南海 IODP 349 航次 U1434 站位海相红层成因 ——来自漫反射光谱与 X 荧光光谱的制约

姜莲婷1,孙杰1*,胡立天2,3*,詹文欢1,唐琴琴1,李健1

1. 中国科学院边缘海与大洋地质重点实验室,南海海洋研究所,广东广州 510301

2. 中山大学地球科学与工程学院,广东广州 510275

3. 广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室, 广东 广州 510275

摘 要提出 IODP349 航次首次在南海发现的大洋红层,与 ODP124 航次苏禄海、苏拉威西海大洋红层以及三水盆地陆相红层相似,都具有直接覆盖于大规模岩浆岩之上的特征,对于揭示红层与岩浆热事件的关系具有重要意义。自上而下采集 U1434 站位灰绿色一红棕色海相沉积序列进行测试分析,并设计实验模拟沉积一成岩过程中氧逸度和地热温度对红层色素形成的控制作用,通过红色与非红色沉积、实测与实验样品的对比分析,探讨红层成因机制及其地质意义。采用漫反射光谱、荧光光谱分析以及二价铁滴定测试,量化分析了海相沉积与实验样品的颜色红度值、针铁矿、赤铁矿与不同价位铁元素的含量,得到以下新认识:U1434 站位红色—非红色海相沉积均形成于较高的氧逸度条件,水体氧化还原环境的差异并不是控制红色与非红色沉积的主要因素;U1434 站位大洋红层直接覆盖大洋玄武岩,起源于沉积一成岩阶段的高地温作用;陆相红层和白垩纪海相红层均分布于相应时期的构造一岩浆活动带,暗示了红层对地质热事件具有重要的指示意义。

关键词 大洋红层; 热成因; 氧逸度; 南海 中图分类号: P736 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)04-1294-07

引 言

"红层"以地层颜色总体呈现 Munsell 色卡 5R~10R 范 围内的红色为特征,根据沉积环境可分为陆相和海相红层。 红层具有标志性的颜色以及特殊的沉积环境,对古气候、古 环境、古地理以及沉积机制等具有重要的指示作用,是认识 沉积圈、大气圈以及岩石圈物质演化与能量交换过程的重要 窗口^[1-2]。Xu等认为白垩纪大洋红层与富氧作用是探索全球 性海洋事件和地球表层系统的关键钥匙^[2]。

然而,相对于研究历史较长、研究程度较高的陆相红层 而言,海相红层长期未受到重视,直至20世纪末才被列入国 际地球科学计划,并迅速成为新的研究热点。2014年由我国 科学家主导的 IODP349 航次,首次在南海获得了海底红层 沉积,具有极高的科学价值^[3-4]。事实上,海相与陆相红层虽 然沉积于不同环境,但主要致色矿物都是赤铁矿,往往形成 于成积成岩阶段含铁矿物向赤铁矿的转化,例如德国和土耳 其 Eastern Pontides 地区远洋红层^[5-6]。因此,作者基于前期 陆相红层研究,引入红层形成的地热温度和氧逸度控制因 素,利用模拟实验与 IODP349 航次 U1434 站位红色一非红 色海相沉积进行对比,以新的角度思考红层成因,对于拓展 红层地质研究具有重要意义。

1 U1434 站位钻孔岩心特征

IODP349 航次在南海中央海盆完成了 5 个站位的钻探, 其中 U1431, U1433 和 U1434 站位均揭露了大洋红层(Ⅲ), 获取了大量具有极高科学价值的岩芯。图 1 为 U1434 站位岩 芯柱状图, 沉积单元 Ⅱ 和 Ⅲ 具有相似的沉积相, 前者为一套 灰绿色富含微型浮游生物化石的粘土岩和粘土质白垩, 后者 为红色、红褐色富含微型浮游生物或有孔虫化石的粘土岩, 二者的主要差别在于沉积物颜色, 分别为灰绿色和红色(即 大洋红层), 这种沉积相相似的红色一非红色沉积旋回为探 索大洋红层致色机制提供了宝贵的沉积记录^[3]。另外值得关

