

doi: 10.3724/SP.J.1201.2013.01127

吴忠市金积地下水饮用水源地保护区划分

邓媛媛^{1,2,3}, 胡立堂^{1,2}, 高童^{1,2}, 王金生^{1,2}

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 地下水污染控制与修复教育部工程研究中心, 北京 100875; 3. 中海石油环保服务有限公司咨询信息中心, 北京 100012)

摘要: 对以地下水为主要供水水源的城市进行地下水饮用水源地保护区划分将提高饮用水的安全保障程度。在总结地下水水源地划分的原则和方法基础上, 利用 FEFLOW 软件建立了吴忠市金积傍河型地下水水源地的地下水数值模型, 模拟了规划的三种地下水开采情景下地下水的运动, 并利用反向粒子跟踪技术和水源地划分原则和标准确定了三级保护区范围。该研究可为吴忠市和其他类似地区地下水资源管理和有效保护提供科学依据和参考。

关键词: 地下水水源地; 保护区划分; 数值模拟; 反向粒子跟踪; 傍河

中图分类号: X143; TU991.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)01-0127-05

Delineation of Drinking Groundwater Sources Protection Areas in Jinji County of Wuzhong City

DENG Yuan yuan^{1,2,3}, HU Li tang^{1,2}, GAO Tong^{1,2}, WANG Jin sheng^{1,2}

(1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Engineering Research Center of Groundwater Pollution Control and Remediation of Ministry of Education, Beijing 100875, China; 3. Cnooc Environmental Protection Service Limited Company Consulting in Formation Center, Beijing 100012, China)

Abstract: Delineation of drinking groundwater sources protection areas in the cities where groundwater is the main water supply source can increase the degree of drinking water security. On the basis of the delineation principles and methods of the drinking groundwater source area, a numerical groundwater flow model was developed using FEFLOW to simulate the groundwater system of the near river groundwater source area in Jinji county of Wuzhong city. Three scenarios of planned groundwater exploration were simulated. The three level groundwater protection area was determined based on the method of inverse particle tracking and delineation principle and standard of groundwater source area. This study can provide scientific references for the management and effective protection of groundwater resources in Wuzhong city or other cities with similar hydrogeological conditions.

Key words: groundwater source area; delineation of protection zone; numerical simulation; inverse particle tracking; near river

地下水是我国许多城市的重要供水水源,也是维系区域生态环境的关键要素。建立地下水饮用水源地保护区目的是保护地下水饮用水源地免受污染,或使轻度受污染的水源水质逐渐恢复清洁;为此需要检测污染物运移的方向,及时采取措施,防止突发事件的发生,并通过对保护区的管理,恢复生态环境,涵养水分,净化水源,减少对补给水源的污染。目前我国地下水水质不断恶化、城市地下水水源地遭受不同程度有机污染,对城市主要供水的地下水饮用水源地进行保护区划分显得尤其迫切^[1]。地下水源保护和污染防治工作按保护区级别不同而要求不同,因此划定各级保护区的界线十分关键。保护区如果划分过小,则不能起到对水源地的保护作用;如果划得过大,则可能增加不必要的保护和污染防治工

作量,经济成本也会相应提高,因此保护区范围应该科学合理地加以确定^[2]。

地下水源地污染防治规划最先始于18世纪末期的德国,德国自来水85%以上依靠地下水供应^[3]。德国经过长期实践,在水源地保护区方面探索出一系列保护规范、模型、政策与法规^[4],并且建立了保护区的划定原则与方法以及分区分级保护等思想,被欧美等工业国家吸收采纳^[5-6]。国内在这方面尚处于起步阶段。1989年国家环保局等五部委联合颁布的《饮用水水源地保护区污染防治管理规定》,对水源地保护区的划分做了原则性规定^[7]。2007年1月颁布的《饮用水水源地保护区划分技术规范》(HJ/T 338 2007),明确规定了地下水饮用水水源地保护区划分的基本方法和饮用水水源地保护区划

收稿日期: 2012-11-21 修回日期: 2012-12-18 网络出版时间: 2013-01-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130124.1131.015.html>

