

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第12期

Vol.33 No.12

**2012**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

特别策划:再生水灌溉利用生态风险研究专题

|                            |                                  |
|----------------------------|----------------------------------|
| 序                          | 陈卫平 (4069)                       |
| 再生水灌溉利用的生态风险研究进展           | 陈卫平, 张炜铃, 潘能, 焦文涛 (4070)         |
| 绿地再生水灌溉土壤微生物量碳及酶活性效应研究     | 潘能, 侯振安, 陈卫平, 焦文涛, 彭驰, 刘文 (4081) |
| 绿地再生水灌溉土壤盐度累积及风险分析         | 潘能, 陈卫平, 焦文涛, 赵忠明, 侯振安 (4088)    |
| 再生水灌溉对土壤性质及重金属垂直分布的影响      | 赵忠明, 陈卫平, 焦文涛, 王美娥 (4094)        |
| 模型模拟再生水灌溉对土壤水盐运动的影响        | 吕斯丹, 陈卫平, 王美娥 (4100)             |
| 模型模拟土壤性质和植被种类对再生水灌溉水盐运移的影响 | 吕斯丹, 陈卫平, 王美娥 (4108)             |
| 再生水灌溉农田土壤镉累积规律模拟研究         | 赵忠明, 陈卫平, 焦文涛, 王美娥 (4115)        |
| 再生水灌溉土壤人工合成麝香累积模型模拟        | 王美娥, 陈卫平, 焦文涛 (4121)             |
| 城市绿化草坪再生水灌溉对地下水水质影响研究      | 王巧环, 陈卫平, 王效科, 任玉芬, 张烨 (4127)    |
| 北京市再生水的公众认知度评估             | 张炜铃, 陈卫平, 焦文涛 (4133)             |

研究报告

|                                  |                                                           |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 北京地区臭氧时空分布特征的飞机探测研究              | 陈鹏飞, 张蕾, 权建农, 高扬, 黄梦宇 (4141)                              |
| 世博会期间上海市大气挥发性有机物排放强度及污染源研究       | 王红丽, 陈长虹, 黄海英, 王倩, 陈宜然, 黄成, 李莉, 张钢锋, 陈明华, 楼晟荣, 乔利平 (4151) |
| 贡嘎山本底站大气中 VOCs 的研究               | 张军科, 王跃思, 吴方堃, 孙杰 (4159)                                  |
| 区域大气环境风险源识别与危险性评估                | 张晓春, 陈卫平, 马春, 詹水芬, 焦文涛 (4167)                             |
| 稻草烟中正构烷烃和正构脂肪酸的碳同位素              | 刘刚, 孙丽娜, 李久海, 徐慧 (4173)                                   |
| 汽油轿车 NEDC 循环超细颗粒物排放特性            | 胡志远, 李金, 谭丕强, 楼狄明 (4181)                                  |
| 城市道路绿化带不同植物叶片附尘对大气污染的磁学响应        | 隆茜, 周菊珍, 孟颖, 达良俊 (4188)                                   |
| 闽江口养殖塘水-大气界面温室气体通量日进程特征          | 杨平, 仝川, 何清华, 黄佳芳 (4194)                                   |
| 模拟增温对冬小麦-大豆轮作农田土壤呼吸的影响           | 刘艳, 陈书涛, 胡正华, 任景全, 沈小帅 (4205)                             |
| 广西大石围天坑中多环芳烃的大气传输与分异             | 孔祥胜, 祁士华, 孙蓓, 黄保健 (4212)                                  |
| 松花江流域冰封期水体中多环芳烃的污染特征研究           | 马万里, 刘丽艳, 齐虹, 白杨, 沈吉敏, 陈忠林, 李一凡 (4220)                    |
| 温州城市河流中多环芳烃的污染特征及其来源             | 周婕成, 陈振楼, 毕春娟, 吕金刚, 许世远, 潘琪 (4226)                        |
| 温州城市河流河岸带土壤中 PAHs 的污染特征与来源       | 周婕成, 毕春娟, 陈振楼, 王璐, 许世远, 潘琪 (4237)                         |
| 辽河水系沉积物中 PAHs 的分布特征及风险评估         | 武江越, 刘征涛, 周俊丽, 高富 (4244)                                  |
| 某炼油厂退役场地土壤与浅层地下水酚类污染特征研究         | 裴芳, 罗泽娇, 彭进进, 祁士华 (4251)                                  |
| 某大型焦化企业污染场地中多环芳烃空间分布的分异性特征       | 刘庚, 郭观林, 南锋, 魏文侠, 李发生, 毕如田 (4256)                         |
| 太原市污灌区有机氯农药垂直分布特征及源解析            | 廖小平, 张彩香, 赵旭, 向青清, 李佳乐 (4263)                             |
| 上海市崇明岛农田土壤中多环芳烃分布和生态风险评价         | 吕金刚, 毕春娟, 陈振楼, 周婕成, 韩景超 (4270)                            |
| 近 50 年来深圳湾红树林湿地 Hg、Cu 累积及其生态危害评价 | 李瑞利, 柴民伟, 邱国玉, 贺蓓 (4276)                                  |
| 北运河源头区沙河水库沉积物重金属污染特征研究           | 张伟, 张洪, 单保庆 (4284)                                        |
| 太湖表层沉积物重金属赋存形态分析及污染特征            | 秦延文, 张雷, 郑丙辉, 曹伟 (4291)                                   |
| 典型季风型温冰川消融期融水化学日变化特征             | 朱国锋, 蒲焘, 何元庆, 王培震, 张建龙, 张宁宁, 辛惠娟 (4300)                   |
| 螺-草水质净化系统氮素环境归趋的实验研究             | 周露洪, 谷孝鸿, 曾庆飞, 毛志刚, 高华梅, 孙明波 (4307)                       |
| 固定化果胶酶抑制铜绿微囊藻生长研究                | 沈清清, 彭谦, 赖泳红, 纪开燕, 韩秀林 (4316)                             |
| 采用膜污染指数评估天然有机物在低压超滤膜中的污染行为       | 肖萍, 肖峰, 赵锦辉, 秦潼, 王东升, 冯金荣, 许光 (4322)                      |
| 水体中甲基汞光化学降解特征研究                  | 孙荣国, 毛雯, 马明, 张成, 王定勇 (4329)                               |
| 土霉素在乙酸水溶液中的臭氧氧化降解研究              | 李时银, 李小荣, 朱怡苹, 朱江鹏, 王国祥 (4335)                            |
| 酰胺咪唑光降解效能与机制及其影响因素研究             | 陈超, 赵倩, 封莉, 张立秋 (4340)                                    |
| 利用 FeS 去除水中硝基苯的试验研究              | 王夏琳, 李睿华 (4346)                                           |
| 地下污水管线泄漏原位自动监测模拟实验研究             | 郭磊, 贾永刚, 付腾飞, 刘晓磊, 赵战坤 (4352)                             |
| 表面活性剂改性沸石对水中酚类化合物吸附性能研究          | 谢杰, 王哲, 吴德意, 李春杰 (4361)                                   |
| 抗生素类制药废水厌氧消化产物急性毒性的检测            | 季军远, 邢雅娟, 郑平 (4367)                                       |
| 废砖块作为人工湿地填料的除磷能力研究               | 王振, 刘超翔, 李鹏宇, 董健, 刘琳, 朱葛夫 (4373)                          |
| 基于生物沸石复合滤料的间歇式脱氮水处理              | 庆承松, 鲍韬, 陈天虎, 陈冬, 谢晶晶 (4380)                              |
| 硝酸盐对厌氧生物膜和颗粒污泥的同时产甲烷反硝化性能影响研究    | 钟晨宇, 叶杰旭, 李若愚, 陈胜, 孙德智 (4387)                             |
| 水平电场作用下活性污泥的脱水研究                 | 季雪元, 王毅力, 冯晶 (4393)                                       |
| 多重环境因子对氟胺磺隆在土壤中降解的影响             | 宋宁慧, 单正军, 石利利, 郭敏, 许静, 孔德洋 (4400)                         |
| 碱后处理对互花米草沼渣理化特性的影响研究             | 陈广银, 郑正, 常志州, 王海芹, 叶小梅 (4406)                             |
| 含砷废渣高温烧结过程砷的矿物相结构变化与环境释放行为       | 王兴润, 农泽喜, 王琪 (4412)                                       |
| 国家大气污染物排放标准体系研究                  | 江梅, 张国宁, 张明慧, 邹兰, 魏玉霞, 任春 (4417)                          |
| 环境基准向环境标准转化的机制探讨                 | 毕岑岑, 王铁宇, 吕永龙 (4422)                                      |
| 对“有毒重金属”实施 2 种总量控制监管方式的利害分析      | 傅国伟 (4428)                                                |
| 《环境科学》第 33 卷(2012 年)总目录          | (4434)                                                    |
| 《环境科学》征订启事(4099)                 | 《环境科学》征稿简则(4166)                                          |
| 信息(4180, 4219, 4225, 4275)       | 编辑征稿通知(4172)                                              |

