

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.11.008

淮北市裂隙岩溶水水位动态 对大气降水的响应机制解析

姚梅¹, 祝丽萍¹, 马宏博², 刘猛³

(1. 安徽省水文局, 安徽 合肥 230022; 2. 安徽省宿州水文水资源局, 安徽 宿州 234099; 3. 安徽省(水利部淮河水利委员会)水利科学研究院, 安徽 合肥 230088)

摘要: 岩溶水水位动态特征是开发利用和保护岩溶区地下水资源的重要依据, 文章针对淮北市裂隙岩溶水水源地, 结合地下水监测井数据、岩溶水赋存条件和水均衡法评价方法, 对研究区裂隙岩溶水水位动态对大气降水的响应机制进行解析。结果表明: 研究区的裂隙岩溶水受日降雨强度大于 50 mm 的次降雨影响最显著, 且当基岩裸露区地下水埋深在 25~35 m 时, 岩溶水水位对降水的滞后响应时间为 6~9 d; 受埋藏条件及上覆松散层厚度影响, 研究区的地下水动态特征从北向南基本由降水入渗型演变为径流型。基于水均衡法预测评价得出, 水源地周边水位抬升 1 m 时, 西部水源地北段、西部水源地南段、东部水源地需分别增加储存量约 765×10^4 、 890×10^4 、 450×10^4 m^3 , 该评价结果可为有序调控淮北市的岩溶水开采提供科学依据。

关键词: 裂隙岩溶水; 动态特征; 大气降水; 水均衡法; 响应机制

中图分类号: P641.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2025)11-1486-06

Response mechanism analysis of fissure karst water level dynamics to precipitation in Huaibei City

YAO Mei¹, ZHU Liping¹, MA Hongbo², LIU Meng³

(1. Hydrology Bureau of Anhui Province, Hefei 230022, China; 2. Suzhou Hydrology and Water Resources Bureau of Anhui Province, Suzhou 234099, China; 3. Anhui and Huaihe River Institute of Hydraulic Research, Hefei 230088, China)

Abstract: The dynamic characteristics of karst water level are an important basis for the development, utilization and protection of groundwater resources in karst areas. Focusing on fissure karst water source in Huaibei City, based on the data from groundwater monitoring wells, karst water occurrence conditions and water balance evaluation method, this paper analyzes the response mechanism of fissure karst water level dynamics to precipitation in the study area. The results show that the fissure karst water in the study area is most significantly affected by rainfall with a daily intensity greater than 50 mm. Moreover, when the depth of karst water in the exposed area is 25-35 m, the response time of karst water level to precipitation is 6-9 d. Affected by the burial conditions and the thickness of the overlying loose layer, the groundwater dynamic characteristics in the study area basically change from the precipitation infiltration type to the runoff type from north to south. Based on the prediction and evaluation of water balance method, when the water level rises about 1 m, the storage capacities of the northern section of the western water source, the southern section of the western water source and the eastern water source need to be increased by about 765×10^4 , 890×10^4 , 450×10^4 m^3 , respectively. The evaluation results can provide a scientific basis for the orderly regulation of karst water exploitation in Huaibei City.

Key words: fissure karst water; dynamic characteristics; precipitation; water balance method; response mechanism

收稿日期: 2023-08-01; 修回日期: 2024-05-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42107082); 安徽省自然科学基金资助项目(2208085US07)

作者简介: 姚梅(1981—), 女, 安徽阜阳人, 博士, 安徽省水文局高级工程师。

岩溶在全球分布广泛,据统计,全球岩溶地区的面积约占陆地面积的 12%,中国的岩溶区面积约 $344 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占国土面积的 1/3,是世界上岩溶分布面积最大的国家^[1]。安徽省淮北市为中国北方隐伏型岩溶发育代表性地区之一,在岩溶蓄水构造作用下,赋存丰富的裂隙岩溶水资源,这为支撑地区经济、社会和生态环境的发展发挥了重要作用。受埋藏条件、勘探程度、认识水平、自然条件及人类活动等因素影响,裂隙岩溶水的动态变化特征复杂,为了深刻理解岩溶水时空分布和水循环规律,研究人员开展了大量研究,如围绕岩溶水枯水期和人类活动驱动下的动态变化特征分析^[2],岩溶水资源评价^[3],岩溶塌陷、泉流量衰减、水化学演化分析^[4-5]等。岩溶水动态是一种自然与人工耦合作用的过程,掌握大气降水、人工开采对地下水动态的演化和作用机制是正确模拟和预测岩溶区地下水资源开发利用的基础。相关分析多采用定性方法描述地下水动态的表面现象,为此,本文针对安徽省淮北市裂隙岩溶水水源地,从

