

文章编号: 1674-5566(2020)05-0789-12

DOI:10.12024/jsou.20190502648

## 2018 年夏季普里兹湾西侧痕量元素水平分布初探

高春梅<sup>1,2,3</sup>, 韩乃旭<sup>1</sup>, 朱国平<sup>2,4,5,6</sup>, 丁国栋<sup>1</sup>, 周梦潇<sup>2,4</sup>, 曹 樟<sup>1</sup>, 方 涵<sup>1</sup>,  
杨 行<sup>1</sup>

(1. 上海海洋大学 海洋生态与环境学院, 上海 201306; 2. 上海海洋大学 极地研究中心, 上海 201306; 3. 上海海洋大学 海洋环境监测与评价中心, 上海 201306; 4. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 5. 大洋渔业资源可持续开发省部共建教育部重点实验室, 上海 201306; 6. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306)

**摘 要:** 为了更好地了解痕量元素在南大洋海洋生物地球化学循环中的作用、分布以及可能的来源, 利用原子荧光和原子吸收分光光度法, 分别测定了普里兹湾西侧(62°S ~ 67°S 和 50°E ~ 72°E) 44 个站点的表层海水样品中铜、铅、镉和砷的含量。结果显示, 普里兹湾西侧水域表层海水铜、铅、镉和砷平均浓度分别为(1.440 ± 0.184) μg/L、(0.250 ± 0.037) μg/L、(0.060 ± 0.007) μg/L 和(3.520 ± 0.128) μg/L。通过进一步分析表明, 普里兹湾西侧表层海水中痕量元素的浓度处于较低水平且在此海域内浓度变化不大。并且, 叶绿素和盐度与铜、镉、砷和铅相关性及显著性并不明显, 且存在差异。此外, 普里兹湾西侧痕量元素的主要来源与冰雪融化、大气及由大陆所携带痕量微粒的输送、人为活动的增多以及浮游植物的分布和摄取等密切相关。

**关键词:** 南极; 普里兹湾; 痕量元素; 浮游植物; 生物地球化学循环

**中图分类号:** X 131      **文献标志码:** A

在海洋生物地球化学循环中, 海水中的某些痕量元素是生物体生命活动的必需营养物质以及海洋中各种过程的示踪剂, 如氧化还原反应、吸附和清除、有机体的生物吸收和再矿化、海底热液活动等<sup>[1]</sup>。南大洋是最大的营养物质分布区, 尽管浮游植物生长所需的主要营养物质(硝酸盐、磷酸盐和硅酸盐) 储量较大, 但其生物量和初级生产量却较低<sup>[2]</sup>。虽然南大洋远离人类, 但随着采样技术和海水中痕量元素处理方法的提高, 以及考虑到全球变化带来的影响和南大洋海洋环境变化敏感的特殊性, 近年来南大洋海水痕量元素及其影响机制也逐渐成为研究的热点<sup>[3-5]</sup>。

海洋系统中痕量元素分布因介质不同而有所差异, 例如在水媒介中, 悬浮微粒物质(生物和非生物) 和更高等的生物体, 在这些基质的内部, 金属能够以不同的化学形式形成各种各样的离子、化合物、复合体或与矿物质、有机固相有着密

切的联系<sup>[6]</sup>。此外, 自然过程中生物和非生物部分对痕量元素分布的影响对于研究痕量元素在海洋生物地球化学循环中的作用有着相当重要的意义。总的来讲, 南大洋关于痕量元素分布的研究可分为两大类: 第一类是探讨海洋环境控制痕量元素瞬时分布和空间分布的动态过程<sup>[7-8]</sup>; 第二类则研究涉及强调在生物活性方面扮演着重要角色的痕量元素, 例如铁和锰控制着浮游生物在高营养盐低叶绿素(HNLC) 区域的生物活动<sup>[9-10]</sup>。此外, 浮游植物是海洋生态系统中最大的初级生产者, 且温度是影响浮游植物群落比较关键的因素, 其群落结构直接影响海洋生态系统的结构和功能以及海洋中痕量元素的动态变化<sup>[11]</sup>, 然而在南大洋这种常年温度较低的环境中浮游植物的群落会受到很大的影响。另外, 痕量元素对浮游生物生产力有效限制的重要性一直被广泛地研究, 在其他痕量元素较低的情况下, 最初, 铁被认为是限制浮游植物生产力的一个主

收稿日期: 2019-05-13      修回日期: 2019-12-27

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1406801); 国家自然科学基金(41776185)

作者简介: 高春梅(1976—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为海洋环境化学。E-mail: cmgao@shou.edu.cn

通信作者: 朱国平, E-mail: gpzhu@shou.edu.cn

要因素<sup>[12]</sup>,随着其他痕量元素含量的升高,像铜和镉这样的金属元素也可能会抑制浮游植物的生长<sup>[13]</sup>。

普里兹湾西侧位于南极印度洋扇区。普里兹湾是我国南极科考的重点区域之一,关于普里兹湾以及南大洋其他海域痕量元素的研究,国内外均有相关报道。孙维萍等<sup>[14]</sup>研究了普里兹湾表层海水中铜、镉、锌的分布,发现表层海水中铜、镉的含量及分布受悬浮颗粒物、初级生产力及盐度等的影响,锌可能受到了一定程度的人类活动的影响,并且,得出铜和镉的浓度范围分别为 0.36 ~ 2.86  $\mu\text{g/L}$  和 0.020 ~ 0.594  $\mu\text{g/L}$ 。此外,还研究了普里兹湾颗粒物微量元素通量的来源组成及季节变化,发现铜、镉、锌、铅的通量以海洋生物源为主,且呈季节性变化,主要受冰雪融化的影响<sup>[15]</sup>。ILLUMINATI 等<sup>[3]</sup>研究了南极洲罗斯海海水中溶解组分、无机颗粒和浮游植物中镉、铅和铜的分布,发现金属浓度主要受浮冰融化和浮游植物活性的影响,并且,得出镉、铅和铜的浓度范围分别为 0.034 ~ 0.101  $\mu\text{g/L}$ 、0.042 ~ 0.104  $\mu\text{g/L}$  和 0.192 ~ 0.320  $\mu\text{g/L}$ 。本

研究主要是分析痕量元素在普里兹湾西侧海域表层海水的分布情况以及影响痕量元素分布变化的因素,以期能够更深层地了解痕量元素在海洋生物地球化学循环中的作用,为以后南极海洋生物资源开发和海洋环境研究提供更多的数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样站点

依托南极海洋生物资源开发利用项目,本研究水样采集于普里兹湾西侧(62°S ~ 67°S 和 50°E ~ 72°E)表层(5 m 左右),共设 44 个采样站点(图 1),采集时间为 2017 年 12 月 27 日至 2018 年 1 月 26 日,利用 2.5 L 有机玻璃采水器采取海水水样后,用 0.45  $\mu\text{m}$  酸酯滤膜(滤膜利用稀硝酸浸泡 24 h,用超纯水反复冲洗干净,烘干备用)。过滤后,加硝酸(优级纯)酸化固定至 pH < 2.0,水样保存于聚乙烯瓶(样品瓶需利用 1:3 硝酸溶液浸泡 24 h 以上,并用去离子水反复洗,放入干燥箱烘干后使用),将样品瓶密封冷藏保存。

