

鄂尔多斯盆地石炭纪—二叠纪煤系全油气系统天然气成藏特征与有序分布模式

丁蓉^{1,2}, 庞雄奇^{1,3}, 贾承造⁴, 熊先钺², 邓泽^{5,6}, 田文广⁵, 蒲庭玉^{1,3}, 王飞宇^{3,6},
林浩^{1,3}, 陈雨萱^{1,3}

[1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 2. 中国石油煤层气有限责任公司, 北京 100028; 3. 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249; 4. 中国石油天然气集团有限公司, 北京 100724; 5. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 6. 中国石油大学(北京)非常规油气科学技术研究院, 北京 102249]

摘要:自2021年以来,鄂尔多斯盆地石炭纪—二叠纪(C—P)煤系深层煤层气勘探取得重大突破并展示出广阔发展前景,其与盆地C—P多层系致密气和其他类型天然气的成因联系及共采潜力受到广泛关注。基于全油气系统理论及其定量评价方法,对盆地内已发现的各类天然气藏的成因机制和关联性进行了分析,并在此基础上建立了煤系全油气系统天然气成藏与有序分布模式,结果表明:①C—P煤系全油气系统边界范围涉及整个盆地。全油气系统内,自浅而深分别存在浮力成藏下限、油气成藏底限和源岩供烃底限3个动力边界。②在地表与上述3个动力边界之间分别形成了自由、局限和束缚3个动力场。③全油气系统在演化过程中,源岩排出烃在中—浅层自由动力场运聚受浮力作用主导,进入圈闭构造高孔—高渗储层形成煤成常规气藏;源岩排出烃在中—深层局限动力场的运聚受源—储间毛细管压力差作用主导,就近进入低孔—低渗储层形成煤成致密气藏;源岩滞留原始烃在束缚动力场的运聚受吸附作用等动力主导,源—储一体形成煤层气藏。④整体自下而上形成的天然气藏呈现出“煤层气—煤成致密气—煤成常规气”的有序分布模式。⑤盆地东部中—浅层因整体抬升和构造裂缝发育,煤成常规气勘探受限,中—深层煤成致密气和煤层气分布面积广、目的层厚度大、富气类型多、资源潜力巨大,是持续勘探的重点方向。

关键词:化石能源;全油气系统;煤层气;煤系气;天然气藏;石炭纪—二叠纪(C—P)煤系;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Natural gas accumulation characteristics and orderly distribution pattern of gas reservoirs in the whole petroleum system of the Carboniferous–Permian coal measures, Ordos Basin

DING Rong^{1,2}, PANG Xiongqi^{1,3}, JIA Chengzao⁴, XIONG Xianyue², DENG Ze^{5,6}, TIAN Wenguang⁵, PU Tingyu^{1,3},
WANG Feiyu^{3,6}, LIN Hao^{1,3}, CHEN Yuxuan^{1,3}

[1. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. Coalbed Methane Company Limited, PetroChina, Beijing 100028, China; 3. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 4. China National Petroleum Corporation, Beijing 100724, China; 5. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China; 6. Unconventional Petroleum Research Institute, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China]

Abstract: Since 2021, significant breakthroughs have been achieved in the exploration of deep coalbed methane (CBM) or coal-rock gas in the Carboniferous–Permian coal measures of the Ordos Basin, revealing broad development prospects. Meanwhile, wide attention has been directed to the genetic correlations and commingling production potential between CBM gas and other natural gas, such as tight gas, across multiple Carboniferous–Permian sequences within the

收稿日期:2025-05-08;修回日期:2025-07-21。

第一作者简介:丁蓉(1987—),女,高级工程师,煤层气勘探开发及储量管理。E-mail:25670030@qq.com。

通信作者简介:贾承造(1948—),男,中国科学院院士、博士研究生导师,构造地质学、石油地质学和油气勘探。E-mail:jiacz@petrochina.cn。

基金项目:中国石油天然气股份有限公司C1类科技项目(2023YQX10110);中国石油天然气股份有限公司“十四五”前瞻性基础性科技重大项目(2021DJ0101);中国石油天然气股份有限公司科技项目(2023ZZ18YJ01)。

basin. Based on the theory and a quantitative evaluation method of the whole petroleum system, we analyze the genetic mechanisms and interrelationships of various natural gas reservoirs that have already been identified in the basin. Accordingly, we establish the accumulation model of natural gas and define the orderly distribution pattern of gas reservoirs in the whole petroleum system of the coal measures. The results indicate that the boundaries of the whole petroleum system in the Carboniferous-Permian coal measures extend across the entire basin. The whole petroleum system exhibits three dynamic boundaries from shallow to deep: the buoyancy-driven hydrocarbon accumulation depth (BHAD), the hydrocarbon accumulation depth limit (HADL), and the active source-rock depth limit (ASDL). Accordingly, three dynamic fields of hydrocarbon accumulation are developed between the Earth's surface and the three dynamic boundaries, namely the free-hydrocarbon dynamic field, the confined-hydrocarbon dynamic field, and the bound-hydrocarbon dynamic field from top to bottom. During the evolution of the whole petroleum system, hydrocarbons expelled from source rocks migrate and accumulate predominantly under the action of buoyancy in the free-hydrocarbon dynamic field of the intermediate to shallow strata, and then enter into high-porosity, high-permeability reservoirs within traps to form conventional natural gas reservoirs. In contrast, within the confined-hydrocarbon dynamic field of the intermediate to deep strata, hydrocarbon migration and accumulation from source rocks are predominantly driven by differences in capillary pressure between the source rocks and reservoirs. Consequently, these hydrocarbons migrate into adjacent low-porosity, low-permeability reservoirs, resulting in the formation of tight gas reservoirs. In the bound-hydrocarbon dynamic field, primary hydrocarbons retained in source rocks migrate and accumulate predominantly through adsorption, contributing to the formation of CBM reservoirs characterized by integrated source rocks and reservoirs. The natural gas reservoirs in the basin generally display an orderly distribution pattern, with CBM reservoirs, tight gas reservoirs, and conventional gas reservoirs occurring sequentially from bottom to top. In the eastern Ordos Basin, the intermediate to shallow strata contain only limited conventional gas due to the overall uplift and the presence of tectonic fractures. In contrast, the intermediate to deep strata in this region demonstrate widely distributed tight gas, substantial thickness of target strata, varied gas-rich plays, and considerable resource potential, establishing them as an important target for sustainable exploration and development.

Key words: fossil fuel, whole petroleum system, coalbed methane (CBM), coal-measure gas, natural gas reservoir, Carboniferous-Permian coal measures, Ordos Basin

引用格式: 丁蓉, 庞雄奇, 贾承造, 等. 鄂尔多斯盆地石炭纪—二叠纪煤系全油气系统天然气成藏特征与有序分布模式[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(4): 1333–1348. DOI: 10.11743/ogg20250420.

DING Rong, PANG Xiongqi, JIA Chengzao, et al. Natural gas accumulation characteristics and orderly distribution pattern of gas reservoirs in the whole petroleum system of the Carboniferous-Permian coal measures, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(4): 1333–1348. DOI: 10.11743/ogg20250420.

鄂尔多斯盆地先后在上古生界中发现了数十个大型和特大型天然气田,其中包括探明储量为 $4.77 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 的苏里格气田^[1]。2021年以来,中国石油、中国石化和中国海油先后在鄂尔多斯盆地开展深层煤层气勘探,并取得重大突破,日产气量高达 $20.00 \times 10^4 \text{ m}^3$,初期平均单井日产气量超过 $10.00 \times 10^4 \text{ m}^3$,目前提交探明储量超过 $3\,392.43 \times 10^8 \text{ m}^3$,展现出广阔的发展前景^[2]。自20世纪以来,戴金星院士等一大批专家学者就对鄂尔多斯盆地源岩和天然气的碳同位素开展了研究^[3–7],结果表明,鄂尔多斯盆地上古生界煤成天然气、煤系泥岩以及煤岩有机质都具有相似的碳同位素组成特征,推测鄂尔多斯盆地天然气源几乎全来自石炭

纪—二叠纪(C—P)煤系。这些气藏在形成演化过程中有何关联性?能否用全油气系统的视角解剖鄂尔多斯盆地C—P煤系并探讨其差异性及其联合共生规律?这些问题的解答对于深化成藏理论认识、指导油气勘探具有重要意义。

本文基于全油气系统理论及其定量评价方法,对鄂尔多斯盆地内已发现的各类天然气藏的成因机制和关联性进行了研究,并在此基础上建立了鄂尔多斯盆地C—P煤系全油气系统天然气成藏与有序分布模式。全油气系统划分步骤如下:①基于鄂尔多斯盆地煤系及相邻储层的天然气同位素特征判定气源;②确定C—P煤系全油气系统形成演化的边界范围,包括纵

向、横向和时间3个尺度;③ 确定全油气系统的3条动力边界,分别是浮力成藏下限、油气成藏底限和源岩供烃底限;④ 根据3条动力边界依次划分出3个动力场,分别是自由动力场、局限动力场和束缚动力场;⑤ 基于原始烃、运移动力-阻力和储层性质三要素耦合分析3类动力场下发育的油气藏类型和特征以及油气资源量;⑥ 构建鄂尔多斯C—P煤系全油气系统成藏动力机制与有序分布演化模式,划分出不同的阶段。最后分别评估C—P煤系全油气系统(whole petroleum system, WPS)常规气、深层煤层气以及煤系气的资源潜力与发展前景。

1 研究方法 with 原理

1.1 天然气藏成因关联性

通过分析鄂尔多斯盆地上古生界各气田的同位素特征,发现绝大多数气田的气源均来自于煤系烃源岩,包括苏里格气田、米脂气田和大牛地气田等^[8](图1)。进一步剖析这些气田的产状特征^[9]、形成条件^[10]以及成因机制^[11],发现目前在鄂尔多斯盆地上古生界发现的天然气主要来自C—P煤系,极少来自其他源岩层,

