

# 太行山前丘陵区基岩裂隙水赋存的非均一性和易疏干性特征

张光辉, 严明疆, 刘春华, 冯慧敏, 王金哲

(中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061)

**摘要:** 针对太行山东麓丘陵区地下水能否可持续开发利用问题, 基于探采结合的大量深井抽水及水位恢复试验资料, 采用量化对比分析方法, 揭示了研究区基岩裂隙水赋存非均一性和开采易疏干性特征。研究表明, 不仅不同井位区之间地下水赋存具有空间非均一性, 而且, 各井孔内的不同深度也存在明显差异: 在抽水时间小于 70 min 时段, ZK<sub>s</sub>3 井的水位降深大于 ZK<sub>s</sub>2 井的降深; 70 min 之后, 随着抽水时间增加, ZK<sub>s</sub>2 井的水位降深大于 ZK<sub>s</sub>3 井的降深, 且二者之差逐渐增大, 表明 ZK<sub>s</sub>2 井位的含水系统上部富水性较强、下部富水性较弱, ZK<sub>s</sub>3 井位的含水系统上部富水性较弱、下部富水性较强。不同井位含水系统具有不同的开采易疏干性: 随着抽水试验轮次的增加, ZK<sub>s</sub>2 井的最大水位降深和水位恢复所需时间依次增加, 但每次水位都能完全恢复至初始水位状态; ZK<sub>s</sub>3 井的水位未能完全恢复至初始水位状态, 且至初始水位的距离依次增大, 但每次水位恢复至稳定状态所用的时间没有明显变化。因此, 合理设计井的结构与布局是防止山丘区地下水疏干性开采的关键。

**关键词:** 太行山丘陵区; 基岩裂隙水; 水位降深与水位恢复; 非均一性; 易疏干性

**中图分类号:** P641; T V211.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)01-0104-06

## Characteristics of Non-uniformity and Vulnerability of Aquifers to Dewatering of Bedrock Fissure Water in the Hilly Area of the Taihang Mountains Piedmont

ZHANG Guang hui, YAN Ming jiang, LIU Chun hua, FENG Hui min, WANG Jin zhe

(Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China)

**Abstract:** In terms of the issues of sustainable utilization of groundwater in the hilly area of the Taihang mountains piedmont, the characteristics of non uniformity and vulnerability of the aquifers to dewatering in the area were investigated based on the quantitative comparison analysis of the pumping and recovery test data from the deep bedrock fissure groundwater wells. The research results showed that the spatial non uniformity exists not only in the groundwater storage between different wells, but also in different depths of the same well. For the pumping time less than 70 minutes, the drawdown of groundwater level in the well ZK<sub>s</sub>3 was larger than that in the well ZK<sub>s</sub>2. However, after 70 minutes of pumping, the drawdown of groundwater level in the well ZK<sub>s</sub>2 was larger than that in the well ZK<sub>s</sub>3, and the drawdown difference between the two wells increased gradually with the increasing pumping time. These results indicated that the upper aquifer of well ZK<sub>s</sub>2 has more water than the lower aquifer of well ZK<sub>s</sub>2, while the upper aquifer of well ZK<sub>s</sub>3 has less water than the lower aquifer of well ZK<sub>s</sub>3. The aquifer systems in different wells had different vulnerability of groundwater to dewatering. With the increasing of pumping time, the maximum drawdown and the time for recovery of groundwater level in the well ZK<sub>s</sub>2 increased, but the groundwater level can be fully restored to the initial level. However, the groundwater level cannot recover to the initial level in the well ZK<sub>s</sub>3, and the difference between the recovered groundwater level and initial level increased as well, but the recovery time of groundwater level to a stable level were similar for different pumping tests. Therefore, the reasonable design and layout of wells is important to prevent the aquifers to dewatering in the hilly area.

**Key words:** hilly area of the Taihang Mountains Piedmont; bedrock fissure water; drawdown and recovery of groundwater level; non uniformity; vulnerability of aquifers to dewatering

收稿日期: 2012-11-17 修回日期: 2013-01-04 网络出版时间: 2013-01-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130124.1128.005.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(41172214); 国家科技支撑计划项目(2009BADA3B05)资助

作者简介: 张光辉(1959), 男, 二级研究员, 博士生导师, 长期从事区域水循环演化和地下水可持续利用研究。E-mail: Huanjing@heinfo.net

近年来华北太行山东麓的丘陵区频繁干旱,为此钻探了数百眼基岩水井,深度150~550 m。同时,这一地区作为华北平原地下水的主要补给源区,该区基岩裂隙水能否可持续开发利用倍受关注。从2011年春季钻进的200余眼井抽水试验资料来看,不仅单位时间涌水量差异较大,介于12~390 m<sup>3</sup>/h,而且,抽水过程中地下水位下降速率和水位恢复所用的时间也相差较大,呈现出显著的地下水赋存非均一性和开采易疏干性。进一步认识太行山丘陵区地下水赋存非均一性和开采易疏干性特征,对于该区地下水资源合理利用具有重要指导作用<sup>[1-9]</sup>。

