

数值模拟结合同位素技术划分地下水水源地保护区

徐海珍¹, 李国敏¹, 张寿全², 董艳辉¹, 赵春虎³, 乔小娟¹

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 2. 北京市水务局, 北京 100038; 3. 煤炭科学研究总院西安研究院, 陕西西安 710054)

摘要 利用数值方法模拟地下水流入水源井的时间, 并根据时间定量划分地下水水源地保护区, 是目前国内外可信度较高的保护区划分方法。计算过程中, 采用同位素定年技术辅助判断水文地质参数的取值范围, 以提高模拟精度。以山西省灵石县静升盆地内的供水站为例, 采用 MODFLOW 和 MODPATH 软件, 结合 CFCs 同位素定年数据, 对其进行了保护区划分, 较好地将数值模拟方法和同位素技术联合应用到水源地保护区划分中。

关键词 数值模拟; 同位素; 粒子示踪; 地下水; 水源地保护区

中图分类号 P641 **文献标识码** A **文章编号** 1004-693X(2009)S1-0057-04

近几十年来, 国内外地下水水源地保护区划分方法迅速发展。在现有的多种方法中, 数值模拟法能较为准确地刻画复杂水文地质条件, 其结果最为可靠。但由于水文地质参数的不确定性, 往往会在建模过程中出现较大误差^[1], 而同位素方法可以有效地缩小参数取值范围以减小误差。本文以山西省灵石县静升盆地为例, 采用 CFCs 定年技术控制关键参数——渗透系数的变化范围和分区, 在用数值法模拟出地下水流场的基础上, 对盆地内的静升供水站定量划定了保护区。

1 方法与原理

1.1 划分方法

用数值模拟法划分地下水水源地保护区, 并结合同位素定年数据确定渗透系数的取值范围, 大致可分为以下几个步骤: ①根据地下水定年数据及其流向上的流动距离, 推算含水层渗透系数的取值范围, 并根据计算结果进行合理的参数分区; ②运用 MODFLOW 或其他计算软件, 模拟研究区地下水流场; ③按水质点迁移到取水井的时间不同, 将保护区划分为 3 级^[2], 确定各级保护区的时间标准; ④以取水井为起点, 采用 MODPATH 软件, 根据质点流入取水井的时间, 反向计算质点运动迹线的起点, 连接各起点即得到各级保护区的分区界线, 从而确定保护区范围。

1.1.1 渗透系数取值范围的确定

根据同位素定年数据, 计算出沿流线方向上两取样点的地下水年龄差, 估算两点间的水力梯度和有效孔隙度, 测量两取样点间距, 根据达西定律推算出该区间含水层的渗透系数。参考不同范围内渗透系数的计算值, 进行参数分区。

将同位素定年技术应用到水文地质参数的估算中, 与传统的抽水试验等方法相比, 在很大程度上提高了参数取值精度, 对地下水流场模拟的准确性有极其重要的意义。

1.1.2 地下水流场的模拟

充分了解研究区地质概况, 分析区域地质地貌、气象、含水介质、地下水位、边界条件等与地下水流动系统相关的因素, 掌握包括水源地在内的较大范围的地下水分布规律, 并结合上一步重要参数的分区结果, 建立地下水流动的概念模型、数学模型及数值模型, 计算出地下水流场的分布^[3]。

1.1.3 保护区划分

根据 2007 年初国家环保部发布实施的《饮用水水源保护区划分技术规范》, 水源地一级保护区是以溶质运移 100 d 的距离所圈定的范围, 二级保护区的时间标准是 1000 d, 补给区和径流区为准保护区^[4]。采用 MODPATH 软件, 按照粒子反向示踪方法, 结合各级保护区的降解时间, 在已建立的地下水流场平面或立体上绘出保护区范围。

1.2 理论基础

在不考虑水的密度变化条件下,根据三维地下水流动的水文地质概念模型,孔隙含水系统的非稳定流数学模型可描述如下^[5]:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx}\frac{\partial H}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_{yy}\frac{\partial H}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_{zz}\frac{\partial H}{\partial z}\right)=U_s\frac{\partial H}{\partial t}+W\tag{1}$$

式中: t 为时间; H 为已知水头; K_{xx},K_{yy},K_{zz} 为坐标轴方向上的主渗透系数; U_s 为弹性给水度; W 为单位体积井流量,抽水时取负号。

