

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkk.2021.0068

沈媛媛,郭高轩,欧志亮,等.北京玉泉山泉恢复方案[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(4):645-655. SHEN Y Y, GUO G X, OU Z L, et al. Recovery scheme of Yuquanshan spring in Beijing[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(4): 645-655. (in Chinese)

北京玉泉山泉恢复方案

沈媛媛,郭高轩,欧志亮,辛宝东,南英华,王丽亚,王树芳,刘久荣

(北京市水文地质工程地质大队(北京市地质环境监测总站),北京 100195)

摘要:在分析玉泉山地区水文地质条件基础上构建地下水流系统数值模型。通过地下水系统均衡分析,提出泉水恢复的主要影响因素为河流渗漏补给和地下水的人工开采。以玉泉山泉恢复出流为目标进行泉水恢复方案研究,结果表明:现状地下水系统呈负均衡,要实现泉水复涌需要同时采取地下水减采和人工回补措施。为此,分别提出以 2030 年和 2050 年为泉水恢复时间,以及不同人工回灌条件下的泉水恢复方案;若在永定河山峡段增加河道渗漏量 0.8 亿 m^3/a ,同时地下水压采至现状的 71%,玉泉山泉有望在 2050 年恢复出流;若地下水压减至现状的 45%,则泉水将在 2030 年恢复出流。考虑到城市发展建设现状,地下水系统恢复的过程中需考虑恢复的适宜水位。

关键词:北京;玉泉山泉;泉水恢复;数值模拟;南水北调

中图分类号:TV211 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



我国北方岩溶水以其动态稳定、水质良好以及岩溶大泉形式集中排泄的自然属性,成为许多城镇的重要供水水源^[1]。玉泉山泉出露于北京西山山麓地带,曾是北京城重要的供水水源,在城市发展历史上发挥过不可估量的作用^[2-3]。

玉泉山泉不仅是城市生活的重要饮用水源,也是维系整个北京地区水生态的重要水源,更因乾隆赐名“玉泉趵突”而成为燕京八景之一^[2-4]。然而,自 1974 年以来,这个作为北京西部地区生态环境“指示剂”的岩溶大泉断流。由于北京人口急剧增长,城市规模不断扩大,地下水开采强度不断加大,造成了区域地下水位持续下降,致使北京 1 000 多眼泉水断流^[5-6]。40 余年过去,南水北调水于 2014 年 12 月进京,北京的供水格局发生了重大改变,北京的西部山区被规划为“生态涵养带”^[7]。在此背景下,玉泉山泉在现代北京发展的进程中是否有复涌的可能,

不同方案或者人工干预下复涌时间的科学预测成为众多科研学者关注的热点^[8-9],吴乐等^[10]进行了北京西山地区地下水数值模拟,分析了不同开采条件下地下水系统响应特征;王莉蛟等^[11]对玉泉山泉恢复进行了模拟,以往成果为本次研究提供了参考,但还缺乏系统的研究不同恢复时间和不同回补条件下的恢复方案。北京西山地区曾开展过多次供水水文地质勘查评价^[10-18],基本查明了这个地区的地质和水文地质条件,评价了岩溶水资源开采潜力,对玉泉山泉恢复也开展了初步探讨。本文在以往研究基础上,针对泉域地下水系统恢复,分析水文地质条件,构建了包含玉泉山-潭柘寺岩溶水系统和永定河冲洪积扇上部第四系地下水系统的地下水流数值模型。以南水北调来水回补地下水为契机,以玉泉山泉复涌为目标,研究了玉泉山泉复涌的可行性,系统地提出了不同恢复时间和不同回灌条件下的玉泉山

收稿日期:2020-07-30 修回日期:2021-03-26 网络出版时间:2021-04-22

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210422.1440.004.html

基金项目:北京市科技计划项目(Z141100003614060);北京市优秀人才资助(2015400617931G297);北京市自然科学基金(8172046);北京市百千万人才工程(2020A55)

作者简介:沈媛媛(1981—),女,河北滦县人,正高级工程师,博士,主要从事水文地质研究。E-mail:shen-8110@163.com

通信作者:郭高轩(1979—),男,陕西乾县人,正高级工程师,博士,主要从事水文地质环境地质研究。E-mail:ggx2008@qq.com

泉恢复方案,并进行了对比分析,为玉泉山泉恢复和区域地下水系统涵养提供依据。

1 研究区概况

1.1 自然地理

研究区位于北京西郊一带,包括玉泉山-潭柘寺岩溶水系统以及永定河冲洪积扇上部第四系发育的地区,区域总面积 2 327 km²,其中基岩研究区面积为 1 226 km²,第四系研究区面积为 1 642 km²,见图 1。地势西北高东南低,西部为太行山北端,地形属中低山,为海拔 200~700 m 的丘陵和低山,山前有玉泉山、老山等海拔在 100 m 左右的残山;东部为缓倾斜的冲洪积平原,海拔自 80.00 m 左右逐渐降为 40.25 m,地形坡降在 1‰~3‰。西部山区植被覆盖度较高,主要为林地,包括针叶林、阔叶林、灌木和少量果树;东部平原区主要为建筑用地,有少量耕地和草地。区域多年(1959—2015 年)平均降水量 601.3 mm,降水量年内分布不均,6—9 月降水量

占全年降水量的 85%。区内主要河流包括永定河和大石河。三家店以上段称为山峡段,三家店以下为平原段。永定河河道渗漏补给是研究区重要的地下水补给源。研究区范围内永定河河道部分地段有衬砌,长约 9.5 km。多年平均径流量为 0.98 亿 m³/a。大石河是大清河水系的主要支流,在京西南房山坳里一带进入京西平原,平原区河道蓄水较少或干枯。平原区内主要有永定河引水渠和京密引水渠等,渠道已经全部衬砌。

研究区地下水开发利用程度高,现状呈超采状态。区域岩溶水系统分布面积大,富水性好,水质优良,因此建成了多个岩溶水集中供水水源地,包括北京市岩溶水开采量最大的水源三厂及石景山水厂、门城水厂、上万水厂等,岩溶水集中开采量达到 0.55 亿 m³/a。区域自备井的分散开采量达到 0.62 亿 m³/a。第四系地下水同样处于超采状态,总开采量达到 3.45 亿 m³/a,其中集中供水厂开采量 0.89 亿 m³/a,主要供给生活和工业用水。

