

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, 孙莺, 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)

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

(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: 人工合成麝香(HHCB/AHTN)是近几年来受关注较多的药品与个人护理品(PPCPs)类新型污染物之一,再生水灌溉是 HHCB/AHTN 输入土壤的主要途径. 本研究结合再生水灌溉土壤的实地检测结果,采用 HYDRUS-1D 模型,模拟了长期灌溉再生水条件下土壤中 HHCB 和 AHTN 的迁移转化和累积趋势. 结果表明,尽管土壤中这两种麝香的含量极低,但是再生水灌溉土壤中的含量是自来水灌溉土壤的 5 倍;再生水灌溉下 HHCB/AHTN 累积趋势从 $\lg K_{oc}$ 较低为 3.44 时的指数型增加,到 $\lg K_{oc}$ 较高为 4.12 和 4.86 时的线性增加;半衰期的变化对再生水灌溉途径输入土壤的 HHCB/AHTN 的表层累积影响并不明显;再生水灌溉下土壤中 HHCB/AHTN 的垂直迁移能力较小,灌溉 40 a 以后最大迁移距离只有 53 cm,且受 K_{oc} 变化的影响较大;通过灌溉水途径进入土壤的 HHCB 和 AHTN 通过生物降解与植物吸收途径消解的比例较低,最高只占输入总量的 7.69%,但是随着 $\lg K_{oc}$ 的减小和灌溉时间增加,通过生物降解和根系吸收的消解率增加. 本研究结果能够为准确评估再生水灌溉途径引起的土壤中人工合成麝香 HHCB/AHTN 的生态风险提供依据.

关键词: HHCB/AHTN; 再生水; 土壤; 累积; HYDRUS-1D

中图分类号: X131.3; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)12-4121-06

Model Simulation of the Transportation, Transformation and Accumulation of Synthetic Musks in Soils Input Through Recycle Water Irrigation

WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao

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

Abstract: Environmental pollution of synthetic musks HHCB and AHTN, one type of PPCPs, have been attracted great attentions in latest years. One of the main input pathways of HHCB/AHTN to soils is reclaimed water irrigation. In this study, we monitored HHCB and AHTN in soils irrigated by reclaimed water and irrigation water and modeled the transportation and accumulation of HHCB and AHTN in soils using HYDRUS-1D. Results showed that concentrations of HHCB and AHTN in soils irrigated by recycling water were 5 times higher than tap water irrigation soils although both of the concentrations are trace. The temporal increase of accumulation was exponential when $\lg K_{oc}$ value was 3.44, while linear when $\lg K_{oc}$ were 4.12 and 4.86. Changes of half life of HHCB/AHTN did not affect their accumulation in surface soils. The downward transportation of HHCB and AHTN under recycling water irrigation was very slow. After 40 years of irrigation, it could only 53 cm at most favored conditionals. The downward movement was greatly impacted by the $\lg K_{oc}$ values. The dissipation of those two synthetic musks through biological degradation and plant uptake were tiny. The highest dissipation rate through biological degradation and plant uptake was only 7.69% of the total input by reclaimed water irrigation after 40 years. The dissipation rate was increased with the decrease of $\lg K_{oc}$ values and irrigation time. Results of this work may offer base for accurate assessing the ecological risks of HHCB and AHTN in soils caused by reclaimed water irrigation.

Key words: HHCB/AHTN; recycling water; soils; accumulation; HYDRUS-1D

人工合成麝香广泛应用于化妆品、个人护理用品等日化产品中,目前,在水体、污泥、大气,以及人体、鱼、虾、贝类等生物体内均已检测到,是近年来受环境科学家关注较多的药品与个人护理品(PPCPs)类新型污染物之一^[1-4].

人工合成麝香输入土壤的途径主要为市政污水直接排放、再生水利用以及污泥农用^[5,6]. 调查研究表明,污水处理过程中人工合成麝香的去除率低于 70%,最低的只有 25% 左右. 环境中检测率和检测浓度最高的两种人工合成麝香分别是佳乐麝香(HHCB)和吐纳麝香(AHTN)^[7,8]. Zhou 等^[7]对

北京市的污水处理厂出水的检测结果发现 HHCB 的浓度最高达到 $1285.3 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, AHTN 的浓度最高达 $89.3 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$. 这两种麝香在土壤中的吸附性较强,并且生物降解缓慢,因此,通过灌溉水途径输入土壤后能够产生累积效应.

