

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第5期

Vol.36 No.5

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

深圳大气颗粒物中卤代多环芳烃污染研究	孙建林, 常文静, 陈正侠, 曾辉 (1513)
北京市典型餐饮企业 VOCs 排放特征研究	崔彤, 程婧晨, 何万清, 任培芳, 聂磊, 徐东耀, 潘涛 (1523)
2006~2010年珠三角地区 SO ₂ 特征分析	李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邓涛, 徐婉筠, 冉靓, 赵春生 (1530)
环境空气 PM _{2.5} 连续监测系统手工采样比对测试	王强, 钟琪, 迟颖, 张杨, 杨凯 (1538)
燃煤电厂可凝结颗粒物的测试与排放	裴冰 (1544)
南海水域不同深度非光合微生物的固碳潜能及其对不同电子供体的响应	方峰, 王磊, 席雪飞, 胡佳俊, 付小花, 陆兵, 徐殿胜 (1550)
基于 GOCI 影像和水体光学分类的内陆湖泊叶绿素 a 浓度遥感估算	冯驰, 金琦, 王艳楠, 赵丽娜, 吕恒, 李云梅 (1557)
贵州清水江流域丰水期水化学特征及离子来源分析	吕婕梅, 安艳玲, 吴起鑫, 罗进, 蒋浩 (1565)
东莞石马河流域水化学特征时空差异及来源辨析	高磊, 陈建耀, 王江, 柯志庭, 朱爱萍, 许凯 (1573)
河南鸡冠洞洞穴水对极端气候的响应及其控制因素研究	刘肖, 杨琰, 彭涛, 赵景耀, 任小凤, 张银环, 聂旭东, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (1582)
石漠化治理对岩溶地下水水化学和溶解无机碳稳定同位素的影响	肖时珍, 熊康宁, 蓝家程, 张晖, 杨龙 (1590)
旱季不同土地利用类型下岩溶碳汇效应差异	赵瑞一, 梁作兵, 王尊波, 于正良, 江泽利 (1598)
有机氯农药在岩溶区上覆土壤中的垂直迁移特征及对地下水的影响	孙玉川, 王永启, 梁作兵, 袁道先 (1605)
山东南四湖沉积物中汞的污染现状及迁移研究	曹霏霏, 杨丽原, 庞绪贵, 王炳华, 王云倩 (1615)
摇蚊幼虫扰动下沉积物微环境和微界面对物理扰动强度的响应	史晓丹, 李勇, 李大鹏, 王忍, 邓猛, 黄勇 (1622)
南方红壤区氮湿沉降特征及其对流域氮输出的影响	郝卓, 高扬, 张进忠, 徐亚娟, 于贵瑞 (1630)
不同紫色母岩对景观水体氮磷及有机物去除的影响	黄雪娇, 刘晓晨, 李振轮, 石纹豪, 杨珊 (1639)
荔枝落叶对铜绿微囊藻生长和光合作用的影响	汪小雄, 姜成春, 李锦卫, 汪晓军 (1648)
黄连根茎浸提物对绿藻的毒理作用	陈亚楠, 袁玲 (1655)
饮用水中消毒副产物 1,1-二氯丙酮的形成机制	丁春生, 孟壮, 徐洋洋, 缪佳 (1662)
水中利谷隆氯化降解动力学和消毒副产物生成特性	凌晓, 胡晨燕, 程明, 谷建 (1668)
化学消毒的中和剂对水中内毒素活性检测的影响	张灿, 刘文君, 史云, 安代志, 白森, 徐稳 (1674)
牛粪生物炭对水中氨氮的吸附特性	马锋锋, 赵保卫, 刁静茹, 钟金魁, 李安邦 (1678)
丁二酸改性茶油树木屑吸附铅的研究	张晓峰, 陈迪云, 彭燕, 刘永胜, 熊雪莹 (1686)
SPG 膜表面润湿性对膜污染和化学耐受性的影响	张静, 肖太民, 张晶, 曹丽亚, 杜亚威, 刘春, 张磊 (1694)
TiO ₂ 诱导下左旋氧氟沙星的可见光降解及其机制	郭宏生, 刘亚楠, 乔琪, 魏红, 董呈幸, 薛洁, 李克斌 (1700)
新型高分子絮凝剂对废水中 Cr(VI) 的捕集性能	王刚, 杜凤龄, 常青, 徐敏 (1707)
基于 OUR-HPR 测量在线估计活性污泥合成 PHA 量	曾善文, 王泽宇, 高敬, 刘东, 张代钧, 卢培利 (1713)
分离高浓度污泥产酸发酵液的自生动态膜形成机制	黄帅, 刘宏波, 殷波, 马惠君, 符波, 刘和, 白洁 (1720)
通风强度对市政污泥生物干化中试效果的影响	张喻, 韩融, 陆文静, 王洪涛, 明中远, 王强, 夏伟 (1727)
生物可降解螯合剂谷氨酸 N,N-二乙酸四钠对污泥中重金属萃取效率的研究	吴青, 崔延瑞, 汤晓晓, 杨慧娟, 孙剑辉 (1733)
百乐克 (BIOLAK) 活性污泥宏基因组的生物多样性及功能分析	田美, 刘汉湖, 申欣, 赵方庆, 陈帅, 姚永佳 (1739)
异养硝化-好氧反硝化菌 YL 的脱氮特性	梁贤, 任勇翔, 杨垒, 赵思琪, 夏志红 (1749)
菌株 <i>Arthrobacter</i> sp. CN2 降解对硝基苯酚的特性与动力学	任磊, 史延华, 贾阳, 姚雪松, Ruth Nahurira, 弥春霞, 闫艳春 (1757)
短短芽孢杆菌及其芽孢对苣的降解	刘芷辰, 叶锦韶, 彭辉, 刘则华, 邓庭进, 尹华, 廖丽萍 (1763)
垃圾填埋场抗生素抗性基因初探	李蕾, 徐晶, 赵由才, 宋立岩 (1769)
不同构型人工湿地基质中土著菌的耐药性及整合子丰度调查	麦晓蓓, 陶然, 杨扬, 张敏, 林剑华, 满滢 (1776)
硝酸盐和甲烷对覆土中苯系物厌氧氧化的影响	柳蓉, 龙焰, 王立立, 何婷, 叶锦韶 (1785)
山西高原落叶松人工林土壤呼吸的空间异质性	严俊霞, 李洪建, 李君剑, 武江星 (1793)
施氮对黄土旱塬区春玉米土壤呼吸和温度敏感性的影响	姜继韶, 郭胜利, 王蕊, 刘庆芳, 王志齐, 张彦军, 李娜娜, 李如剑, 吴得峰, 孙棋棋 (1802)
宣威街道尘中重金属的分布特征及其健康风险评估	张文超, 吕森林, 刘丁戎, 刘品威, 米持真一, 王效举, 王青耀 (1810)
宝鸡市街道尘埃磁学特征空间分布及环境意义	张俊辉, 王瑾, 张健, 房妮, 夏敦胜 (1818)
长期施肥下浙江稻田不同颗粒组分有机碳的稳定特征	毛霞丽, 陆扣萍, 孙涛, 张小凯, 何丽芝, 王海龙 (1827)
矿区植被恢复方式对土壤微生物和酶活性的影响	李君剑, 刘峰, 周小梅 (1836)
三江平原典型湿地类型土壤微生物特征与土壤养分的研究	肖烨, 黄志刚, 武海涛, 吕宪国 (1842)
钠盐类型对表面活性剂清洗煤油污染土壤的强化效应	黄昭露, 陈泉源, 周娟, 谢墨函 (1849)
石油污染土壤的生物修复技术及微生物生态效应	杨茜, 吴蔓莉, 聂麦茜, 王婷婷, 张明辉 (1856)
可生物降解螯合剂 GLDA 诱导东南景天修复重金属污染土壤的研究	卫泽斌, 陈晓红, 吴启堂, 谭蒙 (1864)
绿洲土 Pb-Zn 复合胁迫下重金属形态特征和生物有效性	金诚, 赵转军, 南忠仁, 王胜利, 武文飞, 王厚成 (1870)
硫素对水稻根系铁锰胶膜形成及吸收的影响	王丹, 李鑫, 王代长, 饶伟, 杜光辉, 杨军, 化党领 (1877)
臭氧对几种楠木气体交换参数的影响	李苗苗 (1888)
某货车侧翻水污染事件的环境损害评估方法探索	蔡锋, 赵士波, 陈刚才, 鲜思淑, 杨清玲, 周贤杰, 余海 (1902)
《环境科学》征订启事 (1543) 《环境科学》征稿简则 (1756) 信息 (1667, 1726, 1809, 1848)	

