

文章编号: 1000-0550(2010)06-1108-09

浙闽地区下白垩统黑色泥岩沉积环境初探: 微体古生物与有机地球化学证据^①

谢小敏^{1,2} 胡文瑄² 曹剑² 姚素平² 边立曾² 高玉巧²

(1. 中国石油化工股份有限公司无锡石油地质研究所 江苏无锡 214151; 2. 南京大学地球科学系 南京 210093)

摘要 在中国东南沿海浙闽地区的中生代火山岩分布区,广泛发育有中生代沉积岩系,关于这套沉积岩是否受到海水作用影响,目前还存在争论。通过对福建下白垩统坂头组(K_1b)、浙江地区为寿昌组(K_1s)和馆头组(K_1g)地层进行系统观察及采样,并进行详细的古生物化石观察及有机地球化学研究,发现该区沉积岩中除陆相高等植物之外,还见过渡相的线叶植物和海相红藻和褐藻化石;同时某些有机地球化学特征亦显示其具有一定的海相沉积特征,如普遍存在较高的伽马蜡烷含量,伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷比值较低(0.11~0.18,平均值0.14),以及 C_{30} 重排藿烷检出。因此,从古生物学与有机地球化学特征来看,该区的确受到海侵作用影响,结合地质背景,推测海侵事件主要受古太平洋洋域的影响。

关键词 浙闽地区 下白垩统 有机地球化学 海相化石 沉积环境

第一作者简介 谢小敏 女 1984年出生 硕士 油气地球化学 E-mail: xiexm0842@gmail.com

中图分类号 P534.53 **文献标识码** A

浙闽地区是中新生代火山岩大面积分布地区,因此前人对浙闽地区的研究多从火成岩入手,讨论许多重要科学问题^[1~4]等,而对火成岩中的沉积岩层往往开展工作较少。事实上,在广袤的中生代火成岩覆盖区,沉积岩层分布亦比较广泛,如下白垩统,与火山岩呈互层、夹层共生有厚度不等的暗色沉积岩,其中有的大套黑色泥岩发育,前人对这套沉积岩的研究主要集中于进行古生物时代划分^[5~8]。

关于其沉积环境,一致认为是内陆山间湖盆沉积^[9~11]。徐北煤^[12]对浙江象山石浦地区下白垩统石浦群地层进行详细的古生物及地球化学分析,并结合台湾地区的地质,认为浙闽地区受到不同程度海水入侵的影响,自台湾海峡向陆上,沉积环境存在海相、海陆过渡、陆相的过渡演化。因此,该地区下白垩统沉积岩是否曾受到海水作用的影响?是否存在这样一个从海相至陆相的过渡演化?这是研究该地区下白垩统沉积环境的一个基础地质问题,本研究试图在对浙闽地区下白垩统沉积岩的分布及其发育特征详细研究的基础上,期望能从古生物与有机地球化学特征来探讨该区的沉积环境,为今后的研究提供新的地质资料。

1 地质背景及地层分布

浙闽地区北临大别印支期造山带,南为东南亚陆缘岛弧带,西接北越马江(松马)印支期造山带、东滨太平洋—菲律宾大洋板块^[13]。侏罗纪—白垩纪前主要受特提斯构造域和印支期造山的影响,白垩纪以来则主要受太平洋构造作用的制约,陆内构造、岩浆作用也较发育,形成各具特色的中小型盆地^[14],下白垩统沉积岩也主要分布在这些中小型盆地中。

由于该地区下白垩统沉积地层类型比较复杂,岩性、岩相及厚度多变,古生物化石分布不均,因此,对该地区的地层对比存在分歧与争议^[8,9,15~18]。本次工作通过大量的野外剖面实际观测研究,并经与地质队老专家交流(徐克定、梁诗经等),对浙闽地区的地层划分方案参考丁保良等^[19]的划分标准,并进行了一定的修改(表1)。

总体上,江山—绍兴断裂和政和—大埔断裂将浙闽地区分成东、西两大部分(表1)。西部地区,早白垩世最早期火山活动开始,但仍以沉积岩为主,到黄尖组时期,火山活动极为频繁。寿昌组(福建坂头组)火山活动衰竭,处于相对平静阶段,沉积岩较发

^①中国石油化工股份有限公司海相油气前瞻性研究项目(中国东南部海相盆地差异演化与油气潜力研究)、国家自然科学基金项目(地质环境与生物演化与海相优质烃源岩形成)联合资助。

收稿日期: 2009-06-20; 收修改稿日期: 2009-11-20

育。到下白垩统中晚期,西部地区火山活动基本结束,普遍缺失馆头组;东部地区火山活动一度活跃,馆头组有火山岩夹层,沿海地区馆头组火山岩明显增多。闽东石帽山群上下主要由火山岩组成^[19]。由此可见,沉积岩主要集中在早白垩世中晚期(浙江寿昌组—馆头组,福建坂头组)地层。同时在东、西部不同地区,由于火山活动结束时间不同,西部地区的火山活动结束较早,沉积岩发育较厚,东部地区火山活动延续时间较长,整体以火山碎屑岩为主。

表 1 浙闽地区下白垩统地层划分对比
(参考丁保良等, 1989; 修改)

Table 1 Stratigraphic classification and correlation of lower Cretaceous in Zhejiang and Fujian provinces
(after Ding Baoliang, et al. 1989)

地区	闽西	浙西	浙东	闽东
上白垩统	沙县组	衢江群1-2段	方岩组	
下白垩统	禾口组	建德群	朝川组	石帽山群
	吉山组		馆头组	
	坂头组	横山组	九里坪组	小溪组
	南园组	寿昌组	茶湾组	
	长林组	黄尖组	西山头组	南园组
		劳村组	高坞组	
			大爽组	长林组
中下侏罗统	漳平组	渔山尖组	毛弄组	梨山组

2 样品与实验

样品主要来自于福建地区坂头组,浙江地区寿昌组、馆头组及象山石浦群(与馆头组层位相当^[12])地层,详细采样地点及采样情况见表 2。其中福建地区坂头组主要分布在闽西永安盆地、举岚盆地及崇安盆

地,整体岩性以黑色泥岩及砂岩、粉砂岩为主,黑色泥岩在崇安盆地发育最好(图 1a),颜色最深、污手,厚度最大。浙江地区寿昌组主要分布在浙江西部地区,黑色泥岩发育,向西泥岩变薄(图 1b);馆头组主要分布在浙江中西部地区,其中黑色泥岩发育较少,以砂岩为主,且地层多受到火山作用影响,如浙江宁溪长潭盆地(图 1c);石浦群分布在浙江象山石浦地区,岩性以砂岩、灰岩为主,黑色泥岩发育,但由于火山岩脉发育,大量灰岩、泥灰岩已强烈的硅化蚀变(图 1d)。

