

文章编号: 0253-2697(2024)08-1163-11 DOI:10.7623/syxb202408001

全球古老油气成藏组合资源潜力、重大发现及启示

窦立荣^{1,2} 温志新¹ 王兆明¹ 贺正军¹ 陈瑞银¹ 宋成鹏¹ 刘小兵¹

(1. 中国石油勘探开发研究院 北京 100083; 2. 中国石油国际勘探开发有限公司 北京 100034)

摘要:全球已证实存在 6 套优质烃源岩,发育于前中生界的 3 套烃源岩构成了古老油气成藏组合的主要烃源岩。已发现的前中生界古老油气成藏组合有 5 个特点:①盆地类型以前陆盆地、被动陆缘盆地、克拉通盆地为主;②油气资源类型以常规油气为主,页岩油气发展迅速;③油气主要富集于二叠系、泥盆系、石炭系和奥陶系;④储层岩性主要为灰岩、砂岩、页岩和白云岩;⑤埋深以中—浅层为主,深层勘探潜力大。古老油气成藏组合的重大发现也具有在克拉通周缘、碳酸盐岩储层、页岩油气层系和基岩潜山 4 个领域富集的特征。通过对重点领域的重大发现解剖,指出长期处于低纬度热带辐合带的克拉通周缘易于形成优质生-储-盖组合;全球重大事件对烃源岩发育和页岩油气富集起着重要控制作用,可在全球重大事件时序框架下,通过重建成藏要素古位置超前优选潜在成藏组合。根据已发现油气可采储量和待发现油气资源自主评价结果,明确了常规油气资源应重点关注阿拉伯盆地、扎格罗斯盆地、塔里木盆地等;基岩潜山/残留层系也是值得重点关注的勘探领域;页岩油气应重点关注俄罗斯蒂曼—伯朝拉盆地和伏尔加—乌拉尔盆地泥盆系多玛尼克组页岩、中东地区阿拉伯盆地志留系热页岩、北非地区古达米斯盆地志留系和泥盆系、中国四川盆地和准噶尔盆地的页岩层系等领域。

关键词:古老油气成藏组合;克拉通周缘;碳酸盐岩;页岩油气;基岩潜山;勘探领域

中图分类号:TE132.1

文献标识码:A

Resource potential, giant discoveries, and implications of ancient hydrocarbon plays worldwide

Dou Lirong^{1,2} Wen Zhixin¹ Wang Zhaoming¹ He Zhengjun¹ Chen Ruiyin¹ Song Chengpeng¹ Liu Xiaobing¹

(1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China;

2. China National Oil and Gas Exploration and Development Company Ltd., Beijing 100034, China)

Abstract: Six sets of high-quality source rocks have been identified globally, with three of them in the pre-Mesozoic strata serving as the primary source rocks for ancient oil and gas reservoirs. Ancient oil and gas reservoirs from the pre-Mesozoic strata exhibit five key characteristics. (1) The predominant basin types include foreland, passive continental margin, and cratonic basins. (2) Their primary type of oil and gas resources remains conventional, although shale oil and gas is developing rapidly. (3) Their oil and gas accumulations are primarily concentrated in the Permian, Devonian, Carboniferous, and Ordovician. (4) Their reservoir lithology is primarily composed of limestones, sandstones, shales, and dolomites. (5) Their burial depth is predominantly within the middle to shallow layers, indicating significant potential for deep plays. The substantial discoveries of ancient oil and gas plays demonstrate enrichment in four fields: the periphery of cratons, carbonate reservoirs, shale oil and shale gas reservoirs, and basement reservoirs. After analyzing the major discoveries in key areas, it is revealed that high-quality source-reservoir-seal combinations form readily in the peripheral regions of cratons that were historically located within low-latitude intertropical convergence zones. Global significant events have played a crucial role in shaping the development of source rocks and the enrichment of shale oil and gas. Within the temporal framework of these significant global events, potential plays can be optimized in advance by reconstructing the paleo-positions of accumulation elements. Based on independent evaluations of recoverable oil and gas reserves and yet-to-be-discovered resources, it is evident that conventional oil and gas exploration should focus on the Arabian Basin, Zagros Basin, Tarim Basin, and other basins. Basement rocks and residual strata are also important potential exploration areas. For shale oil and shale gas exploration, the focus should be on the Devonian Domanik shale in the Timan-Pechora and the Volga-Ural basins in Russia, the Silurian hot shale in the Arabian Basin in the Middle East, the Silurian and Devonian plays in the Ghadames Basin in the North Africa, and several sets of shales in the Sichuan and Junggar basins in China.

Key words: ancient hydrocarbon plays; cratonic margins; carbonate rock; shale oil and shale gas; basement burial-hill; exploration field

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司科技重大专项“海外油气地质新理论资源评价新技术与超前选区研究”(2023ZZ07)资助。

第一作者: 窦立荣,男,1965年8月生,2004年获中国科学院地质与地球物理研究所博士学位,现为中国石油勘探开发研究院教授级高级工程师,主要从事全球油气资源评价与海外重点领域油气勘探关键技术研究。Email:dlirong@petrochina.com.cn

通信作者: 王兆明,男,1975年10月生,2007年获中国科学院地质与地球物理研究所博士学位,现为中国石油勘探开发研究院企业高级技术专家、高级工程师,主要从事全球重点领域超前选区与勘探评价。Email:wangzhaoming@petrochina.com.cn

引用: 窦立荣, 温志新, 王兆明, 贺正军, 陈瑞银, 宋成鹏, 刘小兵. 全球古老油气成藏组合资源潜力、重大发现及启示[J]. 石油学报, 2024, 45(8): 1163-1173.

Cite: DOU Lirong, WEN Zhixin, WANG Zhaoming, HE Zhengjun, CHEN Ruiyin, SONG Chengpeng, LIU Xiaobing. Resource potential, giant discoveries, and implications of ancient hydrocarbon plays worldwide[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(8): 1163-1173.

地球自诞生 4 560 Ma 以来经历了漫长的演化历史, 形成了丰富的油气和矿产资源。就油气资源来看, 古生代持续 290 Ma, 古生界已发现油气资源的占比为 25%^[1-3]; 中生代—新生代持续 250 Ma^[4], 但中生界—新生代已发现油气资源的占比达 74.8%^[1-3]。目前, 全球已证实 6 套优质烃源岩, 其中 3 套发育于前中生界, 分别是志留系、上泥盆统一石炭统、上石炭统一二叠统。近年来, 中国在四川、塔里木等盆地前中生界的古老成藏组合中陆续获得重大油气发现。全球古老油气成藏组合的分布特点、资源潜力、未来勘探领域是非常重要的科学问题, 笔者充分利用睿咨德能源 (Rystad Energy) 等公司的商业数据^[5], 对已发现古老油气成藏组合的分布特征进行了分析, 采用油气成藏要素古位置重建等技术探讨了成藏主控因素, 并根据自主评价的待发现资源量^[1-3] 指出了未来勘探潜力和方向。

1 全球构造与原型盆地演化

全球构造演化主要由多个威尔逊旋回构成, 涉及多个超级大陆的形成与裂解, 包括 1 900~2 100 Ma 前的哥伦比亚超级大陆、900~1 100 Ma 前的罗迪尼亚超级大陆、580~620 Ma 前的潘诺西亚超级大陆以

及 250~330 Ma 前的潘吉亚超级大陆^[4]。超级大陆形成与裂解的过程也是含油气盆地形成、演化与叠加改造的过程^[6-8]。已证实的有效含油气系统主要受 900~1 100 Ma 以来的构造-沉积演化控制。自中元古代—新元古代罗迪尼亚超级大陆形成以来, 显生宙主要经历了 2 个威尔逊旋回。古生代属于第 1 旋回: 主要经历了罗迪尼亚超级大陆裂解到潘吉亚大陆形成的过程, 罗迪尼亚大陆裂解期克拉通内部发育裂陷槽, 随后冈瓦纳、劳俄、潘吉亚等超级大陆先后形成。中生代经历第 2 旋回: 伴随着潘吉亚超级大陆裂解, 形成了特提斯洋和大西洋。新生代主要是新特提斯洋和太平洋收缩的过程^[8]。

