

# 南华北盆地周口坳陷二叠系 砂岩储层岩石学特征及成岩作用研究

李莹<sup>1</sup>, 马明永<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580;

2. 山东省煤田地质勘察研究院, 山东 泰安 271000)

**摘要:** 采用沉积学、岩石学与石油地质学等方法, 在野外露头 and 钻井岩心观察与实验基础上, 对南华北地区周口坳陷二叠系进行致密砂岩储层成岩作用研究, 发现太原组胡石砂岩、山西组大占砂岩、下石盒子组砂锅窑砂岩、上石盒子组田家沟砂岩和孙家沟组平顶山砂岩是主要的砂岩储集体。砂岩中石英含量相对较高, 颗粒间局部存在较大孔隙, 部分颗粒因遭受过构造挤压等作用发生形变或破碎。长石含量相对较低, 多为钾长石类。砂岩的填隙物以泥质、硅质、钙质和绿泥石质较为常见。本区岩石遭受的成岩变化主要有压实压溶作用、胶结作用、溶蚀作用及交代作用 4 种。综合分析本区二叠系砂岩储层的各项指标, 认为砂岩普遍处于中成岩阶段 B 期和晚成岩阶段。

**关键词:** 致密砂岩; 储层; 成岩作用; 二叠系; 周口坳陷; 南华北盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

## Petrography and diagenesis of Permian sandstone reservoirs in Zhoukou Depression, Southern North China Basin

Li Ying<sup>1</sup>, Ma Mingyong<sup>2</sup>

(1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China;

2. Shandong Coalfield Geological Planning Institute, Tai'an, Shandong 271000, China)

**Abstract:** The petrography and diagenesis of the Permian tight sandstone reservoirs in the Zhoukou Depression of the Southern North China Basin were studied using sedimentology, petrology and petroleum geology based on field outcrops, drilling cores observations and laboratory experiments. The main contributive sandstone reservoirs include the Hushi sandstones in the Taiyuan Formation, the Dazhan sandstones in the Shanxi Formation, the Shaguoyao sandstones in the Lower Shihezi Formation, the Tianjiagou sandstones in the Upper Shihezi Formation and the Pingdingshan sandstones in the Sunjiagou Formation. In the sandstones, quartz content is relatively higher. There are larger pores among quartz particles. But many pores disappeared and even the particles were broken because of pressure. Feldspar content is lower and most of which is potash one. The interstitial materials are mainly muddy, siliceous, calcareous and chlorite. Four types of diagenesis can be found, which include compaction-pressure solution, cementation, dissolution and metasomatism. Many diagenesis indexes were studied in detail in order to confirm diagenetic stages, which is in the stage B of the middle diagenesis phase or the late diagenesis phase.

**Key words:** tight sandstone; reservoir; diagenesis; Permian; Zhoukou Depression; Southern North China Basin

近年来, 众多学者先后对南华北地区不同盆地、不同构造层构造沉积演化特征<sup>[1-11]</sup>、上古生界成煤地质条件<sup>[12-14]</sup>、上古生界油气地质条件<sup>[15-27]</sup>等进行过研究。在石炭—二叠系地层划分与对比、沉积环境、沉积体系和聚煤作用等诸多方面也取得了丰硕的成果。但近半个世纪以来, 南华北盆地上

古生界油气勘探一直未获得实质性突破<sup>[1]</sup>。南华北盆地石炭—二叠系分布广泛, 由于其所处的独特的大地构造位置决定了其构造、沉积及油气演化的多期性和复杂性, 其油气聚集规律还远未被认识。本文以南华北盆地周口坳陷为主要研究目标, 在野外剖面实测、钻井观察结合室内扫描电镜的基础

收稿日期: 2013-02-02; 修订日期: 2013-10-15。

作者简介: 李莹(1983—), 女, 在读博士生, 从事能源地质研究。E-mail: cuplying@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金“环渤海湾地区晚古生代海侵事件沉积等时性及时限尺度的研究”(41202070)和山东省优秀中青年科学家科研奖励基金计划项目(BS2011SF017)资助。

