

缺水基岩山区蓄水构造类型划分及其属性分析

张福存, 王新峰, 李伟, 程旭学, 韩双宝, 潘晓东, 龚磊

Classification and attribute analysis of water-storing structures in water deficient bedrock mountainous areas

ZHANG Fucun, WANG Xinfeng, LI Wei, CHENG Xuxue, HAN Shuangbao, PAN Xiaodong, and GONG Lei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202107042>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

山东临朐盆地新构造运动特征及其对地下水的控制作用

李巨芬, 李伟, 冯庆达, 吕琳, 马雪梅

水文地质工程地质. 2020, 47(1): 28-36

川藏铁路格聂山和察雅段构造岩溶发育规律及岩溶地下水循环模式研究

Evolution regularity of the plateau tectonic karst and the relevant karst groundwater circulation mode in Mount Genie and Zaya sections along the Sichuan-Xizang Railway

李向全, 马剑飞, 张春潮, 王振兴, 付昌昌, 白占学

火烧迹地土壤斥水性和渗透性变化特性

Research on the change in soil water repellency and permeability in burned areas

王严, 胡卸文, 杨瀛, 于振江, 曹希超

西南岩溶山区特大滑坡成灾类型及动力学分析

An analysis of disaster types and dynamics of landslides in the southwest karst mountain areas

高杨, 贺凯, 李壮, 高浩源, 卫童瑶, 邢爱国, 李滨

地下水井水位及化学组分的同震差异响应特征分析

An analysis of the coseismic differential response characteristics of well water levels and chemical components : A case study triggered by the Qingbaijiang earthquake

顾鸿宇, 王东辉, 李胜伟, 郑万模, 刘港, 向元英, 李丹, 陈能德

永定河生态补水的地下水位动态响应

Response of groundwater regime to ecological water replenishment of the Yongding River

胡立堂, 郭建丽, 张寿全, 孙康宁, 杨郑秋



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202107042

张福存, 王新峰, 李伟, 等. 缺水基岩山区蓄水构造类型划分及其属性分析[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(2): 7-16.
ZHANG Fucun, WANG Xinfeng, LI Wei, *et al.* Classification and attribute analysis of water-storing structures in water deficient bedrock mountainous areas[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(2): 7-16.

缺水基岩山区蓄水构造类型划分及其属性分析

张福存^{1,2,3}, 王新峰^{1,2,3,4}, 李伟^{1,2}, 程旭学^{1,2}, 韩双宝^{1,2}, 潘晓东⁵, 龚磊^{1,2,3}

(1. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051; 2. 中国地质调查局地下水勘查与开发工程技术研究中心, 河北 保定 071051; 3. 河北省高校生态环境地质应用技术研发中心(河北地质大学), 河北 石家庄 050031; 4. 河北省水资源可持续利用与产业结构优化协同创新中心(河北地质大学), 河北 石家庄 050031; 5. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004)

摘要: 近十多年来, 服务脱贫攻坚的基岩山区找水打井工作充分运用并丰富了蓄水构造理论, 但缺乏对其类型的统一划分和属性的深入分析。以蓄水构造为理论指导, 考虑地貌汇水、岩性赋水、构造控水等控制因素, 以构造为主控因素, 综合地形地貌、地层岩性和植被发育及开发利用实际价值等因素, 系统总结划分出缺水基岩山区水平岩层、单斜、褶皱、断裂、接触、风化壳、复合、洞藏等8类20型35式蓄水构造, 并借鉴、结合新构造控水理论和地下水系统理论分析总结不同尺度、不同类型蓄水构造的共性特征, 从蓄水构造空间组合特征、边界水文地质性质、水动力条件、尺度效应、控水共生特征、开发利用实际价值等方面, 提出了岩性与地质构造的相关性、透水与隔水的相对性、汇水与蓄水的平衡性、尺度与系统的统一性、形成与改造的继承性和规模与目的的匹配性等蓄水构造属性。研究成果细化完善了缺水基岩山区地下水蓄水构造类型划分, 总结提炼了蓄水构造属性特征, 深化了对蓄水构造概念内涵的理解与认识。既进一步推动了基岩山区水文地质学的研究, 也可缺水区找水定井提供参考, 并指导缺水区水资源可持续利用。

关键词: 找水打井; 蓄水构造; 蓄水构造属性; 缺水山区; 地下水勘查

中图分类号: P641.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)02-0007-10

Classification and attribute analysis of water-storing structures in water deficient bedrock mountainous areas

ZHANG Fucun^{1,2,3}, WANG Xinfeng^{1,2,3,4}, LI Wei^{1,2}, CHENG Xuxue^{1,2}, HAN Shuangbao^{1,2},
PAN Xiaodong⁵, GONG Lei^{1,2,3}

(1. Center for Hydrogeology and Environmental Geology, China Geological Survey, Baoding, Hebei 071051, China; 2. Center for Groundwater Exploration and Development Engineering Technology Research, CGS, Baoding, Hebei 071051, China; 3. Hebei Center for Ecological and Environmental Geology Research, Hebei GEO University, Shijiazhuang, Hebei 050031, China; 4. Hebei Province Collaborative Innovation Center for Sustainable Utilization of Water Resources and Optimization of Industrial Structure, Hebei GEO University, Shijiazhuang, Hebei 050031, China; 5. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin, Guangxi 541004, China)

收稿日期: 2021-07-14; 修订日期: 2021-09-15

投稿网址: www.swdgedz.com

基金项目: 河北省水资源可持续利用与产业结构优化协同创新中心开放基金(XTZK202106); 中国地质调查局地质调查项目(DD20179262; DD20190259)

第一作者: 张福存(1963-), 男, 博士, 教授级高工, 主要从事地下水调查与可持续利用研究。E-mail: zhangfucun@mail.cgs.gov.cn

通讯作者: 王新峰(1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事基岩山区水文地质调查及成果集成研究。

