

文章编号:1000-0550(2017)05-0958-10

doi: 10.14027/j.cnki.cjxb.2017.05.008

人类世生态地质学研究方法及应用研究

孙立广^{1,2}, 杨仲康^{1,2}

1. 极地环境与全球变化安徽省重点实验室, 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026

2. 中国科学技术大学极地环境研究室, 合肥 230026

摘要 地质学家和社会学家广泛关注“人类世”这一新概念,但是,对于“人类世”的时间跨度仍然存在很大争议。在结合前人研究结果的基础上,对人类世提出了新的划分方法:认为人类世是一个以人类活动为主导因素的地质时期,要探讨人类世的生态与环境演化过程,就需要寻找一种有时间序列、分辨率高、分布范围广并且与生物活动紧密相关的沉积层。选取粪土层作为过去生态环境信息记录的新载体,运用多学科交叉的方法探索南极生态、气候和环境变化的问题,是南极无冰区生态地质学的理论基础。南极无冰区生态地质学是人类世生态地质学的组成部分,是沉积学与地球化学、考古学、生态学多学科交叉的结果,它的理论和方法已被成功地运用到北极和中国的南海地区,它应该放在全球的沉积学大平台上,开拓新的领域。并详细讨论了人类世生态地质学的研究方法及应用实例,对于了解人类世以来气候、环境和生态的变化及其与人类活动的关系具有重要意义。

关键词 人类世;生态地质学;沉积学;南极无冰区

第一作者简介 孙立广,男,1945年出生,教授,生态地质学,E-mail: slg@ustc.edu.cn

中图分类号 X141 **文献标识码** A

0 引言

从地质学角度来看,人类活动时期非常短,但是却对地球环境产生了深远的影响。尤其是近几年来,人类活动对地球环境、大气组成成分的改变等标志着地球可能已经进入了一个新的以人类为主导因素的地质时期,即 Crutzen^[1]提出的“人类世”(Anthropocene)概念。这得到了国际学术界和公众对这一概念的广泛关注^[2-3],并且由此创办了相关的学术期刊:*The Anthropocene*、*The Anthropocene Review* 和 *Elementa*。而对这一新的地质时期的开始年代及其划分成为了一个新的科学问题^[3-5],目前科学界对于人类世的开始时间尚未达成统一认识,因此本文结合前人的研究成果,就人类世提出了一种划分方案供学者们讨论。

人类世是一个以人类为主导的地质时期,在这个时期,人类在太短的时间内,以太快的速度改变了地球的环境。从全球的尺度来看,它史无前例地超越了自然力对地球环境的改造。因此,我们在研究人类世地球系统与演化的过程中,不得不把人类活动对地球系统和自然环境的改变考虑在内。南极无冰区生态地质学^[6]作为全球变化与地球系统科学这两个新兴科学的一个新的研究领域,选取粪土沉积层为研

究载体,运用多学科交叉整合的方法,来探索宏观的生态、气候和环境变化的主题。这一整套研究方法已经成功用于研究全新世以来企鹅、海豹和磷虾等海洋生物数量变化及其影响因素^[6-11]、粪土沉积中有机地球化学及其环境意义^[12-14]以及人类文明在粪土沉积层中的历史记录^[15-16]等方面。作为人类世研究的一个部分,南极无冰区生态地质学这套方法和理论已经成功运用到北极和中国的南海地区,因此,也可以应用于人类世生态地质学的研究,这对于了解人类世以来气候、环境和生态的变化及其与人类活动的关系具有重要意义。

1 定义人类世

2002年,诺贝尔奖获得者 Crutzen^[1]提出“人类世”,他们的方案是技术在现代社会的中心作用及其环境影响,起点应当与工业革命和瓦特发明蒸汽机一致,它的时间跨度定为公元1786年至未来万年。这一新的地质时代概念引发了地质学家和社会科学家广泛的关注。由37位科学家组成的人类世工作组中约一半是地质学家,其余的有考古学家、古生物学家、气候专家、大气科学家还有其他学科的代表,这表明人类世研究已经与传统地层学的工作方法有明显的不同。Lewis *et al.*^[4]提出,最近的

全球环境变化提示地球可能已经进入了一个新的以人类为主导的地质时期。他们综合论述了人类世4种不同的时间下限的划分方案后认为,目前提供的证据表明在各个被推荐的时间点中有两个似乎满足标准,并可以作为人类世开始时间:1)在 LawDome 冰芯的 285.2 m 处,记录到的大气 CO_2 下降到低谷为 271.8×10^{-6} , 定年为公元 1610 (± 15) 年,可以作为一个适当的全球层型剖面 and 点位(GSSP)标志;2)公元 1964 年的 ^{14}C 峰值。其他一些地层学家则建议将公元 1800 年作为人类世的开始^[5,17], 尽管缺失相应的全球地质标志。Monastersky^[18] 的评论倾向认为:“过去六十年无疑是人类历史上人类和自然关系发生最深远的转变的一个阶段。”原子弹试验引起的全球放射性尘埃被提议为一个全球事件的圈层标志。选择公元 1964 年作为新的人类世基准,符合确定地质界线的严格标准。

刘东生^[19]认为广泛的地层学证据表明应将“人类世”时间的下限定于全新世这个阶段。从某种程度上,人类世和全新世在时间上是可以重合的,但在研究内容上,人类世更为强调人类活动对自然界的适应和改变。

也许,上述的这些讨论,都有道理,但是没有一种观点能得到普遍的认同。我们认为,“公元 1964 年”这个起点让人类世研究者的工作领域显得太过局促,同时, ^{137}Cs 的半衰期太短,在“后人类世”能否被智慧生物检测出来也是个疑问;“公元 1610 年”或“公元 1786 年”的显著效果是 CO_2 的缩小和放大效应,但是南北极的冰芯并不是永恒的,甚至可以怀疑它们能否比人类世的时间更久远;其他主张的 GSSP 界线都面临同样的问题。这使得我们要“另类思维”来重新考虑“人类世”的问题。

首先,地球历史上从来没有哪一种自然力量能在“百年”这样的时间尺度上如此快速地改变着地球的外地圈,人类世应该标志着以人类因素为主导改变地球环境的进程。这就决定了不能用传统的地层学方法去划分人类世;其次,我们没有必要为后人类世的智慧生物考虑他们能识别的方法去划分人类世。因为,人类活动的蛛丝马迹、文化遗存和历史记录的绝大部分都将在后人类世消失。但是,他们会有自己的科学方法去解读我们的历史,如同我们今天解读恐龙的历史一样。实际上,我们对恐龙历史的了解较之实际所发生的肯定是九牛一毛。而我们要做的是为人类服务,并解读人类那些已经记录和未曾记录的历史,

