

末次盛冰期至早全新世冲绳海槽中南部 黑潮的阶段性演化及其对中国东部降水的影响*

冶玉兰^{1,2} 杨小强¹ 张庭伟¹ 胡邦琦^{2,3}

1 中山大学地球科学与工程学院, 广东广州 510275

2 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 山东青岛 266237

3 青岛海洋科技中心海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东青岛 266237

摘 要 黑潮是北太平洋副热带环流的核心西边界流, 其演化历史对理解西北太平洋海洋环流与气候变化具有重要意义。然而, 以往研究多依赖单一指标, 对黑潮演化过程中上层水团结构与沉积动力的综合特征认识不足, 对其在轨道一千年尺度是否对中国东部降水存在影响尚不清晰。基于此, 本研究综合海水表层种与温跃层种有孔虫碳同位素差值($\Delta\delta^{13}\text{C}$)、SIRM 退磁区间比值($\text{SIRM}_{(30-60)/(2.5-10)\text{ mT}}$)和沉积物粒度分析, 重建了末次盛冰期至早全新世期间冲绳海槽中南部黑潮的演化序列。 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 指示上层海水垂向结构变化, $\text{SIRM}_{(30-60)/(2.5-10)\text{ mT}}$ 和粒度共同反映黑潮对粗颗粒物质的输运能力, 三者从不同物理过程共同响应黑潮变化。结果表明, 黑潮演化呈现显著的阶段性特征: 末次盛冰期(18.9—17 ka)整体减弱; 冰消期(17—12 ka)波动增强, 在 Bølling-Allerød (BA) 暖期和 Younger Dryas (YD) 冷事件期间分别加强和短暂减弱; 冰消期末至早全新世(12—6 ka)持续增强, 至约 9.5 ka 达到鼎盛状态。结合区域海温梯度记录对比显示, 黑潮的阶段性演化与热带太平洋东西海温梯度变化一致, 类 La Niña 背景期有利于黑潮增强, 类 El Niño 背景期则相反。与中国东部梅雨带内大九湖、巢湖和新街遗址 3 条古降水记录对比发现, 黑潮强度与区域降水在轨道尺度上呈“强黑潮—多降水”的耦合关系, 且存在显著的空间不均一性: 靠近冲绳海槽的梅雨带核心区降水与黑潮强度高度同步, 而远离海槽的西部边缘响应相对弱化, 反映了黑潮影响下西太平洋水汽补给的影响。本研究揭示了黑潮活动的驱动机制和对中国梅雨区域降水的可能影响, 为深入理解西边界流对东亚水文气候的调控提供了新证据。

关键词 黑潮 末次盛冰期 有孔虫碳同位素 环境磁学 粒度 冲绳海槽

第一作者简介 冶玉兰, 女, 2000 年生, 硕士, 主要从事第四纪地质研究。E-mail: yeylan@mail2.sysu.edu.cn。

通讯作者简介 胡邦琦, 男, 1983 年生, 博士, 研究员, 主要从事海洋沉积与矿产资源调查研究。E-mail: bangqihu@gmail.com。

中图分类号: P532; P467 文献标志码: A

Evolution of Kuroshio Current in south-central Okinawa Trough from the Last Glacial Maximum to Early Holocene and its influence on precipitation in eastern China

* 国家自然科学基金项目(编号: 42330504, 42274090, 42576072), 山东省自然科学基金项目(编号: ZR2024MD018)和中国地质调查项目(编号: DD20230647, DD20240301801)联合资助。[Co-funded by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 42330504, 42274090, 42576072), the Natural Science Foundation of Shandong Province (No. ZR2024MD018) and the Project of China Geological Survey (Nos. DD20230647, DD20240301801)]

收稿日期: 2026-03-24 改回日期: 2026-04-22

YE Yulan^{1,2} YANG Xiaoqiang¹ ZHANG Tingwei¹ HU Bangqi^{2,3}¹ School of Earth Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China² Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Shandong Qingdao 266237, China³ Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao 266237, China

Abstract As the core western boundary current of the North Pacific subtropical gyre, the evolutionary history of the Kuroshio Current (KC) is of great significance for understanding ocean circulation and climate change in the Northwest Pacific. However, previous studies have mostly relied on single proxies, providing insufficient understanding of the integrated characteristics of upper water-mass structure and sedimentary dynamics during KC evolution. Moreover, it remains unclear whether KC variability has influenced precipitation in eastern China on orbital-millennial timescales. Based on Core CF5 from the south-central Okinawa Trough, this study reconstructs the KC evolution from the Last Glacial Maximum to the early Holocene through integrated analyses of the carbon isotope difference ($\Delta\delta^{13}\text{C}$) between surface- and thermocline-dwelling planktonic foraminifera, the SIRM demagnetization interval ratio ($\text{SIRM}_{@ (30-60)/(2.5-10) \text{ mT}}$), and sediment grain size. $\Delta\delta^{13}\text{C}$ reflects changes in the vertical structure of the upper ocean, whereas the $\text{SIRM}_{@ (30-60)/(2.5-10) \text{ mT}}$ ratio and grain size together indicate the transport capacity of the KC for coarse-grained materials; these three proxies respond to KC variability from different physical perspectives. The results reveal distinct phases in KC evolution: a generally weakened phase during the Last Glacial Maximum (18.9–17 ka); a fluctuating intensification during the deglaciation (17–12 ka), with a strengthening pulse during the Bølling-Allerød (BA) warm period and a brief weakening during the Younger Dryas (YD) cold event; and a sustained strengthening from the end of the deglaciation to the early Holocene (12–6 ka), culminating in its peak intensity at ~9.5 ka. Comparison with regional sea surface temperature gradient (ΔSST) records shows that the phased evolution of the KC is consistent with the zonal ΔSST across the tropical Pacific, with La Niña-like background states favoring KC intensification and El Niño-like states favoring weakening. Comparison with three paleo-precipitation records from the Meiyu rainbelt region of eastern China—Dajiuhe, Chaohu, and the Xinjie site—reveals a coupling between KC intensity and regional precipitation on orbital scales (strong KC-more precipitation), accompanied by significant spatial heterogeneity: precipitation in the core Meiyu region proximal to the Okinawa Trough is highly synchronous with KC intensity, whereas the western marginal region exhibits a relatively muted response, reflecting the influence of KC-modulated western Pacific moisture supply. This study reveals the driving mechanisms of KC variability and its potential influence on precipitation in the Meiyu region of China, providing new evidence for understanding the role of western boundary currents in regulating East Asian hydroclimate.

Key words Kuroshio Current, Last Glacial Maximum, foraminiferal carbon isotopes, environmental magnetism, grain size, Okinawa Trough

About the first author YE Yulan, born in 2000, holds a master's degree. Her main research field is Quaternary geology. E-mail: yeylan@mail2.sysu.edu.cn.

About the corresponding author HU Bangqi, born in 1983, holds a Ph.D. and is a professor. His main research interests include marine sedimentation and mineral resource investigation. E-mail: bangqihu@gmail.com.

0 引言

黑潮是北太平洋最强的西边界流，由北赤道暖流在菲律宾群岛以东分支汇合形成，沿台湾东侧北上，经琉球群岛进入冲绳海槽，最终将巨量热量和盐分输送至中高纬度地区（Jayne *et al.*, 2009; Fenies *et al.*, 2023）。其主轴位于西太平洋海气热交换最强烈的区域，对东亚气候、上层海洋热结构以及该地区的海洋沉积物分布有着强烈的影响（Jian *et al.*, 2000; Qiu, 2001; Hu *et al.*, 2015; Yang *et al.*, 2024）。同时，黑潮有可能通过海—气相互作用显著影响东亚季风系统，进而影响中国东部的降水格局和极端气候事件（Sasaki *et al.*, 2012; 殷明等, 2016; Gan *et al.*, 2019）。

近年来，前人多基于沉积和地化指标重建黑潮的活动规律与演化路径。根据有孔虫碳同位素梯度（ $\Delta\delta^{13}\text{C}$ ）及表层海水温度分别从温跃层深度、水体分层与水团温盐性质等角度揭示上层水团结构对黑潮强度演化的响应（Ujiié and Ujiié, 1999; Jian *et al.*, 2000; Ujiié *et al.*, 2003; Li *et al.*, 2020）。对沉积物粒度和 Sr-Nd 同位素的分析指示黑潮的流速大小和移动路径（McCave *et al.*, 1995; Diekmann *et al.*, 2008, Dou *et al.*, 2010; Zheng *et al.*, 2016）。同时也有利用沉积物的磁学特征讨论粗颗粒磁性矿物的输运能力对黑潮的响应，认为黑潮增强时粗颗粒组分输入增加（Wang *et al.*, 2025b）。综合上述指标研究发现，黑潮强度在末次冰盛期整体较弱，自冰消期开始呈现阶段性增强趋势，至全新世达到强盛状态（Shi *et al.*, 2014）。然而，已有研究多侧重单一维度，在黑潮活动时上层水团结构和流速与搬运能力的综合特征认识相对不足，不同钻孔不同指标重建的黑潮演化时空响应差异显著。如最新重建结果揭示，末次冰盛期黑潮主路径可能偏移或未进入冲绳海槽，冰后期随海平面回升重新入侵并持续增强（Wang *et al.*, 2025a），且黑潮的强度变化与路径迁移存在显著的空间异质性（Huang *et al.*, 2025）。

此外，现代观测与数值模拟证实，在年际—年代际尺度上，黑潮的变化可以通过调节向西太平洋暖池的热量积累及向东亚大陆的水汽输送，对东亚季风降水产生一定影响（Qiu and Chen, 2010; Taguchi *et al.*, 2010; Gan *et al.*, 2019）。近期定量研究进一步显示，黑潮对东亚降水的影响在中国东

部梅雨带尤为显著：东海黑潮增温可通过强化对流层低层风场辐合与水汽聚集增强梅雨降水（Qiao *et al.*, 2024），过去 40 年间黑潮温度升高对梅雨期降水增强的贡献率可达 37%（Qiao *et al.*, 2025）。在长江流域的全新世气候演变研究中，也发现了降水与黑潮强度从早全新世显著波动向中晚全新世振荡性减少的阶段性转变模式（Chen *et al.*, 2024）。但是在较长时间尺度，在轨道—千年尺度上黑潮演化与中国东部降水之间直接耦合关系及其主导机制的认识仍有待进一步厘清。

基于此，本研究针对冲绳海槽中南部获取的沉积钻孔 CF5，通过对海水表层种（*Globigerinoides ruber*, *G. ruber*）和次表层种（*Pulleniatina obliquiloculata*, *P. ob.*）有孔虫碳同位素分析，结合沉积物粒度及表征磁性矿物颗粒大小和含量变化的磁学参数，构建黑潮综合活动指标，系统重建末次盛冰期至早全新世期间冲绳海槽中南部黑潮的演化特征，揭示轨道—千年尺度上黑潮演变与中国东部降水的耦合关系，并结合热带太平洋东西海温梯度记录，探讨黑潮活动的驱动机制，以期为深入理解西边界流在东亚水文气候变化中的作用提供关键的地质证据。

