

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2018.06.007

西沙群岛永乐环礁瀉湖沉积速率及地球化学特征

刘刚¹, 何其江¹, 李亮¹, 吴时国², 韩孝辉¹, 王雪木¹, 蔡观强³, 王大伟²

1. 海南省海洋地质调查研究院, 海口 570206

2. 中国科学院深海科学与工程研究所海底资源与探测重点实验室, 三亚 572000

3. 广州海洋地质调查局, 广州 510760

摘要:西沙群岛环礁海底沉积物的沉积速率及其地球化学特征是环礁沉积地貌环境演化研究的重要指标。为了探讨永乐环礁晚全新世以来沉积速率的变化和常量化学元素垂向分布与变化特征,我们在西沙群岛永乐环礁瀉湖内进行了详细的取样,开展了重力柱状样的 AMS¹⁴C 同位素测年和沉积物地球化学分析。永乐环礁晚全新世海底沉积物沉积速率约 0.778mm/a;根据沉积物常量地球化学含量测试, CaO 含量最高,其次是 MgO,其他元素含量均小于 1%,可以将常量元素组分分为 5 类。CaCO₃ 含量和 MgO/Al₂O₃ 含量比值都非常高,说明本区沉积物的来源主要为生物成因,极少量来自其他物质输入;与晚全新世气候相比,总体上永乐环礁瀉湖沉积速率随 SST 增加而升高。

关键词:沉积速率;地球化学特征;晚全新世;永乐环礁

中图分类号:P534.63 **文献标识码:**A

Sedimentation rate and geochemical characters of the lagoonal deposits in the Yongle Atoll, Xisha Islands

LIU Gang¹, HE Qijiang¹, LI Liang¹, WU Shiguo², HAN Xiaohui¹, WANG Xuemu¹, CAI Guanqiang³, WANG Dawei²

1. Marine Geological Survey Institute of Hainan Province, Haikou 570206, China

2. Key Laboratory of Marine Geophysics and Georesource, Institute of Deep-sea Science and Engineering, CAS, Sanya 572000, China

3. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, China

Abstract: A gravity core, labeled as Core YLD01, was collected from the lagoon of the Yongle Atoll. AMS¹⁴C isotopic dating and geochemical analysis were carried out aiming to reveal the changes in sedimentation rate during Holocene as well as the vertical variation in major chemical elements with time. The AMS¹⁴C isotope dating suggests that the sedimentation rate in the lagoon of Yongle Atoll is about 0.778mm/a since the Holocene. Geochemical composition of the sediments indicated that CaO dominates the lagoonal deposits followed by MgO, and the others are all lower than 1%. The major elements can be grouped into five categories. Both the CaCO₃ content and the ratio of MgO/Al₂O₃ are very high, indicating that the major source of sediments is from native organisms. Other source of materials from outside is very little. Compared the data with Late Holocene climatic change, the sedimentation rate of the lagoonal deposits was obviously increased with the rise of SST on the Yongle Atoll.

Key words: sedimentary rate; geochemical character; Holocene; Yongle Atoll

南海是西太平洋典型的边缘海,其海底沉积物的沉积速率及其地球化学特征是南海沉积地貌环境演化研究的重要指标。近年来国内外学者对南海的沉积环境与古气候、沉积作用和古海洋学等进行了深入研究,积累了大量沉积速率资料^[1-6]。研究表明,AMS¹⁴C 测年数据可以测定 5 万年以来的沉积物年龄和沉积速率,沉积物年龄和沉积速率在研究

晚全新世以来海洋物质来源、迁移、环境变化和气候响应演变中发挥了重要作用^[7-11],但由于受局限性的影响较大,不同海域沉积物的沉积速率及影响因素不同。目前国内学者对南海北部、中部及南部海域的沉积速率及其环境响应等进行了大量研究,但对在西沙群岛永乐环礁瀉湖内沉积物的沉积速率及其地球化学元素变化特征的研究较少,其意义尚

资助项目:海南省自然科学基金“三沙市永兴岛东部海底滑坡类型分布和成因探讨”(418QN306);中国地质调查局项目(GZH201400210, DD20160140);海南省国土资源厅项目(HZ2015-137)

作者简介:刘刚(1982—),男,硕士,高级工程师,主要从事海洋地质、沉积和地质灾害调查及研究, E-mail:lg1208@163.com

收稿日期:2018-06-30; **改回日期:**2018-10-09. 周立君编辑

未揭示。

2015年海南省海洋地质调查研究院在西沙群岛永乐环礁瀉湖内进行了地质采样,取得了大量第一手资料,并对采集的表层样和柱状样进行了粒度、地球化学分析和同位素年龄测定。分析测试数据为西沙群岛永乐环礁沉积作用深入研究提供了重要基础资料。本文分析和研究了 YLD01 柱状沉积物同位素年龄和地球化学数据,对晚全新世以来西沙群岛永乐环礁内的沉积速率、地球化学变化特征和物质来源进行了探讨和揭示。

1 区域地质背景

西沙群岛,古名七州洋、千里长沙,位于南海北部大陆坡的西沙台阶,北起北礁,南至先驱滩,西迄中建岛,地理位置在 $15^{\circ}43' \sim 17^{\circ}07'N$ 、 $111^{\circ}11' \sim 112^{\circ}54'E$ 之间,处于南海航道要冲。西沙群岛海域面积 50 多万 km^2 ,共有 40 座岛礁,其中露出海面 29 座,总面积大于 $8km^2$ 。可分为两大群组:东北面的宣德群岛和西南面的永乐群岛,其中三沙市政府所在地坐落于宣德群岛永兴岛上,永乐群岛的主体主要为永乐环礁。

古近纪末期,西沙地块由华南大陆裂离到现今位置^[12]。在随后热沉降过程中,早期高地成为发育碳酸盐台地的水下隆起。1973 年以来,先后在永兴岛、石岛和琛航岛钻探了西永 1 井、西石 1 井、西永

