

研究论文

南极企鹅和贼鸥骨骼中的稀土研究

王静^{1,2} 谢周清¹

(¹中国科学技术大学极地环境研究室, 合肥 230026

²中国科学院研究生院, 北京 100049)

提要 利用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) 分析了南极长城站区和中山站区企鹅和贼鸥骨骼中稀土元素, 两种海鸟骨骼中稀土总量 ΣREE 介于 $0.8-3.5 \mu\text{g/g}$ 并具有明显富集轻稀土的特征。企鹅和贼鸥骨骼中稀土元素总量存在显著的种间和地区差异, 长城站的 ΣREE 为: 金图企鹅 > 贼鸥 > 帽带企鹅, 而中山站的情况是: 金图企鹅 > 贼鸥 > 阿德利企鹅, 且长城站海鸟骨骼稀土含量明显高于中山站的同种个体。两种海鸟不同部位骨骼稀土含量也具有显著差异, 腿骨明显高于翅骨, 约为翅骨的 2 倍。南极海鸟骨骼稀土配分模式相对富集 LREE, 呈现负斜率变化, HREE 则呈现平坦型; 企鹅和贼鸥骨骼具有不同的稀土配分模式, 对海水没有明显的继承性, 是食物链和海鸟生理机制的综合反映, 以及受陆源环境的影响。

关键词 企鹅 贼鸥 骨骼 稀土元素

1 前言

稀土元素 (REE) 是一个特殊“元素族”, 既具有共性又有系统性差异, 它们的地球化学行为相近, 在一些特定环境中又会发生分异, 所以被广泛用来示踪各类地球化学体系的物质来源与演化过程, 成为地球化学作用的指示剂^[1]。稀土元素是一种生理活性物质, 在骨骼中的沉积主要通过采食经消化道吸收, 随饮食摄入而变化, 也受到一定新陈代谢的控制, 在随食物链传递的过程中能够被生物选择性地吸收或排斥, 导致生物分馏作用的发生, 不同的稀土元素状态能指示行为方式、食物结构和生活环境等方面的信息^[2,3]。经过沉积作用的骨骼中的稀土元素含量与原始沉积环境有很大关系, 由于骨骼特殊的生理作用, 其中稀土元素含量和配分模式包含的生态环境信息能够保存较好, 具有重要的古环

[收稿日期] 2007 年 4 月收到来稿, 2007 年 6 月收到修改稿。

[基金项目] 国家自然科学基金 (40306001, 40776001)、教育部百篇优秀博士论文作者专项资金 (200354) 和中国科学院优秀博士论文作者专项资金资助。

[作者简介] 王静, 中国科学院研究生院硕士研究生, 主要研究方向为环境科学。

[联系作者] 谢周清, 中国科学技术大学教授, E-mail: zqx@ustc.edu.cn

境、古生态研究价值^[4,5]。

南极无冰区生活着大量的海鸟和海兽,它们居于南大洋食物链的最高营养级,对气候条件和食物因素变化非常敏感,是南大洋海洋生态系统和南极陆地生态之间物质能量循环的桥梁。这些生物死亡后,它们的骨骼被保存在聚集区粪土沉积和湖泊沉积中,成为研究南极生物种群数量和环境变迁的重要材料^[6]。通过挖掘企鹅巢穴并对其中的骨骼进行统计和定年,科学家研究了企鹅在南极无冰区岛屿登陆和演化的历史^[7,8]。Xie等利用同步辐射 X 荧光研究了南极生物骨骼中元素的分布特征^[9-11],尝试建立南极生物的骨骼元素分布的指纹库^[12]。

迄今为止,还未见利用南极生物骨骼中稀土元素进行古生态、古环境研究的报道。本文利用 ICP-MS 从宏观的角度分析比较了东南极中山站和西南极长城站企鹅和贼鸥骨骼中稀土的含量、分布、配分模式及其种间和地区差异,初步探讨了稀土来源、海鸟生态习性、食物来源等对南极海鸟稀土元素分布的影响及其在南极古生态研究中的意义。

