

唐春雷, 梁永平, 晋华, 等. 山西娘子关泉群及其水的来源[J]. 中国岩溶, 2022, 41(2): 174-182.

DOI: 10.11932/karst20220201

## 山西娘子关泉群及其水的来源

唐春雷<sup>1,2,3,4</sup>, 梁永平<sup>2,3,4</sup>, 晋华<sup>1</sup>, 申豪勇<sup>2,3,4</sup>, 赵春红<sup>2,3,4</sup>,  
王志恒<sup>2,3,4</sup>, 谢浩<sup>2,3,4</sup>, 赵一<sup>2,3,4</sup>, 王士娜<sup>5</sup>

(1. 太原理工大学, 山西太原 030024; 2. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室, 广西桂林 541004; 3. 联合国教科文组织国际岩溶研究中心, 广西桂林 541004; 4. 广西岩溶资源环境工程技术研究中心, 广西桂林 541004; 5. 河北省地质矿产开发局国土资源勘查中心, 河北石家庄 050081)

**摘要:**娘子关泉域群泉是中国北方最大的岩溶泉, 泉域汇水面积达 7 436 km<sup>2</sup>, 前人认为: 泉域内岩溶水由北、西、南 3 面向娘子关一带径流汇集, 由于娘子关一带下奥陶系燧石团块或条带白云岩相对隔水层隆起, 并被桃河侵蚀出露, 使岩溶地下水溢出地表成泉群, 其主要含水层为中奥陶系含石膏碳酸盐岩。但各泉的水化学、同位素特征有差异, 娘子关泉群并不是出自统一源。文章通过水化学、同位素、水文地质剖面等方法研究得出: 娘子关泉域存在两个含水层、三个子系统: 中奥陶系灰岩含水层和中上寒武系白云岩含水层; 西部奥陶系岩溶水系统、东部奥陶系岩溶水系统和东部中上寒武系岩溶水系统。泉域内城西泉与程家泉出露于中奥陶系下马家沟组泥灰岩之上, 含水层为中奥陶系灰岩裂隙、溶隙水, 由于区域下马家沟组泥灰岩隆起隔水出露地表成泉, 属于东部奥陶系岩溶水系统; 坡底泉、五龙泉、河北泉、水帘洞泉、苇泽关泉其补给主要来源于中上寒武系含水岩组, 为承压上升泉, 属于东部中上寒武系岩溶水系统。

**关键词:**娘子关泉群; 水文地质剖面; 地球化学; 稳定同位素; 地下水调查工程

**中图分类号:** P641 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-4810 (2022) 02-0174-09 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



### 0 引言

水化学类型是地下水化学成分的集中反映, 也是地下水水文地球化学特征研究的重要内容之一。地下水中的化学成分可示踪地下水的循环途径, 反映地下水流系统的特征<sup>[1-3]</sup>, 而水文地球化学结合同位素示踪的方法可更深入地研究区域地下水的循环特征和水动力场特征<sup>[4-10]</sup>。

娘子关泉域岩溶地下水一直受到各级政府学界

的高度重视, 为此开展过大量的勘查、调查与研究工  
作。在 20 世纪 80 年代, 关于娘子关泉群出露成因的  
研究得出娘子关泉是在隔水底板 O<sub>1</sub> 地层翘起和断层  
(苇泽关断层) 阻水的条件下, 受河流侵蚀切割形成的  
河岸性溢流泉的结论<sup>[11-12]</sup>。刘再华<sup>[13]</sup> 从泉水的温度、  
矿化度、其他水化学特征及硫同位素和水力联系等  
分析得出娘子关泉群(或各泉组) 并非同出一源, 而  
是有两个明显不同的源。李义连等<sup>[14]</sup> 通过岩溶地下  
水水化学和同位素分析, 得出除程家泉和城西泉是主

基金项目: 广西自然科学基金面上项目(2021GXNSFAA220071); 国家自然科学基金项目(41672253); 中国地质调查项目(DD20221758, DD20190334); 中国地质科学院基本科研项目(2020010)

第一作者简介: 唐春雷(1984—), 男, 副研究员, 研究方向: 岩溶水文地球化学、岩溶生态环境修复。E-mail: yourfriendtcl@163.com。

通信作者: 晋华(1969—), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向: 水文水资源、矿山环境地质。E-mail: jinhua@tyut.edu.cn。

收稿日期: 2021-04-06

要排泄局部流动系统的地下水外,其他各泉均为不同空间尺度流动系统地下水混合、排泄的产物。娘子关泉群是阳泉市最重要的供水水源,在城市生活和农业生产建设中发挥着不可替代的支撑性作用。然而,由于过度开采地下水和采煤疏干,使地下水位持续性下降,泉水流量衰减,更为严重的是水质恶化、硬度和硫酸盐超标,生态环境不断恶化<sup>[15-17]</sup>。为改善水质,进一步实现泉域生态保护和高质量发展,开展娘子关泉群来源研究成为一项必要工作。

## 1 研究区概况

### 1.1 娘子关泉群

娘子关泉群位于山西省阳泉市娘子关镇,是岩溶地下水主要的天然排泄点,由11个泉组成(图1)。其分布在桃河、温河和绵河的河漫滩及阶地上,出露高程为360~392 m,以程家泉最高,禁区泉最低。各泉组流量差异较大,以五龙泉最大,为 $1.7\sim 2.1\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ,而出露高程较高的程家泉和水帘洞泉历史上就具有间歇性泉的特点,其泉群多年平均流量为 $9.48\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ (1956-2020年)。



图1 娘子关泉域排泄区泉群分布图

Fig. 1 Distribution of springs in discharge area of Niangziguan spring field

娘子关泉群岩溶水开发利用历史悠久。泉口开发利用主要为:(1)河北省井陘县于1958年在娘子关以东的绵河修建绵右渠引水灌溉,平均引水量

$5.1\sim 7.3\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ,灌溉面积 $14\ 000\text{ hm}^2$ ,保浇面积 $11\ 400\text{ hm}^2$ ;(2)1980年阳泉建成娘子关提水工程,取水水源为五龙泉泉水,设计提水规模为 $3\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ,总扬程423 m。一期建成单线工程供水能力为 $1.5\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ;(3)平定县于1987年建成娘子关提水工程。从桥墩、滚泉、苇泽关等四个集泉站提水,总扬程700 m,设计取水量为 $3\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ,一期工程供水能力为 $1.0\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ;(4)泉口附近乡镇农村及部队的生活、灌溉和水产养殖业用水约 $0.3\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 。

