

张新康, 贾国东. 沉积物埋藏深度和碳酸钙含量对南海沉积物干密度的影响[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(6): 25-33.

ZHANG Xinkang, JIA Guodong. Burial depth and calcium carbonate content of sediment: impact on the sediment dry bulk density for the South China Sea[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(6): 25-33.

# 沉积物埋藏深度和碳酸钙含量对南海沉积物干密度的影响

张新康, 贾国东\*

(同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 在古海洋学研究中, 质量堆积速率是反映地质历史时期某种物质沉积通量变化趋势的重要指标。计算质量堆积速率的一个必要参数是沉积物的干密度 (DBD)。但是, 很多钻孔沉积物的干密度数据往往因采样间隔稀疏而分辨率太低, 甚至没有实测数据, 为后续研究带来一定限制。前人研究中曾经发现深海沉积物的 DBD 可以用沉积物中的  $\text{CaCO}_3$  含量进行估算, 但这一方法在南海是否可行尚缺乏研究。笔者根据前人经验, 对南海 ODP184, IODP 349、367、368 共 4 个航次 17 个站位的 DBD、 $\text{CaCO}_3$  含量与样品埋藏深度数据进行了分析, 发现沉积物埋藏深度是影响 DBD 的重要因素, DBD 和  $\text{CaCO}_3$  含量仅在南海南部的 ODP1143 站位表现出良好的关系。而在南海北部及中部可能由于受到不同程度深层流活动的影响, 导致沉积环境极不稳定, 非碳酸盐组分来源复杂多变, 故 DBD 与  $\text{CaCO}_3\%$  的相关性差。在南海南部, 以沉积物埋藏深度和  $\text{CaCO}_3\%$  为变量, 对 ODP1143 站位用二元多项式拟合出一经验公式, 该公式适用于南海南部海域与 1143 站位有相似沉积环境的沉积物样品干密度的估算。

**关键词:** 南海; 干密度; 沉积物埋藏深度; 碳酸盐; 二元多项式拟合

中图分类号: P736.2

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2021.189

## 0 引言

质量堆积速率是古海洋学研究中定量重建地质历史时期某种物质沉积通量变化趋势的重要数据。比如, 海洋总有机碳 (TOC) 的堆积速率可以反映 TOC 的沉积通量变化, 进而指示有机碳生产和输出通量的变化历史。这要比单纯运用 TOC 含量数据得出的变化曲线更加接近实际情况。然而, 计算沉积物的质量堆积速率往往受到一些限制, 其中的一个限制就是经常缺乏沉积物的干密度 (DBD)

这一基础参数。

沉积物的干密度是指从原位取出的单位体积的沉积物, 其孔隙中完全脱水后的质量。即沉积物固体颗粒的质量与其原位总体积之比。然而, DBD 参数在钻孔沉积物采集后通常并没有及时进行高分辨率的测量, 而且沉积柱在岩芯库储存较长时间后往往会部分失水并变形, 从而无法获得准确的原位体积, 也就无法进行可靠的 DBD 的测量。一些研究中会假设样品干密度是不变的, 然而多数情况下这种假设会给有关计算带来较大误差<sup>[1]</sup>。CLEMENS 等<sup>[2]</sup> 曾使用氯离子提取法与干燥失重法分别计算沉积物中原始海水含量, 并进一步计算原始干密度, 但这两种方法所得结果误差仍可达  $\pm 20\%$ , 且实验过程较为繁琐。所以, 如何对缺乏 DBD 数据的样品通过其他简单参数进行估算以获得相对可靠的 DBD 数据就显得尤为重要。

影响原始海洋沉积物干密度的因素主要有沉积物本身物质组成和早期成岩作用 (影响孔隙度)

收稿日期: 2021-07-16

资助项目: 国家自然科学基金“南海浮游生态系统对上新世暖期气候的响应及其机制研究” (42030504)

作者简介: 张新康 (1997—), 男, 在读硕士, 主要从事海洋地质方面的研究工作. E-mail: 1931653@tongji.edu.cn

\* 通讯作者: 贾国东 (1969—), 男, 博士, 教授, 主要从事有机地球化学和古海洋学研究工作. E-mail: jiagd@tongji.edu.cn

两部分。前人研究还发现沉积物埋藏深度直接影响早期成岩作用,进而影响孔隙度,最终影响沉积物的干密度,在此基础上总结出了孔隙率与沉积物埋藏深度的相关经验公式<sup>[3-4]</sup>。原位海洋沉积物主要包含有机质(通常<1%)、碳酸钙以及非钙质部分(如黏土矿物等,多来自陆源输入)等。其中,碳酸钙是深海沉积物的主要生源组分,含量较高且容易测量,成为用来估算沉积物 *DBD* 的重要参数。前人在对赤道太平洋<sup>[1,5]</sup>、南印度洋<sup>[2]</sup> 以及东赤道大西洋<sup>[6]</sup> 的研究中,都发现沉积物干密度与碳酸钙百分含量( $\text{CaCO}_3\%$ )有着显著的相关关系。这种显著的关系应该是由所研究的钻孔位置均处于远洋区,陆源输入影响微弱,碳酸盐含量高所致。但是,不同海域之间由于沉积环境与埋藏环境不尽相同,上述研究中得出的预测公式并不相同,因此没有一个普遍适用的经验公式可以应用到所有海域。

在南海,沉积物 *DBD* 与  $\text{CaCO}_3\%$ , 以及沉积物埋藏深度之间的关系尚缺乏研究报道。对于南海这样一个边缘海,陆源物质在沉积物中占很大比例,其环境背景与前人所研究的大洋区域有较大差别。但是,如果某个区域的沉积环境与陆源物质来源稳定,那么沉积物干密度仍可能由沉积物成分,甚至  $\text{CaCO}_3\%$  来定量预测。否则,*DBD* 与  $\text{CaCO}_3\%$  之间的相关性就会变差,难以用  $\text{CaCO}_3\%$  作为预测 *DBD* 的参数。为验证上述推测,本文从南海的数次国际大洋钻探数据库中提取了钻孔沉积物的埋藏深

