

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)	
专辑征稿通知(4172)	

绿地再生水灌溉土壤盐度累积及风险分析

潘能^{1,2}, 陈卫平², 焦文涛², 赵忠明², 侯振安^{1*}

(1. 石河子大学农学院资源与环境科学系, 石河子 832003; 2. 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)

摘要: 和常规水源相比, 再生水常含有较高的盐分, 因而再生水灌溉下土壤盐分的风险引起学者的广泛关注. 以再生水利用程度较高的北京市为研究区域, 分层采集了不同再生水灌溉历史城区公园绿地与城郊农田表层土壤样品, 测定并分析了土壤电导率(EC)和钠吸附比(SAR)等盐分相关指标, 探讨再生水灌溉下土壤盐分的累积特征, 分析了长期再生水灌溉下土壤盐分累积的风险. 结果表明, 再生水灌溉下城市绿地和农田土壤 $EC_{1:5}$ 值和 $SAR_{1:5}$ 值均显著高于其对照灌区, 这种差异在农田中更加显著. 公园与农田中再生水灌区土壤 $EC_{1:5}$ 值较对照灌区分别上升了 12.4% 和 84.2%; 土壤 $SAR_{1:5}$ 值上升幅度分别为 64.5% 和 145.8%. 调查区土壤 0~10 cm 与 10~20 cm 土层间 $EC_{1:5}$ 值和 $SAR_{1:5}$ 值差异不显著. 长期再生水灌溉会使盐分累积在土壤表层, 同时土壤孔隙度有轻微的减小. 在北京地区再生水用于城市绿地灌溉引起表层土壤盐渍化的风险不容忽视.

关键词: 再生水; 灌溉; 电导率; 钠吸附比; 土壤孔隙度; 风险

中图分类号: X53; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)12-4088-06

Soil Salinity in Greenland Irrigated with Reclaimed Water and Risk Assessment

PAN Neng^{1,2}, CHEN Wei-ping², JIAO Wen-tao², ZHAO Zhong-ming², HOU Zhen-an¹

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

Abstract: Compared to drinking water or groundwater, reclaimed water contains more salts. Therefore, the effects of application of reclaimed water on the soil salinity have received great attentions. To evaluate the potential risks posed by long-term reclaimed water irrigation, we collected surface soil samples from urban green lands and suburban farmlands of Beijing represented different irrigation durations. The electrical conductivity (EC) and sodium adsorption ratio (SAR) in soils were measured subsequently. Both $EC_{1:5}$ and $SAR_{1:5}$ from the green land and farmland soils irrigated with reclaimed water were significantly higher than those of control treatments (drinking water or groundwater irrigation). The $EC_{1:5}$ values increased by 12.4% and 84.2% than control treatments in the green land and farmland, respectively. The $SAR_{1:5}$ values increased by 64.5% and 145.8% than control treatments, respectively. No significant differences of both $EC_{1:5}$ and $SAR_{1:5}$ were found between of 0-10 cm and 10-20 cm soil layer. A slight decrease of soil porosity was observed. The field investigation suggested there was a high potential of soil salinization under long-term reclaimed water irrigation. Proper management practices should be implemented to minimize the soil salinity accumulation risk when using reclaimed water for irrigation in Beijing.

Key words: reclaimed water; irrigation; electrical conductivity; sodium adsorption ratio; soil porosity; risk

再生水利用具有节约淡水资源、保护水环境等现实意义. 此外, 再生水中含有大量植物生长的营养成分, 当再生水用于农田和城市绿地灌溉时可以减少化肥的使用量, 节约生产成本. 目前, 世界上已有许多国家和地区把城市污水再生利用作为解决水资源短缺的重要战略之一, 并已取得良好的效果^[1~3].

