

西北冰洋中太平洋入流水营养盐的变化特征

李宏亮¹, 陈建芳^{1,2*}, 高生泉¹, 卢勇¹, 金海燕¹, 金明明¹, 王奎¹, 白有成¹, 张海生¹

(1. 国家海洋局 第二海洋研究所 海洋生态系统与生物地球化学重点实验室, 浙江 杭州 310012; 2. 国家海洋局 第二海洋研究所 卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 浙江 杭州 310012)

摘要: 利用 1999, 2003 和 2008 年夏季(7—9 月)三次中国北极科学考察数据资料, 分析和讨论太平洋入流水营养盐的分布和楚科奇海关键生物地球化学过程对太平洋水化学性质的改造。结果表明, 2003 和 2008 年在白令海峡南部 64.3°N 纬向断面(BS 断面)由于水团性质差异显著, 营养盐呈西高、东低的分布趋势。2003 年 BS 断面水柱上下分层明显, 跃层以上水体营养盐浓度较低, 可能是由生物泵作用和河流冲淡水稀释造成的。2008 年 BS 断面东、西两侧水柱上下混合均匀, 垂向营养盐浓度基本无变化; 在海峡中部由于不同水团密度差异导致营养盐呈楔状分布, 上层水体营养盐浓度较低。在 BS 断面 2008 年最高值大于 2003 年, 这可能是 BS 断面西侧受到高营养盐的阿纳德尔流的影响, 而在 2003 年考察 BS 断面未发现该水体的踪迹。太平洋水进入楚科奇海后由于浮游植物吸收利用和融冰水的稀释作用, 沿 170°W 经向断面(C 断面和 R 断面)的上层水体营养盐浓度明显低于跃层之下水体浓度。跃层之下水体受不同水团和 Herald 浅滩的影响, 营养盐浓度在 70°N 以北海区浓度明显较高, 但是仅从物理输送方面并不能找到太平洋水影响楚科奇海营养盐浓度的变化规律, 这可能是有机质分解等化学过程有较大的年际变化。引入反映固氮和脱氮作用的参数 N^* , 并结合 DIN 与 P 和 DIN 与 Si 含量比值讨论楚科奇海脱氮作用对太平洋入流水化学性质的改造程度。较低的 DIN 与 P 含量比值和偏负的 N^* 数值表明, 太平洋水流经白令海陆架时已经被脱氮作用改造而损失部分无机氮营养盐; 进入楚科奇海后在底界面附近发生强烈的脱氮作用而损失更多的生物可利用氮, 这将进一步加剧无机氮元素对北冰洋中心海盆浮游植物的限制。

关键词: 太平洋水; 营养盐; 脱氮作用; 白令海峡; 楚科奇海

中图分类号: P734.2⁺1; P734.2⁺5

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2011)02-0085-11

1 引言

经白令海峡流入北冰洋的太平洋水携带的热能、淡水、营养盐和亚极地生物种, 对北冰洋的海冰、环流及海洋生态系统至关重要^[1], 其中氮、磷、硅等营养盐不仅是支撑海洋生态系统的物质基础, 也是联结海洋环境演变和生态系统响应的中间纽带, 起着承上启下的作用^[2]。近 30 a 的研究表明, 北极地

区除气温升高和北冰洋中层水持续增暖等变化之外, 以海冰厚度持续减小、多年冰覆盖面积锐减和夏季最小冰边缘线北退等为主要表现特征的海冰快速消退是北极环境变化的重要标志之一^[3]。海冰消退引起海冰融化的季节延长以及开阔无冰海域面积的增加将使北冰洋营养盐补充与消耗机制、海洋初级生产力和生态结构都发生巨大改变。因此, 北冰洋海洋生态系统对海冰快速变化的响应已经成为国际

收稿日期: 2010-08-08; 修订日期: 2011-01-08。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41003036; 41076135; 40876103); 国家海洋局青年海洋科学基金项目(2008602); 中国极地战略研究基金(20070201); 国家海洋局第二海洋研究所基本科研业务费专项资助(JG0826)。

作者简介: 李宏亮(1981—), 男, 浙江省金华市人, 助理研究员, 硕士, 主要研究海洋生物地球化学。E-mail: lihongliang@sio.org.cn

* 通信作者: 陈建芳(1968—), 男, 研究员。E-mail: jfchen@sio.org.cn

海洋科学家关注的热点问题,也是我国历次北极考察的科学目标之一。本文利用中国第 1,第 2 和第 3 次北极考察获得的五项营养盐数据(硝酸盐、磷酸盐、硅酸盐、亚硝酸盐和铵盐),探讨 1999 年第 1 次北极考察以来太平洋入流水营养盐浓度及其营养结构的变化以及楚科奇海生物地球化学过程对其的改造程度。

2 材料和方法

2.1 样品采集

在 1999,2003 和 2008 年的 7~9 月依托“雪龙”号科考船进行了中国第 1、第 2 和第 3 次北极科学考察,考察区域主要覆盖白令海、楚科奇海、波弗特海和加拿大海盆等海区。本文所涉及的站位如图 1 所示,其中白令海峡南侧的 BS 断面位于 $64^{\circ}20'N$, $171^{\circ}30' \sim 167^{\circ}00'W$ 。第 1 次北极考察未采集白令海峡南侧的水样。在 2003 年共设 10 个站位(BS01—BS10),每站间隔 0.5 个经度,于 7 月 28 日和 29

日采样。2008 年由于船速限制只设 6 个站位(BS01,BS03,BS04,BS05,BS07,BS09),于 7 月 26 日和 27 日采样。楚科奇海沿 $170^{\circ}W$ 向北延伸断面第 1 次北极考察命名为 C 断面(C15, C16, C18, C20, C21, C22, C23, C25, C27),第 2 次和第 3 次考察都命名为 R 断面(R00—R17),三次采样时间分别是 1999 年 8 月 3 日至 8 月 4 日、2003 年 7 月 30 日至 8 月 2 日和 2008 年 8 月 1 日至 8 月 6 日。第 1 次北极考察由于条件限制,标准层海水用 CTD 梅花式采水器采集,其他加密层位海水通过尼斯金采水瓶直接悬挂于钢缆采集。第 2 次和第 3 次北极考察所有海水通过海鸟 CTD 梅花式采水器采集,通过一根乳胶管将约 500 mL 水样采集到聚丙烯塑料瓶中,采集前用少量水样冲洗采样瓶 3 次。采集水样后立即经 $0.45 \mu m$ 醋酸纤维膜过滤,滤液分装于 100 mL 的塑料瓶存放于 $0.5^{\circ}C$ 的恒温冰箱用于分析。样品带回陆地实验室分析则加入 $HgCl_2$ 试剂固定后在低温冷藏保存。

