

陇东盆地西部岩溶地下水形成机制研究

张彦林 李生永 付东林 崔旭东

(甘肃省地质调查院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 陇东盆地西部处于鄂尔多斯盆地西缘逆冲推覆构造带, 新元古—下古生界碳酸盐岩裸露或浅埋, 构成一南北向展布的岩溶水富集带。通过运用构造控水分析、水化学同位素等方法, 对岩溶裂隙水系统进行了深入的分析与讨论。指出本区岩溶水的空间分布明显受南北向逆冲推覆构造控制, 储水空间以岩溶裂隙为主, 构造条件是岩溶发育和岩溶水富集的主要制约因素。岩溶水化学特征具有明显的南北差异, 在补给条件优越的中南部平凉—华亭地区, 水化学主要由含水层岩性及其赋存条件决定。岩溶地下水以大气降水来源为主, 对于埋藏型岩溶水表现为多源水混合而成。根据岩溶水的空间分布与水动力场特征及其补径排条件, 全区可划分为平凉、华亭和环西 3 个相对独立的岩溶水系统, 并以此可作为水资源评价的基础。这些认识对于深入了解西北干旱—半干旱地区岩溶水赋存及富集规律、形成与演化机理和在该区开发利用岩溶地下水资源具有重要的科学意义。

关键词: 陇东盆地西部; 岩溶含水介质; 构造控水; 岩溶水系统

中图分类号: P641.134 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3657(2006)06-1393-07

陇东地区是甘肃省重要的能源化工基地。本区属典型的干旱—半干旱气候区, 降水稀少, 蒸发强烈, 生态环境脆弱, 地表水资源贫乏, 城市和工业供水十分紧张, 农业生产长期靠天维持, 许多地区连人畜饮水都成问题, 水资源的短缺阻碍着这一地区社会经济的发展。因此, 寻找并开发利用优质深层地下水资源成为解决该地区缺水问题的重要途径。自上世纪 90 年代中期以来, 该地区先后开展了“西北地区地下水资源特别计划”和“国土资源大调查”项目, 经勘查研究证实陇东地区西部南北向褶皱带为一岩溶地下水资源的富集带, 水质好、水量大, 有良好的开发利用前景, 是仅次于河谷平原第四系地下水的第二大地下水资源类型。笔者通过对岩溶地下水赋存、富集规律及其形成、演化机理的研究, 为该地区岩溶地下水资源的合理开发利用提供科学依据。

1 区域岩溶地下水赋存与富集规律

1.1 岩溶分布及含水岩组特征

陇东盆地以甜水堡—车道(F1)及彭阳—平凉深大断裂(F2)为界, 东为鄂尔多斯地块的西南部, 是鄂尔多斯古—中生代大型沉积盆地的一部分, 震旦系—奥陶系碳酸盐岩伏于上古生界—中生界碎屑岩的底部, 埋深 3000 m 以下。甜水

堡—车道和彭阳—平凉深大断裂以西为鄂尔多斯盆地西缘逆冲构造带, 震旦系—奥陶系碳酸盐岩被推到地表形成岩溶断块山, 或隐伏于白垩系及新生界之下, 构成一条南北向的碳酸盐岩岩溶带(图 1)。鄂尔多斯盆地西缘逆冲构造带以逆冲推覆为其主要构造形式, 以近等间距呈叠瓦状向东或北东逆冲的断层为骨架, 并伴随着同生和由断层牵引而形成的褶皱, 以及反冲断层、后冲断层、正断层和平移断层。每个逆冲断层都相应形成一个逆冲席或逆冲块, 每个逆冲席或块的锋端多为隆起或背斜, 地层出露老, 地貌上多呈山岭, 构造变形强烈, 褶皱、断层发育; 尾端多为凹陷或向斜, 地层出露新, 地貌上多为平坦的洼地, 构造变形微弱^[1]。受此构造形式控制, 陇东盆地西部新元古界—下古生界碳酸盐岩呈现裸露与埋藏相间的区块分布特征。

研究区的可溶岩层为新元古界—下古生界碳酸盐岩。震旦系(Z)为浅海相的叠层石白云岩、硅质条带白云岩。下寒武统(ϵ_1)为台地边缘浅滩相的砂页岩沉积; 中寒武统(ϵ_2)为盆地边缘相的灰岩、鲕粒灰岩、白云岩及页岩沉积; 上寒武统(ϵ_3)为局限台地相白云岩、灰质白云岩沉积。奥陶纪该区为开阔海环境, 下奥陶统(O₁)为厚层块状粉晶—细晶白云岩; 中奥陶统三道沟组(O_{3s})为开阔台地相、台地边缘浅滩相的灰