2 研究区域环境概况

本研究的样品分别采自中国南极长城站和中山站周围无冰区海鸟聚集区。

2.1 长城站区无冰区环境概况

长城站 ($62^{\circ}13'S$, $58^{\circ}58'W$) 位于西南极乔治王岛西南部的菲尔德斯半岛 (Fildes Peninsula) 东海岸,主体由第三纪层状熔岩、火山碎屑岩和火山沉积岩组成,且以基性熔岩为主,地表岩石出露较好,风化成土作用较弱。菲尔德斯半岛是南极乔治王岛上最大的无冰区,属典型的亚南极海洋性气候,气温不很低、湿润、夏季较长,陆生植物生物多样性丰富,有四百多种地衣,六十多种苔藓和两种高等植物。阿德雷岛 (Adelie Island) 与长城站隔湾相望,通过沙坝与菲尔德斯半岛相连,岩性主要为灰绿、灰黄色凝灰质砂岩和磷灰质角砾岩,含植物化石,另外还零星分布有集块岩、集块熔岩、角砾岩及熔岩。阿德雷岛植被覆盖度占全岛面积的 70%—80%,是重要的企鹅聚集地之一,也是国际南极科学研究委员会 (SCAR) 确定的特别生态保护区。据统计,在长城站无冰区繁殖的鸟类有 20 多种,主要有金图企鹅、阿德利企鹅、帽带企鹅、贼鸥、黑背鸥等^[13,14]。

2.2 中山站区及其邻近地区环境概况

中山站 ($69^{\circ}22'S$, $76^{\circ}22'E$) 位于东南极普里兹湾拉斯曼丘陵的米勒半岛 (Mirror Peninsula) 北端,其所在的拉斯曼丘陵是南极大陆沿海少数夏季无冰区之一,该地区有相对稳定的地盾、多期变质的岩体,主要出露元古代低压麻粒岩相的变质岩,片麻状花岗岩主要出露于米勒半岛北部,历经多期强烈混合变质的岩体,发育了大量的构造裂隙,有利于冰劈作用、风蚀作用和雪蚀作用的进行。中山站地区位于南极圈之内,受环极气旋和南极大陆高压的双重影响,属典型的风寒、干旱的极地大陆性气候,天气变化较为复杂,冬天严寒、干燥、风大,夏季较短。中山站无冰区地面基岩裸露,植被稀少,环境恶劣,冻结期长及缺少液态水分,限制了拉斯曼丘陵区生物风化和化学风化过程,但物理风化,尤其以冰劈、冻胀、冻裂、重力崩塌等为主要特点,则比较强烈。随着冰盖后退和融雪径流的发展,在拉斯曼丘陵低洼处形成众多湖泊,底栖生物群落较为繁盛,以藻类为主^[14-16]。在中

山站区活动的海鸟主要有金图企鹅、帽带企鹅、帝企鹅和贼鸥等。

3 样品采集与测试分析

3.1 样品采集和前处理

本次实验所研究的骨骼样品均来自中国科学技术大学极地环境研究室参加中国第 15、16 和 18 次南极考察期间在长城站和中山站附近区域收集到的海鸟尸体。样品的种类和采样区域如表 1 所示。

表 1 研究样品及其采集区域
Table 1. Research samples and their sampling sites

海 鸟	部 位	长城站	中山站
阿德利企鹅	腿 骨		✓
<i>Pygoscelis adeliae</i>	翅 骨	✓	
金图企鹅	腿 骨	✓	✓
<i>Pygoscelis papu</i>	翅 骨	✓	✓
帽带企鹅	腿 骨	✓	
<i>Pygoscelis antarctica</i>	翅 骨	✓	
贼 鸥	腿 骨	✓	✓
<i>Catharacta maccomicki</i>	翅 骨	✓	✓

为了防止骨骼附属物对测试的影响, 分析前对骨骼样品进行了脱脂处理^[17]: (1) 用刀片将骨骼样品上的残留肌肉完全剔除; (2) 用 1:1 丙酮和乙醇混合液浸泡 12 h; (3) 用去离子水洗, 真空冷冻干燥 10 h。

骨骼样品粉碎至过 100 或 120 目样品筛, 贮存在干燥器中, 分析前 105°C 烘干至恒重。称取 50 mg 左右样品于高压密闭特氟龙溶样器中, 加入 1 mL 的高纯硝酸和 1 mL 的高纯氢氟酸, 加热消解后放入烘箱中在 190°C 加热 48 h, 待冷却后, 再次加热消解置于烘箱中 140°C 过夜。重复上述过程, 提取盐类, 待溶样器冷却, 将提取液用 2% 的硝酸稀释于清洗干净的聚酯 (PET) 瓶中 (稀释因子为 1:1500) 密闭保存。

3.2 样品测试和质量保证

样品稀土元素测定采用 PE DRCH 型 ICP-MS, 其所应用的动态反应池 (DRC) 技术采用与反应池中气体的化学反应最大程度地消除了 Fe, Ca, K, As, Se 等对分析物的干扰, 改善了离子在反应池中的传输, 降低复杂样品的基体效应, 并同时保证了这些分析物的有效传输, 能得到最佳检出限。在样品分析全过程中加入 10% 的质量监控样品, 所有样品和标准溶液在测量前均加入铑 (Rh) 元素内标监测基体干扰, 检出限优于 0.1 ng/L。