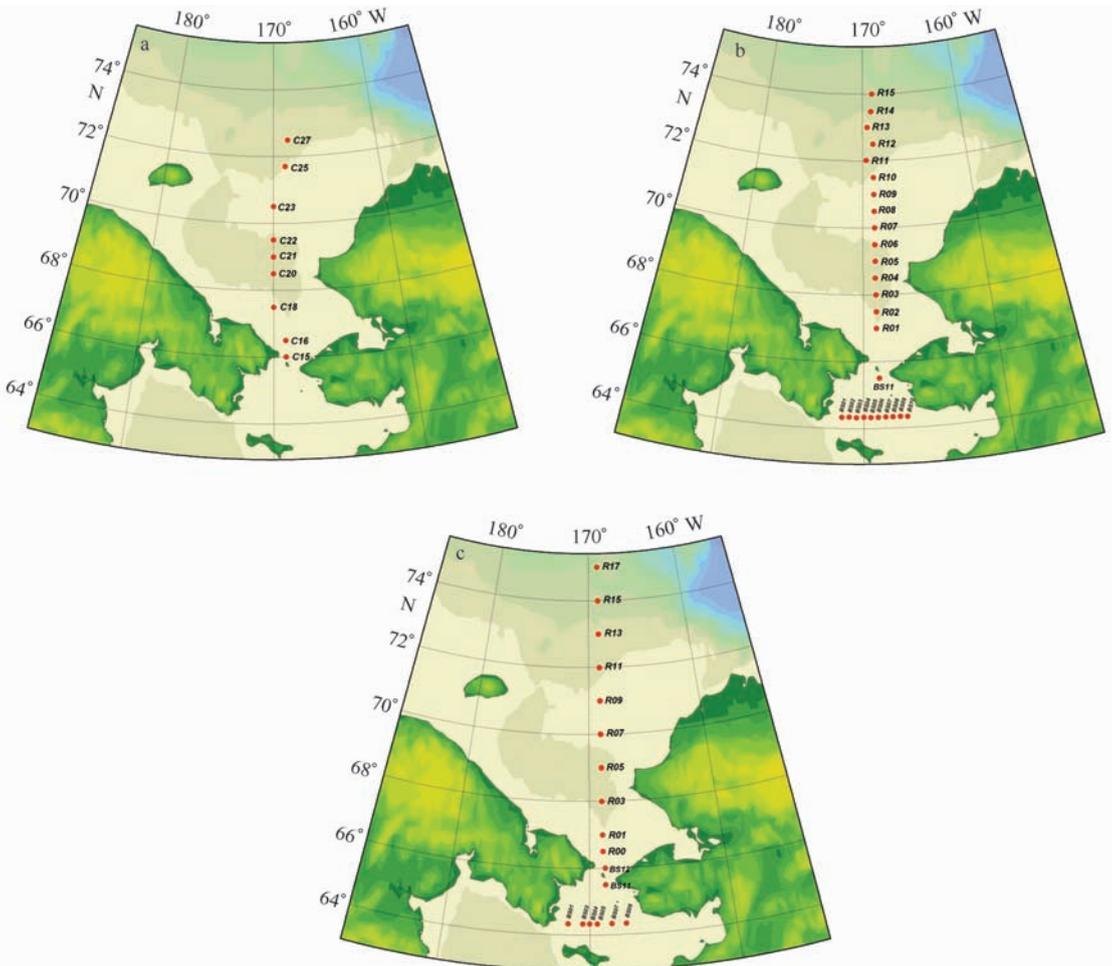


图 1 采样站位(图中 a,b 和 c 分别代表第 1 次、第 2 次和第 3 次北极考察)

2.2 分析方法

第1次北极考察五项营养盐全部采用手动分光光度计法测定;第2次北极考察除(硝酸盐加亚硝酸盐)采用营养盐自动分析仪测定,其他四项营养盐均用手动分光光度计法分析;第3次北极考察(硝酸盐加亚硝酸盐)、磷酸盐和硅酸盐采用营养盐自动分析仪(skalar San⁺⁺)测定,铵盐和亚硝酸采用手动分光光度计法测定。分析方法参考 Grasshoff 等^[4]主编的《Methods of Seawater Analysis》、《海洋调查规范——海水化学要素观测》和《SKALAR SAN⁺⁺ 营养盐自动分析仪操作手册》,其中手动分析法中对硝酸盐、磷酸盐、亚硝酸盐和铵盐分别采用锌-镉还原法、磷钼蓝法、重氮-偶氮法和靛酚蓝法测定,对硅酸盐在第1和第2次北极考察分别采用硅钼黄法和硅钼蓝法分析。对营养盐自动分析仪测定硝酸盐、磷酸盐和硅酸盐分别采用镉铜柱还原法、磷钼蓝法和硅钼蓝法。

利用 Gruber 和 Sarmiento^[5]提出的参数 N^* 来评估楚科奇海固氮作用和脱氮作用的影响。 N^* 是按照公式 $N^* = [c(\text{DIN}) - 16c(\text{P}) + 2.98] \times 0.87$ 计算的,其中 $c(\text{DIN})$ 表示 $(\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^- + \text{NH}_4^+)$ 离子浓度; $c(\text{P})$ 表示 PO_4^{3-} 离子浓度;常数 2.98 是指全球海洋由于脱氮作用引起的平均亏损值,引入该参数表示设定全球平均 N^* 值为 0;因子 0.87 是为了扣除脱氮过程中有机质释放磷酸盐的影响。因此, N^* 值越偏向正值,表明固氮作用强于脱氮作用,反之则表明脱氮作用更加显著。

3 结果和讨论

3.1 白令海峡 BS 断面营养盐变化特征

2003 年 BS 断面磷酸盐浓度为 $0.21 \sim 1.98 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$,最低值和最高值分别位于 BS02 站的表层和 BS01 站的底层。溶解无机氮(DIN,是指硝酸盐、铵盐和亚硝酸盐的总和)浓度为 $0.5 \sim 20.66 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$,最低值和最高值分别位于 BS07 站的表层和 BS01 站的底层;硅酸盐浓度为 $1.4 \sim 38.2 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$,其最低值和最高值分别位于 BS02 站的表层和 BS01 站的 30 m 层。如图 2 所示,2003 年 BS 断面在 10~20 m 存在营养盐跃层,而且东西两侧层化强、中间弱。跃层之上水体营养盐浓度较低,10 m 水柱内上、下混合较均匀,浓度变化较小。20 m 以深水体营养盐呈西高、东低分布。2008 年 BS 断面磷酸盐浓度为 $0.37 \sim$