三江平原典型湿地类型土壤微生物特征与土壤养分的研究

肖烨^{1,2}, 黄志刚³, 武海涛¹, 吕宪国^{1*}

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所湿地生态与环境重点实验室, 长春 130102; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 南阳师范学院生命科学与技术学院, 南阳 473061)

摘要: 为探讨不同湿地类型土壤微生物数量和酶活性的分布特征及其与土壤养分的关系, 本研究选择了三江平原洪河湿地保护区4种典型湿地类型(小叶章+沼柳湿地、小叶章湿地、毛苔草湿地和芦苇湿地)的土壤为研究对象。结果表明4种湿地类型在0~30 cm土层内: ①土壤有机碳、全氮和全磷均随土层深度的增加而减少, 速效钾、速效磷和速效氮则未表现出有规律的变化, 且不同湿地类型土壤养分含量差异显著。②土壤微生物数量为细菌>放线菌>真菌, 3种微生物菌落数量均随土层深度的增加而减少。土壤微生物总数量以小叶章湿地最多, 毛苔草湿地最少。③土壤蔗糖酶和纤维素酶活性均随土层深度的增加而减少, 而土壤过氧化氢酶活性未表现出有规律的变化。小叶章+沼柳湿地和小叶章湿地中3种酶活性显著高于毛苔草湿地和芦苇湿地($P<0.05$)。④相关性分析表明, 土壤细菌、真菌和纤维素酶与土壤养分各指标均呈极显著或显著正相关, 放线菌和蔗糖酶与速效钾、过氧化氢酶与速效钾、速效磷无显著相关性关系。因此, 土壤微生物和酶活性是反映土壤养分状况的重要指标。

关键词: 三江平原; 湿地; 土壤微生物; 土壤酶活性; 土壤养分

中图分类号: X172; X173 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)05-1842-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.05.045

Soil Microorganism Characteristics and Soil Nutrients of Different Wetlands in Sanjing Plain, Northeast China

XIAO Ye^{1,2}, HUANG Zhi-gang³, WU Hai-tao¹, LÜ Xian-guo^{1*}

(1. Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Department of Life Science and Technology, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, China)

Abstract: Four typical wetland types (i. e. wetlands with the following dominant plant species: *Calamagrostis angustifolia* + *Salix brachypoda*, *Calamagrostis angustifolia*, *Carex lasiocarpa* and *Phragmites australis*) of the Honghe reserve in Sanjiang Plain were studied to investigate the distribution of soil microorganism quantity and enzyme activity and their relationships with soil nutrients. The results showed that in 0-30 cm soil layer of these four wetlands: ① Contents of soil total organic carbon, total nitrogen and total phosphorus decreased with the increase of soil depth, while available nitrogen, phosphorus and potassium did not exhibit regularly changes. Moreover, there were significantly different for soil nutrient contents among different wetland types ($P<0.05$). ② The number of soil microorganism was bacteria > actinomycetes > fungi, furthermore, the number of three microbial colonies all decreased with the increase of soil depth. Total soil microbial number of *C. angustifolia* wetland was the highest and that of *C. lasiocarpa* wetland was the lowest. ③ Soil invertase and cellulase activities decreased with soil depth, while soil catalase activity showed no consistent changes. Three kinds of enzyme activities in *C. angustifolia* + *S. brachypoda* and *C. angustifolia* wetlands were significantly higher than those of *C. lasiocarpa* and *P. australis* wetlands ($P<0.05$). ④ The correlation analysis showed that soil bacteria, fungi and cellulose activity had a significant correlation with indicators of soil nutrients. But there was no correlation between actinomycetes, invertase and available potassium, as well as between catalase and available potassium, available phosphorus. Overall, soil microorganism and enzyme activities are important indicators for reflecting the status of soil nutrients.

Key words: Sanjing Plain; wetlands; soil microorganism; soil enzyme activities; soil nutrients

土壤微生物和酶是湿地土壤中最活跃的组分, 有利于推动土壤有机质矿化分解、土壤养分的循环和转化。土壤微生物是土壤生态系统中最具活力的组成部分, 通过参与土壤有机物质的循环、运输以及作物生长进而影响土壤特性^[1]。土壤微生物群落结构的变化不仅在有机质分解、腐殖质合成以及土

壤养分转化等方面具有关键作用^[2,3], 而且对土壤团聚体形成与稳定、土壤碳库动态的作用显著^[4,5]。

收稿日期: 2014-09-10; 修订日期: 2014-12-30

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050508); 国家自然科学基金项目(31100320, 41371261)

作者简介: 肖烨(1979~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为湿地土壤与环境效应, E-mail: xiaoye8417@sina.cn

* 通讯联系人, E-mail: luxg@neigae.ac.cn

土壤酶是土壤环境的重要组成部分,主要来源于土壤微生物和植物根系的分泌物^[6],是土壤生物化学过程的主要调节者,参与土壤中多种反应过程如矿化-同化、氧化-还原等,是土壤养分转化、有机碳代谢及污染物降解的主要驱动力^[7].因此,土壤微生物和酶是反映湿地土壤养分变化的敏感性指标.

