论文

东南极普里兹湾浮游植物群落和叶绿素 α 变化与 ENSO 的联系及其预测意义张海生^{①②*}, 韩正兵^{①②}, 赵军^{①②}, 于培松^{①②}, 扈传昱^{①②}, 孙维萍^{①②}, 杨丹^{①②}, 朱根海^{①②}, 卢冰^{①②}, Hans-Ulrich PETER^③, Walter VETTER^③

① 国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012;

② 国家海洋局海洋生态系统与生物地球化学重点实验室, 杭州 310012;

③ Institute of Ecology, Friedrich Schiller University, Jena, D-07743, Germany

* E-mail: zhangsoa@163.com

收稿日期: 2013-09-11; 接受日期: 2014-01-24; 网络版发表日期: 2014-07-15

国家自然科学基金项目(批准号: 40876104, 41076134, 41306202, 41376193)和国家海洋局第二海洋研究所基本科研业务费(编号: JT1208, JG1217, JG1218)资助

摘要 对中国南极科学考察现场(普里兹湾)实测浮游植物和叶绿素 α 历史数据(1990~2002 年)进行整合研究, 显示在厄尔尼诺/拉尼娜期间, 普里兹湾海水温度、盐度、营养盐和含氧量等发生了很大变化, 生态系统对于环境变化的反应已通过组成生态系统的生物群落变动反映出来, 在厄尔尼诺期间明显改变了叶绿素 α 浓度和浮游植物群落结构比例, 硅藻相对比例增高, 甲藻降低; 在拉尼娜期间硅藻比例有降低趋势、金藻和蓝藻类呈显著增加, 海湾种群变动又直接影响群落的生物多样性, 同时表现出极地海洋生态对海洋环境变化的敏感性. 同时利用卫星遥感数据 2002~2011 年(12 月至 3 月)时段进行联合研究, 对普里兹湾卫星遥感叶绿素 α 与海表温度的月际变化特征研究, 发现普里兹湾叶绿素 α 月际变化和浮游植物的旺发开始、结束时间存在明显差异, 并对应着海冰消融、厄尔尼诺/拉尼娜事件和正常年份. 研究发现南极海域叶绿素 α 表征的浮游植物旺发开始时间提前于海表温度的变化, 或浮游植物的旺发结束时间滞后于海表温度的变化, 或浮游植物的旺发开始、结束时间与海冰消融、海表温度的变化相一致. 研究还发现, 在湾内陆架区浮游植物的旺发开始时间与封冰消融(水域面积大小)相对应, 这在一定程度上对 ENSO 的发生具有预报意义.

关键词南极普里兹湾
浮游植物
叶绿素 α
海冰消融
厄尔尼诺/拉尼娜
卫星遥感数据

随着对 ENSO(厄尔尼诺/拉尼娜)的了解, 科学家开始注意到厄尔尼诺/拉尼娜对海洋浮游生物种群的影响(Yoder 和 Kennelly, 2003), 发现浮游植物生长快

慢和群落结构变化与全球气候变暖和厄尔尼诺/拉尼娜密切相关(Gloersen, 1995; 江爱良, 2000; Corwith 和 Wheeler, 2002; Whitney 和 Welch, 2002; Behrenfeld

中文引用格式: 张海生, 韩正兵, 赵军, 等. 2014. 东南极普里兹湾浮游植物群落和叶绿素 α 变化与 ENSO 的联系及其预测意义. 中国科学: 地球科学, 44: 1701-1712

英文引用格式: Zhang H S, Han Z B, Zhao J, et al. 2014. Phytoplankton and chlorophyll α relationships with ENSO in Prydz Bay, East Antarctica. Science China: Earth Sciences, doi: 10.1007/s11430-014-4939-8

等, 2006; Harris 等, 2009; Reiss 等, 2009); Murtugudde 等(1999)和 McClain 等(2004)研究发现, 海洋初级生产力异常变化与厄尔尼诺/拉尼娜多元指数(Multivariate ENSO Index)高度相关, 海洋生态响应年际尺度变化与厄尔尼诺/拉尼娜相关尤为突出; Behrenfeld 等(2001)利用水色卫星遥感数据反演得到 1997~2006 年的全球海洋叶绿素 α 和海洋初级生产力变化趋势, 发现全球不同纬度海域生态响应不同, 总趋势受到厄尔尼诺/拉尼娜气候强迫所致。

海冰是极地海洋状况的最显著特征, 海冰生消伴随潜热变化。中国学者很早就提出东南极普里兹湾海冰与 ENSO 之间的某种关联(卞林根, 1988; 解思梅等, 1992; 程彦杰等, 2003; 陈锦年等, 2004); 之后更多证据表明, 南极半岛西部、别林斯高晋海、罗斯海西部的海冰与厄尔尼诺/拉尼娜现象显著相关(Stammerjohn 等, 2008); Lizotte(2001)和 Reiss 等(2009)研究了 ENSO 现象与南极海域表层温度的年际变化和浮游植物生产量(叶绿素 α), 认为 ENSO 现象已经影响到南极某些海域的生态系统。这表明高纬度海区对全球性气候事件 ENSO 更为敏感些, 这种高纬度与低纬度之间对全球气候变化(ENSO)的响应与反馈机制, 尽管目前仍未定论, 但低纬度通过海洋环流和大气环流对高纬度海区的影响已经得到了普遍认可(Philander 等, 1984; McPhaden 等, 1998; 李崇银和穆明权, 1999; 陈锦年和王宏娜, 2009)。然而, 近期科学家在南极的相关研究取得了新认识(White 和 Peterson, 1996; Cai 和 Baines, 2001; 刘伟和杨学祥, 2004), 提出了 ENSO 循环过程与南极海冰存在一定的关系, 海冰关键区的异常变化(海冰减少)引起温度、气压和风场的响应而影响洋流, 进而对 ENSO 的发生、发展产生影响, 而且前者(ENSO)明显滞后; 南极海冰范围异常增加或减少, 直接影响南极绕极流(ACC)的冷暖结构和经向输送, 对 ENSO 事件发生起到推动作用。Yuan(2004)提出了高纬 ENSO 遥相关与海冰响应机制的概念假设。南极海洋在 ENSO 这个复杂的海-气相互作用中究竟扮演了怎样角色? 特别是东南极海冰变化与 ENSO 循环过程较为密切, 更值得我们做进一步的探索研究。