城市绿地和农业灌溉是再生水利用的一种主要途径. 与常规的灌溉水相比, 再生水中含有较高的盐分, 因而再生水灌溉下土壤盐渍化风险广受关注^[4~6]. Hulugalle 等^[7]的研究表明当实验土壤排水性能良好时, 再生水灌区土壤盐度没有增加. Wu 等^[8]认为短期内再生水滴灌几乎不会引起草坪草的盐分胁迫, 而喷灌因为与草坪草直接接触, 其耐受

性要差于滴灌. Friedel 等^[9]在墨西哥进行田间实验发现再生水长期灌溉能够增加土壤盐分含量. Fabregat 等^[10]研究发现, 持续使用再生水灌溉高尔夫球场会导致渗流层顶层土壤中钠含量显著增加. Qian 等^[11]通过对美国高尔夫球场绿地(再生水和清水灌溉)实验研究, 发现土壤 EC_e 值与钠吸附比分别增加 187% 和 481%. 大量研究结果表明长期使用再生水灌溉会导致土壤盐分累积, 并且再生水中较高含量的钠离子会置换土壤中钙、镁等二价离子,

收稿日期: 2011-12-22; 修订日期: 2012-02-14

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: hzatytl@163.com

导致土壤大孔隙的破坏,渗透性降低,造成土壤紧实^[11~13]。

再生水灌区土壤盐分主要受灌溉水质、灌溉方式、土壤特性和气候等影响,因此盐分在土壤中的迁移规律不尽相同。陈卫平^[14]研究表明有效的管理策略包括科学的灌溉方式、选择种植耐盐植物、用额外的水洗去过量的盐分以及土壤改良增加土壤淋溶潜力等,均可有效降低再生水灌溉盐度累积风险和损害。我国再生水利用起步较晚,有关再生水灌溉下土壤盐分变化的研究多集中在大田试验及室内盆栽模拟实验,缺乏多年再生水灌溉下原位土壤盐分累积特征的研究。北京市从2003年开始大力推进再生水利用,大兴北野厂灌区定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年再生水灌溉历史。本研究的主要目的是调查再生水长期灌溉下不同类型灌区土壤盐分的累积情况,探究其对植被生长的潜在风险,旨在为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

研究区域位于北京市,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。农田灌区选定了北野厂灌区及凉水河灌区,其农作物以小麦和玉米为主。北野厂与凉水河灌区均有污水灌溉的历史,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),公园有陶然亭公园、龙潭公园、南馆公园、柳荫公园、朝阳公园与奥林匹克森林公园;社区为北京教学植物园和中国科学院生态环境研究中心。此外,在大兴区(远离再生水灌渠)选有地下水灌区作为农田再生水灌溉对照区,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

土样于2011年5月下旬采集,共采集100个土样(见表1),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。实验中使用土水质量比为1:5的浸提液测定土壤电导率 $EC_{1:5}$ 以及 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的浓度。 $EC_{1:5}$ 值使用电导率仪(Mettler Toledo 326,深圳怡华公司)测定; Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 采用全谱直读等离子体发射光谱仪(ICP-OES,Prodigy,美国Leeman公司)测定;土壤孔隙度采用环刀法测定。

表1 各采样点的土壤样本数

Table 1 Number of soil samples in each sampling point		
采集地点	再生水灌区样本数	对照灌区样本数
大兴区农田	6	6
通州区农田	2	—
陶然亭公园	8	8
龙潭公园	8	—
北京教学植物园	8	6
南馆公园	8	—
朝阳公园	8	—
柳荫公园	8	—
奥林匹克森林公园	8	—
中国科学院生态环境研究中心	8	8

1.3 数据处理

参考美国农业部60号农业手册中土壤饱和百分率定义,据土水质量比1:5浸提液中的 $EC_{1:5}$ 值和土样饱和含水量转化得到土壤饱和电导率 EC_e ^[15]。数据统计分析使用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。

其中钠吸附比(sodium adsorption ratio, SAR)按下式计算:

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}}$$

式中, Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的单位均为 $mmol \cdot L^{-1}$ 。