目前有关土壤微生物、酶与养分的相关研究主要集中在草原和农田^[8,9]、森林^[10,11]、河口和草甸湿地^[12,13]等生态系统,并且取得了显著的研究成果.然而在高纬度区的湿地有关土壤微生物性质差异以及与土壤养分相互关系的研究却鲜见报道.三江平原是我国最大的淡水沼泽分布区,洪河湿地自然保护区位于三江平原的东北部,是国际上重要的湿地.近年来,由于保护区周边大面积的湿地被开垦为农田,同时大量的开沟排水使湿地出现了明显的退化,严重地影响了湿地的碳“汇”功能^[14].因此,本研究通过对三江平原典型湿地类型土壤微生物数量、与碳循环相关的几种酶活性和养分的调查,及其各指标之间的相互关系分析,以期评估自然湿地在人类活动干扰下土壤退化程度以及生态重建提供量化指标.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

洪河保护区位于黑龙江省三江平原东北部的同江市与抚远县交界处($47^{\circ}42'18'' \sim 47^{\circ}52'07''\text{N}$, $133^{\circ}34'38'' \sim 133^{\circ}46'29''\text{E}$),总面积 $28\,135.7\text{ hm}^2$.该区属于温带湿润半湿润季风气候.年平均气温为 $1.5 \sim 2.0^{\circ}\text{C}$,极端最高气温 36.6°C ,极端最低气温 -41°C .年平均降水量 600 mm 左右,年均蒸发量 565 mm .空气湿度大,属于三江平原最湿润地区,冻结期5个月,最深冻层 1.9 m 左右,无霜期 130 d .沼泽地貌类型为河漫滩及阶地洼地,成土母质中细砂含量较大,地表沉积物质主要为冲积-沼泽相淤泥亚黏土和淤泥质黏土^[15].

1.2 采样点设置与样品采集

于2013年10月初在洪河湿地核心保护区域内分别采集了小叶章+沼柳湿地(CS)、小叶章湿地(CA)、毛苔草湿地(CL)和芦苇湿地(PA)这4种具有代表性的湿地类型土壤.CS属于全年很少淹水区,CA为季节性淹水区,而CL和PA则位于常年淹水区.每一类型湿地中随机设置3个 $1.0\text{ m} \times 1.0\text{ m}$ 样方,共计12个样方.取土样时先去除样地土壤表层凋落物以后,用自制金属土壤取样器(长 50 cm ,

直径 5.7 cm)按 $0 \sim 10$ 、 $10 \sim 20$ 和 $20 \sim 30\text{ cm}$ 进行分层取样,同一样方内由随机采取的3~5个土柱同层混合而成,每种湿地类型获取3个重复样品,4种湿地类型共采集土样36份.采集的土样放入无菌塑料袋内,置于有冰袋的保鲜盒中运回实验室,充分混匀后分成2份,1份过 4 mm 筛,挑去根系和石砾,保存于 4°C 冰箱中,用于微生物区系组成数量和酶活性的测定.另1份自然风干,研磨后过 2 mm 筛,用于土壤碳氮磷养分的分析.

1.3 土样分析方法

1.3.1 土壤养分含量的测定

土壤总有机碳测定采用浓硫酸-重铬酸钾外加热法^[16],全氮采用凯氏定氮仪测定,全磷采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-HClO}_4$ 消煮,钼蓝比色法测定.

1.3.2 土壤微生物的测定

土壤微生物菌落数量采用平板稀释法测定:细菌、真菌、放线菌分别使用牛肉膏蛋白胨(NA)培养基、马丁(Martin)培养基、高氏一号(Gause 1)培养基培养,计数结果均以每克干土中的菌落数($\text{CFU} \cdot \text{g}^{-1}$)表示^[17].

1.3.3 土壤酶活性的测定

土壤蔗糖酶和纤维素酶活性的测定采用3,5-二硝基比色法,蔗糖酶活性以 1 g 土壤在 37°C 下培养 24 h 后生成的葡萄糖 mg 数表示,纤维素酶活性以 1 g 土壤在 37°C 下培养 72 h 后生成的葡萄糖 mg 数表示;过氧化氢酶采用高锰酸钾滴定法测定,酶活性以 1 g 干土 1 h 内消耗的 $0.1\text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}\text{ KMnO}_4$ 的 mL 数表示^[18].

1.4 数据分析

采用Excel 2007进行数据处理及制图.采用SPSS 18.0统计软件对所测数据进行单因素方差分析(ANOVA),LSD多重比较(P 为0.05或0.01)分析不同湿地类型土壤微生物数量和酶活性分布的差异性.用相关性分析来阐明土壤微生物数量、酶活性与土壤养分之间的相互关系.

2 结果与分析

2.1 不同湿地类型土壤养分状况

不同湿地类型土壤养分状况有所差异(表1),不同湿地类型土壤总有机碳、全氮、全磷含量的变化范围为 $10.32 \sim 63.57$ 、 $0.88 \sim 6.58$ 和 $0.38 \sim 1.37\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,且3种营氧成分含量在各湿地中均随土层深度的增加而减少.在 $0 \sim 30\text{ cm}$ 土层,小叶章+沼柳湿地、小叶章湿地、毛苔草湿地和芦苇湿地

土壤 0 ~ 30 cm 土壤有机碳含量平均值分别为 34.12、30.96、16.99 和 13.12 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全氮含量平均值分别为 3.55、3.13、1.57 和 1.69 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; 全磷含量的平均值分别为 0.95、0.72、0.66 和 0.42 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 土壤总有机碳和全磷的变化趋势为小叶章 + 沼柳湿地 > 小叶章湿地 > 毛茛草湿地 > 芦苇湿地 ($P < 0.05$), 全氮含量的变化趋势为小叶章 + 沼柳湿地 > 小叶章湿地 > 芦苇湿地 > 毛茛草湿地 ($P <$

0.05). 各湿地速效钾、速效磷和速效氮的含量较低, 随土层深度的增加没有表现出一致的变化规律. 在 0 ~ 30 cm 土层内, 速效钾平均含量以毛茛草湿地最高 (210.6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 显著高于其它湿地类型 (112.4 ~ 144.6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) ($P < 0.05$); 各湿地间速效磷平均含量差异不显著; 速效氮各土层含量均以小叶章 + 沼柳湿地和小叶章湿地显著高于毛茛草湿地和芦苇湿地 ($P < 0.05$).

表 1 不同湿地类型土壤主要养分状况¹⁾

Table 1 Soil nutrients in different wetlands (mean $\pm$ SD)

