

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)
稻草烟尘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)	

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

(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: 再生水是城市绿化的良好水源,但其潜在的地下水污染问题不容忽视. 本研究基于对地下水及其灌溉水水质的长期监测,探讨了绿化草坪地下水主要理化性质和污染物浓度的变化规律及其与灌溉用水水质的关系. 连续5 a的监测结果表明,再生水氨氮超出用于城市绿化的城市杂用水水质标准(GB/T 18920-2002),总氮偏高,二者变化范围分别为 $0.05 \sim 65.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $2.56 \sim 78.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均值分别为 $12.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $28.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 使用自来水灌溉,地下水水质指标正常,波动不大;用再生水灌溉草坪(冬末初春4个月未浇)对地下6 m浅井水质影响明显,对20 m深井水质影响不明显,主要变化表现在硝态氮浓度值升高. 浅井地下水硝态氮浓度与灌溉的再生水溶解态氮呈滞后的显著正相关性,表明用再生水灌溉草坪可能会引起地下浅层水硝态氮污染. 因此,需要根据城市绿化用水量大的特点,进一步完善再生水回用标准,避免再生水回用造成新的环境污染风险.

关键词: 地下水; 再生水; 水质污染; 硝态氮

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)12-4127-06

Impacts of Reclaimed Water Irrigation of Urban Lawn on Groundwater Quality

WANG Qiao-huan, CHEN Wei-ping, WANG Xiao-ke, REN Yu-fen, ZHANG Ye

(State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Based on long-term monitoring of groundwater and irrigation water quality, the dynamics of the main physicochemical property and pollutant concentration of groundwater influenced by reclaimed water irrigation were examined in this study. The results of our five-year continuous study showed that the ammonium nitrogen concentration in reclaimed water ranged $0.05 \sim 65.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ with an average of $12.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, which exceeded the urban miscellaneous water quality standards for urban greening (GB/T 18920-2002). The total nitrogen in reclaimed water averaged at $28.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, ranging from $2.56 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ to $78.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, which was also relatively high. The groundwater quality indexes were normal with small fluctuations under tap-water irrigation. The influence of lawn irrigation with reclaimed water on the groundwater water quality was significant in the shallow well with a depth of 6 m, but not obvious in the deep well with a depth of 20 m. The greatest change was found in the enhanced value of nitrate concentration. The nitrate nitrogen concentration in shallow underground water had significantly positive correlation but lagging with the concentration of dissolved nitrogen in the irrigation reclaimed water, which indicated that lawn irrigation with reclaimed water might cause nitrate nitrogen pollution in shallow underground water. Therefore, considering the huge water consumption for the urban greening, it is suggested that the criteria of reclaimed water reuse should be further improved to avoid the risk of environmental pollution.

Key words: groundwater; reclaimed water; water pollution; nitrate

城市绿地具有重要的生态系统服务功能,能够改善微气候环境、调节水量平衡、增加生物多样性等. 城市绿地在我国的发展速度很快,北京市至2010年有 $62\,672 \text{ hm}^2$ 的城市园林绿地面积. 绿地的灌溉每年都需要消耗大量的水资源. 面对日益紧张的水资源,利用再生水灌溉绿地已经成为保障北京城市绿地发展的一个重要措施. 再生水是对污水处理厂处理过的水再进行深度处理,达到国家城市杂用水水质标准,可在一定范围内重复使用的非饮用水. 城市再生水由于其污染程度轻,水量稳定,并含有植物生长需要的氮素,被认为是城市绿化的良好水源. 随着我国城镇化的推进以及城镇绿地建设,城镇绿地灌溉需要消耗大量水资源,利用再生水灌溉绿地

势在必行.

地下水占我国水资源总量的1/3,我国有约70%的人口以地下水作为饮用水源,约71%的城市以地下水作生活供水^[1],其水质的安全关系到人类的健康,所以地下水源的保护非常重要. 全国城市1 817个地下水饮用水源地中,水质安全存在问题的比例高达49.48%^[2],地下水污染问题日趋严重.