伴随着全球超级大陆的演化, 地质历史上不同类型的盆地也发生有规律的演化。古生代主要发育克拉通盆地、被动陆缘盆地、前陆盆地 3 大类盆地^[6-8]。随着前寒武纪罗迪尼亚超级大陆的裂解和晚二叠世潘吉亚超级大陆的形成, 被动陆缘盆地的面积占比先稍微增加后逐渐减少, 前陆盆地的面积占比逐渐增多, 克拉通盆地面积占比变化不大; 二叠纪后, 随着潘吉亚大陆的裂解, 裂谷盆地和被动陆缘盆地的面积占比逐渐增多(图 1)。

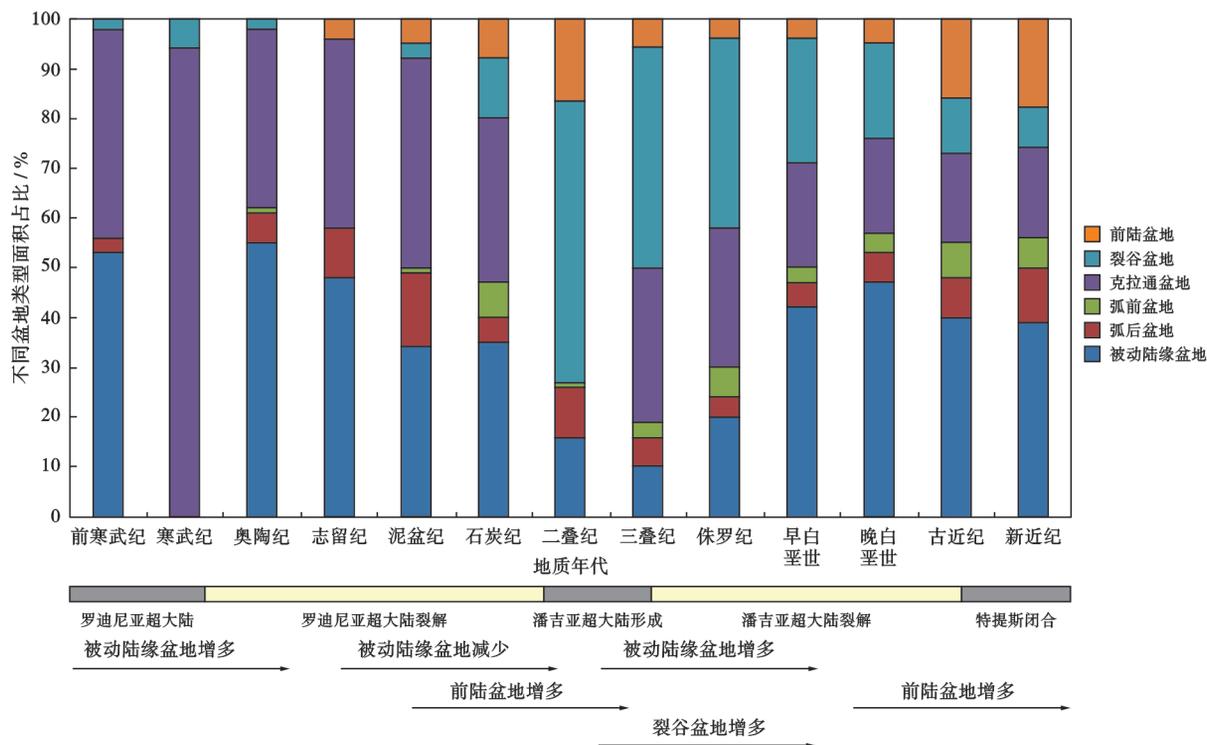


图 1 地质历史时期不同类型盆地的面积占比

Fig. 1 Proportion of different types of basins in geological history

2 已发现古老油气成藏组合的分布特征

据睿咨德能源公司的数据统计^[5],截至 2023 年 2 月,全球共发现 21 361 个古老油气藏^[5](主要指中生界之前地层中赋存的油气藏),其油气可采储量为 2780×10^8 t 油当量,油、气可采储量的占比分别为 53% 和 47%。排名前 5 的盆地依次为阿拉伯盆地、二叠盆地、阿巴拉契亚盆地、伏尔加—乌拉尔盆地和阿纳达科盆地。

2.1 盆地类型以前陆盆地、被动陆缘盆地和克拉通盆地为主

已发现的古老油气藏主要分布于特提斯构造域两

侧^[9-11](图 2)与克拉通相关的前陆盆地、被动陆缘盆地和克拉通盆地,其可采储量占比分别为 56.2%、21.7% 和 17.2%。前陆盆地主要包括乌拉尔前陆盆地、阿巴拉契亚前陆盆地、落基山前陆盆地以及扎格罗斯前陆盆地,包括前陆逆冲带和与之相关克拉通构成的前陆盆地系统。前陆盆地多与潘基亚超大陆形成过程中的碰撞造山事件相关,其主要的烃源岩、储层等成藏要素主要形成于克拉通演化阶段,后期的前陆改造阶段对油气成藏起到正、反两方面的作用:一方面,剧烈的碰撞造山对沉积地层产生剥蚀,对油气成藏起到破坏作用;另一方面,碰撞造山可形成大量的背斜圈闭,并促进油气运聚,对油气成藏起正向积极作用。

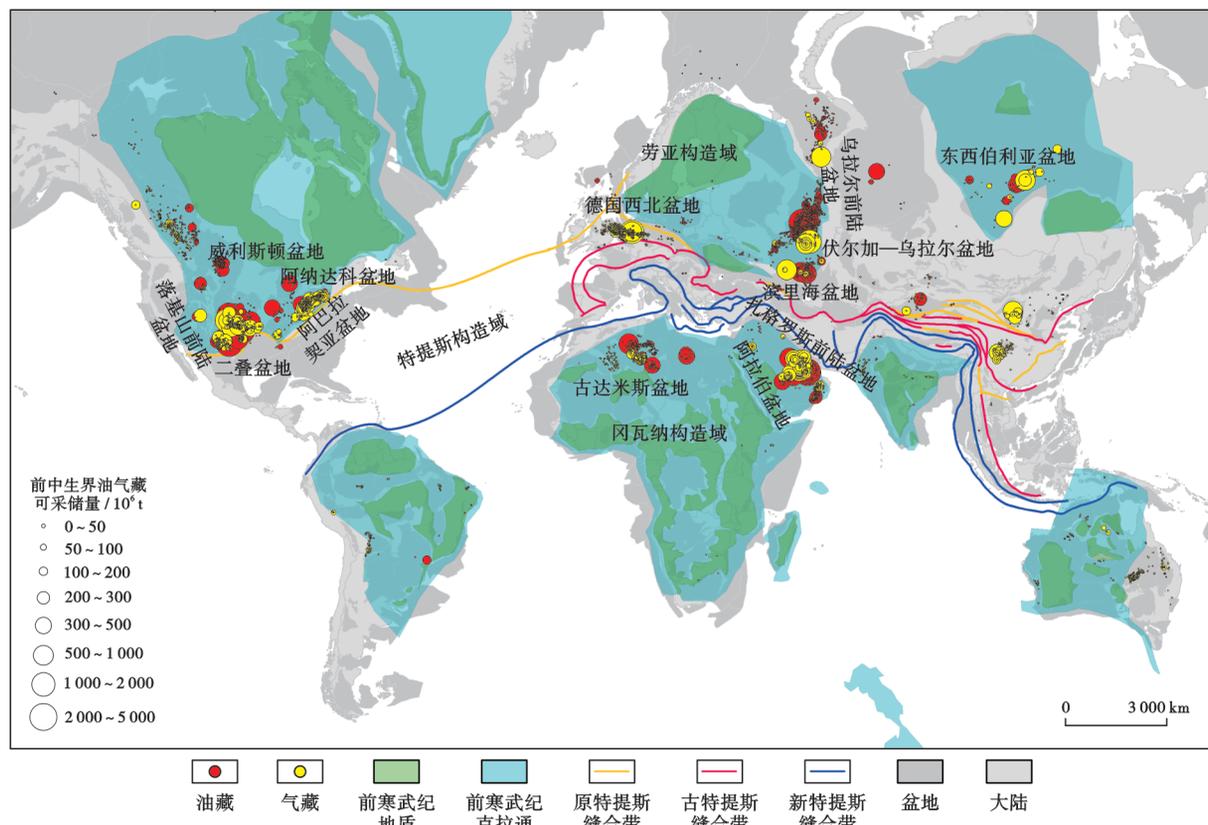


图 2 已发现古老油气藏及前寒武纪克拉通的平面分布(不同时期特提斯域的缝合带据文献^[9-10];构造域的定义据文献^[10-11];油气藏数据据文献^[5])

