

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2020.0107

李海学,程旭学,韩双宝,等. 分层抽水在大厚度含水层水文地质勘查中的应用[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(5): 174-181. LI H X, CHENG X X, HAN S B, et al. Application of stratified pumping test in hydrogeological exploration of larger thickness aquifers[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(5): 174-181. (in Chinese)

分层抽水在大厚度含水层水文地质勘查中的应用

李海学,程旭学,韩双宝,刘伟坡

(中国地质调查局 水文地质环境地质调查中心,河北 保定 071051)

摘要:为查明深埋于240 m以下总厚度达660 m的多个大厚度含水层的渗透系数、涌水量、水质等参数,基于钻孔岩心和测井资料划分6个抽水试段,利用分层抽水试验进行取样和计算相关参数。研究表明,研究区洛河组和环河组平均渗透系数均为上段小于下段,同一含水岩组上下段含水层之间几乎没有水力联系;洛河组上段含水层富含优质淡水资源,可作为城镇集中水源地的目标开采层,同时要防止过度开采导致水质变差;单孔多层段含水层分层抽水试验不仅可以精确获取大厚度含水层的水文地质参数,还对厘清含水层间越流关系及合理规划地下水开发利用具有重要意义。

关键词:分层抽水试验;大厚度含水层;白垩系;水文地质参数

中图分类号:TV221 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



Application of stratified pumping test in hydrogeological exploration of larger thickness aquifers

LI Haixue, CHENG Xuxue, HAN Shuangbao, LIU Weipo

(Center for Hydrogeology and Environment Geology, China Geological Survey, Baoding 071051, China)

Abstract: Water inflow, water quality and other parameters of several aquifers with a buried depth of 240 m and a thickness of 660 m for large thickness aquifers. Based on borehole core and logging data, the well is divided into 6 pumping section. The results showed that; the average hydraulic conductivity of the Luohe and Huanhe aquifer is lower than that in the upper section in the study area, there is almost no hydraulic connection between the upper and lower aquifers of the same aquifer group, the upper of the Luohe aquifer is rich in high-quality freshwater resources, which can be used as a target mining layer for urban concentrated water sources, and simultaneously prevent over-exploitation and lead to poor water quality, the stratified pumping test with new packer technology may effectively solve the difficulty of obtaining hydrogeological parameters of large thickness aquifers, which not only improve the accuracy of the survey but also obtain accurate and reliable hydrogeological parameters. Therefore, it is of great significance to clarify the flow relationship between aquifers and to rationally plan the exploitation and utilization of groundwater.

Key words: Longdong Basin; stratified pumping test; larger thickness aquifer; Cretaceous; hydrogeological parameter

抽水试验是水文地质勘查工作极其重要的工作手段之一,是掌握含水层富水性、获取水文地质参数

最直接的手段,可以定量判断地下水的补、径、排关系及含水层的水力联系,是评价水质和水量的基础

收稿日期:2019-07-16 修回日期:2019-12-06 网络出版时间:2019-12-19

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20191219.1417.002.html>

基金项目:自然资源部地质调查项目(DD20190333; DD20160288)

作者简介:李海学(1986—),男,河北邯郸人,工程师,主要从事水文地质调查评价与研究工作。E-mail: 836167465@qq.com

性工作^[1-2]。随着我国1:5万水文地质调查研究工作的持续开展,针对含水层埋藏深度浅、厚度小的平原盆地松散含水层和基岩山区基岩含水层,研发多种口径的单孔分层抽水试验封隔器装备,系统总结分层成井、止水、洗井等工艺,提高了含水层水文地质精细刻画,为大厚度含水层的分层抽水试验和水文地质参数研究奠定基础^[3]。

不同地区对大厚度含水层的界定不一致,结合水文地质钻孔一般止水深度小于200 m的情况。本文中“大厚度含水层”为厚度大于100 m且埋深大于200 m的含水层。获取大厚度深埋含水层水文地质参数是水文地质勘查的一个难点。章伟民等^[4]利用3眼不同深度的井获取了大厚度含水层3个不同层段的出水能力。Zlotnik^[5]、Price等^[6]和Brassington等^[7]利用 packer 装置以冲击试验的方法获取深埋含水层的渗透系数。王晓燕等^[8]针对黑河流域埋深浅的大厚度含水层采用分层抽水试验获取一孔同径多层含水层水文地质参数的真实值。汪力等^[9]通过混合抽水试验不同含水层段的水头变化,计算了不同含水层的水文地质参数。总体上基于成井成本、技术要求和抽水设备,针对大厚度深埋含水层抽水试验的研究成果并不多,主要存

在成井技术要求高、获取参数不精确和经济成本高等问题。前人研究成果^[5-7,10-13]表明:大厚度深埋含水层使用 packer 原位水文地质试验和分层取样技术是获取含水层渗透系数,查明地下水水化学场、水动力场的有效方法。基于上述成果,本文以陕甘宁革命老区1:5万水文地质调查项目为依托,利用分层抽水试验和可视化在线监测技术获取典型黄土地区下伏大厚度基岩含水层的地下水动力场、化学场、温度场等水文地质和水化学参数,对精确查明各种参数进行探索性研究,为大厚度含水层水文地质参数获取方法和类似地区勘查找水提供借鉴。

