

环球海洋大气气溶胶化学研究

III: 金属形态和入海通量*

陈立奇 余 群 杨绪林

(国家海洋局第三海洋研究所, 厦门 361005)

提 要

中国第三次南极考察和环球科学考察, 历经北太平洋、南太平洋、南极半岛海域、南大西洋、北印度洋, 以及沿途近岸海域, 共收集 58 个气溶胶样品, 采用石墨炉原子吸收法分析其中的水可溶态和酸可溶态的 Mn、Fe、Pb、Cu、Cd。气溶胶中金属表现明显陆源向大洋输送的浓度梯度, 近岸海域上空金属含量大于大洋上空含量, 北太平洋上空含量高于南太平洋和南极半岛海域。气溶胶中金属的水可溶程度, 在近岸海域上空依次为 $Cd > Mn > Cu > Fe > Pb$, 百分比分量分别为 39%, 36%, 23%, 14% 和 5.3%; 在大洋上空依次为 $Cd > Mn > Fe > Cu > Pb$, 百分比分量分别为 62%, 44%, 11%, 3.1% 和 2.5%。本文还计算和比较各观测海区上空金属从大气输入海水的通量。

关键词: 世界大洋; 近岸海域; 气溶胶; 金属

一、引 言

海洋上空气溶胶中微量金属的水溶程度, 不但会影响光散射特征和气颗转换速率^[1], 而且对海洋生物化学循环有着重要影响。金属的溶解度不仅反映它们在气溶胶中的化学形式分量, 而且反映了它们在大气环境中迁移变化特征。大气中酸性气体的氧化或吸附在气溶胶表面, 都会影响着气溶胶的溶解性, 因此, 气溶胶在不同的 pH 介质中对金属的释放也有重要影响, 一般表现低 pH, 高水可溶性; 高 pH, 低水可溶性, 气溶胶中的 Pb、Cu、Cd 表现更为明显^[2]。海水中的 Mn 和 Fe 是属于生物所需的痕量元素。越来越多的研究表明, 铁是控制和影响浮游植物生长的主要因素之一, 尤其在高营养盐低生物量的海区, 铁对浮游植物生长起着限定因子作用, 而世界大洋浮游植物的生长和分布, 其光合作用吸收 CO_2 , 将会影响海洋对大气中 CO_2 的吸收通量^[3]。Cu 也是

1992年7月3日收到, 11月10日收到修改稿。

* 本文I: "Na, Mg, K, Cl, Ca, Br, F的特征"发表于《海洋学报》, 14(6), 45-55; II: "来源示踪元素的特征"发表于《海洋与湖泊》, 24(3), 264-271。

海洋生物所必需的微量元素,但过量的 Cu 对生物体是有毒的。Pb 和 Cd 是主要海洋污染指标之一,溶解的 Pb、Cd 可通过吸附在有机、无机胶体或生物体的粘液表面,或通过充当“营养”金属等途径而进入海洋食物链,继而为鱼、贝类所富集,导致毒害^[4]。因此,研究气溶胶中金属的化学形态及含量,对于了解它们对海洋生物动力学过程也是有重要意义的。最近的全球金属通量估算表明,从大气输入海洋的 Pb 和 Cd 的量明显大于来自河流的输入,而 Cu 和 Fe 的输入,两者相当^[4]。来自河流的溶解态铁在河口会出现凝聚作用,使输入海洋的溶解态 Fe 减少 90%;而陆源金属在风系作用下,可通过大气输送到几千公里以外的大洋上空,大洋表层海水的重金属含量都较低,因此,研究海洋气溶胶中水和酸可溶金属分量以及其输入海水通量,对于大海洋生态系统、生物多样性和全球变化研究都具有重要意义。

二、样品采集和分析

1. 样品采集

1986 年 11 月至 1987 年 5 月,利有我国极地号科学考察船的南极和环球科学考察,共采集了 58 个气溶胶样品,其中北太平洋 5 个,南太平洋 5 个,南极半岛海域 18 个,南大西洋 4 个,北印度洋 4 个,近岸海域为 22 个,近岸海域系指船经智利、新加坡、中国海等海域上空采集的样品。

