

# 淮安市化工企业地下水污染预测与风险评价

马群宇, 卞雪, 刘楚焯, 赵言文

(南京农业大学 资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095)

**摘要:** [目的] 评价地下水污染风险, 为同类建设项目及企业自环评的地下水污染预测与风险评价提供一种简单有效的新方法。[方法] 建立基于过程模拟的溶质运移数学模型, 对特征污染物高锰酸盐指数和镍的污染水平和污染范围进行预测, 提出以保护地下水为目标的风险评价方法, 以某化工厂为案例进行地下水污染风险评价。[结果] 突发事故后 100 d, 高锰酸盐指数最大迁移距离 11.6 m, 镍最大迁移距离 10.8 m, 分别超出厂界范围 8.8 和 8.0 m; 监测井 2 属较高污染风险等级, 监测井 3 属中等污染风险等级。[结论] 特征污染物在地下水中的扩散速度快, 对水质影响严重, 因而运行期须对污染源加强跟踪监测、定期检查污水池防渗性能。

**关键词:** 地下水; 污染预测; 解析解; 溶质运移; 风险评价

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2017)05-0297-05

**中图分类号:** X523

**文献参数:** 马群宇, 卞雪, 刘楚焯, 等. 淮安市化工企业地下水污染预测与风险评价[J]. 水土保持通报, 2017, 37(5): 297-301. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.05.050; Ma Qunyu, Bian Xue, Liu Chuyue, et al. Forecast and risk assessment of groundwater pollution in a chemical plant in Huai'an City, Jiangsu Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(5): 297-301. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.05.050

## Forecast and Risk Assessment of Groundwater Pollution in a Chemical Plant in Huai'an City, Jiangsu Province

MA Qunyu, BIAN Xue, LIU Chuyue, ZHAO Yanwen

(College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210095, China)

**Abstract:** [Objective] The risk of groundwater pollution was evaluated, in order to provide a simple and effective new method for groundwater pollution forecast and risk assessment of both similar construction projects and enterprises' independent environmental impact assessment. [Methods] A solute transport model based on the mathematical model of solute transport was established to predict the pollution levels of  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  and Ni. And a risk assessment method for groundwater protection was developed to evaluate the groundwater contamination risk. [Results] After 100 d of a sudden accident, the maximum migration distance of  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  was 11.6 m, for Ni, it was 10.8 m, having 8.8 m and 8.0 m spreads beyond the boundary of this factory, respectively. The monitor well  $W_2$  was determined as higher pollution risk level, and  $W_3$  as middle pollution risk level. [Conclusion] Pollutants such as  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  and Ni in the groundwater diffuse rapidly, affect water quality seriously, so that track monitoring should be strengthened and the impermeability should be checked regularly.

**Keywords:** groundwater; pollution forecast; analytical solution; solute transport; risk assessment

随着经济社会的快速发展,化工企业的污染问题也越来越受到人们的关注。与地表水、大气、噪声等环境要素相比,地下水污染由于存在隐蔽性、滞后性

及艰巨性的特点,一直以来都是化工企业环评中较为薄弱的环节。化工污染往往是由产品、原料、辅料等污染物的跑、冒、滴、漏等造成的,受污染的土壤被雨

收稿日期: 2017-03-26

修回日期: 2017-04-26

资助项目: 国家自然科学基金重点项目“农村发展中生态环境管理研究”(70833001)

第一作者: 马群宇(1990—),女(汉族),浙江省海宁市人,硕士研究生,主要从事水土保持、环境规划与评价研究。E-mail: 371408037@qq.com。

通讯作者: 赵言文(1965—),男(汉族),江苏省徐州市人,教授,博士生导师,主要从事水土保持、环境生态学、环境影响评价研究。E-mail: ywzhao@njau.edu.cn。

水淋洗后,地下水水位发生变动,加上包气带的溶滤作用,进入土壤的污染物经长时间渗透,穿过包气带进入地下水,进而污染地下水。而厂区的地下储罐、污水排放管道等的渗漏会使得污染物直接进入地下水,这些污染物随着地下水的流动不断迁移进一步污染含水介质,地下水污染面积不断扩大,水质不断恶化,严重威胁周边环境安全,因此化工企业的地下水污染预测及风险评价更要受到重视。

