

山西沁水盆地天然气封存箱成藏机理与模式

林玉祥, 吴玉琛, 赵承锦, 朱传真, 李 佳

(山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590)

摘 要:依据沁水盆地现有勘探资料及研究成果,从构造特征、地下水及天然气分布等方面出发,综合分析盆地内天然气封存箱成藏模式。盆地内水动力条件复杂,地层水可依次划分为补水带、强径流带、弱径流带、交替阻滞带及泄水带 5 个区带。根据地下水动力条件与地层水矿化度的关系,并结合地层水矿化度的变化趋势与盆地内地层含气量的展布特征,提出了由煤岩、泥岩等致密岩层组成的顶、底板,形成了在盆地内广泛展布的近同心圆状的“饼状”箱体模式。同时,还进一步分析了盆地内致密砂岩气的成藏机理及封闭机理,发现区内“饼状”箱体可分为上、下两层,上层为 3# 煤层上部山西组致密砂岩段箱体,下层为 3# 煤层与 15# 煤层之间的致密砂岩段箱体。上、下封存箱封存机理虽然不同,但自盆地边缘到盆地内部,再到盆地边缘,“饼状”箱体稳定展布。

关键词:矿化度;封存箱;成藏机理;地层水;水动力条件;“饼状”箱体;致密砂岩气;沁水盆地

中图分类号:P618.130.2

文献标志码:A

Accumulation Mechanism and Model of Natural Gas Compartment in Qinshui Basin of Shanxi, China

LIN Yu-xiang, WU Yu-chen, ZHAO Cheng-jin, ZHU Chuan-zhen, LI Jia

(College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology,
Qingdao 266590, Shandong, China)

Abstract: Based on the existing exploration data and research findings in Qinshui Basin, the accumulation model of natural gas compartment was set up by comprehensive analysis of structure characteristics, formation water composition and natural gas distribution. The hydrodynamic conditions are very complex, and the formation water can be divided into five zones in turn, including water supply zone, strong runoff zone, weak runoff zone, alternating block zone and discharge zone. According to the relationship between hydrodynamic and salinity of formation water, the change rules of formation water salinity and distribution of formation gas content were studied. Then, it is proposed that the roof and floor combined by tight formations (coal, mudstone, etc.) form the model of widely distributed and nearly concentric “discus” box. Meantime, the accumulation mechanism and sealing mechanism of tight sandstone gas in Qinshui Basin were analyzed. It is found that the “discus” box can be divided into the upper and lower layers. The upper layer is tight sandstone of Shanxi Formation above No. 3 coal bed; the lower layer is tight sandstone between No. 3 and No. 15 coal beds. Although the sealing mechanism of upper and lower layers is different, the distribution of “discus” box is stable from the edge to the interior, then to the edge of Qinshui Basin.

收稿日期:2016-07-11

基金项目:国家自然科学基金项目(41172108);国家科技重大专项项目(2016ZX05041005,2016ZX05001003)

作者简介:林玉祥(1963-),男,山东临清人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:sdkdlyx@126.com。

Key words: salinity; compartment; accumulation mechanism; formation water; hydrodynamic condition; “discus” box; tight sandstone gas; Qinshui Basin

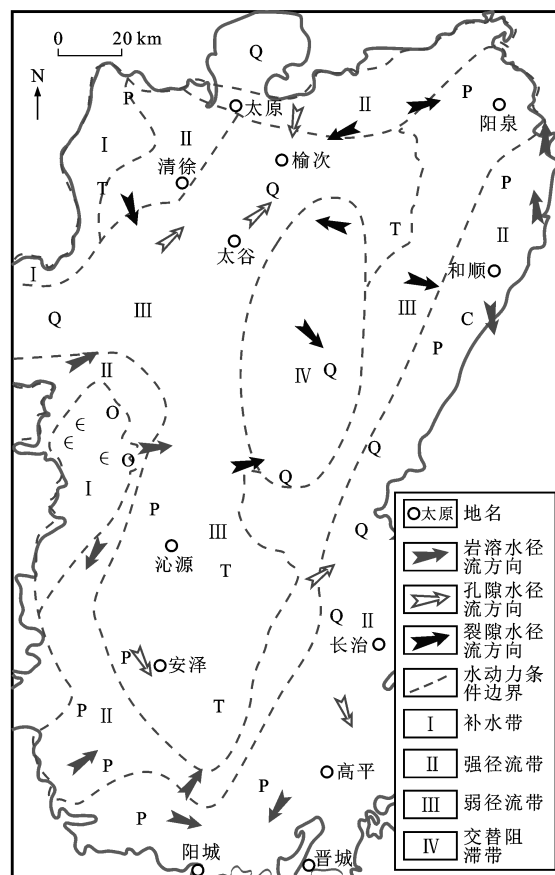
0 引言

沁水盆地位于山西东南部,具有十分丰富的煤与天然气资源,是重要的煤层气富集区^[1]。该盆地总体呈 NNE 向延伸、中间收缩的椭圆形,主要发育 3[#] 煤层及 15[#] 煤层两套主力煤层,同时也是区内主要的天然气烃源岩^[2-4]。池卫国在天然气勘探开发研究过程中发现该盆地内水动力条件复杂^[5]。通过分析地层水矿化度与含气量的变化,结合前人研究成果,梁宏斌等发现地层水矿化度与含气量有密切关系,高矿化度地层水与高含气带的分布范围较为一致^[6-10]。因此,认识到地层水矿化度的突变带是天然气封存箱侧面屏障存在的位置,有助于将封存箱理论由单纯的压力箱体^[11]扩展到地层水矿化度箱体(甚至地层水化学成分箱体),这对于常压盆地封存箱的研究具有重要意义。结合构造条件、气藏成藏条件及地层水矿化度等因素,本文提出了沁水盆地内致密砂岩气的“饼状”箱体成藏模式。