本文利用中国南极科学考察现场(普里兹湾)浮游植物实测的历史数据(1990~2002 年时段)进行整合研究, 特别是对浮游植物群落种群和浮游植物生产量(叶绿素 α)与厄尔尼诺/拉尼娜这一全球性事件的相

关研究, 并与(2002~2011 年时段)卫星遥感数据叶绿素 α 浓度、海表温度和海冰消融等联合研究, 以获得更多的与 ENSO 有内在联系的证据, 特别对南极海洋夏季浮游植物旺发(水华)对海表温度、封冰融化的响应, 进而为研究南极海洋对全球变暖的响应与反馈提供新认识, 特别是进一步为 ENSO 触发机制(南极海冰机制)提供新的理论依据, 为我们的预测能力打下基础。

1 研究海域

普里兹湾位于南大洋的印度洋扇区, 是南极大陆仅次于威德尔海和罗斯海的第三大海湾(东南及最大)。它西与弗拉姆浅滩相邻, 东毗邻澳大利亚戴维斯站, 南面与埃默里冰架相连, 1990~2002 年对普里兹湾浮游植物、叶绿素 α 、营养物质的现场实测和中国南大洋调查研究进行的(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的历年考察文献资料)。图 1 为 2001/2002 年和 2010, 2011 年南极夏季普里兹湾采样站位图。

2 研究方法

2.1 浮游植物采样和鉴定

用 ROSETTE 采水器在选择深度——表层, 25, 50, 100, 150 和 200 m 水层采集水样供分析营养物质浓度和叶绿素 α 浓度; 采集表层水样 500 cm³立即用中性福尔马林固定保存, 用于计算浮游植物分析鉴定。在实验室使用 Olympus-VANOX-AHB:LB-显微镜(日产)观察、鉴定和计数, 所有操作按《海洋调查规范》进行。

2.2 营养盐现场测试方法

1990~2011 年航次测定了五项营养盐(磷酸盐、硅酸盐、硝酸盐、亚硝酸盐和铵盐), 采集水样经 0.45 μ m 孔径的醋酸纤维膜过滤后, 使用 7230G 型分光光度计对滤液进行测定, 测定方法见 GB12763.4-91。测量过程中所用标准溶液均由国家海洋局第二海洋研究所标准物质中心生产(CBW0817-08645)。

2.3 叶绿素 α 实测方法

1990~2011 年航次叶绿素 α 测定采用萃取荧光法(GB12763.6), 采用 GF/F 滤膜过滤一定体积的水样(100~500 cm³), 将滤膜放入 90%的丙酮:水=90:10在

图 1 2001/2002 年(红点)和 2010/2011 年(蓝方块)南极普里兹湾采样站位图

-20℃的冰箱内萃取 24 h 后, 用唐纳荧光计进行测定。

2.4 水色遥感叶绿素 α 和海表温度数据

南极地区由于环境恶劣, 海洋观测集中在夏季, 资料连续性较差, 因而使得传统的研究方法受到很大的限制。通过美国国家航天航空局(NASA)地球科学数据分析处理和可视化系统 GIOVANNI 下载 SeaWiFS 卫星获得(时间范围为 2001~2011 年)海洋表层水叶绿素 α 浓度(由于 2008 年传感器出现问题后, 选用 MODIS-Aqua 卫星数据和 MODIS-Terra 卫星获得海水表层温度资料, 并与实测表层海水叶绿素 α (空间选定雪龙号现场实测区域为 65~80°E/60~70°S 范围)进行连接、对比研究, 误差小于 15%, SeaWiFS 遥感数据在相当程度上能较好反映叶绿素 α 的分布趋势。

3 讨论与结果

本文将厄尔尼诺、拉尼娜和正常年份划分为 3

个等级, 给出了事件的起始和结束时间(月份)、持续时间(月数)以及对厄尔尼诺/拉尼娜事件划分为强、中、弱三个等级。从 1990~2012 年一共发生了 9 次厄尔尼诺、5 次拉尼娜事件, 根据世界气象组织报告, 近十年来频繁的厄尔尼诺和拉尼娜交替发生给世界带来各种极端天气。

3.1 实测环境因子、浮游植物和叶绿素 α 与厄尔尼诺/拉尼娜的联系

本文利用普里兹湾有限的 7 个年份的实测资料(水温、盐度、溶解氧、营养盐与浮游植物群落、叶绿素 α 浓度及浮游植物现存生产量)研究生态环境变化对厄尔尼诺/拉尼娜的响应。一般来说, 厄尔尼诺/拉尼娜通过大气遥响应过程使海洋表层温度、盐度和含氧量产生异常, 而海洋生物多为狭盐性和狭氧性, 所以厄尔尼诺/拉尼娜使海洋生物渗透压及温度调节出现问题, 影响其生理活动及最终改变了若干浮游

植物群落结构和细胞丰度分布模式。

由表 2 可看出, 海湾各项环境因子在不同年份, 其年间变异性十分显著, 通过各项因子与正常年份比较, 在厄尔尼诺/拉尼娜期间各环境因子一致表现出明确的对应关系。1991-03~1992-06 和 1993-02~09 发生了中强度厄尔尼诺事件, 2 次现场考察(1991-12~1992-01 和 1992-12~1993-02)实测表层平均温度各为 $(0.38\pm0.84)^{\circ}\text{C}$ (湾内 $(1.56\pm1.74)^{\circ}\text{C}$)、 $(0.49\pm0.75)^{\circ}\text{C}$ (湾内 $(0.82\pm1.10)^{\circ}\text{C}$, 东北区 $(1.12\pm0.13)^{\circ}\text{C}$), 比正常年份的海温要高一些, 与一般认为厄尔尼诺现象发生时、海洋温度会升高相吻合; 盐度各为 (33.63 ± 0.35) 和 (33.69 ± 0.46) (含盐量偏低, 这种变化与气候变暖的海冰融化有关), 溶解氧为 (505.0 ± 16.9) 和 $(511.3\pm28.8) \mu\text{mol dm}^{-3}$ 在厄尔尼诺期间有一定程度的上升, 硝酸盐为 (23.3 ± 4.32) 和 $(22.36\pm5.37) \mu\text{mol dm}^{-3}$, 磷酸盐为 (1.53 ± 0.30) 和 $(1.51\pm0.43) \mu\text{mol dm}^{-3}$, 硅酸盐为 $(39.41\pm8.48) \mu\text{mol dm}^{-3}$ 。

