

# Baja California 边缘 PC14 岩芯海水表层 温度及生产力变化的百年尺度记录\*

邢 磊<sup>1</sup> 丁 玲<sup>1</sup> 赵美训<sup>2</sup> 张荣平<sup>1</sup> Alexander van Geen<sup>3</sup> Joseph D. Ortiz<sup>4</sup>

(1. 中国海洋大学海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室 青岛 266100; 2. 同济大学海洋与地球科学学院  
海洋地质国家重点实验室 上海 200092; 3. Lamont-Doherty Earth Observatory, Columbia University,  
Palisades, NY 10964, USA; 4. Department of Geology, Kent State University, Kent, OH 44242, USA)

**提要** 加利福尼亚流是北太平洋环流的重要组成部分, 它的变化对全球气候及碳循环有重要影响。对位于东北太平洋低纬区 Baja California 外海的 PC14 柱状样进行了有机地球化学分析, 重建了过去 14ka 来这一地区百年尺度的海水表面温度及生产力变化, 发现其存在明显的 B/A (Bling-Aller) 和 YD (Younger Drays) 事件, 但 B/A 和 YD 事件温度变化幅度小于中纬度地区。与中纬度加利福尼亚流系早中全新世温度降低不同, PC14 全新世温度无明显变化趋势。这些结果表明了东太平洋低纬地区对高纬地区的气候响应以及沿岸上升流和 ENSO 现象对加利福尼亚流系中纬和低纬地区的影响不同。从冰消期到全新世, PC14 生产力呈现阶段上升趋势, 指示了由 El Niño 气候向 La Niña 气候的转化以及沿岸上升流加强的总体趋势。在全新世中后期(6.5—3.8ka)生产力的降低, 则可能是受 ENSO 加强的影响。在 B/A 暖期, PC14 生产力增加不多, 但氧最小层强度增加, 这表明生产力变化不是东太平洋边缘海的氧最小层强化的控制因素。

**关键词** Baja California, 海水表面温度, B/A, YD, 生产力, ENSO, 氧最小层

**中图分类号** P731

北太平洋环流是世界上层大洋主要环流体系, 其冰期/间冰期的演变对全球气候和环境变化有重要影响。尤其是构成北太平洋环流体系的太平洋东西边界流: 加利福尼亚流和黑潮, 对东亚和北美洲气候变化和水气循环有重要作用(Dean, 2007; Ujiie *et al*, 2003)。现代调查已发现北太平洋高压季节性的强弱变化及南北位置的迁移(Bograd *et al*, 2002)。这主要是因为夏季的相对高温造成了北迁且变强的北太平洋高压。这种北太平洋高压的强弱变化也导致了加利福尼亚流及北美西岸沿岸上升流的强度变化。与季节变化类似, 加利福尼亚流也经历了冰期弱、间冰期强的变化(Herbert *et al*, 2001; Yamamoto *et al*, 2007)。同样, 由沿岸风引起的北美西岸上升流也发生了强度变化,

并导致生产力呈现冰期低/间冰期高的演变(Dean, 2007; Dean *et al*, 1997; Mangelsdorf *et al*, 2000)。

相对于中高纬度区加利福尼亚流的研究, 对东太平洋低纬度地区加利福尼亚流变化的研究还较少。与中高纬度地区相比, 低纬地区对高纬区的气候变化响应不同, 而且现有一些研究表明在末次冰消期低纬地区的变化早于大陆冰盖, 这可能是气候变化的驱动力(Lea *et al*, 2000; Nurnberg, 2000; Tian *et al*, 2006; Visser *et al*, 2003; Wei *et al*, 2007)。位于东太平洋低纬度区的 Baja California 外海不仅受到高纬地区气候变化的影响, 还受到上升流以及 ENSO 的影响。有研究表明, 在 El Niño 年, Baja California 外海与赤道太平洋的温度异常幅度类似(Durazo *et al*, 2002)。这些因

\* 国家自然基金项目, 40676032 号、40706021 号和国家重点基础研究发展计划(973)项目, 2007CB815904 号资助。邢 磊, 讲师, E-mail: xinglei@ouc.edu.cn

通讯作者: 赵美训, 教授, E-mail: maxzhao04@yahoo.com

收稿日期: 2008-07-15, 收修改稿日期: 2008-10-15

素导致加利福尼亚流低纬地区的温度变化呈现复杂性。但是这个区域高分辨记录缺乏，不能显示千年、百年尺度温度变化。例如B/A,YD事件，以及ENSO对Baja California边缘海气候变化的影响。

由于受东北信风的影响，北美西岸存在明显的上升流，造成了东太平洋边缘海的高生产力。但现代调查也发现在El Niño期间，赤道太平洋的异常升温通过Kelvin波传递到东边界流，加深了温跃层，使初级生产力降低(Chavez *et al*, 2002; Pennington *et al*, 2006)。长时间尺度的研究也表明东赤道太平洋在末次冰盛期(LGM)时有类似ENSO的现象(Koutavas *et al*, 2002)。这种类似ENSO的气候也会传递到加利福尼亚流系，从而影响该区域的生产力。由于以往对加利福尼亚流系演变的研究侧重于中纬度的加州外海，ENSO现象对其影响有限，所以目前关于ENSO对加利福尼亚流系生产力演变的影响还没有充分的证据。

