

邓国仕, 岑鑫雨, 唐业旗, 等. 乌蒙山以礼河流域岩溶地下水富集特征及供水意义研究[J]. 中国岩溶, 2023, 42(4): 685-698.

DOI: 10.11932/karst20230405

乌蒙山以礼河流域岩溶地下水富集特征 及供水意义研究

邓国仕, 岑鑫雨, 唐业旗, 钟金先

(中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610218)

摘要: 岩溶地下水是乌蒙山集中连片贫困区内居民生产生活的主要水源, 归纳区内地下水富集特征并探讨岩溶地下水的供水意义对于当地地下水资源勘察和开发利用具有重要的现实意义。文章针对乌蒙山以礼河中上游区域, 基于现场水文地质调查, 对水样进行采样和测试, 并结合地下水天然资源量的计算方法, 归纳总结了研究区内岩溶地下水的富集特征, 并结合富水程度、供水条件和水质特征三个方面探讨了岩溶水的供水意义。研究得到以下结论: (1) 研究区内岩溶地下水的富集特征可归纳为五种类型: 断裂导水带、断裂溶蚀谷、条带溶蚀谷、褶皱溶蚀谷、阻水接触带; (2) 富水块段内地下水化学类型以 Na-HCO_3 型和 Ca-Mg-HCO_3 型为主, 水质整体较好, I~III 类水占比为 79%, 超标指标主要为硝酸盐和耗氧量; (3) 各富水块段地下水的天然补给量和排泄量分别为 $329.7\sim 14\,512.4\text{ 万 m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $4.6\sim 1\,308.4\text{ 万 m}^3\cdot\text{a}^{-1}$, 排泄量占补给量比值为 0.3%~15.5%, 区内地下水资源剩余开发潜力较大; (4) 断裂溶蚀谷、条带溶蚀谷和阻水接触带供水意义显著, 其余富水块段在不同程度上受限于水资源时空分配不均、不具备供水条件、水质较差等情况, 其供水受到影响。

关键词: 岩溶地下水; 富集特征; 供水意义; 乌蒙山地区

中图分类号: P641.134 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2023)04-0685-14

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

乌蒙山地区是我国西南的典型集中连片贫困区, 该区域缺水问题严峻, 解决吃水用水难题被纳入了脱贫的硬性指标^[1-2]。碳酸盐岩在该区域广泛分布, 岩溶地下水是当地居民生产生活的最主要水源之一^[3-4]。由于岩溶发育的不均匀性和新生代地壳大幅度抬升造成的岩溶发育深度增加, 导致岩溶水时空分布极不均匀, 开采、利用地下水非常困难, 因此摸清岩溶水的富集规律, 对于地下水资源勘察和开发利用具有重要的现实意义^[5-6]。

岩溶地下水富集特征的归纳总结工作受早期的蓄水构造理论启发, 其工作思路主要基于对地质构造特征和水文地质特征的综合概括^[7-9]。在我国北方地区, 岩溶水以相对独立的单元进行循环, 相关研究将其初步划分出 119 个子系统, 并概括为 5 个大类的系统结构模式^[10]。此外, 针对天山北麓和鲁中南地区, 相关研究深入探讨了构造模式特征和新构造运动对水循环特征和地下水流场的控制作用^[11-12]。针对蓄水构造和岩溶地下水赋存特征的研究为勘察定井工作提供了坚实的理论依据, 随着技术方法的更新, 上述理论与物探方法的结合, 大大提高了定井

资助项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20211381)

第一作者简介: 邓国仕(1981—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事水文地质环境地质调查研究工作。E-mail: dguoshi@mail.cgs.gov.cn。

通信作者: 岑鑫雨(1994—), 女, 博士, 工程师, 主要从事岩溶水文地质与水资源调查研究工作。E-mail: cenxinyuk12@163.com。

收稿日期: 2023-01-20

准确率^[13-16]。我国西南岩溶区降雨量虽然整体大于北方地区,但蒸发量较大、水资源时空分配极不均匀等特征仍然对水资源保障工作造成巨大风险^[17-18]。相关研究细致归纳了广西峰丛平原区、贵州高原斜坡和深切河谷区以及云南石山地区的岩溶水赋存规律,并初步进行了岩溶水系统的资源量评价工作^[19-22]。

在滇东乌蒙山地区,由于岩溶地下水空间分布不均且开发利用条件不足,深部地下水的利用受到明显限制,仅能通过合理开发表层岩溶带地下水来解决当地用水需求^[23-24]。岩溶地下水富集特征的研究可以有效助力圈定水资源开发靶区,但在地下水由储量概念真正转化为可有效利用的资源过程中,水质水量特征和供水条件则深刻影响着岩溶地下水的供水意义。据此,本文以乌蒙山以礼河流域中上游区域为研究对象,归纳总结岩溶地下水的富集特征并分别计算各类模式的水资源量,结合水样的采集与测试评价地下水的水化学和水质特征,最后综合富水程度、供水条件和水质特征三个方面探讨岩溶泉的供水意义,该研究成果为保障贫困缺水区的用水安全提供理论基础。

1 研究区概况

1.1 气象水文

研究区地处乌蒙山滇东北地区以礼河流域中上游,主要位于云南省曲靖市会泽县。以礼河流域地处低纬度高原区,属中亚热带、温带及寒带共存的立体气候类型区。年平均气温 13.2℃;最高达 30.5℃;最低为-5.3℃。研究区年均降水量为 817.7 mm,全年干湿季分明,降水量主要集中在 5-10 月,10 月-翌年 4 月降雨日数及降雨量均较少。以礼河为金沙江右岸的一级支流,全长 122 km,流域面积 2 622.77 km²,发源于会泽县待补镇野马川车鲁箐,源头海拔 3 080 m,于会泽县与巧家县交界注入金沙江。以礼河共有支流 59 条,年径流量 12.2 亿 m³。

1.2 地形地貌

以礼河流域南北高,南部最高海拔 3 857 m,北部最高海拔 3 905 m,最低处为以礼河和金沙江汇合口,海拔 636 m。境内山高坡陡,沟谷纵横,多呈“V”型峡谷,沟谷平均坡度约 35°。研究区地貌类型以山

地地貌为主,其次为盆地地貌。根据表面形态和成因,以礼河流域可划分为中高山构造侵蚀溶蚀地貌区(碳酸岩、碎屑岩及玄武岩分布区)、中高山侵蚀地貌区(玄武岩及碎屑岩分布区)及构造山间盆地(会泽盆地)。

1.3 地质构造

研究区位于川滇经向构造体系之绿汁江-小江南北构造带东缘与其东侧滇东多字型构造交界处,构造线方向主要为近 SN 向和 NE 向,褶皱和断裂均较发育,变形程度不均。研究区特有的构造应力场和所处的大地构造部位决定了全区的构造格局,主要表现为断裂以压性、压扭性为主,褶皱向斜宽缓,背斜紧凑。研究区中北部会泽盆地为一典型的断陷盆地,其北部和南部分别为北东向桃园断层和近东西向会泽断层,断层性质均为压扭性,主要出露地层为二叠系玄武岩和灰岩,上覆全新世松散岩类^[25]。在研究区南部待补镇近平行分布北东向构造雨碌断层、待补断层、舍居河背斜和二道平向斜,主要出露地层为震旦系白云岩、二叠系玄武岩和灰岩以及三叠系灰岩和砂岩。在研究区西南部菁坪村分布近南北向菁坪背斜,主要出露地层为二叠系玄武岩和灰岩以及三叠系灰岩和砂岩。

1.4 水文地质

本文研究区为以礼河流域中上游,主要位于会泽县境内,研究区边界除北部边界为会泽县与巧家县县界外,其余边界均以地表分水岭为界,研究区水文地质简图如图 1。根据区内地层岩性、地质构造及水动力条件,将地下水划分为松散岩类孔隙水、碎屑岩类孔隙裂隙水、碳酸盐岩类裂隙溶洞水、岩浆岩变质岩类裂隙水等四个类型。在此基础上,将碎屑岩类孔隙裂隙水和碳酸盐岩类裂隙溶洞水分别进一步划分为四个和三个亚类(图 1)。松散岩类孔隙水主要分布于会泽盆地以及岩溶槽谷和缓丘洼地中间的河谷地带;碎屑岩类孔隙裂隙水主要分布于老厂乡、会泽盆地南北部和新街乡;碳酸盐岩裂隙溶洞水主要广泛分布于会泽盆地及其南部;岩浆岩变质岩类基岩裂隙水以玄武岩裂隙孔洞水为主,在区内以面状特征广泛分布。区内地下水的补给来源主要为大气降雨,少部分来自于地表水入渗,受地形地貌影响,研究区北部及南部的地下水分别向南、向北形

