

南极海-陆界面营养物质流动和磷循环*

秦先燕 黄涛 孙立广**

(中国科学技术大学地球和空间科学学院极地环境研究室, 合肥 230026)

摘要 南极大陆气候严寒、营养贫瘠, 企鹅、海豹等生物能传递海洋中的营养物质到陆地, 这些营养物质是维系南极无冰区生态系统的基础。本文首先阐述了海洋向南极无冰区输入营养物质的方式, 重点介绍了生物方式输入的营养物质对无冰区生态系统组成、结构和功能的影响, 以及无冰区向近海输入营养物质的方式及其影响。然后, 以西南极法尔兹半岛为例, 对企鹅、海豹传输的营养物质磷在陆地、淡水生态系统中的记录进行了分析, 讨论了南极近海磷的生物地球化学循环及其机理, 估算了磷循环通量。结果表明, 南极阿德雷岛磷的外来营养源包括物理输入、生物输入和大气沉降输入 3 种, 其中, 生物输入(企鹅粪)占 94.34%~99.74%, 在近海磷循环中起着关键作用。

关键词 企鹅; 生物传输; 标型元素; 生物地球化学; 通量; 生态系统

中图分类号 X21 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2013)1-0195-09

Nutrient flow and phosphorus cycle in sea-land interface in the Antarctica. QIN Xian-yan, HUANG Tao, SUN Li-guang** (*Institute of Polar Environment, School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(1): 195–203.

Abstract: The Antarctica is very cold and infertile, where the organisms such as seals and penguins can transfer nutrients from sea to land, and these nutrients are crucial to support the ecosystems in the ice-free areas of the Antarctica. This paper reviewed the ways by which the nutrients were transferred from the sea to the ice-free areas of the Antarctica, with the focus on the effects of the nutrients transferred by the organisms on the composition, structure, and function of the ecosystems in the ice-free areas, as well as the pathways of nutrient translocation from the ice-free areas to the sea and their impacts on the marine ecosystems. Taking the Fildes Peninsula in West Antarctica as an example, the data of the phosphorus transferred by penguins and seals to the terrestrial and freshwater ecosystems were compiled and analyzed, the mechanisms of the phosphorus biogeochemical cycle in the Antarctica were discussed, and the flux of the phosphorus was estimated. Our results indicated that in the Ardley Island of the Antarctica, there were three ways of foreign phosphorus input, including physical transport, bio-transport, and atmospheric deposition. Remarkably, the phosphorus transported by penguins in the form of guano accounted for 94.34%–99.74% of the total foreign phosphorus input, being a key contributor to the phosphorus cycle in the Antarctic ecosystems.

Key words: penguin; bio-transport; bio-element; biogeochemistry; flux; ecosystem.

当前, 由于人类对磷的需求增大, 不可再生的磷矿床被大量开发, 磷资源正在急剧衰减, 而磷的过度消费, 也带来了严重的富营养化和环境污染问题。未来, 磷资源的亏损有可能带来磷肥的匮乏和水体

寡营养化的问题, 因此, 有必要研究磷的生物地球化学循环和其机理, 以及磷循环通量。一般来说, 磷的天然来源是岩石风化和降水, 在未受人类活动影响的地方, 水体总磷浓度通常很低 ($< 10 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) (Holtan *et al.*, 1988)。南极地理位置偏远, 气候严寒干燥, 岩石风化形成磷的速度低, 受人类活动影响输入的磷的量也非常少。然而, 南极企鹅、海豹等海

* 教育部博士点基金项目(20103402110023)、南北极环境综合考察与评估专项(CHINARE 2012-02-01-03 和 CHINARE 2012-04-04-09)资助。

** 通讯作者 E-mail: slg@ustc.edu.cn

收稿日期: 2012-06-12 接受日期: 2012-10-15

洋动物周期性地沿海脱毛、筑巢、繁殖期间,会以粪便、死亡残体等形式为无冰区带来包括磷在内的丰富的海洋源营养物质。磷是南极企鹅粪土的生物标型元素(孙立广等,2000;黄涛等,2007),海鸟粪成为无冰区磷的重要外部来源。

因此,理解南极海-陆界面企鹅、海豹等生物输入的营养物质对无冰区生态系统组成、结构和功能的影响,由此形成的陆源营养物质向近海的输出,探讨南极近海磷的生物地球化学循环及其机理,以及磷循环通量,可以更深入地理解海洋动物在海-陆界面生态系统营养物质循环中的作用,具有重要的理论和实践意义。

1 南极海洋向陆地的物质传输方式及其对无冰区生态系统的影响

1.1 海洋向陆地物质的传输方式

相邻生态系统间的作用是相互的(Barrett *et al.*, 2005),物质流动和能量传输等将它们直接紧密地联系在一起。一般来说,生态系统间物质传输方式主要有物理和生物两种,风和水是基本的物理传播者,它们通过水平对流或者散布进行传播(Polis *et al.*, 1997)。世界范围内,许多哺乳动物和鸟类在海洋中取食、在陆地繁殖,是海洋物质传递到陆地生态系统的重要生物传播者,是连接海洋和陆地生态系统的重要生物(Sánchez-Piñero & Polis, 2000)。现有观点认为,通过生物方式传递的营养物质甚至决定了许多沿海和内陆地区生态系统的结构和功能(Michelutti *et al.*, 2009)。极地环境受人类活动影响较小,生态系统相对简单,环境较为原始,易受到季节性迁移的哺乳动物、海鸟的影响,因而生物传输显得尤为重要(Blais *et al.*, 2007)。

1.2 生物输入的营养物质对南极陆地生态系统的影响

1.2.1 土壤、微生物、动物 海鸟粪能强烈地改造陆地土壤,南极干旱而低温的气候使得该地区土壤形成过程缓慢(Heine & Speir, 1989),因而,鸟粪对土壤的理化性质改造作用更强烈。首先,鸟粪能改变土壤物理性质,如温度、盐度、湿度、电导率等方面。东南极罗斯岛 Cape Bird 阿德雷企鹅聚居地鸟粪覆盖区的土壤温度高于邻近没有鸟粪覆盖区域的土壤,这可能是由于鸟粪土生物学和生物化学活力增加所致(Heine & Speir, 1989)。在土壤盐度、土壤湿度方面,对 Gulf of California 干旱岛屿研究结果表

