

doi:10.3799/dqkx.2012.011

华南陆缘晚三叠一早、中侏罗世海平面相对升降与古气候演化的地球化学记录

许中杰¹, 程日辉^{1*}, 张莉², 王嘹亮², 孔媛¹

1. 吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061

2. 广州海洋地质调查局, 广东广州 510075

摘要: 晚三叠—中侏罗世华南陆缘发生多期海侵—海退旋回。元素地球化学特征指示的古盐度高低和古水深深浅记录了海平面的相对升降。华南陆缘存在3个级别的海平面变化。其中, III级海平面波动频繁, 由晚三叠世3次波动、早侏罗世4次波动和早、中侏罗世2次波动构成了此间大规模海侵—海退旋回。华南陆缘I级海平面相对升降曲线与全球海平面长周期曲线, 在诺利克阶早期—辛涅缪尔阶晚期变化同步, 在辛涅缪尔阶晚期—阿连阶变化相悖。III级海平面相对升降曲线与全球海平面短周期曲线, 在瑞替阶—辛涅缪尔阶晚期同发生4次波动, 时间上近乎同步。Sr/Cu值指示的元素迁移与富集反映了气候的温湿与干热。粤中—粤东地区晚三叠一早、中侏罗世经历了温湿—干热—温湿的气候变化。

关键词: 华南陆缘; 早中生代; 海平面变化; 古气候; 地球化学; 海洋地质。

中图分类号: P595

文章编号: 1000-2383(2012)01-0113-12

收稿日期: 2010-12-28

The Geochemistry Records of Sea-Level Relative Movement and Paleoclimatic Evolution of the South China Continental Margin in Late Triassic-Early-Middle Jurassic

XU Zhong-jie¹, CHENG Ri-hui^{1*}, ZHANG Li², WANG Liao-liang², KONG Yuan¹

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

2. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China

Abstract: The margin of South China in Late Triassic-Middle Jurassic had undergone multi transgression-regression cycles. The element geochemistry character indicates the paleosalinity and the water depth records the relative movements of the sea level. There are three levels of sea level change in the margin of South China. The grade III sea-level fluctuated frequently. There were 3 times in Late Triassic, 4 times in Early Jurassic and 2 times in Early or Middle Jurassic. These fluctuations constituted a large-scale transgression-regression cycle. The relative movements curve of the grade I sea-level is synchronous with the change of the long-period global sea-level curve in early Norian-late Sinemurian of the margin of South China. But it is contrary in late Sinemurian-Aalenian. The relative movements curve of the grade III sea-level and the short-period global sea-level curve occurred 4 fluctuations in Rhaetian-late Sinemurian. And they were almost simultaneously in time. The element migration and enrichment which were indicated by Sr/Cu reflected the warm-humid and dry-heat of the climate. The area of Middle Guangdong-East Guangdong in Late Triassic-Early-Middle Jurassic undergone the climate change of warm-humid to dry-heat and to warm-humid.

Key word: the margin of South China; Early Mesozoic; sea-level change; paleoclimate; geochemistry; marine geology.

基金项目: 吉林大学平台基地建设(Nos. 450060445181, 450060326044); 国家自然科学基金项目(No. 40972074); 国家“973”项目(No. 2009CB219303)。

作者简介: 许中杰(1984—), 男, 讲师, 博士, 主要从事海洋地质学专业的教学与科研工作。* 通讯作者: 程日辉, E-mail: chengrh@jlu.edu.cn

晚三叠—早侏罗世华南陆缘在云开断裂以东发育陆相—海相沉积。华南陆缘(广东和福建等地)在晚三叠世卡尼中晚期遭受海侵,“粤东海盆”在闽西南—粤东—粤北—粤中地区形成,并向南海北部海域延伸至珠江口盆地东部(郝沪军等,2001,2004)。华南陆缘在晚三叠世诺利期经历短暂海退后,早侏罗世发生更大规模海侵,粤东地区蓝塘群甚至出现半深海相复理石建造(周蒂等,2005)。中侏罗世华南陆缘隆受环太平洋构造域的强烈俯冲和挤压作用升为陆地。中侏罗世以后,华南陆缘为陆相沉积。晚三叠—中侏罗世华南陆缘经历的海平面相对升降,在连续的细粒沉积物中必然留下完整的反映该时段的地球化学记录。元素富集、迁移及其元素比值指示的古盐度、古水深就是这一纪录的重要反映(许中杰等,2009)。地球化学元素具有精确示踪和高分辨率的特性(傅强,2005;邱欣卫等,2011),对其分析和研究已成为研究古环境变迁、古气候变化的重要手段(韩永林等,2007;王珊珊等,2010)。

南海北部中生界具有巨大的油气资源潜力和良好的勘探前景(何家雄等,2007)。但对南海北部海域中生界地层、构造的认识,多是通过重磁、地震资料的解释获得的。所以,对海域地球物理资料的认识、解读以及成果的验证,就要依靠在晚三叠世—早侏罗世与其同处于“粤东海盆”的华南陆缘资料。华南陆缘海平面相对升降曲线的建立及其与全球海平面升降曲线的对比,便是连接海域—陆区的桥梁,对实现海—陆区地层、沉积、层序地层和盆地类型的对比具有重要意义。也为海—陆区盆地原型和盆地动力学的深入研究提供了海平面变化的证据。

1 剖面岩性、岩相特征

对华南陆缘(广东和福建地区)13个上三叠—下侏罗统野外剖面进行实地考察,并选取粤中—粤东地区地层出露相对完整、厚度大、现象清晰的5条剖面作为本文研究对象(图1)。包括粤中佛山市高明区高明叠坪剖面,地理位置为 $22^{\circ}58'30''\text{N}$ 、 $112^{\circ}46'20''\text{E}$,位于广东省高明市西安镇境内,剖面出露上三叠统小坪组。海丰青年水库剖面,地理位置位于 $22^{\circ}57'6.6''\text{N}$ 、 $115^{\circ}15'53.1''\text{E}$,位于广东省海丰县城西,出露下侏罗统蓝塘群的银瓶山组、上龙水组、长埔组和吉水门组。惠来青坑剖面,地理位置为 $23^{\circ}07'32.6''\text{N}$ 、 $116^{\circ}03'19.2''\text{E}$,位于广东省惠来县北西方向,出露下侏罗统蓝塘群青坑村组。惠来葵潭剖

面,地理位置为 $23^{\circ}05'37.9''\text{N}$ 、 $115^{\circ}58'58.2''\text{E}$,位于广东省惠来县境内。惠来葵潭剖面包括出露下一中侏罗统桥源组一段和二段的葵潭剖面 and 出露下一中侏罗统桥源组三段的葵潭西岭剖面。

1.1 岩性、岩相特征

1.1.1 上三叠统小坪组 粤中佛山高明地区小坪组由罗客段、凤岗段和马鞍段组成。罗客段以黑色粉砂岩、粉砂质页岩为主,水平层里发育,偶夹煤线和煤层,含菱铁矿结核,该段是滨海相的沉积组合。凤岗段岩性由厚层黑色、灰黑色、褐色炭质泥岩,局部夹薄层灰色粉砂岩和细砂岩,中下部偶见薄层灰色含砾粗砂岩,沉积环境为浅海陆棚沉积。马鞍段岩性主要为黑色、浅灰色的粉砂岩、细砂岩,局部夹浅灰色、灰白色中砂岩、含砾粗砂岩和粉砂质页岩,黑色粉砂岩具水平层理,该段是三角洲相的沉积组合。