E-mail: wangxinfeng@mail.cgs.gov.cn

Abstract: Since 2002, the China Geological Survey has successively organized and implemented hydrogeological survey and groundwater exploration in water deficient areas, such as severe water shortage areas in west China, Wumeng Mountain area, Yimeng mountain area and red bed area in southern Jiangxi, obtained a large number of exploration data conducive to promoting discipline development, and summarized the law of water abundance. In recent decades, water prospecting and well drilling in bedrock mountainous areas serving poverty alleviation have not been systematically summarized based on water storage structures and their attributes. This paper takes the water storage structure as the theoretical guidance, considers geomorphic catchment, lithological water accumulation, structural water control and other control factors, and takes structure as the main control factor. The factors such as topography, formation lithology, vegetation development and actual value of development and utilization are systematically summarized and water storage structures are divided into 8 types, further divided into 20 types, and more into 35 types, such as the horizontal rock stratum, monocline formation, fold, fault, contact zone, weathered crust, composite and cave reservoir. The common characteristics of different scales and types of water storage structures are analyzed and summarized with reference to and in combination with the neotectonic water control theory and groundwater system theory. From the aspects of spatial combination characteristics of water storage structure, boundary hydrogeological properties, hydrodynamic conditions, scale effect, symbiotic characteristics of water control and practical value of development and utilization, this paper puts forward the correlation between the lithology and geological structure, the relativity of permeability and water separation, the balance between catchment and water storage, the unity of scale and system, the inheritance of formation and transformation and the matching of scale and purpose. The research results refine and improve the classification of groundwater storage structure types in bedrock mountain areas with water shortage, summarize the attribute characteristics of water storage structure, deepen the understanding of the concept and connotation of water storage structure, not only further promote the research of hydrogeology in bedrock mountain areas, but also provide references for water prospecting and well locating in water shortage areas, and guide the sustainable utilization of water resources in water shortage areas.

Keywords: water exploration and well drilling; water-storing structure; water-storing structure attribute; water deficient bedrock mountainous areas; groundwater exploration

我国贫困缺水地区多为基岩山区,水文地质条件较为复杂,水资源匮乏,找水难度大,缺水成为制约经济社会发展的因素之一。2002年以来,中国地质调查局先后在燕山—太行山区、六盘山区、罗霄山区、乌蒙山区、沂蒙山区等集中连片贫困区和革命老区开展了支撑服务脱贫攻坚找水打井工作,实施探采结合井7200余眼,小口径浅井供水井 213.5×10^4 眼,直接解决2340多万人的饮水困难,蓄水构造理论得到了广泛运用,发挥了重要的理论指导作用。

蓄水构造是指由透水层和隔水层相互结合而构成的富集和储藏地下水的地质构造^[1]。它由3个基本要素组成:透水的岩层或岩体构成其含水介质;相对隔水的岩层或岩体构成其隔水边界;地下水的补给和排泄条件,即具有透水边界、补给水源和排泄出路^[2-3]。

蓄水构造的概念与地质构造不同,是融合了地质体特征与地下流体规律的综合性认识。特别是在岩

溶地区,找准蓄水构造,是成功打井找水的关键^[4-6]。蓄水构造理论是基于山区找水实践总结而形成的、最具有中国特色的应用性理论,一经提出就得到了广泛运用,尤其是在我国贫困缺水区勘查找水过程中再次证明了该理论的有效性、科学性,取得了丰硕成果^[7-9]。在蓄水构造研究与应用中,韩子夜等^[10]、武选民等^[11-12]高度集成水文地质调查勘查成果,总结了不同水文地质区的蓄水构造类型,提高了干旱区地下水富集规律认识。丁秉弼^[13]运用蓄水构造理论突出富水部位,编制了实用性强的《朝阳地区蓄水构造类型图》,徐军祥等^[14]通过制定野外寻找基岩蓄水构造的勘查技术路线,提升了缺水区地下水勘查效率。张之淦等^[15]、武选民等^[16]、刘新号^[17]、李伟等^[18]、汪云等^[19]把蓄水构造认识与遥感解译、物探勘查结果结合起来,准确刻画其空间结构,进一步提出山区综合找水技术方法,提高了找水定井的准确率。潘晓

东等^[20]运用蓄水构造,探索地下水系统划分,在编图上与水文地质分区、地下含水系统、地下水流系统进行耦合,准确清晰指示了基岩地下水富集带。Sophocleous^[21]利用水位波动法和氯质量平衡法,以地下水蓄水构造为单元,评估干旱半干旱地区地下水的补给量,认为蓄水构造对降水的最大补给量有较大的影响。本文在总结贫困区找水打井实践、特别是近十年工作成果基础上,借鉴已有蓄水构造类型划分方法^[2-3,22],对缺水基岩山区地下水蓄水构造进行了类型归纳和细化研究,并侧重分析总结了与基岩地下水开发利用相关的蓄水构造属性特征,深化了对蓄水构造概念内涵的理解与认识。

1 蓄水构造类型的划分

本文以蓄水构造理论为指导,考虑地貌汇水、岩性赋水、构造控水等多因素的控制作用,以地质构造为主控因素,综合地形地貌、地层岩性和植被发育及开发利用实际价值等因素,对燕山—太行山区、六盘山区、罗霄山区、乌蒙山区、沂蒙山区等贫困缺水水文地质调查工作进行系统总结^[23],将基岩山区蓄水构造类型统一划分为 8 类 20 型 35 式,见表 1。

2 蓄水构造属性

通过水文地质调查准确划定蓄水构造,是为了圈定找水靶区,确定找水方向,提高打井找水成功率,获得充足、可持续利用的水量和良好的水质,满足缺水群众饮用水需求。在充分比较不同区域、不同规模、不同用途的蓄水构造基础上,将其特征属性总结为“六性”:岩性与地质构造的相关性、透水与隔水的相对性、汇水与蓄水的平衡性、尺度与系统的统一性、形成与改造的继承性和规模与目的的匹配性。蓄水构造属性的总结,是尝试对其概念内涵、结构组成和水量平衡作进一步阐述,也希望对其尺度性、可持续性和经济性有所拓展与丰富。

2.1 岩性与地质构造的相关性

岩性与地质构造的相关性是指蓄水空间的形成,岩性是基础,构造是关键,有储水空间没有集水、蓄水通道依然无法形成蓄水构造。

地下水储存于岩石空隙中,不同成因的岩石结构和构造不同,原生空隙发育程度因岩性颗粒粗细、矿物组成和力学性质不同而差异性显著。但“在有利的构造条件下,几乎任何一种基岩都可以存在相对的富水地段;而在不利的构造条件下,即使是所谓的含水