赞皇县东部地区是华北典型的太行山前丘陵区,缺水最为严重。本文通过野外水文地质调查和物探,在赞皇东部地区确定了24个井位,以其中2眼、深度500 m探采结合井的多次抽水试验资料为基础,探讨丘陵区地下水赋存的非均一性和开采易疏干性特征。

## 1 研究区与资料来源概况

研究区——赞皇县域,地处河北省石家庄地区的西南部,与邢台市临城、内邱县相毗邻,北距石家庄市44 km,西临山西省界,位于东经114°25′-114°31′,北纬37°26′-37°41′,面积102 km<sup>2</sup>。该区属暖温带半湿润季风型大陆性气候,春季干旱多风,年均气温13.3℃,年均降水量568 mm,降水主要分布在7月、8月份。

由于气候干旱和持续、开采地下水,地下水位埋深从20世纪70年代不足20 m,已下降到目前的大于75 m,钻井深度普遍在350 m以上,最深的井深达840 m,但出水量不足80 m<sup>3</sup>/h。

本文研究选定的代表井ZK<sub>s</sub>-2和ZK<sub>s</sub>-3,分别位于赞皇县东部的陈家庄和邢郭村,位于太行山东麓丘陵区,地面高程76~132 m,两井间相距3.89 km。其中ZK<sub>s</sub>-2井位地处寒武系和长城系地层分布区,地表为麦田,设计井深500 m,实际进尺深度484 m。ZK<sub>s</sub>-3井位地处第三系、奥陶系地层分布区,设计井深500 m,实际进尺深度523 m。ZK<sub>s</sub>-2、ZK<sub>s</sub>-3井分别进行了7轮次和5轮次的4寸潜水泵抽水试验(1轮次=抽水水位下降与停止抽水水位恢复的全过程),额定出水量80 m<sup>3</sup>/h。抽水过程或恢复过程的监测时间间隔,分别为0、1、3、5、10、20 min和30 min间隔,连续3个时刻以上的观测结果之间差值为零作为抽水或恢复过程的截止标志。观测内容,包括水位埋深、单位时间降深、累计出水量、单位时间出水量、水温和电导率等。

## 2 地质与水文地质概况

研究区位于太行山脉的赞皇背斜内,因新构造运动和第四纪冰川作用,形成西高、东低的地貌。在研究区的西南部,以太古代甘陶河群地层为主,穿插变质辉绿岩(墙)。在西北部,为元古代早期变质钾长花岗岩和太古代片麻岩套。在中部地区,出露太古代邢台片麻岩套和元古代变质花岗岩,河谷分布第四系松散层。在东部地区,第四系和第三系覆盖下为长城系砂岩和白云岩,寒武系崮山组、张夏组和徐庄组灰岩,以及奥陶系峰峰组、下马家沟组和上马家沟组灰岩。向东、向南,第四系和第三系厚度明显增大,下伏地层断裂发育(见图1)。

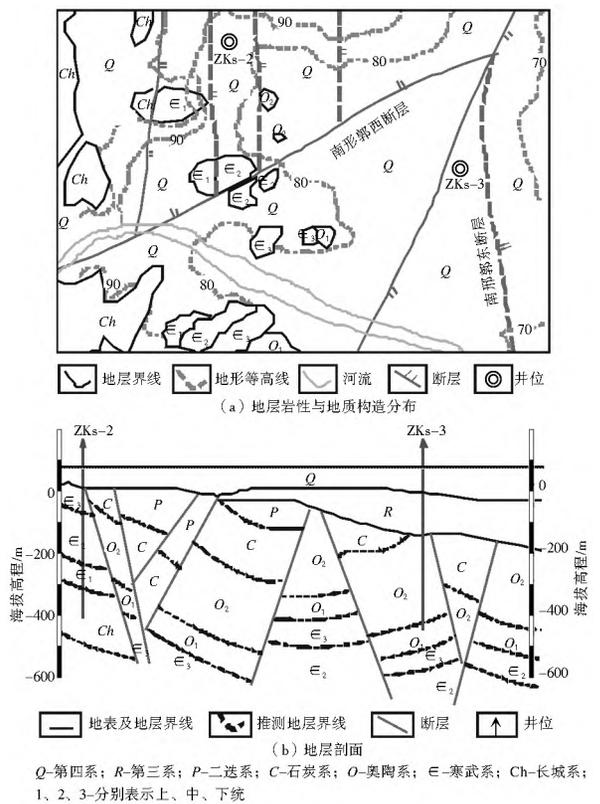


图1 研究区地层岩性与地质构造分布及地层剖面简图

Fig. 1 The stratigraphic lithology and distribution of geological structures (a) and stratigraphic profile (b) in the study area

