

王越奇,宋金明,李学刚,等. 台湾东部黑潮区海源碳的沉积物记录与近千年来生产力与气候变化的反演[J]. 海洋学报,2018,40(10):131—142, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2018.10.013

Wang Yueqi, Song Jinming, Li Xuegang, et al. Sedimentary records of sea-derived carbon and records of paleoproductivity and climate change in the Kuroshio mainstream over the past millennium[J]. Haiyang Xuebao, 2018, 40(10): 131—142, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2018.10.013

台湾东部黑潮区海源碳的沉积物记录与近千年来 生产力与气候变化的反演

王越奇^{1,2,3,4}, 宋金明^{1,2,3,4*}, 李学刚^{1,2,3,4}, 王启栋^{1,2,3,4}

(1.中国科学院海洋研究所 海洋生态与环境科学重点实验室, 山东 青岛 266071; 2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋生态与环境科学功能实验室, 山东 青岛 266237; 4.中国科学院 海洋大科学中心, 山东 青岛 266071)

摘要: 本文基于对台湾以东黑潮主流区沉积物的粒度和定年, 通过解析沉积物总有机碳及其同位素组成获取海源碳变化特征, 首次报道了该海区近千年来初级生产力与气候变化反演结果。研究显示, 台湾以东黑潮主流区近千年来平均沉积速率为 34.44 cm/ka, 沉积环境较为稳定。另外, 台湾以东黑潮主流区沉积物中的总有机碳和总氮含量主要受台湾东部河流输入、海洋初级生产力的沉降过程、成岩作用和粒度效应影响。对沉积物海源碳的定量估算表明, 近千年来台湾以东黑潮主流区沉积物中 40.02%~73.88% 的有机质为海源输入, 陆源输送次之。同时, 近千年来台湾以东黑潮主流区沉积物记录较好地反映了中世纪暖期、小冰期和现代暖期 3 个气候变化阶段。1150—1420 年期间, 沉积物中总有机碳、总氮和海源碳含量缓慢升高, 较高的表层海水温度有利于海洋初级生产力水平的升高。1500—1840 年期间, 较低的表层海水温度和亚洲大陆风尘输送水平使得海洋初级生产力较低, 同时台湾地区小冰期较高的降水量有利于台湾东部河流向海输送, 增强的水动力条件可能会加强海底沉积物的东移, 从而导致该区域沉积物中总有机碳含量的增加。进入现代暖期以来研究区的海水温度逐渐增暖, 而东亚季风强度和降水量却表现出波动的年际变化特征, 并体现在研究区 1930—1950 年和 1970 年期间沉积物的中值粒径、总有机碳和总氮含量的快速波动。

关键词: 古生产力; 气候变化; 海源碳; 沉积物; 黑潮

中图分类号: P736.21

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2018)10-0131-12

1 引言

海洋碳循环主要通过与大气的 CO₂ 交换过程、生物泵和水动力条件下的水平输送吸收和贮存大气中

的 CO₂, 是构成全球碳循环的重要组成部分, 也是影响全球变化的关键控制环节^[1]。近千年来全球气候变化特征和规律已成为广泛关注的热点, 研究其变化原因和特征不仅有助于辨识气候变化的背景, 还可

收稿日期: 2018-04-30; 修订日期: 2018-06-14。

基金项目: 深海专项—深海典型生境生物多样性与生态系统(2016ASKJ14); 山东省—国家基金委联合基金(U1606404); 中国科学院创新先导专项项目(XDA11020102)。

作者简介: 王越奇(1992—), 女, 山东省淄博市人, 从事海洋生物地球化学研究。E-mail: iocaswyq@163.com

* 通信作者: 宋金明(1964—), 男, 研究员, 主要从事研究海洋生物地球化学。E-mail: jmsong@qdio.ac.cn

以为未来的气候预测模型提供支撑,提高预测气候变化的能力^[2]。

西太平洋边缘海区域是全球气候和环境变化以及全球碳循环研究的重点^[3]。黑潮作为北太平洋的西边界暖流,具有流速快、流量大和高温高盐的特征,其强弱变化不仅影响邻近海域的水文状况和海洋生态环境,还会引起西太平洋甚至全球的气候发生改变^[4]。另外,西太平洋暖池区的热量释放过程对于东亚地区压力梯度驱动下的季风环流作用显著^[5],而东亚季风是控制西太平洋边缘海区域气候系统的重要因素。西太平洋边缘海可以通过西边界流、季风系统和入海径流等相互作用,将富营养盐的陆源物质输入边缘海,从而促进海洋初级生产力的繁盛,并实现海洋对大气 CO₂ 的固定。

海洋沉积物记录了生物演化、气候变化和大陆隆升剥蚀的重要信息^[6],如何利用西太平洋边缘海沉积物重建古生产力是了解地质时期碳循环过程的重要条件。目前,用于定量估算古生产力的指标主要包括沉积物有孔虫种属^[7]、生物标志物^[8]和长链不饱和烯酮等有机地球化学指标^[3]、有机碳氮和生源硅等生源要素指标^[9]以及元素比值^[10]等,对于西太平洋边缘海的古生产力研究主要集中在南海和冲绳海槽,且多为冰期一间冰期时间尺度的研究,缺乏对黑潮流域千年历史变化的研究。本文试图通过研究台湾以东黑潮主流区的基本沉积特征,分析近千年来台湾以东黑潮主流区的沉积环境演变,并通过分析总有机碳(TOC)、

总氮(TN)含量和有机碳同位素组成($\delta^{13}\text{C}$)变化,估算海源有机碳含量,在此基础上探讨研究区海洋初级生产力变化。另外,本文结合台湾地区的温度和降水资料探讨了近千年来台湾以东黑潮主流区的气候环境变化,这对于进一步研究揭示黑潮流域近千年来的碳循环和气候演化过程具有重要的科学意义。

2 研究区背景

台湾岛位于琉球岛弧和吕宋岛弧两个俯冲体系的结合带,构造环境复杂,台湾岛以东海底地形总体呈现“北陡南缓、西浅东深”的特征,本研究区(图 1)位于台湾以东南澳盆地的西北部,水深基本在 2 500~3 500 m^[11]。台湾东部河流长度短、坡度大、水流急的特点使得台湾东部河流输送的沉积物成为周边海域的重要物质来源,台湾东部 4 条主要河流(双溪、兰阳溪、花莲溪和秀姑峦溪)的年输沙量高达 $49.71 \times 10^6 \text{ t}$,与本研究站位距离较近的花莲溪的年输沙量约占台湾东部主要河流的 41.5%^[12]。台湾以东黑潮主流宽约 112~167 km,平均流量约 $21 \times 10^6 \sim 33 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$,黑潮在台湾以东海域流速约 36~202 cm/s,黑潮水可达 1 000 m 以深^[13],是东海海域生源要素、痕量元素和同位素等化学物质的重要输入源,同时也会携带吕宋岛弧物质进入台湾以东海域^[6, 14]。另外,台湾地区属亚热带海洋性气候,其温度与降水特征同受东亚季风影响较大,以东亚冬季风主导的亚洲大陆风尘输送也是本研究区沉积物的重要来源。

