

白垩纪特提斯域原型盆地与岩相古地理及其控油气作用

黄彤飞¹, 张光亚^{1,2}, 罗贝维¹, 喻志骅¹, 张磊³, 何治亮², 白国平², 尹继全¹,
祝厚勤¹, 殷进垠², 姚健欢⁴

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 北京大学能源研究院, 北京 100871;
3. 中国石油油气和新能源分公司, 北京 100007; 4. 中国石油天然气集团有限公司综合管理部, 北京 100007)

摘要: 研究特提斯域在白垩纪的古构造格局、原型盆地及岩相古地理特征, 对于深化特提斯域油气富集规律认识具有重要作用。在聚焦早白垩世(125 Ma±)和晚白垩世(90 Ma±)特提斯域原型盆地和岩相古地理发育特征的基础上, 重点讨论了白垩纪构造、沉积演化对特提斯域油气成藏条件及富集的控制作用。研究结果表明: ①早白垩世(125 Ma±), 新特提洋处于快速张开阶段, 在特提斯域近劳亚大陆一侧的欧洲—北非段、中东—中亚段主要发育被动陆缘盆地、裂谷盆地和弧后盆地, 在中国西部—印度段主要发育被动陆缘盆地和弧后盆地, 中国东部—东南亚段主要发育克拉通内盆地。在特提斯域近冈瓦纳大陆一侧广泛发育被动陆缘盆地。②晚白垩世(90 Ma±), 新特提洋处于萎缩早期阶段, 特提斯域近冈瓦纳大陆一侧被动陆缘盆地及近劳亚大陆一侧裂谷盆地与弧后盆地继承发展。③特提斯域北缘与南缘在早、晚白垩世均广泛发育厚层以砂岩+泥岩+碳酸盐岩为主的岩相组合, 纵向上形成多套有利生—储—盖组合, 在冈瓦纳大陆北缘的北非、中东及澳大利亚板块北部地区, 油气成藏条件更为优越。④中东波斯湾地区白垩纪在相对稳定的板块构造背景下发育了被动陆缘原型盆地及滨浅海—半深海沉积, 加之阿拉伯板块持续位于低纬度环境, 由此形成和保存了白垩系富有机质烃源岩和多套优质储—盖组合, 为大规模油气富集提供了优越的成藏条件。

关键词: 油气富集; 岩相古地理; 古构造格局; 白垩纪; 原型盆地; 特提斯域

中图分类号: TE121.1

文献标识码: A

Cretaceous prototype basins and lithofacies paleogeography in the Tethyan domain and their role in hydrocarbon accumulation

HUANG Tongfei¹, ZHANG Guangya^{1,2}, LUO Beiwei¹, YU Zhihua¹, ZHANG Lei³, HE Zhiliang², BAI Guoping²,
YIN Jiquan¹, ZHU Houqin¹, YIN Jinyin², YAO Jianhuan⁴

(1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China; 2. Institute of Energy, Peking University, Beijing 100871, China; 3. PetroChina Oil, Gas & New Energies Company, Beijing 100007; 4. General Management Department, CNPC, Beijing 100007, China)

Abstract: Investigating the Cretaceous paleotectonic framework, prototype basins, and lithofacies paleogeographic characteristics of the Tethyan domain is essential for gaining a deeper understanding of the hydrocarbon accumulation patterns therein. Focusing on prototype basins and lithofacies paleogeographic characteristics during the Early Cretaceous (125 Ma±) and Late Cretaceous (90 Ma±) in the Tethyan domain, this study highlights the role of the Cretaceous structural and sedimentary evolution in governing hydrocarbon accumulation and enrichment in the domain. The results indicate the rapid spreading of the Neo-Tethys Ocean during the Early Cretaceous (125 Ma±). Accordingly, the Tethyan domain near Laurasia witnessed the formation of passive margin, rift, and back-arc basins in the Europe-North Africa and Middle East-Central Asia sections; the development of passive margin and back-arc basins in its

收稿日期: 2024-01-20; 修回日期: 2024-05-12。

第一作者: 黄彤飞(1990—), 男, 博士、高级工程师, 海外含油气盆地构造与油气地质。E-mail: huangtfei@petrochina.com.cn。

通信作者: 张光亚(1962—), 男, 博士、教授级高级工程师、博士研究生导师, 全球含油气盆地构造与战略选区。E-mail: zgy@petrochina.com.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目(92255302); 中国石油-北京大学战略合作计划基础研究合作项目(23-2-1); 中国石油天然气股份有限公司重大科技专项(2023ZZ07)。

western China-India section, and the occurrence of intracratonic basins in its eastern China-Southeast Asia section. In contrast, the Tethyan domain near Gondwanaland featured extensive passive margin basins during this period. As the Neo-Tethys Ocean began to contract during the Late Cretaceous (90 Ma±), the passive margin basins in the Tethyan domain near Gondwana and the rift basins and back-arc basins in the realm near Laurasia were maintained and further developed. Throughout the Early and Late Cretaceous, lithofacies assemblages dominated by thickly laminated sandstones, mudstones, and carbonate rocks were widely seen along both the northern and southern margins of the Tethyan domain, with multiple source rock-reservoir-caprock assemblages favorable for hydrocarbon accumulation formed vertically. Notably, regions along the northern margin of Gondwana, including North Africa, the Middle East, and the northern Australian Plate, exhibit superior geological conditions for hydrocarbon accumulation. During the Cretaceous, the Persian Gulf region of the Middle East exhibited passive margin prototype basins with littoral-neritic to bathyal sediments against a relatively stable plate. In comparison, the Arabian Plate's low-latitude environment facilitated the formation and preservation of large quantities of organic-rich source rocks, as well as the multiple reservoir-caprock assemblages of high quality.

Key words: hydrocarbon enrichment, lithofacies paleogeography, paleotectonic framework, Cretaceous, prototype basin, Tethyan domain

引用格式:黄彤飞,张光亚,罗贝维,等. 白垩纪特提斯域原型盆地与岩相古地理及其控油气作用[J]. 石油与天然气地质,2024,45(3):658-672. DOI: 10.11743/ogg20240306.

HUANG Tongfei, ZHANG Guangya, LUO Beiwei, et al. Cretaceous prototype basins and lithofacies paleogeography in the Tethyan domain and their role in hydrocarbon accumulation[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(3): 658-672. DOI: 10.11743/ogg20240306.

白垩系是全球最重要的含油气层系^[1-3]。截至2021年底,白垩系油气可采储量约占全球已发现可采储量的33%^[4];在特提斯域白垩系油气也最为富集,其占全球白垩系油气可采储量的51%。特提斯域白垩系油气资源分布高度不均^[5-6],中东地区白垩系油气可采储量占特提斯域的82%,其次为北非和东南亚地区。系统认识特提斯域的概念与基本地质特征^[7-10]、形成演化规律^[11-14]、资源环境效应^[5-6,15-16]及在地球演化进程中的意义^[17],剖析“岩石圈-水圈-大气圈-生物圈”等多圈层影响下的特提斯域油气资源差异富集特征是地学和油气行业的研究热点。研究原型盆地与岩相古地理旨在通过重塑盆地在全球板块构造中的位置^[18-19],恢复白垩纪原型盆地类型与沉积演化^[20],揭示板块构造、盆地发育和沉积演化对油气成藏条件的控制作用,深化油气分布及富集规律认识。尽管前人已就上述方面做了大量研究工作,但针对特提斯域构造演化及原型盆地与岩相古地理恢复,系统认识特提斯域上、下白垩统成藏条件及油气富集规律的研究鲜有发表。本文依托特提斯地球动力系统重大研究计划与国家油气重大专项,在早白垩世(125 Ma±)和晚白垩世(90 Ma±)全球原型盆地和岩相古地理演化研究的基础上,聚焦特提斯域在这两个时期的古构造格局、原型盆地和岩相古地理发育特征,并通过重点解剖波斯湾油气富集区,探讨它们对油气成藏条件及富集的控制作用。

1 特提斯域地质概况

1.1 特提斯域内涵

特提斯洋最初由Neumayr(1885)提出,用于描述在劳亚大陆和冈瓦纳大陆之间、呈近东西向展布、沉积了侏罗纪海相地层的古大洋(时称中央地中海)^[11]。Suess(1893)将这一古老的大洋命名为特提斯(Tethys)^[8]。经历了一个多世纪的发展,目前对特提斯域的研究已取得长足的进展,中外学者提出了原特提斯域^[21-22]、古特提斯域^[7, 23-27]、中特提斯域^[8, 28-29]和新特提斯域^[30-39]等概念,其时空范围得到了丰富和完善。在时间上,特提斯域是在罗迪尼亚超级联合古陆解体后,从新元古代—寒武纪(540 Ma±)原特提斯洋出现直到新近纪(23 Ma±)新特提斯洋闭合,在冈瓦纳(南方)大陆与劳亚(北方)古陆群之间的古大洋及相关的大陆架。根据特提斯洋的演化历史,前期特提斯洋的消亡伴随着后期特提斯洋的新生与扩张,划分为原特提斯洋(540~400 Ma为主要扩张期,400~280 Ma为主要萎缩期)、古特提斯洋(400~280 Ma为主要扩张期,280~200 Ma为主要萎缩期)、中特提斯洋(280~200 Ma为主要扩张期,200~100 Ma为主要萎缩期)和新特提斯洋(200~100 Ma为主要扩张期,100~23 Ma

为主要萎缩期)。尽管以班公-怒江缝合带作为中特提斯洋残迹的认识已得到广泛认同,但在特提斯域内将中特提斯与新特提斯完全区分开存在一定的困难,因此本次研究采用“原-古-新”三分方案。空间上,本文研究的特提斯域范围为:劳亚大陆南缘(主要指南天山-北山-Solongker缝合带和 Scytho-Turanian 以南区域,它们在某些时期受到特提斯洋活动的直接或间接影响)与冈瓦纳大陆北缘(主要指南美板块、非洲板块、阿拉伯板块、印度板块和澳大利亚板块等北缘,其盆地形成、演化受到特提斯洋演化的影响)及其间古大洋和大陆架的残留地带(图1)。

1.2 特提斯域构造格架

根据特提斯域构造特征及演化的差异性,自西向东可以分为加勒比段、北非-欧洲段(包括西地中海特提斯构造区和东地中海特提斯构造区)、中东-中亚段、中国西部-印度段和中国东部-东南亚段(图1)。本次的研究范围是东半球部分。

北非-欧洲段的西地中海特提斯构造区中,劳亚大陆对应的是劳伦古陆阿瓦隆地块和波罗的板块西南部,冈瓦纳大陆对应的是非洲板块西北部,西临中-新

生代张开的北大西洋,东部以亚平宁造山带与东地中海特提斯构造区相接。东地中海特提斯构造区中,劳亚大陆对应的是以波罗的板块南部为核心的东欧地台,冈瓦纳大陆对应的是非洲板块北部-东北部、阿拉伯板块西北部,西与西地中海特提斯构造区相接,东临中东-中亚段特提斯。