2 井和西琛 1 井等多口科学钻孔,试图解释西沙隆起区碳酸盐台地发育、演化规律。吴时国等分析资料显示中晚中新世和第四纪为主要的成礁期^[13,14],认为从古近纪末期开始,西沙群岛一直是碳酸盐台地发育的地区,目前仍发育大量的碳酸盐岛礁。

研究区位于西沙群岛永乐环礁(图 1),是一个晚新生代碳酸盐台地,水深变化为 $0 \sim 1138m$,台地之上水深变化较小,为 $0 \sim 50m$;台地斜坡水深变化剧烈,为 $50 \sim 800m$;其周边深水盆地平原水深为 $800 \sim 1138m$ 。

2 样品与分析方法

根据永乐环礁瀉湖内水深数据初步分析结果,选取 YLD01 重力柱状样(图 2)为研究对象,站位水深约 $49m$,柱状样长度为 $113cm$,柱状样从顶到底变化不多,主要为淡黄色粗砂,表层 $2 \sim 4cm$ 颜色较深,松散状,无味,黏性较弱,呈次圆-次棱角状,分选性一般,主要物质成分为珊瑚碎屑砂,并含有大量的生物贝壳碎屑等(图 3)。

柱状样品按照 $1 \sim 2cm$ 进行取样,进行地球化学分析,共计 60 个样品;对 YLD01 柱状样取 8 个 $AMS^{14}C$ 测年样品进行测试。 $AMS^{14}C$ 测年由美国 Beta Analytic Inc 实验室完成,选柱状样中贝壳、珊瑚等为测年材料,得到有效年代数据,然后使用 CALIB7.1Beta 进行日历年转换,使用海洋放射性

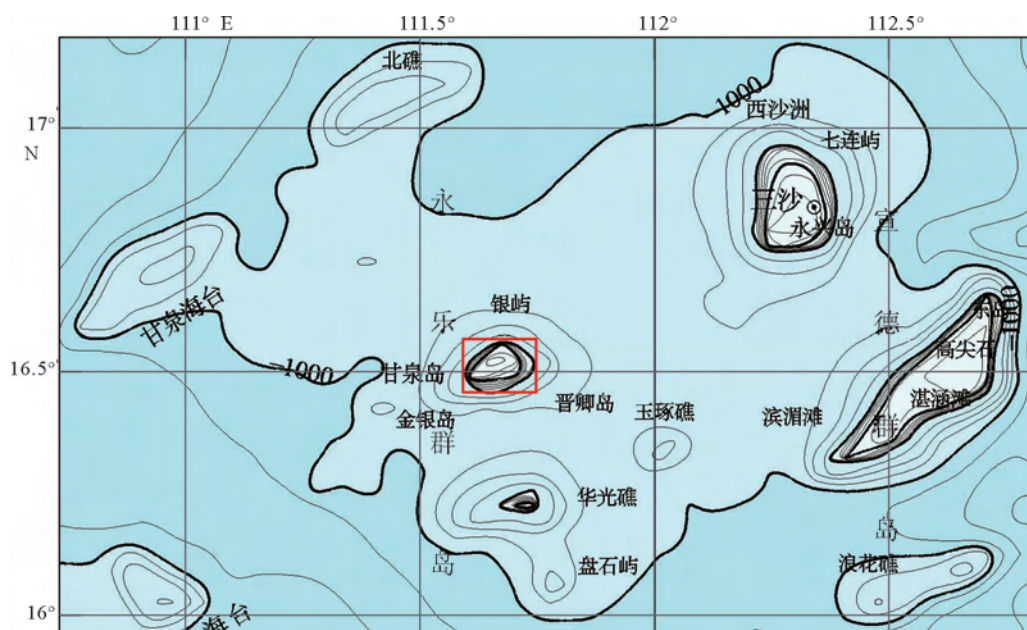


图 1 西沙群岛永乐环礁位置(红框范围为研究区范围)

Fig.1 Location of study area

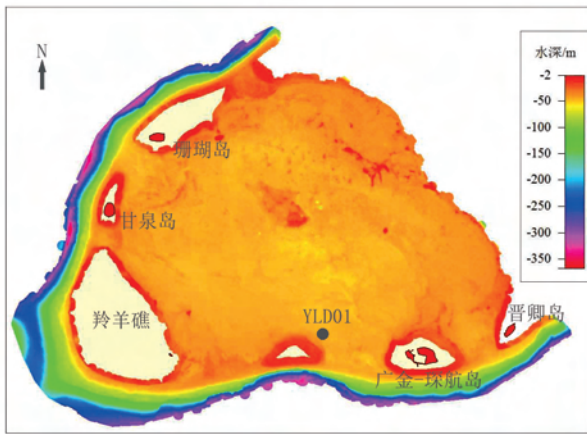


图 2 西沙群岛永乐环礁重力柱状样取样站位
Fig.2 Site of the gravity core

碳校正曲线(Marine13)^[15-17]进行日历年校正,计算实际的沉积速率。在海南省海洋地质测试研究中心,采用 X-射线荧光光谱分析方法对柱状沉积物的常量元素进行测试分析。

3 结果

3.1 AMS¹⁴C 测年与沉积速率

沉积速率主要受陆源碎屑物输入、生源碎屑供应和深海 CaCO₃ 的溶解等因素的影响,该环礁远离大陆,主要受生源的碎屑影响^[18,19]。根据 AMS¹⁴C 测年结果(表 1),YLD01 柱状沉积物在晚全新世以来(1460aBP 以来)的平均沉积速率为 0.778mm/a (图 4)。从表 1 可以看出,YLD01 柱状样分别在 65~50cm 和 40~30cm 两处沉积速率最大,沉积速率均大于 1mm/a,在柱状样底部 113~85cm 处沉积

速率最小。此外,测定年龄结果无反转,表明晚全新世以来永乐环礁沉积环境比较稳定,没有发生滑塌等事件。

表 1 西沙群岛永乐环礁 YLD01 柱状沉积物 AMS¹⁴C 测年结果

Table 1 The AMS¹⁴C isotopic dating data,calendar years and sedimentation rate

层位/cm	AMS ¹⁴ C 测年/aBP	日历年/aBP	沉积速率/(mm/a)
5	430±30	65	0.769
15	540±30	175	0.909
30	730±30	360	0.811
40	800±30	435	1.333
50	1030±30	595	0.625
65	1200±30	725	1.154
85	1450±30	985	0.769
111	1930±30	1460	0.547

