

河南某大型裂隙岩溶水源地地下水位动态分析

姜宝良, 陈宁宁, 李小建, 潘登, 张晓, 姜英博

A dynamic analysis of groundwater levels in a large fractured-karst groundwater wellfield in Henan

JIANG Baoliang, CHEN Ningning, LI Xiaojian, PAN Deng, ZHANG Xiaocai, and JIANG Yingbo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202007046>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

鄂尔多斯浩勒报吉水源地开采地下水的环境影响分析

Inspection and assessment of the environmental impacts of groundwater exploitation at the Haolebaoji wellfield in Inner Mongolia

王旭升, 尹立河, 方坤, 张俊, 王晓勇 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 5-5

兴隆水利枢纽对汉江河岸带氮素分布特征的影响

Effects of Xinglong Hydro-Junction on nitrogen distribution in the Hanjiang River riparian zone

陈淑娴, 尚睿华, 冯予诚, 王志强, 马腾 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 182-190

永定河生态补水的地下水位动态响应

Response of groundwater regime to ecological water replenishment of the Yongding River

胡立堂, 郭建丽, 张寿全, 孙康宁, 杨郑秋 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 5-11

西北地区地下水水量-水位双控指标确定研究——以民勤盆地为例

A study of the determination of indicators of dual control of groundwater abstraction amount and water table in northwest China: a case study of the Minqin Basin

王晓玮, 邵景力, 王卓然, 崔亚莉, 张秋兰 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 17-24

地下水水位波动带三氮迁移转化过程研究进展

Advances in researches on ammonia, nitrite and nitrate on migration and transformation in the groundwater level fluctuation zone

刘鑫, 左锐, 王金生, 何柱锬, 李桥 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 27-36

大武水源地断裂带关键水动力参数确定及污染防治对策

Determination of the key hydrodynamic parameters of the fault zone using colloidal borescope in the Dawu well field and strategies for contamination prevention and control

包锡麟, 费宇红, 李亚松, 曹胜伟 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 56-63



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202007046

河南某大型裂隙岩溶水源地地下水位动态分析

姜宝良¹, 陈宁宁¹, 李小建², 潘登³, 张晓偲¹, 姜英博¹

(1. 华北水利水电大学, 河南 郑州 450046; 2. 济源市布袋沟供水站, 河南 济源 459000;
3. 河南省地质环境监测院, 河南 郑州 450016)

摘要: 青多水源地岩溶地下水是济源市的主要供水水源, 研究其地下水位动态变化特征及影响因素对地下水资源合理开发及生态环境保护意义重大, 探明蟒河口水库是否补给水源地对城市安全供水具有重要意义。依托河南某大型裂隙岩溶水源地多年逐月(1994年6月—2019年12月)地下水位动态监测资料, 对不同阶段、不同时期的地下水位动态进行分析, 采用逐步回归分析方法定量确定水源地地下水位动态的影响因素, 建立水位动态预测的逐步回归方程。结果表明: ①第一阶段(蟒河口水库蓄水前), 水源地地下水位主要受降水和开采影响。其中, 第1时段(1994年6月—2005年12月), 水源地开采量约 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 地下水位主要受降水量影响, 开采量影响较小; 第2时段(2006年1月—2014年8月), 水源地开采量由 $2.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 逐渐增大到约 $6.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 地下水位受开采和降水双重因素影响, 总体呈现下降趋势。②第二阶段(蟒河口水库蓄水后), 水源地开采量由2014年8月的 $6.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 增大到2019年6月的 $8.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 岩溶地下水位不降反升, 其水位主要受蟒河口水库蓄水和降水影响, 开采量影响甚微。在不考虑蟒河口水库蓄水影响的情况下, 应用建立的逐步回归方程对水源地地下水位进行预测, 蟒河口水库蓄水后实测的水源地地下水位高于预测水位, 并从水源地水文地质条件、蟒河口水库蓄水水位、水质特征等方面论证了蟒河口水库的补给效果。本研究可为水源地地下水资源评价、水资源可持续利用和管理提供科学依据, 也可类似地区地下水动态研究提供参考。

关键词: 水源地; 开采量; 地下水位; 蟒河口水库; 逐步回归分析

中图分类号: P641.8

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)02-0037-07

A dynamic analysis of groundwater levels in a large fractured-karst groundwater wellfield in Henan

