ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

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

双奖期刊

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 33 卷 第 12 期
2012 年 12 月 15 日

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,张蔷,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来源研究 …… 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,孟颉,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,孙骞,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, 孔建龙,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)
酰胺咪嗪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)

再生水灌溉利用的生态风险研究进展

陈卫平[1],张炜铃[1],潘能[1,2],焦文涛[1]

(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: 污水再生回用因其具有显著的社会、经济及生态效益,已成为缓解水资源危机的一项重要举措. 城市绿地和农业灌溉作为再生水的主要利用途径之一,在国内外已经得到广泛推广实践. 为了解国内外在再生水灌溉利用风险方面的研究进展,本文围绕再生水典型污染物包括盐、氮、重金属和新型污染物、病原菌等,从对土壤质量、植物生长、地下水质量和公众健康等几方面,对再生水灌溉利用的生态风险进行了系统分析. 结果表明,盐分及盐离子是再生水灌溉利用的主要风险,灌溉利用导致疾病传播的风险始终存在,而新型污染物的生态风险是科学研究热点. 借鉴国外经验,分别就城市绿地和农业的灌溉提出了风险管理措施. 最后,提出了加强长期定位研究和模型研究,建立再生水水质、灌溉管理与生态风险的有机关联,进行再生水灌溉土壤承载力评价和建立风险管理体系等 5 项建议,以促进再生水安全利用.

关键词:再生水; 灌溉; 生态风险; 风险管理

中图分类号: X820.4 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2012)12-4070-11

Ecological Risks of Reclaimed Water Irrigation: A Review

CHEN Wei-ping[1], ZHANG Wei-ling[1], PAN Neng[1,2], JIAO Wen-tao[1]

(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: Wastewater reclamation and reuse have become an important approach to alleviate the water crisis in China because of its social, economic and ecological benefits. The irrigation on urban green space and farmland is the primary utilization of reclaimed water, which has been practiced world widely. To understand the risk of reclaimed water irrigation, we summarized and reviewed the publications associated with typical pollutants in reclaimed water including salts, nitrogen, heavy metals, emerging pollutants and pathogens, systematically analyzed the ecological risk posed by reclaimed water irrigation regarding plant growth, groundwater quality and public health. Studies showed that salt and salt ions were the major risk sources of reclaimed water irrigation, spreading disease was another potential risk of using reclaimed water, and emerging pollutants was the hot topic in researches of ecological risk. Based on overseas experiences, risk control measures on reclaimed water irrigation in urban green space and farmland were proposed. Five recommendations were given to promote the safe use of reclaimed water irrigation including ① strengthen long-term in situ monitoring, ② promote the modeling studies, ③ build up the connections of reclaimed water quality, irrigation management and ecological risk, ④ evaluate the soil bearing capacity of reclaimed water irrigation, ⑤ and establish risk management system of reclaimed water reuse.

Key words: reclaimed water; irrigation; ecological risk; risk management

我国是一个水资源贫乏且地域分布不均匀的国家,北方和西部地区缺水严重,全球气候变化和快速的城市化进程加剧了我国水资源危机. 城市污水再生利用因具有节约淡水资源、保护水环境、较高的经济价值等优势被联合国环境规划署认定为环境友好技术[1],因而得到推广应用. 目前,不仅是缺水的中东国家、地中海国家、拉美国家重视再生水利用,而且许多人口密度较大的国家和城市也十分重视再生水的利用,世界上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,纷纷建立污水回用工程,并取得了良好的效果.

再生水被广泛用于各种非饮用水途径如农业灌溉、工业用水、河湖生态用水和市政杂用水等,其中,城市绿地及农业灌溉是再生水利用的一种主要途径. 美国加利福尼亚州 20 世纪后期开始大量使用再生水,到 2009 年再生水年使用量已是 1970 年的 4 倍,达 8.94 亿 m^3,47% 的再生水回用于城市绿地或农业灌溉[2]. 以色列 100% 的生活污水和 72% 的城市污水得到了回用,农业灌溉用量占污水处理总量的 46%[3]. 北京市从 2003 年开始大力推进再生水利用,市区内多数绿地能够利用管网实现再生水浇灌,测算年再生水利用量约7 600万 m^3[4],在

收稿日期: 2012-04-20; **修订日期**: 2012-07-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(41173123);国家自然科学基金青年科学基金项目(41001330)

作者简介: 陈卫平(1976~),男,博士,研究员,主要研究方向为城市生态风险,E-mail:wpchen@rcees.ac.cn

2010 年约 3.0 亿 m^3 再生水被用于农田灌溉[5].

同未经处理或简单处理的污水相比,再生水水质大幅提高,有效降低了其环境风险. 但由于城市污水含有的各类无机、有机和生物类的污染物,尤其是盐、新型污染物和生物类污染物,目前还无法经济有效地去除,从而再生水中含有的这些污染物质致使其灌溉存在一定风险,主要包括由病原体和化学污染物引起的人体健康风险,由有毒有害污染物土壤累积引起的土壤生态系统退化和植物危害风险,以及由污染物的向下迁移引起的地下水污染风险等.

随着再生水灌溉利用的增加,其利用风险与生态环境效应引起了学者和管理者的广泛关注,国内外针对再生水灌溉风险开展了系列研究. 本文旨在通过对再生水灌溉利用生态风险和生态效应两方面内容的总结分析,获取国内外有关再生水灌溉利用风险的相关研究成果,并借鉴国外经验提出再生水灌溉风险管理措施,最后据此提出研究建议,以期为再生水灌溉管理提供参考,为促进我国再生水利用提供理论支撑.

1　再生水灌溉利用生态风险分析

1.1　再生水水质特征分析

再生水水质是决定再生水利用风险大小最主要的因素之一. 不同地区、不同季节、不同处理工艺,再生水水质有较大的区别. 调查结果显示多数再生水符合城市杂用标准和农田灌溉标准的要求. 与饮用水相比,再生水水质的主要特征体现在:①盐度(溶解性总固体)增加明显,尤其是钠离子和氯离子;②氮磷等营养元素含量较高;③具有一定的痕量元素、有毒有机污染物和病原菌. 这些特征决定了再生水利用管理时具有一定的生态风险,主要包括:①由盐分及盐离子过高引起的土壤盐渍化及相关风险等;②氮素地下水污染风险;③重金属等痕量元素土壤累积风险;④新型污染物地下水污染风险;⑤病原菌传播人体健康风险等. 风险的大小除与再生水水质密切相关外,还受灌溉土壤的类型、灌溉方式等诸多因素的影响,下文从对土壤质量、地下水环境和植物生长的影响,及土壤微生态效应和健康风险这 5 个方面系统分析了再生水灌溉利用的生态风险.

1.2　对土壤质量的影响

再生水灌溉对土壤质量的影响主要体现在土壤 pH 的改变、土壤盐渍化、土壤污染物累积这 3 个方面.

1.2.1　土壤 pH

pH 值的大小代表着再生水的酸碱程度. 研究表明,再生水灌溉可导致土壤 pH 值有轻微上升[6~8],主要原因是再生水中含有丰富的营养元素,以及较高的碳酸氢根和盐分,可导致 pH 值增加[9]. 再生水 pH 值在中性范围内,水质调查结果显示,北京市再生水 pH 值在 7.70 左右,天津市再生水 pH 值在 7.20 左右. 因而,通常情况下,再生水灌溉不会导致土壤 pH 值发生明显的变化[10,11].