度、*DBD* 和  $\text{CaCO}_3\%$  数据,以此来探究 *DBD* 与  $\text{CaCO}_3\%$  和沉积物埋藏深度参数之间的相关性,讨论运用  $\text{CaCO}_3\%$  和沉积物埋藏深度参数预测沉积物 *DBD* 数据的可能性。

## 1 数据来源与处理

本文所使用数据均来自 IODP Database 所公布的航次数据(<https://web.iodp.tamu.edu/OVERVIEW/>),共包括 ODP 184, IODP 349、367、368 等 4 个航次的 17 个站位的 *DBD*、 $\text{CaCO}_3\%$  与沉积物埋藏深度数据,以及沉积速率数据。站点位置如图 1,详细信息见表 1。

上述数据库中同一站位钻孔沉积物的 *DBD* 与  $\text{CaCO}_3\%$  数据并不对应相同的沉积物埋藏深度,考虑到前者变化幅度更小且较为平滑,我们在每 2 个 *DBD* 数据间使用线性内插法得到与  $\text{CaCO}_3\%$  数据对应沉积物埋藏深度的 *DBD* 值。在此基础上,对数据进行统计分析和曲线拟合。所使用的分析软件为 MATLAB R2018a 的曲线拟合工具 cftool (Curve Fit Tool)。

## 2 分析结果

本文根据钻孔站点的位置将其分为 3 组:①南海北部,包括 1144、1145、1146、1147、1148、U1432、U1435、U1499、U1500、U1501、U1502、U1504、

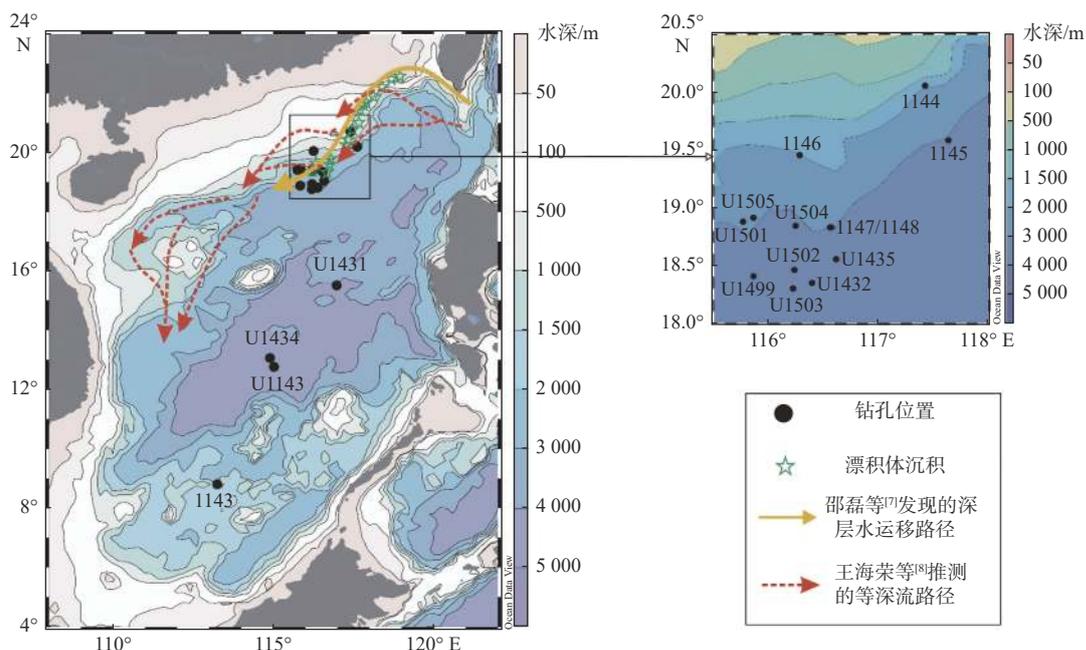


图 1 本文涉及站点位置以及南海深层流运移路径示意图

Fig.1 Site locations and the flow path of deep current in the South China Sea

表 1 本文站位信息

Table 1 Specification of the study sites

航次	航次时间	站位	经度/(°E)	纬度/(°N)	水深/m	数据点/个
184	1999年2-4月	1143	113.285	9.362	2 771	180
		1144	117.419	20.053	2 035	143
		1145	117.631	19.584	3 175	60
		1146	116.273	19.457	2 091	181
		1147	116.555	18.835	3 245	24
		1148	116.566	18.836	3 297	196
		U1431	117.000	15.376	4 237	43
349	2014年1-3月	U1432	116.391	18.352	3 829	16
		U1433	115.047	12.919	4 379	147
		U1434	114.923	13.192	4 009	6
		U1435	116.610	18.556	3 252	27
367	2017年2-4年	U1499	115.860	18.409	3 760	79
		U1500	116.220	18.305	3 801	53
		U1501	115.766	18.885	2 852	94
368	2017年4-6月	U1502	116.231	18.465	3 763	32
		U1504	116.242	18.849	2 816	16
		U1505	115.859	18.918	2 916	79

U1505; ②中部海盆, 包括 U1431、U1433、U1434; ③南海南部, 包括 1143。我们对 3 组数据沉积物 DBD 分别与  $\text{CaCO}_3\%$  和沉积物埋藏深度的关系进行线性回归分析与显著性分析, 结果如图 2。在图 2 左列, 不论南海北部、中部还是南部, DBD 都与沉积物埋藏深度有着良好的相关关系; 而在图 2 右列, 沉积物 DBD 与  $\text{CaCO}_3\%$  的关系呈现出由北向南逐渐变好的趋势, 至南海南部的 1143 站位, 二者的相关系数  $R$  达 0.79, 相关性好且显著。这种由北向南 DBD 与  $\text{CaCO}_3\%$  相关性变好的现象并非是由于在南部仅有 ODP1143 一个钻孔所导致, 因为我们也考察了北部及中部的每个单独钻孔的样品 DBD 与  $\text{CaCO}_3\%$  之间的相关性, 相关性均较差,  $R$  均不超过 0.45。所以, 我们认为, 1143 站位沉积物干密度与  $\text{CaCO}_3\%$  之间较好的相关性并非偶然。