1997 年 5 月至 1998 年 6 月发生 20 世纪最强的厄尔尼诺事件, 1998 年是有气象记录以来最热的一年, 紧随其后 1998 年 6 月至 2000 年 8 月发生了持续两年的最强的拉尼娜事件, 1998 年 6 月至 2000 年 8 月发生的拉尼娜整个生命期 28 个月, 2000 年 11 月至 2001 年 3 月发生的拉尼娜整个生命期为 5 个月, 现场考察(1998-12~1999-01 和 2000-01)正处于拉尼娜过程之中, 海湾实测温度为 (-1.13 ± 0.66) 和 -1.20°C , 比正常年份的海温要低一些, 与一般认为拉尼娜现象发生时, 海洋温度会降低相吻合; 盐度为 (33.81 ± 0.31) 和 (34.56 ± 0.25) , 溶解氧为 (721.0 ± 55) 和 $(726.0\pm17.8) \mu\text{mol dm}^{-3}$, 溶解氧的含量在拉尼娜期间明显上升, 硝酸盐为 (25.89 ± 5.50) 和 $(27.1\pm8.33) \mu\text{mol dm}^{-3}$, 磷酸盐为 (1.84 ± 0.59) 和 $(1.61\pm0.24) \mu\text{mol dm}^{-3}$, 硅酸盐为 (54.43 ± 8.11) 和 $(56.9\pm10.00) \mu\text{mol dm}^{-3}$, 2 次拉尼娜期间各项环境因子呈现出一致性的变化趋势。

对 2 次厄尔尼诺年期间(1991 年 3 月至 1992 年 6 月、1993 年 2 月/3 月至 1993 年 9 月)的现场实测浮游植物群落结构和叶绿素 α 浓度进行分析, 研究表明东南极海湾夏季浮游植物水华与 ENSO 之间有密切联系。1991 年 12 月至 1992 年 1 月调查期间经鉴定浮游植物共有 3 门 26 属 78 种, 其中硅藻 21 属 68 种(占 84.78%), 甲藻门 4 属 9 种(占 13.04%), 金藻门 1 属 1 种(占 2.17%)(朱根海等, 1995); 1992 年 12 月~1993 年 2 月观察期间经鉴定浮游植物共有 5 门 34 属 95 种,

其中硅藻 2 占 78.6%, 甲藻门占 15.0%, 金藻门类占 6.4%(宁修仁, 1998), 与正常年相比较, 厄尔尼诺期间巴克氏菱形藻(*Nitzschia barkleyi*)和圆柱菱形藻(*Nitzschia cylindrus*)迅速繁殖并占优势, 浮游植物种属和种类数显著减少, 表明了厄尔尼诺对南极海域浮游植物产生了显著的生态效应。对现场实测叶绿素 α 浓度进行分析, 1991 年 12 月至 1992 年 1 月现场实测叶绿素 α 各为 $(1.21\pm1.11) \text{mg m}^{-3}$ (湾内 $(2.89\pm1.62) \text{mg m}^{-3}$), 1992 年 12 月~1993 年 2 月为 $(1.79\pm2.18) \text{mg m}^{-3}$ (湾内 $(5.03\pm2.12) \text{mg m}^{-3}$)(宁修仁, 1998), 从表 1 可看出明显高于正常年。叶绿素 α 浓度与 POC 之间具有显著正相关性, 表明海域 POC 主要来自浮游植物的影响(扈传昱等, 2001)。浮游植物对海洋环境变动的响应不仅体现在生物量上, 而且还体现在叶绿素 α 粒级结构上, 在正常年叶绿素 α 微微型在 (0.52 ± 0.28) 和 $(0.53\pm0.89) \text{mg m}^{-3}$, 厄尔尼诺期间叶绿素 α 微微型提高到 (0.69 ± 0.72) 和 $(1.27\pm1.82) \text{mg m}^{-3}$, 由此可见海域温度变暖, 它们与水温协同作用, 只有粒级较小个体才能停留在真光层内完成其生活史, 因而在厄尔尼诺年微微型浮游植物更占优势。

从表 1 还可以看出, 浮游植物群落对冷事件(拉尼娜)的反应和对暖事件的反应一样灵敏, 从物种组成、丰度和优势种都发生了很大变化, 拉尼娜期间浮游短菱形藻迅速繁殖并占优势。根据 1998 年 12 月至 1999 年 1 月和 2000 年 1 月采集鉴定浮游植物种类组成经鉴定共有 5 门 20 个属 36 种, 其中硅藻 61.1%、甲藻 19.5%, 其他(金藻、蓝藻和隐藻)占 19.4%(蔡昱明等, 2005); 2000 年 1 月采集浮游植物经鉴定共 4 门 33 属 65 种(变种和变型), 硅藻占 70.50%, 甲藻占 7.0%, 金藻类和蓝藻类为 22.54%)(朱根海等, 1993)。在拉尼娜期间海湾浮游植物群落结构以硅藻门为主体, 与厄尔尼诺一致, 但所占比例不尽相同, 与正常年份相比较, 浮游植物种群数明显减少, 该结果表明许多浮游植物在面对气候变暖(变冷)及环境变化均显得很脆弱。

另外, 在该次拉尼娜结束以后, 2002 年 1 月/2 月现场观察未受到厄尔尼诺(2002 年 05 月至 2003 年 03 月)影响的正常年份, 该年份现场浮游植物鉴定结果与前 2 个正常年份(1989 年 12 月至 1990 年 1 月/3 月和 1990 年 12 月至 1991 年 1 月)明显不同, 但该正常年份浮游植物门类数没有增加, 但种群数明显增加, 硅藻比例相应减少为 68.6%、甲藻比例大幅增加到