水文地质条件、年降雨及场次降雨角度,采用水位动态与水均衡相结合的方法,解析淮北市裂隙岩溶水水位动态对大气降水的响应机制,定量评估缓解该地区地下水水位下降调控措施,以期为裂隙岩溶水的合理开发利用提供科学依据,同时丰富岩溶区地球关键带的研究。

1 研究区概况

淮北市位于安徽省淮北平原北部,属暖温带半湿润季风气候区,多年平均降水量和蒸发量分别为 839.0、997.5 mm,在地质构造上处于一个 NNE 向的复式向斜和复式背斜交替出现的大构造带。区内广泛分布第四系松散孔隙含水层组和奥陶系碳酸盐岩裂隙岩溶含水层组,前者主要用于农业灌溉,后者则是淮北市城市生活与工业用水的主要取水层位。研究区岩溶区及水源地分布示意图如图 1 所示(基于安徽省标准地图服务网站审图号为皖准 S(2020)001 号的标准地图制作,边界无修改)。

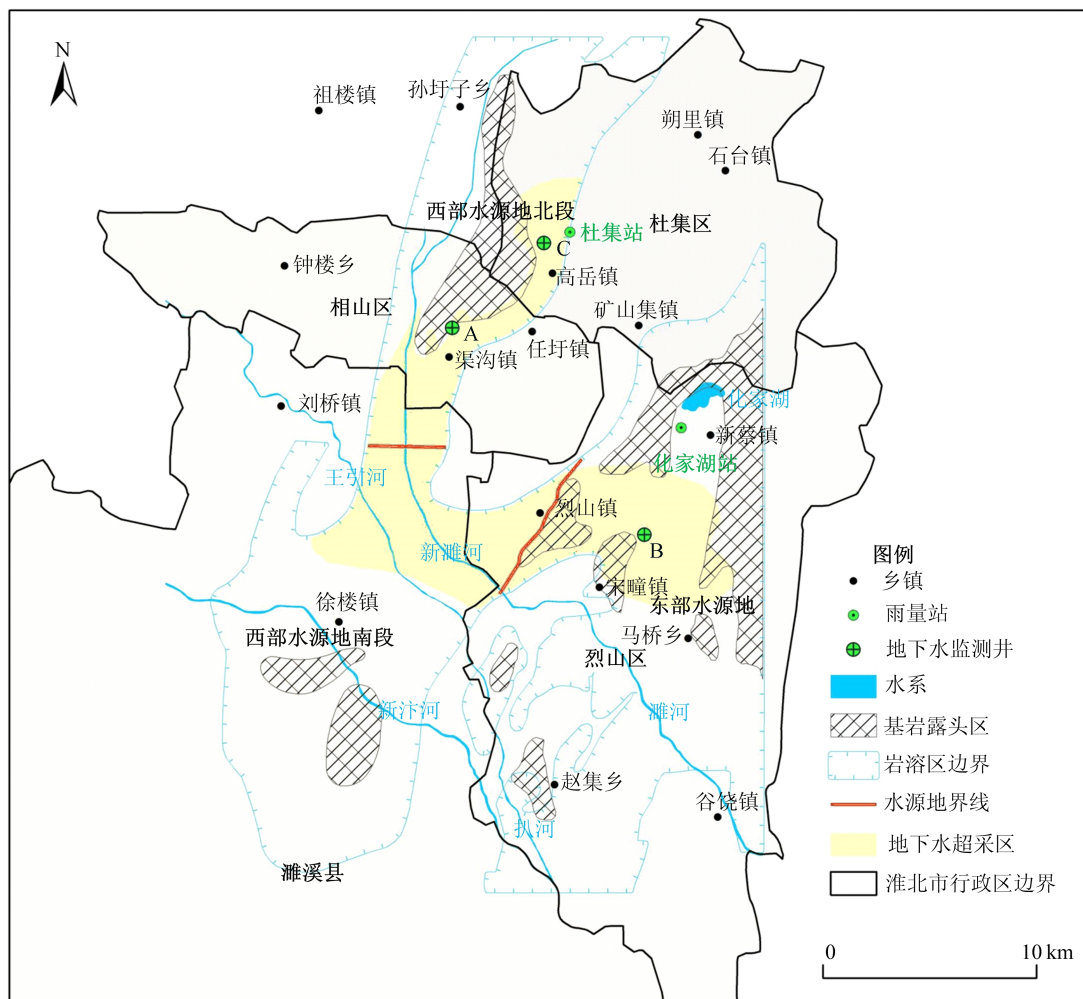


图 1 研究区岩溶区及水源地分布示意图

受构造条件影响,区内裂隙较发育,局地基岩出露,中部区域上覆厚度小于 40 m 且透水性能良好的松散孔隙层,南部区域松散孔隙层厚度逐渐增厚,厚度为 40~200 m。

第四系松散孔隙含水层组间无稳定分布的黏性土,各含水层间水力联系密切,基岩裸露地区的裂隙岩溶水直接接受大气降水、地表水补给,其他地区裂隙岩溶水主要接受上层松散孔隙水的越流补给,人工开采是区内裂隙岩溶水的主要排泄途径。开采条件下,区域裂隙岩溶水形成统一的地下水流场。

淮北市裂隙岩溶水源地主要分布在相山、三堤口、濉溪县城、徐楼及穆浅子—赵集一带,总面积约 521 km²。受新华夏 NNE 向构造控制,岩溶水源地呈 NNE—SSW 方向展布,水源地西侧边界为石炭系—二叠系煤系地层,东侧边界为山地分水岭。根据碳酸盐岩裂隙岩溶含水层空间分布及补给条件,淮北市裂隙岩溶水源地划分为东部、西部 2 个水源地;西部水源地为淮北主要的供水水源地,该水源地受人工开采影响,在中部形成地下水分水岭,据此划分为南段和北段 2 个计算评价单元。