

文章编号:1673-9469(2009)03-0097-05

磁西煤系下岩溶热水水文地球化学特征及成因

王夕明¹,张景森²,张静²,张玉贞¹,刘强³

(1. 中国煤炭地质总局 第二水文地质队,河北 邢台 054066;2. 河北工程大学 资源学院,河北 邯郸 056038;3. 邯郸市水利局防汛办,河北 邯郸 056001)

摘要:根据水质分析结果,并结合岩溶地下水水质资料,分析了磁西煤田一号采区的深层岩溶热水水文地球化学特征、热储特征及其成因。结果表明,磁西煤田煤系下具有高TDS、高硬度、SO₄Cl-CaNa型水质特征的深层岩溶温热水是地下水沿断裂构造参与深部循环、长期演化的结果;地热异常属于热水型地热,热储温度可达60℃以上,循环深度在1500m以上,热源来自于燕山期岩浆侵入岩体产生的热异常与区域地温的叠加。本研究同时也为地热资源研究、煤田开发、矿井热害和矿井水防治提供有意义的参考。

关键词:深层岩溶水;成因;磁西煤田

中图分类号: P641.134

文献标识码: A

Hydrogeochemical characteristic and genesis of hot karst groundwater under coal-bearing strata in the western Cizhou

WANG Xi-ming¹, ZHANG Jing-sen², ZHANG Jing², ZHANG Yu-zhen¹, LIU Qiang³

(1. Second Hydrogeologic Team, China National Administration of Coal Geology, Hebei Xingtai 054066, China;
2. School of Natural Resource, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China;
3. Handan Bureau of Water Resources, Hebei Handan 056001, China)

Abstract: Based on the analysis of the water sample and integration of karst groundwater data, this paper analyzes the hydrogeochemical and geothermal characteristics of the hot karst water and its genesis in the western Cizhou coalfield. The results show that the deep karst warm-hot water in Ordovician under the coal-bearing strata is SO₄Cl-CaNa type water with high TDS and high hardness, and its formation is derived from the deep seepage of groundwater along faults and long time evolution; the geothermal abnormality is water-heated geothermy with more than 60℃ temperature of heat storage and 1500m depth of circulation, and the heat source is from the thermal addition of igneous rock mass intruding in Yanshanian over the regional normal geothermy. The research provides some reference in geothermal research, coal exploitation, prevention of thermal damage and mine water damage.

Key words: deep karst groundwater; genesis; western Cizhou Coalfield

邯郸-峰峰煤矿区是我国重要的优质煤生产基地,同时也是河北省邯郸市重要的供水水源地。经过几十年的开采,浅层煤炭资源逐渐枯竭,煤矿开采向深部难采煤层推进。在开发磁西深部煤炭资源进行的一号井田详细勘探工作中,为查明煤系下岩溶水文地质条件,在第45勘探线施工了45-1水文地质钻孔,并进行了抽水试验和水样的水质分析。资料表明,煤系下深层岩溶水是高矿

化的高温热水。这种水有什么水质特征,它是怎样形成的,它所显示的地热异常又是怎样形成的?这些问题成为工程技术人员所关注的中心。本文依据该钻孔揭露的煤系下岩溶水水质资料,试图阐明矿区深层岩溶水的水文地球化学特征,分析其水质成因和地热异常的形成条件,以期正确认识矿区水文地质条件、开发利用和保护地下水资源、开展煤矿井防水治水和矿井热害防护以及

收稿日期:2009-03-24

基金项目:国家自然科学基金项目(40872056) 河北省教育厅科学研究计划项目(Z2008202)

