

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.239>



黄骅坳陷上古生界深部煤层气主控因素及成藏模式

李宏军¹, 陈长伟¹, 董晓伟¹, 秦晨焱^{2,3*}, 甘华军^{2,3}, 卢碧娴^{2,3}, 付一鸣^{2,3}

1. 中国石油大港油田公司勘探开发研究院, 天津 300280

2. 中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

3. 中国地质大学(武汉)内蒙古研究院, 内蒙古自治区鄂尔多斯 017000

摘要: 黄骅坳陷构造格局复杂, 上古生界煤层埋深、热演化程度和保存条件空间差异明显, 煤层气富集规律及成藏类型尚不明确, 制约了区域煤层气勘探开发部署。以研究区太原组、山西组主力含煤地层为对象, 综合煤厚展布、煤岩煤质、镜质体反射率(R_o)平面分布、典型井埋藏-热演化史、构造演化及岩浆活动资料, 分析沉积、构造深埋和岩浆作用对煤层气成藏的控制。太原组煤层厚度和横向连续性整体优于山西组, 王官屯-乌马营和孔店-埕海地区为主要聚煤区; 构造深埋作用导致区域性高成熟度及保存条件分异, 多期构造反转则造成气藏调整, 岩浆热事件不仅导致浅埋或构造高部位出现异常高熟, 还能叠加改造深埋煤系。研究区煤层气富集受埋藏增温、构造调整和岩浆热改造共同控制, 可划分为浅埋岩浆作用、构造深埋作用、多期构造反转作用和深埋岩浆作用4类成藏模式。本研究成果可为黄骅坳陷上古生界煤层气有利区优选与勘探潜力评价提供理论支撑。

关键词: 黄骅坳陷; 上古生界; 煤层气; 主控因素; 成藏模式; 构造演化; 岩浆热改造。

中图分类号: TE121

文章编号: 1000-2383(2026)07-2514-14

收稿日期: 2026-07-05

Main Controlling Factors and Accumulation Models of Upper Paleozoic Coalbed Methane in Huanghua Depression

Li Hongjun¹, Chen Changwei¹, Dong Xiaowei¹, Qin Chenyang^{2,3*}, Gan Huajun^{2,3}, Lu Bixian^{2,3}, Fu Yiming^{2,3}

1. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Dagang Oilfield Company, Tianjin 300280, China

2. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, Ministry of Education, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

3. Inner Mongolia Research Institute, China University of Geosciences (Wuhan), Ordos 017000, China

Abstract: The Huanghua Depression is characterized by complex structural units. The Upper Paleozoic coal seams show marked spatial variations in burial depth, thermal maturity, and preservation conditions, and the enrichment patterns and accumulation types of coalbed methane remain unclear. This study integrated coal-thickness distribution, coal petrographic and coal-quality characteristics, plane distribution of vitrinite reflectance (R_o), burial-thermal evolution histories of typical wells, tectonic evolution, and borehole evidence of magmatic rocks to analyze the controls of sedimentation, tectonic deep burial, and magmatism on coalbed methane accumulation. The coal thickness and lateral continuity of the Taiyuan Formation are generally better than those of the Shanxi Formation, and the Wangguantun-Wumaying and Kongdian-Chenghai areas are the main coal-

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(No.42230804); 国家自然科学基金地区项目(No.42262022)。

作者简介: 李宏军(1973—), 男, 高级工程师, 从事潜山石油天然气地质综合研究。ORCID: 0009-0005-6920-9018. E-mail: dg_lihjun1@petrochina.com.cn

* **通讯作者:** 秦晨焱, ORCID: 0009-0003-5574-9705. E-mail: chenyangqin@cug.edu.cn

引用格式: 李宏军, 陈长伟, 董晓伟, 秦晨焱, 甘华军, 卢碧娴, 付一鸣, 2026. 黄骅坳陷上古生界深部煤层气主控因素及成藏模式. 地球科学, 51(7): 2514-2527.

Citation: Li Hongjun, Chen Changwei, Dong Xiaowei, Qin Chenyang, Gan Huajun, Lu Bixian, Fu Yiming, 2026. Main Controlling Factors and Accumulation Models of Upper Paleozoic Coalbed Methane in Huanghua Depression. *Earth Science*, 51(7): 2514-2527.

accumulation zones. Tectonic deep burial resulted in regional high maturity and differentiation of preservation conditions; multi-stage tectonic inversion caused reservoir adjustment; and magmatic thermal events led to abnormally high maturity in shallow-burial areas or structural highs, and could further modify deeply buried coal measures. Coalbed methane enrichment in the study area is jointly controlled by burial heating, tectonic adjustment, and magmatic thermal modification. Four accumulation models are identified: shallow-burial magmatic model, tectonic deep-burial model, multi-stage tectonic inversion model, and deep-burial magmatic model. This study provides a theoretical basis for favorable area selection and exploration potential evaluation of Upper Paleozoic CBM in the Huanghua Depression.

Key words: Huanghua Depression; Upper Paleozoic; coalbed methane; main controlling factor; accumulation model; tectonic evolution; magmatic thermal modification.

华北克拉通晚古生代经历多期海侵-海退旋回,广泛发育石炭-二叠纪海陆交互相含煤建造,为煤系气和煤层气形成提供了重要物质基础(赵国春,2009;翟明国,2019)。渤海湾盆地与鄂尔多斯盆地在中生代以前同属华北克拉通盆地,均发育上古生界煤系地层,但受中生代以来克拉通破坏及新生代裂陷作用影响,渤海湾盆地上古生界残留厚度、埋藏深度、热演化程度和构造保存条件显示出更强的区域差异性(朱炎铭等,2006;李伟等,2009;张津宁等,2019a)。近年来,渤海湾盆地冀中坳陷、济阳坳陷和黄骅坳陷相继发现多个石炭-二叠纪煤系烃源油气藏,证实该套含煤岩系具有较大的深层油气勘探潜力(Liu *et al.*, 2017; 金凤鸣等,2019; 赵长毅等,2019)。

黄骅坳陷位于渤海湾盆地中部,太原组和山西组为主要含煤地层。太原组主要发育障壁海岸-潟湖沉积体系,山西组主要发育三角洲沉积体系,煤层展布和厚度受控于沉积相带,潟湖泥炭坪、潮坪泥炭坪及泛滥平原泥炭坪是主要聚煤环境(常嘉等,2021)。黄骅坳陷大港地区上古生界煤层厚度大,煤系地层气测显示良好,主要聚煤带镜质体反射率 R_o 为0.6%~3.4%,具备煤层气形成与富集的地质基础(龚训等,2022;蒲秀刚等,2024)。

此前,已有研究主要从煤系烃源岩地球化学特征、煤成气生烃演化、潜山油气成藏及深部煤系气富集机理等方面对黄骅坳陷上古生界油气成藏进行了探讨(周立宏等,2017;杨润泽等,2022;王鑫等,2023)。黄骅坳陷上古生界煤系经历了多期埋藏、抬升和再埋藏过程,其热演化历史受中生代构造改造和新生代裂陷沉降共同控制(张津宁等,2019a)。早白垩世初期和古近纪-新近纪中期是煤系有机质热演化和生烃的重要阶段,不同构造单元因埋藏深度、剥蚀强度和后期再埋藏程度的差异,煤系有机质成熟度和生烃强度表现出明显空间分异。与此同时,燕山

期岩浆活动在局部地区叠加改造煤层,造成煤化程度异常增高,影响煤储层孔裂隙结构和煤层气保存条件(徐进军等,2017;张津宁等,2019b)。上述因素共同导致黄骅坳陷上古生界煤系具有较强的非均质性,使煤层气形成、保存和富集过程在不同构造部位表现出明显差异。现有研究多侧重煤系烃源岩评价或煤系气整体成藏过程,对煤层气富集差异及成藏类型的系统认识仍相对不足,制约了对黄骅坳陷上古生界煤层气有利区带评价和成藏规律的认识。

基于此,本文以黄骅坳陷上古生界太原组和山西组煤层为研究对象,综合煤层沉积环境、煤层展布、煤储层物性、埋藏史、构造史和生烃史,分析煤层气成藏的主控因素,建立煤层气成藏模式,以期为黄骅坳陷上古生界煤层气富集规律认识和有利区带评价提供地质依据。

1 区域地质背景

黄骅坳陷位于渤海湾盆地中部,是渤海湾盆地重要的次级构造单元,整体呈北东-南西向展布(严德天,2025)。坳陷西邻沧县隆起,东接埕宁隆起,北部受燕山褶皱带影响,东部与渤中坳陷相邻,区内发育多个凹陷、次凹及凸起构造单元,整体具有“隆凹相间、断裂发育、构造分异明显”的特征(图1)(任建业等,2010;李三忠等,2011)。黄骅坳陷地理上覆盖天津、黄骅、任丘等地区,构造上处于渤海湾盆地中部转换部位,不同构造单元的埋深、剥蚀强度和热演化程度差异明显,为上古生界煤层气差异成藏提供了构造背景(朱炎铭等,2006)。