Fig. 2 Distribution of the discovered ancient oil-gas fields and Precambrian cratons

2.2 油气资源类型以常规油气为主,页岩油气发展迅速

在古老成藏组合中已发现常规油气藏 11 891 个,可采储量为 1858×10^8 t 油当量,储量占比为 66.8%,其中,石油储量占比为 57.1%,天然气储量占比为 42.9%。页岩气储量占比为 16.1%,页岩油/致密油储量的占比为 15.9%,其他重油、油砂等储量占比较小。常规油气田主要分布于阿拉伯盆地、伏尔加—乌拉尔盆地、二叠盆地、阿纳达科盆地和阿巴拉契亚盆地等,与阿拉伯板块、北美克拉通和波罗的(东欧)克拉通周缘盆地相关。页岩/致密油气田主要分布于二叠盆地、阿巴拉契亚盆地、四川盆

地等,主要位于北美克拉通和扬子克拉通周缘。目前,页岩油气勘探开发方兴未艾;未来,其他克拉通周缘盆地仍有较大勘探潜力。

2.3 古老油气主要富集于二叠系、泥盆系、石炭系和奥陶系

从全球尺度来看,前中生界古老油气藏的储量占比为 25.0%,中生界的储量占比为 56.2%,新生界的储量占比为 18.8%。其中,前中生界的油气资源以古生界二叠系、泥盆系、石炭系和奥陶系中最为富集,储量占比分别为 12.2%、6.4%、2.7% 和 2.3%。

2.4 储层岩性以灰岩、砂岩、页岩、白云岩为主

已发现油气藏的储层岩性主要为灰岩、砂岩、页岩和白云岩,其储量占比分别为 36.8%、26.9%、25.1% 和 9.2%。灰岩储层中以礁滩体为主,白云岩也非常重要。常规油气藏中碳酸盐岩储层占 67.3%(其中,灰岩储层占 53.5%,白云岩储层占 13.8%),砂岩储层占 31.7%,含少量基岩储层(占 0.3%)。

2.5 已发现的成藏组合以中—浅层为主,深层未来潜力大

在已发现的古老油气藏中,埋深小于 4 500 m 的中—浅层储量占比为 95.7%,埋深为 4 500~6 000 m 的深层储量占比为 3.9%,埋深大于 6 000 m 的超深层储量占比仅为 0.4%。对于古老油气成藏组合深层中发现的油气储量,中国在上世界上排名第一,发现储量占 23.5%;其次是沙特阿拉伯,占 22.6%;再次为阿曼,占 12.7%。目前,全球探井的深度仍以 6 000 m 以浅为主,深层油气潜力大,勘探程度低,需要加大研究和勘探力度。

3 古老油气成藏组合的重大发现与启示

大油气田是指可采储量大于 5×10^8 桶油当量的油气田^[11]。目前,全球共发现 478 个前中生界大油气田(图 3),可采储量为 $1 295 \times 10^8$ t 油当量,油气田数量的占比仅为 2%,可采储量占比却高达 47%,石油和天然气可采储量占比分别为 47% 和 53%。从可采储量分布的盆地类型看,前陆盆地占 41%,被动陆缘盆地占 38%,克拉通盆地占 20%。从可采储量分布的油气类型看,常规油气占 75%,页岩气占 15%,页岩油占 9%,其他类型占 1%。从可采储量的分布层系看,二叠系占 61%、泥盆系占 19%,奥陶系占 7%,石炭系占 6%,寒武系等其他层系占 7%。从可采储量分布的岩性看,灰岩占 47%,页岩占 20%,砂岩占 19%,基岩等其他岩性占 14%。克拉通周缘、碳酸盐岩、页岩油气和基岩潜山是古老油气成藏组合重大发现的 4 大领域,主要有 3 方面启示。

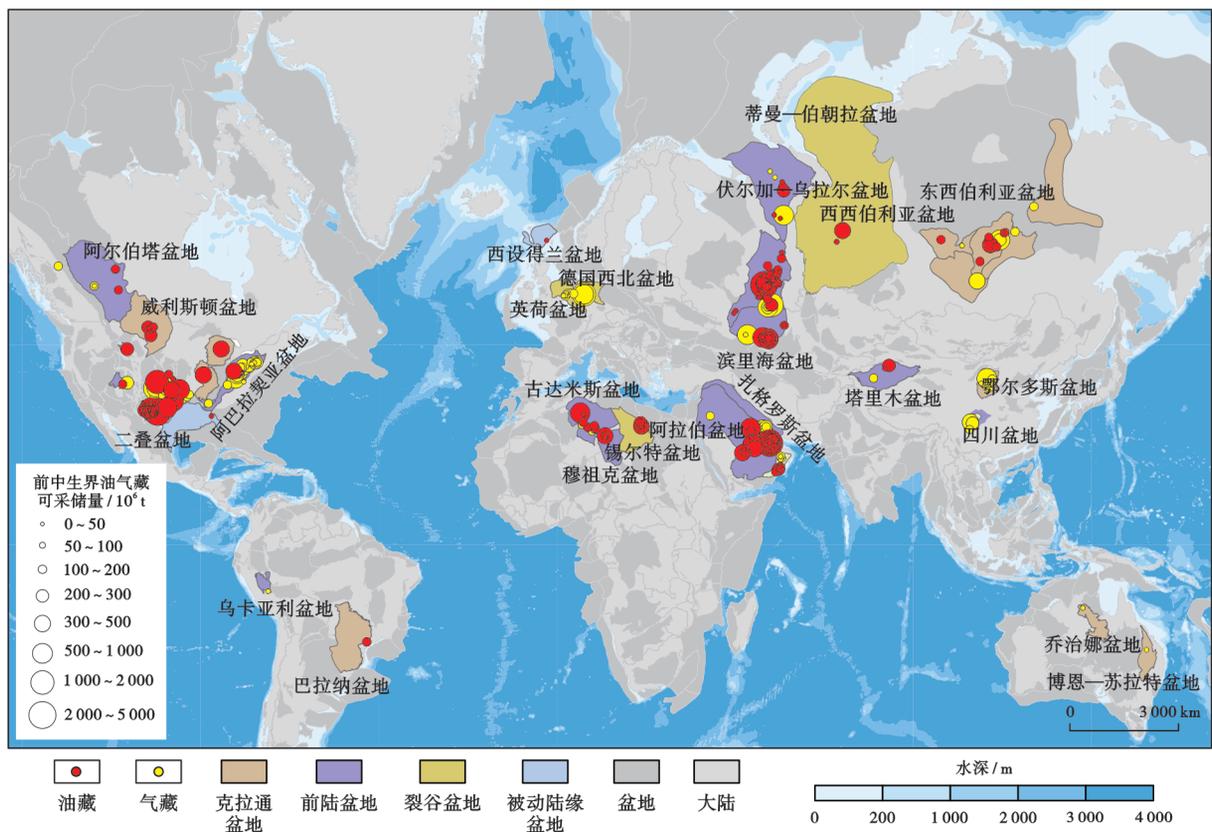


图 3 已发现大型古老油气藏盆地分布

Fig. 3 Basin distribution of the discovered giant ancient oil-gas fields

3.1 长期处于低纬度热带辐合带的克拉通周缘易于形成优质生-储-盖组合

3.1.1 阿拉伯板块周缘重大发现

阿拉伯板块富集了 21% 的前中生界油气资源,拥有全球最大的油田和气田,其分布范围包括阿拉伯地

盾、稳定大陆架和扎格罗斯褶皱带 3 大构造单元。阿拉伯板块发育前寒武纪—寒武纪形成的 NW—SE 向走滑断裂带,古生代形成的 NS 向构造带,新生代形成的 NW—SE 向扎格罗斯造山带 3 期主要构造带^[12]。阿拉伯板块油气富集的主要原因是其在地质历史时期

长期处于赤道附近,长时间位于热带辐合带(Intertropical Convergence Zone, ITCZ),形成了4套优质生-储-盖组合^[9-12]。加之板块在后期未经大规模抬升破坏,晚期遭受“软碰撞”,主要的生-储-盖成藏要素未被破坏,形成大量平行于造山带的大型长轴背斜成为油气聚集的主要构造圈闭。

