo} 数值的大小, 可以将土壤重金属污染程度分为 7 个等级(表 1).

表 1 地积累指数与污染程度评价

Table 1 Geo-accumulation index and contamination grade assessment

污染级别	无	轻度	偏中度	中度	偏重度	重度	严重
I_{geo} 数值	≤0	0 ~ 1	1 ~ 2	2 ~ 3	3 ~ 4	4 ~ 5	> 5

2 结果与分析

2.1 土壤重金属特征

通过表 2 可以看出思的村不同类型样地 Pb、Zn 和 Cu 的全量及有效态呈现出水稻田 > 玉米 > 柑橘园 > 对照的变化规律, 并且水稻田与对照组差异显著($P < 0.05$). 尽管柑橘园 Cd 全量最高, 但其有效态仍呈现出水稻田 > 玉米 > 柑橘园 > 对照的变化

规律. 这是由于当地农民在平整污染土地时存在一定的空间异质性造成土壤铅锌尾矿砂分布不均^[14]. 此外, 植物对土壤重金属的吸收富集能力取决于土壤重金属的有效态质量分数, 而不是总量^[25,26]. 为此, 对研究区 Pb、Zn、Cu 和 Cd 全量及有效态进行归一化处理后, 可以发现研究区重金属含量的总体变化趋势为:水稻田 > 玉米地 > 柑橘园 > 对照(图 2). 鉴于水稻田土壤存在湿干交替过程, 氧化还原

表 2 思的村不同样地土壤重金属含量¹⁾/mg·kg⁻¹

Table 2 Soil heavy metals in different land use types in Sidi Village/mg·kg⁻¹

样地类型	全量				有效态			
	Pb	Zn	Cu	Cd	DTPA-Pb	DTPA-Zn	DTPA-Cu	DTPA-Cd
对照	119.78 ± 25.83 a	146.15 ± 24.25 a	12.04 ± 4.77 a	16.13 ± 5.89 a	13.97 ± 0.48 a	0.29 ± 0.41 a	1.00 ± 0.05 a	2.68 ± 0.15 a
玉米地	1 043.88 ± 389.67 b	1 267.96 ± 359.46 b	54.75 ± 31.51 b	31.30 ± 8.83 b	289.49 ± 184.90 b	62.13 ± 36.50 bc	21.41 ± 12.19 b	7.11 ± 1.18 b
柑橘园	800.91 ± 226.59 bc	1 163.05 ± 201.35 b	39.71 ± 20.86 ab	41.22 ± 11.82b	199.64 ± 85.82 ab	34.43 ± 23.09 ab	17.51 ± 11.26 bc	9.27 ± 1.29 c
水稻田	1 284.70 ± 415.37 c	2 025.35 ± 459.00 c	97.97 ± 29.87 c	37.39 ± 5.19 b	350.98 ± 172.24 b	90.92 ± 29.76 c	34.36 ± 9.80 c	13.40 ± 1.29 d

1) 每列数据后若出现不同字母表示差异显著($P < 0.05$), 有任何相同字母或无字母的表示差异不显著($P > 0.05$), 下同

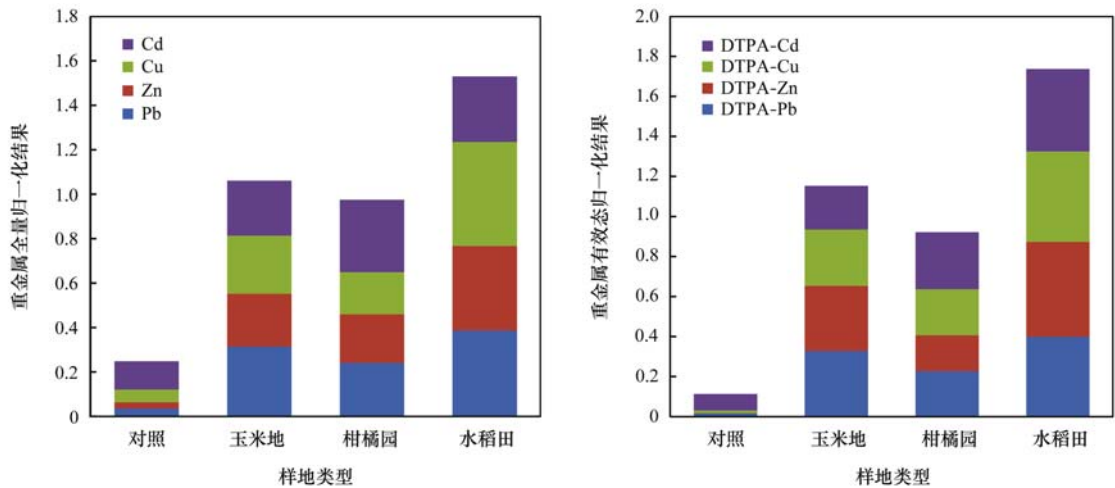


图 2 思的村不同样地重金属全量与有效态归一化结果

Fig. 2 CNV of total and bioavailable heavy metals in different land use types in Sidi Village

电位会随之变化,进而影响重金属的形态和生物有效性^[25,26],造成水稻田重金属总体含量最高,该研究结果与胡清菁等^[15]的研究一致.

利用地累积指数法,以桂林市土壤背景值作为参比值(Pb、Zn、Cu、Cd 背景值分别为 36.9、127、34.8 和 0.191 mg·kg⁻¹)^[27],本文对研究区土壤 Pb、Zn、Cu 和 Cd 等四项重金属进行潜在危害的风险评价(表 3).以平均全量来评价重金属污染风险,研究区土壤 Cd 的 I_{geo} 系数均高于 5,属于严重污染;玉米地和水稻田土壤 Pb 的 I_{geo} 系数均高于 4,属于重度污染;柑橘园土壤 Pb 造成的重金属污染风险属于偏重度;Zn 造成的重金属污染风险除水

稻田属于偏重度外,玉米地和柑橘园均遭受中等程度的污染;Cu 只给土壤带来轻度以下的污染风险.以有效态来评价重金属污染风险,发现除对照外,Cd 给研究区土壤带来重度及其以上的污染风险;Zn 和 Cu 没有给土壤带来污染风险;而 Pb 造成了偏重度及重度的污染风险.此外,由于桂林岩溶区蔬菜地土壤 Cd 背景值(1.193 mg·kg⁻¹)及 I_{geo} 系数(2.06)较高^[28],通过系统评价可以看出对对照样地的重金属污染可能来自于铅锌尾矿砂粉尘,并且 Cd 造成的土壤环境污染风险最高,是污染土壤修复的主要控制目标,该结果与胡清菁^[15]等的研究一致.