以及人类活动对这个星球的影响。

同时,人类活动是一个进程,从有显示改造环境的记录开始到逐步地显著改造环境,寻找那些人类活动留下的遗迹,尤其是其中带有突变意义的重大事件。事实上,近年来科学家对于石器时代,尤其是新石器时代的研究,取得了重要的研究成果,人类文明在全新世整个时期取得较大的进步。在中国,有北方的大地湾文化(距今 4 800~8 000 多年)、南方的河姆渡文化(距今 6 000~7 000 年),有跨越南北方的大汶口文化(距今 4 500~6 500 年)和龙山文化(距今 4 000~4 500 年),有历史记录的中华文明已经有接近 5 000 年的历史,几乎每一个王朝都留下了遗址剖面,它们构成了“人类世”典型的地质历史事件和人类历史文化发展的过程。因此,文化的发展对自然产生的影响和自然对人类的影响都在相应的地质剖面中留下了痕迹,由于时间距现在很近,这些痕迹比过去任何地史时期都更加清晰。

定义人类世的开始作为一个正式的地质年代的时间点需要在地层学材料(例如岩石,沉积物或冰川冰)中找到一个全球标志事件的位置,即全球层型剖面 and 点位(GSSP),加上其他辅助地层标志,指示地球系统的变化。或者,在一次地层证据调查之后,能够由委员会确定一个时间点,被称为全球标准地层年代(GSSA),即“金钉子”,是首选的边界标志。

目前,人类世 GSSP 界线的多个主张都无法得到普遍的认同,并且人类在几千年前就已经开始逐渐显著地改造地球环境,我们提议将人类世紧随更新世并取代全新世,人类世可分为四个发展阶段(图 1):早人类世(11 700~5 000 B.P.)、中人类世(5 000 B.P.~1 765 C.E.)、晚人类世(1 765~1 945 C.E.)和新人类世(公元 1945 以后),这个方案吸纳了关于人类世的其他各种设想。

距今 11 700 年以来,人类逐渐从未次冰期中走出来,并开始适应和改造自然,进入新石器时代^[20-21]。距今 5 000 年前后,由于人类活动导致的甲烷排放量的升高^[4,22]可以作为早人类世和中人类世的分界点,标志着人类适应自然环境的能力不断增强,人类活动开始显著地改造大气,逐渐进入以农耕文明为主的时期。而公元 1765 年第一次工业革命开始,化石燃料的加速使用和一系列快速的社会变革对人类生活产生了深远的影响^[1,5,23],预示着人类从农业社会正式步入工业社会,可以作为中人类世和晚人类世的分界点。从 1945 年最初的核爆开始,人类进

人以原子弹爆炸为标志的核能时代,人类活动对地球系统的影响日趋显著。Lewis *et al.*^[4]认为从1950年开始是一次“伟大的加速”,主要标志有人类数量的急剧膨胀、自然过程的巨大变化以及新型材料的快速发展等,这也标志着人类进入快速改变地球环境的现代社会,即新人类世。

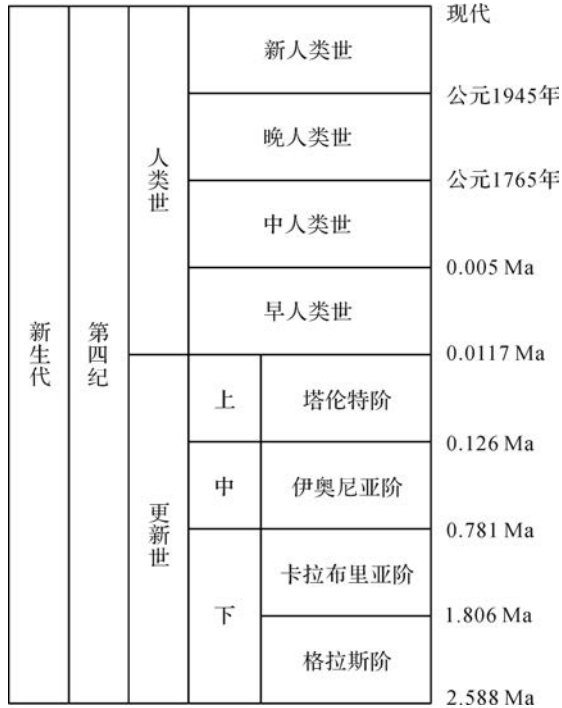


图1 人类世的划分方案

图中年龄单位为百万年,顶部两个分界线使用的是公元纪年

Fig.1 Scheme for the definition of Anthropocene

Boundaries marked in millions of years, except for the top two boundaries marked in CE (Common Era)

2 人类世生态地质学研究载体——粪土沉积

刘东生在“开展人类世环境研究,做新时代地学的开拓者”这篇文章中提出要积极考虑诺贝尔奖获得者 Crutzen 提出的“人类世(Anthropocene)”^[1]这一新的研究方向,并指出“人类世是研究大约10 000年以来人类活动和自然环境构成的地球系统的变化及适应的可持续发展性。作为第四纪地质的一部分,人类世的环境问题关系到人类社会的全面问题和应当涉及人类未来的现实问题,它要求第四纪环境工作者思考自己的科学问题时具有强烈的社会意识,所以它又是一门属于人的科学”^[19]。

探讨人类世的生态历史和环境演化过程需要找

到一种有时间序列的、分辨率高、分布范围广且与生物活动紧密相关的沉积层。大量研究表明^[9-11,24-26],含有企鹅、海豹、巨海燕等海鸟、海兽的排泄物的沉积层是进行生态地质学研究的良好载体。海鸟、海兽的聚集地及其附近的积水区一般存在许多含有生物排泄物的堆积层以及含粪的沉积层(其中可能包含动植物的遗体、遗迹和遗物如毛发、骨骼、牙齿、废弃巢穴和植物残体等),将其定义为粪土沉积层,可用于重建人类世以来生态和环境演化过程。因此以粪土层沉积为载体的生态地质学研究成为人类世全球变化和沉积学领域的一个新的研究方向。

3 人类世生态地质学研究方法与应用

作为人类世研究的一个部分,南极无冰区生态地质学的这套理论和方法也可以应用于人类世生态地质学研究。人类世沉积环境研究正在从学术水平上被提升到社会需求水平,从单一的地质问题研究向综合的地球系统科学研究转变。南极无冰区生态地质学的理论和方法,不应该仅仅局限在南极大陆边缘的狭小空间,而应该将成套研究方法放在全球的沉积学大平台上进行探索性地应用,它为生态对全球气候变化的响应这一人类世沉积学研究提供了一种全新的方法。

