

南极普里兹湾表层沉积物微量元素分布特征及其物源指示意义

孙维萍¹ 扈传昱¹ 韩正兵¹ 翁焕新² 陈际雨¹ 潘建明¹

(1.国家海洋局第二海洋研究所 杭州 310012;2.浙江大学 杭州 310027)

摘要 利用电感耦合等离子体质谱仪测定了中国南极科考 21~27 航次期间获取的普里兹湾表层沉积物中 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Co、Al、Fe、Mn 的含量,分析了普里兹湾微量元素的分布特征,结合沉积物粒度分布、生物硅含量,并利用富集系数和主成分分析的方法,探讨了微量元素的物源指示意义。研究表明:普里兹湾沉积物中的微量元素含量与南大洋其他海域具有很好的可比性。Cu、Zn、Cr、Co、Fe、Mn 含量在陆坡深海区明显高于冰架边缘区和陆架区;Al、Pb 含量在冰架边缘区较高;而 Cd 含量在陆架区相对较高。人类活动对普里兹湾沉积物中的微量元素没有明显的影响,南极大陆岩石风化产物和海洋生物源性沉降是其主要来源。冰架边缘区及陆架破折处 P2-9 站位的微量元素主要为岩源性输入。陆架区、陆坡深海区的微量元素 Cu、Zn、Cr、Co、Fe、Mn 明显受到生源性物质输入的影响。而普里兹湾沉积物中 Cd 则主要来源于硅藻的吸收利用及硅质软泥的富集。

关键词 微量元素 生源 岩源 沉积物 南极

第一作者简介 孙维萍 女 1979 年出生 博士 副研究员 海洋环境科学 E-mail: sunwp1998@hotmail.com

中图分类号 P736.4⁺1 **文献标识码** A

0 引言

自然和人为来源的生物化学要素通过生物吸收、化学反应、吸附与解吸附作用、沉降、扩散等过程将最终沉积于海底,因此海底沉积物承载着丰富的生物地球化学信息。海洋沉积物中微量元素的含量及分布特征不但可以反映人类活动对海洋环境的影响^[1-4],指示物质来源及其迁移转化过程^[5-7],还能反映海洋沉积环境^[8-9]和早期成岩过程^[10],甚至反演全球气候变迁^[11-13]。目前南大洋海域的相关研究主要集中在威德尔海(Weddell Sea)、罗斯海(Ross Sea)、南极半岛(Antarctic Peninsula)邻近海域及南大洋深海区^[14-21]。普里兹湾作为南大洋第三大海湾及中国南极科考的重点海域,相关报道甚少^[22]。本文利用中国南极科考 21~27 航次期间获取的样品,分析了普里兹湾沉积物中微量元素的含量与分布特征,并探讨微量元素的来源及其人类活动的影响。

1 材料与方法

1.1 研究海域与采样站位

普里兹湾是南极大陆印度洋扇区的最大海湾,位

于 66°E ~ 79°E 之间。其西南边界是埃默里冰架(AIS, Amery Ice Shelf),东南边界是英格丽德·克里斯滕森海岸(Ingrid Christensen Coast)。湾内陆架区为广阔的埃默里海盆(Amery Depression),底形平缓,水深基本上在 600~700 m 之间。四女士浅滩(Four Ladies Bank)和福拉姆浅滩(Fram Bank)分别位于湾口东西两侧,水深小于 200 m,成为湾内与大洋海水交换的天然屏障^[23]。陆坡以北则为水深超过 3 000 m 的开阔洋区。

中国南极科考 21(2004/2005)~27(2010/2011)航次期间采用抓斗获取了表层沉积物样品共 16 个(图 1),IS 站位位于冰架边缘区,P3-9 和 P3-6 位于湾口以北的陆坡及深海区,其余站位均位于陆架区。获取表层样后立即用塑料勺子采集样品(舍弃与采样器直接接触的沉积物)于聚乙烯塑料袋中,冷冻保存。冷冻干燥后的沉积物用于化学及沉积物粒度组成分析。

1.2 样品分析

针对硅或有机质含量高的沉积物,依据美国环境保护署规范方法 USEPA Method 3052 采用硝酸(HNO₃)和氢氟酸(HF)的混合酸(HNO₃和 HF 体积

