

于斯遥, 秦梓萱, 杨艳娜, 等. 明月峡背斜南部张关—排花洞岩溶水系统地下水径流模式解析[J]. 中国岩溶, 2022, 41(4): 599-609.

DOI: 10.11932/karst20220408

明月峡背斜南部张关—排花洞岩溶水系统地下水径流模式解析

于斯遥¹, 秦梓萱¹, 杨艳娜¹, 毛唯娜², 郝朝², 许模¹, 刘洋³

(1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川成都 610059;

2. 重庆城投基础设施建设有限公司, 重庆 400020; 3. 重庆市勘测院, 重庆 400020)

摘要:川东明月峡背斜地下岩溶发育的强烈非均质性造就了独特的地下水径流模式, 孕育出区域复杂的岩溶工程水文地质问题, 查明明月峡背斜南段地下水径流模式对指导区内隧道工程选址及建设具有重要意义。文章在已有研究基础上, 以“张关—排花洞”岩溶水系统为研究区, 通过系统厘清区内水文地质条件, 深入剖析区内地下水水文地球化学特征及水动力条件, 明确区内岩溶含水介质不均一性控制下的地下水小尺度径流规律。结果显示: 研究区地下水在平面上表现为形似“扫帚状”的径流模式: 在补给、径流区, 三叠系下统嘉陵江组一段(T_j^1)、嘉陵江组三段(T_j^3)地层(强岩溶化)与嘉陵江组二段(T_j^2)、嘉陵江组四段(T_j^4)地层(弱岩溶化)呈间互状分布的特点导致相邻地层之间水力联系较弱, 以地层为单位形成多个相对独立的岩溶水子系统; 在研究区排泄区, 受控于势汇最强的 T_j^3 内部管道流对其他地层地下水持续的袭夺效应, 地下水统一汇聚至排花洞暗河出口向御临河排泄, 各岩溶水子系统最终整合为一个岩溶水系统。

关键词:川东褶皱带; 明月峡背斜; 张关—排花洞岩溶水系统; 地下水径流模式; 小尺度

中图分类号: P641.13 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2022)04-0599-11 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

岩溶地区在地质构造、地层岩性及气象水文等多种内外因素综合作用下, 岩溶含水介质各向异性的发育使得地下水的分布及赋存往往具有高度的非均质性特征^[1-3], 由此造成隧道涌突水灾害的强烈突发性和危害程度的不确定性特点, 长期制约着岩溶地区隧道建设的发展。川东岩溶区独特的隔档式构造呈现的向斜宽缓背斜窄陡, 可溶岩及非可溶岩在其中呈条带状交错分布, 造就了区域复杂的地下水

径流模式, 开展川东隔档式构造区地下水径流特征研究, 对于指导区域岩溶隧道涌突水灾害防治具有重要意义。

早在20世纪60年代, 王士天等^[4]就以整个川东地区为研究对象, 考虑气候、地貌和地质结构等地下水径流制约因素, 初步总结出厚层缓倾斜谷地、向斜汇流纵谷和背斜横谷三种地下水循环交替类型; 而后何明亮^[5]将研究的空间尺度缩小, 聚焦于川东褶皱带背斜区, 总结出地下水径流模式为完整背斜型、单侧河流切穿背斜型和双侧河流切穿背斜型; 李生红^[6]

资助项目: 国家自然科学基金项目“隔档式构造区岩溶地下水流系统模式及演化规律研究”(42072283)

第一作者简介: 于斯遥(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向主要为岩溶水文地质。E-mail: 627376184@qq.com.

收稿日期: 2022-03-06

在此基础上进一步缩小研究空间尺度,以川东紧窄背斜区的中、下三叠统含水岩组为研究对象,探究其地下水的运动特征。川东岩溶区隧道工程建设的加快促使研究需求的发展,学者们对区域内地下水径流特征在不同空间尺度下的探讨持续深入,研究对象逐步由大尺度角度的构造区域发展至小尺度视野的含水岩组,以此不断丰富川东隔档式构造背景下不同空间尺度地下水径流模式研究内容。

川东明月峡背斜隧道工程向南延伸必然通过御临河河谷,在河谷横向深切控制下,地下水向南径流与岩溶含水介质产生长期的互馈作用,形成区域复杂的岩溶水系统,隧道下穿建设面临严重的涌突水灾害威胁。本文以明月峡背斜南段张关—排花洞岩溶水系统为研究对象,深入剖析三叠系雷口坡组及嘉陵江组($T_2I+T_1j^{1-4}$)岩溶含水岩组内部小尺度地质条件空间分异控制下的地下水径流特征,并结合地下水蕴含的水文地球化学信息辅以佐证,以此精细化查明张关—排花洞岩溶水系统内部地下水径流模式,以期有效指导区域岩溶隧道选址与建设提供

参考依据。

1 研究区概况

明月峡背斜地处四川盆地东部与重庆交界的区域,与铜锣山、华蓥山平行排列成“川”字形北—北东向岭谷,总长约 240 km。区内属亚热带温湿气候,冬冷夏热,降雨充沛,年平均降雨量为 1 085.3 mm,降雨多集中在 5-9 月份,占全年总降雨的 64.6%^[7]。

明月峡背斜核部大面积出露雷口坡组及嘉陵江组的可溶岩;两翼则受相对隔水的须家河组砂岩夹页岩地层挟持;地区水系发育,御临河与明月江贯穿明月峡背斜的南、北部。背斜系统可溶岩经溶蚀后形成岩溶槽谷,非可溶岩则形成脊状山地,呈现出“一山三岭两槽”的地貌形态^[8]。

本文选取明月峡南段张关—排花洞浅层岩溶水系统为研究对象(图 1)。作为一个背斜汇流型储水构造系统^[9],其北部以勤俭村附近的岩溶地下水分水岭及飞仙关组非可溶岩地层为边界;东西两侧以透水性极弱的须家河组非可溶岩为界;南端则以贯穿

