

基于数值模拟的河道再生水补充区地下水监测网构建

杨庆,林健,姜媛

(北京市水文地质工程地质大队,北京 100195)

摘要:再生水作为改善城市景观用水纳入河道,可其对地下水具有潜在的污染风险。通过构建区域地下水数值模型,应用质点追踪技术,计算出永定河补水区在河湖受水后地下水 5 a 运移 1.47 km、20 a 运移 6.32 km,年均运移 0.32 km。在数值模拟的基础上,依据地下水运移轨迹,结合区域水文地质条件,将研究区划分为核心监控区、二级监控区和控制监控区 3 个地下水监测分区,并提出各分区地下水监测井的布设原则及布设方式,实现地下水环境监测网络的优化。

关键词:再生水;地下水监测;数值模拟;质点运移

中图分类号:X523;X143;TV138

文献标识码:B

文章编号:1006-2009(2015)01-0014-04

Establishing the Groundwater Monitoring Network for the Areas of Reclaimed Water Reused to River Based on Numerical Simulation

YANG Qing, LIN Jian, JIANG Yuan

(Hydrogeology and Engineering Geology Team of Beijing, Beijing 100195, China)

Abstract: Reclaimed water, which was used as replenished water to improve urban landscape, was drained into river, while it have potential pollution risk to groundwater because of its complex composition. A numerical simulation of a groundwater basin was established, combining with particle transportation technology, to calculate the groundwater of Yongding River moving 1.47 km in 5 years and 6.32 km in 20 years, the average velocity is 0.32 km per year. Based on the particle transport model of groundwater numerical simulation, three monitoring districts were set: Core monitoring area, Second monitoring area and Control monitoring area, and presented the layout principle and the method of monitoring wells.

Key words: Reclaimed water; Groundwater monitoring; Numerical simulation; Particle transport

2010 年北京市开始打造永定河绿色生态走廊,将干涸的永定河道建成“五湖一线”工程,水源以再生水为主^[1]。河道再生水补给区(以下简称研究区)位于永定河冲洪积扇区的上部,地层颗粒较粗,包气带对地下水成分吸附及降解作用较小,地表水和地下水的水力联系极为密切,是北京市平原区地下水的主要补给区^[2]。

地下水一旦被污染,其恢复技术难度大、周期长、费用高,因此地下水保护应以“预防为主,重在保护”为原则。《全国地下水污染防治规划(2011—2020 年)》^[3]明确指出,地下水污染防治应“预防为主,综合防治,开展地下水污染状况调查,加强地下水环境监管”。我国再生水虽然有严格的标准^[4-6],但是再生水中仍含有大量的营养盐分、微

量有机污染物、固体悬浮微粒和微生物等^[7],这可能会使回用区地下水环境面临一定的污染风险。再生水作为河道生态用水回用,将通过河床渗透系统过滤后参与地下水循环,再生水的水质及其回用技术将直接影响地下水和含水层的状态,其不良影响往往具有滞后性和长期性^[8],为此需要建立长期有效的监测体系^[9]。今通过构建区域地下水数值模型,运用质点追踪技术,根据地下水运移轨迹,

收稿日期:2014-04-18;修订日期:2014-11-26

基金项目:水利部公益性行业科研专项基金资助项目(201001067);北京市财政基金资助项目(PXM2013_158305_000004, HCZB-2012-BJ1188)

作者简介:杨庆(1980—),男,湖南沅陵人,高级工程师,硕士,主要从事地下水环境研究。

制定研究区的地下水监测体系,合理布设地下水监测井,实现地下水环境监测网络的优化。

1 河道入渗的模拟预测

1.1 模型简介

1.1.1 概念模型

研究区位于永定河冲洪积扇的顶部地区,地层主要由砂卵石、砂砾石和含砾石砂层组成,其埋藏和分布由西向东呈有规律的变化,按含水层的岩性、结构,大致可以划分为 2 个含水层组:一是单层砂卵石、砂砾石含水层,主要分布于永定河河床、河漫滩及一级阶地,位于西钓鱼台—昆明湖以西,含水层渗透性能好,渗透系数 $300 \text{ m/d} \sim 500 \text{ m/d}$,大部分地区地表没有或有少量黏性土覆盖。二是多层砂卵石、砂砾石含水层,主要位于西钓鱼台—昆明湖以东一带,有两三层砂砾石、含砾石砂层含水层,含有透镜状的砂黏土夹层,渗透系数 $50 \text{ m/d} \sim$

$$\left\{ \begin{array}{l} S \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \varepsilon \\ \mu \frac{\partial h}{\partial t} = K_x \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)^2 + K_y \left(\frac{\partial h}{\partial y} \right)^2 + K_z \left(\frac{\partial h}{\partial z} \right)^2 - \frac{\partial h}{\partial z} (K_z + p) + p \\ h(x, y, z, t) \Big|_{t=0} = h_0 \\ K_n \frac{\partial h}{\partial \vec{n}} \Big|_{\Gamma_2} = q(x, y, z, t) \\ \frac{\partial h}{\partial \vec{n}} \Big|_{\Gamma_4} = 0 \end{array} \right.$$

