

文章编号: 1001-1986(2020)03-0075-06

沁水盆地南部 15 号煤层和顶板 K₂ 灰岩水文 地球化学演化特征

李忠诚, 吴建光, 王建中, 吴翔, 卢国军
(中联煤层气有限责任公司, 北京 100015)

摘要: 针对煤层气井产水量大、降压困难、产气效果不佳等问题, 基于沁水盆地南部煤矿 15 号煤层顶板 K₂ 灰岩水以及 15 号煤层气井水矿化度和离子数据, 利用统计、对比方法, 系统研究两者的水化学成分特征、类型、成因机理, 建立了地层水演化模型, 系统阐述灰岩和煤层水在补给区、径流区、滞流区发生的各种反应和作用。研究结果表明: K₂ 灰岩水和 15 号煤层水会发生离子交换、混合作用及 CO₂ 作用, 在补给区和强径流区, K₂ 灰岩水水型以 Ca-Mg-HCO₃-SO₄ 型为主, 煤层水水型以 Na-HCO₃-SO₄ 型为主; 缓径流区 K₂ 灰岩水一般为 Na-Ca-Cl-HCO₃ 型, 而煤层水以 Na-Cl-HCO₃ 或 Na-HCO₃ 型为主; 滞流区 K₂ 灰岩水和煤层水水型相同, 为 Na-HCO₃ 或 Na-Cl-HCO₃ 水型。研究结果为 15 号煤的煤层气开发提供可靠的水文地质依据。



关 键 词: K₂ 灰岩水; 15 号煤层气井产出水; 水类型; 水演化模型; 沁水盆地南部 移动阅读
中图分类号: P641.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2020.03.011

Hydrogeochemical evolution of No.15 coal seam and limestone K₂ in southern Qinshui basin

LI Zhongcheng, WU Jianguang, WANG Jianzhong, WU Xiang, LU Guojun
(China United Coalbed Methane Corporation Ltd., Beijing 100015, China)

Abstract: Based on the water test data of No.15 coal roof K₂ limestone and No.15 coalbed methane well in the southern Qinshui basin, the characteristics, types and the genetic mechanism of water chemical composition were systematically studied by statistical and comparative methods. The evolution model was built to systematically describe the various reactions and effects of limestone and coalbed water in the recharge zone, runoff zone and detention zone. The results show that the K₂ limestone water and the No.15 coal seam water will undergo ion exchange, mixing and CO₂ action. The K₂ limestone water is mainly Ca-Mg-HCO₃-SO₄ type in the recharge zone and the strong runoff zone, and the water type of the coal seam is Na-HCO₃-SO₄ type; K₂ limestone water in slow-flow area is generally Na-Ca-Cl-HCO₃ type, while coalbed water is mainly Na-Cl-HCO₃ or Na-HCO₃ type; K₂ limestone water is the same as the coal seam water in detention area, and it is Na-HCO₃ or Na-Cl-HCO₃ water type. The study aims to provide a reliable hydrogeological basis for the development of No.15 coalbed methane.

Keywords: K₂ limestone water; water producing from the No.15 coal seam gas wells; water pattern; water evolution model; southern Qinshui basin

由于地下水所处的补给区、径流区、滞流区控气作用不同, 导致不同水文地质单元煤层气富集程度存在差异^[1-4]。煤层气井排采效果不同^[5-8], 直接影响煤层气选区评价和后续开发^[9], 煤层气开发为

排水降压采气, 因此, 煤层气勘探开发工作中水文地质条件, 尤其是地层水的水文地球化学特征, 应作为煤层气开发前一项重要工作。

前人针对煤矿井下或含煤岩系水文地质特征开

收稿日期: 2019-01-10; 修回日期: 2019-07-16

基金项目: 国家科技重大专项项目(2017ZX05064)

Foundation item: National Science and Technology Major Project(2017ZX05064)

第一作者简介: 李忠诚, 1971 年生, 男, 河北唐山人, 博士, 高级工程师, 从事煤层气地质与勘探开发工作. E-mail: zcliu0623@sina.com

引用格式: 李忠诚, 吴建光, 王建中, 等. 沁水盆地南部 15 号煤层和顶板 K₂ 灰岩水文地球化学演化特征[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(3): 75-80.