早在 20 世纪 60 年代,国外学者就开始使用数学模型进行地下水模拟预测。1996 年,Rivera 等<sup>[1]</sup>采用数值模拟软件对德国某放射性废弃物堆场地下水中污染物浓度的变化进行了预测;1998 年,Islam 等<sup>[2]</sup>在利用地下水模型研究美国圣保罗地区污染物运移问题时,发现得到的规律与实际情况相符,为地下水污染问题的解决提供了科学依据。

中国于 20 世纪 70 年代开始开展地下水污染预测,目前侧重于对地下水模拟软件的开发和应用。李伟等<sup>[3]</sup>采用三维耦合地下水溶质运移模型进行垃圾填埋场的地下水污染预测,得到了污染物迁移的距离及范围。杨亚芳等<sup>[4]</sup>基于 Excel,开发了一种简易的一维地下水溶质运移的数值方法。2016 年,《环境影响评价技术导则—地下水环境》(HJ 610-2016,以下简称《导则》)<sup>[5]</sup>颁布,中国地下水保护的新局面也随之打开。《导则》明确要求二级评价采用数值法或解析法对污染物迁移趋势进行预测。目前,采用 Visual Modflow,FEFLOW,GMS 等可视化软件可实现数值预测<sup>[6]</sup>,但因均属于商业软件,价格较高、操作复杂,对小型或者企业自评价的环评项目并不适用。

地下水水质安全直接影响着人类健康与发展,地下水污染风险评价也因此成为国内外的研究热点<sup>[7]</sup>。Sophocleous 等<sup>[8]</sup>以含水层脆弱性与海水入侵等影响为基础,采用线性回归法进行地下水污染风险评价。Napolitano<sup>[9]</sup>基于 GIS 系统对意大利山前河谷地带的地下水污染风险进行评价时引入灾害风险理论,综合考虑地下水流向、地下水水质及危害等因素。Rosén 等<sup>[10]</sup>考虑到风险本身的不确定性,应用不确定性理论构建了风险最小化模型,实现了对地下水污染风险的随机模拟。Blumberga 等<sup>[11]</sup>应用 Visual Modflow 软件及 Landsim 软件建立过程数学模型进行地下水污染风险评价,获得了良好效果。

中国于 20 世纪末开始涉足地下水污染风险评价,目前主要侧重于地下水脆弱性评价,且以改进国外研究成果为主,缺少自主研发的评价体系和方法。王建飞等<sup>[12]</sup>综合考虑非正规垃圾填埋场包气带的隔污指数和有效隔污厚度等因素,提出了风险评价指标

体系与评价方法。王俊杰等<sup>[13]</sup>根据特征污染物与排放量的关系,构建量化的评价体系,采用层次分析法对北京市地下水污染进行了风险评价。杨彦等<sup>[14]</sup>以 ArcMap 为开发平台构建多指标综合指数模型,综合考虑污染源、含水层及污染物等影响因素,进行了地下水污染风险评价。由此可见,目前中国地下水污染风险评价尚处于起步阶段,评价方法以定性评价为主,缺少对污染物迁移转化过程的描述,评价体系与评价方法还需完善。

对此,本文拟首先利用《导则》给出的不同条件下地下水溶质运移解析法的解析解,构建基于过程模拟的溶质运移数学模型,对特征污染物的污染水平和污染范围进行预测;其次,提出以保护地下水为目标的风险评价方法,以某化工厂为案例进行地下水污染风险评价。旨在服务《导则》的实施,以期为同类建设项目及企业自环评的地下水污染预测与风险评价提供一种简单有效的新方法。

## 1 材料与方 法

### 1.1 地下水污染预测方法

1.1.1 预测因子确定 按照《导则》要求,对地下水污染源特征因子按重金属、持久性有机污染物和其他类别进行分类,并对每一类别中的各项因子采用标准指数法进行排序,取标准指数最大的因子作为预测因子。因此,根据标准指数计算结果(计算结果见表 1)与国家标准中各类污染物的标准浓度值进行比较,得到研究区预测因子为:高锰酸盐指数和镍。选取污染源初始浓度最大值进行分析预测:高锰酸盐指数最大排放浓度为 87.5 mg/L,镍最大排放浓度为 2.534 mg/L。

表 1 特征因子标准指数计算结果

特征因子	高锰酸盐 指数	污染源			
		铅	汞	砷	镍
标准指数	29.1	0.5	0.084	0.006 3	50.68
标准浓度值	3.0	0.05	0.001	0.05	0.05