# 绿地再生水灌溉土壤微生物量碳及酶活性效应研究

潘能<sup>1,2</sup>, 侯振安<sup>2</sup>, 陈卫平<sup>1\*</sup>, 焦文涛<sup>1</sup>, 彭驰<sup>1</sup>, 刘文<sup>1</sup>

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 石河子大学农学院资源与环境科学系, 石河子 832003)

**摘要:** 再生水灌溉引起了土壤理化性质的变化, 其对土壤生物活性的影响备受关注. 以再生水利用较典型的北京为研究区, 分层采集了不同再生水灌溉历史的城区公园绿地与城郊农田表层土壤样品, 测定并分析了一些常规理化指标、土壤微生物量碳及5种土壤酶(脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶、脱氢酶和过氧化氢酶)活性, 探讨长期再生水灌溉下土壤微生物量碳和酶活性的变化. 结果表明, 再生水灌溉下公园绿地土壤微生物量碳和酶活性均高于其自来水对照灌区, 农田上升不明显. 与对照相比, 公园绿地与农田再生水灌区0~20 cm土层土壤微生物量碳平均含量分别上升了60.1%和14.2%, 公园绿地再生水灌区0~20 cm土层中土壤酶活性平均增幅为36.7%, 而农田为7.4%. 调查区土壤微生物量碳及酶活性均随土壤深度的增加而降低, 其中公园绿地0~10 cm与10~20 cm土层间差异极显著. 因此, 北京地区城市绿地使用再生水长期灌溉有助于提高土壤生物活性.

**关键词:** 再生水; 灌溉; 绿地; 土壤酶活性; 微生物量碳

中图分类号: X131.3; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)12-4081-07

## Study on Soil Enzyme Activities and Microbial Biomass Carbon in Greenland Irrigated with Reclaimed Water

PAN Neng<sup>1,2</sup>, HOU Zhen-an<sup>2</sup>, CHEN Wei-ping<sup>1</sup>, JIAO Wen-tao<sup>1</sup>, PENG Chi<sup>1</sup>, LIU Wen<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. Department of Resources and Environmental Sciences, Shihezi University, Shihezi 832003, China)

**Abstract:** The physicochemical properties of soils might be changed under the long-term reclaimed water irrigation. Its effects on soil biological activities have received great attentions. We collected surface soil samples from urban green spaces and suburban farmlands of Beijing. Soil microbial biomass carbon (SMBC), five types of soil enzyme activities (urease, alkaline phosphatase, invertase, dehydrogenase and catalase) and physicochemical indicators in soils were measured subsequently. SMBC and enzyme activities from green land soils irrigated with reclaimed water were higher than that of control treatments using drinking water, but the difference is not significant in farmland. The SMBC increased by 60.1% and 14.2% than those control treatments in 0-20 cm soil layer of green land and farmland, respectively. Compared with their respective controls, the activities of enzymes in 0-20 cm soil layer of green land and farmland were enhanced by an average of 36.7% and 7.4%, respectively. Investigation of SMBC and enzyme activities decreased with increasing of soil depth. Significantly difference was found between 0-10 cm and 10-20 cm soil layer in green land. Soil biological activities were improved with long-term reclaimed water irrigation in Beijing.

**Key words:** reclaimed water; irrigation; green space; soil enzyme activities; microbial biomass carbon

城市污水再生利用是当今解决水资源匮乏的重要举措之一, 同时也可减轻污水排放对区域生态环境的压力<sup>[1]</sup>. 近年来, 再生水作为一种稳定的新型水源在我国发展迅速, 广泛应用于城市绿地和农业灌溉等领域并取得了良好的效果. 目前, 世界各国再生水利用的经验表明, 在适当的管理下再生水利用是安全可行的<sup>[2~4]</sup>.

土壤生物指标能够敏感地反映土壤质量和健康变化, 通常被用着生态系统稳定性的早期预警和敏感指标<sup>[5]</sup>. 土壤微生物和土壤酶在土壤物质循环、能量转化及污染物降解等方面发挥着重要的作用<sup>[6]</sup>. 再生水中含有丰富的N、P和有机质等营养物质, 因而, 许多研究表明再生水灌溉可以提高土壤肥力、作物

产量和增加草坪草抗性等, 但再生水同时含有较高的盐分以及多种痕量污染物, 长期灌溉可导致这些污染物的累积, 进而威胁土壤健康如土壤理化性质恶化, 肥力降低等<sup>[7~10]</sup>. 因此, 再生水灌溉对土壤生态效应的影响备受关注<sup>[11~15]</sup>. Chen等<sup>[16]</sup>对美国加州再生水灌溉下与土壤C、N、P和S循环相关的17种酶活性的研究表明, 与对照相比, 酶活性平均提高了2.2~3.1倍. 何艺等<sup>[17]</sup>通过室内模拟试验发现, 再生水浇灌可在一定程度上提高受污染土壤的过氧化氢酶、

收稿日期: 2012-04-17; 修订日期: 2012-07-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41001330)

作者简介: 潘能(1986~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为污染生态学, E-mail: panneng.ok@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: wpchen@rcees.ac.cn

多酚氧化酶和脲酶活性,有利于受污染土壤肥力和质量的恢复. 焦志华等<sup>[7]</sup>在室内模拟试验条件下,得出再生水灌溉能够在一定程度提高土壤肥力,具体表现为土壤脲酶活性增加,碱性磷酸酶活性高于其它清水以及原污水处理.