LI Zhongcheng, WU Jianguang, WANG Jianzhong, et al. Hydrogeochemical evolution of No.15 coal seam and limestone K₂ in southern Qinshui basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(3): 75-80.

展了大量研究。煤层水矿化度影响煤层气富集成藏条件, 高矿化度有利于高阶煤煤层气富集成藏, 低矿化度有利于低阶煤煤层气富集成藏^[10]。对于陷落柱发育井田, 陷落柱临近区域水的矿化度增加^[11]。煤层水和地表水或煤层顶底板等其他含水层水文地球化学特征存在显著差异, 通过监测其之间的水质差异, 可快速判断突水水源, 以预防矿井突水^[12-13]; 刘超等^[14]针对废弃矿井水地化特征开展了取样实验研究, 认为矿井水受地表水的强烈影响, 且利于生成次生生物气。

沁水盆地南部石炭-二叠系太原组 15 号煤层直接顶板 K₂灰岩为裂隙含水层, 水文地质条件复杂^[15], 15 号煤研究程度低, 煤层气井产水量大, 降压困难, 至今无法有效开发。基于前人研究认识, 笔者开展 15 号煤煤层水和顶板含水层水为地球化学演化研究, 以期从机理上揭示其演化过程, 总结不同水文地质单元煤层水和顶板灰岩水特征, 指导煤层气勘探过程中富集区优选; 同时结合开发过程中产出水分析化验数据, 依据不同水文单元水化学特征判断井区地下水活跃程度, 制定合适的开采方案, 为实现 15 号煤煤层气有效开发提供可靠的水文地质依据。

1 矿区地质及水文地质情况

1.1 矿区地质概况

水样取自 3 个煤矿, 其中 1、3 和 2 号矿分别位于沁水煤田东南端和南端(图 1), 煤矿基本构造形态为一走向 NE、倾向 NW 的单斜构造。在此基础上发育了一系列近 SN—NNE 向的宽缓褶曲, 形成井田内岩(煤)层的波状起伏, 岩层倾角一般不超过 15°。3 个煤矿的煤系主要为二叠系下统山西组、石炭系上统-二叠系下统太原组, 平均总厚度 136.02 m, 本次研究对象为 15 号煤层及其顶板灰岩, 全区稳定可采, 煤层厚度在 1.80~5.45 m, 平均厚度 2.67 m,

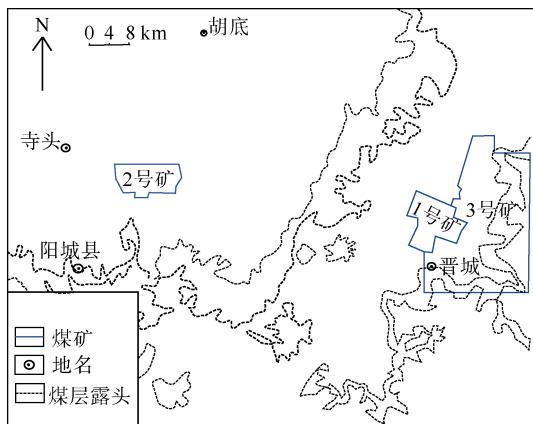


图 1 样品采集煤矿地理位置

Fig.1 Geographical location of coal mine

含夹矸 0~4 层; 直接顶板为石灰岩(K₂)。

1.2 矿区水文地质概况

3 个矿区均是在地势较高的煤层浅埋露头处接受大气降水补给, 在沟谷低洼处向地表排泄, 自上而下主要含水层为第四系松散岩类孔隙含水层, 基岩风化带裂隙含水层, 二叠系石盒子组碎屑岩类裂隙含水层, 二叠系下统山西组碎屑岩类裂隙含水层组, 石炭-二叠系太原组碎屑岩、碳酸盐岩类裂隙岩溶含水层组, 奥陶系碳酸盐岩类岩溶裂隙含水层组。其中, 石炭-二叠系太原组 K₂ 灰岩裂隙岩溶含水层为 15 号煤层的直接充水含水层, 据混合抽水试验资料, 单位涌水量为 0.000 67~0.048 L/(s·m)。

