

DOI: 10.20103/j.stxb.202503080509

李秀美, 王芸, 刘苏涛, 秦轲鑫, 马硕, 张明源. 粪便甾醇在环境污染溯源与古生态应用中的研究进展与展望. 生态学报, 2025, 45(21): - .  
Li X M, Wang Y, Liu S T, Qin K X, Ma S, Zhang M Y. Advances and perspectives in the application of fecal sterols for environmental pollution source tracing and paleoecology. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(21): - .

# 粪便甾醇在环境污染溯源与古生态应用中的研究进展与展望

李秀美<sup>1,\*</sup>, 王 芸<sup>1</sup>, 刘苏涛<sup>2</sup>, 秦轲鑫<sup>1</sup>, 马 硕<sup>1</sup>, 张明源<sup>1</sup>

1 信阳师范大学地理科学学院, 河南省水土环境污染协同防治重点实验室, 信阳 464000

2 兰州大学资源环境学院, 西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000

**摘要:** 粪便甾醇是由人类和高等动物肠道微生物还原胆固醇等  $\Delta^5$ -甾醇产生的一系列甾族化合物, 是环境污染溯源与古生态重建的重要指标, 在揭示区域生态演变、评估现代环境风险以及探究气候变化与人类活动耦合机制方面具有独特优势与重要价值。系统综述了国内外研究中关于粪便甾醇现代过程调查及其在污染溯源与古生态应用中的研究进展, 发现: (1) 不同物种 (如人类、反刍动物、海洋哺乳动物) 的粪便甾醇具有独特的“甾醇指纹”, 基于特征比值 (如粪甾烷醇/24-乙基粪甾烷醇、异构粪甾烷醇/粪甾烷醇等) 可有效区分污染来源, 并量化人类与其他动物输入的贡献; (2) 在古生态领域, 粪便甾醇已成功应用于历史时期人口规模、畜牧业发展及南极企鹅和藏羚羊种群动态的重建研究, 为深入理解人类与环境相互作用提供了关键证据; (3) 当前研究仍面临种间甾醇特征重叠、区域基础数据库缺失及沉积后生作用干扰等挑战。未来研究需进一步加强粪便甾醇现代过程调查, 深入理解其传输、沉积和保存过程及其机制, 并结合机器学习算法、多指标分析 (如孢粉、古 DNA) 及高灵敏度检测技术, 优化分类模型并构建全球尺度的甾醇指纹数据库, 从而提升污染溯源的精度与古生态重建的可靠性。

**关键词:** 粪便甾醇; 粪甾烷醇; 古生物重建; 现代污水研究

## Advances and perspectives in the application of fecal sterols for environmental pollution source tracing and paleoecology

LI Xiumei<sup>1,\*</sup>, WANG Yun<sup>1</sup>, LIU Suta<sup>2</sup>, QIN Kexin<sup>1</sup>, MA Shuo<sup>1</sup>, ZHANG Mingyuan<sup>1</sup>

1 Xinyang Normal University, Henan Key Laboratory for Synergistic Prevention of Water and Soil Environmental Pollution, Xinyang 464000, China

2 College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Key Laboratory of Western Environment Ministry of Education, Lanzhou 730000, China

**Abstract:** Fecal sterols, a class of persistent steroidal biomarkers derived from the anaerobic microbial reduction of  $\Delta^5$ -sterols (e.g., cholesterol) in the gastrointestinal tracts of humans and higher animals, are widely distributed in diverse environmental matrices including lacustrine sediments, peat deposits, and marine sediments. Owing to their relative chemical stability and recalcitrance to degradation, these compounds are preserved long-term in geological systems. Consequently, they serve as critical geochemical tracers for environmental pollution source apportionment and multi-millennial scale paleoecological reconstruction. Their intrinsic molecular stability against biodegradation, coupled with distinctive structural signatures across taxa, provides unparalleled advantages in revealing regional ecological evolution, quantifying modern environmental risks, and exploring the coupling mechanisms between abrupt climate change and human activities. Motivated by the urgent need to refine sterol-based environmental diagnostics, this paper conducted a systematic

**基金项目:** 河南省自然科学基金项目 (242300421371); 河南省高等学校青年骨干教师培养计划项目 (2023GGJS096); 河南省本科高校研究性教学改革研究与实践项目 (2022SYJXLX062); 信阳师范学院“南湖学者奖励计划”青年项目联合资助

