

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2019.05.06

郑州地下水均衡试验场的改建工程 ——主要测试设施与数据自动化采集

李俊亭^{1,2}, 张彦辉³, 申圆⁴, 刘尚杰³, 王 帅⁵

(1. 长安大学环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 干旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 西安永泰传感器科技有限公司, 陕西 西安 710018; 4. 西安文理学院生物与环境工程学院, 陕西 西安 710065; 5. 河南省地质矿产勘查开发局第二地质环境调查院, 河南 郑州 450053)

摘要: 郑州地下水均衡试验场的改建, 是由中国地质环境监测院主持的国家地下水监测工程中地下水均衡试验场的改建项目之一, 由河南省环境地质监测院具体负责实施。科学技术的发展, 为试验场观测数据采集的自动化奠定了良好基础。试验场数据采集需要自动化的有: 3m 高主杆气象站测试系统; 太阳全辐射、太阳净辐射、太阳直射观测仪, E-601 蒸发仪, 5 TM 含水率、温度传感器, 自动补水仪, 负压测量仪。除后两项外, 其他需要数据采集仪器已经市场化。后两项是作者的发明与实用专利。自动补水仪是用来模拟地下水埋深的设备, 它是以传统的马里奥特瓶补水原理为基础, 采用控制电路使其可以自动补给因蒸发而消耗的水量, 同时还可以记录降水的历时过程。负压测量是利用空气运动黏度约大于水运动黏度的 15 倍这一特性, 即当水刚通过多孔瓷头时, 气体不能通过多孔瓷头, 据此设计了在包气带中能测定负压的传感器。数据采集则应用了惠斯登电桥平衡的补偿原理。由于控制、供电、采集数据的电缆过多, 因此数据自动化采集系统应用了三级采集、逐级集成的方案。

关键词: 自动补水仪; 负压传感器; 5 TM 水分与温度传感器; 数据自动化采集系统

中图分类号: P641.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2019)05-0038-06

Reconstruction project of groundwater balance experiment site of Zhengzhou: mainly test equipments and data automatic acquisition

LI Junting^{1,2}, ZHANG Yanhui³, SHEN Yuanyuan⁴, LIU Shangjie³, WANG Shuai⁵

(1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;
2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region of Ministry of Education, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 3. Xi'an Yongtai Sensor Technology Limited Company, Xi'an, Shaanxi 710018, China;
4. School of Biological and Environmental Engineering, Xi'an University, Xi'an, Shaanxi 710065, China;
5. No. 2 Institute of Geological & Mineral Resources Survey of Henan, Zhengzhou, Henan 450053, China)

Abstract: The reconstruction project of groundwater balance experiment site of Zhengzhou was rebuilt by geo-environmental monitoring institute of Henan Province, belongs to one of the national groundwater monitoring projects, which performed by China geological Environment Monitoring Institute. The development of science and technology has laid a good foundation for the automation of observation field observation data collection. The experiment field data needs to be automated collection including 3m high main pole weather station test system with 3m high main pole; solar full radiation, solar net radiation, direct solar observation instrument; E-601 evaporator; 5 TM soil moisture and temperature sensor; automatic water supplying instrument; negative pressure measuring instrument. other data automation collection instruments have been marketized except the

收稿日期: 2019-04-12; 修订日期: 2019-06-18

基金项目: 国家地下水监测工程(自然资源部); 国家自然科学基金面上项目(41472222)

第一作者: 李俊亭(1936-), 男, 教授, 长期从事水文地质的数值模拟与物理模拟。E-mail: 13689193382@163.com

latter two items, which belong to the author's invention and utility patents. The automatic water supply instrument is a device based on the traditional Mario bottle hydration principle for simulating the depth of the groundwater level. It is. It uses a control circuit to automatically replenish the amount of water consumed by evaporation as well as record the duration of precipitation. process. The negative pressure measurement utilizes the characteristic that the air kinematic viscosity is about 15 times greater than the water kinematic viscosity, that is to say, when the water just passes through the porous ceramic head, the gas cannot pass through the porous ceramic head, though which a sensor for measuring the negative pressure in the vadose zone is designed. Data acquisition based on the compensation principle of Wheatstone bridge balance. Due to the much more numbers of controlling cables for power supply and data acquisition, the data collection automation system uses a three-level integration scheme.

