南海西沙永乐龙洞沉积物组成、来源及其沉积作用*

范德江¹ 田 元¹ 傅 亮² 罗 珂¹ 孙晓霞¹ 毕乃双¹ 姚 鹏³ 刘光兴⁴ 陈洪举⁴ 杨作升¹

 (1. 中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室 青岛 266100; 2. 三沙航迹珊瑚礁保护研究所 三沙 573199;
3. 中国海洋大学海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室 青岛 266100; 4. 中国海洋大学海洋环境与生态教育部重点 实验室 青岛 266100)

摘要 南海永乐龙洞发育于永乐珊瑚礁台地,龙洞深度达 300m,为世界之最。沉积物堆积在龙洞 的洞壁斜坡、龙洞中部的转折平台以及洞底等部位。使用激光粒度仪、X 射线粉晶衍射仪、X 射线 荧光光谱仪等对采自不同深度的沉积物进行了粒级、矿物物相、元素含量的研究。研究结果表明:龙 洞沉积物绝大部分为钙质生物碎屑,以砂粒级碎屑为主,含砾石碎屑、粉砂碎屑,分选和磨圆差;沉 积物矿物组成以文石、高镁方解石为主,含少量低镁方解石,其平均含量分别为 69%、28%、3%;化 学组成以 Ca、Mg、Sr 为主,平均含量分别为 35.5%、0.9%、0.5%,含少量 Si、Al、Ti、P、S 等元 素。该区沉积物来源包括礁坪生物碎屑和东亚季风风尘陆源物质两个方面,以礁坪来源的生物碎屑 为主;龙洞沉积作用包括机械捕获作用和垂直沉降作用两种方式,而以机械捕获作用为主。 关键词 永乐龙洞;沉积物;矿物和元素组成;来源;沉积作用 中图分类号 P76 doi: 10.11693/hyhz20180200027

海洋蓝洞指发育于碳酸盐海岸及岛礁上的水下 洞穴,因为深度大使得水体颜色明显区别于周围水 体,最早发现于巴哈马群岛(Mylroie *et al*, 1995),如 巴哈马群岛长岛上的迪恩斯蓝洞、红海北部的达哈布 蓝洞、中美洲洪都拉斯伯利兹的灯塔蓝洞、马耳他戈 佐蓝洞等。海洋蓝洞具有特殊的物理化学条件和生态 环境,孕育极端生物群落,含有重要科学研究价值 (lliffe *et al*, 2007; Pohlman, 2011; Rastorgueff *et al*, 2015)。蓝洞沉积物是沉积记录的潜在载体,可以用于 重建历史时期地震、风暴等事件过程(Gischler *et al*, 2013)。

前人对世界上海洋蓝洞沉积物的报道不多。 Shinn 等(1996)报道了佛罗里达 Keys 洞底质沉积物组 分,发现有气溶胶、花粉孢子、生物骨屑等; Gischler 等(2008, 2013)和 van Hengstum 等(2014)对巴哈马的 近海洞穴的洞底沉积物进行了研究,揭示了夏季热 带风暴海况和冬季平静海况下进入洞口水体的颗粒 沉积物粒度和成分的明显差异,发现了正常海况下 形成的由细颗粒碳酸盐沉积物构成的纹层以及风暴 海况下形成的粗颗粒碳酸盐夹层,并与该区的风暴 事件建立联系; Surić 等(2010)研究了克罗地亚的近海 洞穴认为其中的陆源悬浮体主要来自波河和亚平宁 半岛的河流入海沉积物等。这些研究,着重于沉积物 组成和来源,探讨蓝洞沉积作用并尝试利用蓝洞中 的沉积物进行沉积环境重建。