1 区域地质背景

冲绳海槽位于琉球岛弧与亚洲大陆边缘之间，其形成与菲律宾海板块和欧亚板块的碰撞与俯冲密切相关（Sibuet *et al.*, 1987; Diekmann *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2016）。海槽呈弯曲状自北向南延伸，最深处可达 2500 m，水深一般超过 1000 m（Diekmann *et al.*, 2008）。海槽两侧具有陡峭的边缘，底部则呈现平坦形态，由琉球岛弧与琉球海沟构成完整的海沟岛弧盆地体系（Li *et al.*, 2023）。起源于西太平洋赤道附近的高温、高盐表层暖流，沿菲律宾东部海域转向之后沿台湾东岸北上，形成黑潮，是北太平洋副热带环流的核心西边界流（Hu *et al.*, 2015）。黑潮在进入冲绳海槽后沿大陆坡北上（图 1），其主流轴位置和水动力强度对该区域的海洋环境具有主导性控制作用（Wang *et al.*, 2016; Hsueh, 2000）。黑潮夏季表层水温可达 28℃ 以上，盐度通常在 34.5‰~35‰ 之间，流速快、流量大、具有较强的搬运能力，是将低纬度的高热量输送到中高纬度的重要输送带。现代观测数据表明，黑潮在冲绳海槽段的表层流速可达 1.5~2.0 m/s，并受

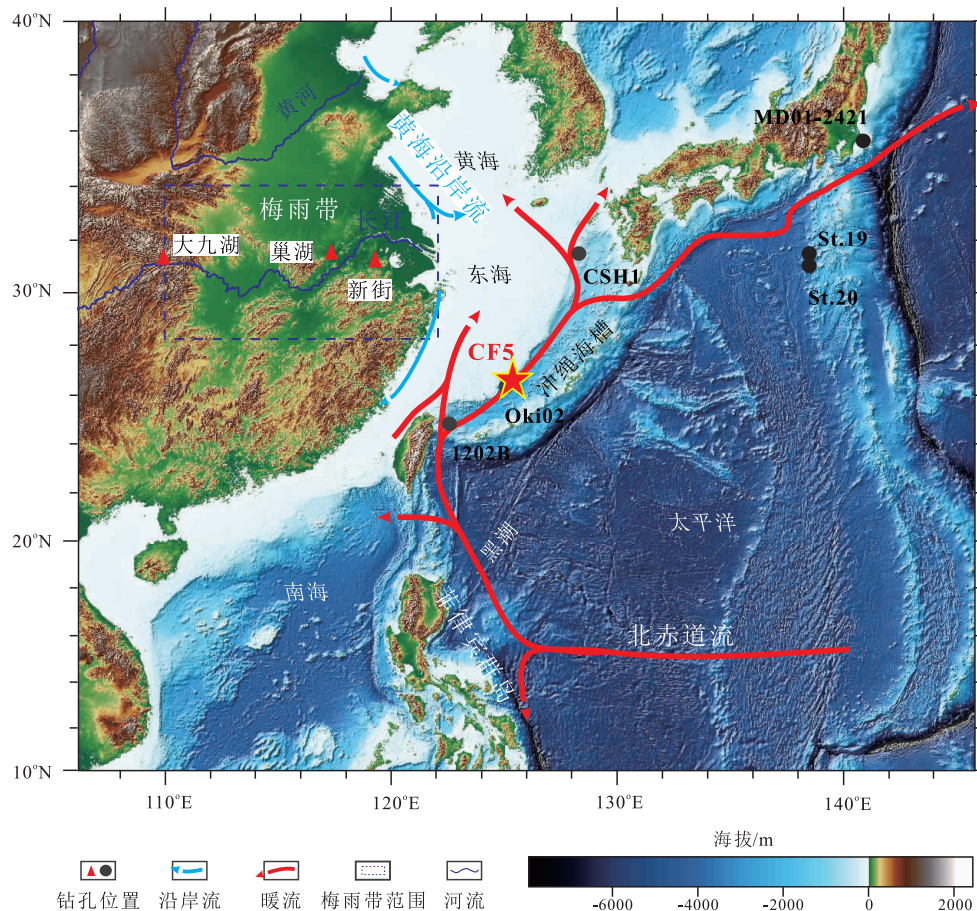


图 1 钻孔 CF5 在冲绳海槽内的位置 (红星) 及黑潮流动路径 (黑色圆点表示文中引用讨论的钻孔; 红色三角形为梅雨影响区域钻孔; 蓝色虚框为梅雨带区域, 据胡娅敏等, 2008)

Fig. 1 Location of Core CF5 (red star) in the Okinawa Trough and the flow path of the Kuroshio Current (KC) (Black dots denote cores discussed and cited in the text; red triangles indicate drilling holes within the Meiyu-influenced region; the blue dashed box delineates the Meiyu rainbelt region, according to Hu *et al.*, 2008)

到季节性风应力场、海洋温盐结构等因素的调节 (Sasaki *et al.*, 2012; Zhao *et al.*, 2015)。在冰期—间冰期气候转换过程中, 黑潮的强度和空间上的南、北摆动, 与 El Niño 等海—气耦合过程相关, 深刻影响着中国东部沿海区域的气候和沉积过程 (Hu *et al.*, 2015)。

研究区沉积环境受物质来源、海洋动力条件和区域构造活动等多重因素控制 (Ujiie *et al.*, 2003; Bian *et al.*, 2010; Dou *et al.*, 2010; 姜 韬 等, 2015)。沉积物主要来自邻近的东海陆架、台湾造山带以及琉球火山岛弧, 通过河流输入、重力搬运和洋流输送进入海槽 (Bian *et al.*, 2010; Zheng *et al.*, 2016; 王 越 奇 等, 2018; Wang *et al.*, 2025a)。黑潮作为该区域的主控动力, 其流速和路

径变化直接影响沉积物的输运、分选和堆积过程: 流速增强时, 水动力增强可将粗颗粒物质向更远区域搬运; 流速减弱时, 沉积物沉降速率和堆积厚度相应变化 (Ellwood and Ledbetter, 1977; Qiu, 2001; Qiu and Chen, 2010; Zhao *et al.*, 2015)。这种水动力调控在沉积记录中表现为粒度组成、磁学参数及矿物特征的变化, 为重建区域古海洋环境提供了重要载体 (Thompson and Oldfield, 1986)。

2 材料与方法

2.1 研究材料

本研究选取的沉积柱状样 (CF5 钻孔) 位于冲绳海槽中南部 (125.33° E, 26.57° N; 水深:

1015 m), 钻孔总长 514 cm, 是由青岛海洋地质研究所于 2020 年使用重力柱状采样器获取。钻孔岩性以青灰色粉砂质黏土为主, 沉积连续, 在岩性上未发现明显的沉积扰动和间断, 处于现代黑潮主流轴影响范围内, 是研究黑潮演化的理想站位。将钻孔沿中间切分之后, 以约 2 cm 为间距, 连续采集 249 个样品进行磁学测试; 以相同间距同步采集 249 个样品用于粒度分析, 测试过程中个别样品损耗未获得有效数据, 但不影响整体粒度曲线的趋势与解释; 以约 6 cm 为间距, 采集 76 个样品进行有孔虫碳同位素分析。

2.2 研究方法

2.2.1 碳同位素分析

在 CF5 钻孔样品中挑选浮游有孔虫表层种 *Globigerinoides ruber* (*G. ruber*) 和温跃层种 *P. obliquiloculata* (*P. ob*) 壳体进行稳定碳同位素分析。测试样品个体要求壳体完整、表面洁净且无明显溶蚀痕迹。挑选出的壳体经玻璃板轻压破碎后, 在 10% H_2O_2 中浸泡 12 h 去除有机质, 随后在乙醇溶液中用超声波清洗器 (40 Hz) 震荡 3~5 s 去除残留颗粒, 重复清洗 3 次, 直至上清液不再浑浊, 最后置于 60 °C 烘箱中烘干。将预处理后的有孔虫个体转移至 Gas bench II 样品瓶中, 加入 100% 磷酸过夜反应, 生成的 CO_2 气体导入 Thermo Fisher Delta V Plus 稳定同位素质谱仪进行测定。测试工作在中山大学地球科学与工程学院古地磁实验室完成。测试结果按国际标准转换为 Vienna Pee Dee Belemnite (VPDB) 量表, 根据 NBS 18 和 04405 标准进行精度校准, 分析精度优于 $\pm 0.06\text{‰}$ 。由于黑潮活动强烈时, 水体分层增强, 不同水深有孔虫的同位素比值的差值能够反映水体结构的变化, 我们采用 $\Delta\delta^{13}C_{G. ruber-P. ob} = \delta^{13}C_{G. ruber} - \delta^{13}C_{P. ob}$, 反映表层与温跃层之间的碳同位素差异。 $\Delta\delta^{13}C$ 增大指示温跃层加深、上层海洋分层加强, 通常对应黑潮增强阶段; 反之则指示温跃层变浅、分层减弱 (Ujiie *et al.*, 2003)。

2.2.2 粒度分析

称取约 0.2~0.3 g 沉积物样品 (经预实验确定该质量可满足仪器遮光度要求), 依次加入 10% 双氧水和 10% 盐酸溶液去除有机质与碳酸盐, 反应完全后用超纯水离心清洗至 pH 呈中性。上机测试

前加入 0.05 mol/L 六偏磷酸钠溶液并超声震荡 5 min 使颗粒充分分散。粒度分析在中山大学地球科学与工程学院海洋地质实验室完成, 使用 Mastersizer 3000 型激光粒度分析仪。测试过程中仪器搅拌器转速为 2500 转/min, 并伴随 15 s 超声处理, 样品之间执行超声清洗以防交叉污染。粒度测量范围为 0~3500 μm , 重复测量相对误差小于 5%。

2.2.3 磁学参数测量

对 CF5 钻孔所有样品进行等温剩磁 (IRM) 测量。首先给样品施加 1 T 的脉冲场使样品饱和磁化, 测得样品的饱和等温剩磁 (SIRM), 随后逐步施加梯度交变场退磁 (2.5~80 mT) 并测量剩磁。测量工作在中国地质大学 (武汉) 地球科学学院环境磁学实验室完成, 使用 2G755-4k U-Channel SQUID 超导岩石磁力仪, 灵敏度为 $1.0 \times 10^{-12} \text{ Am}^2$ 。