随着社会经济的快速发展,水源地开采量不断增加,20 世纪 70 年代为 0.15×10^4 m³/d 左右,90 年代增加至约 30×10^4 m³/d,21 世纪以来岩溶水开采量基本稳定在 40×10^4 m³/d 左右。因开采区基本集中在淮北市区及濉溪县城,且水源地开采井布局较集中,裂隙岩溶水的持续开采已引

起地下水水位明显下降,致使水源地附近裂隙岩溶水的补给条件发生变化,由裂隙岩溶水越流补给浅层孔隙水演变为浅层孔隙水越流补给裂隙岩溶水,市区及濉溪县城一带已形成 123.8 km² 的超采区,约占岩溶区总面积的 29.8%。

2 裂隙岩溶水水位动态变化机制解析

2.1 水位动态变化特征分析

淮北市水源地现布设 2 个雨量站和 3 眼国家级地下水监测井(监测井 A、B、C),如图 1 所示,3 眼监测井位于基岩裸露区。根据 2018—2022 年逐月地下水水位监测数据及降水情况,得到裂隙岩溶水的水位动态变化情况如图 2 所示。由图 2 可知,2018—2022 年,研究区地下水的开采量基本稳定,裂隙岩溶水水位随降水量的增加而上升,两者呈明显的周期性波动现象,每年 9 月至次年 5 月,降水量减少,裂隙岩溶水水位下降,埋深开始增大,最低水位出现在枯水月份;次年 6—8 月,降水量逐渐增加,岩溶水水位上升,埋深也开始减小,丰水期水位基本达到年度最大值。

以 2020 年为例,6—8 月降雨量分别为 295.3、348.7、55.9 mm,与 6 月水位相比,监测井 A 处 7 月、8 月的平均水位分别抬升 6.79、9.83 m,8 月因降雨量比 7 月减少近 200 mm,9 月岩溶水水位比 8 月又下降 3.06 m。由此可得,大气降水是影响研究区裂隙岩溶水水位动态变化的主要因素,裂隙岩溶水水位动态为降水入渗型。

