

# 显生宙烃源岩分布的古板块再造研究

李江海 杨静懿 马丽亚 王洪浩

(北京大学地球与空间科学学院, 北京大学石油与天然气研究中心, 北京 100871)

**摘要:** 本文依据古地磁方法对不同时期的全球古板块进行再造, 并在此基础上叠加了全球大地构造背景、洋流系统、气候带分布以及岩相古地理等要素, 共编制了 11 个时间段古板块格局下的全球烃源岩分布图。综合各种地质要素可以看出烃源岩在时间和空间分布上具有强烈不均匀的特征, 在时间上, 中、新生代烃源岩无论是从分布范围, 还是厚度上, 都较古生代更为发育; 在空间上, 全球显生宙海相烃源岩主要分布于陆棚及斜坡相、台内拗陷等环境, 而陆相烃源岩则主要分布在湖盆中心。烃源岩的沉积和保存受到超大陆旋回的控制, 超大陆汇聚过程中陆架和适宜陆缘的消失不利于烃源岩的沉积和保存, 反之亦然。较高的海平面以及上升流的存在是烃源岩发育的有利条件, 全球优质烃源岩富含的有机质泥页岩多发育于海侵体系域顶部与高位体系域底部的密集段中。

**关键词:** 显生宙; 烃源岩; 古板块; 发育环境; 有利因素

**中图分类号:** P618.13      **文献标志码:**      **文章编号:** 1000-3657(2013)06-1683-16

烃源岩是指富含适当化学成分的有机质, 并且在生物作用或者热作用的条件下能够产生并且释放出碳氢化合物的岩石单元<sup>[1]</sup>。烃源岩是油气勘探的物质基础, 研究其形成环境对油气勘探与开发具有极其重要的意义。前人围绕全球不同时代不同盆地的烃源岩形成背景, 包括古板块再造、古地理环境、沉积岩相、古气候-洋流等开展了大量研究<sup>[2-15]</sup>, 先后探讨了烃源岩的地层分布、平面分布、深度分布以及烃源岩类型等问题<sup>[2,6,8,10-14,16-24]</sup>。其中, Klemme and Ulmishek (1991) 曾以地史上六个时段为基准, 进行了烃源岩分布的全球古板块编图, 提出全球超过 90% 的可采油气储量产自六套地层的烃源岩<sup>[2]</sup>, 白垩系以 34% 的比例居首。

关于烃源岩研究尚存一些亟待解决的问题, 主要包括: 缺乏全球各时期烃源岩分布、大地构造背景、岩相古地理、沉积环境、古气候、烃源岩有机质类型等方面的综合研究, 特别是缺乏全球古板块再造

的成图研究。开展全球古板块再造框架下, 不同时期烃源岩分布相关的沉积盆地岩相古地理恢复研究, 对于油气资源勘探具有重要意义。

本文依据古地磁方法, 对不同时期的全球古板块进行再造, 并在此基础上叠加了全球大地构造背景、洋流系统、气候带分布以及岩相古地理等要素, 共编制了 11 个时间段古板块格局下的全球烃源岩分布图。

## 1 烃源岩的地层分布特征

全球烃源岩主要发育的地层包括: ①志留系 (450~420 Ma); ②上泥盆统一下石炭统 (380~340 Ma); ③上石炭统一早二叠统 (310~280 Ma); ④上侏罗统 (170~150 Ma); ⑤中白垩统一上白垩统 (110~90 Ma); ⑥渐新统一中新统 (40~5 Ma)。烃源岩在时间和空间分布上具有强烈不均匀特征。中、新生代烃源岩无论是从分布范围, 还是厚度上, 都较古生代更为发育。

收稿日期: 2013-06-19; 改回日期: 2013-10-15

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973 计划”(2009CB219302)项目资助。

作者简介: 李江海, 男, 1965 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事大地构造及油气构造研究; E-mail: jhli@pku.edu.cn。

通讯作者: 杨静懿, 女, 1988 年生, 硕士生, 主要研究方向为含油气盆地; E-mail: yangjingyi\_pku@126.com。

震旦纪及古生代烃源岩(保存至现今)中除泥盆纪、二叠纪外,其余时代不甚发育,约占整个地质时期的 10.2%。中生代以来,烃源岩发育规模逐渐扩大,约占整个地质时期的 89.8%,其中侏罗纪和白垩纪最为发育,分别约占 25%和 34%<sup>[25]</sup>,其次为新近纪<sup>[16]</sup>。数据显示,高质量、广泛发育的世界级烃源岩大都发育在侏罗系—白垩系,它们产生了超过全球 70%的大油气田,并且集中分布在全球最重要的含油气盆地,如:波斯湾盆地、西西伯利亚盆地、北海裂谷盆地、墨西哥湾盆地等(表 1)。

## 2 本文编图研究思路和方法

本文在古板块构造、盆地分析等理论框架下,以全球已发现的含油气盆地数据为基础(AAPG, 2013; IHS, 2009),通过古板块再造方法结合地理信息系统(ArcGIS)对 11 个层位(震旦系、寒武系、奥陶系、志留系、泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、古近系)烃源岩数据进行统计、对比,并恢复了 11 个时期对应的古板块位置、岩相古地理环境及其烃源岩分布,并在此基础上对烃源岩分布特征、干酪根类型、形成环境及主控因素给出自己的见解。具体成图流程见图 1,震旦纪—显生宙全球烃源岩分布见图 2。

与前人图件相比,本项成图研究具有以下特点和区别:(1) 板块再造图增加了板块运动学分析、大火山岩省(LIP)制约、区域构造分析(碰撞造山带、走滑断层、裂谷带);(2) 在板块再造新的框架下,进行古环境和岩相古地理恢复,并叠合古气候带、洋流等;(3) 在岩相古地理图上叠合烃源岩分布,开展主控因素的分析 and 分布规律研究;(4) 通过不同时期板块运动连续性的衔接,增加了本图系列的校对分析。

## 3 震旦纪—古生代全球烃源岩分布及其古板块构造环境(600~250 Ma)

### 3.1 震旦纪烃源岩

震旦纪烃源岩主要分布在盘诺提大陆北部的被动陆缘盆地和克拉通盆地(如扬子陆块上的四川盆地、西伯利亚板块上的通古斯、拜基特盆地、劳伦大陆北缘的二叠盆地、丹佛盆地、阿尔伯塔盆地)和南部的被动陆缘盆地(如波罗的板块上的莫斯科盆地、伏尔加—乌拉尔盆地等);盘诺提大陆内部(澳洲、巴西、阿拉伯和印度)的克拉通盆地也有部分烃源岩分

布。盘诺提大陆北侧广阔的被动大陆边缘和克拉通盆地,均处于南半球古纬度 30°附近,气候湿热,导致海相生物大量繁殖<sup>[58]</sup>,有利于烃源岩的发育。

震旦纪烃源岩的主要沉积岩相为台地相碳酸盐岩、浅海和海湾相泥页岩以及陆内深水湖相泥页岩<sup>[59-60]</sup>。震旦系海相地层中发育的烃源岩主要为 II 型干酪根,其发育位置和大陆南北缘暖流流域中的上升流位置较吻合;陆相地层中发育的烃源岩主要为 I 型干酪根,主要发育于深湖相泥页岩,其大部分位于内陆位置(如澳洲内陆的乔治亚、卡本塔利亚盆地、阿拉伯板块东缘阿曼盆地等<sup>[61-63]</sup>)、陆缘三角洲位置(如印度西北部和塔里木盆地北部<sup>[23,64]</sup>)。

### 3.2 寒武纪烃源岩

寒武纪烃源岩分布与震旦系类似,主要分布在盘诺提超大陆北部的被动陆缘盆地以及克拉通盆地<sup>[65-70]</sup>,多形成于海相环境,少量发育于深湖和陆相三角洲。寒武系烃源岩主要为下寒武统富有机质的黑色页岩和碳酸盐岩,多处于成熟—过成熟的状态,干酪根以 I 型和 II 型为主<sup>[71-74]</sup>,可与其上覆的碳酸盐岩储层和蒸发岩盖层构成较好的生储盖组合。目前,西伯利亚板块、波罗的板块、阿拉伯板块、东北非板块、澳大利亚板块、塔里木陆块、扬子陆块等已有寒武系烃源岩发现<sup>[75]</sup>。

在北美、西伯利亚、波罗的、澳洲、华南、塔里木等板块,寒武系底部沉积物中均发现有含磷层,并且与全球寒武系烃源岩的分布范围相对应。推断早寒武世这些地区存在上升流,与海水热液沉积相关,有助于烃源岩的发育。

寒武纪处于全球性大冰期之后的冰川快速消融—海平面上升期,古气候以干热为主,寒武系烃源岩主要分布于亚热带干燥区。在(低压)气旋控制的沿岸带、浅水区,往往发育风暴岩而不利于烃源岩发育,但在处于风暴浪基面之下的相邻较深水区却发育碳—硅泥岩优质烃源岩。热带干燥区的赤道洋流辐散带形成低温、富含营养盐的上升洋流,极有利于广阔范围内烃源岩的发育。且寒武系伸展盆地发育,不存在大规模碰撞造山运动,也有利于烃源岩的保存。

### 3.3 奥陶纪烃源岩

奥陶纪烃源岩主要分布于劳伦大陆被动陆缘、冈瓦纳南缘及澳大利亚中北部及中国陆块群内部,主要分布的岩相为浅海碳酸盐岩(劳伦板块、华北陆块、塔里木陆块)、海陆过渡相泥页岩(阿拉伯板块)

表 1 震旦纪—显生宙全球重要烃源岩分布区统计  
Table 1 Statistics of distribution of important hydrocarbon source rocks in Sinian-Phanerozoic period in the world