明,与无鸟粪的岛屿相比,有鸟粪的岛屿土壤盐度呈现显著的斑驳块状,且土壤湿度显著较高(Wait *et al.*, 2005),而海鸟聚居地土壤保水性研究结果差异较大,难以概括(Ellis, 2005)。此外,企鹅聚居地的土壤电导率值一般也较高(Aislabie *et al.*, 2009)。其次,鸟粪能影响土壤的化学性质。南极无冰区大量的企鹅繁殖活动能改造土壤形成鸟成土(Tatur & Myrcha, 1984),所有企鹅聚居地土壤 C、N、P 含量均较高,且 pH 变化大(Tatur & Myrcha, 1984, 1989)。然而,古代鸟粪土层和当代鸟成土中成分是不同的,前者主要含磷酸盐,而后者富含氮(主要是氨)(Juchnowicz-Bierbasz & Rakusa-Suszczewski, 2002)。

鸟类排泄物、总有机碳和磷的累积是影响南极土壤微生物特性的主要因素(Tscherko *et al.*, 2003)。南极现代企鹅聚居地鸟成土的微生物群落结构组成中,细菌占主导地位(92%),而酵母和真菌则非常少(Roser *et al.*, 1993)。对细菌种类的进一步研究表明, Ross Sea 现代阿德雷企鹅聚居地土壤中细菌种类主要是厚壁菌(*Firmicutes*)和 γ -变形菌(*Psychrobacter*),废弃企鹅聚居地土壤中则以属于黄色单胞菌科(*Xanthomonadaceae*)的 γ -变形菌和放线菌(*Actinobacteria*)占据优势,而未受到企鹅影响的风化土壤中厚壁菌(*Firmicutes*)则很少(Aislabie *et al.*, 2009)。在微生物量和微生物活性方面,南极鸟成土中微生物生物量(如,总微生物碳、微生物氮)比风化土壤高 2 个数量级;而受到企鹅和海鸟排泄物影响的鸟成土中基础呼吸、酶活性(尿酶、木聚糖酶、磷酸酶等)都显著增加(Tscherko *et al.*, 2003)。

生物输入的营养物质对聚居地动物也有显著的影响。与没有海鸟聚居的岛屿相比,有海鸟聚居岛屿的陆地消费者丰度较高,如许多对 Gulf of California 甲虫和蜥蜴的研究结果都证明了这一点(Sánchez-Piñero & Polis, 2000; Barrett *et al.*, 2005)。然而,在南极罗斯岛企鹅聚居地,较高的营养物质和湿度水平并没有导致聚居地土壤中无脊椎动物群落丰度和多样性的增加,这可能是由于营养过分累积增加了土壤盐度,从而抑制了无脊椎动物的生存(Porazinska *et al.*, 2002)。此外,海鸟输入的物质也在一定程度上改变了陆地生态系统的营养结构。Sánchez-Piñero 和 Polis(2000)认为,海鸟尸体是幼体和成体甲虫的主要食物,存在直接的取食关系;而在没有鸟类的岛屿,甲虫则主要吃植物碎屑(95%)。因此,海鸟输入的海洋来源的物质是陆地

主要消费者(甲虫)种群动力学的关键,并对整个岛屿食物网和生态系统产生显著的影响(Sánchez-Piñero & Polis, 2000)。

综上所述,南极企鹅等生物输入的营养物质对陆地生态系统有着显著的影响,能改变生态系统非生物部分(土壤温度、盐度等,C、N、P等含量)和生物部分(土壤微生物、陆地消费者)组成,但对陆地生态系统营养结构的影响还有待进一步研究。

1.2.2 植物 南极企鹅、海豹等海洋动物活动及其输入的营养物质会在一定程度上影响植物种类组成、群落盖度、生产力以及植物体内营养物质含量等方面,且这种影响有利也有弊。1) 植物种类组成。企鹅活动会减少植物种类。在有机肥料丰富的区域,暂时性地覆盖嗜粪的藻类皱溪菜(*Prasiola crispata*);而在企鹅聚居地的岩石上,仅繁茂地生长着喜氮的地衣群落(Myrcha & Tatur, 1991)。2) 植物群落盖度。由于持续的踩踏和过剩的营养输入,南极企鹅活动首先导致植被盖度的减少,而不是形成新的适合植物生长的土壤(Myrcha & Tatur, 1991)。研究发现,过剩肥力所引起的植被盖度的减少可能是由于N毒性或pH低所致(Wait *et al.*, 2005)。相反,废弃企鹅聚居地古代鸟粪土层的分解能不断为植物生长提供营养,因而上面一般为植被所覆盖(Tatur & Myrcha, 1989)。3) 植物生产力。陆地植物生长会受到土壤N、P可利用性的限制,海鸟输入的营养物质增加了土壤肥力,促进了植物生长,增加了植物生产力(Ellis *et al.*, 2006)。4) 植物体内营养物质含量。在亚南极 Marion Island, 与未受到鸟类影响地区植物相比,鸕科鸟类活动区植物N、P、K、Fe、Na含量较高(Smith, 1976)。5) 物种流动。一些鸟类(如海鸥)能携带种子到陆地岛屿,从而促进了新物种的定居(Sigurdsson & Magnusson, 2009),这样,鸟类活动实现了生态系统的物种流动功能。

1.3 生物输入的营养物质对南极淡水生态系统的影响

南极企鹅、海豹等在无冰区活动时所带来的大量营养物质,除供植物所需要外,会通过径流和风等方式流入湖泊、溪流等淡水生态系统,从而改变了水域营养状态。如,企鹅来源的营养对水体营养物质含量,以及浮游生物密度和组成有很大的影响。对南极半岛霍普湾 Boeckella 湖周围不同采样点的水化学分析表明,靠近企鹅聚居地的湖泊水体及下游径流区水体总磷含量很高,相应地绿藻纲(*Chloro-*

phyceae)和蓝藻纲(*Cyanophyceae*)物种密度也最高,平均物种丰度有11种,而未受到企鹅影响的湖泊补给水体总磷含量非常低,平均物种丰度也很少(Izaguirre *et al.*, 1993)。此外,P、S等作为企鹅粪的标型元素,在企鹅活动区的湖泊沉积物中显著富集(孙立广等, 2000; 黄涛等, 2007),企鹅种群数量的波动会在沉积物元素含量上明显地体现出来(Sun *et al.*, 2000; Huang *et al.*, 2009)。可见,企鹅等生物输入的营养物质能强烈地改变水体及沉积物中营养物质含量。

