

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, 孙寿, 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, 刘吉敏, 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)
太原市市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氨水处理 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的降解的影响 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)

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

(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: 为推动再生水安全灌溉, 本研究运用 ENVIRO-GRO 模型模拟了不同土壤性质、植被条件下土壤盐分的分布规律及累积趋势, 探讨了土壤性质和植被种类对再生水灌溉水盐运移的影响. 研究发现, 不同土壤初始含盐量下, 经多年重复模拟后最终达到统一的平衡状态; 而不同土壤质地下, 随着灌溉年份的增加, 壤土、黏壤土中的土壤 EC_e 年均值逐渐增加直到平衡, 砂壤土中的土壤 EC_e 年均值逐渐减少直到平衡, 平衡时土层中的 EC_e 值砂壤土 < 壤土 < 黏壤土. 3 种植被下, 大叶黄杨、油松的土壤 EC_e 值增加量小于早熟禾; 土壤盐分在土层中的空间、时间分布也均有所不同. 此外, 不同模拟情景下, 土壤盐分累积都不会影响植被的生长(黏壤土除外), 但均出现轻度盐渍化(砂壤土除外).

关键词: 再生水; 灌溉; 土壤盐分; 土壤性质; 植被; ENVIRO-GRO 模型

中图分类号: X131.3; X53 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2012)12-4108-07

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

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

Abstract: In order to promote safe irrigation with reclaimed water and prevent soil salinisation, the dynamic transport of salts in urban soils of Beijing under irrigation of reclaimed water was simulated by ENVIRO-GRO model in this study. The accumulation trends and profile distribution of soil salinity were predicted. Simultaneously, the effects of different soil properties and plants on soil water-salt movement and salt accumulation were investigated. Results indicated that soil salinity in the profiles reached uniform equilibrium conditions by repeated simulation, with different initial soil salinity. Under the conditions of loam and clay loam soil, salinity in the profiles increased over time until reaching equilibrium conditions, while under the condition of sandy loam soil, salinity in the profiles decreased over time until reaching equilibrium conditions. The saturated soil salinity (EC_e) under equilibrium conditions followed an order of sandy loam < loam < clay loam. Salt accumulations in Japan euonymus and Chinese pine were less than that in Blue grass. The temporal and spatial distributions of soil salinity were also different in these three types of plants. In addition, the growth of the plants was not influenced by soil salinity (except clay loam), but mild soil salinization occurred under all conditions (except sandy loam).

Key words: reclaimed water; irrigation; soil salinity; soil properties; plants; ENVIRO-GRO model

北京属于水源性缺水城市, 为了缓解水资源供需矛盾, 已将再生水大量用于北京农业灌溉、工业冷却、城市绿地和市政杂用及河湖景观等方面. 据报道, 2007 年再生水供水量达到 4.8 亿 m^3 , 占全市供水量的 14%; 2008 年再生水供水量达 6.2 亿 m^3 , 回用率达到 50%^[1]. 2009 年, 全市再生水利用量达到 6.5 亿 m^3 , 占全市总用水量的 18%^[2]. 目前, 北京绿地灌溉用再生水主要是北京市高碑店污水处理厂、北小河污水处理厂等污水处理厂的二级出水, 其含盐量(EC_w 值)一般为 $1.2 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 左右.

大多数的研究表明, 长期利用再生水进行灌溉有可能会增加表土盐度, 导致土壤次生盐碱化^[2-5]. 而再生水灌溉土壤盐分累积规律受到土壤条件、灌溉水质、气候条件、植被等因素的影响^[2-5], 宝哲

等^[5]通过低 Na^+ 配制液淋洗不同质地土壤, 发现 Na^+ 在壤土中富集并不显著, 但在粉质砂壤土中部分 Na^+ 吸附累积时间较长; 不同的植被下, 土壤盐分累积规律不同. 此外, 土壤盐分累积影响作物的正常生长^[6,7], 研究发现农业生产中, 使用含盐量高的水灌溉, 能使土壤盐分积累, 进而引起作物减产.

