

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第3期

Vol.34 No.3

**2013**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

BP网络框架下MODIS气溶胶光学厚度产品估算中国东部PM<sub>2.5</sub> ..... 郭建平, 吴业荣, 张小曳, 李小红 (817)

北京市近地层颗粒物浓度与气溶胶光学厚度相关性分析研究 ..... 林海峰, 辛金元, 张文煜, 王跃思, 刘子锐, 陈传雷 (826)

气象因素对长三角背景地区甲烷浓度的影响分析 ..... 浦静姣, 徐宏辉, 顾骏强, 马千里, 方双喜, 周凌晔 (835)

密闭化填埋作业条件下的场内恶臭污染分布情况与分析 ..... 路鹏, 吴世新, 戴志锋, 张晓辉, 苏昭辉, 周小飞, 代占国, 卢旭飞, 郑斌, 沈凯, 卫潘明 (842)

冬季中国东海海水中挥发性卤代烃的分布特征和海-气通量 ..... 何真, 陆小兰, 杨桂朋 (849)

2000~2010年大鹏湾颗粒有机物的年变化和年际变化 ..... 李绪录, 周毅频, 夏华永 (857)

渤海湾浮游植物与环境因子关系的多元分析 ..... 周然, 彭士涛, 覃雪波, 石洪华, 丁德文 (864)

青藏高原淡水湖泊水化学组成特征及其演化 ..... 王鹏, 尚英男, 沈立成, 伍坤宇, 肖琼 (874)

漳卫南运河流域非点源污染负荷估算及最佳管理措施优选 ..... 徐华山, 徐宗学, 刘品 (882)

面向对象的湖泊污染控制智能工程设计方法 ..... 邹锐, 周环, 刘永, 朱翔, 赵磊, 阳平坚, 郭怀成 (892)

九龙江口湿地植物凋落物对沉积物有机质赋存的贡献 ..... 罗专溪, 邱昭政, 王振红, 颜昌宙 (900)

修复达标土壤回填对地下水环境影响的层次化评估方法应用研究 ..... 钟茂生, 姜林, 姚珏君, 樊艳玲, 夏天翔, 李婷婷, 田美影 (907)

去除地下水中硝酸盐的渗透性反应墙研究 ..... 李秀利, 杨君君, 卢晓霞, 张姝, 侯珍 (914)

北京城区雨水管道沉积物污染负荷研究 ..... 李海燕, 徐波平, 徐尚玲, 崔爽 (919)

城市污水处理厂及其受纳水体中5种典型PPCPs的赋存特征和生态风险 ..... 温智皓, 段艳平, 孟祥周, 陈玲 (927)

城市景观娱乐水体微生物风险评价 ..... 孙博, 沙婧, 张一帆, 刘彦华 (933)

模拟曝气生物滤池去除邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯试验研究 ..... 李伟, 赵晶, 余健, 任文辉 (943)

膜生物反应器处理工业废水中膜污染及膜过滤特性研究 ..... 范举红, 余素林, 张培帅, 兰亚琼, 刘锐, 陈吕军 (950)

$\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>负载磷钨酸催化强化电化学法处理水中酸性大红3R的研究 ..... 岳琳, 王开红, 郭建博, 杨景亮, 刘宝友, 廉静, 王涛 (955)

活性炭催化过硫酸钠降解金橙G动力学 ..... 杨梅梅, 周少奇, 刘琳, 郑可 (962)

ABR反应器处理碱减量印染废水的启动研究 ..... 杨波, 钟启俊, 李方, 田晴 (968)

O<sub>3</sub>-BAF深度处理制革废水中沿程污染物降解规律 ..... 余彬, 刘锐, 程家迪, 范举红, 李昌湖, 冉坤, 曹国华, 陈吕军 (974)

规模化猪场养殖废水UASB-SFSBR-MAP处理工艺中试研究 ..... 王亮, 陈重军, 陈英旭, 吴伟祥 (979)

连续流态下以城市污水培养好氧颗粒污泥及颗粒特性研究 ..... 牛姝, 段百川, 张祚薰, 刘士峰, 张家铭, 王聪, 周丹丹 (986)

乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(I)——模型的建立 ..... 张超, 陈银广 (993)

乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(II)——动力学模拟 ..... 张超, 陈银广 (998)

乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(III)——模型的应用 ..... 张超, 陈银广 (1004)

三峡水库两条支流水-气界面CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>通量比较初探 ..... 李哲, 白镭, 郭劲松, 方芳, 蒋滔 (1008)

不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异的影响因素 ..... 陈书涛, 刘巧辉, 胡正华, 刘艳, 任景全, 谢薇 (1017)

黄土区农田和草地生态系统土壤呼吸差异及其影响因素 ..... 周小刚, 张彦军, 南雅芳, 刘庆芳, 郭胜利 (1026)

层次化健康风险评估方法在苯污染场地的应用及效益评估 ..... 姜林, 钟茂生, 梁竞, 姚珏君, 夏天翔, 樊艳玲, 李敬东, 唐振强 (1034)

海州湾滩涂重金属污染的历史记录 ..... 张瑞, 张帆, 刘付程, 尹福军, 丁迎军, 高金荣, 陈晶, 邵威 (1044)

草海典型高原湿地表层沉积物重金属的积累、分布与污染评价 ..... 张清海, 林昌虎, 谭红, 林绍霞, 杨鸿波 (1055)

大金山岛土壤重金属污染评价及相关性分析 ..... 程芳, 程金平, 桑恒春, 于金莲, 席磊, 皮帅帅 (1062)

典型有色金属矿山城市小河流沉积物重金属形态分布及风险评估 ..... 李如忠, 姜艳敏, 潘成荣, 陈婧, 徐晶晶 (1067)

典型有色金属矿业城市零星菜地蔬菜重金属污染及健康风险评估 ..... 李如忠, 潘成荣, 徐晶晶, 陈婧, 姜艳敏 (1076)

城市表层土壤磁化率与重金属含量分布的相关性研究 ..... 陈秀端, 卢新卫, 杨光 (1086)

典型热带林地土壤团聚体颗粒中重金属的分布特征及其环境意义 ..... 龚仓, 徐殿斗, 成杭新, 任雅阁, 刘志明, 刘应汉, 刘飞, 聂海峰, 郑祥, 马玲玲 (1094)

生态沟渠底泥属性与磷吸附特性研究 ..... 张树楠, 贾兆月, 肖润林, 杨凤飞, 余红兵, 刘锋, 吴金水 (1101)

三峡库区澎溪河底泥及消落区土壤磷的形态及吸附特性研究 ..... 孙文彬, 杜斌, 赵秀兰, 何丙辉 (1107)

Triton X-100在黄土上的吸附行为及影响因素 ..... 钟金魁, 赵保卫, 朱琨, 钱小龙, 张杰西 (1114)

新疆哈密地区有机氯农药大气、土壤残留特征、气-土交换及潜在生态风险 ..... 马子龙, 毛潇萱, 丁中原, 高宏, 黄韬, 田慧, 郭强 (1120)

青海省西宁市与天峻县大气中得克隆与十溴联苯醚的水平与来源 ..... 何畅, 金军, 马召辉, 王英, 扎西卓玛, 马丽花 (1129)

