

# 宁夏南部“南北古脊梁”岩溶裂隙水流系统分析

李向全<sup>1,2)</sup> 张发旺<sup>1)</sup> 毕二平<sup>1)</sup> 韩占涛<sup>1)</sup>

1) 同济大学地下建筑与工程系, 江苏 上海 200092;

2) 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 正定 050803

**摘 要** 运用构造控水分析、水化学同位素等方法,对宁夏“南北古脊梁”岩溶裂隙水系统进行了深入的分析与讨论。该区储水空间以岩溶裂隙为主,岩溶水的空间分布明显受 SN 向大型断裂构造控制。岩溶地下水以大气降水起源为主,并表现为多元水混合而成。水质分布呈现南优北劣的分带特征,北部水-岩相互作用形式为溶滤-蒸发浓缩型,呈高矿化咸水,南部为溶滤-混合型,呈低矿化淡水。根据水动力场和水化学场特征,划分了 3 个相对独立的岩溶水子系统。

**关键词** 西北 干旱区 深层岩溶 地下水

## The Deep Karst Groundwater System in Arid Regions of Northwestern China : A Case Study of Karst Fissure Groundwater in Southern Ningxia

LI Xiangquan<sup>1,2)</sup> ZHANG Fawang<sup>1)</sup> BI Erping<sup>1)</sup> HAN Zhantao<sup>1)</sup>

1) Department of Geotechnical Engineering Tongji University, Shanghai, Jiangsu 200092;

2) Institute of Hydrogeology & Environmental Geology, CAGS, Zhengding, Hebei, 050803

**Abstract** Karst fissure groundwater in southeastern Ningxia has been synthetically analyzed by applying the theories of tectonic-controlled groundwater and groundwater geochemistry as well as isotope techniques. The results show that karst is not well developed in the area, the groundwater storage space is mainly made up of karst fissures, and the distribution of karst groundwater is strictly controlled by the NS-trending faults. Karst groundwater in this region mainly originates from atmospheric precipitation and is mixed with various sorts of primitive water. Groundwater quality shows zonal characteristics, i. e., good in the south and bad in the north. The water-rock interaction is characterized by dissolution-evapotranspiration and produces salt water in the northern area. In the southern area the water-rock interaction has features of dissolution-mixture and produces fresh water. According to characteristics of hydro-dynamic conditions and water chemistry, the whole karst system has been divided into three subordinate karst groundwater systems. The results have an important scientific significance in the study of the difference between the karst groundwater in western China and that in eastern China.

**Key words** western China arid regions deep karst groundwater

中国广大的西北地区地处干旱-半干旱气候带,干燥少雨,年平均降雨量多在 500 mm 以下,表流不发育,地表水和浅层地下水一般水质都较差。水资源贫乏是造成西北地区经济落后、人民生活困苦的重要原因之一。因此,寻找并开发利用优质深层地下水资源成为解决西北地区缺水问题的重要途径。本文具体研究区位于宁夏回族自治区南部,于青龙山至固原沟口南北一线,南北延伸 180 km 的狭长黄土丘陵地带,即所谓的“南北古脊梁”地区,也是宁夏南部最为缺水和贫困地区之一。长期以来,一些学者一直认为黄土覆盖层之下深部碳酸盐岩分布区

可能存在着一-条裂隙-岩溶储水带,水资源量可观。然而,深部岩溶水的形成与赋存特征不甚清楚,在找水过程中尚存在相当大的盲目性,难以准确圈定找水靶区。通过此次较深入的工作,取得了一些重要的认识,可为该地区深埋岩溶水的合理开发利用提供科学佐证。

