

江西禾丰盆地水循环野外科学观测基地建设进展

刘学浩¹, 黄长生^{1,2*}, 刘圣博¹, 易秤云², 肖攀¹, 黎义勇¹

LIU Xuehao¹, HUANG Changsheng^{1,2*}, LIU Shengbo¹, YI Chengyun², XIAO Pan¹, LI Yiyong¹

1. 中国地质调查局武汉地质调查中心/中南地质科技创新中心, 湖北 武汉 430205;

2. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074

1. Wuhan Center, China Geological Survey/Central South China Innovation Centre for Geosciences, Wuhan 430205, Hubei, China

2. China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China

摘要:水循环观测基地是指对区域大气降水、蒸发蒸腾、河川径流、断面流量、地下水补径排等要素开展系统性连续观测,是水
资源调查监测和水资源管理的重要科学依据。中国水循环观测基地经历了3个发展阶段,取得了丰硕成果,但仍存在观测基
地空间布局不合理、部分区域代表性丧失、设备老化落后等问题。为适应新时期地表水地下水一体化水资源调查,在长江流
域选取江西省赣州市禾丰盆地作为典型小流域,建设水循环观测基地。在此背景下,介绍了禾丰盆地水循环野外科学观测基
地建设进展。此外,基于当地地质环境条件构建了禾丰盆地水循环监测网络,并综合使用遥感综合解译、大气降水监测、地表
河流监测、地下水动态监测井、地下水环境分层监测井等技术手段进行定量观测,根据野外监测数据对地表水地下水循环转
换进行了初步分析。

关键词:水循环;水资源监测;监测网络;分层监测;地表水与地下水相互转换

中图分类号: P64; X143 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2021)04-0610-13

Liu X H, Huang C S, Liu S B, Yi C Y, Xiao P, Li Y Y. Construction of field scientific observation base for water cycle of Hefeng Basin, Jiangxi Province. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(4): 610-622

Abstract: The water cycle observation, as an important scientific basis for water resources investigation and water resources management, refers to the systematic and continuous observation of regional atmospheric precipitation, evaporation and transpiration, river runoff, cross-sectional flow, groundwater replenishment and drainage. Water cycle observation bases in China have witnessed three stages' development and achieved fruitful results, but there are some problems such as unreasonable spatial layout of observation bases, loss of representativeness of some regions due to urbanization, and old and backward equipment. To adapt to the integrated surface and groundwater resources survey, the Hefeng Basin in Ganzhou City of Jiangxi Province was chosen as a typical small watershed to build a water cycle observation base. In the context, this paper introduces the construction of Field Scientific Observation Base for water cycle of Hefeng Basin. In addition, based on the hydrogeology condition, a water cycle monitoring network was established in the Hefeng Basin. The remote sensing interpretation, atmospheric precipitation monitoring, surface water monitoring, groundwater dynamic monitoring, groundwater multilevel monitoring and other technical means were used for quantitative observation. Based on the field monitoring data, the groundwater-surface water transformation was preliminarily analyzed.

Key words: water cycle; water monitoring; monitoring networks; multilevel monitoring; groundwater-surface water transformation

收稿日期: 2020-08-10; 修订日期: 2020-11-15

资助项目: 国家重点研发计划《污染场地土壤与地下水采样新技术与新设备》(编号: 2018YFC1800800)、中国地质调查局项目《长江流域水文地质调查工程》(编号: DD20190824)、湖北省自然科学基金《新型土壤入渗系数原位测试方法》(编号: ZRMS2019001907)

作者简介: 刘学浩(1988-), 男, 博士, 助理研究员, 从事地质环境领域设备研发、水文地质调查等工作。E-mail: xuehao8@163.com

* 通信作者: 黄长生(1964-), 男, 博士, 教授级高工, 从事区域水文地质与水资源调查评价等工作。E-mail: 185236157@qq.com

中国共产党第十九次全国代表大会要求树立与践行绿水青山就是金山银山的理念,推进五位一体可持续发展,明确要求“要坚持以水定城、以水定地、以水定人、以水定产,把水资源作为最大的刚性约束,合理规划人口、城市和产业发展”。水作为山水林田湖草生命体中的活跃因子,兼具资源、环境、生态和社会属性^[1],是自然资源资产管理的重要内容,是国土空间规划的核心决策依据,是生态系统修复的主要对象。

水循环监测指针对水资源数量、质量及动态变化,特别是水循环机理进行系统监测^[2],对区域大气降水、蒸发蒸腾、河川径流、断面流量、地下水补径排等要素连续观测^[3-5]。

国内水循环观测基地建设分 3 个阶段展开(图 1),早期以地下水均衡试验场为主^[6]。

地下水均衡场是研究地下水动态规律的试验场地,是研究地下水运移规律和三水转化的基本途径和重要手段^[7-9]。掌握地下水动态规律,获取给水度、降雨入渗补给系数、灌溉回归系数、潜水蒸发系统等水文地质参数,评价地下水资源量^[10-11]。

第一阶段,1956 年原地质矿产部开始建设地下水均衡试验场,在全国建成 29 个,其中一直观测的有 22 个。1985 年召开“西北、内蒙六省地下水均衡

试验场(站)设计方案技术研讨会”,详细讨论了国内试验场建设方案^[12],西北各省积极开展地下水均衡试验场建设^[13-14]。

第二阶段,1993 年仍在运行的水均衡试验场有 18 个^[14]。其中北方分布 17 个,南方仅 1 个,为广西桂林丫吉岩溶水均衡试验场。主要基于地下水动态均衡法^[15]、地中渗透计^[16]、零通量面法、剖面水量差法^[17]、同位素示踪法^[18-20]等手段研究地下水形成、四水转化,获取水均衡参数。

第三阶段,从地下水均衡扩展至地表水与地下水一体化的水循环定量观测评价。甘肃黑河流域^[11]、山西大同盆地^[18,21]、广西桂林丫吉、新疆昌吉^[22-23]等持续运行的基地取得了较系统的丰硕成果。2018 年依托国家地下水监测工程扩建河北秦皇岛地下水与海平面综合监测基地、河南郑州地下水均衡试验场^[16,24-25];2019 年依托“水文地质与水资源计划”按流域新建一批水循环观测基地等。

地下水均衡试验场取得了较好的研究成果,应用于区域地下水资源评价、指导农业节水灌溉、低产土壤试验改良、服务城市、厂矿区环境保护等。如 1988 年建成的新疆昌吉地下水均衡试验场,建立了水面蒸发量、降雨入渗补给量、潜水蒸发量、作物蒸腾量等计算公式^[26-27],揭示包气带-地下水系统