收稿日期: 2006-02-28; 改回日期: 2006-08-21

基金项目: 中国地质调查局地质大调查项目(1212010535205)资助。

作者简介: 张彦林, 男, 1971 年生, 工程师, 主要从事地下水资源与环境调查评价工作; E-mail: zhyL319@126.com。

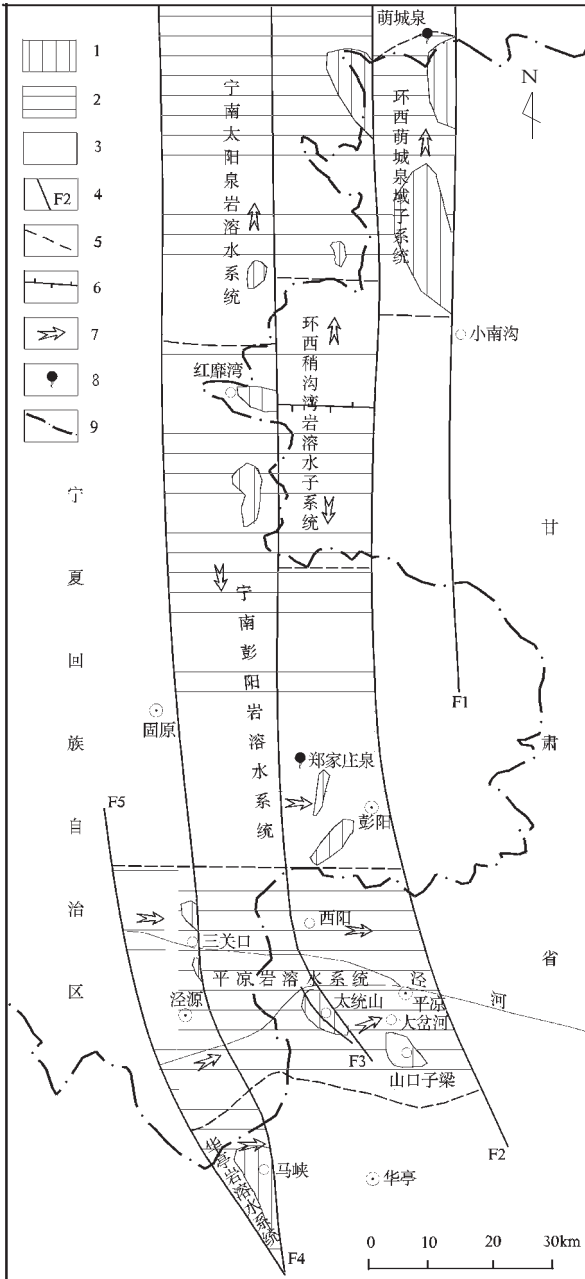


图1 陇东盆地西部岩溶分布及岩溶水系统划分图

- 1—Z—O 碳酸盐岩裸露区; 2—Z—O 碳酸盐岩埋藏区;
- 3—非岩溶区; 4—断裂及编号; 5—岩溶水系统界线;
- 6—岩溶地下水分水岭; 7—地下水流向; 8—岩溶泉; 9—省界

Fig.1 Karst distribution and karst groundwater systems in the western Longdong basin

- 1—Sinian—Ordovician exposed carbonate rock area;
- 2—Sinian—Ordovician buried carbonate rock area; 3—Non—karst area;
- 4—Fault and its number; 5—Boundary of karst groundwater system;
- 6—Watershed of karst groundwater; 7—Groundwater flow direction;
- 8—Karst spring; 9—Provincial boundary

岩及藻屑、砂屑灰岩;中奥陶统平凉组(O_p)为盆地边缘相、深水盆地斜坡相的页岩沉积。根据岩性组合特征、岩溶的发育程度及富水性,区内可划分出4个含水岩组,即纯碳酸盐岩含水岩组(O_{2s})、不纯碳酸盐岩含水岩组(Z, O_{1s})、不纯碳酸盐岩夹非碳酸盐岩含水岩组(ϵ_2, ϵ_3)和非碳酸盐岩夹碳酸盐岩含水岩组(O_{3p}, ϵ_1)^[2]。其中中奥陶统三道沟组(O_{2s})基本是稳定的广阔海相灰岩连续沉积,质纯层厚,是本区最主要的可溶岩层。

1.2 岩溶含水介质特征

传统上根据中国岩溶发育的地域特征分为“南方岩溶”和“北方岩溶”。“南方岩溶”因其气候特点及水文特征条件,决定其溶洞及地下河系发育,表现为“洞隙型”含水介质。“洞隙型”岩溶介质主要由溶洞、溶孔、溶隙等构成,是强烈岩溶化作用的结果,其介质结构多发育成地下洞穴,地下岩溶往往与地表岩溶连为一体,含水空间具有形态多边性、空隙空间非均一性及介质组合的多重性等特点。其中的水流具有快速、多相、部分非连续,以及非线性流态的特点,和具有与地表水流特性相似的水文型特征。地下洞穴系统是传输地下水流的主体,岩溶化的分异及地表泥砂的充填,使地下水具强烈的不均一性^[3]。

“北方岩溶”狭义上指古华北地台岩溶,即包括渭北在内的以东地区,主要岩溶含水层为中奥陶世地层,其层状沉积构造决定了发育“似层状”岩溶层,含水介质表现为“裂隙岩溶型”。“裂隙岩溶型”介质由溶蚀空洞和裂隙共同构成,其中岩溶作用形成的溶蚀空间占有一定的主导地位,但地下河系发育程度低,其地下水动态相对稳定,一般具明显的滞后期,富水性均一,往往在径流、排泄区地下水水力坡度很平缓,水量丰富,形成地下水强径流带,多数泉域可形成数千平方千米的巨型地下水流循环系统^[4]。

