

毛吉成, 刘宏, 左双英, 等. 织金大龙井岩溶大泉形成机理研究[J]. 中国岩溶, 2019, 38(4): 539-545.
DOI: 10.11932/karst20190410

织金大龙井岩溶大泉形成机理研究

毛吉成¹, 刘宏², 左双英¹, 胡宣²

(1. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025;

2. 喀斯特环境与地质灾害防治教育部重点实验室(贵州大学), 贵阳 550025)

摘要:为了弄清大龙井岩溶大泉形成机理以及地下水补径排关系。通过调查大龙井地形地貌、补径排关系以及对水化学分析等研究大龙井岩溶大泉的形成机理,通过调查得知:大龙井岩溶大泉是形成于低山—丘陵地区的石灰岩地区。是山盆期和乌江期的强烈岩溶作用以及河谷的不断下切,加上上寨台地地表峰丛之间发育洼地、漏斗,中间区域的落水洞,大气降雨沿着落水洞进入地下,在重力作用下从南向北径流,在这过程中水流逐渐集中,岩溶空间形态也逐步扩大,最终水汇集于龙洞沟呈泉集中排泄出地面,形成大龙井岩溶大泉以及大龙井水系统。

关键词:岩溶;径流;补给;排泄;系统

中图分类号:P641.134 **文献标识码:**A

文章编号:1001-4810(2019)04-0539-07 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

织金大龙井岩溶大泉位于贵州省织金县茶店乡龙洞沟,是茶店乡最大的岩溶大泉。岩溶地下水经地下由南向北于茶店乡龙洞沟流出地表,形成大龙井岩溶大泉。岩溶地下水系统是西南岩溶石山地区最基本的水系统,岩溶大泉是大量岩溶地下水集中排泄而形成^[1-5]。关于西南岩溶地下水,前人开展过大量研究:归纳提出了岩溶水系统分类分级方案及其基本水文地质特征,将岩溶水系统分为三级,第一级为岩溶水系统,第二级分为浅循环和深循环岩溶水系统,第三级分别进一步分为裸露型、裸露—覆盖型、裸露—埋藏型及层控型和断裂带型五类基本的岩溶水系统^[6-7],得出了贵州省岩溶区管道流与水动力特征,认为管道流是受管道结构、补给方式和路径所控制的^[8-9]。通过同位素示踪剂及水化学分析法分析,追踪水源来源和最终流向可以得到地下水的补径排关系以及岩溶地下水径流特征^[10-13]。同时通过

对水文地质调查,得出了岩溶受岩性以及构造作用的抬升影响^[14-16],溶洞的发育对地层层位、构造部位、地形地貌单元有着极鲜明的选择性^[17-18]。贵州能化拟建一个化工厂在大龙井岩溶大泉北侧,化工厂位于大龙井岩溶大泉水流下游,为防止化工厂将水污染后流向下游水库,故迫切需要查明大龙井岩溶大泉的含水介质特征与补给特性,为今后大龙井水源保护提供指导。

1 基本地质条件

研究区位于大龙井岩溶大泉出水口南侧(图1)。是位于低山—丘陵地区,总体上地势起伏不平,南高北低。地形地貌格局由山盆期残存台地在乌江期抬升阶段河流、沟谷深切过程中形成,茶店—上寨村一带台地标高约1 350~1 400 m,地貌主要为岩溶地貌,其次为构造剥蚀地貌。大龙井后缘为海拔较高的灰岩溶蚀台地,台地上溶丘连绵,溶丘之间洼地、漏斗发育。

资助项目:贵州省山地地质灾害防治工程技术研究中心(黔科合平台人才[2017]5402号);贵州省科学技术厅社会发展科技攻关项目(黔科合支撑[2017]2866)