太湖沉积物中多溴联苯醚和类二噁英多氯联苯的水平垂直分布 ..... 马召辉, 金军, 元奎奎, 王英, 姜霞, 何松浩, 李明圆 (1136)

典型电器工业区河涌沉积物中有机污染物特征分析 ..... 刘近, 邓代永, 许玫英, 孙国萍 (1142)

柴油轿车颗粒多环芳烃的排放特性 ..... 谭丕强, 周舟, 胡志远, 楼狄明 (1150)

机械炼焦过程生成飞灰中多环芳烃分布特征研究 ..... 牟玲, 彭林, 刘效峰, 白慧玲, 张建强 (1156)

污泥干化床与芦苇床稳定化污泥中多环芳烃的含量比较 ..... 崔玉波, 孙红杰, 冉春秋, 李金凤, 谢瑶 (1161)

固体添加剂对污泥焚烧过程中重金属迁移行为的影响 ..... 刘敬勇, 孙水裕, 陈涛 (1166)

铸造废砂的环境毒性研究 ..... 张海凤, 王玉珏, 王劲磷, 黄天佑, 熊鹰 (1174)

Cr<sup>6+</sup>生物可利用度检测的微生物全细胞传感器CB10的构建及其响应特征 ..... 侯启会, 马安周, 庄绪亮, 庄国强 (1181)

反硝化脱硫工艺中微生物群落结构及动态分析 ..... 于皓, 王爱杰, 陈川 (1190)

农业废物好氧堆肥中环境因子对nirK、nirS和nosZ数量的影响 ..... 胡春晓, 陈耀宁, 张嘉超, 唐聪, 曾光明 (1196)

蚯蚓体内过氧化物还原蛋白PRDX基因对土壤PAHs污染胁迫的转录响应 ..... 林康丽, 郑森林, 宋玉芳, 邱晓燕, 薛文玲 (1204)

有序介孔碳载金/L-赖氨酸/纳米金修饰电极的制备及其对邻苯二酚、对苯二酚的检测响应研究 ..... 周耀渝, 汤琳, 李贞, 刘媛媛, 杨贵德, 伍梦诗, 雷晓霞, 曾光明 (1211)

新建核电站风险信息沟通实证研究 ..... 贺桂珍, 吕永龙 (1218)

《环境科学》征订启事(942) 《环境科学》征稿简则(992) 信息(932, 949, 1061, 1210) 专辑征稿通知(1173)

# 修复达标土壤回填对地下水环境影响的层次化评估方法应用研究

钟茂生<sup>1,2,3</sup>, 姜林<sup>1,2,3\*</sup>, 姚珏君<sup>1,2,3</sup>, 樊艳玲<sup>1,2,3</sup>, 夏天翔<sup>1,2,3</sup>, 李婷婷<sup>1,2,3,4</sup>, 田美影<sup>1,2,3,4</sup>

(1. 北京市环境保护科学研究院, 北京 100037; 2. 国家城市环境污染控制工程技术研究中心, 北京 100037; 3. 污染场地风险模拟与修复北京市重点实验室, 北京 100037; 4. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048)

**摘要:** 以含 1,2-二氯乙烷等 10 种有机物污染土壤异位修复后回填为例, 采用层次化方法评估将按原厂址健康风险评价确定的修复目标进行达标修复后的土壤回填对回填区地下水下游 700 m 处饮用水井水质的影响。第一层次预测结果显示 8 种污染物在回填土层淋溶液中的浓度将超过评价标准, 可能对目标水井水质造成污染。考虑回填区非饱和带土壤的吸附截留进行第二层次评估的结果显示, 到达回填区地下水水面处浓度依然超过评价标准的污染物降低至 6 种, 不能排除对目标水井的水质影响。进一步考虑地下水混合稀释进行第三层次评估的结果显示, 经地下水混合稀释后, 超过评价标准的污染物降低至 4 种。最后, 考虑饱和带吸附截留作用进行第四层次评估的结果显示, 目标水井中超过评估标准的污染物仅 1 种。由此可见, 随着评估层次的不深入, 虽然所需开展的工作及获取的场地参数增加, 但是污染物预测浓度更接近目标预测点的浓度, 需调整修复目标的污染物数量逐渐减少, 污染防治成本将逐渐降低。

**关键词:** 达标修复; 土壤回填; 地下水; 影响评估; 层次化方法

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)03-0907-07

## Application of Tiered Approach to Assess the Impact of Backfilling Remediated Soil on Groundwater

ZHONG Mao-sheng<sup>1,2,3</sup>, JIANG Lin<sup>1,2,3</sup>, YAO Jue-jun<sup>1,2,3</sup>, FAN Yan-ling<sup>1,2,3</sup>, XIA Tian-xiang<sup>1,2,3</sup>, LI Ting-ting<sup>1,2,3,4</sup>, TIAN Mei-ying<sup>1,2,3,4</sup>

(1. Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China; 2. National Engineering Research Center of Urban Environmental Pollution Control, Beijing 100037, China; 3. Beijing Key Laboratory for Risk Modeling and Remediation of Contaminated Sites, Beijing 100037, China; 4. College of Environment and Tourism of Capital Normal University, Beijing 100048, China)

**Abstract:** The tiered approach for assessing the impact of backfilling treated contaminated soil on groundwater was presented in details with a case study. The soil was contaminated by 1,2-dicholoroethane and 9 other organic pollutants and had been remediated before backfilling to meet the pre-set remediation goals based on health risk assessment. The results from tiered I assessment indicate that the concentrations of 8 contaminants in the leachate of the backfilling soil layer would exceed the assessment standards probably leading to groundwater contamination. However, the results from tiered II assessment, in which the adsorption and retardation of vadose zone soil was taken into account and the concentrations of pollutants reaching the groundwater table were predicated, reveal that only the concentrations of 6 contaminants would exceed the assessment standards. Further, taking the dilution and mixing of the groundwater into consideration, tiered III assessment was adopted and the results reveal that only 4 contaminants were beyond the standards. Finally, tiered IV assessment, aiming at predicting the concentration at the target well downstream, was carried out by considering the retardation of contaminants in saturated layer, and the results indicate only 1 pollutant was above the assessment standard. Therefore, it can be seen that the predicted concentrations of the target pollutants at advanced assessment levels will be closer to those at the target drinking water well and the amount of contaminants whose initially-set remediation goals need to be modified will decrease correspondingly, indicating the reduction in pollution prevention cost, although more efforts should be made and more field data should be collected to implement the advance assessment level.