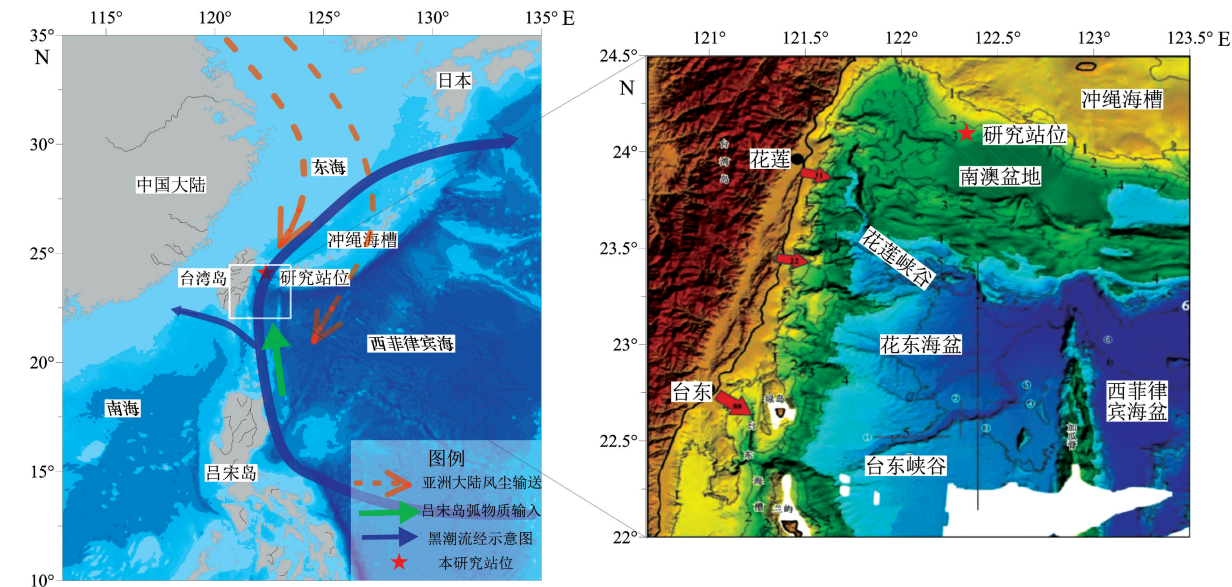


图 1 研究站位及海底地形示意图(据文献[15]修改)

Fig.1 Map of the research location and its submarine topography(modified by the reference [15])

3 材料与方 法

本文研究的柱状沉积物样品为 2014 年中国科学院海洋研究所“科学号”考察船在西太平洋台湾以东黑潮主流区(图 1)获得,站位坐标为 24°5.708 4'N, 122°20.268'E,水深 2 893 m,柱状沉积物长 30 cm。共分析了 38 个样品,前 8 cm 每隔 0.5 cm 取样,后 22 cm 每隔 1 cm 取样,并对沉积物样品进行了 AMS¹⁴C 定年、粒度分析、TOC、TN 和 δ¹³C 的测定分析。

AMS¹⁴C 年代测试选取 6 个层位的沉积物有孔虫样品在美国 Woods Hole 海洋研究所碳同位素实验室测定,原始数据使用 INTCAL2013 软件进行日历年龄校正。粒度测试于中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室用法国产 Cilas1190L 激光粒度分析仪测定,测试范围为 0.04~2 500 μm,粒度数据使用 Mc Manus 矩法公式^[16]计算。沉积物中 TOC、TN 和 δ¹³C 含量的测定,先取一定量沉积物样品,用 4 mol/L HCl 处理以去除无机碳,用去离子水洗至中性后烘干研磨,准确称取定量沉积物样品装入锡杯,使用元素分析仪—稳定同位素质谱联用仪(Flash EA 1112 HT—Delta V Advantages, Thermo 公司)测定,TOC、TN 和 δ¹³C 测定的相对标准偏差分别为 0.05%、0.03%和 0.2%。

4 结 果

4.1 沉积特征

台湾以东黑潮主流区柱状沉积物年代模式的建立基于 6 个 AMS¹⁴C 定年数据控制点(表 1),测年结果为 870 a,沉积速率变化范围为 16.67~120.0 cm/ka,平均沉积速率为 34.44 cm/ka。其沉积速率低于位于冲绳海槽南部的 255 孔(25°12'N, 123°07'E)过去 8 ka 来的平均沉积速率(60 cm/ka),更低于 MD05—2908 孔(24°48.04'N, 122°29.35'E)近 1 ka 来 750 cm/ka 的沉积速率^[17],而高于深的开阔大洋约 0.6~0.9 cm/ka 的沉积速率^[18]。该区沉积物岩性较为均一,以灰色黏土质粉砂为主。粒度分析的结果表明,沉积物的粉砂质成分占据主要地位,其含量变化范围为 83.53%~88.12%,平均含量为 85.37%,黏土质成分的变化范围为 11.79%~16.47%,平均为 14.62%,几乎不含砂质成分,其平均含量不足 0.02%。沉积物的平均粒径变化范围 9.01~11.02 μm,中值粒径变化范围为 9.68~11.78 μm,平均 10.56 μm,沉积速率和粒度随深度变化过程见图 2。对于近千年来台湾以东黑潮主流区的沉积环境,未发现较大的沉积间断和扰动情况,该区处于低能的沉积环境,基本上受台湾东部河流和黑潮的水动力作用控制,暴雨台风和地震等极端事件对沉积状况有短暂影响。

表 1 台湾东黑潮柱状沉积物 AMS¹⁴C 测年结果
Tab.1 AMS¹⁴C dating of the core sediments of eastern Taiwan

深度/cm	材料	AMS ¹⁴ C 年龄/ a BP	日历年龄/ a BP(1σ)
7~8	有孔虫全样	550±40	105(0~250)
11~12	有孔虫全样	650±30	255(125~300)
14~15	有孔虫全样	840±30	435(310~490)
17~18	有孔虫全样	870±30	460(380~505)
23~24	有孔虫全样	1 220±30	690(645~775)
28~29	有孔虫全样	1 310±30	780(695~895)

4.2 沉积物中生源要素记录

沉积物反映的环境信息主要分为物质输入和初级生产力(或营养状况)两大方面^[19]。沉积物中用于指示有机质来源的指标很多,用于反映水体营养状况和初级生产力水平的指标也较多,但每种指标的实际应用都有各自的优缺点,本文选用了基本的地化指