1 研究区概况

1.1 研究区水文地质概况

研究区位于鄂尔多斯盆地南部马莲河流域,地势北高南低,北部沟壑纵横、梁峁相间,南部黄土塬及残塬呈放射状分布。区内主要含水岩组自下而上为洛河组、环河组、罗汉洞组和离石黄土(图1),根据地下水的补、径、排条件及地下水埋藏条件,将地下水划分为黄土潜水、河谷潜水及白垩系基岩孔隙-裂隙水等3种类型。

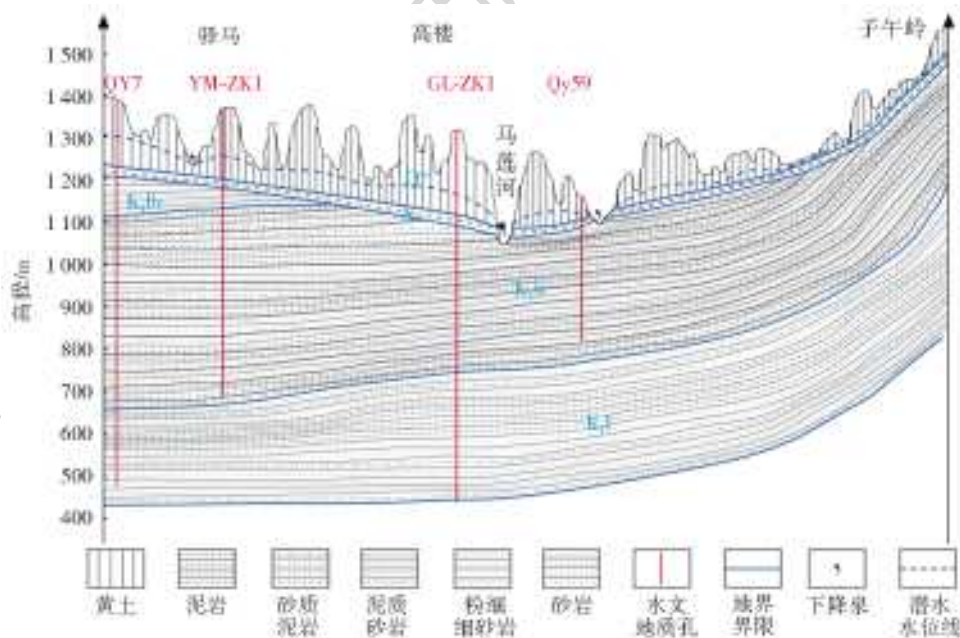


图1 研究区水文地质剖面

Fig. 1 Hydrogeological profile of the study area

黄土潜水主要分布在黄土塬及残塬,主要接受大气降雨补给,地下水径流和排泄受地形地貌控制,循环路径短、径流迅速、地下水交替强烈、水质好,循环深度一般在200 m以内,水位受季节性降雨影响较大。河谷潜水主要分布在马莲河河谷及其较大支

沟的第四系砂层、卵砾石地层中,含水层厚度5~10 m,受大气降雨及基岩承压水补给,径流受河谷展布方向控制,与地表水流向一致,以地表溢出、人工开采及蒸发排泄为主,水质较差,以Ⅳ、Ⅴ类水居多。白垩系基岩孔隙-裂隙水含水岩组有罗汉洞组、环河

组、洛河组,主要补给来源为西部六盘山岩溶地下水和东部子午岭基岩裸露区大气降雨,地下水径流交替十分缓慢,补、径、排分带明显,循环路径长,循环深度多大于 500 m 可达到白垩系的底界,地下水流呈水平活塞式流动,水质较差,水化学分带明显。

1.2 GL-ZK1 钻孔概况

GL-ZK1 钻孔位于甘肃省庆阳市庆城县高楼乡,属于典型黄土区水文地质勘探孔,主要揭穿地层

为第四纪黄土、新近系红黄土、白垩系环河组泥质砂岩与粉细砂岩互层、白垩系洛河组泥质砂岩与中细砂岩互层,孔深 951.08 m,成井深度 901.50 m。由图 2 可知:上部黄土层段 0~241.30 m 钻孔直径 500 mm、成井直径 273 mm;下部基岩段 >241.30~901.50 m 裸眼成井,井径 235 mm。主要含水层段为环河组上段 >241.30~339.11 m、环河组下段 405.40~541.00 m 和洛河组全段 >541.00~901.50 m。