基金项目: 国家“水体污染控制与治理”科技重大专项“饮用水源地环境保护与管理技术与示范”(2009ZX07419-003)

作者简介: 邓媛媛(1985-),女,山东威海人,硕士研究生,从事地下水环境影响评价等方面的工作。19851111yuan@163.com

通讯作者: 胡立堂(1976-),男,湖北潜江人,副教授,博士,主要从事地下水数值模拟和渗流计算方面的研究。litanghu@bnu.edu.cn

分技术文件编制的要求^[8]。划分地下水水源保护区时需要考虑众多因素,涉及技术和非技术两个方面。技术方面的因素包括保护区的自然地理状况、水文气候、地质及水文地质条件、污染源分布及污染物类型、供水井的分布及规模;而非技术因素包括经济负担能力、制度执行能力等。地下水水源保护区实施分级保护^[9],即从取水点(区)向外依次分为一级保护区、二级保护区和准保护区,保护级别从内向外逐渐降低。各级地下水水源保护区的范围应根据当地的水文地质条件确定,并保证开采规划水量时能达到所要求的水质标准。本文在总结地下水饮用水源地划分原则和方法的基础上,针对吴忠市典型傍河地下水水源保护区划分进行探讨。

1 地下水饮用水源地划分原则与方法

地下水水源保护区划分需依据一定原则,主要包括:(1)地下水和地表水统筹考虑;(2)水质和水量兼顾;(3)优先保护原则;(4)协调一致原则。指保护区划分要与地下水管理有关的部门之间协调,要考虑国家、省、地区、县级之间的协调,还要考虑与地下水保护相关的法律、规章和协议之间的协调一致;(5)预警原则。需要通过污染源、水文地质条件等因素的调查和地下水监测,预测地下水系统可能遭受的危害或潜在危害^[10],提前提出警告,选择合适的预防和保护措施,防止地下水污染。具体制定地下水水源保护区时需要根据研究区的实际情况和以上原则确定。

划分地下水水源保护区的方法很多,包括经验法、公式计算法、水文地质描绘法、解析模型法、地下水数值模拟法^[11]。数值模拟法是求解实际地下水水源保护区的主要方法,水力截获技术是目前国外应用最广的划分水源保护区的数值模拟技术之一^[12-14]。数值模拟法划分标准有距离标准和时间标准,由于距离标准没有考虑到污染物在含水层中发生的地球化学过程,这样单纯的用距离来划分保护区可能会造成过度保护或保护不足,因此地下水数值模型中普遍采用的是时间标准划分保护区,而且采用紧迫的时间观念,有利于保护部门及早做出保护措施,防止水源地的污染。相对于 50 日流程等时线,100 d 更有利于细菌的死亡,因为考虑到吴忠市地下含水层的空间异质性,有些细菌和病毒在超过 50 d 后仍然可以存活,因此采用 100 d 为一级保护区划分标准。

2 研究区概述

吴忠市地处我国西北(如图 1),位于银川市南部,黄河纵贯全境,引黄灌溉自秦汉以来有 2000 多年的历史,而且地下水饮用水源地属傍河地下水水源类型。研究区属中温带半干旱气候区,多年平均降水量 193.4 mm,多年平均蒸发量 2 013.7 mm。研究区地势南高北低,南部为牛首山及罗山余脉汇合而成的黄土丘陵地带;北部为黄河冲积平原,平均海拔高度为 1 125 m。

吴忠市区内含水层主要有第四系松散岩类孔隙潜水-承压含水层、第三系碎屑裂隙孔隙承压含水层。第四系最厚达 1 600 m,为地下水储存提供了良好条件,是建设水源地的主要含水层。地下水水源含水层介质类型主要为砂砾石或薄层状砂,含水层水力传导系数为 0.5~15 m/d,包气带性质为含较多的粉粒和黏粒的砂砾石(如表 1)。地下水水源

