doi:10.3799/dqkx.2012.S1.001

# 末次冰消期以来白令海古环境及古生产力演化

邹建军,石学法\*,白亚之,朱爱美,陈志华,黄元辉

海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室,国家海洋局第一海洋研究所,山东青岛 266061

摘要:对白令海 B5-4 岩心沉积物中有机碳、CaCO。及 17 种地球化学元素进行分析,结合 AMS<sup>14</sup>C 年龄数据,恢复了白令海 13.7 ka 以来古环境和古生产力的演化历史.结果显示,B5-4 孔沉积速率高达 34.2 cm/ka,新仙女木(YD)、Bolling-Allerod (BA)及冰川融水信号在 B5-4 孔都有记录.白令海陆源沉积物的输入受源区气候、海平面变化和生源物质稀释等多种因素的 控制.末次冰消期白令海以高生产力和底层水体缺氧为显著特征.冰川融水及太平洋暖水团输入是导致末次冰消期白令海高 生产力的 2 个主要因素.末次冰消期底层水体缺氧与表层高生产力和次表层水体层化有显著的关系.但是,太平洋中层水通风能力及太平洋底层环流减弱也是导致底层水体出现缺氧现象的潜在因素.全新世,阿拉斯加环流成为白令海古生产力和古环境变化的主要控制因素,生产力及古环境在全新世没有发生显著的变化.

关键词:古生产力;古氧化还原环境;末次冰消期;白令海;沉积物;地球化学. 中图分类号: P736.4 文章编号:1000-2383(2012)S1-0001-10

**收稿日期:** 2011-07-21

## Paleoenvironment and Paleoproductivity Variations in the Bering Sea Since the Last Deglacial

ZOU Jian-jun, SHI Xue-fa\*, BAI Ya-zhi, ZHU Ai-mei, CHEN Zhi-hua, HUANG Yuan-hui

Key Laboratory of Marine Sedimentology and Environmental Geology, the First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China

Abstract: Paleoenvironment and paleoproductivity variations were constructed, combined with radiocarbon dating, based on 17 geochemical elements, *TOC* and CaCO<sub>3</sub>, since 13. 7 ka in the Bering Sea. The results show that the sedimentation rate was 34. 2 cm/ka and the climate signals such as Younger-Dryas (YD), Bolling-Allerod (BA), and meltwater pulse were also reflected in the B5-4 core. The accumulation of terreginous sediments is controlled by many factors, including climate condition in the sediments source, sea level change and biogenic material dilution. The obvious features are the high paleoproductivity and hypoxia in the bottom water in the Bering Sea during the last deglacial period. The high paleoproductivity are attributed to the meltwater pulse event and the input of warmer Pacific water with the increased temperature. Hypoxia in the bottom water is caused by high productivity in the surface water and subsurface waterbody stratification due to saline gradient. However, the potential factors caused hypoxia in the bottom water also include the decreasing Pacific intermediate water ventilation and bottom-current speed in the Pacific Ocean. In the Holocene, the paleoenvironment and productivity of the Bering Sea were mainly controlled by the Alaskan stream. There are no obvious changes for productivity and paleoenvironment in the Holocene. Key words: paleoproductivity; paleoredox environment; the last deglacial; Bering Sea; sediments; geochemistry.

白令海是西北太平洋最北的边缘海,面积 2.29×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>,仅次于地中海和南海,是世界上面 积第三大的边缘海,在全球碳循环和气候变化研究 中占有十分重要的地位.其通过白令海峡(平均深度 45 m)连接北太平洋和北冰洋.随着冰期海平面的下降,势必影响太平洋与北冰洋水体交换,近而对白令海海域的表层环流、温盐环流、海冰分布、表层生产力及区域气候产生重要的影响.

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 40431002,41106166);2012 年度北极海域海洋地质考察(No. CHINARE2012-03-02);中国第三次北极科学 考察项目;"泰山学者"建设工程专项.

作者简介:邹建军(1979一),男,助理研究员,主要研究方向为海洋地球化学. E-mail: zoujianjun@fio.org. cn

<sup>&</sup>quot;通讯作者:石学法, E-mail: xfshi@fio.org. cn

白令海北部以宽阔的陆架为特征,在南部分布 Komandorsky、鲍尔斯(Bowers basin)和阿留申3个深 海盆.陆架水经白令海峡向北流入北冰洋.白令海表 层环流为气旋型环流,阿拉斯加流携带0.23 Sv的太 平洋水团通过 Unimak 通道(<80 m)输送至白令海 陆架(Stabeno et al., 2010).白令海与北冰洋相连的 通道(白令海峡)较浅,而与太平洋相连的通道(堪查 加海峡,4000 m)较深,因此白令海水团结构主要受太 平洋水团的影响.白令海位于全球深层水环流(Okazaki et al., 2005)和东部边界流的末端,因此白令海 巨厚的沉积物也记录了全球环流体系的变化过程.