第一作者简介:毛吉成(1994—),男,硕士研究生,研究方向:地质工程勘察研究。E-mail:1439711473@qq.com。

收稿日期:2019-04-30



图1 大龙井泉点出水口

Fig. 1 Outlets of Dalongjing springs

研究区大部分区域出露碳酸盐岩,属岩溶地貌。出露的碳酸盐岩岩性上有较大的差异,调查区出露地层主要为三叠系中统关岭组一段(T_{2g}^1)的泥质白云岩、关岭组二段(T_{2g}^2)的灰岩以及三叠系中统杨柳井组(T_{2y})的白云岩,可溶性有较大差异,加上岩体结构、地质构造的影响,在地貌上表现出明显的差异性。如白云岩可溶性差、主要为薄层结构,地表岩溶景观不显著,地表溶沟溶槽、石芽不发育,山体浑圆,发育冲沟,兼有强烈的剥蚀作用,地表多被植被覆盖。而灰岩可溶性较强,主要为厚层状结构,地表岩溶景观十分显著,地表溶沟溶槽、石芽发育,岩石出露地表,山体较陡峻。灰岩区微地貌单元上以溶蚀丘陵、低山为主,岩溶槽谷、洼地、漏斗、落水洞等地表岩溶景观也较普遍。

调查区主要发育了两条断层以及一个上寨背斜,两条断层主要为NE—SW向和NW—SE向的断裂,其中NE—SW向断裂切割地层分别为二叠系和三叠系。主断裂走向变化于 $30^\circ\sim 65^\circ$,断面倾向南东或北西,倾角 $65^\circ\sim 80^\circ$ 。NW—SE向的断裂规模较小,延伸长度大约2~5 km,在区内错断NE—SW向断层。上寨背斜轴线为NE—SW向,长约3.5 km,核部地层为关岭组一段泥质白云岩,两翼地层为关岭组二段灰岩、杨柳井组白云岩。受北东向和南西向两个方向断层的影响,背斜西南侧地层不对称(图2)。

2 大龙井泉点基本情况

2.1 流量大小及地下水类型

根据调查资料以及现场实际调查,大龙井岩溶大泉出水口高程约1 236 m,雨季暴雨后泉最大流量

$144\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ (1980.7.9), 枯季最小流量 $20.2\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ (2016.1.14)。图3是织金茶店乡最大的岩溶大泉。

研究区主要分布在灰岩、白云质灰岩地区,总体裂隙十分发育。地下水动力条件为管道、廊道集中流运动,含水极不均一,以地下河、岩溶大泉为主要排泄特征。大龙井泉点发育在关岭组中段,关岭组中段灰岩溶隙裂隙等较为发育,局部发育较大的溶洞,并形成地下暗河等,水量较大。研究区地下水类型主要为碳酸盐岩溶洞水。

2.2 水化学分析

水化学分析法是在关于地下水研究方面的主要手段之一,它在水的径流等研究中也具有独特的研究意义,在一定程度上记录着水体的补给来源、赋存条件、渗流途径等信息,因此,水文地球化学指标可作为研究地下水补、径、排的重要依据^[12,19-20]。本次在研究区内选2个地下水点进行采样与水化学指标的测定,从水化学类型、水化学离子指标进一步分析研究区地下水的补、径、排条件。

岩溶水化学成分的形成是地质条件、水文地质条件、物理化学平衡等因素综合控制下元、素迁移的结果,其空间分布特征主要取决于地下水的循环交替条件,反之,岩溶水的化学组成也可反映水动力场的基本特征^[21]。

由图4可清楚地看出:这些水样点在图形中都比较集中,说明两组样中水化学类型变化不大,在阴离子三角形图中,这些水样点落在三角形图的左侧边界偏下附近, Cl^- 贫乏;在阳离子三角形图中,这些水样点落在三角形图的左侧偏下部附近, Na^+ 和 K^+ 含量较少,主要为 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} ;在菱形区域上这些水样点

