

文章编号:1673-5005(2016)02-0034-09

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2016.02.004

北部湾盆地乌石凹陷东部地区流沙港组 烃源岩孢粉相特征及其意义

任拥军¹, 徐志尧¹, 李福来^{1,2}, 刘红艳³, 徐新德⁴, 杨希冰⁴

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; 2. 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术
功能实验室, 山东青岛 266071; 3. 大庆油田有限责任公司第七采油厂, 黑龙江大庆 163517;
4. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东湛江 524057)

摘要:根据孢粉相研究方法,在明确有机碎屑组成的基础上,对乌石凹陷古近系流沙港组烃源岩的有机质来源、形成环境进行研究,并对烃源岩生烃潜力进行了评价。结果表明:流沙港组烃源岩形成于具有一定矿化度的微咸水湖至半咸水湖,流二段底部和顶部油页岩层段对应着湖泊发育的鼎盛时期;从流三段到流一段生源特征在垂向上表现为从混源到水生生物为主,再到混源,最后变为以陆相高等植物有机质为主;流沙港组烃源岩的生烃潜力受无定形有机质的含量影响最大,流二段尤其是其上下两套油页岩段无定形有机质含量最高,生烃潜力最大,流三段次之,流一段生烃潜力最差。

关键词:乌石凹陷; 流沙港组; 孢粉相; 浮游藻类; 生烃潜力

中图分类号:TE 122.113

文献标志码:A

引用格式:任拥军,徐志尧,李福来,等. 北部湾盆地乌石凹陷东部地区流沙港组烃源岩孢粉相特征及其意义[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(2):34-42.

REN Yongjun, XU Zhiyao, LI Fulai, et al. Palynofacies of source rocks of Liushagang Formation in East Wushi Depression, Beibuwan Basin and its significance[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016,40(2):34-42.

Palynofacies of source rocks of Liushagang Formation in East Wushi Depression, Beibuwan Basin and its significance

REN Yongjun¹, XU Zhiyao¹, LI Fulai^{1,2}, LIU Hongyan³, XU Xinde⁴, YANG Xibing⁴

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology,
Qingdao 266071, China;
3. No. 7 Oil Extraction Factory, Daqing Oil Field Company Limited, Daqing 163517, China;
4. Zhanjiang Branch, CNOOC China Limited, Zhanjiang 524057, China)

Abstract: Using the palynofacies analyzing method, this article first studied the origin and formation environment of organic matter of the source rocks in Liushagang Formation of Paleogene, Wushi Depression, and then evaluated the hydrocarbon generation potential of the region. The results show that the source rocks originated from low salinity lakes, and the bottom and top of the El² oil shale formation correlate with the culmination of the lakes. For the El³ and the mudstone of the middle part of El², the biogenic origin is mixed. For the oil shale of El², the biogenic origin is the aquatic organisms. Lastly for the El¹, the biogenic origin is the higher plants. The hydrocarbon generation potential of the source rocks is mainly influenced by the amorphous organic matter (AOM) content of the oil shale of El², whose AOM content is the highest, has the greatest hydrocarbon generation potential, the El³ takes the second place, while the El¹ has the least potential.

Keywords: Wushi Depression; Liushagang Formation; palynofacies; phytoplankton; hydrocarbon generation potential

收稿日期:2015-01-11

基金项目:国家自然科学基金项目(41202075)

作者简介:任拥军(1968-2015),男,教授,博士,研究方向为油气地质及勘探。E-mail: Renyongjun126@126.com。

通讯作者:李福来(1978-),男,讲师,博士,研究方向为油气地质及勘探。E-mail: liful@upc.edu.cn。

孢粉相的概念最早由 Combaz^[1] 于 1964 年提出,是指用 HCl 和 HF 孢粉分析技术从沉积物或沉积岩中获得的在显微镜下可观察的所有抗酸有机质。自此之后许多学者对孢粉相的概念和应用进行了讨论与研究^[2-15],现今孢粉相主要可用在研究古环境^[4-8]、生油母质类型和生油潜力评价^[9,16-22]中。乌石凹陷是北部湾盆地的次级凹陷,位于北部湾盆地中部拗陷的西北部,是涠西南凹陷之后,北部湾盆地又一被证实的富油气凹陷^[23-24]。北部湾盆地经历了古近纪断陷演化和新近纪拗陷演化两个时期,断陷期是主要生储盖组合的形成期。乌石凹陷在断陷期自下而上对应形成了 3 套沉积层序:古新统长流组形成于初始断陷阶段、始新统流沙港组形成于强烈断陷阶段、渐新统涠洲组形成于晚期断陷阶段。初步研究表明,流沙港组泥岩、页岩是乌石凹陷的主要烃源岩^[24]。目前还

没有深入探讨乌石凹陷烃源岩的形成条件,尚无评价生烃潜力的相关研究,因此笔者依据烃源岩的孢粉相分析,并结合有机地球化学特征,在明确有机质组成的基础上对有机质来源、烃源岩形成环境和生烃潜力等进行研究,为深入评价凹陷的资源潜力奠定基础。

1 样品与分析方法

本次分析样品分别取自乌石凹陷不同构造单元的 6 口探井,分布位置见图 1,包括中央隆起带乌石 17-2 构造的 WS17-2-2 井、WS17-2-1 井,乌石 16-1 构造的 WS16-1-4 井和乌石 17-1 构造的 WS17-1-1 井;南部洼陷带的 WS22-2-1 井、WS22-5-1 井,共计 200 份,均为岩屑(表 1)。乌石凹陷断陷期自下而上对应形成了 3 套沉积层序,新生界地层年代划分见图 2。

