

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第12期

Vol.33 No.12

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

特别策划:再生水灌溉利用生态风险研究专题

序	陈卫平 (4069)
再生水灌溉利用的生态风险研究进展	陈卫平, 张炜铃, 潘能, 焦文涛 (4070)
绿地再生水灌溉土壤微生物量碳及酶活性效应研究	潘能, 侯振安, 陈卫平, 焦文涛, 彭驰, 刘文 (4081)
绿地再生水灌溉土壤盐度累积及风险分析	潘能, 陈卫平, 焦文涛, 赵忠明, 侯振安 (4088)
再生水灌溉对土壤性质及重金属垂直分布的影响	赵忠明, 陈卫平, 焦文涛, 王美娥 (4094)
模型模拟再生水灌溉对土壤水盐运动的影响	吕斯丹, 陈卫平, 王美娥 (4100)
模型模拟土壤性质和植被种类对再生水灌溉水盐运移的影响	吕斯丹, 陈卫平, 王美娥 (4108)
再生水灌溉农田土壤镉累积规律模拟研究	赵忠明, 陈卫平, 焦文涛, 王美娥 (4115)
再生水灌溉土壤人工合成麝香累积模型模拟	王美娥, 陈卫平, 焦文涛 (4121)
城市绿化草坪再生水灌溉对地下水水质影响研究	王巧环, 陈卫平, 王效科, 任玉芬, 张烨 (4127)
北京市再生水的公众认知度评估	张炜铃, 陈卫平, 焦文涛 (4133)

研究报告

北京地区臭氧时空分布特征的飞机探测研究	陈鹏飞, 张蕾, 权建农, 高扬, 黄梦宇 (4141)
世博会期间上海市大气挥发性有机物排放强度及污染源研究	王红丽, 陈长虹, 黄海英, 王倩, 陈宜然, 黄成, 李莉, 张钢锋, 陈明华, 楼晟荣, 乔利平 (4151)
贡嘎山本底站大气中 VOCs 的研究	张军科, 王跃思, 吴方堃, 孙杰 (4159)
区域大气环境风险源识别与危险性评估	张晓春, 陈卫平, 马春, 詹水芬, 焦文涛 (4167)
稻草烟中正构烷烃和正构脂肪酸的碳同位素	刘刚, 孙丽娜, 李久海, 徐慧 (4173)
汽油轿车 NEDC 循环超细颗粒物排放特性	胡志远, 李金, 谭丕强, 楼狄明 (4181)
城市道路绿化带不同植物叶片附尘对大气污染的磁学响应	隆茜, 周菊珍, 孟颖, 达良俊 (4188)
闽江口养殖塘水-大气界面温室气体通量日进程特征	杨平, 仝川, 何清华, 黄佳芳 (4194)
模拟增温对冬小麦-大豆轮作农田土壤呼吸的影响	刘艳, 陈书涛, 胡正华, 任景全, 沈小帅 (4205)
广西大石围天坑中多环芳烃的大气传输与分异	孔祥胜, 祁士华, 孙蓓, 黄保健 (4212)
松花江流域冰封期水体中多环芳烃的污染特征研究	马万里, 刘丽艳, 齐虹, 白杨, 沈吉敏, 陈忠林, 李一凡 (4220)
温州城市河流中多环芳烃的污染特征及其来源	周婕成, 陈振楼, 毕春娟, 吕金刚, 许世远, 潘琪 (4226)
温州城市河流河岸带土壤中 PAHs 的污染特征与来源	周婕成, 毕春娟, 陈振楼, 王璐, 许世远, 潘琪 (4237)
辽河水系沉积物中 PAHs 的分布特征及风险评估	武江越, 刘征涛, 周俊丽, 高富 (4244)
某炼油厂退役场地土壤与浅层地下水酚类污染特征研究	裴芳, 罗泽娇, 彭进进, 祁士华 (4251)
某大型焦化企业污染场地中多环芳烃空间分布的分异性特征	刘庚, 郭观林, 南锋, 魏文侠, 李发生, 毕如田 (4256)
太原市污灌区有机氯农药垂直分布特征及源解析	廖小平, 张彩香, 赵旭, 向青清, 李佳乐 (4263)
上海市崇明岛农田土壤中多环芳烃分布和生态风险评价	吕金刚, 毕春娟, 陈振楼, 周婕成, 韩景超 (4270)
近 50 年来深圳湾红树林湿地 Hg、Cu 累积及其生态危害评价	李瑞利, 柴民伟, 邱国玉, 贺蓓 (4276)
北运河源头区沙河水库沉积物重金属污染特征研究	张伟, 张洪, 单保庆 (4284)
太湖表层沉积物重金属赋存形态分析及污染特征	秦延文, 张雷, 郑丙辉, 曹伟 (4291)
典型季风型温冰川消融期融水化学日变化特征	朱国锋, 蒲焘, 何元庆, 王培震, 张建龙, 张宁宁, 辛惠娟 (4300)
螺-草水质净化系统氮素环境归趋的实验研究	周露洪, 谷孝鸿, 曾庆飞, 毛志刚, 高华梅, 孙明波 (4307)
固定化果胶酶抑制铜绿微囊藻生长研究	沈清清, 彭谦, 赖泳红, 纪开燕, 韩秀林 (4316)
采用膜污染指数评估天然有机物在低压超滤膜中的污染行为	肖萍, 肖峰, 赵锦辉, 秦潼, 王东升, 冯金荣, 许光 (4322)
水体中甲基汞光化学降解特征研究	孙荣国, 毛雯, 马明, 张成, 王定勇 (4329)
土霉素在乙酸水溶液中的臭氧氧化降解研究	李时银, 李小荣, 朱怡苹, 朱江鹏, 王国祥 (4335)
酰胺咪唑光降解效能与机制及其影响因素研究	陈超, 赵倩, 封莉, 张立秋 (4340)
利用 FeS 去除水中硝基苯的试验研究	王夏琳, 李睿华 (4346)
地下污水管线泄漏原位自动监测模拟实验研究	郭磊, 贾永刚, 付腾飞, 刘晓磊, 赵战坤 (4352)
表面活性剂改性沸石对水中酚类化合物吸附性能研究	谢杰, 王哲, 吴德意, 李春杰 (4361)
抗生素类制药废水厌氧消化产物急性毒性的检测	季军远, 邢雅娟, 郑平 (4367)
废砖块作为人工湿地填料的除磷能力研究	王振, 刘超翔, 李鹏宇, 董健, 刘琳, 朱葛夫 (4373)
基于生物沸石复合滤料的间歇式脱氮水处理	庆承松, 鲍韬, 陈天虎, 陈冬, 谢晶晶 (4380)
硝酸盐对厌氧生物膜和颗粒污泥的同时产甲烷反硝化性能影响研究	钟晨宇, 叶杰旭, 李若愚, 陈胜, 孙德智 (4387)
水平电场作用下活性污泥的脱水研究	季雪元, 王毅力, 冯晶 (4393)
多重环境因子对氟胺磺隆在土壤中降解的影响	宋宁慧, 单正军, 石利利, 郭敏, 许静, 孔德洋 (4400)
碱后处理对互花米草沼渣理化特性的影响研究	陈广银, 郑正, 常志州, 王海芹, 叶小梅 (4406)
含砷废渣高温烧结过程砷的矿物相结构变化与环境释放行为	王兴润, 农泽喜, 王琪 (4412)
国家大气污染物排放标准体系研究	江梅, 张国宁, 张明慧, 邹兰, 魏玉霞, 任春 (4417)
环境基准向环境标准转化的机制探讨	毕岑岑, 王铁宇, 吕永龙 (4422)
对“有毒重金属”实施 2 种总量控制监管方式的利害分析	傅国伟 (4428)
《环境科学》第 33 卷(2012 年)总目录	(4434)
《环境科学》征订启事(4099)	《环境科学》征稿简则(4166)
信息(4180, 4219, 4225, 4275)	编辑征稿通知(4172)