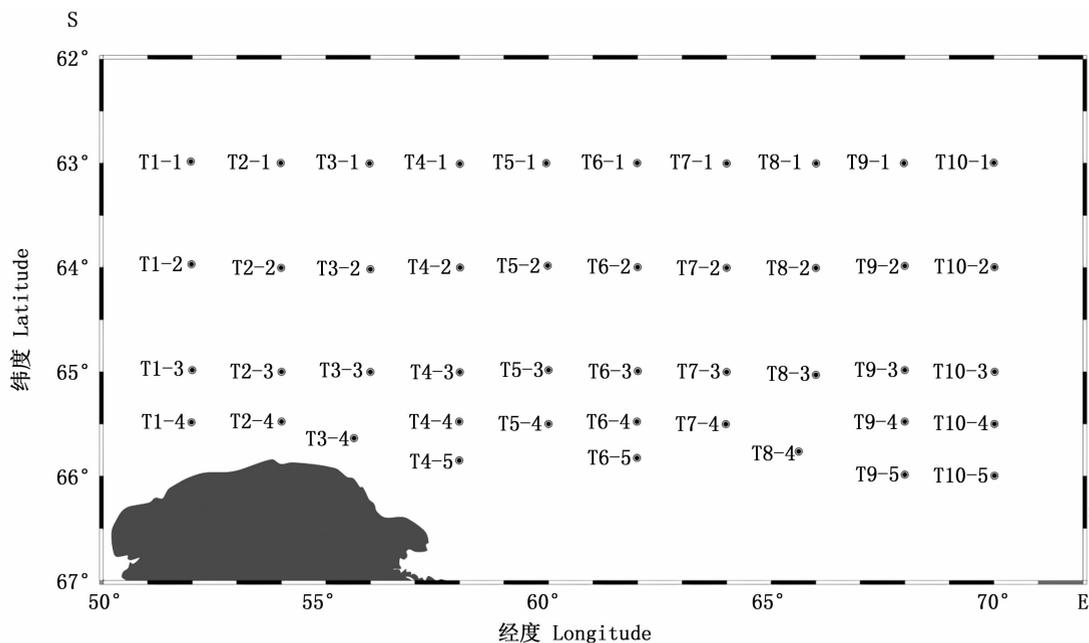


图 1 普里兹湾西侧采样站点图

Fig. 1 The sampling station on the west side of the Prydz Bay

### 1.2 分析方法

检测仪器为 AFS-2100 双道原子荧光光度

计,AS-900 石墨炉原子分光光度计。实验试剂均由国药集团化学试剂(上海)有限公司提供。所

有操作方法及所用试剂均严格根据海洋监测规范(GB 17378.4—2007)第四部分海水分析,铜、铅和镉采用无火焰石墨炉原子分光光度法,砷采用原子荧光法,实验所用玻璃器皿均用 1:3 硝酸浸泡至少 24 h 以上,并用去离子水反复冲洗,所有操作均在洁净的实验室进行。叶绿素和盐度数据利用 MODIS 卫星数据获取。

## 2 结果

### 2.1 铜

铜在普里兹湾西侧夏季表层海水中的平均浓度为  $1.44 \mu\text{g/L}$ ,图 2 为铜元素的水平分布情况,从经度上显示,  $50^\circ\text{E}$  向东部海域铜浓度逐渐升高,  $60^\circ\text{E}$  左右达到最大

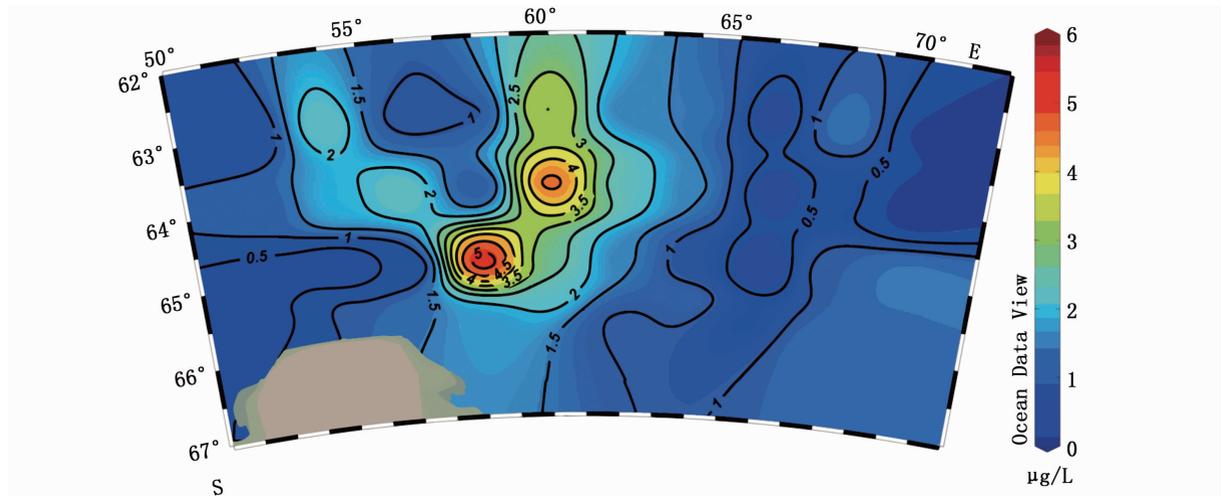


图 2 2018 年夏季普里兹湾西侧表层海水中溶解铜的分布

Fig. 2 Distribution of dissolved copper in surface seawater on the west side of the Prydz Bay in the austral summer 2018

值,之后,铜的浓度开始递减,但是东侧普里兹湾湾口附近铜浓度有升高的趋势。从纬度上显示,在此海域东部铜浓度变化不大,然而在西部有大陆延伸出来的海域,高浓度的铜主要集中在  $63^\circ\text{S} \sim 65^\circ\text{S}$  之间。

### 2.2 铅

铅在普里兹湾西侧夏季表层海水中的平均浓度为  $0.25 \mu\text{g/L}$ ,图 3 为铅元素的水平分布情况,铅在此海域浓度起伏变化较大,在图中可以明显看到 3 处浓度较高的海域,分别位于  $(63^\circ\text{S}, 59^\circ\text{E})$  和  $(64^\circ\text{S}, 66^\circ\text{E})$ 、 $(66^\circ\text{S}, 66^\circ\text{E})$  附近海域,其余海域铅浓度较低。此外,靠近大陆架边缘铅显现出较低的浓度,而靠近普里兹湾湾口海域显现出较高的铅浓度。

### 2.3 镉

镉在普里兹湾西侧夏季表层海水中的平均浓度为  $0.06 \mu\text{g/L}$ ,图 4 为镉元素的水平分布情

况,镉在  $(62.5^\circ\text{S}, 58^\circ\text{E})$  和  $(63^\circ\text{S}, 66^\circ\text{E})$  附近海域浓度较低,然而高浓度的镉分布在  $(65.5^\circ\text{S}, 64^\circ\text{E})$  和  $(66^\circ\text{S}, 51^\circ\text{E})$  附近海域,整体变化趋从中部海域向东南海域和西南海域递增。此外,从经度上显示,东部海域镉的平均浓度高于西部海域,从纬度上显示,靠近陆架边缘的高纬度相较于低纬度海域具有更高的镉浓度分布。