1 研究区地质概况

沁水盆地为一向斜构造盆地,古构造上属于华北地台中带,是在燕山期不断增强的剪切挤压作用下不断隆升扩大的残余型构造盆地^[12]。区内主要含煤地层为山西组和太原组,平均厚度约为 150 m,其主力煤层具有厚度大、分布广、结构简单、发育稳定的特点,既是天然气的源岩,又可作为天然气良好的储层。沁水盆地周边分布有太行山、王屋山、中条山及太岳山等山脉,环绕着出露地表的寒武系、奥陶系高山和高地,西部霍山地区为区域性高势能区^[5]。盆地内平原区较为局限,大部分为上古生界、中生界及新生界构成的低山、丘陵。西部的霍山分水岭是盆地内地下水的主要补给来源,年降雨量为 500~650 mm;而位于东北部的太行山西翼和北部高地是盆地内局部地区的地下水补给区。其次,地表河流尤其是地表切割较深的地区(如断裂带或有陷落柱发育的地区)也是地下水的重要补给来源^[5]。

地下水排泄区位于沁水盆地周缘低地势区。较大的排泄区为岩溶泉区,主要有阳泉地区娘子关泉域、长治地区辛安泉域、阳城地区马山泉域和太原地区晋祠泉域等(图 1)。盆地大部分地区为地下水径流区,径流的强弱主要取决于构造条件以及地层变



图件引自文献[5],有所修改

图 1 山西沁水盆地地下水动力条件及径流方向
Fig. 1 Diagram Showing Hydrodynamic Condition and Runoff Direction of Groundwater in Qinshui Basin of Shanxi

化状况。基于构造盆地的特点,地下水流动的驱动力主要为重力,因此,相对较陡的西部单斜地层径流条件强于向斜轴部平缓区。

区内水文地质条件可从地表水、煤系基底地下水及煤系地下水等 3 个方面进行分析。区内地表河流大部分发育于盆地内部,自西向东流出盆地,地表水既是地下水的排泄通道,也是岩溶地下水的补给来源;作为独立的水文地质单元,区内发育有 6 个相对独立的泉域,不同层位的煤系基底地下水含水层有不同的补、径、排系统,而同一泉域内基底寒武系—奥陶系岩溶含水层则控制着该泉域内不同含水层系统;盆地以沁源—古县—一线南部的小型隆起为界,划分为南、北两套煤系地下水系统,其中北部地下水流向相对简单,而南部则比较复杂。

本文主要研究主力煤层(3[#]、15[#] 煤层)水动力

条件及化学特征。最上部的新生界松散孔隙水及上石盒子组砂岩裂隙含水层分别由于新生界底部的黏土层及下石盒子组多层厚层泥岩的阻隔作用,均不会对山西组 3[#] 煤层产生影响,因此,影响 3[#] 煤层的含水层主要是其上部围岩中的裂隙含水层,该层径流条件不强导致 3[#] 煤层水特征相对稳定。影响 15[#] 煤层水的因素主要是其围岩裂缝中的含水层,其水动力条件也比较稳定;但部分地区奥陶系地层水的水头标高高于 15[#] 煤层的底板标高,除西部外,这种逆向关系越向盆地中部越明显,只是被 15[#] 煤层之下的地层阻隔,但不排除部分地区下部奥灰水会突入到 15[#] 煤层中,从而对煤层水产生影响。

2 封存箱特征

判断封存箱是否存在,可以从以下几点进行分析:①是否存在封隔体;②箱体内是否有天然气成藏;③封存箱的封隔机理是否存在。本文提出沁水

盆地有封存箱存在正是基于以上几点,并从地层水化学条件、含气饱和度变化、测井数据及理论研究等方面综合分析,探讨了沁水盆地封存箱封隔机制以及气藏形成机理。

2.1 砂岩气藏

沁水盆地已发现的天然气主要分布在 3[#] 煤层之上山西组砂岩以及 3[#] 煤层与 15[#] 煤层之间的砂岩。由测井分析可以看出,3[#] 煤层上部以及 3[#] 煤层与 15[#] 煤层之间的砂岩均含气,结合上、下地层岩性,推测该部位存在气藏成藏的封存箱(图 2)。

2.2 封隔体

封隔体是封存箱存在的关键因素。正是由于封隔体的阻隔作用,才使得天然气可以在封存箱箱体中聚集成藏而不会向外逸散。对于封隔体(即封存箱的顶、底板和边板),周兴熙等主要通过分析地层压力异常、岩性封闭性及测井响应异常等来确定封隔体及其所处位置^[13-15]。这主要是针对存在异常压力地区采取的方法,而沁水盆地在漫长的地质历史