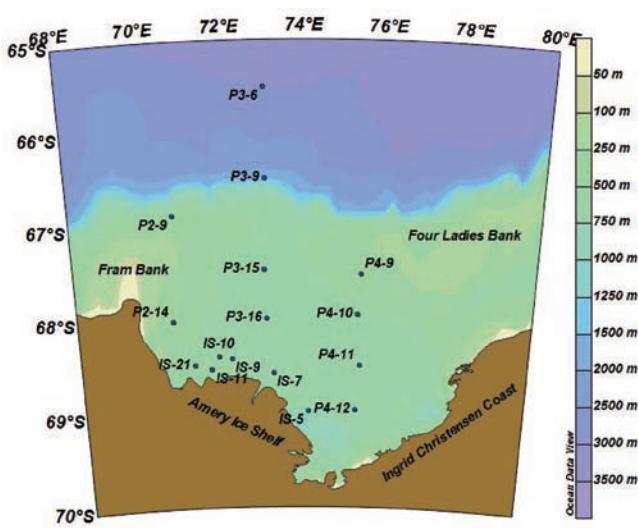


图1 研究海域与采样站位图

Fig.1 Study area and sampling stations

比为 7 : 3) 利用高通量密闭微波消解系统 (CEM Mars, 美国) 消解沉积物。消解液用 Milli-Q 制备的去离子水稀释后利用 ICP-MS (Agilent 7700, 美国) 测定了金属元素 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Co、Al、Fe、Mn 的浓度。检测过程中采用近海沉积物标准物质 MESS-3 (National Research Council Canada) 以及南极海洋沉积物成分分析标准物质 (GBW07357) 作为质控样, 并采用铑 (Rh) 内标对检测过程进行全程的质量控制。所有试验器皿用 30% 硝酸溶液浸泡 24 h 以上, 并用 Milli-Q 去离子水清洗 3 次。所有实验试剂均为优级纯。本次金属元素检测的回收率在 96% ~ 110% 之间, RSD 均小于 8.6%。生物硅 (BSi) 采用碳酸钠提取法^[24]。生物硅提取液的硅酸盐含量按照海洋监测规范 (GB17378.4-2007) 中适用于硅酸盐含量较高海水的硅钼黄法测定。本文中的 BSi 以蛋白石 ($\text{SiO}_2 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$) 的含量计算。未经研磨和预筛选的沉积物样采用激光粒度分析仪 (Sympactec laser diffraction Helos system, 德国) 分析沉积物粒径分布。根据 Udden-Wentworth 分类方案对不同粒径的沉积物进行定义^[25], 即 2~64 mm 为砾 (gravel), 63 μm ~2 mm 为砂 (sand), 4~63 μm 为粉砂 (silt), <4 μm 为黏土 (clay), 并通常将粉砂和黏土合称为泥质沉积物 (mud)。

1.3 富集系数和沉积通量计算

微量元素在沉积物样品中的含量与其在自然界中天然丰度的比值, 通过地化指标标准化处理后, 通常作为指示沉积物中微量元素自然源性或者污染源

性输入的一个重要指标, 即重金属富集系数 EF 。微量元素在自然界中天然丰度通常为陆壳或未受污染土壤中的含量。地化指标一般是地壳中的某一种保守组分, 并且没有明显的污染来源^[26], 如 Al、Ti 或 Li 等。其中 Al 因其测量的准确性和精确性, 是最常被采用的地化指标^[27]。本次研究采用 Al 作为标准化处理的指标。EF 的计算公式如下:

$$EF = (\text{TE}/\text{Al})_{\text{sample}} / (\text{TE}/\text{Al})_{\text{nature}} \quad (1)$$

其中, $(\text{TE}/\text{Al})_{\text{sample}}$ 是样品中微量元素和 Al 的比值, $(\text{TE}/\text{Al})_{\text{nature}}$ 是自然界中微量元素与 Al 环境背景值的比值, 通常采用地壳岩矿中的比值, 本文采用 Taylor^[28] 的地壳元素表。

沉积通量是衡量微量元素在海底埋藏的一个重要指标。根据表层沉积物中微量元素的含量, 可以通过公式 (2) 估算其沉积通量^[29]:

$$R = W(1-\phi)\rho M \quad (2)$$

其中, R 为沉积通量 ($\mu\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{y})$), ϕ 为孔隙度, W 为平均沉积速率 (cm/y), ρ 为沉积物密度 (湿样, g/cm^3), M 为表层沉积物中重金属的含量 (湿重, $\mu\text{g}/\text{g}$)。本次研究中 ϕ 取南大洋的均值 0.78^[30]。普里兹湾上层沉积物的密度主要在 1.3~1.4 g/cm^3 之间变化^[31], 由于陆架区、陆坡深海区硅质软泥为主, 密度较小, ρ 取 1.30 g/cm^3 ; 冰架边缘区含砂量高, 密度大, ρ 取 1.40 g/cm^3 。本文沉积物中重金属的含量均以干重表示, 因此需要通过沉积物含水率转化为湿重含量。本批次样品没有测定含水率, 但是以往不同航次的沉积物样品检测表明, 普里兹湾冰架边缘表层沉积物含水率的均值约为 75%, 陆架区和深海区硅质软泥的含水率约为 80%。因此, 以湿重表示的含量应该分别是以干重表示的含量的 25% 和 20%。冰架边缘区、陆架区和深海区的平均沉积速率分别为 0.056 cm/y 、0.136 cm/y 、0.101 cm/y ^[32], 由于 P2-9 受到南极辐散带影响, 含砂量高, 沉积速率低, 沉积速率和沉积物密度难以估算, 本次沉积通量估算过程中剔除该站位。

