

贵州毕节岩溶斜坡地带地下水赋存规律与 钻探成井模式

潘晓东, 曾洁, 任坤, 焦友军, 彭聪, 兰干江

中国地质科学院岩溶地质研究所, 国土资源部岩溶动力学重点实验室, 广西桂林 541004;
联合国教科文组织国际岩溶研究中心, 广西桂林 541004

摘要: 结合贵州省毕节地区水文地质调查资料和 486 口钻井资料发现: 构造、岩性和地貌是控制钻孔是否成井的主要因素, 应结合具体实例综合分析。寒武系娄山关组($C_{2-3}ls$)、二叠系茅口组(P_{2q-m})、三叠系嘉陵江组(T_{1j})和关岭组(T_{2g})为主要岩溶找水层位, 占成井总数的 79.83%, 成井率分别为 88.1%、41.56%、76.32%、70.94%, 平均单井涌水量分别为 409.62 m³/d、165.93 m³/d、291.2 m³/d、277.42 m³/d, 相较于厚层纯灰岩, 灰岩夹碎屑岩地层和白云岩地层成井率更高, 且钻孔平均涌水量更大; 区域性断层不再是钻井找水的有利部位, 中小型断裂等小构造控制局部富水区成为钻井找水的有利靶区, 归纳 4 种钻探成井模式: 中小型断裂控水模式、逆断层上盘富水模式、含水层与隔水层接触带富水模式、白云岩岩溶裂隙富水模式。

关键词: 地下水; 岩溶斜坡地带; 钻井成井模式; 毕节; 地下水资源开发利用

中图分类号: P642.25; TV213.6 **文献标志码:** A **doi:** 10.3975/cagsb.2018.071501

Groundwater Occurrence Characteristics and Drilling Well Models in Karst Slope Zone, Bijie, Guizhou Province

PAN Xiao-dong, ZENG Jie, REN Kun, JIAO You-jun, PENG Cong, LAN Gan-jiang

*Karst Dynamics Laboratory, Ministry of Land and Resources, Institute of Karst Geology,
Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin, Guangxi 541004;
International Research Center on Karst under the Auspices of UNESCO, Guilin, Guangxi 541004*

Abstract: Combined with the hydrogeological survey data and 486 drilling data obtained in Bijie area of Guizhou Province, the authors found that structure, lithology and geomorphology are the main factors controlling drilling holes, which should be combined with concrete examples. The Cambrian Loushanguan Formation ($C_{2-3}ls$), the Permian Makkou Formation (P_{2q-m}), the Triassic Jialingjiang Formation (T_{1j}) and the Guanling formation (T_{2g}) are the main karst water-finding layers, which account for 79.83% of the total wells, and the well completion rates are 88.1%, 41.56%, 76.32% and 70.94% respectively. The average well water inflow is divided into 409.62 m³/d, 165.93 m³/d and 291.2 m³/d, 277.42 m³/d; compared with the thick layer of pure limestone, the limestone intercalated with classic and dolomite strata have a higher well formation rate, and the average water inflow of the borehole is greater. The regional fault is no longer the favorable part of drilling water exploration. The small structures such as small and medium faults control the local rich water area as the favorable target area for drilling water exploration, and this paper sums up 4 drilling patterns: the small and medium-sized fault water control mode, the reverse fault upper plate water rich mode, the aquifer and the aquifer contact zone water rich mode, and the dolomite interlayer crack water rich mode.

Key words: groundwater; karst slope zone; drilling well models; Bijie; groundwater water resources exploitation and utilization

本文由中国地质调查局地质调查项目(编号: DD20160285; 12120113052500)和国家科技支撑计划课题(编号: 2012BAJ11B04)联合资助。
为中国地质调查局、中国地质科学院 2017 年度地质科技十大进展第五名“科技创新引领地质调查精准支撑服务脱贫攻坚成效显著”的成果之一。

收稿日期: 2018-07-09; 改回日期: 2018-07-12; 网络首发日期: 2018-07-17。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 潘晓东, 男, 1984 年生。高级工程师。主要从事岩溶水文地质方面调查研究。E-mail: panxiaodong@karst.ac.cn。

岩溶地下水是赋存于岩溶介质中的重要水资源, 统计显示我国岩溶地下水天然资源总量约 $2.039.67 \times 10^8$ 吨/年, 占全国地下水资源总量的 23.4%, 在支撑服务国民经济建设中发挥重要作用(陈梦熊和马凤山, 2002; 韩行瑞, 2015)。在我国南方岩溶地区, 岩溶地下水资源丰富, 尤其以贵州最为突出, 可占当地地下水资源总量的 80%(卢耀如等, 2006; 袁道先, 2015), 调查显示 80%以上县城、乡镇、村屯饮用地下水(潘晓东等, 2015b; 袁建飞等, 2016)。

岩溶地下水资源丰富, 但由于其储存空间分布和相互间连通的高度不均匀, 给岩溶地下水资源开采带来了极大的挑战, 中国大量地质工作者在这方面做了许多工作, 取得一系列研究成果(李向全等, 2004; 蒋忠诚等, 2006; 党学亚和张茂省, 2007)。钻井取水是开采地下水资源的主要方式, 但由于对岩溶地下水资源赋存特征认识不够, 中国不少岩溶地区的成井率低于 50%, 尤其在岩溶山区钻井成井率低于 30%(焦彦杰等, 2011; 潘晓东等, 2015a), 因此归纳不同地区岩溶地下水赋存特征, 可以提高打井找水成功率, 进一步服务于国民经济建设(李伟等, 2011)。