3.1.2 对古老克拉通周缘盆地油气富集的启示

古纬度对于油气成藏要素的形成至关重要,特别是烃源岩、生物礁储层以及蒸发岩盖层的形成。ITCZ以赤道为中心向南、北方向对称分布。南、北纬 5° 之间为赤道辐合带,该带由于常年高温湿润,生物繁盛,有机质产率高而易于形成优质烃源岩;南、北纬 $5^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 是亚热带干旱带,该带气候干旱,易于形成膏盐岩沉积,可作为优质盖层;南、北纬 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 是温带湿润带,该带气候温暖湿润,易于发育煤系地层和相关烃源岩。另外,南、北纬 30° 之间的温度和光照条件适宜发育生物礁建造,易于形成优质碳酸盐岩储层。

纵观目前古老油气成藏组合富集的克拉通,通过重建其极移曲线的古位置^[13](图4)可以发现,绝大多数都围绕着ITCZ移动,主要的烃源岩、储层和盖层等

成藏要素与古纬度具有非常好的一致性。例如:在北美劳伦克拉通上,泥盆系—石炭系优质烃源岩为北美地区常规油气和页岩油气的主要贡献者;在西伯利亚克拉通,东西伯利亚盆地上形成了前寒武系古老油气系统;在哈萨克板块,滨里海等盆地内发育泥盆系—石炭系优质烃源岩、石炭系生物礁储层以及二叠系蒸发盐岩盖层。中国的华南、华北、塔里木3大板块上分别发育四川盆地、鄂尔多斯盆地、塔里木盆地3大盆地,由于其长期处于赤道附近,经历了多期碰撞改造,形成了多勘探“黄金带”^[13-14]。中国3大板块呈现出以“小克拉通、多岛洋”为特点的大地构造格局,由于其长时间处于ITCZ,经历了大角度旋转,块体周缘多角度形成被动陆缘,发育海相沉积,有利于成烃、成储^[13]。赵文智等^[14]总结了四川盆地、塔里木盆地、鄂尔多斯叠合盆地的多勘探“黄金带”,认为四川盆地有5个(31套工业产层)、塔里木盆地有4个、鄂尔多斯盆地有3个勘探“黄金带”。相反地,非洲的刚果克拉通由于长期处于该带以外的南半球高纬度地区,勘探潜力相对一般,目前尚未有规模油气发现。因此,未来古老油气成藏组合的勘探方向应围绕长时间处于ITCZ的克拉通周缘相关盆地寻找。

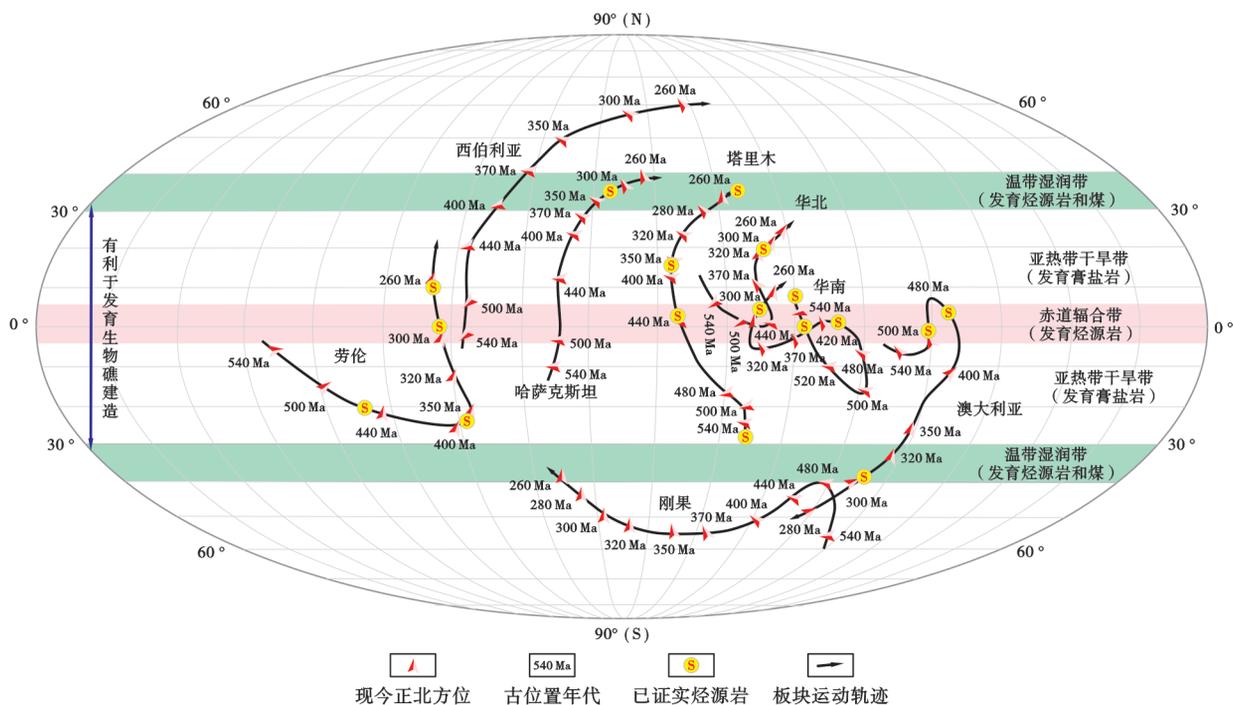


图4 全球主要板块极移曲线古位置与热带辐合带叠合关系(板块极移曲线轨迹据文献^[13],热带辐合带据文献^[9])

Fig. 4 Overlapping of polar shift curves of global major plates with ITCZ

3.2 全球重大事件对烃源岩发育和页岩油气富集起重要作用

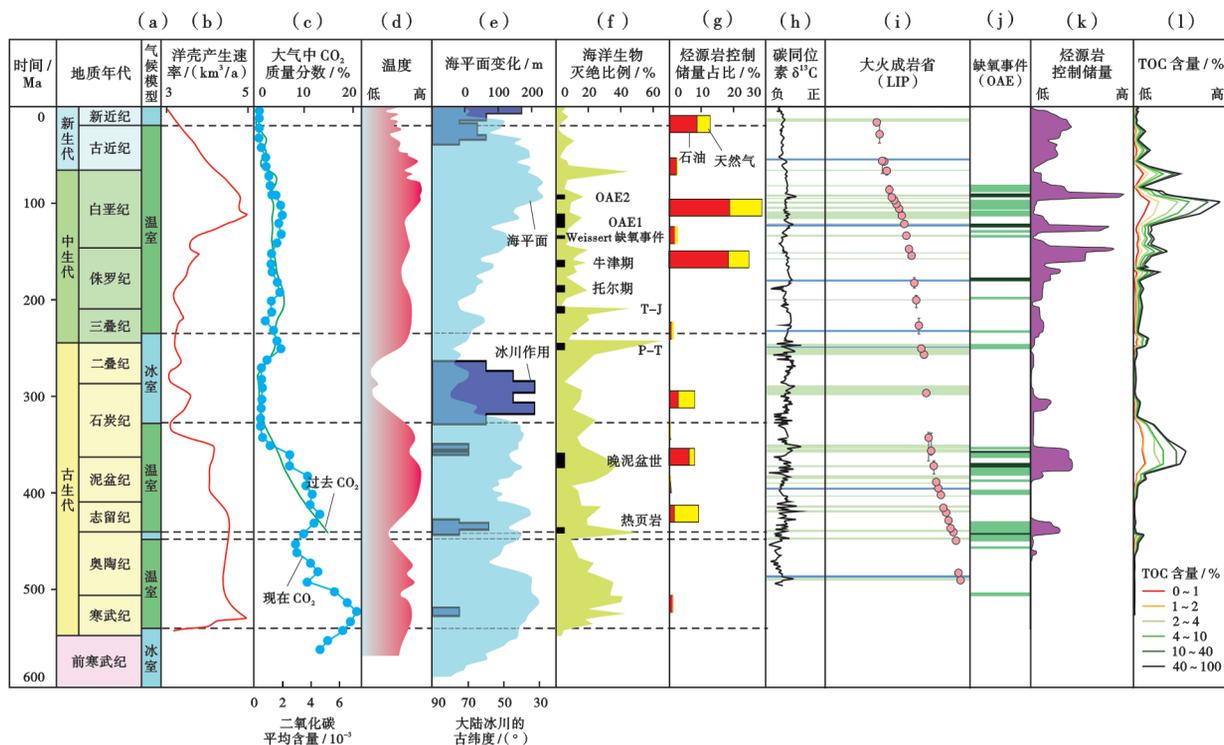
3.2.1 地质历史上重大事件与重大发现关系密切

地质历史时期全球发生过3次温室/冰期,5次大

规模的生物灭绝,数十次大火成岩省(LIP)和大洋缺氧事件(OAE)。全球重大事件与高有机碳含量烃源岩发育、油气重大发现和储量富集程度具有非常好的一致性^[15-22](图5),这表明上述重大事件与油气成藏事件息