中东-中亚段对应劳亚大陆的东欧地台东南部和哈萨克斯坦板块,冈瓦纳大陆对应的是阿拉伯板块和印度板块西北部,西部与东地中海特提斯区相接,东接中国西部-印度段。该构造区是晚古生代以来,北方的波罗的板块、西伯利亚板块和哈萨克板块拼贴、碰撞,南方大陆及其裂离地块向北漂移,原特提斯洋、古特提斯洋和新特提斯洋先后关闭,以及北方增生大陆边缘弧后张裂、差异挤压等复杂变形条件下形成的,以多期造山形成扎格罗斯造山带等为标志。

中国西部-印度段所对应的劳亚大陆为塔里木板块及以北的哈萨克斯坦板块,冈瓦纳大陆对应的是印度板块北部,西部与中东-中亚段相接,东接中国东部-东南亚段。中国西部-印度段以新特提斯洋关闭,印度板块与欧亚大陆碰撞形成的喜马拉雅造山带

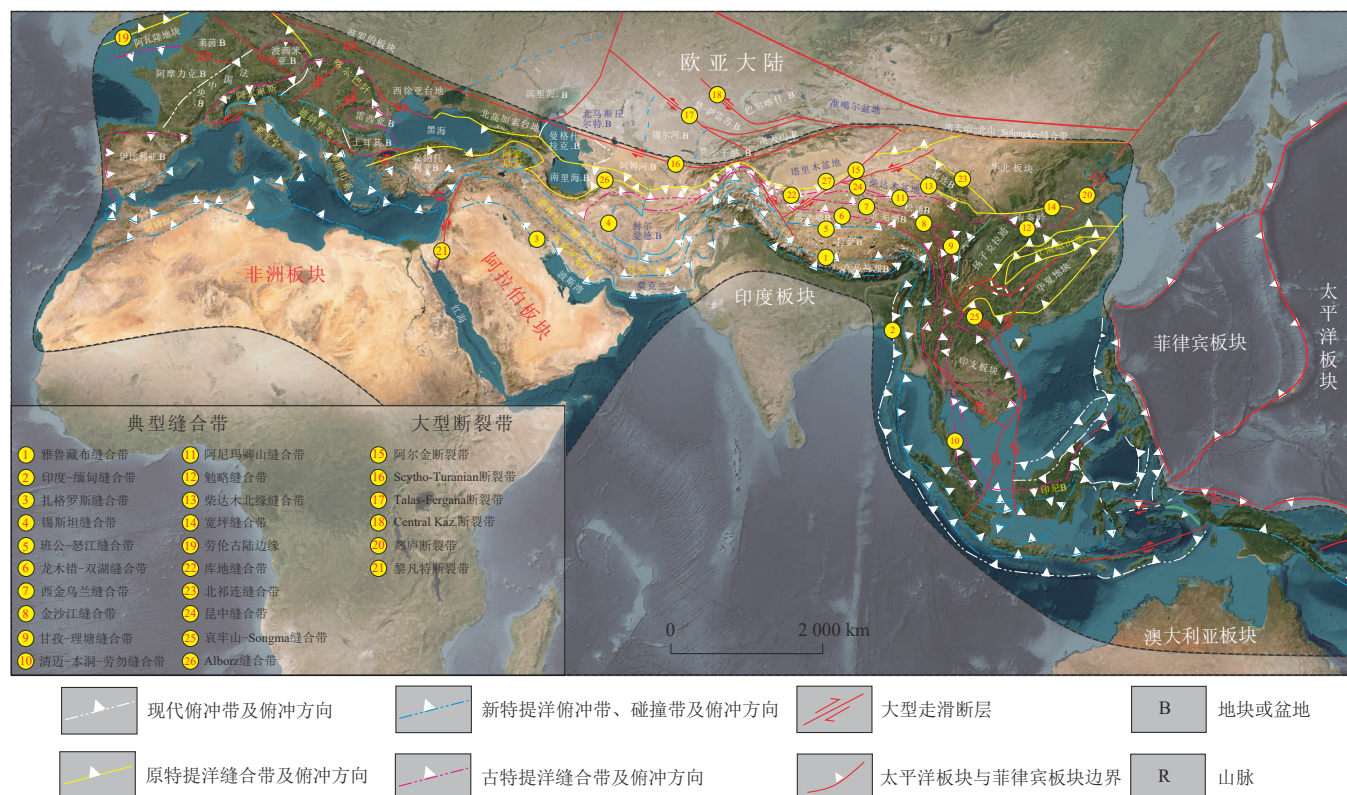


图1 特提斯域及邻区区域构造格架

Fig. 1 Map showing the regional tectonic framework of the Tethyan domain and adjacent areas

[底图据美国国家海洋和大气管理局NOAA数据库;缝合带位置及名称等据吴福元等(2020)、Van Hinsbergen等(2020)和朱日祥等(2022)。]

等为标志。

中国东部—东南亚段所对应的劳亚大陆为华北—华南板块,冈瓦纳大陆对应的是澳大利亚板块,西部与中国西部—印度段相接,东接太平洋构造域。该构造域是古生代以来,罗迪尼亚超大陆解体形成的地块、冈瓦纳超大陆裂离的众多地块先后汇聚拼合,古太平洋、太平洋和印度洋俯冲作用形成的,以发育新生代众多伸展盆地和残留小洋盆为标志。

2 白垩纪特提斯域古构造格局

2.1 白垩纪全球古构造格局

本文参考国内外学者对中国^[40-41]与全球板块构造演化^[18-19,42-43]、古地磁^[44-45]、板块运动模型^[46-47]、板块重建^[48-52]、冈瓦纳大陆、罗迪尼亚超大陆等研究成果,借鉴以古地磁数据为主要依据进行的古板块重建,认为白垩纪全球板块构造演化正处于潘基亚超大陆裂解阶段^[20]。潘基亚超大陆裂解开始于中生代晚期,劳亚大陆和冈瓦纳大陆在早—中三叠世开始裂解,晚三叠世—早侏罗世北美板块与欧亚板块之间分裂,开始形成大西洋;劳亚大陆与冈瓦纳大陆之间裂解扩大,特提斯洋沟通了太平洋与大西洋;冈瓦纳大陆内部分裂,印度、非洲—阿拉伯、澳大利亚—南极洲等板块之间分离,印度洋开始孕育。中侏罗世潘基亚大陆开始明显地裂解,到晚侏罗世分裂为劳亚大陆与冈瓦纳大陆,中大西洋表现为一狭窄大洋,东冈瓦纳与西冈瓦纳开始分裂。

白垩纪潘基亚大陆裂解达到最强盛期。早白垩世,冈瓦纳大陆不断分裂,南大西洋在南美大陆和非洲大陆之间开始分段张开,印度板块和马达加斯加陆块从非洲大陆分离^[55-59];澳大利亚板块西缘的东印度洋开始张裂;劳亚大陆也开始分裂,北美大陆与欧洲大陆分离。晚白垩世,格陵兰陆块从欧洲大陆分离,南美大陆与非洲大陆、澳大利亚板块与南极洲大陆间距加大。

2.2 白垩纪特提斯域古构造格局

随着基梅里陆块群在早二叠世空谷期(280 Ma±)从冈瓦纳大陆明显裂离,向北方大陆聚敛,古特提斯洋与新特提斯洋的发育范围呈现此消彼长的态势,古特提斯洋逐渐关闭,新特提斯洋进入扩张阶段^[10-11]。中—晚侏罗世,古特提斯洋闭合,形成碰撞缝合带(图1),但新特提斯洋的扩张并未终止。早白垩世处于新特提斯洋的

主要扩张阶段,在冈瓦纳大陆与北方大陆之间发育大洋中脊,在早白垩世晚期,潘基亚大陆裂解达到鼎盛时期,新特提斯洋张开宽度达到最大,冈瓦纳大陆一侧属于稳定大陆边缘,广泛发育与伸展相关的被动陆缘盆地和裂谷盆地。晚白垩世处于新特提斯洋的主要萎缩阶段,晚白垩世早期,新特提斯洋北缘开始向北方大陆发生俯冲消减,北方大陆一侧属于活动大陆边缘,广泛发育与俯冲挤压相关的原型盆地类型,此时冈瓦纳大陆与北方大陆之间的大洋中脊消失,仅在印度板块与澳大利亚板块之间发育大洋中脊。在新特提斯洋南缘,非洲—阿拉伯板块整体绕西北非陆块发生逆时针旋转,印度板块及澳大利亚板块发生东北向单行汇聚,新特提斯洋逐渐萎缩闭合。该运动持续到始新世,欧亚大陆发生碰撞,新特提斯洋最终闭合。

3 白垩纪特提斯域原型盆地

3.1 白垩纪全球原型盆地

早白垩世是全球洋盆迅速扩张的时期,北大西洋和印度洋洋壳形成。在与北大西洋、中大西洋和印度洋相邻的大陆边缘广泛发育被动陆缘盆地(图2)。南美与非洲之间开始发育裂谷盆地,断裂分离呈剪刀状在南美和非洲之间发育。另外,主要盆地类型还包括克拉通盆地、弧前盆地、弧后盆地及前陆盆地。弧前、弧后及前陆盆地的发育主要受太平洋板块的俯冲控制,主要分布在南、北美洲西海岸及欧亚大陆的东缘。克拉通盆地发育在北美、南美、非洲、澳大利亚及欧亚大陆腹地。

晚白垩世,西冈瓦纳大陆进一步解体,南大西洋洋壳形成,离散大陆的边缘迅速沉降,形成被动陆缘盆地,如发育在南美东南缘、非洲西南缘、非洲东缘、印度北缘、澳大利亚西缘及南缘的盆地。格陵兰岛和北美大陆之间进一步裂开,开始发育裂谷盆地。

晚白垩世的海侵达到奥陶纪以来的最大范围,海水侵入内陆地区,克拉通盆地的沉积范围明显变大,如北美西部和南美。在欧亚大陆内部裂谷盆地发育。受太平洋板块俯冲影响,在板块两侧的北美大陆、南美大陆西缘和欧亚板块东缘,发育与聚敛背景有关的盆地,包括弧前盆地、弧后盆地及前陆盆地。