4 结果与讨论

4.1 海鸟骨骼中稀土元素的丰度

本次实验中各稀土元素 (La-Lu) 的浓度在 10^{-3} — 10^{-1} $\mu\text{g/g}$ 之间。轻稀土 (La-Eu) 含量稍高, 介于 0.07—2.97 $\mu\text{g/g}$ 之间, 少数单个稀土元素如 La, Ce 可以达到 10^{-1} $\mu\text{g/g}$ 量级, 在 REE 总量中占了很大比例; 而重稀土 (Gd-Lu) 则处于低浓度水平, 介于

0.01—0.55 $\mu\text{g/g}$ 之间。从轻重稀土之间的比例关系来看, LREE/HREE 的范围在 5—16 之间, 海鸟骨骼明显富集轻稀土, 相对亏损重稀土 (表 2), 说明海鸟在新陈代谢的过程中在骨骼中选择性地淀积轻稀土, 这既与轻、重稀土元素晶体化学性质的差异有关^[18], 也说明轻稀土的生物效应要强于重稀土^[3]。

稀土属于微量元素, 现代生物骨骼中所含的稀土含量相当低。大白鼠体内骨骼中稀土总量只有 0.6 $\mu\text{g/g}$ ^[19], 海域鱼体中稀土总量不大于 0.6 $\mu\text{g/g}$ ^[20]; 南极海鸟骨骼中的稀土重量与它们相比, 量级相同, 大小相近, 说明南极生物骨骼中的稀土元素丰度呈现正常状态, 未发生明显的富集或亏损行为。贼鸥和企鹅骨骼稀土总量 (ΣREE) 范围在 0.8—3.5 $\mu\text{g/g}$ 之间, 大部分少于 1.0 $\mu\text{g/g}$ 含量比无冰区玄武岩和安山岩中稀土元素值^[21, 22]低两个数量级左右。从表 2 可以看出, 长城站地区, ΣREE 为: 金图企鹅 > 贼鸥 > 帽带企鹅, 中山站地区, 则为: 金图企鹅 > 贼鸥 > 阿德利企鹅, 这说明南极无冰区生物骨骼稀土富集特征具有显著的种间差异。相对其他种类的企鹅和贼鸥, 金图企鹅骨骼具有相对富集稀土元素的趋势, 而阿德利企鹅和帽带企鹅骨骼中稀土元素含量则较低, 后两者在企鹅分类学上最密切。

稀土元素必须通过食物链从环境中获得。骨骼中稀土含量指示了稀土微量元素的积累, 反映了从各种食物和水资源中所摄取的元素的数量和比例, 与饮食习惯密切相关^[23]。企鹅和贼鸥处于食物链上的不同位置, 具有不同的食谱组成, 同属企鹅的金图企鹅、帽带企鹅和阿德利企鹅食谱和生活习性也存在一定的差异, 这可能在一定程度上解释了同一地区不同物种骨骼中稀土含量的差异。

表 2 中山站和长城站海鸟骨骼组织中的稀土组成特征

Table 2 REE contents in seabirds' bones at Great Wall Station and Zhongshan Station

海 鸟	部 位	ΣCe ($\mu\text{g/g}$)		ΣY ($\mu\text{g/g}$)		LREE/HREE		ΣREE ($\mu\text{g/g}$)	
		长城站	中山站	长城站	中山站	长城站	中山站	长城站	中山站
阿德利企鹅	腿 骨	/	0.14	/	0.02	/	6.30	/	0.16
<i>Pygoscelis adeliae</i>	翅 骨	/	0.07	/	0.01	/	4.84	/	0.09
金图企鹅	腿 骨	2.97	0.45	0.55	0.05	5.37	9.18	3.52	0.50
<i>Pygoscelis papu</i>	翅 骨	1.23	0.23	0.23	0.02	5.42	10.36	1.46	0.26
帽带企鹅	腿 骨	0.09	/	0.01	/	7.16	/	0.10	/
<i>Pygoscelis antarctica</i>	翅 骨	0.12	/	0.02	/	6.23	/	0.14	/
贼鸥	腿 骨	0.98	0.40	0.14	0.40	7.12	16.50	1.12	0.43
<i>Catharacta macromicki</i>	翅 骨	0.48	0.13	0.08	0.13	6.31	6.96	0.56	0.15