## 1 区域岩溶地下水赋存与分布特征

### 1.1 岩溶含水介质特征

经野外水文地质调查和钻孔资料分析表明,研究区内主要岩溶裂隙含水岩组有:青白口系王全口

组含硅质条带和含结核的白云岩岩溶裂隙含水岩组、寒武系灰岩-白云岩岩溶裂隙含水岩组、奥陶系马家沟组灰岩-白云质灰岩岩溶裂隙含水岩组。其中,奥陶系马家沟组灰岩-白云质灰岩岩溶裂隙含水岩组分布面积最广,是工作区内最主要的岩溶裂隙含水岩组。工作区内碳酸盐岩地层大多被黄土覆盖,仅在青龙山和云雾山一带出露,其他地区埋深多在 100~500 m 之间,属隐伏岩溶类型。云雾山以北奥陶系灰岩多被黄土和第三系覆盖。云雾山以南马家沟组灰岩被白垩系、第三系和黄土覆盖,在官厅至彭阳地区白垩系砂砾岩与奥陶系灰岩之间水力联系密切,构成一个含水岩组。受多种岩溶发育因素影响,区内碳酸盐岩发育比较细微的裂隙是灰岩中主要的储水空间,且容积相当大。并且在灰岩中发育的断裂带为其导水通道。总之,深埋隐伏接受降水补给条件差和岩溶相对不发育,在很大程度上也决定了岩溶地下水径流条件的强弱和富水性优劣。

## 1.2 构造控水分析

由于该区地处鄂尔多斯地台西缘的构造褶皱带,弧形推覆构造发育。断裂和褶皱走向多呈 SN 或 NW 走向,由牛首山-六盘山大断裂( $F_1$ )、车道-阿色浪断裂( $F_3$ )、贺家川-古城断裂( $F_6$ )、青龙山东麓-彭阳大断裂( $F_7$ )、韦州-下马关向斜、河川-新集向斜等构成长条型束状构造带(图 1)。经钻孔资料分析,震旦系、寒武系、奥陶系灰岩含水岩层仅分布牛首山-六盘山断裂( $F_1$ )和车道-阿色浪断裂( $F_3$ )之间狭长区间之内,亦多呈 SN 向展布,在这两条断层的外侧灰岩地层缺失,取而代之的是中生代地层。这些断裂和褶皱形成的裂隙作为区域性岩溶裂隙水的储水空间和导水通道,控制了区域内岩溶裂隙水的分布与径流。通过流场分析,发现区域岩溶地下水径流方向也是以南北向为主,在 EW 方向上,尤其在控制性断层两侧基岩地下水水流场,往往形成较大水位差,且径流方向相背,如 A44 孔水位高程 1 487 m 和 G49 孔水位高程 1 290 m 分布在青龙山东麓-彭阳大断裂( $F_7$ )两侧,水位相差 197 m,应分属于不同的地下水流子系统。该区岩溶地下水系统受构造控水影响明显,大型构造空间分布特征及其力学性质是地下水系统边界划分的重要依据。

## 2 水化学及同位素特征

### 2.1 区域水化学特征

根据岩溶地下水分布范围,由南至北对几个主要的灰岩井孔和岩溶泉点的水化学测试数据进行了分析整理。分析结果表明,研究区岩溶水水化学场

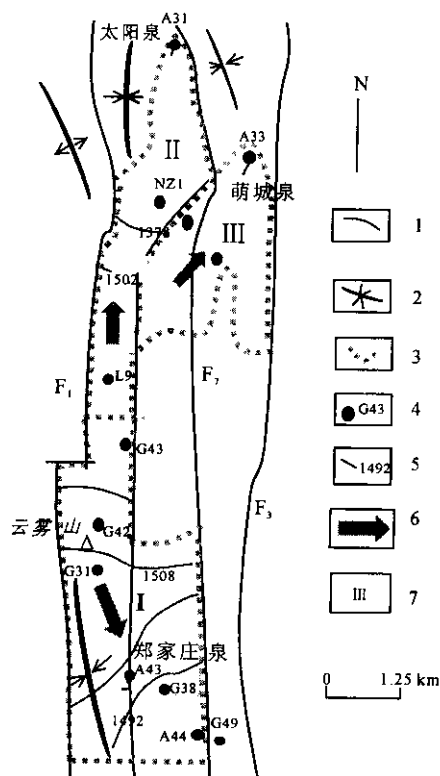


图 1 宁南‘南北古脊梁’岩溶水系统分布略图

Fig. 1 Distribution of the karst groundwater system in south Ningxia

1-断裂带 2-褶皱带 3-系统边界 4-水点;

5-水位 6-径流方向 7-系统编号

1-faulted zone 2-folded belt 3-serial boundary 4-water point;