地土壤介质类型是砂质壤土或粉质壤土。总体上的岩性特征是:除表层为薄层黏性土之外,下层结构由松散粗碎屑物质组成,构成了巨大厚度的储水空间。

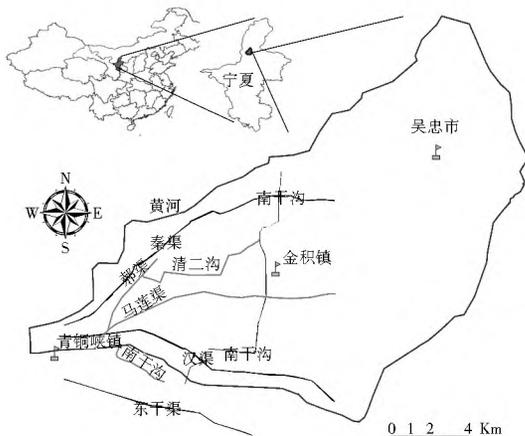


图 1 研究区域地理位置

Fig. 1 Location of study area

表 1 300 m 内典型钻孔岩性和厚度

Table 1 The lithology and thickness of the typical borehole

层序	单层厚度/m	岩性
1	6.47	黏砂土
2	15.00	砂卵石
3	5.47	砂黏土
4	14.77	砂卵石
5	11.18	砂黏土
6	18.42	砂卵石
7	5.56	黏砂土
8	3.17	砂卵石
9	2.19	黏砂土
10	35.71	砂卵石

吴忠市金积地下水水源地位于吴忠市西北部,主要补给量来自田间渗漏、引黄灌渠及排水沟下渗,其次是大气降水渗入补给;主要排泄方式为蒸发、开采和侧向径流至黄河,开采只供农村生活使用。水源地被两条主要的工业/生活排水沟(南干沟和清二沟)包围,清水沟沿岸依次分布着大小 16 家排污企业,南干沟沿岸有 11 家造纸、化肥等企业,每年排放工业废水达 862 万 t。两条排水沟全年污染严重,水质级别为劣 V 类,石油类污染物、高锰酸盐指数、挥发酚等污染物超标。区内化肥农药污染、禽畜养殖污染和农村生活污染等非点源污染也同时影响地下水质量:大量的化肥农药残留在土壤中,造成土壤污染,并通过渗漏作用造成地下水污染;由于养殖业发展迅猛,畜禽粪便直接或间接进入农田,然后随降雨径流或农田退水进入地表或地下水水体,引起水体氨氮含量增加;农村地区大量的生活垃圾随意堆放,其渗滤液污染地表水和地下水;大量未经处理的污水直接用于农田灌溉,未被土壤、作物吸收的 N、P 等元素以及有毒有害物质随径流进入地表水、地下水,直接危害着饮水和食物安全。从水文地质条件来看,吴忠地区含水层岩性均为砂砾石,渗透性良好,深层水与浅层水有直接的水力联系,上层的污染水、劣质水容易进入地下造成深层地下水水质恶化;而且金积水

源地的大量地下水开采将使地下水位长期低于南干沟和清二沟的地表污水水位,加快了浅层污染的地下水向下部较深层地下水的垂向流动。由此可见,吴忠地区水源地正面临严重威胁,保护区的划分刻不容缓。

研究区金积水源地设计日供水量为 40 000 m³/d,单井流量为 2 000 m³/d,且水源地要确保正常运行 20 年,中心水位降深限定在 30 m 以内。水源地共有 12 眼抽水井,其中 3 眼为备用井,井群之间的距离为 50 m。目前金积水源地尚未投入使用,本文将探讨不同井开采模式下水源地附近水头分布及保护区变化情况。