研究区地层自下而上发育中-新元古界、下古生界、上古生界、中生界和新生界(图1)。其中,上古生界石炭系-二叠系为主要研究层系,含煤地层主要包括石炭系太原组和二叠系山西组。太原组和山西组位于奥陶系碳酸盐岩之上,中生界-新生界陆相碎屑岩之下,是黄骅坳陷上古生界煤层气形

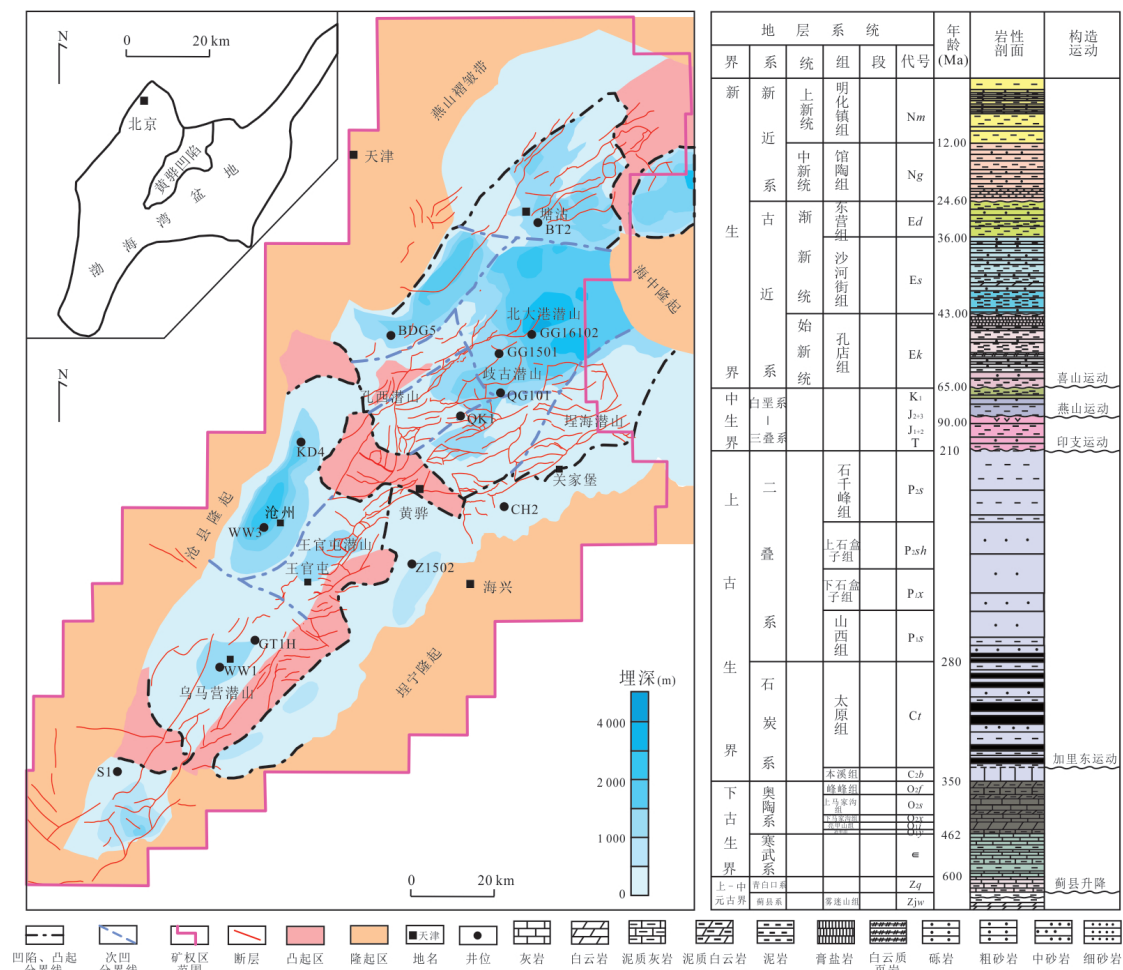


图1 黄骅坳陷构造位置及上古生界地层综合柱状图(据刘海涛等,2026)

Fig.1 Tectonic location of the Huanghua Depression and composite stratigraphic column of the Upper Paleozoic

成与富集的主要目的层(龚训等,2022).该套地层经历了印支期、燕山期和喜山期等多期构造运动改造,既受到埋藏增温和构造深埋控制,也在局部地区受到岩浆热事件影响,导致煤层煤化程度、储层物性和含气性在不同构造部位表现出明显差异(张津宁等,2019c;杨润泽等,2022).

2 煤层特征

2.1 煤层展布特征

黄骅坳陷上古生界煤层主要发育于太原组和山西组,平面展布受晚古生代聚煤环境和后期构造作用共同控制.两套煤层在研究区均发育厚煤层,但展布特征差异明显.山西组厚煤层分布范围更集中,煤厚横向变化更明显,煤层连续性和区域展布规模均相对较弱,太原组煤层厚度和连续性整体优于山西组,表现出更稳定的区域聚煤特征(图2).

山西组煤层累计厚度较太原组小,厚煤层发育

范围相对收缩,整体表现为聚煤中心较为局限、横向变化较强的特征(图2a).山西组发育南、北两个主要聚煤区:南部聚煤中心位于乌马营地区,累计煤厚可达15 m;北部聚煤中心位于埕海及其周缘地区,其中张巨河—关家堡一带累计煤厚可达20 m,表明埕海地区是山西组相对有利的聚煤区.

太原组发育明显的南、北两个聚煤带,累计煤厚普遍超过15 m.除黑龙村—盐山、沧县隆起南段局部地区及北塘一带煤层相对较薄外,研究区大部分地区均表现出煤层较厚的特征(图2b).南部聚煤中心主要位于王官屯—乌马营及其周缘地区,煤层累计厚度最大可达30 m,聚煤作用较强;北部聚煤中心主要分布于孔店和埕海地区,埕海地区累计煤厚可超过20 m,孔店地区累计煤厚约18 m.整体来看,太原组煤层厚度较大、分布范围较广,厚煤层区在南、北两个聚煤带内均较为发育,反映出太原组沉积期聚煤环境相对稳定.

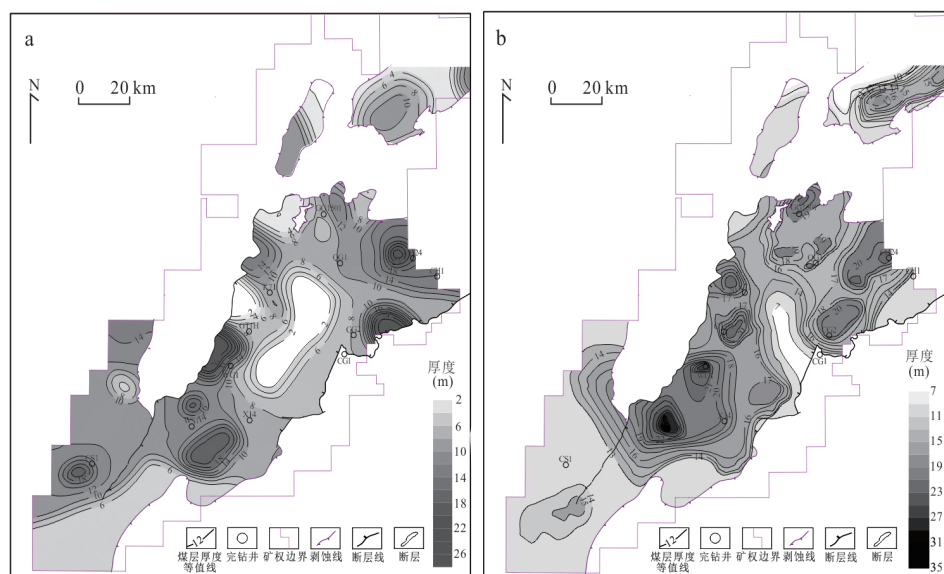


图 2 黄骈拗陷山西组(a)和太原组(b)煤层厚度平面分布图

Fig.2 Plane distribution of coal thickness in the Shanxi (a) and Taiyuan (b) formations of the Huanghua Depression

表 1 黄骈拗陷上古生界煤岩煤质参数特征

Table 1 Characteristics of coal quality parameters of Upper Paleozoic coal rock in Huanghua Depression

层位	样品数	$M_{ad}(\%)$	$V_{ad}(\%)$	$A_{ad}(\%)$	$FC_{ad}(\%)$	镜质组(%)	惰质组(%)	壳质组(%)	$R_o(\%)$
山西组	10	0.58	18.86	17.09	63.47	66.12	26.48	7.39	0.55~3.73
太原组	10	1.05	20.03	21.21	57.71	73.62	18.32	8.06	0.86~1.21

黄骈拗陷上古生界煤层具有明显的层间差异和分区聚煤特征,太原组煤层厚度大、连续性好,南部王官屯-乌马营及北部孔店-埕海地区构成研究区主要厚煤层发育区;山西组煤层累计厚度相对较小,厚煤层主要集中于乌马营和埕海地区,且埕海地区聚煤作用相对更强。