JIANG Baoliang¹, CHEN Ningning¹, LI Xiaojian², PAN Deng³, ZHANG Xiaocai¹, JIANG Yingbo¹

(1. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, Henan 450046, China;

2. Jiyuan Budaigou Water Supply Station, Jiyuan, Henan 459000, China;

3. Geological Environment Monitoring Institute of Henan Province, Zhengzhou, Henan 450016, China)

Abstract: Karst groundwater near the Qingduo wellfield is the main water supply source for the city of Jiyuan. It is of great significance to study the dynamic change characteristics of groundwater levels and the influencing factors for the rational development of groundwater resources and the protection of ecological environment. It is also of great significance to explore whether the Manghekou Reservoir is a recharge source area for the safe water supply of the city. In order to verify the replenishment effect of the groundwater after the impoundment of the Manghekou Reservoir, based on the monthly groundwater level data (from June, 1994 to December, 2019) of a large-scale fractured karst groundwater wellfield in Henan, the groundwater level dynamics at different stages and periods are analyzed. The step wise regression analysis is used to quantitatively determine the influencing factors

收稿日期: 2020-07-14; 修订日期: 2020-08-19

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(WT2018132)

第一作者: 姜宝良(1962-), 男, 教授级高工, 硕士, 主要从事水工环勘察研究方面的研究。E-mail: 1801521595@qq.com

通讯作者: 陈宁宁(1995-), 女, 硕士研究生, 主要从事水工环勘察研究方面的研究。E-mail: 13007619103@163.com

of groundwater level dynamics in the wellfield and a stepwise regression equation for the dynamic prediction of groundwater levels is established. The results show that (1) in the first stage (before the impoundment of the Manghekou Reservoir), the groundwater levels near the wellfield are mainly affected by precipitation and mining. In the first period (from June, 1994 to December, 2005), the extraction rate of the wellfield was about 20 000 m³/d, and the groundwater levels were mainly affected by precipitation. In the second period (from January, 2006 to August, 2014), the extraction rate of the wellfield was increased from 22 000 m³/d to about 65 000 m³/d, the groundwater levels were affected by the dual factors of precipitation and mining, showing an decreasing

Keywords: wellfield; extraction rate; groundwater level; Manghekou Reservoir; stepwise regression analysis

河南某大型裂隙岩溶水源地位于济源克井盆地出口青多村东南,为济源市第一水厂和第二水厂提供水源。自 1994 年投入运行以来,对地下水位、开采量、水质等进行了系统的统计和监测工作,积累了丰富的监测资料。随着气象、水文以及开采条件的变化,水源地的地下水资源也随之发生变化,这些变化集中反映在水位动态上。

地下水动态是水文地质学的重要研究内容,早在 20 世纪 40 年代国内外相关学者就开始研究地下水动态^[1]。目前地下水动态分析方法可分为解析法、数值法和数理统计法 3 类。解析法和数值法必须了解边界条件和相关水文地质参数。裂隙岩溶地下水的水文地质条件复杂,很难取得所需参数,难以建模求解。数理统计的逐步回归分析方法,可以从众多影响因素中,智能筛选出较为重要的影响因素,建立水位或泉水流量与相关因素(变量)的相关方程,具有一定实用价值。国内学者对华北平原地下水的动态类型、水位时空变化、下降速率及影响因素等开展研究分析^[2-7],这些研究主要针对华北平原大区域,数据的空间尺度和时间跨度都较大,对局部区域分析深度不够。姜宝良,赵贵章等^[8-9]利用逐步回归分析方法,研究新乡百泉泉水流量动态,确定了泉水流量动态的主要影响因素,建立了天然条件下泉水流量动态预测的逐步回归模型,预测了天然状态下的泉水流量,评价了百泉泉域的裂隙岩溶水资源量;姜宝良等^[10]通过某大型水源地的地下水位动态分析,建立了水位与开采量、降水量等相关因素逐步回归模型,进行了水位预测和资源评价。国内外针对地下水位动态特征及其影响因子的相关研究多以城市、流域、灌区等较大面积的区域为研究对象^[11-12],较小尺度范围内的地下水位变化研究较少且结果不够精确^[13-14]。蟒河口水库建设过程中,部分防渗工程未随水库主体工程完工,导致水库建成后漏水现象严重。蟒河口水库渗漏对