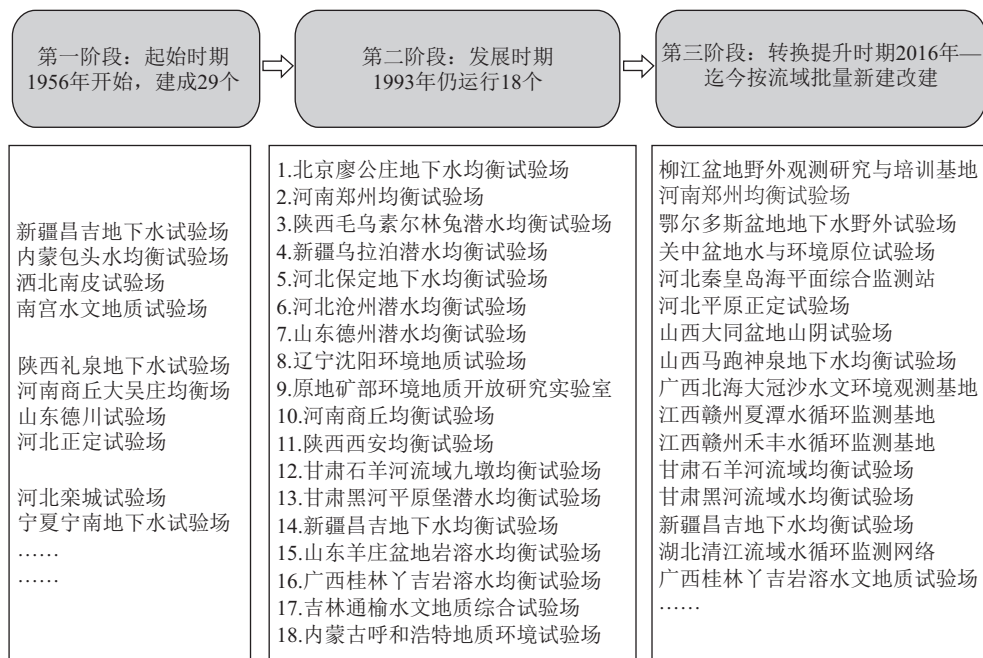


图 1 中国水循环基地/水均衡试验场发展情况

Fig. 1 The development of water cycle base/water balance test site in China

水分转化量的均衡临界深度,预测土层剖面水分盐分运移动态,通过流域水资源合理配置来调控地下水埋深^[28]。1984年建成的河南郑州地下水均衡试验场,观测水均衡要素,研究降水入渗速率、潜水蒸发规律及极限深度,基于35套地中渗透计长时间观测数据,建立了降水入渗补给函数^[16]。

但早期建设的水循环观测基地仍存在诸多问题。首先,观测基地空间布局不合理,南方基地严重偏少;其次,部分早期建设的观测基地在城市化进程中被建筑物等包围,失去缓冲区,严重影响观测基地区域代表性;其次,较多基地运行困难,设备老化,技术手段落后,观测方法自动化程度低^[14];再者,理念及功能需与时俱进,地表水地下水资源一体化,关注生态环境,支撑国土空间生态保护修复与区域可持续发展^[29]。为适应新时期地表水地下水一体化水资源调查,转变理念与功能,2018年以来正处于按流域批量开展水循环观测基地改建新建的历史阶段。

为探索地表水与地下水一体化的水资源调查监测评价,支撑服务水资源配置与确权登记,中国地质调查局部署新建了一批水循环野外科学观测研究基地^[7-8]。在此背景下,在长江流域新建水循环野外科学观测基地,探索流域尺度水资源调查监测技术方法体系,服务鄱阳湖水系重点地区水平衡分析、重大水旱灾害防范与区域可持续发展^[9]。

依托长江流域水文地质调查工程,本文介绍了江西禾丰盆地水循环野外科学观测基地建设进展,研究内容侧重小流域水循环监测网络构建,以及基于野外监测数据的地表水地下水循环转换初步分析。

1 小流域水循环野外科学观测基地

鉴于此,为探索新时期地表水地下水一体化水资源调查监测评价技术方法,提高长江流域水循环定量观测水平,在鄱阳湖水系选取一处典型小流域开展水循环野外科学观测研究。

1.1 水循环基地建设技术路线

水循环基地建设主要内容通过水循环监测网络构建、水循环机理研究、水循环技术方法体系探索,进而支撑区域水资源一体化管理与可持续发展。通过资料收集、野外水文地质调查、专题研究、综合分析等手段展开研究^[30-31],技术路线见图2。

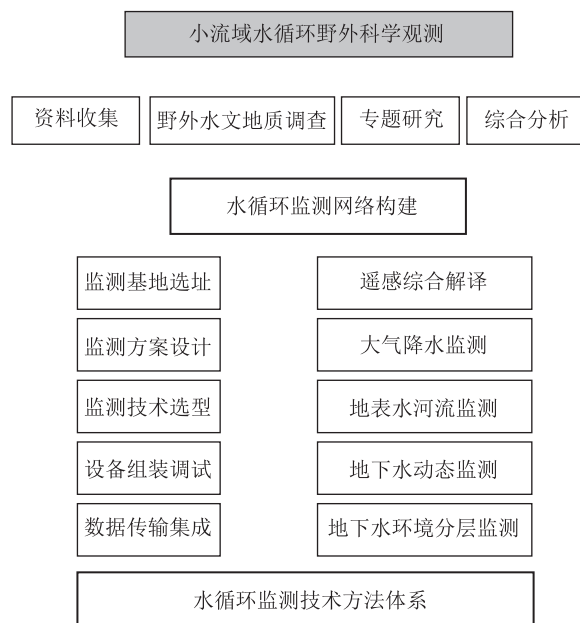


图2 技术路线图

Fig. 2 The technology roadmap

1.2 水循环基地选址

水循环基地选址考虑因素包括:①流域形态清晰完整的产流盆地,有明确的地表地下分水岭及边界,宜三面环山,流域内大气降雨产流,通过地表河流唯一出口流出;②在长江流域具有代表性,包括山区-平原-河流阶地等地貌类型。流域内宜发育一条主干河流,流域源头山区自然植被丰富多样、河流阶地级次分支汇水丰富、存在与河流水力联系的重要湖泊水库、流域下游人类活动明显;③流域小而监测要素全,面积宜在300 km²以内,覆盖多圈层交互带水循环要素;④水文地质条件清晰,前期调查工作基础全面。

1.3 小流域地质环境条件

基于水循环野外科学观测基地选址原则,综合考虑选择鄱阳湖水系的江西省赣州市禾丰盆地。与水循环相关的地质环境介绍如下。

1.3.1 自然地理

禾丰盆地由赣州市于都县禾丰镇下辖,地理坐标为东经115°26'03"~115°33'00",北纬25°43'05"~25°52'47"。

盆地四周高山环围,为典型山间盆地,流域边界清晰(图3)。地势东高西低,盆地内水系发育,干流禾丰河,其中上游产流区自然植被丰富,下游城镇人为活动明显,地表水由北西向西唯一出口流