2 结果与分析

2.1 微量元素和生物硅的分布特征

普里兹湾表层沉积物中的微量元素含量见表 1。从总体上来看, 普里兹湾表层沉积物中微量元素的含量与南大洋罗斯海、威德尔海及乔治王岛邻近海域 (Potter Cove 和 Admiralty Bay) 的表层沉积物具有很好的可比性。普里兹湾沉积物中的 Al 含量明显低于

罗斯海和乔治王岛海域,但是与威德尔海表层沉积物及东南极 Windmill Islands 次表层沉积物中的含量差异不大。普里兹湾 Pb 含量相对较高,而 Co 含量甚至比罗斯海西北海域高一个数量级,但是并不比 Admiralty Bay 表层沉积物中的 Co 含量高。从普里兹湾不同海区微量元素的分布差异来看(表 2),Cu、Zn、Cr、Co、Fe、Mn 的含量在陆坡深海区明显高于冰架边缘区和陆架区;Al、Pb 的含量在冰架边缘区较高;而 Cd 的含量在各个海区差异不大,在陆架区相对较高。相对应地,Cu、Zn、Cr、Co、Fe 的沉积通量具有明显的陆坡深海区>陆架区>冰架边缘区的分布特征,Pb 和 Cd 的沉积通量高值也分别出现在冰架边缘和陆架区,而 Mn 沉积通量则深海区明显较高,Al 沉积通量在三个海区没有明显的差异(表 3)。

普里兹湾表层沉积物中生物硅的含量在 6.2%~

75.3%之间,均值为 28.6%。生物硅高值位于湾中心的开阔水域(P3-15、P3-16),总体上具有陆架区>陆坡深海区>冰架边缘区的分布特征(表 2)。

2.2 沉积物类型分布特征

普里兹湾表层沉积物的粒径分布具有明显的地理分异现象,砂、粉砂和黏土的含量与其距离冰架边缘的远近密切相关(图 2)。冰架边缘多为砂质沉积,砂的含量高达 42.1%~81.7%,均值为 65.5%。除了 P2-9 站位,陆架区和陆坡深海区多为泥质沉积(粉砂和黏土),粉砂的含量在 43.9%~77.1%之间,均值为 67.8%;而且黏土的含量也远高于冰架边缘。

2.3 富集系数 EF

普里兹湾不同海区微量元素的富集系数见表 4。当 EF>1 时,一般认为沉积物样品中的微量元素出现富集^[33]。P2-9 站位除了 Pb、Cd 的富集系数较高,

表 1 普里兹湾表层沉积物中的微量元素含量及其与南大洋其他海域的比较 (单位:μg/g)

Table 1 Trace metal contents in the surficial sediments of Prydz Bay and comparison to the other regions of the Southern Ocean

	普里兹湾	Windmill Islands 近海 ^a	Weddell Sea	North-west Ross Sea	Ross Sea 陆架区	Terra Nova Bay (Ross Sea)	Potter Cove	Admiralty Bay ^b
Cu	7.9~75.6	13.5	38	4.0~12.5	11.6~33.4	/	73.4~156.3	47~84
Pb	6.7~39.0	/	8	0~4.1	4.7~19.8	15.3~27.7	2.3~5.5	3~11
Zn	32.8~96.6	70	78	6.8~1098.5	53~120	20.6~57.1	45.0~63.0	44~89
Cd	0.25~0.44	0.5	0.72	0.04~0.57	0.11~0.50	0.16~0.37	/	0.4~0.9
Cr	28.0~78.2	29.2	91	0.8~2.0	35~82	4.1~33.5	4.1~8.1	7~12
Co	5.1~17.8	4.9	/	0.4~1.7	/	/	/	16.9~22.4
Al%	1.26~3.22	3.20	3.01	/	3.49~5.62	5.10~6.28	/	/
Fe %	1.31~3.30	1.59	3.20	/	2.13~5.76	0.68~2.16	0.52~2.14	4.96~5.48
Mn	158~638	387	464	28~131	372~1048	107~514	790~1130	/
参考文献	本文	[12]	[15]	[16]	[20]	[17]	[18]	[3, 9]

注:a. Al、Fe、Mn 为表层 0~1 cm 层沉积物中的含量,其余元素为 1~3 cm 层沉积物中的含量;b. Cu、Pb、Zn、Cd、Cr 数据来源于文献[3],Co、Fe 数据来源于文献[9]。

表 2 普里兹湾三个海区微量元素和生物硅含量均值的差异 (单位:μg/g)