北京市是我国再生水利用较早的城市之一,从2003年开始大力推进再生水利用,选定大兴北野厂灌区为再生水农田灌溉示范区,陶然亭公园、龙潭公园及朝阳公园等已有多多年再生水灌溉历史. 土壤微生物及酶活性受灌溉水质、植被类型、土壤质地、土地利用方式、管理措施和气候等多种因素的综合影响. 目前我国有关再生水灌溉对土壤微生物及酶活性的影响研究多集中在室内模拟试验,缺乏多年再生水灌溉下原位土壤微生物及酶活性变化的研究. 本研究选取了北京市典型再生水公园绿地和农田灌区,分析再生水长期灌溉下不同类型灌区土壤微生物及酶活性的变化情况,探究对土壤微生物活性及土壤肥力的影响,以期对再生水长期安全使用提供理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

研究区位于北京市,为典型暖温带半湿润大陆季风气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,春、秋短促;年降水量约620 mm,全年80%降水集中在6、7、8月这3个月;主要土壤类型为褐潮土、砂姜土以及一些零星分布的湿潮土和盐潮土.

本研究调查区主要分为再生水城市绿地灌区与农田灌区两类(见图1). 农田灌区选定了北野厂灌区(F1)和凉水河灌区(F2),其农作物种植以小麦和玉米为主. 北野厂与凉水河灌区均有多年污水灌溉的历史,但近年由于北京再生水回用工程快速发展,排入灌渠的多是经过处理的污水,因此农田灌溉水质明显提高. 城市绿地灌区选取了不同再生水来源、灌溉年限的公园及社区(共计8处),分别为陶然亭公园(P1)、龙潭公园(P2)、北京教学植物园(P3)、南馆公园(P4)、朝阳公园(P5)、柳荫公园(P6)、奥林匹克森林公园(P7)和中国科学院生态环境研究中心(P8). 此外,在大兴北野厂灌区选有使用地下水灌溉的农田作为对照区,在陶然亭公园内的华夏名亭园、北京教学植物园的“溢景园”及中国科学院生态环境研究中心这3处均选有自来水灌区作为绿地再生水灌溉对照区.

### 1.2 土壤样品的采集与测定

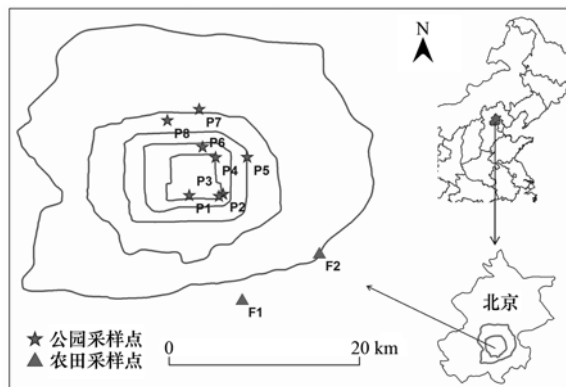


图1 采样点分布示意

Fig. 1 Location of soil samples collection sites

土样于2011年5月下旬采集,共采集100个土样,样品采集过程中遵循随机布点的原则,取土深度由地面至20 cm深处,每10 cm采集1个子样品,每个样品由5~7个子样品混匀组成,四分法除去残渣后留1 kg左右土样,室内自然风干后过1 mm筛,保存待测. 土样基础理化性质按文献<sup>[18]</sup>测定.

土壤酶活性的测定主要参照文献<sup>[19]</sup>:脱氢酶(Dehydrogenase)采用TTC分光光度法测定,酶活性以6 h后每克土壤释放出来的三苯基甲臜微克数表示;脲酶(Urease)采用苯酚钠比色法测定,其活性以3 h后每克土壤中 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 的毫克数表示;碱性磷酸酶(Alkaline phosphatase)采用磷酸苯二钠比色法测定,其活性以3 h后每克土壤中释放出酚的毫克数表示;蔗糖酶(Sucrase)采用3,5-二硝基水杨酸比色法测试,其活性以24 h后每克土壤中葡萄糖的毫克数表示;过氧化氢酶(Catalase)采用紫外分光光度法测定,其活性以20 min内每克土壤分解过氧化氢的毫克数表示;使用紫外可见分光光度计(UV-1700,日本岛津公司)完成比色过程. 土壤微生物量碳采用氯仿熏蒸-硫酸钾浸提-仪器分析法进行测定<sup>[20]</sup>,所用仪器为德国Elementar公司生产的Liqui TOC II分析仪.

### 1.3 数据处理

试验所有数据采用统计分析软件SPSS 16.0完成,运用独立样本 $T$ 检验对再生水组与对照组进行显著性分析,相关性分析通过SPSS中Pearson双侧显著检验法完成.

## 2 结果与讨论

### 2.1 再生水长期灌溉下农田与公园土壤微生物量碳的变化

土壤微生物量碳是在很大程度上反映土壤微生物

物数量与活性的重要指标,不仅是土壤碳素循环的重要环节,也是土壤碳素循环的驱动力<sup>[21,22]</sup>。由图 2 可知,农田与公园绿地再生水灌区土壤微生物量碳含量均高于其相应的对照灌区,尤其是公园绿地。在公园绿地灌区中,再生水灌区 0~10 cm 与 10~20 cm 土层土壤微生物量碳含量均显著高于其自来水对照灌区 ( $P$  分别为 0.000 和 0.003),分别增加了 58.2% 和 62.1%;而农田灌区中,增幅分别为 16.6% 和 11.8%。研究结果表明长期使用再生水灌溉有利于土壤微生物数量的增加。李晓娜等<sup>[23]</sup>研究结果也表明再生水灌溉能显著增加早熟禾、高羊茅和黑麦草土壤微生物量碳含量。

