

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第1期

Vol.37 No.1

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

碳质大气颗粒物的扫描质子微探针分析 包良满,刘江峰,雷前涛,李晓林,张桂林,李燕 (1)

中国8个城市大气多溴联苯醚的污染特征及人体暴露水平 林海涛,李琦路,张干,李军 (10)

广州城区秋冬季大气颗粒物中WSOC吸光性研究 黄欢,毕新慧,彭龙,王新明,盛国英,傅家谟 (16)

南京地区大气PM_{2.5}潜在污染源硫碳同位素组成特征 石磊,郭照冰,姜文娟,芮茂凌,曾钢 (22)

青奥会前后南京PM_{2.5}重金属污染水平与健康风险评估 张恒,周自强,赵海燕,熊正琴 (28)

南昌市秋季大气PM_{2.5}中金属元素富集特征及来源分析 林晓辉,赵阳,樊孝俊,胡恭任,于瑞莲 (35)

南京北郊冬春季大气能见度影响因子贡献研究 马佳,于兴娜,安俊琳,朱彬,于超,朱俊,夏航 (41)

边界层低空急流导致北京PM_{2.5}迅速下降及其形成机制的个例分析 廖晓农,孙兆彬,何娜,赵普生,马志强 (51)

电厂燃煤烟尘PM_{2.5}中化学组分特征 王毓秀,彭林,王燕,张腾,刘海利,牟玲 (60)

2014年APEC期间北京市空气质量改善分析 程念亮,李云婷,张大伟,陈添,孙峰,李令军,李金香,周一鸣,杨妍妍,姜磊 (66)

APEC会议期间北京机动车排放控制效果评估 樊守彬,田灵娣,张东旭,郭津津 (74)

晋城城市扬尘化学组成特征及来源解析 王燕,彭林,李丽娟,王毓秀,张腾,刘海利,牟玲 (82)

北京市混凝土搅拌站颗粒物排放特征研究 薛亦峰,周震,钟连红,闫静,曲松,黄玉虎,田贺忠,潘涛 (88)

长株潭地区人为源氨排放清单及分布特征 尤翔宇,刘湛,张青梅,漆燕,向仁军,苏艳蓉 (94)

长春城市水体夏秋季温室气体排放特征 温志丹,宋开山,赵莹,邵田田,李思佳 (102)

查干湖和新立城水库秋季水体悬浮颗粒物和CDOM吸收特性 李思佳,宋开山,赵莹,穆光熠,邵田田,马建行 (112)

不同地质背景下河流水化学特征及影响因素研究:以广西大溶江、灵渠流域为例 孙平安,于爽,莫付珍,何师意,陆菊芳,原雅琼 (123)

大渡河老鹰岩河段的水生生物群落结构及水质评价 黄允优,曾焯,刘守江,马永红,胥晓 (132)

西湖龙泓洞流域暴雨径流氮磷流失特征 杨帆,蒋秩锋,王翠翠,黄晓楠,吴芝斌,陈琳 (141)

合肥城郊典型农业小流域土壤磷形态及淋失风险分析 樊慧慧,李如忠,裴婷婷,张瑞钢 (148)

辽河入海口及城市段柱状沉积物金属元素含量及分布特征 王维契,周俊丽,裴淑玮,刘征涛 (156)

水源水库沉积物中营养元素分布特征与污染评价 黄廷林,刘飞,史建超 (166)

低分子量有机酸对三峡水库消落区土壤中汞赋存形态及其活性的影响 游蕊,梁丽,覃蔡清,邓晗,王定勇 (173)

北京市凉水河表层沉积物中砷含量及其赋存形态 王馨慧,单保庆,唐文忠,张超,王闯 (180)

紫外辐射对小球藻混凝效果作用途径探讨 王文东,张轲,许洪斌,刘国旗 (187)

二氧化钛光催化氧化阿散酸 许文泽,杨春风,李静,李建斐,刘会芳,胡承志 (193)

紫外光照下盐酸环丙沙星的光解性能 段伦超,王凤贺,赵斌,陈亚君 (198)

氢氧化镧-天然沸石复合材料对水中低浓度磷酸盐的吸附作用 林建伟,王虹,詹艳慧,陈冬梅 (208)

纳米TiO₂吸附HgCl₂水溶液中Hg(II) 周雄,张金洋,王定勇,覃蔡清,徐凤,罗程钟,杨熹 (220)

好氧生化污水处理厂化学品暴露预测模型构建 周林军,刘济宁,石利利,冯洁,徐炎华 (228)

3种苯胺类化学品在好氧污水处理模拟系统中的降解特性 古文,周林军,刘济宁,陈国松,石利利,徐炎华 (240)

Fe(II)活化过硫酸钠深度处理工业园区污水处理厂出水 朱松梅,周振,顾凌云,蒋海涛,任佳懿,王罗春 (247)

长江三角洲区域表土中多环芳烃的近期分布与来源 李静雅,吴迪,许芸松,李向东,王喜龙,曾超华,付晓芳,刘文新 (253)

直链烷基苯指示城市化过程初步研究 徐特,曾辉,倪宏刚 (262)

龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征 刘硕,吴泉源,曹学江,王集宁,张龙龙,蔡东全,周历媛,刘娜 (270)

水分减少与增温处理对冬小麦生物量和土壤呼吸的影响 吴杨周,陈健,胡正华,谢燕,陈书涛,张雪松,申双和,陈曦 (280)

中水浇灌对土壤重金属污染的影响 周益奇,刘云霞,傅慧敏 (288)

生物质炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响 安艳,姬强,赵世翔,王旭东 (293)

3种工业有机废弃物对铅锌尾矿生物化学性质及植物生长的影响 彭禧柱,杨胜香,李凤梅,曹建兵,彭清静 (301)

丛枝菌根真菌对铈污染土壤上玉米生长和铈吸收的影响 王芳,郭伟,马朋坤,潘亮,张君 (309)

珠江三角洲典型区域农产品中邻苯二甲酸酯(PAEs)污染分布特征 李彬,吴山,梁金明,邓杰帆,王珂,梁文立,曾彩明,彭四清,张天彬,杨国义 (317)

三峡库区重金属的生物富集、生物放大及其生物因子的影响 韦丽丽,周琼,谢从新,王军,李君 (325)

起源喀斯特溶洞湿地稻田与旱地土壤的微生物数量、生物量及土壤酶活性比较 靳振江,曾鸿鹄,李强,程亚平,汤华峰,李敏,黄炳富 (335)

序批式生物反应器填埋场脱氮微生物多样性分析 李卫华,孙英杰,刘子梁,马强,杨强 (342)

铁氮掺杂碳纳米管/纤维复合物制备及其催化氧还原的效果 杨婷婷,朱能武,芦昱,吴平霄 (350)

运行微生物燃料电池减排稻田土壤甲烷的研究 邓欢,蔡旅程,姜允斌,钟文辉 (359)