贵州省毕节市地处乌蒙山腹地, 是中国西南岩溶的中心地带, 是乌蒙山片区脱贫攻坚的核心地带, 属于典型岩溶斜坡地带, 水文地质条件复杂, 是贵州省布井难度最大地区之一(王明章, 2012)。特殊的

岩溶地质环境导致了严重的工程性缺水, 频繁的极端气候引起了大范围的干旱灾害, 强烈的人为工程活动导致了突发性的水源干涸和地下水污染, 工业园区、产业园区建设和城镇化带动战略实施对水资源开发与保护提出了更高的要求(覃政教等, 2012; 任坤等, 2016)。

2013 年, 中国地质调查局启动乌蒙山区 1:5 万水文地质调查项目, 在贵州毕节地区实施钻井 112 眼, 涌水量达到 $48\ 107\ m^3/d$, 为 14 万缺水群众提供了饮用水源, 实现了地质调查项目与解决群众缺水问题的有机结合, 支撑国家脱贫攻坚建设。另笔者收集研究区以往水文地质资料及钻井资料 374 口, 对地下水赋存特征和钻探成井模式进行总结, 希望为以后岩溶地区钻井找水提供一定借鉴。

1 区域水文地质条件

研究区属北亚热带季风湿润气候, 丰富的降水为岩溶发育提供了充足补给来源; 岩溶发育强烈和河谷深切地貌导致地下水深埋且流动迅速, 地下水以裂隙流和管道流为主, 极不均一, 给地下水勘探和开发带来了极大困难, 在局部地区受到蓄水构造控制, 地下水局部均匀, 成为钻井取水的有利部位。

地貌总体隶属黔西高原中山峡谷区, 处于滇东高原向黔中山地丘陵开始过渡的倾斜地带, 受燕山运动和喜马拉雅运动改造, 地表大河深切发育, 与两岸高差大。研究区出露地层较为齐全, 自震旦系

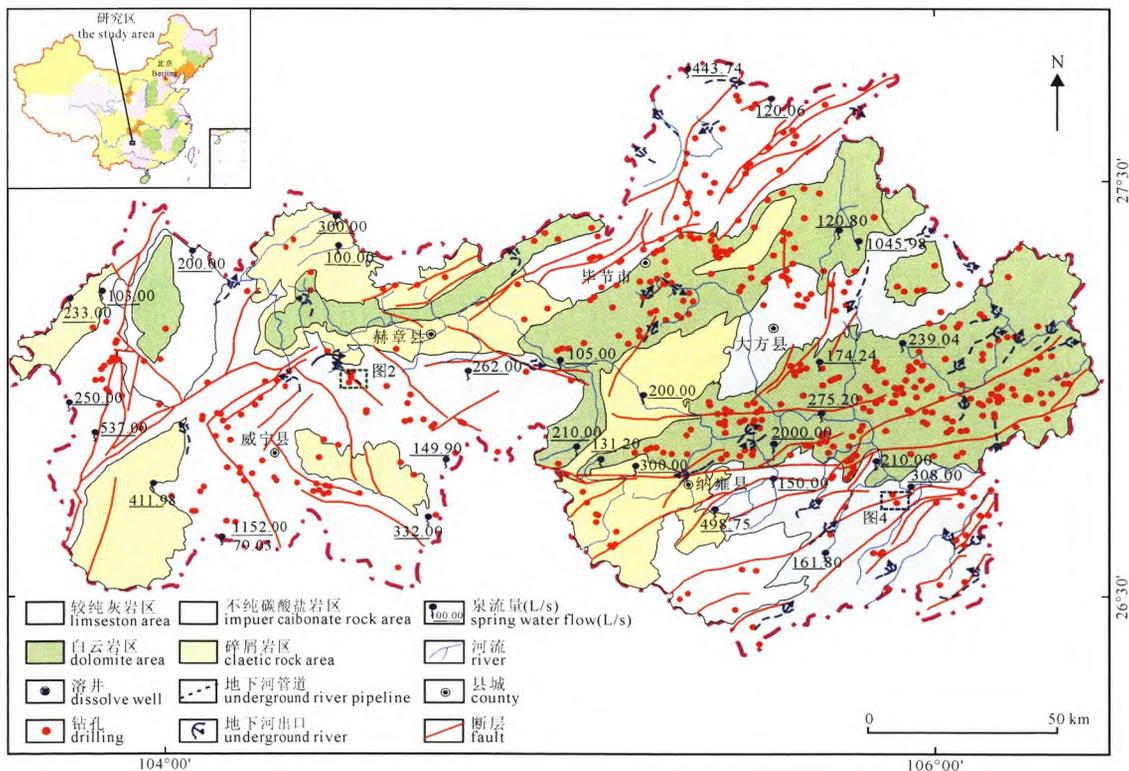


图 1 研究区区域水文地质背景
Fig. 1 Hydrogeological map of the study area

至第四系均有出露，其中以寒武系、二叠系和三叠系地层出露最为广泛，寒武系娄山关组白云岩、二叠系茅口组灰岩、三叠系嘉陵江组和关岭组不纯碳酸盐岩构成最主要岩溶含水层位。岩溶含水层位主要可以归纳为 3 种岩性组合，分别为厚层至块状较纯灰岩含水层位、白云岩含水层位和不纯碳酸盐岩含水层位(图 1)。