$2.1 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$,最低值和最高值分别位于海峡最西侧 BS07 站的表层和 BS01 站的 30 m。DIN 浓度为 $0.3 \sim 20.41 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$,最低值和最高值分别位于 BS09 站的 10 m 和 BS01 站的底层;硅酸盐浓度为 $0.52 \sim 43.17 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$,其最低值和最高值分别位于 BS09 站的 10 m 和 BS01 的 30 m。上升流、河流羽状流等海洋中尺度物理过程是形成营养盐的主要分布格局,而浮游植物初级生产和细菌分解作用等生物活动在原有基础之上进行改造而最终形成所观测到的分布趋势^[6]。一般认为太平洋入流水分 3 个水团经白令海峡进入楚科奇海,它们分别是海峡西侧高盐低温、高营养盐的阿纳德尔流(Anadyr Water, AW)、东侧低盐高温、低营养盐的阿拉斯加沿岸流(Alaska Coast Water, ACW)和海峡中间的白令海陆架流(Bering Shelf Water, BSW)^[7]。太平洋入流水的流量以及水团覆盖范围都有较大的季节和年际变化^[8-9]。

根据 Zhao 等^[10]分析,2003 年 7 月 BS 断面主要由 BSW 和 ACW 两个水团控制,而未发现 AW 的踪迹,其中 BSW 控制着断面西侧 BS01—BS07 站,ACW 则占据着断面东侧的 BS08—BS10 站。因此,BS 断面营养盐分布格局是不是由上述水团结构所决定呢?如图 2 所示,2003 年跃层以下营养盐浓度呈西高、东低分布,特别是西侧硝酸盐浓度是东侧的 35 倍左右,表明 BSW 水团和 ACW 水团营养盐浓度的差别是造成 BS 断面东西向浓度梯度的主要原因。10 m 以上水营养盐浓度呈海峡中间高、东西两侧低的分布格局,其中西侧磷酸盐和硅酸盐低于东侧,最低值位于海峡西侧 BS02 站的表层,而硝酸盐则不同,东侧浓度明显高于西侧。根据 Zhao 等分析 2003 年 7 月 BS01—BS03 站 10 m 以浅高温、低盐海水可能是来自 Anadyr 湾的河流冲淡水。BS01 站上层水体 DIN 与 Si 含量比值接近 1.0 左右,明显区别于该断面其他站位亦证明该区域可能受河流淡水的影响,而且与河流入海的 DIN 与 Si 含量比值(1.0 左右)相符^[11]。Andreev 等^[12]报道浮游植物吸收 Anadyr 湾夏季表层营养盐极低。同一航次观测显示 BS 断面上层水体叶绿素 a 浓度均在 $1.0 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ 以上,最高值位于 BS05 站表层和 10 m 层^[13],这与图 2 中 BS05—BS07 站上层水体硝酸盐、磷酸盐浓度较低以及较低的营养盐与 Si 含量比值接近。

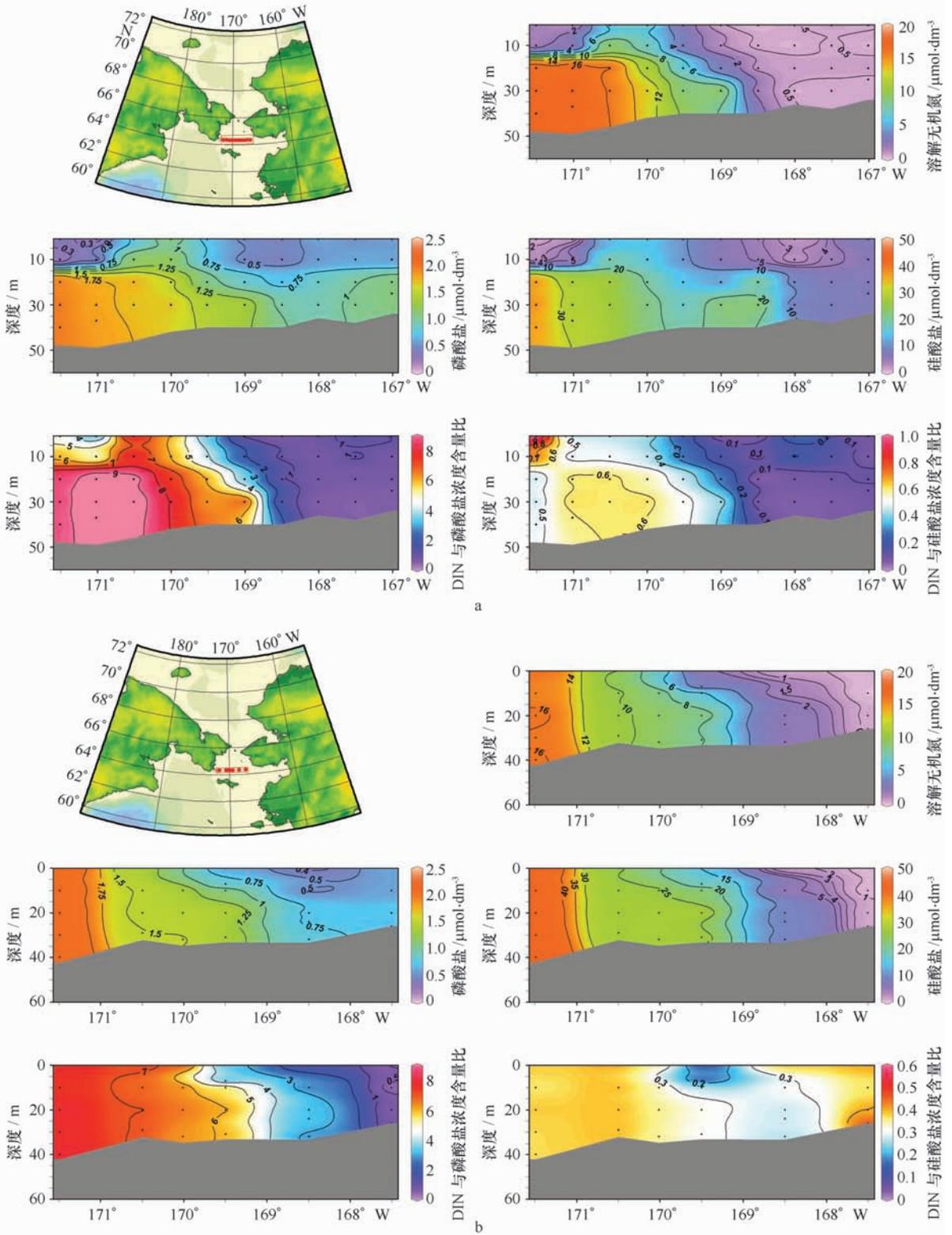


图2 白令海峡BS断面营养盐浓度和结构分布(a和b分别代表2003年和2008年)

