

赵有美, 刘小平, 齐欢. 济南岩溶地区小岭重点渗漏带补源试验[J]. 中国岩溶, 2023, 42(1): 161-170.

DOI: [10.11932/karst20230112](https://doi.org/10.11932/karst20230112)

济南岩溶地区小岭重点渗漏带补源试验

赵有美^{1,2,3}, 刘小平^{1,2,3}, 齐欢^{1,2,3}

(1. 山东省地质矿产勘查开发局八〇一水文地质工程地质大队, 山东 济南 250014; 2. 山东省地质矿产勘查开发局地下水水资源与环境重点实验室, 山东 济南 250014; 3. 山东省地下水环境保护与修复工程技术研究中心, 山东 济南 250014)

摘要:为了解济南趵突泉泉域重点渗漏带下伏可溶性岩补源渗漏特征、影响因素及对泉水的影响, 以小岭重点渗漏带为研究对象, 采用野外调查、地球物理勘探、钻探、补源试验、模型评估等方法, 分析小岭重点渗漏带下伏可溶性岩石岩性、厚度、岩溶发育情况、影响因素及补源渗漏量, 评估补源效果。结果表明: 小岭重点渗漏带下伏岩层为炒米店组, 岩性主要为中厚层微晶灰岩、薄层状灰岩、泥质条带灰岩, 厚度自东向西从7.6 m向56.3 m增厚, 岩溶发育较弱, 受千佛山断裂影响, 发育规模大的断裂带两侧岩溶越发育, 岩溶发育带越宽, 补源渗漏能力越强。在钻孔补源条件下, 小岭重点渗漏带断裂两侧精准补源地段炒米店组地层补源渗漏量为 $20\,023\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 。在综合考虑其他补源措施的情况下枯水期补源量为 $15\,000\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 、补源时长1个月对泉水的影响值为2 cm。

关键词:重点渗漏带; 岩溶地下水; 千佛山断裂; 补源渗漏量

中图分类号:P641.8 **文献标识码:**A

文章编号:1001-4810(2023)01-0161-10

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

济南是山东省省会城市, 是全省政治、经济、文化中心。济南因泉水众多而驰名中外, 素有“泉城”之称, 有“家家泉水, 户户垂柳”之景观。随着城区向南急剧扩展, 占用大量的泉域直接补给区, 造成直接补给区硬化面积增大, 其直接补给区硬化面积比20世纪50年代增加 160.76 km^2 , 影响大气降水入渗补给量^[1-4], 进而影响泉水喷涌。国内外专家对岩溶大泉进行的研究多集中在岩溶大泉的成因^[5]、泉流量的影响因素^[6-7]、河流、洼地人工补源^[8-9]、泉水保护措施^[10-12]等方面。黄春海等^[13]在趵突泉泉域划分出24个重点渗漏带, 认为这些地段具有较强的大气降

水入渗补给能力, 对泉水的补给具有重要作用。随着城市化进程的加快, 重点渗漏带渗漏功能都受到不同程度的影响, 重点渗漏带渗漏功能的减弱, 直接影响到泉水持续喷涌。

前人针对重点渗漏带特征、河道型重点渗漏带放水补源、重点渗漏带渗漏影响因素等问题开展过相关研究工作, 取得一批研究成果。例如, 陈学群等^[14]采用遥感解译、电法勘探、野外试验等方法分析重点渗漏带的特征; 刘彩虹等^[15]利用变径流系数经验公式和变参数法对地表径流和地下水渗漏补给量进行分析计算; 齐欢等^[16-17]采用地下水数值模拟软件, 通过模型评估玉符河、兴济河补源对地下水的影响范围及泉水位的影响, 量化补源工程的效果。

基金项目: 山东省重点研发计划(2017CXGC1601); 山东省自然科学基金项目(ZR2019PD019)

第一作者简介: 赵有美(1974—), 女, 高级工程师, 主要从事水工环地质及泉水保护方面的研究工作。E-mail: 13573785057@139.com。

通信作者: 刘小平(1975—), 女, 高级工程师, 主要从事水工环地质研究工作。E-mail: 408506209@qq.com。

收稿日期: 2022-01-10

刘国爱等^[18-20]通过研究千佛山断裂两侧水位,认为千佛山断裂在北段市区具有透水性。已有研究多集中于重点渗漏带表层渗漏性能,缺乏对重点渗漏带下伏可溶性岩层井孔渗漏能力、精准补源岩层的研究,而对断裂的研究主要集中在市区,对市区以南的断裂研究较少。因此,本文以小岭重点渗漏带下伏炒米店组地层及千佛山断裂为研究对象,采用野外调查、地球物理勘探、钻探、补源试验、模型评估等方法分析第四系下伏炒米店组灰岩岩溶发育情况、影响因素及补源渗漏特征,计算重点渗漏带下伏岩层的补源渗漏量,并利用地下水数值模拟软件模型评价下伏可溶性岩层井孔补源对泉水的影响,以期为更好地选择精准补源地点、重点渗漏带的修复措施提供依据。

1 研究区概况

小岭重点渗漏带位于趵突泉泉域直接补给区内,为九女山、兴隆山、长更山、胡家山等山脚线围成的东西向沟谷,总面积为 4.03 km²。小岭重点渗漏带属于丘陵地貌单元,地势东高西低,总体起伏较大,沟谷发育,沟谷内多被第四系所覆盖,第四系岩性多为粉质黏土、碎石土。第四系覆盖层厚度在 2.7~6.0 m。第四系下伏岩层为炒米店组,岩性以中厚层微晶灰岩、薄层状灰岩、泥质条带灰岩为主。周边山体出露地层主要为寒武—奥陶系九龙群炒米店组($\text{C}_4\text{O}_1\hat{\text{c}}$)、三山子组(O_1s)、奥陶系马家沟群东黄山组(O_2d)、北庵庄组石灰岩(O_2b)和第四系大站组(Qpd)。重点渗漏带内断裂构造发育,主要发育北北西向的千佛山断裂和近东西向的断裂。重点渗漏带内植被发育,植被茂密,多为乔木,植被覆盖率较高,具有较好涵养水源能力,减少地表径流,具有良好的补给地下水条件(图 1)。