式中: Ω 为渗流区域; h 为含水层的水位标高, m ; t 为计算时间, d ; K_x, K_y, K_z 分别为 x, y, z 方向的渗透系数, m/d ; K_n 为边界面法向方向的渗透系数, m/d ; S 为承压含水层储水系数, m^{-1} ; μ 为潜水含水层的重力给水度; ε 为含水层的源汇项, d^{-1} ; p 为潜水面的降水入渗量, d^{-1} ; h_0 为含水层的初始水位分布, m ; Γ_0 为渗流区域的上边界, 即地下水的自由表面; Γ_2 为渗流区域的侧向边界和永定河入渗补给边界; Γ_4 为渗流区域的下边界, 即承压含水层底部的隔水边界; \vec{n} 为边界面的法线方向; $q(x, y, z, t)$ 定义为二类边界的单宽流量, $\text{m}^2/(\text{d} \cdot \text{m})$, 流入为正, 流出为负, 隔水边界为 0。

选择地下水模型软件 GMS 计算该定解问题, 建立研究区地下水数值模拟模型。水平剖分在河湖地段加密, 最小网格为 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$, 最大网格长度为 500 m 。其中有效单元格为 9 191 个, 见图 1。

300 m/d 。

根据上述水文地质条件, 模型在空间上分为 2 层, 第一层含水层组底板深度 $60 \text{ m} \sim 70 \text{ m}$, 第二层底板深度 $60 \text{ m} \sim 300 \text{ m}$ 。在垂向上除了大气降水补给外, 底部含水层与奥陶系灰岩直接接触, 接受越流补给。模型区西边以西山为界, 东部到西城区, 南边以大兴为边界, 北部以昆明湖为边界, 总面积约 365 km^2 , 深度以见基岩为准。

研究区地下水的主要补给源为大气降水入渗、山区侧向流入、河湖入渗、农业灌溉回渗和基岩水顶托补给; 主要排泄源为人工开采和侧向流出。地下水动态主要为降水-人工开采型, 地下水水位受降水和人工开采的影响而变化。

1.1.2 数值模型

对于上述非均质、各向异性、空间三维结构、非稳定地下水水流系统, 采用地下水水流连续性方程及其定解条件式来描述。

$$x, y, z \in \Omega, t \geq 0$$

$$x, y, z \in \Gamma_0, t \geq 0$$

$$x, y, z \in \Gamma_2, t \geq 0$$

$$x, y, z \in \Gamma_4, t \geq 0$$

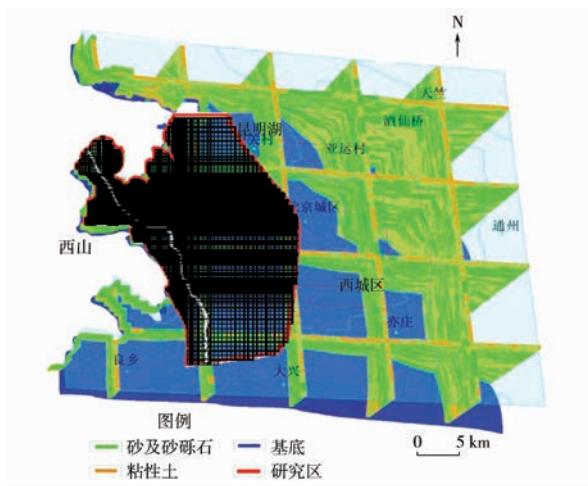


图 1 研究区地层三维结构及网格剖分

Fig. 1 Three-dimensional hydrogeology section and mesh generation for the study area

1.1.3 模型识别和验证

模型的识别和验证是整个模型模拟中极为重要的一步,要进行反复的修改参数和调整某些源汇项才能达到较为理想的拟合结果,这种识别和检验的方法也称为试估计-校正法,其属于反求参数方法之一。模型的识别和验证期为 2005 年 1 月 1 日—2010 年 12 月 31 日。图 2(a)(b) 为 187-1 号、446 号观测孔水位计算值和观测值的拟合情况。