过去研究的地下水污染类型主要为工业污染、

收稿日期: 2012-04-20; 修订日期: 2012-07-30

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(2AKZCX2-YW-Y421); 国家自然科学基金青年科学基金项目(40901265)

作者简介: 王巧环(1969~),女,工程师,主要研究方向为生态要素综合分析, E-mail: wangqh@rcees.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: wangxk@rcees.ac.cn

农业污染、生活污染以及自然界自身污染^[1~4]. 污水用于长期农业灌溉引起地下水污染的报道有很多,这些污水未经处理或只经简单处理,与再生水有很大的区别,而再生水目前已经在分类回用,并且有了相关的回用标准. 国内外关于再生水用于灌溉的研究也有很多报道^[5],多数为灌溉再生水水质标准研究^[6~8]、再生水灌溉对土壤环境影响的研究^[9,10]、再生水灌溉对所灌溉植物的影响研究^[10,11]和回用再生水的健康风险研究^[12~14]等,而再生水作为城市绿化用水对地下水的污染研究国内还鲜见报道. 鉴于此,本研究对绿地地下水进行了5 a的采样分析,探讨了地下水主要理化性质和污染物浓度的变化,并评价了再生水灌溉草坪对地下水产生的潜在污染问题.

1 材料与方法

1.1 仪器

所用仪器设备为美国梅特勒 320pH 计、日本岛津 UV-1700 型紫外可见分光光度计、美国戴安公司的 ICS-1000 型离子色谱仪、德国 Elementar 公司的 Liqui TOC 仪和美国利曼-徕伯斯公司的 PRODIY 型全谱直读等离子体发射光谱仪.

1.2 样品采集

1.2.1 采样地点及成井方式

地下水样品采集于北京城市系统生态站科研监测专用的两口井,两井相距约 2 m,位于中国科学院生态环境研究中心楼间的绿化草坪内,绿化草坪为早熟禾(*Poa oapretensis*)草坪,草坪除了日常的灌溉和修剪外,未做其它施肥等处理. 草坪灌溉水在井水监测期间有不同的来源,2006 年 5 月之前为自来水灌溉,2006 年 6 月之后为再生水灌溉. 再生水为小区的再生水处理系统所产生的再生水.

监测井所处地层有两层,地面以下 3.1 m 为人工堆积层,人工堆积层以下为第四纪沉积层. 浅井地下部分为 6 m,深井地下部分为 20 m. 井管选用外径 220 mm、内径 205 mm 的无缝钢管,管材进行了防腐处理. 浅井的地下部分全部为透水段,深井的底部 2.82 m 为透水段. 井管透水段打孔绑扎了滤网,透水段外部填充 100 mm 厚的滤料,非透水段外部填充 100 mm 厚的黏土. 井口高出地面 300 mm,加有宽于井口的不锈钢井盖. 两井建成于 2005 年,两监测井地下水均为潜水.

1.2.2 采样时间及方法

井水采样:自 2005 年 6 月起每月下旬分别采集

两井的上部、底部井水进行分析测定,采样后将井水抽干,以备下月再采样.

再生水采样:2007 年 3 月起对草坪灌溉用水(即再生水)进行采样,与井水同一时间采集并同时分析. 由于每年 11 月至下一年 2 月一般不对草坪浇灌,这几个月一般不采再生水样;当月雨水较多时,草坪再生水灌溉较少,也不采再生水样.

1.3 分析方法

分析方法参考文献[15~17]. pH 值采用玻璃电极法、氨氮使用纳氏试剂光度法、总氮使用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法、总磷使用钼酸铵分光光度法测定,氯化物、硫酸盐、硝酸盐用离子色谱法测定,无机碳用的样品均为过 0.45 μm 滤膜后的样品,使用非色散红外线吸收法测定,钾、钠、钙、镁用电感耦合等离子体发射光谱法测定.

全盐量以阴离子和阳离子加和法^[18]得出,用于对溶解性总固体的评价. 样品分析后每口井结果取平均值.

1.4 数据处理

首先对监测数据按年进行了统计分析. 水质评价采用地下水质量标准^[19](GB/T 14848-93)和城市污水再生利用城市杂用水水质的城市绿化用水水质标准^[20](GB/T 18920-2002). 两类标准都未规定总氮、总磷、无机碳、钾、钠、钙、镁的含量标准,对这些指标也就未做评价.