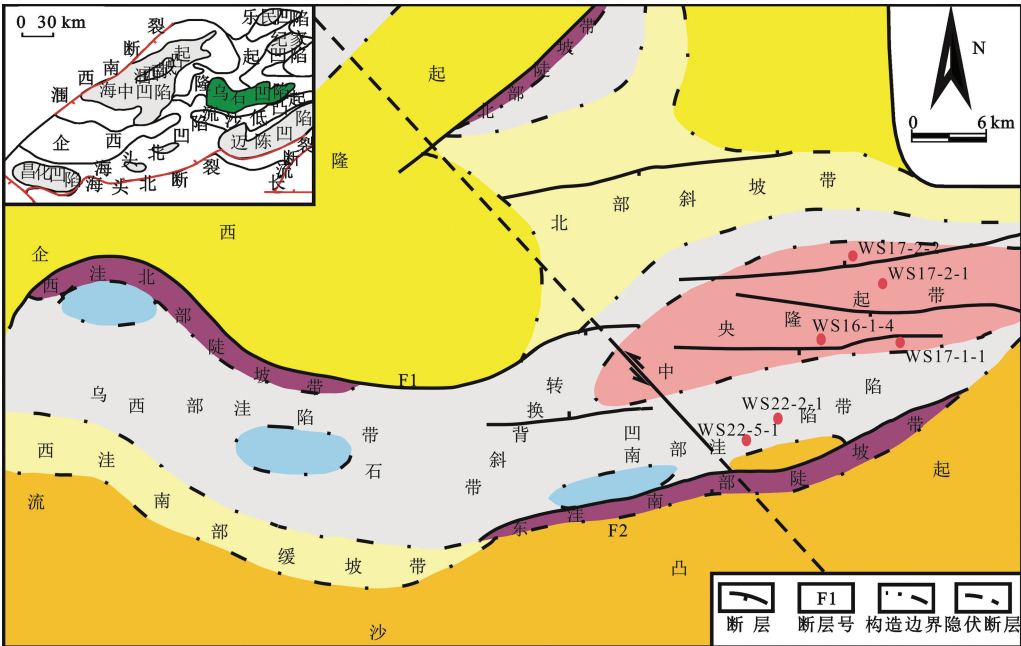


图 1 乌石凹陷构造位置
Fig.1 Tectonic setting of Wushi Sag

表 1 分析样品
Table 1 Analytical samples

地层	钻井及分析样品数					
	WS17-2-1	WS17-2-2	WS16-1-4	WS17-1-1	WS22-2-1	WS22-5-1
流沙港组一段	0	0	0	8	10	35
流沙港组二段	9	44	18	11	18	22
流沙港组三段	11	14	0	1	0	0
合计	20	58	18	19	28	57

用于孢粉相分析的单份样品质量大于 5 g。样品处理采用孢粉分析的常规方法。处理过程中不使用氧化剂。先用 HCl 去除碳酸钙质,再用 HF 去除硅质,经水洗筛选(筛布孔径 7 μm)或者重液(比重

约为 2.10)浮选后取得全部筛选或悬浮物质。将所得物质洗净后制片作透射光显微镜观察用,对孢粉、浮游藻类等有机壁微体植物化石及各种有机屑进行系统鉴定。

地层系统				绝对年 龄/Ma	地层厚 度/m	岩性特征简述
系	统	组	段			
第四系	更新统			2. 6		
新近系	上新统	望楼港组		5. 3	170~428	浅灰、灰黄色中砂岩、含砾砂岩夹薄层泥岩
	中新统	灯楼角组		11. 6	135~216	浅灰色砂岩、砾岩夹薄层泥岩互层
		角尾组	一	—	242~415	灰、绿灰色泥岩，灰黄色含砾中砂岩
			二			
		下洋组	一	—	220~453	灰黄色中砂岩夹泥岩互层
	二					
古近系	渐新统	涠洲组	一	23. 3	100~273	杂色泥岩与浅灰色厚层中砂岩
			二	25. 5	580~683	厚层杂色泥岩与薄层浅灰色砂岩
			三	28. 4	600~1 070	深灰色泥岩、浅灰色细砂岩
	始新统	流沙港组	一	32	200~380	杂色泥岩、深灰色泥岩、浅灰色中砂岩、细砂岩
			二	39. 5	1 000~1 526	顶部：灰褐色油页岩、泥岩 中部：褐灰色页岩与褐灰色粉砂岩互层 底部：深灰色厚层油页岩与薄层细砂岩、粉砂岩互层
			三	48	200~299	深灰色泥岩、浅灰色中砂岩、细砂岩
			古新统	长流组		56. 5
	前古近系				65	

图 2 乌石凹陷新生界地层年代划分

Fig. 2 Stratigraphic timetable of Cenozoic in Wushi Sag

2 分析结果

孢粉相分析的对象主要是沉积物中的有机壁微体植物化石、植物碎屑和无定形有机质等沉积有机屑。参照李建国^[25]的分类方案将有机屑组分归纳

为 4 种类型,包括煤质、木质、草质和无定形有机质,分别统计各组分含量。经过孢粉学处理,绝大多数样品获得了较丰富的孢粉和浮游藻类等沉积有机屑(表 2、3),极个别样品有机质太少,统计数量有限,未计算其含量。

表 2 流沙港组烃源岩沉积有机屑组分

Table 2 Sedimentary organic detritus composition of source rocks of Liushagang Formation