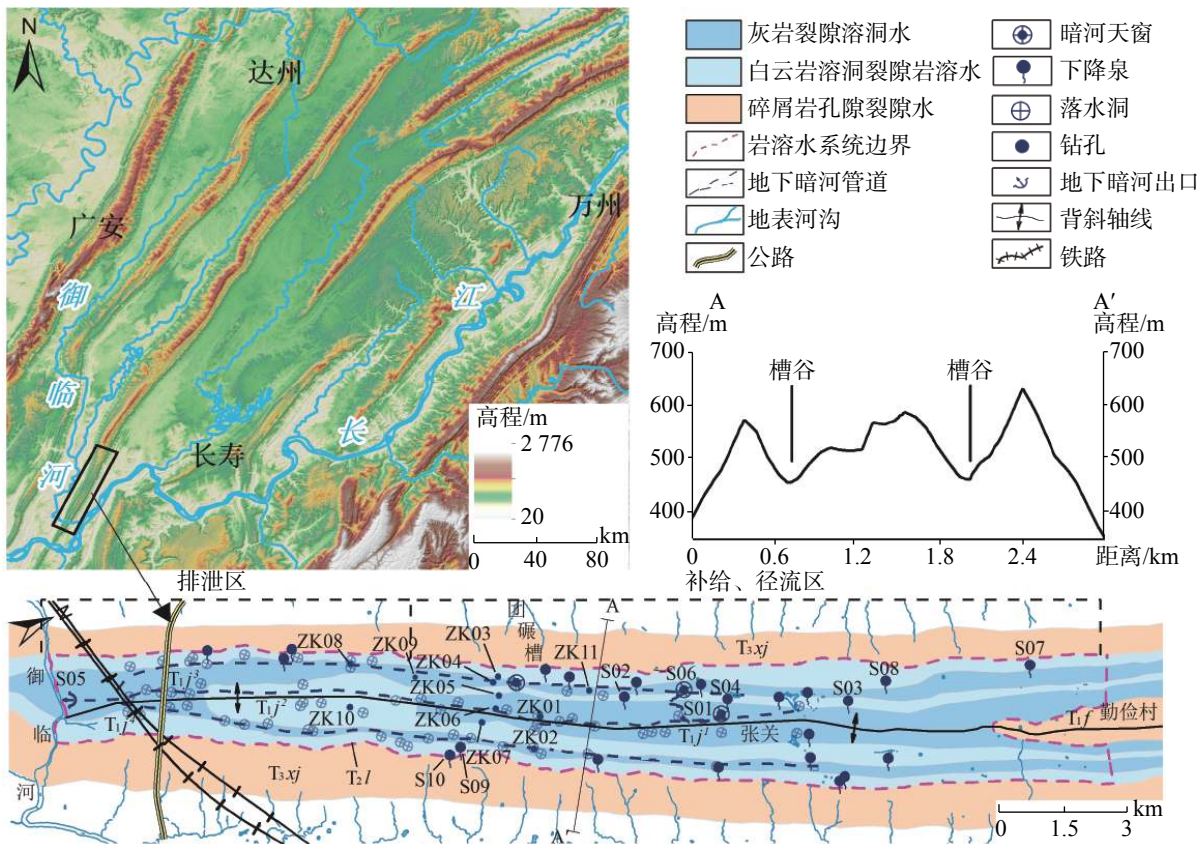


图 1 研究区位置及水文地质简图

Fig. 1 Location and hydrogeological sketch map of the study area

背斜的区域排泄基准面御临河为边界。

2 研究区岩溶水文地质条件

2.1 地质构造

地下水运移、排泄往往会受到构造作用的控制^[10-11]。研究区位于川东阻挡式褶皱带上的明月峡背斜南部，主体地质构造为明月峡背斜，区内褶皱发育，并无断层影响。背斜周边受非可溶岩挟持，轴部可溶岩形成顺构造线分布的呈条带状谷地，由于纵张裂隙发育，有利于岩溶作用进行，形成地下水富集的地带。褶皱构造使径流的总体方向受构造线控制，主要以纵向运移为主^[12]。明月峡背斜南段高陡紧密，研究区内的可溶岩具有灰岩、白云岩互层分布的特征，岩层倾角较大，通过大气降雨补给的地下水先顺岩层倾向运动到一定深度后，受重庆地区线状特殊地质构造条件的控制，再顺岩层走向纵向运动至横切沟谷排泄。

2.2 碳酸盐岩地层岩性

研究区出露的碳酸盐岩地层主要为中三叠世早期嘉陵江组地层以及中三叠世中、晚期的雷口坡组地层。雷口坡组(T_2l)和嘉陵江组(T_2j^{1-4})可溶岩在下伏飞仙关组四段(T_3f^4)泥岩与上覆须家河组(T_3xj)砂岩的圈闭下成为独立的含水岩组，构成岩溶发育的基本单元(图 2)。

通过对研究区各段碳酸盐岩地层典型样品取样并进行矿物成分分析，绘制出 $T_2l+T_2j^{1-4}$ 含水岩组主要矿物成分三角图(图 3)。从图 3 可知， T_2j^1 、 T_2j^3 中的岩样主要偏向方解石端元，而 T_2j^2 、 T_2j^4 以及 T_2l 地层中的岩样则主要偏向白云石端元， T_2j^1 、 T_2j^3 地层岩性以灰岩为主， T_2j^2 、 T_2j^4 、 T_2l 地层岩性以白云岩为主。

