

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)	

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

(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: 随着水资源供需矛盾日益尖锐, 污水再生利用成为了缓解北京水资源紧缺的重要举措. 为推动北京再生水安全灌溉, 本研究运用 ENVIRO-GRO 模型模拟缺水城市北京再生水灌溉土壤水盐运动规律, 并对土壤盐分累积进行预测, 探讨了不同灌溉措施对土壤水盐运动规律和盐分累积的影响. 结果表明, 高水量、常规、低水量灌溉, 平衡时土壤含盐量 (EC_e) 年均值分别增加了 29.5%、97.2%、197.8%; 灌溉频率对土壤水盐运动规律影响不大, 但低频灌溉下土壤中盐分的累积有减少的趋势; 灌溉水含盐量 (EC_w) 为 0.6、1.2、2.4 $dS \cdot m^{-1}$ 灌溉条件下, 平衡时 EC_e 的年均值分别增加了 23.7%、97.2%、208.5%, 自来水灌溉下土壤盐分虽有增加, 但土壤未出现盐渍化. 总的来说, 目前北京常规再生水灌溉, 平衡时土壤盐分累积不会影响早熟禾的生长, 但土壤会出现轻度盐渍化.

关键词: 再生水; 灌溉; 城市绿地; 土壤盐分; 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)12-4100-08

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

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

Abstract: As the conflict between water supply and demand, wastewater reuse has become an important measure, which can relieve the water shortage in Beijing. In order to promote safe irrigation with reclaimed water and prevent soil salinisation, the dynamic transport of salts in urban soils of Beijing, a city of water shortage, under irrigation of reclaimed water was simulated by ENVIRO-GRO model in this research. The accumulation trends of soil salinity were predicted. Simultaneously, it investigated the effects of different irrigation practices on soil water-salt movement and salt accumulation. Results indicated that annual averages of soil salinity (EC_e) increased 29.5%, 97.2%, 197.8% respectively, with the higher irrigation, normal irrigation, and low irrigation under equilibrium conditions. Irrigation frequency had little effect on soil salt-water movement, and soil salt accumulation was in a downward trend with low frequency of irrigation. Under equilibrium conditions, annual averages of EC_e increased 23.7%, 97.2%, 208.5% respectively, with irrigation water salinity (EC_w) 0.6, 1.2, 2.4 $dS \cdot m^{-1}$. Soil salinity increased slightly with $EC_w = 0.6 dS \cdot m^{-1}$, while soil salinization did not appear. Totally, the growth of Blue grass was not influenced by soil salinity under equilibrium conditions with the regular irrigation in Beijing, but mild soil salinization appeared.

Key words: reclaimed water; irrigation; urban green space; soil salinity; ENVIRO-GRO model

北京属于水源性缺水城市, 随着人口的增长、城市规模的扩大、生活水平的不断提高, 水资源供需矛盾日益尖锐, 而污水再生利用成为了缓解北京水资源紧缺的重要举措. 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].

再生水为园林绿地灌溉提供了一个经济可靠的新水源, 合理利用再生水能提高土壤肥力, 促进植物生长^[2]. 但由于经济、技术原因, 再生水中的污染物质并没有被完全去除, 尤其是污水处理后通常具有较高的含盐量^[3]. 田间试验研究表明, 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^[4~7], 且盐分累积规律受到土壤条

件、灌溉水质、气候条件等因素的影响; 盐分累积影响作物的正常生长^[8,9].

土壤盐分与植被之间的相互作用通常较为复杂, 因此, 通过田间试验来研究土壤水盐运动规律相对来说比较困难且成本较高. 目前, 相关研究的仿真模型一般都整合了作物生长、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, 且不受时间、空间的限制. Forkutsa 等^[10]结合田间试验研究, 利用土壤-水模型 Hydrus-1D 研究了水管理策略对浅层地下水灌溉的棉花地土壤盐分的影响.

收稿日期: 2011-10-17; 修订日期: 2011-12-31

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@rcees.ac.cn

Chen 等^[11]结合田间试验利用 ENVIRO-GRO 模型研究了盐水灌溉下土壤盐分的分布,模拟结果与田间试验结果符合度较高. Jiang 等^[12]结合田间试验利用 SWAP 模型模拟了盐水灌溉下土壤盐分的分布规律,模拟值与田间监测值相符合.

本研究以北方缺水城市北京为案例,拟通过运用 ENVIRO-GRO 模型对再生水灌溉下土壤水盐运动规律和盐分累积进行模拟,探讨不同灌溉措施对土壤水盐运动规律和盐分累积的影响,以期对再生水灌溉土壤盐分累积风险评价提供理论基础和技术方案.