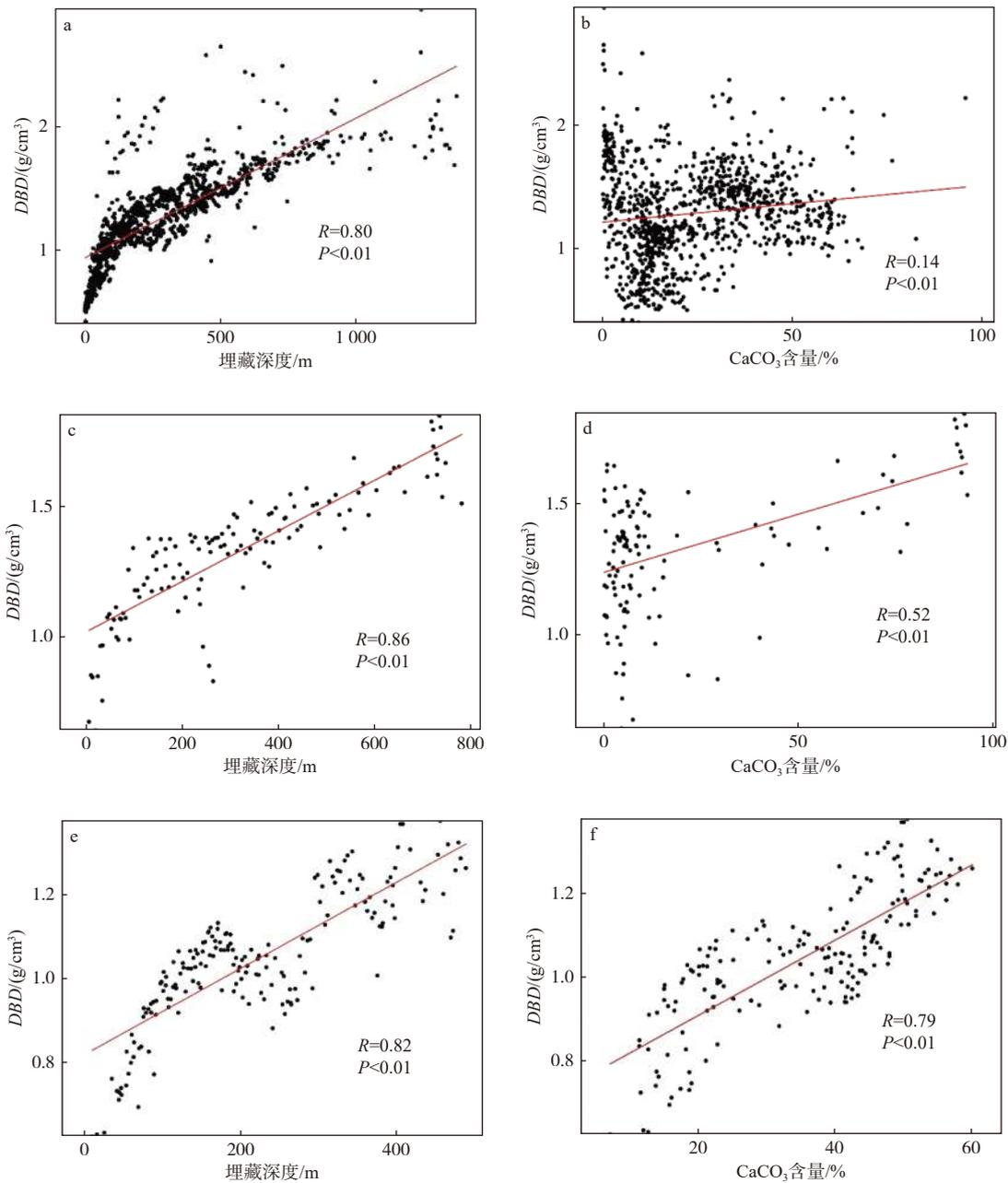
### 3 讨论

#### 3.1 沉积物干密度与埋藏深度关系

沉积物随着埋藏深度的增加被不断压实, 孔隙度不断降低, 其含水量也随之降低, 沉积物干密度会增大。很早就有人提出沉积物密度、孔隙度与沉积物埋藏深度的关系并总结出相关经验公式<sup>[3-4]</sup>, 并将其应用于在缺少样品 DBD 与孔隙度数据的情况下质量沉积速率的计算<sup>[9]</sup>。

谢杨冰等<sup>[10]</sup>曾对 ODP184、IODP349 航次南海北部诸站位沉积物埋藏深度-孔隙度关系进行过研究, 发现沉积物的压实系数在埋藏较浅时较大, 在到达某一深度时急剧减小并趋于稳定, 说明沉积物已经接近完全压实固结深度。本文中同样发现这一规律, 3 组 DBD-埋藏深度数据的曲线形态皆在约 150 m 以浅时较陡, 而在 150 m 以深显著变缓。这可能暗示了南海沉积物的压实作用最明显的阶段发生在埋藏深度约 150 m 以浅, 而到达这一深度后, 由于沉积物已经被压实到某个临界程度, 上覆压力的继续增大对其孔隙度与 DBD 的影响逐渐减弱, 曲线逐渐变得愈加平缓, DBD 值趋于稳定, 变化较小。