5-water stage 6-runoff trend 7-serial number

具有明显的分带特征。以云雾山-寨科一线为界,南北两侧水化学性质存在明显差异。从寨科(G41)向北,地下水  $Cl^-$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $Na^+$  离子成分显著增高,在水化学三线图中表现为集中分布于  $SO_4 + Cl$  每升毫克当量百分数为 80%~100% 的区域(图 2),岩溶水 TDS 变化区间位于 2 479.59~5 237.9 mg/L 之间,尤其是在吕套至严湾之间 TDS 有一个明显的跳跃升高,构成了从云雾山-寨科一线至北部边界青龙山一带的岩溶地下水高矿化咸水地带(图 3)。岩溶水化学类型为  $Cl-SO_4-Na$ 、 $Cl-SO_4-Na-Mg$ 、 $SO_4-Cl-Na$ 、 $SO_4-Cl-Na-Mg$  型水。寨科以南  $Cl^-$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $Na^+$  离子成分迅速降低,三线图中表现为分布  $SO_4 + Cl$  每升毫克当量百分数为 40%~60% 的区域,  $HCO_3^-$  离子含量相对升高,水化学类型演变为  $HCO_3-Cl-SO_4-Ca-Mg$ 、 $HCO_3-SO_4-Na$ 、 $HCO_3-SO_4-Na-Mg$  型水,大部分地区 TDS 小于 1 000 mg/L,为淡水区。区域岩溶地下水的这种水化学场空间分带性,表明南北两区的地下水的水循环条件、水岩作用方式是不同的。从水化学类型看,该区岩溶水属典

型的干旱区溶滤水,从  $CL-SO_4-Na$  类型水到  $HCO_3-SO_4-Na-Mg$  型水的演变,反映了由北至南水循环交替条件由差到好,溶滤作用逐渐增强的变化过程。这与当地实际情况是相吻合的,从云雾山向北,年降雨量由 400 mm 减至 250 mm,水循环交替微弱,溶滤脱盐作用也弱,所以水质较差。南部至六盘山区地区降雨量由 400 mm 增至 600 mm,水循环交替强烈,盐分淋滤充分,易于地下淡水形成。

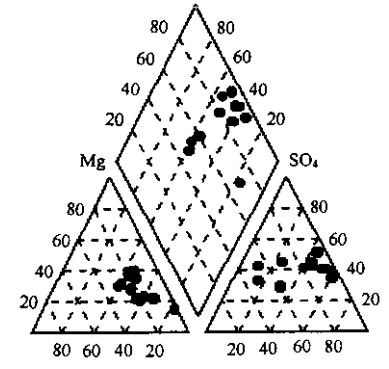


图 2 岩溶地下水水化学三线图  
Fig. 1 Diagram of Piper for Karst groundwater

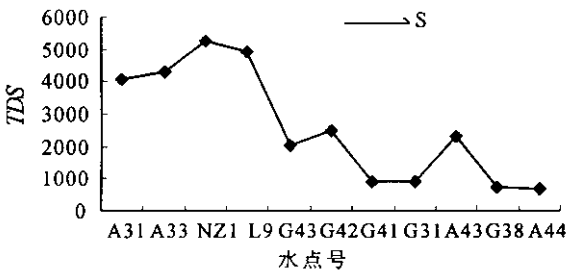


图 3 南北向岩溶地下水 TDS 变化趋势图  
Fig. 3 Changes of TDS of Karst groundwater along the south-north direction

2.2 同位素分布特征

从图 4 中看出岩溶水点基本分布在全球雨水线和当地雨水线附近,表明岩溶地下水的主要由大气降水入渗补给形成。此外,氡测试结果为水点氡浓度大多位于 5~20 TU 之间, $^{14}C$  测试为:L9 点 15 ka,G43 点 12 ka,A31 点 13 ka。这些都说明该区岩溶地下水为近代入渗水和深部“古水”混合而成。从图中点的分布来看,明显分成 3 个区域。A 区包括 G42 点,G35 点,G40S 点,地下水  $\delta^{18}O$  和  $\delta D$  的值较低, $\delta^{18}O$  平均在  $-12\text{‰}$  左右,位于图的左下角,分布于全球雨水线和当地降雨线附近;B 域的岩溶水点位于 A 域的上部,分布于全球雨水线和当地降雨线附近,地下水  $\delta^{18}O$  和  $\delta D$  的值与 A 域相比明显升高, $\delta^{18}O$  值平均在  $-10\text{‰}$  左右;C 域包括 L9 点和 G43 点,这两点明显偏离两降水线,表现出  $O^{18}$  的“漂移”

