

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2019092502

南海琼东上升流区过去 1 900 年海洋生产力记录

计超¹, 徐利强^{1,2}, 张一辉¹, 郭敏¹, 孔德明³

1. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009
2. 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验, 西安 710061
3. 广东海洋大学海洋与气象学院, 湛江 524088

摘要:对南海琼东陆架上升流区一根 45 cm 海洋沉积柱样进行了年龄和地球化学元素分析, 并利用生物源 Ba (Ba_{bio}) 重建了研究区过去 1 900 年的海洋生产力记录。结果表明海洋生产力在过去的 1 900 年中变化明显, 在中世纪暖期时生产力相对较高, 而在气候相对凉爽的小冰期时生产力相对低。海洋生产力在过去 100 多年增加迅速 (当前 Ba_{bio} 约为 210 $\mu\text{g/g}$), 达到过去 1 900 年以来的最高水平。通过与气候环境记录对比, 发现琼东上升流区海洋生产力受东亚夏季风影响显著, 并与温度变化之间存在一定的关联。在气候温暖期, 东亚夏季风强度增加, 引起沿岸上升流增强, 使得海洋生产力提高。在全球变暖背景下, 人为因素导致的气候变化可能会对该地区海洋生产力造成影响。

关键词:上升流; Ba; 生产力; 东亚季风; 气候变化; 南海

中图分类号:P736.2 **文献标识码:**A

A 1 900-year record of marine productivity in the upwelling area of east continental shelf of Hainan Island, South China Sea

Ji Chao¹, XU Liqiang^{1,2}, ZHANG Yihui¹, GUO Min¹, KONG Deming³

1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China
2. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, CAS, Xi'an 710061, China
3. College of Ocean and Meteorology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China

Abstract: A 45 cm long sediment core was collected from the upwelling area of the east continental shelf of Hainan Island, South China Sea. Via chronological and geochemical analyses, marine productivity (in terms of Ba_{bio}) over the past 1 900 years was reconstructed for the study area. The results show that the marine productivity changed significantly over the past 1 900 years, with relatively high productivity during the Medieval Warm Period (MWP), but relatively low productivity during the Little Ice Age (LIA). Marine productivity has increased rapidly over the last century (currently Ba_{bio} is about 210 $\mu\text{g/g}$), reaching its highest level over the past 1 900 years. By comparison with the climatic and environmental records, it was found that the marine productivity in the upwelling area was highly affected by the East Asian summer monsoon and also displayed some kind of correlation with temperature. In a warm climate, the intensity of the East Asian summer monsoon enhanced, resulting in an increase in coastal upwelling, which led to increase in marine productivity. Solar activity may also impact on the marine productivity of the upwelling area by affecting climate and intensity of the East Asian monsoon. In the context of global warming, human-induced climate change may impose some effects on marine productivity as well in the study area.

Key words: upwelling; Ba; productivity; East Asian monsoon; climate change; South China Sea

海洋生产力在海洋渔业资源^[1-2]、全球碳循环^[3-4]和全球气候变化^[5-6]有着重要的作用, 是现代海洋学和古代海洋学重点关注的领域之一。对于古海洋生产力研究, 主要通过有孔虫^[7-8]、放射虫^[9]、钙质超

微化石^[10-11]等海洋微体古生物化石、蛋白石^[12-14]、有机碳^[15-16]、粉尘输入^[17]等指标重建。此外, 国内外学者通过分析海洋沉积物的 Ba 元素, 发现其与海洋表层生产力具有良好的相关性^[18-20], 是一种良好

资助项目:国家自然科学基金“晚全新世西沙海鸟营养级变化对重金属传输效率的影响”(41402148); 黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金“南海琼东上升流区过去 2000 年环境演变及其机理”(SKLLQG1929); 国家留学基金(201806695035)

作者简介:计超(1995—), 男, 硕士, 从事第四纪地质研究, E-mail: jichao1995@foxmail.com

通讯作者:徐利强(1984—), 男, 博士, 硕士生导师, 主要从事生态环境演变研究, E-mail: xllq@hfut.edu.cn

收稿日期:2019-09-25; **改回日期:**2019-11-04. 蔡秋蓉编辑

的重建古海洋生产力的指标。

南海是西太平洋最大的边缘海,因为其半封闭性的地理位置特征,能够很好地记录地球环境变化信息^[21]。南海沉积物是周边大陆的陆源碎屑、海洋自生沉积物和大气沉降物质的汇^[22];同时连接着岩石圈、水圈、大气圈和生物圈^[23],成为了各个圈层相互关系的重要纽带,对全球和区域性的气候和环境变化响应明显^[24],是开展地球系统科学研究的理想区域^[25]。研究人员通过借助有孔虫^[26-27]、放射虫^[28]、蛋白石^[29-30]、有机碳^[16]等替代指标重建了南海不同区域的海洋古生产力的变化过程。如边叶萍等^[31]通过有机碳恢复了南海北部 900 年生产力变化过程;李丽等通过 C_{37} 和 C_{38} 长链不饱和和酮化合物的含量恢复了 4 万年来南海北部颗石藻的生产力变化^[32]。

南海北部陆架区域有着明显的季节性差异的沿岸上升流,表现为东亚夏季风越强,上升流作用越强烈^[33]。沿岸上升流携带的底层营养物质对上升流海域的渔业^[34]、生产力^[8,35]和生态环境^[36]等具有重要影响。风生上升流海区对气候和环境变化响应敏感^[37-39]。研究区域所在的琼东上升流海区是南海北部上升流的强中心区域^[40],同样也是我国沿岸强上升流中心之一^[41]。通过地球化学指标重建南海北部陆架海域沿岸上升流区的千年尺度生产力变化的研究尚未见相关报道,生产力变化及其影响因素也不明确。

本文基于采自南海琼东陆架海域的一根海洋沉积柱(编号 QD2),拟通过 Ba 和其他元素的地球化学数据,结合年代学分析,尝试重建该地区晚全新世以来生产力变化过程,探讨该地区生产力变化的主要影响因素。

1 材料与方法

1.1 样品采集

本研究所使用沉积柱样采自琼东陆架海域,采样点水深 84.6 m,坐标为 18°54.00'N、110°42.00'E(采样点位置如图 1 所示),采样点位置近海距离约 20 km。样品采集于 2015 年度国家自然科学基金委“珠江口—南海西部综合航次”期间,搭载中国科学院南海海洋研究所“实验三号”科学考察船。采样工具为箱式采样器,采样器高 60 cm。采样器出水后,虹吸抽出海水,现场观察可知箱式采样器所采集的沉积物样品保存完好,未受明显扰动。之后将