1 研究方法

1.1 ENVIRO-GRO 模型描述

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^[13],主要由 4 部分组成:水流、盐分迁移、氮迁移、痕量元素(TE)迁移.由于本研究考察土壤中水盐的运动规律,因此主要对前两部分作介绍.

该模型中水的流动通过一维 Richards 方程进行模拟:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} \right] + A(z, t) \quad (1)$$

式中, θ 指单位体积土壤的含水量 ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, 溶液/土壤), H 指土壤水势 (cm), $A(z, t)$ 指植物根系吸水函数 [$\text{cm}^3 \cdot (\text{cm}^3 \cdot \text{h})^{-1}$], $K(\theta)$ 指非饱和导水率,是与 θ 相关的函数 ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$).

其中,非饱和导水率 $K(\theta)$ 应用 Van Genuchten 非饱和导水率模型来描述:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m} \\ \theta_s \end{cases} \quad (2)$$

$$K = K_s \sqrt{S_e} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (3)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (4)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (5)$$

式中, h 指土壤吸力 (cm), θ_s 、 θ_r 分别指饱和土壤含水量 ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) 和滞留土壤含水量 ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$), α 是与进气吸力相关的参数, K_s 、 K 分别指土壤饱和导水率和非饱和导水率 ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$), m 、 n 指形状系数, α 、 θ_s 、 θ_r 、 n 、 K 即为构成 Van Genuchten 方程所需要的 5 个相互独立的参数.

植物根系吸水函数通过 Van Genuchten 定义的经验公式来进行模拟:

$$A(z, t) = T_p(t) \Gamma(z, t) \sigma(h, \pi) \quad (6)$$

式中, $T_p(t)$ 指潜在蒸腾率 ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$); $\Gamma(z, t)$ 指植物根系分布函数; $\sigma(h, \pi)$ 指作物基质势-盐胁迫函数 (crop matric potential salinity stress function).

植物根系的生长通过经典的 Verhulst-Pearl 逻辑函数进行模拟:

$$RD(t) = \frac{RD_0 \times RD_m}{RD_0 + (RD_m - RD_0) e^{-rt}} \quad (7)$$

式中, RD_0 、 RD_m 分别指初始的和最大的根深度 (cm); r 指根系生长速率 (h^{-1}).

植物根系的分布通过含有 2 个参数的根系分布模型来模拟:

$$\Gamma(z) = -dz \frac{c}{Z_{50}} \left(\frac{z}{Z_{50}} \right)^{c-1} \left[1 + \left(\frac{z}{Z_{50}} \right)^c \right]^{-2} \quad (8)$$

$$c = \frac{a}{\lg(Z_{50}) + \lg(Z_{95})} \quad (9)$$

式中, z 指距离表层的深度, dz 指土层的厚度, Z_{50} 、 Z_{95} 是指根系占 50%、95% 时土层的深度, 参数 a 是植物的特征值.

利用 Van Genuchten 提出的 α 关系式计算 $\sigma(h, \pi)$ (作物基质势-盐胁迫函数):

$$\sigma(h, \pi) = \frac{1}{1 + \left[\frac{\alpha \times h + \pi}{\pi_{50}} \right]^3} \quad (10)$$

式中, h 指土壤基质势, π 指土壤渗透势, $\alpha = \pi_{50}/h_{50}$, 其中 π_{50} 、 h_{50} 分别指蒸腾减少 50% 时的渗透势和基质势.

假定土壤水中的盐分没有溶解、沉淀以及植物吸收. 盐分的迁移通过对流-弥散迁移方程进行模拟:

$$\frac{\partial (\theta c_s)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D_s(\theta, v) \frac{\partial c_s}{\partial z} - v c_s \right] \quad (11)$$

式中, c_s 指盐浓度, v 指孔隙水平平均流速, $v = q/\theta$, q 指达西流速, θ 指孔隙度, D 指水动力弥散系数.

水动力弥散系数 (D) 计算公式:

$$D_s(\theta, v) = D_0 \xi + \lambda |v| \quad (12)$$

$$\xi = \theta^{10/3} / \phi^2 \quad (13)$$

式中, D_0 指纯水中盐的扩散系数, ξ 指曲折因子, θ 指土壤含水量, ϕ 指土壤孔隙度, λ 指弥散度.

1.2 模型参数

1.2.1 土壤性质与水动力学参数

根据已有的田间试验研究^[6, 7], 取 100 cm 的土壤剖面作为研究对象, 并将该剖面分为 5 层, 得到各土层的土壤质地、容重、 EC_e 值分布如表 1.

