

文章编号:1000-0550(2014)06-1188-13

North Carnarvon 盆地三叠系沉积格局转换 与烃源岩发育特征^①

牛杏^{1,2} 杨香华^{1,2} 李丹^{1,2} 常吟善^{1,2} 胡孝林³ 许晓明³

(1.中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室 武汉 430074;2.中国地质大学资源学院 武汉 430074;
3.中国海洋石油研究总院 北京 100027)

摘要 North Carnarvon 盆地是澳大利亚最主要的产油气盆地,也是世界上主要的富气盆地之一。三叠纪 North Carnarvon 盆地属于克拉通边缘拗陷,地层厚度巨大且平面分布广。中三叠世晚期澳大利亚西北陆架发生强制性海退,造成 North Carnarvon 盆地沉积格局发生转变,沉积环境由滨浅海突变为海陆过渡环境,从而沉积了两套差异性明显的地层,即 Locker shale 和 Mungaroo 组。本文从宏观和微观、有机与无机入手,阐述了 Locker shale 和 Mungaroo 组的古地理背景、沉积充填演化及其相关的烃源岩与有机质显微组分发育特征。

宏观上,Mungaroo 组发育大型三角洲,中粗粒分支流水道砂岩与暗色泥岩频繁互层,其中近端三角洲平原泥岩厚度较薄,薄煤层只局部发育,陆源有机质含量较高,平均 TOC 含量为 1.59%;远端三角洲平原泥岩厚度较大,薄煤层广泛发育,陆源有机质含量高,TOC 含量最高,达 4.11%;三角洲前缘泥岩厚度较大,陆源有机质含量低,TOC 含量低,为 1.05%。Locker Shale 以滨浅海相沉积为主,局部发育小型三角洲,其中开阔浅海亚相烃源岩厚度较大,前三角洲、滨浅海、开阔浅海三个亚相 TOC 含量相当,平均值为 1.16%。

微观上,Mungaroo 组由近端平原亚相—远端平原亚相—前缘亚相壳质组含量逐渐增多,镜质组先增加后下降,惰质组先减少后增加;远端三角洲平原镜质组含量最高。Locker shale 由前三角洲相—浅海相壳质组增加,镜质组和惰质组均减少。

研究区三叠系烃源岩及有机质显微组分的分布规律与特提斯南缘特殊的古地理、季风洪水的古气候背景密切相关,Mungaroo 组的远端三角洲平原为最有利的烃源岩发育环境。North Carnarvon 盆地三叠系岩相古地理格局与沉积充填演化规律体现了温室气候效应下阵发性水流主导的沉积特色,为类似地质背景下油气资源评价提供了新的思路。

关键词 North Carnarvon 盆地 Mungaroo 组 Locker Shale 沉积格局转换 烃源岩

第一作者简介 牛杏女 1989 年出生 硕士研究生 盆地沉积学、层序地层学及储层预测 E-mail: whdidazk@163.com

通讯作者 杨香华 男 教授 E-mail: xhyang111@vip.sina.com

中图分类号 TE121.3 TE122.1⁺13 **文献标识码** A

0 引言

North Carnarvon 盆地为一典型的被动大陆边缘盆地^[1],盆地内部发育 Exmouth 低隆起、Exmouth 凹陷、Investigator 凹陷、Dampier 地堑等构造单元(图 1)。North Carnarvon 盆地处于澳大利亚西北陆架的南部,是在古生代克拉通盆地内区域下拗的基础上形成的中生代裂谷盆地,它经历了一个完整的被动大陆边缘盆地的形成、发展全过程^[2]:早古生代—晚古生代早期冈瓦纳古陆克拉通内裂谷盆地或拗陷盆地、晚二叠世—三叠世大陆边缘拗陷盆地、侏罗世—早白垩

世早期大陆边缘裂谷盆地、早白垩世晚期—晚白垩世大陆边缘热沉降盆地与新生代被动大陆边缘盆地(Labutis, 1998)。三叠系盆地总体处于克拉通边缘拗陷演化阶段。

中三叠世泛大陆开始逐步解体,劳亚大陆西部与西冈瓦纳大陆之间裂开,由此开始产生的“冈瓦纳裂解—亚洲增生”演化过程对西澳大利亚大陆边缘盆地具有重要的影响和控制作用。晚三叠世澳大利亚陆块与印度陆块作为冈瓦纳大陆的整体均向西北漂移,但印度板块向西漂移的速度快于澳大利亚板块,由于两陆块漂移速度的差异而产生陆块之间分离作

^①国家科技重大专项子课题“澳大利亚西北陆架油气成藏条件及勘探潜力研究”(编号:2011ZX05030-02-02)资助
收稿日期:2013-11-20;收修改稿日期:2014-02-24

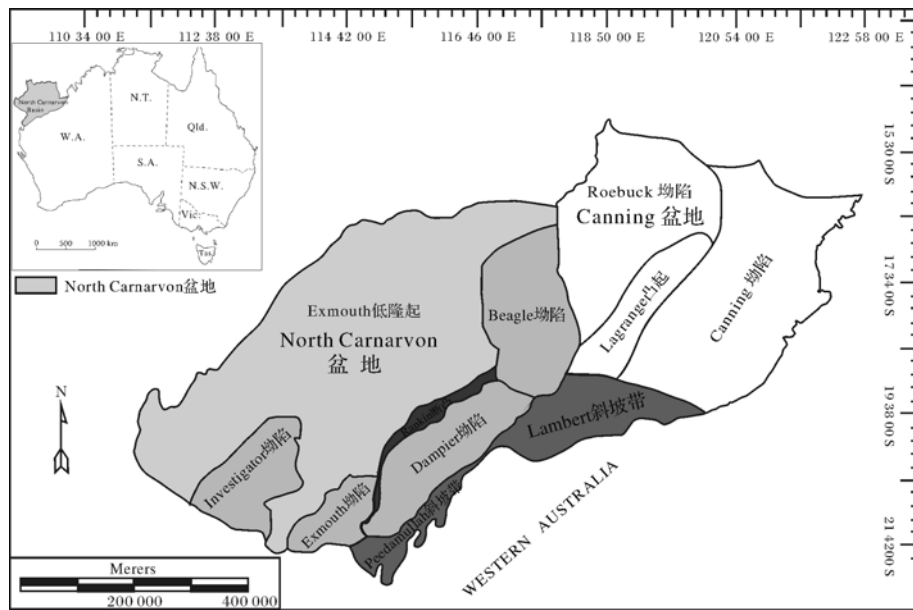


图1 North Carnarvon 盆地构造单元图

Fig.1 The tectonic units of North Carnarvon Basin

用,从而影响西澳大利亚大陆伸展构造的发展进程。在伸展作用初始期,陆壳块体间受拉张应力作用,使得西北大陆壳边缘在原冈瓦纳大陆与印度大陆结合的薄弱部位拉张减薄,造成大陆壳边缘沿剪切带滑脱沉降。

在这一演化过程中, North Carnarvon 盆地东南部 Lambert 斜坡带控盆断裂开始形成,导致盆地沉降,坳陷型盆地形成,表现为坳陷的沉降幅度大,地层发育全,沉积厚度也大,最大厚度达 8 000 m 以上。三叠纪时期, North Carnarvon 盆地沉积了一套不整合于二叠系之上的 Locker 页岩,该套页岩分布范围广,受断层影响比较小,向上渐变为河流三角洲相的 Mungaroo 组,主要为厚层砂岩、泥岩及薄煤层。

三叠纪全球普遍干旱,温室气候效应明显,蒸发岩广泛分布^[4,5]。 North Carnarvon 盆地中晚三叠世处于环特提斯洋南缘气候带,并受到三叠纪环特提斯洋巨型季风的影响^[6-8],气候温暖潮湿^[9-11],当南半球夏季时,季节性降雨量剧增,洪泛频繁,在澳大利亚西北陆架发育巨厚的三叠系滨浅海—三角洲沉积建造。本文通过单井相、岩矿资料、宏体化石、孢粉组合、有机质显微组分与有机碳含量的综合分析,分别从无机与有机两个方面,阐述研究区三叠系的沉积古地理、沉积充填特征与烃源岩分布规律,探讨温室气候条件下大型三角洲的沉积充填特征,揭示 North Carnarvon 盆地三叠系岩相古地理格局的演化规律,为类似地质

背景下沉积盆地的油气勘探部署提供地质依据。

1 三叠系沉积格局转换

三叠纪时期, North Carnarvon 盆地总体上沉积了两套地层:一套为中—下三叠统浅海相 Locker 页岩,另一套为中—上三叠统浅水辫状河三角洲相 Mungaroo 组。

