

地下水水源地保护区划分方法研究综述

徐海珍¹,李国敏¹,张寿全^{1,2},董艳辉¹

(1.中国科学院地质与地球物理研究所工程地质力学重点实验室,北京 100029;2.北京市水务局,北京 100038)

摘要 介绍国内外地下水水源地保护区划分方法的发展进程,重点剖析经验法、公式计算法、解析解模型法和数值模拟法的特点及适用条件。鉴于目前国际上流行的数值模拟方法中具有不确定性特征的水文地质参数是影响保护区划分的重要因素,强调了条件随机模拟思想对保护区划分的重要性,指出了地下水水源地保护区划分的发展趋势和研究方向。

关键词 地下水 水源地保护区 保护区划分方法 解析解模型 数值模拟 随机模拟

中图分类号 :P641.8 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2009)02-0080-05

Summary of research on the method of partition of the groundwater wellhead protection zone//XU Hai-zhen¹, LI Guo-min¹, ZHANG Shou-quan², DONG Yan-hui¹ (1. Key Laboratory of Engineering Geomechanics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. Beijing Water Authority, Beijing 100038, China)

Abstract :The development process of the method of partition of the groundwater wellhead protection zone is introduced. The characteristics and applicable condition of the empirical method, formulation calculation method, analytical model algorithm and numerical simulation method are anatomized. In the international popular numerical simulation method, the hydro-geological parameters with uncertain characteristics are important factors affecting the protection zone delineation, which emphasizes the importance of stochastic simulation in the protection zone delineation. Finally, the development and the research direction of the partition of the groundwater wellhead protection zone are described.

Key words :groundwater; wellhead protection zone; protection zone delineation method; analytical model; numerical simulation; stochastic simulation

水源地保护区是指国家为防止水源地(多为饮用水)污染、保护水源地环境质量而划定并要求加以特殊保护的一定面积的水域和陆域,它分为地表和地下水饮用水水源地保护区。近年来,世界人口的持续增长和水污染的日益加剧,促使各国更重视地下水并把其作为优先饮用水源,而建立保护区则是保护地下水水源地的有效手段。

早在 18 世纪末期,欧美工业国家就开始了对水源地保护区划分的研究,到 20 世纪末期研究方法已相对成熟,并颁布了许多与地下水水源地保护区划分工作相关的法规,其中包括影响广泛的美国 WHPP(well head protection program)计划。

我国水源地保护区划分工作始于 1984 年颁布实施的《中华人民共和国水污染防治法》^[1],当时主要针对地表水水源划分保护区。在 1989 年国家环保总局颁布的《饮用水水源保护区污染防治管理规

定》^[2]中,提出了地表和地下饮用水水源保护区划分和防护的原则。2002 年中华人民共和国第九届全国人民代表大会常务委员会第二十九次会议通过了《中华人民共和国水法》^[3]。为规范水源保护区的划分工作,国家环保总局于 2007 年初颁布了《饮用水水源保护区划分技术规范》^[4],对保护区划分的标准、方法、要求等做了系统规定。

地下水水源地保护区的划分,应根据水源地所处的地理位置、水文地质条件、井源类型、供水数量、开采方式和污染源的分布等完成。而实际的水文地质条件是复杂的,含水层的非均质、各向异性及水文地质参数的时空变异性等问题,导致了保护区划分的不确定性,增加了研究难度。随着人们对水源地保护区问题的不断探索,其划分方法也在不断改进,笔者将对水源地保护区划分研究发展中的几类主要方法进行总结,介绍各方法的原理、划分步骤和适用

条件等,并讨论其发展方向。

1 研究方法

早期的水源地保护区划分主要是根据经验进行的。随着人们对水文地质条件等认识的提高,考虑到划分的准确性,逐渐发展出公式计算法、解析解方法、数值模拟方法等。美国环境保护总署曾统计过各种划分方法,并总结出 6 种常用方法^[5]。近些年来,随着各学科的发展融合,水质分析、示踪剂试验与地下水测年(时间)等技术也逐渐被应用到水源地保护区划分研究中来。这些技术通常结合传统的划分方法,用来提高含水层系统水文地质参数获取的准确性,从而提高水源地划分的可靠性。