息相关。古生代主要有奥陶纪—志留纪(O-S)、泥盆纪—石炭纪(D-C)、二叠纪—三叠纪(P-T)3个重要转折期。众多学者对烃源岩的成因机制进行了研究^[15-22]。O-S转折期,黑色页岩(Hot Shale)分布广泛,是中东地区、北非地区最为重要的常规油气烃源岩。邱振等^[23-24]

对 O-S 转折期发生的 6 个全球/区域性重大事件与烃源岩的发育关系进行了阐述,认为该时期为北方劳亚大陆和南方冈瓦纳大陆汇聚阶段,海平面快速升降,经历了冰期与间冰期等极端气候、大规模火山喷发、海洋水体缺氧以及第一次全球性生物大灭绝事件。



注:(a)据文献[15];(b)据文献[16];(c)一(d)据文献[15];(e)据文献[17];(f)据文献[18];(g)据文献[19];(h)一(i)据文献[20];(j)、(l)据文献[21-22];(k)据文献[5];OAE1为白垩纪第1次海洋缺氧事件;OAE2为白垩纪第2次海洋缺氧事件;T-J为三叠纪—侏罗纪转折期;P-T为二叠纪—三叠纪转折期。

图5 全球主要地质历史时期的重大事件

Fig. 5 Global events in major geological periods

3.2.2 在全球重大事件时序框架下,通过古位置重建可超前优选潜在成藏组合

重大事件一定会引起地球系统不同圈层连锁反应。油气的富集成藏效应与重大事件相关,因此需要在全局重大事件的时间和序列框架下,通过将已发现的油气成藏要素恢复到其成藏关键时刻,去寻找和类比发现潜在的有利成藏组合。这种“定位溯源”的研究思路和方法与“将今论古”和“由已知推未知”类似,对于超前优选有利勘探领域至关重要。

近年来,中国在扬子克拉通的四川盆地取得了页岩气勘探开发重大突破,特别是奥陶系—志留系五峰组—龙马溪组笔石页岩,建成了页岩气国家级示范区^[25-26]。通过将该层系中已发现的油气藏投影到重建的早志留世(距今440 Ma)板块重建图上^[27-28](图6)可以发现,目前已发现的油气藏主要位于古特提斯洋周缘的被动大陆边缘。中国商业开发的页岩气主要位于

四川盆地;北非地区和中东地区也有少量页岩气发现。志留系热页岩是中东地区和北非地区常规油气藏的主力烃源岩,未来这些地区的页岩油气应该也具有非常大的勘探潜力,值得重点关注。

此外,早志留世中国的塔里木板块处于比北非地区和中东地区更靠近低纬度的陆架位置,目前已在奥陶系和志留系有油气发现^[29]。劳伦板块、波罗的板块、西伯利亚板块3大板块在早志留世处于赤道附近,也应该发育志留系烃源岩,可以重点关注相关盆地中以志留系为烃源岩的成藏组合,包括常规和非常规油气资源勘探潜力。北美二叠盆地等已明确了志留系页岩油气的勘探潜力,但由于埋藏深,尚未进入勘探开发日程,是未来重要的油气勘探储备领域。

晚泥盆世(距今370 Ma)是全球烃源岩非常发育的时期,发生了全球重要的加里东构造运动,劳伦板块

与波罗的板块碰撞,全球温度较高、海平面上升、大量海洋生物灭绝,同时发生密集的大洋缺氧事件,对应着高有机碳含量和优质烃源岩的发育。该时期另外一个显著特点是生物礁特别发育。礁灰岩储层是古老油气成藏组合最重要的一类储层,受控于古地理、古纬度、古洋流、古风向等多种因素,板块的古地理和古位置决

定了优质礁滩相带储层是否发育^[30]。通过重建已发现油气藏的古位置^[27-28](图 7)可以发现,在全球多个盆地的泥盆系中均发现了巨型生物礁油气藏,如劳伦板块西缘、波罗的板块东缘以及西伯利亚板块。未来应重点关注与上升流发育相关的华南板块和塔里木板块,以及哈萨克板块周缘的勘探潜力。

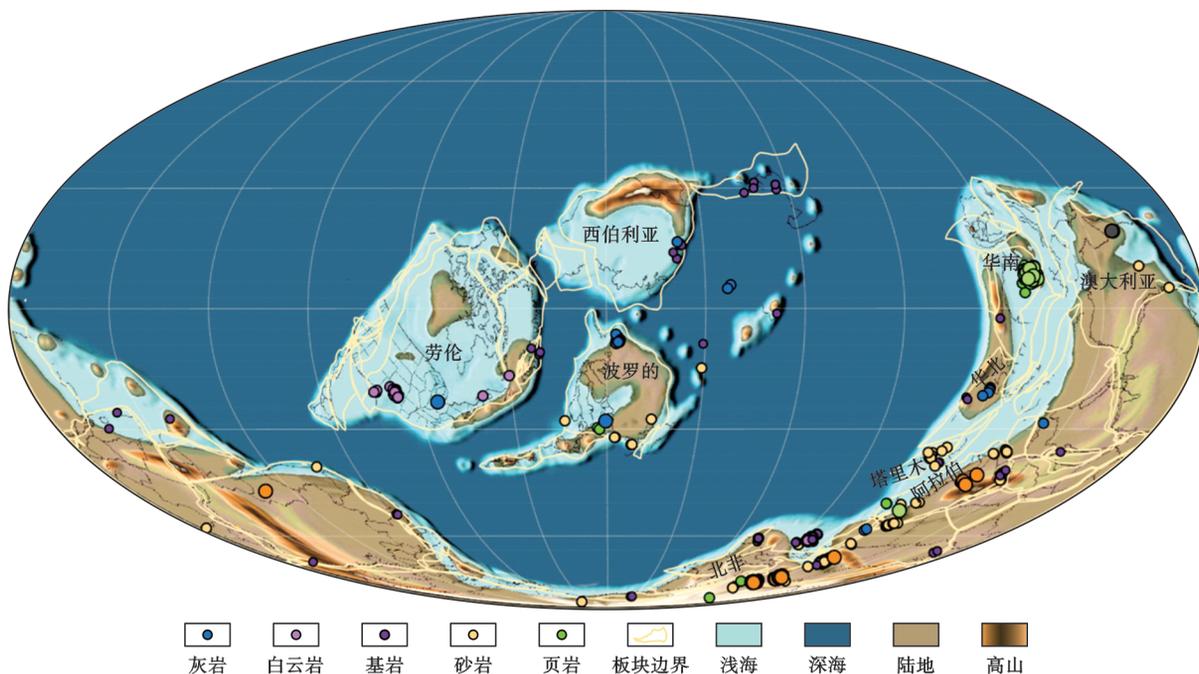


图 6 早志留世(距今 440 Ma)古板块重建及已发现古老油气藏(板块重建底图及旋转模型据文献[27-28])
 Fig. 6 Reconstruction of the paleo-plates and discovered ancient oil-gas fields during Early Silurian(440 Ma)

