论文

西南极企鹅栖息地粪土层生物标志物记录和实测群落结构变化与 ENSO 的响应

张海生^{①*}, 陆斗定^①, 于培松^①, 张卫国^②, 卢冰^①, Hans-Ulrich PETER^③, Walter VETTER^③^① 国家海洋局海洋生态系统与生物地球化学重点实验室, 国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012;^② 华东师范大学河口海岸动力沉积和动力地貌综合国家重点实验室, 上海 201100;^③ Institute of Ecology, Friedrich Schiller University, Jena D-07743, Germany

* E-mail: zhangsoa@163.com

收稿日期: 2011-12-08; 接受日期: 2012-05-13

国家自然科学基金(批准号: 40876104, 41006118)资助

摘要 采用 ^{210}Pb 进行年代测定, 建立了西南极阿德雷岛 AD2 企鹅粪土地层的类脂生物标志物时间序列, 应用粪土层记录的环境冷暖指标脂肪酸分子 $n\text{C}_{18:2}/n\text{C}_{18:0}$ 比值变化, 反映 1931~2006 年以来西南极地区几次短期气候冷暖变化事件, 它们在年代和形式上与 ENSO 事件相互对应, 且低值出现在 2~3 和 6~7 cm 处的 2 个 ENSO 年结束年(1958 和 1983 年), 反映了记录在南极沉积地层中的 ENSO 信号可能有一个时间滞后效应. 研究结果还显示, AD2 粪土层正构烷烃主峰碳(MH) C_{23} 的相对丰度、 $\text{C}_{23}/\text{C}_{17}$ 、轻组分与重组分比值($\Sigma\text{C}_{21}^-/\Sigma\text{C}_{22}^+$)、碳优势指数 CPI 等的变化不仅反映了土壤菌藻微生物与低等植被的相对变化, 而且也与气候变化具有密不可分的联系. 细菌脂肪酸很好地记录了近 75 年来该地区经历了两次明显的细菌变化, 细菌脂肪酸 $i\text{C}_{15:0}/a\text{C}_{15:0}$ 比值敏锐地反映了这一地区在这两个时期微生物作用明显增大, 且均发生在 ENSO 结束年, 同时段的脂肪酸组分 CPI_A 值降低, $\Sigma\text{C}_{21}^-/\Sigma\text{C}_{22}^+$ 增高, 表明微生物为粪土层贡献低碳数的脂肪酸分子, 与 Pr/Ph 没有太大相关性, 这种变化反映了微生物及细菌在南极这个相对简单的生态系统中扮演了重要角色, 无疑微生物的活动与气候冷暖条件密切相关. 另外结合企鹅群落实测研究表明, 鸟类数量变化在一定程度上是可以反映全球气候变化对群落生态系统的影响.

关键词南极
企鹅粪土层
 ^{210}Pb
生物标志物
企鹅种群
气候变化

ENSO(厄尔尼诺-南方涛动)是影响全球大气和海洋循环变化的一种现象, 它是迄今为止人类发现的全球气候和环境异常最强的年际变化信息, 其发生时的影响范围波及全球^[1-3]. 为应对这一共同挑战, 人们需要从多种角度对 ENSO 进行研究, 增加对

ENSO 与气候背景之间的相互作用关系的了解, 其中利用 ENSO 事件的自然记录研究和揭示其现象与特征^[4-7]以了解过去不同冷暖时期的 ENSO 变率成为最直接和最有启发性的工作, 这将有利于我们从原理上, 而非仅仅简单地依赖于模式集合去预测未来背

中文引用格式: 张海生, 陆斗定, 于培松, 等. 西南极企鹅栖息地粪土层生物标志物记录和实测群落结构变化与 ENSO 的响应. 中国科学: 地球科学, 2013, 43: 232-242

英文引用格式: Zhang H S, Lu D D, Yu P S, et al. Biomarker records in penguin droppings and observed changes in penguin communities and their response to the ENSO in the Western Antarctic. Science China: Earth Sciences, 2012, 55: 1238-1247, doi: 10.1007/s11430-012-4439-7

景下的 ENSO 特点.

南极是全球变化的敏感地区, 在揭示全球变化机制中处于十分关键的地位, 很多研究都推测南极气候变化可能与厄尔尼诺现象的周期有关, 如南极海冰变化与 ENSO 循环过程的关系和影响^[8-14]以及南极的降水与 ENSO 的可能联系^[15]等等. 目前, 在高分辨率的气候变化研究中充分发挥类脂生物标志化合物的作用解决地球科学问题是国际上的学科前沿. 类脂生物标志物在有机质演化过程中具有一定的稳定性, 虽受成岩和地质作用的影响, 但没有或较少发生变化, 基本保存了原始生物生化组分的碳骨架, 记载了原始生物母质的相关信息^[16], 因而成为古环境重建的有效工具. 对地质地层中生物标志物的深入研究, 可加深我们对 ENSO 这一海洋气候变异事件的了解.

本文利用一种新研究载体——南极阿德雷岛企鹅原地粪土沉积地层中类脂生物标志物的精细结构组成和分子组合特征指数的记录, 结合南极企鹅栖息地周边物质来源^[17]、陆地植被兴衰^[18]、沉积环境特征(氧化或还原环境^[19])和环境温度变化等^[20], 揭示这一地区是否曾经受到厄尔尼诺现象的影响, 以及微生物群落(细菌)繁荣和衰落与 ENSO 之间的内在联系, 同时将过去的地质记录与现代的企鹅群落生态实测数据结合研究. 通过企鹅种群动态研究、优势种群分布、年际间的数量变化等, 来探讨导致其变化的关键因素, 这也是当前鸟类种群研究的前沿.