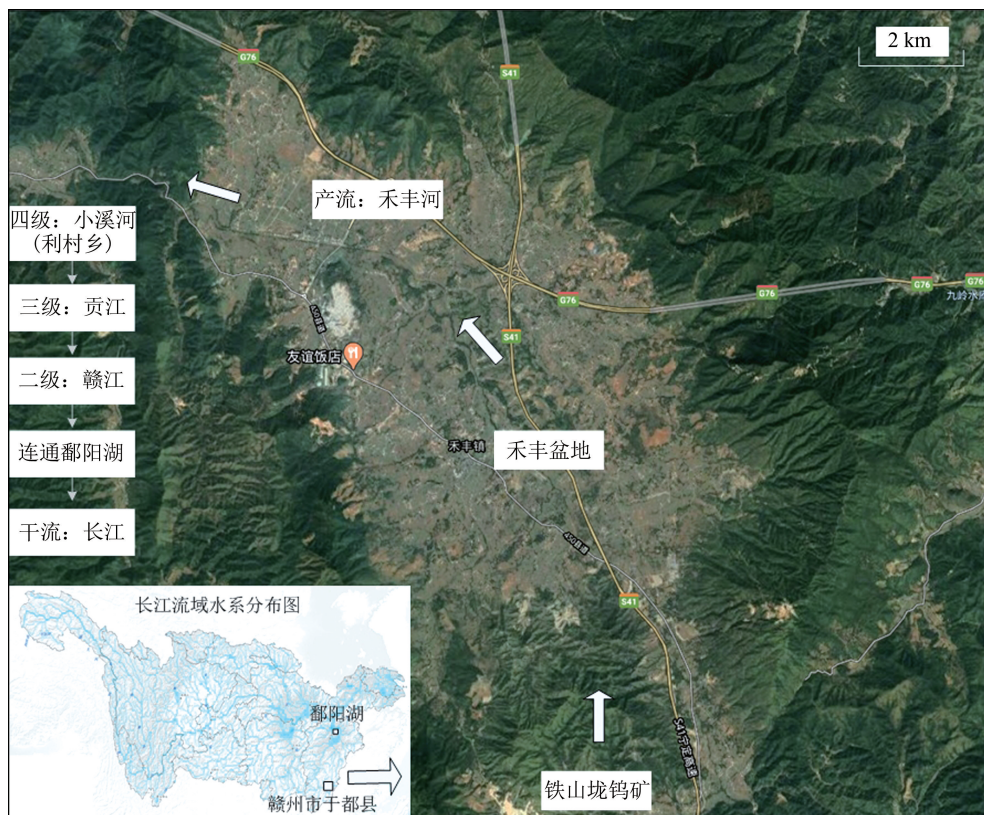


图 3 江西赣州禾丰盆地地理位置图

Fig. 3 Location of the Hefeng catchment in Ganzhou of Jiangxi Province

出。流域面积 129 km^2 , 大气降雨、蒸散发、地表径流、泉点排泄、地下水类型(孔隙水、裂隙水、岩溶水)等水循环要素齐全, 地质条件较清晰。

1.3.2 地形地貌

禾丰盆地为北西西向呈椭圆形展开的向斜盆地, 中间平坦、四面环山, 地势由东南向西北倾斜, 上游东南邻铁山垅钨矿, 下游西接利村乡小溪河。最高点锡牛嶂海拔 813.8 m , 最低处麻村水阁口河床海拔 160 m 。地貌类型包括盆地四周的侵蚀构造低山地貌、盆地中部的构造剥蚀丘陵地貌, 以及盆地南西侧的岩溶地貌、分布于山前坡麓及河流两岸的侵蚀堆积地貌。

1.3.3 水文气象

禾丰盆地属亚热带季风气候, 温暖湿润, 四季分明, 年平均气温 18.7°C 。雨量充沛, 多年平均降雨量 1562.3 mm , 平均水面蒸发量 1629.5 mm 。降雨量分配不均, 丰水期 4—6 月份降雨量达全年 46% 以上, 枯水期降水量仅占 10%。

盆地内光照充足, 冷暖变化显著, 适合植被生

长, 多年平均年蒸发量为 1163.8 mm , 多年平均干旱指数(蒸发量与降水量之比)为 0.76。因植被茂盛始称“木丰”、建村开发五谷丰登, 后人改称“禾丰镇”。农作物主要有水稻、脐橙、大豆、薯类等, 近年精准扶贫大力发展蔬菜大棚等现代农业种植技术。

河流水系方面, 盆地内发育的禾丰河属赣江水系贡江小溪河的支流, 河流级次拓扑关系为: 长江—赣江—贡江—小溪河—禾丰河。禾丰河在长江流域颇具代表性, 由产流盆地汇水而成的次级河流, 中上游接受禾丰盆地低山丘陵区降雨补给, 汇流成河。禾丰河主河长 34.3 km , 平均流量 $6.01 \text{ m}^3/\text{s}$, 由东向西流经禾丰镇流向利村乡, 河道蜿蜒曲折, 多呈 V 形, 滩多水浅。

水利设施较少, 盆地内园岭村建有小(I)型“八三一”水库。降雨不均旱情频发, 禾丰镇居民用水及农业用水受到影响。2000 年建地下水源镇自来水厂, 日供水 500 t 。2018 年实施以临近村镇铁山垅水厂为调水水源的自来水饮水工程, 保障禾丰镇 2.8 万人口供水需求。截止 2020 年仍有 4 个自然村庄

未通自来水,中国地质调查局在该处开展脱贫攻坚地下水源地饮水安全工作。

水质污染源方面,人为活动主要为矿山开发和农业种植,化工污染较少。区内主要工矿企业有东方红水泥有限公司、铁山垅钨矿、东光页岩矿等。2014 年东光页岩矿露天开采矿区面积 0.12 km^2 。弃土石及尾矿乱堆放,造成严重水土流失隐患,污染山下农田、溪水,威胁水库安全。

1.3.4 地质条件

禾丰盆地地质构造行迹有向斜、褶皱和断裂。禾丰向斜轴向北西—南东,展布宽 9 km , 延长 19 km 。震旦系、寒武系变凝灰质砂岩、变石英砂岩地层构成向斜基底,向斜两翼由泥盆系—石炭系灰岩夹粉砂岩地层构成。岩层走向北西,相向倾斜,倾角一般为 $35^\circ \sim 50^\circ$ 。向斜北东翼地层较完整,由老到新分别为泥盆系云山组、中棚组、三门滩组,石炭系梓山组,第四系中更新统联圩组、上更新统赣江组、全新统^[30]。向斜南东翼受断裂切割地层支离破碎。主要发育北北西向断裂(二十余条),另外还发育北西向断裂 6 条、北东向断裂 9 条、北东东向断裂 6 条。岩浆岩出露于盆地南部,为燕山早期侵入,见灰白中粗粒黑云母花岗岩。

地下水类型包括松散岩类孔隙水、基岩裂隙水和岩溶水。据钻孔揭露,第四系含水层厚度 $8.4 \sim 9.9 \text{ m}$, 地下水位年变幅 $0.52 \sim 3.90 \text{ m}$, 单井涌水量 $120 \sim 170 \text{ m}^3/\text{d}$, 水量中等。岩溶水赋存于石炭系和二叠系灰岩溶洞及溶蚀裂隙中,含水层厚度 $8.2 \sim 94.4 \text{ m}$, 受大气降水补给较明显,水流方向由盆地边缘向中心排泄,地下水水位年变幅约 1.83 m 。1992 年禾丰盆地岩溶水资源初步勘察报告表明,岩溶水天然补给量 $37000 \text{ m}^3/\text{d}$, 岩溶水资源可开采量为 $28200 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