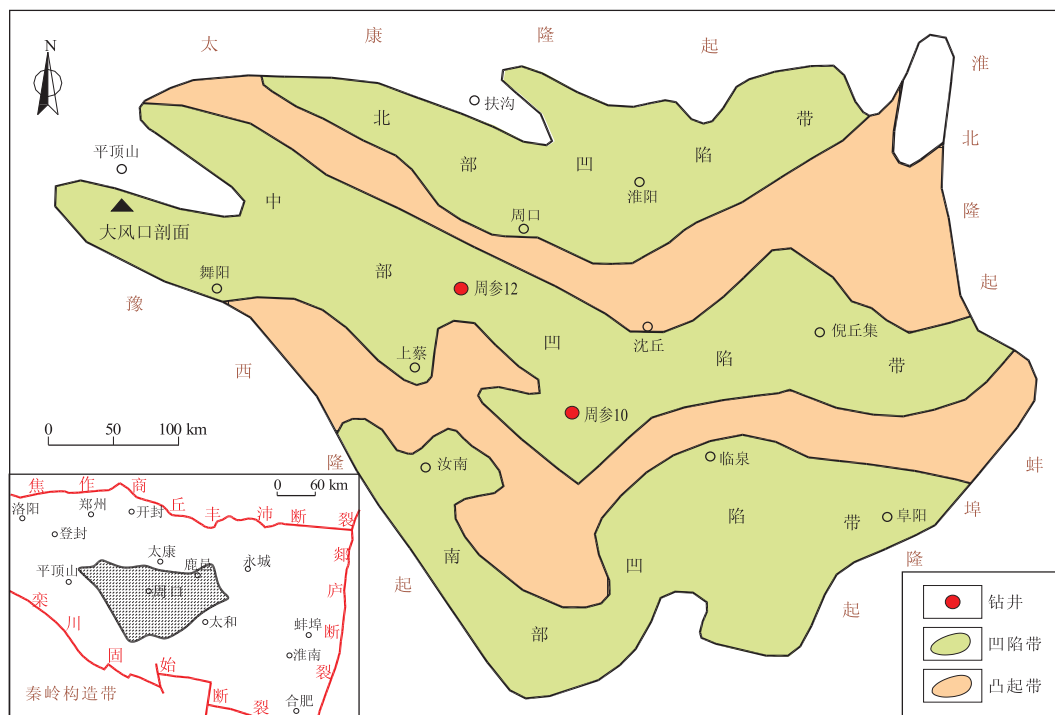


图1 南华北盆地周口坳陷构造区划示意

Fig.1 Tectonic division of Zhoukou Depression, Southern North China Basin

上,对煤系天然气的砂岩储层岩石学特征及成岩作用进行研究,以期对该区油气勘探有所启示。

## 1 研究区概况

南华北地区是指秦岭—大别造山带以北,郟庐断裂带以西,丰沛凸起以南地区,西含豫西隆起区,包括豫西隆起区、周口坳陷、太康隆起、开封坳陷、长山隆起、信阳—合肥坳陷、淮北隆起等7个一级构造单元<sup>[1]</sup>,总面积约  $15 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。周口坳陷位于南华北盆地中部,由华北地块和秦岭构造带基础上发育的大型中、新生代断拗型坳陷(图1)。周口坳陷南为秦岭—大别造山带<sup>[2]</sup>,北为太康隆起,东为淮北隆起和蚌埠隆起,西为豫西隆起,面积约  $3.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ ;内部发育北西西向和北东—北东东向2组规模较大的断裂,划分为16个凹陷(一般以断裂为边界)和2个凸起,平面上构成“三凹二凸”共5个向南呈弧形凸出的构造单元(图1)。

## 2 储层沉积环境

本区石炭—二叠系(除本溪组以外)地层发育有几层主要的砂岩储集层,其岩性岩相特征、分布情况和几何形态直接受沉积环境的控制。不同沉积环境下形成的砂体类型及原始储集性能亦有较明显差别。沉积相是影响储层性质的主要因素,不同沉积微相沉积砂体孔隙度和渗透率也存在一定差异。在