3.2 白垩纪特提斯域原型盆地

早白垩世与晚白垩世特提斯域原型盆地类型及平面分布具有明显继承性和规律性(图3,图4)。在冈瓦

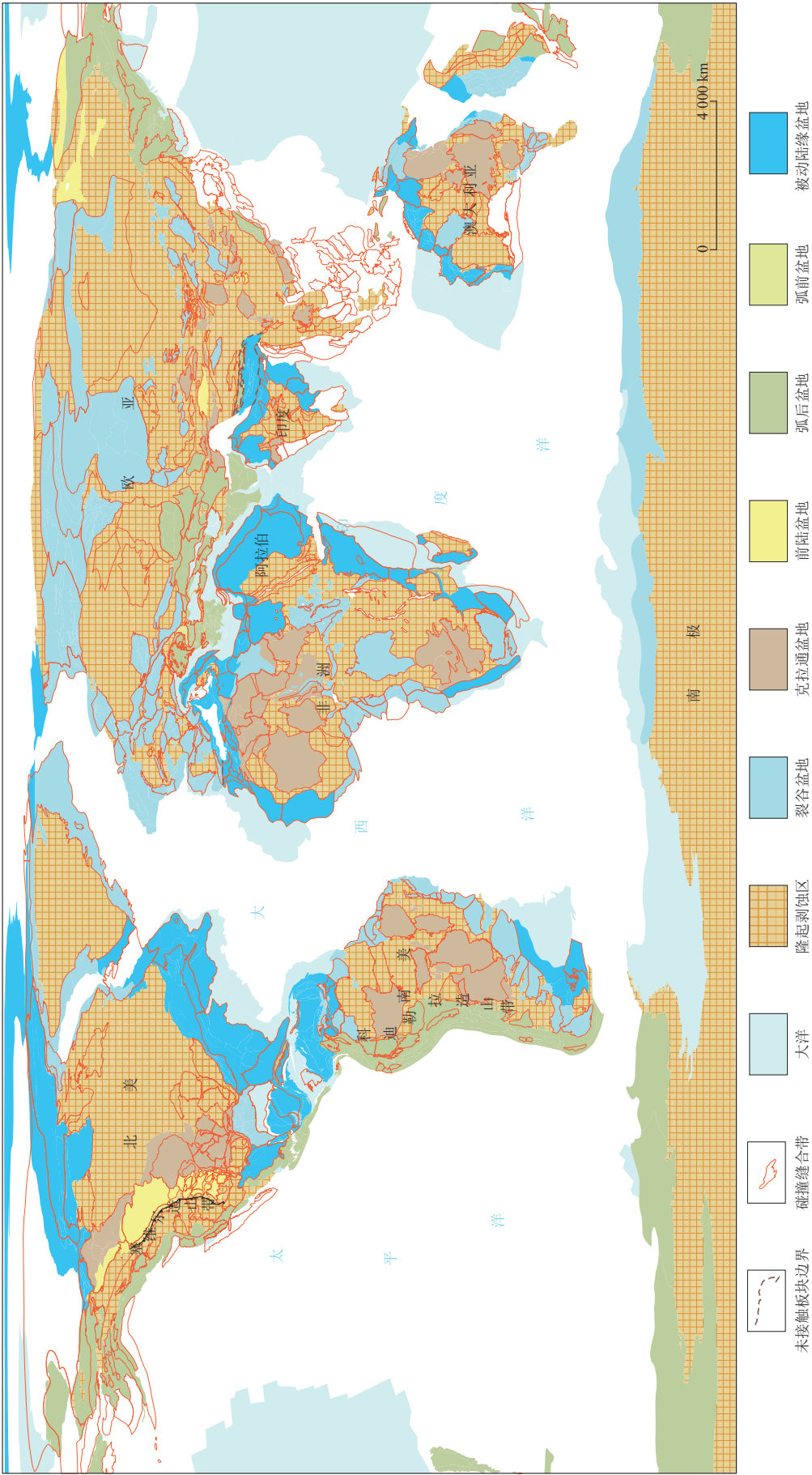


图2 早白垩世(125 Ma±)全球原型盆地分布(据张光亚等, 2019)

Fig. 2 Map of global prototype basins during the Early Cretaceous (125 Ma±; after Zhang et al. , 2019)

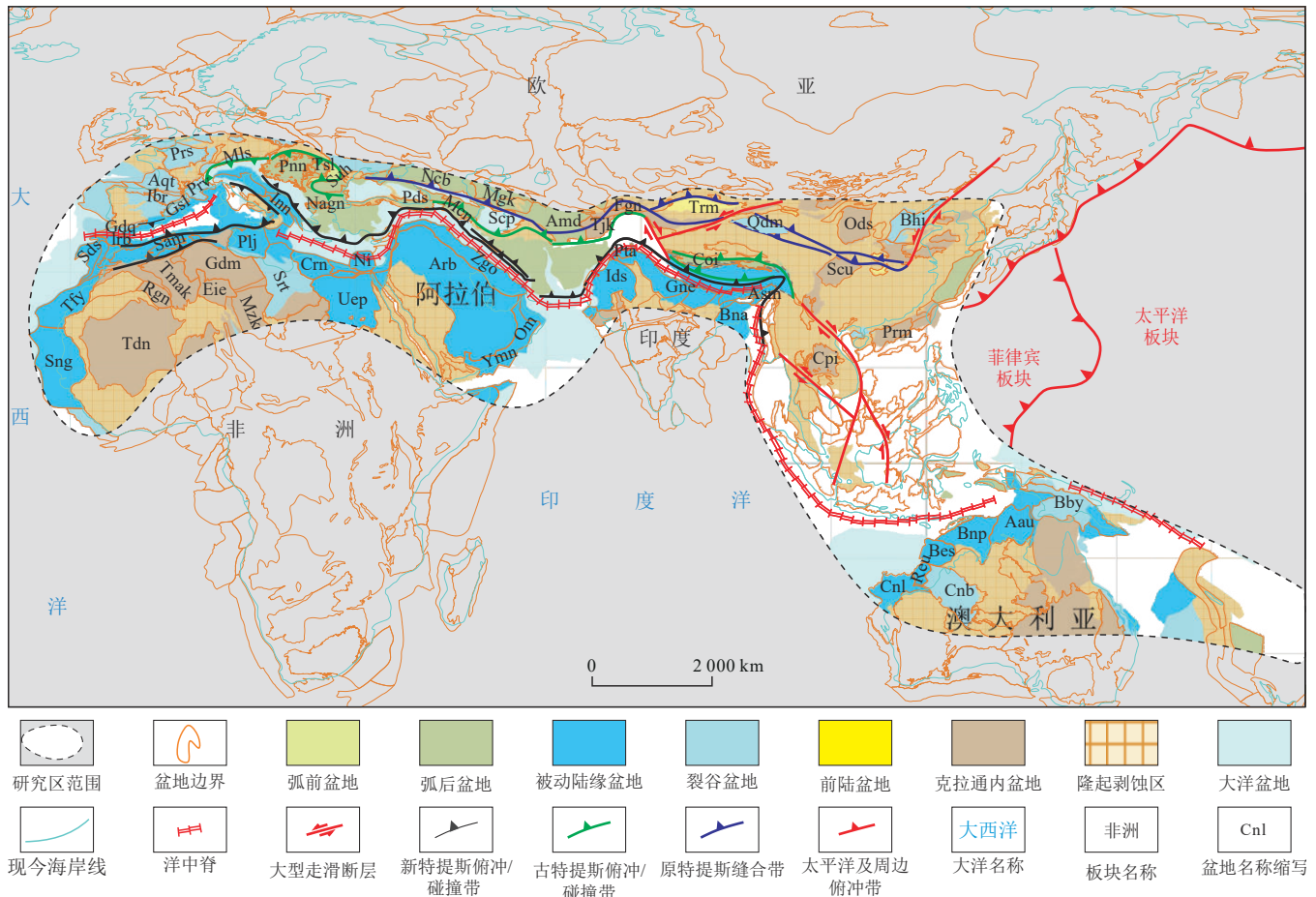


图3 早白垩世(125 Ma±)特提斯域及邻区原型盆地分布

Fig. 3 Map of prototype basins in the Tethyan domain and adjacent areas during the Early Cretaceous (125 Ma±)

[构造单元边界性质与时代厘定参考Torsvik等(2014), Torsvik(2019), Scotese(2021)和朱日祥等(2022)。

图中盆地名称缩写见正文后注释。]

纳大陆的北缘,普遍发育被动陆缘盆地;在劳亚大陆的南缘,自西向东,主要发育被动陆缘盆地和弧后盆地。

3.2.1 北非—欧洲段原型盆地展布

在北非—欧洲段的西地中海特提斯构造区,新特提斯洋北缘(现为北非一侧)在早白垩世与晚白垩世均为稳定大陆边缘,发育的原型盆地均为被动陆缘盆地,如塞内加尔盆地、塔尔法亚盆地、杜卡拉盆地、霍德纳盆地、南奥兰梅塞塔盆地以及佩拉杰盆地等。

向大陆腹地,劳亚大陆一侧主要发育裂谷盆地,如瓜达尔基维尔盆地、加泰罗尼亚盆地、普罗旺斯盆地等,而冈瓦纳大陆一侧主要发育克拉通内盆地,如陶丹尼盆地、雷甘盆地、蒂米蒙—阿赫奈特盆地、古达米斯盆地等。

在北非—欧洲段的东地中海特提斯构造区,新特提斯洋北缘(现为欧洲一侧)和南缘(现为非洲一侧)在早白垩世与晚白垩世发育的原型盆地开始分异。由于新

特提斯洋北缘向北方大陆俯冲,欧洲一侧发育的早白垩世与晚白垩世原型盆地主要为弧后盆地,如潘农盆地、爱琴海北部盆地;在古特提斯和原特提斯缝合带附近,零星发育前陆盆地,如南喀尔巴阡盆地。非洲大陆一侧构造稳定,不受北缘俯冲的影响,主要发育被动陆缘盆地,如爱奥尼亚盆地、昔兰尼加盆地、上埃及盆地、北埃及盆地和尼罗河三角洲盆地等;向非洲大陆腹地,该时期主要发育的原型盆地类型为陆内裂谷盆地和克拉通盆地,如锡尔特裂谷盆地和穆祖克克拉通内盆地等。

3.2.2 中东—中亚段原型盆地展布

该段发育了与东地中海构造区相似的早白垩世与晚白垩世原型盆地及展布特征。稳定大陆边缘一侧发育大规模的被动陆缘盆地,如阿拉伯盆地、阿曼盆地和扎格罗斯盆地等。活动大陆边缘一侧主要发育弧后盆地,如庞帝斯盆地、小高加索盆地、库姆盆地和阿姆河盆地等。