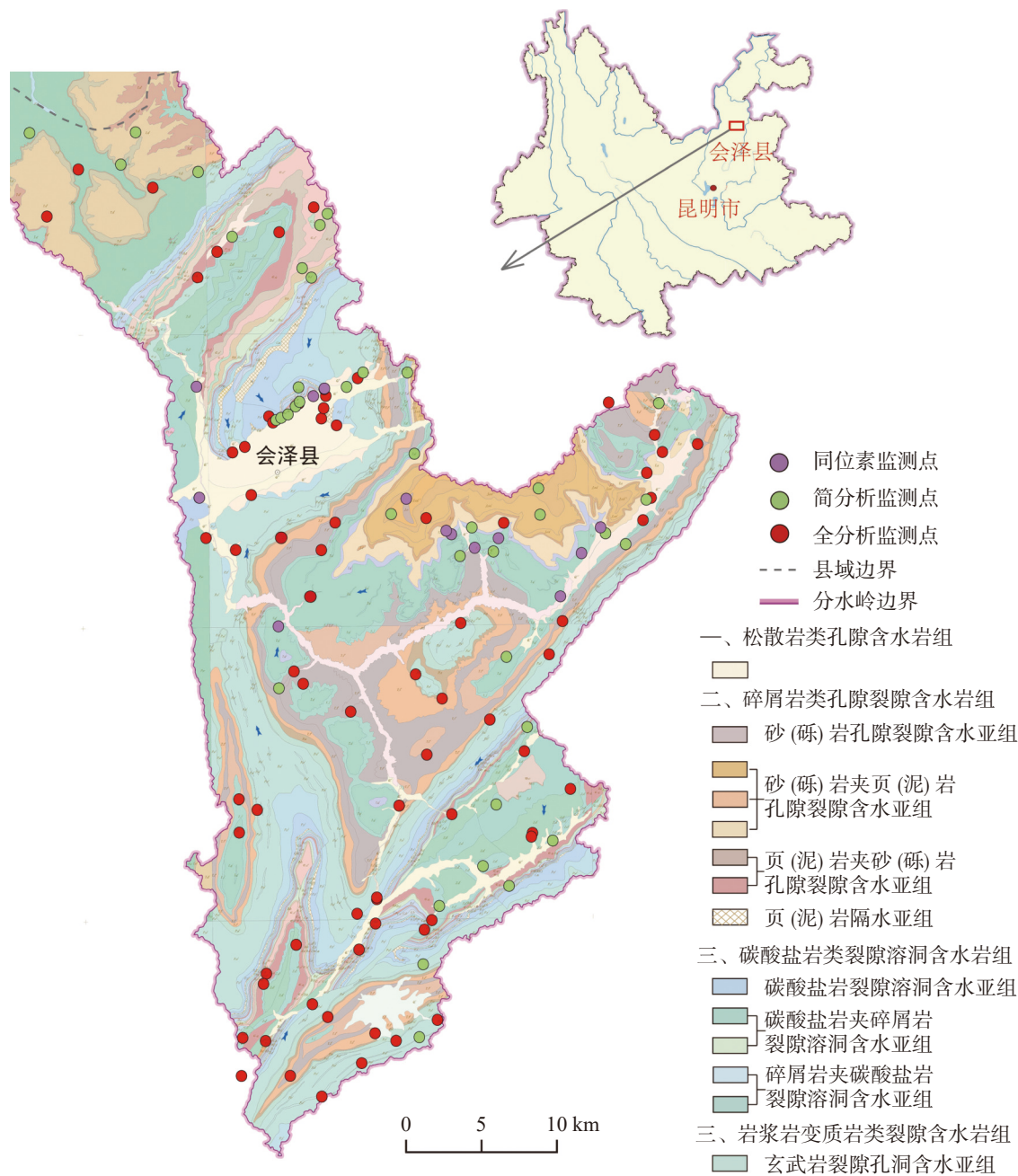


图 1 研究区位置及水文地质简图
Fig. 1 Location and the hydrogeological sketch of the study area

成地下径流,随后以泉或泉群的形式排泄于会泽盆地、或就近排泄于溪沟与河流。

2 研究方法

2.1 水文地质调查

对乌蒙山地区以礼河流域中上游及重点区曲靖市会泽县分别开展了 1:10 万和 1:5 万的水文地质调查工作,调查面积分别为 1 400 km² 和 450 km²,查

明了研究区水文地质条件、地下水资源分布及其开发利用状况,以及与地下水相关的环境地质问题。现场水文地质调查及分析工作是岩溶地下水富集特征归纳总结的基础,通过对岩溶含水岩组的空间展布及其组合形态、构造控水机制、地形地貌的综合分析,在研究区划分出五类地下水富集特征形式,分别为断裂导水带、断裂溶蚀谷、条带溶蚀谷、褶皱溶蚀谷和阻水接触带。随后基于上述分类,在每一类富集特征中圈定富水块段,并分别对其水质和水资

源量进行评价。

2.2 水样采集与测试

为研究乌蒙山以礼河流域中上游各富水块段的地下水水质特征,于 2020 年 5 月至 8 月采集水样 133 件,其中全分析样 40 件,简分析样 93 件,采样点分布如图 1 所示。采样过程严格按照规范标准进行,并现场测定了水温、pH、TDS 等指标,所有测试水样阴阳离子电荷平衡误差均在 5% 以内。

2.3 地下水资源量计算

在归纳总结地下水富集特征的基础上,综合考虑分水岭展布、含水岩组的空间分布及组合关系、断层及褶皱的空间形态、泉点汇水面积等因素,圈定各泉点或泉群对应的富水块段。采用降雨入渗系数法计算地下水的天然补给量^[26]:

$$Q_{补} = \alpha \cdot F \cdot H$$

式中: $Q_{补}$ 为降雨入渗补给地下水量(万 $m^3 \cdot a^{-1}$); α 为降雨入渗系数(-); F 为泉域面积(km^2); H 为研究区多年平均降水量($mm \cdot a^{-1}$)。采用总排泄量法计算地

下水的天然排泄量^[27]:

$$Q_{排} = \sum_{i=1}^n Q_i$$

式中: $Q_{排}$ 为地下水总排泄量(万 $m^3 \cdot a^{-1}$); Q_i 为第 i 个地下水排泄点的流量(万 $m^3 \cdot a^{-1}$); n 为地下水排泄点总数。

3 结果与讨论

3.1 岩溶地下水富集特征

3.1.1 断裂导水带(I)

断裂导水带地下水富集区主要分布于研究区南部待补镇咿则村的干龙洞暗河(I-1, 图 2(a)(b))以及会泽盆地西北部的龙泉寺暗河(I-2, 图 2(c)(d)), 该类型富集特征的形成机制主要包括二叠系阳新组(P_{2y})中-厚层较纯灰岩常作为良好的地层条件,与地下水流向小角度相交的断裂破碎带为管道型岩溶水流通