表1 普里兹湾 1990~2002 年实测环境因子和浮游植物种群、相对丰度等与厄尔尼诺/拉尼娜的关联^{a)}

实测时间	正常年份	正常年份	中强度厄尔尼诺 (1991-03~1992-06)	中强度厄尔尼诺 (1993-02/03~1993-09)	强度拉尼娜 (1998-06~2000-07)	强度拉尼娜 (2000-11~2001-03)	正常年份 (2002-05~2003-03)
调查海区	1/1990~3/1990	12/1990~2/1991	12/1991~1/1992	12/1992~2/1993	12/1998~1/1999	1/2000	1/2002~2/2002
水温(°C)	63°~69°S 64°~80°E 0.40±1.13	62°S以南 68°~108°E -0.35±0.56	62°S以南 6°~103°E 0.38±0.84	62°S以南 58°~83°E 0.49±0.75	63°~69°12'S 70°~75°E -1.13±0.66	70°~75°30'E 62°~68°S -1.2	62°~69°S 60°30'E~76°45'E -0.2~-0.8
盐度(psu)	33.99±0.40	33.83±0.72	33.63±0.35	33.69±0.46	33.81±0.31	34.58±0.25	33.86±0.55
真光层厚度(m)	44.0±12.0	49.2±15.5	37.3±14.4	34.74±12.57	33.4±12.0	41.3±16.7	43.1±13.2
溶解氧(μmol dm ⁻³)	496.9±13.8	498.8±33.1	505.0±16.9	511.3±28.8	721.0±55	693.1±17.8	-
硝酸盐(μmol dm ⁻³)	26.38±8.32	28.25±5.67	23.30±4.32	22.36±5.37	25.58±5.69	29.79±8.33	26.79
磷酸盐(μmol dm ⁻³)	1.40±0.42	1.73±0.41	1.02±0.58	1.51±0.43	1.84±0.59	1.61±0.24	1.2~2.8
硅酸盐(μmol dm ⁻³)	36.91±7.41	50.27±11.64	36.05±15.93	-	54.43±8.11	39.58±10.00	-
Chl.a(μg dm ⁻³)	0.52±0.28	0.53±0.89	0.69±0.72	1.27±1.82	0.71±0.86	-	-
(Net)	0.20±0.12	0.52±0.92	0.53±0.48	0.53±0.55	0.65±0.63	-	-
(N+P)	0.72±0.35	1.05±1.25	1.21±1.11	1.79±1.18	1.36±1.41	1.33±1.38	0.77±1.08
(Sum)							
PR(mgm ⁻² h ⁻¹)	0.81±0.02	0.86±0.08	2.75±1.67	0.10~1.72	0.85±0.05	0.396±1.38	1.07±0.97
PP(mgm ⁻² d ⁻¹)	334.2±224.9	72.91~1704.72	22.47±2.02	25.2±170	468.5±13.0	272±250	166.7±2160.3
POC(μg dm ⁻³)	97.6±27.9	134.6±68.1	159.4±49.1	101.0±38.7	279.11	527.14	-
浮游植物种类数	5 门 46 属 145 种	5 门 40 属 122 种	3 门 26 属 78 种	5 门 34 属 95 种	5 门 20 属 36 种	4 门 33 属 65 种	3 门 37 属 86 种
优势种	<i>Nitzschia curta</i>	<i>Nitzschia cylindrus</i>	<i>Nitzschia barkleyi</i>	<i>Nitzschia cylindrus</i> , <i>Nitzschia barkleyi</i>	<i>Nitzschia curta</i>	<i>Nitzschia curta</i>	<i>Fragilariopsis kerguelensis</i>
平均细胞丰度(个 dm ⁻³)	10.8×10 ⁶	15.3×10 ⁴	116×10 ⁵	230.81×10 ²	22.5×10 ³	32.67×10 ³	8.8×10 ³
硅藻门	77.93%	73.0%	84.78%	78.6%	61.1%	70.50%	68.6%
甲藻门	14.48%	20.5%	13.04%	15.0%	19.5%	7.0%	30.2%
金藻门或其他	7.59%	6.5%	2.17%	6.4%	19.4%	22.50%	1.2%
硅藻/甲藻	5.38	3.56	6.52	5.24	3.13	10.07	2.27
资料来源	宁修仁(1998)	宁修仁(1998)	宁修仁(1998)	宁修仁(1998)	朱根海等(1993)	刘子琳等(2001)	孙军等(2003)

a) “-”为无数据资料

30.2%, 数量上以南大洋特有种克格伦拟脆杆藻 (*Fragilariop siskerguelensis*) 占绝对优势, 浮游植物种类数比前不久发生拉尼娜时期的种类数显著增多, 这就意味着在拉尼娜发生时期种群数量减少, 事件发生一段时间后, 海洋生态系统通过种群增殖得到一定恢复, 而此时生物周围的环境又可能发生着新变化, 这种时间交错和事件转换叠加效应所带来的后果, 尚需要进一步研究和探索。

海水中的溶解氧是海洋生命活动不可缺少的物质, 溶解氧与厄尔尼诺/拉尼娜事件都有很好的对应性, 浮游植物光合作用时产生大量氧, 厄尔尼诺期间硅藻大量繁衍茂盛, 故与正常年份相比海水中溶解氧呈过饱和状态, 含量为 (505.0 ± 16.9) 和 $(511.3 \pm 28.8) \mu\text{mol dm}^{-3}$, 而明显低于拉尼娜年(溶解氧含量 (721.0 ± 55) 和 $(726.0 \pm 17.8) \mu\text{mol dm}^{-3}$); 海湾盐度与温度相比规律不够明显, 但仔细观察, 仍有些规律可循, 厄尔尼诺期间普里兹湾海水盐度低于非厄尔尼诺年(正常年份和拉尼娜年), 南极海域这种盐度变化与低纬度海域非常一致, 尤其是与厄尔尼诺事件密切相关的热带太平洋地区降水变化(郭忠信, 1989; 龚道溢和王绍武, 1998, 1999), 太平洋地区是降水量增多相应稀释了海水盐度, 而在南极海洋, 增温导致冰架和海冰加速融化, 这些冰融淡水具有低盐特征, 此时海水中营养物质比非厄尔尼诺年明显偏低。硝酸盐与浮游植物细胞丰度关系密切, 呈负相关性, 可见普里兹湾海域若干浮游植物对厄尔尼诺/拉尼娜响应主要是通过水文状况(温盐、盐度变化)、溶解氧、营养盐的影响来体现生态效应的。

