

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2019.04.08

郑州地下水均衡试验场的改建工程 ——总体思路与应用展望

李俊亭^{1,2}, 王 帅³, 宋高举³, 乔晓英^{1,2}, 王继华⁴

(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. 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; 4. 河南省地质环境监测院, 河南 郑州 450016)

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, 由河南省地质环境监测院具体负责实施。文章详细论述了改建工程的总体思路、各实施环节的具体做法、运行及其应用前景。在改建时充分考虑到试验介质对河南省的代表性; 试验柱要有较好的力学、热学性能; 数据采集要全面自动化; 监测面适当拓宽等。在总体思路下, 设计了由玻璃钢材质构建的试验筒, 选取河南省 5 个典型地貌单元采集的试验介质, 构成了模拟包气带多层地质结构的 1, 2, 3, 5, 7 m 试验柱共计 25 个。围绕试验柱设计了能模拟控制水位埋深的自动补水仪 25 台, 以及为了探测试验柱内水分运移信息设置了负压传感器 140 只、水分传感器 (含温度) 140 只。数据采集采用了逐级集成的方法, 大大简化了线路布置, 据此设计了一台数据采集箱, 可及时获得实验过程的环境信息。在试验场设置了能测定空气温度、空气湿度、气压、风向、风速、降水量、蒸发量的小型 (主杆 3 m) 气象站一座; 在试验场设置了太阳全辐射、太阳净辐射与太阳直射的观测仪各一台。试验场还设置了 0.3 m² 和 1 m² 口径的蒸发量 (含降水量) 对比观测设施一处。要真正解决试验成果的实际应用问题, 应注意开展野外包气带参数的研究。

关键词: 试验介质; 试验柱; 自动补水仪; 蒸发对比试验; 参数变异性

中图分类号: P641.12

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2019)04-0058-06

Reconstruction project of groundwater balance experiment site of Zhengzhou: general ideas and application prospect

LI Juntao^{1,2}, WANG Shuai³, SONG Gaoju³, QIAO Xiaoying^{1,2}, WANG Jihua⁴

(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. No. 2 Institute of Geological & Mineral Resources Survey of Henan, Zhengzhou, Henan 450053, China; 4. Geo-environmental Monitoring Institute of Henan Province, Zhengzhou, Henan 450016, China)

Abstract: The reconstruction project of groundwater balance experiment site of Zhengzhou was hosted by geo-environmental monitoring institute of Henan Province, belongs to one of the national groundwater monitoring projects, which is performed by Institute of China Geo-Environment Monitoring. This paper discusses in detail the general ideas, the specific practices of each implementation link, operation and its application prospects of the reconstruction project. In the reconstruction, the representative of test medium to Henan Province should be fully noticed, the test column should have better mechanical and thermal properties, the data collection

收稿日期: 2019-03-13; 修订日期: 2019-04-20

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

should be fully automated, and the monitoring area should be properly broadened. Under the general idea, a test tube constructed of FRP material was designed, and the test media collected by five typical geomorphic units in Henan Province were selected to construct a total of 25 test columns of 1, 2, 3, 5, 7 meters for simulating multi-layer geological structure of vadose zone. A total of 25 automatic water supplying instrument were designed to simulate and control the depth of water level around the test column, and 140 negative pressure sensors and 140 moisture sensors (including temperature) were set to detect the moisture movement information in the test column. Data collection adopts a step-by-step integration approach that greatly simplifies the cable line, based on this, a data acquisition box is designed to obtain the environmental information of the experimental process in time. In the experiment site, a small (3 m main pole) weather station capable of measuring air temperature, air humidity, air pressure, wind direction, wind speed, precipitation, and evaporation was set up; one set of solar radiation, solar radiation and direct sunlight is installed; a comparative observation facility for evaporation (including precipitation) of 0.3 m² and 1 m² calibres was also set up. Finally, the paper points out that attention should be paid to the study of vadose zone parameters in the field in order to truly solve the practical application of test results.