收稿日期: 2017-11-13,修订日期: 2018-06-23

基金项目:国家自然科学基金项目(41706058,41376063),中国科学院边缘海与大洋地质重点实验室开放基金项目(MSGL15-01)资助 作者简介:姜莲婷,1987年生,中国科学院边缘海与大洋地质重点实验室助理研究员 e-mail: liantingyihe@163.com

层以及三水盆地陆相红层分别上覆于大规模的玄武岩和花岗 岩体^[4,6],即它们都具有直接覆盖岩浆岩的产状特征。



图 1 IODP349 航次钻孔揭露红层沉积的站位(U1431, U1433, U1434)示意图 以及 U1434 站位沉积单元 Ⅱ 和 Ⅲ 岩芯柱状图

Fig. 1 The positions of Site U1431, U1433 and U1434 disclosing oceanic redbeds, and the lithostratigraphy summary and interpretation of depositional processes, Unite II and III (oceanic redbeds) in Site U1434

据此,有学者推测直接覆盖玄武岩的大洋红层主要受控 于海盆的海底扩张事件,可能表征了海底扩张停止;也有观 点认为它们起源于缓慢的沉积速率,能够指示海底扩张停止 后迅速到来的"宁静"^[3-4]。然而,现代大洋红色沉积物沉积 速率仅为1~5 mm·km⁻¹,而南海红层沉积速率高达1.6 cm·km⁻¹,并且与上覆灰绿色沉积无明显差异^[3],暗示红 层形成与缓慢的沉积速率无直接关系。那么,直接覆盖玄武 岩的大洋红层是否与岩浆活动具有成因联系,或形成于大洋 富氧事件?本文以此为切入点设计了两个模拟实验,讨论沉 积一成岩过程中地热温度与氧逸度对红层形成的控制作用, 探索 U1434 站位海相红层成因及其对地质热事件、古环境变 迁或海底扩张等重大地质事件的指示意义。

2 海相沉积样品测试分析

本文针对 IODP 349 航次 U1434 站位中-晚中新世沉积 单元 II 和 III 的 6R—10R 岩芯,自上而下采集红色—非红色 沉积序列的 7 个样品,采样深度分别为 235.6,238.9, 246.4,255,258.1,266.1 和 276.9 m。沉积物组成以灰绿色 和棕红色粘土岩和粘土质白垩为特征,且含丰富的微型浮游 生物和有孔虫化石^[3],其中灰绿色沉积样品自上而下依次标 记为 G1,G2 和 G3,棕红色沉积样品标记为 R1,R2,R3,和 R4。

2.1 漫反射光谱分析

由于样品中针铁矿和赤铁矿等矿物颗粒非常细小且含量低,普通方法很难检测得到,而漫反射光谱(diffuse reflectance spectrometry, DRS)对铁矿物含量的变化尤其敏感,铁 的氧化物含量在 0.01%左右就可以被检测到,为样品的含铁 矿物及染色度的测定提供了有效的检测手段^[7]。因此,本文 利用 Perkin-Elmer Lambda 950 紫外-可见-近红外分光光度 计(扫描间隔为 0.5 nm),对沉积物中铁氧化物进行定量/半 定量分析。

