

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第4期

Vol.35 No.4

**2014**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

2008 ~2012 年上海黑碳浓度变化特征分析 ..... 王洪强,贺千山,陈勇航,亢燕铭 (1215)

乌鲁木齐市东南郊一次降雪过程的化学组成及其悬浮态颗粒形态特征 ..... 陆辉,魏文寿,崔彩霞,何清,王瑶 (1223)

典型地区大气中多溴联苯醚和新型溴代阻燃剂的水平及组成分布 ..... 吴辉,金军,王英,李明圆,何松洁,徐萌,孙一鸣 (1230)

某焦化厂周边大气 PM<sub>10</sub> 重金属来源及健康风险评价 ..... 董婷,李天昕,赵秀阁,曹素珍,王贝贝,马瑾,段小丽 (1238)

基于车流和大气污染物浓度同步增量的机动车平均排放因子估算方法 ..... 李润奎,赵彤,李志鹏,丁文军,崔晓勇,许群,宋现锋 (1245)

珠江三角洲地区硫和氮沉降临界负荷研究 ..... 孙成玲,谢绍东 (1250)

低温等离子体-生物法处理硫化氢气体研究 ..... 李华琴,何觉聪,陈洲洋,黎宝仁,黄倩茹,张再利,魏在山 (1256)

太子河流域莠去津的空间分布及风险评价 ..... 郑磊,张依章,张远,朱鲁生,王志强 (1263)

一种大批量测定沉积物微量间隙水样品中溶解态磷和铁含量的方法 ..... 王燕,朱春刚,许笛,丁士明 (1271)

外源营养盐输入后水体中营养盐浓度的时空变化 ..... 傅玲,赵凯,王国祥,欧媛,范娟,毛丽娜,张佳,韩睿明 (1278)

基于物理过程的矿区地下水污染风险评价 ..... 孙法圣,程品,张博 (1285)

重庆典型岩溶地下水系统水文地球化学特征研究 ..... 杨平恒,卢丙清,贺秋芳,陈雪彬 (1290)

重庆老龙洞地下河流域氮、磷及微生物污染调查研究 ..... 蓝家程,杨平恒,任坤,陈雪彬,徐昕,胡宁 (1297)

苦草 (*Vallisneria spiralis*) 根系对沉积物中各形态磷的影响 ..... 李振国,王国祥,张佳,马久远,魏宏农,俞振飞 (1304)

循环廊道湿地中氮归趋过程模拟研究 ..... 彭剑峰,宋永会,袁鹏,张雪妍,胡小明 (1311)

不同环境因素下太湖中四环素的自然消减 ..... 段伦超,王凤贺,纪莹雪,张帆,赵斌,王国祥 (1318)

再生水中 5 种抗生素抗性菌的紫外线灭活及复活特性研究 ..... 黄晶晶,汤芳,席劲璇,庞宇辰,胡洪营 (1326)

二级处理出水的 UV-TiO<sub>2</sub> 消毒及大肠杆菌和粪肠球菌光复活试验 ..... 王西峰,龚昕,胡晓莲,任伯帜 (1332)

水中 C<sub>60</sub> 纳米颗粒的稳定性研究 ..... 方华,沈冰冰,荆洁,陆继来,王媛 (1337)

XDLVO 理论解析不同离子条件下海藻酸钠微滤膜污染 ..... 赵应许,纵瑞强,高欣玉,谢慧君,殷永泉,梁爽 (1343)

纳米零价铁催化过氧化氢强化修复 4-氯硝基苯污染地下水的研究 ..... 付融冰 (1351)

共存氯苯类同系物对六氯苯厌氧降解活性的影响 ..... 王琪,刘辉,姜林,唐军 (1358)

硫酸盐还原生物滤池对含镉废水去除效果试验研究 ..... 吴宣,谭科艳,胡希佳,顾远,杨宏 (1366)

基于氮平衡原理对南方污水处理厂中试脱氮工艺调控策略研究 ..... 姜应和,刘佩炬,王磊,田中凯,刘小英 (1372)

模拟电镀污泥阴离子浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响 ..... 陈燕,黄芳,谢鑫源 (1377)

电活性生物膜介导 Cu<sup>2+</sup> 生物还原的试验研究 ..... 刘毅,周顺桂,袁勇,刘志 (1384)

模拟废旧线路板生物浸出液中铜的回收 ..... 程丹,朱能武,吴平霄,邹定辉,邢翊佳 (1391)

填埋垃圾浸提液与地下水污染物组成差异及成因 ..... 何小松,余红,席北斗,崔东宇,潘红卫,李丹 (1399)

化学合成施氏矿物与 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 共存体系下光化学处理垃圾渗滤液的研究 ..... 王鹤茹,宋永伟,徐峙辉,崔春红,周立祥 (1407)

处理 BPA 模拟废水的 SBR 工况参数对污泥有机毒性的影响研究 ..... 杨娜,陈秀荣,林逢凯,黄华,章斐,赵骏,丁毅 (1414)

剩余污泥厌氧消化甲烷生成势与产甲烷菌群多样性的比较研究 ..... 董慧岭,季民 (1421)

锰氧化菌 *Aminobacter* sp. H1 的分离鉴定及其锰氧化机制研究 ..... 晏平,姜理英,陈建孟,何智敏,肖少丹,蒋铁锋 (1428)

1 株铁基质自养反硝化菌的脱氮特性 ..... 王弘宇,杨开,张倩,季斌,陈丹,孙宇翀,田俊 (1437)

碘普罗胺降解菌 *Pseudomonas* sp. I-24 共代谢降解性能研究 ..... 徐冰洁,高品,薛昱,何梦琦,吴凡 (1443)

利用流式细胞术研究鞘氨醇单胞菌 GY2B 降解非过程中细菌表面特性的变化 ..... 张梦露,党志,伍凤姬,梁旭军,郭楚玲,卢桂宁,杨琛 (1449)