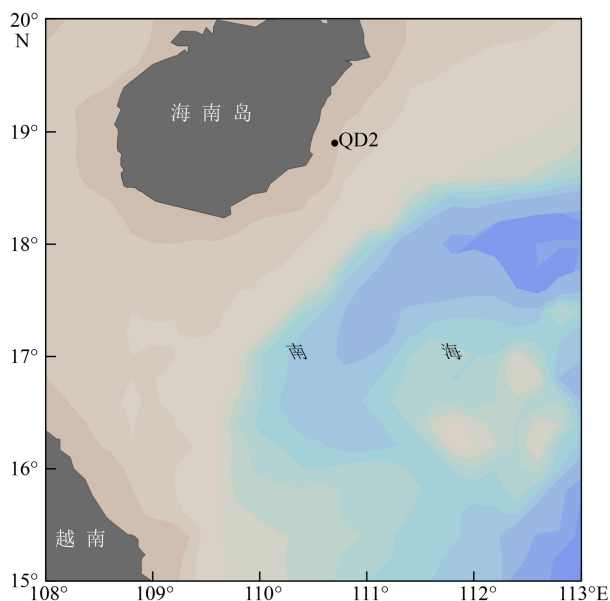


图 1 研究区及 QD2 站位分布图

(基于 Ocean Data View 创建)

Fig.1 Map of study area showing sampling site of QD2

(created based on Ocean Data View)

直径 7.5 mm 的聚氯乙烯(PVC)塑料管垂直插入箱式采样器中,获得沉积柱样,并用盖子封口取出沉积样心。该沉积柱长 45 cm,编号 QD2。在进行分析之前,柱样于 -20 °C 的环境下低温冷冻保存。

1.2 分析方法

在分析之前,对 QD2 沉积柱(45 cm)按照 1 cm 间隔进行分样,同时拍照和记录,得到共计 45 个样品,按照从表层到底部的方式依次编号为 QD2-1—QD2-45。在岩性方面,沉积柱可以分为两个沉积单元,0~18 cm 的表层样主要以黄灰色细砂为主,18~45 cm 层位的样品以灰黑色粉砂为主,部分层位有贝壳出现。

该沉积柱样的年代学是由表层沉积物全样的 ^{210}Pb 定年和底部的有孔虫 ^{14}C 定年共同建立。表层样品干燥后,样品的 ^{210}Pb 、 ^{226}Ra 和 ^{137}Cs 的放射性活度由低本底高纯锗(HPGe) γ 能谱仪检测得到每个样品的放射性,检测峰位分别为 46.5、352 和 661 keV。放射性核素的测试单位为合肥工业大学第四地质实验室。另在沉积柱 35 和 44 cm 深度处取干样约 15 g,置于烧杯中,清水浸泡将其分散,之后过 100 目筛分离有孔虫样品。收集之前,将保留在筛子上的有孔虫样品使用酒精超声清洗 3 次,60 °C 烘干后在 40 倍双目体式显微镜下挑选有孔虫,并选择浮游有孔虫 *Globigerinoides ruber* 和 *Globigerinoides sacculifer* 混合样约 10 mg 进行 AMS ^{14}C 测试,分析

单位为美国贝塔分析实验室(Beta Analytic Inc)。

同时,本研究也对样品进行了 Ba、Al、Ti、Ni、Co、Rb 和 Zr 元素测试。在进行化学分析之前,我们对样品进行了前处理。将样品自然风干后,等分的试样使用研钵和研杵磨成均匀的粉末,直至通过 200 目筛网,研磨之后的样品再烘干至恒重。样品经 HCl-HNO₃-HF 多酸体系消解后, Ba、Al、Ti、Ni、Co、Rb 和 Zr 等元素的含量由电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定得到,测试单位为澳实分析检测(广州)有限公司,测试误差小于 5%。

2 结果与讨论

2.1 QD2 沉积柱年代分析

为了更好地重建 QD2 站位的精确年龄深度模型,对沉积柱采用了²¹⁰Pb 和¹⁴C 相结合的两种定年方式。根据核素测试结果,²¹⁰Pb 与²²⁶Ra 在 17 cm 处达到平衡,因此, QD2 沉积柱 17 cm 以上样品采用²¹⁰Pb 年龄。同时,分别选取 QD2 剖面 35 和 44 cm 处浮游有孔虫样品进行了 AMS¹⁴C 测试,测定的¹⁴C 年龄分别为 2 140±30 和 2 350±30 BP。此处采用 Marine13 校正数据库将其校正为日历年龄,其中区域性海洋储库效应偏差 ΔR 取 110±31^[42]。QD2 整个剖面的年龄-深度模型由基于 R 语言的 Clam 软件包实现,结果如图 2 所示。

根据年龄-深度模型结果, QD2 沉积剖面底部的年龄为 106 AD, 即该沉积柱记录了过去约 1 900

年的沉积历史。由图 2 可以看出, QD2 沉积剖面的年龄随深度逐渐增加,说明样品保存完好,沉积样品未受扰动。

2.2 元素垂直分布特征

本次工作重点分析了 QD2 站位与生产力有关系的几种地球化学元素的变化。元素 Ti、Al、Ba 随深度变化如图 3E、3F、3G 所示。由图可知, Ti、Al 呈现出极其相似的变化特征,具有相同的变化趋势和共同的峰值,但 Ba 的分布与 Ti 和 Al 存在明显的差异。

Ti 和 Al 是典型的岩性元素^[43],海洋沉积物中的 Al 的来源主要与陆源黏土矿物有关^[44]。Ti 则主要分布在重矿物中^[45],在化学风化和搬运沉积过程中不容易发生迁移,且由于本身的元素性质特点,具有较强的抵抗化学侵蚀的特点,使得 Ti 元素成为海洋沉积物中陆源输入的最佳的指示因子^[46]。Ti 和 Al 共同受到陆源黏土矿物的影响,在细粒的黏土矿物中富集,因此元素表现出在深度上共同的变化趋势。Ba 元素在垂直深度的独特的变化与其复杂的元素来源具有重要的关系。Ba 元素在海洋中的主要来源包括陆源铝硅酸盐中的钡、生源硫酸钡和海底热液钡的沉淀^[47]。QD2 站位不属于热液活动区域, Ba 的来源主要受陆源和生源的共同影响,使得它的含量的变化不同于典型的陆源元素的变化。

