

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020012101

南海 IODP U1499 和 U1500 站位浊积岩的沉积特征及岩石物理响应

苏晶, 钟广法

同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092

摘要: 深海浊流沉积是重要的油气和天然气水合物勘探目标, 对古海洋、古环境、古构造乃至古气候等方面的研究具有重要的科学意义。前人对于浊积岩的研究多从沉积学角度进行, 从岩石物理角度开展的相关研究很少。本文将岩芯宏观沉积学分析、薄片(或涂片)分析与岩石物性分析相结合, 研究南海海盆北部 IODP 367 航次 U1499、U1500 站位浊流沉积的沉积特征和岩石物理响应。共识别出了 3 类浊积岩: 钙质、陆源碎屑和陆源碎屑—钙质混积浊积岩, 以陆源碎屑和混积浊积岩最发育。不同类型的浊积岩表现出不同的岩石物性特征: 钙质浊积岩表现为低磁化率、高颜色反射率亮度、密度变化较大和低自然伽马; 陆源碎屑浊积岩表现为低磁化率、中—低亮度、中—高密度、中—低自然伽马; 混积浊积岩的磁化率、亮度和自然伽马变化大, 密度中—高。南海海盆浊积岩的丰度在发育时间上以晚中新世和中—晚更新世最高, 然后依次为早更新世、上新世和早—中中新世。晚中新世和中—晚更新世全球海平面总体处于低位时期, 有利于浊积岩的发育。自晚中新世以来, 南海海盆钙质浊积岩的丰度总体呈逐渐减少趋势, 可能与南海海盆水深逐渐加大、碳酸盐沉积逐渐萎缩等因素有关。

关键词: 浊流沉积; 岩石物性; IODP 367 航次; 海盆; 南海

中图分类号: P736.2

文献标识码: A

Sedimentary and petrophysical characteristics of various turbidites at IODP Sites U1499 and U1500 in the northern South China Sea

SU Jing, ZHONG Guangfa

State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract: The deep-sea turbidite is an important target for petroleum and gas hydrate exploration, and is of significance to paleoceanographic, paleoenvironmental, paleotectonic and paleoclimatic researches. Turbidites have been investigated mostly in a sedimentological and less in a petrophysical perspective. In this paper, cores and thin sections (and /or smear slides) are used to study the sedimentary characteristics and petrophysical responses of the turbidites at the IODP Sites of U1499 and U1500 in the northern part of the South China Sea (SCS). Three types of turbidites are identified, i.e. the calcareous, terrigenous, and terrigenous-calcareous mixed turbidites. The later two types dominate. Each type of turbidites has its own petrophysical characteristics. The calcareous turbidites are characterized by low magnetic susceptibility, high brightness in color reflectance spectrometry, variable density, and low natural gamma radiation; the terrigenous turbidites characterized by low magnetic susceptibility, low to medium brightness, medium to high density, and medium to low natural gamma radiation; and the mixed turbidites characterized by variable magnetic susceptibility, brightness and natural gamma radiation and medium to high density. The turbidites mainly occur in the late Miocene and the middle-late Pleistocene sequences, followed by the early Pleistocene, the Pliocene, and the early-middle Miocene. The eustatic lowstand periods in the late Miocene and middle-late Pleistocene could be favorable for the deposition of the turbidites in the SCS. The gradual decrease in the abundance of calcareous turbidites since late Miocene could be associated with the gradual deepening of the oceanic basin and the shrinking of carbonate depositional area in the SCS.

Key words: turbidites; petrophysical properties; IODP Expedition 367; oceanic basin; South China Sea

南海是西太平洋地区最大的新生代边缘海, 四周被陆地和岛屿环抱, 物源供应充分, 构造活跃, 是

浊流沉积发育的有利场所。前人基于沉积物柱状样对南海海盆的浊流沉积进行过一些研究^[1-5], 主要

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“南海北部洋陆过渡带的重力流沉积”(41876049)

作者简介: 苏晶(1994—), 女, 硕士研究生, 主要从事大洋钻探岩芯-物性-测井数据解释, E-mail: sujing1218@tongji.edu.cn

通讯作者: 钟广法(1964—), 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事地震、测井解释和沉积学方面的研究工作, E-mail: gfz@tongji.edu.cn

收稿日期: 2020-01-21; 改回日期: 2020-03-30。 周立君编辑

局限于全新世或更新世末期以来浊流沉积的特征及分布,对于更新世及以前南海海盆浊流沉积的沉积特征及分布规律缺乏应有的了解,也缺乏对海盆浊流沉积岩石物理特征方面的研究。本文利用IODP 367航次U1499和U1500两个站位的岩芯及岩石物性测试资料研究南海海盆北部中新世以来浊流沉积的类型、沉积特征、岩石物理响应及纵向发育规律。

1 地质背景

南海深海盆总体为NE-SW向的菱形,面积约46.2万km²,平均坡度小于0.1°,水深主要为3300~4000m。它形成于33~15Ma的海底扩张^[6],其四周被不同性质的大陆边缘包围:南、北为被动大陆边缘,西侧为走滑边缘,东侧为俯冲边缘。以中南断裂为界,南海海盆可以进一步细分为3个次盆,分别是东部次海盆、西北次海盆和西南次海盆。本文研究对象为IODP 367航次U1499与U1500站位(图1),位于南海东部次海盆北缘近洋陆过渡带部位。大洋钻探揭示,南海海盆基底为玄武岩,其上接受了渐新世以来的深海沉积^[6-7]。

2 数据与方法

本文研究数据来自大洋钻探IODP 367航次U1499

与U1500站位(图1)。这两个站位分别钻有A、B两孔^[7]。U1499A孔(18°24.5698'N、115°51.5881'E,水深3760.20m)取芯深度为0~659.20mbsf,取芯长度为417.05m(取芯率63%),地层年代为晚中新世—晚更新世;U1499B孔(18°24.5705'N、115°51.5990'E,水深3758.10m)取芯深度为655.00~1081.80mbsf,取芯长度为150.64m(取芯率35%),地层年代为渐新世—晚中新世^[7]。U1500A孔(18°18.2762'N、116°13.1916'E,水深3801.70m)取芯分为两段:378.20~494.60mbsf,取芯长度为26.50m(取芯率23%);641.20~854.60mbsf,取芯长度为67.20m(取芯率31%),地层年代均为晚中新世。U1500B孔(18°18.2707'N、116°13.1951'E,水深3801.70m)取芯深度为846.00~1529.00mbsf,取芯长度为279.62m(取芯率41%),地层年代为渐新世—晚中新世^[7]。

本文所用到的两个站位的数据有:(1)高分辨率岩芯扫描照片;(2)岩芯样品薄片和涂片(薄片125个,涂片250个);(3)物性测试参数,包括磁化率、颜色反射率亮度参数(以下简称“亮度”)、GRA密度、自然伽马。其中,磁化率和亮度参数的采样间隔为1cm或2cm,GRA密度的采样间隔为2cm,自然伽马采样间隔为10cm。岩芯照片、岩芯样品及物性测试数据由IODP提供。两个站位的年代地层数据来源于IODP 367航次科学报告^[7]。