2008年BS断面盐度分布在32.13~32.88之间,假如根据上述三个水团盐度界限判断该断面

主要由AW和BSW两个水团控制,其中AW控制着断面171°W以西的海区(即2003年考察时的

BS01—BS02站),其余站均被BSW水团覆盖,但是BS断面属浅海陆架区,水团的性质会有较大的年际差异。因此,区分白令海峡水团,仅靠盐度区分水团特征可能不够全面。如图2所示,BS09站硝酸盐浓度小于 $0.5\ \mu\text{mol}/\text{dm}^3$,明显区别于其他站位。BS09站极低的营养盐和低盐、高温等特征说明该海区可能受ACW流所控制。由图2可见除2008年夏季BS断面营养盐呈楔状分布外,在海峡中部上、下层水体分别呈现出高温、低盐和低营养盐的ACW流和西侧低温、高盐和高营养盐的BSW流。由于在采样前气旋的混合作用,2008年BS断面水柱上下营养盐浓度均匀分布。同一航次的叶绿素a数据^[14]显示BS01—BS07站各层位浓度均在 $1.3\ \mu\text{g}/\text{dm}^3$ 以上,平均为 $3.6\ \mu\text{g}/\text{dm}^3$,表明白令海峡水体具有较高浮游植物生物量。从图2b中的DIN与P含量比值和DIN与Si含量比值在水柱上下较均匀的分布可以看出在经过气旋混合作用后浮游植物吸收,即生物泵作用尚未对该断面大部分水体的营养盐分布产生影响,但是BS05站上层叶绿素a浓度达到 $15.0\ \mu\text{g}/\text{dm}^3$,DIN与Si含量比值小于0.2,表明浮游植物通过生物泵作用已经对个别站位上层水体的营养盐格局进行了再分布。

3.2 楚科奇海 170°W 经向断面营养盐变化特征分布

1999年C断面磷酸盐浓度分布为 $0.28\sim 2.13\ \mu\text{mol}/\text{dm}^3$,最低值和最高值分别位于C25站的10m层和C27站的底层。DIN浓度分布为 $0\sim 20.79\ \mu\text{mol}/\text{dm}^3$,最低值和最高值分别位于C25站的表层和C16站的底层。硅酸盐浓度为 $2.30\sim 60.80\ \mu\text{mol}/\text{dm}^3$,最低值和最高值分别位于C18站的表层和C27站的底层。2003年R断面磷酸盐浓度为 $0.29\sim 2.55\ \mu\text{mol}/\text{dm}^3$,最低值和最高值分别位于R02站的表层和R13站的底层。DIN浓度分布为 $1.34\sim 20.23\ \mu\text{mol}/\text{dm}^3$,最低值和最高值分别位于R06站的20m层和R12站的底层。硅酸盐浓度为 $0.05\sim 67.30\ \mu\text{mol}/\text{dm}^3$,最低值分布在R03—R09站的10m以浅水体,最高值位于R13站的底层。2008年R断面磷酸盐浓度为 $0.35\sim 2.5\ \mu\text{mol}/\text{dm}^3$,最低值和最高值分别位于R05站的表层和R13站的底层。DIN浓度为 $0.27\sim 18.30\ \mu\text{mol}/\text{dm}^3$,最低值和最高值分别位于R05站的20m层和R13站的底层。硅酸盐浓度为 $0.39\sim 66.6\ \mu\text{mol}/\text{dm}^3$,与磷酸盐相似,其最低值和最高值

分别位于R05站的表层和R13站的底层。

如图3所示,1999年磷酸盐、硝酸盐和硅酸盐具有相似的分布格局,即在 $10\sim 15\ \text{m}$ 左右形成很强的营养盐跃层,上层营养盐浓度低于底层。通过对比跃层上下水体的DIN与P含量比值发现下层水体是上层水体比值的 $2\sim 5$ 倍左右,表明楚科奇海浮游植物吸收利用太平洋水的营养盐形成有机质,最后以生物碎屑的形式沉降到底层后经再矿化重新转化成无机营养盐,即通过生物泵作用将上层水体的营养盐转移至底层附近。白令海峡北侧附近的站位的DIN与P含量明显大于北侧其他站位(67°N 以北)的比值,表明楚科奇海上层浮游植物吸收以及下层水体中的微生物活动对该海区的影响尚不明显。由于较强的温跃层阻碍了下层水体高浓度营养盐通过垂直混合作用进入上层水体。夏季融冰水具有低盐、低温和低营养盐的特征,对表层水体影响最大。因此,很难从温度、盐度方面判断跃层之上水体的水团属性。下层水体相对简单,以盐度 32.8 为界限在 70°N 以南是海冰融化后进入北冰洋的BSW水,而 70°N 以北是冬季或春季早期海冰覆盖时进入北冰洋的AW水,这可能是Herald浅滩阻挡了海水的流动形成绕流,其北部处于绕流死角造成的^[15]。从下层水体的DIN与P含量比值看,在Herald浅滩以南海区该比值大都在 0.4 左右,而在浅滩以北海区大都在 0.2 左右,表明以Herald浅滩为界南北下层水体属于不同的水团。2003年磷酸盐、硝酸盐和硅酸盐具有相同的分布格局。总体来说,R断面上层水体营养盐浓度较低,上下水体存在明显的营养盐跃层,特别是在陆架中部海区的R04—R09站表层硝酸盐和硅酸盐浓度已接近或低于浮游植物生长的阈值(NO_3^- 浓度约为 $1.0\ \mu\text{mol}/\text{dm}^3$, SiO_3^{2-} 浓度约为 $2.0\ \mu\text{mol}/\text{dm}^3$),而水柱深层即营养盐跃层以下浓度也有较大变化:在白令海峡北侧(R01—R03站)由于太平洋入流持续补充,营养盐浓度相对较高;在处于楚科奇陆架中部的站位(R04—R09)浓度较低,与表层水体相比浓度相差不大。根据该断面叶绿素a浓度分布^[16]显示中部海区叶绿素a浓度最高,而且最大值位于水柱底层。这表明陆架中部海区浮游植物随着表层营养盐大量消耗而转移至水柱深层生长,使得该海区水柱上下层营养盐浓度差别不大,而在R断面北侧较深海区(R10—R15站)深层海水营养盐浓度比白令海