3.2 (2002~2011 年)实测和遥感叶绿素 α 变化与厄尔尼诺/拉尼娜的联系

叶绿素 α 是浮游植物光合作用的主要色素, 其浓度是表征海域浮游植物现存量与海洋初级生产力密切相关。一般来说, 南极 12 月封冰开始消融、温度上升、浮游植物开始-旺发; 1 月开阔水域的面积和叶绿素 α 浓度达到最高值; 2 月海面温度下降、开阔水域开始结冻、面积减少、叶绿素 α 浓度下降; 3 月份南极夏季结束, 表层海水温度持续下降, 直至冰封, 叶绿素 α 浓度进一步降低-结束。现场实测表层海水叶绿素 α 时空设定在南极科学考察期间夏季 2002~2011 年(12 月至 3 月)、选定雪龙号调查区域普里兹湾及邻近海域 $65^{\circ}\sim 80^{\circ}\text{E}/60^{\circ}\sim 70^{\circ}\text{S}$ 范围。美国国家航天航空局

(NASA)数据库下载 SeaWiFS 卫星获得(时间范围为 2001~2011 年)海洋表层水叶绿素 α 浓度和 MODIS-Terra 卫星获得海水表层温度资料, 水色遥感资料为我们进一步研究普里兹湾叶绿素 α 和海表温度提供了一个有效的时间序列, 水色遥感基于水色测出叶绿素 α 浓度的观察数据与实测表层海水叶绿素 α 浓度进行对比研究(误差小于 15%), 两者有较好的相关性($y=1.081x-0.077$, $R^2=0.835$), 表明遥感数据能较好反映叶绿素 α 的实际浓度。

表 2 现场实测叶绿素 α 、营养盐(硝酸盐、磷酸盐和硅酸盐)结合水色遥感叶绿素 α 和海表层平均温度联合研究与对比, 与世界大洋相比, 南大洋具有相对高的营养盐水平, 但其初级生产力却不高。研究区域划分为湾内陆架区、陆坡区和湾外深海区, 每个区域具有显著的空间区域化特征。2002~2011 年实测叶绿素 α 在湾内陆架区为 $2.72\sim 5.28 \text{ mg m}^{-3}$ (平均 3.41 mg m^{-3}), 整个湾内陆架区的叶绿素 α 浓度呈现出由湾内向湾外递减的变化特征; 2002~2011 年在湾内陆架区、陆坡区和湾外深海区的硝酸盐、磷酸盐和、硅酸盐浓度分布趋势呈湾内向海增加, 与叶绿素 α 浓度呈相反的分布趋势, 这是由于浮游植物繁盛大量消耗营养盐所致, 但营养盐不是南极域浮游植物繁殖生长的限制因子, 可能还存在更关键因素在制约浮游植物的繁殖。

2002~2011 年卫星遥感数据计算得出湾内陆架区海表温度为 $-1.19\sim -0.01^{\circ}\text{C}$ (平均 -0.67°C)、陆坡区遥感海表温度为 $-1.37\sim -0.36^{\circ}\text{C}$ (平均 -0.76°C)、湾外深海区遥感海表温度为 $-0.25\sim -0.57^{\circ}\text{C}$ (平均 0.18°C)、远比湾内陆架区和陆坡区海表温度高, 这是由于在 64°S 存在东西向的温盐锋面; 水色遥感叶绿素 α 浓度与现场实测有相应趋势, 水色遥感叶绿素 α 在湾内陆架区为 $0.79\sim 2.31 \text{ mg m}^{-3}$ (平均 1.40 mg m^{-3})、陆坡区遥感叶绿素 α 为 $0.18\sim 0.90 \text{ mg m}^{-3}$ (平均为 0.44 mg m^{-3})、湾外深海区遥感叶绿素 α 为 $0.15\sim 0.34 \text{ mg m}^{-3}$ (平均 0.25 mg m^{-3}), 相比现场观察数据, 卫星遥感数据能够获取整个研究海域周、月、年际尺度的叶绿素 α 和海表温度(Marrari 等, 2006; Uitz 等, 2006), 弥补了走航实测数据分散、缺失, 更利于对厄尔尼诺/拉尼娜现象对生态影响的分析和研究。

厄尔尼诺、拉尼娜年份的统计在时间上尺度较大, 因此利用多变量厄尔尼诺指数(MEI)来研究浮游植物生产量(叶绿素 α)与厄尔尼诺两者之间的关系。图 2

表 2 2001~2011 年现场实测叶绿素 a 和营养盐与遥感数据叶绿素 a、海表温度^{a)}

研究区域	现场调查时间	2001/2002	2002/2003	2003/2004	2004/2005	2005/2006	2006/2007	2007/2008	2008/2009	2009/2010	2010/2011
湾内陆架区	实测叶绿素 $a(\text{mg m}^{-3})$	2.37	—	—	2.35	3.99	—	2.72	2.82	5.28	4.35
	实测硝酸盐 $(\mu\text{mol dm}^{-3})$	23.45	17.82	—	19.38	13.38	—	17.64	17.88	16.48	19.10
	实测磷酸盐 $(\mu\text{mol dm}^{-3})$	1.36	1.15	—	2.28	1.32	—	1.34	0.76	2.30	0.97
	实测硅酸盐 $(\mu\text{mol dm}^{-3})$	41.54	38.60	—	27.72	22.90	—	38.52	30.03	61.54	45.69
	遥感叶绿素 $a(\text{mg m}^{-3})$	1.08	1.69	1.55	1.14	1.42	1.35	1.30	1.41	2.31	0.79
	遥感表层海温 $(^{\circ}\text{C})$	-1.19	-0.30	-0.20	-0.81	-0.65	-1.00	-1.14	-0.43	0.01	-0.95
陆坡区	实测叶绿素 $a(\text{mg m}^{-3})$	0.2	—	—	0.39	0.52	—	1.80	0.34	1.39	0.66
	实测硝酸盐 $(\mu\text{mol dm}^{-3})$	29.03	22.48	—	25.50	33.87	—	21.98	31.71	18.74	35.48
	实测磷酸盐 $(\mu\text{mol dm}^{-3})$	2.19	1.50	—	2.93	2.67	—	1.74	1.31	1.94	2.03
	实测硅酸盐 $(\mu\text{mol dm}^{-3})$	60.16	46.63	—	50.76	54.45	—	39.74	43.14	59.22	59.55
	遥感叶绿素 $a(\text{mg m}^{-3})$	0.18	0.90	0.50	0.19	0.27	0.44	0.37	0.39	0.88	0.27
	遥感表层海温 $(^{\circ}\text{C})$	-0.91	-0.37	-0.42	-0.75	-0.61	-1.25	-1.15	-0.41	-0.36	-1.37
湾外深海区	实测叶绿素 $a(\text{mg m}^{-3})$	0.16	—	—	0.18	0.22	—	0.55	0.17	0.23	0.29
	实测硝酸盐 $(\mu\text{mol dm}^{-3})$	30.51	26.35	—	29.77	34.23	—	23.23	34.18	30.82	31.96
	实测磷酸盐 $(\mu\text{mol dm}^{-3})$	2.32	2.07	—	2.80	2.69	—	1.89	1.64	2.47	1.70
	实测硅酸盐 $(\mu\text{mol dm}^{-3})$	48.19	53.09	—	46.99	48.17	—	41.91	47.81	75.17	53.80
	遥感叶绿素 $a(\text{mg m}^{-3})$	0.15	0.23	0.29	0.19	0.20	0.30	0.41	0.34	0.19	0.23
	遥感表层海温 $(^{\circ}\text{C})$	-0.20	0.57	0.48	0.51	0.08	-0.25	0.17	0.49	0.09	-0.17