### 2.4 砷

砷在普里兹湾西侧夏季表层海水中的平均浓度为  $3.52 \mu\text{g/L}$ ,图 5 为砷元素的水平分布情况,从分布图中明显看到砷在  $(65.5^\circ\text{S}, 64^\circ\text{E})$  和  $(66.5^\circ\text{S}, 71^\circ\text{E})$  附近海域浓度较低,然而在  $(63.5^\circ\text{S}, 58^\circ\text{E})$  和  $(66^\circ\text{S}, 68^\circ\text{E})$  附近海域浓度较高,从经度上显示,此海域整体上显示出砷的平均浓度东部海域高于西部海域,在纬度上显示,高纬度海域砷的平均浓度低于低纬度。

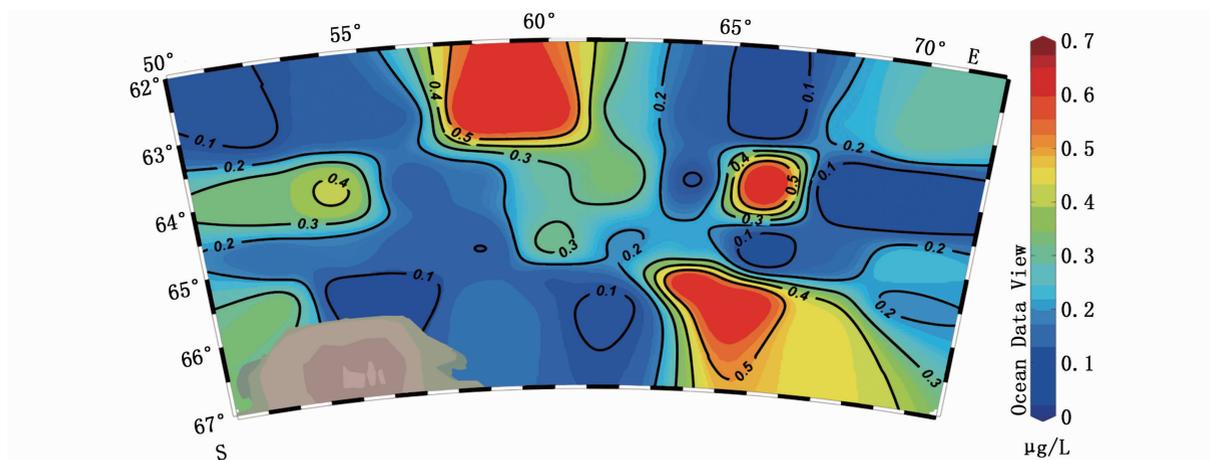


图3 2018年夏季普里兹湾西侧表层海水中溶解铅的分布

Fig. 3 Distribution of dissolved lead in surface seawater on the west side of the Prydz Bay in the austral summer 2018

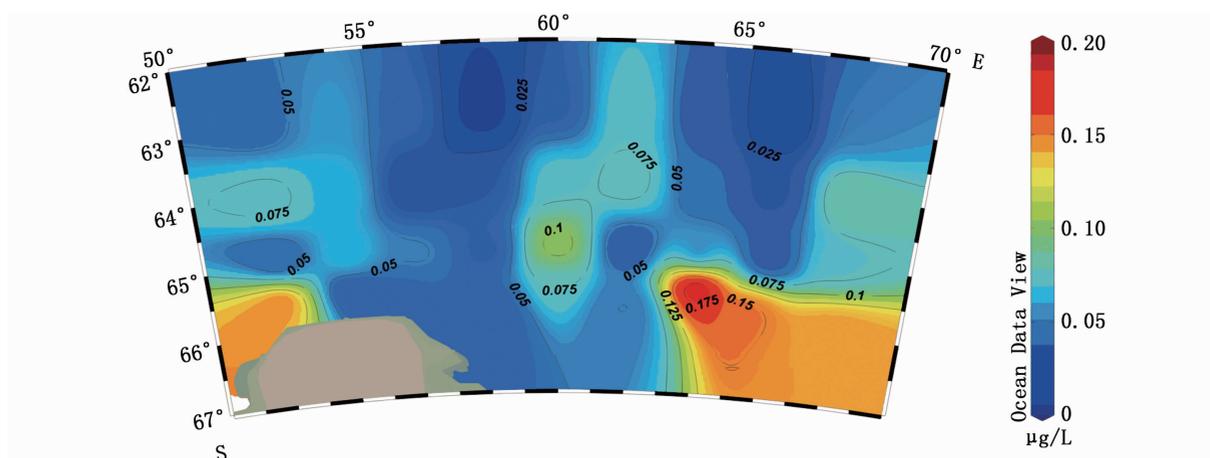


图4 2018年夏季普里兹湾西侧表层海水中溶解镉的分布

Fig. 4 Distribution of dissolved cadmium of surface seawater on the west side of the Prydz Bay in the austral summer 2018

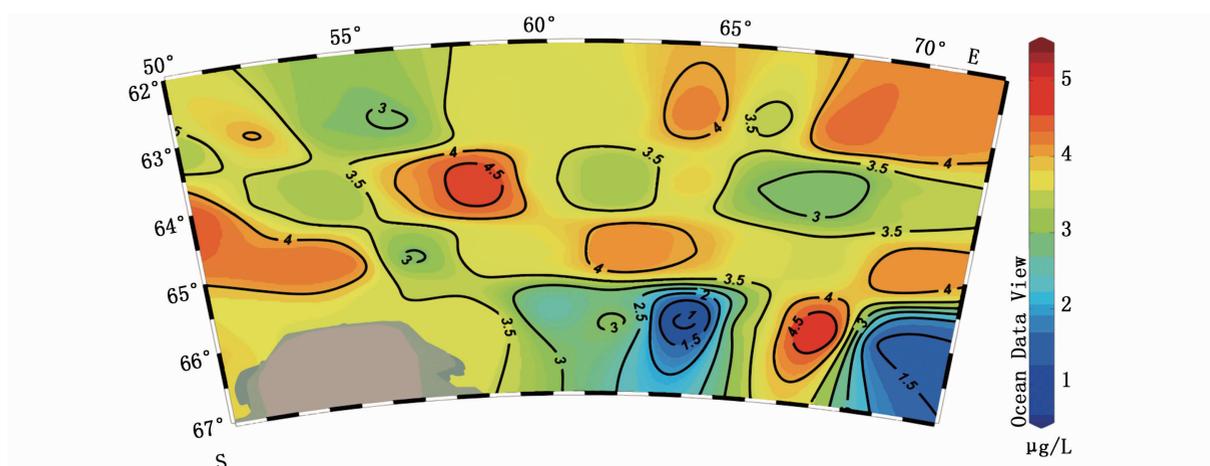


图5 2018年夏季普里兹湾西侧表层海水中溶解砷的分布

Fig. 5 Distribution of dissolved arsenic in surface seawater on the west side of the Prydz Bay in the austral summer 2018