千佛山断裂位于研究区的中部,为大佛寺西一千佛山西哑口段,由四条分支断裂组成,呈树枝状向 NNW 展布,断裂走向 320°~350°,倾向南西,倾角 78°。四条分支断层过北井之后,又合为单支向 NNW 展布。该断裂在研究区南侧,东盘东侧为寒武系炒米店组,西侧以奥陶系三山子组为主。研究区北部,断层东侧以奥陶系三山子组为主,西侧为奥陶系北庵庄组。在重点渗漏带内隐伏于第四系之下,在周边山体有出露,为一正断层,具早期张扭性后期压性特征。断

裂对研究区地层空间展布具有控制作用,影响区内岩溶裂隙的发育。

2 研究方法

本文综合利用野外地质调查、地球物理勘探、钻探、注水补源试验及模型模拟预测评估等方法对小岭重点渗漏带第四系厚度、下伏可溶性岩层展布埋深、厚度、岩溶裂隙发育程度、断裂构造展布特征、渗漏量及对泉水的影响等进行研究。其中:第四系岩性和厚度根据地质调查和钻孔揭露的地层岩性、厚度确定;下伏可溶性岩层及岩溶发育程度采取地球物理勘探、钻探相结合的方法获得;断裂构造的展布特征采用地质调查和地球物理勘探相结合的方法获得;通过对钻孔进行注水补源试验等确定水文地质参数。采用不含水的干燥岩(土)层中渗透系数计算经验公式和概化“大井法”计算允许补源量。渗透系数和补源量计算公式如下:

渗透系数:

$$k = 0.423 \frac{Q}{h^2} \lg \frac{2l}{r} \quad (1)$$

补源量:

$$Q = \frac{kh^2}{0.423 \lg \frac{2l}{r}} \quad (2)$$

式中: k 为渗透系数 (m·d⁻¹); Q 为稳定注水量 (m³·d⁻¹); h 为注水造成的水头高度 (m); l 为试验段或过滤器长度 (m); r 为钻孔或过滤器半径或概化“大井”的半径 (m)。

利用地下水数值模拟软件模型评价钻孔补源对泉水的影响。

3 结果与分析

3.1 断裂发育情况

为查明研究区千佛山断裂的展布情况,在研究区内布设了 2 条高密度电法测线和 2 条视电阻率测深测线(图 2)。从图 2 中可知,研究区内千佛山断裂共发育了 4 条分支断裂。F1 断层位于小岭重点渗漏带的中西部,走向 NNW,倾向 NEE,倾角 80°,断层发育深度约 200 m,规模较大,断裂破碎带宽约 20 m; F2 断层位于小岭重点渗漏带的中部,走向 NNW,倾

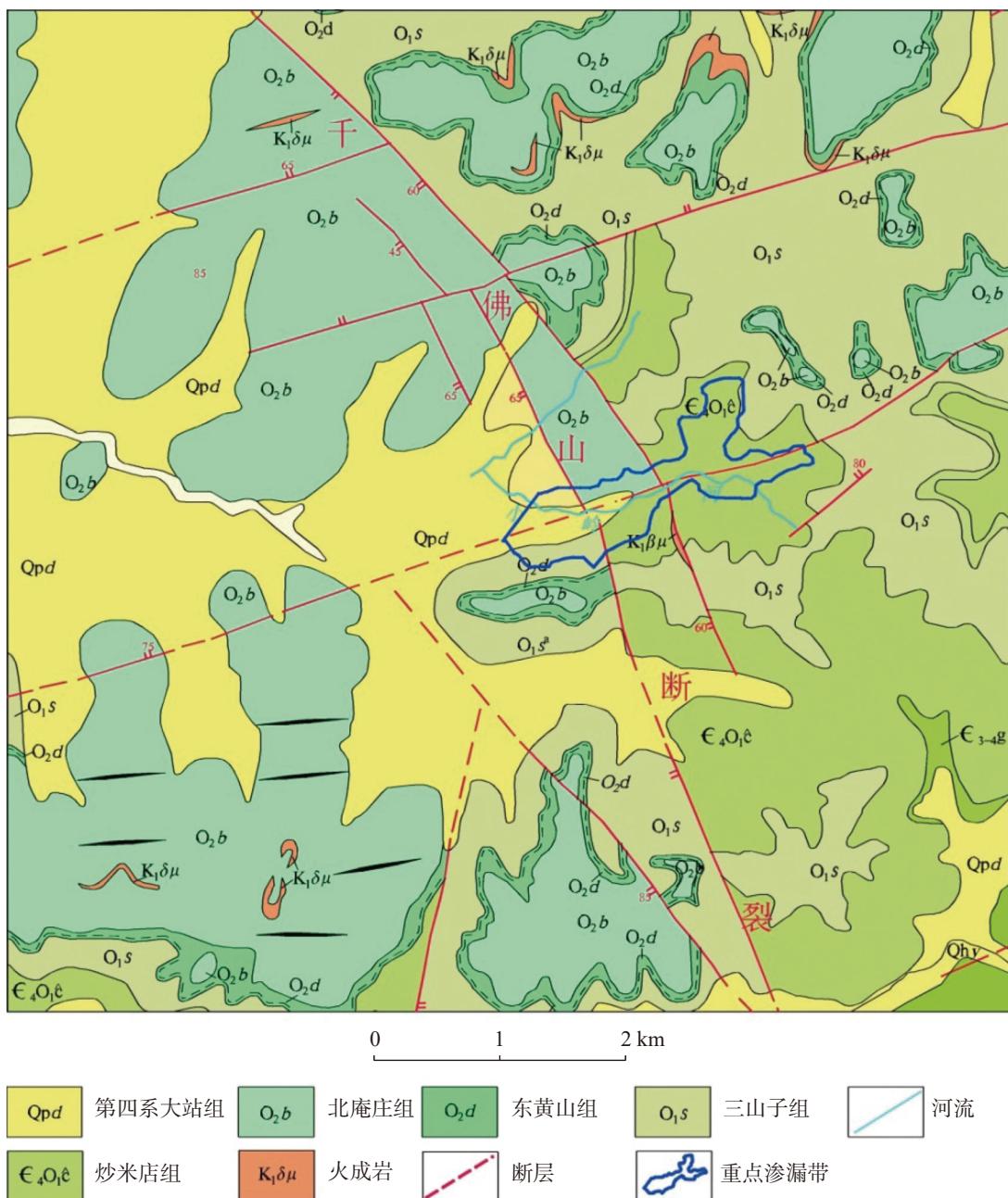


图 1 研究区地质图
Fig. 1 Geological map of the study area

向 SWW, 倾角 80°, 断层发育深度约 200 m, 规模一般; F3 断层位于小岭重点渗漏带的东部, 走向 NNW, 倾向 SWW, 倾角 80°, 断层发育深度约 200 m, 规模一般; F4 断裂位于小岭重点渗漏带西部, 走向 NNW, 倾向 SWW, 断层发育深度约 200 m, 规模较大, 断裂破碎带宽约 20 m。