对所有样品在 AGICO KLY-5 Kappabridge 磁化率仪进行同相位 (in-phase) 和异相位 (out-of-phase) 体积磁化率的测试 (工作频率 1220 Hz, 外加场强 400 A/m)。异相位磁化率源于磁性颗粒在交变磁场中的磁弛豫滞后效应, 其数值大小对处于超顺磁/单畴边界的细小磁性颗粒尤为敏感, 功能上与频率磁化率 (χ_{fd}) 等效, 可指示超顺磁颗粒的相对丰度 (Hrouda *et al.*, 2013)。实验在中山大学地球科学与工程学院古地磁实验室完成。

3 年代框架

为获取精确的沉积物年龄信息, 作者根据沉积物粒度的变化趋势, 从 CF5 沉积物柱状样中自上而下选取岩性均一、粒度较细的层位, 挑选 18 个浮游有孔虫壳体样品分别送往美国 Beta 实验室和中国科学院广州地球化学研究所进行放射性碳同位素加速质谱仪测年 (AMS ^{14}C)。

测年数据显示, 不同层位 AMS ^{14}C 年龄存在明显的新、老倒置现象 (表 1 中带* 的样品), 这与冲绳海槽高沉积速率地区普遍存在的沉积物二次搬运过程密切相关。末次冰消期以来, 海平面快速回升导致东海陆架被大面积淹没, 陆架上原有的老沉积物被侵蚀再搬运至冲绳海槽再沉积 (Dou *et al.*, 2010; Zheng *et al.*, 2016), 造成了不同层位中浮游有孔虫壳体年龄的新老倒置。Broecker 等 (1989) 指出, 在高沉积速率的海洋沉积物中, 再搬运作用是造成有孔虫 AMS ^{14}C 年龄异常的主要原因之一,

剔除明显偏老的非原位年龄是建立可靠年代框架的必要步骤。

在年龄控制点的筛选过程中,本研究遵循以下标准:(1)优先选取自下而上年龄随深度递减的测年点,符合地层叠覆律;(2)剔除明显偏离整体年龄—深度趋势的异常偏老样品(表 1 中带* 标记),这些样品的偏老年龄由二次搬运的有孔虫加入所致。综合上述标准,从 18 个测年点中剔除 9 个受二次搬运影响的样品,最终选取 9 个测年样品建立年龄深度模型(见表 1)。测年结果使用 CALIB 8.1.0 软件进行日历校正,校正曲线选用 Marine 20 (Heaton *et al.*, 2020),应用当地海洋储库效应校正值 $\Delta R = -150 \pm 59^{14}\text{C yr}$ (Wang *et al.*, 2025b)。年代—深度模型基于 Bacon v2.5.6 构建(默认分层厚度为 5 cm; Blaauw and Christen, 2011),采用贝叶斯统计方法并考虑沉积速率的时变性。结果表明(图 2),CF5 钻孔记录了自约 18.9—2.9 ka 期间较连续的沉积过程,沉积速率介于 20.8~49.6 cm/kyr 之间,在约 7.0 ka 时达到峰值,平均沉积速率为 33.2 cm/kyr。

鉴于本研究聚焦末次盛冰期至早全新世黑潮的

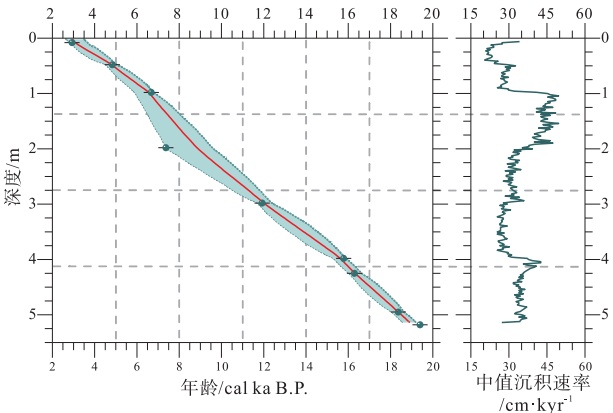


图 2 钻孔 CF5 的年龄深度模型

Fig. 2 Age-depth model of Core CF5

阶段性演化及其气候效应,且钻孔上部(约 6 ka 以来)仅有 2 个年龄控制点(8 cm 和 48 cm,表 1),沉积速率出现异常波动,可能存在由生物扰动、垂向混入导致的 AMS ^{14}C 年龄偏差 (Broecker *et al.*, 1989; Zheng *et al.*, 2016)。此外,浮游有孔虫碳同位素数据在约 6 ka 以来分辨率较低,难以支持精细的古海洋重建。因此,讨论分析主要围绕约 18.9—6 ka 时段展开,中晚全新世黑潮变率及其与东亚降水的耦合关系有待今后更高分辨率和

表 1 钻孔 CF5 的 AMS ^{14}C 年龄信息

Table 1 Age information of the Core CF5 using AMS ^{14}C method

实验室编号	深度/cm	^{14}C 常规年龄/a B. P.	校正年龄/cal a B.P., 2σ	测年材料
Beta 491955	8	3150±30	2836~3046	浮游有孔虫混合样
Beta 491956	48	4620±30	4782~4939	浮游有孔虫混合样
Beta 491957	98	6230±30	6594~6771	浮游有孔虫混合样
Beta 491958 *	102	10170±40	11074~11255	浮游有孔虫混合样
Beta 491959	152	6850±30	7290~7429	浮游有孔虫混合样
Beta 491960 *	202	14180±40	16423~16898	浮游有孔虫混合样
GZ11699 *	227	12920±60	14456~15164	浮游有孔虫混合样
Beta 491961	252	10610±40	11716~12100	浮游有孔虫混合样
GZ11700 *	285	13320±70	15085~15703	浮游有孔虫混合样
GZ11701 *	321	12900±60	14419~15137	浮游有孔虫混合样
Beta 491962 *	348	13320±40	15238~15631	浮游有孔虫混合样
GZ11702 *	375	13390±60	15180~15782	浮游有孔虫混合样
Beta 491963	398	13540±40	15595~15980	浮游有孔虫混合样
GZ11703	424	14010±70	15976~16619	浮游有孔虫混合样
Beta 491964 *	438	16510±50	19246~19603	浮游有孔虫混合样
Beta 491965 *	478	16280±60	18945~19353	浮游有孔虫混合样
GZ11704	496	15720±80	18089~18652	浮游有孔虫混合样
Beta 491966	518	16470±50	19213~19567	浮游有孔虫混合样

注:前缀 Beta、GZ 分别为美国 Beta 实验室和广州地球化学研究所测的样品。其中带* 的样品剔除,不参与 Bacon 程序构建年龄—深度框架。

更精确年代控制的工作进一步厘清。

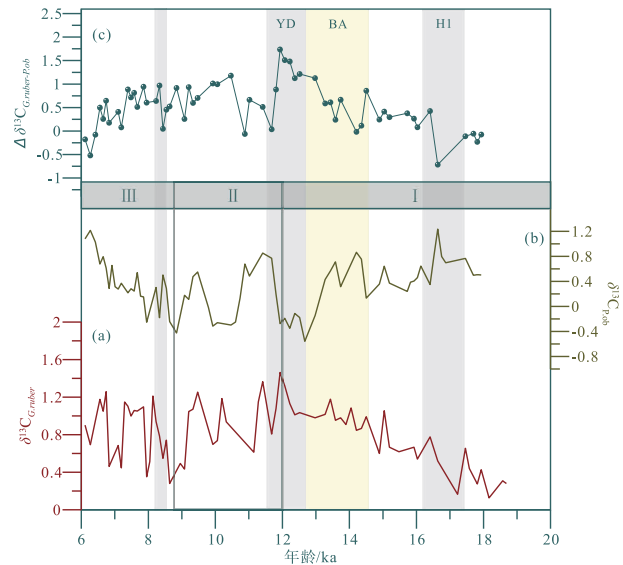
4 结果

4.1 有孔虫碳同位素

浮游有孔虫 *G. ruber* 主要生活在表层水体, 而 *P. ob* 是温跃层种属, 生活在约 100 m 左右水深, 两者壳体 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 值的变化反映了上层水团中碳的混合均一程度和水分层情况 (Jian *et al.*, 2000; Jing *et al.*, 2024)。由于黑潮以高温、高盐和低营养盐为特征, 当黑潮侵入时, 水体中营养盐组分相应会降低, 因此表层浮游有孔虫壳体的碳同位素相应地会偏正, 表层和温跃层之间碳同位素的梯度将加大 (Ujiie *et al.*, 2003; Chen *et al.*, 2011; Xu *et al.*, 2021)。CF5 钻孔中 *G. ruber* 碳同位素呈现 3 段波动变化: 阶段 I (18.9—12 ka) 逐渐升高; 阶段 II (12—8.8 ka) 波动降低; 阶段 III (8.8—6 ka) 快速波动恢复到与之前相近的水平 (图 3-a)。 *P. ob* 的总体规律与 *G. ruber* 相反, 伴随更为显著的千年尺度的波动 (图 3-b)。即当表层浮游有孔虫碳同位素偏正时, 温跃层种属的碳同位素则偏负, 二者之间的梯度 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 加大 (图 3-c)。这种变化反映了当黑潮侵入时, 温跃层加厚, 海水分层增强, 使表层与次表层的碳同位素之间的混合作用变弱, 梯度增加。

4.2 黑潮活动磁学指标构建

冲绳海槽粗颗粒碎屑主要源自东海陆架和台湾造山带 (Bian *et al.*, 2010; Dou *et al.*, 2010), 黑潮流速变化直接影响其搬运能力, 其增强时搬运更多粗颗粒物质 (Diekmann *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2014; Zheng *et al.*, 2016)。在同一类型的磁性矿物中, 剩磁矫顽力的大小可以反映颗粒的粗细变化。粗颗粒磁铁矿矫顽力低, 其剩磁在低场区间可以被快速清洗; 细颗粒磁铁矿矫顽力较高, 携带的剩磁在较高的交变场才能逐步清除 (Thompson and Oldfield, 1986)。分析 CF5 钻孔样品 SIRM 的交变退磁曲线谱 (图 4-a), 可以发现在 2.5~10 mT 和 30~60 mT 之间, 退磁曲线的衰减过程存在 2 个显著的斜率, 前者快速的衰减代表了粗颗粒磁性矿物, 而后者则反映了较细磁性颗粒携带剩磁的变化。基于这一现象, $\text{SIRM}_{(30-60)/(2.5-10) \text{ mT}}$ 比值 (以下简称