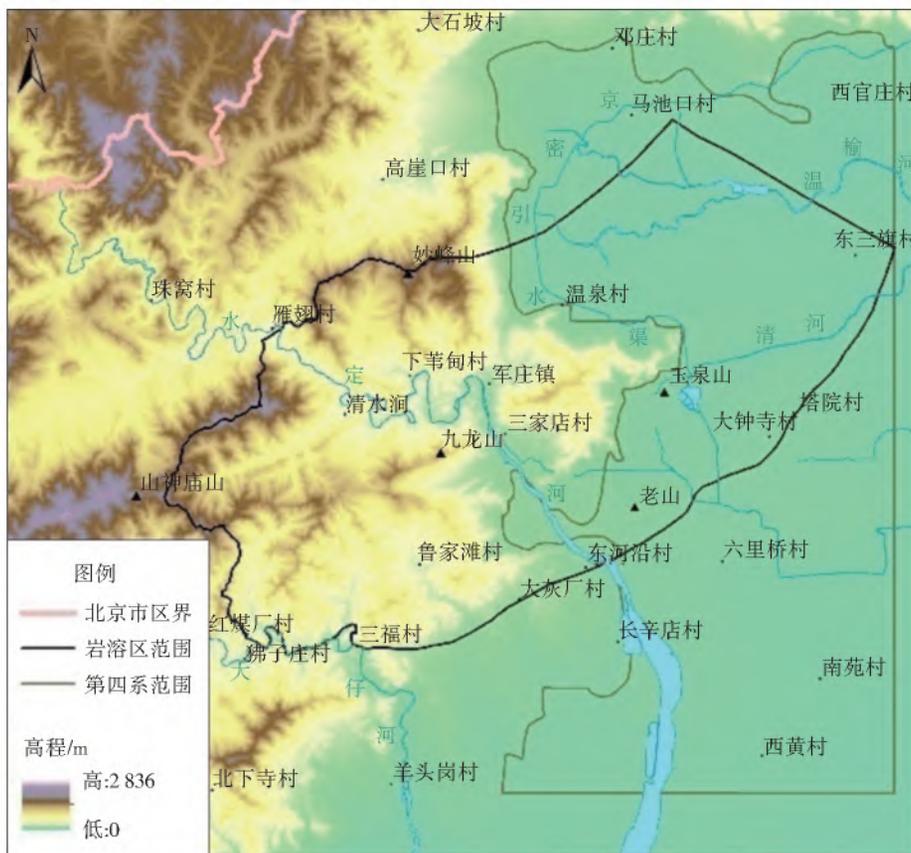


图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographical location map of the study area

1.2 地质及水文地质条件

1.2.1 地质条件

玉泉山泉位于北京玉泉山-潭柘寺岩溶水系统排泄区,泉域岩溶水系统在大地构造上处于华北地

台北缘的燕山台褶带的西山迭拗褶中,其南部为北京迭断陷,地质构造比较复杂。全区以北东向构造为主,包括九龙山向斜、香峪向斜、谷积山背斜,黄庄-高丽营断裂、八宝山断裂、南口-孙河断裂以及永

定河断裂等构成本区主要构造骨架,见图2。区内地层比较齐全,除个别地层缺失外,从元古界长城系到新生界第四系地层均有出露。奥陶系地层是该区的主要含水岩组,也是本次研究的目的层。研究区西部在鲁家滩、军庄等地大面积出露奥陶系,在玉泉山地区亦有少量奥陶系灰岩出露。玉泉山以南的大部分地区,位于八宝山断裂下盘,奥陶系直接被上覆第四系覆盖,埋深在150~313 m。在北部温泉-沙

河地区奥陶系地层直接与第四系地层接触。在鲁家滩到玉泉山之间则埋藏于石炭系、二叠系、三叠系和侏罗系地层之下。第四系地层广泛分布于平原区,平原区以冲洪积物为主,岩性主要为砾石、卵石、砂卵砾石。从山前向平原区第四系逐渐变厚,在三家店永定河山谷流出处第四系厚度约15~20 m,向东南至西冉村附近厚度大于270 m。含水层由单一结构变为多层结构,岩性由卵砾石、砂砾石变为多层砂。

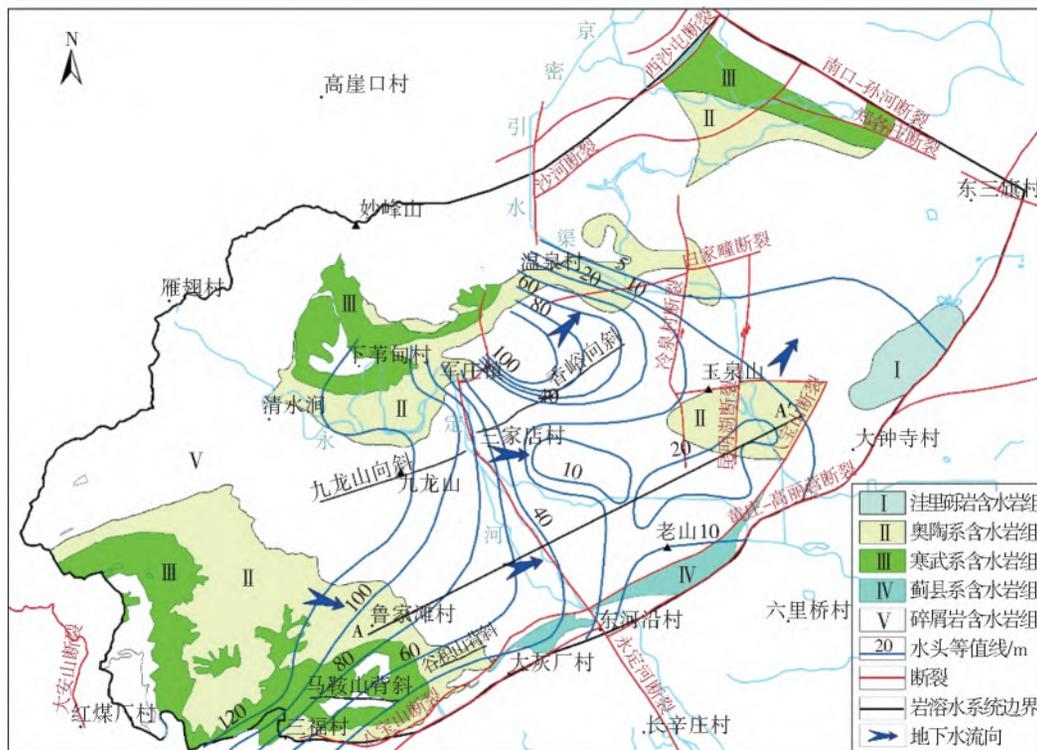


图2 玉泉山-潭柘寺岩溶水系统基岩水文地质

Fig. 2 Hydrogeological sketch map of bed rock in Yuquanshan-Tanzhesi karst water system