生态地质学是以粪土沉积层作为记录过去生态环境信息的载体,通过生物圈与其他圈层的相互作用过程,研究物质在水、岩、土、气界面上的循环。因此生态地质学是一门多学科交叉的科学,这就也要求我们不能仅仅关注单个圈层的变化,而要将各个圈层联系起来,作为一个整体深入的探索自然系统中的奥秘,其实,在自然背景下利用系统的观点,很多看似矛盾的现象都可以找到合理的答案。在研究方法上,生态地质学利用沉积学与地球化学、生物学、古气候学以及其他先进的技术手段等多学科交叉来探索宏观的气候、生态与环境变化的问题。因此,人类世生态地质学是全球变化和地球系统科学领域的一个全新的研究方向。

研究表明,在南极和北极无冰区以及低纬度地区的我国南海西沙群岛应用粪土层作为生态地质学的研究载体是完全适用的^[6,9,11,27-33]。在我国的偏远地区,如青藏高原、西北地区等,寻找那些基本没有受到人类活动干扰的湖泊和湿地,应用粪土沉积层这个重要的生态环境载体研究候鸟对气候变化的响应等科学问题上可能会有很大的帮助。

3.1 人类世沉积学与元素地球化学、同位素地球化学的交叉

在南极阿德雷岛 Y2 淡水湖泊沉积中,我们注意到企鹅粪土层 Sr、F、S、P、Se、Ba、Ca、Cu 和 Zn 这 9 种元素相对富集并显著相关,其中 P 的含量普遍偏高,最高可达 15%,这 9 种元素是企鹅粪土的生物标型元素。根据这些标型元素的丰度首次揭示了过去 3 000 年企鹅数量的变化及其与气候变化的关系^[11]。从企鹅数量变化曲线可以看出(图 2),历史时期企鹅种群数量出现过明显的波动,在 2 300~1 800 B.P.期间,企鹅数量锐减,在 1 800~1 000 B.P.期间,企鹅数量增加,其中大约在 1 800~1 400 B.P.期间企鹅数量尤为繁盛。但是除了企鹅粪的输入外,风化土壤等其他物质来源也可能对这 9 种生物标型元素的含量产生

影响,从而影响曲线的生物学意义。因此,有必要寻找更加准确的生物学指标,而某些同位素在风化土壤中含量非常低并且波动极小,可以将同位素地球化学与沉积学结合起来应用于企鹅、海豹的古生态研究中。我们的研究表明,粪土沉积层中酸溶相 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值以及 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 等指标可以准确地指示历史时期企鹅、海豹的数量变化^[29-31]。除此之外,粪土沉积层中的有机分子标志物粪甾醇和胆甾醇指标与上述无机指标也是一致的^[12-13],这进一步说明了运用粪土沉积层来研究海鸟、海兽的古生态演化过程是可靠的。

同样的研究方法也被应用到了南海西沙群岛地区。对南海甘泉岛 GQ 海鸟粪土层沉积剖面元素地球化学研究发现,Cu、Zn、Cd、P、Ba、As、Se 七种元素

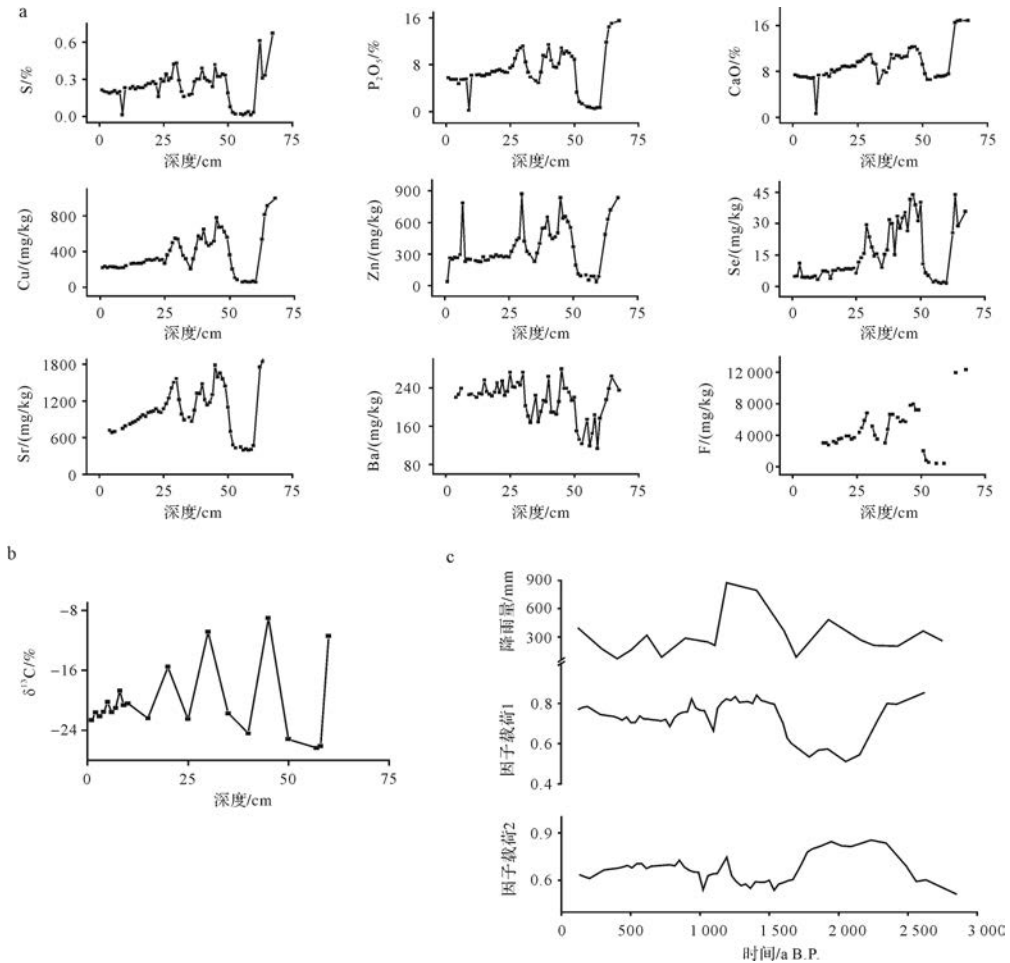


图 2 南极阿德雷岛过去 3 000 年企鹅数量变化历史(据 Sun *et al.*^[11] 修改)

a. 沉积剖面中元素 S、P₂O₅、CaO、Cu、Zn、Se、Sr、Ba 和 F 的含量随深度的变化;b. 沉积剖面中碳同位素的变化;c. 因子分析结果与降雨量的对比,因子 1 的载荷代表了过去 3 000 年企鹅数量变化的历史