2 结果与讨论

2.1 再生水长期灌溉农田及公园土壤盐分的变化

全盐量是反映土壤盐害的重要指标之一,电导率可直接反映土壤全盐量。由图1可知,再生水灌溉下农田土壤0~10 cm与10~20 cm土层的平均 $EC_{1:5}$ 值均高于地下水灌溉对照区,分别高出93.3%和75.1%,长期再生水灌溉下土壤盐分积累明显。导致这一结果最主要的原因是灌溉水中盐分的差异,如表2所示再生水中全盐量约是自来水的2倍。此外,农田土壤蒸发作用强,灌溉频率低,致使表层土壤盐分累积。

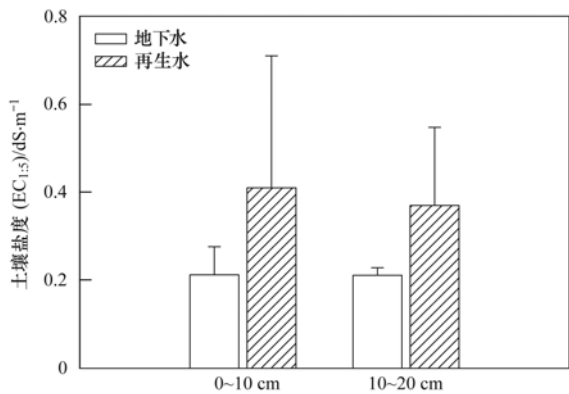


图1 农田灌区0~20 cm土壤盐分变化情况

Fig. 1 Changes of 0-20 cm soil salinity in farmland irrigation

表2 灌溉水全盐量统计表¹⁾/mg·L⁻¹

Table 2 Statistical table of total dissolved solids (TDS)

研究区域	in irrigation water/mg·L ⁻¹			文献
	自来水	再生水	污水	
北京水源六厂	412	786	—	[16]
北京市酒仙桥再生水厂	412	814	—	[17]
北京市高碑店污水处理厂	314	758~767	958	[4]
北京大兴北野厂	—	680~926	—	[18]

1)表中数据部分是根据 $EC(dS\cdot m^{-1}) \times 640 = TDS(mg\cdot L^{-1})$ 转换而来

图2显示了公园绿地再生水与自来水灌区土壤盐分的变化. 总体上,再生水灌区0~10 cm土层与10~20 cm土层土壤平均 $EC_{1:5}$ 值均高于其自来水对照灌区,其中0~10 cm土层再生水与自来水灌区间差异达到显著水平($P=0.002$),这与杨林林等^[19]和魏益华等^[20]的研究结果一致. 城市公园绿地再生水灌区之间土壤 $EC_{1:5}$ 平均值大小顺序为:陶然亭公园($0.301 dS\cdot m^{-1}$)>龙潭公园($0.284 dS\cdot m^{-1}$)>北京教学植物园($0.272 dS\cdot m^{-1}$)>奥林匹克森林公园($0.265 dS\cdot m^{-1}$)>朝阳公园(0.260

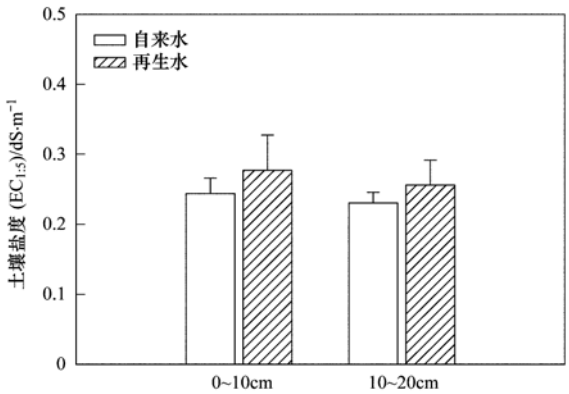


图2 公园灌区土壤0~20 cm盐分变化情况

Fig. 2 Changes of 0-20 cm soil salinity in park irrigation

$dS\cdot m^{-1}$)>中国科学院生态环境研究中心($0.249 dS\cdot m^{-1}$)>柳荫公园($0.235 dS\cdot m^{-1}$). 陶然亭公园与龙潭公园 $EC_{1:5}$ 值较大与其使用再生水浇灌的年限最长有关. 郭道宇^[21]对比研究再生水与自来水灌溉的草坪,同样发现随着灌溉年限的增加,再生水灌溉下土壤中盐分出现累积.