数据的整理分析用 Microsoft Excel 2003 处理,相关性分析采用最小二乘法进行线性拟合,相关系数显著性检验采用查相关系数检验表^[21].

2 结果与讨论

2.1 自来水与再生水水质比较

自来水采用 2005 年 6 月~2006 年 5 月数据的平均值,再生水采用 2007 年 3 月~2010 年 12 月数据的平均值,其水质见图 1. 从中可见,自来水水质波动小,水质稳定. pH 值均值 7.69 为弱碱性;氨氮均值 0.081 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和硝态氮均值 0.986 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 都处于低值范围;氯离子和硫酸盐均值分别为 23.7 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 52.4 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,监测值波动小. 做为绿地灌溉用水,自来水是安全的.

由图 1 可见,再生水 pH 值变化范围在 6.15~8.07 之间,符合城市杂用水水质标准 pH 值 6.0~9.0 的标准;再生水总氮变化范围在 2.56~78.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,2007~2010 年年平均浓度分别为 27.5、50.0、26.2 和 18.8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 再生水氮的形

态有时以硝态氮为主,有时以氨氮为主,硝态氮最高达 $54.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,氨氮最高达 $65.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,多数情况下氨氮超出作为城市绿化用水的限值 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的标准,存在氨氮超标的问题。再生水溶解态氮(氨氮 + 硝态氮)约占总氮的 91.0%,是再生水氮素的主要成分;再生水总磷变化范围在 $0.02 \sim 4.74 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,均值为 $1.91 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;再生水全盐浓度为 $277 \sim 840 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,符合城市绿化用水的要求。所监测项目中除了 pH 值、溶解性总固体(全盐量)和氨氮这 3 项为城市杂用水水质标准规定的项目,其余为未规定项目。

与自来水相比,再生水 pH 值均值稍低、常规阴离子浓度都比较高,作为植物营养元素的氮、磷值都比较丰富,再生水的化学组分变化范围比较大,水质也不稳定,而且有氨氮超标的问题。再生水有高

浓度的营养物质,特别是氮和磷,虽然可以被植物利用,但仍应适当使用,以避免营养不平衡。从澳大利亚的报道^[22]中可见,再生水回用于作物灌溉还存在地下水硝酸盐污染、重金属积累于土壤、内分泌干扰物、病原微生物等已知或未知的潜在危害问题需要解决。再生水作为城市绿化用水水质仍然有待提高。

2.2 两种灌溉水灌溉的地下水水质比较

自来水及再生水灌溉的地下水水质监测结果见图 1,浅井地下水和深井地下水采用 2006 ~ 2010 年数据的平均值。结果表明,再生水浇灌后两井地下水 pH 值的低值更低、氨氮值由高变低;而浅井水氯离子、硝态氮、硫酸盐都明显升高;深井水氯离子、硫酸盐总体升高,深井水硝态氮仍比较低,但有升高的趋势。