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

(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: 我国农田土壤重金属污染情况严重, 主要来源包括由污水灌溉、施肥和大气沉降等。由于这一过程具有小剂量长期性的特点, 模型的应用相对常规检测手段能够更好地探索土壤重金属污染趋势和风险。基于 STEM-profile 模型, 结合北京市通州凉水河农田区的实地检测, 对该地区重金属 Cd 污染趋势进行了预测。结果表明, 模型模拟结果与实测结果拟合较好, 在持续现有输入的情况下, 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 $0.866 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。同时, 通过对污染物的输入量与输入形态以及灌溉用水量对 Cd 的分布影响的分析发现, 单独的有机肥施用和再生水灌溉均会导致 Cd 的累积, 在地下水灌溉同时施用化肥的情况下不会造成 Cd 累积; 当 Cd 的输入全部为有机结合态时, 土壤耕作层中的 Cd 含量增加为 $0.943 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 在不改变由灌溉输入污染物的量的情况下, 当灌溉量分别为 0.8、1.5 和 2.0 ET 时, 土壤耕作层中金属镉的含量分别为 0.952、0.784 和 $0.638 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

关键词: 土壤污染; 重金属; 模型; 预测

中图分类号: X131.3; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)12-4115-06

Modeling the Cd Accumulation in Agricultural Soil Irrigated with Reclaimed Water

ZHAO Zhong-ming, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, 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: Recent years, soil pollution of heavy metal has affected human life seriously, especially in farmland. Heavy metal pollution in farmland is mainly caused by irrigation, fertilizing and atmospheric fallout. As the character of heavy metal input in farmland is chronic and low dosage, application of model would be more suitable than routine methods to illustrate the dynamic changes of heavy metals in soil. In this paper, we use the model of STEM-profile to analyze and predict Cd pollution in farmland in Tongzhou, Beijing, based on the data from field survey. The results showed that: the concentration of Cd in this land would exceed the national soil environment standard after 100 years under current situations, reaching $0.866 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ in plow layer. Studies of the influence of the amount and the form of inputs and the amount of irrigation water on the distribution of Cd in soil showed that irrigated with reclaimed water or fertilized with organic manure could lead to accumulation of Cd in the soil, while groundwater irrigation with inorganic fertilization would not cause accumulation of Cd in soil. When Cd inputs changed from mineral to organic form, the concentration of Cd in plow layer would be $0.943 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ after 100 year. When the amount of irrigation water increased from 0.8 ET to 1.5 ET and to 2.0 ET, the plow layer Cd content would be 0.952, 0.784 and $0.638 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ respectively.