此外, 我们还发现, 当处于同一埋藏深度, 即重力压实条件相似时, 不同海域的沉积物样品具有不同干密度。总体来看, 南海北部干密度值相对较高, 而南部则相对较低。这可能与不同海域由于陆源输入物源不同, 沉积物在组成上存在差异有关。比如, 有研究发现<sup>[11]</sup>, 北部站位所处区域表层沉积物中, 密度相对较大的绿泥石 ( $2.6\sim 3.3\text{ g/cm}^3$ )、伊利石 ( $2.6\sim 2.9\text{ g/cm}^3$ ) 含量可分别达 29%、51%, 而密度相对较小的蒙脱石 ( $2.1\sim 2.5\text{ g/cm}^3$ ) 仅为 12%; 而在南部海域, 表层沉积物中绿泥石、伊利石与蒙脱石的比例分别为 16%、26% 与 38%。因此, 碎屑矿物组成的这种差异可能导致了南海北部与南部同一埋藏深度沉积物的密度存在差异的现象。



(a-b) 北部; (c-d) 中部; (e-f) 南部

图2 南海 DBD-沉积物埋藏深度关系和 DBD-CaCO<sub>3</sub>% 关系

Fig.2 Relationships of DBD vs sediment burial depth and DBD vs CaCO<sub>3</sub>% in the South China Sea

### 3.2 沉积物干密度与碳酸钙含量关系

南海深海沉积物中的碳酸盐主要是海洋生物成因, 主要来源为有孔虫和颗石藻两大类生物壳体。不同来源的碳酸钙的影响可能主要表现在孔隙度, 例如, 以较为粗粒的有孔虫钙质壳体为主的含碳酸盐沉积物相比以较为细粒的颗石藻壳体为主的含碳酸盐沉积物, 有着更大的孔隙度。但这些不同的孔隙度都包含在总的孔隙度中, 本文认为这并不影

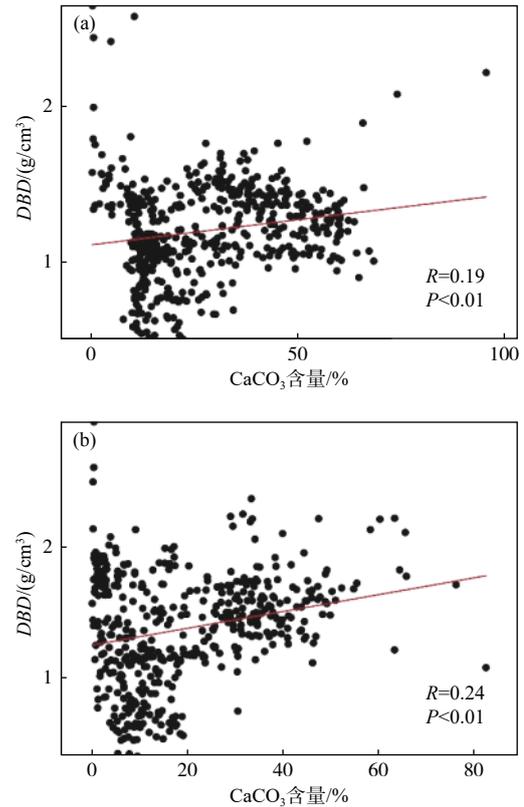
响碳酸盐含量与样品干密度之间的关系。其次, 本文讨论的碳酸钙含量是一个质量分数, 讨论其与沉积物干密度关系的一个前提是默认沉积物中碳酸钙的密度是不变的, 即碳酸钙本身的晶体结构是相同的。事实上, 海洋沉积物中碳酸钙沉积的晶体结构不一定相同, 例如文石质碳酸钙与方解石质碳酸钙。尽管如此, 二者密度相差并不显著, 仅约  $0.2 \text{ g/cm}^3$  (文石约  $2.9 \text{ g/cm}^3$ , 方解石约  $2.7 \text{ g/cm}^3$ )。而本文中南海沉积物的干密度平均值为  $(1.3 \pm$

0.4)  $\text{g}/\text{cm}^3$  (平均±标准差), 上述碳酸盐类型的差异在混合沉积物中平均造成的影响应该  $< 15\%$ 。但是, 本文中所涉及沉积物样品并没有关于碳酸钙组分来源与结构的分析, 故对其带来的影响难以准确评估, 仍有待后续研究中进行深入的探究与讨论。因此, 在本文对沉积物干密度与碳酸钙含量的关系的讨论中, 仍默认沉积物中碳酸钙组分的密度不变。

前已述及, 在赤道太平洋、南印度洋以及东赤道大西洋等多个海域沉积物的  $\text{CaCO}_3\%$  与  $\text{DBD}$  之间有着密切的关系。在南海, 这种关系表现为从北部向南部相关性逐渐升高, 在南部的相关性最好 (图 2)。

位于南海中部的 IODP349 航次 1431、1433、1434 站位, 其现代水深均  $> 4\,000\text{ m}$ , 远深于  $3\,000\text{ m}$  的现代南海溶跃面<sup>[12]</sup>。这使得碳酸钙溶解作用强, 导致绝大多数数据点的  $\text{CaCO}_3\%$  值均  $< 10\%$ , 从而影响了拟合效果, 使得  $\text{DBD}$  与  $\text{CaCO}_3\%$  相关性较低。但从图 2d 来看, 在  $\text{CaCO}_3\%$  值  $> 20\%$  时 (可能由于地质历史上溶跃面有明显加深), 中部数据点的分布似乎也较为规律, 但因数据有限, 仍有待后续进一步研究。