Keywords: automatic water supplying instrument; negative pressure sensor; 5 TM moisture and temperature sensor; data automatic collection system

试验场地的数据采集包括:3 m 高主杆气象站测试系统,太阳全辐射、太阳净辐射、太阳直射观测仪,E—601 蒸发仪,5 TM 含水率、温度传感器,自动补水仪,负压测量仪。除了后两项外,其它设施的数据输出口都是标准的 4~20 mA,因此这些设施观测数据的自动化采集完全可以借助于市场上已经成熟的设备,再根据需要组合。5 TM 含水率、温度测量探头是美国的专利产品,有其单独的自动化采集系统与数据下载接口^[1-8]。只有最后两项是专门为郑州地下水均衡试验场量身定做的。本文重点介绍自动补水仪与负压测量仪的设计原理及其数据采集,最后介绍总体的数据自动化采集构成。

1 测定试验柱下界面改变的自动补排水仪

设计的自动补水仪有两个功能:在试验柱中设置固定水位,当此水位被外界因素扰动(比如蒸发)时,可以通过计量补水以保持预设水位,并自动记录其补给量;同样,当有外界因素使其升高(比如降水)时,可以通过计量排水以保持预设水位,并记录其排出的水量。自动补水仪是按水文地质学中双环试验常用的马利奥特瓶(简称马氏瓶)的补水原理设计的^[9](图1)。当 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 四个开关都关闭时,马斯瓶是封闭的,且与平衡杯也是隔离的。开启 K_3 、 K_4 ,由 K_3 向马氏瓶供水水面超过 AA 面时,多余的水由平衡杯中间的玻璃管 C 端排出,此时关闭 K_4 。开启 K_1 、 K_2 ,继续由 K_3 向马斯瓶供水,当马斯瓶中的水达到某一高度时,关闭 K_2 、 K_3 。当 K_4 开启时,由于 K_1 开启是通大气的,所以马氏瓶连同平衡杯中的水是平衡在 AA 面的。

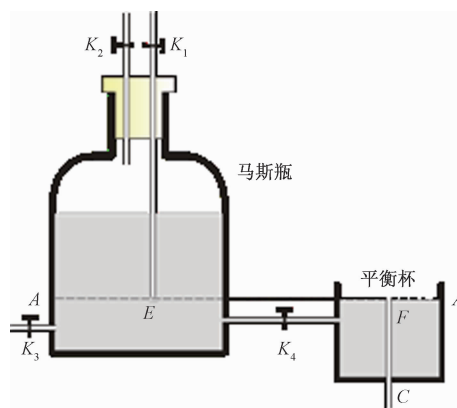


图1 马氏瓶自动补水原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of automatic water supply for Mas bottle

如果由于某种原因导致平衡杯中的水位下降,为了 AA 面的平衡,空气必从已开启的 K_1 进入马斯瓶补充到马斯瓶的上部,马氏瓶中的水通过 K_4 补充平衡杯水的缺失。只要马斯瓶中有一定水位,这个过程就是连续的,在一定程度上就实现了自动向平衡杯供水。由于某种原因导致平衡杯中的水位上升时,高于 AA 面的水就由 C 端排出,以保持水面的平衡。安装于试验桩上的自动补水仪就是按照上述原理设计的(图2)。运转程序如下:

首先,开启开关 K_1 、 K_2 ,由自来水向试验柱与平衡杯供水至预先设计的高度 AA 面(平衡杯的高度是可调的),当平衡杯中中间的管子有水流出时,关闭 K_1 、 K_2 。紧接着,开启 K_2 ,关闭 $2K_1$ 。由试验场特设的供水房向补水柱供水,当水面升至 AA 面时,正压传感器启动,其压力信号的输出使 $2S_1$ 与 $2S_2$ (常闭电磁阀)自动开启, $2K_1$ 与 $2K_2$ (常开电磁阀)自动关闭,同时关闭 K_3 。此时补水柱中的水位继续上升,当补水柱中的水面升