收稿日期: 2025-03-08; 网络出版日期: 2025-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lixm@xynu.edu.cn

review of research advances in national and international studies on the investigation of modern processes of fecal sterols and their application in pollution traceability and paleoecology. The review reveals that: (1) Divergent foraging behaviors, digestive system anatomies, and enzymatic conversion efficiencies across taxa lead to species-specific sterol profiles in fecal matter, forming unique “sterol fingerprints”. Based on characteristic sterol ratios (e.g., coprostanol/24-ethylcoprostanol, epicoprostanol/coprostanol, etc.), researchers can effectively differentiate contamination sources and quantify the contribution of human and animal inputs; (2) Methodological advances in organic geochemical analysis have established biomarker compounds as integral proxies for paleobiological and paleoenvironmental reconstructions. Fecal sterols extracted from lacustrine, marine, and peat archives enable the temporal reconstruction of anthropogenic activities and wildlife dynamics, including human demographic fluctuations, pastoralism intensification patterns, and Antarctic penguin population variations throughout historical periods. These applications served as critical proxies for decoding centennial-scale human-environment coevolution mechanisms preserved in sedimentary archives; (3) While fecal sterols, as an emerging biomarker in geoenvironmental research, demonstrate unique value in tracing human activities, paleoecological reconstruction, and identifying contamination sources, inherent limitations and challenges remain. Current challenges include overlapping sterol characteristics among species, the lack of regional baseline databases, interference from post-depositional processes, and poorly constrained quantification frameworks for holistic modern process modeling. Future research needs to strengthen investigations of modern fecal sterol processes across diverse regions and decipher compartment-specific drivers governing sterol pathways from enteric synthesis to sedimentary sequestration. This requires controlled mesocosm experiments simulating regional environmental stressors (e.g., salinity gradients, temperature anomalies). Combining machine learning algorithms, multi-indicator analyses (e.g., sporoderma, ancient DNA), and high-sensitivity detection techniques will optimize classification models and establish a global-scale sterol fingerprint database, thereby improving the accuracy of pollution source tracing and the reliability of paleoecological reconstruction.

**Key Words:** fecal sterols; coprostanol; paleontological reconstruction; modern sewage research

甾醇 (Sterols) 是一类由一个环戊烷及 3 个己烷环耦合而成的环戊烷多氢菲有机化合物, 广泛存在于湖泊沉积物、泥炭、海洋沉积物等多种环境介质中<sup>[1]</sup>。作为动植物的次级代谢产物, 其在生物体内主要以游离态或脂类形式存在。其中, 粪便甾醇 (Fecal Sterols) 是由人类及高等动物肠道微生物还原胆固醇等  $\Delta^5$ -甾醇产生的一系列甾族化合物<sup>[2-3]</sup>, 主要包括粪甾烷醇 (Coprostanol)、异构粪甾烷醇 (Epicoprostanol)、24-乙基粪甾烷醇 (24-Ethylcoprostanol) 等<sup>[4]</sup>。粪便甾醇在自然界中化学性质相对稳定, 不易降解, 能在地质环境中长期保存, 是示踪人类和动物粪便输入丰度变化的理想指标<sup>[5-8]</sup>。微生物介导的甾醇异构化过程 (图 1), 揭示了环境条件对甾醇保存状态的重要调控机制<sup>[2]</sup>。近年来, 随着有机地球化学分析技术的进步, 粪便甾醇已经成为地质环境中生态溯源示踪的重要指示物<sup>[9-10]</sup>。大量研究表明, 粪便甾醇不仅可以精准解析陆源污染物向水生生态系统的输入路径, 还能通过沉积记录揭示历史时期生物活动与生态系统的协同演化过程, 为生态评估与修复提供分子尺度的动态证据<sup>[4, 11-14]</sup>。

早在 20 世纪 70 年代, 研究学者便已在沉积物中检测出粪便甾醇, 并将其作为人类粪便污染的代用指标, 用于确定纽约湾的污水污染程度<sup>[15]</sup>。随后, 粪便甾醇分析在环境科学研究中得到了广泛的应用和发展。在国外, 粪便甾醇已成功应用于示踪水体、沉积物、河口以及海洋环境中生活污水的输入<sup>[16-20]</sup>。国内研究则主要聚焦于南极、渤海及部分海湾地区<sup>[21-22]</sup>, 研究发现粪便甾醇的分布特征能较好地反映人类生活污染物对近岸环境影响的范围与程度。气相色谱-质谱联用技术 (GC-MS) 的发展, 为基于粪便甾醇在特定场景下开展古人类活动的重建研究提供了有力支撑<sup>[5, 23-24]</sup>。D'Anjou 等人利用挪威北部遗址周边湖泊沉积物中的粪便甾醇指标, 重建了该地区晚全新世以来的人口数量动态变化, 为探究该区域人类活动历史及其与环境相互作用提供了关键依据<sup>[11]</sup>。近年来, 我国学者在青藏高原南部<sup>[7]</sup>、西部<sup>[8]</sup>以及北部<sup>[25]</sup>等地利用粪便甾醇指标重建

了人类、反刍动物和藏羚羊等物种的种群规模变化,凸显了该指标在古生物活动重建研究中的重要价值。然而,当前该指标的应用仍面临诸多挑战,如种间甾醇重叠、生物来源定量困难、区域性与全球性动物甾醇数据库尚不完善等。目前,国内对粪便甾醇现代过程及其应用进展缺乏系统性综述。鉴于此,本文系统梳理了近年来国内外相关研究,重点解析粪便甾醇现代过程及其在环境污染溯源与古生态重建领域的应用现状,进而归纳当前研究中的关键瓶颈问题并提出未来研究方向,以深化该生物标志物在古生态和古环境研究中的理论价值与实践潜力。