Table 2 The average contents of trace metals in the three regions of Prydz Bay

海区	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Co	Al/%	Fe/%	Mn	BSi
冰架边缘	10.4	27.3	50.9	0.30	34.7	6.7	2.88	1.82	435	11.2
陆架区	24.0	11.1	59.0	0.33	38.0	6.0	1.87	1.47	210	44.6
陆坡深海	59.9	17.2	95.7	0.28	77.6	15.3	2.19	2.96	534	16.7

表 3 普里兹湾微量元素的沉积通量和大气沉降通量 (单位:mg/m²·y)

Table 3 Sedimentation and deposition fluxes of trace metals in Prydz Bay

海区	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Co	Al	Fe	Mn
冰架边缘	0.34~0.55	0.86~1.68	1.5~2.5	0.012~0.015	1.2~1.9	0.22~0.36	1 125~1 338	691~897	13~24
陆架区	1.21~2.38	0.52~1.43	3.7~6.4	0.020~0.034	2.4~3.7	0.41~0.54	980~1 540	1 020~1 394	12~23
陆坡深海	2.55~4.37	0.96~1.03	5.5~5.6	0.015~0.017	4.4~4.5	0.75~1.02	1 172~1 366	1 513~1 915	25~37
大气沉降 ^a	0.1x10 ⁻³	0.23 x10 ⁻⁴	0.13x10 ⁻³	0.037x10 ⁻⁶	0.18x10 ⁻³	0.46x10 ⁻⁴	0.15	0.10	0.001 7

注:a. 大气沉降根据普里兹湾海域大气沉降通量^[37]和地壳元素含量均值^[28]估算。

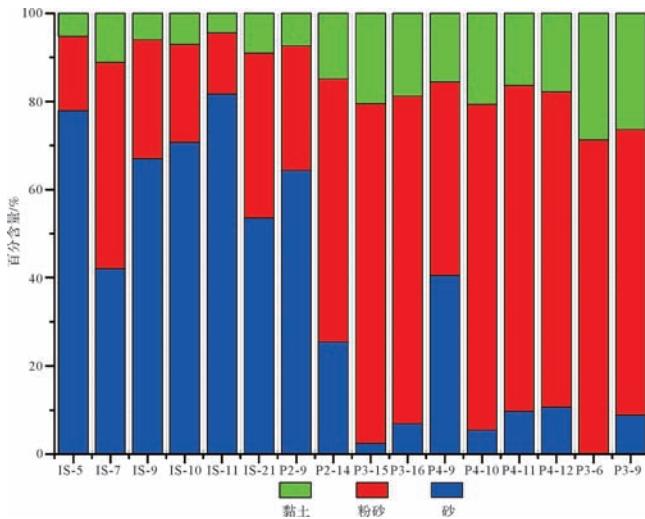


图 2 表层沉积物类型分布

Fig.2 Grain size characteristics

其余元素均没出现明显的富集现象。Cu、Cr 在冰架边缘区富集不明显,而在陆架区(P2-9 站位除外,下同)和陆坡深海区出现不同程度的富集,且富集系数具有陆坡深海区>陆架区的特征。Pb、Zn、Cd 在三个海区均有明显的富集,其中 Pb 在冰架边缘区富集最明显,而 Zn、Cd 则在陆架区富集特别明显。Fe、Mn、Co 在冰架边缘和陆架区富集不明显,而在陆坡深海区出现轻微的富集。

金属元素、生物硅及不同粒径沉积物的含量共 13 个参数为变量进行了主成分分析。分析结果显示,成分 1 和成分 2 能够解释所产生现象的 86.8%,其中主成分 1 占 52.2%,主成分 2 占 34.6%。由图 3 旋转空间中的成分图可见,主成分 1 更能代表 Al、Pb、Mn、Sand (砂)、BSi (生物硅)、Silt (粉砂)、Clay (黏土) 这七个变量因素,其中 Al 和 Mn、Pb、砂为正载荷,而 BSi 与粉砂、黏土则为负载荷。主成分 2 适合代表 Cu、Zn、Cr、Co、Fe、Mn 和黏土这七个变量。根据各个变量的特点进一步分析,主成分 1 中最明显的正负载荷 Al 和 BSi 分别代表了岩源性和生物源性物质,可以把主成分 1 解释为物源因子;而主成分 2 可以解释为受黏土粒径沉积物含量影响的因子。