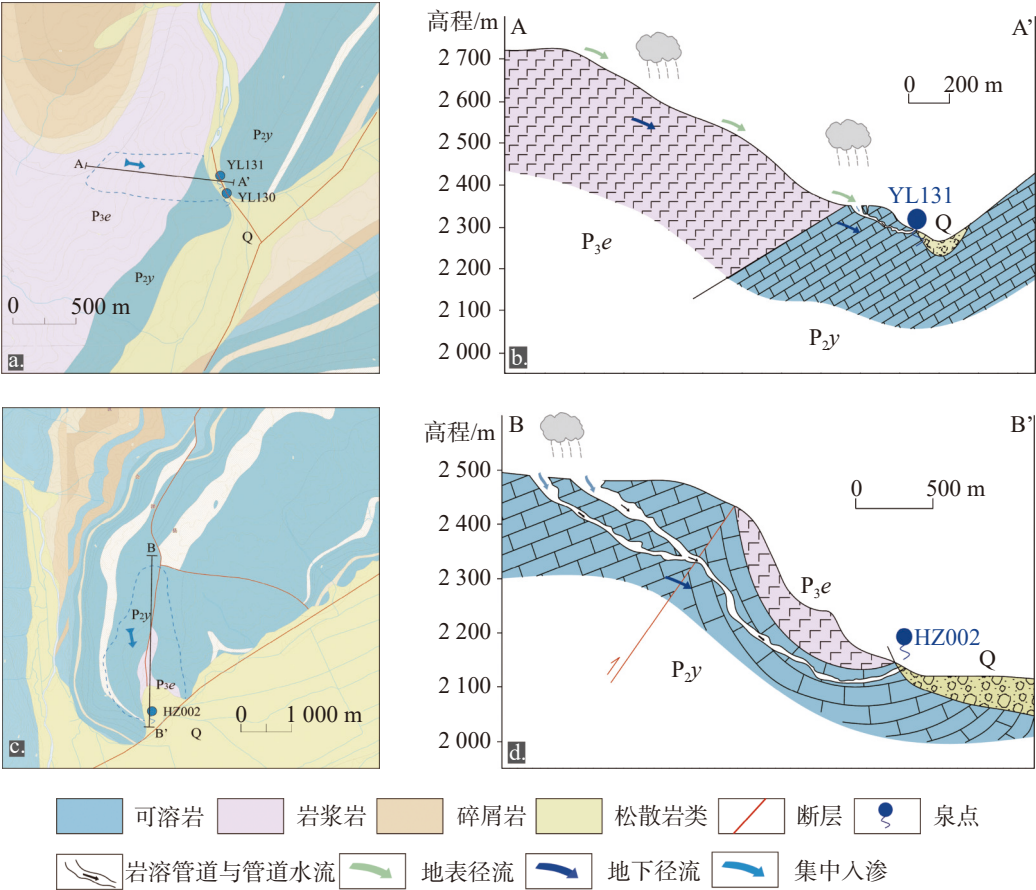


图 2 断裂导水带富集特征剖面示意图

Fig. 2 Profile of enrichment characteristics in the fault-conducting zone

斗以及斜坡地貌有利于降雨的集中入渗和地表径流汇流补给。断裂导水带富集区中的地下水多为近源补给,地下水流在岩溶管道中径流迅速,暗河排泄流量与降雨量相关性较高,动态变化大,旱季流量较小甚至断流。

3.1.2 断裂溶蚀谷 (II)

断裂溶蚀谷地下水富集区主要分布于研究区南部的哨排村(II-1,图 3(a)(b))和待补镇(II-2,图 3(c)(d)),该类型富集特征的形成机制主要为震旦系至二叠系的地层提供了可观的岩溶储水空间,断裂错动可溶岩地层后,沿断裂走向发育的溶蚀沟谷为岩溶水提供了良好的排泄条件。断裂溶蚀谷富集区中的地下水主要受坡地降雨入渗面状补给,地下水流在裂隙-溶隙介质中运移,于断裂溶蚀谷低洼处排泄,岩溶泉流量动态相对稳定,雨季流量约为旱季的 2 至 3 倍,无断流现象。

3.1.3 条带溶蚀谷 (III)

条带溶蚀谷地下水富集区主要分布于研究区东

部的老街回族乡(III,图 4),该类型富集特征是由分布于侏罗系和三叠系碎屑岩之间的三叠系关岭组上段(T_2g^2)可溶岩条带的溶蚀形成。条带溶蚀谷富集区中的地下水主要受降雨在碎屑岩地区的面状入渗补给,地下水在表层风化带的孔隙和裂隙中渗流,于地势较低的可溶岩条带处排泄,岩溶泉流量动态相对稳定,雨季流量约为旱季的 2 至 4 倍,常年不断流。

3.1.4 褶皱溶蚀谷 (IV)

褶皱溶蚀谷地下水富集区主要分布于研究区南部待补镇菁门村和大菜园村,可进一步细分为背斜溶蚀谷(IV-1,图 5(a)(b))和向斜溶蚀谷(IV-2,图 5(c)(d)),该类型富集区的核部均为可溶岩地层。背斜溶蚀谷核部地层为震旦系灯影组(Z_2d)白云岩,由核部至翼部依次分布寒武系至二叠系地层,其中泥盆系和石炭系多分布可溶岩地层,降雨入渗后主要沿表层风化溶隙和裂隙径流,于核部低洼排泄。向斜溶蚀谷核部地层为三叠系嘉陵江组(T_2j)泥灰岩,其两翼分布飞仙关组(T_1f)砂岩,地下水主要沿孔隙和裂隙径流,汇入可溶岩地层后排泄于沟谷。

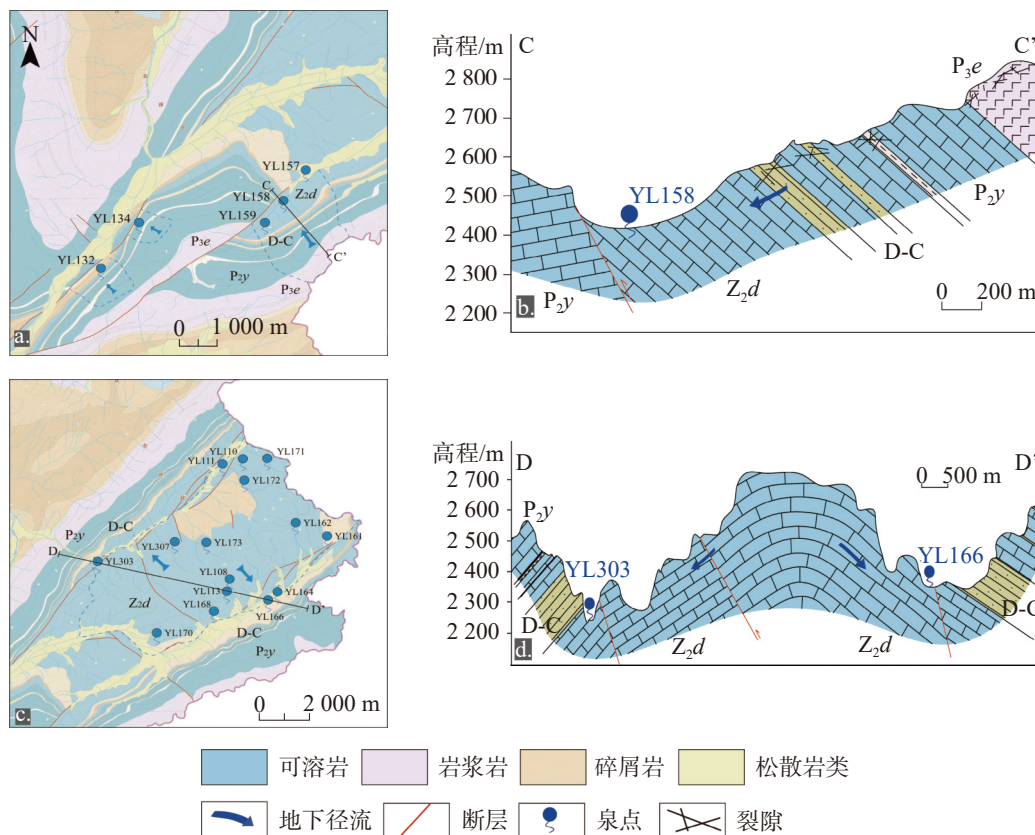


图 3 断裂溶蚀谷富集特征剖面示意图

Fig. 3 Profile of enrichment characteristics in the fault dissolution valley

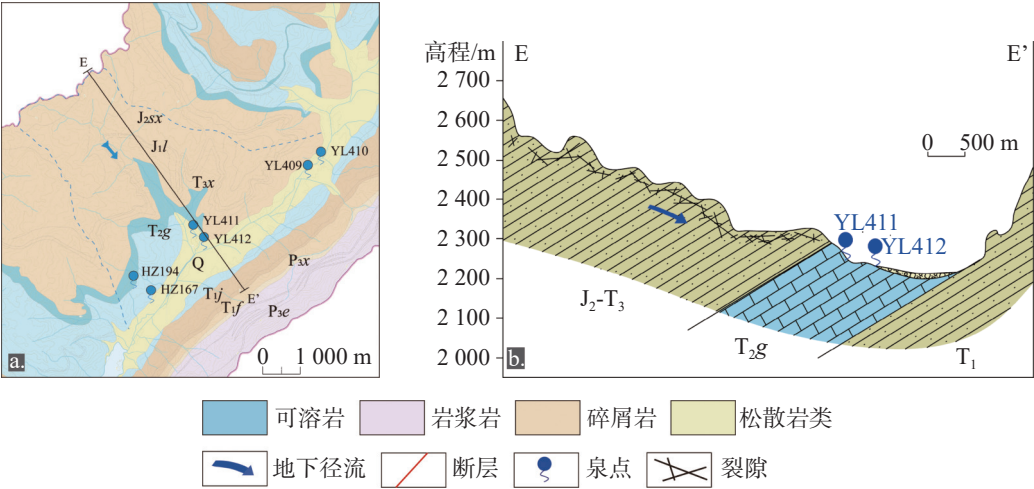


图 4 条带溶蚀谷富集特征剖面示意图

Fig. 4 Profile of enrichment characteristics in the strip dissolution valley

3.1.5 阻水接触带 (V)