3.2 地球化学特征

3.2.1 常量元素特征

YLD01 柱状沉积物中主元素含量最多的是 CaO(45.26%~52.07%,平均值为 50.63%),其次是 MgO(1.26%~8.44%,平均值为 2.46%),随后是 Na₂O(0.67%~1.01%,平均值为 0.73%)、SiO₂(0.27%~1.01%,平均值为 0.51%)、Fe₂O₃(0.01%~4.35%,平均值为 0.13%)、P₂O₅(0.04%~0.11%,平均值为 0.06%)、Al₂O₃(0.01%~0.03%,平均值为 0.02%)、K₂O(平均值为 0.02%)、MnO(0~0.03%,平均值为 0.01%)、TiO₂(0.001%~0.007%,平均值为 0.002%)(表 2)。

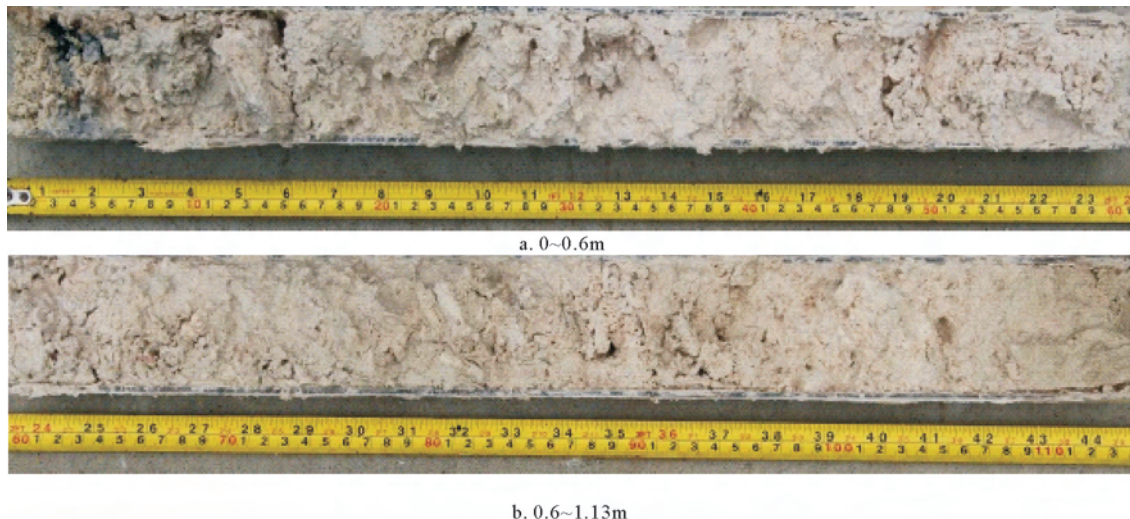


图 3 西沙群岛永乐环礁 YLD01 柱状沉积物样品
Fig.3 The gravity core for sample

表2 YLD01与其他海区柱状沉积物常量元素含量分析结果

		Table 2 Chemical analysis results of major elements									%
海区		Al ₂ O ₃	CaO	TFe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	SiO ₂	Na ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅
YLD01	平均值	0.018	50.634	0.129	2.460	0.020	0.506	0.733	0.002	0.006	0.06
	最大值	0.027	52.070	4.350	8.440	0.024	1.010	1.010	0.007	0.029	0.11
	最小值	0.012	45.260	0.008	1.260	0.017	0.270	0.670	0.001	0.003	0.04
南海南部 ^[19]	平均值	20.13	1.14	7.10	2.28	2.78	48.66	2.57	0.43	0.24	0.11
	最大值	21.38	7.80	7.80	2.60	2.93	51.17	3.38	0.54	0.50	0.40
	最小值	18.66	0.20	5.90	1.90	2.42	45.77	2.16	0.34	0.14	0.06
南海北部 ^[20]	平均值	12.22	15.62	5.27	2.16	2.49	40.36	2.20	\	\	\
	最大值	13.92	18.87	5.84	2.43	2.87	44.65	2.80	\	\	\
	最小值	10.50	11.79	4.87	1.99	2.28	37.32	1.50	\	\	\
地壳平均值		15.10	5.50	6.28	3.70	2.40	61.50	3.20	0.68	0.10	0.18