时代	盆地/油气区	构造属性	沉积环境	干酪根类型	烃源岩 (主要)
震旦纪	非洲南部 (Owambo Basin, Nama-Kalahari Basins)	大陆	浅海—三角洲	II-III	Kombat 组、Zaris 组页岩
	西伯利亚 (通古斯盆地, Nepa-Botuoba Basin, 安加拉—叶尼塞盆地等)	被动陆缘	滨海, 大陆	II、III	Chorskaya 组页岩, Nepa 组粉砂岩
	北美 (丹佛盆地, 二叠盆地, 密歇根盆地等)	被动陆缘, 内克拉通	滨浅海	II、II-III	Redkinskaya 组页岩、粉砂岩
	东欧 (莫斯科盆地, 伏尔加乌拉尔盆地, 帝曼—伯朝拉盆地)	裂谷—被动陆缘	浅海	II	Serra da sudade 组泥灰岩、
	巴西 (巴纳伊巴盆地, 圣弗朗西斯科盆地)	内克拉通前陆、裂谷	浅海、河流—三角洲	II-III、III	Nafun 群砂泥岩, Hormuz 组泥页岩、灰岩, Khewra 组泥页岩
	阿拉伯—印度 (阿曼盆地, Widiyan-Mesopotamia Province, 波特凡盆地)	裂谷, 走滑拉分、内陆	滨海, 蒸发岩相, 河流	II-III、III	扎摩克提组砂泥岩, 灯影组白云岩
	中国 (塔里木盆地, 四川盆地)	裂谷—被动陆缘	浅海, 局限台地	II、III	Kuonam & Inikan formations (下一中寒武统) 黑色页岩
	Lena-Vilyuy Basin	被动陆缘	海相	II	Shuram Formation 黑色页岩/泥质叠层石白云岩
	阿拉伯盆地	克拉通内拗陷	海相	II	Goulburn Group 泥岩/灰岩
	阿拉弗拉盆地	内克拉通沉降阶段	海相	品质较差	Tempe Formation 泥岩/页岩 Chandler Formation 泥岩/页岩
寒武纪	Amadeus 盆地	内克拉通裂谷、拗陷	海相	II	下寒武统页岩和碳酸盐岩
	四川盆地	克拉通内拗陷	浅海相	I	下寒武统灰质泥岩、沥青质白云岩
	塔里木盆地	克拉通内拗陷	深海相	I	Quietame Group 黑色页岩
	Lianos-Barinas 盆地	裂谷	海相	I-II	上寒武统 Grosses-Roches Formation
	Lianos-Barinas 盆地	裂谷	大陆斜坡	I-II	Deadwood Formation
	Gaspe Peninsula 盆地	克拉通内拗陷	湖相	I	Dhababan 碳酸盐岩
	威林顿盆地	后裂谷内拗陷	浅海相	II	Supra-Hormuz Formation 碳酸盐岩/硅质碎屑岩
	阿曼盆地	裂谷拗陷	海相	I-II	下奥陶统一中奥陶统碳酸盐岩
	伊朗 (Fars Province/Khuzestan Province/Lorestan Province)	裂谷	开陆海	I、II	下奥陶统一中奥陶统泥岩和碳酸盐岩
	中国渤海湾盆地	陆内克拉通	海相	I、II	下奥陶统一中奥陶统泥岩和碳酸盐岩
奥陶纪	中国鄂尔多斯盆地	被动大陆边缘	浅海陆架-斜坡	I-II	中奥陶统碳酸盐岩
	中国塔里木盆地	陆内克拉通	浅海相	I、II	中奥陶统碳酸盐岩, 泥岩
	澳大利亚坎宁盆地	裂谷	浅海相	I、II	上奥陶统碳酸盐岩
	澳大利亚乔治盆地	台地	浅海—半深海相	I、II	下奥陶统一上奥陶统泥岩
	欧洲威利斯顿盆地	前陆	浅海—深海相	I、II	上奥陶统泥页岩
	Moesian Platform	被动大陆边缘	陆地—浅海相	II、III	下奥陶统一上奥陶统泥页岩
	Baltic Depression	陆内克拉通	海陆过渡相	II、III	上奥陶统泥页岩
	巴拉那盆地	陆内克拉通	海陆过渡相	II、III	下奥陶统一上奥陶统泥页岩
	阿尔及利亚廷杜夫	陆内拗陷	海陆过渡相	II、III	上奥陶统泥页岩
	库夫拉盆地	裂谷+被动陆缘	浅海相	II、I-II	下志留统古寨巴段海相页岩和粉砂岩
志留纪	波斯湾地区	内克拉通	浅海相—海相	II	页岩
	二叠盆地	克拉通	浅海相	II	碳酸盐岩
	密歇根盆地	克拉通	浅海相	II	页岩
	阿纳托利亚盆地	被动陆缘	浅海相	II	页岩
	阿曼盆地	被动陆缘	浅海相	II	页岩
	阿拉伯盆地	被动陆缘	浅海相	II-III	上志留统页岩
	卡那封盆地	被动陆缘	浅海相	II-III	页岩
	拜尔肯盆地	被动陆缘	浅海相	I-III	页岩
	阿基里盆地	克拉通内拗陷	浅海相	II-III	页岩
	四川盆地	克拉通内拗陷	浅海相	II-III	页岩
北美东部大尔格盆地	被动陆缘	浅海相	II	页岩	

续表 1

时代	盆地/油气区	构造属性	沉积环境	干酪根类型	烃源岩 (主要)
泥 盆 纪	劳俄北部 (蒂曼—伯朝拉盆地, 莫斯科盆地, 梅津盆地)	被动陆缘	浅海相	II、III	Grebenskov 组泥页岩、泥页岩, Nyumigskiy 组、Timen 组、Vyarovskiy 组砂页岩、灰岩
	非洲北部 (塞内加尔盆地, Aaiun-Tarifaya basin, 古达尔盆地, 陶丹尼盆地)	被动陆缘, 内克拉通	浅海台地	II、III	Bafata sh 组、Buba sh 组泥页岩, 灰岩, Aouinet oucinine 组泥页岩
	阿拉伯 (北格罗斯, Wichan-Mesopotamia Province, 中阿拉伯省)	被动陆缘, 前缘	浅海台地	II、III	Derdere 组、Karababa 组白云岩、泥灰岩, Jauf 组泥页岩
	劳伦大陆 (阿尔伯特盆地, 丹佛盆地, 威灵顿盆地, 东格林兰盆地)	内克拉通	滨浅海, 局限台地	II、I	泥盆系碳酸盐岩、泥页岩
	澳洲 (南卡那封盆地, 波拿巴特盆地, 乔治亚盆地, 阿玛迪斯盆地)	裂谷	深湖相	II	泥盆系泥页岩
	南美 (查科巴拉那盆地, 上亚马逊盆地, 圣克鲁斯盆地)	裂谷	深湖相	II、III	Rincon、Cabure 组, Cumu 组泥页岩
	南美查科盆地	前陆	海相	II-III	D <sub>3</sub> -C <sub>1</sub> Itucua 组页岩
	北美威利斯顿、密歇根、伊利诺斯盆地	圆形拗陷	海相	II	C <sub>1</sub> Bakken 组
	北美阿尔伯特盆地	台地	海相	II	C <sub>1</sub> Exshaw 组页岩
	北非三叠盆地等	隆升	—	—	C 黑色页岩
石 炭 纪	欧洲南部北海盆地	前渊	陆相	III	C <sub>2</sub> 威斯特伐利亚阶煤层组
	欧洲 Pripjat、第聂伯—顿尼茨盆地	裂谷	海相	II	D <sub>3</sub> -C <sub>1</sub> 杜内阶碳酸盐页岩
	亚洲里海北部盆地	圆形拗陷	海相	II	C-P <sub>1</sub> 盆地相, 碳酸盐和泥岩
	亚洲楚—萨雷苏盆地	被动大陆边缘	浅海	—	D—C 杜内阶, 达到了强烈的过成熟生气阶段
	亚洲塔里木盆地	前陆、克拉通	潮坪	—	C 卡拉沙依组暗色泥岩、碳酸盐
	巴伦支海盆地	克拉通	浅海相	II、III	上二叠统泥页岩
	波罗的东南部 (Tabriz Basin、Khalkhal Basin、Sirjan Basin、Estaham Basin)	克拉通	河湖相—浅海相	II、III	上二叠统泥页岩
	中亚 (准噶尔盆地、锡尔河盆地)	前渊	河湖相	II、III	下二叠统泥页岩
	四川盆地	克拉通	浅海—深海相	II、I	上二叠统页岩
	渤海湾盆地	裂谷	海相	II	石河子组泥页岩
二 叠 纪	阿拉伯油气区 (中阿拉伯、鲁卜哈利、扎格罗斯盆地)	台地-被动陆缘	浅海—深海相	II、III	Khuff、Faraghan FM 泥页岩
	马达加斯加马江格盆地	裂谷	河湖相	III、II	上二叠统泥页岩
	东冈瓦纳西北部 (波拿巴特盆地、东澳大利亚盆地)	被动陆缘-台地	河流、三角洲相	II、III	下二叠统页岩、泥岩
	西冈瓦纳中部 (亚马逊、查科—巴拉纳、帕内盆地)	克拉通	河湖相	II-III、II	下二叠统泥页岩
	准噶尔盆地	陆内沉降	泻湖	II、III	karamay 组, 泥页岩
	塔里木盆地	裂谷	沼泽相	III	xiaoquanguo 群, Tliqike 组泥岩
	North Ustyurt 盆地	前陆	陆相	II、III	泥灰岩, 泥岩
	鄂尔多斯盆地	隆起	三角洲	II、III	yangchang, 泥、页岩
	四川盆地	裂谷	浅海过度相	I-II, III	xiangxi 群, xujiahe 泥、页岩, leikoupo 组泥页岩, jialingjiang 组灰岩, feixianguan 组泥灰岩
	里海盆地	裂谷	浅海相	II、II-III	灰岩, 泥、页岩
中阿拉伯盆地	被动陆缘	浅海相	II、I-II	Malussa 组泥灰岩, Kangan daian 组灰岩, Jilh 组泥灰岩	