作者简介:王夕明(1965-),男,山东诸城人,工程师,从事水文地质、工程地质领域勘察、设计、施工及研究工作。

研究地热资源等提供重要的参考。

1 区域地质和水文地质概况

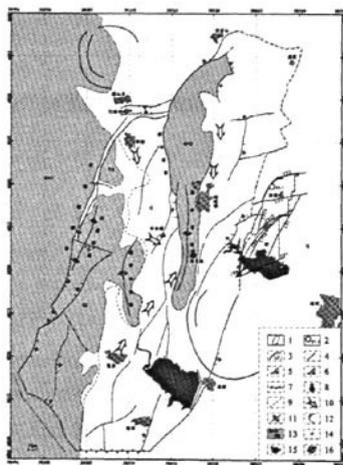
邯郸-峰峰矿区(以下简称矿区)位于河北省南部太行山东麓,在构造上处于华北断块区吕梁-太行断块的太行山前断裂带影响范围内。太行山前断裂带形成于中-新生代以来的拉张体制下,是太行山断块隆起区与华北平原裂陷盆地的构造分界^[1]。矿区断裂构造发育,断裂走向以 NNE 及 NE 向为主,NWW 向次之,不同走向的断层相互切错,将矿区分割成若干小型地垒、地堑及阶梯状单斜(掀斜)断块组合等构造形态。矿区沉积盖层挤压变形较微弱,褶皱宽缓,主体构造线方向呈 NNE-NE 展布,轴向近 SN 的大型褶皱鼓山背斜将矿区分为东西两部分,西侧为和村向斜,东侧为向 SEE 缓倾的单斜,在此基础上发育有极为宽缓的小型褶曲^[1]。区内地层岩性总体上自西向东逐渐变新,西部区及中部的鼓山背斜区出露有寒武和奥陶系碳酸盐岩地层,其余地表大部分为第四系覆盖,石炭系、二叠系等地层仅在局部零星出露(图 1)。

该矿区的岩溶地下水系统,即著名的邯邢水文地质南单元岩溶地下水系统^[2]。其西部边界为贾壁断裂带,北段弱导水,南段导水,均可接受边界以西大面积碳酸盐岩裸露区大气降水入渗后的侧向流入;东部以岳城-康庄一线为边界,灰岩埋深达标高-800m 以下,岩溶极不发育,为阻水边界;南部边界是一地下水分水岭;北部边界在八特村-黄粟山-康庄一带,由于断层或使含水层错开,或使奥陶系灰岩埋藏加深,岩溶极不发育,可视为阻水边界(图 1)。系统主要含水层为奥陶系石灰岩,岩溶裂隙极为发育,且为非均质各向异性,厚度约为 66~132m,由东南向西北逐渐变厚,含水层导水性能强,地下水流场水力坡度很小。在埋藏区,含水层上覆石炭系本溪组铝土质泥岩,构成相对稳定的隔水顶板,地下水处于承压状态,局部地段由于人工开采和排泄,水位下降而呈无压状态;西部和中部的灰岩出露区及灰岩直接第四系覆盖区可接受大气降水、地表水入渗补给(包括系统西侧径流流入),是地下水最主要补给来源。地下径流由北、西和南侧边界沿向斜盆地和断裂带向东部和系统中心部位流动时,受到东侧边界的阻挡,在中部形成著名的黑龙洞泉群。由于系统内具有集中式开采的大型水源地(如羊角铺水源地、王凤水源地、邯峰电厂水源地、黑龙洞水厂等)和各矿区集中式疏排井以及众多分散式

开采的工农业和生活用水水源井,人工开采量剧增,形成了以羊角铺、黑龙洞泉群、峰峰一带为中心的区域地下水位降落漏斗(图 1)。

2 磁西煤田和水文地质钻孔概况

磁西煤田一号井田位于邯郸-峰峰矿区东部,岩溶水系统南单元东部滞流边界外侧,西邻羊渠河矿和九龙口矿。根据煤田勘探资料,区内发育一系列呈 NNE 和 NE 向展布的断层(图 1);钻探所揭露的地层有第四系(Q)、第三系(R)、三叠系和尚沟组(T_{1h})、刘家沟组(T_{1l})、二叠系石千峰组(P_{2sk})、上石盒子组(P_{2s})、下石盒子组(P_{1s})、山西组(P_{1s})、石炭系太原组(C_{3t})和本溪组(C_{2b})、奥陶系峰峰组(O_{2f})。