2 应用实例

静升供水站位于山西灵石静升盆地内。静升盆地位于山西省中部,总面积约 1 206 km²。由于地处晋中与临汾两大断陷的隆起带,构造复杂,地貌形态多变。全区地形呈东西两边高,中间低的宽槽形,东部为基岩山地,其余为大片黄土覆盖^[6]。

2.1 地质概况

静升盆地是一个山前洪积倾斜平原所构成的典型盆地,由霍山山前的岩沟、红崖底沟、三奇沟、后悔沟等 4 个冲洪积扇群组合而成。区内海拔 900 ~ 1 080 m,多年平均降水量为 601 mm,岩性为砾卵石漂石,由扇顶向前缘颗粒由粗变细。盆地西边界由汾阳—介休断裂的南延部分与霍山断裂的一个小分支组合而成,两断裂走向近南北;东南边界为绵山断裂,东北边界大致在兴地—长寿—秦树一线,该处存在一隔水隐伏断层;东部为盆地内主要补给区,由 4 个冲洪积扇群组合而成;西部盆地地下水系统通过四沟汇流至静升河,以地下潜流的形式向盆地系统外排泄(图 1)。

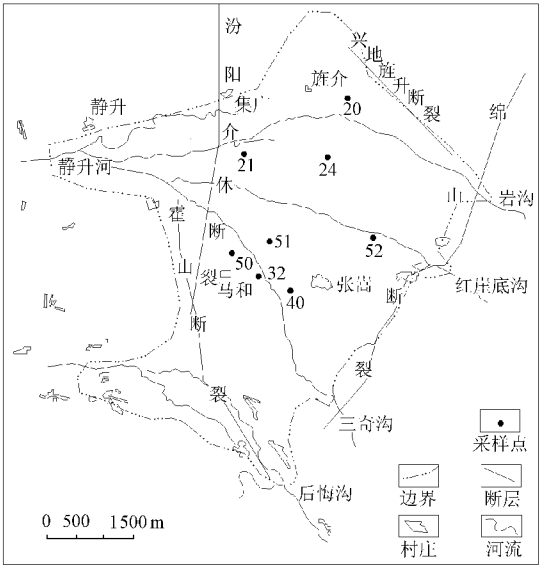


图 1 静升盆地地质地貌概况及采样井分布

2.2 渗透系数取值范围的确定及分区

在模拟地下水流场的过程中,地质参数的准确性对结果影响很大,渗透系数 K 值尤为重要。

本研究采用地下水 CFCs 定年实验作为参数判断的依据^[7],即根据地下水 CFCs 定年数据及其流动距离,估算出地下水的流速,进而推算含水层的渗透系数,以此来约束模型中 K 的取值范围和分区。CFCs 采样点位置见图 1。

渗透系数 K 值的推算方法如下:

$$\text{根据达西定律: } V = KI\tag{2}$$

$$\text{其中 } V = nu, \quad u = L/t\tag{3}$$

$$\text{得到 } K = Ln/It\tag{4}$$

式中: K 为渗透系数, V 为渗流速度, u 为实际流速, n 为有效孔隙度, I 为水力梯度, L 为渗流途径长度, t 为两点间渗流时间差。

盆地东边水流出山口一带受地形影响,水力梯度较大,而在西部平原区,地形平缓,水力梯度变小,故对于水力梯度的取值应考虑分区,其取值范围约为 2% ~ 1%。以张嵩村和吴小庆样点为例,两点间距约为 1.6 km,地下水年龄差为 13 a(即 t 为 4 745 d),该处水力梯度 I 约 1%,含水介质有效孔隙度 n 约为 0.25,则推算区间含水层的渗透系数 K 为 8.16 m/d。

根据以上计算方法,估算出渗透系数取值范围约为 3 ~ 50 m/d(表 1)。根据估算出的渗透系数分布可以看出,盆地北部地下水动力条件好,渗透系数比大南部地区大,距离出山口越远,水流强度受下游开采强度的影响明显,尤其在静升供水站附近,流速明显加大。根据估算出的数据进行渗透系数分区,以便于进行地下水流场的模拟。