同种生物骨骼中稀土含量具有明显的地区差异。长城站区的骨骼中稀土含量明显大于中山站 (图 1)。考虑到动物骨骼稀土主要通过食物摄入, 而食物中金属元素含量一般会受到当地地球化学背景的影响, 如人类骨骼平均稀土含量约为 5 $\mu\text{g/g}$ 而生活在稀土矿区的居民其骨骼稀土含量则可以达到 20 $\mu\text{g/g}$ 以上, 因此两地生物骨骼中稀土含量的差异可能与东南极和西南极稀土地球化学背景值有关。另外, 有研究报道, 在不同的食物丰富程度下, 同一地区同种生物对食物中元素的吸收效率并不相同^[24], 对海鸟而言, 中山站和长城站区的捕食条件存在明显的差别, 这也可能是造成它们骨骼中稀土含量差异的原因。

另外, 本文所研究的几种海鸟, 仅部分季节生活在上述南极地区, 其他季节迁徙到南

极以外的区域, 这导致了其骨骼稀土来源的复杂性, 但同时也为利用骨骼中稀土元素指示历史时期企鹅的迁徙活动提供了可能。

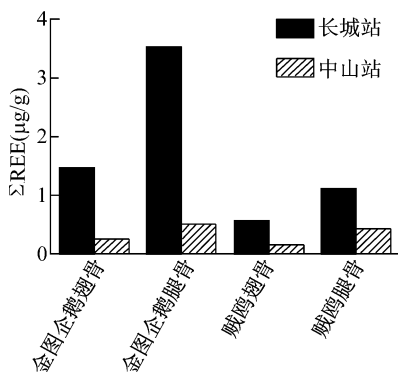


图 1 不同地区同种生物的 Σ REE

Fig 1 Σ REE in the same pieces of seabird bone in different area

4 2 骨骼中稀土元素的分布

对人体稀土元素含量的分析表明, 稀土元素在骨骼中的分布是不均匀的, 其中以肋骨含量最高, 下颌骨次之, 颅骨含量最低^[25]。对比南极海鸟腿骨和翅骨稀土含量发现, 除稀土含量偏低的长城站帽带企鹅腿骨与翅骨稀土含量相近外, 其他海鸟的腿骨与翅骨稀土含量均存在显著的差异, 腿骨中明显高于翅骨, 前者约为后者的 2 倍(图 2)。除长城站帽带企鹅外, 南极海鸟骨骼稀土含量虽然存在着显著的种间和地区差异, 但其腿骨和翅骨之间 ΣC₆, ΣY 和 ΣREE 的比值却非常一致(图 3), 这说明各种海鸟控制稀土元素在腿骨和翅骨之间分配比例的机制是一致的。

稀土元素是一种生理活性物质, 轻稀土有类似超钙的作用, 在骨骼中适量积累稀土元素可以刺激骨骼的发育, 南极海鸟腿骨 翅骨稀土含量的 2/1 关系, 可能是南极生物在演化过程中为适应南极环境所进化出的特殊生理机制。例如人体组织中各个部分对¹³C 等稳定同位素具有不同的分馏效应, 这取决于自身生理机制的调节^[26]。

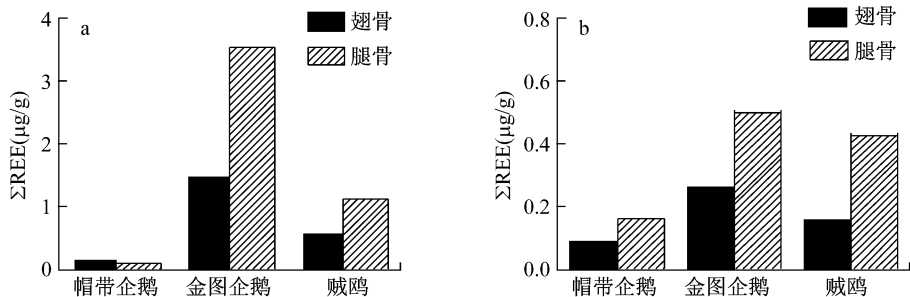


图 2 (a) 长城站地区和 (b) 中山站地区不同海鸟骨骼组织的 Σ REE 分布

Fig 2 Σ REE in the different seabirds of Great Wall Station and Zhongshan Station