标,C/N 比值和 δ¹³C 含量用于区分海源和陆源输送,TOC、TN 含量和海源碳含量变化用于指示研究区水体的初级生产力变化。

利用藻类植物和脉管类陆地高等植物所含蛋白质和纤维素有所差异的原理所确立的 C/N 比值方法广泛用于区分有机质来源。一般而言,海洋植物有机

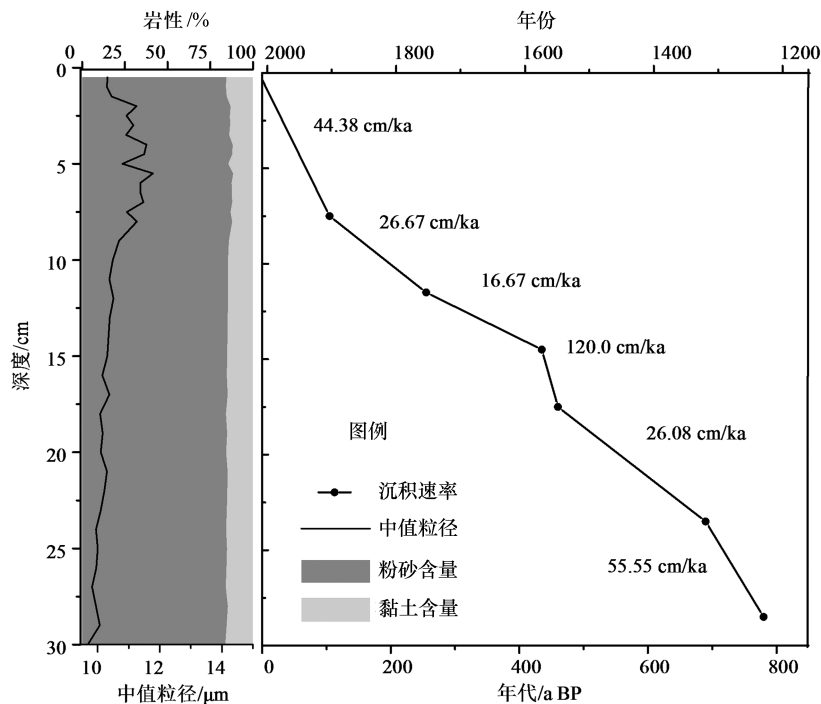


图 2 研究区柱状沉积物年代框架与粒度图解

Fig.2 Chronology and grain size of sediments in the research area

质 C/N 变化范围为 4~10,而陆地植物有机质 C/N 通常大于 20^[19]。另外,利用 C₃、C₄ 类植物进行光合作用时固定 CO₂ 的效率不同因而体内有机质的 δ¹³C 含量不同的原理,确立了 δ¹³C 的方法也可以用于确认水体中有机质的来源,这两种指标常共同使用,对于推测古生产力变化和人为活动对海洋环境的影响具有重要意义^[19],但 δ¹³C 是比 C/N 比值更有效的判定指标。在本研究区的柱状沉积物中,C/N 比值变化范围为 5.72~7.22,平均为 6.52;δ¹³C 变化范围为 -23.90‰~-21.70‰,平均为 -22.90‰。本研究区表层沉积物中 δ¹³C 的含量为 -22.03‰,中国陆架海黄东海表层沉积物中 δ¹³C 的变化范围为 -22.2‰~-18.2‰,平均值为 -20.8‰;冲绳海槽南部的 MD05-2908 孔表层沉积物的 δ¹³C 约为 -23‰,而南海北部表层沉积物 δ¹³C 的变化范围为 -23.05‰~-21.24‰,平均 -22.15‰^[9, 20-21]。相对而言,本研究区沉积物中 δ¹³C 含量与南海北部沉积物更为接近。

水体中有机质主要来源于包括以浮游植物或生物的残体和碎屑为主的自生来源和以陆地高等动植物碎屑或排泄物为主的陆地来源。一般而言,TOC 所含的碳原子占总有机物质质量的 50%,因此 TOC 占

沉积物中有机物质含量的 50%,但沉积物中 TOC 受物质来源、成岩作用、底栖生物扰动和氧化还原环境影响较大,还与粒度密切相关^[19]。沉积物中氮主要以有机氮形式存在,在本研究中有有机氮含量约占总氮的 97.67%,有机氮与生物过程关系密切,在一定程度上也可以反映水体的初级生产力水平^[19]。在本研究站位的沉积物中,TOC 含量的变化范围为 0.439%~0.533%,平均为 0.485%;TN 含量的变化范围为 773.00~977.47 μg/g,平均为 870.85 μg/g,二者的垂直变化趋势非常一致(图 3),共同反映了台湾以东黑潮主流区的初级生产力水平变化过程。TOC 和 TN 含量在 1400 年以前缓慢增加,至 1500 年前后急剧减小,1500 年之后 TOC 含量依然保持在较高水平,TN 含量有所减小,但也维持在稳定水平;在 1840 年前后,TOC 和 TN 含量急剧减小,之后表现出较大波动。

5 讨论

5.1 基于沉积物海源碳变化的初级生产力反演

关于本研究区沉积物中的有机质,既包括海洋自生来源的浮游植物残体和碎屑,还包括高等陆地动植物碎屑或排泄物的陆源输入。从本区水动力条件来看,陆源有机质可能由台湾东部河流输送而来,也可

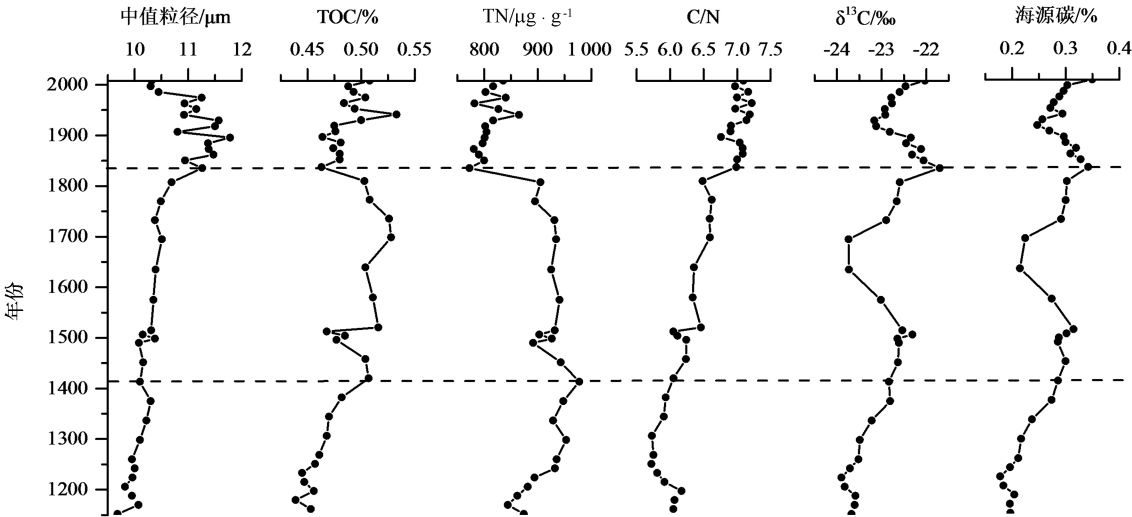


图 3 沉积物中值粒径及生源要素等参数随年代变化曲线图

Fig.3 Graph of median particle diameter and biogenic elements versus age

能由黑潮从吕宋岛输送而来。但本研究无法准确地区分有机质来源于台湾河流输送还是黑潮输送,但利用 $\delta^{13}\text{C}$ 特性我们基本可以定量估算沉积物中的海源碳和陆源碳含量。从 $\delta^{13}\text{C}$ 和 C/N 比值投影(图 4)可以看出,研究区沉积物的有机质大部分来源于海洋自生藻类,较少部分来源于台湾东部河流输入的陆源淡水藻类,极少部分来源于细菌类生物。蔡德陵等利用沉积物柱状样中的海源碳含量成功重建了东海、黄海过去 200 a 以来的初级生产力,这表明沉积物中的海源碳含量可以作为古生产力指标来指示水体中海洋初级生产力的变化。本文利用沉积物中有机碳稳定