注: 1. 磁西煤田一号井田范围, 2. 水文地质钻孔与编号, 3. 井田断层与编号, 4. 岩溶水滞流边界, 5. 阻水断层边界, 6. 导水断层边界, 7. 地下水分水岭边界, 8. 黑龙洞泉群, 9. 潜水承压水分界线, 10. 岩溶地下水流向, 11. 背斜轴线, 12. 遥感解译环形构造(岩浆岩体), 13. 寒武、奥陶系地层, 14. 第四系, 15. 水库, 16. 村庄、乡镇。

图1 区域地质和水文地质略图^[1, 2]

Fig. 1 Sketched geologic and hydrogeologic map of Handan-Fengfeng Coalfield

水文地质钻孔位于磁县林坦镇北西向军营村南侧,西侧邻近断层 CF_2 , 孔深 1338.18m(-1219m 水平), 揭露峰峰组厚度为 51.58m。峰峰组岩性为浅灰色巨厚层状隐晶质结构石灰岩,局部含有丰富的黄铁矿晶体,发育为方解石全充填的不规则裂隙,部分灰岩段发育有溶孔、其中生长有方解石晶体。它与上覆地层太原组呈断层接触(CF_2 , 断距 180m)。抽水试验表明,奥陶系岩溶水静水位埋深 12.97m,降深 17.14m 时涌水量达 31.3m³/h;经

表 1 水质分析成果

Tab.1 Hydrogeochemical analysis of water samples (mg/L)

层位	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺ + Na ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SiO ₂	TDS	pH	T/°C
O _{2f}	1040.9	135.8	1931.4	246.5	2177.4	3465.9		16.0	9186	7.4	42
煤系 1	651.3	126.0	1129.5	227.6	1808.2	1794.1	0.5	13.0	5914	8.2	
煤系 2	581.8	90.4	1048.1	241.6	1714.3	1503.0	0.6	13.0	5272	7.4	

注:除 pH 值和温度 T 外其余各单位均为 mg/L。煤系 1、2 分别为九龙口矿野青灰岩水和 2# 煤顶板砂岩水。

计算,含水层渗透系数 $K = 1.1m/d$,导水系数 $T = 56.5m^2/d$ 。

3 岩溶热水水文地球化学特征

3.1 水化学特征

钻孔抽水试验和水样化验分析表明,岩溶水为高矿化、高水温弱碱性水质(表 1),水化学类型属于 SO₄Cl - CaNa 型水(图 2),表明其径流循环深度大、循环微弱。总溶解固体 TDS 和主要离子含量都很高,水质总硬度达到 3158 mgCaCO₃/L,且永久硬度占 94%。为便于比较,本次研究还对九龙口矿煤系含水层进行了取样分析(表 1)。

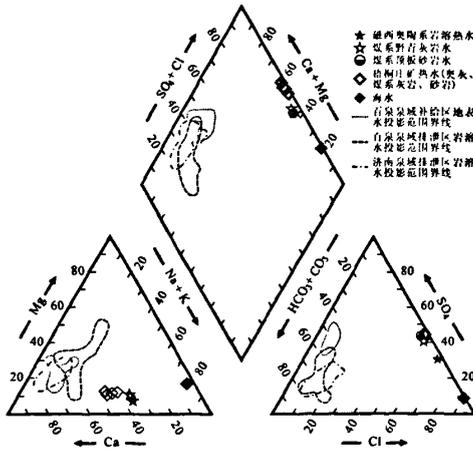


图2 阴阳离子平衡关系图解
Fig.2 Ion balance diagram of Ordovician karst water sample

该岩溶水水质与矿区南部岳城梧桐庄矿地热异常区热水水质类似,但后者总溶解固体 TDS 略低, Mg²⁺ 离子偏高, HCO₃⁻ 偏低^[3]。其与循环条件良好的岩溶泉域排泄区水(如邢台百泉泉域^[4]、济南岩溶泉域^[5]天然泉和开采井)水质相比则差异十分显著,表明地下水演化过程差异极大。

水样的 HCO₃⁻ 量为 246.5mg/L,与一般岩溶水

中 HCO₃⁻ 含量相差不大,反映出地下水补给区(地面和包气带)输入 CO₂ 的能力。HCO₃⁻ - TDS 关系图(图 3)表明,由包气带输入的 CO₂ 已经耗尽,地下水经历了较长的径流路径。