表 1 缺水基岩山区蓄水构造类型划分

Table 1 Water storage structure types in water deficient bedrock mountainous areas

类	型	式	代表性地区
水平岩层蓄水构造	沉积动力型	红层方山式	赣南、西南红层区
	喷发动力型	喷发堆积式	沂蒙山区临朐
单斜蓄水构造	碳酸盐岩型	单一碳酸盐岩式	沂蒙山区
		碳酸盐岩与碎屑岩互层式	沂蒙山区鲁村盆地、乌蒙山区
	碎屑岩型	砂岩式	陇东盆地庆阳地区
		砂、泥岩互层式	乌蒙山区
	变质岩火成岩型	砂砾岩式	赣南红层盆地
大理岩式		太行山区	
褶皱蓄水构造	向斜型	玄武岩式	燕山山区
		承压水式	沂蒙山区南麻盆地
	背斜型	潜水式	沂蒙山区莱芜盆地
		背斜式	沂蒙山区、乌蒙山区
断裂蓄水构造	断层型	断裂带式	沂蒙山区、乌蒙山区
		断裂影响带式	沂蒙山区、乌蒙山区
		断层交会式	沂蒙山区南鲁山自流区
	断块型	断层岩块式	沂蒙山区
		滑脱构造式	沂蒙山区莱芜盆地
		地垒式	沂蒙山区沂源盆地
	断块型	地垒式	青海东部碎屑岩区
		地垒式	陕西渭北岩溶区
		地垒式	陕西渭北岩溶区
接触蓄水构造	侵入体接触型	阻水岩脉(墙)式	河北太行山、山西吕梁山、乌蒙山、江西赣州地区
	不整合接触型	导水岩脉(墙)式	宁夏中南部地区
风化壳蓄水构造	裸露型	片麻岩式	河北太行山地区
		花岗岩式	海南琼中、江西赣州地区
	碎屑岩式	川渝红层区、赣南地区	
隐伏型	古风化壳式	辽宁西部山区	
复合蓄水构造		向斜-岩体式	太行山区涑源盆地
		断层-不整合接触式	沂蒙山区
		单斜-断裂式	沂蒙山区
		岩脉-侵入接触式	江西赣州兴国地区
洞藏蓄水构造	天然型	风化壳-断层式	江西赣州宁都地区
		孔洞式	西南岩溶区、河北坝上高原
	人为活动型	废弃矿洞(巷道)式	太行山区曲阳县、陕西北部等地区

性最好的石灰岩也不一定富水”^[2]。即地质构造作用能够产生裂隙、裂隙带、破碎带,后期地质作用还会改造与发展裂隙,如岩溶区地下廊道、玄武岩区空洞等。在一定的空间内,地质构造形成的空隙连通性决定着蓄水能力的大小和可供水能力。

一般情况下,大空隙、强脆性岩石,在地质构造作用下,更易形成发育的裂隙和富水的蓄水构造,而韧性岩石则相对较弱。同时,地质构造类型也影响不同岩性蓄水构造的富水程度。相对而言,张性、张扭性

断裂形成的断层带多为富水蓄水构造,压性、压扭性断裂一般在断层两侧一定距离内形成裂隙影响带蓄水;前者的规模一般比后者小。

如在沂蒙山区莱芜盆地新发现的滑脱构造式蓄水构造^[24],其在沉积岩与火成岩的结合部形成的层间虚脱、碎裂岩带及揉皱带内的层间空隙均可成为良好的地下富集空间(图 1)。它具有以下特征:

(1)滑脱面总体产状平缓,滑脱方向多沿 NNE 向;

(2)滑脱构造带内岩石发生不同程度的破碎揉皱或碎裂,形成厚度 20~80 cm 不等碎裂岩带或者揉皱带;

(3)滑脱构造揉皱带内,多在薄层碳酸盐岩褶皱转折端形成层间空隙;

(4)由于重力卸载作用,朱砂洞组底部多顺层形成不同规模的层间虚脱,部分层间虚脱被燕山期闪长玢岩侵入体充填。

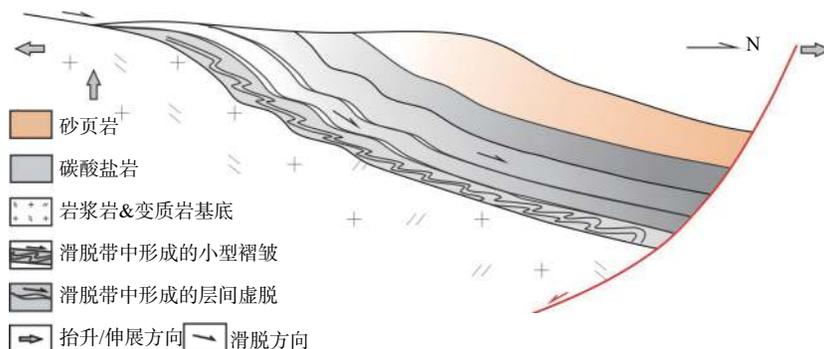


图 1 滑脱构造式蓄水构造示意图^[24]

Fig. 1 Schematic diagram of water-storing structure of the decollement structure form^[24]

朱砂洞组含水层碳酸盐岩可溶组分含量高达 84.6%,构成了溶蚀发育的物质基础,滑脱构造使其底部顺层形成不同规模的层间虚脱、碎裂岩带或揉皱带^[24],形成的蓄水构造说明岩性与构造相互作用且关联紧密。

2.2 透水与隔水的相对性

透水与隔水的相对性是指某一地层岩石透水与隔水性质是相对的。围岩的透水性超过岩层本身的透水性,岩层起隔水作用,是蓄水边界性质;围岩的透水性弱于岩层本身的透水性,岩层起透水作用,是蓄水空间性质,一般可以满足分散供水所需。

在一个蓄水构造中透水或隔水的作用是固定的,但在不同蓄水构造之间具有相对性。如一个岩脉,如果两侧岩石富水性差,而它本身透水性好,围岩圈闭形成了一定宽度的裂隙带作为透水层。在适宜补给条件下,在迎水一侧即形成一个小型的导水岩脉(墙)式蓄水构造;如果它侵入到透水性好的岩层,且处于地下水水流的下游,因其透水性相对差而阻水成为隔水边界,形成阻水岩脉(墙)式蓄水构造。一些断层也有类似的规律。故在寻找地下水以集中供水或分散供水形式解决不同需求饮水困难时,不仅要盯住大的区域,也要关注小的局部;更不要因为小的局部蓄水构造而忽视更大尺度上的富水蓄水构造。