淡水沉积物中微生物数量和多样性也受到海鸟来源的营养物质的影响。研究表明,企鹅粪便带来的丰富营养以及阿德雷岛夏季适宜的气温条件,使得该岛沉积物中细菌的数量和多样性较丰富(张锐等, 2003)。该岛Y2湖泊沉积物中企鹅粪的输入对几丁质细菌数量影响较大(Xiao *et al.*, 2005),但对整个沉积柱细菌数量影响不大(Li *et al.*, 2006)。同样地,Y2湖沉积物中可培养细菌的总量随着深度变化与企鹅粪土标型元素总磷含量有较高相关性,说明可培养细菌数量受到企鹅排泄物的影响(王鹏和王风平, 2009)。因而,企鹅带来的营养物质一般会增加沉积物中细菌数量和多样性,但也因细菌类型而异。

2 南极陆地向近海的物质传输方式及对近海生态系统的影响

海-陆生态系统间物质传输是相互的,正如以水流和风这两种物理方式输入海洋中的营养物质到陆地一样,来自陆地的水流和风也会携带很多营养物质到近海中。研究表明,富集鸟粪的淡水径流和藻类残体的腐烂分解是南极近岸区域生态系统的主要营养来源(Neřdzarek & Rakusa-Suszczewski, 2004; Neřdzarek, 2008),而来自土壤和土壤溶液中的离子(如Fe),也丰富了南极近海中营养物质浓度(Rakusa-Suszczewski, 2003)。企鹅聚居地中营养物质输入到邻近海域的速度依赖于聚居地到海洋的距离、地形、径流等;聚居地植被类型、植物物种组成、盖度水平等也是很重要的影响因素(Stempniewicz *et al.*, 2007)。而流过聚居地地表水的化学组成依赖于降雨的大小和频率以及聚居地的位置(Tatur & Myrcha, 1983),在强降雨季节地表径流占据优势,它能携带大量的粪悬浮物和溶解在其中的营养物质,主要富含铵离子、pH呈中性或碱性;在干旱季节,土壤

溶液则没有悬浮物,营养浓度低于地表径流几倍(Tatur & Myrcha,1983)。地表径流水体及土壤溶液到达海洋中的浓度与流过聚居地陆地水体的路线有关,路线越长,越复杂,营养物质被稀释的越多,浓度也就越低(Tatur & Myrcha,1983)。此外,附近海域中的水对海湾营养物质浓度也有一定的稀释作用,如来自 Bransfield Strait 的水对海湾的稀释作用导致乔治王岛 Admiralty Bay 水体 N、P 浓度在近岸水体较高而中心水域较低(Nędzarek,2008)。

风作为物理传输介质之一,也能输入动植物来源的碎屑、富含海洋气溶胶的矿物盐以及海洋飞沫到近海中(Rakusa-Suszczewski,2003)。南极风力一般较强,多年观测资料表明,长城站盛行西北风,中山站偏东风,年平均风速分别为 7.3 和 7.1 m · s⁻¹(卞林根等,2010b),因而,风这一物理传输介质也起着非常重要的作用。

陆地向海洋的物质输入一般会对沿海地区水体营养元素含量、浮游植物生产力等起着明显的促进作用,但也要结合当地海洋营养物质条件来综合考虑。部分作者认为来自鸟类聚居地的水体溶液能显著增加沿海水体营养水平,并可能在增加初级生产

力和次级生产力方面起着重要作用(Tatur & Myrcha,1983)。但是,在南极近海地区海水有丰富的营养物质,鸟类聚居地水体输入的营养物质对该区海洋生态系统的作用并不是很明显(Tatur,2002)。

3 企鹅、海豹输入的磷对法尔兹半岛生态系统的影响

法尔兹半岛位于西南极南设得兰群岛的乔治王岛西南部,是该岛最大的无冰区。该区属于亚南极海洋性气候区,植被单调,群落结构简单,鸟类大约有 20 种,其中阿德雷企鹅、金图企鹅和帽带企鹅占据海鸟总数的 80% 以上(孙立广等,2006)。阿德雷岛通过沙坝与法尔兹半岛相连,该岛东岸是目前南设得兰群岛地区最大的企鹅聚居地(孙立广等,2006)。磷是最重要的营养元素,也是企鹅粪的标型元素(孙立广等,2000),因此,本文以法尔兹半岛为例,结合相应的环境介质背景值进行对比分析,探讨企鹅、海豹等生物输入的磷对这个岛屿生态系统的影响。

从表 1 可以看出,岩石、古土壤及苔藓、苔藓下土壤中的磷含量大小顺序为:阿德雷岛苔藓下土壤(22333 mg · kg⁻¹)>法尔兹半岛苔藓下土壤风化壳

表 1 南极法尔兹半岛地区各环境介质中磷含量
Table 1 The contents of phosphorus in environmental media in Fildes Peninsula, Antarctica