峡口的浓度高,特别是硅酸盐浓度是海峡口的 5 倍左右。与前两次北极考察相似,2008 年 R 断面上层水体营养盐浓度明显低于底层,其中在白令海峡北部站位(R00 和 R01 站)表层浓度最高,而叶绿素 a 浓度的 $5.0 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ 以上^[14],表明白令海峡附近太平洋水的及时补充基本满足浮游植物生长的需求。随着断面向北延伸表层营养盐浓度随之降低,至 R17 站表层浓度达到最小值。在同一航次 R03—R17 站叶绿素 a 浓度仍维持在较高水平($0.5\sim 3.0 \mu\text{g}/\text{dm}^3$),表明浮游植物吸收利用对楚科奇海上层水体营养盐分布格局有较大影响。从 R 断面盐度分布图^[17]分析,该断面表层水体都受到融冰水的影响,特别在 R13—R17 站表层极低的盐度($26.0\sim 30.0$)说明融冰水对该海区影响尤为明显。高生泉等分析了 2008 年海冰的营养盐数据显示融冰水营养盐浓度极低(NO_3^- 浓度小于 $0.34 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$, PO_4^{3-} 浓度小于 $0.05 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$, SiO_3^{2-} 浓度小于 $0.5 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$)。因此,浮游植物吸收利用和融冰水的稀释作用对楚科奇海表层水体营养盐分布格局具有重要意义。如图 3 所示,在 70°N 以北下层水体(150 m 以浅)营养盐浓度明显高于其南部浓度,而在 R15 和 R17 站大于 150 m 水体营养盐浓度逐渐降低。盐度数据显示在 R01—R06 站 10 m 以深水体盐度为 $32.0\sim 32.8$,属于 BSW 水;在 R07—R17 站为 $32.8\sim 33.5$,属于 AW 水,这与 1999 年情况类似,可能是 Herald 浅滩的影响。因此,R 断面下层水体营养盐浓度差异主要是水团性质差异造成的,而 R15 和 R17 站大于 150 m 水体主要来源于大西洋水(盐度大于 34.0),营养盐浓度较低。与 2003 年不同,2008 年 R 断面 R09—R17 站底层附近(小于 150 m 以浅)海水盐度超过 32.8,根据史久新等^[18]描述这应该是在冬季进入楚科奇海的白令海水,但是 2008 年 $71^\circ\sim 73^\circ\text{N}$ 海区底层附近水体营养盐浓度并不是历次北极考察中浓度最高的。因此,仅从不同水团的物理输送角度考虑并不能找到太平洋水营养盐浓度在楚科奇海的变化规律,这可能是上层水体高初级生产力输出的有机质再矿化作用有较大的年际变化。

3.3 北冰洋氮循环与营养盐限制

由于太平洋入流水密度小于北大西洋入流水的密度,太平洋水主要进入北冰洋浮游植物活动旺盛的上层水体^[1]。因此,太平洋水携带的营养

盐对北冰洋海洋生态系统至关重要。如图 3 所示,1999,2003 和 2008 年 R 断面 DIN 与 P 含量比最高值(分别是 $11.30:1$, $12.7:1$ 和 $9.17:1$)都小于 Redfield 比($16:1$),表明氮营养要素会限制楚科奇海初级生产力。Codispoti 等^[19]指出北冰洋初级生产力主要受太平洋入流水携带 DIN 的限制。通常情况下,浮游植物吸收无机营养盐形成的颗粒有机物质通过生物泵作用从海洋真光层输出,在沉降过程中按 DIN 与 P 含量比为 $16:1$ 的比例再矿化成无机营养盐,但是当固氮作用或者脱氮作用(包括缺氧氨氧化)参与该生物泵过程时将改变颗粒有机物质再矿化的 DIN 与 P 含量比^[20]。

如图 4 所示,1999 年楚科奇海 C 断面 N^* 为 $-13.55\sim -1.13 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$,平均为 $-6.30 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$;2003 年 R 断面 N^* 为 $-16.83\sim -1.34 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$,平均为 $-5.30 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$;2008 年 R 断面 N^* 为 $-16.75\sim -0.93 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$,平均为 $-8.36 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ 。因此,上述 N^* 值都小于 $2.98 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ 表明,固氮作用对楚科奇海初级生产力并不重要。因为 1999 年 C 断面仅延伸至 72.5°N 左右,与后两次北极考察数据相差较大,所以本节主要讨论 2003 和 2008 年的数据。2003 年白令海峡 BS 断面 N^* 为 $-11.48\sim -1.27 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$,平均值为 $-5.08 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$;2008 年 BS 断面 N^* 为 $-9.17\sim -1.91 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$,平均为 $-5.98 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$,表明进入北冰洋的太平洋水虽然相对富含硝酸盐,但是流经白令海陆架过程中已被脱氮作用所改造而损失部分硝酸盐。两次北极考察 R 断面 N^* 分布趋势是一致的,在白令海峡口站位和上层水体 N^* 较高,对照图 3 发现 N^* 高值区正好是磷酸盐的低值区。Codispoti 等^[19]报道了 2002 年春季和夏季白令海峡 N^* 值相对较高($-5\sim -8 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$)主要是该区域浮游植物旺发大量消耗磷酸盐引起的,但是对比图 3 中 R 断面 DIN 与 P 含量的分布图不难发现 N^* 高值区也是 DIN 与 P 含量比值的低值区。这表明浮游植物大量消耗磷酸盐的同时也消耗硝酸盐,甚至比例更大。因此,R 断面上下层水柱之间 N^* 差值如此大是如何形成的? NO_2^- 是反硝化作用的中间产物,往往在陆架海区底界面附近浓度较高。对比图 4 和 5 可以发现, N^* 低值与 NO_2^- 浓度高值之间有很好的对应关系,表明在楚科奇陆架海区底界面附近存在反硝

化细菌将硝酸盐转化成 N_2 。文献中已明确指出在楚科奇海陆架的沉积物和海冰包裹的卤水中存在着强烈的脱氮作用^[21-22]。最新研究结果表明北冰洋陆架沉积界面年均脱氮速率达到