对农田以及公园绿地灌区土壤不同深度盐分的比较表明:农田地下水与农田再生水灌区土壤0~10 cm与10~20 cm土层 $EC_{1:5}$ 值相当,0~10 cm土层略大于10~20 cm土层,但二者间差异均不显著. 通过对公园绿地灌区土壤不同深度盐分比较,得出与农田灌区相同的结论. 从调查区土壤0~10 cm与10~20 cm土层 $EC_{1:5}$ 值无显著差异说明灌溉水深度已达到土壤20 cm以下,对土壤盐分离子有一定的淋洗作用,可能少数盐分离子已随水渗入下层土壤,但本研究未对20 cm以下的土壤进行监测,需要以后的实验进一步验证.

图3显示了农田土壤与公园绿地盐度变化的对比情况. 地下水灌溉下农田土壤 $EC_{1:5}$ 值略小于自来水浇灌的公园绿地,但是再生水灌溉的农田土壤 $EC_{1:5}$ 值却是再生水灌区的公园土壤的1.46倍. 农田与公园再生水灌区土壤 $EC_{1:5}$ 值较其对照(分别为地下水与自来水)分别上升了84.2%和12.4%,且公园绿地再生水灌区0~20 cm土层土壤与其对照自来水灌区的差异达到了极显著水平($P<0.001$). 经调查北野厂灌区与凉水河灌区均有多年的污灌历史,多年污水灌溉是农田再生水灌区土壤盐度高于公园绿地的主要原因. 另外,与灌溉管理等措施也有关系,比如公园绿地灌溉频率高于农田. 因此,再生水无论是用于农田还是公园绿地灌溉,其导致的土壤盐分积累问题都应当引起高度的重视.

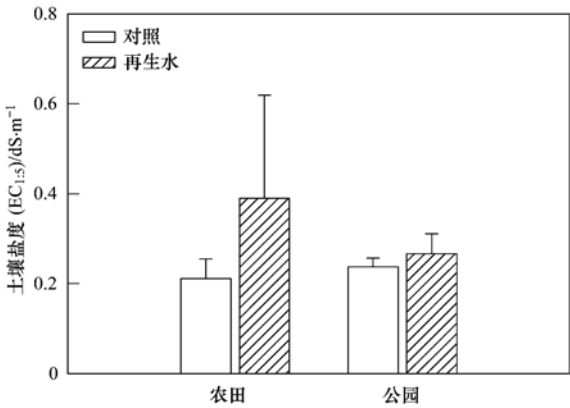


图3 农田与公园灌区土壤0~20 cm盐分变化对比

Fig. 3 Changes of 0-20 cm soil salinity in farmland and park irrigation

2.2 再生水长期灌溉对农田及公园土壤钠吸附比的影响

土壤钠吸附比(SAR 值)是反映土壤碱化危害的国际通用指标之一,土壤钠吸附比值越大,土壤的导水能力越差. 本研究中 2 种不同灌溉水下土壤 $SAR_{1:5}$ 值差异明显(图 4 ~ 图 6). 由图 4 可知,无论 0 ~ 10 cm 还是 10 ~ 20 cm 土层,用再生水灌溉的农田土壤的 $SAR_{1:5}$ 值均显著高于用地下水灌溉的对照区土壤,分别增加了 145.8% 和 64.5%. 从图 5 可以看出,同一土层不同灌溉水公园绿地土壤 $SAR_{1:5}$ 具有明显差异,用再生水灌溉的公园绿地土壤 $SAR_{1:5}$ 值高于用自来水灌溉的土壤,其中公园绿地灌区 10 ~ 20 cm 土层差异达到极显著水平($P < 0.001$). 结合图 4 与图 5 发现:同种灌溉水下 0 ~ 10 cm 与 10 ~ 20 cm 土层间 $SAR_{1:5}$ 值差异不明显,结论与本研究的土壤盐度 $EC_{1:5}$ 值一致.