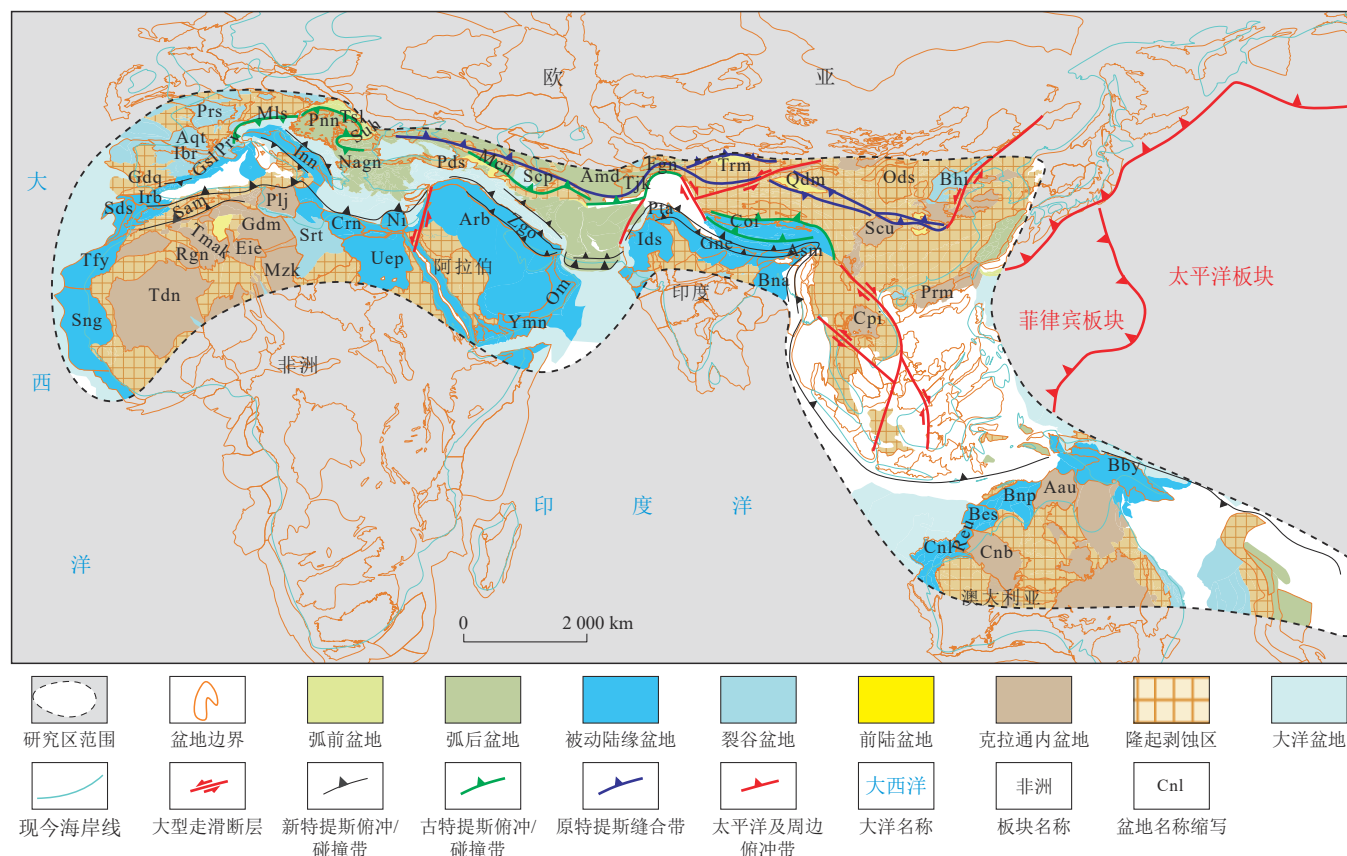


图4 晚白垩世(90 Ma±)特提斯域及邻区原型盆地分布

Fig. 4 Map of prototype basins in the Tethyan domain and adjacent areas during the Late Cretaceous (90 Ma±)

[构造单元边界性质与时代厘定参考Torsvik等(2014), Torsvik(2019), Scotese(2021)和朱日祥等(2022)。

图中盆地名称缩写见正文后注释。]

3.2.3 中国西部—印度段原型盆地展布

在中国西部—印度段,早白垩世与晚白垩世新特提斯洋南缘发育的原型盆地类型及展布特征与中东—中亚段相似。印度板块的周缘发育被动陆缘盆地,如恒河盆地、波特瓦尔盆地、印度河盆地、孟加拉盆地和阿萨姆盆地等;新特提斯洋北缘的原型盆地类型主要有中国西藏的措勤弧后盆地,中亚地区的塔吉克和费尔干纳等弧后盆地。

3.2.4 中国东部—东南亚段原型盆地展布

在中国东部—东南亚段,早白垩世与晚白垩世新特提斯洋南缘的盆地原型发育及展布特征与冈瓦纳大陆北缘其他地区基本一致。澳大利亚板块的西部到北部边缘发育被动陆缘盆地,如卡纳尔文盆地、布劳斯盆地和波拿帕特盆地等;该时期特提斯域北部(中国东南部华南板块)发育因距新特提斯洋活动带遥远,对华南板块的直接影响较小,弧后和前陆等与俯冲碰撞有关

的原型盆地不发育,特提斯域北缘的邻区发育的原型盆地类型主要为克拉通内盆地(四川盆地、珠江口盆地和鄂尔多斯盆地等)。

4 白垩纪特提斯域岩相古地理

4.1 白垩纪全球岩相古地理

早白垩世(125Ma±)全球岩相古地理发育特征呈现明显的规律性^[18-19]。全球主要的大陆边缘广泛发育浅海砂岩+泥岩、砂岩+泥岩+碳酸盐岩沉积,在各大陆内部主体为隆起剥蚀区与近源陆相沉积^[61]。具体来说,欧亚大陆的腹地为大面积的隆起剥蚀区,但在中国华南板块内部等处,发育陆相断陷湖盆,沉积了厚层的砂岩+泥岩组合。在印度板块内部,以隆起剥蚀为主。澳大利亚板块北部发育浅海相碎屑岩沉积,其内部及南部则以陆相为主。在非洲大陆内部的中-西非裂谷系盆地群,广泛沉积了巨厚的早白垩世陆相砂岩+泥

岩,与该时期非洲板块内部各陆块间差异离散、伸展断陷有密切关系^[62-63];在非洲大陆西缘与南美大陆东缘,发育了陆相碎屑岩体系。在南美大陆西缘,广泛沉积了陆相砂岩+泥岩,而与其他大陆边缘相比,浅海砂岩+泥岩相对不发育。北美板块内部以大面积的隆起剥蚀区为主,西部科迪勒拉山向陆一侧发育海相碎屑岩体系。

晚白垩世与海平面上升在离散大陆边缘对岩相古地理的影响更为明显。具体来看,南美东缘与非洲大陆西缘沉积体系由早白垩世近源陆相沉积转变为晚白垩世浅海碎屑沉积。南美西缘在该时期接受海侵范围明显增大,安第斯山前陆盆地群沉积了厚层泥质碳酸盐岩与海相碎屑岩。在非洲大陆北非地区,海水沿 Benue 槽-尼日尔 Termit 盆地向北发生侵入,沉积了晚白垩世海相碎屑岩地层^[59],但中非裂谷系盆地群该时期仍为陆相碎屑沉积体系^[63]。北美大

陆东缘已接受海侵沉积,大西洋的持续张开造成海侵在南、北方向贯通,岩相组合由陆内狭窄的陆相碎屑沉积逐渐演变为陆间开阔的海相碎屑岩体系。

4.2 白垩纪特提斯域岩相古地理

在早白垩世(125 Ma±),特提斯域广泛发育浅海沉积环境,岩相组合特征以砂岩+泥岩+碳酸盐岩为主,向欧亚大陆以及非洲-阿拉伯板块内部,早白垩世浅海沉积环境逐渐过渡为陆相碎屑沉积(图5)。

在冈瓦纳大陆北缘,自非洲大陆到阿拉伯板块一带,由西向东,在杜卡拉盆地、切里夫盆地、阿赫奈特盆地、古达米斯盆地、佩杰拉盆地、锡尔特盆地和上埃及盆地等,该时期为浅海沉积环境,岩相组合为砂岩+泥岩+碳酸盐岩。在阿拉伯盆地和扎格罗斯盆地,早白垩世同样为浅海沉积环境,但岩相组合为质纯、层厚的碳酸盐岩。向冈瓦纳大陆内部,沉积环境转变为湖泊

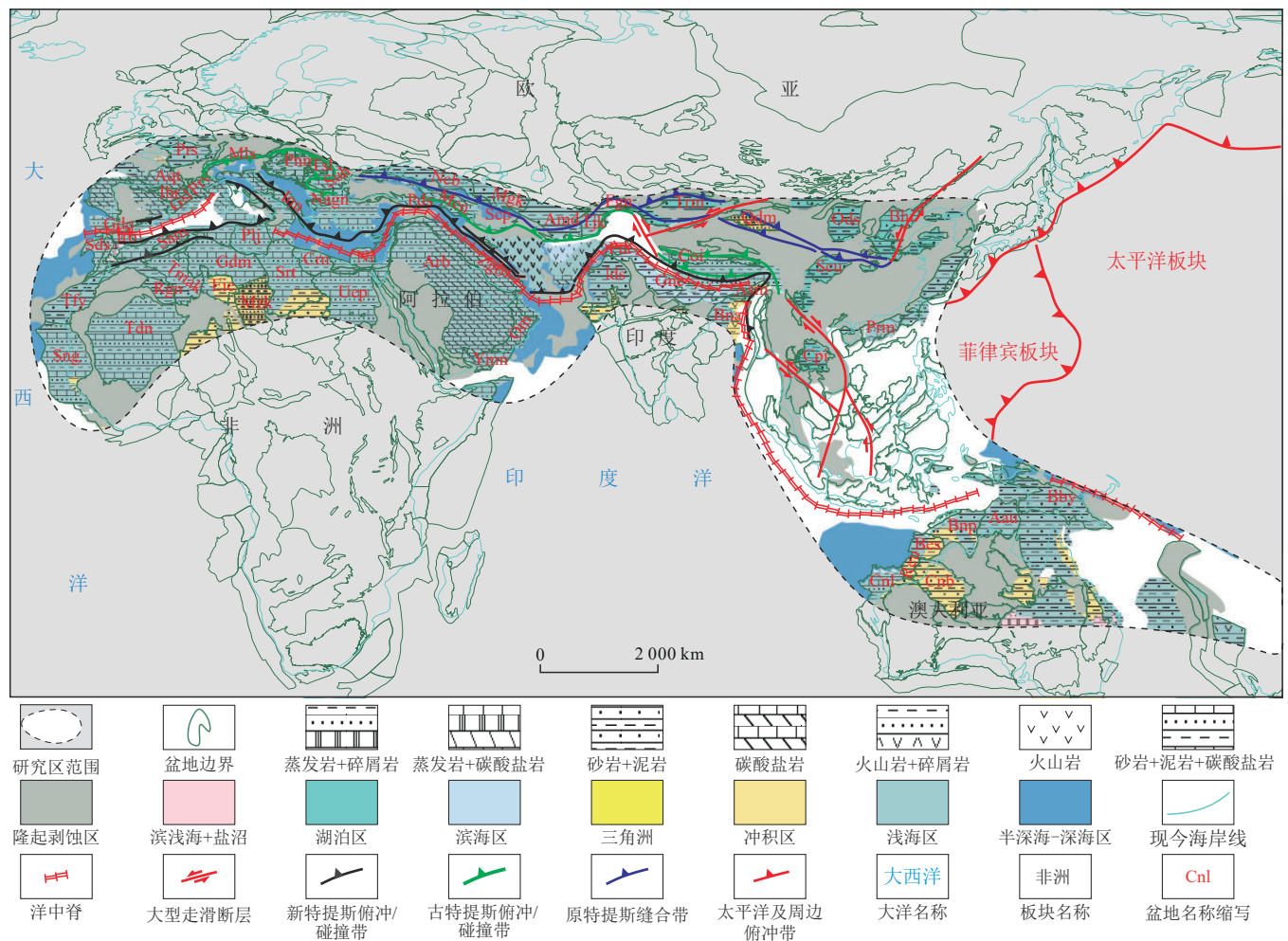


图5 早白垩世(125 Ma±)特提斯域及邻区岩相古地理分布

Fig. 5 Lithofacies paleogeography of the Tethyan domain and adjacent areas during the Early Cretaceous (125 Ma±)

