

基于数值模型的地下水污染预警方法研究

白利平^{1,2} 王业耀³ 王金生^{2,4} 李发生^{1,2}

(1. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 2. 地下水污染控制与修复教育部工程研究中心, 北京 100875; 3. 中国环境监测总站, 北京 100012; 4. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875)

摘要:地下水是中国许多城市主要的供水水源, 目前中国部分城市地下水已受到不同程度的污染, 导致地下水资源供需矛盾日益突出。进行地下水污染预警是保护地下水资源的一个有效措施, 当前国内外相关研究刚刚起步, 有关预警理论、方法和技术框架仍未形成一套完善的体系。本文简述了地下水污染预警的研究现状及存在的不足, 并以中国北方某铬渣场地为例, 根据当地的水文地质条件, 利用数学模型建立了地下水污染预警模型, 给出了不同等级的地下水污染预警分区, 研究结果可为当地地下水污染防治和地下水污染控制规划提供科学依据。

关键词:地下水; 地下水污染预警; 数学模型

中图分类号: P641.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2011)06-1652-08

地下水是地球上最主要、分布最广泛的水资源之一, 全世界超过 15 亿人口主要依靠地下水作为饮用水, 中国水资源总量的 1/3 和总供水量的近 20% 来自地下水^[1]。中国有 400 多个城市开采利用地下水, 北方和西部地区主要城市的地下水利用率往往超过供水总量的 50%, 许多城市高达 80% 以上, 在部分城市和广大农村地区, 地下水几乎是唯一的供水水源^[1-3]。

地下水污染是水资源开发利用过程中出现的主要问题, 目前地下水污染在中国大中城市都不同程度地存在。据国土资源部 2005 年对全国 195 个城市地下水水质监测结果, 97% 的城市地下水受到不同程度的污染, 40% 的城市地下水污染趋势加重, 局部地区地下水污染已经造成了严重危害, 并危及到供水安全; 一些大城市的中心地带和地下水排泄区, 地下水污染最严重, 部分城市浅层地下水已不能直接饮用^[4]。地下水水质的恶化使得本来就相对短缺的地下水资源可利用量越来越少。探索有效的地下水资源保护与污染预防措施是当前亟需加强的工作。进行地下水污染预警是保护水资源的一个有效措

施, 当前国内外地下水污染预警方面的工作尚处于探索阶段, 研究地下水污染预警模型对于区域地下水污染防治与地下水污染控制规划方面具有重要的意义。本文以中国北方某铬渣污染场地为例, 进行了地下水污染预警方法研究, 研究成果可为当地政府部门的规划、管理和决策提供依据。

1 地下水污染预警研究现状

“预警”一词最早出现在军事领域, 近年来预警理论在经济、社会、人口、资源和环境等各个领域得到了广泛的应用。对环境质量而言, 预警是对环境质量进行定性、定量分析并确定其变化趋势及速度的动态过程后作出预测与报警, 并提出相应对策^[5]。地下水污染预警的研究目前刚刚起步, 国外主要对水源地进行实时监测预警; 国内有研究者通过对多年水质监测数据的评价、预测, 然后进行预警。

2006 年 6 月, 国土资源部与国家环保总局联合下发《关于开展全国地下水污染防治规划编制工作的通知》, 共同开展了全国地下水污染防治规划编制工作, 《地下水污染防治规划》对未来 15 年中国在地

收稿日期: 2011-03-29; 改回日期: 2011-06-28

基金项目: 环保公益性行业科研专项(200909038, 201009009)资助。

作者简介: 白利平, 男, 1979 年生, 博士, 主要从事环境数值模拟及地质灾害防治研究工作; E-mail: bclp@163.com。

下水环境保护与污染防治、地下水预警应急体系等进行了详细规划。总体上,中国对水环境预警的研究目前尚处于起步阶段,有关地下水污染预警方法研究始于最近几年,对于预警的概念、理论及模型选取等均未形成一套完善的体系,现有的地下水污染预警方法一般可归纳为水质状态预警和水质趋势预警 2 类。

1.1 水质状态预警

水质状态预警方法实质上是对水质现状进行综合评价,以此为基础进行预警。根据预警的需求和水质特征,选取单项或多项因子,利用单因子评价或多因子综合指数评价法评价地下水水质,根据评价结果进行预警。