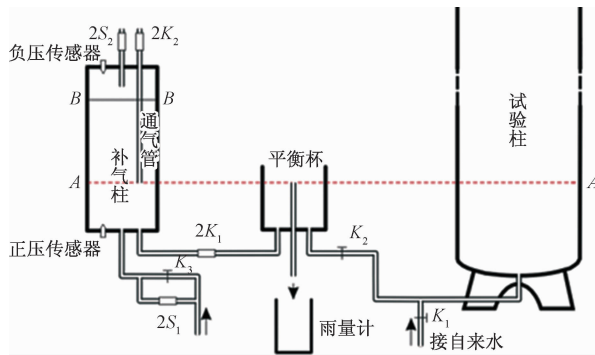


图2 自动补水仪示意图

Fig. 2 Schematic diagram of automatic water supplying instrumen

至BB面时,按照事先对正压传感器的设定,输出信号使 $2S_1$ 与 $2S_2$ 关闭, $2K_1$ 与 $2K_2$ 开启,正压传感器自动切断,同时使负压传感器加电处于零状态。开启 K_2 ,此时补水系统处于稳定状态。如蒸发或降水入渗,试验柱中的水面必然导致平衡杯的水面波动。如果是下降,此时补水柱向平衡杯补水,补水柱中的水面下降,其下降值被负压传感器采集(采集间隔可至秒)。而由于平衡杯水面升高的水将由平衡杯中间的水管排泄至雨量计计量(采样间隔也可至秒)。由于补水柱不断补水,当水面降至AA面时正压传感器再一次被启动,这就实现了补水柱通过平衡杯向试验柱的不断补水。照此设计装配的自动补水仪全貌见图3。自动补水仪通常悬挂在墙上或立在墙根,尽量使补水仪离控制与数据采集箱近一些。

这种自动补水仪能否满足一定的精度要求呢?现予以分析。

假定自动补水柱的内直径为 d ,试验柱的内径为 D 。试验柱由于客观原因在瞬时水面下降了 Δy ,此时自动补水柱中的水面下降 Δx ,补给的水量为: $\pi(d/2)^2\Delta x$,同时 $\pi(d/2)^2\Delta x = \pi(D/2)^2\Delta y$ 。于是得到:

$$\Delta x = \Delta y D^2 / d^2$$

假定 $\Delta y = 0.1 \text{ mm}$; $D = 1000 \text{ mm}$; $d = 200 \text{ mm}$,计算可得 $\Delta x = 2.5 \text{ mm}$ 。这就是说,自动补水柱的水面下降 2.5 mm ,就可以满足试验柱中水位下降 0.1 mm (对蒸发试验来讲,这已是很高的精度了)的补水要求。近似假定 $10 \text{ kPa} \approx 1000 \text{ mm}$ 水柱,即 $1 \text{ Pa} \approx 0.1 \text{ mm}$ 水柱。而给补水柱提供的 $-10 \sim 0 \text{ kPa}$ 压力变送器可直读 0.1 Pa ,假定其精度为 1 Pa (这样的分析会更保守一些),可见补水柱自动补水可达到对 $\Delta y = 0.004 \text{ mm}$ (即 $1/250$)的补水要求。由此可见,设计的自动补水

