

南海三沙永乐龙洞关键水体环境要素特征及其影响因素

毕乃双^{1,2*}, 傅亮³, 陈洪举⁴, 刘瑞志⁵, 陈霖⁶, 刘庆庆⁵, 林岩璇⁵, 姚鹏⁶, 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. 青岛海洋科学与技术国家实验室, 海洋地质过程与环境功能实验室, 青岛 266061;
3. 三沙航迹珊瑚礁保护研究所有限公司, 三沙 573100;
4. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 青岛 266100;
5. 中国环境科学研究院, 北京 100101;
6. 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

* 联系人, E-mail: binaishuang@ouc.edu.cn

2018-01-29 收稿, 2018-03-16 修回, 2018-03-19 接受, 2018-07-03 网络版发表
三沙市生态环境保护专项和中央高校基本科研业务费专项(201762038)资助

摘要 基于2016年10月在南海三沙永乐龙洞开展的水体环境要素的综合观测, 获取了水体温度、盐度、密度、叶绿素a、溶解氧、浊度、悬浮颗粒物粒度和海流等数据, 研究了南海三沙永乐龙洞关键水体环境要素的分布特征及影响因素。结果表明: 永乐龙洞在水深10 m以下区域与外海无大规模连通; 水体温度、盐度、密度存在多个跃层, 分别位于水深3, 10, 50和80~110 m附近水深, 其中以50 m水深附近跃层最强, 155 m以下区域水文要素几无变化。叶绿素a垂向分布表现为多峰特征, 在10~20 m附近存在一次表层叶绿素a最大值区。随着水深增加叶绿素a含量快速降低, 在水深90 m附近叶绿素a浓度达到最大值, 而后叶绿素a快速降低。溶解氧浓度垂向分布较为复杂, 表层最高可达7 mg/L, 在温度、盐度和密度跃层水深附近浓度快速降低, 并在水深90 m附近降为0, 即无氧状态。水体浊度与叶绿素a分布特征极为相似, 即在水深10~20和90 m附近存在浊度高值区。龙洞内悬浮颗粒物主要有两个粒径组分, 分别为145~500 μm 的粗颗粒组分和5.28~38.55 μm 的细颗粒组分, 其中以粗颗粒组分为主。龙洞80 m以上和其下水体性质差异显著, 表明其来源不同。80 m以上水体温度、盐度跃层主要为日变和季节性跃层, 80~110 m为永久性跃层。跃层处密度的显著差异, 导致水体垂向对流受限并富集悬浮颗粒物, 是导致溶氧浓度快速降低的主控因素。80 m以下水体与其上水体几无交换, 加之有机颗粒物的氧化与分解, 形成无氧状态。悬浮细颗粒组分体积浓度控制水体浊度变化, 推测细颗粒应主要为矿物及岩石碎屑, 粗颗粒应主要为藻类和海洋雪花等。

关键词 南海三沙永乐龙洞, 水体环境要素, 垂向分布, 影响因素

海洋蓝洞(marine blue hole)是一种水下海洋洞穴, 一般认为其为水下碳酸盐岩喀斯特系统, 水平方向规模较大, 世界各大洋海域均有发现, 如太平洋塞班岛蓝洞(Saipan blue hole)、印度洋马尔代夫法努马杜高蓝洞(blue hole of Faanu Madugau)、红海哈达布蓝洞(Dahab blue hole)、地中海马耳他戈佐蓝洞(Gozo blue hole)以及澳大利亚珊瑚礁和美国佛罗里达近海

的蓝洞群等。由于洞穴内沉积的白色碳酸盐碎屑和蓝天反射的共同作用, 使其水体表现为蓝色, 因此称之为蓝洞^[1~3]。蓝洞有内陆蓝洞(inland blue hole)和滨外蓝洞(offshore blue hole)之分^[4], 前者位于距离海岸线几千米的内陆, 一般通过侧向洞穴、裂隙等与外海相连, 其内部水文物理化学参数层化显著, 一般表层为淡水或咸水, 而在温跃层或化学跃层之下则为低

引用格式: 毕乃双, 傅亮, 陈洪举, 等. 南海三沙永乐龙洞关键水体环境要素特征及其影响因素. 科学通报, 2018, 63: 2184–2194

Bi N S, Fu L, Chen H J, et al. Hydrographic features of the Yongle blue hole in the South China Sea and their influential factors (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 2184–2194, doi: 10.1360/N972017-01329

含氧量的海水^[5-8]。滨外蓝洞则位于海岸线处或者淹没于海水之下,其内部水体为海水,有些可随潮汐变化与外海自由进行水交换^[9],但也有部分蓝洞与外海水交换受限,其相对隔绝的内部环境,形成包括温度、盐度、溶解氧和硫化氢在内的物理-化学跃层^[10,11],甚至出现无氧环境^[12]。这些物理-化学跃层既有随气温、季风等影响的季节性跃层,又有终年不变的永久性跃层,如佛罗里达Jewfish蓝洞^[13]。世界上已知的绝大多数海洋蓝洞都属于滨外蓝洞类型,是多次全球海平面升降影响下碳酸盐岩体中形成喀斯特溶洞过程的产物,即近岸碳酸盐岩体在低海面期间出露海面并形成喀斯特溶洞,海平面上升后将其淹没,形成岸外的海洋蓝洞^[2,4,14,15]。

我国南海三沙永乐龙洞是迄今为止发现的世界上海最深的海洋蓝洞,位于西沙群岛永乐环礁(图1),深度可达300 m左右,受到国内外学者和媒体的广泛关

注^[16,17]。然而诸如其是否与外海有水交换、如何交换,其内部水文、生物地球化学要素的分布特征如何等关键科学问题尚无科学报道。本文基于2016年10月在南海三沙永乐龙洞开展的综合调查,旨在研究南海三沙永乐龙洞关键水体环境要素的分布特征,比较龙洞与外海水体环境要素的差异,揭示其影响因素。

1 数据资料及方法

2016年10月25~31日开展永乐龙洞综合调查,其中25~27日开展了永乐龙洞及其外海水文环境要素调查,包括水体温度、盐度、浊度、溶解氧、叶绿素a,龙洞内还进行了悬浮颗粒物粒度及海流观测。调查依托人工搭建浮体平台,平台采用三角固定方式,分别在3个方向的礁坪上固定锚桩,再通过缆绳将锚桩与平台连接,保证平台位置相对固定,以减小平台水平移动对海流观测结果的影响。具体调查方法及内容如下。