国外目前在地下水污染预警方面的工作主要是水质状态预警,通过监测地下水的水质进行预警。1991 年,美国俄亥俄州启动了一个地下水保护工程(WHPP),WHPP 由美国国会通过,成为 1986 年发布的安全饮用水法的一部分;俄亥俄州实施了地下水监测项目,通过设置监测井进行地下水监测,监测参数主要包括硝酸盐、挥发性有机物、杀虫剂、除草剂、金属、细菌、合成有机物、温度、pH、电导率、溶解氧和碱等,根据地下水监测数据,提供地下水污染预警。德国基尔的 Sensatec 公司研制了一种地下水预警系统,通过置于土中的精密传感器网络监控着泥土和地下水中的微生物状况,如果地下水面临污染,传感器就会发出预警。荷兰在自动监测技术方面,研制出了先进的微型“Diver”地下水自动监测传感器,对水位及水质进行自动监测,可根据监测数据进行预警。

国内也有研究者利用水质评价的方法进行了地下水污染预警研究,如洪梅等^[9]对吉林西部地区地下水进行了预警研究,在水质状态预警中选取的指标包括 pH、色度、总硬度、溶解性总固体等。董志颖等^[10]在吉林西部地下水水质预警中,选取钙、硫酸根、铁、氟、矿化度和硬度 6 项指标作为预警因子,参照国家地下水质量标准,利用模糊综合评判法对水质进行预警评价,预警级别共分为无警、轻警、中警和重警 4 类。

1.2 水质趋势预警

水质趋势预警是对一段时间内地下水水质的变化趋势进行预测、判断,在此基础上进行污染预警。地下水水质预测方法可归类为确定性和非确定性方法,确定性方法包括解析法、数值法和物理模拟法;

非确定性方法有回归分析法、时间序列法及随机微分方程等,近年来灰色系统理论、模糊理论及神经网络理论等在地下水动态预报中也得到了应用。

洪梅等^[9]建立了地下水预警的综合指标体系,预警方法为水质状态预警及水质趋势预警,状态预警通过地下水浓度数据进行判别,趋势预警通过分析区域水质变化速率与趋势进行判别。李宏卿等^[11]采用 Visual Modflow 对长春城区的地下水水位、Cl⁻浓度进行模拟和预报,在此基础上,建立了长春城区地下水预警系统。王凯军等^[12]在长春地区开展了地下水水位、水质预警研究,利用地下水资源管理模型及提出的水位、水质预警标准,提出了地下水资源管理预警系统;水质预警中将 Cl⁻作为模拟因子,当其浓度等于 250~300 mg/L 确定为预警浓度,大于 300 mg/L 确定为警戒浓度,分别用橙色和红色信号显示。谢洪波等^[13]利用灰色预测模型预测了焦作地下水水质的变化情况,并建立了地下水污染预警系统,根据该系统实现了监测数据单因子和综合指标的评价,并预测了地下水水质的变化趋势。

1.3 地下水污染预警研究中存在的问题

1.3.1 预警的概念

目前国内外在地下水污染预警概念的认识上存在不同看法,体现在预警的方法上也不相同,如根据水质现状评价结论进行预警,或在预测水质未来变化趋势的基础上进行预警。根据 2006 年国土资源部与国家环保总局联合下发的《关于开展全国地下水污染防治规划编制工作的通知》,未来 15 年内将重点开展地下水环境保护与污染防治、地下水预警等工作。因此,在今后的研究中有必要对地下水污染预警的含义进行分析、总结和归纳,以形成一个相对明确、统一的“地下水污染预警”的概念,便于地下水资源保护及地下水污染预警工作的顺利实施。

1.3.2 水质状态预警

状态预警方法是根据地下水水质现状监测数据的评价结果进行的,其本质仍属于水质现状评价的范畴,目前国外主要采用该方法进行地下水污染预警工作。本研究认为仅仅依靠对地下水水质的监测与评价来进行污染预警的方法对于追查污染源、污染责任认定等工作是必要的,但难以满足保护地下水资源的需求,也难以达到地下水污染预警的目的。水质状态预警反映的是水质现状,无法体现预先警告的功能;且一旦监测发现地下水已受到污染,再根