1 研究地区概况

南极海洋性气候区主要范围包括南三明治群岛(South Sandwich Islands)、南设得兰群岛(South Shetland Islands)以及南极半岛 70°S 以北的西部海岸至 55°S 以南的岛屿地区, 这些地区气候明显高于南极其他区域, 主要是得益于周边海洋暖湿气团影响^[21]. 阿德雷岛(Ardley Island)面积大约为 2 km², 地势平坦, 最高海拔只有 70 m, 地衣和苔藓生长较密, 群落分布均匀连续, 地面植物覆盖率约占全岛面积的 70%~80%. 岛东岸是最大的企鹅聚居地, 因而是南极鸟类成土条件最好也是作用最强的岛屿. 企鹅是南极生态系统中的顶级捕食者之一, 主要食物为磷虾, 年捕食磷虾约 3317 万吨, 占南极海鸟总消耗的 90%. 企鹅栖息地粪土沉积始于地表扰动和外来物质的输入, 在建巢阶段大量碎石带入栖息地, 在地

表形成富含砾石的异源物质层. 在繁殖期和育雏期间企鹅粪便约每年 $1.39 \times 10^5 \text{ kg}$ ^[22]进入阿德雷岛, 为粪土地层的形成和发育提供最重要的物质需要. 另外, 企鹅栖息地中还有大量食物残留物、凋落羽毛(含有油脂层)、蛋壳碎片以及鸟尸残骨等形式输入栖息地. 此外, 海洋和空气温度的增高也影响到该岛, 自 1989 年以来西南极乔治王岛上企鹅数量明显下降, 特别是纹颊企鹅. 鸟类粪土和鸟类生态学数据是全球变化大科学中的一条无可替代的线索, 由于活的生物体对环境和气候的变化更为敏感, 因而更具有重要的生态学意义.

2 柱样采集和实验方法

2.1 柱样采集

粪土沉积地层中的有机质主要来源是企鹅粪和这一特殊环境下生长的植物输入. AD2 柱样采集于 2001 年(图 1), 2006 年在 AD2 附近采集了微表层样品. 应用 GPS 卫星定位在西南极阿德雷岛企鹅栖息地选择采样点若干, 考虑到粪土沉积层的特征, 选择地势低洼处易形成沉积层, 而且沉积后又不易迁移, 同时还要兼顾沉积地层中砂砾少无扰动, 经环境地质调查鉴定符合沉积地层记录的粪土柱样. AD2 柱样用内径为 10.5 cm 的 PVC 管采集原状沉积物, 可见植物残体, 散发出浓烈臭味, 样品采集后冷冻封存.

图 1 采样站位图

2.2 粪土样核素测定方法

^{210}Pb 测年采用 γ 能谱方法^[23]. 称取 3 g 样品, 装入直径 1 cm 圆柱管内(装样高度为 4 cm), 密封 3 周后, 使用美国 EG&G ORTEC 生产的井型探头 (GWL-120210-S) 测量. 测量时间一般为 80000 s 左右, 此实验在华东师范大学河口海岸动力沉积和动力地貌综合国家重点实验室进行.

2.3 生物标志物提取和仪器分析

样品经冷冻干燥后粉碎至 100 目以下, 称取 10 g 样品用二氯甲烷/甲醇(体积比 3:1)提取 48 h. 总抽提物用固相分离法分离成中性和酸性组分. 中性组分再用硅胶色层柱法分离成饱和烃、芳烃、酮/酯、醇/甾醇和极性组分, 淋洗液分别为正己烷、正己烷/二氯甲烷(9:1)、二氯甲烷、二氯甲烷/甲醇(1:1)和甲醇, 饱和烃浓缩后直接上机分析. 酸性组分用 10% 的 BF_3 /甲醇混合液酯化过夜, 并用二氯甲烷萃取脂肪酸甲酯组分; 正构烷烃和脂肪酸的定量分析采用内标法, 内标物为氘代碳二十四烷烃($\text{C}_{24}\text{D}_{50}$)和正十九酸($n\text{C}_{19:0}$), 结合标样响应因子在 GC 上进行分析, 化合物鉴定根据色谱相对保留时间确定^[24,25]. 醇组分内标物为 5 α -胆甾醇, 用 BSTFA(Bis(trimethyl)-trifluoroacetamide)转化为三甲基硅醚衍生物(TMS-醚), 进行 GC/MS/SIM 分析, 分析结果和质谱图解释对比文献标准图谱确定^[26,27].

正构烷烃: 气相色谱分析采用 HP6890, 弹性石英毛细管柱(DB-5, 内径 30 m $\times$ 0.25 mm, 膜厚 0.25 μm). 进样器温度和检测器温度分别为 280 $^{\circ}\text{C}$, 初始温度为 80 $^{\circ}\text{C}$. 升温速度为 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 终至温度 280 $^{\circ}\text{C}$, 保持 30 min.

脂肪酸甲酯: 气相色谱分析采用 HP5890 气相色谱仪, 弹性石英毛细管柱(DB-5, 内径 30 m $\times$ 0.25 mm, 膜厚 0.25 μm). 进样器温度和检测器温度分别为 290 $^{\circ}\text{C}$, 初始温度为 80 $^{\circ}\text{C}$, 以 3 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温至 150 $^{\circ}\text{C}$, 终至温度 290 $^{\circ}\text{C}$, 保持 30 min. 进样量为 1 μL , 载气为高纯氦气, 流速 1.0 mL/min.

甾醇类: 色谱柱为 HP-5, 石英毛细管柱 30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μm , 载气为高纯氦气, 进样口温度 260, 无分流进样. 初始温度为 80 $^{\circ}\text{C}$, 升至 290 $^{\circ}\text{C}$, 保持 20 min. 质谱条件: 电子源为四极杆离子源, 50~550 amu 质量范围全扫描, 电离方式 EI, 电离能

量 70 eV, 接口温度 280 $^{\circ}\text{C}$, 离子源温度 230 $^{\circ}\text{C}$, 扫描方式 TIC, 溶剂延迟 3 min(此项实验在德国耶纳大学分析).

