

西沙石岛岩溶: 三大顶级生态景观之殇与修复保护*

许 红^{1,2,3} 李 琦⁴ 马文旭⁵ 董树义⁶ 陈 刚⁷ 吴朝东⁸
张威威^{2,9} 马鹏飞^{2,10} 马亚增^{2,10} 王 勤^{1,3} 纳 琴^{2,9} 陶 萌^{2,9}
王 英^{2,6} 王宇泽⁹ 沈江远^{1,3} 马 骁^{2,11} 梅军鹏¹² 苏大鹏³

1 长江大学地球科学学院, 湖北武汉 430100

2 自然资源部第一海洋研究所, 山东青岛 266061

3 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 山东青岛 266071

4 中国地质大学(北京)海洋学院, 北京 100083

5 建筑材料工业技术监督研究中心, 北京 100024

6 成都理工大学地球与行星科学学院, 四川成都 610059

7 中国地质大学(武汉)海洋学院, 湖北武汉 430074

8 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

9 中国石油大学(华东)地球科学学院, 山东青岛 266580

10 山东科技大学地质科学与工程学院, 山东青岛 266590

11 中国石化集团上海海洋油气分公司勘探开发研究院, 上海 200120

12 武汉科技大学城市建设学院, 湖北武汉 430065

摘 要 石岛是南海海拔最高的海岛, 也是南海现代海洋海岛弱固结高位海滩岩型岩溶重灾区, 同时也是生态环境保护和修复工程技术的难点地区。文中报道了逾十年实地调查的发现, 指出老龙头、根管石和楔形前积层理大剖面是西沙群岛三大顶级生态景观和珍贵地质遗迹资源。老龙头是全球唯一自然成因龙形石, 也是西沙军民的龙图腾。但是, 浪蚀、涛蚀、风蚀、高温、高湿、高盐和淡水淋滤溶蚀 7 种自然力与人类活动导致岩溶毁灭性快速演进, 令人触目惊心! 虽为不可抗拒之自然进程, 却是顶级生态景观之殇。简要阐述了 7 种岩溶自然力特征, 利用铁铝酸盐水泥基材料及其低碱度 (pH 值为 10~11)、抗海水腐蚀、强度越高 (抗蚀系数 > 1) 等性能特征, 加上独特工程工艺技术实施修复, 或可实现老龙头外部增韧、岩体内部原位增强, 达到永续传承的修复目标。

关键词 西沙群岛 石岛 老龙头 根管石 楔形前积层理大剖面 顶级生态景观 碳酸盐岩岩溶 铁铝酸盐水泥基纳米材料

第一作者简介 许红, 1957 年生, 研究员, 博士, 专职从事海洋地质、油气地质和生物礁成因研究。
E-mail: qdxhong@163.com。

谨以此文纪念冯增昭先生 100 周年诞辰。

* 国家自然科学基金项目 (编号: 41872114), 国家重点研发计划项目课题 (编号: 2017FY201407), 国家油气重大专项子课题 (编号: 2011ZX05025-002-04), 国家重点基础研究发展计划项目子课题 (编号: 2012CB956004) 和三沙市政府项目“石岛老龙头修复保护实施方案”联合资助。[Co-funded by the National Natural Science Foundation of China (No. 41872114), the Key Research and Development Program of China (No. 2017FY201407), the Sub-Project of the National Major Project for Oil and Gas (No. 2011ZX05025-002-04), the Sub-Project of the National Key Basic Research Program of China (No. 2012CB956004), and the “Shidao Laolongtou Restoration and Protection Implementation Plan” Project of Sansha Municipal Government]

收稿日期: 2026-02-03 改回日期: 2026-03-09

通讯作者简介 苏大鹏, 1977 年生, 副研究员, 专职从事海洋地质、海洋油气和生物礁—碳酸盐岩成因研究。E-mail: wlmz_008@sina.com。梅军鹏, 1986 年生, 博士, 副教授, 专职从事材料科学、土木工程材料研究。E-mail: meijunpeng2006@126.com。

中图分类号: P736.2; X171.4 文献标志码: A

Xisha Shidao karst: the woes and restoration protection of three top ecological landscapes

XU Hong^{1,2,3} LI Qi⁴ MA Wenxu⁵ DONG Shuyi⁶ CHEN Gang⁷ WU Chaodong⁸
ZHANG Weiwei^{2,9} MA Pengfei^{2,10} MA Yazeng^{2,10} WANG Qin^{1,3} NA Qin^{2,9} TAO Meng^{2,9}
WANG Ying^{2,6} WANG Yuze⁹ SHEN Jiangyuan^{1,3} MA Xiao^{2,11} MEI Junpeng¹² SU Dapeng³

1 School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China

2 First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Shandong Qingdao 266061, China

3 Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Shandong Qingdao 266071, China

4 School of Ocean Sciences, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

5 Research Center for Quality Supervision and Inspection of Building Materials Industry, Beijing 100024, China

6 College of Earth and Planet Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

7 College of Marine Science and Technology, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

8 School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

9 School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Shandong Qingdao 266580, China

10 School of Geosciences and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Shandong Qingdao 266590, China

11 Exploration and Development Research Institute, Sinopec Shanghai Oil & Gas Branch, Shanghai 200120, China

12 School of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China

Abstract Shidao is the highest-altitude island in the South China Sea and a severely karst-affected area with weakly consolidated high beachrocks. It is also a challenging region for ecological protection and restoration engineering. This paper reports the findings of over a decade of field investigations, highlighting the Old Dragon Head (Laolongtou), Root Pipe Stone, and Wedge-shaped Prograding Stratification as the three top ecological landscapes and precious geological heritage resources in the Xisha Islands. The Laolongtou is the only naturally formed dragon-shaped stone in the world and a symbol of the military and civilian population's dragon totem in the Xisha Islands. However, the rapid and destructive evolution of karstification caused by seven natural forces, including wave erosion, tidal erosion, wind erosion, high temperature, high humidity, high salinity, and freshwater leaching, as well as human activities, is alarming. Although this is an inevitable natural process, it is a tragedy for the top ecological landscapes. This paper briefly describes the characteristics of the seven natural forces of karstification and proposes the use of iron-aluminate cement-based materials with low alkalinity (pH value is 10 ~ 11), resistance to seawater corrosion, and increasing strength upon immersion (corrosion resistance coefficient > 1), along with unique engineering techniques, to achieve the goal of external toughening and in-situ strengthening of the rock mass, ensuring the sustainable inheritance of the Laolongtou.

Key words Xisha Islands, Shidao, Laolongtou, Root Canal Stone, wedge-shaped pre-sedimentary layering large section, top ecological landscapes, carbonate rock karst, iron-aluminum silicate cement-based nano-materials

About the first author XU Hong, born in 1957, is a Ph. D. and research fellow. He specializes in

marine geology, petroleum geology, and genetic studies of reef systems. E-mail: qdxhong@163.com.

About the corresponding authors SU Dapeng, born in 1977, is a Ph. D. and associate research fellow. He specializes in marine geology, offshore oil and gas exploration, and genetic studies of reef-carbonate systems. E-mail: wlmz_008@sina.com. MEI Junpeng, born in 1986, is a Ph. D. and associate professor. He specializes in materials science and civil engineering materials. E-mail: meijunpeng2006@126.com.

