

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2023.174>

Short Survey



# 南海西沙海域甘泉海台发现大型溶洞群

杜文波<sup>1,2</sup>, 杨楚鹏<sup>1,2\*</sup>

1. 广州海洋地质调查局自然资源部海底矿产资源重点实验室, 广东广州 511458  
2. 天然气水合物勘查开发国家工程研究中心, 广东广州 511458

海底溶洞是发育于海平面以下碳酸盐岩台地上的洞穴, 主要是碳酸盐岩的化学溶蚀作用而形成的凹陷和深坑(Yao *et al.*, 2020), 是一种特殊的海底岩溶地貌。目前, 全球已报道发现的海底溶洞群仅有 6 处, 分别位于南亚得里亚海 Gargano 岬陆架(溶洞 11 个)(Taviani *et al.*, 2012)、阿布洛霍斯陆架(溶洞 36 个)(Bastos *et al.*, 2016)、布莱克—巴哈马深海盆(溶洞 29 个)(Cavailles *et al.*, 2022)、加勒比海 Saba 台地(溶洞 21 个)(Humphreys *et al.*, 2022)、佛罗里达海峡(溶洞 12 个)(Land *et al.*, 1999)和日本石垣岛 Nagura 湾(Kan *et al.*, 2015)。由于海底溶洞为半封闭的负地貌空间, 其内部处于偏无氧或弱氧化的环境, 因此通常具有独特的生态系统(Mylroie *et al.*, 2008)。同时海底溶洞沉积物是沉积记录的潜在载体, 可以用于重建历史时期的地震、风暴等地质事件过程。另外, 海底溶洞发育的碳酸盐岩沉积建造是海洋中重要的碳储库之一, 岩溶作用对海洋中碳通量的平衡影响很大。因此对于海底溶洞的研究越来越受到全球学者的重视。

我国南海现今有约 128 个环礁(现代碳酸盐台地), 总面积约为 8 000 km<sup>2</sup>(Wu *et al.*, 2014), 受调查手段和资料的限制, 至今南海未有大型海底溶洞群的报道。广州海洋地质调查局利用新采集的高精度多波束测深数据和水下无人遥控深潜器(ROV)

下潜实地探测资料, 首次在南海北部西沙海域甘泉海台发现由 37 个海底溶洞组成的大型溶洞群, 并对溶洞发育规模、形态特征以及溶洞内部典型地质地貌形态和景观特征进行了分析和描述, 为未来开展进一步的精细探测和成因机制研究打下了良好基础。

## 1 区域地质背景

西沙群岛位于南海北部陆坡之上, 是南海碳酸盐岩台地及生物礁最为发育的四大岛礁群之一, 其出露的岛礁面积最大(Wu *et al.*, 2014)。在自中新世以来, 由于海平面变化和两次区域性的构造沉降作用(白云运动和东沙运动), 西沙古隆起逐渐被海水淹没, 基底之上直接覆盖生物礁相沉积地层, 目前西沙海域出露的岛礁主要位于该区; 西部盆地区处于西沙隆起西斜坡向琼东南盆地延伸部位, 地质历史时期该区具有优良的成礁环境, 广泛发育着新近纪以来形成的碳酸盐岩台地和生物礁。甘泉海台位于西沙隆起的西部, 为一个沉没的孤立碳酸盐岩台地, 其形态中间宽两边窄, 其平面形态似纺锤形, 总体呈北东走向, 长约 48.3 km, 最宽处约 14.7 km, 面积约 424 km<sup>2</sup>(图 1)。该海台顶面平坦, 坡度小于 0.08°, 水深为 559~687 m, 外缘水深约 1 200 m, 海

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(Nos.DD20221712, DD20221719)。

作者简介: 杜文波(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事层序地层学和海洋地质等研究。ORCID: 0000-0002-4221-3261。E-mail: superdwb@outlook.com

\* 通讯作者: 杨楚鹏, E-mail: gmgs\_yang@foxmail.com

引用格式: 杜文波, 杨楚鹏, 2023. 南海西沙海域甘泉海台发现大型溶洞群. 地球科学, 48(10): 3961—3964.