2.2 煤岩煤质特征

黄骈拗陷上古生界山西组煤的工业分析指标 M_{ad} 、 V_{ad} 、 A_{ad} 和 FC_{ad} 平均值分别为 0.58%、18.86%、17.09% 和 63.47%;太原组对应平均值分别为 1.05%、20.03%、21.21% 和 57.71% (表 1),总体具有低水分、中等挥发分和较高固定碳的特征。山西组固定碳含量略高于太原组,太原组灰分和挥发分含量相对较高。研究区 R_o 在 0.55%~3.73% 之间,这主要受埋藏热演化和局部岩浆热事件共同影响,成熟度变化范围较大。

研究区煤有机显微组分以镜质组为主,山西组和太原组镜质组平均含量分别为 66.12% 和

73.62%;惰质组次之,平均含量分别为 26.48% 和 18.32%;壳质组含量较低,平均含量分别为 7.39% 和 8.06%。山西组镜质组含量略低于太原组,而惰质组含量略高于太原组(表 1)。

镜质组主要包括结构镜质体、均质镜质体、基质镜质体和碎屑镜质体(图 3a~3c)。惰质组主要为碎屑惰质体、半丝质体及少量丝质体(图 3d~3f)。壳质组则主要为角质体、树脂体和孢子体(图 3g~3i)。镜质组多呈块状、基质状或碎屑状赋存,惰质组多呈碎屑状或条带状分布,壳质组多呈分散状、条带状或团块状。

2.3 煤储层储集空间特征

煤储层储集空间主要由孔隙和裂隙共同构成,孔隙类型包括黄铁矿铸模孔、溶蚀孔、植物组织原生孔、气孔和粒间孔等,裂隙主要为内生裂隙(图 4)。黄铁矿集合体周缘可见铸模孔和溶蚀孔;植物组织原生孔多呈定向排列;气孔多呈圆形或椭圆形;粒间孔多发育于矿物颗粒或有机质颗粒之

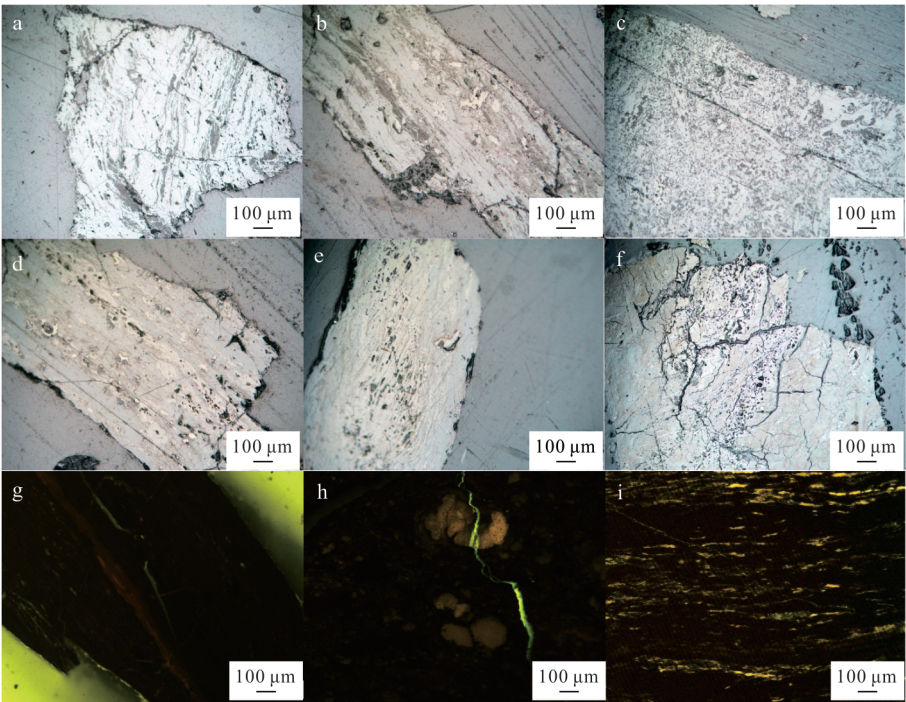


图3 煤中显微组分类型及赋存样式

Fig.3 Maceral types and occurrence patterns of Upper Paleozoic coals in the Huanghua Depression
a.GT1H井,3 642 m,结构镜质体;b.GT1H井,3 650 m,均质镜质体;c.GT1H井,3 710 m,基质镜质体和碎屑镜质体;d.GT1H井,3 642 m,碎屑惰质体;e.GT1H井,3 710 m,碎屑惰质体;f.GT1H井,3 650 m,半丝质体;g.GT1H井,3 642 m,角质体;h.GT1H井,3 710 m,树脂体;i.GT1H井,3 711 m,孢子体

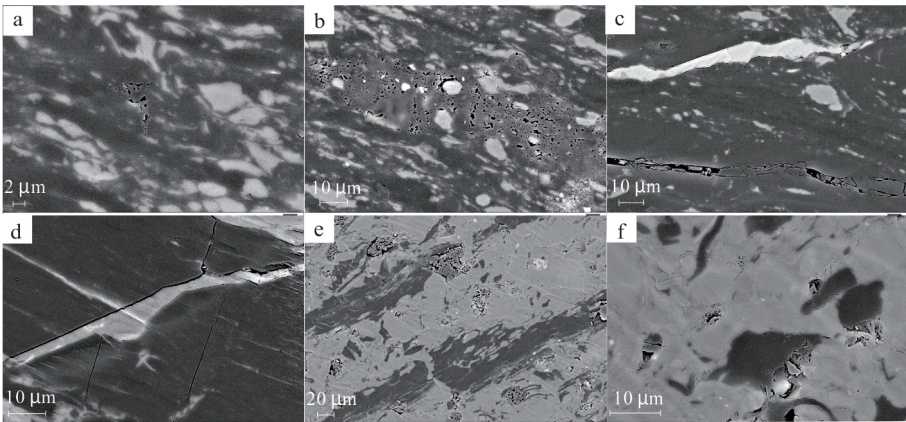


图4 黄骅坳陷上古生界煤储层孔隙结构扫描电镜特征

Fig.4 Scanning electron microscope characteristics of pore-fracture structures in Upper Paleozoic coal reservoirs of the Huanghua Depression

a. 有机质、高岭石黏土及有机质孔隙;b. 有机质、有机质孔隙及孔隙中充填的高岭石黏土、石英等矿物;c. 有机质、有机质孔隙、有机质裂缝及孔隙中充填的高岭石黏土和方解石;d. 有机质、有机质裂缝及裂缝中充填的高岭石黏土;e. 碎屑颗粒、有机质、黏土矿物及微孔缝;f. 碎屑颗粒、黏土矿物、有机质及微孔缝

间. 内生裂隙较为发育,局部可见两组割理斜交或近垂直相交,部分裂隙被矿物充填. 研究区煤储层孔隙类型多样,内生裂隙较发育,共同构成煤层气赋存和运移的储集空间.

山西组和太原组煤样均发育纳米级孔隙,但不

同孔径段的发育特征存在明显差异(表2). 低温 N₂ 吸附结果表明,太原组比表面积、孔体积和平均孔径均高于山西组,说明其介孔及较大孔隙更为发育,孔隙尺度和储集空间更大. 低温 CO₂ 吸附结果显示,两组煤样微孔平均孔径基本一致,

表 2 黄骅拗陷上古生界煤储层孔隙结构						
Table 2 Pore-structure parameters of Upper Paleozoic coal reservoirs in the Huanghua Depression						
层位	低温 N ₂ 吸附			低温 CO ₂ 吸附		
	比表面积 (m ² /g)	孔体积 (cm ³ /g)	平均孔径 (nm)	比表面积 (m ² /g)	孔体积 (cm ³ /g)	平均孔径 (nm)
山西组	2.95	0.016 07	18.77	57.52	0.017 08	0.62
太原组	3.50	0.031 02	42.11	40.20	0.011 72	0.61

但山西组微孔比表面积和孔体积分别较太原组高 43.1% 和 45.7%, 表明其微孔-超微孔更为发育, 可提供更多吸附位点。

3 深部煤层气成藏主控因素

黄骅拗陷上古生界煤层气成藏受沉积、构造-深埋和岩浆作用共同影响。沉积作用控制煤层厚度、平面展布和煤系组合; 构造-深埋作用控制煤层埋深、热演化程度和保存条件; 岩浆作用主要影响局部煤层煤化程度和孔裂隙结构。

3.1 沉积作用

沉积作用主要通过控制聚煤环境、煤层厚度和煤层连续性影响黄骅拗陷上古生界煤层气成藏条件。晚石炭世-早二叠世, 研究区经历由海陆过渡相向陆相三角洲体系转化的沉积演化过程(侯中帅, 2020)。太原组沉积期主要发育障壁海岸-潮坪-潟湖沉积体系, 聚煤环境以潟湖泥炭坪、潮坪泥炭坪和岛后泥炭坪为主; 山西组沉积期海水影响减弱, 沉积体系转化为三角洲体系, 聚煤环境以三角洲平原和泛滥平原泥炭坪为主(图 5)。两类沉积体系中泥炭堆积空间、碎屑物质输入强度和煤层保存条件不同, 导致太原组和山西组煤层厚度及连续性存在明显差异。