### 2.5 叶绿素

叶绿素在普里兹湾西侧夏季表层海水中分布情况如图 6 所示,浓度在  $0.03 \sim 2 \text{ mg/m}^3$  之间,叶绿素靠近陆架边缘显示出较高的浓度,此外,在  $(63^\circ\text{S}, 70^\circ\text{E})$  附近海域也显示出了较高的叶绿素浓度,此海域的其他区域浓度变化较小。此外,本研究分别对铜、铅、镉和砷的浓度与叶绿素的分布进行了相关性及显著性分析(图 7 ~ 10),

结果显示相关系数  $r$  及显著性  $P$  依次为  $r = -0.139, P = 0.368, r = -0.172, P = 0.263, r = 0.168, P = 0.275, r = -0.088, P = 0.571$ , 整个研究海域铜、铅、砷的浓度与叶绿素呈较弱的负相关性,而镉的浓度与叶绿素呈较弱的正相关性,此外  $P$  值均大于  $0.05$ ,表明铜、铅、镉和砷的浓度与叶绿素的分布相关显著性不大。

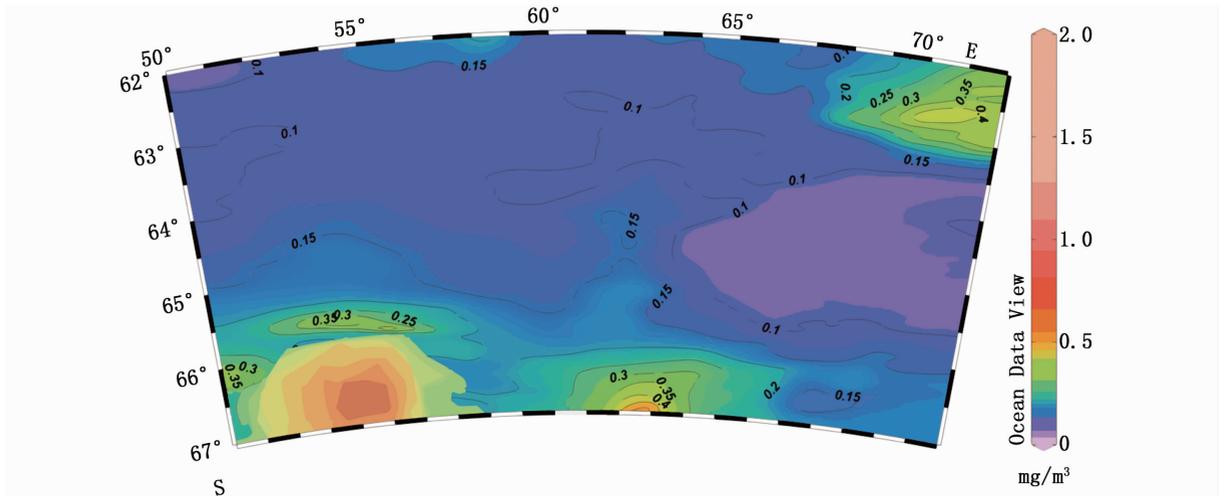


图 6 2018 年夏季普里兹湾西侧表层海水中叶绿素的平均浓度

Fig. 6 Mean concentration of chlorophyll in surface seawater on the west side of the Prydz Bay in the austral summer 2018

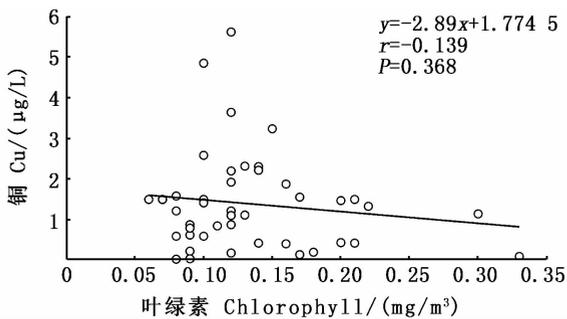


图 7 普里兹湾西侧表层海水中叶绿素浓度与铜的关系图

Fig. 7 Plots of chlorophyll versus copper in surface seawater on the west side of the Prydz Bay

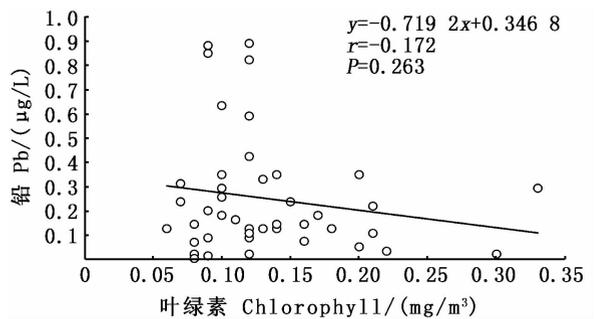


图 8 普里兹湾西侧表层海水中叶绿素浓度与铅的关系图

Fig. 8 Plots of chlorophyll versus lead in surface seawater on the west side of the Prydz Bay

### 2.6 盐度

普里兹湾西侧夏季表层海水的盐度如图 11 所示,明显可以看出深海区域盐度几乎没有变化,然而,当靠近陆架边缘时,盐度随着离岸距离的减小而减小。

此外,本研究分别对铜、铅、镉和砷的浓度与盐度进行了相关性及显著性分析(图 12 ~ 15),结果显示相关系数  $r$  及显著性  $P$  依次为  $r = -0.139, P = 0.440, r = -0.172, P = 0.459, r = 0.168, P = 0.614, r = -0.088, P = 0.269$ , 整个研究海域铜、

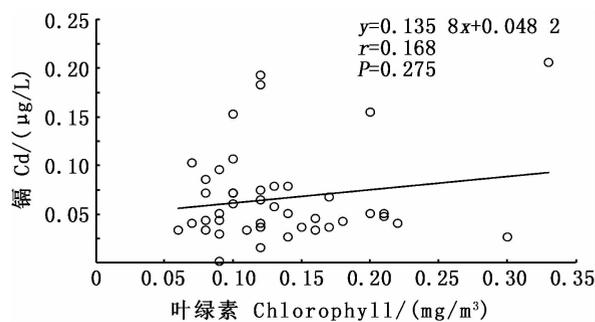


图9 普里兹湾西侧表层海水中  
叶绿素浓度与镉的关系图

Fig.9 Plots of chlorophyll versus cadmium in surface  
seawater on the west side of the Prydz Bay

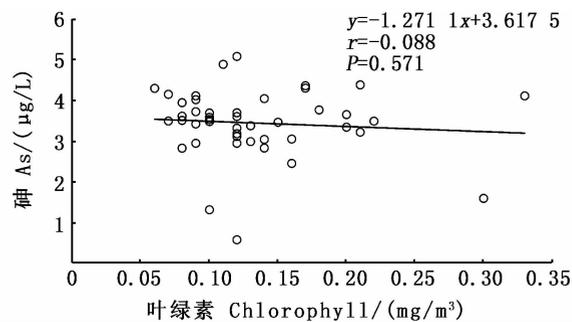


图10 普里兹湾西侧表层海水中  
叶绿素浓度与砷的关系图

Fig.10 Plots of chlorophyll versus arsenic in surface  
seawater on the west side of the Prydz Bay