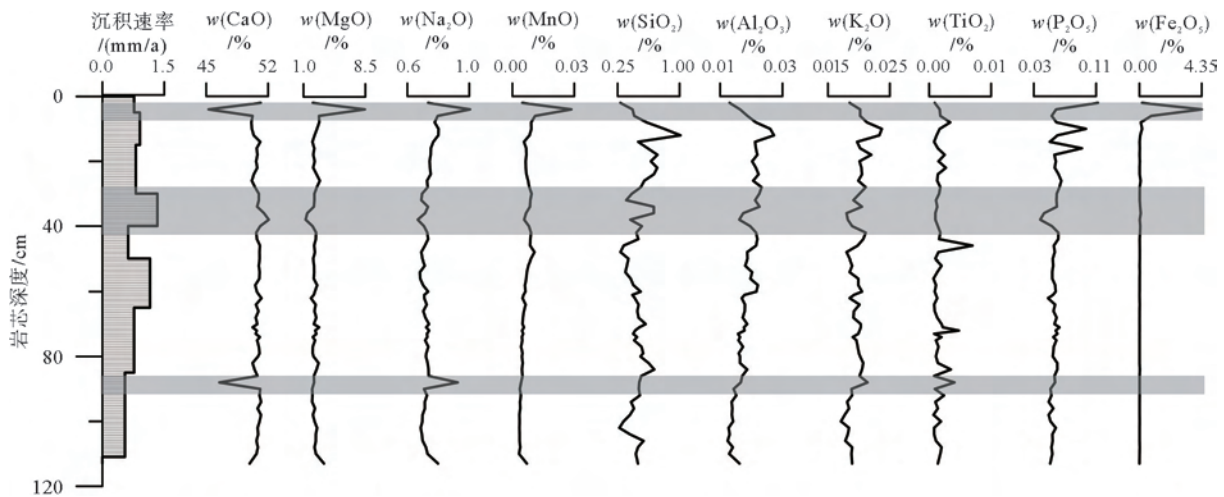


图4 YLD01柱状沉积物常量元素垂直分布图

Fig.4 Vertical distribution of major elements

除了CaO和MgO含量外,其他主元素平均含量均小于1%(图4),与测试样品的CaCO₃平均含量为92%相比,YLD01柱状沉积物基本是由碳酸盐矿物组成。

西沙永乐环礁YLD01柱状沉积物与南海南部97-37^[20]和南海北部191柱状沉积物^[21]的常量元素含量相比(表2),YLD01柱状沉积物CaO平均含量最高,远高于其他海域及地壳平均含量;MgO平均含量略高于其他海区,低于地壳平均值;YLD01柱状沉积物其他常量元素均很低,与其他海区可比性较差。

3.2.2 聚类分析

聚类分析是地质成果推断解释的重要多元统计手段之一^[22],为了研究西沙群岛永乐环礁地球化学指标随深度的变化特征及影响因素,计算常量元素

之间相关系数见表3、图5,用R型聚类分析方法对YLD01柱状沉积物常量元素进行分析。图4和表3显示,CaO和MgO呈显著的负相关,相关系数高达-0.80,在岩芯顶部0~6cm层段MgO的高含量可能反映了高镁方解石的存在,而非白云石化作用的结果。

由于西沙生物礁碳酸盐生物礁台地为大陆坡型碳酸盐台地,并且中间有西沙海槽与陆架相隔,陆源碎屑物质难以达到,但可能也有少量火山灰、风尘物质混入。因此,除CaO和MgO外,其他氧化物的含量很低,总体相关性一般。分析各常量元素之间的相关性(表3、图5),若选择相关系数绝对值>0.6,可以将常量元素组分分为5类:

(1) 以CaO为主,辅以Na₂O的原生碳酸盐组分,该组分对应的主要造岩矿物是方解石,代表了未

表 3 西沙群岛永乐环礁 YLD01 柱状沉积物常量元素之间相关性分析

Table 3 Correlation analysis among major elements

	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	SiO ₂	Na ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅
Al ₂ O ₃	1									
CaO	-0.03	1								
Fe ₂ O ₃	-0.08	-0.74	1							
MgO	-0.02	-0.80	0.94	1						
K ₂ O	0.74	-0.31	0.04	0.14	1					
SiO ₂	0.49	-0.10	-0.07	-0.04	0.68	1				
Na ₂ O	0.13	-0.91	0.73	0.71	0.44	0.30	1			
TiO ₂	0.19	-0.23	0.00	0.05	0.24	0.04	0.26	1		
MnO	0.36	-0.62	0.84	0.81	0.26	0.01	0.61	0.08	1	
P ₂ O ₅	0.24	-0.13	0.02	0.11	0.42	0.14	0.18	0.01	0.11	1

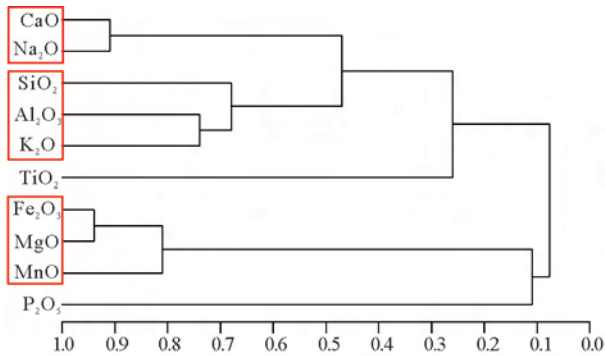


图 5 西沙群岛永乐环礁 YLD01 柱状沉积物常量元素 R 型聚类分析

Fig.5 R-type cluster analysis for major element

经白云岩化的生物礁原生碳酸盐沉积^[21]。图 4 和表 3 显示 CaO 和 Na₂O 呈显著的负相关,相关系数高达 -0.91,在岩芯顶部 0~6cm 段含量变化较大,CaO 含量从 51.16% 突降到 45.26%,再突增到 50.24%,而 Na₂O 含量变化与 CaO 含量变化趋势相反,从 0.73% 突增至 1.01%,再突降到 0.78%;24~42cm 段,CaO 含量呈增高趋势,而 Na₂O 含量为降低趋势,也是在该柱状样中的最高值和最低值处,变化幅度较大,变化频率一般;84~90cm 段,CaO 和 Na₂O 含量变化幅度较大,变化幅度、趋势与 0~6cm 段相似。总体上来看,Na₂O 含量变化频率要大于 CaO 含量变化频率。

(2) 以 MgO 为主,辅以 Fe₂O₃ 和 MnO 自生铁锰类矿物,珊瑚死亡后的外面黑色膜,代表了白云岩化作用中的富集作用,反映了相对封闭的瀉湖环境。图 4 和表 3 显示 MgO 分别与 Fe₂O₃ 和 MnO 呈显著的正相关,相关系数分别为 0.84 和 0.81,在岩芯顶部 0~6cm 段含量变化较大,MgO 含量从 2.12%

突增到 8.44%,再突降到 2.88%,Fe₂O₃ 和 MnO 含量变化与 MgO 含量变化趋势相同,其中 Fe₂O₃ 含量变化振幅最大;20~42cm 段 3 个元素的变化振幅较大,频率较高,变化趋势基本相同;其余段处相对变化振幅较小,总体来说 3 个元素含量变化频率相对比较平稳,MnO 含量有逐渐减小的趋势,MgO 含量变化振幅较其余两元素较强。