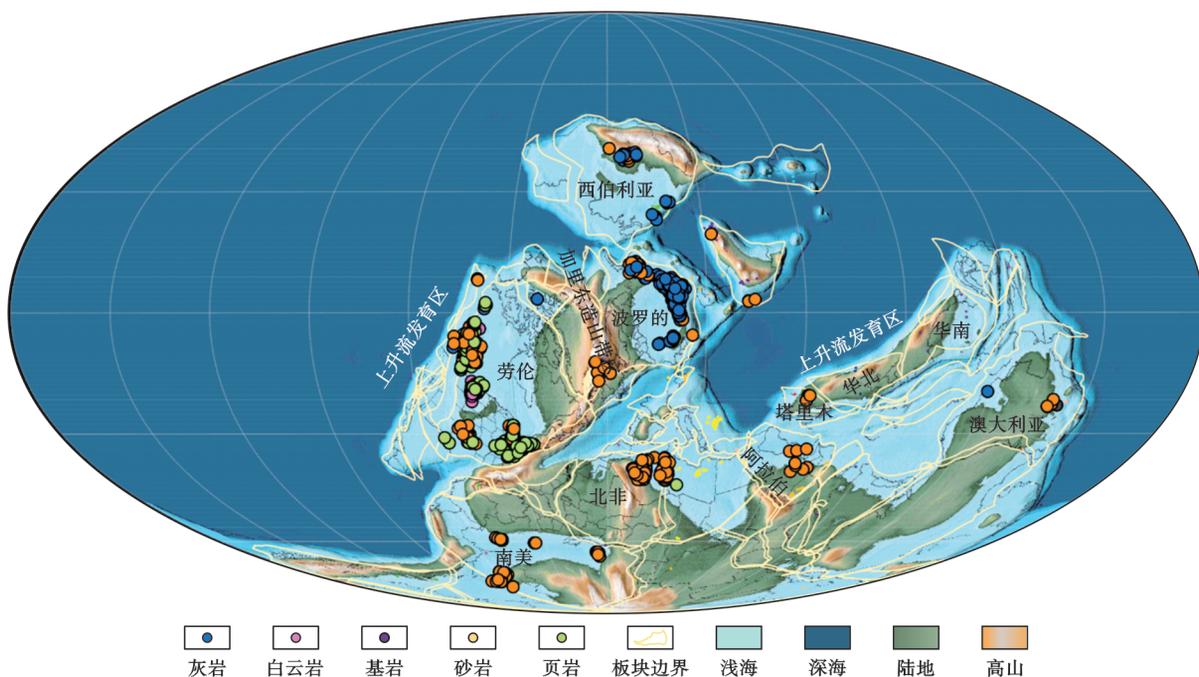


图 7 晚泥盆世(距今 370 Ma)古板块重建及已发现古老油气藏(板块重建底图及旋转模型据文献[27-28])
 Fig. 7 Reconstruction of the paleo-plates and discovered ancient oil-gas fields during Late Devonian(370 Ma)

更加古老的前寒武纪油气藏分布在俄罗斯、澳大利亚、非洲、阿曼,以及中国的四川盆地和塔里木盆地等多个盆地中,均有油气重大发现^[31-38]。目前正在钻探的中国首口万米深井塔科1井的主要目的层是寒武系吾松格尔组—沙依里克组和震旦系齐格布拉克组,通过地震资料已识别出多个大型台缘丘滩带,这将开辟一个新的勘探领域。整个元古界—寒武系的勘探潜力值得期待^[33-38]。

值得注意的是,“定位溯源”的方法可以从源头探究可能发育的潜在成藏组合,但同时应关注此类成藏组合后期的改造和破坏对油气成藏的影响。在判断勘探潜力时,应综合考虑多种因素。

3.2.3 基岩潜山/残留层系是值得重点关注的勘探领域

基岩潜山、残留层系类油气藏在全球范围广泛分布^[39-43],目前全球已在80个盆地发现579个此类油气藏,可采储量约为 48×10^8 t油当量,是值得重视的勘探领域。基岩潜山的岩性包括花岗岩、变质沉积岩、残留沉积地层,可以是自生自储,也可以是新生古储,甚至可能发育多期潜山。例如:西西伯利亚盆地是在海西期褶皱基底上形成的中生代—新生代巨型裂谷盆地,其主要勘探目的层是侏罗系以来的地层,该盆地的前侏罗系为盆地形成初期与多个岛弧相关的浅海相及火山沉积。截至2023年,西西伯利亚盆地累计发现86个前侏罗系油气田,可采储量为 14×10^8 t油当量^[5];按地层统计,泥盆系中的储量占比为69%,三叠系中的储量占比为17%,二叠系中的储量占比为14%;按岩性统计,灰岩中的储量占比为72%,砂岩中的储量占比为28%。西西伯利亚盆地于2017年发现Alexander Zhagrin油田,其可采储量为 1.7×10^8 t^[5],由于靠近基础设施,已于2019年快速投入商业开发。对于优质烃源岩较为发育的盆地,需要重视基岩潜山这一勘探领域,特别是裂谷盆地,如中国的渤海湾盆地、松辽盆地的基岩潜山和部分残留层系是非常重要的勘探领域。

4 古老油气成藏组合的资源潜力与未来勘探领域

4.1 古老油气成藏组合的待发现资源潜力

根据中国石油天然气股份有限公司“十三五”期间(2016—2020年)全球油气资源评价项目的自主评价结果^[1-3]:在全球(不含中国境内)古老油气成藏组合中,常规石油的待发现可采资源量为 365×10^8 t,天然气待发现可采资源量为 660×10^8 t油当量,古老油气成藏组合合计的待发现可采资源量约占全球常规油气可采资源量的23%,主要富集于二叠系、石炭系和前

寒武系,占比分别是11.3%、3.5%和3.0%(图8)。在古老油气成藏组合中,非常规石油的技术可采资源量为 895×10^8 t,天然气的技术可采资源量为 1058×10^8 t油当量,以页岩油、页岩气为主,古老的非常规油气成藏组合可采资源量在全球的占比为31%,主要富集于泥盆系、石炭系和志留系,占比分别为10.1%、8.0%和4.7%(图9)。常规和非常规待发现可采资源都比较丰富,是未来重要的勘探领域。

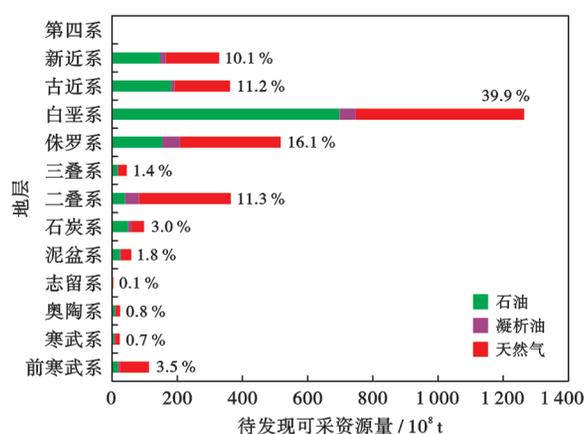


图8 全球各层系常规待发现可采资源量及占比

Fig. 8 Proportion of global conventional undiscovered recoverable resource in geological ages

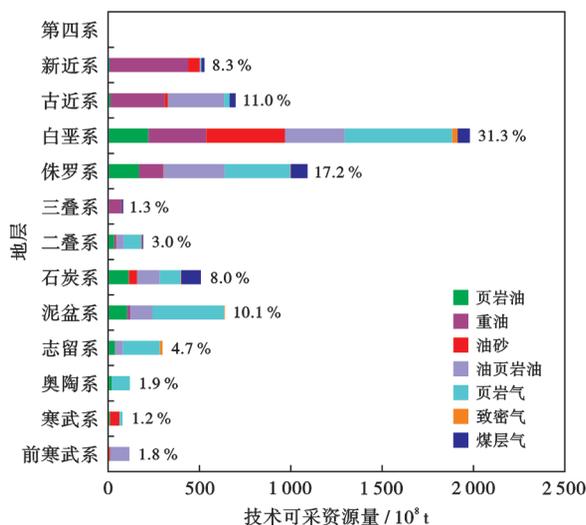


图9 全球各层系非常规技术可采资源量及占比

Fig. 9 Proportion of global unconventional recoverable oil and gas resources in geological ages

4.2 未来勘探领域与方向

4.2.1 常规油气勘探领域与方向

综合分析常规已发现油气储量和待发现油气资源的潜力,古老油气成藏组合未来的重点勘探层系是二叠系、石炭系和泥盆系。重点勘探方向包括:阿拉伯盆地古生界的地层—岩性圈闭,预计待发现可采资源量