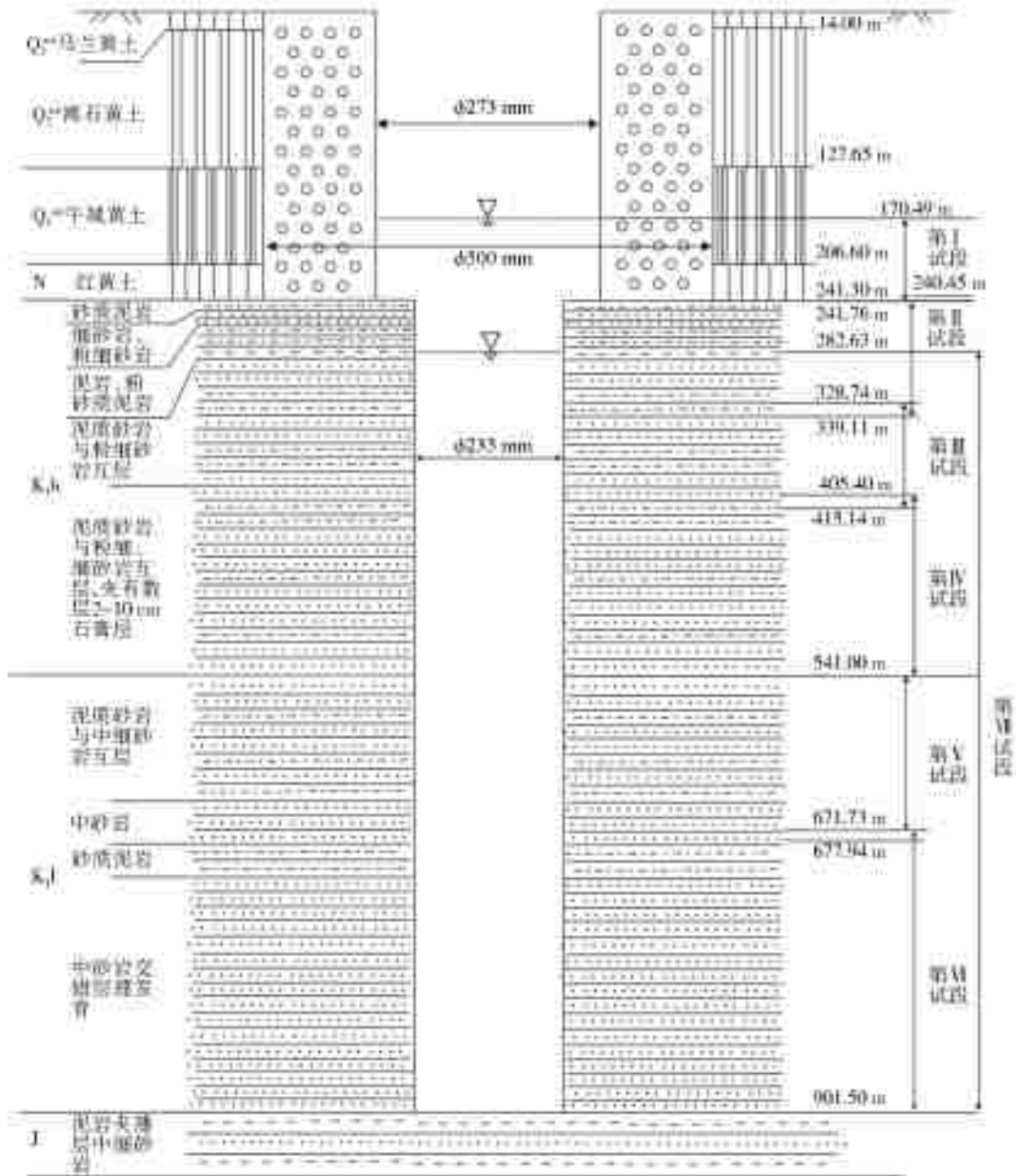


图 2 GL-ZK1 钻孔成井结构及抽水试验流程

Fig. 2 Schematic diagram of GL-ZK1 borehole completion structure and pumping test flow

2 研究方法

2.1 分层抽水试验原理

分层抽水试验的基本原理是在相对隔水层层位(管外止水处)安放封隔设备,阻断因成井造成的含

水层连通性,使上下含水层间的水力联系恢复到成井前的状态,利用封隔器中间放置的水泵,实现对目标含水层段的抽水试验^[8,14-15],见图 3。试验设备主要包括:抽水及动力、封隔止水 and 可视化监测等 3 个子系统,这 3 个子系统相辅相成,即:抽水泵选择不

当会造成数据偏离真实值、监测出现故障得不到抽水数据、封隔止水效果不好所求参数会不准确。抽水试验前应根据已有水文地质资料、简易水文观测数据、井身结构等,编制抽水试验流程方案,预估涌水量并选择合适的水泵类型。

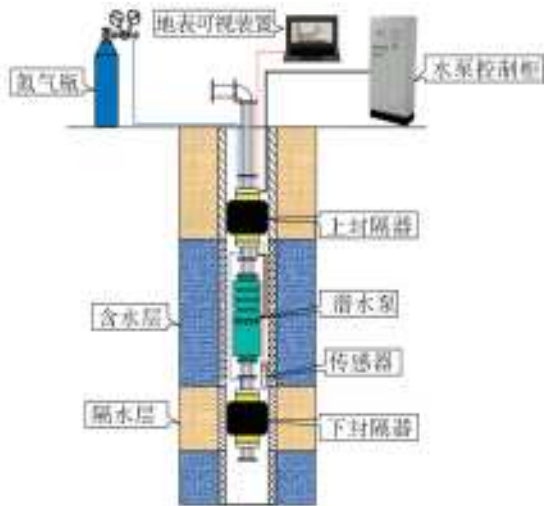


图3 抽水试验设备及原理(依据文献[7]修改)