(3) 以 SiO₂ 为主,辅以 Al₂O₃ 和 K₂O,由于西沙群岛永乐环礁远离大陆,基本未受陆源物质的混杂,因此反映的应该是造礁生物对这些组分的富集作用。图 4 和表 3 显示 SiO₂ 分别与 Al₂O₃ 和 K₂O 呈显著的正相关,相关系数分别为 0.49 和 0.68,根据 3 个元素含量总体变化,变化趋势相似,划分为 2 个下降段和 3 个上升段,在 0~12cm、48~82cm 和 102cm 以下为上升段,其中 0~12cm 段变化振幅较大;在 12~48cm 和 82~102cm 段为下降段,其中 12~48cm 段变化频率及振幅变化较大。

(4) TiO₂,在南海通常以 Ti 作为陆源物质指标。TiO₂ 平均含量为 0.002%,在 0.001%~0.007% 之间变化,与其他常量元素相关性较差。

(5) P₂O₅,代表了生物自身沉积的作用,表现为含 P 高的生物碎屑沉积。含量在 0.04%~0.11% 之间变化,平均含量为 0.06%,与其他常量元素相关性较差。

4 讨论

4.1 沉积环境与物源

元素在地层中的分布与气候变化关系密切,蕴含重要的古海洋学意义^[5, 11, 20]。西沙群岛永乐环

礁瀉湖 YLD01 柱状沉积物中主元素含量的垂直变化看, CaCO_3 和 CaO 含量变化趋势基本相同(图 6), 相关系数为 0.60, 钙为亲生物元素, 来源于生物作用和生物化学作用, 反映了该海区海平面和生物生产力的变化。海底沉积物中 CaCO_3 含量的变化是一项对气候环境敏感的地球化学指标。图 6 显示 YLD01 柱状沉积物的沉积速率与 CaO 、 CaCO_3 含量之间关系, 1460aBP 以来 CaO 、 CaCO_3 含量非常高, CaCO_3 含量变化范围为 86.82%~94.29%, 平均值为 91.99%。在此阶段 CaCO_3 含量变化有 3 次是升高过程: (1) 86~62cm 沉积速率为升高过程, 从 0.547mm/a 升高到 1.154mm/a, 该段大部分沉积速率为 0.769mm/a, 相对应 CaCO_3 含量在 90.65%~93.03% 之间变化; (2) 38~24cm 沉积速率降低过程, 从 1.333mm/a 降低到 0.811mm/a, 相对应 CaCO_3 含量在 91.26%~94.29% 之间变化; (3) 14~4cm 沉积速率平稳过程, 该段沉积速率为 0.769mm/a, 相对应 CaCO_3 含量在 86.82%~92.87% 之间变化, 总体来说, CaCO_3 含量升高过程为沉积速率较高阶段。西沙群岛永乐环礁在远离大陆的开阔海区, 海底沉积物中 CaCO_3 的主要来源为珊瑚碎屑, 其次为少量的钙质生物壳体, 如有孔虫等。

SiO_2 、 Al_2O_3 、 K_2O 和 MgO 、 Fe_2O_3 两组含量变化相似(图 4), SiO_2 、 Al_2O_3 、 K_2O 组变化振幅较大, 两组组分主要来自陆源的砂质碎屑和黏土矿物, 其变化反映了陆源物输入/输出量的变化。图 4 显示, 自 1460aBP 以来, 随着沉积速率的增加, SiO_2 、 Al_2O_3 、 K_2O 和 MgO 、 Fe_2O_3 两组含量有递增的趋势, 但两组含量均较小, 除 MgO 含量超过 1% 以外, 其他元素含量均小于 1%, 说明西沙永乐环礁瀉湖的陆源物质较少。

海洋沉积物中 MgO 与 Al_2O_3 含量比值大小主要反映陆源物质的输入量大小, 比值越小, 陆源物质输入量越多, 反之则越少^[20]。 MgO 与 Al_2O_3 含量比值变化可以较好地指示源区的气候环境因子变化的特征。YLD01 柱状沉积物中, 底部年代为 1460aBP, 即晚全新世, 指示了冰后期较温暖的气候特征, $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量比值平均值为 133, 在 78~214 之间变化(图 7)。 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量比值与沉积速率对比, 随着沉积速率的增加, $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量比值逐渐降低。但总体上 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量比值较大, 反映冰后期陆源物质的输入量相对来说极少, 该柱状样极高的钙含量也说明研究区沉积物来源主要为钙质生物。