1.1 经验法

经验法是以井中水质为保护对象、以多年实践的经验半径为参数、按照简单图形(一般为圆形)划定各级保护区的方法。其中分区半径通常与时间密切相关。

著名的‘50 日流程等时线’是经验法的代表^[6]。20 世纪 30 年代,德国人 Knorr 通过试验发现饮用水中的病菌病原体在地下水层中的随流生存时间不多于 50 d,因此建立了‘50 日流程等时线’这个概念,并以此作为一级保护区界,之后,“50 日流程等时线”被许多国家采用。英国在 1902 年的玛基特法(Margate Act)中曾明确规定,井口附近 1 500 码(1 码=0.914 4 m)范围内需进行保护。英国卫生部于 1948 年建议半径 3 km 的圆形作为保护区^[7]。在地下水源保护工作初期,各国多采用经验法划定保护区。

中国早期的地下水源地保护区划分,主要是对国外经验法的借鉴。国内许多省市如辽宁^[8]、北京、郑州、大连、长春^[9]、洛阳^[10]、石家庄等,都采用经验法划分地下水水源地保护区,但由于缺乏统一的标准,各地的保护区划分结果相差很大。为了利于地下饮用水水源地保护工作的进一步开展,1989 年颁布的《饮用水水源地保护区污染防治管理规定》^[2]中,提出了一、二级及准保护区设立时应满足的条件,原则上采用了国际上的三级划分法^[11]。

1.2 公式计算法

考虑到不同地区地质条件的差异,在完全依靠经验值确定保护区半径方法的基础上发展出了公式计算法。该法依据简单的水文学原理,选取代表性水文地质参数,通过小型计算得到分区半径,再结合水源地地质条件对保护区形状(如圆形或椭圆形)、中心点位置等作适当调整,得到最终的保护区范围。

英国从 20 世纪 70 年代开始使用简单的地下水动力学公式计算保护区半径。在中国,使用公式计算

法获取中小型水源地保护区半径的情况比较多,例如对中小型孔隙水潜水型水源地,常按经验公式(式(1))计算圆形保护区半径^[12]。《饮用水水源地保护区划分技术规范》中已明确将该用法标准化。

$$R = \frac{\alpha KIT}{n} \quad (1)$$

式中: R 为保护区半径, m; α 为安全系数,一般取 150%; K 为含水层渗透系数, m/d; l 为地下降落漏斗范围内的平均水力坡度; T 为污染物水平迁移时间, d; n 为有效孔隙度。

高秀娟等^[13]曾将地下水水质污染预测近似解法引入国内,把复杂的弥散方程简化,得出预测水源地污染的计算公式,但其公式仅适用于一般建设项目对水源地的影响。

美国常用 CFR(calculated fixed radius)法^[14]计算保护区半径。其基本原理是假定保护区为圆柱形,根据抽水井内流入和抽出水量遵守质量守恒的原理,结合抽水井滤管长度,计算出保护区横截面半径。根据水均衡原理可知:

$$Qt = \pi r_t^2 nb \quad (2)$$

整理得

$$r_t = \sqrt{\frac{Qt}{\pi nb}} \quad (3)$$

式中: Q 为抽水量, m³/a; t 为各级保护区的时间标准, a; b 为抽水井滤管长度, m; r_t 为对应时间 t 的保护区半径, m。

式(2)最适合无越流发生的承压型水源地保护区半径计算。调整抽水量 Q ,则式(3)可以用于不同地质条件下的保护区划分^[15]。

公式法实际上也属于经验法的范围,这类方法的优点是简便易行。在其他研究手段尚未成熟时期,对于资料稀少的研究区,进行保护区划分选择经验法较好。但是,公式法具有较强的主观性,划分结果粗略,与实际地质条件脱离较大,常出现划定区域保护强度过高或过低的现象,尤其对于复杂的水源地问题不能满足需求。

1.3 地下水流动解析解模型法

地下水流动解析解模型法将水文地质条件简化,例如假设含水介质均质、各向同性、等厚,降落漏斗呈圆形,含水层无限延伸等,假定变量连续并建立水流方程,采用解析解法求解方程,得到抽水井周围的水位降深,并结合初始水位得到水头分布,再刻画一定时间内流入井中水质点的分布面积。