厚层至块状较纯灰岩以石炭系上统马坪组(C_{3mp})和二叠系中统栖霞-茅口组(P_{2q-m})灰岩最为典型，该层位岩性纯且厚度大，岩溶发育强烈，落水洞、溶洞、地下河分布广泛，是区内地下水分布最不均一的含水层位。

白云岩含水层位涉及地层单元有震旦系灯影组(Z_{bdn})、寒武系中上统娄山关组($C_{2,3ls}$)、石炭系下统摆佐组(C_{1b})和中统黄龙组(C_{2hn})，岩溶发育以溶隙、孔洞为主，且富含硅质、泥质层，岩性脆易形成岩溶裂隙，是本区地下水连通性和均一性最优的岩溶层位。

不纯碳酸盐岩含水层位涉及地层单元有寒武系下统清虚洞组(C_{1q})、石炭系下统大塘组(C_{1d})、三叠系下统夜郎组(T_{1y})、嘉陵江组(T_{1j})和中统关岭组(T_{2g})，岩性为灰岩、白云岩和碎屑岩组合，岩溶发育中等，其中碎屑岩隔水层和岩溶相对弱发育的白云岩导致地下水均一程度介于厚层灰岩和白云岩之间。

2 钻探成井模式

结合实施 112 口钻井资料和收集 374 口钻井资料，对区内岩溶地下水赋存特征和规律进行总结，归纳 4 种钻探成井模式：中小型断裂控水模式、逆断层上盘富水模式、含水层与隔水层接触带富水模式、白云岩岩溶裂隙富水模式。

2.1 中小型断裂控水模式

构造是岩溶地区钻井找水的关键，以往研究亦认为断层破碎带是地下水富集区，但近几年实施的钻孔发现，断层破碎带附近实施钻孔亦有许多干孔。究其原因，发现岩溶斜坡地带地下水总体表现为快速流动性，地下水径流带宽度一般小于十几米，而区域性断层规模大，断距几百至几千米，地下水虽然总体富集，但受限于断层和地下水径流带规模宽度差异，在区域性断层实施钻井成井率较低。而且断层附近泥质充填较多，利用地球物理探测方法区分溶洞充泥和充水难以实现，大断层附近找水出现许多干孔，而中小型断裂附近，岩溶发育到一定规模，构造断裂和岩溶作用导致地下水局部富水且均匀，往往成为打井找水有利地区。

以贵州省赫章县妈姑镇桃园村实施 3 口钻井为

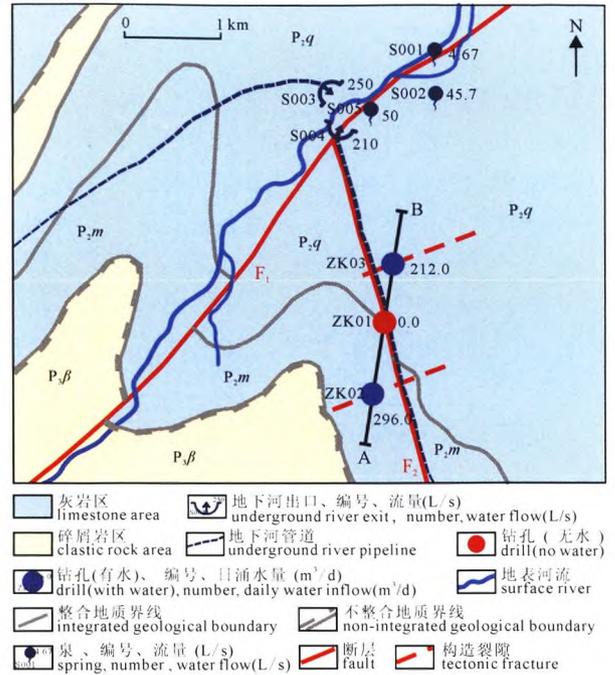


图 2 赫章县妈姑镇钻井水文地质图

Fig. 2 Hydrogeological map of deep valley pattern near Magu Town of Hezhang County

P_{2q} -二叠系栖霞组; P_{2m} -二叠系茅口组; $P_{3\beta}$ -峨眉山玄武岩组
 P_{2q} -Qixia Formation of Permian; P_{2m} -Maokou Formation of Permian; $P_{3\beta}$ -Emeishan basalt

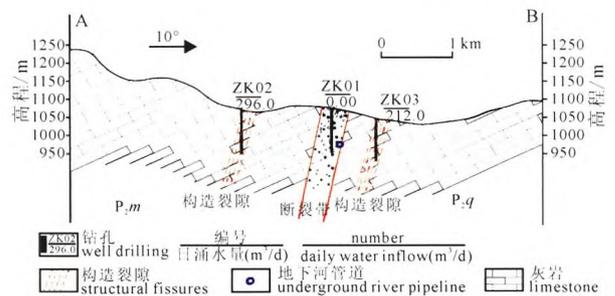


图 3 赫章县妈姑镇钻井剖面图

Fig. 3 Borehole profile at Magu Town of Hezhang County

P_{2q} -二叠系栖霞组; P_{2m} -二叠系茅口组
 P_{2q} -Qixia Formation of Permian;
 P_{2m} -Maokou Formation of Permian