野外样品首先进行薄片磨制,黑色泥岩样品在中科院南京古生物研究所实验中心进行镜解,制成薄片,以便古生物观察鉴定。显微镜系统观察后,精选黑色泥岩样品在中国石油化工集团无锡石油地质研究所实验中心进行有机地球化学实验分析。

3 实验结果及讨论

3.1 古生物特征

精细的薄片观测及古生物镜鉴,发现本区样品中含有大量高等植物碎片(图 2a, b),孢子,以及生长在过渡相环境的线叶植物(图 2c),显示复杂的沉积环境,如滨湖等。此外,更重要的发现是,在福建地区坂头组黑色泥岩中存在底栖宏观藻类,包括红藻和褐藻(图 2d, e, f),红藻具有明显的髓部,褐藻具有双层结构。红藻和褐藻一般生活在海相环境中,其中红藻只有少数种属生活在高山湍急流水中,其沉积以碎屑状散布为特征^[20]。可见,该区底栖宏观藻类反映的是海相沉积特征,说明该地区具有海相沉积,曾受到过海水作用影响。

实际上,早在 1977 年,张弥漫等^[21]就在浙江下白垩统中发现过指示海相环境的浙东鲕鲚鱼化石。徐北煤^[12]在对浙江地区的工作中,在浙江象山石浦地区石浦群中发现咸水、半咸水生物—龙介科虫管化石,都曾暗示该区具有海相沉积层。

表 2 浙闽地区野外工作剖面基本信息及样品分析情况

Table 2 Basic information of the outcrops and the analyzed samples in Zhejiang and Fujian provinces

盆地名称	剖面位置	剖面起点 GPS	岩石地层	采样情况	有机地化分析
福建永安盆地	永安吉山村	N25°57'0", E117°19'29"	坂头组	61 件	3 件
福建举岚盆地	泰宁举岚	N26°41'58", E116°56'33"	坂头组	7 件	1 件
福建崇安盆地	武夷山	N27°39'21", E117°59'28"	坂头组	36 件	3 件
浙江老竹盆地	丽水老竹	N28°30'19", E119°44'36"	馆头组	6 件	1 件
浙江湖山盆地	遂昌湖山	N28°29'26", E121°1'53"	馆头组	15 件	1 件
浙江宁溪盆地	台州宁溪	N28°35'15", E119°1'47"	馆头组	11 件	1 件
浙江象山石浦	象山石浦	N29°14'8", E121°58'2"	石浦群	12 件	1 件



图1 浙闽地区下白垩统地层野外照片。

a. 福建崇安盆地武夷山下白垩统坂头组(K_1b)黑色泥岩; b. 浙江地区建德盆地寿昌中学旁寿昌组(K_1s)杂色泥岩; c. 浙江宁溪长潭盆地馆头组(K_1g)下部火山岩脉发育; d. 浙江象山石浦地区石浦群(K_1sh)中段硅化泥灰岩与砂岩互层

Fig. 1 Photographs of lower Cretaceous strata in Zhejiang and Fujian provinces

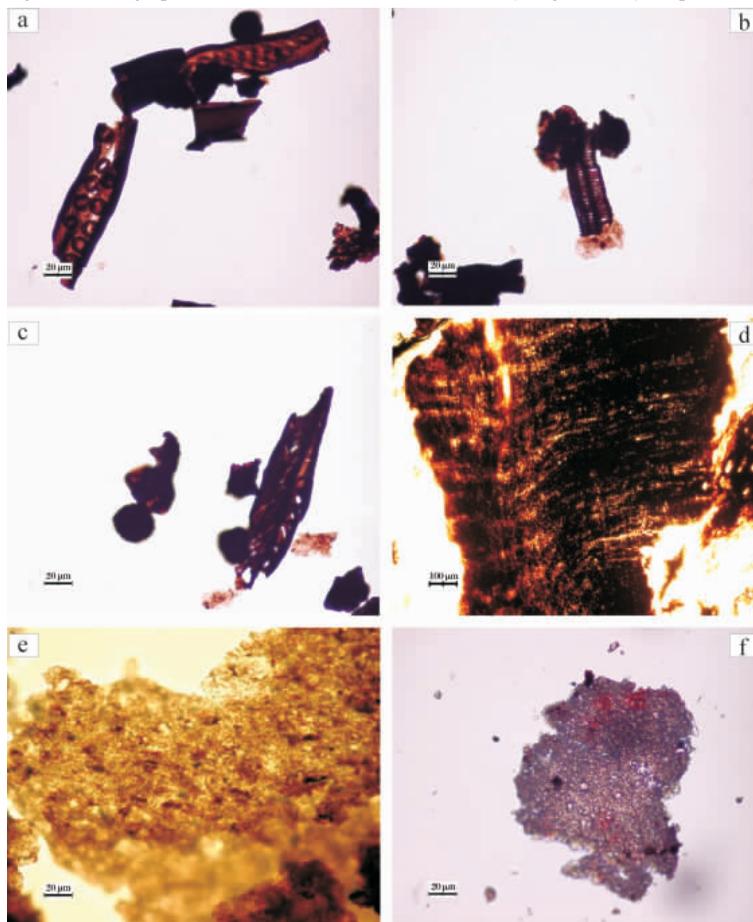


图2 浙闽地区下白垩统地层微体化石照片

a. Wy-11 高等植物 福建崇安盆地武夷山坂头组(K_1b); b. Wy-11 高等植物 福建崇安盆地武夷山坂头组(K_1b); c. Wy-15 线叶植物, 福建崇安盆地武夷山坂头组(K_1b); d. K1b-26 红藻 福建永安盆地吉山村坂头组(K_1b); e. K1bn-15 褐藻 福建永安盆地吉山村坂头组(K_1b); f. Wy-23 红藻 福建崇安盆地武夷山坂头组(K_1b)

Fig. 2 The photomicrographs occurrence of microfossils of samples from lower Cretaceous strata in Zhejiang and Fujian provinces