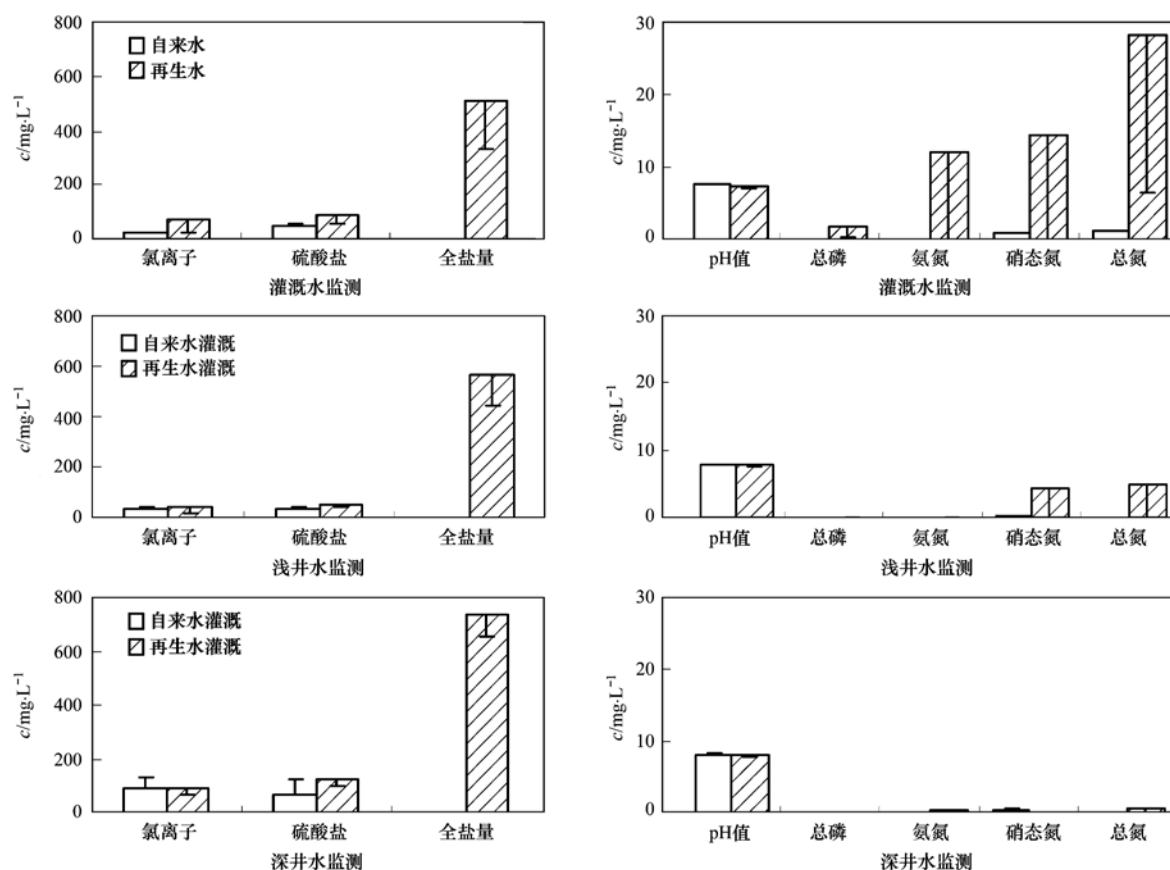


图 1 灌溉水与地下水水质监测结果

Fig. 1 Quality of irrigation water and ground water

再生水灌溉时期,浅井水和深井水 pH 值及深井硝态氮含量均能达到地下水质量标准的 I 类标准;浅井水和深井水的氯离子含量及浅井水的硫酸盐均达到地下水质量标准的 II 类标准;浅井水和深井水氨氮、全盐含量及浅井硝态氮含量、深井水硫

酸盐含量均达到地下水质量标准的 III 类标准;在地下水质量标准中未规定总氮和总磷的限值。浅井硝态氮变化范围在 $0.06 \sim 18.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,浅井硝态氮变化较大,2006 ~ 2010 年年平均值分别为 0.116 、 3.52 、 9.67 、 5.96 和 $1.70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;深井水

硝态氮在较低水平,低于地下水质量标准的Ⅰ类标准;深井水氨氮、硝态氮、总氮都在较稳定的低水平,浅井水除了氨氮在较低的稳定水平,硝态氮和总氮自2007年6月起明显升高,并且总氮值与硝态氮值接近,硝态氮占总氮的86.1%,说明浅井水总氮的形态主要是硝态氮;以《地下水质量标准》对两井所测项目进行综合评价,两井符合Ⅲ类地下水质量标准。