阻水接触带地下水富集区主要分布于会泽盆地西缘及北缘,该类型富集特征主要是由大面积的灰岩补给径流区与阻水接触界面排泄带组成,界面类型在会泽盆地边缘主要表现为断层及可溶岩与第四系沉积物接触面的组合(V-1, 泉 YL413、泉 HZ009、

HZ016), 以及可溶岩与非可溶岩接触面(V-2, 泉 HZ243)。大面积分布且具有良好入渗条件的灰岩裸露区是该类型地下水富集区中最主要的补给区,地下水经溶蚀裂隙径流,随接触界面在地表呈线状排泄。由于补给面积与含水层体积均较大,地下水资源量相对丰富,泉流量最大可达 215 L/s(图 6(b)), 泉

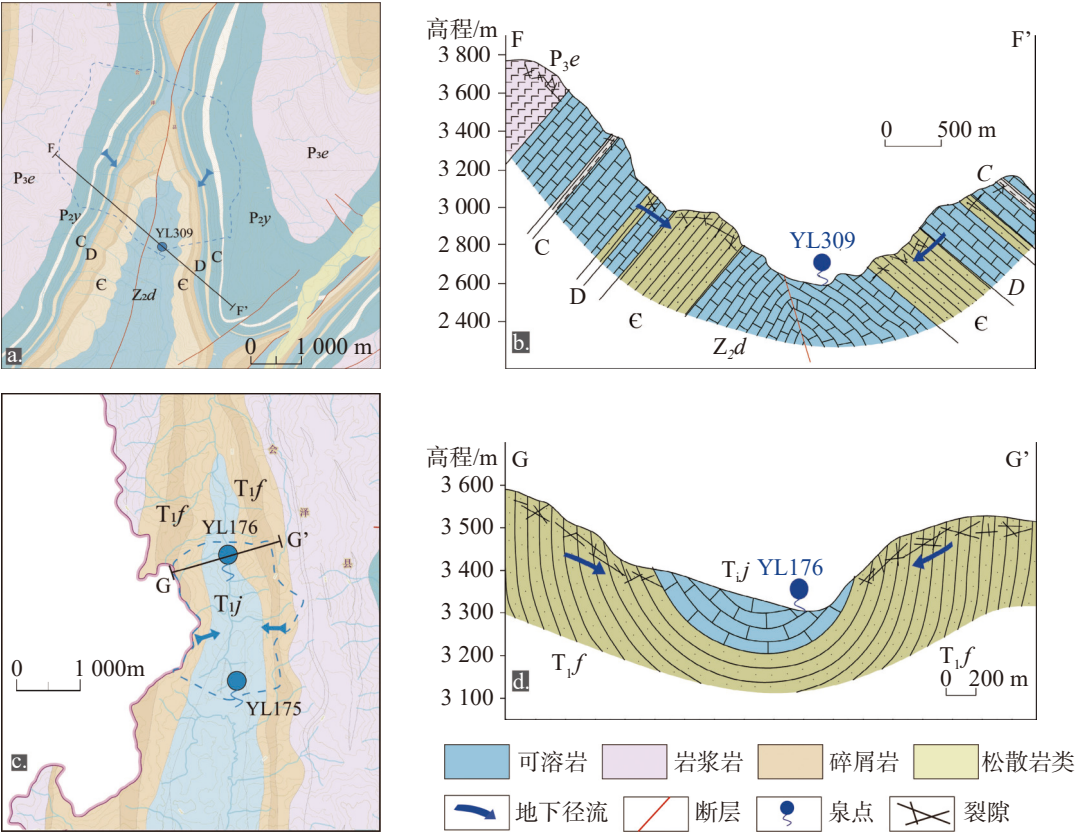


图 5 褶皱溶蚀谷富集特征剖面示意图

Fig. 5 Profile of enrichment characteristics in the fold dissolution valley

YL413);此外,由于径流与排泄条件均较好,泉点流量动态变幅相对其它类型富集特征略大,雨季流量可达旱季流量的 4 至 20 倍,无断流现象。

3.2 富水块段水质特征

研究区内采集水样的检测结果汇总如表 1,对于各类地下水富集特征,分别计算各项检测参数的样本均值及变异系数,以展现参数的整体特征及分布情况。此外,基于参数获取各富集特征中的地下水类型及质量分级情况,并将各水样的水化学数据投绘与 Piper 三线图中(图 7)。

综合分析可知,各富水块段中地下水均呈弱碱性,地下水中阴离子为重碳酸根为主,阳离子以钾离子、钠离子、钙离子和镁离子为主。研究区内地下水水化学类型主要为 Na-HCO₃ 型、K-HCO₃ 型、Ca·Mg-HCO₃ 型和 Ca-HCO₃ 型,少量水样为 Ca·Na-

HCO₃ 型和 Na·Mg-HCO₃·SO₄ 型。断裂导水带富水块段(I)中,干龙洞暗河子区(I-1)均为 K-HCO₃ 型, K⁺ 含量为 373~618 mg/L,推测来源于上游及附近菜地的化肥施用;而龙泉寺暗河子区(I-2)为 Na-HCO₃ 型,其中 K⁺和 Na⁺含量均较高,推测主要受附近居民区的人类活动影响。断裂溶蚀谷富水块段(II)中的地下水化学类型包含 Na-HCO₃ 型和 Ca·Mg-HCO₃ 型,其中哨排村子区(II-1)主要为 Na-HCO₃ 型,而待补镇子区(II-2)均为 Ca·Mg-HCO₃ 型,结合图 3 分析可知,II-1 子区径流路径和汇水面积的规模均小于 II-2,地下水以就近补给、就近排泄为主;II-2 子区除两条近平行断裂外,还分布一核部为较纯白云岩的宽缓背斜,地下水径流条件好,径流路径较长。条带溶蚀谷富水块段(III)中地下水均为 Ca·Mg-HCO₃ 型,主要是由于该富水块段的补给区和径流区分布大面积的