表 3 思的村不同样地土壤重金属地累积指数

Table 3 Geo-accumulation index of soil heavy metals in different land use types in Sidi Village

样地类型	Pb	Zn	Cu	Cd	DTPA-Pb	DTPA-Zn	DTPA-Cu	DTPA-Cd
对照	1.11	-0.38	-2.12	5.82	-1.99	-9.36	-5.71	3.23
玉米地	4.24	2.73	0.07	6.77	2.39	-1.62	-1.29	4.63
柑橘园	3.85	2.61	-0.39	7.17	1.85	-2.47	-1.58	5.02
水稻田	4.54	3.41	0.91	7.03	2.66	-1.07	-0.60	5.55

2.2 土壤微生物生物量特征

土壤微生物生物量通常是指土壤生态系统中体积小小于 $5 \times 10^3 \mu\text{m}^3$ 细菌、真菌等活物质总量,代表参与土壤养分和能量循环、有机质分解和积累的微生物数量,是表征微生物在土壤肥力演化中的重要指标^[29].土壤微生物熵(MBC/SOC, SMQ)是指土壤微生物生物量碳与土壤总有机碳的比值,土壤微生物熵受重金属污染影响会出现明显变化,在一定程度上能指示土壤微生物对有机碳分解的程度.本研究对不同样地 MBC、SOC 和 SMQ 进行分析(表 4),发现与对照相比,柑橘园和玉米地 SOC 略下

降,差异不显著,水稻田 SOC 质量分数最高,并与其他样地差异显著($P < 0.05$);MBC 和 SMQ 变化趋势总体表现为对照 > 柑橘园 > 玉米地 > 水稻田,并且对照与其他样地差异显著($P < 0.05$).这与长期重金属胁迫改变了土壤微生物群落生理活动和代

表 4 思的村不同样地土壤总有机碳和微生物生物量碳

Table 4 SOC and MBC in different land use types in Sidi Village

样地类型	SOC /g·kg ⁻¹	MBC /mg·kg ⁻¹	SMQ /%
对照	13.58 ± 1.19 a	323.64 ± 73.80 a	2.36 a
玉米地	11.71 ± 2.52 a	157.85 ± 19.84 b	1.32 b
柑橘园	11.72 ± 2.51 a	161.33 ± 14.12 b	1.41 b
水稻田	18.91 ± 3.98 b	144.97 ± 15.18 b	0.79 b

谢能力，以致于微生物需要消耗更多能量维持自身正常生理代谢，导致有机碳向微生物量碳转化效率降低有关^[30]。

2.3 土壤微生物群落碳源代谢特征

2.3.1 土壤微生物 AWCD 及群落功能多样性

AWCD 能够反映微生物群落碳源利用能力随时间变化的趋势^[31]。通过图 3 可以看出，供试样品 AWCD 值均表现为随培养时间延长而升高的趋势，36 h 内各样品 AWCD 值无明显变化，36 h 后对照组与其他样地的 AWCD 值区分开，60 h 后水稻田与柑橘园、玉米地的 AWCD 值区分开，96 h 后柑橘园与玉米地的 AWCD 值区分开，180 h 之后 AWCD 值趋于稳定，并且 AWCD 值总体表现为对照 > 柑橘园 > 玉米地 > 水稻田。由于培养 180 h 后，微生物碳源利用速率基本稳定，为此选 180 h 处的 AWCD 值计算微生物群落功能多样性指数（表 5），结果显示：McIntosh 丰富度指数为对照 > 柑橘园 > 玉米地 > 水稻田，对照与水稻田差异显著（ $P < 0.05$ ）；Shannon 多样性指数和 Simpson 优势度指数

表现为柑橘园 > 玉米地 > 对照 > 水稻田，水稻田与其他样地差异显著（ $P < 0.05$ ），而旱地之间没有显著差异（ $P > 0.05$ ）；Shannon 均匀度指数表现为玉米地 > 对照 > 柑橘园 > 水稻田，并且没有显著差异（ $P < 0.05$ ）。从而说明重金属污染不但影响微生物碳源利用能力，而且还影响土壤微生物群落功能多样性。

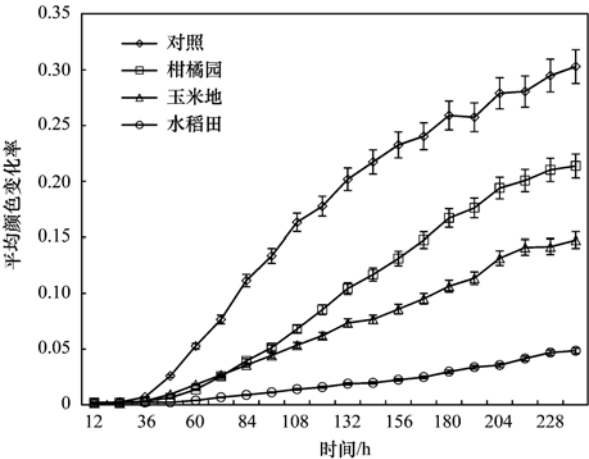


图3 思的村不同样地平均颜色变化率
Fig. 3 Change in AWCD in different land use types in Sidi Village

表 5 思的村不同样地土壤微生物群落功能多样性指数

Table 5 Functional diversity of soil microbial community in different land use types in Sidi Village				
样地类型	McIntosh 丰富度指数 (U)	Shannon 多样性指数 (H')	Simpson 优势度指数 (D)	Shannon 均匀度指数 (E)
对照	2.32 ± 1.50a	2.31 ± 0.73 a	0.85 ± 0.13 a	1.38 ± 0.65 a
玉米地	1.08 ± 0.70 ab	2.34 ± 0.29 a	0.86 ± 0.04a	1.50 ± 0.81a
柑橘园	1.41 ± 0.88 ab	2.58 ± 0.46 a	0.87 ± 0.10 a	0.88 ± 0.57a
水稻田	0.43 ± 0.35 b	1.68 ± 0.58 b	0.64 ± 0.20 b	0.37 ± 0.84 a

2.3.2 土壤微生物碳源底物利用速率

碳源是微生物的主要能源物质，研究结果表明：研究区土壤微生物对酯类的利用效率最高，糖类利用效率最低（图 4）。微生物对糖类的利用效率总体表现为：柑橘园 > 玉米地 > 水稻田 > 对照；其他 5 类糖原的利用效率表现对照 > 柑橘园 > 玉米地 > 水稻田（图 4）。相关分析结果进一步显示（表 6）：对照土壤微生物糖类利用效率与全量 Cd 显著负相关（ $P < 0.05$ ），酸类利用效率与全量 Zn 显著负相关、与 DTPA-Cu 显著正相关（ $P < 0.05$ ）；柑橘园土壤微生物糖类利用效率与全量 Cd 显著正相关（ $P < 0.05$ ）；水稻田土壤微生物糖类利用效率与全量 Zn、DTPA-Zn 以及 DTPA-Cd 显著负相关（ $P < 0.05$ ），氨基酸类、胺类利用效率与全量 Pb 和 Cu 显著负相关（ $P < 0.05$ ）。从而说明，土地利用类型不同，重金属对土壤微生物碳源利用能力的影响不