Ba 在海洋中的含量除了受到 Ba 的来源的影响,还会受到氧化还原状态的影响。在还原条件下,生物源 Ba 由于还原作用而发生部分溶解,从而造成 Ba 的流失^[48]。研究表明,海洋沉积物中的 Ni/Co 比值可以指示氧化还原环境:当 Ni/Co<5 时,普遍认为沉积环境为氧化环境^[49]。根据图 3D, Ni/Co 比值的最大值低于 2.7, 均值是 2.46, 整个沉积过程是低于 5 的,因此整个沉积环境都是处于氧化环境状态下,生物源 Ba 能够得以较好地保存。

2.3 基于 Ba 的古海洋生产力变化

一般来说,海洋中 Ba 元素的含量由几个因素共同影响,其中生物成因钡(Ba_{bio})与海洋生产力关系密切,早期降解过程中大约 40% 的 Ba_{bio} 能够留存在海洋沉积物中^[50],明显优于有机碳和生物成因硅等传统的生产力研究指标^[51],使得与表层生产力有着良好的相关性^[18]。Ba_{bio} 主要以海洋生物成因重晶石(BaSO₄)存在。Ba_{bio} 成为反演海洋古生产力变化的重要指标被广泛使用^[48, 52-56]。

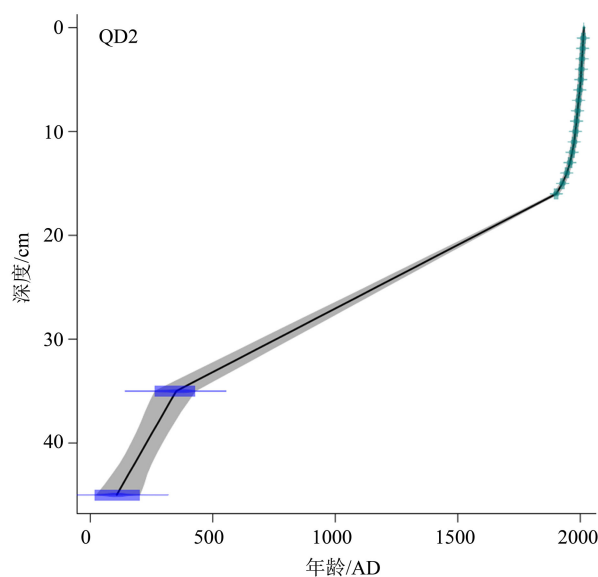


图 2 QD2 沉积柱基于 Clam 的年龄-深度模型

Fig.2 Clam-based age-depth model for the core QD2

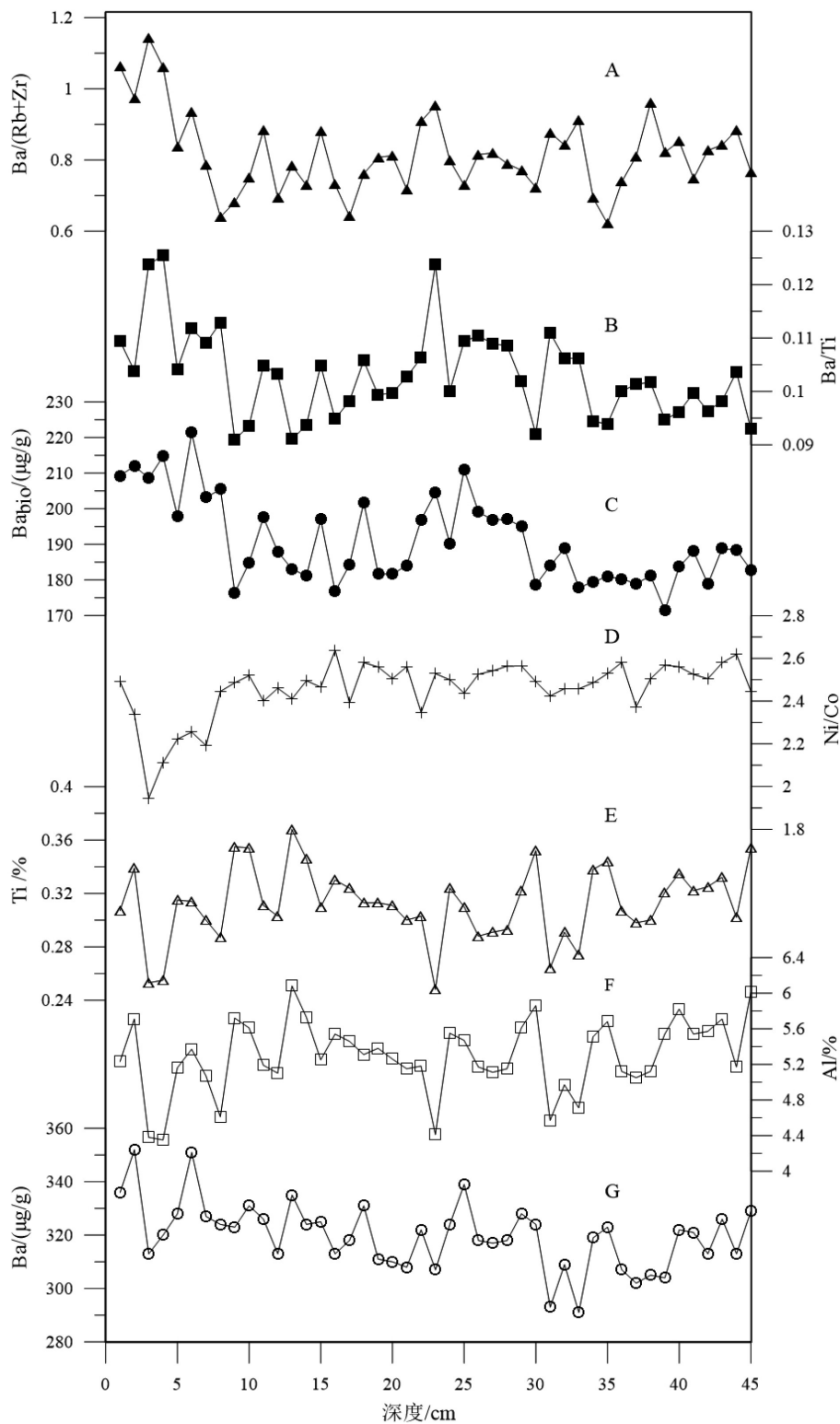


图3 QD2 沉积柱 Ti, Ba, Al, Ni/Co, Ba_{bio}, Ba/Ti 和 Ba/(Rb+Zr) 随深度的变化图

Fig.3 The depth distributions of Ti, Ba, Al, Ni/Co, Ba_{bio}, Ba/Ti, and Ba/(Rb+Zr) in the core QD2