2.3 岩溶发育特征

受碳酸盐岩可溶性、地质构造等因素的综合影响，张关—排花洞岩溶水系统内岩溶发育的程度和

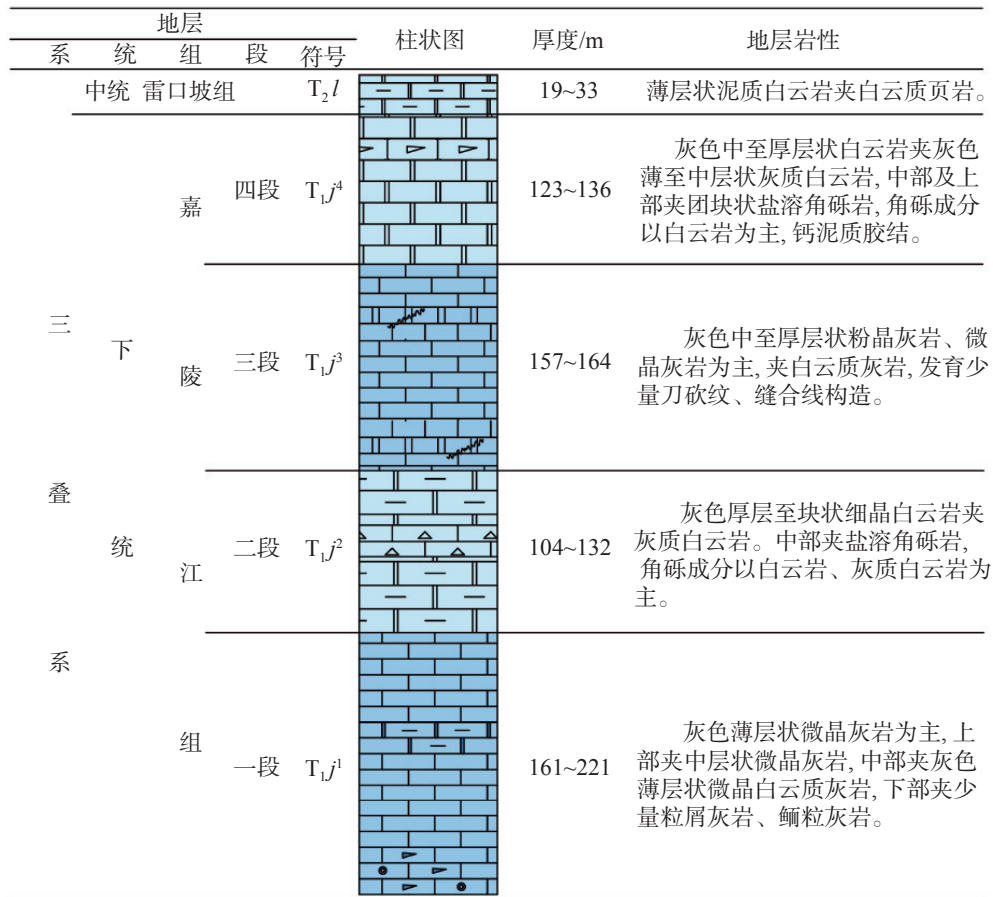


图 2 研究区地层柱状图

Fig. 2 Stratigraphic histogram of the study area

规模具有明显的不均一性特点。

2.3.1 地表岩溶

地表岩溶形态数量和规模是表征岩溶发育程度的重要依据^[14-16]。为查明研究区内各含水层内部岩溶发育程度,对张关—排花洞岩溶水系统中各种地表岩溶形态的数量、规模、空间分布等特征进行统计分析(图 4, 表 1): (1) 发育在 T_{j^1} 、 T_{j^3} 地层中的岩溶洼地规模和深度普遍较大, 形态较为不规则, 平面上多呈长条状、“X”形、“人”字形等, 这反映含水层内部岩溶发育剧烈, 地表崩塌作用显著^[17-18]。 T_{j^1} 地层中的洼地面积共计 1.58 km², T_{j^3} 中共计 2.16 km², 相较于整个系统内洼地面积之和的比值分别为 28.47% 以及 38.92%; (2) 落水洞多分布于岩溶洼地底部, 沿褶皱轴向呈串珠状分布。 T_{j^1} 、 T_{j^3} 地层内部所调查到的落水洞数量分别为 16 个及 28 个, 占系统内落水洞总数的 25.40% 及 44.44%。

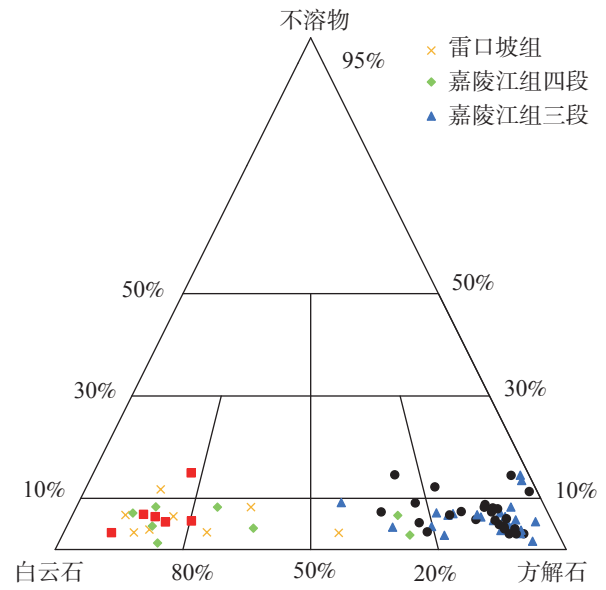


图 3 $T_{2l}+T_{j^1-4}$ 可溶岩层组主要矿物成分 (部分引自钟玲敏^[13])

Fig. 3 Triangulation of main mineral components of carbonate rocks in the study area

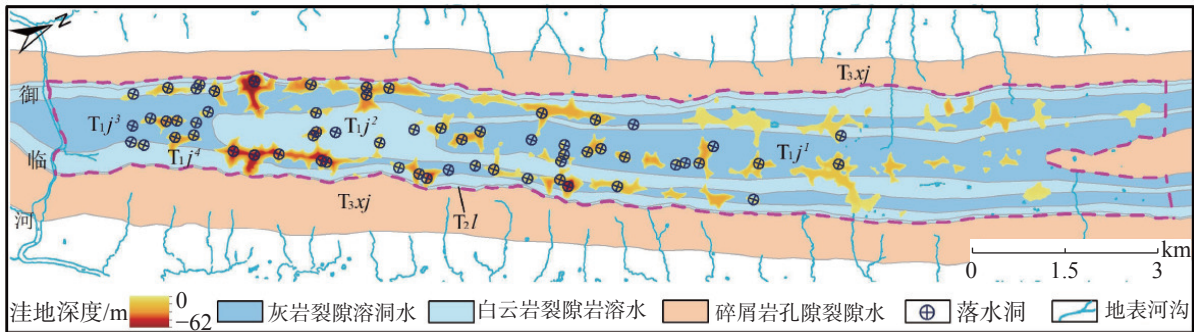


图 4 研究区地表岩溶形态分布

Fig. 4 Distribution of the surface karst morphology in the study area

表 1 研究区地表岩溶形态分布特征

Table 1 Distribution characteristics of the surface karst morphology in the study area

地层	洼地		落水洞	
	面积/km ²	面积比/%	数量	数量比/%
T_{2l}	0.12	2.16	0	0
T_{j^4}	0.93	16.76	11	17.46
T_{j^3}	2.16	38.92	28	44.44
T_{j^2}	0.76	13.69	8	12.70
T_{j^1}	1.58	28.47	16	25.40

从地表岩溶洼地、落水洞以及岩溶泉的发育情况上看,以灰岩为主的 T_{j^1} 、 T_{j^3} 地层的岩溶发育程

度明显较强于以白云岩为主的 T_{j^1} 、 T_{j^3} 、 T_{2l} 地层,二者洼地面积、落水洞数量分别占系统内总量的 67.38% 及 69.84%。

2.3.2 地下岩溶

研究区内共布设 22 个水文地质钻孔,其中 19 个钻孔揭露到溶洞、溶隙、溶孔等地下岩溶现象。由图 5 可知,区内溶洞多分布在 T_{j^1} 、 T_{j^3} 地层之中,共有大小溶洞 91 个,约占溶洞总数的 75.8%,其发育深度相对较为集中,以埋深 30~40 m 最为常见。 T_{j^2} 、 T_{j^4} 以及 T_{2l} 地层岩芯相对完整,局部发育溶孔、溶隙等小规模溶蚀现象,部分可见泥质或方解石填充。