以上可见, 本区湖盆的沉积过程中, 的确受到过海侵作用的影响, 结合本期黑色泥岩在浙江寿昌组, 馆头组均有分布的事实, 可以推测这种影响可能是广泛的。

3.2 生物标志化合物特征

(1) 链烷烃

如表 3 浙闽地区下白垩统暗色泥岩的正构烷烃碳数分布范围 $C_{13} \sim C_{40}$, 主要为单峰型, 主峰碳以 C_{16} 或 C_{18} 为主, 反映有机质来源主要为低等水生藻类^[22~24]。此外, 福建坂头村坂头组的 1 件泥岩样品其主峰碳为 C_{24} (Bt-9), 武夷山的一个样品 (Wy-8) 为 C_{23} , 浙江宁溪长潭水库馆头组样品 (Ct-9) 和浙江象山石浦石浦群样品 (Xs-1) 主峰碳为 C_{25} , 在一定程度上反映母质来源于沉水和漂浮水生植物。由此可见, 根据有机质的正构烷烃组成特征, 本区泥岩有机质的来源总体上以低等浮游生物为主, 也包括沉水和漂浮水生植物。

表 3 浙闽地区下白垩统黑色泥岩饱和烃色谱参数
Table 3 Saturated hydrocarbon chromatography biomarker parameters of black mudstone in lower Cretaceous in Zhejiang and Fujian provinces

样号	碳数范围	主峰碳	OEP	Pr/nC ₁₇	Ph/nC ₁₈	Pr/Ph
K1b n-1	$C_{13} \sim C_{34}$	C_{16}	0.50	1.15	1.19	0.65
K1b n-9	$C_{14} \sim C_{34}$	C_{18}	0.44	1.08	0.83	0.42
K1b-16	$C_{14} \sim C_{35}$	C_{18}	0.76	1.07	1.38	0.59
Jl-7	$C_{13} \sim C_{38}$	C_{16}	0.99	0.06	0.07	0.90
Wy-8	$C_{14} \sim C_{40}$	C_{23}	1.02	0.08	0.14	0.60
Wy-29	$C_{14} \sim C_{36}$	C_{18}	0.53	1.07	0.94	0.44
Wy-41	$C_{14} \sim C_{36}$	C_{18}	0.28	1.03	0.48	0.51
Ct-9	$C_{14} \sim C_{38}$	C_{25}	1.04	0.95	1.08	0.30
Lsw-27	$C_{14} \sim C_{40}$	C_{18}	0.71	0.76	0.83	0.35
LS-7	$C_{14} \sim C_{38}$	C_{18}	0.69	0.57	0.79	0.20
Xs-1	$C_{14} \sim C_{40}$	C_{25}	1.19	0.42	0.47	0.45

Pr/Ph 值的高低反映沉积环境的氧化还原性质^[25~26]。一般认为, Pr/Ph < 1 时反映有机质的沉积环境为还原环境, 大于 1 时为氧化环境^[22]。如表 3, 浙闽地区下白垩统暗色泥岩具明显的植烷优势, 其 Pr/Ph 均 < 1, 大部分为 0.2 ~ 0.6 之间, 为强还原环境, 这种情况一般只出现在高盐度沉积环境中^[25, 27, 28], 如咸水湖泊^[29, 30] 或者海相环境。

(2) 甾萜烷

三环萜烷

在本次工作所分析的 12 块样品中, 三环萜烷通常以 C_{21} 或 C_{23} 为主峰, $C_{19} \sim C_{25}$ 三环萜烷相对分布总

体以 C_{19} 、 C_{20} 、 C_{21} (或 C_{19} 、 C_{20} 、 C_{21} 、 C_{23}) 呈上升型为特征(图 3), 反映了湖相沉积的特征^[31]。

伽马蜡烷

浙闽地区样品中均检测出伽马蜡烷, 一般认为高含量的伽马蜡烷是高盐度水体沉积的标志, 许多湖相石油和沥青中, 伽马蜡烷是主要的生物标志化合物, 如美国犹他州的绿河泥灰岩和我国西北地区^[27, 32~37]; 但同时海相烃源岩中也普遍检测出伽马蜡烷^[38, 39]。两者的差异在于, 在 Pr/Ph < 1 的还原沉积环境中, 海相沉积中伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷比值多数较低, < 0.2^[23, 39], 而陆相湖泊相中该比值要高^[40, 41]。本区伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷分布在 0.11 ~ 0.18 范围(表 4), 平均值为 0.14, 与藏北的情况相似^[23]。可见, 根据浙闽地区下白垩统暗色泥岩的伽马蜡烷丰度来看, 这套泥岩具有海相沉积特征。

C_{30} 重排藿烷

在该区样品中均检测出高含量的 C_{30} 重排藿烷, C_{30} 重排藿烷/ C_{30} 藿烷在 0.08 ~ 0.12 范围。曹剑等^[31, 42] 在柴达木盆地北缘地区通过对重排藿烷与藻类含量的对比分析, 指出重排藿烷可以指示底栖宏观红藻, 与该地区红藻化石的发现相一致, 显示海相沉积特征。

甾烷类

本研究过程中检测出的甾烷类化合物主要成分为规则甾烷 ($C_{27} \sim C_{29}$) 和重排甾烷 ($C_{27} \sim C_{29}$), 其次为 $C_{21} \sim C_{22}$ 孕甾烷 和少量 4-甲基甾烷(图 4)。其中规则甾烷呈不对称“V”字型分布, 表现为 $C_{27} > C_{29} > C_{28}$ 的分布特征, 福建坂头组少量样品 (Bt-9, Jl-7, Wy-8) 则表现为 $C_{27} > C_{28} > C_{29}$ (表 4), 代表了低等水生生物, 特别是藻类对有机质母质的影响。这一特征与藏北羌塘盆地晚侏罗世海相油页岩生物标志物特征一致^[43], 说明该套暗色泥岩具有海相沉积特征。

4 关于海侵作用

根据古生物特征和生物标志物地球化学两方面的研究结果, 结合地质背景, 可以基本明确浙闽地区下白垩统暗色岩系的沉积环境属于受海侵影响的湖相沉积。主要证据如下:

古生物特征: 暗色泥岩中除了普遍发现低等水生藻类体, 部分高等植物外, 还普遍发现了典型的海相藻类, 即底栖宏观藻;