由于人工合成麝香在环境中属于痕量污染物,

收稿日期: 2012-04-19; 修订日期: 2012-06-07

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(41001330); 国家自然科学基金重点项目(40930739)

作者简介: 王美娥(1975~),女,副研究员,主要研究方向为污染生态学, E-mail: mewang@rcees.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: wpchen@rcees.ac.cn

在复杂的土壤环境中有关此类新型污染物的生态风险研究结果较少。然而,毒理学实验结果表明,人工合成麝香对植物、土壤动物也存在一定的毒性效应^[9,10]。污染物的生态风险预评价是生态风险评价过程进行问题阐述和生态终点确定的关键步骤,而模型模拟是预评价的主要手段之一。污染物排放是生态风险评价中暴露分析模型的必要输入参数^[11]。据报道^[12,13],PPCPs 在农田土壤中的浓度可以通过用于农田灌溉的污水处理厂出水和农田施用的污泥中 PPCPs 的含量来计算。Zhang 等^[8]采用质量平衡公式,根据上海污水处理厂进出水、污泥以及污水处理厂对人工合成麝香的去除率计算了苏州河中人工合成麝香的年输入量。

本研究拟采用 HYDRUS-1D 模拟长期灌溉再生水条件下,土壤中 HHCB 和 AHTN 的迁移转化和累积趋势,旨在为土壤中人工合成麝香生态风险评价和预测提供方法手段。

1 材料与方法

1.1 研究场地

选择北京南二环附近的龙潭公园绿地作为研究再生水灌溉人工合成麝香土壤累积趋势预测的样点。这个公园从 2002 年开始进行再生水灌溉,附近 5 km 范围内无排放这两种麝香的工厂企业,并且目标场地中没有生活垃圾填埋。因此,该场地土壤中这两种人工合成麝香的累积主要来源于再生水灌溉。

土壤样品采集时间为 2010 年 3 月和 5 月,分别从公园东南西北 4 个方向选择再生水灌溉的草坪作为样地,每个样地根据大小和形状采用矩形 5 点混合采样方法,采集 0~20 cm 表层土壤。另外选取一直使用自来水灌溉的草地土壤作为对照,采样方法同上。

1.2 样品采集以及水样和土壤样品中 HHCB/AHTN 分析

目标场地灌溉水样采集,分别在 3 月和 5 月进行 2 次采样,直接采集灌溉水管中流出来的水样,每隔 10 min 采集一次,采 3 次。水样中 HHCB 和 AHTN 分析采用固相萃取、硅胶小柱净化,ICP-MS (Agilent 6890,5975C) 检测的方法。土壤样品中人工合成麝香的提取和分析采用快速溶剂萃取法 (ASE, Dionex ASE 300), SPE 小柱净化,ICP-MS (Agilent 6890,5975C) 检测。具体检测方法见文献 [14,15]。

1.3 土壤 HHCB 和 AHTN 累积趋势预测

HYDRUS-1D 模型 (Version. 4.14) 是一个单元有限元模型^[16],能够在不同空气和其它边界条件下模拟不同饱和程度的多介质体或者分层土壤中水、热、气以及多种溶质的运移过程。若将坐标原点选在地面,取 z 轴向下为正,则一维饱和-非饱和带水分运移方程如公式(1):

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

式中, θ 为含水率; h 为负压水头; S 为植物根系吸水量。在 HYDRUS-1D 中污染物的迁移转化依据对流-弥散方程进行模拟,就本研究选取的人工合成麝香而言,可用如下公式描述:

$$\frac{\partial \theta c}{\partial t} + \frac{\partial \rho S}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta D_w \frac{\partial c}{\partial x} \right) - \frac{\partial qc}{\partial x} - \mu_w \theta c - U$$