通风策略对污泥生物干化过程中含氮气体和甲烷排放的影响 齐鲁,魏源送,张俊亚,赵晨阳,才兴,张媛丽,邵春岩,李洪枚 (366)

高温生物滤塔处理污泥干化尾气的研究 陈文和,邓明佳,罗辉,丁文杰,李琳,林坚,刘俊新 (377)

应用FCM-qPCR方法定量检测水中常见病原体 王明星,柏耀辉,梁金松,霍咏,杨婷婷,袁林江 (384)

乙腈和正己烷对环境特征污染物免疫传感分析的影响 娄雪宁,周丽萍,宋丹,杨荣,龙峰 (391)

废弃菌糠资源化过程中的成分变化规律及其环境影响 楼子墨,王卓行,周晓馨,傅瑞琪,刘榆,徐新华 (397)

《环境科学》征订启事(9) 《环境科学》征稿简则(15) 信息(50, 165, 186, 287)

起源喀斯特溶洞湿地稻田与旱地土壤的微生物数量、生物量及土壤酶活性比较

靳振江^{1,2,3}, 曾鸿鹄^{1,3}, 李强^{2*}, 程亚平^{1,3}, 汤华峰³, 李敏³, 黄炳富³

(1. 桂林理工大学广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 桂林 541004; 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. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 桂林 541004)

摘要: 本研究的目的是比较起源于天然湿地的稻田湿地与旱地土壤微生物特征的差异. 以桂林会仙喀斯特溶洞湿地系统内的稻田湿地、天然湿地和旱地表层(0~20 cm)土壤为研究对象, 采用平板菌落计数法与氯仿熏蒸提取法和试剂盒提取法分别测定微生物数量与微生物生物量和微生物 DNA, 采用比色法测定土壤酶活性. 结果表明, 稻田湿地的细菌数量为 $(4.36 \pm 2.25) \times 10^7$ CFU·g⁻¹, 显著高于天然湿地和旱地; 稻田湿地和旱地的真菌数量分别为 $(6.41 \pm 2.16) \times 10^4$ CFU·g⁻¹ 和 $(6.52 \pm 1.55) \times 10^4$ CFU·g⁻¹, 显著高于天然湿地, 而旱地的放线菌数量为 $(2.65 \pm 0.72) \times 10^6$ CFU·g⁻¹, 显著高于天然湿地. 稻田湿地微生物 DNA 质量分数为 $(11.92 \pm 3.69) \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 显著高于旱地. 稻田湿地的蔗糖酶活性为 $(66.87 \pm 18.61) \text{mg} \cdot (\text{g} \cdot 24 \text{h})^{-1}$, 显著高于旱地, 天然湿地的碱性磷酸酶活性为 $(2.07 \pm 0.99) \text{mg} \cdot (\text{g} \cdot 2 \text{h})^{-1}$, 显著高于旱地. 统计分析显示, 碱性磷酸酶活性、微生物生物量碳和微生物 DNA 质量分数与土壤 pH、土壤有机碳、总氮、碱解氮、土壤水分、交换性 Ca²⁺ 和交换性 Mg²⁺ 呈显著的正相关关系, 蔗糖酶活性与前 4 种土壤因子也呈显著的正相关关系. 以上结果表明, 微生物生物量和微生物功能活性对会仙喀斯特溶洞湿地土地利用方式变化的反应比较敏感, 土壤含水量、pH、Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 等理化因子与土壤有机碳等养分是影响土壤微生物数量和活性的主要因子. 鉴于天然湿地和稻田湿地土壤微生物特征的相似性, 把适量稻田湿地作为一种特殊的人工湿地在喀斯特湿地系统的缓冲区和实验区中加以保留并加以保护较为合理.

关键词: 土地利用; 喀斯特溶洞湿地系统; 稻田湿地; 旱地; 土壤微生物

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)01-0335-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.01.043

Comparisons of Microbial Numbers, Biomasses and Soil Enzyme Activities Between Paddy Field and Dryland Origins in Karst Cave Wetland

JIN Zhen-jiang^{1,2,3}, ZENG Hong-hu^{1,3}, LI Qiang^{2*}, CHENG Ya-ping^{1,3}, TANG Hua-feng³, LI Min³, HUANG Bing-fu³

(1. Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. Karst Dynamics Laboratory, Ministry of Land and Resources and Guangxi, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: The purpose of this study is to compare microbial number, microbial biomass as well as soil enzyme activity between paddy field and dryland originated karst wetland ecosystems. The soil samples (0-20 cm) of uncultivated wetland, paddy field and dryland were collected in Huixian karst cave wetland, Guilin, China. Microbial numbers and biomass were detected using dilute plate incubation counting and chloroform fumigation-extraction, respectively. Microbial DNA was extracted according to the manufacturer's instructions of the kit. Microbial activity was examined using soil enzyme assays as well. The result showed that the bacteria number in paddy field was $(4.36 \pm 2.25) \times 10^7$ CFU·g⁻¹, which was significantly higher than those in wetland and dryland. Fungi numbers were $(6.41 \pm 2.16) \times 10^4$ CFU·g⁻¹ in rice paddy and $(6.52 \pm 1.55) \times 10^4$ CFU·g⁻¹ in wetland, which were higher than that in dryland. Actinomycetes number was $(2.65 \pm 0.72) \times 10^6$ CFU·g⁻¹ in dryland, which was higher than that in wetland. Microbial DNA concentration in rice paddy was $(11.92 \pm 3.69) \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, which was higher than that in dryland. Invertase activity was $(66.87 \pm 18.61) \text{mg} \cdot (\text{g} \cdot 24 \text{h})^{-1}$ in rice paddy and alkaline phosphatase activity was $(2.07 \pm 0.99) \text{mg} \cdot (\text{g} \cdot 2 \text{h})^{-1}$ in wetland, both of which were higher than those in dryland. Statistical analysis showed there was a significant positive correlation of microbial DNA content, alkaline phosphatase activity and microbial carbon with soil pH, soil organic carbon (SOC), total nitrogen, alkali-hydrolyzable

收稿日期: 2015-06-03; 修订日期: 2015-08-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41361054, 41003038, 51268008); 广西自然科学基金项目(2011GXNSFD018002, 2011GXNSFA018006, 2010GXNSFB013004); 岩溶动力学重点实验室基金项目(KDL2010-02, KDL2011-10); 广西高等学校立项科研项目(201204LX162, 201106LX229); 广西科学研究与技术开发计划项目(桂科合 14123001-13); 桂林市科学研究与技术开发计划项目(20140122-1); 广西高等学校高水平创新团队及卓越学者计划项目

作者简介: 靳振江(1974~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为生态学和环境微生物学, E-mail: zhenjiangjin@163.com

* 通讯联系人, E-mail: qiangli@163.com

nitrogen, soil moisture, exchangeable Ca^{2+} and exchangeable Mg^{2+} , as well as a significant positive correlation of interbase activity with the former three microbial factors. The above results indicated that microbial biomass and function responded much more sensitively to land-use change than microbial number in karst cave wetland system. Soil moisture, SOC and some factors induced by land-use change could affect mainly microbiological characteristics. We suggest that rice paddy, a kind of constructed wetland, should be kept and protected in experimental area or buffer area of Huixian karst cave wetland in the light of its similar property with the natural wetland.