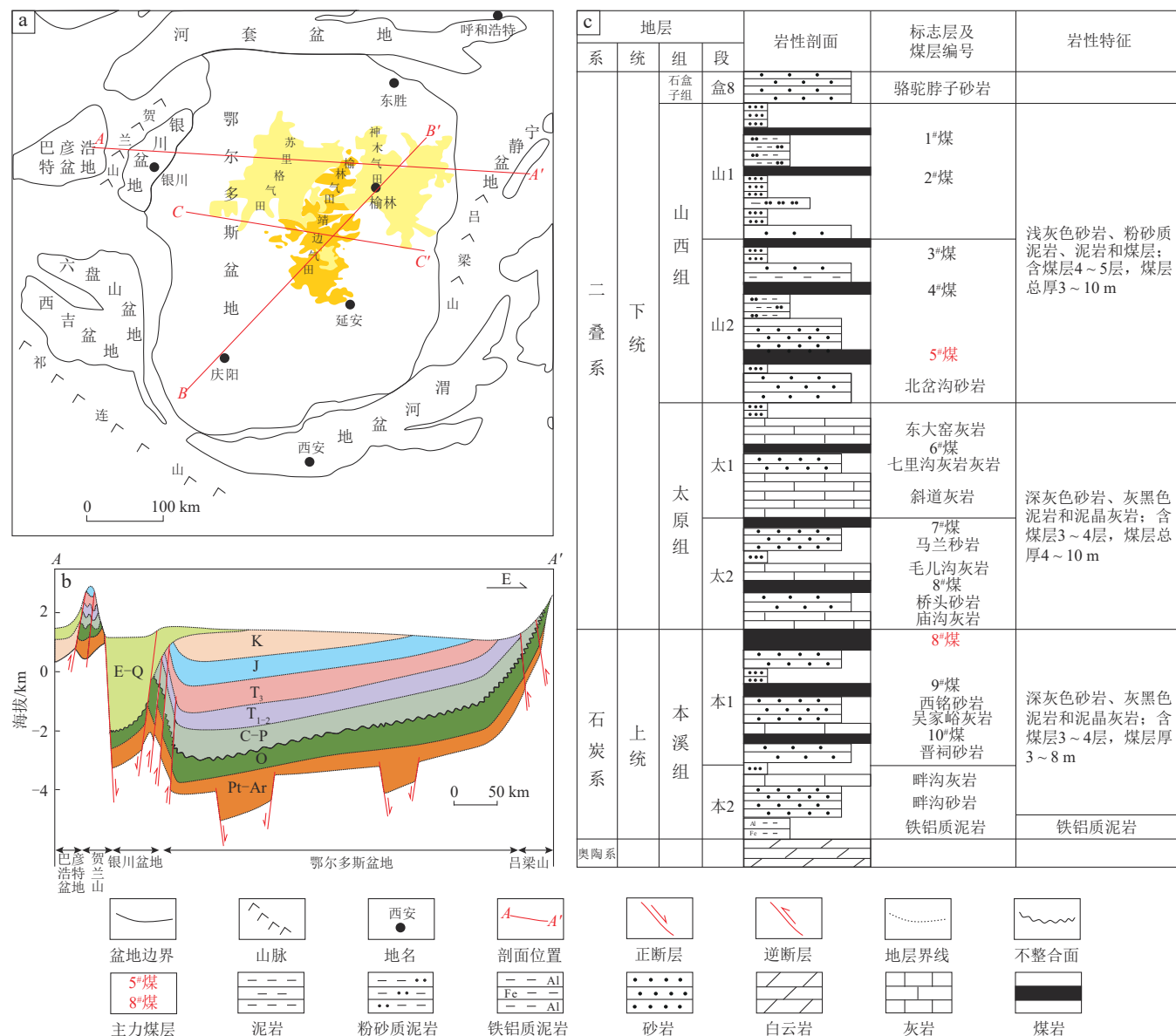


图1 鄂尔多斯盆地地理位置及上古生界油气来源基本条件

Fig. 1 Geographical location and essential conditions for the Upper Paleozoic hydrocarbon sources of the Ordos Basin

a. 盆地地质和地理位置; b. 东西向大剖面及地层发育特征(剖面位置见a图); c. 古生代C—P含煤层系地层综合柱状图

E—Q. 古近系—第四系; K. 白垩系; J. 侏罗系; T₃. 上三叠统; T₁₋₂. 中—下三叠统; C—P. 石炭系—二叠系; O. 奥陶系; Pt—Ar. 元古宇—太古宇

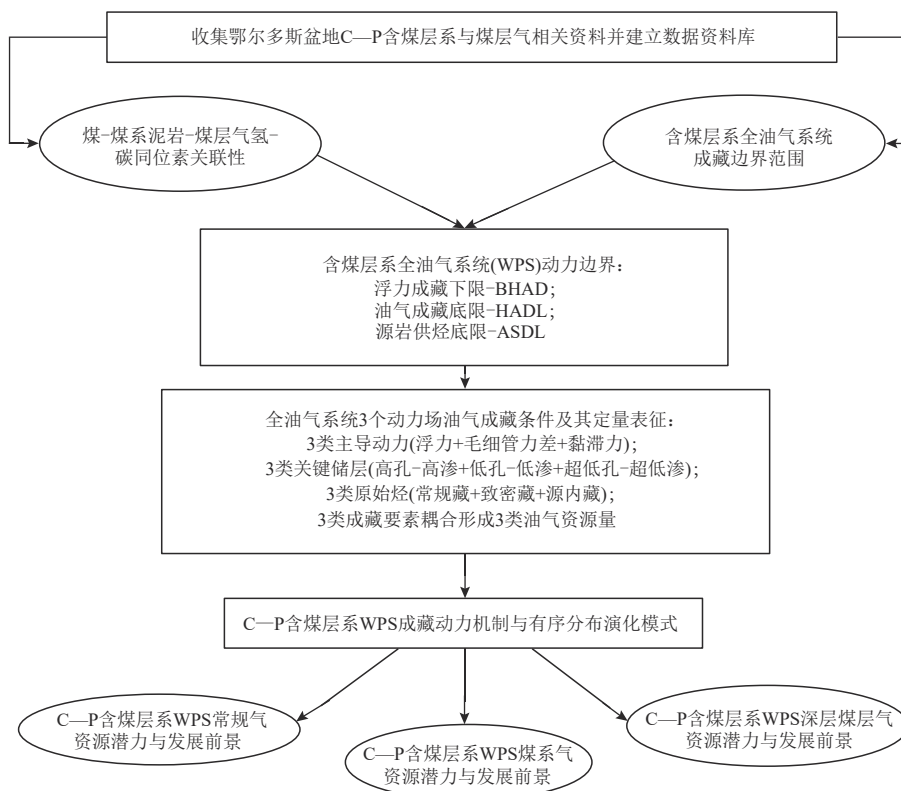


图2 鄂尔多斯盆地C—P煤系全油气系统研究的基本内容及技术思路

Fig. 2 General content and technical roadmap of the research on the whole petroleum system of the Carboniferous-Permian coal measures in the Ordos Basin

他们在演化过程中相互关联且彼此制约,共同影响着鄂尔多斯盆地天然气资源和勘探开发前景。

1.2 煤层气藏联合成因机制和有序分布规律

庞雄奇等较为系统地提出了全油气系统定量评价方法^[12]并出版了英文专著《Quantitative Evaluation of the Whole Petroleum System—Hydrocarbon Thresholds and Their Application》^[13],认识到全油气系统内常规和非常规油气藏联合共生且有序分布的根本原因有5点:①全油气系统内存在浮力成藏下限^[14]、油气成藏底限^[15]和源岩供烃底限^[16]3个油气动力边界,决定了3类油气资源在纵向上的有序分布。②上述3个动力边界的围合作用形成了自由、局限和束缚3个动力场,决定了3类油气藏形成动力机制和产状特征的差异性^[17]。③揭示出浅层自由动力场三要素耦合“源岩早期生-排油气+浮力运移油气+高孔-高渗储层聚集油气”形成常规油气藏;深层局限动力场三要素耦合“源岩晚期生-排油气+源-储间毛细管压力差运移油气+低孔-低渗储层聚集油气”形成非常规致密油气藏;源内束缚动力场三要素耦合“源岩滞留油气+煤岩有机质吸附滞留油气+煤层超低孔-超低渗储层聚集油气”形成非常规煤层油气藏或页

岩油气藏^[17]。④将全油气系统内所有可能形成的常规和非常规油气藏分成为3类6亚类15种49种^[18]。本文基于上述成果预测鄂尔多斯盆地C—P煤系全油气系统不同类别煤层气藏的形成分布并阐述其资源潜力和勘探前景。具体的思路和工作流程如图2所示。

2 C—P煤系全油气系统成藏基本特征

2.1 盆地演化与全油气系统形成分布

鄂尔多斯盆地C—P煤系WPS几乎涵盖了整个盆地:纵向上,煤系自下而上涉及到石炭系本溪组(C_2b)以及二叠系的太原组(P_1t)、山西组(P_1s)、下石盒子组(P_2x)、上石盒子组(P_2sh)和石千峰组(P_3s)。上部与三叠系陆相地层整合接触,其中-上三叠统延长组(T_3y)为一套广泛分布的富有机质泥岩,构成了C—P煤系之上的区域性盖层,有利于C—P煤系形成煤层气藏并保存。C—P煤系的下部因缺失部分石炭系,与奥陶系不整合接触^[19-20]。

平面上,C—P煤系覆盖盆地面积超过 $16 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。演化过程中(图3),C—P煤系经历了4个主要阶段:

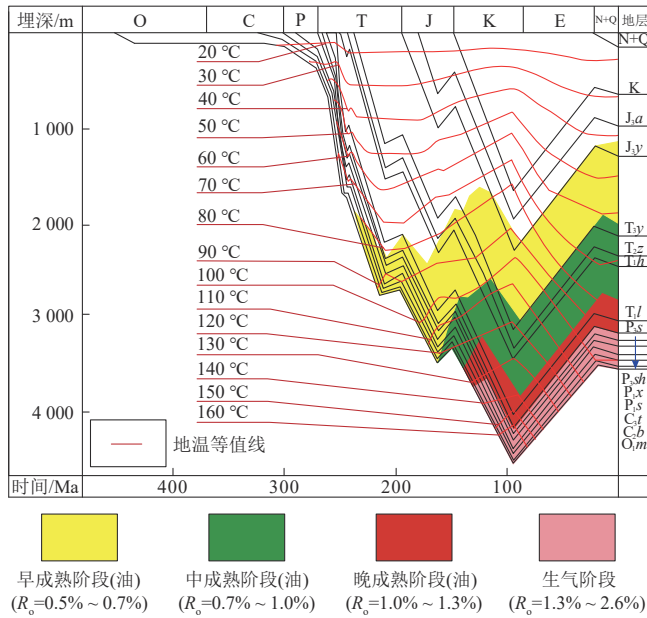


图3 鄂尔多斯盆地C—P煤系全油气系统时间分布

Fig. 3 Temporal distribution of the whole petroleum system of the Carboniferous-Permian coal measures in the Ordos Basin

R_o : 镜质体反射率; O: 奥陶系; C: 石炭系; P: 二叠系; T: 三叠系; J: 侏罗系; K: 白垩系; E: 古近系; N: 新近系; Q: 第四系

①石炭纪—二叠纪主要沉积发育了煤系地层;②侏罗纪—早白垩世继续接受上覆沉积并快速深埋;③晚白垩世—古近纪又快速抬升并接受地层剥蚀;④新近纪—第四纪继续接受上覆沉积而埋藏。值得指出的

是,在盆地不同部位,盆地演化类型不尽相同。在盆地边缘,由于构造隆升作用,煤岩流体动力场及对应的动力边界会发生调整,李国欣等人以鄂尔多斯盆地中—东部三交地区和宜川地区的8#煤埋藏史为例,说明盆地演化类型的差异性,从而影响到流体动力场的演化^[21]。在鄂尔多斯盆地内,煤系全油气系统演化的4个阶段显示出他们之间的差异性:中—西部整体稳定沉降,4个阶段不太清晰;东部抬升幅度大,伴生的断裂作用强烈,但是深部煤层构造较为稳定^[22],4个阶段的特征明显。从西到东,构造抬升幅度和地层剥蚀厚度不断增大,东南部地区地层最大剥蚀量可达2 000 m以上^[23]。