在 20 世纪 80 年代末到 90 年代初,解析解模型法是划分地下水水源地保护区的主要方法,不少学者在该法上进行了大量的研究和实例论证。

Muskat^[16]论证了层流条件下对单井的解析解

法;Rodd^[17]提出把捕获区内的补给量考虑进计算中;Bair等^[18]开发出CAPZONE,用来计算抽水井周围各单元节点的降深,并采用Monte-Carlo模拟法判断水力传导系数和有效孔隙度取值对结果不确定性的影响;Shafer^[19]开发出GWPATH,用来描绘质点在流场中的运动轨迹。在俄亥俄州的一些典型研究区,如裂隙岩溶含水层和沉积含水层,Bair等^[20]用CAPZONE和GWPATH处理完整井问题,得到了理想的结果;Bhatt^[21]利用地下水流解析模型研究各地质参数的取值对保护区范围的影响,依次分析了含水层厚度、有效孔隙度、水力梯度和水力传导系数对结果的影响程度。

另外,在解析法发展后期,还出现了一些准解析模型。RESSQC是1个典型的准解析模型软件,它是WHPA中的1个模块^[22],用于刻画满足Theis井流方程的承压完整井的捕获区,DREAM可用来绘出水头的分布,通常联合RESSQC和DREAM来确定保护区范围^[23];Evers等^[24]也开发过1套准解析软件,计算抽水井捕获区内的补给量,其研究结果表明补给量考虑与否对保护区范围的大小和形状影响非常明显。

结合计算模型和绘图软件,用解析解模型法来划分地下水水源地保护区,可以根据不同研究区的地质条件选择井流方程,精确度比经验法有了很大的提高。但是,解析法在建立概念模型的过程中需要预先做出许多假设,而实际地质问题比假设情况复杂得多,实际情况与假设情况之间的差距影响了结果的可靠性。因此,需要一种能解决复杂地下水流问题的方法来处理解析法难以解决的问题,这样,数值模拟方法就自然地运用到水源地保护区划分研究中了。

1.4 地下水流动/溶质运移数值模拟法

数值模拟法是求解大型地下水水源地问题的主要方法。其要点是将渗流区分割成若干个小单元,各单元近似看做是均质的,结合地质条件选择合适的水文地质参数,得到合理的水文地质概念模型,将变量离散化并建立方程,用数值法求解每个单元流动方程,模拟研究区内的水流状态,最后结合质点运动轨迹与时间等条件划定各级保护区。

该方法发展过程中,学者们的关注点很多。其中,水文地质参数取值问题是对保护区结果可信度影响最大的因素之一,对该问题的研究可以分为2类,即水文地质参数确定和不确定情况下的保护区划分方法研究。前者以抽水试验或经验等手段获取确定的水文地质参数作为前提进行模拟计算;后者是在水文地质参数无确定值的情况下,首先判断

出各参数的合理取值范围,在该范围内取值、组合,依照一定的限制条件(如观测水头)排除不可能实现的组合方式,对剩余情景的模拟结果进行叠加,最后根据统计和风险评价得到保护区范围。

1.4.1 参数确定条件下的保护区划分

关于参数确定条件下的保护区划分,早期的研究工作都是在水文地质参数确定的情况下进行的。Rock等^[25]用数值模拟法对奥地利东南部的一个地下水水源地划分保护区,结果表明,水流系统的非稳定性对保护区面积大小和形状都有显著影响,如果将非稳定流近似为稳定流进行保护区划分,得到的结果会存在较大误差;Fadlelmawla等在埃及尼罗河三角洲地区用该法完成了地下水水源地保护区划分,同时得出抽水速率、水力梯度、垂向渗透系数及水力传导系数是影响保护区面积的最重要参数的结论^[26];Taylor等用数值法研究了孤立岛屿中含水层系统的保护区圈定问题,认为弄清上层滞水的厚度形状等对正确划定保护区至关重要^[27]。