1.2.2　土壤盐渍化

与饮用水相比,再生水最显著的水质特征是含有较高的全盐量,因而,再生水灌溉导致土壤盐渍化的风险广受关注[12]. 盐分在土壤中的迁移受灌溉水质、土壤类型、植被类型、气候条件、灌溉措施等多种因素影响,因而,盐分在土壤中的迁移规律不尽相同,不同的研究结果之间存在一定的差异,例如,Friedel 等[13]在墨西哥田间试验发现再生水长期灌溉能够增加土壤盐分的含量,而 Magesan 等[14]研究显示用三级处理水灌溉 5 a 后土壤盐分累积不明显. 潘能等[15]对北京多年再生水灌溉下公园和农田原位土壤盐分累积进行了研究,结果表明,长期再生水灌溉可导致土壤盐分的积累,公园与农田中再生水灌区表层土壤盐度较对照灌区分别上升了 12.4% 和 84.2%;土壤钠吸附比值上升幅度分别为 64.5% 和 145.8%;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;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,盐分累积程度随灌溉年限增加而增加.

Hulugalle 等[16]的研究表明当试验土壤排水性能良好时,再生水灌区土壤盐度没有增加. Lin 等[17]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. Fabregat 等[18]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[7]通过对美国高尔夫球场绿地(再生水和清水灌溉)的试验研究,发现土壤盐度与钠吸附比分别增加 187% 和 481%. 大量的研究表明长期使用再生水灌溉会导致土壤盐分累积,入渗性能下降,进而影响作物的正常生长[19~22],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,导致土壤大孔隙的破坏,渗透性降低,造成土壤紧实.

对于田间试验而言不可控的因素较多,且在一个生长季节里盐分的累积量一般较少,采取的土样可能无法监测到土壤盐分的变化. 目前,相关研究的仿真模型如 SALTMED、ENVIRO-GRO、SWAP、ALSIS-MODFLOW 和 Hydrus-1D 等都整合了作物生长、根区化学淋洗等作用,能较为准确地对土壤中盐分分布进行模拟[23~27]. 吕斯丹等[28,29]运用 ENVIRO-GRO 模型模拟研究了北京不同再生水灌溉条件下土壤盐分的累积变化规律,结果表明,常规再生水灌溉下土壤出现轻度盐渍化,盐分累积不严重,高水量灌溉下土壤未出现盐渍化,而节水灌溉下土壤出现中度盐渍化,长期灌溉再生水的草坪,不适宜种植盐阈值小于 2.53 $dS \cdot m^{-1}$ 的草本植被.

总之,由于再生水盐度相对较高,盐度始终是其潜在的风险因素,长期利用再生水进行灌溉(特别是在蒸发较大、降雨较少、排水不良的地区)有可能会使土壤盐分累积,出现土壤次生盐碱化,也可能导致地下水盐度升高,因而需要科学的风险管理措施. 目前,国内外在再生水灌溉对土壤盐分的影响方面研究较多,但现有的研究多集中在田间试验或土柱模拟试验研究,模型相关研究不足,因而对再生水多年连续灌溉盐分累积及迁移动态认识不足,同时,针对再生水水质、灌溉管理方式以及植被、土壤等对土壤及地下水盐分系统评价研究还存有不足.

1.2.3 土壤重金属污染

重金属类污染物可以损害作物生长,也可通过再生水-土壤-作物-人体暴露途径,危害人体健康. 再生水灌溉下,以重金属为代表,再生水中有毒有害离子的环境影响广受关注.

一方面,以城市生活污水为主要来源的再生水,其重金属含量通常较低,中短期的再生水灌溉不足以引起土壤重金属的明显累积. 刘帆等[30]的研究表明用再生水对两种作物吸收土壤重金属的能力不产生明显影响,Kang 等[31]的田间试验结果显示,在再生水和其它 4 种水源灌溉 1 a 后,土壤重金属含量没有显著差异,这与国内其他一些研究结果相似[32~34]. Wang 等[35]的研究提出通过再生水灌溉途径带入的重金属与地下水灌溉相当,低于大气沉降和有机肥施用等输入途径带入的重金属. 当前再生水灌溉导致土壤重金属污染的风险较小[36],并不会导致农作物重金属超标. 再生水灌区土壤重金属污染并不一定是由于再生水灌溉导致,更大程度是早期的污水灌溉或有机肥施用造成的[12,37].

另一方面,由于再生水含有较高的盐分,再生水灌溉下重金属-盐分交互作用可改变土壤重金属的生物可利用性. 杜鹃等[38]的试验结果表明,和地下水灌溉相比,再生水灌溉将会影响表层土中重金属形态的稳定性,使土壤重金属(Zn、Cd、Cu、As)的稳定性向易转变的形态转化,即增加了土壤重金属的生物可利用形态. 邓金锋等[39]对再生水灌溉土壤 Cd 累积进行了模拟预测,结果表明随作物收获离开土壤的重金属相对于灌溉水带入的量来说非常小,如果使用北京高碑店污水厂的二级处理水作为灌溉水,土壤中 Cd 将在灌溉 40 a 后超过国家标准,如果灌溉水中 Cd 含量降到 5 $mg \cdot m^{-3}$ 或以下,模拟结果显示到 100 a 左右时土壤中 Cd 含量达到标准临界值 1.0 $mg \cdot m^{-3}$. 赵忠明等[40]运用 STEM-profile 模型北京市通州凉水河再生水灌区农田重金属 Cd 累积趋势进行了预测,结果显示,单独的有机肥施用和再生水灌溉均会导致 Cd 的累积,地下水灌溉同时施用化肥不会造成 Cd 累积,在持续现有输入输出情况下,100 a 之后该地区的土壤 Cd 污染将会超出国家土壤环境质量标准,耕作层中 Cd 含量达到 0.866 $mg \cdot kg^{-1}$.

鉴于此,虽然再生水中重金属浓度较低,利用再生水灌溉土壤重金属污染风险较低,但由于随作物收获离开土壤的重金属通常远小于灌溉水带入量,因而,长期再生水灌溉土壤重金属可能累积至危害水平. 由于土壤重金属污染过程具有小剂量长期性的特点,相对常规检测手段模型的应用能够更好地探索土壤重金属污染趋势和风险,而目前相关研究还比较缺乏.

1.2.4 土壤新型污染物污染

再生水中的有毒有机污染物是当前国际水处理界和卫生界关注的焦点. 再生水中 POPs 的残留水平通常较低(如 OCPs 含量在 1 ~ 100 $ng \cdot L^{-1}$,PAHs 含量在 10 ~ 1 000 $ng \cdot L^{-1}$[41]),相对于大气沉降等其它来源,输入通量较小,因而,再生水灌溉利用时 POPs 土壤残留风险较低. 相对于 POPs,一些新型污染物浓度残留较高,如多环麝香抗生素含量多在 1 ~ 10 $\mu g \cdot L^{-1}$,再生水是其环境中的主要来源,其风险已逐步引起关注.

再生水中新型污染物的浓度及种类受处理工艺、季节以及居住人口特征等影响. 通常的污水再生处理系统不能有效去除包括消毒副产物、药品及个人护理用品和内分泌干扰物在内的新型污染物[42,43]. 多数情况下,再生水中这些污染物的浓度

在ng·L^{-1}至μg·L^{-1}水平[44,45]. 与国外同类研究相比,我国污水中药物类污染物的检出率和含量水平普遍接近或高于欧洲及美国等国家报道的水平[46,47].

这些新型污染物具有“类持久性”和效应累积性,研究表明释放到土壤中的新型污染物,可降低土壤微生物量和硝化作用,影响土壤微生物活性,影响植物的生长和发育,以及土壤原生动物和蚯蚓活动[48~51].