1 石岛三大顶级生态景观-珍贵地质遗迹资源

石岛（别名“蚱蜢屿”，海南渔民还称“小猫注”）位于西沙群岛（图 1-A）宣德环礁中永兴岛东北端（图 1-B），是南海四大群岛中海拔最高的岛屿，也是唯一一座由大量粒度中等、弱胶结生物灰沙沉积物弱固结形成的第四纪碳酸盐岩小岛。石岛南北长约 400 m，东西宽约 250 m，面积 0.08 km²，海拔一般 11~14 m，最高处 15.9 m，因遍布高位海滩岩，故称石岛。石岛地貌四周陡、中间高，呈台地形；东、西、北三翼陡峭，南部相对平缓，建有人工海堤和永兴岛相连并融为一体（图 1-C，1-D）。石岛沉积物全部位于礁盘上，珊瑚沙是它的最基础沉积物，整体发育形成老龙头（图 1-E；图 2）、根管石和楔形前积层理大剖面（图 3；图 4），被誉为石岛的地理标志与网红打卡地、三大顶级生态景观和珍贵地质遗迹资源。

作为全球唯一自然成因龙形石，因酷似龙头，被军民称为老龙头。石岛老龙头是无价的中华民族瑰宝。文中披露了逾 15 年跟踪观察拍摄到的大量珍贵照片和最新的北斗卫星照片，指出老龙头正在遭受毁灭性岩溶！简介了国内外岩溶学理论研究现状、修复理论和工程现状。指出海洋海岛岩溶与桂林山水、云南石林岩溶特征和机理完全不同；也与台湾省新北野柳公园女王头不同。近 5 年来石岛老龙头已被海水分割穿插，形成为多个孤立岩体，很可能一场热带风暴即导致它突然规模垮塌，最终远离我们而去已是大概率事件！目前石岛岩溶遍及全岛，深入其内脏与骨髓，已接近毁灭性岩溶！文章简述了石岛老龙头修复的难度和意义，是生态修复和顶级生态景观与珍贵地质遗迹资源、汉民族龙图腾永续传承原貌修复。

老龙头（图 2）长约 166 m，后部最宽 27 m，头部最宽 17 m，最窄 10 m；头部到“石岛老龙头”

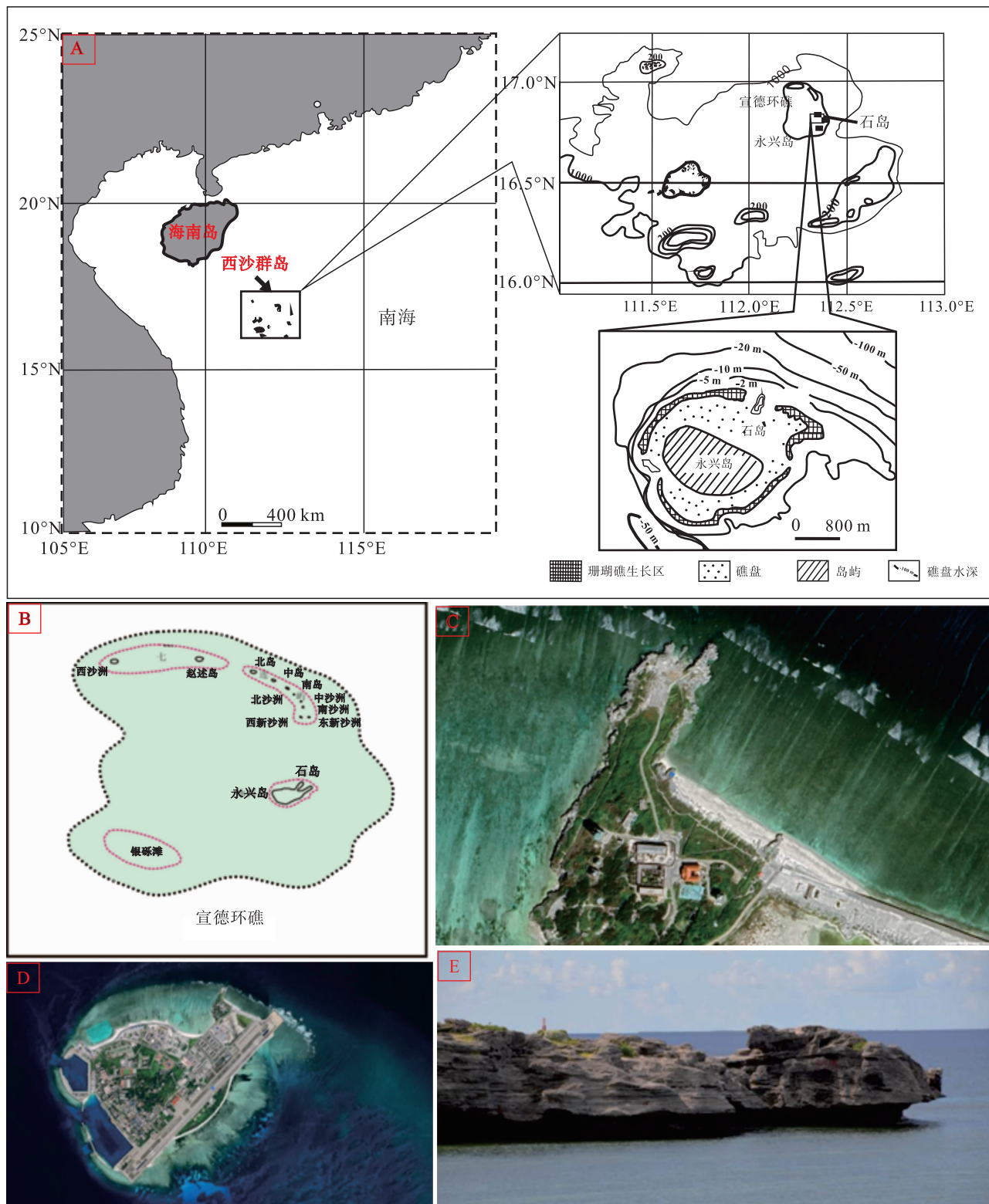
石碑处约 50 m；高 9~13 m。老龙头左右翼各发育向北伸出小龙头，其中，左翼小龙头长 21 m，宽 11 m；右翼小龙头与老龙头后缘之间形成长达 148 m 小沙滩，两侧 2 座高位海滩岩，左右翼分别称天涯海角；海角即右翼小龙头长 42 m，其后部 62 m 发育根管石。

石岛根管石（图 3）很可能形成于草海桐（一种热带海岛上的密集灌木丛），构成植物化石岩；高 3.2 m，宽约 6 m，长约 6 m。目前底部已经被淡水淋滤溶蚀。掏空后剩下几根枝状化石支撑。

石岛楔形前积层理大剖面（图 4）位于石岛西翼后部，由 11 个典型楔形前积层理组成，包括高角度楔状体、单斜层理、凸镜体状层理、板状斜层理、块状斜层理等。其中，高角度楔状前积板状层理厚逾 2 m，内部发育低角度楔形层理及小型交错层理，单层厚度数厘米至 1~2 m 不等；楔形前积层理大剖面整体倾向东南，倾角 25°~35°，长逾 50 m，高约 5 m。粒度分析表明其为弱固结胶结海滩砂，砂粒重量多集中于 0.002~0.003 g，部分小于 0.001 g，大于 0.01 g 的颗粒较少，总体属中砂，平均粒径 1.56~2.07 Φ ，分选中等（分选系数 ≤ 0.5 ， >0.9 ）。

石岛三大顶级生态景观尤其是老龙头媲美中国三山五岳乃至世界各国国家公园自然生态景观，是代表性海洋海岛顶级生态景观。作为全球唯一自然天成龙形石，以自然、海洋海岛、生态和龙文化多重价值更具特色，既是唯一栩栩如生、自然天成的珍贵地质遗迹资源，优质生态—旅游资产，更代表汉民族龙文化的海洋“金山银山”，所以老龙头无价。根管石是石岛古植被郁郁葱葱的证据，成因于古海洋埋藏事件，是草海桐化石岩。楔形前积层理大剖面则是位于西太平洋双向季风区风成成因的证据，蕴含南海西北盛行风区第一海拔高岛石岛成因的沉积学证据。

但是，石岛三大顶级生态景观正遭受高温、高



A—西沙群岛；B—西沙宣德环礁；C—永兴岛与石岛；D—石岛上的老龙头；E—老龙头东侧远眺

图 1 西沙宣德环礁石岛—老龙头分布位置图

Fig. 1 Distribution location of Shidao-Laolongtou Island in Xisha Islands' Xuande Atoll