对于海洋生源钡的含量通常认为是沉积物中除去陆源输入钡的部分而剩余的钡的含量。在本研究中, Ba_{total} 主要由陆源 Ba 和生物源 Ba 组成, 为获取生物源 Ba, 需要扣除陆源 Ba 的输入。研究人员曾利用 Al 元素来校正得到生物源 Ba^[57]。随后,

研究人员发现在海洋沉积物中, 普遍存在着 Al 的自生富集^[58-59], 而 Ti 元素在海洋中的含量少, 存在时间短, 自生物物质中难以富集, 基本上海洋中的 Ti 全部来自于陆源碎屑的输入^[60]。由于过剩 Al 会对生物源 Ba 的计算产生影响, 研究人员进一步提

出用 Ti 来校正生物源 Ba 的含量^[57]。本文中所使用的计算公式为^[61-62]:

$$Ba_{bio} = Ba_{total} - Ti_{total} \times (Ba/Ti)_{terrigenous} \quad (1)$$

式中 Ba_{bio} 为沉积物生物源 Ba 的含量; Ba_{total} 为实验测得的沉积物中 Ba 的总含量; Ti_{total} 为实验测得的沉积物中的 Ti 元素总含量; $(Ba/Ti)_{terrigenous}$ 为陆源 Ba/Ti 的比值^[57, 62]。

本文在恢复 Ba_{bio} 中采用的是利用邻近的主要由陆源输入的河流珠江, 因为南海北岸的小型河流多属于少沙型河流, 陆源输入物质较少。QD2 站位的北岸小型河流韩江、鉴江和漠阳江的输沙量分别为 7×10^6 、 1.9×10^6 、 0.8×10^6 t/a, 总量远不及珠江输入量 83×10^6 t/a^[63]。因此本次研究选取了珠江中测得的 Ba 和 Ti 的比值 0.041 28^[64] 来作为 $(Ba/Ti)_{terrigenous}$ 的背景值, 利用上述公式计算得到了 QD2 站位 Ba_{bio} 的变化过程, 结果如图 3C 所示。同时, Ba/Ti 也可在一定程度上反映海洋源 Ba 与陆源物质的相对比例, 其值在剖面上的变化如图 3B 所示。此外, 青子琪提出 $Ba/(Rb+Zr)$ 也可以作为海洋生产力的替代性指标^[65]。我们也计算了 $Ba/(Rb+Zr)$, 结果见图 3A。总的来看, 生物源 Ba 与反映生产力的其他指标 Ba/Ti、 $Ba/(Rb+Zr)$ 变化趋势一致(图 3A、B、C)。研究表明, 上升流在携带大量营养物质到海洋表面的同时, 海底的冷水会使海表面温度(SST)降低, 即 SST 降低的同时, 海洋生产力会增加。我们也分析了表层 16 cm 的 SST 数据, 结果显示生物源 Ba 在表层的快速增加伴随着 SST 的快速下降(SST 数据另文刊发), 这进一步佐证生物源 Ba 可作为生产力的代用指标。

结合生产力指标(Ba_{bio})和年龄深度模型, 重建了 QD2 站位过去 1 900 年的生产力变化记录(图 4E)。由图可知, Ba_{bio} 在过去的 1 900 年中变化明显。100—240 AD 时, Ba_{bio} 含量变化呈现为下降趋势, 平均值为 $185 \mu\text{g/g}$, 略高于 240—800 AD 期间的值($180 \mu\text{g/g}$)。在 240—800 AD 期间, 尽管约在公元 600 AD 出现一个相对高值($189 \mu\text{g/g}$), 但 Ba_{bio} 数值总体水平较低。此后, 在 800—1400 AD 期间(对应气候时期为中世纪暖期), Ba_{bio} 维持在一个相对较高的水平($199 \mu\text{g/g}$), 并且在 1160 AD 附近, Ba_{bio} 含量到达了 $211 \mu\text{g/g}$ 的高值, 但在 1400—1900 AD (即小冰期时)又有所回落, 该时间段均值为 $188 \mu\text{g/g}$ 。1900 AD 以来(现代暖期), 生产力迅速增加(图 4E), 尤其是 20 世纪 80 年代之后, Ba_{bio} 含量变化明显。在 20 世纪末, Ba_{bio} 达到了过去 1 900 年以来的最高值($221 \mu\text{g/g}$), 20 世纪 80 年代到现在的阶段也是过

去 1 900 年以来最高阶段, 平均值为 $209 \mu\text{g/g}$ 。总的来看, 在冷期时琼东上升流区生产力相对低, 在暖期时海洋生产力相对高; 在过去约 100 年的时间里, 海洋生产力随着全球平均温度的快速升高而迅速增加, 达到过去 1 900 年的最高水平。研究人员曾对南海北部 900 年、南海南部 2 400 年非上升流区古海洋生产力进行了重建^[31], 但其记录与琼东上升流区的记录存在明显差别, 这说明上升流区与非上升流区的海洋生产力控制机理不同。

2.4 古海洋生产力的控制因素

为进一步探讨琼东上升流区古海洋生产力的控制因素, 将海洋生产力与温度、季风等气候记录进行了对比分析(图 4)。

QD2 站位特殊的地理位置, 处于琼东上升流区域^[66], 较强的东亚夏季风能够驱动风生上升流区域产生更强的上升流^[67], 现代遥感数据也表明较强的南海北部上升流能够带来较强的海洋生产力的增加。据此, 推测历史时期东亚夏季风与生产力之间也存在一定的关联。根据前人的研究, 由东亚夏季风引起的中国西南部董哥洞与和尚洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的差值($DG\text{-}HSA\delta^{18}\text{O}$)可作为东亚夏季风的替代性指标^[68](图 4D)。通过对比图 4D 和 4E 可知, 在 600 AD 以前, 海洋生产力与各指标的对应关系不明显, 原因不详, 有待进一步研究。但在 600 AD 之后, 琼东陆架海洋生产力与东亚夏季风存在着明显的正相关。在中世纪暖期和小冰期阶段, 二者在相同的时期出现峰值且两者的数值曲线波动变化相似。此外, 前人的研究表明, 海洋沉积物中陆源植物叶蜡 δD_{wax} 值可反映印尼季风强度, 且该季风与东亚夏季风反相关^[69]。由图 4C 可知, 在 800—1400 AD (中世纪暖期, MWP)时, 印尼季风较弱, 东亚夏季风较强; 1400—1900 AD (小冰期, LIA)时, 印尼季风增强, 东亚夏季风减弱; 1900 AD 至今(现代暖期, RWP), 东亚夏季风又明显增强, 陆源植物叶蜡 δD_{wax} 值指出的东亚夏季风的强弱变化趋势同 Ba_{bio} 的含量变化也表现出明显的相关性, 东亚夏季风增强时期, Ba_{bio} 的含量较高, 而东亚夏季风减弱时期, Ba_{bio} 的含量也相对降低。在 1168、1331 和 1739 AD 时, Ba_{bio} 出现峰值(图 4E), 分别达到 211、204 和 $202 \mu\text{g/g}$, 东亚夏季风强度与其记录基本一致, 也出现对应的 3 个峰值(图 4C、D)。总的来说, QD2 站位的海洋生产力的变化确实同东亚夏季风驱动的风生上升流有着密切的联系: 东亚夏季风越强, 风驱上升流强度也随之增强, 海水表层营养物质增