Key words: soil pollution; heavy metal; model; prediction

农田土壤重金属污染是当前广受关注的环境问题之一, 已严重威胁我国的食品安全。农田土壤中重金属的分布和含量会随着各种土地耕作活动而产生变化, 如施肥、灌溉、喷洒农药等^[1,2]。成熟作物体内的重金属含量常常与土壤中重金属含量相关, 尤其是污染严重的土壤^[3~5]。以重金属镉为例, 在特定的土壤 pH 值和有机质含量条件下, 土壤作物所吸收的重金属镉和土壤表层镉浓度具有很好的相关性^[6]。

在环境风险评价中, 需要明晰土壤中重金属的长期累积趋势, 但是在正常的农业活动中, 土壤重金属元素的输入输出量相对于土壤中的既有含量很小, 如在正常情况下土壤 Cd 的输入量 < 10

$\text{g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 假定土壤容重为 $1.5 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$, 在 $10 \text{ g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 的输入量情况表层下 20 cm 土壤 Cd 变化仅为 $0.0033 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。因此, 很难用常规的土壤采样方法测定其随时间的变化情况, 进而为长期的规划提供帮助。瑞士土壤监测网络显示土壤重金属的变化趋势需数十年才能被监测到。在这种情况下, 数学模型的应用能够为这方面的问题提供一个新的途径。通过模型的模拟可以弥补实测手段在连

收稿日期: 2012-04-06; 修订日期: 2012-05-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41173123); 城市与区域生态国家重点实验室开放基金项目(SKLURE2008-1-4)

作者简介: 赵忠明(1987~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为城市生态风险评价, E-mail: zhaozhongming@yahoo.cn

* 通讯联系人, E-mail: wpchen@cees.ac.cn

续性上的缺陷,并且可以在时间和空间的宏观尺度上了解污染物的迁移转化,并借助于实测数据进行长期风险预测。

北京市早在 20 世纪 60 年代便开始利用再生水进行农田灌溉,并且长期对农田施用化肥和有机肥,这一系列活动对土壤重金属污染造成很大的影响。在本研究中借助于 STEM-profile 模型对北京市典型再生水灌溉区重金属镉累积的长期影响进行模拟预测,以期北京市再生水灌溉的环境风险评价提供帮助。

1 材料与方法

1.1 研究区域

本次研究以北京市典型再生水灌溉区凉水河灌区为研究对象,该地区为冲积扇平原,土层深厚、土壤类型为潮土,土壤肥沃,适合农作物的生长,农作物以玉米小麦为主。属大陆性季风气候,受季风影响,春季干旱多风。凉水河灌区从 20 世纪 60 年代开始引凉水河水进行灌溉,导致重金属污染累积。为研究凉水河灌区的重金属污染情况,本研究进行了前期调查,主要采集了灌区内 120 cm 内的土壤

剖面样品进行重金属垂直分布情况的测定。研究表明该地区土壤表层重金属呈现明显累积现象,尤其以镉的累积最明显。

1.2 STEM-profile 模型描述

在 STEM-profile 模型中,土壤剖面被分成一系列垂直方向上连在一起的部分。在每一部分中土壤重金属分配于 4 个相互作用的相中,分别为溶液相、吸附相、矿物相和有机相,并且它们受 3 项输入输出流的影响,包括重金属的输入、淋溶和植物吸收^[7]。图 1 为该模型的基本原理。

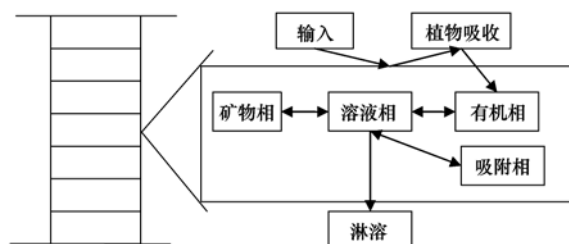


图 1 STEM-profile 模型

Fig. 1 Schematic depiction of the STEM-profile model

各相间相互作用的动力学平衡关系由以下方程表示:

$$(K_d + \theta) \cdot \frac{\partial c}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z} [q \cdot c - \theta \cdot D(\theta, q) \frac{\partial c}{\partial z}] - U + I + k_{im} \cdot \text{Org} - k_f(K_d + \theta) \cdot c - k_b \cdot \text{MP} \quad (1)$$