前人曾对白令海进行有关古海洋学方面的研究 (Sancetta and Robinson, 1983; Sancetta et al., 1984; Nakatsuka et al., 1995; Gorbarenko et al., 2005; Okazaki et al., 2005; Tanaka and Takahashi, 2005; 王汝建等, 2005; 何沅澎等, 2006; Chekhovskaya et al., 2008; Gebhardt et al., 2008; Caissie et al., 2010; Gorbarenko et al., 2010). 大量的学者以微体 硅质生物化石(硅藻、放射虫)(Sancetta and Robinson, 1983; Sancetta et al., 1984; Katsuki and Takahashi, 2005; Okazaki et al., 2005; Tanaka and Takahashi, 2005; 王汝建等, 2005; Caissie et al., 2010)、 沉积物有机质稳定碳、氮同位素(Nakatsuka et al., 1995)、花粉(Sancetta et al., 1984)和一些不连续的有 孔虫记录(Cook et al., 2005; Okada et al., 2005; Khusid et al., 2006; Chekhovskaya et al., 2008; Gebhardt et al., 2008; Gorbarenko et al., 2010)作为切 入点,重现了白令海表层环流、水团垂直结构、古生产 力变化、海冰扩张消退及冰期/间冰期旋回中古环境 演化历史.由于白令海碳酸盐补偿深度较浅(Feely et al.,2002),沉积物中缺乏钙质生物壳体,使得在古海 洋学及古气候研究中基于钙质生物壳体建立地层年 代模型的努力受到极大的制约,严重阻碍了白令海古 海洋学研究的发展.

本文的主要目的是利用元素地球化学方法恢复 白令海末次冰消期以来古生产力和古环境演化历 史,为理解白令海古海洋环境演化提供新的视角.

## 1 材料和方法

重力活塞岩心 B5-4 采自白令海盆北部陆坡 (176°31.32′W、58°5.27′N),位于白令海陆坡环流 影响区域(图1),岩心长4.7m,水深3370m,系中 国首次北极科学综合考察航次采集.B5-4 岩心岩性 均一,主要由深灰色一灰绿色粘土质粉砂组成,偶见 灰色或灰白色的火山物质.按2 cm 间隔连续取样, 共挑选117个样品进行分析.分析指标包括有机碳、 总氮、总碳及主微量元素.

#### 1.1 有机碳、总碳、总氮分析

有机碳、总碳、总氮分析方法详见文献(邹建军 等,2010a). 简述如下:样品经冷冻干燥、研磨后,用 Vario EL III元素分析仪(德国元素分析仪公司)直 接测试有机碳的含量(*TOC*)、总碳的含量(*TC*)、总 的氮含量(*TN*). 有机碳的样品经酸化处理后再进 行测试. CaCO<sub>3</sub> 的含量用如下公式进行计算:

 $c(CaCO_3) = (c_{TC} - c_{TOC}) \times 8.33.$ 



Fig. 1 Sketch map of sample station in the Bering Sea 虚线代表 120 m 水深线; ANSC. 阿留申北部陆坡环流; BSC. 指白令海陆坡环流; ACC. 指阿拉斯加沿岸流

在测试过程中用空白样和 GSD-9 标样进行质量 监控. GSD-9 标样的 TOC 和 TN 的前处理过程与方法 与测试样品一致,每分析 20 个样品加入 1 个 GSD-9 标 样进行质量监控. 重复分析标样 GSD-9 表明, TC、TN、 TOC 的相对标准偏差分别为 0.8%、1.4%、2.4%.

#### 1.2 主微量元素分析

对 B5-4 岩心中 17 种主微量元素进行了分析 (Al、Fe、K、Ca、Na、Mg、Ti、P、Ba、Sr、Th、Sc、Y、Zr、 Cd、Mo、U),前处理过程和分析方法详见文献(邹建 军等,2010b). 在测试过程中用空白样和 GSD-9 标 样进行质量监控. 重复分析标样 GSD-9 表明,主量 及痕量元素相对标准偏差皆小于 5%.

#### 1.3 年龄模型和质量累积速率

B5-4 岩心仅在底部 454~456 cm 处较为富集. 挑选浮游有孔虫 N. pachyderma 15 mg 用于 AMS<sup>14</sup>C测年. AMS<sup>14</sup>C在美国伍兹霍尔海洋研究 所(WHOI)进行测试,并利用 CALIB 6.0.1 软件校 正为日历年龄(Stuiver and Reimer, 1993). 目前对 白令海平均全球碳储库校正( $\Delta R$ )年龄还存在争议 (Cook *et al.*, 2005),本文选择  $\Delta R$ =400 a 进行校 正,即对应的储库校正年龄约为 800 a. 浮游有孔虫 壳体的 AMS<sup>14</sup>C年龄为 12 250±50 a,校正后的年 龄为 13 312 a,表明取样位置的沉积速率非常高,平 均沉积速率达到 34.2 cm/ka.

## 2 结果

#### 2.1 有机碳、总氮、总硫及 CaCO<sub>3</sub>

B5-4 岩心中 TOC 介于 1.04%~1.57%,其中表 层 TOC 含量为 1.57%.在 11.5~3.0 ka,TOC 含量逐 渐减小;在 13.6~11.8 ka 和 1~0 ka,TOC 含量逐渐 增加(图 2).总氮(TN)含量介于 0.1%~0.2%.TN 剖面分布特征与 TOC 存在显著的差别,这种差异可



图 2 主微量元素、总有机碳、总氮及 CaCO<sub>3</sub> 剖面

Fig. 2 Profiles of major and minor elements, total organic carbon, total organic nitrogen and CaCO<sub>3</sub>



图 3 TOC 及主微量元素相关分析散点 Fig. 3 Scatter plots between TOC and major and minor elements

能与白令海沉积物有机质的成岩作用有关.沉积物中 CaCO。含量仅在部分层位被检测出,暗示大部分碳酸 钙在被埋藏过程中发生了溶解,这与 B5-4 站位水深 远大于白令海碳酸盐补偿深度有关,也表明沉积物中 被保存的钙主要是陆地风化的产物.