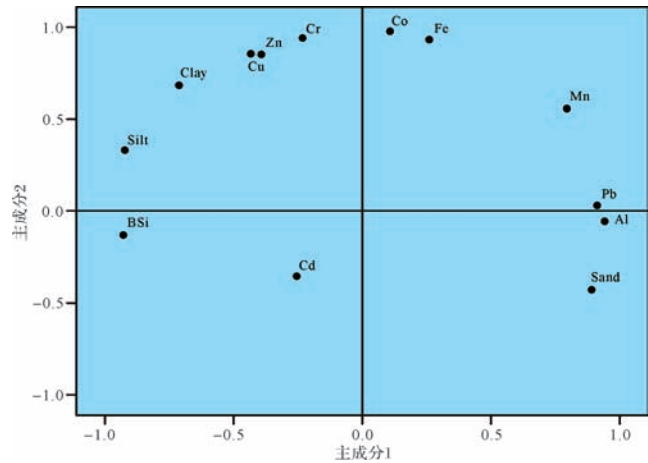


图 3 旋转空间中的成分图

Fig.3 Component plot in rotated space

表 4 普里兹湾表层沉积物中微量元素的富集系数

Table 4 Enrichment factors of the trace metals in the surface sediments of Prydz Bay

站位	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Co	Fe	Mn
IS-5	0.5	5.2	1.6	5.4	0.9	0.6	1.0	1.0
IS-7	0.7	5.0	2.6	5.1	1.4	0.9	1.1	1.2
IS-9	0.7	8.3	2.2	4.0	1.1	0.8	0.8	1.6
IS-10	0.5	8.6	2.2	4.2	1.1	0.8	0.9	1.3
IS-11	0.4	6.0	2.2	4.2	0.9	0.9	1.0	1.6
IS-21	0.5	4.3	1.8	3.5	0.7	0.6	0.7	1.2
P2-9	0.6	4.0	1.2	3.3	0.7	0.6	0.7	1.0
P2-14	1.7	4.3	2.8	7.3	1.3	0.9	1.0	0.9
P3-15	2.7	3.4	5.8	6.3	2.3	1.4	1.6	0.8
P3-16	2.9	3.6	5.0	9.5	2.3	1.3	1.3	0.9
P4-9	1.2	6.5	3.9	9.7	1.5	1.2	1.1	1.3
P4-11	3.4	3.7	6.4	8.7	2.8	1.6	1.8	1.2
P4-12	2.4	3.0	4.0	9.7	1.9	1.1	1.1	0.8
P4-13	2.1	2.5	3.4	7.3	1.6	1.0	1.1	0.8
P3-6	4.8	5.0	4.8	5.1	2.7	2.5	2.1	2.4
P3-9	3.3	5.4	5.5	5.2	3.2	2.1	1.9	1.8

2.4 主成分分析

运用 SPSS 20 统计软件,以 16 个站位为样本,以

3 讨论

微量元素的富集可能是由自然过程引起,也有可能是污染导致。考虑到陆壳具有不同的岩石类型及其风化程度,通常 $EF < 10$ 被认为产生的富集是自然过程造成的^[34]。普里兹湾海域表层沉积物中微量元素的 EF 值均小于 10,可以认为未受到人为污染的影响。而普里兹湾与南大洋其他未明显受到人类活动影响海域的沉积物中微量元素含量水平的一致性(表 1),也进一步证实了该观点。由于普里兹湾周边缺少裸露的土壤及明显的河流输入,南极大陆岩石风化产物和海洋生物源性沉降成为微量元素的主要来源。当然,南美大陆的陆源性颗粒物通过大气远距离输送沉降也是南极海域沉积物中微量元素的可能来源^[35-36]。普里兹湾海域大气沉降通量估算值为 $0.0005 \sim 0.0050 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{d}$,即最大年际沉降通量为 $1.825 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{y})$ ^[37]。假设大气颗粒物中的微量元

素与地壳元素组成近似,采用地壳中元素含量均值^[28]计算得到普里兹湾微量元素的年际最大大气沉降通量(表3)。由表3可见,估算的大气沉降通量最大值远小于该海域的沉积通量(不足1‰),理论上认为大气沉降对微量元素沉积的影响可以忽略不计,即普里兹湾表层沉积物中微量元素主要为岩源性和生源性输入。

沉积物粒径分布能在一定程度上反映其主要物质来源。大颗粒的物质通常为矿质颗粒物,岩源性输入为主^[22]。而细颗粒物则富含有机质,这些有机质通常为上层水体中海洋生物的排泄物和残体在海底的沉积。研究表明,普里兹湾陆架区硅质软泥为主的沉积物中有机质含量很高,其中生物硅含量甚至高达85%^[38]。普里兹湾冰架边缘区主要为大颗粒的砂质沉积,而陆架区、陆坡深海区基本上是以粉砂和黏土为主的细颗粒物。三个海区沉积物粒径分布特征与生源物质BSi的分布具有很好的一致性。由此我们认为,岩源性输入对冰架边缘沉积物中微量元素的贡献较大;而P2-9站位于陆架坡折处,由于受到南极辐散带的影响,水体稳定性差,底部沉积物在强水动力的分选作用下,大颗粒物含量高,微量元素也主要来源于岩石风化产物;陆架、陆坡深海泥质沉积区受到明显的生物源性输入的影响,而且富含有机质的细颗粒物会对沉积物中微量元素的富集产生影响,即沉积物中微量元素的含量与粒径负相关,粒径越小,微量元素的含量越高^[39]。