湿地类型	土层深度 /cm	含水量 /%	总有机碳 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全氮 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全磷 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效氮 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效磷 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效钾 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
CS	0 ~ 10	93.1 $\pm$ 17.5a	63.6 $\pm$ 8.8a	6.6 $\pm$ 1.0a	1.37 $\pm$ 0.29a	554.4 $\pm$ 67.0a	30.9 $\pm$ 6.4a	225.2 $\pm$ 35.2a
	10 ~ 20	35.9 $\pm$ 5.8b	25.4 $\pm$ 4.1b	2.7 $\pm$ 0.2b	0.84 $\pm$ 0.14b	267.1 $\pm$ 63.0b	11.8 $\pm$ 3.1b	122.2 $\pm$ 29.7b
	20 ~ 30	31.1 $\pm$ 6.4b	13.4 $\pm$ 4.7c	1.3 $\pm$ 0.3c	0.64 $\pm$ 0.12b	117.6 $\pm$ 30.2c	7.1 $\pm$ 1.2b	86.4 $\pm$ 11.3b
CA	0 ~ 10	96.2 $\pm$ 15.7a	62.5 $\pm$ 4.7a	6.2 $\pm$ 1.0a	1.04 $\pm$ 0.09a	529.2 $\pm$ 51.9a	18.4 $\pm$ 3.5a	193.0 $\pm$ 49.4a
	10 ~ 20	41.1 $\pm$ 10.2b	17.6 $\pm$ 4.6b	1.9 $\pm$ 0.2b	0.60 $\pm$ 0.07b	189.8 $\pm$ 60.0b	11.1 $\pm$ 1.7a	73.7 $\pm$ 12.2b
	20 ~ 30	36.3 $\pm$ 8.3b	12.8 $\pm$ 1.0c	1.2 $\pm$ 0.2b	0.54 $\pm$ 0.04b	188.2 $\pm$ 50.8b	14.5 $\pm$ 4.0a	70.5 $\pm$ 10.1b
CL	0 ~ 10	135.2 $\pm$ 23.7a	24.8 $\pm$ 3.2a	1.9 $\pm$ 0.9a	0.79 $\pm$ 0.05a	228.5 $\pm$ 41.0a	14.0 $\pm$ 3.0a	196.1 $\pm$ 48.7a
	10 ~ 20	117.1 $\pm$ 11.8b	15.0 $\pm$ 2.5b	1.7 $\pm$ 0.3a	0.74 $\pm$ 0.06a	112.6 $\pm$ 24.4b	14.7 $\pm$ 3.8a	216.5 $\pm$ 39.0a
	20 ~ 30	85.3 $\pm$ 10.9c	11.2 $\pm$ 1.1b	1.1 $\pm$ 0.2a	0.46 $\pm$ 0.01b	147.8 $\pm$ 43.3ab	11.5 $\pm$ 2.7a	219.2 $\pm$ 37.7a
PA	0 ~ 10	118.2 $\pm$ 19.8a	17.1 $\pm$ 3.3a	2.6 $\pm$ 0.4a	0.49 $\pm$ 0.06a	188.2 $\pm$ 27.0a	13.2 $\pm$ 2.4a	130.9 $\pm$ 18.6a
	10 ~ 20	97.3 $\pm$ 13.4b	11.9 $\pm$ 1.6b	1.6 $\pm$ 0.2b	0.39 $\pm$ 0.03a	79.0 $\pm$ 9.3b	16.7 $\pm$ 4.1a	117.1 $\pm$ 27.5a
	20 ~ 30	75.4 $\pm$ 10.1b	10.3 $\pm$ 1.2b	0.9 $\pm$ 0.1c	0.38 $\pm$ 0.06a	84.0 $\pm$ 13.0b	17.4 $\pm$ 3.2a	124.0 $\pm$ 20.5a

1) 同列不同小写字母表示同一湿地类型间不同土层之间差异显著 ($P < 0.05$)

2.2 不同湿地类型土壤微生物数量比较

土壤细菌、真菌和放线菌数量在不同湿地类型土壤垂直剖面上分布明显, 均随着土层深度的增加而呈递减的变化趋势 (图 1). 不同湿地类型土壤细菌数量在各土层中的分布差异较大: 在 0 ~ 10 cm 土层中, 小叶章湿地和芦苇湿地中的细菌数量显著高于小叶章 + 沼柳湿地、毛茛草湿地 ($P < 0.05$); 在 10 ~ 20 和 20 ~ 30 cm 土层中, 芦苇湿地土壤细菌数量均显著高于其它湿地类型 ($P < 0.05$) [图 1(a)]. 而真菌数量在 0 ~ 10 cm 土层以小叶章 + 沼柳湿地和小叶章湿地显著高于毛茛草和芦苇湿地 ($P < 0.05$), 在 10 ~ 20 cm 土层各湿地无显著性差异, 在 20 ~ 30 cm 土层以毛茛草湿地最高 [图 1(b)]. 放线菌的数量在各土层均是以小叶章 + 沼柳湿地和小叶章湿地显著高于毛茛草湿地和芦苇湿地 ($P < 0.05$) [图 1(c)].

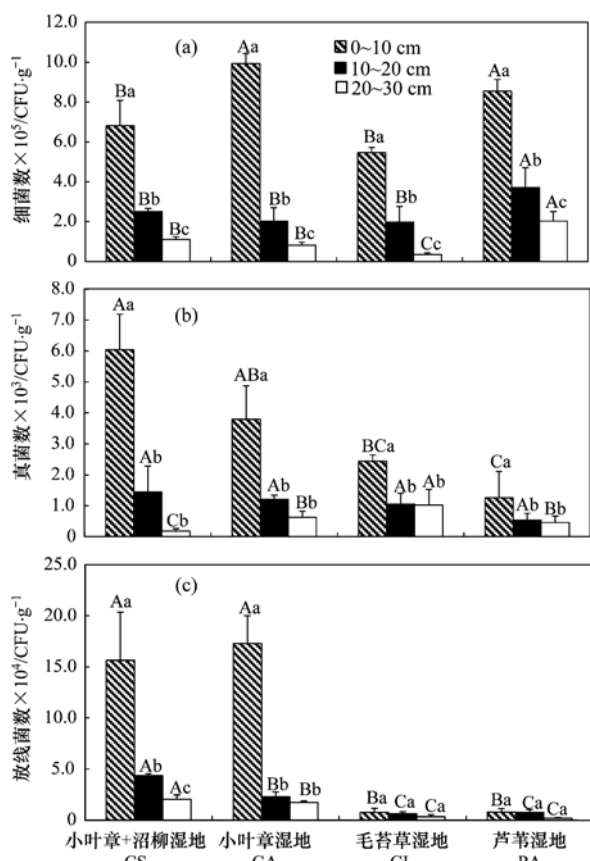
总体而言, 4 种湿地类型不同土层间土壤微生物总数量均具有显著性差异 ($P < 0.05$). 在 0 ~ 30 cm 土层, 土壤微生物总数量 (以干土计) 依次为: 小叶章湿地 ($149.62 \times 10^4 \text{ CFU}\cdot\text{g}^{-1}$) > 芦苇湿地 ($144.80 \times 10^4 \text{ CFU}\cdot\text{g}^{-1}$) > 小叶章 + 沼柳湿地

($126.96 \times 10^4 \text{ CFU}\cdot\text{g}^{-1}$) > 毛茛草湿地 ($80.05 \times 10^4 \text{ CFU}\cdot\text{g}^{-1}$). 各湿地类型土壤微生物区系组成均以细菌为主, 占微生物的 63% 以上 (82.04% ~ 98.70%); 其次为放线菌, 占微生物总数的 1.19% ~ 17.36%; 真菌数量所占比例最少 (0.16% ~ 0.60%), 说明在土壤环境中, 细菌在土壤微生物活性中起着主要的决定作用.