在北部, 同样有超半数站位的水深  $> 3\,000\text{ m}$ , 也可能是导致一些沉积物样品中  $\text{CaCO}_3\%$  值较低 (如  $< 10\%$ ) 的一个原因。对此, 本文将北部的所有钻孔按照站位水深分为现代溶跃面 ( $3\,000\text{ m}$ ) 以上和以下两部分进行分析, 结果如图 3, 不论在溶跃面以上还是以下,  $\text{CaCO}_3\%$  与沉积物干密度之间的相关性都较差。那么, 又是什么原因导致了南海北部  $\text{DBD}$  与  $\text{CaCO}_3\%$  相关关系如此之差呢? 通过与前人研究区域的对比可以发现, 与南海不同, 在赤道太平洋、南印度洋以及东赤道大西洋等这些  $\text{DBD}$  与  $\text{CaCO}_3\%$  相关关系很好的海域, 其沉积环境为受陆源输入微弱的典型深海沉积。而南海作为分隔亚洲大陆和太平洋的最大边缘海, 每年从周围接收超过 190 亿 t 河流沉积物<sup>[11]</sup>, 使其成为世界范围内封闭或半封闭边缘海中最大的河流沉积物储存地<sup>[13]</sup>。这应该是在相同  $\text{CaCO}_3\%$  值的情况下, 南海地区沉积物干密度较赤道太平洋沉积物大得多的一个原因。南海大量的陆源沉积物输入稀释了生源  $\text{CaCO}_3$  含量, 导致南海沉积物中  $\text{CaCO}_3$  含量较低, 普遍  $< 60\%$ 。而赤道太平洋、南印度洋以及东赤道大西洋海域  $\text{CaCO}_3$  含量可高达  $90\%$  以上。而且, 陆源输入因其来源与成分相对复杂也显著减弱了  $\text{DBD}$



(a) 钻孔处于溶跃面之上; (b) 钻孔处于溶跃面之下

图 3 南海北部钻孔中  $\text{CaCO}_3\%$  与  $\text{DBD}$  的相关性分析

Fig.3 Correlation between  $\text{CaCO}_3\%$  and  $\text{DBD}$  in boreholes in the northern South China Sea

与  $\text{CaCO}_3\%$  之间本应紧密的相关关系。

类似的对比也可以应用于南海的北部与南部。南部 1143 钻孔所处位置离陆架与河口相对较远, 且海底地形平缓, 接受的陆源输入可能相对较少; 而北部一系列钻孔紧邻北部陡峭的陆坡, 接受了比 1143 钻孔更多的陆源沉积。这或许是南部 1143 钻孔  $\text{DBD}$  与  $\text{CaCO}_3\%$  相关性较好的一个原因。但这并不是绝对的, 据 LIU 等<sup>[10]</sup> 统计, 南海北部主要的陆源沉积物来源为台湾与北部大陆, 年输入量分别为 176 和 102 Mt; 而与南部相近的婆罗洲、中南半岛的年输入量分别达 459 和 166 Mt。所以即使 1143 钻孔所处位置离陆坡较远, 地势较为平缓, 但由于南部巨大的输入量, 其也接受了相当可观的陆源沉积物。从沉积速率来看, 南部 1143 钻孔的平均沉积速率为  $3.2\sim 7.2\text{ cm}/\text{ka}$ ; 而北部尽管一些站位 (如 1144 站位) 的沉积速率非常高, 达  $31\sim 93\text{ cm}/\text{ka}$ , 但仍有相当部分北部站位除个别时期内沉积速率较高外, 大部分时期沉积速率与 1143 钻孔相近。北部那些沉积速率与南部 1143 相近的钻孔, 如 1147、1148 等,  $\text{DBD}$  与  $\text{CaCO}_3\%$  相关性仍然很差,

并未表现出像南部 1143 站位的数据那样有相对较好的相关性。这似乎说明单纯的陆源沉积输入的多少对  $DBD$  与  $CaCO_3\%$  相关性的强弱影响是有限的。

如果将南海北部、中部以及南部所有的数据点放在同一坐标系中进行比较就可以发现,如图 4,在相同  $CaCO_3\%$  下,南海南部的数据点  $DBD$  值较为集中,而南海北部与中部的数据点的  $DBD$  值分布范围很大。这说明南海北部和中部相同  $CaCO_3\%$  值的不同数据点之间,非碳酸钙组分的差异较大。这似乎暗示,南海北部与中部的陆源输入的物源复杂且变化较快,沉积环境不稳定,而南部相对而言沉积环境较为稳定。

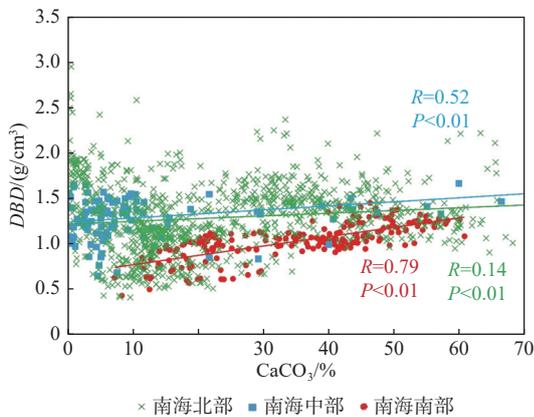


图 4 南海北部、中部及南部  $DBD$ - $CaCO_3\%$  关系对比

Fig.4 The  $DBD$ - $CaCO_3\%$  relationship in the northern, central and southern South China Sea

我们认为沉积物来源和水动力环境的差异是导致上述南海南北不同区域的沉积物  $DBD$  与  $CaCO_3\%$  关系出现明显差异的重要原因。首先,前人已有大量研究表明,南海北部靠近陆坡位置沉积物的来源极其复杂,包括北部大陆、台湾岛、吕宋岛、甚至包括深层流与黑潮携带来的菲律宾海盆与台湾东南部的沉积物,而这些沉积物的成分(主要为黏土矿物)组成有着极大的差异<sup>[11]</sup>。这就导致了北部的  $DBD$  与  $CaCO_3\%$  相关性受到较大的干扰;而对于南海南部,CHI 等<sup>[14]</sup>通过元素与矿物分析证明 1143 钻孔沉积物的物源至少自 6 Ma 以来变化不大,主要来自于中南半岛与婆罗洲 2 处,所以对  $DBD$  与  $CaCO_3\%$  相关性产生的干扰相对较小。