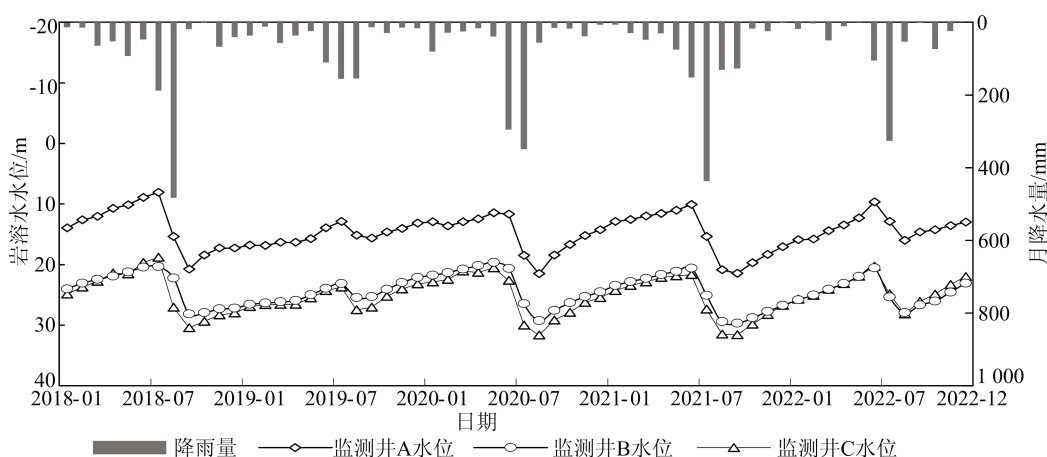


图 2 淮北市岩溶区 2018—2022 年大气降水与岩溶水水位变化过程线

为进一步量化分析岩溶水水位对降雨频次和降雨强度的响应程度,以 2021 年 7 月和 2022 年 7 月的场次降雨及监测井 A 的岩溶水埋深数据为例,得到两者的变化过程如图 3 所示。由图 3 可

知,2021 年 7 月和 2022 年 7 月裂隙岩溶水埋深总体均呈减小的现象,表明岩溶水水位处于上升趋势。7 月是研究区降雨量较多的月份,2021 年 7 月 2 日、14 日、15 日、28 日,分别降雨 78.0、

96.0、95.5、94.5 mm,岩溶水埋深自 7 月 2 日的 34.62 m 逐渐减小至 7 月 8 日的 31.81 m,水位抬升 2.81 m,响应持续时间约为 6 d。7 月 14 日和 15 日 2 场降雨后,埋深从 7 月 16 日的 31.97 m 减小至 7 月 24 日的 26.76 m,水位抬升 5.21 m,响应时间 8~9 d。2022 年亦呈现类似的现象,不再重复阐述。由此可知,监测井 A 附近裂隙岩溶水受大气降水影响极其显著,岩溶水水位对降水的滞后响应时间为 6~9 d。

从月降雨角度看,2022 年 7 月降雨量同比 2021 年 7 月减少 111 mm,2022 年 7 月平均水位与 2021 年 7 月相比降低 2.49 m,2022 年 7 月有

3 d 日降雨强度大于 50 mm,降雨强度在 55~71 mm/d 之间,当月水位抬升 7.29 m;而 2021 年 7 月有 4 d 日降雨强度大于 50 mm,降雨强度在 78~96 mm/d 之间,当月水位抬升 12.01 m,水位抬升幅度是 2022 年 7 月的 1.65 倍。水位动态特征再次呈现显著的降水入渗型,且从水位变化幅度可得,当日降雨强度低于 50 mm 时,裂隙岩溶水水位波动不明显,由此可知研究区的岩溶水受日降雨强度大于 50 mm 的次降雨影响显著。