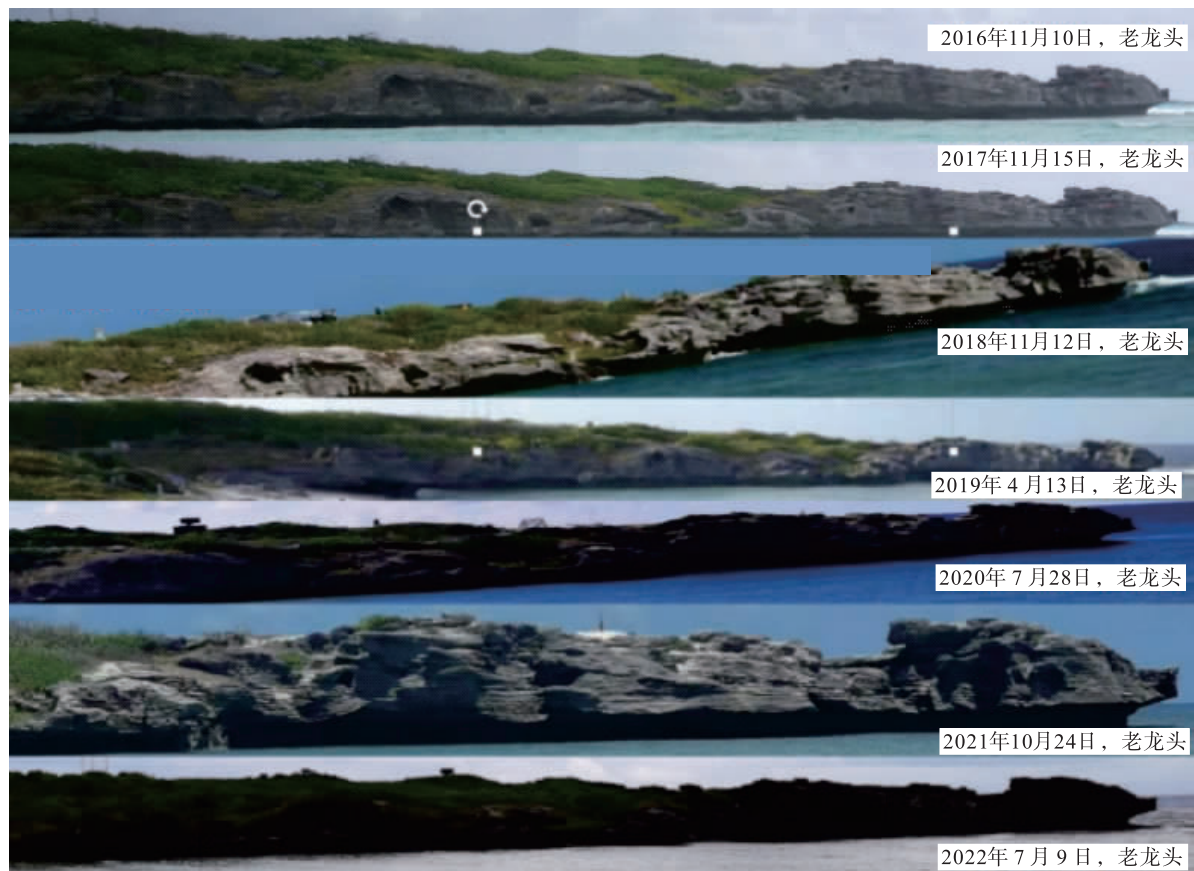
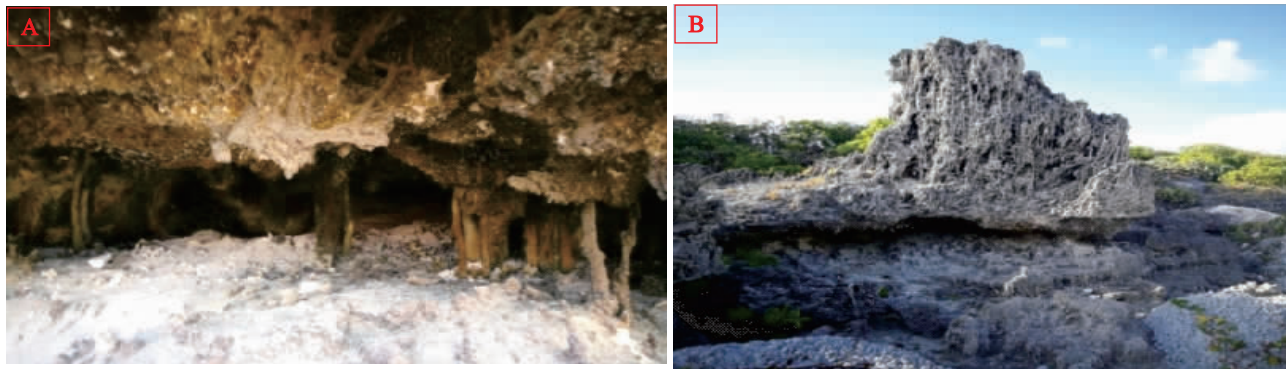


图 2 西沙老龙头的连续 7 个科考航次拍摄影像

Fig. 2 Images captured during seven consecutive scientific expeditions of Laolongtou, Xisha Islands



A—摄于 2017 年；B—摄于 2018 年

图 3 西沙石岛根管石

Fig. 3 Root Canal Stone from Shidao in Xisha Islands

湿、高盐、浪蚀、涛蚀、风蚀、淡水淋滤溶蚀 7 种自然力的摧残。其中，高温通过加速化学反应速率，提高矿物溶解度，增强水体流动性与扩散能力及影响水的化学性质，直接促进溶蚀进程；高湿通过维持岩石表面水膜、促进离子交换及物质迁移，并协同其他侵蚀因子，显著强化了碳酸盐岩的溶蚀

过程；高盐环境通过加速物理风化与化学溶蚀及它们的协同作用，进一步加剧岩石破坏；浪蚀作为关键水文动力，以物理冲击力剥蚀岩体、暴露新鲜表面，并增强水岩界面流体交换，从而大幅提升化学溶蚀效率；涛蚀主要通过持续的机械冲击、爬地作用与化学风化协同作用加速礁盘岩石的破坏；风蚀

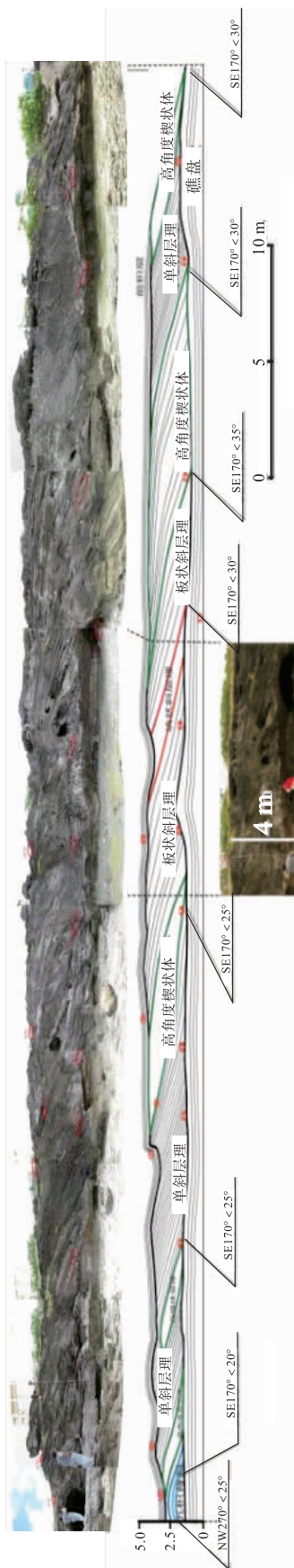


图 4 西沙石岛楔形前积层理大剖面 and 11 个楔形前积层理
Fig. 4 Large cross-section of the wedge-shaped pre-sedimentary layering and 11 wedge-shaped pre-sedimentary layers in Shidao, Xisha Islands

则通过清除溶蚀产物，暴露新鲜岩面，增加盐分结晶与物理剥蚀，改变微地形，扩大溶蚀反应面积，间接促进溶蚀过程；淡水淋滤不仅是物理搬运载体，更通过 CO_2 酸化、离子交换、盐效应等多重机制驱动碳酸盐岩溶解。这 7 种自然力协同作用，再加上参观人流踩踏导致的严重地表沙化，石岛现状堪忧。

2 顶级生态景观岩溶现状

2009 年开始连续至今的调查发现石岛岩溶非常严重。2016 年，环老龙头高潮线下凹蚀坑实测发现两侧近似对穿、各深逾 11 m 溶蚀洞(图 5-A 至 5-D)，老龙头高潮线环形岩溶高逾 2 m，进深逾 2 m。2022 年浮潜拍摄老龙头头部礁盘上 8 个水下冲蚀坑(图 5-E 至 5-H)。

老龙头头部多处巨大岩体垮塌(图 6-A) 或移位(图 6-B)；在“祖国万岁”崖壁、天涯岩体上部均发现垂直裂缝，这些裂缝是正在孕育之中的垮塌(图 7-A)。2020 年，确认“天涯”遭受毁灭性岩溶形成海蚀龛和海蚀柱，最薄仅 17 cm。在根管石，内部底部溶蚀悬空(图 3)。2022 年浮潜，首次拍摄获得老龙头正面照，呈倒三角锥状(图 7-B)。2022 年，以“石岛顶级生态景观之殇”向全球同行口头报告了老龙头岩溶现状(Xu, 2022)。