2.4 企鹅生态实测方法

2005/2006 年和 2006/2007 年对阿德雷岛企鹅生态学的调查和研究采用直接观察法, 记录企鹅种群数、行为特点和繁殖行为(分三个阶段: 孵化、幼鸟阶段和雏鸟下海前夕), 分组分片同步进行. 由于观测活动受制于气候条件和潮汐变化, 因此进行了定期(使用俄罗斯考察站小艇)和不定期(根据潮汐步行往返)的生态学观察和记录. 繁殖种群数量统计主要采用巢位计数法, 在企鹅雏鸟孵出之前, 调查研究区域营巢企鹅的群数, 当两个企鹅群体相距 50 m 以上或存在明显的地形地貌差异的时候, 可以认为是两个不同的群^[28]. 观察记录巢内蛋卵、雏鸟和空巢情况, 并假定每个巢内只有一对企鹅繁殖对. 观测企鹅的居留时间和各种繁殖行为, 测量有关的繁殖参数. 在每个企鹅种群的繁殖点选择 100~200 个巢, 在雏鸟孵出后统计雏鸟存活状况, 以平均每对企鹅繁殖对所养育成活的幼鸟数计算繁殖成功率.

3 地层记录

3.1 粪土地层样品 ^{210}Pb 定年

利用 46.5 和 351.9 keV 特征峰作为总 ^{210}Pb 和补偿 ^{210}Pb 的比活度计算, 二者的差值即为过剩 ^{210}Pb 的比活度. 总体上看, ^{210}Pb 的比活度在 AD2 粪土沉积层 0~1 cm 处含量最高, 比活度随深度的增加呈典型的指数衰减分布(图 2), 其异常波动可能与人类活动以及沉积速率变化有关. 根据 CRS 模式, AD2 粪土沉积层平均沉积速率为 0.167 cm/a ($R^2=0.794$). 对柱样不

图 2 AD2 粪土柱样中 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 随深度呈指数衰减

同深度相对应的地质年代进行计算, AD2 粪土柱样时间跨度约为 70 a(1931~2001 年), 根据 ^{210}Pb 比活度, 在 0~1, 2~3, 4~5, 6~7, 8~9, 10~11 cm 处的峰值分别定为 1931, 1947, 1958, 1969, 1983, 1994 年, 微表层年代为 2001 和 2006 年。

3.2 正构烷烃分子组合特征与生物源

AD2 粪土沉积地层中检测的正构烷烃碳数分布范围在 $n\text{C}_{14}\sim n\text{C}_{33}$, 呈单峰型分布, 主峰碳数大多为 $n\text{C}_{23}$, $n\text{C}_{27}$ 也有较高含量(图 3). 轻烃/重烃($\Sigma\text{C}_{21}\sim\Sigma\text{C}_{22}^+$)为 0.30~0.71, 据此表明在粪土层中碳数大于 C_{22} 的长链是主要组分. 碳优势指数 CPI 为 2.52~7.10, 具有明显的奇偶优势. 本次研究样品中长链正构烷烃的这种分布特征和主峰碳 $n\text{C}_{23}$ 与本区陆地存在大量苔藓地衣植物输入有关, 并反映了草本植物的母源特征, 已有研究表明某些苔藓植物的正构烷烃分布示意 $n\text{C}_{23}$ 为主峰^[29,30], 且前人已对 $n\text{C}_{23}$ 正构烷烃与苔藓植物的关系进行了研究, 并提出 $n\text{C}_{23}$ 标志了一种寒冷气候的信息^[31]. 需要指出的是, $n\text{C}_{27}$ 主要来源于本地枝状地衣占优势的茂密植物, 该区环境中没有陆生木本植物, 故而可排除这一生物来源. 阿德雷岛大约 70%~80% 的面积为植被(苔藓和地衣)所覆盖, 其中苔藓类和枝状地衣占优势(针叶离齿藓、高山金发藓丛和簇花石萝). 粪土层中正构烷烃的分布特征与当地植物种类相吻合. 陆地低等植物与菌藻类低等生物贡献 $\text{C}_{23}/\text{C}_{17}$ 比值在 1.00~1.75 之间, 该比值

的变化规律可直接由气候变化引起.

另外低碳数正构烷烃($n\text{C}_{17}\sim n\text{C}_{19}$)占较大比例, 这些低碳数来源于菌藻类低等生物^[32,33], 可以确认这个途径就是企鹅捕食的海洋生物通过食物链转移到栖息地中, 也包括地衣菌类、土壤藻类和雪藻等. 微生物中主要是细菌, 尽管企鹅粪土层中微生物总量并不高, 但却是有有机质分解过程的关键控制因素, 细菌占微生物总量的 90% 以上^[34,35], 阿德雷岛企鹅排泄物的输入量对微生物分布有极大的影响^[36].

3.3 类异戊二烯的 Pr/Ph 与沉积环境记录

样品中检测出的类异戊二烯烷烃包括老蛟烷(Pr)和植烷(Ph), 它们是在不同条件下的降解产物, 对这些分子组合特征的精细分类, 在确定沉积时的氧化或还原程度方面能提供有关地质历史记录. Pr/Ph 为 0.72~1.34, Pr/Ph 大于 1, 呈氧化沉积环境; 小于 1 则呈还原沉积环境^[37], 这是通过企鹅群落的活动影响栖息地土壤环境, 改善了粪土沉积物的还原状况, 提高粪土柱样氧化作用.

3.4 脂肪酸分布和细菌活动对环境温度的响应

AD2 粪土柱样中检测到丰富的脂肪酸, 碳数分布为 $n\text{C}_{14:0}\sim n\text{C}_{32:0}$, 呈双峰群分布, 前锋以 $n\text{C}_{16:0}$ 为主峰碳, 后峰则以 $n\text{C}_{24:0}$ 为主峰碳(图 4). 一般认为短链脂肪酸 $n\text{C}_{15:0}\sim n\text{C}_{19:0}$ 主要来源于海洋浮游生物和细菌^[38], 可推测是企鹅群落以排泄粪便的形式把大量

图 3 AD2 粪土样品正构烷烃气相色谱图

图 4 脂肪酸甲酯气相色谱图

源自海洋的有机物输入栖息地. 已有研究表明企鹅排泄物中壳质素在新鲜企鹅粪便中占三分之一^[39], 阿德雷岛企鹅的食物来源主要是磷虾, 占食物量的 81.79%^[40]. 脂肪酸的轻烃/重烃 ($\Sigma C_{21-}/\Sigma C_{22+}$) 为 0.51~0.71, 表征偶碳数分子与奇碳数分子的相对含量比值 CPI_A 为 2.98~6.14, 具有强烈的偶奇优势, 长链脂肪酸来自陆源高等植物, 据此可推断脂肪酸 $nC_{24:0}$ 酸应当来源于陆地苔藓植物, 这与前述正构烷烃以 nC_{23} 为主峰相一致, 表明样品中的高碳数正构烷烃主要是从对应的正脂肪酸脱羧生成的.