再生水灌溉时新型污染物在土壤中的残留水平与其在土壤中的吸附-解吸过程、降解过程、挥发过程等环境行为密不可分,并受再生水水质、土壤质地以及灌溉措施的影响. 受自身性质、土壤特性和环境条件的影响,再生水中新型污染物的土壤吸附能力变化很大. Xu 等[52]研究结果显示在其选择的 9 种典型 PPCPs 中,土壤吸附系数(K_d)可以从不到 1 L·kg^{-1}(如布洛芬)变化到几百L·kg^{-1}(如 4-*n*-Nonylphenol),且不同土壤吸附系数差异较大. 王冉等[53]的研究表明抗生素在土壤的吸附系数(K_d)可以从不到 1 L·kg^{-1}到几万 L·kg^{-1},常见抗生素吸附作用强弱顺序依次为四环素类 > 大环内酯类 > 氟喹诺酮类 > 磺胺类 > 氨基酸糖苷类 > 青霉素类. Gunnison 等[54]的研究结果显示典型消毒副产物 NDMA 的土壤吸附系数很小,只有 0.56 L·kg^{-1}左右. Nowara 等[55]发现含—COOH的喹诺酮类抗生素的 K_d 值很相近,在 300 ~ 500 L·kg^{-1}之间. 与吸附过程相似,在土壤中,新型污染物的持久性变化很大,从少于一天到几周甚至几个月[56]. Sarmah 等[51]研究结果显示在其选择的 9 种典型 PPCPs 中,各种条件下,降解半衰期最短为 1.7 d,最长则达 77 d. Gan 等[57]研究发现消毒副产物 NDMA 在两种不同土壤表层的降解半衰期约为 1 ~ 4 d,而在深层土壤降解半衰期增加到 13 ~ 58 d. Brown 等[47]报道两种常见麝香 HHCB 和 AHTN 在土壤中半衰期超过 1 a.

综合分析,大多新型污染物在土壤中半衰期短,在土壤中的累积不明显. 然而连续的输入使环境中新型污染物呈现出一种“假持续”现象,进而对人体健康及整个生态系统构成长期潜在的危害[58]. 但这些污染物种类较多,性质差异较大,在特定环境条件下的污染风险受到多种因素的同时影响,需要相关模型帮助管理者筛选出那些具有潜在风险的污染物,并通过一些动力学模型(如 HYDRUS)对其环境行为进行定量预测和评估,进而对科学管理再生水利用以及降低其对生态环境的负面效应提供依据.

1.3　对地下水质量的影响

再生水灌溉对地下水质量的影响主要来自盐分、硝态氮、新型污染物和病原菌等几个方面.

1.3.1　盐分

长期再生水灌溉下,盐分及盐分离子的地下水迁移广受关注. 研究表明北京西南郊浅层地下水受长期再生水(早期为污水)灌溉影响,其氯化物、硫化物、钠盐以及总硬度明显增加,硝酸盐氮污染严重,亚硝酸盐氮和氨氮含量逐年上升[59]. 美国 Swancar 等[60]考察用二级处理水灌溉 4.5 a 的 9 个高尔夫球场,结果表明,地下水的溶解物含量增加,电导率上升. 加拿大 Hogg 等[61]调查了二级处理再生水灌溉的绿地,从调查点 Moose Jaw Site(其再生水浇灌历史为 1981 ~ 1995 年共 15 a)的数据看,地下水中钠和氯化物增加了近 5 倍,但仍未超出饮水安全范围,而调查点 Swift Current Site(其再生水浇灌历史为 1978 ~ 1995 年共 18 a)氯化物含量已经超标,形成了污染.

再生水灌溉对地下水的影响与灌溉水质、土壤质地及地下水位等密切相关,总的来说,国内再生水灌溉造成地下水盐分及相关离子污染的案例并不多见(除污灌外). 在长期再生水灌溉时,有必要运用 DRASTIC 等经验模型或 HYDRUS、ENVIRO-GRO 等动态模型对地下水污染脆弱性评估,确保地下水安全.

1.3.2　硝态氮

再生水富含植物生长所需的氮、磷、钾等营养元素及有机质,故合理利用再生水能提高土壤肥力,促进植物的生长,也能减少肥料的施用量[62],但使用再生水灌溉致使氮过量带来的风险不容忽视. 过量的氮素可降低农作物质量,此外,长期再生水灌溉下由于淋溶作用造成的浅层地下水硝态氮污染也广受关注.

土壤-植物体系中水、盐、氮素之间存在高度的反馈机制,长期再生水灌溉可影响土壤氮素利用与迁移. 一方面,再生水灌溉下,随着土壤硝态氮浓度的增加以及溶解氧的下降,其反硝化作用增强,可以减少氮素渗漏对地下水的威胁[9,63];另一方面,土壤盐分的累积可降低作物吸水和氮素吸收,进而增加土壤氮素的淋溶. 吴文勇等[64]对北京市再生水灌区调蓄工程对地下水盐分的影响的研究结果显示,12 m 包气带厚度对总氮的去除率达到 97.3%,渗滤液中总氮含量指标接近地下水背景值,未发现

再生水调蓄工程蓄水导致地下水水质发生明显变化. 但在一些特殊情况下,氮的去除率较低,可导致地下水硝态氮含量的增加. 国外的一些研究也表明,再生水灌溉可导致地下水硝酸盐含量有所增加[60,61].

总体上,再生水中氮含量较高,进入土壤后,氮素在各种驱动力作用下不断转化,虽然现有的研究显示因再生水灌溉导致地下水氮污染的可能性较低,但长期再生水灌溉下,依然存在硝态氮污染地下水的风险.

1.3.3 新型污染物

随着监测技术的提高,再生水灌溉下污染物的地下水污染风险开始受到关注. 国外从 20 世纪 90 年代末开始关注 PPCPs 对环境的污染,但这一问题在我国还没有引起重视. 美国加州公共卫生署从 2003 年要求在再生水利用工程的第一年必须检测新型污染物,同时在长期再生水利用样地设置地下水监测井,进行长期定位监测. 新型污染物种类繁多,有些污染物去除速率较慢,可以在土壤中长期残留,对地下水体存在潜在威胁. Dougherty 等[65]的调查结果显示,再生水利用过程中有多种 PPCPs 可进入浅层地下水. Fang 等[66]研究结果显示,再生水利用过程中新型污染物吉非罗齐(Gemfibrozil)可能到达地下水,浓度可达 6.86 ng·L^{-1}. Kuroda 等[67]的研究结果显示,PPCPs 在东京 68% 的不受限制地下蓄水层和 44% 的受限制地下蓄水层样品中被检出,其中卡马西平(Carbamazepine)和克罗米通(Crotamiton)检出频率最高,地下水中 PPCPs 的浓度通常较市政污水低 1 ~ 2 个数量级. Haruta 等[68]运用 HYDRUS 动力学模型评价了典型消毒副产物 NDMA 的地下水污染风险,模拟结果显示在再生水灌溉的过程中,NDMA 在某些特定条件下可以淋溶到达地下水,污染地下水源,进而威胁人体健康. Xu 等[52]利用筛选模型评价了 10 种典型 PPCPs 的地下水污染风险,结果表明再生水中一些新型污染物如布洛芬(ibuprofen)、氯贝酸(Clofibric Acid)等对地下水存在潜在的污染风险.