1.4 水循环基地方案设计

小流域水循环监测网络构建是基地建设的核心内容之一。水循环监测网络重点针对大气降水、蒸散发水、地表水、地下水开展定量监测。禾丰盆地水循环野外科学观测基地设计方案主体包括气象监测、地表河流监测、地下水监测,而对蒸散发水、土壤水、生态水等要素待有条件开展。

气象监测主要对大气降水量实时监测。采用 TP-120 型翻斗式降雨量传感器远程观测,降雨量分辨率 0.2 mm (6.28 mL),适用于降水强度小于 4 mm/min 。观测基地结合地形条件部署降雨量观

测站点,并收集临近气象站点历史监测数据。

地表河流监测对流域内主干河流的地表水位与断面流量实时监测。采用雷达流速仪 DX-LLX、非接触式雷达水位计 DX-WLX,断面流速测量精度 $\pm 0.01 \text{ m/s}$, 水位测量精度 $\pm 3 \text{ mm}$ 。基于多普勒效应原理,根据水面电磁波频率偏移得到水面流速值,结合河道地形换算为断面流量值。其次,遥测终端机 RTU 将监测信息实时采集,并通过 GPRS 无线网络远程自动传输至终端信息中心。河流水下断面地形测量采用美国智能多频走航式声学多普勒流速剖面仪 (SonTek River Surveyor M9/S5), 并对河流监测值定期标定。观测基地在禾丰河干流河道的流域边界位置部署。

地下水监测为观测基地工作重点。技术手段包括针对浅层第四系松散孔隙水的地下水动态监测井、针对深层基岩裂隙水和岩溶水的地下水探采结合井,以及地下水水质多参数自动化监测站、地下水环境分层监测井。观测基地结合禾丰盆地已有探采结合井及机井控制 50 m 以深的地下水含水层,重点针对水循环转换强烈的浅层地下水部署专用地下水动态监测井。其中,水质多参数自动化监测地下水位、水温、pH、DO,采用太阳能供电系统野外供电,通过模数转换器和数据采集卡进行监测数据实时采集,通过 GPRS 无线通讯网络远程传输至终端信息管理系统。此外,对地表水地下水入渗转化、不同深度地下水水质变化情况,部署地下水环境 U 型管分层监测井。观测基地结合监测目的、水文地质条件及要素类型综合部署。

水循环监测网络信息管理系统,基于 SOA 软件构架,实现硬件软件互联。系统由多处野外监测终端、GPRS/4G 等通信网络、监测系统接收移动端(手机、电脑)、监测系统终端数据中心(工作站)等构成,集原位监测感知、远程多源信息汇集传输、移动端实时快速查询、终端数据中心分析管理为一体。

2 禾丰盆地水循环监测网络构建

如前所述,禾丰盆地水循环监测网络主体由遥感综合监测、地质剖面控制、大气降水监测、地表水河流监测、地下水监测、地下水环境分层监测、监测网络信息管理系统构成。

2.1 遥感综合监测

图 4 为遥感解译禾丰盆地地表水系分布图。三

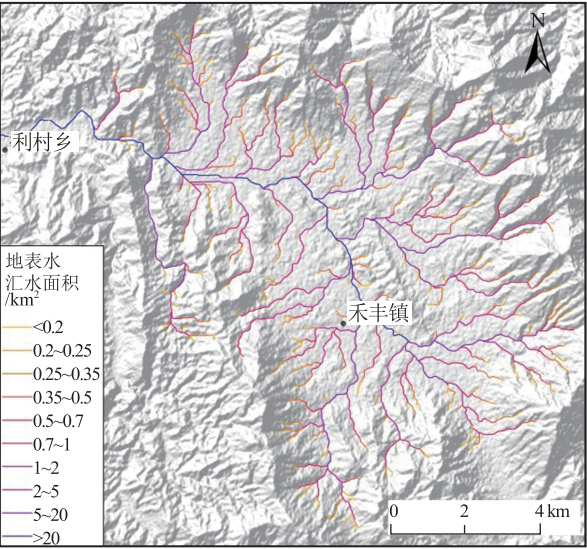


图 4 禾丰盆地水系分布遥感解译图

Fig. 4 Remote sensing image interpretation of drainage distribution in the Hefeng catchment

维地形清晰揭示禾丰盆地四面环山的地表分水岭,通过汇水面积及河道宽度自动识别划分河流级次。蓝色河道显示盆地水系的干流禾丰河,自东南丘陵山区产流汇集成河,向北西西方向流出盆地。

2.2 地质剖面控制

观测基地监测网络沿主剖面重点部署(图 5)。针对水循环转换观测目的,结合禾丰盆地水文地质条件、人类活动影响等开展。水循环监测网络 3 条主剖面具体阐述如下。

①剖面 I 沿北北东向设置,垂直禾丰河下游,横切禾丰向斜,地势较低。地表水由两翼汇入向斜核部,断层发育,JC03 附近见泉水出露,存在以岩溶泉为排泄通道的地表水与地下水相互作用。此外,该剖面穿过农业规模化种植区,水资源开采利用强度较大;②剖面 II 沿北北东向与剖面 I 平行设置,垂直禾丰河中游,横切禾丰向斜两翼,为人口相对集



图 5 禾丰盆地水循环监测网络工作部署图

Fig. 5 Deployment of water cycle monitoring system at the Hefeng catchment

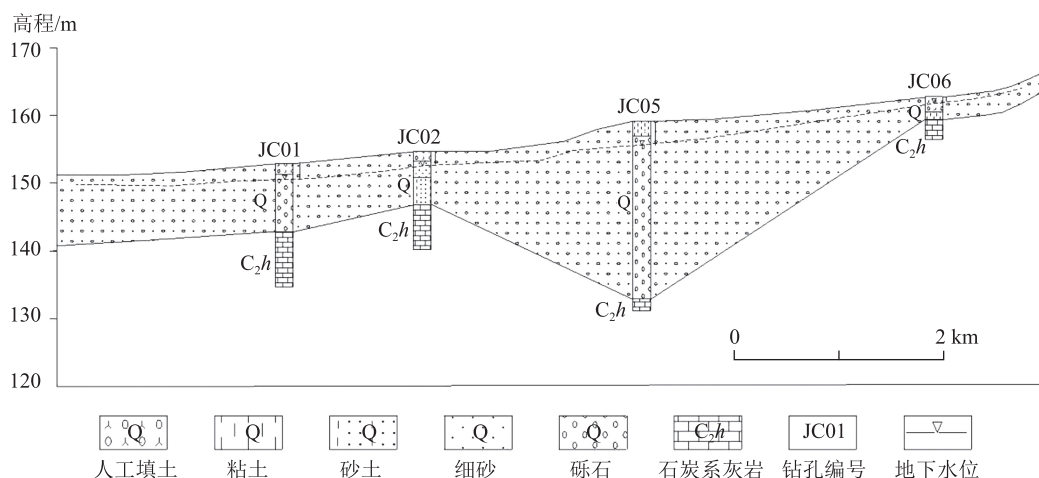


图6 沿河流地下水监测井地质剖面图(剖面Ⅲ)

Fig. 6 Geological profile of groundwater monitoring wells along the Hefeng river (line III)