其次,南海南北深层水动力环境差异很大,而深水水动力极其复杂,性质多样,会引起迥异的沉积响应<sup>[15]</sup>。在南海北部,深层流(主要为 2 000 m 等深流)对北部陆坡沉积有着很强的影响,但由于

海底地形不同,深层流可能对南海南部沉积物的扰动影响比较有限。当然,目前关于南海深层环流模式的信息仍然较为有限<sup>[7,16]</sup>。在深海环境下,深层流可使沉积物发生二次运移与再沉积,会在水道一侧或两侧形成漂积体(sedimentary drift)<sup>[17-19]</sup>。根据伊利石分布特征,南海北部深层流可向南分别延伸至 13°N<sup>[20]</sup>。同时,前人根据地球物理方法已大致总结出南海北部深层流的运移路径<sup>[7-8]</sup>(图 1)。该深层流具有平均振幅达 7 cm/s 的潮流,这足以冲刷疏松的底质并且导致黏土沉积物的再悬浮,而且该深层流同时呈现很强的中尺度振荡特征,这种等深流的振荡对于表层沉积物的再悬浮及长距离运输具有非常重要的贡献<sup>[21-22]</sup>。所以南海东北缘强烈而多变的深层流活动导致了复杂的沉积过程<sup>[7]</sup>。深层流的搬运路径也已用于解释南海东北陆坡的大规模沉积物漂积体带的存在<sup>[23]</sup>(图 1)。南海北部的 ODP1144 站位就位于北部陆坡的漂移体上,从而导致了极快速的沉积速率(最高达 93 cm/ka)。同时,吕宋海峡入口外侧深层边界流流向呈现季节振荡,在夏半年沿地形向南,冬半年反之。这就进一步增加了南海北部沉积物来源与沉积环境的复杂性<sup>[24]</sup>。因此,在南海北部陆架和陆坡海域,沉积物物源除了受多个方向的陆源河流输入影响外,深层流的搬运和扰动作用也非常重要<sup>[25]</sup>。南海的这一由北向南影响逐渐减弱的深层流活动可能也正是导致  $DBD$ - $CaCO_3\%$  关系由北向南逐渐变好的原因。

相比而言,南海南部沉积物来源相对简单,且目前所知的北部深层流活动难以到达 1143 站位所处的南海南部。所以对于南海南部来言,其沉积环境相对北部来讲稳定的多,沉积过程中受到的扰动程度相对较轻,非碳酸盐组分变异较小。这就使得沉积物的  $DBD$  与  $CaCO_3\%$  存在一定程度的相关关系。因此,虽然  $CaCO_3\%$  并不适合在南海北部和中部海盆用来作为估算  $DBD$  的参数变量,但在南海南部可以和沉积物埋藏深度一起作为变量来提高对  $DBD$  的估算精度。

### 3.3 南海南部沉积物干密度与碳酸钙含量关系的二元拟合

南海南部沉积物的  $DBD$  与  $CaCO_3\%$  存在较为良好的相关性,但是这与前人所研究的沉积环境稳定的远海海域相比仍然相对较差。所以,单纯用  $DBD$ - $CaCO_3\%$  关系进行拟合并用来预测南海南部

其他钻孔沉积物的干密度可能会带来较大误差。所以, 结合 *DBD* 与沉积物埋藏深度之间的良好相关关系, 我们尝试对南海南部沉积环境相对稳定海域, 建立  $\text{CaCO}_3\%$  和沉积物埋藏深度这 2 个自变量与 *DBD* 的二元多项式拟合关系, 希望能获得比  $\text{CaCO}_3\%$  或者沉积物埋藏深度的一元拟合更好的拟合效果。我们用 3 种方式的多项式进行了拟合, 并对拟合效果进行了比较, 结果如表 2、3。

拟合结果表明, 在沉积物埋藏深度变量为 3 阶,  $\text{CaCO}_3\%$  变量为 2 阶或 3 阶时, 二元拟合的效果要好于任意单个变量的拟合, 且与更高阶的拟合效果十分接近, 拟合效果如图 5。

所以为尽量降低方程式的复杂程度, 本文决定采用(沉积物埋藏深度,  $\text{CaCO}_3\%$ )阶数为(3, 2)的二元多项式拟合公式:

$$DBD = p_{00} + p_{10}d + p_{01}c + p_{20}d^2 + p_{11}dc + p_{02}c^2 + p_{30}d^3 + p_{21}d^2c + p_{12}dc^2$$

式中: *DBD* 为沉积物干密度;

*d* 为沉积物埋藏深度, m;

*c* 为沉积物中  $\text{CaCO}_3\%$  值;

*p* 为一系列系数, 由 MATLAB 软件 cftool 生成, 分别如下:

表 2 南海南部不同一元拟合效果比较

Table 2 Comparison of different unary fitting methods for the southern South China Sea