[构造单元边界性质与时代厘定参考Torsvik等(2014), Torsvik(2019), Scotese(2021)和朱日祥等(2022)。

图中盆地名称缩写见正文后注释。]

相和三角洲,岩相组合以砂岩+泥岩为主。

在印度板块北缘,早白垩世沉积环境为滨海,岩相组合为砂岩+泥岩的海相碎屑岩沉积。在澳大利亚板块的西北缘-北缘,沉积环境为浅海,岩相组合表现为以砂岩+泥岩为主的碎屑岩沉积体系,比如卡纳尔文盆地、波拿帕特盆地和阿拉弗拉盆地,而在罗巴克盆地和坎宁盆地等陆内盆地,该时期的沉积体系为陆相砂泥岩体系。

在欧亚大陆南缘,各盆地沉积环境与地理位置上相应的非洲板块北缘十分相似,时代具有可对比性。自西向东,在瓜达尔基维尔盆地、加泰罗尼亚盆地、普罗旺斯盆地、环亚宁西北盆地、爱奥尼亚盆地及爱琴海北部盆地,该时期的沉积环境主体为浅海,岩相组合以砂岩+泥岩+碳酸盐岩为主,而在庞蒂斯盆地和小高加

索盆地等,沉积环境主要为浅海,广泛发育了厚层碳酸盐岩。库姆盆地、阿姆河盆地及塔吉克盆地普遍发育了火山岩。在现今青藏高原一带,早白垩世主要发育了浅海碎屑岩+碳酸盐岩沉积体系。

在晚白垩世(90 Ma±),特提斯域沉积环境和沉积体系基本继承了早白垩世(125 Ma±)的格局,广泛发育了浅海沉积环境,岩相组合特征以砂岩+泥岩+碳酸盐岩为主,向欧亚大陆以及非洲-阿拉伯板块内部,沉积环境逐渐由浅海过渡为陆相碎屑岩沉积体系。在部分地区,沉积环境和沉积体系发生了较大的变化:在冈瓦纳大陆北缘的阿赫奈特盆地和阿拉伯盆地,沉积环境由早白垩世的浅海转变为滨浅海+盐沼,岩相组合分别由早白垩世砂岩+泥岩+碳酸盐岩、质纯厚层的碳酸盐岩过渡为蒸发岩+碎屑岩、蒸发岩+碳酸盐岩(图6)。

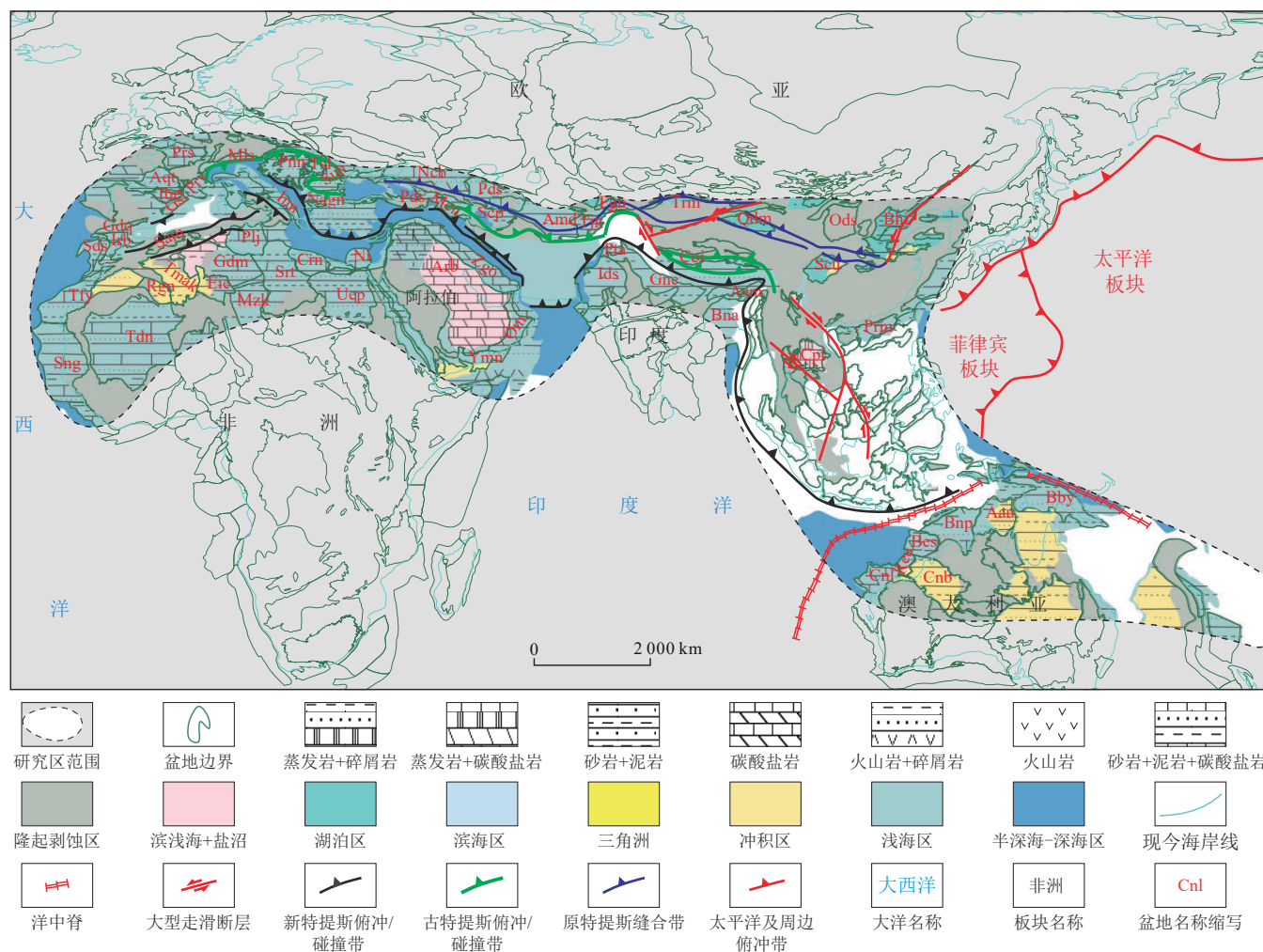


图6 晚白垩世(90 Ma±)特提斯域及邻区岩相古地理分布

Fig. 6 Lithofacies paleogeography of the Tethyan domain and adjacent areas during the Late Cretaceous (90 Ma±)

[构造单元边界性质与时代厘定参考Torsvik等(2014), Torsvik(2019), Scotese(2021)和朱日祥等(2022)。

图中盆地名称缩写见正文后注释。]

5 白垩纪原型盆地、岩相古地理对油气富集的控制作用

白垩系是全球已发现油气最多的层系。据 IHS (2022)数据库,截至2021年底,白垩系中已发现油气可采储量超过 1.44×10^{12} bbl 油当量。中东—中亚段已发现的油气可采储量占特提斯域的72%,而该段内白垩系石油可采储量占比最大,达到77%,天然气可采储量占比达到66%。这些油气又主要富集于波斯湾地区的阿拉伯被动陆缘盆地和扎格罗斯前陆盆地,分

别占中东—中亚段已发现油气储量的78%和17%。因此解剖波斯湾地区白垩纪原型盆地和岩相古地理特征与油气超级富集的关系,有助于揭示特提斯域乃至全球白垩纪原型盆地、岩相古地理对油气成藏条件及富集的控制作用。

白垩纪波斯湾地区被动陆缘原型盆地发育、海平面升降等及其控制的岩相古地理展布,有利于白垩纪富有机质烃源岩的广泛发育与保存,纵向上多套优质规模储—盖组合为波斯湾地区油气富集提供了扎实的物质基础和先决条件(图7)。

白垩纪继承性发育的被动陆缘原型盆地造就了长

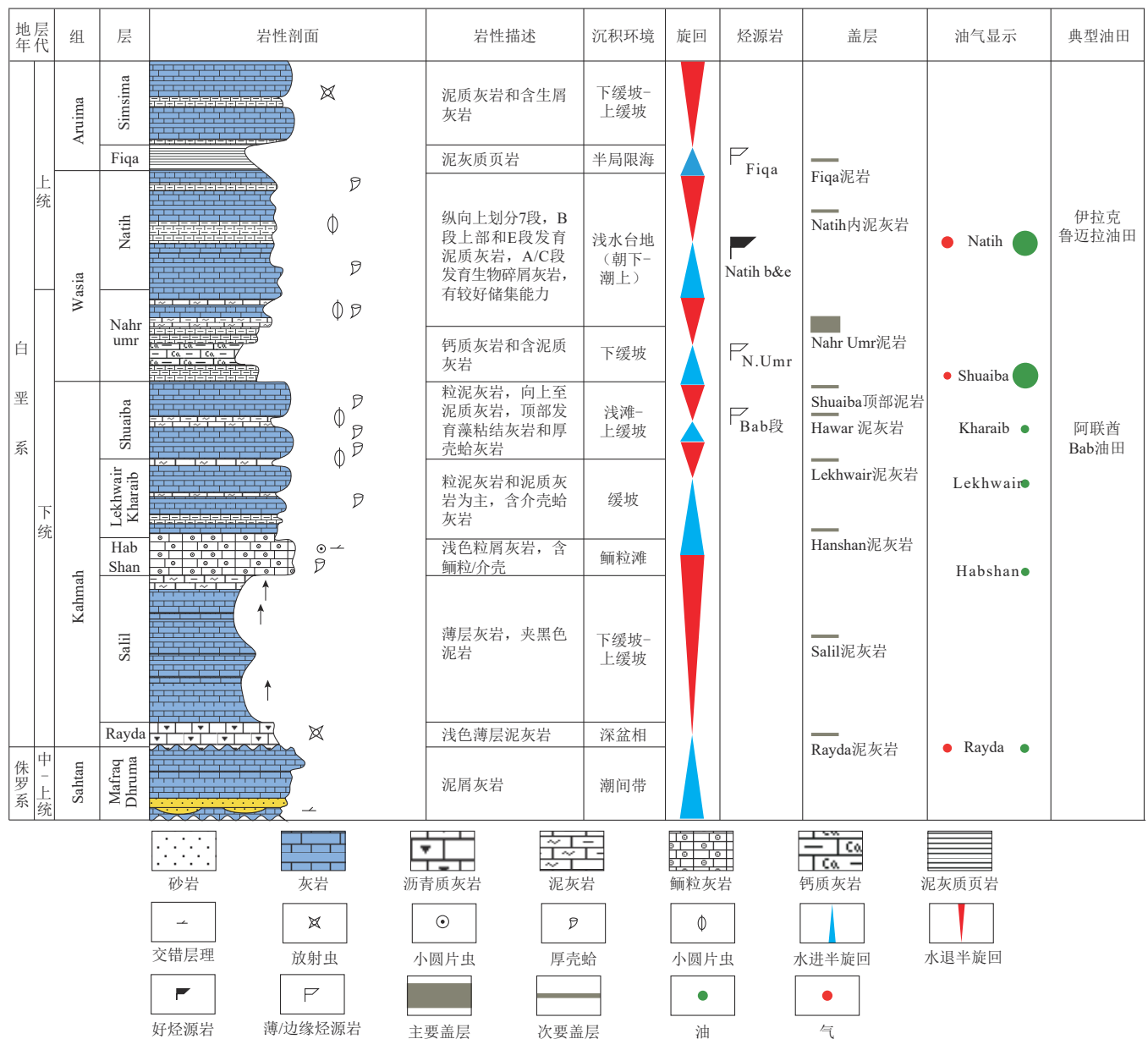


图7 波斯湾地区白垩系综合柱状图及生-储-盖配置关系

Fig. 7 Composite stratigraphic column with source rock-reservoir-caprock configuration of the Cretaceous strata in the Persian Gulf region (岩性组合主要参考阿曼地区。)