Citation: Du Wenbo, Yang Chupeng, 2023. A Large Submarine Sinkhole Group was Discovered on Ganquan Platform in Xisha Sea Area of South China Sea. *Earth Science*, 48(10): 3961—3964.

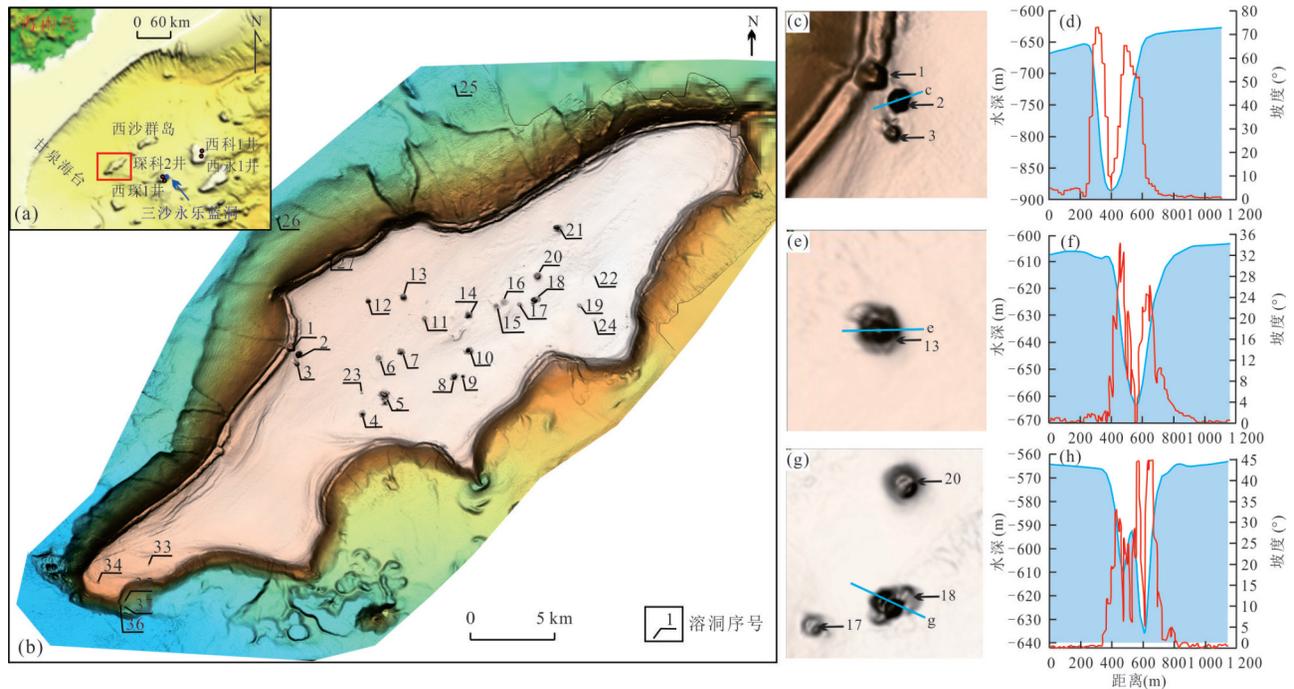


图1 研究区位置(a), 甘泉海台溶洞群分布特征(b); 溶洞地形特征(c, e, g); 溶洞地形剖面(d, f, h)

Fig.1 Location of the study area(a); distribution characteristics of submarine sinkholes on the Ganquan carbonate platform(b); bathymetry maps (c, e, g); bathymetric profiles cross sections of submarine sinkhole (d, f, h)