毒性有机物 BPA 与普通小球藻的相互影响特性研究 ..... 陈善佳,陈秀荣,闫龙,赵建国,章斐,江子建 (1457)

缺镁胁迫对普通小球藻光合生理及油脂积累的影响 ..... 王珊,赵树欣,魏长龙,于水燕,史吉平,张保国 (1462)

微囊藻毒素对水稻根系生长和抗氧化系统的影响 ..... 王妮敏,邓琦,邹华,梁婵娟 (1468)

东北春大豆品种东生 1 号对臭氧胁迫的响应 ..... 张巍巍,王光华,王美玉,刘晓冰,冯兆忠 (1473)

生物结皮的发育演替与微生物生物量变化 ..... 吴丽,张高科,陈晓国,兰书斌,张德禄,胡春香 (1479)

老化土壤中铅对赤子爱胜蚓生长及繁殖的影响 ..... 陈丽红,刘征涛,方征,王晓南,王婉华 (1486)

土壤重金属镉标准值差异比较研究与建议 ..... 赵晓军,陆泗进,许人骥,李伯苓,吴国平,魏复盛 (1491)

藏北可可西里地区土壤元素背景值研究 ..... 柏建坤,王建力,李潮流,康世昌,陈鹏飞 (1498)

三峡库区香溪河消落带及库岸土壤重金属迁移特征及来源分析 ..... 胥焘,王飞,郭强,聂小倩,黄应平,陈俊 (1502)

浙江海宁电镀工业园区周边土壤重金属污染特征及生态风险分析 ..... 厉炯慧,翁珊,方婧,黄佳蕾,陆芳华,卢宇浩,张洪铭 (1509)

西湖景区土壤典型重金属污染物的来源及空间分布特征 ..... 张海珍,唐宇力,陆骏,周虹,徐芸茜,陈川,赵赞,王美娥 (1516)

生活垃圾焚烧厂周边土壤汞污染特征及评价 ..... 解惠婷,张承中,徐峰,李海凤,田振宇,唐琛,刘文彬 (1523)

上海滴水湖周边土壤和沉积物对磷的吸附特征 ..... 诸葛祥真,毕春娟,陈振楼,张焕焕,倪玮怡 (1531)

SDBS/Na<sup>+</sup> 对红壤胶体悬液稳定性的影响 ..... 唐颖,李航,朱华玲,田锐,高晓丹 (1540)

稳定化处理对矿渣中重金属迁移转化的影响研究 ..... 赵述华,陈志良,张太平,潘伟斌,彭晓春,车融,欧英娟,雷国建,周鼎 (1548)

藻类水体 Cd<sup>2+</sup> 毒性快速监测新方法研究 ..... 段静波,刘文清,张玉钧,赵南京,殷高方,肖雪,余晓娅,方丽 (1555)

用于 1,3-二硝基苯快速检测的免疫传感器研究 ..... 龙峰,施汉昌,王洪臣,盛建武 (1561)

Mg/Al 水滑石微波共沉淀法合成及其对 BrO<sub>3</sub><sup>-</sup> 吸附性能的研究 ..... 钟琼,李欢 (1566)

污染场地修复决策支持系统的几个关键问题探讨 ..... 廖晓勇,陶欢,阎秀兰,赵丹,林龙勇,李尤 (1576)

城市区域土壤铅含量空间变异的多尺度研究进展 ..... 杨孟,李凤英,刁一伟,吴丹 (1586)

水中细菌内毒素污染特性及检测方法研究进展 ..... 张灿,刘文君,张明露,田芳,杨毅,安代志 (1597)

六价铬细菌还原的分子机制研究进展 ..... 李斗,赵由才,宋立岩,尹雅洁,王洋清,徐中慧 (1602)

农副食品加工工业高浓度废水的厌氧膜生物反应器技术 ..... 魏源送,郁达伟,曹磊 (1613)

《环境科学》征稿简则(1427) 《环境科学》征订启事(1497) 信息(1383, 1390, 1398, 1560)

# 基于物理过程的矿区地下水污染风险评价

孙法圣, 程品, 张博\*

(吉林大学环境与资源学院, 长春 130021)

**摘要:** 目前国内外所做的地下水污染风险评价的实例研究一般都是从地下水的脆弱性研究出发, 并未过多地考虑特征污染物对污染后果的影响。脆弱性是环境对污染物的自然敏感性, 而地下水污染评价中更应当体现出污染物在地下水中的迁移分布特性。为了完善地下水污染风险评价的理论和方法, 以某尾矿区为例提出了基于物理过程的地下水污染风险评价方法, 在污染发生之前, 根据经济社会的敏感性条件和污染物将来可能的分布范围, 事先划分各个污染风险等级在含水层空间上的分布范围, 然后据此反推各个风险等级所对应的污染物源强, 以此作为地下水污染风险评价等级的划分标准, 通过对污染物在包气带和含水层中的运移进行数值模拟来评价尾矿区地下水的污染风险。结果表明, 这种基于物理过程的地下水污染风险评价方法可以给出污染物浓度和风险水平在空间和时间上的分布规律, 对于单个点状的污染场地来说, 具有详尽的风险表征方式, 优于以往基于含水层固有脆弱性指数法的评价方法, 该方法适用于现有污染场地的风险评价、场地优化选址和为场地建设提供设计参数。

**关键词:** 尾矿区; 地下水污染; 风险评价; 基于物理过程; 数值模拟

中图分类号: X523; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)04-1285-05 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.04.011

## Physical Process Based Risk Assessment of Groundwater Pollution in the Mining Area

SUN Fa-sheng, CHENG Pin, ZHANG Bo

(College of Environment and Resource, Jilin University, Changchun 130021, China)