例，ZK01 钻孔目标为区域性断层(F02)控制的地下河管道，钻进过程中虽然遇到了溶洞，但偏离了地下河主要径流带，为干孔；而 ZK02 和 ZK03 附近均发育有裂隙密集带，裂隙密集带宽度分别为 50 m 和 65 m，裂隙密集带走向垂直地下河管道方向，ZK02 和 ZK03 钻进过程中均未遇到溶洞，但构造裂隙与附近地下水连通，钻孔涌水量分别达到 296 m³/d 和 212 m³/d(图 2, 3)。

2.2 逆断层上盘富水模式

压性、压扭性逆断层核部岩层紧密，水文地质意义上具有拦水坝作用。具体调查研究发现，逆断层上盘上升、下盘下降，由于岩层相对位移，产生一系列与主干断层斜交的张裂隙和扭裂隙，且上盘

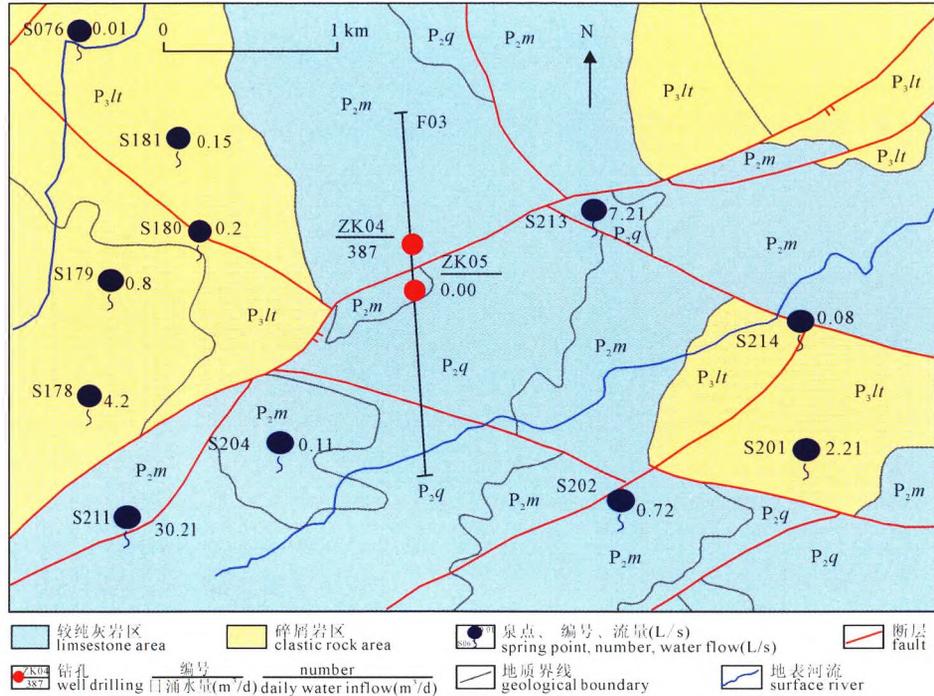


图 4 织金县三甲乡钻井水文地质图

Fig. 4 Hydrogeological map of deep valley pattern near Sanjia Town of Zhijin County

P_{2q}-二叠系栖霞组; P_{2m}-二叠系茅口组; P_{3lt}-二叠系龙潭组

P_{2q}-Qixia Formation of Permian; P_{2m}-Maokou Formation of Permian; P_{3lt}-Longtan Formation of Permian

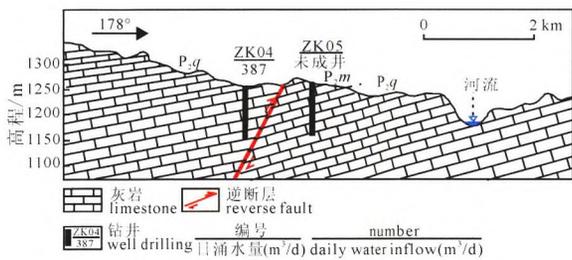


图 5 织金县三甲乡钻孔剖面示意图

Fig. 5 Borehole profile at Sanjia Town of Zhijin County

更容易形成张裂隙, 下盘容易形成扭裂隙。逆断层上盘碳酸盐岩分布区, 次生张性裂隙发育, 为岩溶空洞的形成提供了有利条件。在有一定汇水面积, 地下水自远向逆断层径流时候, 逆断层水文地质意义上具有拦水坝作用, 形成地下水库, 成为钻井取水的有利部位。

以织金县三甲乡实施 2 口钻井为例, ZK04 和 ZK05 钻孔分别位于 F03 断层两盘, ZK04 位于断层上盘来水方向一侧, ZK05 位于断层下盘一侧(图 4)。钻井过程中发现 ZK04 钻孔岩石破碎, 发育一系列小溶洞, 并有方解石填充, 涌水量达到 387 m³/d; ZK05 钻井岩石致密, 岩溶基本不发育, 为一干孔(图 5)。