在老龙头头部，2018 年发现垂直迎风面岩体上形成密密麻麻分布的风蚀洞(图 7-D, 7-E)；地表形成冲蚀沟(图 7-C)；在“祖国万岁”崖壁，岩溶导致崖壁背后 1~2 m 冲蚀坑，崖壁本身仅半人高，厚度仅 20 cm(图 7-F)。加上登岛人流的过度踩踏，导致石岛地标：老龙头石碑前的地面全部严重沙化(图 8-A, 8-B)，左翼地表依稀可见的小洞，透过它，发现了地下已经形成一个巨大的高数米涛蚀洞。

老龙头“龙眼”：是洞顶地表垮塌，底部与海联通形成的巨大涛蚀洞(图 8-C, 8-D)。石岛全岛发育高位海滩岩，最具代表性即老龙头等三大顶级生态景观。在老龙头后缘，发育高角度海滩岩和低角度海滩岩(图 9)；包括：横向连续性良好的低角度风成岩(图 9-A)，内部可见植物丘发育的低角度海滩岩(图 9-B)，低角度海滩岩层状溶蚀(图 9-C)；穹状前积层(图 9-D)；前积交错层、



A—老龙头几近对穿溶蚀洞右岸 (2016); B—老龙头几近对穿溶蚀洞左岸 (2016); C—作者和学生实测老龙头凹蚀悬臂岩右岸 (2016); D—作者和学生实测老龙头凹蚀悬臂岩左岸 (2016); E—老龙头头部礁盘冲蚀坑 1 号话筒型冲蚀坑, 深逾 5 m; F—“祖国万岁”下 2 号冲蚀坑, 深 3~5 m; G—老龙头左翼礁盘 3-4 号冲蚀坑; H—龙头左翼 5-8 号冲蚀坑呈联通之势 (2016)

图 5 西沙石岛老龙头溶蚀洞以及冲蚀坑特征

Fig. 5 Characteristics of Laolongtou penetrating karst caves and erosion pits in Shidao, Xisha Islands

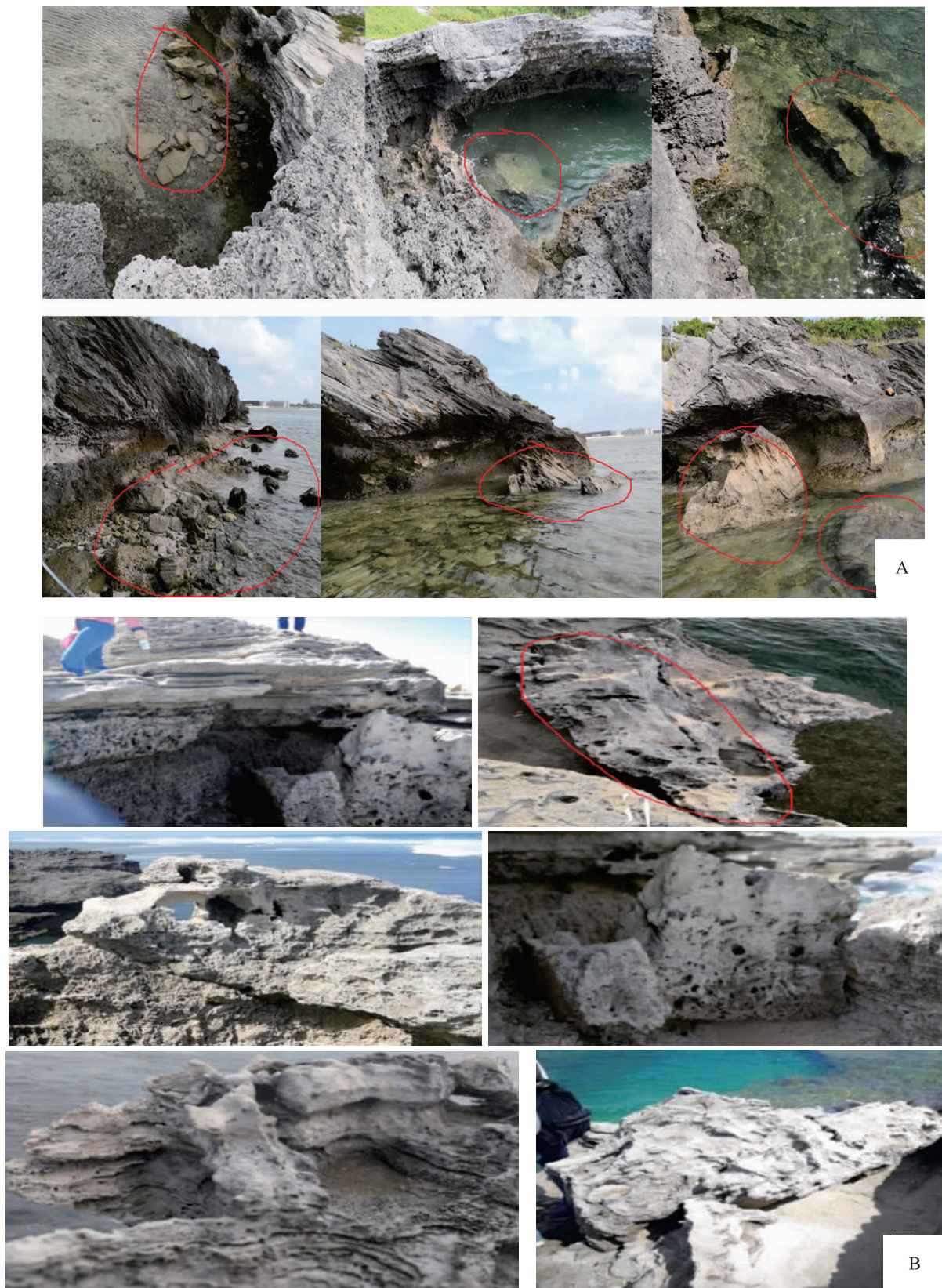
古土壤层和根管石化层(图 9-E, 9-F, 9-G)。不难发现, 这些海滩岩底部全部被涛(掏)蚀, 形成高潮线下涛蚀洞, 进深逾 2 m; 它们多数形成穹窿型巨大涛蚀洞, 从小到大不断扩展, 直至上连形成龙洞乃至在横向上互连互通, 最后洞顶大规模垮塌, 形成高位海滩岩灭顶之灾, 这就是石岛每天都在发生快速演进岩溶的残酷现实。