**Key words:** remediation meeting targets; soil backfilling; groundwater; impact assessment; tiered approach

近年来由于工业企业搬迁、停产和倒闭所遗留的场地已成为我国污染场地中的主要类型, 特别是污染企业的搬迁已成为快速改善城市环境和督促企业升级改造的有效手段。一些位于城市中心、生产历史长、生产工艺变革多的污染企业遗留场地对场

收稿日期: 2012-05-23; 修订日期: 2012-07-24

基金项目: 北京市科委重大项目 (D08040900360804); 环境保护公益性行业科研专项 (201009032)

作者简介: 钟茂生 (1986 ~), 男, 硕士, 主要研究方向为污染场地调查评估与修复, E-mail: zzmss1986@126.com

\* 通讯联系人, E-mail: jl-iep@vip.163.com

地未来使用人群的健康可能产生不利影响<sup>[1,2]</sup>。因此,各地环保部门已要求这类场地在重新开发利用前需进行风险评估,并依据评估结果对土壤或地下水进行适当的修复<sup>[3]</sup>。目前,北京市已颁布相应技术导则,国家层面的技术导则已进入征求意见阶段<sup>[4-6]</sup>,相应的研究报道也较多<sup>[7-10]</sup>。由于修复行动往往严重滞后于风险评估,制定的土壤修复目标主要保护原场地未来人群的健康及厂区地下水,对于进行异位修复的场地(即将污染土挖离原厂址送往某一集中修复场所进行修复),如果依然执行风险评估阶段制定的修复目标,修复后土壤的再利用是否会对环境造成二次污染,需要依据其最终用途和去向进行重新评估。其中,修复达标土壤用作地势低洼处的回填土以平整土地是其资源化利用方式之一,因此需要结合回填区的水文地质条件重新评估土壤回填对回填区地下水环境的影响。

虽然目前对于如何评估废弃物填埋对填埋区地下水环境的影响报道较多<sup>[11-13]</sup>,对污染物在非饱和带中迁移规律的研究报道也较多<sup>[14-16]</sup>。但是,对于修复达标土壤回填对回填区地下水环境影响评价方法的研究报道较少。同时,与其他固体废物(如生活垃圾、工业固废等)相比,土壤由于具备一定特性(如含水率远低于生活垃圾、自身对污染物有一定的吸附作用等),无法直接套用评估生活垃圾填埋或其他固废填埋对地下水环境影响的评估方法进行评估。因此,本研究将以一个具体案例为例,详细介绍如何开展修复达标土壤回填对回填区地下水环境的影响评估,以期为国内同类项目提供借鉴与参考。

## 1 案例概况

北京某修复公司承担了某化工厂原厂址 1,2-二氯乙烷污染土壤修复工程,需修复土方量 123 万 m<sup>3</sup>。根据招投标要求,拟采用常温热解吸技术进行修复,修复目标拟按原场地再开发为居住用地时确定的修复目标执行,如表 1 所示。

修复达标后,拟将土壤回填至位于修复公司西北部的大坑中,坑平均深约 11 m。由于拟执行的修复目标是原厂址场地环境评价过程中依据场地未来用地功能所制定,未考虑土壤修复达标后回填对回填区地下水的影响。因此,需结合回填区水文地质条件进行评估,以判断执行拟定目标达标修复后土壤回填是否会对回填区地下水造成污染。

回填区地层结构主要表现为:0~4 m 粉土层、4~6 m 黏土层、6~7.5 m 粉土层、7.5~9.0 m 黏

表 1 拟执行的修复目标/mg·kg<sup>-1</sup>

序号	污染物	修复目标值
1	1,2-二氯乙烷	0.82
2	苯	2.4
3	四氯乙烯	22
4	四氯化碳	0.97
5	1,1,2-三氯乙烷	2.8
6	1,1,2,2-四氯乙烷	1.21
7	1,1-二氯乙烯	29.1
8	1,1-二氯乙烷	130
9	茚并(1,2,3-cd)芘	4
10	二苯并(a,h)蒽	0.4

土层。地下水埋深约 9 m,厚度约 27 m。含水层岩性为中砂、砾石,渗透系数 200 m·d<sup>-1</sup>,地下水流向为自西北向东南、水力梯度 0.02%。这层地下水是该区域居民生活及工农业生产的重要水源之一,回填区地下水下游居民饮用水井最近距离为 700 m。土壤回填后回填区潜在的场地污染概念模型如图 1 所示。

## 2 评估方法

### 2.1 方法概述

由图 1 的概念模型可知,回填土层中的污染物到达下游饮用水井需依次经历以下 4 个过程:①自回填土层土壤颗粒相解吸至孔隙水中;②在降雨淋溶作用下孔隙水中的污染物随淋溶液穿透非饱和带土层达到地下水水面处;③到达地下水水面处的污染物将进一步被地下水混合稀释;④混合稀释后的污染物将随地下水运移至下游饮用水井处。如果直接采用模型预测敏感点(即下游饮用水井处)污染物浓度,将要同时收集以上 4 个过程中的相关水文地质参数,以满足模型预测要求,这将给评估工作带来困难,增加成本。但是,由于过程②~④中分别考虑了非饱和带土壤对污染物的吸附阻滞、地下水对污染物的混合稀释以及饱和带土壤对污染物的吸附阻滞作用,污染物的预测浓度将逐渐降低。因此,国外评估非饱和带土壤或污染土壤回填对回填区地下水的影响,往往采用层次化思路,即首先评估回填土层土壤孔隙水中污染物浓度,并根据结果收集更多水文地质参数,逐步开展更高层次评估,预测经历②~④所述过程后地下水中污染物浓度。

此次预测修复达标土壤回填对回填区地下水环境的影响,将采用以上的层次化的评估思路,具体决策流程如图 2 所示。首先采用简单但结果非常保守的三相平衡模型<sup>[17]</sup>进行回填土层淋溶液中目标污