式中, c 代表溶液相浓度, ρ 代表土壤容重, D_w 代表水相分子扩散系数, q 代表水流, μ_w 代表降解速率, U 代表植物吸收。

模拟中设定 0~100 cm 土壤剖面为研究目标土层,土壤剖面分为 4 个层次,分别为:0~20、20~40、40~60 以及 60~100 cm。生物降解设定为最上面两层,即 0~40 cm 土层。据报道 HHCB 和 AHTN 的 $\lg K_{oc}$ 值范围为 3.44~4.86 和 3.58~4.80^[17~20]。表 1 列出了模型模拟所需要的参数包括:降解率、麝香在水中的扩散系数、固液分配系数等。模型中水分运动参数采用 Van Genuchten 推导, Van Genuchten 方程所需要的参数见表 2^[21,22]。

表 1 HYDRUS-1D 模型模拟中 HHCB 和 AHTN 相关参数¹⁾

项目	HHCB	AHTN
$D_w/\text{cm}^2 \cdot \text{d}^{-1}$	0.523	0.523
μ_w/d^{-1}	0.0039	0.0039
$K_d/\text{cm}^3 \cdot \text{ng}^{-1}$	41~1086	57~946

1) D_w : 水相中的分子扩散系数; μ_w : 降解速率; K_d : 固-液分配系数

表 2 HYDRUS-1D 模型模拟中不同土层土壤水动力学及理化参数¹⁾

项目	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	60~100 cm
$\theta_r/\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$	0.061	0.071	0.053	0.051
$\theta_s/\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$	0.43	0.47	0.42	0.41
$K_s/c \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	35.5	51.8	29.8	20.6
α/cm^{-1}	0.01	0.02	0.02	0.01
n	1.53	1.55	1.46	1.43
$\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1.610	1.520	1.500	1.460

1) θ_r : 土壤残余水分; θ_s : 饱和含水量; K_s : 饱和导水率; α : 进气值的倒数; n : 孔径分布指数; ρ : 土壤容重

进入土壤的水流量分别根据气候条件和自由灌溉设定,灌溉次数设定为每周灌溉 3 次. 灌溉量设定为北京地区草地最大平均蒸散发量 (ET_c) 的 120%, ET_c 为潜在蒸散发量 (ET_0) 经过草地系数 (K_c)^[23] 修正, ET_0 按照 Penman-

Monteith 公式计算,公式所需的气象数据来自中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.cma.gov.cn/index.jsp>). 本研究选择以公园草坪灌溉为例,确定蒸发量及蒸腾量、灌溉量(设为 1.2 ET_c)、灌溉次数(表 3).

表 3 目标公园草坪蒸发量及蒸腾量、灌溉量、灌溉次数

Table 3 Growth stages, K_c , evaporation, transpiration, irrigation, and irrigation times of study area

时间(月-日)	蒸发量/cm·h ⁻¹	蒸腾量/cm·h ⁻¹	灌溉量/mm	灌溉次数
03-21 ~ 03-31	0.004	0.000	30	3
04-01 ~ 04-20	0.000	0.006 ~ 0.014	80	3
04-21 ~ 04-30	0.000	0.014		1
05-01 ~ 05-31	0.000	0.017	110	5
06-01 ~ 06-30	0.000	0.018	80	3
07-01 ~ 07-31	0.000	0.015	25	2
08-01 ~ 08-31	0.000	0.013	30	3
09-01 ~ 09-30	0.000	0.011	50	4
10-01 ~ 10-12	0.000	0.008	30	2
10-13 ~ 10-31	0.000	0.008 ~ 0.007		3
11-01 ~ 11-30	0.000	0.005 ~ 0.004	25	5
12-01 ~ 12-06	0.000	0.004 ~ 0.003	0	0

灌溉水中 HHCB 和 AHTN 浓度根据实测(表 4)与文献报道结果设定为 50、250 和 2 500 ng·L⁻¹ 共 3 个浓度^[7,18]. 由于 HHCB 和 AHTN 的化学性质类似,模型模拟的输入参数也基本相同,因此,在讨论模拟结果时把这两种麝香合并起来讨论.