3 地下水流数值模拟

3.1 水文地质概念模型

在青铜峡口以北,黄河东岸,地下水为单一潜水区。潜水含水层的岩性为砂砾岩、中粗砂、细砂,其厚度由西向东变薄,普遍小于 20 m,水位埋深大于 10 m。承压水分布在洪积倾斜平原前沿细粒带与冲积平原交错部位,含水层岩性为细砂,厚度为 10~30 m,最厚达 50 m,水位埋深 1~10 m,承压水接受潜水的越流补给及侧向地下水径流补给。在 300 m 勘探深度内一般有二组承压水,上覆潜水含水层以砂卵石、粉细砂为主。据此将区域概化为具有统一水力场的多层含水系统,模拟区面积约为 201.82 km²。南边界为侧向流入边界,西边界、北边界为黄河,为水头值连续变化的三类边界(即黄河和地下水关系根据地下水位和黄河水位关系进行判断,其转化量也根据地下水位、黄河水位和河水-地下水水力传导系数来计算);东边界为侧向排泄边界。对于引水渠,直接概化为入渗项;对于排水沟,因其与地下水有一定的水力联系,常年排泄地下水,概化为第三类排水沟边界。上边界为潜水面边界。模型以第四系底部为界,为零流量边界。垂向上按区内承压区的多层岩性结构概化为三层:潜水层、弱透水层和承压含水层。

3.2 三维地下水流模拟

采用德国 WASY 水资源规划所开发的地下水有限单元数值计算软件(FEFLOW)^[15]进行模拟计算。平面上初始剖分节点为 2 468 个,在水源地集中开采区,网格加密;垂向上分为 3 个模拟层,各分层厚度按掌握的钻孔各层厚度插值;各分层岩性分区和赋值参考已进行的抽水试验结果和岩性水文地质参数的经验值。模型识别期为 2011 年 4 月至 2011 年 9 月。在多年平均条件下,地下水总补给与排泄量基本处于平衡状态,因此用稳定流模型计算的流场作为 2011 年年初的流场分布。输入 2011 年源汇项数据之后开始进行水文地质参数识别,经过拟合调参最终确定各区渗透系数值。2011 年 9 月模拟与实测的潜水位等值线比较见图 2,统测与模拟的观测孔水位关系见图 3,拟合的结果误差都在 3% 以内。

4 地下水水源地保护区划分

4.1 地下水水源地保护区划分

在地下水流场数值模拟结果的基础上,利用 FEFLOW 软件中的反向粒子追踪功能,在 20 年的水位流场基础上进

行反向示踪模拟。按照水质点流入水源井的时间,不同时间的迹线点连线即可画出各级水源地保护区范围。根据《饮用水水源保护区划分技术规范》中的时间标准,其中一级保护区时间为 100 d,二级为 1 000 d^[8],准保护区相当于水源井的水流捕获区,得到各级保护区范围。由于第 1 年水位变化快,一旦发生污染事件,污染物质在地下水中的运移速度也较快,因此有必要对第 1 年进行反向示踪模拟,与 20 年的保护区范围相互比较与优化,从而更准确地划分保护区范围。由于目前没有确定水源井开采方式,模型将水源井概化为 1 眼(情景一)、4 眼(情景二)和 12 眼开采井(情景三),分别划分 3 种情景保护区,模拟结果如下。

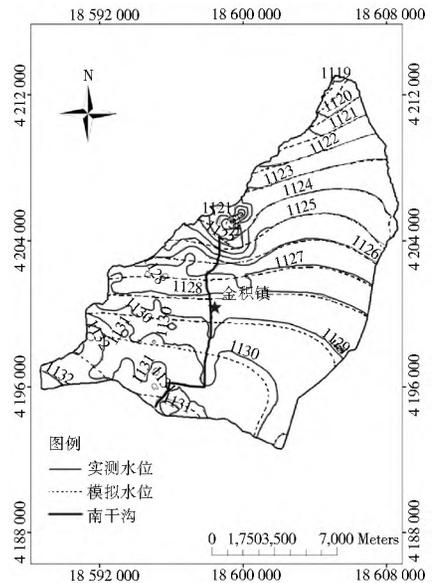


图 2 2011 年 9 月流场拟合图

Fig. 2 Comparison between the simulated and observed groundwater level contours

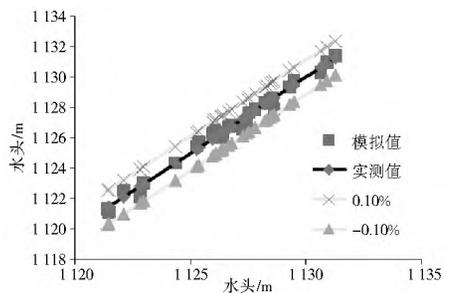


图 3 实测值与模拟值比较

Fig. 3 Comparison between the simulated and observed hydraulic heads in the observation wells