1.1.2 下侏罗统蓝塘群 银瓶山组累计厚度达387.1 m。下部岩性为灰白色细砂岩,局部夹泥质粉砂岩。中部岩性以浅灰色粉砂质泥岩为主,粉砂质泥岩层中夹有灰色细砂岩。上部岩性由粗砂岩、中砂岩、粉砂质泥岩和泥岩组成。细砂岩中发育波状层理、楔状交错层理。该组是浅海相的沉积组合。

上龙水组累计厚度达到761.1 m。下部岩性以紫色、灰色、深灰色厚层泥岩夹粉砂岩为主。中上部岩性以灰色、深灰色泥岩和灰色、灰白色粉砂岩为主,泥岩和粉砂岩不等厚互层,泥砂比为3:1~2:1。顶部岩性以黄色、灰色粉砂岩夹泥质粉砂岩为主,见细砂岩。与银瓶山组岩性相比较,本组粒度变细,颜色变深。该组为半深海相的沉积组合。

长埔组累计厚度达741.5 m。岩性由灰色、黄色、浅紫色细砂岩、粉砂岩,局部夹深灰色泥岩组成,泥岩层中含双壳类化石和大量植物化石碎片。该组是浅海相的沉积组合。

吉水门组累计厚度达419.0 m。中下部岩性为深灰色泥岩,夹灰白色泥质粉砂岩。上部岩性为灰白色细砂岩和深灰色泥岩。细砂岩和泥岩不等厚互层,泥岩层发育水平层理,一些细砂岩层发育交错层理。该组中下部为半深海相沉积,上部为浅海相沉积。

青坑剖面青坑村组累计厚度约为910.0 m。底部岩性以浅灰色细砂岩为主,夹浅灰色中砂岩、泥质粉砂岩和粉砂质泥岩。中部岩性为灰色、灰白色粉砂质泥岩夹细砂岩、中砂岩和泥质粉砂岩。上部岩性以浅灰色、灰黄色粉砂质泥岩和浅灰色细砂岩为主,同时见泥质粉砂岩和中砂岩层。该组是浅海相的沉积组合。

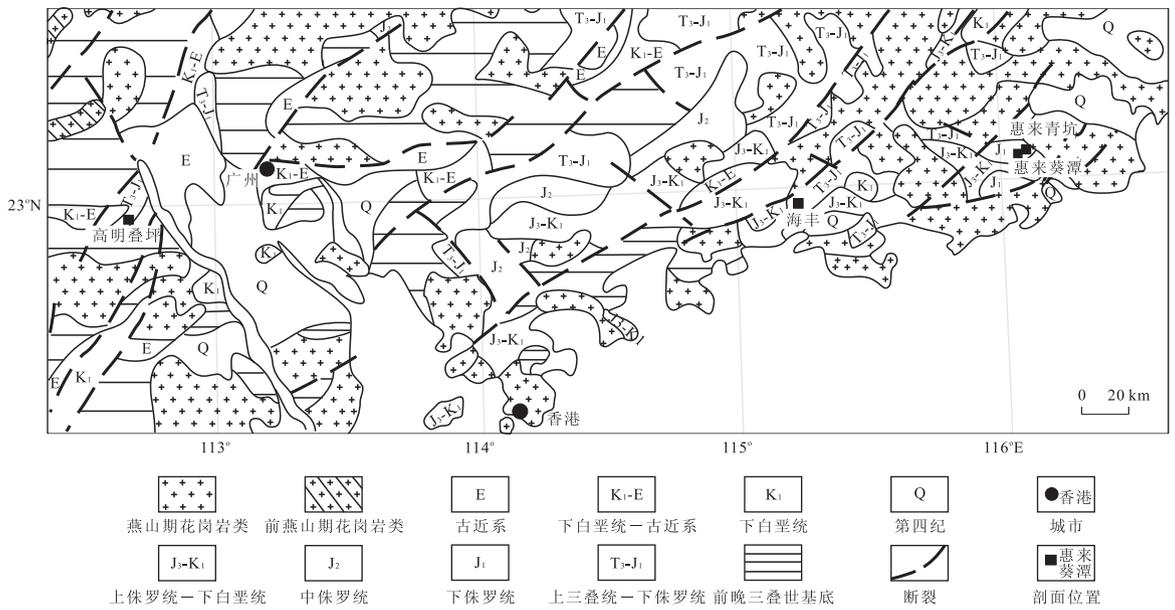


图 1 粤中—粤东地区地质略图及剖面位置(据舒良树等,2004)

Fig. 1 The geological sketch map and profile location of the area in Middle Guangdong-East Guangdong

1.1.3 下一中侏罗统桥源组 桥源组一段累计厚度约 310.0 m。底部岩性以灰白色中砂岩、细砂岩为主;中部岩性为黄色、浅灰色和灰色中砂岩、细砂岩和泥质粉砂岩组成;上部岩性由明显的 2 段组成,下段岩性以灰黑色粉砂质泥岩为主,上段岩性由灰色、灰白色细砂岩、中砂岩组成。该段是一套三角洲相沉积物组合。

源组二段累计厚度约为 905.0 m。底部岩性以灰白色、深灰色粉砂质泥岩为主;中部岩性分为 2 段,上段岩性为灰白色、深灰色粉砂质泥岩与泥质粉砂岩,下段岩性为灰白色细砂岩夹泥质粉砂岩;上部岩性以灰白色、深灰色粉砂质泥岩为主,见植物碎片,偶见煤层,粉砂质泥岩、泥岩层发育水平及波状层理。这是一套滨海相的沉积物组合。

桥源组三段累计厚度约为 502.0 m。中下部岩性为灰色粉砂质泥岩夹泥质粉砂岩,粉砂质泥岩层中含植物化石和双壳类化石,见虫穴;上部岩性为灰色、浅灰色、黄色中砂岩、细砂岩夹泥质粉砂岩,发育波状、板状交错和楔状交错层理。该段是一套三角洲相沉积物组合。

1.2 海退事件的物质表现

晚三叠一早、中侏罗世粤中—粤东地区海平面的相对升降引发了多个海侵—海退旋回,并且在沉积地层中留下相应的物质记录。Ⅲ级海退事件的特点表现在:(1)5 级和 4 级旋回呈现向上变粗的特征(代表向上变浅);(2)岩性由泥岩、粉砂岩,向细砂

岩、中砂岩、粗砂岩转变(5 级旋回),从更大的尺度看,上龙水组的泥岩和泥岩沉积向长埔组砂岩沉积转变(3 级旋回);(3)沉积物颜色由深灰色变为灰色、浅紫色,反映水体变浅和氧化性增强;(4)层理构造由水平层理变为波状层理和交错层理,说明水动力条件增强,水体变浅;(5)沉积相类型由半深海相转化为浅海相。

下一中侏罗统过渡相沉积和中侏罗统陆相沉积环境的出现,反映从早、中侏罗世开始,广东地区开始发生了大规模的海退事件。这个受 I 级海平面变化影响的海退事件在物质表现上比受 III 级海平面变化控制下的海退事件更为明显,其特征为:(1)沉积层序的粒度有细—粗—砾;(2)岩性有泥岩、粉砂岩—砂岩—砾岩;(3)层理构造由泥岩水平层理—砂岩交错层理—砾岩的叠瓦状排列或砂岩粗糙的板状、槽状交错层理;(4)古生物化石由海相双壳类到湖泊相植物化石碎片;(5)薄煤层(桥源组)和陆相火山碎屑沉积岩(塘厦组)的出现;(6)沉积相类型由海相转化为滨海相(桥源组中部)和三角洲相(桥源组下部和上部)。