Fig.2 Historical changes of penguin populations for the past 3 000 years in Ardley Island, Antarctica (modified from Sun *et al.*^[11])
 a. vertical profiles of S, P₂O₅, CaO, Cu, Zn, Se, Sr, Ba and F content in Y2 lake sediment; b. vertical profiles of stable isotope $\delta^{13}\text{C}$ values of organic carbon; c. comparison between factor analysis and precipitation record; variation in factor 1 represents the penguin populations of the past 3 000 years

含量在深度剖面上表现出很好的协同变化趋势,是该地区海鸟粪土层的生物标型元素,它们的含量变化主要反映了不同时期海鸟粪输入量的变化,通过这些地球化学指标恢复了历史时期该岛的海鸟数量变化记录^[32]。

通过对南极和南海地区含生物粪的集水区沉积剖面进行元素、同位素地球化学分析并对沉积层进行精确定年,识别粪土层标型元素组合特征;综合对比,结合多个同位素和有机分子标志物指标,重建该地区历史时期海鸟数量变化的高分辨率记录,通过对比该区域的气候变化记录可以更好的研究人类和自然因素对南极和南海生态的影响,对于评估未来人类对生态环境的影响具有重要意义^[15]。

3.2 人类世沉积学与有机地球化学的交叉

利用无机标型元素可以表征物种的生态历史,然而却不能区分不同物种之间的变化过程,动植物的遗体以及排泄物中都含有大量的生物有机标志物,这些有机标志物对于探讨当地动物和植被的生态变化历史具有重要意义,粪土层中有机生物标志物指标也可以为无机标型元素提供有力的支撑。粪土沉积层中的有机生物标志物指标比较灵敏,但是降解过程对该指标可能有一定程度的影响,而无机元素则相对稳定,但是风化土壤等本底输入会影响其准确性,尽管两者各有优劣,但是利用有机生物标志物可以同时指示主要物种和植被的生态演化历史,跳出了无机标型元素只能表征主要物种的局限^[12-13]。因此,将沉积学与有机地球化学交叉是一项非常有趣的工作。

在南极企鹅粪土沉积中检测到比正构烷烃浓度还高的烯烃,表明当地有机物的保存极其完好。高浓度的粪甾醇和胆汁酸,说明当地有机物输入的主要来

源于企鹅粪。低等藻类的变化趋势与企鹅数量变化一致,这类植物依赖企鹅而生,以企鹅粪为主要养分。苔藓植被显示了与企鹅数量变化相反的趋势,表明企鹅数量增加,活动区域的扩大,影响了苔藓的生长^[14](图3)。

除此之外,通过分析南极纳尔逊冰盖前缘冰水沉积物和阿德雷岛无冰区企鹅粪土层中有机氯农药 DDT、HCH 的浓度发现,两者的 DDT 沉积通量变化记录截然不同,随着全球范围的 DDT 相继禁用,大气沉降的 DDT 约从 1970 年开始大幅降低,而冰缘的 NR 沉积芯的 DDT 沉积通量却不降反升,研究表明,从 1970 年以后, NR 沉积芯中 DDT 的沉积通量不断升高是全球变暖导致冰盖亏损的结果^[33]。

应用粪土沉积层有机生物标志物来研究动植物的生态历史及其相互之间响应关系、有机污染物的历史记录等有着重要的生态学意义和环境意义。

3.3 人类世沉积学与生物学的交叉

南极磷虾是南大洋海豹、海鸟和鱼类的重要食物来源,是南大洋生态系统的重要物种。因此南极磷虾的变化直接影响着南大洋生态系统的命运,恢复南极磷虾的生态历史与气候变化之间的关系是我们了解未来南大洋生态系统发展趋势的重要依据^[34]。我们已经成功运用标型元素、同位素地球化学等手段恢复了历史时期海鸟、海兽的变化记录,而重建磷虾的生态历史需要更深入和独特的研究方法。

阿德雷企鹅和南极毛皮海豹优先选择磷虾作为食物,当磷虾数量不足时,鱼类在其食谱中的比例开始增加^[35],因此,阿德雷企鹅和毛皮海豹的食谱组成和营养级变化可以间接地反映磷虾的生态历史。研究表明,生物体中 $\delta^{15}\text{N}$ 的变化可以作为研究海鸟的

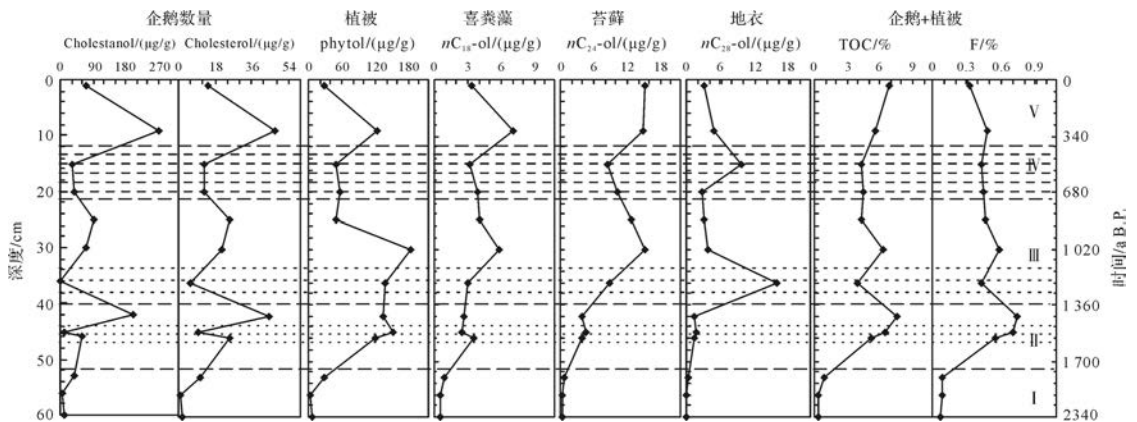


图3 南极阿德雷岛粪土沉积 Y2 中的生物标志物与生物标型元素的变化(据 Wang *et al.*^[14] 修改)

Fig.3 Profiles of biomarkers and bioelements in Y2 sediment from Ardley Island, Antarctica. (modified from Wang *et al.*^[14])

食谱组成、营养级水平及其取食行为信息的重要指标^[36-38]。因此,企鹅、海豹粪土沉积层中企鹅残骨、羽毛和海豹毛的 $\delta^{15}\text{N}$ 信息可用于研究过去企鹅、海豹食谱营养级变化及其所指示的南极磷虾数量动态。