**Abstract:** Case studies of groundwater pollution risk assessment at home and abroad generally start from groundwater vulnerability, without considering the influence of characteristic pollutants on the consequences of pollution too much. Vulnerability is the natural sensitivity of the environment to pollutants. Risk assessment of groundwater pollution should reflect the movement and distribution of pollutants in groundwater. In order to improve the risk assessment theory and method of groundwater pollution, a physical process based risk assessment methodology for groundwater pollution was proposed in a mining area. According to the sensitivity of the economic and social conditions and the possible distribution of pollutants in the future, the spatial distribution of risk levels in aquifer was ranged before hand, and the pollutant source intensity corresponding to each risk level was deduced accordingly. By taking it as the criterion for the classification of groundwater pollution risk assessment, the groundwater pollution risk in the mining area was evaluated by simulating the migration of pollutants in the vadose zone and aquifer. The result show that the risk assessment method of groundwater pollution based on physical process can give the concentration distribution of pollutants and the risk level in the spatial and temporal. For single punctuate polluted area, it gives detailed risk characterization, which is better than the risk assessment method that based on aquifer intrinsic vulnerability index, and it is applicable to the risk assessment of existing polluted sites, optimizing the future sites and providing design parameters for the site construction.

**Key words:** mining area; groundwater pollution; risk assessment; physical processes based; numerical simulation

地下水污染风险评价作为地下水合理开发、利用和保护的一项基础性工作, 已经成为地下水管理与污染防治的重要手段<sup>[1]</sup>。地下水污染风险的概念是地下水脆弱性概念的延伸<sup>[2,3]</sup>, 是在地下水脆弱性研究不断深化的基础上发展而来的。迄今为止, 对地下水污染风险的概念尚未统一。Finizio 等<sup>[4]</sup>认为地下水污染风险是地下水环境中污染事件发生的可能性; Brian 等<sup>[5]</sup>认为地下水污染风险是含水层污染脆弱性与人类活动造成的污染负荷之间相互作用的结果; 周仰效等<sup>[6]</sup>则把地下水污染风险定义为地下水污染的概率与污染后果之乘积。从上述定义可

以看出, 地下水污染风险是由含水层本身的抗污能力和人类活动所产生的污染负荷共同造成的, 它包含两个层次的内容<sup>[7,8]</sup>: 一是含水层的固有脆弱性, 可以反映出地下水系统抵抗污染的能力; 二是污染危害性, 表征了污染物对含水层的影响程度。地下水污染风险评价与脆弱性评价和危害性评价有着密切的联系。目前国内外所做的地下水风险评价的实例

收稿日期: 2013-08-09; 修订日期: 2013-11-13

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(2011467010)

作者简介: 孙法圣(1988~), 男, 硕士研究生, 主要研究地下水污染控制与修复, E-mail: sunfasheng01@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: hongmeizhangbo@163.com

研究一般都是从地下水脆弱性研究出发,并未过多地考虑特征污染物对污染后果的影响<sup>[9~14]</sup>,绝大多数的地下水污染风险评价方法建立在表征含水层固有脆弱性的指数法基础上<sup>[15,16]</sup>,适用于区域尺度上的决策分析<sup>[17,18]</sup>.

然而,脆弱性评价并不能解释污染物的属性特征,也不能预测污染物将来的分布.脆弱性是环境对污染物的自然敏感性<sup>[19~21]</sup>,而地下水污染评价中更应当体现出污染物在地下水中的迁移分布特性.例如,对单个点状的污染场地来说,脆弱性评价不能给出污染晕的预测和风险级别在时间和空间上的分布.相对比而言,基于过程的物理模型可以模拟水流系统携带污染物在含水层中的运移、介质之间的相互作用、自身的降解和衰减过程以及污染物在包气带和含水层中的时空分布,非常适合对地下水环境受体进行风险性评价.鉴于此,田华<sup>[22]</sup>提出了基于物理过程的地下水污染风险评价方法的概念,但没有将之简化为一种简单易行的方法<sup>[23,24]</sup>.

为了完善地下水污染风险评价的理论和方法,本研究以某尾矿区为例,提出了基于物理过程的地下水污染风险评价方法.在污染未发生之前,根据经济社会的敏感性条件和污染物将来可能的分布范围,事先划分各个污染风险等级在含水层空间上的分布范围,然后据此反推各个风险等级所对应的污染物源强,以此作为地下水污染风险评价的等级划分标准,最后进行风险评价.换言之,这个评价标准是动态的.

## 1 实验方法

污染物的类型、毒性、负荷、运移和分布应当包含在地下水污染的风险评价之中,前人在进行地下水污染风险评价中,提出了综合考虑这些因素的

基于指数法的公式<sup>[25~27]</sup>.本研究认为,某一特定危害物的类型、毒性与浓度分布之间的关系已经在国家水质标准中反映出来(例如 EPA 的地下水质量标准,或者地下水环境质量标准 GB-T 14848-93<sup>[28]</sup>).环境脆弱性的影响因素如含水层岩性、非饱和介质影响、渗透系数、土壤特征等的综合影响也通过数值模拟有所体现,因此不需要把危害物的类型、毒性、浓度分布这 3 个因素以及含水层固有脆弱性按照指数法进行加权求和,应当通过物理模型进行数值仿真模拟,通过污染物浓度扩散的时空关系来划分风险性.以污染源持续释放的情况为例,当污染物进入含水层后,如果污染晕持续扩大,或者污染晕扩散范围已经危害到了周边水源地或敏感区,则定义风险级别为高;当污染晕扩散范围较大,但没有影响环境敏感区,则定义风险级别为较高;当污染物有一定扩散,形成较明显的污染晕,但没有影响周边人民的生活,则定义风险级别为中等;当污染物扩散较小,污染晕只是分布在污染源附近,地下水水质有恶化,且超过了地下水Ⅲ类标准,则定义风险级别为较低;如果污染物没有扩散,则定义风险级别为低.