有机地球化学研究: 大量生物标志物特征指示还

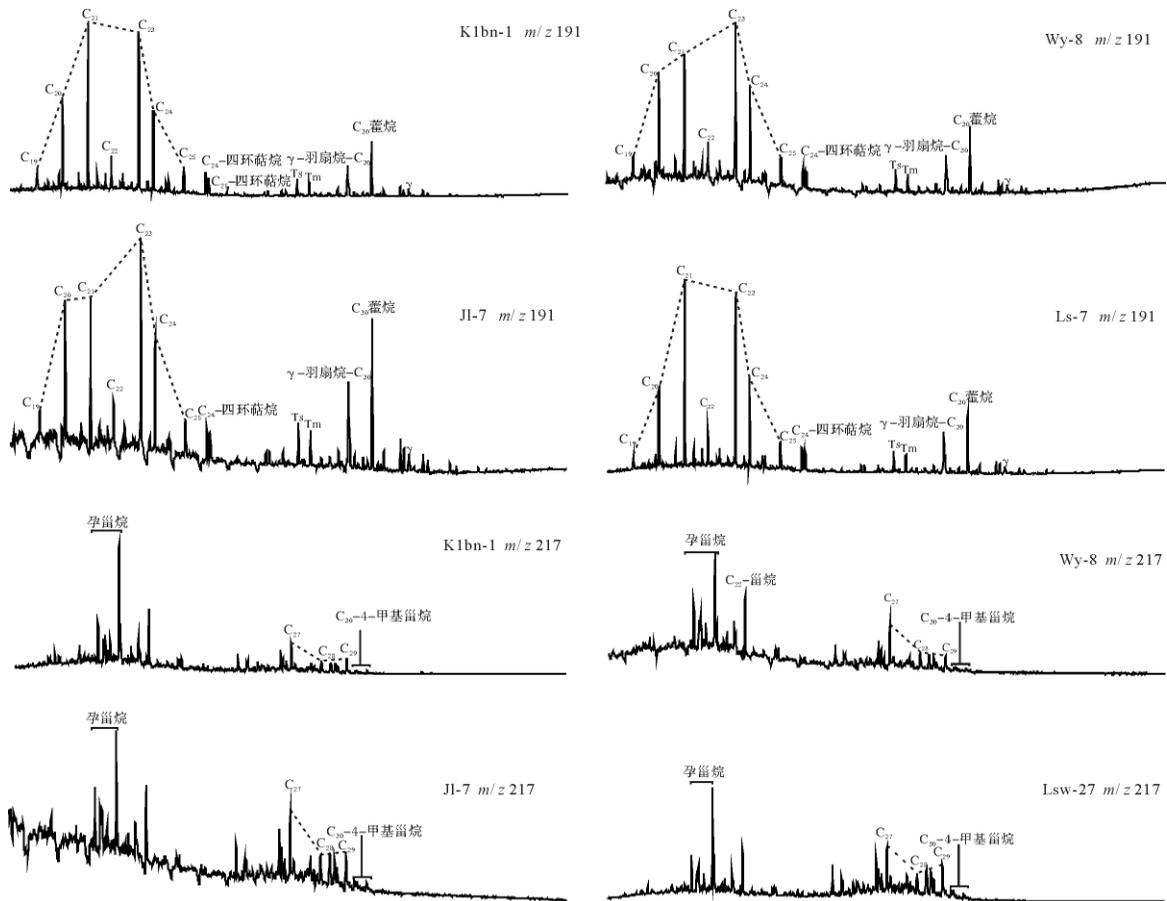


图3 浙闽地区下白垩统暗色泥岩部分样品 m/z 191 色质谱图与 m/z 217 色质谱图

Fig. 3 The biomarker characteristics of black mudstone in lower Cretaceous in Zhejiang and Fujian provinces

表4 浙闽地区下白垩统黑色泥岩的主要生物标志物地球化学特征

Table 4 The main biomarker index of black mudstone in lower Cretaceous in Zhejiang and Fujian provinces

参数	K1bn-1	K1bn-9	K1b-16	Jl-7	Wy-8	Wy-29	Wy-41	Ct-9	Lsw-27	Ls-7	Xs-1
1	0.76	0.64	0.55	0.52	0.69	0.66	0.72	0.67	0.36	0.66	0.11
2	0.25	0.22	0.23	0.18	0.21	0.20	0.22	0.19	0.20	0.19	0.24
3	0.6	0.52	0.61	1.07	0.85	0.52	0.59	0.52	0.52	0.51	0.42
4	1.10	1.00	1.17	0.71	0.72	1.03	1.18	1.14	0.99	1.05	0.51
5	0.43	0.36	0.36	0.37	0.41	0.35	0.37	0.38	0.38	0.39	0.36
6	1.06	1.12	1.19	1.21	1.20	1.16	1.13	1.15	1.54	1.10	1.22
7	0.65	0.58	0.59	0.57	0.58	0.59	0.58	0.67	0.64	0.72	0.76
8	0.08	0.09	0.10	0.10	0.10	0.10	0.08	0.09	0.10	0.09	0.10
9	0.18	0.14	0.15	0.12	0.16	0.13	0.15	0.11	0.12	0.11	0.20
10	2.11	2.04	2.03	1.24	1.39	2.06	2.09	2.04	1.84	2.04	1.29
11	0.28	0.34	0.21	0.12	0.16	0.26	0.29	0.20	0.12	0.20	0.08
12	0.13	0.16	0.10	0.10	0.12	0.13	0.14	0.10	0.07	0.10	0.06
13	0.56	0.56	0.56	0.57	0.61	0.56	0.55	0.55	0.57	0.56	0.55
14	2.46	2.19	1.51	1.10	1.73	1.79	1.92	2.28	1.10	1.95	0.10
15	0.36	0.28	0.37	0.54	0.46	0.30	0.33	0.32	0.33	0.29	0.30
16	2.55	1.84	0.64	1.65	1.88	1.82	1.71	1.72	1.82	1.66	1.21
17	0.86	0.88	0.83	1.03	1.08	1.02	0.80	0.83	0.70	0.96	0.75
18	1.53	1.61	1.37	1.70	2.02	1.86	1.38	1.44	1.26	1.58	0.91
19	0.51	0.50	0.50	0.43	0.45	0.49	0.56	0.50	0.44	0.48	0.45
20	0.35	0.35	0.35	0.38	0.36	0.36	0.32	0.35	0.36	0.36	0.38