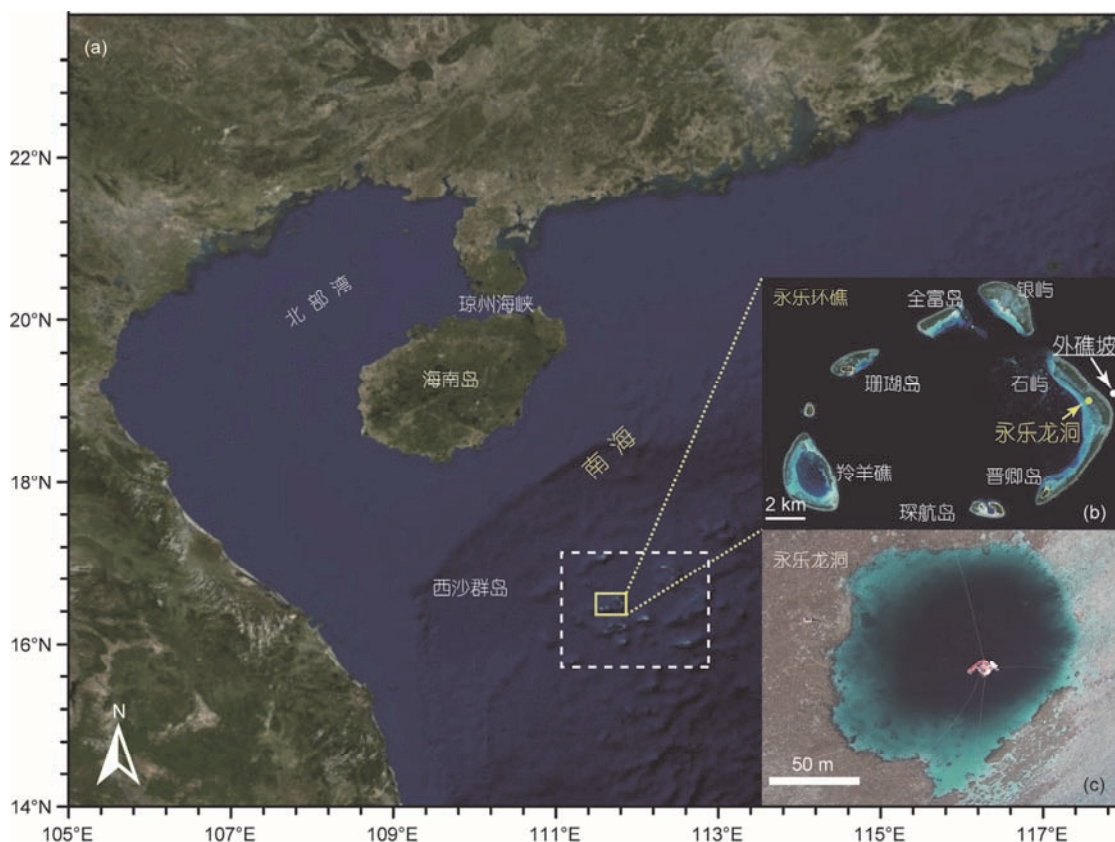


图1 区域概况。(a) 南海及西沙群岛;(b) 永乐环礁;(c) 永乐龙洞。其中卫星遥感影像取自于ArcGIS Earth软件内嵌遥感影像,(a)为Landsat影像;(b)为DigitalGlobe影像;(c)为三沙航迹珊瑚礁保护有限公司提供的无人机航拍照片

Figure 1 Regional settings. (a) The South China Sea and the Xisha islands; (b) the Yongle Atoll; (c) the Yongle blue hole. Remote sensing images, Landsat image in (a) and DigitalGlobe image in (b), were acquired from ArcGIS Earth software. The aerial photo in (c) was taken by the Track Ocean Institute of Coral Reef Conservation

(i) 海流观测. 采用TRDI WHS 300 kHz型声学多普勒流速剖面仪(acoustic doppler current profiler, ADCP)开展海流剖面观测(测量范围最大可达110 m, 测量精度为0.1 cm/s), 将ADCP固定在平台一侧、水下2 m左右水深, 采用间歇工作(burst)模式, 每10 min进行一次观测, 连续观测25 h. 另外, 使用一台Nortek公司的点式声学多普勒流速仪(acoustic doppler velocimeter, ADV), 其测量精度可达0.1 mm/s, 将ADV与CTD(conductivity, temperature and depth)一同下放, 并分别在10, 40, 70和150 m处以2 Hz的采样频率连续观测3 min.

(ii) 水文观测. 采用SBE 19 plus型(温度、盐度、深度和浊度)和JFE-Advantech公司ASTD 102型(温度、盐度、深度、溶解氧、叶绿素a、浊度)CTD的联合观测系统, 龙洞内最大观测深度约为170 m, 外海最大观测深度为80 m. 本文温、盐和深度数据采用SBE 19 plus CTD观测数据, 其他参数采用JFE-Advantech CTD观测数据. 由于外海观测时SBE 19 plus CTD盐度传感器工作异常, 应用同期南海北部海盆Argo浮标数据的温度、盐度和深度替代. 调查同时在不同深度采集水样应用荧光法进行叶绿素a浓度分析, 以检验CTD测定叶绿素a浓度的精度.

(iii) 悬浮颗粒物粒度分布. 在完成CTD剖面观测后, 应用SEQUOIA公司现场激光粒度分析仪(LISST-100X), 粒径观测范围为2.5~500 μm , 分别观测32个粒度组分的体积浓度. 测量前使用酒精对仪器测量窗口进行了清洁, 并进行实时背景文件采集.

2 结果

2.1 海流特征

受龙洞周围洞壁影响, ADCP所能观测的最大有效深度约为80 m. 基于ADCP 25 h连续观测, 结果显示龙洞内8.5 m以下(第一测量层位为8.5 m)ADCP所测得南北向和东西向流速分量最大值约为80 mm/s, 但在观测时段内同一时刻不同深度的流速和同一深度不同时刻的流速均无明显趋势性和周期性, 流速测量数值随机性显著, 推测测量结果基本为噪声或测量误差(如洞壁的旁瓣效应或受波浪影响平台的晃动)(图2). 同时, ADV在10和40 m等水深附近测量结果显示, 流速在3 min的观测时段内在东西和南北向均无稳定的趋势性流动(数据未展示), 这一结果与

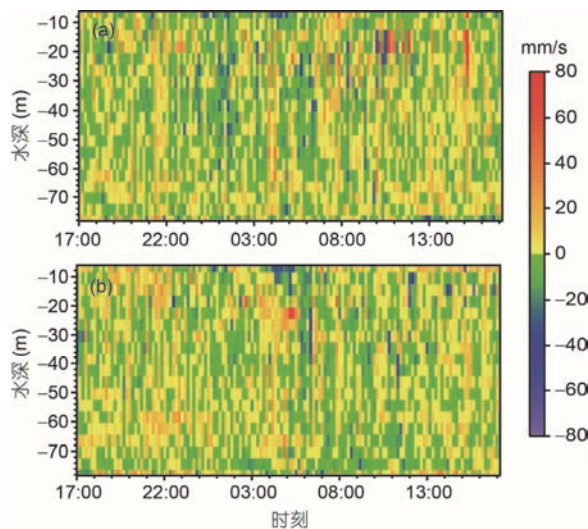


图2 基于ADCP观测的龙洞内部潮流变化

Figure 2 Observed tidal currents in the Yongle blue hole using ADCP

ADCP的观测结果一致. 表明龙洞在10 m以下与外海无大规模开放式连通.