通过岩芯观察,结合高分辨率岩芯扫描照片,

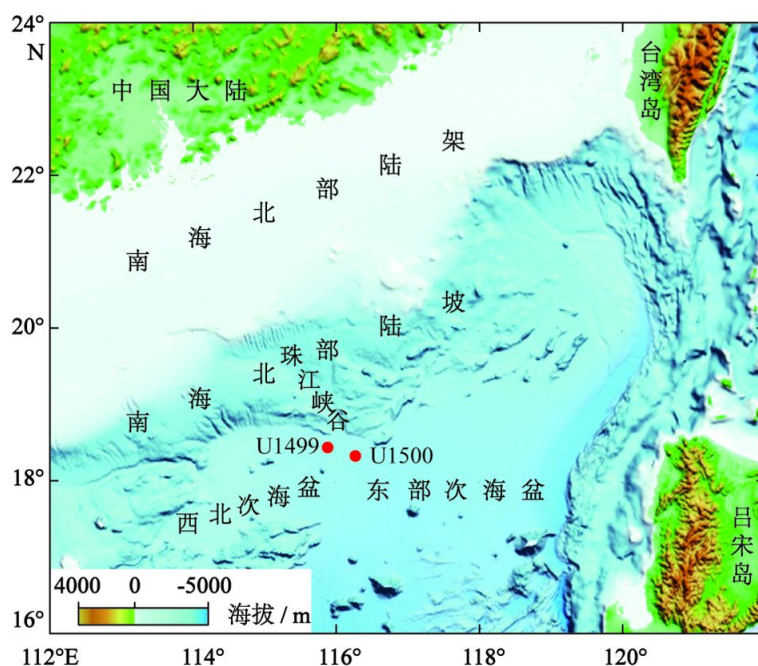


图1 研究区位置及IODP U1499和U1500站位分布图^[8]

Fig.1 Topographic map of the northern SCS showing the location of IODP Sites U1499 and U1500^[8]

根据侵蚀底界、递变层理等宏观沉积标志识别浊积岩。根据薄片(或涂片)鉴定浊积岩的岩石类型(陆源碎屑、钙质或混积浊积岩)。将岩芯中识别出的浊积岩与对应的物性参数进行对比,研究不同类型浊积岩的岩石物理响应特征。在岩芯分析基础上,根据岩芯标定分析不同类别浊积岩的岩石物性参数,包括磁化率、亮度、GRA 密度、自然伽马的分布特征。其中,磁化率主要对铁磁性矿物敏感,而陆源碎屑沉积物中常含有铁磁性矿物,故磁化率可用于识别陆源碎屑浊积岩^[9];亮度主要受到样品中碳酸钙含量的影响,可用于识别钙质沉积层^[10];GRA 密度主要与颗粒大小、矿物成分、孔隙度、固结程度等因素相关,可以反映不同的矿物组分,也可帮助确定沉积类型^[11];自然伽马反映沉积物的放射性含量(主要是 U、Th、K 的丰度),由于 U、Th 易吸附在黏土矿物和有机质表面,所以黏土含量高的细粒沉积物中自然伽马值一般较高^[12]。

3 结果

3.1 浊积岩的类型及沉积特征

U1499 和 U1500 站位中新世以来主要由黏土、黏土质粉砂、钙质软泥等组成,含有丰富的砂质或粉砂质浊流沉积,局部见碎屑流沉积和滑塌沉积,此外还见少量的火山灰层^[7]。

根据岩芯和薄片(或涂片)所反映的沉积特征,特别是浊积岩中钙质颗粒和陆源碎屑颗粒的相对百分含量,识别浊积岩并将浊积岩划分为以下 3 种类型:钙质浊积岩,钙质颗粒占总颗粒含量的 70% 以上;陆源碎屑浊积岩,陆源碎屑颗粒占总颗粒含量的 70% 以上;陆源碎屑—钙质混积浊积岩,钙质颗粒和陆源碎屑颗粒在总颗粒含量中的占比均小于 70%。

钙质浊积岩的颗粒组分以钙质生物化石为主,主要为有孔虫,亦见双壳类、珊瑚等浅水生物化石碎片,可含少量石英等陆源碎屑颗粒(图 2)。碎屑颗粒间多数为泥晶碳酸盐基质充填(图 2a, 图 5a-b),少数为亮晶碳酸盐胶结物充填(图 2b, 图 5c-d)。钙质浊积岩的颜色浅,一般为浅灰—灰白色。

陆源碎屑浊积岩的颗粒组分以陆源碎屑为主,主要为石英,其次为长石和岩屑,见云母、角闪石、海绿石等,可含少量生物或其他碳酸盐颗粒(图 3)。碎屑颗粒间主要为泥质基质(图 3a)或亮晶钙质胶结物(图 3b)充填。按充填物的成分可细分为以泥质基质为主的杂砂岩类和以亮晶胶结物为主的净

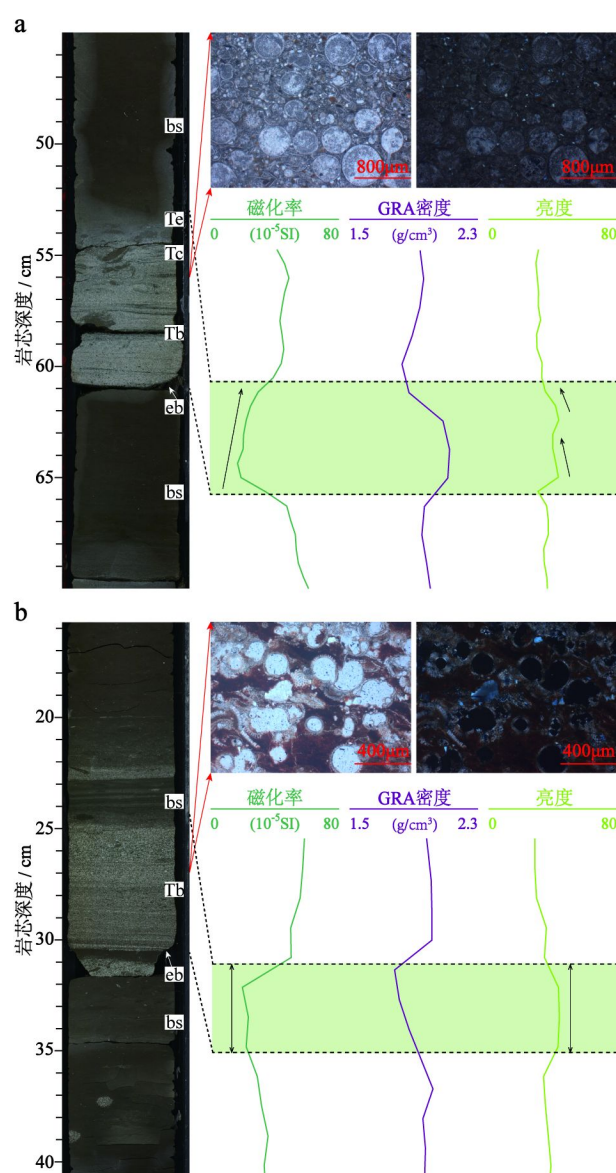


图 2 钙质浊积岩的岩心、薄片(左侧为单偏光,右侧为正交光)及物性特征

a. U1500B 孔 5R-1 岩芯(874.93~875.01 mbsf); b. U1499B 孔 17R-4 岩芯(804.98~805.04 mbsf)。eb, 底界侵蚀面; Ta-Te, 鲍马序列 a-e 段; bs, 远洋-半远洋泥质背景沉积。

Fig.2 Characteristics of calcareous turbidites in cores, thin sections (right panel, plane polarized light on the left and perpendicular polarized light on the right), and physical properties (a) Core 5R-1 (874.93~875.01 mbsf), Hole U1500B; (b) Core 17R-4 (804.98~805.04 mbsf), Hole U1499B. eb, erosional base; Ta-Te, Ta to Te intervals in Bouma sequence; bs, background sediments.