模型中 Van Genuchten 方程所需要的参数, 即

土壤水动力学参数,可以参考北京土壤性质的相关研究^[14,15],以及结合 Carsel 等^[16]的研究结果,得到各参数的值见表 2. 模型中分子扩散系数取 $0.02\text{ cm}^2\cdot\text{h}^{-1}$,纵向弥散率取 $1\text{ cm}^{[17]}$.

表 1 100 cm 土层中土壤质地、容重、EC_e 值的分布

Table 1 Soil texture, soil bulk density, and EC_e at the 100 cm soil profile

项目	0 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm	40 ~ 60 cm	60 ~ 80 cm	80 ~ 100 cm
土壤质地	壤土	壤土	壤土	砂壤土	砂壤土
土壤容重/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	1.610	1.520	1.500	1.460	1.460
EC _e / $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$	1.872	1.777	1.512	1.524	1.407

表 2 北京的土壤水动力学参数

Table 2 Average soil hydrodynamic parameters in Beijing

项目	0 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm	40 ~ 60 cm	60 ~ 80 cm	80 ~ 100 cm
$\theta_r/\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$	0.061	0.071	0.053	0.051	0.064
$\theta_s/\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$	0.43	0.47	0.42	0.41	0.43
$K_s/\text{cm}^3\cdot\text{h}^{-1}$	1.48	2.16	1.24	0.86	0.84
α/cm^{-1}	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01
n	1.53	1.55	1.46	1.43	1.21

1.2.2 蒸散发(ET)

参考 FAO Penman-Monteith 公式^[18]计算参考作物蒸散发量(ET_0),该公式考虑了太阳辐射、大气温度、大气湿度、风速等影响因素,其表达式为:

$$\text{ET}_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (14)$$

式中, ET_0 指参考作物蒸散发量($\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$), R_n 指作物表面接收到的净辐射 [$\text{MJ}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d}^{-1})$], G 指土壤热通量密度 [$\text{MJ}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d}^{-1})$], T 指 2 m 高处的日平均气温($^{\circ}\text{C}$), u_2 指 2 m 高处的风速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), e_s 指饱和蒸汽压(kPa), e_a 指实际蒸汽压(kPa), Δ 指蒸汽压曲线的斜率($\text{kPa}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$), γ 指温湿常数($\text{kPa}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$).

计算所得的 ET_0 值见表 3. 从中可知,北京降雨主要集中在 7、8 月,蒸散发集中在 5、6 月,且蒸散发的计算结果与相关研究结果^[19]相近.

实际作物蒸散发(ET)需通过作物系数(K_c)进行修正. 作物的生长期一般可以被分为初期、快速生长期、中期、后期四个阶段,每个阶段的 K_c 值可以通过查表或计算得到. 蒸发主要取决于土壤表层能照射到的太阳辐射,随着植物的生长土壤表层能接收到的辐射将减小,因此当植物较小时(即植物生长初期)土壤水主要通过土壤蒸发减少,蒸散发主要为蒸发值;但当植物生长到足以覆盖土壤时,蒸腾将会成为主要过程. 本研究选择以早熟禾为主的绿地进行灌溉模拟,根据目前已有的研究^[19~21],确定早熟禾的生长期、 K_c 值、蒸发量及蒸腾量、灌

溉量(设为 1.2 ET)、灌溉次数(表 4).

早熟禾灌溉量、灌溉次数的设计主要参考文献 [20,21],并结合每月的 ET 值,灌溉总量设为 ET 值的 1.2 倍,即 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 $1.2\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$.

1.2.3 植物生长与吸收

根据早熟禾(Blue grass)的生长规律^[19],在 ENVIRO-GRO 模型中早熟禾开始生长时间设为 79 d,收获时间设为 339 d,生长盛期设为 135 d(5 月中旬),并且早熟禾主要根系分布在 10 cm 以上土层中,因此,设置 Z_{50} 为 5 cm, Z_{95} 为 15 cm.

根据已有研究^[22,23],早熟禾能忍受的土壤水势最小值为 -500 cm ,低于该值植物的生长将受到影响,而当植物根系生长速度被抑制 50% 时,土壤水势为 -1200 cm . 此外,参数土壤盐分胁迫阈值早熟禾设为 $2.7\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$,超过该值其生长将会受到影响;生长速度下降 50% 时的土壤盐分设为 $11\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$;停止生长时的土壤盐分设 $19\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ ^[24].