Fig. 3 Pumping test equipment and schematic diagram (modified according to literature 7)

整个工艺流程主要分为4步^[8]:第1步,根据止水及含水层厚度确定上下封隔器的间距和水泵的位置(水泵宜在抽水层段的中部),连接并检查通电电缆、数据传输电缆和高压气管,确保能够正常工作;第2步,下放水泵到指定位置,开启封隔器,根据封隔前后传感器监测的水位变化判断封隔效果,地面安装流量计,开始震荡洗井;第3步,待“水清砂净”后,停泵恢复至洗井前水位,开始目标含水层抽水试验,利用变频柜改变电压,完成“先大落程、后小落程”的抽水试验;第4步,抽水试验完成封隔器解封,上下移动水泵及封隔器,进行下一个层段抽水试验。

与传统水文地质抽水试验相比,封隔器技术抽水试验优势主要有3个方面:一是利用封隔器技术每个抽水层段可以视为完整井,避免传统抽水试验受滤水管、等效完整井等因素影响造成参数计算误差,提高参数计算精度;二是可以获取特定深度、任意含水层段的渗透系数、涌水量、水质、水温、水位等参数,提高含水层水文地质参数分辨精度;三是单孔分层抽水试验不仅可以通过监测非抽水层段的含水层水位直观判断各含水层间的水力联系,还可以通过分层水样水质分析确定具有供水意义的含水层位。与传统 packer 分层试验相比,封隔器技术抽水试验的优势主要有3个方面:一是基本不受水位埋深和施工场地的限制;二是通过泵管将封隔设备和水泵连接在一起,无需另外准备特殊的管件;三是不

仅可以解决深、分层取样问题,还可以求取含水层水文地质参数、获取含水层的出水能力,特别是通过多层段的震荡可以洗井更彻底。

2.2 抽水试验设计

2.2.1 分层抽水试验的目的和原则

GL-ZK1 钻孔是工作区水文地质勘查深度较大的钻孔,目的是在严重缺水寻找深部可以利用的淡水资源,获取深部含水层水文地质参数,探索深埋大厚度含水层分层抽水试验的工艺方法,研究深部含水层地下水循环特征。抽水层段划分的主要原则是:若含水层岩性基本一致,厚度大于20 m(考虑水泵电机和叶轮的长度为16 m左右)且上下均有相对隔水层,则划为一层;每个完整含水岩组划为一层;开采难度低、钻探过程估算的涌水量具有供水意义划为一层;勘探的目标含水层划为一层。

2.2.2 抽水试验试段划分及过程

按照上述分层原则,根据地层岩心和测井数据,将GL-ZK1 钻孔划分为6个层段(图2和表1)。使用YQS150-13型与200QJ20-692型潜水泵、THK-B-132/1TY型变频柜、 $\phi 195$ 型封隔器组合等分层抽水设备进行孔内封隔分层和混合抽水。按照相关技术标准,采用稳定流、变落程抽水试验,结果见表2。

分层抽水试验共耗时293.87 h,其中稳定时间163.08 h,每个落程抽水完成后恢复至初始水位。抽水过程分浅部168.83~415.14 m和深部405.40~901.50 m两个阶段。根据前人研究成果^[16-20],由黄土至环河组风化壳含水层富水性逐渐增大,浅部含水层采用由上及下的抽水顺序,并将黄土和基岩风化壳含水层混合作为一层,查明浅部居民主要开采层含水层的水量、水质情况。在保证完成抽水试验目标任务的前提下,基于省时、经济等因素,深部含水层采用由下至上的抽水顺序,获取环河组和洛河组含水层不同层段的水文地质参数。全孔混合抽水Ⅶ主要是为了查明混合抽水时最大的涌水量、水质情况及不同含水层段的贡献率,为优化地下水开采层的选择提供依据。

3 结果分析与讨论

抽水过程中采用能够连续记录数据的水位传感器和超声波流量计获取水位降深和流量变化数据,这种连续性、实时性、精确性的测量为水文地质参数的求取提供了依据,使参数的计算结果更科学合理^[21]。

表 1 分层抽水试验情况

Tab. 1 Experimental data of stratified pumping

试段 编号	试段深度/m		含水层 时代	含水层岩性	分层依据	落程	抽水时长	抽水 顺序
	起	止						
I	170.49	241.76	Q+N	黄土和红黄土	单一、完整含水岩组。	—	1.17 h	1
II	233.04	339.11	Q+N+ K ₁ h 上段	泥质砂岩与 粉细砂岩互层	居民生活用水主要开采层段。	大 小	88.5 h 19 h	2
III	328.74	415.14	K ₁ h	泥质砂岩与粉细砂岩 互层,具部有石膏夹层	以泥质砂岩和砂质泥岩为主,夹薄层粉细 砂岩,分层位置为薄层的泥岩相对隔水。	—	42 min	3
IV	405.40	539.71			以细砂岩、粉细砂岩和泥质砂岩为主,夹 薄层泥岩。	—	25 min 24.5 h	6
V	543.63	677.94	K ₁ l	泥质砂岩与中、 细砂岩互层	以细砂岩、粉细砂岩和泥质砂岩互层为 主,分层位置为砂质泥岩。	大 小	37.5 h 18.5 h	5
VI	671.73	901.50			以细砂岩和中砂岩为主,夹薄层的泥质砂岩。	大 小	24.5 h 9 h	4
VII	170.49	901.50	Q+N+K ₁ h+ K ₁ l			大 小	30 h 9 h	7