2 样品的采集与测试

上三叠统研究样品采集于粤中佛山市高明区高明叠坪剖面,采集层位为上三叠统小坪组凤岗段和马鞍段。样品 FG-1、FG-2、FG-3 和 FG-4 采集于凤

岗段底段,样品 FG-8 和 FG-9 采集于凤岗段中段,FG-10 采集于凤岗段中上段,FG-11 采集于凤岗段上段。MA-18 和 MA-19 样品采集于马鞍段下部,MA-23 样品采集于马鞍段上部。下侏罗统研究样品采集于粤东海丰县海丰青年水库剖面 and 惠来县惠来青坑剖面,采集层位为上侏罗统蓝塘群银瓶山组、上龙水组、长埔组、吉水门组和青坑村组。其中 HF-25 样品采自吉水门组中部, HF-26 和 HF-31 样品采自长埔组上部和中部, HF-37、HF-38、HF-1、HF-2 和 HF-3 样品采自上龙水组底部至上部, HF-4、HF-19 和 HF-20 样品采自银瓶山组中部和上部。QK-4 样品采集于青坑村组底部, QK-3 采集于剖面青坑村组中上部, QK-2 样品采集于青坑村组上部。早、中

侏罗世研究样品采集于粤东惠来县葵潭剖面,采集层位为下一中侏罗统桥源组。其中 KT-8 样品采集于桥源组底部, KT-1 和 KT-2 样品采集于桥源组中下部, KT-3、KT-4、KT-5 和 KT-6 样品采集于桥源组中部, KT-11 样品采集于桥源组上部。

常量、微量和稀土元素分析在吉林大学实验测试中心完成。常量元素分析采用化学分析法中的滴定法完成,分析精度优于 5%。微量和稀土元素采用 ICPMS 质谱仪进行分析。质谱仪测试检出限小于 0.5×10^{-6} 。各测试样品最终结果取 3 次测定平均值。高温会使样品中 B 元素挥发,为了确保 B 元素数据准确,实验中加热温度均较正常实验温度低。微量和稀土元素具体实验步骤同许中杰等(2010),分析结果见表 1。

表 1 晚三叠一早、中侏罗世典型剖面常量、微量元素比值

Table 1 Content and element ratio of the typical profile in Late Triassic-Early-Middle Jurassic

时代	层位	样品号	岩性	$m=100 \times \text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$	Ca/Mg	Sr/Ba	B/Ga	Sr/Cu
晚三叠世	小坪组 凤岗段	FG-1	泥岩	2.96	1.75	0.04	1.56	2.43
		FG-2	泥岩	3.69	0.97	0.04	1.45	2.48
		FG-3	泥岩	3.00	0.58	0.04	1.44	2.78
		FG-4	泥岩	2.83	0.95	0.04	1.52	0.83
		FG-8	泥岩	6.19	1.17	0.19	1.31	14.76
		FG-9	泥岩	6.88	0.66	0.19	1.42	11.89
		FG-10	泥岩	4.78	0.85	0.15	0.83	21.30
		FG-11	泥岩	2.46	0.39	0.13	1.98	2.73
	马鞍段	MA-18	泥岩	3.32	1.27	0.26	3.72	13.27
		MA-19	泥岩	3.38	0.46	0.26	2.92	12.72
		MA-23	泥岩	3.91	0.33	0.06	1.43	8.41
早侏罗世	银瓶山组	HF-20	泥岩	1.43	0.24	0.15	6.46	75.29
		HF-19	泥岩	1.56	0.79	0.22	11.51	7.29
		HF-4	泥岩	1.77	0.30	0.23	4.53	9.03
	上龙水组	HF-3	泥岩	1.19	0.16	0.28	—	34.95
		HF-2	泥岩	1.66	0.65	0.25	4.76	16.68
		HF-1	泥岩	1.49	0.19	0.20	4.36	8.80
		HF-38	泥岩	1.71	0.41	0.20	4.55	7.07
		HF-37	泥岩	2.06	0.24	0.16	—	3.65
	长埔组	HF-31	泥岩	1.92	0.14	0.09	7.44	5.20
		HF-26	泥岩	2.21	0.09	0.13	8.96	13.15
	吉水门组	HF-25	泥岩	1.60	0.14	0.16	4.04	3.48
	青坑村组	QK-2	泥岩	2.52	0.20	0.10	3.23	11.35
		QK-3	泥岩	3.40	0.13	0.11	4.30	10.16
		QK-4	泥岩	3.13	0.08	0.08	3.19	2.63
早—中侏罗世	桥源组	KT-8	粉砂质泥岩	5.72	0.08	0.08	4.92	2.18
		KT-1	粉砂质泥岩	3.33	0.37	0.04	2.93	3.07
		KT-2	粉砂质泥岩	2.99	0.33	0.06	2.18	1.62
		KT-3	粉砂质泥岩	7.56	0.07	0.07	1.46	0.43
		KT-4	粉砂质泥岩	8.65	0.13	0.05	2.31	0.74
		KT-5	粉砂质泥岩	1.87	0.30	0.19	1.56	0.82
		KT-6	粉砂质泥岩	4.13	0.39	0.11	2.97	7.81
		KT-11	粉砂质泥岩	4.09	0.13	0.06	3.96	0.72

注:样品由吉林大学实验测试中心完成,常量元素用 X 射线荧光光谱仪测定;微量稀土元素用 ICPMS 质谱仪测定。“—”为 B 元素未检测出数据,未得出计算结果。

3 海平面相对升降的元素地球化学记录

3.1 古盐度、古水深与海平面相对升降

沉积物中的常量、微量元素保存了相当丰富的地质信息,常量、微量元素的变化是对沉积环境的记录(李进龙和陈东敬等,2003;文华国等,2008)。

常量、微量元素随着海平面变化出现迁移与富集,并形成能反映古盐度、古水深变化的特殊记录。古水深变化受海平面相对升降影响,元素地球化学特征指示的古水深变化可反映海平面相对升降。影响海水盐度变化的主要因素有纬度变化、海底火山热液、冰凝冰融的交替和淡水倾注等。现代海洋的盐度随纬度的不同而发生变化,但在一定纬度范围内,盐度是相对稳定的。北纬及南纬 $20^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 的范围内,盐度为 35.5‰ 左右,变化极不明显(冯洪真等,1993)。马力等(2004)对中国南方及邻区早寒武世以来的构造—古地理进行了复原,华南陆缘在晚三叠世古纬度约为 10°N ,到白垩纪时古纬度约为 15°N 。如果认为华南陆缘在晚三叠世—白垩纪的纬度变化幅度约为 5° ,那么其对盐度随时间变化的影响就很小,也就是说,古纬度变化可能不是影响华南陆缘晚三叠—中侏罗世水体古盐度随时间变化的根本原因。海底火山热液对水体盐度也会产生明显的影响,例如红海海底的一些与火山热液相关的很热(45°C)的水体盐度高达 43‰(冯洪真等,1993)。经显微镜鉴定,华南陆缘晚三叠一早、中侏罗世泥岩样品中,极少发现样品中含有可鉴定的火山物质。因此华南陆缘晚三叠一早、中侏罗世水体古盐度在时间上的明显变化,与海底火山热液尚难建立起直接联系。当有淡水大量注入海中时,海平面升高,水体盐度降低;而枯水时期,海平面相对下降,水体盐度升高。在冰期,冰川大规模形成,使得海平面降低,海水盐度升高;在间冰期,由于冰川消融,大量淡水注入,使得海平面相对上升,盐度降低。可见,冰川消融与凝结、淡水倾注与减少是影响海水盐度低与高及海平面明显升降的 2 种因素,且其引起的海平面升降与海水盐度变化是同步进行的。但晚三叠一早、中侏罗世并无大规模冰川消融,冰川和淡水对华南陆缘晚三叠—中侏罗世水体古盐度变化无影响。根据以上分析,华南陆缘海平面变化与盐度变化存在对应性是肯定的。同时,典型的盐度分析表明,在水深 $0\sim 200\text{ m}$ 范围内,盐度随水体深度的增加而增加(冯洪