水源地的地下水环境影响尚未有人研究。本文根据水源地水位与开采量、降水量、蟒河口水库的蓄水量、水库蓄水后水位及水源地与水库水质等资料,定量确定地下水位动态的影响因素,论述了蟒河口水库蓄水后对水源地的补给效果。

1 研究区概况

克井盆地北、西和南部边界由盘古寺断层、三樊断层、封门口断层和五龙口断层构成。盆地北部为东西向延伸的太行山南麓余脉,西部万羊山及东南部孔山为低山丘陵,盆地内由蟒河冲洪积扇和山前坡洪积扇裙组成。地形东高西低,北高南低。

克井盆地含水岩组分为 3 类:松散岩类孔隙含水岩组、碳酸盐岩类裂隙岩溶含水岩组和碎屑岩类裂隙含水岩组^[15]。因碳酸盐岩类裂隙岩溶含水岩组为水源地开采目的层,故主要介绍此类含水岩组。根据克井盆地碳酸盐岩裂隙岩溶含水岩组的埋藏条件可分为:裸露型、覆盖型和埋藏型。太行山南麓、孔山、万羊山碳酸盐岩大面积裸露(裸露型),岩性主要为寒武—奥陶系的灰岩、白云质灰岩、白云岩等,加之断层交错,裂隙岩溶发育。五龙口断层与封门口断层之间、盆地出口的万羊山与孔山之间,碳酸盐岩被第四系松散堆积物覆盖(覆盖型),局部奥陶系灰岩与第四系卵砾石直接接触,形成“天窗”。盆地内石炭—二叠系砂泥岩地层掩埋(埋藏型)(图 1)。克井盆地裂隙岩溶地下水主要接受大气降水入渗补给,沁河侧向径流补给和蟒河口水库渗漏补给。地下水排泄以人工开采为主,也有以泉的形式集中排泄。

2 水源地地下水位动态

青多水源地是济源市唯一的大型裂隙岩溶地下水供水水源地,其多年地下水位动态可分为 2 个阶段(图 2)。

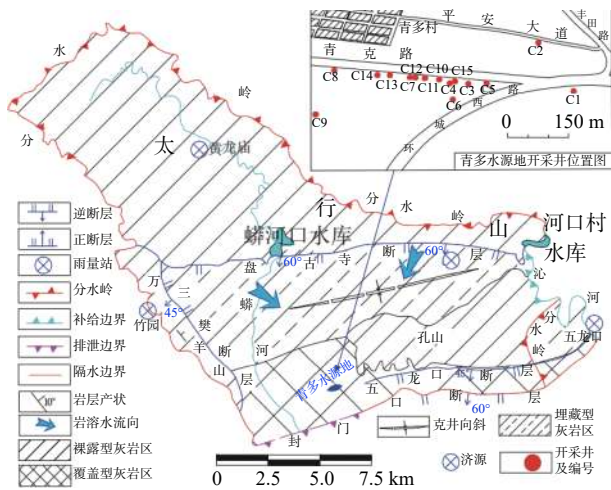


图1 克井盆地水文地质条件略图

Fig. 1 Simplified hydrogeological map of the Kejing Basin

2.1 第一阶段(1994年6月—2014年8月)

蟒河口水库建成前,水源地水位主要受降水和开采影响,水位一般滞后降水3~4个月。根据水源地开采量的变化又分2个时段。

2.1.1 第1时段(1994年6月—2005年12月)

水源地开采量维持在约 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,地下水位主要受降水量控制,呈现丰水期(年)水位上升,枯水期(年)水位下降的动态特征,开采量影响较小,基本呈

天然动平衡状态,水位峰值滞后降水峰值2个月以上。如:枯水年(1997年)降水量仅348.5 mm,水位持续下降。从年初的162.8 m下降到年末的153.01 m,下降近10 m,呈负均衡;丰水年(1996年)降水量932 mm,7—9月降水量达742.3 mm,水位从7月的151.99 m迅速上升到9月的163.09 m,呈正均衡状态;平水年呈均衡状态。该时段枯水年少,丰水年和平水年多,开采量小,总体呈正均衡状态。

2.1.2 第2时段(2006年1月—2014年8月)

水源地开采量由 $2.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 逐渐增大到约 $6.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,地下水位受降水和开采双重因素控制,呈现持续下降趋势。仅在丰水年(2011年降水量897.5 mm,7—9月降水量达620.5 mm)水位由7月的146.6 m急剧上升到11月的157.15 m,之后又持续下降至2014年6月的148.15 m。该时段由于开采量持续增加,水位持续下降,总体呈负均衡状态。