注:高锰酸盐指数、铅、汞、砷和镍标准浓度值参考《地下水质量标准》(GB/T14848-93,以下简称《标准》)Ⅲ类标准<sup>[15]</sup>。

1.1.2 预测模型建立 研究区预测范围内地下水径流缓慢,污染物的排放对地下水水流场没有显著影响,含水层的基本参数变化很小,因此根据《导则》要求,采用解析法对地下水水质进行预测,地下水溶质运移采用一维稳定流动—一维水动力弥散问题模型。

研究区化工厂废水经预处理达标后排入淮安经济开发区污水处理厂深度处理,正常情况下不会对地

下水环境造成污染,因此污染源可概化为无污染源。但因污水池防渗失效或污水排放管道破损等突发事件导致废水渗入地下水,此时污染源可概化为点源连续恒定污染。

研究区浅层地下水与下部中深层地下水之间有稳定的隔水层,因此预测时只考虑污染物对浅层地下水的影响。研究区开采浅层地下水主要用于居民生活辅助性用水,开采量较少,不会形成大范围的降落漏斗,即使受降雨影响,区内地下水位的波动也不会引起流场发生较大变化,因此预测时不考虑流场变化的影响。此外,为研究最大风险程度,预测时不考虑溶解、吸附作用。

采用《导则》推荐的一维稳定流动一维水动力弥散问题,概化条件为一维半无限长多孔介质柱体,一

端为定浓度边界。其解析解为:

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x-ut}{2\sqrt{D_L t}}\right) + \frac{1}{2} e^{\frac{ux}{D_L}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x+ut}{2\sqrt{D_L t}}\right) \quad (1)$$

式中: $x$ ——距注入点的距离(m); $t$ ——时间(d); $C(x,t)$ —— $t$ 时刻 $x$ 处的示踪剂浓度(g/L); $C_0$ ——注入的示踪剂浓度(mg/L); $u$ ——水流速度(m/d); $D_L$ ——纵向弥散系数( $\text{m}^2/\text{d}$ ); $\operatorname{erfc}(\ )$ ——余误差函数。

以 Excel 为平台进行 VB(visual basic, VB) 编程,利用该解析解研究污染物浓度从包气带到含水层以及沿含水层运动的整个过程中的变化情况,并实现可视化操作。

1.1.3 预测模型参数确定 根据研究区现有地质资料及相关试验结果,确定预测模型参数(见表 2)。

表 2 预测模型主要参数

渗透系数/ $(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	水力坡度/ $\%$	孔隙度	水流速度/ $(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	弥散度/m	纵向弥散系数/ $(\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1})$
1.0	3	0.444 49	$6.75 \times 10^{-5}$	20	$6.893 \times 10^{-4}$

### 1.2 地下水污染风险评价方法

目前,常用的地下水污染风险评价方法主要有统计方法、迭置指数法和过程数学模拟法<sup>[16]</sup>。统计方法是指客观地筛选出影响地下水污染的主要因素,利用回归方程赋值,计算权重,进而进行评价;迭置指数法是目前使用最广泛的风险评价方法,但因其基于经验方法获取评价因子的权重,具有明显的缺陷<sup>[17]</sup>;而过程数学模拟法既能描述地下水污染物的迁移过程,

又能预估污染物时空分布特性,具有广泛的应用价值<sup>[18]</sup>。因此,本研究采用基于过程数学模拟的方法进行该化工厂的地下水污染风险评价,即通过过程模拟计算风险受体处高锰酸盐指数( $C_1$ )和镍的浓度值( $C_2$ ),参照《标准》中对高锰酸盐指数和镍指标划分标准进行风险等级的划分,本研究将该化工厂特征污染物对地下水污染风险划分为低、中、较高和高等 4 个等级如表 3 所示。

表 3 某化工厂特征污染物地下水污染风险分级

$C_1/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$C_2/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	风险等级	污染特征
$C_1=0$	$C_2=0$	低	地下水未受到该化工厂特征污染物污染,地下水生态环境未受影响,基本不用进行修复,地下水可用于各种用途
$0 < C_1 \leq 2$	$0 < C_2 \leq 0.005$	中	地下水受到该化工厂特征污染物污染程度较小,地下水生态环境受到轻微影响,有恶化趋势,需及时进行修复,地下水适用于工业、农业用水,若要作为生活用水需经过处理
$2 < C_1 \leq 3$	$0.005 < C_2 \leq 0.05$	较高	地下水受到该化工厂特征污染物污染程度较高,地下水生态环境受到较大影响,有严重恶化趋势,但尚能进行修复,修复比较困难,地下水适用于部分工业用水
$3 < C_1$	$0.05 < C_2$	高	地下水受到该化工厂特征污染物污染程度严重,地下水生态环境受到重大影响,有严重恶化趋势,修复很困难,地下水不宜使用