永乐龙洞位于我国南海西沙群岛永乐环礁中的 晋卿岛与石屿之间的礁盘上,地理坐标为 16°31.5′N, 111°46′E,距离三沙市首府永兴岛约 70km(图 1)。永 乐龙洞内部形态不规则,侧壁起伏不平,侧洞发育, 且在 160m 处发生转折,形成中部的转折平台。与世 界上其他海洋蓝洞相比,南海永乐龙洞水深超过 300m,是迄今发现的最深的海洋蓝洞,属于尚未被 勘查的处女地。2016年 10 月和 2017年 6月,三沙航 迹珊瑚礁保护研究所和中国海洋大学共同对三沙永

^{*}三沙航迹珊瑚礁保护研究所航迹南海海洋科研发展项目, HJLD17-01 号; 中央高校基本科研业务费项目, 201762038 号。范德江, 教授, E-mail: djfan@ouc.edu.cn

收稿日期: 2018-02-02,收修改稿日期: 2018-03-13

1204

乐龙洞进行了较为系统的调查,采集了龙洞不同深 度和位置的多个沉积物样品,为了解龙洞沉积物组 成和对环境响应提供了可能。本文对上述调查取得的 样品开展研究,以阐明永乐龙洞沉积物特征,并探讨 其沉积作用,为深入了解蓝洞成因和更好地保护龙 洞生态环境提供科学参考。



图 1 西沙永乐龙洞位置图 Fig.1 The location of Yongle Blue Hole in the Xisha Islands

1 材料和方法

1.1 样品采集

2016年10月、2017年6月两次对三沙永乐龙洞 进行综合调查和采样,沉积物样品由潜水员和水下 机器人(美国 VideoRay LLC 公司生产的 Video Ray Pro4型遥控水下机器人)在龙洞侧壁、转折平台处及 龙洞底部分别采集(表1)。沉积物样品装入样品袋,常 温保存。

1.2 分析方法

 1.2.1 粒度分析 根据沉积物粒级特点采用筛分 法或激光粒度分析法分析,得到各粒级沉积物的百 分含量。

筛分法:砂粒级为主的沉积物使用该方法。取沉 积物样品 10—20g,烘干称重后,置于孔径间隔为 0.5 Φ 的一套标准筛中,进行机械振动筛分,分别获取各 个粒级沉积物,称重并经重量校正后得到各个粒级 沉积物的重量百分含量。

激光粒度分析方法:粉砂粒级为主的沉积物使

用该方法。取 0.5—1g 左右的样品放入 100mL 的干净 烧杯中,加入 3mL 分散剂(0.5mol/L 六偏磷酸钠)超声 30 分钟确保充分分散,供上机测试。测试仪器为英国 Malvern 公司的 Mastersizer 2000 型激光粒度分析仪, 该仪器测量范围为 0.02—2000μm,粒级分辨率为

表1 永乐龙洞沉积物采样信息表

Tab.1 Information of sediments sampling in the Yongle Blue Hole

Hole								
序号	样品号	采样位置	采样时间 (月-日-年)	备注				
1	LD16-01-2M	2m	10/27/2016	龙洞侧壁				
2	LD16-01-4M	4m	10/27/2016	龙洞侧壁				
3	LD16-01-8M	8m	10/27/2016	龙洞侧壁				
4	LD16-01-13M	13m	10/27/2016	龙洞侧壁				
5	LD17-02-15M	15m	06/14/2017	龙洞侧壁				
6	LD17-02-25M	25m	06/14/2017	龙洞侧壁				
7	LD17-02-35M	35m	06/14/2017	龙洞侧壁				
8	LD17-02-50M	50m	06/14/2017	龙洞侧壁				
9	LD16-01-165M	165m	10/27/2016龙	;洞中部转折平台				
10	LD16-01-D-S	300m	10/27/2016	龙洞底部				

0.01Φ, 重复测量的相对误差<3%。

粒度分级采用伍登-温德华方案, 粒径使用 Φ 值 标准, 粒度参数采用矩法公式(McManus,1988)进行 计算。

1.2.2 元素含量分析 采用 X 射线荧光光谱法 (XRF)进行沉积物元素含量, 仪器为德国斯派克分析 仪器公司 SPECTRO XEPOS 台式偏振 X 射线荧光光 谱仪。分析方法如下: 将样品在 106°C 下烘干 24 小 时, 取 4—5 克研磨至 300 目以细粉末, 装入直径为 32mm 的聚乙烯样品杯内, 压实后上机测试。通过碳 酸盐岩国家标准(GBW07120)和平行样进行质量控制, 所测元素的相对标准偏差都小于 5%。分析后的样品 回收供 X 射线衍射分析。