迹象。A 域和 C 域点的同位素丰度较低,这些点主要分布在研究区中部云雾山至严湾一带,表明这些地区的老的深部岩溶水与现代入渗水的混合作用较弱,现代入渗水所占的比例相对较小。其中 C 域点出现的偏离降水线的现象,表明在接受补给后有蒸发作用。B 域点的同位素丰度偏高,主要包括研究区南北两侧水点,表明这些地区的岩溶地下水在形成与径流过程中,受地表水、第四系水入渗补给以及蒸发浓缩作用的进一步增强的影响,同位素值升高。此外 B 域点与部分浅部第四系地下水混杂分布,也说明岩溶水与上部第四系地下水存在密切的水力联系。

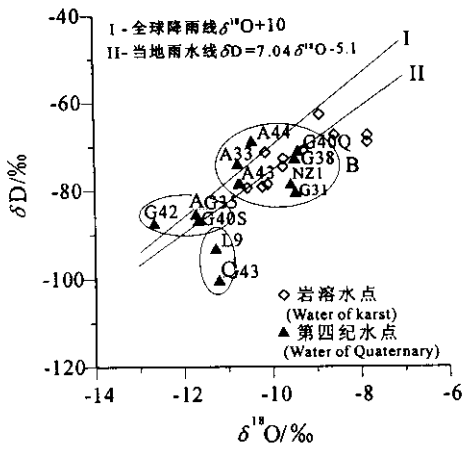


图 4  $\delta D-\delta^{18}O$  同位素分析图  
Fig. 4 Diagram of  $\delta D-\delta^{18}O$  isotope analysis

2.3 地下水咸化特征

从分析图(图 5)中可以看到,岩溶水与第四系相比,主要分布于左边区域, $\delta^{18}O$  值随 TDS 的变化幅度较小,表明本区岩溶地下水的咸化是由溶滤作用形成,这与实际的地质条件是相符的,这一地区的第三系黄土层中含有大量的膏盐,使得地下水在入渗过程溶解了大量的易溶盐,形成高矿化的地下水。单就岩溶水而言,从图中表现出两种不同的趋势。I 区的水点  $\delta^{18}O$  与 TDS 呈正相关,说明蒸发作用对地下咸水的形成有较大影响,云雾山以北地区,气候干旱,降雨量小,水循环交替微弱,岩层溶滤脱盐不充分,地下水在形成过程中受到强烈的蒸发浓缩作用,使水中矿化度增高。所以北面咸水是易溶盐溶滤和蒸发浓缩共同作用的结果。II 区的水点  $\delta^{18}O$  与 TDS 呈负相关趋势,表明南面地区地下水以溶滤混合作用为主,大气降水、地表水通过基岩裸露区、较薄黄土覆盖层、以及深切沟谷,渗入补给岩溶水,并与北部来的基岩咸水和六盘山侧向补给淡水发生多元混合,使岩溶水质沿径流方向逐渐趋好。