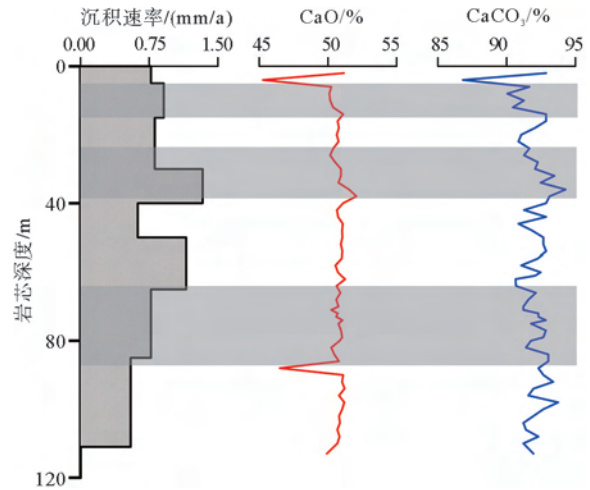


图 6 YLD01 柱状沉积物 CaO 和 CaCO_3 含量的纵向耦合关系

Fig.6 The vertical coupling relationship of CaO and CaCO_3

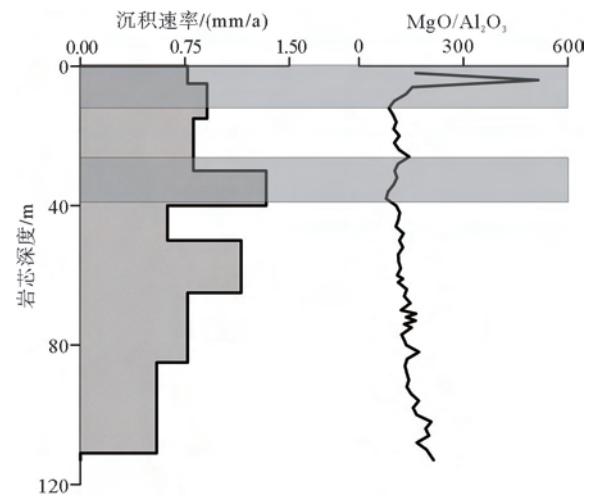


图 7 YLD01 柱状沉积物 MgO 和 Al_2O_3 含量比值曲线图

Fig.7 MgO and Al_2O_3 ratio curve

4.2 沉积速率与气候变化关系

根据 YLD01 柱状沉积物的 AMS¹⁴C 测年, 该柱状样晚全新世时期 1460aBP 以来的平均沉积速率为 0.778mm/a(表 1)。各层段的沉积速率略有不同, 以该柱状样平均沉积速率为准, 将全柱自上而下划分出 6 个沉积速率高低交替阶段: (1) 上部 0~30cm 层段(现今至 360aBP)沉积速率较高阶段; (2) 30~40cm 层段(360~435aBP)为沉积速率高阶段; (3) 40~50cm 层段(435~595aBP)沉积速率较低阶段; (4) 50~65cm 层段(595~725aBP)为沉积速率高阶段; (5) 65~85cm 层段(725~985aBP)为沉积速率略低阶段, 沉积速率接近平均沉积速率; (6) 85~

113cm 层段(985~1460aBP)为沉积速率最低阶段。根据章伟艳等研究的南海深水区晚更新世以来的沉积速率^[23],南海柱状样分布极不均匀,西北陆坡—深海盆区柱状样分布密集,东南陆坡—深海盆其次,东北陆坡柱状样较少,西南陆坡及中央深海盆几乎没有柱状样,南海氧同位素 1 期沉积速率为 1.67~26.67cm/ka,平均 8.13cm/ka。与永乐环礁瀉湖内 YLD01 柱状样对比,平均速率远高于南海的平均沉积速率,可能由于瀉湖是礁顶珊瑚的生长和堆积作用较强所致。

竺可桢划分了中国大陆近 5000 年来气候冷暖变化的几个阶段^[24],他展示了近 1700 年来中国的气温波动同格陵兰岛冰川剖面 $\delta^{18}\text{O}$ 含量曲线所表征的世界冷暖变化如出一辙;他指出中国大陆 23—600AD 为冷期,600—1100AD 为暖期,1100—1894AD 为冷期,1894AD 以来为暖期,这与晏宏、孙立广等人^[25]研究的西沙晚全新世温暖期(990AD 左右)的高海温特性相符。西沙永乐环礁瀉湖内

YLD01 柱状样近 1700 年来沉积速率与历史温度波动曲线的趋势相似(图 8),永乐环礁地区历史气候的冷热分期与我国大陆大体上一致。西沙群岛区域自新生代以来属热带,冰后期冷热变化是相对性的,其年际气温波动幅度虽不超过 4℃,但对海水表面温度敏感的珊瑚生物仍会产生一定的影响^[18],具有相当明显的相关关系,存在“寒处较短,暖处较长”的规律^[26],也就是说一般气候温暖时生物繁盛,沉积物多,沉积速率高。珊瑚生长速率对现代瀉湖的沉积速率有较大影响,珊瑚生长较快,提供的物源多,加快沉积,从而沉积速率较大。张会领、余克服等利用珊瑚生长率重建了西沙海域中晚全新世海温变化^[27],得出在中晚全新世以来,西沙海域 SST 总体上先降后升的趋势,并在 2985~2904aBP 期间平均 SST 为 26.5℃,为晚全新世以来的 SST 最低值,在此阶段至现今为升高阶段,这与 YLD01 柱状沉积物总体上沉积速率升高相符。

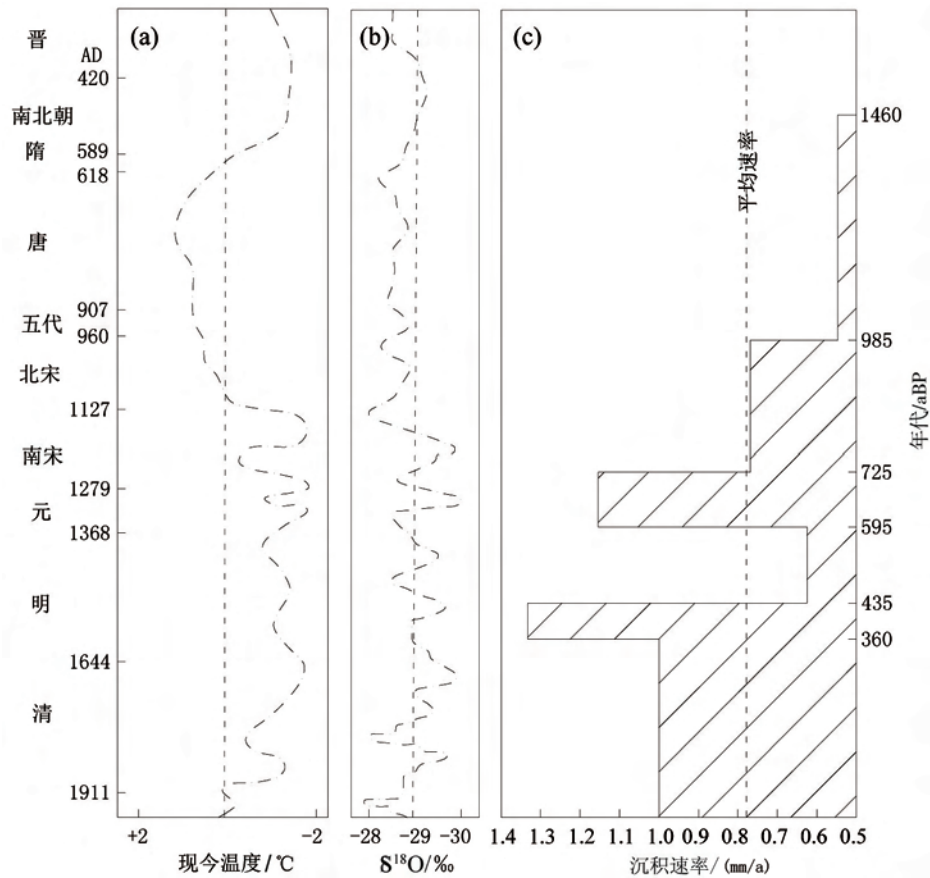


图 8 1700 年来世界气温波动与永乐环礁瀉湖沉积速率变化
 (a) 中国近 1700 年来温度波动趋势图;(b) 格陵兰冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 测试结果图(每增加 0.69‰, 则气温增加 1℃);(c) 永乐环礁瀉湖 YLD01 柱状沉积物沉积速率变化图