2.2 水文特征

温度垂向分布表明龙洞内温度呈现随水深增加而降低的变化趋势, 温度由表层约29.5 $^{\circ}\text{C}$ 降低至170 m附近的15.5 $^{\circ}\text{C}$. 温度随深度变化呈阶梯式降低, 存在多个温度快速变化层位, 分别位于水深3, 10, 50和80~110 m附近水深, 其中以3和50 m水深附近变化最为强烈, 其温度梯度可达0.6 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 以上, 其余两个层位温度梯度也达到0.2 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 以上, 均达到南海水深200 m以浅温跃层温度梯度的临界值(0.2 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$)^[18]. 跃层155 m以下水体温度几无变化(图3).

盐度垂向分布表明龙洞内盐度随水深增加逐渐增加, 盐度由表层约33.8增加至水深170 m附近的34.5. 垂向分布模式与温度基本呈镜像变化, 在水深3 m附近稍有波动, 在10, 50和80~110 m存在显著的盐度跃层, 其中50 m附近跃层最强, 盐度梯度可达0.2 m^{-1} , 其余跃层梯度约为0.01~0.05 m^{-1} , 与温度相似, 155 m以下水体盐度无明显变化.

龙洞内水体密度随水深增加而增加, 密度变化主要受控于温盐变化, 尤其是温度, 其变化趋势与温度呈镜像变化, 3和50 m水深附近跃层最为显著, 密度梯度最高可达0.5 kg/m , 其余跃层密度梯度约为0.1 kg/m . 受温盐变化控制, 155 m以下水体密度无明显变化.

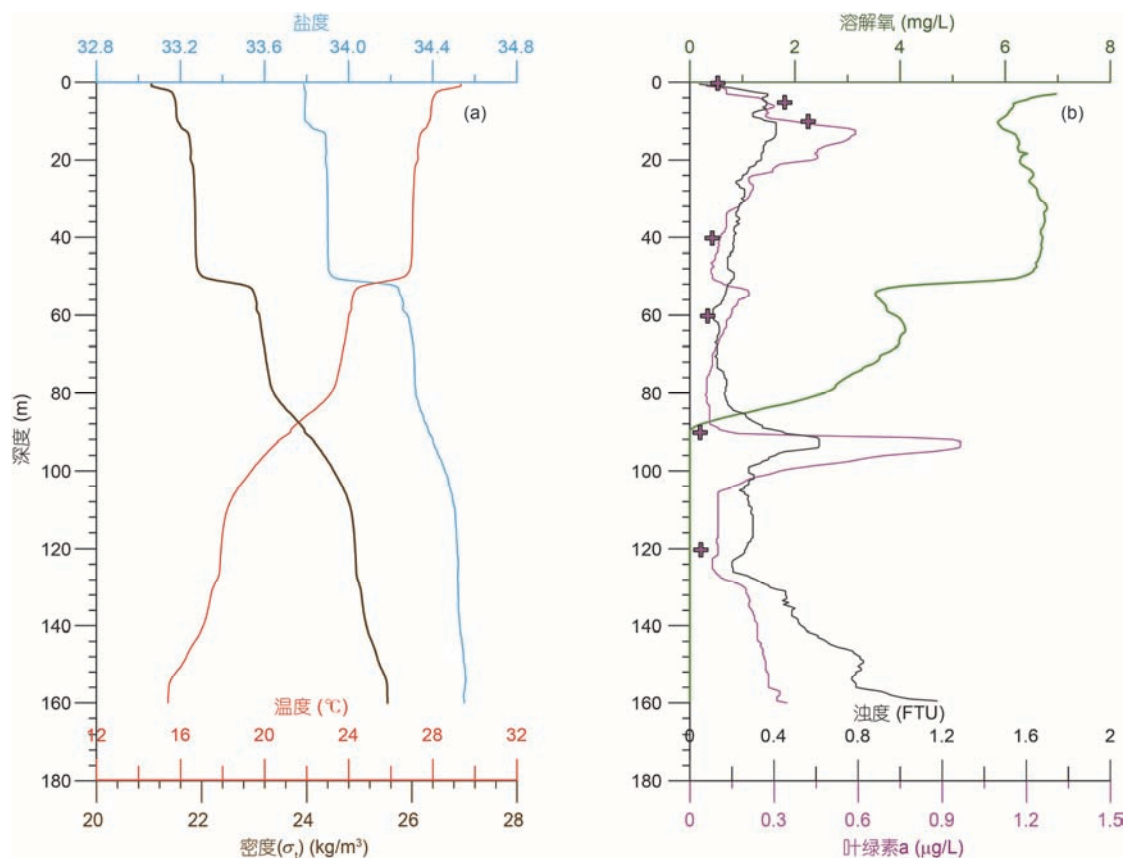


图3 龙洞内关键水文要素垂向分布特征,“+”代表水样实测叶绿素a浓度

Figure 3 Profiles of the key hydrographic elements in the Yongle blue hole, the points with “+” indicate the concentrations of *Chl*-a which were measured in the laboratory

叶绿素a CTD观测结果与实验室分析结果基本一致,表明CTD所测叶绿素a浓度可信(图3(b)). CTD垂向分布表现为多峰特征,在10~20 m附近存在一次表层叶绿素a最大值区,叶绿素a含量约为0.6 $\mu\text{g/L}$. 随着水深增加叶绿素a含量快速降低,至50 m附近降低至最低值约为0.1 $\mu\text{g/L}$,在温跃层附近叶绿素a快速升至0.2 $\mu\text{g/L}$,其后叶绿素a浓度逐渐降低至最低值附近,在水深90 m附近叶绿素a浓度达到最大值,约为1.0 $\mu\text{g/L}$,而后叶绿素a快速降低. 130 m以下水体叶绿素a又稍有增加.

溶解氧垂向分布表现为表层最高,可达7 mg/L,随深度增加溶解氧浓度快速降低,至10 m温跃层附近降低至约6 mg/L,而后溶解氧浓度缓慢升高,并在40 m附近趋于稳定. 在温盐跃层处(水深约50 m),溶解氧浓度快速降低至约3.5 mg/L. 其后溶解氧浓度值再次缓慢升高,至水深约65 m处升高至4 mg/L后,溶解氧浓度值波动式快速降低,至水深80 m附近,溶解氧浓

度急剧降低,并在水深90 m附近降为0,即无氧状态.

水体浊度与叶绿素分布特征具有一定的相似性,20 m以浅水体浊度较高,约为0.4 FTU,20 m开始水体浊度逐渐降低,最低值约为0.2 FTU,80 m后水体浊度逐渐增加,并在90 m附近显著增加至0.5 FTU,在100 m附近降至0.4 FTU. 130 m以下水体浊度逐渐增加,至160 m处达到峰值约1.2 FTU.