样品与其它岩溶水水质的 Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺、SO₄²⁻ 和 Cl⁻ 含量与 TDS 之间呈明显的正比关系(图 3),说明了样品地下水处于一般岩溶地下水水化学成分演化序列上。

3.2 地热水特征

邯郸 - 峰峰矿区各含水层水温一般小于 20℃。研究的岩溶水温为 42℃,抽水过程中十分稳定,呈显著的地热异常,属于温热水(40℃ ≤ T < 60℃)型低温地热资源^[6]。

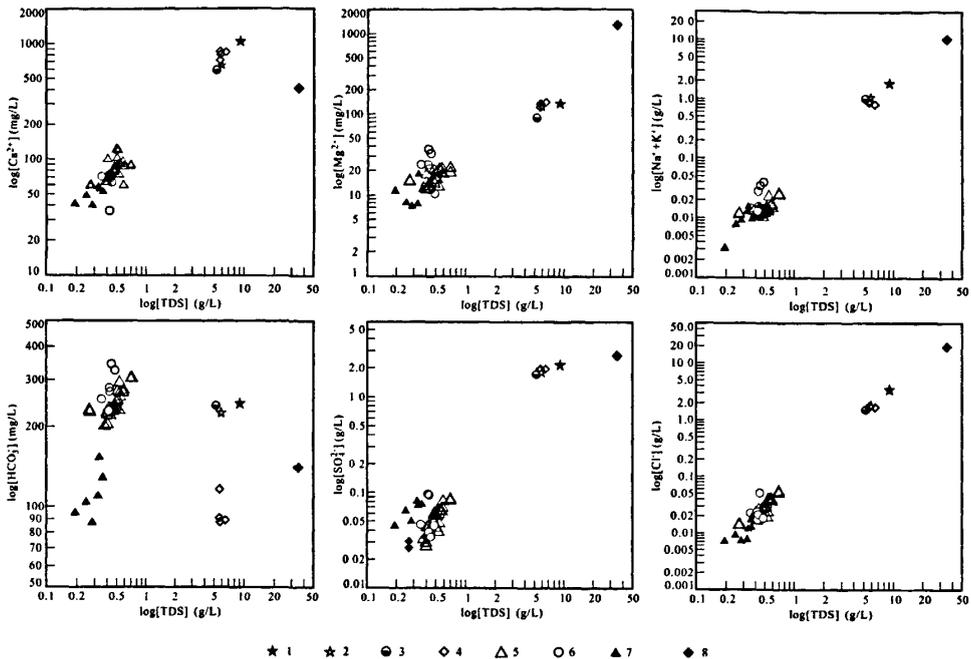
根据资料,梧桐庄矿地热异常属热水型地热异常,热水来源为大气降水经过深循环加热而来,热储温度 49℃ - 88℃,热水循环深度约 2 000m,钻孔平均地温梯度为 3.5℃/100m 或更高,奥陶系岩溶含水层温度均匀、呈高温平衡状态^[3]。磁西地热区与梧桐庄地热区之间由 NNE 向系列断层相联系,地质条件相似,因此推断其地热异常也具有上述类似特征和成因。

使用 SiO₂ 温标^[7]估算该地热异常区热储温度为 55℃ ~ 62℃(表 2)。钻孔井温测井孔底温度为 40℃,热水应该来源于深部。按照张永强^[3]使用的地温梯度 2.77℃/100m 计算该热水的水循环深度为 1444m ~ 1696m,可以推测深度应在 1500m 以上。

表 2 利用石英温标计算的热储层温度
Tab.2 Geothermal reservoir temperature calculated by SiO₂ thermometric scale