Fig.8 World temperature fluctuation and relation with the sedimentation of lagoon in Yongle Atoll since 1700

5 结论

(1) AMS¹⁴C 测年结果表明, YLD01 柱状沉积物在晚全新世以来(1460aBP 以来)的平均沉积速率为 0.778mm/a。将全柱自上而下划分出 6 个沉积速率高低交替阶段, 测年结果无反转情况发生, 表明晚全新世以来永乐环礁沉积环境比较稳定, 沉积速率总体为升高趋势。

(2) YLD01 柱状沉积物中主元素含量最多的是 CaO, 其次是 MgO, 其他主元素平均含量均小于 1%。根据主元素之间的相关性, 大致可以分为 5 类: ①以 CaO 为主, 辅以 Na₂O 的原生碳酸盐组分, 该组分对应的主要造岩矿物是方解石, 代表了未经白云岩化的生物礁原生碳酸盐沉积; ②以 MgO 为主, 辅以 Fe₂O₃ 和 MnO, 代表了白云岩化作用中的富集作用, 反映了相对封闭的瀉湖环境; ③以 SiO₂ 为主, 辅以 Al₂O₃ 和 K₂O, 由于西沙群岛永乐环礁远离大陆, 基本未受陆源物质的混杂, 因此反映的应该是造礁生物对这些组分的富集作用; ④TiO₂ 在南海通常以 Ti 作为陆源物质指标, 但其含量非常低, 说明该海域陆源物质较少; ⑤P₂O₅ 表现为含磷高的生物碎屑沉积, 在该海域主要为生物粪便沉积, 其含量较低。

(3) 与沉积速率对比, 随着沉积速率的增加, MgO/Al₂O₃ 含量比值逐渐变小, 但总体上 MgO/Al₂O₃ 含量比值较大, 反映冰后期陆源物质的输入量相对极少, 说明研究区沉积物来源主要为钙质生物。这与 CaCO₃ 和 CaO 含量垂直变化趋势基本相同, 钙为亲生物元素, 并且 CaCO₃ 含量非常高, 说明本区沉积物的来源主要为生物成因, 极少量来自其他物质输入。

(4) YLD01 柱状沉积物沉积速率远高于南海西北陆坡-盆地沉积速率, 可能由于瀉湖是礁顶珊瑚的生长和堆积作用。与晚全新世气候相比, 总体上永乐环礁瀉湖随 SST 升高沉积速率呈升高的趋势。

参考文献 (References)

- [1] Levitan M A, Stein R. History of sedimentation rates in the sea-ice sedimentation zone during the last 130ka[J]. *Lithology and Mineral Resources*, 2008, 43(1): 65-75.
- [2] Baiyegunhi Christopher, Liu Kuiwu, Gwavava Oswald. Sedimentation rate and subsidence history of the southeastern Karoo Basin, South Africa, using 1D backstripping method[J]. *Arab J. Geosci.*, 2017, 10: 225.
- [3] 许冬, 龙江平, 等. 海南岛近海海域 7 个沉积岩芯的现代沉积速率及其分布特征[J]. *海洋学研究*, 2008, 26(3): 9-17. [XU Dong, LONG Jiangping, et al. The modern sedimentation rate and the distribution character of 7 cores in Hainan Island offshore[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2008, 26(3): 9-17.]
- [4] 黄维, 汪品先. 末次冰期以来南海深水区的沉积速率[J]. *中国科学 D 辑*, 1998(28): 13-17. [HUANG Wei, WANG Pinxian. Sedimentary Rates in the Deep Waters of the South China Sea Since the Last Ice Age[J]. *Science in China (Series D)*, 1998(28): 13-17.]
- [5] 张志忠, 李双林, 董岩翔, 等. 浙江近岸海域沉积物沉积速率及地球化学[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2005, 25(3): 15-24. [ZHANG Zhizhong, LI Shuanglin, DONG Yanxiang, et al. Deposition rate and geochemical characters of sediments in Zhejiang offshore[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2005, 25(3): 15-24.]
- [6] 李传顺, 江波, 李安春, 等. 冲绳海槽西南端中全新世以来的沉积速率与物源分析[J]. *科学通报*, 2009, 54(9): 1303-1310. [LI Chuanshun, JIANG Bo, LI Ancun, et al. Sedimentation rates and provenance analysis in the Southwestern Okinawa Trough since the mid-Holocene[J]. *Chinese Sci. Bull.*, 2009, 54(9): 1303-1310.]
- [7] 陈芳, 苏新, Nurnberg D, 等. 南海东沙海域末次冰期最盛期以来的沉积特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(6): 9-17. [CHEN Fang, SU Xin, Nurnberg D, et al. Lithologic features of sediments characterized by high sedimentation rates since the last glacial maximum from Dongsha area of the South China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2006, 26(6): 9-17.]
- [8] 李粹中. 南海深海沉积物¹⁴C 测年和近代沉积速率的研究[J]. *海洋学报*, 1990, 12(3): 340-346. [LI Cuizhong. A study on the ¹⁴C dating and modern sedimentary rates of deep-sea sediments in the South China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1990, 12(3): 340-346.]
- [9] 王律江, Sarnthein M. 南海北部陆坡近四万年的高分辨率古海洋学记录[J]. *第四纪研究*, 1999, 29(1): 27-31. [WANG Lvjiang, Sarnthein M. High-resolution paleoceanographic records during the last 40 000 years from the northern slope of the South China Sea[J]. *Quaternary Sciences*, 1999, 29(1): 27-31.]
- [10] 徐尚, 王英民, 彭学超, 等. 台湾峡谷 HD133 和 HD77 柱状样的沉积构成和发育背景[J]. *沉积学报*, 2013, 31(2): 325-330. [XU Shang, WANG Yingmin, PENG Xuechao, et al. Depositional Elements and Settings of HD133 and HD77 cores in the Taiwan Canyon[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(2): 325-330.]
- [11] 徐兆凯, 崔镇勇, 等. 日本海西南陆坡全新世对马暖流演化的沉积学和地球化学记录[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30(1): 55-64. [XU Zhaokai, CHUI Jinyong, et al. Evolution of the tsushima warm current during the Holocene: sedimentological and geochemical recordson the southwestern slope of East/Japan Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2010, 30(1): 55-64.]