a) “—”为无数据资料

图2 2001~2011年普里兹湾叶绿素 α 遥感均值与MEI时间对应序列图

图3 遥感叶绿素浓度与遥感海表温度相关关系图

为 2001~2011 年普里兹湾叶绿素 α 遥感均值与 MEI 时间对应序列图, 左侧坐标轴为 MEI 值, 根据 MEI 指数正值或负值的大小可划分厄尔尼诺/拉尼娜事件的强弱, 在此基础上研究表层海水叶绿素 α 浓度变化特征与 10 个年份遥相关型强度指数及厄尔尼诺的关系; 右侧坐标为普里兹湾内海域(72°~78°E, 67°~69°S)表层海水叶绿素 α 浓度(采用各年份夏季遥感平均值)。

尽管, 通过多年的海洋水色卫星观测在南北纬 50°之间的海域叶绿素 α 和海温出现反向变化(Martinez 等, 2009), 而在南极普里兹湾 67°~69°S 和 72°~78°E 及邻近海域, 2001~2011 年(12 月~3 月)叶绿素 α 与海表温度之间呈现出一致的变化趋势。在年际变化上, 两者也有明显的变化趋势, 图 3 利用 2001~2011 年(12 月~3 月)每个月遥感叶绿素 α 浓度平均值与遥感海表温度平均值之间的相关性, 结果表明两者具有良好的相关性(图 3)。

3.3 海温、海冰和浮游植物旺发与 ENSO 的联系及其前期征兆

海表温度、封冰消融和浮游植物群落变化能直接反映和捕捉气温变化和 ENSO 循环过程中留下痕迹及其海洋效应。本文利用卫星遥感数据海温、海冰密集度(杨光, 2011)、叶绿素 α 浓度对 1990~2002 年现场实测资料(表 2)作进一步细致研究, 可以发现在 1992 年 12 月至 1993 年 2 月现场考察正处于厄尔尼诺起始年 1993 年 2 月(也有人认定起始年在 3 月), 尽管厄尔尼诺事件认定标准有些差别, 但并不影响我们以下的讨论: 若是赤道太平洋厄尔尼诺发生在 2 月份, 那么南极普里兹湾海温已经明显变暖为(0.49±0.75)°C, 与赤道太平洋厄尔尼诺同步发生(起始年在

2 月份), 这意味着相距遥远的二者区域之间即存在某种必然关联——即所谓的“遥相关”。这种遥相关表明 ENSO 循环过程不仅与热带海洋自身的海-气相互作用存在密切关系, 而且与南极海冰也存在一定的联系(陈锦年等, 2004); 若赤道太平洋厄尔尼诺发生在 3 月份, 那么南极普里兹湾 2 月份海温就有明显增温迹象(通过 7 个年份的同期实测海温资料), 意味着该月的海温上升在先, 主要是受南极独特地理环境及南半球的大气和海洋环流引起、并不是受到赤道太平洋厄尔尼诺大气或海流传播的影响。

表 2 是 2002/2011 年卫星遥感数据叶绿素 α 与海表温度的月际(12~3 月)变化特征分析, 总体上普里兹湾海表温度是湾外深海区域高于湾内近岸区域, 联合研究表明叶绿素 α 浓度月际变化和浮游植物的旺发开始、结束时间有 3 种类型, 对应着海表温度、海冰密集度变化, 并与厄尔尼诺/拉尼娜事件存在某种联系。类型 I (图 4): 浮游植物群落在 12 月份就开始旺发(旺发区域主要集中在冰间湖区域), 叶绿素 α 浓度与 1 月份相当(2002/2003, 2004/2005), 或高于 1 月份(2006/2007, 2009/2010), 浮游植物旺发开始时间提前于海表温度的变化, 并对应着厄尔尼诺事件的起始与结束过程中(2002-12~2003-03, 2004-10~2005-05, 2006-08~2007-02 和 2009-10~2010-03), 2005 年 12 月中旬海湾近岸的海冰密集度为 70%~80%至 10%~30%、陆坡区域为 90%~40%; 2006 年 12 月中旬海湾近岸、陆坡区域海冰密集度为 90%~100%至 70%~80%。类型 II: 浮游植物于 1 月开始旺发, 叶绿素 α 浓度达到最高值, 且远高于 12 月、2 月(2001/2002, 2005/2006), 浮游植物的旺发开始、结束时间与海表温度的变化相一致,

图 4 2002 年 12 月至 2003 年 3 月普里兹湾叶绿素和地表温度遥感月均分布图

(a), (c), (e), (g) 叶绿素 a (mg m^{-3}); (b), (d), (f), (h) 地表温度 ($^{\circ}\text{C}$). 类型 I

图5 2010年12月至2011年3月普里兹湾叶绿素和海表温度遥感月均分布图

(a), (c), (e), (g)叶绿素 $\alpha(\text{mg m}^{-3})$; (b), (d), (f), (h)海表温度($^{\circ}\text{C}$). 类型III