13 Tg/a, 占全球海洋脱氮总量的 4%~13%^[23]。另外, 对比两次 N^* 平均值不难发现 2008 年 N^* 明显偏小, 预示着北冰洋陆架海区氮的净迁出作用逐渐增强。

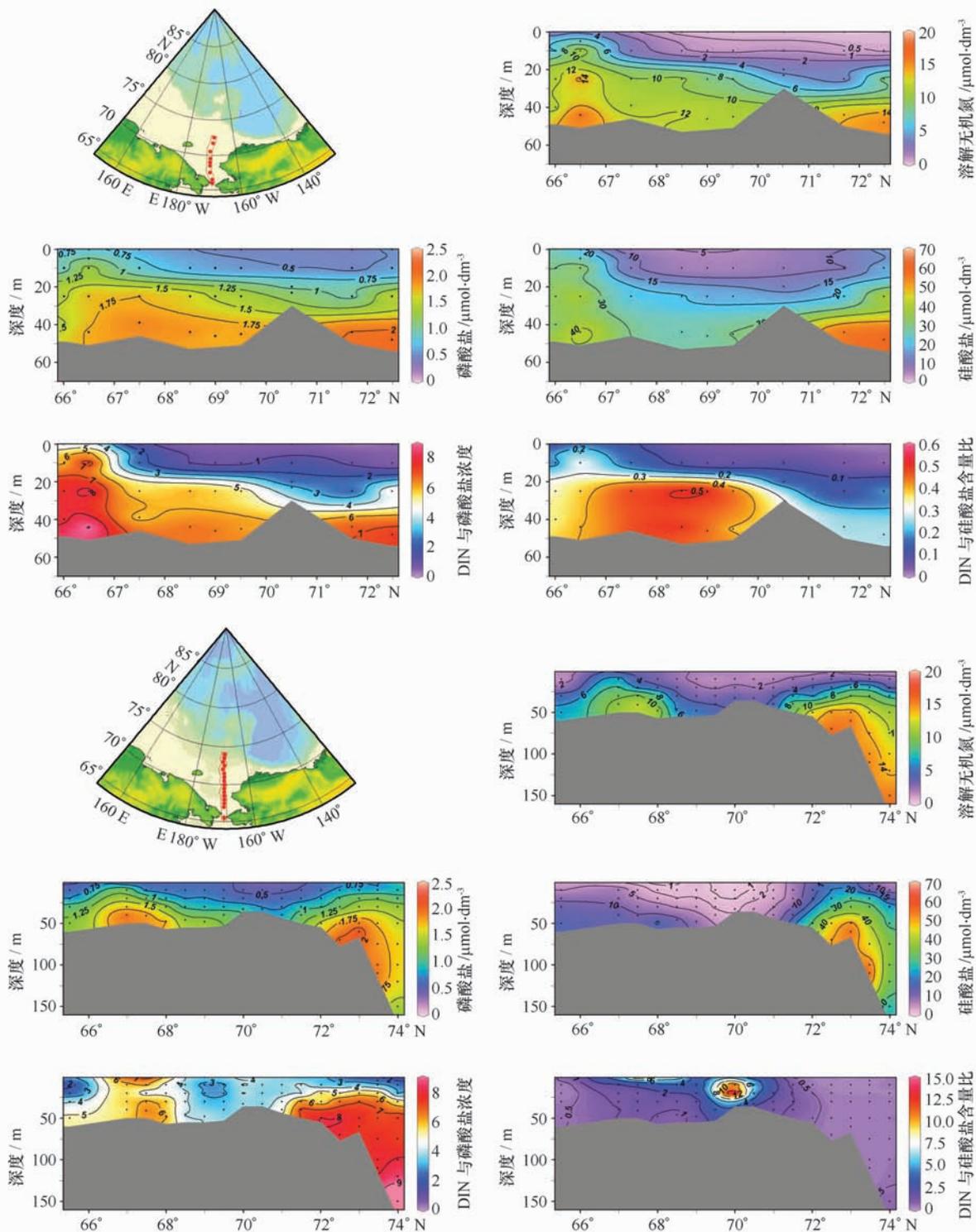


图3 楚科奇海 R 断面营养盐浓度和结构分布

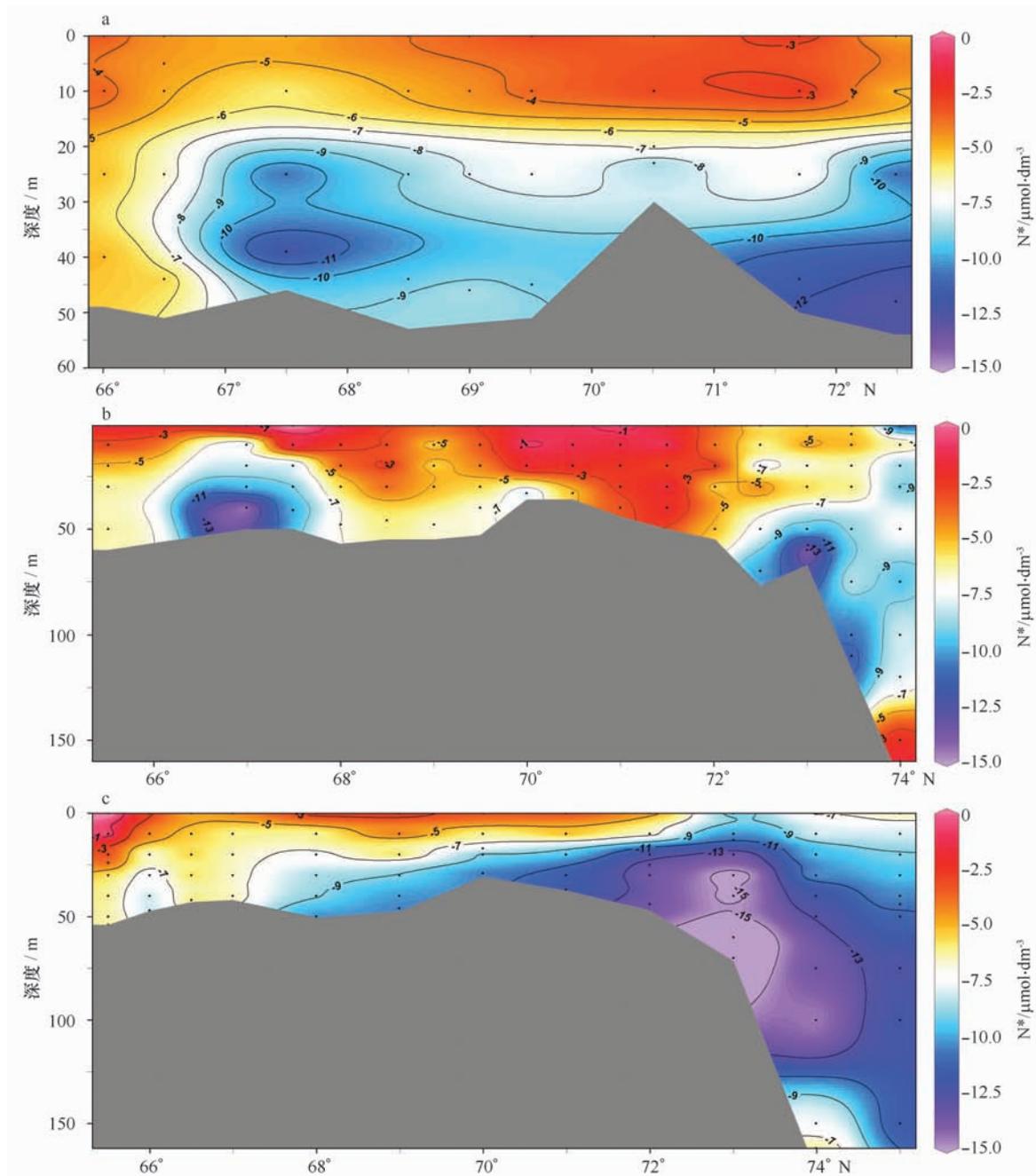


图4 楚科奇海R断面 N^* 分布

a, b 和 c 分别代表 1999, 2003 和 2008 年

4 结论

太平洋入流水携带的 DIN 是控制西北冰洋海洋初级生产力的关键因素。对 2003 和 2008 年白令海峡南部 BS 断面营养盐的分析表明, 海峡西侧的 AW 水团、中间的 BSW 水团和东侧的 ACW 水团的分布范围将控制进入北冰洋的太平洋水的营养盐浓