真等,1993)。盐度是海水中盐类物质的质量分数,氯化钠和氯化镁是海水中主要的盐类物质,氯化钠、氯化镁等盐类物质在水中的溶解度与温度和压强有关,温度越高、压强越大(深度越深),其溶解度越大,即盐度越大,这说明在浅海—半深海的范围内,随着海平面上升或海水变深,盐度会增加。结合岩石、沉积相、古生物等地质特征,海平面变化可以通过古盐度和古水深的变化进行推测。

3.2 海平面相对升降的元素地球化学记录

3.2.1 古盐度、古水深的元素地球化学记录

元素地球化学特征是可以指示古盐度和古水深的。在水深 $< 2000\text{ m}$ 的沉积环境中,沉积物的 Mg 含量随水深增加而减少;Al 含量明显表现出随水深增加而增加的特征。 $m(m=100\times\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3)$ 值呈随水深增加而变小的规律,这是通过对太平洋表层沉积物研究得出的结论(黄剑霞,1986;张士三,1990)。在自然界水体中 Sr 迁移能力比 Ba 强(王益友等,1979;赵永胜等,1998;郑荣才和柳梅青,1999)。当盐度逐渐加大时,Ba 以 BaSO_4 的形式首先沉淀,留在水体中的 Sr 相对富集。当水体盐度加大到一定程度时,Sr 以 SrSO_4 的形式和递增的方式沉淀,因而沉积物中 Sr 丰度和 Sr/Ba 比值与古盐度呈明显的正相关关系。Sr 丰度或 Sr/Ba 比值增大,反映古盐度增加,指示古水深增加。

水体中的 Ca 和 Mg 元素常以钙盐和镁盐形式存在,但它们的溶解度不同,镁盐要比钙盐难于沉淀,而且钙沉淀受介质酸碱性影响更明显。Ca/Mg 比值变小,反映古盐度降低、水体 pH 值降低、Eh 值升高、沉积物搬运距离减小和古水体深度变浅。B 和 Ga 相比,硼酸盐溶解度大,迁移能力强,海相泥质沉积物中含量较高;Ga 的活动性低,易于沉淀,多富集在淡水沉积物中(Keith and Degens,1959;王益友等,1979)。因此泥岩的 B/Ga 比值,可以有效指示古盐度。B/Ga 比值增大,反映古盐度增加,水体深度变深。

m 值、B/Ga、Sr/Ba 和 Ca/Mg 比值大小变化反映古盐度高低和古水深。研究区在上三叠统一下侏罗统以海相和过渡相沉积为主,发生了多次重要的海侵海退事件,海平面的升降变化直接影响着研究区的古水深。古盐度变化随海水深度增加而增加。所以,元素地球化学特征反映的古盐度高低和古水深,可以指示海平面相对升降。

3.2.2 海平面相对升降

通过对粤中—粤东地区岩性组合、沉积相变化和元素地球化学分析,研究区

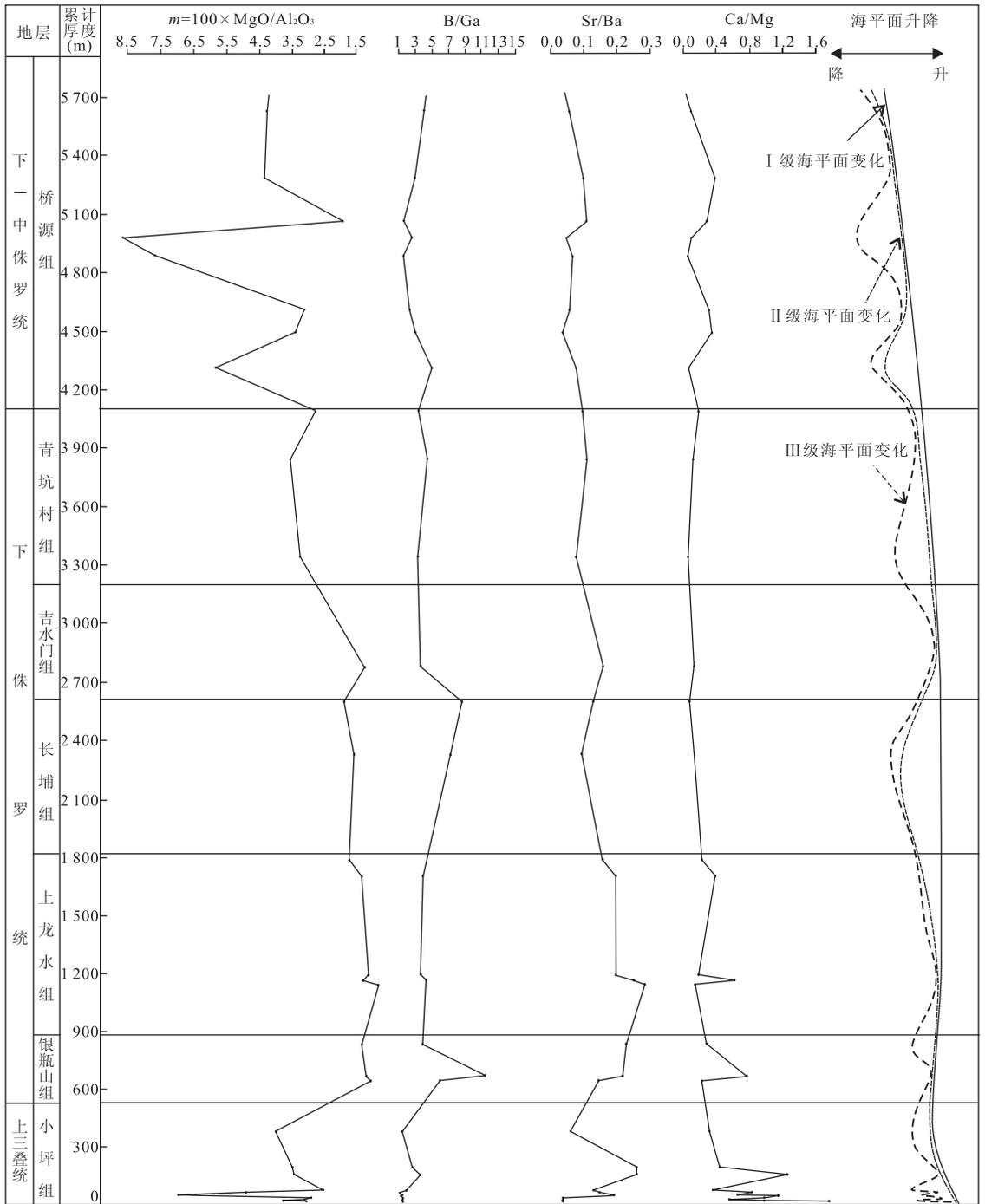


图 2 晚三叠一早、中侏罗世华南陆缘古盐度变化、古水深变化和海平面相对升降曲线

Fig. 2 The curves of the paleosalinity change, the water depth change and the sea-level relative movement of South China continental margin in Late Triassic-Early-Middle Jurassic