表 1 CFCs 定年数据及估算出的渗透系数取值

井号	井位	CFC-12/ (pmole·kg ⁻¹)	年龄/ a	距离/ m	时间/ d	渗透系数/ (m·d ⁻¹)
40	张嵩村 5 #	1.19	30	471	1460	5.06
32	马和村 1 #	0.76	34			
24	良种场	2.21	18	3 760	6 570	14.25
0	岩沟出山口	—	0			
52	毛玉新	1.49	26	2 830	2 190	31.07
21	旌介村 8 #	1.99	20			
40	张嵩村 5 #	1.19	30	1 550	4 745	8.16
50	吴小庆	0.25	43			
24	良种场	2.21	18	1 515	730	51.86
21	旌介村 8 #	1.99	20			
51	泉州兔业	1.42	27	784	5 840	3.35
50	吴小庆	0.25	43			
24	良种场	2.21	18	2 433	5 840	10.42
32	马和村 1 #	0.76	34			

(样品测试单位:中国科学院地质与地球物理研究所地下水 CFCs 定年实验室)

2.3 地下水流动场的模拟

静升供水站位于开阔的静升盆地中,周围没有明显的地质边界,若以开采区的局部范围作为模拟区,由于盆地内地下水流动的系统性,模拟边界难以控制,必然影响仿真程度;而如果选取整个盆地作为研究区,由于盆地面积较大,网格剖分达不到所需精度,必然会影响水源地保护区划分准确度。因此,本文首先选取整个静升盆地作为研究区,选取盆地的自然边界作为模拟边界,模拟得到地下水流动场后,再选取静升供水站附近范围作为次级研究区,将盆地模拟的地下水流动场作为次级研究区的流量边界,在网格剖分和参数分区细化的基础上,进一步模拟地下水流动场,然后再划分保护区范围。

根据静升盆地的水文地质条件,将其概化为非均质各向异性承压含水层。西部、东北部、东南部均视为二类边界,东部为盆地内主要补给区,根据东部山区年内实际观测的月降水量和四沟的流域面积,分别计算各出山口侧向补给量,在模型中以流量边界较客观的刻画,西部静升河定义为一类水头边界。垂向上,顶部为潜水面边界,接受大气降水的补给和蒸发排泄,底部定义为第四系与基岩的接触面,为零通量边界。地下水运动符合达西定律。静升盆地地下水流动场模拟结果如图2所示。

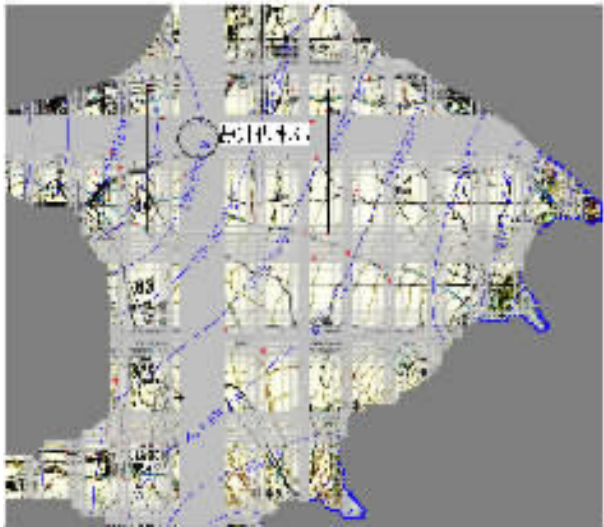


图2 静升盆地地下水流动场模拟结果示意图

图中方形区为次级研究区范围。在盆地地下水流动场模拟的结果上,进一步细化次级研究区的输入信息,再次模拟地下水流动场,结果见图3。

2.4 地下水保护区的划分

在完成地下水流动场模拟结果的基础上,MODPATH能绘出流线分布及任意时刻粒子的运动位置。根据这一功能,在水源地开采井位置放置粒子,使用MODPATH模块的粒子反向示踪功能^[8],按照各级保护区所需降解时间的不同,计算出各级保护区范围。

静升供水站常年取水井主要有两口。在取水井位置放置粒子时,采用单元格表面和内部分层设置粒子的方法,不仅可以反应含水层表面的水流变化,也可以从剖面上体现水流的垂向运动特征。按一级保护区范围,计算出100 d内粒子逆向运动的轨迹,将迹线末端连接,得到的范围即为一级保护区(图3)。同理,按照1 000 d等时线绘出二级保护区(图4),补给区和径流区划为准保护区,即从盆地的洪积扇顶部延伸到前缘部分。