3.2 地层分布情况

为确定小岭重点渗漏带内第四系地层、下伏可溶性岩层的岩性、厚度等, 在重点渗漏带内查明的千

佛山断裂附近布设 5 个钻孔(图 3)。从图 3 和地层厚度统计表(表 1)可知, 第四系岩性主要为杂填土、粉质黏土、碎石土等, 由于人为因素影响其厚度自西向东变厚; 第四系下伏可溶性岩层为炒米店组, 岩性以中厚层微晶灰岩、薄层状灰岩、泥质条带灰岩为主, 受沉积环境的控制, 自东向西炒米店组发育逐渐变厚, 其厚度由东部的 7.6 m, 过渡到西部的 56.3 m 左右。其次受断裂构造的控制, F1 断裂与 F2 断裂之间为一相对地堑, 其发育厚度由 F2 断裂东的 7.6 m, 突变为 F2 断裂西部的 30~42 m。

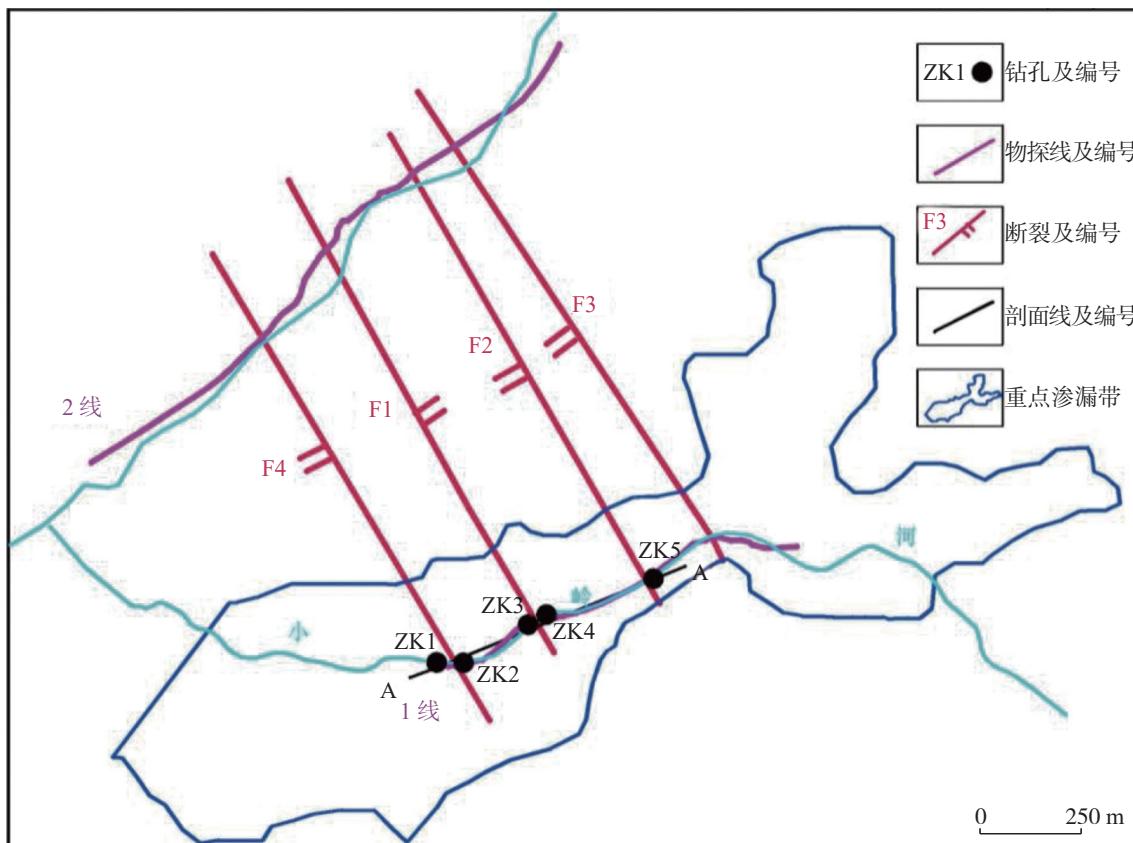


图 2 千佛山断裂钻孔及地质剖面线位置示意图

Fig. 2 Locations of boreholes and geological section lines in the Qianfoshan fault