土壤盐分与植被之间的相互作用一般较为复杂, 受到气候、微生物、土壤性质等各种因素的影响, 利用田间实验研究不可控的因素较多, 但对于综合了作物生长、根区化学淋洗等作用的模型, 则能

收稿日期: 2012-05-09; 修订日期: 2012-07-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41173123)

作者简介: 吕斯丹(1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为城市生态风险评价, E-mail: lvsidan01@yahoo.cn

* 通讯联系人, E-mail: wpchen@cees.ac.cn

方便地、较为准确地对土壤中盐分分布进行模拟。例如,Chen 等^[8]结合田间实验,利用 ENVIRO-GRO 模型研究了盐水灌溉下土壤盐分的分布,模拟结果与田间实验结果符合度较高。

本研究拟通过运用 ENVIRO-GRO 模型研究北京再生水灌溉,不同土壤、植被条件下土壤盐分的分布规律及累积趋势,探讨土壤性质和植被种类对再生水灌溉水盐运移的影响,以期对再生水灌溉对土壤影响的研究及再生水的安全利用提供理论基础和技术方案。

1 研究方法

1.1 ENVIRO-GRO 模型简述

ENVIRO-GRO 模型是综合了水、盐分、氮、作物生长之间关系的瞬态模型,主要由四部分组成:水流、盐分迁移、N 迁移、痕量元素(TE)迁移,模型的详细介绍见文献^[9]。

1.2 模型参数

1.2.1 土壤性质、水动力学参数及蒸散发量(ET)

各个土层的土壤质地、容重、 EC_e 值分布、土壤水动力学参数的确定,以及参考作物蒸散发、实际作物蒸散发的详细估算过程见文献^[9]。油松、大叶黄杨灌溉量、灌溉次数的设计主要参考文献^[10],早熟禾相关设计见文献^[9],并结合每月的 ET_c 值,灌溉总量(降水量加上实际灌溉量)都设为 ET_c 值的 1.2 倍,分别为 1 432.8、1 006.3、892.3 mm。其中,运行 ENVIRO-GRO 模型时,将每月的降雨量也考虑成灌溉量,且降雨前后不再设计再生水灌溉。降雨主要为小到中雨,雨水 EC 值设为 $0.3 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$,灌溉的再生水水质设为 $1.2 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 。

早熟禾的生长期、 K_c 值、蒸发量及蒸腾量、灌溉量、灌溉次数等参数见文献^[9],大叶黄杨、油松等相关参数见表 1、表 2,其中,由于大叶黄杨和油松均属于常绿植被,所以 K_c 值在整个生长季节里变化不大,可以设为一个值。

表 1 大叶黄杨的生长期、 K_c 值、蒸发量及蒸腾量、灌溉量、灌溉次数

Table 1 Growth stages, K_c , evaporation, transpiration, irrigation, and irrigation times for Japan euonymus

时间(月)	生长期	K_c 值	蒸发量/ $\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$	蒸腾量/ $\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$	灌溉量/mm	灌溉次数
1	初期	0.7	0	0.003	35	3
2	初期	0.7	0	0.005	40	3
3	初期	0.7	0	0.008	60	4
4	初期	0.7	0	0.013	85	4
5	生长期	0.7	0	0.016	90	4
6	生长期	0.7	0	0.017	85	4
7	生长期	0.7	0	0.014	25	3
8	生长期	0.7	0	0.012	25	3
9	生长期	0.7	0	0.010	40	3
10	生长期	0.7	0	0.007	30	3
11	后期	0.7	0	0.005	30	3
12	后期	0.7	0	0.004	30	3

表 2 油松的生长期、 K_c 值、蒸发量及蒸腾量、灌溉量、灌溉次数

Table 2 Growth stages, K_c , evaporation, transpiration, irrigation, and irrigation times for Chinese pine

时间(月)	生长期	K_c 值	蒸发量/ $\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$	蒸腾量/ $\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$	灌溉量/mm	灌溉次数
1	初期	1	0	0.005	50	1
2	初期	1	0	0.007	60	1
3	初期	1	0	0.012	100	2
4	初期	1	0	0.019	130	2
5	生长期	1	0	0.023	150	2
6	生长期	1	0	0.024	120	2
7	生长期	1	0	0.020	70	1
8	生长期	1	0	0.017	70	1
9	生长期	1	0	0.015	90	1
10	生长期	1	0	0.010	70	1
11	后期	1	0	0.006	45	1
12	后期	1	0	0.005	45	1

1.2.2 植物生长与吸收

根据油松 (Chinese pine)、大叶黄杨 (Japan euonymus)、早熟禾 (Blue grass) (植被选择见模拟情景部分) 的生长规律^[11~13], 在 ENVIRO-GRO 模型中油松、大叶黄杨开始生长时间都设为 1 d, 表示从 1 年中第 1 d 开始模拟, 早熟禾设为 79 d, 表示从 1 年中第 79 d 开始返青; 收获时间油松和大叶黄杨都设为 365 d, 早熟禾设为 339 d, 对于油松和大叶黄杨指在第 365 d 结束模拟, 早熟禾指褪绿的时间; 生长盛期 (生长速度最快的时期) 油松和大叶黄杨设为 181 d (6 月), 早熟禾设为 135 d (5 月中旬)。根据文献^[10,11]可知, 油松、大叶黄杨、早熟禾主要的根系分别分布在 50、30、10 cm 以上土层中, 因此, 设置 3 种植被的 Z_{50} 分别为 30、15、5 cm, Z_{95} 分别为 60、40、15 cm。