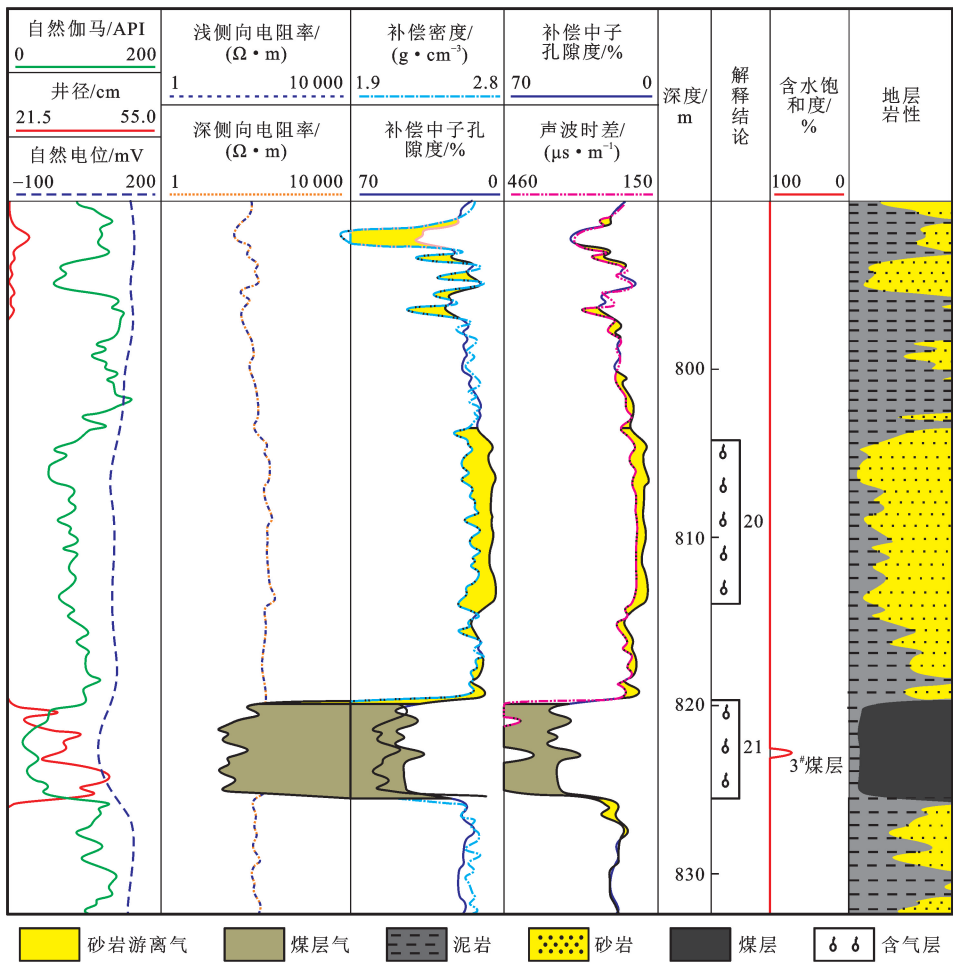


图 2 石炭系—二叠系地层含气测井分析

Fig. 2 Logging Analysis of Carboniferous-Permian Gas-bearing Layers

时期经受了长期的抬升剥蚀作用,盆地内并不存在异常高压,因此,关于异常高压地区封隔体的确定方法在本区并不适用。

针对沁水盆地封隔体,本文以其构造演化、岩性保存条件及水动力条件为基础,主要从地层水矿化度及岩性分析等角度综合研究。对沁水盆地地下水水文地质条件分析可知,太原组、山西组地层受上覆

地层水影响作用较小,水动力条件及水化学成分稳定。根据含水层之间的水力联系,地层水矿化度自上而下分为明显的 3 层(表 1),经历了低矿化度到高矿化度,再到低矿化度的变化;在此过程中,到山西组 3[#] 煤层和太原组 15[#] 煤层时,矿化度达到峰值。地层水矿化度越高,说明地下水运动停滞,天然气溶解度减小,气藏保存条件较好。

表 1 主要含水层特征

Tab. 1 Characteristics of Main Water-bearing Layers

类型	层位	岩性	赋存空间	pH 值	水型	矿化度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	单位涌水量/ ($\text{L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)	渗透系数/ ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	富水性
松散孔隙 含水层	N+O	砂砾岩	孔隙	7.2~7.6	Na_2SO_4	430~600	0.187 0~1.810 0	0.110~39.100	中等
					NaHCO_3				
裂隙 含水层	T	砂岩	裂隙	7.6~9.4	NaHCO_3		1.600 0~2.300 0	0.200~0.710	中等
	C—P	砂岩、页岩	裂隙		NaHCO_3	700~1 100	0.001 0~0.009 1		弱
		上、下主力煤层	割理、裂隙		NaHCO_3	1 600~8 000	0.001 0~0.008 0		弱
裂隙岩溶 含水层	$\text{C}_2\text{—P}_1t$	灰岩	裂隙、孔洞	8.0~9.1	NaHCO_3	800~1 500	0.008 0~0.570 0	0.009~2.610	较弱
	O_2m	灰岩	裂隙、孔洞	7.3~8.6	NaHCO_3 Na_2SO_4	<1 400	0.001 5~16.670 0, 一般大于 2.050 0		强