2 结果与讨论

2.1 再生水以及目标场地土壤中 HHCB 和 AHTN 的含量

如表 4 所示,灌溉水中 HHCB 和 AHTN 的含量分别为 200 ~ 251 ng·L⁻¹ 以及 65 ~ 130 ng·L⁻¹. 文

献报道在污水处理厂的出水中 HHCB/AHTN 最高与最低含量相差近 5 倍,与文献报道相比本研究再生水样品中 HHCB 和 AHTN 的含量偏低. 自来水灌溉的公园土壤中 HHCB 和 AHTN 含量分别为 0.233 ~ 0.435 ng·g⁻¹ 和 0.330 ~ 0.659 ng·g⁻¹, 而再生水灌溉的公园土壤中的这两种麝香含量分别为 1.33 ~ 2.55 ng·g⁻¹ 和 1.91 ~ 3.92 ng·g⁻¹. 尽管 2 类土壤中含量都在痕量的级别,但是两者之间每种麝香的含量相差近 10 倍,因此,本研究认为再生水灌溉在一定程度上造成了土壤中这两种人工合成麝香的累积.

表 4 再生水与自来水灌溉公园土壤中以及北京某污水处理厂出水中的 HHCB 和 AHTN 浓度

Table 4 Concentrations of HHCB and AHTN in reclaimed water and soils irrigated by reclaimed water

项目	再生水灌溉土壤 /ng·g ⁻¹	自来水灌溉土壤 /ng·g ⁻¹	文献报道污水处理厂出水 ^[7,8] /ng·L ⁻¹	现场灌溉用再生水 /ng·L ⁻¹
HHCB	1.33 ~ 2.55	0.233 ~ 0.435	492 ~ 2 766	200 ~ 251
AHTN	1.91 ~ 3.92	0.330 ~ 0.659	47 ~ 315	65 ~ 130

2.2 再生水灌溉下土壤表层中 HHCB/AHTN 的累积趋势及其影响因素分析

图 1 显示了灌溉水中 HHCB/AHTN 浓度分别为 50、250 和 2 500 ng·L⁻¹ 时(其它参数不变),土壤表层 0 ~ 20 cm HHCB/AHTN 的累积趋势. 从中可知,随着灌溉时间的延长以及灌溉水中的 HHCB/AHTN 浓度增加,表层土壤中这两种麝香的浓度线性增加,浓度为 50、250 和 2 500 ng·L⁻¹ 的灌溉水灌溉 5 a 后,土壤中这两种麝香的浓度分别达到 0.24、

1.21 和 12.1 ng·g⁻¹,与实际观测结果相近. 在灌溉 40 a 后,两种麝香的浓度分别达到 1.53、7.73 和 77.7 ng·g⁻¹. 依据现有的生态毒理学数据,即使以 2 500 ng·L⁻¹ 的高污染水平灌溉 40 a,其土壤累积仍不足以引起明显的毒理效应.

固-液分配系数 K_d 和降解速率是决定土壤累积浓度的 2 个关键参数,因此,本研究对土壤表层中 HHCB/AHTN 浓度对这两个参数的变化的响应进行了模拟和讨论,结果如下.

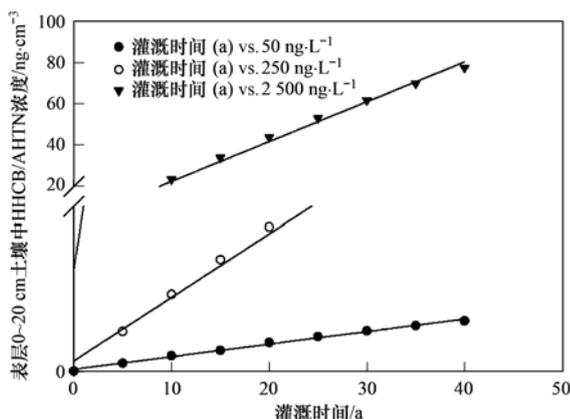


图1 不同浓度灌溉水条件下土壤表层0~20 cm的HHCB/AHTN浓度随时间的变化

Fig. 1 Temporal changes of HHCB/AHTN in surface soils (0-20 cm) irrigated by reclaimed water containing different concentrations of HHCB/AHTN