砂岩类。陆源碎屑浊积杂砂岩颜色偏深,一般为绿灰—深绿灰色(图 3a, 图 5c-f);陆源碎屑浊积净砂岩颜色偏浅,多为灰色—绿灰色(图 3b, 图 5g-h)。

陆源碎屑-钙质混积浊积岩中,颗粒组分以陆源碎屑和钙质颗粒两者混合为主,主要包括石英、长石、云母、岩屑等陆源碎屑颗粒和钙质生物化石碎

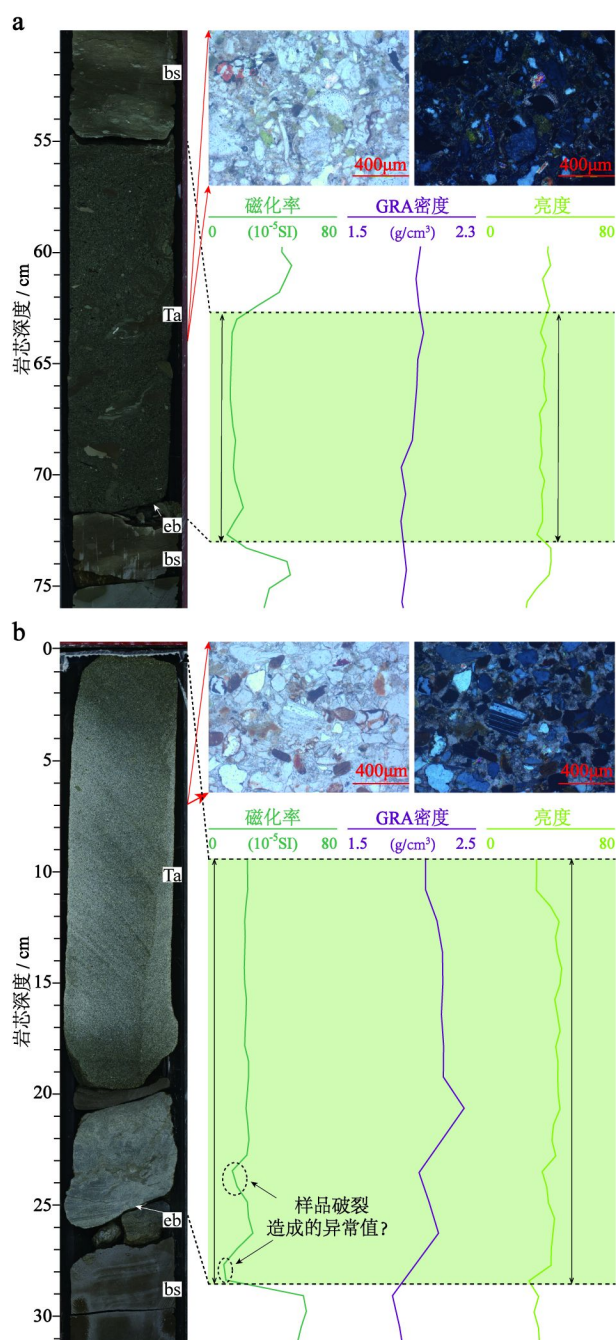


图3 陆源碎屑浊积岩的岩心、薄片（左侧为单偏光，右侧为正交光）及物性特征

- a. U1500B 孔 23R-1 岩芯(1 049.55~1 049.72 mbsf);
b. U1500A 孔 29R-1 岩芯(777.00~777.26 mbsf)。
eb, 底界侵蚀面; Ta-Te, 鲍马序列 a-e 段;
bs, 远洋-半远洋泥质背景沉积。

Fig.3 Characteristics of terrigenous clastic turbidites in cores, thin sections (right panel, plane polarized light on the left and perpendicular polarized light on the right), and physical properties
(a) Core 23R-1 (1 049.55~1 049.72 mbsf), Hole U1500B; (b) Core 29R-1 (777.00~777.26 mbsf), Hole U1500A. eb, erosional base; Ta-Te, Ta to Te intervals in Bouma sequence; bs, background sediments.

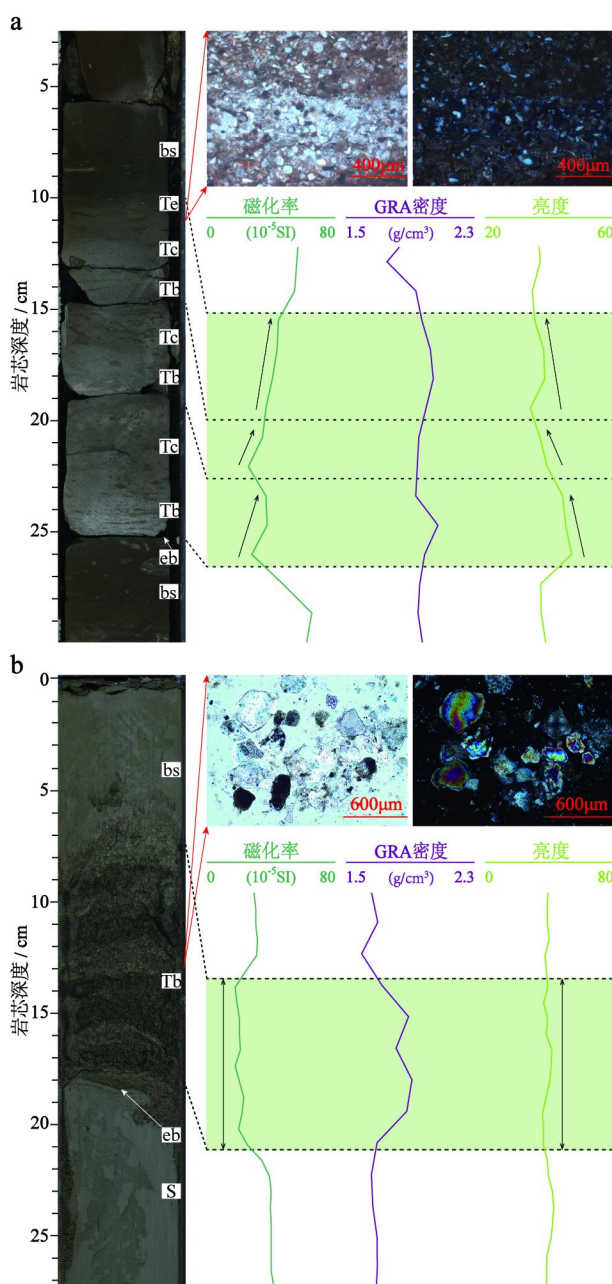


图4 混积浊积岩的岩心、薄片（或涂片）（左侧为单偏光，右侧为正交光）及物性特征

- a. U1499B 孔 15R-1 岩芯(781.20~781.35 mbsf);
b. U1499A 孔 5H-6 岩芯(43.57~43.68 mbsf)。
eb, 底界侵蚀面; Ta-Te, 鲍马序列 a-e 段;
bs, 远洋-半远洋泥质背景沉积; S, 滑塌沉积。

Fig.4 Characteristics of mixed turbidites in cores, thin sections (or smear slide) (right panel, plane polarized light on the left and perpendicular polarized light on the right), and physical properties
(a) Core 15R-1 (781.20~781.35 mbsf), Hole U1499B;
(b) Core 5H-6 (43.57~43.68 mbsf), Hole U1499A.
eb, erosional base; Ta-Te, Ta to Te intervals in Bouma sequence; bs, background sediments; S, slump deposits.

片等钙质颗粒(图 4)。碎屑颗粒间主要为钙泥质基质充填(图 4), 属于杂砂岩类。按颗粒含量可以进一步细分为: 钙质含量偏多的混积浊积岩和陆源碎屑含量偏多的混积浊积岩。视陆源碎屑和钙质颗粒含量的多寡, 混积浊积岩的颜色变化较大。钙质颗粒偏多的混积浊积岩一般为绿灰色(图 4a, 图 5i-j), 而陆源碎屑颗粒偏多的混积浊积岩一般为深绿灰色(图 4b, 图 5k-l)。

所有浊积岩的底界均表现为明显的侵蚀突变面, 顶界渐变或突变, 内部显示正向的粒度或颜色递变(粒度向上变细、颜色向上变深)或呈块状, 可以发育平行纹理、砂纹交错纹理或包卷纹理等沉积构造。垂向序列主要有 Ta、Tb、Tbc、Tde、Tbce、Tbde、Tcde、Tbcde 等不完整的鲍马序列组合(图 2-5)。

3.2 浊积岩的纵向分布

根据上述各类浊积岩的特征, 在 U1499 和

U1500 两个站位取芯井段内共识别出了 740 个浊积岩, 其中 U1499 站位 513 个(图 6), U1500 站位 227 个(图 7)。分时段对不同类型浊积岩的发育丰度包括单位地质时间内浊积岩的层数(图 8a)和单位地层厚度内浊积岩的厚度(图 8b)进行了统计。结果表明, 晚中新世和中—晚更新世这两个时段内浊积岩最发育, 然后依次为早更新世、上新世和早—中中新世。晚中新世单位时间内浊积岩的层数最多(图 8a), 而中—晚更新世单位地层厚度内浊积岩的厚度最大(图 8b), 这说明晚中新世浊流事件发生的频率高, 而中—晚更新世单次浊流事件的规模更大。