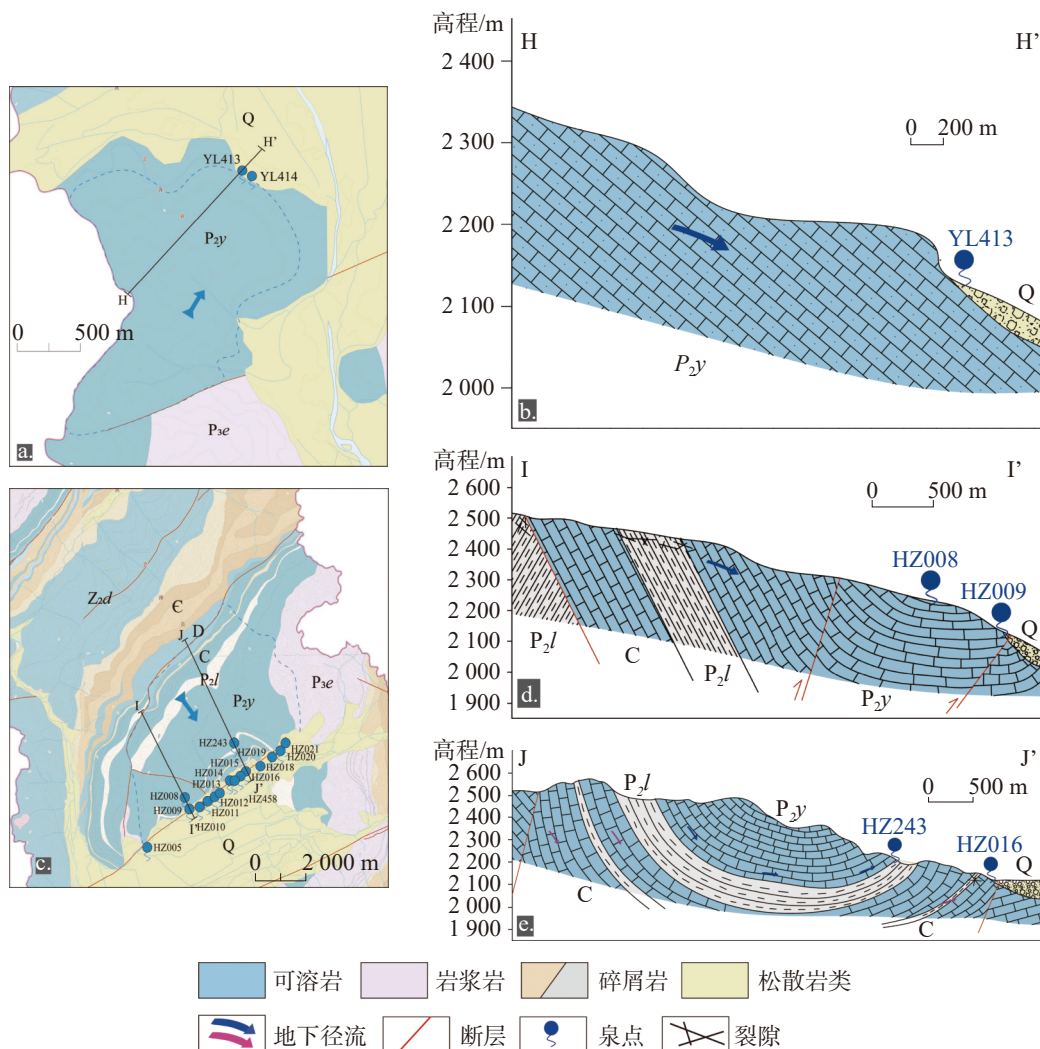


表 1 研究区地下水水质特征汇总表
Table 1 Summary of groundwater quality in the study area

	I(N ¹ =3)		II(N=8)		III(N=4)	IV(N=3)		V(N=15)
	I-1(N=2)	I-2(N=1)	II-1(N=5)	II-2(N=3)	\	IV-1(N=1)	IV-2(N=2)	V-1
pH	7.9/0.4	7.9/0	8.0/1.9	7.9/0.9	7.9/2.1	8.2/0	7.9/0.4	7.9/1.7
K ⁺	495.5/24.7	80/0	13.1/122.6	1.0/12.8	0.9/33	0/0	22/100	20.6/312.8
Na ⁺	0/0	63.6/0	7.4/106.9	1.6/13.4	1.7/58.7	87/0	0.6/100	20.7/145.6
Ca ²⁺	0.3/6.5	0.6/0	9.6/196.4	49.8/14.7	39.1/8.7	0.2/0	0.4/53.2	52.4/96.7
检测 Mg ²⁺	0.5/10	0.4/0	5.4/193.1	25.0/11.5	9.5/17.7	0.3/0	0.1/9.1	9.2/152.5
参数 ^{2,3} Cl ⁻	2.3/2.6	3.4/0	3.2/106.5	3.1/15.3	1.9/81	1.2/0	2.5/22.9	7.2/76.7
SO ₄ ²⁻	5.1/13.2	11.5/0	30.2/82	7.7/35.6	18.5/38.6	15/0	1.7/9.5	20.4/158.9
HCO ₃ ⁻	155.7/0	217.9/0	196.1/13.8	259.4/11.3	148.7/8.2	217.9/0	85.6/34.6	246.1/33.1
NO ₃ ⁻	4/10.6	5.8/0	5.4/158.3	10.0/21.6	2.5/91.2	1.7/0	0/0	13.3/77.2
TDS	139.8/1.3	199.3/0	205.4/18.8	221.1/11.6	148.1/11.9	190.8/0	74.4/32.4	245.2/39.1
地下水类型	Na-HCO ₃	Na-HCO ₃	Na-HCO ₃ (N=4) Ca·Mg-HCO ₃ (N=1)	Ca·Mg-HCO ₃	Ca·Mg-HCO ₃	Na-HCO ₃	Na-HCO ₃ (N=1) Ca·Na-HCO ₃ (N=1)	Ca-HCO ₃ (N=9) Na-HCO ₃ (N=5) Na·Mg-HCO ₃ ·SO ₄ (N=1)
地下水质量分级	III	III	III(N=4), IV(N=1)	III(N=2), IV(N=1)	I(N=1) II(N=1) III(N=1) IV(N=1)	IV	III	II(N=11), III(N=1) IV(N=2), V(N=1)

注: ¹N为样本数; ²物化参数一栏中,pH无量纲,其余参数单位均为mg·L⁻¹; ³物化参数数据格式为:样本均值/变异系数(%).
Note: ¹N represents sample size. In the column of ²physicochemical parameter, pH is dimensionless; the unit of other parameters is mg·L⁻¹. The data format of ³physicochemical parameter is sample average/coefficient of variation(%)

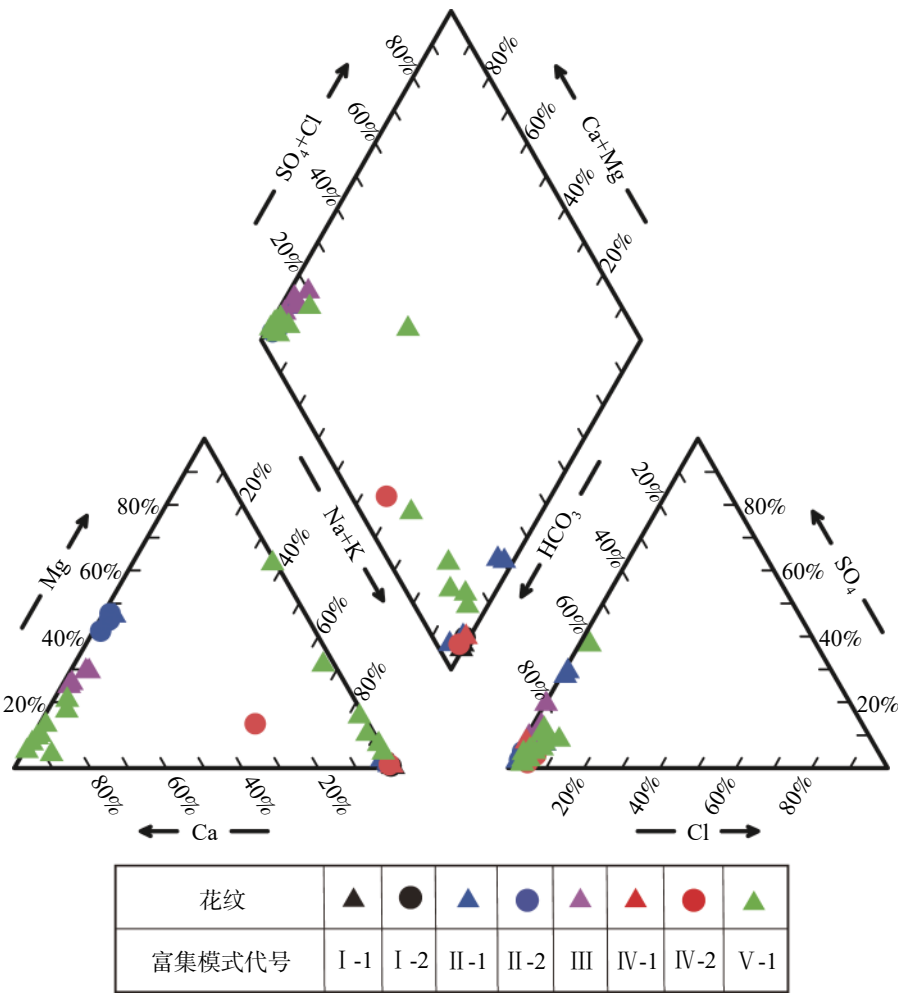


图 7 富水块段水样水化学 Piper 图

Fig. 7 Piper diagram of the hydrogeochemical characteristics in water enrichment blocks

侏罗系和三叠系下统碎屑岩,地下水在孔隙和裂隙中的渗流伴随着一定程度的水岩作用。在褶皱溶蚀谷富水块段(IV)中,背斜溶蚀谷(IV-1)的 TDS 明显高于向斜溶蚀谷(IV-2),推测该现象主要受地下水流经地层数量的影响。阻水接触带富水块段(V)地下水类型主要为 Ca-HCO_3 型和 Na-HCO_3 型,碳酸岩盐的溶解提供了主要的离子来源。

由表 1 可知,研究区内地下水水质整体较好,I、II、III 类水占比约为 79%,IV 类水和 V 类水的超标指标主要为硝酸盐和耗氧量,位于富水块段 II-2 内的泉点 YL111 则表现为铅超标。从水质分布的空间特征来看,IV 类水和 V 类水主要分布于人口较密集的山间平原和断陷盆地,推测上述区域农业活动所使用的农药和化肥以及居民生活废水的排放是造成指标超标的主要原因。