图 2 所示为 U1434 站位灰绿一棕红色海相沉积 7 个样 品的漫反射光谱一阶导数曲线,所有样品都具有 555 nm 的 赤铁矿物峰以及 435 nm(或 425 nm)的针铁矿物峰,其中 535 nm 的针铁矿物峰受到赤铁矿干扰而并不显著。对比样品峰 高特征可知,从 G1 至 R3 随样品埋藏深度的增大,赤铁矿 555 nm 特征峰显著升高;而位于最深部的 R4 与其他红层 (R1—R3)样品相比,赤铁矿和针铁矿物峰均明显较低,可能 受到了右侧峰值的影响,因此不能简单以 R4 的峰高值代表 矿物含量与其他样品进行对比,但可以利用赤铁矿与针铁矿 的峰高比值(H_{hem} / H_{goe})表征样品的矿物含量比例。因此, 本文计算了各样品 H_{hem} / H_{goe} 值,结果表明随沉积物埋深增 大, H_{hem} / H_{goe} 值从 0.7 增加到 2.8,具有自上而下逐渐增 大的趋势(图 3)。根据红度值(Red-value)公式^[8]定量描述样 品红色素的染色程度,发现沉积物红度值随埋深而显著增大



(图 3); 进一步分析 7 个样品 H_{hem} / H_{goe} 与 Red-value 的相 关性特征(图 3),发现二者的正相关系数高达 0.92,暗示针 铁矿转化赤铁矿含量的增大可能是沉积物红度值升高的原因。





Fig. 3 The relaionship between red-value and $H_{\text{hem.}}/H_{\text{goe.}}$ of the 7 marine sediments in Sites U1434

2.2 荧光光谱测试

利用元素地球化学方法分析红层中元素来源及其富集或 亏损状态,是探索红层成因、重建古海洋环境的重要环节。 本文利用 ME-XRF26 荧光光谱仪对红层主量元素进行测试, 结合酸消解、重铬酸钾滴定(Fe-VOL05)法测定氧化亚铁含 量,计算样品 FeO, Fe₂O₃和 TFe₂O₃指标,分析其他主量元 素与 Al₂O 和 TiO₂含量的关系,以判别沉积物来源、示踪沉 积一成岩阶段的氧化还原环境。

表1为U1434站位7个海相沉积样品主量元素分析结 果,显示了沉积物随埋深增加Al₂O₃含量从18.18%减少到 12.78%,具有逐渐降低的趋势,反映了陆源碎屑输入量的 减少。结合其他主量元素与Al₂O₃,TiO₂含量的相关性分析 (图4)可知,沉积物SiO₂含量高达41%~53%,平均值约 46%,与Al₂O₃和TiO₂含量的正相关系数高达0.89和 0.83,揭示SiO₂主要来源于陆源碎屑物质的输入,并且是 构成碎屑的主要组成成分;而CaO与Al₂O₃,TiO₂含量具 有良好的负相关关系,相关系数为0.75和0.72,表明Ca 元素不是来自陆源碎屑的供给,而主要形成于海洋生物成 因或水溶液中饱和沉淀的自生成因,是陆源碎屑物质之外 的主要组成成分,对陆源碎屑含量起到了"稀释"作用;然 而MgO和MnO含量与Al₂O₃和TiO₂含量的相关系数较低 (0.17~0.30),表明它们形成于陆源碎屑与自生矿物等共 同来源。

表 1 U1434 站位 7 个海相沉积物主量元素数据 Table 1 Major element compositions of the 7 marine sediments in Sites U1434

			0							
Samples	Fe_2O_3	FeO	$\mathrm{Fe_2O_3/FeO}$	TFe_2O_3	$\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$	${\rm TiO}_2$	SiO_2	CaO	MnO	MgO
G1	4.24	1.21	3.51	5.59	18.18	0.69	47.69	7.58	0.16	2.39
G2	5.49	0.98	5.60	6.58	17.20	0.60	48.82	6.24	0.31	2.72
G3	5.73	0.90	6.37	6.73	16.82	0.65	49.49	5.87	0.33	2.88
R1	4.64	0.70	6.63	5.42	14.38	0.52	42.25	12.90	0.35	2.49
R2	6.46	0.86	7.51	7.42	18.50	0.68	52.77	1.83	0.31	3.06
R3	4.63	0.55	8.42	5.25	13.64	0.51	41.25	14.20	0.20	2.44
R4	6.83	0.11	62.08	6.96	12.78	0.49	40.91	11.10	0.65	5.34