本区石炭、二叠系有利的砂岩储集层基本上属于以下几种沉积相:冲积平原的河流相,三角洲分流河道相,三角洲前缘河口砂坝相,以及滨岸带的障壁岛—海湾相、潮坪砂和潮道砂体等(表1)。

## 3 储层岩石学特征

对平顶山大风口剖面以及钻井的岩心取样发现,砂岩主要是以石英砂岩为主,含少量的长石砂岩、岩屑砂岩。粒度上,在上石盒子组储层中以中砂、粗砂为主,成熟度比较高,绝大部分分选性为中—好<sup>[24]</sup>。分选性好或差与沉积微相、粒度有关,其规律为:粒度粗的砂岩较粒度细的砂岩分选性好;河道充填、三角洲平原砂体砂岩较决口与越岸砂体砂岩分选性好。

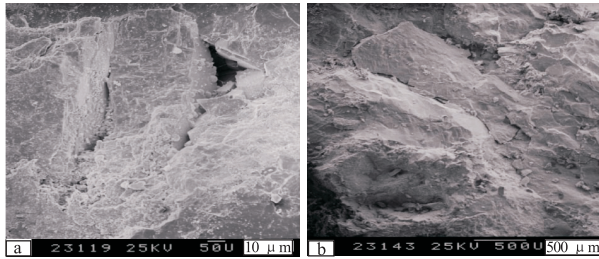
### 3.1 碎屑矿物

(1)石英:本区石英含量相对较高,碎屑石英主要为单晶石英,常见多晶石英,少量燧石。石英+燧石的平均含量在山西组为87%,太原组为75%,下石盒子组为63%,上石盒子组为69%,孙家沟组为49%。单晶石英大部分来自岩浆岩,少量来自沉积岩和变质岩。石英颗粒间有的存在较大孔隙,孔隙间有后期热液作用形成的微小石英晶粒(图2)。有的石英颗粒之间的接触关系较为致密,孔洞很少(图2a)。石英颗粒往往因遭受过构造挤压等刚性应力作用而发生形变或者出现较严重破碎(图2b)。

表 1 南华北盆地周口坳陷大风口剖面及钻井解释的主要砂体沉积环境

Table 1 Sedimentary environment of main sand markers of Dafengkou section and some wells in Zhoukou Depression, Southern North China Basin

岩石地层	主要砂岩名称	厚度/m	沉积构造	沉积环境
孙家沟组	平顶山砂岩		板状交错层理	冲积平原河道
上石盒子组	大风口砂岩	2.80	不明显大型板状交错层理	分流河道
	田家沟砂岩	9.60	双向交错层理和大型板状交错层理	分流河道、河口坝
下石盒子组	柳叶炭砂岩	9.19	大型板状交错层理	分流河道
	红炭砂岩	3.52	大型板状交错层理和小型槽状交错层理	河口坝和分流河道复合砂体
	三、四煤段分界砂岩	5.60	大型板状交错层理	河口砂坝
	老君庙砂岩	2.23	大型板状交错层理	分流河道
	砂锅窑砂岩	5.10	大型板状、楔形交错层理和双向交错层理	河口坝和分流河道复合砂体
山西组	香炭砂岩	2.98	大型板状交错层理	分流河道
	大占砂岩	17.91	大型板状交错层理及少数楔形交错层理	河口坝和分流河道复合砂体
太原组	胡石砂岩	1.00	大型冲洗层理	潮坪—潮道

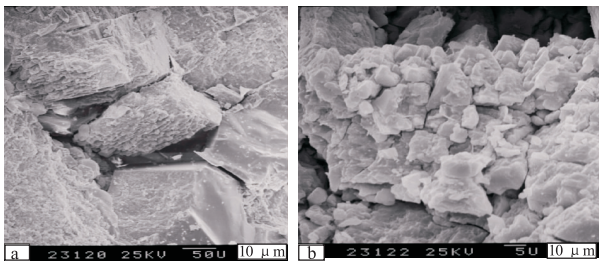


较大的石英颗粒间存在孔隙,有后期热液作用形成的微小石英晶粒(大风口剖面,孙家沟组平顶山砂岩)