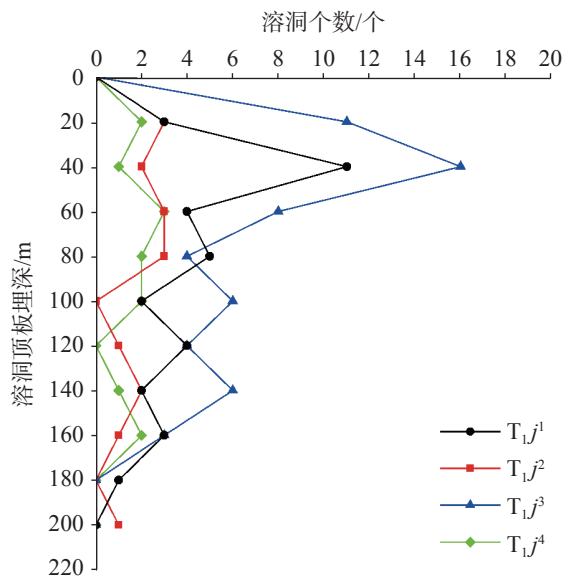


图 5 溶洞发育地层及顶板高程分布

Fig. 5 Karst cave strata and roof elevation distribution

2.4 地下水动力条件

(1) 地下水补给条件

张关—排花洞岩溶水系统内部地表水不甚发育，大气降水为地下水主要补给来源，系统东北部勤俭村一带高程 610 m，为岩溶水系统的主要补给区，该区主要为“槽谷洼地”地貌，降雨沿岩溶谷地及串珠状分布的洼地、落水洞、暗河天窗等地表汇水构造快速入渗，呈线状补给岩溶水文系统。

(2) 地下水排泄条件

明月峡背斜南段不同切割深度的横切沟谷所提

供的重力势能差是区内地下水运动的主要驱动力，地下水排泄受不同切割深度的排泄基准面控制。御临河高程 164 m，为区域最低排泄基准面，控制岩溶水系统内部大部分地下水排泄，出露于其岸坡之上的 S05 排花洞暗河出口（高程 180 m）为系统内部最主要的地下水排泄点，枯季测得其流量为 $365 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ ，占全部天然地下水露头流量之和的 95.94%。随着与系统补给区距离逐渐靠近，御临河对地下水的袭夺作用逐渐减弱，于系统补给、径流区出现若干切入可溶岩内部的横切沟谷，控制局部范围内地下水排泄，在系统补给、径流区背斜两翼的位置形成一系列的侵蚀岩溶泉，其流量一般不大，除 S02 流量为 $3.5 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ 外，其余均小于 $3 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

(3) 钻孔及泉点揭示的不连续水流现象

研究区 T_{1j}^1 、 T_{1j}^3 地层沉积厚度较大，灰岩含量比例较高，岩溶发育最为强烈，是张关—排花洞水系统内岩溶水分布的最主要层位，地下水在其中主要以管道流的形式径流； T_{1j}^2 、 T_{1j}^4 以及 T_{2l} 岩性主要为白云岩，其沉积厚度较薄亦或是晶粒较为粗大的特点限制了地层内部的岩溶发育，为岩溶管道裂隙水分布的主要层位，地下水在白云岩地层密集发育的溶蚀裂隙中分散径流，岩溶管道不发育。研究区岩溶发育程度较强的灰岩地层同岩溶发育程度较弱的白云岩地层间互分布的特点使得各含水层之间水力联系不强，团碾槽一带(图 1)近似垂直构造线分布的钻孔及泉点揭示的地下水水位在各地层内部表现出明显的不连续性(表 2)。

表 2 钻孔及泉点揭示的各地层内部地下水水位统计表

Table 2 Statistical table of the groundwater level in each layer revealed by boreholes and spring points

水点编号	ZK05	ZK07	ZK04	S09	S10
地下水水位/m	395.55	497.99	404.14	498.96	526.98
揭露(出露)地层	T_{1j}^1	T_{1j}^2	T_{1j}^3	T_{1j}^4	T_{2l}

3 基于水化学的地下水径流特征

在水文循环过程中，岩溶水水质携带大量水文地球化学信息，其变化往往能在一定程度上反映地下水体的径流环境，对分析水体补径排特征具有重要的指示作用^[19-20]。为精细化研究明月峡南段岩溶水径流特征，对嘉陵江组不同段地层采集水样，样品的取样信息如表 3 所示。

3.1 常规水化学特征

张关—排花洞岩溶水系统中 18 组水样的 TDS 含量在 $276\text{--}464 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间，除 ZK08、ZK10 以及 S05 位于系统排泄区外，其余 15 组水样均位于系统补给、径流区。由常规水化学特征 Piper 三线图(图 6)可知， T_{1j}^{1-4} 各段地层中出露的地下水水化学组分存在明显差异， T_{1j}^1 、 T_{1j}^3 中主要为 $\text{HCO}_3\text{—Ca}$ 型水；而 T_{1j}^2 、 T_{1j}^4 中地下水水化学类型则以 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{—Ca}$ 、

表3 研究区取样点信息

Table 3 Information of sampling sites in the study area

样品编号	取样层位	经度	纬度	采样高程/m	矿化度/mg·L ⁻¹	地貌位置
S01	T _{1j} ¹	106.9077°	29.7693°	507	290	补给、径流区
S03	T _{1j} ²	106.8965°	29.7563°	507	300	补给、径流区
S04	T _{1j} ²	106.9151°	29.7709°	501	325	补给、径流区
S05	T _{1j} ²	106.8451°	29.6625°	218	388	排泄区
S06	T _{1j} ³	106.8900°	29.7533°	507	325	补给、径流区
S07	T _{1j} ⁴	106.9162°	29.8035°	539	298	补给、径流区
S08	T _{1j} ⁴	106.9197°	29.8145°	547	315	补给、径流区
ZK01	T _{1j} ¹	106.8873°	29.7279°	422	365	补给、径流区
ZK02	T _{1j} ³	106.8921°	29.7257°	422	372	补给、径流区
ZK03	T _{1j} ³	106.8773°	29.7248°	250	276	补给、径流区
ZK04	T _{1j} ³	106.8924°	29.7355°	443	446	补给、径流区
ZK05	T _{1j} ¹	106.8801°	29.7244°	398	432	补给、径流区
ZK06	T _{1j} ¹	106.8825°	29.7228°	270	464	补给、径流区
ZK07	T _{1j} ¹	106.8845°	29.7197°	338	327	补给、径流区
ZK08	T _{1j} ³	106.8637°	29.7043°	160	422	排泄区
ZK09	T _{1j} ³	106.8666°	29.7038°	200	310	补给、径流区
ZK10	T _{1j} ²	106.8639°	29.7132°	271	340	排泄区
ZK11	T _{1j} ³	106.8863°	29.7381°	482	362	补给、径流区