约为 213×10^8 t 油当量;扎格罗斯盆地的复杂逆冲构造圈闭,预计待发现可采资源量约为 162×10^8 t 油当量;东西伯利亚盆地里菲系碳酸盐岩和文德系碎屑岩,预计待发现可采资源量约为 113×10^8 t 油当量;滨里海盆地泥盆系—石炭系碳酸盐岩和二叠系碎屑岩的地层-岩性圈闭,预计待发现可采资源量约为 48×10^8 t 油当量;中国3大盆地(塔里木盆地、鄂尔多斯盆地和四川盆地)古老含油气系统的深层,近年来勘探持续获得重大发现,未来勘探潜力仍然巨大^[44-46]。另外需要重视优质烃源岩发育的裂谷盆地基岩潜山勘探潜力,如中国东部渤海湾盆地、松辽盆地前古近系的基岩潜山层系^[41,43]。

4.2.2 页岩油气勘探领域与方向

近年来,页岩油气勘探开发进展迅速,也是古老油气成藏组合的重点勘探领域。对页岩油气的勘探应重点围绕泥盆系、石炭系、志留系和二叠系4个主要目的层系。重点关注:俄罗斯蒂曼—伯朝拉盆地和伏尔加—乌拉尔盆地的泥盆系多玛尼克组页岩,预计技术可采资源量约为 37×10^8 t 油当量;中东地区阿拉伯盆地、鲁卜哈利盆地和美索不达米亚盆地的志留系热页岩,预计技术可采资源量约为 26×10^8 t 油当量;北非地区古达米斯盆地的志留系热页岩和泥盆系页岩,预计技术可采资源量约为 17×10^8 t 油当量;中国四川盆地的页岩气及准噶尔盆地的页岩油/致密油等领域也具有非常大的资源潜力^[45-46]。

5 结论

(1) 古生代持续 290 Ma,古生界中已发现的油气资源占比为 25%;中生代—新生代持续 250 Ma,但目前中生界—新生代已发现的油气资源占比为 74.8%。古生代主要经历了罗迪尼亚超级大陆裂解到潘吉亚大陆形成的过程,盆地类型的面积占比表现为被动陆缘盆地先增后减,前陆盆地增多,克拉通盆地基本不变。

(2) 截至 2023 年 2 月,全球共发现 21361 个前中生界古老油气藏,油气可采储量为 2780×10^8 t 油当量,油、气占比分别为 53% 和 47%。排名前 5 位的盆地依次为阿拉伯盆地、二叠盆地、阿巴拉契亚盆地、伏尔加—乌拉尔盆地和阿纳达科盆地。主要有以下 5 个显著特点:①盆地类型以前陆盆地、被动陆缘盆地、克拉通盆地为主;②油气资源类型以常规油气为主,页岩油气发展迅猛;③油气藏主要富集于二叠系、泥盆系、石炭系和奥陶系;④储层岩性主要为灰岩、砂岩、页岩和白云岩;⑤埋深以中—浅层为主,深层未来潜力大。

(3) 目前,全球共发现 478 个前中生界大油气田,可采储量为 1295×10^8 t 油当量,其个数占比为 2%,

可采储量占比为 47%,主要富集于克拉通周缘、碳酸盐岩储层、页岩油气和基岩潜山等领域。通过对中东地区、志留系页岩油、泥盆系生物礁等地区的典型重大发现进行解剖,提出长期处于低纬度热带辐合带的克拉通周缘地区易于形成优质生-储-盖组合;全球重大事件对烃源岩发育和页岩油气富集起着重要控制作用,可在全球重大事件时序框架下,通过重建油气成藏要素的古位置,“定位溯源”超前优选潜在成藏组合。

(4) 根据已发现油气储量和待发现油气资源量的自主评价结果指出:常规油气资源应重点关注阿拉伯盆地、扎格罗斯盆地、塔里木盆地等盆地;基岩潜山/残留层系也是值得重点关注的深层勘探领域;页岩油气应重点关注俄罗斯蒂曼—伯朝拉盆地和伏尔加—乌拉尔盆地泥盆系多玛尼克组页岩、中东地区阿拉伯盆地志留系热页岩、北非地区古达米斯盆地志留系和泥盆系页岩、中国四川盆地和准噶尔盆地等盆地页岩层系的勘探潜力。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 中国石油勘探开发研究院.全球油气资源潜力与分布(2021年)[M].北京:石油工业出版社,2021.
PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development. Potential and distribution of global oil and gas resources[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2021.
- [3] 窦立荣,李大伟,温志新,等.全球油气资源评价历程及展望[J].石油学报,2022,43(8):1035-1048.
DOU Lirong, LI Dawei, WEN Zhixin, et al. History and outlook of global oil and gas resources evaluation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(8): 1035-1048.
- [4] 郑永飞.21世纪板块构造[J].中国科学:地球科学,2023,53(1):1-40.
ZHENG Yongfei. Plate tectonics in the twenty-first century[J]. Science China Earth Sciences, 2023, 53(1): 1-40.
- [5] Rystad Energy. Navigating the future of energy[DB/OL]. <https://rystadenergy.com/>.
- [6] 窦立荣,温志新.从原型盆地叠加演化过程讨论沉积盆地分类及含油气性[J].石油勘探与开发,2021,48(6):1100-1113.
DOU Lirong, WEN Zhixin. Classification and exploration potential of sedimentary basins based on the superposition and evolution process of prototype basins[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(6): 1100-1113.
- [7] 温志新,童晓光,张光亚,等.全球板块构造演化过程中五大成盆期原型盆地的形成、改造及叠加过程[J].地学前缘,2014,21(3):26-37.
WEN Zhixin, TONG Xiaoguang, ZHANG Guangya, et al. The