早—中三叠世,整个澳大利亚西北陆架为干旱炎热气候,并为浅海所覆盖^[2], North Carnarvon 盆地沉积一套 Locker 浅海相页岩(图 2),并夹有薄层的砂岩,砂岩主要为长石石英砂岩。 Locker Shale 厚度介于 200~1 000 m,其中发育正常浅海珊瑚、有孔虫、腕足类、双壳、菊石等底栖类浅海化石。

中晚三叠世,经历 P-T 生物大灭绝后,古植被已经开始复苏,此时澳大利亚西北陆架正处于环特提斯洋南缘温暖潮湿气候带,气候温暖潮湿^[9-11],植被茂盛,主要为蕨类和种子蕨类,高海拔地区还生长松杉类植物,这为沉积区提供了丰富的陆源有机质;加之降雨量充沛,地表径流发育,因此具备了巨型三角洲发育的有利地质条件。在 North Carnarvon 盆地沉积了一套浅水辫状河三角洲相 Mungaroo 组地层(图 2),其分布广泛,沉积厚度大^[12],平均可达 4 500 m,典型沉积特征为三角洲平原分支流间湾暗色泥岩与分流河道砂岩频繁互层,并夹有薄煤层。其中, Mungaroo 组发育的厚层砂岩主要是中粗粒石英砂岩,暗色泥岩中富含陆相孢粉化石及植物碎屑。

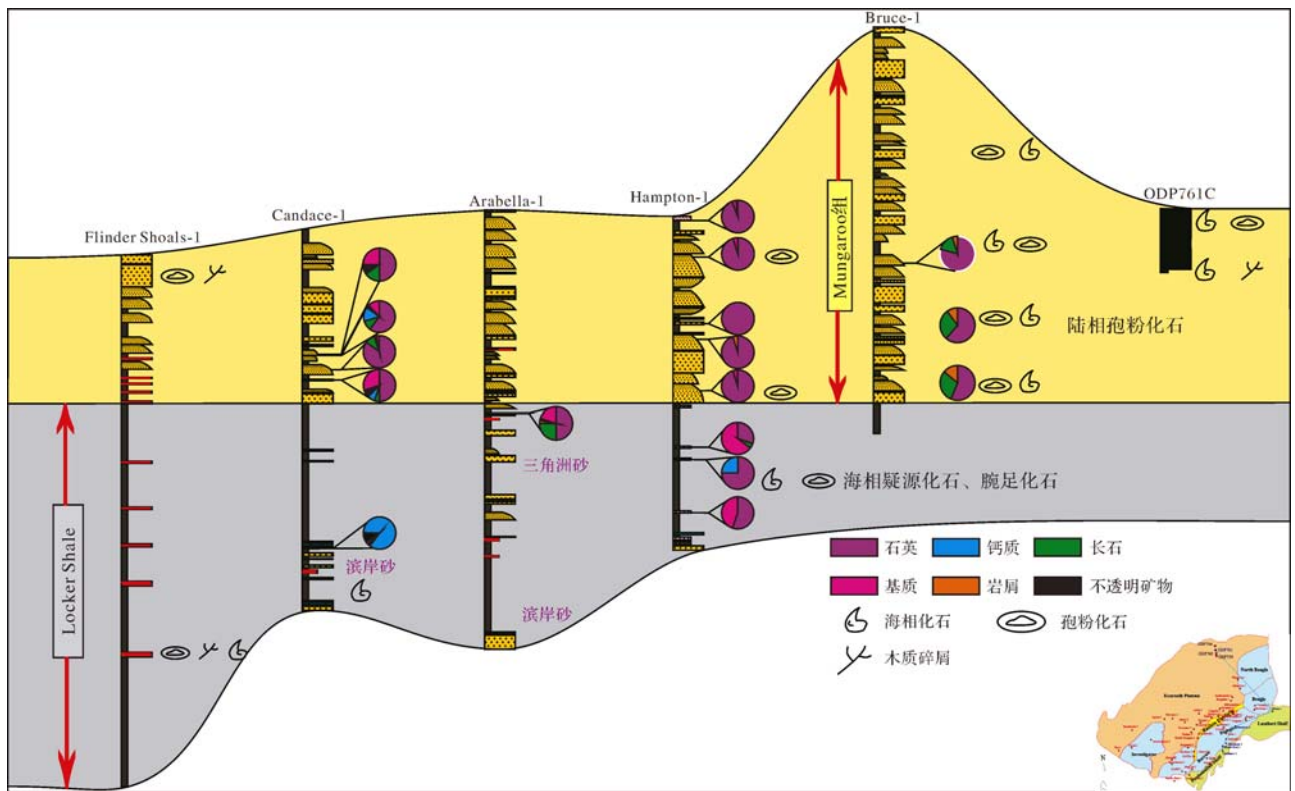


图 2 三叠系 Flinder Shoals-1, Candace-1, Arabella-1 等井地层综合连井图

Fig.2 Interwell composite cross-section from Flinder Shoals-1, Candace-1, Arabella-1 wells and so on

从图 3 和图 4 可以看出, Mungaroo 组富含孢粉, 疑源类和藻类含量均很低, Locker Shale 相对富含疑源类, 藻类含量明显高于 Mungaroo 组。根据钻遇 Locker Shale 层段 6 口井孢粉分析报告的统计, 可以看出 Locker Shale 与 Mungaroo 组孢粉组合差异性明显(图 5)。

Locker Shale 与 Mungaroo 组沉积特征差异明显: ①岩性差异巨大, 下部主要为泥岩, 上部为砂泥岩互层; ②沉积环境发生巨变, 由滨浅海相突变为海陆过渡相; ③砂岩岩矿组分差异明显, 下部以长石石英砂岩为主, 上部以石英砂岩为主; ④孢粉组合差异性明显, 早三叠世处于生物绝灭事件之后的生态过渡期, 古陆缺乏植被保护, 主要发育疑源类、腕足等海相化石, 而到中晚三叠世陆地生态系统迅速恢复, 古植被繁盛, 主要发育陆相孢粉化石。

因此 North Carnarvon 盆地中下三叠统与中上三叠统之间存在大范围的相迁移, 这次大规模的相迁移是由中三叠世晚期澳大利亚西北陆架发生强制性海退造成的。早三叠世时期, 整个澳大利亚西北大陆架为浅海所覆盖, 三叠纪温室气候效应明显, 地球两极没有冰川发育, 水主要储集在海洋内, 所以海平面的

高低与海洋容积呈反比。全球二叠纪—三叠纪时期是古特提斯洋从发展到闭合的过程, 二叠纪时期, 古特提斯洋呈现多岛洋的特点, 王鸿祯等(1990)在《中国及邻区构造古地理和生物古地理》专著中, 首次提出了环岛状古特提斯洋新模型^[13]; 殷鸿福等(1999)在《华南是特提斯多岛洋体系的一部分》一文中解释了特提斯多岛洋模式, 特提斯的多岛洋模式认为, 冈瓦纳超大陆与欧亚超大陆的裂解块体群在其漂移过程中, 漂移前方的洋盆萎缩、消亡, 后方则由裂谷发展为新的洋盆, 如此循序出现的洋盆就构成了古、中、新特提斯等不同阶段。裂解、漂移和消亡的多幕次过程, 使特提斯与大西洋、太平洋等“干净”的大洋不同。它在其各个演化阶段, 始终是个充满着裂解地块与裂谷、海道, 微板块与小洋盆, 岛弧与边缘海等不同裂离与聚合程度的海陆相间的多岛洋盆^[14]。中三叠世时期, 古特提斯洋闭合, 多岛洋消失, 形成统一的泛大洋, 海洋容积明显增大, 导致海平面迅速下降(图 6), 形成了中三叠世晚期澳大利亚西北陆架的强制性海退。由此造成了 North Carnarvon 盆地三叠系沉积格局的转换。