Key words: land-use; karst cave wetland system; paddy field; dryland; soil microbe

当前,稻作农业仍然是保证我国粮食安全的主要支撑^[1].在桂北喀斯特区的桂林地区,2013年的水稻种植面积更是占到了粮食作物播种面积的72.97%^[2].但是,一个不容回避的问题是,我国部分稻田是来自历史上不同时期对天然湿地的垦殖^[3].一方面,目前我国的粮食危机日益凸显,再加上农民对替代生计选择的意愿难以统一^[4],因此大规模的退稻还湿不太可能;另一方面,作为人工湿地一种类型,稻田湿地不仅具有天然湿地的部分生态功能^[5],南方稻田还具有土壤固碳的功能^[1,6].而且,稻作农业的美学价值和其它生态系统服务功能逐渐被业界所认识和重视^[7,8].2011年11月,苏州市率先立法,将水稻田湿地纳入湿地保护范围,这为稻田湿地的保护提供了法律依据^[9].在桂北喀斯特地区,有我国最大的天然喀斯特溶洞湿地——会仙湿地^[10].由于历史原因,除水体外,会仙天然湿地中的陆地部分已经几乎不复存在,只有零星的小斑块状湿地存在,取而代之的是几乎全部垦殖为农业用地.在农业用地中,稻田湿地是一种常见和典型农业用地类型,是会仙湿地的重要组成部分,也是会仙湿地生态系统中的重要景观类别^[11],在离湿地水系较远的地方也有部分旱地存在.2012年4月,桂林会仙湿地被列入国家湿地公园试点加以保护,并明确提出要把稻田湿地作为一种湿地类型加以保留和保护^[12].

在微观方面,从天然湿地到稻田湿地和旱地,随着土地利用方式的改变,土壤碳库受到扰动,土壤微生物群落结构和功能也可能发生相应的变化^[13].其主要原因不是土地利用类型本身的变化,而是土地利用方式改变带来的土壤理化性质的改变造成的^[14].对于我国南方起源天然湿地的稻田湿地或旱地微生物特点研究,目前的研究主要集中在荆江湿地^[15]、鄱阳湖湿地^[16]、纳帕海湿地^[17,18]、崇明岛河口湿地^[19,20]和洞庭湖湿地^[21]等多个湿地系统.在这些研究结论中,认为土地利用变化造成土壤有机碳、氮和土壤水分等多个土壤因子变化是影响微生物群落结构和功能变化的重要生态因子.由于喀

斯特区土壤具有高pH和高钙镁含量等特殊性质^[22];而且,在会仙喀斯特溶洞湿地系统内,稻田湿地的pH、钙镁含量、阳离子交换量、土壤有机碳、碱解氮和总氮等指标均与天然湿地无显著差异,而显著高于旱地^[11],但是,与天然湿地相比,喀斯特稻田湿地与旱地微生物特点发生了哪些变化,哪些因素是影响微生物特性变化的主导因素,还未见报道.

因此,本文以会仙喀斯特溶洞湿地系统的天然湿地、稻田湿地和旱地表层土壤为研究对象,选取土壤微生物数量、微生物生物量和土壤酶活性这3个表征土壤微生物特性的经典指标,通过考察稻田湿地与天然湿地和旱地土壤微生物特性的异同,以期从微生物生态学角度为稻田湿地的保护提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 采样点描述

会仙湿地位于广西桂林临桂县东南部,地貌上处于峰丛洼地和峰林平原的交界地带,属于典型的喀斯特溶洞湿地.桂林市地处亚热带季风区,多年平均降雨量为1915.2 mm,多年平均蒸发量为1378.3 mm,年平均气温为18℃,4~8月降雨量占全年降雨量的70.32%.经过调查和走访了解到,湿地样地受到轻度的人为活动干扰,属于原始半干扰湿地,植被以矮小的禾本科杂草为主.稻田湿地与旱地的耕作历史均超过20年,样地均为散户经营,以施用无机肥为主,水稻收割后稻茬留高约15 cm,第二年插秧前翻入土壤.旱地多种植叶菜类蔬菜,采样时蔬菜已经采收,杂草较少.

1.2 采样方法

在桂林会仙喀斯特生态与石漠化综合防治研究基地内,2011年11月,选取4个稻田湿地、4个旱地和3个天然湿地作为样地,相同土地利用方式的不同样地之间,直线距离保持在200 m以上.在每块样地(均大于15 m×15 m)中,随机选取3个采样点,采集0~20 cm土壤样品后均匀混合为一个样本,带回实验室后去掉植物根系和碎片等侵入体,过

2 mm 筛,于 4℃ 短暂保存后备测. 会仙喀斯特系统的土壤理化因子见表 1^[11].

表 1 会仙喀斯特溶洞湿地系统的土壤因子

Table 1 Soil factor properties in karst cave wetland ecosystem

土地利用方式	pH (H ₂ O)	土壤水分 /%	土壤有机碳 /g·kg ⁻¹	总氮 /g·kg ⁻¹	碱解氮 /mg·kg ⁻¹	阳离子交换量 /mol·kg ⁻¹	交换性钙 /mol·kg ⁻¹	交换性镁 /mol·kg ⁻¹	有效磷 /mg·kg ⁻¹
稻田湿地	7.91 ± 0.07	34.33 ± 7.57	22.33 ± 1.19	2.33 ± 0.35	156.83 ± 16.95	24.09 ± 8.15	1.22 ± 0.09	1.23 ± 0.21	0.43 ± 0.11
天然湿地	7.87 ± 0.17	29.75 ± 2.50	21.77 ± 1.42	2.28 ± 0.15	177.57 ± 42.38	19.46 ± 2.37	1.44 ± 0.30	1.34 ± 0.26	0.31 ± 0.17
旱地	6.64 ± 0.22	25.50 ± 2.38	12.78 ± 0.22	1.38 ± 0.17	117.25 ± 11.91	9.56 ± 3.02	1.01 ± 0.17	0.99 ± 0.09	0.36 ± 0.08

1.3 分析方法

1.3.1 土壤微生物的数量

土壤微生物的数量采用逐级稀释平板菌落计数法^[23]测定,细菌、真菌和放线菌的培养基分别采用牛肉膏蛋白胨、孟加拉红和高氏一号(Gause'1)培养基. 计数结果均以每克干土中的菌落数(CFU·g⁻¹)表示.