同。但总体结果表明，Cd 是影响土壤微生物糖源利用效率的主要风险物，并且糖源利用速率直接影响土壤有机碳质量分数。

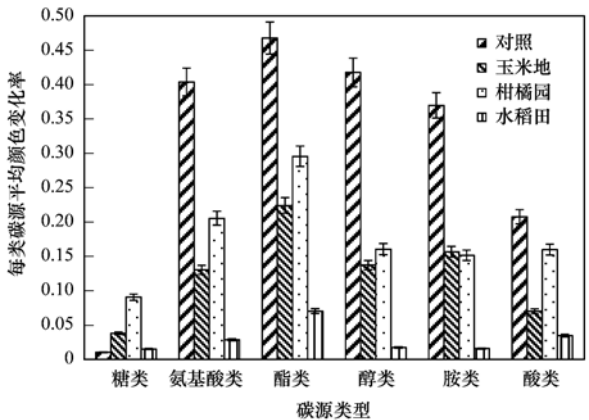


图4 思的村不同样地土壤微生物对六类碳源的利用速率
Fig. 4 Utilization efficiency of six kinds of carbon sources by the microbial community in different land use types in Sidi Village

表 6 思的村不同样地重金属与六类碳源底物利用效率相关分析¹⁾
Table 6 Correlative analysis of heavy metal pollution and utilization efficiency
of six kinds of carbon sources in different land use types in Sidi Village

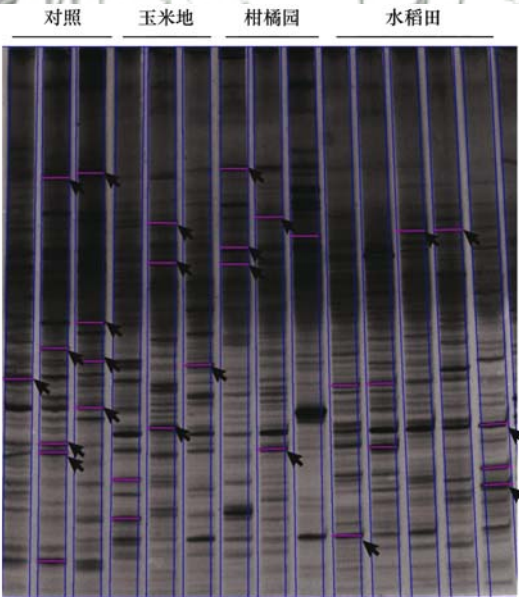
项目	对照								玉米地							
	Pb	Zn	Cu	Cd	DTPA-Pb	DTPA-Zn	DTPA-Cu	DTPA-Cd	Pb	Zn	Cu	Cd	DTPA-Pb	DTPA-Zn	DTPA-Cu	DTPA-Cd
糖类	-0.688	-0.408	-0.605	-0.998 *	0.916	-0.351	0.389	-0.253	-0.04	-0.035	-0.071	0.347	-0.057	0.093	-0.130	0.254
氨基酸类	0.619	-0.962	-0.875	-0.203	-0.264	0.876	0.968	0.921	0.268	0.234	0.236	0.317	0.290	0.287	0.208	0.151
胺类	0.245	-0.990	-0.996	-0.585	0.152	0.603	0.986	0.682	0.346	0.319	0.26	0.327	0.405	0.283	0.314	0.301
酯类	0.021	-0.932	-0.99	-0.752	0.370	0.408	0.924	0.500	0.242	0.05	0.208	0.384	0.234	0.135	0.129	-0.193
醇类	-0.089	-0.886	-0.969	-0.820	0.470	0.306	0.877	0.402	-0.09	0.047	-0.071	0.090	-0.075	-0.057	-0.099	-0.169
酸类	0.332	-0.999 *	-0.985	-0.509	0.062	0.673	0.997 *	0.745	0.175	0.307	0.191	-0.001	0.272	0.250	0.271	0.034

项目	柑橘园								水稻田							
	Pb	Zn	Cu	Cd	DTPA-Pb	DTPA-Zn	DTPA-Cu	DTPA-Cd	Pb	Zn	Cu	Cd	DTPA-Pb	DTPA-Zn	DTPA-Cu	DTPA-Cd
糖类	-0.344	-0.303	-0.393	0.721 *	-0.406	-0.233	-0.383	0.095	-0.276	-0.644 *	-0.568	0.084	-0.367	-0.744 *	-0.555	-0.729 *
氨基酸类	0.049	0.026	-0.044	0.441	-0.368	-0.031	-0.343	0.103	-0.654 *	-0.551	-0.674 *	-0.390	-0.539	-0.356	-0.516	-0.582
胺类	0.083	0.098	-0.083	0.458	-0.451	-0.117	-0.451	0.180	-0.642 *	-0.525	-0.641 *	-0.493	-0.519	-0.340	-0.390	-0.468
酯类	-0.278	-0.244	-0.405	0.194	-0.587	-0.389	-0.597	-0.268	-0.757 *	-0.582	-0.700 *	-0.268	-0.639 *	-0.407	-0.547	-0.528
醇类	0.235	0.360	0.188	0.472	0.068	0.179	0.088	-0.083	0.235	0.190	0.137	0.164	0.298	0.012	0.212	0.101
酸类	-0.065	-0.084	-0.187	0.430	-0.459	-0.142	-0.460	-0.025	-0.448	-0.378	-0.496	-0.433	-0.311	-0.194	-0.307	-0.525

1) * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关

2.4 基于 PCR-DGGE 技术解析参与土壤碳循环的真菌

DGGE 依据双链 DNA 片段熔解行为的不同, 可以分离为相同长度但碱基对序列不同的 DNA 标记片段. 对图 5 不同样地特异条带切胶后进行克隆转化测序, 并在 NCBI 中进行 Blast 比对, 得到与其相似度较高的序列, 共对比到 23 个有用序列(表 7), 克隆序列与已知序列相似度在 93% ~ 100%.



按照从左往右的泳道、自上而下的箭头依次标注为:1-1、2-1、2-2、2-3、2-4、3-1、3-2、3-3、3-4、5-1、5-2、5-3、6-1、7-1、7-2、7-3、8-1、8-2、10-2、12-1、13-1、14-1 和 14-3

图 5 18S rDNA 基因的 DGGE 图谱

Fig. 5 DGGE profile of 18SrDNA fragments

在门水平上, 测试样品中共检出子囊菌门 7 个, 占总比例的 31%; 未培养真菌 6 个, 占总比例 26%; 真核生物 6 个, 占总比例 26%; 结合菌门 2 个, 占总比例 8.7%; 担子菌门 2 个, 占总比例 8.7%. 本研究表明子囊菌门是铅锌尾矿砂污染土壤的主要真菌群落, 并与杨金水等^[32]利用高通量测序技术获