式中, θ 是土壤体积水含量, c 是土壤溶液的浓度 ($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$); $K_d c$ 代表吸附相的含量,其中 K_d 是固液分配系数 ($\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$), $k_f(K_d + \theta)c - k_b \cdot \text{MP}$ 代表矿物相(MP)溶解沉淀过程,其中 k_f 和 k_b 分别代表沉淀、溶解速率常数 (h^{-1}), $k_{im} \cdot \text{Org}$ 代表有机相(Org)矿化过程, k_{im} 是一维矿化速率常数 (h^{-1}); q 是水流速 ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$); D 是水力动态弥散系数 ($\text{cm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$); U 和 I 分别代表植物吸收相和外部输入相 [$\mu\text{mol} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$]. 土壤含水量和水流通过结合 HYDROUS-1D 模型子程序获得,其中水流通过 Richard 方程模拟:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - S \quad (2)$$

式中, h 代表压力水头 (cm); $K(h)$ 是非饱和水力传导函数 ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$); S 代表根系吸水相 [$\text{cm}^3 \cdot (\text{cm}^3 \cdot \text{h})^{-1}$].

植物吸收是通过以下方程计算:

$$U(z, t) = B(z, t) \times \text{RD}(t) \frac{J_{\max} c}{K_m + c} \quad (3)$$

式中, $B(z, t)$ 是一个符合指数分布的根分布系数,它的最大值在土壤表层; $J_{\max}$ 和 K_m 是 Michaelis-

Menten 动力常数; $J_{\max}$ 是最大流入速率 [$\mu\text{mol} \cdot (\text{cm} \cdot \text{h})^{-1}$], K_m 是根透过系数 ($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$); $\text{RD}(t)$ 是根密度 (root/soil, $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$), 它由经典的 Verhulst-Pearl 逻辑生长函数模拟:

$$\text{RD}(t) = \frac{\text{RD}_0 \text{RD}_m}{\text{RD}_0 + (\text{RD}_m - \text{RD}_0) e^{-rt}} \quad (4)$$

式中, RD_0 和 RD_m 是最初和最大根长密度 (root/soil, $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$); r 是生长速率 (h^{-1}). 植物所吸收的元素并不是全部离开土壤,其中一部分会随着植物残体回到土壤中。外部输入源被大体分成了 3 类:①大气沉降源,连续地沉积在土壤表层,主要为矿物相和移动相;②通过施肥污泥等输入的离散源,主要直接进入耕作层,主要是矿物相、移动相和有机相的结合;③通过灌溉输入的源,主要进入上层土壤溶液当中。

1.3 模型参数

1.3.1 基本信息

根据研究对象模型模拟深度为 120 cm,其中耕作层为 20 cm,模拟时间为 50 a. 结合以往的研究^[8],动力学常数 K_a 、 k_f 和 k_b 分别设定为 $100 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 0.01 h^{-1} 和 0.002 h^{-1} ; 矿化速率设定为

$10^{-6} \cdot \text{h}^{-1[9,10]}$ ；通过美国 EPA 提供的公式 $D = 0.792 \times M_r^{-2/3}$ 计算镉的分子弥散系数为 $0.034 \text{ cm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ ，式中 M_r 代表相对分子质量；纵向扩散为 $0.2 \text{ cm}^{[11]}$ 。土壤性质参数根据以往北京田间土壤研究^[12,13]和 Carsel 等^[14]的研究成果得到参数如下：土壤容重为 $1.55 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 θ_r 和 θ_s 分别为 $0.061 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 $0.43 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 、 K_s 为 $1.48 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 α 为 0.01 cm^{-1} 、 n 为 1.53 。

1.3.2 初始条件和输入

根据前期采样研究，土壤中镉的浓度设定为 $0.156 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。元素在溶液相、吸附相、有机相和矿物相的分配给予以下假设：①有机相占总量的 5%；②吸附相和矿化相与溶液相处于动态平衡。分配结果为：溶液相为 $0.3 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ；吸附矿化相为 $0.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ；有机相为 $0.078 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。外部输入源包括大气沉降、肥料施用和灌溉输入，根据相关研究大气沉降率设定为 $2.72 \text{ g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ，肥料输入量为 $14.6 \text{ g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1[15]}$ 。灌溉输入量根据灌溉量和元素浓度计算得出，每年的灌溉量为 650 mm ，浓度为 $1.32 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ，结果为 $8.58 \text{ g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 。

1.3.3 边界流量

边界流量包括降水和蒸发。根据北京市气候条件设定灌溉和降水一共 16 次，每次 $50 \sim 100 \text{ mm}$ 不等。参考 FAO Penman-Monteith 公式^[16]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：

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

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 ($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)。实际作物蒸散发通过作物系数 (K_c) 进行修正^[17]。表 1 列出不同作物生长时期的蒸发量、蒸腾量及降雨灌溉量。

1.3.4 植物生长吸收

根据相关小麦玉米根系生长规律研究^[18,19]最大根深度设定为 100 cm ，生物量返回系数分别设定为 0.5 和 0.8 。植物根系吸水通过 Feddes 模型模拟^[20]，该模型提供了 7 种植物的吸收参数，分别为土豆、小麦、玉米、苜蓿、甜菜、牧草和卷心菜。