#### 2.2 主微量元素

Al、Fe、K、Mg、Ti、Sc、Th、Y、Zr等元素主要富 集在上地壳中.与平均页岩相比,B5-4 岩心中 Al、 Fe、K、Ca、Mg、Ti、Sc、Y、Zr、Th 相对贫化,Na、Ba、 P、Cd、U、Mo显著富集.据已有方法,计算了陆源物 质的组成:陆源物质百分含量=(Al<sub>#A</sub>/Al<sub>陆源背景</sub>)× 100%,Al<sub>陆源背景</sub>选择前寒武纪平均页岩(PAAS) (Taylor and McLennan, 1985).结果表明陆源碎屑 含量介于 37.6%~70.1%,平均值为 53.8%.B5-4 沉积物中陆源碎屑含量相对较高.CaO 硅酸盐相计 算结果显示,沉积物中 CaO 皆为硅酸盐相态,与铝、 钛有显著的正相关性.化学蚀变指数(CIA)作为一 个反映源区物质化学风化程度的地球化学指标,与 粘土矿物和长石比值成正比,值越大反映化学风化 越强.其计算公式如下;CIA = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O+CaO<sup>\*</sup>)×100(摩尔比)(Nesbitt and Young, 1982),其中 CaO<sup>\*</sup>为硅酸盐相. B5-4 岩心 样品的 *CIA* 值介于 37.2~54.2,平均为 45.6,暗示 沉积物未经剧烈的蚀变. Al、Ti 随着深度的增加,表 明陆源碎屑含量逐渐增加. 钡含量介于 607.5×  $10^{-6} \sim 1.241.8 \times 10^{-6}$ ,含量显著高于平均页岩 (580×10<sup>-6</sup>). 对沉积物中的过剩钡计算表明,沉积 物中过剩钡含量(664.2×10<sup>-6</sup>)与平均页岩含 量接近.

相关分析显示,B5-4 岩心中铁、钾、镁、钛、钪、 钍、铱、锆与铝、钛的含量都呈显著的正相关,表明上 述元素主要来源于陆源碎屑.Al-Na(相关系数, $r^2 =$ 0.25)(图 3)为弱相关,这与 Na 在化学风化中易淋 滤有关,从而导致风化产物中相对富集钠.锶含量与 CaO呈显著的正相关( $r^2 = 0.93$ ),这与锶在矿物晶 格中易替代钙有关.此外,K-Fe( $r^2 = 0.93$ )、K-Mg ( $r^2 = 0.89$ )、K-Sc( $r^2 = 0.68$ )、Y-Zr( $r^2 = 0.63$ )也呈 显著的正相关,表明上述元素源区一致.

#### 2.3 自生组份

海洋沉积物中铀、钡、钼、镉、磷除了来自陆源以





Fig. 4 Profiles of authigenic components for uranium, barium, cadmium, phosphorus and molybdenum

外,还存在海洋源.与平均页岩相比,上述元素平均 含量显著富集.假设沉积物中元素仅有这2种来源, 那么减去陆源组份,过量的组份即来自海洋源.依据 如下公式对自生组份进行估算:

 $c_{\mathrm{au}} = a_{\mathrm{t}} - a_{\mathrm{t-Al}} \times c_{\mathrm{de}} / c_{\mathrm{de-Al}}$ 

式中:c代表自生组份含量,a<sub>t</sub>及a<sub>tAl</sub>分别代表沉积物中部分元素(铀、钡、钼、镉、磷)及铝的丰度;c<sub>de</sub>及 c<sub>deAl</sub>分别代表页岩平均中部分元素(铀、钡、钼、镉、 磷)及铝的平均丰度.对B5-4 岩心沉积物中自生组 份进行了计算(图4).结果表明,沉积物中铀和钡有 显著的海洋源,镉在大多数层位皆存在自生组份,而 钼仅部分层位存在自生组份(图4).所有的自生组份 含量皆在 Bolling-Allerod(BA)暖期增大,表明此时底 层水环境为缺氧环境,有利于它们的富集.对冰消期 (11.7~13.6 ka)TOC、自生铀、钡、镉、磷含量进行相 关分析,发现自生铀和自生镉、TOC 与过剩钡之间存 在显著的正相关(相关系数分别为0.71 和0.51).