存在 3 个级别的海平面变化(图 2). I 级海平面的相对变化由早侏罗世的海侵和中侏罗世的海退构成; II 级海平面相对变化由晚三叠世诺利克阶早期 1 次海侵、早侏罗世早期的 2 次大规模海侵、早侏罗世晚期的 1 次小规模海侵和海侵之间的海退构成; III 级海平面相对变化由晚三叠—中侏罗世各组内部

经历的多次海平面波动构成. 具体变化如下:

上三叠统小坪组凤岗段的古盐度由凤岗段底部至中部逐渐增加, 中部达到最大, 反映古水深逐渐变深. 中部之后古盐度降低, 至中上部又增大, 及顶部古盐度降至最低, 反映古水深在中部和中上部之间出现了短暂的降低, 即到中上部变深, 至顶部变浅.

由凤岗段顶部到马鞍段下部,古盐度增大,反映古水深变深。由马鞍段下部至中部,古盐度逐渐降低,反映由马鞍段底部至中部,古水深逐渐变浅。上三叠统小坪组凤岗段和马鞍段经历了3次海平面相对上升和4次相对下降。其中,凤岗段海侵—海退较频繁,在凤岗段中部、中上部发生了2次海平面相对上升。

蓝塘群古盐度在银瓶山组中部出现一个高峰,反映古水深在中部最深;向银瓶山组顶部,古盐度降低,古水深变浅。上龙水组中下部古盐度又出现1次高峰,反映上龙水组中下部水体古水深逐渐变深。上龙水组顶部至长埔组的古盐度逐渐变小,反映该段水体古水深逐渐变浅。向上至吉水门组水体古盐度又逐渐增高,古水深逐渐变深。从青坑村组底部到中上部古盐度逐渐增加,反映古水深逐渐变深。由中上部到上部古盐度逐渐降低,古水深逐渐变浅。下侏罗统蓝塘群经历了4次海平面相对上升和3次相对下降。海平面相对上升发生在银瓶山组中部、上龙水组、吉水门组和青坑村组中上部。相对下降发生在银瓶山组上部、长埔组和青坑村组下部。其中,影响规模最大的2次海平面相对上升发生在上龙水组和吉水门组。

下一中侏罗统桥源组底部到中下部古盐度逐渐增加,反映古水深逐渐变深。中下部到中部古盐度逐渐降低,反映古水深逐渐变浅。中部到中上部古盐度逐渐变大,反映古水深逐渐变深。中上部到上部古盐度逐渐变小,反映古水深逐渐变浅。下一中侏罗统桥源组发生了2次海平面波动,分别发生在桥源组中下部和中上部。在桥源组中上部之后,发生了影响范围覆盖整个广东地区的海退事件。

3.3 华南陆缘海平面相对升降与全球海平面变化对比

Vail *et al.* (1977)建立的全球海平面变化曲线由1条长周期曲线和1条短周期曲线构成(图3)。在晚三叠世诺利克阶—中侏罗世阿连阶(约51 Ma)的长周期曲线显示,瑞替阶晚期—赫唐阶(约10 Ma)、普林斯巴阶晚期—托阿尔阶早期(约5 Ma)和阿连阶早期(约4 Ma)全球海平面发生海退。在诺利克阶早期、辛涅缪尔阶早期和托阿尔阶中期发生海侵。短周期曲线显示,在晚三叠世诺利克阶—中侏罗世阿连阶全球海平面共发生了14次海平面的波动。

晚三叠诺利克阶—瑞替阶(约12 Ma)发生了2次海平面的波动。早侏罗世赫唐阶—托阿尔阶(约31 Ma)发生了10次海平面的波动。中侏罗世阿连

阶发生了2次海平面的波动。

利用元素地球化学指示的晚三叠世诺利克阶—中侏罗世阿连阶(约51 Ma)的古盐度、古水深变化绘制的I级海平面相对变化曲线显示粤中—粤东地区发生了2次海退(图3)。一次发生在瑞替阶晚期—赫唐阶(约10 Ma);另一次发生在普林斯巴阶晚期—中侏罗世阿连阶(约24 Ma),这次海退使得粤中—粤东地区由海相沉积转变为陆相沉积。I级海平面相对变化曲线显示,海侵发生在诺利克阶早期和辛涅缪尔阶早期。III级海平面相对变化曲线共发生了10次海平面波动。晚三叠诺利克阶—瑞替阶(约12 Ma)发生了3次海平面的波动。早侏罗世赫唐阶—托阿尔阶(约31 Ma)发生了5次海平面的波动。中侏罗世阿连阶发生了1次海平面的波动。

粤中—粤东地区I级海平面相对变化曲线与Vail *et al.* (1977)建立的全球海平面变化长周期曲线可对比。III级海平面相对变化曲线与Vail *et al.* (1977)建立的全球海平面变化短周期曲线可对比。下面对全球海平面变化与粤中—粤东地区海平面相对变化曲线进行对比:(1)诺利克阶早期全球海平面变化长周期曲线显示海平面上升,粤中—粤东地区海平面相对变化曲线显示海平面上升;(2)瑞替阶晚期—赫唐阶全球海平面变化长周期曲线显示海平面发生下降,粤中—粤东地区I级海平面相对变化曲线显示海平面发生了下降;(3)辛涅缪尔阶早期—普林斯巴阶晚期全球海平面变化长周期曲线显示海平面上升,粤中—粤东地区在辛涅缪尔阶早期—辛涅缪尔阶晚期I级海平面相对变化曲线显示海平面上升,在辛涅缪尔阶晚期—普林斯巴阶晚期显示海平面下降;(4)普林斯巴阶晚期—托阿尔阶早期全球海平面变化长周期曲线显示海平面下降,粤中—粤东地区I级海平面相对变化曲线显示海平面持续下降;(5)托阿尔阶早期—阿连阶晚期全球海平面变化长周期曲线显示海平面发生了2次上升和1次下降,粤中—粤东地区I级海平面相对变化曲线显示海平面仍然持续下降;(6)全球海平面短周期波动和粤中—粤东地区III级海平面相对变化曲线波动在瑞替阶—辛涅缪尔阶晚期均出现4次波动,这4次波动在时间上近乎同步。

粤中—粤东地区上三叠统凤岗段为浅海相沉积,马鞍段为三角洲相沉积,下侏罗统蓝塘群银瓶山组和长埔组为浅海相沉积,上龙水组和吉水门组为半深海沉积。地球化学元素在比值(m 值、B/Ga、Sr/Ba和Ca/Mg)大小及曲线变化趋势上反映的古盐