同位素计算海源碳的模式^[9]计算了本研究区沉积物中的海源碳含量,其垂直变化趋势如图 3 所示, $\delta^{13}\text{C}$ 陆源有机质输入端元值选择 -26.5‰ ,海相有机质输入端元值选择 -20‰ ^[20]。表 2 列出了海源碳的计算结果及沉积物中 TOC 的海洋和陆源输入比例,结果表明,台湾东黑潮主流区沉积物的总 TOC 中有 $40.02\%\sim 73.88\%$ 为海洋自生输入,平均为 55.42% ,而陆源输入仅占 $26.12\%\sim 59.98\%$,平均为 44.58% 。因此,本研究区沉积物有机质主要来源于海源输入,陆源输送占据次要地位。

表 2 台湾东黑潮沉积物海源碳含量及海源陆源输入 TOC 比例计算结果

Tab.2 Sea-derived carbon contents and calculation results of TOC input proportion of home and abroad in the sediments of eastern Taiwan					
	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	TOC/%	海源碳含量/%	海源输入 TOC 比例/%	陆源输入 TOC 比例/%
最大值	-21.70	0.53	0.35	73.88	59.98
最小值	-23.90	0.44	0.18	40.02	26.12
平均值	-22.90	0.48	0.27	55.42	44.58

本研究对 1150—1907 年的海源碳含量与 TOC、TN、中值粒径等参数做了相关性分析,从表 3 可以看出,海源碳含量与 C/N、 $\delta^{13}\text{C}$ 具有显著的正相关关系,表明海源碳可以反映海洋自生来源的有机碳含量变化。另外,海源碳含量与 TOC 有显著正相关,与 TN 无明显的相关关系,但 TN 与中值粒径呈显著负相

关,这一方面表明海源碳含量作为沉积物中 TOC 的一部分,其变化过程与 TOC 有异同点,而二者的差异可能与海洋初级生产力的变化过程有关;另一方面也反映了 TN 可能较易吸附在细粒沉积物中,受粒度效应影响较大。同时,海源碳含量与中值粒径具有显著正相关,但海源碳与 TN 却无显著相关性,这表明粒

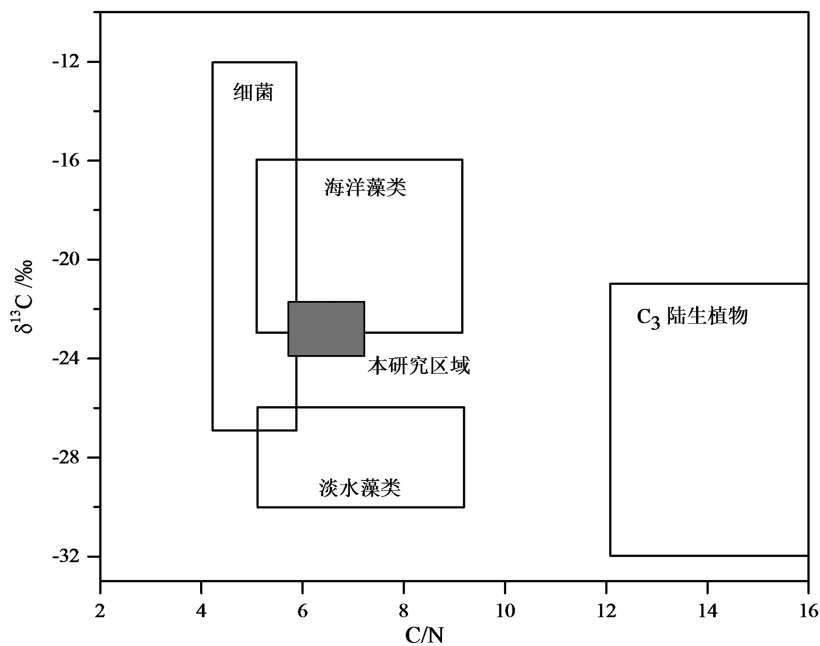


图 4 陆源和海洋自生来源有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 C/N 比值示意图

Fig.4 $\delta^{13}\text{C}$ versus C/N of organic matter from home and abroad

度效应对海源碳和 TN 含量的作用机制是不同的。因此,海源碳含量的变化可以较好地反映近千年来台湾以东黑潮主流区沉积物中有机质的物源问题和海洋初级生产力的变化过程。另外,沉积物中浮游有孔虫暖水种与冷水种个数的比值是反映表层海水温度变化的可靠指标^[22],本文利用常见的暖水种浮游有孔虫 *Globigerinoides ruber* 与冷水种浮游有孔

虫 *Globigerina bulloides* 比值作为反映近千年来台湾以东黑潮主流区表层海水温度的指标^[23-24],并将本研究站位沉积物中该指标(有孔虫数据未发表)与海源碳含量做相关性分析,结果表明二者的相关系数为 0.479,呈现显著的正相关关系,这表明海洋初级生产力可能受温度影响较大。

表 3 研究区沉积物各项参数相关性分析 (n=29)

Tab.3 Correlation analysis of several parameters of sediments in the research area(n=29)

	海源碳	$\delta^{13}\text{C}$	C/N	TOC	TN	中值粒径	有孔虫冷暖种比值
海源碳	1						
$\delta^{13}\text{C}$	0.693 **	1					
C/N	0.693 **	0.695 **	1				
TOC	0.622 **	0.242	0.325	1			
TN	-0.222	-0.487 **	-0.739 **	0.395	1		
中值粒径	0.542 **	0.712 **	0.865 **	0.148	-0.720 **	1	
有孔虫冷暖种比值	0.479 **	0.336	0.597 **	0.505 **	-0.229	0.583 **	1

注:** 表示 $P<0.001$ 水平(双侧)上显著相关。

从图 3 中可以看出,海源碳含量在 1152—1420 年基本表现为稳定增加的变化趋势,这与 TOC、TN

的变化趋势一致,表明该时期台湾以东黑潮主流区海洋初级生产力水平有所增加。在 1500 年前后,沉积

速率高达 120 cm/ka,沉积物其他各项指标突然降低,可能是由于本研究区沉积环境受台风、暴雨或海底地震等突发事件影响,这一点还需要深入研究。在 1500—1840 年期间,TOC 含量一直维持在较高水平,TN 含量则有所降低,二者变化波动较小,但海源碳含量在 1650—1700 年期间明显降低,并于 1700—1840 年前后一直升高到最大值。海源碳与 TOC 含量变化的这一差异反映了在 1600—1750 年期间海洋自生有机质含量相对总有机质含量的明显减少,这可能与该时期气候条件改变下的温度与降水变化有关。1670—1730 年期间对应我国南部严寒事件的集中发生时期,较低的海水温度不利于浮游生物的生长和繁殖。另一方面,海洋沉积物黏土矿物的(伊利石+绿泥石)/蒙脱石比值可以用来指示东亚冬季风和夏季风的