### 1.2 娘子关泉域水文地质条件

娘子关泉域位于山西省东部,涉及的行政区有阳泉市的城区、郊区、平定县、盂县,晋中市的昔阳县、和顺县、左权县、寿阳县及榆次区,太原市区及阳曲县等十个市、县、区,地理位置介于北纬 $36^{\circ}55'\sim 38^{\circ}15'$ ,东经 $112^{\circ}20'\sim 113^{\circ}55'$ 之间(图2),全区总面积为 $7\ 436\text{ km}^2$ <sup>[18-19]</sup>。娘子关泉域范围多年平均水面蒸发量为 $1\ 202\text{ mm}$ ,多年平均气温为 $10.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,1月份平均气温 $-4.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,极端最低气温 $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,全区多年平均降水量为 $542.4\text{ mm}$ (资料来自中国气象数据网)。

泉域岩溶含水层的总体构造展布是由NE向WS倾斜,在北部和东南部裸露碳酸盐岩区接受降水入渗补给,岩溶地下水大致沿地层走向分别在北部和南部形成主径流带。整个泉域岩溶地下水渗流从平面上就是围绕北部、南部与中部三条岩溶地下水强径流带的渗流汇集,向娘子关方向运移,沿强径流带及两侧形成了岩溶地下水的富水区。泉域内岩溶地下水接受降雨、河流补给后,在重力驱动作用下,由北、西、南三面向娘子关一带径流汇集,受苇泽关断层阻隔出露成群泉。娘子关泉出露于阳泉市平定县娘子关镇,多年平均流量为 $9.48\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 。娘子关泉是我国北方最大的岩溶泉之一。娘子关岩溶地下水以水量集中稳定、水质良好成为阳泉市工农业生产及城市供水的重要水源<sup>[20]</sup>。

## 2 研究方法

通过开展野外地质与水文地质补充调查,查明娘子关泉域岩溶水水文地质条件。于2014-2015年在阳泉市平定县布置水文地质钻探,查明地层结构,绘制区域地质剖面。于2019年5月在娘子关泉域范围取样17组,通过多参数水质监测仪现场测试获得pH、温度、电导率等指标;常量、微量元素、氢氧

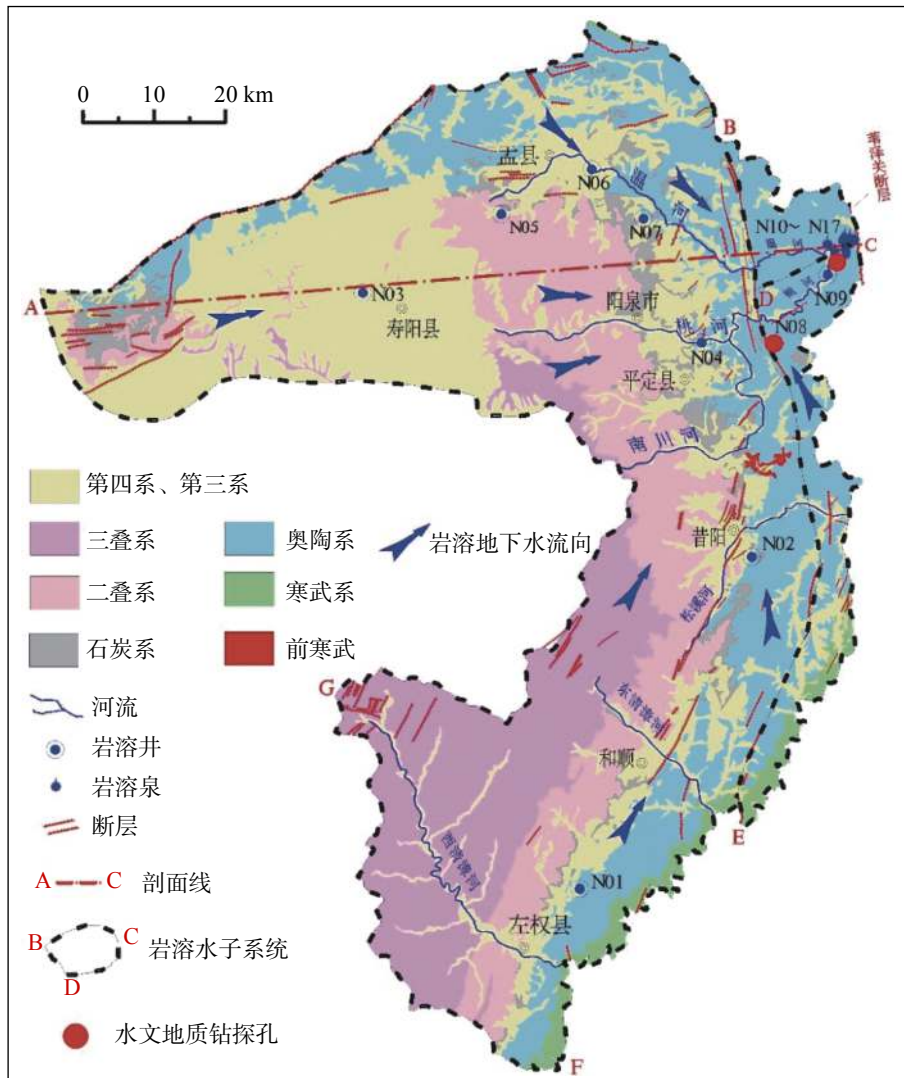


图2 娘子关泉流域水文地质图

Fig. 2 Hydrogeological map of Niangziguan spring area

同位素测试由自然资源部岩溶地质资源环境监督检查中心完成。<sup>2</sup>H/<sup>18</sup>O 同位素测定精度分别为±2.0‰和±0.1‰; δ<sup>34</sup>S 值在中国地质调查局武汉地质调查中心实验室完成测试, δ<sup>34</sup>S 值采用 IsoPrime 质谱仪进行测定, δ<sup>34</sup>S 值采用 CDT 标准, 测试精度优于±0.1‰。所有水样的阴阳离子平衡相对误差小于 5%, 利用 Origin 软件绘制离子比例系数图。