受低流速的北太平洋中层水和沿岸上升流带来的高生产力的影响，在加州外海存在氧最小层(OMZ)。对Santa Barbara盆地的研究发现氧最小层强度在冷期减弱，暖期加强，其解释是北太平洋中层水在暖期流速更慢，导致氧最小层强度加强(Behl *et al*, 1996; Cannariato *et al*, 1999)。但对Baja California外海的底栖有孔虫的研究发现，底层水氧含量的变化主要与生产力有关，而不是由北太平洋的中层水流速控制(Ortiz *et al*, 2004)。这一结论还缺乏更多的进一步证据支持。

Soledad盆地(Magdalena盆地)位于Baja California大陆边缘，属于东太平洋低纬地区，不仅受到南流的加利福尼亚流及沿岸上升流的影响，还受到南部的热带水团影响(Esparza-Alvarez *et al*, 2007)。由于其纬度较以往加州外海的研究站位偏低，因此相对而言，低纬的气候现象对其影响更大，尤其是赤道太平洋的ENSO现象。再加上Soledad盆地沉积速率高，底层水氧含量低，可以提供高分辨率的柱状样，因此Soledad盆地是研究ENSO现象对加利福尼亚流系的影响及冰期/间冰期东太平洋边缘海氧最小层强度变化的理想场所。作者选择位于的Soledad盆地的一个高分辨率柱状样研究其温度和生产力的变化，并与中高纬区加利福尼亚流系的变化进行比较，揭示百年尺度温度和生产力变化事件，讨论ENSO现象对这一地区的影响及其底层水氧含量变化的控制因素。

## 1 站位、样品与研究方法

采样站位 PC14( $25^{\circ}12.07'N, 112^{\circ}43.00'W$ )位于Soledad 盆地(Magdalena 盆地)(图 1)。Soledad 盆地位于 Baja California 海岸以西 45km，约长 85km，宽 35km，最大深度约 540m。水柱中密度垂直分布表明，海槛在 290m 水深处将外海水与海盆水分隔，底层水氧含量为  $3\text{--}5\mu\text{mol/kg}$ (van Geen *et al*, 2003)。PC14 样品采自 Soledad 盆地水深 541m 处，柱长 14m，柱状样呈现有规律的 dark/light 粗颗粒纹层分布，其中还包含很多只有几毫米的主要由颗石藻组成的白色纹层(van Geen *et al*, 2003)。10 个  $^{14}\text{C}$  测年数据得到该柱顶部年龄约为 2420 年，底部年龄约为 14190 年。每隔约 1cm 取样进行 DSR(diffuse spectral reflectance 漫射光谱反射率)分析，得到 1327 个 DSR3 数据来指示有机碳含量的变化。在许多环境中 DSR 颜色光谱与沉积物组成相关。在 Baja California 的漫射光谱反射率模型研究表明，DSR3 与有机碳含量相关(Ortiz *et al*, 2004)。每隔约 10cm 取样，共取得 138 个样品进行生物标志物分析，分辨率约为 100 年/个。生物标志物的测定分为样品预处理和上机分析两个过程。具体过程已有详细报道(Zhao *et al*, 2005)，简述如下。样品被冷冻干燥后，加入二氯甲烷和甲醇(3 : 1)萃取液和 19 醇组成的内标，超声萃取四次。萃取液经 KOH/甲

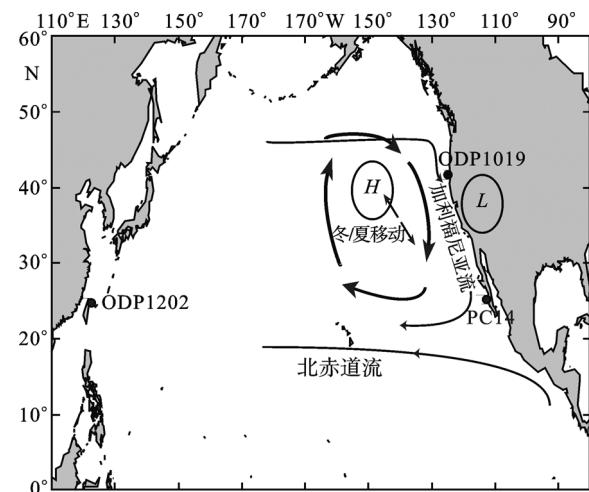


图 1 在本文中所用的站位及研究区域的主要表层流和夏季东北太平洋气压体系(H 代表高压, L 代表低压)[修改自 (Mangelsdorf *et al*, 2000)]

Fig.1 The major surface currents in the study areas and the summer positions of the atmospheric pressure systems of the northeast Pacific Ocean (H represents high pressure, and L for low pressure) (adapted from (Mangelsdorf *et al*, 2000)) and the core sites discussed in this paper

醇溶液水解后, 过硅胶柱分离, 得到  $C_{37:2}+C_{37:3}$  长链烯酮, 经氮吹富集、衍生化处理后上机分析。对处理好的样品用气相色谱-质谱仪(Thermo)定性分析, 用气相色谱定量分析(Agilent 6890N)。所用色谱柱为 HP-1(50m), 所用载气为氢气, 流速 1.2ml/min。利用 Muller 等(1998) 全球 SST(海水表层温度)重建公式  $SST = (U_{37}^{k'} - 0.044)/0.033$ , 重建 SST。 $C_{37:2}+C_{37:3}$  长链烯酮含量通过其色谱峰与内标峰对比计算得到。

## 2 结果与讨论

根据 GISP-2 数据(Grootes *et al*, 1997)和 Barron 等(2003)的研究把整个柱状样分为 B/A 期(14.0—12.9ka)、YD 期(12.9—11.6ka)、早全新世(11.6—8.2ka)、中全新世(8.2—3.2ka)和晚全新世(3.2ka—2.4ka)来讨论。