### 1.3 工程概况

1.3.1 水文地质概况 研究区位于江苏省淮安市境内,属亚热带季风气候区,区内年平均气温  $14.7\text{ }^\circ\text{C}$ ,年平均降水量  $985.3\text{ mm}$ ,年无霜期  $206\text{ d}$ 。研究区处在扬子准地的苏北凹陷区西侧,基岩均隐伏于松散地层之下,基底为前震旦系泰山群变质岩,上覆第三系,

第四系松散堆积层。区内地下水在勘察范围内为潜水,其主要补给源为大气降水垂直补给,主要排泄方式为地表径流和蒸发;枯水期水位在自然地面下约  $2.5\text{ m}$ ,变化幅度约  $2.0\text{ m}$ 。

包气带作为连接含水层与地面污染物的过渡带和主要通道,是污染物媒介体,也是污染物的净化场

所和防护层。研究区属于回填整平区,区内稳定地下水水位以上的包气带大部分为填土层,自上而下分为素填土层、粉土层和黏土层。包气带厚度在 1.0~2.8 m,无基岩裸露,因此判定包气带防污性能为中等。

含水层岩性以稀砂、粉砂为主,渗透性能一般,含水层易污染特征为中等。第 I 含水岩组砂层渗透系数约为 1~7 m/d。第 II 含水岩组渗透系数一般为 6~7 m/d,非古道河一带为 1~4 m/d。第 III 含水岩组渗透系数为 0.26~4 m/d。

1.3.2 建设项目概况 本工程为废弃脱硝催化剂回收利用项目,项目建设场地东西长 144 m,南北长 101 m,面积 14 544 m<sup>2</sup>,废催化剂填料规格为 0.2 m×0.2 m×1 m 的长方体,填料以袋装或无包装的方式运输入厂,暂存于原料库房;废催化剂堆放场地采取防渗措施,地面排水良好,易于清洁和消毒,产生的废水采用暗沟、管直接排入污水收集消毒处理设施。根据厂区设备布置图,厂区西南侧为生产车间,污水收集池位于西南侧围墙边,距离厂界最近距离 2.8 m,

东南侧为成品和原料堆放库房,原料堆放库房的东北侧为办公生活区。根据本项目处理工艺,新建项目产生的废水排放源主要是:重力分离水 200 m<sup>3</sup>/d,深度清洗废水 640 m<sup>3</sup>/d,车间清洗废水 1 m<sup>3</sup>/d,打浆浸取废水 300 m<sup>3</sup>/d,离子交换树脂再生废水 90 m<sup>3</sup>/d,生活污水 6 m<sup>3</sup>/d。

1.3.3 地下水环境现状 根据地下水水质监测数据及舒卡列夫地下水化学类型分类法,确定本研究区地下水化学类型为 HCO<sub>3</sub>-Mg 型。另据地下水水质检测报告,研究区各监测点位的地下水水质指标均满足《标准》Ⅲ类标准要求。

## 2 结果与分析

### 2.1 预测结果与分析

利用构建的地下水溶质运移模型对该化工厂地下水特征污染物进行正向推算,计算 100 d,3 a(1 000 d),10 a(3 650 d),20 a(7 300 d)后污染物的最大迁移距离,结果见图 1。