2.2 3个动力边界

前人通过多种方法确定了鄂尔多斯盆地上古生界全油气系统内存在的3个油气成藏的动力边界,分别是浮力成藏下限、油气成藏底限和源岩供烃底限。相关学者进行了物理模拟实验来表征浮力成藏下限^[24],用不同孔喉半径的玻璃管模拟油气受力的平衡实验,包括膨胀压力、静水压力和毛细管压力,用于验证储层中浮力成藏下限的存在和机制。依据上古生界含气目的层钻探结果,判别出浮力成藏下限对应埋深为1 350~2 700 m,随砂岩储层中颗粒粒径的增大而变深,表明煤成常规气藏形成分布的最大埋深随地质条

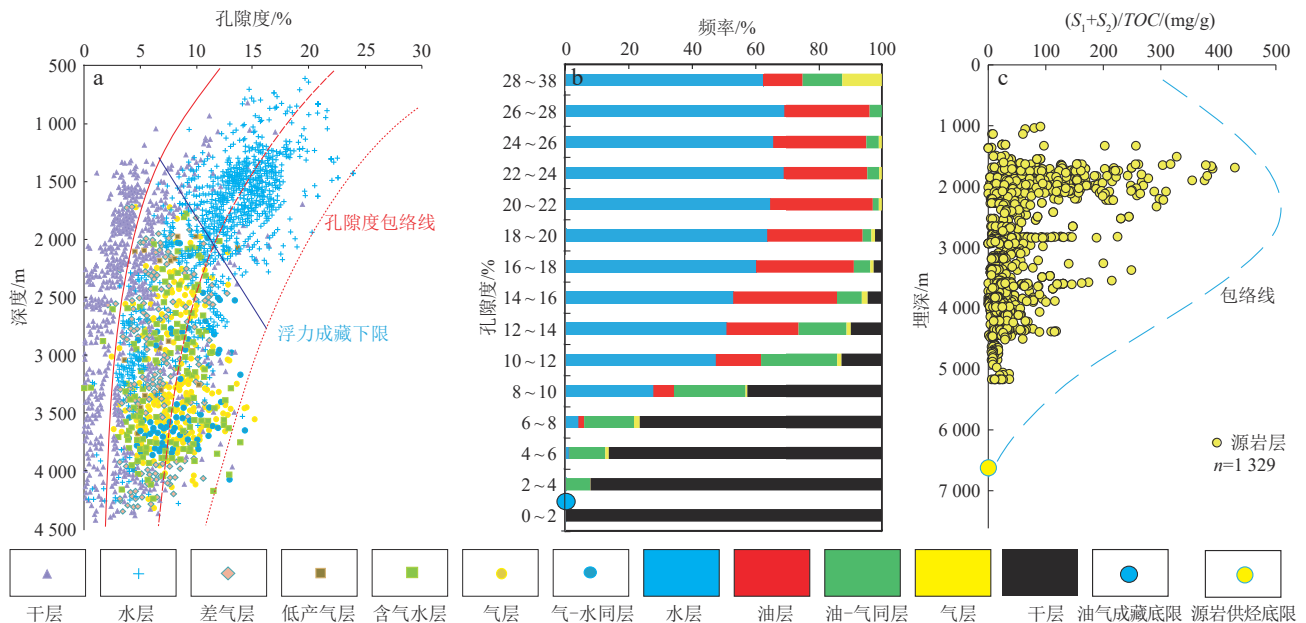
图4 鄂尔多斯盆地C—P煤系全油气系统油气成藏动力边界判别结果^[14-16]

Fig. 4 Identification of the dynamic boundaries for hydrocarbon accumulation in the whole petroleum system of the Carboniferous-Permian coal measures in the Ordos Basin^[14-16]

a. 浮力成藏下限; b. 油气成藏底限; c. 源岩供烃底限

(S_1+S_2 为生烃潜量; TOC 为总有机碳含量; n 为样本个数。)

件的不同而变化(图4a),之所以鄂尔多斯盆地上古生界全油气系统的浮力成藏下限处在一个动态的范围中,是因为其地质物理参数受到诸如地质构造和地温梯度等多因素的影响。以塔里木盆地为例,在盆地的南、北方,由于隆起发育程度的不同,浮力成藏下限的埋深分布范围为1 000~4 200 m,跨度达3倍之多。正是由于在同一个盆地内部各个地区的差异性,因此精确划分同一盆地各个地区的动力边界也是下一步的研究方向之一。结合孔隙度和渗透率随埋深变化特征等研究内容,确定浮力成藏下限最大埋深对应砂岩储层孔喉半径约为1.000 μm 、渗透率约为 $1.000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、源岩热演化程度(镜质体反射率 R_o)约为 $1.10\% \pm 0.10\%$;依据目的层钻探结果统计分析,判识出砂岩储层内油气成藏底限对应临界条件孔隙度约为2.00%(图4b)、砂岩埋深约为5 350 m、源岩 R_o 约为2.75%、孔喉半径约为0.010 μm 、渗透率约为 $0.010 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ [14];依据源岩层生烃潜力变化特征,判识出源岩层供烃底限对应临界条件埋深约为6 600 m(图4c)、源岩 R_o 约为3.50%、孔喉半径约为0.001 μm 、渗透率约为 $0.001 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

2.3 3个动力边界划分3个油气动力场

基于浮力成藏下限、油气成藏底限和源岩供烃底限3个油气动力边界的围合作用,鄂尔多斯盆地C—P煤系全油气系统可以划分出自由、局限和束缚3个油气动力场,不同动力场因主导油气运聚动力不同,形成油气藏的地质特征和类型也不相同[20]。

1) 在地表和浮力成藏下限等条件围合作用下形成自由动力场

自由动力场因埋深较浅,通常呈现出3方面地质特征:① 储层高孔、高渗,对于砂岩储层孔隙度 $\geq 12.00\%$,渗透率 $\geq 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔喉半径 $\geq 1.000 \mu\text{m}$;② 源岩层热演化程度低, $R_o \leq 1.20\%$;③ 煤层气在储层内运移遇到的毛细管等阻力 $\leq$ 浮力($p_c \leq F_b$)^[14]。自由动力场煤层气主要受浮力主导自下而上运移,进入圈闭后形成煤成常规气藏。如果构造变动导致圈闭受到破坏,则自由动力场油气在浮力主导下运移至地表散失或受到氧化破坏。

2) 在浮力成藏下限和油气成藏底限等围合作用下形成局限动力场

局限动力场因埋深较深,通常呈现出3方面地质特征:① 储层低孔、低渗,砂岩储层孔隙度为 $2.00\% \sim 12.00\%$,渗透率为 $(0.010 \sim 1.000) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔喉半径为 $0.010 \sim 1.000 \mu\text{m}$;② 源岩层热演化程度较高, $1.20\% < R_o < 2.75\%$ ^[15],正处于大量生—排烃阶段;

③ 油气在储层内运移遇到的毛细管阻力大于浮力($p_c > F_b$),油气主要受源—储间毛细管力差等非浮力主导并自高势区向低势区运移,当源内煤层气自源岩层排入紧邻的致密储层后便形成广泛分布的连续型煤成致密气藏。如果构造变动导致储层致密性受到破坏,则早前致密气被改造成常规类气藏,或因构造变动强度过大而导致油气藏彻底被破坏。

3) 在油气成藏底限和源岩供烃底限围合作用下形成束缚动力场

深部束缚动力场因埋深太大以及源岩层生—排烃潜力趋于枯竭,不利油气藏形成分布。然而,在地表和油气成藏底限间的烃源岩层内部形成了另一类非压实型源内束缚动力场,他们因分子吸附和分子黏滞等动力作用导致油气滞留而形成了源内煤层气藏。源岩层内因孔喉半径不同又可细分为更小的流动单元:① 孔喉半径小于0.38 nm时,甲烷分子难以进入或储层因压实致密后导致早前聚集的甲烷气难以运移,构成死气;② 孔喉半径介于0.38~1.50 nm时,甲烷等天然气以微孔填充形式存在且主要以扩散形式运移,主体构成吸附相扩散气;③ 孔喉半径介于1.50~100.00 nm时,甲烷等天然气以多层游离相形式存在且在外力作用下以滑移形式发生运移,主体构成游离相扩散气;④ 孔喉半径大于100.00 nm时,甲烷等天然气以游离相渗流形式运移,构成局限达西流游离天然气^[25-26]。

值得特别指出的是,由于煤岩源—储一体的性质,既可以充当烃源岩,又可以充当储集层储集煤层气。现有的勘探开发表明,煤层内部也存在局部的构造高点(例如神木—临兴区块,准噶尔盆地白家海地区的侏罗系深层煤层气即为局部构造高点圈闭成藏)。同时李国欣等人的研究也表明,煤层内部也可以划分出3种动力场,即“三场”控制成藏^[21]。因此与经典的碎屑岩全油气系统基本模式相比,煤系全油气系统具有其典型性和特殊性,而在本文中把C—P煤系作为一个整体来划分全油气系统,因此如何在考虑煤岩源—储一体的基础上精确划分出煤岩的3条底限和3个动力场也是接下来应该重点开展的研究方向。

2.4 3个动力场发育3类储集层

鄂尔多斯盆地C—P煤系全油气系统自下而上发育了3类储集层,包括煤岩储气层(本溪组)、煤系砂岩储气层(太原组)和煤系地层外部砂岩储气层(山西组2段)。

图5a展示了本溪组沉积时期发育大型克拉通盆地形成煤系地层的沉积岩相特征。前人基于煤岩学和

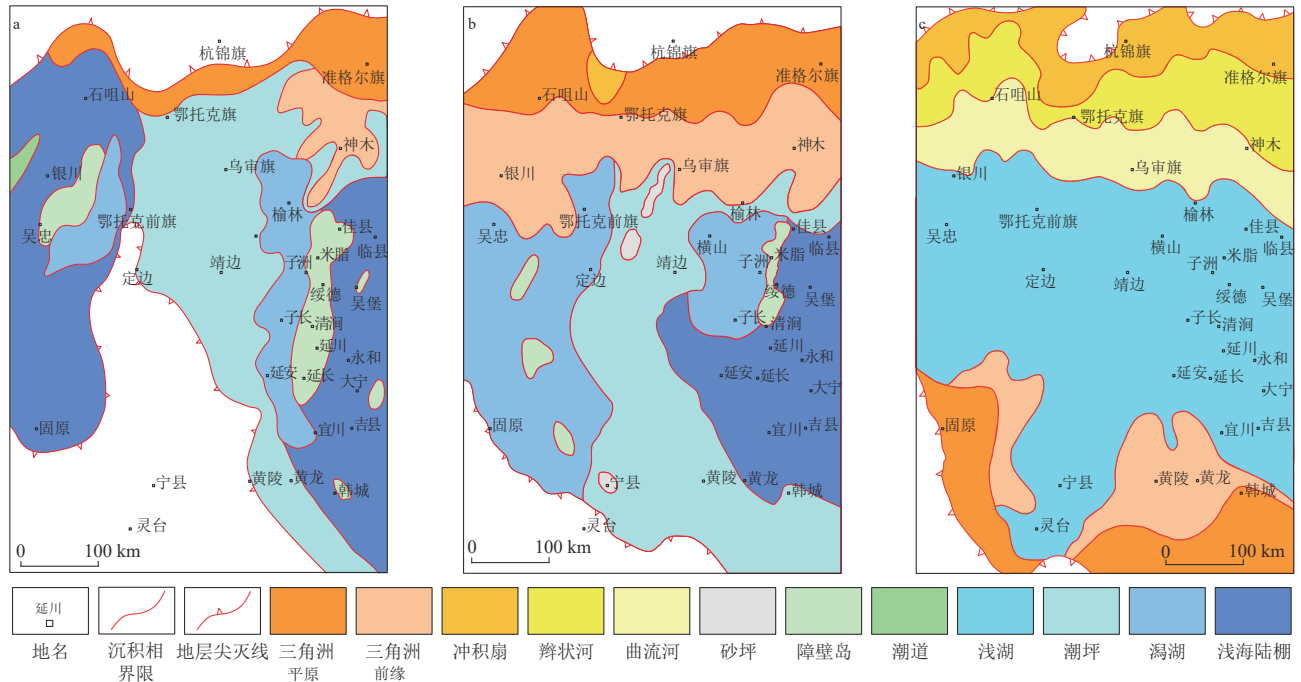


图5 鄂尔多斯盆地C—P煤系全油气系统内3类储气层沉积岩相特征

Fig. 5 Planar views of sedimentary lithofacies of three types of gas reservoirs in the whole petroleum system of the Carboniferous-Permian coal measures in the Ordos Basin