表 7 DNA 测序结果对照
Table 7 DNA sequencing results

样地类型	克隆子编号	菌株名称	最大相似度/%	GenBank 序列号
对照	1-1	<i>Crossodonthina koreana</i>	99	Z36893
	2-1	uncultured eukaryote	98	KU657019
	2-2	<i>Archaeorhizomyces finlayi</i>	95	JF836020
	2-3	uncultured fungus	97	EU733605
	2-4	<i>Tectereaeus incompletus</i>	93	KR081635
	3-1	uncultured eimeriidae	97	EF023142
	3-2	<i>Archaeorhizomyces finlayi</i>	95	JF836020
	3-3	uncultured fungus	98	EU733583
玉米地	3-4	<i>Pycnoporus</i> sp. ZW02. 30	99	AY705970
	5-1	<i>Endogonolactiflua</i>	97	LC107343
	5-2	uncultured ascomycota	96	FJ889079
	5-3	<i>Fusarium solani</i>	99	KP310124
柑橘园	6-1	uncultured fungus	100	KJ021757
	7-1	uncultured zygomycete	100	KT923269
	7-2	<i>Penicillium decumbens</i>	100	KR063176
	7-3	<i>Phacidiumlacerum</i>	98	KJ830797
	8-1	uncultured eukaryote	100	KP059046
	8-2	<i>Fusarium oxysporum</i>	100	KJ126877
水稻田	10-2	uncultured fungus	99	KX147636
	12-1	uncultured fungus	99	KJ862862
	13-1	<i>Phaeomyces dubiosus</i>	99	KF830077
	14-1	Phryniidae environmental sample	93	EF023624
	14-3	<i>Soutigera coleoprata</i>	99	AF007279

取的铅锌矿区土壤真菌群落组成结果相一致。

此外, 对照土壤中的 3-4 与 *Pycnoporus* sp. ZW02.30 同源性较高(99%), 属担子菌门多孔菌目白腐真菌。已有研究表明, 白腐真菌能够通过分泌多种降解酶参与木质素、纤维素和半纤维素的降解, 并对重金属有一定的吸附能力^[33]。玉米地和柑橘园土壤中检出的 5-3 和 8-2 与 *Fusarium solani* 和 *Fusarium oxysporum* 同源性较高(99% 和 100%), 属于子囊菌门镰刀属, 是一类土壤内生存的非致病性菌, 并能参与纤维素分解^[34]。柑橘园土壤中检出的 7-2 与 *Penicillium decumbens* 的同源性达 100%, 是青霉属真菌中降解纤维素的重要菌种之一, 能够促进多种含钾矿物风化和钾溶出^[35]。而水稻田主要存在着未培养真菌。

3 讨论

土壤有机碳作为陆地碳库的重要组成部分, 通过土壤植物残体的补充以及土壤微生物的分解实现动态变化^[3], 并与植被、土壤理化特性、人类活动等因素有关。然而, 在过去, 企业为降低生产成本, 修建了大量的简易铅锌尾矿砂坝用于储存矿渣。一旦铅锌尾矿砂溃坝, 不但造成土壤污染, 通过食物链危害人体健康, 而且还将引起土壤理化性质以及土壤微生物活性的改变。已有研究表明: 铅、锌、铜、镉共生的矿尾砂是一个污染复合体^[14], 能够长时间连续释放重金属污染物进而对土壤理化特性产生影响。本研究表明, 水稻田遭受的重金属生态污染风险最为严重, 其次为玉米地, 最后为柑橘园。尽管 C4 植物(玉米)对土壤重金属的吸收和积累能力低于 C3 植物(柑橘、水稻)^[36], 然而由于该区水稻田和玉米地土壤重金属含量高于柑橘园土壤, 因此研究区土壤在经过改良后适合种植柑橘。此外, 对照组由于受铅锌尾矿砂粉尘的影响, 有效态 Cd 高于桂林岩溶区蔬菜地土壤 Cd 的背景值。受铅锌尾矿砂影响, 水稻田、玉米地和柑橘园表层土壤有机碳含量分别为 18.91、11.71 和 11.72 g·kg⁻¹, 低于方芳等^[37]关于桂林毛村基地水稻田 21.14 g·kg⁻¹、玉米地 17.23 g·kg⁻¹ 以及柑橘园 17.42 g·kg⁻¹ 的含量, 并且对照组表层土壤有机碳 13.58 g·kg⁻¹ 的含量高于靳振江等^[38]关于桂林会仙基地旱地 12.78 g·kg⁻¹ 的结果。受岩溶区地质背景的特殊性、地形地貌的复杂性和生境的高度异质性影响, 研究区表层土壤有机碳与其他样地具有一定的差异。但研究结果总体表现为水稻田表层土壤有机

碳高于旱地, 这是因为厌氧环境抑制微生物矿化速率以及好氧环境有利于微生物矿化速率^[39]。然而, 本研究水稻田、玉米地、柑橘园和对照的 SMQ 分别为 0.79%、1.32%、1.41% 和 2.36%, 与陈志杰等^[40]关于水稻田 SMQ 高(SMQ 为 2.58%)旱地 SMQ 低(SMQ 为 1.47%)的结果截然相反。一般来说水稻田由于长期处于干湿交替的人为管理环境, 能促进微生物生长, 有最大的 SMQ。本研究关于水稻田 MBC 和 SMQ 值较低, 说明铅锌尾矿砂污染是造成水稻田土壤矿化率降低以及土壤碳释放速率变慢的关键因素^[41]。此外, 上述结果均表明铅锌尾矿砂污染引起土壤微生物发生变化的同时还将造成土壤碳释放速率的改变。

土壤微生物指标能敏感地反映土壤质量的变化, 因此 BIOLOG 可简单、快速地进行土壤微生物群落功能多样性和碳源代谢特性评价。本文研究结果表明, 水稻田的 AWCD 变化速率、McIntosh 丰富度指数、Shannon 多样性指数、Simpson 优势度指数和 Shannon 均匀度指数最低, 并与其具有最小的 MBC 结果相吻合。由于土壤类型、理化性质和植物种类等均能影响土壤微生物群落代谢多样性, 因此, 本研究通过对比分析发现水稻田土壤中的铅锌尾矿砂通过抑制微生物生长, 造成水稻田土壤微生物群落结构简单, 功能单一。这一结果与李忠佩等^[42]关于水稻田土壤微生物功能群落多样性指数高于旱地的结果相反。微生物对土壤重金属长期适应后, 污染状态下土壤微生物群落多样性高于未污染区^[43], 因此, 研究区玉米地和柑橘园的 Shannon 多样性指数和优势度指数均高于对照。尽管玉米地和柑橘园具有较高的 Shannon 多样性指数和优势度指数, 但是其 AWCD 变化速率却低于对照。从而说明土壤微生物的丰富度在调节土壤碳释放速率方面的作用更为重要。显然, 这一结果这将影响人们对于污染区土壤微生物群落发生变化驱动机制的全面认识^[44]。

真菌作为土壤微生物的主要组成部分, 能够通过分泌多种酶降解土壤中的有机物。自然界中广泛存在的淀粉、纤维素、半纤维素、木质素等糖类必须通过微生物的分解才能参与土壤生物地球化学循环过程^[44]。已有研究表明: 土壤中的真菌丰度与土壤木质纤维素降解酶显著相关^[45]。同时, 李强等^[7]在该区调查时发现参与土壤有机碳循环的纤维素酶和蔗糖酶的活性指数在水稻田最低。本研究发现微生物对糖类的利用效率总体表现为: 柑橘园 > 玉米