2.3 悬浮颗粒物分布特征

基于现场激光粒度分析仪(LISST)结果,龙洞内悬浮颗粒物主要有两个粒径组分,分别为145~500 μm 的粗颗粒组分和5.28~38.55 μm 的细颗粒组分,其他粒径组分悬浮颗粒物基本检测不到. 其中以145~500 μm 的粗颗粒组分占主导,约占总悬浮颗粒物99.9%(图4(a)),尤其是大于462 μm 组分,其含量高达80%. 细颗粒组分含量较粗颗粒组分低2~3个数量级,约占总悬浮体颗粒物含量的0.1%. 细颗粒组分粒径分

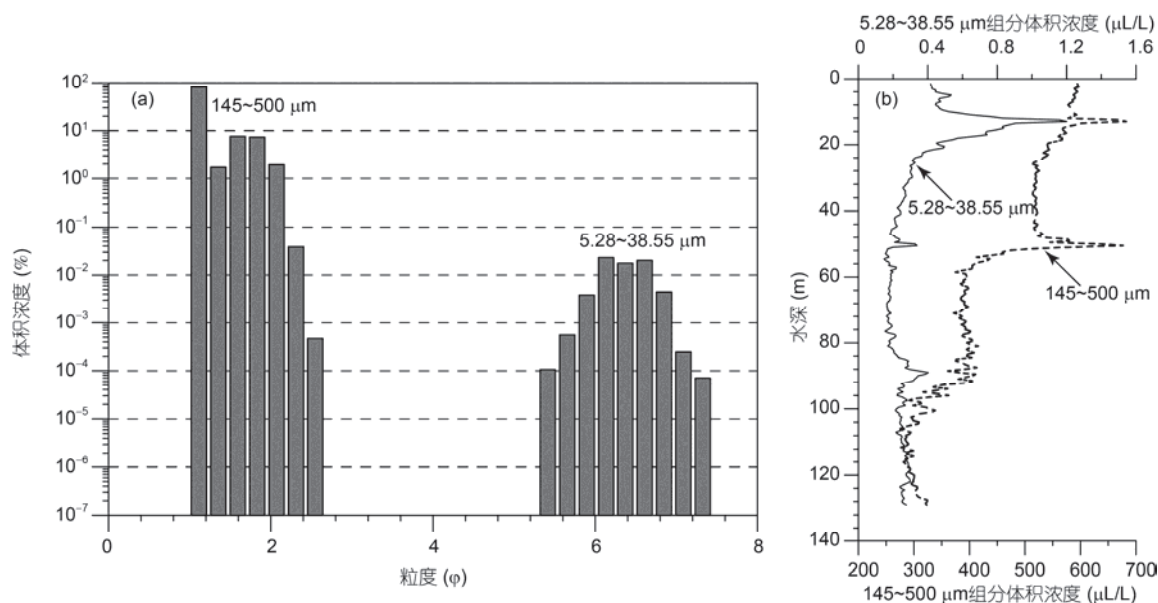


图4 龙洞内悬浮颗粒物粒度分布(a)及其垂向变化(b)

Figure 4 Grain size distributions (a) and their vertical variations (b) of suspended particulate matter (SPM) in the Yongle blue hole

布总体呈正态分布, 粒径组分最高含量仅为0.02%.

悬浮颗粒物浓度的垂向分布表明, 粗颗粒组分体积浓度在300~700 $\mu\text{L/L}$ 之间, 总体表现为随着深度增加浓度阶梯式降低(图4(b)). 表层体积浓度约600 $\mu\text{L/L}$ 并随水深增加逐渐降低, 但在15 m水深附近浓度锐增至约700 $\mu\text{L/L}$, 峰值水体厚度仅为1~2 m, 峰值以下浓度快速降低, 在30 m附近降至550 $\mu\text{L/L}$ 并保持稳定. 至水深50 m附近又锐增至约700 $\mu\text{L/L}$, 峰值厚度与上一峰值基本相当, 浓度在60 m水深附近降至约400 $\mu\text{L/L}$ 并保持稳定. 在水深80 m附近浓度再次缓慢降低, 至100 m附近降为300 $\mu\text{L/L}$, 并基本保持稳定. 细颗粒组分变化与粗颗粒组分差异显著, 其体积浓度约为0.2~1.2 $\mu\text{L/L}$. 细颗粒组分浓度总体随水深增加表现为先升高(0~15 m)后降低(15~80 m)再升高(80~130 m)的趋势. 除与粗颗粒组分类似在水深15和50 m附近存在峰值外, 在表层5 m水深附近和下层90 m附近也存在一高值区. 另外, 水深15 m附近峰值显著高于其他水深峰值浓度, 可达1.2 $\mu\text{L/L}$.

3 讨论

3.1 龙洞内外海水文要素对比

龙洞内水文要素垂向分布与外海差异显著. 外海水体与龙洞相比表层水体混合显著, 导致30 m以

上水体温度无显著变化(图5). 30 m水深以下温度显著降低, 并形成温度跃层, 温跃层下边界下移至60 m附近, 其厚度可达30 m左右. 跃层强度显著弱于龙洞内部, 温度梯度约为0.34 $^{\circ}\text{C/m}$, 显示秋季外海垂向混合逐渐加强, 上层水体跃层已逐渐进入衰退期^[17], 但龙洞内部50 m以上存在多个跃层, 且跃层上下界清晰, 跃层厚度薄且强度大, 显示其尚未进入明显的衰退期. 值得注意的是外海水体跃层之上温度高于龙洞内部水体, 而跃层以下温度显著低于龙洞内部. 外海水体盐度总体高于龙洞内部, 尤其是100 m以上水体(图5(a)). 外海水体表层水体叶绿素a含量较低, 仅为0.15 $\mu\text{g/L}$, 15 m水深以下缓慢增加; 次表层叶绿素最大层在20 m水深以下, 50 m附近达到最大值约为0.7 $\mu\text{g/L}$, 这与龙洞内叶绿素分布差异显著. 外海水体表层溶解氧含量约为7.5 mg/L, 15 m以下溶解氧随叶绿素含量稍有增加, 在温跃层上界溶解氧含量开始快速降低, 并在跃层以下降至6 mg/L, 但显著高于龙洞内相同深度的溶解氧含量(2.5 mg/L), 龙洞内水体溶解氧含量显著低于外海. 外海水体80 m以上浊度基本在0.1 FTU以内, 且与叶绿素变化无明显相关性, 龙洞内水体浊度显著高于外海水体1~2个数量级且波动显著(图5(b)). 龙洞内外海水文要素剖面结构、量值均有显著差异, 一方面表明龙洞与外海水体水交换受限, 另一方面也表明龙洞内外物理、生物和地