a. 本溪组煤岩储气层; b. 太原组煤系砂岩储气层; c. 山2段煤系地层外部砂岩储气层

古植物学,将成煤的沼泽类型划分为森林沼泽、苔藓沼泽、芦苇沼泽和含水生植物开阔水域4种^[27]。同时研究发现,鄂尔多斯盆地在本溪组沉积期属于障壁海岸和陆棚沉积体系^[28-30]。煤岩本身也可作为天然气的储层,由于煤岩孔隙结构的特殊性,其储集空间主要包括煤基质孔隙和煤岩割理裂缝。其中基质孔隙主要分为原生孔、外生孔、变质孔和矿物质孔^[31],成因主要包括成煤植物本身的孔隙结构、受到构造破坏形成的孔隙、矿物质充填和生气引起的增孔效应;此外,煤中的割理裂缝也大量发育,这为天然气的储集和渗流提供了良好的空间和通道。鄂尔多斯盆地煤储层物性好,研究表明,煤岩微孔占总孔隙比例约为50%,宏孔约为35%^[32],这为天然气提供了大量吸附点位和游离空间。煤系地层中有2套主力煤岩层,8#煤和5#煤,其厚度大、分布连续且稳定,不仅有利于天然气形成,也构成了优质储气层。其中8#煤层厚6~25 m,5#煤层厚2~6 m,叠合有利面积为 $16 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

图5b展示了太原组时期发育大型克拉通盆地形成煤系地层的平面沉积岩相特征,煤系地层内不仅发育煤岩层,还发育与之伴生的砂岩储层和泥页岩储层^[28]。对鄂88井—米46井本溪组8#煤储-盖组合剖析后发现,煤系中,煤层与其紧临的储层的组合形式包括有煤-砂组合、煤-灰组合和煤-泥组合等。煤系储层

孔-渗性主要由3方面因素决定:① 储层深埋过程中受到的压实作用。鄂尔多斯盆地煤系地层目前埋深较深,储层孔隙度和渗透率随埋深增大而不断减小。埋深较浮力成藏下限浅时,储层孔隙度 $\geq 12.00\%$ 、渗透率 $\geq 1.000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ^[14];埋深超过浮力成藏下限后,储层孔隙度 $< 12.00\%$ 、渗透率 $< 1.000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。② 储层形成时的沉积岩相变化。与煤层伴生的砂岩储层形成时水动力条件较弱,沉积区颗粒较细,主要形成粉砂岩质泥岩、泥质粉砂岩和粉砂岩等,这类储层孔隙度 $< 12.00\%$ 、渗透率 $< 1.000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。③ 储层演化过程中的构造变动。构造变动导致地层褶皱和断裂,产生了裂缝和孔洞;地层抬升受到剥蚀,产生不整合面和潜山,形成了溶蚀孔洞。岩相变化大、非均质性强的储层有利于源岩生成和排出的油气就地富集成藏。

图5c展示了山(山西组)2段砂岩储层沉积岩相平面分布特征。该套储层湖泊近岸发育冲积扇和三角洲沉积^[33];湖泊发育水下河道沉积,水下河道砂体之间发育湖相泥岩,当水体深度增大后,水下河道砂体可能全部转变为滨浅湖相砂岩体且大面积分布,有利于煤系地层形成的油气发生长距离运移并聚集成藏。有学者对山2段储层的物性做出研究,结果表明,山2段发育的孔隙以粒间孔和晶间孔为主,喉道类型以细窄型为主,高压压汞实验表明山2段储层孔隙度在 $1.53\% \sim$

8.95%, 平均值为 5.33% , 渗透率分布在 $(0.010 \sim 5.620) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均值为 $1.020 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 整体具有低孔、低渗的特征^[34],

2.5 3个动力场内源岩层提供了3类原始烃

本文将鄂尔多斯盆地C—P煤系作为一个整体的系统来讨论, 油气源均来自C—P的煤岩层和煤系源岩, 主要为本溪组、太原组和山西组的煤、炭质泥岩和暗色泥岩^[35], 其中煤层厚 $6 \sim 20 \text{ m}$, 暗色泥岩厚 $40 \sim 120 \text{ m}$ 。有学者对烃源岩特征展开了研究, 结果表明, 鄂尔多斯盆地煤系烃源岩总有机碳含量(TOC)平均值约为 2% , 炭质泥岩 TOC 平均值约为 12% , 煤岩 TOC 平均值约为 60% , 总体达到中等—好烃源岩的级别。同时烃源岩有机质类型以Ⅲ型干酪根为主, 热演化程度较高, 处于过成熟生干气阶段^[36-37], 整个盆地总体表现为广覆式生烃的特征。这些烃源岩在演化过程中为C—P煤系WPS提供了3类原始烃, 为形成3类油气资源提供了物质基础: ①煤系地层演化过程中自身生成但因受吸附和束缚作用而滞留于源岩内的烃, 称之为源内油气原始烃(滞留原始烃), 主要形成煤层油气藏或页岩油气藏; ②煤系地层演化过程中处于自由动力场期间生成并排出的烃, 称之为常规油气原始烃, 主要形成源外常规油气藏; ③煤系地层演化过程中处于局限动力场期间生成并排出的烃, 称之为致密油气原始烃, 主要形成近源非常规致密油气藏。

图6a展示了鄂尔多斯盆地C—P煤系WPS演化过程中煤岩层提供的3类原始烃总量及其所占煤系

生—排油气总量的相对比率。C—P煤系中煤岩层有机质生油气总量共计 $6503 \times 10^8 \text{ t}$, 其中煤岩层滞留原始烃量 $3233 \times 10^8 \text{ t}$, 约占总量的 49.71% ; 早期排运常规油气原始烃量 $863 \times 10^8 \text{ t}$, 约占总量的 13.27% ; 晚期排运致密油气原始烃量 $2408 \times 10^8 \text{ t}$, 约占总量的 37.02% 。其中, 3类原始烃总量所占煤系生—排烃量比率按照煤岩层生气量与煤系总生气量比率 75% ^[38] 计算获得。鄂尔多斯盆地C—P煤系在WPS演化过程中煤系源岩提供的3类原始烃量, 总计 $8670 \times 10^8 \text{ t}$ 。其中, 煤系地层滞留原始烃量 $4310 \times 10^8 \text{ t}$, 约占供烃总量的 49.71% ; 早期在自由动力场排运常规油气原始烃量 $1150 \times 10^8 \text{ t}$, 约占供烃总量的 13.27% ; 晚期在局限动力场排运致密油气原始烃量 $3210 \times 10^8 \text{ t}$, 约占供烃总量的 37.02% (图6b)。相关的模拟计算方法和资料来源参考有关文献^[14], 应用类似方法对中国6个代表性盆地(塔里木、准噶尔、鄂尔多斯、四川、渤海湾和松辽盆地)主力源岩层演化过程中提供的3类原始烃量及其比率的模拟计算, 结果显示: 主要源岩层滞留原始烃量所占比率为 $34.70\% \sim 54.10\%$, 平均比率约为 44.40% (图6c中绿色); 处于早期自由动力场排出的可形成常规油气原始烃量所占比率为 $8.70\% \sim 11.80\%$, 平均比率约为 10.30% (图6c中红色); 处于晚期局限动力场排出的可形成致密油气原始烃量所占比率为 $35.00\% \sim 54.30\%$, 平均比率约为 45.30% (图6c中黄色)。可以看出, 致密类油气和源岩层滞留原始烃量约为常规油气的9倍, 展示出了巨大的资源潜力。

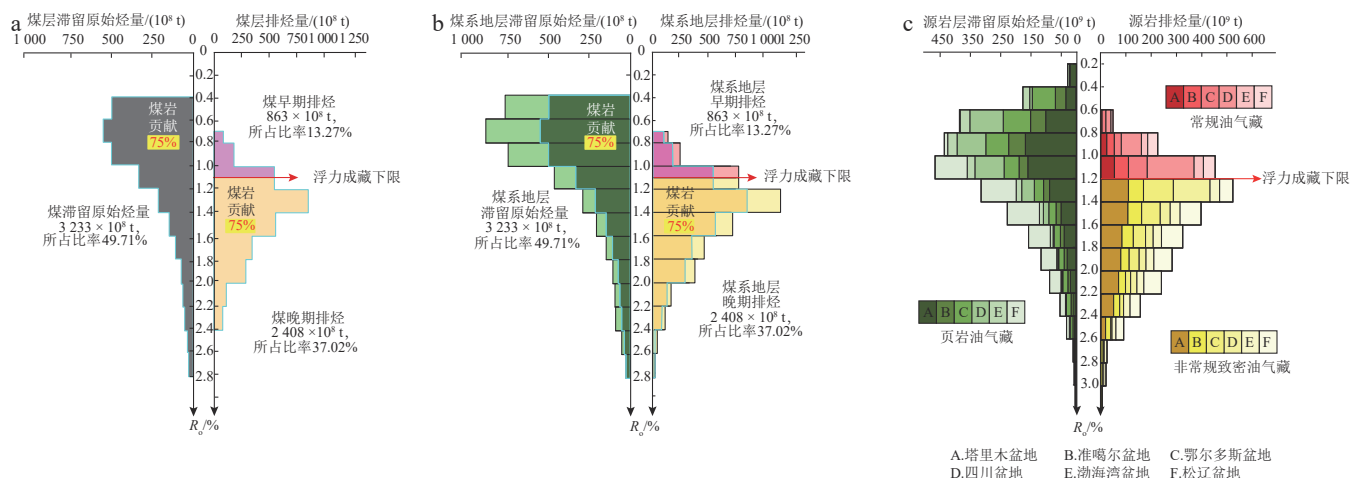


图6 鄂尔多斯盆地C—P煤系全油气系统的3类原始烃量^[14]

Fig. 6 Quantification of three primary hydrocarbon types in the whole petroleum system of the Carboniferous-Permian coal measures in the Ordos Basin^[14]

a. 研究区煤岩; b. 研究区煤系源岩; c. 代表性盆地源岩

(R_o 为镜质体反射率。荧光蓝色的线条代表煤系地层滞留原始烃量中煤岩的贡献量。)