1. C_{23} 三环萜烷 / (C_{23} 三环萜烷 + C_{30} 藿烷); 2. 三环萜烷 C_{19}/C_{20} ; 3. 三环萜烷 C_{20}/C_{21} ; 4. 三环萜烷 C_{21}/C_{23} ; 5. C_{24} 四环萜烷 / (C_{24} 四环萜烷 + C_{26} 三环萜烷); 6. Ts/Tm; 7. C_{29} 藿烷 / C_{30} 藿烷; 8. C_{30} 重排藿烷 / C_{30} 藿烷; 9. 伽马蜡烷 / C_{30} H 藿烷; 10. C_{28-25} -降藿烷 / C_{29-25} -降藿烷; 11. C_{28-25} -降藿烷 / C_{30} 藿烷; 12. C_{29-25} -降藿烷 / C_{30} 藿烷; 13. $C_{31}2S/(22S + 22R)$; 14. 孕甾烷 / ($C_{27} + C_{28} + C_{29}$) $\alpha\alpha\alpha$ 20R; 15. $C_{21}\beta\alpha/C_{21}\alpha\beta$; 16. $C_{27}\alpha\alpha\alpha$ 20R / $C_{28}\alpha\alpha\alpha$ 20R; 17. $C_{28}\alpha\alpha\alpha$ 20R / $C_{29}\alpha\alpha\alpha$ 20R; 18. $C_{27}\alpha\alpha\alpha$ 20R / $C_{29}\alpha\alpha\alpha$ 20R; 19. $C_{29}20R / (C_{29}20R + 20S) \alpha\alpha\alpha$; 20. $C_{29}\alpha\beta\beta / (C_{29}\alpha\beta\beta + C_{29}\alpha\alpha\alpha) (R + S)$ 。

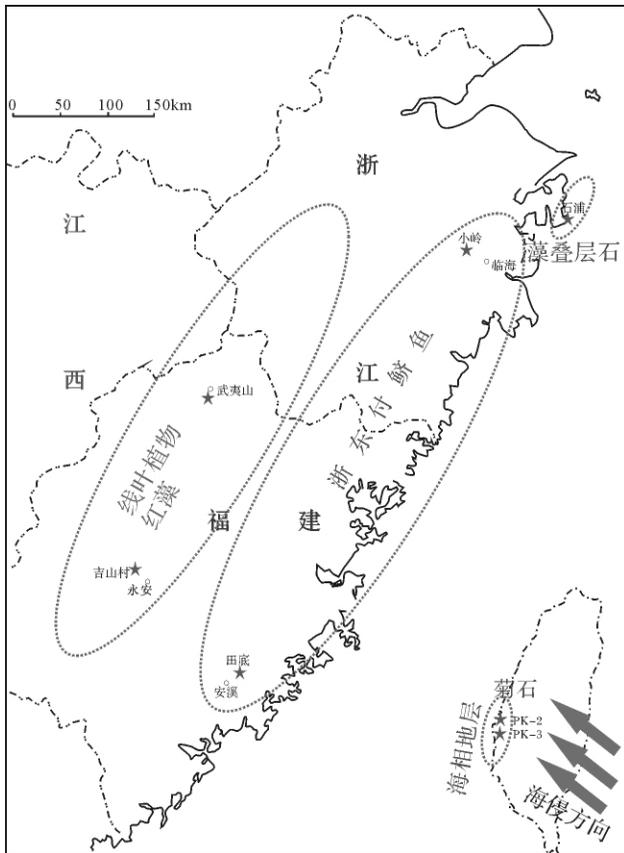


图 4 浙闽地区下白垩统古生物化石分布简图

Fig. 4 Simplified diagram showing fossils distribution of lower Cretaceous in Zhejiang and Fujian provinces

前人研究表明,在我国东部地区,中、新生代可能曾受到过两次海侵作用的影响,一次发生在晚三叠世—早侏罗世,一次即是本次研究的早白垩世^[46]。海相白垩系地层主要见于珠江口盆地^[46, 47]及台湾地区^[48]。关于海相地层形成机制,一种观点认为,以雅鲁藏布江缝合带为遗迹的新特提斯多洋岛在中生代曾向东延伸,经过红河裂谷抵南海地区后分为两支,一支沿中南半岛进入南海南部,另一支经琼州海峡沿现今的南海北部大陆架延伸至台湾西部海域,在南海东北部及台湾地区沉积海相地层^[46],这一分支海泛时期也可能到达福建境内。

根据本次工作,新发现在浙闽地区下白垩统中普遍见海相沉积特征,但这种海相沉积可能并不等同于珠江口和台湾地区的海相沉积,浙闽地区的海相沉积实际上是海侵。徐克定^[49]曾指出浙江地区小岭原始盆地较大,可达到浙江象山石浦地区,盆地在下陷过程中就会受到海水入侵。通过岩石学和古生物上来看(图 4)岩石学上,在福建永安和武夷山地区该套暗色岩系以“砂岩+泥岩”为主,到仙居盆地,馆头组地层发育薄层泥灰岩,在往东到象山石浦地区,见到多套灰黑色泥灰岩,台湾西海岸有典型的早白垩世海相沉积,海相成分从西向东逐渐增加;古生物上,在福建永安和武夷山地区发现了海陆过渡相的线叶植物和红藻,在浙江临海小岭盆地和福建安溪田底等地,发现浙东付鲚鱼^[50],往东石浦地区,见到藻叠层石和龙介科化石^[12],在台湾地区发现有完整的菊石,也说明了海相成分从西向东逐渐增多(图 4)。因此,对于海侵的形成机制,结合区域构造背景,可能主要受太平洋体系域的影响,在正常海平面时,故太平洋难以越过沿脉山系,但在古太平洋海平面上升期间,可能越过沿岸山脉,侵入到浙闽地区(如图 5),沉积灰黑色泥岩。

致谢 感谢南京古生物无锡所唐鹏老师及中国石化无锡石油地质研究所秦建中教授及承秋全老师对本文实验的指导,同时感谢评审老师提出的宝贵意见,衷心感谢!

原环境,以及低等水生藻类和海相底栖宏观藻类有机质生源特征,反映海相和陆相沉积的双重影响。某些生标,如 Pr/Ph 比值较低所反映的强还原环境、 $C_{31} \sim C_{35}$ 藿烷的下降型分布和规则甾烷的 $C_{27} > C_{29} > C_{28}$ 分布特征反映的有机质主要来源于低等水生生物等,可能指示盐湖环境,但根据伽马蜡烷的丰度,以及与香港坪洲岛典型第三系盐湖相泥岩生标组成特征的对比^[44, 45],可知浙闽地区的这套暗色岩系不属于盐湖相沉积。那些可以反映盐湖沉积特征的生标组成实际上主要表明了沉积水体具有一定的盐度,而这正是海水区别于正常湖水的重要特征。

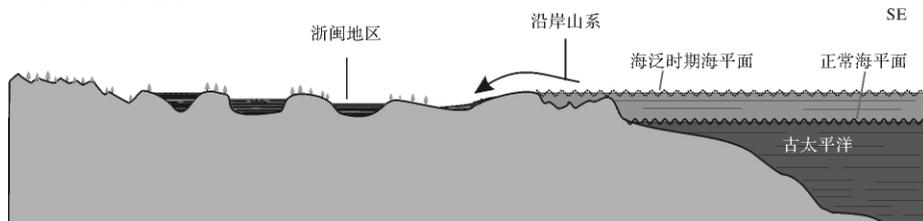


图 5 早白垩世浙闽地区受古太平洋海侵作用模式图

Fig. 5 Model chart of transgression from paleo-pacific in lower Cretaceous, Zhejiang and Fujian provinces