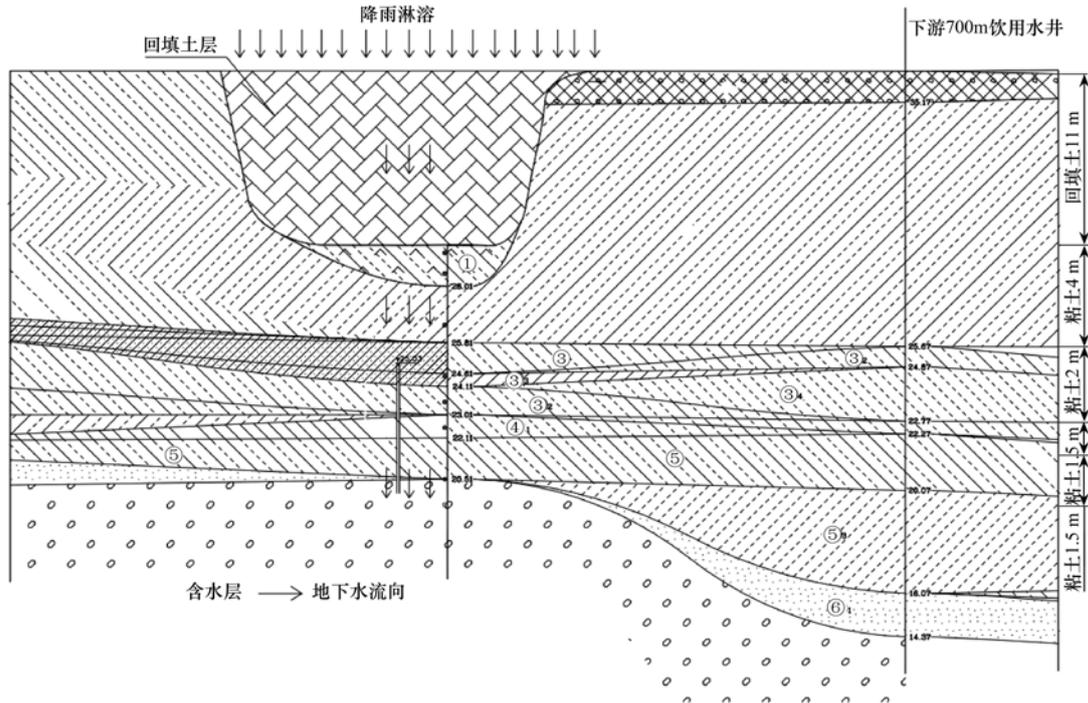


图1 场地污染概念模型

Fig. 1 Site contamination conceptual model

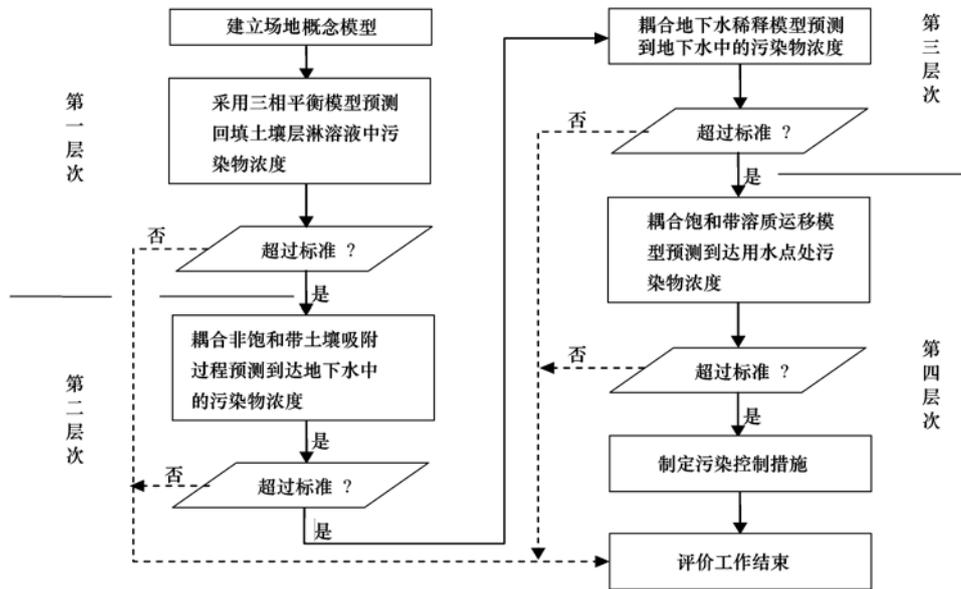


图2 层次化评估决策流程

Fig. 2 Decision flow-chart of tiered assessment approach

染物浓度预测并将其与评价标准比较,如污染物低于相应的评价标准,将结束评估并得出结论. 如浓度超过相应的评价标准,将在三相平衡模型的基础上耦合污染物在非饱和带土层中的溶质运移模型<sup>[18~21]</sup>,预测污染物随淋溶液穿透非饱和带土层到达地下水面的浓度. 如预测浓度依然超标,则考虑

耦合地下水对污染物的稀释模型以进一步预测,否则终止评估并得出结论. 如耦合地下水稀释模型预测地下水中污染物依然超过相应标准,将进一步耦合含水层溶质运移模型以预测污染物到达回填区地下水下游方向最近的饮用水井处的浓度并得出结论.

## 2.2 预测模型

### 2.2.1 第一层次预测模型

第一层次中用于预测回填土层土壤孔隙淋溶液中污染物浓度的三相平衡模型如式(1)所示<sup>[17,22,23]</sup>.

$$c_w = c_s \times \frac{\rho}{\theta_w + H \times \theta_a + \rho \times K_{oc} \times f_{oc}} \quad (1)$$

式中,  $c_w$  为回填土层孔隙淋溶液中污染物浓度,  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $c_s$  为回填土壤中污染物浓度,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $\rho$  为回填土壤密度,  $\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $\theta_w$  为回填土壤含水空隙度, 无量纲;  $\theta_a$  为回填土壤含气空隙度, 无量纲;  $H$  为污染物亨利常数, 无量纲;  $K_{oc}$  为污染物有机碳分配系数, 无量纲;  $f_{oc}$  为回填土壤有机碳含量, 无量纲.

### 2.2.2 第二层次预测模型

第二层次中对于污染物在非饱和带土壤中的运移规律模拟, 主要采用相对简单的垂向一维非饱和-饱和稳定流水分溶质运移模型, 其水分及溶质运移控制方程如式(2)及式(3)所示<sup>[14]</sup>. 方程求解利用 Hydrus-1D 软件进行.

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

式中,  $\theta$  为土壤体积含水率, 无量纲;  $h$  为压力水头, 饱和带大于 0, 非饱和带小于 0,  $\text{m}$ ;  $z$  为垂直方向坐标变量,  $\text{cm}$ ;  $t$  为时间变量,  $\text{a}$ ;  $k$  为土壤垂直方向的水力传导系数,  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ .

$$\frac{\partial(\theta c)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho s)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \theta c \times D \frac{\partial c}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} (cq) - Asc \quad (3)$$

式中,  $c$  为淋溶液中污染物浓度,  $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 通过式(1)计算;  $\rho$  为非饱和带土壤密度,  $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3}$ ;  $s$  为单位质量土壤溶质吸附量,  $\text{cm}^3 \cdot \text{kg}$ ;  $q$  为入渗量,  $\text{cm} \cdot \text{a}^{-1}$ ;  $D$  为土壤纵向弥散系数,  $\text{cm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ ;  $A$  一般取 1.

### 2.2.3 第三层次预测模型

第三层次预测模型中的参数  $U_{gw}$ 、 $W_{gw}$ 、 $I$  及  $B$  通过现场测试获取, 分别为  $0.04 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $500 \text{ m}$ 、 $4.1 \times$

对于地下水稀释后污染物浓度的预测主要采用箱式模型, 该模型假设进入地下水混合层中的污染物将混合均匀, 模型具体如式(4)所示<sup>[21~23]</sup>.

$$c_{w1} = c_{w0} \left/ \left( 1 + \frac{U_{gw} \times \delta_{gw}}{I \times W_{gw}} \right) \right. \quad (4)$$

$$\delta_{gw} = \min \left\{ B, 0.10583 \times W_{gw} + B \times \left[ 1 + \exp \left( \frac{-W_{gw} \times I}{U_{gw} \times B} \right) \right] \right\}$$

式中,  $c_{w1}$  为稀释后地下水中污染物浓度,  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $c_{w0}$  为稀释前进入地下水中污染物浓度, 通过第二层次预测获得,  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $U_{gw}$  为地下水流速,  $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ ;  $\delta_{gw}$  为地下水混合层厚度,  $\text{m}$ ;  $W_{gw}$  为地下水流向上回填区长度,  $\text{m}$ ;  $I$  为降雨入渗量,  $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ ;  $B$  含水层厚度,  $\text{m}$ .