如在山东临朐发现的喷发堆积式蓄水构造^[25],蓄水空间包括玄武岩气孔、原生节理裂隙、古风化壳裂隙,以及下伏古近系砂砾岩孔隙等。玄武岩与碎屑岩接触带之间为近水平状的半松散砂砾岩,其下伏的古近系粉砂岩、泥质粉砂岩相对隔水,砂砾岩成为区域性含水层(图 2)。大气降水通过裂隙、孔洞向深部径流,地下水遇古近系碎屑岩阻滞,在半松散砂砾岩中富集,从而形成水平层状蓄水构造,并于坡脚排泄形成下降泉,含水层的富水性呈现出由中央向边缘变差的规律。实施 ZK28,孔深 153 m,揭露了玄武岩及古

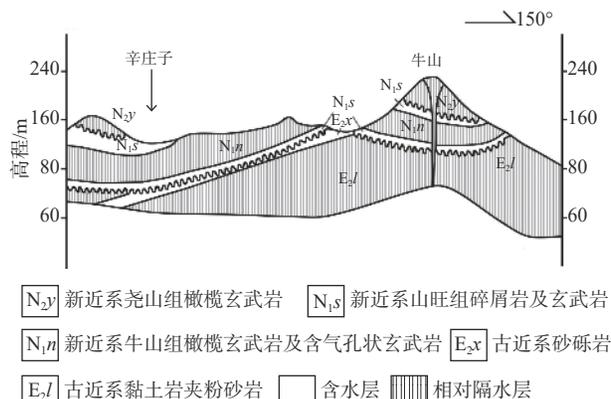


图 2 喷发堆积式蓄水构造示意图 (引自文献 [25], 有修改)

Fig. 2 Schematic diagram of water-storing structure of the eruption accumulation form (modified from Ref. [25])

近系砂砾岩含水层, 单井涌水量 $120 \text{ m}^3/\text{d}$, 基本满足当地居民生活用水需求。

在牛山火山机构周边, 以气孔状玄武岩为主, 与砂砾岩风化壳共同构成了似层状分布的含水层, 这显著不同于一般存在的玄武岩块状含水层。

2.3 汇水与蓄水的平衡性

汇水与蓄水的平衡性意即蓄水空间和汇水空间共同构成一个完整的、地下水更新速度适宜的蓄水构造。只蓄不汇无法可持续开发, 有汇不蓄无法形成稳定供给。蓄水空间具有透水边界、储水空间和排泄出路, 汇水空间是在适宜地形条件下汇集水源并补给蓄水空间。

汇水与蓄水的平衡性表现在水质优劣和水量大小 2 个方面。蓄水构造地下水循环途径和速度决定其可更新性。循环途径长, 更新速度过慢, 可能会造成水中物质的富集而成化或某种元素含量的超标, 如陕甘宁革命老区陇东白垩系部分含水层地下水。若循环途径短, 更新速度过快, 一方面可能会造成水中物质的贫化, 如赣南革命老区兴国县云峰嶂风化壳蓄水构造地下水 TDS 含量几乎接近纯净水; 另一方面难以蓄存足够的水量, 如乌蒙山区厚层灰岩强岩溶发育地层地下含水空间大, 降雨入渗后经地下溶洞管道快速向地表河排泄, 难以蓄集足够水量加以利用。

只有更新速度适宜, 才能够在水质、水量上满足人类饮用需要, 甚至在灰岩地区可能形成锶型矿泉水、火成岩区形成偏硅酸型矿泉水, 不仅可以解决饮用水困难, 还可以作为经济资源进行产业化经营, 促进经济发展。在乌蒙山区, 一定汇水区域的降雨入渗进入岩溶空隙发育的厚层灰岩地层后, 由于没有隔水地层的蓄水条件而快速通过岩溶管道排向地表河, 地下岩溶空间多为无效含水介质。而白云岩和不纯碳酸盐岩岩溶发育相对较弱, 与碎屑岩互层, 降雨入渗后主要经孔洞、裂隙、溶洞向地表河排泄, 地下滞留时间较长, 地下空间多为可蓄水的有效含水介质, 导致平均单井涌水量弱岩溶发育的白云岩和不纯碳酸盐岩大于厚层灰岩。如在贵州省赫章县发现的碳酸盐岩与碎屑岩互层式蓄水构造^[26], 碎屑岩顶托岩溶地下河形成汇水、蓄水空间(图 3)。ZK01 钻孔碎屑岩隔水层位于碳酸盐岩含水层下部, 地下水在碳酸盐岩含水层中径流赋存, 碎屑岩隔水层形成隔水底板, 地下水在隔水层之上径流赋存, 钻井涌水量为 $102 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

由此可以看到, 大厚度纯碳酸盐岩含水层具有很大汇水空间, 但是如果如果没有相对隔水层限制岩溶发育

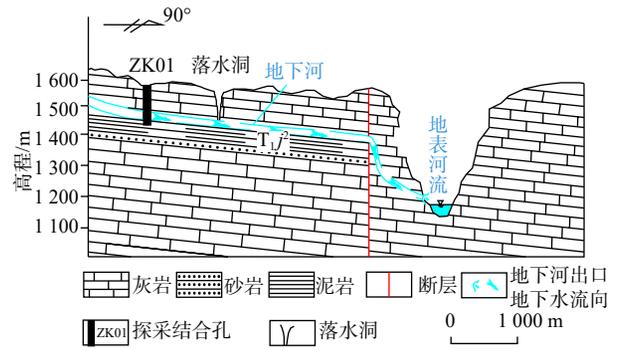


图 3 碳酸盐岩与碎屑互层式蓄水构造示意图

(引自文献 [26], 有修改)

Fig. 3 Schematic diagram of water-storing structure of the carbonate interbedded with clastics form (modified from Ref. [26])

深度或发育边界, 地下水的深埋或快速排泄就无法适应当前的开发利用条件。开发此类岩溶水需要人工建设相对隔水层, 如筑坝涌水形成地下水岩溶水库, 以促进蓄水与汇水的平衡, 满足开采需要。