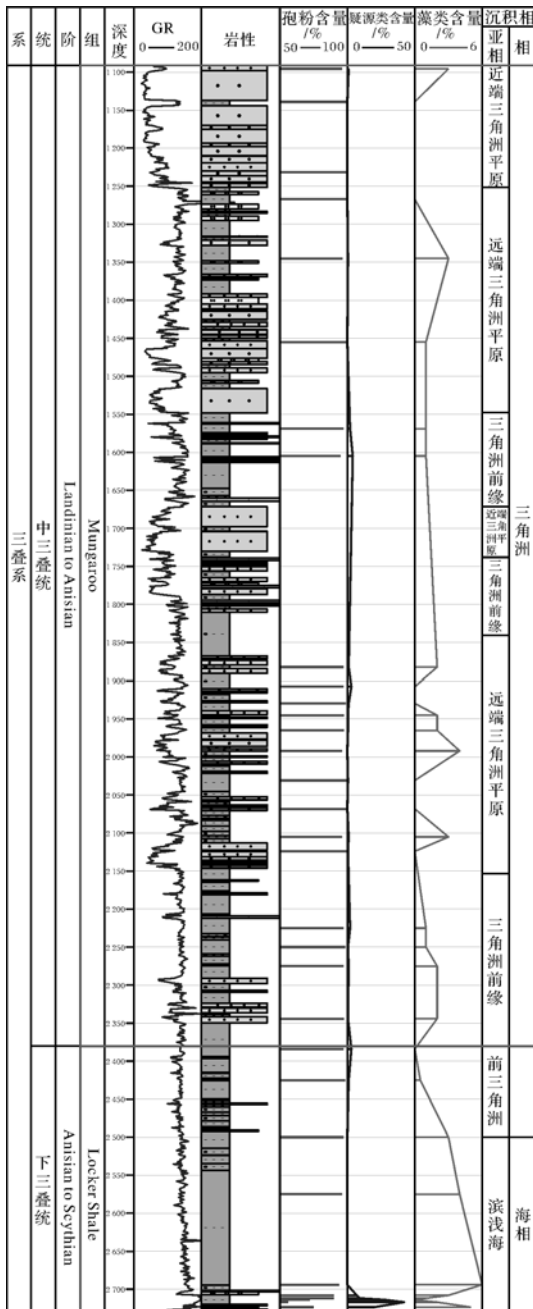


图 3 Roebuck-1 井综合解释图

Fig.3 Integrated interpretation chart of Roebuck-1

2 烃源岩及有机质显微组分发育特征

三叠系自下而上发育两套烃源岩:Locker 浅海相页岩和 Mungaroo 组富含陆源有机质的暗色泥岩+煤层。煤和陆源有机质烃源岩是重要的生烃岩类型之一, Mungaroo 组烃源岩与一般陆源有机质岩石学特点^[16]相比,具有以下特点:①沉积环境主要为三角洲、沼泽,沉积过程中泥炭沼泽不断出现或持续发育;②受强烈季风频繁改造,广泛发育薄煤层;③烃源岩

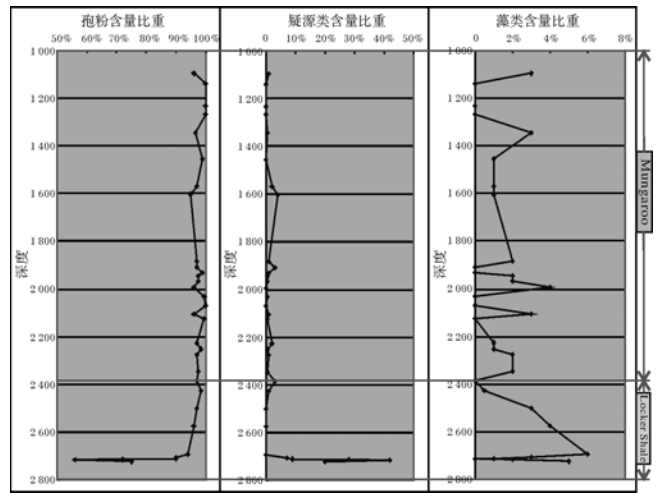


图 4 Roebuck-1 井孢粉组合分析

Fig.4 Palynological assemblages analysis of Roebuck-1

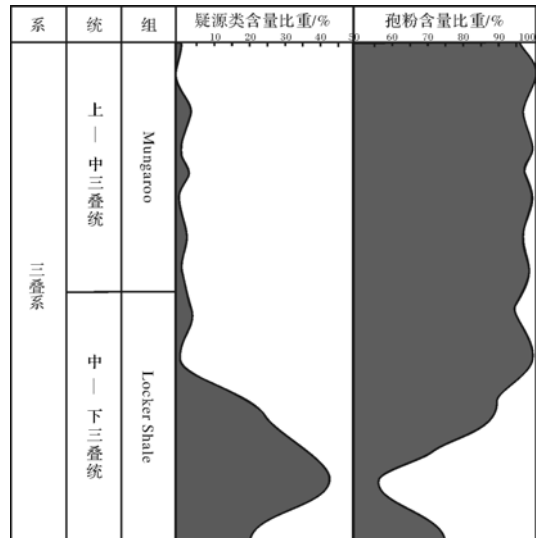


图 5 North Carnarvon 盆地三叠系孢粉组合分布示意图

Fig.5 Triassic palynological assemblages distribution diagram of North Carnarvon Basin

有机质中以高等植物贡献占绝对主导地位,其有机质类型主体是Ⅲ型或Ⅱ~Ⅲ型干酪根,生烃显微组分主要为壳质组和镜质组,以镜质组为主;④煤和暗色泥岩中陆源有机质丰度较高;⑤陆源有机质泥岩明显受季风洪水的影响,近端三角洲平原因受季风洪水强烈冲刷,暗色泥岩不发育。

2.1 三叠系烃源岩分布规律

2.1.1 Mungaroo 组烃源岩分布规律

Mungaroo 组烃源岩主要包括薄层煤和富含陆源有机质的暗色泥岩。根据 North Carnarvon 盆地中晚三叠世沉积的浅水辫状河三角洲发育特征,可将

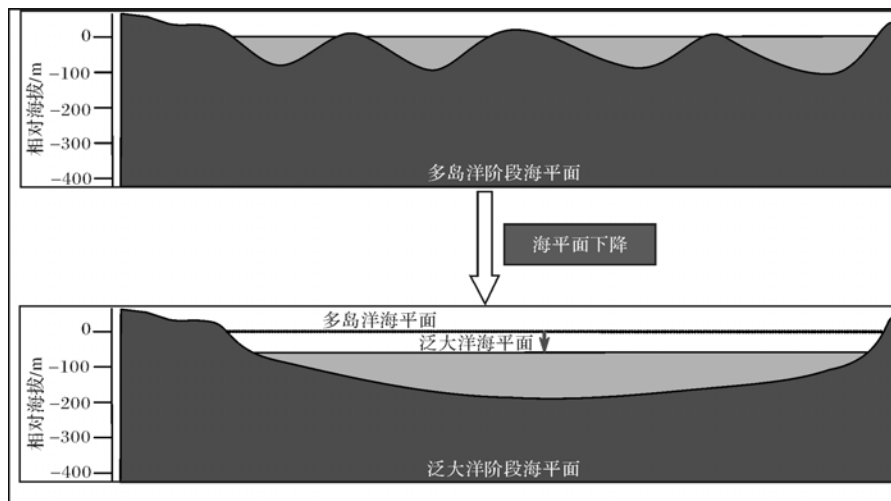


图 6 多岛洋向泛大洋转换时期海平面响应模式图

Fig.6 Sea level response pattern diagram in the period of archipelagic ocean turning to Pan Ocean

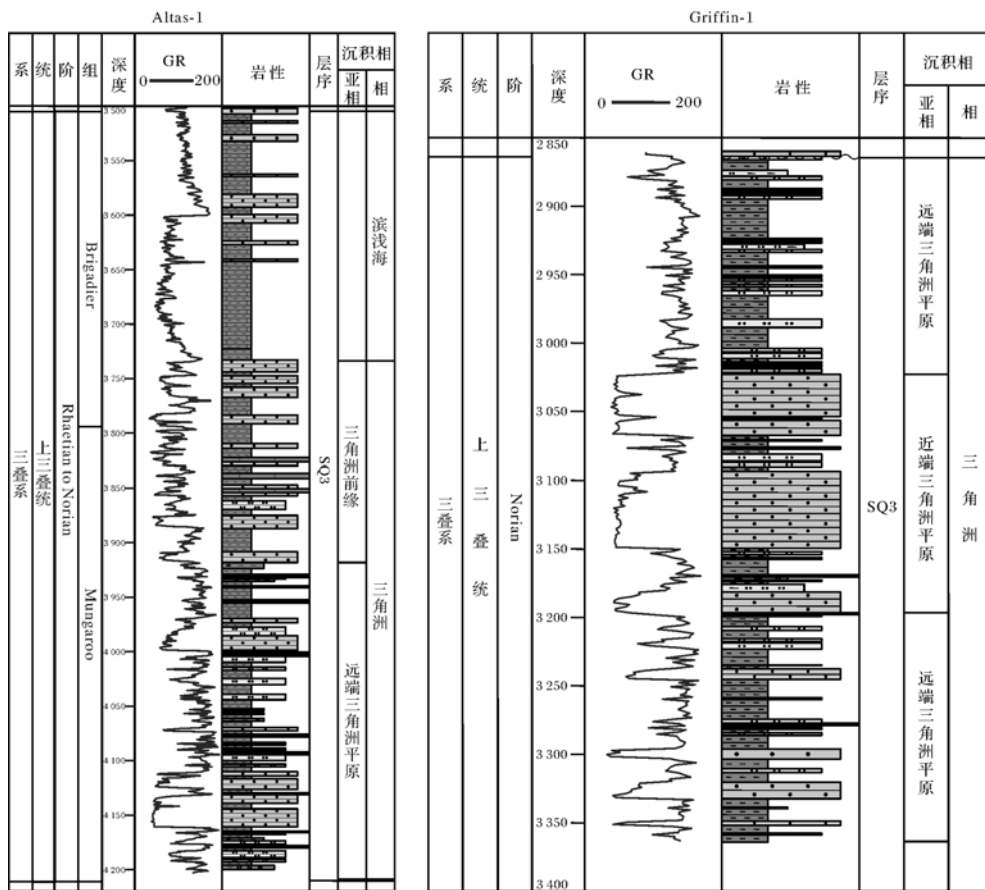


图 7 Mungaroo 组各沉积亚相岩性特征

Fig.7 The sedimentary subfacies lithologic characteristics of Mungaroo Group

Mungaroo 组沉积相细分为四个沉积亚相:近端三角洲平原,远端三角洲平原,三角洲前缘和前三角洲。其中近端三角洲平原为辫状河主水道发育区,沉积厚层的水道砂体和薄层暗色泥岩,局部发育薄煤层;远