生态系统	地点	环境介质	磷	数据来源
陆地	法尔兹半岛	火成岩(背景值)	550(mg · kg ⁻¹)	赵俊琳等,1989
	法尔兹半岛	沉积岩(背景值)	641(mg · kg ⁻¹)	赵俊琳等,1989
	法尔兹半岛	古土壤(背景值)	450.4(mg · kg ⁻¹)	赵俊琳等,1989
	法尔兹半岛	苔藓(背景值)	1209(mg · kg ⁻¹)	赵俊琳等,1989
	法尔兹半岛	苔藓	1492(mg · kg ⁻¹)	李锋和李天杰,1997
	法尔兹半岛	苔藓下土壤风化壳	2295(mg · kg ⁻¹)	李锋和李天杰,1997
	阿德雷岛	苔藓	1877(mg · kg ⁻¹)	Qin <i>et al.</i> ,待发表
	阿德雷岛	苔藓下土壤	22333(mg · kg ⁻¹)	Qin <i>et al.</i> ,待发表
	法尔兹半岛	磷虾	34154(mg · kg ⁻¹)	赵俊琳等,1989
	阿德雷岛	企鹅粪	60821(mg · kg ⁻¹)	孙立广等,2006
	法尔兹半岛	象海豹粪	7204(mg · kg ⁻¹)	Qin <i>et al.</i> ,待发表
	阿德雷岛	企鹅粪土 AD3	11520(mg · kg ⁻¹)	Sun <i>et al.</i> , 2004
	阿德雷岛	企鹅粪土 AD4	11608(mg · kg ⁻¹)	Sun <i>et al.</i> , 2004
淡水	法尔兹半岛	湖水(背景值)	<0.04(mg · L ⁻¹)	赵俊琳等,1989
	法尔兹半岛	湖水	0.028(mg · L ⁻¹)	李植生等,1997
	Admiralty Bay	淡水溪流	0.088~1.709(mg · L ⁻¹)	Nędzarek, 2008
	Admiralty Bay	近岸海水	0.129(mg · L ⁻¹)	Nędzarek, 2008
	法尔兹半岛	活体水草(背景值)	2617(mg · kg ⁻¹)	赵俊琳等,1989
	纳尔逊岛	冰前沉积物 N1	611(mg · kg ⁻¹)	Liu <i>et al.</i> , 2004
	西湖	西湖沉积物	523.5(mg · kg ⁻¹)	赵俊琳等,1989
	法尔兹半岛西海岸	HF4 海豹积水区沉积物	1458(mg · kg ⁻¹)	Liu <i>et al.</i> , 2005
	阿德雷岛	Y2 湖泊沉积物	25093(mg · kg ⁻¹)	Sun <i>et al.</i> , 2000
	阿德雷岛	Y4 湖泊沉积物	31988(mg · kg ⁻¹)	Liu <i>et al.</i> , 2004
	阿德雷岛	G 湖泊沉积物	4251(mg · kg ⁻¹)	Sun <i>et al.</i> , 2004

(2295 mg · kg⁻¹) > 阿德雷岛苔藓 (1877 mg · kg⁻¹) > 法尔兹半岛苔藓 (1492 mg · kg⁻¹) > 法尔兹半岛苔藓背景值 (1209 mg · kg⁻¹) > 沉积岩 (641 mg · kg⁻¹) > 火成岩 (550 mg · kg⁻¹) > 古土壤 (450 mg · kg⁻¹), 阿德雷岛苔藓及其下覆土中磷含量均大于法尔兹半岛其他地区苔藓及苔藓下土壤中磷含量, 阿德雷岛苔藓中磷含量 (1877 mg · kg⁻¹) 是其背景值 (1209 mg · kg⁻¹) 的 1.55 倍。可见, 阿德雷岛大量企鹅活动输入的磷增加了苔藓土壤中磷的含量, 并经由植物吸收, 在苔藓植物体内也体现出来。此外, 象海豹以鲑鱼为主食, 其粪便中磷含量较低, 而以含磷量高的磷虾为主食的企鹅粪便中磷含量很高, 约为海豹粪的 8.5 倍。但通过冰或雪融化, 以及以 PH₃ 形式排放到大气中 (Zhu *et al.*, 2006) 都会带走企鹅或海豹粪中的磷, 加上土壤中磷含量远小于企鹅或海豹粪中磷含量, 因而粪土中磷含量有了较大程度的降低, 如阿德雷岛企鹅粪土 AD3、AD4 中平均磷含量仅约为企鹅粪中的 1/5。

由表 1 可见, 在淡水生态系统中, 湖水背景值中的磷含量与李植生等 (1997) 研究的结果较为一致, 但是尚未发现阿德雷岛淡水湖泊或积水区水体中磷含量的数据。因此, 参照阿德雷岛附近乔治王岛 Admiralty Bay 企鹅聚居地附近淡水溪流中磷的浓度值 0.088 ~ 1.709 mg · L⁻¹, 阿德雷岛淡水磷的浓度大于湖水背景值 (<0.04 mg · L⁻¹), 且阿德雷岛近岸海水中也有较高的磷含量 (平均 0.129 mg · L⁻¹), 可见, 企鹅带来的磷明显增加了淡水水体中磷含量。表 1 还显示, 阿德雷岛企鹅聚居地湖泊沉积物 (Y2、Y4、G) 以及生物湾海豹聚居地的积水区沉积物 (HF4) 中磷的含量远大于非海鸟栖息地湖泊沉积物 (如纳尔逊岛冰前沉积物 N1、长城站西湖沉积物) 中磷的含量。企鹅/海豹聚居地水体和沉积物中磷含量的增加, 主要是来源于鸟成土或企鹅、海豹粪。可见, 在法尔兹半岛, 企鹅、海豹等海洋动物带来的海洋来源的磷一般会增加土壤、植物 (苔藓等)、水体及沉积物等磷含量, 从而对无冰区生态系统产生影响。

4 南极近海磷的生物地球化学循环

4.1 循环机制

物质在生态系统间的输入和输出、生物间的流动和交换以及它们在大气圈、水圈、岩石圈之间的流动过程称为生物地球化学循环, 它可分为生物体及

其生长基质 (土壤) 间的封闭循环以及生态系统间化学物质交换过程的开放循环, 包括流入和流出 (熊汉锋和王运华, 2005)。下面以南极典型的企鹅聚居地法尔兹半岛阿德雷岛为例, 阐述封闭和开放两种形式下磷的生物地球化学循环及其机理。

阿德雷岛天然磷的来源是岩石风化。外部磷源包括风和水的物理输入、生物输入以及大气沉降输入 3 种途径 (图 1)。藻类和浮游植物残体, 磷虾、樽海鞘等腐肉在风的吹散和水的对流等作用下传播到陆地, 与企鹅尸体、企鹅带到巢边的食物等一起在微生物分解作用下, 部分为微生物吸收, 大部分为土壤吸收进而促进植物生长。南极长城站 1995—2008 年气象资料表明, 夏季 (12 月—翌年 2 月) 月平均温度在 -1.2 ~ 2.9 °C, 年平均降水量 503 mm, 平均相对湿度 88% (卞林根等, 2010a, 2010b), 此温度和湿度条件有利于微生物分解和企鹅排泄物的矿化。鸟粪土和鸟成土都能为植物生长提供营养, 一般情况下, 植物可以直接从土壤或水中吸收无机态磷酸盐离子, 然后通过植食动物和肉食动物在生态系统中传递。但是, 南极陆地生态系统中牧食食物链相对缺乏, 而腐食食物链在营养物质循环中起到相对重要的作用 (Smith, 1985; 沈静等, 1999)。植食动物的缺乏, 使得植物只能在腐烂后经过微生物分解重新形成无机态磷酸盐, 一部分被微生物所利用, 其余则回到土壤中, 供植物再次利用。