1.2.2 水文地质条件

玉泉山-潭柘寺岩溶水系统为一个相对独立的岩溶水系统,见图2。该系统西北界为百花山-髻髻山向斜轴部地表分水岭;东北边界为南口断裂。断裂两侧大部分地层为青白口系,为相对隔水边界,局部地段断裂两侧为寒武系,有一定的水量交换,为地下水的流量边界。系统东南边界为展布较广的黄庄-高丽营断裂,该断裂具有明显的分段特性,不同的分段对地下水的控制作用不同。大钟寺以北,断裂两侧奥陶系存在断层接触,为流量边界。在大钟寺以南,断裂北侧主要岩性为蓟县系雾迷山组白云岩、侏罗系安山岩等,断裂东南侧则为北京凹陷,主要岩性为古近系和新近系棕红色半胶结砾岩及紫红色砂质页岩或黏土质页岩,为相对阻水边界。在东河沿村以东存在永定河断裂强导水带,岩溶地下水沿导水带侧向流出,为局部流出边界。南部佛子庄到三福村一带,大石河沿八宝山断裂侧向补给岩溶

水,为流入边界。西部边界为北峪-佛子庄,大安山-红煤厂断裂为逆冲断裂,断裂东部分布大面积下马岭组板岩、千枚岩,为隔水边界。

岩溶水系统具有明确的补给、径流和排泄区。岩溶水系统主要补给来源有西部鲁家滩和军庄灰岩裸露区。在灰岩裸露区,大气降水直接入渗补给岩溶水。其次,在雁翅-军庄地区,永定河流经灰岩裸露区大量漏失补给岩溶水。另外,在西南部大石河河水对奥陶系岩溶地下水存在侧向补给。

鲁家滩地区岩溶水总体上自西部向东北部隐伏岩溶区径流。玉泉山地区灰岩成为隐伏灰岩的唯一露头,一部分地下水以上升泉群的形式涌出地表,形成玉泉山泉群,成为岩溶水系统的主要排泄点,见图3。根据1947—1974年观测资料,玉泉山泉历年平均流量为 $0.26\sim 1.66\text{ m}^3/\text{s}$ [5]。由于大量开采地下水,20世纪70年代中期出现断流状态,之后长期断流。

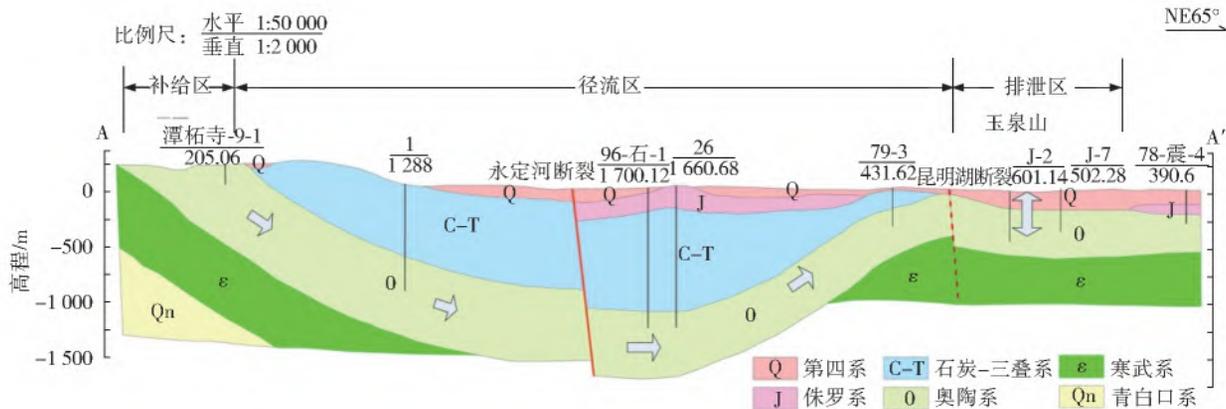


图 3 A-A'水文地质剖面(剖面位置见图 2)^[15]

Fig. 3 Hydrogeological cross-section of A-A' (the location is indicated in Fig. 2)

人工开采是岩溶水的主要排泄方式,该区分布有多个岩溶水源地。另外,在局部地区岩溶含水层与第四系含水层存在水量交换,还有少部分岩溶水沿系统边界流出区外。

研究区内第四系地下水主要接收大气降水入渗和山前侧向补给,自山前向东、东南部径流,主要排泄方式为人工开采和侧向流出。由于大量开采地下水,区域地下水位近年来呈逐渐下降趋势。

2 地下水数值模型

在分析水文地质条件基础上,构建研究区水文地质概念模型和地下水流数值模型,并进行模型的校验,用于玉泉山泉恢复研究。

2.1 水文地质概念模型

2.1.1 定解条件

根据研究区内的地质和水文地质条件,将模拟范围确定为包括整个玉泉山-潭柘寺岩溶水系统和永定河冲洪积扇上部第四系地下水系统。根据岩溶水系统水文地质条件中描述的边界属性,概化模型边界均为二类边界,包括流入边界、流出边界和零流量边界,见图 4。垂向上,模型顶部为第四系潜水自由水面,通过该界面地下水系统与外界进行水量交换。模型底部边界为奥陶系含水层底界,概化为隔水边界。模型的初始水位采用 2012 年 9 月统测的地下水位作为模型的初始条件。



图 4 模型边界条件处理

Fig. 4 Boundary condition of the study area

2.1.2 含水层结构

将研究区内含水层垂向上概化为5层。研究区第四系含水层从山前单一砂卵砾石层向下游逐渐过渡为多层砂卵砾石层,岩性颗粒由粗变细,岩层逐渐增厚。将第四系地层从上到下概化为潜水含水层、弱透水层和承压含水层。基岩地层主要为石炭-二叠系、侏罗系、白垩系和奥陶系地层,将相对隔水的基岩地层概化为基岩隔水层作为模型第四层,奥陶系含水岩组为主要模拟层概化为第