企鹅粪土层中不饱和直链脂肪酸的含量很低, 主要为 $nC_{18:1}$, $nC_{18:2}$ 和 $nC_{20:4}$ 等, 一般认为它来自细菌^[41-43], 特别是粪土层中的 $nC_{18:2}$ 主要来源于细菌, 而不是藻类, 相对单一的生源特征是脂肪酸 $C_{18:2}/C_{18:0}$ 主要受控于温度的变化, 而不是生源输入的变化. 脂肪酸是生物细胞膜的重要组成部分(包括细菌等在内的生物体), 它们在较低环境温度下倾向于合成较多不饱和脂肪酸以维持体内细胞膜的流动, 这也是南极地区气候寒冷的表现^[20]. $C_{18:2}/C_{18:0}$ 比值可指示环境温度变化, 较高的 $C_{18:2}/C_{18:0}$ 比值指示较低的环境温度. AD2 粪土柱样 $C_{18:2}/C_{18:0}$ 比值在 0.19~0.50 之间, 不饱和直链脂肪酸的相对含量随环境温度的降低而提高, 反之亦然.

此外, 还检测到支链(iso/anteiso) 脂肪酸(如 $iC_{14:0}$, $iC_{15:0}$ 和 $aC_{15:0}$ 等), 它们是类群细菌活动成因的标志物^[44-46]. 奇碳数异构(is-)/ 反异构(ai-)这类细菌脂肪酸 $iC_{15:0}/aC_{15:0}$ ^[45]. AD2 粪土柱样 $iC_{15:0}/aC_{15:0}$ 比

值为 0.20~0.55, 在 2~3 和 6~7 cm 层位上反异构的 $aC_{15:0}$ 几乎高于 $nC_{16:0}$, 反映细菌作用较强. 这些细菌脂肪酸主要来源于原地企鹅排泄物, 并依赖于粪土化学物质生存的细菌, 已有研究表明南极海洋气候区企鹅栖息地粪土的微生物作用非常活跃^[35].

3.5 甾醇分子组成与沉积埋深的关系

AD2 企鹅粪土层中的甾醇类主要以胆甾-5-烯-3 β -醇(俗名胆甾醇又称胆固醇)为主, 新鲜企鹅粪中含有大量胆甾醇, 浓度占总醇类的 98%以上^[47], 表明其母质来源对最初结合到沉积物中的甾醇组成起主要控制作用. 阿德雷岛是企鹅聚集地, 胆甾醇主要由企鹅排泄粪便直接输入. 粪土层中 5 β -胆甾-3 β -醇(胆甾烷醇又称二氢胆甾醇)也有较高含量, 虽然在活的生物体中胆甾烷醇浓度很低, 它通常是甾烯醇化学和生物作用下转化为胆甾烷醇. 其含量随沉积物埋深迅速增加. 胆甾烷醇在还原环境中是热力学稳定的异构体, 因此可作为分子示踪地质时期企鹅群落的兴衰趋势^[48].

另外谷甾醇、粪甾醇和异构粪甾醇是常见的粪便甾醇. AD2 粪土层中检测出 5 β -胆甾-3 β -醇(俗名粪甾醇)和 5 β -胆甾-3 α -醇(异构粪甾醇)和 24-乙基-胆甾-5-烯-3 β -醇(俗名谷甾醇)也是鸟类粪便的主要甾醇, 可推断它们直接由企鹅排泄输入^[49]. 本次重点研究的 4 种粪甾醇相对百分含量见表 1. 甾醇组成随沉积物埋藏深度变化, 胆甾烷醇/甾烯醇比值变化在 0.21~7.06 之间(除 6~7 和 2~3 cm 两处较高以外), 该比值埋埋

表 1 AD2 粪土柱样中粪甾醇分布特征($\mu\text{g/g}$)

粪甾醇	2006 年 表层 ENSO 年	2001 年 表层 ENSO 年	1994 年 0~1 cm ENSO 年	1983 年 2~3 cm ENSO 结束年	1969 年 4~5 cm ENSO 年	1958 年 6~7 cm ENSO 结束年	1947 年 8~9 cm 非 ENSO 年	1931 年 10~11 cm 非 ENSO 年
胆甾-5-烯-3 β -醇(俗名胆甾醇又称胆固醇)	706.20	733.24	645.74	450.11	630.87	401.46	543.10	390.00
5 α -胆甾-3 β -醇(胆甾烷醇又称二氢胆固醇)	63.78	70.25	90.11	210.33	125.63	259.20	159.78	270.14
5 β -胆甾-3 β -醇(俗名粪甾醇)	15.42	11.99	10.89	23.00	16.55	15.32	20.10	11.57
5 β -胆甾-3 α -醇(俗名异构粪甾醇)	4.73	5.00	4.15	9.23	8.94	5.97	7.55	8.20
24-乙基-胆甾-5-烯-3 β -醇(俗名谷甾醇)	6.12	7.74	7.00	6.12	9.77	10.41	10.00	7.98
胆甾烷醇/甾烯醇	0.10	0.10	0.14	0.47	0.20	0.65	0.29	0.59

深有所增加,反映了在南极冻土环境下,有机质所经历的成岩转化作用比较微弱,有机质保存条件良好。但微生物活动对甾醇组成具有重要影响,在微生物存在的情况下胆甾烯醇在厌氧条件下被氢化,在氧化条件下被优先降解,这种氢化作用和氧化作用是导致现代沉积物胆甾烷醇/胆甾烯醇比值增加的主要作用^[50]。