EF≈1说明沉积物中元素组成与陆壳基本一致,可以认为这些元素主要来源于岩石风化产物。可见,P2-9站位的微量元素Cu、Zn、Cr、Co、Fe、Mn主要为岩源性输入,而冰架边缘区的Cu、Cr、Co、Fe、Mn及陆架区的Co、Fe、Mn也均主要来源于岩源性物质。Pb、Zn、Cd在三个海区均出现了明显的富集,而在陆坡深海区所有元素都出现富集。既然排除了人类活动的影响,可能是当地岩石矿物组成与地壳均值的差异导致的“富集”表象,也有可能是生物吸收沉降、颗粒物吸附等生物、理化过程导致的真正的“富集”。从主成分分析结果来看,明显正载荷的Al、Pb、Mn主要为岩源性的输入,即使Pb在三个海区富集明显,尤其是在冰架边缘区。由于冰架边缘区以粗颗粒物为主,有机质含量低,且冰架前缘沿岸流冲刷剧烈,生物和理化作用对沉积物中Pb的富集不会有明显的影响,因此普里兹湾沉积物中Pb的富集现象可能是当地岩石风化产物中Pb的含量高造成的。Cu、Zn、Cr、

Co、Fe、Mn在主成分2中与黏土均为明显正载荷,推测这六种元素易于在黏土粒级的沉积物中富集,明显受到生源性物质输入的影响。而Cd则在生物量最高的陆架区富集最明显,Cd的富集系数与BSi含量的分布趋势一致,且Cd与BSi在主成分分析的成分图中处于同一象限,推测沉积物中Cd的来源与生物硅一致。真光层水体中硅藻对Cd进行吸收利用并同化。在硅藻死亡后,一部分Cd在有机质降解过程中重新释放到海水中,另一部分Cd则与硅藻残体结合沉降海底,并在硅质软泥中富集。

4 结论

(1) 普里兹湾沉积物中的微量元素含量与南大洋其他海域具有很好的可比性。Cu、Zn、Cr、Co、Fe、Mn的含量在陆坡深海区明显高于冰架边缘区和陆架区;Al、Pb的含量在冰架边缘区较高;而Cd的含量在各个海区差异不大,在陆架区相对较高。

(2) Pb、Zn、Cd在三个海区均有明显的富集,Cu、Cr、Co、Fe、Mn在冰架边缘和陆架区没有富集或者富集不明显;所有元素在陆坡深海区均有不同程度的富集。

(3) 南极大陆岩石风化产物和海洋生物源性沉降是普里兹湾微量元素的主要来源。冰架边缘区及陆架破折处P2-9站位的微量元素主要为岩源性输入。陆架区、陆坡深海区的微量元素Cu、Zn、Cr、Co、Fe、Mn明显受到生源性物质输入的影响。而普里兹湾沉积物中的Cd则主要来源于硅藻的吸收利用及硅质软泥的富集。

致谢 衷心感谢国家海洋局极地考察办公室对极地考察的关心和支持,感谢参加中国第21-27次南极科学考察任务的科考人员和“雪龙”船上的全体船员!

参考文献 (References)

- 1 Scouller R C, Snape I, Stark J S, et al. Evaluation of geochemical methods for discrimination of metal contamination in Antarctic marine sediments: a case study from Casey Station[J]. *Chemosphere*, 2006, 65(2): 294-309.
- 2 Böning P, Brumsack H J, Schnetger B, et al. Trace element signatures of Chilean upwelling sediments at ~36°S[J]. *Marine Geology*, 2009, 259(1/2/3/4): 112-121.
- 3 Ribeiro A P, Figueira R S L, Martins C C, et al. Arsenic and trace metal contents in sediment profiles from the Admiralty Bay, King George Island, Antarctica[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62(1): 192-196.