2眼水文地质孔揭露含水层主要为石炭系、奥陶系、寒武系和长城系灰岩,其中ZK<sub>s</sub>-2井位区以寒武系张夏组、徐庄组灰岩、白云岩和长城系团山子组白云岩、石英砂岩地层为主;ZK<sub>s</sub>-3井位区以第三系石灰质砂砾岩(目前处于疏干状态)和奥陶系峰峰组、马家沟组灰岩地层为主,见表1。

## 3 地下水赋存非均一性和易疏干性特征

### 3.1 地下水赋存非均一性

虽然ZK<sub>s</sub>-2井与ZK<sub>s</sub>-3井的位置之间仅相距3.89 km,但是在相同潜水泵、相同水泵设置深度条件下两井三次抽水试验的地下水水位总降深彼此相差8.67 m(水泵的深度120 m)、9.97 m(水泵的深度135 m)和10.52 m(水泵的深度150 m),ZK<sub>s</sub>-2井的水位降深明显大于ZK<sub>s</sub>-3井的降深,分别为28.63~30.44 m和19.92~19.96 m(表2)。

在抽水试验的0~70 min期间,ZK<sub>s</sub>-2井的水位降深始终小于ZK<sub>s</sub>-3井的降深,其中在三次抽水试验中的10 min时ZK<sub>s</sub>-2井的水位降深分别比ZK<sub>s</sub>-3井的水位降深小9.57 m、11.87 m和10.21 m。抽水至10 min时,ZK<sub>s</sub>-2井的三次抽水试验水位降深分别为6.37 m、6.47 m和7.48 m,ZK<sub>s</sub>-3井的三次抽水试验水位降深分别为15.94 m、18.34 m和17.69 m(表2)。这表明,ZK<sub>s</sub>-2井取水层位的上段富水性强于ZK<sub>s</sub>-3井取水层位的上段富水性。

在抽水的100 min、200 min和300 min时,ZK<sub>s</sub>-2井水位降深情景与上述相反,分别大于ZK<sub>s</sub>-3井的降深,两者之差分别为3.56~3.84 m、6.23~7.41 m和7.68~8.80 m。抽水时间愈长,水泵设置的深度愈大,ZK<sub>s</sub>-2井的地下水位

表 1 ZK<sub>s</sub> 2 和 ZK<sub>s</sub> 3 井位地层岩性特征

Table 1 The stratigraphic lithology of the wells ZK<sub>s</sub> 2 and ZK<sub>s</sub> 3

ZK <sub>s</sub> 2 井位(E114° 27' 11.9" N 37° 39' 32.6", 地面高程 84 m) 地层岩性特征			ZK <sub>s</sub> 3 井位(E114° 29' 05.2" N 37° 38' 03.8", 地面高程 78 m) 地层岩性特征		
地层单位	厚度/m	岩性及水文地质特征	地层单位	厚度/m	岩性及水文地质特征
第四系 Q	46	黄土等松散沉积物。	第四系 Q	32	黄土等松散沉积物。
长山组 $\epsilon_{3ch}$	16	灰白泥竹叶状灰岩	第三系 R	115	石灰质砂砾岩, 孔隙发育。
崮山组 $\epsilon_{3g}$	35	浅黄绿泥质条带灰岩, 夹鲕状灰岩和竹叶状灰岩。	峰峰 O <sub>2f</sub>	143	上部: 深灰巨厚-中厚层致密灰岩、结晶灰岩、花斑状灰岩夹薄层灰岩、角砾状灰岩; 岩溶裂隙发育, 富水性极强。下部: 杂色中厚层角砾状灰岩、薄层白云质灰岩、泥灰岩。底部: 含石膏, 致密灰岩、结晶灰岩、花斑状灰岩。
张夏组 $\epsilon_2$	168	上部: 灰白厚层泥质鲕状灰岩。中部: 含泥带灰岩、致密灰岩。下部: 深灰板状与鲕状灰岩, 裂隙发育, 富水性中等, 局部岩溶裂隙发育强。	上马家沟组 O <sub>2s</sub>	217	上部: 灰色中厚层致密灰岩、结晶灰岩和花斑状白云质灰岩, 夹黄褐色泥灰岩、燧石结核即燧石条带; 岩溶裂隙发育, 富水性强。底部: 白云质灰岩、泥灰岩, 局部见石膏。
寒武系 $\epsilon$			奥陶系 O		
徐庄组 $\epsilon_{2x}$	107	上部: 灰绿板状泥灰岩、暗紫砂质白云母泥岩。下部: 结晶灰岩、鲕状白云质灰岩, 含云母泥岩、粉砂岩。	下马家沟组 O <sub>2x</sub>	> 16	上部: 灰色巨厚层白云质灰岩、致密灰岩, 岩溶裂隙发育, 富水性强。中部: 灰黄角砾状白云质泥质灰岩。底部: 白云质灰岩、白云岩, 薄层含砂白云岩及钙质石英砂岩。
毛庄组 $\epsilon_{1mz}$	34	上部: 灰白、紫灰中厚层钙质白云岩及薄层泥灰岩。下部: 鲜红含砂质泥岩、紫红泥灰岩。	亮甲山组 O <sub>ll</sub>	-	灰色白云质灰岩、白云岩, 岩溶裂隙比较发育
馒头组 $\epsilon_{1m}$	23	顶部: 灰色板状泥质灰岩。中部: 砖红泥岩与紫红泥灰岩互层。下部: 褐色泥灰岩, 夹红石英砂岩、砂质砾岩。	冶里组 O <sub>ly</sub>	-	灰色、浅灰色白云岩, 底为钙质泥岩及白云岩。
长城系 Ch	> 70	灰色中厚层状含燧石条带白云岩, 夹紫色泥灰岩; 灰白中厚层中粒石英砂岩; 底部为含砾石英砂岩。白云岩裂隙、石英砂岩裂隙发育, 富水性中等。			
总厚度/m		> 480	总厚度/m		> 520