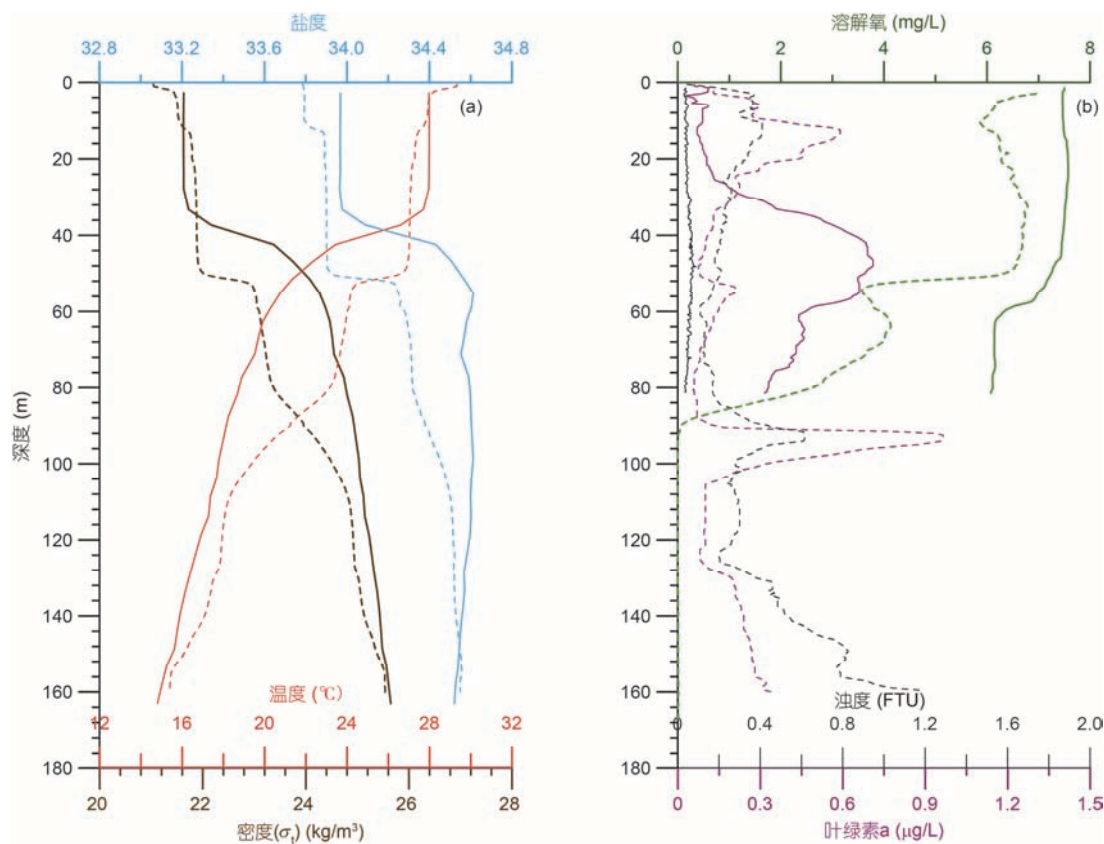


图 5 龙洞内外海水文参数对比, 实线代表外海水体参数, 虚线代表龙洞内参数. (a) 其中外海温度、盐度和密度参数由同期(11 月 3 日)南海海盆Argo浮标(WMO: 2902698, 位置: 14°20.76'N, 113°9.3'E)观测, 数据来源: 中国Argo实时资料中心(<http://www.argo.org.cn/data/argo.php>); (b) 其他参数由本航次JFE-Advantech CTD观测获取

Figure 5 Comparisons of profiles of key hydrographical elements between the Yongle blue hole (solid lines) and its adjacent ocean (dashed lines). Data of salinity, temperature and density (a) were observed by the Argo float in the basin of the South China Sea (WMO: 2902698, Latitude: 14°20.76'N, Longitude: 113°9.3'E) on November 3, 2016. Data was acquired from China Argo real-time Center (<http://www.argo.org.cn/data/argo.php>). Other parameters of the water column in the adjacent South China Sea (b) were obtained using the JFE-Advantech CTD

球化学过程差异显著.

3.2 龙洞水文要素形成机制

海洋蓝洞水文环境要素分布受与其连通的外海水以及自身特殊的水文、生物和化学环境影响^[12]. 永乐龙洞海流观测结果显示, 龙洞内部无明显的周期性和趋势性流动, 表明龙洞与外海无大规模、开放式连通. 同时, 龙洞内水文要素垂向分布与外海差异显著, 结构特征无明显的相似性, 表明外海水体与龙洞无明显连通且不是龙洞水文要素结构的主控因素. 为揭示龙洞水体的来源及其性质, 本文绘制了龙洞水体温盐(θ - S)点聚图(图6). 温度和盐度作为海水最重要的两个水文参数, 二者的关系及其变化是研究近海及大洋水团的有效指标, 进而揭示研究区海水性质及其来源^[20]. 温盐点聚图显示在水深80 m左右,

龙洞水体温盐关系发生显著变化, 表明80 m水深上下水体性质差异显著(图6). 与南海北部秋季 θ - S 点聚图比较, 80 m以下龙洞内水体与南海北部尤其是南海北部陆坡水体性质相似, 但80 m以上水体性质有所差异.

南海温跃层按其生命周期可划分为日变化型温跃层、季节性温跃层和永久性温跃层, 其中日变化型温跃层随太阳高度角变化, 呈日周期变化, 水深一般0~10 m; 季节性温跃层随日照、气温及风等因素的影响, 呈现季节性周期变化, 上界深度一般在50 m左右; 永久性温跃层系不同水团、水系叠加形成, 深度一般上百米, 强度较低^[21]. 基于此龙洞内3 m左右的跃层应属日跃层, 其不仅受到太阳高度变化导致的辐射量的影响, 同时还受附近环礁礁盘上和潟湖内高温、低盐的水体在涨潮时注入的影响, 进而形成

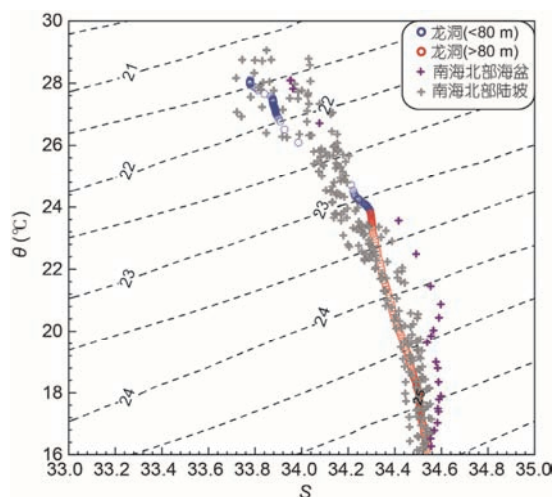


图6 龙洞及南海北部 θ -S点聚图. 等值线为海水密度(σ_t)(kg/m^3), 其中南海北部海盆数据源自Argo浮标数据(图5), 南海北部陆坡数据源自刘长健等人^[19]于2004年9月在越南外海(15°N , $110^\circ45'\text{E}$)的船载CTD资料

Figure 6 θ -S diagrams of Yongle blue hole and the northern South China Sea. The contour lines indicate the density of seawater (σ_t) in kg/m^3 . Data in the basin of the northern South China Sea was acquired by the Argo float (see Figure 5), and that in the continental slope of the northern South China Sea was observed by CTD in the offshore of Vietnam (15°N , $110^\circ45'\text{E}$) in September, 2004^[19]

表层厚度小、强度大且高温低盐的温跃层(图3). 10和50 m处温跃层应主要为双跃层形式的季节性温跃层, 其中50 m处温跃层为主温跃层, 强度大且相对稳定, 10 m附近温跃层强度低, 易受事件性天气(大风、降雨)等影响^[21].