1.3.2 土壤微生物生物量和微生物熵

微生物生物量碳和微生物生物量氮采用氯仿熏蒸法测定,具体过程参考文献[24]进行. 采用 Mo BIO 公司的 DNA 快速提取试剂盒(Power Soil)提取土壤微生物总 DNA, DNA 质量浓度用 Quawell 超微量分光光度计 Q3000 测定. 微生物熵以微生物生物量碳质量分数与土壤有机碳质量分数之间的比值表征.

1.3.3 土壤酶活性

选取与土壤碳、氮和磷代谢有密切关系的蔗糖酶、脲酶和碱性磷酸酶活性代表总体土壤微生物活性,其测定参考文献[25]的方法. 这 3 个酶的测定分别采用 3,5-二硝基水杨酸比色法、苯酚-次氯酸钠比色法和磷酸苯二钠比色法.

1.4 数据处理与统计检验

对 3 类土地利用方式土壤中的微生物数量和土

壤酶活性的归一化处理用多属性决策法^[15]. 具体方法如下. 首先将所有样本的 3 个酶活性值与微生物数量分别进行归一化,得到单个样本归一化的酶活性值与微生物数量值,计算公式为:

$$x'_i = x_i / \sum_{i=1}^{11} x_i \quad (i = 1, 2, \dots, 11)$$

然后把每个样本归一化的 3 个酶活性值和微生物数量值分别相加后取算术平均值,得到单个样本归一化的酶活性值和微生物数量值. 不同土地利用方式下数据间差异的显著性检验采用 JMP 5.0.1 软件进行. 属性间相关性及其显著性则采用 SPSS 13.0 软件的 Pearson 相关进行检验.

2 结果与分析

2.1 土壤微生物的数量

从表 2 可以看出,稻田湿地土壤的细菌数量和微生物总数均高于旱地和天然湿地土壤,天然湿地土壤真菌数量和归一化的微生物数量均显著低于稻田湿地和旱地土壤. 旱地土壤中的放线菌数量显著高于天然湿地,而天然湿地土壤的真细菌比显著高于稻田湿地. 以上结果表明,这些不同的微生物数量指标对土地利用变化的响应并不相同.

表 2 会仙喀斯特溶洞天然湿地、稻田湿地和旱地土壤的微生物数量比较¹⁾

Table 2 Comparison of soil microbial numbers in Huixian karst cave wetland, paddy field and dryland

土地利用方式	细菌 × 10 ⁷ /CFU·g ⁻¹	真菌 × 10 ⁴ /CFU·g ⁻¹	放线菌 × 10 ⁶ /CFU·g ⁻¹	微生物总数 × 10 ⁷ /CFU·g ⁻¹	归一化的微生物总数	真细菌比 × 10 ⁻³
稻田湿地	4.36 ± 2.25 a	6.41 ± 2.16 a	1.93 ± 0.48 ab	4.56 ± 2.28 a	0.119 ± 0.037 a	1.71 ± 0.91 b
天然湿地	0.61 ± 0.49 b	2.92 ± 1.72 b	1.44 ± 0.61 b	0.76 ± 0.55 b	0.045 ± 0.025 b	6.70 ± 3.79 a
旱地	1.42 ± 0.62 b	6.52 ± 1.55 a	2.65 ± 0.72 a	2.11 ± 0.41 b	0.096 ± 0.015 a	3.48 ± 1.46 ab

1) 表中的数字形式为(平均值 ± 标准差),其后的小写字母表示变量在 0.05 水平上的差异显著性,下同

2.2 土壤微生物生物量和微生物熵

从表 3 可以看出,尽管天然湿地和稻田湿地土壤中的微生物生物量碳和微生物生物量氮数值较大,但二者之间均无显著差异. 微生物 DNA 质量分数在稻田湿地土壤中显著高于旱地土壤. 微生物生物量碳氮比和微生物熵在 3 种土地利用方式土壤中均无显

著差异. 表明在这几个表征微生物生物量的指标中,微生物 DNA 质量分数对土地利用变化较为敏感.

2.3 土壤酶活性

从表 4 可以看出,稻田湿地土壤的蔗糖酶活性显著高于旱地土壤. 天然湿地土壤的蔗糖酶活性显著高于旱地土壤,脲酶活性和归一化的酶活性在 3

种土地利用方式土壤中均无显著差异,表明在喀斯特生态系统中,蔗糖酶活性与碱性磷酸酶活性受土地利用方式变化的影响较为显著. 综合表 2~4 的

数据不难发现,天然湿地土壤的微生物指标具有较大的变异性,表明天然湿地的微生物分布具有较高的不均一性.

表 3 会仙喀斯特溶洞天然湿地、稻田湿地和旱地土壤的微生物生物量和微生物熵比较

Table 3 Comparison of soil microbial biomasses and quotients in Huixian karst cave wetland, paddy and dryland

土地利用方式	微生物生物量碳 /mg·kg ⁻¹	微生物生物量氮 /mg·kg ⁻¹	微生物 DNA /μg·g ⁻¹	微生物生物 量碳氮比	微生物熵 ×10 ⁻³
稻田湿地	267.07 ± 85.34 a	21.26 ± 3.22 a	11.92 ± 3.69 a	12.38 ± 2.99 a	12.00 ± 3.92 a
天然湿地	273.80 ± 115.34 a	20.96 ± 10.41 a	9.51 ± 5.11 ab	14.38 ± 6.55 a	12.33 ± 4.51 a
旱地	159.13 ± 48.62 a	16.00 ± 6.77 a	5.24 ± 1.38 b	10.87 ± 4.26 a	12.25 ± 3.95 a

表 4 会仙喀斯特溶洞天然湿地、稻田湿地和旱地的土壤酶活性比较

Table 4 Comparison of soil enzyme activities in Huixian karst cave wetland, paddy field and dryland

土地利用方式	蔗糖酶活性 /mg·(g·24 h) ⁻¹	脲酶活性 /mg·(g·24 h) ⁻¹	碱性磷酸酶活性 /mg·(g·2 h) ⁻¹	归一化的酶活性
稻田湿地	66.87 ± 18.61 a	1.57 ± 0.32 a	1.61 ± 0.51 ab	0.102 ± 0.022 a
天然湿地	51.56 ± 12.40 ab	1.35 ± 0.67 a	2.07 ± 0.99 a	0.074 ± 0.054 a
旱地	38.57 ± 6.96 b	1.71 ± 0.24 a	0.88 ± 0.08 b	0.073 ± 0.006 a

2.4 土壤微生物数量、微生物生物量和土壤酶活性与土壤理化因子的相关性

从表 5 可以看出,蔗糖酶活性、碱性磷酸酶活性、归一化的土壤酶活性、微生物生物量碳和微生物 DNA 质量分数与土壤 pH、有机碳质量分数、总氮质量分数、碱解氮质量分数、交换性钙和交换性镁质量分数之间大多呈显著的正相关关系,表明微生物生物量和微生物功能受土壤性质和养分的敏感调节.