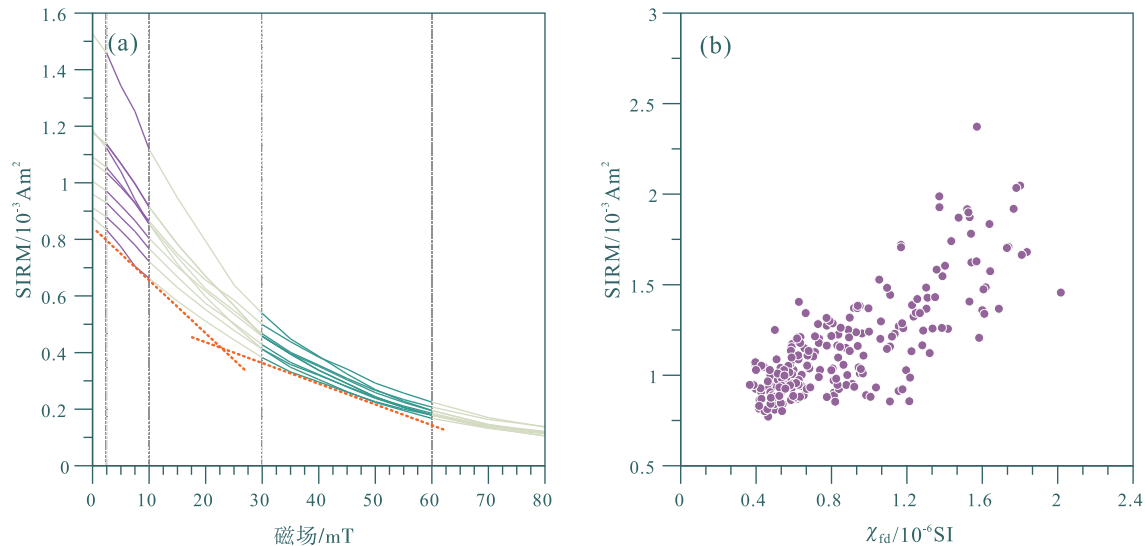
a~c—海水表层浮游有孔虫 (*G. ruber*) 和温跃层种有孔虫 (*P. ob*) 的碳同位素值 ($\delta^{13}\text{C}$) 及其差值 ($\Delta\delta^{13}\text{C}$)。由老到新按罗马数字 I、II、III... 的顺序分别标注了各参数的特征变化阶段。柱状条为千年尺度气候事件

图 3 有孔虫碳同位素结果

Fig. 3 Foraminiferal carbon isotope results

S_{soft} 比值) 可以反映沉积物中磁性矿物颗粒粗、细组分含量的相对变化, 其可能表示了搬运动力强弱变化, 可以作为黑潮强度的替代指标, 即 S_{soft} 比值越低, 指示粗颗粒磁性矿物相对含量越高, 反映黑潮流速增大、搬运能力增强。但是细颗粒磁性矿物可能会受早期成岩作用的影响而溶解, 使原始的颗粒大小信息发生变化, 本研究对早期成岩作用可能的效应进行分析评估。

早期成岩过程中的还原作用优先溶解细小的超顺磁 (SP) 颗粒 (Karlin and Levi, 1983), 若本钻孔沉积物经历了显著的还原改造, 对 SP 颗粒丰度敏感的 χ_{fd} 值则会显著减小。由于 SIRM 只表示大于 SP 颗粒磁性矿物携带的剩磁, 如果还原作用显著, χ_{fd} -SIRM 之间就不可能呈现线性关系。分析 CF5 钻孔所有样品的 χ_{fd} -SIRM 关系, 二者在全孔范围内呈现显著的线性正相关关系 (图 4-b), 表明 SP 颗粒与其他颗粒均主要受碎屑输入控制, SP 颗粒保存良好, 早期成岩溶解作用对磁性矿物粒级组成的改造有限。这一结果与本钻孔较高的沉积速率 (平均 33.2 cm/kyr) 及区域已有研究表明冲绳海槽磁学参数变化主要受控于碎屑输入而非成岩改造 (Liu *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2019) 的结果相一



a—SIRM 交变退磁曲线, 紫色和绿色线条分别表示 2.5~10 mT 和 30~60 mT 退磁区间范围内的剩磁变化, 橙色虚线表示 2 个区间剩磁变化斜率; b—频率磁化率 (χ_{fd}) 与 SIRM 二元关系图

图 4 黑潮磁性代用指标可靠性检验

Fig. 4 Reliability assessment of magnetic proxies for the Kuroshio Current

致。此外, 区域物源研究表明, 冲绳海槽粗颗粒磁铁矿主要源自台湾造山带的碎屑输入 (Li *et al.*, 2019), 黑潮动力变化调控的是该物源端元的输入通量, 而非物源区的根本性改变。因此, 磁学信号的变化本质上反映的是水动力强度对物源混合比例的调制。

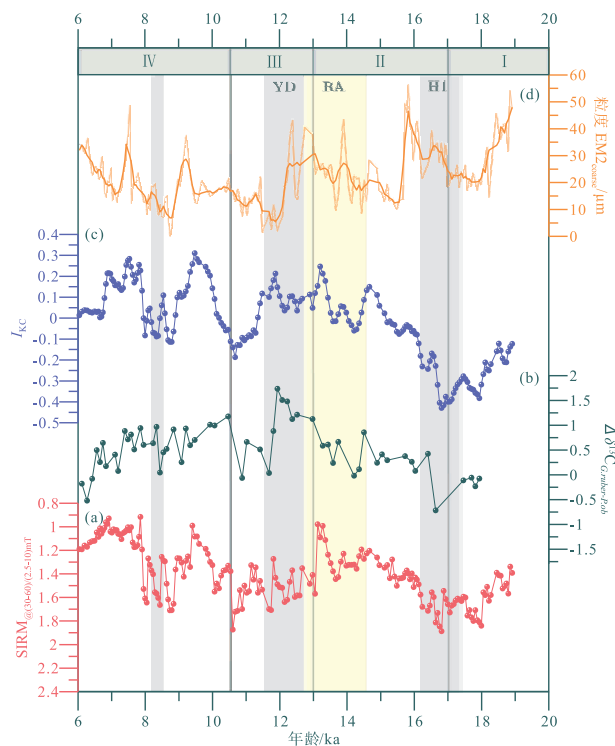
在上述可靠性检验的基础上, S_{soft} 比值呈现 4 阶段变化特征 (图 5-a): 阶段 I (18.9—17 ka), S_{soft} 比值升高, 说明此时黑潮流速低, 搬运能力弱; 阶段 II (17—13 ka) 其值逐渐减低, 表示粗颗粒磁性组分含量逐渐增加, 黑潮流速加大、搬运能力逐渐增强; 阶段 III (13—10.5 ka) 期间再次增加, 阶段 IV (10.5—6 ka) 又开始整体上降低, 反映了黑潮流速的再次减弱和增强的过程。

综合分析有孔虫碳同位素值 (图 5-b) 和粗颗粒磁性矿物组分的变化, 可以发现尽管两者在总体上指示了黑潮活动在末次冰消期之前 (约 17 ka) 较弱, 之后逐渐增强, 全新世基本保持小幅波动的特征, 但是二者反映的黑潮入侵和搬运动力大小方面, 在千年尺度上存在一定差异。即当黑潮入侵时, 其流速并不一定显著增强, 这一特征在末次冰消期和早全新世体现的尤为明显。为了统一表示其活动特征, 本研究尝试将磁学参数和有孔虫碳同位素梯度指标各自归一化, 然后等间距插值。考虑到

S_{soft} 比值与黑潮强度呈负相关, 对其进行反向处理: $SIRM_{\text{rev}} = 1 - SIRM_{\text{norm}}$ 后求取二者的平均值作为黑潮活动的一个综合指标 ($I_{\text{KC}} = 0.5 \times \Delta\delta^{13}C_{\text{norm}} + 0.5 \times SIRM_{\text{rev}}$) ($SIRM_{\text{norm}}$ 为归一化后的剩磁比值, $SIRM_{\text{rev}}$ 为反向处理后的 $SIRM_{\text{norm}}$; C_{norm} 为归一化后的有孔虫碳同位素差值, I_{KC} 为构建的黑潮综合指标) (图 5-c)。尽管该指标由于碳同位素数据分辨率相对不足存在一定误差, 但在总体上仍能反映黑潮在冲绳海槽活动的历史。

4.3 碎屑物质粒度变化

为进一步验证上述指标的可靠性, 准确重建黑潮演化信息, 作者通过 AnalySize 软件 (Paterson and Heslop, 2015) 中的非参数化端元建模算法 (HALS-NMF) 对钻孔沉积物粒度进行分解。经测试, 当端元数为 2 时拟合效果最佳, 所有样品的拟合决定系数 (R^2) 均大于 0.98 (平均约 0.99), 角距离 (θ) 普遍较小, 表明两端元模型已能充分表征粒度数据的主要变异特征分析。其中 EM1 组分众数粒径约 6~12 μm , 代表细颗粒组分, EM2 组分众数粒径约 40~100 μm , 代表粗颗粒组分。发现粗粒组分 ($\text{EM2}_{\text{coarse}}$) 含量与黑潮综合指标 I_{KC} 在长时间尺度上呈现一致的波动趋势 (图 5-d), 均记录到了末次盛冰期的弱水动力、冰消期的波动增强及早全新世的强盛状态。且在冷热事件期间均



a— S_{soft} 比值变化；b—表层浮游有孔虫 (*G. ruber*) 和温跃层有孔虫 (*P. ob*) 的碳同位素差值 ($\Delta\delta^{13}\text{C}$)；c—根据 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 和 S_{soft} 比值构建的黑潮综合指标 (I_{KC})；d—粒度端元分解的粗粒组分 $\text{EM2}_{\text{coarse}}$ 含量变化，指示沉积动力强弱。由老到新按罗马数字 I、II、III... 的顺序分别标注了各参数的特征变化阶段。柱状条为千年尺度气候事件。YD—新仙女木事件，BA—博令—阿勒罗德暖期，HI—早全新世

图 5 钻孔 CF5 的磁学参数、有孔虫碳同位素及粒度结果

Fig. 5 Magnetic parameters, foraminiferal carbon isotopes, and grain-size results of Core CF5

表现出一致的波动特征，表明粒度对千年尺度的黑潮减弱或增强事件同样具有清晰响应。尽管在个别时间如约 16 ka，粒度中的粗粒组分含量突然大幅下降，而 I_{KC} 仅小幅回落，这可能反映了冰消期初期黑潮水团增强先于搬运能力建立的异步响应， $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 的上升部分抵消了 I_{KC} 的降幅。这进一步支持了 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 和 S_{soft} 作为黑潮演化代用指标的可靠性。