进入秋季后随着日照、气温及风场的季节性变化, 南海表层水体失温明显, 水体密度增加显著, 导致垂向对流加强, 加之波浪和潮流的混合作用, 导致水体垂向混合逐渐加强, 季节性跃层的上界逐渐降低(图5), 跃层深度被不断压低^[22]. 由于龙洞内基本无潮流作用, 湍流作用显著弱于外海, 且受周围礁坪的障壁作用, 波浪又较弱, 导致在外海季节性跃层进入衰退期时, 龙洞内部仍无消退迹象(图5). 随着季节性跃层的消退并最终被完全破坏, 上层水体将通过垂向对流进一步与下层水体混合与交换, 但这一垂向对流所能影响的最大深度基本在永久性跃层之上. 由于龙洞内部与外海无明显水交换, 因此外海、潟湖及环礁礁盘水体仅通过龙洞表层水体对其影响, 并在季节性垂向对流的作用下与下层水体混合和交换, 但其最大影响深度可能在80 m左右, 导致80 m上下水体性质差异显著, 同时也表明80~110 m附近

的跃层应为永久性跃层, 虽其深度变化不大但其强度可能随季节性跃层的演化有所变化. 另外, 由于与外海水体性质差异明显的潟湖及礁盘内部水体的影响, 导致龙洞80 m以上水体与外海有所差异, 而80 m以下龙洞水体与外海水体性质基本一致(图6). 鉴于全球其他多数海洋蓝洞形成于海平面变化和喀斯特共同作用^[2,4,14,15], 推测龙洞内80 m以下水体有可能是龙洞在低海平面时已形成的喀斯特溶洞, 在海平面上升时海水淹没灌入时形成.

水体中生物地球化学要素(溶解氧、叶绿素a等)分布不仅受物理要素(温度、盐度和密度)的控制, 同时也受环境内生物及地球化学过程包括光合作用、呼吸作用及氧化还原反应等的影响^[23~25]. 龙洞内溶解氧分布特征显示, 其基本在跃层附近浓度快速降低, 跃层之后(80~110 m跃层除外), 溶解氧浓度缓慢回升(图3). 与其他水体类似, 龙洞水体中溶解氧主要源于空气中氧气在水体中的溶解和浮游植物的光合作用, 其消耗主要由于部分元素(C和N等)的氧化作用和浮游生物的呼吸作用等. 由于温跃层的障壁作用, 表层高含氧水体无法扩散至跃层以下, 导致跃层上下溶解氧浓度差异显著^[9]. 另一方面, 跃层处水体密度差异显著, 浮游植物及颗粒态有机质在跃层附近富集^[26,27], 以浮游植物为食的浮游动物亦富集于此, 导致浮游动物呼吸作用占主导, 加之该处颗粒态有机物的氧化分解, 进而形成了温跃层附近溶氧浓度快速降低并伴有叶绿素a浓度和浊度高值的现象(图3). 跃层之下, 由于浮游动物等耗氧生物及颗粒态有机物减少, 溶解氧耗氧量降低, 光合作用占主导, 导致溶解氧浓度缓慢回升. 值得注意的是, 龙洞内部90 m以下溶解氧锐减至0 mg/L , 这在世界蓝洞中也实属罕见. 该溶解氧锐减的界面与其上两个界面形成机制相似, 但不同的是该界面溶解氧降为0 mg/L 后并未出现溶解氧浓度增加的过程, 表明90 m以下水体中仍以耗氧占主导. 究其原因一方面由于90 m以下水深由于光线衰减, 浮游植物光合作用显著减弱, 另一方面由于80~110 m处为永久性跃层, 导致其下水体与上层水体几乎永久性隔绝, 无大气中氧气的供应. 在无氧区出现的叶绿素a峰值和浊度高值区, 推测是由于含叶绿素a的颗粒物富集和蓝细菌在无氧条件下产生叶绿素a导致, 这在瑞士Rot湖水下无氧层的研究中已有报道^[28]. 龙洞内130 m以下水体叶绿素a浓度升高及其与浊度有较好的相关性, 推测可能是在极低叶绿素a

浓度的情况下,高浊度造成叶绿素a光源信号的强散射,导致叶绿素a荧光的测量值偏高所致^[29,30]。

龙洞内水体浊度显著高于外海,尤其是表层水体,主要是由于附近珊瑚礁礁盘受波浪作用产生大量珊瑚礁碎屑(孙晓霞等,尚未发表),并被表层潮流搬运至龙洞,沉降并在跃层附近富集,进而导致龙洞内浊度显著高于外海。由于表层水体浊度高,其对透光性的影响显著,导致龙洞内次表层叶绿素a最大值的深度显著浅于外海(图5)。浊度不仅受控于悬浮颗粒物浓度,同时还受颗粒物粒度、形态和物质组成等影响,其中粒度是仅次于悬浮体浓度影响浊度的最重要因素^[31]。在颗粒组成方面,矿物或岩石碎屑后散射效率是浮游植物细胞的4~60倍^[32,33]。虽然LISST结果表明水中颗粒物以145~500 μm的组分占主导,但浊度与5.28~38.55和145~500 μm组分的体积浓度相关性分析显示,水体浊度仅与细颗粒组分相关性显著(图7),即细颗粒组分含量的变化是水体浊度变化的主控因素。基于细颗粒组分体积浓度计算该组分悬浮颗粒物浓度范围为0.5~3.1 mg/L(颗粒密度按2650 g/L计算),这与基于部分水深层位采样测得的龙洞悬浮颗粒物浓度基本一致(0.2~1.7 mg/L)(孙晓霞等,尚未发表)。因此,推测细颗粒组分应主要为矿物和岩石碎屑,其具有沉降速度慢,易在跃层富集的特点,能在类似龙洞的封闭且静水环境下悬浮。粗颗粒组分可能主要为以藻类等为主的浮游生物和海洋雪花等,这一推论被扫描电子显微镜下观察到的悬