2.4 尺度与系统的统一性

尺度与系统的统一性是指从不同尺度划分蓄水构造, 类似多级地下水系统, 划分的依据之一应该考虑满足开发利用的实际需要。

蓄水构造规模大小不一, 相差悬殊, 山区一眼小型的人畜饮用水井所在的蓄水构造面积可能不足 0.01 km^2 , 一个大型岩溶泉或大型地下河系蓄水构造面积可达几千平方千米^[27-28]。但从地下水系统的观点研究, 它们又是统一的, 在不同尺度上, 它们可能是局部水流系统、中间水流系统, 甚至是区域水流系统; 在空间上, 不同蓄水构造具有嵌套关系。因此, 要注意开发利用过程中相互的影响, 特别是一些有水力联系的蓄水构造。同时, 要区分确定井位与寻找蓄水构造的差异, 蓄水构造是确定井位的基础, 确定井位需要综合考虑涌水量和施工条件与成本等因素。

从构造主从关系研究, 蓄水构造与邻近构造存在构造体系主从关系, 如压性、压扭性断裂的主断层一般透水性差, 而它的次级构造一般为富水的蓄水构造。所以临近的蓄水构造规模大小与富水性的差异, 可以从断裂力学性质与主从关系上得到统一。

从构造形态研究, 同一个蓄水构造在不同尺度上, 属于不同的类型, 如一个大型背斜蓄水构造, 其轴部张裂带破碎岩石完全被剥蚀掉, 时代较老的坚硬致密岩层出露地表时, 因其抗风化能力强于两翼新地层而成为背斜山岭, 两翼夹于隔水层中的透水层形成良好的蓄水构造, 从大尺度上看是背斜蓄水构造, 从小

尺度单侧地层来看,又分别是单斜蓄水构造。

如在贵州沿河县发现的背斜式蓄水构造^[20],就是局部单斜、区域背斜与断裂组合的复合型蓄水构造的典型代表(图 4)。背斜核部出露寒武系白云岩,岩层

薄且岩性脆,挤压易碎,密集发育网格状裂隙,地下水分布相对均匀,水力联系密切。背斜两翼下伏的白云岩挤压变形,平行于背斜轴部发育纵张裂隙,构成岩溶地下水主径流带,发育数量众多的岩溶泉。

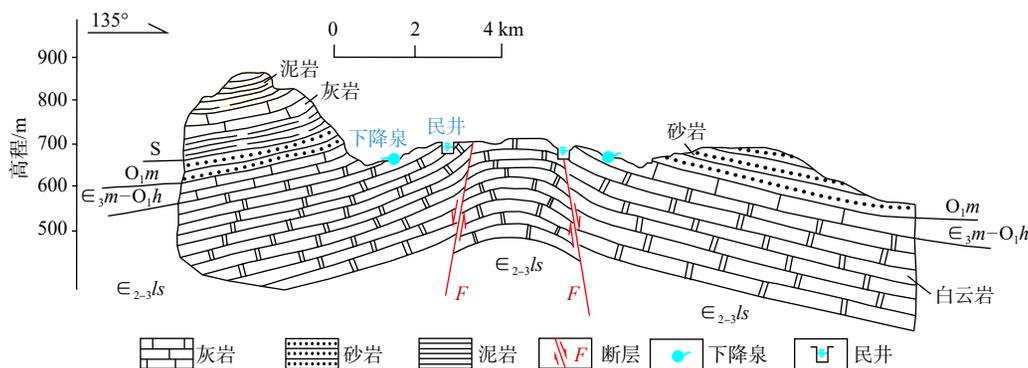


图 4 背斜式蓄水构造示意图 (引自文献 [20], 有修改)

Fig. 4 Schematic diagram of water-storing structure of the anticline form (modified from Ref. [20])

2.5 形成与改造的继承性

形成与改造的继承性是指控水构造的水文地质性质随着后续构造活动的改造,具有分期次、分段特征,一个大型构造局部富水与局部阻水的共生是正常的水文现象。

老断层作为后期改造的基础,无论什么力学性质,如果破碎带被充填或固结成岩,则一般透水性和含水性差,除非风化或充填物被溶蚀,难以形成蓄水构造。燕山运动以后的多期次构造运动,其破碎带胶结较弱或未胶结,透水性和含水性好,可形成蓄水构

造。这也是新构造控水理论的基础和找水方向。

如在赣南革命老区韩坊盆地发现的单斜—断裂式蓄水构造^[29],就是非对称单斜断陷盆地受加里东—燕山等多期次构造运动作用形成的。该盆地的沉降受边界断层运动控制,盆地内红层整体呈单斜沉积,巨厚层砾岩和花岗岩基底成为良好的隔水层,网状裂隙发育的泥质粉砂岩成为良好稳定的蓄水空间,粉砂岩层出露地区构成地下水的补给区,盆缘断裂成为良好的地下水补给通道和储水区(图 5)。

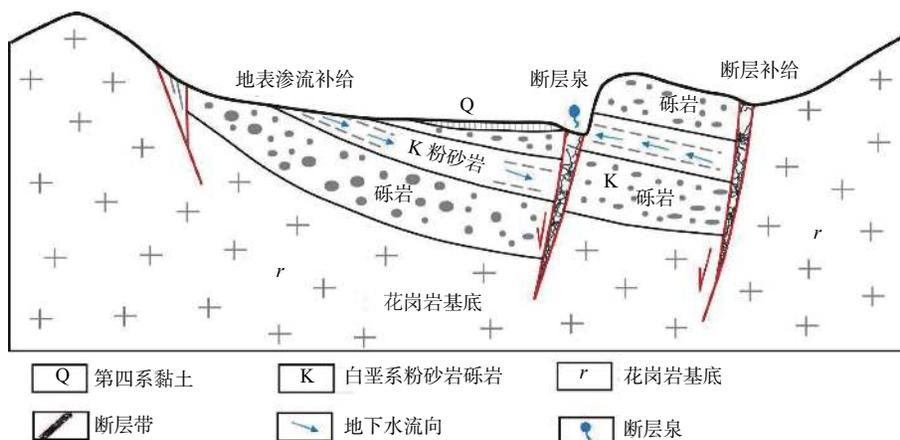


图 5 单斜—断裂式蓄水构造示意图 (引自文献 [29], 有修改)