对同种灌溉水质下不同土层的土壤微生物量碳含量进行比较,发现灌区 0~10 cm 土层土壤微生物量碳高于 10~20 cm 土层,其中这种差异在公园绿地土壤更加明显,公园自来水灌区与再生水灌区 0~10 cm 土层土壤微生物量碳含量分别是其 10~20 cm 土层的 2.63 倍和 2.56 倍,且均达到了极显著水平 ( $P < 0.01$ )。公园绿地 0~10 cm 与 10~20 cm 土层之间土壤微生物量碳的差异较农田灌区显著的原因,可能是农田常年种植作物时耕作和施肥等管理措施优于公园绿地。郭道宇等<sup>[24]</sup>研究表明再生水灌溉有利于增加草坪草根际微生物的数量。城市绿地草坪的根际主要分布在 0~10 cm 土层附近,而农田主要耕作层达到 0~20 cm 土层或者更深,由于两种土地利用方式下耕作管理措施的差异,导致城市绿地土壤孔隙度小于农田土壤,紧实的公园绿地上的枯枝落叶等有机物质在没有人翻动的措施下很难到达下层土壤,日积月累,因此大量营养元素和微生物都聚集在表层,而且公园绿地的灌溉量小于农田,一次浇灌的水难以渗透到 10 cm 以下的土层,长期以来多种原因的综合作用致使公园绿地 0~10

cm 与 10~20 cm 土层间土壤微生物的差异较农田更大。

## 2.2 再生水长期灌溉对农田及公园绿地土壤酶活性的影响

土壤酶作为土壤的重要有机组分,常用作土壤肥力和土壤环境质量的评价指标<sup>[25]</sup>。本研究依据 Chen 等<sup>[16]</sup>对再生水长期灌溉下土壤酶活性的研究结果,选取了最具指示作用的脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶、脱氢酶和过氧化氢酶这 5 种土壤酶作为评价多年再生水灌溉下土壤酶活性的变化。此外,由于磷酸酶的分布、活性及稳定性受土壤 pH 的影响,而北京地区的土壤多呈碱性,试验调查区土壤 pH 在 7.5~8.3 之间,因此本研究只选择测试了碱性磷酸酶的活性。

再生水灌溉下这 5 种土壤酶活性变化情况如图 3 所示,整体而言,无论是再生水灌区还是对照灌区,农田土壤脲酶活性高于城市公园绿地土壤,导致这一结果的原因可能与农田在耕作过程中的翻土与施肥等措施密切相关。与对照相比,农田再生水灌区土壤脲酶、磷酸酶、蔗糖酶活性均有一定的升高,但差异不显著;公园绿地再生水灌区土壤脲酶、磷酸酶、蔗糖酶、脱氢酶和过氧化氢酶活性均有不同程度的上升,在 0~10 cm 土层其上升幅度分别为 19.4%、56.2%、35.4%、29.1% 和 7.6%,在 10~20 cm 土层分别上升了 25.2%、108.5%、46.1%、26.4% 和 13.5%。对比同种灌溉水下 0~10 cm 与 10~20 cm 土层之间土壤酶活性的差异,公园绿地灌区(自来水与再生水)这 5 种土壤酶均达到极显著的差异水平 ( $P < 0.01$ ),而农田灌区则差异不显著,表明公园土壤 0~10 cm 土层与 10~20 cm 土层的酶活性差异较农田土壤更明显,原因如前土壤微生物量碳所述,为农田和公园耕作管理方式不同所导致的结果。

调查区土壤磷酸酶活性如图 3(b) 所示,再生水灌溉下公园绿地 0~10 cm 与 10~20 cm 土层土壤磷酸酶活性均高于其自来水对照灌区,且都达到极显著水平 ( $P$  分别为 0.006 和 0.010)。这可能是由于经济技术的原因导致再生水中的污染物质并没有被完全去除,其中残留的 N、P 营养元素作用于土壤生物体,从而使土壤磷酸酶活性较高;或许也是再生水灌溉下植被快速生长反作用土壤有效磷,导致土壤有效磷的供不应求,进而刺激磷酸酶的活性增强。焦志华等<sup>[7]</sup>通过室内模拟试验,得出二级处理再生水灌溉下土壤磷酸酶活性均高于清水与原污水

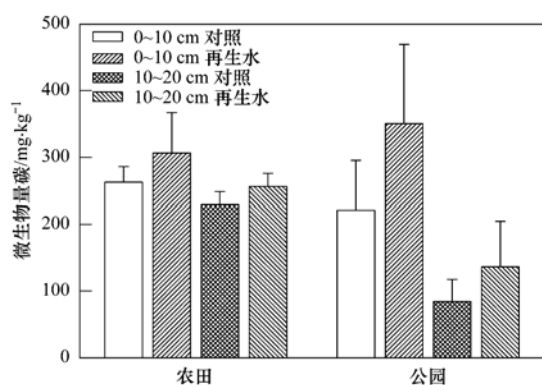


图 2 农田与公园灌区 0~20 cm 土壤微生物量碳含量变化

Fig. 2 Change of 0-20 cm soil microbial biomass carbon in farmland and park irrigation

灌溉组. Truu 等<sup>[26]</sup>研究表明二级处理再生水灌溉增加了柳树林的碱性磷酸酶活性.

脱氢酶和过氧化氢酶都属于氧化还原酶类,如

图 3(d)所示,再生水灌区的公园绿地 0~10 cm 土层土壤脱氢酶活性显著高于其自来水对照灌区 ( $P=0.03$ ). 由图 3(e)可以看出,再生水灌溉下公园