粗大的石英颗粒,接触关系致密,孔隙很少,石英颗粒有形变,遭受过构造挤压(周参12井,孙家沟组平顶山砂岩)

图 2 南华北盆地周口坳陷二叠系砂岩石英特征

Fig.2 Characteristics of quartzes in Permian sandstones in Zhoukou Depression, Southern North China Basin



硅质胶结。受到过构造挤压,孔隙内有后期热液作用形成的晶体,长石发生蚀变(大风口剖面,下石盒子组砂锅窑砂岩)

高岭石。长石蚀变严重,主要形成黏土矿物,包括高岭石、伊利石、蒙脱石(大风口剖面,上石盒子组田家沟砂岩)

图 3 南华北盆地周口坳陷二叠系砂岩长石特征

Fig.3 Characteristics of feldspars in Permian sandstones in Zhoukou Depression, Southern North China Basin

(2)长石:本区孙家沟组砂岩中长石含量相对较高,平均为 39%,其余层位含量相对较低:山西组为 3%,太原组为 10%,下石盒子组为 18%,上石盒子组为 3%。所见长石多为钾长石类,如正长石、微斜长石和条纹长石,斜长石主要为来自岩浆岩的中酸性长石。长石常遭受高岭石化、绢云母化和碳酸盐化等次生变化,碳酸盐化强烈的斜长石可全部或大部分发生变化,仅保留长石碎屑的假象。

长石受压实作用的影响,常发生塑性和脆性变形(图 3a),长石往往发生蚀变(图 3b)。

(3)岩屑:太原组岩屑主要包括火山岩岩屑、浅变质岩岩屑及石英岩岩屑,火山岩岩屑含量平均 6%,其他含量平均 3%。山西组岩屑主要包括火山岩岩屑(平均 8%)及浅变质岩岩屑(平均 8%)。下石盒子组岩屑主要包括火山岩岩屑(平均 12%)及浅变质岩岩屑(平均 8%)。上石盒子组岩屑主要包括火山岩岩屑(平均 24%)及变质岩岩屑(平均 3%)。孙家沟组岩屑主要包括火山岩岩屑(平均 6%)及浅变质岩岩屑(平均 7%)。

### 3.2 填隙物成分

研究区砂岩的填隙物胶结类型较为复杂,成分以泥质、硅质、钙质和绿泥质胶结较为常见。硅质胶结在孙家沟组平顶山砂岩段和上石盒子组上部比较常见,往往有后期热液作用形成的微小石英晶簇、石英球(图 4a)。上石盒子组砂岩有部分泥质胶结,以高岭石为主,含少量伊利石(图 4b)。黏土矿物胶结在上石盒子组的砂岩中比较常见,包括高岭石及伊利石,此层位砂岩石英颗粒不致密,表面有蒙脱石等黏土矿物和溶洞(图 4c,d)。除此之外,还有部分钙质胶结,胶结物为方解石,呈连晶状充填孔隙。