太原组障壁海岸-潟湖体系具有相对封闭、低能和水体较稳定的沉积环境, 有利于泥炭持续堆积和厚煤层形成(吴成璞, 2018)。受障壁岛保护的潟湖和潮坪泥炭坪受强水动力改造较弱, 泥炭沼泽保存条件较好, 太原组煤层累计厚度较大, 厚煤层分布范围较广, 形成南、北两个主要聚煤带, 累计煤厚普遍超过 15 m, 除黑龙村-盐山、沧县隆起南段局部地区和北塘地区外, 多数地区煤层较厚(图 2b)。南部王官屯-乌马营及其周缘地区为主要聚煤中心, 煤层累计厚度最大可达 30 m; 北部孔店-埕海地区亦发育厚煤层, 埕海地区累计煤厚可超过 20 m, 孔店地区约 18 m(图 2a)。太原组厚煤层主要受潟湖-潮坪泥炭坪控制, 煤层厚度大、横向连续性较好。

山西组沉积期三角洲体系发育, 聚煤环境主要位于三角洲平原分流河道间、泛滥平原及局部低洼沼泽区(程秋萌, 2017)。三角洲平原环境下陆源碎屑输入增强, 分流河道迁移频繁, 泥炭沼泽更易受到冲刷、分割或砂泥质沉积的稀释, 导致煤层厚度整体减小, 厚煤层分布更局限。山西组煤层累计厚度较太原组明显减小, 厚煤层主要集中于乌马营和埕海两个聚煤区。南部聚煤中心位于乌马营地区, 累计煤厚可达 15 m; 北部聚煤中心位于埕海及其周缘地区, 张巨河-关家堡一带累计煤厚可达 20 m, 埕海地区聚煤作用相对较强。山西组煤层主要受三角洲平原局部低洼泥炭坪控制, 厚煤层呈局部富集特征, 连续性弱于太原组。

太原组和山西组煤层厚度差异与沉积体系转化关系密切。太原组潟湖-潮坪泥炭坪发育范围较广、泥炭堆积较稳定, 因此具有煤厚大、连续性好的平面展布特征; 山西组三角洲平原泥炭坪受河道迁移和碎屑输入影响较强, 导致煤层厚度减小、厚煤中心分散的展布特征。

3.2 构造-深埋作用

黄骅拗陷自侏罗纪-白垩纪以来主要经历了中生代伸展裂陷、晚白垩世构造反转与区域剥蚀、古近纪强裂陷快速沉降以及新近纪-第四纪拗陷期广覆沉降等演化阶段(图 6)。南部和北部构造演化阶段总体一致, 但构造样式和沉降格局存在明显差异(薄尚尚等, 2022)。南部以主控边界断裂控制的半地堑结构为主, 断裂组合相对简单, 沉降中心较集中, 深埋区主要受主断裂及其控制的深洼区控制; 北部断裂更为发育, 多条正断层将地层切割为多个地堑-地垒和断阶单元, 沉降中心呈多洼并列分布, 埋深变化更强。南北差异导致上古生界煤系地层在不同构造部位经历了不同的埋藏、抬升剥蚀和再埋藏过程, 是造成煤层煤化程度和保存条件空间分异的重要构造背景。

埋藏-热演化史能够反映构造部位差异对煤系成熟度的控制(胡洪瑾等, 2018)。乌马营地区

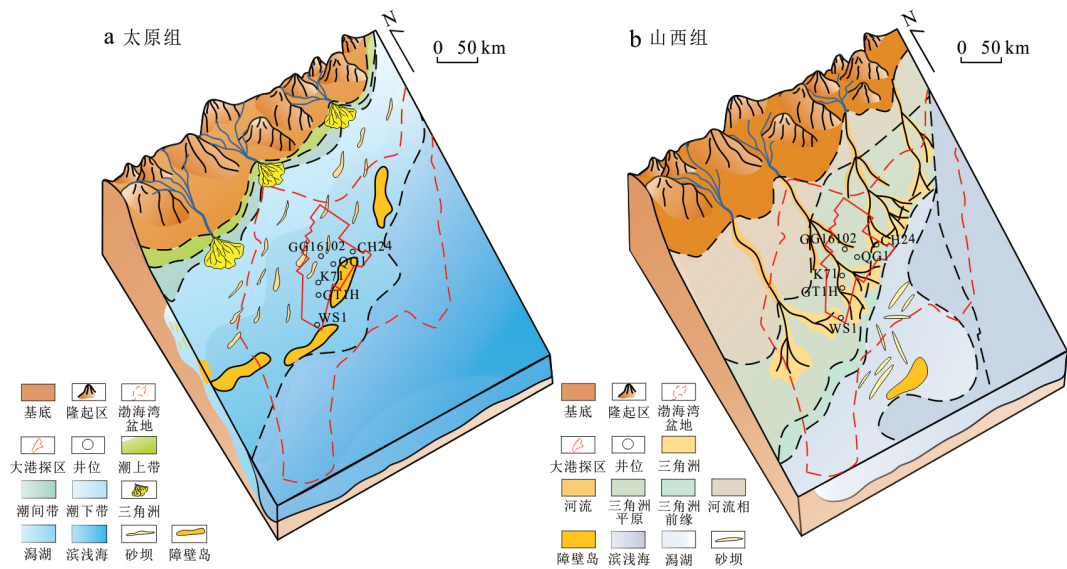


图5 华北地区渤海湾盆地沉积模式
Fig.5 Depositional models of the Bohai Bay Basin, North China

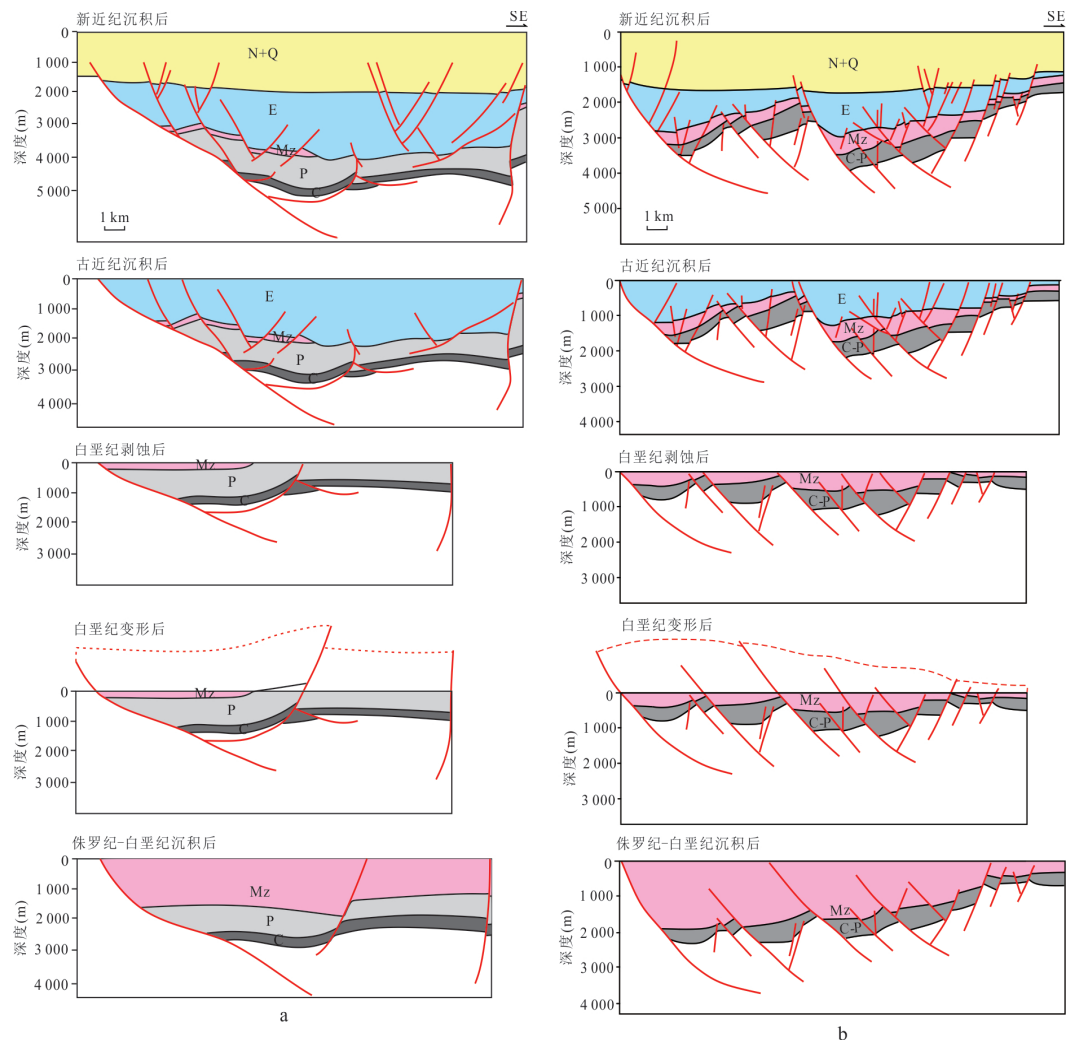


图6 黄骅坳陷构造演化
Fig.6 Tectonic evolution of the Huanghua Depression
a. 黄骅坳陷南部; b. 黄骅坳陷北部