五层。

2.1.3 水文地质参数

含水层水文地质参数根据前人研究资料作为初始值,通过模型识别得到最终结果,其中:第四系含水层水平渗透系数为5~350 m/d,垂向渗透系数为0.50~35.00 m/d,给水度值为0.10~0.26;奥陶系含水岩组水平渗透系数为0.2~50.0 m/d,垂直渗透系数取值范围为0.02~5.00 m/d,贮水率取值范围为 $1 \times 10^{-7} \sim 7 \times 10^{-5}$ /m,见表1。

表1 模型水文地质参数

Tab.1 Hydrologic property values in the model

含水岩组	水平渗透系数/($m \cdot d^{-1}$)	垂直渗透系数/($m \cdot d^{-1}$)	给水度	贮水率/ m^{-1}
潜水含水层	5.0~300.0	0.50~30.00	0.10~0.26	
弱透水层	1.5~150.0	0.15~1.00		$3 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-6}$
承压含水层	15.0~350.0	1.50~35.00		$3 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^{-5}$
奥陶系含水岩组	0.2~50.0	0.02~5.00		$1 \times 10^{-7} \sim 7 \times 10^{-5}$

2.2 地下水数值模型

西山奥陶系岩溶水含水介质以溶蚀裂隙为主,具备我国北方岩溶的典型特征^[20-24],运动性质基本

符合地下水流渗透定律,可用微分方程的定解问题进行描述,将研究区地下水概化为非均质、各向异性的非稳定三维地下水系统,微分方程组为

$$\begin{cases} S \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \epsilon & x, y, z \in \Omega, t \geq 0 \\ \mu \frac{\partial h}{\partial t} = K_x \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)^2 + K_y \left(\frac{\partial h}{\partial y} \right)^2 + K_z \left(\frac{\partial h}{\partial z} \right)^2 - \frac{\partial h}{\partial z} (K_z + p) + p & x, y, z \in \Gamma_0, t \geq 0 \\ h(x, y, z, t) |_{t=0} = h_0 & x, y, z \in \Omega, t \geq 0 \\ K_n \frac{\partial h}{\partial n} \Big|_{\Gamma_1} = q(x, y, z, t) & x, y, z \in \Gamma_1, t \geq 0 \\ \frac{\partial h}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = 0 & x, y, z \in \Gamma_2, t \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: Ω 为模拟渗流区域; h 为水位标高,m; t 为时间,d; K_x 、 K_y 、 K_z 、 K_n 为含水层渗透系数,m/d; S 为储水率,1/m; μ 为给水度; ϵ 为源汇项,1/d; p 为潜水面的蒸发和降水等,m/d; h_0 为含水层的初始水位,m; Γ_1 为渗流区域的两类边界; Γ_2 为渗流区域的下边界,即含水层底部的隔水边界; \vec{n} 为边界面的法线方向; q 为流量边界的单宽流量, $m^2/(d \cdot m)$,流入为正,流出为负,隔水边界值为0。

将研究区剖分为200 m×200 m网格,垂向上分为5层。模型模拟时段为2012年9月至2015年9月,以1个月为1个应力期,时间步长为10 d。根据实测数据绘制模拟期初始流场和末刻流场。采用“试错法”对数值模型进行识别和验证,使模拟流场与实测流场基本一致,水位动态过程曲线拟合基本满足要求,见图5。从拟合曲线看,建立的模型基本反映了研究区地下水流运动特征,符合实际水文地质条件,能够用于模拟预测。

2.3 模拟期地下水系统均衡

通过构建概念模型、搭建数值模型,进行模型的识别和验证,最终得到模拟期内地下水系统均衡结果,具体见表2。模拟结果表明,在模拟期内地下水系统整体上呈负均衡状态,地下水系统总补给量为5.38亿 m^3/a ,总排泄量为5.96亿 m^3/a ,补排差为-0.57亿 m^3/a 。降水入渗是地下水最主要的补给来源,占总补给量的55.57%;边界流入量占25.05%;河流渗漏量占12.73%。地下水系统主要排泄方式为地下水开采,占总排泄量的77.74%,边界流出量占18.65%。

对于岩溶含水岩组,其补给量为1.15亿 m^3/a ,排泄量为1.26亿 m^3/a ,补排差为-0.11亿 m^3/a ,呈负均衡。其中:永定河渗漏是研究区岩溶含水岩组最主要的补给来源,占总补给量的54.72%;岩溶裸露区直接接受大气降水入渗补给,占补给量的24.85%;越流补给量占18.78%。岩溶含水岩组地下水的主要

排泄方式为人工开采, 占总排泄量的 93.55%。从岩溶水系统的源汇项中可以看出, 对其系统均衡起主要作用的因素是河流渗漏量和岩溶水的开采量, 若想使岩溶水系统均衡由负转正, 则需增加河流入渗量和减

小岩溶水开采量。在模拟期内, 岩溶水接受第四系地下水越流补给, 说明岩溶水头低于第四系地下水头。若想实现玉泉山泉复涌, 则须使岩溶水头抬升, 并顶托补给上层第四系含水层。