2.5 土壤微生物数量、微生物生物量和土壤酶活

性之间的相关性

从表 6 可以看出,归一化的微生物总数与细菌数、真菌数、放线菌数和微生物总数之间均呈显著正相关关系. 归一化的酶活性与蔗糖酶活性和碱性磷酸酶活性之间均呈显著正相关关系. 微生物 DNA 质量分数与蔗糖酶活性、碱性磷酸酶、归一化的酶活性、微生物生物量碳和微生物生物量氮之间均呈显著正相关关系. 这些微生物指标之间的相互关系表明,与微生物数量相比,微生物生物量和微生物功能之间具有较为密切的内在关系.

表 5 土壤微生物数量、微生物生物量和土壤酶活性与土壤理化性质之间的相关性¹⁾

Table 5 Correlation of soil microbial number and biomass and soil enzyme activity with soil physico-chemical property

	pH	土壤水分	有机碳	总氮	碳氮比	碱解氮	阳离子交换量	交换性 Ca ²⁺	交换性 Mg ²⁺
细菌数	0.185	-0.300	0.217	0.092	0.379	-0.200	0.722 *	-0.293	-0.219
真菌数	-0.318	-0.560	-0.288	-0.439	0.452	-0.476	-0.018	-0.680 *	-0.675 *
真细菌比	0.071	0.643 *	0.106	0.263	-0.382	0.574	-0.186	0.570	0.351
放线菌数	-0.673 *	-0.732 *	-0.698 *	-0.762 **	0.150	-0.683 *	-0.108	-0.845 **	-0.903 **
微生物总数	0.159	-0.324	0.190	0.064	0.382	-0.224	0.712 *	-0.322	-0.250
归一化的微生物总数	-0.173	-0.586	-0.149	-0.299	0.439	-0.480	0.435	-0.653 *	-0.619 *
蔗糖酶活性	0.641 *	0.440	0.643 *	0.631 *	0.086	0.639 *	-0.065	0.316	0.293
脲酶活性	-0.257	-0.613 *	-0.336	-0.420	0.177	-0.470	0.203	-0.595	-0.377
碱性磷酸酶活性	0.730 *	0.626 *	0.675 *	0.787 **	-0.276	0.876 **	0.287	0.647 *	0.872 **
归一化的酶活性	0.706 *	0.417	0.641 *	0.684 *	-0.089	0.731 *	-0.332	0.381	0.601
微生物生物量碳	0.686 *	0.821 *	0.654 *	0.757 **	-0.288	0.842 **	0.019	0.792 **	0.835 **
微生物生物量氮	0.366	0.734 *	0.466	0.584	-0.431	0.537	-0.021	0.725 *	0.348
微生物 DNA	0.712 *	0.715 *	0.715 *	0.786 **	-0.177	0.834 **	0.213	0.650 *	0.615 *
微生物熵	0.082	0.486	-0.072	0.094	-0.543	0.414	-0.496	0.398	0.444
微生物生物量碳氮比	0.549	0.224	0.410	0.451	-0.023	0.538	0.097	0.275	0.719 *

1) * 和 ** 分别表示变量在 0.05 和 0.01 水平上的相关性,下同

表 6 土壤微生物数量、微生物生物量和土壤酶活性之间的相关性

Table 6 Correlation among soil microbial number, biomass and soil enzyme activity

	细菌数	真菌数	放线菌数	真细菌比	微生物总数	归一化的微生物总数	蔗糖酶活性	脲酶活性	碱性磷酸酶活性	归一化的酶活性	微生物生物量碳	微生物生物量氮	微生物商	微生物 DNA
真菌数	0.392													
放线菌数	0.201	0.771 **												
真细菌比	-0.689 *	-0.501	-0.325											
微生物总数	0.999 **	0.417	0.236	-0.696 *										
归一化的微生物总数	0.839 **	0.803 **	0.666 *	-0.717 *	0.857 **									
蔗糖酶活性	0.252	0.321	-0.112	0.080	0.246	0.240								
脲酶活性	0.100	0.420	0.411	-0.663 *	0.114	0.319	-0.142							
碱性磷酸酶活性	-0.306	-0.474	-0.695 *	0.434	-0.329	-0.551	0.528	-0.199						
归一化的酶活性	-0.059	-0.031	-0.384	0.113	-0.072	-0.156	0.773 **	0.150	0.860 **					
微生物生物量碳	-0.222	-0.442	-0.740 **	0.378	-0.248	-0.498	0.533	-0.511	0.747 **	0.578				
微生物生物量氮	-0.119	-0.267	-0.421	0.430	-0.134	-0.284	0.452	-0.660 *	0.290	0.175	0.710 *			
微生物商	-0.410	-0.381	-0.403	0.231	-0.421	-0.507	0.109	-0.293	0.375	0.205	0.744 **	0.540		
微生物 DNA	0.078	-0.068	-0.503	0.209	0.059	-0.113	0.867 **	-0.298	0.723 *	0.791 **	0.829 **	0.638 *	0.476	
微生物生物量碳氮比	-0.236	-0.321	-0.495	0.081	-0.252	-0.399	0.237	0.070	0.796 *	0.681 *	0.496	-0.185	0.254	0.396

3 讨论

土壤水分和水位显著影响着湿地系统土壤微生物的特性^[26-28]。在纳帕海湿地地区,天然沼泽、沼泽化草甸的土壤有机碳水平均高于草甸,土壤有机碳质量分数和土壤微生物生物量碳质量分数都与土壤水分显著相关,表明纳帕海湿地不同退化程度土壤有机碳质量分数和土壤微生物生物量碳质量分数主要受土壤水分的影响^[18]。在漓江河流湿地地区,不同植被类型土壤水分质量分数和土壤有机碳显著影响土壤酶活性的变化^[29]。在扎龙湿地地区,土壤植被和土壤水分差异影响了土壤 pH,进而影响了微生物的群落结构和功能^[30]。在本研究中,蔗糖酶活性、碱性磷酸酶活性、归一化的酶活性、微生物生物量碳质量分数和微生物 DNA 质量分数中的多个指标与土壤水分和养分呈显著的正相关关系(表 5);而且,天然湿地和稻田湿地的土壤水分和土壤养分与旱地之间有显著差异^[11]。这些正相关关系和差异性表明,随着土地利用的变化,淹水环境和地上植被发生改变,受耕种、施肥和管理方式、以及植物系分泌的氧气和分泌物的影响,土壤微生物的群落发生了演替,土壤微生物生物量和微生物功能随着土壤有机碳和多种养分的提高而提高。反过来,土壤微生物生物量和功能活性的提高也因此促进了土壤养分循环和碳循环。

在本研究中,微生物生物量碳和微生物 DNA 质量分数与土壤 pH 呈显著的正相关关系,表明在炎热高湿的亚热带地区,强烈的喀斯特作用使大量的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 离子从碳酸盐中溶出,随水流进入土