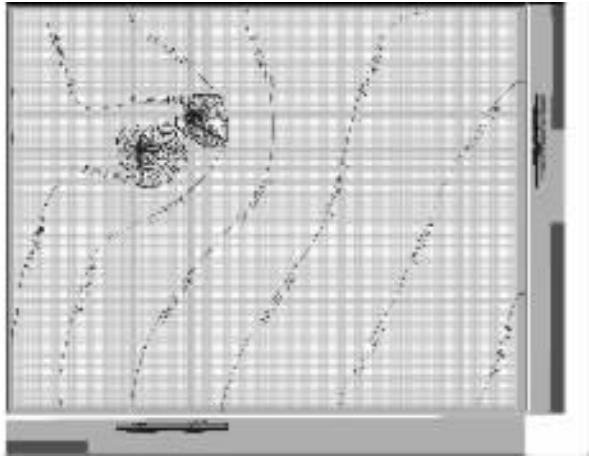


图3 一级保护区范围示意图

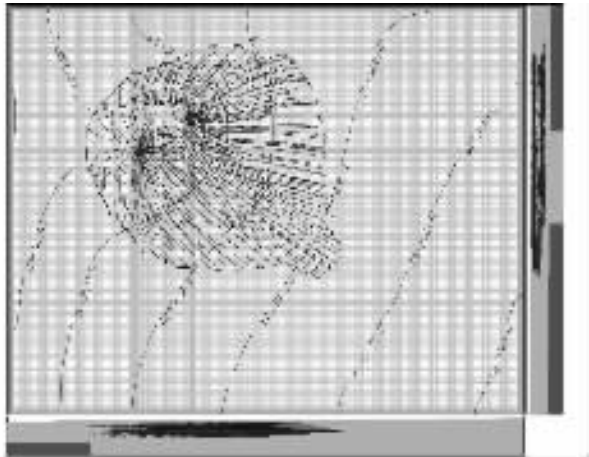


图4 二级保护区范围示意图

划定保护区范围后,其内的环境管理和水质防护是确保饮用水安全的重要部分^[9]。对于一级保护区,要设立明显的边界标志,禁止一切可能发生污染的作业;二级保护区和准保护区在重要地点设立标志,并限制土地利用类型。此外,对饮用水水源地需设立监测网,定期监测水质,确保饮用水安全。

3 结 论

a. 地下水水源地保护区划分方法很多,而数值模拟方法可以详细地刻画含水层特征,划分结果可信度较高。而结合粒子逆向运动迹线,可以按照不同的时间标准,达到定量划分保护区范围的目的。

b. 根据 CFCs 定年数据判断渗透系数的取值范围 ,可以有效地减小因模型参数取值不当引起的地下水流域模拟误差。采用同位素技术 ,推求研究区渗透系数的取值范围 ,有效降低参数取值的不确定性 ,提高地下水数值模拟的仿真度 ,从而提高水源地保护区划分结果的准确度 ,将是今后水源地保护区划分的一个重要发展方向。

c. 静升供水站位于面积较大的静升盆地中 ,为保证模拟水文地质单元的完整性 ,同时网格剖分要达到所需精度 ,本研究采用了双重模型嵌套的方法 ,用大区域的流量模拟结果作为小区域的边界条件 ,在小区域模型内细化网格和各项参数 ,再次计算小面积范围内的地下水流域。模型嵌套方法可以解决研究区边界条件不明确的问题。

参考文献 :

[1] BHATT K. Uncertainty in wellhead protection area delineation due to uncertainty in aquifer parameter values[J]. Journal of Hydrology , 1993 , 149 :1-8.

.....

(上接第 56 页)

[6] DONOVAN R ,HONDZO M. Hydrodynamic effects on sediment oxygen demand[C]/World Water Congress ,USA :ASCE , 2001 :450-458.

[7] 张丽萍 ,袁文权. 底泥污染物释放动力学研究[J]. 环境污染治理技术与设备 ,2003 ,4(2) :22-26.

[8] DRAGO M. A three-dimensional numerical model for eutrophication and pollutant transport[J]. Ecological Modelling ,2001 (145) :17-34.

[9] 董浩平. 城市湖泊底泥污染释放规律及在水质模型中的应用[D].南京 :河海大学 ,2005.

[10] ROBERT P. LAMBERTUS L. Estimation of sediment-water exchange of solutes in lake veluwe[J]. Water Research , 1999 ,33(1) :279-285.

[11] 龚春生 ,姚琪. 城市浅水型湖泊底泥释磷的通量估算 :以南京玄武湖为例[J]. 湖泊科学 ,2006 ,18(2) :179-183.