### 3 娘子关泉群泉水来源

#### 3.1 娘子关泉群水化学同位素特征

##### 3.1.1 水化学特征

岩溶地下水化学特征不但受到区域内的地质构

造、地层岩性、水动力条件等因素的控制, 同时还受人类活动直接或间接的影响。而岩溶地下水的水化学特征能很好地保存和反演这些复杂的信息<sup>[21-23]</sup>, 水文地球化学是研究复杂岩溶水系统的有效方法<sup>[24]</sup>。例如, 表 1 所示岩溶地下水的 pH 为 7.08~7.70, 均值为 7.38; 钙离子浓度为 75.8~312.5 mg·L<sup>-1</sup>, 均值为 148.6 mg·L<sup>-1</sup>; 镁离子浓度为 18.9~85.2 mg·L<sup>-1</sup>, 均值为 39.9 mg·L<sup>-1</sup>; K+Na 离子浓度为 7.8~135.4 mg·L<sup>-1</sup>, 均值为 48.0 mg·L<sup>-1</sup>; 硫酸根离子浓度为 44.9~816.5 mg·L<sup>-1</sup>, 均值为 307.2 mg·L<sup>-1</sup>。岩溶井水化学类型主要为 HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>-Ca·Mg、HCO<sub>3</sub>-Ca·Mg、SO<sub>4</sub>-Ca·Mg、HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>-Ca·Na、HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>-Ca; 岩溶泉水水化学类型为 HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>-Ca·Mg。如图 3 所示岩溶泉水阳离子高 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>, 低 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>; 阴离子高 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, 低 Cl<sup>-</sup>。

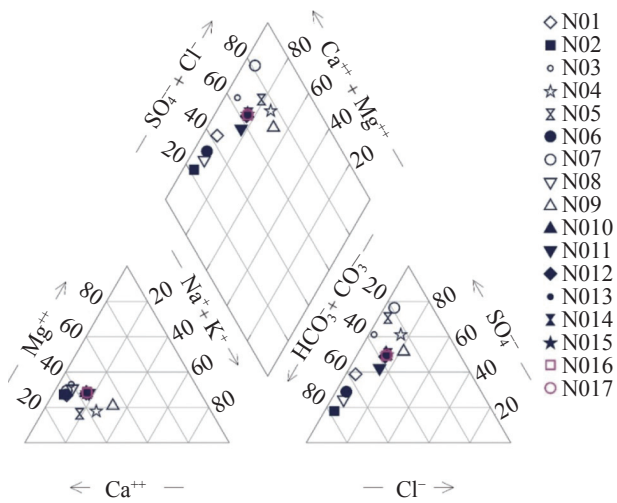


图 3 岩溶地下水的 Piper 图

Fig. 3 Piper diagram of ionic concentration in karst groundwater  
城西泉与其他泉水化学特征有明显区别,说明其与其他泉水来源不同。

3.1.2 离子比例分析

在岩溶水循环过程中, Sr<sup>2+</sup>浓度随着径流途径和水岩交互作用时间的增加而增加,相比之下 Ca<sup>2+</sup>浓度却受制于溶解平衡<sup>[25-26]</sup>。因此,不同来源水的 Sr<sup>2+</sup>/Ca<sup>2+</sup>值不同,径流途径和水岩交互作用的时间越

长,其值越大,反之越小。如图 2、图 4 所示, N02、N08、N06 和 N01 位于补给区, N03 位于滞留区,其他位于径流区,城西泉的径流途径较短或水岩交互时间较短,其次是五龙泉,而坡底泉、河北泉、苇泽关泉、水帘洞泉、禁区泉和滚泉的径流途径和水岩交互作用时间较长。

3.1.3 岩溶泉水补给来源

$\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ 被用于追踪岩溶地下水中硫酸盐的来源<sup>[27-34]</sup>。氢氧同位素是研究地下水起源与演化的理想示踪剂,可利用地下水中的稳定氢氧同位素识别研究区地下水补给来源。

研究表明:山西中奥陶系石膏的  $\delta^{34}\text{S}$  值为 23.8‰~31.4‰,矿坑水中的  $\delta^{34}\text{S}$  值为 -13.6‰~7.98‰,大气降水中的  $\delta^{34}\text{S}$  值为 5.39‰~8.98‰,新近系黄土中的  $\delta^{34}\text{S}$  值为 5.5‰~9.5‰。如图 5 所示, N01、N03、N05 和 N07 的  $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$  值较大,说明其  $\text{SO}_4^{2-}$  补给来源主要为石膏溶解; N02、N04、N06、N08 和 N09 的  $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$  值较小,说明其  $\text{SO}_4^{2-}$  补给来源为矿坑水或者大气降水。城西泉的  $\delta^{34}\text{S}$  值为 9.19‰,  $\text{SO}_4^{2-}$  值为 185.6 mg·L<sup>-1</sup>,说明其  $\text{SO}_4^{2-}$  补给来源主要为大气降水和石膏溶解。其余泉水的  $\delta^{34}\text{S}$  值为 15.54‰~17.78‰,