3.3 富水块段水资源量评价

3.3.1 天然补给量

在采用降雨入渗系数法计算富水块段的天然补给量时,首先基于区域地表分水岭、阻水断裂和流域边界在平面上的分布特征划分各岩溶水系统的平面边界^[28],划分结果见图 2 至图 6 的蓝色虚线,基于此计算得到的岩溶水系统面积统计如表 2。此外,考虑各富水块段的地层岩性及组合情况、岩溶发育程度、水文地质补径排条件、地形地貌和植被覆盖情况,参考类似及临近区域取值情况^[29-30],得到的各块段降雨入渗系数取值统计如表 2。研究区多年平均降雨量数据来源于云南省气象局与会泽县气象局提供的 1990~2019 年长序列大气降水资料,由于研究区均位于会泽县境内,故取统一值进行计算。

由表 2 可知,位于研究区南部的待补镇断裂溶蚀谷富水块段(II-1)天然补给量最大,其次是会泽盆地阻水接触带(V)富水块段,上述两块段均具有较好的降雨入渗补给条件和较大的泉域补给面积。位于研究区东部的新街回族乡条带溶蚀谷虽然泉域面积较为可观,但受限于大面积出露的碎屑岩以及坡度较大的斜坡地貌,入渗系数整体较低,故天然补给量有限。此外,由于玄武岩和碎屑岩在补给区出露面积较大导致的低降雨入渗系数,以及有限的泉域面积,使得干龙洞暗河断裂导水带(I-1)和大菜园村向斜溶蚀谷(IV-2)富水块段天然补给量较少。

3.3.2 天然排泄量

研究区内岩溶泉均属表层岩溶泉,其流量动态与降雨较为同步。此外,由于现场调查的泉流量为单次测量结果,故根据访问得到的泉流量年动态变幅对其它期的地下水流流量赋值动态系数,然后全年流量求和得到富水块段的地下水天然排泄量,相关参数选取和计算结果如表 3。由于断裂导水带富水块段(I)泉点常年在旱季断流,无法根据当期测量流量赋值合理的系数,故无法计算其天然排泄量。

由表 3 可知,会泽盆地阻水接触带(V)富水块段天然排泄量最大,主要是由于在盆地边缘沿会泽断层一线出露 15 个岩溶泉点,且整体流量较大($0.1\sim90\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$);菁门村背斜溶蚀谷(IV-1)富水块段天然排泄量最小,是由于其泉域内仅调查到 1 个泉点,且其丰水期流量为 $2.1\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ 。在得到富水块段天然排泄量和补给量的基础上,进一步计算排泄量占补给量的比值,可以分析得出各富水块段的地下水资源天然补排状态及开发利用潜力。由表 3 可知,研究区内泉点天然排泄量在降雨入渗补给量中的占比

表 2 研究区富水块段天然补给量计算参数取值及结果统计一览表
Table 2 Values and results of calculation parameters of the natural recharge in water enrichment blocks

富水块段	子区	入渗系数 α	泉域面积 F/km^2	多年平均降雨量 H/mm	$Q_{\text{补}}/\text{万 m}^3\cdot\text{a}^{-1}$
I	I-1	0.33	2.22	817.7	599
	I-2	0.56	3.81		1 744.6
II	II-1	0.41	5.26		1 763.5
	II-2	0.49	36.22		14 512.4
III	\	0.12	21.34		2 094.0
IV	IV-1	0.37	4.61		1 394.8
	IV-2	0.21	1.92		329.7
V	\	0.52	23.13		9 835.0

表 3 研究区富水块段天然排泄量计算参数取值及结果统计一览表

Table 3 Values and results of calculation parameters of the natural discharge amount in water enrichment blocks

富水块段	子区	丰水期 ¹		平水期 ²		枯水期 ³		Q排/ 万m ³ ·a ⁻¹	Q排/ Q补
		系数	流量L·s ⁻¹	系数	流量L/s	系数	流量L·s ⁻¹		
II	II-1	3	121.4*	1.5	60.7	1	40.47	230.8	13.1%
	II-2	3	57.68*	1.5	28.84	1	19.23	109.6	0.7%
III	\	2.5	43.84*	1.3	22.8	1	17.54	87.3	4.2%
IV	IV-1	2	2.1*	1.2	1.26	1	1.05	4.6	0.3%
	IV-2	3.5	27.4*	1.8	14.09	1	7.83	51.1	15.5%
V	V-1	4	721.1	2	360.55*	1	180.28	1 308.4	13.3%

¹丰水期为每年6月、7月、8月、9月; ²平水期为每年3月、4月、5月、10月; ³枯水期为每年1月、2月、11月、12月; *流量为调查实测流量

¹Wet season: from June to September; ²Normal season: from March to May and October; ³Dry season: from January to February and from November to December.

*The flow is the actual measurement in the survey

整体较低,最高比例为 15.5%,最低仅为 0.3%,说明就地下水资源量而言,其剩余的开发潜力较大。

3.4 岩溶泉供水意义探讨

岩溶地下水是我国具有重要意义的供水水源,在北方地区,岩溶地下水作为近三十个大、中型城市的主要供水水源^[31];在西南岩溶石山地区,岩溶含水层具有可观的储水和导水空间,赋存着丰富的地下水,同样因此具有较大的开发利用价值和供水意义^[32]。在研究区所处的乌蒙山片区,岩溶地下水资源分布不均,受开采利用的条件限制,深部地下水的供水意义有限,只有通过合理开发利用浅部的表层岩溶水才能有效解决人畜饮水困难的问题。在综合前文的研究内容的基础上,本节对于研究区表层岩溶泉供水意义的探讨,主要从富水程度、供水条件和

水质特征三个方面进行分析,分析结果汇总见表 4。

断裂导水带富水块段(I)的水资源量对降雨量的变化非常敏感,年内分布不均,岩溶泉在旱季常常断流,因此就富水程度而言,其整体供水意义一般。在干龙洞暗河富水块段(I-1)区域,仅分布一户农户,暗河出口高程低于农户高程,且暗河出口位于河流右岸,地下水直接排泄进入河流,因此基本不具备天然的供水条件;在龙泉寺暗河富水块段(I-2)下游,分布人口较密集的村镇,地下水由暗河出口流出,经由水渠排泄最终汇入以礼河水系,具备良好的取水条件,对降雨具有一定的调蓄作用,此外,该块段地下水水质较好,因此具有一定的供水意义,较适合采用引、提、堵、蓄的方式进行开发利用^[33]。

断裂溶蚀谷富水块段(II)和条带溶蚀谷富水块

表 4 各富水块段供水意义评价要素与评价结果一览表

Table 4 Evaluation elements and results of water supply significance in water enrichment blocks

富水块段	子区	评价要素			供水意义 评价结果
		富水程度	供水条件	水质特征	
I	I-1	水资源时空分配极不均,仅雨季富水	不具备天然供水条件	III类水,水质较好	较差
	I-2	水资源时空分配较不均,旱季易断流	泉水经水渠流经居民区,具备天然供水条件	III类水,水质较好	较好
II	II-1	良好的补给条件和富水空间	泉点位于用水户上方,自然引流条件较好	绝大部分优于III类水,个别泉点为IV类水	显著
III	II-2				
IV	IV-1	良好的补给条件和富水空间	泉点自然引流用于居民生活和灌溉用水	IV类水,耗氧量超标	农业用水:较好 居民用水:较差
	IV-2		泉点高程较高,附近无用水户	III类水,水质较好	较差
V	V-1	良好的补给条件和富水空间,地下水资源量丰富	泉点自然引流用于居民生活和灌溉,且已修建蓄水设施	大部分优于III类水,个别泉点为IV类水和V类水	显著
	V-2				

段(III)具有良好的补给条件和储水空间,岩溶泉流量动态相对稳定,雨季流量约为旱季的2至4倍,无断流现象,富水程度较为理想。在哨排村、待补镇和新街回族乡,块段中泉点天然出露点基本位于用水户上方,自然引流条件较好。此外,上述块段地下水多优于III类水,仅个别为IV类水,水质整体较好,因此具有显著的供水意义,除引、提、堵、蓄以外,还可采用钻井开采利用岩溶水。

褶皱溶蚀谷富水块段(IV)具有较好的补给条件和储水空间,岩溶泉流量动态相对稳定,无断流现象,富水程度较为理想。据现场调查,在背斜溶蚀谷(IV-1)出露的泉点被自然引流,部分作为生活用水,部分被用作农业灌溉;而向斜溶蚀谷(IV-2)的泉点出露高程较高(均大于3250m),附近无居民和农田,泉点以自然排泄为主。此外,背斜溶蚀谷(IV-1)泉点水质为IV类水,主要表现为耗氧量超标;向斜溶蚀谷(IV-2)泉点均为III类水,水质相对较好。综上所述,受水质影响,背斜溶蚀谷(IV-1)富水块段的地下水可主要作为农业灌溉的供水水源,作为居民生活用水意义有限;而由于出露高程较高,附近无用水户,向斜溶蚀谷(IV-2)富水块段的供水意义较差。