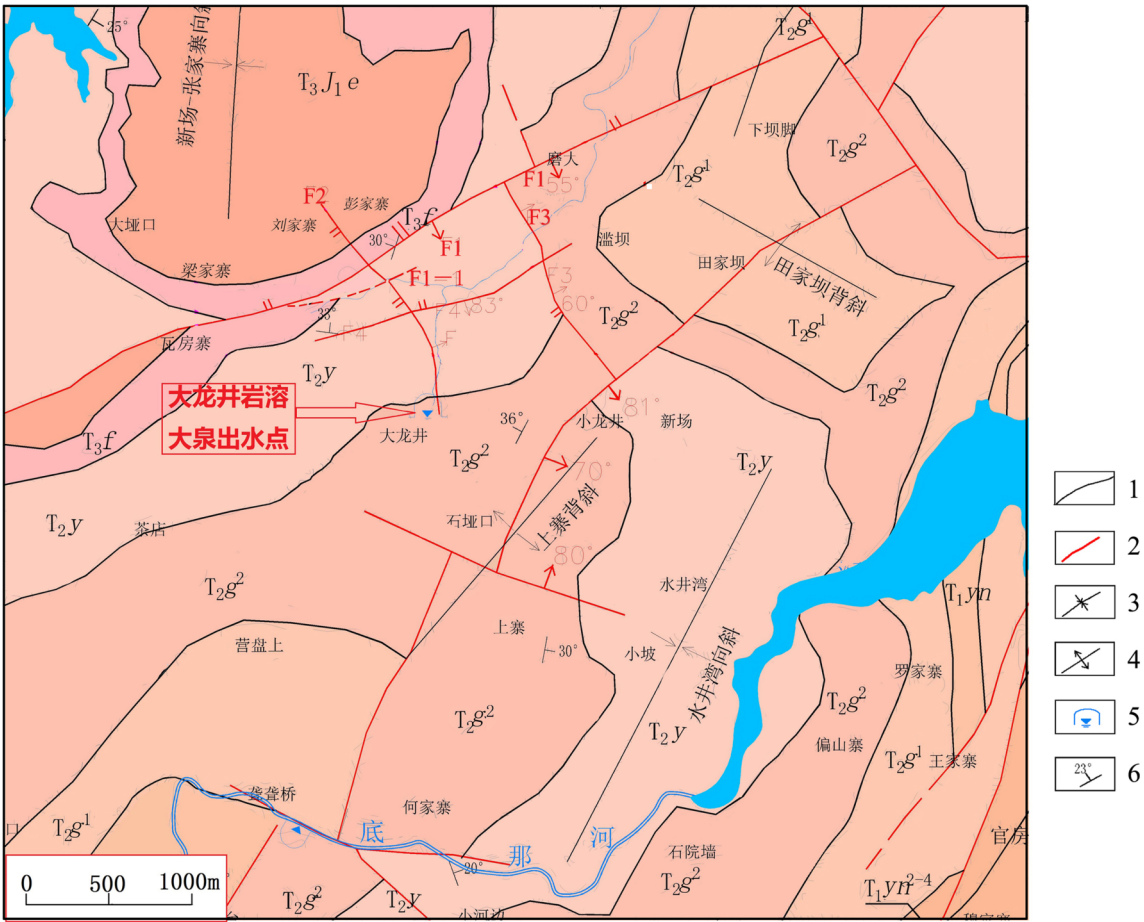


图 2 大龙井泉区地质简图

Fig. 2 Simplified geologic map around the Dalongjing spring

T_3J_1e —二桥组 T_3f —法郎组 T_2Y —杨柳井组湖沼层段 T_2g^2 —关岭组二段 T_2g^1 —关岭组一段
 T_{1yn} —永宁镇组 T_{1y} —夜郎组 1—地质界线 2—断层 3—向斜 4—背斜 5—充水溶洞 6—产状



图 3 大龙井岩溶大泉出水口

Fig. 3 Outlets of big karst springs at Dalongjing

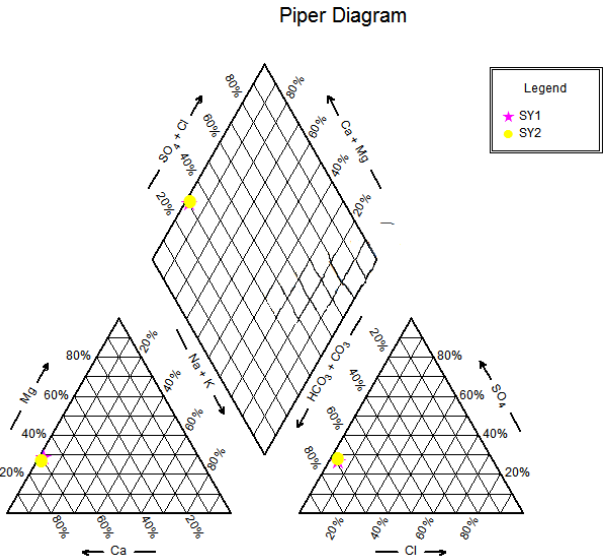


图 4 Piper 三线图

Fig. 4 Piper three-line chart

表1 大龙井泉水化学分析
Table 1 Water chemical analysis of Dalongjing springs

水样 编号	化学组分/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$									总硬度 $\rho(\text{CaCO}_3)$	矿化度	pH
	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}				
含量	SY1	87.51	21.73	3.00	2.00	7.20	254.33	10.64	75.69	307.97	334.94	8.58
	SY2	87.20	20.01	2.90	1.90	3.84	249.94	8.51	79.08	300.12	328.41	8.32