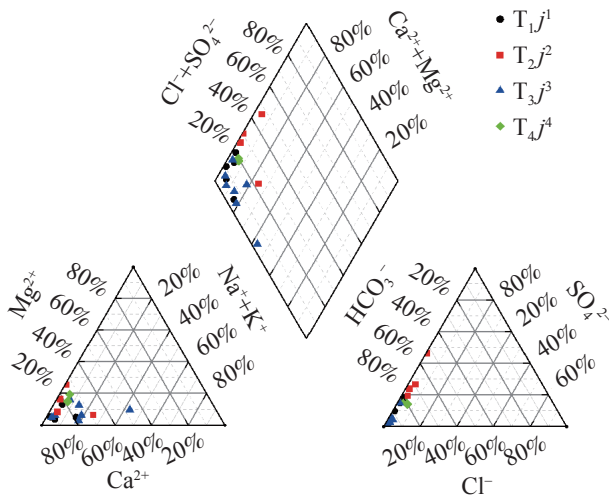


图6 取样点 Piper 图

Fig. 6 Piper diagram of sampling sites

HCO₃·SO₄—Ca·Mg 为主。T_{1j}²、T_{1j}⁴ 中SO₄²⁻平均浓度分别为 136 mg·L⁻¹ 以及 73 mg·L⁻¹, Mg²⁺平均浓度分别为 24 mg·L⁻¹ 以及 28 mg·L⁻¹, 明显高于 T_{1j}¹、T_{1j}³ 中的 35 mg·L⁻¹、29 mg·L⁻¹ 以及 7 mg·L⁻¹、10 mg·L⁻¹。SO₄²⁻和 Mg²⁺含量的显著差异, 反映出流经嘉陵江组地层的地下水经历了不同的水岩作用。由前文矿物成分分析结论可知, T_{1j}¹、T_{1j}³ 为纯度较高的灰岩, 地

下水在其中主要发生方解石的溶解作用; T_{1j}²、T_{1j}⁴、T_{2j} 岩性主要为白云岩及膏溶角砾岩, 其内部除发生方解石的溶解作用外, 还进行了白云石及石膏的溶解, 这是造成地下水中 Mg²⁺、SO₄²⁻浓度升高的主要原因。

张家洞(S01)至排花洞(S05)水文地质剖面图显示出地下水由补给至排泄过程之中携带水化学信息的变化规律(图7b)。从图中可知, 从补给区到排泄区, 随径流路径增长, 地下水 TDS 值呈现规律性上升。分布在系统补给、径流区的水样 S01 及 ZK07 水化学类型均表现为 HCO₃—Ca 型, 水化学特征表现出极高的相似性, 推测补给、径流区含水岩组内部各层间水力联系较弱, 地下水在其中未发生成规模的水量交换。随着位置进入排泄区, ZK10 及 S05 的水化学类型转变为 HCO₃·SO₄—Ca 型, 伴随 TDS 值显著升高。由于系统排泄区水力坡度较大, 水动力强度在御临河周边急剧增强, 相邻流动系统之间的袭夺作用导致经历不同水岩作用的地下水在排泄区相互混合, 地下水化学成分发生剧烈改变。

3.2 同位素特征

将嘉陵江组各地层中同位素结果与全球大气降水线^[21]和西南地区大气降水线^[22]进行拟合, 绘制出

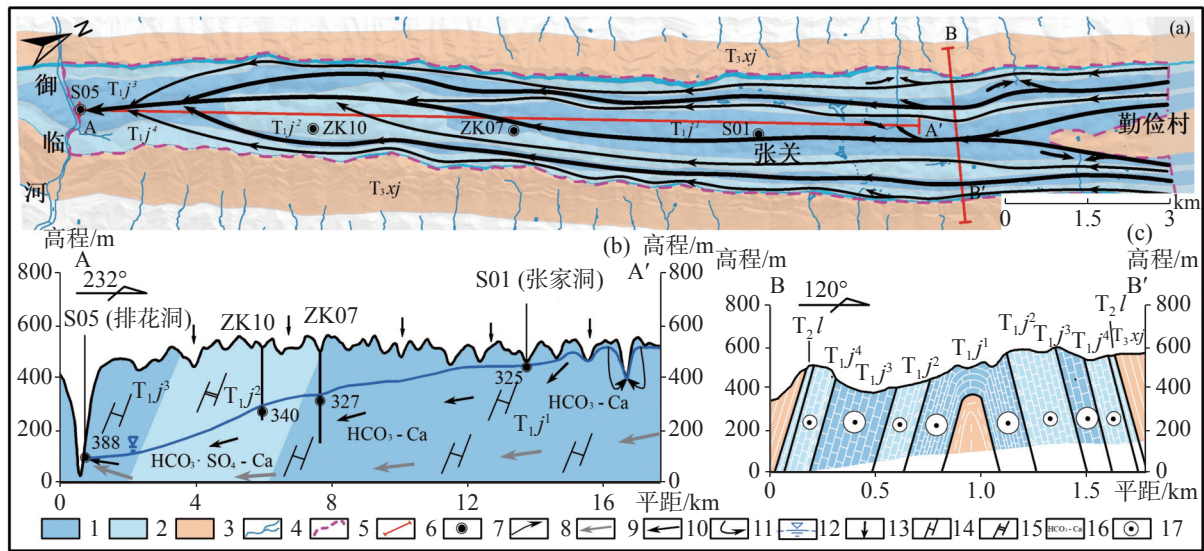


图 7 研究区地下水径流模式图

1—灰岩裂隙溶洞水 2—白云岩溶洞裂隙岩溶水 3—碎屑岩孔隙裂隙水 4—地表河、沟 5—地下水系统边界 6—剖面位置 7—地下水取样点, 数值代表 TDS/mg·L⁻¹ 8—水流方向(线条越粗表示流量越大) 9—区域水流系统 10—中间水流系统 11—局部水流系统 12—地下水水位 13—大气降水补给 14—灰岩 15—白云岩 16—取样点附近水化学类型 17—自北向南流出剖面(圆圈越大表示流量越大)

Fig. 7 Diagram of groundwater runoff patterns in the study area

δD 、 $\delta^{18}O$ 二元散点图(图 8)。从图 8 可知, 所取样品大致位于 LMWL 下方和 GMWL 上部之间, 推测样品点补给来源均为大气降水, 并反映该地区为远离蒸汽源的内陆、海拔高度较高的情况, 这与研究区实际情况相吻合。前人研究^[23] 验证了重庆市大气降雨 δD 和 $\delta^{18}O$ 的同位素高程效应显著, 通过高程效应对地表自然出露的地下水点进行计算得到地下水补给高程为 620~730 m, 同系统补给区勤俭村附近高程相近。