续表 1

时代	盆地/油气区	构造属性	沉积环境	干酪根类型	烃源岩 (主要)
侏罗纪	北海北部盆地	裂谷	浅海相-海相	II	上侏罗统页岩和中侏罗统煤层和含煤页岩
	东北德国盆地	裂谷	浅海相	II	碳酸盐岩
	阿基田盆地	裂谷	浅海相	II	上侏罗统碳酸盐岩
	莫尔盆地	被动大陆边缘	浅海相	II	中上侏罗统碳酸盐岩
	凯尔特盆地	裂谷	浅海相	II	泥页岩
	波丘派恩盆地	裂谷	浅海相	II	上侏罗统泥页岩
	墨西哥湾盆地	被动大陆边缘	浅海相-海陆过渡相	II、II-III	上侏罗统提塘阶-棉谷群黑色钙质页岩和牛津阶斯马可夫组灰岩及藻类泥灰岩
	渤海湾盆地	裂谷	河流相-三角洲相	II	泥页岩
	波斯湾盆地	克拉通+裂谷	浅海相	II、III	碳酸盐岩
	西西伯利亚盆地	克拉通	深湖相	II、III	上侏罗统巴热诺夫黑色硅质页岩
	澳洲西北	被动大陆边缘	浅海相	II、I	藻型页岩及煤层
	四川盆地	克拉通	河流相-三角洲相	II、III	砂泥岩
	阿尔伯特盆地	前陆	河流相-三角洲相	II	侏罗系 Nordleg 组泥页岩
	下刚果盆地	裂谷	深湖相	I-III	上侏罗统页岩
北格罗斯盆地	前陆	浅海相	II	泥页岩	
白垩纪	阿拉伯油气区 (中阿拉伯、鲁卜哈利、北格罗斯盆地)	台地	浅海-深海相	II、I-II	阿尔必阶、参诺曼阶页岩
	西伯利亚 (北部)	裂谷	浅海相、陆相	II、III	凡兰吟阶-欧特里夫阶页岩, 阿尔必阶、森诺曼阶砂岩
	北非油气区 (锡尔特、突尼斯、苏伊士湾)	前裂谷	河流相-冲积相	II、III	上白垩统页岩
	东亚油气区 (松辽盆地)	裂谷	半-深水湖泊相	I、II	中白垩青山口泥岩
	南大西洋 (坎波斯、桑托斯、加蓬、下刚果盆地)	裂谷	半-深水湖泊相	I、II	巴列姆阶-阿普第阶页岩、泥灰岩
	北大西洋 (西格陵兰、茯苓盆地)	裂谷	海相	I-II	森诺曼阶-上侩阶泥页岩贝里亚组页岩
	北美 (阿尔伯特、绿河、怀俄明)	前渊	海陆过渡相	II、III	Mannville 泥岩
	冈瓦纳东南部 (澳洲-印度油气区)	三角洲	河流、三角洲相	III、IV	下白垩统页岩、泥岩
	尼日尔	三角洲	湖泊相	II、III	坎诺阶-麦斯里希特阶和森诺曼阶-上侩阶页岩
	中大西洋 (墨西哥湾、东委内瑞拉)	三角洲	海陆过渡相	II、II-III	森诺曼阶-科尼亚阶碳酸盐岩、页岩
	北苏门答腊盆地	弧后	浅海相-海陆过渡相	II、II-III	下中侩统钙质页岩、页岩、钙质泥岩
	中苏门答腊盆地	弧后	浅海相-海陆过渡相	II、II-III	上始新统一下渐新统页岩、煤
	南苏门答腊盆地	弧后	浅海相-海陆过渡相	II、II-III	第三系砾质页岩、煤
	西爪哇盆地	弧后	浅海相-海陆过渡相	II、II-III	上始新统一下渐新统页岩
东爪哇盆地	弧后	浅海相-海陆过渡相	II、II-III	第三系页岩、泥灰岩、煤	
马里盆地	裂谷	浅海相	II	古近系、新近系煤、页岩	
库泰盆地	裂谷	浅海相-海陆过渡相	II、II-III	古近系、新近系泥页岩、灰岩、煤	
渤海湾盆地	裂谷	河湖相	II	古近系、新近系粉砂岩	
东非裂谷东支	裂谷	河湖相	II	始新统页岩	
墨西哥湾盆地	被动大陆边缘	深海相	II	古近系泥页岩	
塔里木盆地	叠合	河湖相	II	砂泥岩	

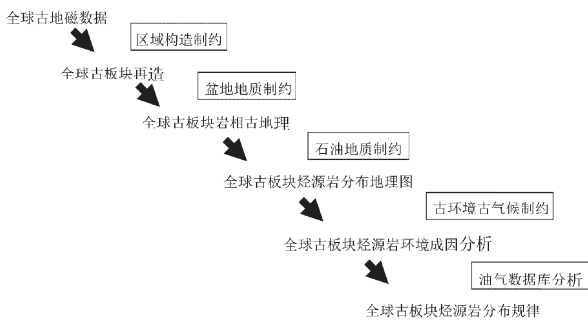


图1 本文成图思路及其构造流程

Fig.1 Mapping method and tectonic process

和湖相泥页岩(非洲板块北部、南美板块中部)。奥陶系烃源岩干酪根类型有 I 型、II 型及 III 型,其中,劳伦、塔里木和华北等海相碳酸盐岩沉积区烃源岩以 I 型、II 型干酪根为主<sup>[66,76-77]</sup>,而非洲北部及澳大利亚则以 II 型-III 型干酪根为主<sup>[78-79]</sup>。

奥陶系烃源岩形成有利区为浅海、海湾、三角洲和陆相深水湖泊环境。发育奥陶系烃源岩的相关重要油气盆地有:北美威尔斯頓盆地、澳大利亚坎宁盆地、塔里木盆地、华北鄂尔多斯盆地、北非古达米斯盆地等。在中国陆块中,塔里木盆地奥陶系烃源岩主要沉积在具上升洋流的陆棚、滞流的海湾陆棚、正常陆棚、深海盆地以及淹没台地陆棚等不同的环境中<sup>[73]</sup>。而华北东部奥陶系中、下奥陶统烃源岩则发育于局限台地沉积环境中<sup>[80]</sup>。

烃源岩发育区总体位于赤道低纬度地区,处于热带-干旱带气候区,且受冷暖流交汇区的上升流控制。自早奥陶世以来,海平面不断上升,全球变暖,浮游生物繁盛。尤其在低纬度冷、暖流交汇处(华北—塔里木—澳大利亚),特别适宜浮游生物的繁殖,从而造成有机质的大量沉积。

### 3.4 志留纪烃源岩

志留纪烃源岩主要分布在冈瓦纳大陆北部的非洲北缘、阿拉伯北缘以及劳俄大陆、西伯利亚的被动陆缘和克拉通盆地。全球重要的含志留系烃源岩盆地主要有:北非阿尔及利亚、突尼斯以及利比亚盆地群、阿拉伯盆地、北美二叠盆地、阿纳达科盆地、密歇根盆地、东部大尔格盆地以及蒂曼—伯朝拉盆地等<sup>[24]</sup>。北非—阿拉伯半岛的下志留统海相页岩烃源岩大致与北美内部盆地群和俄罗斯地台下志留统烃源岩相

对应<sup>[78]</sup>。此外,欧洲的波西米亚、法国、德国等地,富含有机质的笔石页岩时代跨度为早志留世鲁丹期到中志留世文洛克期。志留系烃源岩主要分布的岩相为海相碳酸盐岩、海陆过渡相泥岩和页岩,以 I 和 II 型干酪根为主。其中全球 9%的可采油气储量产自志留系的烃源岩<sup>[2]</sup>。

志留纪整体气候比较温暖,海平面较高。广阔的浅海以及温暖湿润的环境有利于海相生物的大量繁殖,同时上升流作用带来的丰富的有机质和营养物质,导致在有上升流的区域广泛发育黑页岩沉积。以北非和阿拉伯地区为例,下志留统的烃源岩页岩直接沉积在上奥陶统的冰海相砂岩上。早志留世冈瓦纳大陆冰盖大规模融化,陆内大型河流将丰富的有机物质搬运至古特提斯洋南部河口及浅海区(北非和阿拉伯地区)。上升流的作用以及此处强烈的缺氧事件,也有利于黑色页岩的形成<sup>[81]</sup>。此时,劳俄板块位于赤道附近,气候温暖潮湿,浅海分布范围较广,也有利于海相烃源岩发育。

冈瓦纳北缘的下志留统黑色页岩具有横向不连续的特点,同时黑色页岩的分布受到古地形的控制。而志留纪冈瓦纳北缘的古地形主要受到泛非期造山以及寒武纪陆内伸展构造的影响,同时叠加了晚奥陶世冰川的改造作用。这就导致在冈瓦纳北缘志留系烃源岩最富集的地区主要集中在北非的阿尔及利亚、突尼斯和西利比亚和阿拉伯半岛上的沙特阿拉伯、阿曼、约旦以及伊拉克。而埃及未见志留系烃源岩分布,主要是因为志留纪埃及属于高地<sup>[81]</sup>。

### 3.5 泥盆纪烃源岩

虽然泥盆纪全球海平面和气温相比志留纪略有下降,但从很多方面,泥盆纪仍是志留纪的延续。泥盆系烃源岩主要分布在被动陆缘盆地(劳俄板块北部海湾、非洲北部海湾、阿拉伯)、克拉通—裂谷盆地(劳伦、澳洲、南美)。分布的岩相主要为浅海台地相碳酸盐岩(波罗的、非洲北部、阿拉伯)、浅海相泥页岩(劳俄北缘)以及深湖相泥页岩(哈萨克斯坦、南美、澳大利亚)等。晚泥盆世的海侵对烃源岩的发育具有重要作用,温带、热带区及冷暖流交汇区为烃源岩发育的有利区带(如西伯利亚与劳伦—波罗的板块间)。

全球发育泥盆系烃源岩的重要油气盆地有:北美阿尔伯塔盆地、阿巴拉契亚盆地<sup>[82]</sup>、伏尔加—乌拉尔盆地<sup>[83]</sup>、非洲北部盆地群、美国南部盆地群等。烃

源岩类型以Ⅱ型干酪根为主。

### 3.6 石炭纪烃源岩

石炭纪烃源岩主要分布于浅海台地相碳酸盐岩(华南)、海陆过渡相泥页岩以及河湖相泥页岩中(哈萨克斯坦、南美、澳大利亚、非洲),有利区为温带、热带及冷暖流交汇区的浅海、海湾、三角洲和陆相深水湖泊。石炭纪烃源岩以Ⅱ型干酪根为主,但Ⅲ型干酪根和煤也成为重要的烃源岩。

上石炭统的黑色页岩主要形成于中低纬度的克拉通盆地内,如北美中部大陆盆地、欧洲中部的泽西斯坦(Zechstein)盆地,以及泛大陆(Pangea,在250 Ma左右达到最大规模,此时泛大陆外围为Panthalassa,内部为特提斯洋,环绕泛大陆的泛大洋被称为Panthalassa)西北缘的盆地(美国西部)。形成环境为邻近大洋的半封闭边缘拗陷盆地,大洋区发育强烈的上升流,形成巨大硫酸盐系统,造成黑色页岩沉积;西伯利亚板块与哈萨克斯坦板块缝合带北缘,近洋一侧的浅海盆地内堆积了上石炭统富含炭质的细碎屑岩及碳酸盐岩,成为该时期重要的烃源岩;澳大利亚库珀、博恩、苏拉特、阿克任伽盆地,石炭系发育有巨厚陆相碎屑岩夹冰碛层及泥炭沼泽环境沉积<sup>[84]</sup>,舌羊齿植物群发育,煤层广泛分布,上述前三个盆地发现了天然气田。此外,南美玻利维亚—阿根廷北部的查科盆地形成的Itacua组页岩、中国准噶尔盆地石炭系等也都是石炭纪形成的比较重要的烃源岩地层。

总体来说,石炭纪时期,全球海平面降低,平均气温较泥盆纪降低2℃以上<sup>[85]</sup>,陆上植物繁盛,大气氧气含量突增约一倍<sup>[86]</sup>,海水氧化增强,不利于海相缺氧地层和相关烃源岩沉积和保存。

### 3.7 二叠纪烃源岩

二叠纪烃源岩主要形成在板块边缘的浅海—半深海环境和板块内部的半深湖—深湖环境中,其中浅海碳酸盐台地、深水湖泊为最有利的烃源岩发育区。主要分布于以下地区:①新特提斯洋南缘的被动陆缘盆地中,如阿拉伯盆地、澳洲西北缘盆地。其中,阿拉伯盆地烃源岩干酪根类型以Ⅱ型为主,发育少量的Ⅰ型干酪根,而澳大利亚西北缘盆地烃源岩干酪根类型以Ⅱ型为主,发育少量Ⅲ型干酪根;②泛大陆中部裂谷盆地,如西西伯利亚盆地、冈瓦纳内部的查科—巴拉纳盆地等。西西伯利亚盆地烃源岩沉积在浅海—半深海环境中,干酪根类型以Ⅱ型为主。冈