近年来通过岩溶地质勘查实践,证实西北地区岩溶是一种有别于中国华北地区“裂隙岩溶型”的“岩溶裂隙型”含水介质。这种介质主要出现在干旱、半干旱气候条件下连续沉积厚度较大的碳酸盐岩地层区。“岩溶裂隙型”介质的空间主要由裂隙及经岩溶作用改造后的溶蚀裂隙组成,构造裂隙是“岩溶裂隙型”介质的基础,含水层中地下水的运移、储存严格地受到构造裂隙的控制,一些大的断裂构造带、构造复合部位、裂隙密集区往往成为有利的富水带,岩溶分异作用更促进了地下水的不均一性,是典型的“脉状水”,地下水动态不稳定,水位高差大,地下水流循环系统相对较小。陇东盆地西部地区中奥陶世地层为一套连续沉积的纯灰岩层,夹层很少,岩溶发育相对较弱,溶蚀作用主要沿构造裂隙发育,加之地层产状较陡,岩溶发育显示不出成层性,岩溶富水性不均一,地下水流循环系统较小,表现为典型的“岩溶裂隙型”含水介质。

1.3 构造控水分析

岩性是岩溶发育的物质基础,地质构造则成为岩溶发育的主要外在制约因素。区内碳酸盐岩结构致密,矿物颗粒很

细,水的渗透作用较弱,而断裂和裂隙破坏了可溶岩的完整性,同时形成了地下水径流的良好通道,扩大了可溶岩与地下水的接触面积,从而促进了溶蚀作用的进行,为岩溶发育提供了必要条件。影响岩溶发育的构造条件主要为断裂构造、褶皱构造及节理裂隙等^[4]。

碳酸盐岩脆性好,在断裂两侧极易形成破碎带,造成构造裂隙发育,为地下水的渗透和运移提供了有利条件,从而断裂带成为岩溶化程度较高的地带,而且为地下水的富集区和强径流带。溶洞是区内典型的岩溶形态,断层带上该类岩溶景观一般较密集发育。同时在断裂带上,钻孔一般都出水量很大,单位涌水量普遍在 $1\ 000\ \text{m}^3/\text{d}\cdot\text{m}$ 以上。一般来说,断裂的性质对岩溶发育程度影响的差异性并不明显,但对于压性断裂来说,一般上盘一侧要比下盘一侧的岩溶发育程度强,如位于太统山北断裂上盘的甘沟自流孔、K4 号勘探孔单井涌水量达 $8\ 000\sim 10\ 000\ \text{m}^3/\text{d}$,而位于太统山南断裂下盘的 K3、K5 孔单井最大涌水量仅为 $1\ 000\sim 2\ 000\ \text{m}^3/\text{d}$ 。

褶皱构造对岩溶发育的控制作用非常突出,表现在褶皱的核部岩溶非常发育,而两翼要弱的多。褶皱在挤压作用形成过程中,核部由顺层错动产生的层面溶蚀和由剖面节理形成的斜切层面溶蚀非常发育,甚至形成构造溶蚀裂隙密集带,沿两组剪节理的交汇处往往会扩大继而形成小溶洞,成为地下水的主要储存空间和运移通道,富水性极强。

由风化裂隙和普通节理及层面裂隙构成的裂隙构造对岩溶发育起着重要的影响作用。裂隙不但对降雨和地表水向岩体内的入渗起控制作用,而且为溶蚀作用的进行提供了空间,增加了岩石的可溶性,同时也影响着岩溶作用的速度。岩体内裂隙越发育,张开度越好,连通性越强,则岩体的渗透率越大。在地下水水力坡度一定的情况下,地下水流速越快,越有利于在连通性好的张性裂隙内发育成巨大的溶蚀空间。

勘探证实凡是富水性好,单孔涌水量大的钻孔无一例外都处在构造带上,而远离构造带的钻孔出水量都较小,甚至极小乃至为干孔。“构造控水”是本区岩溶水的一个突出特点,这一原则对该区寻找岩溶地下水具有重要的指导意义。

2 岩溶水的形成与演化特征

2.1 岩溶水化学特征及其形成

研究区北部环县西部地区水化学样品少,仅有个别水点的总矿化度值和水化学类型。中南部平凉—华亭地区地下水样品丰富,水化学分布如图 2 所示。区内地下水化学特征主要由含水层岩性及地下水赋存条件决定。裸露型及覆盖型岩溶水和黄土潜水化学特征基本一致,为 HCO_3-Ca 或 $\text{HCO}_3-\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型水,矿化度 $0.3\sim 0.5\ \text{g/L}$,总硬度小于 $250\ \text{mg/L}$,pH 值 $7.7\sim 8.4$, $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ 和 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 的含量分别占阴离子和阳离子总量的 80% 以上, $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 含量小于 $11.9\ \text{mg/L}$, Cl^- 含量小于 $4.2\ \text{mg/L}$, SO_4^{2-} 含量小于 $50\ \text{mg/L}$,表明该类水直接来源于大气降水的入渗补给,而且径流途径短,循环条件好。