(1)情景一(见图 4)。保护区范围近似于以开采井为中心的圆,一级保护区的近似半径为 450 m(400~490 m);二级保护区的近似半径为 1 100 m(1 000~1 200 m)。准保护区的范围为集水区,可以根据迹线所覆盖的剩下区域来划定。

(2)情景二(见图 5)。一级保护区的形状也近似为椭圆,长轴的半径为向水流上游方向延伸 350 m,短轴为向下游方向延伸 130 m;二级保护区的形状也近似为椭圆,长轴的半径为向水流上游方向延伸 850 m,短轴为向下游方向延伸 200 m。

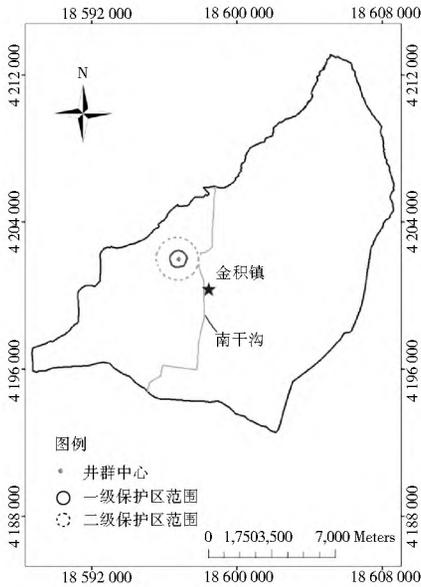


图 4 情景一地下水保护区划分

Fig. 4 Delineation of groundwater protection area under Scenerio 1

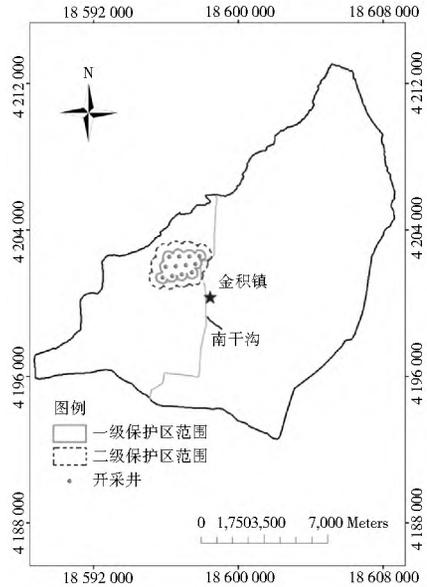


图 6 情景三地下水保护区划分

Fig. 6 Delineation of groundwater protection area under Scenerio 3

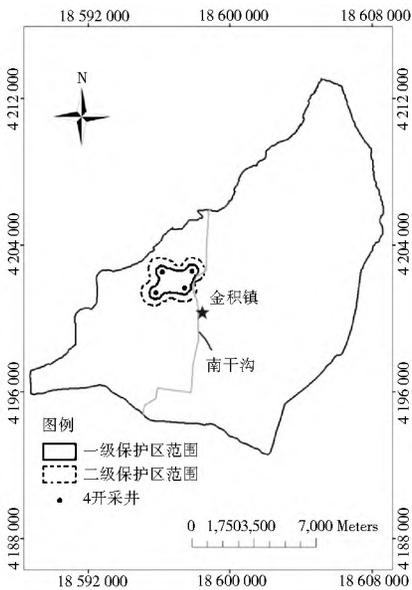


图 5 情景二地下水保护区划分

Fig. 5 Delineation of groundwater protection area under Scenerio 2

(3) 情景三(见图 6)。每个井的反向示踪形状近似为椭圆,一级保护区(6 号、7 号井除外)长轴的半径为向水流上游方向延伸 350 m,短轴为向下游方向延伸 130 m;二级保护区的长轴的半径为向水流上游方向延伸 800 m,短轴为向下游方向延伸 180 m;6 号、7 号井一级保护区的形状近似为圆形,半径为 300 m。准保护区的范围为集水区,可以根据迹线所覆盖的剩下区域来划定。