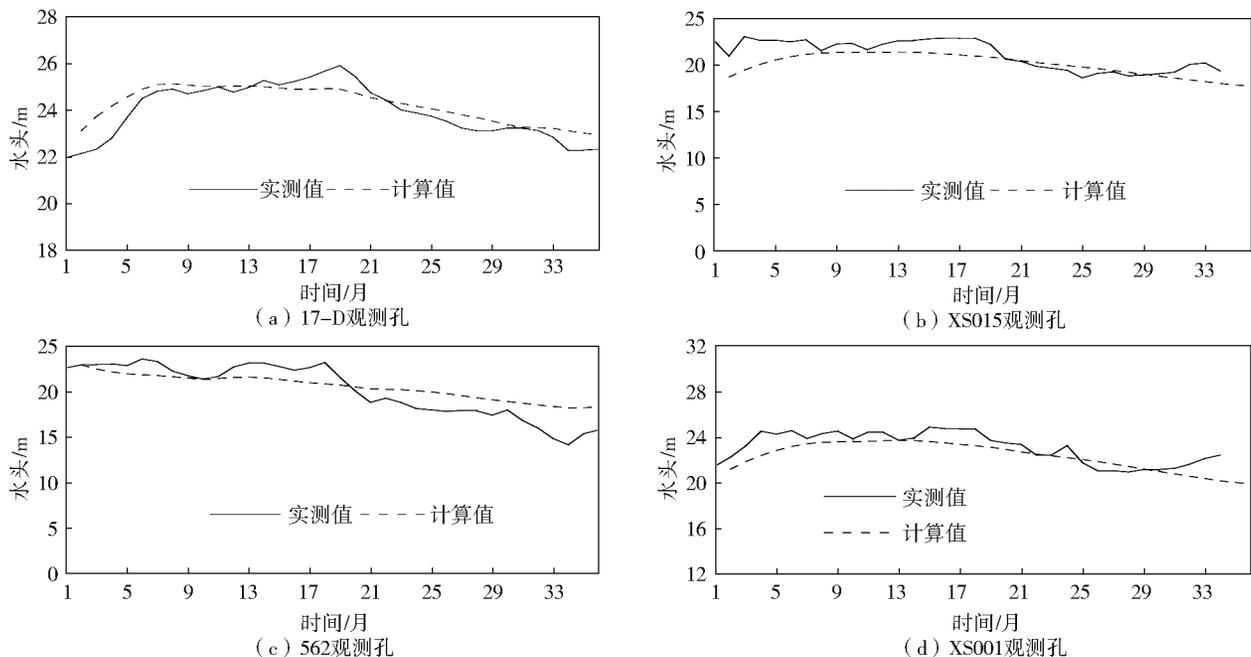


图 5 观测孔地下水位拟合图

Fig. 5 Observed and simulated heads at some monitoring wells

表 2 模拟期年均地下水系统均衡结果

Tab. 2 Annual average groundwater system equilibrium results in simulation period

地下水系统均衡	地下水系统/ (亿 m ³ · a ⁻¹)	所占比例/ %	岩溶含水层组/ (亿 m ³ · a ⁻¹)	所占比例/ %	第四系含水层组/ (亿 m ³ · a ⁻¹)	所占比例/ %	
补给量	降水入渗量	2.99	0.29	25.00	2.71	63.92	
	灌溉回归量	0.14	0	0	0.14	3.30	
	河流渗漏量	0.69	12.80	0.63	54.31	0.06	1.41
	边界流入量	1.35	25.05	0.02	1.72	1.33	31.37
	越流补给量	0.22	4.08	0.22	18.97	0	0
	补给量合计	5.39	100.00	1.16	100.00	4.24	100.00
排泄量	开采量	4.63	1.18	93.55	3.45	73.40	
	边界流出量	1.11	0.08	6.45	1.03	21.92	
	越流排泄量	0.22	3.69	0	0	0.22	4.68
	排泄量合计	5.96	100.00	1.26	100.00	4.70	100.00
补排差	-0.57		-0.11		-0.46		

对于第四系含水岩组, 其主要补给来源为大气降水入渗补给, 占补给量的 63.89%, 主要排泄量为人工开采量, 占开采量的 73.50%。在模拟期内, 第四系含水层组向岩溶含水层组进行越流排泄。

3 玉泉山泉恢复研究

3.1 方案设计

现状西山地区地下水位呈不断下降趋势, 要实现地下水系统恢复和泉水复涌, 需根据北京市规划

和南水北调工程, 从调整开采布局减少地下水开采量、增加补给量两方面进行方案设计, 以寻求恢复第四系地下水位到适宜水位以及实现玉泉山泉水复涌。根据北京市规划, 在南水北调持续供水后在永定河流域利用河道良好的天然渗透能力有计划地进行回灌地下水, 另外北京西郊地区第四系渗透性好, 可考虑以大口井回灌方式增加地下水补给量。因此, 方案以永定河渗漏量、大口井回灌和地下水开采量为可变因素进行设计。具体方案见表 3。

表 3 不同方案的回补和开采条件

Tab.3 Recharge and pumping scenarios

回补和 开采量	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五	方案六
	现状开采 (预测至 2030 年)	极端减采 (预测至 2030 年)	增渗减采 (预测至 2050 年)	泉水恢复方案 (预测至 2050 年)	大口井回灌 (预测至 2030 年)	大口井回灌 (预测至 2050 年)
补给量						
永定河渗漏/亿 m ³	0.63	1.43	0.93	1.43	0.63	0.63
大口井回补/亿 m ³	0	0	0	0	0.80	0.80
开采量						
第四系开采量/亿 m ³	3.45	2.09	3.00	3.00	2.20	2.94
岩溶水开采量/亿 m ³	1.18	0	0.50	0.29	0.50	0.63
总开采量/亿 m ³	4.63	2.09	3.50	3.29	2.70	3.57
占现状比例/%	100	45	76	71	58	77

方案一为现状开采方案,现状条件永定河渗漏量为 0.63 亿 m³/a,地下水总开采量为 4.63 亿 m³/a;方案二为极端减采方案,在永定河山峡段增加渗漏量 0.8 亿 m³,并且岩溶水全部停采,地下水总开采减少至现状开采的 45%;方案三为增渗减采方案,即永定河山峡段增加渗漏量 0.3 亿 m³,地下水总开采量减少至现状的

76%;方案四为以泉水至 2050 年恢复为目标的长期恢复方案,即在永定河山峡段增加渗漏量 0.8 亿 m³/a,地下水总开采量减少至现状的 71%;方案五和方案六分别为以西郊砂石坑为大口井进行回灌的短期方案(至 2030 年)和长期方案(至 2050 年),开采量分别为现状开采量的 58%和 77%。



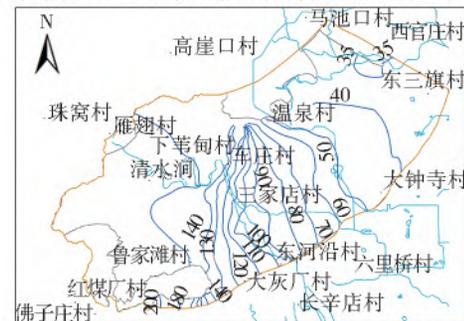
(a) 方案一预测期末第四系孔隙水水头等值线



(b) 方案二预测期末第四系孔隙水水头等值线



(c) 方案一预测期末岩溶水水头等值线



(d) 方案二预测期末岩溶水水头等值线

图 6 方案一和方案二预测期末地下水水头等值线

Fig. 6 Contour line of groundwater head at the end of prediction period of scheme 1 and scheme 2