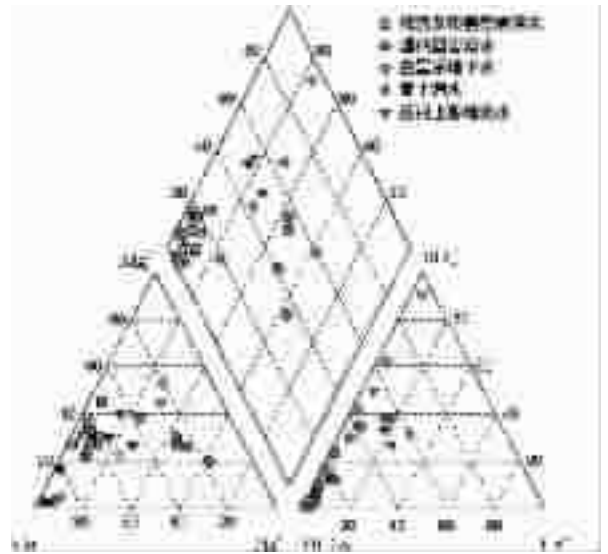


图 2 研究区中南部地区地下水化学三线图
Fig.2 Chemical trilinear diagram of groundwater in the central and south parts of the study area

埋藏型岩溶水矿化度升高,水化学类型趋于复杂化,主要表现在矿化度达 $0.4\sim 1.0\ \text{g/L}$,阳离子中三大离子含量平均化,阴离子中 SO_4^{2-} 的含量明显升高,最高比例可达阴离子总量的 40%;与裸露型及覆盖型岩溶水相比, Cl^- 含量占阴离子总量的比例仍然不大,最高不足 20%,但绝对值增大,最高可达 $70.3\ \text{mg/L}$ 。具体到各埋藏型岩溶水区片,从南向北水化学组分具有不同特点。平凉泾河以南的大岔河埋藏型岩溶水区水化学类型为 $\text{HCO}_3-\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型,矿化度 $0.43\ \text{g/L}$, $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 含量 $31.9\ \text{mg/L}$, Cl^- 含量 $14.2\ \text{mg/L}$, SO_4^{2-} 含量 $30.7\ \text{mg/L}$,与裸露型及覆盖型岩溶水区基本接近,表明该区岩溶水分布面积小,区域内岩溶零星露头区和黄土覆盖区大气降水入渗是主要补给来源,径流循环条件较好。平凉泾河以北的三关口—西阳埋藏型岩溶水区水化学类型为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4-\text{Na}$ 或 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4-\text{Na}\cdot\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型,矿化度 $0.79\sim 0.95\ \text{g/L}$,阴离子中 SO_4^{2-} 的含量占阴离子总量的 35%~40%,绝对值大于 $174\ \text{mg/L}$, Cl^- 含量大于 $21.3\ \text{mg/L}$;阳离子中 Na^+ 成为优势项,占总量的 40% 以上, $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 含量大于 $116.9\ \text{mg/L}$,表明该区岩溶水分布面积大,补给来源复杂、交替条件差的特点。三关口—西阳埋藏型岩溶水区处于泾河上游,其各支流除雨洪季节外,主要为六盘山区及其东麓地区白垩系潜水的泉集河,河水化学类型为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4-\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型,矿化度 $0.74\sim 0.87\ \text{g/L}$,各支流在流经三关口、秋千架等裸露岩溶区段时存在漏失现象,在三线图上,埋藏型岩溶水、白垩系地下水与泾河上游地表水处于同一个区域,水化学类型基本一致,同为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4$ 型水,从而证明河水入渗是平凉泾河以北埋藏型岩溶水的一

个重要补给来源。

白垩系碎屑岩地下水与碳酸盐岩岩溶水相比,水化学类型更趋复杂,矿化度增高,水化学类型为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Mg} \cdot \text{Ca} \cdot \text{Na}$ 或 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl-Na}$ 型,矿化度为 0.55~1.25 g/L。

从以上水化学特征可以认为,研究区中南部平凉—华亭地区裸露型岩溶水直接来源于大气降水的入渗补给,水化学类型简单,矿化度低。覆盖型岩溶水与黄土潜水关系密切,从水化学特征上也验证了这一点,两者水化学组成基本一致。埋藏型岩溶水水化学特征复杂,与上覆的白垩系地下水基本相似,表明埋藏型岩溶水与上覆白垩系地下水具有相同的赋存特征,也说明埋藏型岩溶水补给来源多元化,它除具有零星裸露岩溶区和黄土覆盖区大气降水的入渗补给外,还具有上覆白垩系地下水的越流补给以及裸露岩溶区地表水的入渗补给。

研究区北部环县西部地区年降水量不足 400 mm,碳酸盐岩上覆的黄土及围岩新近系—白垩系泥岩含盐量高,岩溶水岩作用以溶滤为主,地下水径流滞缓,属典型的干旱区溶滤水,水质较中南部地区明显变差。萌城泉水矿化度 3.16~4.53 g/L,水化学类型为 $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4\text{-Na} \cdot \text{Mg}$ 型;稍沟湾地区岩溶地下矿化度在 2~6 g/L,水化学类型为 $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4\text{-Na}$ 型。