通过分析研究区的水文地质条件,建立水文地质概念模型,在此基础上建立数学模型并利用实际观测资料进行模型识别,最后对污染场地释放的污染物在地下水中的迁移特性进行模拟预测.考虑到研究区的环境敏感性和承受能力,根据风险级别,通过模型试算分别反推求得污染场地污染物进入饱水带的源强  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$ 、 $C_5$ ,此源强即为尾矿区地下水污染风险性评价的标准,风险等级与污染源强的对应关系如表 1 所示,然后把用 HYDRUS-1D 模拟得出的由包气带进入地下水的污染物源强与表 1 对比,得出尾矿区地下水污染风险等级.

表 1 风险等级与污染源强之间的关系

Table 1 Relationships between risk evaluation level and the pollution source intensity

污染特征	污染物没有扩散	污染物扩散较小,污染晕只是分布在污染源附近	污染物有一定扩散,形成较明显的污染晕,但没有影响周边人民的生活	污染物扩散范围较大,但没有影响环境敏感区	污染晕持续扩大,或者污染晕扩散范围已经影响到了周边水源地或敏感区
风险等级	低	较低	中等	较高	高
污染源强 $C$	$C_1 \leq C < C_2$	$C_2 \leq C < C_3$	$C_3 \leq C < C_4$	$C_4 \leq C < C_5$	$C \geq C_5$

## 2 研究区概况

某尾矿区地处山前冲洪积倾斜平原,地势西高东低,南、西、北三面环山,本区气候干旱,降水稀

少,渺无人烟,水文网不发育.该区有大型的有色冶金、化工联合企业,主要生产砷等稀有化工产品.目前废水总排量大约为  $6\ 200\ \text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ,排水中含砷(主要为砷酸根)等重金属离子,盐分以  $\text{SO}_4^{2-}$  为主.

根据尾矿区的钻孔资料,将包气带概化为一维非均质各向同性模型,包气带平均厚度约 75 m,自上而下分别为卵石层、中粗砂层、卵石层、中粗砂层、中粗砂层。废水经库底排入地下水,地下水类型为第四系松散岩类孔隙水,含水层岩性为大粒度卵石及砂砾石,含水层厚度为 100 ~ 120 m,地下水位埋深 60 ~ 90 m。根据现场抽水试验结果,含水层渗透性较好,渗透系数约为  $100 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 。地形坡度约为 30%,年平均降雨量约为  $140 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ,入渗系数约为 0.3。本区地下水的补给区位于金川河口(宁远堡)一带,补给源为大气降水和河水入渗补给,向东北方向径流,以侧向径流的方式排泄于下游的民勤盆地,人工开采也是地下水的排泄方式之一,开采量约  $0.8 \times 10^8 \sim 1.1 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ 。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 评价标准

本区为荒漠戈壁,没有人烟,根据该区的经济社会敏感因子和水文地质条件,设定了 5 个风险等级的分布范围。按照表 1 制定的标准,划定的各个风险等级的空间分布如图 1 所示。

以总砷(主要为三价砷与五价砷,不考虑不同价的砷之间的化学转化)为主要污染物,对 MODFLOW 和 MT3D 模型进行调参与试算,反推得 5 种风险等级(低、较低、中等、较高、高)的污染晕分布情况发生时对应的污染源强(废水排放量约为  $6200 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )如表 2 所示。

#### 3.2 包气带和含水层的数值模型

根据尾矿区的钻孔资料,将包气带概化为一维非均质各向同性模型,包气带厚度约 75 m,垂向概化为 5 层,分别为:卵石层(厚度 18.0 m)、中粗砂(厚度 4.5 m)、卵石层(厚度 30.9 m)、中粗砂(厚

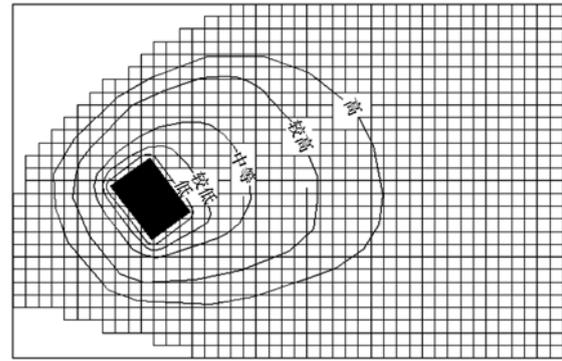


图 1 污染物分布范围与风险性等级的关系

Fig. 1 Relationships between pollutant distribution and pollution risk levels

表 2 污染风险等级与污染源强的关系

污染风险等级	低	较低	中等	较高	高
污染源强 $C/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.05	0.07	0.10	0.35	0.60

度 7.1 m)、中粗砂(厚度 14.2 m)。其中卵石层的骨架颗粒由石英砂岩和花岗岩组成,磨圆较好,级配良好,一般粒径为 20 ~ 40 mm,卵石含量占 60% ~ 70%,其它为砂砾填充,透水性好。中粗砂颗粒以石英砂岩和花岗岩为主,粒径大于 0.5 mm 的大约为 80%,其它为填充粉细砂和黏性土,约占 20%,稍湿,中密,透水性较好。为了对污染物在包气带及地下水中的迁移进行模拟,需要对各个参数进行赋值。主要参数经实际测量以及在文献中获得。本文就具有代表性的总砷进行了研究。通过查阅文献,总砷在包气带中的吸附符合 Langmuir 等温吸附方程<sup>[29]</sup>,含水层对砷化物的阻滞因子通过室内实验测量与调参确定。根据分析室内实验结果,结合野外观测数据,以及参考关于多孔介质竞争吸附多种重金属离子能力的报道<sup>[30]</sup>,确定等温吸附常数  $K_d$ 。模型主要参数如表 3 所示。

表 3 土壤水分运动参数和溶质运移参数<sup>1)</sup>

Table 3 Parameters of soil water movement and solute transport

参数	$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	$n$	$K_s/\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$	$D/\text{cm}$	$K_d/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
卵石层	0.045	0.43	14.5	2.68	250	7.5	3
中粗砂	0.057	0.41	12.4	2.28	10	7.5	3