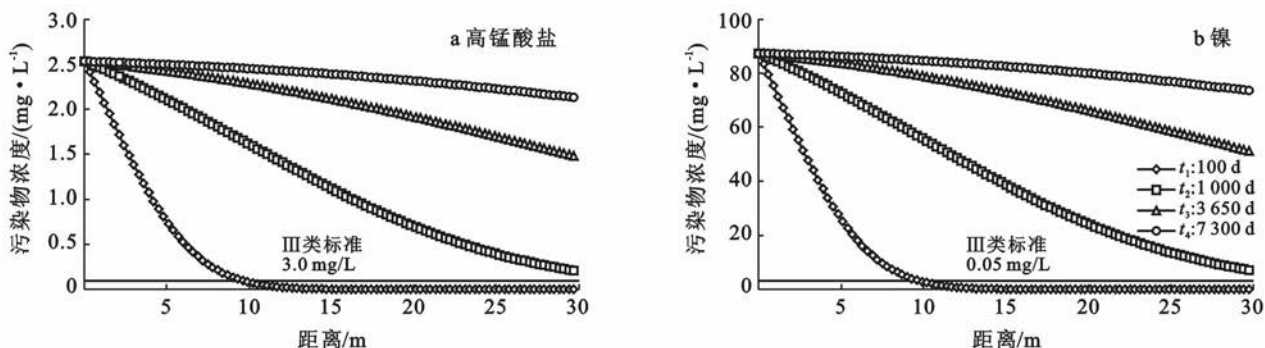


图 1 污染物最大迁移距离

由图 1 可知,100 d 内,高锰酸盐指数的迁移距离达到 9.8 m,镍的迁移距离达到 10.6 m,之后浓度迅速降低至《标准》规定的Ⅲ类标准,且随着时间的推移,浓度降低的速度减缓,因此污染发生后的 100 d 内是化工企业治理地下水污染的最佳时期,此期间,企业应加强监控,及时采取措施防止污染大面积扩散。同时,高锰酸盐指数在地下水中污染范围为:100 d 最大迁移距离为 11.6 m,3 a(1 000 d)最大迁移距离为 41 m,10 a(3 650 d)最大迁移距离为 89.2 m,20 a(7 300 d)最大迁移距离为 139.9 m;镍在地下水中污染范围为:100 d 最大迁移距离为 10.8 m,3 a(1 000 d)最大迁移距离为 38.2 m,10 a(3 650 d)最大迁移距离为 62.5 m,20 a(7 300 d)最大迁移距离为 107.9 m。根据本项目污水池距离厂界最近距离约为 2.8 m,2 种污染物在 100 d 时迁移距离已分别超出厂界 8.8 和 8.0 m,污染物沿着地下水水流方向不断向

下游扩散,浓度随着迁移距离的增加不断降低。

由此可知,突发事件条件下地下水中污染物扩散速度快,且特征污染物初始浓度较高,因此本项目场地建设时应重点做好防渗处理,并对污染源进行跟踪监测,一旦发现泄漏,及时处理,同时项目运行期内加强设备维修和生产管理,防止滴漏等无组织排放。

### 2.2 风险评价结果与分析

根据研究区地下水总体流向(自西北向东南),在建设场地西北、东南方向 1 000 m 处各设置一个监测井,编号为 W<sub>1</sub>,W<sub>2</sub>,在建设场地内设置一个监测井,编号为 W<sub>3</sub>,分别进行风险评价。

应用前文建立的风险评价方法对该化工厂特征污染物对周边地下水的影响进行风险评价,结果如图 2 所示。

结果表明,位于污染场地地下水流上游的 W<sub>1</sub>,高锰酸盐指数和镍浓度始终为 0,说明该化工厂不会对

上游的地下水造成污染,  $W_1$  监测井属低污染风险等级。位于污染场地地下水下游的  $W_2$ , 高锰酸盐指数浓度和镍的浓度均随时间的推移呈显著上升趋势, 40 a(14 500 d)后高锰酸盐指数浓度超过 3 mg/L, 41 a(15 000 d)后镍浓度超过 0.05 mg/L, 属较高污染风险。位于建设项目场地内的  $W_3$ , 高锰酸盐指数和镍浓度与时间的相关性不大, 波动明显, 究其原因可能是受到人为活动和降水等的影响, 导致该化工厂特征污染物变化趋势难以判断, 但总体上, 高锰酸盐

指数浓度始终在 0~2 mg/L 内, 镍浓度始终介于 0~0.05 mg/L, 因此  $W_3$  属中等污染风险。

综上所述, 位于研究区下游的监测井受地下水污染的风险较高, 水质影响严重, 因此工厂在生产过程中应对废水进行合理的回用和治理, 对排污管道、污水处理设备进行定期检查, 以防止和降低污水的滴漏, 将污染物泄漏的地下水风险事故降至最低, 制定风险应急预案和应急治理程序, 一旦发生事故, 防止其向下游进一步扩散。