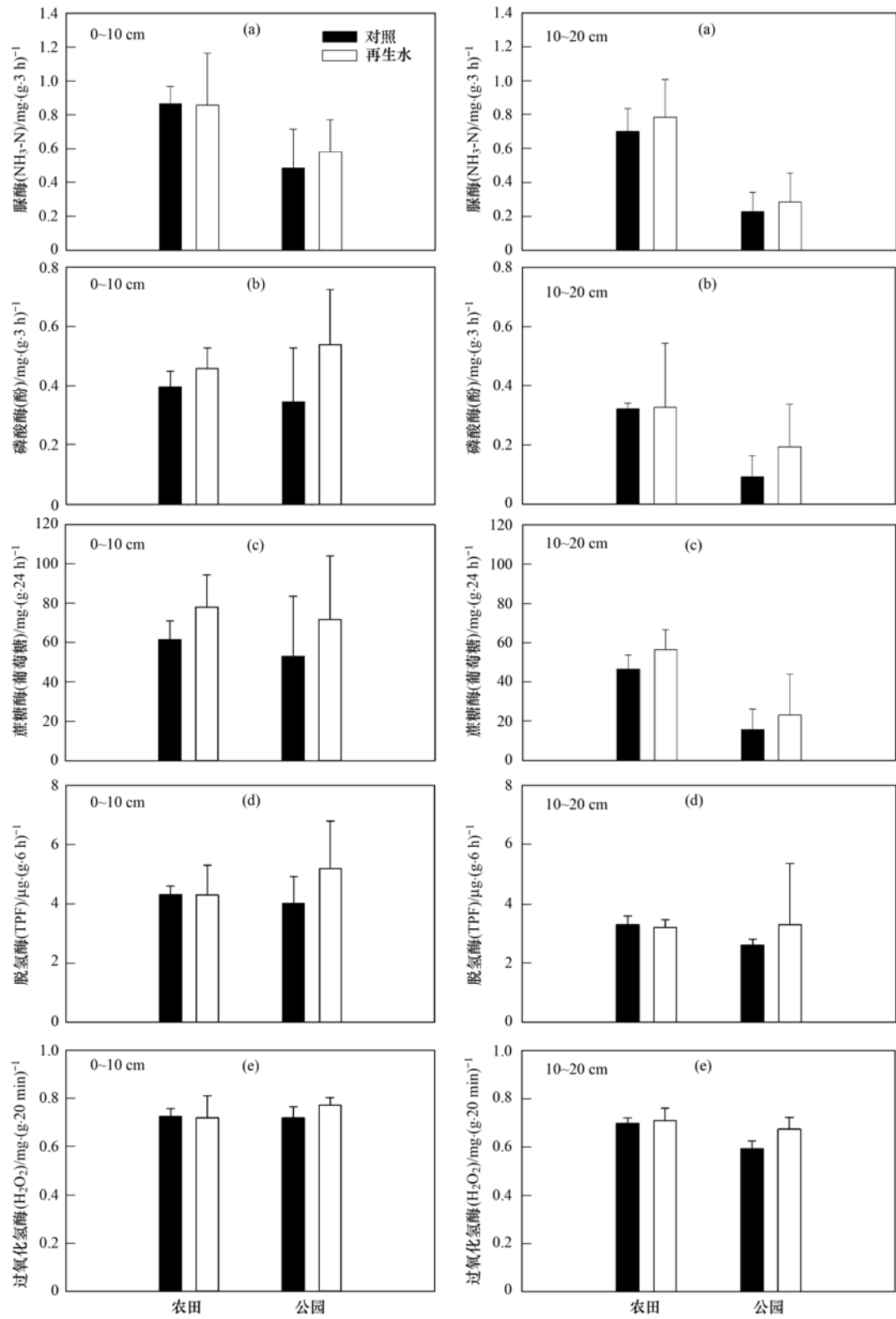


图 3 农田与公园灌区 0~20 cm 土壤酶活性变化情况

Fig. 3 Change of 0-20 cm soil enzyme activities in farmland and park irrigation

土壤 0 ~ 10 cm 与 10 ~ 20 cm 土层的过氧化氢酶活性均显著高于自来水对照灌区 ( $P$  分别为 0.003 和 0.000). 脱氢酶能促进或加快对进入土壤中的污染物所起的还原固定和氧化降解作用, 尤其能分解转化环状有机化合物, 是对土壤解毒能力的定量表征<sup>[27]</sup>. 过氧化氢酶能有效地防止过氧化氢对生物体的毒害作用, 其活性与好氧微生物的数量、土壤肥力、植物根系、土壤呼吸作用以及土壤微生物活动息息相关, 是表征土壤生物学特性的重要酶<sup>[28]</sup>. 调查区公园绿地再生水灌区土壤脱氢酶与过氧化氢酶活性的增强, 可能是再生水中的一些污染物质在土壤中的累积已导致土壤微环境的变化, 引起土壤氧化还原酶活性的上升. 总之, 虽然再生水灌区土壤酶活性有一定程度的上升, 但其影响因素错综复杂, 确切的原因仍有待进一步研究.

2.3 调查区土壤理化指标与土壤微生物量碳及酶活性的相关分析

从表 1 可知, 研究区土壤 pH 值与土壤微生物量碳及 5 种酶活性都存在极显著的负相关. 一方面, 土壤酶及微生物对土壤酸碱环境比较敏感, 另一方面, 土壤中过高的 pH 值会影响有机质、N、P 等养分的分布, 本研究调查样地土壤 pH 值与土壤全氮、有机质含量及有效磷含量之间存在明显的负相关, 进而对土壤生物产生不利的影响. 本研究中各样地 pH 变化较小, 土壤 pH 值对土壤微生物量碳及 5 种酶活性不利的影响可能是由于土壤养分的变化造成的. 全氮和有机质与土壤微生物量碳及 5 种酶活性存在极显著的正相关, 说明有机质含量的高低

是决定土壤微生物量碳及酶活性的主要因素之一, 同时也是土壤酶活性的重要来源. Taylor 等<sup>[29]</sup>研究表明土壤酶与土壤有机质间存在显著的正相关. 蔗糖酶与土壤盐度间存在显著的正相关, 土壤有效磷与脲酶和蔗糖酶间存在极显著的正相关, 但与土壤碱性磷酸酶间相关性并不显著. 沈有信等<sup>[30]</sup>研究表明磷酸酶数量的增加与土壤有效磷含量之间没有显著相关关系, 原因可能是再生水中的营养物质促进了植被的生长, 快速生长的植被加速了土壤中有效磷的消耗. 而本研究中农田再生水灌区土壤有效磷含量低于其地下水对照区, 因此根和土壤微生物在受到磷饥饿刺激时能增加酶的数量. 土壤微生物量碳与有效磷也存在显著的正相关, 调查区土壤微生物量碳与有效磷之间存在高度的同步性.

土壤微生物量碳及 5 种酶活性与土壤重金属间的相关性如表 1 所示, 土壤微生物量碳、脲酶、磷酸酶、蔗糖酶和过氧化氢酶与 Cd 存在极显著的正相关, 表明低浓度的 Cd 含量可能对土壤微生物及酶活性有促进作用. 除此之外, 磷酸酶与 As 存在显著的负相关, 通过分析发现调查区土壤 As 含量为 6.07 ~ 14.43  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 平均值为 9.16  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 与北京市背景值 7.09 相比<sup>[31]</sup>, 92.39% 的样点超过此背景值, 表明调查区的磷酸酶活性可能受到土壤 As 的抑制作用. 土壤微生物量碳及 5 种酶活性与 Cu、Zn、Cr 和 Pb 不存在显著的相关性. 调查区的重金属 (Cu、Zn、Cr、As、Cd 和 Pb) 统计分析表明, 除南馆公园外, 灌区的重金属都在正常的范围内, 虽然再生水灌区较对照有轻微的增加, 但都不显著.

表 1 土壤理化指标与土壤微生物量碳及酶活性的相关系数<sup>1)</sup>

Table 1 Correlation between soil microbial biomass carbon and enzyme activities and soil properties

|     | 脲酶        | 磷酸酶       | 蔗糖酶       | 脱氢酶       | 过氧化氢酶     | 微生物量碳     |
|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| pH  | -0.641 ** | -0.446 ** | -0.742 ** | -0.357 ** | -0.304 ** | -0.587 ** |
| EC  | 0.098     | 0.129     | 0.238 *   | 0.114     | 0.001     | 0.201     |
| 全氮  | 0.721 **  | 0.568 **  | 0.784 **  | 0.486 **  | 0.585 **  | 0.829 **  |
| 有机质 | 0.549 **  | 0.459 **  | 0.592 **  | 0.377 **  | 0.397 **  | 0.663 **  |
| 有效磷 | 0.419 **  | 0.057     | 0.362 **  | 0.051     | 0.069     | 0.225 *   |
| Cu  | -0.187    | -0.195    | 0.057     | -0.071    | -0.157    | -0.012    |
| Zn  | -0.184    | -0.162    | -0.059    | -0.056    | -0.135    | 0.021     |
| Cr  | 0.058     | -0.007    | 0.051     | 0.079     | 0.123     | 0.152     |
| As  | -0.057    | -0.223 *  | -0.002    | -0.105    | -0.006    | -0.007    |
| Cd  | 0.453 **  | 0.288 **  | 0.474 **  | 0.194     | 0.322 **  | 0.489 **  |
| Pb  | -0.137    | -0.129    | 0.037     | -0.065    | -0.082    | 0.067     |

1) \* 为  $P < 0.05$ , \*\* 为  $P < 0.01$ ,  $n = 92$

2.4 再生水灌溉土壤微生物效应分析

土壤微生物是土壤生态系统的重要组成部分之一, 几乎直接或间接地参与了所有的土壤生化过程<sup>[21]</sup>.