有机物污染物地下水污染风险可以通过一些筛选模型(screening model)进行定性评估,如由 Jury 等[69]开发的农药淋溶筛选模型(即 Jury 不等式),Gustafson 等[70]提出的地下水污染评分方法(groundwater ubiquity score,GUS),以及 Cohen 等[71]提出的方法. 这些方法有助于对新型污染物地下水污染进行快速筛选,但需要化合物的土壤吸附常数和半衰期等信息,同时,其真实环境风险还应结合实地研究及动力学模型模拟进行验证.

1.3.4 病原菌

再生水中含有多种病原微生物,除在空气中传播造成直接的健康风险外,再生水中的这些病原菌也可能到达地下水,威胁饮水安全. 在加州利用再生水地下水回灌工程中,病原微生物是其首要关注对象,典型的监测指标如总大肠杆菌并不能有效代表其风险. El-Arabi 等[72]调查埃及具有 70 a 再生水(早期可能用的是初级处理水)灌溉历史的灌区的结果显示,其地下水受到大肠菌的影响. Sheikh 等[73]和 Aiello 等[74]研究使用再生水灌溉绿地时发现,在两次灌溉之间土壤表面变干时,大肠杆菌会很快死亡,超过 90% 的大肠杆菌会保留在土壤表层的 2.5 cm 之内,决不会渗透到 30 cm 以下深度. 因此,再生水中的大肠杆菌不会对地下水造成污染.

1.4 植物生长影响

再生水灌溉对植物产生影响的主要来源及各自表现可归结为以下 5 个方面.

1.4.1 余氯

过量的余氯可导致植物叶面损伤,也可导致草坪叶片出现黄边等危害症状. 通常余氯 < 5 mg·L^{-1} 被认为对植物是安全的,一般再生水中的余氯不能超过 1.0 mg·L^{-1}.

1.4.2 痕量元素

再生水中高浓度的硼会危害植物生长,叶片呈畸形萎蔫,褪绿泛黄甚至霉变,而低浓度的硼(< 0.5 mg·kg^{-1})对植物的生长是必需的,不同的植物对硼的毒性阈值差别较大,如樱桃、葡萄、洋葱等很敏感,其阈值在 0.5 ~ 0.75 mg·kg^{-1}之间,小麦、向日葵、草莓和豆角等比较敏感,其阈值在 0.75 ~ 1.0 mg·kg^{-1}[75]. 再生水的重金属元素在土壤中累积可对植物造成伤害,但在通常情况下土壤重金属的累积不至于对植物造成直接的危害.

1.4.3 盐度

盐度对作物的影响主要取决于土壤盐度、灌溉用水盐度、浸出率及生长作物自身的耐盐度等多方面的因素. 当盐分稍一过量时,植物就会出现发芽延迟,生长受阻,枝叶变褐变黄,叶缘枯焦,根茎腐坏等症状,当土壤含盐过多时,还会引起土壤的结构的变化,渗透性变差,也会影响地上植物的生长.

1.4.4 钠离子和氯离子

钠离子可通过影响土壤的渗透性间接影响植物的生长,并引起植物营养障碍,如钠离子使土壤交换

络合物饱和，钙就会从植物根部组织去除，最终由于缺钙而死亡，钠离子中毒还可引起叶片灼伤. 灌溉水中过量的钠离子导致土壤分散及结构坍塌，使得细小的土壤颗粒填充到土壤孔隙中并封住土壤表面，使水的渗透速率明显降低. 氯离子对植物造成伤害的主要症状是叶变黄，叶类灼烧和生长速度降低. 氯对于草皮没有显著的毒性，但是大多数树木和灌木对氯浓度相当敏感. 对于根吸收的植物，氯浓度 $<70\ mg\cdot kg^{-1}$ 没有影响，$70\sim355\ mg\cdot kg^{-1}$ 中度影响，$355\ mg\cdot kg^{-1}$ 以上重度影响；对于叶吸收的植物，氯浓度 $<100\ mg\cdot kg^{-1}$ 没有影响，$>100\ mg\cdot kg^{-1}$ 中度影响以上.

1.4.5　营养物质

再生水中含有丰富的氮、磷、钾、锌、硫和有机质等营养物质，因此使用再生水灌溉有助于植物生长. 但长期使用营养物质含量过高的再生水灌溉时，则容易滋生疾病，会对植物生长产生有害影响. 再生水中过量的氮素可引起农作物质量降低，同时如果与其他营养物质如 P、K 比例失调，将加剧这些物质的缺乏.

1.5　土壤微生物效应

土壤微生物、酶活性是评价再生水灌溉对环境安全效应的重要指标. 不合理的再生污水灌溉将造成土壤中重金属元素和有机污染物增加，可能产生的土壤微生物效应可归结为以下两方面.

(1)导致微生物数量下降、微生物种群改变[76]

再生水灌溉使得微生物群落结构及多样性发生相应变化，这种变化体现为优势类群及亚优势类群丰度增加，对再生水敏感的非优势类群失去原有的地位；另外一部分偶见类群出现或消失，群落多样性最终增加. 而张楠等[77]的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. 但土壤微生物的适应性很强，经过一定时间后，土壤微生物对重金属的适应性也会相应增强[78]. 具有较高活性的微生物甚至可以通过降解作用使土壤中有害物质转化为可被作物吸收利用的营养成分. 唐立军等[79]研究表明自来水灌溉处理土壤微生物总数低于再生水灌溉，再生水灌溉对细菌的繁衍有促进作用. 张娟等[11]对再生水灌溉对土壤理化性质的影响进行了研究，结果表明，再生水灌溉的土壤微生物含量除细菌有增高趋势外，真菌、放线菌数量对比无显著差异. 此外还有一些类似的研究结果，焦志华等[80]研究表明再生水灌溉使土壤细菌数量相对清水灌溉处理增加；二级再生水和三级再生水灌溉处理间的放线菌数量差异显著，且明显高于清水对照；再生水灌溉对真菌数量影响不大；再生水灌溉使大豆根际土壤脲酶活性增加，碱性磷酸酶活性最高. 郭逍宇等[81]研究表明与自来水对照相比，再生水草坪灌溉有利于草坪草根际微生物数量的增加，尤其是有利于芽孢杆菌的增加，但对根系及非根系层微生物无显著影响.

(2)对土壤酶活性具有一定影响　Liang 等[82]报道当 Ag^{+}、Hg^{2+}、Cd^{2+}、Ni^{2+}、As^{3+}、Cr^{3+}、B^{3+}、Al^{3+}、Se^{4+}、Mo^{6+} 等离子含量达到 5 $mmol\cdot kg^{-1}$ 时就会有效地抑制硝化反应. Antil 等[83]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. 以城市生活污水为主要水源的再生水污染物如重金属等浓度较低，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. Chen 等[84]对美国加州长期利用再生水灌溉样地调查研究表明，再生水灌溉可以提高土壤生物酶的活性，改善碳、氮、磷等营养元素的循环，其中脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶、脱氢酶和过氧化氢酶这 5 种土壤酶反应敏感，可以作为评价长期再生水灌溉土壤微生态效应的指标. 潘能等[85]在北京市调查研究显示，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，但农田上升不明显.