### 3 讨论

#### 3.1 TN 剖面的分布特征及其意义

海洋沉积物中有机质保存效率受埋藏速率和供 给速率的双重影响.在开阔大洋,由于水体富含溶解 氧,表层产生的有机质在水体降落的过程中被生物 体消耗和发生降解,仅有不到1%不易降解的有机 质被保存下来(Hedges and Keil, 1995). 上文的数据显示,B5-4站位位于白令海陆坡环流影响区域, 沉积速率较高,是全球海洋生产力最高的区域之一, 被称为绿色带(green belt)(Wang *et al.*, 2006). *TN* 随深度增加含量没有发生显著的变化,变异系 数仅为 10.1%,这与 *TOC* 剖面存在显著的差异. 相 关分析显示,B5-4站位 *TOC* 与 *TN* 二者之间为弱 相关(图 3),这与河口近岸海域(熊林芳等, 2012)、 日本海(邹建军等, 2010a)、鄂霍次克海观测到的结 果存在显著的差异. B5-4站位沉积物中 *TN* 与 *TOC* 分布相异的因素可能与沉积物中氮的反硝化作用有 关. 对白令海水深>2000 m 区域的实验观测结果表 明,沉积物反硝化速率为 230  $\mu$ mol·N·m<sup>-2</sup>· d<sup>-1</sup>,远高于全球相同水深沉积物反硝化速率上限的 3 倍(Lehmann *et al.*, 2005).

有机质稳定氮同位素和 C/N 比值被广泛用于 示踪有机质来源和海洋表层水体生产力演化(Calvert et al., 1992; Meyers, 1994; Kienast et al., 2002; Higginson et al., 2003). 在本研究区域,沉 积物中氮的反硝化作用将对上述 2 个参数产生影 响,改变沉积物中原始记录的信号. 因此在白令海, 用 C/N 比值和有机质稳定氮同位素解释诸如古生 产力变化、有机质来源等现象时必须十分谨慎.

#### 3.2 古生产力演化

海洋生产力一般受光照、温度、营养盐和海洋环 流的影响,被认为是导致冰期/间冰期旋回中大气 CO<sub>2</sub>浓度变化的一个重要机制(Sigman and Boyle, 2000),因此重建海洋古生产力是认识地球气候系统的一个十分有用的工具.海洋古生产力重建不能直接进行观测,只能采用一些替代指标如*TOC*、CaCO<sub>3</sub>、生源钡和一些自生组份如磷、镉等.生源钡已经广泛用于海洋古生产力的重建(Dymond et al., 1992; Murray et al., 2000),自生磷和镉在一些海域也得到了广泛的应用(Schenau et al., 2005; Tribovillard et al., 2006; 邹建军等, 2010a).B5-4站位水深远大于碳酸盐被偿深度,CaCO<sub>3</sub> 仅在部分层位被检测出.因此文中采用*TOC*、生源钡、自生磷、自生镉来重建白令海古生产力变化,并用多种生产力替代指标进行相互佐证.

古生产力替代指标显示(图 4),虽然古生产力 替代指标出现峰值的时间并不一致(如 TOC 和过 剩钡),但是其剖面变化趋势表明全新世和末次冰消 期白令海初级生产力发生了显著的变化.总体上生 产力暖期增加,冷期降低,冰消期高于全新世.

3.2.1 末次冰消期白令海的生产力 末次冰消期 (11.5~13.6 ka),B5-4 岩心中可以检测出较高含量 的 CaCO<sub>3</sub>(图 2).一方面表明,尽管采样站位水深远 大于白令海 CCD(碳酸钙补偿深度)和溶跃面,该时 期沉积物间隙水及底层水 CO<sub>2</sub> 浓度较低,沉积环境 有利于 CaCO<sub>3</sub> 的保存;另一方面也暗示末次冰消期 钙质生物生产力较高.这与末次冰消期检测到高含 量的长链不饱和烯酮相对应(Caissie *et al.*, 2010).

在末次冰消期,可以明确的观测到生产力在 BA 暖期高、YD 冷期低,全新世早期生产力又逐渐 增加的特征(图 2,4).阿拉斯加湾硅藻和硅鞭毛藻 的研究结果显示,BA 暖期,阿拉斯加沿岸上升流增 强,在 YD 冷期减弱(Barron et al., 2009).阿拉斯 加上升流强度的变化受风暴、北极大气环流的控制. 阿拉斯加上升流强度的变化与白令海生产力在 BA 暖期高、YD 冷期低的现象存在一致性.这种耦合现 象表明,阿拉斯加上升流强度的变化对白令海陆坡生 产力的发育具有十分重要的意义.虽然阿拉斯加沿岸 流环通过 Unimak 进入白令海的营养盐数量非常小 (Stabeno et al., 2002),但是阿拉斯加沿岸流进入白 令海后可能起着将白令海陆架区营养盐输运至陆坡、 刺激白令海陆坡区域生产力的发育的重要作用.

除了阿拉斯加沿岸流以外,引起白令海末次冰 消期高生产力的潜在因素还有2个:一是随着全球 变暖,冰川消退,冰川融水将大量的陆源营养盐输入 白令海,刺激白令海表层生产力的生长;二是随着温 度增加,海平面上升,温暖的太平洋水团通过阿留申 群岛上深浅不一的通道进入白令海,加剧水体层化. 将有利于维持表层生产力所需的营养盐,导致末次 冰消期生产力暴长.

3.2.2 全新世自令海的生产力 在全新世,古生产 力替代指标剖面分布特征存在较大的差异(图 2, 4). TOC 及自生铀含量在全新世有显著的变化,而 生源钡、自生磷和自生镉含量变化不显著.生产力替 代指标剖面分布特征的差异与其海洋化学性质密切 相关.与末次冰消期相比,全新世生产力较低,并保持 相对稳定.在5ka左右,TOC、生源钡、自生磷、自生铀 暗示在此时期生产力出现一次短暂的下降(图 4).