[12] MESNAG V ,OGIER S. Nutrient dynamics at the sediment-water interface in a mediterranean lagoon(Thau ,France) : influence of biodeposition by shellfish farming activities[J]. Marine Environmental Research ,2007(63) :257-277.

[13] CHAO Xiao-bo ,JIA Ya-fei. Numerical modeling of water quality and sediment related process[J]. Ecological Modeling , 2007(201) :385-397.

[14] EIJI K. TAKEHIKO F ,HIKIOAKI S. Modeling of P-dynamics and algal growth in a stratified reservoir-mechanisms of P-cycle in water and interaction between overlying water and sediment[J]. Ecological Modeling ,2006(197) :331-349.

[15] 戴树桂 ,张明顺 ,庄源益. 底泥中氮的主要迁移转化过程及其转化模型的研究[J]. 环境科学学报 ,1990 ,10(1) :1-9.

[2] 李建新. 我国生活饮用水水源保护区问题的探讨[J]. 水资源保护 ,2000(3) :12-14.

[3] 何杉. Processing Modflow 软件在地下水污染防治中的应用[J]. 水资源保护 ,1999(3) :16-18.

[4] 国家环境保护总局. 饮用水水源保护区划分技术规范[S]. 北京 :中国环境科学出版社 ,2007.

[5] 陈崇希 ,李国敏. 地下水溶质运移理论及模型[M]. 武汉 :中国地质大学出版社 ,1994.

[6] 赵春虎 ,李国敏 ,黎明 ,等. 盆地地下水系统的数值模拟研究 :以山西灵石静升盆地为例[J]. 地下水 ,2008 ,30(2) :14-17.

[7] 秦大军. 地下水 CFC 定年方法及应用[J]. 地下水 ,2004 ,27(6) :435-437.

[8] KONSTADINOS N ,MOUTSOPOULOS V A. Delineation of groundwater protection zones by the backward particle tracking method : theoretical background and GIS-based stochastic analysis[J]. Environmental Geology ,2008 ,54(5) :1081-1090.

[9] 毕小刚. 构筑“三道防线”保护饮用水源[J]. 环境保护 ,2007 ,38(19) :52-54.

(收稿日期 :2008-09-23 编辑 :高渭文)

[16] 李剑超 ,褚君达 ,丰华丽. 河流底泥冲刷悬浮对水质影响途径的实验研究[J]. 长江流域资源与环境 ,2002(3) :137-140.

[17] 何用 ,李义天. 泥沙污染水质模型研究综述[J]. 水资源保护 ,2004(5) :5-9.

[18] REDDY K R ,FISHER M M ,IVANOFF D. Resuspension and diffusive flux of nitrogen and phosphorus in a hypereutrophic lake[J]. Journal of Environmental Quality ,1996(25) :363-371.

[19] 褚君达 ,徐惠慈. 河流底泥冲刷沉降对水质影响的研究[J]. 水利学报 ,1994(11) :43-69.

[20] 何用 ,李义天 ,郗会彩 ,等. 泥沙污染水质模型研究[J]. 四川大学学报 :工程科学版 ,2004 ,36(6) :12-17.

[21] 张景钰 ,方江华. 关于太湖污染底泥生态疏浚工程的探讨[J]. 西部探矿工程 ,2005(2) :213-215.

[22] 姜安刚 ,李凤歧. 胶州湾红岛码头疏浚物质输移扩散数值模拟[J]. 海洋科学 ,2003 ,27(12) :45-49.

[23] LEWIS M A ,WEBER D E ,STANLEY R S. Dredging impact on an urbanized Florida bayou : effects on benthos and algal-periphyton[J]. Environmental Pollution ,2001(115) :161-171.

[24] JE Chuang-hwan ,KIM Kyung-sub. Web-based application for estimating water quality impacts due to environmental dredging[J]. Environmental Geology ,2004 ,46(2) :217-225.

[25] 张华庆 ,李华国 ,岳翠平. 海河口潮流泥沙运动数值模拟及清淤方案研究[J]. 水动力学研究与进展 ,2002 ,17(3) :318-326.

[26] 张修峰 ,陆健健. 温州三埭湿地底泥疏浚对水体总磷浓度影响的生态模型研究[J]. 农业环境科学学报 ,2006 ,25(增刊) :158-162.

(收稿日期 :2009-03-28 编辑 :高渭文)