表 2 分层抽水试验成果

Tab. 2 Results of stratified pumping test

试段编号	水位埋深/m	落程	降深/m	涌水量/(m ³ ·h ⁻¹)	导水系数/(m ² ·d ⁻¹)	平均渗透系数 K/(m·d ⁻¹)	水位恢复时间/h
I	170.49			抽水 1 h 掉泵			—
II	240.45	大	57.33	3.13	1.60	0.010	28
III	261.03			抽水 25 min 掉泵			恢复极慢
IV	276.59	大		抽水 30 min 掉泵			恢复较慢
		小	125.96	1.44	4.85	0.036	
V	280.02	大	70.87	26.20	13.23	0.098	22
VI	283.65	大	8.51	26.20	156.98	1.169	6
VII	282.63	大	6.44	24.11	131.22	0.230	13

注:由于 II 和 IV 单位涌水量较小,故 VII (混合抽水) 含水层厚度按 VI 层和 V 层厚度之和计算。

3.1 水文地质参数计算

含水层为承压或潜水含水层,每个抽水试段均视为完整井,参照《水文地质手册》(第二版),选用抽水时长不小于 24 h,且抽水降深稳定或似稳定后的水位恢复阶段数据,利用恢复阶段剩余降深-时间($s-lgt$)直线图解法计算含水层渗透系数,不同抽水试段剩余降深-时间($s-lgt$)关系见图 4。

承压含水层计算公式为

$$T = \frac{0.183Q}{[i]} \quad (1)$$

$$K = \frac{T}{M} \quad (2)$$

潜水含水层计算公式为

$$K = \frac{0.183Q}{[i]H_0} \quad (3)$$

式中: K 为抽水试段平均渗透系数, m/d; T 为含水层导水系数, m²/d; i 为降深-时间, $s-lgt$ 直线段斜率;

H_0 为潜水抽水前含水层厚度, m; Q 为涌水量, m³/d; t 为恢复至初始水位时间, h; M 为承压含水层厚度, m。

3.2 不同含水层水文地质参数及水力联系分析

由表 1 和 2 可以看出,分层抽水试验获取了不同含水层段的水位埋深、涌水量、导水系数和渗透系数等水文地质参数,并且不同含水层的水文地质参数方面存在的较大的差异性。与前人^[11-12, 17-18, 22-23]

对该区域水文参数和地下水循环模式的研究成果相比,本次抽水试验提高了勘查精度、深化了对含水层的认识,主要表现为两个方面:在平均渗透系数方面,白垩系环河组和洛河组不同层段含水层由新至老逐渐增大;在富水性方面,洛河组下段是区域主要的含水层,明显好于上部白垩系其他层段含水层。这是由于环河组以湖相沉积的泥岩、砂质泥岩为主,洛河组以沙漠相沉积的细-中粒石英砂岩、长石砂岩