4.2 保护区划分结果分析

水源地增加地下水开采后产生降落漏斗(图 7),由于研究区临近黄河有黄河的入渗补给,三种模拟情景下 20 年降深在 30 m 以内,可保证水源地的正常运行。当将整个井群概化成一个水井时,一级保护区范围过小,没有包括整个井群;并且一、二级保护区的形状近似圆形,不符合实际粒子迁移情况。当概化为 4 眼开采井时,井群间相互干扰较小,各个井的反向示踪情况符合基本实际粒子运移情况;但是由于

两两姐妹井之间距离较远(大于 150 m),导致一级保护区的范围出现空隙,增加了水源地的安全风险。当采用所有的开采井进行保护区划分时,抽水引起的水位降深最小,最符合水源地开采的实际情况,且一级保护区包含所有的水源井之间的空隙,因此当开采井为所有的水源开采井时,保护区划分范围最准确。模拟示踪粒子经过 100 d 的逆向轨迹,将最外层示踪粒子的起点连接起来的范围就是一级保护区。同理,二级保护区范围分别为 1 000 d 的等值线。每个井的反向示踪形状近似为椭圆,一级保护区长轴的半径为向水流上游方向延伸 350 m,短轴为向下游方向延伸 130 m;二级保护区的长轴的半径为向水流上游方向延伸 800 m,短轴为向下游方向延伸 180 m。准保护区的范围为集水区,可以根据迹线所覆盖的剩下区域来划定。

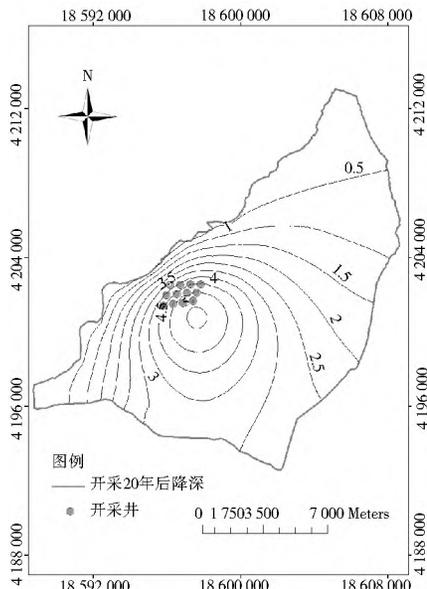


图 7 情景三潜水位降深等值线图

Fig. 7 Contour map of groundwater drawdown under Scenerio 3

5 结语

(1) 数值模型对水源地的实际水文地质条件及水源井的

数量及开采情况进行准确的刻画,提高了地下水饮用水源地保护区划分的精度。采用数值法划分地下水水源地保护区,可以预测地下水水源地投入使用后地下水的时空变化趋势,以便及时对水源地做出预警,能够及时的对环境突发事件做出反应。

(2)采用FEFLOW软件建立了金积傍河地下水水源地的三维地下水流数值模型,在模型识别基础上,对水源井开采的3种布井方案分别进行了水源地保护区划分,3种方案下地下水头降深满足规划的最大30m降深要求。在金积水源地内将水源井概化成1眼井,一级保护区划分面积过小,而将水源井概化成12眼开采井模型,能够很好地反应水源地开采井布局,因此得出的地下水保护区范围比较准确。如果水源地投入使用,除在饮用地下水水源地的三级保护区进行宣传教育外,还需要在三级保护区内对傍河水源地周围的地下水水质、环境应进行严格的监测,尽可能避免或减少对生态环境和供水安全的影响,保证傍河水源地的稳定和安地运行。

参考文献(References):