1.3 模拟情景

根据早熟禾耗水规律及灌溉制度的相关文献^[19,25],本研究设置了不同灌溉措施的情景模拟. 首先,设置了 3 种灌溉量:①采用过量水进行灌溉即高水量灌溉,作物蒸散发量的 1.5 倍($1.5\text{ ET} = 1014.7\text{ mm}$);②采用适宜植物生长的水量进行灌溉即正常灌溉,作物蒸散发量的 1.2 倍($1.2\text{ ET} =$

892.3 mm)；③采用少于植物需水的水量进行灌溉,即节水灌溉,作物蒸散发量的 0.8 倍($0.8 ET = 597.4 \text{ mm}$)。其次,在正常灌溉量下设置了早熟禾的 3 种灌溉频率,即高频、中频、低频:3 月下旬开

始灌溉,3 月每 3 d 一次,4 月及之后的月份①每 3 d 一次、②每 5 d 一次、③每 7 d 一次。最后,设置 3 种不同含盐量的灌溉水质即: $0.6 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (自来水)、 $1.2 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (再生水)、 $2.4 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (再生水)。

表 3 北京多年平均日最高温度、日最低温度、风速、降雨量、相对湿度、 ET_0 值¹⁾

Table 3 Long-time average daily maximum temperature, daily minimum temperature, wind speed, rainfall, relative humidity, and ET_0 in Beijing							
月份	平均最高温度 /℃	平均最低温度 /℃	平均温度 /℃	平均风速 / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	平均降雨量 /mm	平均相对湿度 /%	ET_0 / $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$
1	1.8	-8.5	-3.7	2.6	3.68	43.6	1.2
2	5.0	-5.6	-0.7	2.8	4.97	41.3	1.7
3	11.5	0.3	5.8	3.1	11.04	40.0	2.9
4	20.3	7.9	14.2	3.2	23.60	44.6	4.5
5	26.0	13.6	19.9	2.8	37.07	49.9	5.5
6	30.2	18.8	24.4	2.4	67.23	57.5	5.8
7	30.9	22.0	26.2	2.0	112.79	68.4	4.9
8	29.6	20.7	24.8	1.8	82.68	71.1	4.2
9	25.8	14.8	20.0	2.0	45.83	64.6	3.5
10	19.1	7.8	13.1	2.1	30.39	56.9	2.5
11	10.0	0.0	4.6	2.4	11.32	53.4	1.5
12	3.7	-5.9	-1.5	2.5	2.12	46.4	1.2

1) 表中平均日最高温度、平均日最低温度、平均温度、平均风速来自于中国天气网统计数据,平均降雨量、平均相对湿度来自于中国统计年鉴

表 4 早熟禾的生长期、 K_c 值、蒸发量及蒸腾量、灌溉量、灌溉次数

Table 4 Growth stages, K_c , evaporation, transpiration, irrigation, and irrigation times for Blue grass						
时间(月-日)	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
03-21 ~ 03-31	初期	0.30	0.004	0.000	30	3
04-01 ~ 04-20	快速生长期	0.30 ~ 0.75	0.000	0.006 ~ 0.014	80	3
04-21 ~ 04-30	中期	0.75	0.000	0.014		1
05-01 ~ 05-31	中期	0.75	0.000	0.017	110	5
06-01 ~ 06-30	中期	0.75	0.000	0.018	80	3
07-01 ~ 07-31	中期	0.75	0.000	0.015	25	2
08-01 ~ 08-31	中期	0.75	0.000	0.013	30	3
09-01 ~ 09-30	中期	0.75	0.000	0.011	50	4
10-01 ~ 10-12	中期	0.75	0.000	0.008	30	2
10-13 ~ 10-31	后期	0.75 ~ 0.65	0.000	0.008 ~ 0.007		3
11-01 ~ 11-30	后期	0.75 ~ 0.65	0.000	0.005 ~ 0.004	25	5
12-01 ~ 12-06	后期	0.75 ~ 0.65	0.000	0.004 ~ 0.003	0	0

2 结果与讨论

2.1 再生水灌溉量对土壤盐分垂直分布和累积的影响

本研究以 $1.2 ET$ 、中频、含盐量 $1.2 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 再生水灌溉早熟禾为北京常规灌溉。由图 1 可知, 3 种水量灌溉下,土壤 EC_e 年均值随着灌溉年限的增加而逐渐增加直到平衡,当灌溉量为 $1.5 ET$ 、 $1.2 ET$ 时第 4 a 达到平衡状态,当灌溉量为 $0.8 ET$ 时第 13 a 达到平衡状态,平衡时 EC_e 年均值分别增加了 29.5%、97.2%、197.8%。再生水灌溉下盐分会在土壤中累积,且灌溉水量越少盐分累积越多,是因为