另外,从 LREE/HREE 比值(表 2 图 3c)来看,长城站各种海鸟腿骨和翅骨的 LREE/HREE 非常接近,这说明不同部位骨骼在稀土矿物化的过程中分馏程度一致,重稀土元素要比 La Ce 等轻稀土元素溶解度高,因此通常情况下离子半径较大的轻稀土元素主要积聚在动物的骨骼中。相对长城站,中山站区各种海鸟骨骼的 LREE/HREE 比值的种间和骨组织间差异大得多,其中中山站贼鸥翅骨与长城站贼鸥相近,但前者腿骨的明显较其他生物富集轻稀土;而金图企鹅的地区差异和以及和其他企鹅之间的种间差异较大,但它们各自骨组织的差异相对较小。整体来说, LREE/HREE 地区差异 > 种间差异 > 骨组织差异;另外,地区生活环境的差异还有可能致稀土在被海鸟吸收、运输、矿物化过程中分馏效应的变化,如中山站生物 LREE/HREE 骨组织差异相对长城站同种生物要大得多。

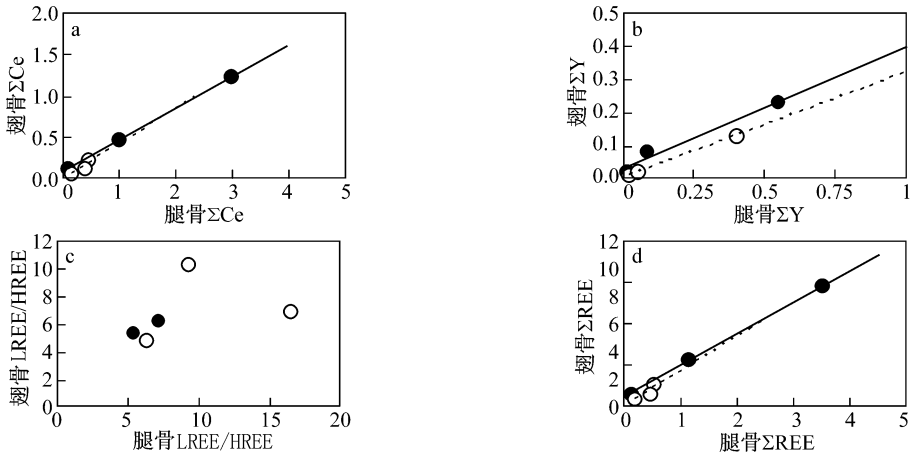


图 3 长城站(●)和中山站(○)地区海鸟不同部位骨骼稀土元素的含量特征 (a) ΣCe (b) ΣY ; (c) LREE/HREE; (d) ΣREE 。(除(c)图外,其他图中坐标轴单位为 $\mu g/g$)

Fig 3 (a) ΣCe , (b) ΣY , (c) LREE/HREE and (d) ΣREE in bone of different part of seabird skeleton in ice free area around Great Wall Station and Zhongshan Station

4.3 南极海鸟骨骼的稀土配分模式

将样品中每个稀土元素的含量除以特定标准中相应稀土元素的含量,所得到的稀土丰度系数曲线称为稀土元素分布模式,消除了偶数规则效应,可以反映所研究样品相对于原始地球稀土组成的地球化学分异作用,可以提供当地重要的环境信息^[1]。

在图 4 (a)、(b)中,曲线的趋势相似,起始倾斜呈负斜率变化,即本文所有南极骨骼相对富集 LREE,均属轻稀土适度富集型,而 HREE 分布呈平坦状态,骨骼中轻、重稀土之间存在明显的分馏。

本文研究的企鹅和贼鸥都是生活在南极无冰区的肉食性海鸟,企鹅主要以磷虾为食,贼鸥为食腐动物,除捕食少量的海洋动物外,主要吃企鹅、海豹等海洋动物的尸体,也捕食企鹅幼鸟^[28],因此它们的稀土元素主要都来自海洋生态系统。从绝对数量上来说,南极海鸟骨骼中轻稀土相对富集,与磷虾等海洋生物的稀土组成相符,但南极海鸟骨骼的稀土配分模式与南大洋海水和磷虾的 REE 配分模式不同而与长城站所在菲尔德斯半岛

(Filles Peninsula)玄武岩、安山岩和火山岩的 REE 配分模式相似, 前者表现出平坦状, 相对富集重稀土^[29-31]。南大洋的磷虾主要分布在南极洲的周围, 以浮游植物和冰藻为食, 直接从海水中吸收稀土元素进入体内, 且没有发生明显的分馏, 很大程度上仍保持着海水配分的特点。而以磷虾为主要食物的企鹅, 处于食物链的顶端, 生活范围主要集中在陆地上, 陆源环境会对其产生很大的影响, 所以骨骼稀土元素组成应该具有陆源性的稀土配分模式。因此, 企鹅和贼鸥等虽是海鸟, 以海洋生物为食, 但其特殊的生态地理位置决定了其稀土的陆源特征, 同时也说明稀土配分模式在南极生态研究中具有重要的示踪意义。