石英温标	温标 ₁	温标 ₂	温标 ₃
热储温度(°C)	55.1	55.3	61.7

注:计算公式,温标₁ - 无蒸汽分离或混合作用时,温标₂ - 无蒸汽散失时,温标₃ - 蒸汽足量散失时^[7]。



注: 1. 磁西岩溶热水; 2. 九龙口矿煤系野青灰岩水; 3. 九龙口矿2#煤顶板砂岩水; 4. 梧桐庄井田热水(奥陶系岩溶水、伏青灰岩水、野青灰岩水和大煤顶板砂岩水); 5. 济南岩溶泉域泉水和开采井水; 6. 百泉泉域排泄区岩溶水; 7. 百泉泉域补给区地表水; 8. 海水。

图3 离子含量与总溶解固体关系图

Fig. 3 Ion content vs. TDS diagram of karst waters

4 水质与热水成因分析与讨论

4.1 水质成因

地下水水质主要取决于流域内岩石、土壤和植物等多种因素和地下水径流循环过程中所发生的各种物理、化学和生物反应。岩溶水系统中,含水层主要由碳酸盐岩地层构成,对地下水有影响的矿物主要有方解石(CaCO_3)、白云石($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)和石膏(CaSO_4)三种,地下水化学成分的演化主要受到这三种矿物的化学溶解反应的影响,一般呈现三个阶段:(1)降水入渗补给岩溶含水层时,带入一定数量的 CO_2 使水呈弱酸性,可以溶解方解石、石膏和白云石,沿着地下水径流路径, HCO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 都出现增长,总溶解固形物也呈增长趋势;(2)当 CO_2 消耗完后,方解石不再溶解,地下水中 HCO_3^- 含量趋于稳定,而石膏和白云石仍可溶解,地下水继续径流;(3)当白云石趋于饱和、停止溶解后, Mg^{2+} 含量趋于稳定,当石膏也趋于饱和、停止溶解后,地下水往往

处于滞流状态。值得注意的是方解石和白云石会出现复杂的全非等溶解,当温度小于 10°C 时,白云石溶解而方解石沉淀;当温度大于 10°C 时,方解石溶解而白云石沉淀^[8]。白云石的全非等溶解常称之为脱白云石化过程。地下水沿径流路径流动时的水化学演化一般都会经历这一过程,这在低矿化岩溶水成分上表现相当明显^[5]。图3中热水的 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 显示出第III阶段的特征。

岩溶水TDS值大小与地下水循环深度和循环强弱程度有密切关系。循环交替强烈的岩溶水TDS很少超过 700mg/L ^[4,5],循环深度一般不超过 300m ^[5]。磁西岩溶热水高TDS值是由各离子含量增加决定的。从图3可以看出,与低矿化岩溶水相比,除 HCO_3^- 外,其它各离子含量都有显著增加。地下水中 HCO_3^- 含量主要反映地面输入 CO_2 的数量,受到地面环境、尤其是植被状况的限制,一般比较稳定、含量不会很高(梧桐庄矿热水中偏低,可能与含水层排气有关^[3])。其它离子增加与地下水循环深度大和长时间呈滞流状态有关。

根据本地区地质条件,岩溶水水质还可能受到以下因素的影响:(1)含水层上部煤系地层中大

量的硫化物由于断裂沟通作用对地下水水质产生影响;(2) 石灰岩地层中黄铁矿的氧化作用;(3) 地层深处中酸性岩浆岩矿物的溶解作用;(4) 地下水受地面污染水体混入影响。

研究表明,岩溶系统中排泄区地下水、特别是泉水的方解石饱和指数近似为 0,即泉水相对于方解石达到化学平衡状态^[9]。长时间的水岩作用使控制地下水化学成分中含水层矿物与地下水达到反应平衡状态^[6]。使用 PHREEQCI 软件可以方便地计算出与地下水成分相关矿物的饱和指数(SI),其中石膏(0.02)、方解石(1.02)、白云石(1.61)、白云母(0.24)是非常接近于平衡状态的矿物,它们对水化学成分具有显著控制作用;而钠长石(-2.45)、钙长石(-5.15)、钾长石(-3.13)显著不饱和,黄铁矿(13.58)显著过饱和,它们不对地下水水质起控制作用。从图 3 中也可以看出其它来源的离子成分对 TDS 值没有显著贡献。因此,该岩溶热水水化学特征是地下水在参与大断裂深循环和滞流状态下长期演化的结果。