## 4 成岩作用及成岩阶段划分

### 4.1 成岩作用类型

本区岩石遭受的成岩变化主要有压实压溶作用、胶结作用、溶蚀作用、交代作用及黏土转化等作用。主要以机械压实作用、胶结作用、溶蚀与交代作用 4 种类型为主。

#### 4.1.1 压实压溶作用

本区的压实作用使原生粒间孔隙度损失率一

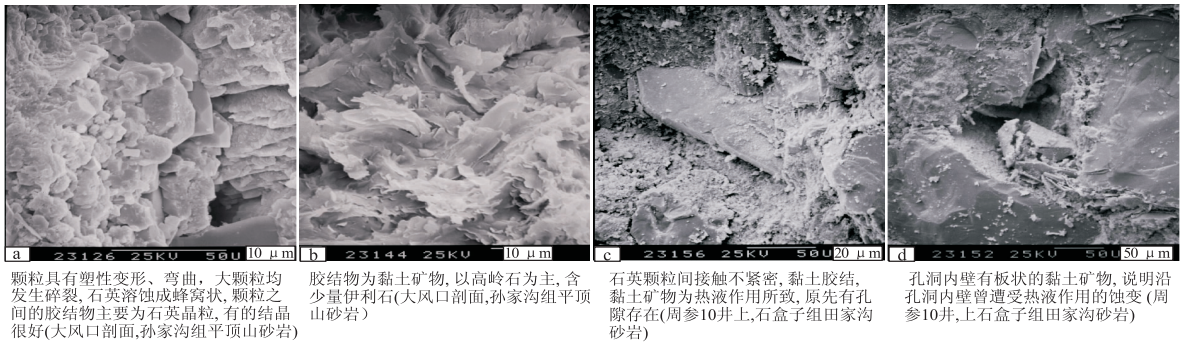


图4 南华北盆地周口坳陷二叠系砂岩填隙物特征

Fig.4 Characteristics of matrixes in Permian sandstones in Zhoukou Depression, Southern North China Basin

一般是60%~70%,孔隙度的损失量一般是25%~30%,保留下来的原生粒间孔隙度一般为8%~13%。局部层段甚至被完全压实,形成无缝、无孔和无胶结物的压实致密层。区内上古生界砂岩总体压实作用较强,受流体改造作用较弱,形成的储层亦主要是低孔、低渗型,孔隙类型属微孔型。不过,区内有些层段的砂岩压实后的原生孔隙度还是很高,可高达30%~40%,主要是因为这些砂岩中早期方解石亮晶胶结物充填特别发育,从而抑制了压实作用,其碎屑颗粒往往呈点式接触甚至呈悬浮状。总体来说,区内上古生界砂岩经历的机械压实作用较强,砂岩原生粒间孔隙大部分已经消失,对砂岩层物性的改造总的来说是起破坏作用的。

#### 4.1.2 胶结作用

上石盒子组砂岩中多见胶结物对碎屑颗粒的交代作用和不同胶结物之间的交代作用。硅质胶结物与碳酸盐胶结物交代碎屑颗粒比较普遍,主要交代石英、长石颗粒。石英颗粒被交代溶蚀呈锯齿状边缘,充填于粒间孔隙中的碳酸盐胶结物沿着碎屑颗粒边缘进行交代,使大部分颗粒交代界限呈现出不同程度的锯齿状、蚕食状或港湾状。特别是对长石和石英颗粒交代作用最为明显,使部分颗粒呈残骸状和幻影状,少数颗粒甚至孤立地漂浮在胶结物之中,还可见隐晶质硅质胶结物及有些石英颗粒次生加大后又被方解石所交代,说明加大边形于碳酸盐交代石英颗粒作用之前。此外,黏土矿物对碎屑颗粒也有交代作用,程度相对于碳酸盐矿物交代作用来说要弱得多,正交偏光下可见黏土物质与被交代颗粒间相互穿插。其中高岭石蚀变交代长石(高岭石化)可提供少量晶间微孔,交代岩屑的碳酸盐矿物也可在成岩晚期发生溶解而提供部分次生孔隙,对储层的形成有建设性作用。

#### 4.1.3 溶蚀与交代作用

溶蚀作用主要发生在长石和岩屑颗粒中,溶蚀

作用使砂岩产生各种溶蚀孔隙,如粒间、粒内及晶间溶蚀孔隙。其中以上下石盒子组砂体溶蚀作用最为强烈,形成次生溶孔发育的孔隙型储层。太原组、山西组砂体长石颗粒的溶蚀作用最为明显,分布也较广泛,主要是沿长石的解理或裂缝发生溶蚀,使长石被溶蚀成蜂窝状或残骸状等不规则状,其溶蚀方式主要为选择性溶蚀和部分溶蚀。石英颗粒边部也常被溶蚀成港湾状,但其溶蚀程度远较长石低。胶结物的溶蚀主要是碳酸盐矿物(方解石、白云石)的溶蚀,对次生孔隙的形成贡献较大。有时胶结物可能部分或全部溶解,但后来又被别的胶结物沉淀,或胶结物再被交代。电镜下可见到颗粒溶蚀孔隙部分被方解石胶结物充填的现象,说明胶结、交代及溶蚀反复作用造成了溶蚀作用不均匀分布的成岩特征。