中分布区。侧重控制盆地内不同水文地质单元,剖面西北侧为地势低洼、水系发育的第四系灰岩分布区,东南侧为地势稍高、富水性贫乏的二叠系粉砂岩、硅质岩分布区;③剖面Ⅲ沿禾丰河北西西向设置,位于禾丰向斜轴部(图6)。地表水与地下水转换强烈,水流在地形高程差作用下往盆地中心地势低洼处汇流,然后整体沿禾丰向斜轴部向北西西流出,汇入上级支流利村乡小溪河。

2.3 大气降水监测

降雨量监测站基于翻斗式原理,由承水口、过滤网、干式舌簧管、翻斗等组成。传感器计量脉冲信号,实现降雨量遥测目的。同时,在地下水监测井旁布置,共用太阳能电源系统、数据采集系统、数据远程传输系统,协同自动采集地下水动态信息。

观测基地沿禾丰河部署3处,垂直河道沿禾丰向斜东北翼部署2处(图7)。远程自动化监测参数包括降雨量、地下水位、水温、pH、DO。

2.4 地表水河流监测

结合遥感解译的水系分布,禾丰盆地地表水系通过西北角唯一出口流出。禾丰河年平均流量 $6.01 \text{ m}^3/\text{s}$,观测基地在盆地出口处沿450县道设置1处自动化地表河流监测站(图8)。在线连续监测该处河流水位及断面流量信息,数据频率每小时采集一次。

观测基地基于该河流监测站点反映流域地表径流量,揭示流域地表水资源动态变化情况。



图7 禾丰盆地大气降水监测站

Fig. 7 Rainfall monitoring station in the Hefeng catchment

2.5 地下水动态监测

结合禾丰盆地探采结合井及已有机井控制深部含水层,设置5处地下水水质多参数自动监测站点及1眼地下水环境分层监测井控制流域水质。观



图 8 禾丰盆地地表河流监测站

Fig. 8 River hydrological monitoring station in the Hefeng catchment

测基地部署多眼地下水监测井,基本情况如表 1 所示。

沿禾丰向斜轴部部署的剖面Ⅲ,自西向东由地下水监测井 JC01、JC02、JC05、JC06 构成,典型钻孔岩心柱状图如图 9 所示。此外,垂直禾丰河部署的剖面 I 由钻孔 JC07、JC02、ZK21、JC03、ZK09、JC04 构成,控制由边缘汇流至盆地中部的地下水流场。

2.6 地下水环境分层监测

地下水环境分层监测井指安装在一个钻孔中获取多个不同垂向地层深度或多个含水层地下水信息的监测技术^[33],概念示意如图 10 所示。地下水分层监测技术通过地层封隔、地下水分层采样、一孔多层集成监测,可有效揭示多个含水层系统的三维结构,精确刻画地下水垂向的物质运移与对流扩散^[34]。

观测基地探索示范了自主研发的地下水环境 U 型管分层监测井^[34]。该新技术基于 U 型管原理,针对地下水分层采样效率低、地下水样品代表存在偏差、分层监测井下技术集成空间受限三大关键技术问题研发^[35-36]。适用于多个含水层的水文地质调查,污染场地土壤与地下水三维分层精细监测,以及地层垂向不同深度水循环转换研究等。

表 1 禾丰盆地地下水监测井基本情况

Table 1 Groundwater monitoring wells in the Hefeng catchment

钻孔编号	孔深 /m	地下水埋深 /m	单位涌水量 /($\text{m}^3 \cdot \text{d} \cdot \text{m}^{-1}$)	渗透系数 K /($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)
JC01	18.2	2.88	35.35	2.77
JC02	14.5	1.96	4.69	0.46
JC03	17.7	2.03	/	/
JC04	39.0	28.64	/	/
JC05	28.0	3.41	1.22	0.41
JC06	6.3	1.21	/	/
JC07	32.0	/	/	/
ZK09	82.7	0.90	68.64	1.34
ZK21	101.6	2.80	82.35	1.26
ZK22	80.50	5.34	0.079	0.0011

地下水环境 U 型管分层监测井现场工作情况如图 11 所示。场地基本水文地质条件为:地下水位 2.03 m,地层岩性第四系砂砾石层(Qh)埋深 4.0~5.1 m,灰岩强风化带分布于 5.1~6.6 m,以下至孔底均为石炭系黄龙组(C_2h)灰岩,岩溶较发育,富水性较好。根据地层条件设计地下水环境一孔三层监测,具体为:①埋深 3~4 m 区段监测第四系松散孔隙水;②埋深 5~6 m 区段控制第四系与灰岩强风化带水质交互界面;③埋深 15~16 m 区段监测岩溶水,终孔孔深 17.7 m。

综上所述,针对水循环要素及多种技术手段,观测基地初步构建了禾丰盆地水循环监测网络。水循环监测网络构成,截至目前包括 5 处大气降水监测点、1 处地表河流监测站点、6 眼地下水探采结合井(深层)、6 眼地下水动态监测井(浅层)、5 处地下水水质多参数自动化监测站(水位、水温、pH、DO)、1 眼地下水环境 U 型管分层监测井(一孔三层分层监测)。此外,还通过水位统测揭示流域地下水流场及地下水动态变化,通过物探解译联合钻孔信息精细表征地层特征剖面 I、II。