5 讨论

5.1 末次盛冰期至早全新世冲绳海槽中南部黑潮的阶段性演化

综合分析 S_{soft} 比值和有孔虫碳同位素特征，本研究可以在整体上刻画黑潮在冲绳海槽 18.9~6 ka 期间在入侵和搬运动力等方面的演化特征。尽管由

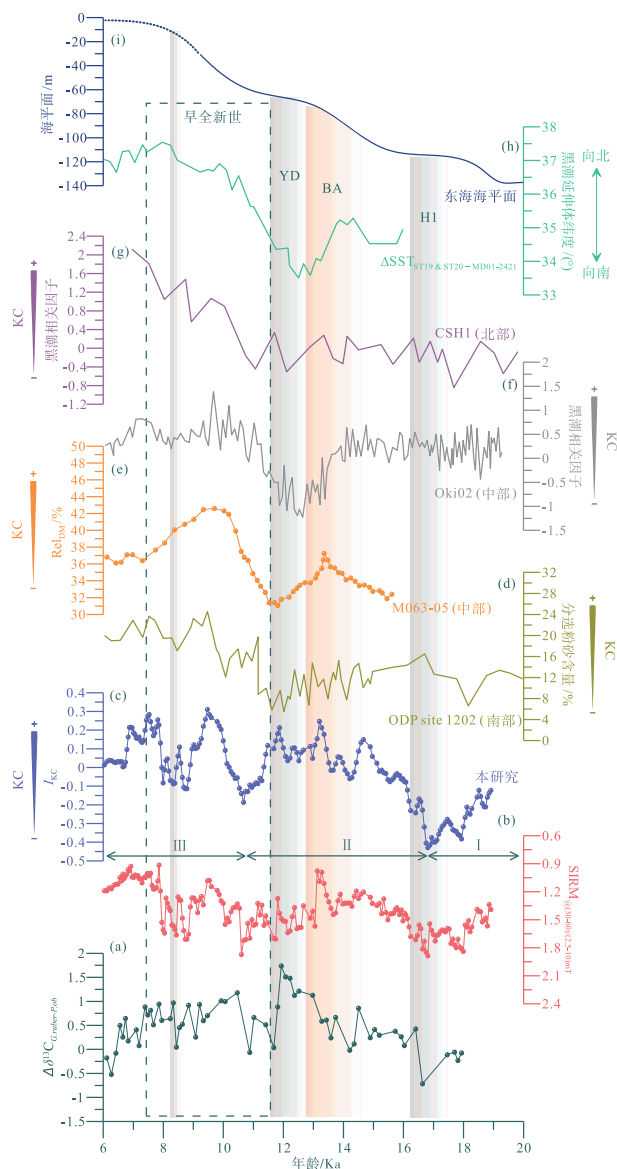
于可能源自沉积二次搬运的影响， AMS^{14}C 存在一定的不确定性，但是从年龄模型分析，仍然可以在总体上约束数千年尺度的黑潮演化的讨论，尤其冰消期以来几个关键的气候事件，如 BA 暖期 (14.7—12.9 ka) 和 YD 冷事件 (12.9—11.7 ka)，有较好的年龄控制。具体可以将黑潮在此时期内的活动规律分为以下 3 个阶段 (图 6)。

阶段 I (18.9—17 ka)：末次盛冰期弱黑潮阶段。此阶段 I_{KC} 逐渐降低， $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 较小、 S_{soft} 比值较高，指示温跃层较浅、上层海洋分层较弱，黑潮流速低、搬运能力弱。区域钻孔的粒度指标同样显示水动力减弱 (Diekmann *et al.*, 2008)，本研究中粒度含量的同步变化更为明显。此时海平面较现代低约 120 m (Lambeck *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2014)，东海陆架大面积暴露。

阶段 II (17—10.5 ka)：冰消期波动增强阶段。 I_{KC} 呈波动上升趋势，指示黑潮活动逐渐增强，温跃层开始加深、上层海洋分层加强，流速增大。期间可进一步识别出 H1 事件后的缓慢增强、BA 暖期的快速增强以及 YD 事件时的短暂减弱。

其中 BA 暖期 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 值相对减小，但粗颗粒组分增加，反映黑潮流速增大而温跃层实际变浅。同时，综合区域对比结果显示，在此期间黑潮响应存在空间差异：南部记录显示黑潮搬运能力增强，中部和北部相对减弱 (Diekmann *et al.*, 2008; Shi *et al.*, 2014; Zheng *et al.*, 2014, 2016)，可能反映了黑潮主流轴的摆动或不同纬度对驱动力的敏感性差异 (Jin *et al.*, 2010; 武杰等, 2020)。磁学指标与不同区域钻孔粒度指标呈现一定的差异，说明了从南向北，黑潮搬运粗碎屑能力的减弱和不同碎屑颗粒对黑潮活动的响应特征不同，沉积物粒度的可排序组分，可能更多地混合了来自陆架的碎屑物质，在一定程度上弱化了黑潮信息。从表层海水温度梯度重建的黑潮南、北空间扩展范围看 (Liu *et al.*, 2022)，在 BA 暖期黑潮向北扩展和之后的向南收缩 (Yamamoto, 2009)，与磁学参数指示的黑潮活动强度也一致，向北扩展时搬运能力增强，而向南收缩时搬运能力减弱。

YD 事件期间， I_{KC} 明显回落，与区域各钻孔记录的黑潮减弱特征一致，但 CF5 钻孔 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 在 YD 初期出现的短暂升高可能反映了黑潮在该时期水体温盐性质与强度的差异。即该时期冲绳海槽的水体



a~c—本研究 KC 指标；d—ODP 1202B 孔分选粉砂含量（据 Diekmann *et al.*, 2008）；e—冲绳海槽中部 M063-05 孔 Rel_{DM} 指标（碎屑磁铁矿相对含量）指示的黑潮强度演化（据 Li *et al.*, 2019）；f—Oki02 孔黑潮指标（据 Zheng *et al.*, 2014, 2016）；g—冲绳海槽北部 CSH1 孔黑潮指示因子（据 Shi *et al.*, 2014）；h—西北太平洋 MD01-2421 孔与 St 19、St 20 孔海表温度差指示的黑潮延伸纬度变化（ $\Delta T = SST_{ST19 \& ST20} - SST_{MD01-2421}$ ，据 Yamamoto, 2009）；i—东海海平面变化（据 Li *et al.*, 2014）。由老到新按罗马数字 I、II、III 的顺序标注了黑潮的特征变化阶段。YD—新仙女木事件，BA—博令—阿勒罗德暖期，HI—早全新世

图 6 冲绳海槽中南部黑潮演化特征

Fig. 6 Evolution of the Kuroshio Current in the south-central Okinawa Trough

物理性质体现的黑潮特征非常显著，但是流动速度偏弱，搬运能力下降。

此外，冰消期前期，随着 $\Delta\delta^{13}C$ 逐渐升高，南、中、北部区域基于沉积物粒度的指标尽管存在多个高频波动（Fenies *et al.*, 2023），但没有体现出黑潮逐渐增强的特征。这种差异可能源于东海陆架碎屑物质和由黑潮搬运的碎屑物质的混合影响，弱化了黑潮搬运可排序粒径碎屑物质携带的信息。

阶段 III（10.5—6 ka）：早全新世强盛阶段。 I_{KC} 在 YD 事件后快速反弹，至约 9.5 ka 左右达到整个序列的最高值，指示黑潮输运能力达到最强，对应温跃层达到最深、上层海洋分层最为稳定。这一时期黑潮将最强盛的暖水输送至冲绳海槽，表层增温显著，稳定的浮力层抑制了垂直混合，导致温跃层持续加深（Ujiié *et al.*, 2003；Kubota *et al.*, 2010）。此时海平面已上升至接近现代水平，东海陆架被完全淹没，黑潮路径趋于稳定，对冲绳海槽的影响达到最强（Xu *et al.*, 2021）。区域对比显示，南部和中部钻孔在 8.4 ka 事件期间同样记录了黑潮的短暂减弱，而北部响应较弱。

5.2 黑潮演化对中国东部降水的影响及驱动机制探讨

黑潮作为北太平洋副热带环流的核心西边界流，通过调控西太平洋暖池热量积累及向东亚大陆的水汽输送，对东亚季风降水产生重要影响（Liu *et al.*, 2024）。现代观测与模拟研究已揭示，在年际—年代际尺度上，黑潮强度与 ENSO 背景态密切相关：类 La Niña 态下黑潮增强，为东亚夏季风提供更充沛的水汽来源；类 El Niño 态下黑潮减弱，东亚降水相应减少（Qiu and Chen, 2010；Taguchi *et al.*, 2010）。且其对中国东部梅雨带的影响尤为显著，研究已证实东海黑潮增温通过强化水汽辐合增强梅雨降水（Qiao *et al.*, 2024, 2025）。然而，这一“ENSO—黑潮—东亚降水”遥相关机制在轨道—千年尺度上是否依然稳定，尚需地质记录检验。因此，本研究选取梅雨带内大九湖（109.9~110.2°E，31.5~31.6°N，西部边缘；Xiao *et al.*, 2015；Sun *et al.*, 2019）、巢湖（117.4°E，31.6°N，核心区；Li *et al.*, 2018）和新街遗址（119.7°E，31.4°N，核心区；Lu *et al.*, 2019）3 条孢粉降水重建记录与本研究对比分析，以检验长时间尺度上黑潮与区域降水的关联。

基于冲绳海槽中南部钻孔 CF5 重建的黑潮综

合活动指数 (I_{KC} , 图 7-a) 显示, 末次盛冰期至早全新世期间冲绳海槽中南部黑潮演化记录与热带太平洋东西海表温度梯度 ΔSST (图 7-b) 高度同步。定量分析表明: I_{KC} 与 ΔSST 呈显著正相关 (Pearson $r = 0.60$, $p < 0.0001$; Spearman $\rho = 0.44$, $p = 0.002$; $n = 47$), 证实现代观测所揭示的 ENSO 对黑潮的调制作用在更长尺度上同样有效, 热带太平洋背景态是调控黑潮长期演变的关键因素 (Bond *et al.*, 2001)。结合 3 条降水记录的时间覆盖, 将黑潮与降水的对比划分为 3 个时段。

阶段 I (18.9—17 ka): 此阶段仅大九湖记录有效。 I_{KC} 、 ΔSST 与大九湖降水均呈降低趋势 (图 7-a 至 7-d), 指示弱黑潮、类 El Niño 背景态与低降水的耦合。此时西太平洋暖池热量积累减少、副热带环流减弱 (Sun *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2024), 同时暴露的陆架改变了黑潮的流动路径, 使其更偏向东侧 (Ujiié *et al.*, 2003; 赵子荟等, 2023), 向东亚大陆的水汽输送通量显著降低。