[1] 矫勇. 统一思想, 明确目标, 精心组织, 编制好城市饮用水源地安全保障规划[EB/OL]. http://www.mwr.gov.cn/slx/slyw/200507/t20050729_148799.html, 2005-07-29. (JIAO Yong. Unified Thought, Clear Objectives, Elaborate Organization, Work out City Drinking Water Security Planning[EB/OL]. http://www.mwr.gov.cn/slx/slyw/200507/t20050729_148799.html, 2005-07-29. (in Chinese))

[2] 李砚阁, 雷志栋. 地下水系统保护研究[M]. 中国环境科学出版社出版, 2008. (LI Yan ge, LEI Zhi dong. The Reserch of Groundwater System Protection[M]. China Environmental Science Press, 2008. (in Chinese))

[3] 马斌, 谭柳, 潘惠民. 发达国家水源地保护模式研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(3): 53-56. (MA Bin, TAN Liu, PAN Huimin. Research on Models of Water Source Protection in Developed Countries[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2010, 8(3): 53-56. (in Chinese))

[4] 李建新. 德国饮用水水源地保护区的建立与保护[J]. 地理科学进展, 1998, 17(4): 88-97. (LI Jian xin. The Conservation Areas for Drinking Water Resources in Germany[J]. Progress in Ge

ography, 1998, 17(4): 88-97. (in Chinese))

[5] Gartner A. Die Hygiene des Wassers Gesundheitliche Bewertung, Schutz[M]. Braunschweig: Verbesserung Untersuchung der Gew aesser, 1915.

[6] Noering F. W asserschutzbiete[J]. GW F W asser A bw asser, 1984, 6: 169-171.

[7] 国家环境保护局. 关于饮用水源保护区污染防治管理规定[Z]. 1989. (The National Environmental Protection Agency. Pollution Prevention Management Regulations of Drinking Water Protection Zones[Z]. 1989. (in Chinese))

[8] HJ/T 338-2007, 饮用水水源地保护区划分技术规范[S]. (HJ/T 338-2007, Technical Guideline for Delineating Drinking Water Source Protection Areas[S]. (in Chinese))

[9] 方华山. 银川地区水文地质条件分析及地下水水源地保护区划分[D]. 西安: 长安大学, 2009. (FA NG Hua Shan. Analysis of Hydrogeology Condition and the Wellhead Protection Zoning Division in Yinchuan Area[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009. (in Chinese))

[10] 张伟红. 地下水污染预警研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007. (ZHANG Wei hong. Study on the Early Warning of Groundwater Pollution [D]. Changchun: Jilin University Doctoral Dissertation, 2007. (in Chinese))

[11] 李国敏, 徐海珍, 黎明, 等. 地下水源地保护区划分方法与应用[M]. 北京: 中国科学环境出版社, 2010. (LI Guomin, XU Hai zhen, LI Ming, et al. Methods of Drinking Groundwater Protection Area Delineation and the Application[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2010. (in Chinese))

[12] John M.S. Reverse Pathline Calculation of Time related Capture Zones in Nonuniform Flow[J]. Ground Water, 1987, 25(3): 283-289.

[13] Carl DM. Capture Zones for Simple Aquifers[J]. Ground Water, 1991, 29(4): 587-590.

[14] Stuart G. Analytical Model for Estimation of Steady-state Capture Zones of Pumping Wells in Confined and Unconfined Aquifers[J]. Ground Water, 1993, 31(1): 27-32.

[15] Diensch H-J G. WASY Software FEFLOW (R) - Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System: Reference Manual[M]. Berlin, Germany: WASY GmbH Institute for Water Resources Planning and Systems Research, 2005.

《南水北调与水利科技》编辑部郑重声明

《南水北调与水利科技》自创刊以来,从未委托任何中介机构、网站及个人征稿,请广大读者、作者提高警惕,不要通过他人投稿,更不要向他人或不明机构缴纳任何费用。

编辑部投稿邮箱: nsbdqk@263.net, 电话: 0311-85020507, 85020512, 85020535, 85020630, 85020639。

《南水北调与水利科技》编辑部