图 c, e, g 中蓝线为地形剖面位置. c. 2号溶洞地形特征; e. 13号溶洞地形特征; g. 18号溶洞地形特征; d. 2号溶洞地形剖面; f. 13号溶洞地形剖面; h. 18号溶洞地形剖面

台相对高差约 500 m. 2016年7月, 在西沙群岛发现的世界最深的海洋蓝洞——“三沙永乐龙洞”(Yao *et al.*, 2020), 距甘泉海台溶洞群约 80 km. 一般认为海底溶洞和海洋蓝洞在成因上属于类似的地质地貌现象(Land *et al.*, 1999), 而海底溶洞所处水深相对较深, 一般难以被发现.

## 2 海底溶洞发育规模和特征

本次发现的甘泉海台大型溶洞群由 37 个海底溶洞组成, 发育密度达 8~9 个/100 km<sup>2</sup>. 海底溶洞群分布极不均匀, 海台顶面发育数量多达 32 个, 而斜坡阶地处仅发现 5 个(图 1b). 溶洞洞口水深为 550~1 267 m, 洞深 2.5~241 m; 洞口形态多为不规则圆形或者椭圆形, 平均直径 57~667 m, 洞壁地势陡峭, 坡度范围为 6°~45°(表 1). 过溶洞的地形横截面多呈不对称的 V 型、U 型或复合型等多种形态类型(图 1d, 1f, 1h). 通过与全球已报道发现的海底溶洞群进行对比, 甘泉海台溶洞群孤立碳酸岩台地上发育的溶洞数量在世界上是最多的.

## 3 溶洞内部典型地质地貌形态和景观

“海马 2”号 ROV 在最深“2 号”溶洞(洞深 241 m)下潜拍摄的高清视频资料显示, 溶洞壁呈不规则形态, 沿壁岩石外观变化较大, 发育有包括石笋、岩脉、沟槽、溶蚀孔洞等在内的典型岩溶地貌和地质景观(图 2a~2c). 在深海高矿化度环境中形成类似陆地灰岩溶洞内部的岩溶景观较为罕见. Chen *et al.* (2023) 对甘泉海台顶部和斜坡载人下潜抓取的样品分析表明, 岩性均为大型底栖有孔虫、珊瑚藻等胶结的生物灰岩, 其表层覆盖暗灰色氧化锰结壳, 指示了浅水生物礁停滞生长和泛光带下碳酸盐岩台地的淹没. 另外, 高清影像记录了大量“海洋雪”现象(图 2d), 应该是海洋上层硅藻、有孔虫、细菌等生物死后沉降过程中, 颗粒被黏性物质粘在一起形成的大聚合物. 这些聚合物在溶洞底部沉积成厚层灰白色生物碎屑砂(已获取 338 cm 重力柱样品).

此外, 在其内部不同深度可以观测到鱼类和珊瑚等多种海洋生物(图 2e). 尤其是在水深 883 m 的 2 号溶洞洞底发现了冷水珊瑚的生长(图 2f), 预示着

表 1 甘泉海台溶洞群的地形参数

Table 1 Geomorphologic parameters of the sinkholes on the Ganquan platform

编号	洞顶水深(m)	溶洞深度(m)	平均直径(m)	编号	洞顶水深(m)	溶洞深度(m)	平均直径(m)
1	724	54	572	20	571	56	502
2	642	241	449	21	595	81	574
3	647	46	330	22	551	5.5	172
4	591	64	441	23	597	8.5	213
5	593	90	566	24	559	3.8	267
6	598	26	465	25	1 267	15	321
7	597	54	435	26	1 242	12	338
8	586	86	459	27	821	42	264
9	586	45	252	28	776	22	207
10	573	89	501	29	584	3	268
11	599	21	320	30	590	6	214
12	613	78	339	31	593	3	148
13	609	69	468	32	601	3	180
14	580	120	487	33	704	5	144
15	582	25	416	34	794	5	145
16	580	19	519	35	1 101	14	95
17	572	22	333	36	1 089	26	66
18	571	79	550	37	1 143	16	76
19	561	14	293				