表 2 不同井位多次抽水试验中不同时间降深及其占总降深比率特征

Table 2 The different drawdowns of groundwater level and their proportions of the total drawdown at different times from the multiple pumping tests at different wells

累计抽水时间/min	ZK <sub>s</sub> 2 井						ZK <sub>s</sub> 3 井					
	抽水试验 7 2		抽水试验 7 3		抽水试验 7 4		抽水试验 5 2		抽水试验 5 3		抽水试验 5 4	
	累计降深/m	占总降深比率(%)	累计降深/m	占总降深比率(%)	累计降深/m	占总降深比率(%)	累计降深/m	占总降深比率(%)	累计降深/m	占总降深比率(%)	累计降深/m	占总降深比率(%)
10	6.37	22.25	6.47	21.43	7.48	24.41	15.94	80.36	18.34	91.93	17.69	88.81
20	10.76	37.58	11.58	38.36	12.53	40.89	17.23	86.32	18.72	93.83	18.37	92.22
50	17.09	59.69	17.93	59.39	18.35	59.89	17.55	87.93	19.17	96.09	19.28	96.79
100	22.08	77.12	22.89	75.82	23.25	75.88	18.24	91.38	19.33	96.89	19.47	97.74
200	25.72	89.84	26.14	86.58	27.06	88.32	19.49	97.65	19.49	97.69	19.65	98.64
300	27.50	96.05	27.67	91.65	28.49	92.98	19.82	99.30	19.63	98.40	19.69	98.85
400	28.34	98.99	28.55	94.57	29.34	95.76	19.96	100.00	19.95	100.00	19.92	100.00
500	28.60	99.90	28.92	95.79	30.01	97.94	19.96	100.00	19.95	100.00	19.92	100.00
600	28.63	100.00	29.92	99.11	30.44	99.35	19.96	100.00	19.95	100.00	19.92	100.00
初始水位埋深/m	76.15		76.13		76.17		84.87		85.16		85.48	
水泵设置深度/m	120		135		150		120		235		150	

注: ZK<sub>s</sub> 2 井的取水层位 93~ 484 m, ZK<sub>s</sub> 3 井的取水层位 134~ 523 m, 为无花管裸孔; 其上止水封孔, 避免地表污水沿孔壁下渗。

下降深度愈大于 ZK<sub>s</sub> 3 井水位降深(表 3)。这表明, ZK<sub>s</sub> 2 井取水层位的下段富水性弱于 ZK<sub>s</sub> 3 井取水层位的下段富水性。

在抽水过程中, 随着地下水位下降, 涌水层位不断下移<sup>[10][13]</sup>。对于某一井孔来讲, 不同涌水段地层的给水能力是不同的。某一涌水段地层给水能力愈强, 抽水引起的地下水

表3 不同时刻 ZK<sub>s</sub>2 与 ZK<sub>s</sub>3 井的水位降深之差变化特征Table 3 The difference of draw downs of groundwater level between the well ZK<sub>s</sub>2 and well ZK<sub>s</sub>3 at difference times

m

累计抽水时间/min	抽水试验 2			抽水试验 3			抽水试验 4		
	ZK <sub>s</sub> 2 水位降深	ZK <sub>s</sub> 3 水位降深	降深差值	ZK <sub>s</sub> 2 水位降深	ZK <sub>s</sub> 3 水位降深	降深差值	ZK <sub>s</sub> 2 水位降深	ZK <sub>s</sub> 3 水位降深	降深差值
10	6.37	15.94	-9.57	6.47	18.34	-11.87	7.48	17.69	-10.21
20	10.76	17.23	-6.47	11.58	18.72	-7.14	12.53	18.37	-5.84
50	17.09	17.55	-0.46	17.93	19.17	-1.24	18.35	19.28	-0.93
100	22.08	18.24	3.24	22.89	19.33	3.56	23.25	19.47	3.78
200	25.72	19.49	6.23	26.14	19.49	6.65	27.06	19.65	7.41
300	27.50	19.82	7.68	27.67	19.63	8.04	28.49	19.69	8.79
400	28.34	19.96	8.38	28.55	19.95	8.60	29.34	19.92	9.42
500	28.60	19.96	8.64	28.92	19.95	8.97	30.01	19.92	10.09
600	28.63	19.96	8.67	29.92	19.95	9.97	30.44	19.92	10.52
水泵设置深度	120			135			150		