瓦纳内部的烃源岩多沉积在河湖相环境中,干酪根类型偏Ⅲ型;③稳定板块上克拉通盆地,如华北陆块上的鄂尔多斯和渤海湾盆地、扬子陆块上的四川盆地、波罗的板块等。其中,扬子和华北陆块上的烃源岩沉积在海相碳酸盐岩中,干酪根类型以Ⅱ型为主。波罗的北缘的烃源岩见于碳酸盐岩台地相,干酪根类型以Ⅱ型为主。波罗的内部的烃源岩沉积在半深湖—深湖环境,干酪根类型为Ⅱ—Ⅲ型。二叠系煤层出现于高纬度湿润带,泥炭沉积于浅水克拉通盆地和伸展盆地,如南非、印度、澳洲、南极、南美、华北、西伯利亚南部等。

随着超大陆(某一地质历史期由当时大部分或全部陆壳聚合在一起形成的超级大陆)汇聚和海平面下降<sup>[87]</sup>,二叠纪陆架面积和合适的陆表海不断减少,中二叠统一侏罗统海相烃源岩持续减少。晚古生代以来海平面一直处于下降状态,并在晚二叠世达到整个显生宙的最低值。二叠纪末生物大灭绝事件提供了丰富的有机质来源,但烃源岩的发育主要受有机质保存条件的限制。

## 4 中、新生代全球烃源岩分布及其古板块构造环境(250~23 Ma)

### 4.1 三叠纪烃源岩

三叠纪烃源岩主要分布于浅海相泥质灰岩、页岩以及深湖相泥页岩中,全球发育三叠系海相烃源岩的盆地有阿尔伯塔盆地、阿拉斯加北斜坡盆地等。发育陆相烃源岩的盆地有北美东海岸的裂谷盆地群(如Newart盆地)、准噶尔盆地、鄂尔多斯盆地<sup>[88]</sup>以及坦桑尼亚卡鲁裂谷盆地等,陆相烃源岩的发育多与超大陆裂解形成湖相有机质沉积有关。

三叠系烃源岩类型以Ⅱ型(主要分布于北美、南美西缘,澳大利亚北缘,阿拉伯以及波罗的西南缘)、Ⅲ干酪根(主要沿着古特提斯洋分布,如中亚的曼格什拉克盆地、华北的鄂尔多斯盆地和华南的四川盆地等)为主,少量为Ⅰ型干酪根(如伊利兹盆地、锡尔特盆地和阿拉斯加北坡盆地等)<sup>[89]</sup>。总体来说,中生界烃源岩以三叠系最不发育,但相比古生界发育程度而言有所提高。三叠系烃源岩主要集中于冷暖流交汇区,且大陆裂解造成的区域性沉降也在一定程度上有利于烃源岩的保存

### 4.2 侏罗纪烃源岩

侏罗纪烃源岩很发育,以中上侏罗统的浅海相

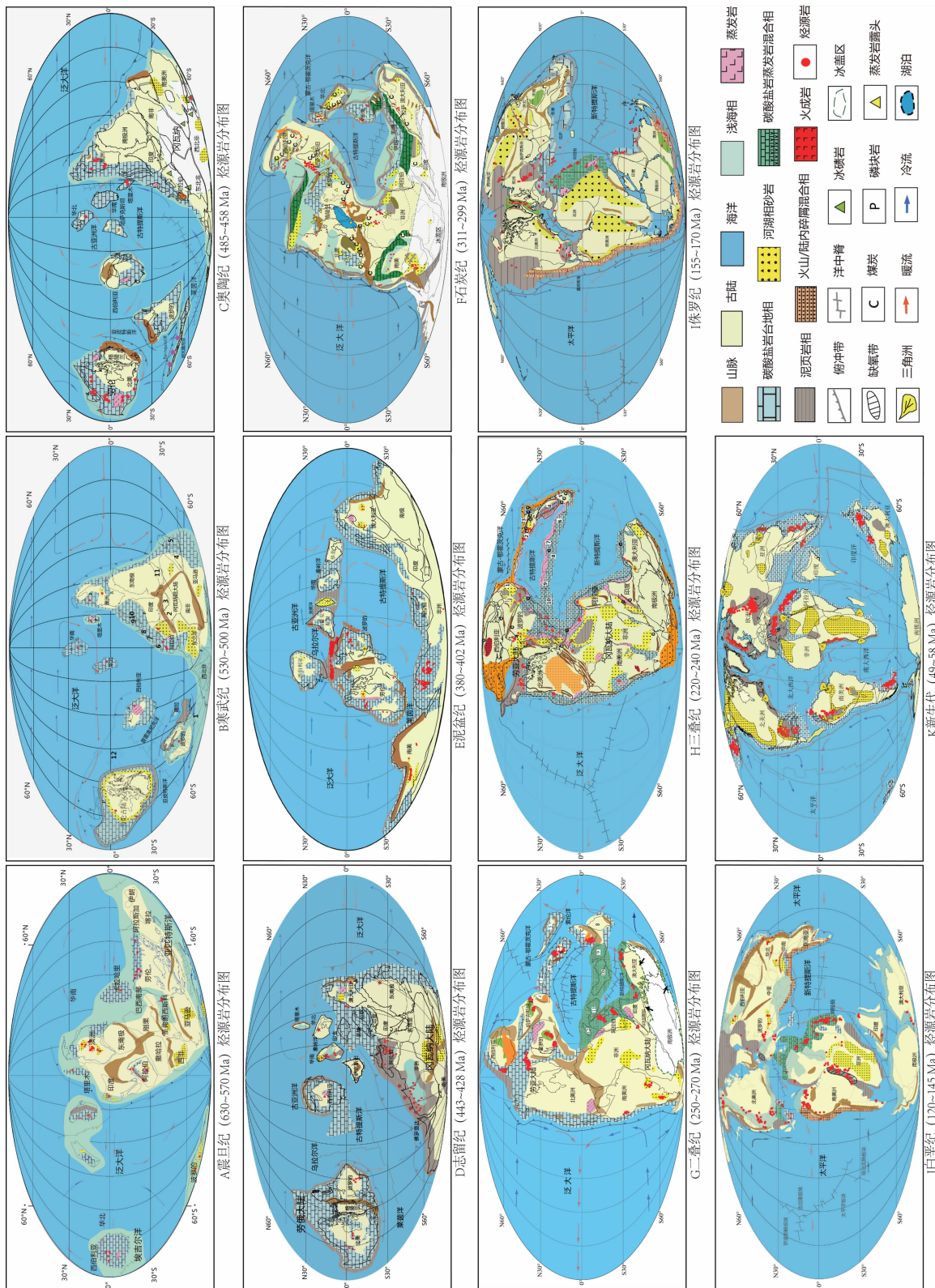


图 2 震旦纪—显生宙全球烃源岩分布图 Fig.2 Global distribution of source rocks (Sinian to Phanerozoic)



## 图件说明

A—震旦纪(600 Ma)古板块图

B—寒武纪(520 Ma)古板块图

1—阿瓦隆尼亚;2—马达加斯加;3—索马里;4—巴拉那;5—科罗拉多;6—厄尔布尔土地体;7—中伊朗;8—阿富汗地块;9—羌塘地块;10—拉萨地块;11—毛德皇后地;12—楚科奇

C—奥陶纪(470 Ma)古板块图(板块位置—470 Ma;造山带—482~468 Ma;岩浆岩—470~488 Ma)

D—泥盆纪(390 Ma)古板块再造图(板块位置—390 Ma;造山带—359~416 Ma)

E—志留纪(430 Ma)古板块再造图(板块位置—430 Ma;造山带—443~420 Ma)

F—石炭纪(320 Ma)古板块再造图(板块位置—320 Ma;造山带—338~323 Ma)

G—二叠纪(260 Ma)古板块再造图

1—准噶尔地体;2—塔里木陆块;3—柴达木地体;4—昆仑地体;5—阿穆尔陆块;6—华北陆块;7—扬子陆块;8—加里曼丹板块;9—印支板块;10—马来西亚陆块;11—伊朗板块;12—土耳其板块

H—三叠纪(220Ma)古板块再造图(板块位置—220 Ma;造山带—250~210 Ma)

1—塔里木;2—华北;3—阿姆利亚;4—扬子;5—加里曼丹;6—印支;7—马来西亚;8—基默里陆块群;9—伊朗;10—土耳其

I—侏罗纪(160Ma)古板块再造图(板块再造—160 Ma;造山带—146~166 Ma)

J—白垩纪(120 Ma)古板块再造图(板块再造—120 Ma;造山带—250~120 Ma)

K—古近纪(50 Ma)古板块再造图(板块再造位置—50 Ma,俯冲带—65~48 Ma)

## Explanation of maps

A—Sinian (600Ma)paleoplate map

B—Map of Cambrian(520Ma) paleoplate

1— Avalon microcontinent; 2—Madagascar; 3—Somalia; 4—Parana; 5—Colorado; 6—Alborz Massif; 7—Central Iran; 8—Afghanistan Massif; 9—Qiangtang Massif; 10—Lhasa Massif; 11—Queen Maud Land;12—Chukot

C—Ordovician (470 Ma)paleoplate map (Plate position—470 Ma; Orogenic belt—482~468 Ma; Magmatic rock—470~488 Ma)

D—Devonian (390 Ma)paleoplate reconstruction map(Plate position—390 Ma; Orogenic belt—359~416 Ma)

E—Silurian (430 Ma) paleoplate reconstruction map(Plate position—430 Ma;Orogenic belt —443~420 Ma)

F—Carboniferous (320 Ma) paleoplate reconstruction map( Plate position—20 Ma;Orogenic belt—338~323 Ma)

G—Permian(260 Ma)paleoplate reconstruction map

1—Junggar Massif; 2—Tarim Landmass; 3—Qaidam Massif; 4—Kunlun Massif; 5—Amur Landmass; 6—North China Landmass; 7—Yangtze Landmass; 8—Kalimantan Plate; 9—Indosinian Plate; 10—Malaysia Landmass; 11—Iran Plate; 12—Turkey Plate

H—Triassic (220 Ma) paleoplate reconstruction map(Plate position—220Ma;Orogenic belt—250~210 Ma)

1—Tarim; 2—North China; 3—Amuria; 4—Yangtze; 5—Kalimantan; 6—Indosinian; 7—Malaysia; 8—Cimmerian Contitnent; 9— Iran; 10—Turkey

I—Jurassic (160Ma) paleoplate reconstruction map(Plate reconstruction—160 Ma;Orogenic belt—146~166 Ma)

J—Cretaceous (120 Ma) paleoplate reconstruction map(Plate reconstruction—120 Ma; orogenic belt—250~120 Ma)

K—Pliocene (50 Ma) paleoplate reconstruction map(Plate reconstruction position 50 Ma, Subduction zone 65~48 Ma)