3 问题讨论

3.1 中国碳酸盐岩喀斯特与石岛高位海滩岩岩溶

石岛岩溶即喀斯特, 但是与传统喀斯特不一样。

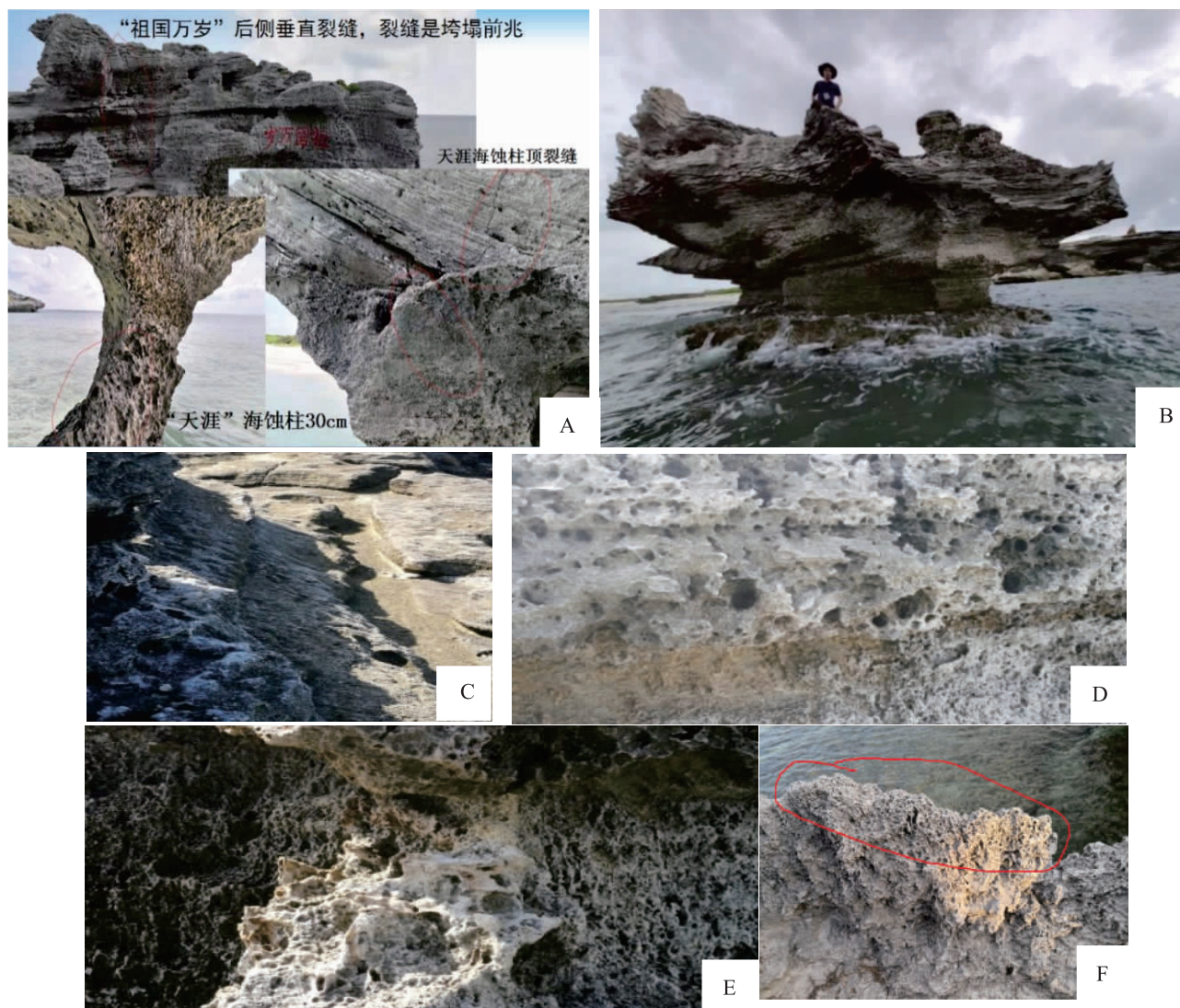
以袁道先院士(蒋忠诚和袁道先, 1999; 章程



A—老龙头周缘最新垮塌的岩体（2019.7）；B—老龙头头部地表巨大岩体多处垮塌、移位（2018，2019）

图 6 西沙石岛老龙头垮塌、移位现状

Fig. 6 Current state of collapse and displacement of the Laolongtou in Shidao, Xisha Islands



A—发现于老龙头“祖国万岁”、“天涯”海蚀柱等多处的垂直裂缝；B—老龙头正面照，呈倒三角锥状，中间支撑岩体不断减小；
C—老龙头地表岩溶冲蚀沟；D、E—垂直面风蚀洞；F—“祖国万岁”岩溶仅厚 20 cm（2019）

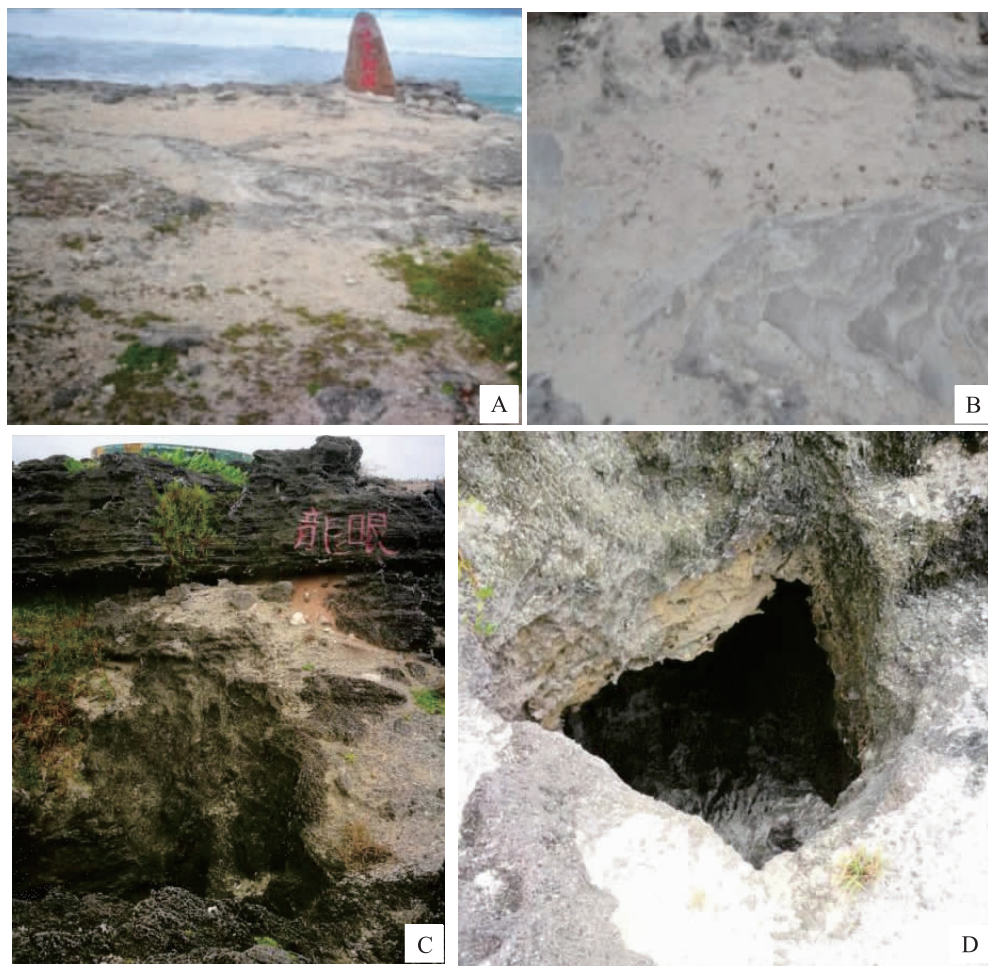
图 7 西沙石岛典型景观现状

Fig. 7 Typical landscape statu in Shidao, Xisha Islands

和袁道先, 2004; 郭芳等, 2008; 袁道先等, 2014; 郭小娇等, 2019; 陈朝军等, 2021; 胡雨晴等, 2021; 马源等, 2022) 为首系统研究中国西南地区喀斯特及其石漠化问题, 提出了石漠化的成因机制及其对生态环境的影响; 特别是有关岩溶关键带与碳—水耦合过程的研究, 系统阐述了岩溶关键带的碳—水耦合过程, 提出了岩溶碳汇的动态模型, 并指出气候变化和人类活动对岩溶碳汇的潜在影响, 揭示了岩溶区碳循环的全球意义; 进一步量化了岩溶区在全球碳循环中的贡献, 为岩溶生态修复提供了理论基础。前人研究不但揭示了岩溶碳循

环的机制: 包括碳酸盐岩溶解、碳迁移与转化过程; 而且针对岩溶碳汇潜力, 评估岩溶区碳汇能力及对全球碳循环的贡献 (黄芬等, 2014); 还探讨了岩溶碳循环与气候变化的关系, 岩溶碳循环对气候变化的响应及在减缓全球变暖中的作用; 岩溶于人类活动的影响: 分析土地利用变化、污染等对岩溶碳循环的干扰。通过总结现代岩溶学研究的进展, 提出了岩溶系统的定义及其环境效应, 岩溶动力学过程及其与全球变化的联系。

卢耀如院士等 (卢耀如, 2001; 张凤娥和卢耀如, 2001; 卢耀如等, 2006, 2009) 探讨了岩溶



A, B—老龙头石碑地表的沙化；C—龙眼正面照；D—龙眼鸟瞰图（2017）

图 8 西沙石岛老龙头地表沙化与龙眼现状

Fig. 8 Desertification on surface of the Laolongtou and statu of Longyan, Xisha Islands