2.2 第二阶段(2014年9月—2019年12月)

2014年9月10日蟒河口水库开始蓄水。2015年汛期没有蓄水。2016—2019年连续4年汛期蓄水。

水源地开采量由2014年8月的 $6.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 增大到2019年6月的 $8.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。蟒河口水库蓄水后虽水源地开采量不断增加,但水源地水位不降反升,出

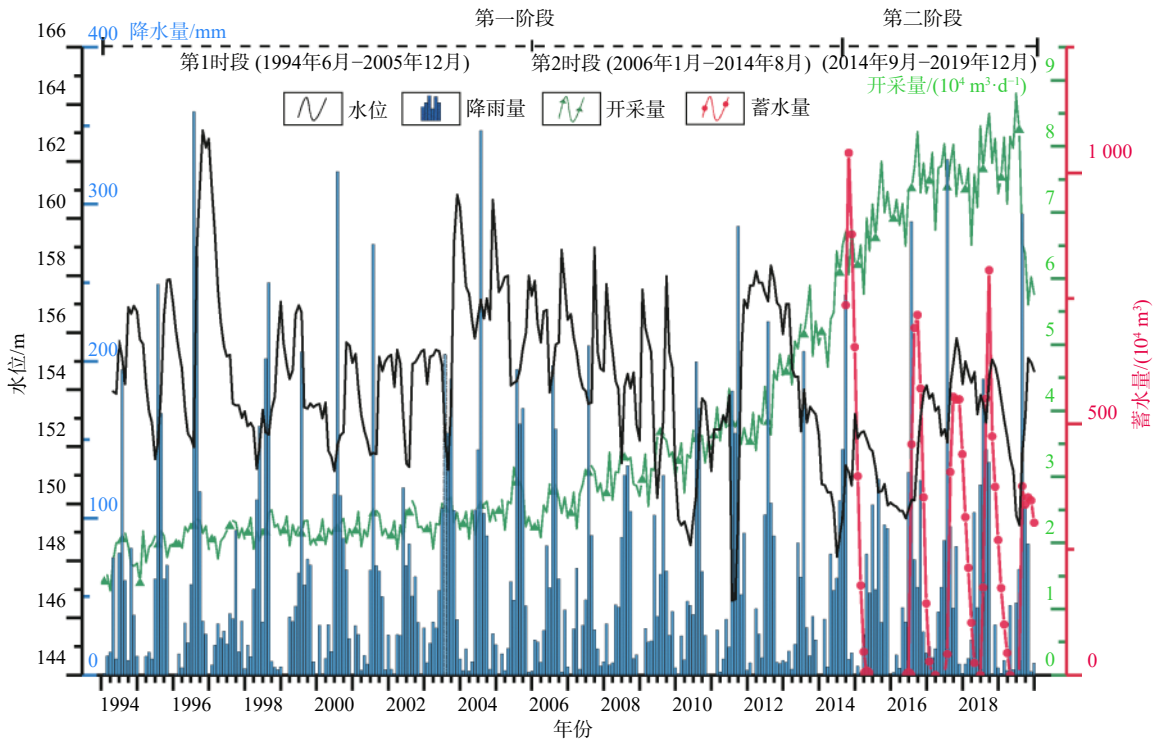


图2 水源地水位与开采量、降水量、蟒河口水库蓄水量动态曲线图

Fig. 2 Dynamic curves of groundwater levels, extraction rate, precipitation and water storage of the Manghekou Reservoir

现新的均衡状态。2019 年 7 月底, 济源第三水厂(利用河口村水库水)建成供水, 水源地开采量开始减少, 至 2019 年 12 月开采量减少到约 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 水源地水位上升。由于蟒河口水库距水源地约 7 km, 其水位滞后蟒河口水库蓄水高峰 2~3 个月。

3 水源地地下水位动态逐步回归分析

以水源地水位 H 为因变量, 降水量 P 、开采量 Q 、蟒河口水库蓄水量 W 及前期水位等为自变量, 进行逐步回归计算。

3.1 数据和算法

(1) 数据

收集 1994 年以来水源地地下水位、降雨量、开采量、水库水位及 2014 年开始蓄水后的水库蓄水量数据:

①水源地水位 H 选用观测系列长且相距较近的 C3、C4、C5 井的逐月平均水位。

②降水量 P 选用水文部门布置在克井盆地及附近的交地、竹园、黄龙庙 3 个雨量站和五龙口、济源 2 个水文站逐月降水量的算术平均值。

③水源地开采量 Q 采用济源市自来水公司统计的逐月平均开采量^[16-18]。

④蟒河口水库蓄水量 W 采用逐月平均蓄水量。

(2) 逐步回归分析方法

逐步回归分析是在多元回归分析的基础上派生出来的一种算法, 能从众多变量(或预先尽可能多地考虑一些变量)中自动挑选重要变量^[8, 10, 16], 并确定其数学表达式的一种统计方法。逐步回归模型为:

$$H_i = B_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \cdots + b_n x_n \quad (1)$$

式中: H_i ——当月地下水位/m;

x_1, x_2, \cdots, x_n ——自变量;

B_0 ——常数项;

$b_i (i=1, 2, \cdots, n)$ ——回归系数。

该方法常用来分析众多因素中无法确定究竟是哪些因素对因变量有影响的情况, 在数据分析中应用广泛。其最大特点是在引入或剔除一个变量时都要进行 F 检验。具体流程为根据向前选择法则引入自变量, 然后根据向后剔除法则将回归方程中 F 检验概率最小且符合剔除条件的自变量剔除, 重复进行上述引入和剔除过程直到回归方程外的自变量均不符合引入条件、回归方程中的变量均不符合剔除条件。

计算结果中, 除式(1)中出现的因素外, 还出现各影响因素 F 检验值 F , F 值越大, 该因素对因变量影响越大; 复相关系数 R , R 越大, 方程回归效果越显著。

3.2 结果与分析

3.2.1 蟒河口水库蓄水前(1994.6—2014.8)

以当月水位 H_i 为因变量, 以水源地当月开采量 Q_i 、当月及前 1~4 月降水量($P_i, P_{i-1}, P_{i-2}, P_{i-3}, P_{i-4}$)、前期水位(H_{i-1})为自变量, 对 1994 年 6 月—2014 年 8 月数据进行逐步回归分析计算, F 临界检验值取 2.0, 计算得到回归方程为:

$$H_i = 26.6500 + 0.8281 H_{i-1} + 0.0087 P_{i-2} - 0.2151 Q_i \quad (2)$$

该回归方程的复相关系数 $R=0.88$; 剩余标准差 $S_y=1.36$; $F^*=263.70$ 。

由式(2)可知, 水源地水位主要受前期水位、前 2 月降水量和当月开采量影响, 其中前期水位的影响最为显著($F=610.6$), 其次是前 2 月降水量($F=46.8$); 最后是当月开采量($F=4.9$)。

3.2.2 蟒河口水库蓄水后(2014.9—2019.12)

在求解该阶段逐步回归方程的基础上, 探明前期水位(H_{i-1})对水源地地下水位的影响, 故分两种情况进行讨论:

①以水源地水位 H_i 为因变量, 以水源地当月开采量 Q_i 、当月及前 1~4 月降水量($P_i, P_{i-1}, P_{i-2}, P_{i-3}, P_{i-4}$)、当月及前 1~4 月蟒河口水库蓄水量($W_i, W_{i-1}, W_{i-2}, W_{i-3}, W_{i-4}$)为自变量, 采用不同的 F 检验值分别进行逐步回归计算。

②以水源地水位 H_i 为因变量, 以水源地当月开采量 Q_i 、当月及前 1~4 月降水量($P_i, P_{i-1}, P_{i-2}, P_{i-3}, P_{i-4}$)、当月及前 1~4 月蟒河口水库蓄水量($W_i, W_{i-1}, W_{i-2}, W_{i-3}, W_{i-4}$)、前期水位 H_{i-1} 为自变量, 采用不同的 F 检验值分别进行逐步回归计算。

计算结果见表 1。

由表 1 可知, 蟒河口水库蓄水后, 在不考虑前期水位的影响下, 相关性较为一般($R=0.5955 \sim 0.7466$); 加入前期水位 H_{i-1} 这一因素后, 方程相关性明显提升($R=0.8566 \sim 0.9183$)。由此可见水源地地下水位受前期水位影响最为显著, 其次是前 1 月降水、前 2 月蟒河口水库蓄水量, 虽开采量由 $6.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 增加到最大的 $8.77 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 其对水位基本无影响或影响甚微。