主要分布左侧偏下部附近,水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$ 型。pH为8.32,呈弱碱性水。与西南岩溶地下水的特征一致^[7],主要受控于碳酸盐岩溶解。

3 大龙井泉域划分

3.1 大龙井岩溶发育特征

大龙井的补给区为其后缘斜坡及上寨村台地上关岭组二段灰岩出露区。台地与大龙井出水点高差近200 m。台地地表发育峰丛(丘陵),峰顶与台面高差30~50 m,峰丛之间发育洼地、漏斗,中间区域发育落水洞。大部分洼地面积不大,也有个别直径过百米的洼地。其地表岩溶的发育特征与两条断层从台地中部穿过,同时发育褶皱构造(背斜)有关。台地上漏斗、洼地已覆盖一定厚度的红黏土或次生红黏土,峰丛之间均被开垦为耕地,山体上基岩出露地表。台地上未发现土洞、地表塌陷。大气降水除少量蒸发、滞留于覆盖层外,绝大部分补充地下水,为地下岩溶的发育提供了充分的保证。

台地地下岩溶空间发育特征受到岩体结构特征及构造的影响,总体上沿层面、构造裂隙面发展。地下岩溶空间形态可分为垂向发育带和水平发育带。垂向发育带地下岩溶空间形态上主要为竖向(局部斜向)洞穴和溶蚀裂隙。因处于地表水入渗区,而地表水仅为大气降水,补给量有限,垂向发育带不具备发育规模较大的岩溶空间的条件,故台地上未发现地表塌陷现象。下部地下水逐步转化为水平径流,地下岩溶形态发生改变,在强水平径流带至排泄点,水流逐渐集中,岩溶空间形态逐步扩大,由溶蚀裂缝、小型洞隙转化为较大的溶蚀洞穴、管道。

此外,大龙井后缘至台顶之间为缓坡,斜坡区地表发育石芽、溶沟溶槽、岩溶落水洞,大气降水以分散流的形式补给地下水,地下岩溶空间形态主要为溶蚀裂隙。

3.2 大龙井岩溶大泉形成过程

研究区位于晚近山盆期第二亚期台面后缘与乌

江期的过渡垄升带,上寨村台地为山盆期第二亚期残存台地,标高1 400~1 500 m。山盆期第二亚期地壳稳定时间长、岩溶作用强烈,水平溶蚀作用为主,垂直溶蚀作用次之,形成宽谷、盆地。乌江期由于地壳强烈上升,岩溶由水平侵蚀为主变为垂向侵蚀为主,六冲河、底那河河谷下切,大龙井泉点出水点北侧逐步发育出以冲沟,形成场地至底那河之间的上寨村台地。台地岩溶作用也变为以垂向作用为主,地表水短途径流后沿层面、节理裂隙下渗,在台地上逐步形成溶丘、洼地、漏斗、落水洞等岩溶地表岩溶景观。随着台地周边地形的不断下切,台地岩溶水的排泄基准面不断改变,且早期以分散性排泄为主,包括台地东侧新场—水井湾也应为排泄区,因此早期不具备发育规模较大水平洞穴的条件。底那河和以冲沟的下切导致台地地下水位不断降低,排泄点逐步集中在南北两侧。台地北侧以冲沟下切深度不断增大,成为台地岩溶水排泄区之一,但北侧灰岩区上覆杨柳井组白云岩,白云岩岩溶发育条件差,岩溶发育弱,透水性差,对地下水形成阻挡作用,灰岩区岩溶水只能从发育冲沟的相对低点区域排泄,在地势较低的冲沟末端形成集中的地下水排泄点。场地内发育的断层导致在该位置形成深切冲沟,逐渐成为灰岩区岩溶水的集中排泄点。同时入渗区和排泄面(点)之间高差不断增大,形成分流状—差流状地下水动力条件,有足够的补给量且地下水动力条件充足,最终形成了大龙井岩溶大泉(图5)。