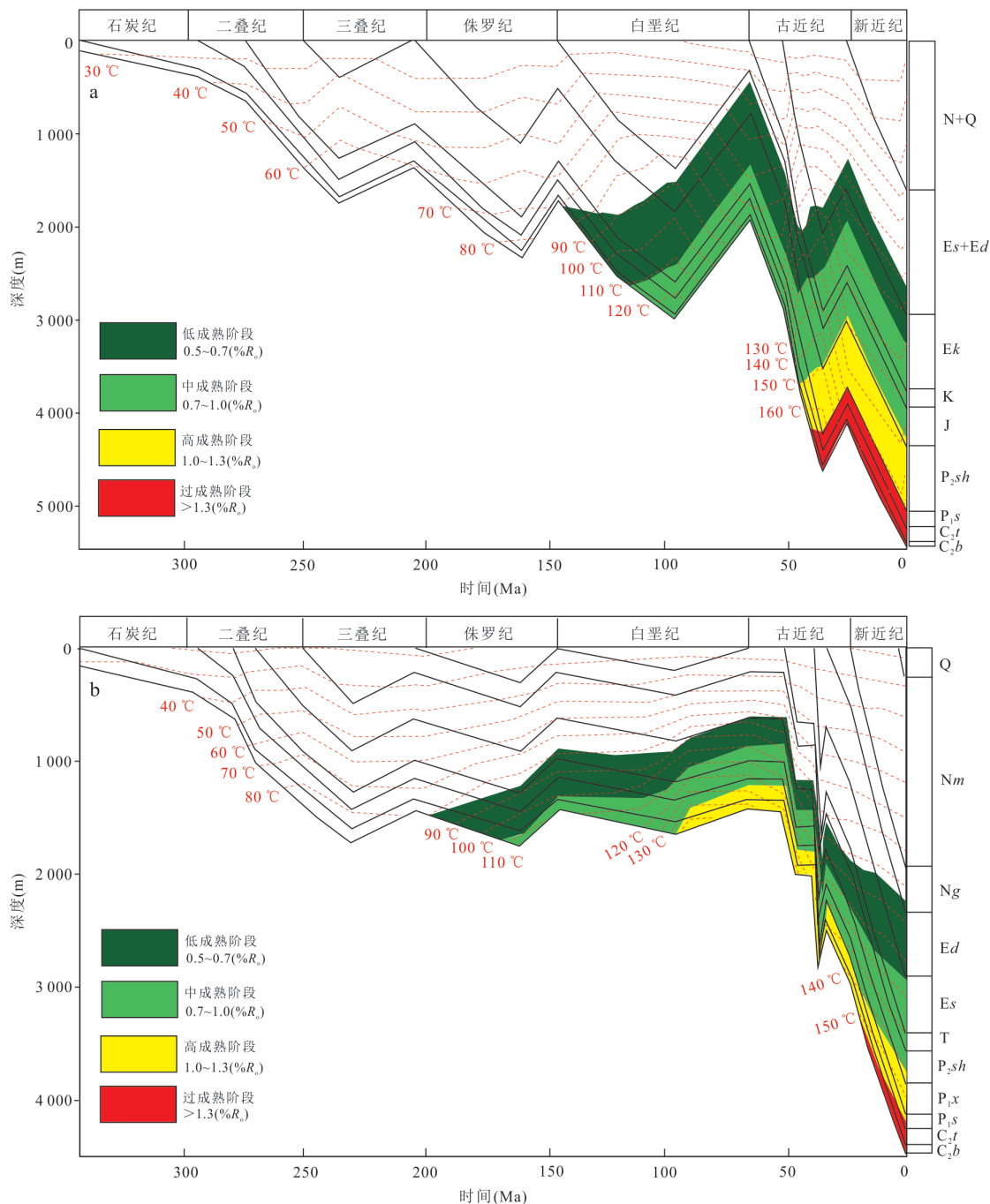


图 7 黄骅拗陷上古生界典型井埋藏-热演化史模拟图

Fig.7 Burial-thermal evolution histories of typical Upper Paleozoic wells in the Huanghua Depression

a. 黄骅拗陷南部 WS1 井; b. 黄骅拗陷北部 HG1 井

WS1 井和埕海地区 HG1 井均经历多期埋藏、抬升剥蚀和再埋藏过程,但二者现今埋深、升温过程和成熟度演化存在差异(图 7).WS1 井代表南部乌马营地区深埋型热演化过程,古近纪以来受快速埋藏增温影响,煤系成熟度明显升高,太原组 R_o 可达 1.3%~1.5%,山西组 R_o 为 1.3%~1.4%,整体进入较高成熟阶段.HG1 井代表北部埕海地区晚期

再埋藏增温过程,早白垩世 R_o 为 0.70%~0.80%,古近纪以来在持续沉降和快速埋藏背景下 R_o 升至 1.0% 以上,进入新的生烃阶段.

研究区成熟度高值区总体与深埋凹陷、潜山及深部构造带具有较好对应关系(图 8).乌马营潜山、沧东凹陷、歧口凹陷、南皮凹陷及盐山浅次凹等地区 R_o 普遍较高,表明构造深埋对煤系热演化具有明

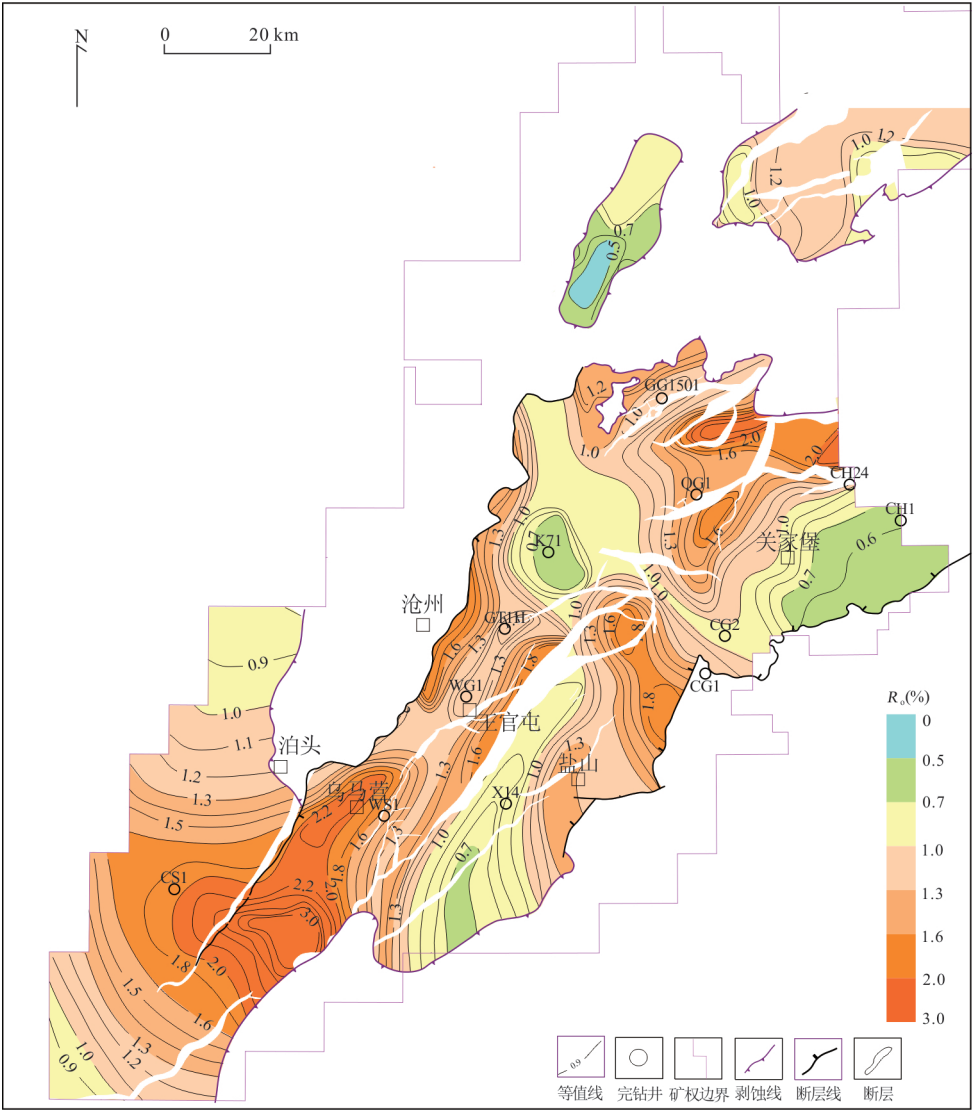


图8 黄骅坳陷大港探区石炭-二叠系 R_o 平面分布图

Fig.8 Plane distribution map of Carboniferous-Permian R_o in Dagang exploration area of Huanghua Depression

显控制作用.南部深埋区相对集中,成熟度高值带多沿主断裂及其控制的深洼区展布;北部断裂分割作用强,洼陷和凸起相间分布,成熟度变化更复杂.成熟度分异说明黄骅坳陷上古生界煤系热演化程度不仅受埋深控制,也受构造分区和断裂分段活动影响.部分 R_o 高值区与现今埋深并不完全对应,局部浅埋或构造高部位仍存在成熟度异常升高,表明除正常埋藏增温外,还存在局部热事件的叠加改造.