3.3 浊积岩的岩石物性参数

不同类型浊积岩的岩石物性参数存在一定的差异。

钙质浊积岩总体表现为低磁化率、高颜色反射

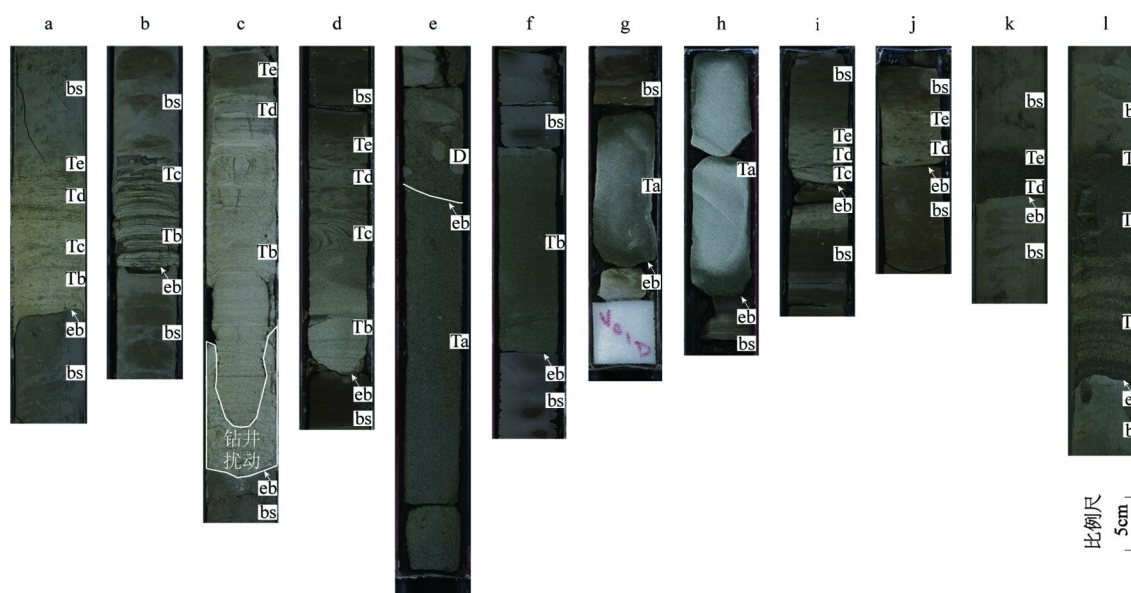


图 5 典型浊积岩岩芯照片

a-d. 钙质浊积岩; e-h. 陆源碎屑浊积岩; i-l. 混积浊积岩。a. U1499A 孔 5H-1 岩芯(36.85~37.00 mbsf); b. U1499A 孔 36X-2 岩芯(329.67~329.77 mbsf); c. U1499A 孔 48X-5 岩芯(449.85~450.24 mbsf); d. U1500A 孔 26R-6 岩芯(754.85~755.07 mbsf); e. U1500A 孔 33R-1 岩芯(816.58~817.03 mbsf); f. U1500B 孔 31R-1 岩芯(1 127.72~1 127.90 mbsf); g. U1500B 孔 8R-1 岩芯(904.43~904.57 mbsf); h. U1500B 孔 37R-1 岩芯(1 184.80~1 185.03 mbsf); i. U1499A 孔 70X-CC 岩芯(650.27~650.32 mbsf); j. U1500A 孔 27R-1 岩芯(757.65~757.71 mbsf); k. U1499A 孔 6H-1 岩芯(46.37~46.41 mbsf); l. U1499A 孔 6H-2 岩芯(47.65~47.86 mbsf)。

eb, 底界侵蚀面; Ta-Te, 鲍马序列 a-e 段; bs, 远洋-半远洋泥质背景沉积; D, 碎屑流沉积。

Fig.5 Core photos of typical turbidites

(a-d) calcareous turbidites; (e-h) terrigenous elastics turbidites; (i-l) mixed turbidites. (a) Core 5H-1 (36.85~37.00 mbsf), Hole U1499A; (b) Core 36X-2 (329.67~329.77 mbsf), Hole U1499A; (c) Core 48X-5 (449.85~450.24 mbsf), Hole U1499A; (d) Core 26R-6 (754.85~755.07 mbsf), Hole U1500A; (e) Core 33R-1 (816.58~817.03 mbsf), Hole U1500A; (f) Core 31R-1 (1 127.72~1 127.90 mbsf), Hole U1500B; (g) Core 8R-1 (904.43~904.57 mbsf), Hole U1500B; (h) Core 37R-1 (1 184.80~1 185.03 mbsf), Hole U1500B; (i) Core 70X-CC (650.27~650.32 mbsf), Hole U1499A; (j) Core 27R-1 (757.65~757.71 mbsf), Hole U1500A; (k) Core 6H-1 (46.37~46.41 mbsf), Hole U1499A; (l) Core 6H-2 (47.65~47.86 mbsf), Hole U1499A. eb, erosional base; Ta-Te, Ta to Te intervals in Bouma sequence; bs, pelagic to semipelagic background sediments; D, debrites.

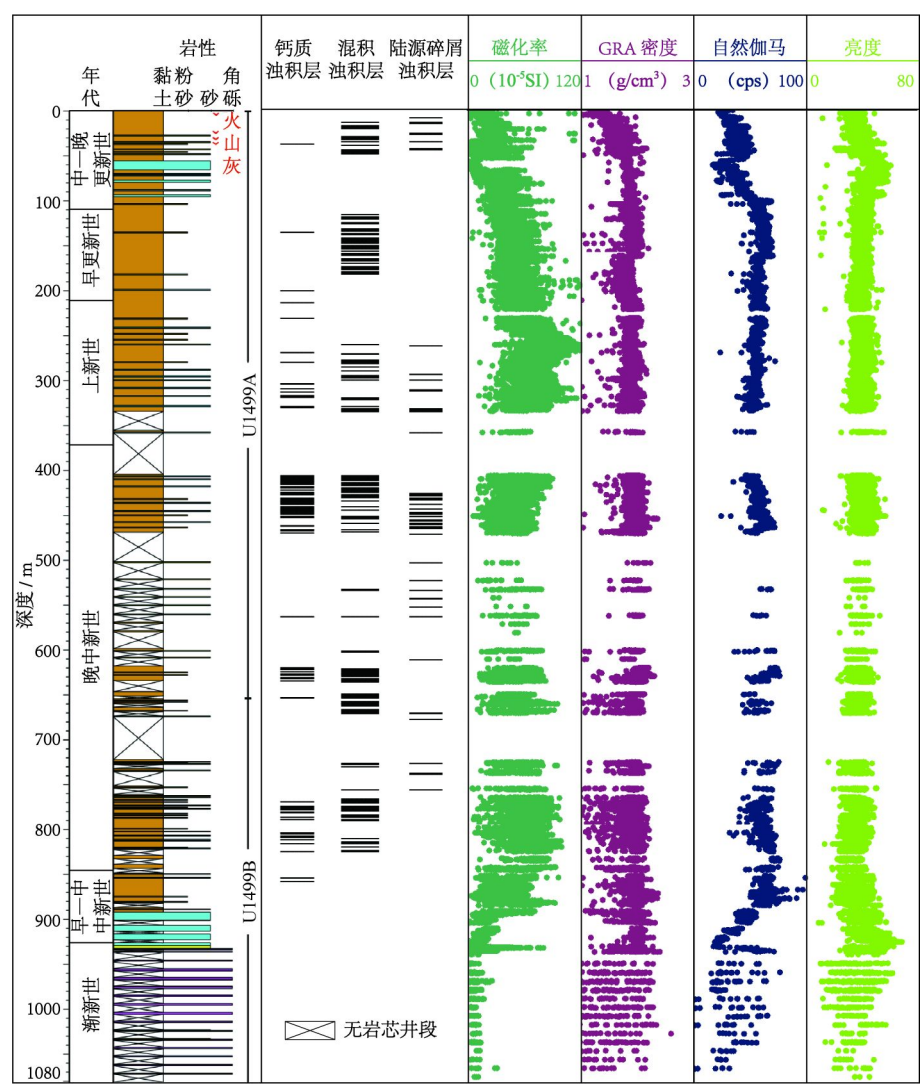


图 6 U1499 站位浊积岩的纵向分布序列及其与岩性和岩石物性参数之间的对应关系
(左侧岩性柱状剖面图据文献 [7])