铁元素是影响沉积物颜色的主要因素,并且对氧化还原 条件敏感,在示踪古海洋环境方面具有独特的优势。对比7 个样品 FeO 含量及其与 Al₂O₃,TiO₂ 含量相关性可知,FeO 含量自上而下逐渐降低,从1.21%减小到0.11%,并且与 Al₂O₃,TiO₂ 含量的正相关系数高达0.78和0.70,表明 FeO 主要来源于陆源碎屑沉积。并且,不同于西藏白垩纪海 相红层 Fe₂O₃(平均8.4%)远高于相邻灰色页岩(仅1%~ 4%)的特征^[9],南海U1434站位灰绿色和红棕色海相沉积 Fe₂O₃含量分别为4.2%~5.7%和4.6%~6.8%,二者差异 十分微小,无明显变化规律,与 Al₂O₃,TiO₂含量的相关性 极低,仅为0.006和0.003,暗示 Fe₂O₃主要形成于沉积— 成岩阶段的自生作用,而不是陆源碎屑输入。TFe₂O₃含量 特征与 Fe₂O₃ 相似,无明显变化规律并且与 Al₂O₃,TiO₂ 无 相关性。综上所述,U1434站位灰绿一棕红色海相沉积物中 二价铁主要来自于陆源输入,与富含 SiO₂的碎屑物质一起 搬运到海水中沉积,后期未发生明显的价位改变(可能主要 赋存于硅酸盐矿物晶格); Fe₂O₃ 主要形成于沉积—成岩阶 段的自生作用,该时期的氧逸度环境直接决定了沉积层固定 流体中溶解态 Fe 的能力,换言之,U1434 站位沉积物 Fe₂O₃ 的富集或亏损状态能够反映沉积—成岩过程中氧化还原环境 的差异。

3 红层色素控制因素的实验研究

红层中含有大量自形赤铁矿,主要形成于沉积一成岩阶 段氧化条件下褐铁矿的脱水转化过程^[8-9]。长期以来,学者 们将大洋红层的形成与大洋富氧事件相关联,强调古气候、 古环境、古地理以及沉积机制等因素对海底富氧的贡 献^[1,2,9-11]。事实上,从化学角度分析,赤铁矿生成反应是吸 热反应,温度控制着反应速率和平衡,合成化学、磁学以及 实验岩石学研究都表明,针铁矿转化为赤铁矿的初始温度约 150℃^[6,12]。近年来研究揭示华南陆相红层色素起源于成岩 阶段的高地温作用^[6,8,13]。然而,目前尚未有学者提及地热 温度对大洋红层形成的重要影响。因此,本文通过模拟实 验,量化分析温度和氧逸度条件对红层色素形成的控制作 用,为重新认识红层控制因素提供实验数据支持。

3.1 氧逸度实验

图 5(a)所示高温烧制的红砖,其外层为红色、内部却为 灰黑色,图 5(b)为未经烧制的棕色砖坯。本文采集 red, black和 brown 样品进行对比,以验证红层形成过程中游离 氧的作用。利用荧光光谱以及酸消解和重铬酸钾滴定法,分析样品不同价位铁元素含量。结果如表2所示,red,brown和black三个样品Fe₂O₃含量依次减小、FeO含量依次增大、Fe₂O₃/FeO比值也逐渐减小。这是由于棕色砖坯(brown)在高温烧制过程中,外表面与氧气充分接触,大量低价铁被氧化为三价铁、针铁矿也快速脱水转化为红色的赤铁矿,因而外表面(red)呈现出红色;内部则因与氧气隔绝,在高温作用下三价铁被大量还原为二价铁、针铁矿脱氧转化为黑色的磁铁矿,内部(black)呈现出灰黑色。实验结果揭示,在红层形成过程中,游离氧的供给是红层色素赤铁矿形成的必要条件之一。