根据已有研究^[14,15], 油松、大叶黄杨、早熟禾这 3 种植被能接受的土壤水势最小值为 -500 cm, 低于该值植被的生长将受到影响, 当植被根系生长速度被抑制 50% 时, 土壤水势为 -1 200 cm。此外, 参数土壤盐分胁迫阈值油松、大叶黄杨、早熟禾各自分别设为 9.0、6.0、2.7 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$, 超过该值其生长将会受到影响; 油松、大叶黄杨、早熟禾根系生长速度下降 50% 时的土壤盐分分别设为 15、13、11 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$; 而油松、大叶黄杨、早熟禾停止生长时的土壤盐分分别设为 24、20、19 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ ^[16~18]。

1.3 模拟情景

1.3.1 土壤性质

土壤性质的影响主要考察土壤含盐量、土壤质地等因素。土壤含盐量根据盐渍土的划分^[19], 考察背景值 (EC_e 值, 即非盐渍化土)、背景值的 2 倍 (EC_e 值, 即轻度盐渍化土)、背景值的 4 倍 (EC_e 值, 即中度盐土), 其中以北京平均土壤含盐量为背景值。本

研究考察的土壤质地主要有砂壤土、壤土、黏壤土, 其土壤容重及土壤动力学各参数值见表 3。

表 3 砂壤土、壤土、黏壤土的土壤容重及土壤动力学参数^[20]

Table 3 Soil bulk density and hydrodynamic parameters for sandy loam, loam, and clay loam			
项目	砂壤土	壤土	黏壤土
土壤容重/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	1.6	1.5	1.4
$\theta_v/\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$	0.065	0.078	0.095
$\theta_s/\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$	0.41	0.43	0.41
$K_s/\text{cm}^3\cdot\text{h}^{-1}$	4.42	1.04	0.26
α/cm^{-1}	0.075	0.036	0.019
n	1.89	1.56	1.31

1.3.2 植被

根据北京市建成区绿地主要物种的重要值^[21], 参考已有北京再生水灌溉研究中考察的植被^[22~24], 设计考察的植被有油松 (乔木)、大叶黄杨 (灌木)、早熟禾 (草本)。

2 结果与讨论

2.1 土壤性质对土壤水盐运动规律的影响

2.1.1 土壤含盐量

本研究以北京平均土壤含盐量为背景值, 模拟土壤含盐量为背景值、背景值的 2 倍、背景值的 4 倍这 3 种情况下, 再生水灌溉早熟禾时土壤的水盐运动规律。结果见图 1, 其中显示了 3 种情况下土壤中的 EC_e 值随时间的变化, 及平衡条件下 EC_e 值的垂直分布情况。由图 1(a) 可知, 当土壤 EC_e 值为背景值时, 随着灌溉年份的增加, 土壤的 EC_e 均值逐渐增加直到第 4 a 达到平衡状态; 当土壤 EC_e 值为背景值的 2 倍时, 土壤 EC_e 值随着灌溉年限变化不大; 当土壤 EC_e 值为背景值的 4 倍时, 土壤 EC_e 值随着灌溉年限的增加而逐渐降低, 直到模拟 5 a 后达到平衡; 最终 3 种情况下均达到统一的平衡状