据水质现状评价结果发布预警也无法改变地下水污染的事实,这种预警方法也将使保护地下水资源的一系列行动处于被动状态。

1.3.3 水质趋势预警

水质趋势预警是在水质变化趋势预测基础上进行的,地下水水质预测的方法主要包括确定性和非确定性方法。

(1) 确定性方法

确定性方法是预测水质变化趋势的有效手段,现阶段研究中多采用数值模拟的方法。李宏卿等^[7]、王凯军等^[8]利用 Visual Modflow 进行了长春地区地下水水质预警研究,该研究中仅确定了预警浓度和警戒浓度两个界限,无法与传统的四级预警相对接。采用确定性方法进行预警的优点是考虑了实际水文地质条件及污染物运移特征,水质预测结果较为准确;缺点是建立地下水数值模型需要大量的基础数据作为支撑,在水文地质资料不齐全的地区无法使用数值模拟的方法。

(2) 非确定性方法

非确定性方法包括回归分析法、时间序列法、随机微分方程、灰色系统、模糊理论、神经网络理论等,如张伟红^[10]采用时间序列分析与灰色预测方法进行地下水污染预警,谢洪波等^[9]利用灰色预测模型进行预警。采用非确定性方法进行预警的缺陷主要是未考虑实际的地质、水文地质条件与地下水系统的动力学机制。污染物在地下水中的迁移、转化受多种因素的影响,因此,忽略水文地质条件来进行预警的方法难以满足预警的要求。

2 基于数值模型的地下水污染预警方法研究

笔者以中国北方某铬渣污染场地为例,构建了污染物迁移转化的数值模型,基于数值模型提出了地下水污染预警方法,根据模型计算结果给出了不同地区的地下水污染预警等级,并提出不同预警区的地下水污染防治措施建议,供有关决策部门参考。

2.1 研究区概况

研究区位于中国北方某工业城市,铬渣场地修建于 20 世纪 70 年代,因其修建时未采取有效的防护措施,导致当地地下水受到严重污染。目前,铬渣污染场地下游多处井水呈黄色或绿色,地下水中 Cr(VI)含量超标面积达 0.3 km²。研究区所处的城市严

重缺水,因地下水污染导致的水资源短缺问题愈发严重。

研究区主要含水层有 2 个,一是上部以上更新统至全新统砂卵砾石为主的含水层,为潜水含水层,含水层厚 20~30 m;二是以中下更新统下部砂砾石为主的含水层,其上部有分布广泛、厚度大、隔水性好的中更新统上部淤泥质粘性土为隔水顶板,使本组含水层普遍承压,为承压水含水层,厚一般 10~50 m。潜水的主要补给来源为侧向径流、降水入渗、灌溉回渗及地表水体入渗等,排泄主要是蒸发和开采。承压水主要补给来源为侧向径流,排泄主要为人工开采。目前研究区潜水的污染较为严重,承压水污染尚不明显,因此,本研究仅针对潜水含水层。

2.2 地下水污染预警模型构建

地下水污染预警的依据为地下水水质的动态变化,因此,本研究利用 GMS 软件建立了地下水水流及水质数值模型,根据模型对水质的模拟计算结果进行预警分析。

2.2.1 利用 MODFLOW 建立水流模型

地下水数值模拟是开展地下水定量评价和预测研究的工具^[11],为模拟地下水水质的动态变化情况,首先要建立研究区地下水水流模型。根据研究区的水文地质条件,将含水层在垂向上概化为潜水和承压水。空间上,研究区地下水可概化成非均质各向同性、稳定、空间二维结构的地下水流系统。

利用 GMS 中的 2D SCATTER POINT 模块、MAP 模块与 MODFLOW 模块^[12,13]建立水流模型,模拟中将研究区采用矩形网格剖分,铬渣场附近地区行、列为 20 m×20 m,其余地区为 100 m×100 m,有效单元数为 98 793 个。根据研究区的水文地质条件,按渗透系数和给水度的差异性将潜水含水层划分为 18 个区,各个分区具有相同的水文地质参数。

地下水各补给、排泄量按不同的方式在模型中进行了处理,具体为:灌溉回渗量转化为单位时间、单位面积上的回渗补给量;地表水渗漏量处理为单位时间、单位面积上的回渗补给量;降水入渗补给量按全年平均加到含水层中;侧向补给量按虚拟的注水井加到含水层的边界上;河流侧渗补给量按虚拟的注水井加到含水层的边界上;潜水含水层开采量按全年平均加到含水层中;蒸发量按全年平均加到含水层中。