笔者从文献报道的 $\lg K_{oc}$ 3.44 ~ 4.86 的范围中选择3个 $\lg K_{oc}$ 值,分别为3.44、4.12、4.86;灌溉水中HHCB/AHTN浓度选择为 $250 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,半衰期选择为6个月,模拟不同 K_{oc} 情况下表层0~20 cm土壤中HHCB/AHTN的累积趋势变化,模拟结果如图2所示。随着 $\lg K_{oc}$ 的增加,表层0~20 cm土壤中HHCB/AHTN的累积量增加,并且随着灌溉时间的延长,不同 $\lg K_{oc}$ 值之间的累积量差距增大。此外,随着 $\lg K_{oc}$ 的增大,累积趋势也发生了变化,在 $\lg K_{oc}$ 较低为3.44时,表层土壤中HHCB/AHTN的累积随着时间呈指数性增加,而当 $\lg K_{oc}$ 较高为4.12和4.86时,表层土壤中HHCB/AHTN的累积随着时间呈线性增加。在灌溉40 a后, $\lg K_{oc}$ 为3.44时,土壤表层HHCB/AHTN的累积达到了平衡,浓度为2.27

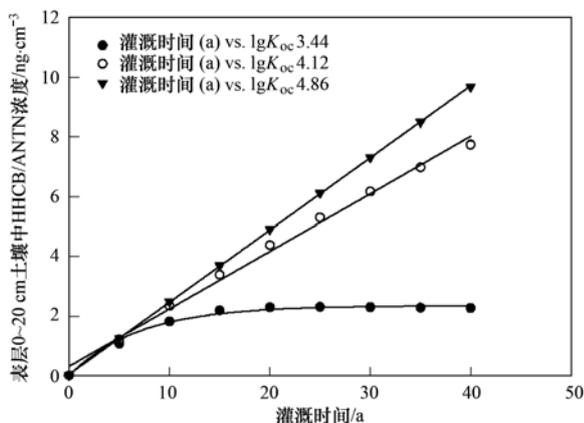


图2 不同 $\lg K_{oc}$ 下土壤表层0~20 cm的HHCB/AHTN浓度随时间的变化

Fig. 2 Temporal changes of HHCB/AHTN in surface soils (0-20 cm) under different $\lg K_{oc}$ values

$\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$,而在 $\lg K_{oc}$ 为4.12和4.86时,土壤表层HHCB/AHTN的累积未到达平衡,浓度分别为 $7.73 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $9.67 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

$\lg K_{oc}$ 的变化反映在模型中为导致 K_d 发生变化,即土壤固-液分配的变化,这将进一步影响化合物土壤环境行为过程,包括垂直向下迁移、植物根系吸收和生物降解,因此,下文将对这3个过程对 $\lg K_{oc}$ 变化的响应做详细讨论。

生物降解的半衰期是影响土壤表层HHCB/AHTN累积的另一个重要因素,由于土壤中这两种麝香的含量较低,以及分解速率非常缓慢,其生物降解速率至今为止还未有确切定论。根据文献报道,HHCB的半衰期为6~17个月,AHTN的半衰期从6~24个月,甚至更长^[24~26]。然而,野外的研究尽管没有确切的半衰期,但是消解速率明显比实验室内快很多^[26]。因此,分别选择半衰期60、180和600 d,灌溉水中HHCB/AHTN浓度为 $250 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, $\lg K_{oc}$ 为4.12来模拟半衰期的变化对表层0~20 cm土壤中HHCB/AHTN累积量的影响,模拟结果如图3所示。半衰期的变化对再生水灌溉途径输入土壤的HHCB/AHTN的表层累积影响并不明显,这主要是因为输入土壤的人工合成麝香的降解主要与其水溶态有关,而两种麝香在土壤中吸附能力较强,因而半衰期的变化对于其在土壤的消减影响不明显,3种半衰期情况下土壤累积变化不明显。

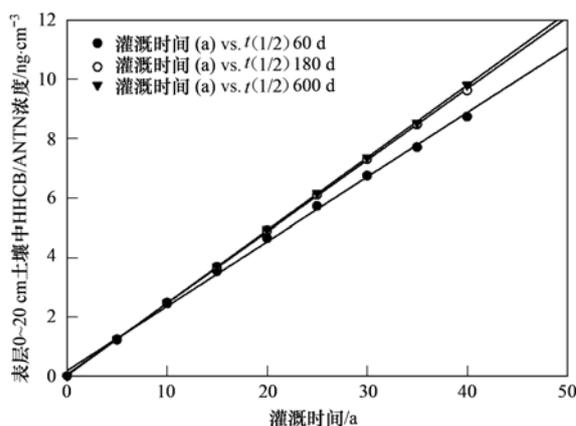


图3 不同半衰期下土壤表层0~20 cm的HHCB/AHTN浓度随时间的变化

Fig. 3 Temporal changes of HHCB/AHTN in surface soils (0-20 cm) under different half lives of HHCB/AHTN in soils