壤,与土壤有机质中的胡敏酸相结合,形成难于被微生物所利用的胡敏酸盐,因此喀斯特区土壤中的有机质相对稳定^[22]。牛佳等^[31]的土壤培养研究结果也发现,单加外源稻草或 Ca^{2+} 或者二者同时添加的条件下,微生物能够增强土壤有机碳的稳定性。这与本研究中的土壤有机碳、微生物生物量、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量之间的正相关关系的研究结果是一致的,这也正是喀斯特区土壤微生物与有机碳稳定性之间的内在关系,表明由于稻田湿地与天然湿地具有较为相似的淹水条件,从而能维持较高的土壤微生物生物量和微生物活性,既不会降低喀斯特溶洞湿地的土壤有机碳水平,也不会破坏土壤的碳循环过程。因此,疏通湿地系统的水系,旱地改种水稻或者直接退旱还湿,也将有利于扩大喀斯特溶洞湿地的面积。同时,要遵循喀斯特溶洞湿地水分的保持机制和运移规律,对稻田湿地加以良好管理,确保整个湿地系统土壤较高微生物生物量和功能活性,进而维持土壤有机碳的稳定。

在洞庭湖湿地地区的表层土壤中,稻田湿地微生物碳与湖草滩地无显著差异,而显著高于芦苇湿地,但稻田湿地微生物熵显著高于这两类天然湿地,而且土壤有机碳、土壤总氮、土壤微生物生物量碳、土壤微生物生物量氮等多个指标之间均呈显著的正相关关系^[21]。在鄱阳湖湿地地区,与以苔草 (*Carex cinerascens*) 和藨草 (*Phalaris arundinacea*) 为优势植物的天然湿地相比,在耕种 38 ~ 92 a 后,稻田湿地的土壤有机碳质量分数均显著提高,提高幅度达 70.32% ~ 94.26%^[16]。在湖北的荆江湿地地区,河流湿地土壤和稻田湿地土壤的微生物数量均

无显著差异,但微生物生物量碳在稻田湿地中显著高于河流湿地,而且微生物生物量碳与土壤总有机碳也呈显著正相关关系^[15]。在崇明岛河口湿地系统的0~20 cm土层内,稻田湿地土壤有机碳和微生物生物量碳质量分数显著高于苗圃栎树林、水杉林带、桔园和鱼塘撂荒地土壤^[19]。相似的是,对崇明岛湿地地区的天然湿地、稻田湿地和旱地土壤的研究表明,以磷酸脂肪酸图谱为标志的微生物生物量的变化与土壤营养质量分数存在显著的正相关关系^[20]。这些研究结果提示人们,在长江中下游的湿地地区,在水稻种植过程中,微生物演替对土壤有机碳积累与土壤肥力提高具有重要促进的作用。

在云贵高原纳帕海湿地系统的4种不同土地利用方式中,沼泽草甸、草甸和垦后湿地(旱地)的土壤微生物数量与有机质和全氮质量分数呈极显著正相关^[17]。在本研究所涉及的会仙喀斯特溶洞湿地系统中,稻田湿地与天然湿地之间的土壤有机碳、总氮、碱解氮、pH、阳离子交换量之间均没有显著差异,但都显著高于旱地^[11];而且,在本研究中稻田湿地土壤微生物DNA质量分数和细菌数量显著高于旱地。此外,土壤微生物碳和土壤微生物DNA量与土壤有机碳及多个养分指标之间呈显著的正相关关系(表6)。其中,微生物生物量碳、微生物生物量氮、微生物DNA和微生物生物量碳氮比在湿地土壤和稻田湿地土壤之间并无显著差异,而旱地的微生物DNA质量分数却显著降低。可能的原因是,随着土地利用的变化,淹水环境和植被发生改变,受耕种、施肥和管理方式等的影响,以及植物根系分泌的氧气和分泌物的影响,土壤微生物群落的丰度、组成发生了演替^[16,26,31,32],因而微生物群落在稻田湿地和旱地中发生明显分异;而且,不同的微生物类群的变化趋势也不一致,引起土壤微生物呼吸等功能活性也发生相应的改变^[20,27],并因此影响土壤有机碳的稳定,是多种土壤因子综合作用的结果^[33]。在本研究所涉及的湿地土壤中,兼性好氧的微生物在好氧情况下生长较为缓慢,不易为平板菌落计数法检出,但是,它们的数量仍然较多,因而具有较高的微生物生物量和功能活性。所以,尽管天然湿地土壤中检出的细菌数量较少,但是微生物生物量和土壤酶活性却较高。相似的是,在非喀斯特区,稻田湿地被利用为果园以后,由于土壤含水率、有机质和碱解氮等养分的降低和理化性质的改变,微生物数量和种类显著下降,因此,在我国南方湿润亚热带地区,稻田湿地是一种土壤(地)可持续利用

的一种有效方式^[34]。综合以上分析,在会仙喀斯特溶洞湿地系统中的实验区或缓冲区中,适当保留一部分稻田湿地存在是较为合理的,这不但符合维持湿地生态系统景观多样化的要求,而且也符合我国迎接保障国家粮食安全与减缓全球气候变化双重挑战的迫切需要。当然,本文只是从微生物特征方面论证了在会仙喀斯特湿地系统中保留稻田湿地的合理性。后续的工作还需要从天然湿地和稻田湿地的结构、功能和价值等多个方面比较它们之间的异同,进行综合分析和评判^[8],最终为会仙喀斯特溶洞湿地保护提供更加充分和合理的证据。

4 结论

在喀斯特溶洞湿地系统中,与旱地相比,稻田湿地系统由于具有较高的土壤微生物生物量和微生物功能活性,与天然湿地的水平较为接近,而土壤水分、pH、阳离子交换量、钙镁离子、土壤有机碳等理化因子与微生物区系和功能之间的相互作用是维持喀斯特溶洞湿地系统运行的主要原因。因此,从微生物生态学角度来看,与旱地相比,在会仙喀斯特溶洞湿地系统中,把稻田湿地作为一种人工湿地在缓冲区或实验区中给予保留并加以保护是较为合理的。

参考文献:

- [1] 潘根兴,李恋卿,郑聚锋,等. 土壤碳循环研究及中国稻田土壤固碳研究的进展与问题[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 901-914.
- [2] 广西壮族自治区统计局. 广西统计年鉴 2014 [EB/OL]. <http://www.gxtj.gov.cn/tjsj/tjnj/2014/indexch.htm>, 2015-05-26.
- [3] 张毅,曾群,陈玉华,等. 20世纪50-70年代的围湖垦殖与江汉平原湖泊湿地演化[J]. 湿地科学与管理, 2009, 5(2): 52-55.
- [4] 张春丽,佟连军,刘继斌. 湿地退耕还湿与替代生计选择的农民响应研究——以三江自然保护区为例[J]. 自然资源学报, 2008, 23(4): 568-574.
- [5] 李向东,陈尚洪,陈源泉,等. 四川盆地稻田多熟高效保护性耕作模式的生态系统服务价值评估[J]. 生态学报, 2006, 26(11): 3782-3788.
- [6] Wu J S. Carbon accumulation in paddy ecosystems in subtropical China: evidence from landscape studies[J]. European Journal of Soil Science, 2011, 62(1): 29-34.
- [7] 陈浩,向平安,张秀英. 稻作生态系统多功能性价值评估现状及分析[J]. 湖南农业科学, 2013, (3): 51-55.
- [8] 姚敏,崔保山. 哈尼梯田湿地生态系统的垂直特征[J]. 生态学报, 2006, 26(7): 2115-2124.
- [9] 刘巍巍. 苏州将水稻田纳入湿地保护范围[EB/OL]. http://news.xinhuanet.com/tech/2012-02/02/c_122644230.htm,