由于水库蓄水后的逐步回归方程基本都无开采量的体现, 但实际预测过程中必须考虑开采量的影响, 故不使用第二阶段的回归方程作为水位预测方程。

4 蟒河口水库补给效果分析

蟒河口水库位于克井盆地西北的北蟒河出山口, 控制流域面积 94 km^2 , 总库容为 $1094 \times 10^4 \text{ m}^3$, 主要任

表 1 水库蓄水后逐步回归方程

Table 1 Stepwise regression equations after reservoir impoundment

考虑因素	F	逐步回归方程	R
$Q_i, P_{i-4}, P_{i-3}, P_{i-2}, P_{i-1}, P_i,$ $W_{i-4}, W_{i-3}, W_{i-2}, W_{i-1}, W_i$	6	$H_i=151.288 8+0.003 9W_{i-2}$	0.595 5
	5-3	$H_i=150.810 6+0.004 4W_{i-2}+0.005 7P_{i-1}$	0.635 7
	2	$H_i=146.187 4+0.002 1W_{i-2}+0.005 5P_{i-1}+0.003 4W_{i-4}+0.006 1P_{i-2}+0.007 6P_{i-3}+0.486 7Q_i$	0.746 6
$Q_i, P_{i-4}, P_{i-3}, P_{i-2}, P_{i-1}, P_i,$ $W_{i-4}, W_{i-3}, W_{i-2}, W_{i-1}, W_i, H_{i-1}$	29	$H_i=24.579 6+0.838 9H_{i-1}$	0.856 6
	4-28	$H_i=28.142 4+0.812 5H_{i-1}+0.002 0W_i$	0.904 9
	3	$H_i=27.427 9+0.816 7H_{i-1}+0.001 5W_i+0.002 9P_{i-2}$	0.909 9
	2	$H_i=34.681 7+0.766 6H_{i-1}+0.003 9P_{i-2}+0.005 1P_{i-1}+0.001 4W_{i-2}$	0.918 3

务是防洪、补给地下水等, 蟒河口水库建成后, 其防洪效果明显, 但补给效果备受诟病。

蟒河口水库坝址区为寒武系中上统的碳酸盐岩地层, 受盘古寺断层影响, 次级断裂发育, 岩体破碎, 裂隙岩溶发育, 渗漏严重。水库蓄水水位标高为 255 ~ 310 m; 水源地地面标高约 173 m, 水位埋深 10 ~ 25 m, 水位标高 148 ~ 163 m, 水库蓄水水位高于水源地水位 100 m 以上。蟒河口水库距水源地直线距离约 7 km, 其间在石炭—二叠系地层之下隐伏有巨厚层的奥陶—寒武系的碳酸盐岩裂隙岩溶含水层, 蟒河口水库渗漏

补给碳酸盐岩裂隙岩溶地下水, 通过裂隙岩溶通道由北向南径流补给水源地地下水^[19]。

利用蟒河口水库蓄水前建立的逐步回归方程式(2), 预测在不考虑蟒河口水库蓄水影响下水源地水位(2014 年 9 月—2019 年 12 月), 见图 3。实测水位与预测水位差值见表 2。

由图 3 和表 2 可知, 蟒河口水库蓄水期间实测水位均高于不考虑蟒河口水库蓄水的预测水位, 其差值最大 1.46 ~ 3.10 m, 最小 0.21 ~ 0.89 m, 平均 0.86 ~ 1.57 m。说明蟒河口水库蓄水对水源地裂隙岩溶地下



图 3 逐步回归方程(2)预测值与实测水位动态曲线图

Fig. 3 Dynamic curves of the predicted values of the stepwise regression equation (2) and the measured groundwater levels

表 2 蟒河口水库蓄水期间水源地实测水位与不考虑蟒河口水库蓄水预测水位差值
Table 2 Differences between the measured groundwater levels near the wellfield during the impoundment period of the Manghekou Reservoir and the predicted groundwater levels without considering the impoundment of the Manghekou Reservoir

年份	2014	2016	2017	2018	2019
最大	3.10	1.80	2.55	1.46	2.51
最小	0.29	0.39	0.89	0.61	0.21
平均	1.00	1.16	1.57	0.86	1.05