表 1 岩溶地下水水化学特征

Table 1 Hydrochemical characteristics of karst groundwater

编号	类型	pH	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Sr	$\delta\text{D}$	$\delta^{18}\text{O}$	$^{34}\text{S}$	水化学类型
			/mg·L <sup>-1</sup>	/mg·L <sup>-1</sup>	/mg·L <sup>-1</sup>	/mg·L <sup>-1</sup>	/mg·L <sup>-1</sup>	/mg·L <sup>-1</sup>	/mg·L <sup>-1</sup>	/mg·L <sup>-1</sup>	/mg·L <sup>-1</sup>	/‰	/‰	
N01	左权石港村	7.70	98.7	24.6	1.5	11.7	11.1	127.2	244.5	0.86	-68.0	-9.2	18.2	HCO <sub>3</sub> ·SO <sub>4</sub> -Ca·Mg
N02	昔阳大寨水源 地岩溶井	7.55	75.8	18.9	1.2	6.6	9.0	44.9	262.0	0.38	-74.6	-10.2	7.2	HCO <sub>3</sub> -Ca·Mg
N03	寿阳岩溶井	7.21	123.7	40.9	1.5	14.1	8.2	284.4	240.6	2.96	-73.1	-10.2	23.1	HCO <sub>3</sub> ·SO <sub>4</sub> -Ca·Mg
N04	小河村斜井岩溶井	7.24	235.0	45.7	4.9	124.2	111.1	596.0	320.2	1.17	-61.3	-8.2	4.7	HCO <sub>3</sub> -Ca·Mg
N05	孟县岩溶井	7.36	291.6	44.4	1.6	95.0	34.9	744.7	359.0	1.26	-67.3	-9.1	18.1	HCO <sub>3</sub> ·SO <sub>4</sub> -Ca
N06	温池水源地岩溶井	7.60	90.6	22.6	0.9	9.6	12.2	90.4	277.5	0.63	-70.0	-9.6	8.5	HCO <sub>3</sub> ·SO <sub>4</sub> -Ca·Mg
N07	河底镇岩溶井	7.08	312.5	85.2	2.0	31.0	40.2	816.5	293.0	1.89	-65.5	-8.8	12.8	SO <sub>4</sub> -Ca·Mg
N08	神子山岩溶井	7.56	82.3	25.0	1.3	11.7	12.3	68.8	262.9	0.54	-70.5	-9.5	3.7	HCO <sub>3</sub> -Ca·Mg
N09	程家泉岩溶井	7.28	165.5	45.1	6.5	128.9	125.7	405.8	291.1	0.79	-62.2	-8.2	5.3	HCO <sub>3</sub> ·SO <sub>4</sub> -Ca·Na
N10	坡底泉	7.35	135.2	41.8	2.1	42.9	55.7	271.8	263.9	2.14	-71.6	-9.5	15.5	HCO <sub>3</sub> ·SO <sub>4</sub> -Ca·Mg
N11	城西泉	7.40	112.1	34.8	2.1	39.5	48.0	185.6	260.0	1.59	-67.1	-9.1	9.2	HCO <sub>3</sub> ·SO <sub>4</sub> -Ca·Mg
N12	五龙泉	7.36	131.4	39.7	2.1	42.1	55.7	251.7	263.9	1.97	-69.3	-9.4	16.7	HCO <sub>3</sub> ·SO <sub>4</sub> -Ca·Mg
N13	河北泉	7.32	134.1	41.2	2.1	43.1	57.7	262.0	267.8	2.10	-69.9	-9.4	17.4	HCO <sub>3</sub> ·SO <sub>4</sub> -Ca·Mg
N14	苇泽关泉	7.19	134.5	42.2	2.1	44.6	57.8	268.2	265.8	2.09	-70.5	-9.6	17.8	HCO <sub>3</sub> ·SO <sub>4</sub> -Ca·Mg
N15	水帘洞泉	7.31	135.0	42.0	2.1	44.5	57.9	267.3	265.8	2.10	-70.1	-9.5	17.4	HCO <sub>3</sub> ·SO <sub>4</sub> -Ca·Mg
N16	禁区泉	7.47	134.5	42.3	2.1	44.2	58.0	266.6	263.9	2.12	-70.6	-9.5	17.5	HCO <sub>3</sub> ·SO <sub>4</sub> -Ca·Mg
N17	滚泉	7.44	134.2	42.2	2.1	44.0	58.2	269.9	262.0	2.07	-70.4	-9.6	16.7	HCO <sub>3</sub> ·SO <sub>4</sub> -Ca·Mg

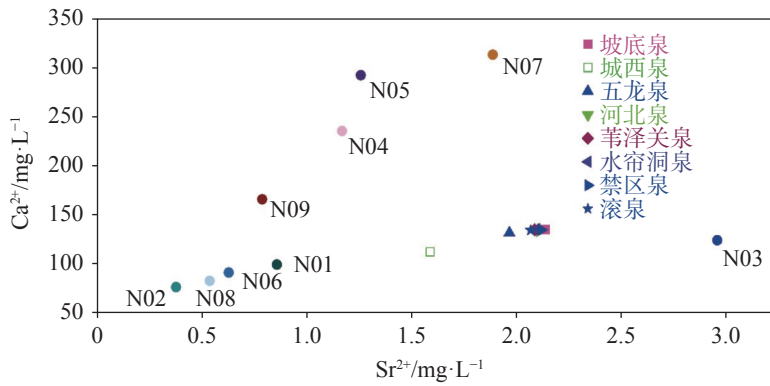


图 4 岩溶泉水 Sr<sup>2+</sup> 与 Ca<sup>2+</sup> 的关系

Fig. 4 Relationship between Ca<sup>2+</sup> and Sr<sup>2+</sup> in karst spring water

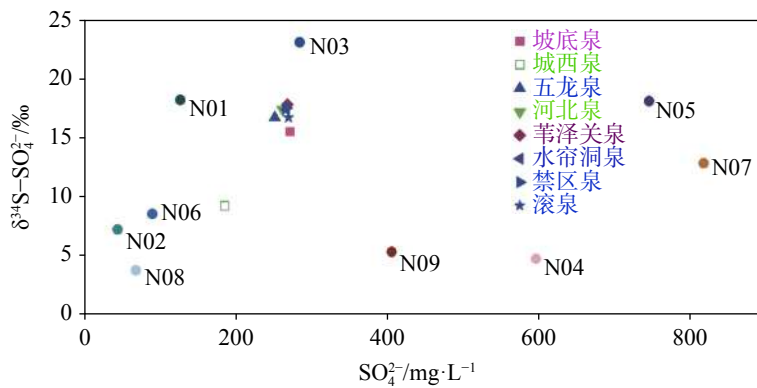


图 5 岩溶地下水 δ<sup>34</sup>S 与 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 关系

Fig. 5 Relationship between δ<sup>34</sup>S and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> in karst groundwater

均值为 17.02‰, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 值为 262.0~267.8 mg·L<sup>-1</sup>, 均值为 264.7 mg·L<sup>-1</sup>, 说明其 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 补给来源主要为中奥陶系石膏和矿坑水。

如图 6 所示, δD 值为 -74.6‰~-61.3‰, 均值为 -68.94‰, δ<sup>18</sup>O 值为 -10.2‰~-8.2‰, 均值为 -9.33‰。岩溶地下水点 N02 和 N03 位于娘子泉域的滞留区,

其 δD 和 δ<sup>18</sup>O 值在全球降水的左下方, 说明其受古降水补给影响。娘子关泉群的 δD 和 δ<sup>18</sup>O 值位于全球降水的右下方, 说明泉群的补给来源接受了大量经过蒸发浓缩后的大气降水及地表水的渗漏补给。城西泉的 δD 值为 -67.1‰, δ<sup>18</sup>O 值为 -9.1‰, 明显与其他泉补给来源不同。