期稳定的浅海大陆架,同时白垩纪阿拉伯板块位于赤道与北纬20°的热带-亚热带地区,适宜的水温有利于藻类繁盛。阿拉伯板块尽管在早白垩世和晚白垩世分别处于新特提斯扩张晚期和萎缩早期阶段,但新特提斯洋北缘的俯冲消减对阿拉伯板块几乎没有影响,因此该板块长期处于相对稳定大地构造背景,浅海大陆架环境为优质烃源岩的形成与保存提供了有利条件^[64-67]。下白垩统阿尔必阶 Kazhdumi (伊拉克)、Shuaiba 组 Bab 段泥岩和贝里阿斯阶 Sulaiy 组泥岩及上白垩统森诺曼阶 Khatiyah/Shilaif 组烃源岩均沉积于该构造背景和沉积环境,其有机质类型好,属于 I 型和 II₁ 型干酪根,总有机碳含量(TOC)普遍介于1%~6%,最高达8%。烃源岩厚度普遍大于200 m,最厚可达500 m。同时,由于该区发育的盆地规模大,早、晚白垩世海泛期形成的优质烃源岩分布面积分别达12×10⁴ km²和7×10⁴ km²。这些都为该地区白垩系含油气系统提供了丰富的油源,同时也对新生界含油气系统有重要贡献。

白垩纪继承发育的海相砂岩+泥岩、碳酸盐岩及砂岩+泥岩+碳酸盐岩组合,控制了纵向上多套优质规模储-盖组合的形成,主要储-盖组合包括下白垩统滩相灰岩与滩间致密灰岩,Shuaiba 组礁灰岩与 Nahr Umr 组页岩,森诺曼阶 Mishrif/Naith 组厚壳蛤灰岩与 Laffan 组泥岩, Simsima 组灰岩与 Lower Fars 组膏岩等。白垩纪,阿拉伯板块接受频繁的水进、水退,浅水碳酸盐岩和陆源碎屑沉积在纵向上交互发育。砂岩储层以 Zubair 组石英砂岩为代表,其为海相三角洲沉积,主要发育在阿拉伯板块中西部,并以科威特和伊拉克南部最为发育。以伊拉克南部鲁迈拉油田 Zubair 组砂岩油藏为例,其砂岩段厚度可达400 m,其中, Main Pay 组主力砂岩段厚度约130 m,岩性主要为分选、磨圆好的水下分流河道砂岩,平均孔隙度约22%,渗透率(100~10 000)×10⁻³ μm²。

碳酸盐岩储层以 Yamama 组滩坝鲕粒灰岩、Minagish 组中粗鲕粒灰岩和 Thamama 群 Kharab 组泥粒灰岩、台缘介壳灰岩及森诺曼阶 Mishrif 组厚壳蛤灰岩为主。白垩纪森诺曼阶,在伊拉克东南部、伊朗西部和阿联酋东西部发育缓坡孔隙型碳酸盐岩储层。该套碳酸盐岩储层以富含厚壳蛤的生物碎屑灰岩为主,粒间孔和粒间溶孔发育,优质储层在内缓坡滩体和潟湖内潮道,整体厚度120~450 m,孔隙度20%~25%,渗透率(10~500)×10⁻³ μm²。晚白垩世全球海平面上升,沉积了区域性稳定发育的泥页岩,如白垩纪 Nahr Umr 组泥岩,提供了重要的区域性盖层。

下白垩统层间泥岩、Mishrif 组下部的 Ahmadi 组、Rumaila 组的深水泥岩以及上白垩统 Fiqa 组、Gurpi 组泥岩和泥灰岩提供了局部盖层条件。

白垩纪波斯湾地区盆地长期稳定,非常广阔而且构造活动平静,周而复始的海进和海退产生了多个生-储-盖旋回,其中,新特提斯洋被动陆缘主要发育期沉积的碳酸盐岩储层厚度超400 m,构成了波斯湾地区、特别是伊拉克常规油资源的主要储层(图8)。伊拉克西古尔纳油田石油地质储量约693×10⁸ bbl,其中碳酸盐岩油藏石油地质储量672×10⁸ bbl,占98.6%。该油田发育在近南北向长期继承性长轴背斜圈闭(面积约400 km²),受基底古地形影响,该构造在新特提斯洋开张早期已初具规模,早白垩世背斜构造幅度逐渐增加,受晚白垩世-新生代扎格罗斯逆冲推覆运动的影响甚微。在古近纪早期白垩系烃源岩开始生、排烃,油气沿下白垩统大套砂岩发生由盆地中心向边缘的横向运移,沿大型逆断层完成由深层向浅层的纵向运移,并在背斜圈闭中汇聚成藏。白垩纪地层纵向发育6套含油层,除下白垩统 Zubair 组砂岩外,其他均为碳酸盐岩储层;其中,主力层森诺曼阶 Mishrif 组厚度225~260 m,孔隙度19.3%,平均渗透率38×10⁻³ μm²。

从区域上看,晚白垩世以来的造山运动及断层活化对白垩系成藏组合的圈闭形成与富集成藏产生两个方面影响:①在阿曼及扎格罗斯造山带前渊至远端等中-弱形变区,基底先存断层受新生代新特提斯洋闭合活化进而沟通了下伏白垩系乃至侏罗系烃源岩油源。白垩系储层物性受淡水和热液等成岩流体影响进一步改善^[63]。中-深层油气沿白垩系内部不整合面向周缘输导,广泛汇聚于近基底控制的古隆起及古背斜、盐控构造和前陆冲断构造等多类型正向构造单元^[59,64],使得油气进一步富集。②在造山带等强形变区,与前陆推覆构造相关的地质过程导致白垩系遭受广泛剥蚀甚至缺失,促使山前区域白垩系和新生界之间发育角度不整合。原有的上白垩统油气聚集遭受破坏或发生二次运移,最终在新生代地层中聚集形成不同规模的次生油藏^[64]。

6 结论

1) 白垩纪全球处于潘基亚超大陆裂解阶段,特提斯域南缘即冈瓦纳大陆北缘属于稳定大陆边缘,广泛继承性发育被动陆缘盆地;特提斯北缘即欧亚大陆南缘属于活动大陆边缘,普遍继承性发育弧后盆地。深入大陆腹地方向,该时期原型盆地类型逐渐过渡为克拉通内盆地。

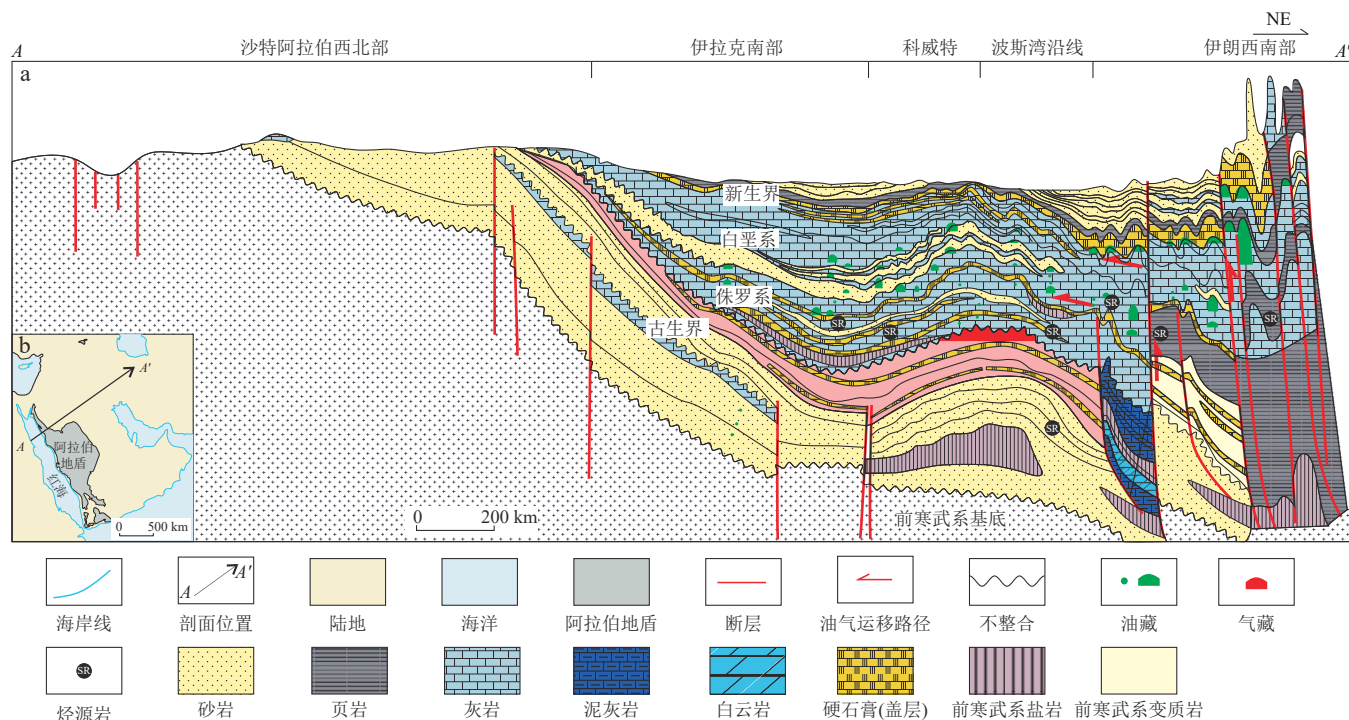


图8 中东地区典型成藏模式(以西古尔纳油田为例)