2.3 不同湿地类型土壤酶活性差异

由图 2(a) 所示, 4 种湿地类型土壤蔗糖酶活性为 2.03 ~ 23.65 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 均随土层深度的增加而减少. 除毛茛草湿地各土层间酶活性无显著性差异外, 其余湿地各土层间均存在显著性差异. 同一土层不同湿地类型间各土层土壤蔗糖酶活性以小叶章 + 沼柳湿地最高, 毛茛草湿地土壤蔗糖酶活性最低且与其它湿地存在极显著性差异 ($P < 0.01$). 在 0 ~ 30 cm 土层, 土壤蔗糖酶活性的变化趋势均表现为小叶章 + 沼柳湿地 > 小叶章湿地 > 芦苇湿地 > 毛茛草湿地 ($P < 0.05$).

由图 2(b) 可知, 4 种湿地类型纤维素酶活性的变化范围为 0.09 ~ 0.88 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 均随土层深度的增加而减少. 各湿地表层 0 ~ 10 cm 土层土壤纤维素



相同土层不同大写字母表示不同湿地类型间差异显著 ($P < 0.05$), 同一湿地类型不同小写字母表示不同土层间差异显著 ($P < 0.05$), 下同

图1 不同湿地类型土壤细菌、真菌和放线菌数量的垂直分布特征

Fig. 1 Vertical distribution of bacteria, fungi and actinomyces in different wetlands

酶活性均显著高于 10 ~ 20 cm 和 20 ~ 30 cm ($P < 0.05$). 小叶章 + 沼柳湿地与小叶章湿地土壤纤维素酶活性在同土层中差异不显著,但在 0 ~ 10 和 10 ~ 20 cm 土层二者均显著高于毛茛草湿地和芦苇湿地 ($P < 0.05$); 20 ~ 30 cm 土层,以芦苇湿地土壤纤维素酶活性最低,与其它湿地存在显著性差异 ($P < 0.05$). 在 0 ~ 30 cm 土层内,土壤纤维素酶活性的变化趋势为小叶章 + 沼柳湿地 > 小叶章湿地 > 毛茛草湿地 > 芦苇湿地 ($P < 0.05$).

由图 2(c) 所示,4 种湿地类型土壤过氧化氢酶活性的变化范围为 $1.04 \sim 1.57 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$,酶活性除在小叶章 + 沼柳湿地呈现出先增后减的变化趋势外,在另外 3 种湿地中均随土层深度的增加而减少 ($P < 0.05$). 在 0 ~ 10 cm 土层,各湿地土壤过氧化氢酶活性均无显著性差异; 10 ~ 20 和 20 ~ 30 cm 土层,小叶章 + 沼柳湿地土壤过氧化氢酶活性最高,显

著高于其它 3 个湿地 ($P < 0.05$) [图 2(c)]. 在 0 ~ 30 cm 土层内,土壤过氧化氢酶活性的变化趋势为小叶章 + 沼柳湿地 > 小叶章湿地 > 芦苇湿地 > 毛茛草湿地 ($P < 0.05$).

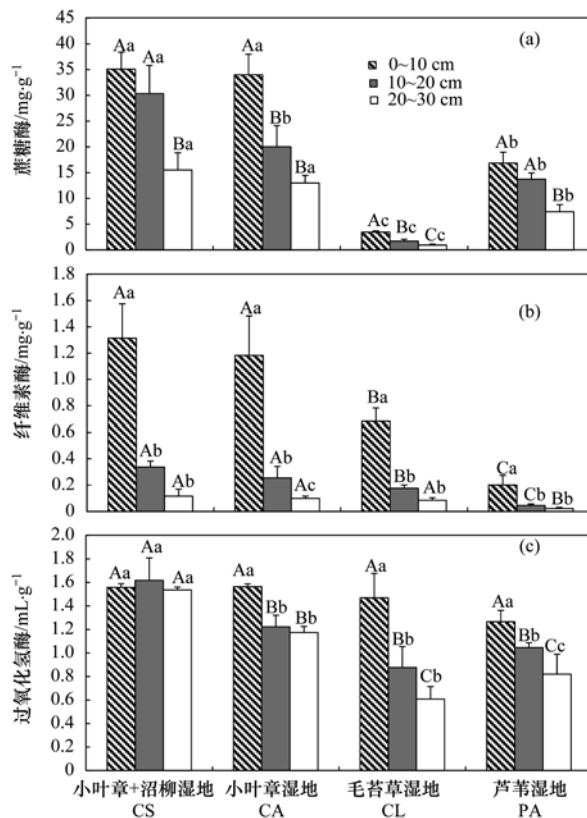


图2 不同湿地类型各土层土壤酶活性变化

Fig. 2 Changes of soil enzyme activities in each soil layer of different wetland types

2.4 土壤微生物数量、酶活性与土壤养分的相关性分析

由表 2 可知,土壤细菌、真菌和纤维素酶与总有机碳、全氮、全磷、速效氮和速效磷均呈极显著正相关关系,与速效钾呈显著正相关. 放线菌和蔗糖酶仅与速效钾相关性不显著,过氧化氢酶除了与速效钾、速效磷相关性不显著外,与其它养分均具有极显著相关性关系. 其中细菌、真菌、放线菌、蔗糖酶、纤维素酶和过氧化氢酶与总有机碳、全氮和速效氮均有较高的相关性系数,此外,过氧化氢酶还与全磷存在密切相关性关系.

3 讨论

3.1 不同湿地类型土壤微生物与养分的关系

土壤微生物参与土壤物质循环与能量转化的全过程,不同的植被类型下其土壤微生物数量必定有明显的差异. 对不同湿地类型土壤微生物区系组成

表 2 土壤微生物数量、酶活性与土壤养分的相关关系

Table 2 Correlations between soil nutrients, microbial quantities and enzyme activities

土壤微生物指标	总有机碳	全氮	全磷	速效氮	速效磷	速效钾
细菌	0.679 **	0.740 **	0.482 **	0.637 **	0.425 **	0.404 *
真菌	0.843 **	0.825 **	0.820 **	0.824 **	0.688 **	0.596 *
放线菌	0.930 **	0.901 **	0.788 **	0.895 **	0.533 **	0.313
蔗糖酶	0.761 **	0.758 **	0.634 **	0.755 **	0.480 **	-0.015
纤维素酶	0.917 **	0.866 **	0.780 **	0.890 **	0.490 **	0.362 *
过氧化氢酶	0.585 **	0.556 **	0.590 **	0.576 **	0.119	-0.111

数量研究发现,细菌数量最多,其次是放线菌,真菌数量最少,这与马玲等^[13]的研究结果一致,真菌繁殖的最适温度是 24 ~ 25℃,采样时正值 10 月,东北已进入寒冷季节温度很低,不利于真菌生长,故数量显著减少. 本研究 4 种湿地类型土壤微生物数量都表现出了明显的表聚效应,且随土层深度增加而显著降低. 这是由于表层有机质含量较丰富,根系密集,根系分泌物及死亡根系能为土壤微生物生长提供丰富的养分^[19]. 下层土壤紧实,温度低,通气性差,不能提供给微生物良好的生存和繁殖空间,许多好气性微生物不能生存和繁殖,因此其微生物数量大大减少^[20]. Ekklund 等^[21]研究也表明微生物的数量及其活性随着土壤的深度而降低. Bossio 等^[22]对加利福尼亚湿地研究同样证实了随着土层深度增加,氧浓度降低,微生物群落发生改变,土壤厌氧菌增加,微生物数量明显减少. 在本研究中,芦苇湿地微生物总数量相对于陆地上的小叶章湿地少,但稍高于小叶章 + 沼柳湿地,这主要与芦苇湿地有较高的细菌数量有关,严炎等^[23]研究的芦苇湿地比人工杨树林细菌数量高,陈为峰等^[24]在研究黄河三角洲新生湿地不同植被类型土壤微生物也发现,相对于碱蓬、怪柳而言芦苇土壤同样有较高的细菌数量. 可能的原因与芦苇根茎具有发达的通气组织有关,其根和根状茎节间中空能为根际周围的好氧和兼氧微生物提供充足的养分^[25].