## 资料来源:

- (1)古地磁数据:文献[26-32];
- (2)造山带:文献[33-36];
- (3)上地幔低速带(Upper mantle low velocity zone):文献[37];
- (4)裂谷系、地幔柱、热点、大岩浆岩省:文献[38-44];
- (5)俯冲带[34,45];
- (6)板块运动方向推测依据:文献[46-47];
- (7)前人图件资料:文献[47-57]。

泥质灰岩和页岩为主。烃源岩干酪根类型主要为Ⅱ型、Ⅲ型,其中低纬区以Ⅱ型干酪根为主,高纬区出现Ⅲ型干酪根,主要发育在中亚和北美西北部地区。Ⅰ型干酪根仅在新特提斯洋南缘发育(澳大利亚和印度板块边缘)。

侏罗系烃源岩主要分布在波斯湾地区、欧洲西部地区、墨西哥湾地区以及西西伯利亚地区等。其中波斯湾地区烃源岩主要发育于浅海宽阔的碳酸盐岩台地上;墨西哥湾地区包括墨西哥湾和中大西洋两侧,烃源岩主要发育于浅海相泥页岩和碳酸盐岩中;欧洲西部地区烃源岩主要发育在裂谷环境下的浅海相泥页岩中;西西伯利亚区的烃源岩主要发育于浅海相的泥页岩中,少量发育于陆内湖相泥岩中。此外,在非洲东部、南美中部、华北和华南等地,烃源岩发育于深水湖相泥页岩中。在北美和欧亚南缘还出现含煤盆地<sup>[9]</sup>。

全球广泛的海进形成上侏罗统世界级烃源岩,且多出现于线状或圆形的席状海相盆地。侏罗纪全球气候温暖湿润,大气含氧量较高(大气圈氧气含量是现今的130%),适合生物生存及繁殖,为烃源岩的形成提供了丰富的母质。上升流带来的底部营养盐有利于生物发育,从而较大幅度地提高原始生产力;另一方面从底层带来的底层水氧含量低,有利于缺氧环境的形成。经统计,烃源岩层位数约占整个地质时代的25%。特提斯构造域在中生代时位于古南、北纬30°之间,温暖洋流适于大量生物发育生长,有机质丰富,形成优质烃源岩,并以泥质岩为主。发育侏罗系烃源岩的相关重要油气盆地有:波斯湾盆地、东西伯利亚盆地、阿尔伯塔盆地、北海盆地、里海盆地、墨西哥湾盆地、阿拉斯加北斜坡盆地、西西伯利亚盆地,以及澳洲西北、东亚、东欧等地<sup>[9]</sup>。

#### 4.3 白垩纪烃源岩

白垩纪烃源岩广泛分布,以中白垩统富含有机质的海相泥岩和泥灰质灰岩为主,除北美板块西部,陆内烃源岩多为湖相、三角洲相沉积。主要出现于四类地区<sup>[9]</sup>:(1)欧亚的新特提斯大陆架(阿拉伯、滨里海);(2)冈瓦纳大陆的裂谷-漂移期被动大陆边缘(南大西洋、中大西洋两岸);(3)北美-南美科迪勒拉的白垩纪前陆盆地海道;(4)西西伯利亚。另外,白垩系烃源岩还出现于北海、澳洲等海陆过渡带(被动陆缘、裂谷环境)。白垩系烃源岩沉积环境并非典型被动大陆边缘,不具备滨海相至深海相的演化序列,

主要发育于被海水淹没的陆地,如陆内凹陷、陆内地台等,其物质来源广泛,三种干酪根类型均广泛出现,以Ⅱ型和Ⅲ型为主。

白垩纪烃源岩形成环境主要为浅海碳酸盐岩和蒸发岩台地、三角洲相和陆相深水湖相砂泥岩、浅海泥页岩等。大西洋两侧的被动陆缘和特提斯构造域广泛出现白垩系黑色页岩地层,它们在时代上可以全球对比。白垩系全球烃源岩以泥、页岩为主,赤道与古北纬30°之间的热带、暖流域促使大量碳酸盐岩发育,导致当时的阿拉伯、墨西哥湾等盆地沉积大量以钙质泥灰岩、粘土质白云岩为主的烃源岩。地表风化和水循环加速,海洋中营养元素过剩输入,引发海洋生产力升高及海洋中缺氧条件发生<sup>[9]</sup>。白垩纪古海洋分别在阿普第期-阿尔必期、森诺曼期-土仑期、科尼亚斯期-桑顿期期间发生多次大洋缺氧事件,有的缺氧事件达到全球规模,随着海进、海退,烃源岩母质发育区与保存区不断转移叠加有机碳的大规模埋藏及烃源岩沉积。现今许多大型油气田烃源岩多形成于早-中白垩世。

与白垩系烃源岩相关的重要油气盆地有:波斯湾、阿尔及利亚盆地、德克萨斯-阿卡拉盆地、东委内瑞拉盆地、马拉开波盆地、松辽盆地、锡尔特盆地、阿拉斯加北斜坡盆地<sup>[9-24]</sup>以及南大西洋的坎波斯盆地、下刚果-加蓬盆地等。分布地区主要在西西伯利亚、东欧、中亚、墨西哥湾、北大西洋、北美西部<sup>[50]</sup>、澳洲西北、北非等。

#### 4.4 古近纪烃源岩

古近纪烃源岩主要分布于被动陆缘盆地、东欧东南部-东部前陆盆地、东亚裂谷盆地以及三角洲盆地(如尼罗河盆地、巴兰盆地、迈肯齐盆地)等。浅海台地相碳酸盐岩、陆架泥页岩、三角洲泥页岩以及深水湖相泥页岩为古近系烃源岩赋存的主要岩相<sup>[9]</sup>。

古近系烃源岩干酪根类型主要为Ⅱ型、Ⅲ型,少量为Ⅰ型(如渤海湾盆地、江汉盆地等)。密西西比河、尼日尔河三角洲的烃源岩干酪根类型为陆相Ⅲ型,以陆地高等植物为主,有利于天然气生成。加州拉分盆地、东委内瑞拉前陆盆地等古近系烃源岩以Ⅱ型干酪根为主。

发育古近系烃源岩的相关重要油气盆地有:东委内瑞拉盆地、地中海盆地、渤海湾盆地、中苏门答腊盆地、北高加索-曼格什拉克盆地、南里海盆地、墨西哥湾盆地、尼日尔三角洲盆地、密西西比河三角

洲盆地、利比亚锡尔特盆地、南里海盆地等。

## 5 烃源岩发育的主控因素和有利条件

烃源岩的形成是有机质原始生产力和良好保存条件等因素综合作用的结果<sup>[24,96-98]</sup>。有机质的发育需要的条件主要为高生产率的上升流区(海岸、赤道区高营养供给径流),多分布于海岸三角洲、陆内盆地、大陆架处。因此,大地构造背景、盆地演化和岩石圈板块运动造成的区域气候变化对烃源岩发育具有重要影响。

其中,烃源岩形成环境中表层水的高有机质生产力比底层水的缺氧环境更重要,有机质生产力足够高时在含氧的非还原环境中也能形成烃源岩<sup>[99]</sup>。其次,最少化生物扰动作用、厌氧条件(低能深水环境)、高沉积速率(亏损降落到水底)及细粒沉积物(低渗透率、低OC)等是有机质避免被氧化的主要方式。有机质的有利保存也涉及:盆地的生物分布、气候、陆地有机质生产率、海相有机质生产率、大洋循环、沉积速率和水深等。

### 5.1 烃源岩分布及其类型

随着板块构造格局及其原型盆地演化,烃源岩类型及其空间分布发生改变。志留系、上泥盆统一下石炭统、上石炭统一下二叠统主要沉积I型干酪根的烃源岩;上泥盆统一下石炭统内煤系和III型烃源岩较少,上石炭统一早二叠统出现大量的煤系和III型烃源岩;上侏罗统煤系较少,但中白垩统一上白垩统、渐新统一中新统煤系增加,这一时期I型和II型烃源岩较发育。上述煤系和III型烃源岩在古生代末期空间分布的变化,可以解释为陆生植物逐渐向陆地拓展,并造成陆地生物演化。晚古生代和晚新生代以大陆碰撞、气候变冷、较低海平面为特点,主要在前陆盆地和三角洲沉积了II型和III干酪根为主的烃源岩。出现温暖气候和高海平面的地史时期,有利于广阔海相台地上大量II型干酪根烃源岩的沉积。

### 5.2 板块构造环境

超大陆聚合期间,海岸线长度减小,随着超大陆拱起和海平面下降,大陆架和适宜的陆表海或边缘海面积不断减少或消失<sup>[100]</sup>,导致海洋有机质沉积或含有机质沉积的保存持续减少<sup>[100]</sup>。石炭纪—二叠纪—三叠纪时期,海西期造山运动相关的挤压作用,使地壳隆升剥蚀,有机质难以保存,这段时间烃源岩发育较差,仅占整个地质时期烃源岩的9%<sup>[82]</sup>。

晚侏罗世—白垩纪泛大陆裂解期间,现代大洋盆地开始形成,伴随大规模火山活动,造成大气圈CO<sub>2</sub>含量过度增加、气温和海平面增高,广泛形成海相沉积。大陆裂解边缘出现富有机质沉积,如:中生代墨西哥湾北部、南、北大西洋边缘,也门裂谷等。海相高有机质丰度烃源岩主要发育于被动大陆边缘盆地、克拉通内坳陷盆地和前陆盆地这三类盆地中<sup>[96]</sup>。

### 5.3 沉积盆地与沉积岩相

海相烃源岩的形成环境大多以还原、咸水、弱碱性和弱水动力条件为主要特征。欠补偿浅水与深水盆地、蒸发潟湖和台缘斜坡以及半闭塞—闭塞欠补偿海湾,是高有机质丰度烃源岩发育的最有利环境<sup>[64]</sup>,如:被海水淹没的宽阔大陆架、沉积—水界面氧含量最低的陆架区、上升流活跃区及构造上孤立的盆地。开放的深水和咸化的浅水在拥有还原环境方面是相同的,前者通过水柱高度绝氧,后者通过盐的溶解绝氧<sup>[102]</sup>。

大陆深水—半深水湖泊也是烃源岩的有利发育区<sup>[103]</sup>,汇聚周围河流带来的大量有机质,一定深度的稳定水体有利水生生物的繁殖发育,湖泊系统长期发育,有利有机质保存。富烃的湖相页岩源岩在坎波斯、加蓬、安哥拉、巴西、澳大利亚西北缘等中生代裂谷盆地均是重要的生油层,且主要为I型干酪根烃源岩<sup>[104]</sup>。

### 5.4 海平面变化和上升流作用

高丰度烃源岩形成于最大海侵、海域面积最大时。层序地层学理论认为,烃源岩一般发育于海侵体系域顶部的凝缩段。受海平面快速上升控制所发育的烃源岩,位于层序的下部甚至底部<sup>[96]</sup>。间歇性海进—海退的被动陆缘环境有利于海相烃源岩发育保存<sup>[2]</sup>,如:北海、墨西哥湾、大西洋两岸等盆地。志留系、上泥盆统一上二叠统、上侏罗统和中白垩统烃源岩沉积于普遍海进期。相反,宾夕法尼亚系—下二叠统和渐新统一中新统烃源岩沉积于海退时期。高水位裂谷环境(深湖)是陆上烃源岩发育和保存的有利环境。