硅藻属种 N. seminae 是指示阿拉斯加流的一 个良好的示踪剂.从12.0~4.5 ka 其相对丰度逐渐 增加,暗示阿拉斯加流在此期间的影响不断增强 (Caissie et al., 2010),阿拉斯加流成为影响白令海 表层生产力的一个主要因素,这与10~4 ka 时期 TOC 含量不断降低相对应. 全新世仅有 2 个层位检 测出 CaCO<sub>3</sub>,一方面表明全新世白令海研究区底层 水环境不利于 CaCO<sub>3</sub> 的保存;另一方面也与钙质生 物生产力减弱有关.不饱和烯酮含量逐渐减小(反映 颗石藻生产力)就是一个明显的证据(Caissie et al., 2010). 近1 ka 以来, TOC 及自生铀含量逐渐 增大,表明生产力逐渐增加.阿拉斯加流温度、盐度 相对较高(Reed et al., 1991),其进入白令海后打 破层化的水体,增强白令海表层水和深层水团的垂 向混合,次表层及深层营养盐得以输运至表层,刺激 硅藻的生长.这与全新世观测生源硅含量逐渐增加的 观测结果一致(Okazaki et al., 2005). 尽管在全新世 白令海生产力变化没有末次冰消期显著,但表层生产 力微小的波动仍记录了阿拉斯加流强度的变化.

#### 3.3 古环境演化

图 5 显示, B5-4 岩心中陆源碎屑含量从末次冰 消期至全新世,陆源碎屑含量逐渐减小.海洋沉积物 中陆源碎屑含量的变化主要受物源区供给速率的控 制. B5-4 岩心处于季节性海冰覆盖区域,因此末次 冰消期陆源碎屑含量的增加反映了冰筏碎屑搬运能 力的增强.在末次冰消期,陆源碎屑含量增加佐证了 这种解释.此外,陆源碎屑含量的变化还受生源物质 稀释和海平面因素的控制.在13 ka,全球海平面约 比现今低 60 m,至中全新世海平面与现今一致.一 般而言,随着海平面的增加陆源物质输入含量减少. 5 ka 以来陆源物质含量要低于 5 ka 以前的陆源物 质含量,总体上与海平面变化趋势相一致.在1 ka



图 5 陆源碎屑、古生产力与冰芯及太阳辐射变化比较(h引自文献 Dansgaard *et al.*, 1993;i引自文献 Berger and Loutre, 1991) Fig. 5 Comparison between terrigenous debris and paleoproductivity and ice core and solar insolation

以来显著减小,这可能与生源物质(尤其是硅质生物)的稀释作用有关,可以从 Ti/Al 比值和 TOC 含量剖面分布趋势正好相反得到印证(图 5c, 5d).在 全新世 CIA 风化指数与太阳辐射变化相一致,表明 源区化学风化程度与温度密切相关.

前人研究表明,在末次冰消期白令海陆坡发育 纹层沉积(laminated layer)(Cook *et al.*, 2005).厌 氧底栖浮游有孔虫丰度在末次冰消期增加也表明此 时期白令海底层水为缺氧环境(Chekhovskaya *et al.*, 2008).末次冰消期,B5-4 岩心中氧化还原敏感 元素自生钼、自生铀、自生镉和自生磷显著富集(图 4)支持上述观点,显示研究区底层缺氧水体层位大 约位于 3 400 m. 末次冰消期底层水缺氧事件可能是 多种因素共同作用的结果.

现今,白令海含氧最小带(0.6~0.9 ml/L) (Okazaki et al., 2005)位于 500~1 500 m. 在末次 冰消期,阿留申盆地贫氧水层大约位于 2 400 m (Okazaki et al., 2005).与白令海其他海区相比,白 令海陆坡环流带是一个生产力更高的区域.在末次 冰消期,白令海陆坡环流带生产力增加,使得大量的 有机质在水体沉降过程中发生降解,这将消耗水体 中大量的溶解氧.与此同时,末次冰消期温度突然增 加,大量低盐冰川融水的输入导致陆坡表层海水淡 化,而在底部为温暖高盐的太平洋水团,这将增加水 体层化的强度,导致表层与深部溶解氧的交换受 到限制.

北太平洋中层水通风能力减弱是导致白令海底 部水体出现缺氧现象的另一个诱因(Crusius et al., 2004; Cook et al., 2005).太平洋中层水主要源于 鄂霍次克海 300~800 m 深处.在末次冰消期,随着 全球变暖、海冰消退,北太平洋中层水通风能力减 弱,中层水溶解氧得不到及时的更新和补充;随着水 体中的溶解氧不断被消耗,北太平洋含氧最小带的 范围不断增大.北太平洋低溶解氧高盐水团进入白 令海后,在表层高生产力作用的影响下,中层水团的 溶解氧含量进一步降低.由于太平洋中层水团一般 小于1000 m,中层水通风能力减弱是否为导致末次 冰消期白令海陆坡环流带 3 400 m 水深存在缺氧现 象的一个因素值得怀疑.