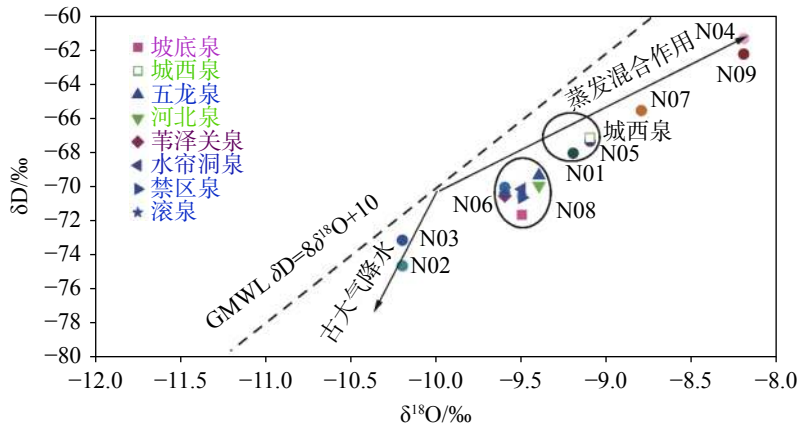


图 6 岩溶地下水 δD 与 δ<sup>18</sup>O 关系

Fig. 6 Relationship between δD and δ<sup>18</sup>O in karst groundwater

### 3.2 巨城地堑水文地质意义

水文地质钻探是水文地质调查的重要组成部分,是对地下水含水层的岩性、构造、层次、厚度、埋深、水量、水温、水质等相关信息数据进行获取的一种手段,可提供更加全面详实的水文地质资料与信息,以便科学合理地开发利用地下水资源<sup>[35-36]</sup>。水文地质剖面图能主要反映含水层的埋藏与分布,地下水位及地下水的补给、径流、排泄情况,地下水化学类型及其垂向的变化等<sup>[37-38]</sup>。

通过收集水文地质钻探资料可绘制水文地质剖面 A-C 图(图 7)。如图 7 所示巨城地堑是在 NW-SE 向压应力作用下所产生张力作用的结果,地堑由

走向 NNW、南端弯向南东的两个平行正断层组成。在地貌上为一 NNE 展布的长条形洼地,地堑内保留有石炭系碎屑岩,两翼为奥陶系石灰岩。巨城地堑是娘子关泉域岩溶水的主要控水构造之一<sup>[39]</sup>。巨城地堑使得地堑西部奥陶系含水层与地堑东部的中上寒武系含水层对接,使得储存于西部奥陶系含水岩组的地下水通过该断裂带进入东部中上寒武系含水岩组中。同时阻隔或者减弱其地堑两侧奥陶系含水层之间的水力联系。奥陶系下统含燧石白云岩为娘子关泉域区域隔水层<sup>[40-41]</sup>,因此巨城地堑东部含水层可分为上层奥陶系灰岩含水层与下层中上寒武系白云岩含水层。由于苇泽关断层阻水,下层中上寒武系白云岩含水层通过破碎带管道出露成泉。

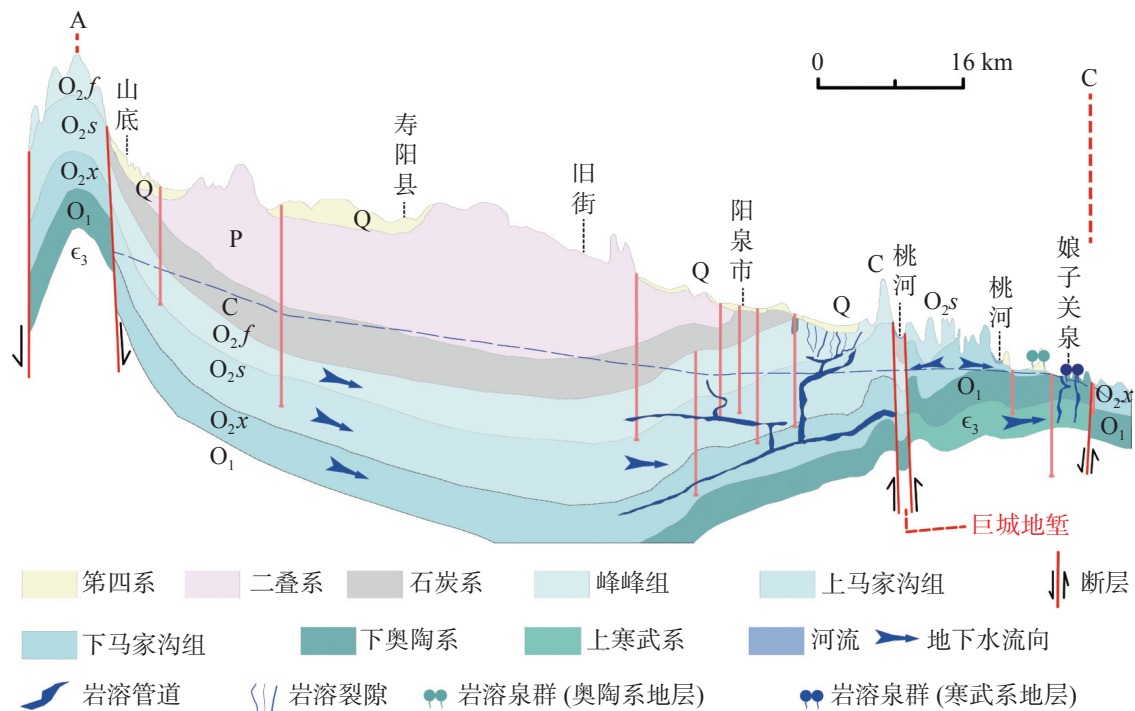


图 7 娘子关泉域水文地质剖面图

Fig. 7 Hydrogeological section of Niangziguan spring area

### 3.3 娘子关泉域岩溶地下水子系统

城西泉与程家泉出露于中奥陶系下马家沟组泥灰岩之上,含水层为中奥陶系灰岩裂隙、溶隙水,由于区域下马家沟组泥灰岩隆起隔水出露地表成泉。坡底泉、五龙泉、河北泉、水帘洞泉、苇泽关泉其补给主要来源于寒武系下含水岩组,为承压上升泉(图 7)。可将娘子关泉岩溶地下水分为三个子系统:(1)西部奥陶系岩溶水系统(A-B-D-E-F-G),其补给来源主要为裸露岩溶区降雨入渗、河流入渗和石炭系—二叠