Fig. 5 Schematic diagram of water-storing structure of the monoclinic formation-fault form (modified from Ref. [29])

2.6 规模与目的的匹配性

规模与目的的匹配性是指蓄水构造的规模与富水程度和可供水能力及经济性的关系,寻找蓄水构造解

决缺水问题,需要考虑开发利用与后续维护的经济成本。

为缺水贫困区找水打井,一般以乡镇、村组甚至几户为单元作为供水对象,且以解决饮水困难为首要

目标, 兼顾发展经济。所以蓄水构造打井时要考虑技术经济合理性, 一方面井位与村镇的距离要适当, 从而限制了工作区域。另一方面取水深度也要合适, 不至于因运行成本过高而打得起井、用不起水。如此, 在寻找蓄水构造时, 要目标导向, 既要考虑以村镇为单元的小型集中供水, 也不能放弃类似西南红层缺水地区以一户、几户为目标的分散式供水^[30]。

缺水地区深部地下水储量一般取决于地质构造而不是气候^[31]。如在大骨节病水质型缺水地区的阿坝州若尔盖县^[32], 下部基岩风化裂隙水广泛发育, 局部花岗岩侵入体形成阻汇水墙体 (图 6), 虽富水性一

般, 但水质较好, 是分散性供水的主要层位。黄寨村扶贫示范井在 31.45 ~ 58.75 m 揭露风化强烈的青灰色钙质砂岩, 抽水试验结果显示涌水量为 34.56 m³/d, 解决了该村的吃水难题。

在赣南革命老区红层分布区, 发现了红层方山式蓄水构造^[33]。丹霞山底部为粉砂质泥岩, 裂隙不发育, 构成隔水底板。丹霞山顶部为砂砾岩, 风化后破碎严重, 造壤能力强, 且土壤易被杉树固结, 低矮伏地植被进一步发育, 形成较为稳定的风化层, 在接受降水补给后, 形成滞水式蓄水空间, 在山腰发育悬挂式泉水 (图 7), 泉群流量可达 328 m³/d, 是当地村民分散

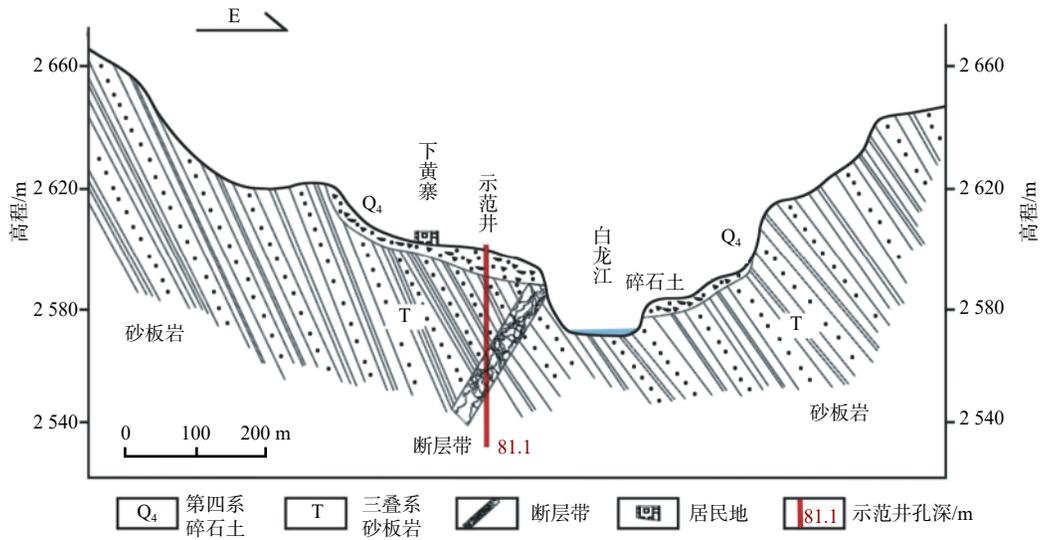


图 6 单斜-断裂式蓄水构造示意图^[32]

Fig. 6 Schematic diagram of water-storing structure of the monoclinic formation-fault form^[32]

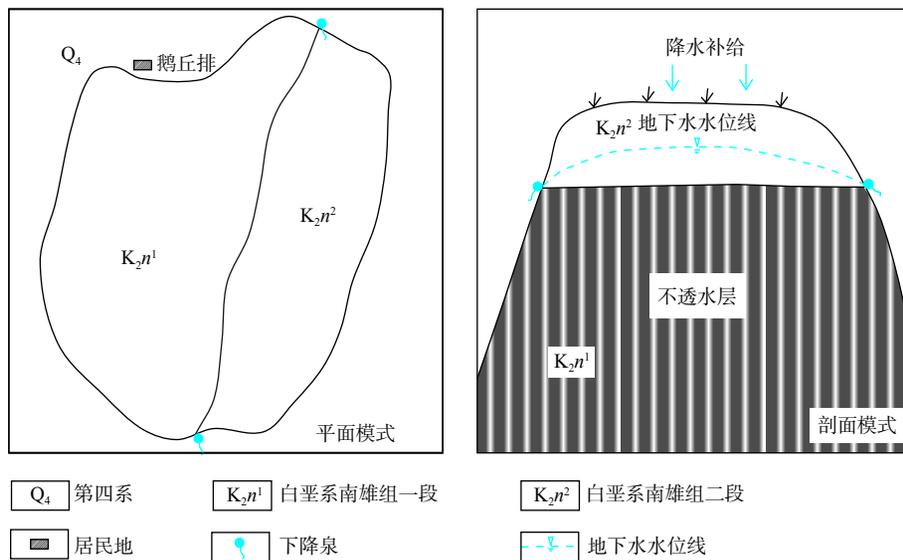


图 7 红层方山式蓄水构造示意图^[33]

Fig. 7 Schematic diagram of water-storing structure of the red bed Fangshan form^[33]

引水入户的主要水源。在四川—重庆川渝红层盆地地区,此类蓄水构造也多有分布^[7]。

3 结论

(1)在燕山—太行山区、六盘山区、罗霄山区、乌蒙山区和沂蒙山区等集中连片贫困区和革命老区,蓄水构造可以划分为水平岩层式、单斜式、褶皱式、断裂式、接触式、风化壳式、复合式、洞藏式等 8 类 20 型 35 式。