加,最终使得海洋生产力升高。

除了东亚夏季风与海洋生产力之间的相关性外,我们还发现东太平洋地区的降水记录在 600 AD 以来也与 QD2 的 Ba_{bio} 之间存在很好的对应关系,整体变化相似。东太平洋厄瓜多尔 Laguna Pallcacocha 湖泊的降水记录(以沉积物红度计)如图 4B 所示。由图中可以看出, Laguna Pallcacocha 湖泊沉积物红度值越大(降雨量越大), QD2 站位上升流区海洋生

产力越高,在 600 AD 和中世纪暖期阶段, Laguna Pallcacocha 湖泊沉积物红度值和 Ba_{bio} 都表现为高值,反之则相反(图 4B、E)。这说明西太平洋琼东陆架海洋生产力同东太平洋地区的降水存在遥相关,这可能与热带辐合带(ITCZ)的摆动有关^[69-70]。

利用树轮、冰心、湖泊等载体,研究人员重建了中国及其周边地区过去两千年的气候变化^[71](图 4A),并将其划分为罗马暖期(0—240 AD, RWP)、黑暗

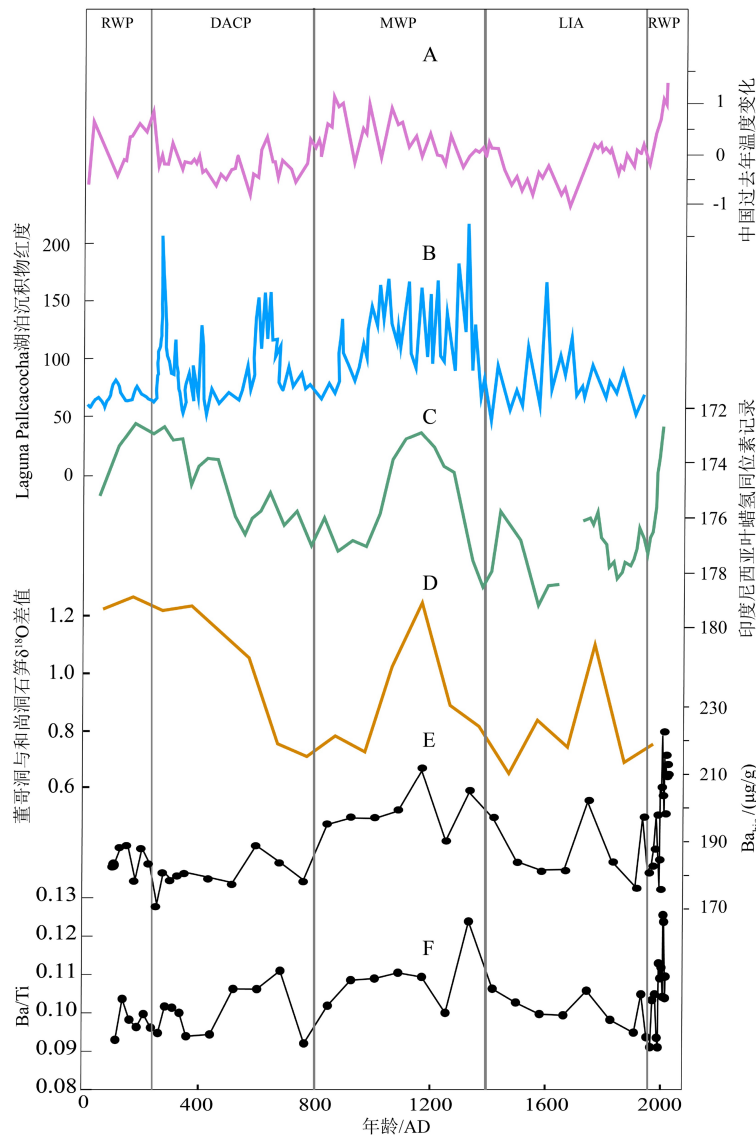


图 4 琼东陆架海域海洋生产力与气候环境指标对比图

A. 中国过去 2 000 年温度变化^[71], B. 厄瓜多尔 Laguna Pallcacocha 湖泊沉积物红度记录^[70], C. 印度尼西亚深海沉积物陆源叶蜡氢同位素记录^[69], D. 董哥洞和尚洞石笋 $\delta^{18}O$ 差值(DG-HS $\delta^{18}O$)记录^[68], E. QD2 站生源 Ba(Ba_{bio})变化(本研究), F. QD2 站 Ba/Ti 比值变化(本研究)。图中气候期: 罗马暖期(RWP)、黑暗时代寒冷期(DACP)、中世纪暖期(MWP)、小冰期(LIA)和现代暖期(RWP)。

Fig.4 Comparison between Ba_{bio} and a variety of climatic records

A.China's temperature record over the last 2000 years^[71], B.Redness record of sediments from lake Laguna Pallcacocha in Ecuadorian Andes^[70], C.Sedimentary wax record from Indonesia^[69], D.Dong Gedong-He Shangdong stalagmite $\delta^{18}O$ record^[68], E. Ba_{bio} and (F) Ba/Ti records at QD2. Years were divided into Roman Warm Period (RWP), Dark Ages Cold Period (DACP), Medieval Warm Period (MWP), Little Ice Age (LIA) and Rapid Warm Period (RWP).