城市公园绿地采样点土壤 $SAR_{1:5}$ 平均值大小顺序为:陶然亭公园(1.316) > 龙潭公园(1.131) > 北京教学植物园(0.808) > 朝阳公园(0.735) > 奥林匹克森林公园(0.670) > 中国科学院生态环境研究中心(0.619) > 柳荫公园(0.237). 其中陶然亭公园与龙潭公园值较大,与其使用再生水浇灌的年限最长有关. 徐小元等^[6]的研究也表明土壤钠吸附比随着再生水灌溉年限的增加而增大.

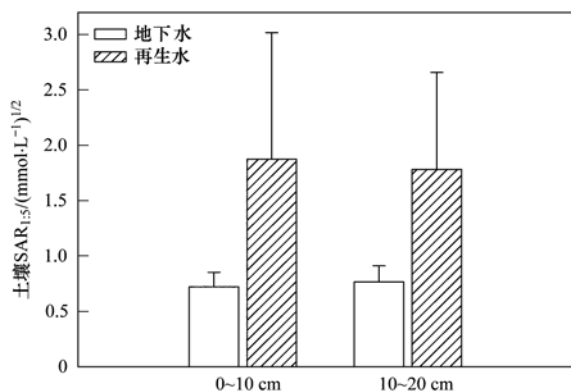


图 4 农田灌区土壤 0 ~ 20 cm $SAR_{1:5}$ 变化情况

Fig. 4 Changes of 0-20 cm soil $SAR_{1:5}$ in farmland irrigation

2.3 再生水长期灌溉下农田及公园绿地土壤孔隙度的变化

土壤孔隙度是反映土壤质量的重要指标之一,其大小反映了土壤的疏松程度和通气透水能力. 再生水长期灌溉下农田与公园土壤孔隙度的变化见图 7,再生水灌区农田与公园绿地土壤孔隙度较其对照灌区都有所下降,差异不显著. 这与郑汐等^[22]研究