2 15 号煤层顶板 K₂ 灰岩水特征

2.1 K₂ 灰岩水的水型

通过对沁水盆地南部 3 个煤矿的 15 号煤顶板 K₂ 灰岩水水型分析发现, 3 个煤矿 K₂ 灰岩水水型差别较大(图 2), 1 号矿为 Na-Ca-HCO₃ 型, 2 号矿为 Na-HCO₃ 型, 3 号矿水型较复杂, 有 Na-Cl-HCO₃ 型和 Na-Cl-SO₄-HCO₃ 型两种。1 号矿煤层埋深 230~260 m, 2 号矿煤层埋深 270~280 m, 3 号矿煤层埋深 290~350 m, 取样深度依次增加, 1 号—3 号水样矿化度总体上依次升高(表 1), 反映了随埋深增加水体封闭性变好, 水力交换降低, 水型由 Na-Ca-HCO₃ 型向 Na-HCO₃ 型和 Na-Cl-HCO₃ 型过渡, 说明封闭条件越好, 钙离子消耗越大。由于 3 号矿的 3 号煤层已开采几十年, 资源基本枯竭, 遗留的 3 号煤层小煤矿采空区大量积水, 导致 15 号煤层开采时受到影响, 部分水样矿化度偏低。

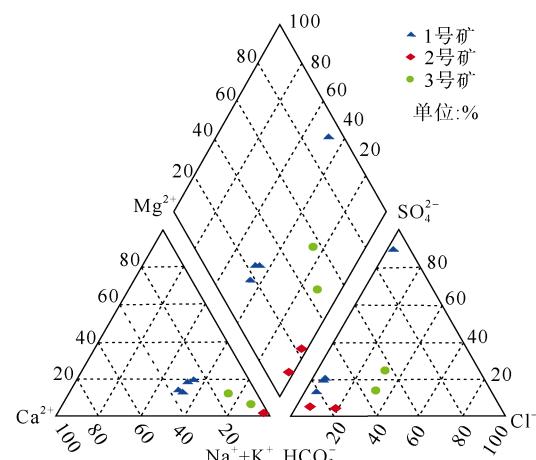


图 2 沁水盆地南部 15 号煤层顶板 K₂ 灰岩水型

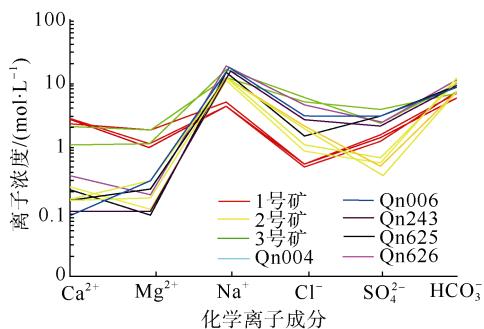
Fig.2 K₂ limestone water pattern of No.15 coal seam roof

表1 不同矿井K₂灰岩水矿化度

煤矿编号	矿化度/(mg·L ⁻¹)	平均矿化度/(mg·L ⁻¹)
1号	629~731	662
2号	873~1 116	1 019
3号	701~1 346	1 024

2.2 K₂灰岩水和15号煤层产出水比较

煤矿开采证实15号煤层为弱含水层, 采矿过程中的水主要来自顶板K₂灰岩。顶板灰岩水和15号煤层气井产出水两者从水型上分析基本相同, 主要是Na-HCO₃型和Na-Cl-HCO₃型。两者水中离子组成均呈现“W”形状(图3), 碳酸氢根离子浓度高; 煤层气井产出水阴离子与3号矿顶板灰岩水相似, 氯离子和硫酸根离子浓度较高; 煤层气井产出水阳离子主要和2号矿顶板灰岩水大致相同, 钙、镁离子均较低; 1号矿顶板灰岩水明显与其他矿灰岩水以及煤层气井排出水不同, 主要体现在钙离子较高, 钠离子和氯离子浓度明显较低。造成这种现象的主要原因是, 1号矿埋深较浅, 导致其水化学成分不同。