时期冷期(240—800 AD, DACP)、中世纪暖期(800—1400 AD, MWP)和小冰期(1400 AD—20世纪初, LIA),近100多年为快速增温期(RWP)。通过对比可以看出,在600 AD之后的冷期时,东亚夏季风较弱,海洋生产力低;在暖期时,东亚夏季风较强,海洋生产力较高。如在中世纪暖期时, Ba_{bio} 整体偏高;相比之下,小冰期时,生产力水平整体偏低;当前的温度是过去1900年的最高值(图4A),生产力该时段快速增长,达到1900年来的最高水平(图4E, F)。综合对比温度、东亚季风和生产力记录,可以发现三者之间的变化基本一致,即在气候相对温暖的时期,东亚夏季风强度增加,引起沿岸上升流增强,最终使得海洋生产力提高。

由图4E和4F可知, Ba_{bio} 增加最快的阶段发生在20世纪后期,而20世纪后期是全球变暖最快的时期,当今快速的气候变化与人类活动密切相关^[72]。人为因素导致的全球变暖会增强沿岸风应力,使得沿岸上升流的强度增加^[39,73],从而可能影响上升流区海洋生产力,即当今人类活动所导致的温度变化也可能在一定程度上影响琼东地区海洋生产力。

3 结论

(1)上升流区对气候环境响应灵敏,是研究地球各圈层相互作用的理想区域。

(2)生物源 Ba(Ba_{bio})、Ba/Ti 和 Ba/(Rb+Zr)在总体趋势变化上具有相似性, Ba_{bio} 可作为古海洋生产力的一种替代性指标。

(3)本文结合²¹⁰Pb和¹⁴C年代学模型,发现过去1900年以来,海洋生产力变化明显。在气候较暖的中世纪暖期,生产力相对高;在小冰期时,相对较低。伴随着最近一百多年的快速气候变暖,海洋生产力也迅速增加,20世纪末生产力增加更加剧烈。

(4)现阶段 Ba_{bio} 均值约为209 $\mu\text{g/g}$,为1900年来的最高水平。

(5)海洋生产力与驱动琼东上升流的东亚夏季风关系密切,表现为夏季风越强,生产力越高。 Ba_{bio} 在最近一百多年来迅速增加,可能与人类活动导致的全球变暖有关,温度越高,生产力越高。

致谢: 样品采集得到刘建国、黄云、韦洋洋、胡莉莉的帮助,在此表示感谢。

参考文献 (References)

- [1] Chassot E, Bonhommeau S, Dulvy N K, et al. Global marine primary production constrains fisheries catches [J]. *Ecology Letters*, 2010, 13 (4): 495-505.
- [2] Friedland K D, Charles S, Drinkwater K F, et al. Pathways between primary production and fisheries yields of large marine ecosystems [J]. *PLoS One*, 2012, 7 (1): e28945.
- [3] Gruber N, Galloway J N. An earth-system perspective of the global nitrogen cycle [J]. *Nature*, 2008, 451 (7176): 293-296.
- [4] Keller K M, Joos F, Lehner F, et al. Detecting changes in marine responses to ENSO from 850 to 2100 C. E.: Insights from the ocean carbon cycle [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42 (2): 518-525.
- [5] Pospelova V, Price A M, Pedersen T F. Palynological evidence for late Quaternary climate and marine primary productivity changes along the California margin [J]. *Paleoceanography*, 2015, 30 (7): 877-894.
- [6] Moore J K, Fu W W, Primeau F, et al. Sustained climate warming drives declining marine biological productivity [J]. *Science*, 2018, 359 (6380): 1139-1143.
- [7] Wollenburg J E, Knies J, Mackensen A. High-resolution paleoproductivity fluctuations during the past 24 kyr as indicated by benthic foraminifera in the marginal Arctic Ocean [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, 204 (3-4): 209-238.
- [8] 钮耀诚, 张译元, 杜江辉, 等. 南海西部MIS 3期底栖有孔虫反映的生产力变化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31 (1): 85-92. [NIU Yaoheng, ZHANG Yiyuan, DU Jianghui, et al. Variations in paleoproductivity recorded by benthic foraminifera during mis 3 from the western South China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2011, 31 (1): 85-92.]
- [9] Bittniok B, Lazarus D B, Diester-Haass L, et al. Radiolarian and sedimentologic paleoproductivity proxy record from the benguela upwelling system, DSDP site 532, 0-6 Ma [J]. *Marine Micropaleontology*, 2004, 68 (3): 223-235.
- [10] Eshet Y, Almogi-Labin A. Calcareous nannofossils as paleoproductivity indicators in Upper Cretaceous organic-rich sequences in Israel [J]. *Marine Micropaleontology*, 1996, 29 (1): 37-61.
- [11] Zhao J T, Li T G, Li J, et al. Paleoproductivity variations in the southern Okinawa Trough since the middle Holocene: Calcareous nannofossil records [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57 (30): 3917-3922.
- [12] Wang R J, Li J. Quaternary high-resolution opal record and its paleoproductivity implication at ODP Site 1143, southern South China Sea [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48 (4): 363-367.
- [13] Sermo S, Winckler G, Anderson R F, et al. Using the natural spatial pattern of marine productivity in the Subarctic North Pacific to evaluate paleoproductivity proxies [J]. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 2014, 29 (5): 438-453.
- [14] Dezileau L, Reyss J L, Lemoine F. Late Quaternary changes in biogenic opal fluxes in the Southern Indian Ocean [J]. *Marine Geology*, 2003, 202 (3-4): 143-158.