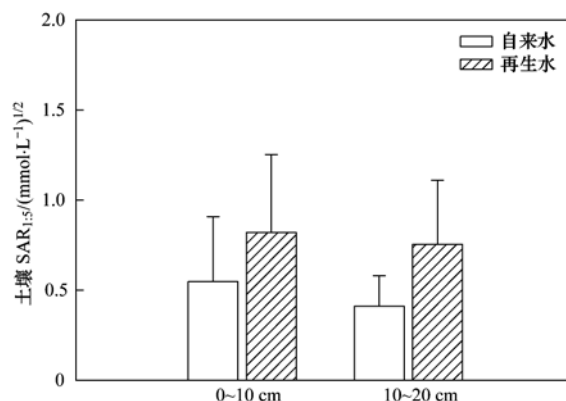


图 5 公园灌区土壤 0 ~ 20 cm $SAR_{1:5}$ 变化情况

Fig. 5 Changes of 0-20 cm soil $SAR_{1:5}$ in park irrigation

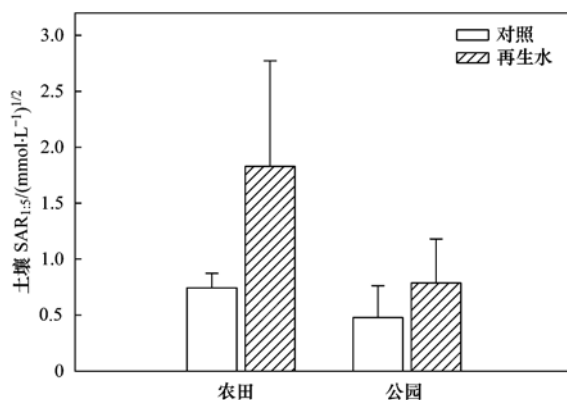


图 6 农田与公园灌区土壤 0 ~ 20 cm $SAR_{1:5}$ 变化情况

Fig. 6 Changes of 0-20 cm soil $SAR_{1:5}$ in farmland and park irrigation

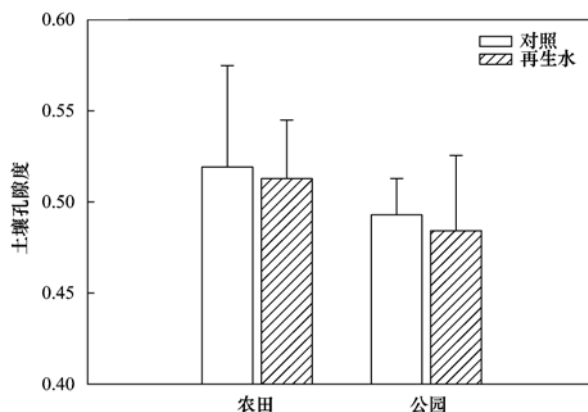


图 7 农田与公园灌区 0 ~ 10 cm 土层土壤孔隙度变化

Fig. 7 Changes of 0-10 cm soil porosity in farmland and park irrigation

结果基本一致. 郑汐等对经过 7 a 中水浇灌的草坪绿地的理化性状进行了测定分析,实验结果表明在长期中水浇灌下,0 ~ 20 cm 土层土壤孔隙度小于清

水对照. 总体来看,农田土壤孔隙度大于公园绿地土壤,原因在于农田土壤由于耕作措施的特殊性,每年都有翻地,而公园绿地不但没有翻地管理,大量的行人践踏也是导致公园土壤孔隙度低于农田的原因之一. 本研究结果表明,再生水灌区土壤 $SAR_{1:5}$ 呈上升趋势,致使土壤渗透性降低,加之土壤孔隙度有轻微的减小,因此需加强管理以应对灌区土壤透水性问题.

2.4 再生水长期灌溉下土壤盐分风险分析

常规的污水二级处理工艺无法去除盐分,在三级处理时还会因为混凝工艺带入混凝剂等可溶性盐分,使总溶解性固体不降反增. 一些可溶性盐可作为营养成分对植物的生长具有一定的促进作用,但随灌溉时间的增加,每灌溉一次盐分在土壤积累一次,土壤中可溶性盐含量过高则对植物的伤害有持久的累积作用. 因此再生水的品质对植物与土壤的影响很大,将其大规模用于灌溉时应定期监测土壤盐分的累积状况,防止植被生长受到盐分胁迫. 国际上,盐碱土的分类标准以及对植物生长的危害常基于饱和浸提液电导率 EC_e (见表3).

本实验研究区农田地下水灌区土壤饱和 EC_e 值范围在 $2.71 \sim 3.65 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 之间,平均值为 $2.92 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$. 农田再生水灌区土壤饱和 EC_e 值范围在 $4.21 \sim 10.20 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 之间,平均值为 $5.35 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$,最大值出现在通州再生水灌区. 据表3可知农田调查区土壤均受到轻度盐渍化的影响,其中通州调查区已为重度盐土,其作物产量将受到严重影响. 因此该区应及时采取相应的管理措施和调整耕作制度,以保证种植作物稳定的产量.