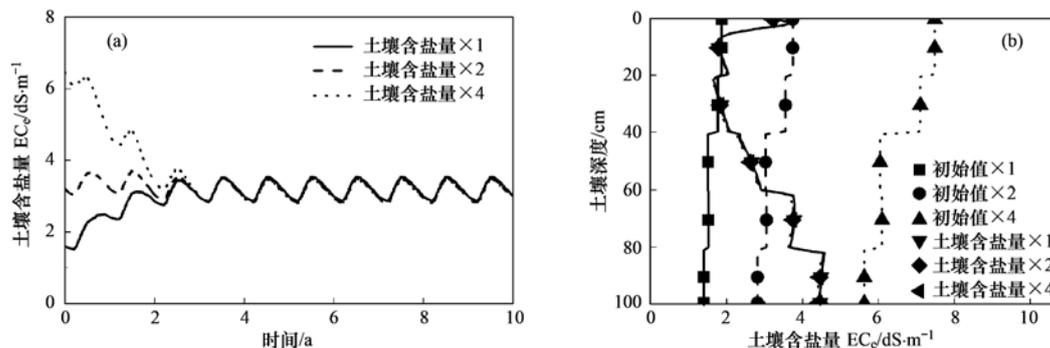


图 1 不同初始 EC_e 下 100 cm 土层的 EC_e 均值和 EC_e 值平衡时的垂直分布

Fig. 1 Average soil salinity (EC_e) and salt vertical distribution under equilibrium conditions in the 100 cm soil profile with different initial EC_e .

态,虽然初始的土壤 EC_e 值差别较大,但平衡时土壤 EC_e 值的分布基本上没有差别,达到平衡时土壤 EC_e 均值各自变化 97.2%、-2.1%、-51.5%。

由图 1(b) 可知,在背景值条件下再生水灌溉早熟禾,平衡时,表层 0~5 cm 盐分增加了 70.2%,5~40 cm 土层 EC_e 值增加了 3.0%,90~100 cm 土层 EC_e 值增加了 217.0%。其中,表层盐分累积,主要是因为表层受到灌溉及降雨的作用较明显,并且早熟禾的根系也主要集中在表层($Z_{50} = 5$ cm);底层盐分累积主要是因为灌溉水的淋溶作用,使上层的盐分向下淋溶在底层累积。而在背景值的 2 倍、4 倍条件下,平衡时盐分分布与背景值条件下相同,可见当土壤初始的 EC_e 值较高时,灌溉及降雨可以将土层中的盐分向下淋溶,减少土层中盐分的累积,对盐碱土具有一定的改良作用。

总的来说,土壤含盐量为背景值、背景值的 2

倍、4 倍条件下,平衡时 0~10 cm 土层中的 EC_e 均值分别为 2.53、2.53、2.49 $dS \cdot m^{-1}$,都小于早熟禾生长的盐阈值 2.7 $dS \cdot m^{-1}$,早熟禾的生长将不会受到影响;平衡时 100 cm 土层中的 EC_e 均值各自为 2.99、2.96、2.93 $dS \cdot m^{-1}$,可见均出现轻度盐渍化(2~4 $dS \cdot m^{-1}$)。

2.1.2 土壤质地

图 2 显示了 3 种情景(壤土、砂壤土、黏壤土)下,再生水灌溉早熟禾时,土壤中的 EC_e 值随时间的变化,及平衡条件下 EC_e 值的垂直分布情况。由图 2(a) 可知,壤土、黏壤土条件下,土壤 EC_e 随着灌溉年限的增加呈上升趋势直到平衡,而砂壤土呈下降趋势直到平衡;其中,砂壤土第 3 a 达到平衡,壤土第 4 a 达到平衡,黏壤土第 5 a 达到平衡;且平衡时壤土、砂壤土、黏壤土中土壤 EC_e 年均值分别为 2.43、1.18、3.80 $dS \cdot m^{-1}$,可见,平衡时砂壤土中的盐分远小于黏壤土中的盐分。

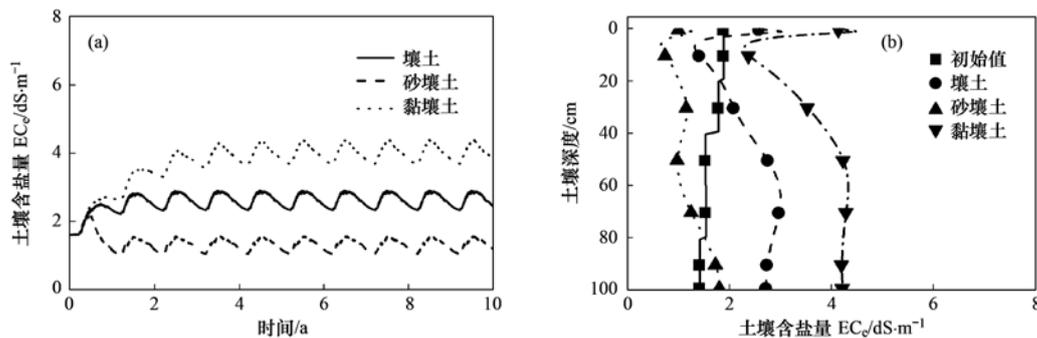


图 2 不同土壤质地下 100 cm 土层的 EC_e 均值和 EC_e 值平衡时的垂直分布

Fig. 2 Average soil salinity (EC_e) and salt vertical distribution under equilibrium conditions in the 100 cm soil profile with different soil textures