用数值模拟法处理地下水问题是离不开计算机软件。比较成熟的MODFLOW^[28]是用有限差分法计算流场的软件;MODPATH^[29]可以模拟质点在任意时刻前后的运动轨迹;王金生等^[30]以及王澎^[31]以北京密云-怀柔-顺义冲积平原区第八水厂为例,将开采井群概化为1口大井,采用数值模拟方法,利用以上2个软件对该地下水源地进行了保护区划分。

1.4.2 参数不确定条件下的保护区划分

定量划分保护区的前提是需要整套的水文参数建立模型,而随着学者们对含水层系统非均质性认识的提高,由抽水试验等传统方法获取的水文地质参数不再是固定值,而是一个有代表性的取值范围^[32]。为了更科学合理地利用这些地质参数的取值范围,随机模拟的思想被引入地下水水源地保护区划分研究中来。

随机模拟法(unconditional stochastic simulation method)的基本思想是将未确定的参数在其范围内按一定规律取值,把各参数的所有取值随机组合,计算各情景下的保护区,然后根据统计结果划定各级保护区范围。在随机模拟的基础上设定限制条件,例如观测水头值等,来控制未确定参数的组合方式,将计算水头与观测值不匹配的组合方式去掉,然后在可能实现的组合基础上进行统计划分,这就是条件随机模拟法(conditional stochastic simulation method)的基本思想^[33-34]。

渗透系数分布的不确定性对各级保护区范围的影响一直是数值模拟法研究的重点。Varljen等^[35]用二维有限差分模拟地下水流动,并以观测点水位

作为限制条件,采用条件随机模拟法划分保护区,结果证明加入限制条件有助于降低保护区范围的不确定性,Bair等^[36]认为用随机模拟法得到的并不是确定的保护区面积,而是每个质点属于保护区范围的概率分布图,他们对美国一个地质资料稀少的水源地进行研究,采用 Monte-Carlo 模拟法确定水文地质参数的随机组合并求解^[37],用实例证明了条件随机模拟法是解决水文地质参数不确定问题的有效途径,李国敏等^[38]开发出的 STGF 是用有限单元法求解地下水流动方程的软件,采用 Monte-Carlo 思想确定含水层参数,Vassolo等^[39]将 STGF 应用到德国某地下水水源地保护区划分中,计算并得出了水源地保护区范围的概率分布图。

由于用单一方法确定地下水水源地保护区存在很大的不确定性,很多学者尝试过将几种研究方法进行对比。Bair 和 Roadcap 使用解析解模型法、准解析法和数值模拟法对裂隙岩溶区的抽水井保护区范围进行了研究,Springer 和 Bair 也使用这 3 种方法对古峡谷地区抽水井划分了保护区范围,指出数值模拟法对于刻画具体的地下水流动系统最有弹性,因此,该法用于以上 2 种地质条件得到的结果也是最理想的^[40];Kinzelbach 等^[41]采用二维和三维的解析法、数值法,分别研究了各向异性含水层中抽水井的保护区范围,测定出补给量对结果的影响巨大。

采用数值模拟法来计算水源地保护区范围,可以客观并较为详细地刻画实际含水层的结构与水文地质条件,适用于各种背景的水源地研究,尤其对于大型地下水源地保护区的划分,能得到比其他方法更为可靠的结果。我国颁布的《饮用水水源保护区划分技术规范》中,明确提出对于大型地下水水源地保护区要采用计算机数值模拟方法来评价与划分。

2 结语与展望

通过对比与分析地下水水源地保护区划分常用的几种主要研究方法可以看出,近年来国内外多选用地下水流动/溶质运移数值模拟法定量划分保护区。基于数值模拟方法划分结果的可靠性,在有条件的情况下,不论水源地规模大小,建议尽量采用数值模拟法进行地下水水源地保护区划分。另外,高性能计算机技术的快速发展与复杂地下水数值模拟计算关键问题的不断解决,也将加速数值方法作为地下水水源地保护区划分主要研究手段的普及。