2.2 岩溶水同位素特征

研究区各类水体氢氧稳定同位素分布如图 3 所示。在 $\delta D-\delta^{18}O$ 关系图上,各类水点均位于雨水线附近,虽然盈余值(d)偏大,但仍沿雨水线走向分布,表明研究区各类水体最初都由大气降水补给形成。碳酸盐岩裸露型及覆盖型岩溶水均位于雨水线的偏右上端, δD 和 $\delta^{18}O$ 值均较富,表明其主要接受大气降水的入渗补给,而且径流条件好,水交替畅通。碳酸盐岩埋藏型岩溶水,均位于雨水线偏左下端, δD 和 $\delta^{18}O$ 值均较贫,表明其形成时间较早,而且径流条件较差,循环速度慢。白垩系地下水一般位于雨水线的左下端,表明白垩系地下水形成时间普遍较早,径流循环条件较差。地表水和第四系潜水均位于雨水线的右上端,代表的是目前状态下形成的现代水。

从氡值来看,裸露及覆盖型碳酸盐岩岩溶水氡含量一般为 9~37.42 Tu,为含氡值高的地下水,表明其与大气降水交替循环强烈,为 1952 年以来形成的现代水,这与氢氧稳定同位素特征一致。埋藏型碳酸盐岩地下水氡含量一般为 7~8.77 Tu,为含氡的地下水,表明该类岩溶水存在区内零星裸露及黄土覆盖岩溶区大气降水和地表水等现代水的入渗补给,也有滞留时间较长的老水,具备混合水的特征。白垩系地下水中来自深层的自流水,氡含量均很低,如平凉市南坡下白垩系三桥组—和尚铺组自流井(K_5+H)、上颧河自流孔(K_5+H),氡含量均小于 2 Tu,可认为是不含氡的地下水,表明其形成时间大于 50 a;非自流的白垩系地下水,如平凉柳湖公园井水、安国乡白杨林钻孔,氡含量 $8.42 \pm 2.38 \sim 11.05 \pm 2.41$ Tu,为含氡的地下水,表明其与现代水具有水力联系,存在露头区及松散层覆盖区大气降水和地表水的入渗补给。

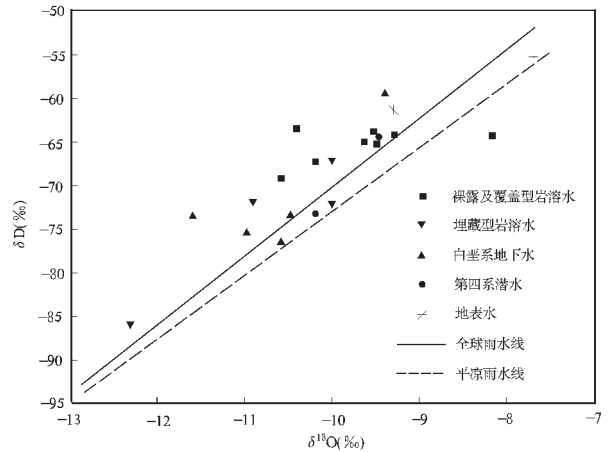


图 3 研究区地下水稳定同位素分布图

Fig.3 Stable isotope distribution in groundwater of the study area

3 岩溶地下水系统划分

地下水系统的研究是地下水研究的重要内容,是地下水资源评价的基础。岩溶地下水系统是地下水系统的一个特定范例,是指构成汇集一定岩溶地下水量的岩石圈、水圈和大气圈的空间有机耦合体,它包括了含、隔水体及边界、系统范围内与岩溶地下水密切相关的各种形态水体。研究区受构造作用控制,碳酸盐岩呈裸露与埋藏相间的区块分布,各区块之间受构造和非碳酸盐岩的分隔,相互失去水力联系,成为各自独立的水文地质单元,彼此无统一的水动力场,具有多区补给、多途径流和多级排泄的水流特征。根据岩溶水的空间分布与水动力场特征及其补径排条件,将本区岩溶水划分为平凉岩溶水系统、华亭岩溶水系统和环县西部岩溶水系统(简称“环西岩溶水系统”)等 3 个岩溶地下水系统(图 1)。

3.1 平凉岩溶水系统

平凉岩溶水系统的西部边界为六盘山东麓大断裂(F5),断裂西为大关山推覆体前缘巨厚的下白垩统六盘山群碎屑岩,断裂东为小关山推覆体后缘的埋藏岩溶区,为隔水边界;东部边界为彭阳—平凉—龙门断裂(F2),断裂西侧的埋藏岩溶水以此为界与断裂东侧的鄂尔多斯地块下白垩系保安群地下水对接,为排泄边界(图 4);南部边界为沿泾河与汭河分水岭的麻川—麻武一线,为中生代凹陷的厚层碎屑岩,为隔水边界;北部边界被人为划定的甘肃、宁夏两省区分界线,以此为界,本岩溶水系统与以北的宁夏南部彭阳地区岩溶水系统对接,两者具有统一的水动力场,构成一个完整的水文地质单元。

平凉岩溶水系统内震旦系、寒武系、奥陶系碳酸盐岩岩溶水主要分布于太统山、山口子梁、大岔河和三关口—西阳一带等 4 个区域,分别称为太统山岩溶水区、山口子岩溶水区、大岔河岩溶水区和三关口—西阳岩溶水区。岩溶水含水