- [12] Taylor B, Hayes D E. Origin and History of the South China Sea[C]//The tectonics and geological evolution of Southeast Asia Seas and islands. American Geophysical Union Monography, 1983, 23: 89-104.
- [13] 朱伟林,王振峰,米立军,等. 南海西沙西科 1 井层序地层格架与礁生长单元特征[J]. 地球科学, 2015, 40(4): 677-687. [ZHU Weilin, WANG Zhenfeng, Mi Lijun, et al. Sequence Stratigraphic framework and reef growth unit of well Xike-1 from Xisha Islands, South China Sea[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2015, 40(4): 677-687.]
- [14] 吴时国,秦蕴珊. 南海北部陆坡深水沉积体系研究[J]. 沉积学报, 2009, 27(5): 922-930. [WU Shiguo, QIN Yunshan. The research of deepwater depositional system in the northern South China Sea[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(5): 922-930.]
- [15] Southon J, Kashgarian M, Fontugne M, et al. Marine reservoir corrections for the Indian Ocean and Southeast Asia [J]. Radiocarbon, 2002, 44:167-180.
- [16] Stuiver M, Reimer P J. Extended ^{14}C data base and revised CALIB 3.0 ^{14}C age calibration program [J]. Radiocarbon, 1993, 35:215-230.
- [17] Stuiver M, Reimer P J, Reimer R W. 2018, CALIB 7.1 [WWW program] at <http://calib.org>, accessed 2018-2-9.
- [18] 赵焕庭,温孝胜,王丽荣. 南沙群岛永暑礁环礁湖的沉积速率与气候变化[J]. 热带地理, 2000, 20(4): 247-249. [ZHAO Huanting, WEN Xiaosheng, WANG Lirong. Climate change and the depositional velocity in the lagoon of Yongshu atoll, Nansha Islands [J]. Tropical Geography, 2000, 20(4): 247-249.]
- [19] 乔培军,邵磊. 南海南部末次冰期以来的沉积物特点及其古环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(2): 73-78. [QIAO PeiJun, SHAO Lei. Characteristics of sediments in the southern South China Sea since the last glaciation and their paleoenvironmental significance[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2003, 23(2): 73-78.]
- [20] 颜文,古森昌,等. 南海 97-37 柱样的主元素特征及其潜在的古环境指示作用[J]. 热带海洋学报, 2002, 21(2): 75-83. [YAN Wen, GU Senchang, et al. Characteristics of major elements of sediments in core 97-37 from southern South China Sea and its potential implications to paleoenvironment [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2002, 21(2): 75-83.]
- [21] 赵宏樵,韩喜彬,等. 南海北部 191 柱状沉积物主元素特征及其古环境意义[J]. 海洋学报, 2008, 30(6): 85-93. [ZHAO Hongqiao, HAN Xibin, et al. Characteristics of main elements and their palaeoenvironment significance of Core 191 in the northern South China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2008, 30(6): 85-93.]
- [22] 何建林. R 型聚类分析的简便计算算法[J]. 物化探计算技术, 1985, 7(3): 259-263. [HE Jianlin. A simple and convenient computing method of the r-model cluster analysis[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 1985, 7(3): 259-263.]
- [23] 章伟艳,张富元,等. 南海深水区晚更新世以来沉积速率_沉积通量与物质组成[J]. 沉积学报, 2002, 20(4): 668-674. [ZHANG Weiyan, ZHANG Fuyuan, et al. Constituents of Matter and Sedimentation Fluxes and Sedimentation Rates of Deep-water Sedimentation during the Late Pleistocene in the South China Sea[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(4): 668-674.]
- [24] 竺可桢. 中国近五千年来气候变迁的初步研究[J]. 中国科学, 1973(2): 168-189. [ZHU Kezhen. A preliminary study on climate change in China in the last 5000 years[J]. Science in China, 1973(2): 168-189.]
- [25] 晏宏,孙立广,邵达,等. 砗磲记录的南海西沙晚全新世温暖期的高海温特征[J]. 科学通报, 2014, 59: 1761-1768. [YAN Hong, SUN Liguang, SHAO Da, et al. Higher sea surface temperature [J]. in the northern South China Sea during the natural warm periods of late Holocene than recent decades [J]. Chin Sci Bull, 2014, 59, doi: 10.1007/s11434-014-0317-3.]
- [26] Ma T Y. On the growth rate of reef corals and its relation to sea water temperature[J]. Palaeontologia Sinica (Series B), 1937, 6: 21-22.
- [27] 张会领,余克服,施祺,等. 珊瑚生长率重建西沙海家中晚全新世海温变化[J]. 第四纪研究, 2014, 34(6): 1296-1305. [ZHANG HuiLing, YU Kefu, SHI Qi, et al. Sea surface temperature variations during the mid-late Holocene reconstructed by porites coral growth rates in the Xisha Islands[J]. Quaternary Sciences, 2014, 34(6): 1296-1305.]