4.2 岩溶热水形成条件

根据矿区地质条件,分析认为出现岩溶热水具有如下几个有利条件。(1) 构造条件:区内断裂构造十分发育,一些规模大、延伸远的断裂构成了地下导热导水的重要通道,如梧桐庄至九龙口南地温异常呈线状分布^[3],并有断层延伸至钻孔 45-1(图 1)。(2) 水文地质条件:区内岩溶地下水向东径流,含水层埋藏深度增大,循环交替微弱。(3) 区内具有良好的储热储水层:寒武-奥陶系岩溶含水层,岩溶裂隙较发育,构成良好的储热储水层;同时煤系地层中的多层灰岩夹层也是良好的储层。(4) 具有形成热水的良好隔热覆盖层:各含水层上覆中-新生界粘土(岩)、砂土(岩)等导热率低,构成了良好的隔热隔水盖层,有利于保存储热层中的热量。(5) 燕山期岩浆侵入岩体:根据 ETM 遥感图像构造解译^[1],梧桐庄矿一带具有清晰的环形影像特征,表明侵入岩体的存在,且岳城水库下也曾勘探到岩浆岩体^[3];矿区西北侧磁山岩体、北侧紫山岩体的环形影像也很清晰,说明这一地区岩浆岩体广泛存在。它们所产生的热异常叠加在区域地温背景之上,是矿区产生地热异常的根本原因,尽管地热水水化学特征并没有显示出岩浆作用的特征。

因此,矿区的地热异常源于广泛分布的岩浆

岩体产生的热异常的叠加,沿大型断裂深循环的地下水被加热后在有利的储热层中聚集,形成热水中心,下部的热水又通过断裂、裂隙通道加热上部的煤系含水层,构成矿区一定范围内完整的地热系统。

值得注意的是,地热异常也会对煤矿生产带来热害。如果矿井生产对含水层进行疏干降压,那么井田的热水异常有可能出现两种情况:一是疏干降压工作会引起热水区外常温水侧向补给量大于深部断裂循环补给热量,导致井田水温下降;二是侧向补给水量小于深部断裂循环热水补给量,则会使井田热水异常更为显著^[3]。这是需要进行深入研究的问题之一。

5 结论

1) 磁西煤田煤系下深层岩溶水是高 TDS、高硬度、 $\text{SO}_4\text{Cl}-\text{CaNa}$ 型水质温热水,其水化学特征是地下水沿断裂构造参与深部循环、长期演化的结果。

2) 岩溶热水地热异常属于热水型地热类型,其热储温度可达 60°C 以上,循环深度在 1500m 以上,热源来自于燕山期岩浆侵入岩体产生的热异常与区域地温的叠加。

参考文献:

- [1] 曹代勇, 占文峰, 张军, 等. 邯鄹—峰峰矿区新构造特征及其煤炭资源开发意义 [J]. 煤炭学报, 2007, 32 (2): 141-145.
- [2] 付延玲. 邯邢水文地质南单元岩溶地下水系统数值预报 [J]. 中国岩溶, 2002, 21 (4): 269-275.
- [3] 关永强. 梧桐庄矿地热异常成因初探 [J]. 中国煤田地质, 2002, 14 (3): 36-38.
- [4] 苑振海, 乔光建, 张冬婷. 邢台百泉岩溶地下水水质变化特征分析 [J]. 水资源保护, 2006, 22 (1): 60-62, 65.
- [5] 徐慧珍, 段秀铭, 高赞东, 等. 济南泉域排泄区岩溶地下水水化学特征 [J]. 水文地质工程地质, 2007, (3): 15-19.
- [6] GB/T 11615-89, 地热资源地质勘查规范 [S].
- [7] 汪集场, 熊亮萍, 庞忠和. 中低温对流型地热系统 [M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [8] 钱会, 马致远. 水文地球化学 [M]. 北京: 地质出版社, 2005.
- [9] 刘再华, DREYBRODT W, 韩军, 等. $\text{CaCO}_3-\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 岩溶系统的平衡化学及其分析 [J]. 中国岩溶, 2005, 24 (1): 1-14. (责任编辑 马立)