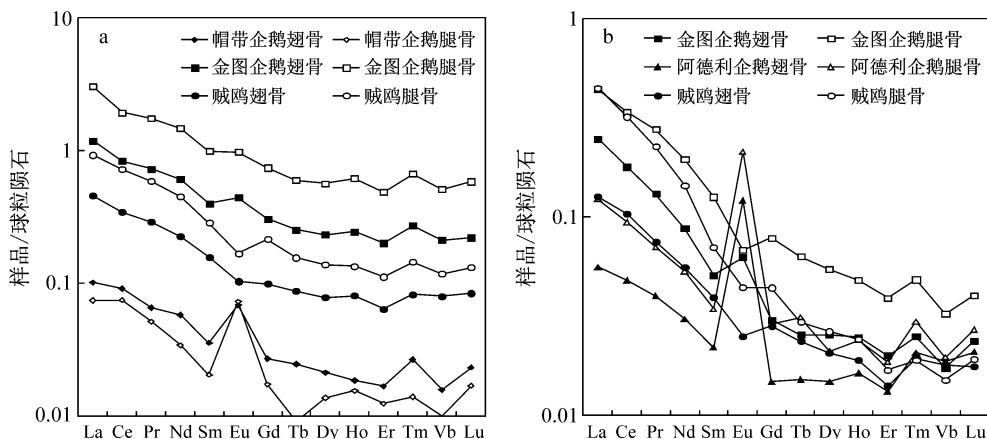


图 4 (a)长城站和 (b)中山站地区不同海鸟骨骼组织的稀土配分模式 (球粒陨石数据来自于文献^[27])
 Fig 4 The REE distribution patterns in bone of seabirds in ice free area around (a) Great Wall Station and (b) Zhongshan Station

虽然企鹅和贼鸥骨骼稀土都属起始倾斜呈负斜率变化的轻稀土适度富集型, 但在 Ce、Eu 元素的富集特征上, 两者表现出显著的差异 (图 4)。对 δ_{Ce} 而言, 大部分海鸟骨骼中 Ce 无明显异常, 长城站帽带企鹅具有一般的 Ce 正异常; 对 δ_{Eu} 而言, 企鹅骨骼中均为 Eu 正异常, 贼鸥中则为负异常, 是两者稀土配分模式的重要区别 (表 3)。企鹅和贼鸥骨骼稀土配分的这一重要区别可能与它们处于食物链的不同位置以及贼鸥食物的多样性有关。

由于 Ce 比其他稀土元素更快地从海水中迁出, 它的停留时间仅 80a, 海水中其余稀土均数倍于 Ce^[32], 也有人这样认为, Ce³⁺ 被氧化为 Ce⁴⁺, 再以 CeO₂ 沉淀下来, 从而产生分馏, 呈现强烈的 Ce 负异常^[33]; 而海鸟骨骼内 Ce 无明显异常, 进一步说明南极海鸟稀土元素组成的陆源性。

通常认为, 温暖湿润气候条件下风化稀土的活动能力更强, 而且稀土元素间的分异程度也比干燥气候下大^[34-35]。处于亚南极区的长城站地区气候相对温和湿润, 两地的岩石风化及稀土的分异程度不一样, 粉尘中稀土配分也就不一样。另外, 对贼鸥而言, 长城站地区的食物网比中山站地区要复杂得多^[36], 如夏季长城站贼鸥可以觅食海湾的海洋软体动物帽贝, 而这些帽贝的稀土是海水来源的, 这就导致了不同地区海鸟骨骼稀土不同的富

集特征。

表 3 不同地区不同生物 δCe 和 δEu 比较Table 3 δCe and δEu in bone of seabirds in ice free area around Great Wall Station and Zhongshan Station

海 鸟	部 位	δCe		δEu	
		长城站	中山站	长城站	中山站
阿德利企鹅	腿 骨		/		+++
<i>Pygoscelis adeliae</i>	翅 骨		/		+++
金图企鹅	腿 骨	-	-	+	--
<i>Pygoscelis papu</i>	翅 骨	-	/	+	++
帽带企鹅	腿 骨	++		++	
<i>Pygoscelis antarctica</i>	翅 骨	++		++	
贼鸥	腿 骨	/	/	--	--
<i>Catharacta maccomicki</i>	翅 骨	-	/	--	--