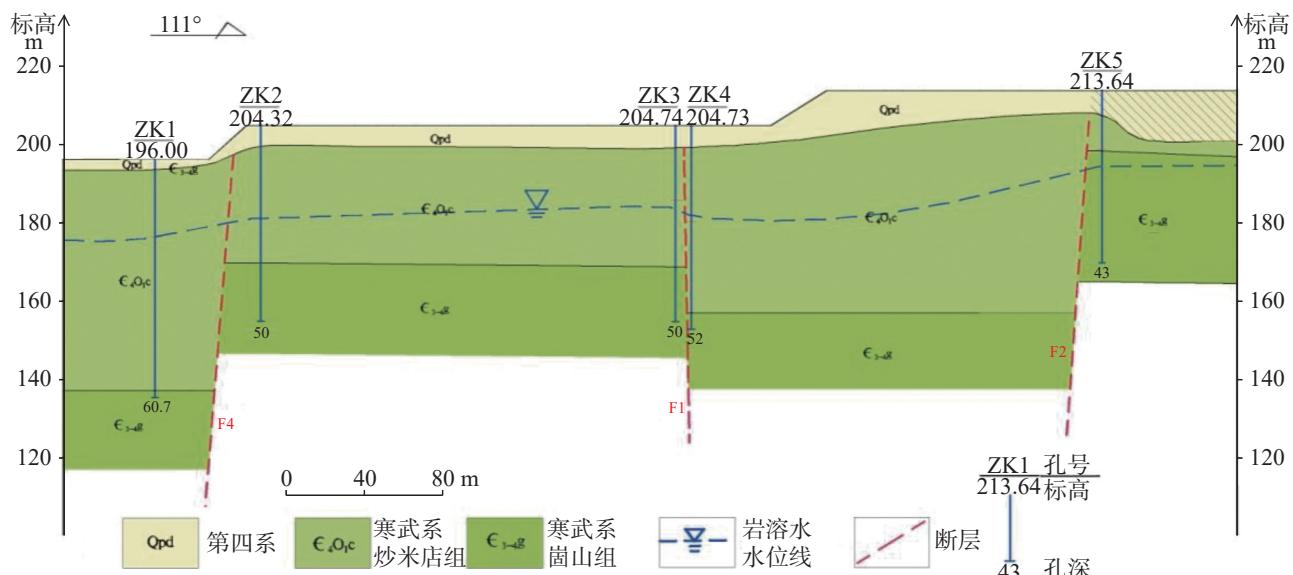


图 3 千佛山断裂地质剖面图

Fig. 3 Geological section of the Qianfoshan fault

表 1 千佛山断裂地层厚度统计表

Table 1 Statistics of formation thickness in the Qianfoshan fault

地层厚度/m	ZK1	ZK2	ZK3	ZK4	ZK5
第四系	2.7	5.0	4.0	6.0	5.8
炒米店组	56.3	30.0	32.0	42.0	7.6

3.3 岩溶发育情况

3.3.1 岩溶发育控制因素

研究区岩溶发育情况主要受地层岩性和断裂构造控制。根据对济南以往钻孔资料的统计分析, 济南地区三山子组、北庵庄组、阁庄组和八陡组岩溶发育, 地下岩溶主要形态为溶孔、溶隙和孔洞, 岩溶发育带深度在地下 200 m 或-150 m 标高以上, -150 至-350 m 为中等发育带, -350 至-550 m 为弱发育带。地下岩溶最为发育的是泥晶灰岩、大理岩和白云质灰岩。泥晶灰岩岩溶特点是以溶隙为主, 孔洞占第二位, 而溶孔相对较差。大理岩岩溶溶隙、溶孔、孔洞均极为发育, 白云质灰岩则以孔洞和溶孔占优势。豹斑灰岩以溶隙和溶孔为主, 而孔洞较少。

岩溶发育情况不仅受可溶性岩石岩性控制, 同时也受断裂构造控制, 断裂构造规模越大, 断裂构造

影响带越宽, 带内岩溶越发育, 张性断裂带内岩溶发育。

3.3.2 岩溶发育情况

根据本次钻孔资料, 小岭重点渗漏带内第四系下伏可溶性岩层为炒米店组, 岩性以中厚层微晶灰岩、薄层状灰岩、泥质条带灰岩为主, 该岩性地层岩溶发育相对较弱。

从地球物理勘探解译成果、钻探岩芯及钻孔注水补源试验结果统计表(表 2)可知, F1 和 F4 断裂规模较大, F1 断裂东的 ZK4 和 ZK5 孔注水量小, 证明 F1 断裂以东渗漏能力弱, 可溶性岩层岩溶裂隙发育较弱。F4 断裂以西的 ZK1 孔注水量小, 证明 F4 断裂以西渗漏能力弱, 可溶性岩层岩溶裂隙发育较弱。F1 断裂西侧的 ZK3 孔和 F4 断裂东侧的 ZK2 孔注水量较大, 证明在分支断裂构造影响带内, 渗漏能力强, 岩溶裂隙发育。

表 2 注水层厚度与注水量统计表

Table 2 Statistics of thickness of water injection layer and water injection quantity

钻孔号	初始水位埋深/m	注水量/ $m^3 \cdot d^{-1}$	注水时间/h	稳定水位埋深/m	注水层厚度/m	距离断裂距离
ZK1	19.29	108	11	0.22	11.3	F4断裂西40 m
ZK2	22.95	2 880	11	1.20	22.0	F4断裂东13.5 m
ZK3	18.86	2 400	8	0.30	12.7	F1断裂西4.5 m
ZK4	24.20	228	5	1.18	12.4	F1断裂东3 m
ZK5	14.69				1.2	F2断裂东7 m

3.4 渗漏量计算分析

3.4.1 精准补源地段

为求取小岭重点渗漏带内水文地质参数、确定精准补源地段、计算渗漏量, 本次工作对施工的 5 个钻孔进行了注水补源试验(表 2)。ZK1 孔初始水位埋深为 19.29 m, 注水量为 $108 m^3 \cdot d^{-1}$, 稳定注水时间为 11 h, 稳定水位埋深为 0.22 m, 停止注水后 20 min 水位埋深恢复至埋深 11.33 m, 4 h 后基本恢复到初始水位埋深; ZK2 孔初始水位埋深为 22.95 m, 注水量为 $2 880 m^3 \cdot d^{-1}$, 稳定注水时间为 11 h, 稳定水位埋深为 1.20 m, 停止注水后 1 h 水位埋深恢复至埋深 16.06 m, 6 h 后基本恢复到初始水位埋深; ZK3 孔初始水位埋深为 18.86 m, 注水量为 $2 400 m^3 \cdot d^{-1}$, 稳定注水时间为 11 h, 稳定水位埋深为 0.30 m, 停止注水后 1 h 水位埋深恢复至埋深 16.21 m, 4 h 后基本恢复

至初始水位埋深; ZK4 孔初始水位埋深为 24.2 m, 注水量为 $228 m^3 \cdot d^{-1}$, 稳定注水时间为 5 h, 稳定水位埋深为 1.18 m, 停止注水后 1 h 水位埋深恢复至埋深 22.00 m; ZK5 孔初始水位埋深为 14.69 m, 注水 1 min 水位升至孔口, 停止注水后 5 min 水位保持在孔口, 1.5 h 后水位埋深为 0.1 m, 4 d 后水位埋深为 2.70 m。从表 2 中和上述数据分析可知, F1 断裂以西和 F4 断裂以东为强渗漏地段, 结合小岭河道中台阶和桥梁的位置确定小岭重点渗漏带内河道精准补源地段。F4 断裂东 4 m 为河道内台阶位置, 确定台阶东 16 m 范围, F1 断裂西 20 m 范围为精准补源地段。

3.4.2 渗透系数

利用 ZK2 和 ZK3 孔注水补源试验数据, 根据公式(1), 计算不同精准补源地段的含水层渗透系数, 经计算 F4 断裂东渗透系数为 $7.06 m \cdot d^{-1}$, F1 断裂东