1.2.3 矿物物相分析 使用 XRF 分析后回收样品 进行矿物物相分析。所用 X 射线衍射仪为德国布鲁 克公司生产的 Bruker D8 ADVANCE 型衍射仪,铜靶, 管电压 40kV,管电流 100mA。衍射条件设置:步进 长度 0.02°(20),扫描速度 4°/min,扫描范围 3°—65°。 得到的测试结果运用 Jade5 软件进行物相分析。采用 自清洗方法计算矿物相对含量(Milliman *et al*, 1974), 其中文石、方解石(含高镁方解石)的 K 值取自国际衍 射数据中心(ICDD)的 PDF-4 矿物数据库,分别为 0.55(d=1.99)、2.65(d=3.02);方解石中 MgCO₃含量依 据 Goldsmith 等(1955)方解石(104)面网间距方法计算 得到。

2 研究结果

2.1 沉积物粒度特征

龙洞侧壁沉积物、中部转折平台和洞底沉积物粒 度构成存在明显差异。

侧壁沉积物呈灰白色,颗粒粗,几乎都由砾石 级、砂粒级的白色生物碎片构成,其中可见大量的珊 瑚碎片。砾石级的生物碎屑含量 1%—15%,砂级生物 碎屑含量为 84%—98%,粉砂粒级生物碎屑不足 10%。侧壁沉积物平均粒径为 0.72—2.64Ф,分选差、 负偏态、峰态较陡(表 2);沉积物的频率分布曲线呈 现多峰特点,主众数位于 2.25Ф,次级众数分别位于 -1.75Ф,-0.5Ф、0.75Ф、1.25Ф等,总体上显示分选差、 图形不对称、重心偏向细粒部分(图 2)。

龙洞中部转折平台、洞底沉积物仍然以生物碎屑 为主,但是颗粒明显变细,为粉砂质砂,未见砾石级 碎屑,其中砂级碎屑占 47%—86%,粉砂级碎屑占 11%—42%,黏土粒级碎屑不足 10%,分选差、正偏、 高峰态(表 2)。粒度频率分布图呈不对称单峰,众数 在 2Φ 左右,粒级明显向粗粒级方向集中,细粒级端 留下细长的拖尾(图 3)。

样品号	采样位置(m)	平均粒径 (Φ)	分选系数	偏态	峰态 -	粒级含量(%)			
						砾石	砂	粉砂	黏土
LD16-01-2M	2	0.72	1.52	-1.15	1.85	15.8	84.0	0.1	
LD16-01-4M	4	1.57	1.15	-1.17	1.65	3.	96.3	0.3	
LD16-01-8M	8	1.26	1.45	-1.37	1.92	9.6	90.1	0.3	
LD16-01-13M	13	1.48	1.58	-1.41	2.05	9.6	88.38	1.98	
LD17-02-15M	15	2.48	0.86	-0.88	1.39	1.1	98.2	0.7	
LD17-02-25M	25	1.80	1.31	-1.12	1.76	6.0	92.8	1.2	
LD17-02-35M	35	2.64	1.55	-1.64	2.18	6.7	82.9	10.4	
LD17-02-50M	50	1.62	1.47	-1.11	1.89	9.9	87.8	2.3	
LD16-01-165M*	165	4.47	2.41	2.05	3.12		47.8	42.8	9.5
LD16-01-D-S*	300	2.46	1.63	1.83	2.58		86.7	11.9	1.4

表 2 南海永乐龙洞沉积物粒度特征 Tab.2 Grain-size distribution statistics of the sediments in the Yongle Blue Hole