### 2.1 SST 变化

PC14 样品的  $U_{37}^{k'}$  SST 在 B/A 期温度变化范围为 20.2—22.7 ; YD 期为 19.6—21.0 ; 全新世为 20.1—22.7 , 平均温度为 21.7 。从 YD 到全新世呈现上升的总趋势。这种上升的趋势在 ODP1202 和 ODP1019 都有发现。与 GISP-2 相比, 也可以看出 PC14 温度的总体变化趋势与格陵兰冰芯的氧同位素变化趋势一致, 特别是千年尺度的 B/A 和 YD 事件在 PC14 温度变化中有很好的体现, 温度之差有 3.1 。已发表的东太平洋低纬温度记录中, 由于分辨率低没有显示 B/A 和 YD 事件(Herbert *et al*, 2001; Lea *et al*, 2000)。B/A 和 YD 事件也存在于 ODP1019 站位中, 温度之差有 5.6 。但在西太平洋低纬度地区的 ODP1202 则没有明显的 B/A 和 YD 事件。Kiefer 等(2005)总结了冰消期太平洋温度变化规律时也发现, 低纬西太平洋的古温度记录中, 都没有明显的 YD 降温显示。南海作为对气候现象有明显放大效应的边缘海, YD 期间的降温也不明显, 只有 1 左右(Pelejero *et al*, 1999; Zhao *et al*, 2006)。因此, PC14 在 YD 事件 3.1 的降温在太平洋低纬区域是很大的。PC14 全新世温度变化没有大的趋势, 但存在明显波动。由图 2 可以看出, 这种全新世的温度波动呈现千年时间尺度的循环。这种千年尺度的气候波动在北大西洋(Bond *et al*, 1997; Oppo, 1997), 低纬地区(DeMenocal *et al*, 2000; Liew *et al*, 2006)以及北太平洋(Jian *et al*, 2000; Kienast *et al*, 2001; Xiang *et al*, 2007)都有发现。PC14 全新世温度变化无明显趋势, 这与加州南部陆

架上的  $U_{37}^{k'}$  SST 在中全新世无明显趋势变化一致(Herbert *et al*, 2001)。ODP1019 的全新世温度变化则呈现明显的中全新世变冷趋势(Barron *et al*, 2003)。这一现象在加州中部和北部外海(Prahl *et al*, 1995; Sabin *et al*, 1996)也有发现。而位于西太平洋的 ODP1202 站位的  $U_{37}^{k'}$  SST 在全新世有明显的上升趋势。

上述站位冰消期到全新世相似的温度上升趋势以及 B/A 和 YD 事件的存在显示了低纬度的东太平洋地区对北大西洋高纬地区气候变化的响应。这种响应很可能是通过北大西洋和北太平洋的大气循环尤其是水蒸气的循环联系在一起的(Dean, 2007)。从图 2 可以看出, PC14 和位于中纬度的 ODP1019, 都存在明显的 B/A 和 YD 事件。但在 PC14, B/A 和 YD 的最大温差为 3.1 , 而 ODP1019 最大温差为 5.6 。已有证据表明, YD 事件主要与大西洋深层水的对流减弱有关(Broecker, 2003; Cao *et al*, 2007; Hughen *et al*, 2000), 这一减弱主要是由于北半球高纬地区的冰盖(Laurentide 冰盖)溶解引起(Broecker, 2006)。模型也显示北太平洋的温度变化影响北半球的气候并通过水气循环影响 Laurentide 冰盖的形成(Peteet *et al*, 1997)。东太平洋中高纬地区由于距离北半球高纬地区近, 所以与高纬地区的气候响应更加灵敏。再加上赤道太平洋 B/A 期的类 La Niña 及 YD 期类 El Niño 现象的影响(Koutavas *et al*, 2002), 因此, 造成低纬的 PC14 站位 B/A 和 YD 事件的温度变化幅度小于中纬度的 ODP1019。与东太平洋两个站位相反, 位于西太平洋低纬度地区的 ODP1202 站位则没有明显的 B/A 和 YD 事件。但中国东部却存在明显的 B/A 和 YD 事件(Dykoski *et al*, 2005; Wang *et al*, 2001; Yancheva *et al*, 2007)。B/A 和 YD 事件在北大西洋地区有明显的证据(Mayle *et al*, 1995), 但在低纬地区和南半球其存在还不明确(Rodbell, 2000)。而位于东太平洋低纬地区的 PC14 有明显的 B/A 和 YD 事件, 这证明了北大西洋高纬地区气候突变事件对东太平洋低纬地区的影响。西太平洋低纬地区对 B/A 和 YD 事件无明显响应, 这可能与 Laurentide 冰盖对东西太平洋的影响不同以及赤道太平洋的 ENSO 现象有关。在图 2 中太平洋这三个站位全新世的温度变化呈现不同的趋势, 这主要与上升流及北太平洋与北大西洋的气候遥相关有关。Kim 等(2004)总结了北太平洋东西沿岸  $U_{37}^{k'}$  SST, 发现了北太平洋全新世(0—7ka)与北大西洋温度变化趋势相反, 北太平洋呈现变暖趋势。这种