端三角洲平原为薄煤层发育区,中—厚层分支流水道砂与中厚层炭质泥岩、薄煤层互层;三角洲前缘主要发育中—薄层细粒砂岩和中厚层灰色泥岩,由于海水的影响砂岩普遍发生钙质胶结,且含少量的海绿石

(图 7);前三角洲与浅海泥岩较难区分, North Carnarvon 盆地主要沉积前三角洲泥岩。研究区 Mungaroo 组浅水辫状河三角洲以宽广的三角洲平原亚相与较窄的三角洲前缘亚相和前三角洲亚相为特征。

近端三角洲平原暗色泥岩厚度较薄,薄煤层只局部发育,薄泥岩中有机碳含量较高(图 8A);远端三角洲平原暗色泥岩厚度较大,且发育大量薄煤层,有机碳含量最高(图 8A);三角洲前缘泥岩厚度较大,但有机碳含量较低(图 8B)。上述有机质分布规律与 North Carnarvon 盆地三叠系特殊的古地理背景相关:近端三角洲平原离物源近,水动力作用强,再加上 Mungaroo 组沉积时期,气候湿热,植被茂盛,温室气体效应明显,频繁受到季风洪水影响,分支间湾沉积泥岩和煤炭沼泽经常遭到冲刷,从而造成近端三角洲平原暗色泥岩厚度薄,薄煤层仅局部较发育,但保存下来的泥岩中有机碳含量仍较高;远端三角洲平原受季风洪水改造相对较弱,且受波浪作用的影响也较小,因此沉积了厚度较大的暗色泥岩和大量的薄煤层,同样保存下来的泥岩富含陆源有机质,因此有机碳含量高;三角洲前缘由于离陆源物源较远,且受到

波浪作用的影响,其沉积的泥岩中陆源有机质遭受搬运稀释,因此有机碳含量低。由此可见,烃源岩中陆源有机质分布规律与三叠纪季风洪水的水动力条件密切相关。

2.1.2 Locker 组烃源岩分布规律

Locker Shale 主要为浅海相页岩,局部发育小型三角洲。浅海相又可划分为开阔浅海亚相和滨浅海亚相。其中开阔浅海亚相主要为巨厚层页岩;滨浅海亚相为中厚层页岩和薄层砂岩互层,夹薄层灰岩,砂岩普遍发生钙质胶结,含少量海绿石;前三角洲亚相厚层泥岩夹薄层砂岩,含植物碎屑。

从单井 TOC 统计(图 9)看,开阔浅海、滨浅海、前三角洲三个亚相的 TOC 值均较低,无明显变化。开阔浅海、滨浅海亚相烃源岩中有机质来源于低等水生生物,而低等水生生物是否丰富主要取决于养分是否充分,而天然海盆的养分主要靠周边河流供给^[18]。而早一中三叠纪时期气候干旱炎热,地表径流不发育,海盆内养分不充足,低等水生生物的丰度也不高,因此 Locker Shale 页岩中 TOC 含量整体较低。

综上所述,总结出了 North Carnarvon 盆地三叠系

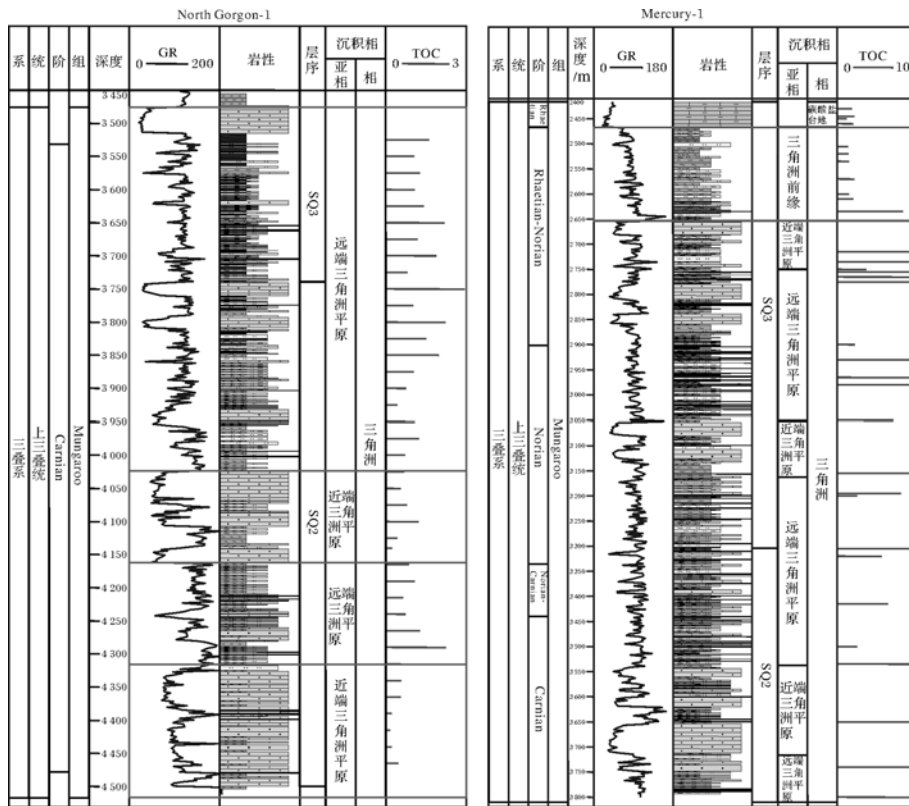


图 8 Mungaroo 组不同沉积亚相烃源岩有机碳对比图

A. North Gorgon-1 有机质含量分析图; B. Mercury-1 有机质含量分析图

Fig.8 Organic carbon comparison chart of Mungaroo Group in different sedimentary facies source rock

A.Organic matter content of North Gorgon-1 Well; B.Organic matter content of Mercury-1 Well