Fig.6 Vertical distribution of various turbidites at Site U1499, in comparison with lithology and physical properties
The lithographic column on the left panel is adapted from reference [7]

率亮度、密度变化较大和低自然伽马特征(图 2, 图 9-10)。与背景沉积相比,钙质浊积岩的磁化率比背景沉积低约 40%~60%,亮度比背景沉积高约 30%~40%,密度略高于或低于背景沉积(-10%~10%),自然伽马比背景沉积低约 5%~10%。

陆源碎屑浊积岩包含以泥质基质为主的杂砂岩和以亮晶胶结物为主的净砂岩两个亚类。陆源碎屑浊积杂砂岩的岩石物性表现为低磁化率、中—低亮度、中等密度、中—低自然伽马;与背景沉积相比,该类浊积岩的磁化率比背景沉积低约 30%~60%,亮度比背景沉积低约 5%~15%,密度比背景沉积高约 5%~10%,自然伽马与背景沉积没有明显差异(图 3a, 图 9-10)。陆源碎屑浊积净砂岩的岩石物性表现为:低磁化率、中—高亮度、中—高

密度、低自然伽马;与背景沉积相比,该类浊积岩的磁化率比背景沉积低约 30%~60%,亮度比背景沉积高约 20%~25%,密度比背景沉积高约 20%~25%,自然伽马比背景沉积低约 5%~10%(图 3b, 图 9-10)。

混积浊积岩细分为钙质含量偏多的混积浊积岩和陆源碎屑含量偏多的混积浊积岩。钙质含量偏多的混积浊积岩在岩石物性上表现为中—低磁化率、中—高亮度、中等密度、中等自然伽马。与背景沉积的物性相比,其磁化率比背景沉积低约 20%~30%,亮度比背景沉积高 10%~15%,密度比背景沉积高约 5%~6%,自然伽马与背景沉积无明显差异(图 4a, 图 9-10)。陆源碎屑含量偏多的混积浊积岩的岩石物性主要有两种情形:(1)岩石物性表现为低磁化率、中—低亮度、中—高密度和中等

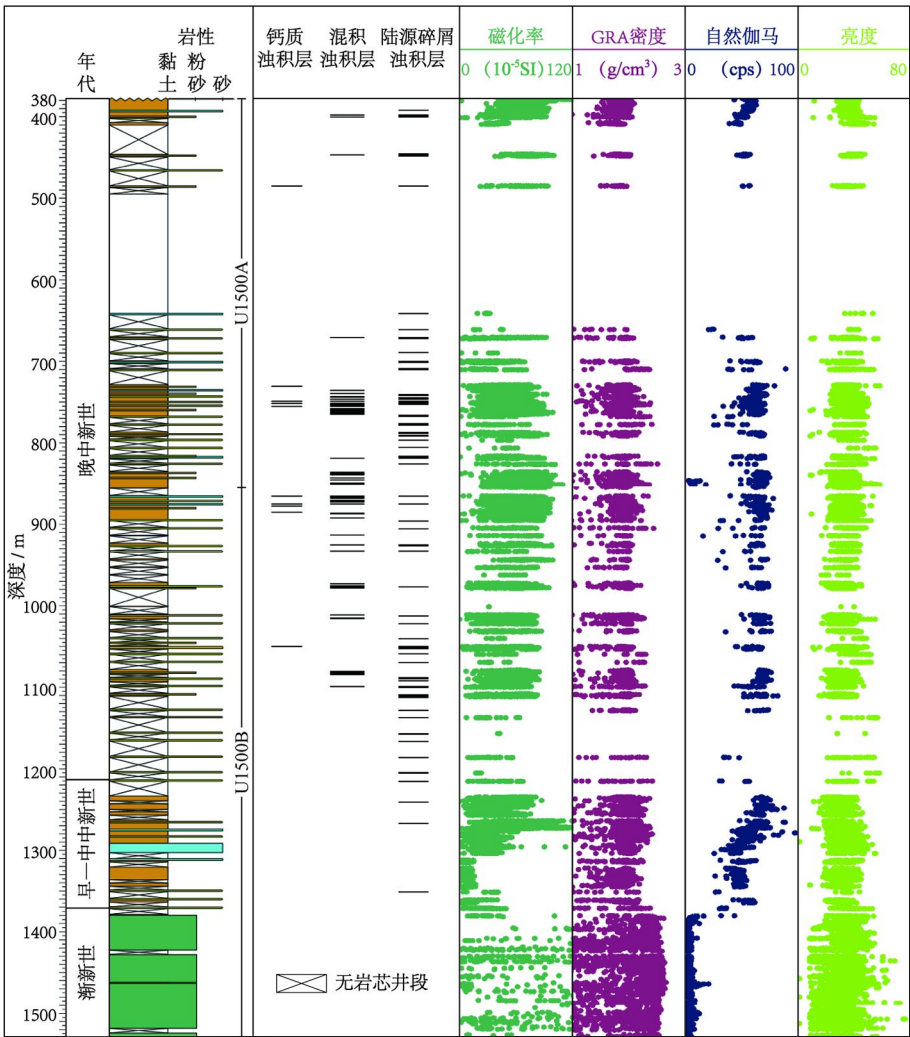


图 7 U1500 站位浊积岩的纵向分布序列及其与岩性和岩石物性参数之间的对应关系
(左侧岩性柱状剖面图据文献 [7])

Fig.7 Vertical distribution of various turbidites at Site U1500, in comparison with lithology (left panel) and physical properties (right panel)

The lithographic column on the left panel is adapted from reference [7]

自然伽马,与背景沉积的物性相比,该类浊积岩的磁化率比背景沉积低约 30%~50%,亮度与背景沉积无明显差异,密度比背景沉积高约 10%~15%、自然伽马与背景沉积无明显差异(图 4b,图 9-10);(2)岩石物性表现为高磁化率、中—低亮度、中—高密度和高自然伽马,与背景沉积的物性相比,该类浊积岩的磁化率比背景沉积高约 30%~40%,亮度与背景沉积无明显差异,密度比背景沉积高约 10%~15%,自然伽马比背景沉积高约 10%~15%(图 9-10)。

不同类型浊积岩的物性参数在纵向上总体有两种表现形式:一是钟形,自下而上磁化率逐渐增加,颜色反射率逐渐减小,对应于正向递变的浊积岩(图 2a,图 4a);二是箱型,自下而上磁化率和颜色

反射率等参数基本稳定,对应于块状或递变不明显的浊积岩(图 2b,图 3,图 4b)。图 3b 块状浊积岩整体物性参数呈箱型,但下部磁化率有明显的锯齿状抖动,推测与样品破碎导致测量误差有关。

4 讨论

4.1 不同类型浊积岩岩石物性参数的分布特点

沉积岩的磁化率主要对铁磁性矿物(磁铁矿和赤铁矿)的浓度敏感,铁磁性矿物含量越高,则磁化率的值越大。通常认为,浊积岩底部粒度粗,含有较多的铁磁性矿物,其磁化率较高,往往对应着浊积岩内磁化率的峰值,且相比于半远洋背景沉积,