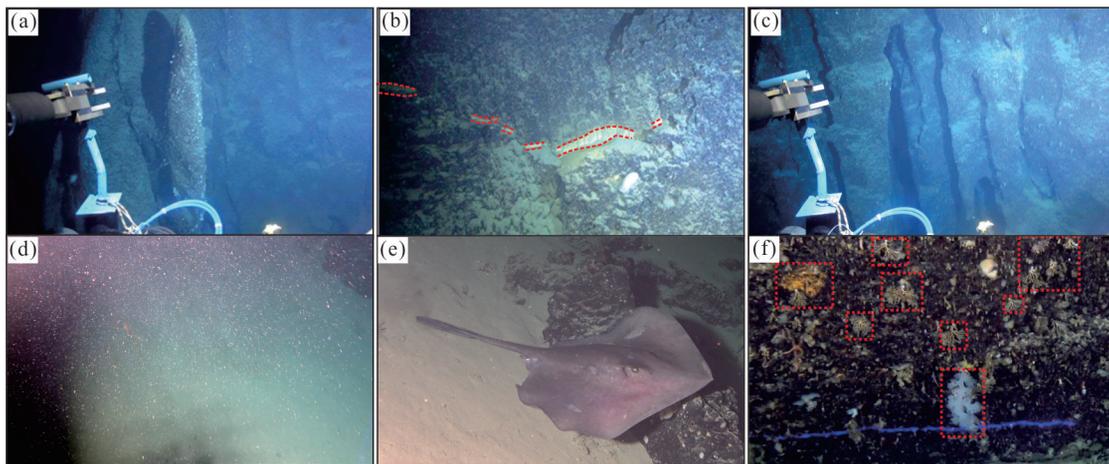


图 2 “2号”溶洞洞内景观图

Fig. 2 Images of the inner part of the sinkhole No. 2

a. 石笋; b. 洞壁岩脉; c. 洞壁溶蚀沟槽; d. 海洋雪; e. 鳐鱼; f. 冷水珊瑚

溶洞内部具有一定的生物生存适宜度的生态系统,以及下沉式生物泵系统.根据“2号”溶洞水体溶解氧剖面(图 3)可知,溶解氧含量随深度增加而降低,在近洞底深 850 m 处溶解氧含量依然达到 2.8 mg/L,说明“2号”溶洞此时处于弱氧环境,海洋生物的存在也证实了弱氧环境,而三沙永乐龙洞在洞深约 80 m 左右溶解氧迅速降低,到 100 m 水深处溶解氧含量趋近于 0.但目前溶洞内生物群落结构和种类

等信息尚不清楚,是否含有稀有海洋生物物种有待进一步调查研究.三沙永乐龙洞的研究表明,其内有机碳含量明显低于开阔海洋,但发现了大量参与硫元素循环的特殊细菌类群,指示洞内硫循环过程非常活跃(Yao *et al.*, 2020).甘泉海台溶洞是否具有以上类似的生物地球化学特征,值得进一步调查研究证实.