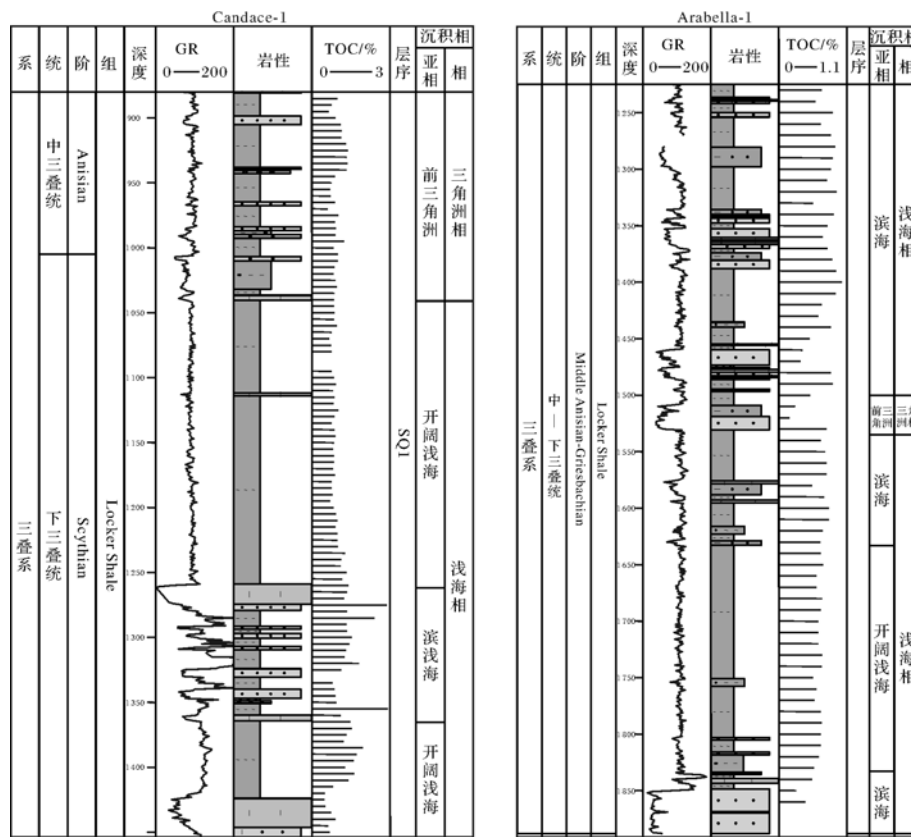


图 9 Candace-1 和 Arabella-1 井 Locker Shale 有机质含量分析图

Fig.9 Organic matter content of Locker Shale of Candace-1 and Arabella-1 wells

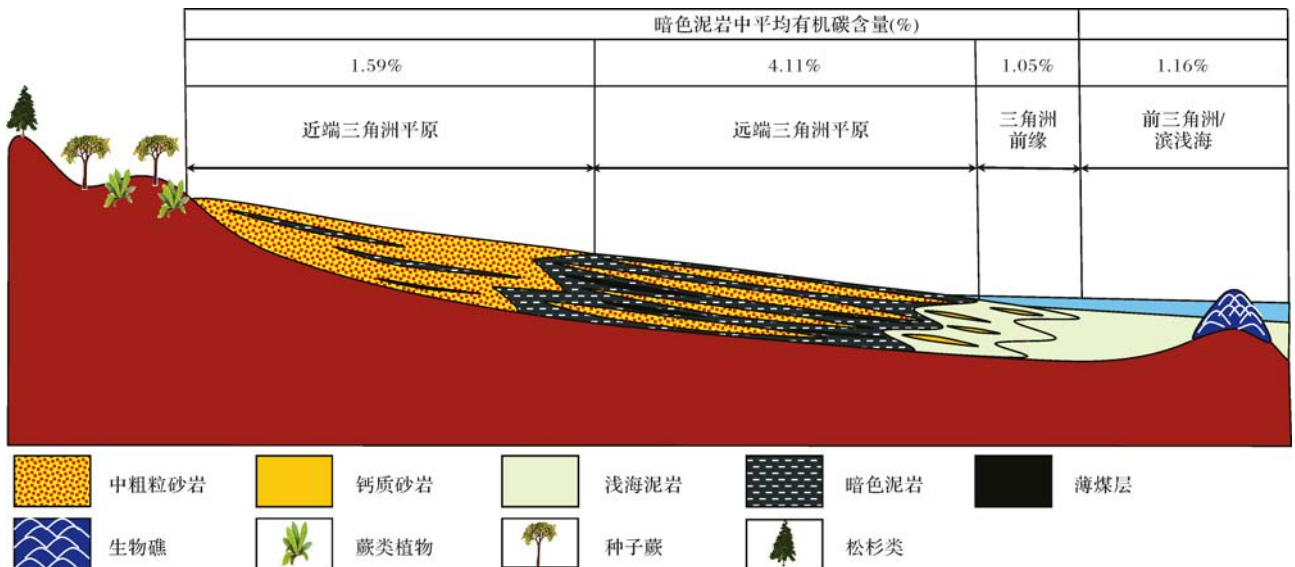


图 10 North Carnarvon 三叠系沉积格局及有机质分布特征图

Fig.10 Triassic sedimentary framework and the characteristics of organic matter distribution of North Carnarvon Basin

烃源岩分布规律(图 10):①Mungaroo 组近端三角洲平原泥岩厚度较薄,薄煤层只局部发育,陆源有机质含量较高,平均 TOC 含量为 1.59%;远端三角洲平原泥岩厚度较大,薄煤层广泛发育,陆源有机质含量高,

TOC 含量最高,平均达 4.11%;三角洲前缘泥岩厚度较大,陆源有机质含量低,TOC 含量较低,平均为 1.05%。②Locker 组开阔浅海亚相烃源岩厚度最大,前三角洲、滨浅海、开阔浅海三个亚相 TOC 含量相

当,均较低,平均值为 1.16%。由此可见,烃源岩的分布规律与三叠纪特殊的古气候与古地理密切相关。

2.2 烃源岩中有机质显微组分发育特征

2.2.1 有机质类型

根据李增学主编的《煤地质学》和 Mukhopadhyay 等(1985)提出的干酪根类型综合分类法,将有机质显微组分分类、来源、生烃特点等汇总于表 1。壳质组来源于比较富氢的植物组分,既可以生油又可以生气;镜质组由高等植物的根、茎、叶在覆水还原条件下经凝胶化作用形成^[19],以生气为主;惰质组是由植物的根、茎、叶在比较干燥的氧化条件下经过丝炭化作用后在泥炭沼泽中沉积下来形成的,还可以由镜质组和壳质组经过煤化作用形成,不能生烃。

表 1 陆源高等植物有机质显微组分分类、来源、特点等

Table 1 Terrigenous higher plant organic matter maceral classification, origin, characteristics, and so on

显微组分	母质来源	生烃特点	干酪根类型
孢子体	由比较富氢的植物物质,如孢粉质、木栓质、树脂、脂肪和油等组成	氢含量高,主要生油,低成熟度烃源岩中较常见,成熟度高时转化为气态烃	I~II 型
角质体			
树脂体			
木栓体			
碎屑壳质体等			
结构镜质体	由高等植物的根、茎、叶在覆水还原条件下,经过凝胶化作用	氧含量较高,氢含量中等,碳含量较低,主要生气	III 型
无结构镜质体			
碎屑镜质体			
丝质体	由植物的根、茎、叶在比较干燥的氧化条件下经过丝炭化作用后在泥炭沼泽中沉积下来形成,还可以由镜质组和壳质组经过煤化作用形成	生烃潜力低,不可能生油,不是烃类来源	IV 型
半丝质体			
粗粒体			
菌类体			
碎屑惰质体			
微粒体			

2.2.2 Mungaroo 组不同沉积亚相有机质显微组分分布规律

从微观尺度上分析 Mungaroo 组烃源岩镜质组、壳质组和惰质组在不同沉积亚相的分布规律,有利于揭示研究区三叠系烃源岩发育的特殊古地理背景。

A.C.Cook 等(1985)做了 Mungaroo 组有机质显微组分的相关分析,从 Jupiter-1、Mercury-1 和 Saturn-1 煤层中选取 121 个样品、暗色泥岩段选取 123 个样品进行分析,绘制了显微组分三角图。对于 75%以

上的薄煤层来说(图 11 左),其显微组分中镜质体占 80%以上,体现了原地有机质聚集的特点;部分薄煤层镜质组含量较低,指示季风洪水的改造作用。对于泥岩中分散有机质来说(图 11 右),镜质组、壳质组与惰质组含量相当,体现了阵发性洪水的搬运特点;少部分泥岩中镜质组含量高达 80%,为煤层改造搬运的产物;少部分支流间湾泥岩中,以壳质组为主。

通过对 North Carnarvon 盆地 Exmouth 低隆起、Rankin 断凸和 Barrow 地堑三个构造单元 13 口井烃源岩段进行取样分析,统计出 Mungaroo 组浅水辫状河三角洲不同沉积亚相有机质显微组分的分布规律:近端三角洲平原和远端三角洲平原有机质显微组分主要为镜质组和惰质组,壳质组含量较低;前缘亚相中壳质体含量增高,与镜质体+惰质体含量相近,部分样品中只含有壳质组(图 12)。由平原相到前缘相壳质组增加是因为壳质组比较稳定,且质轻,可以由河流长距离搬运后在三角洲前缘富集;镜质组不稳定,受季风洪水影响,在搬运过程中易氧化分解;三角洲前缘有机质来源于水生生物和陆源有机质两部分,壳质组更多地来源于水生低等植物,因而烃源岩中壳质组含量相对较高。

从陆源有机质显微组分的单井分析(图 13)来看,Jupiter-1 井由近端三角洲平原—远端三角洲平原—三角洲前缘壳质组逐渐增多,镜质组先增加后减少,惰质组先减少后增加;Altas-1 井由远端三角洲平原—三角洲前缘壳质组和惰质组含量增高,镜质组减少。由近端三角洲平原—远端三角洲平原—三角洲前缘,壳质组逐渐增多的原因是海水影响逐渐增强,水生生物逐渐增多;镜质组先增加后减少的原因是来源于高等植物的镜质组受到季风洪水或波浪搬运易氧化分解,导致其在烃源岩中含量不稳定。近端三角洲平原与三角洲前缘由于季风洪水与波浪的搬运改造,烃源岩中镜质组含量较低;而远端三角洲平原陆源有机质丰富,且受季风洪水与波浪的影响相对较弱,因而烃源岩中镜质组含量较高。镜质组由凝胶化作用形成,凝胶化的任一阶段都有可能因环境条件如覆水深度、氧逸度等的变化而终止,转向丝炭化作用,形成惰质组分。覆水变浅、氧逸度增加,丝炭化作用增强。惰质组由近端三角洲平原—远端三角洲含量下降的原因是远端三角洲覆水深,氧逸度较近端三角洲平原低,镜质组不再向惰质组转化;由远端三角洲平原到三角洲前缘惰质组含量增高的原因是虽然水