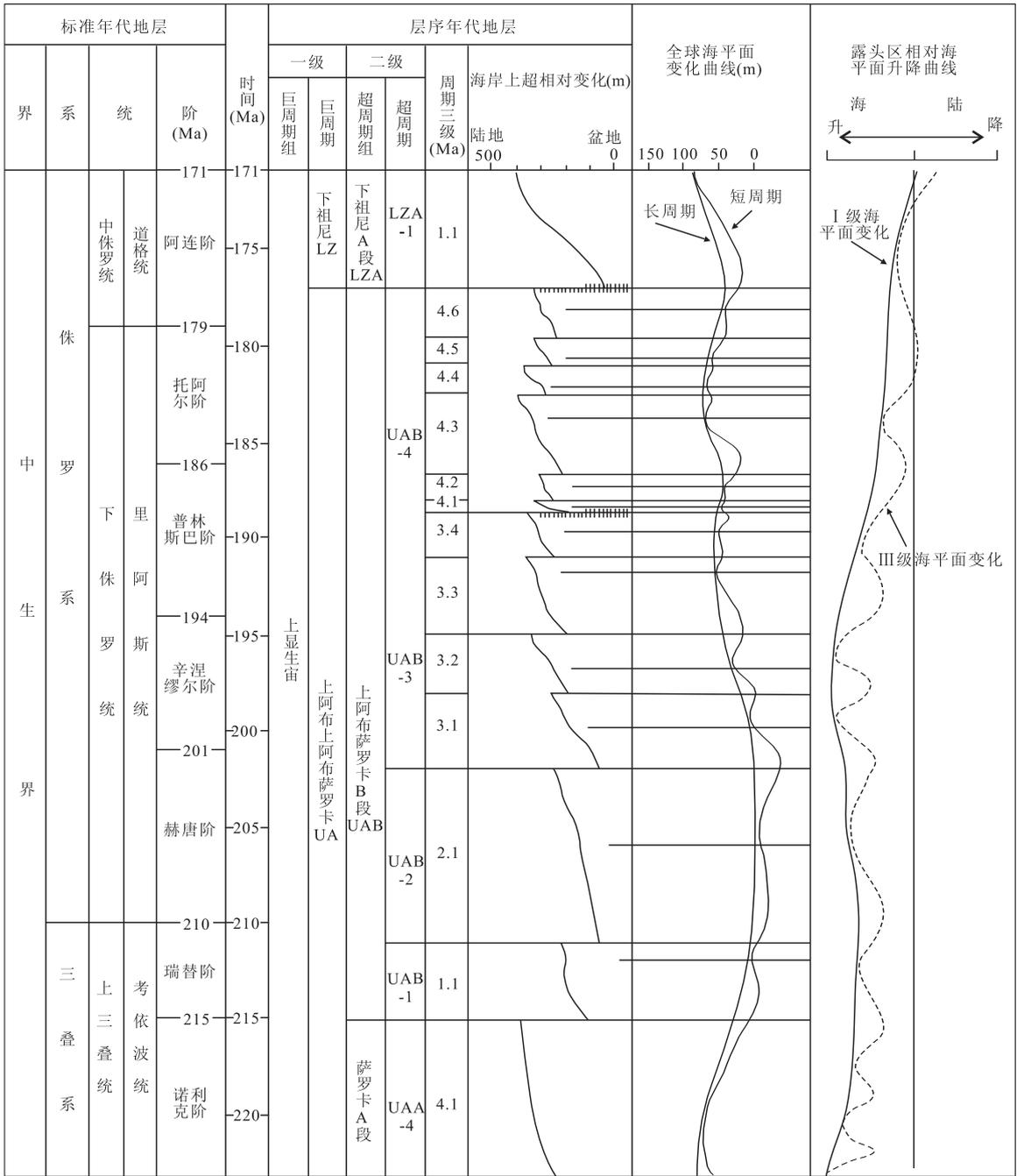


图 3 华南陆缘海平面相对升降曲线与全球海平面升降曲线对比

Fig. 3 The comparison of the sea-level relative movement curve in South China continental margin and the global sea-level movement curve

度、古水深与沉积环境反映的海侵—海退旋回一致。整体表现为诺利克阶早期—辛涅缪尔阶晚期发生的海侵—海退—海侵旋回，这与全球海平面变化同步。粤中—粤东地区下侏罗统蓝塘群青坑村组为浅海相沉积，下一中侏罗统桥源组为三角洲相和滨海相沉积组合。这 2 个组的地球化学元素特征与上三叠统和下侏罗统蓝塘群银瓶山组—吉水门组相比，元素

比值(m 值、 B/Ga 、 Sr/Ba 和 Ca/Mg)明显变小，曲线明显靠向小值区，曲线整体呈变小趋势，反映辛涅缪尔阶晚期—阿连阶的持续海退，这与全球海平面在辛涅缪尔阶早期和托阿尔阶中期发生海侵相悖。

晚三叠—早侏罗世在闽西南—粤东—粤北—粤中地区形成“粤东海盆”，在中侏罗世海盆则完全消失，中侏罗世粤东地区发育内陆盆地，河湖相红层发

育. 全球海平面变化事件因区域构造影响而复杂化, 导致同一时期的海平面变化因位置不同而存在差异. 这可能与环太平洋构造域的活动、强烈俯冲和挤压作用有关, 早、中侏罗世受古太平洋板块在日本一带俯冲作用影响, 南海北部陆缘发生了由古特提斯域向古太平洋域的转换(舒良树和周新民, 2002; 舒良树等, 2004). 赣闽粤地区再次发生挤压, 从而隆升为陆地. 这期巨大的构造变动是导致中侏罗世全球海平面上升、广东地区发生海退的重要原因.

4 元素地球化学特征对古气候演化的指示

沉积物中常量、微量元素富集与亏损分析可以获知沉积时期元素迁移变化过程. 沉积物中元素含量的聚集和分移不但取决于元素本身的物理化学性质, 而且古气候和古环境对其也有重要的影响. 沉积物中元素的分配及比值的变化, 在一定程度上指示着古气候环境的演化历程. 沉积物的元素地球化学特征能够反映古气候特征. Sr/Cu 比值介于 1.30~5.00 之间指示温湿气候, 大于 5.00 则指示干热气候(王随继等, 1997). Sr/Cu 比值的变化已成为判断古气候的重要手段(莱尔曼, 1989).

4.1 晚三叠世古气候特征

高明叠坪剖面凤岗段中段和中上段 Sr/Cu 比值均大于 5.00, 中上段 Sr/Cu 比值达到 21.30, 而下段及上段 Sr/Cu 比值均小于 3.00(表 1). 这显示高明地区凤岗段气候有明显变化. 凤岗段下部主要为温湿气候, 而中部气候变为干热气候, 上部又变为温湿气候, 但整体上凤岗段为温湿气候. 马鞍段中、下部样品的 Sr/Cu 比值均大于 5.00, 指示马鞍段为干热气候.

4.2 早侏罗世古气候特征

银瓶山组 Sr/Cu 比值均大于 5.00, 平均比值为 7.94, 反映银瓶山组为干热气候. 上龙水组 Sr/Cu 平均比值均为 14.23, 由底部至上部 Sr/Cu 比值逐渐减小, 在上龙水组顶部 Sr/Cu 比值为 3.65, 其余样品的 Sr/Cu 比值均大于 5.00, 反映上龙水组整体为干热气候, 只是在上龙水组顶部受短暂的温湿气候的影响. 长埔组 Sr/Cu 比值均大于 5.00, 反映长埔组为干热气候. 吉水门组 Sr/Cu 比值为 3.48, 反映吉水门组为温湿气候(表 1), 青坑村组底部、中上部和上部 Sr/Cu 比值变化较大(表 1), 底部 Sr/Cu

比值为 2.63, 指示其底部为气候温湿; 中上部及上部 Sr/Cu 比值均大于 10.00, 指示其为干热气候. 早侏罗世粤东地区以干热气候为主, 出现短暂温湿气候.