参考文献(References)

- 1 王德滋,周金武,邱检生. 东南沿海早白垩世火山活动中的岩浆混合和壳幔作用证据[J]. 南京大学学报: 地球科学版, 1994, 6(4): 317-385 [Wang Dezi, Zou Jinwu, Qiu Jiansheng. The magma mixing and crust-mantle interaction evidences of early Cretaceous volcanic activity in the southeast coast [J]. Journal of Nanjing University: Earth Science Edition, 1994, 6(4): 317-385]
- 2 周新民,李武显. 中国东南部中生代火成岩成因: 岩石圈消减和玄武岩底侵相结合的模式[J]. 自然科学进展, 2000, 10(3): 240-247 [Zhou Xinmin, Li Wuxian. Origin of Mesozoic igneous rocks in southeastern China: The model of lithosphere subduction and underplating of mafic magma [J]. Progress in Natural Science, 2000, 10(3): 240-247]
- 3 徐夕生,谢昕. 中国东南部晚中生代—新生代玄武岩与壳幔作用[J]. 高校地质学报, 2005, 11(3): 318-334 [Xu Xisheng, Xie Xin. Late Mesozoic-Cenozoic basaltic rocks and crust-mantle interaction, SE China [J]. Geological Journal of China Universities, 2005, 11(3): 318-334]
- 4 舒良树,周新民. 中国东南部晚中生代构造作用[J]. 地质论评, 2002, 48(3): 249-260 [Shu Liangshu, Zhou Xinmin. Late Mesozoic tectonism of Southeast China [J]. Geological Review, 2002, 48(3): 249-260]
- 5 郑芬,黎文本. 福建白垩系孢粉组合与地层对比[J]. 古生物学报, 1986, 25(2): 201-210 [Zhen Fen, Li Wenben. Spore-pollen assemblage and correlation of Cretaceous in Fujian [J]. Acta Palaeontologica Sinica, 1986, 25(2): 201-210]
- 6 曹宝森,梁诗经,张小勤,等. 福建永安吉山村剖面的再研究[J]. 地层学杂志, 1990, 14(1): 63-69 [Cao Baosen, Liang Sijin, Zhang Xiaoqin, et al. Restudy on Jishan outcrop in Yong'an, Fujian province [J]. Journal of Stratigraphy, 1990, 14(1): 63-69]
- 7 陈其爽. 浙江寿昌组、横山组和馆头组关系探讨[J]. 石油与天然气地质, 1983, 4(1): 128-130 [Chen Qishuang. Discussion on Shouchang Formation, Hengshan Formation and Guantou Formation in Zhejiang Province [J]. Oil & Gas Geology, 1983, 4(1): 128-130]
- 8 陈其爽. 论福建坂头组的时代及对比[J]. 地层学杂志, 1991, 15(4): 278-285 [Chen Qishuang. Age and correlation of Bantou Formation in Fujian province [J]. Journal of Stratigraphy, 1991, 15(4): 278-285]
- 9 李兼海. 福建省晚侏罗世—白垩世陆相火山岩地层划分、对比研究[J]. 福建地质, 1996, (13): 240-247 [Li Jianhai. Classification and correlation of Late Jurassic-Cretaceous continental volcanic rock strata in Fujian Province [J]. Geology of Fujian, 1996, (13): 240-247]
- 10 福建省地质矿产局. 福建省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1984 [Bureau of Geological and Mineral in Fujian Province. Regional Geology of Fujian Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1984]
- 11 浙江省地质矿产局. 浙江省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1985 [Bureau of Geological and Mineral in Zhejiang Province. Regional Geology of Zhejiang Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1985]
- 12 徐北煤. 我国东部海相下白垩统的发现及其地质意义[J]. 东海海洋, 1991, 9(1): 38-45 [Xu Beimei. The revaluation of marine lower Cretaceous series in the east area of China and its geological significance [J]. Donghai Marine Science, 1991, 9(1): 38-45]
- 13 舒良树,周新民,邓平,等. 中国东南部中、新生代盆地特征与构造演化[J]. 地质通报, 2004, 23(9-10): 876-894 [Shu Liangshu, Zhou Xinmin, Deng Ping, et al. Geological features and tectonic evolution of Meso-Cenozoic basins in the southeastern China [J]. Regional Geology of China, 2004, 23(9-10): 876-894]
- 14 王德滋,周金城,邱检生,等. 中国东南部晚中生代花岗质火山—侵入杂岩特征与成因[J]. 高校地质学报, 2000, 6(4): 487-498 [Wang Dezi, Zhou Jincheng, Qiu Jiansheng, et al. Characteristics and petrogenesis of late Mesozoic granitic volcanic-intrusive complexes in the southeastern China [J]. Geological Journal of China Universities, 2000, 6(4): 487-498]
- 15 陈丕基,沈炎彬. 苏浙皖中生代后期叶肢介化石[M]. 中国古生物志, 新乙种 17 号, 北京: 科学出版社, 1982 [Chen Peiji, Shen Yanbin. Conchostracans of Late Mesozoic in Jiangsu, Zhejiang and Anhui Provinces [M]. Palaeontology Sinica, The New B No. 17, Beijing: Science Press, 1982]
- 16 顾知微. 浙江侏罗系和白垩系的研究[M] // 中国科学院南京地质古生物研究所著. 浙皖中生代火山沉积岩地层的划分及对比. 北京: 科学出版社, 1980: 2-68 [Gu Zhiwei. Study on Jurassic-Cretaceous in Zhejiang Province [M] // Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Chinese Academy of Sciences. Stratigraphic Classification and Correlation of Volcanic and Sedimentary Strata in Mesozoic in Zhejiang and Anhui Provinces. Beijing: Science Press, 1980: 2-68]
- 17 张利民. 浙闽赣地区侏罗系—白垩系界线再认识[J]. 地质论评, 1997, 43(1): 25-32 [Zhang Limin. The Jurassic-Cretaceous boundary in the Zhejiang-Fujian-Jiangxi region [J]. Geological Review, 1997, 43(1): 25-32]
- 18 陈丕基. 中国陆相侏罗、白垩系划分对比述评[J]. 地层学杂志, 2000, 24(2): 114-119 [Chen Peiji. Comments on the classification and correlation of non-marine Jurassic and Cretaceous of China [J]. Journal of Stratigraphy, 2000, 24(2): 114-119]
- 19 丁保良,蓝善先,汪迎平. 浙闽赣地区非海相侏罗—白垩纪火山、沉积地层及生物群[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1989 [Ding Baoliang, Lan Shanxian, Wang Yingping. Study of Non-marine Jurassic and Cretaceous Volcano, Stratigraphic and Biota in Zhejiang, Fujian and Jiangxi Provinces [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1989]
- 20 中国科学院中国孢子植物志编辑委员会. 中国海藻志(第二卷)[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 1-200 [Consilio Florarum Cryptogamarum Sinicarum Academiae Sinicae. Flora Algarum Marinarum Sinicarum, Tomus II Rhodophyta [M]. Beijing: Science Press, 1999: 1-200.]
- 21 张弥曼,周家健. 浙江中生代晚期鱼化石[M]. 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所, 甲种专刊第十二号, 北京: 科学出版社, 1977: 2-8 [Zhang Miman, Zou Jiajian. Fish Fossil of Late Mesozoic in Zhejiang [J]. Institute of Vertebrate Paleontology and Paleo-