- 2012-02-02.
- [10] 马祖陆, 蔡德所, 蒋忠诚. 岩溶湿地分类系统研究[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2009, **27**(2): 101-106.
- [11] 靳振江, 程亚平, 李强, 等. 会仙喀斯特溶洞湿地、稻田和旱地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.
- [12] 伍碧飞. 临桂会仙湿地: 中国最大岩溶湿地公园[EB/OL]. http://www.gxb.com.cn/html/2012-05/11/content_681134.htm, 2012-05-12.
- [13] Bossuyt H, Deneff K, Six J, *et al.* Influence of microbial populations and residue quality on aggregate stability [J]. *Applied Soil Ecology*, 2001, **16**(3): 195-208.
- [14] Lauber C L, Strickland M S, Bradford M A, *et al.* The influence of soil properties on the structure of bacterial and fungal communities across land-use types [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, **40**(9): 2407-2415.
- [15] 靳振江, 邵继承, 潘根兴, 等. 荆江地区湿地与稻田有机碳、微生物多样性及土壤酶活性的比较[J]. 中国农业科学, 2012, **45**(18): 3773-3781.
- [16] 张杰, 胡维, 刘以珍, 等. 鄱阳湖湿地不同土地利用方式下土壤微生物群落功能多样性[J]. 生态学报, 2015, **35**(4): 965-971.
- [17] 陆梅, 田昆, 莫剑锋. 高原湿地纳帕海 4 种湿地利用类型土壤养分和微生物特征研究[J]. 水土保持研究, 2011, **18**(2): 241-245.
- [18] 赖建东, 田昆, 郭雪莲, 等. 纳帕海湿地土壤有机碳和微生物量碳研究[J]. 湿地科学, 2014, **12**(1): 49-54.
- [19] 林黎, 崔军, 陈学萍, 等. 滩涂围垦和土地利用对土壤微生物群落的影响[J]. 生态学报, 2014, **34**(4): 899-906.
- [20] 张容娟, 布乃顺, 崔军, 等. 土地利用对崇明岛围垦区土壤有机碳库和土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2010, **30**(24): 6698-6706.
- [21] 彭佩钦, 张文菊, 童成立, 等. 洞庭湖典型湿地土壤碳、氮和微生物碳、氮及其垂直分布[J]. 水土保持学报, 2005, **19**(1): 49-53.
- [22] 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.
- [23] 李振高, 骆永明, 滕应. 土壤与环境微生物研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 2008. 97-99.
- [24] 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, 2000. 106-185.
- [25] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986. 275-276, 294-296, 310-312.
- [26] 侯翠翠, 宋长春, 李英臣, 等. 不同水分条件沼泽湿地土壤轻组有机碳与微生物活性动态[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(1): 113-119.
- [27] 汪浩, 于凌飞, 陈立同, 等. 青藏高原海北高寒湿地土壤呼吸对水位降低和氮添加的响应[J]. 植物生态学报, 2014, **38**(6): 619-625.
- [28] 杨桂生, 宋长春, 万忠梅, 等. 三江平原小叶章湿地土壤微生物活性特征研究[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(8): 1715-1721.
- [29] 杨文彬, 耿玉清, 王冬梅. 漓江水陆交错带不同植被类型的土壤酶活性[J]. 生态学报, 2015, **35**(14): 4604-4612.
- [30] 张静, 马玲, 丁新华, 等. 扎龙湿地不同生境土壤微生物量碳氮的季节变化[J]. 生态学报, 2014, **34**(13): 3712-3719.
- [31] 牛佳, 周小奇, 蒋娜, 等. 若尔盖高寒湿地干湿土壤条件下微生物群落结构特征[J]. 生态学报, 2011, **31**(2): 474-482.
- [32] 陆松柳, 张辰, 徐俊伟. 植物根系分泌物分析及对湿地微生物群落的影响研究[J]. 生态环境学报, 2011, **20**(4): 676-680.
- [33] 关晓燕, 韩家波, 王摆, 等. 辽东湾大凌河口湿地土壤微生物群落分析[J]. 生态环境学报, 2012, **21**(6): 1063-1070.
- [34] 杨东伟, 章明奎. 水田改果园后土壤性质的变化及其特征[J]. 生态学报, 2015, **35**(11): 3825-3835.