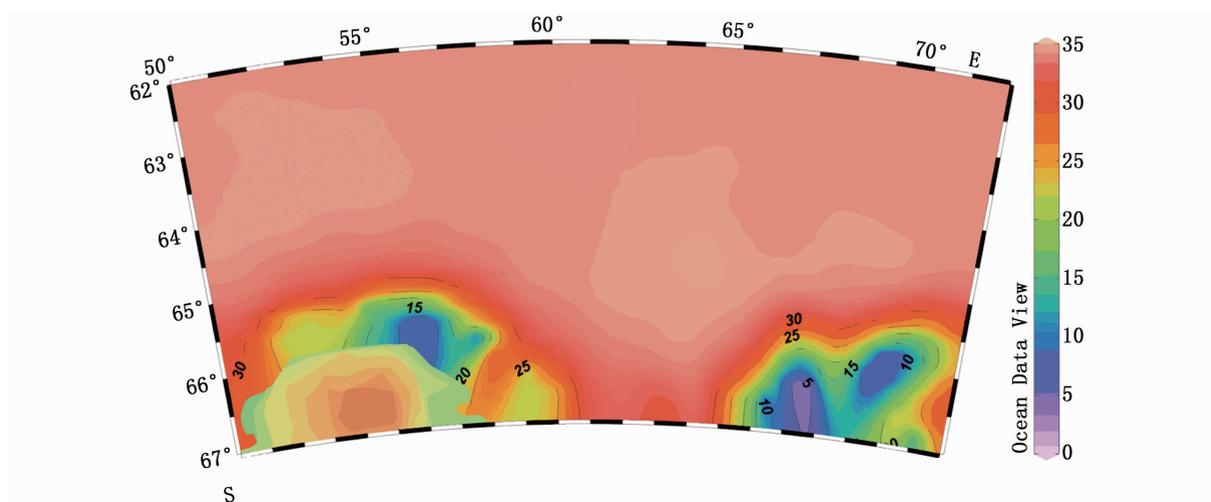


图11 2018年夏季普里兹湾西侧表层海水的平均盐度

Fig.11 Mean salinity in surface seawater on the west side of the Prydz Bay  
in the austral summer 2018

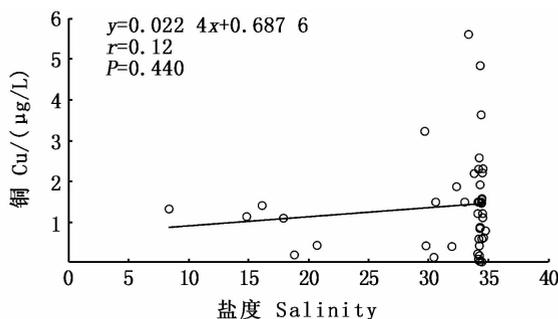


图12 普里兹湾西侧表层海水中  
盐度与铜的关系图

Fig.12 Plots of salinity versus copper in surface  
seawater on the west side of the Prydz Bay

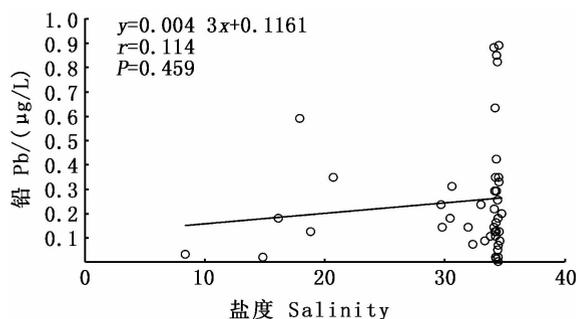


图13 普里兹湾西侧表层海水中  
盐度与铅的关系图

Fig.13 Plots of salinity versus lead in surface  
seawater on the west side of the Prydz Bay

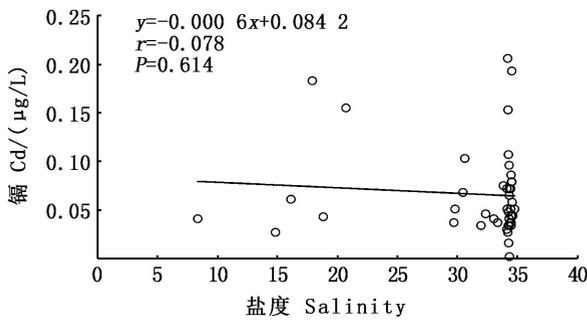


图 14 普里兹湾西侧表层海水中  
盐度与镉的关系图

Fig. 14 Plots of salinity versus cadmium in surface  
seawater on the west side of the Prydz Bay

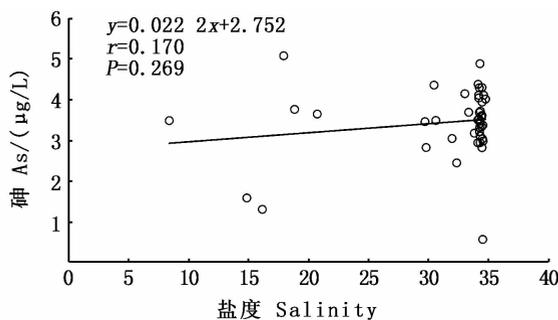


图 15 普里兹湾西侧表层海水中  
盐度与砷的关系图

Fig. 15 Plots of salinity versus arsenic in surface  
seawater on the west side of the Prydz Bay

铅、砷的浓度与叶绿素呈较弱的正相关性,而镉的浓度与叶绿素呈较弱负相关性,此外  $P$  值均大于 0.05,表明铜、铅、镉和砷的浓度与盐度的相关显著性不大。

### 3 讨论

#### 3.1 铜

由表 1<sup>[3-4,16-24]</sup>可知,通过对比其他研究发现,本研究结果铜的平均浓度相对偏高,但是同在普里兹湾的研究所得铜的平均浓度较为接近,稍有偏高,但距离本研究已有十年之久。并且,早有研究证明季节变化对海洋中痕量元素的影响,主要原因是季节变化导致南极大陆的冰雪融化,进而释放铜元素进入海洋中。其次,近几年南极大陆冰架的融化也成为全球关注的问题,冰雪的融化势必会释放铜进入海洋中,导致海水中铜浓度的升高。另一方面,在海洋生物地球化学循环中,铜作为浮游植物生长的必需元素,并且是一

种具有生物活性金属,参与细胞中超氧化物歧化酶的构成,能够促进很多重要的生物地球化学过程,例如,氮氧化物的减少,光合作用<sup>[25]</sup>和耗氧氨氧化过程<sup>[26]</sup>,伴随着其他微量营养元素(铁、镉、锌),铜也有能力促进浮游植物群落和全球初级生产力<sup>[27]</sup>。并且,海洋中铜的分布对于解释生物利用度和吸收之间的关系及其对生物体生理和生长的影响至关重要。叶绿素是估算海洋中浮游植物的良好指标,为此,本研究对叶绿素的分布和铜的浓度进行了相关性分析(图 7),但是铜元素和叶绿素的相关性并不强,由于影响铜浓度变化因素较多,出现这样的现象也并不奇怪,南大洋普里兹湾西侧相对于世界上其他大洋地理位置和季节性变化存在特殊性。此区域常年温度较低,即使是在南大洋的夏季,温度也是在零下,会导致浮游植物的生命活动相对较弱,对铜的吸收利用可能会出现下降,此外,此区域由于季节性变化导致冰雪融化现象明显,然而冰雪融化会导致铜元素大量的输送到周边海域,铜元素发生较大的变化,并且有研究<sup>[28]</sup>指出普里兹湾邻近海域的水团和环流时空变化显著,对此海域的海洋环境有很大的影响,这可能也是造成此海域铜元素和浮游植物相关性较弱的原因。但叶绿素和铜的相关性并不能准确的得出浮游植物对铜分布的影响。但有研究证明叶绿素的分布对铜的浓度变化是有一定影响的。例如, LAI 等<sup>[29]</sup>研究发现浮游植物的摄取和铜的再生在控制南大洋海水中铜的分布中扮演着重要的角色,虽然铜元素对大多数浮游植物有毒,但也是必需元素,是呼吸蛋白和氧化酶的重要组成部分,必然会导致浮游植物对铜的摄取,但是高浓度的铜也会对浮游植物等产生毒性。此外,本研究对盐度和铜的浓度进行了相关性分析(图 12),结果显示整个研究海域呈较弱的正相关性,铜的浓度可能会随着盐度的升高和降低而发生变化,而具体如何改变,还有待于后续更加深入的研究。