渗透系数为 $7.37 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

3.4.3 渗漏量计算

为减少回灌补源井与井之间的干扰,按精准补源地段面积的 1/2 作为概化大井的面积;回灌补源时回灌井稳定水位埋深 0.5 m,根据公式(1)、公

式(2)计算重点渗漏带精准补源地段补源量的结果见表 3。

计算得出 F1 断裂破碎带内,炒米店组渗透系数为 $7.37 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$,地层渗漏量为 $10\ 582 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$;F4 断裂破碎带内,炒米店组渗透系数为 $7.06 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$,地层渗漏量为 $9\ 441 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。

表 3 允许补源量计算综合表

Table 3 Comprehensive table for calculation of allowable supplementary sources

断裂带	水头高度/m	渗水段/m	渗透系数/ $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$	大井半径/m	渗漏量/ $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$
F1	18.36	12.70	7.37	7.07	10 582
F4	22.45	22.00	7.06	5.66	9 441

F1 断裂破碎带内的补源井布设在 F1 断裂的西侧,按“之”字形布设,布设 5 眼补源井,井距 5 m;F4 断裂破碎带内的补源井布设在 F4 断裂的东侧,按“之”字形布设,布设 4 眼补源井,井距 5 m。

4 小岭重点渗漏带补源对泉水影响评价

4.1 地下水数值模型

4.1.1 模型范围

由于小岭重点渗漏带开展钻孔内补源试验持续时间较短,试验期间趵突泉水位受降雨、其他生态补源工程、市区应急补源、自备井开采等因素综合影响,难以从地下水位变化上直接分析小岭生态补源试验对泉水的影响,本次采用地下水数值模拟的方式对补源效果进行分析评价。

考虑到趵突泉泉域处在一个比较完整的地下水系统内,在较长时期内,有相对固定的补给项和排泄项,本次模拟范围为东至东坞断裂,西至马山断裂,北侧以一系列近东西向隔水断裂,奥陶系灰岩顶板埋深 600 m 一线为界,南至寒武系中统张夏组底界面,面积达 $1\ 315 \text{ km}^2$ (图 4)。

4.1.2 含水层结构特征

模拟区含水系统主要包括第四系孔隙含水层和裂隙岩溶含水层,概化为非均质的各向异性的承压三维非稳定流。第一层为潜水含水层,该目的层主要为第四系全新统及上更新统地层,含水层岩性为中粗砂、砂砾石层。第二层为承压含水层,该目的层是寒武系和奥陶系地层,根据钻孔资料,灰岩埋藏深

度,确定模型研究深度为 600 m 左右^[16]。

模拟区平面上剖分为 470 行、500 列,各层采用 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 网格剖分,垂向上剖分为 2 层,每层得到 235 000 个单元格。选择 2017 年 10 月 1 日至 2018 年 9 月 30 日为模型的识别期,2018 年 10 月 1 日至 2019 年 6 月 1 日为模型的验证期,以 5 日作为一个应力期。

4.1.3 源汇项的处理

大气降水是地下水的重要补给来源,据统计 2017 年 10 月-2019 年 6 月泉域内平均降雨量为 $1\ 044.10 \text{ mm}$; 泉域内晚寒武统崮山组、炒米店组及早寒武统灰岩入渗系数为 0.01,裸露的中晚寒武统张夏组灰岩入渗系数为 0.33,奥陶系灰岩入渗系数为 0.45,孔隙水和岩溶水有水力联系的山前隐伏区入渗系数为 0.39^[16-17,21]; 降雨分区及降雨入渗系数分区依据 1988 年济南保泉供水勘探报告;河流渗流量根据实测的河流测流资料,河流渗流量为 $12.00 \text{ 万 m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$; 根据统计资料,人工开采量主要包括工业自备井开采量($7.40 \text{ 万 m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)、水源地开采量($10.76 \text{ 万 m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)、农业灌溉开采量($7.59 \text{ 万 m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$),此外,农村生活用水开采量为 $0.99 \text{ 万 m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$; 泉水排泄量主要收集整理 2017 年 10 月-2018 年 9 月四大泉群的流量数据,泉水涌出量平均为 $16.55 \text{ 万 m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ (表 4)。