2.6 全油气系统3个动力场内3类成藏要素耦合形成3类油气资源

鄂尔多斯盆地C—P煤系WPS内形成分布着煤层气藏、煤成致密气藏和煤成常规气藏(图7),是3个动力场形成演化过程中3类原始烃、3类成藏动力和3类储集层相互耦合作用的结果,且自下而上遵循有序分布的基本模式(图7a)。

①煤系源内束缚动力场之中滞留烃动力、滞留烃量和超致密煤岩储层3个成藏要素的相互耦合形成了煤层气藏,呈现出源—储一体、广泛致密、连续分布和储量规模巨大等显著特征(图7b₁),深层煤层气是典型代表;

②近源局限动力场之中源—储间毛细管力差、源岩层晚期排出烃量和近源致密储层3个成藏要素的相互耦合形成了具有“低坳汇聚、低位倒置、低孔聚集、低压稳定和源—储紧临”等显著特征的煤成致密气藏(图7b₂),苏里格气藏是其中之一;

③远源自由动力场之中天然气浮力、早期排出烃量、远离源岩的高孔—高渗储层3个成藏要素的相互耦合形成了具有“高点汇聚、高位封盖、高孔聚集、高压成藏和源—藏分离”等显著特征的煤成常规气藏(图7b₃),盒(石盒子组)6段及其以上各目的层构造圈闭中形成的油气藏均属于这一类。

3 C—P煤系WPS成藏演化模式与资源潜力预测

3.1 成藏动力机制与有序分布演化模式

结合前人有关研究区构造演化史、油气生成史和运聚成藏史等方面研究取得的最新成果,得出鄂尔多斯盆地C—P煤系WPS天然气成藏动力机制与演化模式及有序分布规律(图8)。

C—P煤系WPS内常规和非常规气藏形成遵循有序分布模式:源内煤层气藏(煤层气和煤岩夹层气)形成并分布在系统下部;煤成致密气形成于煤层之间围岩层内,包括砂岩气或泥页岩气;煤成常规气藏形成于远离源内煤层气或近源煤成致密气之上(图8a)。

C—P煤系WPS天然气成藏过程可以划分出4个不同的阶段。

1) 早期第1阶段(石炭纪—二叠纪),在煤岩等源岩层内形成煤层吸附气(图8b₁)。煤系地层内部生成的天然气,受浮力作用影响较小,首先被煤层自身作用力吸附滞留,剩余的排出后被紧临的细粒砂岩储层聚集而形成广泛连续的煤成致密气藏。除此之外,煤岩

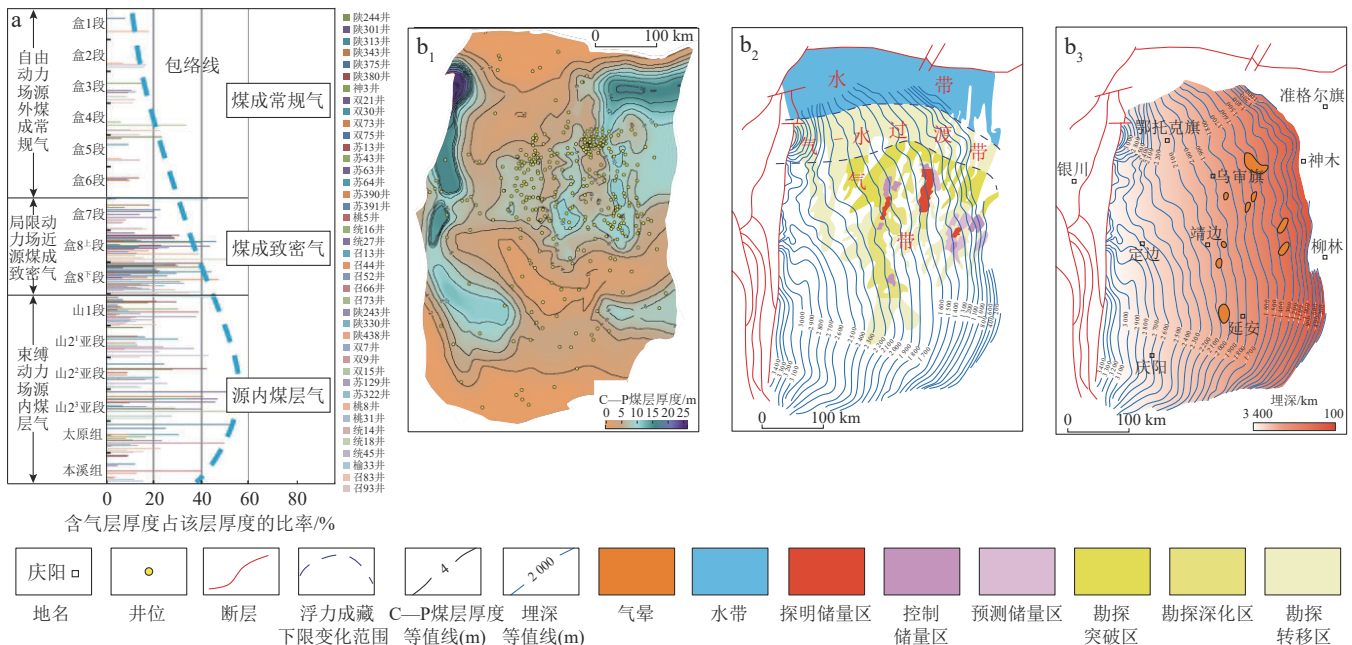


图7 鄂尔多斯盆地C—P煤系全油气系统中3类气藏形成条件与三要素耦合成藏特征

Fig. 7 Formation conditions and hydrocarbon accumulation characteristics of three element coupling for the three types of gas reservoirs in the whole petroleum system of the Carboniferous-Permian coal measures in the Ordos Basin

a. 气藏纵向分布特征(盒为石盒子组;山为山西组);b₁. C—P煤层厚度分布特征;b₂. 山2段煤成致密气分布特征;b₃. 盒5段煤成常规气平面分布特征

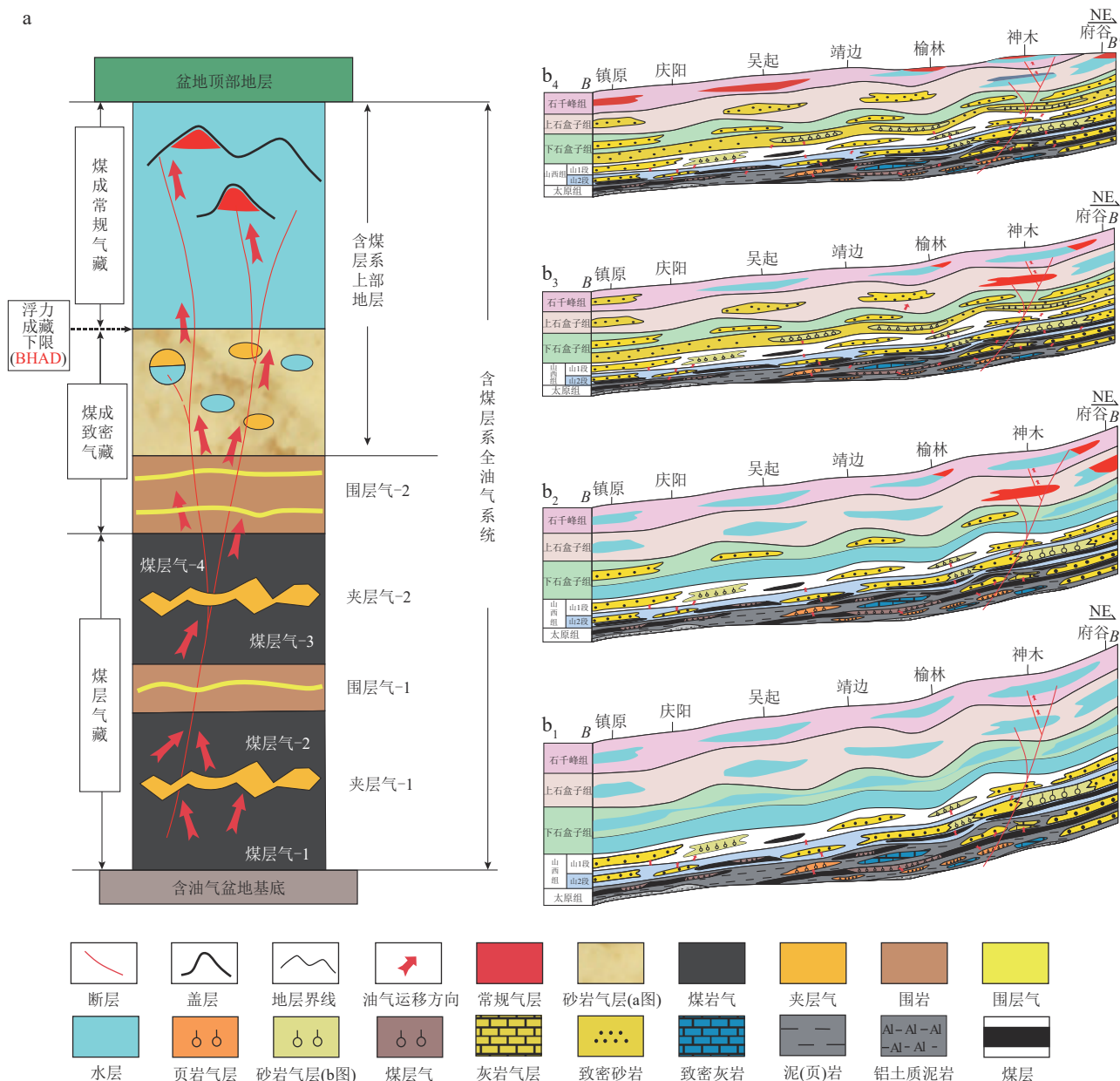


图8 鄂尔多斯盆地C—P煤系WPS天然气成藏动力机制与有序分布演化模式(b₁—b₄图剖面位置见图1a)

Fig. 8 Dynamic mechanisms of natural gas accumulation and orderly distribution and evolutionary patterns of gas reservoirs in the whole petroleum system of the Carboniferous-Permian coal measures in the Ordos Basin (see Fig. 1a for the section locations in Fig. 9b₁—b₄)

a. 气藏纵向有序分布模式; b₁. C—P煤系生气滞留成藏阶段(煤吸附滞留成藏); b₂. 三叠纪—侏罗纪远源圈闭成藏阶段(浮力运聚成藏); b₃. 早白垩世煤层排气成藏阶段(毛细管力封堵成藏); b₄. 晚白垩世—第四纪构造变动形成调整改造类油气藏(后期构造改造成藏)

和泥页岩生成后排出的部分天然气受浮力作用主导进入高孔—高渗储层,再被浮力带到浅层聚集或地表散失。

2) 中期第2阶段(三叠纪—侏罗纪),主要受浮力作用形成远离源岩层的煤成常规气藏(图8b₂)。煤系地层内部生成的天然气在吸附力饱和了自身需要后,多余的在浮力主导下大规模向上运移,遇到区域性盖层后汇聚到圈闭中形成煤成常规气藏,富集于高孔—高渗储层内,形成的规模取决于煤系地层向外供运的