2.3 再生水灌溉下土壤中HHCB和AHTN的垂直分布及其对 K_{oc} 变化的响应

以HHCB/AHTN含量为 $250 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 的再生水灌溉为例,选择土壤中HHCB和AHTN的半衰期为

180 d, 灌溉时间为 40 a, 模拟在 3 种 $\lg K_{oc}$ 分别为 3.44、4.12 和 4.86 情况下, 人工合成麝香垂直迁移规律. 如图 4 所示, 当 $\lg K_{oc}$ 为报道中最高值 4.86 时, 灌溉 40 a 后才到达 11 cm 土层, 并且随着土层深度的增加, 麝香浓度呈指数下降; 而当 $\lg K_{oc}$ 为 3.44 和 4.12 时, 随着土层深度的增加, 土壤中的 HHCB/AHTN 浓度先增加后降低, 分别在土层深度为 17 cm 和 7 cm 左右达到最高值, 灌溉 40 a 后分别到达了 53 cm 和 25 cm 左右土层. 对比 3 种 $\lg K_{oc}$ 值的模拟结果发现, $\lg K_{oc}$ 的降低显著增加 HHCB/AHTN 垂直向下迁移的程度. 由于 $\lg K_{oc}$ 的不同直接影响了麝香在土壤中的 K_d 值, 而 K_d 值与土壤性质密切相关, 因此, HHCB/AHTN 的向下迁移能力与具体场地的土壤性质相关. 另一方面, 在 K_d 值最小的情况下, 灌溉 40 a 后, 才到达土层的 53 cm, 可以说明 HHCB 和 AHTN 垂直向下移动的速度是非常缓慢的. 模型模拟的结论与 Litz 等^[20] 从淋溶实验结果得出的结论类似, 他们的研究发现, 48 h 土柱淋溶实验中 HHCB 和 AHTN 的淋溶率 $< 0.001\%$, 因此他们认为 HHCB/AHTN 的向下垂直迁移的能力很弱.

2.4 土壤中 HHCB 和 AHTN 的生物降解与植物根系吸收对 $\lg K_{oc}$ 变化的响应

为了进一步了解再生水灌溉途径输入土壤中的 HHCB/AHTN 的累积与 $\lg K_{oc}$ 之间的关系, 模型模拟

表 5 不同 $\lg K_{oc}$ 值条件下土壤 HHCB/AHTN 的生物降解与植物根系吸收等消解情况

Table 5 Dissipation of HHCB/AHTN in soils input through biological degradation and plant uptake

灌溉时间/a	$\lg K_{oc}$ 3.44			$\lg K_{oc}$ 4.12			$\lg K_{oc}$ 4.86		
	降解 / $\text{ng}\cdot\text{cm}^{-3}$	根系吸收 / $\text{ng}\cdot\text{cm}^{-3}$	消解率 /%	降解 / $\text{ng}\cdot\text{cm}^{-3}$	根系吸收 / $\text{ng}\cdot\text{cm}^{-3}$	消解率 /%	降解 / $\text{ng}\cdot\text{cm}^{-3}$	根系吸收 / $\text{ng}\cdot\text{cm}^{-3}$	消解率 /%
5	0.621	0.169	1.98	0.131	0.116	0.619	0.024	0.053	0.194
10	1.30	0.248	1.94	0.274	0.290	0.707	0.094	0.149	0.305
15	5.26	0.540	4.85	1.16	0.475	1.37	0.212	0.268	0.401
20	8.63	0.725	5.86	2.06	0.661	1.70	0.376	0.404	0.489
25	12.2	0.910	6.57	3.21	0.846	2.03	0.586	0.552	0.571
30	15.8	1.10	7.06	4.61	1.03	2.36	0.844	0.711	0.650
35	19.4	1.28	7.42	6.26	1.22	2.68	1.15	0.877	0.725
40	23.1	1.47	7.69	8.16	1.40	3.00	1.50	1.05	0.798

3 结论

(1) 通过再生水灌溉和非再生水灌溉土壤的对比分析发现, 再生水灌溉在一定程度上导致 HHCB/AHTN 在土壤表层的累积.