#### 3.2 铅

通过对比其他研究发现,本研究所得结果(表 1)显示了较高的浓度,本研究认为南大洋不同的海域会存在一定浓度上的差异,并且影响铅浓度变化的一个重要原因就是人类活动,由于工业活动期间美国和欧洲含铅汽油的使用导致全球范围海洋中铅浓度的升高,虽然是在遥远的南

大洋,也受到了一定的影响,并且在南极洲内陆地区雪样中<sup>[30]</sup>和企鹅的研究<sup>[30]</sup>中也证实了人为的影响<sup>[31]</sup>。此外,ARGAGLI<sup>[32]</sup>研究认为铅在生物地球化学循环中仅有一个重要的影响就是人为输入。但是也有研究<sup>[33]</sup>表明由于近几十年含铅汽油逐步淘汰,铅在海洋中的浓度稳步下降,人类活动对铅浓度变化影响的比重也相对降低。那么,冰雪融化的释放、大气层的输送和水团的相互作用、温度、盐度等物理海洋因素以及浮游动植物摄取等生物海洋因素就成为铅浓度变化的重点。为此,本研究通过现有的数据,分析了叶绿素和盐度对铅浓度变化的影响(图8、图13),两者与铅呈现相反的关系,但是相关性都很弱,一方面,单一的物理或生物因素可能很难与铅的浓度变化建立联系,另一方面,铅作为有毒的金属元素,并不能为生物体的生命活动提供营养物质而产生积极作用,相反,铅浓度的升高会导致生物体的被动吸收产生毒害作用,从而影响生物体群落的变化。并且,早有研究<sup>[3]</sup>表明铅属于不能被生物所利用的毒性金属元素,铅分布主要受大气沉降、海冰的融化、人为的输入,浮游生物对铅分布只有很细微的影响。

### 3.3 镉

由表1可知,本研究所得结果显示镉的平均浓度与其他研究较为相近,说明镉在南大洋的时间和空间上浓度变化并不是很大,并且镉的浓度变化受人为主的影响较小,海洋生物对镉的吸收转化是水体中镉迁移转化的主要途径,因此研究其生物效应对于了解镉在海洋中的变化具有重要的意义。并且,MOREL等<sup>[34]</sup>研究表明,海洋中镉的生物地球化学循环是比较显著的,它在海水中的分布类似于磷酸盐,海水中镉的浓度受浮游植物吸收和有机质再矿化的控制,镉能够很好的被海洋浮游植物所摄取,并且可以代替金属碳化脱水酶,对来自海水的 $\text{HCO}_3^-$ 的摄取起催化作用,还能提供光合作用无机碳的来源。本研究针对镉的生物效应分析了叶绿素对镉浓度变化的影响(图9),结果并没有体现出叶绿素和镉浓度变化之间良好的相关性,本次研究认为产生这样的原因除了与冰雪融化、水团的相互作用影响之外,浮游植物对表层海水中镉的消耗可能与铁和锌的含量有较大的关系,在铁含量有限的条件下,浮游植物比铁含量充足的条件下消耗更多的

镉,并且,南大洋海水中的生命活动存在铁限制。某实验室培养研究<sup>[35]</sup>表明,藻类对镉的限制和对镉的吸收之间有很强的联系,在限镉条件下培养的藻类比在富镉条件下培养的藻类消耗更多的镉,镉能够在碳化脱水酶作用中代替镉,并且能够引导更多的细胞碳化脱水行为,有更高的效率,并且,当藻类生长在限铁且限镉的条件下,藻类对镉的吸收趋势进一步加剧。其次,盐度和镉的浓度呈负相关(图14),并有研究报告<sup>[15]</sup>,大洋海水中镉的分布与盐度在冰架边缘具有良好的负相关,说明在冰架边缘盐度较低的海水中,镉的生物效应发生了一定程度的变化,这还需要进一步分析镉在南大洋海水中的生物效应。

### 3.4 砷

由表1可知,砷的平均浓度相差不大,砷在南大洋的生物地球化学循环过程相当复杂,它涉及到大气、沉积物、冰雪融化、浮游生物及水团混合等物理、化学、生物学过程,其中各种因素本身又是不断变化的,并有研究<sup>[36]</sup>表明,海水中砷的生物积累一直归因于自然过程中地质构成的结果,人类活动的影响较小。并且也分析了叶绿素和盐度对砷的影响(图10、图15),与其他痕量元素一样,相关性较弱,但是表层海水中的砷也会作为营养元素被浮游植物所吸收、消耗,并有研究表明在海藻新陈代谢过程中随着磷含量的变化能够吸收砷酸盐,所以海藻的组织中能积累砷<sup>[37]</sup>。此外,浮游植物所吸收的砷将通过排泄或降解作用以还原态或甲基化形式释放出来,因此砷的浓度分布会由于不同海域浮游植物的生物量而发生变化,叶绿素的浓度变化必然是影响砷浓度变化的一个重要因素。此外,除了研究砷的总量,砷的各种形态也有相对独特的物理化学性质且其生物毒性与存在的形式有很大关系,天然形态的无机砷具有较高的毒性,而以有机形式存在的砷则毒性较小<sup>[38]</sup>。海洋生物通过对砷的吸收会将无机砷向有机砷转化,尤以低级浮游植物的转化能力最大,有机砷的主要形态有两种砷糖和砷脂,即有机砷与糖类及脂类相结合而存在,然后通过食物链向高级营养传递。由于有机砷对生物的毒性比无机砷小得多,因此海洋生物的无机砷的有机化可以说是海洋中砷的解毒过程<sup>[39]</sup>。并且它们在海洋环境中的迁移、转化和富集性能不同,并且各种形态间会由于季节的变

化、水体的温度、盐度、酸碱度及浮游植物种类的不同相互转化,这种分布特点表明在开阔的海洋溶解态总砷主要受生物活动的控制。

表 1 南大洋海水中痕量元素平均浓度和影响因素相关研究

Tab.1 The effect factors and mean concentration of trace elements in Southern Ocean