土壤酶是由动植物活体分泌、微生物以及动植物残体分解释放到土壤中的一类具有催化能力的生物活性物质<sup>[19]</sup>. 土壤脲酶、磷酸酶和蔗糖酶分别在土壤

系统的氮、磷和有机质循环代谢过程中起着重要作用<sup>[16,32]</sup>。其中脲酶活性与土壤的有机质含量、微生物数量、全氮和速效氮含量成正相关;磷酸酶能够加速有机磷的脱磷速度,提高土壤有效磷的含量,是衡量土壤有效磷水平的一个重要指标,其活性受土壤的腐殖质含量、活性磷量、能矿化有机磷化合物的微生物数量以及植物类型等因素的影响;蔗糖酶不仅可以表征土壤生物活性强度,还常被用着评价土壤熟化程度和肥力水平。脱氢酶是存在于活的微生物体内的胞内酶,常被作为评价土壤微生物活性和功能多样性的重要指标<sup>[27]</sup>。过氧化氢酶能有效地防止代谢中间产物过氧化氢对生物体的毒害作用。

土壤微生物与酶活性是评价再生水灌溉对环境安全效应的重要指标。早期不合理的再生污水灌溉造成土壤渗透性降低以及盐分、重金属和有害物质的累积,一方面导致微生物数量下降、种群结构改变,另一方面使土壤酶活性受到抑制<sup>[33]</sup>。张楠<sup>[34]</sup>研究表明再生水盐度高对放线菌产生胁迫,导致其数量减少。Antil 等<sup>[35]</sup>认为重金属在土壤中积累的含量达到足够浓度时会影响微生物、氮的转化和土壤酶的活性。

目前以城市生活污水为主要水源的再生水重金属浓度较低,而原污水中的有机质和矿质养料为微生物生长和繁殖提供了丰富的营养来源,从而有利于土壤中微生物的生长,土壤酶活性升高。因此,使用再生水灌溉通常情况下有助于土壤微生物数量的增加<sup>[3,7,24]</sup>。通过对北京地区长期再生水灌溉下土壤微生物量碳及酶活性的变化的调查分析结果表明,再生水灌溉并没有降低土壤微生物量碳与土壤酶活性,相反,与对照相比都有一定程度的上升。证明再生水中富含的营养元素有益于绿地土壤生物生长繁殖。

### 3 结论

再生水灌溉有助于提高公园绿地和农田土壤微生物量碳及酶活性,尤其是公园绿地;公园绿地再生水灌区 0~10 cm 与 10~20 cm 土层土壤微生物量碳含量较其对照自来水灌区分别上升了 58.2% 和 62.1%,而农田灌区中,增幅分别为 16.6% 和 11.8%;公园绿地 0~10 cm 土层土壤脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶、脱氢酶和过氧化氢酶的活性上升幅度分别为 19.4%、56.2%、35.4%、29.1% 和 7.6%,10~20 cm 土层分别为 25.2%、108.5%、

40.1%、26.4% 和 13.5%;再生水灌区的农田土壤的脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶的活性略高于地下水对照区,而脱氢酶与过氧化氢酶活性与对照差异不明显;调查区土壤 0~10 cm 土层土壤微生物量碳及酶活性均高于 10~20 cm 土层,其中公园绿地达到了极显著水平。因此,北京地区多年使用再生水灌溉促进了土壤微生物生长及酶活性。

### 参考文献:

- [1] 陈卫平. 美国加州再生水利用经验剖析及对我国的启示[J]. 环境工程学报, 2011, 5(5): 961-966.
- [2] 周彤. 污水回用决策与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [3] 郭道宇. 再生水草坪灌溉生态效应及其评价[D]. 北京: 首都师范大学, 2006.
- [4] Kayaalp N M. Regulatory framework in South Australia and reclaimed water reuse options and possibilities[J]. Desalination, 1996, 106: 317-322.
- [5] Schlöter M, Dilly O, Munch J C. Indicators for evaluating soil quality[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2003, 98 (1-3): 255-262.
- [6] Gianfreda L, Sannino F, Vtoante A. Pesticide effects on the activity of tree immobilized and soil invertase[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1995, 27(9): 1201-1208.
- [7] 焦志华, 黄占斌, 李勇, 等. 再生水灌溉对土壤性能和土壤微生物的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(2): 319-323.
- [8] 张大庚, 依艳丽, 郑西来. 沈抚污水灌区石油烃对土壤及水稻的影响[J]. 土壤通报, 2003, 34(4): 333-336.
- [9] 孙吉雄, 韩烈保, 陈学平. 用二线城市污水灌溉草坪[J]. 草原与草坪, 2001, 92(1): 36-40.
- [10] Xu J, Wu L S, Chang A C, et al. Impact of long term reclaimed wastewater irrigation on agricultural soils: a preliminary assessment[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 183(1-3): 780-786.
- [11] 崔超, 韩烈保, 苏德荣. 再生水绿地灌溉水质标准的比较研究[J]. 再生资源研究, 2004, (1): 28-31.
- [12] Al-Nakshabandi G A, Saqqar M M, Shatanawi M R. Some environmental problems associated with the use of treated wastewater for irrigation in Jordan [J]. Agricultural Water Management, 1997, 34(1): 81-94.
- [13] 宝哲, 杨培岭, 任树梅, 等. 模拟再生水灌溉下污灌土壤中盐分离子交换运移的试验研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(1): 101-106.
- [14] 杨林林, 杨培岭, 任树梅, 等. 再生水灌溉对土壤理化性质影响的试验研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 82-85.
- [15] 魏益华, 徐应明, 周其文, 等. 再生水灌溉对土壤盐分和重金属累积分布影响的研究[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(3): 5-8.
- [16] Chen W P, Wu L S, Frankenberger W T, et al. Soil enzyme activities of long-term reclaimed wastewater-irrigated soils[J]. Journal of Environmental Quality, 2008, 37(S5): S36-S42.