注: Qn004为煤层气井产出水; 1—3号矿为顶板灰岩水

图3 15号煤层气井产出水和顶板K₂灰岩水的斯科勒图

Fig.3 Schoeller diagram of K₂ limestone water and output water of No.15 coal seam

15号煤层气井产出水脱硫系数大部分低于0.1, 2号矿和3号矿灰岩顶板水脱硫系数为0.1~10.0, 而1号矿K₂灰岩水的脱硫系数均在2.0以上, 明显高于前两者(图4)。脱硫系数高反映封闭性差, 说明1、2、3号矿的K₂灰岩水、15号煤层气井产出水封闭性依次增强, 这与矿化度反映的规律一致。1号矿K₂灰岩水体封闭性差, 氧化作用较强, 还原作用较弱, 地下水体中以氧化反应和溶解作用为主, 二氧化碳不断溶解, 导致水体酸性增加, 方解石不断被溶蚀, 钙离子浓度增高。

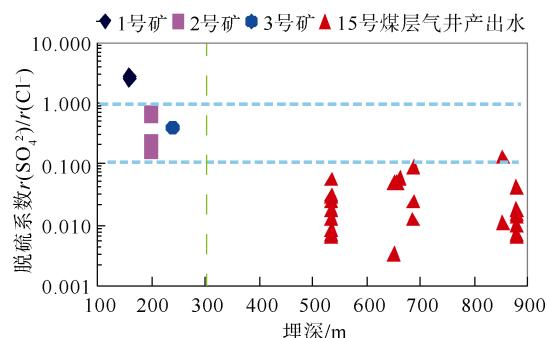
图4 沁水盆地南部15号煤层气井产出水与K₂灰岩水脱硫系数对比

Fig.4 Comparison of desulfurization coefficient between produced water of No.15 coalbed methane well and K₂ limestone water of No.1—No.3 coal mine

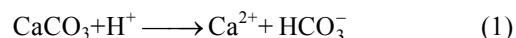
不仅埋深、水体所处环境不同能导致水中离子组成的差异, 同样灰岩水和煤层接触也会导致部分离子浓度发生变化。将2号矿15号煤层样品和K₂灰岩水放到一起(一周时间), 分析混合后水样化学离子浓度发现, 混合水中镁离子浓度明显减小, 由原来的2.69 mol/L降至0.67 mol/L, 混合后硫酸根离子浓度高于K₂灰岩水, 由31.98 mol/L升至38.69 mol/L, 其他离子浓度变化较小, 这说明地下灰岩水在与煤层接触过程中, 会发生离子交换。

3 煤层水文地球化学特征形成机理

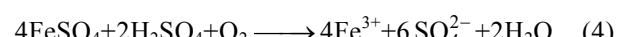
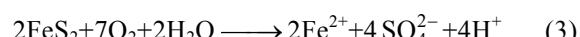
煤层水在地层流动过程中会发生溶滤作用、氧化作用、脱硫酸作用、离子交换作用等。地下水在补给、径流过程中会发生不同的地球化学反应。

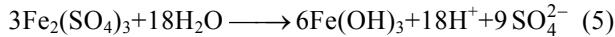
3.1 补给区

大气降水会溶滤盐类和二氧化碳, 二氧化碳溶解后会产生氢离子, 形成HCO₃⁻和CO₃²⁻, 使得补给水pH值降低。随着二氧化碳溶解量的增加, 方解石、白云石等碳酸盐岩类矿物开始溶解, 释放钙、镁离子, pH值升高。反应式为:



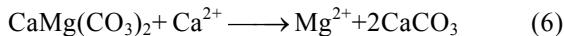
补给区水中氧含量较高, 处于氧化环境, 地下水与煤层中的硫化物(如黄铁矿)发生氧化作用, 使得水中硫酸根离子含量增高, 酸性增加, pH值降低, 继续氧化可形成三价铁的硫酸盐, 最终形成Fe(OH)₃沉淀, 变成SO₄²⁻浓度高的酸性水^[16]。具体的反应式为:





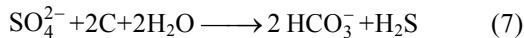
因此, 煤中硫化物被氧化会产生大量氢离子, 加速了碳酸盐岩的溶解过程, 使得水体中硫酸根离子增加。硫化物氧化过程只发生在浅部水溶氧化带, 距气水交汇界面越近, 氧化作用越强。大气降水不断携氧补充含水层, 氧化反应得以持续进行。

石膏类矿物的溶解度大于碳酸盐岩类矿物, 其溶解会发生在任意深度, 水中钙离子的增加, 会促进方解石发生沉淀。具体的反应式为:



3.2 还原环境的径流区

当有机质存在时, 在脱硫酸还原菌作用下, 发生脱硫化作用。其反应式为:



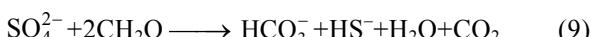
脱硫酸还原菌可在-5~75℃、pH值5~9的条件下生存。根据沁水盆地南部煤层温度资料可知, 15号煤储层温度最高为30.79℃; pH值均在9以下, 完全满足硫酸还原菌的生存条件。因此, 在水径流较弱的还原环境煤层中, 会发生式(7)反应, 导致碳酸氢根离子浓度增大, 硫酸根离子浓度减小。

当水溶甲烷较多时也会与 SO_4^{2-} 发生反应^[17], 反应式为:



尽管目前沁水盆地水溶甲烷量较低, 但在印支期和燕山期区域岩浆热变质阶段, 温度、压力高, 水溶甲烷量多^[18], 很可能发生式(8)反应, 消耗硫酸根离子, 增加碳酸氢根离子。

当煤层埋深较大时, 会发生无机成分(SO_4^{2-})氧化水中有机物的反应^[16], 导致径流区水中硫酸根离子大量减少, 碳酸氢根离子增加。反应式为:



3.3 离子交换作用

矿物颗粒表面常带有电荷, 具有吸附阳离子的能力。在一定条件下, 岩石颗粒将吸附地下水某些阳离子, 将其原来吸附的部分阳离子转入地下水。通常离子价位越高, 被岩石颗粒吸附的可能性越大; 原子半径越大, 吸附能力越强。常见阳离子按吸附能力自大而小顺序为: $\text{H}^+ > \text{Fe}^{3+} > \text{Al}^{3+} > \text{Ba}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mn}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Li}^+$, 钙、镁离子的吸附能力要大于钠离子的吸附能力。另外岩石颗粒越细小, 比表面积越大, 颗粒的吸附能力越强。在漫长的地质时期, 大量钙、镁离子被煤颗粒