Fig. 8 Typical hydrocarbon accumulation model in the Middle East (exemplified by the West Qurna oilfield)

a. 成藏模式图; b. 西古尔纳油田位置

2) 早、晚白垩世特提斯域岩相古地理发育具有继承性,受控于相对稳定的构造背景,均广泛发育浅海沉积环境,岩相组合特征以砂岩+泥岩+碳酸盐岩为主,向欧亚大陆以及非洲-阿拉伯板块内部,滨浅海沉积环境逐渐过渡为陆相碎屑沉积体系。

3) 白垩纪波斯湾地区于阿拉伯板块之上继承性稳定发育了被动陆缘原型盆地,长期稳定的浅海大陆架环境利于白垩纪富有机质烃源岩的广泛分布与保存;频繁的海侵与海退形成了纵向上多套优质规模海相碎屑岩+碳酸盐岩的成藏组合;晚白垩世以来的造山运动及断层活化促进了白垩系成藏组合大型圈闭的形成与大规模油气聚集。

盆地名称缩写注释

Aau. 阿拉弗拉盆地
Amd. 阿姆河盆地
Aqt. 阿基坦盆地
Arb. 阿拉伯盆地
Asm. 阿萨姆盆地
Bby. 巴布亚盆地
Bes. 布劳斯盆地
Bhi. 渤海湾盆地
Bma. 孟买盆地
Bna. 孟加拉盆地

Bnp. 波拿帕特盆地
Cnb. 坎宁盆地
Cnl. 卡纳尔文盆地
Coi. 措勤盆地
Cpl. 呵咧高原盆地
Crm. 昔兰尼加盆地
Dcr. 杜卡拉盆地
Eie. 伊利兹盆地
Fgn. 费尔干纳盆地
Gdm. 三叠古达米斯盆地
Gdq. 瓜达尔基维尔盆地
Gne. 恒河盆地
Gsl. 加索罗尼盆地
Ibr. 伊布罗河盆地
Ids. 印度河盆地
Inn. 爱奥尼亚盆地
Lrb. 拉尔勃盆地
Mcn. 小高加索盆地
Mgk. 曼格什拉克盆地
Mhd. 默哈纳迪盆地
Mls. 磨拉石盆地
Mzk. 穆祖克盆地
Nagn. 爱琴海北部盆地

Ncb. 北高加索盆地
 Nl. 尼罗河盆地
 Ods. 鄂尔多斯盆地
 Om. 阿曼盆地
 Pds. 庞帝斯盆地
 Plj. 佩拉杰盆地
 Pnn. 潘农盆地
 Prm. 珠江口盆地
 Prs. 巴黎盆地
 Prv. 普罗旺斯盆地
 Pta. 波特瓦尔盆地
 Qdm. 柴达木盆地
 Reu. 罗巴克盆地
 Rgn. 雷甘盆地
 Sam. 南奥兰梅塞塔盆地
 Scp. 南里海盆地
 Scu. 四川盆地
 Sds. 塞纳深海盆地
 Sml. 索马里盆地
 Sng. 塞内加尔盆地
 Srt. 锡尔特盆地
 Suh. 南喀尔巴阡盆地
 Tdn. 陶丹尼盆地
 Tfy. 塔尔法亚盆地
 Tjk. 塔吉克盆地
 Tmak. 蒂米蒙-阿赫纳特盆地
 Trm. 塔里木盆地
 Tsl. 特兰西瓦尼盆地
 Uep. 上埃及盆地
 Ymn. 也门盆地
 Zgo. 扎格罗斯盆地。

参 考 文 献

- [1] 邹才能, 张光亚, 陶士振, 等. 全球油气勘探领域地质特征、重大发现及非常规石油地质[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(2): 129-145.
 ZOU Caineng, ZHANG Guangya, TAO Shizhen, et al. Geological features, major discoveries and unconventional petroleum geology in the global petroleum exploration[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(2): 129-145.
- [2] 邹才能, 翟光明, 张光亚, 等. 全球常规-非常规油气形成分布、资源潜力及趋势预测[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(1): 13-25.
 ZOU Caineng, ZHAI Guangming, ZHANG Guangya, et al. Formation, distribution, potential and prediction of global conventional and unconventional hydrocarbon resources [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(1): 13-25.
- [3] 童晓光, 张光亚, 王兆明, 等. 全球油气资源潜力与分布[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 727-736.
 TONG Xiaoguang, ZHANG Guangya, WANG Zhaoming, et al. Distribution and potential of global oil and gas resources [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 727-736.
- [4] 张光亚, 田作基, 王红军, 等. 全球油气地质与资源潜力评价[M]. 北京: 石油工业出版社, 2019: 25-30.
 ZHANG Guangya, TIAN Zuoji, WANG Hongjun, et al. Global petroleum geology and resource potential assessment [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2019: 25-30.
- [5] 赵重远. 特提斯: 油气聚集何方[J]. 中国石油勘探, 2000, 5(2): 59-66, 8.
 ZHAO Chongyuan. Oil and gas accumulation in Tethys structural belt[J]. China Petroleum Exploration, 2000, 5(2): 59-66, 8.
- [6] 甘克文. 特提斯域的演化和油气分布[J]. 海相油气地质, 2000, 5(3/4): 21-29.
 GAN Kewen. The Tethyan evolution and the distribution of oil and gas[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2000, 5(3/4): 21-29.
- [7] ŞENGÖR A M C. Mid-Mesozoic closure of Permo-Triassic Tethys and its implications[J]. Nature, 1979, 279(5714): 590-593.
- [8] ŞENGÖR A M C. The Cimmeride orogenic system and the tectonics of Eurasia [M]//ŞENGÖR A M C. The Cimmeride Orogenic System and the Tectonics of Eurasia. Boulder: Geological Society of America, 1984: 1-74.
- [9] 黄汲清, 陈炳蔚. 中国及邻区特提斯海的演化[M]. 北京: 地质出版社, 1987: 1-109.
 HUANG Jiqing, CHEN Bingwei. The evolution of the Tethys in China and adjacent regions [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987: 1-109.
- [10] 朱日祥, 赵盼, 赵亮. 新特提斯洋演化与动力过程[J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(1): 1-25.
 ZHU Rixiang, ZHAO Pan, ZHAO Liang. Tectonic evolution and geodynamics of the Neo-Tethys Ocean [J]. Science China Earth Sciences, 2022, 52(1): 1-25.
- [11] 吴福元, 万博, 赵亮, 等. 特提斯地球动力学[J]. 岩石学报, 2020, 36(6): 1627-1674.
 WU Fuyuan, WAN Bo, ZHAO Liang, et al. Tethyan geodynamics [J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 36(6): 1627-1674.
- [12] KAPP P, DECELLES P G. Mesozoic-Cenozoic geological evolution of the Himalayan-Tibetan orogen and working tectonic hypotheses [J]. American Journal of Science, 2019, 319(3): 159-254.
- [13] YIN An, HARRISON T M. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2000, 28: 211-280.
- [14] LIU Yuzhi, LI Yaohui, HUANG Jianping, et al. Attribution of the Tibetan Plateau to northern drought [J]. National Science Review, 2020, 7(3): 489-492.
- [15] 罗贝维, 尹继全, 张兴阳, 等. 阿曼前陆盆地构造-沉积特征及其对油气成藏的控制[J]. 岩石学报, 2022, 38(9): 2608-2618.
 LUO Beiwei, YIN Jiquan, ZHANG Xingyang, et al. Structural and sedimentary features of Oman foreland basins and its influences on hydrocarbon accumulation [J]. Acta Petrologica Sinica, 2022, 38(9): 2608-2618.
- [16] HOU Zengqian, ZHANG Hongrui. Geodynamics and metallogeny of the eastern Tethyan metallogenic domain [J]. Ore Geology Reviews, 2015, 70: 346-384.
- [17] WANG Xiaoyi, WANG Tao, XU Jinfeng, et al. Enhanced habitat loss of the Himalayan endemic flora driven by warming-forced