图 1 为极地号的环球航线图。采样头安放在极地号船的上甲板,抽气泵安放在离采样头低 4m 的下风处,用塑料软管与采样头连接,抽气泵采用美国 METEK 公司生产的高容量真空泵,滤膜为美国瓦特曼 41 型滤纸,平均每个样品采集 50 小时左右,平均流量约为每小时 60 m^3 ,每个样品富集近 3000 m^3 大气体积。

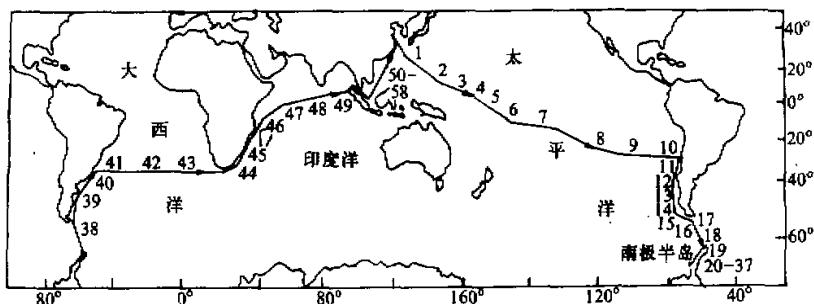


图 1 极地号环球科学考察航行图

2. 石墨炉原子吸收法测定

气溶胶样品在 100 级的洁净台上,用有机玻璃制成的剪刀剪出 $1/4$,放入聚乙烯瓶内,加入石英蒸馏水,振荡 15 分钟,静置过夜,取清液;使用石墨炉原子吸收分光光度计测定水可溶态锰(wMn)、水可溶态铁(wFe),水可溶态铅(wPb)、水可溶态铜

(wCu)、水可溶态镉(wCd); 静置液再用浓度为 1mol 的亚沸硝酸溶液提取, 测定酸可溶态锰(aMn)、铁(aFe)、铅(aPb)、铜(aCu)和镉(aCd)。原子吸收法用氘灯背景校正, 数据采用标准曲线法计算^[5]。

三、结果和讨论

各观测海区上空气溶胶中金属的平均浓度和标准偏差列在表 1。图 2 为水可溶态和酸可溶态金属在各海区的平均浓度分布。

1. 浓度变化

图 2a 为水可溶态锰和酸可溶态锰在各海区的浓度分布。wMn 在南太平洋和南极半岛海域上空含量最低, 北太平洋, 南大西洋和北印度洋含量次之, 而近岸海域上空含量最高。aMn 在南太平洋最低, 南极半岛海域和南大西洋上空次之, 北太平洋上空含量为北印度洋的 4 倍, 近岸海域上空又比北太平洋高出 2 倍。海水中可溶态的 Mn 一般富集在表层, 因此, 大气输入是表层海水中 Mn 的重要来源。本文作者在百慕大群岛上空, 观测到海洋气溶胶的 Mn, 既来自北美工业污染飘尘, 又来自非洲的撒哈拉沙漠的沙尘, 两地离百慕大群岛海域达数千公里^[6], 故海洋气溶胶中 Mn 主要来自大陆。

图 2b 为水可溶态铁和酸可溶态铁在各观测海区上空的平均浓度分布。各海区的 wFe 比 aFe 浓度低。wFe 在南极半岛海域上空的含量最低, 南太平洋次之, 而南大西洋和近岸海域上空较高。aFe 在南极半岛海域上空明显高于南太平洋, 也比南大西洋高, 北印度洋上空含量是南大西洋的 3 倍, 而北太平洋上空含量高出北印度洋近 2 倍, 近岸海域则为北太平洋的 2.4 倍。研究表明, 海洋气溶胶中的 Fe 也主要来自陆源矿物沙尘或工业飘尘, 在北太平洋观测到来自亚洲西北沙漠的尘暴, 含铁量高达 10%—15%^[7]。