阻水接触带富水块段(V)分布大面积入渗条件较好的灰岩裸露区,储水空间大,地下水资源量丰富,岩溶泉流量动态较其它富水块段大,但基本无断流现象,因此富水程度非常理想。该块段泉点下游多为居民生活区和农田,可自然引流,且在一些流量较大的泉点处已修建一定规模的蓄水设施。此外,该块段泉点水质大部分优于III类水,个别为IV类和V类水,整体水质较好,因此具有显著的供水意义,可同时考虑引、提、堵、蓄和钻井开采方式。

4 结 论

本文基于在乌蒙山以礼河流域中上游开展的水文地质调查、水样采集与测试以及地下水资源量计算等研究手段,归纳总结了该区域岩溶地下水的富集特征、评价了各富水块段的水质特征、计算了地下水资源的天然补给量和排泄量,并综合富水程度、供水条件和水质特征对岩溶泉的供水意义进行了探讨,主要得到以下结论:

(1)受岩性组合、构造条件和地形地貌等因素的综合影响,研究区内岩溶地下水的富集特征可归纳

为五种类型:断裂导水带、断裂溶蚀谷、条带溶蚀谷、褶皱溶蚀谷、阻水接触带;

(2)研究区内各富水块段地下水均呈弱碱性,水化学类型主要为Na-HCO₃型、Ca-Mg-HCO₃型和Ca-HCO₃型。研究区内地下水水质整体较好,I、II、III类水占比约为79%,IV类水和V类水的超标指标主要为硝酸盐和耗氧量,农药化肥施用和生活污水排放是造成上述超标现象的主要原因;

(3)研究区内各富水块段地下水的天然补给量和排泄量分别为329.7~14512.4万m³·a⁻¹和4.6~1308.4万m³·a⁻¹,排泄量占补给量比值为0.3~15.5%,区内地下水资源剩余开发潜力较大;

(4)断裂溶蚀谷、条带溶蚀谷和阻水接触带富水块段地下水供水意义显著;其余富水块段在不同程度上受限于水资源时空分配不均、不具备供水条件、水质较差等情况,其供水受到影响。

参考文献

- [1] 郭蕾蕾,魏良帅,黄安邦,舒勤峰. 乌蒙山地区岩溶地下水流系统结构及其找水应用[J]. 地质科技通报, 2022, 41(1): 146-156.
GUO Leilei, WEI Liangshuai, HUANG Anbang, SHU Qinfeng. Structure of karst groundwater system and its water exploration in Wumeng Mountain area[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(1): 146-156.
- [2] 魏良帅,黄安邦,罗云丰,贾逸,舒勤峰,和铭. 乌蒙山昭通地区玄武岩地下水赋存规律及开发利用[J]. 地质通报, 2020, 39(12): 1891-1898.
WEI Liangshuai, HUANG Anbang, LUO Yunfeng, JIA Yi, SHU Qinfeng, HE Ming. Occurrence regularity and exploration and utilization of groundwater in Zhaotong area of Wumeng Mountain[J]. Geological Bulletin of China, 2020, 39(12): 1891-1898.
- [3] 洪涛,谢运球,喻崎雯,赵一,赵光帅,杨丽超. 乌蒙山重点地区地下水水化学特征及成因分析[J]. 地球与环境, 2016, 44(1): 11-18.
HONG Tao, XIE Yunqiu, YU Qiwen, ZHAO Yi, ZHAO Guangshuai, YANG Lichao. Hydrochemical characteristics study and genetic analysis of groundwater in a key region of the Wumeng Mountain, Southwestern China[J]. Earth and Environment, 2016, 44(1): 11-18.
- [4] 钱康,张继,陈鹏,蒲文斌,陈贝贝,魏良帅. 云南乌蒙山盘河地区地下水水化学及同位素特征[J]. 地质通报, 2022, 41(7): 1291-1299.
QIAN Kang, ZHANG Ji, CHEN Peng, PU Wenbin, CHEN Beibei, WEI Liangshuai. Hydrochemical and isotopic characteristics of groundwater in Panhe area of Wumeng Mountain, Yunnan[J]. Geological Bulletin of China, 2022, 41(7): 1291-1299.

- [5] 曹建华, 袁道先, 章程, 蒋忠诚. 受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统[J]. *地球与环境*, 2004, 32(1): 1-8.
CAO Jianhua, YUAN Daoxian, ZHANG Cheng, JIANG Zhongcheng. Karst ecosystem constrained by geological conditions in Southwest China[J]. *Earth and Environment*, 2004, 32(1): 1-8.
- [6] 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. Unique characteristics of groundwater occurrence and its development and utilization model in the Wumeng Mountain area: A case study of the Zhaojie area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(11): 3544-3555.
- [7] 刘光亚. 基岩地下水[M]. 北京: 地质出版社, 1979.
- [8] 廖资生. 北方岩溶的主要特征和岩溶储水构造的主要类型[M]. 北京: 地质出版社, 1978: 56-61.
- [9] 胡宽榕, 曹玉清, 胡忠毅, 刘星. 水文地质蓄水构造级、区带划分及其水资源分布特点[J]. *长春科技大学学报*, 2000, 30(3): 246-250.
HU Kuanrong, CAO Yuqing, HU Zhongyi, LIU Xing. Hydrological impounded structure classification and its zone division[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2000, 30(3): 246-250.
- [10] 梁永平, 王维泰. 中国北方岩溶水系统划分与系统特征[J]. *地球学报*, 2010, 31(6): 860-868.
LIANG Yongping, WANG Weitai. The division and characteristics of karst water system in Northern China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2010, 31(6): 860-868.
- [11] 乔晓英, 王文科, 陈英, 王杰, 韩锦萍, 梁煦枫. 天山北麓蓄水构造模式与水循环特征[J]. *地球科学与环境学报*, 2005, 27(3): 33-37.
QIAO Xiaoying, WANG Wenke, CHEN Ying, WANG Jie, HAN Jinping, LIANG Xufeng. Storage water structure modes and water cycle characteristic on Tianshan Mountain foot[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2005, 27(3): 33-37.
- [12] 李巨芬, 李伟, 冯庆达, 吕琳, 马雪梅. 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, LYU Lin, MA Xuemei. 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.
- [13] 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.
- [14] 于丽莎, 潘晓东, 曾洁, 任坤, 焦友军, 兰干江. 鲁中南泰莱盆地岩溶地下水赋存特征和找水规律[J]. *地质与勘探*, 2019, 55(1): 168-177.
YU Lisha, PAN Xiaodong, ZENG Jie, REN Kun, JIAO Youjun, LAN Ganjiang. Occurrence characteristics of karst groundwater and the rule of water search in the Tailai basin, central-southern Shandong Province[J]. *Geology and Exploration*, 2019, 55(1): 168-177.
- [15] 汪云, 杨海博, 郑梦琪, 赵耀, 韩智昕. 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, ZHAO Yao, HAN Zhixin. 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.
- [16] 潘晓东, 唐建生, 苏春田. 鲁中南地区岩溶水系统模式: 以泰安市岱岳区为例[J]. *桂林理工大学学报*, 2014, 34(1): 39-44.
PAN Xiaodong, TANG Jiansheng, SU Chuntian. Karst groundwater system in central and southern Shandong province: A case in Daiyue district of Tai'an[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2014, 34(1): 39-44.
- [17] 杨红, 许模, 张劲松. 滇东南弥勒盆地蓄水构造特征分析及找水方向[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(6): 254-258.
YANG Hong, XU Mo, ZHANG Jinsong. Analysis of the characteristics of groundwater storage structure and groundwater exploration in Mile basin, southeast Yunnan Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2012, 19(6): 254-258.
- [18] 覃小群, 宋开本, 黄奇波, 蓝美宁, 黄春阳, 黄辉. 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*, 2017, 36(5): 618-625.
QIN Xiaoqun, SONG Kaiben, HUANG Qibo, LAN Funing, HUANG Chunyang, HUANG Hui. Groundwater occurrence characteristics and drilling well models in karst peak forest areas, Guangxi, China[J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(5): 618-625.
- [19] 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(6): 1-5.
ZHANG Zhigan, CHEN Weihai. Water-bearing structure in karst terrain: A case study in Xiaopingyang area, Laibin, Guangxi[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2000(6): 1-5.
- [20] 潘晓东, 唐建生, 苏春田, 孟小军, 曾洁, 杨杨. 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*, 2015, 61(1): 121-127.
PAN Xiaodong, TANG Jiansheng, SU Chuntian, MENG Xiaojun, ZENG Jie, YANG Yang. Discussion of groundwater exploration in compressive fault zones in karst areas of Guizhou Plateau slopes[J]. *Geological Review*, 2015, 61(1): 121-127.
- [21] 屈伟, 丁坚平, 邹仕孝, 曹兴民. 褶皱构造对岩溶泉发育的控制作用: 以贵州威宁地区为例[J]. *地下水*, 2009, 31(6): 131-133.
QU Wei, DING Jianping, ZOU Shixiao, CAO Xingmin. Fold structure's control function on the karst stephen development: Taking the Weining region in Guizhou as an example[J]. *Ground Water*, 2009, 31(6): 131-133.