地 > 水稻田 > 对照, 并与土壤重金属污染程度呈反比, 说明微生物通过影响土壤中淀粉、纤维素、半纤维素、木质素等糖类的代谢速率进而使不同样地的土壤有机碳具有差异性. 由于 Cd 对白腐真菌具有较强的毒性, 因此对照组中检出的白腐真菌通过参与土壤木质素、纤维素和半纤维素的降解/分解过程^[33], 进而使其表层土壤有机碳的含量与会仙基地旱地的结果基本一致. 柑橘园和玉米地中镰刀菌属的 *Fusarium solani* 和 *Fusarium oxysporum* 以及青霉属的 *Penicillium decumbens* 是土壤中常见的纤维素分解菌^[46], 因此纤维素在内切葡聚糖酶、外切纤维素酶和 β -葡糖苷酶的协同作用下可转化成葡萄糖. 尽管柑橘园和玉米地碳源代谢速率不一致, 但通过微生物之间的交互作用进而使其土壤表层有机碳含量分别为 $11.71 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $11.72 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 进而说明岩溶生态系统土壤碳库的稳定性可能与钙离子-胡敏酸的结合/螯合作用无关^[16]. 然而, 上述参与淀粉、纤维素、半纤维素、木质素等糖类降解过程的真菌没有在水稻田土壤检出. 考虑到不同耕作方式对土壤微生物群落的影响也不相同, 但研究区水稻田较低的 MBC 和 SMQ 值加之没有检出的真菌说明土壤有机碳矿化过程与土壤微生物活性即微生物生物量无关, 而是与某些关键微生物的丰富度有关, 这一点通过研究区的 McIntosh 丰富度指数可以得到佐证. 总而言之, 本研究表明 Cd 不但是研究区土壤的关键污染风险物, 而且还通过真菌群落的差异化表现影响土壤 MBC、SMQ 和碳源代谢速率, 改变土壤有机碳周转速率, 进而影响不同耕作方式的土壤有机碳碳库. 然而真菌如何影响 SMQ 和土壤有机碳周转速率, 还需要利用稳定性同位素核酸探针技术(DNA-SIP)进一步验证.

4 结论

(1) 受铅锌尾矿砂影响, 研究区不同类型样地的重金属复合污染程度及其遭受的生态风险表现为: 水稻田 > 玉米地 > 柑橘园 > 对照, 同时研究区土壤的生态风险主要由 Cd 造成, 并成为土壤修复的主要控制目标.

(2) 研究区土壤微生物生物量碳、微生物熵和碳源代谢速率随着样地污染程度的加剧而降低, 而土壤有机碳质量分数除对照外, 表现出随样地污染程度的加剧而升高的趋势. 水稻田土壤进而表现为土壤微生物生物量碳、微生物熵和碳源代谢速率较低的特征.

(3) 受土壤 Cd 影响, 土壤微生物糖源利用效率受到限制, 进而影响土壤有机碳矿化速率.

(4) 研究区对照组土壤存在担子菌门多孔菌目 *Pycnoporus* sp. ZW02.30, 柑橘园和玉米地土壤存在镰刀菌属 *Fusarium solani* 和 *Fusarium oxysporum* 以及柑橘园土壤存在青霉属 *Penicillium decumbens*. 然而, 上述参与淀粉、纤维素、半纤维素、木质素等糖类降解过程的真菌没有在水稻田土壤检出. 从而说明铅锌尾矿砂通过影响不同样地土壤微生物糖类代谢过程, 进而调节土壤碳在微生物作用下的矿化速率.

致谢: 感谢中国地质科学院岩溶地质研究所张强副研究员提供河水重金属测试结果.

参考文献:

- [1] Lal R. Restoring soil quality to mitigate soil degradation[J]. Sustainability, 2015, 7(5): 5875-5895.
- [2] 蒋先军, 骆永明, 赵其国. 重金属污染土壤的微生物学评价[J]. 土壤, 2000, 32(3): 130-134.
- [3] 靳振江, 汤华峰, 李敏, 等. 典型岩溶土壤微生物丰度与多样性及其对碳循环的指示意义[J]. 环境科学, 2014, 35(11): 4284-4290.
Jin Z J, Tang H F, Li M, et al. Microbial community abundance and diversity in typical Karst ecosystem to indicate soil carbon cycle[J]. Environmental Science, 2014, 35(11): 4284-4290.
- [4] 李小林, 颜森, 张小平, 等. 铅锌矿区重金属污染对微生物数量及放线菌群落结构的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(3): 468-475.
Li X L, Yan S, Zhang X P, et al. Response of microbe quantity and actinomycetes community of heavy metal contaminated soils in Lead-Zinc mine[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(3): 468-475.
- [5] 王秀丽, 徐建民, 姚槐应, 等. 重金属铜、锌、镉、铅复合污染对土壤环境微生物群落的影响[J]. 环境科学学报, 2003, 23(1): 22-27.
Wang X L, Xu J M, Yao H Y, et al. Effects of Cu, Zn, Cd and Pb compound contamination on soil microbial community[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2003, 23(1): 22-27.
- [6] 李强, 靳振江, 杨荣梅. 典范对应分析在重金属污染区土壤性质及土壤酶活性关系中的应用——以阳朔县思的村为例[J]. 热带地理, 2014, 34(1): 14-19.
Li Q, Jin Z J, Yang R M. Relationship between soil properties and soil enzyme activities in heavy metal contaminated area based on canonical correspondence analysis: a case study of Sidi Village, Yangshuo[J]. Tropical Geography, 2014, 34(1): 14-19.
- [7] 李强, 胡清菁, 张超兰, 等. 基于土壤酶总体活性评价铅锌尾矿砂坍塌区土壤重金属污染[J]. 生态环境学报, 2014, 23(11): 1839-1844.
Li Q, Hu Q J, Zhang C L, et al. Assessment on heavy metals in the Pb-Zn mine tailing dam collapse area based on total enzyme activity index[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(11): 1839-1844.
- [8] Hiroki M. Effects of heavy metal contamination on soil microbial