系碎屑裂隙水的越流,串层(钻孔)补给;(2)东部奥陶系岩溶水系统(B-D-E-C),其补给来源主要为裸露岩溶区降雨入渗、河流入渗;(3)东部中上寒武系岩溶水系统(B-D-E-C),其补给来源主要为西部奥陶系岩溶水系统(A-B-D-E-F-G)的径流补给。(2)与(3)两个子系统是同一地区的上、下两组含水层系统。

东部奥陶系岩溶水系统(B-D-E-C)以桃河与温河之间的地下分水岭为界限分为东北部奥陶系岩溶水子系统(B-D-C)与东南部奥陶系岩溶水子系统(B-

E-C)两个子系统。东南部奥陶系岩溶水子系统的主要天然排泄点为程家泉与城西泉。

## 4 结 论

(1)巨城地堑是娘子关泉域岩溶水的主要控水构造之一。巨城地堑使得储存于地堑西部奥陶系含水岩组的岩溶水,通过该断裂带进入东部中上寒武系含水岩组中。同时阻隔或者减弱地堑西部奥陶系含水层与东部奥陶系含水层之间的水力联系;

(2)城西泉与程家泉出露于中奥陶系下马家沟组泥灰岩之上,含水层为中奥陶系灰岩裂隙、溶隙水,由于区域下马家沟组泥灰岩隆起隔水出露地表成泉。坡底泉、五龙泉、河北泉、水帘洞泉、苇泽关泉其补给主要来源于中上寒武系含水岩组,为承压上升泉;

(3)娘子关泉域岩溶地下水含水层主要为中奥陶系灰岩含水层和中上寒武系白云岩含水层;可分为三个子系统:西部奥陶系岩溶水系统、东部奥陶系岩溶水系统和东部中上寒武系岩溶水系统。

## 参考文献

- [1] 沈照理,王焰新.水—岩相互作用研究的回顾与展望[J].地球科学,2002,27(2):127-133.  
SHEN Zhaoli, WANG Yanxin. Review and Outlook of Water Rock Interaction Studies[J]. Earth Science, 2002, 27(2): 127-133.
- [2] 王焰新,马腾,郭清海,马瑞.地下水与环境变化研究[J].地学前缘,2005(S1):14-21.  
WANG Yanxin, MA Teng, GUO Qinghai, MA Rui. Groundwater and environmental change[J]. Earth Science Frontiers, 2005(S1): 14-21.
- [3] 袁道先.中国岩溶地球化学研究的进展[J].水文地质工程地质,1990(5):41-42.  
YUAN Daoxian. Advances in Karst geochemistry in China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1990(5): 41-42.
- [4] 唐春雷,梁永平,王维泰,赵春红,申豪勇.龙子祠泉域岩溶水水化学—同位素特征[J].桂林理工大学学报,2017,37(1):53-58.  
TANG Chunlei, LIANG Yongping, WANG Weitai, ZHAO Chunhong, SHEN Haoyong. Hydrogeochemical and isotopic Characteristic of the karst Groundwater Systems, in Longzici spring basin[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2017, 37(1): 53-58.
- [5] Q Xiao, Y Jiang, L Shen, D Yuan. Origin of calcium sulfate-type water in the Triassic carbonate thermal water system in Chongqing, China: A chemical and isotopic reconnaissance[J]. Applied Geochemistry, 2018, 89: 49-58.
- [6] W Smykatz-Kloss, H Kossel, H Hotzl. The gypsum karst area of Fom Tatahouine, Southern Tunisia: Mineralogy and hydrogeochemistry[J]. Chemical Geology, 1990, 84(1): 206-207.
- [7] M A Schiavo, S Hauser, P P Povinec. Stable isotopes of water as a tool to study groundwater-seawater interactions in coastal south-eastern Sicily[J]. Journal of Hydrology, 2009, 364(1): 40-49.
- [8] M Musgrove, L A Stern, J L Banner. Springwater geochemistry at Honey Creek State Natural Area, central Texas: Implications for surface water and groundwater interaction in a karst aquifer[J]. Journal of Hydrology, 2010, 388(1): 144-156.
- [9] 唐春雷,王桃良,王维泰,赵春红.极端降水条件下北京西山黑龙关泉响应研究[J].水文,2016,36(6):70-75.  
TANG Chunlei, WANG Taoliang, WANG Weitai, ZHAO Chunhong. Response of Heilongguan Spring to Extreme Precipitation in Xishan Mountain Area, Beijing[J]. Journal of China Hydrology, 2016, 36(6): 70-75.
- [10] 唐春雷,郑秀清,梁永平,张发旺,景泽.山西太原晋祠—平泉水力联系及对晋祠泉复流的贡献[J].中国地质,2020,47(6):1755-1764.  
TANG Chunlei, ZHENG Xiuqing, LIANG Yongping, ZHANG Fawang, JING Ze. The hydraulic connection between Jinci and Pingquan in Taiyuan and its contribution to the reflow of Jinci spring[J]. Geology in China, 2020, 47(6): 1755-1764.
- [11] 高旭波,王万洲,侯保俊,高列波,张建友,张松涛,李成城,姜春芳.中国北方岩溶地下水污染分析[J].中国岩溶,2020,39(3):287-298.  
GAO Xubo, WANG Wanzhou, HOU Baojun, GAO Liebo, ZHANG Jianyou, ZHANG Songtao, LI Chengcheng, JIANG Chunfang. Analysis of karst groundwater pollution in northern China[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(3): 287-298.
- [12] 梁永平,韩行瑞.优化技术在娘子关泉域岩溶地下水开采资源量评价与管理中的应用[J].水文地质工程地质,2006(4):67-71.  
LIANG Yongping, HAN Xingrui. Application of optimal technique to evaluation of exploitable karstwater resources and its management in Niangziguan spring basin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006(4): 67-71.
- [13] 刘再华.娘子关泉群水的来源再研究[J].中国岩溶,1989,8(8):22-29.  
LIU Zaihua. Restudy on the Source of Niangziguan springs[J]. Carsologica Sinica, 1989, 8(8): 22-29.
- [14] 李义连,王焰新,周来茹,高红波,张江华.地下水矿物饱和度的水文地球化学模拟分析:以娘子关泉域岩溶水为例[J].地质科技情报,2002,21(1):32-36.  
LI Yilian, WANG Yanxin, ZHOU Lairu, GAO Hongbo, ZHANG Jianghua. Hydrogeochemical Modeling on Saturation of minerals in Groundwater: A case study at Niangziguan, Northern China[J]. Geological Science and Technology Information, 2002, 21(1): 32-36.
- [15] 袁道先.我国北方岩溶研究的形势和任务[J].中国岩溶,2010,29(3):219-221.  
YUAN Daoxian. The situation and tasks for northern karst research of our country[J]. Carsologica Sinica, 2010, 29(3): 219-221.