3.2 方案预测分析

3.2.1 水位预测

方案一为现状条件下的预测方案(表 4),现状条件下地下水位逐年下降,到 2030 年浅层第四系含

水层在玉泉村到六里村范围内已经疏干,岩溶地下水持续下降,玉泉山泉水位约为 8.30 m,平均每年下降约 1.20 m。

表 4 各预测方案水位变化情况

Tab. 4 Table of water level changes for each forecast scheme

水位	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五	方案六
第四系水位变幅/(m·a ⁻¹)	-1.10	0.80	0.28	0.51	1.10	0.53
岩溶水位变幅/(m·a ⁻¹)	-1.10	2.05	0.71	1.22	1.98	0.84
预测期泉水位变幅/(m·a ⁻¹)	-1.20	2.38	0.70	1.00	2.38	1.00
预测期末泉水位/m	8.30	52.10	40.70	52.00	52.20	51.90
泉水是否出流	否	是	否	是	是	是

方案二在大量增加补给量,减小开采量后,地下水位则持续上升,第四系地下水位每年上升约 0.80 m,岩溶地下水水位每年上升约 2.05 m。到 2030 年末,玉泉山泉水位为 52.10 m,高于泉水最低出流水位 51.60 m,泉水恢复出流。

方案三为增渗减采方案,其增加补给量和减少的开采量均小于方案二,因此其水位恢复效果没有方案二明显。第四系地下水位整体呈上升趋势,平均上升 0.28 m/a。玉泉山泉水位每年水位上升 0.70 m,到 2050 年为 40.70 m,低于泉水出流水位,因此到 2050 年泉水不能恢复出流。

方案四在方案三基础上增加了 0.6 亿 m³/a 河道渗漏补给量,并减小了岩溶水开采量。第四系水位上升速率达 0.51 m/a,岩溶水水位上升约 1.22 m/a,玉泉山泉水位每年上升约 1.00 m,到 2050 年末为 52.00 m,泉水在该方案下实现复涌。

方案五和方案六选择在靠近玉泉山地区的第四系地层进行大口井回灌补给地下水,补给量均为 0.8 亿 m³/a。根据预测结果,当地下水开采量缩减至现状的 58%时(方案五),到 2030 年泉水恢复出流;当地下水开采量缩减至现状的 77%时(方案六),玉

泉山泉到 2050 年末恢复出流。可见在补给量相同的条件下,开采量越小,泉水恢复出流时间越早。

从预测期末地下水水流场图分析,当玉泉山泉恢复出流时区域地下水位整体上升,考虑到城市发展建设现状,地下建筑物和地下空间的利用的工程设防水位等,为避免地下水位过高产生新的环境地质问题,在地下水系统恢复的过程中,需考虑恢复的适宜水位^[25]。

3.2.2 预测期地下水系统均衡

现状西山地区年均降水入渗量为 3.13 亿 m³,占总补给量的 59.6%,每年地下水开采量 4.63 亿 m³,占总排泄量的 80.65%,地下水系统呈负均衡状态。方案二到方案六为增加河道渗漏补给量,同时减小地下水开采量,地下水系统均为正均衡,其中方案三补排差相对较小,为 0.94 亿 m³/a,在该条件下泉水到 2050 年末恢复出流。方案二和方案五补排差分别为 2.85 亿 m³/a 和 2.24 亿 m³/a,两个方案在 2030 年泉水恢复出流;方案四和方案六补排差分别为 1.65 亿 m³/a 和 1.37 亿 m³/a,两者在 2050 年泉水均恢复出流,见表 5。

表 5 预测期地下水系统均衡

Tab. 5 Groundwater system balance in prediction period

源汇项	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五	方案六
降水入渗量	3.13	3.13	3.13	3.13	3.13	3.13
灌溉回归量	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
补给量						
河流渗漏量	0.69	1.49	0.99	1.49	1.49	1.49
边界流入量	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30
合计	5.25	6.05	5.55	6.05	6.05	6.05
开采量	4.63	2.09	3.50	3.29	2.70	3.57
排泄量						
边界流出量	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11
合计	5.74	3.20	4.74	4.40	3.81	4.68
补排差	-0.49	2.85	0.94	1.65	2.24	1.37

3.3 方案对比

方案一为现状条件下开采方案,地下水系统为负均衡,第四系地下水和岩溶水水头逐年下降,因此,该方案条件下地下水逐年亏损,地下水不会回升,泉水不能出流。

对比方案三和方案四可以看出,虽然2个方案地下水系统均为正均衡,但在方案三条件下,泉水到2050年仍没有恢复出流,可见现状地下水亏损严重,要实现地下水系统恢复,需加大力度增加人工回灌补给量,同时减少地下水开采量,地下水系统有望逐步恢复。

对比方案二和方案五,两者均实现在2030年使泉水恢复出流。两者对地下水的回补量均为0.8亿 m^3/a ,区别在于回补地段和方式不同,其中,方案二在永定河山峡段增加河流渗漏补给,方案五为在平原段靠近玉泉山地区利用大口井回灌补给第四系地下水。两者对地下水进行不同比例的压采:方案二地下水开采量较现状减少了55%,其中岩溶水全部停采;方案五地下水开采量较现状减少了42%,其中岩溶水集中水厂及玉泉山附近分散基岩供水井停采。从补排项可以看出,两者的补给量相同,方案五开采量比方案二开采量大,说明人工回灌补给地下水,距离玉泉山越近越有利于泉水恢复。以2030年为目标恢复玉泉山泉水,方案五对地下水压采量较方案二小,可考虑方案五为较优方案。

对比方案四和方案六,两者均能实现在2050年玉泉山泉水得到恢复。其地下水回补量与方案二和方案五相同,不同的是地下水压采比例。与前述方案类似人工回补的地段越靠近玉泉山越有利于泉水恢复。但考虑到增加河道天然渗漏与大口井人工回灌两种方式,从工程经济技术角度考虑,利用天然河道增加渗漏从工程技术角度更为经济合理,因此方案四为较优方案。

对比方案五和方案六,两者较现状增加的人工回灌补给量均为0.8亿 m^3/a ,总补给量相同:当开采量为现状的77%时,泉水于2050年恢复出流;当开采量缩减为现状的58%时,泉水于2030年恢复出流。这说明在相同的补给条件下,开采量越小越有利于泉水恢复,即方案五更有利于泉水恢复。

4 结论

(1)西山奥陶系岩溶水含水层主要补给来源为河道渗漏补给和降水入渗补给,二者分别占总补给量的55%和25%,其与上部第四系水力联系密切。目前岩溶地下水系统呈负均衡状态,若要恢复该区地下水水位,需结合南水北调工程通水的新水情,对