1.6　健康风险

尽管经过一定的消毒和处理，病原菌数量大大降低，但病原微生物却依然是使用再生水时最大的健康威胁. 人类使用再生水灌溉已有几十年，迄今仍未发现其可对人体健康造成危害，然而使用再生水导致疾病传播的可能性仍然未被排除. 再生水中主要的病原菌可以分为三大类，即细菌、寄生虫(原生动物和蠕虫)和病毒. 目前基于粪大肠菌和总大肠菌的健康风险评价指标尚有一定局限性，该指标对细菌性病原体的指示性很好，但在对于指示肠道原生动物和病毒方面较差，而后者的健康风险更大. 经过再生水浇灌的绿地，水中的病原体常会附着在树木和草坪上，人体接触就有可能被感染，而且目前大多数城市绿地采用喷灌形式，雾化程度高、易形成气溶胶，带有病原体的气溶胶通过呼吸途径进入人体有可能造成呼吸系统的感染. 为保证再生水的安全利用，对病原微生物进行监测和风险评价十分必要.

赵欣等[86]的研究表明再生水用于城市绿化灌溉时,未列入现有管理标准的隐孢子虫和贾第鞭毛虫存在较大的健康风险. 仇付国等[87]研究结果表明经“超滤 + 氯消毒”工艺处理后的城市污水用于农作物灌溉和城市绿化时,其中病毒对人体健康风险很小. 王伟等[88]对微滤再生水中病毒的健康风险评价结果表明,微滤膜出水用于景观灌溉时可基本保证卫生安全. Tanaka 等[89]运用微生物定量风险评价的方法评价了加里福尼亚的 4 个二级污水处理厂的再生水用于高尔夫球场和食用作物灌溉时被感染的风险,结果表明当再生水用于食用作物灌溉时加氯量不低于 5 $mg\cdot L^{-1}$ 即可使其可靠性达 100%,而用于高尔夫球场灌溉,加氯量需达 10 $mg\cdot L^{-1}$ 才可保证其安全性.

除病原菌外,再生水利用健康风险关注的另一个核心是其中的有毒化学物质. 仇付国等[90]运用美国健康风险评价四步法即危害鉴别、暴露评价、剂量-反应分析、风险评定,对再生水中致癌和非致癌化学物质对城市绿化和农业灌溉的健康风险进行了评价,结果发现使用常规处理后的再生水的终生致癌风险在 10^{-5} 数量级,而非致癌物健康危害风险在 10^{-9} 数量级,均在可接受范围. 何星海等[91]建立了再生水用于公园绿化时,职业人群和公众的暴露评价方法和评价模型,获取了再生水利用暴露人群的再生水日摄入量和终生日均暴露剂量,并评价了再生水典型消毒副产物的健康风险. 此外,不同学者针对再生水中的 PAHs、壬基酚、重金属等也开展了健康风险研究,研究结果显示再生水用于灌溉时,这些污染物的健康风险均处于可接受水平[30,92,93].

综上分析,再生水用于城市绿地或农业灌溉的有毒有害化学物质健康风险较小,而再生水中病原菌风险受处理工艺和消毒效果的影响,存在较大不确定性. 目前还缺乏流行病学证据,同时很多暴露特征数据多采取国外数据和估算获得,缺乏第一手数据,因而现有风险评价结果的可靠性不足,需更多的数据支撑.

2 再生水灌溉风险管理

再生水灌溉利用存在诸多的潜在风险,采取科学的管理措施可有效避免或降低再生水利用人体健康风险和生态风险. 陈卫平[2]从灌溉管理、肥料管理、盐度管理这 3 个方面系统地总结了美国加州再生水灌溉利用终端用户管理经验,并对两个典型案例进行了分析. 综合国内外的管理经验,再生水用于农业或绿地灌溉时,可综合考虑如下措施.

(1)对于农业灌溉,应充分考虑再生水灌溉对于食物安全和土壤质量的影响,用户应依据实际情况选择合适的再生水灌溉系统、合理的灌溉量,采取管理策略防止再生水中的盐分在土壤中的累积与危害; 再生水灌溉地区周边要建立一个缓冲区,其大小通常与再生水的处理水平和应用方式有关,美国环保署推荐在用于直接食用作物灌溉时,灌溉区要远离饮用水井 15 m 以上, 而在用于非直接食用作物灌溉时应离饮用水井 90 m 以上,当以喷灌方式灌溉时,要远离公共可接触区 30 m 以上; 在使用再生水时应进行径流控制管理,用户应建立末端水回流设施以防止再生水外排,可采取缩短灌溉周期、增加灌溉频率的灌溉方式以减少地表径流; 建立储存池以应对季节性变化,使其发挥储存、稳定水质、帮助出水水质达到国家灌溉用水水质标准等功能; 根据作物的采摘时间及作物特性,合理规划再生水浇灌的起止时间,避免再生水中微量有害物质可能进入作物而引起连锁反应.

(2)对于绿化灌溉,应尽量安排在公众暴露少的时间段,以减少人群接触喷雾和气溶胶的机会,如选择在晚上 22:00 ~ 次日 06:00 之间进行景观灌溉,可将公众与再生水的直接接触降到最低程度,如在其他时间段灌溉应人工控制确保再生水不接触公众,可在显著位置进行清晰的标识以告知公众灌溉水为再生水并建议其保持一定距离; 每日灌溉所需的再生水水量根据灌溉面积和预计的灌溉频率(受当地的土壤特征、气候条件和景观类型等因素的影响)确定; 灌溉方式宜采用滴灌或微喷灌,采用普通喷灌方式时设置缓冲距离; 同时应考虑对土壤和植物以及地下水的环境影响,尽可能延长灌溉周期,以刺激深层根系的生长、降低盐分影响,为地面维护和市民娱乐带来便利.

3 结论与建议

随着再生水灌溉利用的增加,其生态环境效应及风险引起了学者和管理者的广泛关注. 国内外针对再生水中典型污染物如盐、氮、重金属、新型污染物和病原菌等对植物生长、地下水质量和公众健康的影响开展了系列研究,总结如下.

(1)盐分及盐离子是再生水灌溉利用的主要风险,应耦合田间试验和相关环境模型系统揭示不同再生水水质、灌溉措施、植被与土壤条件下土壤盐

分动态变化规律,结合植被盐度阈值信息,对再生水灌溉植被适宜性进行评价,进而为风险调控措施提供科学支撑. 可采取将再生水与含盐量较低的水混合使用、选择种植耐盐植物、用额外的灌溉水洗去过量的盐分及增加土壤淋溶潜力等管理策略以降低盐度相关风险,也可通过源水管理和利用反渗透等先进技术,降低再生水中含盐量.

(2)再生水灌溉利用下新型污染物生态风险受到学者广泛关注,但由于其种类繁多、在土壤生态系统迁移转化的复杂性以及缺乏相应的环境标准,现有的数据难以有效评价其环境风险,应加强相关科学研究.

(3)再生水灌溉利用导致疾病传播的风险始终存在,现有的以大肠杆菌为主要指标体系的管理措施并不能有效保证消毒灭菌的效果,需要流行病学数据的相关支持以排除再生水导致疾病传播的可能性,也需要更科学和实用的指标指示再生水消毒效果.

为保障再生水安全利用,减小再生水灌溉的生态及健康风险,建议如下.

(1)加强长期定位研究. 由于许多污染物形成风险需要经过长期再生水灌溉才能表现出来,可能在短期内难以察觉,为了尽可能获取再生水灌溉风险及效应相关信息,并减小其利用风险,应对再生水灌溉区域的土壤、植被、地下水等进行定期监测,加强长期的定位监管与研究.

(2)推进模型研究. 由于再生水水质的复杂性以及土壤类型、植被类型及灌溉方式等的差异性,对再生水灌溉下典型污染物土壤环境过程认识还存在不足. 现有研究多限于短期野外观测和实验室模拟研究,缺乏利用模型将再生水水质、土壤、植被和灌溉管理方式等多因素耦合的研究. 开发建立再生水灌溉风险评价和管理模型,相较于实地观测试验和一些常规检测方法能更加迅速有效地研究再生水灌溉下污染物的土壤环境过程、评估再生水灌溉风险、优化再生水风险管理.