		煤质/%	木质/%		草质/%			无定形 有机质/%
			降解木质	未降解木质	角质	壳质	孢质	
流一段		11. 3 ~ 86. 32 (51. 54)	2 ~ 38. 46 (16. 96)	0 ~ 28. 83 (4. 21)	0 ~ 8. 85 (1. 76)	6. 84 ~ 45. 76 (20. 21)	0. 81 ~ 21. 35 (4. 84)	0 ~ 7. 64 (0. 47)
流二段	中部	0. 75 ~ 62. 42 (25. 87)	0 ~ 36. 6 (14. 56)	0 ~ 17. 14 (4. 59)	0 ~ 11. 65 (3. 3)	15. 34 ~ 54. 14 (29. 85)	0. 89 ~ 43. 66 (8. 7)	0 ~ 50. 59 (13. 13)
	顶底油页岩	2. 06 ~ 19. 46 (8. 84)	1. 04 ~ 18. 47 (8. 47)	0 ~ 9. 28 (2. 42)	0. 35 ~ 4. 88 (2. 18)	8. 2 ~ 40. 61 (20. 66)	0. 41 ~ 25. 91 (5)	19. 69 ~ 83. 61 (52. 43)
流三段		7. 27 ~ 61 (17. 4)	3. 09 ~ 25 (10. 84)	0. 78 ~ 9. 52 (5. 04)	0 ~ 9. 3 (4. 13)	17. 53 ~ 46. 67 (33. 65)	1 ~ 24. 85 (9. 23)	0 ~ 49. 35 (19. 71)

注:表中数据为 $\frac{\text{最小值} \sim \text{最大值}}{\text{(平均值)}}$ 。

表 3 流沙港组烃源岩孢粉和浮游藻类组分

Table 3 Sporopollen and phytoplankton composition of source rocks of Liushagang Formation

		孢粉/%		浮游藻类/%		
		孢子	花粉	淡水绿藻	球藻	非海相沟鞭藻
流一段		49 ~ 87 (37. 5)	0. 94 ~ 91 (34. 59)	0 ~ 68. 63 (9. 66)	0 ~ 41. 51 (13. 68)	0 ~ 19. 8 (4. 57)
流二段	中部	0. 98 ~ 63 (25. 59)	0 ~ 81. 58 (26. 97)	0 ~ 60. 19 (12. 41)	4. 67 ~ 56 (29. 98)	0 ~ 18. 63 (5. 01)
	顶底油页岩	0 ~ 38. 61 (10. 43)	0. 97 ~ 53. 78 (28. 45)	0 ~ 50. 46 (12. 59)	13. 76 ~ 61. 71 (43. 86)	0 ~ 18. 1 (4. 67)
流三段		0. 86 ~ 49. 04 (21. 23)	1 ~ 56. 52 (25. 48)	8. 7 ~ 60. 91 (28. 53)	3. 64 ~ 39. 81 (22. 86)	0 ~ 8. 26 (1. 9)

注:表中数据为 $\frac{\text{最小值} \sim \text{最大值}}{\text{(平均值)}}$ 。

构造演化及沉积相研究表明,流沙港组沉积期整个乌石凹陷基本为统一的沉积构造环境,WS17-2-2 井所在的中央隆起带是在流沙港组沉积后形成的。WS17-2-2 井所在区域抬升遭受剥蚀,缺失了流沙港组上部部分地层,导致该井的样品主要分布在流三段到流二段中部,而 WS22-2-1 井未钻穿流二段,样品主要分布在流二段顶部到流一段,根据这两口井的沉积有机屑统计结果,绘制了能够反映乌

石凹陷流沙港组烃源岩总体有机质纵向变化特征的孢粉相图(图 3)。

流三段有机屑组成以代表陆相高等植物有机质输入的煤质、降解木质和壳质含量占优势,平均含量分别为 17.4%、15.88% 和 33.65%。代表水生植物输入的无定形有机质含量平均值只有 19.71%。孢藻组合以浮游藻类含量占优势,淡水绿藻、球藻和非海相沟鞭藻平均含量分别为 28.53%、22.86% 和 1.9%。