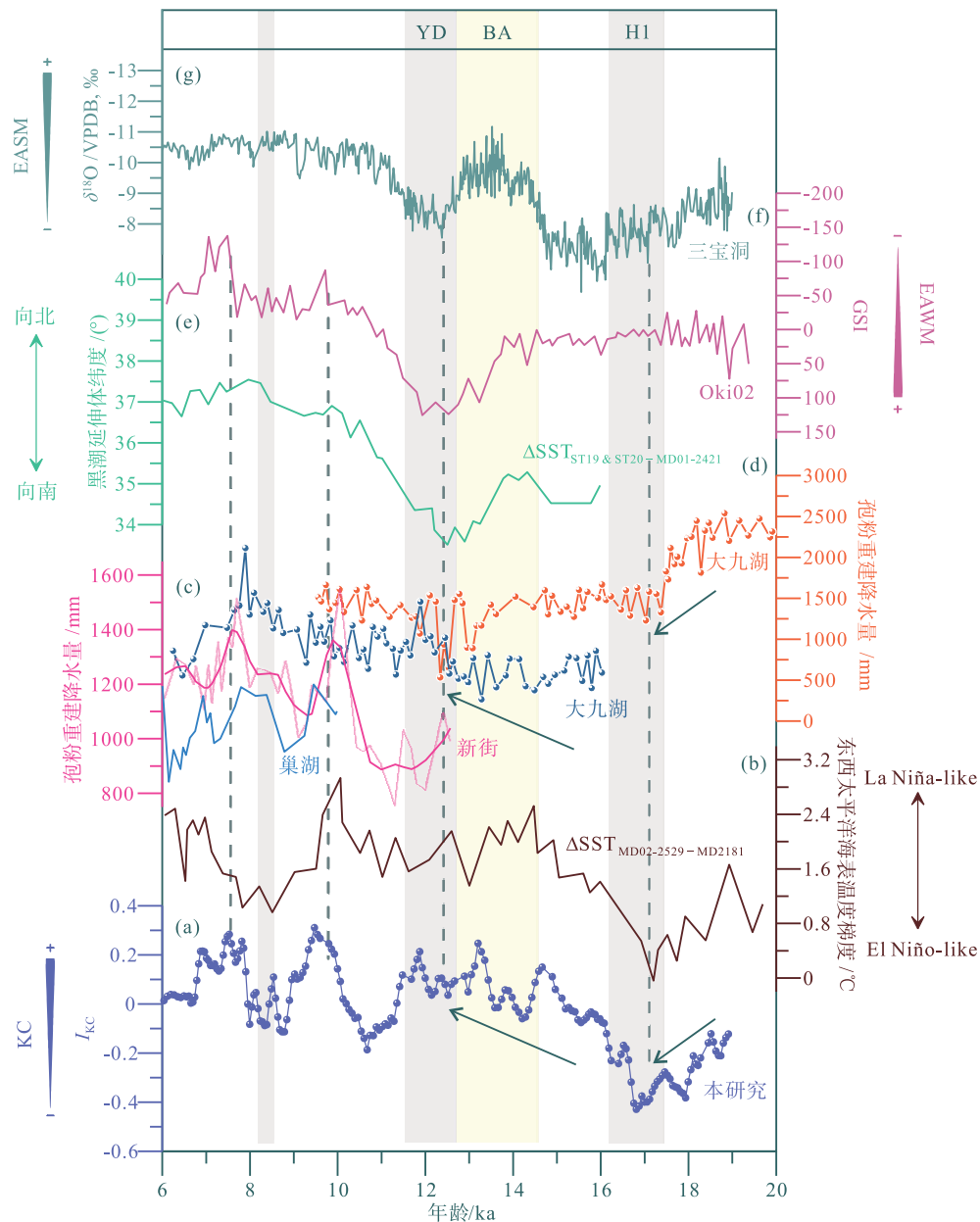
阶段 II (17—12 ka): 该时期西太平洋暖池热量开始积累, 驱动黑潮呈现波动增强趋势 (Cane, 2005; Qiu and Chen, 2005; Xie *et al.*, 2009; Taguchi *et al.*, 2010), I_{KC} 和 ΔSST 大幅波动上升, BA 暖期出现增强, 反映了变暖背景下副热带环流系统增强, 随后在 YD 期间短暂回落。大九湖降水整体小幅上升, 这表明随着冰盖消融和海平面上升, 黑潮主流轴逐渐西移, 向陆地输送暖湿水汽 (Diekmann *et al.*, 2008; Zheng *et al.*, 2014, 2016), 为东亚夏季风提供了充沛的水汽来源, 从而驱动了区域降水的增加。然而, 大九湖降水在 H1 事件后短时间内和 YD 期间与 I_{KC} 存在明显解耦, 且新街遗址降水记录在 YD 期间恰与 I_{KC} 、 ΔSST 同步下降 (图 7-c), 这一差异暗示了黑潮对降水影响的空间不均一性及其他气候驱动因子的补偿作用。

阶段 III (12—6 ka): 此阶段根据巢湖与新街记录重建的 2 条降水曲线与 I_{KC} 、 ΔSST 呈现近乎同步的演化——冰消期末至早全新世同步波动上升, 在约 10 ka 和 7.5 ka 先后达到峰值, 是西太平洋暖池充分发展、东西海温梯度达到峰值、海平面上升至接近现代水平的综合结果 (Linsley *et al.*, 2010; Xu *et al.*, 2021)。此时, 东海陆架被完全淹没, 黑潮路径趋于稳定, 西太平洋暖池为西边界流的增强提供了充足的热量积累, 其对冲绳海槽的影响达到

最强。梅雨带核心区 2 条独立记录与 I_{KC} 具有高度一致性, 表明黑潮对梅雨带降水的调控在该时段内占主导地位。这种“强黑潮—多降水”的对应关系, 清晰地揭示了在适宜的海平面和气候背景下, 强盛的西边界流能够有效地将热带海洋的水分向北输送, 为东亚夏季风降水提供关键的水汽支持。

综合上述分段对比, 本研究发现黑潮对中国东部降水的影响存在显著的空间不均一性。在 YD 期间, 靠近冲绳海槽的梅雨带核心区 (新街, 119.7°E) 降水与 I_{KC} 同步下降, 对黑潮减弱响应敏感; 而西部边缘 (大九湖, 109.9~110.2°E) 降水未显著下降, 对黑潮信号的响应相对弱化。12—6 ka 期间核心区降水与 I_{KC} 高度同步、而 17—12 ka 期间边缘区降水与 I_{KC} 多次解耦的对比, 进一步印证了这一空间分异。究其机制, 黑潮对中国东部降水的影响存在自东向西的梯度变化。

在靠近冲绳海槽的梅雨带核心区, 降水变化主要受热带太平洋背景态主导下的黑潮水汽输送调控。该区域距黑潮水汽源区近, 太平洋水汽在降水来源中占比较高, ENSO—黑潮信号能够直接、高效地传递至降水记录中, 表现为 I_{KC} 与降水的同步耦合。在远离冲绳海槽的梅雨带西部边缘, 黑潮水汽输送随距离增加而衰减, 降水的水汽来源更为多元, 南海水汽的贡献显著增强 (江志红等, 2013)。因此, 该区域降水对黑潮信号的响应相对弱化, 而季风系统自身的强度变化、高纬过程的遥相关调制等其他因子的作用则更为凸显。例如, H1 事件后短期内和 11.5—10.5 ka 期间黑潮与大九湖降水的解耦, 可能正是由于高纬融冰事件导致 AMOC 减弱、通过大气遥相关激发东亚夏季风增强 (Jian *et al.*, 2000; Stott *et al.*, 2002; Wassenburg *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2021), 季风增强带来的水汽输送增加部分抵消了黑潮减弱或滞后增强的影响, 从而在降水记录中掩盖了黑潮信号。类似地, H1 事件后短期内黑潮增强而降水未同步响应, 亦可能因 AMOC 减弱背景下东亚夏季风系统尚未完全建立 (Cheng *et al.*, 2016), 对黑潮水汽的“承接”能力有限。此外, 东亚季风系统自身对黑潮也存在反馈式调制: 夏季风增强可促进黑潮延伸体北扩, 冬季风增强则可能抑制黑潮系统 (Sasaki *et al.*, 2012; Yu *et al.*, 2019), 这种调制在全新世尤为显著 (Zheng *et al.*, 2014)。在梅雨带边缘区,



a—本研究指示黑潮的综合指标 I_{KC} ；b—赤道太平洋东西海表温度梯度指示的 ENSO 变化（据 Stott *et al.*, 2002；Leduc *et al.*, 2007）；c, d—中国东部梅雨带区域基于孢粉的降水重建：新街遗址（粉色曲线；据 Lu *et al.*, 2019），巢湖（浅蓝色曲线；据 Li *et al.*, 2018），大九湖（深蓝色、橙色曲线。据 Xiao *et al.*, 2015；Sun *et al.*, 2019）；e—西北太平洋 MD01-2421 孔与 St 19、St 20 孔海表温度差指示的黑潮延伸纬度变化（ $\Delta T = SST_{ST19 \& ST20} - SST_{MD01-2421}$ 。据 Yamamoto, 2009）；f—粒度指数（GSI）指示的东亚冬季风变化（据 Zheng *et al.*, 2014）；g—石笋 $\delta^{18}O$ 复合记录指示的东亚夏季风变化（据 Cheng *et al.*, 2016）。绿色箭头表示热带太平洋背景态下黑潮与降水同步变化阶段

图 7 冲绳海槽中南部黑潮演化对中国东部降水的影响及机制讨论

Fig. 7 Influence of Kuroshio evolution in the south-central Okinawa Trough on precipitation in eastern China and discussion of the underlying mechanisms

季风对降水的直接调控可能进一步弱化了黑潮信号的辨识度。

综上所述，末次盛冰期至早全新世期间黑潮强度与梅雨带降水在轨道尺度上呈“强黑潮—多降

水”的耦合关系，但黑潮对中国东部降水的影响具有显著的空间异质性：自东向西随距离增加而逐渐减弱，梅雨带核心区由 ENSO—黑潮主导，边缘区则受多因子协同调制。在千年尺度上，边缘区降

水与黑潮的解耦反映了季风系统独立调制和高纬过程介入的叠加效应。这种“热带太平洋背景态主导长期趋势，季风调制高频波动，水汽输送空间衰减”的多因子协同机制，为理解黑潮—降水关系的复杂模式提供了完整的理论框架，深入认识这一模式，对预测未来区域水循环变化具有重要意义。

6 结论

基于冲绳海槽中南部 CF5 钻孔的表层浮游有孔虫 (*G. ruber*) 和温跃层种有孔虫 (*P. ob*) 壳体的碳同位素、磁学参数及粒度分析，本研究构建了黑潮综合活动指数 (I_{KC})，重建了末次盛冰期至早全新世 (约 18.9~6 ka) 黑潮的阶段演化历史，并结合梅雨带内多条古降水记录，探讨了黑潮对中国东部降水的影响及驱动机制。主要结论如下：

1) 末次盛冰期至早全新世期间冲绳海槽中南部黑潮演化呈现显著的 3 阶段特征：末次盛冰期 (18.9—17 ka) 黑潮整体较弱，温跃层浅、搬运能力低；冰消期 (17—12 ka) 黑潮波动增强，BA 暖期出现显著增强脉冲，YD 期间短暂减弱；冰消期末至早全新世 (12—6 ka) 黑潮持续增强，约 9.5 ka 前后达到鼎盛，温跃层最深、输运能力最强。