2.3 含水层与隔水层接触带富水模式

含水层与隔水层作为水文地质研究的重要内容, 具有相对性。区内碳酸盐岩一般作为含水层,

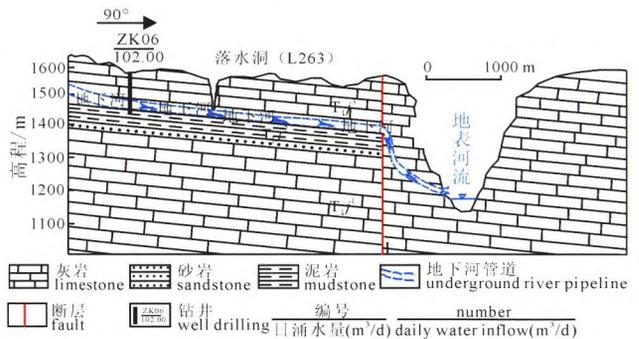


图 6 赫章县古达乡钻井剖面图

Fig. 6 Borehole profile at Guda Town of Hezhang County

T_{1j}¹-嘉陵江组一段; T_{1j}²-嘉陵江组二段; T_{1j}³-嘉陵江组三段

T_{1j}¹-first member of Jialingjiang Formation;

T_{1j}²-second member of Jialingjiang Formation;

T_{1j}³-third member of Jialingjiang Formation

碎屑岩(砂岩、泥岩)一般作为隔水层。在碳酸盐岩与碎屑岩接触地带, 地下水经含水层汇流至此, 受到隔水层的阻挡, 岩溶发育易形成空洞, 具有良好的地下水储存条件, 成为钻井取水的有利部位。根据含水层与隔水层位置关系和地下水流动赋存特征, 又可以分为 2 种类型: 碎屑岩隔水层模式、碎屑岩阻水墙模式。

以赫章县古达乡和大方县瓢井镇实施 2 口钻井为例, ZK06 和 ZK07 钻孔均位于碳酸盐岩含水层与碎屑岩隔水层附近(图 6, 7)。ZK06 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

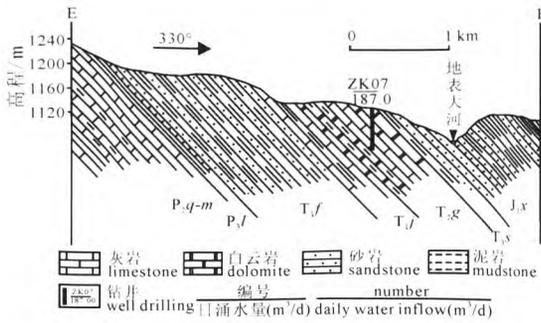


图 7 大方县瓢井镇钻井地质剖面图

Fig. 7 Borehole profile at Piaojiang Town of Dafang County

P₂q-m-二叠系栖霞-茅口组; P₃l-二叠系龙潭组; T₁f-三叠系飞仙关组; T₂g-三叠系关岭组; T₃s-三叠系三桥组; J₁x-侏罗系香溪组

P₂q-m-Qixia-Maokou Formation of Permian; P₃l-Longtan Formation of Permian; T₁f-Feixianguan Formation of Triassic; T₂g- Guanling Formation of Triassic; T₃s-Sanqiao Formation of Triassic; J₁x-Xiangxi Formation of Jurassic

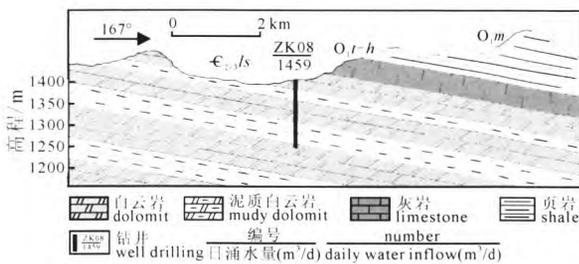


图 8 七星关区燕子口镇钻井地质剖面图

Fig. 8 Borehole profile at Yanzikou Town of Qixingguan County

O₁t-h-奥陶系桐梓-红花园组; C₂₋₃ls-寒武系娄山关组; O₁m-奥陶系湄潭组

O₁t-h-Tongzi-Honghuayuan Formation of Ordovician; C₂₋₃ls-Loushanguan Formation of Cambrian; O₁m-Meitan Formation of Ordovician

下水在隔水层之上径流赋存, 钻井涌水量 102 m³/d;

ZK07 钻孔碎屑岩隔水层位于碳酸盐岩含水层上部, 地下水在碳酸盐岩含水层中径流赋存, 碎屑岩隔水层起到阻水墙作用, 导致隔水层来水一侧地下水附近, 钻井涌水量 187 m³/d。

2.4 白云岩岩溶裂隙富水模式

白云岩地层因含水相对均匀, 钻井成井率极高, 为毕节地区乃至整个贵州地区被水文地质工作者所熟知。究其原因相较于灰岩, 白云岩地层岩溶弱发育, 含水介质以孔洞为主, 且白云岩岩层薄且脆, 层间裂隙较为发育, 相互之间连通性好, 水力联系密切, 地下水含水相对均匀, 易于成井。同时白云岩地层富含泥质、硅质层, 地下水垂向上具有一定成层性。