1)  $\theta_r$  为包气带残余含水率;  $\theta_s$  为包气带饱和含水率;  $K_s$  为渗透系数;  $D$  为水力分散系数;  $K_d$  为等温吸附常数;  $n$  和  $\alpha$  均为经验参数

模拟假设尾矿废水直接经库底排入包气带,只考虑污染物垂直向下的运移过程。建立污染物在包气带中运移的数学模型,水流控制方程采用修改过的 Richards 方程,溶质的运移方程采用对流-弥散方程,采用迦辽金有限元法进行数值求解。从土壤包气带-地下水系统出发,应用 HYDRUS-1D 软件模拟污

染物在包气带中运移的过程得出污染物进入地下水时的源强。模拟和计算结果如图 2 所示,从中可知污染物在第 21 a 时穿破包气带,第 30 a 时由包气带进入地下水的总砷源强大约为  $0.11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。可见本区包气带对污染物虽然具有一定的吸附阻截能力,但不能无限制地对污染物进行阻截,根据表 2 可知

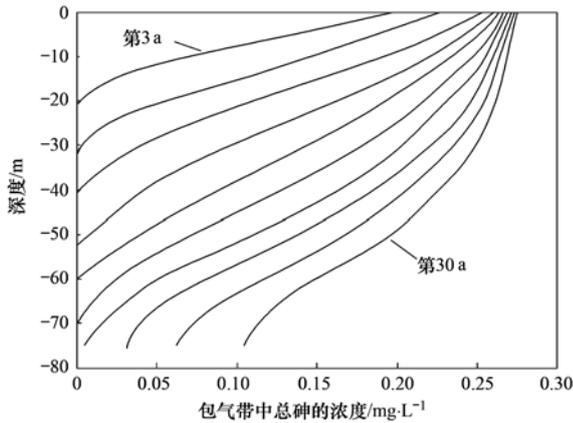


图2 包气带中的总砷浓度随埋深和时间的变化  
Fig. 2 Total arsenic concentration changes with depth and time in vadose zone

该尾矿区地下水污染风险等级为中等。

应用 MODFLOW 和 MT3D 模型对总砷在地下水中的运移进行数值模拟,通过 MODFLOW 数值模拟,得到总砷进入地下水 10 a 时该研究区的地下水水位如图 3 所示. 地下水径流方向由西南到东北,地下水位和地下水流场几乎没有改变. 通过 MT3D 数值模拟得出,总砷进入地下水 10 a 时的浓度分布如图 4 所示. 总砷污染的影响半径最大达 4.5 km,污染物的扩散面积约为 9.4 km<sup>2</sup>,该范围内的总砷浓度高于地下水 III 类标准(0.05 mg·L<sup>-1</sup>),污染源附近的总砷浓度最大达 0.10 mg·L<sup>-1</sup>,该研究区的地下水有一定程度的污染.

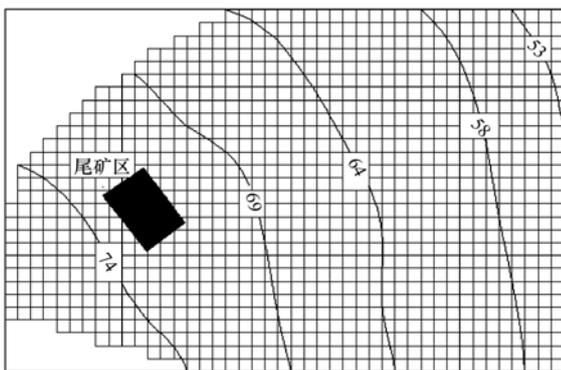


图3 第 10 a 时该研究区的地下水水位  
Fig. 3 Water table of the study area at the first 10 years

### 3.3 总体评价

该研究区的地下水污染风险等级为中等,该区的含水层以砂砾石为主,含水层有较强的渗透性能,又由于该区的水力条件比较好,水力坡度比较大,水的更替较快,污染物在含水层中的运移速度较快,污染物在含水层中得到有效的稀释而没有过高

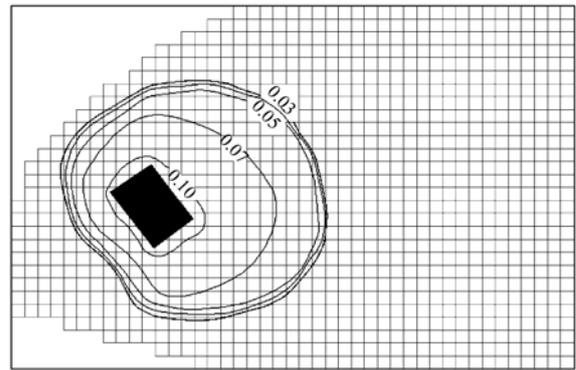


图4 第 10 a 时该研究区的总砷浓度等值线  
Fig. 4 Total arsenic concentration contours of the study area at the first 10 years

的积累,污染晕趋于稳定,这与尾矿区运行期间的地下水水质监测数据较为一致。

### 3.4 讨论

评价结果表明,要保证尾矿区地下水污染风险等级为较低,在保持日排放量不变的情形下,则源强浓度不得大于 0.10 mg·L<sup>-1</sup>,在保持排放浓度不变的情形下,日排放量不得大于 6 200 m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>. 因此,应当采用有效技术手段和工程设施,如使用可渗透反应墙技术 (PRB) 防止大量的污染物渗入到地下水中;对于新建场地可以增加黏土层厚度,铺设高密度聚乙烯防渗膜 (HDPE) 等措施防止大量的污染物渗入到地下水中.

本例中尾矿区所在地的经济社会条件比较简单,风险性影响因子较少,实践中可根据环境敏感因子的分布,自行调整不同风险等级范围的空间分布.