2) 黑潮的长期演化受热带太平洋背景态主导。 I_{KC} 与热带太平洋东西海表温度梯度 (ΔSST) 呈显著正相关，类 La Niña 背景态有利于黑潮增强，类 El Niño 背景态则对应黑潮减弱，表明 ENSO 对黑潮的调制作用在轨道—千年尺度上稳定存在。

3) 黑潮对中国东部降水的影响具有显著的空间不均一性。在靠近冲绳海槽的梅雨带核心区 (如新街、巢湖)，降水受 ENSO—黑潮水汽输送主导，与 I_{KC} 高度同步；而在远离海槽的西部边缘 (如大九湖)，黑潮信号随距离衰减，降水响应相对弱化，更易受南海水汽补给、季风系统独立变化及高纬融冰事件等因子的叠加调制。这种“热带太平洋背景态主导长期趋势、季风系统调制高频波动、水汽输送空间衰减”的多因子协同机制，为理解黑潮—降水关系的复杂模式提供了完整的理论框架。

参考文献 (References)

- 胡娅敏, 丁一汇, 廖菲. 2008. 江淮地区梅雨的新定义及其气候特征. 大气科学, 32(1): 101–112. [Hu Y M, Ding Y H, Liao F. 2008. A study of updated definition and climatological characters of Meiyu season in the Yangtze-Huaihe Region. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 32(1): 101–112]
- 姜韬, 曾志刚, 南青云, 郑旭峰, 马本俊. 2015. 全新世以来冲绳海槽北部 S9 孔粒度变化特征及其古气候响应. 第四纪研究, 35(2): 307–318. [Jiang T, Zeng Z G, Nan Q Y, Zheng X F, Ma B J. 2015. The grain size characteristics of the core S9 sediments in the northern Okinawa trough and their paleoclimate response since Holocene. Quaternary Sciences, 35(2): 307–318]
- 江志红, 任伟, 刘征宇, 杨浩. 2013. 基于拉格朗日方法的江淮梅雨水汽输送特征分析. 气象学报, 71(2): 295–304. [Jiang Z H, Ren W, Liu Z Y, Yang H. 2013. Analysis of water vapor transport characteristics during the Meiyu over the Yangtze-Huaihe River valley using the Lagrangian method. Acta Meteorologica Sinica, 71(2): 295–304]
- 王越奇, 宋金明, 袁华茂, 李学刚, 李宁, 段丽琴. 2018. 西北太平洋黑潮源区沉积特征及黑潮输入对东海沉积物的影响. 海洋科学, 42(9): 112–126. [Wang Y Q, Song J M, Yuan H M, Li X G, Li N, Duan L Q. 2018. Sedimentary characteristics of the Kuroshio origination area and the influence of the Kuroshio intrusion on sediments of the East China Sea. Marine Sciences, 42(9): 112–126]
- 武杰, 张林林, 同晓梅. 2020. 吕宋和台湾岛以东黑潮季节与年际变化规律的对比分析. 海洋与湖沼, 51(4): 839–850. [Wu J, Zhang L L, Yan X M. 2020. Comparative analysis of seasonal and interannual variations of the Kuroshio east of Luzon and Taiwan Island. Oceanologia et Limnologia Sinica, 51(4): 839–850]
- 殷明, 肖子牛, 黎鑫, 李崇银. 2016. 东海黑潮暖舌的演变及其对我国气温的影响. 气候与环境研究, 21(3): 333–345. [Yin M, Xiao Z N, Li X, Li C Y. 2016. Evolution of the Kuroshio warm tongue in the East China Sea and its influence on air temperature in China. Climatic and Environmental Research, 21(3): 333–345]
- 赵子芸, 马文涛, 张晓. 2023. 末次冰盛期黑潮变化的数值模拟. 第四纪研究, 43(4): 1029–1041. [Zhao Z H, Ma W T, Zhang X. 2023. Numerical simulation of the Kuroshio current during the Last Glacial Maximum. Quaternary Sciences, 43(4): 1029–1041]
- Bian C W, Jiang W S, Song D H. 2010. Terrigenous transportation to the Okinawa Trough and the influence of typhoons on suspended sediment concentration. Continental Shelf Research, 30(10–11): 1189–1199.
- Blaauw M, Christen J A. 2011. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. Bayesian Analysis, 6(3): 457–474.
- Bond G, Kromer B, Beer J, Muscheler R, Evans M N, Showers W, Hoffmann S, Lotti-Bond R, Hajdas I, Bonani G. 2001. Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene. Science,

- 294(5549): 2130–2136.
- Broecker W S, Trumbore S, Bonani G, Wöflfi W, Klas M. 1989. Anomalous AMS radiocarbon ages for foraminifera from high-deposition-rate ocean sediments. *Radiocarbon*, 31(2): 157–162.
- Cane M A. 2005. The evolution of El Niño, past and future. *Earth and Planetary Science Letters*, 230(3–4): 227–240.
- Chen C Z, Zhao W W, Xia Y X, Gu Q R, Li H, Cao X Y, Zhao Y, Liang C, Zhang X J. 2024. Holocene climatic transition in the Yangtze River region and its impact on prehistoric civilizations. *Catena*, 238: 107886.
- Chen H F, Chang Y P, Kao S J, Chen M T, Song S R, Kuo L W, Wen S Y, Yang T N, Lee T Q. 2011. Mineralogical and geochemical investigations of sediment-source region changes in the Okinawa Trough during the past 100 ka (IMAGES core MD012404). *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(6): 1238–1249.
- Cheng H, Edwards R L, Sinha A, Spötl C, Yi L, Chen S T, Kelly M, Kathayat G, Wang X F, Li X L, Kong X G, Wang Y J, Ning Y F, Zhang H W. 2016. The Asian monsoon over the past 640,000 years and ice age terminations. *Nature*, 534(7609): 640–646.
- Diekmann B, Hofmann J, Henrich R, Fütterer D K, Röhl U, Wei K Y. 2008. Detrital sediment supply in the southern Okinawa Trough and its relation to sea-level and Kuroshio dynamics during the late Quaternary. *Marine Geology*, 255(1–2): 83–95.
- Dou Y G, Yang S Y, Liu Z X, Clift P D, Shi X F, Yu H, Berne S. 2010. Provenance discrimination of siliciclastic sediments in the middle Okinawa Trough since 30 ka; constraints from rare earth element compositions. *Marine Geology*, 275(1–4): 212–220.
- Ellwood B B, Ledbetter M T. 1977. Antarctic bottom water fluctuations in the Vema Channel; effects of velocity changes on particle alignment and size. *Earth and Planetary Science Letters*, 35(2): 189–198.
- Fenies P, Bassetti M A, Vazquez Riveiros N, Menniti C, Frigola C, Babonneau N, Ratzov G, Hsu S K, Su C C. 2023. Changes in Kuroshio Current dynamics and East Asian monsoon variability during the last 26 kyr. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 632: 111836.
- Gan B L, Kwon Y O, Joyce T M, Chen K, Wu L X. 2019. Influence of the Kuroshio interannual variability on the summertime precipitation over the East China Sea and adjacent area. *Journal of Climate*, 32(8): 2185–2205.
- Heaton T J, Köhler P, Butzin M, Bard E, Reimer R W, Austin W E N, Bronk Ramsey C, Grootes P M, Hughen K A, Kromer B, Reimer P J, Adkins J, Burke A, Cook M S, Olsen J, Skinner L C. 2020. Marine20: the marine radiocarbon age calibration curve(0–55,000 cal BP). *Radiocarbon*, 62: 779–820.
- Hrouda F, Pokorný J, Ježek J, Chadima M. 2013. Out-of-phase magnetic susceptibility of rocks and soils: a rapid tool for magnetic granulometry. *Geophysical Journal International*, 194(1): 170–181.
- Hsueh Y. 2000. The Kuroshio in the East China Sea. *Journal of Marine Systems*, 24(1–2): 131–139.
- Hu D X, Wu L X, Cai W J, Gupta A S, Ganachaud A, Qiu B, Gordon A L, Lin X P, Chen Z H, Hu S J, Wang G J, Wang Q Y, Sprintall J, Qu T D, Kashino Y, Wang F, Kessler W S. 2015. Pacific western boundary currents and their roles in climate. *Nature*, 522(7556): 299–308.
- Huang C, Wu L Y, Cheng J S, Qu X X, Luo Y Y, Zhang H L, Ye F, Wei G J. 2025. Sedimentary responses to climatic variations and Kuroshio intrusion into the northern South China Sea since the last deglaciation. *Global and Planetary Change*, 245: 104671.
- Jayne S R, Hogg N G, Waterman S N, Rainville L, Donohue K A, Randolph Watts D, Tracey K L, McClean J L, Maltrud M E, Qiu B, Chen S M, Hacker P. 2009. The Kuroshio Extension and its recirculation gyres. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 56(12): 2088–2099.
- Jian Z M, Wang P X, Saito Y, Wang J L, Pflaumann U, Oba T, Cheng X R. 2000. Holocene variability of the kuroshio current in the Okinawa trough, northwestern Pacific Ocean. *Earth and Planetary Science Letters*, 184(1): 305–319.
- Jin B G, Wang G H, Liu Y G, Zhang R. 2010. Interaction between the East China Sea Kuroshio and the Ryukyu Current as revealed by the self-organizing map. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C12): 2010JC006437.
- Jing Y G, Zhang T L, Zhu B, Zhao J T, Zhao X X, Dou Y G, Li Q, Cai F, Hu B Q, Dong L. 2024. Organic carbon burial and their implication on sea surface primary productivity in the middle Okinawa Trough over the past 200 ka. *Frontiers in Marine Science*, 11: 1331940.
- Karlin R, Levi S. 1983. Diagenesis of magnetic minerals in recent haemipelagic sediments. *Nature*, 303(5915): 327–330.
- Kubota Y, Kimoto K, Tada R, Oda H, Yokoyama Y, Matsuzaki H. 2010. Variations of East Asian summer monsoon since the last deglaciation based on Mg/Ca and oxygen isotope of planktic foraminifera in the northern East China Sea: variations of East Asian summer monsoon. *Paleoceanography*, 25(4): PA4205.
- Lambeck K, Rouby H, Purcell A, Sun Y Y, Sambridge M. 2014. Sea level and global ice volumes from the Last Glacial Maximum to the Holocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(43): 15296–15303.
- Leduc G, Vidal L, Tachikawa K, Rostek F, Sonzogni C, Beaufort L, Bard E. 2007. Moisture transport across Central America as a positive feedback on abrupt climatic changes. *Nature*, 445: 908–911.
- Li D Y, Xu X Y, Liu X T, Cheng H G, Xu S J, Jiang X D. 2023. Grain size and geochemistry characteristics of Core S01–10 from the central Okinawa Trough since 14 ka; indications for sediment source and the East Asian winter monsoon. *Marine Geology*, 460: 107053.
- Li G X, Li P, Liu Y, Qiao L L, Ma Y Y, Xu J S, Yang Z G. 2014. Sedimentary system response to the global sea level change in the East China Seas since the Last Glacial Maximum. *Earth-Science Reviews*, 139: 390–405.
- Li J Y, Dodson J, Yan H, Wang W M, Innes J B, Zong Y Q, Zhang X J, Xu Q H, Ni J, Lu F Y. 2018. Quantitative Holocene climatic reconstructions for the Lower Yangtze region of China. *Climate Dynamics*,