度。太平洋水进入楚科奇海后较高的初级生产力和融冰水的稀释作用将降低上层海水的营养盐浓度。不同的水团性质将决定跃层之下水体营养盐浓度范围, 但是来自上层水体的有机颗粒物的再矿化也可能是影响底层营养盐浓度的重要原因。较低的 DIN 与 P 含量比值和偏负的 N^* 表明太平洋水进入北冰洋之前已经被脱氮作用改造而损失部分无机氮

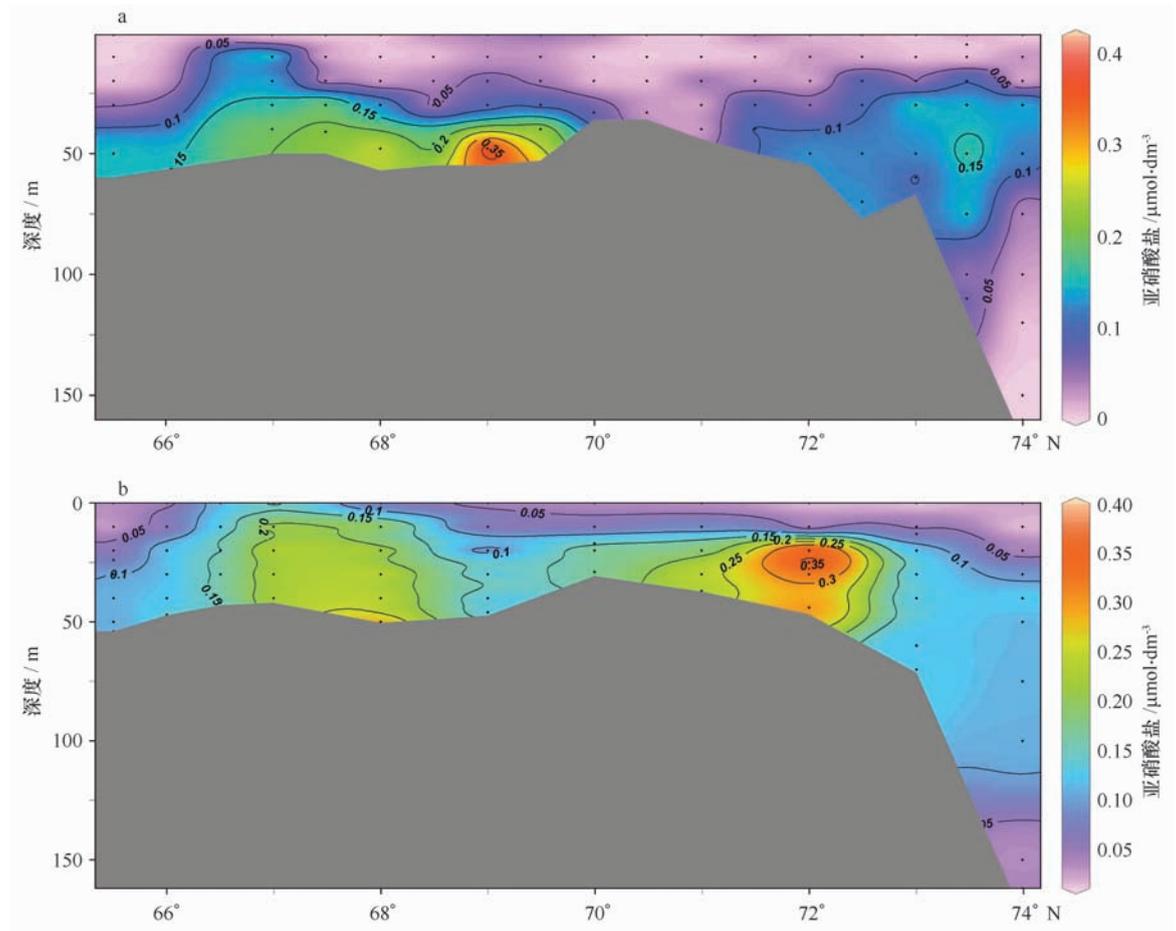


图5 楚科奇海 R 断面 2003 年(a)和 2008 年(b)亚硝酸盐浓度分布

营养盐。进入北冰洋后经楚科奇海高效率的生物泵过程,上层水体中大部分硝酸盐以有机质形式沉降至底界面附近发生强烈的脱氮作用而损失更多的生物可利用氮。因此,在海冰快速消退的北冰洋浮游植物生长季节延长、开阔无冰海区面积增加和营养盐供应充足的情况下,北冰洋陆架海区初级生产力

和输出生产力可能会大幅提高。由此可见,底层水体脱氮作用可能会加强,并进一步加剧无机氮元素对北冰洋中心海盆浮游植物的限制。

致谢:感谢中国前三次北极科学考察队全体队员的支持,特别感谢海洋化学组全体同仁的支持!