(2) 随着灌溉时间的延长以及灌溉水中的 HHCB/AHTN 浓度增加, 0~20cm 表层土壤中这两种麝香的浓度增加, 并且受 $\lg K_{oc}$ 的影响较大; 随着

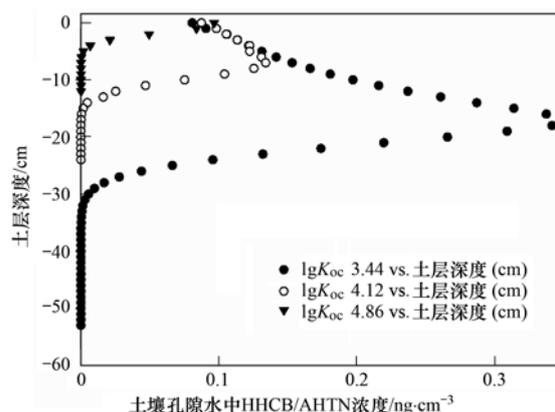


图 4 不同 $\lg K_{oc}$ 情况下 HHCB/AHTN 麝香的向下垂直迁移

Fig. 4 Downward transportation of HHCB and AHTN with different $\lg K_{oc}$ values

了灌溉水中 HHCB/AHTN 浓度为 $250 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 、半衰期为 180 d 时, 土壤表层 0~20 cm 中 HHCB/AHTN 的生物降解和植物根系吸收等消减途径随着 $\lg K_{oc}$ 变化的情况, 模拟结果如表 5 所示. 随着时间延长, 土壤中 HHCB/AHTN 的降解和植物吸收量增加, 消减率逐年增加. 随着 $\lg K_{oc}$ 的减小, 通过生物降解和根系吸收的消解率增加. 然而, 通过这两种方式消解的人工合成麝香在灌溉 40 a 后, 最高的情况下也只占输入土壤总量的 7.69%, 因此, 输入土壤中 HHCB/AHTN 具有较强的持久性, 大部分污染物将在土壤累积.

$\lg K_{oc}$ 的增大, 表层土壤中的累积量增加明显, 累积趋势从 $\lg K_{oc}$ 较低为 3.44 时的指数型增加, 到 $\lg K_{oc}$ 较高为 4.12 和 4.86 时的线性增加; 生物降解半衰期的变化对再生水灌溉途径输入土壤的 HHCB/AHTN 的表层累积影响并不明显.

(3) 灌溉水途径进入土壤的 HHCB 和 AHTN 垂直向下移动的速度非常缓慢, 而且受 $\lg K_{oc}$ 变化影响较大, 因此, 向下迁移能力与具体场地的土壤性质

相关。

(4) 通过灌溉水途径进入土壤的 HHCb 和 AHTN 通过生物降解与植物吸收途径消解的比例较低,但是随着 $\lg K_{oc}$ 的减小和灌溉时间增加,通过生物降解和根系吸收的消解率增加,大部分污染物将在土壤中累积。

参考文献:

- [1] 桑文静,周雪飞,张亚雷. 城市污水厂污泥中合成麝香分析方法的研究进展[J]. 中国给水排水, 2009, **25**(8): 16-20.
- [2] 桂红艳,曾祥英,盛国英,等. 污水处理厂污泥中多环麝香的初步研究[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(9): 1576-1580.
- [3] 郭亚文,张晓岚,钱光人,等. 城市污泥中合成麝香的分布特征[J]. 环境科学, 2009, **30**(5): 1493-1498.
- [4] An J, Zhou Q, Sun Y, *et al.* Ecotoxicological effects of typical personal care products on seed germination and seedling development of wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Chemosphere, 2009, **76**(10): 1428-1434.
- [5] Rosal R, Rodriguez A, Perdigon-Melon J, *et al.* Occurrence of emerging pollutants in urban wastewater and their removal through biological treatment followed by ozonation [J]. Water Research, 2010, **44**(2): 578-588.
- [6] 任宏英. 北京市城市污水厂污泥利用途径的研究[D]. 北京:北京工业大学, 2003. 64-78.
- [7] Zhou H D, Huang X, Gao M J, *et al.* Distribution and elimination of polycyclic musks in three sewage treatment plants of Beijing, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, **21**(5): 561-567.
- [8] Zhang X, Yao Y, Zeng X, *et al.* Synthetic musks in the aquatic environment and personal care products in Shanghai, China [J]. Chemosphere, 2008, **72**(10): 1553-1558.
- [9] Chen C, Zhou Q, Bao Y, *et al.* Ecotoxicological effects of polycyclic musks and cadmium on seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum*) [J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, **22**(12): 1966-1973.
- [10] Liu S, Zhou Q, Wang Y. Ecotoxicological responses of the earthworm *Eisenia fetida* exposed to soil contaminated with HHCb [J]. Chemosphere, 2011, **83**(8): 1080-1086.
- [11] Topp E, Monteiro S C, Beck A, *et al.* Runoff of pharmaceuticals and personal care products following application of biosolids to an agricultural field [J]. Science of the Total Environment, 2008, **396**(1): 52-59.
- [12] Ternes T, Herrmann N, Matthias B, *et al.* A rapid method to measure the solid-water distribution coefficient (K_d) for pharmaceuticals and musk fragrances in sewage sludge [J]. Water Research, 2004, **38**(19): 4075-4084.
- [13] Bradbury S P, Feijtel T C J, Leeuwen C J. Meeting the scientific needs of ecological risk assessment in a regulatory context [J]. Environmental Science and Technology, 2004, **38**(23): 463-470.
- [14] 田艺心,王美娥,陈卫平,等. 污水和污泥中的人工合成麝香分析方法[J]. 生态学杂志, 2011, **30**(2): 395-400.
- [15] Zeng X Y, Sheng G Y, Fu J M, *et al.* Determination of polycyclic musks in sewage sludge from Guangdong, China using GC-EI-MS [J]. Chemosphere, 2005, **60**(6): 817-823.
- [16] Simunek J, Genuchten M T. Modeling nonequilibrium flow and transport processes using HYDRUS [J]. Vadose Zone Journal, 2008, **7**(2): 782-797.
- [17] Balk F, Ford R. Environmental risk assessment for the polycyclic musks AHTN and HHCb in the EU, I. Fate and exposure assessment [J]. Toxicology Letters, 1999, **11**(1-2): 57-79.
- [18] Balk F, Ford R. Environmental risk assessment for the polycyclic musks AHTN and HHCb in the EU, II. Effect assessment and risk characterization [J]. Toxicology Letters, 1999, **111**(1-2): 81-94.
- [19] Böhm L, Düring R. Partitioning of polycyclic musk compounds in soil and aquatic environment-experimental determination of KDOC [J]. Journal of Soils and Sediments, 2010, **10**(4): 708-713.
- [20] Litz N, Müller J, Böhmer W. Occurrence of polycyclic musks in sewage sludge and their behaviour in soils and plants, Part 2: Investigation of polycyclic musks in soils and plants [J]. Journal of Soils and Sediments, 2007, **7**(1): 36-44.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 潘兴瑶,刘洪禄,李法虎,等. 基于 GIS 技术的北京通州区灌区生态需水研究[J]. 农业工程学报, 2007, **23**(2): 42-48.
- [24] Difrancesco A, Chiu P, Standley L, *et al.* Dissipation of fragrance materials in sludge-amended soils [J]. Environmental Science and Technology, 2004, **38**(1): 194-201.
- [25] Müller J, Böhmer W, Litz N. Occurrence of polycyclic musks in sewage sludge and their behavior in soils and plants, Part 1: Behavior of polycyclic musks in sewage sludge of different treatment plants in summer and winter [J]. Journal of Soils and Sediments, 2006, **6**(4): 231-235.
- [26] Martin C, Moeder M, Daniel X, *et al.* Biotransformation of the polycyclic musks HHCb and AHTN and metabolite formation by fungi occurring in freshwater environments [J]. Environmental Science and Technology, 2007, **41**(15): 5395-5402.

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