#### 4.2 成岩作用阶段划分

综合分析周口坳陷二叠系砂岩储层的各项指标,根据压实作用、粒间自生矿物的充填作用和自生矿物对颗粒的交代及溶解作用等各种成岩作用特征,参考泥岩中黏土矿物演化特征和泥岩有机质热演化特征等因素(图5),对研究区二叠系砂岩进行了成岩阶段划分。

(1) 砂岩成熟度较高,经历了较强烈的机械压实作用,原生孔隙多已消失殆尽,经常形成致密砂岩。胶结作用强烈,以泥质胶结为主,其次为钙质和硅质胶结。晚期方解石和白云石的充填和交代作用也很多见。次生溶蚀作用较弱,常出现构造微裂隙和构造裂缝,表明研究区二叠系砂岩成岩作用较强,具中成岩阶段B期和晚成岩阶段的特征。

(2) 砂岩中碳酸盐胶结物主要为方解石、铁方解石、白云石、铁白云石和菱铁矿,除部分方解石以外,以含铁碳酸盐矿物多见,而菱铁矿更是普遍存在且含量相对较高,可以看出其成岩阶段主要为中成岩A期和B期。

成岩阶段		有机质		泥岩		砂岩中自生矿物							溶解作用	孔隙特征	颗粒接触关系		
阶段	期	$R_o$ /%	成熟带	I/S 中 S/%	混层类型分带	高岭石	蒙皂石	伊/蒙混层	伊利石	白云石	铁白云石	方解石				含铁方解石	石英加大
早成岩	A	<0.35	未成熟	>70	蒙皂石带											原生孔隙带	点
	B	<0.5		70~50	无混层带												混合孔隙带
中成岩	A	0.5~0.7	成熟	50~20	有序混层带											次生孔隙带	点—线
	B	1.3~2	高成熟	<15	超序混层带											次生孔隙带	线
晚成岩		2~4.5	过成熟	0	伊利石带											次生孔隙带	线

图 5 南华北盆地周口坳陷二叠系砂岩成岩阶段划分及其主要标志

Fig.5 Classification and principal marks of diagenetic stages of Permian sandstones in Zhoukou Depression, Southern North China Basin

(3) 前人研究发现<sup>[23]</sup>, 区内的倪丘集凹陷  $R_o = 0.62\% \sim 2\%$ , 相当于中成岩阶段 A 及 B 期; 鹿邑凹陷  $R_o = 0.82\% \sim 2.54\%$ , 也属于中成岩阶段, 甚至到了晚成岩阶段; 襄城凹陷  $R_o = 1.07\% \sim 1.24\%$ , 相当于晚成岩阶段 A2 亚期及 B 期; 太康隆起  $R_o = 2.18\% \sim 3.39\%$ , 达到了晚成岩阶段。

(4) 本区伊/蒙混层黏土矿物中蒙脱石层含量在 35%~20% 之间, 属于蒙脱石第二迅速转化带, 相当于中成岩阶段 A 期。

(5) 本区石炭—二叠系地层干酪根最大热解峰温  $T_{max}$  普遍达到了 435 °C 以上, 甚至可高达 560 °C。

(6) 借鉴前人<sup>[19]</sup>对本区流体包裹体均一温度的测量工作结果, 基本集中在 130~170 °C 之间, 尤其是在 140~160 °C, 可以充分证明本区石炭—二叠系砂岩已达到中成岩阶段的 B 期和晚成岩阶段。