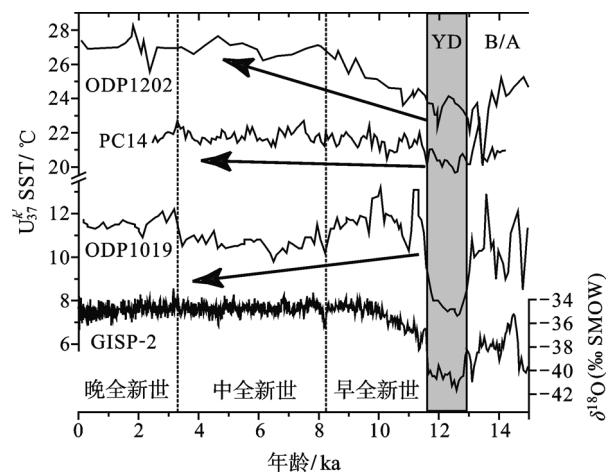


图 2 太平洋三个站位  $U_{37}^k$  SST 对比和 GISP-2 氧同位素记录  
Fig.2  $U_{37}^k$  SST records for PC14, ODP1202 (Zhao et al., 2005) and ODP1019 (Barron et al., 2003) in the Pacific Ocean and GISP-2 oxygen isotope record (Grootes et al., 1997)

相反的变化趋势可能与北大西洋涛动和北太平洋与北美大陆之间的气候波动有关。与冷期相比, 北美西岸在暖期有更强的上升流(Dean, 2007; Dean et al., 1997; Mangelsdorf et al., 2000)。因此东太平洋的 ODP1202 和 PC14 在全新世受到更强的上升流影响, 导致 ODP1019 出现温度下降的趋势。而 PC14 由于纬度较低, 受上升流的影响要小于 ODP1019, 再加上受到整个北太平洋全新世温度上升的影响, 因此在全新世温度变化不明显。ODP1202 全新世温度的变化则应该是整个北太平洋全新世温度上升的反映(Kim et al., 2004)。由 PC14 B/A—YD 期及全新世的温度变化可以推断, 东太平洋低纬度地区可能受 ENSO 影响更大, 而东太平洋中纬度可能更多受北美陆地气候影响。

## 2.2 生产力变化

Dean 等(2006)对 Baja California 外海的研究发现, TOC 与 Cd、Mo 含量的变化趋势一致, 可以指示生产力的变化。图 3 指示了 14ka 来 PC14 生产力指标的变化。PC14 的有机碳含量 (DSR3, 总初级生产力指标) 在 B/A 期略有升高, 在 YD 期初期略有下降, YD 后期又略有上升。由于 PC14 位于低纬度高温地区, 颗石藻是其浮游植物种群结构的主要组成(Falkowski et al., 2007)。也有研究表明, 加州流系的  $\text{CaCO}_3$  含量要由生产力而不是溶解作用控制,  $\text{CaCO}_3$  可以作为这一地区的生产力指标(Barron et al., 2003)。因此作者以颗石藻生物标志物  $C_{37:2}+C_{37:3}$  长链烯酮来研究颗石藻生产力的变化。 $C_{37:2}+C_{37:3}$  长链烯酮含量变化范围为

3516—20228 ng/g, 其含量在 B/A 略有升高, 在 YD 期初期略有下降, 但 YD 后期升高, 与 TOC 变化基本一致。全新世的早—中期(11.6—6.5 ka), 长链烯酮含量和 TOC 呈现明显的阶段上升趋势。表明从 YD 期到全新世的早—中期 PC14 生产力是上升的, 与温度上升的趋势一致。全新世的中后期(6.5—3.8 ka), 长链烯酮的含量出现明显下降趋势, TOC 也降低, 长链烯酮在 5.5—6 ka 后变化频率明显增大。中全新世后段(3.8—3.2 ka)TOC 和长链烯酮含量又上升。晚全新世(3.2—2.4 ka)TOC 和长链烯酮含量下降。

很多研究结果都显示在加州外海区域存在 B/A 暖期生产力明显升高、YD 冷期生产力的下降的现象。其解释是暖期强化的北太平洋高压增强了东北信风,

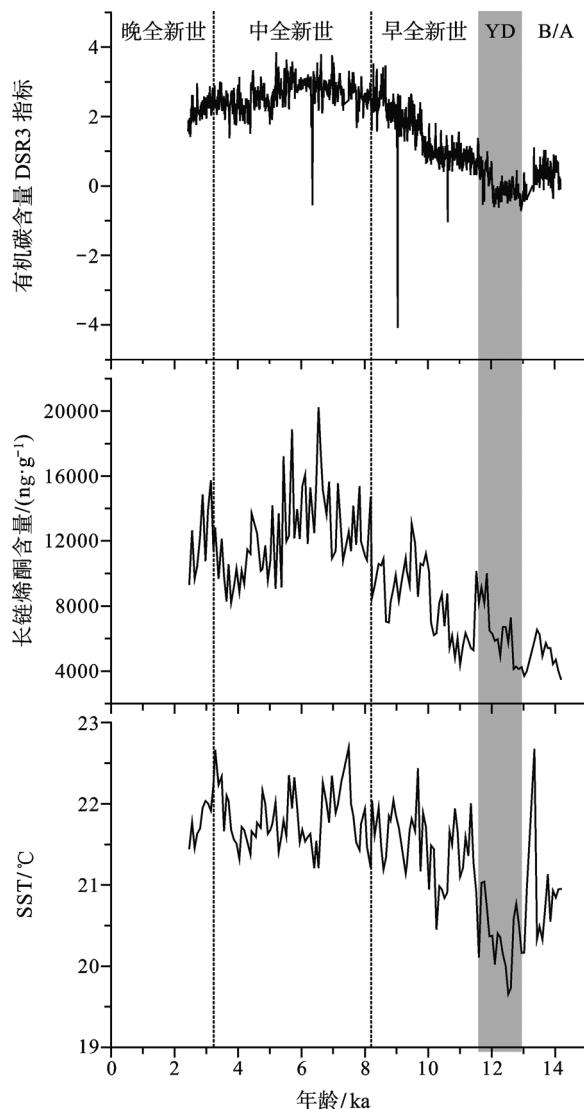


图 3 14ka 来 PC14 的长链烯酮和有机碳指标 DSR3 的变化  
Fig.3 Records of alkenones and DSR3 of PC14 during the last 14 ka