- [16] 赵春红, 梁永平, 卢海平, 唐春雷, 申豪勇, 王志恒. 娘子关泉域岩溶水 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\delta^{34}\text{S}$ 特征及其环境意义[J]. 中国岩溶, 2019, 38(6): 867-875.  
ZHAO Chunhong, LIANG Yongping, LU Haiping, TANG Chunlei, SHEN Haoyong, WANG Zhiheng. Chemical characteristics and environmental significance of  $\text{SO}_4^{2-}$  and sulfur isotope in the karst watershed of the Niangziguan spring, Shanxi Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(6): 867-875.
- [17] 梁永平, 高洪波, 张江华, 霍建光, 王桃良. 娘子关泉流量衰减原因的初步定量化分析[J]. 中国岩溶, 2005, 34(3): 227-231.  
LIANG Yongping, GAO Hongbo, ZHANG Jianghua, HUO Jianguang, WANG Taoliang. Preliminary quantitative analysis on the causes of discharge attenuation in Niangziguan spring. [J]. *Carsologica Sinica*, 2005, 34(3): 227-231.
- [18] 梁永平, 赵春红, 唐春雷, 申豪勇, 王志恒, 郭芳芳. 山西娘子关泉水及污染成因再分析[J]. 中国岩溶, 2017, 36(5): 633-640.  
LIANG Yongping, ZHAO Chunhong, TANG Chunlei, SHEN Haoyong, WANG Zhiheng, GUO Fangfang. Reanalysis of spring water and its pollution causes of the Niangziguan spring in Shanxi[J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(5): 633-640.
- [19] 唐春雷, 晋华, 梁永平, 赵春红, 申豪勇, 潘尧云, 景泽. 娘子关泉域岩溶地下水水位变化特征及成因[J]. 中国岩溶, 2020, 39(6): 810-816.  
TANG Chunlei, JIN Hua, LIANG Yongping, ZHAO Chunhong, SHEN Haoyong, PAN Yaoyun, JING Ze. Characteristics and Formation causes of Karst Groundwater Level variation in Niangziguan Spring Area[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(6): 810-816.
- [20] C Tang, H Jin, Y Liang. Using Isotopic and Hydrochemical Indicators to Identify Sources of Sulfate in Karst Groundwater of the Niangziguan Spring Field, China[J]. *Water*, 2021, 13(3): 390.
- [21] B Capaccioni, O Vaselli, F Tassi, A P Santo, A D Huertas. Hydrogeochemistry of the thermal waters from the Sciacca Geothermal Field (Sicily, southern Italy)[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 396(3): 292-301.
- [22] R Ma, Y Wang, Z Sun, C Zheng, T Ma, H Prommer. Geochemical evolution of groundwater in carbonate aquifers in Taiyuan, northern China[J]. *Applied Geochemistry*, 2011, 26(5): 884-897.
- [23] C Kohfahl, C Sprenger, J B Herrera, H Meyer, F F Chacón, A Pekdeger. Recharge sources and hydrogeochemical evolution of groundwater in semiarid and karstic environments: A field study in the Granada Basin (Southern Spain)[J]. *Applied Geochemistry*, 2008, 23(4): 846-862.
- [24] S Pasvanoğlu. Hydrogeochemistry of thermal and mineralized waters in the Diyadin (Ağrı) area, Eastern Turkey[J]. *Applied Geochemistry*, 2013, 38: 70-81.
- [25] N Keul, G Langer, S Thoms, L J de Nooijer, G J Reichart, J Bijma. Exploring foraminiferal Sr/Ca as a new carbonate system proxy[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2017, 202: 374-386.
- [26] 唐春雷, 郑秀清, 梁永平. 娘子关泉域岩溶地下水水化学特征及成因[J]. 环境科学, 2020, 41(5): 2087-2095.  
TANG Chunlei, ZHENG Xiuqing, LIANG Yongping. Hydro-chemical Characteristics and Formation Causes of Ground Karst Water Systems in the Longzici Spring Catchment[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(5): 2087-2095.
- [27] J Zhou, Q Zhang, F Kang, Y Zhang, L Yuan, D Wei, S Lin. Using multi-isotopes ( $^{34}\text{S}$ ,  $^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$ ) to track local contamination of the groundwater from Hongshan-Zhaili abandoned coal mine, Zibo city, Shandong province[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2018, 128: 48-55.
- [28] H Mohammadzadeh, R Aravena. Investigating the Origin and Interaction between Karstic and Alluvial Aquifers in NW of Zagros Mountain Range, Iran, Using Isotopic and Geochemical Tools[J]. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2015, 13: 256-260.
- [29] F Xu, H Yuan, G Xu, X Luo. Fluid charging and hydrocarbon accumulation in the Cambrian Long wangmiao Formation of Moxi Structure, Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(3): 442-451.
- [30] I Herms, J Jódar, A Soler, I Vadillo, L J Lambán, S Martos-Rosillo, J A Núñez, G Arnó, J Jorge. Contribution of isotopic research techniques to characterize high-mountain-Mediterranean karst aquifers: The Port del Comte (Eastern Pyrenees) aquifer[J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 656: 209-230.
- [31] E S B Santiago, R P Xavier, S G Hagemann, L V S Monteiro, J Cliff. Multiple sulfur isotopes constraints on origin and evolution of the Neoproterozoic and Paleoproterozoic Cu-Au systems from the Carajás Domain, Amazonian Craton, Brazil[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 1038: 72.
- [32] C Erarslan, Y Örgün, N Balcı. Source and distribution of pyrite and inorganic sulfur isotopes in the Saray and Pınarhisar Coal-fields, North Thrace Basin, Turkey[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2020: 227.
- [33] B Yang, J Liu, X Shi, H Zhang, X Wang, Y Wu, X Fang. Mineralogy and sulfur isotope characteristics of metalliferous sediments from the Tangyin hydrothermal field in the southern Okinawa Trough[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020: 120.
- [34] 唐春雷, 赵春红, 申豪勇, 梁永平, 王志恒. 娘子关泉群水化学特征及成因[J]. 环境科学, 2021, 42(3): 1416-1423.  
TANG Chunlei, ZHAO Chunhong, SHEN Haoyong, LIANG Yongping, WANG Zhiheng. Chemical Characteristics and Causes of Groups Water in Niangziguan Spring[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(3): 1416-1423.
- [35] 杨振华. 浅议矿区水文地质钻探工作[J]. 冶金管理, 2020(3): 160,162.  
YANG Zhenhua. Discussion on hydrogeological drilling in mining area[J]. *China Steel Focus*, 2020(3): 160,162.
- [36] 王磊. 水文地质钻探在土壤调查采样中的应用[J]. 黑龙江科学, 2020, 11(8): 48-49.  
WANG Lei. The Application of Hydrogeologic Drilling in the Sampling Survey of Soil Pollution[J]. *Heilongjiang science*, 2020, 11(8): 48-49.
- [37] 朱静静, 周宏. 水文地质剖面分析在岩溶水系统研究中的应用: 以鄂西响水洞岩溶水系统为例[J]. 安全与环境工程, 2017,