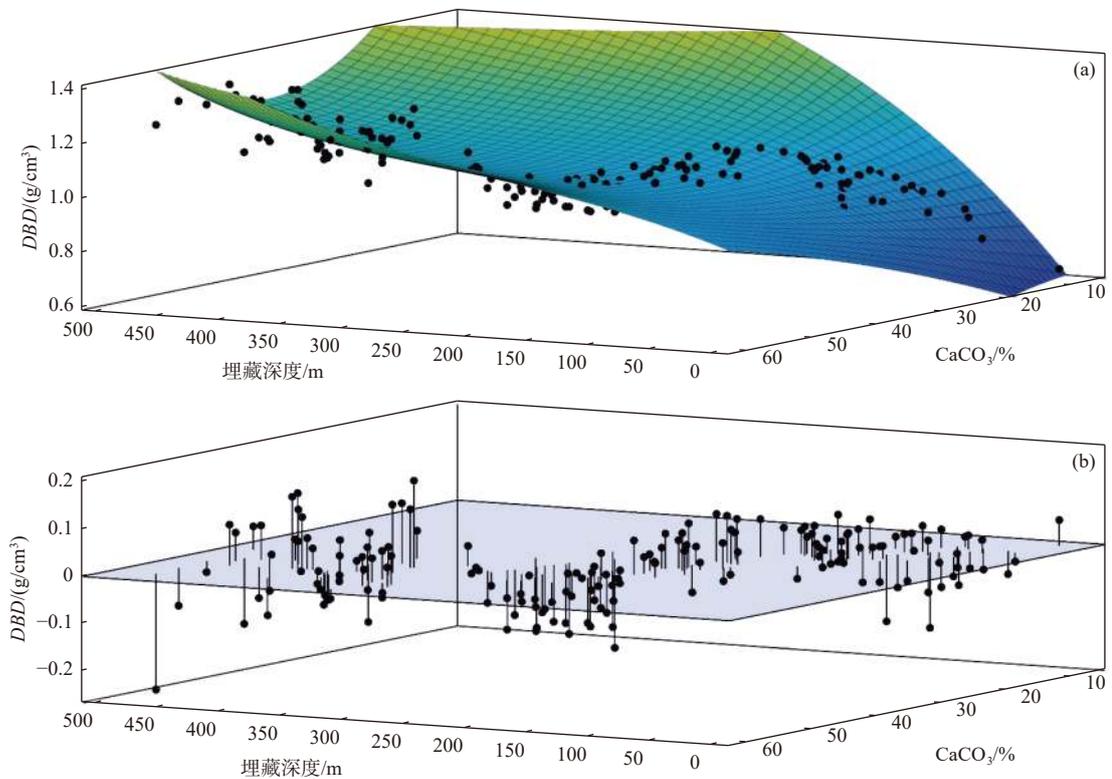
自变量	阶数	$R^2$	RMSE/(g/cm <sup>3</sup> )
$\text{CaCO}_3\%$	1	0.62	0.10
	2	0.62	0.10
	3	0.65	0.09
沉积物埋藏深度	1	0.674	0.09
	2	0.70	0.08
	3	0.74	0.08

表 3 南海南部不同阶数二元拟合效果比较

Table 3 Comparison of different binary fitting methods for the southern South China Sea

阶数(埋藏深度)	阶数( $\text{CaCO}_3\%$ )	$R^2$	RMSE/(g/cm <sup>3</sup> )
1	1	0.70	0.08
2	1	0.71	0.08
3	1	0.79	0.07
1	2	0.71	0.08
2	2	0.71	0.08
<b>3</b>	<b>2</b>	<b>0.80</b>	<b>0.07</b>
1	3	0.79	0.07
2	3	0.80	0.07
3	3	0.80	0.07

注: 加粗一行数据为最终采用的阶数。



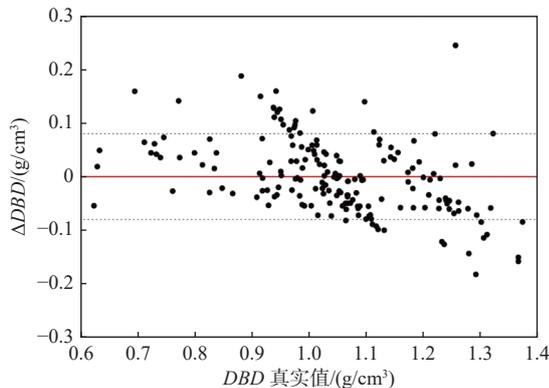
(a)二元拟合效果;(b)残差分布

图 5 南海南部 1143 站位 *DBD* 二元拟合效果和残差分布

Fig.5 Binary fitting and residual distribution for the *DBD* at the site 1143 in southern South China Sea

$$\begin{aligned}
 p_{00} &= 4.437 \times 10^{-1} \\
 p_{10} &= 6.326 \times 10^{-3} \\
 p_{01} &= 1.133 \times 10^{-2} \\
 p_{20} &= -1.024 \times 10^{-5} \\
 p_{11} &= -1.628 \times 10^{-4} \\
 p_{02} &= -4.141 \times 10^{-5} \\
 p_{30} &= 7.361 \times 10^{-9} \\
 p_{21} &= 1.037 \times 10^{-7} \\
 p_{12} &= 1.364 \times 10^{-6}
 \end{aligned}$$

随后,将样本数据带入所得经验公式计算并与其真实值相比较,发现绝大多数数据点的误差在均方根误差( $\pm 0.08 \text{ g/cm}^3$ )以内(图6),说明该经验公式至少在本文情境下是可靠的。



虚线范围为 $\pm 0.08$ ( $\Delta DBD = \text{估算值} - \text{真实值}$ )

图6 南海南部 DBD 二元拟合公式计算值误差范围

Fig.6 Error range of the DBD binary fitting for southern South China Sea

## 4 结论

(1)在南海北部及中部海域,由于沉积物来源极其复杂,且受深层流对沉积物扰动的影响,DBD和 $\text{CaCO}_3\%$ 相关关系很差,不能应用于对样品DBD的估算。相比碳酸钙含量,沉积物埋藏深度是影响其干密度更重要的因素,可用DBD-沉积物埋藏深度关系大致估算沉积物干密度。

(2)南部由于物源和沉积环境相对稳定,DBD和 $\text{CaCO}_3\%$ 相关关系良好。同时运用沉积物埋藏深度和 $\text{CaCO}_3\%$ 数据,采用二元多项式拟合得出的经验公式,可以较好地用来估算该海域与ODP1143站点有着相似沉积环境中沉积物的DBD。

致谢:感谢同济大学地球与海洋科学学院李超副教授对稿件提出的建设性意见!