图 5 (a)高温烧制的红砖,外层为红色、内部灰黑色; (b)未经烧制的棕色砖坯 Fig. 5 (a) A brick burned at a high temperature, which outside is red and inside is gray-black; (b) A adobe without burning

表 2 实验 1 样品 FeO, Fe₂O₃ 含量 以及 Fe₂O₃/FeO 比值

 Table 2
 The ferrous and ferric oxide contents, and their ratios from the experiment 1

	-		
Sample	$Fe_2O_3/\%$	$\mathrm{FeO}/\%$	$Fe_2O_3/FeO/\%$
Red	6.10	1.53	3.99
Brown	2.56	1.66	1.54
Black	2.31	3.96	0.58

与该实验对比可知,南海 U1434 站位 7 个海相沉积 FeO 含量虽然随样品埋深而逐渐减小,但各样品间 FeO 含量差异 较小(0.11%~1.21%),平均值仅为 0.76%,均小于 red (1.53%)和 brown(1.66%),明显小于 black(3.96%);沉积 物 Fe₂O₃ 含量变化无规律性,变化范围较小(4.24%~ 6.83%),平均值高达 5.43%,接近 red(6.10%)而明显大于 black(2.31%)和 brown(2.56%);样品 Fe₂O₃/FeO 随埋深逐 渐增大,R5 样品比值高达 62.08,其他样品比值 3.51~ 8.42,与 red 比值相当(3.99),明显大于 black(0.58)和 brown(1.54)。上述海相沉积 FeO, Fe₂O₃ 和 Fe₂O₃/FeO 指 标均与 red 相似,并且样品间差异较小,都具有相对较低的 FeO 以及较高的 Fe₂O₃ 与 Fe₂O₃ /FeO,表明海相沉积的氧 化一还原环境与 red 的形成条件相似,揭示红层及其上覆灰 绿色沉积均形成于较高氧逸度环境。另外,由于海相沉积物 中自生成因的 Fe₂O₃ 富集或亏损状态能够反映氧化还原环 境的差异,那么灰绿色一红色沉积序列 Fe₂O₃ 含量变化无规 律且差异较小,则表明红层形成时期的水体氧逸度并非总高 于灰绿色沉积,即沉积一成岩阶段的氧化还原环境不是控制 U1434 站位红色与非红色沉积的主要因素。

3.2 地热温度实验

作者曾通过现代沉积物加热实验模拟红层形成过程,量 化揭示了富氧情况下温度对于色素赤铁矿的作用,证实高地 热温度是控制红层形成的重要因素。实验对现代沉积物进行 不同方式的加热,首先利用马沸炉对粉末状样品进行全方位 加热,设计了恒时变温与恒温时长加热实验,获得不同红度 的样品,揭示针铁矿脱水转化为赤铁矿的初始温度约为 150 ℃;其次,利用电热板对块状样品进行单向加热,成功模拟 了地热梯度对沉积物的加热作用,重现了红层完整的构造— 沉积旋回的色素变化序列和过程(图 6)^[6]。



图 6 实验 2 块状样品经电热板 450 ℃恒温加热 7 d 后颜色纵向变化与 Munsell 色值(样品底部恒温~300 ℃, 顶部~70 ℃) Fig. 6 Colour variation of an air-dried black mud block heated on a hot-plate at 450 ℃ for 7 days together with Munsell-colour values of the powders (right)^[6] from the experiment 2





加热前,均匀的黑色淤泥块状样品一阶导数曲线显示出 明显的针铁矿物峰,无赤铁矿物峰;电热板加热后,随着温 度自块状样品顶部向底部增加,针铁矿物峰逐渐降低(a,b 样品针铁矿已消失),而赤铁矿物峰逐渐升高,并且曲线形 态趋近于三水盆地陆相红层(赤铁矿物峰显著,无针铁矿物 峰)(图7),表明随温度升高针铁矿向赤铁矿的转化量增大, 因此样品红度值增加(30.14增加到35.16),证实了红层起 源于沉积—成岩阶段的高地温作用^[6]。