- anthropology. A Species of Special, Issue No. 12. Beijing: Science Press, 1977: 2-8]
- 22 Peters K E, Moldowan J M. The Biomarker Guide: Interpreting Molecular Fossils in Petroleum and Ancient Sediments [M]. Englewood Cliffs New Jersey: Prentice Hall, 1993: 120-159
- 23 林金辉, 伊海生, 邹艳荣. 藏北高原海陆相油页岩生物标志化合物对比研究[J]. 地球化学, 2004, 33(1): 57-64 [Lin Jinhui, Yi Haisheng, Zou Yanrong. Biomarkers of marine and continental oil shales, the Zangbei Plateau [J]. Geochimica, 2004, 33(1): 57-64]
- 24 高红梅, 高福红, 樊馥, 等. 鸡西盆地早白垩世烃源岩可溶有机质地球化学特征[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2007, 37(1): 86-90 [Gao Hongmei, Gao Fuhong, Fan Fu, et al. Geochemical characteristics of solvable organic matter extracted from source rocks of Early Cretaceous in Jixi Basin [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2007, 37(1): 86-90]
- 25 傅家谟, 盛国英, 许家友. 应用生物标志物参数判别古环境[J]. 地球化学, 1991, 20(1): 1-12 [Fu Jiamo, Sheng Guoying, Xu Jiayou. Application of biomarker parameters to quantitative discrimination of paleoenvironment [J]. Geochimica, 1991, 20(1): 1-12]
- 26 ten Haven H L, de Leeuw J W, Schenck P A. Organic geochemical studies of a Messinian evaporitic basin, northern Apennines (Italy) - Hydrocarbon biological markers for a hypersaline environment [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1985, 49: 2181-2191
- 27 傅家谟, 盛国英. 中国主要含油气盆地沉积类型的有机地球化学特征[C]//有机地球化学论文集. 北京: 科学出版社, 1986 [Fu Jiamo, Sheng Guoying. Geochemistry characteristic of primary types of oil-gas-bearing sedimentary Basins [C]//Papers on Organic Geochemistry, Beijing: Science Press, 1986]
- 28 Fu J, Sheng G, Xu J. Application of biological markers in the assessment of paleoenvironments of Chinese non-marine sediments [J]. Organic Geochemistry, 1990, 16: 769-770
- 29 曾宪章, 梁狄刚. 中国陆相原油和生油岩生物标志物[M]. 兰州: 甘肃省科学技术出版社, 1989: 253-258 [Zeng Xianzhang, Liang Digang. Biomarkers in Continental Crude Oil and Hydrocarbon Rocks [M]. Lanzhou: Gansu Science & Technology Press, 1989: 253-258]
- 30 张枝焕, 杨藩, 李东明, 等. 中国新生界咸水湖相烃源岩和原油生物标志物组合特征[J]. 沉积学报, 1998, 16(3): 119-124 [Zhang Zhihuan, Yang Fan, Li Dongming, et al. Biomarker Assemblage characteristics of source rocks and associated crude oils in saline lake facies of Cenozoic in China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1998, 16(3): 119-124]
- 31 曹剑, 边立曾, 胡凯, 等. 柴达木盆地北缘侏罗系不同沉积环境烃源岩生物标志物特征及其应用[J]. 地质学报, 2008, 82(8): 1121-1128 [Cao Jian, Bian Lizeng, Hu Kai, et al. Biomarker features of Jurassic mudstone source rock from different sedimentary environments in the Northern Qaidam Basin and its applications [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(8): 1121-1128]
- 32 Hills I R, Whitehead E V, Anders D E, et al. An optically active triterpane, gammacerane in Green River, Colorado, oil shale bitumen [J]. Journal of the Chemical Society, Chemical Communications, 1966, 20: 752-754
- 33 Jiang Z S, Fowler M G. Carotenoid-derived alkanes in oils from northwestern China [J]. Organic Geochemistry, 1986, 13: 561-571
- 34 傅家谟. 有机地球化学标志化合物—生物标志物研究及其在油气勘探中的应用[J]. 地球科学, 1988, (4): 12-13 [Fu Jiamo. Organic geochemistry-biological marker studies and the applications in oil-gas exploration [J]. Earth Science, 1988, (4): 12-13]
- 35 常振恒, 陈中红, 张玉体, 等. 渤海湾盆地东濮凹陷原油地球化学特征研究[J]. 石油实验地质, 2007, 29(2): 178-182 [Chang Zhenheng, Chen Zhonghong, Zhang Yuti, et al. An investigation on the geochemical characteristics of crude oil from Wenliu area in the Dongpu Sag, Bohai Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29(2): 178-182]
- 36 段毅, 吴保祥, 张辉, 等. 鄂尔多斯盆地西峰油田原油地球化学特征及其成因[J]. 地质学报, 2006, 80(2): 301-310 [Duan Yi, Wu Baoxiang, Zhang Hui, et al. Geochemistry and genesis of crude oils of the Xifeng Oilfield in the Ordos Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(2): 301-310]
- 37 段毅, 张胜斌, 郑朝阳, 等. 鄂尔多斯盆地马岭油田延安组原油成因研究[J]. 地质学报, 2007, 81(10): 1408-1416 [Duan Yi, Zhang Shengbin, Zheng Zhaoyang, et al. Study on genesis of crude oil in the Yan' an Formation of the Maling Oilfield, Ordos Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(10): 1408-1416]
- 38 华阿新, 黄第藩. 华北中、上元古界有机质成烃作用及生物标志化合物特征[C]. 中国科学院兰州地质所气体地球化学开发实验室研究年报, 1988: 10-43 [Hua Axin, Huang Difan. Hydrocarbon generation and biological marker characteristics in Mid-Upper Proterozoic in North China [C]. Lanzhou Institute of Geology of Development Laboratory of Gas Geochemistry Research Report, 1988: 10-43]
- 39 曾凡刚, 程克明. 华北地区下古生界海相烃源岩饱和烃生物标志物地球化学特征[J]. 地质地球化学, 1998, 26(3): 25-32 [Zeng Fangang, Cheng Keming. Geochemical characteristics of saturated hydrocarbon biomarkers from lower Palaeozoic marine carbonate rocks in north China [J]. Geology-Geochemistry, 1998, 26(3): 25-32]
- 40 Andrew D Hanson, Bradley D Ritts, David Zinniker, et al. Upper Oligocene lacustrine source rocks and petroleum systems of the northern Qaidam Basin, northwest China [J]. AAPG Bulletin, 2001, 85(4): 201-219
- 41 潘长春, 傅加谟, 张敏. 柴达木盆地柴西地区烃源岩生烃效率、油气源精细对比及成藏地球化学研究[R]. 中石油青海油田公司勘探开发研究院内部科研报告, 2005: 64-65 [Pan Changchun, Fu Jiamo, Zhang Min. Study of efficiency of hydrocarbon generation, hydrocarbon source correlation and geochemistry of petroleum reservoir in West Qaidam Basin [R]. Petrochina Qinghai Oilfield Company Internal Research Institute of Exploration and Development Report, 2005: 64-65]
- 42 曹剑, 边立曾, 胡凯, 等. 柴达木盆地北缘侏罗系烃源岩中发现底栖宏观红藻类生烃母质[J]. 中国科学: D辑, 2009, 39(4): 474-480 [Cao Jian, Bian Lizeng, Hu Kai, et al. Benthic macro red alga: A new possible bio-presursor of Jurassic mudstone source rocks in the northern Qaidam Basin, northwestern China [J]. Science in