综合上述分析可得,在基岩裸露区,当日降雨强度大于 50 mm,地下水埋深在 25~35 m 时,研究区岩溶水水位对降雨的滞后响应时间为 6~9 d。

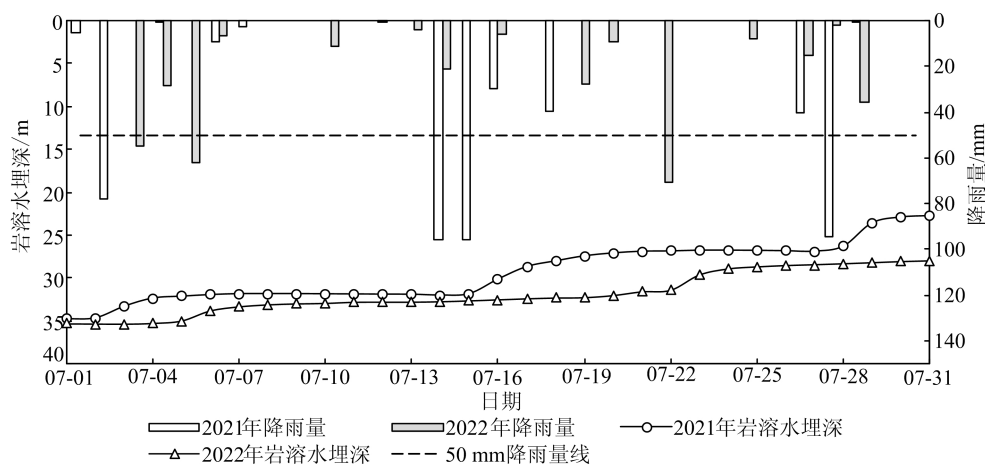


图 3 2021 年和 2022 年 7 月逐日降雨和岩溶水埋深变化过程线

2.2 水位动态变化机制解析

研究区水文地质结构概化示意图如图 4 所示。从水文地质角度分析,3 眼监测井位于基岩裸露区,监测井周边裂隙较发育,基岩直接出露于

地表,出露面积约 22.9 km²,表层多为松散的堆积物,包气带不发育,保水能力差,含水层补给条件良好,对降雨过程响应显著,地下径流属于典型的汇流型,降水后水位抬升明显。

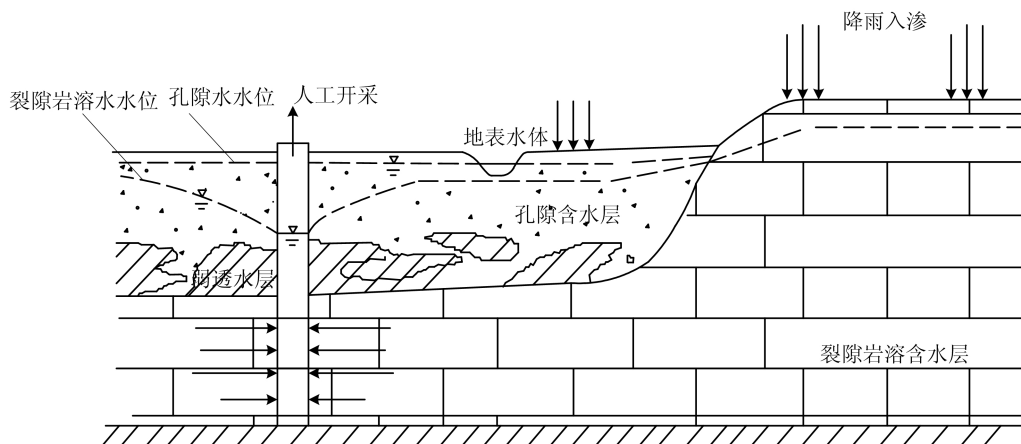


图 4 研究区水文地质结构概化示意图

研究区中部区域上覆厚度小于 40 m 且透水

性能良好的松散孔隙层,南部区域松散孔隙层厚

度逐渐增厚,为 40~200 m。大气降水首先补充上覆包气带水分的亏缺,然后松散孔隙层获得多余水分补给,孔隙水水位升高后,通过弱透水层以越流的形式补给裂隙岩溶水,大气降水间接补给裂隙岩溶水,且需经过包气带和松散孔隙层,补给路径较长,裂隙岩溶水水位对大气降水的滞后响应时间增大至月或年尺度。在研究区西部水源地南段,裂隙岩溶水埋藏比较深,属于深部隐伏型^[6],降水基本无法通过上覆松散层孔隙水补给,该地区已开展的多孔抽水试验也表明,上覆浅层孔隙水位与下伏岩溶水基本无水力联系^[6],补给条件变差,由地下水运动规律可知,地下水动态将由降水入渗型演变为径流型。