仪完全可以满足均衡试验场的要求。

自动补水仪的控制电路框图见图4。



图3 自动补水仪

Fig. 3 automatic water supplying instrument

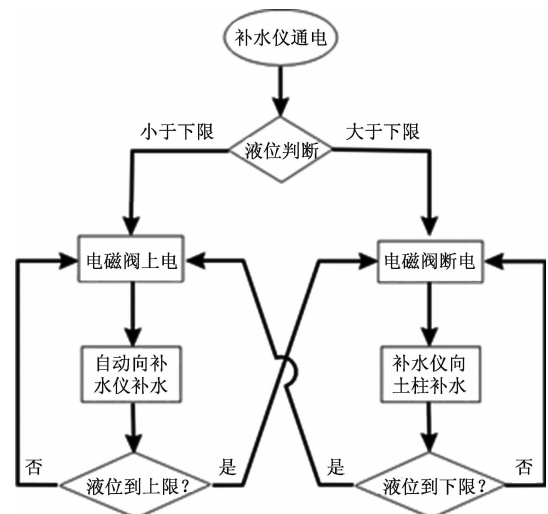


图4 自动补水仪控制电路框图

Fig. 4 Control circuit block diagram of automatic water supplying instrument

2 试验柱中试验介质负压的传感器

依据包气带中水与空气二者物理性质的差异,即空气的运动黏度大约是水的运动黏度的15倍(在 20°C 、1个大气压的条件下,空气与水的动力黏度分别为: $17.9 \times 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 与 $1.01 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$;其运动黏

度分别为: $14.8 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 与 $1.01 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$), 这就是说当多孔瓷头孔隙刚能通过水时, 空气则不能通过。据此以设计在包气带中能测定负压的传感器, 此传感器包括四个部分(图 5), 即多孔瓷头(又称阻气瓷头)、连接管、抽气腔与压力变送器。阻气瓷头是用黏土烧制而成, 在不超过一个大气压下允许水可通过而气体则不能通过。连接管的作用: (1) 可以调剂负压计插入试验介质中的深度; (2) 可以储水。抽气腔是通过抽气嘴对负压传感器进行抽气以创造负压传感器的真空状态。压力变送器是负压传感器的核心, 装有测定负压值的芯片、自动采集数据的控制线路与数据信号的传输线路。

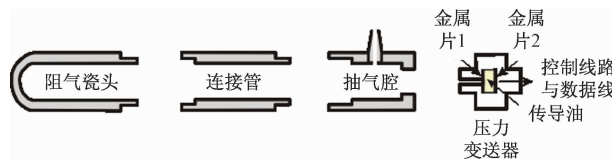


图 5 负压传感器四个部分

Fig. 5 Four parts of negative pressure sensor

将四个部分连接组成负压传感器, 连接处均要严密封闭。装配好传感器的阻气瓷头一端, 垂直置于无气水中(烧沸 5 min, 且在封闭容器中冷却 24 h 后的水), 通过抽气嘴抽气(图 6), 随着抽气, 水通过瓷头进入传感器的空腔。当抽气嘴有水流出现且保证抽出的水不再含有空气时, 用抽气嘴上的特殊装置关闭抽气嘴, 此时压力变送器设定为零状态, 金属片 1 上所受压力为 1 个大气压。

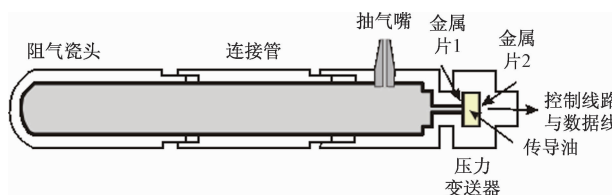


图 6 负压传感器的装配示意图

Fig. 6 Diagram of assembled negative pressure gauge

现设想将负压传感器的阻气瓷头垂直的插入包气带中(只允许从水平到垂向的任一角度的正向插入, 不允许反向插入)。由于包气带是非饱和的, 负压传感器中水可认为是饱和的(系指已充满水的情形), 两者在界面处的压力是不平衡的。要使从不平衡达到平衡, 则负压计中的水就要在包气带“势”的作用下, 将负压计中的水吸入包气带中以达到平衡。负压计中的水被吸出之后, 在负压计中形成负压, 此压对金属片 1 形成吸力, 导致其变形。其变形的大

小又通过传导油传递给金属片 2, 使金属片 2 也跟着变形。预先设置在金属片上的惠斯登电桥的平衡也被打破。通过控制线路的调整使其惠斯登电桥再次平衡, 这种补偿平衡的形成正是测量包气带负压值的信号。