### 2.2.4 第四层次预测模型

预测地下水下游水井中目标污染物浓度选择比较常用的多米尼克模型, 模型具体如式(5)所示<sup>[21,22]</sup>.

$$\frac{c_x}{c_{w1}} = \text{erf} \left[ \frac{Y}{4 \times \sqrt{\alpha_y \times x}} \right] \times \text{erf} \left[ \frac{\delta_{gw}}{2 \times \sqrt{\alpha_z \times x}} \right] \quad (5)$$

式中,  $Y$  为垂直于地下水流方向回填区的宽度,  $\text{m}$ ;  $\delta_{gw}$  为地下水混合层厚度,  $\text{m}$ ;  $\alpha_y$  为地下水横向弥散系数,  $\alpha_y = Y/30$ ,  $\text{m}$ ;  $\alpha_z$  为垂向弥散系数,  $\alpha_z = \delta_{gw}/200$ ,  $\text{m}$ ;  $x$  为预测点沿污染源中心线距污染源的垂直距离,  $\text{m}$ ;  $c_x$  为预测点  $x$  处污染物浓度,  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ; 其余符号同前.

## 2.3 参数取值

三相平衡模型中土壤参数  $\rho$ 、 $\theta_w$ 、 $\theta_a$  通过现场实测, 分别为  $2.1 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.31$ 、 $0.03$ , 土壤中各污染物浓度取值为拟定的修复目标(即表 1 中的浓度). 第二层次预测模型求解过程中所用的非饱和带各层土壤的参数通过现场采样分析获取, 如表 2 所示, 淋溶液中污染物浓度通过式(1)求取.

表 2 第二层次模型参数取值

Table 2 Parameter values for tiered II prediction model

土层	残留含水量 $Q_r$	饱和含水量 $Q_s$	$\rho/\text{m g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$k/\text{cm} \cdot \text{s}$	$D$	$f_{oc}$
回填土层	0.034	0.46	2 100	$4.87 \times 10^{-5}$	4.6	0.001 5
粉土层	0.034	0.46	2 010	$5.01 \times 10^{-5}$	4.6	0.001 5
黏土层	0.068	0.38	1 980	$7.70 \times 10^{-6}$	2.6	0.002 5
粉土层	0.034	0.46	2 000	$1.21 \times 10^{-4}$	4.6	0.001 5
黏土层	0.068	0.38	1 980	$1.07 \times 10^{-5}$	2.6	0.002 5

$10^{-4} \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $27 \text{ m}$ , 进入地下水中污染物浓度  $c_{w0}$  通过式(2)及式(3)求取. 多米尼克模型参数  $Y$ 、 $\delta_{gw}$ 、 $x$  取

值通过现场测试获取,分别为50 000 cm、2 700 cm、700 m,  $c_0$  通过式(4)求取。预测过程中各污染物理化参数  $K_{oc}$ 、 $H$ 、 $D_w$ 、 $D_a$  的取值参见文献[6]。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 第一层次预测结果

采用三相平衡模型预测的回填土层土壤孔隙淋溶液中污染物浓度如表3所示。

表3 第一层次预测结果/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$   
Table 3 Prediction results of tiered I/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

序号	污染物	预测结果	标准
1	1,2-二氯乙烷	683	30 <sup>[24]</sup>
2	苯	580	10 <sup>[24]</sup>
3	四氯乙烯	8 073	40 <sup>[24]</sup>
4	四氯化碳	730	2 <sup>[24]</sup>
5	1,1,2-三氯乙烷	1 579	3 <sup>[25]</sup>
6	1,1,2,2-四氯乙烷	469	1 <sup>[25]</sup>
7	1,1-二氯乙烯	29 051	30 <sup>[24]</sup>
8	1,1-二氯乙烷	131 119	30 <sup>[25]</sup>
9	茚并(1,2,3-cd)芘	0.058	0.2 <sup>[25]</sup>
10	二苯并(a,h)蒽	0.011	0.3 <sup>[25]</sup>

由表3可知,采用保守的三相平衡模型预测回填土层孔隙淋溶液中仅茚并(1,2,3-cd)芘及二苯并(a,h)蒽未超过评价标准。主要原因在于这两种污染物的碳分配系数( $K_{oc}$ )较高,相比其余几种污染物,更易吸附于土壤颗粒相而不易解吸溶解于淋溶液中,其垂向迁移因此而大幅度降低,这与已有研究结果类似<sup>[26-28]</sup>。由于污染物溶于孔隙淋溶液是决定其垂向迁移特性的首要条件,因此对于这两种污染物,当采用三相平衡模型预测其溶解于孔隙淋溶液中的浓度已低于评价标准时,可判定其对回填区地下水不会造成污染。对于其余8种污染物,由于其自回填土层迁移至地下水层需穿越一定厚度的非饱和土壤层,为确定其对地下水是否造成污染,需考虑非饱和土壤层对污染物的吸附截留作用,以预测其到达地下水层的浓度,即需开展第二层次预测评价。

#### 3.2 第二层次预测结果

针对第一层次预测结果超标的8种污染物,将采用一维水分-溶质运移模型进行第二层次预测,结果如表4所示。

由表4可知,考虑非饱和带土壤吸附截留作用后,到达地下水水面的1,2-二氯乙烷及苯的浓度已低于相应标准。因此,对于这2种污染物,可判定执行拟定修复目标达标修复后将土壤回填至回填区不会对地下水造成污染。其余6种污染物到达地下

水水面处的浓度依然超过相应标准,需要进行更高层次的预测评估。

表4 第二层次预测结果/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$   
Table 4 Prediction results of tiered II/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

序号	污染物	预测结果	标准
1	1,2-二氯乙烷	8	30 <sup>[24]</sup>
2	苯	6	10 <sup>[24]</sup>
3	四氯乙烯	72	40 <sup>[24]</sup>
4	四氯化碳	6	2 <sup>[24]</sup>
5	1,1,2-三氯乙烷	25	3 <sup>[25]</sup>
6	1,1,2,2-四氯乙烷	10	1 <sup>[25]</sup>
7	1,1-二氯乙烯	213	30 <sup>[24]</sup>
8	1,1-二氯乙烷	1 241	30 <sup>[25]</sup>

#### 3.3 第三层次预测结果

针对第二层次预测结果超标的6种污染物,将进一步预测污染物经过地下水混合稀释后的浓度,结果如表5所示。

表5 第三层次预测结果/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$   
Table 5 Prediction results of tiered III/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

序号	污染物	预测结果	标准
1	四氯乙烯	12	40 <sup>[24]</sup>
2	四氯化碳	1	2 <sup>[24]</sup>
3	1,1,2-三氯乙烷	4	3 <sup>[25]</sup>
4	1,1,2,2-四氯乙烷	2	1 <sup>[25]</sup>
5	1,1-二氯乙烯	36	30 <sup>[24]</sup>
6	1,1-二氯乙烷	207	30 <sup>[25]</sup>

由表5可知,虽然到达地下水面的四氯乙烯及四氯化碳浓度超标评价标准,但考虑地下水的混合稀释后,其浓度值已低于相应的评价标准,因此,也可判定执行拟定修复目标达标修复后土壤回填不会对回填区地下水造成污染。对于其余4种污染物,即使考虑地下水的混合稀释作用,其浓度依然超过评价标准,需进一步预测其沿地下水流向的浓度变化以及到达当前距离评估区最近的居民饮用水井(敏感点)处污染浓度。

#### 3.4 第四层次预测结果

针对第三层次预测结果依然超标的4种污染物,将采用多米尼克溶质运移模型预测其沿地下水流向的浓度分布以及到达地下水下游700 m居民饮用水井处的浓度。这4种污染物的多米尼克预测结果如图3所示。