以 2000 年地下水监测水位作为初始流场,对模

型进行识别与验证。潜水模拟水位中,81%的误差小于 0.5 m,19%的误差为 0.5~1 m。观测井计算水位与观测水位误差对比见表 1 和图 1。

根据模拟计算水位与实测水位的拟合情况看,所建立的模型基本能够反映地下水系统的水流特征,模型能够反映实际的水文地质条件。

2.2.2 利用 MT3D 构建地下水水质模型

考虑地下水中 Cr(VI)的对流、弥散、源汇项和化学反应项,利用 GMS 中的 MT3D 模块^[14]建立溶质运移模型。根据 MODFLOW 的模拟结果,运行 MT3D 可得到在给定水文地质参数和各均衡项条件下污染物 Cr(VI)在地下水中的时空分布情况,通过拟合一定时期的 Cr(VI)浓度变化曲线,对建立的模型进行识别和验证,使其符合实际水文地质条件。本研究以铬渣掩埋时间地下水中 Cr(VI)浓度作为初始条件,通过调整各项水文地质参数及进入地下水中 Cr(VI)的浓度值对模型进行识别与验证。

模拟时共选取了 1999 年 15 个监测点监测数据、2002 年 32 个监测点监测数据、2009 年 16 个观测井地下水中 Cr(VI)浓度监测值对水质模型进行识别和验证,各监测点监测数据见表 2,各监测点 2002 年监测值与计算值误差对比见图 2。模型识别和验

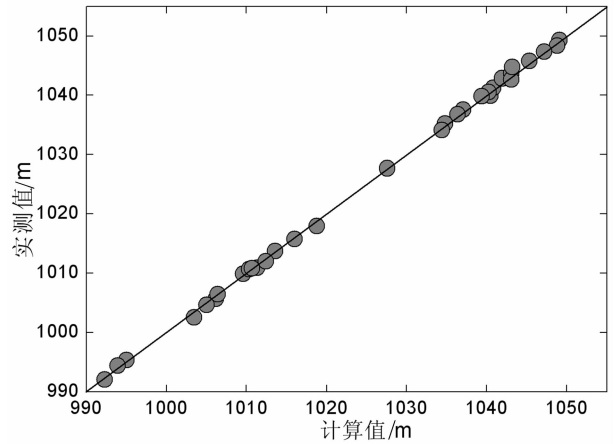


图 1 潜水观测井计算水位与观测水位误差对比图
Fig.1 Comparison of observed and computed values in the observation wells of phreatic aquifer

证时,水质模型中用到的主要参数(吸附常数、弥散系数)参考室内实验分析结果及经验值进行调整,以实验获取的参数作为初始值,根据地下水 Cr(VI)浓度监测数据反复调整、模拟计算得出主要参数值。图 2 显示,本次模拟计算值与实测值的误差总体上不太大,一般都在误差限范围之内。用 MT3D 建立的水质模型可以反映实际的水文地质条件与地下水水

表 1 2000 年地下水监测井中水位监测值与计算值统计

Table 1 Observed and computed groundwater levels in the observation wells in 2000

监测井号	计算值/m	监测值/m	误差/m	监测井号	计算值/m	监测值/m	误差/m
1	1003.44	1002.56	0.88	17	1049.13	1049.32	-0.19
2	1016.01	1015.77	0.24	18	1048.83	1048.37	0.46
3	1009.58	1009.92	-0.34	19	1039.38	1039.83	-0.45
4	1037.06	1037.54	-0.48	20	1047.21	1047.37	-0.16
5	1036.37	1036.78	-0.41	21	1045.33	1045.79	-0.46
6	1034.83	1035.21	-0.38	22	1043.21	1044.77	-1.56
7	1040.47	1039.93	0.54	23	1027.59	1027.68	-0.09
8	1040.83	1041.24	-0.41	24	1011.30	1010.9	0.40
9	1041.94	1042.84	-0.90	25	1006.16	1005.68	0.48
10	1013.58	1013.74	-0.16	26	1012.42	1012.03	0.39
11	1043.08	1043.66	-0.58	27	1010.72	1010.82	-0.10
12	1018.76	1017.92	0.84	28	1006.40	1006.42	-0.02
13	1043.09	1042.66	0.43	29	1005.00	1004.65	0.35
14	1040.25	1040.51	-0.26	30	992.28	992.02	0.25
15	1034.42	1034.1	0.32	31	995.01	995.3	-0.29
16	1010.33	1010.67	-0.34	32	993.91	994.36	-0.45