事实上,与块状样品特征相似,U1434 站位灰绿色一红 棕色海相沉积也具有上灰下红的颜色序列,沉积物红度值自 上而下逐渐增大,漫反射光谱一阶导数曲线 H_{hem.}/H_{goe.}随埋 深增加而呈增大趋势(从 0.7 增大到 2.8),与块状加热实验 样品相似,曲线形态呈现出由褐色淤泥原样(H_{hem.}/H_{goe.}→ 0)逐渐演化为三水盆地红层(H_{hem.}/H_{goe.}→∞)的趋势。上述 结果揭示了随沉积物的埋深增加或者受到下部岩浆活动的加 热作用,地热温度自上而下升高,针铁矿转化为赤铁矿的含 量增加,导致赤铁矿与针铁矿的峰高比值自上而下逐渐增 大,沉积物的红度值也随着埋藏深度逐渐升高。

4 讨 论

4.1 红层色素形成的主要控制因素

许多学者认为大洋红层的形成与沉积时期的古气候、缓 慢的沉积速度、较低的有机质含量、或者沉积后的风化作用 有关[1,2,9-11],强调了上述因素对沉积一成岩时期水体氧逸 度的控制作用,为色素赤铁矿的生成提供了必要的氧化环 境,是红层形成的决定性因素。因此普遍认为白垩纪大洋红 层的大规模分布,是全球性大洋富氧事件的结果[1-2]。然而, 合成化学实验研究表明无杂质与含杂质针铁矿转化为赤铁矿 的初始温度分别为 200 和 300 ℃; 250~500 ℃条件下玄武岩 与海水反应释放 Fe 含量比 25 ℃时增加 530 倍^[12, 14], 暗示高 温环境能促进含铁矿物大量转化为赤铁矿;并且已有研究证 实华南陆相红层色素赤铁矿起源于成岩阶段的高地温作 用^[13]。本文对比分析了 IODP 349 航次 U1434 站位红色一非 红色海相沉积序列的光谱学与实验岩石学特征:①通过氧逸 度实验揭示了沉积物 FeO, Fe₂O₃ 以及 Fe₂O₃ /FeO 指标差异 较小,均与富氧条件(red)样品相似,具有相对较低的 FeO 以及较高的 Fe₂O₃ 与 Fe₂O₃/FeO, 指示了红色一非红色海相 沉积形成于较高的氧逸度环境;并且元素地球化学研究表明 FeO 主要来自于陆源碎屑的输入,而 Fe₂O₃则形成于沉积-成岩阶段的自生作用,其含量变化差异较小且无规律性,暗 示灰绿色—红色沉积形成时期的水体氧化还原环境无明显差 异;换言之,该实验证实红层色素形成于氧化环境,但水体 氧逸度差异并不是控制 U1434 站位红色与非红色沉积的主 要因素。②地热梯度实验揭示了 U1434 站位海相沉积与单向 加热实验样品特征一致,都具有上灰下红的颜色序列,并且 样品 H_{hem.} /H_{goe.} 比值与红度值自上而下逐渐增大, 暗示了海 相沉积物埋深增加或者下部岩浆活动加热导致的地热梯度作 用,是形成灰绿色-红色海相沉积序列的重要控制因素。综 上所述,本文提出 U1434 站位红色一非红色海相沉积序列与 沉积-成岩时期氧逸度差异无关,而是形成于地热梯度的控 制作用,即U1434站位大洋红层起源于沉积-成岩阶段的高 地热温度作用。