注: 差值为负值表示 ZK<sub>s</sub>2 井的降深小于 ZK<sub>s</sub>3 井的降深; 差值为正值表示 ZK<sub>s</sub>2 井的降深大于 ZK<sub>s</sub>3 井的降深。

水位降幅愈小, 该时刻降深占总降深的比率也愈小; 给水能力愈弱, 地下水水位的降幅愈大, 该时刻降深占总降深的比率也愈大<sup>[16]</sup>。在 ZK<sub>s</sub>2 和 ZK<sub>s</sub>3 两眼井的三次抽水试验过程中, 在抽水 10 min 时, ZK<sub>s</sub>2 井的水位降深占该井总降深的 21.43%~24.41%, ZK<sub>s</sub>3 井为 80.36%~91.93%; 当抽水 20 min 时, ZK<sub>s</sub>2 井水位降深占该井总降深的 37.58%~40.89%, ZK<sub>s</sub>3 井为 86.32%~93.83% (表 2), 这表明 ZK<sub>s</sub>3 井取水层位的上段给水能力弱于 ZK<sub>s</sub>2 井取水层位上段的给水性。在抽水 100~400 min 期间, ZK<sub>s</sub>2 井的水位降深占该井总降深的 18.92%~21.87%, ZK<sub>s</sub>3 井为 2.26%~8.62%, 这表明 ZK<sub>s</sub>3 井取水层位的下段给水能力明显强于 ZK<sub>s</sub>2 井取水层位下段的给水性。

从抽水过程中地下水水位下降速率来看, ZK<sub>s</sub>3 井明显大于 ZK<sub>s</sub>2 井 (图 2(a)), 第 1、5、10、20、30、50、70、250 min 和第 400 min 的 ZK<sub>s</sub>3 井与 ZK<sub>s</sub>2 井水位降速比值, 分别为 9.68、4.50、2.80、1.66、1.31、1.07、0.86、0.69 和 0.69 (图 2(b))。根据达西公式推求可知, 由于两井出水量相同, 相同抽水时间地下水水位降深不同, 所以 ZK<sub>s</sub>2 井取水层位的上段给水度是 ZK<sub>s</sub>3 井取水层位上段给水度的 1.07~9.68 倍, 下段是 0.69 倍。

另外, 从 ZK<sub>s</sub>2 井和 ZK<sub>s</sub>3 井的水位恢复过程线变化特征可以得到进一步证实, 上述结论是正确的。ZK<sub>s</sub>3 井的水位恢复到初始水位, 仅用时 5~7 min, 而 ZK<sub>s</sub>2 井的水位恢复到初始水位, 用时 240 min 以上 (图 3)。ZK<sub>s</sub>3 井的水位恢复用时短, 说明该井位地层富水性和给水能力强, ZK<sub>s</sub>2 井的水位恢复用时长, 说明该井位地层富水性和给水能力较弱, 它需要吸夺更大范围的地下水汇向该井孔, 影响半径较 ZK<sub>s</sub>3 井的影响半径大许多, 由此该井孔地下水水位恢复过程所需耗用较多时间。

### 3.2 地下水易疏干性特征

在额定出水量 80 m<sup>3</sup>/h 的潜水泵抽取下, 随着潜水泵设置深度 (分别为 120 m、135 m 和 150 m) 增大, ZK<sub>s</sub>2 井的三次抽水试验最大降深依次增大, 分别为 28.63 m、29.92 m 和 30.44 m (表 2), 它们恢复至初始水位所用时间相应延长, 分

别为 250 min、480 min 和 610 min, 表现出明显的易疏干性。

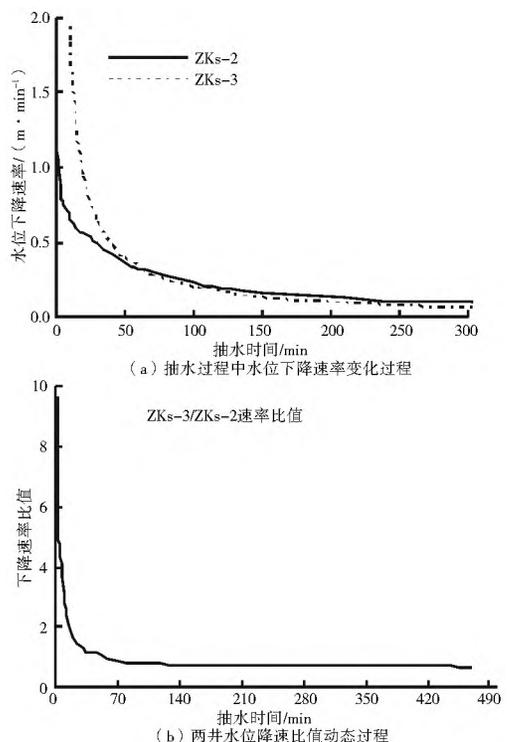


图2 不同井位抽水过程中水位下降速率变化过程及两井水位降速比值动态过程

Fig. 2 The variation process of draw down rates of groundwater level at different wells (a) and the dynamic process of ratio of draw downs between two wells (b)