气量、圈闭规模和保存条件。

3) 晚期第3阶段(早白垩世),主要受毛细管力主导形成大面积分布的煤成致密气藏(图8b₃)。随着地层被深埋,源岩层之上的自由动力场内的目的层因深埋相继达到浮力成藏下限后进入局限动力场,储集层中的孔喉半径随着深度的增加而减小,因此天然气在储层中运移遇到的毛细管阻力等大于其所受浮力,因不能在浮力主导下运移,而只能在紧临源岩层的致密储层内聚集,并不断排驱孔隙水而形成广泛、连续、大面积分

布的致密深盆气藏,储层具有低孔-低渗的特征。

4) 后期第4阶段(晚白垩世—第四纪),因构造变动形成调整改造类油气藏(图8b₄)。盆地西部继续深埋但东部抬升导致上覆地层被剥蚀、断裂带附近气藏被破坏,西部继续深埋使目的层之中油气裂解而形成干气藏;东部抬升使地层受到剥蚀,剥蚀速度为20~28 m/Ma,剥蚀厚度为800~1 200 m^[2]。地层抬升过程中产生断裂活动,上覆盖层封油气性变差,导致早前形成的煤成常规气、连续型煤成致密气和煤层气藏等被破坏,含气性整体变差,晚白垩世以来的主要构造事件及适度的抬升强度控制着油气成藏事件的时间^[39]。新近纪—第四纪,东部及整个盆地又开始接受沉积,早期被破坏的气藏又开始受到保护,相继溢散出来的天然气因上覆沉积地层封盖而聚集起来,可能形成规模较小的气藏。

3.2 常规气资源潜力与发展前景

鄂尔多斯盆地C—P煤系WPS煤成常规气主要富集在埋深较浅的自由动力场和盆地东部抬升起来的改造型动力场内。考虑到下列3方面原因,认为煤成常规气资源潜力相对较小,大规模勘探开发风险较大:

① C—P煤系WPS源岩在演化过程中提供的常规油气原始烃量共约 $1\,150 \times 10^8$ t,所占生烃总量比率较小,约为13.27%;② C—P煤系目前普遍致密,仅有盒6段及其以上地层处于自由动力场且远离下部煤系源岩,除东部地区外的区域性盖层广泛发育且厚度大、完整性好,天然气向上运移困难,钻探结果表明距离源岩层越远,盒6段及其以上地层含气性差(图7a),另外盒6段及其以上地层处于盆地斜坡背景下,圈闭构造不发育且规模非常小,不利于煤成常规气藏的形成与分布(图7b₃);③ 进入晚白垩世之后,盆地东部抬升并产生大量断裂,虽然有利于裂缝的形成和改造类气藏的形成与分布,但因这次构造变动后的沉积作用弱、上覆地层剥蚀厚度较大,更主要的是导致了早前形成的油气藏被破坏和已经聚集的油气量的散失。前人研究表明,鄂尔多斯盆地东部的神木—米脂气田天然气散失率可达58%^[24]。

3.3 深层煤层气资源潜力与发展前景

鄂尔多斯盆地C—P煤系WPS深层煤层气资源潜力巨大,发展前景看好。基于全油气系统分析,主要有4方面原因(图9)。

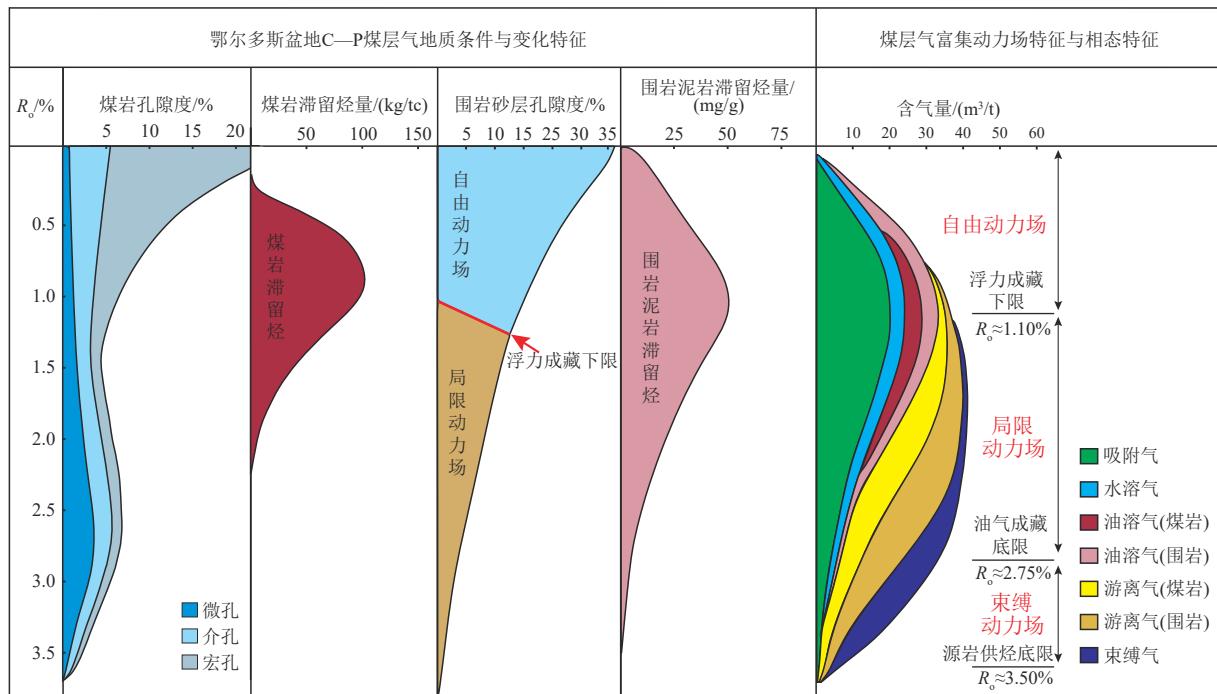


图9 鄂尔多斯盆地C—P煤系全油气系统纵向地质条件匹配关系及煤层气富集特征与相态演化规律

Fig. 9 Geological condition matching, CBM enrichment characteristics, and phase evolution in the vertical direction in the whole petroleum system of the Carboniferous-Permian coal measures in the Ordos Basin

R_0 : 镜质体反射率

(建立相关模式主要应用了中国石油长庆油田和煤层气公司有关鄂尔多斯盆地C—P煤系煤岩滞留原始烃量和围岩层泥页岩滞留原始烃量的测试数据资料,另外引用了文献[21, 40, 42~43]中的相关资料对其进行补充和完善。)

1) 深层煤层气富集条件好于浅层。随着埋深增大,煤层吸附气量不断增大并在一定埋深内达到高峰期;随着埋深增大,煤层生气量增大,当他们饱和了煤层吸附等形式的需要后,将以游离态形式聚集在煤夹层和煤岩围层内;若仅考虑热演化程度的影响,随着埋深增大和煤岩热演化程度不断增加,煤岩内微孔体积比率增大^[40],煤层气还将以束缚态形式继续滞留于煤层内,这一过程一直延续到源岩层进入供烃底限,但若埋深增加导致的地应力,特别是侧向构造应力增加,可能会使得煤岩内部发育构造微裂缝,增加孔隙度的同时还会增加煤层的渗流能力,为游离气的富集和运移创造条件。

2) 深层煤层气保存条件好于浅层。中-浅层煤系地层处于自由动力场,煤岩生成的天然气首先溶解于孔隙水或与之伴生的液态烃内,多余的天然气或被吸附在煤岩和矿物表面或受扩散作用向外运移;中-深层煤系地层处于局限动力场,煤岩大量生成的天然气已经饱和了煤系地层各种形式的存留需要,多余的天然气将以游离态和吸附态形式在各类储集层孔隙中聚集起来并增大地层压力。

3) 深层煤层储气空间好于浅层。煤层在深埋过程中孔-中渗储层先是不断减少的,但当煤岩 R_o 超过1.5%后,其微孔比例呈现出不断增加的特征,储气空间和孔隙比表面积均持续增加并达到某一孔隙体积比率高峰^[40-43],表明深层煤层气在理论上存在一个富气高峰期,鄂尔多斯盆地东部深层煤层气勘探获得重大突破,日产气量高达 $20 \times 10^4 \text{ m}^3$ 证明了这一点。

4) 煤层富气量随埋深增大而增大,并在自由动力场向局限动力场过渡区达到高峰。煤层在自由动力场上部以水溶态滞留天然气,下部以吸附态聚集天然气;进入局限动力场上部以游离态富集天然气,下部以束缚态保存天然气。总之,煤层滞留气量随埋深增大呈现出大肚子曲线变化特征,游离气最富集的区域和与之对应的地层领域($0.5\% < R_o < 2.5\%$)有利于深层煤层气勘探和开发。

3.4 煤系气资源潜力与发展前景

鄂尔多斯盆地上古生界煤系WPS煤系气资源潜力巨大,发展前景广阔。这里的煤系气是指煤系之中富集的全部天然气,包括煤岩气、煤夹层气、煤岩围层气和煤系泥页岩气等(图10a)^[44]。煤系地层内部生-储-盖条件组合特征复杂,储层非均质性通常有“煤-砂-泥”“煤-灰-泥”和“煤-泥-灰”等形式(图10b),同时煤岩性质纵向非均质性强^[45]。通过对煤系地层发

育特征和含气性钻探结果剖析,认识到煤系气资源潜力和发展前景较之深层煤层气更好,主要原因有3个方面。

1) 鄂尔多斯盆地C—P煤系累积烃源岩厚度,远比能够单独作为煤岩气或煤层气开发的5#煤层和8#煤层厚度之和大得多。以鄂尔多斯盆地东南部上古生界煤系烃源岩分布为例,本溪组煤层平均厚度为6.2 m、太原组含薄煤层、山西组煤层平均厚度为5.1 m,除此之外,还发育大量炭质泥岩和暗色泥岩,其中很大部分都是品质较高的烃源岩,煤层厚度仅仅只占烃源岩层厚度的10.8%^[37]。如果加之煤系泥岩中的有机质,则煤系地层生气总量将远大于煤层的生气总量。

2) 鄂尔多斯盆地C—P煤系作为储集层的体积远比能够单独作为含气层开发的5#煤层和8#煤层体积之和大得多。统计分析结果表明,本溪组、太原组、山西组和下石盒子组煤系地层内,能够构成储气层的累积厚度达56.0~130.0 m^[46],约为5#煤层和8#煤层厚度之和(8.0~31.0 m)的5倍。

3) 鄂尔多斯盆地C—P煤系内富集气量远比5#煤层和8#煤层的多。模拟计算结果表明,煤系地层内滞留的煤岩气、煤岩夹层气、煤岩围层气和煤系泥岩气量共计约 $4\,310.0 \times 10^8 \text{ t}$,他们是5#煤层和8#煤层含气总量($10\,503.0 \times 10^8 \text{ m}^3$,约 $10.5 \times 10^8 \text{ t}$)的411倍。另外,5#煤层和8#煤层并非在整个盆地的厚度都超过1.3 m,在厚度较薄的地区,煤层气只有与其他煤系气合并开采才具有商业价值,例如延安组的低阶煤层^[47],重视煤系气资源并研发联合开采关键技术是今后应当努力的大方向。

4 结 论

1) 鄂尔多斯盆地发育了C—P煤系全油气系统,其边界范围在纵向上包括本溪组至石千峰组等,平面上涵盖整个盆地,演化历程自石炭纪沉积以来至现今。全油气系统内形成了包括煤系地层成因的煤成常规气、煤成致密气和煤层气。