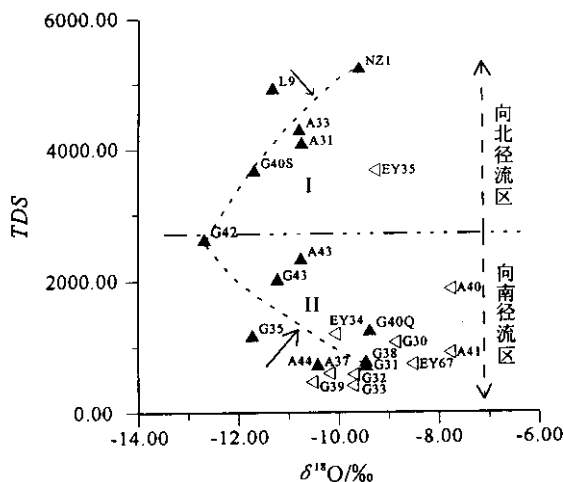


图 5 岩溶地下水咸化特征分析图

Fig.5 Characteristics of saltiness of Karst groundwater

### 3 岩溶地下水系统划分

#### 3.1 马渠-洪河岩溶水系统

该系统位于宁夏南部“南北古脊梁”的南部地区,北起同心马渠,南至洪河分水岭。系统的西侧以六盘山前大断裂为界,东侧以青龙山-彭阳大断裂为界。系统北端没有发现标志性构造,但通过水动力场分析,在马渠至严湾之间存在地下分水岭,在此处地下水向 SN 两个相反的方向径流。因此,以此地下分水岭作为该系统的北边界。南部以洪河分水岭为界。本系统含水岩组主要为奥陶系灰岩岩溶裂隙含水岩组。官厅以南地区下白垩砂岩与深部灰岩之间无隔水地层和构造,具有统一的水力联系,构成统一的含水岩组。地下水径流方向由北至南,主要补给区位于云雾山一带的基岩裸露区和南部六盘山的侧向补给。排泄方式主要有,泉群排泄和河谷排泄。主泉点有郑家庄泉群,根据最近测流结果,枯季流量为 2 500 m<sup>3</sup>/d。茹河、洪河河谷为该区地势最低区,河谷切穿白垩系地层是本系统地下水的主要排泄区。TDS 是 0.7~2.4 g/L,为淡水区,水-岩作用以溶滤-混合为主。

#### 3.2 严湾-太阳山岩溶水系统

南起固原县严湾北至盐池惠安堡太阳山的狭长地带。东西两侧分别为青铜峡-六盘山断裂和青龙山-彭阳断裂所控制,含水岩组主要由寒武、奥陶系碳酸岩地层组成。地形由南而北逐渐降低,南部严湾一带,黄土覆盖层厚度较薄加之沟壑纵横,降雨入渗补给强度较大,是该岩溶地下水系统的主要补给区。地下水由南向北径流。岩溶水在青龙山北端受石炭-二叠系岩层阻挡,沿断层裂隙向地表排泄,形成了典型的太阳泉群,该泉群也是该岩溶水系统的唯一排泄点。据夏季流量为 7 410 m<sup>3</sup>/d。该区为高

矿化咸水区, TDS 为 2~5.2 g/L。水岩作用以溶滤-蒸发为主。

#### 3.3 萌城岩溶水系统

受青龙山断裂、车道-阿色浪断裂等周边弧型断裂的阻隔,萌城泉域形成了一个独立的岩溶水系统。主要含水层为寒武、奥陶系灰岩,萌城泉群是该泉域唯一的地表排泄点,据 2001 年测流结果,枯季泉流量为 300 m<sup>3</sup>/d。大气降水是唯一的补给来源,主要补给途径是大气降水经过黄土表层径流,汇集到沟谷地带,通过沟谷岩溶出露区补给裂隙岩溶水。本系统岩溶水 TDS 为 4.3 g/L。

### 4 结论

(1) 宁夏南部地区岩溶水为岩溶裂隙水,岩溶不发育,储水空间以岩溶构造裂隙为主。埋藏条件属深埋隐伏型,上部黄土覆盖层较厚,主要通过深切沟谷接受大气降水和地表水的补给,因此其富水性受到一定的限制。此外,岩溶水的分布和径流严格受大型断裂构造控制,以 SN 向分布与径流为主。

(2) 水质分布呈显著分带性,呈现南好北差的特征。大气降水是岩溶水的主要来源,岩溶地下水是多元混合水。水岩作用方式北部以溶滤蒸发为主,形成以氯化物和硫酸盐类型水为主的高矿化咸水。南部以溶滤混合作用为主,形成以重碳酸盐类型水为主的低矿化的微咸水和淡水,可指导寻找优质淡水区。

(3) 该区岩溶水划分的 3 个子系统可作为岩溶水资源量评价的重要基础。

(4) 研究区南部岩溶裂隙水为 HCO<sub>3</sub> 型淡水,但补给困难,流量有限,仅可以作为生活饮用水,不宜扩大开采。

### 参 考 文 献

- 李文鹏. 2000. 塔里木盆地地下水开发远景区研究. 北京: 地质出版社.
- 潘国营. 2001. 裂隙水运动理论与渗流模拟实践. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 沈照理. 1986. 水文地球化学基础. 北京: 地质出版社.
- 王恒纯. 1991. 同位素水文地质概论. 北京: 地质出版社.

### References

- Li Wenpeng. 2000. Study of the prospective region for groundwater developing in Talimu basin. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Pan Guoying. 2001. Theory and model for groundwater flow transport in fissured rocks. Wuhan: China University of Geoscience Press (in Chinese with English abstract).
- Wang Hengchun. 1991. An introduction to isotopic hydrogeology. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Shen Zhaoli. 1986. Basic theory of hydrology and geochemistry. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).