4 讨论

4.1 企鹅群落变化(生态实测)对全球变暖和 ENSO 的响应

鸟类是全球生态系统的一个重要组成,鸟类数量变化可以反映全球气候变化对生态系统的影响^[51]。最近 Vargas 等^[52]报道, ENSO 通过改变赤道洋流从而影响海洋初级生产力,进而通过食物链对企鹅产生生态效应。目前阿德雷岛上栖息的企鹅主要有三种:巴布亚企鹅(*P.papua*)、阿德利企鹅(*P.adeliae*)和纹颊企鹅(*P.antarctica*),其中巴布亚企鹅在数量上占绝对优势。2006/2007 年企鹅生态实测巴布亚企鹅、阿德利企鹅和纹颊企鹅繁殖对分别为 4429, 423 和 10 对,总共 9724 只。2005/2006 年阿德雷岛上巴布亚企鹅、阿德利企鹅和纹颊企鹅繁殖对分别为 4635, 34 和 9 对,总共 9956 只。2001/2002 年阿德雷岛上巴布亚企鹅、阿德利企鹅和纹颊企鹅繁殖对分别为 4400, 810 和 24 对,总共 10468 只^[53]。1994/1995 年岛上巴布亚企鹅繁殖对为 4000 对,阿德利企鹅和纹颊企鹅大约各为 1000 对,总共 1200 只;1983/1984 年巴布亚企鹅 3200 对,阿德利企鹅近 1200 对和纹颊企鹅 120 对;1981/1982 年岛上巴布亚企鹅 3700 对,阿德利企鹅近 1000 对和纹颊企鹅 5000 对,总共 19400 只;由此可见十几年来岛上企鹅数量发生了明显的波动^[54]。

通过对以上南极鸟类生态监测多年观察资料分析(图 5), ENSO 年期间,在 1982/1983, 1986/1987, 1991/1992, 1997/1998 和 2005/2006 年,海水营养贫瘠化,海洋浮游生物繁殖减退,以之为食的磷虾和海洋生物也随之衰竭,继而影响到以磷虾为食的企鹅,纹颊企鹅数量均要比相邻的非 ENSO 年低一些。从 20 世纪 70 年代末以来,纹颊企鹅的数量更是急剧减少,从 200 多对下降到 2006/2007 年的仅 10 对^[55]。阿德利企鹅也有相似的趋势。巴布亚企鹅没有显示出这一规律,并与纹颊企鹅似乎呈反向关系。

全球气候变暖,南极半岛气候增温尤为突出,冬季的平均气温在此期间上升将近 6°C^[56]。气温上升一方面导致南极冰雪融化、冰盖消退,大大缩减了适宜企鹅活动的冰原栖息地和生存活动场所,活动面积的不足导致群落栖息场所竞争。而这些时期巴布亚企鹅数量的上升是否与该种群对冰盖的依赖性不强^[56]有关,从而使得它们在生存竞争中具有优势;另一方面气候增温也导致南极磷虾产量萎缩^[57],南极磷虾是三种企鹅的生存资源,期间必定存在激烈的食物竞争。有研究表明,磷虾在阿德利企鹅、巴布亚企鹅与纹颊企鹅的食物中所占比例分别为 81.79%, 86.87% 和 100%,可见对于磷虾产量的增减和食物来源的变化对纹颊企鹅更为敏感,相关的科学问题还需要进行更为深入的研究。

4.2 分子记录及植被、企鹅数量与气候变化(ENSO)的关系

最近几十年间,南极地区的气温变化格局非常复杂,南极半岛西侧和北侧升温最快。本次研究使用 Orcadas 站的气温距平来近似代表南极半岛地区气温变化^[58],近百年来气温呈明显上升趋势。Orcadas 站的地理位置非常重要,它位于南极半岛末端,正好

 图 5 阿德雷岛三种企鹅 35 年来种群变化^[55]

靠近南极海冰涛动在南极半岛和别林斯高晋海的关键区。南极半岛地区的气候变化不但和南极海冰涛动有着紧密联系, 同时又和 ENSO 事件有关。

采用 ^{210}Pb 进行年代测定, 建立了西南极阿德雷岛 AD2 粪土地层的类脂生物标志物时间序列, 从沉积地层年代 1931~2006 年, 记录了 3 个 ENSO 年(1969, 1994 和 2006 年)、2 个 ENSO 结束年(1958 和 1983 年)以及 2 个非 ENSO 年(1931 和 1947 年)。应用粪土层中环境温度指标脂肪酸分子 $n\text{C}_{18:2}/n\text{C}_{18:0}$ 比值记录, 反映出 75 年来南极地区几次短期气候冷暖变化事件, 在年代和形式上与全球 ENSO 事件相互对应。在沉积年代 1994 年(0~1 cm 处)脂肪酸 $n\text{C}_{18:2}/n\text{C}_{18:0}$ 比值 0.32 对应 Orcadas 站的气温距平 -3.2°C ; 在沉积年代 1983 年(2~3 cm 处) $n\text{C}_{18:2}/n\text{C}_{18:0}$ 比值 0.19 对应气温距平 -3°C ; 在沉积年代 1969 年(4~5 cm 处) $n\text{C}_{18:2}/n\text{C}_{18:0}$ 比值 0.42 对应气温距平 -3.6°C ; 在沉积年代 1958 年(6~7 cm 处) $n\text{C}_{18:2}/n\text{C}_{18:0}$ 比值 0.17 对应气温距平 -5.0°C ; 在沉积年代 1947 年(8~9 cm 处) $n\text{C}_{18:2}/n\text{C}_{18:0}$ 比值 0.45 对应气温距平 -5.8°C ; 在 1931 年对应气温距平大致为 -5.9°C 。以上 2 个脂肪酸 $n\text{C}_{18:2}/n\text{C}_{18:0}$ 低比值均出现在 ENSO 结束年(1958 和 1983 年), 反映了在南极沉积地层记录中的 ENSO 可能有一个时间滞后效应。