- [15] Hinrichs K U, Schneider R R, Müller P J, et al. A biomarker perspective on paleoproductivity variations in two Late Quaternary sediment sections from the Southeast Atlantic Ocean [J]. *Organic Geochemistry*, 1999, 30(5): 341-366.
- [16] Devendra D, Xiang R, Thilakanayaka V, et al. Paleoproductivity changes in the Southern South China Sea from the Last Glacial to the Holocene: Evidence from Stable Isotopes and Total Organic Carbon [J]. *International Journal of Geology and Earth Sciences*, 2019, 5(2): 1-14.
- [17] Zhai L N, Wan S M, Tada R, et al. Links between iron supply from Asian dust and marine productivity in the Japan Sea since four million years ago [J]. *Geological Magazine*, 2019: 1-11.
- [18] Schmitz B. Barium, equatorial high productivity, and the northward wandering of the Indian continent [J]. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 1987, 2(1): 63-77.
- [19] Bridgestock L, Hsieh Y T, Porcelli D, et al. Controls on the barium isotope compositions of marine sediments [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 481: 101-110.
- [20] 倪建宇, 赵军, 江巧文, 等. 南海北部海域沉积物中生物钡、碳氮同位素的组成特征及其与表层水体初级生产之间的关系[J]. *海洋学报*, 2019, 41(2): 41-51. [Ni J Y, Zhao J, Jiang Q W, et al. Biogenic barium, carbon and nitrogen isotopes features in sediments of the northern South China Sea and their correlation with primary productivity of surface ocean [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 41(2): 41-51.]
- [21] 赵泉鸿, 汪品先. 南海第四纪古海洋学研究进展[J]. *第四纪研究*, 1999, 19(6): 481-501. [ZHAO Quanhong, WANG Pinxian. Progress in quaternary paleoceanography of the south China sea: a review [J]. *Quaternary Sciences*, 1999, 19(6): 481-501.]
- [22] Liu Z F, Zhao Y L, Colin C, et al. Source-to-sink transport processes of fluvial sediments in the South China Sea [J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 153: 238-237.
- [23] Zhou X X, Ding Y H, Wang P X. Moisture transport in the Asian summer monsoon region and its relationship with summer precipitation in China [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2010, 24(1): 31-42.
- [24] Huang C, Zeng T, Ye F, et al. Natural and anthropogenic impacts on environmental changes over the past 7500 years based on the multiproxy study of shelf sediments in the northern South China Sea [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2018, 197: 35-48.
- [25] Yuan J H, Luo Y L, Xu Z L, et al. Deep-sea pollen record during 3.0-2.0 Ma B.P. from ODP Site 1143 and its response to global climate changes [J]. *Marine Science Bulletin*, 2006, 8(1): 1-10.
- [26] 黄宝琦, 翦知湔, 林慧玲. 南海东北部晚第四纪古生产力变化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2000, 20(2): 65-68. [HUANG Baoqi, JIAN Zhimin, LIN Huiling. Late Quaternary changes of paleoproductivity in the northeastern South China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2000, 20(2): 65-68.]
- [27] 梁静之, 黄宝琦, 董轶婷, 等. 南海北部MD12-3432站MIS 11期以来底栖有孔虫反映的古环境变化[J]. *地学前缘*, 2016, 23(4): 292-300. [LIANG Jingzhi, HUANG Baoqi, DONG Yiting, et al. Benthic foraminifera's implications on paleo-environment variability in MD12-3432 in the northern South China Sea since MIS 11 [J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(4): 292-300.]
- [28] Wang R J, Abelman A. Radiolarian responses to paleoceanographic events of the southern South China Sea during the Pleistocene [J]. *Marine Micropaleontology*, 2002, 46(1-2): 25-44.
- [29] 李建, 王汝建. 南海北部一百万年以来的表层古生产力变化: 来自ODP1144站的蛋白石记录[J]. *地质学报*, 2004, 78(2): 228-233. [LI Jian, WANG Rujian. Paleoproductivity variability of the northern South China Sea during the past 1 Ma: The opal record from ODP site 1144 [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(2): 228-233.]
- [30] Tang Z, Shi X F, Zhang X, et al. Deglacial biogenic opal peaks revealing enhanced Southern Ocean upwelling during the last 513 ka [J]. *Quaternary International*, 2016, 425: 445-452.
- [31] 边叶萍, 翦知湔. 南海最近2400年来的古海洋学变化与历史气候资料的比较[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2005, 25(4): 73-78. [BIAN Yeping, JIAN Zhimin. Paleoceanographic changes in the South China Sea over the Last 2 400 Years and Their comparison with the historical paleoclimatical records [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2005, 25(4): 73-78.]
- [32] 李丽, 王慧, 汪品先. 南海北部17937岩心四万年来古环境变化的分子有机地球化学记录[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2008, 33(6): 793-799. [LI Li, WANG Hui, WANG Pinxian. Molecular organic geochemical record of paleoenvironmental changes of core 17937 in northern South China Sea since 40 ka [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2008, 33(6): 793-799.]
- [33] Li Y F, Peng S Q, Yang W, et al. Numerical simulation of the structure and variation of upwelling off the east coast of Hainan Island using QuikSCAT winds [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2012, 30(6): 1068-1081.
- [34] Hu J Y, Liang X S, Lin H Y. Coastal upwelling off the China coasts[M]//Coastal Environment, Disaster, and Infrastructure-A Case Study of China's Coastline. BoD—Books on Demand, 2018. DOI: 10.5772/intechopen.80738.
- [35] Song X Y, Lai Z G, Ji R B, et al. Summertime primary production in northwest South China Sea: Interaction of coastal eddy, upwelling and biological processes [J]. *Continental Shelf Research*, 2012, 48: 110-121.
- [36] Zhou L B, Huang L M, Tan Y H, et al. Size-based analysis of a zooplankton community under the influence of the Pearl River plume and coastal upwelling in the northeastern South China Sea [J]. *Marine Biology Research*, 2015, 11(2): 168-179.
- [37] Snyder M A, Sloan L C, Diffenbaugh N C, et al. Future climate change and upwelling in the California Current [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(15): 1823.
- [38] Jing Z Y, Qi Y Q, Du Y. Upwelling in the continental shelf of northern South China Sea associated with 1997-1998 El Nino [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2011: 116.
- [39] Sydean W J, García-Reyes M, Schoeman D S, et al. Climate change and wind intensification in coastal upwelling ecosystems [J]. *Science*, 2014, 345(6192): 77-80.
- [40] 吴日升, 李立. 南海上升流研究概述[J]. *台湾海峡*, 2003, 22(2): 269-277. [WU Risheng, LI Li. Summarization of study on upwelling