但是, ZK<sub>s</sub>2 井的三次抽水试验恢复的最终水位埋深分别为 76.13 m、76.17 m 和 76.16 m, 表明 ZK<sub>s</sub>2 井位的含水系统可开采资源量是较丰富的。

ZK<sub>s</sub>3 井的三次抽水试验最大降深没有随着潜水泵设置深度增加而增大, 分别为 19.96、19.95 m 和 19.92 m (表 2), 恢复至初始水位所用时间也没有随着潜水泵设置深度增大而增加, 分别为 6 min、5 min 和 7 min, 未呈现明显的易疏干性。但是, ZK<sub>s</sub>3 井的三次抽水试验恢复的最终水位埋深

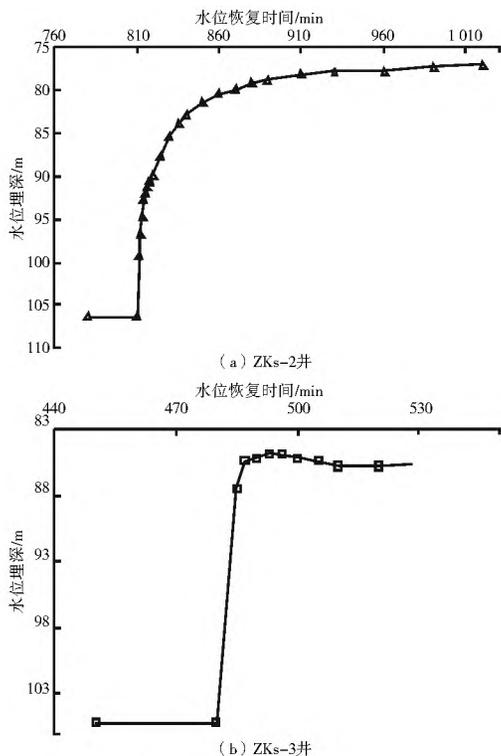


图 3 不同井位抽水试验的地下水水位恢复过程

Fig. 3 The recovery process of groundwater level from the pumping tests at different wells

分别为 85.01 m、85.45 m 和 85.67 m，它们分别是在恢复至 84.29 m、84.42 m 和 84.79 m 后缓慢回落至稳定水位，这表明 ZK<sub>s</sub> 3 井位的含水系统也存在易疏干性，可开采资源量是相对有限的，只是给水的岩溶裂隙连通性和导水性强于 ZK<sub>s</sub> 2 井位的含水系统。

从地下水动力学角度分析，ZK<sub>s</sub> 3 井含水系统地下水流场的渗透性和水力梯度都强于 ZK<sub>s</sub> 2，但是其水源补给范围不如 ZK<sub>s</sub> 2 补给水源范围广，持续补水和给水能力弱于 ZK<sub>s</sub> 2，由此造成 ZK<sub>s</sub> 3 井抽水期间水位下降和停止抽水水位恢复稳定状态所用的时间较短、恢复至初始水位的差距愈来愈大；而 ZK<sub>s</sub> 2 的最大降深愈来愈大，井抽水期间水位下降和停止抽水水位恢复稳定状态所用的时间愈来愈长、但每轮试验都能完全恢复至初始水位状态。即 ZK<sub>s</sub> 2 表现为暂时性疏干特征，而 ZK<sub>s</sub> 3 为阶段性或永久性疏干特征。

## 4 结论

通过上述研究表明，华北太行山东麓的丘陵区基岩裂隙水具有明显的赋存非均一性和开采易疏干性。

(1) 在水平方向上，ZK<sub>s</sub> 2 井位区与 ZK<sub>s</sub> 3 井位区的含水系统中地下水赋存具有明显的非均一性：在相同潜水泵、相同水泵设置深度条件下，两井三次抽水试验结果表明 ZK<sub>s</sub> 2 井的水位降深明显大于 ZK<sub>s</sub> 3 井的降深，分别为 28.63~30.44 m 和 19.92~19.96 m；在垂直方向上，两井的各自井孔内、不同深度也存在明显差异：ZK<sub>s</sub> 2 井位的含水系统上部富水性较强于 ZK<sub>s</sub> 3 井位上部，而 ZK<sub>s</sub> 2 井位的含水系统下部富水性弱于 ZK<sub>s</sub> 3 井位下部富水性。

(2) ZK<sub>s</sub> 2 和 ZK<sub>s</sub> 3 井位区的含水系统具有不同的开采易疏干性。随着抽水试验轮次的增加，ZK<sub>s</sub> 2 井的最大水位