- 4 Heimbürger L E, Cossa D, Thibodeau B, et al. Natural and anthropogenic trace metals in sediments of the Ligurian Sea (Northwestern Mediterranean)[J]. *Chemical Geology*, 2012, 291: 141-151.
- 5 Angino E E, Andrews R S. Trace element chemistry, heavy minerals, and sediment statistics of Weddell Sea sediments[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1968, 38(2): 634-642.
- 6 Karbassi, A R, Amirzad R. Geochemistry of heavy metals and sedimentation rate in a bay adjacent to the Caspian Sea[J]. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 2004, 1(3): 191-198.
- 7 Durán I, Sánchez-Marín P, Beiras R. Dependence of Cu, Pb and Zn remobilization on physicochemical properties of marine sediments[J]. *Marine Environmental Research*, 2012, 77: 43-49.
- 8 Sirocko F, Garbe-Schönberg D, Davey C. Processes controlling trace element geochemistry of Arabian Sea sediments during the last 25,000 years[J]. *Global and Planetary Change*, 2000, 26(1/2/3): 217-303.
- 9 Santos I R, Fávoro D I T, Schaefer C E G R, et al. Sediment geochemistry in coastal maritime Antarctica (Admiralty Bay, King George Island): Evidence from rare earths and other elements[J]. *Marine Chemistry*, 2007, 107(4): 464-474.
- 10 Caetano M, Prego R, Vale C, et al. Record of diagenesis of rare earth elements and other metals in a transitional sedimentary environment[J]. *Marine Chemistry*, 2009, 116(1/2/3/4): 36-46.
- 11 Angino E E. Geochemistry of Antarctic pelagic sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1966, 30(9): 939-961.
- 12 Gasparon M, Ehrler K, Matschullat J, et al. Temporal and spatial variability of geochemical backgrounds in the Windmill Islands, East Antarctica: Implications for climatic changes and human impacts[J]. *Applied Geochemistry*, 2007, 22(5): 888-905.
- 13 Asahara Y, Takeuchi F, Nagashima K, et al. Provenance of terrigenous detritus of the surface sediments in the Bering and Chukchi Seas as derived from Sr and Nd isotopes: Implications for recent climate change in the Arctic regions[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2012, 61-64: 155-171.
- 14 Cosma B, Soggia F, Abelmochi M L, et al. Determination of trace metals in Antarctic sediments from Terra Nova Bay-Ross Sea[J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1994, 55(1/2/3/4): 121-128.
- 15 Niemistö L, Perttälä M. Trace elements in the Weddell Sea water and sediments in the continental shelf area[J]. *Chemosphere*, 1995, 31(7): 3643-3650.
- 16 Ravanelli M, Tubertini O, Valcher S, et al. Heavy metal distribution in sediment cores from western Ross Sea (Antarctica)[J]. *Water, Air, and Soil pollution*, 1997, 99(1/2/3/4): 697-704.
- 17 Giordano R, Lombardi G, Ciaralli L, et al. Major and trace elements in sediments from Terra Nova Bay, Antarctica[J]. *Science of the Total Environment*, 1999, 227(1): 29-40.
- 18 Andrade S, Poblet A, Scagliola M, et al. Distribution of heavy metals in surface sediments from an Antarctic marine ecosystem[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2001, 66(2): 147-158.
- 19 Niemistö L, Perttälä M. Trace elements in the Weddell Sea water and sediments in the continental shelf area[J]. *Chemosphere*, 1995, 31(7): 3643-3650.
- 20 Ianni C, Magi E, Soggia F, et al. Trace metal speciation in coastal and off-shore sediments from Ross Sea (Antarctica)[J]. *Microchemical Journal*, 2010, 96(2): 203-212.
- 21 Howe J A, Wilson C R, Shimmield T M, et al. Recent deep-water sedimentation, trace metal and radioisotope geochemistry across the Southern Ocean and Northern Weddell Sea, Antarctica[J]. *Deep-Sea Research II*, 2007, 54: 1652-1681.
- 22 Sun W P, Hu C Y, Weng H X, et al. Sources and geographic heterogeneity of trace metals in the sediments of Prydz Bay, east Antarctica[J]. *Polar Research*, 2013, 32: 20049.
- 23 Smith N, Tréguer P. Physical and chemical oceanography in the vicinity of Prydz Bay, Antarctica[M]//El-Sayed S Z. *Southern Ocean Ecology: The BIOMASS Perspective*. Cambridge: Cambridge University Press, 1994: 25-44.
- 24 Mortlock R A, Frölich P N. A simple method for the rapid determination of biogenic Opal in pelagic marine sediments[J]. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 1989, 36(9): 1415-1426.
- 25 Wentworth C K. A scale of grade and class terms for clastic sediments[J]. *Journal of Geology*, 1922, 30: 377-392.
- 26 Bowen H J M. *Environmental Chemistry of the Elements*[M]. London: Academic Press, 1979: 5-15.
- 27 Sutherland R A. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii[J]. *Environmental Geology*, 2000, 39(6): 611-627.
- 28 Taylor S R. Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1964, 28(8): 1273-1285.
- 29 Cochran J K, Hirschberg D J, Wang J, et al. Atmospheric deposition of metals to coastal waters (Long Island Sound, New York U.S.A.): evidence from saltmarsh deposits[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1998, 46(4): 503-522.
- 30 Ragueneau O, Gallinari M, Corrin L, et al. The benthic silica cycle in the Northeast Atlantic: annual mass balance, seasonality, and importance of non-steady-state processes for the early diagenesis of biogenic opal in deep-sea sediments[J]. *Progress in Oceanography*, 2001, 50(1/2/3/4): 171-200.
- 31 Valppu H, Strand K, Huusko A. Spectral analysis of physical properties of the Prydz Bay sediments, Antarctica for identifying cycles for the last five million years[J]. *Geophysica*, 2009, 45(1/2): 215-223.
- 32 孙维萍. 南极普里兹湾微量元素锌(Zn)镉(Cd)的分布与来源及其对初级生产力的指示[D]. 杭州: 浙江大学, 2013. [Sun Weiping. Distribution and sources of micronutrients zinc and cadmium and their role in tracing primary productivity in Prydz Bay, Antarctica[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.]
- 33 Blaser P, Zimmermann S, Luster J, et al. Critical examination of trace element enrichments and depletions in soils: As, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn in Swiss forest soils[J]. *Science of the Total Environ-*