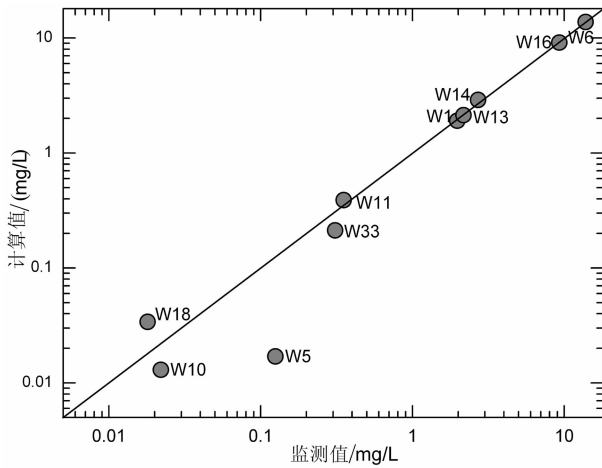


图 2 2002 年各观测井地下水中 Cr(VI)浓度监测值与计算值误差对比

Fig.2 Simulated and observed values of Cr (VI) concentration in groundwater observation wells in 2002

质变化情况，模拟结果基本上能够代表实际地下水中污染物浓度的变化特征，可利用该模型进行预报。

2.2.3 预警级别的确定

目前中国还没有发布针对地下水污染预警的相

应标准和要求，为此，笔者参照国家环保总局 2007 年发布的《国家突发环境事件应急预案》进行地下水污染预警级别划分。《国家突发环境事件应急预案》中将突发环境事件的预警分为四级，预警级别由低到高的颜色依次为蓝色、黄色、橙色、红色。以研究区铬渣场对地下水的污染作为一个环境污染事件，将地下水受 Cr(VI)污染的预警级别划分为五级，即零级、一级、二级、三级和四级，其中，一、二、三、四级与《国家突发环境事件应急预案》中的预警级别一致，零级表示地下水没有污染风险。

建立地下水污染预警模型时，预警级别的确定需要综合考虑地下水质量标准、地下水的用途、地下水水质现状及污染物特性等因素。中国地下水质量标准(GB/T 14848-1993)中将地下水质量划分为 5 类，I 类主要反映地下水化学组分的天然低背景含量，II 类主要反映地下水化学组分的天然背景含量，III 类以人体健康基准值为依据，IV 类以农业和工业用水要求为依据，V 类不宜饮用。该标准中，Cr(VI)浓度 ≤0.005 mg/L 为 I 类，≤0.01mg/L 为 II 类，≤0.05mg/L 为 III 类，≤0.1mg/L 为 IV 类，>0.1mg/L 为

表 2 1999 年、2002 年和 2009 年各地下水监测井中 Cr(VI)浓度监测值
Table 2 Observed values of Cr (VI) concentration in groundwater observation wells in 1999, 2002 and 2009

1999 年		2002 年				2009 年	
监测井号	监测值/(mg/L)	监测井号	监测值/(mg/L)	监测井号	监测值/(mg/L)	监测井号	监测值/(mg/L)
W1	2.580	W1	1.973	W18	0.018	W34	0.394
W3	1.794	W2	N.D.	W19	0.018	W35	0.020
W4	0.005	W4	N.D.	W20	0.012	W36	0.047
W5	0.120	W5	0.125	W21	N.D.	W37	4.238
W6	21.02	W6	13.821	W22	N.D.	W38	0.380
W7	0.094	W7	N.D.	W23	0.009	W39	0.274
W8	0.005	W8	N.D.	W24	N.D.	W40	0.220
W9	0.011	W9	N.D.	W25	N.D.	W41	4.171
W10	0.014	W10	0.022	W26	N.D.	W42	0.020
W12	0.020	W11	0.352	W27	N.D.	W43	0.033
W13	2.580	W12	N.D.	W28	0.027	W44	0.027
W14	0.008	W13	2.167	W29	0.009	W45	0.027
W23	0.012	W14	2.704	W30	0.029	W46	0.033
W25	0.010	W15	0.011	W31	0.009	W47	0.020
W28	N.D.	W16	9.272	W32	N.D.	W48	0.020
		W17	N.D.	W33	0.309	W49	0.320