表 1 不同作物的生长时期蒸发量、蒸腾量及降雨灌溉量

Table 1 Evaporation, transpiration, precipitation and irrigation duration different growth periods

时间 (月-日)	蒸发量 / $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$	蒸腾量 / $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$	降雨灌溉量 / mm
10-01 ~ 10-31	59	7	50
11-01 ~ 11-30	37	4	0
12-01 ~ 12-31	18	2	0
01-01 ~ 01-31	11	1	90
02-01 ~ 02-28	8	3	90
03-01 ~ 03-31	15	23	90
04-01 ~ 04-30	31	123	90
05-01 ~ 05-31	48	194	90
06-01 ~ 06-20	17	68	90
06-21 ~ 06-30	34	4	140
07-01 ~ 07-31	91	36	230
08-01 ~ 08-31	49	73	195
09-01 ~ 09-30	28	113	115

2 结果与讨论

2.1 实际条件下土壤 Cd 的累积分布预测

本研究参数均为北京市通州区凉水河再生水灌溉区的当前情况。通过 50 a 的模拟得出凉水河灌区土壤重金属 Cd 垂直累积分布的模拟数据，其结果与本研究前期实测数据比较如图 2 所示。在土壤剖面中除了 90 cm 和 110 cm 之外的其他样点模拟与实测曲线基本吻合。表层 20 cm 平均浓度的模拟结果为 $0.316 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，而实测值为 $0.3003 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，偏差为 5.2% 。整个剖面的模拟平均浓度为 $0.214 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，而实测浓度为 $0.207 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，偏差为 3.4% 。以上结果说明 STEM-profile 模型对于再生水灌溉的重金属 Cd 的迁移累积具有很好的重现性。

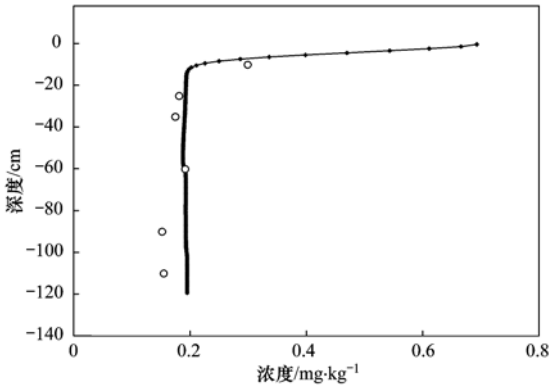


图 2 土壤中镉的垂直分布的模拟结果和实测结果

Fig. 2 Predicted and measured Cd concentration in soil profile

在以上验证研究的基础上对凉水河灌区进行 100 a 的模拟预测研究。图 3(a) 为预测的 100 a 后土壤中 Cd 的剖面分布情况，在土壤表层 30 cm 范围

内,Cd 的含量随着土壤纵向剖面呈现出明显的梯度变化. 0~10 cm 处由于土壤扰动比较强烈和向下迁移较快而呈现出自上而下的递增现象. 在 10~30 cm 范围内由于向下迁移的速率大于外界输入的速率,所以镉的含量迅速地下降. 而在 30 cm 以下区域由于扰动较少,土壤镉的含量趋于稳定.

在模型模拟的 100 a 期间里,土壤中 Cd 的输入输出情况如表 2 所示;3 种输入途径中,肥料输入为主要输入途径,占总输入的 56.4%,其次是灌溉;输出主要为植物吸收,占总输出的 80% 以上. 由于每年随着大气沉降、肥料施用和灌溉进入土壤的 Cd 的量要大于植物吸收和土壤淋溶的量,经过 100 a 的输入输出作用,土壤耕作层中的 Cd 含量增加了 174.7%,由原来的 $0.315\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增加到 $0.866\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,整个土壤层的 Cd 含量由原来的 $0.212\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增加到 $0.313\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,增加了 47.6%. 因

此,这种在长时间范围内的持续低量输入仍会造成 Cd 在土壤中的累积,并且这种累积在表层土壤表现得更加明显.

土壤耕作层和整个土壤层中 Cd 随时间的累积情况如图 3(b) 所示. 北京市土壤 Cd 的背景值为 $0.145\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ [21],土壤环境质量标准(二级)中对于 Cd 的规定为 $0.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 若按现在的输入输出情况继续进行农业活动,在 100 a 之后,土壤中的 Cd 含量将会超出现在土壤环境质量标准中镉的浓度范围,并且远远超过北京市土壤背景的含量. 同时,随着土壤中 Cd 含量的增加,耕作层植物吸收和向下淋溶的量也相应增加,其中植物吸收速率由原来的 $1.74\text{ g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 增加到 $4.1\text{ g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$,而在整个 120 cm 土层范围内植物吸收速率由 $3.7\text{ g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 增加到 $6.0\text{ g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$. 这在一定程度上加大了重金属污染的健康风险.