Keywords: test medium; test column; automatic water supplying instrument; contrasting experiment of evaporation; parameter variability

应用试验柱(试验筒中装入试验介质)研究包气带水分运移机理,在我国已有半个多世纪的历史,据不完全统计,试验柱的累计数量已达数百座以上。这些试验柱大致分为两类:称重式试验柱与非称重式试验柱。由于我国的业务部门以及所研究内容与解决问题的侧重点不同,农田水利部门多使用称重式试验柱;而地质矿产部门多应用非称重式试验柱。河南郑州地下水均衡试验场(始建于1981年)与新疆昌吉地下水均衡试验场(始建于1992年),是地质部门建场时间较早、监测时间较长、且取得了丰硕成果的两个试验场^[1-4]。由于现代科学技术的进步,这两试验场的各种监测设施均显有所落后。为适应新形势的需要,国家地下水监测工程决定对这两试验场进行升级改造^[5]。本文就此详细介绍郑州地下水均衡试验场在升级改造过程中的一些做法。

1 改建工程中的试验柱构建

原郑州地下水均衡试验场,始建于1981年,1983年开始监测,截至2016年已运行33年,曾被列为“六五”国家重点科技攻关项目。改建前的试验场如图1(a)所示。

试验柱是地下水均衡试验场的核心构筑物。原有试验场的试验柱(直径50.46 cm、材质为聚氯乙烯)置于以排气孔为中心的直径8 m、总高11.5 m的半地下式建筑。试验柱有1, 2, 3, 5, 7 m五种长度,组成5组。试验柱中的试验介质,主要取自黄河冲积平原、淮海平原与豫西黄土区。共计25个试验柱,呈环形放射状排



图1 郑州地下水均衡试验场改建前后对比

Fig.1 Overview of Zhengzhou groundwater experiment site before reconstruction and top view of the Zhengzhou groundwater balance experiment site after reconstruction

列布置在以排气通道为中心的地下监测室周围。

从现代科学技术发展水平看,原试验场由于历史原因存在的主要不足是:试验柱介质岩性单一,监测范围较窄,观测手段落后,采集数据未能实现自动化,对解决实际问题尚有差距。于是在改建时充分注意到:(1)试验柱中的介质对于试验结果应用于河南省范围必须有代表性;(2)材质为聚氯乙烯的试验柱对试验的力学、热学性能都欠佳,口径又太小,人难以直接进

入试验柱内做某些必要的操作;(3)必须全面提升数据采集手段;(4)监测范围适当拓宽,例如增加太阳辐射观测、降水与蒸发对比试验观测等,以便提高研究水平。改建后的郑州地下水均衡试验场见图 1(b)。

由于试验土质及结构的选择是构建试验柱的核心问题,决定着试验结果的代表性及其以后在生产中的实际应用。为此在 2016—2017 年间多次邀请河南省内从事水文地质与工程地质的老专家进行论证,将全省的包气带岩性按地貌特征分为黄北冲积平原、黄河南冲积平原、淮河冲积平原南阳盆地、豫西黄土丘陵等五个单元。通过实际考察分析对比,对五个单元 7 m 深度范围内的包气带岩性及其叠置关系进行概化,最终形成了能表征五个单元的岩性柱的典型剖面。用于地下水均衡研究的试验柱,从理论上讲,只需要一个 7 m 的试验柱就够了,通过建模就可计算出 7 m 内任意一种长度所需要的结果。由于原试验场的试验柱为 1、2、3、5、7 m 等五种情形,考虑到传统习惯及试验结果的验证对比,新的试验柱仍采用水位埋深分别为 1、2、3、5、7 m 的五种规格。以实际采样时在现场对各类岩性测得的干容重及颗分结果为依据,在设计好的试验筒中(图 2)装入介质(滤料)以用于模拟试验。试验柱顶面填充 10 cm 的砂砾,是为了防止大降雨状态下产生的泥皮效应^[6]。

试验筒采用玻璃钢材质。筒的内直径为 100 cm,以便于两个人能在其中进行必要的操作。筒壁厚 1 cm,经过力学分析,其强度完全可以满足试验要求。据此,在试验场组成总高为 205 cm 的试验柱 5 个、305 cm 的试验柱 5 个、405 cm 的试验柱 5 个、605 cm 的试验柱 5 个、805 cm 的试验柱 5 个,共计试验柱 25 个。

在构建施工试验柱时,预先依据概化的岩性柱中各层岩性厚度设计的采样点,在试验筒的壁上按设计的开孔直径凿孔,以便装置各类数据采集传感器。传感器的设置至少要保证能测得各种岩性的脱湿与吸湿两种状态下的水分特征曲线,通过数学模拟获取包气带水分运移的若干参数。25 个试验柱共设置了 140 个负压探头及传感器^[7]、140 个含水率传感器(5TM 含温度)。25 个试验柱亦呈环形放射状排列布置在以排气通道为中心 5 个地下监测室中(图 1)。每个地下检测室中置放不同地貌单元同一高度的试验柱,并给予相应的标注。试验柱有以下特点:

(1)具有很好的隔温性能,当气温变化时,由于筒壁传热系数小,较好地减弱了温度效应;

(2)筒的内表面,有特殊工艺构成的“磨砂面”,较

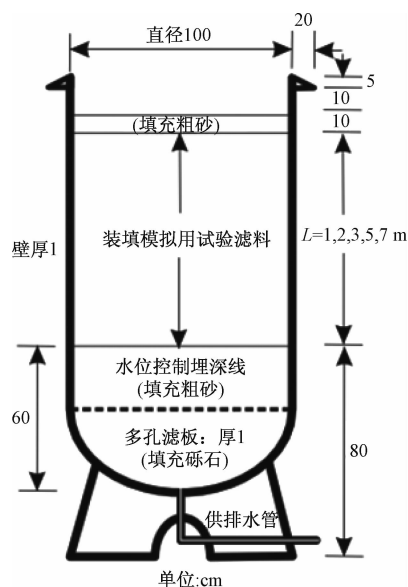


图 2 用于模拟试验的试验筒

Fig. 2 Test tube for simulation

好地克服了水流的边界效应;

(3)筒口留有 15 cm 的空间(图 2),可以较好地保留特、大降水的信息,为研究有压入渗状态下包气带水分运移提供了重要信息;

(4)经实际检验在有效荷载内不会变形。

每个试验柱都应有独立的供水系统,以保证每个试验柱在设置的“水位控制埋深线”(图 2)处的水均衡,这一均衡是由自动供水仪提供保障的^[8-9]。自动供水仪有两个功能:(1)为蒸发提供连续补给水源;(2)接受降水入渗量,通过平衡杯将超出“水位控制埋深线”的降水余量排至计量筒。每一个试验柱配有一套自动供水仪,共计有 25 套自动供水仪。考虑到城市供水到达试验场的水压经多次测量约为 2.2 kg,为了使自动供水仪能在一个安全状态下运行,特在地表面设置了一个供水房(图 1)。供水房内设有有一个释压水罐。

由城市管网提供的水源,经过滤清器滤清与测压(掌握城市管网供水压力)再注入释水罐,释水罐内的压力保持在约 0.8 kg。由供水房引出两根供水管道:城市管网供水管直接连接于试验柱的供排水口;释压水罐的供水管道首先连结每一个试验柱的自动供水仪之后,再与试验柱的供排水口通过三通连接。25 个试验柱的供水网络如图 3 所示。

适于土建工程的需要,1、2、3 m 三个试验柱的排水,经各自串联后直接通到五试柱区排水立管,再连同 5 m 试验柱区的排水一同排至窨井,7 m 试验柱区的直接串联排至窨井。

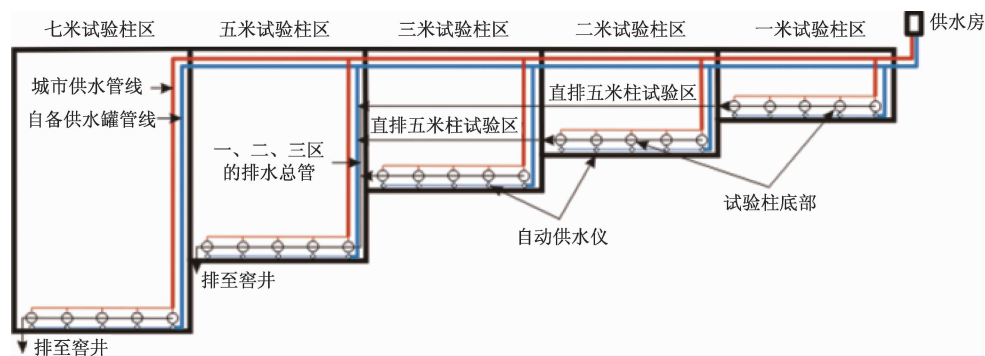


图3 25个试验柱的供排水网络

Fig. 3 Water supply and drainage network of 25 test columns

2 蒸发(含降水)对比试验区

蒸发与降水是制约包气带水分运移的重要因素^[10],其时空变化信息一直由气象部门提供,使用的信息采集工具为直径200 mm的蒸发皿及相应口径尺寸的雨量计。近几年来,使用的蒸发皿已改进为皿口面积3 000 cm²的蒸发筒,命名为E—601型,为了应用气象部门的历史资料,许多业务部门通过试验亦取得了直径为200 mm蒸发皿与E—601蒸发筒的数据换算系数。但这些成果对研究地下水均衡试验的试验场显然是不够的。尤其像郑州地下水均衡试验场周边已是高楼林立,完全失去了应用气象部门信息的可能。为此,必须自行建立蒸发(含降水)对比试验观测。对比观测试验装置有两套,一套是E—601,另一套是自行设计的双圈水面蒸发筒(图4)。