4.3 早、中侏罗世古气候特征

桥源组 Sr/Cu 平均比值为 2.17(表 1), Sr/Cu 比值小于 5.00, 为温湿气候. 在桥源组中部上方采集的 KT-6 样品 Sr/Cu 比值为 7.81, 推测桥源组在中部上方可能为短暂的干热气候. 早、中侏罗世桥源组时期广东地区为温湿气候.

元素地球化学特征反映, 晚三叠世中期粤中一粤东地区以温湿气候为主, 出现短暂干热气候. 晚三叠世晚期以干热气候为主. 早侏罗世早期粤中一粤东地区地区以干热气候为主. 早侏罗世晚期粤东地区以干热气候为主, 出现短暂温湿气候. 早、中侏罗世粤中一粤东地区以温湿气候为主, 出现短暂干热气候. 晚三叠世一早、中侏罗世粤中一粤东地区气候发生了由温湿—干热—温湿的转变.

根据沉积岩相和生物组合特征. 晚三叠世高明地区小坪组罗客段滨海相沉积发育煤线和煤层. 凤岗段浅海相沉积发育褐色炭质泥岩. 粤北地区良口群红卫坑组发育炭质页岩及煤层, 小水组黑色粉红色岩和页岩中夹炭质页岩和薄煤层. 滇西保山地区上三叠统大水塘组为一套海相碳酸盐岩系, 有珊瑚、有孔虫、牙形刺、腹足类、苔藓虫及双壳类等化石. 南梳坝组由泥岩、泥灰岩、灰岩组成, 以双壳类为主, 伴有菊石、牙形刺、有孔虫及珊瑚等化石(陈汉宗等, 2003). 滇西大水塘组和南梳坝可与粤北红卫坑组和小水组、粤中小坪组罗客段和凤岗段对比. 粤东揭西灰寨地区良口群头木冲组在粉砂岩及泥质粉砂岩层中含有瓣腮类化石(广东省地质矿产局, 1988), 粤东良口群头木冲组可以粤中南小坪组马鞍段对比. 粤中开平金鸡地区金鸡组赫唐阶、辛涅缪尔阶和普林斯巴阶早期均含有菊石、双壳类等化石, 金鸡组赫唐阶含有介形虫化石. 粤东惠东上龙水地区长埔组 and 上龙水组含有瓣腮类和菊石化石(广东省地质矿产局, 1988). 粤东惠来葵潭地区桥源组滨海相发育煤层, 滨海相和三角洲相泥岩和粉砂岩中含植物碎片, 见虫穴.

小坪组罗客段和凤岗段为浅海相碎屑岩和海陆交互相含煤岩系, 植物非常茂盛. 滇西保山地区产珊瑚、有孔虫等适宜在温暖、盐度正常的海洋环境中生活的生物. 小坪组马鞍段为三角洲相、蓝塘群以浅海陆棚和半深海沉积为主. 上述晚三叠世早、中期繁茂

的生物基本消声匿迹,多见广盐性的菊石、瓣鳃类生物。标志着晚三叠世晚期和早侏罗世具有干燥气候特征,恰与在温湿气候环境下沉积的晚三叠世早、中期含煤地层形成鲜明对比。早、中侏罗世桥源组又发育海陆交互相含煤岩系,动植物丰富。表明早侏罗世的干燥气候到早、中侏罗世结束,重新转变为温暖、潮湿的气候。晚三叠世至早、中侏罗世元素地球化学特征反映的古气候与沉积岩相及生物组合反映的古气候具有一致性。

5 结论

(1)晚三叠—中侏罗世南海北部存在 3 个级别的海平面变化。Ⅰ级海平面的相对变化由早侏罗世的海侵和中侏罗世的海退构成。Ⅱ级海平面相对变化由晚三叠世诺利克阶早期 1 次海侵、早侏罗世早期的 2 次大规模海侵、早侏罗世晚期的 1 次小规模海侵和海侵之间的海退构成。Ⅲ级海平面波动频繁。晚三叠世经历了 3 次海平面波动,早侏罗世经历了 4 次波动,早、中侏罗世经历了 2 次波动,构成了此间大规模海侵—海退旋回。

(2)瑞替阶—辛涅缪尔阶晚期全球海平面短周期波动和粤中—粤东地区Ⅲ级海平面相对变化曲线均发生 4 次波动,且时间上近乎同步。

(3)华南陆缘Ⅰ级海平面相对升降曲线与全球海平面长周期曲线,在诺利克阶早期—辛涅缪尔阶晚期变化同步,表现为海侵—海退—海侵的旋回;而在辛涅缪尔阶晚期—阿连阶变化相悖,表现为粤中—粤东地区持续海退,全球海平面在辛涅缪尔阶早期和托阿尔阶中期发生海侵。

(4)晚三叠世中期研究区以温湿气候为主,晚期以干热气候为主,早侏罗世以干热气候为主,早、中侏罗世以温湿气候为主,晚三叠世—早、中侏罗世研究区气候经历了温湿—干热—温湿的变化。

致谢:感谢“吉林大学东北亚生物演化与环境教育部重点实验室”开放课题研究基金资助!

References

Chen, H. Z., Sun, Z., Zhou, D., 2003. Distributions of Mesozoic lithofacies and marine strata in South China. *Journal of Tropical Oceanography*, 22(2): 74—82 (in Chinese with English abstract).

Feng, H. Z., Yu, J. H., Fang, Y. T., et al., 1993. Analysis on palaeosalinity in Wufengian in the Upper Yangtze re-

gion. *Journal of Stratigraphy*, 17(3): 179—185 (in Chinese).

- Fu, Q., 2005. Rare elements utility in Paleo-Lake evolution and signification of Lower Tertiary Funing Formation, Gaoyou sag, Subei basin. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 33(9): 1219—1239 (in Chinese with English abstract).
- Guangdong Province Bureau of Geological and Mineral, 1988. Regional geology of Guangzhou Province. Geological Publishing House, Beijing, 180—198 (in Chinese).
- Han, Y. L., Wang, H. H., Chen, Z. H., et al., 2007. Paleosalinity analysis and trace element geochemistry of Chang-6 Member in Gengwan-Shijiawan area, Ordos basin. *Lithologic Reservoirs*, 19(4): 16—20 (in Chinese with English abstract).
- Hao, H. J., Lin, H. M., Yang, M. X., et al., 2001. The Mesozoic in Chaoshan depression; a new domain of petroleum exploration. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 15(3): 157—163 (in Chinese with English abstract).
- Hao, H. J., Wang, R. L., Zhang, X. T., et al., 2004. Mesozoic marine sediment identification and distribution in the eastern Pearl River Mouth basin. *China Offshore Oil and Gas*, 16(2): 84—88 (in Chinese with English abstract).
- He, J. X., Shi, X. B., Xia, B., et al., 2007. The status of the petroleum exploration in the northern South China Sea and the resource potential in the deep-water areas. *Advances in Earth Science*, 22(3): 261—270 (in Chinese with English abstract).
- Huang, J. X., 1986. Preliminary study of geochemistry in the vertical sediments from the central Pacific. *Marine Science Bulletin*, 5(3): 41—48 (in Chinese with English abstract).
- Keith, M. L., Degens, E. T., 1959. Geochemical indicators of marine and fresh water sediments. In: Abelson, P. H., ed., *Researches in geochemistry*. John Wiley & Sons, New York, 38—61.
- Lerman, A., 1989. The chemical geology and physics of the lakes. Translated by Wang, S. M.. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Li, J. L., Chen, D. J., 2003. Summary of quantified research method on paleosalinity. *Geology and Recovery Efficiency*, 10(5): 1—3 (in Chinese with English abstract).
- Ma, L., Chen, H. J., Gan, K. W., et al., 2004. The continental tectonics and the marine petroleum geology in South China (I). Geological Publishing House, Beijing, 86—90 (in Chinese).