和长石石英砂岩为主,洛河组下段沉积相为亚沙丘相、岩石的孔隙率高、孔隙的连通性好。总体上讲,

洛河组下部含水层较其他含水层具有较强的储水和透水能力。

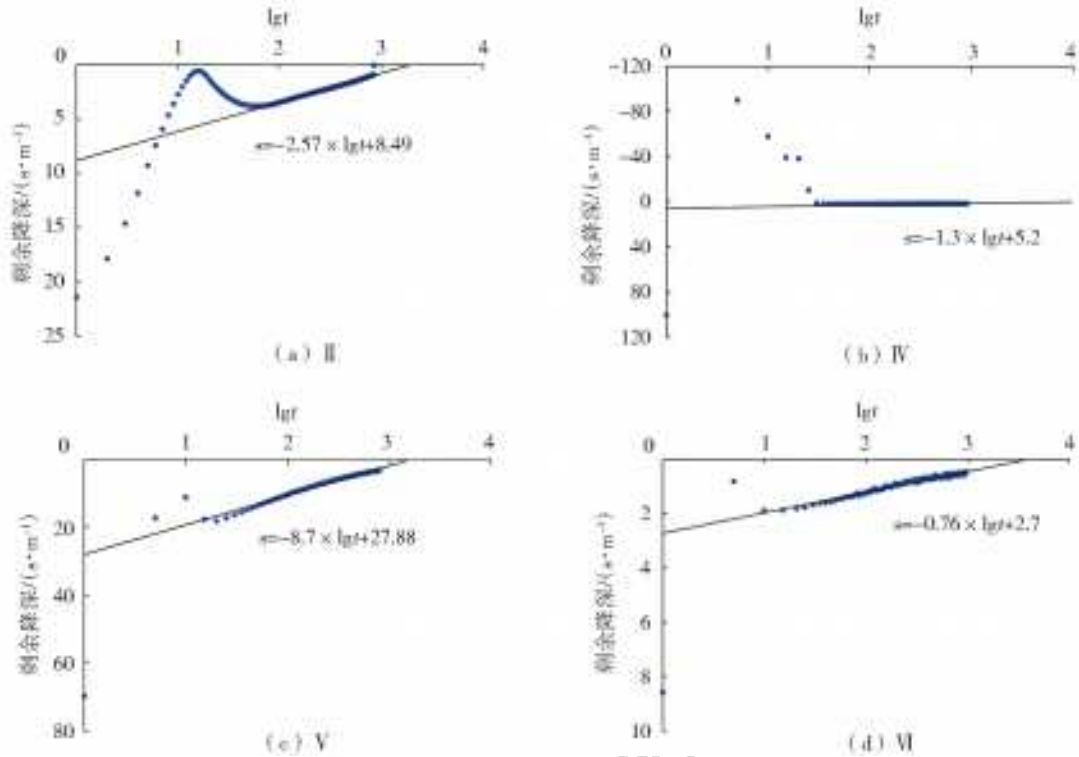


图 4 抽水试验恢复阶段剩余降深-时间对数关系

Fig. 4 Relationship between residual depth reduction and time logarithmic in recovery phase of pumping test

表 3 含水层之间水力联系情况

Tab. 3 Hydraulic linkages between aquifers

抽水层段	TDS/(g · L ⁻¹)	锶/(mg · L ⁻¹)	水化学类型	水力联系情况及判断依据
I	0.64	2.37	HCO ₃ · SO ₄ -Na	—
II	0.74	3.91	SO ₄ · HCO ₃ -Na	与Ⅲ段几乎无水力联系。依据:(1)分别抽水时水位无变化;(2)水中锶含量差别较大,水化学类型略有差别;(3)327.2~347.8 m为厚层状泥岩,自然伽马值相对偏高。
III	0.52	1.38	HCO ₃ · SO ₄ -Na	与Ⅳ段几乎无水力联系。依据:(1)分别抽水时水位无变化;(2)水中锶含量差别较大,水化学类型差别较大;(3)399.10~418.20 m为厚层状、泥质结构的砂质泥岩。
IV	1.82	3.75	SO ₄ -Na	与Ⅴ段几乎无水力联系。依据:(1)分别抽水时水位无变化;(2)水中锶含量差别较大,水化学类型差别较大;(3)532.90~537.15 m为厚层状泥质砂岩夹多层薄层泥质条带。
V	0.73	1.62	SO ₄ · HCO ₃ -Na	与Ⅵ段几乎无水力联系。依据:(1)分别抽水时水位无变化;(2)670.90~684.7 m为粉砂岩夹薄层泥质砂岩。
VI	1.66	3.03	SO ₄ · Cl-Na	

由表 2 和 3 可知:第 I 试段和第 II 试段的静止水位相差高达 70 m,并且黄土与基岩风化壳中间为新近系泥岩,可以确定两个含水层之间几乎无水力联系,水化学特征相似是因为两者的补给来源全为大气降水,循环交替较快;环河组不同层段静止水位相差 15~20 m,并且抽水过程中相邻含水层水位没有变化,不同层段地下水 TDS 质量浓度、水化学类型和锶的质量浓度均有较大差别,说明地层的矿物

组成具有一定差别,另外厚层状的砂质泥岩、泥岩也阻断了含水层之间的水力联系;洛河组不同层段之间虽然水位差别不大,但抽水过程中相邻含水层水位没有变化,地下水 TDS 质量浓度、水化学类型和锶的质量浓度均有较大差别,这表明洛河组含水层之间基本无水力联系。抽水试验时不同层段涌水量相同降深相差比较大,也可以证明两个含水层岩性、渗透性具有较大差异。综上,可以判断黄土潜水与

基岩潜水几乎不存在水力联系,基岩潜水与承压水亦无水力联系,承压水含水层内也存在隔水层。含水层之间的水力联系和结构是对区域含水层的重新认识,分层段求取的水文地质参数为更准确评价地下水资源量提供支撑。

3.3 混合抽水试验过程不同含水层段的涌水量

研究混合抽水试验不同含水层的涌水量,可以为开采层位的优化选择提供支撑,同时也为长时间

开采后水质水量变化进行预判。由于在抽水过程中 I、III 和 IV 试段均出现掉泵状态,所以本文只计算混合抽水过程中 II、V 和 VI 试段分别的涌水量。由图 5 可知,上部潜水试段(II) Q_s 呈非线性关系,其余基岩承压水试段(V、VI)及全孔段 Q_s 呈线性相关,依据总涌水量是各层涌水量之和,结合每个试段单独抽水的 Q_s 线性拟合方程估算混合抽水试验时不同抽水试段的涌水量。