- [22] 苏春田, 潘晓东, 李兆林, 唐建生, 梁小平, 程洋, 赵伟, 谢代兴, 孟小军. 云南广南岩溶区水文地质环境地质调查进展[J]. [中国地质调查](#), 2015, 2(8): 9-16.
SU Chuntian, PAN Xiaodong, LI Zhaolin, TANG Jiansheng, LIANG Xiaoping, CHENG Yang, ZHAO Wei, XIE Daixing, MENG Xiaojun. Progress of hydrogeology and environmental geology survey in Guangnan karst area, Yunnan Province[J]. [Geological Survey of China](#), 2015, 2(8): 9-16.
- [23] 彭淑惠, 李继红. 滇东岩溶区表层岩溶水源地特征及其开发利用[J]. [云南地质](#), 2006, 25(2): 249-255.
PENG Shuhui, LI Jihong. The characteristics and development of epigenic karst water in east Yunnan[J]. [Yunnan Geology](#), 2006, 25(2): 249-255.
- [24] 任蕊, 杨成程, 匡野. 乌蒙山岩溶缺水地区表层岩溶泉有效开发模式研究[J]. [地下水](#), 2018, 40(2): 24-26.
REN Rui, YANG Chengcheng, KUANG Ye. Study on the exploitation model of epikarst spring karst water Wumengshan area[J]. [Ground Water](#), 2018, 40(2): 24-26.
- [25] 赵伟策, 祝新友, 王书来, 蒋斌斌, 刘孜, 管育春. 云南会泽铅锌矿灯影组矿石硫、铅同位素组成及找矿意义[J]. [沉积与特提斯地质](#), 2023, 43(1): 156-167.
ZHAO Weice, ZHU Xinyou, WANG Shulai, JIANG Binbin, LIU Zi, GUAN Yuchun. Sulfur and lead isotopic compositions of ores from the Dengying Formation and their prospecting implications in the Huize Pb-Zn deposit, Yunnan Province[J]. [Sedimentary Geology and Tethyan Geology](#), 2023, 43(1): 156-167.
- [26] 何师意, 周锦忠, 曾飞跃. 岩溶地下河流域地下水资源评价: 以湖南湘西大龙洞为例[J]. [水文地质工程地质](#), 2007(5): 33-36.
HE Shiyi, ZHOU Jinzhong, ZENG Feiyue. Assessment on the karst water resources of Dalongdong underground river catchment of Xiangxi[J]. [Hydrogeology & Engineering Geology](#), 2007(5): 33-36.
- [27] 杨杨, 赵良杰, 潘晓东, 夏日元, 曹建文. 西南岩溶山区地下水资源评价方法对比研究: 以寨底地下河流域为例[J]. [中国岩溶](#), 2022, 41(1): 111-123.
YANG Yang, ZHAO Liangjie, PAN Xiaodong, XIA Riyuan, CAO Jianwen. Comparative study on evaluation methods of groundwater resources in karst area of Southwest China: Taking Zhaidi underground river basin as an example[J]. [Carsologica Sinica](#), 2022, 41(1): 111-123.
- [28] 劳文科, 蒋忠诚, 时坚, 梁彬. 洛塔表层岩溶带水文地质特征及其水文地质结构类型[J]. [中国岩溶](#), 2003, 22(4): 258-266.
LAO Wenke, JIANG Zhongcheng, SHI Jian, LIANG Bin. Hydrogeologic structure and feature of the epi-karst in Luota[J]. [Carsologica Sinica](#), 2003, 22(4): 258-266.
- [29] 云南省地质局水文地质工程地质队. 1: 20万东川幅区域水文地质普查报告[R]. 1980.
- [30] 中国地质调查局成都地质调查中心. 乌蒙山滇东北地区以礼河流域水文地质调查报告[R]. 2022.
- [31] 梁永平, 赵春红. 中国北方岩溶水功能[J]. [中国矿业](#), 2018, 27(Supp.2): 297-299, 305.
LIANG Yongping, ZHAO Chunhong. Karst water function in Northern China[J]. [China Mining Magazine](#), 2018, 27(Supp.2): 297-299, 305.
- [32] 王宇. 云南泸西小江流域岩溶水有效开发模式研究[D]. 昆明: 昆明理工大学. 2006.
WANG Yu. Effective exploration model of karst water in Xiaojiang basin, Luxi county, Yunnan[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2006.
- [33] 王宇. 西南地区岩溶水源地类型及开发技术条件[J]. [中国岩溶](#), 2009, 28(4): 370-374.
WANG Yu. Classification and exploitive technical condition of karst water source field in Southwest China[J]. [Carsologica Sinica](#), 2009, 28(4): 370-374.

Study on the enrichment characteristics and water supply significance of karst groundwater in the Yili river basin, Wumeng Mountain area

DENG Guoshi, CEN Xinyu, TANG Yeqi, ZHONG Jinxian

(Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu, Sichuan 610218, China)

Abstract The deepened karst development caused by its uneven development of karst and significant uplift of the Cenozoic crust results in the extremely uneven spatial and temporal distribution of karst groundwater, which makes it very difficult to extract and utilize groundwater. Therefore, understanding the enrichment law of karst groundwater is of great significance for the exploration and development of groundwater resources. Karst groundwater is the main water source for local people's production and life in the contiguous poverty-stricken area in Wumeng Mountain area, Southwest China. Hence, summarizing the characteristics of groundwater enrichment and studying the significance of karst groundwater supply can provide important references for the exploration and utilization of local groundwater resources.

Firstly, this study conducted a hydrogeological survey of 1: 100,000 in the upper and middle reaches of the Yili river basin covering an area of 1,400 km² and another survey of 1: 50,000 in Huize county of Qujing City, with an area of 450 km². In the surveys, five types of groundwater enrichment characteristics in the study area have been identified through a comprehensive analysis of the spatial distribution and composition of karst water-bearing rock formations, the mechanism of structural groundwater control, and topography. In addition, 133 groundwater samples were collected and tested in the study area, and the main groundwater chemical types and water quality conditions of each groundwater enrichment block were analyzed. Subsequently, factors such as the distribution of watersheds, the spatial distribution and composition of water-bearing rock formations, the spatial morphology of faults and folds, and the catchment area of springs were taken into consideration to delineate the groundwater enrichment blocks corresponding to each spring or spring group. The natural recharge and discharge of groundwater in each groundwater enrichment block were calculated according to the rainfall infiltration coefficient and the total discharge. Finally, based on the previous research, the significance of groundwater supply by karst springs is concluded in terms of the groundwater abundance, supply conditions, and quality.

The study results show that the enrichment characteristics of karst groundwater in the study area can be summarized into five types: fault-conducting zone, fault dissolution valley, strip dissolution valley, fold dissolution valley, and water-blocking contact zone. Besides, Na-HCO₃ and Ca·Mg-HCO₃ are the main groundwater chemical types in the enrichment blocks. 79% of groundwater is classified as type I to type III with nitrate and oxygen consumption as the main indicators exceeding the permitted level. Moreover, the natural recharge and discharge of groundwater in each groundwater enrichment block are 3,297,000-145,124,000 m³·a⁻¹ and 46,000-13,084,000 m³·a⁻¹ respectively. The ratios of discharge to recharge are 0.3%-15.5%, which indicates considerable potential of exploiting groundwater resources. Finally, the water enrichment blocks such as fault dissolution valley, strip dissolution valley, and water-blocking contact zone are of marked significance in water supply. Limited by the uneven spatial and temporal distribution of groundwater resources, shortage of water supply, poor water quality, etc., the other types of water enrichment blocks are of less significance. The research results provide a theoretical basis for ensuring water safety in poor water-scarce regions.

Key words karst groundwater, groundwater enrichment characteristics, water supply significance, Wumeng Mountain area

(编辑 张玲 杨杨)