### 4 结论

(1) 本研究通过提出基于物理过程的地下水污染风险评价方法对某尾矿区做出风险性评价. 这种地下水污染风险评价方法,允许事先假定风险表征,然后以反演的方式反推风险的等级,该方法能够比较好地反映出当地地下水流场动态和污染物运移的情况,能够根据不同场地的水文地质条件得出不同的风险等级评价标准,具有很强的灵活性. 对于风险受体来说,可以很好地刻画风险水平的分布.

(2) 包气带是污染物进入地下水必须经过的介质,对地下水的污染源强起到至关重要的作用. 本例中包气带厚达 75 m,不可以忽略其对污染物运移的阻碍作用,基于物理过程的地下水污染风险评价方法恰到好处地应用其自身的特点,模拟了污染物进入地下水前在包气带中的迁移转化过程,能够较准

确地反映地下水污染源强的时空变化过程。

(3) 实例研究表明, 基于物理过程的地下水污染风险评价方法可以给出污染物浓度和风险水平在空间和时间上的分布规律。对于单个点状的污染场地来说, 具有详尽的风险表征方式, 优于以往基于含水层固有脆弱性指数法的风险评价, 本方法适用于现有污染场地的风险评价、新建场地优化选址和为场地建设提供设计参数。

#### 参考文献:

- [1] 董志贵. 地下水污染风险评价方法研究及软件设计开发[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2008.
- [2] 申利娜, 李广贺. 地下水污染风险区划方法研究[J]. 环境科学, 2010, **31**(4): 918-923.
- [3] 张殷钦, 刘俊民, 尹丽娜. 地下水脆弱性评价研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2012, **31**(5): 127-131.
- [4] Finizio A, Villa S. Environment risk assessment for pesticides: A tool for decision-makers [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2002, **22**(3): 235-248.
- [5] Brian M, Stephen F. Assessment of Groundwater Pollution risk [M/OL]. 2006-05-06. <http://www.inweb18.worldbank.org/essd/essd.nsf>.
- [6] 周仰效, 李文鹏. 地下水水质监测与评价[J]. 水文地质工程地质, 2008, **35**(1): 1-11.
- [7] 张伟红. 地下水污染预警研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- [8] 王俊杰, 何江涛, 陆燕, 等. 地下水污染风险评价中特征污染物量化方法探讨[J]. 环境科学, 2012, **33**(3): 771-776.
- [9] 雷静. 地下水环境脆弱性的研究[D]. 北京: 清华大学, 2002.
- [10] Saidi S, Bouri S, Ben D H, *et al.* Assessment of groundwater risk using intrinsic vulnerability and hazard mapping: Application to Souassi aquifer, Tunisian Sahel [J]. Agricultural Water Management, 2011, **98**(10): 1671-1682.
- [11] 杨彦, 于云江, 王宗庆, 等. 区域地下水污染风险评价方法研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(2): 653-661.
- [12] 李春萍, 李国学, 罗一鸣, 等. 北京市 6 座垃圾填埋场地下水环境质量的模糊评价[J]. 环境科学, 2008, **29**(10): 2729-2735.
- [13] 姚文锋. 基于过程模拟的地下水脆弱性研究[D]. 北京: 清华大学, 2007.
- [14] Gogu R C, Dassargues A. Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods [J]. Environmental Geology, 2000, **39**(6): 549-559.
- [15] Mayers L. GIS-Based approach to evaluating regional groundwater pollution potential with DRASTIC [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1990, **45**(2): 138-144.
- [16] 李胜涛, 蔡五田, 张敏, 等. 我国土壤污染风险评价的研究进展[J]. 黑龙江水专学报, 2010, **37**(2): 120-123.
- [17] 丁桑岚. 环境评价概论[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- [18] Raj K S, Manoj D, Kumar N. Groundwater contamination hazard potential rating of municipal solid waste dumps and landfills [J]. Proceedings of the International Conference on Sustainable Solid Waste Management, 2007, (9): 296-303.
- [19] 姜志群, 朱元生. 地下水污染敏感性评价中 DRASTIC 法的应用[J]. 河海大学学报, 2001, **29**(2): 100-103.
- [20] 范琦, 王桂玲, 蔺文静, 等. 地下水脆弱性评价方法的探讨及实例[J]. 水利学报, 2007, **38**(5): 601-605.
- [21] 杜朝阳, 钟华平. 地下水系统风险分析研究进展[J]. 水科学进展, 2011, **22**(3): 437-444.
- [22] 田华. 基于过程的地下水污染风险评价——以滦河三角洲为例[D]. 西安: 西安科技大学, 2011.
- [23] Lima M L, Zelaya K, Massone H. Groundwater vulnerability assessment combining the Drastic and Dyna-Clue model in the Argentine Pampas [J]. Environmental Management, 2011, **47**(5): 828-839.
- [24] 刘增超, 董军, 何连生, 等. 基于过程模拟的地下水污染风险评价方法研究[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(6): 1120-1126.
- [25] 陈翠华, 倪师军, 何彬彬, 等. 基于污染指数法和 GIS 技术评价江西德兴矿区土壤重金属污染[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2008, **38**(1): 105-111.
- [26] 滕彦国, 苏洁, 翟远征, 等. 地下水污染风险评价的选置指数法研究综述[J]. 地球科学进展, 2012, **27**(10): 1140-1147.
- [27] 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): 65-70.
- [28] 国家技术监督局. GB/T 14848-93 地下水质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.
- [29] 纪书华. 多孔介质中重金属反应性运移的数值模拟研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2009.
- [30] 孟昭福, 万丹, 邓晶, 等. Cu/Zn 复合条件下 Cd 在陕西 5 种土壤中的吸附[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(1): 71-77.