- 50(3-4): 1101-1113.
- Li Q, Zhang Q, Li G X, Liu Q S, Chen M T, Xu J S, Li J H. 2019. A new perspective for the sediment provenance evolution of the middle Okinawa Trough since the last deglaciation based on integrated methods. *Earth and Planetary Science Letters*, 528: 115839.
- Li Q, Li G X, Chen M T, Xu J S, Liu S D, Chen M N. 2020. New insights into kuroshio current evolution since the last deglaciation based on paired organic paleothermometers from the middle Okinawa trough. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 35(12): e2020PA004140.
- Linsley B K, Rosenthal Y, Oppo D W. 2010. Holocene evolution of the Indonesian Throughflow and the western Pacific warm pool. *Nature Geoscience*, 3(8): 578-583.
- Liu B, Li S Z, Suo Y H, Li G X, Dai L M, Somerville I D, Guo L L, Zhao S J, Yu S. 2016. The geological nature and geodynamics of the Okinawa Trough, western Pacific. *Geological Journal*, 51(S1): 416-428.
- Liu J, Zhu R X, Li T G, Li A C, Li J. 2007. Sediment-magnetic signature of the mid-Holocene paleoenvironmental change in the central Okinawa Trough. *Marine Geology*, 239(1-2): 19-31.
- Liu L, Guan H X, Xu L F, Sun Z L, Wu N Y. 2022. Paleoclimate records of the middle Okinawa trough since the middle Holocene: modulation of the low-latitude climate. *Frontiers in Earth Science*, 10: 799280.
- Liu S, Zhang Z S, Yang J, Zhao Y Y, Zhang X, Hu B Q, Zhang G L, Yang D D, Sun G J, Wei H T, Wu J Q, Guo X Q, Zhang Y R, Li S Z, Zhu J J. 2024. El Niño-Southern Oscillation and East Asian Monsoon controlled Kuroshio Current evolution over the last 42 kyr. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 637: 111981.
- Lu F Z, Ma C M, Zhu C, Lu H Y, Zhang X J, Huang K Y, Guo T H, Li K F, Li L, Li B, Zhang W Q. 2019. Variability of East Asian summer monsoon precipitation during the Holocene and possible forcing mechanisms. *Climate Dynamics*, 52(1-2): 969-989.
- McCave I N, Manighetti B, Robinson S G. 1995. Sortable silt and fine sediment size/composition slicing: parameters for palaeocurrent speed and palaeoceanography. *Paleoceanography*, 10(3): 593-610.
- Paterson G A, Heslop D. 2015. New methods for unmixing sediment grain size data. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 16(12): 4494-4506.
- Qiao Y X, Nakamura H, Tomita T. 2024. Warming of the Kuroshio Current over the last four decades has intensified the Meiyu-Baiu rainband. *Geophysical Research Letters*, 51(2): e2023GL107021.
- Qiao Y X, Nakamura H, Tomita T, Liu Z J, Zhao N, Sugimoto S. 2025. Role of Kuroshio warming in intensifying the Mei-yu-Baiu rainband: a quantitative study. *Journal of Climate*, 38(20): 5809-5823.
- Qiu B. 2001. Kuroshio and Oyashio Currents. In: *Encyclopedia of Ocean Sciences*. San Diego: Academic Press, 1413-1425.
- Qiu B, Chen S M. 2005. Variability of the Kuroshio Extension jet, recirculation gyre, and mesoscale eddies on decadal time scales. *Journal of Physical Oceanography*, 35(11): 2090-2103.
- Qiu B, Chen S M. 2010. Interannual-to-decadal variability in the bifurcation of the north equatorial current off the Philippines. *Journal of Physical Oceanography*, 40(11): 2525-2538.
- Sasaki Y N, Minobe S, Asai T, Inatsu M. 2012. Influence of the Kuroshio in the East China Sea on the early summer (Baiu) rain. *Journal of Climate*, 25(19): 6627-6645.
- Shi X, Wu Y, Zou J, Liu Y, Ge S, Zhao M, Liu J, Zhu A, Meng X, Yao Z, Han Y. 2014. Multiproxy reconstruction for Kuroshio responses to northern hemispheric oceanic climate and the Asian Monsoon since Marine Isotope Stage 5.1 (~88 ka). *Climate of the Past*, 10(5): 1735-1750.
- Sibuet J C, Letouzey J, Barbier F, Charvet J, Foucher J P, Hilde T W C, Kimura M, Chiao L Y, Marsset B, Muller C, Stéphan J F. 1987. Back arc extension in the Okinawa trough. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 92(B13): 14041-14063.
- Stott L, Poulsen C, Lund S, Thunell R. 2002. Super ENSO and global climate oscillations at millennial time scales. *Science*, 297(5579): 222-226.
- Sun J, Ma C M, Cao X Y, Zhao Y T, Deng Y K, Zhao L, Zhu C. 2019. Quantitative precipitation reconstruction in the east-central monsoonal China since the late glacial period. *Quaternary International*, 521: 175-184.
- Sun Y B, Oppo D W, Xiang R, Liu W G, Gao S. 2005. Last deglaciation in the Okinawa Trough: subtropical northwest Pacific link to Northern Hemisphere and tropical climate. *Paleoceanography*, 20: 2004PA001061.
- Taguchi B, Qiu B, Nonaka M, Sasaki H, Xie S P, Schneider N. 2010. Decadal variability of the Kuroshio Extension: mesoscale eddies and recirculations. *Ocean Dynamics*, 60(3): 673-691.
- Thompson R, Oldfield F. 1986. *Environmental Magnetism*. London: Springer Netherlands.
- Ujiié H, Ujiié Y. 1999. Late Quaternary course changes of the Kuroshio Current in the Ryukyu Arc region, northwestern Pacific Ocean. *Marine Micropaleontology*, 37: 23-40.
- Ujiié Y, Ujiié H, Taira A, Nakamura T, Oguri K. 2003. Spatial and temporal variability of surface water in the Kuroshio source region, Pacific Ocean, over the past 21,000 years: evidence from planktonic foraminifera. *Marine Micropaleontology*, 49(4): 335-364.
- Wang F, Huang T Q, Wang Z B, Zhang W G, Qiao P Y, Tang H Y, Mei X, Yin P, Lai Z P. 2025a. Magnetic evidence of redox transition event in the Okinawa Trough during the early-middle Holocene and its links to the Kuroshio Current evolution. *Global and Planetary Change*, 245: 104699.
- Wang L B, Li J, Zhao J T, Wei H L, Hu B Q, Dou Y G, Sun Z L, Zou L, Bai F L. 2016. Solar-, monsoon- and Kuroshio-influenced thermocline depth and sea surface salinity in the southern Okinawa Trough during the past 17,300 years. *Geo-Marine Letters*, 36(4): 281-291.
- Wang S L, Lee Y Y, Shen C C, Yen I C, Wang S W, Yang Y C, Burr G, Shyu J B H. 2025b. Marine reservoir age correction (ΔR) for the Taiwan Strait and the northeastern South China Sea since the early Mid-

- Holocene. Radiocarbon, 67(5): 1117–1134.
- Wassenburg J A, Vonhof H B, Cheng H, Martínez-García A, Ebner P R, Li X L, Zhang H W, Sha L J, Tian Y, Edwards R L, Fiebig J, Haug G H. 2021. Penultimate deglaciation Asian monsoon response to North Atlantic circulation collapse. *Nature Geoscience*, 14: 937–941.
- Xiao J Y, Xiao X Y, Zhang M H, Shang Z Y, Chen Y. 2015. Late Pleistocene montane vegetation and climate history from the Dajiuhe Basin in the western Hubei Province of Central China. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 222: 22–32.
- Xie S P, Hu K M, Hafner J, Tokinaga H, Du Y, Huang G, Sampe T. 2009. Indian Ocean capacitor effect on Indo-western Pacific climate during the summer following El Niño. *Journal of Climate*, 22(13): 730–747.
- Xu Y, Chang F M, Li T G, Li B H. 2021. High-resolution sea surface temperature and salinity dynamics in the northern Okinawa Trough over the last 24 kyr. *Palaeoworld*, 30(4): 770–785.
- Yamamoto M. 2009. Response of mid-latitude North Pacific surface temperatures to orbital forcing and linkage to the East Asian summer monsoon and tropical ocean-atmosphere interactions. *Journal of Quaternary Science*, 24(8): 836–847.
- Yang H Y, Cai J Z, Wu L X, Guo H H, Chen Z H, Jing Z, Gan B L. 2024. The intensifying East China Sea Kuroshio and disappearing Ryukyu current in a warming climate. *Geophysical Research Letters*, 51(12): e2023GL107890.
- Yu P L, Zhang L F, Zhong Q J. 2019. Contrasting relationship between the Kuroshio Extension and the East Asian summer monsoon before and after the late 1980s. *Climate Dynamics*, 52: 929–950.
- Zhang H W, Zhang X, Cai Y J, Sinha A, Spötl C, Baker J, Kathayat G, Liu Z Y, Tian Y, Lu J Y, Wang Z Q, Zhao J Y, Jia X X, Du W J, Ning Y F, An Z S, Edwards R L, Cheng H. 2021. A data-model comparison pinpoints Holocene spatiotemporal pattern of East Asian summer monsoon. *Quaternary Science Reviews*, 261: 106911.
- Zhao J T, Li J, Cai F, Wei H L, Hu B Q, Dou Y G, Wang L B, Xiang R, Cheng H W, Dong L, Zhang C L. 2015. Sea surface temperature variation during the last deglaciation in the southern Okinawa Trough: modulation of high latitude teleconnections and the Kuroshio Current. *Progress in Oceanography*, 138: 238–248.
- Zheng X F, Li A C, Wan S M, Jiang F Q, Kao S J, Johnson C. 2014. ITCZ and ENSO pacing on East Asian winter monsoon variation during the Holocene: sedimentological evidence from the Okinawa Trough. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119: 4410–4429.
- Zheng X F, Li A C, Kao S, Gong X, Frank M, Kuhn G, Cai W J, Yan H, Wan S M, Zhang H H, Jiang F Q, Hathorne E, Chen Z, Hu B Q. 2016. Synchronicity of Kuroshio Current and climate system variability since the Last Glacial Maximum. *Earth and Planetary Science Letters*, 452: 247–257.

(责任编辑 李新坡)