注: $\text{C}_2\text{—P}_1t$ 为中石炭统一下二叠统太原组; O_2m 为中奥陶统马家沟组;表中数据引自文献[5]。

3[#] 煤层水与 15[#] 煤层水为承压水,对天然气的运移起到了封堵作用。沁水盆地煤系地层石炭系—二叠系为一套独立的承压系统,系统上部二叠系发育的泥岩层段封隔了地层水向下的网络状渗滤,系统下部本溪组稳定发育的泥岩、铝土质泥岩分隔了煤系地层与奥陶系风化壳地层水的沟通^[16]。地层水矿化度分析说明煤系地层水为一独立系统,除部分地区被断层或陷落柱切穿,导致煤系地层水与上部地下水发生水力联系,其余煤系地层水矿化度高于浅层地表水($300\sim 700 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)和深部奥陶系地层水(表 1)。煤系地层含水层砂岩致密、灰岩裂缝不太发育导致含水层含水性、渗透性及可流动性都很弱,为弱径流-交替阻滞区。沁河两岸的钻孔在煤田勘探过程中曾多次发生涌水现象。上述现象都表明本区为承压水封堵型煤层气藏,有利于煤层气的保存^[17]。

由地层含气饱和度变化分析可知,上、下主力煤层部位含气饱和度较高,气藏含量较大,对其上、下地层中天然气箱外运移起到了良好的阻隔作用。因此,上、下主力煤层(即 3[#] 煤层与 15[#] 煤层)可作为良好的封隔体,其间砂岩中的天然气在向外出运移过程中受地层水阻隔及煤岩含气层的抑制作用,从而在砂岩中聚集成藏。而山西组之上,下石盒子组地层因发育多套较厚泥岩,成为较好的盖层,对其下部

3[#] 煤层顶部山西组砂岩中天然气的向上逸散起到极好的阻隔作用。沁水盆地内广泛分布的断层封闭段(如寺头断层等)对砂岩中天然气运移也起到一定的阻隔作用。因此,上、下主力煤层及下石盒子组泥岩段均可作为沁水盆地内封存箱的封隔体。

2.3 箱体成藏机理

由于受沁水盆地整体构造形态的影响,根据区域水动力条件,从盆地边缘到盆地内可将其依次分为补水带、强径流带、弱径流带、交替阻滞带和泄水带^[18]。不同水动力带指示的构造部位不同,对气藏的控制作用也不尽相同。由于受地下水活动影响,不同水动力带地下水化学场变化明显,由强径流带向泄水带,地层水矿化度经历了低→高→低的变化过程,而地层水矿化度的高低与气藏的保存条件密切相关,高矿化度中心与高含气带中心保持一致^[19],所以可从矿化度的变化来推测地层内气藏富集的变化。

沁水盆地内地层水矿化度分析表明(图 3),盆地内地层水矿化度变化明显,由盆地边缘到盆地内部,补水带、强径流带、弱径流带、交替阻滞带及泄水带等从宏观上指示出了地层水矿化度的变化过程,由地层水矿化度高低划分出的不同区带呈同心圆状分布,即“饼状”形态。高的部位(如盆地内部的 QC1 井)矿化度高达 $14\ 387 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,低的部位(如

盆地边缘)矿化度每升只有几百甚至几十毫克。与盆地内 3[#]煤层与 15[#]煤层含气量(图 4)相比,盆地内高矿化度中心与高含气带中心有保持一致的趋势^[7],因此,笔者提出了按地层水矿化度高低呈同心圆状的游离气“饼状”箱体成藏模式。