4.2 模型识别验证

4.2.1 水位线的拟合

由图 5 可知,地下水长期观测点的模拟值和实测值之间的误差基本都处在允许范围之内,该模型可较好反映研究区地下水流动场的变化趋势,模型

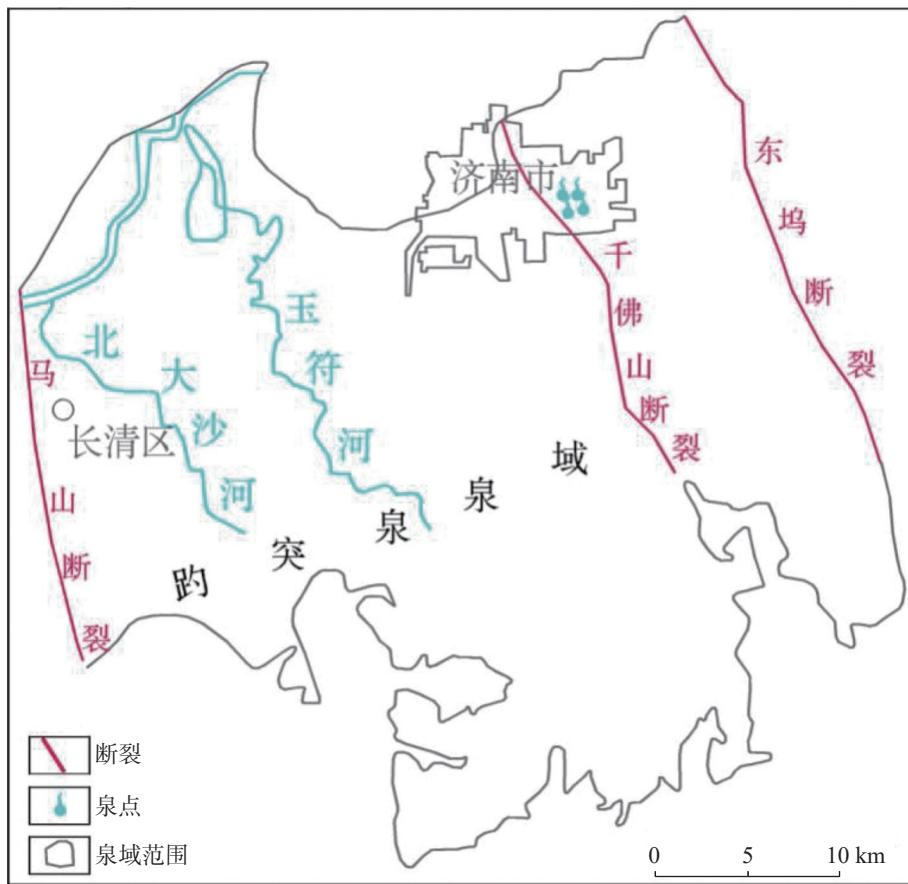


图4 模拟区范围图
Fig. 4 Simulation area map

表4 2017年10月–2018年9月岩溶地下水均衡表

Table 4 Karst groundwater balance from October, 2017 to September, 2018

地下水均衡	源汇项	岩溶水补排量/ $10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$
		趵突泉泉域
补给	降雨	30.04
	侧向补给量	4.76
	越流	0.14
	河道水库渗流量	12.00
	灌溉回渗量	1.52
	小计	48.46
排泄	人工开采	26.74
	泉水排泄	16.55
	侧向排泄量	3.19
	越流	1.55
	小计	48.03
	补排差	0.43

与实际情况良好吻合, 模拟结果合理, 基本反映出地下水系统的水力特征, 可利用模型进行地下水位预测。

4.2.2 地下水均衡分析

由表4可知, 在识别期趵突泉泉域总补给量为 $48.46 \text{万 m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 总排泄量为 $48.03 \text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 均衡差为 $0.43 \times 10^4 \text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 补给量大于排泄量, 为正均衡。河道水库渗流量对趵突泉泉域地下水的均衡起到积极的支撑作用。

4.2.3 效果评估

利用构建的趵突泉泉域岩溶地下水数值模型, 采用单一变量的方式, 在GMS中利用WELL模块, 以钻孔的形式进行处理, 模拟计算小岭重点渗漏带精准补源地段于枯水期6月1日开始补源, 补源量为1.50万 $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 时, 补源时间为1个月时, 小岭重点渗漏带钻孔补源对趵突泉水位的最大影响值约0.02 m。

5 结论与建议

(1)通过野外调查、地球物理勘探、钻探、钻孔补源试验等方法, 得出小岭重点渗漏带内断裂构造破碎带内, 岩溶裂隙发育, 为精准补源地段;

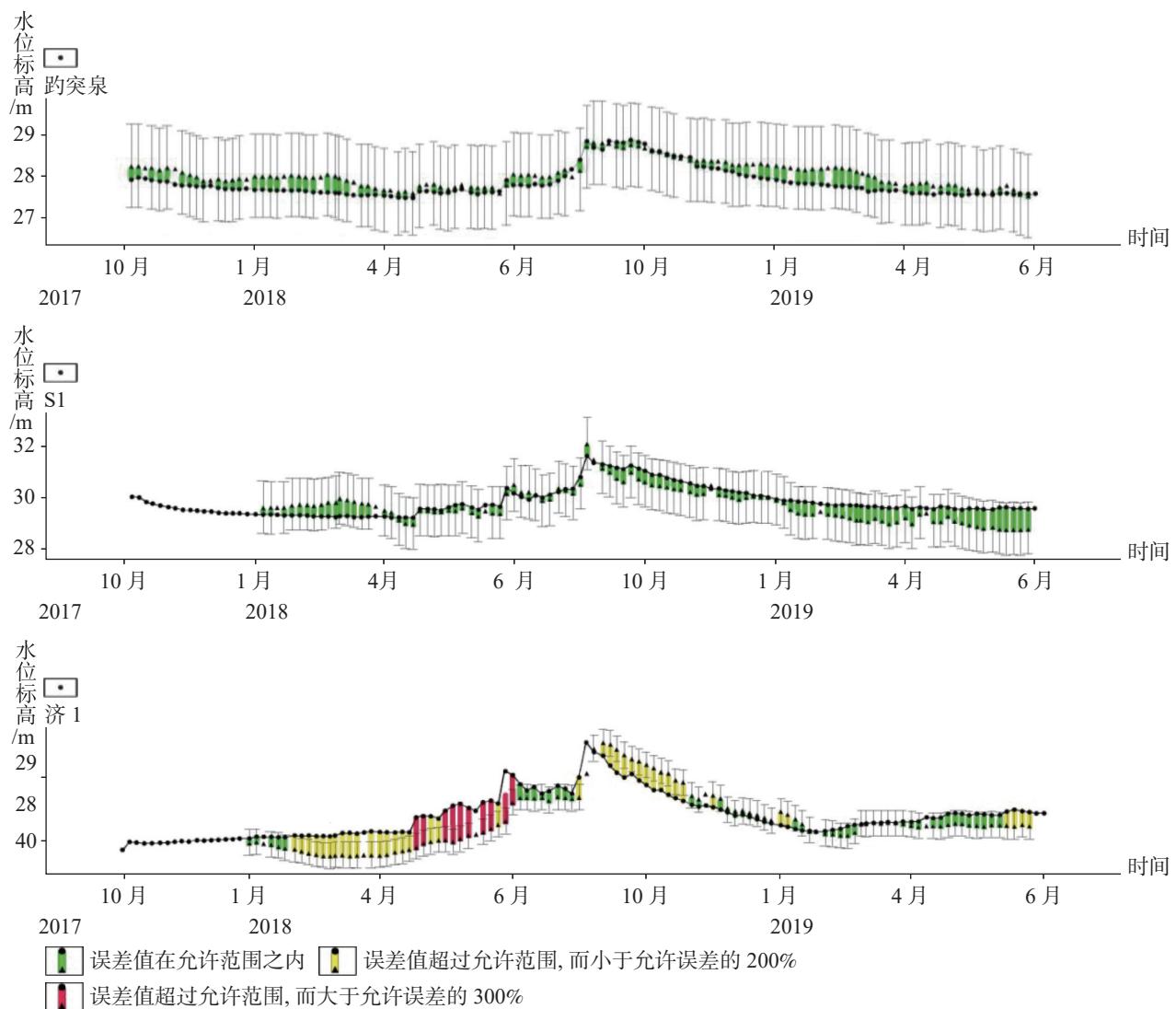


图 5 模拟区典型岩溶水长期观测点水位拟合图

Fig. 5 Fitting diagram of water level at long-term observation point of typical karst water in the simulation area