2) 鄂尔多斯盆地煤系全油气系统存在浮力成藏下限(埋深1 350~2 700 m)、油气成藏底限(埋深5 350 m)和源岩供烃底限(埋深6 600 m)3个动力边界,浮力成藏下限之上形成自由动力场、浮力成藏下限和油气成藏底限之间形成局限动力场、油气成藏底限和源岩供烃底限之间以及地表和油气成藏底限间的烃源岩层内部形成束缚动力场,分别有利于煤成常规气、煤成致密气以及深层和源内煤层气的形成与分布。

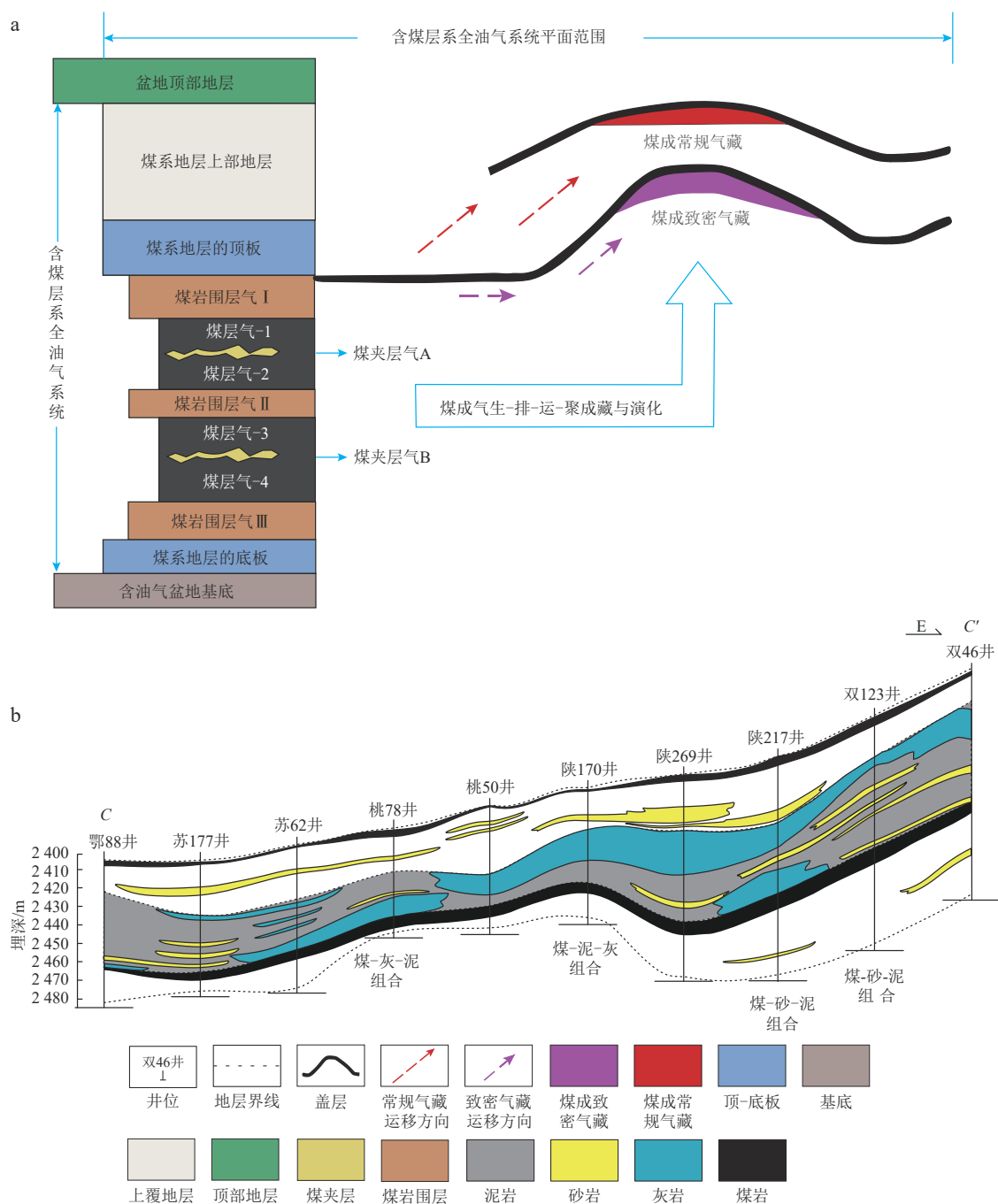


图10 鄂尔多斯盆地C—P煤系全油气系统煤系气资源潜力

Fig. 10 Resource potential of coal-measure gas in the whole petroleum system of the Carboniferous-Permian coal measures in the Ordos Basin

a. 煤系全油气系统构成特征及含气性影响因素(修改自文献[44]); b. 鄂88井—米46井本溪组8#煤储-盖组合剖面(剖面位置见图1a)

3) 煤系全油气系统成藏遵循有序分布模式。煤系顶部中-浅层自由动力场浮力与早期排气量和高孔-高渗储层耦合形成煤成常规气藏;中-深部局限动力场煤储间毛细管力差与晚期排气量和低孔-低渗储层耦合形成煤成致密气藏;底部及其以上煤层束缚动力场分子吸附与束缚的滞留气量和自身微孔隙耦合形成深层煤层气藏。

4) 煤系全油气系统内东部中-浅层自由动力场抬升受到剥蚀,煤成常规气资源潜力小,发展前景有限;中-深层煤成致密气和煤层气分布面积广、目的层厚度大、富气类型多、资源潜力巨大,有望发展成为研究区未来最主要的勘验领域。

致谢:本文资料来源于中国石油相关油田单位,感谢相关领导与项目组成员的大力支持!同时相关油气

藏和富集模式引用了前人大量的研究成果,在此一并致以衷心感谢!

参 考 文 献

- [1] 付金华, 范立勇, 刘新社, 等. 苏里格气田成藏条件及勘探开发关键技术[J]. 石油学报, 2019, 40(2): 240-256.
FU Jinhua, FAN Liyong, LIU Xinshe, et al. Gas accumulation conditions and key exploration & development technologies in Sulige Gas Field [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40 (2) : 240-256.
- [2] 徐凤银, 王成旺, 熊先钺, 等. 鄂尔多斯盆地东缘深部煤层气成藏演化规律与勘探开发实践[J]. 石油学报, 2023, 44(11): 1764-1780.
XU Fengyin, WANG Chengwang, XIONG Xianyue, et al. Evolution law of deep coalbed methane reservoir formation and exploration and development practice in the eastern margin of Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44 (11) : 1764-1780.
- [3] 戴金星, 倪云燕, 胡国艺, 等. 中国致密砂岩大气田的稳定碳氢同位素组成特征[J]. 中国科学(地球科学), 2014, 44(4): 563-578.
DAI Jinxing, NI Yunyan, HU Guoyi, et al. Stable carbon and hydrocarbon isotopes of gases from the large tight gas fields in China [J]. Science China Earth Sciences, 2014, 44 (4) : 563-578.
- [4] 戴金星, 李剑, 罗霞, 等. 鄂尔多斯盆地大气田的烷烃气碳同位素组成特征及其气源对比[J]. 石油学报, 2005, 26(1): 18-26.
DAI Jinxing, LI Jian, LUO Xia, et al. Alkane carbon isotopic composition and gas source in giant gas fields of Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(1): 18-26.
- [5] 冯乔, 耿安松, 廖泽文, 等. 煤成天然气碳氢同位素组成及成藏意义: 以鄂尔多斯盆地上古生界为例[J]. 地球化学, 2007, 36(3): 261-266.
FENG Qiao, GENG Ansong, LIAO Zewen, et al. Carbon and hydrogen isotopic compositions of coal-genetic natural gases and their applications in accumulation in Upper Paleozoic, Ordos Basin [J]. Geochimica, 2007, 36(3): 261-266.
- [6] 杨晋东, 于振锋, 郭旭, 等. 鄂尔多斯盆地东缘晚古生代泥岩地球化学特征及有机质富集机理[J]. 岩矿测试, 2023, 42(6): 1104-1119.
YANG Jindong, YU Zhenfeng, GUO Xu, et al. Geochemical characteristics and organic matter enrichment mechanism in Late Paleozoic mudstone, eastern margin of Ordos Basin [J]. Rock and Mineral Analysis, 2023, 42(6): 1104-1119.
- [7] 倪春华, 朱建辉, 刘光祥, 等. 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区上古生界煤系烃源岩生烃潜力再评价[J]. 石油实验地质, 2021, 43(5): 826-834.
NI Chunhua, ZHU Jianhui, LIU Guangxiang, et al. Re-evaluation of hydrocarbon generation potential of the Upper Paleozoic coal-measure source rocks in the Hangjinqi area of Ordos Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2021, 43 (5): 826-834.
- [8] 戴金星, 倪云燕, 廖凤蓉, 等. 煤成气在产气大国中的重大作用[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(3): 417-432.
DAI Jinxing, NI Yunyan, LIAO Fengrong, et al. The significance of coal-derived gas in major gas producing countries [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(3): 417-432.
- [9] 夏辉, 王龙, 张道锋, 等. 鄂尔多斯盆地庆阳气田二叠系山西组1段层序结构与沉积演化及其控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(6): 1397-1412, 1488.
XIA Hui, WANG Long, ZHANG Daofeng, et al. Sequence architecture, sedimentary evolution and controlling factors of the Permian Shan-1 member, Qingyang Gas Field, southwestern Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(6): 1397-1412, 1488.
- [10] 赵伟波, 黄道军, 王康乐, 等. 鄂尔多斯盆地青石岭气田成藏条件及勘探开发关键技术[J]. 石油学报, 2023, 44(10): 1739-1754.
ZHAO Weibo, HUANG Daojun, WANG Kangle, et al. Accumulation conditions and key technologies of exploration and development for Qingshimao Gas Field in Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(10): 1739-1754.
- [11] 倪春华, 吴小奇, 王萍, 等. 鄂尔多斯盆地大牛地气田上古生界致密气轻烃地球化学特征[J]. 石油实验地质, 2024, 46(2): 366-379.
NI Chunhua, WU Xiaoqi, WANG Ping, et al. Geochemical characteristics of light hydrocarbons in Upper Paleozoic tight gas from Daniudi Gas Field, Ordos Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2024, 46(2): 366-379.
- [12] 庞雄奇, 贾承造, 宋岩, 等. 全油气系统定量评价: 方法原理与实际应用[J]. 石油学报, 2022, 43(6): 727-759.
PANG Xiongqi, JIA Chengzao, SONG Yan, et al. Quantitative evaluation of whole petroleum system: Principle and application [J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(6): 727-759.
- [13] PANG Xiongqi. Quantitative evaluation of the whole petroleum system: Hydrocarbon thresholds and their application [M]. Singapore: Springer, 2023.
- [14] PANG Xiongqi, JIA Chengzao, WANG Wenyang, et al. Buoyance-driven hydrocarbon accumulation depth and its implication for unconventional resource prediction [J]. Geoscience Frontiers, 2021, 12(4): 101133.
- [15] PANG Xiongqi, HU Tao, LARTER S, et al. Hydrocarbon accumulation depth limit and implications for potential resources prediction [J]. Gondwana Research, 2022, 103: 389-400.
- [16] PANG Xiongqi, JIA Chengzao, ZHANG Kun, et al. The dead line for oil and gas and implication for fossil resource prediction [J]. Earth System Science Data, 2020, 12(1): 577-590.
- [17] PANG Xiongqi, JIA Chengzao, CHEN Junqing, et al. A unified model for the formation and distribution of both conventional and unconventional hydrocarbon reservoirs [J]. Geoscience Frontiers, 2021, 12(2): 695-711.
- [18] PANG Xiongqi, SHAO Xinhe, LI Maowen, et al. Correlation and