- population[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1992, **38**(1): 141-147.
- [9] 刁展. 外源重金属对不同类型土壤养分及微生物活性的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [10] Jastrow J D, Amonette J E, Bailey V L. Mechanisms controlling soil carbon turnover and their potential application for enhancing carbon sequestration[J]. *Climatic Change*, 2007, **80**(1-2): 5-23.
- [11] 谢文军, 周健民, 王火焰. 重金属 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 及氯氰菊酯对不同施肥模式土壤微生物功能多样性的影响[J]. *环境科学*, 2008, **29**(10): 2919-2924.
- Xie W J, Zhou J M, Wang H Y. Influence of Cu^{2+} , Cd^{2+} and cypermethrin on microbial functional diversity in different fertilization soils[J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(10): 2919-2924.
- [12] Chen L J, Feng Q, Li C S, *et al.* Impacts of aquaculture wastewater irrigation on soil microbial functional diversity and community structure in arid regions[J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**(1): 11193.
- [13] Li Q, Hu Q J, Zhang C L, *et al.* The effect of toxicity of heavy metals contained in tailing sands on the organic carbon metabolic activity of soil microorganisms from different land use types in the karst region[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **74**(9): 6747-6756.
- [14] 李强, 李忠义, 靳振江, 等. 基于典范对应分析的铅锌矿尾砂坝坍塌污染土壤特征研究[J]. *地质论评*, 2014, **60**(2): 443-448.
- Li Q, Li Z Y, Jin Z J, *et al.* Relationships between soil and environment in pollution of agricultural soils from a tailing spill at a Pb-Zn mine based on canonical correspondence analysis[J]. *Geological Review*, 2014, **60**(2): 443-448.
- [15] 胡清菁, 张超兰, 靳振江, 等. 铅锌矿尾砂重金属污染物对不同土地利用类型土壤性质影响的典范对应分析[J]. *岩矿测试*, 2014, **33**(5): 714-722.
- Hu Q J, Zhang C L, Jin Z J, *et al.* Canonical correspondence analysis for soil properties and heavy metal pollution from Pb-Zn mine tailings in different land use types[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2014, **33**(5): 714-722.
- [16] 曹建华, 袁道先, 潘根兴. 岩溶生态系统中的土壤[J]. *地球科学进展*, 2003, **18**(1): 37-44.
- Cao J H, Yuan D X, Pan G X. Some soil features in karst ecosystem[J]. *Advance in Earth Science*, 2003, **18**(1): 37-44.
- [17] GB 5749-1985, 生活饮用水卫生标准[S].
- [18] GB/T 17138-1997, 土壤质量 铜、锌的测定 火焰原子吸收分光光度法[S].
- [19] GB/T 17141-1997, 土壤质量 铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法[S].
- [20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999. 13-195, 205-227.
- [21] 黄雅丹, 靳振江, 李强, 等. 17 β -雌二醇对岩溶稻田土壤微生物群落的影响[J]. *生态环境学报*, 2016, **25**(10): 1721-1726.
- Huang Y D, Jin Z J, Li Q, *et al.* Responses of karst paddy soil microbial community structure to 17 β -estradiol in the simulated experiments[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, **25**(10): 1721-1726.
- [22] 刘畅, 黄雅丹, 张莹, 等. 培养条件下双酚 A 对稻田土壤微生物群落特征的影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(11): 4380-4388.
- Liu C, Huang Y D, Zhang Y, *et al.* Effects of bisphenol A on characteristics of paddy soil microbial community under different cultural conditions[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(11): 4380-4388.
- [23] 靳振江, 李强, 黄静云, 等. 典型岩溶生态系统土壤酶活性、微生物数量、有机碳含量及其相关性——以丫吉岩溶试验场为例[J]. *农业环境科学学报*, 2013, **32**(2): 307-313.
- Jin Z J, Li Q, Huang J Y, *et al.* Relationship among soil organic carbon, enzyme activities and microbial numbers in typical karst ecosystem: a case study of Yaji karst experimental site, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, **32**(2): 307-313.
- [24] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geo Journal*, 1969, **2**(3): 108-118.
- [25] Pan Y Y, Bonten L T C, Koopmans G F, *et al.* Solubility of trace metals in two contaminated paddy soils exposed to alternating flooding and drainage[J]. *Geoderma*, 2016, **261**: 59-69.
- [26] Rinklebe J, Shaheen S M, Yu K W. Release of As, Ba, Cd, Cu, Pb, and Sr under pre-definite redox conditions in different rice paddy soils originating from the U. S. A. and Asia[J]. *Geoderma*, 2016, **270**: 21-32.
- [27] 黄碧燕. 桂林市菜地土壤重金属含量及其风险评价[J]. *广西农学报*, 2010, **25**(4): 34-36.
- Huang B Y. Heavy metal content and their risk evaluation in vegetable field soil of Guilin City[J]. *Journal of Guangxi Agriculture*, 2010, **25**(4): 34-36.
- [28] 宋波, 唐丽嵘. 桂林市土壤和蔬菜镉含量调查及食用安全性评估[J]. *生态与农村环境学报*, 2012, **28**(3): 238-242.
- Song B, Tang L R. A survey of cadmium concentrations in vegetables and soils in Guilin and food safety assessment of vegetables[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2012, **28**(3): 238-242.
- [29] Mummey D L, Stahl P D, Buyer J S. Microbial biomarkers as an indicator of ecosystem recovery following surface mine reclamation[J]. *Applied Soil Ecology*, 2002, **21**(3): 251-259.
- [30] Anderson T H, Domsch K H. Application of eco-physiological quotients ($q\text{CO}_2$ and $q\text{D}$) on microbial biomasses from soils of different cropping histories[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1990, **22**(2): 251-255.
- [31] 华建峰, 林先贵, 蒋倩, 等. 砷矿区农田土壤微生物群落碳源代谢多样性[J]. *应用生态学报*, 2013, **24**(2): 473-480.
- Hua J F, Lin X G, Jiang Q, *et al.* Diversity of carbon source metabolism of microbial community in farmland soils in an arsenic mining area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, **24**(2): 473-480.
- [32] 杨金水, 杨扬, 孙良明, 等. 铅锌矿区土壤真菌响应重金属污染的群落组成变化[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2017, **53**(2): 387-396.
- Yang J S, Yang Y, Sun L M, *et al.* Characterization of soil fungal community in response to heavy metal pollution in Lead-Zinc mining area[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2017, **53**(2): 387-396.
- [33] Metuku R P, Burra S, Nidavolu S V S S S L, *et al.* Selection