(2)不同尺度、不同类型的蓄水构造,具有岩性与地质构造的相关性、透水与隔水的相对性、汇水与蓄水的平衡性、尺度与系统的统一性、形成与改造的继承性和规模与目的的匹配性等属性,且各属性之间具有理论与实际应用的关联。

进一步分析蓄水构造类、型、式与我国多级次构造单元的嵌套关系,研究蓄水构造的尺度分级与水资源可持续开发利用的相互作用模式,是今后基岩山区水文地质学支撑服务生态文明建设和乡村振兴的重要方向。

致谢:感谢中国地质调查局总工程师室、水文地质环境地质部在成果总结过程中给予的指导帮助,武汉地质调查中心、南京地质调查中心、成都地质调查中心、沈阳地质调查中心、探矿工艺研究所在成果编制过程中给予的大力支持,感谢各扶贫区项目团队的无私奉献和辛勤付出!

参考文献 (References) :

- [1] 刘光亚. 基岩蓄水构造[J]. 河北地质学院学报, 1978, 1(1): 19 - 39. [LIU Guangya. Bedrock theory of water storage structure[J]. Hebei Geological College, 1978, 1(1): 19 - 39. (in Chinese)]
- [2] 刘光亚. 基岩地下水[M]. 北京: 地质出版社, 1979. [LIU Guangya. Bedrock groundwater[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1979. (in Chinese)]
- [3] 沈照理, 刘光亚, 杨成田, 等. 水文地质学[M]. 北京: 科学出版社, 1985. [SHEN Zhaoli, LIU Guangya, YANG Chengtian, et al. Hydrogeology[M]. Beijing: Science Press, 1985. (in Chinese)]
- [4] 吉学亮, 尹学灵, 潘晓东, 等. 岩溶斜坡地带基于蓄水构造的地下水富集模式[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(22): 8 - 15. [JI Xueliang, YIN Xueling, PAN Xiaodong, et al. Groundwater enrichment model in Karst slope zone based on storage structure[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(22): 8 - 15. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 贾德旺. 鲁南山区基岩蓄水构造类型及找水定井方法[J]. 地质学刊, 2020, 44(3): 318 - 325. [JIA Dewang. Type of bedrock water storage structure and the method of water exploration and well determination in the southern mountainous area of Shandong[J]. Journal of Geology, 2020, 44(3): 318 - 325. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 关琴, 徐聪聪, 叶倩, 等. 鲁中南新汶盆地地下水蓄水模式分析[J]. 山东国土资源, 2021, 37(5): 41 - 48. [GUAN Qin, XU Congcong, YE Qian, et al. Analysis on groundwater storage model in Xinwen basin in central and southern Shandong Province[J]. Shandong Land and Resources, 2021, 37(5): 41 - 48. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 武选民, 文冬光, 郭建强, 等. 西部严重缺水地区人畜饮水地下水勘查示范工程[M]. 北京: 中国大地出版社, 2006. [WU Xuanmin, WEN Dongguang, GUO Jianqiang, et al. Groundwater exploration demonstration project of drinking water for human and livestock in western regions with serious water shortage[M]. Beijing: China Earth Press, 2006. (in Chinese)]
- [8] 王新峰, 李伟, 曹红, 等. 基岩山区水文地质图编制新模式与实践[J]. 人民黄河, 2016, 38(5): 10 - 14. [WANG Xinfeng, LI Wei, CAO Hong, et al. Initial analysis and practices of bedrock mountainous hydrogeology mapping theory[J]. Yellow River, 2016, 38(5): 10 - 14. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 李伟, 王新峰, 邓启军, 等. 基于山区地下水非均一性特征的水文地质编图研究[R]. 北京: 国家自然科学基金成果, 2014: 1 - 43. [LI Wei, WANG Xinfeng, DENG Qijun, et al. Hydrogeological mapping based on heterogeneity of groundwater in mountainous areas[R]. Beijing: Achievements of National Natural Science Foundation of China, 2014: 1 - 43. (in Chinese)]
- [10] 韩子夜, 武选民, 张福存, 等. 西宁盆地储水构造及其地下淡水赋存规律研究[J]. 水文地质工程地质, 2006, 33(5): 66 - 70. [HAN Ziye, WU Xuanmin, ZHANG Fucun, et al. A study of groundwater-bearing structures and occurrence of fresh groundwater in the Xi'ning Basin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006, 33(5): 66 - 70. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 武选民, 文冬光, 张福存, 等. 我国西北人畜饮用缺水地区储水构造特征与工程范例[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(1): 22 - 26. [WU Xuanmin, WEN Dongguang, ZHANG Fucun, et al. Groundwater-bearing structures in Northwestern China and their application to