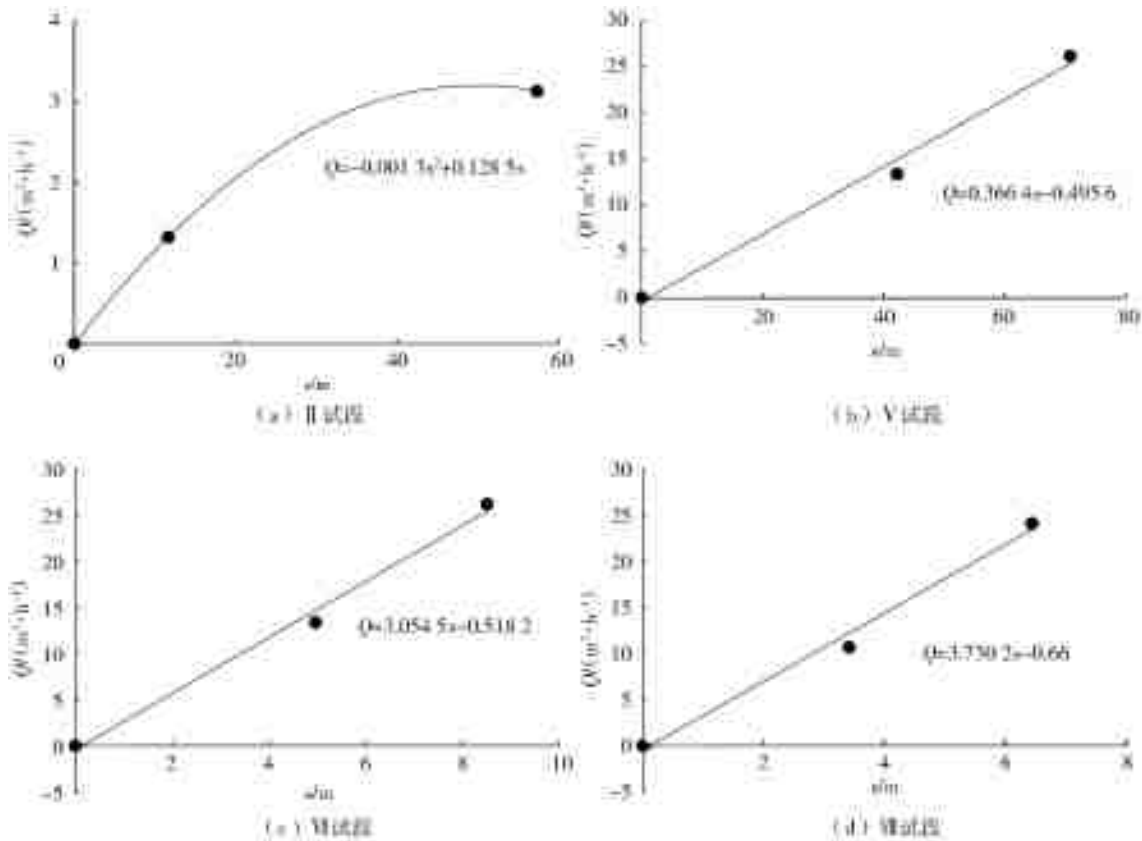


图 5 抽水试验流量-降深关系

Fig. 5 Relationship between flow and drawdown in pumping test

按照上述方法计算混合抽水试验大落程时,稳定后水位埋深为 289.07 m, II、V 和 VI 试段的降深分别为 48.62、9.05、5.42 m, 相应涌水量分别为 3.18、2.82、16.04 m³/h, 与混合抽水试验实际涌水量相差 2.09 m³/h, 考虑到井损、多层承压水的相互干扰和 IV 试段等因素的影响, 计算结果是可信的。计算结果表明, 混合抽水试验过程中 V 试段涌水量远小于单层抽水时的涌水量, 也就是说在设备允许的情况下, 混合抽水试验的涌水量可以大幅提高; 但是水化学资料显示 VI 试段 TDS 为 1.66 g/L, 所以要严格控制开采量和降深, 并将水泵放置洛河组上段, 避免抽水导致 VI 试段劣质水进入洛河组上段含水层 V。

3.4 地下水开发利用对策建议

通过本次分层抽水试验, 结合区域地下水开发利用条件^[24]及地下水水资源分布特征^[25], 质优量大

的地下水资源主要储存在洛河组砂岩地层, 可作为集中供水开采层段。若在该钻孔附近设立供水源地, 成井深度宜 800~900 m, 采用基岩裸眼成井工艺, 并对环河组含水层段进行止水, 水泵位置宜在 650 m 以下; 浅部黄土及基岩风化壳潜水宜部署分散式供水井, 井深 400~500 m, 水泵位置宜在 350~450 m。开采地下水的同时要部署地下水监测设备, 分层监测地下水水位的变化, 特别是监测洛河组上段地下水水位变化, 严格控制源地水位降深、水质变化情况。

4 结论

(1) 分层抽水试验是解决大厚度深埋含水层的地下水勘查精度、获取精确可靠水文地质参数非常有效的技术手段。利用封隔器技术自由地划分抽水

层段,将人为成井过程破坏的含水层秩序得到恢复,实现“层析水力”。与传统抽水试验相比经济、省时、参数获取准确且精度高。与传统 Packer 设备相比简单易操作,不仅可以获取精确的含水层水文地质参数和出水能力,还基本不受场地和埋深限制。