3 禾丰盆地水循环转换初步分析

基于上述构建水循环监测网络的原位连续监测及数据综合分析,开展了初步的水循环转换分析研究。

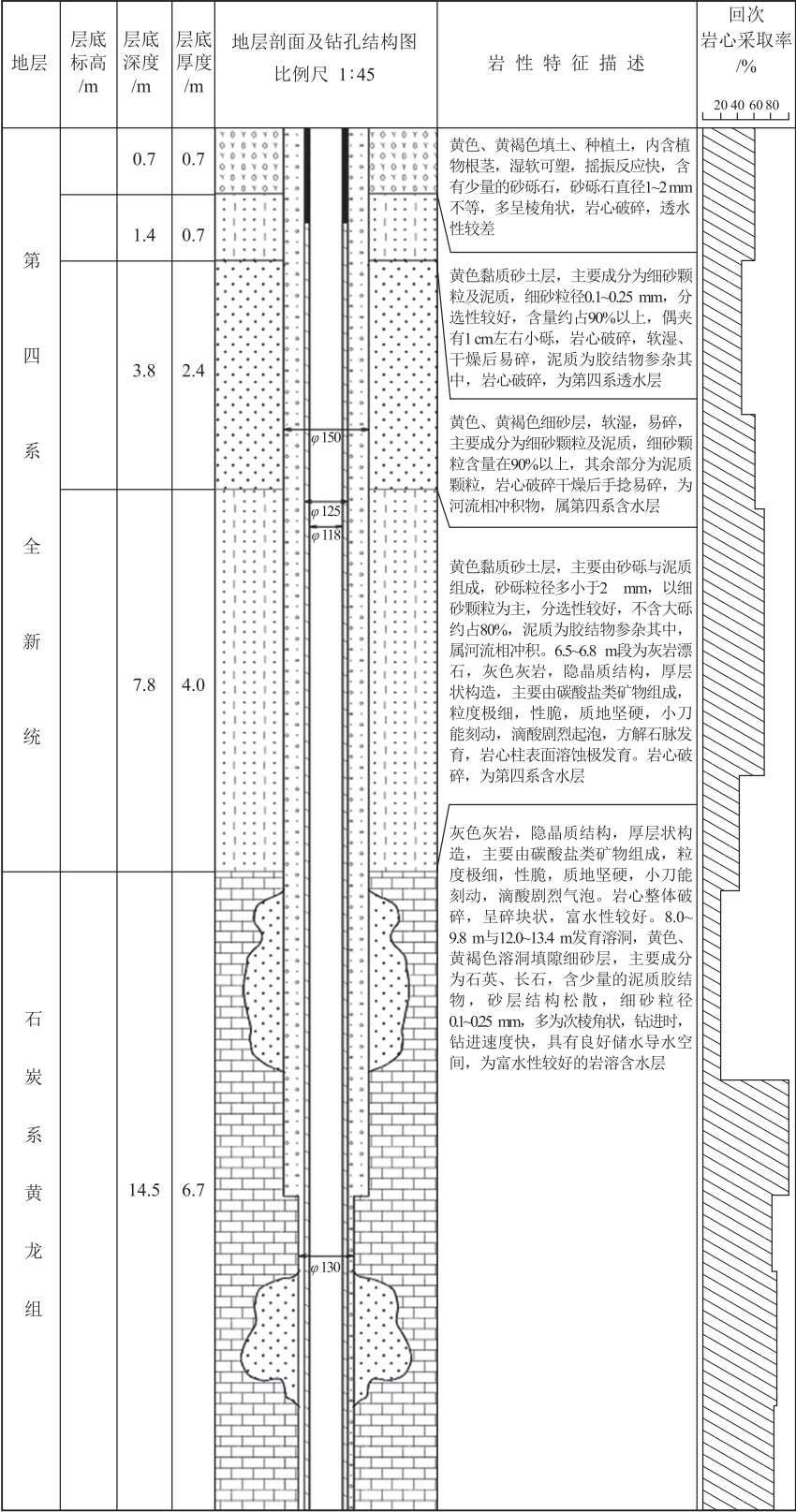


图9 地下水监测井水文地质柱状图(JC02)

Fig. 9 Geological column of the groundwater monitoring well JC02

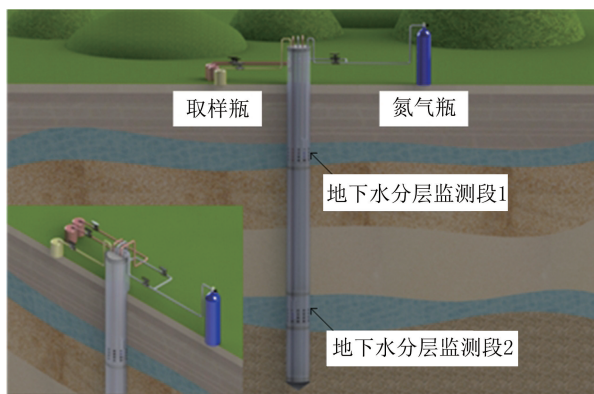


图 10 地下水环境 U 型管分层监测井示意图

Fig. 10 The diagram of the U-tube groundwater multilevel monitoring well

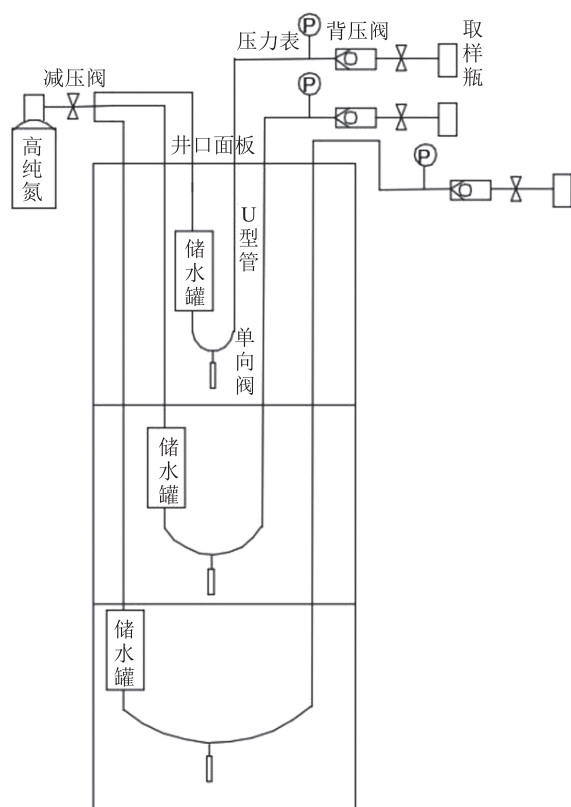


图 11 地下水环境 U 型管分层监测井现场工作图

Fig. 11 Fieldwork of the U-tube groundwater multilevel monitoring well

地表水监测指标主要包括河流水位和断面流量。禾丰河断面径流量变化特征如图 12 所示。禾丰河在冬季枯水期径流滞缓,大部分时间小于 $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 。2020 年 1—3 月禾丰盆地的径流量呈增加态

势。然而,相对于年均 $6.01 \text{ m}^3/\text{s}$ 的径流量,3 月平均径流量仅为 $2.23 \text{ m}^3/\text{s}$ 。禾丰盆地出口处河流水位变化如图 13 所示。禾丰河地表水位在 $1.4 \sim 1.75 \text{ m}$ 区间浮动,受降雨影响明显,分别在 2 月 15 日和 3 月 13 日出现河流水位短期显著上涨。

不仅地表河流水位,地下水位动态变化亦受降雨控制明显。具体体现在 1 月份 JC01 JC05 监测井地下水水位在低位,此后受降雨强度增强的作用,地下水位呈现逐步增加的态势,在 3 月份达到相对高位(图 13)。地下水的波动幅度在 1 m 以内。

禾丰盆地地表水与地下水循环转换明显。首先,体现在大气降雨驱动下河流水位与地下水位动态变化趋势保持一致。枯水期盆地水循环以地下水补给地表水为主要模式,受间歇性大气降水影响。图 13 显示了河流水位与临近地下水监测井水位的对比关系。受 2 月 15 日强降水作用,河流水位达到相对高点,单日上涨 0.2 m ;地下水位稍后同步达到高点,2 眼监测井地下水位均上涨 0.2 m 左右。河流水位与地下水位涨落趋势及幅度、曲线形态变化等基本一致。

其次,禾丰盆地地表水与地下水循环转换还体现在水位相关系数分析。通过皮尔森相关系数分析,地下水动态监测井 JC01 与河流水位时间序列对比的相关系数为 0.57 ,显示出较强的相关性(图 13)。偏盆地中游的地下水动态监测井 JC05 与河流水位水时间序列对比的相关系数为 0.72 。