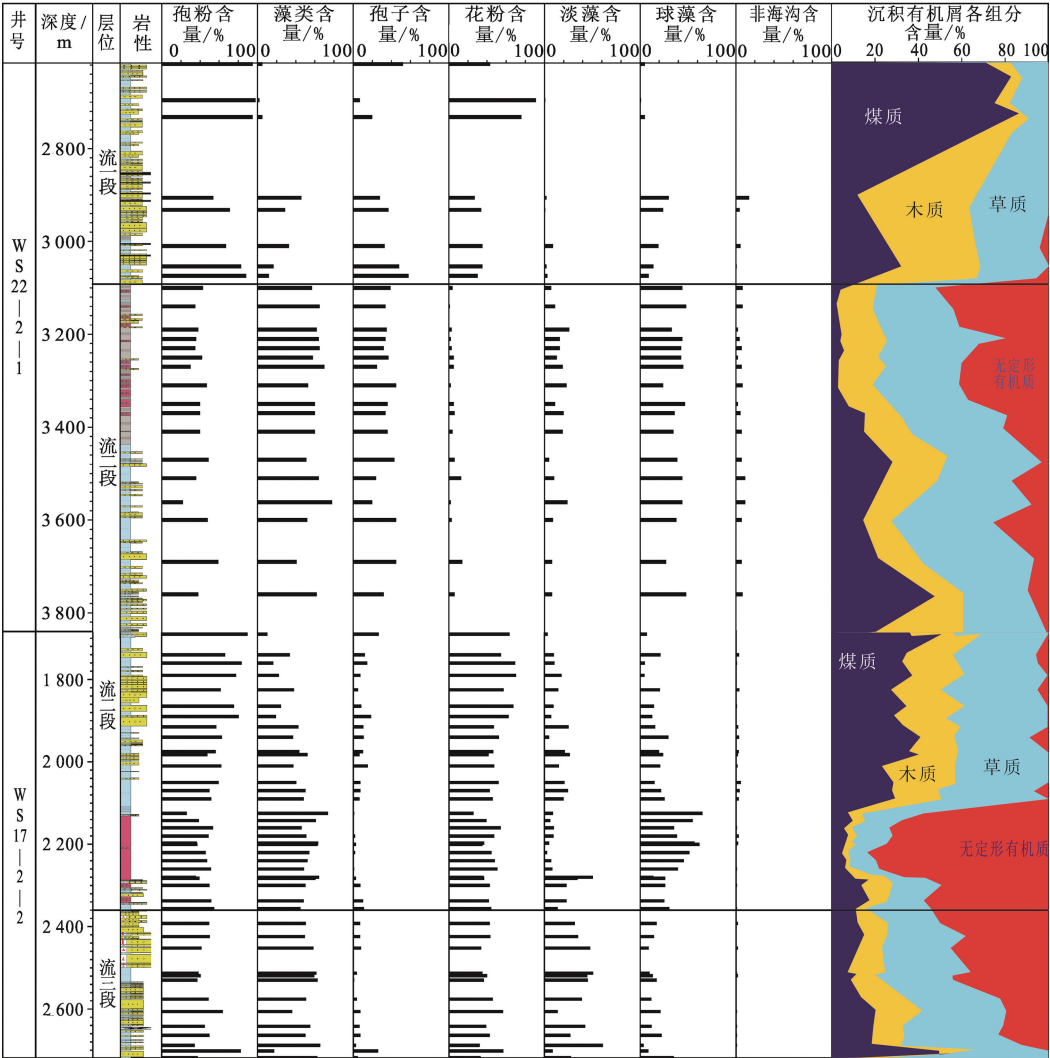


图 3 乌石凹陷流沙港组烃源岩孢粉相图

Fig.3 Palynofacies diagram of source rocks of Liushanggang Formation in Wushi Depression

流二段中部和顶底油页岩层段的孢粉相特征有一定差异。流二段顶底油页岩层段的沉积有机屑中无定形有机质含量为各层段最高,孢藻组合中浮游藻类含量也为各层段最高值。流二段中部泥岩则以煤质、木质和壳质为主,无定形有机质含量急剧下降。孢藻组合中代表陆源有机质输入的孢粉含量明显增加。

流一段有机屑组成以煤质、降解木质和壳质含

量占优势,其中煤质含量最高,平均含量达 51.54%。无定形有机质含量非常低,平均值只有 0.47%。孢藻组合中浮游藻类含量(平均为 27.91%)也是在各层段中最少。

总的来看(图 3),代表水生生物有机质输入的无定形有机质和浮游藻类的含量有着相同的变化趋势。流三段到流二段底部油页岩段,随着浮游藻类含量的增多,无定形体含量亦逐渐增加,到流二段底

部油页岩段,无定型体的含量达到顶峰,最大值为83.61%。流二段中部泥岩段浮游藻类的含量大大降低,无定型体含量随之突降,含量最低为0。之后,浮游藻类含量和无定形体含量又同步升高,在流二段顶部达到又一个高值。从流一段开始浮游藻类含量又开始降低,无定形体含量也骤降,仅为零星出现。与此同时,代表陆相高等植物输入的煤质、木质和壳质含量则表现为完全相反的变化趋势。

3 讨论

3.1 有机质来源

在A-P-E图式(图4)中,3个角端分别表示相应的三类有机屑组分的最高值(100%)。A代表无定形有机质;P代表木质和煤质植屑及类似组分;E代表壳质植屑和孢质有机质及类似组分。图中P端到A端的变化反映水生植物源有机质发育;P端到E端的变化反映物源区距离增加;E端到A端的变化反映从氧化到还原的变化^[26]。由此可见,该图的3个端点分别代表沉积有机质物源性质及其与沉积地点的距离,以及有机质堆积、保存的条件。

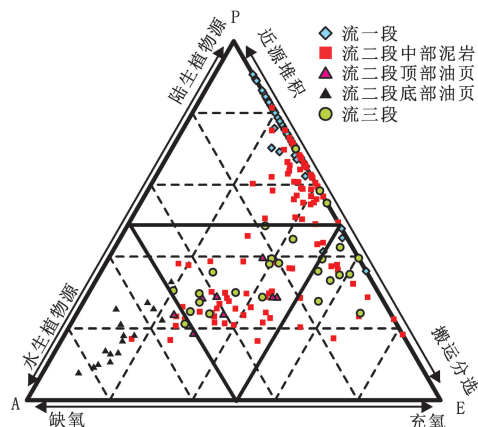


图4 乌石凹陷烃源岩沉积有机屑组分A-P-E综合图式

Fig. 4 A-P-E triangular plot of sedimentary organic detritus of source rocks in Wushi Depression

流沙港组沉积有机屑在不同段显示了不一样的构成特征,表明其有机母源和沉积环境存在差异。流三段烃源岩样品主要分布在中间位置,也有相当部分分布在靠近P-E边线附近,反映水生藻类与陆源高等植物都发育,且陆源高等植物略占优势的混合生源。流二段的数据点在A-P-E图式上显示出3个不同的点群,即近A端、中间区和靠近P端的P-E边线附近。底部油页岩段主要分布于近A端、顶部油页岩主要分布于中间区,显示了油页岩的形成主要与水生藻类有机质输入和缺氧条件的相关

性。流二段中部泥岩分布与流三段相似,但有相当样品在靠近P端的P-E边线附近,反映了从混源到高等植物源为主的特征。流一段样品点分布在P-E边线靠近P端区域,有机屑均以煤质和木质屑为主,指示了有机质物源为近源陆生植物。从有机屑组合特征来看流二段油页岩特别是下段油页岩具有烃源岩形成最有利的条件,流三段和流二段泥岩次之,流一段最差。