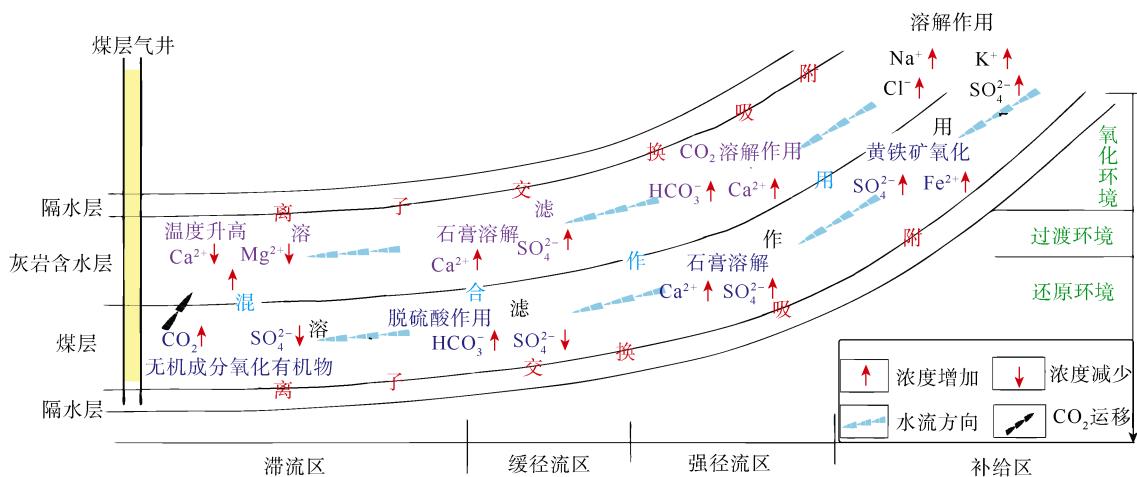
吸附, 置换出的钠离子转移到水中, 导致煤层水中钙、镁离子损耗。

4 15号煤层与顶板灰岩水文地球化学演化

大量数据显示, 沁水盆地南部无论是3号煤层还是15号煤层, 煤层气井产出水总体表现为富碳酸氢根离子和钠离子, 缺少硫酸根、钙和镁离子; 水型以 $\text{Na}-\text{HCO}_3$ 或 $\text{Na}-\text{HCO}_3-\text{Cl}$ 为主^[5,19]。美国6个主要煤层气生产盆地产出水特征, 也有类似结论^[20]。导致这种特征的主要原因有两个方面: 首先, 煤层富含有机质, 在弱径流的还原环境下, 发生了脱硫酸作用, 导致硫酸根离子减少, 碳酸氢根离子浓度增加; 其次, 离子交换吸附作用的发生, 使得吸附能力差的钠、钾离子增加, 钙、镁离子被吸附而减少。

尽管15号煤层与顶板 K_2 灰岩两含水层岩石成分、结构、裂隙发育特点差别很大, 地下水水文地球化学演化过程不尽相同, 由于两层相互接触, 水力联系密切, 水中化学成分相互影响、作用, 最终形成相似的水型。地球化学演化模型如图5所示。模型以单斜形态表示, 地下水流动路径从地表依次分为补给区、强径流区、缓径流区和滞流区。随深度增加, 水体环境发生变化, 从浅到深依次分为氧化环境、过渡环境和还原环境。一般补给区和强径流区为氧化环境, 部分缓径流区为过渡环境, 大部分缓径流区和滞流区为还原环境。不同的水体环境发生的物理变化和化学反应不同。当地下水处于氧化环境时, 由于地表水携带 CO_2 进入, 导致灰岩中碳酸盐岩发生溶解, 使得钙、镁、碳酸氢根离子浓度增加, 水型以 $\text{Ca}-\text{Mg}-\text{HCO}_3-\text{SO}_4$ 型为主; 而煤层中黄铁矿则发生氧化反应, 使得水中硫酸根和铁离子浓度增加, 水型以 $\text{Na}-\text{HCO}_3-\text{SO}_4$ 型为主。随着深度的增加, 温度、压力增高, 水体进入还原环境。此时煤层中会发生脱硫酸作用和无机成分氧化有机物的反应, 如式(7)和式(9)(不需要氧气参加), 导致硫酸根离子大量减少, 碳酸氢根离子增加, 同时生成一定数量的 CO_2 , 此时煤层水以 $\text{Na}-\text{Cl}-\text{HCO}_3$ 或 $\text{Na}-\text{HCO}_3$ 型为主。由于方解石和白云石随温度的升高溶解度降低, 同时氯化物被不断溶解, 导致埋深大、温度高的还原环境下灰岩水中钙、镁离子浓度减少, 钠离子浓度增加, 此时灰岩水一般为 $\text{Na}-\text{Ca}-\text{Cl}-\text{HCO}_3$ 型。

15号煤层水和 K_2 灰岩水相互作用主要体现在3个方面。首先是离子吸附交换。煤层颗粒细小, 具有很强的吸附阳离子的能力, 在两者接触处会不断

图5 沁水盆地南部15号煤层水和顶板K₂灰岩水演化过程模型Fig.5 Evolution model of No.15 coal seam water and K₂ limestone water

发生离子交换，钙、镁离子被吸收，钠、钾离子被置换到水中。其二是混合作用，主要发生在两者接触面和相沟通联系的裂隙中。两种水混合是否产生明显的化学反应，取决于两种水的成分及混合比例。如氧化和过渡环境中煤层水以硫酸根和钠、钾离子为主，而灰岩水以碳酸氢根和钙离子为主，两者混合时会形成石膏沉淀和碳酸氢钠型水。还原环境下两种水发生反应的可能性小，但是灰岩水中硫酸根离子进入煤层时会发生脱硫酸作用，间接导致灰岩水中离子浓度的降低。其三，由于煤层水中无机成分氧化有机物产生的CO₂进入灰岩水中，使得方解石和白云石发生溶解，水中钙、镁、碳酸氢根离子浓度增加。