注：N.D.表示未检出。

V类。

Cr(VI)已被确认为是致癌物,并能在人体内积蓄,对皮肤和粘膜有剧烈的腐蚀性,长期接触会出现全身中毒症状^[15-17]。铬渣场附近地区的地下水主要用作农业用水和生活用水,参照中国地下水质量标准及研究区地下水水质现状情况,确定水质预警指标赋值为:地下水中 Cr(VI)浓度 0~0.05 mg/L 赋值为 1, 0.05~0.1 mg/L 赋值为 2, 0.1~0.5 mg/L 赋值为 3, 0.5~1 mg/L 赋值为 4, >1mg/L 赋值为 5。根据地下水水质数值模拟预测结果,按确定的赋值标准,用 GIS 软件进行各单元格参数的赋值。

2.2.4 研究区地下水污染预警演示

根据 2.2.3 中确定的地下水污染预警标准,利用 2.2.2 中建立的数值模型模拟计算可得到现状条件下研究区地下水中 Cr(VI)浓度的变化情况,根据模拟计算的 Cr(VI)浓度进行预警。以 2015 年研究区地下水污染预警为例,以 2015 年数值模拟计算得出的地下水中 Cr(VI)浓度进行预警分级,研究区水位预警演示情况见图 3。

根据预警模型的计算结果,预警区可分为零级、一级、二级、三级和四级,具体预警分区结果如下:

(1)四级预警区

面积为 260 316 m²,需发布红色预警,可将该预警区的边界以钉桩或红颜色的标志物为标记。该区目前地下水中 Cr(VI)浓度均大于 0.1 mg/L,到 2015 年 Cr(VI)浓度将全部大于 1 mg/L,地下水水质将不能满足工、农业和生活用水的标准,本区地下水面临 Cr(VI)污染的风险极大,且污染程度严重,地下水污染的治理成本很高。地下水资源管理部门需及早采取防治地下水污染的有效措施(包括水污染的应急措施,水资源管理部门应与有关部门联合及早采取措施将污染源铬渣清除),同时对受污染的地下水进行治理(常用的治理方法包括吸附、反渗透和化学反应等),加强对地下水的监控和管理,防止污染源对本区地下水的进一步污染,并预防本区受污染的地下水对下游水体造成污染。

(2)三级预警区

面积 48 227 m²,需发布橙色预警,可将该预警区的边界以钉桩或橙色的标志物以标记。该区目前地下水中 Cr(VI)浓度为 0~0.5 mg/L,到 2015 年 Cr(VI)浓度将处于 0.5~1 mg/L,地下水水质将不能满足工、农业和生活用水的标准,本区地下水面临 Cr

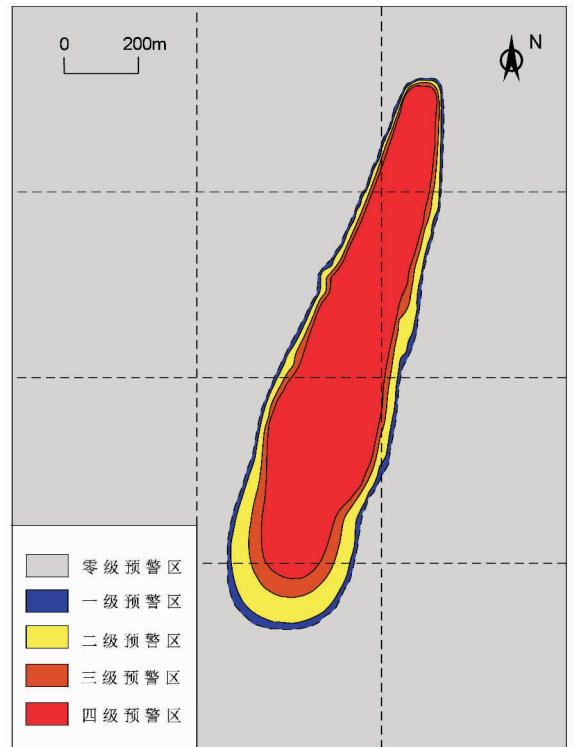


图 3 研究区地下水污染预警分级结果

Fig.3 Demonstration of the groundwater pollution early-warning method in the study area