图 2c 为水可溶态铅和酸可溶态铅在各观测海区上空的平均浓度分布。各海区的 wPb 明显低于 aPb。wPb 在北太平洋、南

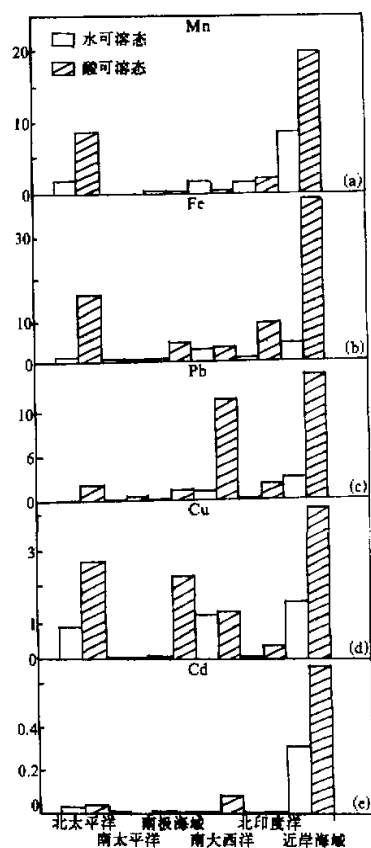


图 2 各观测海区上空金属浓度分布(ng / m^3)

表 1 各观测海区上空气溶胶中金属的浓度(ng/m^3)

金 属	形态	北太平洋	南太平洋	南极半岛海域	南大西洋	北印度洋	近岸海域
Mn	水可溶	1.7(1.1)	0.05(0.02)	0.32(0.29)	1.7(2.6)	1.7(1.6)	8.5(18.1)
	酸可溶	9.1(13.1)	0.06(0.02)	0.41(0.30)	0.48(0.68)	2.1(1.7)	19.8(29.5)
Fe	水可溶	1.1(2.4)	0.22(0.13)	0.09(0.19)	3.0(4.7)	0.63(0.47)	4.2(4.2)
	酸可溶	16.4(10.6)	0.32(0.14)	4.6(17.3)	3.1(3.1)	9.6(2.9)	39.6(94.8)
Cu	水可溶	0.91(2.0)	0.01(0.01)	0.10(0.26)	1.2(2.4)	0.06(0.04)	1.6(3.0)
	酸可溶	2.7(5.3)	0.01(0.02)	2.3(6.9)	1.3(1.7)	0.40(0.13)	4.3(5.8)
Pb	水可溶	0.07(0.14)	0.08(0.11)	0.06(0.21)	1.1(2.2)	0.03(0.03)	2.5(6.0)
	酸可溶	1.9(2.8)	0.62(0.44)	1.1(2.3)	11.5(20.1)	2.0(1.3)	15.0(16.8)
Cd	水可溶	0.03(0.03)	0.06(0.001)	0.03(0.07)	0.007(0.008)	0.011(0.007)	0.32(0.67)
	酸可溶	0.05(0.07)	0.0002(0.0003)	0.02(0.04)	0.09(0.16)	0.02(0.01)	0.68(1.3)

注: 括号内数据为标准偏差。

极半岛海域, 北印度洋和南太平洋上空的含量较低, 而南大西洋较高, 近岸海域最高。南大西洋较高含量的 Pb 可能与北美和西欧陆源高工业污染 Pb 排放和输送有关。aPb 在南大西洋上空也高达 $11.5 \text{ ng}/\text{m}^3$, 接近近岸海域上空 Pb 的含量, 高出其他海域上空含量 5—10 倍。Pb 是人类活动产生的对生物危害性较大的一类金属。污染源 Pb 的全球输送已在格陵兰雪样, 南极冰柱样中被发现^[8]。在太平洋和大西洋调查中还发现, Pb 的海水垂直分布, 表层浓度最大, 这与大气 Pb 的输入有关^[9]。