- [17] 何艺, 谢志成, 朱琳. 不同类型水浇灌对已污染土壤酶及微生物量碳的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, **27**(6): 2227-2232.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [19] 关松荫. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [20] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [21] 周丽霞, 丁明懋. 土壤微生物学特性对土壤健康的指示作用[J]. 生物多样性, 2007, **15**(2): 162-171.
- [22] Menéndez S, López-Bellido R J, Benítez-Vega J, *et al.* Long-term effect of tillage, crop rotation and N fertilization to wheat on gaseous emissions under rainfed Mediterranean conditions [J]. Europe Journal of Agronomy, 2008, **28**(4): 559-569.
- [23] 李晓娜, 吴菊英, 徐彪, 等. 再生水灌溉草坪对土壤质量影响的试验研究[J]. 水土保持学报, 2011, **25**(3): 245-249.
- [24] 郭道宇, 董志, 宫辉力. 再生水灌溉对草坪土壤微生物群落的影响[J]. 中国环境科学, 2006, **26**(4): 482-485.
- [25] Al-Lahham O, El Assi N M, Fayyad M. Impact of treated wastewater irrigation on quality attributes and contamination of tomato fruit[J]. Agricultural Water Management, 2003, **61**(1): 51-62.
- [26] Truu M, Truu J, Heinsoo K. Changes in soil microbial community under willow coppice: the effect of irrigation with secondary-treated municipal wastewater [J]. Ecological Engineering, 2009, **35**(6): 1011-1020.
- [27] 秦华, 林先贵, 陈瑞蕊, 等. DEHP 对土壤脱氢酶活性及微生物功能多样性的影响[J]. 土壤学报, 2005, **42**(5): 829-833.
- [28] 冯绍元, 邵洪波, 黄冠华. 重金属在小麦作物体中残留特征的田间试验[J]. 农业工程学报, 2002, **2**(4): 113-115.
- [29] 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.
- [30] 沈有信, 周文君, 刘文耀, 等. 云南松根际与非根际磷酸酶活性与磷的有效性[J]. 生态环境, 2005, **14**(1): 91-94.
- [31] 陈同斌, 郑袁明, 陈煌, 等. 北京市土壤重金属含量背景值的系统研究[J]. 环境科学, 2004, **25**(1): 117-122.
- [32] Microbial Room of Institute of Soil CAS. Research methods on soil microbial[M]. Beijing: Science Press, 1985.
- [33] 郭道宇, 赵文吉, 李小娟, 等. 再生污水绿地灌溉生态效应研究进展[J]. 自然灾害学报, 2008, **17**(6): 100-104.
- [34] 张楠. 再生水灌溉绿地水质指标限制的试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2005.
- [35] Antil R S, Gupta A P, Narwal R P. Effect of substrate concentration soil moisture and organic amendments on urease activity of soil containing variable nickel amounts[J]. Arid Soil Research and Rehabilitation, 1993, (7): 381-387.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                  |                                                                     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Preface .....                                                                                                                                                    | CHEN Wei-ping (4069)                                                |
| Ecological Risks of Reclaimed Water Irrigation: A Review .....                                                                                                   | CHEN Wei-ping, ZHANG Wei-ling, PAN Neng, <i>et al.</i> (4070)       |
| Study on Soil Enzyme Activities and Microbial Biomass Carbon in Greenland Irrigated with Reclaimed Water .....                                                   | PAN Neng, HOU Zhen-an, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (4081)          |
| Soil Salinity in Greenland Irrigated with Reclaimed Water and Risk Assessment .....                                                                              | PAN Neng, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4088)         |
| Effect of Reclaimed Water Irrigation on Soil Properties and Vertical Distribution of Heavy Metal .....                                                           | ZHAO Zhong-ming, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4094)  |
| Simulation of Effect of Irrigation with Reclaimed Water on Soil Water-Salt Movement by ENVIRO-GRO Model .....                                                    | LÜ Si-dan, CHEN Wei-ping, WANG Mei-e (4100)                         |
| Simulation of Effects of Soil Properties and Plants on Soil Water-salt Movement with Reclaimed Water Irrigation by ENVIRO-GRO Model .....                        | LÜ Si-dan, CHEN Wei-ping, WANG Mei-e (4108)                         |
| Modeling the Cd Accumulation in Agricultural Soil Irrigated with Reclaimed Water .....                                                                           | ZHAO Zhong-ming, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4115)  |
| Model Simulation of the Transportation, Transformation and Accumulation of Synthetic Musk in Soils Input Through Recycle Water Irrigation .....                  | WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao (4121)                      |
| Impacts of Reclaimed Water Irrigation of Urban Lawn on Groundwater Quality .....                                                                                 | WANG Qiao-huan, CHEN Wei-ping, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (4127)   |
| Public Awareness Assessment of Water Reuse in Beijing .....                                                                                                      | ZHANG Wei-ling, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao (4133)                  |
| Temporal and Spatial Distribution of Ozone Concentration by Aircraft Sounding over Beijing .....                                                                 | CHEN Peng-fei, ZHANG Qiang, QUAN Jian-nong, <i>et al.</i> (4141)    |
| Emission Strength and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Shanghai During 2010 EXPO .....                                                      | WANG Hong-li, CHEN Chang-hong, HUANG Hai-ying, <i>et al.</i> (4151) |
| Study on Atmospheric VOCs in Gongga Mountain Base Station .....                                                                                                  | ZHANG Jun-he, WANG Yue-si, WU Fang-kun, <i>et al.</i> (4159)        |
| Regional Atmospheric Environment Risk Source Identification and Assessment .....                                                                                 | ZHANG Xiao-chun, CHEN Wei-ping, MA Chun, <i>et al.</i> (4167)       |
| Carbon Isotopic Compositions of <i>n</i> -Alkanes and <i>n</i> -Alkanoic Acids in the Smoke from Combustion of Rice Straw .....                                  | LIU Gang, SUN Li-na, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (4173)               |
| Research on NEDC Ultrafine Particle Emission Characters of a Port Fuel Injection Gasoline Car .....                                                              | HU Zhi-yuan, LI Jin, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (4181)             |
| Magnetic Response of Street Tree Leaves to Particulate Pollution in Shanghai .....                                                                               | LONG Qian, ZHOU Ju-zhen, MENG Jie, <i>et al.</i> (4188)             |
| Diurnal Variations of Greenhouse Gas Fluxes at the Water-Air Interface of Aquaculture Ponds in the Min River Estuary .....                                       | YANG Ping, TONG Chuan, HE Qing-hua, <i>et al.</i> (4194)            |
| Effects of Simulated Warming on Soil Respiration in a Cropland Under Winter Wheat-Soybean Rotation .....                                                         | LIU Yan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (4205)           |
| Transport and Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Air from Dashiwei Karst Sinkholes in Guangxi, China .....                                   | KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, SUN Qian, <i>et al.</i> (4212)        |
| Pollution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water of Songhua River Basin During the Icebound Season .....                                   | MA Wan-li, LIU Li-yan, QI Hong, <i>et al.</i> (4220)                |
| Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Urban Rivers of Wenzhou City .....                                                  | ZHOU Jie-cheng, CHEN Zhen-lou, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (4226)   |
| Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Riparian Soils Along Urban Rivers of Wenzhou City .....                             | ZHOU Jie-cheng, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (4237)   |
| Spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Partial Surface Sediments of Liaohe River .....                                  | WU Jiang-yue, LIU Zheng-tao, ZHOU Jun-li, <i>et al.</i> (4244)      |
| Phenols Pollutants in Soil and Shallow Groundwater of a Retired Refinery Site .....                                                                              | PEI Fang, LUO Ze-jiao, PENG Jin-jin, <i>et al.</i> (4251)           |