综上所述, 该区二叠系致密砂岩普遍处于中成岩阶段 B 期和晚成岩阶段。

## 5 结论

1) 研究区发育太原组的胡石砂岩、山西组的老君庙砂岩、大占砂岩及香炭砂岩、下石盒子组的砂锅窑砂岩、上石盒子组的田家沟砂岩及大风口砂岩和孙家沟组的平顶山砂岩, 其中大占砂岩、砂锅

窑砂岩、田家沟砂岩和平顶山砂岩是区内最主要的致密砂岩储集砂体。以石英砂岩为主, 含少量的长石砂岩、岩屑砂岩。粒度上, 在上石盒子组储层中以中砂、粗砂为主, 成熟度比较高, 绝大部分分选性为中—好。分选性好或差与沉积微相、粒度有关, 其规律为: 粒度粗的砂岩较粒度细的砂岩分选性好; 河道充填, 三角洲平原砂体砂岩较决口与越岸砂体砂岩分选性好。

2) 砂岩中石英含量相对较高, 石英颗粒间有的存在较大孔隙, 但也有的石英颗粒因遭受过构造挤压等刚性应力作用而发生形变或者出现较严重破碎。长石除了孙家沟组砂岩中含量相对较高外, 其余层位含量相对较低, 所见长石多为钾长石类。长石常遭受高岭石化、绢云母化和碳酸盐化等次生变化。长石受压实作用的影响, 常发生塑性和脆性变形, 往往发生蚀变。太原组岩屑主要包括火山岩岩屑、浅变质岩岩屑及石英岩岩屑; 山西组、下石盒子组、孙家沟组岩屑主要包括火山岩岩屑及浅变质岩岩屑; 上石盒子组岩屑主要包括火山岩岩屑及变质岩岩屑。填隙物胶结类型较为复杂, 以泥质、硅质、钙质和绿泥石质较为常见。

3) 岩石遭受的成岩变化主要有压实压溶作用、胶结作用、溶蚀作用及交代作用 4 种。研究区

二叠系致密砂岩普遍处于中成岩阶段 B 期和晚成岩阶段。

参考文献:

[1] 赵重远,刘池洋.华北克拉通沉积盆地形成与演化及其油气赋存[M].西安:西北大学出版社,1990:45-46.

[2] 袁政文,何明喜,宋建华,等.周口残留盆地油气勘探前景分析[J].石油实验地质,2003,25(6):679-685.

[3] 徐汉林,赵宗举,吕福亮,等.南华北地区的构造演化与含油气性[J].大地构造与成矿学,2004,28(4):450-463.

[4] 刘司红,刘西宁,李平和.洛阳—伊川盆地构造演化特征及含油气远景评价[J].地质与资源,2003,12(4):228-232.

[5] 赵宗举,朱琰,徐春华,等.合肥盆地与大别—张八岭造山带的耦合关系[J].地质与资源,2003,25(6):670-678.

[6] 吴根耀,马力,陈焕疆,等.苏皖地块构造演化、苏鲁造山带形成及其耦合的盆地发育[J].大地构造与成矿学,2003,27(4):337-353.

[7] 孙晓猛,张梅生,龙胜祥,等.秦岭—大别造山带北部逆冲推覆构造与合肥盆地、周口坳陷控盆断裂[J].石油与天然气地质,2004,25(2):191-198.

[8] 陈世悦,刘焕杰.华北石炭二叠系层序地层学研究的特点[J].岩相古地理,1994,14(5):11-20.

[9] 孙自明,熊保贤.周口坳陷的逆冲推覆构造特征[J].石油勘探与开发,1999,26(3):22-25.

[10] 周丽.南华北盆地晚石炭世—中二叠世构造沉积演化与烃源岩演化[D].西安:西北大学,2005:6.

[11] 白斌,周立发,刘彬辉,等.南华北上二叠统石千峰组物源与沉积环境分析[J].西北大学学报:自然科学版,2006,36(3):461-466.

[12] 韩树荣,朱彬,齐文凯.淮北地区浅层煤成气的形成条件及资源评价[M].北京:地质出版社,1993:55-70.