加强了南流的加州流和沿岸上升流,从而提高了生产力。与加州外海的记录(Barron *et al*, 2003; Dean, 2007; Pisias *et al*, 2001)相比,PC14 的有机碳和长链烯酮含量在 B/A 和 YD 期变化不明显,与 Ortiz 等(2004)对 Baja California 大陆边缘的 PC08 站位的研究结果相似。在东太平洋的 B/A 暖期,尽管由于强化的东北信风带来了增强的沿岸上升流,但由于 PC14 更靠近赤道,受上升流的影响较小,导致 B/A 暖期生产力并无明显变化。许多研究表明,北美沿岸在暖期氧最小层加强,这种加强或与暖期北太平洋中层水流速减慢有关(Behl *et al*, 1996; Cannariato *et al*, 1999)或与暖期生产力升高有关(Ortiz *et al*, 2004)。尤其是 B/A 暖期氧最小层加强的成因目前有争议(Dean, 2007)。但 PC14 在 B/A 暖期生产力并无明显变化,所以生产力可能不是控制这个地区氧最小层强度的主要因素。

PC14 从冰消期到全新世生产力的上升与北太平洋东部边缘海的研究结果相同。这种变化主要受北太平洋高压的强度控制,与加州流和沿岸上升流的强弱对应(Barron *et al*, 2003; Dean, 2007; Doose *et al*, 1997; Mangelsdorf *et al*, 2000; Ortiz *et al*, 2004; Yamamoto *et al*, 2007)。与东太平洋的结果相对的是西太平洋边缘海在冰消期到全新世转化过程中生产力的降低(Maeda *et al*, 2002; Zhang *et al*, 2007),并且与现代相比,东赤道太平洋在末次冰期,赤道以北东西生产力梯度减小(Herguera, 2000)。尽管东西太平洋的生产力变化模式相反,但它们的变化机制是相同的。冰消期到全新世转化过程中随着温度的升高,北太平洋高压加强,东北信风加强,造成北太平洋东岸沿岸上升流加强,生产力提高。而在西太平洋,暖期时由于与加州流对应的低营养盐黑潮对西太边缘海影响增强以及东亚冬季风的减弱,导致营养盐跃层加深,因此生产力降低。作者对陆源生物标志物高碳数正构醇的初步分析(未发表数据)表明,从冰消期到全新世陆源输入是增加的,但在中全新世后无明显变化。这与暖期时温度升高导致的水蒸发增大,河流输入通量增大有关。北美地区在冰消期到全新世的转化中由于 ITCZ 的北迁和北太平洋高压增强,导致气候湿润(Haug *et al*, 2001; McGee *et al*, 2007),因此河流输入增加。这也是北美东岸冰消期到全新世生产力增加的一个因素。

PC14 在全新世的中后期的生产力下降最可能与 ENSO 的影响有关。现代研究表明,Soledad 盆地在 ENSO 年呈现寡营养和颗粒有机碳通量减小的现象

(Silverberg *et al*, 2004)。在 ENSO 年 Baja California 外海温度升高,生产力降低,而在 La Niña 年则是温度降低,生产力增加(Espinosa-Carreón *et al*, 2004)。长时间尺度的研究也表明东赤道太平洋在冰期时有类似 ENSO 的现象,而在中全新世时有类似 La Niña 的现象(Koutavas *et al*, 2002)。现代的 ENSO 现象可能开始于 5ka 左右,在 3ka 后强度和频次得到强化(Gagan *et al*, 2004)。ENSO 频次的增多也加大了气候变化的频率(Barron *et al*, 2007; Brijker *et al*, 2007),从而引起生产力和浮游植物的波动。由图 3 也可以看出,5.5—6ka 后长链烯酮的含量波动频次明显加强,3ka 左右温度有明显上升,这也许是 ENSO 加强的反映。因此,全新世的中后期(6.5—3.8ka),PC14 生产力的降低很有可能与 ENSO 的加强有关。而 3.8—2.4ka 生产力的先上升后下降的趋势也与 ENSO 强度和频次的变化有关。

由以上的分析可知,PC14 的生产力变化主要受上升流和 ENSO 现象的影响。从长时间角度来讲,冰消期到全新世东太平洋从类 El Niño 现象向类 La Niña 现象的转化,上升流加强,因此生产力呈现上升的趋势,温度与生产力呈正比。在全新世期间,由于 ENSO 的强化,6ka 后从类 La Niña 现象向现代 El Niña 现象转换,导致生产力从 6ka 后下降。从短时间尺度来看,温度与生产力没有明显的相关性,这或许与上升流位置变化有关。因此需要更多的站位及其他生产力指标,才能明确这一地区生产力与 ENSO 及沿岸上升流的关系。