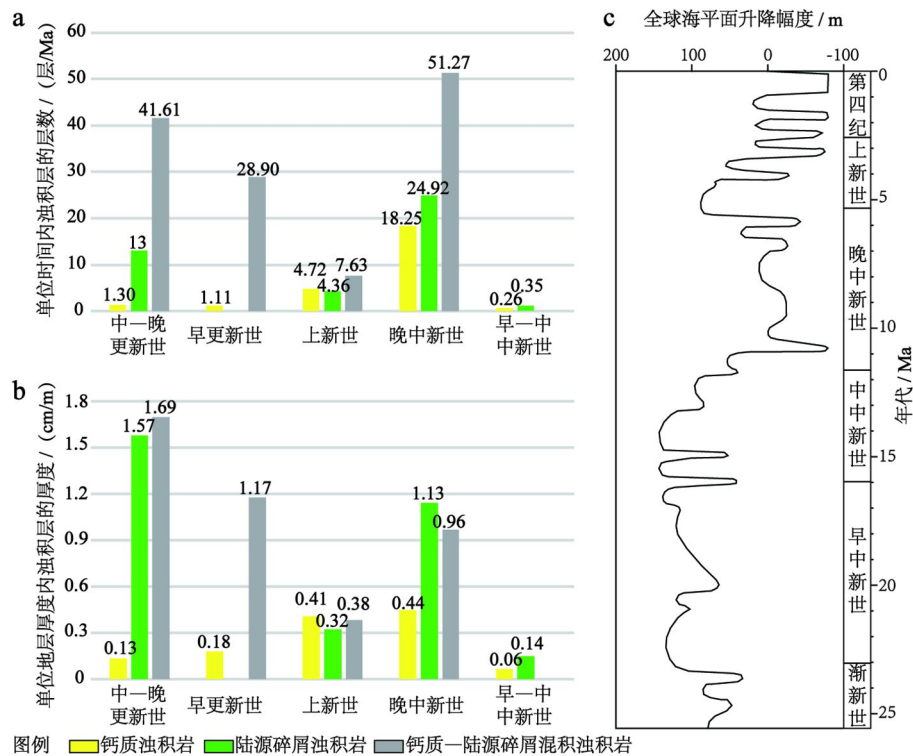


图8 IODP U1499与U1500站位不同地质年代钙质、陆源碎屑及混积浊积岩的发育丰度直方图(a-b)及全球海平面曲线(c)
a. 单位地质时间内浊积岩的层数(层/Ma), b. 单位地层厚度内浊积岩的厚度(cm/m), c. Haq全球海平面曲线^[13]。

Fig.8 Histograms showing the abundance of calcareous, terrigenous clastic, and mixed turbidites in different geological ages at IODP Sites U1499 and U1500 (a-b), and Haq et al. global eustatic curve

a. histogram of the layer number of the turbidites per unit time(layers/Ma), b. histogram of the layer thickness of the turbidites per stratigraphic thickness(cm/m), c. global eustatic curve^[13].

也表现为正异常^[14-16]。

本文研究结果表明,不同年代不同类型的浊积岩其磁化率表现存在差异。钙质浊积岩表现为低磁化率,134个样品的磁化率比背景沉积低约20%~60%;而陆源碎屑和混积浊积岩也并不总是表现为高磁化率,183个前者样品和392个后者样品的磁化率比背景沉积低约30%~60%,只有粒度较粗、铁磁性矿物含量较高的陆源碎屑偏多的混积浊积岩才表现出较高的磁化率,31个样品的磁化率比背景沉积高约30%~40%。纵向上,单个浊积岩的磁化率通常表现为钟形或箱型特征,钟形曲线自下而上磁化率由高到低,反映浊积岩粒度自下而上逐渐变细(图2a,图4a);箱型曲线自下而上磁化率变化不大,反映浊积岩内部粒度变化不大(图2b,图3,图4b)。

亮度反映的是沉积层的亮度。该参数主要与钙质含量、泥质含量有关。一般而言,钙质含量越高,则亮度值越高;泥质含量越高,则亮度值越低^[10]。因此,钙质浊积岩表现为高亮度,134个样品的亮度值比背景沉积高约30%~40%;钙质偏多的混积浊

积岩表现为中—高亮度,351个样品的亮度值比背景沉积高约10%~15%;陆源碎屑浊积杂砂岩层与陆源碎屑偏多的混积浊积岩表现为低—中低亮度,149个前者样品和31个后者样品的亮度值比背景沉积低约0~15%。

钙质浊积岩的颗粒组成主要是有孔虫等钙质生物化石,多数情况下密度高于背景沉积(图2a),103个样品的密度值比背景沉积高约5%~10%;少数密度低于背景沉积,31个样品的密度值比背景沉积低约5%~10%,可能与其内部有孔虫等生物化石体腔孔较发育有关(图2b)。其他类浊积岩的密度通常都大于背景沉积。

钙质浊积岩为盆内沉积,其矿物组成以无放射性的碳酸钙(生物碎屑的主要成分)为主,而陆源碎屑浊积净砂岩中颗粒间亦主要为亮晶钙质胶结充填,碳酸钙含量较高,故两者均表现为低自然伽马放射性,一般低于背景沉积:134个前者样品与34个后者样品的自然放射值均比背景沉积低5%~10%。黏土(泥质)含量较高的陆源碎屑浊积杂砂岩与陆源碎屑偏多的混积浊积岩因含较多黏土矿物,