还有观点认为,白令海底层水缺氧可能与深层 水环流有关(Okazaki et al., 2005),这实际上涉及 到南、北半球气候的相关机制.目前白令海底层水 (3500~4000 m)主要来源于北太平洋深层水,其通 过 Kamchatka 海峡(4000 m)进入白令海.而北太平 洋深层水主要源于南半球,其更新速率以及规模变 化势必对北太平洋底层水团的特征产生影响.但是, 关于此解释的一个主要问题是南半球深层和底层团 的物理化学性质的变化是否能迅速影响到白令海底 层水环境.

末次冰消期底层水缺氧事件在日本海(Bahk et al., 2001)、阿拉斯加湾、加利福尼亚陆架(Dean, 2007)、卡里亚科盆地(Cariaco basin)(Dean et al., 1999)可观测到,表明末次冰消期北太平洋中高纬度海域底层水体缺氧是一个普遍的现象,暗示存在一种或几种相同的因素导致在末次冰消期出现大范围的缺氧现象.表层水生产力暴长消耗水体中的溶解

氧,以及水体层化阻碍溶解氧垂直交换是底层水体 缺氧现象的必要条件.太平洋中层水通风能力减弱 和南半球底层水流速及通风能力减弱可能也是白令 海底层水体出现缺氧现象的潜在因素,但是这2种 解释需要更多的证据进行佐证.

全新世阿拉斯加流成为控制白令海古环境变化 的一个重要因素.在全新世,不饱和烯酮古温度计显 示,白令海东南部海域表层海水温度介于 6.5~ 8.5℃之间,没有发生显著的变化(Caissie *et al.*, 2010).在全新世,白令海底层水体没有出现缺氧事 件,这与全新世早期冰川融水事件减弱、阿拉斯加环 流增加了水体垂直对流有关.8 ka 左右,主微量元素 出现一个峰值,可能对应着全球 8.2 ka 冷事件.

## 4 结论

通过对白令海 B5-4 岩心多种地球化学指标进 行分析,发现白令海沉积环境和表层生产力发生了 显著的变化.末次冰消期以来白令海陆源沉积物的 输入受源区气候、海平面变化和生源物质稀释等多 种因素的控制.

在末次冰消期,白令海以高生产力和底层水缺 氧为显著特征.末次冰消期高生产力与冰川融水和 太平洋暖水团流入白令海有关.此时底层水缺氧则 是多种因素共同作用的结果,包括表层高生产力,太 平洋中层水通风能力减弱及南半球底层水更新速 率变缓.

在全新世,阿拉斯加环流成为影响白令海表层 生产力和古环境变化的一个主要因素.与末次冰消 期相比,全新世生产力没有发生显著的变化.陆源碎 屑含量在 8.2 ka 时增加可能是对 8.2 ka 冷气候事 件的一个响应.

#### References

- Bahk, J. J., Chough, S. K., Jeong, K. S., et al., 2001. Sedimentary records of paleoenvironmental changes during the last deglaciation in the Ulleung Interplain Gap, East Sea (sea of Japan). *Global and Planetary Change*, 28(1-4): 241-253. doi:10.1016/S0921-8181(00)00076-X
- Barron, J. A., Bukry, D., Dean, W. E., et al., 2009. Paleoceanography of the Gulf of Alaska during the past 15 000 years: results from diatoms, silicoflagellates, and geochemistry. *Marine Micropaleontology*, 72 (3-4): 176-195. doi:10.1016/j. marmicro.2009.04.006

Berger, A., Loutre, M. F., 1991. Insolation values for the cli-

mate of the last 10 million years. *Quaternary Science Reviews*, 10(4): 297 - 317. doi: 10. 1016/0277 - 3791 (91)90033-Q

- Caissie, B. E., Brigham-Grette, J., Lawrence, K. T., et al., 2010. Last glacial maximum to Holocene Sea surface conditions at Umnak plateau, Bering Sea, as inferred from diatom, alkenone, and stable isotope records. *Paleoceanography*, 25: PA1206. doi: 10. 1029/ 2008pa001671
- Calvert, S. E., Nielsen, B., Fontugne, M. R., 1992. Evidence from nitrogen isotope ratios for enhanced productivity during formation of eastern Mediterranean sapropels. *Nature*, 359(7302):223-225. doi:10.1038/359223a0
- Chekhovskaya, M. P., Basov, I. A., Matul, A. G., et al., 2008. Planktonic foraminifers in the southern Bering Sea; changes in composition and productivity during the Late Pleistocene-Holocene. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 16 (3): 328 – 342. doi: 10. 1134/ s0869593808030076
- Cook, M. S., Keigwin, L. D., Sancetta, C. A., 2005. The deglacial history of surface and intermediate water of the Bering Sea. Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 52(16-18):2163-2173. doi:10. 1016/j. dsr2. 2005. 07. 004
- Crusius, J., Pedersen, T. F., Kienast, S., et al., 2004. Influence of Northwest Pacific productivity on North Pacific intermediate water oxygen concentrations during the Bølling-Ållerød interval (14. 7–12. 9 ka). *Geology*, 32 (7):633–636. doi:10.1130/G20508.1
- Dansgaard, W., Johnsen, S. J., Clausen, H. B., et al., 1993. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature*, 364(6434):218-220. doi:10.1038/364218a0
- Dean, W. E. , 2007. Sediment geochemical records of productivity and oxygen depletion along the margin of western North America during the past 60 000 years; teleconnections with Greenland ice and the Cariaco basin. Quaternary Science Reviews, 26 (1-2): 98-114. doi: 10. 1016/j. quascirev. 2006. 08, 006
- Dean, W. E., Piper, D. Z., Peterson, L. C., 1999. Molybdenum accumulation in Cariaco basin sediment over the past 24 k. y. : a record of water-column anoxia and climate. *Geology*, 27(6): 507 – 510. doi: 10. 1130/0091 – 7613(1999)027<0507:MAICBS>2. 3. CO; 2
- Dymond, J., Suess, E., Lyle, M., 1992. Barium in deep-sea sediment: a geochemical proxy for paleoproductivity. *Paleoceanography*, 7 (2): 163 - 181. doi: 10. 1029/ 92PA00181