由图3可知,这4种污染物随着距离的增加,浓度逐渐降低。其中,1,1-二氯乙烯、1,1,2-三氯乙烷及1,1,2,2-四氯乙烷浓度均已降低至标准值以下,分别为9、1和0.5  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。但是,由于初始浓度较高,运移至目标敏感点处1,1-二氯乙烷的浓度为53

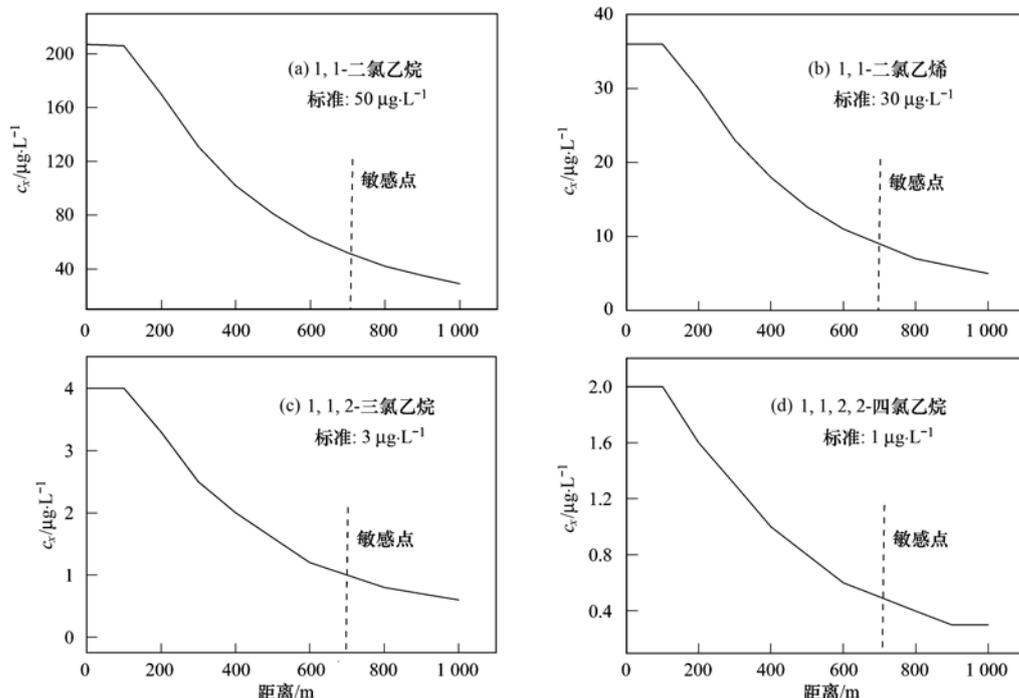


图3 多米尼克模型预测结果

Fig. 3 Prediction results of Deminico model

$\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 依然略超过标准  $50\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ .

### 3.5 评估结果

综合以上不同层次预测结果可知, 回填土壤如果执行拟定修复目标(表1)修复达标后回填, 土壤中的茚并(1,2,3-cd)芘及二苯并(a,h)蒽由于具有较高的碳分配系数, 更易吸附于回填土颗粒相中, 难以随淋溶液进入地下水而造成污染. 1,2-二氯乙烷及苯虽然在回填土层淋溶液中浓度超过相应标准, 但经过回填区非饱和带土壤的吸附截留, 到达地下水水面处的浓度也低于相应标准, 所以这两种污染物执行拟定修复目标达标修复后土壤回填对回填区地下水也不会造成污染. 四氯乙烯及四氯化碳经过非饱和带的吸附截留以及地下水的混合稀释后, 浓度也已低于相应标准. 进一步考虑饱和含水层的吸附截留及对流弥散, 到达下游 700 m 饮用水井处 1,1-二氯乙烯、1,1,2-三氯乙烷及 1,1,2,2-四氯乙烷已低于相应水质标准, 但是, 由于 1,1-二氯乙烷的初始浓度较高, 其在饮用水井处的预测浓度依然超标, 需对拟定修复目标进行调整或采取一定的污染控制措施, 预防地下水受到污染.

## 4 结论

(1) 当仅开展第一层次评估时, 除茚并(1,2,3-cd)芘及二苯并(a,h)蒽外, 如果直接执行保护人体

健康的修复目标, 土壤中其余污染物将可能污染目标用水点地下水.

(2) 当开展到第二层次评估时, 由于考虑了回填区非饱和带土壤对污染物的吸附截留, 仅四氯乙烯、四氯化碳、1,1,2-三氯乙烷、1,1,2,2-四氯乙烷、1,1-二氯乙烷、1,1-二氯乙烯这 6 种污染物可能污染回填区地下水.

(3) 当开展到第三层次时, 由于同时考虑到非饱和带土壤的吸附截留及地下水的混合稀释, 仅四氯乙烯、四氯化碳、1,1,2-三氯乙烷、1,1,2,2-四氯乙烷这 4 种污染物可能污染回填区地下水.

(4) 当开展到第四层次时, 仅 1,1-二氯乙烷可能污染目标用水点地下水, 仅需对这种污染物的拟定修复目标进行相应调整.

(5) 随着评估层次的深入, 虽然所需开展的预测工作及获取的场地参数增加, 但是所预测的污染物浓度越接近其运移至目标用水点的浓度, 使得评估结果也越来越客观, 需要调整修复目标的污染物数量逐渐减少, 污染防治成本将降低.

### 参考文献:

- [1] 孙俊, 陈晓东, 常文越, 等. 搬迁企业环境遗留问题分析及修复对策研究[J]. 环境保护科学, 2003, 29(4): 40-42.
- [2] 张军. 某污染企业搬迁替代方案的优化选择[J]. 中国公共卫生, 2005, 21(5): 600-601.
- [3] 中华人民共和国环境保护部. 污染场地土壤环境管理暂行办法