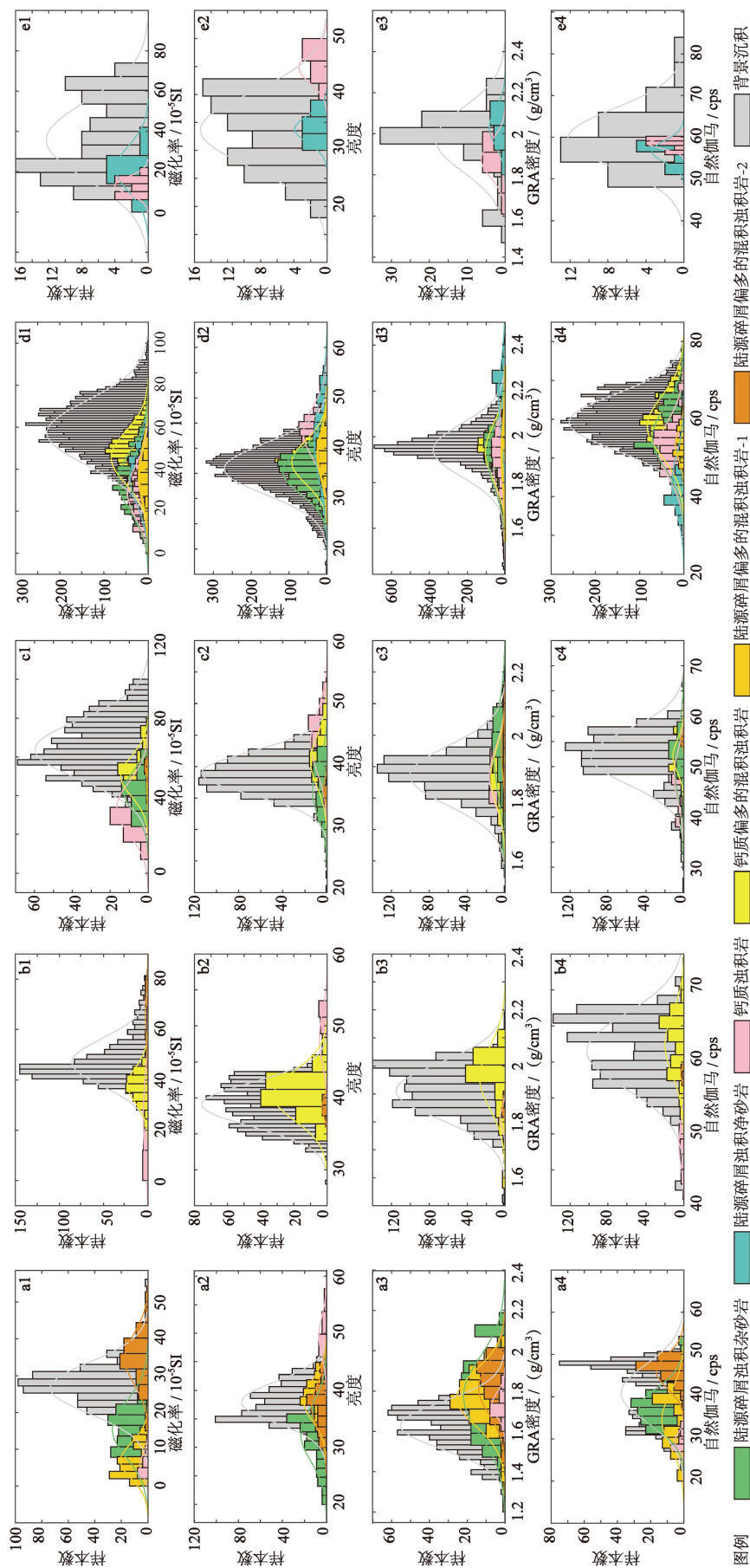


图 9 U1499 与 U1500 站位各类油积岩的岩石物性参数分布直方图

图中的曲线为不同类别油积岩、不同岩性物性数据的正态拟合曲线。a1-a4, 中—晚更新世; b1-b4, 早更新世; c1-c4, 上新世; d1-d4, 晚中新世; e1-e4, 早—中中新世。

Fig.9 Histograms of the petrophysical parameters for different types of turbidites at U1499 and U1500 sites

The curves in the figure represent normal distribution curves by fitting the physical property data of different turbidites.

a1-a4, middle-late Pleistocene; b1-b4, early Pleistocene; c1-c4, Pliocene; d1-d4, late Miocene; e1-e4, early-middle Miocene.

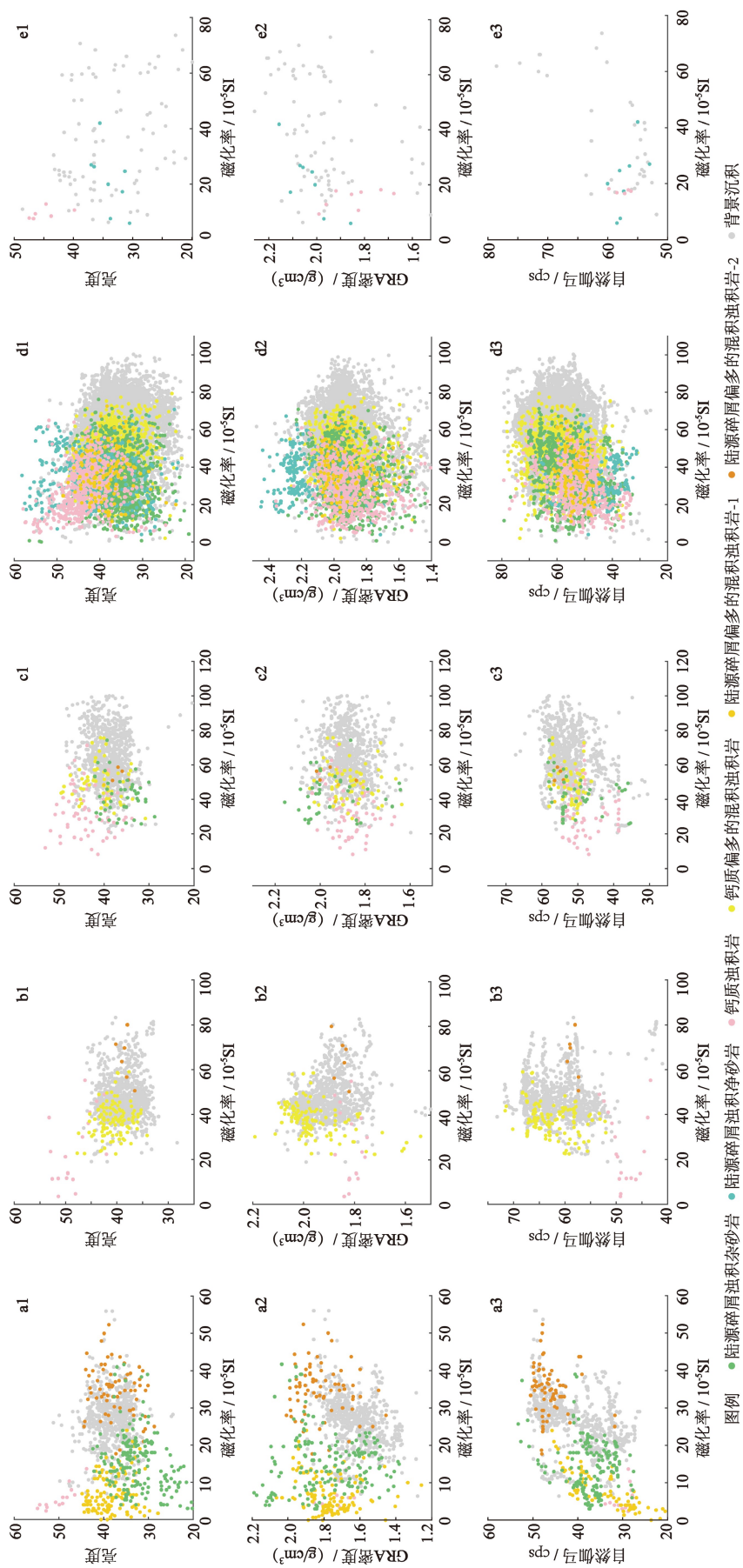


图 10 U1499 与 U1500 站位各类油积岩的岩石物性参数交会图
a1-a3, 中—晚更新世; b1-b3, 早更新世; c1-c3, 上新世; d1-d3, 晚中新世; e1-e3, 早—中中新世。
Fig.10 Crossplots of the petrophysical parameters for different types of turbidites at U1499 and U1500 sites
a1-a3, middle-late Pleistocene; b1-b3, early Pleistocene; c1-c3, Pliocene; d1-d3, late Miocene; e1-e3, early-middle Miocene.

部分含较多陆源碎屑长石等原因, 通常表现为中—高自然伽马放射性, 但是 149 个前者样品和 41 个后者样品的自然伽马值与背景沉积物无明显差异, 仅 31 个后者样品的自然伽马值比背景沉积高 10%~15%, 这可能是自然伽马数据的分辨率较低造成的。因为自然伽马的采样间隔为 10 cm, 但浊积岩的厚度绝大多数小于 10 cm(663 层, 占全部浊积岩的 89.59%), 亦即绝大多数浊积岩在自然伽马数据中难以分辨, 因此自然伽马数据仅具参考意义。

4.2 浊积岩发育的影响因素

综上所述, 南海 U1499 和 1500 站位陆源碎屑浊积岩主要发育于晚中新世和中—晚更新世两个时间段。与这两个时段恰好对应的是晚新生代全球海平面的两个相对低位时期(图 8c)^[13]。这说明低海平面时期有利于陆源碎屑浊积岩的发育。这一认识与前人一致。低海平面时期, 由于陆架部分或大部出露, 河流搬运来的陆源碎屑物质更容易抵达陆架边缘至上陆坡区, 并进一步以重力流形式向深海盆地搬运^[17-19]。

与陆源碎屑浊积岩相比, 南海海盆钙质浊积岩的丰度总体较低(图 8), 且随着时间推移, 自晚中新世以来钙质浊积岩的丰度呈逐渐降低趋势。晚中新世以来钙质浊积岩发育丰度的这种变化, 可能与南海扩张期后洋壳逐渐冷却、海盆水深逐渐增大, 以及南海碳酸盐产率总体逐渐下降有关。前人研究表明, 南海的碳酸盐台地经历了晚渐新世至早中新世的萌生, 到早—中中新世达到鼎盛; 从晚中新世开始, 碳酸盐台地逐渐被淹没, 其分布范围逐渐萎缩^[20-22]。同时, 我们也注意到, 早—中中新世南海洋盆钙质浊积岩的丰度很低, 而这一时期恰好处在南海碳酸盐台地发育的鼎盛期, 台地边缘斜坡区应该有很多的重力流沉积。导致这一时期钙质浊积岩丰度低的原因可能与该时期全球海平面处于高位期有一定联系。按照层序地层学观点, 全球低水位期有利于重力流沉积的发育, 高水位期陆坡重力流相对不活跃。统计表明, 地质历史时期浊积岩的发育主要分布于全球海平面低位期, 低位期浊积岩的丰度要远高于高位期^[23]。