构造-深埋作用还影响煤层气保存和储层改造(吴永平等,2002).深埋作用提高煤成熟度,促进煤层气生成,但压实作用也会降低孔隙连通性(刘倩颖等,2017).构造应力可促进内生裂隙发育,为煤层气扩散和局部游离气赋存提供通道.构造活动适中且盖层保存较好的地区,有利于煤层

气保存;断裂切割强烈或抬升剥蚀明显的地区,封闭条件可能遭受破坏,煤层气保存条件变差.

3.3 岩浆作用

岩浆作用是研究区局部煤系成熟度异常升高的重要叠加因素(吴传荣,1992).与正常埋藏增温相比,岩浆热事件具有作用时间短、热强度高和影响范围局限的特点,可通过接触热效应和热液活动提高邻近煤系地层温度,使煤热演化程度在局部范围内明显升高(张津宁等,2019c).

R_o -埋深关系表明,研究区煤系成熟度并非完全随埋深增加而单调升高(图9).部分样品在相对较浅或中等埋深条件下具有较高 R_o 值,明显偏离正常埋藏热演化趋势,说明除埋藏增温外,还存在其他热源影响.沧县隆起南部CS1并在2 600 m以深钻遇厚

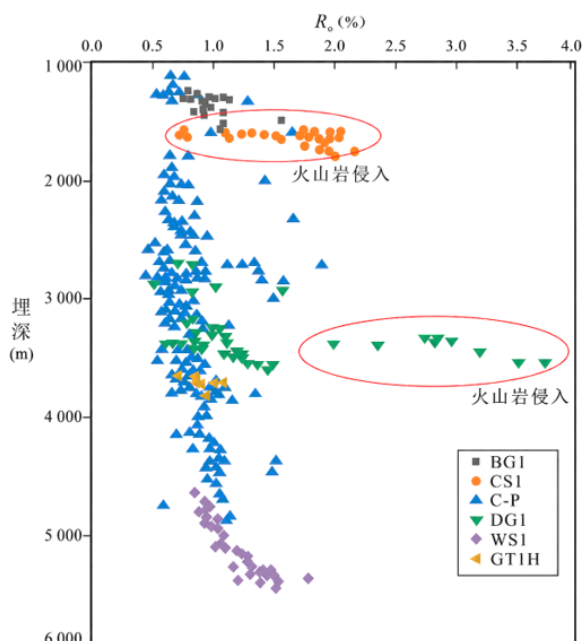


图9 黄骅坳陷上古生界煤系 R_o 与埋深关系

Fig.9 Relationship between vitrinite reflectance and burial depth of Upper Paleozoic coal-bearing strata in the Huanghua Depression

层火成岩,表明研究区局部存在较强岩浆活动,岩浆热事件可能是造成成熟度异常升高的重要原因。

研究区 R_o 高值区总体受构造深埋控制,但局部高值区与现今埋深并不完全对应(图9)。尤其在部分构造高部位或相对浅埋区,仍出现成熟度偏高现象,说明研究区成熟度分布不仅受构造-深埋作用控制,也受到局部岩浆热事件的叠加改造。 R_o 与埋深关系中的异常高值和 R_o 分布中的局部高值区相互印证,共同反映了岩浆作用对煤系热演化的局部改造。

岩浆作用对煤层气成藏的影响主要体现在增熟生气和储层改造两个方面(于志金等,2024)。对于正常埋藏条件下成熟度不足的浅埋区或构造高部位,岩浆热事件可补偿埋藏增温不足,使煤层局部达到较高成熟阶段;对于已经处于深埋背景的煤系地层,岩浆热作用则可能在正常埋藏增温基础上进一步提高热演化程度。与此同时,热作用可促进煤基质收缩及微裂隙形成,有利于局部储集空间发育;但与岩浆活动有关的热液过程也可能造成矿物充填,使部分孔裂隙连通性降低(He *et al.*, 2023)。煤储层储集空间特征中可见矿物充填裂隙及矿物相关孔隙类型,说明后期流体活动对煤储层孔裂隙系统具有一定改造作用。

4 深部煤层气成藏模式

在煤层展布、煤岩煤质、储集空间及主控因素分析基础上,结合研究区不同构造部位的埋深、成熟度、岩浆活动和保存条件,将黄骅坳陷上古生界煤层气成藏归纳为浅埋岩浆作用型、构造深埋作用型、多期构造反转作用型和深埋岩浆作用型四类模式(图10a~10d)。

4.1 浅埋岩浆作用型成藏模式

浅埋岩浆作用型主要发育于沧县隆起南部等浅埋构造部位(图10a),上古生界煤系埋深相对较浅,构造改造较弱,正常埋藏增温对煤岩成熟度的贡献有限。 R_o -埋深关系表明,部分浅埋或中等埋深样品具有较高 R_o 值,偏离正常埋藏热演化趋势;CS1井在沧县隆起南部2600 m以深钻遇厚层火成岩,说明局部岩浆热事件对煤系成熟度具有叠加改造作用。

该模式的典型特征为“浅埋、弱构造改造、岩浆增熟、吸附气为主”。岩浆热事件可补偿浅埋区埋藏增温不足,使煤层局部达到较高成熟阶段;但由于埋深相对较浅,地层压力较低,游离气保存条件有限,煤层气主要以吸附态赋存。

4.2 构造深埋作用型成藏模式

构造深埋作用型主要发育于乌马营-王官屯等深埋构造部位(图10b),位于太原组重要厚煤层发育区,煤层累计厚度大、连续性较好(图2)。多期构造沉降和深埋作用使煤系长期处于较高温高压条件下,煤成熟度较高,具备较强生气能力。

该模式的典型特征为“深埋、高成熟、孔裂隙共同发育、吸附气与游离气并存”。深埋增温促进煤层气生成,压实作用有利于吸附气保存;多期构造应力可促进内生裂隙发育,为游离气赋存和运移提供通道。若构造活动适中、盖层保存较好,则有利于煤层气富集;若断裂切割强烈,则保存条件变差。

4.3 多期构造反转作用型成藏模式

多期构造反转作用型主要发育于经历明显构造反转和后期调整的中部构造带(图10c),早期深埋阶段为煤系热演化和煤层气生成提供条件,后期构造反转使原深埋部位发生抬升、转折或局部成背斜化,煤层气成藏过程表现出明显调整性。

该模式的典型特征为“深埋生气、反转调整、侧翼保存、局部富集”。构造高部位若断裂发育强烈,煤层气易散失;背斜侧翼或断裂影响较弱部位,若盖层保存较好,则有利于煤层气富