对应着正常年份(以上年份的 12 月至 3 月份均不在 ENSO 过程中), 2002 年 12 月中旬近岸的海冰密集度为 90%~100%至 20%~30%、陆坡区域为 40%~60%至 0、深海区域为 40%~60%至 0. 类型 III(图 5): 浮游植物于 1 月份开始旺发, 叶绿素 α 浓度大小与高低范围与 2 月接近, 但高于 12 月份(2007/2008, 2008/2009, 2010/2011), 浮游植物的旺发结束时间滞后与海表温度的变化, 并对应着拉尼娜事件的起始与结束过程中(2007-08~2008-04, 2008-12~2009-03, 2010-09~2011-03). 通过以上联合研究可以发现, 在正常年和拉尼娜年份浮游植物在 1 月开始旺发, 而在厄尔尼诺年份里浮游植物在 12 月就开始提前旺发, 旺发开始时间提前于海表温度的变化, 特别是 2002 年 12 月/2003 年 1~3 月, 赤道太平洋厄尔尼诺起始于 2002 年 12 月, 在 2003 年 3 月结束, 这也同样意味着南极普里兹湾浮游植物旺发与赤道太平洋厄尔尼诺起始月份同步, 以上表明普里兹湾浮游植物旺发超前或滞后于海表温度的年际变化, 对 ENSO 的发生在一定程度上具有预报意义.

值得特别关注的是, 封冰融化与海表温度变化相一致, 并与同时期厄尔尼诺/拉尼娜事件相对应. 新迹象显示南极德雷克海峡正在经历异常变暖过程, 近 30 年来太平洋环流减慢与南极海冰减少相对应, 凸显德雷克海峡冰退/冰进在海洋环流和全球气候变化中的作用(McPhaden 和 Zhang, 2002), 并与同时期厄尔尼诺/拉尼娜事件相对应, 故提出南极海冰开关可能是激发 ENSO 的重要机制之一(Frakes, 1979; Koutavas 等, 2002; Stott 等, 2002). 中国学者杨学祥(2003)、刘伟等(2004)、杨冬红等(2007)明确提出过德雷克海峡“海冰开关”效应的概念, ENSO 发生与前期南极关键区海冰进/退有着重要联系, 并且这种信号具有一定程度上的前兆响应关系(杨学祥, 2003; 杨

东红和杨学祥, 2007); 古气候资料提供了南极海冰、南极环流与全球气候相关的更可信的证据, 德雷克海峡海冰消长直接调节全球气候冷暖变化(Lea, 2002; Scher 和 Martin, 2008). 以上研究反映了南极海冰开关可能是触发 ENSO 的重要机制之一. 尽管, 目前该机制尚需进一步的认识和求证, 但是南极海冰开关的发现——意味着已经打开了认识新机制的途径. 南极海洋在 ENSO 这个复杂的海-气相互作用中究竟扮演了怎样角色? 更值得我们做进一步的探索研究.

4 结论

(1) 根据 1990~2002 年实测资料研究显示, 在厄尔尼诺/拉尼娜期间, 普里兹湾海水温度、盐度、营养盐和含氧量等发生了很大变化, 生态系统对于环境变化的反应已通过组成生态系统的生物群落变动反映出来, 其响应程度与厄尔尼诺/拉尼娜发生和结束的时间、强度有关. 在厄尔尼诺期间明显改变了叶绿素 α 浓度和浮游植物群落结构比例, 硅藻相对比例增高、甲藻降低; 在拉尼娜期间硅藻比例有降低趋势、金藻和蓝藻类呈显著增加, 海湾种群变动又直接影响群落的生物多样性.

(2) 结合卫星遥感数据 2002~2011 年(12 月~3 月)叶绿素 α 与海表温度的月际变化特征分析, 普里兹湾叶绿素 α 月际变化和浮游植物的旺发开始、结束时间有 3 种类型, 并对应着厄尔尼诺/拉尼娜事件和正常年份. 叶绿素 α 表征的浮游植物旺发开始时间提前于海表温度的变化, 或浮游植物的旺发结束时间滞后于海表温度的变化, 或浮游植物的旺发开始、结束时间与海表温度的变化相一致, 在一定程度上均对 ENSO 的发生具有预报意义.

参考文献

- 卞林根. 1988. 南极海冰的变动与赤道 SST 的关系. 应用气象学报, 2: 219~222
- 蔡昱明, 宁修仁, 朱根海, 等. 2005. 南极普里兹湾浮游植物现存量与初级生产力粒级结构和新生产力研究. 海洋学报, 27: 135~147
- 陈锦年, 褚健婷, 许兰英. 2004. ENSO 循环过程与南极海冰变化. 水科学进展, 15: 56~60
- 陈锦年, 王宏娜. 2009. 西太平洋暖池热状态变化特征及其东传过程. 海洋与湖沼, 6: 669~673
- 程彦杰, 陆龙骅, 卞林根, 等. 2003. 南极半岛地区气温与南极海冰涛动、ENSO 的联系. 极地研究, 15: 121~128
- 龚道溢, 王绍武. 1998. 南北半球副热带高压对赤道东太平洋海温变化的响应. 海洋学报, 20: 44~54
- 龚道溢, 王绍武. 1999. 近百年全球变化中的 ENSO 分量. 地球科学进展, 14: 518~523
- 郭忠信. 1989. 厄尔尼诺时期北部湾表层水温和盐度的异常. 热带海洋学报, 8: 52~57
- 扈传昱, 张海生, 潘建明, 等. 2001. 夏季普里兹湾碳的生物地球化学循环 II: POC 的分布特征. 极地研究, 13: 196~204
- 江爱良. 2000. ENSO 事件及其对全球生态环境的影响. 成都气象学院学报, 15: 46~52