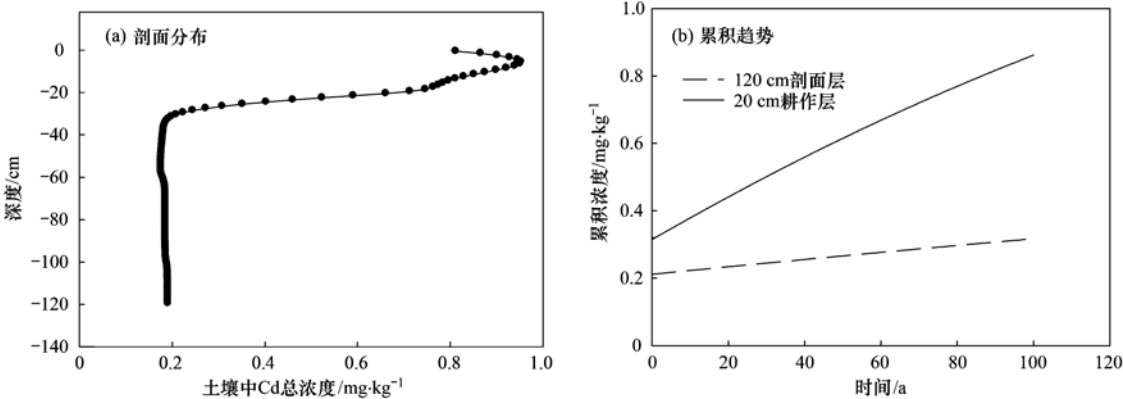


图 3 目前条件下 100 年后土壤中镉的剖面分布和累积趋势

Fig. 3 Cd concentration in soil profile after 100-year simulation and accumulation trends under current agricultural activities

表 2 模型模拟 100 a 后 Cd 输入输出通量/ $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$

Table 2 Input and output fluxes of Cd during 100-year simulation/ $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$

输入输出途径	起始	终点	变化	比例/%
大气沉降	0	272	272	10.5
肥料输入	0	1 460	1 460	56.4
灌溉输入	0	858	858	33.1
总计	0	2 560	2 560	100
植物吸收	0	-519	-519	82.4
迁移淋洗	0	-111	-111	17.6
总计	0	-630	-630	100
合计	0	1 960	1 960	

2.2 输入源变化对 Cd 分布的影响

目前,凉水河灌区通过大气沉降、肥料施用和灌溉输入 Cd 的量为 $25.9\text{ g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$,最主要的两项为肥料输入和再生水灌溉输入,分别为 $14.6\text{ g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 和 $8.58\text{ g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$,这两项也是引

入污染的主要农业活动. 根据相关研究结果,该区域 Cd 的肥料输入主要为有机肥料的使用 [14]. 基于以上情况本研究主要设定了 3 种输入情况:①肥料设为无机化肥,灌溉用水设定为地下水;②肥料设为无机化肥,灌溉用水为再生水;③肥料为有机肥,灌溉用水为地下水. 普通化肥的金属镉输入速率根据相关文献设定为 $0.0375\text{ g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$ [22,23],地下水金属镉浓度根据本研究前期检测为 $0.24\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

模拟结果如图 4 所示:化肥、再生水情境和有机肥、地下水情境都产生了 Cd 累积现象,后者的累积量更高一些. 100 a 后土壤耕作层中镉浓度在化肥、再生水情境下 $0.497\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,在有机肥、地下水情境下为 $0.651\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,高于土壤环境质量标准中规定镉浓度的要求. 两种情境耕作层中镉含量分别增

加了 58% 和 107%, 整个剖面的平均浓度也分别增加了 15.2% 和 33.1%。由于化肥、地下水情境引入的污染物最少, 100 a 后土壤耕作层中 Cd 的浓度降为 $0.287 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 而整个土壤剖面中 Cd 的浓度降为 $0.206 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 分别比初始浓度降低了 8.9% 和 2.7%。以上结果表明, 单一的有机肥料输入和灌溉

输入均会造成重金属镉在土壤中的累积。同时, 随着污染物含量增加, 耕作层中向下迁移量的增加要高于植物吸收量的增加。在化肥再生水输入情况下植物吸收总量为 $215.2 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$, 向下迁移总量为 $336.7 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$; 有机肥地下水情况下植物吸收总量为 $252.6 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$, 向下迁移总量为 $537.6 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