/m

水补给效果显著。

从 2018 年蟒河口水库与青多水源地水质分析结果(表 3)可知,蟒河口水库和水源地的水化学类型均为 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca-Mg}$ 型,水源地主要化学组分除 K^+ 外,其它含量均大于蟒河口水库,这是由于蟒河口水

库水渗漏补给裂隙岩溶地下水后,经过较长距离的运移和溶滤作用,溶解了碳酸盐岩矿物质,使水源地地下水中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子的含量增加,总硬度和溶解性总固体也增加。

表 3 蟒河口水库与青多水源地水质分析对比表

Table 3 Comparison of hydrochemical analyses between the Manghekou Reservoir and the Qingduo wellfield

水样	取样时间	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	总硬度	溶解性总固体	水化学类型
		/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)									
蟒河口水库	2018年3月	1.5	2.7	79.3	37.1	6.8	103.3	250.8	352.9	420.4	$\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca-Mg}$
青多水源地	2018年4月	1.2	15.7	98.4	47.4	24.5	147.5	304.5	440.5	550.3	$\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca-Mg}$

5 结论

(1) 第一阶段水位受前期水位的影响最显著、其次是前 2 月降水量、开采量影响最小。其中第 1 时段水源地开采量固定,地下水位主要受水源地降水影响,开采量影响很小;第 2 时段增大开采量,水位主要受开采影响,其次是降水量。

(2) 第二阶段水位受前期水位影响最为显著,前 1 月降水量、前 2 月水库蓄水量次之。虽开采量增加较多,但其对水位的影响很小或基本没有影响,其水位滞后蟒河口水库蓄水 1~4 个月、降水 1~3 月。

(3) 第二阶段(水库蓄水后)计算得出的回归方程中,开采量对地下水位无影响或产生微弱影响,无法对实际工作中考虑开采量条件的地下水位进行预测,不具有现实意义,故不采用该阶段方程作为预测方程。

通过分析逐步回归方程的预测水位与水源地实测水位差、水源地与水库水质发现,蟒河口水库蓄水后对水源地地下水补给效果显著,但本研究在此方面只进行了定性研究,今后需要从同位素示踪方向进一步研究。

参考文献 (References):

- [1] 张士杰,黄智华.华北平原邯郸地区地下水位动态及成因分析[J].人民黄河,2019,41(增刊2):25-27. [ZHANG Shijie, HUANG Zhihua. Dynamic and genetic analysis of groundwater level in Handan area of North China Plain[J]. Yellow River, 2019, 41(Sup2): 25-27. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 刘美英,闵雷雷,沈彦俊.河北平原浅层地下水位动态变化分析[J].中国农村水利水电,2017(8):80-85. [LIU Meiyang, MIN Leilei, SHEN Yanjun. An analysis of the dynamic variations of shallow groundwater level in

- the Hebei Plains[J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(8): 80-85. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 刘志国,王恩德,付建飞,等.河北平原地下水位的时空变异[J].北京大学学报(自然科学版),2007,28(5):717-720. [LIU Zhiguo, WANG Ende, FU Jianfei, et al. Temporal and spatial variation of groundwater level in Hebei Plain[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2007, 28(5): 717-720. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 许月卿,蔡运龙.基于GIS的河北平原地下水位时空变化动态分析[J].北京大学学报(自然科学版),2005,41(2):265-272. [XU Yueqing, CAI Yunlong. GIS-based analysis on spatio-temporal change of groundwater level in the Hebei Plain[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2005, 41(2): 265-272. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 王春泽,张石春,张建平.河北平原区近30年地下水动态及可持续利用对策[J].河北水利,2005(2):14-16. [WANG Chunze, ZHANG Shichun, ZHANG Jianping. Groundwater dynamics and sustainable Utilization in Hebei Plain in recent 30 years[J]. Hebei Water Resources, 2005(2): 14-16. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 费宇红,张兆吉,张凤娥,等.华北平原地下水位动态变化影响因素分析[J].河海大学学报(自然科学版),2005,33(5):538-541. [FEI Yuhong, ZAHNG Zhaoji, ZHANG Fenge, et al. Factors affecting dynamic variation of groundwater level in North China Plain[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2005, 33(5): 538-541. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 张永强,刘昌明,沈彦俊.太行山前平原浅层地下水位动态分析——以河北省栾城县为例[J].中国生态农业学报,2001(2):42-44. [ZHANG Yongqiang,