然而, 植物并不能利用鸟成土分解所提供的所有营养物质 (Myrcha & Tatur, 1991), 大部分鸟成土和鸟粪中的磷酸盐通过地表径流、冰雪融化, 以及鸟类直接排泄等方式进入积水区、湖泊 (孙立广等, 2000) 等淡水水域, 一部分沉积下来, 另一部分通过地下水或溪流流入潮间带和近海。当然, 风也能吹送动植物残体、粪等进入海洋。此外, 在阿德雷岛企鹅聚居地, 小部分磷会以 PH₃ 的形式排放到大气中去 (Zhu *et al.*, 2006)。因此, 以阿德雷岛为例的南极近海磷的生物地球化学循环包括了磷在海洋/大气-陆地-淡水湖泊/溪流-海洋/大气的迁移过程。

4.2 输入、输出通量的估算

就大的开放循环而言, 生态系统中营养元素的输入、输出状况反映了一个地区生产发展水平的高低和生态系统功能的强弱; 而投入、产出的动态变化则显示了一定时期内营养元素循环的基本规律 (卢兵友和王留芳, 1990)。在海-陆生态系统界面, 其物理输入依赖于邻近生境的渗透性, 或者是物理传递

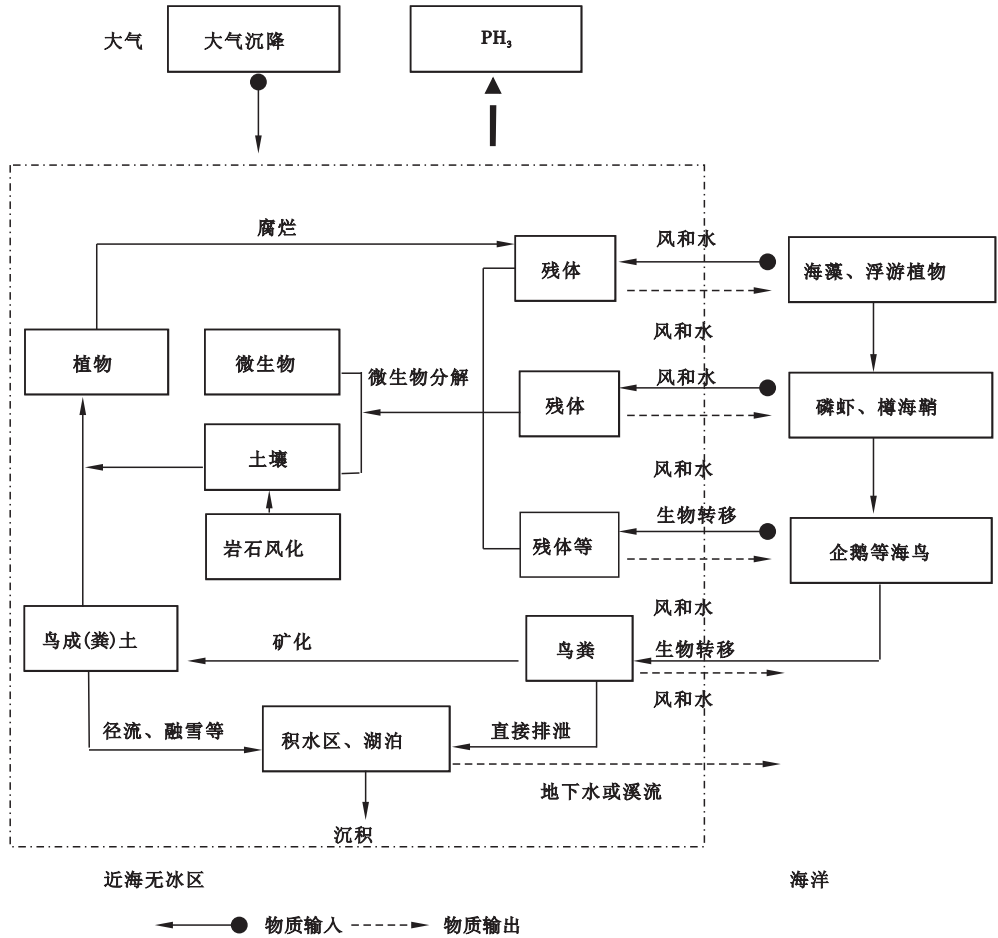


图 1 南极近海磷的生物地球化学循环(以阿德雷岛为例)
Fig. 1 Biogeochemical cycle of phosphorus in the Maritime Antarctic (Illustrated by Ardley Island as an example)

者的具体特征,如水和风的流量、速度和体积能决定传输物质的数量和种类(Fariña *et al.*, 2003)。此外,物理输入的量与岛屿面积和周长也紧密相连(Polis & Hurd, 1996)。南极乔治王岛 Admiralty Bay 每年以物理方式输入的大型海藻、磷虾、樽海鞘残体的量为 2.80×10^5 kg (Rakusa-Suszczewski, 1995)。Admiralty Bay 海岸线长 83.40 km(Nędzarek, 2008), 则每年以物理方式输入的物质的量为 $3.36 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$ 海岸线。这与 Gulf of California 藻类、海洋动物腐肉每年输入的为 $2.93 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$ 海岸线(Anderson & Polis, 1998)在数量上较为一致。阿德雷岛与 Admiralty Bay 地理位置非常接近,地形特征等也很相似,因此,可以以 Admiralty Bay 为参照来估算阿德雷岛物理输入的量。用 CAD 软件测量标准测绘地图获得阿德雷岛海岸线长度约为 6382 m,则每年以大型海藻、樽海鞘、磷虾残体输入到阿德雷岛的物质的量约为 21443.52 kg。据调查,南大洋中海藻、纽鳃樽、磷虾含磷量分别为 $10910.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Rakusa-Sus-

zczewski, 2003)、1110(分散)~1500(聚集)(Iguchi & Ikeda, 2004)和 $34154.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (赵俊琳等, 1989),物理输入通量的不确定性主要来自于这 3 个物种各自输入量占总输入量比例的不同,假设含磷量最低的樽海鞘输入的比例为 100%,则以物理方式输入的磷的量为 23.80 kg(以含最低磷量 1110 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 计);若含磷量最高的磷虾输入的比例为 100%,则以物理方式输入的磷的量为 732.38 kg,因此,估算每年以物理方式输入的磷的量为 23.80 ~ 732.38 kg(表 2)。