注:带*者为激光粒度分析结果







图 3 南海永乐龙洞中部转折平台和洞底沉积物粒度频率 分布图

Fig.3 Grain-size distribution patterns of the sediments on the middle platform and the bottom of the Yongle Blue Hole

2.2 永乐龙洞沉积物矿物组成

南海永乐龙洞沉积物矿物类型较单一, 主要由 文石、高镁方解石和低镁方解石 3 种矿物构成, 以文 石为主, 高镁方解石次之, 出现少量低镁方解石。3 者的平均含量分别为 69%、28%、3%(图 4, 表 3)。根据 晶体衍射参数估算高镁方解石的 MgCO₃ 含量约为 14%。 2.3 龙洞沉积物地球化学特征

龙洞沉积物中的元素相对简单,其含量见表 4。 Ca 元素含量最高,平均 35%左右,其他元素含量不 足 1%。元素组成中可以明显地分成两组:其一为钙 质组分元素,包括 Ca、Mg、Sr 等,平均含量分别为 35.5%、0.9%、0.5%。Ca 是文石、方解石的主要元素, 而 Mg、Sr 元素性质和离子半径接近于 Ca,以类质同 象替代 Ca 方式进入碳酸盐矿物晶格之中,它们含量 关系密切。另一组元素赋存于陆源碎屑之中,包括 Si、Al、K 等元素,它们含量很少,都小于 0.5%,但 是在各个沉积物中都存在。从陆源元素的组合分析, 该陆源碎屑物质应该以黏土矿物为主。除了以上元素 之外,其余的元素含量都很少,其值介于 n×10×10⁻⁶ —n×100×10⁻⁶, 它们属于碳酸盐或黏土矿物中的微量 元素。



图 4 永乐龙洞沉积物全样 X-ray 粉晶衍射图谱 Fig.4 X-ray diffraction curves of the sediments from the Yongle Blue Hole

表 3 永乐龙洞沉积物矿物物相组成(%)

Mineral composition based on XRD data of the

Tab.3

sediments from the Yongle Blue Hole								
样品号	文石	低镁方解石	高镁方解石	高镁方解石中 MgCO₃含量				
LD16-01-2M	68	1	31	14				
LD16-01-4M	72	1	27	15				
LD16-01-8M	70	1	29	14				
LD16-01-13M	71	1	28	14				
LD17-02-15M	75	2	23	14				
LD17-02-25M	72	2	26	14				
LD17-02-35M	72	2	26	15				
LD17-02-50M	72	2	27	14				
LD16-01-165M	51	14	36	15				
LD16-01-D-S	71	2	28	14				
平均	69	3	28	14				

从垂向分布上看, 龙洞中部转折平台处元素组 成与侧壁沉积存在明显差异, 该处钙质组分元素 Ca、 Sr 减少, 而陆源组分 Si、Al、Ti 增加; 同时 S、P 两 个元素也表现为增加的趋势(图 5)。龙洞底部沉积物 元素组成与侧壁较为一致。



图 5 龙洞不同深度沉积物元素组成 Fig.5 Elements content of the sediments sampled at difference depths in the Blue Hole

lab.4 Elements content of the sediments from the Blue Hole (Unit:

- +	LD16-01	LD16-01	LD16-01	LD16-01	LD17-02	LD17-02	LD17-02	LD17-02	LD16-01	LD16-01	
兀系	-2M	-4M	-8M	-13M	-15M	-25M	-35M	-50M	-165M	-D-S	平均
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.025	0.026	0.026	0.027	0.000	0.000	0.010
Mg	0.909	0.922	0.939	0.937	0.742	0.826	0.801	0.802	0.877	1.007	0.876
Al	0.149	0.146	0.134	0.137	0.093	0.088	0.090	0.087	0.429	0.138	0.149
Si	0.213	0.198	0.175	0.186	0.192	0.158	0.202	0.203	1.022	0.170	0.272
Р	0.038	0.038	0.037	0.037	0.007	0.009	0.011	0.007	0.113	0.045	0.034
S	0.043	0.043	0.043	0.043	0.040	0.038	0.040	0.039	0.123	0.046	0.050
Κ	0.280	0.278	0.279	0.283	0.089	0.087	0.087	0.087	0.302	0.277	0.205
Ca	35.295	35.035	35.131	35.015	37.479	36.661	36.924	37.015	31.819	34.745	35.512
Ti	0.002	0.003	0.003	0.003	0.002	0.001	0.002	0.002	0.016	0.002	0.004
Mn	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.002	0.002	0.004	0.002	0.002
Ni	0.00185	0.00218	0.00198	0.00206	0.00095	0.00089	0.00087	0.00091	0.00245	0.00229	0.0016
Zn	0.00000	0.00020	0.00028	0.00021	0.00042	0.00040	0.00040	0.00036	0.01363	0.00029	0.0016
Sr	0.45009	0.46586	0.45072	0.46156	0.59237	0.55728	0.56980	0.56519	0.40797	0.44695	0.4968
Pb	0.00065	0.00039	0.00057	0.00000	0.00115	0.00104	0.00112	0.00113	0.00115	0.00044	0.0008

3 讨论

3.1 南海永乐龙洞沉积物来源

依据永乐龙洞沉积物矿物、元素组成可以清晰地 分成两种类型:碳酸盐岩类沉积物和非碳酸盐岩类 沉积物。X 射线物相分析显示 3 种碳酸盐岩矿物相, 即文石、高镁方解石和低镁方解石,它们主要来自钙 质生物碎屑。前人研究表明西沙岛礁处生活着种类繁 多的珊瑚,在宣德环礁上西科 1 井中共鉴定出 16 个 属的六射珊瑚和 1 个属的 8 射珊瑚(刘新宇等, 2015); 在西琛 1 井也鉴定出了大量的珊瑚、钙藻、海绵等造 礁生物(许红等, 1989)。除了造礁珊瑚之外,礁体上还 生活着众多的附礁生物,有孔虫、腹足类、双壳类等 (许红等, 1989;魏喜等, 2008)。珊瑚礁体的矿物物相 以文石为主,少量的高镁方解石(Milliman *et al*, 1974; 朱而勤等, 1987),这与该区出现的沉积物矿物组成一 致。从附礁生物种类看, 壳体矿物也是以文石、高镁 方解石为主, 但是可以出现低镁方解石(范德江等, 2005)。这些生物碎屑亦可能加入礁坪沉积之中。

除了钙质生物碎屑外,该处沉积物还出现了少 量的陆源碎屑,其矿物组成中出现了石英、黏土矿物, 元素组成中出现了一定量的 Si、Al、Ti 等陆源组分。 由于西沙远离大陆,礁体又明显高出海底,河流输送 的陆源沉积物难以影响该海域。南海位于东亚季风影 响区,有证据表明亚洲大陆风尘可以向东南方向输 送至中国南海和台湾(Jiang *et al*, 2013),所以推断西 沙龙洞沉积物中出现的石英、黏土矿物等陆源物质是 通过亚洲大陆风尘搬运方式到达该处的。

3.2 永乐龙洞沉积物的沉积作用

永乐龙洞侧壁沉积物主要由砂级、砾石级的生物 碎屑构成,其粒度概率累积曲线表现为典型的两段 式,即滚动搬运次总体(-2—2Ф)和跳跃搬运次总体 (2—4Ф),缺失悬浮搬运(图 6)。由于龙洞内水体运动 受限,现场测得流速几乎为零,处于静止状态。由此 分析,龙洞内沉积物的搬运属性保留了礁坪沉积物 搬运和沉积特点。这些沉积物形成于礁坪环境,仅经 历较短距离的搬运作用,使得生物碎屑受搬运改造 弱,碎屑棱角明显。在潮汐和风暴作用之下,礁坪上 的沉积物经推移搬运经过龙洞时被龙洞捕获,降落 到龙洞之中,受龙洞形态的影响,这些沉积物率先滞 留在侧壁上,部分继续滑落至转折平台处、或者龙洞 底部。这部分成因的沉积物颗粒较粗,为砂以及砾石 级的颗粒,与在中美洲灯塔蓝洞中风暴事件层的颗 粒组成相似(Gischler *et al*, 2013)。