公园绿地自来水灌区土壤饱和 EC_e 值范围在 $2.94 \sim 3.65 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 之间,平均值为 $3.25 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$. 公园绿地再生水灌区土壤饱和 EC_e 值范围为 $2.67 \sim 5.06 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$,平均值为 $3.66 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$, $EC_e > 4.0$

$\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 的样点数占总样数的 28.6%,已达到中度盐碱土水平,其中最大 EC_e 值 $5.06 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 出现在北京教学植物园再生水灌区. 左海涛等^[24]认为“清水+再生水”交替灌溉可增加土壤盐分的淋洗作用,减少盐分对植物生长的影响. 由于本次公园绿地采样前(2011年5月底)北京下过一次雷阵雨,降雨量较大对本研究区 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土体的盐分有一定的淋洗,因此实际公园绿地 EC_e 值可能会高一些. 通过对公园绿地调查区土壤饱和 EC_e 值比较发现,其结果与 $EC_{1:5}$ 值一致,即再生水灌溉年限最长的陶然亭公园与龙潭公园平均 EC_e 值较高,分别为 $3.34 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 和 $3.16 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$. 以上数据表明一些采样点土壤在再生水灌溉过程中已有盐渍化趋势,因此为确保大多数植物在适宜的土壤盐度下生长,灌溉土壤必须有一个较充分的盐分淋洗.

不同植物的耐盐性差别很大,如土壤 EC_e 值超过 $3 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 时早熟禾的生长将会受到一定程度的影响,野牛草的耐盐范围为 $3 \sim 6 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$,高羊茅的耐盐范围为 $6 \sim 9 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$,银杏为中度耐盐植物,可以在土壤盐度为 $2 \sim 3 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 下生存,杨柳、槐树为高度耐盐植物,可以在土壤盐度为 $3 \sim 4 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 下生存^[25]. 参考赵娟娟等^[26]对北京城区公园重要值前10位的乔木、灌木、草本植物研究结果,结合调查及前人^[3,25]实验结果表明:银杏、月季、榆叶梅、国槐、大叶黄杨、绦柳、芍药、白三叶、高羊茅等具有较高的耐盐性,比较适宜使用达到相关标准的再生水灌溉;早熟禾、二球悬铃木、山楂、珍珠梅、紫叶小聚、百合、天竺葵、四叶草等对盐分相对敏感的植物,使用再生水灌溉风险较高,需要科学的管理.

总之,盐度对植物的影响主要取决于土壤盐度、灌溉水盐度、浸出率及生长植物自身的耐盐度等多方面的因素,为促使再生水灌溉安全利用,需制定出详细的再生水灌溉盐分管理制度.

表3 土壤饱和浸出液 EC_e 值与盐分、植物生长间的关系^[23]

Table 3 Relationships between EC_e and salt, plant growth

饱和浸出液 EC_e 值 / $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$	盐分 / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	盐渍化程度	植物反应
0 ~ 2	< 1	非盐渍化土壤	对作物不产生盐害
2 ~ 4	1 ~ 3	轻度盐渍化土	对盐分极敏感的作物产量可能受到影响
4 ~ 8	3 ~ 5	中度盐土	对盐分敏感作物产量受到影响,但对耐盐作物(苜蓿、棉花、甜菜、高粱、谷子)无多大影响
8 ~ 16	5 ~ 10	重盐土	只有耐盐作物有收成,但影响种子发芽,而且出现缺苗,严重影响产量
> 16	> 10	极重盐土	只有极少数耐盐植物能生长,如耐盐的牧草、灌木、树木等

3 结论

使用再生水灌溉的公园绿地和农田土壤 $EC_{1:5}$ 值

和 $SAR_{1:5}$ 均显著高于对照灌区;公园绿地与农田再生水灌区土壤 $EC_{1:5}$ 值较其对照灌区分别上升了 12.4% 和 84.2%,土壤 $SAR_{1:5}$ 值上升幅度分别为 64.5% 和