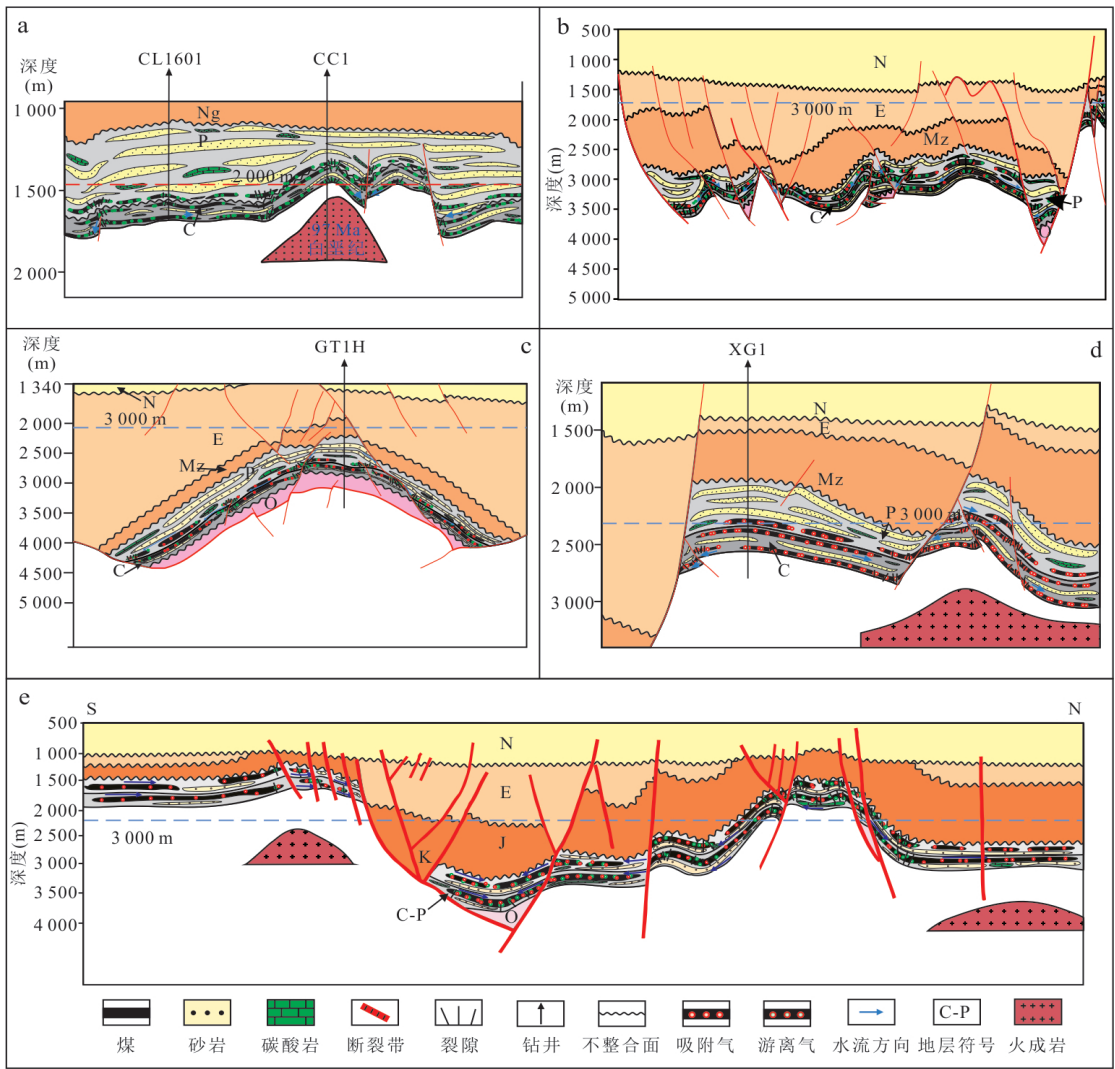


图 10 黄骅坳陷上古生界煤层气成藏模式图

Fig.10 Coalbed methane accumulation models of the Upper Paleozoic in the Huanghua Depression
a. 浅埋岩浆作用型; b. 构造深埋作用型; c. 多期构造反转作用型; d. 深埋岩浆作用型; e. 综合成藏模式

集. 该模式中煤层气既可在煤层内部就近赋存, 也可沿裂隙或断裂发生短距离运移.

4.4 深埋岩浆作用型成藏模式

深埋岩浆作用型主要发育于徐黑潜山带等深埋且受岩浆活动影响的地区(图 10d), 煤系经历多期深埋, 正常埋藏增温已促进煤成熟; 叠加岩浆热事件, 进一步提高热演化程度. R_o 平面分布和 R_o -埋深关系表明, 研究区存在成熟度与现今埋深不完全对应的异常高值区(图 8、图 9), 为识别深埋背景下的岩浆热改造提供了依据.

该模式的典型特征为“深埋、岩浆增熟、构造改造较弱、吸附气与游离气共存”. 深埋条件有利于地层压力维持和游离气保存, 岩浆热事件进一步增强煤成熟度和生气强度; 若后期构造破坏较

弱, 则有利于气体保存. 与构造深埋作用型相比, 该模式中游离气赋存更多受温压条件和岩浆热改造影响, 而不是单纯受断裂输导作用控制.

综上, 在 4 类单一成藏模式基础上, 进一步提出黄骅坳陷上古生界煤层气综合成藏模式, 展示了不同成藏类型在南北向构造格局中的空间配置关系(图 10e). 浅埋构造部位在岩浆热事件叠加下形成浅埋岩浆作用型; 深洼及潜山深埋部位以构造深埋作用型为主; 构造反转带经历早期生气和后期调整, 形成多期构造反转作用型; 深埋且受岩浆热改造影响的部位则发育深埋岩浆作用型. 整体上, 研究区煤层气成藏表现为埋深、构造调整和岩浆作用共同控制下的分区成藏与差异富集.

5 结论

(1)黄骅坳陷上古生界煤层主要发育于太原组和山西组,煤层展布具有明显的层系差异和分区聚煤特征.太原组主要受障壁海岸-潟湖-潮坪聚煤环境控制,煤层厚度大、连续性较好,南部王官屯-乌马营及北部孔店-埕海地区为主要厚煤层发育区;山西组受三角洲平原及泛滥平原泥炭坪控制,煤层累计厚度相对较小,厚煤层主要集中于乌马营和埕海地区.

(2)研究区煤岩有机显微组分以镜质组为主,煤储层储集空间由孔隙和裂隙共同构成.山西组低温 N_2 吸附和低温 CO_2 吸附比表面积相对较高,储集空间优势主要体现在微孔和小孔径纳米孔提供的吸附位点;太原组低温 N_2 吸附孔体积和平均孔径较大,介孔及较大孔径孔隙对孔体积的贡献更突出.两套煤层均具备煤层气赋存基础,但储集空间结构存在差异.

(3)黄骅坳陷上古生界煤层气成藏主要受沉积、构造-深埋和岩浆作用共同控制.沉积作用决定厚煤层发育位置和煤层连续性;构造-深埋作用控制煤系埋深、成熟度和保存条件,深埋凹陷、潜山及深部构造带通常对应较高成熟度区;岩浆作用主要表现为局部叠加改造,可造成浅埋或构造高部位煤系成熟度异常升高,并对孔裂隙结构产生改造作用.

(4)根据埋深、成熟度、构造改造、岩浆活动和保存条件差异,研究区可划分为四类煤层气成藏模式:浅埋岩浆作用型以浅埋、弱构造改造、岩浆增熟和吸附气赋存为特征;构造深埋作用型以深埋、高成熟、孔裂隙共同发育和吸附气-游离气共存为特征;多期构造反转作用型表现为深埋生气、反转调整、侧翼保存和局部富集;深埋岩浆作用型则表现为深埋增温与岩浆热改造叠加,吸附气与游离气共存.总体上,厚煤层发育、成熟度较高、构造破坏适中且保存条件较好的地区,是研究区煤层气富集的有利部位.

References

- Bo, S. S., Zhang, J. N., Han, G. M., et al., 2022. Differential Evolution of South and North Structure in Huanghua Depression. *Bulletin of Science and Technology*, 38(1): 20—25 (in Chinese with English abstract).
- Chang, J., Chen, S. Y., Wang, Q., et al., 2021. Sedimentary Sequence and Coal Accumulation Model of Barrier Coastal System under the Background of Epicontinental Sea: A Case Study of Late Paleozoic Taiyuan Formation in Bohai Bay Area. *Coal Geology & Exploration*, 49(4): 123—133 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, Q. M., 2017. Sedimentary Characteristics and Evolution of Upper Paleozoic in Huanghua Depression (Dissertation). China University of Petroleum (East China), Qingdao (in Chinese with English abstract).
- Gong, X., Wang, Y. B., Yu, Y., 2022. Geochemical Characteristics and Hydrocarbon Generation Characteristics of Upper Paleozoic Coal Measures Source Rocks in Huanghua Depression, Bohai Bay Basin: Case Study of Dagang Exploration Area. *Natural Gas Geoscience*, 33(6): 1013—1024 (in Chinese with English abstract).
- He, J., Wang, B. H., Lu, Z. L., 2023. Experimental Study on the Effect of Magma Intrusion and Temperature on the Pore Structure of Coal. *Energy*, 284: 128688. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128688>
- Hou, Z. S., 2020. Research on Sequence, Sedimentology and Favorable Reservoir of Carboniferous - Permian in Huanghua Depression (Dissertation). China University of Petroleum (East China), Qingdao (in Chinese with English abstract).
- Hu, H. J., Jiang, Y. L., Liu, J. D., et al., 2018. Gas Generation Evolution and Potential Analysis of Carboniferous-Permian Coal-Measured Source Rocks in Dongpu Depression. *Earth Science*, 43(2): 610—621 (in Chinese with English abstract).
- Jin, F. M., Wang, X., Li, H. J., et al., 2019. Formation of the Primary Petroleum Reservoir in Wumaying Inner Buried-Hill of Huanghua Depression, Bohai Bay Basin, China. *Petroleum Exploration and Development*, 46(3): 521—529 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. Z., Suo, Y. H., Zhou, L. H., et al., 2011. Pull-Apart Basins within the North China Craton: Structural Pattern and Evolution of Huanghua Depression in Bohai Bay Basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(5): 1362—1379 (in Chinese with English abstract).
- Li, W., Wu, Z. P., Liu, H., 2009. Mesozoic and Cenozoic Basin Evolution and Coal-Derived Gas Accumulation of Upper Paleozoic in the Area of Bohai Bay Basin. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 16(1): 13—16 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H. T., Shen, C. B., Yu, H. T., et al., 2026. Special Geological Conditions, Genetic Types, and Significance of Petroleum Exploration in Low Exploration Degree Depressions of Bohai Bay Basin. *Earth Science*, 51(5): 1619—1635 (in Chinese with English abstract).
- Liu, N., Qiu, N. S., Chang, J., et al., 2017. Hydrocarbon Migration and Accumulation of the Suqiao Buried-Hill