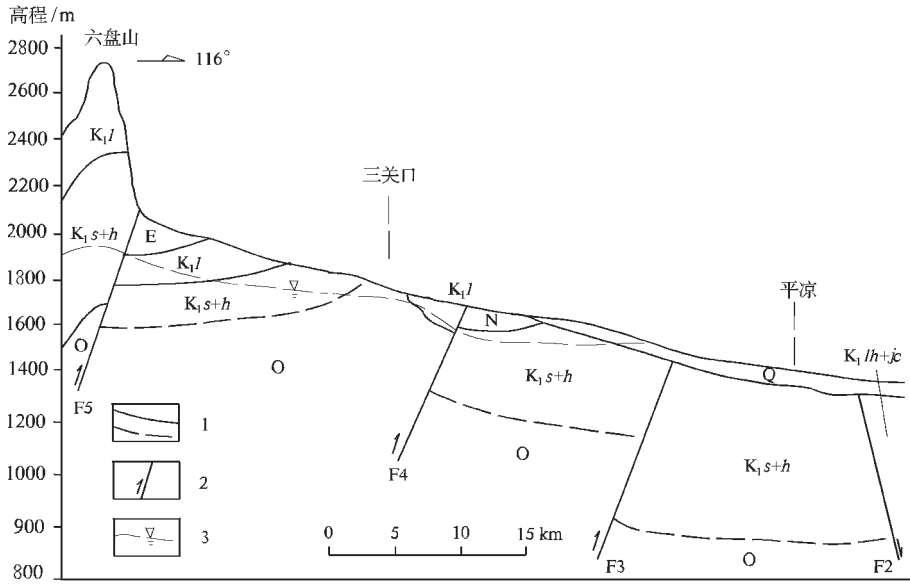


图 4 平凉岩溶水系统东西向水文地质剖面图

Q—第四系;N—新近系;E—古近系;K₁l—下白垩统李洼峡组;K₁s+h—下白垩统三桥组—和尚铺组;
 K₁lh+jc—下白垩统罗汉洞组—泾川组;O—奥陶系;F2—彭阳—平凉断裂;F3—古城—安国断裂;
 F4—固原—三关口断裂;F5—六盘山东麓大断裂;1—地质界线及推测地质界线;2—断裂;3—岩溶地下水头线;

Fig.4 E-W-trending hydrogeological section across the Pingliang karst groundwater system

Q—Quaternary;N—Neogene;E—Paleogene;K₁l— Lower Cretaceous Liwaxia Formation;

K₁s+h—Lower Cretaceous Sanqiao and Heshangpu formations;K₁lh+jc—Lower Cretaceous Luohandong and Jingchuan formations;

O—Ordovician;F2—Penyang—Pingliang fault;F3—Gucheng—Anguo fault;F4—Guyuan—Sanguankou fault;

F5—Fault at the eastern foot of the Liupanshan Mountains;1—Geological boundary, measured and inferred;2—Fault;3—Karst groundwater head line;

岩组主要为中奥陶统三道沟组灰岩和下奥陶统水泉岭组及震旦系白云岩、白云质灰岩,富水性强—中等,是研究区岩溶水最主要的富集区。

除新元古界—下古生界碳酸盐岩外,本系统内的下白垩统六盘山群三桥组(K₁s)砾岩普遍具有岩溶化现象,赋存有丰富的地下水资源,成为勘查区内除新元古界—下古生界碳酸盐岩岩溶水和河谷第四系松散层地下水外的另一个重要含水层位。三桥组砾岩含水层对碳酸盐岩岩溶水的传输、联系起重要作用。由于三桥组含水层的沟通,使得太统山、山口子梁、大岔河和三关口—西阳岩溶水区之间互相联通,平凉地区才形成一个完整、统一的地下水流系统。太统山及山口子梁两大裸露岩溶水区位于平凉岩溶水系统南部山区,两者北部下游均为三桥组砾岩分布区,三桥组就构成了碳酸盐岩岩溶水向北排泄的潜流通道;本系统中、下游的大岔河岩溶水区及三关口—西阳埋藏岩溶水区,三桥组砾岩地下水既是碳酸盐岩岩溶水的上游补给来水,也是下游的排泄通道。在地下水场图上反映出各区水位具有较大差异,太统山岩溶水水位在 1 610~1 660 m,山口子岩溶水水头标高大于 1 660 m,大岔河岩溶水水头仅为 1 370~1 390 m,表明碳酸盐岩岩溶水的岩溶发育,地下水径流条件好,地下水力坡度平缓;而三桥组砾岩地下水区,水力坡降大,径流条件差,与碳酸盐岩

岩溶水相比有很大差距。

平凉岩溶水系统地下水的补给来源主要为裸露岩溶区的大气降水入渗,其次为黄土覆盖岩溶区大气降水的间接入渗和裸露岩溶区地表水的入渗补给。岩溶水径流方向总体上自北西南东,向泾河下游方向径流,排泄主要是通过彭阳—平凉—龙门断裂向下白垩统保安群含水岩组弱渗流。