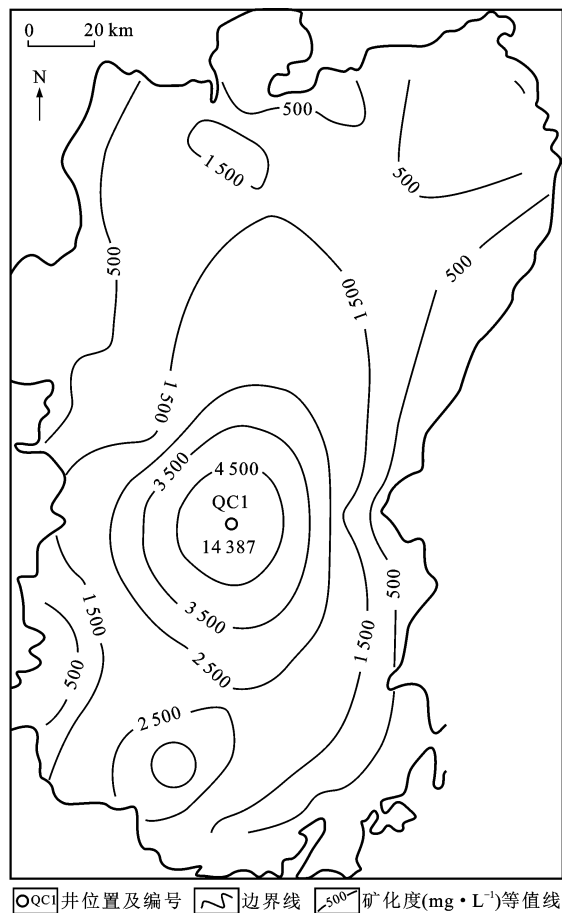


图 3 含煤地层水矿化度等值线

Fig. 3 Contour Map of Salinity of Coal-bearing Formation Water

3 箱体成藏模式

3.1 天然气藏类型

沁水盆地煤岩生气量大,在煤层顶、底板以及区域性的 3[#]煤层和 15[#]煤层之间的其他类型储层中普遍存在天然气,同时煤岩裂缝中的游离气与其顶、底板岩石中游离气有明显的气体交换现象,煤岩中的吸附气与其他类型储层中的游离气之间存在明显的动态平衡关系。

沁水盆地内的天然气主要分为 3 种类型:吸附气、游离气和溶解气。吸附气主要呈吸附态吸附于煤岩表面,游离气以游离态存在于砂岩储层、灰岩储层及煤岩储层中,溶解气则是溶解于地层水中的天然气。3 种状态的天然气关系密切,特别是游离气

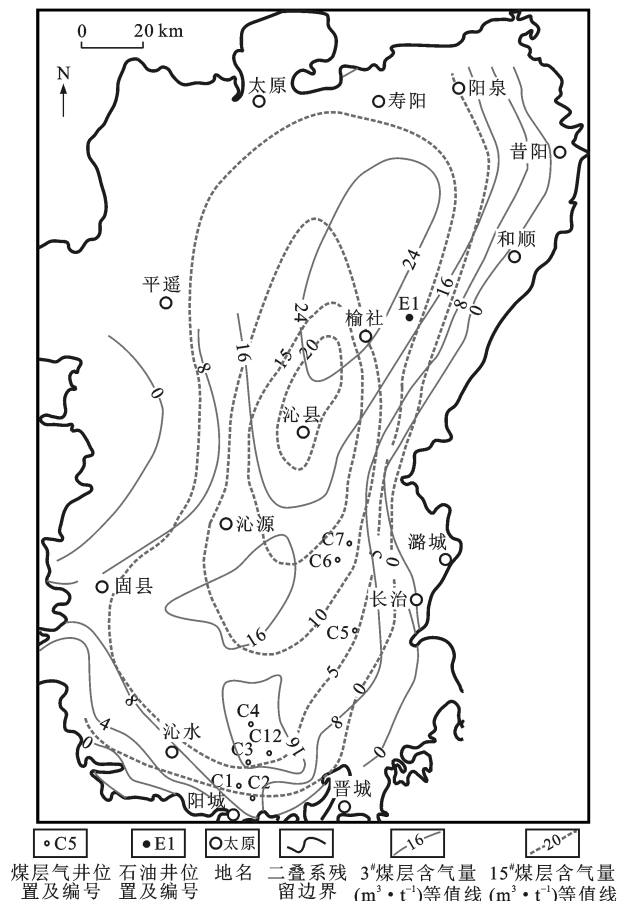


图 4 3[#]煤层和 15[#]煤层含气量等值线

Fig. 4 Contour Map of Gas Content of No. 3 and No. 15 Coal Beds

与吸附气,二者具有同源共生的特点,一定温压条件下二者可以相互转化,处于一个动态平衡系统之中。吸附气主要存在于上、下主力煤层中,游离气一般发育在上、下主力煤层顶、底围岩及二者之间的储层岩石中^[4]。本文主要研究赋存于砂岩中的游离气,即 3[#]煤层上部以及 3[#]煤层与 15[#]煤层之间的砂岩游离气藏。

3.2 砂岩游离气成藏模式

本文所研究的砂岩段主要是指沁水盆地内 3[#]煤层之上山西组砂岩以及 3[#]煤层与 15[#]煤层之间的砂岩段。煤岩、泥岩中产生的天然气经过运移在砂岩中聚集成藏。在盆地内部褶皱断裂未破坏地层,地层水矿化度较高的部位(如弱径流带及交替阻滞带)煤层吸附气与砂岩游离气达到动态平衡阶段,即地下水活动性较弱,溶解气由于地下水矿化度较高而含量较少,构造稳定;在天然气聚集的山西组砂岩段,顶部受下石盒子组砂泥岩封盖作用,底部与 3[#]煤层接触的部位由于煤层中含气饱和度较高,气藏含量较高而起到封闭作用;由于上、下主力煤层气

藏含量较高,3[#]煤层与15[#]煤层之间的致密砂岩段同时有数层灰岩的阻隔而封闭成藏。在盆地边缘,地层水矿化度较低以及地下水活动性较强的部位(如补水带、强径流带及泄水带)通常受断裂褶皱影响,地层落差大或与地表相通,导致地下水及气藏活动性较强,不利于气藏保存。

因此,沁水盆地致密砂岩气的“饼状”箱体可分为上、下两层箱体(图5):一是山西组砂岩段的箱

体,以3[#]煤层为底板,下石盒子组泥岩为顶板,纵向上稳定展布;二是3[#]煤层与15[#]煤层之间砂岩段的箱体,以3[#]煤层为顶板,15[#]煤层为底板。上述两层箱体的封隔机理不同,自盆地边缘到盆地内部,再到盆地边缘,“饼状”箱体稳定展布(图6)。从强交替区→弱交替区→强交替区,地层水矿化度变化呈低→高→低趋势,箱体内致密砂岩气资源量同地层水矿化度变化趋势一致。