(2) F1 断裂以西 20 m 的断裂破碎带和 F4 断裂以东 16 m 的断裂破碎带为小岭重点渗漏带的精准补源地段。F1 断裂破碎带内, 炒米店组渗透系数为 $7.37 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$, 补源渗漏量为 $10\ 582 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$; F4 断裂破碎带内, 炒米店组渗透系数为 $7.06 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$, 补源渗漏量为 $9\ 441 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。枯水期 6 月 1 日开始补源, 补源量为 $1.50 \text{ 万 m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 时, 补源时间为 1 个月时, 小岭重点渗漏带钻孔补源对趵突泉水位的最大影响值约 0.02 m。F1 断裂西侧需施工 5 眼补源井, 井距 5 m, F4 断裂东侧需施工 4 眼补源井, 井距 5 m;

(3) 通过小岭重点渗漏带补源试验, 查明影响第四系下伏可溶性岩层井孔回灌补源量的因素有: 下伏可溶性岩层的岩性、岩溶发育程度、断裂构造破碎带的宽度等。

参考文献

- [1] 李道真. 山丘区三水转化及应用变参进行区域水资源计算方法研究(上)[J]. 中国人口·资源与环境, 1989, 1(1): 44-49.
LI Daozhen. Study on calculating method of variable parameters in areal water resource evaluation and the interaction between surface water and groundwater[J]. China Population, Resources and Environment, 1989, 1(1): 44-49.
- [2] 李道真. 山丘区三水转化及应用变参进行区域水资源计算方法研究(下)[J]. 中国人口·资源与环境, 1990, 2(1): 36-44.
LI Daozhen. Study on calculating method of variable parameters in areal water resource evaluation and the interaction between surface water and groundwater[J]. China Population, Resources and Environment, 1990, 2(1): 36-44.
- [3] 孟庆斌, 邢立亭, 滕朝霞. 济南泉域三水转化与泉水恢复关系探讨[J]. 山东大学学报(工学版), 2008, 38(5): 82-87.
MENG Qingbin, XING Liting, TENG Zhaoxia. The relationship of spring protection and transformation pattern between precipi-

- tation and groundwater and surface water in the Jinan spring region[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2008, 38(5): 82-87.
- [4] 邢立亭, 周娟, 宋广增, 邢学睿. 济南四大泉群泉水补给来源混合比探讨[J]. 地学前缘, 2018, 25(3): 260-272.
XING Liting, ZHOU Juan, SONG Guangzeng, XING Xuerui. Mixing ratios of recharging water sources for the four largest spring groups in Jinan[J]. Earth Science Frontiers, 2018, 25(3): 260-272.
- [5] 孙斌, 邢立亭, 彭玉明, 李常锁. 济南十大泉群特征、形成模式及水循环差异性浅析[J]. 中国岩溶, 2021, 40(3): 409-419.
SUN Bin, XING Liting, PENG Yuming, LI Changsuo. Characteristics, formation models and water cycle differences of ten major spring groups in Jinan City[J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(3): 409-419.
- [6] 孙斌, 彭玉明. 济南泉域边界条件、水循环特征及水环境问题[J]. 中国岩溶, 2014, 33(3): 272-279.
SUN Bin, PENG Yuming. Boundary condition, water cycle and water environment changes in the Jinan spring region[J]. Carsologica Sinica, 2014, 33(3): 272-279.
- [7] 周娟, 邢立亭, 滕朝霞, 王立艳. 制约济南岩溶大泉持续喷涌的主要因素阈值研究[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2015(3): 146-156.
ZHOU Juan, XING Liting, TENG Zhaoxia, WANG Liyan. Study on the threshold of main factors restricting Jinan large karst spring spewing[J]. Journal of East China Normal University(Natural Science), 2015(3): 146-156.
- [8] 李凤丽, 王维平, 徐巧艺, 吴深, 张郑贤. 济南市玉符河多水源回灌岩溶水水质风险评价[J]. 中国岩溶, 2017, 36(5): 751-758.
LI Fengli, WANG Weiping, XU Qiaoyi, WU Shen, ZHANG Zhengxian. Assessment of water quality risk from karst aquifer recharge with multi-source water in the Yufuhe river, Jinan[J]. Carsologica Sinica, 2017, 36(5): 751-758.
- [9] 李福林, 马吉刚, 李玉国, 金丽, 陈学群, 王德辰, 吴兴波, 卢朝霞, 赵德岭. 济南市泉群喷涌的控制性参数计算及供水保泉宏观调控措施研究[J]. 中国岩溶, 2002, 21(3): 188-194.
LI Fulin, MA Jigang, LI Yuguo, JIN Li, CHEN Xuequn, WANG Dechen, WU Xingbo, LU Zhaoxia, ZHAO Deling. Study on controlling parameters of Jinan spring groups gushing and macro-methods of spring protection and water supply[J]. Carsologica Sinica, 2002, 21(3): 188-194.
- [10] 徐军祥, 邢立亭, 佟光玉, 范立芹. 济南泉域地下水环境演化与保护[J]. 水文地质工程地质, 2004(6): 69-73.
XU Junxiang, XING Liting, TONG Guangyu, FAN Liqin. Groundwater environment evolution and its conservation in Jinan spring catchment[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2004(6): 69-73.
- [11] 梁永平, 申豪勇, 赵春红, 王志恒, 唐春雷, 赵一, 谢浩, 石维芝. 对中国北方岩溶水研究方向的思考与实践[J]. 中国岩溶, 2021, 40(3): 363-380.
LIANG Yongping, SHEN Haoyong, ZHAO Chunhong, WANG
- Zhiheng, TANG Chunlei, ZHAO Yi, XIE Hao, SHI Weizhi. Thinking and practice on the research direction of karst water in Northern China[J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(3): 363-380.
- [12] 王志恒, 梁永平, 唐春雷, 申豪勇, 赵春红, 郭芳芳, 谢浩, 赵一. 北方断流岩溶大泉复流的生态修复模式与复流措施效果的定量评价: 以山西太原晋祠泉为例[J]. 中国地质, 2020, 47(6): 1726-1738.
WANG Zhiheng, LIANG Yongping, TANG Chunlei, SHEN Haoyong, ZHAO Chunhong, GUO Fangfang, XIE Hao, ZHAO Yi. Ecological restoration pattern and quantitative evaluation of recirculation measures for northern discontinuous karst spring: A case study of Jinci Spring in Taiyuan City, Shanxi Province[J]. Geology in China, 2020, 47(6): 1726-1738.
- [13] 黄春海, 李升云. 地下水开发研究[M]. 济南: 山东大学出版社, 1988..
HUANG Chunhai, LI Shengyun. Study on groundwater exploitation[M]. Jinan: Shandong University Press, 1988.
- [14] 陈学群, 刘彩虹, 管清花, 田婵娟, 李成光, 辛光明. 跃突泉泉域洼地型强渗漏带特征及保护措施[J]. 人民黄河, 2020, 47(6): 1726-1738.
CHEN Xuequn, LIU Caihong, GUAN Qinghua, TIAN Chanjuan, LI Chengguang, XIN Guangming. Characteristics and protection measures of depression type strong leakage zone in Baotu Spring area[J]. Yellow River, 2020, 47(6): 1726-1738.
- [15] 刘彩虹, 陈学群, 田婵娟, 辛光明, 管清花, 李成光. 小岭村改造项目对济南泉域小岭强渗漏带的影响[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(11): 40-45.
LIU Caihong, CHEN Xuequn, TIAN Chanjuan, XIN Guangming, GUAN Qinghua, LI Chengguang. Impacts of Xiaoling urban village renovation project on leakage zone of Baotu Spring area, Jinan[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(11): 40-45.
- [16] 齐欢, 秦品瑞, 赵振华, 丁冠涛. 基于GMS的玉符河人工补源影响研究[J]. 山东国土资源, 2017, 33(11): 55-61.
QI Huan, QIN Pinrui, ZHAO Zhenhua, DING Guantao. Study on impact of artificial recharge of Yufu river based on GMS[J]. Shandong Land and Resources, 2017, 33(11): 55-61.
- [17] 齐欢, 秦品瑞, 丁冠涛. 基于GMS的济南市人工补源影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(1): 98-105.
QI Huan, QIN Pinrui, DING Guantao. Impact of artificial recharge in Jinan City based on GMS[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(1): 98-105.
- [18] 刘国爱, 赵新华. 济南泉域岩溶水动态特征及有关问题讨论[J]. 山东地质, 1997, 13(2): 67-73.
LIU Guoai, ZHAO Xinhua. Dynamic characteristics of karst water in Jinan Spring field and discussion on some questions related[J]. Geology of Shandong, 1997, 13(2): 67-73.
- [19] 陈鸿汉, 张永祥. 中国北方岩溶区地下岩溶水库—地表水库联合调蓄[J]. 地学前缘, 2001, 8(1): 185-190.
CHEN Honghan, ZHANG Yongxiang. Coupling-management of the underground karst reservoir and the surface reservoir in the karst area in North China[J]. Earth Science Frontiers, 2001, 8(1): 185-190.