### 3 结论

(1) PC14 百年尺度的  $U_{37}^{k'}$  温度记录显示了明显的 B/A 和 YD 期暖/冷事件,表明了东太平洋低纬地区对北大西洋高纬地区气候响应。但与中纬度加州流系的研究不同,其 B/A 和 YD 期的温度变化幅度小。这表明东太平洋低纬度地区可能受 ENSO 影响更大,而东太平洋中纬度地区可能更多受北美陆地气候影响。PC14 全新世温度无明显变化趋势,表明北美西岸上升流对这一区域的影响小于中纬度地区。

(2) PC14 生产力变化主要与上升流及低纬的 ENSO 现象有关。从冰消期到全新世,PC14 生产力有明显上升,这与增强的北太平洋高压导致的强上升流有关。这也指示了从冰期到间冰期东太平洋 El Niño 气候向 La Niña 气候的转化总体趋势。颗粒藻生产力在 5.5—6ka 后变化频率明显增大以及全新世的

中后期(6.5—3.8ka)生产力的降低,可能是受到 ENSO 的影响。从短时间尺度来看,温度与生产力没有明显的相关性,这或许与上升流位置变化有关。因此需要更多的站位及其他生产力指标,才能明确这一地区生产力与 ENSO 及沿岸上升流的关系。

(3) B/A 暖期, PC14 生产力无明显升高,表明东太平洋边缘海的氧最小层暖期强化不是由生产力控制。

## 参 考 文 献

- Barron J, Heusser L, Herbert T *et al*, 2003. High-resolution climatic evolution of coastal northern California during the past 16,000 years. *Paleoceanography*, 18(1): 1020
- Barron J A, Bukry D, 2007. Development of the California Current during the past 12,000 yr based on diatoms and silicoflagellates. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 248(3—4): 313—338
- Behl R, Kennett J, 1996. Brief interstadial events in the Santa Barbara basin, NE Pacific, during the past 60 kyr. *Nature*, 379(6562): 243—246
- Bograd S, Schwing F, Mendelsohn R *et al*, 2002. On the changing seasonality over the North Pacific. *Geophysical Research Letters*, 29(9): 47
- Bond G, Showers W, Cheseby M *et al*, 1997. A Pervasive Millennial-Scale Cycle in North Atlantic Holocene and Glacial Climates. *Science*, 278(5341): 1257
- Brijker J M, Jung S J A, Ganssen G M *et al*, 2007. ENSO related decadal scale climate variability from the Indo-Pacific Warm Pool. *Earth and Planetary Science Letters*, 253(1—2): 67—82
- Broecker W, 2003. Does the Trigger for Abrupt Climate Change Reside in the Ocean or in the Atmosphere? *Science*, 300 (5625): 1519—1522
- Broecker W, 2006. GEOLOGY: Was the Younger Dryas Triggered by a Flood? *Science*, 312: 1146—1148
- Cannariato K, Kennett J, 1999. Climatically related millennial-scale fluctuations in strength of California margin oxygen-minimum zone during the past 60 ky. *Geology*, 27(11): 975
- Cao L, Fairbanks R G, Mortlock R A *et al*, 2007. Radiocarbon reservoir age of high latitude North Atlantic surface water during the last deglacial. *Quaternary Science Reviews*, 26(5—6): 732—742
- Chavez F P, Pennington J T, Castro C G *et al*, 2002. Biological and chemical consequences of the 1997—1998 El Niño in central California waters. *Progress In Oceanography*, 54(1—4): 205—232
- Dean W E, 2007. Sediment geochemical records of productivity and oxygen depletion along the margin of western North America during the past 60000 years: teleconnections with Greenland Ice and the Cariaco Basin. *Quaternary Science Reviews*, 26(1—2): 98—114
- Dean W E, Gardner J V, Piper D Z, 1997. Inorganic geochemical indicators of glacial-interglacial changes in productivity and anoxia on the California continental margin. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(21): 4507—4518
- Dean W E, Zheng Y, Ortiz J D *et al*, 2006. Sediment Cd and Mo accumulation in the oxygen-minimum zone off western Baja California linked to global climate over the past 52 kyr. *Paleoceanography*, 21(4): 4209
- DeMenocal P, Ortiz J, Guilderson T *et al*, 2000. Coherent High-and Low-Latitude Climate Variability During the Holocene Warm Period. *Science*, 288: 2198—2202
- Doose H, Prahl F, Lyle M, 1997. Biomarker temperature estimates for modern and last glacial surface waters of the California Current system between 33° and 42°N. *Paleoceanography*, 12(4): 615—622
- Durazo R, Baumgartner T R, 2002. Evolution of oceanographic conditions off Baja California: 1997—1999. *Progress in Oceanography*, 54(1—4): 7—31
- Dykoski C A, Edwards R L, Cheng H *et al*, 2005. A high-resolution, absolute-dated Holocene and deglacial Asian monsoon record from Dongge Cave. *China Earth and Planetary Science Letters*, 233(1—2): 71—86
- Esparza-Alvarez M A, Herguera J C, Lange C, 2007. Last century patterns of sea surface temperatures and diatom [>38 (mu)] variability in the Southern California current. *Marine Micropaleontology*, 64(1—2): 18—35
- Espinosa-Carreón T, Strub P, Beier E *et al*, 2004. Seasonal and interannual variability of satellite-derived chlorophyll pigment, surface height, and temperature off Baja California. *J Geophys Res*, 109(C3): C03039
- Falkowski P, Oliver M, 2007. Mix and match: how climate selects phytoplankton. *Nature reviews Microbiology*, 5(10): 813—819
- Gagan M K, Hendy E J, Haberle S G *et al*, 2004. Post-glacial evolution of the Indo-Pacific Warm Pool and El Niño Southern oscillation. *Quaternary International Climates, Human, and Natural System of the PEPII Transect*, 118—119, 127—143
- Grootes P, Stuiver M, 1997. Oxygen 18/16 variability in Greenland snow and ice with 10.3-to 10.5-year time resolution. *Journal of Geophysical Research*, 102(C12): 26455—26470
- Haug G H, Hughen K A, Sigman D M *et al*, 2001. Southward migration of the intertropical convergence zone through the Holocene. *Science*, 293(5533): 1304—1308
- Herbert T D, Schuffert J D, Andreasen D *et al*, 2001. Collapse of the California Current during glacial maxima linked to climate change on land. *Science*, 293(5527): 71—76
- Herguera J C, 2000. Last glacial paleoproductivity patterns in the eastern equatorial Pacific: benthic foraminifera records. *Marine Micropaleontology*, 40(3): 259—275