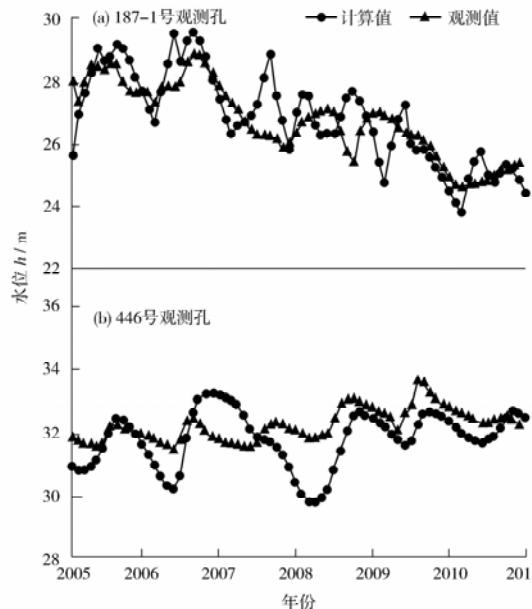


图 2 观测孔水位计算值和观测值拟合曲线

Fig. 2 Relative curves between the calculating value and observing value in the observation wells

由图 2(a)(b) 可见,识别和验证后,模型所计算的流场与实际流场吻合,长观孔的计算水位动态变化与实测的水位动态变化曲线趋于一致,且相对误差在 5% 以内。所建立的模拟模型符合实际的水文地质条件,基本反映了地下水系统的水力特征,可利用模型进行地下水运移的模拟预测。

1.2 模型预测及质点追踪

根据再生水的使用情况,假设现有的减渗条件不发生变化,预测期为 20 a。运用质点追踪技术,对河湖主要受水段进行质点追踪。河湖主要受水段地下水水质点运移情况见图 3。以永定河受水区为起点,地下水水质点 5 a 运移了 1.47 km,20 a 运移 6.32 km,年均运移距离 0.32 km,见表 1。

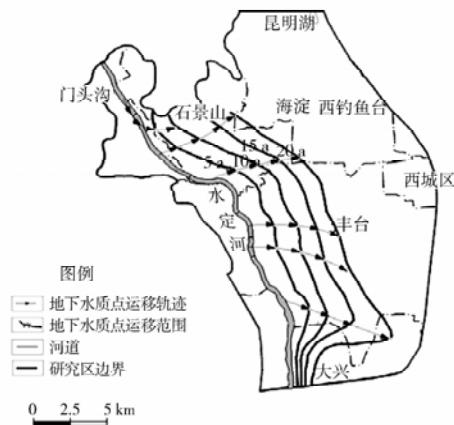


图 3 地下水质点 20 a 运移距离

Fig. 3 The groundwater particle transport distance in 20 years

表 1 质点运移距离及速率

Table 1 Particle transport distance and velocity

地点	5 a		10 a		15 a		20 a	
	距离 d/km	速率 v/ (km · a ⁻¹)	距离 d/km	速率 v/ (km · a ⁻¹)	距离 d/km	速率 v/ (km · a ⁻¹)	距离 d/km	速率 v/ (km · a ⁻¹)
莲石湖	1.19	0.24	2.92	0.35	4.46	0.31	5.82	0.27
园博湖	1.31	0.26	3.16	0.37	4.65	0.30	6.03	0.28
晓月湖	1.62	0.32	3.24	0.32	4.66	0.28	6.28	0.32
宛平湖	1.74	0.35	3.52	0.36	5.16	0.33	7.14	0.40
平均值	1.47	0.29	3.21	0.35	4.73	0.31	6.32	0.32

2 地下水监测网的建设方案

以永定河受水区为重点研究对象,兼顾地下水水流场,根据质点运移范围设置核心监控区、二级监控区和控制监控区。

(1) 核心监控区。以永定河受水河道为起点,

地下水水质点运移 5 a 的范围。该区需要在主要受水区河道内布设监测井,并在河道附近按照地下水水质点运移方向,选取适宜的位置,以河道为起点,按线性方式布置监测井,每组监测井 7 眼,距河道为 5 m、20 m、40 m、80 m、200 m、500 m、1 500 m。

(2) 二级监控区。以永定河受水河道为起点,地下水水质点运移 20 a 的范围。该区一方面作为区域控制井,总体和宏观上控制再生水影响区域地下水的环境质量状况和地下水质量空间变化;另一方面,由于目前模型模拟的前提条件是河道保持现有的减渗层正常工作,可是在遭遇洪水后减渗层出现破坏等条件下,地下水水质点运移的速度要远大于现状减渗条件,因此,二级监控区监测井同时也作为备用监测井,监控河道内减渗层出现破坏或洪水而出现大量河水入渗的情况。依据地下水运移流速,可 1 km² 布设 1 个监测井。