已有研究表明^[23],黏土颗粒细腻,含盐水灌溉时,水里的盐分不易下渗,受到黏土颗粒的拦截;而壤土和砂土颗粒较黏土大,对水中的盐分拦截不大,灌溉水可将表层土壤盐分向下淋洗。因此,结合表 4 可知,偏砂质的砂壤土及壤土淋溶量较多,土层中的

EC_e 值较低,而偏黏质的黏壤土淋溶量较小,土层中的 EC_e 值较砂壤土及壤土大。由于黏质土壤本身具有通气透水性差、水分进入时渗透较困难等特点,所以再生水灌溉此类土壤时,一定要严格控制再生水中的含盐量,含盐量过高,极易造成黏质土壤盐渍化。

表 4 不同初始 EC_e 、土壤质地、植被下,平衡时每年的淋溶量

Table 4 Annual leaching under equilibrium conditions with different initial EC_e , soil textures and plants

情景	土壤含盐量			土壤质地			植被		
	1 倍	2 倍	4 倍	壤土	砂壤土	黏壤土	早熟禾	大叶黄杨	油松
淋溶量/mm	118.8	120.1	121.2	134.0	178.2	125.7	118.8	175.3	260.9

此外,由图 2(b) 可知,平衡时壤土、黏壤土条件下 EC_e 值在土层中的分布规律相似,表层 0~5 cm 及中间层 30~70 cm 盐分累积较多,从 10 cm 土层开始 EC_e 值先增加后减小,底层 80~100 cm 的 EC_e 值小于中间层,这主要是因为这两种土壤中盐

分的淋溶能力较弱,大多盐分仍累积在中间土层;而砂壤土条件下,其 EC_e 值在土层中的分布规律是表层 0~5 cm 及低层 80~100 cm 盐分累积较多,从 10 cm 土层开始 EC_e 值一直呈增加的趋势,可见砂壤土中盐分的淋溶能力较强,大多数盐分被淋溶到

底层;但总体上土层中的 EC_e 值砂壤土 < 壤土 < 黏壤土。

总的来说,壤土、砂壤土条件下,平衡时 0~10 cm 土层的 EC_e 均值分别为 1.79 、 0.84 $dS \cdot m^{-1}$,均小于早熟禾生长的盐阈值 2.7 $dS \cdot m^{-1}$,早熟禾的生长将不会受到影响;而黏壤土条件下,平衡时 0~10 cm 土层的 EC_e 均值为 2.95 $dS \cdot m^{-1}$,大于早熟禾生长的盐阈值 2.7 $dS \cdot m^{-1}$,早熟禾的生长将会受到影响。此外,壤土、黏壤土条件下,平衡时 100 cm 土层中的 EC_e 均值各自为 2.43 、 3.80 $dS \cdot m^{-1}$,土壤均出现轻度盐渍化;而砂壤土条件下,平衡时 100 cm 土层中的 EC_e 均值为 1.18 $dS \cdot m^{-1}$,土壤未出现盐渍化($0 \sim 2$ $dS \cdot m^{-1}$)。

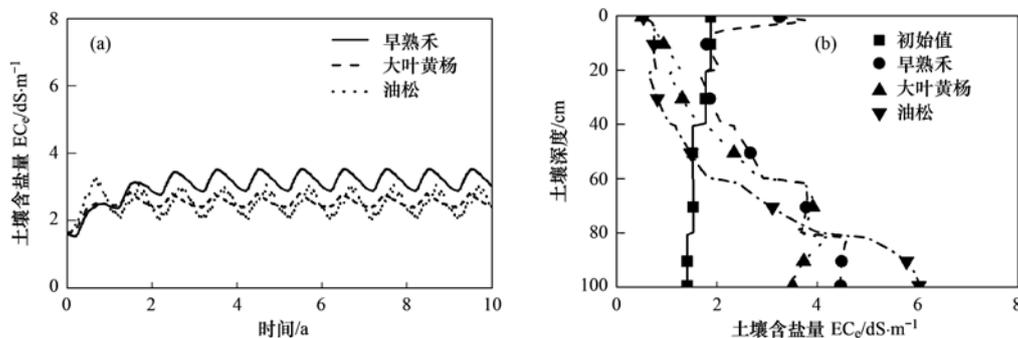


图 3 不同植被下 100 cm 土层的 EC_e 均值和 EC_e 值平衡时的垂直分布

Fig. 3 Average soil salinity (EC_e) and salt vertical distribution under equilibrium conditions in the 100 cm soil profile with different plants