(3)建立再生水水质、灌溉管理与生态风险的有机关联. 当前,我国正大力推进污水资源化,如何降低在使用再生水过程中带来的生态风险已成为迫切需要解决的问题. 国内外再生水利用的成功经验表明,科学的灌溉管理包括灌溉周期、灌溉量、灌溉方式等可有效降低再生水灌溉的风险. 现有的多数研究成果难以将灌溉管理与生态风险有机地关联起来,因而无法有效地指导再生水灌溉安全利用. 同时,应加强再生水水质与生态风险的关联,完善现有的水质标准体系

(4)进行再生水灌溉土壤承载力评价. 依据现有研究成果和相关环境标准,建立基于安全灌溉年限和灌溉量的再生水灌溉土壤承载力评价方法,针对不同利用途径和特征,提出再生水灌溉土壤承载力,指导再生水灌溉安全利用.

(5)建立风险管理体系. 应协调再生水管理部门、再生水运营单位和再生水用户建立集水源管理-生产管理-水质监管-终端用户管理的风险管理体系,保障再生水安全持续利用.

参考文献:

[1] UNEP and Global Environment Centre Foundation. Water and wastewater reuse: an environmentally sound approach for sustainable urban water management [R]. United Nations, 2006. 48.

[2] 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.

[3] Friedler E. Water reuse-an integral part of water resources management: Israel as a case study[J]. Water Policy, 2001, **3**(1): 29-39.

[4] 刘培滨. 北京市污水深度处理与再生水循环利用规划方案[J]. 水工业市场, 2008, (6): 37-39.

[5] 刘洪禄, 吴文勇, 师彦武, 等. 北京市再生水利用潜力与配置方案研究[J]. 农业工程学报, 2006, **22**(S2): 289-291.

[6] Stewart H T L, Hopmans P, Flinn D W, *et al*. Nutrient accumulation in trees and soil following irrigation with municipal effluent in Australia[J]. Environmental Pollution, 1990, **63**(2): 155-177.

[7] 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.

[8] Mancino C F, Pepper I L. Irrigation of turfgrass with secondary sewage effluent: soil quality[J]. Agronomy Journal, 1992, **84**(4): 650-654.

[9] 吴文勇, 刘洪禄, 郝仲勇, 等. 再生水灌溉技术研究现状与展望[J]. 农业工程学报, 2008, **24**(5): 302-306.

[10] Bouwer H, Idelovitch E. Quality requirements for irrigation with sewage water [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1987, **113**(4): 516-535.

[11] 张娟, 王艳春. 再生水灌溉对植物根际土壤特性和微生物数量的影响[J]. 节水灌溉, 2009, (3): 5-8.

[12] 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.

[13] 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]. Biology and Fertilize Soil, 2000, **31**(5): 414-421.

[14] Magesan G N, Williamson J C, Sparling G P, *et al*. Hydraulic conductivity in soils irrigated with wastewaters of differing strengths: field and laboratory studies[J]. Australian Journal of Soil Research, 1999, **37**(2): 391-402.

[15] 潘能, 陈卫平, 焦文涛, 等. 绿地再生水灌溉土壤盐度累积及风险分析[J]. 环境科学, 2012, **33**(12): 4088-4093.

[16] Hulugalle N, Weaver T, Hicks A, *et al*. Irrigating cotton with treated sewage[J]. Cotton Grower, 2003, **24**(3): 41-42.

[17] Lin W, Xun G, Jerry B. Studies of recycled water irrigation and performance of landscape plants under Urban landscape conditions[R]. Slosson Report, 1999-2000. 302-308.

[18] Fabregat S, Mas J, Candela L, *et al*. Impact of urban treated wastewater reuse during irrigation of golf courses[J]. EGS XXVII General Assembly, 2002, **77**(3): 21-26.

[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] 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.

[21] 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.

[22] Toze S. Reuse of effluent water-benefits and risk [J]. Agricultural Water Management, 2006, **80**(1-3): 147-159.

[23] Xu P, Shao Y P. A salt-transport model within a land-surface scheme for studies of salinisation in irrigated areas [J]. Environmental Modeling and Software, 2002, **17**(1): 39-49.

[24] Ragab R, Malash N, Gawad G A, *et al*. A holistic generic integrated approach for irrigation, crop and field management: 1. The SALTMED model and its calibration using field data from Egypt and Syria[J]. Agricultural Water Management, 2005, **78**(1-2): 67-88.

[25] Forkutsa I, Sommer R, Shirokova Y I, *et al*. Modeling irrigated cotton with shallow groundwater in the Aral Sea Basin of Uzbekistan: Ⅱ. Soil salinity dynamics[J]. Irrigation Science, 2009, **27**(4): 319-330.

[26] Chen W P, Hou Z A, Wu L S, *et al*. Evaluating salinity distribution in soil irrigated with saline water in arid regions of northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2010, **97**(12): 2001-2008.

[27] Jiang J, Feng X Y, Huo Z L, *et al*. Application of the SWAP model to simulate water-salt transport under deficit irrigation with saline water[J]. Mathematical and Computer Modeling, 2011, **54**(3-4): 902-911.

[28] 吕斯丹, 陈卫平, 王美娥. 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[J]. 环境科学, 2012, **33**(12): 4108-4114.

[29] 吕斯丹, 陈卫平, 王美娥. 模型模拟再生水灌溉对土壤水盐运动的影响[J]. 环境科学, 2012, **33**(12): 4100-4107.

[30] 刘帆, 程波, 张志敏, 等. 城市再生水灌溉区作物重金属的健康风险研究[J]. 中国农学通报, 2008, **24**(4): 445-449.

[31] Kang M S, Kim S M, Park S W, *et al*. Assessment of reclaimed wastewater irrigation impacts on water quality, soil, and rice cultivation in paddy fields[J]. Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering, 2007, **42**(4): 439-445.

[32] 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.

[33] 巫常林, 黄冠华, 刘洪禄, 等. 再生水短期灌溉对土壤-作物中重金属分布影响的试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, **22**(7): 91-96.

[34] 杨军, 陈同斌, 雷梅, 等. 北京市再生水灌溉对土壤、农作物的重金属污染风险[J]. 自然资源学报, 2011, **26**(2): 209-216.

[35] 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.

[36] Al-Nakshabandi G A, Saqqar M M, Shatanawi M R, *et al*. Some environmental problems associated with the use of treated wastewater for irrigation in Jordan [J]. Agricultural Water Management, 1997, **34**(1): 81-94.

[37] Mapanda F, Mangwayana E N, Nyamangara J, *et al*. The effect of long-term irrigation using wastewater on heavy metal contents of soils under vegetables in Harare, Zimbabwe[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2005, **107**(2-3): 151-165.

[38] 杜鹃, 范瑜, 钱新. 再生水灌溉对土壤中重金属形态及分布的影响[J]. 环境污染与防治, 2011, **33**(9): 58-65.

[39] 邓金锋, 焦志华, 何晨玲, 等. 再生水灌溉土壤 Cd 累积的模拟和预测[J]. 灌溉排水学报, 2008, **27**(2): 113-115.

[40] 赵忠明, 陈卫平, 焦文涛, 等. 再生水灌溉对土壤性质及重金属垂直分布的影响[J]. 环境科学, **33**(12): 4094-4099.