南极半岛湖泊沉积地层记录了过去的近 80 年来发生的几次短期气候冷暖事件, 并在年代和形式上

与 ENSO 事件相互对应。企鹅粪便和周边低等植物为主输入的 AD2 原地粪土沉积地层中, 替代性指标显示出的生物源输入变化直接或间接与气候变化有关。正构烷烃 C_{23} 在非 ENSO 年相对丰度有增高趋势, 反映出气候寒冷使某些苔藓植物的 C_{23} 正构烷烃成分明显增加。在 ENSO 结束年(1958 和 1983 年)正构烷烃 C_{23} 相对丰度略微减少, 但是陆地苔藓植物与菌藻类低等生物相对贡献 $\text{C}_{23}/\text{C}_{17}$ 值在这两个时段的变化要比单纯的 C_{23} 相对丰度拟合得好一些, 这种规律性变化可能是直接由气候变化引起。正构烷烃 C_{27} (地衣)几乎没有变化, 可能是地衣需要经过漫长的一百年才会长高区区 1 mm, 是地衣生长速度极其缓慢造成的。从图 6 中可以看出, AD2 粪土层的正构烷烃 CPI 与轻/重组分比值($\Sigma\text{C}_{21}^-/\Sigma\text{C}_{22}^+$)具有良好的负相关性。正构烷烃的 $\Sigma\text{C}_{21}^-/\Sigma\text{C}_{22}^+$ 比值中的长链烷烃来源于陆地植物, 短链烷烃属于低等菌藻类生物(海洋生物), 反映低等菌藻类生物(海洋生物)和陆地植物相对变化^[59], 且与气候变化具有密不可分的联系; 而正构烷烃的 CPI 值, 一方面与源区有关, 另一方面与有机质所经历的温度有关(影响有机质的成熟度)有关, 有机质所经历的温度越高, 其成熟度相对也越高, CPI 值就降低^[60]; 两者的垂向分布特征, 显示了环境气候都发生了重大变化, 低等菌藻类生物比陆生植物对气候变化可能更为敏感。

与植被相比较, 微生物对环境变化的承受力要大一些, 对气候变暖有比较明显的反应。细菌脂肪酸

的组成与细菌所处外部环境条件(温度)有很大关系, 天气温暖条件下微生物活动加强, 特别是细菌能大量繁殖; 寒冷气候条件下, 微生物活动减弱, 相对高含量的不饱和脂肪酸的出现可能与较弱的微生物活动有关, 不饱和脂肪酸与饱和脂肪酸比值所表现出来的气候意义可能是微生物活动对气候的反映. AD2 粪土层中的微生物分子标志物很好地记录了 70 多年来该地区经历了两次明显的细菌变化, 均发生在 ENSO 结束年. 脂肪酸 $iC_{15:0}/aC_{15:0}$ 比值为低值, 敏锐地反映了南极地区这一时期微生物及细菌作用明显增大, 与此同时脂肪酸组分 CPI_A 值降低, 而 $\Sigma C_{21}/\Sigma C_{22}^{+}$ 增高, 微生物为粪土层贡献低碳数的脂肪酸分子. 这种变化反映了企鹅粪土沉积过程中微生物对类脂物中高碳分子的改造强度, 微生物不仅输入其本身的类脂物, 而且对不同类脂物的改造都会使 CPI 和 CPI_A 值发生规律性变化. 这种变化与 Pr/Ph 没有很好的相关性, 表明在粪土沉积过程中, 这种变化反映了微生物及细菌在南极这个相对简单的生态系统中扮演了重要角色, 无疑微生物的活动与气候冷暖条件密切关联.

AD2 粪土层中甾醇组分变化很大是由于胆甾烷醇的浓度增加很快, 胆甾烷醇和甾烯醇两者浓度很

具密切的平行性, 这种平行性提供了甾烯醇双键还原或降解的证据, 导致胆甾烷醇/甾烯醇显著增加, 在 2~3 和 6~7 cm 处(ENSO 结束年)胆甾烷醇和胆甾烷醇/甾烯醇比值显著增加, 反映了微生物活动与化学降解作用十分活跃的结果. 温度突然变化影响细菌数量, 沉积环境的含氧量与细菌对甾烯醇的降解有很大关系, 氧化环境中甾烯醇会迅速降解.

此外从理论上讲, 企鹅粪土层中的胆甾醇主要取决于鸟粪输入量, 因而直接与企鹅数量密切相关, 胆甾烷醇在还原环境中是热力学稳定的异构体, 因此可作为分子示踪地质时期企鹅群落的兴衰趋势. 汪建君等^[48]等利用胆甾烷醇的相对含量很好地恢复了企鹅的相对数量, 所研究的湖泊 Y2-1 沉积物处于较强的还原环境中, 其中的胆甾烷醇和胆甾醇浓度曲线一致, 并与企鹅粪土层中的无机元素标型组合的曲线相似, 可以作为灵敏的企鹅数量指示剂. AD2 企鹅粪土中胆甾烷醇和胆甾烷醇/甾烯醇比值在沉积物中的曲线平行波动, 但与企鹅数量之间没有很好的对应关系. 这是因为本文研究的材料直接取自企鹅栖息地低洼处堆积物, 沉积环境大多呈现氧化环境, 甾烯醇被优先降解. 因此利用胆甾烷醇估算的企鹅数目与实际观察资料有差距, 故不能作为很好的

图 6 各项分子组合特征指数与植被、企鹅数量和气候(ENSO)的关系

指示剂. 此外, 在 2~3 和 6~7 cm 处(ENSO 结束年)胆甾烷醇丰度明显增大, 有可能是某种特殊的生物种类(如微生物)对胆甾烷醇的直接输入.

5 结论

(1) 对企鹅栖息地粪土层进行 ^{210}Pb 定年, 选取具有明确环境气候意义的生物标志物作为替代性指标, 建立各项参数之间的关系以及与 ENSO 事件的联系, 证明了粪土层中的生物标志物组成和相对含量对环境温度存在着敏感响应, 企鹅栖息地粪土分子地层记录能够高分辨地反映区域性和全球性气候(ENSO 事件)的变化.

(2) 企鹅栖息地粪土分子地层记录研究表明, 应

用生物标志物某些低碳分子变化较好反映了环境特征, 这些替代性指标可能代表了数量最多的微生物和生理功能最活跃的类群, 同时也是环境微生物群落中最能反映生态环境特征的类群. 微生物在南极这个相对简单的生态系统中扮演重要的角色, 细菌群落结构变化与气候环境变化密切相关.