- of highest lignolytic white rot fungus and its molecular identification[J]. *Journal of Cell and Tissue Research*, 2011, **11** (1): 2557-2562.
- [34] 罗清, 彭程, 叶波平. 青霉属真菌研究新进展[J]. *药物生物技术*, 2016, **23**(5): 452-456.
- Luo Q, Peng C, Ye B P. New advances in research of the genus *Penicillium*[J]. *Pharmaceutical Biotechnology*, 2016, **23**(5): 452-456.
- [35] 宋森, 彭云湘, Israel P, 等. 草酸青霉对含钾矿物风化及钾溶出的影响[J]. *微生物学通报*, 2015, **42**(7): 1410-1417.
- Song M, Peng Y X, Israel P, *et al.* Bioweathering and K release of K-bearing minerals by *Penicillium oxalicum*[J]. *Microbiology China*, 2015, **42**(7): 1410-1417.
- [36] Greger M. Metal availability, uptake, transport and accumulation in plants[A]. In: Prasad M N V, (Ed.). *Heavy Metal Stress in Plants*[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2004. 1-27.
- [37] 方芳, 靳振江, 李强, 等. 岩溶区与非岩溶区土壤有机碳、养分及特征元素对比[J]. *桂林理工大学学报*, 2016, **36** (3): 550-556.
- Fang F, Jin Z J, Li Q, *et al.* Comparison of soil organic carbon nutrients and characteristic elements between karst and non-karst area[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2016, **36** (3): 550-556.
- [38] 靳振江, 程亚平, 李强, 等. 会仙喀斯特溶洞湿地、稻田和旱田土壤有机碳含量及其与养分的关系[J]. *湿地科学*, 2014, **12**(4): 485-490.
- Jin Z J, Cheng Y P, Li Q. *et al.* Content of soil organic carbon and its relationship with nutrients in karst cave wetlands, paddy fields and dry farmlands in Huixian[J]. *Wetland Science*, 2014, **12**(4): 485-490.
- [39] Hanke A, Cerli C, Muhr J, *et al.* Redox control on carbon mineralization and dissolved organic matter along a chronosequence of paddy soils[J]. *European Journal of Soil Science*, 2013, **64**(4): 476-487.
- [40] 陈志杰, 韩士杰, 张军辉. 土地利用变化对漳江口红树林土壤有机碳组分的影响[J]. *生态学杂志*, 2016, **35**(9): 2379-2385.
- Chen Z J, Han S J, Zhang J H. Effects of land use change on soil organic carbon fractions in mangrove wetland of Zhangjiangkou[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, **35**(9): 2379-2385.
- [41] 黄靖宇, 宋长春, 宋艳宇, 等. 湿地垦殖对土壤微生物量及土壤溶解有机碳、氮的影响[J]. *环境科学*, 2008, **29**(5): 1380-1387.
- Huang J Y, Song C C, Song Y Y, *et al.* Influence of freshwater marsh tillage on microbial biomass and dissolved organic carbon and nitrogen[J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(5): 1380-1387.
- [42] 李忠佩, 吴晓晨, 陈碧云. 不同利用方式下土壤有机碳转化及微生物群落功能多样性变化[J]. *中国农业科学*, 2007, **40**(8): 1712-1721.
- Li Z P, Wu X C, Chen B Y. Changes in transformation of soil organic carbon and functional diversity of soil microbial community under different land use patterns [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, **40**(8): 1712-1721.
- [43] Avidano L, Gamalero E, Cossa G P, *et al.* Characterization of soil health in an Italian polluted site by using microorganisms as bioindicators[J]. *Applied Soil Ecology*, 2005, **30**(1): 21-33.
- [44] 张宇宁, 梁玉婷, 李广贺. 油田土壤微生物群落碳代谢与理化因子关系研究[J]. *中国环境科学*, 2010, **30**(12): 1639-1644.
- Zhang Y N, Liang Y T, Li G H. Studies on relationship between carbon metabolism of soil microbial community and soil physicochemical factors [J]. *China Environmental Science*, 2010, **30**(12): 1639-1644.
- [45] Carney K M, Hungate B A, Drake B G, *et al.* Altered soil microbial community at elevated CO₂ leads to loss of soil carbon [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, **104**(12): 4990-4995.
- [46] Zhao S, Liu D Y, Ling N, *et al.* Bio-organic fertilizer application significantly reduces the *Fusarium oxysporum* population and alters the composition of fungi communities of watermelon *Fusarium* wilt rhizosphere soil [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, **50**(5): 765-774.