嘉陵江组整体水样 δD 、 $\delta^{18}O$ 主要分布于 -54‰~

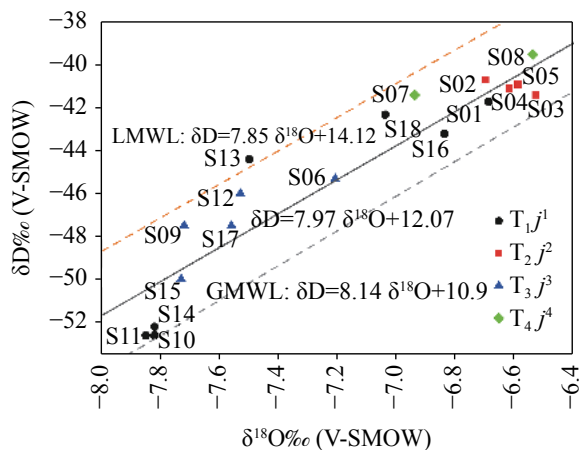


图 8 研究区地下水 δD 、 $\delta^{18}O$ 二元散点图

Fig. 8 Correlation line between δD and $\delta^{18}O$ values in the study area

-38‰与 -8‰~-6.4‰范围内, 存在明显线性关系, 但 T_{1j}^{1-4} 地层中的 δD 、 $\delta^{18}O$ 值仍存在较为明显的空间分异特点, 印证地下水在水岩作用不一的含水地层中有着不同的径流方式。 T_{1j}^2 、 T_{1j}^4 含水岩组集中分布在散点图右上方, 相较于 LMWL 发生了氧漂移现象, 推测其成因一方面为 T_{1j}^2 、 T_{1j}^4 中石膏类的矿物含量较高, 溶解后使地层中的含氧矿物进入地下水增加; 另一方面 T_{1j}^2 、 T_{1j}^4 含水岩组中地下水的循环能力相较于 T_{1j}^1 、 T_{1j}^3 含水岩组弱, 其地下水循环路径及水岩作用时间较长, 物质成分交换量较大, 含水岩组中有大量的 HCO_3^- 进入地下水。 T_{1j}^1 、 T_{1j}^3 的 δD 、 $\delta^{18}O$ 值分布在图中部及下方, 相较于 T_{1j}^2 、 T_{1j}^4 水中 $\delta^{18}O$ 值高、 δD 值低, 说明水岩交互作用程度低, 地下水的滞留时间短, 地下水的循环运移速度快, 推测 T_{1j}^1 、 T_{1j}^3 中管道流发育, 大气降水通过大量发育的岩溶槽谷和岩溶洼地汇集, 进入落水洞后直接灌入补给地下水, 经过短暂径流即排泄。

4 张关—排花洞岩溶水系统地下水径流模式

受明月峡背斜两翼非可溶岩地层的围限以及地形起伏的控制, 张关—排花洞岩溶水系统内部地下水在接受降雨补给后自北东向南西顺层径流。含水岩组内部不同可溶性的碳酸盐岩地层呈间互状分布

的特点导致系统内各含水层岩溶发育程度不尽相同,地下水在径流过程中存在明显的不连续性,在平面上呈现出形似“扫帚状”的径流特点(图 7a, 图 7c)。(1)在系统补给、径流区,含水层之间水力联系不强,各自形成独立的岩溶水子系统:岩溶化程度较强的 T_{j^1} 、 T_{j^3} 地层内部水位较相邻地层明显偏低,水化学特征显示其水岩作用时间较短,径流过程中主要进行方解石的溶解作用,地下水以管道流形式集中径流,流速相对较快、强度较高;岩溶化程度较弱的 T_{j^2} 、 T_{j^4} 、 T_{j^l} 地层内部水位较 T_{j^1} 、 T_{j^3} 明显升高,水化学特征显示其径流时间相对较长,水岩作用类型主要为方解石、白云石及石膏的溶解作用,相比前者 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 浓度显著提高,地下水在其中沿白云岩地层内密集发育的溶蚀裂隙分散径流,流速相对较慢、强度较弱;(2)随着距离逐渐靠近排泄区,势汇最强的 T_{j^3} 内部管道流不断对其他地层中的地下水进行袭夺,水文地球化学证据表明相邻含水层内部的水流在排泄区发生了混合,地下水统一汇聚至排花洞暗河出口向御临河排泄,各岩溶水子系统最终整合为一个岩溶水系统。

此外,据前人研究成果^[24],区内地下水受不同切割深度的排泄基准面控制,在垂向上表现为多级次的嵌套式地下水水流系统^[25](图 7b):中间及区域水流系统中地下水的径流、排泄受贯穿型河谷(御临河)控制,局部水流系统则由系统补给区内发育的浅切沟谷控制。

5 结论

通过对明月峡南段张关—排花洞 T_2 组 T_{j^1-4} 岩溶水系统内嘉陵江组地层进行小尺度研究,查明岩溶含水介质不均一性控制下地下水在各地层内部的径流规律:

(1)受岩石可溶性及地质构造因素控制, T_2 组 T_{j^1-4} 含水岩组内部各地层岩溶化程度存在显著差异,强岩溶化的 T_{j^1} 、 T_{j^3} 地层同岩溶化程度相对较弱的 T_{j^2} 、 T_{j^4} 、 T_{j^l} 地层内部呈间互状分布;

(2)岩溶含水介质在空间上的不均质特点使得地下水在趋向御临河的运动过程中在平面上呈现出形似“扫帚状”的径流模式:在系统补给、径流区,各含水层之间水力联系不强,以地层为单位形成多个岩溶水子系统,地下水在各地层内部进行相对独立

的顺层径流;在系统排泄区,各水流系统之间的相互袭夺作用不断增强,逐渐合并为一个岩溶水系统,统一经排花洞排泄至御临河;