的相对强弱^[25],本研究站位沉积物的(伊利石+绿泥石)/蒙脱石比值在 1630—1730 年期间有减小趋势(数据未发表),表明东亚冬季风有所减弱,即东亚夏季风相对较强,万象洞的 $\delta^{18}\text{O}$ 含量的负偏也证实了这一点。因此,亚洲大陆通过冬季风向本研究海域的风尘输送强度可能减弱,从而造成台湾以东黑潮主流海洋初级生产力的降低。另外,结合近千年来台湾地区降水异常和我国南方每 10 年洪水事件次数的垂直变化趋势(图 5)来看,1600—1750 年期间我国南方洪水事件明显增加,台湾地区降水异常波动较大,可能造成台湾东部河流沿东部陆坡向海底输送较多的台湾陆源物质,从而引起底层沉积物的再悬浮物质向本研究区输送增加,使得沉积物 TOC 含量有所升高。

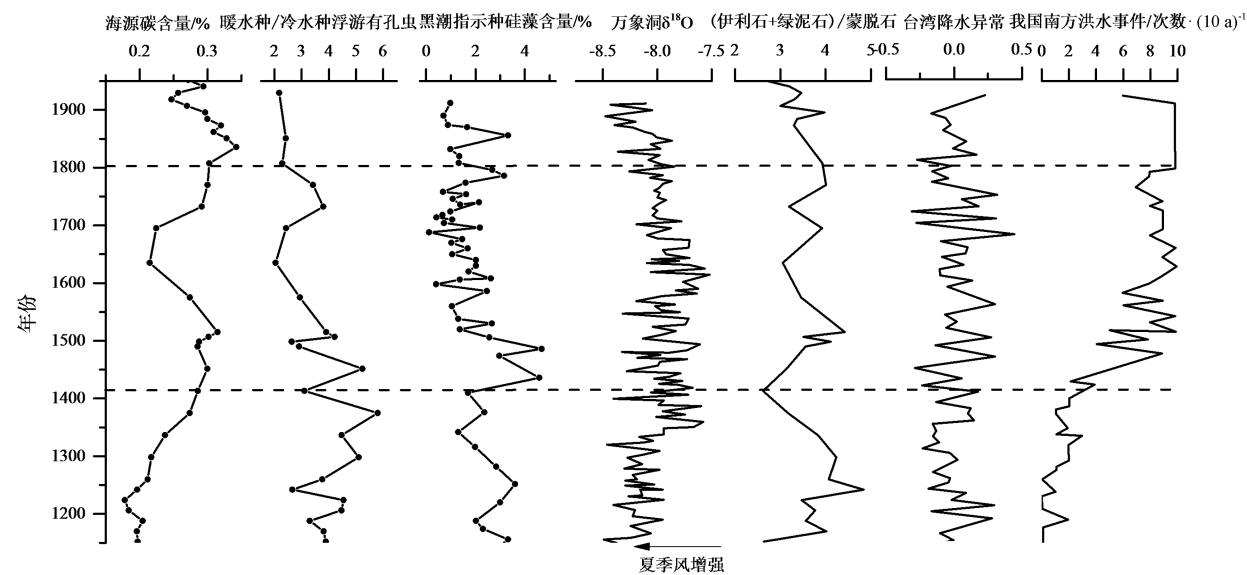


图 5 本研究站位有孔虫冷暖种比值与气候变化代用资料对比

Fig.5 Comparison of the ratio of warm/cold planktonic foraminiferal species in our research area and other proxy data of climate change

进入 1800 年后,各项参数变化波动较大,且相互之间没有较为明显的相关关系。首先,中值粒径波动较大,整体呈现先增大后减小的变化趋势,而海源碳含量则有明显的先减小后增大的变化趋势;其次,TOC 和 TN 含量在 1840 年左右急剧降低,之后表现出波动式升高趋势。1930 年至今,海源碳含量表现出逐渐升高的趋势,中值粒径逐渐减小。苏晓晨^[26]对台湾东北部海水温度年际变化的研究表明,在 1945—2010 年期间台湾以东海域 0~100 m 水深

的海水温度表现为增暖趋势,因此,温度的升高可能促进了海洋表层浮游生物的生长和繁殖,从而使海源碳含量逐渐升高。另一方面,1930 年至今,沉积物中 TOC 和 TN 含量有所增大,这与该时期台湾地区降水量的减少有所矛盾。对福建玉华洞石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 研究^[27]表明,在 1920—2010 年期间, $\delta^{18}\text{O}$ 从 -7‰ 加重到 -4.2‰ ,表明东亚夏季风逐渐增强,长江流域及我国南方地区降水减少。福建玉华洞与我国台湾地区仅相隔台湾海峡,二者受东亚夏季风的影响较为一致,因此,1920—2010 年期间台湾地区的降水可能有所减少,不利于河流向海底的沉积物输送。但事实

上,由于成岩作用较为缓慢,可能使得沉积物上层有机质成岩作用未来得及进行,因而沉积物上层的 TOC 和 TN 含量一般都较高^[19]。

5.2 古气候变化对比分析

过去近千年来的气候变化过程是我们能否将现在与过去的气候变化相联系的关键时段,因此对于过去近千年来的气候变化研究已成为气候研究的热点之一^[17, 28]。通过上述对台湾以东黑潮主流区近千年来初级生产力变化过程的分析,我们可以识别出较为明显的 3 个气候变化时期,即中世纪暖期(900—1300 年)、小冰期(1500—1850 年)和现代暖期(20 世纪暖期),前人对于这 3 个时期的讨论较多。早期在欧洲和北美地区均发现有中世纪暖期的存在,只是持续时间存在差异,而我国是否存在中世纪暖期还有争议,但王绍武等^[29]利用寒冷时间频率重建了我国东部地区 1 200 年以来的气温序列,发现 9 世纪后期到 11 世纪末以及 13 世纪气温接近或略高于现代,因此我国东部地区确实存在一个较为温暖但不连续的时期,可能对应中世纪暖期。对中国小冰期的研究结果分歧不大,总体而言,16 世纪前半叶、17 世纪后半叶和 19 世纪后半叶为冷期^[30]。研究表明,中世纪暖期中国总体降水特征为南旱北涝,而小冰期则南涝北旱。20 世纪以来中国气候逐渐变暖,尤其 20 世纪 90 年代是最暖的 10 年,1998 年则是观测记录以来最暖的一年,近 50 多年中国降水量的变化特征为西部地区增加,东部华北地区减少^[31]。本研究区的沉积物记录较好地反映了中世纪暖期、小冰期和现代暖期台湾以东海域的气候变化特征,并与我国台湾地区的湖泊沉积记录等资料有较好的相关性。