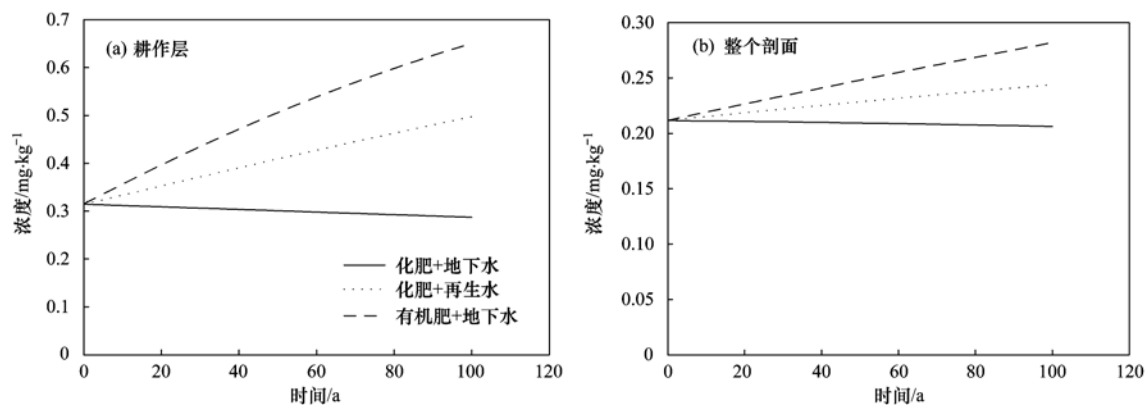


图 4 不同污染输入源情况下土壤耕作层和整个剖面镉累积趋势预测结果

Fig. 4 Accumulation trend of Cd in the plow layer and the whole soil profile under different input sources

除了输入污染物的量之外, Cd 的形态也会对其在土壤中的分布产生影响。在模拟过程中, Cd 的形态可以是溶解态、矿化态和有机态。模型模拟结果表明输入源为溶解态或者矿化态对于模拟的结果没有显著的影响。但是, 输入源为有机态时模拟的结果与溶解态和矿化态有明显的差别。因为在土壤中金属矿化过程的速率要远远小于吸附解吸和沉淀溶解过程的速率。同时, 由于植物吸收金属元素是通过吸收溶解态完成的, 因此当输入源全部为有机相

时, 作物吸收的金属量相对减小。结果如图 5 所示, 当输入源由矿物相全部变为有机相时, 100 a 之后土壤耕作层中的镉含量由 $0.866 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 升高到 $0.943 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。并且有机源与矿物源的累积植物吸收分别为 $236.9 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $300.3 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$, 向下淋溶累积量分别为 $400.5 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $569.7 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。因此, 有机态污染物的输入更易导致污染物的表层停留, 而其他形态污染物更容易被植物吸收和迁入地下。

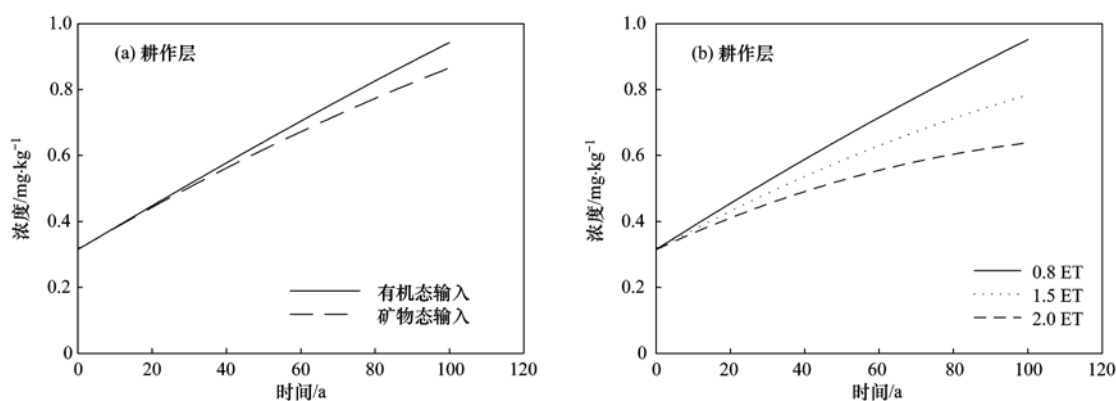


图 5 不同的输入形态和灌溉量下耕作层中镉的累积情况

Fig. 5 Soil Cd Accumulation in plow layer under different pollution source and irrigation practices

2.3 不同灌溉量对 Cd 分布的影响

在土壤剖面中, 降水作用是带动土壤污染物向下运移的主要力量。在实际的农田灌溉中, 根据不同的灌溉方式、气候变化和作物类型等, 灌溉量有

可能上下浮动。在模拟中设定由灌溉引入的 Cd 量不变的前提下灌溉总量分别为 0.8、1.5 和 2.0 ET 的 3 种情况。结果表明 (图 5) 随着年灌溉量的增加, 土壤重金属镉的向下迁移量有明显的增加。3

种灌溉情况 100 a 后耕作层中向下迁移累积量分别为 288、840 和 1 320 $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$, 2.0 ET 灌溉量是 0.8 ET 灌溉量的 4.58 倍。同时, 由于灌溉量的增加, 导致土壤溶液中的 Cd 浓度减低, 100 a 后的浓度分别为 1.15、1.40 和 1.68 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 所以植物吸收量也逐渐降低, 但不如迁移量变化的明显, 100a 的吸收总量分别为 315、285 和 258 $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。图 5 所表示的是在由灌溉引入 Cd 的量不变的情况下, 不同的灌溉量(0.8、1.5 和 2.0 倍的 ET)导致的土壤耕作层中 Cd 总浓度随时间的累积情况。由于迁移量明显增加导致耕作层中 Cd 总量有所降低, 分别为 0.952、0.784 和 0.638 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