降深依次增大，水位恢复所需的时间依次增加，但每次地下水水位都能完全恢复至初始水位状态；随着抽水试验轮次的增加，ZK<sub>s</sub> 3 井的地下水水位未能完全恢复至初始水位状态，且至初始水位的距离依次增大，但每次地下水水位恢复至稳定状态所用的时间没有明显变化。

因此，在山丘区水资源开发利用中，需结合井位区地下水赋存非均一性和开采易疏干性特点，合理设计井深、取水段、潜水泵额定出水量和水泵设置深度，避免超越地下水资源承载力和给水能力开发利用，防止疏干性开发利用地下水情景发生。

## 参考文献 (References):

- [1] 陈宇, 温忠辉, 束龙仓. 基岩裂隙水研究现状与展望[J]. 水电能源科学, 2010, 28(4): 62-65. (CHEN Yu, WEN Zhong-hui, SHU Long-cang. Status and Prospect of Research on Bedrock Fissure Water[J]. Water Resources and Power, 2010, 28(4): 62-65. (in Chinese))
- [2] 陈崇希. 影响半径稳定井流模型与可持续开采量[J]. 水利学报, 2010, 41(8): 1003-1008. (CHEN Chong-xi. Radius of Influence of Unsteady Well Flow Model and Sustainable Exploitation Volume[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(8): 1003-1008. (in Chinese))
- [3] 卢琼, 甘泓, 张象明, 等. 水资源耗减量概念及其分析方法[J]. 水利学报, 2010, 41(12): 1401-1406. (LU Qiong, GAN Hong, ZHANG Xiang-ming, et al. Concept and Calculation Approach of Water Depletion[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(12): 1401-1406. (in Chinese))
- [4] 万诗群. 武汉地区基岩地下水富水规律探讨[J]. 土工基础, 2010, 24(02): 77-80. (WAN Shi-qun. Discussion on Water rich Law of Bedrock Groundwater in Wuhan Area[J]. Soil Engineering and Foundation, 2010, 24(02): 77-80. (in Chinese))
- [5] 李锁成, 魏永顺. 会宁华家岭北麓基岩裂隙水及岩溶裂隙水形成演化条件[J]. 甘肃科技, 2006, 22(06): 76-79. (LI Suo-cheng, WEI Yong-shun. Bedrock Fissure Water and Karst Fissure Water Formation Conditions in Huining Huajialing[J]. Gansu Science and Technology, 2006, 22(06): 76-79. (in Chinese))
- [6] 陈绍桔. 浅谈山区寻找地下水的方法[J]. 福建地质, 2004, 23(2): 73-76. (CHEN Shao-jie. Elementary Introduction of the Method of Hunting for Groundwater in Hilly Regions[J]. Geology of Fujian, 2004, 23(2): 73-76. (in Chinese))
- [7] 范立民, 王双明, 刘社虎, 等. 榆神矿区矿井涌水量特征及影响因素[J]. 西安科技大学学报, 2009, 29(1): 7-11. (FAN Li-min, WANG Shuang-ming, LIU She-hu. Outcome Characteristics and Influencing Factor of Coal Mining Wastewater in Yushen Mining Area[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2009, 29(1): 7-11. (in Chinese))
- [8] 李艳梅. 褶皱构造与地下水富集的内在联系[J]. 东北水利水电, 2012, (4): 41-42. (LI Yan-mei. Fold Structure and Groundwater Enrichment Inner Link[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2012, (4): 41-42. (in Chinese))
- [9] 刘多林, 李石桥, 李建忠. 甘肃阳山金矿带安坝矿段地下水流的基本特征[J]. 四川地质学报, 2007, 27(1): 37-39. (LIU Duo-lin. Basic Features of Groundwater Flow in the Anba Ore Block