(3)在垂向上,地下水表现为多级次的嵌套状水流系统,受不同切割深度的排泄基准面控制,自浅及深依次发育局部水流系统、中间水流系统以及区域水流系统。

参考文献

- [1] 武东强,邢立亭,兰晓荀,孟庆哈,侯玉松,赵振华,孙斌,袁学圣. 济南岩溶含水介质孔隙结构特征[J]. 中国岩溶, 2021, 40(4): 680-688.
WU Dongqiang, XING Liting, LAN Xiaoxun, MENG Qinghan, HOU Yusong, ZHAO Zhenhua, SUN Bin, YUAN Xuesheng. Pore structure characteristics of karst water-bearing media in Jinan[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(4): 680-688.
- [2] 刘元晴,周乐,李伟,王新峰,马雪梅,吕琳,尹凯,孟顺祥. 鲁中山区中生代构造活动对现今岩溶地下水赋存规律的控制作用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(6): 1811-1822.
LIU Yuanqing, ZHOU Le, LI Wei, WANG Xinfeng, MA Xue-mei, LV Lin, YIN Kai, MENG Shunxiang. The controlling effect of Mesozoic tectonic activities on the occurrence of present karst groundwater in the central mountainous area of Shandong Province[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2021, 51(6): 1811-1822.
- [3] 罗利川,梁杏,李扬,周宏,罗明明. 基于GMS的岩溶山区三维地下水模式识别[J]. 中国岩溶, 2018, 37(5): 680-689.
LUO Lichuan, LIANG Xing, LI Yang, ZHOU Hong, LUO Mingming. Identifying three-dimensional groundwater flow patterns[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(5): 680-689.
- [4] 王士天,王家昌,张倬元. 喀斯特研究中某些基本问题的初步探讨:以川东和黔西为例[J]. 成都地质学院学报, 1962(1): 65-77.
WANG Shitian, WANG Jiachang, ZHANG Zhuoyuan. Preliminary discussion on some basic problems in karst research: A case study of eastern Sichuan and western Guizhou[J]. *Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition)*, 1962(1): 65-77.
- [5] 何明亮. 川东互层式可溶岩背斜地下水径流特征研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
HE Mingliang. Groundwater runoff characteristics of interbedded soluble rock anticline in eastern Sichuan[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013.
- [6] 李生红. 川东褶皱带中、下三叠统水文地质特征研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
LI Shenghong. Hydrogeological characteristics of middle and lower Triassic in eastern Sichuan fold belt[D]. Chengdu:

- Chengdu University of Technology, 2013.
- [7] 苏贵芬, 许模. 华蓥山中段某岩溶水系统循环演化条件变化分析[J]. 中国岩溶, 2019, 38(2): 193-201.
SU Guifen, XU Mo. Analysis on the change of cycle evolution conditions of a karst water system in the middle part of Huaying Mountain[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(2): 193-201.
- [8] 吴明亮, 漆继红, 许模, 安成蛟, 李潇, 张世殊, 王能峰. 川东南隔挡式构造区隧道空间展布影响下岩溶涌突水特征简析[J]. 中国岩溶, 2016, 35(2): 190-196.
WU Mingliang, QI Jihong, XU Mo, AN Chengjiao, LI Xiao, ZHANG Shishu, WANG Nengfeng. A brief analysis of karst water inrush characteristics under the influence of tunnel spatial distribution in the southeast of Sichuan basin[J]. *Carsologica Sinica*, 2016, 35(2): 190-196.
- [9] 黄思霜, 张珂. 明月峡背斜南段地下水径流特征研究[J]. 甘肃水利水电技术, 2019, 55(9): 34-37.
HUANG Sishuang, ZHANG Ke. Study on groundwater runoff characteristics in the southern section of Mingyuexia Anticline[J]. *Gansu Water Resources and Hydropower Technology*, 2019, 55(9): 34-37.
- [10] 樊连杰, 邹胜章, 解庆林, 卢丽, 林永生, 朱丹尼, 王佳, 周长松, 李军. 乌蒙山区地下水赋存独特性与开发利用模式: 以昭觉地区为例[J]. 地质学报, 2021, 95(11): 3544-3555.
FAN Lianjie, ZOU Shengzhang, XIE Qinglin, LU Li, LIN Yongsheng, ZHU Danni, WANG Jia, ZHOU Changsong, LI Jun. Characteristics of groundwater occurrence and exploitation pattern in Wumeng mountain area: A case study of Zhaojue area[J]. *Journal of Geological*, 2021, 95(11): 3544-3555.
- [11] 吴继文, 吴亮君, 吕勇, 王璞珺, 周嘉铭, 林宇, 潘明, 廖家飞, 孟庆鑫. 云南泸水市压扭性构造对银厂坪白云岩岩溶系统发育控制作用[J]. 中国岩溶, 2021, 40(5): 793-804.
WU Jiwen, WU Liangjun, LV Yong, WANG Pujun, ZHOU Jiaming, LIN Yu, PAN Ming, LIAO Jiafei, MENG Qingxin. Transpressional structure and its control on development of Yinchangping dolomite karst system in Lushui City, Yunnan[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(5): 793-804.
- [12] 郭娣, 许模. 西南地区紧密背斜岩溶地下水赋存与运移特征[J]. 四川地质学报, 2009, 29(1): 66-69.
GUO Di, XU Mo. Characteristics of occurrence and migration of karst groundwater in tight anticline in southwest China[J]. *Sichuan Geological Journal*, 2009, 29(1): 66-69.
- [13] 钟玲敏. 川东高陡背斜区岩溶空间分异特征及评价系统构建研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
ZHONG Lingmin. Study on karst spatial differentiation and evaluation system construction in high and steep anticline area of eastern Sichuan[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- [14] 张海坦, 李庆华, 黄永泽, 邓书金, 姚万林. 歌乐山地区岩溶发育特征[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(S1): 347-351.
ZHANG Haitan, LI Qinghua, HUANG Yongze, DENG Shujin, YAO Wanlin. Characteristics of karst development in Gele mountain area[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2015, 11(S1): 347-351.
- [15] 李芳涛, 李华明, 胡志平, 陈南南, 晏长根. 峨汉高速廖山隧道岩溶发育规律及其工程效应浅析[J]. 中国岩溶, 2020, 39(4): 592-603.
LI Fangtao, LI Huaming, HU Zhiping, CHEN Nannan, YAN Changgen. Features of karst development and geotechnical effects in the Liaoshan Tunnel on the E-Han expressway[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(4): 592-603.
- [16] 曹贤发, 刘玉康, 刘之葵, 张炳晖. 基于强溶蚀带特征的地基岩溶发育程度评价方法[J]. 中国岩溶, 2020, 39(4): 577-583.
CAO Xianfa, LIU Yukang, LIU Zhikui, ZHANG Binghui. Evaluation method of development degree based on features of intense dissolution layer[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(4): 577-583.
- [17] 邓自强, 林玉石, 张美良, 刘功余, 魏志民. 桂林岩溶洼地和洞穴发生、发展的构造控制剖析[J]. 中国岩溶, 1987, 6(2): 48-59.
DENG Ziqiang, LIN Yushi, ZHANG Meiliang, LIU Gongyu, WEI Zhimin. Structural control analysis of occurrence and development of Karst depressions and caves in Guilin[J]. *Carsologica Sinica*, 1987, 6(2): 48-59.
- [18] 高奋飞, 刘宏, 邓杰文. 贵州省岩溶洼地地质成因分析[J]. 路基工程, 2012(6): 23-26.
GAO Fenfei, LIU Hong, DENG Jiewen. Geologic genesis analysis of karst depression in Guizhou Province[J]. *Subgrade Engineering*, 2012(6): 23-26.
- [19] 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]. 水利水电技术, 2020, 51(2): 53-59.
XU Yiping, XIANG Xiqiong, YANG Genlan. Study on recharge, runoff and drainage of karst groundwater in Nanjiang Grand Canyon in Kaiyang[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2020, 51(2): 53-59.
- [20] Kattan Z. Environmental isotope study of the major karst springs in Damascus limestone aquifer systems: case of the Figh and Barada springs[J]. *Journal of Hydrology*, 1997, 193: 161-182.
- [21] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. *Science*, 1961, 133: 1702-1703.
- [22] 温艳茹. 重庆大气降水中氢氧同位素变化及与ENSO事件的响应机制探究[D]. 重庆: 西南大学, 2017.
WEN Yanru. Variations of stable isotope in daily precipitation and the response to the ENSO phases in Chongqing, Southwest China[D]. Chongqing: Southwest University, 2017.
- [23] 刘梦娇, 王勇, 张耀华, 李果. 中国西南季风区不同水体稳定同位素特征分析: 以重庆市北碚区为例[J]. 中国岩溶, 2015,