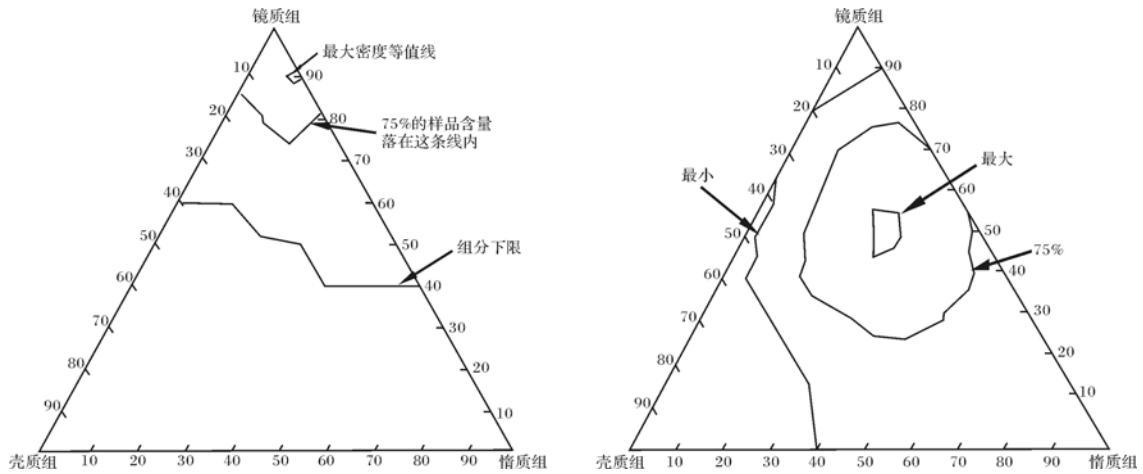


图 11 Jupiter-1、Mercury-1、Saturn-1 三口井煤层(左)和泥岩中分散有机质(右)显微组分三角图(据 Cook A C 等,1985)
 Fig.11 The triangle of maceral compositions of coal (left) and DOM (right) from Jupiter-1, Mercury-1 and Saturn-1 (according to Cook A C *et al.*, 1985)

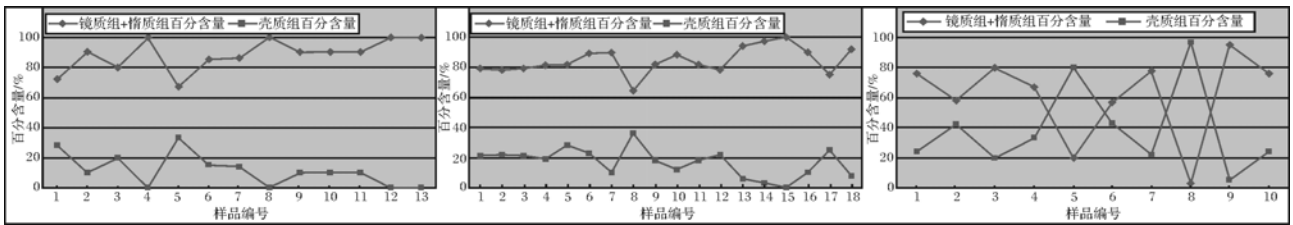


图 12 Mungaroo 组不同沉积亚相有机质显微组分镜质组+惰质组和壳质组含量对比
 (从左向右依次为近端三角洲平原、远端三角洲平原和三角洲前缘)

Fig.12 The comparison of Vitrinite + inertinite and liptinite content of different sedimentary subfacies organic maceral of Mungaroo Group (from left to right, there are proximal delta plain, remote delta plain and delta front in turn)

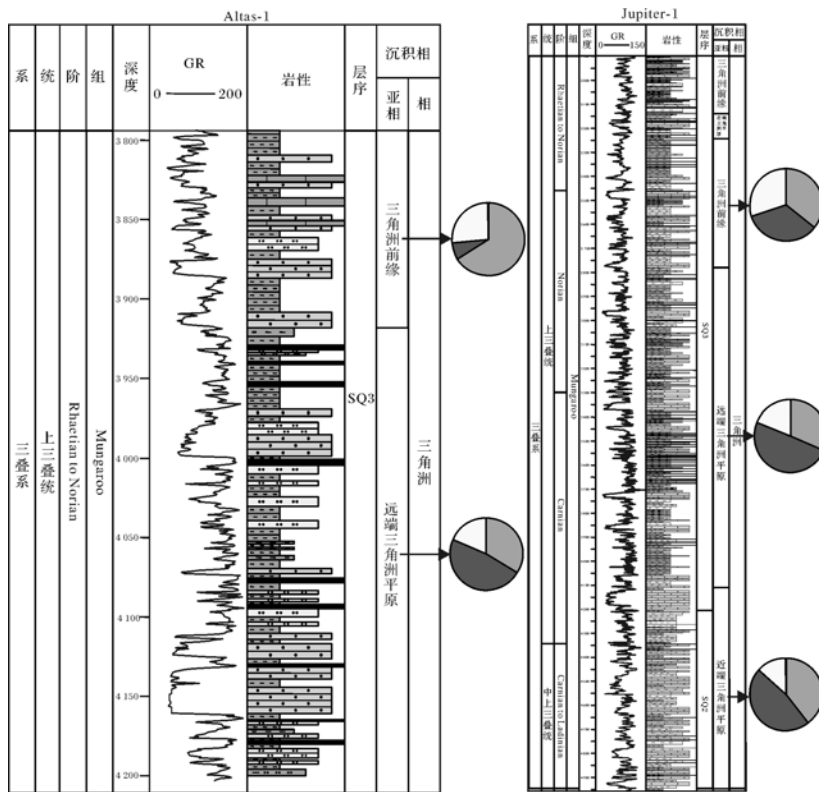


图 13 Mungaroo 组不同沉积亚相烃源岩显微组分单井分析

Fig.13 Different sedimentary subfacies organic maceral analysis in a single well of Mungaroo Group

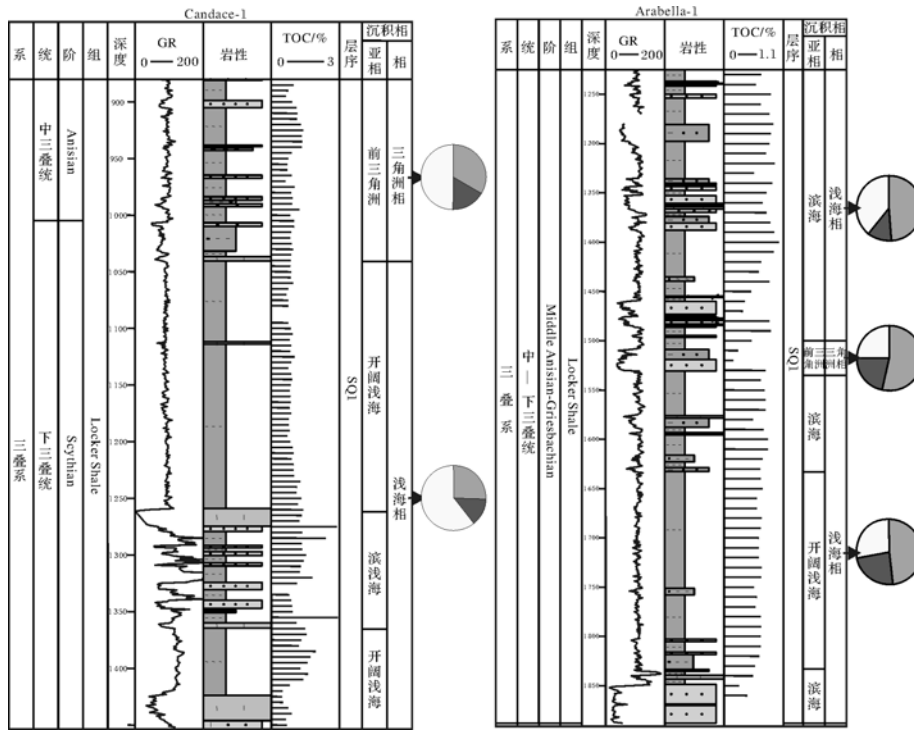


图 14 Locker Shale 不同沉积亚相烃源岩显微组分单井分析

Fig.14 Different sedimentary subfacies organic maceral analysis in a single well of Locker Shale