此外,台地南侧底那河下切深度大于大龙井出水点,且位于背斜的南翼,必然发育岩溶大泉。该区域位于峡谷中,底那河水量大,未能调查到出水点。台地后缘虽有大量的地下水补给,但早期排泄基准面六冲河、底那河高程未降低到足够深度,地表水入渗后很快又转化为泉水向台地周边低洼区域排泄,汇集于以冲沟、底那河,主要以地表径流的形式向六冲河排泄。经勘察大龙井至六冲河区域灰岩岩溶发育较弱,为平流状地下水动力条件,不具备发育较大岩溶空间的条件(图6)。

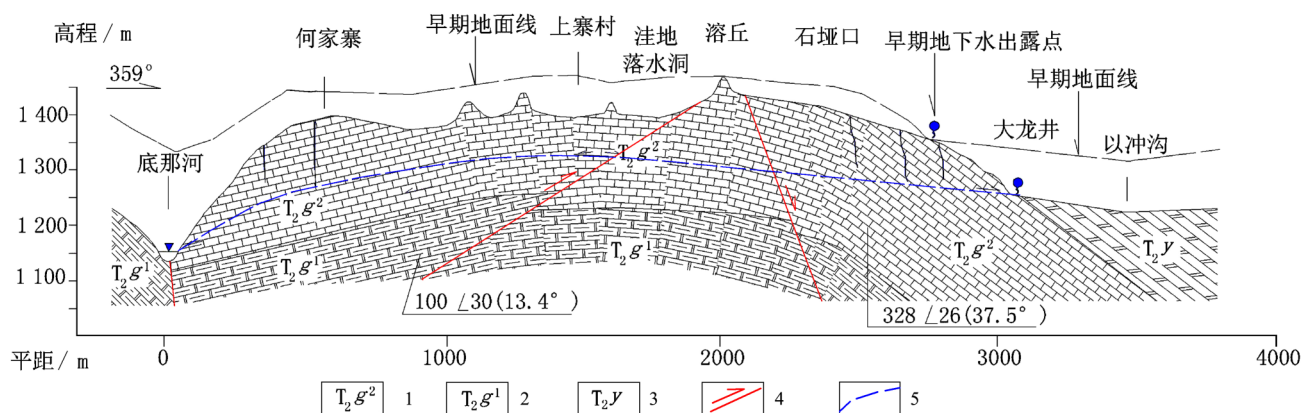


图5 大龙井岩溶水子系统形成过程示意图

Fig. 5 Schematic diagram showing the formation process of Dalongjing karst sub-systems

1-关岭组二段(灰岩) 2-关岭组一段(白云岩) 3-杨柳井组(白云岩) 4-断层 5-地下水位线

4 大龙井岩溶地下水系统

4.1 大龙井岩溶水系统补径排关系

大龙井地下水主要受大气降水补给和部分生活用水排放补给。不同区域大气降水入渗条件差异较大。砂泥岩分布区多为丘陵斜坡,大气降水大部分以地表径流的方式汇集于冲沟。岩溶发育很弱的白云岩、泥质白云岩、泥质灰岩等地层在地貌上多为中低山、丘陵斜坡地貌,冲沟发育,入渗条件也较差。灰岩分布区地表发育溶蚀洼地、槽谷、漏斗、落水洞,大气降水入渗条件好,大部分进入地下补给地下水。

大龙井的补给区为其后缘斜坡及上寨村台地上关岭组二段灰岩出露区,补给主要为上寨台地地表水入渗,主要含水层为关岭组第二段石灰岩。关岭组第二段石灰岩岩溶发育,地表基岩裸露、溶蚀洼地和落水洞发育,含岩溶溶洞水。同时大龙井后缘至台顶之间为缓坡,斜坡区地表发育石芽、溶沟溶槽,大气降水以分散流的形式补给地下水。上寨台地地表发育峰丛,峰丛之间发育洼地、漏斗,中间区域发育落水洞。形成了良好的汇水区域。同时,其经过台地的两条断层以及褶皱构造(背斜),加速了大气降雨的入渗速度,大气降水除少量蒸发、滞留于覆盖层外,绝大部分补充地下水。