3 水均衡法评价裂隙岩溶水水位变化

地下水资源评价方法主要有水均衡法^[7-8]、数值法、水文地质比拟法等,其中,水均衡法具有适用条件广、补排项计算简便等优点,常用于验证其他计算方法的合理性^[9]。考虑到研究区开采时间较长,具有多年实测数据,本文采用水均衡法进一步评价裂隙岩溶水的水位变化幅度,水均衡表达式为:

$$Q_{补} - Q_{排} = \mu F \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad (1)$$

其中: $Q_{补}$ 为岩溶水源地获得的补给量; $Q_{排}$ 为岩溶水源地的排泄量; μ 为裂隙岩溶含水层的给水

度; F 为裂隙岩溶水漏斗面积; ΔH 为均衡期内的水位变幅; Δt 为地下水均衡计算时段。

淮北市水源地现阶段因地下水的过度开采,已出现明显的地下水水位降落漏斗,西部水源地中间形成分水岭。西部水源地北段和东部水源地岩溶水漏斗区补给项包括基岩裸露区降水入渗补给、隐伏区浅层孔隙水越流补给及水源地边界侧向补给;排泄项为人工开采量;西部水源地南段则受周边地质零流量边界影响,仅接受北侧的侧向补给。补给量的计算公式为:

$$Q_{雨渗} = \sum_i \alpha_i P F_i \quad (2)$$

$$Q_{侧补} = \sum_j K_j I_j h_j B_j \quad (3)$$

$$Q_{越补} = \sum_n K_n \frac{H_{孔n} - H_{溶n}}{M_n} A_n \quad (4)$$

其中: $Q_{雨渗}$ 为降水入渗补给量; P 为年降水量; α_i 为降水入渗补给系数; F_i 为补给区面积; $Q_{侧补}$ 为侧向补给量; K_j 为含水层的渗透系数; h_j 为潜水含水层厚度; B_j 为过水断面宽度; I_j 为地下水水力坡度; $Q_{越补}$ 为垂向越流补给量; K_n 为弱透水层垂向渗透系数; $H_{孔n}$ 为孔隙含水层的水头; $H_{溶n}$ 为岩溶含水层的水头; M_n 为弱透水层厚度; A_n 为越流面积; i, j, n 为分区计算编号。

根据式(1)~(4),得到水源地 2020—2022 年的水均衡计算结果,见表 1 所列。

表 1 研究区 2020—2022 年裂隙岩溶水源地水均衡评价结果

区段	年份	补给量/(10 ⁴ m ³ /a)				排泄量/ (10 ⁴ m ³ /a)	变化量/ (10 ⁴ m ³ /a)	区域年均水位变幅/m		
		大气降水	侧向补给	垂向越流	合计			计算值	实测值	误差
西部水源地北段	2020	1 382	159	2 888	4 429	4 979	-550	-0.72	-0.68	-0.04
	2021	1 650	170	3 259	5 079	5 419	-340	-0.45	-0.55	0.10
	2022	1 024	149	2 736	3 908	5 139	-1 231	-1.62	-1.71	0.09
西部水源地南段	2020	0	301	0	301	1 272	-971	-1.10	-1.20	0.10
	2021	0	828	0	828	1 474	-646	-0.60	-0.55	-0.05
	2022	0	903	0	903	2 048	-1 145	-1.07	-0.93	-0.14
东部水源地	2020	82	13	268	363	585	-222	-0.68	-0.74	0.06
	2021	108	11	212	331	451	-120	-0.52	-0.40	-0.12
	2022	40	5	83	128	407	-279	-0.88	-0.93	0.05

由表 1 可知:西部水源地北段 2020—2022 年储存量分别减少约 550×10⁴、340×10⁴、1 231×10⁴ m³,年均水位分别下降 0.72、0.45、1.62 m;西部水源地南段 2020—2022 年储存量分别减少约 971×10⁴、646×10⁴、1 145×10⁴ m³,年均水位分别下降 1.10、0.60、1.07 m;东部水源地因面积较小,补给量和开采量均小于西部水源地,2020—

2022 年年均水位分别下降 0.68、0.52、0.88 m。3 个区域的计算误差在 0.04~0.14 m 之间,误差较小,表明水均衡计算结果较合理。

淮北市岩溶水西部和东部水源地 2020—2022 年的开采量均大于补给量,岩溶水储存量减少,地下水均处于负均衡状态,地下水水位出现持续下降情况,这与图 2 地下水监测井的实际水位