此外,由图 3(b)可知,灌溉早熟禾,表层 0~5 cm 盐分较多,之后呈逐渐增加的趋势,底层盐分含量较多;灌溉大叶黄杨,40 cm 土层以上盐分减少 38.6%,40 cm 以下土层盐分增加 123.0%;灌溉油松,50 cm 土层以上盐分减少 48.8%,50 cm 土层以下盐分增加 157.4%;平衡时,3 种植被下盐分的垂直分布不同,主要与植被的根系分布有关。

总的来说,灌溉油松平衡时,0~50 cm 土层中的 EC_e 均值为 0.88 $dS \cdot m^{-1}$,灌溉大叶黄杨平衡时,0~30 cm 土层中的 EC_e 均值为 1.00 $dS \cdot m^{-1}$,分别小于油松、大叶黄杨生长的盐阈值 9.0 、 6.0 $dS \cdot m^{-1}$,油松、大叶黄杨的生长将不会受到影响;100 cm 土层中的 EC_e 均值各自为 2.34 、 2.99 $dS \cdot m^{-1}$,土壤均出现轻度盐渍化(早熟禾的分析见 2.1.1 节)。

2.2.2 EC_e 均值在不同土层中的年变化情况

图 4 显示了再生水灌溉早熟禾、大叶黄杨、油松 3 种植被下,平衡时 0~10、40~50、90~100 cm 这 3 土层中盐分的分布情况。由图 4 可知,灌

2.2 植被种类对土壤水盐运动规律的影响

2.2.1 EC_e 均值的垂直分布情况

本研究模拟了北京再生水灌溉早熟禾、大叶黄杨、油松这 3 种植被下的土壤水盐运动规律,发现土壤 EC_e 值随着灌溉年限的增加呈逐渐上升的趋势直到平衡[图 3(a)],早熟禾模拟 4 a 达到平衡,大叶黄杨模拟 3 a 达到平衡,油松模拟 2 a 后达到平衡;平衡时,3 种植被下土壤 EC_e 年均值分别为 3.19 、 2.55 、 2.51 $dS \cdot m^{-1}$ 。再生水灌溉大叶黄杨和油松,平衡时的土壤 EC_e 年均值小于灌溉早熟禾,主要是因为种植大叶黄杨和油松时灌溉量增加,淋溶量(见表 4)也随之增加,导致土壤中累积的盐分较小。

灌溉早熟禾平衡时,0~10 cm 土层中的 EC_e 均值变化频率较大:前两个月没有灌溉主要是降雨且降雨较少,土壤中的盐分增加;3 月下旬开始灌溉,土壤中的盐分开始减少;之后由于每 5 d 进行一次灌溉,土壤中 EC_e 值的变化频率较大,但 EC_e 值总体呈下降的趋势;11 月之后由于灌溉及降雨量都较少,土壤中的 EC_e 值又逐渐增加。中间土层 40~50 cm 的 EC_e 均值相对于表层 0~10 cm 变化频率较小:前 5 个月 EC_e 值基本没有变化;7 月初 EC_e 值开始增加,主要是由于 7 月降雨较大,将土层中的盐分向下淋溶所致;8 月底 EC_e 值开始减小。而 90~100 cm 土层平衡时年变化频率及波动都较小,一直处于平衡状态。

灌溉大叶黄杨平衡时,0~10 cm 土层中的 EC_e 值在 3 月之前基本没有增加,可能是因为种植大叶黄杨需要从 1 月开始灌溉,前 3 个月蒸散发较少,灌溉量较多,土壤中几乎没有盐分累积;4 月初由于蒸散发的增加使土壤中的盐分开始累积;直到 7 月初由于灌溉、降雨较多,土壤中的 EC_e 值开始减小。

土层 40 ~ 50 cm 的 EC_e 均值在 7 月之前增加的较少; 7 月初由于灌溉量较大使得上层土壤中的盐分向下淋溶, 导致该土层的含盐量开始逐渐增加; 8

月初该土层的含盐量开始降低. 土层 90 ~ 100 cm 的 EC_e 均值变化较小, 8 月初 EC_e 值开始降低, 10 月中旬开始增加.