据估算,阿德雷岛成年金图企鹅和阿德雷企鹅每年以粪便形式输入的物质的量为 123956.94 kg,输入磷的量可达 12349.00 kg(表 2)。此外,尽管磷的生物地球化学循环属于沉积型循环,但进入大气中的土壤细颗粒和植物体碎屑等以干湿沉降的方式落于地表,成为磷输入一部分(周全来和蒋德明, 2009)。据估计,南极每年通过大气降雨输入到无冰区的磷为 $6.10 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (Nędzarek & Rakusa-

表 2 南极近海阿德雷岛磷循环通量估算
Table 2 The estimate of phosphorus fluxes in Ardley Island, Antarctica

循环	方式	地点	物质的量 (kg)	磷(kg)
输入	物理输入	阿德雷岛	17803. 80	23. 80 ~ 732. 38
	生物输入	阿德雷岛	123956. 94 *	12349. 00 *
	大气沉降输入	阿德雷岛	—	8. 78
	合计			12381. 59 ~ 13090. 17
输出	大气输出	阿德雷岛	—	161. 60 ng · L ⁻¹ (PH ₃) ⁽¹⁾
	水流输出	Admiralty Bay	1. 00×10 ⁸ (夏季) ⁽²⁾	—
	风输出	Admiralty Bay	1. 55×10 ⁶ ⁽³⁾	—
保存	生物保存	阿德雷岛	—	>1358. 39

(1) Zhu *et al.* , 2006; (2) Rakusa-Suszczewski, 2003; (3) Rakusa-Suszczewski, 1995; * Qin *et al.* , 待发表;—没有相关数据。

Suszczewski,2007)。阿德雷岛面积约为 1. 44 km² (CAD 软件测量值),则输入的磷为 8. 78 kg。因此,阿德雷岛每年通过海-陆界面的物理、生物以及大气沉降输入的外来磷总量为 12381. 59 ~ 13090. 16 kg,其中大气沉降输入的磷占得比例非常少(仅约 0. 07%),生物输入的磷的量占主导地位(94. 34% ~ 99. 74%)。

阿德雷岛磷的输出方面,除了一部分以 PH₃ 的形式排向大气外,大部分以水流和风两种形式输出到近海中。研究表明,以水流方式输出的物质的量有季节性的变化,如夏季水流携带物质到 Admiralty Bay 的总量超过 1. 00×10⁸ kg,而冬季输出的物质比夏季降低了几倍(Rakusa-Suszczewski, 2003)。此外,每年通过风的形式从陆地携带无机物质到 Admiralty Bay 表层的量约为 1. 55×10⁶ kg(Rakusa-Suszczewski, 1995)。可见,物质输出方式以水流为主。

4.3 磷的保存

外部来源的磷在南极无冰区的保存在定量磷的生物地球化学循环中是非常重要的。就企鹅以粪便形式输入的磷为例,粪便的保存是至关重要的,保存条件越好,流入近海的磷的量就越少。研究表明,粪便的保存会受到很多因素的影响。首先,南极半岛属于亚南极岛屿,气候较湿润,一般粪容易分解和冲洗掉。其次,粪便保存在无冰区的量与企鹅繁殖习性有关。对乔治王岛 Admiralty Bay 企鹅聚居地研究表明,帽带企鹅喜欢在陡峭光秃的沿海岩石上繁殖,金图企鹅则经常在海滩筑巢,强降雨会很快地将这些企鹅粪便冲入海洋中(Tatur & Myrcha, 1984)。与这两种企鹅相比,阿德雷企鹅则喜欢在靠近内地的地区繁殖(Tatur & Myrcha, 1984),粪便会较好地保留在聚居地。企鹅繁殖聚居地的地形条件也是粪便是否保存完好的决定因素之一,如阿德雷岛地势平坦,有较多的小湖泊和集水区,在此聚居的企鹅粪

便会较好地保存在无冰区陆地。

有研究认为,在条件好时,如地势平坦的乔治王岛 Llano Point 企鹅聚居地,将有超过 11% 循环的磷以鸟成土的形式保留在陆地(Myrcha *et al.* , 1991; Tatur, 2002)。阿德雷岛企鹅聚居地地形与 Llano Point 相似,因而,在此聚居的企鹅粪便会较好地得到保存。以企鹅粪输入的磷为 12349. 00 kg 计算,则每年至少约有 1358. 39 kg 的磷保留在阿德雷岛,排入到近海的约 10990. 61 kg。除了西南极阿德雷岛外,东南极西福尔丘陵、罗斯岛等地都是大型企鹅聚居地,每年保留在无冰区的磷的量是非常可观的。此外,物理输入和大气沉降输入的磷也会部分保留在陆地,但对保存的磷的量尚有待进一步深入研究。

5 小 结

南极企鹅、海豹等输入的海洋来源的营养物质能显著地改变土壤肥力,引起微生物和动物丰度、多样性等的变化,促进植物生长,但也通过践踏、拔起等物理方式干扰植物群落。部分营养物质流入到湖泊、溪流等淡水生态系统,增加了水体和沉积物中营养物质浓度,对沉积物中微生物也有重要的影响。可见,生物输入的营养物质深刻地改变了南极无冰区陆地和淡水生态系统的组成、结构和功能。

磷是企鹅粪的标型元素,在南极法尔兹半岛,企鹅、海豹等输入的营养物质磷为贫瘠的无冰区提供了丰富的营养,并在陆地、淡水生态系统的不同环境介质中有了很明显的记录。本文对阿德雷岛磷循环通量的估算结果表明,磷的 3 种外来营养源输入的量分别为物理输入 23. 80 ~ 732. 38 kg · a⁻¹、生物(企鹅粪)输入 12349. 00 kg · a⁻¹和大气沉降输入 8. 78 kg · a⁻¹。除了少量以 PH₃ 的形式排入大气,生物输入的磷至少约有 1358. 39 kg · a⁻¹ 保留在阿德雷岛陆地,大部分流入近海。可见,南极近海磷的生

物地球化学循环主要包括了磷在海洋-陆地-淡水湖泊/溪流-海洋中的迁移转化过程,企鹅等海洋动物连接了海、陆生态系统间磷的物质流动,使得磷资源能合理地重新分配,从而在南极磷的生物地球化学循环过程中成为最关键的环节。