图 2d 为水可溶态铜和酸可溶态铜在各观测海区上空的平均浓度分布。南太平洋、南极半岛海域和北印度洋上空的 wCu 含量较低, 北太平洋和南大西洋上空含量较高, 约高出其他观测海域 10 倍。aCu 在南太平洋最低, 北印度洋次之, 而南极半岛海域上空含量较高, 相当北太平洋含量, 且高于南大西洋的含量。南极半岛及其邻近海域, 由于人类活动加剧, 其大气环境也受到影响。当然南极半岛海域上空出现的较高含量 aFe 和 aCu, 也有可能来自南半球的澳大利亚中部或智利的沙漠尘暴经长距离输送影响^[10]。

图 2e 为水可溶态镉和酸可溶态镉在各观测海区上空的平均浓度分布。近岸海域上空的 wCd 和 aCd 都明显地高于其他观测海区, 表明陆源 Cd 在向大洋输送过程中, 明显地在近海沉降而损失。aCd 在南大西洋也表现比近岸海域之外的其他观测海域上空含量高。Cd 被认为是亲气性元素, 它在大气中往往表现相对于它在地壳中丰度或海水中丰度而富集, 这类元素在大气中往往表现都市上空的含量高于市郊, 高于近岸和高于大洋上空的含量。

2. 水可溶态金属分量

为了比较各观测海区的水可溶态金属的水可溶程度, 我们采用百分比分量, 即水可溶态金属百分比分量为水可溶态金属浓度除以水可溶态与酸可溶态浓度之和乘上百分之百。表 2 为各观测海区气溶胶中水可溶态金属的百分比分量。wMn 的百分比分量在 6 个观测海区分布比较均匀, 除了南大西洋为 64%, 超过 50% 外, 其它海区均小于 50%。从

35%—44%。 $w\text{Fe}$ 的百分比分量在南太平洋和南大西洋上空最高, 分别为 40% 和 33%, 近岸上空为 14%, 其它海区小于 10%。南极半岛海域上空气溶胶中的 Fe 主要是以水不溶态形式存在。 $w\text{Pb}$ 的百分比分量在各观测海区都小于 10%。南极半岛海域上空的 $w\text{Pb}$ 百分比分量平均值为 5.1%, 但变差较大, 达 20%, 说明该海区也存在有较高水可溶态 Pb 分量, 可能来自污染源的 Pb。 $w\text{Cu}$ 的百分比分量在南大西洋和近岸海域上空最高, 达 23%, 北印度洋上空为 12%, 其它海域上空小于 10%, 南太平洋上空气溶胶中 Cu 主要以水不溶态形式存在。 $w\text{Cd}$ 百分比分量在南太平洋上空高达 97%, 在北太平洋和南极半岛海域上空也大于 50%, 表明上述海域上空气溶胶中 Cd 主要以水可溶态形式存在。 $w\text{Cd}$ 百分比分量在北印度洋和近岸海域上空为 39%, 南大西洋上空则小于 10%。研究表明, 人类活动已明显影响 Pb 和 Cd 等金属的地球化学循环。一些作者对不同地区上空的气溶胶中金属进行了海水可溶性实验, Hardy 等观测到华盛顿市区上空气溶胶中 Pb 有 62% 可溶于海水, 郊区为 54%^[11]。Hodgt 发现加州沿海城市上空气溶胶 Pb 可溶海水为 39%, 而海上气溶胶 Pb 则为 13%, Cd 则大于 80%^[12]。用 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 同位素示踪分析表明, 可溶性的 Pb 和 Cd 主要来自陆源污染。而来自陆源矿物气溶胶中的铝硅酸盐中金属则很难溶于海水, 其水可溶分量一般小于 10%^[2]。

表 2 气溶胶中水可溶态金属的百分比分量(%)

金 属	北太平洋	南太平洋	南极半岛海域	南大西洋	北印度洋	近岸海域
Mn	35(23)	44(6.3)	41(12)	64(25)	43(6.3)	36(20)
Fe	4.8(8.6)	40(11)	1.8(3.1)	33(24)	6.4(5.7)	14(25)
Pb	2.2(3.1)	7.7(7.7)	5.1(20)	4.6(5.3)	0.8(1.0)	5.3(7.5)
Cu	6.4(12)	0.1(0.1)	4.3(7.5)	23(24)	12(4.5)	23(25)
Cd	52(17)	97(4.4)	61(31)	8.9(11)	30(6.8)	39(22)