灌溉水量的减少导致淋溶量减少(表 5),使得土壤中累积的盐分增加。模型淋溶量的模拟值偏高^[26],但该误差对整体的模拟结果影响不大。

图 1 显示在灌溉平衡时,高水量灌溉下,表层 0 ~ 5 cm 盐分增加了 19.4%,5 ~ 40 cm 土层降低了 35.0%,90 ~ 100 cm 土层增加了 131.2%;常规灌溉下,表层 0 ~ 5 cm 盐分增加了 70.2%,5 ~ 40 cm 土层增加了 3.0%,90 ~ 100 cm 土层增加了 217.0%;节水灌溉下,表层 0 ~ 5 cm 盐分增加了 201.1%,5 ~ 40 cm 土层增加了 59.4%,90 ~ 100 cm 土层增加了 422.0%。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,且早熟禾的根系

也主要集中在表层($Z_{50} = 5\text{ cm}$); 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. 本研究中土壤盐分的垂直分布在各土层的分界处(20、40、60、80 cm)均出现了“平

台”现象,可能是由于模型中土壤性质与水动力学参数均通过分层获取,使不同土层间各参数没有连续性,进而导致土壤盐分分布结果出现“平台”现象.

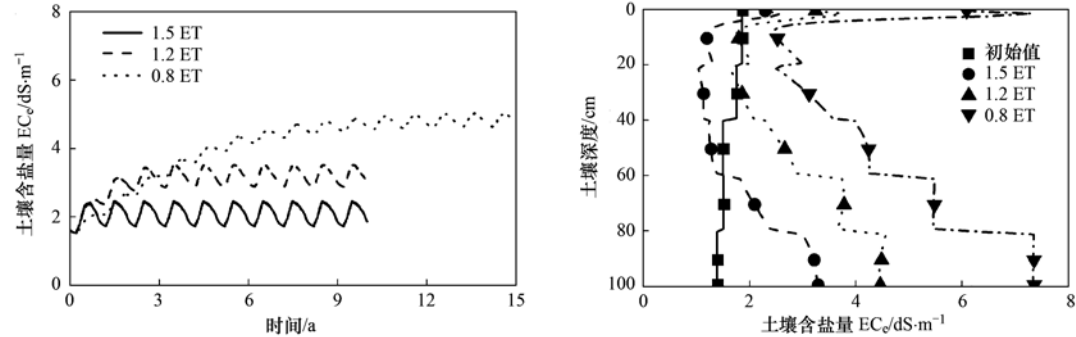


图 1 不同灌溉量下 100 cm 土层的 EC_e 均值和 EC_e 值垂直分布

Fig. 1 Average soil salinity (EC_e) and salt vertical distribution at the 100 cm soil profile with different irrigations

表 5 不同灌溉量、灌溉频率、灌溉水质下,平衡时每年的淋溶量

Table 5 Annual leaching with different irrigations, frequencies, EC_w , under equilibrium conditions

灌溉量	淋溶量/mm	灌溉频率/d	淋溶量/mm	灌溉水质/ $dS \cdot m^{-1}$	淋溶量/mm
1.5 ET	-233.5	3(高频)	-116.7	0.6	-112.2
1.2 ET	-118.8	5(中频)	-118.8	1.2	-118.8
0.8 ET	-32.7	7(低频)	-146.2	2.4	-140.3

高水量灌溉、常规灌溉、节水灌溉下平衡时,0 ~ 10 cm 土层中的 EC_e 均值分别为 1.77、2.53、4.10 $dS \cdot m^{-1}$,高水量和常规灌溉下 10 cm 土层中的 EC_e 均值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,但节水灌溉下 10 cm 土层中的 EC_e 均值 $> 2.7\text{ }dS \cdot m^{-1}$,早熟禾的生长将会受到一定程度的影响,其相对作物产量为 70% ~ 80%^[27];平衡时,100 cm 土层中的 EC_e 均值分别为 1.84、2.99、4.69 $dS \cdot m^{-1}$,高水量灌溉下土壤未出现盐渍化(0 ~ 2 $dS \cdot m^{-1}$),常规灌溉下土壤出现轻度盐渍化(2 ~ 4 $dS \cdot m^{-1}$),节水灌溉下土壤出现中度盐渍化(4 ~ 8 $dS \cdot m^{-1}$). 郑伟等^[28]研究表明北京再生水常规灌溉早熟禾,2 a 后土壤全盐量显著增加,且 30 ~ 60 cm 土层增加的较多,土壤全盐量随着深度呈现先减小后增大的趋势,但盐分累积没有对早熟禾的生长造成危害,也没有达到盐化土的标准.