## CONTENTS

Analysis of Characteristics of Black Carbon Concentration in Shanghai from 2008 to 2012 .....	WANG Hong-qiang, HE Qian-shan, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i>	(1215)
Chemical Characteristics and Insoluble Particulates' Surface Morphology of a Snowfall Process in the Southeastern Suburb of Urumqi .....	LU Hui, WEI Wen-shou, CUI Cai-xia, <i>et al.</i>	(1223)
Comparative Study of the Level and Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers and New Brominated Flame Retardants in the Atmosphere of Typical Urban .....	.....	.....
.....	WU Hui, JIN Jun, WANG Ying, <i>et al.</i>	(1230)
Source and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Ambient Air PM <sub>10</sub> from One Coking Plant .....	DONG Ting, LI Tian-xin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i>	(1238)
Estimation of Average Traffic Emission Factor Based on Synchronized Incremental Traffic Flow and Air Pollutant Concentration .....	LI Run-kui, ZHAO Tong, LI Zhi-peng, <i>et al.</i>	(1245)
Study on Critical Loads of Sulfur and Nitrogen in the Pearl River Delta .....	SUN Cheng-ling, XIE Shao-dong	(1250)
Hydrogen Sulfide Removal by the Combination of Non-Thermal Plasma and Biological Process .....	LI Hua-qin, HE Jue-cong, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i>	(1256)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Atrazine in Taizi River Basin, China .....	ZHENG Lei, ZHANG Yi-zhang, ZHANG Yuan, <i>et al.</i>	(1263)
Development of a Method for Measuring Dissolved Reactive Phosphorus (DRP) and Dissolved Ferrous Iron in Large Batch in Pore Water Samples of Sediments with Micro-volumes .....	.....	.....
.....	WANG Yan, ZHU Chun-gang, XU Di, <i>et al.</i>	(1271)
Temporal and Spatial Variation of Water Nutrient Level After Exogenous Nutrient Input .....	FU Ling, ZHAO Kai, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i>	(1278)
Physical Process Based Risk Assessment of Groundwater Pollution in the Mining Area .....	SUN Fa-sheng, CHENG Pin, ZHANG Bo	(1285)
Hydrogeochemical Characteristics of a Typical Karst Groundwater System in Chongqing .....	YANG Ping-heng, LU Bing-qing, HE Qiu-fang, <i>et al.</i>	(1290)
Investigation of Nitrogen, Phosphorus and Microbial Contamination in Laolongdong Underground River System of Chongqing .....	LAN Jia-cheng, YANG Ping-heng, REN Kun, <i>et al.</i>	(1297)
Effects on Phosphorus Fraction Distribution in Sediment by Roots of <i>Vallisneria spiralis</i> .....	LI Zhen-guo, WANG Guo-xiang, ZHANG Jia, <i>et al.</i>	(1304)
Modeling Nitrogen Transformation in a Novel Circular-Flow Corridor Wetland .....	PENG Jian-feng, SONG Yong-hui, YUAN Peng, <i>et al.</i>	(1311)
Natural Attenuation of Tetracycline in the Water of Taihu Lake Under Different Environmental Conditions .....	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, JI Ying-xue, <i>et al.</i>	(1318)
Inactivation and Reactivation of Antibiotic-Resistant Bacteria During and After UV Disinfection in Reclaimed Water .....	HUANG Jing-jing, TANG Fang, XI Jin-ying, <i>et al.</i>	(1326)
Photoreactivation of <i>Escherichia coli</i> and <i>Enterococcus faecalis</i> in the Secondary Effluent Disinfected by UV-TiO <sub>2</sub> .....	WANG Xi-feng, GONG Xin, HU Xiao-lian, <i>et al.</i>	(1332)
Stability of C <sub>60</sub> Nanoparticles in Aquatic Systems .....	FANG Hua, SHEN Bing-bing, JING Jie, <i>et al.</i>	(1337)
Fouling Behavior of Sodium Alginate During Microfiltration at Various Ionic Compositions; XDLVO Approach .....	ZHAO Ying-xu, ZONG Rui-qiang, GAO Xin-yu, <i>et al.</i>	(1343)
Enhanced Remediation of 4-Chloronitrobenzene Contaminated Groundwater with Nanoscale Zero-valence Iron (nZVI) Catalyzed Hydrogen Peroxide (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ) .....	FU Rong-bing	(1351)
Effect of the Coexistence of Chlorobenzene Homologue on Anaerobic Degradation of Hexachlorobenzene .....	WANG Qi, LIU Hui, JIANG Lin, <i>et al.</i>	(1358)
Research on Removal Efficiency of Cd(II)-bearing Wastewater by Sulfate-reducing Biological Filter .....	WU Xuan, TAN Ke-yan, HU Xi-jia, <i>et al.</i>	(1366)
Control Strategies of Nitrogen Removal Process in a Pilot Test of the Southern WWTP Based on the Nitrogen Balance .....	JIANG Ying-he, LIU Pei-ju, WANG Lei, <i>et al.</i>	(1372)
Effect of Simulated Inorganic Anion Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> .....	CHEN Yan, HUANG Fang, XIE Xin-yuan	(1377)
Microbial Reduction of Cu <sup>2+</sup> Mediated by Electroactive Biofilms .....	LIU Yi, ZHOU Shun-gui, YUAN Yong, <i>et al.</i>	(1384)
Copper Recovery from Artificial Bioleaching Lixivium of Waste Printed Circuit Boards .....	CHENG Dan, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i>	(1391)
Difference of Contaminant Composition Between Landfill Leachates and Groundwater and Its Reasons .....	HE Xiao-song, YU Hong, XI Bei-dou, <i>et al.</i>	(1399)
Photochemical Degradation of Landfill Leachate Facilitated by Combined Schwertmannite and H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....	WANG He-ru, SONG Yong-wei, XU Zhi-hui, <i>et al.</i>	(1407)