土壤微生物参与土壤碳、氮等元素的循环及养分的转化过程,调控着土壤碳截获能力、碳矿化过程以及生态系统生产力^[26],同时以自身生物量的形式储存土壤中的碳和其他矿物养分,因而它们既是土壤养分的重要来源,又是土壤养分的储存库. 本研究中湿地细菌、真菌和放线菌与土壤总有机碳、全氮、全磷、速效磷和速效氮相关性达到极显著水平. 这是因为土壤有机碳控制着土壤微生物介导的能量和营养物质循环,土壤有机碳含量越高,土壤微生物丰度越高. 同时,土壤微生物在进行自身合成与代谢过程中,除了碳源,仍需同化利用一定量的氮

素,适宜的土壤氮含量增加可能会提高微生物分解有机质的速率.

3.2 不同湿地类型土壤酶活性与养分的关系

研究中蔗糖酶、纤维素酶和过氧化氢酶活性基本上表现为随土层深度的增加而降低,这与微生物数量的研究结果一致. 土壤中有有机质是酶促底物的主要供源,其质量分数的多少显著影响着土壤酶的活性. 表层土壤有机质含量高,有利于微生物的生长,代谢活跃,呼吸强度增加而使表层积聚了较高的土壤酶活性^[27]. 小叶章 + 沼柳湿地和小叶章湿地蔗糖酶、过氧化氢酶、纤维素酶活性均较高,这是由于土壤通气性良好,微生物数量较淹水环境下的毛茛草湿地和芦苇湿地大大增加,而土壤微生物数量的多少和生命活动能力的强弱,在很大程度上决定了进入土壤中酶的数量^[28],酶活性高,表明碳素循环快,腐殖质合成能力高,促进了土壤有机质的积累.

土壤养分含量尤其是有机质是土壤微生物的 C 源和 N 源,而土壤微生物的种类和数量又在某种程度上决定土壤酶的来源. 相关性分析表明,不同湿地类型土壤蔗糖酶、纤维素酶和过氧化氢酶与土壤总有机碳、全氮、全磷和速效氮均具有极显著正相关关系,表明土壤酶活性的高低主要受到土壤碳、氮、磷养分含量的制约^[29,30]. 本研究中 3 种酶活性与总有机碳的相关性系数最大,表明土壤有机质含量高则酶活性越高. Taylor 等^[31]研究也表明,土壤酶与土壤有机质之间存在显著正相关. 万忠梅等^[27]对三江平原小叶章沼泽湿地的研究得出土壤酶活性与土壤活性有机碳表征指标间呈极显著正相关关系,其中蔗糖酶与 MBC、DOC 相关系数最高. 土壤酶直接参与了土壤营养元素的有效化过程,因此在一定程度上反映了土壤养分转化的动态情况.

4 结论

(1) 4 种湿地类型中,土壤总有机碳、全氮和全磷均随土层深度的增加而减少,小叶章 + 沼柳湿地

和小叶章湿地土壤总有机碳、全氮、全磷含量均显著高于常年淹水区的毛茛草湿地和芦苇湿地。各湿地速效钾、速效磷和速效氮的含量均较低,随土层深度的增加未表现出有规律的变化趋势。

(2)土壤微生物总数以及三大类群微生物数量差异显著,微生物总数表现为小叶章湿地>芦苇湿地>小叶章+沼柳湿地>毛茛草湿地。在微生物区系组成中,以细菌数量最多,其次是放线菌,真菌数量最少,且均随土层深度的增加而减少。

(3)4种湿地类型土壤蔗糖酶和纤维素酶均随土层深度的增加而减少,过氧化氢酶活性除在小叶章+沼柳湿地呈现出先增后减的变化趋势外,在另外3种湿地中均随土层深度的增加而减少($P < 0.05$)。在0~30 cm土层内,小叶章+沼柳湿地和小叶章湿地中3种酶活性均显著高于毛茛草湿地和芦苇湿地。

(4)相关性分析表明,土壤细菌、真菌和纤维素酶与土壤养分各指标均呈极显著或显著正相关,放线菌和蔗糖酶与速效钾、过氧化氢酶与速效钾、速效磷无显著相关性关系。说明土壤微生物和酶活性的增加可以促进土壤养分循环速率,是反映土壤肥力状况的重要指标。

致谢:非常感谢中国科学院三江站和洪河湿地保护区的工作人员对本研究的大力支持和帮助,感谢吉林省四平师范学院的管强同学在野外采样工作中给予的帮助。

参考文献:

- [1] Widmer F, Rasche F, Hartmann M. Community structures and substrate utilization of bacteria in soils from organic and conventional farming systems of the DOK long-term field experiment [J]. *Applied Soil Ecology*, 2006, **33**(3): 294-307.
- [2] Harris J A. Measurements of the soil microbial community for estimating the success of restoration [J]. *European Journal of Soil Science*, 2003, **54**(4): 801-808.
- [3] 李延茂, 胡江春, 汪思龙, 等. 森林生态系统中土壤微生物的作用与应用[J]. *应用生态学报*, 2004, **15**(10): 1943-1946.
- [4] Rillig M C, Mummery D L. Mycorrhizas and soil structure [J]. *New Phytologist*, 2006, **171**(1): 41-53.
- [5] Billings S A, Ziegler S E. Linking microbial activity and soil organic matter transformations in forest soils under elevated CO₂ [J]. *Global Change Biology*, 2005, **11**(2): 203-212.
- [6] 刘苹, 赵海军, 仲子文, 等. 三种根系分泌脂肪酸对花生生长和土壤酶活性的影响[J]. *生态学报*, 2013, **33**(11): 3332-3339.
- [7] Dick R P. Soil enzyme activities as integrative indicators of soil health [A]. In: Pankhurst C, Doube B M, Gupta V V S R (Eds.). *Biological Indicators of Soil Health* [M]. Michigan: CAB International, 1997. 121-156.
- [8] 吕桂芬, 吴永胜, 李浩, 等. 荒漠草原不同退化阶段土壤微生物、土壤养分及酶活性的研究[J]. *中国沙漠*, 2010, **30**(1): 104-109.
- [9] 陈晓娟, 吴小红, 简燕, 等. 农田土壤自养微生物碳同化潜力与其功能基因数量、关键酶活性分析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(3): 1144-1150.
- [10] 李玥, 张金池, 李奕建, 等. 上海市沿海防护林下土壤养分、微生物及酶的典型相关关系[J]. *生态环境学报*, 2010, **19**(2): 360-366.
- [11] 陈莉莉, 王得祥, 于飞, 等. 松栎混交林土壤微生物数量与土壤酶活性及土壤养分关系的研究[J]. *土壤通报*, 2014, **45**(1): 77-84.
- [12] 王笛, 马风云, 姚秀粉, 等. 黄河三角洲退化湿地土壤养分、微生物与土壤酶特性及其关系分析[J]. *中国水土保持科学*, 2012, **10**(5): 94-98.
- [13] 马玲, 丁新华, 顾伟, 等. 扎龙季节性湿草甸土壤养分和土壤微生物特性[J]. *应用生态学报*, 2011, **22**(7): 1717-1724.
- [14] 段云海, 边延辉, 邓国立. 湿地生态系统保护与修复探讨——以洪河自然保护区为例[J]. *环境科学与管理*, 2007, **32**(9): 152-153.
- [15] 赵魁义. 中国沼泽志[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [16] 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.
- [17] 中国科学院南京土壤研究所微生物室. 土壤微生物研究法[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [18] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [19] 吴建峰, 林先贵. 土壤微生物在促进植物生长方面的作用[J]. *土壤*, 2003, **35**(1): 18-21.
- [20] 王群, 尹飞, 郝四平, 等. 下层土壤容重对玉米根际土壤微生物数量及微生物量碳、氮的影响[J]. *生态学报*, 2009, **29**(6): 3096-3105.
- [21] Ekklund F, Ronn R, Christensen S. Distribution with depth of protozoa, bacteria and fungi in soil profiles from three Danish forest sites[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, **33**(4-5): 475-481.
- [22] Bossio D A, Fleck J A, Scow K M, et al. Alteration of soil microbial communities and water quality in restored wetlands[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**(6): 1223-1233.
- [23] 严炎, 孙启祥, 韦朝领. 人工杨树林对长江中游芦苇滩地土壤细菌多样性影响的研究[J]. *自然科学进展*, 2009, **19**(11): 1164-1174.
- [24] 陈为峰, 史衍玺. 黄河三角洲新生湿地不同植被类型土壤的微生物分布特征[J]. *草地学报*, 2010, **18**(6): 859-864.
- [25] 段晓男, 王效科, 欧阳志云, 等. 乌梁素海野生芦苇群落生物量及影响因子分析[J]. *植物生态学报*, 2004, **28**(2): 246-251.
- [26] Han W Y, Kemmitt S J, Brookes P C. Soil microbial biomass and activity in Chinese tea gardens of varying stand age and productivity[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, **39**(7): 1211-1221.

- 1468-1478.
- [27] 万忠梅, 宋长春. 小叶章湿地土壤酶活性分布特征及其与活性有机碳表征指标的关系[J]. 湿地科学, 2008, 6(2): 249-256.
- [28] 周礼恺. 土壤酶学[M]. 北京: 科学出版社, 1987. 228-270.
- [29] 陈立明, 满秀玲. 云冷杉林土壤酶活性与土壤养分的研究[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(4): 94-99.
- [30] 焦晓光, 魏丹, 隋跃宇. 长期施肥对黑土和暗棕壤土壤酶活性及土壤养分的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42(3): 698-703.
- [31] Taylor J P, Wilson B, Mills M S, *et al.* Comparison of microbial numbers and enzymatic activities in surface soils and subsoils using various techniques[J]. Soil Biology Biochemistry, 2002, 34(3): 387-401.
-

《环境科学》编辑部关于启用编辑信息管理系统公告

《环境科学》编辑部已经开通本刊网站并启用编辑信息管理系统(网站地址:<http://www.hjkx.ac.cn>). 该系统能实现在线投稿、在线审稿、期刊浏览检索等功能, 欢迎广大作者、读者和审稿专家使用. 目前我刊所有来稿都通过网站编辑信息管理系统进行. 作者使用编辑信息管理系统投稿时请先进行注册, 注册完毕后以作者身份登录, 按照页面上给出的提示投稿即可. 如果您在使用过程中有问题, 请及时与我刊编辑部联系.