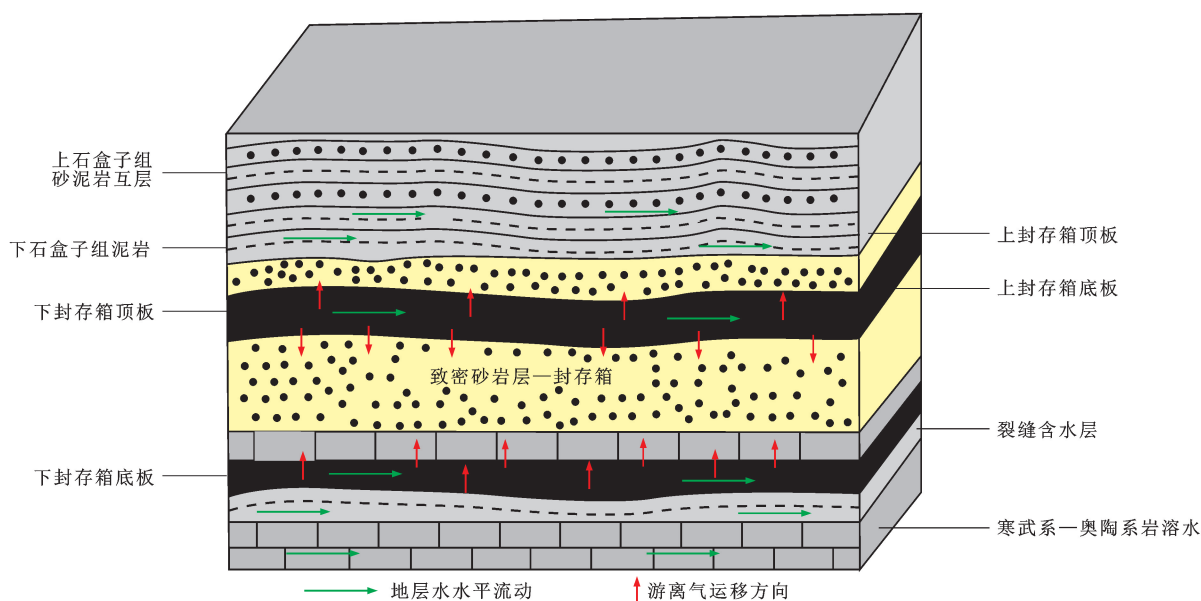


图5 天然气封存箱成藏模式

Fig. 5 Accumulation Model of Natural Gas Compartment

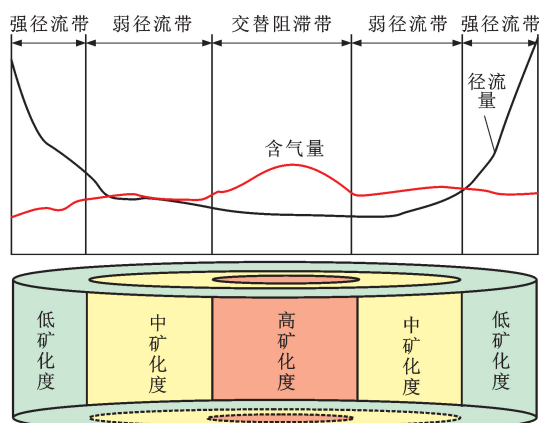


图6 地层水矿化度“饼状”箱体

Fig. 6 “Disc” Box of Formation Water Salinity

4 “饼状”箱体特征及实例

根据地层水矿化度高低所划分的“饼状”箱体有很明显的特征:横向上,自沁水盆地边缘至盆地内部,呈同心圆状的水动力带与地层水矿化度变化趋势基本一致;由地层水矿化度变化所圈限出的“饼状”箱体在盆地大范围内存在大的“饼状”箱体,在小

范围内则存在很多小规模“饼状”箱体;盆地内致密砂岩气成藏呈同心圆状的“饼状”箱体可分为上、下两层,上、下箱体封存机理不同。

以沁水盆地南部郑庄区块为例,由地层水矿化度等值线(图7)可以看出:寺头断层及其附近的一系列小断层地下水活动性较强,所处的部位正是东、西两个“饼状”箱体边缘相接的部位,为低矿化度中心,其中ZS49井实测含气量为 $15.64 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$,ZS32井实测含气量为 $11.74 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$;而左、右“饼状”箱体中矿化度较高部位的ZS58井实测含气量为 $30.04 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$,JS3井实测含气量为 $25.48 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ 。

5 结 语

(1)提出了由地层水矿化度高低所圈限出的呈同心圆状的“饼状”箱体成藏模式。由沁水盆地边缘到盆地内部,根据地下水动力条件,地层水分为补水带、强径流带、弱径流带、交替阻滞带及泄水带5个区带,呈同心圆状展布在盆地内,同时也指示了地层水矿化度的整体变化趋势。地层水矿化度的高低可