自行设计的双圈水面蒸发筒(图4a),内圈直径为1.128 m,深1 m,筒口面积1 m²,筒的壁厚10 mm,在总体结构上与E—601是一致的。外圈水位低于外筒壁上沿15 cm,当水位低至25 cm时,需要人工补水;当水位高于此值时,余的水(如降水引起)通过外圈溢流口接埋管排至土中。

双圈水面蒸发筒内侧,距上沿15 cm处有一半圆形的开孔连接内环溢流管,控制内环中水面高度(即平衡水面)。内环溢流管连接于供水房内自动补水仪(图4b)。当内环的水位因蒸发而下降时,自动补水仪通过平衡杯向其补水。当降水引起内环中的水位升高时,高于平衡水面的水通过自动补水仪的平衡杯流入雨量计。E—601与双圈水面蒸发筒相距2 m,蒸发、降水的历时动态,均同时被数据采集系统自动采集,据此即可算得两者的蒸发、降水量的折算系数。这对试验柱的建模十分重要,因为它是上边界条件。根据双圈水面蒸发筒与自动补水仪供水筒的直径,可以算得

自动补水仪下降2.5 mm,相当于水面下降0.1 mm。由此可见,双圈水面蒸发筒的精度很高。

为了深入研究蒸发机理,在试验区旁边设置一个太阳三辐射观测仪。太阳三辐射是指太阳全辐射、太阳净辐射与太阳直射。“三辐射”的观测结果,可以用来判断蒸发与太阳中的哪一种辐射相关性最强,以及每天蒸发强度的峰值,以便合理安排采样频率。太阳总辐射测量采用TBQ-2总辐射表,测量光谱的范围为0.3~3 μm。太阳直射测量采用TBB-1净辐射表,用来测量太阳辐射及地面辐射净差值,测量范围为0.27~3 μm短波辐射和3~50 μm地球辐射。TBS—2—2太阳自动跟踪直接辐射表用于测量光谱范围为0.3~3 μm太阳直射辐射量,当太阳直射辐射量超过120 W/m²时,直接测量日照时数。

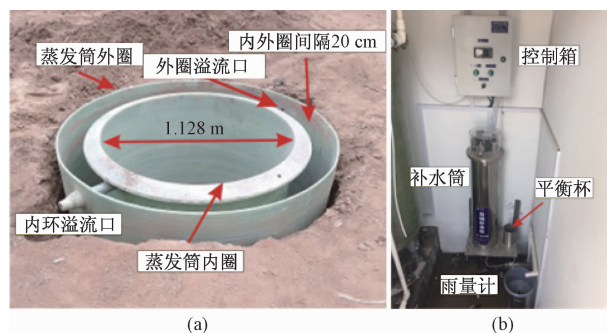


图4 双圈水面蒸发筒

Fig. 4 Double-circle water evaporation tube

3 小型气象观测区

鉴于试验场周边已是高楼林立,因而试验场的试验项目仅受局部小气候的影响,于是选择了3 m高主杆的HOBO野外气象站(图5)。

距地面3 m处的横杆为东西向设置,一端为风向触感器,另一端为风速传感器。温、湿度值的测量传感

器装在距地面 1.5 m 处,其下是数据采集箱,再往下是测量气压值得传感器。太阳能板装在 2 m 处,它提供了气象设施运转的全部动力。数据采集盒,采用 U30-NRC 采集器,有 5 个插口,可扩展到 10 个,内存 512KB。数据存储满时新的存贮将覆盖已有记录,因此必须适时下载,采集间隔最小可自定义为 1 s。