3.2 烃源岩形成环境

本次分析的大多数样品中含有较丰富的有机壁微体植物化石,浮游藻类在孢粉、藻类组合中占一定比例。浮游藻类中既有如盘星藻、葡萄藻等淡水绿藻,也有百色藻为代表的咸水非海相沟鞭藻,尚有包含光面或粒面的反映微咸水湖泊条件的球藻类。这些浮游藻类都是中国东部包括近海新生代含油气盆地湖相沉积地层中的常见类型^[15],因此根据浮游藻类类型确定本次分析涉及的地层均形成于湖相沉积环境。

能较好反映水体盐度的指标是淡水绿藻、非海相沟鞭藻和球藻类的含量变化。从本次分析结果中的浮游藻类含量及纵向变化看,在流二段顶部和底部油页岩层段球藻最为发育,淡水绿藻和非海相沟鞭藻较少。由此可见,乌石凹陷流沙港组烃源岩形成时期的湖泊为具有一定矿化度的微咸水湖至半咸水湖。湖水盐度由下而上经历了升高降低再升高的过程,油页岩的发育与湖水盐度升高期相对应。

沉积记录中的浮游藻类化石较高丰度是水体富营养高生产力和浮游植物繁盛的重要标志。在所分析的井中,流三段至流二段浮游藻类含量较高,只在流二段中部略有降低,而流一段浮游藻类含量较低到几乎消失。可以推断,乌石凹陷流三段至流二段形成时期古湖泊生产力始终较高,流一段形成时期生产力明显变低。

浮游藻类含量高低主要反映水体生产力特征,而无定形有机质含量受制于水体生产力和贫氧的水底环境^[7]。无定形有机质的高含量不仅反映高生产力,而且指示水体底部因水体分层而造成的贫氧环境。从有机屑组分纵向分布特征来看(图3),流三段无定形有机质含量中等,表明其沉积时具有还原的底水条件。流二段无定形有机质含量具有明显的三分特性,其底部油页岩和顶部油页岩含量明显偏高,而中部泥岩段偏低,表明在流二段沉积时期水体逐渐变深,湖底形成了利于无定形有机质保存的缺氧环境,形成了富无定形有机质沉积层。现存的富无定形有机质沉积层是该地区较大深水湖泊存在

的标志;特别是在其沉积早期和晚期应是湖泊发育的两个鼎盛期,对应形成了上下两套油页岩。到流一段中无定形有机质的含量急剧降低。流二段的上述深水湖标志至流一段消失殆尽,表明从流一段形成初期起,沉积环境有了很大改变,湖泊收缩,水体变浅,湖底贫氧环境被破坏。结合生物标志化合物的研究,流沙港组烃源岩姥鲛烷与植烷比值较高。根据姥植比判断,流一段半数以上样品 Pr/Ph 值为 0.8~2.8,表明沉积介质属于还原至弱氧化环境;流二段烃源岩、流二段油页岩及流三段烃源岩沉积介质属于还原环境。流沙港组烃源岩除流一段偏氧化环境外,流二段及流三段烃源岩沉积时总体具有缺氧还原环境的沉积条件。

3.3 生烃潜力评价

沉积有机屑构成可以反映烃源岩的有机质母源和沉积环境特征,而有机质母源和沉积环境特征与烃源岩的各类地球化学参数紧密联系,因此将烃源岩沉积有机屑各组分含量与有机碳和热解参数进行

对比,探讨它们之间的相关性。

沉积有机屑各组分相对含量与有机碳含量(TOC)和热解生烃潜量(S_1+S_2)相关图(图 5,6)中可以看出,有机碳含量和热解生烃潜量总体与无定形有机质含量呈正相关,与煤质、木质和草质含量呈负相关。这表明乌石凹陷流沙港组烃源岩高等植物有机质输入所占的比例越大有机质的丰度越低,烃源岩有机质的丰度主要受水生植物有机质输入控制,流二段油页岩水生植物有机质所占的比重大,因而其有机质的丰度最高。

从沉积有机屑各组分相对含量与烃源岩氢指数(I_H)相关图(图 7)中可以看出,代表有机质类型的氢指数与无定形有机质含量也呈明显的正相关,与煤质、木质和草质含量呈负相关。同样表明乌石凹陷流沙港组烃源岩高等植物有机质输入所占的比例越大有机质的类型越差,烃源岩有机质的类型也主要是受水生植物有机质输入控制,水生植物有机质输入比重最大的流二段油页岩有机质类型最好。