Effects of Operating Parameters on Organic Toxicity of Sludge Treating Synthetic Bisphenol A Wastewater .....	YANG Na, CHEN Xiu-rong, LIN Feng-kai, <i>et al.</i>	(1414)
Comparative Study on Biological Methane Potential and Methanogen Biodiversity in the Anaerobic Digestion of Excess Sludge .....	DONG Hui-yu, JI Min	(1421)
Isolation and Identification of Mn Oxidizing Bacterium <i>Aminobacter</i> sp. H1 and Its Oxidation Mechanism .....	YAN Ping, JIANG Li-ying, CHEN Jian-meng, <i>et al.</i>	(1428)
Nitrate Removal by a Strain of Nitrate-Dependent Fe(II)-Oxidizing Bacteria .....	WANG Hong-yu, YANG Kai, ZHANG Qian, <i>et al.</i>	(1437)
Study on the Iopromide-Degrading Characteristics of Strain <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 via Co-Metabolism .....	XU Bing-jie, GAO Pin, XUE Gang, <i>et al.</i>	(1443)
Using Flow Cytometry to Explore the Changes of <i>Sphingomonas</i> sp. GY2B Bacterial Surface Characteristics in the Process of Degrading Phenanthrene .....	.....	.....
.....	ZHANG Meng-lu, DANG Zhi, WU Feng-ji, <i>et al.</i>	(1449)
Research on Characteristic of Interrelationship Between Toxic Organic Compound BPA and <i>Chlorella vulgaris</i> .....	CHEN Shan-jia, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i>	(1457)
Effect of Magnesium Deficiency on Photosynthetic Physiology and Triacylglyceride (TAG) Accumulation of <i>Chlorella vulgaris</i> .....	WANG Shan, ZHAO Shu-xin, WEI Chang-long, <i>et al.</i>	(1462)
Effects of Microcystins on Growth and Antioxidant System of Rice Roots .....	WANG Wei-min, DENG Yu, ZOU Hua, <i>et al.</i>	(1468)
Responses of Soybean Cultivar Dongsheng-1 to Different O <sub>3</sub> Concentrations in Northeast China .....	ZHANG Wei-wei, WANG Guang-hua, WANG Mei-yu, <i>et al.</i>	(1473)
Development and Succession of Biological Soil Crusts and the Changes of Microbial Biomasses .....	WU Li, ZHANG Gao-ke, CHEN Xiao-guo, <i>et al.</i>	(1479)
Effects of Lead on the Growth and Reproduction of <i>Eisenia fetida</i> with Aged Soils .....	CHEN Li-hong, LIU Zheng-tao, FANG Zheng, <i>et al.</i>	(1486)
Soil Heavy Metal Cadmium Standard Limit and Range of Background Value Research .....	ZHAO Xiao-jun, LU Si-jin, XU Ren-ji, <i>et al.</i>	(1491)
Study on Soil Element Background Values of the Hoh Xil Area in North Tibet .....	BAI Jian-kun, WANG Jian-li, LI Chao-liu, <i>et al.</i>	(1498)
Transfer Characteristic and Source Identification of Soil Heavy Metals from Water-Level-Fluctuating Zone Along Xiangxi River, Three-Gorges Reservoir Area .....	.....	.....
.....	XU Tao, WANG Fei, GUO Qiang, <i>et al.</i>	(1502)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological Risk Analysis for Soil Around Haining Electroplating Industrial Park .....	LI Jiong-hui, WENG Shan, FANG Jing, <i>et al.</i>	(1509)
Sources and Spatial Distribution of Typical Heavy Metal Pollutants in Soils in Xihu Scenic Area .....	ZHANG Hai-zhen, TANG Yu-li, LU Jun, <i>et al.</i>	(1516)
Distribution and Assessment of Mercury in the Ambient Soil of a Municipal Solid Waste Incinerator .....	XIE Hui-ting, ZHANG Cheng-zhong, XU Feng, <i>et al.</i>	(1523)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Soils and Sediments Surrounding Dishui Lake in Shanghai .....	ZHUGE Xiang-zhen, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i>	(1531)
Impact of SDBS/Na <sup>+</sup> on Red Soil Colloidal Stability .....	TANG Ying, LI Hang, ZHU Hua-ling, <i>et al.</i>	(1540)
Effects of Stabilization Treatment on Migration and Transformation of Heavy Metals in Mineral Waste Residues .....	ZHAO Shu-hua, CHEN Zhi-liang, ZHANG Tai-ping, <i>et al.</i>	(1548)
Study on a New Method of Fast Monitoring Toxicity of Cd <sup>2+</sup> by Algal in Water .....	DUAN Jing-bo, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun, <i>et al.</i>	(1555)
Immunosensor for Rapid Detection of 1,3-Dinitrobenzene .....	LONG Feng, SHI Han-chang, WANG Hong-chen, <i>et al.</i>	(1561)
Mg/Al Layered Double Hydroxides Prepared by Microwave-Assisted Co-Precipitation Method for the Removal of Bromate .....	ZHONG Qiong, LI Huan	(1566)
Discussion on Several Key Points of Decision Support System for Remediation of Contaminated Sites .....	LIAO Xiao-yong, TAO Huan, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i>	(1576)
A Review of Multi-Scale Studies on Spatial Variation of the Lead (Pb) Concentration in Urban Soils .....	YANG Meng, LI Feng-ying, DIAO Yi-wei, <i>et al.</i>	(1586)
Review on Characteristics and Detecting Assay of Bacterial Endotoxin Contamination in Water Environment .....	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i>	(1597)
Advances in Molecular Mechanism of Bacterial Reduction of Hexavalent Chromium .....	LI Dou, ZHAO You-cai, SONG Li-yan, <i>et al.</i>	(1602)
Anaerobic Membrane Bioreactors for Treating Agricultural and Food Processing Wastewater at High Strength .....	WEI Yuan-song, YU Da-wei, CAO Lei	(1613)

# 《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)

2014年4月15日 35卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 4 Apr. 15, 2014

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