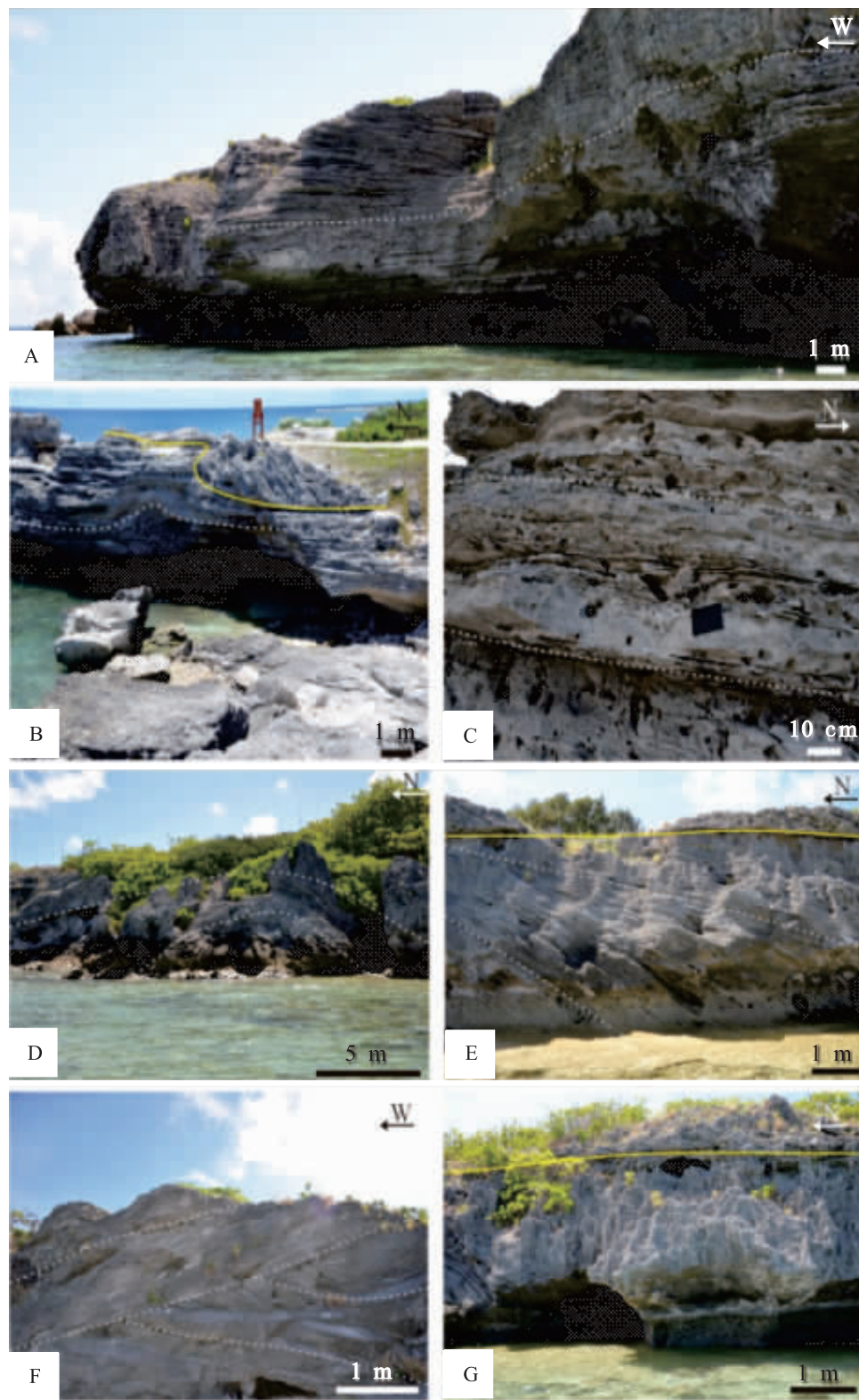
水文地质学的基本理论及其应用，提出了岩溶水文系统的定义和分类，分析了岩溶水资源的形成与分布规律；阐明了岩溶水资源的形成机制及其分布规律和评价方法。

国际上，Palmer（1991）系统总结了石灰岩洞穴的形成机制，提供了岩溶地貌经典理论。Williams（2008）系统阐述了表层岩溶带（epikarst）在岩溶水文地质中的作用。Ford（2006）总结了北美岩溶地貌、洞穴及其沉积物研究成果。Ford 和 Williams（2015）总结岩溶地貌与水文地质理论框架耦合关系，提出岩溶发育溶蚀动力学模型。

中国外岩溶研究还集中于碳酸盐再沉淀，堵塞岩溶管道，减少水—岩接触面积，削弱岩溶碳汇的潜力（Jiang *et al.*, 2013；Zhang *et al.*, 2022；Chen *et al.*, 2023）；也包括地下水超采和气候干旱导致

岩溶含水层由“管道流主导”向“裂隙流主导”的退化，降低了地下水循环效率等研究（John, 2008；Rajabi *et al.*, 2026）；还针对隧道施工排水等人类活动可诱发地下水系统的逆向退化，如圆梁山隧道突水事件揭示了深部岩溶管道与地表水系的连通性的研究（Limin, 2008）；揭示地球表层系统中物质能量循环的复杂机制，特别是碳—水耦合过程及其对全球气候变化响应的研究（Zuo and Hou, 2011；Li *et al.*, 2024）；岩溶研究与地质学、生态学、气候学与大数据深度融合也是发展新趋势（黄芬等，2014；Goldscheider *et al.*, 2020；Zhao *et al.*, 2020）。生态修复与石漠化治理，包括针对中国西南岩溶区石漠化治理的研究（Zhong *et al.*, 2014）。这些都将为石岛修复提供借鉴。

石岛三大顶级生态景观岩溶是海洋海岛高位



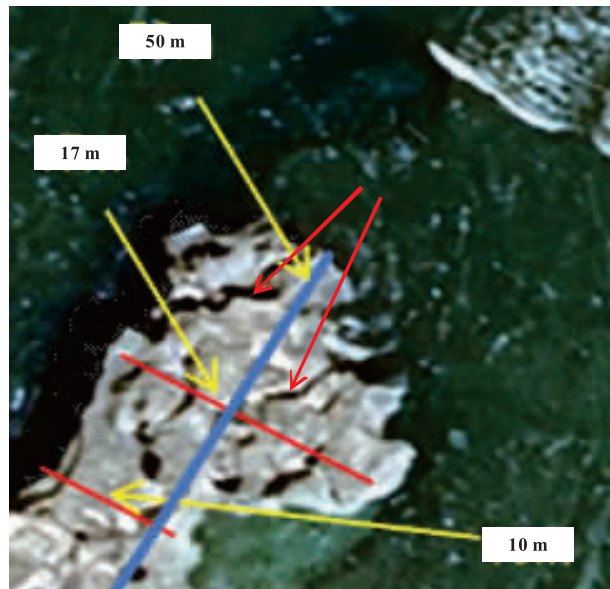
A—横向连续性良好低角度风成岩；B—垂直剖面 10 处的低角度风成岩，内部可见植物丘发育；C—风成岩内部发育的层状溶蚀；D—垂直剖面 7 处的穹型前积层；E—垂直剖面 2 处不整合面附近发生的倾角变化；F—垂直剖面 1 附近的高角度交错层理；G—垂直剖面 6 处发育不整合面，古土壤与根管石

图 9 西沙石岛低角度—高角度高位海滩岩特征

Fig. 9 Characteristics of low-angle and high-angle high-position beachrocks in Shidao, Xisha Islands

海滩岩岩溶。这种岩溶，与袁道先院士、卢耀如院士等领域内权威学者定义的岩溶现象，如溶蚀、侵蚀、溶洞、崩塌等过程及结果导致的岩溶概念相同，但与岩溶地貌的特征包括地下河、天坑、石林等众所周知的岩溶产物不同：石岛岩溶是弹丸海岛岩溶，是南海海岛环境晚第四纪弱固结碳酸盐岩岩溶，是三大顶级生态景观岩溶和珍贵地质遗迹资源之殇（Xu，2022）的毁灭性岩溶。

关键在于，石岛岩溶已经遍及全岛，深入全部高位海滩岩的内脏与骨髓，是无所不在的毁灭性岩溶。岩溶对于石岛已经是不可承受之重！2025 年 12 月 26 日，获得了 800 m² 老龙头头部最新岩溶卫星照片鸟瞰图（图 10）。



注：数字表示老龙头头部被海水分割形成区域长度，红色箭头为海水分割老龙头水道

图 10 西沙石岛老龙头卫星照片鸟瞰

Fig. 10 Aerial view of satellite photo of the Laolongtou of Shidao, Xisha Islands

从图 10 可以发现，老龙头岩溶已经到了最危急时刻：头部区域 3 年前（图 7-B）还是一个整体，如今已被海水穿插切割侵入岩体内部，即老龙头已被海水分割，形成现在多个相互孤立的岩体，老龙头头部快速演进的岩溶程度令人触目惊心！这种趋势不会停止，而且大概率只会越来越严重。如果不尽快启动人工干预保护措施，老龙头远离我们而去已是大概率事件！