- 法(征求意见稿)[S]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2009.
- [ 4 ] DB11/T 656-2009, 场地环境评价导则[S].
- [ 5 ] 姜林, 龚宇阳, 张丽娜, 等. 场地与生产设施环境风险评价及修复验收手册[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- [ 6 ] 中华人民共和国环境保护部. 污染场地风险评估技术导则(征求意见稿)[S]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2009.
- [ 7 ] 郭观林, 王世杰, 施烈焰, 等. 某废弃化工场地 VOC/SVOC 污染土壤健康风险分析[J]. 环境科学, 2010, **31**(2): 397-402.
- [ 8 ] 余世清, 唐伟, 卢滨. 某农药厂废弃场地六六六和滴滴涕污染分布特征及风险评价[J]. 环境科学, 2011, **32**(9): 2645-2653.
- [ 9 ] 武晓峰, 谢磊. Johnson & Ettinger 模型和 Volasoil 模型在污染物室内挥发风险评价中的应用和比较[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(4): 984-991.
- [ 10 ] 湛宏伟, 陈鸿汉, 刘菲, 等. 污染场地健康风险评价的实例研究[J]. 地学前沿, 2006, **13**(1): 230-235.
- [ 11 ] 马志飞, 安达, 姜永海, 等. 某危险废物填埋场地下水污染预测及控制模拟[J]. 环境科学, 2012, **33**(1): 64-70.
- [ 12 ] 王树芳, 王丽亚, 王晓红, 等. 溶质迁移模型在地下水有机污染源识别中的应用[J]. 环境科学, 2012, **33**(3): 760-770.
- [ 13 ] 季文佳, 杨子良, 王琪, 等. 危险废物填埋处置的地下水环境健康风险评价[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(4): 548-552.
- [ 14 ] 叶永红, 宁立波. 石油类污染物在包气带中的迁移预测——以兰州西固商业石油储备库为例[J]. 环境科学与技术, 2009, **32**(11): 186-200.
- [ 15 ] 薛强, 梁冰, 刘建军, 等. 石油污染组分在包气带土壤中迁移的数值仿真模型及应用[J]. 系统仿真学报, 2005, **17**(11): 2589-2592.
- [ 16 ] 栾茂田, 张金利, 杨庆. 非平衡-非线性吸附情况下填埋场污染物运移分析[J]. 岩土力学, 2004, **25**(12): 1855-1861.
- [ 17 ] Carey M A, Marsland P A, Smith J W N. Remedial targets methodology-hydrogeological risk assessment for land contamination[S]. London: UK Environmental Agency, 2006.
- [ 18 ] HYDRUS1D-4.08, The HYDRUS- 1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media[S].
- [ 19 ] David C. Composite mode for leachate migration with transformation [ S ]. Washington DC: US Environmental Protection Agency, 2003.
- [ 20 ] DHI-WASY. FEFLOW 6 Finite element subsurface flow and transport simulation system-user manual [ S ]. Berlin: DHI-WASY, 2010.
- [ 21 ] Waterloo hydro-geologic, Inc. WHI UnSat suite tutorial: VLEACH[S]. USA: Schlumberger Water Services, 2000.
- [ 22 ] Alabama Department of Environmental Management ( ADEM ). Risk-based corrective action guidance manual [ S ]. ADEM: 2008.
- [ 23 ] ASTM E2081-00, 2004. Standard guide for risk-based corrective Action[S].
- [ 24 ] GB 5749-2006, 中华人民共和国生活饮用水卫生标准[S].
- [ 25 ] New Jersey Department of Environmental Protection. Ground water quality Standards [ S ]. New Jersey: Department of Environmental Protection, 2010.
- [ 26 ] Tang L L, Tang X Y, Zhu Y G, *et al.* Contamination of polycyclic aromatic hydrocarbons ( PAHs ) in urban soils in Beijing, China[J]. Environment International, 2005, **31**(6): 822-828.
- [ 27 ] 钟茂生, 姜林, 夏天翔, 等. 基于土壤中多环芳烃解吸特性的生物修复效果评价[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(3): 726-730.
- [ 28 ] 何奉朋, 张枝焕, 汪淑洁. 多环芳烃在土壤剖面中迁移行为的土柱淋滤模拟研究[J]. 环境科学学报, 2009, **29**(5): 988-996.