- Feely, R. A., Sabine, C. L., Lee, K., et al., 2002. In situ calcium carbonate dissolution in the Pacific Ocean. *Global Biogeochemical Cycles*, 16 (4): 1144. doi: 10. 1029/ 2002GB001866
- Gebhardt, H., Sarnthein, M., Grootes, P. M., et al., 2008. Paleonutrient and productivity records from the subarctic North Pacific for Pleistocene glacial terminations I to V. Paleoceanography, 23 (4): PA4212. doi: 10.1029/ 2007pa001513
- Gorbarenko, S. A., Basov, I. A., Chekhovskaya, M. P., et al., 2005. Orbital and millennium scale environmental changes in the southern Bering Sea during the last glacial-Holocene: geochemical and paleontological evidence. Deep-Sea Research Part []: Topical Studies in Oceanography, 52(16-18): 2174-2185. doi: 10.1016/ j. dsr2. 2005. 08.005
- Gorbarenko, S. A., Wang, P., Wang, R., et al., 2010. Orbital and suborbital environmental changes in the southern Bering Sea during the last 50 kyr. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 286 (1-2): 97 – 106. doi:10.1016/j. palaeo.2009.12.014
- He, Y. P., Wang, R. J., Zheng, H. B., et al., 2005. Paleoceanographic and paleoclimatic records from DSDP site 188 in the Bering Sea since marine isotopic stage 3. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 26(2):65-71 (in Chinese with English abstract).
- Hedges, J. I., Keil, R. G., 1995. Sedimentary organic matter preservation: an assessment and speculative synthesis. *Marine Chemistry*, 49 (2-3): 81-115. doi: 10.1016/ 0304-4203(95)00008-F
- Higginson, M. J., Maxwell, J. R., Altabet, M. A., 2003. Nitrogen isotope and chlorin paleoproductivity records from the northern South China Sea: remote vs. local forcing of millennial- and orbital-scale variability. *Marine Geology*, 201 (1-3): 223-250. doi: 10. 1016/ S0025-3227(03)00218-4
- Katsuki, K., Takahashi, K., 2005. Diatoms as paleoenvironmental proxies for seasonal productivity, sea-ice and surface circulation in the Bering Sea during the Late Quaternary. Deep-Sea Research Part []: Topical Studies in Oceanography, 52(16-18): 2110-2130. doi: 10. 1016/j. dsr2. 2005. 07. 001
- Khusid, T. A., Basov, I. A., Gorbarenko, S. A., et al., 2006. Benthic foraminifers in Upper Quaternary sediments of the southern Bering Sea: distribution and paleoceanographic interpretations. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 14 (5): 538 - 548. doi: 10. 1134/ s0869593806050066

- Kienast, S. K., Calvert, S. E., Pedersen, T. F., 2002. Nitrogen isotope and productivity variations along the northeast Pacific margin over the last 120 kyr: surface and subsurface paleoceanography. *Paleoceanography*, 17 (4):1055. doi:10.1029/2001PA000650
- Lehmann, M. F., Sigman, D. M., McCorkle, D. C., et al., 2005. Origin of the deep Bering Sea nitrate deficit: constraints from the nitrogen and oxygen isotopic composition of water column nitrate and benthic nitrate fluxes. *Global Biogeochemical Cycles*, 19(4): GB4005. doi: 10. 1029/2005GB002508
- Meyers, P. A., 1994. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter. *Chemical Geology*, 114(3-4):289-302. doi:10.1016/ 0009-2541(94)90059-0
- Murray, R. W., Knowlton, C., Leinen, M., et al., 2000. Export production and carbonate dissolution in the central equatorial Pacific Ocean over the past 1 Myr. *Paleoceanography*, 15 (6): 570 592. doi: 10. 1029/1999PA000457
- Nakatsuka, T., Watanabe, K., Handa, N., et al., 1995. Glacial to interglacial surface nutrient variations of Bering deep basins recorded by  $\delta^{13}$  C and  $\delta^{15}$  N of sedimentary organic matter. *Paleoceanography*, 10(6):1047-1061. doi:10.1029/95PA02644
- Nesbitt, H. W., Young, G. M., 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299: 715 - 717. doi: 10. 1038/299715a0
- Okada, M., Takagi, M., Narita, H., et al., 2005. Chronostratigraphy of sediment cores from the Bering Sea and the subarctic Pacific based on paleomagnetic and oxygen isotopic analyses. *Deep-Sea Research Part* II: *Topical Studies in Oceanography*, 52 (16-18): 2092-2109. doi:10.1016/j. dsr2.2005.08.004
- Okazaki, Y., Takahashi, K., Asahi, H., et al., 2005. Productivity changes in the Bering Sea during the Late Quaternary. Deep-Sea Research Part []: Topical Studies in Oceanography, 52(16-18): 2150-2162. doi: 10.1016/ j. dsr2. 2005. 07.003
- Reed, R. K., Gonzalez, F. I., Miller, L., 1991. On the structure and stability of the Alaskan Stream. Journal of Marine Research, 49 (4): 719 - 726. doi: 10. 1357/ 002224091784995684
- Sancetta, C., Heusser, L., Labeyrie, L., et al., 1984. Wisconsin-Holocene paleoenvironment of the Bering Sea: evidence from diatoms, pollen, oxygen isotopes and clay minerals. *Marine Geology*, 62(1-2): 55-68. doi: 10.