图 6 龙洞侧壁沉积物粒度概率累积曲线图

 Fig.6 The probability cumulative curves of the sediments from the wall of the Blue Hole
注:图中阴影线 A: 推移次总体; B: 跳跃次总体 龙洞转折平台处沉积物平均粒径较细,为4.47Φ; 洞底沉积物颗粒亦较细,平均粒径为2.46Φ。它们的 概率累积曲线明显区别于侧壁沉积物,出现了悬浮 搬运次总体(图7),而它们的频率分布则为平缓的形 态(图3)。联系到转折处沉积物出现了大量的有机质 残骸(图8),可以认为转折处沉积物以及洞底沉积物 除了来自礁坪沉积物的滚落之外,尚有来自水体中 悬浮搬运的沉积物,它们为相对细小的生物碎屑、有 机质团块以及黏土矿物等颗粒,这些沉积物颗粒细, 可以长期悬浮在水体之中被搬运,受颗粒沉降作用 最终沉积于龙洞转折处以及洞底等部位。







图 8 龙洞转折处沉积物中出现的有机团块 Fig.8 Photos of organic debris in the sediment on the platform in the middle of the Blue Hole

4 结论

南海永乐龙洞中沉积物以砂粒级碎屑为主,粒 度跨度大,包含了砾石级到粉砂粒级的颗粒,分选和 磨圆差;矿物组成以文石、高镁方解石为主,平均含 量分别 69.1%、28.1%, 出现少量的低镁方解石, 平均 含量为 2.8%; 元素组成主要是 Ca、Mg、Sr 等元素, 平 均含量分别为 35.5%、0.9%、0.5%, 出现了少量的 Si、 Al 等元素, 其平均含量分别是 0.27%、0.15%。洞壁 沉积物粒度较粗, 阶地平台及洞底沉积物较细。研究 表明该区沉积物主要来自礁坪上的钙质生物碎屑, 少量来自东亚季风风尘搬运的陆源物质; 龙洞沉积 作用包括机械捕获作用和垂直沉降作用两种方式, 而以捕获作用为主, 垂直沉降作用次之。

致谢 对在调查过程中三沙航迹珊瑚礁保护研究所 提供后勤支持和协助取样的全体成员、以及协助取样 的杨丽标、陈霖等表示衷心的感谢。

参考文献

- 朱而勤,李建华,1987. 东海钙质生物骨屑的矿物学特征.山 东海洋学院学报,17(4):68—78
- 刘新宇,祝幼华,廖卫华等,2015. 西沙群岛西科 1 井珊瑚组 合面貌及其生态环境. 地球科学——中国地质大学学报, 40(4):688—696
- 许 红,王玉净,蔡 峰等,1989.西沙中新世生物地层和藻 类的造礁作用与生物礁演变特征.北京:科学出版社, 1—134
- 范德江, 刘升发, 张爱滨等, 2005. 九种现代双壳类壳体物相 组成的对比研究. 沉积学报, 23(3): 475—482
- 魏 喜, 贾承造, 孟卫工等, 2008. 南海西沙海域西琛 1 井生 物礁的性质及岩石学特征. 地质通报, 27(11): 1933—1938
- Gischler E, Anselmetti F S, Shinn E A, 2013. Seismic stratigraphy of the Blue Hole (Lighthouse Reef, Belize), a late Holocene climate and storm archive. Marine Geology, 344: 155—162
- Gischler E, Shinn E A, Oschmann W et al, 2008. A 1500 year Holocene Caribbean climate archive from the Blue Hole,