- transformation and stacking process of prototype basin in five global plate tectonic evolution stages[J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(3): 26-37.
- [8] 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 Petrolei Sinica*, 2020, 41(12): 1538-1554.
- [9] 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 super-basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(1): 1-11.
- [10] 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.
- [11] MANN P, GAHAGAN L, GORDON M B. Tectonic setting of the world's giant oil and gas fields[M]// HALBOUTY M T. Giant oil and gas fields of the decade 1990-1999. Tulsa: AAPG, 2003.
- [12] 刘小兵, 王兆明, 贺正军, 等. 阿拉伯板块古生代岩相古地理及其对油气富集的控制作用[J]. *岩石学报*, 2022, 38(9): 2595-2607.
LIU Xiaobing, WANG Zhaoming, HE Zhengjun, et al. The lithofacies paleogeography of the Arabian Plate and its control on the hydrocarbon accumulation[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2022, 38(9): 2595-2607.
- [13] 杨风丽, 徐铭辰, 庄圆, 等. 古生代中国中西部三大陆块古地理位置重建与演变[J]. *地学前缘*, 2022, 29(6): 265-276.
YANG Fengli, XU Mingchen, ZHUANG Yuan, et al. Paleozoic paleogeographic reconstruction and evolution of the three continental blocks of central and western China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(6): 265-276.
- [14] 赵文智, 胡素云, 刘伟, 等. 论叠合含油气盆地多勘探“黄金带”及其意义[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(1): 1-12.
ZHAO Wenzhi, HU Suyun, LIU Wei, et al. The multi-staged “golden zones” of hydrocarbon exploration in superimposed petroliferous basins of onshore China and its significance[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(1): 1-12.
- [15] FRAKES L A, FRANCIS J E, SYKTUS J I. Climate modes of the Phanerozoic[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- [16] STANLEY S M. Earth system history[M]. New York: W. H. Freeman, 1999.
- [17] RIDGWELL A. A Mid Mesozoic revolution in the regulation of ocean chemistry[J]. *Marine Geology*, 2005, 217(3/4): 339-357.
- [18] RAUP D M, SEPKOSKI JR J J. Periodic extinction of families and genera[J]. *Science*, 1986, 231(4740): 833-836.
- [19] KLEMMER H D, ULMISHEK G F. Effective petroleum source rocks of the world: stratigraphic distribution and controlling depositional factors[J]. *AAPG Bulletin*, 1991, 75(12): 1809-1851.
- [20] BERGMAN S C, ELDRETT J S, MINISINI D. Phanerozoic large igneous province, petroleum system, and source rock links[M]// ERNST R E, DICKSON A J, BEKKER S. Large igneous provinces: a driver of global environmental and biotic changes. Washington: Wiley, 2021.
- [21] YALLUP C, GRÉSELLE B. Adding context to oceanic anoxic events as source rock drivers: a new approach for frontier areas[J]. *Exploration Insights*, 2019, 9: 13-21.
- [22] TAKASHIMA R H, NISHI B T, HUBER B T, et al. Greenhouse world and the mesozoic ocean[J]. *Oceanography*, 2006, 19(4): 82-92.
- [23] 邱振, 卢斌, 陈振宏, 等. 火山灰沉积与页岩有机质富集关系探讨——以五峰组—龙马溪组含气页岩为例[J]. *沉积学报*, 2019, 37(6): 1296-1308.
QIU Zhen, LU Bin, CHEN Zhenhong, et al. Discussion of the relationship between volcanic ash layers and organic enrichment of black shale: a case study of the Wufeng-Longmaxi gas shales in the Sichuan Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2019, 37(6): 1296-1308.
- [24] QIU Zhen, ZOU Caineng. Controlling factors on the formation and distribution of “sweet-spot areas” of marine gas shales in South China and a preliminary discussion on unconventional petroleum sedimentology[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2020, 194: 103989.
- [25] 马新华, 谢军, 雍锐, 等. 四川盆地南部龙马溪组页岩气储集层地质特征及高产控制因素[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(5): 841-855.
MA Xinhua, XIE Jun, YONG Rui, et al. Geological characteristics and high production control factors of shale gas reservoirs in Silurian Longmaxi Formation, southern Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(5): 841-855.
- [26] 张廷山, 陈雷, 梁兴, 等. 昭通国家级页岩气示范区五峰组—龙马溪组页岩气富集地质主控因素[J]. *天然气工业*, 2023, 43(4): 93-102.
ZHANG Tingshan, CHEN Lei, LIANG Xing, et al. Geological control factors of shale gas enrichment in the Wufeng-Longmaxi Formation of the Zhaotong National Shale Gas Demonstration Area[J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(4): 93-102.
- [27] SCOTESE C R, WRIGHT N. PALEOMAP paleodigital elevation models (PaleoDEMS) for the Phanerozoic[EB/OL]. [2018-08-01]. <https://docslib.org/doc/2622212/paleomap-paleodigital-elevation-models-paleodems-for-the-phanerozoic>.
- [28] SCOTESE C R. PALEOMAP paleoAtlas for GPlates and the paleodataplotter program[R/OL]. Geological Society of America Abstracts with Programs Evanston, IL; PALEOMAP Project, 2016, 48(5). <https://doi.org/10.1130/abs/2016NC-275387>.
- [29] 汪泽成, 赵振宇, 黄福喜, 等. 中国中西部含油气盆地超深层油气成藏条件与勘探潜力分析[J]. *世界石油工业*, 2024, 31(1): 33-48.
WANG Zecheng, ZHAO Zhenyu, HUANG Fuxi, et al. Ultra-deep hydrocarbon accumulation conditions and exploration potential in sedimentary basins of central-western China[J]. *World Petroleum Industry*, 2024, 31(1): 33-48.
- [30] WOLFGANG K, FLÜGEL E, GOLONKA J. Paleoreef maps: evaluation of a comprehensive database on phanerozoic reefs[J]. *AAPG Bulletin*, 1999, 83(10): 1320-1336.
- [31] DICKAS A B. Precambrian as a hydrocarbon exploration target[J]. *Geoscience Wisconsin*, 1986, 11(9): 5-7.

- [32] DICKAS A B. Worldwide distribution of Precambrian hydrocarbon deposits[J]. *Geoscience Wisconsin*, 1986, 11(9): 8-13.
- [33] 杜金虎. 古老碳酸盐岩大气田地质理论与勘探实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 2015.
DU Jinhu. Geological theory and exploration practice of ancient large carbonates gas field [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2015.
- [34] 杨雨, 汪泽成, 文龙, 等. 扬子克拉通西北缘震旦系油气成藏条件及勘探潜力[J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(2): 238-248.
YANG Yu, WANG Zecheng, WEN Long, et al. Sinian hydrocarbon accumulation conditions and exploration potential at the northwest margin of the Yangtze region, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(2): 238-248.
- [35] 孙枢, 王铁冠. 中国东部中—新元古界地质学与油气资源[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
SUN Shu, WANG Tieguan. Meso-Neoproterozoic geology and petroleum resources in eastern China[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [36] 赵文智, 胡素云, 汪泽成, 等. 中国元古界—寒武系油气地质条件与勘探地位[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(1): 1-13.
ZHAO Wenzhi, HU Suyun, WANG Zecheng, et al. Petroleum geological conditions and exploration importance of Proterozoic to Cambrian in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(1): 1-13.
- [37] 赵文智, 王晓梅, 胡素云, 等. 中国元古宇烃源岩成烃特征及勘探前景[J]. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49(6): 939-964.
ZHAO Wenzhi, WANG Xiaomei, HU Suyun, et al. Hydrocarbon generation characteristics and exploration prospects of Proterozoic source rocks in China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, 49(6): 939-964.
- [38] 王清华, 徐振平, 张荣虎, 等. 塔里木盆地油气勘探新领域、新类型及资源潜力[J]. *石油学报*, 2024, 45(1): 15-32.
WANG Qinghua, XU Zhenping, ZHANG Ronghu, et al. New fields, new types of hydrocarbon explorations and their resource potentials in Tarim Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2024, 45(1): 15-32.
- [39] 窦立荣, 魏小东, 王景春, 等. 乍得 Bongor 盆地花岗岩质岩潜山储层特征[J]. *石油学报*, 2015, 36(8): 897-904.
DOU Lirong, WEI Xiaodong, WANG Jingchun, et al. Characteristics of granitic basement rock buried-hill reservoir in Bongor Basin, Chad[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(8): 897-904.
- [40] 窦立荣, 李志, 杨紫, 等. 中国石油海外岩性地层油气藏勘探进展与前景展望[J]. *岩性油气藏*, 2023, 35(6): 1-9.
DOU Lirong, LI Zhi, YANG Zi, et al. Exploration progress and outlook for lithostratigraphic reservoirs of CNPC overseas[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2023, 35(6): 1-9.
- [41] 汪泽成, 江青春, 王居峰, 等. 基岩油气成藏特征与中国陆上深层基岩油气勘探方向[J]. *石油勘探与开发*, 2024, 51(1): 28-38.
WANG Zecheng, JIANG Qingchun, WANG Jufeng, et al. Hydrocarbon accumulation characteristics in basement reservoirs and exploration targets of deep basement reservoirs in onshore China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(1): 28-38.
- [42] 邓兴华, 彭文绪. 渤海锦州 25-1S 混合花岗岩潜山大油气田的发现[J]. *中国海上油气*, 2009, 21(3): 145-150.
DENG Yunhua, PENG Wenxu. Discovering large buried-hill oil and gas fields of migmatitic granite on Jinzhou 25-1S in Bohai Sea [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2009, 21(3): 145-150.
- [43] 徐长贵, 周家雄, 杨海风, 等. 渤海海域油气勘探新领域、新类型及资源潜力[J]. *石油学报*, 2024, 45(1): 163-182.
XU Changgui, ZHOU Jiaxiong, YANG Haifeng, et al. New fields, new types and resource potentials of oil-gas exploration in Bohai Sea[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2024, 45(1): 163-182.
- [44] 郑民, 李建忠, 吴晓智, 等. 我国主要含油气盆地油气资源潜力及未来重点勘探领域[J]. *地球科学*, 2019, 44(3): 833-847.
ZHENG Min, LI Jianzhong, WU Xiaozhi, et al. Potential of oil and natural gas resources of main hydrocarbon-bearing basins and key exploration fields in China[J]. *Earth Science*, 2019, 44(3): 833-847.
- [45] 吴晓智, 柳庄小雪, 王建, 等. 我国油气资源潜力、分布及重点勘探领域[J]. *地学前缘*, 2022, 29(6): 146-155.
WU Xiaozhi, LIU Zhuangxiaoxue, WANG Jian, et al. Petroleum resource potential, distribution and key exploration fields in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(6): 146-155.
- [46] 王建, 郭秋麟, 赵晨蕾, 等. 中国主要盆地页岩油气资源潜力及发展前景[J]. *石油学报*, 2023, 44(12): 2033-2044.
WANG Jian, GUO Qiulin, ZHAO Chenlei, et al. Potentials and prospects of shale oil-gas resources in major basins of China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(12): 2033-2044.

(收稿日期 2023-12-29 改回日期 2024-05-10 编辑 雷永良)