影响浊积岩发育的因素很多, 除全球海平面变化外, 构造、物源供应及气候等均可能对南海洋盆浊流沉积的发育产生影响。晚新生代全球气候变化主要受冰期和间冰期交替控制, 后者直接与全球海平面变化相关联。物源供应对浊流沉积的影响除了与低海平面有关外, 还直接受区域构造控制。

晚中新世以来南海洋盆周边存在一系列的构造事件, 包括南海海盆向东沿马尼拉海沟的俯冲及台湾自晚中新世晚期以来的隆升等, 这些事件对南海洋盆浊积岩发育的影响尚需进一步的研究予以证实。

5 结论

(1) 根据岩芯观察和薄片鉴定将 U1499 和 U1500 站位的浊积岩划分为钙质浊积岩、陆源碎屑浊积岩、陆源碎屑—钙质混积浊积岩 3 大类, 其中丰度最高的是陆源碎屑浊积岩(约占 49%)和混积浊积岩(约占 36%)。

(2) 不同类型浊积岩具有不同的岩石物性参数特征。钙质浊积岩总体表现为低磁化率、高亮度、密度变化较大和低自然伽马特征; 陆源碎屑浊积岩表现为低磁化率、中—低亮度、中—高密度、中—低自然伽马; 混积浊积岩的磁化率、颜色反射率和自然伽马变化大, 密度中—高。

(3) U1499 与 U1500 站位所反映的南海海盆浊积岩的发育程度以晚中新世和中—晚更新世这两个时段最高, 然后依次为早更新世、上新世和早—中中新世, 可能与这两个时期全球海平面处于低位期有关。

(4) U1499 与 U1500 站位所反映的南海海盆钙质浊积岩的发育丰度自晚中新世以来逐渐降低, 推测与海盆扩张期后水深逐渐加深及南海碳酸盐产率总体逐渐下降有关。

参考文献 (References)

- [1] 陈峰, 蔡锋, 杨宝华, 等. 南海深海盆地沉积柱样中的浊流沉积[J]. 台湾海峡, 1992(4): 339-344. [CHEN Feng, CAI Feng, YANG Baohua, et al. Fine-grained turbidite deposits from deep-sea basin in South China Sea [J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 1992(4): 339-344.]
- [2] 李粹中. 南海海盆北部平原受台湾西南陆坡浊流影响的证据[J]. 海洋通报, 1993, 12(1): 103-105. [LI Cuizhong. Evidence of the northern plain of the South China Sea basin affected by the turbulence of the southwestern Taiwan slope [J]. Marine Science Bulletin, 1993, 12(1): 103-105.]
- [3] 章伟艳, 张富元, 张霄宇. 南海东部海域柱样沉积物浊流沉积探讨[J]. 热带海洋学报, 2003, 22(3): 36-43. [ZHANG Weiyan, ZHANG Fuyuan, ZHANG Xiaoyu. Characteristics of turbidity deposits from sediment cores in eastern South China Sea [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2003, 22(3): 36-43.]
- [4] 张富元, 张霄宇, 杨群慧, 等. 南海东部海域的沉积作用和物质来源研究[J]. 海洋学报, 2005, 27(2): 79-90. [ZHANG Fuyuan, ZHANG Xiaoyu, YANG Qunhui, et al. Research on sedimentations and material

- sources in the eastern South China Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, 27(2): 79-90.]
- [5] Wetzel A, Unverricht D. A muddy megaturbidite in the deep central South China Sea deposited ~350 yrs BP [J]. *Marine Geology*, 2013, 346: 91-100.
- [6] Li C, Xu X, Lin J, et al. Ages and magnetic structures of the South China Sea constrained by deep tow magnetic surveys and IODP Expedition 349 [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2014, 15(12): 4958-4983.
- [7] Sun Z, Jian Z, Stock J M, et al. Proceedings of the International Ocean Discovery Program, 367, South China Sea Rifted Margin[R]. IODP College Station, Texas, 2018.
- [8] 杨胜雄, 邱燕, 朱本铎. 南海地质地球物理图系(1:200万)[M]. 天津: 中国航海图书出版社, 2015. [YANG Shengxiong, QIU Yan, ZHU Benduo. The atlas of geology and geophysics of the South China Sea (1:2000000)[M]. Tianjin: China Navigation Publications Press, 2015.]
- [9] Stoner J S, Channell J E T, Hillaire-Marcel C. The magnetic signature of rapidly deposited detrital layers from the deep Labrador Sea: Relationship to North Atlantic Heinrich layers [J]. *Paleoceanography*, 1996, 11(3): 309-325.
- [10] Balsam W L, Deaton B C, Damuth J E. Evaluating optical lightness as a proxy for carbonate content in marine sediment cores [J]. *Marine Geology*, 1999, 161: 141-153.
- [11] St-Onge G, Mulder T, Francus P, et al. Continuous physical properties of cored marine sediments [J]. *Developments in Marine Geology*, 2007, 1: 63-98.
- [12] Rider M H. The geological interpretation of well logs: Caithness (2nd edition)[M]. Whittles Publishing, 1996.
- [13] Haq B U, Hardenbol J, Vail P R. Chronology of Fluctuating Sea Levels Since the Triassic [J]. *Science*, 1987, 235(4793): 1156-1167.
- [14] Mix A C, Tiedemann R, Blum P, et al. Proceedings of the ODP, Initial Reports, 202[R]. Ocean Drilling Program, 2003.
- [15] Goldfinger C, Morey A E, Nelson C H, et al. Rupture lengths and temporal history of significant earthquakes on the offshore and north coast segments of the Northern San Andreas Fault based on turbidite stratigraphy [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 254: 9-27.
- [16] Weber M E, Reilly B T. Hemipelagic and turbiditic deposits constrain lower Bengal Fan depositional history through Pleistocene climate, monsoon, and sea level transitions [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2018, 199: 159-173.
- [17] Prins M A, Postma G. Effects of climate, sea level, and tectonics unraveled for last deglaciation turbidite records of the Arabian Sea [J]. *Geology*, 2000, 28: 375-378.
- [18] Posamentier H W, Kolla V, 刘化清. 深水浊流沉积综述[J]. *沉积学报*, 2019, 37(5): 879-903. [Posamentier H W, Kolla V, Liu H. An overview of deep-water turbidite deposition [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2019, 37(5): 879-903.]
- [19] Weaver P, Kuijpers A. Climatic control of turbidite deposition on the Madeira Abyssal Plain [J]. *Nature*, 1983, 306: 360-363.
- [20] Wu S, Yang Z, Wang D, et al. Architecture, development and geological control of the Xisha carbonate platforms, northwestern South China Sea [J]. *Marine Geology*, 2014, 50: 71-83.
- [21] Wu S, Zhang X, Yang Z, et al. Spatial and temporal evolution of Cenozoic carbonate platforms on the continental margins of the South China Sea: Response to opening of the ocean basin [J]. *Interpretation*, 2016, 4: SP1-SP19.
- [22] 吴时国, 朱伟林, 马永生. 南海半封闭边缘海碳酸盐台地兴衰史[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38(6): 1-17. [WU Shiguo, ZHU Weilin, MA Yongsheng. Vicissitude of Cenozoic carbonate platforms in the South China Sea: Sedimentation in semi-closed marginal seas [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018, 38(6): 1-17.]
- [23] Shanmugam G, Moiola R J. Eustatic control of turbidites and winnowed turbidites [J]. *Geology*, 1982, 10: 231-235.