不管在灰岩还是煤层中的各个环境下，淋滤作用始终发生，只是作用强度有差别。此外，灰岩水、煤层水还与其接触的隔水层发生离子吸附交换，导致钙、镁阳离子含量减少，钠、钾离子增加。在以上各种作用的共同影响下，最终形成了Na-HCO₃或Na-Cl-HCO₃水型。

5 结论

a. K₂灰岩水水型相对复杂，主要有Na-Ca-HCO₃型、Na-Cl-SO₄-HCO₃型、Na-HCO₃-Cl型和Na-HCO₃型4种。结合矿化度、脱硫系数，可以判断出前两种水型是在地层封闭条件差的氧化环境下形成的，后两种则是在封闭条件好的还原环境下形成的。

b. 建立了沁水盆地南部15号煤层和K₂灰岩水演化模型，从机理上分析两者在原始地层条件下相互作用、彼此影响，最终在还原环境下形成以Na-HCO₃为主的水型，但各离子的绝对含量不尽相同。

c. 补给区和强径流区K₂灰岩水水型以Ca-Mg-HCO₃-SO₄型为主，煤层的水型以Na-HCO₃-SO₄型为主；缓径流区K₂灰岩水一般为Na-Ca-Cl-HCO₃型，而煤层水以Na-Cl-HCO₃或Na-HCO₃型为主；滞流区顶板灰岩水和煤层水水型相同，为Na-HCO₃或Na-Cl-HCO₃水型。

请听作者语音介绍创新技术成果
等信息，欢迎与作者进行交流



参考文献(References)

OSID码

- [1] 王红岩, 张建博, 刘洪林, 等. 沁水盆地南部煤层气藏水文地质特征[J]. 煤田地质与勘探, 2001, 29(5): 33-36.
WANG Hongyan, ZHANG Jianbo, LIU Honglin, et al. Hydrogeologic feature of coalbed methane reservoir in the southern Qinshui basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2001, 29(5): 33-36.
- [2] 秦胜飞, 宋岩, 唐修义, 等. 水动力条件对煤层气含量的影响: 煤层气滞留水控气论[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(2): 149-152.
QIN Shengfei, SONG Yan, TANG Xiuyi, et al. The influence on coalbed gas content by hydrodynamics: The stagnant groundwater controlling[J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(2): 149-152.
- [3] 余林. 延川南地区水文地质条件及煤层气成藏[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(2): 69-74.
YU Lin. Groundwater conditions and relative CBM accumulation feature in Yanchuannan area[J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(2): 69-74.
- [4] 刘洪林, 李景明, 王红岩, 等. 水动力对煤层气成藏的差异性研究[J]. 天然气工业, 2006, 26(3): 35-37.
LIU Honglin, LI Jingming, WANG Hongyan, et al. Different effects of hydrodynamic conditions coalbed gas accumulation[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(3): 35-37.