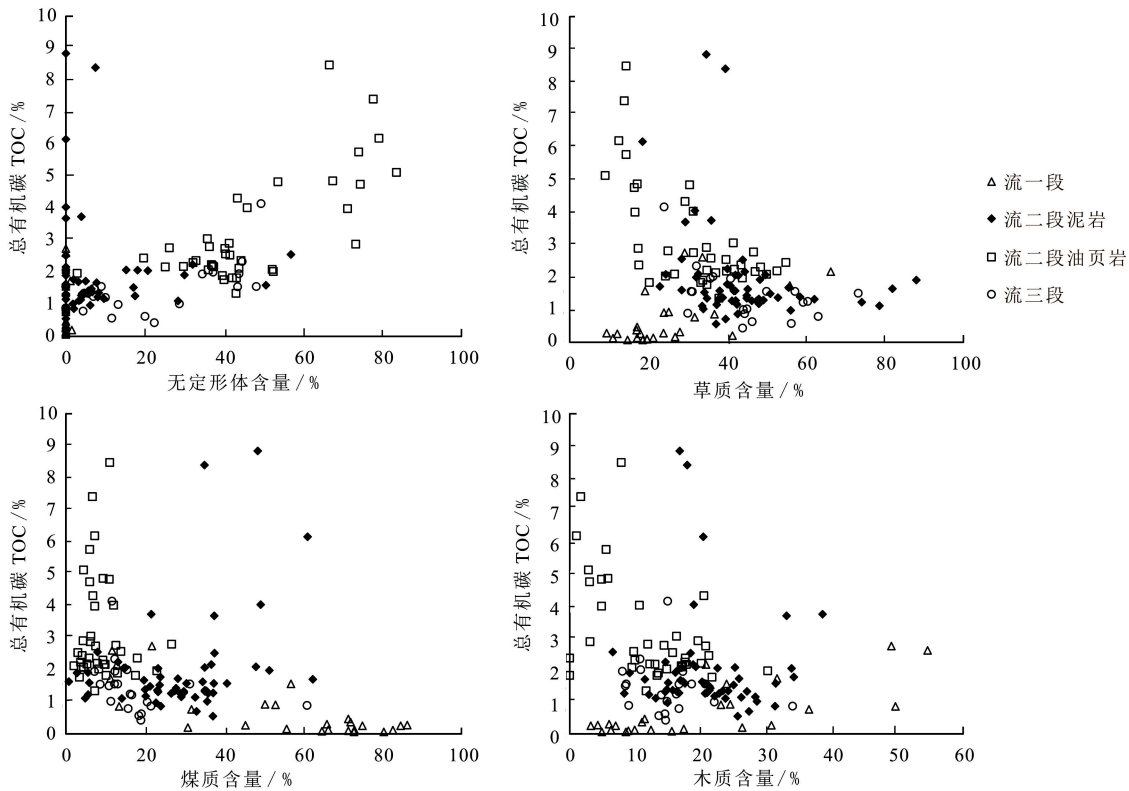


图 5 沉积有机屑各组分与 TOC 关系

Fig. 5 Relationship diagrams of sedimentary organic detritus and TOC

沉积有机屑构成可以直接用以进行烃源岩评价。总的来说,具有较丰富无定形有机质的流二段油页岩及部分流三段烃源岩有机质丰度高,类型好,生烃潜力大;流二段中部泥岩层段生烃潜力处于中等水平,虽然部分碳质泥岩样品显示了异常高的总

有机碳含量和 S_1+S_2 值,但是无定形有机质含量甚微,氢指数值比较低,这部分样品孢藻组合以孢粉占绝对优势,浮游藻类含量较低,有机质类型较差;流一段几乎不含无定形有机质,总有机碳含量、 I_H 和 S_1+S_2 值也比较低,生烃潜力最差。