Huang *et al.*^[8]对南极菲尔德斯半岛毛皮海豹毛序列进行了稳定 N 同位素分析,发现该地区毛皮海豹过去近百年来的 $\delta^{15}\text{N}$ 显示出持续上升的趋势,指示其食谱中磷虾比例在不断下降,近 30 年来的实际监测数据也显示该海域的磷虾数量呈整体下降趋势^[39]。在更长的时间尺度上,东南极西福尔丘陵阿德雷企鹅食谱在过去 8 000 年来发生了显著的波动变化,在 6 300~6 000 B.P.期间的海冰密集度强的寒冷时期企鹅毛骨中 N 同位素偏亏损,指示较高的磷虾种群丰度,企鹅捕食较多磷虾;而在 7 000~6 500 B.P.期间的气候温暖时期企鹅 N 同位素偏富集,指示较低的磷虾种群丰度,企鹅捕食更多的鱼类^[7],与上述毛皮海豹营养级与南极气候海冰之间的关系相似(图 4)。

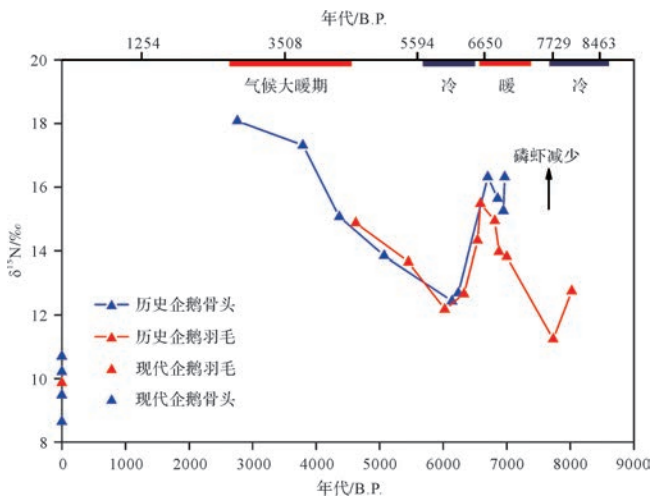


图 4 全新世以来阿德雷企鹅骨骼和羽毛中氮同位素的变化历史(据 Huang *et al.*^[7]修改)

Fig.4 $\delta^{15}\text{N}$ value fluctuations in Adelie penguin bones and feathers during the Holocene epoch (modified from Huang *et al.*^[7])

3.4 人类世沉积学与生态毒理学的交叉

工业革命以来,人类活动对全球环境造成了严重的影响,从有机农药的使用到各种重金属污染物的排放,这些污染物逐渐进入到水圈、生物圈等各个圈层,并逐渐在生物体中富集,近代环境污染对生物体的组织结构产生了重要的影响,通过对粪土沉积以及生物组织中重金属及有机农药等污染物的研究,有助于更

好地评估人类活动对全球生态系统的影响。

研究表明,海鸟、海兽的排泄物对污染物有生物放大的作用^[40-42],但排泄物中的放大作用与生物体内包含不同部位污染物的积累效应是复杂的。比如,过去 1 500 年来南极海豹毛、粪土沉积中记录的 Se、Hg 含量显著正相关,这表明,Se、Hg 之间存在明显的拮抗作用,海豹体内存在着对 Hg 污染的自动保护机制^[43]。与此同时近百年随着 Pb、Hg 等重金属污染物激增,海豹毛中 Hg 含量的剧烈上升,Se 含量却突然降低了,它是否标志着对 Hg 侵入的自动保护机制削弱了呢?

20 世纪 40 年代出现的有机合成农药,如杀虫剂、除草剂等,多数为难降解,高毒、高残留物质,它们在极地留下了明显的痕迹,并在生物体内造成了负担^[44]。研究表明,它们并没有随着高毒农药的禁用、限用而在生物体及排泄物中消失^[33]。

3.5 人类世沉积学与古气候学的交叉

热带辅合带(ITCZ)的南北摆动对赤道太平洋地区降雨起着至关重要的作用,然而东西太平洋两侧的降水却成镜像对称变化,因此 ITCZ 的南北摆动并不是影响太平洋地区降水的唯一因素,而沃克环流等热带气候系统可能也是影响热带降雨的重要因素,一般在厄尔尼诺期间,沃克环流减弱,其上升支离开西太暖池向东移动,这就导致西太平洋相对正常年份降雨更少,而在拉尼娜期间则正好相反。我们利用西沙群岛东岛的三根粪土沉积柱 DY2、DY4 和 DY6 的粒度、介形类和植物种子同位素等指标重建了该地区过去千年的降雨变化,结合目前热带太平洋地区已有的一些降雨记录,深入探讨了热带太平洋地区的降雨机制,并对热带辅合带和沃克环流等气候系统的变化进行了详细的分析讨论^[45]。结果显示(图 5),在相对温暖的时期(AD 1000~1400 和 AD 1850~2000),南海东岛地区降水较少,而在相对寒冷的时期(小冰期期间),南海东岛地区则降水较多,相对比较湿润。考虑到采样点的位置,ITCZ 的南北摆动理论很难解释该地区重建的降雨记录,结合目前热带太平洋地区已有的降雨记录综合分析,我们认为尽管热带辐合带的南北摆动可能对太平洋地区水文循环的变化具有重要影响,但是沃克环流的变化也可能在太平洋地区长期的水文循环中起到了重要作用,尤其是东西太平洋两侧的上升支和下降支区域。