CONTENTS

Investigation of Carbonaceous Airborne Particles by Scanning Proton Microprobe	BAO Liang-man, LIU Jiang-feng, LEI Qian-tao, <i>et al.</i> (1)
Atmospheric Polybrominated Diphenyl Ethers in Eight Cities of China; Pollution Characteristics and Human Exposure	LIN Hai-tao, LI Qi-lu, ZHANG Gan, <i>et al.</i> (10)
Light Absorption Properties of Water-Soluble Organic Carbon (WSOC) Associated with Particles in Autumn and Winter in the Urban Area of Guangzhou HUANG Huan, BI Xin-hui, PENG Long, <i>et al.</i> (16)
Investigations on Sulfur and Carbon Isotopic Compositions of Potential Polluted Sources in Atmospheric PM _{2.5} in Nanjing Region	SHI Lei, GUO Zhao-bing, JIANG Wen-juan, <i>et al.</i> (22)
Pollution Level and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} in Nanjing Before and After the Youth Olympic Games ZHANG Heng, ZHOU Zi-qiang, ZHAO Hai-yan, <i>et al.</i> (28)
Enrichment Characteristics and Source Analysis of Metal Elements in PM _{2.5} in Autumn in Nanchang City	LIN Xiao-hui, ZHAO Yang, FAN Xiao-jun, <i>et al.</i> (35)
Contributions of Factors That Influenced the Visibility In North Suburb of Nanjing In Winter and Spring	MA Jia, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (41)
A Case Study on the Rapid Cleaned Away of PM _{2.5} Pollution in Beijing Related with BL Jet and Its Mechanism	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, HE Na, <i>et al.</i> (51)
Characteristics of Chemical Components in PM _{2.5} from the Coal Dust of Power Plants	WANG Yu-xiu, PENG Lin, WANG Yan, <i>et al.</i> (60)
Improvement of Air Quality During APEC in Beijing in 2014	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (66)
Evaluation on the Effectiveness of Vehicle Exhaust Emission Control Measures During the APEC Conference in Beijing	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (74)
Chemical Compositions and Sources Apportionment of Re-suspended Dust in Jincheng	WANG Yan, PENG Lin, LI Li-juan, <i>et al.</i> (82)
Characteristic of Particulate Emissions from Concrete Batching in Beijing	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, ZHONG Lian-hong, <i>et al.</i> (88)
Anthropogenic Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Chang-Zhu-Tan Region	YOU Xiang-yu, LIU Zhan, ZHANG Qing-mei, <i>et al.</i> (94)
Seasonal Variability of Greenhouse Gas Emissions in the Urban Lakes in Changchun, China	WEN Zhi-dan, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (102)
Absorption Characteristics of Particulates and CDOM in Waters of Chagan Lake and Xinlicheng Reservoir in Autumn	LI Si-jia, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (112)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in Different Geological Background; A Case Study in Darongjiang and Lingqu Basin, Guangxi, China SUN Ping-an, YU Shi, MO Fu-zhen, <i>et al.</i> (123)
Community Structure of Aquatic Community and Evaluation of Water Quality in Laoyingyan Section of Dadu River	HUANG You-you, ZENG Yu, LIU Shou-jiang, <i>et al.</i> (132)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses in Longhong Ravine Basin of Westlake in Rainstorm Runoff	YANG Fan, JIANG Yi-feng, WANG Cui-cui, <i>et al.</i> (141)
Soil Phosphorus Forms and Leaching Risk in a Typically Agricultural Catchment of Hefei Suburban	FAN Hui-hui, LI Ru-zhong, PEI Ting-ting, <i>et al.</i> (148)
Concentrations and Distribution of Metals in the Core Sediments from Estuary and City Section of Liaohe River	WANG Wei-jie, ZHOU Jun-li, PEI Shu-wei, <i>et al.</i> (156)
Distribution Characteristics and Pollution Status Evaluation of Sediments Nutrients in a Drinking Water Reservoir HUANG Ting-lin, LIU Fei, SHI Jian-chao (166)
Effect of Low Molecular Weight Organic Acids on the Chemical Speciation and Activity of Mercury in the Soils of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir YOU Rui, LIANG Li, QIN Cai-qing, <i>et al.</i> (173)
Arsenic Content and Speciation in the Surficial Sediments of Liangshui River in Beijing	WANG Xin-hui, SHAN Bao-qing, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i> (180)
Effect of UV Light Radiation on the Coagulation of Chlorella and Its Mechanism	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, XU Hong-bin, <i>et al.</i> (187)
Photocatalytic Oxidation of <i>p</i> -arsanilic Acid by TiO ₂	XU Wen-ze, YANG Chun-feng, LI Jing, <i>et al.</i> (193)
Photodegradation of Ciprofloxacin Hydrochloride in the Aqueous Solution Under UV	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (198)
Adsorption of Phosphate by Lanthanum Hydroxide/Natural Zeolite Composites from Low Concentration Phosphate Solution	LIN Jian-wei, WANG Hong, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (208)
Experimental Research of Hg(II) Removal from Aqueous Solutions of HgCl ₂ with Nano-TiO ₂	ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (220)
Development of Chemical Exposure Prediction Model for Aerobic Sewage Treatment Plant for Biochemical Wastewaters	ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, SHI Li-li, <i>et al.</i> (228)
Degradation Characteristics of Three Aniline Compounds in Simulated Aerobic Sewage Treat System	GU Wen, ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (240)
Advanced Treatment of Effluent from Industrial Park Wastewater Treatment Plant by Ferrous Ion Activated Sodium Persulfate	ZHU Song-mei, ZHOU Zhen, GU Ling-yun, <i>et al.</i> (247)
Recent Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Yangtze River Delta	LI Jing-ya, WU Di, XU Yun-song, <i>et al.</i> (253)
Preliminary Study on Linear Alkylbenzenes as Indicator for Process of Urbanization	XU Te, ZENG Hui, NI Hong-gang (262)
Pollution Assessment and Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils of Coal Mining Area in Longkou City	LIU Shuo, WU Quan-yuan, CAO Xue-jiang, <i>et al.</i> (270)
Effects of Reduced Water and Diurnal Warming on Winter-Wheat Biomass and Soil Respiration	WU Yang-zhou, CHEN Jian, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (280)
Effect of Recycled Water Irrigation on Heavy Metal Pollution in Irrigation Soil	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia, FU Hui-min (288)
Effect of Biochar Application on Soil Aggregates Distribution and Moisture Retention in Orchard Soil	AN Yan, JI Qiang, ZHAO Shi-xiang, <i>et al.</i> (293)
Effects of Three Industrial Organic Wastes as Amendments on Plant Growth and the Biochemical Properties of a Pb/Zn Mine Tailings PENG Xi-zhu, YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, <i>et al.</i> (301)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Ce Uptake of Maize Grown in Ce-contaminated Soils	WANG Fang, GUO Wei, MA Peng-kun, <i>et al.</i> (309)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Agricultural Products Around the Pearl River Delta, South China LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> (317)
Bioaccumulation and Biomagnification of Heavy Metals in Three Gorges Reservoir and Effect of Biological Factors	WEI Li-li, ZHOU Qiong, XIE Cong-xin, <i>et al.</i> (325)
Comparisons of Microbial Numbers, Biomasses and Soil Enzyme Activities Between Paddy Field and Dryland Origins in Karst Cave Wetland JIN Zhen-jiang, ZENG Hong-hu, LI Qiang, <i>et al.</i> (335)
Analysis on Diversity of Denitrifying Microorganisms in Sequential Batch Bioreactor Landfill	LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> (342)
Synthesis of Fe/nitrogen-doped Carbon Nanotube/Nanoparticle Composite and Its Catalytic Performance in Oxygen Reduction	YANG Ting-ting, ZHU Neng-wu, LU Yu, <i>et al.</i> (350)
Application of Microbial Fuel Cells in Reducing Methane Emission from Rice Paddy	DENG Huan, CAI Li-cheng, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (359)
Effect of Aeration Strategies on Emissions of Nitrogenous Gases and Methane During Sludge Bio-Drying	QI Lu, WEI Yuan-song, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i> (366)
Treatment of Flue Gas from Sludge Drying Process by A Thermophilic Biofilter	CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, <i>et al.</i> (377)
Application of FCM-qPCR to Quantify the Common Water Pathogens	WANG Ming-xing, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (384)
Effect of Acetonitrile and <i>n</i> -hexane on the Immunoassay of Environmental Representative Pollutants	LOU Xue-ning, ZHOU Li-ping, SONG Dan, <i>et al.</i> (391)
Compositional Variation of Spent Mushroom Substrate During Cyclic Utilization and Its Environmental Impact	LOU Zi-mo, WANG Zhuo-xing, ZHOU Xiao-xin, <i>et al.</i> (397)

《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)

2016年1月15日 第37卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 1 Jan. 15, 2016

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