上升洋流富磷、富硅、富铁族元素等营养盐和富绿硫细菌,大大促进了有机质生产力、埋藏率的激增。中、低纬暖流区海水温度较高,水体较为稳定,营养物质丰富,适合海洋浮游生物生存,有利于烃源岩形成,如古生代环古特提斯洋区和中生代环古、新特提斯洋区。另一方面从底层带来的底层水氧含量低,

有利于缺氧环境的形成。

## 5.5 大气圈和气候

烃源岩发育区普遍集中在温带,其平均温度高,日照时间长,空气湿度大,与邻近地区具有宽阔的雨影区,有利于生物的繁殖。

震旦纪、晚奥陶世—早志留世、晚石炭世—二叠纪末三个冰期,极地冰盖发育,全球气温较低,温带和热带范围较小,相应的海平面也较低,不利于烃源岩形成。其烃源岩分别约占整个地质时期烃源岩的0.2%、1%、0.4%<sup>[24]</sup>。地史上大气圈氧含量增高时期不利于烃源岩保存,缺氧事件有利于烃源岩保存。石炭纪—二叠纪烃源岩分布达到最小值,而晚石炭世—早二叠世大气氧含量达到高峰值(35%)<sup>[103]</sup>。寒武纪—早奥陶世、晚志留世—早石炭世、三叠纪开始全球气温较高,大范围属于温室环境,这三个时期海平面较高,白垩纪达到最高峰,有利于烃源岩形成和保存。

综上所述,世界级的烃源岩形成,要求以下条件:(1)发育高含量的外来或原地的有机碳;(2)气候不规则的时间影响,如离邻近大陆有宽阔的降雨遮蔽带,东、西海岸大洋环流、季风作用;(3)全球范围内的海进和限制盆地(与广海有限连通),随机的超级羽流提供营养盐;(4)裂谷深水湖泊、陆架潟湖环境的缺氧条件,有利于有机质保存。陆架潟湖海进期低沉积输入或有机质循环;(5)多套烃源岩空间上叠合,形成优质的生油条件<sup>[24]</sup>。

## 6 结 论

(1)早—中古生代,向大洋开放的被动大陆边缘控制了有效的烃源岩沉积。志留纪—全新世,特提斯域是介于两个古大陆群之间低纬区的东西向浅水海道,形成高质量的Ⅱ型干酪根烃源岩。低纬度地区更有利于Ⅰ型和Ⅱ型烃源岩沉积。相反,高纬度地区更有利于Ⅲ型烃源岩及煤的沉积(除渐新统—中新统)。

(2)海相烃源岩主要分布在陆棚及斜坡相、台内拗陷等环境中。烃源岩在大范围内分布于拗陷盆地,烃源岩或分布在空间上邻近的不同类型的盆地内。中古生代的烃源岩主要形成于开放的陆架海相,而晚古生代烃源岩主要形成于由冈瓦纳与劳俄大陆碰撞、西伯利亚与劳俄大陆、哈萨克斯坦板块与西伯利亚板块碰撞的前陆盆地内。

(3)超大陆旋回对烃源岩的沉积和保存具有重要影响。超大陆汇聚过程中,超大陆拱起和海平面下

降,大陆架和适宜的陆表海或边缘海面积不断减少或消失,海相有机质沉积和保存区域不断减小。反之,超大陆裂解导致裂解边缘出现裂谷、海岸三角洲、广阔大陆架等,有利于海洋有机质沉积。

(4)优质烃源岩富含的富有机质泥页岩多发育于海侵体系域顶部与高水位体系域底部的密集段中。志留系、上泥盆统—上杜内阶、上侏罗统和中白垩统烃源岩沉积于普遍海进时期。相反,宾夕法尼亚系—下二叠统和渐新统—中新统烃源岩沉积于海退时期。高水位裂谷环境(深湖)是陆上烃源岩发育和保存的有利环境。

(5)中、低纬暖流区海水温度较高,水体较为稳定,营养物质丰富,适合海洋浮游生物生存,有利于烃源岩形成,特别是上升流活跃区有机质生产力、埋藏率的激增,配合还原、咸水、弱碱性和弱水动力等保存条件,可大量形成有效烃源岩。

(6)陆相油气烃源岩主要分布在湖盆中心,板块裂解初期发育的裂谷环境或陆内深水—半深水湖泊也是烃源岩发育的有利发育区,汇聚周围河流带来的大量有机质,一定深度的稳定水体有利水生生物的繁殖发育,有利有机质保存。

**致谢:** 本文在写作过程中得到了童晓光院士、朱伟林教授、冯志强教授、杨树锋教授、陈汉林教授、贾东教授、沈忠悦教授、肖安成教授等的指导与帮助,在此表示衷心的感谢!同时,课题组内部周肖贝、李维波、程雅琳、李文山、张华添、毛翔、塔斯肯、李洪林等,在编图过程中付出了辛勤的劳动,在此也表示感谢。

## 参考文献(References):

- [1] Suárez-Ruiz I, Flores D, Mendonça Filho J G, et al. Review and update of the applications of organic petrology: Part 1, geological applications [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 99: 54–112.
- [2] Klemme H D, Ulmishek G F. Effective petroleum source rocks of the world: stratigraphic distribution and controlling depositional factors (1)[J]. *AAPG Bulletin*, 1991, 75(12): 1809–1851.
- [3] Barker P F, Lawver L A. South American–Antarctic plate motion over the past 50 Myr, and the evolution of the South American–Antarctic ridge [J]. *Geophysical Journal*, 1988, 94(3): 377–386.
- [4] Freeman R, Mueller S T. Preface[J]. *Tectonophysics*, 1990, 176(1/2) VII.
- [5] Eyles N. Earth's glacial record and its tectonic setting [J]. *Earth–Science Reviews*, 1993, 35(1): 1–248.
- [6] Scotese C R, Boucot A J, McKerrow W S. Gondwanan palaeogeography and paleoclimatology [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 1999, 28(1): 99–114.
- [7] Ziegler P A, van Wees J D, Cloetingh S. Mechanical controls on collision-related compressional intraplate deformation [J].

- Tectonophysics, 1998, 300(1): 103–129.
- [8] Chumakov N M, Zharkov M A. Climate during Permian–Triassic Biosphere Reorganizations Article 1: Climate of the Early Permian [J]. Stratigraphy and Geological Correlation, 2002, 10(6): 586–602.
- [9] Veevers J J. Gondwanaland from 650–500 Ma assembly through 320 Ma merger in Pangea to 185–100 Ma breakup: supercontinental tectonics via stratigraphy and radiometric dating [J]. Earth–Science Reviews, 2004, 68(1): 1–132.
- [10] Golonka J, Ford D. Pangean (late Carboniferous–Middle Jurassic) palaeoenvironment and lithofacies [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2000, 161(1): 1–34.
- [11] Golonka J, Krobicki M, Oszyzypko N, et al. Geodynamic evolution and palaeogeography of the Polish Carpathians and adjacent areas during Neo–Cimmerian and preceding events (latest Triassic–earliest Cretaceous)[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2003, 208(1): 137–158.
- [12] Golonka J. Late Triassic and Early Jurassic palaeogeography of the world [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2007, 244(1): 297–307.
- [13] Golonka J. Phanerozoic palaeoenvironment and palaeolithofacies maps of the Arctic region[J]. Geological Society, London, Memoirs, 2011, 35(1): 79–129.
- [14] Blakey R C. Gondwana paleogeography from assembly to breakup—A 500 my odyssey[C]//Christopher R F, Tray D F, John L I. Resolving the Late Paleozoic Ice. Age in Time and Space. Geological Society of America, Spec. Pap. Geol. Soc. Am., 2008, 441: 1–28.
- [15] Tabor N J, Poulsen C J. Palaeoclimate across the Late Pennsylvanian–Early Permian tropical palaeolatitudes: A review of climate indicators, their distribution, and relation to palaeophysiographic climate factors [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2008, 268(3): 293–310.
- [16] Mann P, Gahagan L, Gordon M B. Tectonic setting of the world's giant oil and gas fields[C]//Halbouty MT(ed.). Giant Oil and Gas Fields of the Decade 1990–1999. AAPG Memoir 78: 15–105.
- [17] Burdige D J. Preservation of organic matter in marine sediments: Controls, mechanisms, and an imbalance in sediment organic carbon budgets [J]. Chemical Reviews–Columbus, 2007, 107(2): 467–485.
- [18] Bordenave M L, Huc A Y. The Cretaceous source rocks in the Zagros Foothills of Iran: An example of a large size intracratonic basin [J]. AAPG Bulletin, 1993, 77(CONF–930306--).
- [19] Wagner B E, Sofer Z, Claxton B L. Source rock in the Lower Tertiary and Cretaceous, deep–water Gulf of Mexico[J]. 1994.
- [20] Keefer W R. Waltman Shale and shotgun members of Fort Union Formation (Paleocene) in Wind river basin, Wyoming [J]. AAPG Bulletin, 1961, 45(8): 1310–1323.
- [21] Halbouty M T. Giant oil and gas fields of the Decade 2000–2007. AAPG Memoir, USGS Open File Report, 97–463.
- [22] Van der Spuy D. Aptian source rocks in some South African Cretaceous basins [J]. Geological Society, London, Special Publications, 2003, 207(1): 185–202.
- [23] 张水昌, Wang R L, 金之钧, 等. 塔里木盆地寒武纪—奥陶纪优质烃源岩沉积与古环境变化的关系: 碳氧同位素新证据[J]. 地质学报, 2006, 80(3): 459–466.
- Zhang Shuichang, Wang Ruiliang, Jin Zhijun, et al. The relationship between the Cambrian–Ordovician High–TOC source rock development and paleoenvironment Variations in the Tarim basin, western China: Carbon and oxygen isotope evidence [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(3): 459–466(in Chinese with English abstract).
- [24] Alsharhan A S, Kendall C G S C. Cretaceous chronostratigraphy, unconformities and eustatic sealevel changes in the sediments of Abu Dhabi, United Arab Emirates [J]. Cretaceous Research, 1991, 12(4): 379–401.
- [25] Kendall J M, Shearer P M. On the structure of the lowermost mantle beneath the southwest Pacific, southeast Asia and Australasia [J]. Original Research Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1995, 92(1/2): 85–98.
- [26] 全球古地磁数据库 GPMDB (在线数据共享软件) (<http://www.ngu.no/geodynamics/gpmdb/>)
- [27] Scotese, C.R. Continental Drift flip book, 7th edition [M]. Paleomap project. University of Texas at Arlington, Department of Geology, 1997: 79.
- [28] 朱日祥, 杨振宇, 吴汉宁, 等. 中国主要地块显生宙古地磁视极移曲线与地块运动[J]. 中国科学, 1998, 28: 1–16.
- Zhu Rixiang, Yang Zhenyu, Wu Hanning, et al. APWP and motion of China major blocks in Phanerozoic [J]. Science in China, 1998, 28: 1–16(in Chinese).
- [29] 方大钧, 沈忠悦, 王朋岩. 塔里木地块古地磁数据表 [J]. 浙江大学学报, 2011, 28(1): 92–99.
- Fang Dajun, Shen Zhongyue, Wang Pengyan. Aleomagnetic data of Tarim Block [J]. Journal of Zhejiang University (Sciences Edition), 2011, 28(1): 92–99(in Chinese with English abstract).
- [30] 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, 15(3): 349–359.
- Huang Baochun, Zhou Yaoxiu, Zhu Rixiang. Discussions on Phanerozoic evolution and formation of continental China, based on paleomagnetic studies [J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(3): 349–359(in Chinese with English abstract).
- [31] 李朋武, 张世红, 高锐, 等. 内蒙古中部晚石炭世—早二叠世古地磁新数据及其地质意义 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2012, 42(1): 423–440.
- Li Pengwu, Zhang Shihong, Gao Rui, et al. New Upper Carboniferous–Lower Permian paleomagnetic results from the central Inner Mongolia and their geological implications [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(1): 423–440(in Chinese with English abstract).
- [32] 易治宇, 乔庆庆, 黄宝春. 西准噶尔晚古生代古地磁初步结果及其对中亚洋封闭时限的制约 [C]//中国地球物理学会. 中国地球物理学会第二十七届年会论文集. 中国地球物理学会, 2011: 186.
- Yi Zhiyu, Qiao Qingqing, Huang Baochun. Paleomagnetic study of the late Paleozoic rocks, western Junggar, China: Constrains to the timing of closure of the Paleo–Asian Ocean [C]//Chinese Geophysical Society. The 27th annual meeting proceedings of Chinese Geophysical Society. Chinese Geophysical Society, 2011: 186.
- [33] Chumakov N M, Zharkov M A. Climate during Permian–Triassic biosphere reorganizations Article 1: Climate of the Early Permian [J]. Stratigraphy and Geological Correlation, 2002, 10(6): 586–602.
- [34] Scotese C R. 2002. Paleomap website: <http://www.scotese.com>, [chris@scotese.com](mailto:chris@scotese.com).
- [35] Collins W J, Belousova E A, Kemp A I S, et al. Two contrasting Phanerozoic orogenic systems revealed by hafnium isotope data [J]. Nature Geoscience, 2011, 4(5): 333–337.
- [36] Golonka J. Phanerozoic palaeoenvironment and palaeolithofacies maps of the Arctic region[J]. Geological Society, London, Memoirs,