组装成型的负压传感器实体见图 7。组装成型的负压传感器在正式使用前(图 8)通过真空瓶瓶塞上的两个玻璃管分别与真空泵及盛有无气水中负压传感器的抽气嘴连接。启动真空泵, 无气水从阻气瓷头进入负压传感器, 当负压传感器的连接管、抽气腔已被无气水充满时, 真空瓶连接抽气嘴的玻璃管则向真空瓶滴水, 此时关闭真空泵, 同时用抽气嘴上的特殊装置切断抽气嘴与大气相通。利用数据采集箱测量并调整负压传感器的零位, 其误差范围控制在 $\pm 0.1 \text{ Pa}$ 。做好的负压传感器要在无气水中至少浸泡两周(郑州地下水均衡试验场在使用前均浸泡两个月以上), 检验其封闭性。当达到测量的相对误差小于要求的 5% 时方可投入使用。

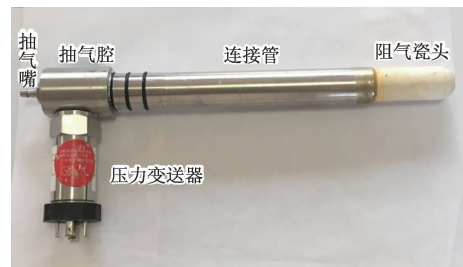


图 7 负压传感器实体

Fig. 7 Suction sensor entity



图 8 负压传感器抽气时的连接

Fig. 8 Connection of suction sensor when pumping

3 测定试验柱中试验介质的 5 TM 水分与温度传感器

用于测定试验介质含水率与温度的传感器为美国 Decagon 公司生产的 5 TM 土壤水分、温度传感器,其外形如图 9 所示。



图 9 5 TM 土壤水分、温度传感器

Fig. 9 5 TM soil moisture and temperature sensors

此传感器集成度很高,它有自身的数据采集系统。它的测量原理是:通过一个频率为 70 MHz 的振荡器测量介质的介电常数以确定介质的体积含水量;通过其探针上的热敏电阻测定介质的温度。

5 TM 土壤水分、温度传感器在使用前,必须在现场选择一个大致均匀的小场地,对其测量数据的一致性和稳定性进行率定(图 10)。测量数据的相对误差要小于 5%。

4 逐级集成的数据采集自动化系统

对于信息采集来讲,郑州地下水均衡试验场的一



图 10 鉴定 5 TM 土壤水分、温度传感器

Fig. 10 Identification of 5 TM soil moisture and temperature sensors

个试验柱至少有 2 个采集位置,多者有 11 个采集位置。一个采集位置上同时设置有负压传感器、含水率、温度传感器及一台自动补水泵,对每一个设备来讲,需要同时布设供给电源与采集信息的线路,可见线路之多。对一个试验柱来讲,需要布设的线路就更多了。如果将同一深度的试验柱需要布设的供给电源线与信号采集线统一集成,其难度也就可想而知。为了克服这一困难,采用了逐级集成的办法。各级集成关系见图 10。第一级按试验柱集成,即一个试验柱的所有负压与自动补水泵的信息集成在一个控制箱(B—1820)中,这样就形成了 25 个控制箱;第二级采用将一个试验区(即同一高度的试验柱)的 5 个控制箱再集成至分区采集箱(YT—BS25);第三级也即最后一级,包括降水、蒸发对比试验区的集成控制箱都一起集成至综合采集箱(YT—S20B)。综合采集箱所采集的数据可以通过电脑或触屏显示。历时采集的数据按一定的格式存储,亦可通过下载设备而获得。