## 参考文献:

- [1] LYLE M W, DYMOND J. Metal accumulation rates in the south-east Pacific — errors introduced from assumed bulk densities[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1976, 30(2): 164-168.
- [2] CLEMENS S C, PRELL W L, HOWARD W R. Retrospective dry bulk density estimates from southeast Indian Ocean sediments — comparison of water loss and chloride-ion methods[J]. *Marine Geology*, 1987, 76(1/2): 57-69.
- [3] HAMILTON E L. Variations of density and porosity with depth in deep-sea sediments[J]. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, 1976, 46: 280-300.
- [4] SIMMONS G R. Subsidence history of basement sites and sites along a carbonate dissolution profile, Leg 115[R]. *Proceedings, Scientific Results, ODP, Leg 115, Mascarene Plateau, 1990*, 123-126.
- [5] SNOECKX H, REA D K. Dry bulk density and  $\text{CaCO}_3$  relationships in upper Quaternary sediments of the eastern equatorial Pacific[J]. *Marine Geology*, 1994, 120(3/4): 327-333.
- [6] CURRY W B, LOHMANN G P. Late Quaternary carbonate sedimentation at the Sierra Leone Rise (eastern equatorial Atlantic Ocean)[J]. *Marine Geology*, 1986, 70(3/4): 223-250.
- [7] 邵磊, 李学杰, 耿建华, 等. 南海北部深水底流沉积作用[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2007, 37(6): 771-777.
- [8] 王海荣, 王英民, 邱燕, 等. 南海北部大陆边缘深水环境的沉积物波[J]. *自然科学进展*, 2007, 17(9): 1235-1243.
- [9] SYKES T J S, RAMSAY A T S. Calculation of mass accumulation rates in the absence of density or porosity measurements[J]. *Marine Geology*, 1995, 122(3): 173-179.
- [10] 谢杨冰, 吴时国. 南海深水海盆沉积物压实作用及影响因素[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(3): 37-46.
- [11] LIU Z, ZHAO Y, COLIN C, et al. Source-to-sink transport processes of fluvial sediments in the South China Sea[J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 153: 238-273.
- [12] 汪品先. 西太平洋边缘海的冰期碳酸盐旋回[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1998, 18(1): 1-4, 6-7, 9-11.
- [13] MILLIMAN J D, FARNSWORTH K L. River discharge to the coastal ocean: a global synthesis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2011, 115-164.
- [14] CHI G, LIU B. Sedimentary source area and paleoenvironmental reconstruction since late Miocene in the southern South China Sea[J]. *Chemie Der Erde*, 2020, 80(1): 1-48.
- [15] 王英民, 王海荣, 邱燕, 等. 深水沉积的动力学机制和响应[J]. *沉积学报*, 2007, 25(4): 495-504.
- [16] WAN S, LI A, CLIFT P D, et al. Increased contribution of terrigenous supply from Taiwan to the northern South China Sea since 3 Ma[J]. *Marine Geology*, 2010, 278(1/4): 115-121.
- [17] GRUETZNER J, UENZELMANN-NEBEN G, FRANKE D. Variations in bottom water activity at the southern Argentine margin: indications from a seismic analysis of a continental slope terrace[J]. *Geo-Marine Letters*, 2011, 31(5/6): 405-417.
- [18] MCCAIVE I N, LONSDALE P F, HOLLISTER C D, et al. Sediment transport over the Hatton and Gardar contourite drifts[J].

- Journal of Sedimentary Petrology, 1980, 50(4): 1049-1062.
- [19] RHEIN M, STRAMMA L, SONN U. The Atlantic Deep Western Boundary Current: water masses and transports near the equator[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(C2): 2441-2457.
- [20] LIU J, XIANG R, CHEN Z, et al. Sources, transport and deposition of surface sediments from the South China Sea[J]. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2013, 71: 92-102.
- [21] HERNÁNDEZ-MOLINA F J. Abyssal plain contourites[J]. *Developments in Sedimentology*, 2008, 60: 345,347-368.
- [22] ZENK W, VISBECK M. Structure and evolution of the abyssal jet in the Vema Channel of the South Atlantic[J]. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2013, 85: 244-260.
- [23] 李华, 王英民, 徐强, 等. 南海北部珠江口盆地重力流与等深流交互作用沉积特征、过程及沉积模式[J]. *地质学报*, 2014, 88(6): 1120-1129.
- [24] 周春. 南海东北部深层环流观测研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015: 1-107.
- [25] 郑洪波, 阎贫, 邢玉清, 等. 反射地震方法研究南海北部的深水底流[J]. *海洋学报*, 2012, 34(2): 192-198.

## Burial depth and calcium carbonate content of sediment: impact on the sediment dry bulk density for the South China Sea

ZHANG Xinkang, JIA Guodong\*

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

**Abstract:** The dry bulk density (*DBD*) of marine sediment is an important parameter to calculate the mass accumulation rate and estimate the sediment flux in geological history. Due to sparse sampling interval, data of *DBD* in many borehole sediments are often poor in resolution or even unavailable, which restricts subsequent studies. Previous studies have found that the *DBD* of deep-sea sediments can be estimated via the content of  $\text{CaCO}_3$  in the sediments. However, whether this method is feasible for the South China Sea (SCS) sediments remains unknown. In this study, we collected and analyzed data of *DBD*,  $\text{CaCO}_3$  content ( $\text{CaCO}_3\%$ ), and burial depth of downcore sediment samples from 17 sites in four ODP/IODP expeditions of Legs 184, 349, 367, and 368 in the SCS. Results showed that the burial depth is an important factor affecting *DBD* in the southern SCS where currents are less dynamic as represented by the ODP1143 site, showing significant *DBD*- $\text{CaCO}_3\%$  relationship; while in the northern and central SCS, relationship between *DBD* and  $\text{CaCO}_3\%$  is poor due probably to dynamic currents and multiple non- $\text{CaCO}_3$  inputs, which leads to the unstable sedimentary environments. Using the burial depth and  $\text{CaCO}_3\%$  of the ODP1143 site as variables, an empirical binary polynomial fitting equation for *DBD* was established, which may be applicable for the *DBD* estimation for the southern SCS where the sedimentary environment is similar to that of the ODP 1143 site.

**Key words:** South China Sea; dry bulk density; sediment burial depth;  $\text{CaCO}_3\%$  content; binary polynomial fitting