4 试验场的运行目标

对应用于试验场的各个测试设备,在安装前要经过严格的质量检验。比如对负压传感器要进行漏气、零点漂移的检验;对于水分传感器(5TM)进行一致性、稳定性的检验;对自动补水仪进行严格的封闭性及可靠性检验。对试验柱而言,只有当沉降观测值达到毫米级正、负误差时,才可以将测试设备装入试验柱。当负压传感器及水分传感器与试验柱中的介质充分接触后才可以开始正规的数据采集。判别“充分接触”这是一个非常困难的事情,有的实际工作者说需要一年的时间,即要经过一年四季的气候变化,关于这方面尚无经验可以借鉴。如果确信正式的试验工作可以开始,就要设定数据的采集频率,起初将采样间隔设置的小一点,比如 1 min 采 1 次样,随着采样数量的增加,根据数据变化趋势,调整采样频率,去掉一些无效的采样。



图 5 HOBO 野外气象站

Fig. 5 HOBO field meteorological station

郑州地下水均衡试验场岩性概化 7 大类 12 种:细砂、粉细砂(含 2 个子类)、粉质黏土(含 3 个子类)、粉土(含 3 个子类)、黄土状粉土、黄土状粉质黏土夹粉质黏土、黏土^[11]。经过较长时间的测试取样,比如具有了一年以上采样值,可以对 13 种岩性建立水分特征曲线模型。随着时间推移,数据采集量增大,不断完善模型,使得控制数学模型主要待常数离差的(单项数值与平均值之

差)与平均值之比不大于 10%,可认为相应的水分特征曲线模型是成功的,可以建立每一个试验柱的数学模型。

试验柱数学模型成功与否的关键在于上、下边界条件的选取。下边界条件受自动补水仪控制容易确定。选定第二类流量边界或第一类边界(零压力水头)均可,通常以第一类边界条件较好。然而,上边界情况比较复杂,存在有压入渗与无压入渗两种情形。在采样数据记录中,由于可以查到有压入渗的历时动态,于是可取第一类变水头边界。对于无压入渗的情况要复杂一些。这是由于“土面蒸发”与水面蒸发不同所致,若采用水面蒸发试验所得蒸发强度值作为第二类边界条件,其值明显过大,影响模型运转时的数据拟合。合理的处理办法是,固定下边界与各种岩性水分特征曲线模型,用优化的方法反求上边界(土面蒸发强度),从而得到土面蒸发强度与水面蒸发强度的转化系数。严格地讲,应该通过实际试验研究,确定不同试验介质的陆面蒸发强度。在试验柱数学模型的运转中要十分关注不同介质层面间积水的形成规律。

当试验柱的数学模型建立后,可以将试验柱的上边界处置为拟研究的溶质,测试在降水与蒸发条件下溶质运移模型,为解决土壤面状污染预测提供重要信息。

试验场的运转近期目标是,建立试验岩性的水分特征曲线模型与试验柱的水分运移模型,总结多层试验介质下包气带水分运动规律;完成试验柱水分运移模型之后,可以建立试验柱在降水与蒸发条件下的水分、溶质对流—扩散模型。研究在典型气象环境与特定土体结构条件下,年入渗与蒸发的动态过程,以及探讨包气带参数的测定与评估方法。

5 试验场成果的应用展望

采用试验场的试验成果,解决实际问题,是建立地下水均衡试验场的终极目的。存在的问题是区域条件下非饱和带参数的变异性。所谓变异性是指同一介质的物理参数(干容重、颗粒分析的不均匀系数或曲率系数、饱和渗透系数及给水度、水分特征曲线等)是空间函数。同一岩性在不同深度所得物理参数的变异也是时间的函数。从已有文献来看,国际学术界自 20 世纪 70 年代提出包气带物理参数的空间变异性以来,国内仅有在河南省商丘大吴庄比较大地块(长 70 m 宽 40 m)进行过变异性研究,由于其研究目标是土壤,所以取样深度最大只有 40 cm^[12]。其研究结论仍然对于解决大面积,即区域性(千米级的)包气带参数的变异性问题具有一定参考价值。但是,为了使试验场试验成果真正用于

解决实际问题,有必要在野外现场较大尺度下探测包气带参数的变异性。建立采用解析公式表述含水率—负压间的关系,或者采用地质统计的方法^[13-14],类似于在非均质含水层中采用地质统计方法分析渗透系数^[15],以诸多已知点的值推算待求点的值。