台地地下的岩溶空间形态为垂向发育带和水平发育带。大气降雨与地表入渗,入渗到地下后遇到底部关岭组一段岩溶不发育的白云岩,下部地下水逐步转化为水平径流,在重力作用下从南向北径流,在强水平径流带至排泄点,水流逐渐集中,随着岩溶空间形态逐步扩大,水流由沿着溶蚀裂缝、小型洞隙

转化为较大的溶蚀洞穴、管道流。地下水流也逐渐集中,在大龙井地带受三叠系中统杨柳井组一段底部泥质白云岩阻隔,最终绝大部分水汇集于大龙井呈泉集中排泄出地面,沿着龙洞沟流向下流,汇入以冲沟中。

4.2 大龙井岩溶水系统

位于大龙井泉点出水点东西侧。该系统西部、北部、东部边界为杨柳井组一段(T_2y^1)底部“浅灰色厚层泥晶—细晶白云岩,灰质白云岩,夹薄层含泥质白云岩”作为地下水系统的隔水边界,南侧边界以关岭组二段(T_2g^2)及关岭组一段(T_2g^1)泥质白云岩分水岭作为边界,该子系统面积 3.35 km^2 。

根据调查资料,雨季暴雨后泉最大流量 $144 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ (1980. 7. 9),枯季最小流量 $20.2 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ (2016. 1. 14),动态变化率7.13倍,极不稳定。大龙井泉水排泄出地表后,全部通过龙洞沟汇入以冲沟后排出。而且泉流量在暴雨后迅速增大,具有“近源补给”的特点和典型的“暴起暴落”、“快补快排”山区的岩溶水动态特征。根据1:5万水文地质图分析,该泉域面积约 3.35 km^2 ,据此计算出子系统内地下水枯季径流模数 $5.2 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$ 。

根据贵州省地矿局在报告在地下水资源计算部分反映,调查区山地及河谷斜坡区石灰岩岩溶含水层的枯季地下径流模数为 $4.15\sim 5.20 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$,富水性中等。本场地计算结果为区调资料的上限值,与本区域大气降水入渗条件好有关。