(3) 控制监控区。包括研究区内主要水源地及其他地区。该区一方面作为区域控制井,总体和宏观上控制再生水影响区域地下水的环境质量状况和地下水质量空间变化;另一方面,可在地下水水源地的捕获区加密布设监测井。

一般而言,考虑监测结果的代表性和实际采样的可行性、便利性,尽可能使用目前已有的专门监测井,补充部分自备井。而在核心监控区务必补充专门监测井,以实时地反馈地下水环境的变化,监测频率建议每季度 1 次。

3 结语

地下水污染形势日趋严峻,对其防护必须从源头抓起,加强污染源监管能力建设,提升污染源监测水平^[9-12]。今在数值模拟的基础上,依据地下水运移轨迹,结合区域水文地质条件,将研究区划分为核心监控区、二级监控区和控制监控区 3 个地下水监测分区,并提出了各区地下水监测井的布设原则及布设方式。通过最有效的地下水监测井布

设,构建最优化的地下水环境监测网络。该技术亦适用于针对污染源、地下水源地等特定目标的地下水环境监测。

〔参考文献〕

- [1] 沈来新,邓卓智.北京水系生态治理的理念与实践[J].中国水利,2010(20):86-88.
- [2] 张安京,叶超,李宇,等.北京地下水[M].北京:中国大地出版社,2008:51-52.
- [3] 中华人民共和国环境保护部.全国地下水污染防治规划(2011—2020 年)[EB/OL].(2011-10-28).<http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201111/W02011109376922920938.pdf>.
- [4] 国家环境保护总局,国家质量监督检验检疫总局.GB 18918-2002 城镇污水处理厂污染物排放标准[S].北京:中国环境出版社,2002.
- [5] 国家质量监督检验检疫总局.GB/T 18921-2002 城市污水再生利用 景观环境用水水质[S].北京:中国标准出版社,2002.
- [6] 国家质量监督检验检疫总局.GB/T 19772-2005 城市污水再生利用 地下水回灌水质[S].北京:中国标准出版社,2005.
- [7] 胡洪营,吴乾云,黄晶晶,等.再生水水质安全评价与保障原理[M].北京:科学出版社,2011:1-3.
- [8] 李云开,杨培岭,刘培斌,等.再生水补给永定河生态用水的环境影响及保障关键技术研究[J].中国水利,2012(5):30-34.
- [9] 杨庆,陈忠荣,张伟红,等.典型水源地地下水污染风险评价[J].中国环境监测,2013,29(5):22-25.
- [10] 龚怒,顾乡.污染源自动监控相关问题探讨[J].环境监测管理与技术,2011,23(2):11-14.
- [11] 喻义勇,董艳平,孟磊.污染源在线监控管理模式探讨[J].环境监测管理与技术,2008,20(5):5-8.
- [12] 陈建江.对我国环境自动监测发展的思考[J].环境监测管理与技术,2007,19(1):1-3,7.

· 简讯 ·

“2014 年度中国生态文明建设十件大事”正式发布

中国生态文明研究与促进会在延续发布“2013 年度中国生态文明建设十件大事”成功做法的基础上,为进一步提高社会公众对生态文明建设的认知度和自觉性,加大生态文明建设宣传力度,对 2014 年度党和国家推进生态文明建设的大政方针和重要举措进行了认真梳理研究,并注意跟踪中央媒体有关生态环境治理和生态文明建设示范创建方面的报道,同时对社会各方面关于生态文明建设和环境保护相关事件的关注度进行了综合动态分析,由此形成了“2014 年度中国生态文明建设十件大事”。近日,中国生态文明研究与促进会在京召开新闻发布会,正式发布了“2014 年度中国生态文明建设十件大事”,分别为:①党的十八届四中全会提出加快建立生态文明法律制度;②习近平强调生态文明建设要上台阶见实效;③中国政府提出要像对贫困宣战一样坚决向污染宣战;④生态文明建设列入新环保法立法目的;⑤社会期盼“APEC 蓝”常态化;⑥全国生态文明示范创建拓展提升;⑦全国土壤污染状况调查结果公布;⑧“中国生态文明奖”设立;⑨中国明确碳排放峰值时间表;⑩生态文明理念逐步走向世界。(人民网)

摘自 www.jshb.gov.cn 2015-01-26