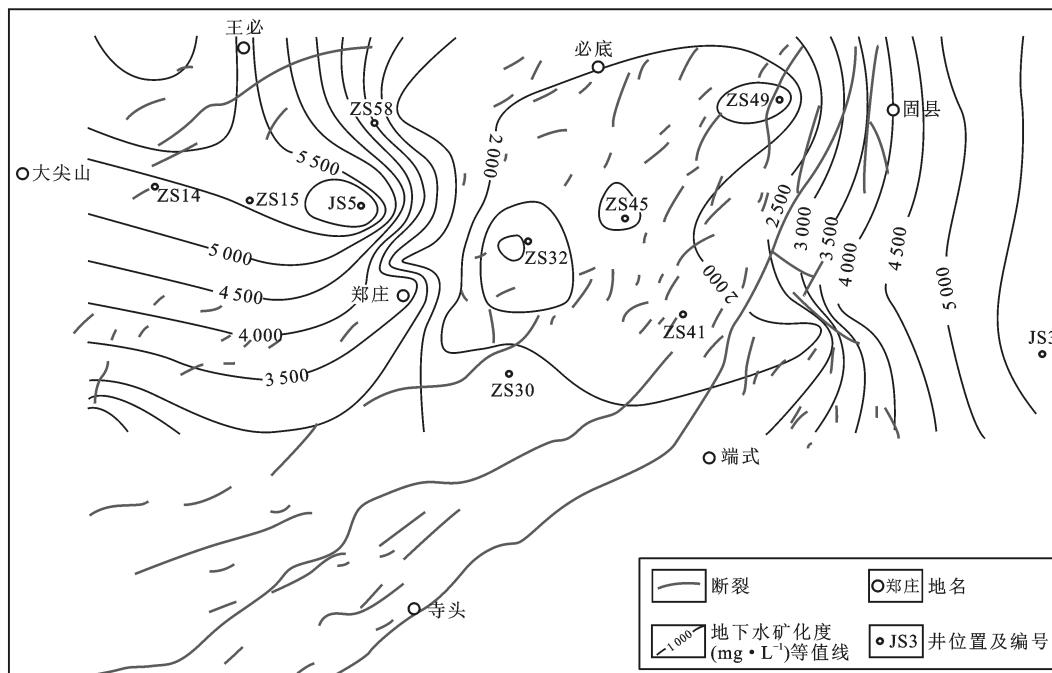


图7 郑庄—樊庄区块地层水矿化度等值线

Fig. 7 Contour Map of Formation Water Salinity in Zhengzhuang-Fanzhuang Block

指示地层内含气量的多少,高矿化度中心与高含气带区域基本一致,由地层水矿化度高低所划分的区带即为呈同心圆状的“饼状”箱体。

(2)综合测井曲线,地层岩性及上、下主力煤层地层水矿化度特征,提出沁水盆地内存在上、下相连的两套封存箱系统:上部以下石盒子组泥岩为顶板,3#煤层为底板,中间致密砂岩为箱体的封存箱;下部以3#煤层为顶板,15#煤层为底板,其间致密砂岩为箱体的封存箱。3#煤层既是上面封存箱的底板,也是下面封存箱的顶板。

(3)沁水盆地内致密砂岩气的“饼状”箱体可分为上、下两个箱体。两个箱体封隔机理不同:上部封存箱顶板为岩性封闭,底板是由3#煤层内较高的天然气含量及其内地层水的阻隔综合作用起封闭作用;而下部封存箱的顶、底板分别为3#煤层和15#煤层,它们对中间致密砂岩中天然气的封隔作用与上部封存箱底板(3#煤层)封存机理相同。

参考文献:

References:

- [1] 李明宅. 沁水盆地煤层气勘探及地质分析[J]. 天然气工业, 2000, 20(4): 24-26.
LI Ming-zhai. Coal-bed Gas Exploration in Qinshui Basin and Its Geological Analysis[J]. Natural Gas Industry, 2000, 20(4): 24-26.
- [2] 梁建设, 王存武, 柳迎红, 等. 沁水盆地致密气成藏条件

与勘探潜力研究[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(10): 1509-1519.

LIANG Jian-she, WANG Cun-wu, LIU Ying-hong, et al. Study on the Tight Gas Accumulation Conditions and Exploration Potential in the Qinshui Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(10): 1509-1519.

- [3] 秦勇, 韦重韬, 张政, 等. 沁水盆地中—南部煤系及其上覆地层游离天然气成藏的地质控制[J]. 地学前缘, 2016, 23(3): 24-35.

QIN Yong, WEI Chong-tao, ZHANG Zheng, et al. Geological Controls of Free Natural Gas Reservoirs in Coal Measures and Overlying Strata in the Central and Southern Qinshui Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(3): 24-35.

- [4] 赵冬, 丁文龙, 刘建军, 等. 沁水盆地煤系天然气系统富集成藏的主控因素分析[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(22): 137-147.

ZHAO Dong, DING Wen-long, LIU Jian-jun, et al. Analyses on Enrichment and Reservoiring Main Controlling Factors of Gas in Coal Measure Qinshui Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(22): 137-147.

- [5] 池卫国. 沁水盆地煤层气的水文地质控制作用[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(3): 15-18.