- Hughen K A, Southon J R, Lehman S J *et al*, 2000. Synchronous Radiocarbon and Climate Shifts During the Last Deglaciation. *Science*, 290: 1951
- Jian Z M, Wang P X, Saito Y *et al*, 2000. Holocene variability of the Kuroshio Current in the Okinawa Trough, northwestern Pacific Ocean. *Earth and Planetary Science Letters*, 184(1): 305—319
- Kiefer T, Kienast M, 2005. Patterns of deglacial warming in the Pacific Ocean: a review with emphasis on the time interval of Heinrich event 1. *Quaternary Science Reviews*, 24(7—9): 1063—1081
- Kienast S, McKay J, 2001. Sea surface temperatures in the subarctic northeast Pacific reflect millennial-scale climate oscillations during the last 16 kyrs. *Geophysical Research Letters*, 28(8): 1563—1566
- Kim J H, Rimbu N, Lorenz S J *et al*, 2004. North Pacific and North Atlantic sea-surface temperature variability during the holocene. *Quaternary Science Reviews*, 23(20—22): 2141—2154
- Koutavas A, Lynch-Stieglitz J, Marchitto Jr T M *et al*, 2002. El Nino-Like Pattern in Ice Age Tropical Pacific Sea Surface Temperature. *Science*, 297(5579): 226—230
- Lea D W, Pak D K, Spero H J, 2000. Climate impact of late quaternary equatorial Pacific sea surface temperature variations. *Science*, 289(5485): 1719—1724
- Liew P M, Lee C Y, Kuo C M, 2006. Holocene thermal optimal and climate variability of East Asian monsoon inferred from forest reconstruction of a subalpine pollen sequence, Taiwan. *Earth and Planetary Science Letters*, 250(3—4): 596—605
- Maeda L, Kawahata H, Nohara M, 2002. Fluctuation of biogenic and abiogenic sedimentation on the Shatsky Rise in the western North Pacific during the late Quaternary. *Marine Geology*, 189(3—4): 197—214
- Mangelsdorf K, Guntner U, Rullkötter J, 2000. Climatic and oceanographic variations on the California continental margin during the last 160 kyr. *Organic Geochemistry*, 31(9): 829—846
- Mayle F E, Cwynar L C, 1995. A review of multi-proxy data for the younger dryas in Atlantic Canada. *Quaternary Science Reviews*, 14(9): 813—821
- McGee D, Marcantonio F, Lynch-Stieglitz J, 2007. Deglacial changes in dust flux in the eastern equatorial Pacific. *Earth and Planetary Science Letters*, 257(1—2): 215—230
- Muller P J, Kirst G, Ruhland G *et al*, 1998. Calibration of the alkenone paleotemperature index  $U$  (super  $K'$ ) (sub37) based on core-tops from the eastern South Atlantic and the global ocean (60 degrees N-60 degrees S). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(10): 1757—1772
- Nurnberg D, 2000. Taking the Temperature of Past Ocean Surfaces. *Science*, 289: 1698—1699
- Oppo D, 1997. Millennial Climate Oscillations. *Science*, 278: 1244—1246
- Ortiz J D, O'Connell S B, DelViscio J *et al*, 2004. Enhanced marine productivity off western North America during warm climate intervals of the past 52 kyr. *Geology*, 32(6): 521—524
- Pelejero C, Grimalt J O, Heilig S *et al*, 1999. High-resolution U-37(K) temperature reconstructions in the South China Sea over the past 220 kyr. *Paleoceanography*, 14(2): 224—231
- Pennington J T, Mahoney K L, Kuwahara V S *et al*, 2006. Primary production in the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, 69(2—4): 285—317
- Peteet D, Del Genio A, Lo K, 1997. Sensitivity of northern hemisphere air temperatures and snow expansion to North Pacific sea surface temperatures in the Goddard Institute for Space Studies general circulation model. *Journal of Geophysical Research*, 102(D20): 23781—23792
- Pisias N G, Mix A C, Heusser L, 2001. Millennial scale climate variability of the northeast Pacific Ocean and northwest North America based on radiolaria and pollen. *Quaternary Science Reviews*, 20(14): 1561—1576
- Prahl F, Pisias N, Sparrow M *et al*, (1995) Assessment of sea-surface temperature at 42 N in the California Current over the last 30000 years. *Paleoceanography*, 10(4): 763—774
- Rodbell D, 2000. Paleoclimate: The Younger Dryas: Cold, Cold Everywhere? *Science*, 290(5490): 285—286
- Sabin A L, Pisias N G, 1996. Sea Surface Temperature Changes in the Northeastern Pacific Ocean during the Past 20,000 Years and Their Relationship to Climate Change in Northwestern North America. *Quaternary Research*, 46(1): 48—61
- Silverberg N, Martinez A, Aguinaga S *et al*, 2004. Contrasts in sedimentation flux below the southern California Current in late 1996 and during the El Nino event of 1997—1998. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 59(4): 575—587
- Tian J, Pak D K, Wang P *et al*, 2006. Late Pliocene monsoon linkage in the tropical South China Sea. *Earth and Planetary Science Letters*, 252(1—2): 72—81
- Ujiie Y, Ujiie H, Taira A *et al*, 2003. Spatial and temporal variability of surface water in the Kuroshio source region, Pacific Ocean, over the past 21000 years: evidence from planktonic foraminifera. *Marine Micropaleontology*, 49(4): 335—364
- van Geen A, Zheng Y, Bernhard J *et al*, 2003. On the preservation of laminated sediments along the western margin of North America. *Paleoceanography*, 18(4): 1098
- Visser K, Thunell R, Stott L, 2003. Magnitude and timing of temperature change in the Indo-Pacific warm pool during deglaciation. *Nature*, 421(6919): 152—155
- Wang Y J, Cheng H, Edwards R L *et al*, 2001. A high-resolution absolute-dated Late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China. *Science*, 294(5550): 2345—2348