注: 括号内数据为标准偏差。

为说明陆源气溶胶金属向大洋迁移特征, 比较它们在大洋和近岸海域上空水可溶程度, 我们把所有观测数据分为大洋和近岸海域两个组, 两组的水可溶态金属百分比分量列在表 3, 图 3 绘出它们在大洋和近岸海域的比较图。气溶胶中 Mn 和 Fe 在大洋和近岸海域上空水可溶程度差别较小, 这可能反映 Mn 和 Fe 的来源单一或在进入海洋大气前经过较好的混合过程, 因此在海洋上空的输送中保持相对稳定的水可溶性。气溶胶中 Cu 从近岸海域进入大洋, 其水可溶程度从 23% 下降到 3.1%, Cd 则明显升高, 而 Pb 无论在近岸海域或大洋上空水可溶程度都较低, 其原因比较复杂, 即气溶胶在传输过程中, 本底气溶胶会不断变化, 既有大颗粒比小颗粒除去较快原因, 也有别的物质源的汇入, 还会由于环境要素的变化而产生物理化学变化等因素影响。一些作者进行不同的地区气溶胶的海水可溶性实验结果, Mn 为 25%—49%, Fe 为小于 1%—50%, Pb 为 13%—90%, Cu 为 15%—86%, Cd 为 81%—84%^[12, 13]。我们在东中国海的黑潮流域上空观测到气溶胶中金属水可溶程度顺序为 $\text{Cd} > \text{Mn} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Fe}$; 本研究的近岸海域上空依序为 $\text{Cd} > \text{Mn} > \text{Cu} > \text{Fe} > \text{Pb}$, 大洋上空为 $\text{Cd} > \text{Mn} > \text{Fe} > \text{Cu} > \text{Pb}$ 。其中 Cd 和 Mn 的顺序比较一致, 而 Pb、Cu 和 Fe 的顺序则依观测海区的不同而有所变化。

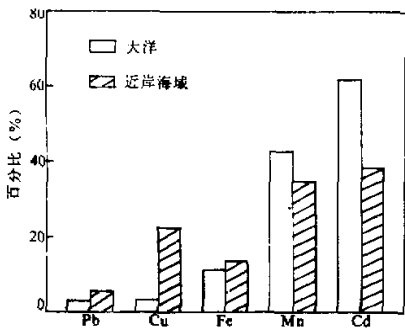


图 3 水可溶态金属百分比分量比较

表 3 大洋和近岸海域上空水可溶态金属百分比分量比较

金 属	大 洋	近岸海域
Mn	44(11)	36(20)
Fe	11(18)	14(25)
Pb	2.5(5.0)	5.3(7.5)
Cu	3.1(6.0)	23(25)
Cd	62(34)	39(22)

注：括号内数据为标准偏差。

3. 金属输入海水通量

评价大气气溶胶中金属输入海水的通量常采用沉降模式，即总沉降通量 F_t (单位为 $\text{mg m}^{-2} \text{a}^{-1}$):

$$F_t = F_d + F_w$$

其中 F_d 为干沉降通量， F_w 为湿沉降通量。它们又分别等于

$$F_d = V_d \cdot C_a$$

$$F_w = P \cdot S \cdot C_a \cdot \rho^{-1}$$

其中 V_d 为气溶胶颗粒的沉降速率，单位为 m s^{-1} ； C_a 为气溶胶中金属的浓度，单位为 mg m^{-3} ； P 为年降雨量，单位为 mm a^{-1} ； S 为金属的雨水清除率，无量纲； ρ 为空气的比重，单位为 g m^{-3} 。根据 GESAMP^[14]1989 年的建议，Cd、Cu 和 Pb 的 V_d 采用 0.1 cm s^{-1} ， S 采用 200，Fe、Mn 采用 1.0 cm s^{-1} ， S 采用 100。各观测海区上空气溶胶中水可溶态和酸可溶态金属输入海水通量计算结果列在表 4。表 5 列出总沉降通量，同时还列出一些作者的研究结果^[14-16]。