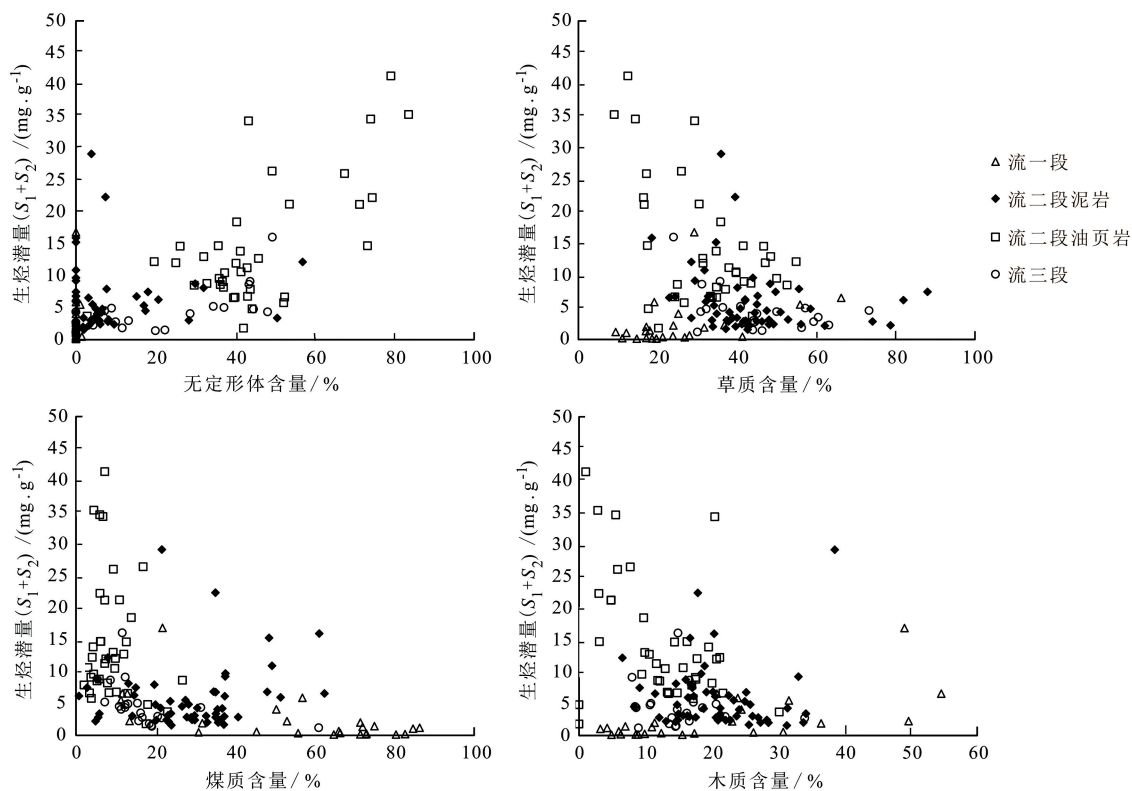


图 6 沉积有机屑各组分与 (S_1+S_2) 关系

Fig. 6 Relationship diagrams of sedimentary organic detritus and S_1+S_2

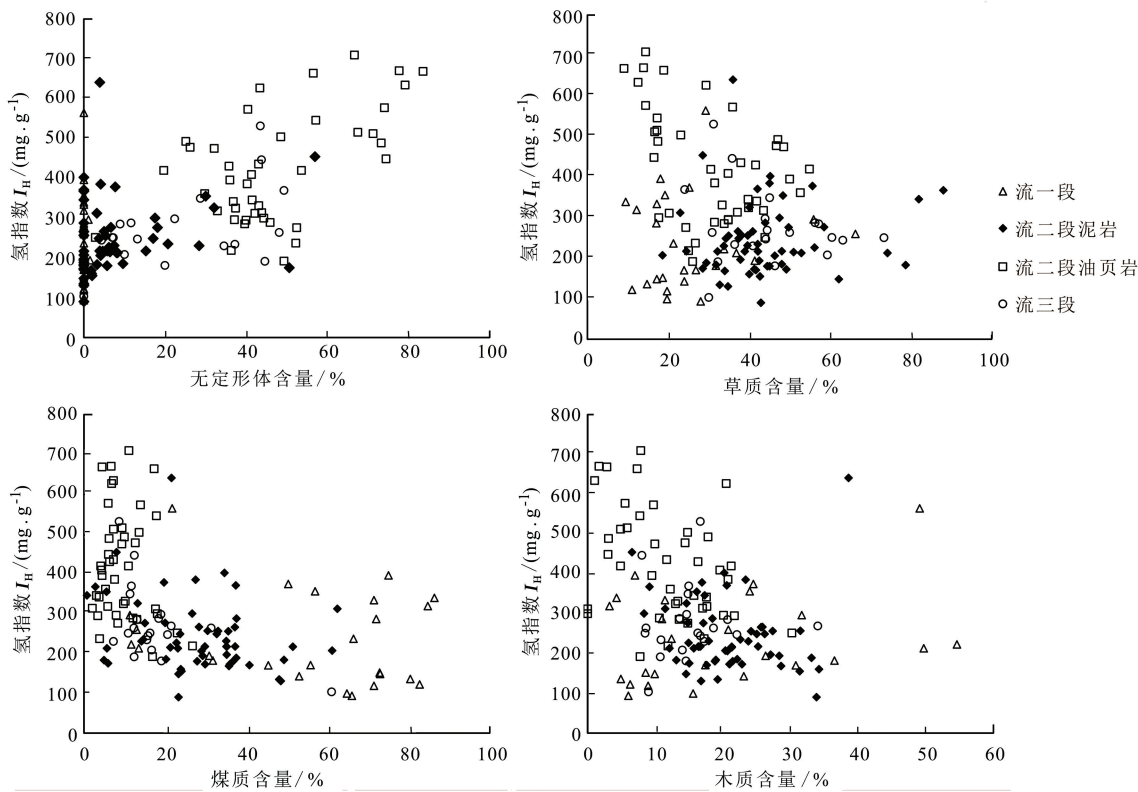


图 7 沉积有机屑各组分与 I_H 关系

Fig. 7 Relationship diagrams of sedimentary organic detritus and I_H

4 结 论

(1) 乌石凹陷流沙港组烃源岩孢粉相构成在纵向上具有明显的演变规律。可以分为流三段泥岩、流二段下油页岩、流二段中部泥岩、流二段上油页岩和流一段泥岩5种组合类型。流二段油页岩中孢粉含量低,藻类和无定形有机碎屑含量高;流三段和流二段泥岩中孢粉含量较高,藻类和无定形有机碎屑含量中等;流一段泥岩孢粉含量高,藻类和无定形有机碎屑含量很低。

(2) 乌石凹陷流沙港组烃源岩总体上显示水生藻类与陆源高等植物的混合生源。流二段油页岩有机母源更富含水生藻类,流三段和流二段泥岩为典型的混合生源,而流一段泥岩主要有机质主要来源于近源陆生植物。乌石凹陷流沙港组烃源岩形成于具有一定矿化度的微咸水湖至半咸水湖。特别是流二段油页岩沉积时期是湖泊发育的两个鼎盛期,水体一直保持着较高的生产力,具有有机质保存的缺氧环境,是乌石凹陷优质烃源岩形成的主要时期。

(3) 乌石凹陷烃源岩孢粉相的构成与有机质的丰度和类型明显相关,特别是无定形有机质的含量越高烃源岩的有机质的丰度越高,有机质的类型越偏向腐泥型,烃源岩的生烃潜力越大。孢粉相分析是研究烃源岩有机质来源、形成环境和进行生烃潜力评价的有效手段。

参考文献:

- [1] COMBAZ A. Les palynofacies[J]. *Revue de Micropaléontologie*, 1964,7(3):205-218.
- [2] DURAND B. Sedimentary organic matter and kerogen. Definition and quantitative importance of kerogen[M]//DURAND B. Kerogen: Insoluble organic matter from sedimentary rocks. Paris: Editions Technip, 1980:13-34.
- [3] 王开发, 吴国瑄. 孢粉相及其应用[J]. *微体古生物学报*, 1989,6(1):103-110.
WANG Kaifa, WU Guoxuan. Palynofacies and its application[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 1989,6(1):103-110.
- [4] TYSON R V. Sedimentary organic matter: organic facies and palynofacies [M]. London: Chapman and Hall, 1995.
- [5] BATTEN D J. Palynofacies and palaeoenvironmental interpretation [C]//JANSONIUS J, MCGREGOR D C. Palynology, principles and application. Dallas: AASP Foundation, 1996,3:1011-1064.
- [6] BATTEN D J. Identification of amorphous sedimentary or-

ganic matter by transmitted light microscopy[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1983,12(1):275-287.