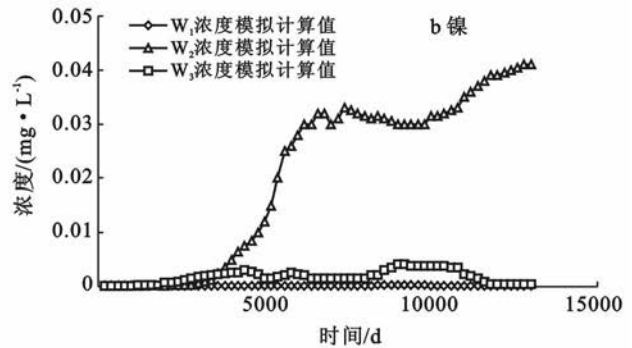
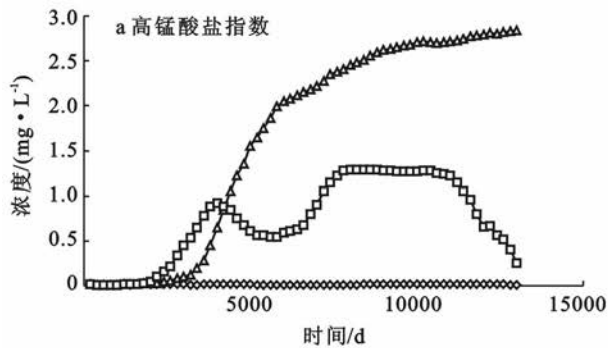


图2 监测井污染物浓度模拟计算值

### 3 讨论与结论

(1) 突发事故后 100 d, 高锰酸盐指数最大迁移距离 11.6 m, 镍最大迁移距离 10.8 m, 分别超出厂界范围 8.8 m 和 8.0 m, 地下水中污染物扩散速度快, 因此本项目场地建设时应重点做好防渗处理, 并对污染源进行定期跟踪监测, 一旦发现泄漏, 及时处理应急措施, 项目运行期加强设备维修和生产管理, 防止滴漏等无组织排放, 同时规范工程防渗分区。

(2) 利用构建的风险评价方法对该化工厂地下水污染进行评价, 结果表明,  $W_1$  属于低污染风险等级,  $W_2$  属于较高污染风险等级, 有向高污染风险靠近的趋势,  $W_3$  属于中等污染风险等级。因此工厂在生产过程中需对排污管道、污水处理设备进行定期检查, 将污染物泄漏的地下水风险事故降至最低, 同时制定风险应急预案和应急治理程序, 一旦发生事故, 立即采取应急措施, 防止其向下游进一步扩散。

(3) 利用构建的地下水污染预测模型对该化工厂地下水污染进行预测, 结果与张韵等<sup>[19]</sup>利用 Visual Modflow 软件得到的重庆某化工园区地下水污染预测结果类似, 地下水污染范围相对较小, 但对水质影响严重, 且本文所采用的预测方法更为简单有效; 利用构建的风险评价方法对该化工厂地下水污染进行评价, 结果与刘增超等<sup>[18]</sup>对某危险废物填埋场地下水污染风险评价结果类似, 位于项目建设地上游的

监测井属于低风险等级, 位于下游的监测井属于较高污染风险等级, 说明污染源与污染物在地下水中的迁移过程共同影响了地下水污染风险等级。

(4) 本文采用的地下水溶质运移解析模型基于一维稳态流速的地下水流动, 不能求解二维或三维地下水流动情况下的溶质运移问题, 因此污染源在二维或三维地下水流动系统中运移的情况还有待进一步开发。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Rivera A, Johns R T, Schindler M, et al. Modeling of strongly coupled groundwater brine flow and transport at the Konrad radioactive waste site in Germany[J]. Proceedings of The Model CARE'96 Conference, 1996(9): 343-352.
- [2] Islam M R, Jewett D, Williams J R, et al. Calibration of groundwater flow and contaminant transport modeling for Ogallala, Nebraska[C]// After the Rain Has Fallen: Ground Water Management Symposium. ASCE, 1998: 105-110.
- [3] 李伟, 骆祖江, 金玮泽, 等. 垃圾填埋场地下水环境影响评价三维数值模型[J]. 环境科技, 2013, 26(2): 17-21, 54.
- [4] 杨亚芳, 吴萌萌, 刘明柱, 等. 基于 Excel 的一维地下水溶质运移数值模拟简易方法[J]. 水电能源科学, 2013, 31(9): 45-47, 28.