- LIU Changming, SHEN Yanjun. Analysis of the groundwater level change in Taihang Piedmont-Aeese study from Luancheng County[J]. Chinese Journal of Eco agriculture, 2001(2): 42 - 44. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 姜宝良,付北峰,赵延涛. 泉水流量分析预测和资源评价——以辉县百泉为例[J]. 水文地质工程地质, 2002, 29(3): 43 - 46. [JIANG Baoliang, FU Beifeng, ZHAO Yantao. Analysis prediction and resources evaluation of spring dynamic-A case study of Bai spring in hui county[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2002, 29(3): 43 - 46. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 姜宝良,赵贵章,于怀昌,等. 河南新乡百泉供水研究[M]. 北京:地质出版社,2012. [JIANG Baoliang, ZHAO Guizhang, YU Huaichang, et al. Study on water supply of Baiquan in Xinxiang, Henan province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012. (in Chinese)]
- [10] 姜宝良,于福荣,陈学军,等. 严重干旱大型水源地地下水资源评价及应急供水研究[M]. 北京:地质出版社,2015. [JIANG Baoliang, YU Furong, CHEN Xuejun, et al. Study on groundwater resource evaluation and emergency water supply in severe drought large water sources[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2015. (in Chinese).]
- [11] 胡立堂,郭建丽,张寿全. 永定河生态补水的地下水位动态响应[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(5): 5 - 11. [HU Litang, GUO Jianli, ZHANG Shouquan. Response of groundwater regime to ecological water replenishment of the Yongding River[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(5): 5 - 11. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 张晨晨,黄翀,何云. 黄河三角洲浅层地下水埋深动态与降水的时空响应关系[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(5): 21 - 30. [ZAHNG Chenchen, HUANG Chong, HE Yun. An analysis of the space-time patterns of precipitation-shallow groundwater depth interactions in the Yellow River Delta[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(5): 21 - 30. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 杨阿敏,李文溢,周维博. 斗门水库试验段区域地下水位动态特征与影响因素[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(1): 111 - 118. [YANG Amin, LI Wenyi, ZHOU Weibo. Study on dynamic characteristics of groundwater level and influence factors in the test section of Doumen Reservoir[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(1): 111 - 118.]
- [14] 姜宝良,郑晓团,李春娥,等. 许昌市应急备用水源地人工补给研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2017, 38(1): 41 - 46. [JIANG Baoliang, ZHENG Xiaotuan, LI Chune, et al. Study on artificial recharge of emergency reserved water source location in mailing, Xuchang City[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2017, 38(1): 41 - 46. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 姜宝良,赵延涛,刘传杰. 济源市克井盆地供水水文地质普查报告[R]. 郑州:河南省工程水文地质勘察院,2000. [JIANG Baoliang, ZHAO Yantao, LIU Chuanjie. General survey report on hydrogeology of water supply in Kejing Basin, Jiyuan city[R]. Zhengzhou: Henan Engineering Hydrogeological Survey Institute, 2000. (in Chinese)]
- [16] 郭同德,贾军强. 概率论与数理统计[M]. 郑州:郑州大学出版社,2007. [GUO Tongde, JIA Junqiang. Probability theory and Mathematical statistics[M]. Zhengzhou: Zhengzhou University Press, 2007. (in Chinese)]
- [17] 姜宝良,李腾超,张石磊,等. 济源市水资源综合规划[R]. 郑州:华北水利水电大学,2018. [JIANG Baoliang, LI Tengchao, ZHANG Shilei et al. Comprehensive water resources planning of Jiyuan City[R]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2018. (in Chinese)]
- [18] 王茂枚,束龙仓,季叶飞,等. 济南岩溶泉水流量衰减原因分析及动态模拟[J]. 中国岩溶, 2008, 27(1): 19 - 23. [WANG Maomei, SHU Longcang, JI Yefei, et al. Causes of spring's of flux attenuation and simulation of spring's regime-A case in Jinan karst spring area[J]. Carsologica Sinica, 2008, 27(1): 19 - 23. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 张晓偲. 济源市克井盆地裂隙岩溶水数值模拟研究[D]. 郑州:华北水利水电大学,2020. [ZAHNG Xiaocai. Numerical simulation of karst water in Kejing Basin, Jiyuan City[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2020. (in Chinese with English abstract)]