从水循环转换量及转换方向看,大气降雨期间,地表水与地下水整体接受补给,水位涨幅及同步响应时间明显。枯水期非降雨期间,受地表河流水位低于地下水位的高程差控制,水循环转换方向为地表水接受地下水补给。而且,1—3 月地下水对地表水的补给转换量呈现总体略微加强的趋势。具体来看,3 月 13 日的降雨导致地表径流快速汇入禾丰河,地表水水位突然抬升,导致地下水对地表水的补给作用迅速减弱。在降雨退水后,地下水对地表水的补给作用又恢复到较高水平。同样的趋势也体现在 2 月 15 号的降雨事件中,地下水对地表水的循环转换量先降后升。通过地表河流水位与地下水动态监测井 JC01 地下水位差值的动态变化曲线(图 14),揭示了水储量受蒸散发作用逐渐减少的趋势,也呈现出受大气降水影响下同步快速增加的客观规律。

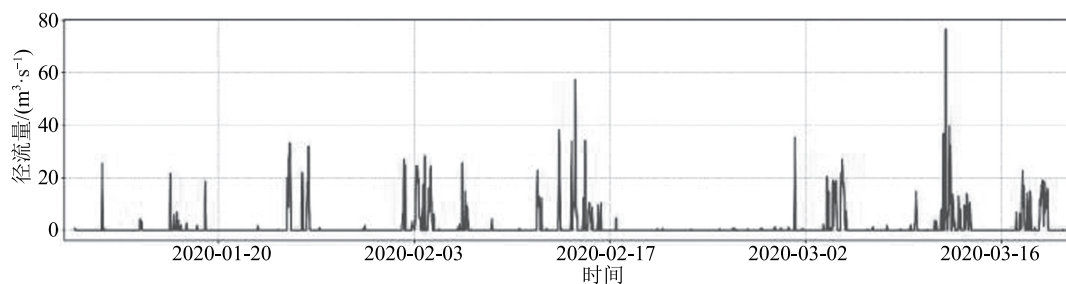


图 12 禾丰河断面流量变化特征

Fig. 12 The flow volume variation of the Hefeng River

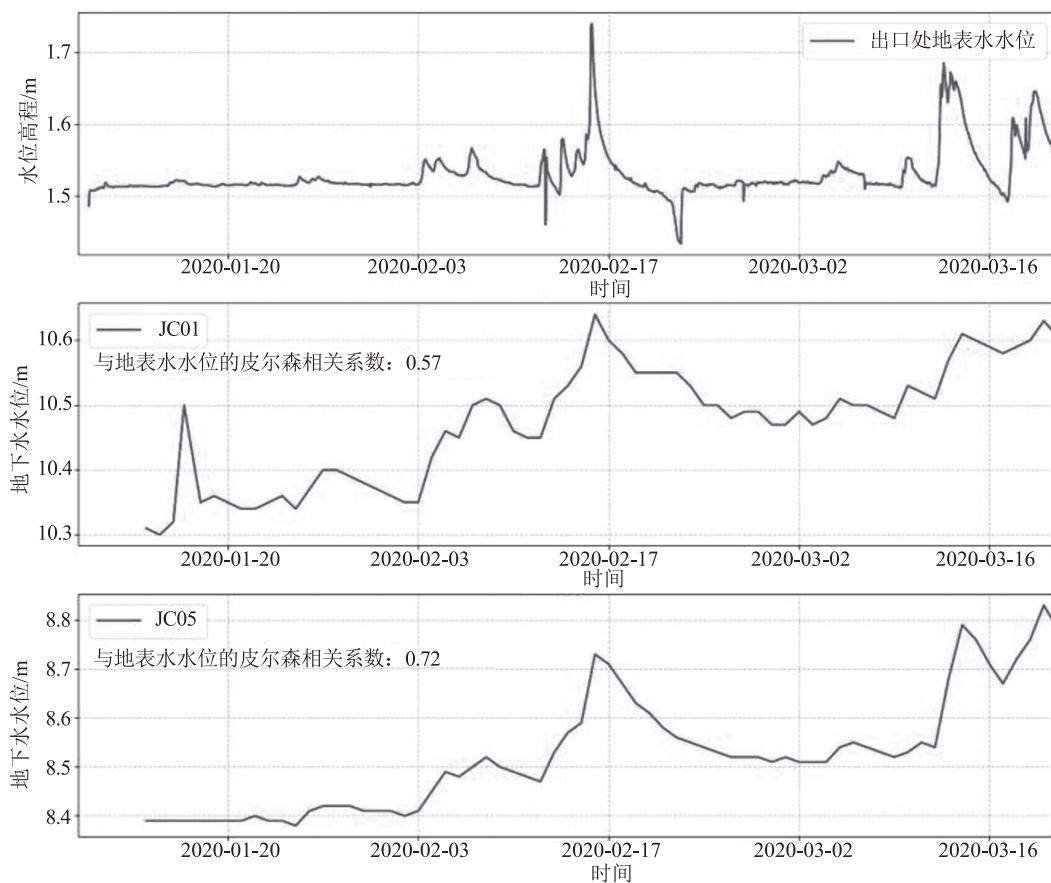


图 13 地表水与地下水水位对比关系及相关系数

Fig. 13 The correlation coefficient of the surface water-groundwater in the Hefeng catchment

水循环定量监测与数据分析结果表明,禾丰盆地水循环转换规律明显。水循环监测网络定量刻画了禾丰盆地地表水与地下水循环转换强度、水循环转换方向及水循环转换量随时间的动态变化规律。

4 结论与展望

水循环观测基地指针对多种水赋存形态、水资

源数量、质量及动态变化开展多要素系统性观测。为探索新时期地表水地下水一体化水资源调查监测评价技术方法,提高长江流域水循环定量观测水平,在鄱阳湖水系选取典型小流域开展水循环野外科学观测研究。本文以水循环监测网络构建为重点,介绍了禾丰盆地水循环野外科学观测基地的建设进展。

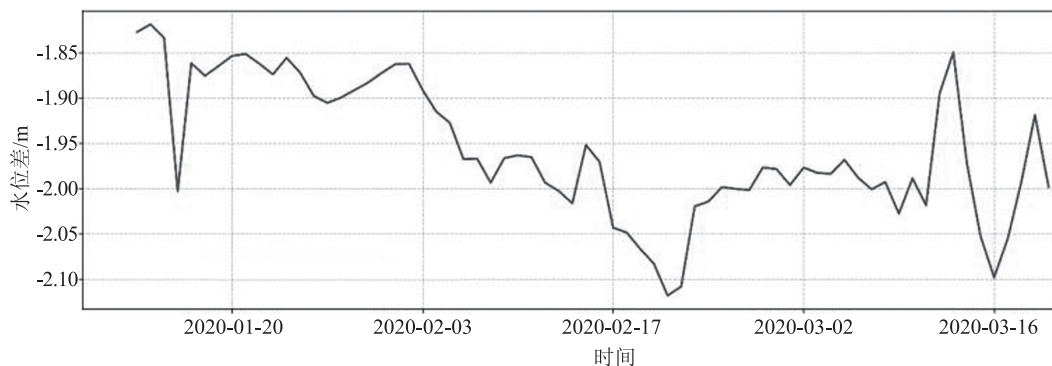


图14 地表水与地下水水位差

Fig. 14 The water level difference of the surface water and groundwater in the Hefeng catchment