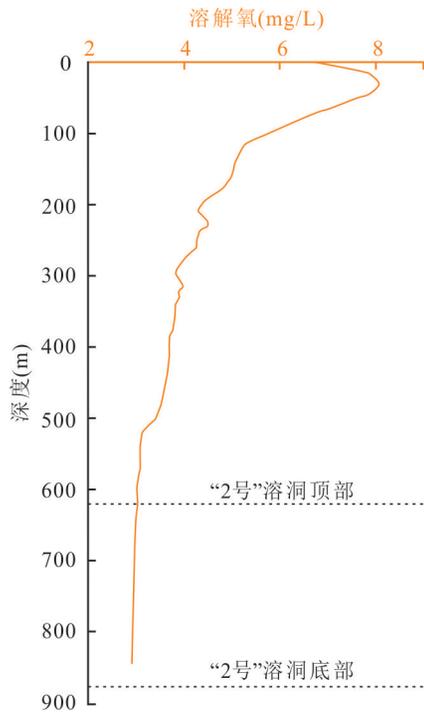


图3 “2号”溶洞水体溶解氧剖面

Fig. 3 Dissolved oxygen profile in the sinkhole No. 2

#### 4 未来工作展望

目前,对甘泉海台溶洞群的调查资料较少,限制了甘泉海台溶洞群的深入研究.下一步广州海洋地质调查局将组织开展包括高精度地形测绘、地质、水文、化学、生物、物理海洋等多学科、多手段的综合科考,查清溶洞内部与外部海水环境要素的差异以及海洋微生物在溶洞内从有氧到弱氧环境转变中的碳循环过程.揭示甘泉海台海底溶洞群的成因机制,为南海乃至全球海底溶洞的研究提供重要的研究范例,以期为海洋特殊环境和生态系统的地球化学循环以及全球气候变化等研究提出新的研究视角.

#### 参考文献

Bastos, A. C., Amado-Filho, G. M., Moura, R. L., et al., 2016. Origin and Sedimentary Evolution of Sinkholes (*buracas*) in the Abrolhos Continental Shelf, Brazil. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 462: 101–111. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2016.09.009>

- Cavailles, T., Gillet, H., Guiastrenec-Faugas, L., et al., 2022. The Abyssal Giant Sinkholes of the Blake Bahama Escarpment: Evidence of Focused Deep-Ocean Carbonate Dissolution. *Geomorphology*, 398: 108058. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.108058>
- Chen, W. L., Wu, S. G., Wang, D. W., et al., 2023. Stratigraphic Evolution and Drowning Steps of a Submerged Isolated Carbonate Platform in the Northern South China Sea. *Frontiers in Marine Science*, 10: 1200788. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1200788>
- Humphreys, M. P., Meesters, E. H., de Haas, H., et al., 2022. Dissolution of a Submarine Carbonate Platform by a Submerged Lake of Acidic Seawater. *Biogeosciences*, 19(2): 347–358. <https://doi.org/10.5194/bg-19-347-2022>
- Kan, H., Urata, K., Nagao, M., et al., 2015. Submerged Karst Landforms Observed by Multibeam Bathymetric Survey in Nagura Bay, Ishigaki Island, Southwestern Japan. *Geomorphology*, 229: 112–124. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.07.032>
- Land, L. A., Paull, C. K., Spiess, F. N., 1999. Abyssal Erosion and Scarp Retreat: Deep Tow Observations of the Blake Escarpment and Blake Spur. *Marine Geology*, 160(1/2): 63–83. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(99\)00012-2](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(99)00012-2)
- Mylroie, J. E., 2008. Late Quaternary Sea-Level Position: Evidence from Bahamian Carbonate Deposition and Dissolution Cycles. *Quaternary International*, 183(1): 61–75. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2007.06.030>
- Taviani, M., Angeletti, L., Campiani, E., et al., 2012. Drowned Karst Landscape Offshore the Apulian Margin (Southern Adriatic Sea, Italy). *Journal of Cave and Karst Studies*, 74(2): 197–212. <https://doi.org/10.4311/2011jcks0204>
- Wu, S. G., Yang, Z., Wang, D. W., et al., 2014. Architecture, Development and Geological Control of the Xisha Carbonate Platforms, Northwestern South China Sea. *Marine Geology*, 350: 71–83. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2013.12.016>
- Yao, P., Wang, X. C., Bianchi, T. S., et al., 2020. Carbon Cycling in the World's Deepest Blue Hole. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 125(2): 1–19. <https://doi.org/10.1029/2019jg005307>

(责任编辑:孙 军)