- water-taking works for water-shortage towns[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2010, 37(1): 22 – 26. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 武选民,文冬光,张福存,等. 辽西山地缺水地区储水构造的特征和供水示范工程的建立[J]. *地质通报*, 2010, 29(1): 142–146. [WU Xuanmin, WEN Dongguang, ZHANG Fucun, et al. Groundwater-bearing structures in water deficient mountainous area, western Liaoning, China and set-up of civil water supply demonstration project[J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(1): 142 – 146. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 丁秉弼. 编制《朝阳地区蓄水构造类型图》的探索[J]. 河北地质学院学报, 1989, 12(2): 231 – 236. [DING Bingbi. Exploration on compiling the type map of water storage structure in Chaoyang area[J]. *Journal of Hebei Institute of Geosciences*, 1989, 12(2): 231 – 236. (in Chinese)]
- [14] 徐军祥,康凤新,张中祥,等. 山东省重大水文地质问题——理论技术创新与应用[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 2014. [XU Junxiang, KANG Fengxin, ZHANG Zhongxiang, et al. Major hydrogeological problems in Shandong Province - theoretical and technological innovation and application[M]. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 2014. (in Chinese)]
- [15] 张之淦,陈伟海. 岩溶蓄水构造与找水——以广西来宾小平阳为例[J]. *水文地质工程地质*, 2000, 27(6): 1 – 5. [ZHANG Zhigan, CHEN Weihai. Water-bearing structures in Karst terrain: A case study in Xiaopingyang area, Laibin, Guangxi[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2000, 27(6): 1 – 5. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 武选民,郭建强,文冬光,等. “逐步逼近式”找水方法及其在缺水地区水文地质勘查中的应用[J]. *西北地质*, 2009, 42(4): 102 – 108. [WU Xuanmin, GUO Jianqiang, WEN Dongguang, et al. The successive approximation method on groundwater exploration and its application in hydrogeological investigation in water-shortage areas[J]. *Northwestern Geology*, 2009, 42(4): 102 – 108. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 刘新号. 基于蓄水构造类型的山区综合找水技术[J]. *水文地质工程地质*, 2011, 38(6): 8 – 12. [LIU Xinhao. Integrated techniques of locating groundwater in mountain areas based on groundwater-impounding types[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2011, 38(6): 8 – 12. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 李伟,朱庆俊,王洪磊,等. 西南岩溶地区找水技术方法探讨[J]. *地质与勘探*, 2011, 47(5): 918 – 923. [LI Wei, ZHU Qingjun, WANG Honglei, et al. On methods of finding water in the Karst zones of southwest China[J]. *Geology and Exploration*, 2011, 47(5): 918 – 923. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 汪云,杨海博,郑梦琪,等. 泰莱盆地地下水蓄水构造特征及勘查定井研究[J]. *水利水电技术*, 2019, 50(3): 52 – 65. [WANG Yun, YANG Haibo, ZHENG Mengqi, et al. Study on characteristics of groundwater storage structures and well exploring and locating within Tailai Basin[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2019, 50(3): 52 – 65. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 潘晓东,梁杏,唐建生,等. 黔东北高原斜坡地区4种岩溶地下水系统模式及特点——基于地貌和蓄水构造特征[J]. *地球学报*, 2015, 36(1): 85 – 93. [PAN Xiaodong, LIANG Xing, TANG Jiansheng, et al. The patterns and characteristics of four Karst groundwater systems in Northeast Guizhou slope zone based on the landscape and reservoir structure[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2015, 36(1): 85 – 93. (in Chinese with English abstract)]
- [21] SOPHOCLEOUS M. Interactions between groundwater and surface water: the state of the science[J]. *Hydrogeology Journal*, 2002, 10(1): 52 – 67.
- [22] 中国地质调查局. 水文地质手册[M]. 2版. 北京: 地质出版社, 2012. [China Geological Survey. Hydrogeological manual[M]. 2nd ed. Beijing: Geological Publishing House, 2012. (in Chinese)]
- [23] 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心. 扶贫找水打井理论总结与技术方法创新成果[R]. 北京: 中国地质调查局, 2020. [Center for Hydrogeology and Environmental Geology. Theoretical summary and technological innovation of water exploration and well drilling for poverty alleviation[R]. Beijing: China Geological Survey, 2020. (in Chinese)]
- [24] 刘元晴,周乐,李伟,等. 鲁中山区下寒武统朱砂洞组似层状含水层成因分析[J]. *地质论评*, 2019, 65(3): 653 – 663. [LIU Yuanqing, ZHOU Le, LI Wei, et al. Genetic analysis of Lower Cambrian Zhushadong Formation layered aquifer in the central mountain area of Shandong Province[J]. *Geological Review*, 2019, 65(3): 653 – 663. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 李巨芬,李伟,冯庆达,等. 山东临朐盆地新构造运动特征及其对地下水的控制作用[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(1): 28 – 36. [LI Jufen, LI Wei, FENG

- Qingda, et al. Characteristics of the new tectonic movement and its control of groundwater in the Linqu Basin in Shandong[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(1): 28 – 36. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 潘晓东, 曾洁, 任坤, 等. 贵州毕节岩溶斜坡地带地下水赋存规律与钻探成井模式[J]. *地球学报*, 2018, 39(5): 606 – 612. [PAN Xiaodong, ZENG Jie, REN Kun, et al. Groundwater occurrence characteristics and drilling well models in Karst slope zone, Bijie, Guizhou Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2018, 39(5): 606 – 612. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 钱学溥. 中国蓄水构造类型[M]. 北京: 科学出版社, 1990. [QIAN Xuepu. Types of water storage structures in China[M]. Beijing: Science Press, 1990. (in Chinese)]
- [28] 肖楠森. 新构造裂隙水[J]. *水文地质工程地质*, 1981(4): 22 – 25. [XIAO Nansen. Neotectonic fissure water[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 1981(4): 22 – 25. (in Chinese)]
- [29] 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. [LI Zhiyong, LI Yiyong, HUANG Changsheng, et al. Typical structural geology and groundwater dynamics in red beds basins of Ganjiang River Basin, South China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(12): 1873 – 1882. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 张福存, 鄢毅, 刘安云, 等. 西南红层浅层地下水特征及其开发利用模式[J]. *水文地质工程地质*, 2008, 35(3): 53 – 56. [ZHANG Fucun, YAN Yi, LIU Anyun, et al. Characteristics and development models of shallow groundwater in the red strata of southwest China[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2008, 35(3): 53 – 56. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 张丽君, 顾承启, 范炎虎, 等编译. 国外干旱区地下水资源勘查评价方法现状与进展[R]. 北京: 地质矿产部地质环境管理司, 1997. [ZHANG Lijun, GU Chengqi, FAN Yanhu, et al. Present situation and progress of groundwater resources exploration and evaluation methods in arid areas abroad[R]. Beijing: Department of Geological Environment Management, Ministry of Geology and Mineral Resources, 1997. (in Chinese)]
- [32] 安永会, 张二勇. 找水打井典型案例汇编[M]. 北京: 科学出版社, 2019. [AN Yonghui, ZHANG Eryong. Collection of typical cases of water exploration and well drilling [M]. Beijing: Science Press, 2019. (in Chinese)]
- [33] 王新峰, 宋绵, 龚磊, 等. 赣南缺水地区地下水赋存特征及典型蓄水构造模式解析——以兴国县为例[J]. *地球学报*, 2018, 39(5): 573 – 579. [WANG Xinfeng, SONG Mian, GONG Lei, et al. An analysis of characteristics of groundwater occurrence and typical model of water-storage structures in water-deficient areas of southern Jiangxi Province: A case study of Xingguo County[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2018, 39(5): 573 – 579. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 张若琳