3.2 华亭岩溶水系统

华亭岩溶水系统位于汭河支流策底河及石堡子河上游,碳酸盐岩在华亭县的马峡、野狐峡一带零星裸露。系统的东部边界为固原—三关口—马峡断裂(F4),为一倾向西的逆断层,其东侧为策底—华亭中生代向斜盆地,其间沉积有大厚度的侏罗系和三叠系,断层西的震旦系硅质灰岩以此为界与三叠系砾岩对接,为隔水边界。南西边界为六盘山东麓大断裂(F5),断裂西为大关山推覆体前缘的厚层白垩系,东为六盘山山前盆地震旦系—奥陶系碳酸盐岩的埋藏型岩溶,为隔水边界。北部边界在策底河以北的东西方向一线,为碳酸盐岩与北部的白垩系不整合接触带,系隔水边界。受以上 3 条边界的控制,华亭岩溶水系统呈一北宽南窄的三角形展布(图 1)。系统内碳酸盐岩东依三关口—沙南—马峡断裂呈南北向的隆起,也被前人称为野狐峡—马峡古残梁,在该隆起的顶部普遍发育有一级夷平面,海拔 1 800 m 左右,同时在

夷平面上形成数个古岩溶洼地,洼地中沉积有新近系和第四系,形成局部黄土潜水水流系统,如何家山岩溶洼地、罗马寺岩溶洼地等。在过境河穿越的地段形成深切岩溶峡谷,为典型的岩溶景观,如野狐峡、苏家峡等。区内出露的碳酸盐岩地层为震旦系硅质灰岩、白云岩和奥陶系中统三道沟组灰岩,三道沟组出露在系统北部苏家峡、新民峡口一带,震旦系出露于何家山以南,两者呈不整合接触。震旦系总体上呈大倾角倾向西的单斜构造形态,其层状构造有利于地表溶蚀裂隙的发育,在岩溶峡谷中小溶洞、宽大的溶隙均较发育,这些都为大气降水的人渗提供了有利条件,但钻探结果表明,震旦系地下岩溶不发育,岩层较致密,溶隙较少见,部分层位已出现变质的倾向也不利于岩溶作用的发展。北部的三道沟组灰岩岩溶发育程度要比震旦系强一些,在岩溶峡谷可见节理裂隙发育,岩石破碎,沿小断层带上溶洞成群产出。系统内岩溶水的富水性总体上为中等。

华亭岩溶水系统为半裸露半覆盖的岩溶水区,大气降水通过裸露灰岩直接入渗是岩溶水的主要补给来源,其次为黄土覆盖区大气降水的间接入渗补给。岩溶水的径流总体上自西向东,与地表水流系统一致。排泄主要是在东部边界带上,在沟谷底部或庙川—上腰崖断裂带上以泉的形式流出,如野狐峡泉群、庙川泉及马峡泉等。

3.3 环西岩溶水系统

环西岩溶水系统又可分为萌城泉域和稍沟湾北、南两个岩溶水子系统。

萌城泉域子系统呈南北向条带状展布,主要由九连山背斜西翼单斜构造构成。泉域西部边界为省界附近的青龙山—彭阳断裂(F2),东部边界为甜水堡—车道断裂(F1),均为隔水边界;南界在苦水渠到小南沟一带推测为滞流性隔水边界;北边界在甜水堡到宁夏境内的萌城一带,由于九连山背斜倾伏,构成隔水边界使泉域封闭(图1)。萌城泉域子系统含水岩组主要是中奥陶统灰岩,并有少量的震旦系和寒武系碳酸盐岩露头呈南北条带状展布。岩溶地下水在碳酸盐岩裸露区获得降雨入渗补给,被两侧隔水边界限制在含水层中由南向北运移,在萌城、甜水堡一带受阻后溢流地表呈泉群形成萌城泉,泉水枯季稳定流量为2308.5 m³/d(2001年6月)。

稍沟湾岩溶水子系统东侧以青龙山—彭阳—平凉断裂(F2)为界,为隔水边界;西侧到省界一线的韦州—安国断裂,为隔水边界,以此与宁南岩溶水区相邻;南、北部边界均到省界一线,为排水边界(图1)。子系统内北部含水层为寒武、奥陶系碳酸盐岩,南部含水层主要为奥陶系灰岩。子系统中部红糜湾—稍沟湾东西一线地势最高,存在地下分水岭,以此为中心岩溶水向北、南两个方向径流^[4],最终分别排泄进入宁夏境内北部的太阳泉岩溶水区和南部的郑家庄泉域。

4 结 论

(1)传统水文地质观念认为,西北干旱—半干旱地区碳酸盐岩溶分布面积小,气象水文条件差,岩溶不发育,不具备

找水的水文地质意义。受这一思想的影响,水文地质工作者历来主要以河谷平原、黄土塬区及盆地构造类水文地质单元作为找水的靶区。通过近年来在陇东西部地区岩溶地下水的勘查实践,从而在认识上打破了这一思想的束缚,得出了西北干旱、半干旱地区碳酸盐岩不但含水,而且富水的认识,并且为同类地区扩大找水方向指明了又一途径。