研究海域 Study area	铜 Copper/( $\mu\text{g/L}$ )	铅 Lead/( $\mu\text{g/L}$ )	镉 Cadmium/( $\mu\text{g/L}$ )	砷 Arsenic/( $\mu\text{g/L}$ )	影响因素 Effect factors	文献来源 Sources
南大洋						
印度洋扇面	0.100	0.035	0.003 5		浮游动植物	[16]
斯科舍海					磷酸盐	
威德尔海	0.192	0.056			硅酸盐	[17]
					人类活动	
威德尔海	0.128	0.020	0.067		冰雪融化	[18]
罗斯海		0.024	0.080		季节变化	[19]
罗斯海	0.125		0.067		浮游植物	[20]
					冰雪融化	
罗斯海	0.297	0.012	0.065		冰雪融化	[21]
					水团	
罗斯海	0.192	0.009	0.077		浮游生物	[22]
					浮游植物	
克洛泽群岛		0.010	0.035		大气层输入	[23]
					悬浮颗粒物	
普里兹湾	1.150		0.143		初级生产力	[14]
					人为影响	
南设得兰群岛	0.078	0.049	0.019	2.210	季节变化	[24]
南极半岛	0.125		0.108		浮游植物	[4]
					冰雪融化	
罗斯海	0.256	0.064	0.062		浮游植物	[3]
					叶绿素	
普里兹湾西侧	1.440	0.250	0.060	3.520	浮游植物 盐度	本研究

#### 4 结论与展望

本研究主要调查了 2018 年夏季普里兹湾西侧( $62^{\circ}\text{E} \sim 67^{\circ}\text{S}$  和  $50^{\circ}\text{E} \sim 72^{\circ}\text{E}$ )表层海水中痕量元素铜、铅、镉和砷的分布,分析了它们可能的来源以及影响因素,探讨了各痕量元素的分布与浮游植物之间的关系,主要得出以下结论:

(1) 铜、铅、镉和砷浓度平均值分别为  $1.440 \mu\text{g/L}$ 、 $0.250 \mu\text{g/L}$ 、 $0.060 \mu\text{g/L}$ 、 $3.520 \mu\text{g/L}$ 。普里兹湾西侧表层海水中痕量元素的浓度处于较低的水平且在此海域内浓度变化不大。

(2) 叶绿素作为估算浮游植物生物量的良好指标,分析叶绿素与各痕量元素的分布情况表明,浮游植物和铜、铅、镉和砷的浓度并没有良好的相关性,但浮游植物确实是影响痕量元素分布的重要因素,并且盐度与各微量元素的浓度也没有显示出良好的相关性,这有待于进一步对南大洋痕量元素进行研究。

(3) 普里兹湾西侧表层海水中痕量元素的主要来源有冰雪的融化、其他大陆所携带痕量微粒的输送、人为活动的增多,包括科考站的建立、海洋渔业活动、南极旅游人数逐年的升高,产生的各类废物不合理的处理等,从而导致南大洋表层海水中痕量元素分布的变化。

为保护南极海洋环境,也防止南极的气候及环境的变化危及到南极生物和人类的生存,探讨南大洋痕量元素的浓度分布及在生物地球化学循环中的作用,对以后南大洋相关的研究有着非常重要的影响。然而,只依靠痕量元素浓度很难表征其污染特性和危害,今后将进一步研究痕量元素的各种形态对海洋环境的影响,进而深入的了解痕量元素在生物地球化学循环中的作用。

感谢中国水产有限公司及“龙腾”轮船长和船员在取样过程中给予的支持与帮助。感谢中国南极磷虾渔业科学观察员在海上数据收集过程中所付出的辛勤劳动。本研究数据来源于农

业部南极海洋生物资源开发利用项目。

### 参考文献:

- [1] VU H T D, SOHRIN Y. Diverse stoichiometry of dissolved trace metals in the Indian Ocean[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3(1): 1745.
- [2] NELSON D M, SMITH JR W O. Sverdrup revisited: critical depths, maximum chlorophyll levels, and the control of Southern Ocean productivity by the irradiance-mixing regime[J]. *Limnology and Oceanography*, 1991, 36(8): 1650-1661.
- [3] ILLUMINATI S, ANNIBALDI A, ROMAGNOLI T, et al. Distribution of Cd, Pb and Cu between dissolved fraction, inorganic particulate and phytoplankton in seawater of Terra Nova Bay (Ross Sea, Antarctica) during austral summer 2011-12[J]. *Chemosphere*, 2017, 185: 1122-1135.
- [4] BOWN J, LAAN P, OSSEBAAR S, et al. Bioactive trace metal time series during Austral summer in Ryder Bay, Western Antarctic Peninsula[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2017, 139: 103-119.
- [5] KIM I, KIM G, CHOY E J. The significant inputs of trace elements and rare earth elements from melting glaciers in Antarctic coastal waters[J]. *Polar Research*, 2015, 34(1): 24289.
- [6] GROTTI M, SOGGIA F, ABELMOSCHI M L, et al. Temporal distribution of trace metals in Antarctic coastal waters[J]. *Marine Chemistry*, 2001, 76(3): 189-209.
- [7] MARTIN J H, GORDON R M, FITZWATER S E. Iron in Antarctic waters[J]. *Nature*, 1990, 345(6271): 156-158.
- [8] SOHRIN Y, IWAMOTO S, MATSUI M, et al. The distribution of Fe in the Australian sector of the Southern Ocean[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2000, 47(1): 55-84.
- [9] 高春梅, 朱国平, 徐鹏翔, 等. 2012 年夏季南奥克尼群岛水域表层海水中典型痕量元素分布研究[J]. *上海海洋大学学报*, 2016, 25(4): 628-633.  
GAO C M, ZHU G P, XU P X, et al. Distribution of typical trace elements in the surface water around the South Orkney Islands in austral Summer 2012 [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2016, 25(4): 628-633.
- [10] SEDWICK P N, DITULLIO G R. Regulation of algal blooms in Antarctic shelf waters by the release of iron from melting sea ice[J]. *Geophysical Research Letters*, 1997, 24(20): 2515-2518.
- [11] 陈明超, 章守宇. 枸杞岛海域浮游植物群落结构分析[J]. *上海海洋大学学报*, 2011, 20(4): 607-612.  
CHEN M C, ZHANG S Y. The community structure of phytoplankton in Gouqi Island [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2011, 20(4): 607-612.
- [12] BOYD P W, JICKELLS T, LAW C S, et al. Mesoscale iron enrichment experiments 1993-2005: synthesis and future directions[J]. *Science*, 2007, 315(5812): 612-617.
- [13] MOREL F M M, REINFELDER J R, ROBERTS S B, et al. Zinc and carbon co-limitation of marine phytoplankton[J]. *Nature*, 1994, 369(6483): 740-742.
- [14] 孙维萍, 扈传昱, 薛斌, 等. 南极普里兹湾表层海水中铜、镉、锌的分布[J]. *极地研究*, 2009, 21(1): 25-32.  
SUN W P, HU C Y, XUE B, et al. Distribution of copper, cadmium and zinc in the surface water of Prydz Bay [J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2009, 21(1): 25-32.
- [15] SUN W P, HAN Z B, HU C Y, et al. Source composition and seasonal variation of particulate trace element fluxes in Prydz Bay, East Antarctica[J]. *Chemosphere*, 2016, 147: 318-327.
- [16] HARRIS J E, FABRIS G J. Concentrations of suspended matter and particulate cadmium, copper, lead and zinc in the Indian sector of the Antarctic ocean[J]. *Marine Chemistry*, 1979, 8(2): 163-179.
- [17] NOLTING R F, DE BAAR H J W, VAN BENNEKOM A J, et al. Cadmium, copper and iron in the Scotia Sea, Weddell Sea and Weddell/Scotia Confluence (Antarctica) [J]. *Marine Chemistry*, 1991, 35(1/4): 219-243.
- [18] WESTERLUND S, ÖHMAN P. Cadmium, copper, cobalt, nickel, lead, and zinc in the water column of the Weddell Sea, Antarctica [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, 55(8): 2127-2146.
- [19] SCARPONIA G, CAPODAGLIO G, TURETTA C, et al. Evolution of cadmium and lead contents in Antarctic coastal sea water during the austral summer [J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1997, 66(1): 23-49.
- [20] FITZWATER S E, JOHNSON K S, GORDON R M, et al. Trace metal concentrations in the Ross Sea and their relationship with nutrients and phytoplankton growth [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2000, 47(15/16): 3159-3179.
- [21] FRACHE R, ABELMOSCHI M L, GROTTI M, et al. Effects of ice melting on Cu, Cd and Pb profiles in ross sea waters (Antarctica) [J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2001, 79(4): 301-313.
- [22] CORAMI F, CAPODAGLIO G, TURETTA C, et al. Summer distribution of trace metals in the western sector of the Ross Sea, Antarctica [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2005, 7(12): 1256-1264.
- [23] CASTRILLEJO M, STATHAM P J, FONES G R, et al. Dissolved trace metals (Ni, Zn, Co, Cd, Pb, Al, and Mn) around the Crozet Islands, Southern Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(10): 5188-5201.
- [24] DE FERRO A M, MOTA A M, CANÁRIO J. Sources and transport of As, Cu, Cd and Pb in the environmental compartments of Deception Island, Antarctica [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 77(1/2): 341-348.