- [5] 李忠城, 唐书恒, 王晓锋, 等. 沁水盆地煤层气井产出水化学特征与产能关系研究[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(3): 424–429.
LI Zhongcheng, TANG Shuheng, WANG Xiaofeng, et al. Relationship between water chemical composition and production of coalbed methane wells, Qinshui basin[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2011, 40(3): 424–429.
- [6] 倪小明, 王延斌, 接铭训, 等. 晋城矿区西部地质构造与煤层气井网布置关系[J]. 煤炭学报, 2007, 32(2): 146–149.
NI Xiaoming, WANG Yanbin, JIE Mingxun, et al. The relations between geological structure in the western Jincheng diggings and coalbed methane wells arrangement[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(2): 146–149.
- [7] 陆小霞, 黄文辉, 唐修义, 等. 沁水盆地南部 15 号煤层顶板灰岩特征对煤层气开采的影响[J]. 现代地质, 2012, 26(3): 518–526.
LU Xiaoxia, HUANG Wenhui, TANG Xiuyi, et al. Impact of limestone of No.15 coal seam roof on the coalbed methane exploitation, southern Qinshui basin[J]. Geoscience, 2012, 26(3): 518–526.
- [8] 陈春琳, 叶贵均. 试论煤储层气–水两相流系统[J]. 煤田地质与勘探, 2003, 31(5): 23–26.
CHEN Chunlin, YE Guijun. Double phase liquid system of gas-water in coal reservoir[J]. Coal Geology & Exploration, 2003, 31(5): 23–26.
- [9] 高向东, 王延斌, 张崇崇, 等. 煤层顶板灰岩特征对煤储层含气量的影响研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(5): 164–169.
GAO Xiangdong, WANG Yanbin, ZHANG Chongchong, et al. Study on impact of limestone features of coal seam roof on gas content of coal reservoir[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(5): 164–169.
- [10] 王勃, 李谨, 张敏. 煤层气成藏地层水化学特征研究[J]. 石油天然气学报, 2007, 29(5): 66–68.
WANG Bo, LI Jin, ZHANG Min. Formation water chemical characteristics of coalbed methane(CBM) reservoir formation[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2007, 29(5): 66–68.
- [11] 徐占杰, 刘钦甫, 宋璞, 等. 寺家庄井田陷落柱对煤层气井产出水地球化学特征的影响[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(2): 50–54.
XU Zhanjie, LIU Qinfu, SONG Pu, et al. Effect on karstic collapse column on hydrogeochemistry of produced water from coalbed methane wells in Sijiazhuang mine field[J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(2): 50–54.
- [12] 方刚, 杨建. 榆横矿区巴拉素井田水文地球化学特征研究[J]. 煤矿安全, 2019, 50(8): 56–62.
FANG Gang, YANG Jian. Research on hydrogeochemical characteristics in Balasu well field of Yuheng mining area[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(8): 56–62.
- [13] 彭龙超, 张雁, 王成绪. 松散层水与煤系地层砂岩水混合效应的水文地球化学研究[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(4): 34–38.
PENG Longchao, ZHANG Yan, WANG Chengxu. Hydrogeochemical research on the mixture effect of groundwater in unconsolidated sediments and groundwater in coal-bearing sandstones[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(4): 34–38.
- [14] 刘超, 冯国瑞, 曾凡桂. 沁水盆地南部潘庄区块废弃矿井煤层气地球化学特征及成因[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(6): 67–72.
LIU Chao, FENG Guorui, ZENG Fangui. Origin and geochemical characteristics of coalbed methane in abandoned coal mines, Panzhuang block, southern Qinshui block[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(6): 67–72.
- [15] 梅洋洋. 沁水盆地南部 15#煤煤层气采排的水文地质控制研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2018.
MEI Yangyang. Study on hydrogeological control of 15# CBM drainage in southern Qinshui basin[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2018.
- [16] 沈照理, 朱宛华, 钟佐燊. 水文地球化学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
SHEN Zhaoli, ZHU Wanhua, ZHONG Zuoshen. Hydrogeochemical basis[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993.
- [17] 蔡春芳, 李宏涛. 沉积盆地热化学硫酸盐还原作用评述[J]. 地球科学进展, 2005, 20(10): 1100–1105.
CAI Chunfang, LI Hongtao. Thermochemical sulfate reduction in sedimentary basins: A review[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(10): 1100–1105.
- [18] 傅雪海, 秦勇, 杨永国, 等. 甲烷在煤层水中溶解度的实验研究[J]. 天然气地球科学, 2004, 15(4): 345–348.
FU Xuehai, QIN Yong, YANG Yongguo, et al. Experimental study of the solubility of methane in coalbed water[J]. Natural Gas Geoscience, 2004, 15(4): 345–348.
- [19] 张晓敏. 沁水盆地南部煤层气产出水化学特征及动力场分析[D]. 焦作: 河南理工大学, 2012.
ZHANG Xiaomin. Chemical characteristics and dynamic field analysis of CBM produced water in the southern Qinshui basin[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2012.
- [20] WAYNE A, VAN V. Geochemical signature of formation waters associated with coalbed methane[J]. AAPG Bulletin, 2003, 87(4): 667–676.

(责任编辑 范章群)