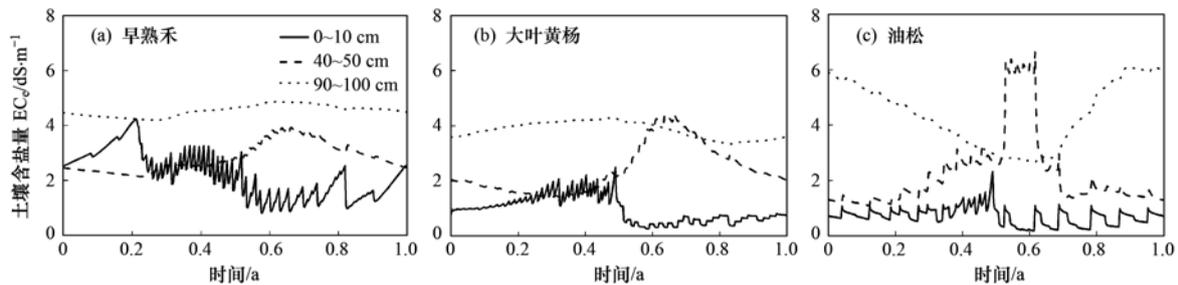


图 4 平衡时种植早熟禾、大叶黄杨、油松 0 ~ 10 cm、40 ~ 50 cm、90 ~ 100 cm 土层中 EC_e 均值的年变化

Fig. 4 Annual variation of soil salinity (EC_e) in the 0-10 cm, 40-50 cm, 90-100 cm soil profiles with Bluegrass, Japan euonymus, Chinese pine, under equilibrium conditions

灌溉油松平衡时, 表层 0 ~ 10 cm 在 5 月之前, 土壤中的 EC_e 值一直处于变化状态, 但没有盐分累积的趋势; 5 月初盐分逐渐增加直到 7 月初开始减小. 土层 40 ~ 50 cm 中的 EC_e 值 4 月末之前几乎没有增加; 之后逐渐增加, 7 月初快速增大, 7 月一直维持较高的 EC_e 值, 出现该情况可能是由于油松根系的作用 ($Z_{50} = 30$ cm, $Z_{95} = 60$ cm); 8 月初 EC_e 值快速下降. 土层 90 ~ 100 cm 的 EC_e 值从 1 月开始就逐渐减小, 直到 8 月初开始增加, 主要是因为淋溶作用.

3 不确定性分析

本研究运用 ENVIRO-GRO 模型, 参考文献取各参数的多年平均值, 降低了模拟的复杂性, 同时由于忽略了众多条件, 使模拟结果与实测值不能完全吻合, 但短期模拟各条件下的土壤盐分分布与已有的研究结果^[22-24]相似, 在文献[9]中也有相关说明. 此外, ENVIRO-GRO 模型中水盐的迁移属于一维模拟, 但实际上田间水盐的迁移属于三维运动, 因此, 一维模拟不能准确地描述田间土壤中盐分的分布. 同时, ENVIRO-GRO 模型没有考虑盐的沉淀、溶解, 该因素对于土壤盐分的分布也有一定的影响. 但该模型模拟的结果符合灌溉地典型的盐分分布, 且相关研究^[8, 25]表明, ENVIRO-GRO 模型能合理地评估灌溉管理对土壤盐分长期变化及作物产量的影响.

4 建议

根据研究结果, 考虑土壤盐度、灌溉用水盐度、浸出率及植被自身的耐盐度等多方面因素, 针对植被选择、灌溉措施、土壤改良三方面提出相关措施. ① 植被选择: 长期灌溉再生水的草坪, 建议不

适宜种植盐阈值 < 2.53 $dS \cdot m^{-1}$ 的草本植被. 城市绿地实际灌溉管理存在一定的差异, 需根据实际情况选择种植耐盐植物, 以有效解决再生水灌溉盐的问题; ② 灌溉措施: 建议再生水灌溉时不采用节水灌溉, 在满足植被生长需求的基础上适当增加灌溉水量, 用额外的水洗去过量的盐分, 可以用公式估算滤去根系层盐分所需的额外水量. 例如, 可忍受盐度为 2.7 $dS \cdot m^{-1}$ 的早熟禾草坪, 用盐度为 1.2 $dS \cdot m^{-1}$ 的再生水进行灌溉, LR 应为 0.10, 即为避免灌溉用水盐分积累, 每次灌溉还应使用大约 10% 的额外用水. 当采用节水灌溉时, 可以将再生水与含盐量较低的水混合使用, 具体方案可将两种水同时注入到同一水库中, 混合用于灌溉, 或用两种水进行轮灌; ③ 土壤改良: 偏砂质的砂壤土淋溶量较多, 土层中的 EC_e 值较小, 而偏黏质的黏壤土淋溶量较少, 土层中的 EC_e 值较大, 因此在一定程度上增加土壤淋溶潜力, 能有效的降低土壤盐分的累积. 如果土壤中有硬土层或隔水黏土层的存在, 可调整土壤剖面以改善其透水性, 增加淋溶; 也可安装人工排水系统, 增加土壤排水功能.