- Qiu, X. W., Liu, C. Y., Mao, G. Z., et al., 2011. Petrological-geochemical characteristics of volcanic ash sediments in Yanchang Foramtion in Ordos basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 36(1): 139—150 (in Chinese with English abstract).
- Shu, L. S., Zhou, X. M., 2002. Late Mesozoic tectonism of Southeast China. *Geological Review*, 48(3): 249—260 (in Chinese with English abstract).
- Shu, L. S., Zhou, X. M., Deng, P., et al., 2004. Geological features and tectonic evolution of Meso-Cenozoic basins in southeastern China. *Geological Bulletin of China*, 23(9—10): 876—884 (in Chinese with English abstract).
- Vail, P. R., Mitchum, R. M., Thompson, J. R., et al., 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea level. In: Payton, C. E., ed., Seismic strairgraphy-applications to hydrocarbon exploration. *American Association of Petroleum Geologists Memoir*, 26: 49—212.
- Wang, S. J., Huang, X. Z., Tuo, J. C., et al., 1997. Evolutional characteristics and their paleoclimate significance of trace elements in the Hetaoyuan Formation, Biyang depression. *Acta Sedimentologica Sinica*, 15(1): 65—70 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S. S., Cao, Z. M., Lan, D. Z., et al., 2010. Geochemical characteristics of sediment of Pearl River estuary and its paleoenvironmental evolution. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35(2): 261—267 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. Y., Guo, W. Y., Zhang, G. D., 1979. Application of some geochemical indicators in determining of sedimentary environment of the Funing Group, Jinhua depression, Kiangsu Province. *Journal of Tongji University*, (2): 51—60 (in Chinese with English abstract).
- Wen, H. G., Zheng, R. C., Tang, F., et al., 2008. Reconstruction and analysis of paleosalinity and paleoenvironment of the Chang-6 Member in the Gengwan region, Ordos basin. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 28(1): 114—120 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. J., Cheng, R. H., Wang, L. L., et al., 2009. Paleosalinity records to sea level change of the northern margin of the South China Sea in Early Jurassic. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(6): 1147—1154 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. J., Cheng, R. H., Wang, L. L., et al., 2010. Elemental geochemical characteristics of tuffaceous sediments and tectonic setting of Tangxia Formation of Middle Jurassic in Dongguan, Guangdong Province. *Acta Petrologica Sinica*, 26(1): 352—360 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. S., 1990. Changes of Mg/Al content ratio in surface sediments from Central Pacific Ocean. *Journal of Oceanography Taiwan Strait*, 9(3): 244—249 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y. S., Song, Z. Y., Wen, J. P., et al., 1998. Quantitative evaluation of paleosalinites and distribution of trace elements in the lacustrine mudstone of Baoshan basin. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 29(4): 409—416 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, R. C., Liu, M. Q., 1999. Study on palaeosalinity of Chang-6 oil reservoir set in Ordos basin. *Oil and Gas Geology*, 20(1): 20—26 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, D., Sun, Z., Chen, H. Z., et al., 2005. Mesozoic lithofacies, paleo-geography, and tectonic evolution of the South China Sea and surrounding areas. *Earth Science Frontiers*, 12(3): 204—218 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈汉宗, 孙珍, 周蒂, 2003. 华南中生代岩相变化及海相地层时空分布. *热带海洋学报*, 22(2): 74—82.
- 冯洪真, 俞剑华, 方一亭, 等, 1993. 五峰期上扬子海古盐度分析. *地层学杂志*, 17(3): 179—185.
- 傅强, 2005. 微量元素分析在高邮凹陷古近纪湖泊演化中的应用. *同济大学学报(自然科学版)*, 33(9): 1219—1239.
- 广东省地质矿产局, 1988. 广东省区域地质志. 北京: 地质出版社, 180—198.
- 韩永林, 王海红, 陈志华, 等, 2007. 耿湾—史家湾地区长6段微量元素地球化学特征及古盐度分析. *岩性油气藏*, 19(4): 16—20.
- 郝沪军, 林鹤鸣, 杨梦雄, 等, 2001. 潮汕坳陷中生界——油气勘探新领域. *中国海上油气(地质)*, 15(3): 157—163.
- 郝沪军, 汪瑞良, 张向涛, 等, 2004. 珠江口盆地东部海相中生界识别及其分布. *中国海上油气*, 16(2): 84—88.
- 何家雄, 施小斌, 夏斌, 等, 2007. 南海北部边缘盆地油气勘探现状与深水油气资源前景. *地球科学进展*, 22(3): 261—270.
- 黄剑霞, 1986. 中太平洋垂向沉积物地球化学初步研究. *海洋通报*, 5(3): 41—48.
- 莱尔曼, 1989. 湖泊的化学地质学和物理学. 王苏民, 译. 北京: 地质出版社.
- 李进龙, 陈东敬, 2003. 古盐度定量研究方法综述. *油气地质与采收率*, 10(5): 1—3.
- 马力, 陈焕疆, 甘克文, 等, 2004. 中国南方大地构造和海相油气地质(上). 北京: 地质出版社, 86—90.

- 邱欣卫,刘池洋,毛光周,等,2011.鄂尔多斯盆地延长组火山灰沉积物岩石地球化学特征.地球科学——中国地质大学学报,36(1):139-150.
- 舒良树,周新民,2002.中国东南部晚中生代构造作用.地质论评,48(3):249-260.
- 舒良树,周新民,邓平,等,2004.中国东南部中、新生代盆地特征与构造演化.地质通报,23(9-10):876-884.
- 王珊珊,曹志敏,兰东兆,等,2010.珠江口沉积地球化学特征与古环境演化过程.地球科学——中国地质大学学报,35(2):261-267.
- 王随继,黄杏珍,妥进才,等,1997.泌阳凹陷核桃园组微量元素演化特征及其古气候意义.沉积学报,15(1):65-70.
- 王益友,郭文莹,张国栋,1979.几种地球化学标志在金湖凹陷阜宁群沉积环境中的应用.同济大学学报,2:51-60.
- 文华国,郑荣才,唐飞,等,2008.鄂尔多斯盆地耿湾地区长 6 段古盐度恢复与古环境分析.矿物岩石,28(1):114-120.
- 许中杰,程日辉,王嘹亮,等,2009.南海北部陆缘早侏罗世海平面变化的古盐度记录.沉积学报,27(6):1147-1154.
- 许中杰,程日辉,王嘹亮,等,2010.广东东莞地区中侏罗统塘厦组凝灰质沉积物的元素地球化学特征及构造背景.岩石学报,26(1):352-360.
- 张士三,1990.太平洋中部表层沉积物镁铝含量比的变化.台湾海峡,9(3):244-249.
- 赵永胜,宋振亚,温静萍,等,1998.保山盆地湖相泥岩微量元素分布与古盐度定量评价.海洋与湖沼,29(4):409-416.
- 郑荣才,柳梅青,1999.鄂尔多斯盆地长 6 油层组古盐度研究.石油与天然气地质,20(1):20-26.
- 周蒂,孙珍,陈汉宗,等,2005.南海及其围区中生代岩相古地理和构造演化.地学前缘,12(3):204-218.