以七星关区燕子口镇 ZK08 钻井为例, 钻孔目标层为寒武系娄山关组(C₂₋₃ls)白云岩含水层, 钻井过程中多次出现漏水、反水现象, 且钻孔终孔后为一自流井, 自流量 289 m³/d, 说明钻井地下水垂向具有一定成层性, 且为承压水, 钻井涌水量 1 459 m³/d(图 8)。

3 钻井统计结果与影响因素

对 486 口钻井含水岩组、成井个数、总施工钻孔数、成井率、单井涌水量范围和平均单井涌水量进行统计, 486 口钻井成井 341 口, 成井率 70.16%, 单井涌水量 0~2 863.21 m³/d, 平均单井涌水量 262.94 m³/d。寒武系娄山关组(C₂₋₃ls)、二叠系茅口组(P₂q-m)、三叠系嘉陵江组(T₁j)和关岭组(T₂g)为主要岩溶找水层位, 占成井总数的 79.83%, 成井率分别为 88.1%、41.56%、76.32%、70.94%, 平均单井涌水量分别为 409.62 m³/d、165.93 m³/d、291.2 m³/d、277.42 m³/d。

表 1 不同岩溶层位成井数和单井涌水量统计结果表

Table 1 Statistical results of well completion and single well discharge in different karst formations

序号	含水岩组	地层代号	岩性特征	成井数/个	总井数/个	占总钻孔比例/%	成井率/%	最大涌水量范围/(m ³ /d)	平均单井涌水量/(m ³ /d)
1	灯影组	Zbdn	薄至厚层白云岩、碎屑白云岩	15	15	3.09	100.00	60.3~840.33	289.304
2	清虚洞组	C ₁ q	中厚层灰岩夹白云质灰岩、白云岩	5	7	1.44	71.43	0~295.3	122.89
3	娄山关组	C ₂₋₃ ls	薄层至块状细晶白云岩、泥质白云岩	37	42	8.64	88.10	0~1767.9	409.62
4	摆佐组	C ₁ b	灰白色厚层块状白云岩	18	21	4.32	85.71	0~944	262.97
5	大塘组	C ₁ d	灰岩夹页岩、砂岩	1	1	0.21	100.00	68.6	68.6
6	黄龙组	C ₂ hn	中厚层白云岩	9	15	3.09	60.00	0~485.43	152.38
7	马坪组	C ₃ mp	中厚层至块状灰岩	4	8	1.65	50.00	0~405.28	82.97
8	栖霞茅口组	P ₂ q-m	厚层至块状灰岩	32	77	15.84	41.56	0~2863.21	165.93
9	夜郎组	T ₁ y	上段和下段为泥岩、粉砂岩, 中段为灰岩	21	31	6.38	67.74	0~1328.4	237.04
10	嘉陵江组	T ₁ j	薄至中厚层灰岩、泥质灰岩夹泥岩	116	152	31.28	76.32	0~2863.21	291.2
11	关岭组	T ₂ g	下段为泥质灰岩、白云岩, 中段为灰岩, 上段为白云岩	83	117	24.07	70.94	0~1431.03	277.42
总计	—	—	—	341	486	100.00	70.16	0~2863.21	262.94

3.1 钻井成井率差异性分析

钻井统计结果表(表 1)显示,不同岩溶含水层位钻井成井率存在明显差异。成井率最低岩溶含水层位为二叠系中统栖霞-茅口组(P_{2q-m})厚层灰岩,成井率41.56%,成井率最高岩溶含水层位为震旦系灯影组($Zbdn$)白云岩,成井率100%。

岩溶含水层位成井率由高到低依次为震旦系灯影组($Zbdn$)、石炭系大塘组(C_1d)、寒武系娄山关组(C_{2-3ls})、石炭系摆佐组(C_1b)、三叠系嘉陵江组(T_{1j})、寒武系清虚洞组(C_1q)、三叠系关岭组(T_{2g})、三叠系夜郎组(T_{2y})、石炭系黄龙组(C_2hn)、石炭系马坪组(C_3mp)、二叠系栖霞-茅口组(P_{2q-m}),其中震旦系灯影组($Zbdn$)、寒武系娄山关组(C_{2-3ls})、石炭系摆佐组(C_1b)、石炭系黄龙组(C_2hn)为白云岩岩溶含水层位,石炭系大塘组(C_1d)、寒武系清虚洞组(C_1q)、三叠系关岭组(T_{2g})、三叠系夜郎组(T_{2y})为不纯碳酸盐岩含水层位,石炭系马坪组(C_3mp)、二叠系茅口组(P_{2q-m})为较纯灰岩含水层位,白云岩成井率>不纯碳酸盐岩成井率>较纯灰岩成井率。

考虑到钻井投入成本高,定井时的谨小慎微,大部分钻孔在汇水条件较好的地区施工,不同岩溶含水层位钻井成井率统计结果具有较强代表性。从不同岩溶含水层位岩性差异性分析,有研究表明(覃小群等,2017),影响碳酸盐岩溶蚀的主要因素为岩石成分和岩石结构。灰岩的方解石含量高、比溶蚀度高于白云岩、酸不溶物少于白云岩,更易被溶蚀,白云岩岩溶发育强度小于灰岩岩溶发育强度,造成白云岩区地下水均一性>>不纯碳酸盐岩区地下水均一性>较纯灰岩区地下水均一性,从而造成成井率的差异。