随着各学科的交叉深入发展,在采用数值模拟法的基础上,地下水水源地保护区划分的技术也将越加丰富起来,主要有以下几个方面的发展趋势:

a. 在水文地质参数与降雨等条件不确定的情

况下,地下水水源地保护区划分的随机模拟分析仍将是今后发展的一个方向,条件随机模拟是研究的重点。结合随机模拟思想,把观测孔水位作为限制条件,对多个水文地质参数在合理的范围内取值并组合,将符合限制条件的模拟结果叠加,根据各点流入抽水井的概率圈定保护区,并进行风险分析评价。

b. 地下水系统数值模拟方法与同位素定年技术的有机耦合将是今后地下水水源地保护区划分方法的另一个重要研究方向。一方面根据同位素技术判断地下水与地表水、大气降水的半定量关系,结合研究区的气象资料,确定模型中各源汇项的取舍或取值范围;另一方面,根据地下水测年数据,结合观测点之间的地下水年龄差和距离,依照达西定律可判断部分水文地质参数(如渗透系数、水力坡度或孔隙度)的取值范围。获取参数取值的合理范围后,可结合条件随机模拟法计算,从而降低因参数取值不当引起数值模拟的不确定性,得到可靠的地下水水源地保护区划分结果。

c. 高性能计算机模拟技术将是未来用于复杂地下水水源地保护区划分的研究热点。过去的一些研究多限于个人计算机,对复杂的含水层结构与水文地质条件进行了简化,数值剖分较粗糙,未能客观精细地刻画实际的研究区地层与水文地质条件。近年来,高性能计算机技术的快速发展与推广,使得并行计算方法已经开始应用于地下水模拟研究,并将推动复杂的大型地下水水源地保护区划分的研究。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国第六届全国人民代表大会常务委员会第五次会议. 中华人民共和国水污染防治法[S]. 北京: 法律出版社,1984.
- [2] 中华人民共和国环境保护总局,卫生部,建设部等. 饮用水水源保护区污染防治管理规定[S]. 北京: 中国环境科学出版社,1991.
- [3] 中华人民共和国第九届全国人民代表大会常务委员会第二十九次会议. 中华人民共和国水法[S]. 北京: 法律出版社,2002.
- [4] HJ/T338—2007, 饮用水水源保护区划分技术规范[S].
- [5] EPA 440/6—87—010, Guidance for delineation of wellhead-protection areas[S].
- [6] 李建新. 我国生活饮用水水源保护区的问题研究[J]. 环境保护科学,2000,26(4): 21-22.
- [7] 李建新,唐登银. 生活饮用水地下水水源保护区的划定方法——英国的经验值法与实例[J]. 地理科学进展,1999,18(2): 153-157.
- [8] 宋吉明. 辽宁省水库饮用水水源保护区的设置与划分[J]. 环境科技,1992,12(3): 23-24.
- [9] 徐明峰,马振洲. 长春市地下水源地保护区划分研究