上述枯水期地下水均衡分析表明大龙井岩溶泉所在的泉域作为一个独立的地下水子系统,大气降

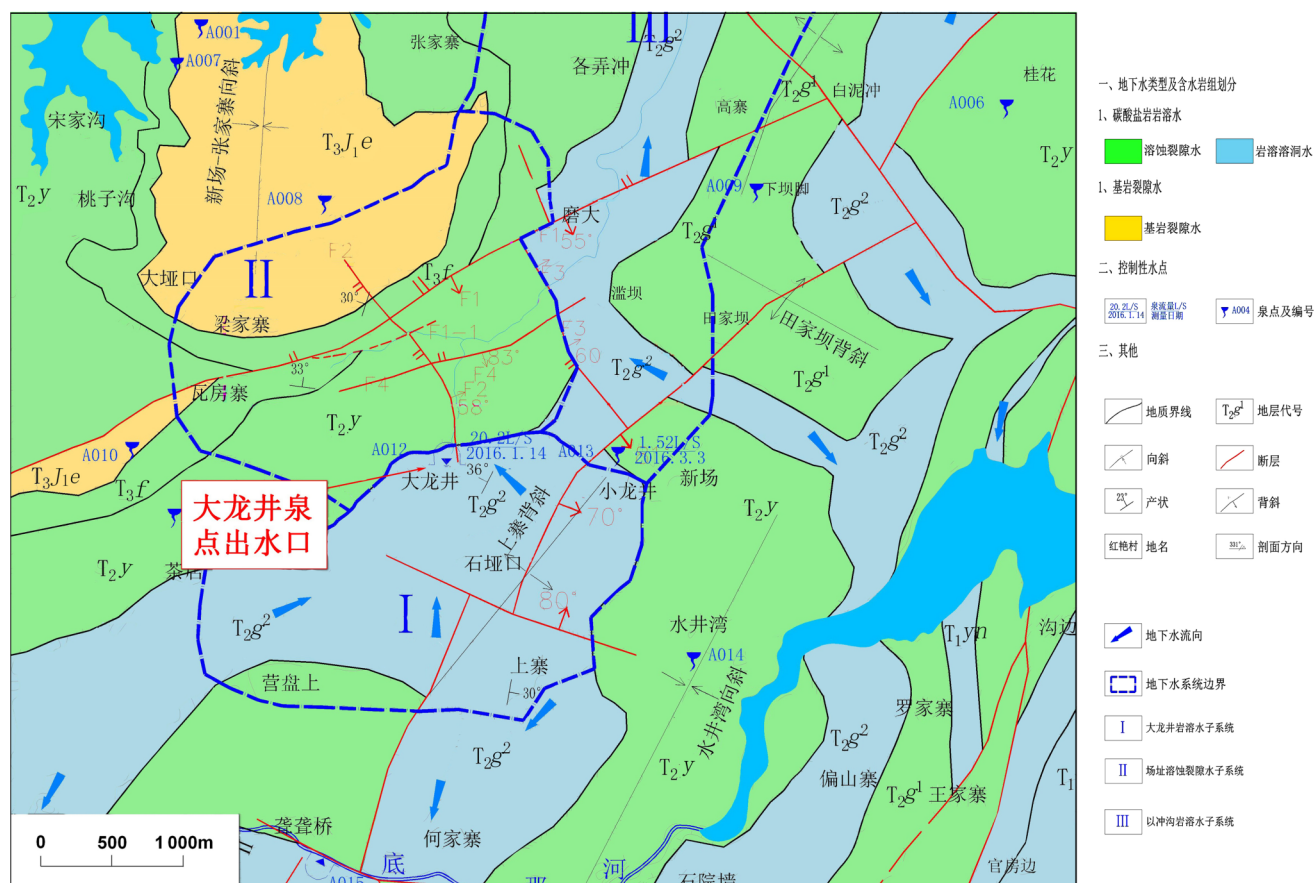


图6 大龙井水系统

Fig. 6 Dalongjing water system

水入渗补给后经短途地下径流,绝大部分从龙洞沟大龙井泉点排泄,因此暴雨后流量猛增。极少部分补充深循环地下水。

5 结论

大龙井岩溶大泉是形成于低山—丘陵地区的碳酸盐岩地区,岩性和可溶性有较大差异,加上地质构造的影响,地貌上表现出明显的差异性。地表溶沟溶槽、石芽发育,岩石出露地表,山体较陡峻。同时上寨台地洼地、漏斗、落水洞等地表岩溶景观也较普遍。为地表水下渗提供了良好的通道。地表水入渗后在地下逐步转化为水平径流,地下岩溶形态发生改变,水流逐渐集中,岩溶空间形态逐步扩大,由溶蚀裂缝、小型洞隙转化为较大的溶蚀洞穴、管道。最终形成了大龙井岩溶地下空间。

大龙井岩溶大泉泉水类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型,呈弱碱性。受控于碳酸盐岩溶解。主要原因是大龙井岩溶大泉主要是受大气降雨补给以及少部分生活用

水补给,沿着后缘斜坡地带以及上寨台地间落水洞等进入地下,在重力作用下从南向北径流,在这过程中水流逐渐集中,最终形成大龙井岩溶大泉以及大龙井水系统。大龙井岩溶大泉流量受季节影响比较大,泉流量在暴雨后迅速增大,具有“近源补给”的特点和典型的“暴起暴落”、“快补快排”山区的岩溶水动态特征。

参考文献

- [1] 赵春红,梁永平,王维泰,等.北京西山泉域岩溶水系统特征探讨[J].中国岩溶,2017,36(5):641-647.
- [2] 徐中平,周训,崔相飞,等.岩溶区地下水数值模拟研究进展[J].中国岩溶,2018,37(4):475-483.
- [3] 罗明明,陈植华,周宏,等.岩溶流域地下水调蓄资源量评价[J].水文地质工程地质,2016,43(6):14-20.
- [4] 易瑞.贵州岩溶地下水系形成和发育的基本特征研究[J].资源信息与工程,2016,31(6):56,58.
- [5] 莫美仙,王宇,李峰,等.云南南洞地下河系统边界及性质研究[J].中国岩溶,2019,38(2):173-185.
- [6] 王宇.西南岩溶地区岩溶水系统分类、特征及勘查评价要点[J].中国岩溶,2002,21(2):44-49.