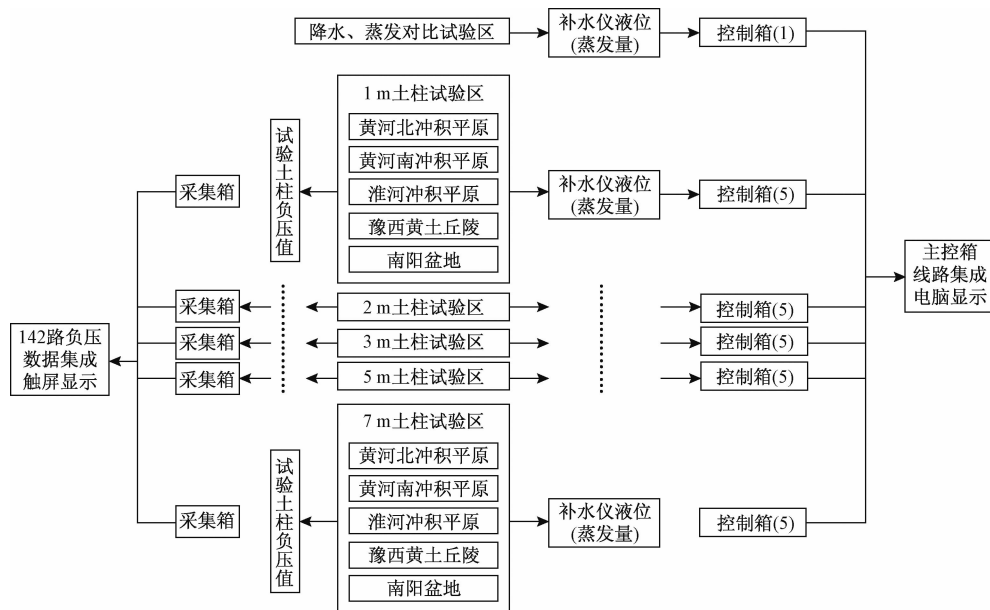


图 11 采集数据的集成

Fig. 11 Integration of collected data

参考文献:

- [1] 李俊亭,王帅,宋高举,等. 郑州地下水均衡试验场的改建工程——总体思路与应用展望[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(4): 58 - 63. [LI J T, WANG S, SONG G J, *et al.* Reconstruction Project of Groundwater Balance Experiment Site of Zhengzhou: general ideas and application prospect [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(4): 58 - 63. (in Chinese)]
- [2] 党学亚,卢娜,顾小凡,等. 柴达木盆地生态植被的地下水阈值[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(3): 1 - 8. [DANG X Y, LU N, GU X F, *et al.* Groundwater threshold of ecological vegetation in Qaidam Basin [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(3): 1 - 8. (in Chinese)]
- [3] 雷晓辉,刘柏君,权锦,等. 地表水与地下水联动关系研究综述[J]. 中国农村水利水电, 2019(5): 1 - 11. [LEI X H, LIU B J, QUAN J, *et al.* Review of the interactive relation between surface water and groundwater[J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(5): 1 - 11. (in Chinese)]
- [4] 张琛,段磊,刘明明,等. 伊犁河支流大西沟河水与地下水转化关系研究[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(3): 18 - 26. [ZHANG C, DUAN L, LIU M M, *et al.* A study of the conversion between the Daxigou river and groundwater[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(3): 18 - 26. (in Chinese)]
- [5] 王思佳,刘鹤,赵文智,等. 干旱、半干旱区地下水可持续性研究评述[J]. 地球科学进展, 2019, 34(2): 210 - 223. [WANG S J, LIU H, Zhao W Z, *et al.* Groundwater sustainability in arid and semi-arid environments: A review [J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(2): 210 - 223. (in Chinese)]
- [6] 李昊旭,邵景力,崔亚莉,等. 不同作物覆盖对农业区地下水入渗补给的影响分析[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(2): 57 - 65. [LI H X, SHAO J L, CUI Y L, *et al.* Effects of different crop covers on vertical groundwater recharge [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(2): 57 - 65. (in Chinese)]
- [7] 魏瑞均. 漳卫河流域平原区地下水资源评价及典型地段地表水与地下水转化关系研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018. [WEI R J. Study on the evaluation of groundwater resources in the plain area of the Weihe River basin and the relationship between surface water and groundwater conversion in typical areas[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018. (in Chinese)]
- [8] 张宇正,张维江. 卫宁灌区迎水桥水源地下水均衡变化研究[J]. 中国农村水利水电, 2019(5): 34 - 37. [ZHANG Y Z, ZHANG W J. A study of groundwater equilibrium variation of Yingshuiqiao water head site in Weining Irrigation District [J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(5): 34 - 37. (in Chinese)]
- [9] 中国地质调查局. 水文地质手册[M]. 2版. 北京: 地质出版社, 2013. [China Geological Survey. Hydrogeology handbook [M]. 2nd ed Beijing: Geological Publishing House, 2013. (in Chinese)]