3.2 钻井涌水量差异性分析

钻井统计结果显示,486口钻孔平均单井涌水量262.94 m^3/d ,不同岩溶含水层位钻井单井涌水量存在明显差异。平均单井涌水量最小为68.6 m^3/d ,为石炭系大塘组(C_1d)岩溶含水层位;平均单井涌水量最大为409.62 m^3/d ,为寒武系娄山关组(C_{2-3ls})岩溶含水层位。

钻井平均涌水量由大到小依次为寒武系娄山关组(C_{2-3ls})、三叠系嘉陵江组(T_{1j})、震旦系灯影组($Zbdn$)、三叠系关岭组(T_{2g})、石炭系摆佐组(C_1b)、三叠系夜郎组(T_{2y})、二叠系栖霞-茅口组(P_{2q-m})、石炭系黄龙组(C_2hn)、寒武系清虚洞组(C_1q)、石炭系马坪组(C_3mp)、石炭系大塘组(C_1d)。

前人研究认为,钻井涌水量大小与钻井汇水条件、含水岩组结构类型和构造裂隙发育情况密切相关(张福存等,2008;韦跃龙等,2018)。在其它条件一致情况下,岩溶地区钻井涌水量与岩溶发育程度呈正相关,但本次统计结果显示区内岩溶最发

育厚层灰岩栖霞-茅口组地层(P_{2q-m})钻井涌水量仅有165.93 m^3/d ,低于平均值,平均单井涌水量最高层位为岩溶相对弱发育寒武系娄山关组(C_{2-3ls})白云岩地层。

毕节岩溶斜坡地带大部分为裸露岩溶石山地貌类型区,地表河谷深切,构成地下水排泄基准面,地下水表现为快速流动性。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,在地下滞留时间较短,地下空间多为无效含水介质(梁永平等,2013);而白云岩和不纯碳酸盐岩岩溶发育相对较弱,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,地下空间多为有效含水介质,导致弱岩溶发育的白云岩和不纯碳酸盐平均单井涌水量大于厚层灰岩平均单井涌水量。

4 结论与建议

(1)结合岩溶斜坡地带地下水径流赋存特点和486口钻井资料,归纳4种钻探成井模式:中小型断裂控水模式、逆断层上盘富水模式、含水层与隔水层接触带富水模式、白云岩岩溶裂隙富水模式。

(2)构造是钻探找水的关键,但在岩溶斜坡地带地下水快速径流,区域性断层控制的地下水主径流带处于非饱和状态,泥质充填给地球物理探测带来了极大困难,区域性断层不再是钻井找水的有利部位,实际钻探找水工作中发现中小型断裂等小构造控制局部富水区成为钻井找水的有利靶区。

(3)结合统计486口钻井资料发现,钻井成井率白云岩含水层>不纯碳酸盐岩含水层>较纯厚层灰岩含水层,原因主要为地下水均一性白云岩含水层位>不纯碳酸盐含水层位>较纯灰岩岩溶含水层位;平均单井涌水量白云岩含水层位>不纯碳酸盐含水层位>较纯灰岩岩溶含水层位,与岩溶发育强度不一致,主要为有效地下水含水空间白云岩含水层位>不纯碳酸盐含水层位>较纯灰岩岩溶含水层位,即受地下水快速径流排泄影响,强岩溶发育层位地下空间多为无效含水空间。

Acknowledgements:

This study was supported by China Geological Survey (Nos. DD20160285 and 12120113052500), and National Key Technology Research and Development Program(No. 2012BAJ11B04).

参考文献:

- 陈梦熊, 马凤山. 2002. 中国地下水资源与环境[M]. 北京: 地震出版社: 413-418.
党学亚, 张茂省. 2007. 晋西南峨嵋台原的岩溶水系统及岩溶水
资源潜力[J]. 水文地质工程地质, (4): 70-73.
韩行瑞. 2015. 岩溶水文地质学[M]. 北京: 科学出版社.