(1)多技术方法融合构建了禾丰盆地水循环监测网络。综合采用遥感综合解译、大气降水监测、地表河流监测、地下水动态监测井等技术手段。此外,基于自主研发的地下水分层监测技术开展示范应用,成功实施1眼地下水环境U型管分层监测井,通过一孔三层监测控制不同地层深度、2个含水层的地下水动态变化。

(2)基于构建的水循环监测网络,开展水循环定量观测研究。结果表明,禾丰盆地水循环转换规律明显,水循环观测数据一定程度定量刻画了禾丰盆地地表水与地下水循环转换强度、水循环转换方向及水循环转换量随时间的动态变化规律。表现在,大气降水驱动下,地表河流水位与地下水位动态变化规律一致,皮尔森相关系数可达0.72。枯水期受地形高程差控制,地下水补给禾丰河地表水;地下水对地表水的循环转换强度在短期大气降水影响下先降后升。此外,地表河流水位与地下水位差值曲线,揭示了禾丰盆地陆地水储量受蒸散发作用逐渐减少的变化规律。

(3)禾丰盆地水循环野外科学观测基地后续将开展水循环要素综合分析专题研究。持续探索示范新理论、新技术、新方法、新设备。补充蒸散发、土壤入渗、生态水方面监测手段。支撑服务长江流域中游鄱阳湖重点地区水平衡分析、水资源管理、重大水旱灾害防范与区域可持续发展。

致谢:感谢河海大学井森博士对水循环转换分析的提升;感谢武汉工程大学田斌副教授、中国科学院武汉岩土力学研究所肖威工程师在基地建设、仪器选型安装等方面的支撑。

参考文献

- [1] 刘昌明. 黄河流域水循环演变若干问题的研究[J]. 水科学进展, 2004, 15(5): 608-614.
- [2] 严登华, 任立良, 王国庆, 等. 关于陆地水循环演变及其在全球变化中的作用研究设想[J]. 水科学进展, 2016, 27(6): 935-942.
- [3] Prakash M R, Slingh V S. Network design for groundwater monitoring—a case study[J]. Environmental Geology, 2000, 6(39): 628-632.
- [4] Rentier C, Delloye F, Brouyère S, et al. A framework for an optimised groundwater monitoring network and aggregated indicators[J]. Environmental Geology, 2006, 50(2): 194-201.
- [5] Chapman D V, Bradley C, Gettel G M, et al. Developments in water quality monitoring and management in large river catchments using the Danube River as an example[J]. Environmental Science & Policy, 2016, 64: 141-154.
- [6] 魏明海, 刘伟江, 白福高, 等. 国内外地下水环境监测工作研究进展[J]. 环境保护科学, 2016, 42(5): 15-18.
- [7] 周仰效, 李文鹏. 地下水水质监测与评价[J]. 水文地质工程地质, 2008, (1): 1-11.
- [8] 周仰效, 李文鹏. 区域地下水位监测网优化设计方法[J]. 水文地质工程地质, 2007, (1): 1-9.
- [9] 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.
- [10] 杨建锋. 地下水-土壤水-大气水界面水分转化研究综述[J]. 水科学进展, 1999, 10(2): 3-5.
- [11] 朱永华, 仵彦卿. 黑河流域地下水监控研究[J]. 干旱区资源与环境, 2000, 14(3): 60-64.
- [12] 朱德全. 浅谈均衡试验场在供水水文地质勘察中的作用[J]. 工程勘察, 1987, (3): 39-42.
- [13] 西北、内蒙六省区地下水均衡试验场站设计方案技术研讨会会议纪要[J]. 地下水, 1985, (3): 18-19.
- [14] 周金龙, 张健文. 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.
- [15] 周金龙, 艾克日木·阿不都拉. 内陆干旱区潜水年垂向补耗差的

- 试验分析[J].地下水,2002,24(1): 6-7.
- [16] 张德祯,徐世民.河南省地下水均衡监测试验研究[J].河南地质,1994,12(1): 41-45.
- [17] Qin R, Cao G, Wu Y, et al. A method for selecting monitoring wells and measured water-quality characteristics with application to the Liaohe River (China) groundwater system [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(9): 792.
- [18] 段萌语,李俊霞,谢先军.大同盆地典型小区域高矿地下水化学与同位素特征分析[J].安全与环境工程,2013,20(6): 1-5.
- [19] 苏小四,林学钰.包头平原地下水水循环模式及其可更新能力的同位素研究[J].吉林大学学报(地球科学版),2003,33(4): 503-508,529.
- [20] Liu J, Gao X, Shao W, et al. Water Resources Monitoring System Construction in Shanxi Province, China [J]. Procedia Engineering, 2016, 154: 326-333.
- [21] 王焰新,苏春利,谢先军,等.大同盆地地下水矿异常及其成因研究[J].中国地质,2010,37(3): 771-780.
- [22] 周金龙,张健文.昌吉地下水综合试验场简介[J].地下水,1993,15(4): 177-178.
- [23] 邵新民,于得胜,王蓓.新疆乌拉泊水均衡试验场凝结水对地下水补给的观测研究[J].水文地质工程地质,2012,39(2): 7-12.
- [24] 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.
- [25] 乔晓英,肖平,王继华,等.郑州地下水均衡试验场的改建工程——试验场监测资料的推广应用核心问题[J].水文地质工程地质,2020,47(1): 46-52.
- [26] 周金龙,王斌.新疆平原区灌溉水入渗补给地下水试验分析[J].地下水,2002,24(4): 202-203.
- [27] 周金龙,董新光,艾克日木·阿不都拉.天山北坡平原区零通量面形成发育规律研究[J].新疆农业大学学报,2003,26(1): 62-65.
- [28] 郭占荣,荆恩春,聂振龙,等.种植条件下潜水入渗和蒸发机制研究[J].水文地质工程地质,2002,(2): 42-44.
- [29] 井柳新,刘伟江,王东,等.中国地下水环境监测网的建设和管理[J].环境监控与预警,2013,5(2): 1-4.
- [30] 李志勇,黎义勇,黄长生,等.赣江流域红层盆地典型构造样式与地下水动力学模式[J].地质通报,2020,39(12): 1873-1882.
- [31] 郑跃军,李文鹏,王瑞久,等.潮白河冲洪积扇地下水循环演化特征[J].人民长江,2012,43(15): 43-46.
- [32] 李文鹏,郑跃军,郝爱兵.北京平原区地下水位预警初步研究[J].地学前缘,2010,17(6): 166-173.
- [33] Cherry J A, Parker B L, Keller C. A New Depth - Discrete Multilevel Monitoring Approach for Fractured Rock [J]. Groundwater Monitoring & Remediation, 2007, 27(2): 57-70.
- [34] 刘学浩,李琦,王清,等.一孔多层地下水环境监测技术国际经验与对中国的启示[C]//2017 中国环境科学学会科学与技术年会论文集(第二卷),2017,(7): 2104-2112.
- [35] 李琦,刘学浩,李霞颖,等.基于 U 型管原理的浅层地下流体环境监测与取样技术[J].环境工程,2019,37(2): 8-12.
- [36] 刘学浩,李琦,方志明,等.一种新型浅层井 CO₂ 监测系统的研发[J].岩土力学,2015,36(3): 898-904.