3.2 岩溶修复与石岛老龙头岩溶修复现状

2018 年，新闻联播播报生态修复保护 13 年海峡对岸工程—台湾新北市野柳公园女王头修复的窘境，这是有资料可查海洋环境顶级生态景观已经实施修复的唯一工程。从 2014 年照片和 2018 年照片对比来看（图 11），海峡对岸同行在 2005 年利用了欧洲纳米材料和喷涂技术，对女王头的修复并不算成功，女王头未来几年或很可能断颈。这是海洋海岸顶级生态景观修复首例，却遗憾地成为失败的前车之鉴。

女王头从 2005 年开始修复到 2018 年承认修复失败的根本原因，核心在于表面喷涂防护修复的固有局限：治标不治本，仅仅形成一层疏水薄膜，未能解决岩石内部胶结物流失、结构松散的本质问题。界面相容性差：有机涂层与钙质砂岩岩体的热膨胀、弹性模量差异大，在冷热、干湿循环下必然产生界面剥离。冻融破坏加剧：表面防水层阻碍了内部水分向外蒸发，导致岩石内部水分在低温下冻胀，加速了结构从内部被撑裂的过程。

与之对比，石岛老龙头修复工程要比女王头修复难度大很多。老龙头一部分淹没于水下，还有一部分位于高低潮线以上，且面积巨大，达数千平方米，其为生物砂形成的海洋海岛弱固结灰岩。女王头则位于高潮线以上，属于钙质泥岩，面积小很多。当然，二者都属于人为干预海洋自然过程工程，显然石岛老龙头修复更难，影响和意义更大：既是生态修复、稳固顶级生态景观岩溶地貌现状和原貌的修复，也是汉民族龙图腾和民心修复。

最新的现实情况，是全球唯一自然形成的龙形石正在我们眼前一步一步快速岩溶乃至会垮塌消失！作为中国有幸登陆西沙群岛不到 10 万公民，且不到 3 万公民登陆石岛老龙头的幸运儿，作者吁请全国支持石岛老龙头三大顶级生态景观修复，作为龙的传人，一定在它们彻底垮塌之前实施修复，或有可能保持原貌永续传承！

3.3 海洋海岛岩溶修复保护工程工艺现状与趋势

当前，国内外岩溶学研究为理解桂林山水、云南石林等岩溶特征和机理提供了理论基础，但针对海洋海岸和海岛环境岩溶修复，只有台湾新北野柳公园女王头修复工程一例，且为 13 年投入的失败



图 11 2018 年 5 月 18 日央视新闻：台湾新北野柳公园女王头修复失败 5 到 10 年或断颈

Fig. 11 On May 18, 2018, CCTV News; the restoration of the “Queen’s Head” in Yelou Park, New Taipei City, Taiwan failed. It may break its neck after 5 to 10 years

案例。因而，直面石岛海洋海岛严酷自然环境弱固结高位海滩岩顶级生态景观一珍贵地质遗迹资源毁灭性岩溶，尚无成熟理论认识，也无修复保护工程可查，更无成功先例可循。因此，石岛三大顶级生态景观修复是重大难题，是海洋海岛岩溶和谐自然生态海洋金山银山保护建设的重大工程。目前，国际珍贵地质遗迹资源修复保护与岩土工程工艺，相关研究正经历从被动防护向主动修复的范式转移。传统工程工艺是表面防护，如女王头修复：主要依赖有机硅、丙烯酸树脂、氟碳材料等表面喷涂材料形成涂层。这类材料虽能短期防水，但存在与基岩热膨胀系数不匹配、易老化剥落、阻碍基岩呼吸、且无法恢复结构强度等根本性缺陷，尤其在高能潮间带环境中失效极快。

岩溶修复的发展趋势是本体加固，核心理念是恢复或增强岩石自身的结构完整性。研究方向聚焦

于开发与碳酸盐岩兼容性友好的无机胶凝材料、仿生矿化材料（如微生物诱导碳酸钙沉淀，MICP）以及能够渗入岩体内部并原位生成增强相的复合浆液；目标是修复加固层要成为岩体的一部分。其中，微生物诱导碳酸钙沉淀（MICP）技术因其环境友好特性受到国际广泛关注，相关研究在荷兰代尔夫特理工大学、美国加州大学戴维斯分校等机构持续开展。然而，该技术目前仍面临加固深度浅、强度增长慢、动态水环境下细菌易流失等技术瓶颈，整体上仍处于实验室到小规模现场试验的过渡阶段（Dai, 2024；王双娇等，2024）。

铁铝酸盐水泥基材料是中国材料科学原创的，中国也是在全球唯一实现工业化生产和规模化应用的国家。铁铝酸盐水泥材料独特的低碱度（pH10~11）、抗海水腐蚀、强度越高（抗蚀系数>1）等性能，使其与碳酸盐岩海岸工程需求高度

契合，能够满足外部增韧内部强身修复目标。在中国大陆，海岸基建已经在重大工程中使用铁铝酸盐水泥基无机凝胶材料，如华龙一号核电厂的海岸岸基修筑维护工程，利用特种铁铝酸盐水泥基材料服役性稳定性远超 30 年（王燕谋和齐冬有，2025）；在北京，针对大量园林景观和雕塑等的生态修复也是铁铝酸盐水泥基材料的杰作，是顶级生态景观新材料修复保护成功的范例。然而，这一国之工程工艺技术和重材，至今还尚未被地质遗迹保护和修复工程及领域内大部分专业人士认知和应用。

未来，或可通过打通材料科学与地质保护之间的学科壁垒，将中国的原创材料优势转化为海洋海岛保护尤其是老龙头修复保护工程工艺技术优势，实现中国材料、中国工法、保护中国（及全球）地质遗产及其修复的创新创造。这是一个基础理论、材料科学应用和工程工艺技术闭环，有利于实现石岛三大顶级生态景观永续传承。

4 结论

西沙群岛石岛发育老龙头、根管石与楔形前积层理大剖面三大顶级生态景观和珍贵地质遗迹资源。老龙头是全球唯一自然天成的中华民族龙形石龙图腾，是无价之宝的海洋海岛“金山银山”。文中展示了 2009 年至今连续调查获得的岩溶照片：石岛正面临 7 种自然力（浪蚀、涛蚀、溶蚀、风蚀、淡水淋滤溶蚀、高温和高盐）与人类踩踏的毁灭性岩溶撕裂和破坏，规模垮塌与沙化是现状令人触目惊心！三大顶级生态景观一珍贵地质遗迹资源正遭受不可承受岩溶之殇。

石岛三大顶级生态景观修复保护刻不容缓，属于国家战略层面工程，非举国家之力难以实施与完成。而且，中国在这个领域已经具有材料科学研究制造甚至在核电站工程应用成功先例。因此，建议应用铁铝酸盐水泥基材料和配套工程工艺技术完成石岛老龙头修复。呼吁以国家之力实施大规模、跨学科、持续性和抢救性修复投入的国家工程，否则石岛顶级生态景观和珍贵自然遗迹资源将不堪重负，很有可能将不复存在！这一国家工程应为可复制、可推广的海洋海岛岩溶灾害治理与生态修复示范性工程！将为全球类似环境修复保护提供中国西沙石岛方案。

吁请学术界支持和政府出手支撑这项关乎珍贵

自然遗产资源守护、民族文化象征自然存续与海洋生态安全示范的工作，在它们消失之前实现修复及至永续传承！

致谢 感谢三沙市政府长期支持与支撑，感谢阿东市长支持；感谢王成善院士长期支持和指导，谨以此文悼念恩师李思田教授。

参考文献 (References)