- 蒋忠诚, 夏日元, 时坚, 裴建国, 何师意, 梁彬. 2006. 西南岩溶地下水开发利用效应与潜力分析[J]. 地球学报, 31(5): 495-502.
- 焦彦杰, 吴文贤, 杨剑, 李富杨, 杨俊波. 2011. 云南岩溶石山区物探找水方法与实例分析[J]. 中国地质, 38(3): 770-778.
- 李伟, 朱庆俊, 王洪磊, 李成. 2011. 西南岩溶地区找水技术方法探讨[J]. 地质与勘探, 47(5): 918-923.
- 李向全, 张发旺, 毕二平, 韩占涛. 2004. 宁夏南部“南北古脊梁”岩溶裂隙水流系统分析[J]. 地球学报, 25(5): 571-574.
- 梁永平, 王维泰, 赵春红, 王玮, 唐春雷. 2013. 中国北方岩溶水变化特征及其环境问题[J]. 中国岩溶, 32(1): 34-42.
- 卢耀如, 张凤娥, 刘长礼, 童国榜, 张云. 2006. 中国典型地区岩溶水资源及其生态水文特性[J]. 地球学报, 27(5): 393-402.
- 潘晓东, 梁杏, 唐建生, 苏春田, 孟小军. 2015a. 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, 36(1): 85-93.
- 潘晓东, 唐建生, 苏春田, 孟小军, 曾洁, 杨杨. 2015b. 贵州高原斜坡岩溶地区逆断层两盘地下水开采规律探讨[J]. 地质论评, 61(1): 121-127.
- 任坤, 潘晓东, 兰干江, 焦友军, 曾洁, 孟小军, 庞园. 2016. 黔中茶店桥地下河流域不同水体硫酸盐浓度特征及来源识别[J]. 地质学报, 90(8): 1922-1932.
- 覃小群, 宋开本, 黄奇波, 蓝芙宁, 黄春阳, 黄辉. 2017. 广西岩溶峰林区地下水赋存特征及钻探成井模式[J]. 中国岩溶, 36(5): 618-625.
- 覃政教, 林玉石, 袁道先, 潘勇邦, 王明章. 2012. 西南岩溶区矿山与水污染问题探讨及建议[J]. 地球学报, 33(3): 341-348.
- 韦跃龙, 罗书文, 陈伟海, 欧阳志宏, 罗劭侃, 李成展. 2018. 贵州绥阳地质公园白云岩喀斯特景观特征及其形成演化分析[J]. 地球学报, 39(3): 365-383.
- 袁道先. 2015. 我国岩溶资源环境领域的创新问题[J]. 中国岩溶, 34(2): 98-100.
- 袁建飞, 邓国仕, 徐芬, 唐业旗, 李鹏岳. 2016. 毕节市北部岩溶地下水水化学特征及影响因素的多元统计分析[J]. 中国地质, 43(4): 1446-1456.
- 张福存, 鄢毅, 刘安云, 李旭峰. 2008. 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, (3): 53-56.
- English abstract).
- LI Xiang-quan, ZHANG Fa-wang, BI Er-ping, HAN Zhan-tao. 2004. The Deep Karst Groundwater System in Arid Regions of Northwestern China: A Case Study of Karst Fissure Groundwater in Southern Ningxia[J]. Acta Geoscientica Sinica, 25(5): 571-574(in Chinese with English abstract).
- LIANG Yong-ping, WANG Wei-tai, ZHAO Chun-hong, WANG Wei, TANG Chun-lei. 2013. Variations of karst water and environmental problems in North China[J]. Carsologica Sinica, 32(1): 34-42(in Chinese with English abstract).
- LU Yao-ru, ZHANG Feng-e, LIU Chang-li, TANG Guo-bang, ZHANG Yun. 2006. Karst Water Resources in Typical Areas of China and Their Eco-hydrological Characteristics[J]. Acta Geoscientica Sinica, 27(5): 393-402(in Chinese with English abstract).
- PAN Xiao-dong, LIANG Xiong, TANG Jian-sheng, SU Chun-tian, MENG Xiao-jun. 2015a. 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, 36(1): 85-93(in Chinese with English abstract).
- PAN Xiao-dong, TANG Jian-sheng, SU Chun-tian, MENG Xiao-jun, ZENG Jie, YANG Yang. 2015b. Discussion of Groundwater Exploring in Compressive Fault Zones in Karst Areas of Guizhou Plateau Slopes[J]. Geological Review, 61(1): 121-127(in Chinese with English abstract).
- QIN Xiao-qun, SONG Kai-ben, HUANG Qi-bo, LAN Fu-ning, HUANG Chun-yang, HUANG Hui. 2017. Groundwater occurrence characteristics and drilling well models in karst peak forest areas, Guangxi, China[J]. Carsologica Sinica, 36(5): 618-625(in Chinese with English abstract).
- QIN Zheng-jiao, LIN Yu-shi, YUAN Dao-xian, PAN Yong-bang, WANG Ming-zhang. 2002. A Discussion on Mine and Water Pollution Problems in Karst Areas in Southwest China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 33(3): 341-348(in Chinese with English abstract).
- REN Kun, PAN Xiao-dong, LAN Gan-jiang, ZENG Jie, JIAO You-jun, MENG Xiao-jun. 2016. Sulfate Concentrations and Source Identification in Different Water Bodies of the Chadianqiao Underground River Basin in Central Guizhou[J]. Acta Geologica Sinica, 90(8): 1922-1932(in Chinese with English abstract).
- WEI Yue-long, LUO Shu-wen, CHEN Wei-hai, OUYANG Zhi-hong, LUO Qu-kan, LI Cheng-zhan. 2018. Characteristics and Formation and Evolution Analysis of the Dolomite Karst Landscape of Suiyang Geopark, Guizhou Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 39(3): 365-383(in Chinese with English abstract).
- YUAN Dao-xian. 2015. Scientific innovation in karst resources and environment research field of China[J]. Carsologica Sinica, 34(2): 98-100(in Chinese with English abstract).
- YUAN Jian-fei, DENG Guo-shi, XU Fen, TANG Ye-qi, LI Peng-yue. 2016. The multivariate statistical analysis of chemical characteristics and influencing factors of karst groundwater in the northern part of Bijie city, Guizhou Province[J]. Geology in China, 43(4): 1446-1456(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Fu-cun, YAN Yi, LIU An-yun, LI Xu-feng. 2008. Characteristics and development models of shallow groundwater in the red strata of southwest China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, (3): 53-56(in Chinese with English abstract).