- Zone in Wen'an Slope, Jizhong Subbasin, Bohai Bay Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 86: 512—525. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.05.040>.
- Liu, Q. Y., Zhang, R., Wang, M., et al., 2017. Physical Properties of Coal from Different Depths. *Journal of China Coal Society*, 42(8): 2101—2109 (in Chinese with English abstract).
- Pu, X. G., Dong, X. Y., Chai, G. Q., et al., 2024. Accumulation Conditions and Exploration Orientation of Coal Measure Gas in the Upper Paleozoic in Huanghua Depression. *China Petroleum Exploration*, 29(4): 60—70 (in Chinese with English abstract).
- Ren, J. Y., Liao, Q. J., Lu, G. C., et al., 2010. Deformation Framework and Evolution of the Huanghua Depression, Bohai Gulf. *Geotectonica et Metallogenia*, 34(4): 461—472 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X., Li, Z., Zhu, R. F., et al., 2023. Study on Hydrocarbon Generation Characteristics of Carboniferous—Permian Coal-Measure Source Rocks in Huanghua Depression, Bohai Bay Basin. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 30(4): 19—27 (in Chinese with English abstract).
- Wu, C. P., 2018. Study on Carboniferous-Permian Sequence Stratigraphy and Sedimentary Facies in South-Central Huanghua Depression (Dissertation). Northeast Petroleum University, Daqing (in Chinese with English abstract).
- Wu, C. R., 1992. Magmatic Thermal Metamorphism of Coal. *Coal Geology & Exploration*, (4): 24—30 (in Chinese).
- Wu, Y. P., Fu, L. X., Yang, C. Y., et al., 2002. Influence of Mesozoic Tectonic Evolution on Hydrocarbon Accumulation in Buried Hill in Huanghua Depression. *Acta Petrolei Sinica*, 23(2): 16—21 (in Chinese with English abstract).
- Xu, J. J., Jin, Q., Cheng, F. Q., et al., 2017. Advances and Crucial Issues on Secondary Hydrocarbon Generation of the Carboniferous-Permian Coal-Measure Source Rocks in Bohai Bay Basin. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 24(1): 43—49, 91 (in Chinese with English abstract).
- Yan, D. T., 2025. Comment: Hydrocarbon Accumulation Conditions and Enrichment Model in Deep Depression of Huanghua Depression. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 44(3): 1 (in Chinese).
- Yang, R. Z., Liu, H. T., Li, H. J., et al., 2022. Accumulation Mechanism and Model of Coal Measure Derived Oil and Gas in the Deep Reservoir of Huanghua Depression, Bohai Bay Basin. *Natural Gas Geoscience*, 33(7): 1074—1090 (in Chinese with English abstract).
- Yu, Z. J., Jin, C., Tang, X., et al., 2024. Influence of Magma Intrusion and Contact Distance on Thermal Effects of Low-Temperature Oxidation Processes in Coal. *Journal of China Coal Society*, 49(12): 4873—4882 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, M. G., 2019. Tectonic Evolution of North China Craton. *Journal of Geomechanics*, 25(5): 722—745 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. N., Fu, L. X., Zhou, J. S., et al., 2019a. Macroscopic Distribution Characteristics and Evolution Process of Buried Hill in the Huanghua Depression, Bohai Bay Basin. *Acta Geologica Sinica*, 93(3): 585—596 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. N., Zhou, J. S., Fu, L. X., et al., 2019b. Geological Characteristics and Process of Natural Gas Accumulation in Gangbei Buried Hill. *Journal of China University of Mining & Technology*, 48(5): 1078—1089 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. N., Zhou, J. S., Xiao, D. Q., et al., 2019c. Control of the Mesozoic Tectonic Movement on the Hydrocarbon Generation and Evolution of Upper Paleozoic Coal-Measure Source Rocks in the Huanghua Depression, Bohai Bay Basin. *Natural Gas Industry*, 39(9): 1—10 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, C. Y., Li, Y. X., Wang, J. F., et al., 2019. Genetic Types and Exploration Potential of Natural Gas in Bohai Bay Basin. *Natural Gas Geoscience*, 30(6): 783—789 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, G. C., 2009. Metamorphic Evolution of Main Structural Units in North China Craton Basement and Discussion on Some Problems. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8): 1772—1792 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, L. H., Hua, S. J., Sun, C. N., et al., 2017. Geochemical Characteristics and Secondary Hydrocarbon Generation of Coal-Measure Source Rocks in Upper Paleozoic of Dagang Oilfield. *Oil & Gas Geology*, 38(6): 1043—1051 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Y. M., Qin, Y., Wang, M., et al., 2006. Tectonic Control on the Hydrocarbon-Generation Evolution of Permo-Carboniferous Coal in Huanghua Depression. *Journal of China University of Mining & Technology*, 35(3): 283—287 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 薄尚尚, 张津宁, 韩国猛, 等, 2022. 黄骅坳陷南、北构造差异演化研究. *科技通报*, 38(1): 20—25.
- 常嘉, 陈世悦, 王琼, 等, 2021. 陆表海背景下障壁海岸体系沉积层序及聚煤模式——以渤海湾地区晚古生代太原

- 组为例. 煤田地质与勘探, 49(4): 123—133.
- 程秋萌, 2017. 黄骅坳陷上古生界沉积特征及沉积演化(硕士学位论文). 青岛: 中国石油大学(华东).
- 龚训, 王延斌, 于赟, 2022. 渤海湾盆地黄骅坳陷上古生界煤系烃源岩地球化学特征及生烃特性: 以大港探区为例. 天然气地球科学, 33(6): 1013—1024.
- 侯中帅, 2020. 黄骅坳陷石炭—二叠系层序、沉积及有利储层研究(博士学位论文). 青岛: 中国石油大学(华东).
- 胡洪瑾, 蒋有录, 刘景东, 等, 2018. 东濮凹陷石炭—二叠系煤系烃源岩生气演化及潜力分析. 地球科学, 43(2): 610—621.
- 金凤鸣, 王鑫, 李宏军, 等, 2019. 渤海湾盆地黄骅坳陷乌马营潜山内幕原生油气藏形成特征. 石油勘探与开发, 46(3): 521—529.
- 李三忠, 索艳慧, 周立宏, 等, 2011. 华北克拉通内部的拉分盆地: 渤海湾盆地黄骅坳陷结构构造与演化. 吉林大学学报(地球科学版), 41(5): 1362—1379.
- 李伟, 吴智平, 刘华, 2009. 中、新生代渤海湾盆地区演化与上古生界煤成气成藏. 油气地质与采收率, 16(1): 13—16.
- 刘海涛, 沈传波, 于海涛, 等, 2026. 渤海湾盆地低勘探程度凹陷特殊地质条件、成因类型及油气勘探意义. 地球科学, 51(5): 1619—1635.
- 刘倩颖, 张茹, 王满, 等, 2017. 不同赋存深度煤的物性特征. 煤炭学报, 42(8): 2101—2109.
- 蒲秀刚, 董雄英, 柴公权, 等, 2024. 黄骅坳陷上古生界煤岩气成藏条件与勘探方向. 中国石油勘探, 29(4): 60—70.
- 任建业, 廖前进, 卢刚臣, 等, 2010. 黄骅坳陷构造变形格局与演化过程分析. 大地构造与成矿学, 34(4): 461—472.
- 王鑫, 李政, 朱日房, 等, 2023. 渤海湾盆地黄骅坳陷石炭系—二叠系煤系烃源岩生烃特征研究. 特种油气藏, 30(4): 19—27.
- 吴成璞, 2018. 黄骅坳陷中南部石炭—二叠系层序地层学与沉积相研究(硕士学位论文). 大庆: 东北石油大学.
- 吴传荣, 1992. 煤的岩浆热变质作用. 煤田地质与勘探, (4): 24—30.
- 吴永平, 付立新, 杨池银, 等, 2002. 黄骅坳陷中生代构造演化对潜山油气成藏的影响. 石油学报, 23(2): 16—21.
- 徐进军, 金强, 程付启, 等, 2017. 渤海湾盆地石炭系—二叠系煤系烃源岩二次生烃研究进展与关键问题. 油气地质与采收率, 24(1): 43—49, 91.
- 严德天, 2025. 评论: 黄骅坳陷深凹区油气成藏条件与富集模式. 地质科技通报, 44(3): 1.
- 杨润泽, 刘海涛, 李宏军, 等, 2022. 渤海湾盆地黄骅坳陷深部煤系地层油气成藏机理与模式. 天然气地球科学, 33(7): 1074—1090.
- 于志金, 晋策, 汤旭, 等, 2024. 岩浆侵入与接触距离对煤低温氧化过程热效应的影响. 煤炭学报, 49(12): 4873—4882.
- 翟明国, 2019. 华北克拉通构造演化. 地质力学学报, 25(5): 722—745.
- 张津宁, 付立新, 周建生, 等, 2019a. 渤海湾盆地黄骅坳陷古潜山的宏观展布特征与演化过程. 地质学报, 93(3): 585—596.
- 张津宁, 周建生, 付立新, 等, 2019b. 港北潜山内幕天然气成藏地质特征与成藏过程. 中国矿业大学学报, 48(5): 1078—1089.
- 张津宁, 周建生, 肖敦清, 等, 2019c. 黄骅坳陷中生代构造运动对上古生界煤系烃源岩生烃演化的控制. 天然气工业, 39(9): 1—10.
- 赵国春, 2009. 华北克拉通基底主要构造单元变质作用演化及其若干问题讨论. 岩石学报, 25(8): 1772—1792.
- 赵长毅, 李永新, 王居峰, 等, 2019. 渤海湾盆地天然气成因类型与勘探潜力分析. 天然气地球科学, 30(6): 783—789.
- 周立宏, 滑双君, 孙超因, 等, 2017. 大港油田上古生界煤系烃源岩地球化学特征与二次成烃. 石油与天然气地质, 38(6): 1043—1051.
- 朱炎铭, 秦勇, 王猛, 等, 2006. 黄骅坳陷石炭—二叠纪煤成烃演化的构造控制. 中国矿业大学学报, 35(3): 283—287.