- [7] 裴建国,梁茂珍,陈阵.西南岩溶石山地区岩溶地下水系统划分及其主要特征值统计[J].中国岩溶,2008,27(1):6-10.
- [8] 王腊春,章海生,严苏宁.贵州省岩溶区管道流及其水动力特征[J].中国岩溶,1995,14(4):315-322.
- [9] 王泽君,周宏,罗明明,等.南方小型岩溶流域与非岩溶流域的释水过程及径流组分差异[J].水文地质工程地质,2019,46(3):27-32,39.
- [10] 陶芸,陈锁忠,都娥娥.基于同位素与水化学分析法的地下水补径排研究:以苏锡常地区浅层地下水为例[J].水文,2011,31(3):76-81.
- [11] 刘大刚,吕玉香,郭传道.西南典型断陷盆地岩溶地下水径流特征研究[J].地下水,2018,40(1):15-17.
- [12] 徐一萍,向喜琼,杨根兰.开阳南江大峡谷岩溶地下水补径排研究[J/OL].水利水电技术:1-11[2019-07-10].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1757.tv.20190404.1540.002.html>.
- [13] 蔡月梅,蔡五田,刘金巍,等.河南省某大型水源地岩溶水水化学及同位素特征[J].水文地质工程地质,2018,45(5):41-47.
- [14] 陈宏峰,张发旺,何愿,等.地质与地貌条件对岩溶系统的控制与指示[J].水文地质工程地质,2016,43(5):42-47.
- [15] 罗利川,梁杏,周宏,等.香溪河流域岩溶洞穴发育与分布特征[J].中国岩溶,2018,37(3):450-461.
- [16] 曹建文,夏日元.西南岩溶石山地区不同类型地下河开发利用模式探讨[J].中国岩溶,2017,36(5):609-617.
- [17] 王中美,杨根兰,胡良博.贵州碳酸盐岩相与岩溶地下水赋水条件关系研究[J].水文地质工程地质,2016,43(1):6-11.
- [18] 罗孝芹.贵阳龙洞堡机场岩溶发育规律及控制因素研究[D].成都:成都理工大学,2017.
- [19] 郭清海,王焰新.水文地球化学信息对岩溶地下水流动系统特征的指示意义:以山西神头泉域为例[J].地质科技情报,2006(3):85-88.
- [20] 王珺瑜,王家乐,靳孟贵.济南泉域岩溶水水化学特征及其成因[J].地球科学,2017,42(5):821-831.
- [21] 黄奇波,覃小群,刘朋雨,等.柳林泉域岩溶地下水区域演化规律及控制因素[J].环境科学,2019,40(5):2132-2142.

Formation mechanism of the karst spring in Dalongjing, Zhijin, Guizhou Province

MAO Jicheng¹, LIU Hong², ZUO Shuangying¹, HU Xuan²

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China; 2. Key Laboratory of Karst Environment and Geological Hazard Prevention, Ministry of Education(Guizhou University), Guiyang, Guizhou 550025, China)

Abstract The Dalongjing karst spring system lies in Chadian township, Zhijin, Guizhou Province. This work attempts to clarify its formation mechanism and the relevant relationship between groundwater recharge and drainage by investigations to the terrain, landform, and chemical analysis. Results show that this big karst spring system formed in a limestone area with low mountains and hills. It is formed during the Range-basin and the Wujiang periods when the area have experienced a persistent river incision and strong karstification. As a result, karst depressions and funnels extensively developed between surface peak clusters on the Shangzhai platform and the water holes in the middle area. In addition, atmospheric rainwater enters the underground along the sinkhole, producing southward runoffs at a natural gradient. During this process, the water flow is gradually concentrated in the karst cave voids, and in turn the karst space is gradually expanded by means of physical and chemical erosions. Finally, the water is collected in the Longdonggou and discharges to the ground surface in a concentrating manner, resulting in the Dalongjing karst springs and the Dalongjing water system.

Key words karst, runoff, supply, excretion, system

(编辑 张玲)