据悉,河南省地质环境监测院已列项目在黄河南选择适当地点进行区域性的包气带参数的变异性研究,这在我国也是一个开拓性的工作。目的通过区域上有限的采样,能够标定区域上任一点位的包气带参数值,并借助于区域上的气象资料,可以利用地下水均衡试验场建立的数学模型,计算区域地下水的补给与排泄,为地下水资源评价、地质环境评价及可持续发展的合理开发利用提供了基础依据。同时也为大范围土壤面状污染评价工作奠定基础。

参考文献:

- [1] 周金龙,张建文. 地矿部地下水均衡试验研究现状与展望[J]. 地下水, 1993, 15(3): 125-127. [ZHOU J L, ZHANG J W. Research status and prospect of groundwater balance experiment in Ministry of Geology and Mineral Resources[J]. Groundwater, 1993, 15(3): 125-127. (in Chinese)]
- [2] 新疆农业大学. 新疆平原区大气降水、灌溉水、土壤水与地下水水量转化关系实验研究[M]. 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社, 2002. [Xinjiang Agricultural University. Experimental study on the relationship between atmospheric precipitation, irrigation water, soil water and groundwater conversion in the plain of Xinjiang [M]. Urumqi: Xinjiang Science and Technology Health Press, 2002. (in Chinese)]
- [3] 张德祯,徐世民. 河南地下水均衡监测试验研究[J]. 河南地质, 1994, 12(1): 41-45. [ZHANG D Z, XU S M. The experimental research on groundwater graded monitoring in Hennan province [J]. Henan Geology, 1994, 12(1): 41-45. (in Chinese)]
- [4] 潘登,孙森,豆敬峰,等. 郑州地下水均衡试验场改建探析[J]. 资源信息与工程, 2017, 32(6): 150-151. [PAN D, SUN M, DOU J F, et al. Reconstruction and analysis of groundwater balance experiment site of Zhengzhou [J]. Resource Information And Engineering, 2017, 32(6): 150-151. (in Chinese)]
- [5] 水总[2015] 250号,水利部. 水利部、国土资源部印发《关于国家地下水监测工程初步设计报告的批复》[Z]. 北京: 水利部, 2015. [Water Total [2015] No. 250, MWR. The ministry of water resources and the ministry of land and resources issued the "reply on the preliminary design report of the national groundwater monitoring project" [Z]. Beijing: MWR, 2015. (in Chinese)]
- [6] 戚蓝,于泳. 泥皮对灌注桩承载能力的影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2015, 133(6): 133-138. [QI L, YU Y. An analysis of the effect of slurry skin of the bored piles and improvement measures [J]. China Rural Water And Hydropower, 2015, 133(6): 133-138. (in Chinese)]
- [7] 李俊亭,王文科. 包气带负压传感器: 中国, ZL00635487[P]. 2012-02-26. [LI J T, WANG W K. Vadose suction Sensor: Chinese, ZL00635487 [P]. 2012-02-26. (in Chinese)]
- [8] 谢森传,沈言琍. 马利奥特(Mariotte)瓶装置的改进及应用[J]. 水文地质工程地质, 1985, 12(2): 22-23. [XIE S C, SHEN Y L. Improvement and application of Mariotte bottle device [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1985, 12(2): 22-23. (in Chinese)]
- [9] 申圆圆,李俊亭. 全自动蒸发降水计量装置: 中国, ZL0042751X[P]. 2016-05-18. [SHEN Y Y, LI J T. Automatic evaporative precipitation metering device: Chinese, ZL0042751X[P]. 2016-05-18. (in Chinese)]
- [10] 张蔚榛. 包气带水分运移问题讲座(一)——包气带水分运移基本方程[J]. 水文地质工程地质, 1981, 8(1): 49-53. [ZHANG W Z. Lecture on water transport in vadose zone: Basic equation of water transport in aerated zone [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1981, 8(1): 49-53. (in Chinese)]
- [11] 刘洪战,田源,杨坡. 细颗粒沉积物分布区地下水源热泵抽灌井施工工艺探讨[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(1): 36-40. [LIU H Z, TIAN Y, YANG P. A discussion of the construction technology of pumping and injection wells in the fine particle sediment distribution area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(1): 36-40. (in Chinese)]
- [12] 雷志栋,杨诗秀,谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988: 321-341. [LEI Z D, YANG S X, XIE S C. Soil hydrodynamics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988: 321-341. (in Chinese)]