- 34(5): 486-494.
- LIU Mengjiao, WANG Yong, ZHANG Yaohua, LI Guo. Variation characteristics of stable isotopes in different water bodies in Southwestern China monsoon area: A case study of Beibei District, Chongqing[J]. *Carsologica Sinica*, 2015, 34(5): 486-494.
- [24] 黄思霜, 许模, 杨艳娜, 成胜, 张贵铜. 川东高陡背斜区水文网控制的地下岩溶空间分异研究[J]. *山地学报*, 2020, 38(1): 83-92.
- HUANG Sishuang, XU Mo, YANG Yanna, CHENG Sheng, ZHANG Guitong. Spatial differentiation of underground karst controlled by hydrological network in high-steep anticline in eastern Sichuan, China[J]. *Mountain Research*, 2020, 38(1): 83-92.
- [25] József Tóth. Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes, processes, and manifestations[J]. *Hydrogeology Journal*, 1999, 7(1): 1-14.

Analysis of groundwater runoff patterns in Zhangguan-Paihuadong karst water system in the south of the Mingyue gorge anticline

YU Siyao¹, QIN Zixuan¹, YANG Yanna¹, MAO Weina², HAO Chao², XU Mo¹, LIU Yang³

(1. State Key Laboratory of Geo-hazard Prevention and Geo-environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Chongqing City Construction Investment (group) Co. Ltd., Chongqing 400020, China; 3. Chongqing Survey Institute, Chongqing 400020, China)

Abstract The long-term interaction between groundwater and karst development in eastern Sichuan has created a unique groundwater runoff pattern and caused a complex hydrogeological problem of karst engineering. Hence, finding out the groundwater runoff pattern in the southern section of Mingyue gorge anticline is of great significance for guiding the site selection and construction of tunnel engineering in this area.

Based on previous studies, hydrogeological conditions of the study area are systematically sorted out. Mingyue gorge anticline is a typical closed one in eastern Sichuan, and there is no fault in the area. Atmospheric rainfall is the main recharge source in the water system. Controlled by the boundary of the non-soluble rock formation on the two sides of anticline and topographic relief, groundwater converges and is recharged through the karst structures such as depressions and sinkholes, flowing toward the river runoff at the lowest discharge datum along the tectonic line within the region. The outlet of S05 (Paihuadong), exposed on the bank slope of Yulin river, is a main discharge point of groundwater in the system. The discharge is about $365 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ in the dry season, accounting for 95.94% of the total discharge of all natural groundwater outcrops in the study area. Main aquifers in the area are composed of carbonate rocks of Jialingjiang formation and Leikoupo formation. The lithology of T_{j^1} and T_{j^3} is mainly limestone, while the lithology of T_{j^2} , T_{j^4} and T_2l is mainly dolomite. The difference of rock solubility results in different karst development in each aquifer. From the perspective of surface karst phenomenon, the area of depression and the number of falling holes developed in T_{j^1} and T_{j^3} strata respectively account for 67.38% and 69.84% of the total amount of the system. From the perspective of underground karst phenomenon, 121 karst caves have been revealed by 22 boreholes in the study area. The number of karst caves distributed in T_{j^1} and T_{j^3} strata accounts for 75.8% of the total. Statistical results of surface and underground karst phenomenon reflect that the degrees of karst in T_{j^1} and T_{j^3} strata is significantly higher than those in T_{j^2} , T_{j^4} and T_2l strata. Because aquifers with different degrees of karstic distribution are intersectional in the plane, the heterogeneity of water-bearing media leads to relatively weak hydraulic connection in adjacent strata, and the groundwater level revealed by boreholes and spring points is obviously different in different layers.

Results of hydrochemical analysis of 18 groups of water samples in the study area further illustrate the

discontinuity of groundwater in each aquifer. $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ type water mainly exists in T_{j^1} and T_{j^3} strata. Their conventional hydrochemical and isotope characteristics indicate that the water-rock interaction time is relatively short. Hydrochemical types of T_{j^2} , T_{j^4} and T_2l strata are mainly $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}$ and $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$. Their conventional hydrochemical and isotope characteristics indicate that the water-rock interaction time is relatively long, and the hydrochemical characteristics of groundwater outcrop in strong and weak karstified strata are obviously different. From the hydrogeological profile of S01 (Zhangjiadong) to S05 (Bahudong), the hydrochemical types of water samples S01 and ZK07 in the recharge and runoff area of the system are $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ type, and the hydrochemical characteristics of the two are very similar. When sampling sites are located within a drainage area of the system, the hydrochemical type of groundwater near sampling sites ZK10 and S05 is changed to $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}$ type, and corresponding TDS values are significantly higher than those of recharge and runoff area, indicating that groundwater in different aquifers is mixed in the system discharge area.

Based on the analysis of karst hydrogeological conditions and hydrogeochemical characteristics in the study area, a runoff law of groundwater in Zhangguan-Paihudong karst water system is summarized (groundwater in the study area generally shows a broom-like runoff pattern). In system recharge and runoff areas, a hydraulic connection between aquifers is not strong. Multiple groundwater flow systems have formed with the stratum as a unit, and groundwater carries out relatively independent bedding runoff in each layer. In the drainage area of the system, the mutual capture of each water flow system is increasingly strong. Hence, these water flow systems gradually merge into one, discharging to Yulin river through the drainage hole. In addition, according to previous research, groundwater inside the system vertically presents a multi-order nested flow system. Controlled by the discharge datum of different cutting depths, this system is successively developed into local flow system, intermediate flow system and regional flow system from the shallow part to the deep.

Key words the fold belt in eastern Sichuan, Mingyue gorge anticline, Zhangguan-Paihudong karst water system, groundwater runoff pattern, small-scale

(编辑 黄晨晖)