南极海-陆界面营养物质流动及磷的生物地球化学循环涉及植物生态学、动物生态学、地球化学、微生物学等多个学科,具有一定的复杂性,虽然已经取得了一定的研究进展,但还有大量的工作需要深入研究,应从以下几个方面得到加强:1)生物输入的营养物质对南极无冰区生态系统的影响,如对陆地动物丰度、营养结构的研究,以及对淡水生态系统浮游生物影响的研究等;2)进一步准确估算南极海-陆界面磷的循环通量,如以物理方式、生物输入方式、大气沉降方式输入的磷的量,特别是以水流和风等物理方式向近海输入的磷的量化,将为磷在南极无冰区的保存的量提供更充足的研究证据。

致谢 感谢中国科学技术大学极地环境研究室马大卫博士、中国科学院亚热带农业生态研究所李峰博士在微生物和植物方面提出的宝贵意见,感谢美国北卡罗来纳州立大学遗传学系黄温博士在英文写作方面提供的帮助。本研究样品由中国极地研究中心沉积物库提供,在此表示感谢。

参考文献

卞林根, 马永锋, 逯昌贵, 等. 2010a. 南极长城站(1985—2008)和中山站(1989—2008)地面温度变化. 极地研究, **22**(1): 1—9.

卞林根, 马永锋, 逯昌贵, 等. 2010b. 南极长城站(1985—2008)和中山站(1989—2008)风和降水等要素的气候特征. 极地研究, **22**(4): 321—333.

黄涛, 孙立广, 吴自军, 等. 2007. 戴维斯站区与长城站区企鹅粪土层生物标型元素的确定与比较. 极地研究, **19**(4): 247—254.

李锋, 李天杰. 1997. 南极长城站地区西湖水化学组成影响因子分析. 极地研究, **9**(4): 268—272.

李植生, 王骥, 王洪铸, 等. 1997. 南极菲尔德斯半岛地区与拉斯曼丘陵地区湖泊水化学比较研究. 极地研究, **9**(3): 176—181.

卢兵友, 王留芳. 1990. 农业生态系统物质循环的系统分析. 生态学杂志, **9**(3): 38—41.

沈静, 徐汝梅, 周国法, 等. 1999. 南极菲尔德斯半岛陆地、淡水、潮间带、浅海各生态系统的结构及其相互关系的研究. 极地研究, **11**(2): 100—112.

孙立广, 谢周清, 刘晓东, 等. 2006. 南极无冰区生态地质学. 北京: 科学出版社.

孙立广, 谢周清, 赵俊琳. 2000. 南极阿德雷岛湖泊沉积: 企鹅粪土层识别. 极地研究, **12**(2): 105—112.

王鹏, 王风平. 2009. 南极阿德雷岛淡水湖沉积物细菌群落研究. 极地研究, **21**(2): 100—108.

熊汉锋, 王运华. 2005. 湿地碳氮磷的生物地球化学循环研究进展. 土壤通报, **36**(2): 240—243.

张锐, 林念炜, 赵晶, 等. 2003. 南极阿德雷岛地表沉积物中细菌多样性及对环境的响应. 自然科学进展, **13**(10): 1067—1072.

赵俊琳, 蒙宇, 赵承义, 等. 1989. 乔治王岛菲尔德斯半岛地区环境背景值初探. 极地研究, **1**(4): 44—51.

周全来, 蒋德明. 2009. 沙地土壤磷循环研究. 生态学杂志, **28**(10): 2117—2122.

Aislabie J, Jordan S, Ayton J, et al. 2009. Bacterial diversity associated with ornithogenic soil of the Ross Sea region, Antarctica. *Canadian Journal of Microbiology*, **55**: 21—36.

Anderson WB, Polis GA. 1998. Marine subsidies of island communities in the Gulf of California: Evidence from stable carbon and nitrogen isotopes. *Oikos*, **81**: 75—80.

Barrett K, Anderson WB, Wait DA, et al. 2005. Marine subsidies alter the diet and abundance of insular and coastal lizard populations. *Oikos*, **109**: 145—153.

Blais JM, Macdonald RW, Mackey D, et al. 2007. Biologically mediated transport of contaminants to aquatic systems. *Environmental Science & Technology*, **41**: 1075—1084.

Ellis JC. 2005. Marine birds on land: A review of plant biomass, species richness, and community composition in seabird colonies. *Plant Ecology*, **181**: 227—241.

Ellis JC, Fariña JM, Witman JD. 2006. Nutrient transfer from sea to land: The case of gulls and cormorants in the Gulf of Maine. *Journal of Animal Ecology*, **75**: 565—574.

Fariña JM, Salazar S, Wallem KP, et al. 2003. Nutrient exchanges between marine and terrestrial ecosystems: The case of the Galapagos sea lion *Zalophus wollebaecki*. *Journal of Animal Ecology*, **72**: 873—887.

Heine JC, Speir TW. 1989. Ornithogenic soils of the Cape Bird Adélie Penguin Rookeries, Antarctica. *Polar Biology*, **10**: 89—99.

Holtan H, Kamp-Nielsen L, Stuanes AO. 1988. Phosphorus in soil, water and sediment: An overview. *Hydrobiologia*, **170**: 19—34.

Huang T, Sun LG, Wang YH, et al. 2009. Penguin population dynamics for the past 8500 years at Gardner Island, Vestfold Hills. *Antarctic Science*, **21**: 571—578.

Iguchi N, Ikeda T. 2004. Metabolism and elemental composition of aggregate and solitary forms of *Salpa thompsoni* (Tunicata: Thaliacea) in waters off the Antarctic Peninsula during austral summer 1999. *Journal of Plankton Research*, **26**: 1025—1037.

Izaguirre I, Mataloni G, Vinocur A, et al. 1993. Temporal and spatial variations of phytoplankton from Boeckella Lake (Hope Bay, Antarctic Peninsula). *Antarctic Science*, **5**: 137—141.

Juchnowicz-Bierbasz M, Rakusa-Suszczewski S. 2002. Nutrients and cations content in soil solutions from the present and abandoned penguin rookeries (Antarctica, King George Island). *Polish Journal of Ecology*, **50**: 79—91.

Li SK, Xiao X, Yin XB, et al. 2006. Bacterial community along a historic lake sediment core of Ardley Island, west Antarctica. *Extremophiles*, **10**: 461—467.