动态变化趋势一致,图 2 再次验证了水均衡计算结果的合理性。

地下水水源地水位出现持续下降现象,易引发不同程度的岩溶塌陷或其他相关的地质环境问题,亟需实施地下水治理相关措施,如施加地下水压、人工回补等,以期科学保障地下水水位不出现明显下降,地下水处于动态均衡状态。根据验证后的水均衡模型,预测得到为保障区域岩溶水水位总体抬升 1 m,西部水源地北段、西部水源地南段、东部水源地需分别增加储存量约 765×10^4 、 890×10^4 、 $450 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

4 结 论

本文针对安徽省淮北地区隐伏型岩溶水源地,结合地下水水位监测数据、水文地质条件、水均衡法评价方法,解析淮北市裂隙岩溶水的水位动态变化机制。该地区岩溶分布面积较广,地下水补径排差异性大,研究区的裂隙岩溶水受日降雨强度大于 50 mm 的次降雨影响最显著。当日降雨强度大于 50 mm,且地下水埋深在 25~35 m 时,基岩裸露区水位动态对大气降水的响应时间为 6~9 d,其原因主要是裸露区表层包气带不发育,保水能力差,含水层补给条件良好;中南部松散孔隙层厚度逐渐增厚,开始出现孔隙水越流补给岩溶水的现象,补给路径逐渐增大;南部则发展为深部隐伏型岩溶,补给条件变差。因此,淮北市的地下水动态从北向南基本由降水入渗型演变为径流型。

岩溶地下水是淮北地区丰富优质的地下水资源,淮北市岩溶水西部和东部水源地水位 2020—2022 年出现持续下降现象,易引发不同程度的岩溶塌陷或其他相关的地质环境问题,亟需实施地下水治理相关措施。从岩溶水系统角度,结合地下水演化动态特征,基于现状地下水水位降落漏

斗分布情况,从水均衡角度预测得到为保障区域岩溶水水位抬升 1 m,西部水源地北段、西部水源地南段、东部水源地需分别增加储存量约 765×10^4 、 890×10^4 、 $450 \times 10^4 \text{ m}^3$,此评价结果可为有序调控岩溶水的开发利用提供科学依据。此外,岩溶地区复杂的水文地质条件加剧了岩溶水开发利用的难度和生态环境的脆弱性,有必要在掌握岩溶水动态变化特征基础上,分析总结水源地岩溶水开采与环境地质问题之间的制约关系,建立岩溶水源地水安全风险评价体系,科学开发利用和保护裂隙岩溶水资源。

[参 考 文 献]

- [1] 曹建华,蒋忠诚,袁道先,等.岩溶动力系统与全球变化研究进展[J].中国地质,2017,44(5):874-900.
- [2] 代天豪,王中美,陈尧,等.贵阳花溪养牛村暗河枯水期岩溶水动态特征分析[J].中国岩溶,2019,38(4):546-551.
- [3] 殷玉忠,陶月赞,黄金书.淮北市裂隙岩溶水动态模拟与超采评价[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2009,32(7):1051-1055.
- [4] 周亚醒,朱凤娜,付一夫,等.大规模开采条件下地下水动态特征与开发评价:以山东双村岩溶水系统为例[J].资源环境与工程,2021,35(4):516-520.
- [5] 孟令华.基于水化学和氢氧同位素的泰安城区岩溶地下水补给来源及演化过程[J].环境科学,2024,45(4):2096-2106.
- [6] 郑三元.安徽省淮北地区岩溶水资源评价方法研究:以淮北市岩溶水资源评价为例[J].地下水,2006,28(5):33-35,43.
- [7] 赵世宇,张绍兴,闫立凯,等.正蓝旗浅层地下水资源评价及开采潜力分析[J].内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版),2020,49(5):460-470.
- [8] 马丹.吉林省榆树市地下水资源评价与研究[D].长春:吉林大学,2018.
- [9] 梁永平,申豪勇,高旭波.中国北方岩溶地下水的研究进展[J].地质科技通报,2022,41(5):199-219.

(责任编辑 张淑艳)