两种灌溉水灌溉的地下水其深井水的氯离子和硫酸盐浓度远大于浅井水,而且氯离子和硫酸盐浓度的变幅也远大于浅井水。其原因主要有以下3点。①绝大部分地下水属于溶滤水,其受地层岩性的影响明显。含有大量易溶盐类(如氯化钠、石膏等)的沉积物被入渗水所溶滤,易溶组分将随着地下水的流动而迁移^[23]。位置较浅的浅井水,由于径流途径短,流动相对较快,溶滤作用发育,形成了全盐量相对较低的地下水;而构造较为封闭位置较深的深井水,地下水径流微弱,水交替缓慢,地下水的盐量则较高,并且以易溶离子(如氯离子、硫酸根)为主。②北京地区土壤、包气带地层中广泛存在钙镁易溶氯化物、钙镁易溶硫酸盐矿物,加上再生水灌溉的影响使地下水氯化物、硫酸盐含量相对较高,更加剧了地层中钙镁易溶盐的溶解,并随入渗水带到地下水中。由于深井地下水汇聚了上层的迁移组分,灌溉水的变化也能反应到深层地下水组分

的变化上,再生水有高含量的氯离子和硫酸盐,而且其浓度变化幅度比较大,因此深井地下水氯离子和硫酸盐浓度也表现出变化幅度大的特点。③盐效应使石膏等易溶盐在地下水中的溶解度增大^[24],因此氯离子浓度高的地下水硫酸盐常常也比较高。

2.3 再生水灌溉地下水水质的动态变化

浅层地下水的水化学组分发生明显变化,图2为浅井地下水8种化学组分的变化趋势。浅井水pH值在2008~2009年度波动较大,pH值在这2a中出现年中期逐渐降低年末至下年年初回升的趋势,其他年份相对平稳;浅井水全盐量的变化趋势基本上与pH值相反,pH值在高值时全盐量处在低值而pH值处在高值时全盐量处在低值,2010年度全盐量比较平稳。这种变化可能是由于在地下水中溶解了更多的硝酸根离子、氯离子和硫酸根离子而使水的pH值降低,相反当这些离子浓度降低时pH值升高;浅井水氯离子与硫酸盐的变化趋势一致,并且变化趋势与全盐量的趋势基本一致,这种一致性是因为氯离子和硫酸盐是全盐量的重要组成;浅井水总氮、硝态氮变化趋势一致,2007~2009年总氮、硝态氮都出现了较高的峰值,阶段性的氮素浓度回落可能由于冬季封灌的原因,2010年度总氮、硝态氮值大幅回落,趋向平稳;浅井水氨氮2006年较高,其后渐渐趋向稳定的较低水平;浅井地下水总磷总体较低,但从2009年后有升高的趋势。

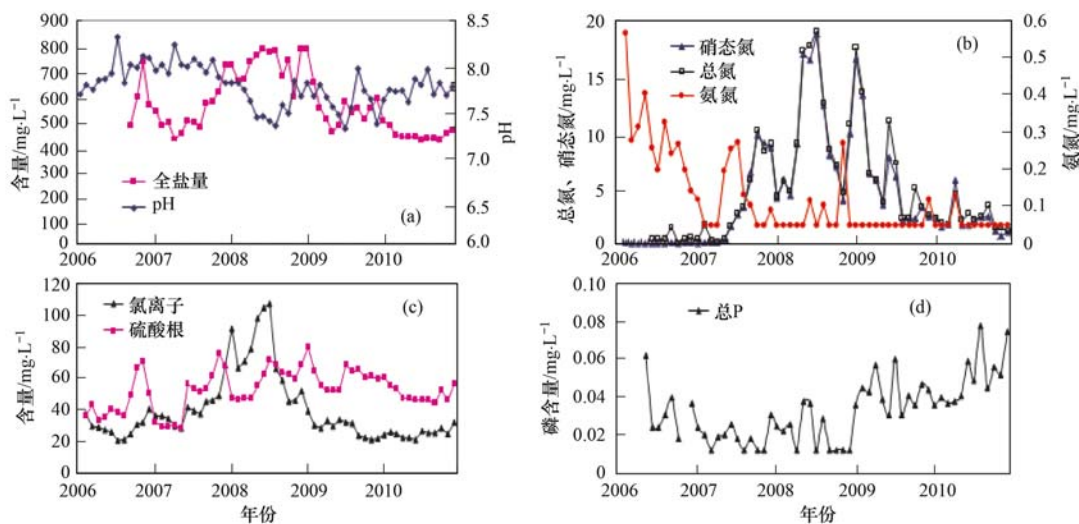


图2 浅井地下水主要指标变化趋势

Fig. 2 Change tendency of water quality in the shallow well

自2007年6月以后浅井水硝态氮大幅度升高,2008年最高值 $18.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,接近 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的Ⅲ类地下水水质标准限值,已接近轻污染的级别^[2]。硝酸