邮政地址: 北京市海淀区双清路 18 号《环境科学》编辑部

邮 编: 100085

电 话: 010-62941102, 010-62849343

传 真: 010-62849343

E-mail: hjkx@rcees.ac.cn

网 址: www.hjkx.ac.cn

CONTENTS

Pollution of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Particulate Matters of Shenzhen	SUN Jian-lin, CHANG Wen-jing, CHEN Zheng-xia, <i>et al.</i> (1513)
Emission Characteristics of VOCs from Typical Restaurants in Beijing	CUI Tong, CHENG Jing-chen, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (1523)
Characteristics Analysis of Sulfur Dioxide in Pearl River Delta from 2006 to 2010	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i> (1530)
Comparison Test Between PM _{2.5} Continuous Monitoring System and Manual Sampling Analysis for PM _{2.5} in Ambient Air	WANG Qiang, ZHONG Qi, CHI Ying, <i>et al.</i> (1538)
Determination and Emission of Condensable Particulate Matter from Coal-fired Power Plants	PEI Bing (1544)
Potential Carbon Fixation Capability of Non-photosynthetic Microbial Community at Different Depth of the South China Sea and Its Response to Different Electron Donors	FANG Feng, WANG Lei, XI Xue-fei, <i>et al.</i> (1550)
Remote Sensing Estimation of Chlorophyll-a Concentration in Inland Lakes Based on GOCI Image and Optical Classification of Water Body	FENG Chi, JIN Qi, WANG Yan-nan, <i>et al.</i> (1557)
Hydrochemical Characteristics and Sources of Qingshuijiang River Basin at Wet Season in Guizhou Province	LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (1565)
Temporal-spatial Variation and Source Identification of Hydro-chemical Characteristics in Shima River Catchment, Dongguan City	GAO Lei, CHEN Jian-yao, WANG Jiang, <i>et al.</i> (1573)
Response and Control Factors of Groundwater to Extreme Weather, Jiguan Cave, Henan Province, China	LIU Xiao, YANG Yan, PENG Tao, <i>et al.</i> (1582)
Impact of Rocky Desertification Treatment on Underground Water Chemistry and Dissolved Inorganic Carbon Isotope in Karst Areas	XIAO Shi-zhen, XIONG Kang-ning, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (1590)
Difference of Karst Carbon Sink Under Different Land Use and Land Cover Areas in Dry Season	ZHAO Rui-yi, LIANG Zuo-bing, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (1598)
Vertical Migration Characteristics of Organochlorine Pesticides in Overlying Soil in Karst Terranes and Its Impact on Groundwater	SUN Yu-chuan, WANG Yong-qi, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i> (1605)
Pollution Status and Migration of Mercury in the Sediments of Nansi Lake in Shandong Province	CAO Fei-fei, YANG Li-yuan, PANG Xu-gui, <i>et al.</i> (1615)
Response of Sediment Micro Environment and Micro Interface to Physical Disturbance Intensity Under the Disturbance of <i>Chironomus plumosus</i>	SHI Xiao-dan, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1622)
Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition and Associated Impact on N Transport in the Watershed of Red Soil Area in Southern China	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1630)
Effect of Different Purple Parent Rock on Removal Rates of Nitrogen, Phosphorus and Organics in Landscape Water	HUANG Xue-jiao, LIU Xiao-chen, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1639)
Effects of <i>Litchi chinensis</i> Defoliation on Growth and Photosynthesis of <i>Microcystis aeruginosa</i>	WANG Xiao-xiong, JIANG Chen-chun, LI Jin-wei, <i>et al.</i> (1648)
Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to Green Algae	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (1655)
Formation Mechanism of the Disinfection By-product 1,1-Dichloroacetone in Drinking Water	DING Chun-sheng, MENG Zhuang, XU Yang-yang, <i>et al.</i> (1662)
Degradation Kinetics and Formation of Disinfection By-products During Linuron Chlorination in Drinking Water	LING Xiao, HU Chen-yan, CHENG Ming, <i>et al.</i> (1668)
Interference for Various Quench Agents of Chemical Disinfectants on Detection of Endotoxin Activities in Water	ZHANG Can, LIU Wen-jun, SHI Yun, <i>et al.</i> (1674)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Dairy Manure Biochar	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei, DIAO Jing-ru, <i>et al.</i> (1678)
Absorption of Uranium with Tea Oil Tree Sawdust Modified by Succinic Acid	ZHANG Xiao-feng, CHEN Di-yun, PENG Yan, <i>et al.</i> (1686)
Effect of Membrane Wettability on Membrane Fouling and Chemical Durability of SPG Membranes	ZHANG Jing, XIAO Tai-min, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (1694)
TiO ₂ -Induced Photodegradation of Levofloxacin by Visible Light and Its Mechanism	GUO Hong-sheng, LIU Ya-nan, QIAO Qi, <i>et al.</i> (1700)
Performance of Novel Macromolecule Flocculant in the Treatment of Wastewater Containing Cr(VI) Ions	WANG Gang, DU Feng-ling, CHANG Qing, <i>et al.</i> (1707)
On-line Estimation for the Amount of Stored PHA in Activated Sludge Based on OUR-HPR Measurements	ZENG Shan-wen, WANG Ze-yu, GAO Jing, <i>et al.</i> (1713)
Formation Mechanism of Self-forming Dynamic Membrane During Separation of High-concentration Sewage Sludge Fermented for Acid Production	HUANG Shuai, LIU Hong-bo, YIN Bo, <i>et al.</i> (1720)
Influence of Air Flux on Municipal Sludge Biodrying in a Pilot Scale Test	ZHANG Yu, HAN Rong, LU Wen-jing, <i>et al.</i> (1727)
Extraction of Heavy Metals from Sludge Using Biodegradable Chelating Agent <i>N,N</i> -bis(carboxymethyl) Glutamic Acid Tetrasodium	WU Qing, CUI Yan-rui, TANG Xiao-xiao, <i>et al.</i> (1733)
Biodiversity and Function Analyses of BIOLAK Activated Sludge Metagenome	TIAN Mei, LIU Han-hu, SHEN Xin, <i>et al.</i> (1739)
Characteristics of Nitrogen Removal by a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium YL	LIANG Xian, REN Yong-xiang, YANG Lei, <i>et al.</i> (1749)
Biodegradation Characteristics and Kinetics of <i>p</i> -nitrophenol by Strain <i>Arthrobacter</i> sp. CN2	REN Lei, SHI Yan-hua, JIA Yang, <i>et al.</i> (1757)
Biodegradation of Pyrene by Intact Cells and Spores of <i>Brevibacillus brevis</i>	LIU Zhi-chen, YE Jin-shao, PENG Hui, <i>et al.</i> (1763)
Investigation of Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in Landfill	LI Lei, XU Jing, ZHAO You-cai, <i>et al.</i> (1769)
Investigation of Antibiotic Resistance of Indigenous Bacteria and Abundance of Class I Integron in Matrix of Constructed Wetlands of Different Configurations	MAI Xiao-bei, TAO Ran, YANG Yang, <i>et al.</i> (1776)
Effects of Nitrate and CH ₄ on Anaerobic Oxidation of BETX in Landfill Cover Soils	LIU Rong, LONG Yan, WANG Li-li, <i>et al.</i> (1785)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Planted Larch Forest in Shanxi Plateau	YAN Jun-xia, LI Hong-jian, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (1793)
Effects of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration and Temperature Sensitivity in Spring Maize Field in Semi-Arid Regions on Loess Plateau	JIANG Ji-shao, GUO Sheng-li, WANG Rui, <i>et al.</i> (1802)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in the Street Dusts in Xuanwei and Their Health Risk Assessment	ZHANG Wen-chao, LÜ Sen-lin, LIU Ding-yu, <i>et al.</i> (1810)
Spatial Distribution of Magnetic Properties of Street Dust in Baoji City and Its Implications of Environment	ZHANG Jun-hui, WANG Jin, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (1818)
Effect of Long-term Fertilizer Application on the Stability of Organic Carbon in Particle Size Fractions of a Paddy Soil in Zhejiang Province, China	MAO Xia-li, LU Kou-ping, SUN Tao, <i>et al.</i> (1827)
Effects of Different Reclaimed Scenarios on Soil Microbe and Enzyme Activities in Mining Areas	LI Jun-jian, LIU Feng, ZHOU Xiao-mei (1836)
Soil Microorganism Characteristics and Soil Nutrients of Different Wetlands in Sanjinag Plain, Northeast China	XIAO Ye, HUANG Zhi-gang, WU Hai-tao, <i>et al.</i> (1842)
Strengthening Effects of Sodium Salts on Washing Kerosene Contaminated Soil with Surfactants	HUANG Zhao-lu, CHEN Quan-yuan, ZHOU Juan, <i>et al.</i> (1849)
Effects and Biological Response on Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil	YANG Qian, WU Man-li, NIE Mai-qian, <i>et al.</i> (1856)
Enhanced Phytoremediation of Heavy Metals from Contaminated Soils Using <i>Sedum alfredii</i> Hance with Biodegradable Chelate GLDA	WEI Ze-bin, CHEN Xiao-hong, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (1864)
Speciation Characteristics and Bioavailability of Heavy Metals in Oasis Soil Under Pb, Zn Combined Stress	JIN Cheng, ZHAO Zhuan-jun, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (1870)
Influence of Sulfur on the Formation of Fe-Mn Plaque on Root and Uptake of Cd by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	WANG Dan, LI Xin, WANG Dai-chang, <i>et al.</i> (1877)
Effects of Ozone on Photosynthesis of Several Plants	LI Miao-miao (1888)
A Method Research on Environmental Damage Assessment of a Truck Rollover Pollution Incident	CAI Feng, ZHAO Shi-bo, CHEN Gang-cai, <i>et al.</i> (1902)

《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5月15日 第36卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 5 May 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