(3) 企鹅是南极地区数量最多的脊椎动物类群之一, 作为水生鸟类, 其生命的大部分时间在海洋中度过, 并把海洋作为其唯一的食物库(以磷虾等海洋生物为食), 处于南大洋食物链终端, 因企鹅在南极生态系统所处的特殊地位(营养地位和能量传递), 对其进行生态学研究应成为南极生命科学研究的重要组成部分, 尤其是企鹅群落可作为全球环境气候变化大型指示生物种.

致谢 感谢审稿专家提出的宝贵意见.

参考文献

- Philander S G H. El Niño, La Nina and the Southern Oscillation. San Diego: Academic Press, 1990. 1–293
- McPhaden M J, Busalacchi A J, Cheney R, et al. The tropical ocean-global atmosphere observing system: A decade of progress. *J Geophys Res*, 1998, 103: 14169–14240
- McBride J L, Nicholls N. Seasonal relationships between Australia rainfall and the Southern Oscillation. *Mon Wea Rev*, 1983, 111: 1998–2004
- Barber R T, Chavez F P. Biological consequences of El Niño. *Science*, 1983, 222: 1203–1210.
- Kerr R A. El Niño grew strong as cultures were born. *Science*, 1999, 283: 467–468
- Shulmeister J, Lees B G. Pollen evidence from tropical Australia for the onset of an ENSO-dominated climate at c. 4000 BP. *Holocene*, 1995, 5: 10–18
- Turney C S M, Kershaw A P, Clemens S C, et al. Millennial and orbital variation of El Niño/Southern Oscillation and high-latitude climate in the last glacial period. *Nature*, 2004, 428: 306–310
- Chiu L S. Antarctic sea ice variation 1973–1980. In: Street-Perrott A, Beran M, Ratcliffe R, eds. *Variations in the Global Water Budget*. Dordrecht: Reidel Publishing Co, 1983. 301–311
- Carleton A M. Antarctic sea-ice relationships with indices of the atmospheric circulation of the Southern Hemisphere. *Clim Dyn*, 1989, 3: 207–220
- Simmonds I, Jacka T H. Relationships between the interannual variability of Antarctic sea ice and the Southern Oscillation. *J Clim*, 1995, 8: 637–648
- Yuan X, Cane M A, Martinson D G. Climate variations: Cycling around the South Pole. *Nature*, 1996, 380: 673–674
- 陈锦年, 秦曾灏, 褚健婷, 等. ENSO 循环过程对南极海冰的影响. *极地研究*, 2003, 15: 129–137
- 陈锦年, 褚健婷, 许兰英. ENSO 循环过程与南极海冰变化. *水科学进展*, 2004, 15: 56–60
- 程彦杰, 陆龙骅, 卞林根, 等. 南极半岛地区气温与南极海冰涛动、ENSO 的联系. *极地研究*, 2003, 15: 121–128
- Cullather R I, Bromwich D H, Van Woert M L. Interannual variations in Antarctic precipitation related to El Niño-Southern Oscillation. *J Geophys Res*, 1996, 101: 19109–19118
- 殷鸿福, 杨逢清, 谢树成, 等. *生物地质学*. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2004. 94–130
- 郭志刚, 杨作升, 陈致林, 等. 东海陆架泥质区沉积有机质的物源分析. *地球化学*, 2001, 30: 416–424
- Brincat D, Yamada K, Ishiwatari R, et al. Molecular-isotopic stratigraphy of long-chain *n*-alkanes in Lake Baikal Holocene and glacial age