地下水系统进行人工回补,同时调整地下水开采布局,减少地下水开采。

(2)数值模拟结果表明:在永定河山峡段增加河道渗漏量0.8亿 m^3/a ,地下水开采量压采至现状的71%,玉泉山泉水有望在2050年恢复出流;若将地下水开采量压减至现状的45%,同时增加河道渗漏量0.8亿 m^3/a ,则有可能在2030年恢复出流。

(3)玉泉山泉水位的上升体现着整个西山地区地下水系统的恢复,泉水恢复伴随着区域地下水位的整体抬升,因此考虑到地下水恢复的适宜水位,可在永定河山峡段增加渗漏量0.3亿 m^3/a ,同时地下水压采24%左右,泉水虽然不能短期内出流,但地下水资源亏损量逐年减少,地下水系统生态环境将得到逐步恢复,比较符合实际条件,也利于本区域的水资源可持续利用。

参考文献(References):

- [1] 韩行瑞. 岩溶水文地质学[M]. 北京:科学出版社,2015. (HAN X R, Karst hydrogeology[M]. Beijing: Science Press,2015. (in Chinese))
- [2] 侯仁之. 北京城市历史地理[M]. 北京:北京燕山出版社,2000. (HOU R Z. Beijing City historical geography [M]. Beijing: Beijing Yanshan Press,2000. (in Chinese))
- [3] 邓辉. 历史时期分布在北京平原上的泉水与湖泊[C]//中国地理学会,河南省科学技术协会. 2012年学术年会学术论文摘要集. 郑州:中国地理学会,河南省科学技术协会,2012. (DENG H. Springs and lakes distributed over the Beijing Plain in historical periods [C]//Abstracts of Academic Papers of 2012 Annual Conference of Chinese Geographical Society. Henan Science and Technology Association, Chinese Geographical Society, Zhengzhou: Chinese Geographical Society, Henan Science and Technology Association, 2012. (in Chinese))
- [4] 蔡向民,郭高轩,张磊,等. 北京城湖泊的成因[J]. 中国地质,2013,40(4):1092-1098. (CAI X M, GUO G X, ZHANG L, et al. Causes of Beijing City lakes[J]. Geology in China, 2013, 40(4): 1092-1098. (in Chinese))
- [5] 北京市水文地质工程地质大队. 北京泉志[R]. 1983. (Hydrogeology and Engineering Geology Team of Beijing. Beijing spring history[R]. 1983. (in Chinese))
- [6] 梁永平,赵春红,唐春雷,等. 北方岩溶区水文地质环境地质调查进展:以北京西山岩溶区为例[J]. 中国地质调查,2015,2(8):1-8. (LIANG Y P, ZHAO C H, TANG C L, et al. Progress of hydrogeological and environmental geological survey in north karst areas: A case study of Xishan karst area in Beijing[J]. Geology in China, 2015, 2(8): 1-8. (in Chinese))

- [7] 北京市人民政府. 北京城市总体规划(2016年—2030年)[R]. 北京市人民政府, 2017. (Beijing Municipal People's Government, Beijing urban master plan(2016-2030)[R]. Beijing Municipal People's Government, 2017. (in Chinese))
- [8] 李巧灵, 雷晓东, 杨勇, 等. 北京西郊玉泉山地区岩溶水强径流路径地球物理分析[J]. 中国地质, 2019, 46(2): 346-358. (LI Q L, LEI X D, YANG Y, et al. A study of flow path in Yuquanshan area of western Beijing based on integrated geophysical technology[J]. Geology in China, 2019, 46(2): 346-358. (in Chinese)) DOI: 10.12029/gc20190211.
- [9] 北京市水文地质工程地质大队. 北京市第三水厂改建工程供水水文地质勘察报告[R]. 1998. (Hydrogeology and Engineering Geology Team of Beijing. Hydrological and geological survey report on water supply for the third water plant reconstruction project in Beijing[R]. 1998. (in Chinese))
- [10] 吴乐, 张有全, 宫辉力, 等. 北京市西山地区地下水数值模拟及预测[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(3): 29-36. (WU L, ZHANG Y Q, GONG H L, et al. Numerical simulation of groundwater flow for Xishan area in Beijing[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(3): 29-36. (in Chinese)) DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665. 2016. 03. 06.
- [11] 王莉姣, 张有全, 宫辉力, 等. 北京市玉泉山泉恢复条件研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(3): 23-28. (WANG L J, ZHANG Y Q, GONG H L, et al. A study on recovery condition of Yuquanshan spring in Beijing[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(3): 23-28. (in Chinese)) DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665. 2016. 03. 05.
- [12] 北京市水文地质工程地质大队. 第三水厂应急供水水文地质勘察报告[R]. 2003. (Hydrogeology and Engineering Geology Team of Beijing. Hydrological and geological survey report on emergency water supply of the third water plant[R]. 2003. (in Chinese))
- [13] 北京市水文地质工程地质大队. 北京市石景山区杨庄水厂改水水文地质勘察报告[R]. 2000. (Hydrogeology and Engineering Geology Team of Beijing. Hydrogeological survey report of Yangzhuang water plant in Shijingshan district, Beijing[R]. 2000. (in Chinese))
- [14] 北京市水文地质工程地质大队. 北京市玉泉山地区基岩供水水文地质勘察总结报告[R]. 1981. (Hydrogeology and Engineering Geology Team of Beijing. Summary report of hydrogeological survey of bedrock water supply in Yuquanshan district, Beijing[R]. 1981. (in Chinese))
- [15] 北京市水文地质工程地质大队. 永定河地下水入渗回补影响研究[R]. 2012. (Hydrogeology and Engineering Geology Team of Beijing. Study on influence of groundwater infiltration replenishment in Yongding River[R]. 2012. (in Chinese))
- [16] 首都师范大学. 西山岩溶水数值模拟成果报告[R]. 2014. (Capital Normal University. Report on Numerical Simulation Results of Xishan Karst Water[R]. 2014. (in Chinese))
- [17] 王晓红, 刘文臣, 沈媛媛, 等. 北京西山岩溶水应急水源地水文地质特征及开采潜力分析[J]. 中国岩溶, 2011, 30(2): 216-221. (WANG X H, LIU W C, SHEN Y Y, et al. Analysis on the hydrogeology characteristics and exploitation potential of the emergency karst water source field in Xishan region, Beijing[J]. Carsologica Sinica, 2011, 30(2): 216-221. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-4810. 2011. 02. 015.
- [18] 郭高轩, 刘文臣, 辛宝东, 等. 北京岩溶水勘查开发的现状与思考[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(2): 33-36, 45. (GUO G X, LIU W C, XIN B D, et al. Current situations and discussions on karst groundwater resources exploration in Beijing[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(2): 33-36, 45. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2011.02033.
- [19] 王晓红, 刘久荣, 辛宝东, 等. 北京岩溶水系统划分及特征分析[J]. 城市地质, 2016, 11(3): 8-15. (WANG X H, LIU J R, XIN B D, et al. Division and characterization analysis of karst groundwater system in Beijing[J]. Urban Geology, 2016, 11(3): 8-15. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-1903. 2016. 03. 002.
- [20] 刘久荣, 王新娟, 王荣, 等. 岩溶水数值模拟研究进展[J]. 城市地质, 2012, 7(4): 1-6. (LIU J R, WANG X J, WANG R, et al. Advances in research of karstwater numerical simulation[J]. Urban Geology, 2012, 7(4): 1-6. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-4810. 2011. 02. 015.
- [21] 沈媛媛, 辛宝东, 郭高轩, 等. 北京房山岩溶水应急水源地地下水流数值模拟及预测[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(5): 103-106, 114. (SHEN Y Y, XIN B D, GUO G X, et al. Numerical simulation and prediction of groundwater flow in emergency karst well fields in Fangshan, Beijing[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(5): 103-106, 114. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2011.05103.
- [22] 南天, 李星宇, 李鹏, 等. 应用数值模拟法研究隐伏岩溶区水文地质条件: 以北京大兴研究区为例[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(3): 143-148. (NAN T, LI X Y, LI P, et al. Application of the groundwater flow simulation to study the hydrogeological conditions in