3.6 人类世沉积学与社会科学的交叉

人类文明对全球环境的影响在几千年前就已经

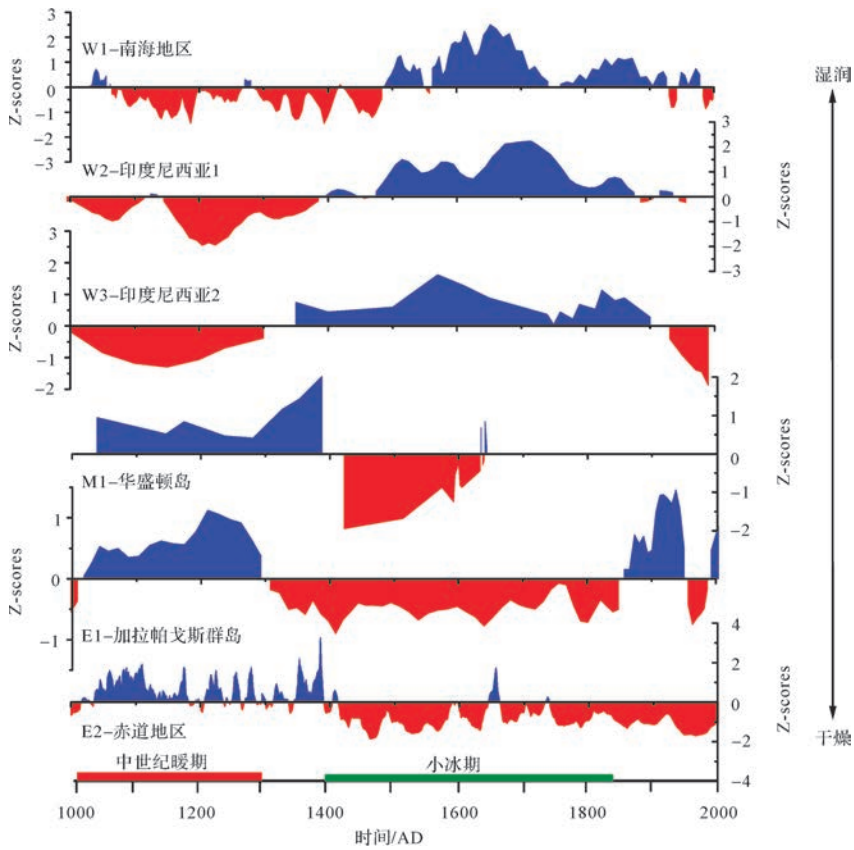


图5 热带太平洋地区过去千年降雨记录(据 Yan *et al.*^[45] 修改)

W1.南海东岛牛塘湖泊沉积物的平均粒径;W2.印度尼西亚的海水氧同位素记录;W3.印度尼西亚海洋沉积物中 C_{30} n-acids 的氧同位素记录;M1.华盛顿岛湖泊盐度记录;E1.埃尔达湖泊沉积物中的砂含量;E2. Laguna Pallcacocha 沉积物的红色色度。

Fig.5 Hydrological records for the past millennium from tropical Pacific(modified from Yan *et al.*^[45])

W1. mean grain size of Cattle Pond sediments from South China Sea; W2. $\delta^{18}O$ of seawater from Indonesia; W3. δD_{wax} records of the C_{30} n-acids from Indonesia marine sediment; M1. lake salinity records of Washington Island; E1. sand percentages from El Junco lake sediment; E2. red colour intensity of Laguna Pallcacocha sediment.

开始^[16,46],并且影响程度日益加剧。人类对南极的影响也不仅仅是从人类登上南极大陆开始,其实,早在中国的龙山文化和古埃及文明时期,青铜器的加工冶炼活动释放的 Pb、Hg 等污染物就通过食物链在南极的粪土沉积物中被保存了下来^[10,16],因此粪土沉积是记录人类文明的理想载体。

Sun *et al.*^[16]通过南极乔治王岛粪土沉积柱中的海豹毛恢复了过去 2 000 年海豹毛中汞含量记录,发现汞含量变化与人类文明具有很好的对应关系(图6)。在公元 18~300 年,罗马帝国为满足金银冶炼的需要发展了火法冶炼辰砂制汞技术^[47],此时,中国汉朝也开始大量冶炼黄金^[48],导致汞含量在这一时期出现一个峰值。此后,汞含量开始降低,可能与罗马帝国的衰败以及中国黄金产量的降低有关。公元 700 年左右,玛雅文明不断繁荣,冶金活动频繁^[49],

并且中国和日本在这一时期盛行佛教,在寺庙建筑的镀金过程中释放了大量汞蒸气,在加上阿拉伯人在这一时期开采阿尔马登汞矿^[47],这些活动使得汞排放量急剧升高,导致海豹毛中汞含量的峰值。在公元 1050~1200 年左右,海豹毛中汞含量再次跌入低谷,可能与欧洲现有银矿开采殆尽有关。而在公元 1100~1500 年左右,南美洲印加文明开采金矿的过程中加热的操作使得矿石中大量汞蒸气被释放出来^[50],基督王国时期(公元 1200 年),金银生产的再度兴盛伴随着又一个高的汞排放时期。不过,欧洲中世纪末期由于黑死病的蔓延,降低了汞消费。自从工业革命以来,燃煤、氯碱工业、炼油工业成为汞的主要人类排放源^[51-54]。

致谢 本文系统总结了过去 20 年来中国科学技术大学极地、南海研究团队的研究成果。将生态地质

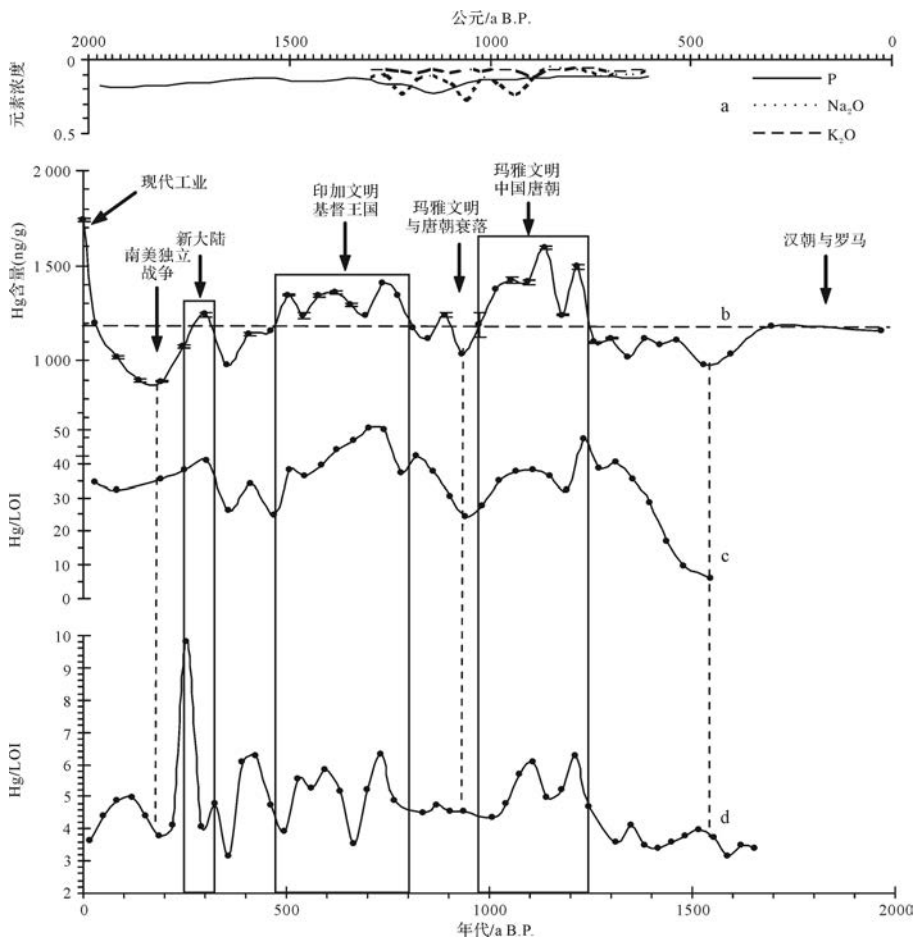


图6 2 000年来(a)南极海豹毛中的 K₂O、Na₂O、P 含量;(b)海豹毛;(c)HF4 沉积物;(d)Y2 沉积物中的 Hg 含量的变化 (根据 Sun *et al.*^[16]重绘)