CHI Wei-guo. Hydro-geological Control on the Coal Bed Methane in Qinshui Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 1998, 25(3): 15-18.

- [6] 梁宏斌, 林玉祥, 钱铮, 等. 沁水盆地南部煤系地层

- 吸附气与游离气共生藏研究[J]. 中国石油勘探, 2011, 16(2): 72-78.
- LIANG Hong-bin, LIN Yu-xiang, QIAN Zheng, et al. Study on Coexistence of Absorbed Gas and Free Gas in Coal Strata South of Qinshui Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2011, 16(2): 72-78.
- [7] 林玉祥, 栾伟娜, 韩继雷, 等. 沁水盆地砂岩游离气成藏主控因素分析[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(10): 1873-1882.
- LIN Yu-xiang, LUAN Wei-na, HAN Ji-lei, et al. Main Controlling Factors on Sandstone Free Gas Accumulation in the Qinshui Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(10): 1873-1882.
- [8] 栾伟娜, 林玉祥, 吴玉琛. 沁水盆地煤岩顶板致密砂岩气充注过程及运移机理研究[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2015, 34(3): 38-44.
- LUAN Wei-na, LIN Yu-xiang, WU Yu-chen. Filling Process and Migration Mechanism of Tight Sandstone Gas on the Coal Rock Roof in Qinshui Basin[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2015, 34(3): 38-44.
- [9] 林玉祥, 韩继雷, 孟 彩, 等. 沁水盆地陷落柱特征及其对气藏的影响[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(4): 44-53.
- LIN Yu-xiang, HAN Ji-lei, MENG Cai, et al. Characteristics of Collapsed Columns in Qinshui Basin and Its Impact on Gas Reservoir[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(4): 44-53.
- [10] 赵 慧, 杨海星, 赵承锦, 等. 沁水盆地郑庄—樊庄区块煤系储层共生藏微观输导体系[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(4): 46-52.
- ZHAO Hui, YANG Hai-xing, ZHAO Cheng-jin, et al. Study on the Micro-transportation System for Symbiotic Accumulation in Coal Seam in Zhengzhuang-Fanzhuang Block of Qinshui Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(4): 46-52.
- [11] 周兴熙. 封存箱辨义及主要类型[J]. 石油实验地质, 2006, 28(5): 424-429.
- ZHOU Xing-xi. Discussion on Meaning and Mostly Type of Compartment[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2006, 28(5): 424-429.
- [12] 陈 刚, 刘林玉. 沁水盆地古生界天然气圈闭条件分析[J]. 西北地质, 1998, 19(4): 34-38.
- CHEN Gang, LIU Lin-yu. Analysis on Trap Conditions of Natural Gas in Qinshui Basin[J]. Northwest-ern Geology, 1998, 19(4): 34-38.
- [13] 周兴熙. 封存箱与油气成藏作用[J]. 地学前缘, 2004, 11(4): 609-616.
- ZHOU Xing-xi. Compartment and Oil-gas Pool Forming Process[J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(4): 609-616.
- [14] 李令喜, 苏玉山. 东濮凹陷深层天然气成藏特征: 超压封存箱结构的作用[J]. 天然气工业, 2004, 24(12): 14-16.
- LI Ling-xi, SU Yu-shan. Reservoir Characteristics of Deep Natural Gas in Dongpu Depression: Effect of Overpressure Compartment[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(12): 14-16.
- [15] 陈中红, 查 明. 东营凹陷流体超压封存箱与油气运聚[J]. 沉积学报, 2006, 24(4): 607-615.
- CHEN Zhong-hong, ZHA Ming. Over-pressured Fluid Compartment and Hydrocarbon Migration and Accumulation in Dongying Depression [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(4): 607-615.
- [16] 李五忠, 王一兵, 崔思华, 等. 沁水盆地南部煤层气田煤层气成藏条件分析[J]. 煤田地质与勘探, 2003, 31(2): 23-26.
- LI Wu-zhong, WANG Yi-bing, CUI Si-hua, et al. Analysis of the Generation Conditions of Coalbed Gas Reservoir, Southern Qinshui Basin [J]. Coal Geology and Exploration, 2003, 31(2): 23-26.
- [17] 高 波, 马玉贞, 陶明信, 等. 煤层气富集高产的主控因素[J]. 沉积学报, 2003, 21(2): 345-349.
- GAO Bo, MA Yu-zhen, TAO Ming-xin, et al. Main Controlling Factors Analysis of Enrichment Condition of Coalbed Methane [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(2): 345-349.
- [18] 王明明, 卢晓霞, 金 惠, 等. 华北石炭—二叠系煤层气富集区水文地质特征[J]. 石油实验地质, 1998, 20(4): 385-393.
- WANG Ming-ming, LU Xiao-xia, JIN Hui, et al. Hydrogeologic Features of Carboniferous-Permian Coal Bed Gas Enriched Areas in North China[J]. Experimental Petroleum Geology, 1998, 20(4): 385-393.
- [19] 雷 群, 李景明, 赵庆波. 煤层气勘探开发理论与实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007.
- LEI Qun, LI Jing-ming, ZHAO Qing-bo. Theory and Practice of Coal Bed Methane Exploration and Development[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007.