- 2011, 35(1): 79–129.
- [37] Torsvik T H, Carlos D, Mosar J, et al. Global reconstructions and North Atlantic paleogeography 440 Ma to recent[J]. *BATLAS—Mid Norway plate reconstruction atlas with global and Atlantic perspectives*, 2002: 18–39.
- [38] Kusznir N J, Stovba S M, Stephenson R A, et al. The formation of the northwestern Dniepr–Donets Basin: 2–D forward and reverse syn–rift and post–rift modeling[J]. *Tectonophysics*, 1996, 268:237–255.
- [39] Guiraud R, Bosworth W, Thierry J, et al. Phanerozoic geological evolution of Northern and Central Africa: An overview [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2005, 43(1): 83–143.
- [40] Courtillot V, Davaille A, Besse J, et al. Three distinct types of hotspots in the Earth’s mantle [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 205(3): 295–308.
- [41] Kravchinsky V A. Paleozoic large igneous provinces of Northern Eurasia: Correlation with mass extinction events [J]. *Global and Planetary Change*, 2012, 86: 31–36.
- [42] Nikishin A M, Ziegler P A, Abbott D, et al. Permo–Triassic intraplate magmatism and rifting in Eurasia: implications for mantle plumes and mantle dynamics[J]. *Tectonophysics*, 2002, 351(1): 3–39.
- [43] 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: 29–59.
- [44] Golonka J, Ford D. Pangean (late Carboniferous–Middle Jurassic) paleoenvironment and lithofacies [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2000, 161(1): 1–34.
- [45] Ford D, Golonka J. Phanerozoic paleogeography, paleoenvironment and lithofacies maps of the circum–Atlantic margins[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20(3): 249–285.
- [46] ver L A, Grantz A, Gahagan L M. Plate kinematic evolution of the present Arctic region since the Ordovician[C]// Miller E L, Grantz A, Klemperer S L (Editors), *Tectonic Evolution of the Bering Shelf –Chukchi Sea –Arctic Margin and Adjacent Landmasses*, Special Paper. Geological Society of America, Boulder, 2002: 333–358.
- [47] Torsvik T H, Van der Voo R, Preeden U, et al. Phanerozoic polar wander, palaeogeography and dynamics[J]. *Earth–Science Reviews*, 2012, 114: 325–368.
- [48] McCausland P J A, Van der Voo R, Hall C M. Circum–Iapetus paleogeography of the Precambrian–Cambrian transition with a new paleomagnetic constraint from Laurentia [J]. *Precambrian Research*, 2007, 156(3): 125–152.
- [49] Álvaro, José Javier, ed. *Palaeozoic reefs and bioaccumulations: climatic and evolutionary controls*[M]. Geological Society, 2007.
- [50] Lefebvre B. Early Palaeozoic palaeobiogeography and palaeoecology of stylophoran echinoderms[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 245(1): 156–199.
- [51] Meert J G, Lieberman B S. The Neoproterozoic assembly of Gondwana and its relationship to the Ediacaran–Cambrian radiation[J]. *Gondwana Research*, 2008, 14(1): 5–21.
- [52] Boger S D. Antarctica—before and after Gondwana [J]. *Gondwana Research*, 2011, 19(2): 335–371.
- [53] Safonova I Y, Simonov V A, Kurganskaya E V, et al. Late Paleozoic oceanic basalts hosted by the Char suture–shear zone, East Kazakhstan: Geological position, geochemistry, petrogenesis and tectonic setting [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 49: 20–39.
- [54] Pirajno F, Hoatson D M. A review of Australia’s Large Igneous Provinces and associated mineral systems: Implications for mantle dynamics through geological time[J]. *Ore Geology Reviews*, 2012, 48: 2–54.
- [55] Cocks L R M, Torsvik T H. The Lower Palaeozoic palaeogeography of Gondwana[J]. *Lund, Sweden*, 9–19 June 2013, 63.
- [56] Dill H G, Pöllmann H, Techmer A. 500 Million years of rift–and (un) conformity–related Mn mineralization in the Middle East: A geodynamic and sequence stratigraphical approach to the recycling of Mn[J]. *Ore Geology Reviews*, 2013, 53: 112–133.
- [57] Meinhold G, Morton A C, Avigad D. New insights into peri–Gondwana paleogeography and the Gondwana super–fan system from detrital zircon U–Pb ages [J]. *Gondwana Research*, 2013, 23 (2): 661–665.
- [58] Weaver P G, McMenamin M A S, Tacker R C. Paleoenvironmental and paleobiogeographic implications of a new Ediacaran body fossil from the Neoproterozoic Carolina Terrane, Stanly County, North Carolina [J]. *Precambrian Research*, 2006, 150(3): 123–135.
- [59] 刘若冰, 田景春, 魏志宏, 等. 川东南地区震旦系—志留系下组合有效烃源岩综合研究[J]. *天然气地球科学*, 2006, 17(6): 824–828. Liu Ruobing, Tian Jingchun, Wei Zhihong, et al. Comprehensive research of effective hydrocarbon source rock of lower strata from Simian to Silurian system in southeast area of Sichuan Province[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2006, 17 (6): 824–828 (in Chinese with English abstract).
- [60] 梁西文, 郑荣才, 周雁, 等. 克拉通盆地层序样式与烃源岩评价——以中扬子区震旦系, 寒武系为例 [J]. *石油天然气学报*, 2006, 28(2): 17–19. Liang Xiwen, Zheng Rongcai, Zhou Yan. Sequence patterns and evaluation of source rocks in Cratonic basins——By taking Sinian and Cambrian systems in mid–Yangtze area for example[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2006, 28 (2): 17–19 (in Chinese with English abstract).
- [61] Cozzi A, Rea G, Craig J. From global geology to hydrocarbon exploration: Ediacaran–Early Cambrian petroleum plays of India, Pakistan and Oman [J]. Geological Society, London, Special Publications, 2012, 366(1): 131–162.
- [62] Schröder S, Grotzinger J P. Evidence for anoxia at the Ediacaran–Cambrian boundary: The record of redox–sensitive trace elements and rare earth elements in Oman [J]. *Journal of the Geological Society*, 2007, 164(1): 175–187.
- [63] Nicholas C J, Gold S E P. Ediacaran–Cambrian Sirab Formation of the Al Huqf region, Sultanate of Oman [J]. *Geo Arabia, Journal of the Middle East Petroleum Geosciences*, 2012, 17(1): 49–98.
- [64] 赵宗举, 周新源, 郑兴平, 等. 塔里木盆地主力烃源岩的诸多证据[J]. *石油学报*, 2005, 26(3):10–15. Zhao Zongju, Zhou Xinyuan, Zheng Xingping, et al. Evidences of chief source rock in Tarim Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2005, 26 (3):10–15(in Chinese with English abstract).
- [65] Versfelt J, Porter L. Major hydrocarbon potential in Iran[J]. *AAPG Memoir* 74, 2001: 417–427.
- [66] Bertrand R, Lavoie D, Fowler M. Cambrian–Ordovician shales in the Humber Zone: Thermal maturation and source rock potential[J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 2003, 51(3): 213–233.
- [67] Terken J M J, Frewin N L, Indrelid S L. Petroleum systems of Oman: Charge timing and risks [J]. *AAPG Bulletin*, 2001, 85(10): 1817–1845.