3 结论

STEM-profile 模型对于再生水灌溉的重金属 Cd 的迁移累积具有很好的重现性; 在外界输入条件不变的情况下, 100 a 后土壤表层中的 Cd 含量将超出国家土壤环境质量二级标准, 达到 0.866 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 土壤 Cd 向下迁移不明显; 情景模拟显示, 单独的有机肥施用和再生水灌溉均会导致金属 Cd 的累积在 100 a 内超出土壤环境质量二级标准, 而地下水灌溉同时施用化肥不会造成 Cd 累积; 土壤中 Cd 的累积受输形态的影响, 当 Cd 的输入全部为有机结合态时, 土壤耕作层中的 Cd 含量增加为 0.943 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 土壤表层中 Cd 的含量随着降水灌溉量的加大而降低。

参考文献:

- [1] Chang A C, Page A L. Trace elements slowly accumulating, depleting in soils[J]. *California Agriculture*, 2000, **54**(2): 49-55.
- [2] De Meeus C, Eduljee G H, Hutton M. Assessment and management of risks arising from exposure to cadmium in fertilisers. I [J]. *Science of the Total Environment*, 2002, **291**(1-3): 167-187.
- [3] Guttormsen G, Singh B R, Jeng A S. Cadmium concentration in vegetable crops grown in a sandy soil as affected by CD levels in fertilizer and soil-pH [J]. *Fertilizer Research*, 1995, **41**(1): 27-32.
- [4] He Q B, Singh B R. Crop uptake of cadmium from phosphate fertilizers. 2. relationship with extractable soil cadmium [J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1994, **74**(3-4): 267-280.
- [5] Huang B, Kuo S, Bembenek R. Availability of cadmium in some phosphorus fertilizers to field-grown lettuce [J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 2004, **158**(1): 37-51.
- [6] Loganathan P, Mackay A D, Lee J, *et al.* Cadmium distribution in hill pastures as influenced by 20 years of phosphate fertilizer application and sheep grazing [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1995, **33**(5): 859-871.
- [7] Chen W P, Wu L S, Chang A C, *et al.* Assessing the effect of long-term crop cultivation on distribution of Cd in the root zone [J]. *Ecological Modelling*, 2009, **220**(15): 1836-1843.
- [8] Chen W P, Chang A C, Wu L S, *et al.* Modeling dynamic sorption of cadmium in cropland soils [J]. *Vadose Zone Journal*, 2006, **5**(4): 1216-1221.
- [9] 穆兴民, 樊小林. 土壤氮素矿化的生态模型研究 [J]. *应用生态学报*, 1999, **10**(1): 114-118.
- [10] Ruhlmann J. Calculation of net nitrogen mineralization from the decomposable soil organic matter pool [A]. In: Burns I G, Bending G D, Mulholland B (Eds.). *Proceedings of the International Workshop on Ecological Aspects of Vegetable Fertilisation in Integrated Crop Production in the Field* [C]. Wageningen: ISHS, 1999. 167-173.
- [11] Reidy W J, Lyman P J, Levy B. Mobility and degradation of organic contaminants in subsurface environments [M]. Chelsea, Mich. (USA): CRC Press, 1992.
- [12] 任理, 李春友, 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.
- [13] 黄冠华, 谢永华, 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.
- [14] Carsel R F, Parrish R S. Developing joint probability-distributions of soil-water retention characteristics [J]. *Water Resources Research*, 1988, **24**(5): 755-769.
- [15] 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): 209-217.
- [16] Pereira L S, Allen R G, Raes D, *et al.* Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements [A]. In: Italy: FAO Irrigation and Drainage Paper 56 [C]. Rome: FAO, 1998.
- [17] 彭世彰, 索丽生. 节水灌溉条件下作物系数和土壤水分修正系数试验研究 [J]. *水利学报*, 2004, (1): 17-22.
- [18] 张岁岐, 慕自新, 郝文芳, 等. 玉米根系形态性状和空间分布对水分利用效率的调控 [J]. *生态学报*, 2005, **25**(11): 2895-2900.
- [19] 毛振强, 宇振荣, 刘云慧, 等. 两种根系采样方法的对比及冬小麦根系的分布规律 [J]. *中国农学通报*, 2005, **21**(5): 261-265.
- [20] Feddes R A, Kowalik P J, Zaradny H. Simulation of FieldWater Use and Crop Yield [A]. In: *Simulation of FieldWater Use and Crop Yield* [M]. New York, NY: John Wiley & Sons, 1978. 16-30.
- [21] 陈同斌, 郑袁明, 陈煌, 等. 北京市土壤重金属含量背景值的系统研究 [J]. *环境科学*, 2004, **25**(1): 117-122.
- [22] 高雪, 陈海燕, 韩峰. 贵州省常用化肥重金属含量分析及评价 [J]. *耕作与栽培*, 2006, (4): 18-19.
- [23] 王起超, 麻壮伟. 某些市售化肥的重金属含量水平及环境风险 [J]. *农村生态环境*, 2004, **20**(2): 62-64.

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