5 结论

3 种土壤初始含盐量下, 多年模拟后土壤盐分分布最终达到一致的平衡状态, 土壤盐分累积不会影响早熟禾的生长, 土壤均出现轻度盐渍化. 3 种土壤质地下, 平衡时土壤中的 EC_e 年均值砂壤土 $<$ 壤土 $<$ 黏壤土; 壤土、砂壤土条件下, 土壤盐分累积均不会影响早熟禾的生长, 黏壤土条件下, 会影响早熟禾的生长; 壤土、黏壤土条件下, 土壤均出现轻度盐渍化, 砂壤土条件下, 土壤未出现盐渍化. 而

3 种植被下,平衡时灌溉大叶黄杨和油松,土壤 EC_e 均值差别不大,均小于灌溉早熟禾;且再生水灌溉油松、大叶黄杨,土壤盐分累积不会影响油松、大叶黄杨的生长,各土壤均出现轻度盐渍化。

参考文献:

- [1] 周军, 杜炜, 张静慧, 等. 北京市再生水行业的现状与发展 [J]. 水工业市场, 2009, (9): 12-14.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Pedrero F, Alarcón J J. Effects of treated wastewater irrigation on lemon trees [J]. *Desalination*, 2009, 246(1-3): 631-639.
- [5] 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.
- [6] Stevens D P, Mclaughlin M J, Smart M K. Effect of long-term with reclaimed water on soils of Northern Adelaide Plains, South Australia [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2003, 41(5): 933-948.
- [7] Palacios-Díaz M P, Mendoza-Grimón V, Fernández-Vera J R, *et al.* Subsurface drip irrigation and reclaimed water quality effects on phosphorus and salinity distribution and forage production [J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(11): 1659-1666.
- [8] Chen W P, Hou Z N, 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.
- [9] 吕斯丹, 陈卫平, 王美娥. 模型模拟再生水灌溉对土壤盐运动的影响 [J]. 环境科学, 2012, 33(12): 4100-4107.
- [10] 王瑞辉. 北京主要园林树种耗水性及节水灌溉制度研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2006.
- [11] 杨建国, 张新民. 北京市草坪灌溉制度拟定 [J]. 节水灌溉, 2005, (2): 11-13.
- [12] 张焰玉. 新型绿化苗木-大叶黄杨 [J]. 中国林业, 2001, 16(8): 25.
- [13] 雷振民, 美存焕, 董丽芬. 油松生长发育规律的观察 [J]. 陕西林业科技, 1993, (4): 27-29.
- [14] 孙璐, 袁小环, 武菊英, 等. 拂子茅和早熟禾的灌溉比较研究 [J]. 节水灌溉, 2006, (5): 11-14.
- [15] 刘娟娟. CO₂ 浓度升高与干旱胁迫对苗木水分运输的影响 [D]. 北京: 北京林业大学, 2009.
- [16] 樊华, 张群, 王海洋, 等. 7 种园林植物的耐盐性研究 [J]. 林业科技, 2007, 32(2): 65-68.
- [17] 马少梅, 麻冬梅, 谢应忠, 等. 北海道黄杨试管苗的耐盐性研究 [J]. 林业资源管理, 2010, (2): 94-96.
- [18] Stowell L J. Pointers on reclaimed water contract negotiations [C]. Fairbanks Ranch Meeting, 1999.
- [19] 南京农业大学. 土壤农化分析 [M]. (第二版). 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [20] Carsel R F, Parrish R S. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics [J]. *Water Resources Research*, 1988, 24(5): 755-769.
- [21] 郎金顶. 北京市建成区绿地植物多样性结构和功能评价 [D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [22] 郑伟, 李晓娜, 杨志新, 等. 再生水灌溉对不同类型草坪土壤盐碱化的影响 [J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 101-104, 122.
- [23] 王艳春, 张莉楠, 古润泽. 再生水灌溉对园林植物和土壤的影响研究 [J]. 北京园林, 2005, 21(4): 6-11.
- [24] 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.
- [25] Feng G L, Meiri A, Letey J. Evaluation of a model for irrigation management under saline conditions [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(1): 71-80.

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-ke, 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 Ruo-yu, <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