1150—1420 年期间本研究区沉积物浮游有孔虫暖水种与冷水种比值(图 5)较高,仅在 1250 年和 1350 年有所降低。前文对本研究区沉积物 TOC、TN 和海源碳的分析表明,在 1150—1420 年期间沉积物中有机质含量逐渐升高,海洋初级生产力也有所增加,反映了在 1150—1400 年台湾以东黑潮主流较高的表层海水温度有利于初级生产力的升高。另外,台湾高山湖泊的沉积记录表明在 820—1320 年期间较为温暖,且位于台湾北部的鸭池其沉积物的孢粉记录也表明在 1100—1300 年期间台湾北部气候偏干^[32—34],反映了中世纪暖期台湾地区温暖干旱的气候特征。况雪源等^[35]重建台湾地区近千年来的降水异常(图 5)与江波^[36]利用台湾东北部海域 MD05—2908 孔柱状沉积物重建的夏季表层海水盐度呈现相

反的变化趋势,即 1150—1300 年期间,台湾地区降水异常较小时,台湾东北部夏季表层海水盐度增大。事实上,造成中世纪暖期台湾地区降水减少的原因可能是温度的升高造成西太平洋副热带高压的位置异常偏北,东亚季风环流增强,而我国东部季风降水一般出现在东亚夏季风控制的西南气流前端,增强的东亚季风使得降雨带北移,从而导致我国长江流域和南方地区降水减少^[2]。

在 1520—1800 年期间,本研究站位浮游有孔虫暖水种与冷水种比值一直处于较低水平,仅在 1740 年前后有一较高值,反映了该时期整体较冷的表层海水环境,研究区北部的 MD05—2908 孔沉积物中黑潮指示硅藻种含量(图 5)总体表现为下降趋势,也反映了该时期表层海水温度的降低^[17]。在小冰期我国南方地区表现为冷湿的气候特点,从我国南方地区发生的洪水事件频数可以看出,南方地区小冰期相对中世纪暖期降水更为丰富。另外,1350—1700 年期间万象洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的偏轻也表明了东亚夏季风的减弱(图 5),对应的东亚季风控制下的降水带南移,造成我国南方地区降水偏多。我国台湾北部湖泊的沉积物记录了蕨类孢子相对孢粉总数的增加,在 1500—1800 年期间达到最高值,反映了当时台湾北部地区较为湿润的气候特征^[34]。

19 世纪中期以后,由于表层样品的有孔虫数据分辨率较低,难以从表层海水温度变化上反映现代暖期的气候变化特征,但 TOC、TN 和中值粒径在 1840 年以来的快速波动变化可以较好的反映气候的年代波动特征。从温度变化来看,大量数据表明现代暖期的全球气温显著增暖,我国地表的平均气温也呈现增长趋势^[2],并且研究表明,1985 年以来台湾平地气温与附近海域的海水面温度也逐渐升高,海温升幅较陆上气温升幅更大^[37]。但值得关注的是,从东亚季风的热力差异变化来看,我国东亚夏季风和降水在现代暖期并没有表现出较为一致的增强或减弱,而是呈现出年际波动的变化特征^[2]。因此,从以上分析中我们可以看出,尽管中世纪暖期与现代暖期都表现为气温的增暖现象,但表现在我国南方地区却存在东亚季风强弱和降水量多少的差异,我国南方地区在中世纪暖期的气候表现为较为明显的温暖干旱特征,但在现代暖期,我国南方地区的气候则表现出快速的波动变化,台湾地区的平均降水量则在 1930—1950 年和 1970 年较高,降水增多有利于台湾陆源物质向海底输送,增强的底层水动力条件可能增加海底再悬浮物

质向本研究站位的输送,因此在 1930—1950 年和 1970 年期间本研究区沉积物有较高的 TOC 和 TN 值。周秀骥等^[2]认为,造成中世纪暖期和现代暖期东亚季风强度和降水异常存在差异的主要原因可能是气候的强迫因子不同。

6 结论

通过对台湾以东黑潮主流区沉积物年代学和粒度特征的研究,分析了台湾以东黑潮主流区的沉积特征,利用有机碳含量和有机碳同位素组成估算了海源碳含量,并讨论了近千年来台湾以东黑潮主流区初级生产力的变化,结合其他资料分析了近千年来台湾以东黑潮主流区对气候环境的响应,主要结论如下:

(1)台湾以东黑潮主流区近千年来平均沉积速率为 34.44 cm/ka,该区沉积物以灰色粘土质粉砂为主要成分,其沉积特征主要受台湾东部河流和黑潮的动力作用控制,暴雨、台风和地震等极端事件也会对沉积环境产生短暂影响。总体而言,台湾以东黑潮主流区沉积环境较为稳定。另外,对台湾以东黑潮主流区海源碳含量的定量计算表明,沉积物总有机质中有 40.02%~73.88% 来源于海洋自生,因此近千年来台湾以东黑潮主流区沉积物的有机质主要为海源输入,

陆源输送占次要地位。

(2)台湾以东黑潮流区沉积物中的 TOC、TN 含量主要受台湾东部河流输入、上层水体海洋初级生产力的沉降过程、成岩作用和粒度效应等因素的影响。通过沉积物中 TOC 和 $\delta^{13}\text{C}$ 定量估算了海源碳含量,其变化可以反映近千年来台湾以东黑潮主流区海洋初级生产力的变化。另外,近千年来台湾以东黑潮主流区沉积物记录较好地反映了中世纪暖期、小冰期和现代暖期 3 个全球性的气候变化阶段。1150—1420 年期间,台湾地区表现为温暖干旱的气候特征,本研究区沉积物中 TOC、TN 和海源碳含量缓慢升高,较高的表层海水温度有助于海洋初级生产力水平的升高。1500—1840 年期间 TOC 和海源碳含量变化趋势存在差异,一方面较低的海水温度和亚洲大陆风尘输送水平使得海洋初级生产力较低,另一方面台湾地区小冰期较高的降水量有利于台湾东部河流向海输送,增强的水动力条件可能会加强海底沉积物的东移,从而导致本研究站位沉积物中 TOC 含量的增加。进入现代暖期以来研究区的海水温度逐渐增暖,但东亚季风强度和降水量却表现出波动的年际变化特征,并体现在 1930—1950 年和 1970 年期间本研究区沉积物的中值粒径、TOC 和 TN 含量的快速波动。

参考文献:

- [1] 殷建平,王友绍,徐继荣,等. 海洋碳循环研究进展[J]. 生态学报, 2006, 26(2): 566—575.
Yin Jianping, Wang Youshao, Xu Jirong, et al. Advances of studies on marine carbon cycle[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(2): 566—575.
- [2] 周秀骥,赵平,刘舸,等. 中世纪暖期、小冰期与现代东亚夏季风环流和降水年代—百年尺度变化特征分析[J]. 科学通报, 2011, 56(25): 2060—2067.
Zhou Xiuj, Zhao Ping, Liu Ke, et al. Characteristics of decadal-centennial-scale changes in East Asian summer monsoon circulation and precipitation during the Medieval Warm Period, little ice age and in the present day[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(25): 2060—2067.
- [3] 南青云,李铁刚,陈金霞,等. 南冲绳海槽 7000a.B.P.以来基于长链不饱和烯酮指标的古海洋生产力变化及其与气候的关系[J]. 第四纪研究, 2008, 28(3): 482—490.
Nan Qingyun, Li Tiegang, Chen Jinxia, et al. Paleoproductivity variation and its correlation with climate changes: An approach of long-chain alkenone[J]. Quaternary Sciences, 2008, 28(3): 482—490.
- [4] 齐庆华,蔡榕硕,张启龙. 台湾以东黑潮经向热输送变异及可能的气候效应[J]. 海洋学报, 2012, 34(5): 31—38.
Qi Qinghua, Cai Rongshuo, Zhang Qilong. Heat transport variability of the Kuroshio east of Taiwan and its possible climatic effect[J]. Haiyang Xuebao, 2012, 34(5): 31—38.
- [5] 安芷生,刘晓东. 东亚季风气候的历史与变率[J]. 科学通报, 2000, 45(3): 238—249.
An Zhisheng, Liu Xiaodong. History and variability of the East-Asian monsoon[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(3): 238—249.
- [6] 王铮,侯一筠,乐肯堂,等. 源区黑潮研究进展[J]. 海洋科学集刊, 2007(48): 40—46.
Wang Zheng, Hou Yijun, Le Kentang, et al. Advances in study on the Kuroshio in the source region[J]. Studia Marina Sinica, 2007(48): 35—40.
- [7] 杨策,徐建,张鹏,等. 27 万年来南海南部上部水体结构和古生产力变化的古海洋学记录[J]. 第四纪研究, 2017, 37(3): 452—462.
Yang Ce, Xu Jian, Zhang Peng, et al. Paleoceanographic records of upper ocean water structure and paleoproductivity in the southern South China Sea since 270 ka[J]. Quaternary Sciences, 2017, 37(3): 452—462.
- [8] Yuan Zineng, Xing Lei, Li Li, et al. Biomarker records of phytoplankton productivity and community structure changes during the last 14000 years in the mud area southwest off cheju island, east china sea[J]. Journal of Ocean University of China, 2013, 12(4): 611—618.
- [9] 蔡德陵,孙耀,张小勇,等. 由东海、黄海沉积物中有机碳含量及稳定同位素组成重建 200a 以来初级生产力历史记录[J]. 海洋学报, 2014, 36(2): 40—50.

- Cai Deling, Sun Yao, Zhang Xiaoyong, et al. Reconstructing a primary productivity history over the past 200 a using the sediment organic carbon content and the stable isotope composition from the East China Sea and the Yellow Sea[J]. *Haiyang Xuebao*, 2014, 36(2): 40–50.
- [10] 周超, 金海燕, 翦知潜. 赤道西太平洋晚第四纪古生产力变化: 来自元素比值的证据[J]. 第四纪研究, 2011, 31(2): 276–283.
Zhou Chao, Jin Haiyan, Jian Zhimin. Variations of the late quaternary paleo-productivity in the western Equatorial Pacific: Evidences from the elemental ratios[J]. *Quaternary Sciences*, 2011, 31(2): 276–283.
- [11] 刘保华, 郑彦鹏, 吴金龙, 等. 台湾岛以东海域海底地形特征及其构造控制[J]. 海洋学报, 2005, 27(5): 82–91.
Liu Baohua, Zheng Yanpeng, Wu Jinlong, et al. The topographical characteristics in the area off eastern Taiwan Island and their tectonic implication[J]. *Haiyang Xuebao*, 2005, 27(5): 82–91.
- [12] Li Chuanshun, Shi Xuefa, Kao Shuji, et al. Clay mineral composition and their sources for the fluvial sediments of taiwanese rivers[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(6): 673–681.
- [13] Andres M, Wimbush M, Park J H, et al. Observations of Kuroshio flow variations in the East China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2008, 113(C5): C05013.
- [14] 刘伟, 宋金明, 袁华茂, 等. 黑潮化学物质输入东海的途径与通量[J]. 地球科学进展, 2015, 30(8): 904–914.
Liu Wei, Song Jinming, Yuan Huamao, et al. Pathway and flux of inputting chemical substances from the Kuroshio to the East China Sea[J]. *Advances in Earth Science*, 2015, 30(8): 904–914.
- [15] Sibuet J C, Hsu S K, Normand A. Tectonic significance of the Taitung canyon, Huatung Basin, East of Taiwan[J]. *Marine Geophysical Researches*, 2006, 27(1): 77–79.
- [16] 贾建军, 高抒, 薛允传. 图解法与矩法沉积物粒度参数的对比[J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(6): 577–582.
Jia Jianjun, Gao Shu, Xue Yunchuan. Grain-size parameters derived from graphic and moment methods: A comparative study[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2002, 33(6): 577–582.
- [17] 李冬玲, 蒋辉, 李铁刚, 等. 南冲绳海槽 1000 年以来的硅藻记录及古环境[J]. 科学通报, 2011, 56(8): 589–597.
Li Dongling, Jiang Hui, Li Tiegang, et al. Late holocene paleoenvironmental changes in the southern Okinawa Trough inferred from a diatom record [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(8): 589–597.
- [18] Gwo W H, Yu-Chia C. Sedimentation rates on the continental slope off eastern taiwan[J]. *Marine Geology*, 1994, 119(1/2): 99–109.
- [19] 于宇, 宋金明, 李学刚, 等. 沉积物生源要素对水体生态环境变化的指示意义[J]. 生态学报, 2012, 32(5): 1623–1632.
Yu Yu, Song Jinming, Li Xuegang, et al. Indicative significance of biogenic elements to eco-environmental changes in waters[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(5): 1623–1632.
- [20] 南青云. 25ka B.P.以来黑潮流域古环境演化对高频全球变化事件的响应[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2008.
Nan Qingyun. The Kuroshio Current variability and it's responses to global high frequency climate events for the past 25ka B. P.[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2008.
- [21] 曹梦莉, 马倩倩, 吴莹, 等. 南海北部和海南岛附近海域表层沉积物中有机质的分布和降解状态的差异[J]. 海洋与湖沼, 2017, 48(2): 258–265.
Cao Mengli, Ma Qianqian, Wu Ying, et al. Difference in organic matter distribution and degradation in surface sediment between northern South China Sea and Hainan Island[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2017, 48(2): 258–265.
- [22] 涂霞, 郑范, 向荣, 等. 末次冰期以来西太平洋暖池变化的浮游有孔虫记录[J]. 热带海洋学报, 2005, 24(1): 1–7.
Tu Xia, Zheng Fan, Xiang Rong, et al. Planktonic foraminifera response to changes of West Pacific Warm Pool since last glacial[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2005, 24(1): 1–7.
- [23] 金海燕, 翦知潜, 刘东升. 西太平洋翁通一爪哇海台晚第四纪浮游有孔虫群与古温度变化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(4): 65–71.
Jin Haiyan, Jian Zhimin, Liu Dongsheng. Late quaternary variations of planktonic foraminiferal assemblage and Paleo-Temperature of Ontong-Java Plateau, West Pacific[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2003, 23(4): 65–71.
- [24] 黄宝琦, 李保华, 翦知潜. 1.5Ma 以来南海南北上部水体温度变化对比[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(1): 79–83.
Huang Baoqi, Li Baohua, Jian Zhimin. Comparison of variations in upper water temperatures between the northern and southern South China Sea since 1.5 Ma BP[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2004, 24(1): 79–83.
- [25] 万世明, 李安春, 胥可辉, 等. 南海北部中新世以来粘土矿物特征及东亚古季风记录[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2008, 33(3): 289–300.
Wan Shiming, Li Anchun, Xu Kehui, et al. Characteristics of clay minerals in the northern south china sea and its implications for evolution of East Asian monsoon since Miocene[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2008, 33(3): 289–300.
- [26] 苏晓晨. 1945–2010 年台湾东北海域温盐变化的时空分异[D]. 上海: 上海师范大学, 2015.
Su Xiaochen. Temporal and spatial variation of temperature and salinity in the northeastern Taiwan in 1945–2010[D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2015.
- [27] 姜修洋, 李志忠, 李金全, 等. 最近 500 年来福建玉华洞石笋氧同位素记录及气候意义[J]. 地理科学, 2012, 32(2): 207–212.
Jiang Xiuyang, Li Zhizhong, Li Jinquan, et al. Stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ record from Yuhua Cave over the past 500 years and its regional climate significance[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(2): 207–212.