2.2 再生水灌溉频率对土壤盐分垂直分布及累积的影响

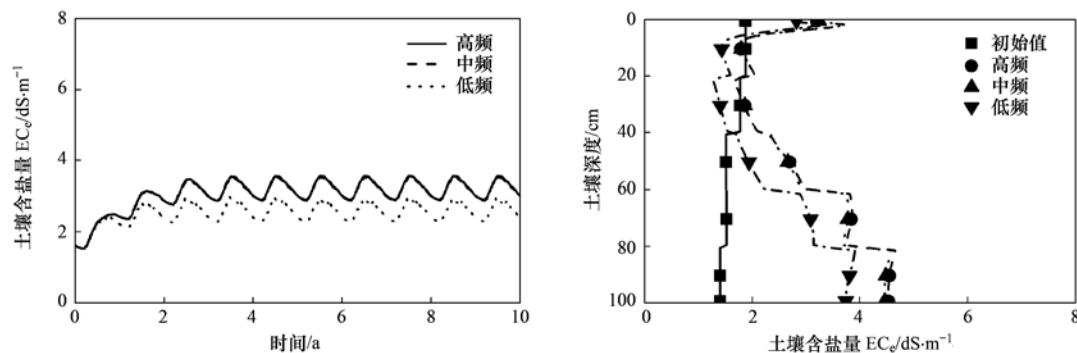
由图 2 可知,3 种灌溉频率下, EC_e 值都随着灌溉年限的增加而逐渐增加,直到模拟 4 a 后达到平衡;低频灌溉下平衡时土壤 EC_e 值小于高频、中频;平衡时,高、中、低频灌溉下 EC_e 年均值分别增

加 98.5%、97.2%、61.1%. 此外,3 种频率灌溉下表层 0 ~ 5 cm 和底层 90 ~ 100 cm 有明显的盐分累积,从高频到低频灌溉,表层 EC_e 值分别增加了 67.9%、70.2%、40.7%,底层 EC_e 值分别增加了 222.0%、217.0%、167.4%;中间土层 5 ~ 40 cm 在高频、中频灌溉下土壤 EC_e 值变化不大,而低频灌溉下土壤 EC_e 值减小了 20.5%.

高、低频灌溉平衡时,0 ~ 10 cm 土层中的 EC_e 均值分别为 2.50 $dS \cdot m^{-1}$ 、2.14 $dS \cdot m^{-1}$,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;100 cm 土层中的 EC_e 均值分别为 3.02 $dS \cdot m^{-1}$ 、2.40 $dS \cdot m^{-1}$,土壤均出现轻度盐渍化(2 ~ 4 $dS \cdot m^{-1}$),但低频灌溉下盐渍化程度小于高、中频. 可见满足早熟禾正常生长的条件下,灌溉频率对土壤水盐运动规律影响不大,可能是因为设置的高、中、低频率梯度不大,导致 EC_e 值差别不大;但总体上,灌溉频率越小土壤中盐分累积越少(该结果与 Shalhavet^[29]的研究结果相似),这可能与淋溶量的增加有关(表 5).

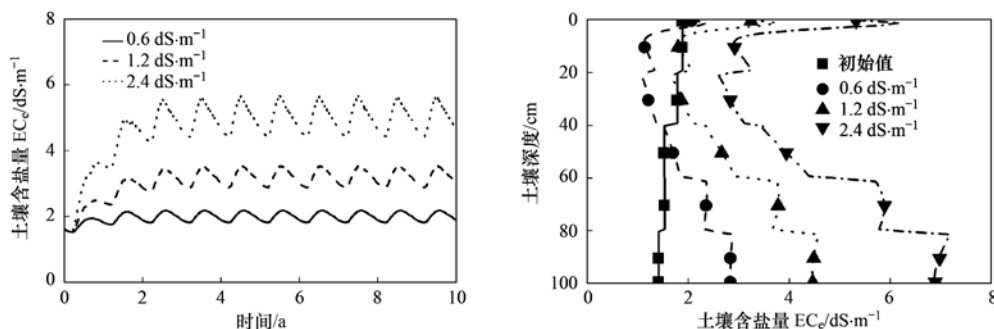
2.3 再生水水质对土壤盐分垂直分布及累积的影响

由图 3 可知,3 种水质灌溉下土壤 EC_e 值随着年限的增加而逐渐增加,直到模拟 4 a 后达到平衡.