注: +++ 强烈正异常; ++ 一般正异常; + 轻微正异常; --- 强烈负异常; -- 一般负异常; - 轻微负异常, / 无异常

5 结论

南极企鹅和贼鸥骨骼中稀土元素总量 ΣREE 介于 $0.8\text{--}3.5 \mu\text{g/g}$ 骨骼中稀土元素总量存在显著的种间和地区差异, 长城站的 ΣREE 为: 金图企鹅 > 贼鸥 > 帽带企鹅, 中山站的 ΣREE 为: 金图企鹅 > 贼鸥 > 阿德利企鹅, 且长城站海鸟骨骼稀土含量明显高于中山站的同种个体; 两种海鸟不同部位骨骼稀土含量也具有显著差异, 腿骨明显高于翅骨, 约为翅骨的 2 倍; 南极海鸟骨骼相对富集 LREE, 呈现负斜率变化, HREE 则呈现平坦型, LREE/HREE 的地区差异 > 种间差异 > 骨组织差异; 企鹅和贼鸥骨骼具有不同的稀土配分模式, 企鹅骨骼中 Eu 正异常, 贼鸥中则为负异常, 两者的稀土配分模式对海水没有明显的继承性, 是食物链和生理机制的综合反映, 以及对陆源环境的响应。本文的初步结果为利用生物骨骼中稀土开展南极古生态环境研究提供了基础。

致谢 感谢国家海洋局极地考察办公室提供的野外现场考察支持。样品为中国科学技术大学极地环境研究室历次极地考察采集获得, 论文撰写过程中, 得到孙立广教授的指导, 样品处理过程中得到徐思琦、夏重欢、贾玮和冯加永的帮助, 特此表示感谢。

参考文献

- 1 王中刚, 于学元, 赵振华, 等. 稀土元素地球化学. 北京: 科学出版社, 1989 292—293.
- 2 西蒙·梅斯(英). 骨骼的化学分析. 肖健一, 张小涓(译). 考古与文物, 2002 2 84—94.
- 3 程发良, 钟广涛. 稀土元素的分布及生物效应. 有色金属与稀土应用, 1990, 4 26—38.
- 4 Richard A K and Clive N T. Rare earth elements in Sohhofen biogenic apatite: geochemical clues to the palaeoenvironment. Sedimentary Geology, 2003, 155 109—127.
- 5 Paul E A, Michael JB, Clive N T, et al. Palaeoenvironments of vertebrates on the southern shore of Tethys: The normarine Early Cretaceous of Tunisia. Palaeogeography Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2007, 243(1—2): 118—131.
- 6 Emalie S D, Fraser W R, Smith R C, et al. Abandoned penguin colonies and environmental change in the Palmer Station