| Heterogeneous Characteristic of PAHs' Spatial Distribution in a Large Coking Site of China .....                                                                 | LIU Geng, GUO Guan-lin, NAN Feng, <i>et al.</i> (4256)              |
| Vertical Distribution and Source Analysis of Organochlorine Pesticides in Sewage Irrigation Area, Taiyuan City .....                                             | LIAO Xiao-ping, ZHANG Cai-xiang, ZHAO Xu, <i>et al.</i> (4263)      |
| Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Agricultural Soil of the Chongming Island in Shanghai .....                   | LÜ Jin-gang, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (4270)      |
| Mercury and Copper Accumulation During Last Fifty Years and Their Potential Ecological Risk Assessment in Sediment of Mangrove Wetland of Shenzhen, China .....  | LI Rui-li, CHAI Min-wei, QIU Guo-yu, <i>et al.</i> (4276)           |
| Characteristics of Heavy Metal Pollution in the Sediments from Shahe Reservoir, the Upper Reach of the North Canal River .....                                   | ZHANG Wei, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing (4284)                         |
| Speciation and Pollution Characteristics of Heavy Metals in the Sediment of Taihu Lake .....                                                                     | QIN Yan-wen, ZHANG Lei, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (4291)        |
| Chemical Composition and Daily Variation of Melt Water During Ablation Season in Monsoonal Temperate Glacier Region: A Case Study of Baishui Glacier No. 1 ..... | ZHU Guo-feng, PU Tao, HE Yuan-qing, <i>et al.</i> (4300)            |
| Experimental Study on the Environmental Fate of Nitrogen in Snail-Macrophyte Ecosystem for Water Purification .....                                              | ZHOU Lu-hong, GU Xiao-hong, ZENG Qing-fei, <i>et al.</i> (4307)     |
| Growth Inhibition Effect of Immobilized Pectinase on <i>Microcystis aeruginosa</i> .....                                                                         | SHEN Qing-qing, PENG Qian, LAI Yong-hong, <i>et al.</i> (4316)      |
| A Novel Approach of Using Fouling Index to Evaluate NOM Fouling Behavior During Low Pressure Ultrafiltration Process .....                                       | XIAO Ping, XIAO Feng, ZHAO Jing-hui, <i>et al.</i> (4322)           |
| Characteristics of Monomethylmercury Photodegradation in Water Body .....                                                                                        | SUN Rong-guo, MAO Wen, MA Ming, <i>et al.</i> (4329)                |
| Degradation of Oxytetracycline with Ozonation in Acetic Acid Solvent .....                                                                                       | LI Shi-yin, LI Xiao-rong, ZHU Yi-ping, <i>et al.</i> (4335)         |
| Photodegradation Performance and Mechanisms of Carbamazepine and Its Impact Factors .....                                                                        | CHEN Chao, ZHAO Qian, FENG Li, <i>et al.</i> (4340)                 |
| Investigation of Nitrobenzene Removal by Iron Sulfide (FeS) .....                                                                                                | WANG Xia-lin, LI Rui-hua (4346)                                     |
| Experimental Research on <i>In-Situ</i> Auto-Monitoring for Underground Sewage Pipeline Leakage .....                                                            | GUO Lei, JIA Yong-gang, FU Teng-fei, <i>et al.</i> (4352)           |
| Adsorption of Phenol Chemicals by Surfactant-Modified Zeolites .....                                                                                             | XIE Jie, WANG Zhe, WU De-yi, <i>et al.</i> (4361)                   |
| Acute Toxicity of Antibiotics and Anaerobic Digestion Intermediates in Pharmaceutical Wastewaters .....                                                          | JI Jun-yuan, XING Ya-juan, ZHENG Ping (4367)                        |
| Study on Phosphorus Removal Capability of Constructed Wetlands Filled with Broken Bricks .....                                                                   | WANG Zhen, LIU Chao-xiang, LI Peng-yu, <i>et al.</i> (4373)         |
| Denitrification Water Treatment with Zeolite Composite Filter by Intermittent Operation .....                                                                    | QING Cheng-song, BAO Tao, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (4380)        |
| Influence of Nitrate on the Simultaneous Methanogenesis and Denitrification Reaction of Anaerobic Biofilm and Granular Sludge .....                              | ZHONG Chen-yu, YE Jie-xu, LI Ruoyu, <i>et al.</i> (4387)            |
| Study on Dewatering of Activated Sludge Under Applied Electric Field .....                                                                                       | JI Xue-yuan, WANG Yi-li, FENG Jing (4393)                           |
| Effects of Multiple Environmental Factors on Trifluorsulfuron-methyl Degradation in Soils .....                                                                  | SONG Ning-hui, SHAN Zheng-jun, SHI Li-li, <i>et al.</i> (4400)      |
| Effect of Alkaline Post-Treatment on Physicochemical Property of Digested <i>Spartina alterniflora</i> .....                                                     | CHEN Guang-yin, ZHENG Zheng, CHANG Zhi-zhou, <i>et al.</i> (4406)   |
| Structural Changes in Mineral Phases and Environmental Release Behavior of Arsenic During Sintering of Arsenic-containing Waste .....                            | WANG Xing-run, NONG Ze-xi, WANG Qi (4412)                           |
| Study on Emission Standard System of Air Pollutants .....                                                                                                        | JIANG Mei, ZHANG Guo-ning, ZHANG Ming-hui, <i>et al.</i> (4417)     |
| Mechanism for Transformation of Environmental Criteria into Environmental Standards in China .....                                                               | BI Cen-cen, WANG Tie-yu, LÜ Yong-long (4422)                        |
| Effect Analysis on the Two Total Load Control Methods for Poisonous Heavy Metals .....                                                                           | FU Guo-wei (4428)                                                   |

# 《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2012年12月15日 33卷 第12期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 12 Dec. 15, 2012

|         |                                                                                                                                                                     |                  |    |                                                                                                                                                                                                                         |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 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)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院                                                                                                                               | Co-Sponsored     | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>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<br>北京市2871信箱(海淀区双清路<br>18号, 邮政编码:100085)<br>电话:010-62941102, 010-62849343<br>传真:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | Edited           | by | The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE )<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版     | 科 学 出 版 社<br>北京东黄城根北街16号<br>邮政编码:100717                                                                                                                             | Published        | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>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<br>电话:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com                                                                                                | Distributed      | by | Science Press<br>Tel:010-64017032<br>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<br>(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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行