深加深,但由于波浪作用增强导致氧逸度增加,镜质组向惰质组转化,因此惰质组增加。

2.2.3 Locker 组不同沉积亚相有机质显微组分分布规律

从有机质显微组分的单井分析看(图 14),由前三角洲相—浅海相泥岩中壳质组增加,镜质组和惰质组减少。壳质组增加的原因是由前三角洲—浅海相水生生物逐渐增多;镜质组减少的原因是由前三角洲—浅海相孢粉含量下降,而镜质组来源于高等植物;惰质组减少的原因是浅海相较前三角洲水更深,更富还原相。

表 2 与表 3 列出了来自 15 口井数十个样品近端三角洲平原、远端三角洲平原、三角洲前缘、前三角洲和浅海相各沉积亚相有机质显微组分的平均值,从中可以看出, Mungaroo 组由近端三角洲—远端三角洲—三角洲前缘有机质显微组分中壳质组含量逐渐增多,镜质组在远端三角洲平原中含量最高,主要是由于镜质组受到洪水冲刷或者波浪搬运时易氧化分解,近端三角洲平原河流作用较强,三角洲前缘波浪作用较强,而远端三角洲平原受洪水冲刷与波浪搬运均较弱。Locker 组由前三角洲到浅海相,壳质组增多,镜质组和惰质组均减少。

从宏观和微观两个角度来看, Mungaroo 组远端三角洲平原亚相泥岩厚度大且有机碳含量高,薄煤层广泛分布,有机质显微组分中镜质组含量最高,活性

表 2 North Carnarvon 盆地三叠系不同沉积亚相有机质显微组分百分含量表

Table 2 The percentage content of organic maceral in different sedimentary subfacies of North Carnarvon Basin in Triassic period

地层	沉积亚相	各显微组分平均百分含量			饼状图
		惰质组	镜质组	壳质组	
Locker Shale	浅海相	37	15	48	
	前三角洲	43	19	38	
Mungaroo	三角洲前缘	38	23	39	
	远端三角洲平原	30	54	16	
	近端三角洲平原	46	42	12	

■ 惰质组 ■ 镜质组 □ 壳质组

表3 Mungaroo 组和 Locker Shale 不同沉积亚相有机质显微组部分数据统计表

Table 3 The statistical table of part data of different sedimentary subfacies organic maceral in Mungaroo Group and Locker Shale

Mungaroo 组											
近端三角洲平原			远端三角洲平原			三角洲前缘					
井名	惰质组 /%	镜质组 /%	壳质组 /%	井名	惰质组 /%	镜质组 /%	壳质组 /%	井名	惰质组 /%	镜质组 /%	壳质组 /%
Jupiter-1	36	36	28	Jupiter-1	28	50	22	Jupiter-1	61	15	24
Mercury-1	45	35	20	Mercury-1	4	60	36	Jupiter-1	18	40	42
Banambu-1	57	43	0	Griffin-1	22	60	18	Jupiter-1	24	56	20
Chervil-1	33	34	33	Altas-1	26	56	18	Jupiter-1	27	40	33
Chervil-1	46	39	15	Altas-1	20	58	22	Mercury-1	20	0	80
Elder-1	50	50	0	Chervil-1	3	91	6	Andromeda-1	50	7	43
Goodwyn-1	45	45	10	Goodwyn-1	48	49	3	Elder-1	52	26	22
Brigadier-1	50	40	10	Bowers-1	52	48	0	Elder-1	2	1	97
North Gorgon-1	70	30	0	Brigadier-1	55	20	25	Brigadier-1	80	15	5
North Gorgon-1	35	65	0	North Gorgon-1	35	57	8	Hampton-1	42	34	24

Locker Shale							
前三角洲			浅海相				
井名	惰质组/%	镜质组/%	壳质组/%	井名	惰质组/%	镜质组/%	壳质组/%
Arabella-1	46	20	34	Hampton-1	25	12	63
Arabella-1	53	21	36	Hampton-1	60	20	20
Candace-1	30	16	43	Hampton-1	30	9	61
				Hampton-1	33	22	45
				Hampton-1	80	15	5
				Arabella-1	48	24	28
				Arabella-1	52	18	30
				Candace-1	22.2	11.1	66.7
				Candace-1	42.86	14.29	42.86
				Candace-1	20	20	60

组分(镜质组+壳质组)含量也最高,因此远端三角洲平原为最有利的烃源岩发育环境,这与 Cook A C *et al.* (1985) 在研究 Exmouth Plateau 上三叠统河流—三角洲体系烃源岩潜力时得出的结论一致。上述烃源岩和显微组分的发育特征揭示了研究区三叠系烃源岩分布的规律与特殊的古地理背景。

3 结论

(1) 中三叠世晚期,澳大利亚西北陆架发生强制性海退,导致 North Carnarvon 盆地三叠系沉积格局发生转换,沉积了两套差异明显的沉积组合: Locker Shale 页岩和 Mungaroo 组;岩性差异巨大,下部为泥岩,上部为砂岩;沉积环境巨变,由海相沉积突变为过渡相沉积;孢粉组合差异性明显,Locker Shale 富含疑源类, Mungaroo 组富含陆源孢粉。

(2) North Carnarvon 盆地三叠系烃源岩分布规律:①Mungaroo 组远端三角洲平原和三角洲前缘烃源岩厚度均较大,近端三角洲平原烃源岩厚度较薄; Mungaroo 组三个亚相中以远端三角洲平原陆源有机

质含量最高,有机碳含量最高,平均 TOC 含量可达 4.11%。②Locker 组开阔浅海亚相烃源岩厚度最大,前三角洲、滨浅海、开阔浅海三个亚相 TOC 含量相当,均较低,平均值为 1.16%。

(3) North Carnarvon 盆地三叠系烃源岩中有机质显微组分发育特征:①Mungaroo 组由近端三角洲—远端三角洲—三角洲前缘壳质组含量逐渐增多,镜质组在远端三角洲平原中含量最高,惰质组含量先上升后下降;②Locker 组由前三角洲到浅海相,壳质组增多,镜质组和惰质组均减少。

(4) 从宏观和微观两个角度来看,远端三角洲平原亚相泥岩厚度大且有机碳含量高,薄煤层广泛分布,有机质显微组分中镜质组含量最高,活性组分(镜质组+壳质组)含量也最高,因此远端三角洲平原为最有利的烃源岩发育环境。研究区三叠系烃源岩及其有机质显微组分的发育特征与特殊的古地理、古气候密切相关,为类似地质背景下的油气勘探部署提供了新的思路。

(5) 有机—无机综合分析表明,研究区三叠纪季

风洪水频发,相序列与有机质空间分布均体现了阵发性水流主导下的搬运与沉积作用,表明特提斯南缘特殊的古地理背景与全球大部分地区干旱气候条件下沉积作用的不同。

参考文献 (References)