- [28] 谭明. 近千年气候格局的环流背景: Enso 态的不确定性分析与再重建[J]. 中国科学: 地球科学, 2016, 46(5): 657—673.
Tan Ming. Circulation background of climate patterns in the past millennium: Uncertainty analysis and re-reconstruction of ENSO-like state[J]. Science China: Earth Sciences, 2016, 46(5): 657—673.
- [29] 王绍武, 罗勇, 闻新宇, 等. 近千年全球温度变化研究的新进展[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(1): 14—19.
Wang Shaowu, Luo Yong, Wen Xinyu, et al. Last advances in studies of the global temperature variations for the last millennium[J]. Advances in Climate Change Research, 2007, 3(1): 14—19.
- [30] 张翼, 张丕远, 张厚瑛, 等. 气候变化及其影响[M]. 北京: 气象出版社, 1993.
Zhang Yi, Zhang Piyuan, Zhang Houxuan, et al. Climate Change and Its Impact[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1993.
- [31] 王绍武, 蔡静宇, 朱锦红, 等. 中国气候变化的研究[J]. 气候与环境研究, 2002, 7(2): 137—145.
Wang Shaowu, Cai Jingning, Zhu Jinhong, et al. Studies on climate change in China[J]. Climatic and Environmental Research, 2002, 7(2): 137—145.
- [32] 罗建育, 陈镇东, 万政康. 台湾大鬼湖的古气候研究[J]. 中国科学:D 辑, 1996, 26(5): 474—480.
Luo Jianyu, Chen Zhendong, Wan Zhengkang. Paleoenvironmental study of Great Ghost Lake, Taiwan[J]. Science in China: Series D, 1996, 26(5): 474—480.
- [33] 罗建育, 陈镇东. 台湾高山湖泊沉积记录指示的近 4000 年气候与环境变化[J]. 中国科学:D 辑, 1997, 27(4): 366—372.
Luo Jianyu, Chen Tung Arthur. Paleoclimatological and paleoenvironmental records since 4000a BP in the sediments of alpine lakes in Taiwan[J]. Science in China: Series D, 1997, 27(4): 366—372.
- [34] Chen S H, Wu J T, Yang T N, et al. Late holocene paleoenvironmental changes in subtropical taiwan inferred from pollen and diatoms in lake sediments[J]. Journal of Paleolimnology, 2009, 41(2): 315—327.
- [35] 况雪源, 刘健, 王红丽, 等. 近千年来中国区域降水模拟与重建资料的对比分析[J]. 地球科学进展, 2009, 24(2): 159—171.
Kuang Xueyuan, Liu Jian, Wang Hongli, et al. Comparison of simulated and reconstructed precipitation in China during the last millennium[J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(2): 159—171.
- [36] 江波. 25 ka 以来冲绳海槽古海洋环境演化研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2010.
Jiang Bo. The research of paleoenvironment evolution in the Okinawa Trough during the 25 ka BP[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [37] 萧长庚. 近百年来台湾气候变化概述[C]//2008 年海峡两岸气象科学技术研讨会论文集. 北京: 中国气象学会, 2008.
Xiao Changgeng. An overview of climate change of Taiwan in the last hundred years[C]//Proseminar of Meteorological Science and Technology Between Both Sides of Taiwan Straits. Beijing: Chinese Meteorological Society, 2008.

Sedimentary records of sea-derived carbon and records of paleoproductivity and climate change in the Kuroshio mainstream over the past millennium

Wang Yueqi^{1,2,3,4}, Song Jinming^{1,2,3,4}, Li Xuegang^{1,2,3,4}, Wang Qidong^{1,2,3,4}

(1. CAS Key Laboratory of Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Marine Ecology and Environmental Sciences Laboratory, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China; 4. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Abstract: Grain size and AMS¹⁴C dating in the sediment of Kuroshio mainstream, eastern of Taiwan, were determined to investigate the sedimentary environmental change of the research area for the past millennium. It made use of total organic carbon (TOC) and carbon stable isotope compositions in organic matter ($\delta^{13}\text{C}$) of sediments to estimate the sea-derived carbon contents. The change of marine primary productivity and the response of climate change in the research area for the past millennium were discussed based on the above study for the first time. The results showed that the sedimentary environment of the research area was relatively stable, with an average sedimentary rate of 34.44 cm/ka. In addition, TOC and total nitrogen (TN) contents of the sediments in Kuroshio mainstream were mainly influenced by rivers input of eastern Taiwan, settlement process of marine primary productivity, diagenesis and grain-size effect. TOC of research area sediments was mainly marine autogenic and was

minor terrigenous input based on the estimation result of sea-derived carbon contents, which is about 40.02%—73.88% of organic matter in the sediments was marine autogenic. Meanwhile, the sedimentary records in Kuroshio mainstream for the past millennium well were reflected three climate periods, which is Medieval Warm Period (MWP), Little Ice Period (LIP) and Modern Period (MP). During 1150—1420, the contents of TOC, TN and sea-derived carbon of sediments in the research area were rising slowly, and the marine primary productivity was rising affected by the relatively high sea surface temperature (SST) in MWP. During 1500—1840, the difference of variation trend between TOC and sea-derived carbon contents reflected the temperature and rainfall features in LIA of the research area. On the one hand, relatively low sea-derived carbon contents and marine primary productivity were affected by relatively low SST and less Asian continental dust input during 1600—1750. Relatively high TOC contents in the research area sediments during 1500—1850 was related to more sediment input, which was caused by increased rainfall of Taiwan in LIA and stronger rivers input of eastern Taiwan. In the MP, SST in the research area was gradually increased, but the intensity of the East Asian monsoon and the precipitation fluctuated rapidly, which is reflected in the rapid fluctuation of the median diameter (D₅₀), TOC and TN contents during 1930—1950 and 1970.

Key words: paleoproductivity; climate change; sea-derived carbon; sediment; Kuroshio