- China Series D: Earth Sciences, 2009, 52(5): 647-654]
- 43 付修根,王剑,汪正江,等. 藏北羌塘盆地晚侏罗世海相油页岩生物标志物特征、沉积环境分析及意义[J]. 地球化学, 2007, 36(5): 486-496 [Fu Xiugen, Wang Jian, Wang Zhengjiang, *et al.* Biomarkers and sedimentary environment of late Jurassic marine oil shale in Qiangtang Basin, northern Xizang and its geological significance [J]. Geochimica, 2007, 36(5): 486-496]
- 44 朱东亚,胡文瑄,陈龙生,等. 香港坪洲岛组中钙芒硝假晶的确定及其成因探讨[J]. 地质学报, 2004, 78(5): 683-689 [Zhu Dongya, Hu Wenxuan, Chen Longsheng, *et al.* Identification and discussion on the origin of glauberite pseudocrystals in the Pingchau formation of the Pingchau Island, Hongkong [J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(5): 683-689]
- 45 姚素平,胡文瑄,陈龙生,等. 香港坪洲岛早第三纪地层发现优质烃源岩[J]. 科学通报, 2004, 49(24): 2596-2604 [Yao Suping, Hu Wenxuan, Chen Longsheng, *et al.* High-quality hydrocarbon source rock in the Paleogene sequence of the Pingchau Formation, Hong Kong [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(2): 2145-2154]
- 46 林鹤鸣,郝沪军. 珠江口盆地东部和台湾西部海域中生界地质构造特征[J]. 中国海上油气(地质), 2002, 16(4): 231-237 [Lin Heming, Hao Hujun. Mesozoic tectonics in the eastern Pearl River mouth basin and offshore western Taiwan [J]. China Offshore Oil and Gas, 2002, 16(4): 231-237]
- 47 吴国璋,王汝建,郝沪军,等. 南海北部海相中生界发育的微生物化石证据[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(1): 79-87 [Wu Guoxuan, Wang Rujian, Hao Hujun, *et al.* Microfossil evidence for development of marine Mesozoic in the north of south China Sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2007, 27(1): 79-87]
- 48 周蒂. 台西南盆地和北港隆起的中生界及其沉积环境[J]. 热带海洋学报, 2002, 21(2): 50-57 [Zhou Di. Mesozoic strata and sedimentary environment SW Taiwan Basin of the south China Sea and Peikang high of western Taiwan [J]. Tropic Oceanology, 2002, 21(2): 50-57]
- 49 徐克定. 中国东南部白垩纪沉积盆地特征及含油气远景[C]//中国南方白垩系会议论文集选集. 南京: 南京大学出版社, 1989: 41-62 [Xu Keding. Characteristics and hydrocarbon potential of Cretaceous sedimentary basin in the southeastern China [C]//China Southern Conference Papers Selected Cretaceous. Nanjing: Nanjing University Press, 1989: 41-62]
- 50 张弥漫,周家健. 我国东部中、新生代含油地层中的鱼化石及有关沉积环境讨论[J]. 古脊椎动物与古人类, 1978, 16(4): 113-116 [Zhang Miman, Zhou Jiajian. Fish fossil in oil-bearing beds of middle-late Mesozoic in eastern China and its significance in depositional environment [J]. Vertebrata Palasiatica, 1978, 16(4): 113-116]

Preliminary Investigation on Depositional Environment of Black Mud in Lower Cretaceous, Zhejiang and Fujian Provinces: Micropaleontology and Organic Geochemical Evidences

XIE Xiao-min¹ HU Wen-xuan² CAO Jian² YAO Su-ping² BIAN Li-zeng² GAO Yu-qiao²

(1. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi Jiangsu 214151;

2. Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract Sedimentary rocks of lower Cretaceous widely distribute in volcanic-covered area in Zhejiang and Fujian provinces, southeast China, and its sedimentary environment that whether it has been influenced by marine water is still controversial. Though carefully observation in outcrops, we have systematically sampled dark sedimentary rocks, including Bantou Formation (K_1b) in Fujian province, Shouchang Formation (K_1s) and Guantou Formation (K_1g) in Zhejiang province. Under microscope, besides high plant, marine fossils such as red algae and brown algae, were found in these samples. Organic geochemistry features, such as lower γ/C_{30} hopanoid values (range from 0.11 to 0.18, 0.14 on average) and C_{30} rearrangement hopanoid, are furthermore to approve the marine influence. Combining with geological background, it is presupposed that it is mainly influenced by paleo-Pacific.

Key words Zhejiang and Fujian provinces; lower Cretaceous; organic geochemistry; marine fossils; sedimentary environment