- difference between conventional and unconventional reservoirs and their unified genetic classification [J]. *Gondwana Research*, 2021, 97: 73–100.
- [19] 杨华, 席胜利, 魏新善, 等. 鄂尔多斯多旋回叠合盆地演化与天然气富集[J]. *中国石油勘探*, 2006, 11(1): 17–24.
- YANG Hua, XI Shengli, WEI Xinshan, et al. Evolution and natural gas enrichment of multicycle superimposed basin in Ordos [J]. *China Petroleum Exploration*, 2006, 11(1): 17–24.
- [20] 杨仁超, 樊爱萍, 韩作振, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界天然气成藏的地质特征[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2005, 24(1): 53–56, 72.
- YANG Renchao, FAN Aiping, HAN Zuozhen, et al. Geological features of natural gas pool formation in the Upper Paleozoic Erathem in the Ordos Basin [J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2005, 24(1): 53–56, 72.
- [21] 李国欣, 贾承造, 赵群, 等. 煤岩气成藏机理与煤系全油气系统[J]. *石油勘探与开发*, 2025, 52(1): 29–43.
- LI Guoxin, JIA Chengzao, ZHAO Qun, et al. Coal-rock gas accumulation mechanism and the whole petroleum system of coal measures [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2025, 52(1): 29–43.
- [22] 刘新社, 黄道军, 虎建玲, 等. 鄂尔多斯盆地中东部地区石炭系本溪组煤岩气储层特征[J]. *天然气工业*, 2024, 44(10): 51–62.
- LIU Xinshe, HUANG Daojun, HU Jianling, et al. Reservoir characteristics of Carboniferous Benxi Formation coal-rock gas in the central and eastern Ordos Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2024, 44(10): 51–62.
- [23] 杨华, 刘新社, 闫小雄. 鄂尔多斯盆地晚古生代以来构造-沉积演化与致密砂岩气成藏[J]. *地学前缘*, 2015, 22(3): 174–183.
- YANG Hua, LIU Xinshe, YAN Xiaoxiong. The relationship between tectonic-sedimentary evolution and tight sandstone gas reservoir since the late Paleozoic in Ordos Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(3): 174–183.
- [24] GUO Yingchun, PANG Xiongqi, LI Zongxing, et al. The critical buoyancy threshold for tight sandstone gas entrapment: Physical simulation, interpretation, and implications to the Upper Paleozoic Ordos Basin [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, 149: 88–97.
- [25] 程远平, 胡彪. 微孔填充——煤中甲烷的主要赋存形式[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(9): 2933–2948.
- CHENG Yuanping, HU Biao. Main occurrence form of methane in coal: Micropore filling [J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(9): 2933–2948.
- [26] 程远平, 胡彪. 基于煤中甲烷赋存和运移特性的新孔隙分类方法[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(1): 212–225.
- CHENG Yuanping, HU Biao. A new pore classification method based on the methane occurrence and migration characteristics in coal [J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(1): 212–225.
- [27] TEICHMÜLLER M. The genesis of coal from the viewpoint of coal petrology [J]. *International Journal of Coal Geology*, 1989, 12(1/4): 1–87.
- [28] 于兴河, 王香增, 王念喜, 等. 鄂尔多斯盆地东南部上古生界层序地层格架及含气砂体沉积演化特征[J]. *古地理学报*, 2017, 19(6): 935–954.
- YU Xinghe, WANG Xiangzeng, WANG Nianxi, et al. Sequence stratigraphic framework and sedimentary evolution characteristics of gas-bearing sandbody in the Upper Paleozoic in southeastern Ordos Basin [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2017, 19(6): 935–954.
- [29] 林进, 李云, 何剑. 鄂尔多斯延长探区本溪组物源及沉积体系分析[J]. *中国地质*, 2013, 40(5): 1542–1551.
- LIN Jin, LI Yun, HE Jian. An analysis of the source and the sedimentary system of the Carboniferous Benxi Formation in Yanchang area of Ordos Basin [J]. *Geology in China*, 2013, 40(5): 1542–1551.
- [30] 苏东旭, 于兴河, 李胜利, 等. 鄂尔多斯盆地东南部本溪组障壁海岸沉积特征与展布规律[J]. *天然气工业*, 2017, 37(9): 48–56.
- SU Dongxu, YU Xinghe, LI Shengli, et al. Sedimentary characteristics and distribution laws of Benxi Fm barrier coast in SE Ordos Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(9): 48–56.
- [31] 张慧. 煤孔隙的成因类型及其研究[J]. *煤炭学报*, 2001, 26(1): 40–44.
- ZHANG Hui. Genetical type of pores in coal reservoir and its research significance [J]. *Journal of China Coal Society*, 2001, 26(1): 40–44.
- [32] 赵喆, 徐旺林, 赵振宇, 等. 鄂尔多斯盆地石炭系本溪组煤岩气地质特征与勘探突破[J]. *石油勘探与开发*, 2024, 51(2): 234–247, 259.
- ZHAO Zhe, XU Wanglin, ZHAO Zhenyu, et al. Geological characteristics and exploration breakthroughs of coal rock gas in Carboniferous Benxi Formation, Ordos Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(2): 234–247, 259.
- [33] 田景春, 王峰, 郑启明, 等. 中国西部三大盆地古生界典型海相砂体特征、分布及意义[J]. *矿物岩石*, 2024, 44(3): 123–141.
- TIAN Jingchun, WANG Feng, ZHENG Qiming, et al. Characteristics, distribution and significance of Paleozoic typical marine sand bodies in three major basins in western China [J]. *Mineralogy and Petrology*, 2024, 44(3): 123–141.
- [34] 孙细宁, 邓长生, 徐敏, 等. 鄂尔多斯盆地子长东区山2段致密储层敏感性评价及其主控因素[J]. *复杂油气藏*, 2024, 17(2): 145–151.
- SUN Xining, DENG Changsheng, XU Min, et al. Sensitivity evaluation and main controlling factors of tight reservoirs for Shan2 member in Zichang east area of Ordos Basin [J]. *Complex Hydrocarbon Reservoirs*, 2024, 17(2): 145–151.
- [35] 戴金星, 秦胜飞, 胡国艺, 等. 新中国天然气勘探开发70年来的重大进展[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(6): 1037–1046.
- DAI Jinxing, QIN Shengfei, HU Guoyi, et al. Major progress in

- the natural gas exploration and development in the past seven decades in China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(6): 1037-1046.
- [36] 张宇. 山西临汾大吉区块石炭-二叠系煤系烃源岩特征研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2023.
- ZHANG Yu. Study on characteristics of source rocks in Permian-Carboniferous coal measure formations in Daji Block, Linfen, Shanxi Province [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2023.
- [37] 师展, 赵靖舟, 孙雄伟, 等. 鄂尔多斯盆地东南部上古生界煤系烃源岩特征及生烃潜力评价 [J]. *天然气地球科学*, 2023, 34(9): 1612-1626.
- SHI Zhan, ZHAO Jingzhou, SUN Xiongwei, et al. Characteristics and hydrocarbon generation potential of Upper Paleozoic coal measure source rocks in the southeastern Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(9): 1612-1626.
- [38] 谭梦琦, 董昭雄, 刘忠群, 等. 鄂尔多斯盆地北部上古生界煤成气及其砂岩气藏成藏模式 [J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2010, 25(5): 33-36, 41, 108.
- TAN Mengqi, DONG Zhaoxiong, LIU Zhongqun, et al. Coal-formed gas of upper Paleozoic in the North of Ordos Basin and its pool forming modes [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2010, 25(5): 33-36, 41, 108.
- [39] 马晓军, 梁积伟, 李建星, 等. 鄂尔多斯盆地中西部中生代构造抬升及演化 [J]. *西北地质*, 2019, 52(4): 127-136.
- MA Xiaojun, LIANG Jiwei, LI Jianxing, et al. Meso-Cenozoic tectonic uplift and evolution of central and western Ordos Basin [J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52(4): 127-136.
- [40] 阎纪伟. 不同煤阶煤的孔隙结构及其对煤层气吸附-扩散的影响 [D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2020.
- YAN Jiwei. Pore structures of various rank coals and their influences on adsorption-diffusion of coalbed methane [D]. Beijing: China University of Mining & Technology (Beijing), 2020.
- [41] PAN Jienan, ZHAO Yanqing, HOU Quanlin, et al. Nanoscale pores in coal related to coal rank and deformation structures [J]. *Transport in Porous Media*, 2015, 107(2): 543-554.
- [42] 杨高峰. 不同煤阶煤储层物性特征研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2013.
- YANG Gaofeng. An research on the physical properties of different rank coal reservoirs [D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2013.
- [43] 刘大锰, 姚艳斌, 蔡益栋, 等. 华北石炭-二叠系煤的孔渗特征及主控因素 [J]. *现代地质*, 2010, 24(6): 1198-1203.
- LIU Dameng, YAO Yanbin, CAI Yidong, et al. Characteristics of porosity and permeability and their geological control of Permian-Carboniferous coals in North China [J]. *Geoscience*, 2010, 24(6): 1198-1203.
- [44] 丁蓉, 庞雄奇, 贾承造, 等. 基于全油气系统理论评价深部煤层气的方法原理和研究实例 [J]. *石油学报*, 2025, 46(3): 532-546.
- DING Rong, PANG Xiongqi, JIA Chengzao, et al. Methods, principles and case study of evaluating deep coalbed methane based on Whole Petroleum System theory [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2025, 46(3): 532-546.
- [45] 牛小兵, 张辉, 王怀厂, 等. 鄂尔多斯盆地中、东部石炭系本溪组煤储层纵向非均质性特征及成因——以M172井为例 [J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(6): 1577-1589.
- NIU Xiaobing, ZHANG Hui, WANG Huaichang, et al. Characteristics and genesis of vertical heterogeneity in a coal seam of the Carboniferous Benxi Formation, eastern Ordos Basin: A case study of well M172 [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(6): 1577-1589.
- [46] 付金华, 段晓文, 姜英昆. 鄂尔多斯盆地上古生界天然气成藏地质特征及勘探方法 [J]. *中国石油勘探*, 2001, 6(4): 68-75.
- FU Jinhua, DUAN Xiaowen, JIANG Yingkun. Geological characteristics and exploration methods of Upper Paleozoic natural gas accumulation in the ordos basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2001, 6(4): 68-75.
- [47] 李勇, 郭涛, 刘欣妍, 等. 中国低煤阶煤层气资源潜力及发展方向 [J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(6): 1537-1554.
- LI Yong, GUO Tao, LIU Xinyan, et al. Resource potential and exploration targets of low-rank coalbed methane in China [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(6): 1537-1554.

(编辑 许 诺)