- [7] SUMMERHAYES C P. Organic-rich Cretaceous sediments from the North Atlantic[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1987,26(1):301-316.
- [8] TYSON R V. The genesis and palynofacies characteristics of marine petroleum source rocks[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1987,26(1):47-67.
- [9] BATTEN D J. Use of palynologic assemblage-types in Wealden correlation[J]. *Palaeontology*, 1973,16(1):1-40.
- [10] BATTEN D J. Palynofacies, palaeoenvironments and petroleum[J]. *Journal of Micropalaeontology*, 1982,1(1):107-114.
- [11] FISHER M J. Kerogen distribution and depositional environments in the Middle Jurassic of Yorkshire UK[C]. Lucknow: Proceedings of the 4th International Palynological Conference (Luck now), 1980,2:574-580.
- [12] NICHOLS G, JONES T. Fusain in Carboniferous shallow marine sediments, Donegal, Ireland: the sedimentological effects of wildfire[J]. *Sedimentology*, 1992,39(3):487-502.
- [13] OBOH F E. Multivariate statistical analyses of palynofacies from the middle Miocene of the Niger Delta and their environmental significance[J]. *Palaaios*, 1992,7(6):559-573.
- [14] OBOH F E. Middle Miocene palaeoenvironments of the Niger Delta [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1992,92(1):55-84.
- [15] 吴国瑄, 朱伟林, 黄正吉. 湖相沉积浮游藻类及有机质类型与烃源研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 1998,26(2):176-179.
WU Guoxuan, ZHU Weilin, HUANG Zhengji. Research on phytoplankton and organic matter in the Lacustrine sediments and hydrocarbon source conditions[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 1998,26(2):176-179.
- [16] 徐金鲤, 祝幼华. 微体浮游植物化石在古湖泊研究中的应用[M]//汪品先, 刘传联. 含油盆地古湖泊学研究方法. 北京: 海洋出版社, 1993:117-191.
- [17] 黄第藩, 李晋超, 张大江. 干酪根的类型及其分类参数的有效性、局限性和相关性[J]. *沉积学报*, 1984,2(3):18-33.
HUANG Difan, LI Jinchao, ZHANG Dajiang. Kerogen types and study on effectiveness, limitation and interrelation of their identification parameters[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1984,2(3):18-33.

- [18] 王开发, 吴国璋. 中国东部第三系含油盆地孢粉相与孢粉颜色研究[M]. 贵阳: 贵州人民出版社, 1989: 54-114.
- [19] 朱浩然, 曾昭琪, 张忠英. 江苏北部下第三系戴南组的盘星藻化石及其环境的初步分析[J]. 古生物学报, 1978, 17(3): 233-244.
ZHU Haoran, ZENG Zhaoqi, ZHANG Zhongying. Fossil Pediastrum algae from the Dainan Formation (Lower Tertiary) of northern Jiangsu with note on their sedimentary conditions[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 1978, 17(3): 233-244.
- [20] 钱泽书, 陈永祥, 何承全. 苏北东台坳陷古新世至始新世非海相微体浮游藻类[J]. 古生物学报, 1986, 25(1): 17-29.
QIAN Zeshu, CHEN Yongxiang, HE Chengquan. Palaeocene-eocene non-marine microphytoplankton from Dongtai Depression, northern Jiangsu[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 1986, 25(1): 17-29.
- [21] 万重芳, 茅绍智. 江汉盆地晚白垩世—早第三纪沟鞭、疑源类及其在沉积环境中的意义[J]. 石油勘探与开发, 1987, 14(6): 31-37.
WAN Chongfang, MAO Shaozhi. The Upper Cretaceous-Early Tertiary dinoflagellates and acritarchs of Jianghan Basin, and their significance in reconstruction of depositional environments[J]. Petroleum Exploration and Development, 1987, 14(6): 31-37.
- [22] 张森, 陈清华, 徐金鲤. 东营凹陷沙河街组四段孢粉相特征及其生烃潜力[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2011, 35(6): 28-35.
ZHANG Miao, CHEN Qinghua, XU Jinli. Characteristics of palynofacies and its hydrocarbon generation potential of member 4 of Shahejie formation in Dongying depression[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Sciences), 2011, 35(6): 28-35.
- [23] 孙伟, 樊太亮, 赵志刚, 等. 乌石凹陷古近系层序地层特征及充填演化[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2008, 38(2): 233-239.
SUN Wei, FAN Tailiang, ZHAO Zhigang, et al. Basin filling features and evolution of sequence stratigraphy of Paleogene in Wushi Sag[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2008, 38(2): 233-239.
- [24] 朱继田, 郭明刚, 刘志辉. 北部湾盆地乌石凹陷勘探前景分析[J]. 西部探矿工程, 2010, 22(12): 99-101.
ZHU Jitian, GUO Minggang, LIU Zhihui. Exploration prospect in Wushi sag, Beibuwan Basin[J]. West-China Exploration Engineering, 2010, 22(12): 99-101.
- [25] 李建国, BATTEN D J. 孢粉相: 原理及方法[J]. 古生物学报, 2005, 44(1): 138-156.
LI Jianguo, BATTEN D J. Palynofacies: principles and methods[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 2005, 44(1): 138-156.
- [26] TYSON R V. Palynofacies analysis[M]//JENKINS J M. Applied micropalaeontology. Dordrecht: Springer Science + Business Media BV Springer Netherlands, 1993: 153-191.

(编辑 徐会永)