参考文献:

- [1] GREBMEIER J M, COOPER L W, FEDER H M, et al. Ecosystem dynamics of the Pacific-influenced northern Bering and Chukchi Seas in the Amerasian arctic[J]. *Progress in Oceanography*, 2006, 71: 331—361.
- [2] KARL D M. Nutrient dynamics in the deep blue sea [J]. *Trends in Microbiology*, 2002, 10: 410—418.
- [3] HOLLAND M M, BITZ C M, TREMBLAY B. Future abrupt reductions in the summer arctic sea ice [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33:L23503, doi: 10.1029/2006GL028024.
- [4] GRASSHOFF K, KREMLING K, EHRHARDT M. *Methods of Seawater Analysis*[M], third, completely revised and extended edition. Weinheim: Wiley-VCH, 1999: 193—198.
- [5] GRUBER N, SARMIENTO J L. Global patterns of marine nitrogen fixation and denitrification [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1997, 11(2): 235—266.
- [6] SARMIENTO J L, GRUBER N. *Ocean Biogeochemical Dynamics* [M]. New Jersey: Princeton University Press, 2006: 1—29.
- [7] WOODGATE R A, AAGAARD K. Revising the Bering Strait fresh water flux into the Arctic Ocean [J]. *Geophysical Research Letters*,

2005, L02602, doi: 10.1029/2004GL021747.

- [8] PICKART R S, WEINGARTNER T J, PIATT L J, et al. Flow of winter transformed Pacific water into the western arctic [J]. *Deep-Sea Research*; II, 2005, 52:3175—3198.
- [9] AAGAARD K, WEINGARTNER T J, DANIELSON S L, et al. Some controls on flow and salinity in Bering Strait [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33.
- [10] ZHAO J P, SHI J X, GAO G P, et al. Water mass of the northward through flow in the Bering Strait in summer 2003 [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 25(2):1—8.
- [11] ITTEKKOT V, UNGER D, HUMBORG C, et al. *The Silicon Cycle* [M]. Washington: Island Press. 2006: 53—70.
- [12] ANDREEV A G, CHEN C T, SEREDA N A. The distribution of the carbonate parameters in the waters of Anadyr Bay of the Bering Sea in the western part of the Chukchi Sea [J]. *Marine Chemistry*, 2010, 50(1): 39—50.
- [13] 刘子琳, 陈建芳, 陈忠元, 等. 白令海光合浮游生物现存量 and 初级生产力 [J]. *生态学报*, 2006, 26(5): 1345—1351.
- [14] 刘子琳, 陈建芳, 陈忠元, 等. 2008 年夏季白令海叶绿素 a 和初级生产力粒级结构 [J]. *海洋学报*, 2011, 33(2): 125—134.
- [15] 赵进平, 史久新, 金明明, 等. 楚科奇海融冰过程中的海水结构研究 [J]. *地球科学进展*, 2010, 25(2): 154—162.
- [16] 刘子琳, 陈建芳, 陈忠元, 等. 楚科奇海及其海台区粒度分级叶绿素 a 与初级生产力 [J]. *生态学报*, 2007, 27(12): 4953—4962.
- [17] 张海生. 中国第三次北极科学考察报告 [R]. 北京: 海洋出版社, 2009: 34—82.
- [18] 史久新, 赵进平, 矫玉田, 等. 太平洋入流及其与北冰洋异常变化的联系 [J]. *极地研究*, 2004, 16(3): 253—260.
- [19] CODISPOTI L A, FLAGG C, KELLY V, et al. Hydrographic conditions during the 2002 SBI process experiments [J]. *Deep-Sea Research*; II, 2005, 52: 3199—3226.
- [20] KARL D M, LETELIER L R, TUPAS J, et al. The role of nitrogen fixation in biogeochemical cycling in the subtropical North Pacific Ocean [J]. *Nature*, 1997, 388: 533—538.
- [21] DEVOL A H, CODISPOTI L A, CHRISTENSEN J P. Summer and winter denitrification rates in western arctic shelf sediments [J]. *Continental Shelf Research*, 1997, 17(9): 102—91050.
- [22] RYSGAARD S, GLUD R N. Anaerobic N₂ production in arctic sea ice [J]. *Limnology and Oceanography*, 2004, 49(1): 86—94.
- [23] CHANG B X, DEVOL A H. Seasonal and spatial patterns of sedimentary denitrification rates in the shelf and slope sediments of the Chukchi Sea [J]. *Deep-Sea Research*; II, 2008, doi:10.1016/j.dsr2.2008.10.024.

Nutrients variation of the Pacific inflow in the western Arctic Ocean

LI Hong-liang¹, CHEN Jian-fang^{1,2}, GAO Sheng-quan¹, LU Yong¹, JIN Hai-yan¹,
WANG Kui¹, BAI You-cheng¹, ZHANG Hai-sheng¹

(1. *Laboratory of Marine Ecosystem and Biogeochemistry, Second Institute of Oceanography, State Oceanologica Administration Hangzhou 310012 China*; 2. *State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography, State Oceanologica Administration Hangzhou 310012 China.*)

Abstract: Nutrients were analyzed for Bering Strait and Chukchi shelf water samples collected during the 1999, 2003 and 2008 arctic expedition of China. Concentrations of nutrients are the highest in the west part of the strait and decrease dramatically to the east part in summer. These spatial distributions of nutrients are depend on water masses (mixed layer, halocline waters, the Anadyr Current, the Alaskan coastal Current, Bering Shelf Current and Anadyr River water), primary production and cyclone. Because of phytoplankton uptake and dilution effect of ice melt water, the concentration of nutrients in the mixed layer (10 m) is lower than the deep layer of the meridian section along 170°W. Below 10 m, nutrients concentrations are higher in the north of 70°N than the southern part of Chukchi Sea because of the Herald shoal and different water mass. Besides physical transport, the variation of organic matter re-mineralization may be another important factor for the nutrients distribution patterns. parameter N^* $\{N^* = [(c(\text{DIN}) - 16c(\text{P}) + 2.98)] \times 0.87\}$ was applied to discussing the loss of fixed nitrogen to N₂ via denitrification or anammox processes. The values of N^* in the Bering Strait region are less negative than that in waters of Chukchi

Sea, suggested that the Pacific inflow transforms fixed nitrogen to N_2 on the Bering Sea shelf. From the negative N^* value and lower concentration ratio of (nitrate plus nitrite plus ammonium) to phosphate in the Chukchi Sea that it is inferred the loss of fixed nitrogen in the water-sediment interface will increase nitrogen limitation to the Arctic Ocean phytoplankton growth.

Key word: Pacific inflow; nutrients; denitrification; Bering Strait; Chukchi Sea