- ment, 2000, 249(1/2/3): 257-280.
- 34 Duce R A, Hoffman G L, Ray B J, et al. Trace metals in the marine atmosphere: Sources and fluxes[M]//Windom H, Duce R A. Marine Pollutant Transfer. Boston: Massachusetts, 1976: 77-119.
- 35 Martin J H, Fitzwater S E, Gordon R M. Iron deficiency limits phytoplankton growth in Antarctic waters[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1990, 4(1): 5-12
- 36 Cassar N, Bender M L, Barnett B A, et al. The Southern Ocean biological response to Aeolian iron deposition[J]. Science, 2007, 317(5841): 1067-1070.
- 37 Wagener T, Guieu C, Losno R, et al. Revisiting atmospheric dust export to the Southern Hemisphere ocean: Biogeochemical implications [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2008, 22(2): GB002984.
- 38 扈传昱,姚梅,于培松,等. 南大洋普里兹湾沉积物中生物硅含量与分布[J]. 海洋学报,2007,29(5):48-54. [Hu Chuanyu, Yao Mei, Yu Peisong, et al. Biogenic silica in surficial sediments of Prydz Bay of the Southern Ocean[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2007, 29(5): 48-54.]
- 39 Ciaralli L, Giordano R, Lombardi G, et al. Antarctic marine sediments: distribution of elements and textural characters[J]. Microchemical Journal, 1998, 59(1): 77-88.

Distribution and Sources of Trace Metals in the Surface Sediments of Prydz Bay, Antarctica

SUN WeiPing¹ HU ChuanYu¹ HAN ZhengBing¹ WENG HuanXin² CHEN JiYu¹ PAN JianMing¹

(1. The Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou 310012, China;

2. Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Trace elements in marine sediment can be used to reflect anthropogenic influence on marine systems, to trace the origin and transformation of the marine substances, to indicate sedimentary environment and early diagenesis, and even to reconstruct the global change of climate. However, studies of trace elements in marine sediments are rarely reported from east Antarctica. In this case, sixteen surface sediments were collected during the 21st to 27th cruises of Chinese Antarctic Expedition in order to investigate the distribution and source composition of trace elements in the surface sediments from Prydz Bay and east Antarctica. Samples were analyzed using ICP-MS to determine the content of trace elements in the bay. Combined with biogenic silica and grain size of the sediments, the sources of trace elements were discussed based on the enrichment factors and principle component analysis. The results show that the trace metal contents range from 7.9 to 75.6 $\mu\text{g/g}$ for Cu, from 6.7 to 39.0 $\mu\text{g/g}$ for Pb, from 32.8 to 96.6 $\mu\text{g/g}$ for Zn, from 0.25 to 0.44 $\mu\text{g/g}$ for Cd, from 28.0 to 78.2 $\mu\text{g/g}$ for Cr, from 5.1 to 17.8 $\mu\text{g/g}$ for Co, from 1.26% to 3.22% for Al, from 1.31% to 3.30% for Fe and from 158 to 638 $\mu\text{g/g}$ for Mn. The metal contents in the surface sediments from Prydz Bay are comparable to those obtained from the other regions of the Southern Ocean. The contents of Cu, Zn, Cr, Co, Fe and Mn are higher in the open sea and continental slope area; the contents of Al and Pb are higher at the edge of Amery Ice Shelf; while the contents of Cd are higher in the continental shelf area. Pb, Zn, and Cd are significantly enriched in all studied sites; no obvious enrichment is observed for Cu, Cr, Co, Fe and Mn from ice shelf edge and continental shelf area; while all trace elements are variously enriched in the sediments from continental slope and open sea area. The main sources of the trace elements in Prydz Bay are mineral particles derived from the erosion and weathering of the surrounding basement, and marine biological deposition. The trace metals at the edge of the ice shelf and site of P2-9 are primarily from local sourced lithogenic inputs. The trace metals of Cu, Zn, Cr, Co, Fe and Mn in the areas of continental shelf and deep sea are significantly influenced by biological input. The trace element of Cd in the sediments from the bay is suggested to be mainly from biogenic sources, which is assimilated by diatom through the uptake from the water column in the euphotic layer and settled down on the marine floor associated with biogenic silica in the body remains.

Key words: Trace metal; Biogenic source; Lithogenic source; Sediment; Antarctica