Fig.6 Concentrations of elements or compounds over the past 2 000 years(modified from Sun *et al.*^[16])

a. K₂O, Na₂O and P in the Antarctic seal hairs. b. Changes of mercury concentration in seal hairs; c. Sediments of HF4; d. Sediments of Y2

学与人类世研究结合起来,是一次理论的提升,感谢王成善院士在这方面给予的指导。

参考文献 (References)

[1] Crutzen P J. Geology of mankind[J]. Nature, 2002, 415(6867): 23.
 [2] Dalby S. Biopolitics and climate security in the Anthropocene[J]. Geoforum, 2013, 49: 184-192.
 [3] Smith B D, Zeder M A. The onset of the Anthropocene[J]. Anthropocene, 2013, 4: 8-13.
 [4] Lewis S L, Maslin M A. Defining the anthropocene[J]. Nature, 2015, 519(7542): 171-180.
 [5] Steffen W, Grinevald J, Crutzen P, et al. The anthropocene: conceptual and historical perspectives[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2011, 369(1938): 842-867.
 [6] 孙立广,谢周清,刘晓东,等. 南极无冰区生态地质学[M]. 北京:科学出版社,2006:1-306. [Sun Liguang, Xie Zhouqing, Liu

Xiaodong, et al. Eco-geology in ice-free area of Antarctica[M]. Beijing: Science Press, 2006: 1-306.]
 [7] Huang T, Sun L G, Long N Y, et al. Penguin tissue as a proxy for relative krill abundance in East Antarctica during the holocene[J]. Scientific Reports, 2013, 3: 2807.
 [8] Huang T, Sun L G, Stark J, et al. Relative changes in krill abundance inferred from Antarctic fur seal[J]. PLoS One, 2011, 6(11): e27331.
 [9] Sun L G, Liu X D, Yin X B, et al. A 1,500-year record of Antarctic seal populations in response to climate change[J]. Polar Biology, 2004, 27(8): 495-501.
 [10] Sun L G, Xie Z Q. Relics: penguin population programs[J]. Science Progress, 2001, 84(1): 31-44.
 [11] Sun L G, Xie Z Q, Zhao J L. A 3,000-year record of penguin populations[J]. Nature, 2000, 407(6806): 858.
 [12] Huang J, Sun L G, Huang W, et al. The ecosystem evolution of penguin colonies in the past 8,500 years on Vestfold hills, East Antarctica[J]. Polar Biology, 2010, 33(10): 1399-1406.

- [13] Huang J, Sun L G, Wang X M, et al. Ecosystem evolution of seal colony and the influencing factors in the 20th century on Fildes Peninsula, West Antarctica [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, 23(9): 1431-1436.
- [14] Wang J J, Wang Y H, Wang X M, et al. Penguins and vegetations on Ardley Island, Antarctica; evolution in the past 2,400 years [J]. *Polar Biology*, 2007, 30(11): 1475-1481.
- [15] Sun L G, Emslie S D, Huang T, et al. Vertebrate records in polar sediments; biological responses to past climate change and human activities [J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 126: 147-155.
- [16] Sun L G, Yin X B, Liu X D, et al. A 2000-year record of mercury and ancient civilizations in seal hairs from King George Island, West Antarctica [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 368(1): 236-247.
- [17] Zalasiewicz J, Williams M, Fortey R, et al. Stratigraphy of the anthropocene [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2011, 369(1938): 1036-1055.
- [18] Monastersky R. Anthropocene; the human age [J]. *Nature*, 2015, 519(7542): 144-147.
- [19] 刘东生. 开展“人类世”环境研究, 做新时代地学的开拓者: 纪念黄汲清先生的地学创新精神 [J]. *第四纪研究*, 2004, 24(4): 369-378. [Liu T. Demand of anthropocene study in the new stage of geoscience; in Honor of late geologist Huang Jiqing for his innovative spirit [J]. *Quaternary Sciences*, 2004, 24(4): 369-378.]
- [20] 赵朝洪. 更新世: 全新世界界的划分与中国石器时代分期研究综述 [J]. *江汉考古*, 1996(1): 45-54. [Zhao Chaohong. Review of the boundaries between Pleistocene and Holocene Epoch and Chinese stone age staging [J]. *Jiangnan Archaeology*, 1996(1): 45-54.]
- [21] 吕厚远, 张健平. 关中地区的新石器古文化发展与古环境变化的关系 [J]. *第四纪研究*, 2008, 28(6): 1050-1060. [Lü Houyuan, Zhang Jianping. Neolithic cultural evolution and Holocene climate change in the Guanzhong Basin, Shaanxi, China [J]. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(6): 1050-1060.]
- [22] Blunier T, Chappellaz J, Schwander J, et al. Variations in atmospheric methane concentration during the Holocene Epoch [J]. *Nature*, 1995, 374(6517): 46-49.
- [23] Zalasiewicz J, Williams M, Haywood A, et al. The anthropocene; a new epoch of geological time? [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2011, 369(1938): 835-841.
- [24] Liu X D, Zhao S P, Sun L G, et al. Geochemical evidence for the variation of historical seabird population on Dongdao Island of the South China sea [J]. *Journal of Paleolimnology*, 2006, 36(3): 259-279.
- [25] Sun L G, Zhu R B, Yin X B, et al. A geochemical method for the reconstruction of the occupation history of a penguin colony in the maritime Antarctic [J]. *Polar Biology*, 2004, 27(11): 670-678.
- [26] 孙立广, 谢周清, 赵俊琳. 南极阿德雷岛湖泊沉积: 企鹅粪土层识别 [J]. *极地研究*, 2000, 12(2): 105-112. [Sun Liguang, Xie Zhouqing, Zhao Junlin. The lake sediment of Ardley Island, Antarctica; identification of penguin-dropping amended soil [J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2000, 12(2): 105-112.]
- [27] Yuan L X, Sun L G, Long N Y, et al. Seabirds colonized Ny-Ålesund, Svalbard, Arctic ~9,400 years ago [J]. *Polar Biology*, 2010, 33(5): 683-691.
- [28] Jiang S, Liu X D, Sun J, et al. A multi-proxy sediment record of late Holocene and recent climate change from a lake near Ny-Ålesund, Svalbard [J]. *Boreas*, 2011, 40(3): 468-480.
- [29] Liu X D, Sun L G, Yin X B, et al. Paleoecological implications of the nitrogen isotope signatures in the sediments amended by Antarctic seal excrements [J]. *Progress in Natural Science*, 2004, 14(9): 786-792.
- [30] Liu X D, Li H C, Sun L G, et al. $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ in the ornithogenic sediments from the Antarctic maritime as palaeoecological proxies during the past 2000 yr [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 243(3/4): 424-438.
- [31] Sun L G, Zhu R B, Liu X D, et al. HCl-soluble $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio in sediments impacted by penguin or seal excreta as a proxy for historical population size in the maritime Antarctic [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2005, 303: 43-50.
- [32] Xu L Q, Liu X D, Sun L G, et al. A 2200-year record of seabird population on Ganquan Island, South China sea [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(4): 957-967.
- [33] Sun L G, Yin X B, Pan C P, et al. A 50-years record of dichlorodiphenyl-trichloroethanes and hexachlorocyclohexanes in lake sediments and penguin droppings on King George Island, Maritime Antarctic [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2005, 17(6): 899-905.
- [34] Nicol S, Pauly T, Bindoff N L, et al. Ocean circulation off east Antarctica affects ecosystem structure and sea-ice extent [J]. *Nature*, 2000, 406(6795): 504-507.
- [35] Murphy E J, Watkins J L, Trathan P N, et al. Spatial and temporal operation of the Scotia sea ecosystem: a review of large-scale links in a krill centred food web [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2007, 362(1477): 113-148.
- [36] Chérel Y. Isotopic niches of emperor and Adélie penguins in Adélie Land, Antarctica [J]. *Marine Biology*, 2008, 154(5): 813-821.
- [37] Emslie S D, Patterson W P. Abrupt recent shift in $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values in Adélie penguin eggshell in Antarctica [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(28): 11666-11669.
- [38] Lorrain A, Graham B, Ménard F, et al. Nitrogen and carbon isotope values of individual amino acids; a tool to study foraging ecology of penguins in the southern ocean [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2009, 391: 293-306.
- [39] Atkinson A, Siegel V, Pakhomov E, et al. Long-term decline in krill stock and increase in salps within the southern ocean [J]. *Nature*, 2004, 432(7013): 100-103.
- [40] Blais J M, Kimpe L E, McMahon D, et al. Arctic seabirds trans-