浮颗粒物的组分所证实(孙晓霞等,尚未发表)。

4 结论

三沙永乐龙洞作为世界上最深的海洋蓝洞,其与外海无大规模开放式连通,内部水环境要素分布与外海差异显著,呈现自身独特特征,具体有以下表现。

(1) 龙洞内部在3, 10, 50和80~110m附近存在多个温度跃层,其中3 m处为日变化跃层、80~110 m处为永久性跃层,而10和50 m附近为季节性跃层。盐度及密度变化与温跃层基本一致。永久性跃层使得表层外海、礁盘及泻湖的混合水体无法通过垂向对流进入永久性跃层以下水体,导致80 m水深上下水体性质差异显著。

(2) 温盐跃层导致的密度跃层,对生物和地球化学要素垂向分布影响显著。受浮力作用密度跃层附近富集大量浮游植物和有机悬浮颗粒物,导致跃层附近叶绿素a含量和浊度较高,而密度跃层的障壁作用,导致溶氧垂向交换受阻,进而导致跃层附近溶解氧含量锐减。同时,龙洞内自身的生物地球化学过程,也影响洞内生物和地球化学要素的空间分布。

(3) 龙洞内悬浮颗粒物主要有两个粒径组分,分别为145~500 μm的粗颗粒组分和5.28~38.55 μm的细颗粒组分,其中以145~500 μm的粗颗粒组分占主导。细颗粒组分含量的变化是水体浊度变化的主控因素,应主要为矿物和岩石碎屑组成,粗颗粒组分则可能主要为以藻类等为主的浮游生物和海洋雪花。

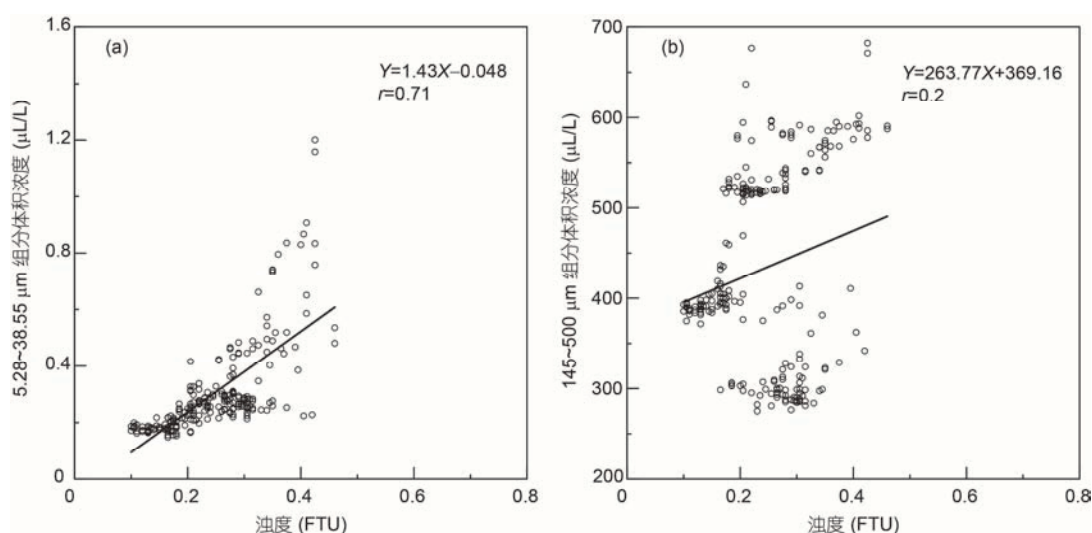


图7 龙洞内水体浊度和两个粒径组分体积浓度的关系。(a) 细颗粒组分;(b) 粗颗粒组分

Figure 7 Correlations between the turbidity and volume concentrations of SPM. (a) The finer component; (b) the coarser component

致谢 三沙航迹珊瑚礁保护研究所琼海渔03138号考察船船长陈宜川及全体科考队员在调查过程中提供了后勤和观测支持,美国波士顿学院Gail C. Kineke教授帮助润色了英文摘要,在此一并致谢。

参考文献

- Smart P L, Dawans J M, Whitaker F. Carbonate dissolution in a modern mixing zone. *Nature*, 1988, 335: 811–813
- Mylroie J E, Carew J L, Moore A I. Blue holes: Definition and genesis. *Carbonates Evaporites*, 1995, 10: 225–233
- Schwabe J S. Biogeochemical investigation of caves within Bahamian carbonate platforms. Doctor Dissertation. Bristol: University of Bristol, 1999
- Bishop R E, Humphreys W F, Cukrov N, et al. “Anchialine” redefined as a subterranean estuary in a crevicular or cavernous geological setting. *J Crustac Biol*, 2015, 35: 511–514
- Labourdette R, Lascu I, Mylroie J, et al. Process-like modeling of flank-margin caves: From genesis to burial evolution. *J Sediment Res*, 2007, 77: 965–979
- Mylroie J E. Coastal karst development in carbonate rocks. In: Lace M, Mylroie J, eds. *Coastal Karst Landforms*. Coastal Research Library. Dordrecht: Springer, 2013. 77–109
- Mylroie J E, Carew J L. The flank margin model for dissolution cave development in carbonate platforms. *Earth Surf Process Landforms*, 2010, 15: 413–424
- Iliffe T M. Anchialine cave biology. In: Camacho A I, ed. *The Natural History of Biospeleology*. Madrid: Museo Nacional de Ciencias Naturales, 1992. 613–636
- Iliffe T M, Kornicker L S. Worldwide diving discoveries of living fossil animals from the depths of anchialine and marine caves. *Smithson Contrib Mar Sci*, 2009, 38: 269–280
- Pohlman J W. The biogeochemistry of anchialine caves: Progress and possibilities. *Hydrobiologia*, 2011, 677: 33–51
- Seymour J R, Humphreys W F, Mitchell J G. Stratification of the microbial community inhabiting an anchialine sinkhole. *J Microbiol Immunol Infect*, 2007, 48: 11–24
- Canganella F, Bianconi G, Kato C, et al. Microbial ecology of submerged marine caves and holes characterized by high levels of hydrogen sulphide. *Life Extrem Environ*, 2007, 6: 115–124
- Rubelmann III H. A functional approach to resolving the biogeocomplexity of two extreme environments. Doctor Dissertation. Tampa: University of South Florid, 2014
- Becking L E, Renema W, Santodomingo N K, et al. Recently discovered landlocked basins in Indonesia reveal high habitat diversity in anchialine systems. *Hydrobiologia*, 2011, 677: 89–105
- Smith D E, Harrison S, Firth C R, et al. The early Holocene sea level rise. *Quat Sci Rev*, 2011, 30: 1846–1860
- Gai G S. The deepest ocean blue hole—Sansha Yongle blue hole (in Chinese). *Ocean World*, 2016, 263: 72–77 [盖广生. 世界最深的海洋蓝洞——三沙永乐龙洞. *海洋世界*, 2016, 263: 72–77]
- Liu Y X, Du J, Wu Z L, et al. Preliminary investigation on the Yongle blue hole in Xisha Islands (in Chinese). *Adv Mar Sci*, 2017, 35: 305–316 [刘炎雄, 杜军, 吴志露, 等. 西沙永乐龙洞探秘前期调查工作综述. *海洋科学进展*, 2017, 35: 305–316]
- Fang X J, Wang C X, Xu J J. Seasonal and interannual variations of the thermocline depth in the South China Sea (in Chinese). *Trans Oceanogr Limnol*, 2013, 3: 45–55 [方雪娇, 王彩霞, 徐佳佳. 南海温跃层深度的季节和年际变化特征. *海洋与湖沼通报*, 2013, 3: 45–55]
- Liu C J, Mao H B, Chen R Y, et al. An analysis on moving vessel profiler observation in Northern South China Sea in September 2004 (in Chinese). *J Trop Oceanogr*, 2005, 24: 77–82 [刘长建, 毛华斌, 陈荣裕, 等. 2004年9月南海北部移动船载温盐剖面仪观测结果初步分析. *热带海洋学报*, 2005, 24: 77–82]
- Murphy R C, Sverdrup H U, Johnson M W, et al. The oceans: Their physics, chemistry, and general biology. *Geogr Rev*, 1944, 34: 170
- Zhou Y X. Statitiscal analysis ocean thermocline on the South China Sea (in Chinese). Master Dissertation. Qingdao: Ocean University of China, 2002 [周燕遐. 南海海洋温度跃层统计分析. 硕士学位论文. 青岛: 中国海洋大学, 2002]
- Qiu C H, Mao H B, Yu J C, et al. Sea surface cooling in the Northern South China Sea observed using Chinese sea-wing underwater glider measurements. *Deep Res Part I-Oceanogr Res Pap*, 2015, 105: 111–118
- Yin K D, Lin Z F, Ke Z Y. Temporal and spatial distribution of dissolved oxygen in the Pearl River Estuary and adjacent coastal waters. *Cont Shelf Res*, 2004, 24: 1935–1948
- Foley B, Jones I D, Maberly S C, et al. Long-term changes in oxygen depletion in a small temperate lake: Effects of climate change and eutrophication. *Freshw Biol*, 2012, 57: 278–289