(2)洛河组是区域地下水的主要富水地层,黄土及基岩风化壳可作为分散供水开采层。混合抽水试验过程中Ⅱ、Ⅴ和Ⅵ试段估计出水量贡献率分别为13.14%、11.68%、66.53%,其他层段约为8.64%,洛河组上段含水层具有较大的出水潜力,可作为集中水源地的开采层位,但要防范过度开采导致水质变差。

(3)GL-ZK1 钻孔是我国目前实施的含水层埋藏最深、厚度最大的分层抽水试验钻孔,分层抽水试验在深部洛河组含水层寻找到优质富锶淡水,水量可达628.8 m³/d,可作为庆城县的后备水源,为陇东典型黄土缺水找水提供了方向,同时也对大厚度深埋含水层的地下水勘查具有重要的借鉴意义。

参考文献:

- [1] DZ/T 0282—2015 水文地质调查规范(1:50,000)[S].
- [2] 高业新. 通过抽水试验研究河北平原深层地下水的补给来源[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(7): 68-71. DOI:10.13448/j.cnki.jalre.2010.07.008.
- [3] 李文鹏. 地质灾害隐患和水文地质环境地质调查计划进展[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(2): 1-4. DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2019.02.01.
- [4] 章伟民,陈新伟,裴照堂. 大厚度含水层分段取水设计及试验成果分析:以乌市某水源地为例[J]. 勘察科学技术, 1995(3): 41-45.
- [5] ZLOTNIK V. Interpretation of slug and packer tests in Anisotropic Aquifers[J]. Ground Water, 1994, 32(5): 761-766.
- [6] PRICE M, MORRIS B, ROBERTSON A. A study of intergranular and fissure permeability in Chalk and Permian aquifers, using double-packer injection testing [J]. Journal of Hydrology, 1982, 54(4): 401-423.
- [7] BRASSINGTON F C, WALTHALL S. Field techniques using borehole packers in hydrogeological investigations [J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 1985, 18(2): 181-193.
- [8] 王晓燕,安永会,邵新民,等. 封隔震荡洗井新技术在水文地质勘查中的应用研究[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(4): 30-33. DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2017.04.05.
- [9] 汪力,李方会,杨刚忠,等. 混合抽水试验在深埋含水层地区水文地质勘查中的应用[J]. 资源环境与工程, 2014, 28(5): 716-719. DOI: 10.16536/j.cnki.issn.1671-1211.2014.05.016.
- [10] 侯光才,尹立河,苏小四,等. 鄂尔多斯白垩系盆地地下水流动系统驻点的理论与实际意义[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(1): 19-23. DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2013.01.019.
- [11] 马思锦,汤献敏. Packer 系统在地下水勘查中的应用[J]. 陕西地质, 2009, 27(2): 75-80.
- [12] 杨郦城,侯光才,张茂省,等. 双 Packer 系统在鄂尔多斯盆地地下水勘查中的应用[J]. 西北地质, 2005, 38(1): 113-115.
- [13] 孙芳强,王晓勇,尹立河,等. Packer 分层取样技术在非均质含水层勘查中的应用[J]. 人民黄河, 2017, 39(12): 54-56, 76. DOI: 10.3969/j.cnki.issn.1000-1379.2017.12.013.
- [14] 何计彬,潘德元,李炳平,等. 深井分层真空抽水试验及机理分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(1): 18-23.
- [15] 张建良. 关于分层抽水试验的技术改进[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2011, 36(4): 156-159.
- [16] 谢渊,王剑,殷跃平,等. 鄂尔多斯盆地白垩系含水层沉积学初探[J]. 地质通报, 2003, 22(10): 819-828.
- [17] 侯光才,张茂省,刘方,等. 鄂尔多斯盆地地下水勘查报告[R]. 西安:中国地质调查局西安地质调查中心, 2006.
- [18] 谢渊,王剑,江新胜,等. 鄂尔多斯盆地白垩系沙漠相沉积特征及其水文地质意义[J]. 沉积学报, 2005, 23(1): 73-83. DOI: 10.14027/j.cnki.cjxb.2005.01.010.
- [19] 侯光才,林学钰,苏小四,等. 鄂尔多斯白垩系盆地地下水系统研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, 36(3): 391-398.
- [20] 徐中华. 鄂尔多斯盆地南区保安群地下水水化学特征及演化机理[D]. 西安:长安大学, 2010.
- [21] 李军,甄世军,张翠云,等. Diver 自动水位记录仪在抽水试验求参中的应用[J]. 工程勘察, 2017(12): 34-39.
- [22] 刘心彪,张永军. 陇东盆地白垩系含水层水文地质参数求解[J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42(1): 35-39. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2014.01.008.
- [23] 赵振宏,王冬,陶正平,等. 鄂尔多斯高原地下水系统的多层结构循环模式:来自深孔中 Packer 系统分层水头测定的证据[J]. 地质通报, 2008, 27(8): 1131-1137.
- [24] 刘心彪,赵成,郭富赞. 陇东盆地洛河组深层地下水开发利用研究[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(4): 13-19. DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2013.04.019.
- [25] 王文科,杨泽元,程东会,等. 面向生态的干旱半干旱地区区域地下水资源评价的方法体系[J]. 吉林大学学报(地球科学), 2011, 40(1): 159-167. DOI: 10.13278/j.cnki.jjuese.2011.01.013.