[41] 李炳华, 杨春. 我国再生水中有毒有机污染物残留水平及处理技术研究进展[J]. 给水排水, 2011, **37**(S1): 259-264.

[42] Wang Y Q, Hu W, Cao Z H, *et al*. Occurrence of endocrine-disrupting compounds in reclaimed water from Tianjin, China [J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2005, **383**(5): 857-863.

[43] Nikolaou A, Meric S, Fatta D. Occurrence patterns of pharmaceuticals in water and wastewater environments [J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2007, **387**(4): 1225-1234.

[44] 胡洪营, 王超, 郭美婷. 药品和个人护理用品 (PPCPs) 对环境的污染现状与研究进展[J]. 生态环境, 2005, **14**(6): 947-952.

[45] 曹仲宏, 马永民, 胡伟, 等. 再生水中内分泌干扰物的初步研究[J]. 环境与健康杂志, 2005, **22**(3): 171-173.

[46] Lindberg R H, Wennberg P, Johansson M I, *et al*. Screening of human antibiotic substances and determination of weekly mass flows in five sewage treatment plants in Sweden [J]. Environmental Science and Technology, 2005, **39**(10): 3421-3429.

[47] Brown K D, Kulis J, Thomson B, *et al*. Occurrence of antibiotics in hospital, residential, and dairy, effluent,

municipal wastewater, and the Rio Grande in New Mexico[J]. Science of the Total Environment, 2006, **366**(2-3): 772-783.

[48] Sengelφv G, Agersø Y, Halling-Sørensen B, *et al*. Bacterial antibiotic resistance levels in Danish farmland as a result of treatment with pig manure slurry[J]. Environment International, 2003, **28**(7): 587-595.

[49] Migliore L, Brambilla G, Cozzolino S, *et al*. Effect on plants of sulphadimethoxine used in intensive farming (Panicum miliaceum, Pisum astivum and Zea mays)[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 1995, **52**(2-3): 103-110.

[50] Litz N, Müller J, Böhmer W, *et al*. Occurrence of polycyclic musks in sewage sludge and their behaviour in soils and plants, Part 2: Investigation of polycyclic musks in soils and plants[J]. Journal of Soils and Sediments, 2007, **7**(1): 36-44.

[51] Sarmah A K, Meyer M T, Boxall A B A, *et al*. A global perspective on the use, sales, exposure pathways, occurrence, fate and effects of veterinary antibiotics (VAs) in the environment[J]. Chemosphere, 2006, **65**(5): 725-759.

[52] Xu J, Chen W P, Wu L S, *et al*. Leachability of some emerging contaminants in reclaimed municipal wastewater-irrigated turf grass fields[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2009, **28**(9): 1842-1850.

[53] 王冉, 刘铁铮, 王恬. 抗生素在环境中的转归及其生态毒性[J]. 生态学报, 2006, **26**(1): 265-270.

[54] Gunnison D, Zappi M E, Teeter C, *et al*. Attenuation mechanisms of *N*-nitrosodimethylamine at an operating intercept and treat groundwater remediation system[J]. Journal of Hazardous Materials, 2000, **73**(2): 179-197.

[55] Nowara A, Burhenne J, Spiteller M. Binding of fluoroquinolone carboxylic acid derivatives to clay minerals[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1997, **45**(4): 1459-1463.

[56] Ingerslev F, Halling-Sørensen B. Biodegradability of metronidazole, olaquindox, and tylosin and formation of tylosin degradation products in aerobic soil-manure slurries[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2001, **48**(3): 311-320.

[57] Gan J, Bondarenko S, Ernst F, *et al*. Leaching of *N*-Nitrosodimethylamine (NDMA) in turfgrass soils during wastewater irrigation[J]. Journal of Environmental Quality, 2006, **35**(1): 277-284.

[58] 周启星, 罗义, 王美娥. 抗生素的环境残留、生态毒性及抗性基因污染[J]. 生态毒理学报, 2007, **2**(3): 243-251.

[59] 邹胜章, 张金炳, 李杰, 等. 北京西南城近郊浅层地下水盐污染特征及机理分析[J]. 水文地质工程地质, 2002, **29**(1): 5-9.

[60] Swancar A. Water Quality, Pesticide Occurrence, and Effects of Irrigation with Reclaimed Water at Golf Courses in Florida[D]. U. S. Geological Survey: Water-Resources Investigations Report. 1996. 95-4250.

[61] Hogg T J, Weiterman G, Tollefson L C. Effluent irrigation: the saskatchewan perspective[J]. Canadian Water Resources Journal, 1997, **22**(4): 445-455.

[62] Lubello C, Gori R, Nicese F P, *et al*. Municipal-treated wastewater reuse for plant nurseries irrigation[J]. Water Research, 2004, **38**(12): 2939-2947.

[63] 杨金忠, Jayawardane N, Blackwell J, 等. 污水灌溉系统中氮磷转化运移的试验研究[J]. 水利学报, 2004, (4): 72-79.

[64] 吴文勇, 刘洪禄, 陈鸿汉, 等. 再生水灌区调蓄工程对地下水盐分的影响[J]. 农业工程学报, 2009, **25**(12): 22-25.

[65] Dougherty J A, Swarzenski P W, Dinicola R S, *et al*. Occurrence of herbicides and pharmaceutical and personal care products in surface water and groundwater around liberty bay, Puget sound, Washington[J]. Journal of Environmental Quality, 2010, **39**(4): 1173-1180.

[66] Fang Y, Karnjanapiboonwong A, Chase D A, *et al*. Occurrence, fate, and persistence of gemfibrozil in water and soil[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2012, **31**(3): 550-555.

[67] Kuroda K, Murakami M, Oguma K, *et al*. Assessment of groundwater pollution in Tokyo using PPCPs as sewage markers[J]. Environmental Science and Technology, 2046, **46**(10): 1455-1464.

[68] Haruta S, Chen W P, Gan J, *et al*. Leaching risk of N-nitrosodimethylamine (NDMA) in soil receiving reclaimed wastewater[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2008, **69**(3): 374-380.

[69] Jury W A, Focht D D, Farmer W J. Evaluation of pesticide groundwater pollution potential from standard indices of soil-chemical adsorption and biodegradation[J]. Journal of Environmental Quality, 1987, **16**(4): 422-428.

[70] Gustafson D I. Groundwater ubiquity score: a simple method for assessing pesticide leachability[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1989, **8**(4): 339-357.

[71] Cohen S, Creeger S, Carsel R. Enfield potential pesticide contamination of groundwater from agricultural uses[A]. In: Kruefer R F, Treatment J N S (Eds.). Disposal of Pesticide Waste[M]. Washington, DC: American Chemical Society, 1984. 297-325.

[72] El-Arabi N E, Vermeulen M. Environmental impacts of sewage water irrigation in groundwater[A]. In: Sustainability of irrigated agriculture: managing environmental changes due to irrigation and drainage[C]. Proceedings of workshop at the 16th ICID Congress, Cairo, Egypt, 1996.

[73] Sheikh B, Cooper R C, Israel K E. Hygienic evaluation of reclaimed water used to irrigate food crops-a case study[J]. Water Science and Technology, 1999, **40**(5): 261-268.

[74] Aiello R, Cirelli G L, Consoli S. Effects of reclaimed wastewater irrigation on soil and tomato fruits: A case study in Sicily (Italy)[J]. Agricultural Water Management, 2007, **93**(1-2): 65-72.

[75] Rhoades J D, Kandiah A, Mashali A M. The use of saline waters for crop production[A]. In: FAO Irrigation and Drainage Paper No. 48[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1992. 133.