- 响[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 37-40.
- [2] 赵松乔. 中国干旱半干旱地区自然资源研究[M]. 北京: 科学出版社, 1988: 89-95.
- [3] 秦嘉海, 吕彪. 河西土壤与合理施肥[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2001.
- [4] 王晓洋, 陈效民, 李孝良, 等. 不同改良剂与石膏配施对滨海盐渍土的改良效果研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(3): 128-132.
- [5] 张丹, 王力华, 孔涛, 等. 生物废弃物对滨海盐碱土改良效果[J]. 生态学杂志, 2013, 32(12): 3289-3296.
- [6] 谷思玉, 耿泽铭, 汪睿, 等. 不同配比生物有机肥对盐渍土改良效果的分析[J]. 东北农业大学学报, 2014, 45(7): 26-30.
- [7] 杨宇, 金强, 卢国政, 等. 生化黄腐酸土壤改良剂对菜田盐碱土壤理化性质的影响[J]. 北方园艺, 2010(5): 45-46.
- [8] 高玉山, 朱知运, 毕亚莉. 石膏改良苏打盐碱上田间定位试验研究[J]. 吉林农业科学, 2003, 28(6): 26-31.
- [9] 王宇, 韩兴, 赵兰坡, 等. 硫酸铝对苏打盐碱上的改良作用研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(4): 50-53.
- [10] 秦嘉海, 吕彪. 种植碱茅草改良河西走廊草甸盐土的研究[J], 土壤通报, 1990, 21(2): 57-59.
- [11] 秦嘉海. 鲁梅克斯对草甸盐土改土培肥效应研究[J]. 草业科学, 2004, 21(6): 25-27.
- [12] 秦嘉海, 吕彪. 河西土壤与合理施肥[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2001: 150-155.
- [13] 明道绪. 田间试验与统计分析[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 185-188.
- [14] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 科学技术出版社, 1978: 110-218.
- [15] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学常规分析法[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 106-208.
- [16] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [17] 浙江农业大学. 植物营养与肥料[M]. 北京: 中国农业出版社, 1988: 268-269.
- [18] 陈伦寿, 李仁岗. 农田施肥原理与实践[M]. 北京: 中国农业出版社, 1983: 185-186.
- [19] 于秀林, 任雪松. 多元统计分析[M]. 北京: 中国统计出版社, 1999: 166-170.
- [20] 陆欣. 土壤肥科学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2004: 50-52.

(上接第 301 页)

- [5] 环境保护部. HJ610-2016, 环境影响评价技术导则: 地下水环境[S]. 环境保护部, 2016.
- [6] 孙从军, 韩振波, 赵振, 等. 地下水数值模拟的研究与应用进展[J]. 环境工程, 2013, 31(5): 9-13, 17.
- [7] 董亮, 朱荫湄, 胡勤海, 等. 应用 DRASTIC 模型评价西湖流域地下水污染风险[J]. 应用生态学报, 2002, 13(2): 217-220.
- [8] Sophocleous M, Ma Tainshing. A decision support model to assess vulnerability to salt water intrusion in the great bend prairie aquifer of Kansas[J]. Groundwater, 1998, 36(3): 476-483.
- [9] Napolitano P. GIS for aquifer vulnerability assessment in the Piana Campana, Southern Italy, using the DRASTIC and SINTACS methods[D]. Netherlands: ITC, Enschede, 1995: 172.
- [10] Rosén L, Wladis D, Ramaekers D. Risk and decision analysis of groundwater protection alternatives on the European scale with emphasis on nitrate and aluminium contamination from diffuse sources [J]. Journal of Hazardous Materials, 1998, 61(1): 329-336.
- [11] Blumberga M. Risk assessment of the skede landfill in Liepaja, Latvia Stockholm[J]. Waste Management & Research, 2000, 89(6): 458-466.
- [12] 王建飞, 纪华. 非正规垃圾填埋场地下水污染风险评价分级方法研究[J]. 工程勘察, 2010(S1): 791-796.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 中华人民共和国地质矿产部. GB/T14848-93, 地下水质量标准[S]. 地质矿产部地质环境管理司, 1993.
- [16] 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.
- [17] 刘增超. 简易垃圾填埋场地下水污染风险评价方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [18] 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.
- [19] 张韵, 龚继文, 程艳茹, 等. 基于 Visual Modflow 的某化工园区地下水污染预测[J]. 地下水, 2016, 38(2): 88-90.