- 白国平,殷进根. 澳大利亚北卡那封盆地油气地质特征及勘探潜力分析[J]. 石油实验地质, 2007, 29(3): 253-258 [Bai Guoping, Yin Jinyin. Petroleum geological features and exploration potential analyses of North Carnarvon Basin, Australia [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29(3): 253-258]
- 张建功,钱桂华,郭念发,等. 澳大利亚大型沉积盆地与油气成藏[M]. 北京:石油工业出版社, 2008: 88-103 [Zhang Jinqiu, Qian Guihua, Guo Nianfa, et al. Large Sedimentary Basins and Hydrocarbon Accumulation of Australia [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 88-103]
- Nereo Preto, Evelyn Kustatscher, Paul B. Wignall. Triassic climates — State of the art and perspectives [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2010, 290(1/2/3/4): 1-10
- Hallam A. A review of Mesozoic climate [J]. Journal of the Geological Society of London, 1985, 142(3): 433-445
- Pindell J. Mesozoic-cenozoic paleogeographic evolution of northern south-America [J]. AAPG Bulletin, 1993, 77(2): 340
- Russell F. Dubiel, Judith Totman Parrish, J. Michael Parrish, et al. The Pangaean megamonsoon — Evidence from the Upper Triassic Chinle Formation, Colorado Plateau [J]. Palaios, 1991, 6(4): 347-370
- Wang P X. Global monsoon in a geological perspective [J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(7): 1113-1136
- Kidder D L, Worsley T R. Causes and consequences of extreme Permian-Triassic warming to globally equable climate and relation to the Permian-Triassic extinction and recovery [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2004, 203(3/4): 207-237
- Frakes L A, Francis J E. A guide to Phanerozoic polar climates from high-latitude ice-rafting in the Cretaceous [J]. Nature, 1988, 333(6173): 547-549
- N. Ruben Cunneo, Edith L, Taylor T N, et al. In situ fossil forest from the upper Fremouw Formation (Triassic) of Antarctica: paleoenvironmental setting and paleoclimate analysis [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2003, 197(3): 239-261
- Nicoletta Buratti, Simonetta Cirilli. Microfloristic provincialism in the Upper Triassic Circum-Mediterranean area and palaeogeographic implication [J]. Geobios, 2007, 40(2): 133-142
- Tao Chongzhi, Bai Guoping, Liu Junlan, et al. Mesozoic lithofacies palaeogeography and petroleum prospectivity in North Carnarvon Basin, Australia [J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 2(1): 81-92
- 刘本培,冯庆来,Chonglakmani,等. 滇西古特提斯多岛洋的结构及其南北延伸 [J]. 地学前缘, 2002, 9(3): 161-170 [Liu Benpei, Feng Qinglai, Chonglakmani, et al. The structure and north-south extension of the poly-island Paleotethys Ocean in Western Yunnan [J]. Earth Science Frontiers, 2002, 9(3): 161-170]
- 殷鸿福,吴顺宝,杜远生,等. 华南是特提斯多岛洋体系的一部分 [J]. 地球科学, 1999, 24(1): 1-12 [Yin Hongfu, Wu Shunbao, Du Yuansheng, et al. South China defined as part of Tethyan archipelagic ocean system [J]. Earth Science, 1999, 24(1): 1-12]
- 颜佳新. 东特提斯地区二叠—三叠纪古气候特征及其古地理意义 [J]. 地球科学, 1999, 24(1): 13-20 [Yan Jiaxin. Permian-Triassic ancient climate characteristics and the palaeogeographic significance of East Tethys region [J]. Earth Science, 1999, 24(1): 13-20]
- 王飞宇,傅家谟,刘德汉,等. 煤和陆源有机质生油岩有机岩石学特点及评价 [J]. 新疆石油地质, 1994, 15(1): 22-29 [Wang Feiyu, Fu Jiamo, Liu Dehan, et al. Organic petrology characteristics and evaluation of coal and terrestrial organic matter oil source rocks [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1994, 15(1): 22-29]
- 朱伟林,李建平,周心怀,等. 渤海新近系浅水三角洲沉积体系与大型油气田勘探 [J]. 沉积学报, 2008, 26(2): 575-582 [Zhu Weilin, Li Jianping, Zhou Xinhui, et al. Neogene shallow water delta sedimentary system and large hydrocarbon exploration of Bohai [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(2): 575-582]
- 邓运华. 论河流与油气的共生关系 [J]. 石油学报, 2010, 31(1): 12-17 [Deng Yunhua. Analysis on correlation of river and petroleum [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(1): 12-17]
- 李增学,魏久传,余继峰,等. 煤地质学 [M]. 北京:地质出版社, 2009 [Li Zengxue, Wei Jiuchuan, Yu Jifeng, et al. Coal Geology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009]
- 冯杨伟,屈红军,张功成. 澳大利亚西北陆架深水盆地油气地质特征 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(4): 131-140 [Feng Yangwei, Qu Hongjun, Zhang Gongcheng, et al. Hydrocarbon geological characteristics of Australia's northwest continental shelf deep-water basin [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2011, 31(4): 131-140]
- Cook A C, Michelle Smyth, Vos R G. Source potential of upper Triassic Fluvio-Deltaic systems of the Exmouth Plateau [J]. The APEA Journal, 1985
- 刘聪. 澳大利亚北卡那封盆地层序地层特征及对海平面变化的响应 [D]. 北京:中国地质大学(北京), 2011: 12-85 [Liu Cong. Stratigraphy characteristics and response of sea level change of Australia's North Carnarvon Basin sequence [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2011: 12-85]
- Lister T R, Orbell G. Triassic-Jurassic source rock studies in the North Carnarvon Basin [J]. 1974
- 张家青. 澳大利亚西北大陆架油气地质特征及勘探潜力——以北卡那封盆地为例 [J]. 内蒙古石油化工, 2011(9): 186-189 [Zhang Jiaqing. Hydrocarbon geological characteristics and exploration potential of Australia's north west continental shelf - North Carnarvon Basin as an example [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2011(9): 186-189]
- 冯杨伟,屈红军,张功成,等. 澳大利亚西北陆架中生界生储盖组合特征 [J]. 海洋地质动态, 2010, 26(6): 16-23 [Feng Yangwei, Qu Hongjun, Zhang Gongcheng, et al. Mesozoic source-reservoir-seal assemblage characteristics in the northwest shelf of Australia [J]. Marine Geology Letters, 2010, 26(6): 16-23]

- 26 王全伟, 阚泽忠, 刘啸虎, 等. 四川中生代陆相盆地孢粉组合所反映的古植被与古气候特征[J]. 四川地质学报, 2008, 28(2): 89-95 [Wang Quanwei, Kan Zehong, Liu Xiaohu, *et al.* The Mesozoic sporopollen assemblage in the Sichuan Basin and its significance to paleovegetation and paleoclimate[J]. Sichuan Geology, 2008, 28(2): 89-95]
- 27 徐兆辉, 胡素云, 汪泽成, 等. 古气候恢复及其对沉积的控制作用——以四川盆地上三叠统须家河组为例[J]. 沉积学报, 2011, 29(2): 235-244 [Xu Zhaohui, Hu Suyun, Wang Zecheng, *et al.* Restoration of paleoclimate and its geological significance: As an example from upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(2): 235-244]
- 28 鲁胜梅, 黄其胜. 川东地区晚三叠统须家河植物群及其沉积环境[J]. 地球科学, 1992, 17(3): 329-335 [Lu Shengmei, Huang Qisheng. Late Triassic epoch Xujiahe flora and its sedimentary environment in the east region of Sichuan [J]. Earth Science, 1992, 17(3): 329-335]
- 29 Jan Golonka. Late Triassic and Early Jurassic palaeogeography of the world [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2007, 244(1/2/3/4): 297-307

The Transformation of Triassic Sedimentary Framework and Corresponding Source Rock, North Carnarvon Basin

NIU Xing^{1,2} YANG Xiang-hua^{1,2} LI Dan^{1,2} CHANG Yin-shan^{1,2} HU Xiao-lin³ XU Xiao-ming³

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

2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074;

3. CNOOC Research Institute International Department in Beijing, Beijing 100027)

Abstract: The North Carnarvon basin is Australia's most important oil and gas basin, also one of main gas-rich basins in the world. In Triassic, North Carnarvon basin belongs to pericratonic depression and the strata are hugely thick and widely distributed. Mandatory regression occurred in northwest shelf of Australia in Late middle Triassic, causing the transformation of Triassic sedimentary framework, North Carnarvon basin, and the depositional environment of North Carnarvon basin from offshore turn into the transition facies, thus two distinct strata-Locker shale and Mungaroo group deposited in North Carnarvon basin. In this article, paleogeographic setting of Locker shale and Mungaroo group and characteristics of associated source rock and organic maceral are elaborated under macro-micro scales, and organic-inorganic aspects.

On a macro level, Mungaroo group is dominated by large-scale delta interbedded distributary channel sandstones and dark mudstones. The mudstone in proximal delta plain is thin, of which terrigenous organic matter content is high and TOC content can be up to 1.59%, besides, thin coal seams just developed locally. The mudstone in remote delta plain is thick, of which terrigenous organic matter content is high and TOC content is highest and can be up to 4.11%, besides, thin coal seams developed widely. The mudstone in delta front is thick, of which terrigenous organic matter content is low and TOC content can be up to 1.05%. Locker Shale is composed of major shallow sea depositional association and small-scale delta. The source rock in open shallow sea subfacies is the thick, what's more, prodelta, offshore and open shallow sea subfacies TOC content is much lower, and three sub-phases average TOC is 1.16%.

On a micro level, sedimentary facies of Mungaroo group from the proximal plain facies-distal plain facies-front subfacies liptinite content gradually increased, with that vitrinite first increased and then decreased, but inertinite first decreased and then increased. As Locker Shale, by the prodelta to neritic facies liptinite increased, with that both vitrinite and inertinite reduced.

The distribution of source rocks and organic maceral is closely related to special paleogeographic and monsoon flood paleoclimate setting of the southern margin of Thethys. The distal delta plain of Mungaroo group is the most favorable environment for the development of source rock. Lithofacies palaeogeographic framework and Sedimentary evolution regularity in Triassic of North Carnarvon Basin reflect the sedimentary characteristics which is dominated by paroxysmal water under the effect of greenhouse climate, providing a new train of thought for oil and gas resource evaluation in a similar geological setting.

Key words: North Carnarvon Basin; Mungaroo Group; Locker Shale; the transformation of sedimentary framework; source rock