145.8%;调查区土壤0~10 cm与10~20 cm土层间 $EC_{1:5}$ 值和 $SAR_{1:5}$ 差异不显著,有轻度盐渍化的趋势;随灌溉年限的增加其盐度累积程度增强;有多年再生水(污水)灌溉历史的农田盐渍化程度普遍高于公园绿地。原位土壤盐分累积研究表明长期再生水灌溉导致了土壤盐分的积累,其累积程度受多种因素影响。因此,建议长期使用再生水浇灌地区应保证一定的额外灌溉量,定期用清水灌溉冲洗土壤,或选择一些耐盐性强的植被。

参考文献:

- [1] 张克强, 张洪生, 宁安荣, 等. 国内外城市再生水灌溉绿地的研究与应用[J]. 农业环境科学学报, 2005, **24**(增刊): 384-388.
- [2] Friedler E. Water reuse-an integral part of water resources management: israel as a case study[J]. Water Policy, 2001, **3**(1): 29-39.
- [3] 王昌俊. 再生水灌溉对城市绿地生态系统的影响研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2005.
- [4] 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.
- [5] Ramirez-Fuentes E, Lucho-Constantino C, Escamilla-Silva E, et al. Characteristics and carbon and nitrogen dynamics in soil irrigated with wastewater for different lengths of time [J]. Bioresource Technology, 2002, **85**(2): 179-187.
- [6] 徐小元, 孙维红, 吴文勇, 等. 再生水灌溉对典型土壤盐分和离子浓度的影响[J]. 农业工程学报, 2010, **26**(5): 34-39.
- [7] Hulugalle N, Weaver T, Hicks A. Irrigating cotton with treated sewage[J]. Cotton Grower, 2003, **24**(3): 41-42.
- [8] Wu L, Guo X, Brown J. Studies of Recycled Water Irrigation and Performance of Landscape Plants under Urban Landscape Conditions[R]. Slosson Report, 1999-2000. 302-308.
- [9] Friedel J K, Langer T, Siebe C, et al. Effects of long-term waste water irrigation on soil organic matter, soil microbial biomass and its activities in central Mexico [J]. Biological Fertilize Soil, 2000, **31**(5): 414-421.
- [10] Fabregat S, Mas J, Candela L, et al. Impact of urban treated wastewater reuse during irrigation of golf course[J]. EGS XXVII General Assembly, 2002, **77**(3): 21-26.
- [11] Qian Y L, Mecham B. Long-term effects of recycled wastewater irrigation on soil chemical properties on golf course fairways[J]. Agronomy Journal, 2005, **97**(3): 717-721.
- [12] Wang Z, Chang A C, Wu L S, et al. Assessing the soil quality of long-term reclaimed wastewater irrigated cropland [J]. Geoderma, 2003, **114**(3-4): 261-278.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Richards L A. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils[M]. Washington: United States Department of Agriculture, 1954.
- [16] 张娟, 王艳春, 田宇. 再生水灌溉对绿地土壤盐分指标和速效养分的影响[J]. 北京园林, 2009, **25**(4): 50-53.
- [17] 王艳春, 张娟, 郝宝刚. 再生水灌溉城市园林绿地对植物矿物质元素和土壤性状的影响研究[J]. 中国园林, 2007, (2): 62-65.
- [18] 宝哲, 杨培岭, 任树梅, 等. 模拟再生水灌溉下污灌土壤中盐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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 郑汐, 王齐, 孙吉雄, 等. 中水灌溉对草坪绿地土壤理化性状及肥力的影响[J]. 草原与草坪, 2011, **31**(2): 61-64.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [24] 左海涛, 武菊英, 温海峰. 再生水灌溉对草坪草生长和土壤的影响[J]. 核农学报, 2005, **19**(6): 474-478.
- [25] Kotuby-Amacher J, Koenig R, Kitchen B. Salinity and plant tolerance[EB/OL]. Utah State University Cooperative Extension Publication AG-SO-03. Logan. 2000.
- [26] 赵娟娟, 欧阳志云, 郑华, 等. 北京城区公园的植物种类构成及空间结构[J]. 应用生态学报, 2009, **20**(2): 298-306.

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) 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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行