4.2 红层分布特征及其地质意义

南海大洋红层(IODP349 航次)与苏禄海、苏拉威西海大 洋红层(ODP124 航次)以及三水盆地陆相红层相似,直接覆 盖于岩浆岩之上,暗示红层形成与岩浆热事件具有密切的成 因联系。事实上,除上述红层之外,作者发现全球不同时期 的大陆红层均分布于相应时期造山带或构造一岩浆活动带 内,早、晚古生代的红层分别集中于加里东造山带与华力西 造山带内,中、新生代红层主要分布于环太平洋带、特提斯 带以及裂谷带;并且,白垩纪大洋红层(CORB)也具有相似 的分布特征,它们大规模发育在北大西洋、南大西洋和印度 洋大陆边缘,太平洋中部岛屿或海山周围,以及太平洋 Ontong Java 和印度洋 Kergulen 海底高原之上^[11],换言之, CORB主要分布于南大西洋裂谷系和环特提斯构造带大陆边 缘,以及火山岛屿和大规模火成岩省形成的海底高原岩浆活 动带之内。综上可知,陆相和海相红层往往发育于相应时期 的构造一岩浆活动带之内,暗示构造一岩浆活动带的高地热 流值为红层色素的形成提供了较高的地热温度,例如现代海 底火山观测数据显示海底面之下 864~1 055 m 深度的温度 为100~350 ℃^[15],足以保障色素赤铁矿形成的初始温度 (150 ℃)条件。

红层因其特殊的颜色可以作为良好的指示性标志而备受 关注。长期以来学者们尝试从多角度深入挖掘红层的地质意 义,强调了它对古气候、古环境、古地理以及沉积机制等因 素的重要指示作用^[1-2,9-11]。尤其是白垩纪深水沉积同时广泛 出现大洋红层与富有机质黑色页岩的现象更成为学者们关注 的热点,普遍认为黑一红色沉积分别指示大洋缺氧与富氧事 件,记录了海底和大气中 CO₂ 与 O₂ 浓度变化过程,蕴含着 重要的白垩纪世界古海洋或古气候演化信息^[1-2],即认为红 层是沉积圈与大气圈物质(碳和氧元素)交换的结果。本文研 究揭示地热温度对红层色素赤铁矿的形成具有重要的控制, 并且红层主要分布在相应时期的构造一岩浆活动带内,因此 提出 IODP349 航次首次在南海发现的直接覆盖大洋玄武岩 的海相红层起源于沉积—成岩阶段的高地热温度作用,对地 质热事件具有重要指示意义,是沉积圈与岩石圈能量交换的 产物。

5 结 论

对比分析了 IODP 349 航次 U1434 站位红色一非红色海 相沉积序列的光谱学与实验岩石学特征,得到以下新认识:

(1) 与氧逸度实验样品的对比,揭示了沉积物 FeO, Fe₂O₃ 以及 Fe₂O₃/FeO 指标差异较小,均指示了较高的氧逸 度环境,其中的 Fe₂O₃ 起源于自生成因,含量无规律性变 化,暗示红层形成于氧化环境,但沉积一成岩阶段的氧逸度 差异并不是控制 U1434 站位红色与非红色沉积的主要因素;

(2) 红色一非红色海相沉积具有上灰下红的颜色序列, 随着埋藏深度的增加,沉积物中赤铁矿与针铁矿峰高比值以 及样品的红度值逐渐增大,与地热梯度实验结果一致,表明 U1434 站位大洋红层起源于沉积一成岩阶段的高地热温度作用。

(3)除 IODP349 与 ODP124 航次发现的直接覆盖大洋玄 武岩的大洋红层之外,陆相红层和白垩纪海相红层也分布于 相应时期的构造一岩浆活动带,暗示了红层对地质热事件具 有重要的指示意义。

References

- [1] Li J, Hu X, Zhao K, et al. Cretaceous Research, 2016, 66: 115.
- [2] Xu X M, Wang C S, Scott R W, et al. SEPM Society for Sedimentary Geology Special Publication, 2009.