- 25 Yang Y, Ma Y, Shi H M. Characteristics of dissolved oxygen and its physical and chemistry influence factors in the slope break zone in northern South China Sea (in Chinese). *Acta Oceanol Sin*, 2013, 35: 104–110 [杨阳, 马媛, 史华明. 南海北部坡折带溶解氧分布特征及理化环境因子影响. *海洋学报*, 2013, 35: 104–110]
- 26 Bottrell S H, Smart P L, Whitaker F, et al. Geochemistry and isotope systematics of sulphur in the mixing zone of Bahamian blue holes. *Appl Geochem*, 1991, 6: 97–103
- 27 Stoessell R K, Coke J G, Easley D H. Localized thermal anomalies in haloclines of coastal Yucatan sinkholes. *Ground Water*, 2002, 40: 416–424
- 28 Brand A, Bruderer H, Oswald K, et al. Oxygenic primary production below the oxycline and its importance for redox dynamics. *Aquat Sci*, 2016, 78: 727–741
- 29 Wang Y F, Zhang J, Sun P G, et al. The *in-situ* chlorophyll-a fluorometer and turbiditymeter for marine application. *Ocean Technol*, 2007, 26: 29–33 [王岩峰, 张杰, 孙培光, 等. 用于海洋现场监测的小型叶绿素 a 荧光计和浊度计. *海洋技术*, 2007, 26: 29–33]
- 30 YSI Environmental. *In vivo* Measurement of chlorophyll and the YSI 6025 wiped chlorophyll sensor. In: YSI Environmental White Paper, 2006. 1–4
- 31 Downing J. Twenty-five years with OBS sensors: The good, the bad, and the ugly. *Cont Shelf Res*, 2006, 26: 2299–2318
- 32 Ahn Y, Bricaud A, Morel A. Light backscattering efficiency and related properties of some phytoplankters. *Deep-Sea Res Part I-Oceanogr Res Pap*, 1992, 39: 1835–1855
- 33 Stramski D, Kiefer D A. Light scattering by microorganisms in the open ocean. *Prog Oceanogr*, 1991, 28: 343–383

Summary for “南海三沙永乐龙洞关键水体环境要素特征及其影响因素”

Hydrographic features of the Yongle blue hole in the South China Sea and their influential factors

Naishuang Bi^{1,2*}, Liang Fu³, Hongju Chen⁴, Ruizhi Liu⁵, Lin Chen⁶, Qingqing Liu⁵, Kuixuan Lin⁵, Peng Yao⁶ & Zuosheng Yang¹

¹ Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Technique, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

² Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, China;

³ Track Ocean Institute of Coral Reef Conservation, Sansha 573100, China;

⁴ College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

⁵ Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100101, China;

⁶ Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

* Corresponding author, E-mail: binaishuang@ouc.edu.cn

A study of the hydrographic features of the Yongle blue hole (YLBH) in the South China Sea has been conducted using an extensive set of hydrological data collected in October, 2016. Observations include water column measurements of temperature, salinity, density, chlorophyll-a (*Chl*-a), dissolved oxygen (DO), turbidity, grain size of suspended particulate matter (SPM) and tidal currents. The variability of tidal currents indicates that the YLBH has no large-scale connection with the adjacent ocean. Four thermoclines were observed in the YLBH at depths of 3, 10, 50 and 80–110 m. The water column was most stratified at 50 m depth and was homogeneous below 155 m depth. A subsurface *Chl*-a maximum was present at 10–20 m depth, and an additional peak of *Chl*-a coincided with the deepest thermocline at 90 m depth. A high concentration of DO was present at the surface with values up to 7 mg/L, and concentrations decreased sharply at the thermoclines becoming 0 mg/L below approximately 90 m. Turbidity seems to vary with *Chl*-a, namely high values at depths of 10–20 m and approximately 90 m. The SPM in the YLBH had two major components in terms of grain size (5.28–38.55 and 145–500 μm). The volume concentration of the coarser component was 2–3 orders of magnitude higher than the finer component. A θ -S diagram indicates that the water properties below 80 m were distinct from the upper water column. The thermoclines above 80 m exhibit diurnal and seasonal variability, suggesting that the vertical circulation could reach as deep as a permanent thermocline at 80 m depth, that restricts water exchange between the upper water column and water below 80 m. In addition, the supply of DO from the atmosphere was inhibited by the permanent thermocline, which contributes to the formation of anoxic water below approximately 90 m. Concentration of the finer component of SPM dominated the turbidity signal in the YLBH, suggesting that the finer component was mainly composed of sediment, and the coarser component might be dominated by algae and marine snow.

Yongle blue hole in the South China Sea, hydrographic features, vertical distribution, influential factors

doi: 10.1360/N972017-01329