- [25] PEERS G, PRICE N M. Copper-containing plastocyanin used for electron transport by an oceanic diatom [J]. *Nature*, 2006, 441(7091): 341-344.
- [26] WALKER C B, DE LA TORRE J R, KLOTZ M G, et al. *Nitrosopumilus maritimus* genome reveals unique mechanisms for nitrification and autotrophy in globally distributed marine crenarchaea [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(19): 8818-8823.
- [27] SUNDA W G. Feedback interactions between trace metal nutrients and phytoplankton in the ocean [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2012, 3: 204.
- [28] 高郭平,董兆乾,侍茂崇,等. 南极普里兹湾关键物理海洋学问题研究进展及未来趋势 [J]. *上海海洋大学学报*, 2013, 22(2): 313-320.  
GAO G P, DONG Z Q, SHI M C, et al. Advances of physical oceanographic study on Prydz Bay and adjacent region, Antarctica [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2013, 22(2): 313-320.
- [29] LAI X D, NORISUYE K, MIKATA M, et al. Spatial and temporal distribution of Fe, Ni, Cu and Pb along 140°E in the Southern Ocean during austral summer 2001/02 [J]. *Marine Chemistry*, 2008, 111(3/4): 171-183.
- [30] JEREZ S, MOTAS M, PALACIOS M J, et al. Concentration of trace elements in feathers of three Antarctic penguins: geographical and interspecific differences [J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(10): 2412-2419.
- [31] SAÑUDO-WILHELMY S A, OLSEN K A, SCELFO J M, et al. Trace metal distributions off the Antarctic Peninsula in the Weddell Sea [J]. *Marine Chemistry*, 2002, 77(2/3): 157-170.
- [32] ARGAGLI R. Trace metals in Antarctica related to climate change and increasing human impact [J]. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 2000, 166: 129-173.
- [33] NOBLE A E, ECHEGOYEN-SANZ Y, BOYLE E A, et al. Dynamic variability of dissolved Pb and Pb isotope composition from the U. S. North Atlantic GEOTRACES transect [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2015, 116: 208-225.
- [34] MOREL F M M, PRICE N M. The biogeochemical cycles of trace metals in the oceans [J]. *Science*, 2003, 300(5621): 944-947.
- [35] LANE T W, MOREL F M M. A biological function for cadmium in marine diatoms [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2000, 97(9): 4627-4631.
- [36] FARÍAS S, SMICHOWSKI P, VÉLEZ D, et al. Total and inorganic arsenic in Antarctic macroalgae [J]. *Chemosphere*, 2007, 69(7): 1017-1024.
- [37] MURRAY L A, RAAB A, MARR I L, et al. Biotransformation of arsenate to arsenosugars by *Chlorella vulgaris* [J]. *Applied Organometallic Chemistry*, 2003, 17(9): 669-674.
- [38] 陈保卫,那仁满都拉,吕美玲,等. 砷的代谢机制、毒性和生物监测 [J]. *化学进展*, 2009, 21(2): 474-482.  
CHEN B W, NARAMANDURA H, LYU M L, et al. Metabolism, toxicity, and biomonitoring of arsenic species [J]. *Progress in Chemistry*, 2009, 21(2): 474-482.
- [39] ANDREAE M O, BYRD J T, FROEHLICH P N. Arsenic, antimony, germanium, and tin in the Tejo estuary, Portugal: modeling a polluted estuary [J]. *Environmental Science & Technology*, 1983, 17(12): 731-737.

## Distribution of trace elements in seawater from the Prydz Bay in the summer 2018

GAO Chunmei<sup>1,2,3</sup>, HAN Naixu<sup>1</sup>, ZHU Guoping<sup>2,4,5,6</sup>, DING Guodong<sup>1</sup>, ZHOU Mengxiao<sup>2,4</sup>, CAO Zhang<sup>1</sup>, FANG Han<sup>1</sup>, YANG Hang<sup>1</sup>

(1. College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Center for Polar Research, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. Marine Environment Monitoring and Assessment Center, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 4. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 5. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai 201306, China; 6. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries Ministry of Science and Technology, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** In order to better understand the role, distribution, as well as possible sources of trace element in biogeochemical cycles in the Southern Ocean, surface seawater samples were collected from 44 survey stations on the west side of the Prydz Bay (62°S-67°S, 50°E-72°E). The concentration and distribution of trace elements, including As, Cu, Pb and Cd were determined and evaluated by AFS (Atomic Fluorescence Spectrometry) and AAS (Atomic Absorption Spectrometry). The results showed that the concentration of As, Cu, Pb, Cd were  $(3.520 \pm 0.184) \mu\text{g/L}$ ,  $(1.440 \pm 0.037) \mu\text{g/L}$ ,  $(0.250 \pm 0.007) \mu\text{g/L}$  and  $(0.060 \pm 0.128) \mu\text{g/L}$ . The concentration of trace elements in the surface water of the western side of Prydz Bay was at a low level, and the concentration in this sea area did not change much. Moreover, the correlation and significance of chlorophyll and salinity with copper, cadmium, arsenic and lead were not obvious and varied. In addition, the main source of trace elements on the west side of Prydz Bay was closely related to the melting of snow and ice, the transport of atmospheric particles and trace particles carried by the continent, the increase of human activities and the distribution and uptake of phytoplankton.

**Key words:** Antarctica; Prydz Bay; trace element; phytoplankton; biogeochemistry