(VI)污染的风险很大,且污染程度将很严重,地下水污染治理的成本高。在该区内必须密切监测地下水中 Cr(VI)浓度的变化情况,并采取有效的处置措施以治理 Cr(VI)的污染,防止本区地下水受四级预警区的污染,并预防本区地下水对下游水体的污染。

(3)二级预警区

面积 77 008 m²,需要发布黄色预警,可将该预警区的边界以钉桩或黄色的标志物以标记。该区目前地下水中 Cr(VI)浓度为 0~0.5 mg/L,到 2015 年 Cr(VI)浓度将处于 0.1~1 mg/L,地下水水质将不能满足工、农业和生活用水的标准,本区地下水面临 Cr(VI)污染的风险较大,且污染程度较严重。在该区内须监测地下水中 Cr(VI)浓度的变化情况,并制定相应的应急处置措施以应对 Cr(VI)的污染。

(4)一级预警区

面积 31 665 m²,需要发布蓝色预警,可将该预警区的边界以钉桩或蓝色的标志以标记。该区目前地下水中 Cr(VI)浓度为 0~0.05 mg/L,到 2015 年 Cr(VI)浓度将处于 0.05~0.1 mg/L,地下水水质能满足农业和工业用水的标准,经适当处理后可以作为生

活用水,本区地下水面临一定程度的 Cr(VI)污染风险,污染程度一般。在该区内应关注地下水水质的变化情况,并制定相应的污染预防措施以应对 Cr(VI)的污染。

(5)零级预警区

除一至四级预警区之外的所有地区,区内地下水在 2015 年之前受 Cr(VI)污染的可能性很小,不需要发布预警。但在一级预警区与本区的交界处需密切关注地下水水质的变化情况,若一级至四级预警区内未能采取有效的地下水污染防治措施,则 2015 年之后本区地下水将面临一定程度的污染风险。

3 结 语

地下水污染预警是预防地下水污染的有效措施,目前国内外在地下水污染预警方法学方面的研究尚处于探索阶段,有关预警的概念、理论及模型等均未形成完善的体系。面对日益稀缺的地下水资源,如何有效的保护水资源是当前亟需解决的问题。

本文以中国北方某铬渣场地为例,利用地下水数值模型建立了地下水污染预警模型,以 2015 年数值模拟计算得出的地下水中 Cr(VI)浓度进行预警分级,提出了不同等级的地下水污染预警分区,并给出相应的警戒信息,研究成果可为当地水资源管理工作提供科学依据。

参考文献(References):