- 解思梅, 张林, 薛振和, 等. 1992. 南极海冰异常与异常海洋大气物理事件. 中国地球物理学会第八届学术年会论文集, 1: 319
- 李崇银, 穆明权. 1999. 厄尔尼诺的发生与赤道西太平洋暖池次表层海温异常. 大气科学, 23: 513–521
- 刘伟, 杨学祥. 2004. 厄尔尼诺的三个调控器. 吉林大学学报(地球科学版), 34: 456–458
- 刘子琳, 蔡昱明, 宁修仁, 等. 2001. 1999/2000 年夏季南极普里兹湾及湾口区叶绿素 a 和初级生产力. 极地研究, 13: 1–12
- 宁修仁. 1998. 南大洋特定海域浮游植物和初级生产力结构研究. 中国海洋学文集(9). 北京: 海洋出版社. 1–79
- 孙军, 刘东艳, 宁修仁, 等. 2003. 2001/2002 年夏季南极普里兹湾及其邻近海域浮游植物. 海洋与湖沼, 34: 519–532
- 杨冬红, 杨学祥. 2007. 澳大利亚夏季大雪与南极海冰三个气候开关. 地球物理学进展, 22: 1680–1685
- 杨光. 2011. 南极夏季普里兹湾浮游动物群落结构的年际变动和优势种摄食生态学研究. 博士学位论文. 青岛: 中国科学院海洋研究所
- 杨学祥. 2003. 太平洋环流速度减慢的原因. 世界地质, 22: 380–384
- 朱根海, 刘子琳, 宁修仁. 1993. 南极夏季普里兹湾及其毗邻南印度洋夏季微小型浮游植物的分布特征. 南极研究, 5: 73–85
- 朱根海, 宁修仁, 陈忠元, 等. 1995. 1991/1992 年夏季南极普里兹湾邻近海域网采浮游植物的聚类分析. 南极研究, 7: 38–41
- Behrenfeld M J, O'Malley R T, Siegel D A, et al. 2006. Climate-driven trends in contemporary ocean productivity. *Nature*, 444: 752–755
- Behrenfeld M J, Randerson J T, McClain C R, et al. 2001. Biospheric primary production during an ENSO transition. *Science*, 291: 2594–2597
- Cai W, Baines P G. 2001. Forcing of the Antarctic circumpolar wave by El Niño-Southern Oscillation teleconnections. *J Geophys Res*, 106: 9019–9038
- Corwith H L, Wheeler P A. 2002. El Niño related variations in nutrient and chlorophyll distributions off Oregon. *Prog Oceanogr*, 54: 361–380
- Frakes L A. 1979. *Climates Throughout Geologic Time*. Amsterdam: Elsevier
- Gloersen P. 1995. Modulation of hemispheric sea-ice cover by ENSO events. *Nature*, 373: 503–506
- Harris S L, Varela D E, Whitney F W, et al. 2009. Nutrient and phytoplankton dynamics off the west coast of Vancouver Island during the 1997/98 ENSO event. *Deep Sea Research Part II: Topical studies in oceanography*, 56: 2487–2502
- Koutavas A, Lynch-Stieglitz J, Marchitto T M, et al. 2002. El Niño-like pattern in ice age tropical pacific sea surface temperature. *Science*, 297: 226–230
- Lea D W. 2002. The glacial tropical Pacific—Not just a west side story. *Science*, 297: 202–203
- Lizotte M P. 2001. The contributions of sea ice algae to Antarctic marine primary production I. *Am Zool*, 41: 57–73
- Marrari M, Hu C, Daly K. 2006. Validation of SeaWiFs chlorophyll a concentrations in the Southern Ocean: A revisit. *Remote Sens Environ*, 105: 367–375
- Martinez E, Antoine D, D'Ortenzio F, et al. 2009. Climate-driven basin-scale decadal oscillations of oceanic phytoplankton. *Science*, 326: 1253–1256
- McClain C R, Feldman G C, Hooker S B. 2004. An overview of the SeaWiFs project and strategies for producing a climate research quality global ocean bio-optical time series. *Deep Sea Research Part II: Topical studies in oceanography*, 51: 5–42
- McPhaden M J, Busalacchi A J, Cheney R, et al. 1998. The tropical ocean-global atmosphere observing system: A decade of progress. *J Geophys Res*, 103: 14169–14240
- McPhaden M J, Zhang D. 2002. Slowdown of the meridional overturning circulation in the upper Pacific Ocean. *Nature*, 415: 603–608
- Murtugudde R G, Signorini S R, Christian J R, et al. 1999. Ocean color variability of the tropical Indo-Pacific basin observed by SeaWiFs during 1997–1998. *J Geophys Res*, 104: 18351–18366
- Philander S G H, Yamagata T, Pacanowski R C. 1984. Unstable air-sea interactions in the tropics. *J Atmos Sci*, 41: 604–613
- Reiss C S, Hewes C D, Holm-Hansen O. 2009. Influence of atmospheric teleconnections and upper circumpolar deep water on phytoplankton biomass around elephant island, Antarctica. *Mar Ecol-Prog Ser*, 377: 51–62
- Scher H D, Martin E E. 2008. Oligocene deep water export from the north Atlantic and the development of the Antarctic circumpolar current examined with neodymium isotopes. *Paleoceanography*, 23: PA1205
- Stammerjohn S E, Martinson D G, Smith R C, et al. 2008. Trends in Antarctic annual sea ice retreat and advance and their relation to El Niño-Southern Oscillation and Southern Annular Mode variability. *J Geophys Res*, 113: C03S90
- Stott L, Poulsen C, Lund S, et al. 2002. Super ENSO and global climate oscillations at millennial time scales. *Science*, 297: 222–226
- Uitz J, Claustre H, Morel A, et al. 2006. Vertical distribution of phytoplankton communities in Open Ocean: An assessment based on surface chlorophyll. *J Geophys Res*, 111: C08005
- White W B, Peterson R G. 1996. An Antarctic circumpolar wave in surface pressure, wind, temperature and sea-ice extent. *Nature*, 380: 699–702
- Whitney F A, Welch D W. 2002. Impact of the 1997–1998 El Niño and 1999 La Niña on nutrient supply in the Gulf of Alaska. *Prog Oceanogr*, 54: 405–421
- Yoder J A, Kennelly M A. 2003. Seasonal and ENSO variability in global ocean phytoplankton chlorophyll derived from 4 years of SeaWiFs measurements. *Glob Biogeochem Cycle*, 17: 1112
- Yuan X. 2004. ENSO-related impacts on Antarctic sea ice: A synthesis of phenomenon and mechanisms. *Antarct Sci*, 16: 415–425