(2)本区中奥陶统三道沟组为一套连续沉积的纯灰岩层,夹层很少,岩溶发育相对较弱,溶蚀作用主要沿构造裂隙发育,加之地层产状较陡,岩溶发育显示不出成层性,岩溶富水性不均一,地下水流循环系统较小,表现为典型的“岩溶裂隙型”含水介质。

(3)“构造控水”是陇东地区岩溶水富水规律的突出特点。在该区,岩溶水的富水性严格受构造条件的控制,在野外勘查中,凡是富水性好,单孔涌水量大的钻孔也无一例外都处在构造带上,而远离构造带的钻孔出水量都较小,甚至为“干”孔。

(4)水质分布具有明显的纬向分带性,呈现南好北差的特征。岩溶水最初源于大气降水,其中裸露型及覆盖型岩溶水径流条件好,水交替畅通;埋藏型岩溶水径流条件较差,循环速度慢,具多元混合水特征。

(5)本区可划分为平凉、华亭和环西3个岩溶水系统,具有各自不同的控水形成模式和补径排条件。3个岩溶水系统的划分可作为岩溶水资源评价的重要基础。

参考文献(References):

- [1] 汤锡元,郭忠铭,陈荷立,等.陕甘宁盆地西缘逆冲推覆构造及油气勘探[M].西安:西北大学出版社,1990.
Tang Xiyuan, Guo Zhongming, Chen Heli, et al. Petroleum and Natural Gas Exploration and the Overthrust Structure on the West Edge of the Shanganning Basin [M]. The Publishing House of the Northwest University, 1990 (in Chinese).
- [2] 张彦林,李生永,崔旭东,等.六盘山东麓地区岩溶地质特征分析[J].甘肃地质学报,2005,14(1):71~75.
Zhang Yanlin, Li Shengyong, Cui Xudong, et al. The geological features analysis of karst in eastern foot of Liupan mountain [J]. Acta Geologica Gansu, 2005, 14 (1):71~75 (in Chinese with English abstract).
- [3] 韩行瑞,梁永平,时坚,等.陕西渭北西部黄土塬隐伏岩溶区地下水开发利用研究[R].桂林:中国地质科学院岩溶地质研究所,2000.
Han Xingrui, Liang Yongping, Shi Jian, et al. Development and usage of karst groundwater buried under the west loess table-land of the north part to Weihe river in Shanxi province [J]. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological sciences, 2000 (in Chinese).
- [4] 张彦林,李生永,刘心彪,等.六盘山东麓地区地质构造对岩溶水的控制作用[A].见:侯光才,张茂省主编.鄂尔多斯盆地地下水资源与可持续开发利用[C].西安:陕西科学技术出版社,2004.
Zhang Yanlin, Li Shengyong, Liu xinbiao, et al. Karst water

controlling of geological structure in the eastern area of Liupanshan Mountain [A]. In: Hou Guangcai; Zhang Maosheng (eds). Groundwater resources in Eerduosi Basin and Sustainable Development and Use about It [C]. Si'an: Shaanxi Scientific and Technical Publishing House, 2004 (in Chinese).

[5] 李向全, 张发旺, 毕二平, 等. 宁夏南部“南北古脊梁”裂隙岩溶水

流系统分析[J]. 地球学报, 2004, 25(5): 571~574.

Li Xiangquan, Zhang Fawang, Bi Erping, et al. The deep karst groundwater system in arid regions of northwestern China: A case study of karst fissure groundwater in southern Ningxia [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2004, 25 (5): 571~574 (in Chinese with English abstract).

Formation mechanism of karst groundwater in the western Longdong basin, northwestern China

ZHANG Yan-lin, LI Sheng-yong, FU Dong-lin, CHUI Xu-dong

(Gansu Institute of Geological Survey, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: The western Longdong basin is situated in an overthrust belt on the western edge of the Ordos basin, where Neoproterozoic-Lower Paleozoic carbonate rocks are exposed or buried at shallow depths, forming a N-S-trending karst water concentration zone. The karst-fissure water system is analyzed and discussed intensively by using the method of structural control on water and hydrochemical isotope analysis. The spatial distribution of karst water in the area is controlled obviously by a N-S-trending overthrust belt, the water-storing space is mainly karst fissures and the karst development and karst water concentration are mainly controlled by structure. The hydrochemical features of karst groundwater in the south are notably different from those in the north. The hydrochemistry in the Pingliang-Huating area in the south-central part with superior recharge conditions of groundwater is mainly determined by the aquifer lithology and its occurrence conditions. Karst groundwater mainly originates from meteoric water, while the buried karst groundwater is mixed water from multiple sources. Based on the spatial distribution, features of the hydrodynamic field and recharge, runoff and draining conditions of karst groundwater, the whole karst area is divided into three relatively independent karst groundwater systems, namely, the Pingliang, Huating and west Huanxian systems, which may serve as a basis for water resource evaluation in the karst area. These views have great scientific significance for a better understanding of the characteristics of occurrence and concentration and mechanism for formation and evolution of karst water in arid and semiarid areas of northwestern China and exploitation and utilization of karst water resources in the study area.

Key words: western Longdong basin; karst groundwater media; structural control on water; karst groundwater system

About the first author: ZHANG Yan-lin, male, born in 1971, engineer, mainly engages in groundwater resources and environment survey and evaluation; E-mail: zhyL319@126.com.