- [1] 薛禹群,张幼宽.地下水污染防治在我国水体污染控制与治理中的双重意义[J].环境科学学报,2009,29(3):474-481.
Xue Yuqun, Zhang Youkuan. Twofold significance of groundwater pollution prevention in China's water pollution control[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, 29 (3):474-481 (in Chinese with English abstract).
- [2] 吴登定,谢振华,林健,等.地下水污染脆弱性评价方法[J].地质通报,2005,24(10/11):169-173.
Wu Dengding, Xie Zhenhua, Lin Jian, et al. Groundwater contamination vulnerability assessment[J]. Geological Bulletin of China, 2005, 24(10/11):169-173(in Chinese with English abstract).
- [3] 白利平,王业耀,王金生.基于数值模型的地下水水位预警体系研究[J].中国地质,2009,36(1):246-253.
Bai Liping, Wang Yeyao, Wang Jinsheng. Research of numerical model based groundwater level early-warning system in Linfen basin[J]. Geology in China, 2009, 36(1):246-253 (in Chinese with English abstract).
- [4] 姜建军.我国地下水污染现状与防治对策[J].建设科技,2007,(21):32-33.
Jiang Jianjun. Groundwater pollution and its prevention-control policy in China[J]. Construction Science and Technology, 2007, (21):32-33 (in Chinese with English abstract).
- [5] 洪梅,赵勇胜,张博.地下水水质预警信息系统研究[J].吉林大学学报(地球科学版),2002,32(4):364-368.
Hong Mei, Zhao Yongsheng, Zhang Bo. The research on groundwater quality early warning system[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2002, 32(4):364-368(in Chinese with English abstract).
- [6] 董志颖,李兵,孙晶. GIS 支持下的吉林西部水质预警研究[J].吉林大学学报(地球科学版),2003,33(1):56-58.
Dong Zhiying, Li Bing, Sun Jing. The research of forecast of water quality in the western part of Jilin province by means of GIS[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2003, 33(1):56-58(in Chinese with English abstract).
- [7] 李宏卿,吴琼,张福林,等.Visua1Modflow 在建立长春市地下水开采预警系统中的应用[J].吉林大学学报(地球科学版),2003,33(3):319-322.
Li Hongqing, Wu Qiong, Zhang Fulin, et al. An application of groundwater exploitation forecasting-alarm system based on Visual Modflow in Changchun[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2003, 33 (3):319-322 (in Chinese with English abstract).
- [8] 王凯军,曹剑峰,徐蕾,等.地下水资源管理预警系统的建立及应用研究[J].水科学进展,2005,16(2):238-243.
Wang Kaijun, Cao Jianfeng, Xu Lei, et al. Establishment and application of early-warning system in groundwater resource management in the urban area of Changchun[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(2): 238-243(in Chinese with English abstract).
- [9] 谢洪波,钱壮志,尹国勋,等.基于 GIS 的焦作市地下水污染预警系统[J].地球科学与环境学报,2008,30(1):94-96.
Xie Hongbo, Qian Zhuangzhi, Yin Guoxun, et al. Warning-forecast system for groundwater pollution in Jiaozuo city based on GIS[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2008, 30(1): 94-96 (in Chinese with English abstract).
- [10] 张伟红.地下水污染预警研究[D].长春:吉林大学环境与资源学院,2007.
Zhang Weihong. Study on the early warning of groundwater pollution[D]. College of Environment and Resources, Jilin University, 2007 (in Chinese with English abstract).
- [11] 张二勇,李长青,李旭峰.区域地下水流数值模拟的方法和实践——以华北平原为例[J].中国地质,2009,36(4):920-926.
Zhang Eryong, Li Changqing, Li Xufeng. Regional groundwater numerical modeling:a case study of North China plain[J]. Geology in China, 2009, 36(4):920-926 (in Chinese with English abstract).
- [12] McDonald M C, Harbaugh A W. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model[R]. Virginia:U.S. Geological Survey, 1988.
- [13] Harbaugh A W, McDonald M G. An update to the U.S. Geological Survey modular finite-difference groundwater flow

- model [R]. Virginia: U.S. Geological Survey, 1996.
- [14] Zheng C, Wang P P. A Modular Three-dimensional Multispecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion, and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems [M]. Joclsonville: US Army Corps of Engineers, 1999.
- [15] Mohanty K, Jha M, Biswas M N, et al. Removal of chromium (VI) from dilute aqueous solutions by activated carbon developed from Terminalia arjuna nuts activated with zinc chloride [J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(11):3049-3059.
- [16] Kaszycki P, Fedorovych D, Ksheminska H, et al. Chromium accumulation by living yeast at various environmental conditions [J]. Microbiological Research, 2004, 159(1):11-17.
- [17] Mohan D, Singh K P, Singh V K. Trivalent chromium removal from wastewater using low cost activated carbon derived from agricultural waste material and activated carbon fabric cloth [J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 135(1/3):280-295.

A study of the groundwater pollution early-warning method based on numerical model

BAI Li-ping^{1,2}, WANG Ye-yao³, WANG Jin-sheng^{2,4}, LI Fa-sheng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. Engineering Research Center for Groundwater Pollution Control and Remediation, Ministry of Education, Beijing 100875, China; 3. China National Environmental Monitoring Station, Beijing 100012, China; 4. College of water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Groundwater is the main source of water supply in many cities of China, and it has been polluted in different degrees, leading to intense contradiction between the supply and the demand of groundwater resources. Research on the groundwater pollution early-warning method plays an important role in the protection of groundwater resources. At present, the early-warning of groundwater in research methodology at home and abroad is still at the exploratory stage, and the sophisticated warning system has not been developed. The research status and problems of the early-warning method of groundwater pollution were analyzed in this paper, the groundwater pollution early-warning method based on a numerical model was studied in a chromium residue site in northern China, and different early-warning grades were zoned by the model. The result of the study provides scientific basis for regional groundwater pollution prevention and control planning.

Key words: groundwater; early-warning system of groundwater pollution; numerical model

About the first author: BAI Li-ping, male, born in 1979, engineer, doctor, mainly engages in the study of numerical simulation of environment and geological hazard control; E-mail: bclrp@163.com.