图2 不同灌溉频率下100 cm 土层的 EC_e 均值和 EC_e 值垂直分布Fig. 2 Average soil salinity (EC_e) and salt vertical distribution at the 100 cm soil profile with different frequencies

在 EC_w 为 0.6、1.2、2.4 $dS \cdot m^{-1}$ 灌溉条件下, 平衡时土壤 EC_e 的年均值各增加了 23.7%、97.2%、208.5%, 可见随着灌溉水含盐量的增加土壤中累积的盐分也增加, 但并不是成比例的增加. 此外, 3 种灌溉水质下, 平衡时表层 0~5 cm 的 EC_e 值都有所增加, 且随着灌溉水 EC_w 的

增加, EC_e 值增加的幅度变大, 增量分别为 7.5%、70.2%、181.3%; 中间土层 5~40 cm, 自来水灌溉时 EC_e 值降低了 33.7%, 再生水灌溉时 EC_e 值分别增加了 3.0%、61.1%; 底层 90~100 cm 在 3 种灌溉水质下, EC_e 值分别增加了 100.7%、217.0%、390.8%.

图3 不同灌溉水质下100 cm 土层的 EC_e 均值和 EC_e 值垂直分布Fig. 3 Average soil salinity (EC_e) and salt vertical distribution at the 100 cm soil profile with different EC_w

EC_w 为 0.6 $dS \cdot m^{-1}$ 、2.4 $dS \cdot m^{-1}$ 的条件下, 平衡时 0~10 cm 土层的 EC_e 均值分别为 1.59 $dS \cdot m^{-1}$ 、4.17 $dS \cdot m^{-1}$, EC_w 为 0.6 $dS \cdot m^{-1}$ 时 10 cm 土层中的 EC_e 均值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, 但 EC_w 为 2.4 $dS \cdot m^{-1}$ 时, 10 cm 土层中的 EC_e 均值大于 2.7 $dS \cdot m^{-1}$, 早熟禾的生长将会受到一定程度的影响, 其相对作物产量为 70%~80%^[27]; 100 cm 土层中的 EC_e 均值分别为 1.89 $dS \cdot m^{-1}$ 、4.63 $dS \cdot m^{-1}$, 自来水灌溉下土壤未出现盐渍化 (0~2 $dS \cdot m^{-1}$), 再生水 2.4 $dS \cdot m^{-1}$ 灌溉下土壤出现中度盐渍化 (4~8 $dS \cdot m^{-1}$).

2.4 不同土层 EC_e 均值的年变化

不同灌溉管理方式下平衡时, 各土层 EC_e 均值的年变化规律类似, 以常规灌溉为例. 由图 4 可知,

常规灌溉早熟禾平衡时, 0~10 cm 土层中的 EC_e 均值变化频率较大: 前两个月没有人工灌溉, 主要通过降雨灌溉, 且降雨较少, 因此土壤中的盐分增加; 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, 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, 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.

3 不确定性分析

北京城市绿地的许多参数具有时空变异性、不确定性, 难以详细考虑所有参数, 使模型所求的解与实际有一定的差别, 例如灌溉方式、土壤性质、植

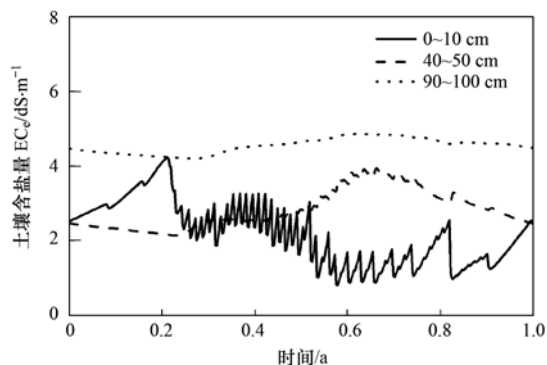


图4 平衡时, 0~10 cm、40~50 cm、90~100 cm 土层中 EC_e 均值的年变化

Fig. 4 Annual variation of soil salinity (EC_e) at the 0-10 cm, 40-50 cm, 90-100 cm soil profiles under equilibrium conditions

被分布等. 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^[28, 30]相似.

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. 灌溉期间盐分将向下移动到更深土层, 同时由于根系的吸水作用盐分将向根系表面迁移, 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, 即随着深度增加盐分逐渐增加, 且相关研究^[11, 31]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 结论

(1) 3 种灌溉量下, 灌溉水量越少, 土壤盐分累积越多. 平衡时高水量、正常灌溉下, 土壤盐分累积不会影响早熟禾的生长, 节水灌溉下早熟禾的相对作物产量将减少为 70%~80%; 高水量灌溉下土壤未出现盐渍化, 正常灌溉下土壤出现轻度盐渍化, 节水灌溉下土壤出现中度盐渍化. 平衡时高频、中频灌溉下的土壤 EC_e 值差别不大, 低频灌溉下的土壤 EC_e 值小于前两者. 在不影响早熟禾正常生长的情况下, 灌溉频率对土壤水盐运动规律影响不大, 但低频灌溉下土壤中盐分的累积有减少的趋势.