- port marine-derived contaminants [J]. *Science*, 2005, 309 (5733): 445.
- [41] Yin X B, Xia L J, Sun L G, et al. Animal excrement: a potential biomonitor of heavy metal contamination in the marine environment [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 399(1/2/3): 179-185.
- [42] 尹雪斌,孙立广,刘晓东,等. 南极生物粪对汞的生物放大作用 [J]. *生态学报*, 2004, 24(3): 630-634. [Yin Xuebin, Sun Liguang, Liu Xiaodong, et al. Biomagnification of Hg in antarctic scats [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(3): 630-634.]
- [43] Yin X B, Sun L G, Zhu R B, et al. Mercury-selenium association in antarctic seal hairs and animal excrements over the past 1,500 years [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2007, 26(3): 381-386.
- [44] Sladen W J L, Menzie C M, Reichel W L. DDT residues in Adelie penguins and a crabeater seal from Antarctica [J]. *Nature*, 1966, 210(5037): 670-673.
- [45] Yan H, Sun L G, Oppo D W, et al. South China sea hydrological changes and Pacific walker circulation variations over the last millennium [J]. *Nature Communications*, 2011, 2: 293.
- [46] Sun L G, Xie Z Q. Changes in lead concentration in Antarctic penguin droppings during the past 3,000 years [J]. *Environmental Geology*, 2001, 40(10): 1205-1208.
- [47] Martínez-Cortizas A, Pontevedra-Pombal X, García-Rodeja E, et al. Mercury in a Spanish peat bog: archive of climate change and atmospheric metal deposition [J]. *Science*, 1999, 284 (5416): 939-942.
- [48] Dubs H H. An ancient Chinese stock of gold [J]. *The Journal of Economic History*, 1942, 2(1): 36-39.
- [49] Henderson J S. *The world of the ancient Maya* [M]. New York: Cornell University Press, 1997.
- [50] Cuadra W A, Dunkerley P M. A history of gold in Chile [J]. *Economic Geology*, 1991, 86(6): 1155-1173.
- [51] Biester H, Kilian R, Franzen C, et al. Elevated mercury accumulation in a peat bog of the Magellanic Moorlands, Chile (53°S): an anthropogenic signal from the Southern Hemisphere [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 201(3/4): 609-620.
- [52] Lockhart W L, Macdonald R W, Outridge P M, et al. Tests of the fidelity of lake sediment core records of mercury deposition to known histories of mercury contamination [J]. *Science of the Total Environment*, 2000, 260(1/2/3): 171-180.
- [53] Pirrone N, Allegri I, Keeler G J, et al. Historical atmospheric mercury emissions and depositions in North America compared to mercury accumulations in sedimentary records [J]. *Atmospheric Environment*, 1998, 32(5): 929-940.
- [54] Slemr F, Langer E. Increase in global atmospheric concentrations of mercury inferred from measurements over the Atlantic ocean [J]. *Nature*, 1992, 355(6359): 434-437.

New Research Methods and Their Applications in Anthropocene Ecogeology

SUN LiGuang^{1,2}, YANG ZhongKang^{1,2}

1. Anhui Province Key Laboratory of Polar Environment and Global Change, School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

2. Institute of Polar Environment, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

Abstract: The new concept of “Anthropocene” attracts wide concern among geologists and sociologists; however, there are still a lot of controversies with regard to the time span of the Anthropocene. Based upon previous research results, we proposed a new partitioning method for Anthropocene. Anthropocene is a geological epoch dominated by anthropogenic activities. In order to study the ecological history and environmental evolution during the Anthropocene, we need high-resolution and widely-distributed sediments which have good temporal series and close relationship with biological activities. Using ornithogenic sediments as a new carrier of ecoenvironmental records and a multidisciplinary approach, we have successfully studied the main issues of ecology, climate and environment in the Antarctica. The ecogeology of ice-free areas of Antarctica is the multidisciplinary cross science between sedimentology, geochemistry, archaeology, and ecology, it is an important part of Anthropocene ecogeology, its theories and methods have been successfully applied in the Arctic and South China Sea, and it should be extended as the great platform of global sedimentology to open up a new area. In this paper, we discuss in detail the research methods and applications of Anthropocene ecogeology. These methods are important for understanding the changes of climate, environment and ecology and their relationship with human activities during the Anthropocene.

Key words: Anthropocene; ecogeology; sedimentology; ice-free areas of Antarctica