- upslope tree expansion[J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2022, 6(7): 890–899.
- [18] 张光亚, 童晓光, 辛仁臣, 等. 全球岩相古地理演化与油气分布(一)[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(4): 633–652.
ZHANG Guangya, TONG Xiaoguang, XIN Renchen, et al. Evolution of lithofacies and paleogeography and hydrocarbon distribution worldwide (I) [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(4): 633–652.
- [19] 张光亚, 童晓光, 辛仁臣, 等. 全球岩相古地理演化与油气分布(二)[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(5): 848–868.
ZHANG Guangya, TONG Xiaoguang, XIN Renchen, et al. Evolution of lithofacies and paleogeography and hydrocarbon distribution worldwide (II) [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(5): 848–868.
- [20] 张光亚, 温志新, 刘小兵, 等. 全球原型盆地演化与油气分布[J]. *石油学报*, 2020, 41(12): 1538–1554.
ZHANG Guangya, WEN Zhixin, LIU Xiaobing, et al. Evolution of global proto-type basin and the petroleum distribution[J]. *Acta Petroli Sinica*, 2020, 41(12): 1538–1554.
- [21] WHITTINGTON H B, HUGHES C P. Geography and faunal provinces in Tremadoc Epoch: Abstract [J]. *AAPG Bulletin*, 1972, 56(3): 662.
- [22] 潘裕生. 昆仑山区构造区划初探[J]. *自然资源学报*, 1989, 4(3): 196–203.
PAN Yusheng. A preliminary study on the regionalization of the structures in the Kunlun mountains region[J]. *Journal of Natural Resources*, 1989, 4(3): 196–203.
- [23] STÖCKLIN J. Structural history and tectonics of Iran: A review [J]. *AAPG Bulletin*, 1968, 52(7): 1229–1258.
- [24] BROSKA I, PETRÍK I, BE'ERI-SHLEVIN Y, et al. Devonian/Mississippian I-type granitoids in the Western Carpathians: A subduction-related hybrid magmatism [J]. *Lithos*, 2013, 162/163: 27–36.
- [25] RUBAN D A. Spatial heterogeneity of the Early-Middle Toarcian (Jurassic) ammonite diversity and basin geometry in the Northwestern Caucasus (southwestern Russia; northern Neo-Tethys) [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2013, 386: 225–232.
- [26] STAMPFLI G M, HOCHARD C, VÉRARD C, et al. The formation of Pangea[J]. *Tectonophysics*, 2013, 593: 1–19.
- [27] STAMPFLI G M. Response to the comments on “The formation of Pangea” by D. A. Ruban[J]. *Tectonophysics*, 2013, 608: 1445–1447.
- [28] ALLÉGRE C J, COURTILLOT V, TAPPONNIER P, et al. Structure and evolution of the Himalaya-Tibet orogenic belt [J]. *Nature*, 1984, 307(5946): 17–22.
- [29] 黄汲清, 陈炳蔚. 中国及邻区特提斯海的演化[M]. 北京: 地质出版社, 1987.
HUANG Jiqing, CHEN Bingwei. The evolution of the Tethys in China and adjacent regions [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987.
- [30] STOCKIN F G. A parsing guide to the Greek new testament by Nathan E. Han[J]. *The Classical World*, 1974, 68(2): 123–124.
- [31] YIN An, HARRISON T M. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2000, 28: 211–280.
- [32] 周肃, 莫宣学, MAHONEY J J, 等. 西藏罗布莎蛇绿岩中辉长辉绿岩 Sm-Nd 定年及 Pb, Nd 同位素特征[J]. *科学通报*, 2001, 46(16): 1387–1390.
ZHOU Su, MO Xuanxue, MAHONEY J J, et al. Gabbro-diorite Sm-Nd age determination and the isotope features of Pb and Nd [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(16): 1387–1390.
- [33] 莫宣学, 赵志丹, 邓晋福. 青藏高原上新世代火成岩的深部探针意义: 若干新成果与新认识[M]//陈运泰, 滕吉文, 阚荣举, 等. 中国大陆地震学与地球内部物理学研究进展——庆贺曾融生院士八十寿辰. 北京: 地震出版社, 2004: 449–461.
MO Xuanxue, ZHAO Zhidan, DENG Jinfu. Deep probe significance of Mesozoic and Cenozoic igneous rocks in the Qinghai Tibet Plateau: Several new achievements and new understandings [M]//CHEN Yuntai, TENG Jiwen, KAN Rongju, et al. Progress in Seismology and Geophysics in China——Celebrating the 80th Birthday of Academician Zeng Rongsheng. Beijing: Seismological Press, 2004: 449–461.
- [34] 郑来林, 金振民, 潘桂棠, 等. 东喜马拉雅南迦巴瓦地区区域地质特征及构造演化[J]. *地质学报*, 2004, 78(6): 744–751.
ZHENG Lailin, JIN Zhenmin, PAN Guitang, et al. Geological features and tectonic evolution in the Namjagbarwa area, eastern Himalayas[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(6): 744–751.
- [35] 莫宣学, 潘桂棠. 从特提斯到青藏高原形成: 构造-岩浆事件的约束[J]. *地学前缘*, 2006, 13(6): 43–51.
MO Xuanxue, PAN Guitang. From the Tethys to the formation of the Qinghai-Tibet Plateau: Constrained by tectono-magmatic events[J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(6): 43–51.
- [36] 朱弟成, 莫宣学, 王立全, 等. 新特提斯演化的热点与洋脊相互作用: 西藏南部晚侏罗世-早白垩世岩浆作用推论[J]. *岩石学报*, 2008, 24(2): 225–237.
ZHU Dicheng, MO Xuanxue, WANG Liquan, et al. Hotspot-ridge interaction for the evolution of Neo-Tethys: Insights from the Late Jurassic-Early Cretaceous magmatism in southern Tibet [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(2): 225–237.
- [37] 许荣科, 郑有业, 冯庆来, 等. 西藏札达县夏浦沟的放射虫硅质岩和岛弧火山岩: 新特提斯洋内俯冲体系的记录?[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2009, 34(6): 884–894.
XU Rongke, ZHENG Youye, FENG Qinglai, et al. Radiolarian chert and island-arc volcanic rocks in Xiapugou Tibet: Records of Neo-Tethys intra-oceanic subduction system? [J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 2009, 34(6): 884–894.
- [38] METCALFE I. Tectonic framework and Phanerozoic evolution of Sundaland[J]. *Gondwana Research*, 2011, 19(1): 3–21.
- [39] METCALFE I. Tectonic evolution of the Malay Peninsula [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 76: 195–213.
- [40] 黄汲清, 任纪舜, 姜春发, 等. 中国大地构造及其演化[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
HUANG Jiqing, REN Jishun, JIANG Chunfa, et al. Geotectonic evolution of China [M]. Beijing: Science Press, 1980.
- [41] 任纪舜, 王作勋, 陈炳蔚, 等. 从全球看中国大地构造——中国及邻区大地构造图简要说明[M]. 北京: 地质出版社, 1999.
REN Jishun, WANG Zuoxun, CHEN Bingwei, et al. A brief introduction of the latest tectonic map of China: A brief explanation of the tectonic map of China and its neighboring regions [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999.
- [42] 王鸿祯. 全球构造研究的简要回顾[J]. *地学前缘*, 1995, 2(1): 37–42, 66.

- WANG Hongzhen. Retrospect of the study on global tectonics[J]. *Earth Science Frontiers*, 1995, 2(1): 37–42, 66.
- [43] 李江海, 王洪浩, 李维波, 等. 显生宙全球古板块再造及构造演化[J]. *石油学报*, 2014, 35(2): 207–218.
- LI Jianghai, WANG Honghao, LI Weibo, et al. Discussion on global tectonics evolution from plate reconstruction in Phanerozoic[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 35(2): 207–218.
- [44] 黄宝春, 周姚秀, 朱日祥. 从古地磁研究看中国大陆形成与演化过程[J]. *地学前缘*, 2008(3): 348–359.
- HUANG Baochun, ZHOU Yaoxiu, ZHU Rixiang. Discussions on Phanerozoic evolution and formation of continental China, based on paleomagnetic studies[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008(3): 348–359.
- [45] 方大钧, 沈忠悦. 塔里木地块各时代视磁极及板块漂移[J]. *浙江大学学报(理学版)*, 2001, 28(1): 100–106.
- FANG Dajun, SHEN Zhongyue. Phanerozoic apparent polar-wander paths of Tarim and plate motion[J]. *Journal of Zhejiang University(Science Edition)*, 2001, 28(1): 100–106.
- [46] KUZMIN M I, YARMOLYUK V V, KRAVCHINSKY V A. Phanerozoic hot spot traces and paleogeographic reconstructions of the Siberian continent based on interaction with the African large low shear velocity province[J]. *Earth-Science Reviews*, 2010, 102(1/2): 29–59.
- [47] HALL R. Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: Computer-based reconstructions, model and animations[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2002, 20(4): 353–431.
- [48] SETON M, MÜLLER R D, ZAHIROVIC S, et al. Global continental and ocean basin reconstructions since 200Ma[J]. *Earth-Science Reviews*, 2012, 113(3/4): 212–270.
- [49] METELKIN D V, VERNIKOVSKY V A, KAZANSKY A Y. Tectonic evolution of the Siberian paleocontinent from the Neoproterozoic to the Late Mesozoic: Paleomagnetic record and reconstructions[J]. *Russian Geology and Geophysics*, 2012, 53(7): 675–688.
- [50] WILLIAMS S E, MÜLLER R D, LANDGREBE T C W, et al. An open-source software environment for visualizing and refining plate tectonic reconstructions using high-resolution geological and geophysical data sets[J]. *GSA Today*, 2012, 22(4): 4–9.
- [51] GORDON R G. The plate tectonic approximation: Plate nonrigidity, diffuse plate boundaries, and global plate reconstructions[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1998, 26: 615–642.
- [52] FORTEY R A, COCKS L R M. Palaeontological evidence bearing on global Ordovician-Silurian continental reconstructions[J]. *Earth-Science Reviews*, 2003, 61(3/4): 245–307.
- [53] COLLINS A S, PISAREVSKY S A. Amalgamating eastern Gondwana: The evolution of the Circum-Indian Orogens[J]. *Earth-Science Reviews*, 2005, 71(3/4): 229–270.
- [54] LI Z X, BOGDANOVA S V, COLLINS A S, et al. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: A synthesis[J]. *Precambrian Research*, 2008, 160(1/2): 179–210.
- [55] FAIRHEAD J D, BINKS R M. Differential opening of the Central and South Atlantic Oceans and the opening of the West African rift system[J]. *Tectonophysics*, 1991, 187(1/3): 191–203.
- [56] FAIRHEAD J D. The West and Central African rift systems: Foreword[J]. *Tectonophysics*, 1992, 213(1/2): 139–140.
- [57] GENIK G J. Regional framework, structural and petroleum aspects of rift basins in Niger, Chad and the Central African Republic (C. A. R.)[J]. *Tectonophysics*, 1992, 213(1/2): 169–185.
- [58] GENIK G J. Petroleum geology of Cretaceous-Tertiary rift basins in Niger, Chad, and Central African Republic[J]. *AAPG Bulletin*, 1993, 77(8): 1405–1434.
- [59] 张光亚, 黄彤飞, 刘计国, 等. 中西非叠合裂谷盆地形成与演化[J]. *岩石学报*, 2022, 38(9): 2539–2553.
- ZHANG Guangya, HUANG Tongfei, LIU Jiguo, et al. Formation and evolution of West and Central African superimposed rift basins[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2022, 38(9): 2539–2553.
- [60] METCALFE I. Gondwana dispersion and Asian accretion: Tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 66: 1–33.
- [61] 吴高奎, 张忠民, 林畅松, 等. 塔里木盆地塔北隆起区中生界沉积演化特征[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(4): 845–858.
- WU Gaokui, ZHANG Zhongmin, LIN Changsong, et al. Evolution of Mesozoic sedimentary fill in the Tabei uplift region, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(4): 845–858.
- [62] 张光亚, 黄彤飞, 刘计国, 等. 非洲 Muglad 多旋回陆内被动裂谷盆地演化及其控油气作用[J]. *岩石学报*, 2019, 35(4): 1194–1212.
- ZHANG Guangya, HUANG Tongfei, LIU Jiguo, et al. Multi-cycle evolution of the intracontinental passive rift basins and its controlling on accumulation of oil & gas: Taking Muglad Basin in Africa as an example[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35(4): 1194–1212.
- [63] 黄彤飞, 史卜庆, 窦立荣, 等. 尼日尔 Termit 盆地 Trakes 斜坡走滑构造的发现及其形成演化分析[J]. *岩石学报*, 2022, 38(9): 2554–2564.
- HUANG Tongfei, SHI Buqing, DOU Lirong, et al. Discovery of strike-slip faults and their evolution on Trakes Slope, Termit Basin in Niger[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2022, 38(9): 2554–2564.
- [64] ALSHARHAN A S, NAIRN A E M. Carbonate platform models of Arabian Cretaceous reservoirs[M]//SIMO J A T, SCOTT R W, MASSE J P. *Cretaceous Carbonate Platforms*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1993: 173–184.
- [65] DAVIES R B, CASEY D M, HORBURY A D, et al. Early to mid-Cretaceous mixed carbonate-clastic shelfal systems: Examples, issues and models from the Arabian Plate[J]. *GeoArabia*, 2002, 7(3): 541–598.
- [66] 白国平. 中东油气区油气地质特征[M]. 北京: 中国石化出版社, 2007.
- BAI Guoping. Oil and gas geological characteristics of oil and gas fields in the Middle East[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2007.
- [67] 朱日祥, 张水昌, 万博, 等. 新特提斯域演化对波斯湾超级含油气盆地形成的影响[J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(1): 1–11.
- ZHU Rixiang, ZHANG Shuichang, WAN Bo, et al. Effects of Neo-Tethyan evolution on the petroleum system of Persian gulf superbasin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(1): 1–11.