- system in the South China Sea [J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2003, 22 (2): 269-277.]
- [41] 郭飞, 侍茂崇, 夏复万. 琼东沿岸上升流二维数值模型的诊断计算[J]. *海洋学报*, 1998, 20 (6): 109-116. [GUO Fei, SHI Maochong, XIA Zongwan. Two-dimension diagnose model to calculate upwelling on offshore of the east coast of Hainan Island [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1998, 20 (6): 109-116.]
- [42] Goodkin N F, Switzer A D, McCorry D L, et al. Coral communities of Hong Kong: Long-lived corals in a marginal reef environment [J]. *Marine Ecology Progress*, 2011, 426: 185-196.
- [43] Dymond J, Collier R, McManus J, et al. Can the aluminum and titanium contents of ocean sediments be used to determine the paleoproductivity of the oceans? [J]. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 1997, 12 (4): 586-593.
- [44] James R H, Palmer M R. Marine geochemical cycles of the alkali elements and boron: the role of sediments [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64 (18): 3111-3122.
- [45] 沈俊, 施张燕, 冯庆来. 古海洋生产力地球化学指标的研究[J]. *地质科技情报*, 2011, 30 (2): 69-77. [SHEN Jun, SHI Zhangyan, FENG Qinglai. Review on geochemical proxies in paleo-productivity studies [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2011, 30 (2): 69-77.]
- [46] Yang S Y, Li C X, Cai J G. Geochemical compositions of core sediments in eastern China: Implication for Late Cenozoic palaeoenvironmental changes [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 229 (4): 287-302.
- [47] Dymond J, Suess E, Lyle M. Barium in Deep-Sea sediment: a geochemical proxy for paleoproductivity [J]. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 1992, 7 (2): 163-181.
- [48] 田正隆, 陈绍勇, 龙爱民. 以Ba为指标反演海洋古生产力的研究进展[J]. *热带海洋学报*, 2004, 23 (3): 78-86. [TIAN Zhenglong, CHEN Shaoyong, LONG Aimin. A review on barium as a geochemical proxy to reconstruct paleoproductivity [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2004, 23 (3): 78-86.]
- [49] 韦恒叶. 古海洋生产力与氧化还原指标——元素地球化学综述[J]. *沉积与特提斯地质*, 2012, 32 (2): 76-88. [WEI Yeheng. Productivity and redox proxies of palaeo-oceans: An overview of elementary geochemistry [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2012, 32 (2): 76-88.]
- [50] 陈建芳. 古海洋研究中的地球化学新指标[J]. *地球科学进展*, 2002, 17 (3): 402-410. [CHEN Jianfang. New geochemical proxies in paleoceanography studies [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2002, 17 (3): 402-410.]
- [51] Pirrung M, Illner P, Matthiessen J. Biogenic barium in surface sediments of the European Nordic Seas [J]. *Marine Geology*, 2008, 250 (1-2): 89-103.
- [52] Elderfield H. Tracers of ocean paleoproductivity and paleochemistry: An introduction [J]. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 1990, 5 (5): 711-717.
- [53] Francois R, Honjo S, Manganini S J, et al. Biogenic barium fluxes to the deep sea: Implications for paleoproductivity reconstruction [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9 (2): 289-303.
- [54] 邹亮, 韦刚健, 李军. 海洋沉积物中生物成因Ba的海洋生产力研究[J]. *第四纪研究*, 2011, 31 (2): 307-315. [ZOU Liang, WEI Gangjian, LI Jun. Review on ocean productivity by using biogenic Ba in marine sediments [J]. *Quaternary Sciences*, 2011, 31 (2): 307-315.]
- [55] Riethdorf J R, Nürnberg D, Max L, et al. Millennial-scale variability of marine productivity and terrigenous matter supply in the western Bering Sea over the past 180 kyr [J]. *Climate of the Past*, 2013, 9 (3): 1345-1373.
- [56] Frank M, Gersonde R, Van Der Loeff M R, et al. Similar glacial and interglacial export bioproductivity in the Atlantic sector of the Southern Ocean: Multiproxy evidence and implications for glacial atmospheric CO₂ [J]. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 2000, 15 (6): 642-658.
- [57] Bonn W J, Gingele F X, Grobe H, et al. Palaeoproductivity at the Antarctic continental margin: opal and barium records for the last 400 ka [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1998, 139 (3-4): 195-211.
- [58] Murray R W, Leinen M. Scavenged excess aluminum and its relationship to bulk titanium in biogenic sediment from the central equatorial Pacific Ocean [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60 (20): 3869-3878.
- [59] 韦刚健, 刘颖, 李献华, 等. 南海沉积物中过剩铝问题的探讨[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2003, 22 (1): 23-25. [WEI Gangjian, LIU Ying, LI Xianhua, et al. Excess al in the sediments from South China Sea [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2003, 22 (1): 23-25.]
- [60] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: its composition and evolution [M]. United States: Blackwell Scientific Publishing, 1985.
- [61] Klump J, Hebbeln D, Wefer G. The impact of sediment provenance on barium-based productivity estimates [J]. *Marine Geology*, 2000, 169 (3-4): 259-271.
- [62] Goldberg E L, Gorbarenko S A, Shaporenko A D, et al. Instability of last glacial climate from SRXFA data for bottom sediments in the Okhotsk Sea [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2005, 543 (1): 284-287.
- [63] 张富元, 张霄宇, 杨群慧, 等. 南海东部海域的沉积作用和物质来源研究[J]. *海洋学报*, 2005, 27 (2): 79-90. [ZHANG Fuyuan, ZHANG Xiaoyu, YANG Hui Qunhui, et al. Research on sedimentations and material sources in the eastern South China Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, 27 (2): 79-90.]
- [64] Woods A M, Lloyd J M, Zong Y Q, et al. Spatial mapping of Pearl River Estuary surface sediment geochemistry: influence of data analysis on environmental interpretation [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2012, 115: 218-233.
- [65] 青子琪, 刘连文, 郑洪波. 越南岸外夏季上升流区22万年来东亚季风的沉积与地球化学记录[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2005, 25 (2): 67-72. [QING Ziqi, LIU Lianwen, ZHENG Hongbo. Sedimentological and geochemical records of east asian monsoon in summer upwelling region off the coast of vietnam for the past 220 000 years [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2005, 25 (2): 67-72.]
- [66] 谢玲玲, 张书文, 赵辉. 琼东上升流研究概述[J]. *热带海洋学报*,

- 2012, 31 (4): 35-41. [XIE Lingling, ZHANG Shuwen, ZHAO Hui. Overview of studies on Qiongdong upwelling [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2012, 31 (4): 35-41.]
- [67] 刘羿, 彭子成, 韦刚健, 等. 南海北部夏季沿岸上升流近百年的强度变化[J]. *地球化学*, 2009, 38 (4): 317-322. [LIU Yi, PENG Zicheng, WEI Gangjian, et al. Variation of summer coastal upwelling at northern South China Sea during the last 100 years [J]. *Geochimica*, 2009, 38 (4): 317-322.]
- [68] Hu C Y, Henderson G M, Huang J H, et al. Quantification of Holocene Asian monsoon rainfall from spatially separated cave records [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 266 (3-4): 221-232.
- [69] Tierney J E, Oppo D W, Rosenthal Y, et al. Coordinated hydrological regimes in the Indo-Pacific region during the past two millennia [J]. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 2010, 25 (1): PA1102.
- [70] Moy C M, Seltzer G O, Rodbell D T, et al. Variability of El Nino/Southern Oscillation activity at millennial timescales during the Holocene epoch [J]. *Nature*, 2002, 420 (6912): 162-165.
- [71] Yang B, Braeuning A, Johnson K R, et al. General characteristics of temperature variation in China during the last two millennia [J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29 (9): 38-1-38-4.
- [72] Neukom R, Steiger N, Gómez-Navarro J J, et al. No evidence for globally coherent warm and cold periods over the preindustrial Common Era [J]. *Nature*, 2019, 571 (7766): 550-554.
- [73] Jickells T D. Global iron connections between desert dust, ocean biogeochemistry, and climate [J]. *Science*, 2005, 308 (5718): 67-71.