盐污染与人类健康密切相关,所以对于水中的硝酸盐含量国内外都有限值。对于地下饮用水硝酸盐限值国内和国外有所差别,国内限值(以N计)为20

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 世界卫生组织和欧盟的标准为 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (以 N 计相当于 $11.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。如果参考世界卫生组织的标准, 浅井水硝酸盐 (以 N 计) 达到 $18.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 已经超标。地下水硝酸盐污染在国内外都有不少报道^[3,4,25-27], 地下水硝酸盐浓度正在逐年增加, 从农业灌溉途径引起的污染已有报道。可见用含氮浓度过高的再生水对绿化草坪的长期灌溉, 可能造成地下水硝酸盐污染。

再生水含有高浓度的硝态氮和氨氮, 进入草坪植被和土壤后, 当过多的硝态氮和氨氮不能被植物、微生物利用, 氨氮将被土壤吸附, 在适宜条件下, 经过硝化作用氨氮转化成硝态氮。而硝态氮不易被土壤微粒吸附, 容易随着下渗水进入浅层潜水含水层, 并主要以硝态氮的形式污染地下水, 成为地下水氮污染的最主要最直接的污染物质。

2.4 浅井水硝态氮与灌溉水中硝态氮、总氮和溶解态氮的相关性分析

2007~2010 年浅井水硝态氮浓度年均变化与再生水氮素的年均变化趋势一致, 而且从上面的分析中得出近几年所监测的地下水水质变化最大的组分是浅井水的硝态氮, 因此, 以浅井水硝态氮作为研究对象来分析发生这种变化的原因。

再生水氮素有时以硝态氮为主, 有时以氨氮为主, 再生水总氮最高达到 $78.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的水平。在用再生水灌溉之前和灌溉 1 a 内, 浅井水硝态氮平均值为 $0.14 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 稳定在 $0.50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以内的水平, 灌溉 1 a 之后, 浅井水硝态氮大幅度升高, 最高值达 $18.70 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

自 2006 年 6 月再生水灌溉草坪至 2007 年 6 月

浅井水硝态氮出现升高, 表明用再生水灌溉草坪后浅井地下水硝态氮有显著变化。由图 3 可见, 从再生水氮素出现峰值到浅井地下水出现峰值, 其滞后时间 2007 年、2008 年为 4 个月, 2009 年为 3 个月, 2010 年为 1 个月。

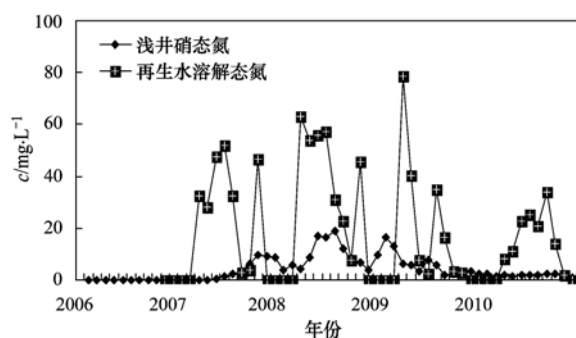


图 3 浅井硝态氮与再生水溶解态氮浓度变化趋势

Fig. 3 Concentration change tendency of nitrate nitrogen in shallow underground water and dissolved nitrogen in reclaimed water

为了研究浅井地下水硝态氮含量与再生水氮素含量的相关性, 取对应的氮素峰值数据进行相关性分析, 对再生水硝态氮、总氮以及溶解态氮与浅井硝态氮的数据进行最小二乘法线性拟合, 拟合曲线与相关方程结果如图 4。结果表明, 浅井硝态氮与再生水硝态氮拟合曲线的 $R^2 = 0.5066$ ($R = 0.7118$), 浅井硝态氮与再生水总氮拟合曲线的 $R^2 = 0.5329$ ($R = 0.7300$), 浅井硝态氮与再生水溶解态氮拟合曲线的 $R^2 = 0.6118$ ($R = 0.7822$)。对 3 个线性方程进行相关系数显著性检验, 查相关系数检验表, 相关系数的临界值为 $R(0.05, 20) = 0.423$ ($n = 22$)、 $R(0.01, 20) = 0.537$ ($n = 22$), 拟合曲线的相关系数