Liu XD, Sun LG, Yin XB. 2004. Textural and geochemical characteristics of proglacial sediments: A case study in the

- foreland of the Nelson Ice Cap, Antarctica. *Acta Geologica Sinica*, **78**: 970–981.
- Liu XD, Sun LG, Yin XB, *et al.* 2005. A preliminary study of elemental geochemistry and its potential application in Antarctic seal palaeoecology. *Geochemical Journal*, **39**: 47–59.
- Michelutti N, Keatley BE, Brimble S, *et al.* 2009. Seabird-driven shifts in Arctic pond ecosystems. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, **276**: 591–596.
- Myrcha A, Ochrya R, Tatur A. 1991. Site of special scientific interest No. 8, Western shore of Admiralty Bay, King George Island, South Shetland Islands// Klekowski RZ, Opaliński KW, eds. First Polish-Soviet Antarctic Symp. 'Arctowski 85'. Institute of Ecology Publishing Office, Warsaw: 157–168.
- Myrcha A, Tatur A. 1991. Ecological role of the current and abandoned penguin rookeries in the land environment of the maritime Antarctic. *Polish Polar Research*, **12**: 3–24.
- Nezdarek A. 2008. Sources, diversity and circulation of biogenic compounds in Admiralty Bay, King George Island, Antarctica. *Antarctic Science*, **20**: 135–145.
- Nezdarek A, Rakusa-Suszczewski S. 2004. Decomposition of macroalgae and the release of nutrient in Admiralty Bay, King George Island, Antarctica. *Polar Bioscience*, **17**: 26–35.
- Nezdarek A, Rakusa-Suszczewski S. 2007. Nutrients and conductivity in precipitation in the coast of King George Island (Antarctica) in relation to wind speed and penguin colony distance. *Polish Journal of Ecology*, **55**: 705–716.
- Polis GA, Anderson WB, Holt RD. 1997. Toward an integration of landscape and food web ecology: The dynamics of spatially subsidized food webs. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, **28**: 289–316.
- Polis GA, Hurd SD. 1996. Linking marine and terrestrial food webs: Allochthonous input from the ocean supports high secondary productivity on small islands and coastal land communities. *The American Naturalist*, **147**: 396–423.
- Porazinska DL, Wall DH, Virginia RA. 2002. Invertebrates in ornithogenic soils on Ross Island, Antarctica. *Polar Biology*, **25**: 569–574.
- Rakusa-Suszczewski S. 1995. Flow of matter in the Admiralty Bay area, King George Island, maritime Antarctica. *Polar Biology*, **8**: 101–113.
- Rakusa-Suszczewski S. 2003. Functioning of the geoecosystem for the West side of Admiralty Bay (King George Island, Antarctica): Outline of research at Arctowski Station. *Ocean and Polar Research*, **25**: 653–662.
- Roser DJ, Seppelt RD, Ashbolt N. 1993. Microbiology of ornithogenic soils from the Windmill Islands, Budd Coast, continental Antarctica: Microbial biomass distribution. *Soil Biology and Biochemistry*, **25**: 165–175.
- Sánchez-Piñero F, Polis GA. 2000. Bottom-up dynamics of allochthonous input: Direct and indirect effects of seabirds on islands. *Ecology*, **81**: 3117–3132.
- Sigurdsson BD, Magnusson B. 2009. Ecosystem respiration, vegetation development and soil nitrogen in relation to breeding density of seagulls on a pristine volcanic island, Surtsey, Iceland. *Biogeosciences Discussions*, **6**: 8393–8409.
- Smith RIL. 1985. Nutrient cycling in relation to biological productivity in Antarctic and sub-Antarctic terrestrial and freshwater ecosystems// Siegfried WR, Condy PR, Laws RM, eds. Antarctic nutrient cycles and food webs. Springer, Berlin: 163–168.
- Smith VR. 1976. The effect of burrowing species of Procellariidae on the nutrient status of inland tussock grasslands on Marion Island. *Journal of South African Botany*, **42**: 265–272.
- Stempniewicz L, Błachowiak-Samołyk K, Weśławski JM. 2007. Impact of climate change on zooplankton communities, seabird populations and arctic terrestrial ecosystem: A scenario. *Deep Sea Research II*, **54**: 2934–2945.
- Sun LG, Zhu RB, Yin XB, *et al.* 2004. A geochemical method for the reconstruction of the occupation history of a penguin colony in the maritime Antarctic. *Polar Biology*, **27**: 670–678.
- Sun LG, Xie ZQ, Zhao JL. 2000. A 3000-year record of penguin populations. *Nature*, **407**: 858–858.
- Tatur A. 1989. Ornithogenic soils of the maritime Antarctic. *Polish Polar Research*, **10**: 481–532.
- Tatur A. 2002. Ornithogenic ecosystems in the maritime Antarctic: formation, development and disintegration// Beyer L, Bölker M, eds. Geocology of Antarctic ice-free coastal landscapes. *Ecological Studies*, **154**, Springer Verlag: 161–184.
- Tatur A, Myrcha A. 1983. Changes in chemical composition of waters running off from the penguin rookeries in the Admiralty Bay region (King George Island, South Shetland Islands, Antarctica). *Polish Polar Research*, **4**: 113–126.
- Tatur A, Myrcha A. 1984. Ornithogenic soils on King George Island, South Shetland Islands (Maritime Antarctic Zone). *Polish Polar Research*, **5**: 31–60.
- Tatur A, Myrcha A. 1989. Soils and vegetation in abandoned penguin rookeries (Maritime Antarctic). *Polar Biology*, **2**: 181–189.
- Tscherko D, Bölker M, Beyer L, *et al.* 2003. Biomass and enzyme activity of two soil transects at King George Island, Maritime Antarctica. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, **35**: 34–47.
- Wait DA, Aubrey DP, Anderson WB. 2005. Seabird guano influences on desert islands: Soil chemistry and herbaceous species richness and productivity. *Journal of Arid Environments*, **60**: 681–695.
- Xiao X, Yin XB, Lin J, *et al.* 2005. Chitinase genes in lake sediments of Ardley Island, Antarctica. *Applied and Environmental Microbiology*, **71**: 7904–7909.
- Zhu RB, Kong DM, Sun LG, *et al.* 2006. Tropospheric phosphine and its sources in coastal Antarctica. *Environmental Science & Technology*, **40**: 7656–7661.