- [J]. 东北水利水电, 2006, 24(9): 22-24.
- [10] 杨松茂, 薛迎春. 洛阳市饮用水地下水水源保护区划分研究[J]. 环境科学研究, 1997, 10(2): 28-31.
- [11] 李力争. 划分地下水源地保护区的研究[J]. 中国环境科学, 1995, 15(5): 338-341.
- [12] 张丽君, 曹红, 马颖. 地下水源地保护区划分方法的探讨[J]. 辽宁城乡环境科技, 2006, 26(2): 9-10.
- [13] 高秀娟, 王聪明, 褚全家. 饮用地下水源地保护区划分界线的探讨[J]. 山西水利科技, 1996, 114(S1): 22-26.
- [14] THOMAS H. Delineating groundwater sources and protection zones[R]. Davis: University of California, 2002.
- [15] JAMES E M, MUESSIG K. Guidelines for delineation of well head protection areas in New Jersey[R]. New Jersey State: New Jersey Department of Environment Protection, 2003.
- [16] MUSKAT M. The flow of homogeneous fluids through porous media[M]. New York: McGraw-Hill, 1937.
- [17] TODD D K. Groundwater hydrology [M]. New York: John Wiley, 1959: 68.
- [18] BAIR E S, SPRINGER A E, ROADCAP G S. CAPZONE: an analytical flow model for simulating confined, leaky confined, or unconfined flow to wells with superposition of regional water levels[R]. The Ohio State: Univ Ohio EPA, Dept of Geological Sciences, 1991.
- [19] SHAFER J M. GWPATh: interactive ground-water flow path analysis[R]. Illinois: Illinois State Water Survey, 1987.
- [20] BAIR E S, SPRINGER A E, ROADCAP G S. Delineation of travel time-related capture areas of wells using analytical flow models and particle-tracking analysis [J]. Ground Water, 1991, 29(3): 387-397.
- [21] BHATT K. Uncertainty in wellhead protection area delineation due to uncertainty in aquifer parameter values[J]. J Hydrol, 1993, 149: 1-8.
- [22] BLANDFORD T N, HUYAKORN P S. WHPA: an integrated semi-analytical model for delineation of wellhead protection areas[CP]. Washington, D.C.: U.S. EPA Office of Ground Water Protection, 1989.
- [23] BONN B, ROUNDS S. DREAM: an analytical groundwater flow program[CP]. Chelsea: Lewis Publishers, 1990.
- [24] EVERS S, LERNER D N. How uncertain is our estimate of a wellhead protection zone[J]. Ground Water, 1998, 36(1): 49-57.
- [25] ROCK G, KUPFERSBERGER H. Numerical delineation of transient capture zones[J]. J Hydrol, 2002, 269: 134-149.
- [26] AMR A F. An approach for delineating drinking water wellhead protection areas at the Nile Delta, Egypt [J]. Journal of Environmental Management, 2006, 79: 140-149.
- [27] JAMES Z T, PWESON M. Capture zone delineations on island aquifer systems[J]. Ground Water, 1998, 36(5): 722-730.
- [28] McDONALD M G, HARBAUGH A W. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model [CP]. U.S. Government Printing Office: U.S. Geological Survey Techniques of Water Resources Investigations, 1988.
- [29] POLLOCK D W. User's Guide for MODPATH/MODPATH-Plot: a particle tracking post-processing package for MODFLOW [R]. Virginia: the U.S. Geological Survey, Earth Science Information Center, 1994.
- [30] 王金生, 王澎, 刘文臣, 等. 划分地下水源地保护区的数值模拟方法[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(4): 83-86.
- [31] 王澎. 用数值模拟的方法划分地下水源地保护区[J]. 山西焦煤科技, 2003, B(6): 48-49, 51.
- [32] 黄勇, 周志芳, 王锦国. 基于抽水试验的水文地质参数三维进化反演[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2002, 30(6): 26-29.
- [33] CAMP C V, OUTLAW J E. Stochastic approach to delineating wellhead protection areas [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1998, 124(4): 199-209.
- [34] LEEUWEN M V, CHRIS B M. Stochastic determination of the Wierden (Netherlands) capture zones [J]. Ground Water, 1999, 37(1): 8-17.
- [35] VARLJEN M D, SCHAFER J M. Assessment of uncertainty in time-related capture zones using conditional simulation of hydraulic conductivity [J]. Ground Water, 1991, 29(5): 737-748.
- [36] BAIR E S, ROADCAP G S. Comparison of flow models used to delineate capture zones of wells: 1. leaky-confined fractured-carbonate aquifer[J]. Ground Water, 1992, 30(2): 199-211.
- [37] BAIR E S, SAFREED C M, STASNY E A. A Monte-Carlo based approach for determining travel time-related capture zones of wells using convex hulls as confidence regions [J]. Ground Water, 1991, 29(6): 849-855.
- [38] LI Guo-min, VASSOLO S. Manual for stochastic groundwater flow (STGF): a 2D finite element program for flow calculation using stochastic Methods [CP]. Heidelberg of German: Heidelberg University, 1995.
- [39] VASSOLO S, KINZELBACH W, SCHAFER W. Determination of a wellhead protection zone by stochastic inverse modeling [J]. J Hydrol, 1998, 206(3/4): 268-280.
- [40] ABRAHAM E S, BAIR E S. Comparison of flow models used to delineate capture zones of wells: 2. stratified-drift buried-valley aquifer [J]. Ground Water, 1992, 30(6): 908-917.
- [41] KINZELBACH W, MARBURGER M, CHIANG Wen-hsing. Determination of groundwater catchment areas in two and three spatial dimensions [J]. J Hydrol, 1992, 134(1/2/3/4): 221-246.

(收稿日期: 2008-04-17 编辑: 高建群)