[76] Hani H, Siegenthaler A, Candinas T. Soil effects due to sewage

sludge application in agriculture[J]. Fertilizer Research, 1996, **43**(1-3): 149-156.

[77] 张楠, 季民, 张克强, 等. 灌溉绿地再生水全盐量对两种草坪草生长影响的研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, **24**(6): 1229-1232.

[78] Aleem A, Isar J, Malik A. Impact of long-term application of industrial wastewater on the emergence of resistance traits in Azotobacter chroococcum isolated from rhizosphere soil [J]. Bioresource Technology, 2003, **86**(1): 7-13.

[79] 唐立军, 李东升, 赵晓松. 再生水灌溉草坪对土壤主要性状的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2008, **30**(5): 721-724.

[80] 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.

[81] 郭逍宇, 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.

[82] Liang C N, Tabatabai M A. Effect of trace elements on nit rification in spils[J]. Journal of Environmental Quality, 1978, **7**(2): 291-293.

[83] 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**(4): 381-387.

[84] 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**(5): S36-S42.

[85] 潘能, 侯振安, 陈卫平, 等. 绿地再生水灌溉土壤微生物量碳及酶活性效应研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(12): 4081-4087.

[86] 赵欣, 胡洪营, 谢兴, 等. 基于健康风险评价的再生水生物学标准制定方法[J]. 给水排水, 2010, **36**(5): 43-48.

[87] 仇付国, 王晓昌. 直接超滤再生水的回用健康风险评价[J]. 中国给水排水, 2003, **19**(4): 5-8.

[88] 王伟, 王丹, 王健, 等. 微滤再生水的健康风险评价[J]. 供水技术, 2009, **3**(1): 20-22.

[89] Tanaka H, Asano T, Schroeder E D, *et al*. Estimating the safety of wastewater reclamation and reuse using enteric virus monitoring data[J]. Water Environment Research, 1998, **70**(1): 39-51.

[90] 仇付国, 王晓昌. 常规工艺再生水效果及其回用健康风险评价[J]. 给水排水, 2004, **30**(4): 11-15.

[91] 何星海, 马世豪, 李安定, 等. 再生水利用健康风险暴露评价[J]. 环境科学, 2006, **27**(9): 1912-1915.

[92] 郝瑞霞, 周玉文, 姚宁, 等. 再生水中壬基酚健康风险评价[J]. 环境与健康杂志, 2007, **24**(5): 301-303.

[93] 王春花, 梁丽君, 张静姝, 等. 某城市再生水中多环芳烃健康风险评价研究[J]. 环境与健康杂志, 2010, **27**(9): 800-803.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 33 No. 12

Dec. 15, 2012

CONTENTS

Preface ····· CHEN Wei-ping (4069)

Ecological Risks of Reclaimed Water Irrigation: A Review ····· CHEN Wei-ping, ZHANG Wei-ling, PAN Neng, *et al.* (4070)

Study on Soil Enzyme Activities and Microbial Biomass Carbon in Greenland Irrigated with Reclaimed Water ····· PAN Neng, HOU Zhen-an, CHEN Wei-ping, *et al.* (4081)

Soil Salinity in Greenland Irrigated with Reclaimed Water and Risk Assessment ····· PAN Neng, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, *et al.* (4088)

Effect of Reclaimed Water Irrigation on Soil Properties and Vertical Distribution of Heavy Metal ····· ZHAO Zhong-ming, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (4141)

Emission Strength and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Shanghai During 2010 EXPO ····· WANG Hong-li, CHEN Chang-hong, HUANG Hai-ying, *et al.* (4151)

Study on Atmospheric VOCs in Gongga Mountain Base Station ····· ZHANG Jun-ke, WANG Yue-si, WU Fang-kun, *et al.* (4159)

Regional Atmospheric Environment Risk Source Identification and Assessment ····· ZHANG Xiao-chun, CHEN Wei-ping, MA Chun, *et al.* (4167)

Carbon Isotopic Compositions of *n*-Alkanes and *n*-Alkanoic Acids in the Smoke from Combustion of Rice Straw ····· LIU Gang, SUN Li-na, LI Jiu-hai, *et al.* (4173)

Research on NEDC Ultrafine Particle Emission Characters of a Port Fuel Injection Gasoline Car ····· HU Zhi-yuan, LI Jin, TAN Pi-qiang, *et al.* (4181)

Magnetic Response of Street Tree Leaves to Particulate Pollution in Shanghai ····· LONG Qian, ZHOU Ju-zhen, MENG Jie, *et al.* (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, *et al.* (4194)

Effects of Simulated Warming on Soil Respiration in a Cropland Under Winter Wheat-Soybean Rotation ····· LIU Yan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (4220)

Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Urban Rivers of Wenzhou City ····· ZHOU Jie-cheng, CHEN Zhen-lou, BI Chun-juan, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (4244)

Phenols Pollutants in Soil and Shallow Groundwater of a Retired Refinery Site ····· PEI Fang, LUO Ze-jiao, PENG Jin-jin, *et al.* (4251)

Heterogeneous Characteristic of PAHs' Spatial Distribution in a Large Coking Site of China ····· LIU Geng, GUO Guan-lin, NAN Feng, *et al.* (4256)

Vertical Distribution and Source Analysis of Organochlorine Pesticides in Sewage Irrigation Area, Taiyuan City ····· LIAO Xiao-ping, ZHANG Cai-xiang, ZHAO Xu, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (4307)

Growth Inhibition Effect of Immobilized Pectinase on *Microcystis aeruginosa* ····· SHEN Qing-qing, PENG Qian, LAI Yong-hong, *et al.* (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, *et al.* (4322)

Characteristics of Monomethylmercury Photodegradation in Water Body ····· SUN Rong-guo, MAO Wen, MA Ming, *et al.* (4329)

Degradation of Oxytetracycline with Ozonation in Acetic Acid Solvent ····· LI Shi-yin, LI Xiao-rong, ZHU Yi-ping, *et al.* (4335)

Photodegradation Performance and Mechanisms of Carbamazepine and Its Impact Factors ····· CHEN Chao, ZHAO Qian, FENG Li, *et al.* (4340)

Investigation of Nitrobenzene Removal by Iron Sulfide (FeS) ····· WANG Xia-lin, LI Rui-hua (4346)

Experimental Research on *In-Situ* Auto-Monitoring for Underground Sewage Pipeline Leakage ····· GUO Lei, JIA Yong-gang, FU Teng-fei, *et al.* (4352)

Adsorption of Phenol Chemicals by Surfactant-Modified Zeolites ····· XIE Jie, WANG Zhe, WU De-yi, *et al.* (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, *et al.* (4373)

Denitrification Water Treatment with Zeolite Composite Filter by Intermittent Operation ····· QING Cheng-song, BAO Tao, CHEN Tian-hu, *et al.* (4380)

Influence of Nitrate on the Simultaneous Methanogenesis and Denitrification Reaction of Anaerobic Biofilm and Granular Sludge ····· ZHONG Chen-yu, YE Jie-xu, LI Ruo-yu, *et al.* (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 Triflulsulfuron-methyl Degradation in Soils ····· SONG Ning-hui, SHAN Zheng-jun, SHI Li-li, *et al.* (4400)

Effect of Alkaline Post-Treatment on Physicochemical Property of Digested *Spartina alterniflora* ····· CHEN Guang-yin, ZHENG Zheng, CHANG Zhi-zhou, *et al.* (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, *et al.* (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