- [3] Li C F, Lin J, Kulhanek D K, et al. Proceedings of the International Ocean Discovery Program, 349: South China Sea Tectonics: College Station, TX (International Ocean Discovery Program), 2014.
- [4] SONG Xiao-xiao, LI Chun-feng(宋晓晓,李春峰). Journal of Tropical Oceanography(热带海洋学报), 2016, 35(1): 17.
- [5] Eker C S, Korkmaz S. Journal of Mineralogy and Geochemistry, 2011, 188: 235.
- [6] Jiang L T, Chen G N, Grapes R, et al. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 101: 14.
- [7] Balsam W, Deaton B C. Reviews in Aquatic Sciences, 1991, 4: 411.
- [8] JIANG Lian-ting, CHEN Guo-neng, PENG Zhuo-lun(姜莲婷,陈国能,彭卓伦). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2013, 33(10): 2727.
- [9] HU Xiu-mian, WANG Cheng-shan, LI Xiang-hui, et al(胡修棉, 王成善, 李祥辉, 等). Science in China Series D Earth Sciences(中国科学 D 辑地球科学), 2006, 36(9): 811.
- [10] Li X, Cai Y. Cretaceous Research, 2013, 46: 257.
- [11] Chen X, Wang C S, Hu X M, et al. Acta Geologica Sinica, 2007, 81: 1070.
- [12] Gialanella S, Girardi F, Ischia G, et al. Journal of Thermal Analysis Calorimetry, 2010, 102: 867.
- [13] Chen G N, Grapes R H. Granite Genesis: in-situ Melting and Crustal Evolution. Dordrecht, The Netherlands: Springer, 2007.
- [14] LIU Yu-shan, ZHANG Gui-lan(刘玉山, 张桂兰). Geochimica(地球化学), 1996, (1): 53.
- [15] Chan L H, Alt J C, Teagle D A H. Earth & Planetary Science Letters, 2002, 201: 187.

The Genesis and Geological Implications for Oceanic Redbeds of the South China Sea in U1434 of IODP Expedition 349——the Constraint from Diffuse Reflectance and X-Ray Fluorescence Spectroscopy

JIANG Lian-ting1, SUN Jie1*, HU Li-tian2.3*, ZHAN Wen-huan1, TANG Qin-qin1, LI Jian1

- Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China
- 2. School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China
- Guangdong Provincal Key Lab of Geodynamics and Geohazards, School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

Abstract We presented a new finding that the occurrences of oceanic redbeds in the South China Sea (SCS) first discovered from Expedition 349 are similar to those in Sulu Sea and Celebes Sea from Expedition 124, as well as to the continental redbeds in Sanshui Basin of China, all directly covering massive magmatic rocks with significance for revealing the connections between oceanic redbeds and magma thermal events. We measured the samples collectted from marine sedimentary with colors ranging from celadon to rufous in U1434 of IODP Expedition 349, and analyzed the influence of oxygen fugacity and geothermal temperature on the formation of pigment in redbeds. By comparing red-nonred sediments and experimental samples, we discussed the redbed genesis and its geological implications. We obtained the red values, the content of goethite, hematite and quantivalent Fe in marine sediments and experiment samples through the analysis of diffuse reflectance and fluorescent spectroscopy and Fe²⁺ in titration test. The results showed that, (1) Red and non-red marine sediments are formed at high oxygen fugacity environment in U1434 of IODP Expedition 349, and difference in oxidation-deoxidation environment was not the controlling factor on red and non-red sediments; (2) The oceanic redbeds directly covering basalts in U1434 of IODP Expedition 349, and differences; (3) And we found that continental redbeds and Cretaceous oceanic redbeds formed in different geological periods are closely associated with tectonic- magmatic active belts, showing that redbeds have significance in indicating geological thermal events.

Keywords Oceanic redbeds; Theraml origin; Oxygen fugacity; South China Sea

* Corresponding authors

(Received Nov. 13, 2017; accepted Jun. 23, 2018)