- [68] Li M. Use of Compound Specific Hydrogen Isotopes Characterizing Crude Oils from the Canadian Williston Basin, SE Saskatchewan[C]//AAPG Annual Meeting, 2002.
- [69] 陶高强,董清水,聂辉,等.俄罗斯西伯利亚地台油气成藏条件与分布规律[J].世界地质,2012,31(1):139-147.  
Tao Gaoqiang, Dong Qingshui, Nie Hui, et al. Reserch on hydrocarbon accumulation condition and distributive regulation of Siberian platform, Russia[J]. Global Geology, 2012, 31(1): 139-147 (in Chinese with English abstract).
- [70] Longley I M, Bradshaw M T, Hebberger J. Australian petroleum provinces of the twenty-first century [J]. Memoirs -American Association of Petroleum Geologists, 2001: 287-318.
- [71] Wang F, Zhang B, Zhang S. Anoxia vs. bioproductivity controls on the Cambrian and Ordovician marine source rocks in Tarim Basin, China[C]//AAPG Annual Meeting, 2002.
- [72] 戴金星,刘德良,曹高社.华北陆块南部下寒武统海相泥质烃源岩的发现对天然气勘探的意义[J].地质论评,2003,49(3):322-329.  
Dai Jinxing, Liu Deliang, Cao Gaoshe. Discovery of marine muddy hydrocarbon source rocks in the southern margin of the North China block and its significance for gas exploration [J]. Geological Review, 2003, 49(3): 322-329(in Chinese with English abstract).
- [73] 于炳松,樊太亮.塔里木盆地寒武系—奥陶系泥质烃源岩发育的构造和沉积背景控制[J].现代地质,2008,22(4):534-540.  
Yu Bingsong, Fan Tai liang. Sedimentary tectonic control on the development of muddy hydrocarbon source rocks of Cambrian - Ordovician from Tarim Basin [J]. Geoscience, 2008, 22 (4): 534-540(in Chinese with English abstract).
- [74] 梁薇,牟传龙,周恩恩,等.湘中地区下寒武统烃源岩沉积环境及其特征[J].沉积与特提斯地质,2011,31(4):34-39.  
Liang Wei, Mou Chuanlong, Zhou Kenken, et al. Sedimentary environments of the Lower Cambrian source rocks in central Hunan [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2011, 31 (4): 34-39(in Chinese with English abstract).
- [75] 于炳松,王黎栋,陈建强,等.塔里木盆地北部下寒武统底部黑色页岩形成的次氧化条件[J].地学前缘,2003,10(4):545-550.  
Yu Bingsong, Wang Lidong, Chen Jianqiang, et al. The suboxic depositional setting of black shales in lower Cambrian from northern Tarim basin[J]. Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing), 2003, 10 (4): 545-550 (in Chinese with English abstract).
- [76] Laughrey C D, Billman D A, Canich M R. Petroleum geology and geochemistry of the Council Run gas field, north central Pennsylvania [J]. AAPG Bulletin, 2004, 88(2): 213-239.
- [77] Newell K D. Lindsborg field—USA Salina basin, Kansas [J]. 1990, 11:1342-1354.
- [78] Wells A T, Forman D J, Ranford L C, et al. Geology of the Amadeus Basin, central Australia [M]. Bureau of Mineral Resources, Geology and Geophysics, 1970.
- [79] Dorozario R F. The Palm Valley Gas Field, Amadeus Basin, central Australia [J]. Geological and Geophysical Studies in the Amadeus Basin, Central Australia, Bulletin 236, 1991, 1: 477-492.
- [80] 程锦翔,焦养泉,颜佳新,等.华北地区东部下古生界烃源岩分布特征及其发育模式[J].现代地质,2007,21(3):538-545.  
Cheng Jinxiang, Jiao Yangquan, Yan Jiaxin, et al. The distribution character and development model of hydrocarbon source rocks of Lower Palaeozoic, the eastern North China [J]. Geoscience, 2007, 21(3): 538-545(in Chinese with English abstract).
- [81] Lüning S, Craig J, Loydell D K, et al. Lower Silurian hot shales in North Africa and Arabia: Regional distribution and depositional model[J]. Earth-Science Reviews, 2000, 49(1): 121-200.
- [82] Etensohn F R. Assembly and dispersal of Pangea: Large-scale tectonic effects on coeval deposition of North American, marine, epicontinental, black shales[J]. Journal of Geodynamics, 1997, 23(3): 287-309.
- [83] 法贵方,袁圣强,王作乾,等.伏尔加-乌拉尔盆地石油地质特征及勘探潜力分析[J].特种油气藏,2012,19(5):46-50.  
Fa Guifang, Yuan Shengqiang, Wang Zuoqian, et al. Analyses of petroleum geology feature and exploration potential in Volga - Urals Basin [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2012, 19(5): 46-50 (in Chinese with English abstract).
- [84] Henry L C, Isbell J L, Fielding C R, et al. Proglacial deposition and deformation in the Upper Carboniferous to Lower Permian Wynyard Formation, Tasmania: A process analysis [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2012, 315: 142-157.
- [85] Doney P J, Hodgson D M, Worden R H. Pre-requisites, processes, and prediction of chlorite grain coatings in petroleum reservoirs: A review of subsurface examples [J]. Marine and Petroleum Geology, 2012, 32(1): 63-75.
- [86] Huey R B, Ward P D. Hypoxia, global warming, and terrestrial Late Permian extinctions[J]. Science, 2005, 308(5720): 398-401.
- [87] Trappe J. Pangea: Extravagant sedimentary resource formation during supercontinent configuration, an overview [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2000, 161(1): 35-48.
- [88] 白玉彬,赵靖舟,方朝强,等.优质烃源岩对鄂尔多斯盆地延长组石油聚集的控制作用[J].西安石油大学学报(自然科学版),2012,2:1-5.  
Bai Yubin, Zhao Jingzhou, Fang Chaoqiang, et al. Control effect of high-quality source rocks on petroleum accumulation in Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2012, 2: 1-5 (in Chinese with English abstract).
- [89] 姚永坚,李学杰,杨楚鹏,等.北极阿拉斯加北坡盆地地质构造特征与油气资源潜力[J].海洋地质前沿,2011,27(12):18-26.  
Yao Yongjian, Li Xuejie, Yang Chupeng, et al. Tectonic characteristic and hydrocarbon resource potential in the north slope basin of Alaska, the Arctic [J]. Marine Geology Frontiers, 2011, 27 (12): 18-26 (in Chinese with English abstract).
- [90] Storey B C, Vaughan A P M, Millar I L. Geodynamic evolution of the Antarctic Peninsula during Mesozoic times and its bearing on Weddell Sea history [J]. Geological Society, London, Special Publications, 1996, 108(1): 87-103.
- [91] Sorkhabi R. Why so much oil in the Middle East? [J]. Geo. Expro., 2010, 7: 21-26.
- [92] 黄永建,王成善,顾建.白垩纪大洋缺氧事件:研究进展与未来展望[J].地质学报,2008,82(1):21-30.  
Huang Yongjian, Wang Chengshan, Gu Jian. Cretaceous oceanic anoxic events: Research progress and forth coming prospects [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(1): 21-30 (in Chinese with English abstract).
- [93] Bralower T J, Lorente M A. Paleogeography and stratigraphy of the La Luna Formation and related Cretaceous anoxic depositional systems [J]. Palaios, 2003, 18(4/5): 301-304.
- [94] Fleet A J, Clayton C J, Jenkyns H C, et al. Triassic source rock deposition in western Europe [J]. Petroleum Geology of North West Europe. Graham and Trotman, London, 1987, 1: 59-70.
- [95] Doust H, Noble R A. Petroleum systems of Indonesia [J]. Marine

- and *Petroleum Geology*, 2008, 25(2): 103–129.
- [96] 张水昌, 张宝民, 边立曾, 等. 中国海相烃源岩发育控制因素[J]. *地质前缘*, 2005, 12(3): 39–48.  
Zhang Shuichang, Zhang Baomin, Bian Lizeng, et al. Development constraints of marine source rocks in China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(3): 39–48(in Chinese with English abstract).
- [97] 陈践发, 张水昌, 孙省利, 等. 海相碳酸盐岩优质烃源岩发育的主要影响因素[J]. *地质学报*, 2006, 80(3): 467–472.  
Chen Jianfa, Zhang Shuichang, Sun Shengli, et al. Main factors influencing marine carbonate source rock formation [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80 (3): 467–472 (in Chinese with English abstract).
- [98] Trabucho Alexandre J, Tuenter E, Henstra G A, et al. The mid-Cretaceous North Atlantic nutrient trap: Black shales and OAEs[J]. *Paleoceanography*, 2010, 25(4).
- [99] 黄俨然, 张枝焕, 李友川, 等. 全球深水区含油气盆地有效烃源岩的发育规律和控制因素[J]. *海相油气地质*, 2011, 16(3): 15–21.  
Huang Yanran, Zhang Zhihuan, Li Youchuan, et al. Development regularity and dominant factors of hydrocarbon source rocks in worldwide deepwater petroliferous basins [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2011, 16 (3): 15–21 (in Chinese with English abstract).
- [100] Bralower T J, Lorente M A. Paleogeography and stratigraphy of the La Luna Formation and related Cretaceous anoxic depositional systems[J]. *Palaios*, 2003, 18(4/5): 301–304.
- [101] Macgregor D S. Factors controlling the destruction or preservation of giant light oilfields[J]. *Petroleum Geoscience*, 1996, 2(3): 197–217.
- [102] 陈安定. 海相“有效烃源岩”定义及丰度下限问题讨论[J]. *石油勘探与开发*, 2005, 32(2): 23–25.  
Chen Anding. Definition and abundance threshold of marine source rocks developed in South China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2005, 32 (2): 23–25 (in Chinese with English abstract).
- [103] Katz B J. *Petroleum Source Rocks—An Introductory Overview* [M]. Springer Berlin Heidelberg, 1995: 1–8.
- [104] Perrodon A. Petroleum systems and global tectonics [J]. *Journal of Petroleum Geology*, 1995, 18(4): 471–476.
- [105] Premovi P I. The late Paleozoic oxygen pulse and accumulations of petroleum source rocks and coal [J]. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 2006, 71(2): 143–147.

## A study of the distribution of source rocks in Phanerozoic based on Paleoplate reconstruction

LI Jiang-hai, YANG Jing-yi, MA Li-ya, WANG Hong-hao

(School of Earth and Space Sciences, Peking University, Institute of Oil & Gas, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** Based on the method of paleomagnetism, the authors reconstructed the tectonic framework of global paleo-plates in 11 different geological periods, and also added more elements such as current system, distribution of climate zone, lithofacies palaeogeography and distribution of source rocks to the maps of paleo-plates reconstruction. By comprehensively analyzing geological elements, the authors have concluded that the distribution of source rocks is heterogeneous in time and space. Temporally, source rocks in Mesozoic and Cenozoic were thicker and more widely distributed than those in Paleozoic. Spatially, global marine source rocks were mainly distributed in continental shelf, continental slope and platform depression, while terrestrial source rocks were mainly distributed in the center of lake basin in Phanerozoic. Furthermore, the deposition and preservation of source rocks were controlled by the supercontinent cycle, and the decrease of sea shelf caused by assembling of supercontinent was unfavorable for the deposition and preservation of the source rock. The formation of the source rock was promoted by high sea level and upwelling. High-quality source rock was mostly deposited in transgressive systems tracts in the dense segment located on the top of the transgressive tract or at the bottom of the highstand systems tract.

**Key words:** Phanerozoic; source rock; paleo-plate; deposition environment; favorable factor

**About the first author:** LI Jiang-hai, male, born in 1965, professor, supervisor of doctor candidates, mainly engages in the study of geotectonics and oil and gas structure; E-mail: jhli@pku.edu.cn.

**About the corresponding author:** YANG Jing-yi, female, born in 1988, master candidate, majors in the study of oil and gas bearing basin; E-mail: yangjingyi\_pku@126.com.