1016/0025-3227(84)90054-9

- Sancetta, C., Robinson, S. W., 1983. Diatom evidence on Wisconsin and Holocene events in the Bering Sea. Quaternary Research, 20 (2): 232 – 245. doi: 10. 1016/ 0033-5894(83)90079-0
- Schenau, S. J., Reichart, G. J., De Lange, G. J., 2005. Phosphorus burial as a function of paleoproductivity and redox conditions in Arabian Sea sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(4):919-931. doi:10.1016/j. gca. 2004.05.044
- Sigman, D. M., Boyle, E. A., 2000. Glacial/interglacial variations in atmospheric carbon dioxide. *Nature*, 407 (6806):859-869. doi:10.1038/35038000
- Stabeno, P. J., Reed, R. K., Napp, J. M., 2002. Transport through Unimak Pass, Alaska. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 49(26):5919-5930. doi:10.1016/S0967-0645(02)00326-0
- Stabeno, P., Napp, J., Mordy C., et al., 2010. Factors influencing physical structure and lower tropic levels of the eastern Bering Sea shelf in 2005; sea ice, tides and winds. *Progress in Oceanography*, 85: 180-196. doi: 10.1016/j. pocean. 2010. 02. 010
- Stuiver, M., Reimer, P., 1993. Extended <sup>14</sup>C database and revised CALIB radiocarbon calibration program. *Radiocarbon*, 35(1):215-230.
- Tanaka, S., Takahashi, K., 2005. Late Quaternary paleoceanographic changes in the Bering Sea and the western subarctic Pacific based on radiolarian assemblages. Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 52 (16-18): 2131-2149. doi: 10.1016/j. dsr2. 2005.07.002
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. The continental crust:its composition and evolution. Blackwell Scientific Publisher, Palo Alto.
- Tribovillard, N., Algeo, T. J., Lyons, T., et al., 2006. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies; an update. *Chemical Geology*, 232(1-2):12-32. doi:10. 1016/j. chemgeo. 2006. 02. 012
- Wang, R. J., Li, X., Xiao, W. S., et al., 2005. Paleoceanographic records and sea ice extension history of the

northern Bering Sea slope over the last 100 ka. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 30(5):550-558 (in Chinese with English abstract).

- Wang, R. J., Xiao, W. S., Li, Q. Y., et al., 2006. Polycystine radiolarians in surface sediments from the Bering Sea green belt area and their ecological implication for paleoenvironmenal reconstructions. *Marine Micropaleon*tology, 59: 135-152. doi: 10. 1016/j. marmicro. 2006. 02, 002
- Xiong, L. F., Liu, J. H., Bai, Y. Z., et al., 2012. The distributions of total organic carbon in the surface sediments from the Yellow Sea and the north of the East China Sea. Advance in Marine Science, in press (in Chinese with English abstract).
- Zou, J. J., Shi, X. F., Liu, Y. G., et al., 2010a. Geochemical records of paleoproductivity and paleoredox in the sea of Japan since 48 ka. Acta Oceanologica Sinica, 32(4): 98-109 (in Chinese with English abstract).
- Zou, J. J., Shi, X. F., Liu, Y. G., et al., 2010b. Geochemical record of terrigenous sediments from the sea of Japan since last glacial and its response for sea level and climate change. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 30(2):75-86 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 王汝建,李霞,肖文申,等,2005. 白令海北部陆坡 100 ka 来的 古海洋学记录及海冰的扩张历史. 地球科学——中国 地质大学学报,30(5): 550-558.
- 何沅澎,王汝建,郑洪波,等,2006. 白令海 DSDP188 站氧同 位素 3 期以来的古海洋与古气候记录. 海洋地质与第 四纪地质,26(2): 65-71.
- 熊林芳,刘季花,白亚之,等,2012.南黄海一东海北部表层沉 积物有机碳分布特征.海洋科学进展(待刊).
- 邹建军,石学法,刘焱光,等,2010a.48 ka 以来日本海古生产 力和古氧化还原环境变化的地球化学记录.海洋学报, 32(4):98-109.
- 邹建军,石学法,刘焱光,等,2010b. 末次冰期以来日本海陆 源碎屑的地球化学记录及其古气候意义. 海洋地质与 第四纪地质,30(2):75-86.