- in the Yangshan Au Ore Belt [J]. Acta Geologica Sichuan, 2007, 27(1): 37-39. (in Chinese)
- [10] 杨文玉, 师春, 王金伟, 等. 克什克腾旗黄岗矿区水文地质特征[J]. 内蒙古水利, 2011, (1): 117-118. (YANG Wen yu, SHI Chun, WANG Jin wei, et al. Characteristics of Hexigten Banner Huanggang Mining Area Hydrogeological [J]. Inner Mongolia Water Resources, 2011, (1): 117-118. (in Chinese))
- [11] 金红, 王生力, 武毅. 基岩裂隙地下水综合勘查技术模式[J]. 工程地球物理学报, 2012, 9(1): 34-38. (JIN Hong, WANG Sheng li, WU Yi. Integrated Exploration Technology Mode for Bedrock Fissure Groundwater [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2012, 9(1): 34-38. (in Chinese))
- [12] 龙玉桥, 李伟, 李砚阁, 等. MQ 点插值法在地下水稳定流计算中的应用[J]. 水利学报, 2011, 42(5): 572-579. (LONG Yu qiao, LI wei, LI Yan ge, et al. Application of Multiquadric Method for Numerical Simulation of Steady Groundwater Flow [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(5): 572-579. (in Chinese))
- [13] 刘立才, 张霓, 王理许. 北京平原区浅层地下水热泵系统承载能力评价[J]. 水利学报, 2009, 40(12): 1473-1480. (LIU Li cai, ZHANG Ni, WANG Li-xu. Energy Load Capacity Evaluation for Shallow Groundwater Heat Pumps in Beijing Plain [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(12): 1473-1480. (in Chinese))
- [14] 付丛生, 陈建耀, 曾松青, 等. 滨海地区潮汐对地下水水位变化影响的统计学分析[J]. 水利学报, 2008, 39(12): 1365-1376. (FU Cong sheng, CHEN Jian yao, Ceng Song qing, et al. Statistical Analysis on Impact of Tide on Water Table Fluctuation in Coastal Aquifer [J]. (in Chinese))
- [15] 霍再林, 冯绍元, 康绍忠, 等. 神经网络与数值模型在地下水变化分析中应用[J]. 水利学报, 2009, 40(06): 724-728. (HU O Zai lin, FENG Shao yuan, KANG Shao zhong, et al. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(06): 724-728. (in Chinese))
- [16] 张玉军, 张维庆. 考虑裂隙的几何-力学特性的双重孔隙介质水-应力耦合模型及其有限元分析[J]. 水利学报, 2009, 40(12): 1452-1459. (ZHANG Yu jun, ZHANG Wei qing. Coupled Hydro-mechanical Model and FEM Analysis for Dual porosity Media Considering Geometric mechanical Characteristics of Fractures [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(12): 1452-1459. (in Chinese))
- (上接第 100 页)
- [2] 赵西宁, 吴普特, 王万忠, 等. 生态环境需水研究进展[J]. 水科学进展, 2005, 16(4): 617-623. (ZHAO Xi ning, WU Pu te, WANG Wan zhong, et al. Research Advance on Ecological Environmental Water Requirement [J]. Advances in Water Science, 2005, 16(4): 617-623. (in Chinese))
- [3] 刘昌明. 水文水资源研究理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2004. (LIU Chang ming. Theory and Practice of Hydrology and Water Resources [M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese))
- [4] 王西琴, 刘昌明, 杨志峰. 生态及环境需水量研究进展与前瞻[J]. 水科学进展, 2002, 13(4): 507-514. (WANG Xi qin, LIU Chang ming, YANG Zhi feng. Research Advance in Ecological Water Demand and Environmental Water Demand [J]. Advances in Water Science, 2002, 13(4): 507-514. (in Chinese))
- [5] 董哲仁. 河流生态系统研究的理论框架[J]. 水利学报, 2009, 40(2): 129-137. (DONG Zhe ren. Framework of Research on Fluvial Ecosystem [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(2): 129-137. (in Chinese))
- [6] 郑建平, 王芳. 大洋河河流生态需水研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2006, 34(5): 502-504. (ZHENG Jian ping, WANG Fang. Research on Ecological Water Requirement of Dayang River [J]. Journal of Hehai University (Natural Sciences), 2006, 34(5): 502-504. (in Chinese))
- [7] 宋兰兰, 陆桂华, 刘凌. 水文指数法确定河流生态需水[J]. 水利学报, 2006, 37(11): 1336-1341. (SONG Lan lan, LU Gui hua, LIU Ling. Estimation of Instream Flow Based on Hydrological Indexes [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(11): 1336-1341. (in Chinese))
- [8] 杨志峰, 张远. 河道生态环境需水研究方法比较[J]. 水动力学研究与进展, 2003, 18(3): 294-301. (YANG Zhi feng, ZHANG Yuan. Comparison of Methods for Ecological and Environmental Flow in River Channels [J]. Journal of Hydrodynamics, 2003, 18(3): 294-301. (in Chinese))
- [9] 魏国, 何俊仕. 沈阳市生态环境需水研究[J]. 人民长江, 2008, 36(5): 54-56. (WEI Guo, HE Jun shi. Research on Ecological Water Requirement of Shenyang [J]. Yangtze River, 2008, 36(5): 54-56. (in Chinese))
- [10] 门宝辉, 刘昌明. Tennant 法计算标准的修正及其应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(3): 479-482. (MEN Bao hui, LIU Chang ming. Modified Calculative Criterion of Tennant and its Application [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(3): 479-482. (in Chinese))
- [11] 董福平, 管仪庆, 周黔生, 等. 河流生态用水量确定新方法研究[J]. 水利学报, 2007, (增刊): 547-551. (DONG Fu ping, GUAN Yi qing, ZHOU Qian sheng, et al. Study on the Calculation Method of River Ecological Environmental Flow [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, (supp.): 547-551. (in Chinese))
- [12] 迟宝明, 易树平, 李治军. 大连地下水开发模式探讨[J]. 地球科学与环境学报, 2005, 27(2): 73-77. (CHI Bao ming, YI Shu ping, LI Zhi jun. Exploitation pattern of groundwater in Dalian Area [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2005, 27(2): 73-77. (in Chinese))