Lighthouse Reef, Belize. Journal of Coastal Research, 24(6): 1495—1505

- Goldsmith J R, Graf D L, Joensuu O I, 1955. The occurrence of magnesian calcites in nature. Geochimica et Cosmochimica Acta, 7(5-6): 212-230
- Iliffe T M, Bishop R E, 2007. Adaptations to life in marine caves. In: Safran P ed. Fisheries and Aquaculture. Oxford, UK: Eolss Publishers
- Jiang F Q, Frank M, Li T G et al, 2013. Asian dust input in the western Philippine sea: Evidence from radiogenic Sr and Nd isotopes. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 14(5): 1538—1551
- McManus J, 1988. Grain size determination and interpretation. In: Tucker M E ed. Techniques in Sedimentology. Oxford: Blackwell Scientific, 63—85
- Milliman J D, Müller G, Förstner U, 1974. Skeletal components. In: Recent Sedimentary Carbonates. Berlin, Heidelberg: Springer
- Mylroie J E, Carew J L, Moore A I, 1995. Blue holes: Definition and genesis. Carbonates and Evaporites, 10(2): 225–233
- Pohlman J W, 2011. The biogeochemistry of anchialine caves: progress and possibilities. Hydrobiologia, 677(1): 33-51
- Rastorgueff P A, Bellan-Santini D, Bianchi C N *et al*, 2015. An ecosystem-based approach to evaluate the ecological quality of Mediterranean undersea caves. Ecological Indicators, 54: 137–152
- Shinn E A, Reich C D, Locker S D et al, 1996. A giant sediment trap in the Florida Keys. Journal of Coastal Research, 12(4): 953—959
- Surić M, Lončarić R, Lončar N, 2010. Submerged caves of Croatia: distribution, classification and origin. Environmental Earth Sciences, 61(7): 1473—1480
- van Hengstum P J, Donnelly J P, Toomey M R *et al*, 2014. Heightened hurricane activity on the Little Bahama Bank from 1350 to 1650 AD. Continental Shelf Research, 86: 103—115

SEDIMENTS OF THE YONGLE BLUE HOLE IN XISHA ISLANDS, SOUTH CHINA SEA: ORIGINATION, COMPOSITION, AND SEDIMENTATION

FAN De-Jiang¹, TIAN Yuan¹, FU Liang², LUO Ke¹, SUN Xiao-Xia¹, BI Nai-Shuang¹, YAO Peng³, LIU Guang-Xing⁴, CHEN Hong-Ju⁴, YANG Zuo-Sheng¹

(1. Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Technique, Ocean University of China, Ministry of Education, Qingdao 266100, China; 2. Sansha Trackline Institute of Coral Reef Environment Protection, Sansha 573199, China; 3. Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ocean University of China, Ministry of Education, Qingdao 266100, China; 4. Key Laboratory of Ministry of Education for Marine Environment and Ecology, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract The Yongle Blue Hole is located in the Xisha Islands, and it is the deepest one (over 300m) in the world. Sediments are distributed and sampled on the wall, the middle platform, and the bottom of the Blue Hole in different depths. The grain size, and the mineral and geochemical components of the sediments were analyzed by a laser particle analyzer, and X-ray diffraction and fluorescence instruments. The results show that the sediments are composed of mainly biogenic debris. Dominant grain size of the sediments are sand, some occasional breccia, and a few silt and clay. The debris is poorly sorted and rounded. Three minerals, i.e., aragonite, high-magnesia calcite, and low-magnesia calcite were found in the sediments, taking 69.1%, 28.1%, and 2.8%, respectively. Elements Ca, Mg, Sr are major components of the sediments, accounting for 35.5%, 0.9%, and 0.5%, respectively, plus rare Si, Al, Ti, P, and S. The results suggest that sediments of the Blue Hole are mainly originated from adjacent reef flat, and a few are terrigenous that transported by winter East Asia Monsoon. Sedimentation of the sediments in the Blue Hole is mainly by mechanical capture, and few via particle settling. **Key words** the yongle blue hole; sediment; mineral and geochemical component; origin; sedimentation