- areas Anvers Island, Antarctic Peninsula Antarctic Science, 1998, 3: 257—268
- 7 Baroni C, Orombelli G. Holocene raised beaches at Terra Nova bay, Victoria land, Antarctica. Quaternary Research, 1991, 36: 157—177
- 8 Baroni C, Orombelli G. Abandoned penguin rookeries as Holocene paleoclimatic indicators in Antarctica. Geology, 1994, 22: 23—26
- 9 Xie Z Q, Sun L G, Long N Y, et al. Analysis of the distribution of chemical elements in Adelie penguin bone using synchrotron radiation X-ray fluorescence. Polar Biology, 2003, 26(3): 171—177.
- 10 Xie Z Q, Cheng B B, Sun L G, et al. Preliminary investigation of mercury in bone tissues of skua and penguin in Antarctica using AFS and Synchrotron Radiation X-rays Fluorescence (SR-XRF). Chinese Journal of Polar Science, 2005, 16(1): 33—40.
- 11 Xie Z Q, Cheng B B, Sun L G, et al. Preliminary determination of calcium, phosphorus and the calcium/phosphorus ratio in cortical bone of Chinstrap penguin using synchrotron X-ray fluorescence analysis. Chinese Journal of Polar Science, 2006, 17(1): 48—54
- 12 谢周清, 孙立广, 程邦波, 等. 同步辐射加速器 X 荧光分析技术在极地环境研究中的应用. 极地研究, 2004, 16(2): 99—105.
- 13 王自磐, Peter H U and Pfeiffer S 南极菲尔德斯半岛海鸟与种群分布. 极地研究, 2004, 16(4): 271—280.
- 14 孙立广, 谢周清, 刘晓东, 等. 南极无冰区生态地质学. 北京: 科学出版社, 2006, 17—47.
- 15 谢周清, 孙立广, 赵俊琳. 南极中山站及毗邻地区湖泊与冰雪 COD_{Mn} 研究. 极地研究, 2000, 12(2): 114—120
- 16 李栓科. 南极东部拉斯曼丘陵地区的地貌. 地理学报, 1995, 50(4): 368—376
- 17 黄曜, 张照健, 黄郁芳, 等. 古人类骨骼中微量元素的分析及其与古代食谱的关联. 分析化学, 2005, 33(3): 374—376
- 18 倪嘉缛. 稀土生物无机化学. 北京: 科学出版社, 1995: 1—10
- 19 程发良. 大白鼠体内轻稀土元素的测定及生理效应. 光谱学与光谱分析, 1996, 16(5): 78—81
- 20 郭卫东, 胡明辉, 杨逸萍, 等. 厦门海域鱼体稀土元素的生态化学特征. 海洋与湖沼, 2003, 34(3): 241—248.
- 21 郑祥身. 西南极乔治王岛北海岸第三纪火山岩的岩石化学和地球化学研究. 南极研究 (现极地研究), 1996, 8(2): 1—15
- 22 余素华, 郑洪汉, 陈肖柏, 等. 南极长城站区燕窝湖岩芯中稀土元素特征. 南极研究 (现极地研究), 1993, 5(3): 48—54.
- 23 王轶华. 古食谱与微量元素分析. 华夏考古, 2003, 3: 98—108
- 24 徐美奕, 练有文, 莫梅英. 饲喂不同食物的小鼠血清微量元素水平变化的实验研究. 微量元素与健康研究, 2003, 20(6): 6—8
- 25 程发良, 钟广涛, 刘传光. 人牙及骨组织中稀土分布状态的研究. 科技通报, 1994, 10(6): 380—382
- 26 lacum P. Stable carbon and nitrogen isotopes as dietary indicators of ancient Nubian populations (Northern Sudan). J Archaeol Sci, 1998, 25: 293—301.
- 27 Sun S S and McDonough W E. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. Geological Society Special Publication, 1989, 42: 313—345.
- 28 沈静, 徐汝梅, 周国法, 等. 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, 1999, 11(2): 100—112
- 29 Hogdahl O T, Miesch S and Bowen V T. Neutron activation of lanthanide elements in seawater. Adv Chem Ser, 1968, 73: 308—325
- 30 李明德. 水生生物学论文集. 北京: 海洋出版社, 1991: 108—109
- 31 Zhang J, Nozaki Y. Rare earth elements and yttrium in seawater: ICP-MS determinations in the East Carolina, Coral Sea and South Fiji basins of the western South Pacific Ocean. Geochim Cosmochim Acta, 1996, 60: 4631—4644
- 32 Fleet A J. Aqueous and sedimentary geochemistry of the rare earth elements. Rare earth element geochemistry. London: Elsevier Science Publishers, 1984: 343—421

- 33 Goldberg E D, et al. Rare earth distributions in the marine environment. *J Geophys Res*, 1963, 68(15): 4209—4217.
- 34 马英军, 霍润科, 徐志方, 等. 化学风化作用中的稀土元素行为及其影响因素. *地球科学进展*, 2004, 19(1): 87—94
- 35 谢又予. 论南极多年冻土区的化学风化作用——以中国长城站、澳大利亚凯西站和戴维斯站地区为例. *南极研究 (现极地研究)*, 1988, 1(2): 8—14
- 36 王自磐, Peter H U. 南极长城站和中山站贼鸥种群生态学比较研究. *极地研究*, 2002, 14(2): 83—92

CHARACTERISTICS OF THE REE IN THE BONE TISSUES OF PENGUINS AND SKUAS, ANTARCTICA

Wang Jing^{1,2} and Xie Zhouqing¹

(¹ Institute of Polar Environment, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

(² Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract

Rare earth elements (REE) in the bone tissues of penguins and skuas from Great Wall Station and Zhongshan Station in the Antarctic were determined using an inductively coupled plasma mass spectrometer (ICP-MS). The result shows that the total REE contents in seabirds of Antarctic vary from 0.8 μg/g to 3.5 μg/g. Enrichment of LREE in the seabirds' bones suggests that there is some fractionation between LREE and HREE. There are obvious differences in species and regions between penguins and skuas and the REE contents in the seabirds of Great Wall Station are more than the ones in Zhongshan Station. The diversity also exists in the different bone tissues of the seabirds and the contents in the leg bone are approximately two times higher than the ones in the wing bone. The REE distribution patterns of the bone tissues in the seabirds show relatively enrichment in LREE, the slope of which shows negative, while HREE keeps stable. There are differences in the REE distribution patterns between penguins and skuas, which relate to the food chain and physiological mechanism rather than the seawater.

Key words penguin, skua, bone tissues, rare earth elements, ICP-MS, Antarctic