由表 5 可知，在多数观测海区，不同作者所观测到气溶胶中金属输入海水的通量较相近，差值多数在 5 倍之内；但也存在有差值大于 10 倍以上的观测海区，如 Fe 在北太平洋上空的差值为 10 倍，南太平洋为 25 倍；Pb 在南大西洋上空为 19 倍。西北亚洲沙漠对太平洋的沙尘输送个例已被许多观测所证实^[17]，因此而产生大洋上空阵发性高浓度 Fe，它输入大洋海水后会激发浮游植物快速生长。Fe 在大洋生态系中的化学和生物动力学以及在全球气候变化中的作用，正越来越多地引起人们的关注。

南大西洋上空，则由于来自北美或西欧的不同来源 Pb 输送也会产生气溶胶中 Pb 的浓度季节变化。金属的大气输入对大洋环境有着重要影响。调查表明^[18]，Fe 在北太平洋的底质沉积通量为 $26 \text{ mg m}^{-2} \text{a}^{-1}$ ，而本调查观测到大气输入北太平洋的 Fe 通量为 $19 \text{ mg m}^{-2} \text{a}^{-1}$ ，而在该海区的矿物学研究表明，来自大气 Fe 约占海底非生物源 Fe 的 75%—90%。海水中的 Cu 和 Cd 则属于活性元素，可与海水中颗粒和生物作用，因

表 4 各观测海区上空金属输入海水通量($\text{mg m}^{-2} \text{a}^{-1}$)

金属	北太平洋			南太平洋			南太平洋海域			南大西洋			北印度洋			近岸海域		
	干	湿	溶解	干	湿	溶解	干*	湿	溶解	干	湿	溶解	干	湿	溶解	干	湿	溶解
Mn	水可溶 0.53(0.35)	1.3(0.87)		0.016(0.006)	0.028(0.011)		0.1(0.09)	0.54(0.8)		0.15(0.21)	0.21(0.29)		0.54(0.5)	1.4(1.3)		2.7(5.7)	8.5(18.1)	
	酸可溶 2.9(4.1)	7.1(10)		0.019(0.006)	0.034(0.011)		0.13(0.10)	0.03(0.06)		0.95(1.5)	1.3(2.0)		0.66(0.54)	1.7(1.4)		6.2(9.3)	20(30)	
Fe	水可溶 0.35(0.76)	0.86(1.9)		0.07(0.04)	0.12(0.07)		1.4(5.5)	0.98(0.98)		1.3(1.3)			0.20(0.15)	0.51(0.38)		1.3(1.3)	4.1(1.2)	
	酸可溶 5.2(3.3)	13(8.4)		0.1(0.04)	0.18(0.08)		2.0(7.0)			35(69)			3.0(0.9)	7.8(2.3)		12(30)	40(95)	
Pb(10^{-6})	水可溶 2.0(4.0)	11(22)		3.0(4.0)	9.0(10)		40(70)	360(630)		990(1700)			0.9(0.9)	5.0(5.0)		79(190)	500(1200)	
	酸可溶 60(90)	300(450)		20(10)	68(50)		3.0(8.0)	38(72)		100(210)			60(40)	320(320)		470(500)	3000(3400)	
Cu(10^{-6})	水可溶 29(63)	150(320)		0.3(0.3)	1.0(1.0)		72(220)	41(54)		110(150)			1.9(1.3)	9.6(6.0)		50(90)	320(600)	
	酸可溶 85(170)	430(850)		0.3(0.6)	1.0(2.0)		0.2(0.3)	0.2(0.3)		0.6(0.7)			13(41)	60(20)		140(180)	860(1100)	
Cd(10^{-8})	水可溶 0.9(0.9)	5.0(5.0)		0.2(0.03)	0.7(0.1)		0.9(2.2)			0.2(0.3)			0.3(0.2)	1.8(1.0)		10(20)	64(130)	
	酸可溶 1.6(2.2)	8.0(11)		0.006(0.009)	0.002(0.003)		0.6(1.3)	2.8(5.0)		8.0(10)			0.6(0.3)	3.0(2.0)		21(41)	140(260)	