- Wei G, Deng W, Liu Y *et al*, 2007. High-resolution sea surface temperature records derived from foraminiferal Mg/Ca ratios during the last 260 ka in the northern South China Sea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 250(1—4): 126—138
- Xiang R, Sun Y, Li T *et al*, 2007. Paleoenvironmental change in the middle Okinawa Trough since the last deglaciation: Evidence from the sedimentation rate and planktonic foraminiferal record. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 243(3—4): 378—393
- Yamamoto M, Yamamoto M, Tanaka Y, 2007. The California current system during the last 136000 years: response of the North Pacific High to precessional forcing. *Quaternary Science Reviews*, 26(3—4): 405—414
- Yancheva G, Nowaczyk N R, Mingram J *et al*, 2007. Influence of the intertropical convergence zone on the East Asian monsoon. *Nature*, 445(7123): 74—77
- Zhang J, Wang P, Li Q *et al*, 2007. Western equatorial Pacific productivity and carbonate dissolution over the last 550 kyr: Foraminiferal and nannofossil evidence from ODP Hole 807A. *Marine Micropaleontology*, 64(3—4): 121—140
- Zhao M X, Huang C Y, Wang C C *et al*, 2006. A millennial-scale U-37(K') sea-surface temperature record from the South China Sea (8 degrees N) over the last 150 kyr: Monsoon and sea-level influence. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 236(1—2): 39—55
- Zhao M X, Huang C Y, Wei K Y, 2005. A 28000 year U-37(K) sea-surface temperature record of ODP Site 1202B, the southern Okinawa Trough. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 16(1): 45—56

## CENTENNIAL VARIATIONS IN SEA SURFACE TEMPERATURE AND PRODUCTIVITY OVER THE LAST 14ka FROM CORE PC-14 OFF BAJA CALIFORNIA

XING Lei<sup>1</sup>, DING Ling<sup>1</sup>, ZHAO Mei-Xun<sup>2</sup>, ZHANG Rong-Ping<sup>1</sup>, Alexander van Geen<sup>3</sup>, Joseph D. Ortiz<sup>4</sup>

(1. The MOE-affiliated Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ocean University of China, Qingdao, 266100; 2. State Key Laboratory of Marine Geology, School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai, 200092; 3. Lamont-Doherty Earth Observatory, Columbia University, Palisades, NY 10964, USA; 4. Department of Geology, Kent State University, Kent, OH 44242, USA)

**Abstract** As an important component of the North Pacific gyre, the California Current affects importantly the global climate and carbon cycle. Organic geochemical survey was carried out on Core PC-14 taken from low-latitude northeast Pacific off Baja California to reconstruct centennial changes in sea surface temperature (SST) and productivity over the last 14 ka. Both B/A (Bling-Aller) and YD (Younger Drays) events were clearly revealed on the SST record, but the magnitudes of the SST change were smaller than those recorded in the cores from the mid-latitude NE Pacific. Unlike the decreasing trend in the mid-latitude California margins, the PC-14 SST record for the Holocene did not show any obvious changes. The results indicate that the low-latitude eastern Pacific responded to the climate forcing from high latitude in millennial scale, and confirm that low- and mid-latitude eastern Pacific was affected mainly by upwelling and ENSO in different ways. In terms of productivity, an overall increasing trend was shown in PC-14 from the deglaciation (14.0—11.6ka) to the Holocene, reflecting a climate transition from an El Niño-dominated climate to a La Niña-dominated climate with increased upwelling, while a decrease was included from the middle to late Holocene (6.5—3.8 ka) that was probably caused by the intensified ENSO. During the B/A warm period, the productivity increased slightly but oxygen minimum zone (OMZ) intensified significantly, suggesting that OMZ variation in this region was irrelevant to the productivity change.

**Key words** Baja California, Sea surface temperature (SST), B/A (Bling-Aller) and YD (Younger Drays), Productivity, ENSO, Oxygen minimum zone