- sediments. *Org Geochem*, 2000, 31: 287–294
- 19 Meyers P A, Ishiwatari R. Lacustrine Organic Geochemistry—An overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments. *Org Geochem*, 1993, 20: 867–900
 - 20 Kawamura K, Ishiwatari R. Polyunsaturated fatty acids in a lacustrine sediment as a possible indicator of paleoclimate. *Geochim Cosmochimica Acta*, 1981, 45: 149–155
 - 21 陈杰, 龚子同, Blume H P. 南极半岛海洋气候区的土壤: I. 风化作用. *土壤*, 2003, 35: 279–285
 - 22 吴宝铃. 南极菲尔德斯半岛及其附近地区生态系统的研究. 国家海洋局极地考察办公室. 中国南极考察科学研究成果与进展. 北京: 科学出版社, 1995. 65–361
 - 23 Appleby P G, Nolan P J, Gifford D W, et al. ^{210}Pb dating by low background gamma counting. *Hydrobiologia*, 1986, 143: 21–27
 - 24 Philp R P, 著. 傅家谟, 盛国英, 译. 化石燃料生物标志物——应用与谱图. 北京: 科学出版社, 1987
 - 25 Zhang Z W, Zheng G M, Yuan J F, et al. Census of Penguins on Ardley Island of Western Antarctic. *Biodiv Sci*, 1994, 2(Suppl): 30–35
 - 26 Leeming R, Nichols P D. Concentrations of coprostanol that correspond to existing bacterial indicator guideline limits. *Wat Res*, 1996, 30: 2997–3006
 - 27 Leeming R, Latham V, Rayner M, et al. Detecting and distinguishing sources of sewage pollution in Australian inland and coastal waters and sediments. *ACS Symp Ser*, 1997, 671: 306–319
 - 28 Robertson G. Population-size and breeding success of the Gentoo Penguin, *Pygoscelis-Papua*, at Macquarie Island. *Aust Wildl Res*, 1986, 13: 583–587
 - 29 Ficken K J, Barber K E, Eglinton G. Lipid biomarker, $\delta^{13}\text{C}$ and plant macrofossil stratigraphy of a Scottish montane peat bog over the last two millennia. *Org Geochem*, 1998, 28: 217–238
 - 30 Nott C J, Xie S, Avsejs L A, et al. *N*-alkane distributions in ombrotrophic mires as indicators of vegetation change related to climatic variation. *Org Geochem*, 2000, 31: 231–235
 - 31 Xie S, Nott C J, Avsejs L A, et al. Palaeoclimate records in compound-specific δD values of a lipid biomarker in ombrotrophic peat. *Org Geochem*, 2000, 31: 1053–1057
 - 32 Otto A, Walther H, Püttmann W. Molecular composition of leaf- and root-bearing Oligocene Oxbow Lake Clay in the Weissenster Basin, Germany. *Org Geochem*, 1994, 22: 275–286
 - 33 Blumer M, Guillard R R L, Chase T. Hydrocarbons of marine phytoplankton. *Marine Biol*, 1971, 8: 183–189
 - 34 Ramsay A J and Stannard R E. Numbers and viability of bacteria in ornithogenic soils of Antarctica. *Polar Biol*, 1986, 5: 195–198
 - 35 Bölter M, Blume H P, Schneider D, et al. Soil properties and distributions of invertebrates and bacteria from King George Island (Arctowski Station), maritime Antarctic. *Polar Biol*, 1997, 18: 295–304
 - 36 王鹏, 王风平. 南极阿德雷岛淡水湖沉积物细菌群落研究. *极地研究*, 2009, 21: 100–108
 - 37 Didyk B M, Simoneit B R T, Brassell S C, et al. Organic geochemical indicators of palaeoenvironmental conditions of sedimentation. *Nature*, 1978, 272: 216–222
 - 38 赵一阳, 栾作峰, 孙作庆, 等. 南海北部湾现代海洋沉积物中一元脂肪酸和烷烃的特征. 中国科学院有机地球化学国家重点实验室研究年报, 1986. 1–9
 - 39 Marr A G, Ingraham J L. Effect of temperature on the composition of fatty acids in *Escherichia coli*. *J Bacteriol*, 1962, 84: 1260–1267
 - 40 Kaneda T. Fatty acids in the genus *Bacillus* I. Iso- and anteiso-fatty acids as characteristic constituents of lipids in 10 species. *J Bacteriol*, 1967, 93: 894–903
 - 41 Bowman J P, Cavanagh J, Austin J J, et al. Novel *Psychrobacter* species from Antarctic ornithogenic soils. *Int J Sys Bacteriol*, 1996, 46: 841–848
 - 42 Romanenko L A, Lysenko A M, Rohde M, et al. *Psychrobacter maritimus* sp. nov. and *Psychrobacter arenosus* sp. nov., isolated from coastal sea ice and sediments of the Sea of Japan. *Int J Sys Evolution Microbiol*, 2004, 54: 1741–1745
 - 43 Brassell S C. Application of biomarkers for delineation marine paleoclimatic fluctuations during the Pleistocene. In: Engel M H, Macko S A, eds. *Organic Geochemistry*. New York: Plenum Press, 1993. 699–733
 - 44 Pace M L, Carpenter S R, Cole J, et al. Does terrestrial organic carbon subsidize the planktonic food web in a clear-water lake? *Limnol Oceanogr*, 2007, 52: 2177–2189
 - 45 Zou L, Sun M Y, Guo L D. Temporal variations of organic carbon inputs into the upper Yukon River: Evidence from fatty acids and their stable carbon isotopic compositions in dissolved, colloidal and particulate phases. *Org Geochem*, 2006, 37: 944–956
 - 46 Summit M, Peacock A, Ringelberg D, et al. Phospholipid fatty acid-derived microbial biomass and community dynamics in hot, hydrothermally influenced sediments from Middle Valley, Juan De Fuca Ridge. In: Zierenberg R A, Fouquet Y, Miller D J, et al, eds.

- Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 2000, 169: 1–19
- 47 Venkatesan M I, Santiago C A. Sterols in ocean sediment: Novel tracers to examine habitats of cetaceans, pinnipeds, penguins and humans. *Mar Biol*, 1989, 102: 431–437
- 48 汪建君, 孙立广, 胡建芳, 等. 南极阿德雷岛企鹅粪土沉积物分子地球化学特征. *极地研究*, 2006, 18: 245–253
- 49 Myrcha A, Pietr S J, Tatur A. The role of pygoscelid penguin rookeries in nutrient cycles at Admiralty Bay, King George Island. In: Siegfried W R, Condry P R, Laws R M, eds. *Antarctic Nutrient Cycles and Food Webs*. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer-Verlag, 1985. 156–162
- 50 Nishimura M. The geochemical significance in early sedimentation of geolipids obtained by saponification of lacustrine sediments. *Geochim Cosmochim Acta*, 1977, 41: 1817–1823
- 51 Giese M. Guidelines for people approaching breeding groups of Adelie penguins (*Pygoscelis adeliae*). *Polar Rec*, 1998, 34: 287–292.
- 52 Vargas F, Harrison S, Rea S, et al. Biological Effects of El Niño on the Galápagos penguin. *Biol Conser*, 2006, 127: 107–114
- 53 Hemmings A D. Human impacts and ecological constraints on skuas. In: Kerry K R, Hempel G, eds. *Antarctic Ecosystems, Ecological Change and Conservation*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1990. 224–230
- 54 Peter H U, Buesser C, Mustafa O, et al. Evaluierung des Gefährdungsgrades der Gebiete Fildes Peninsula und Ardley Island und Entwicklung der Managementpläne zur Ausweisung als besonders geschützte oder verwaltete Gebiete. UBA-report, 2008. 310
- 55 Umwelt B A. Evaluierung des Gefährdungsgrades der Gebiete Fildes Peninsula und Ardley Island und Entwicklung der Managementpläne zur Ausweisung als besonders geschützte oder verwaltete Gebiete. <http://www.umweltbundesamt.de>
- 56 Gross L. As the Antarctic ice pack recedes, a fragile ecosystem hangs in the balance. *PloS Biol*, 2005, 3: 127
- 57 Loeb V, Siegel V, Holm-Hansen O, et al. Effects of sea-ice extent and krill or salp dominance on the Antarctic food web. *Nature*, 1997, 387: 897–900
- 58 卞林根, 王金星, 林学椿, 等. 南极半岛近百年气温的年代际振荡. *冰川冻土*, 2004, 26: 267–274
- 59 Meyers P A. Applications of organic geochemistry to paleolimnological reconstruction: a summary of examples from the Laurentian Great Lakes. *Org Geochem*, 2003, 30: 261–289
- 60 Simoneir B R T, Cardoso J N, Robinson N. An assessment of terrestrial higher molecular weight lipid compounds in aerosol particulate matter over the South Atlantic from about 30°–70°S. *Chemosphere*, 1992, 23: 447–465