注: * 南极半岛海域年沉雨量少, 略去湿沉降计算。干——干沉降; 湿——湿沉降。* * 近岸海域采用全球大洋平均降雨量。

表 5 各海区上空金属输入海水通量比较($\text{mg m}^{-2} \text{a}^{-1}$)

金属	北太平洋		南太平洋		南大西洋		北印度洋		近岸海域			
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	C	D
Mn	12	3.2	0.097	0.21	1.6	0.26	4.3	0.52	37	2.4	1-5	22
Fe	19	188	0.47	12.7	4.5	15.2	12	31.2	57	87	38	150
Pb	0.37	0.2	0.1	0.02	1.5	0.08	0.39	0.05	4.0	2.4	4-23	29
Cu	0.69	0.035-0.13	0.0026	0.0036-0.014	0.29	0.015-0.055	0.085	0.008-0.033	1.4	2.9	1-4.4	4.2
Cd	0.016	0.005-0.01	0.0009	0.0005-0.001	0.012	0.002-0.004	0.005	0.0013-0.0025	0.24	0.14	0.1-0.5	1

注: A 为本研究的总沉降通量; B 引自文献[15], C 引自文献[14], D 引自文献[16]

此, 它们可在水体中残存几百乃至上千年, 它们在北太平洋通过垂直混合上升入表层水体通量分别为 $0.13\text{mg m}^{-2}\text{a}^{-1}$ 和 $0.1\text{mg m}^{-2}\text{a}^{-1}$ ^[18], 而我们观测到来自大气的 Cu 和 Cd 分别为 0.69 和 $0.016\text{mg m}^{-2}\text{a}^{-1}$, 说明海气交换对大洋的 Fe、Cu、Cd 还是起着相当大作用; 而大洋表层海水中 Pb 主要来自大气已有更多的证据^[8, 9, 13]。

四、结 论

1. 气溶胶中金属从陆源向大洋输送中呈现明显的浓度梯度变化, 近岸海域上空含量高于大洋海域上空的含量。北太平洋高于南太平洋和南极半岛海域。工业污染源的 Pb、Cu 和 Cd 在南大西洋上空表现较高浓度。

2. 气溶胶中金属在各观测海区, 大都以酸可溶态形式存在。金属的水可溶程度在近岸海域上空依次为 $\text{Cd} > \text{Mn} > \text{Cu} > \text{Fe} > \text{Pb}$, 百分比分量分别为 39%、36%、23%、14% 和 5.3%; 而在大洋上空依次为 $\text{Cd} > \text{Mn} > \text{Fe} > \text{Cu} > \text{Pb}$, 百分比分量分别为 62%、44%、11%、3.1% 和 2.5%。