- [20] 王鑫, 武朝军, 谢松彬, 李岩, 郑灿政, 周雨阳. 济南千佛山断裂与文化桥断裂导水透水性研究[J]. 山东国土资源, 2018, 34(4): 50-55.
WANG Xin, WU Chaojun, XIE Songbin, LI Yan, ZHENG Canzheng, ZHOU Yuyang. Study on water conductivity and permeability of Qianfoshan fault and Wenhuaqiao fault in Jinan City[J]. Shandong Land and Resources, 2018, 34(4): 50-55.
- [21] 祁晓凡, 李文鹏, 李传生, 杨丽芝, 马瑜宏. 济南岩溶泉域地下水位与降水的趋势性与持续性[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(11): 98-104.
QI Xiaofan, LI Wenpeng, LI Chuansheng, YANG Lizhi, MA Yuhong. Trends and persistence of groundwater table and precipitation of Ji'nan karst springs watershed[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(11): 98-104.

Experimental study on source compensation of Xiaoling key seepage zone in Jinan karst area

ZHAO Youmei^{1,2,3}, LIU Xiaoping^{1,2,3}, QI Huan^{1,2,3}

(1. 801 Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources, Jinan, Shandong 250014, China; 2. Key Laboratory of Groundwater Resources and Environment, Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources, Jinan, Shandong 250014, China; 3. Shandong Engineering Research Center for Environmental Protection and Remediation on Groundwater, Jinan, Shandong 250014, China)

Abstract Located in Baotu Spring area, the study area is a key leakage zone in Xiaoling, a valley with east-west trend surrounded by the foothills of Jiunu Mountain, Xinglong Mountain, Changgeng Mountain and Hujia Mountain. The total area of this leakage zone is 4.03 km². This study is aimed at understanding the characteristics and influencing factors of the leakage of source supplement of the soluble rock under the key seepage zone of Baotu Spring area in Jinan. Besides, this study may provide a basis for the selection of accurate location of source supplement and for the restoration measures of key leakage zone.

In this paper, the thickness of Quaternary system, the buried depth and thickness of underlying soluble rock layer, the development degree of karst fissures, the distribution characteristics of fault structures, and the leakage amount and its effect on spring water in Xiaoling key leakage zone are studied by using the methods of field geological investigation, geophysics exploration, drilling, water injection and recharge experiment, and model simulation and prediction evaluation. The thickness of the Quaternary in the Xiaoling key leakage zone is 2.7-6.0 m, and the underlying strata of the Quaternary are the Chaomidian Formation with the lithology mainly composed of medium-thick micro-crystalline limestone, thin-bedded limestone and argillaceous-banded limestone. Controlled by the sedimentary environment, the formation development of Chaomidian Formation gradually thickens from east to west with its thickness from 7.6 m in the east to 56.3 m in the west. Fault structures are mainly developed with the north-north-west Qianfo Mountain Fault and the near-east-west fault in the key leakage zone. The development of karst is mainly controlled by stratum lithology and fault structure. The karstification of Chaomidian Formation is weak in the study area, affected by the Qianfo Mountain fault. On both sides of the large-scale fault zone, the more developed the karst is, the stronger the leakage of source supplement becomes. Under the condition of drilling and source supplement test, the amount of source-replenishing leakage of the Chaomidian Formation is 20,023 m³·d⁻¹ on both sides of the fault in the Xiaoling key leakage zone. Given other recharge measures, the recharge amount is 15,000 m³·d⁻¹ in the dry season, and the influence value of one-month recharge time on spring water is 2 cm. The research findings show that the influencing factors of recharge amount of the Quaternary underlying soluble rocks are listed as follows: the lithology of the underlying soluble rock, the degree of karst development, the degree of controlling over karst development by the fault structure, the width of the fracture zone of the fault structure, etc.. Besides, the fractured shatter zone in the key leakage zone is a precise source supplement section.

Key words key leakage zone, karst groundwater, Qianfo Mountain fault, leakage of source supplement

(编辑 黄晨晖)