[13] 程东,柴东浩,程保洲.华北晚古生代含煤岩系以层序古地理为背景的聚煤特征[J].华北地质矿产杂志,1996,11(4):587-595.

[14] 赵俊峰,刘池洋,刘永涛,等.南华北地区上古生界热演化史恢复[J].石油与天然气地质,2011,32(1):64-74.

[15] 安作相,马纪.华北克拉通分割与华北平原上古生界含气问题[J].油气地质与采收率,2001,8(5):22-26.

[16] 郑礼全,李贤庆,钟宇宁.华北地区上古生代煤系有机质热演化与二次生烃探讨[J].煤田地质与勘探,2002,30(3):21-25.

[17] 祝厚勤,朱煜,尹玲.周口盆地东部(阜阳地区)石炭—二叠系煤成烃勘探潜力研究[J].天然气地球科学,2003,14(5):407-410.

[18] 余和中.华北板块东南缘油气成藏条件分析[D].北京:中国地质大学,2005.

[19] 翟常博,黄泽光,林良彪.南华北盆地中部坳陷结构分析及油气意义[J].石油实验地质,2005,27(4):353-359.

[20] 王宗礼,罗强,赵锋,等.南华北地区鹿邑坳陷石炭—二叠系有利成藏条件分析[J].天然气地球科学,2005,16(2):7-11.

[21] 解东宁,周立发.南华北地区石炭—二叠系煤系生烃潜力与二次生烃探讨[J].煤田地质与勘探,2006,34(1):30-33.

[22] 刘志武,周立发,何明喜.周口坳陷石炭—二叠系油气资源及其成藏条件[J].地球科学与环境学报,2008,30(3):271-276.

[23] 刘志武,周立发,何明喜.周口坳陷石炭—二叠系油气条件与富集控制因素[J].油气地质与采收率,2008,15(5):13-16.

[24] 何争光.周口坳陷上古生界热演化史分析及其油气地质意义[D].西安:西北大学,2009.

[25] 张威,李勇,张自力,等.南华北上古生界砂岩成岩作用及影响[J].断块油气田,2011,18(5):578-581.

[26] 陈新军,胡周全,李淑筠,等.华北南部地区上古生界晚期生烃潜力研究[J].天然气地球科学,2011,22(4):610-617.

[27] 李素,姚旭.周口坳陷北部构造演化及上古生界油气成藏探讨[J].断块油气田,2011,18(5):564-567.

(编辑 徐文明)

(上接第 639 页)

[51] Ohgaki K, Takano K, Sangawa H, et al. Methane exploitation by carbon dioxide from gas hydrates—phase equilibria for CO<sub>2</sub>—CH<sub>4</sub> mixed hydrate system[J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 1996, 29(3):478-483.

[52] Smith D H, Seshadri K, Wilder J W. Assessing the thermodynamics feasibility of the conversion of methane hydrate into carbon dioxide hydrate in porous media[C]//The 1st national conference on carbon sequestration, U.S. Department of Energy, National energy technology laboratory, Morgantown, 2001:1-16.

[53] Uchida T, Takeya S, Ebinuma T. Replacing methane with CO<sub>2</sub> in

clathrate hydrate; observation using Raman Spectroscopy[C]//The 5th international conference on Greenhouse Gas Control Technology, Collingwood, 2001:523-527.

[54] 李遵照,郭绪强,陈光进,等.CO<sub>2</sub> 置换 CH<sub>4</sub> 水合物中 CH<sub>4</sub> 的实验和动力学[J].化工学报,2007,58(5):1197-1203.

[55] 樊燕,刘道平,谢应明,等.用 CO<sub>2</sub> 置换水合物沉积层中 CH<sub>4</sub> 可行性分析[J].天然气地球科学,2007,18(2):317-320.

[56] 罗莎莎,刘宏菊,孙也.CO<sub>2</sub> 置换开采海底天然气水合物的研究进展[J].中国资源综合利用,2008,26(3):19-23.

(编辑 黄娟)