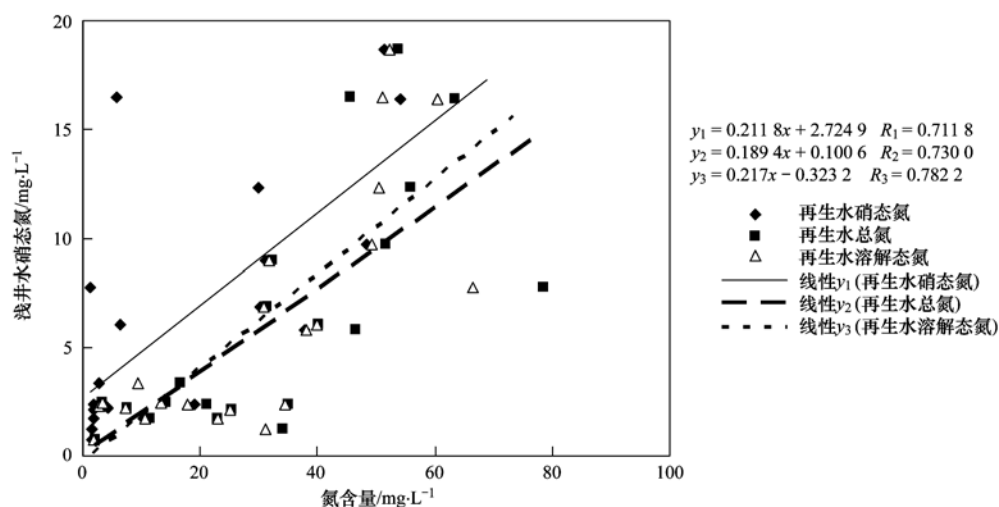


图 4 浅井硝态氮与再生水氮含量的相关性

Fig. 4 Correlation of the nitrate nitrogen concentration in shallow underground water with the total concentration of ammonium and nitrate nitrogen in reclaimed water

$R > R(0.01, 20)$, 说明再生水硝态氮、再生水总氮、再生水溶解态氮的浓度与浅井硝态氮浓度间的线性关系是显著正相关的, 其中以再生水溶解态氮与浅井地下水硝态氮的线性相关最为显著。

草坪地下水入渗来源主要为降水和灌溉, 因再生水浇灌草坪是日常的绿化工作, 因此, 再生水是草坪地下水入渗最主要的来源。地下水埋藏于地下, 污染物需要长时间的运移才能污染地下水, 因而再生水浇灌对地下水硝态氮的影响是滞后的, 滞后时间决定于灌溉量、土质、再生水氮浓度等, 由于土壤的吸附作用, 初次灌溉其滞后时间相对较长, 而后逐渐缩短。再生水氨氮、硝态氮、总氮浓度有高低变化时, 浅井地下水硝态氮浓度也会随着出现高低变化。从上述的相关性分析结果可见, 再生水溶解态氮显著影响着浅井地下水的硝态氮浓度值。

3 建议

对不同特定利用功能的再生水应采用不同的水处理技术, 而用于城市绿化的再生水, 需要有效去除污染因子才能防止或者降低再生水回用对水环境的污染; 城市绿化用的再生水标准只对氨氮限值而未对硝态氮和总氮限值仍显不够完善, 根据城市绿化用水量大的特点, 有必要进一步完善再生水回用标准, 避免再生水回用引起新的环境污染。

4 结论

(1) 小区再生水系统的再生水氨氮超标、总氮偏高是导致浅层地下水硝态氮浓度升高的主要因素。

(2) 经过 5 a 的小区再生水灌溉, 草坪绿地地下水在 6 m 浅层水质发生变化, 突出表现在硝态氮的明显升高上, 地下水 20 m 深井水质没有特别明显的变化, 还未受到污染。