- the covered karst area; A case study in Daxing, Beijing [J]. *South-to-North Water Transfers and water Science & Technology*, 2014, 12 (3): 143-148. (in Chinese) DOI:10.13476/j.cnki.nsbddqk.2014.03.031.
- [23] 翟立娟. 岩溶水饮用水水源保护区划分技术方法: 以邯郸市羊角铺水源地为例[J]. *中国岩溶*, 2011, 30 (1): 47-52. (ZHAI L J. Division for drinking water source protective zones in karst area; A case study at Yangjiaopu in Handan City [J]. *Carsologica Sinica*, 2011, 30 (1): 47-52. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-4810.2011.01.008.
- [24] 徐中平, 周训, 崔相飞, 等. 岩溶区地下水数值模拟研究进展[J]. *中国岩溶*, 2018, 37 (4): 475-483. (XU Z P, ZHOU X, CUI X F, et al. Research advances of numerical simulation of groundwater in karst areas [J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37 (4): 475-483. (in Chinese)) DOI:10.11932/karst20180401.
- [25] 张院, 寇文杰, 刘凯, 等. 北京西郊地区地下水恢复适宜水位分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2013, 11 (5): 108-111. (ZHANG Y, KOU W J, LIU K, et al. Analysis of suitable groundwater recovery level in western part of Beijing [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2013, 11 (5): 108-111. (in Chinese)) DOI:10.3724/SP.J.1201.2013.05108.

Recovery scheme of Yuquanshan spring in Beijing

SHEN Yuanyuan, GUO Gaoxuan, OU Zhiliang, XIN Baodong, NAN Yinghua, WANG Liya, WANG Shufang, LIU Jiurong (*Hydrogeology and Engineering Geology Team of Beijing (Beijing Institute of Geo-Environment Monitoring), Beijing 100195, China*)

Abstract: Yuquanshan spring, located in the foothills of Beijing Xishan, is an essential source of water supply for ecology and environment of Beijing. However, the famous karst spring had been dry since 1974. Since the South-to-North Water Transfer Project was implemented at the end of 2014, the mountainous areas in western Beijing have been planned as "ecological conservation belts". The resurrection of Yuquanshan spring has become a new topic to many researchers. Several hydrogeological surveys of water supply have been carried out in the Beijing Xishan. The hydrogeological conditions have been identified, the exploitation potential of karst groundwater resources has been evaluated, and some preliminary discussions have been made on Yuquanshan spring's recovery.

Based on the comprehensive analysis of the hydrogeological conditions in Yuquanshan areas, a heterogeneous and anisotropic unsteady three-dimensional numerical model of groundwater flow is established, which includes the Yuquanshan-Tanzhesi karst water system and the quaternary groundwater system in the upper part of Yongding River alluvial-proluvial fan. The study area is divided into 200 m × 200 m grids, and the aquifer is generalized into five layers in the vertical direction. The simulation period is from September 2012 to September 2015, with one month as a stress period and a time step of 10 days.

The numerical simulation results showed that the groundwater system was in a negative balance during the simulation period. The main factors that played significant roles in the karst water system's equilibrium were the Yongding River's seepage (54.72% of the total recharge) and the extraction of karst water (93.55% of entire drainage). Supposing the groundwater level in this area was to be restored, it is necessary to make up the groundwater artificially and adjust the groundwater exploitation layout to reduce the groundwater exploitation according to the background of the South-to-North Water Transfer Project's operation.

In order to evaluate the feasibility of Yuquanshan spring recovery, six recharge and exploitation schemes were designed based on the seepage of Yongding River, the recharge of wells, and groundwater extraction as variable factors. These schemes included the current exploiting plans, extreme reduction exploiting plans, plans for increasing infiltration and reducing extraction, a long-term recovery plan with the goal of spring recovery by 2050, the short-term plans (until 2030) and long-term plans (until 2050) for recharging wells with sandpits at western outskirts in Beijing.

If the channel seepage is increased by 0.8×10^8 in the Yongding River gorge and the groundwater extraction is suppressed to 71% of the present situation, the Yuquanshan spring is expected to recover in 2050; if the groundwater extraction is reduced to 45% and the seepage of the river channel is increased by $0.8 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, it is possible to recover in 2030. Besides, to avoid new environmental problems caused by the excessive groundwater levels when Yuquanshan spring is recovered, the appropriate groundwater level for restoration should be considered in groundwater system restoration. The seepage rate can be increased by $0.3 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ in the Yongding River gorge. At the same time, the groundwater is suppressed to 24%. Although the Yuquanshan spring can not guarantee recovery in a short time, the loss of groundwater resources will be reduced year by year. The groundwater system's ecological environment will be gradually restored, which is more in line with the actual conditions and conducive to sustainable water resource utilization in this region.

Key words: Beijing; Yuquanshan spring; spring recovery; numerical simulation; South-to-North Water Transfer Project