- Chinese)]
- [9] 邓振平,周小红,何师意,等. 西南岩溶石山地区岩溶地下水示踪试验与分析——以湖南湘西大龙洞为例[J]. 中国岩溶, 2007, 26(2):163 – 169. [DENG Z P, ZHOU X H, HE S Y, *et al.* Analysis and tracing-test to karst groundwater in Southwest China karst rocky mountain area— A case study in Dalongdong, western Hunan [J]. *Carsologica Sinica*, 2007, 26(2):163 – 169. (in Chinese)]
- [10] 王文娟. 湖南大龙洞地下河流域岩溶特征及其碳汇潜力研究[D]. 南宁:广西师范学院, 2013. [WANG W J. The karst features research and potential calculation on carbon sink in the basin of Dalongdong underground in the Hunan province[D]. Nanning: Guangxi Normal University, 2013. (in Chinese)]
- [11] 郭芳,姜光辉,夏青,等. 土地利用影响下的岩溶地下水水化学变化特征[J]. 中国岩溶, 2007, 26(3):212 – 218. [GUO F, JIANG G H, XIA Q, *et al.* Hydro-chemical variation of karst groundwater under the impact of land use in Donghe catchment, Hunan[J]. *Carsologica Sinica*, 2007, 26(3):212 – 218. (in Chinese)]
- [12] 夏青. 湘西峒河流域受人类活动影响的泉水硝酸根空间分布[D]. 桂林:桂林理工大学, 2007. [XIA Q. Spatial distribution of nitrate in spring water affected by human activities in Donghe river basin in western Hunan province [D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2007. (in Chinese)]
- [13] 胡春华,周文斌,夏思奇. 鄱阳湖流域水化学主离子特征及其来源分析[J]. 环境化学, 2011, 30(9):1620 – 1626. [HU C H, ZHOU W B, XIA S Q. Characteristics of major ions and the influence factors in Poyang lake catchment [J]. *Environmental Chemistry*, 2011, 30(9): 1620 – 1626. (in Chinese)]
- [14] GROSBOIS C, NÉGREL P, GRIMAUD D, *et al.* An overview of dissolved and suspended matter fluxes in the loire river basin: Natural and anthropogenic inputs [J]. *Aquatic Geochemistry*, 2001, 7(2):81 – 105.
- [15] 臧红飞,郑秀清,张永波,等. 柳林泉域岩溶水中 SO_4^{2-} 的来源探讨[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(1):9 – 15. [ZANG H F, ZHENG X Q, ZHANG Y B, *et al.* Source of SO_4^{2-} in karst groundwater in the Liulin spring area [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(1):9 – 15. (in Chinese)]
- [16] 吴沿友,邢德科,刘莹. 植物利用碳酸氢根离子的特征分析[J]. 地球与环境, 2011, 39(2):273 – 277. [WU Y Y, XING D K, LIU Y. The characteristics of bicarbonate used by plants [J]. *Earth and Environment*, 2011, 39(2):273 – 277. (in Chinese)]
- [17] 刘再华,袁道先,何师意. 岩溶动力系统水化学动态变化规律分析[J]. 中国岩溶, 1999, 18(2):103 – 108. [LIU Z H, YUAN D X, HE S Y. Analysis on the variation of hydrochemistry in karst dynamic system[J]. *Carsologica Sinica*, 1999, 18(2):103 – 108. (in Chinese)]
- [18] 康志强,袁道先,常勇,等. 岩溶碳汇的主控因子——水循环[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(5):1542 – 1547. [KANG Z Q, YUAN D X, CHANG Y, *et al.* The main controlling factor of karst carbon sequestration: about water cycle [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2011, 41(5):1542 – 1547. (in Chinese)]

编辑:张若琳

(上接第 63 页)

- [13] 侯景儒. 地质统计学的理论与方法[M]. 北京:地质出版社, 1990:345 – 353. [HOU J L. Theory and Method of Geostatistics [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990: 345 – 353. (in chinese)]
- [14] 任敬,范宣梅,赵程,等. 贵州省都匀市滑坡易发性评价研究[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(5):171 – 178. [REN J, FAN X M, ZHAO C, *et al.* Evaluation of the landslide vulnerability in Duyun of Guizhou Province [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(5):171 – 178. (in Chinese)]
- [15] REHFELDT K R, BOGGS J M, GELHAR L W. Field study of dispersion in a heterogeneous aquifer: 3. Geostatistical analysis of hydraulic conductivity [J]. *Water Resources Research*, 1992, 28(12): 3309 – 3324.