- 24(3): 1-7,19.
- ZHU Jingjing, ZHOU Hong. Application of Hydro geological Profile Analysis to Karst Water System A Case Study on Xiangshuidong Karst Water System in Western Hubei Province[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2017, 24(3): 1-7,19.
- [38] 蔡强, 王一楠. 基于组件式GIS的水文地质剖面图自动生成方法研究[J]. *中小企业管理与科技*, 2017(5): 141-142.
- CAI Qiang, WANG Yinan. Research on Automatic Generation of Hydro geological Profile Based on Component GIS[J]. *Management & Technology of SME*, 2017(5): 141-142.
- [39] 刘广英. 巨城地堑对石太客运专线线路方案的影响[J]. *铁道勘察*, 2004(6): 27-29.
- LIU Guangying. Impact of Jucheng Graben on Railroad Engineering[J]. *Railway Investigation and Surveying*, 2004(6): 27-29.
- [40] 郝永红, 黄登宇, 刘洁, 王学萌. 娘子关泉域降水补给的时滞研究[J]. *中国岩溶*, 2003, 22(2): 11-14.
- HAO Yonghong, HUANG Dengyu, LIU Jie, WANG Xuemeng. Study on time lag of precipitation recharge in Niangziguan Spring Area[J]. *Carsologica Sinica*, 2003, 22(2): 11-14.
- [41] 孙志鸿. 娘子关泉域泉口区岩溶水文地质特征分析[J]. *山西水利科技*, 2017(3): 51-53,61.
- SUN Zhihong. Analysis on the Karst Hydrogeology Character of the Niangziguan Spring Exit Region[J]. *Shanxi Hydrotechnics*, 2017(3): 51-53,61.

## Niangziguan spring group in Shanxi Province and its water source

TANG Chunlei<sup>1,2,3,4</sup>, LIANG Yongping<sup>2,3,4</sup>, JIN Hua<sup>1</sup>, SHEN Haoyong<sup>2,3,4</sup>, ZHAO Chunhong<sup>2,3,4</sup>,  
WANG Zhiheng<sup>2,3,4</sup>, XIE Hao<sup>2,3,4</sup>, ZHAO Yi<sup>2,3,4</sup>, WANG Shina<sup>5</sup>

(1. *Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China*; 2. *Institute of Karst Geology, CAGS/ Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China*; 3. *International Research Center on Karst under the Auspices of UNESCO, Guilin, Guangxi 541004, China*; 4. *Guangxi Karst Resources and Environment Research Center of Engineering Technology, Guilin, Guangxi 541004, China*; 5. *Land and Resources Exploration Center of Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration, Shijiazhuang, Hebei 050081, China*)

**Abstract** As a main natural discharge point of karst groundwater, Niangziguan spring group consists of 11 springs and is located in Niangziguan town, Yangquan City, Shanxi Province. It is distributed on the floodplain and terrace of the Taohe river, the Wenhe river and the Mianhe river, with an exposed elevation of 360 m to 392 m. Among these springs, Chengjia spring is the highest and Jinqu spring is the lowest. The annual average flow of spring group is  $9.48 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  and the flow differences of springs are large, among which the difference of Wulong spring is the largest. Niangziguan spring group is the largest karst spring in northern China, with a catchment area of  $7,436 \text{ km}^2$ . Previous studies believe that karst water in the spring area flows from north, west and south to Niangziguan area, and the chert mass or strip dolomite of lower Ordovician in Niangziguan area relatively rises to the aquifuge, and is eroded and exposed by the Taohe River, which makes the karst groundwater overflow to the surface and form a spring group. The main aquifer is made up of gypsum-bearing carbonate rock of middle Ordovician. However, because Niangziguan springs are not from the same source, their hydrochemistry and isotope are different. Therefore, it is necessary to study the source of Niangziguan spring group. This study is conducted with the methods of hydrochemistry, isotope and hydrogeological section, and is concluded that there are two aquifers and three subsystems in Niangziguan spring area. The aquifer consists of middle Ordovician limestone aquifer and middle upper Cambrian dolomite one. Subsystem distribution is comprised of Ordovician karst water system in the west, and Ordovician karst water system and middle upper Cambrian karst water system both in the East. Chengxi spring and Chengjia spring are exposed on the marl of lower Majiagou formation of middle Ordovician, and their aquifers consist of fissure and fissure water of Middle Ordovician limestone. Because the marl of lower Majiagou formation is uplifted in this region, the surface spring-the eastern Ordovician karst water system-is formed. Mainly supplied by the water-bearing formation of middle upper Cambrian, Podi spring, Wulong spring, Shibanno spring, Shuiliandong spring and Weizeguan spring are pressure-bearing ascending springs and belong to the middle upper Cambrian karst water system in the east.

**Key words** Niangziguan spring group, hydrogeological profile, geochemistry, stable isotope, groundwater investigation project

(编辑 黄晨晖)