(2) 自来水灌溉下土壤表层及底层有一定的盐分累积, 中间层的盐分减少; 再生水灌溉下各土层

的盐分都有一定程度的累积, 且随着 EC_w 值的增加而增加. 平衡时, EC_w 为 $0.6 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 、 $1.2 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 灌溉下, 土壤盐分的累积不会影响早熟禾的生长, EC_w 为 $2.4 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 灌溉下早熟禾的相对作物产量减少为 70%~80%; 自来水灌溉下土壤未出现盐渍化, 再生水 $1.2 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 灌溉下土壤出现轻度盐渍化, 再生水 $2.4 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 灌溉下土壤出现中度盐渍化.

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] 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.
- [3] Toze S. Reuse of effluent water-benefits and risks [J]. Agricultural Water Management, 2006, **80**(1-3): 147-159.
- [4] Qian Y L, Mechem B. Long-term effects of recycled wastewater irrigation on soil chemical properties on golf course fairways[J]. Agronomy Journal, 2005, **97**(3): 717-721.
- [5] Pedrero F, Alarcón J J. Effects of treated wastewater irrigation on lemon trees[J]. Desalination, 2009, **246**(1-3): 631-639.
- [6] 宝哲, 杨培岭, 任树梅, 等. 模拟再生水灌溉下污灌土壤中盐离子交换运移的试验研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(1): 101-106.
- [7] 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.
- [8] Stevens D P, McLaughlin M J, Smart M K. Effects of long-term irrigation with reclaimed water on soils of the Northern Adelaide Plains, South Australia[J]. Australian Journal of Soil Research, 2003, **41**(5): 933-948.
- [9] 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.
- [10] Forkutsa I, Sommer R, Shirokova Y I, *et al.* Modeling irrigated cotton with shallow groundwater in the Aral Sea Basin of Uzbekistan[J]. Irrigation Science, 2009, **27**(4): 319-346.
- [11] 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.
- [12] Jiang J, Feng S Y, Huo Z L, *et al.* Application of the SWAP model to simulate water-salt transport under insufficient saline irrigation[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2011, **54**(3-4): 902-911.
- [13] Pang X P, Letey J. Development and evaluation of ENVIRO-GRO, an integrated water, salinity, and nitrogen model[J]. Soil Science Society of America Journal, 1998, **62**(5): 1418-1427.
- [14] 李春友, 任理, 李保国. 利用优化方法求算 Van Genuchten 方程参数[J]. 水科学进展, 2001, **12**(4): 473-478.

- [15] 谢永华, 黄冠华, 赵立新. 田间土壤特性的空间变异性[J]. 中国农业大学学报, 1998, **3**(2): 41-45.
- [16] Carsel R F, Parrish R S. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics [J]. Water Resources Research, 1988, **24**(5): 755-769.
- [17] 程先军, 许迪. 地下滴灌土壤水运动和溶质运移的数学模型及验证[J]. 农业工程学报, 2001, **17**(6): 1-4.
- [18] Allen R G, Pereira L S, Raes D, *et al.* Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements [M]. Italy: FAO Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, Rome, 1998.
- [19] 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.
- [20] 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. 99-119.
- [21] 车文瑞. 北京城区绿地主要乔灌草年耗水量的估算[D]. 北京: 北京林业大学, 2008. 21-58.
- [22] 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.
- [23] Dane J H, Walker R H, Bahaminyakamwe L, *et al.* Tall fescue and hybrid bluegrass response to soil water matric head limits [J]. Agricultural Water Management, 2006, **86**(1-2): 177-186.
- [24] Stowell L J. Pointers on reclaimed water contract negotiations [C]. Fairbanks Ranch Meeting, 1999. 1-4.
- [25] 张新民, 孙新章, 胡林, 等. 北京地区常用草坪草的耗水规律及适宜灌溉量研究[J]. 农业工程学报, 2004, **20**(6): 77-80.
- [26] 李冬杰, 杨培岭, 王勇, 等. 土壤水分对草坪草蒸散及生长特性的影响[J]. 草地学报, 2005, **13**(4): 308-312.
- [27] 牛菊兰. 早熟禾品种特性与耐盐性关系的研究[J]. 草业科学, 1998, **15**(1): 38-41.
- [28] 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.
- [29] Shalhavet J. Using water of marginal quality for crop production: major issues [J]. Agricultural Water Management, 1994, **25**(3): 233-269.
- [30] 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.
- [31] 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-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