CONTENTS

Estimation of Fine Particle ($PM_{2.5}$) Emission Inventory from Cooking: Case Study for Shanghai	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1971)
Chemical Characterization, Spatial Distribution, and Source Identification of Organic Matter in $PM_{2.5}$ in summertime Shanghai, China	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, JING Sheng-ao, <i>et al.</i> (1978)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Salts in $PM_{2.5}$ in the Southern Suburbs of Beijing	GAO Han-yu, WEI Jing, WANG Yue-si (1987)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust $PM_{2.5}$ During Spring in Tianjin Using the Quadrat Sampling Method	ZHAO Jing-qi, JI Ya-qin, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (1994)
HONO Pollution Characteristics and Nighttime Sources During Autumn in Guangzhou, China	TIAN Zhi-lin, YANG Wen-da, YU Xiao-fang, <i>et al.</i> (2000)
Sulfur Sources and Oxidation Pathways in Summer Aerosols from Nanjing Northern Suburbs Using S and O Isotopes	HAN Xun, REN Jie, CHEN Shan-li, <i>et al.</i> (2010)
Methods for Determining and Applications of High-Resolution Vehicle Emission Inventory at County Scale	FAN Shou-bin, GUO Jin-jin, LI Xue-feng (2015)
Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Emitted from Typical Industrial Biomass Boilers	LIN Yu-jun, BAI Li, WANG Huan-xiang, <i>et al.</i> (2023)
Research of Parameter Uncertainty for the HSPF Model Under Different Temporal Scales	PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, MA Wen-jing (2030)
Contribution of Nitrogen Sources in Water Sources by Combining Nitrogen and Oxygen Isotopes and SIAR	JIN Zan-fang, ZHANG Wen-liao, ZHENG Qi, <i>et al.</i> (2039)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds in Baiyangdian Lake	GAO Qiu-sheng, ZHAO Yong-hui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2048)
Fluorescent Characteristics and Environmental Significance of Particulate Organic Matter in Lake Taihu, China	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i> (2056)
Distribution and Settlement of Microplastics in the Surface Sediment of Yangtze Estuary	ZHU Xiao-tong, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (2067)
Water Chemistry and Characteristics of Dissolved Organic Carbon During the Wet Season in Wulixia Reservoir, SW China	LU Xiao-xuan, LI Qiang, JIN Zhen-jiang, <i>et al.</i> (2075)
Bioavailability of Dissolved Organic Carbon in Rivers for Typical Vegetation Types in the Permafrost Regions on the Qinghai-Tibet Plateau	MA Xiao-liang, LIU Gui-min, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (2086)
Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) and Relationship with Dissolved Heavy Metals in a Peri-urban and an Urban River	LIANG Meng-qi, SHAO Mei-ling, CAO Chang-li, <i>et al.</i> (2095)
Migration and Transformation of Dissolved Organic Matter in Karst Water Systems and an Analysis of Their Influencing Factors	ZHANG Lian-kai, LIU Peng-yu, QIN Xiao-qun, <i>et al.</i> (2104)
Source and Distribution of Dissolved Metal Ions in the Backwater Area of Pengxi River in Three Gorges Reservoir	ZHAO Xiao-song, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (2117)
Differences in Diffusive Fluxes of Nutrients from Sediment Between the Natural River Areas and Reservoirs in the Lancang River Basin	WANG Xue, CHENG Bao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (2126)
Nutrient Distribution Characteristics of the Sediment-water System in the Xiangxi River During the Impoundment of TGR	SU Qing-qing, LIU De-fu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2135)
Effects of Submerged Macrophytes on Different Phosphorus Fractions in Overlying Water and Interstitial Water	YANG Wen-bin, GAO Shun-feng, WAN Rui, <i>et al.</i> (2145)
Distribution Characteristics and Fluxes of Nitrogen and Phosphorus at the Sediment-water Interface of Yuqiao Reservoir	WEN Shuai-long, GONG Wan-qing, WU Tao, <i>et al.</i> (2154)
Distribution of Phosphorus Fractions in Surface Sediments of Minjiang Mainstreams	YANG Geng, QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, <i>et al.</i> (2165)
Nitrate Uptake Kinetics and Correlation Analysis in an Agricultural Drainage Ditch	LI Ru-zhong, YIN Qi-he, GAO Su-di, <i>et al.</i> (2174)
Influencing Factors for Phosphorus Removal by Modified Bio-ceramic Substrates Coated with ZnAl-LDHs Synthesized by Different Modification Conditions	XIANG Yang, ZHANG Xiang-ling, LEI Yu, <i>et al.</i> (2184)
Removal of Odorants in Drinking Water Using VUV/Persulfate	SUN Xin, SHI Lu-xiao, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (2195)
Degradation of OG with Peroxymonosulfate Activated by a $MnFe_2O_4$ -graphene Hybrid	XIA Wen-jun, LIU Feng, HAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism of As(V) Removal from Water by Lanthanum and Cerium Modified Biochars	LI Jin, ZU Yan-qun, LI Gang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption of Dissolved Organic Matter with Different Relative Molecular Masses on Inorganic Minerals and Its Influence on Carbamazepine Adsorption Behavior	LIANG Yu, HE Jiang-tao, ZHANG Si (2219)
Pollution Characteristics of Organophosphorus Flame Retardants in a Wastewater Treatment Plant	SUN Jia-wei, DING Wei-nan, ZHANG Zhan-en, <i>et al.</i> (2230)
Enhanced Coagulation as a Pretreatment for Low Temperature Wastewater	LIU Hai-long, REN Yu-xia, ZHANG Zhong-min (2239)
Operating Characteristics and Fouling Characteristics of a RO Membrane System for Desalination of Dyeing Wastewater	TAN Yu-jun, ZHANG Ze-tian, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (2249)
Optimization of the Nitrogen Removal Performance on the CANON Process in a Biofilm Reactor: From FBBR to MBBR	FU Kun-ming, LI Hui, ZHOU Hou-tian, <i>et al.</i> (2256)
Microbial Community Dynamics During Two Sludge Granulation Processes	GAO Jing-feng, ZHANG Li-fang, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2265)
Sludge Conditioning Performance of Polyaluminum, Polyferric, and Titanium Xerogel Coagulants	WANG Xiao-meng, WANG Xin, YANG Ming-hui, <i>et al.</i> (2274)
Effects of Heat and Heat-alkaline Treatments on Disintegration and Dissolved Organic Matter in Sludge	DAI Qin, ZHANG Wen-zhe, YU Pan-fen, <i>et al.</i> (2283)
Effect of Different Ratios of Anaerobic Time and Aeration Time on the Formation of Partial Nitrification Granules	LI Dong, GUO Yue-zhou, CAO Mei-zhong, <i>et al.</i> (2289)
Spatial and Temporal Variation of Mercury in Municipal Sewage Sludge in China	WANG Ning, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (2296)
Characteristics of N_2O Release and Influencing Factors in Grass-type and Algae-type Zones of Taihu Lake During Summer	ZHENG Xiao-lan, WEN Shuai-long, LI Xin, <i>et al.</i> (2306)
Analysis of Greenhouse Gas Emission Characteristics and Their Influencing Factors in the Algae Zone of Lake Taihu	JIA Lei, PU Yi-ni, YANG Shi-jun, <i>et al.</i> (2316)
Dynamics of CO_2 and N_2O in Seasonal Frozen Soil Profiles for a Typical Steppe in Inner Mongolia	LI Jin-bo, YAO Nan, LI Xiu, <i>et al.</i> (2330)
Characteristics of CO_2 Flux in a Mature Apple (<i>Malus domestica</i>) Orchard Ecosystem on the Loess Plateau	YANG Jian-feng, YANG Xiao-ni, WANG Jun-hua, <i>et al.</i> (2339)
Effects of Biochar Application Rates on Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil	QI Le, GAO Ming, GUO Xiao-min, <i>et al.</i> (2351)
Short-Term Effects of Different Fertilization Treatments on Greenhouse Gas Emissions from Northeast Black Soil	LI Ping, LANG Man, LI Miao, <i>et al.</i> (2360)
Eukaryotic Micro-plankton Community Diversity and Characteristics of Regional Distribution in the Yellow Sea by ITS High-throughput Sequencing	ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (2368)
Influence of Different Patterns of Discharge on Microbial Diffusion in Municipal Treated Wastewater	LANG Xiu-lu, SONG Zhi-wen, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (2380)
Impact of Tourism on Bacterial Communities of Karst Underground River: A Case Study from Two Caves in Fengdu, Chongqing	LÜ Xian-fu, HE Qiu-fang, WANG Feng-kang, <i>et al.</i> (2389)
Diversity of the Microbial Community in Rice Paddy Soil with Biogas Slurry Irrigation Analyzed by Illumina Sequencing Technology	ZHU Jin-shan, ZHANG Hui, MA Lian-jie, <i>et al.</i> (2400)
Effect of Biochar Amendment on Physicochemical Properties and Fungal Community Structures of Cinnamon Soil	YAN Hai-tao, YIN Quan-yu, DING Song-shuang, <i>et al.</i> (2412)
Carbon Metabolism Characteristics of the Karst Soil Microbial Community for Pb-Zn Mine Tailings	FANG Jun-jia, LI Qiang, LIU Chang, <i>et al.</i> (2420)
Denitrification Characteristics and Community Structure of Aerobic Denitrifiers from Lake and Reservoir Sediments	KANG Peng-liang, ZHANG Hai-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (2431)
Investigation of the Coupling Mechanism between Naphthalene Degradation and Denitrification of a Naphthalene Degraded Bacterial Consortium Under Denitrification	ZHANG Ze-yu, WANG Ming-xia, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2438)
Spatial Distribution Study and Pollution Assessment of Pb in Soils in the Xijiang River Drainage of Guangxi	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i> (2446)
Effects of Agricultural Activities on Soil Mercury Changes in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	CHEN Qiu-yu, SUN Song, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2456)
Screening and Identification of Arsenic-resistant Endophytic Bacteria from Different Rice Tissues (<i>Oryza sativa</i> L.) in Different Growth Stages	WANG Bo-xun, WANG Xue-dong, DUAN Gui-lan (2464)
Characteristics of Mercury Transformation in Soil and Accumulation in Rice Plants in an Acidic Purple Paddy Soil Area	LI Yu-qin, SUN Tao, DENG Han, <i>et al.</i> (2472)
Life Cycle Environmental Impact Assessment on Different Modes of Greenhouse Vegetable Production in the North China Plain	XU Qiang, HU Ke-lin, LI Ji, <i>et al.</i> (2480)
Health Effects of $PM_{2.5}$ Based on Bacterial Toxicity Test and Transcriptional Analysis in Lungs of Mice	SONG Peng-cheng, LU Shu-yu, WEI Yong-jie, <i>et al.</i> (2489)
Socio-economic Factors Influencing the Spatial Distribution of $PM_{2.5}$ Concentrations in China: An Exploratory Analysis	DUAN Jie-xiong, ZHAI Wei-xin, CHENG Cheng-qi, <i>et al.</i> (2498)