- 陈朝军,袁道先,程海, Yu T, Shen C, Edwards R L, 吴尧,肖思雅,张键,王涛,黄冉,刘子琦,李廷勇,李俊云. 2021. 人类活动和气候变化触发了中国西南石漠化的扩张. 中国科学: 地球科学, 51(11): 1950–1963. [Chen C J, Yuan D X, Cheng H, Yu T, Shen C, Edwards R L, Wu Y, Xiao S Y, Zhang J, Wang T, Huang R, Liu Z Q, Li T Y, Li J Y. 2021. Human activity and climate change triggered the expansion of rocky desertification in the karst areas of Southwestern China. *Science China Earth Sciences*, 51(11): 1950–1963]
- 郭芳,姜光辉,袁道先. 2008. 南方岩溶区地下河主要离子浓度变化趋势分析. 水资源保护, 24(1): 16–19, 30. [Guo F, Jiang G H, Yuan D X. 2008. Change of major ions concentration in subterranean river in karst areas in South China. *Water Resources Protection*, 24(1): 16–19, 30]
- 郭小娇,龚晓萍,石建省,郭娇,袁道先,林玉石. 2019. 典型岩溶区潜在蒸散发变化及其影响因素. 地质学报, 93(12): 3269–3281. [Guo X J, Gong X P, Shi J S, Guo J, Yuan D X, Lin Y S. 2019. The temporal variations of potential evapotranspiration and influence factors for typical karst area. *Acta Geologica Sinica*, 93(12): 3269–3281]
- 胡雨晴,孙玉川,李晓丽,曹敏,袁道先. 2021. 基于物种敏感度分布的不同岩溶地下河中多环芳烃分布特征及生态风险评价. 地球与环境, 49(6): 684–693. [Hu Y Q, Sun Y C, Li X L, Cao M, Yuan D X. 2021. Spatial distribution and ecological risk assessment of PAHs in different karst underground rivers based on species sensitivity distribution. *Earth and Environment*, 49(6): 684–693]
- 黄芬,张春来,杨慧,曹建华,李为,周运超. 2014. 中国岩溶碳汇过程与效应研究成果及展望. 中国地质调查, 1(3): 57–66. [Huang F, Zhang C L, Yang H, Cao J H, Li W, Zhou Y C. 2014. Achievements and prospects in the study of karst carbon sink processes and effects in China. *Geological Survey of China*, 1(3): 57–66]
- 蒋忠诚,袁道先. 1999. 表层岩溶带的岩溶动力学特征及其环境和资源意义. 地球学报, 20(3): 302–308. [Jiang Z C, Yuan D X. 1999. Dynamics features of the epikarst zone and their significance in environments and resources. *Acta Geoscientia Sinica*, 20(3): 302–308]
- 卢耀如. 2001. 岩溶地区资源的合理开发与地质灾害的防治. 地质学报, 75(3): 432. [Lu Y R. 2001. Reasonable development of resources and prevention of geological disasters in karst areas. *Acta*

- Geologica Sinica, 75(3): 432]
- 卢耀如, 刘长礼, 张凤娥, 童国榜, 张云. 2006. 中国主要岩溶地区地下水系统及其生态水文特性. 地质学报, 80(10): 1577. [Lu Y R, Liu C L, Zhang F E, Tong G B, Zhang Y. 2006. Groundwater system and its eco-hydrological characteristics in the main karst areas of China. Acta Geologica Sinica, 80(10): 1577]
- 卢耀如, 张凤娥, 阎葆瑞, 郭秀红. 2009. 硫酸盐岩岩溶发育机理与有关地质环境效应. 现代地理科学与贵州社会经济: 1-9. [Lu Y R, Zhang F E, Yan B R, Guo X H. 2009. Mechanism of karst development in sulphate rocks and its main geo-environmental impacts. Morden Geography and Guizhou Socioeconomics: 1-9]
- 马源, 殷建军, 袁道先. 2022. 洞穴滴水、石笋中元素及元素比值对气候环境变化响应的研究进展. 地质论评, 68(5): 1897-1911. [Ma Y, Yin J J, Yuan D X. 2022. Research progress on the response of elements and their ratios in cave drip water and speleothems to climate and environment change. Geological Review, 68(5): 1897-1911]
- 王双娇, 李志清, 田怡帆, 李燕明, 周应新, 李丹丹. 2024. 微生物岩土工程技术的过去、现在与未来. 工程地质学报, 32(1): 236-264. [Wang S J, Li Z Q, Tian Y F, Li Y M, Zhou Y X, Li D D. 2024. The past, present and future of technology in microbial geotechnical engineering. Journal of Engineering Geology, 32(1): 236-264]
- 王燕谋, 齐冬有. 2025. 铁铝酸盐水泥论文集: 铁铝酸盐水泥的发明与技术开发. 北京: 中国建设科技出版社, 1-314. [Wang Y M, Qi D Y. 2025. A Collection of Papers on Aluminoferrite Cement: invention and Technology Development of Aluminoferrite Cement. Beijing: China Construction Technology Press, 1-314]
- 袁道先, 蒋勇军, 沈立成, 蒲俊兵, 张陶, 肖琼. 2014. 现代岩溶学. 北京: 科学出版社. [Yuan D X, Jiang Y J, Shen L C, Pu J B, Zhang T, Xiao Q. 2014. Modern Karstology. Beijing: Science Press]
- 张凤娥, 卢耀如. 2001. 硫酸盐岩溶蚀机理实验研究. 水文地质工程地质, (5): 12-16. [Zhang F E, Lu Y R. 2001. Experimental study on the dissolution mechanism of sulfate rock. Hydrogeology & Engineering Geology, (5): 12-16]
- 章程, 袁道先. 2004. 典型岩溶地下河流域水质变化与土地利用的关系: 以贵州普定后寨地下河流域为例. 水土保持学报, 18(5): 134-137, 183. [Zhang C, Yuan D X. 2004. Hydrochemical variation of typical karst subterranean stream basin and its relationship with land use change: a case study of Houzhai subterranean stream basin, Puding County, Guizhou Province. Journal of Soil and Water Conservation, 18(5): 134-137, 183]
- Chen L, Tan L, Zhao M, Sinha A, Wang T L, Gao Y L. 2023. Karst carbon sink processes and effects: a review. Quaternary International, 652: 63-73.
- Dai D. 2024. Improvement Schemes for Bacteria in MICP: a review. Materials, 17: 5420.
- Ford D C. 2006. Karst geomorphology, caves and cave deposits: a review of North American contributions during the past half century. Geological Society of America Special Paper, 404: 1-13.
- Ford D, Williams P W. 2015. Karst Hydrogeology and Geomorphology. John Wiley & Sons: 1-14.
- Goldscheider N, Chen Z, Auler A S, Bakalowicz M, Broda S, Drew D, Hartmann J, Jiang G, Moosdorf N, Stevanovic Z, Veni G. 2020. Global distribution of carbonate rocks and karst water resources. Hydrogeology Journal, 28(5): 1661-1677.
- Jiang Z, Lian Y, Qin X. 2013. Carbon cycle in the epikarst systems and its ecological effects in South China. Environmental Earth Sciences, 68(1): 151-158.
- John W H. 2008. Book review: methods in karst hydrogeology. Ground Water, 46(2): 172.
- Li Y, Yang Y, Wang X, Luo W, Zhao J, Sun Z, Ye Z, Chen X, Shi X, Xu Y. 2024. Sources and transport of CO₂ in the karst system of Jiguan Cave, Funiu Mountains, China. Science of the Total Environment, 918: 170507.
- Limin W. 2008. Rock Desertification in Karst Areas of Southwest China. Semiconductor Lasers and Laser Dynamics III.
- Palmer A N. 1991. Origin and morphology of limestone caves. Geological Society of America Bulletin, 103(1): 1-21.
- Rajabi A M, Mahmoudi M, Khajevand R. 2026. Overview of the problems of constructing tunnels in karst regions. Carbonates & Evaporites, 41(1): 1-18.
- Williams P W. 2008. The role of the epikarst in karst and cave hydrogeology: a review. International Journal of Speleology (Edizione Italiana), 37(1): 1-10.
- Xu H. 2022. Karst: valuable geological relics of carbonate rocks-ruins and reverse karst of top ecological landscape. 21st International Sedimentological Congress.
- Zhang C, Xiao Q, Wu Z Y, Martin K. 2022. Ecosystem-driven karst carbon cycle and carbon sink effects. Journal of Groundwater Science and Engineering, (10): 99-112.
- Zhao S, Pereira P, Wu X, Zhou J, Gao J, Zhang W. 2020. Global karst vegetation regime and its response to climate change and human activities. Ecological Indicators, 113: 106208.
- Zhong C, Lian Y H, Qin X Q. 2014. Rocky desertification in Southwest China: impacts, causes, and restoration. Earth-Science Reviews, 132: 1-12.
- Zuo X X, Hou Y L. 2011. Carbon sequestration within millet phytoliths from dry-farming of crops in China. Chinese Science Bulletin, 56(32): 1-6.

(责任编辑 郑秀娟 王绍华)