(3) 再生水硝态氮、再生水总氮、再生水溶解态氮的浓度与浅井水硝态氮的浓度呈显著的正相关关系, 其中以再生水溶解态氮与浅井地下水硝态氮的线性相关最为显著。

参考文献:

- [1] 熊玲, 鄢贵权. 浅谈我国地下水的污染现状及防治措施[J]. 贵州科学, 2009, 27(4): 86-90.
- [2] 唐克旺, 朱党生, 唐蕴, 等. 中国城市地下水饮用水源地水质状况评价[J]. 水资源保护, 2009, 25(1): 1-4.
- [3] 毕晶晶, 彭昌盛, 胥慧真. 地下水硝酸盐污染与治理研究进展综述[J]. 地下水, 2010, 32(1): 97-102.
- [4] 刘晓晨, 孙占祥. 地下水硝态氮污染现状及研究进展[J]. 辽宁农业科学, 2008, (5): 41-45.
- [5] 金建华, 孙书洪, 王仰仁. 再生水灌溉的研究进展[J]. 节水灌溉, 2009, (5): 30-34.
- [6] 张克强, 张洪生, 韩烈保, 等. 都市再生水灌溉绿地水质控制标准的制定研究[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(增刊1): 100-106.
- [7] 师荣光, 王德荣, 赵玉杰, 等. 城市再生水用于农田灌溉的水质控制指标[J]. 中国给水排水, 2006, 22(18): 100-104.
- [8] 魏东斌, 胡洪营. 污水再生回用的水质安全指标体系[J]. 中国给水排水, 2004, 20(1): 36-39.
- [9] Wang Z, Chang A C, Wu L, *et al.* Assessing the soil quality of long-term reclaimed wastewater-irrigated cropland [J]. Geoderma, 2003, 114(3-4): 261-278.
- [10] 韩烈保, 王昌俊, 苏德荣. 再生水灌溉对绿地土壤及植物影响的研究[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(增刊1): 1-7.
- [11] 白宇, 赵颖, 周军, 等. 奥运森林公园再生水绿地灌溉研究[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(增刊1): 69-72.
- [12] 仇付国, 王晓昌. 城市回用污水中病毒对人体健康风险的评价[J]. 环境与健康杂志, 2003, 20(4): 197-199.
- [13] 仇付国, 王晓昌. 常规工艺再生水效果及其回用健康风险评估[J]. 给水排水, 2004, 30(4): 11-15.
- [14] 何星海, 马世豪. 再生水的卫生安全问题探讨[J]. 给水排水, 2004, 30(3): 1-5.
- [15] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 236-239.
- [16] 国家环境保护总局科技标准司. 最新中国环境保护标准汇编(水环境分册)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2001. 139-143, 206-210, 322-329, 611-614.
- [17] 国家技术监督局. 饮用天然矿泉水检验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1996. 16-24, 86-88.
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999. 85-86.
- [19] GB/T 14848-93, 地下水质量标准[S].
- [20] GB/T 18920-2002, 城市污水再生利用城市杂用水水质[S].
- [21] 汪正范. 色谱定性定量[M]. (第二版). 北京: 化学工业出版社, 2007. 197-199.
- [22] Hamilt A J, Boland A M, Stevens D, *et al.* Position of the Australian horticultural industry with respect to the use of reclaimed water[J]. Agricultural Water Management, 2005, 71(3): 181-209.
- [23] 张人权, 梁杏, 靳孟贵, 等. 水文地质学基础[M]. (第六版). 北京: 地质出版社, 2011. 63-64.
- [24] 北京市地质矿产勘查开发局, 北京市水文地质工程地质大队. 北京地下水[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008. 282-284.
- [25] 朱济成. 关于地下水硝酸盐污染原因的探讨[J]. 北京地质, 1995, (2): 20-26.
- [26] 张洪, 王五一, 李海蓉, 等. 地下水硝酸盐污染的研究进展[J]. 水资源保护, 2008, 24(6): 7-11.
- [27] Capri E, Civita M, Corniello A, *et al.* Assessment of nitrate contamination risk: The Italian experience [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2009, 102(2): 71-86.

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 Musks 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