## CONTENTS

Estimation of PM <sub>2.5</sub> over Eastern China from MODIS Aerosol Optical Depth Using the Back Propagation Neural Network .....	GUO Jian-ping, WU Ye-rong, ZHANG Xiao-ye, <i>et al.</i> ( 817 )
Comparison of Atmospheric Particulate Matter and Aerosol Optical Depth in Beijing City .....	LIN Hai-feng, XIN Jin-yuan, ZHANG Wen-yu, <i>et al.</i> ( 826 )
Impacts of Meteorological Factors on Atmospheric Methane Mole Fractions in the Background Area of Yangtze River Delta .....	PU Jing-jiao, XU Hong-hui, GU Jun-qiang, <i>et al.</i> ( 835 )
Dispersion and Analysis of Odor Pollution in Landfill Area Under the Enclosed Operation Condition .....	LU Peng, WU Shi-xing, DAI Zhi-feng, <i>et al.</i> ( 842 )
Distribution Characteristics and Sea-Air Fluxes of Volatile Halocarbons in the East China Sea in Winter .....	HE Zhen, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng ( 849 )
Intra- and Inter-annual Variabilities of Particulate Organic Matter in the Mires Bay from 2000 to 2010 .....	LI Xu-lu, ZHOU Yi-pin, XIA Hua-yong ( 857 )
Phytoplankton Assemblages and Their Relation to Environmental Factors by Multivariate Statistic Analysis in Bohai Bay .....	ZHOU Ran, PENG Shi-tao, QIN Xue-bo, <i>et al.</i> ( 864 )
Characteristics and Evolution of Hydrochemical Compositions of Freshwater Lake in Tibetan Plateau .....	WANG Peng, SHANG Ying-nan, SHEN Li-cheng, <i>et al.</i> ( 874 )
Estimation of Nonpoint Source Pollutant Loads and Optimization of the Best Management Practices (BMPs) in the Zhangweinan River Basin .....	XU Hua-shan, XU Zong-xue, LIU Pin ( 882 )
An Object-Oriented Intelligent Engineering Design Approach for Lake Pollution Control .....	ZOU Rui, ZHOU Jing, LIU Yong, <i>et al.</i> ( 892 )
Contribution of Plant Litters to Sediments Organic Matter in Julong River Estuary Wetland .....	LUO Zhuan-xi, QIU Zhao-zheng, WANG Zhen-hong, <i>et al.</i> ( 900 )
Application of Tiered Approach to Assess the Impact of Backfilling Remediated Soil on Groundwater .....	ZHONG Mao-sheng, JIANG Lin, YAO Jue-jun, <i>et al.</i> ( 907 )
Removal of Nitrate from Groundwater Using Permeable Reactive Barrier .....	LI Xiu-li, YANG Jun-jun, LU Xiao-xia, <i>et al.</i> ( 914 )
Research on Pollution Load of Sediments in Storm Sewer in Beijing District .....	LI Hai-yan, XU Bo-ping, XU Shang-ling, <i>et al.</i> ( 919 )
Occurrence and Risk Assessment of Five Selected PPCPs in Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water .....	WEN Zhi-hao, DUAN Yan-ping, MENG Xiang-zhou, <i>et al.</i> ( 927 )
Microbial Risk Assessment of Urban Water Bodies for Aesthetical and Recreational Uses .....	SUN Fu, SHA Jing, ZHANG Yi-fan, <i>et al.</i> ( 933 )
Study on Removal of Di-(2-Ethylhexyl) Phthalate by Using of Small-Scale Biological Aerated Filter .....	LI Wei, ZHAO Jing, YU Jian, <i>et al.</i> ( 943 )
Mechanism of Membrane Fouling and Filtration Characteristics in a Membrane Bioreactor for Industrial Wastewater Treatment .....	FAN Ju-hong, YU Su-lin, ZHANG Pei-shuai, <i>et al.</i> ( 950 )
Enhanced Electro-Chemical Oxidation of Acid Red 3R Solution with Phosphotungstic Acid Supported on $\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	YUE Lin, WANG Kai-hong, GUO Jian-bo, <i>et al.</i> ( 955 )
Degradation Kinetics of Activated Carbon Catalyzed Persulfate Oxidation Orange G .....	YANG Mei-mei, ZHOU Shao-qi, LIU Dan, <i>et al.</i> ( 962 )
Study on the Start-up of the Anaerobic Baffled Reactor for Treating Alkali-deweying and Dyeing-printing Wastewater .....	YANG Bo, ZHONG Qi-jun, LI Fang, <i>et al.</i> ( 968 )
Study on the Pollutants Removal Performance Along the Advanced Treatment in Tannery Wastewater by O <sub>3</sub> -BAF .....	YU Bin, LIU Rui, CHENG Jia-di, <i>et al.</i> ( 974 )
Effect of Pilot UASB-SFSBR-MAP Process for the Large Scale Swine Wastewater Treatment .....	WANG Liang, CHEN Chong-jun, CHEN Ying-xu, <i>et al.</i> ( 979 )
Cultivation of Aerobic Granular Sludge with Municipal Wastewater and Studies on Its Characteristics Under the Continuous Flow .....	NIU Shu, DUAN Bai-chuan, ZHANG Zuo-li, <i>et al.</i> ( 986 )
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources ( I ) : Model Constitution .....	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang ( 993 )
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources ( II ) : Process Simulation .....	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang ( 998 )
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources ( III ) : Model Application .....	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang ( 1004 )
Comparative Study on Water-air CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> Flux in Two Tributaries in the Three Gorges Reservoir, China .....	LI Zhe, BAI Lei, GUO Jin-song, <i>et al.</i> ( 1008 )
Factors Influencing the Spatial Variability in Soil Respiration Under Different Land Use Regimes .....	CHEN Shu-tao, LIU Qiao-hui, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> ( 1017 )
Differences in Soil Respiration Between Cropland and Grassland Ecosystems and Factors Influencing Soil Respiration on the Loess Plateau .....	ZHOU Xiao-gang, ZHANG Yan-jun, NAN Ya-fang, <i>et al.</i> ( 1026 )
Application and Benefit Evaluation of Tiered Health Risk Assessment Approach on Site Contaminated by Benzene .....	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, LIANG Jin, <i>et al.</i> ( 1034 )
History of Heavy Metal Pollution from Tidal Flat in Haizhou Bay .....	ZHANG Rui, ZHANG Fan, LIU Fu-cheng, <i>et al.</i> ( 1044 )
Accumulation, Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Surface Sediment of Caohai Plateau Wetland, Guizhou Province .....	ZHANG Qing-hai, LIN Chang-hu, TAN Hong, <i>et al.</i> ( 1055 )
Assessment and Correlation Analysis of Heavy Metals Pollution in Soil of Dajinshan Island .....	CHENG Fang, CHENG Jin-ping, SANG Heng-chun, <i>et al.</i> ( 1062 )
Fraction Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Stream Sediments from a Typical Nonferrous Metals Mining City .....	LI Ru-zhong, JIANG Yan-min, PAN Cheng-rong, <i>et al.</i> ( 1067 )
Contamination and Health Risk for Heavy Metals via Consumption of Vegetables Grown in Fragmentary Vegetable Plots from a Typical Nonferrous Metals Mine City .....	LI Ru-zhong, PAN Cheng-rong, XU Jing-jing, <i>et al.</i> ( 1076 )
Correlativity Study of the Distribution of Soil Magnetic Susceptibility and the Heavy Metal Contents in Xi'an City .....	CHEN Xiu-duan, LU Xin-wei, YANG GUANG ( 1086 )
Distribution Characteristics and Environmental Significance of Heavy Metals in Soil Particle Size Fractions from Tropical Forests in China .....	GONG Cang, XU Dian-dou, CHENG Hang-xin, <i>et al.</i> ( 1094 )
Study on Phosphorus Adsorption Characteristic of Sediments in an Ecological Ditch .....	ZHANG Shu-nan, JIA Zhao-yue, XIAO Run-lin, <i>et al.</i> ( 1101 )
Fractions and Adsorption Characteristics of Phosphorus on Sediments and Soils in Water Level Fluctuating Zone of the Pengxi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir .....	SUN Wen-bin, DU Bin, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> ( 1107 )
Sorption Behavior of Triton X-100 on Loess and Affecting Factors .....	ZHONG Jin-kui, ZHAO Bao-wei, ZHU Kun, <i>et al.</i> ( 1114 )
Residual Levels in Air, Soil and Soil-Air Exchange of Organochlorine Pesticides in Hami Region of Xinjiang and Its Potential Ecological Risk .....	MA Zi-long, MAO Xiao-xuan, DING Zhong-yuan, <i>et al.</i> ( 1120 )
Levels and Sources of Decabromodiphenyl Ether and Dechlorane Plus in Xining and Tianjun, Qinghai Province, China .....	HE Chang, JIN Jun, MA Zhao-hui, <i>et al.</i> ( 1129 )
Vertical Distribution of PBDEs and DL-PCBs in Sediments of Taihu Lake .....	MA Zhao-hui, JIN Jun, QI Xue-kui, <i>et al.</i> ( 1136 )
Characteristics of Organic Pollutants in the Sediments from a Typical Electronics Industrial Zone .....	LIU Jin, DENG Dai-yong, XU Mei-ying, <i>et al.</i> ( 1142 )
Emission Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Exhaust Particles from a Diesel Car .....	TAN Pi-qiang, ZHOU Zhou, HU Zhi-yuan, <i>et al.</i> ( 1150 )
Characterization of PAHs in Fly Ashes from Coke Production .....	MU Ling, PENG Lin, LIU Xiao-feng, <i>et al.</i> ( 1156 )
Comparison of PAHs Distribution in Stabilized Sludge by Sludge Drying Bed and Reed Bed .....	CUI Yu-bo, SUN Hong-jie, RAN Chun-qiu, <i>et al.</i> ( 1161 )
Effects of Adsorbents on Partitioning and Fixation of Heavy Metals in the Incineration Process of Sewage Sludge .....	LIU Jing-yong, SUN Shui-yu, CHEN Tao ( 1166 )
Environmental Toxicity of Waste Foundry Sand .....	ZHANG Hai-feng, WANG Yu-jue, WANG Jin-lin, <i>et al.</i> ( 1174 )
Construction and Properties of a Microbial Whole-cell Sensor CB10 for the Bioavailability Detection of Cr <sup>6+</sup> .....	HOU Qi-hui, MA An-zhou, ZHUANG Xu-liang, <i>et al.</i> ( 1181 )
Structure and Dynamics of Microbial Community in the Denitrifying Sulfide Removal Process .....	YU Hao, WANG Ai-jie, CHEN Chuan ( 1190 )
Effects of Physico-chemical Parameters on the Abundance of the Denitrification-associated Genes <i>nirK</i> , <i>nirS</i> and <i>nosZ</i> During Agricultural Waste Composting .....	HU Chun-xiao, CHEN Yao-ning, ZHANG Jia-chao, <i>et al.</i> ( 1196 )
Impact of PAHs on the Expression of PRDX in Earthworm ( <i>Eisenia fetida</i> ) .....	LIN Kang-li, ZHENG Sen-lin, SONG Yu-fang, <i>et al.</i> ( 1204 )
Preparation of OMC-Au/L-Lysine/Au Modified Glassy Carbon Electrode and the Study on Its Detection Response to Hydroquinone and Catechol .....	ZHOU Yao-yu, TANG Lin, LI Zhen, <i>et al.</i> ( 1211 )
Risk Communication in Construction of New Nuclear Power Plant .....	HE Gui-zhen, LÜ Yong-long ( 1218 )

# 《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)

2013年3月15日 34卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 3 Mar. 15, 2013

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行