3. 海洋气溶胶中金属输入海水通量, Fe 在北太平洋接近底质沉积通量, Cu 和 Cd 对它们在水体循环起着重要影响, 大洋表层海水中 Pb 则主要来自大气。

参 考 文 献

- [1] Cadle, R.D. and Grams, G.W., 1975, Stratospheric aerosol particles and their optical properties, *Rev. Geophys. Space Phys.*, **13**, 475-481.
- [2] Maring, H.B. and Duce, R.A., 1987, The impact of atmospheric aerosols on trace metal chemistry in open ocean surface seawater. 1. aluminum, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **84**, 381-392.
- [3] Martin, J.H. and Gordon, R.M., 1988, Northeast Pacific iron distributions in relation to phytoplankton productivity, *Deep Sea Res.*, **35**, 177-196.
- [4] Gray, J.S., et al., 1991, Scientifically based strategies for marine environmental protection and management, *Marine Pollution Bulletin*, **22**(9), 432-440.
- [5] 余群, 陈立奇, 高鹏飞, 1991, 水和稀酸浸提直接石墨炉原子吸收法测定海洋气溶胶中的微量重金属, *海洋学报*, **13**(4), 581-587.
- [6] Chen Liqi and Duce, R.A., 1983, The sources of sulfate, vanadium and mineral matter in aerosol particles over Bermuda, *Atmos. Environ.*, **17**, 2055-2064.
- [7] Young, R.W., et al., 1991, Atmospheric iron inputs and primary productivity: phytoplankton responses in the North Pacific, *Global Biogeochemical Cycles*, **5**(2), 119-134.
- [8] Ng, A. and Patterson, C., 1981, Natural concentrations of lead in ancient Arctic and Antarctic ice, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **45**, 2109-2121.
- [9] Schaule, B.K. and Patterson, C.C., 1981, Lead Concentrations in the northeast Pacific: evidence for global anthropogenic perturbations, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **54**, 97-116.
- [10] 陈立奇, 杨绪林, 黄江淮, 1989, 南极半岛海域气溶胶中硫、磷、氮的海气交换, 中国第一届南大洋考察学术讨论会, 上海科技出版社, 126-131.
- [11] Hardy, J.T. and Crecelius, E.A., 1981, Is atmospheric particulate matter inhibiting marine primary productivity? *Environ. Sci. Technol.*, **15**, 1103-1105.
- [12] Hodge, V., Johnson, S.R. and Goldberg, E.D., 1978, Influence of atmospherically transported aerosols on surface ocean water composition, *Geochem. J.*, **12**, 7-20.
- [13] Maring, H.B. and Duce, R.A., 1990, The impact of atmospheric aerosols on trace metal chemistry in open ocean surface seawater. 3. lead, *J. Geophys. Res.*, **95**, 5341-5347.

- [14] GESAMP (Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Pollution), 1989. The atmospheric input of trace species to the world ocean, *Rep. Stud.*, GESAMP, **38**, 111-112.
- [15] Duce, R.A., et al., 1991, The atmospheric input of trace species to the world ocean, *Global Biogeochem. Cycles*, **5**(3), 193-259.
- [16] Bergametti, G., et al., 1989, Seasonal variability of the elemental composition of atmospheric aerosol particles over the northwestern Mediterranean, *Tellus*, **41b**, 353-361.
- [17] 陈立奇, 1985, 中国沙漠尘土向北太平洋的长距离大气输送, *海洋学报*, **7**(5), 554-560.
- [18] Arimoto, R. and Duce, R.A., 1987, Air-sea transfer of trace elements, in *Sources and Fates of Aquatic Pollutants*, Adv. in Chem. Ser., 216, ed. by Hites, R.A. and Eisenreich, S.J., 131-150, American Chemical Society, Washington, D.C.

A Study of Aerosol Chemistry in the Atmosphere over Oceans Part III: Forms and Air-Sea Fluxes of Metal

Chen Liqi, Yu Qun and Yang Xulin

(The Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen 361005)

Abstract

Fifty eight aerosol samples were collected in the atmosphere over the North Pacific, the South Pacific, the Antarctic Peninsula waters, the South Atlantic, the North Indian Ocean, and near shore waters during the Third Chinese Antarctic Expedition and Global Scientific Research Experiment. An atomic absorption spectrophotometry was used to determine water soluble and acid leachable concentrations of Mn, Fe, Pb, Cu and Cd in the aerosols. Concentrations of aerosol metal show obvious gradient in the transport process from the continent to the ocean. The concentration of metals in aerosols is higher in the near shore atmosphere than that in the ocean atmosphere. The contents of metals in aerosols over the North Pacific are higher than those over the South Pacific or over the Antarctic Peninsula waters. The order of water solubilities of aerosol metal over the near shore waters is $\text{Cd} > \text{Mn} > \text{Cu} > \text{Fe} > \text{Pb}$ with the water soluble fraction of 39%, 36%, 23%, 14% and 5.3%, respectively, and the order over the oceans is $\text{Cd} > \text{Mn} > \text{Fe} > \text{Cu} > \text{Pb}$ with 62%, 44%, 11%, 3.1% and 2.5%, respectively. The fluxes of metals from air to sea were also estimated for the investigated shores and oceans.

Key words: world oceans; near shores; aerosol; metal.