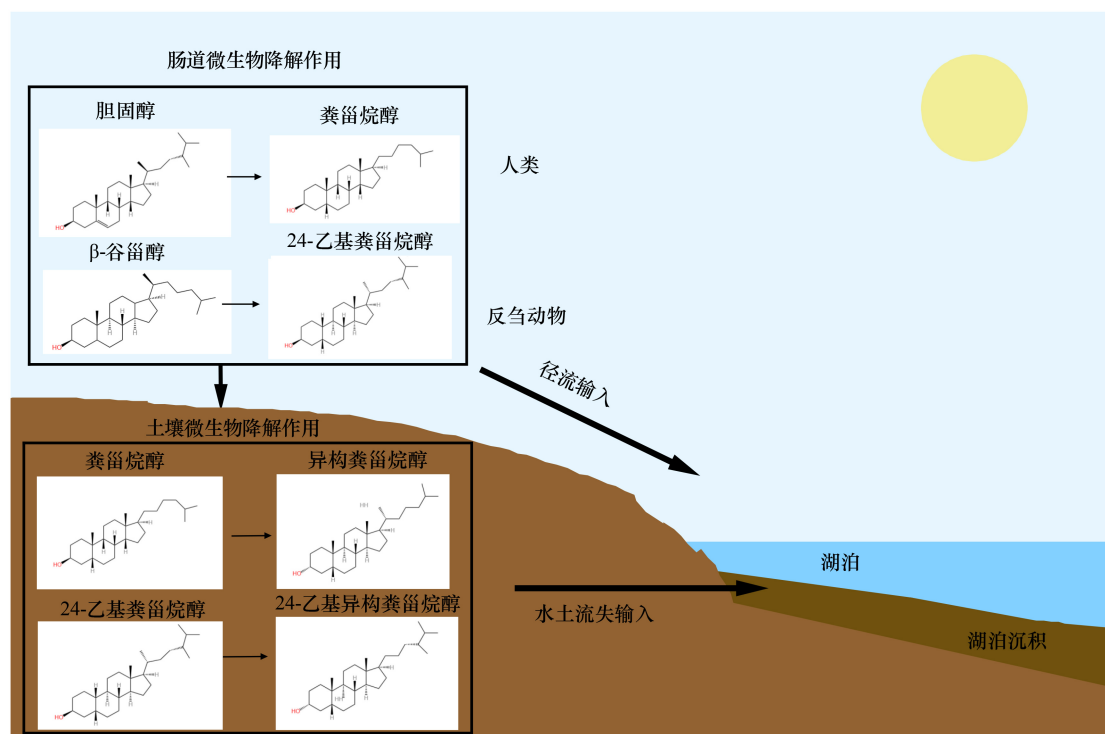


图1 粪便甾醇化合物形成、降解以及湖泊沉积示意图(修改自 Keenan 等<sup>[9]</sup>)

Fig.1 Schematic diagram depicting the formation, deposition, and degradation of fecal stanols (modified from Keenan et al., 2021)

## 1 甾醇的结构与分类

甾醇,属于甾族化合物的一种,由1个环戊烷及3个己烷环稠合而成,以共同的甾核即环戊烷多氢菲为基本特征<sup>[1]</sup>。甾醇的化学性质与生物活性主要由分子上取代基类型与位置、侧链长度与构型以及双键的数量与空间排列共同调控<sup>[26]</sup>。自然界中的甾醇通常具有特定的生物来源,据此可分为动物甾醇、植物甾醇以及菌类甾醇。动物甾醇以胆固醇(Cholesterol)为主,主要由动物自身合成,食物补充为辅<sup>[27]</sup>。植物甾醇包括 $\beta$ -谷甾醇( $\beta$ -sitosterol)、豆甾醇(Stigmasterol)以及菜油甾醇(Campesterol)等, $\beta$ -谷甾醇和豆甾醇是高等植物的主要成分<sup>[28-29]</sup>,也可源于湖底的藻类或海洋浮游生物(如硅藻、蓝藻和金藻等)<sup>[30-31]</sup>。菌类甾醇源自真菌或其他微生物,常见者为存在于真菌类的细胞膜内为麦角甾醇(Ergosterol)<sup>[32]</sup>,其生理功能与动物细胞中胆固醇类似。粪便甾醇为人类和高等动物肠道内微生物还原 $\Delta^5$ -甾醇产生的一系列甾族化合物<sup>[2-3]</sup>,主要源于动物粪便及排泄物,常见的粪便甾醇包括粪甾烷醇、异构粪甾烷醇、24-乙基粪甾烷醇等<sup>[4]</sup>。

## 2 粪便甾醇的现代过程研究进展

### 2.1 物种特异性甾醇分布规律

如图2所示,粪便甾醇的分布特征因物种食性及代谢差异呈现显著特异性。20世纪60年代,Eneroth

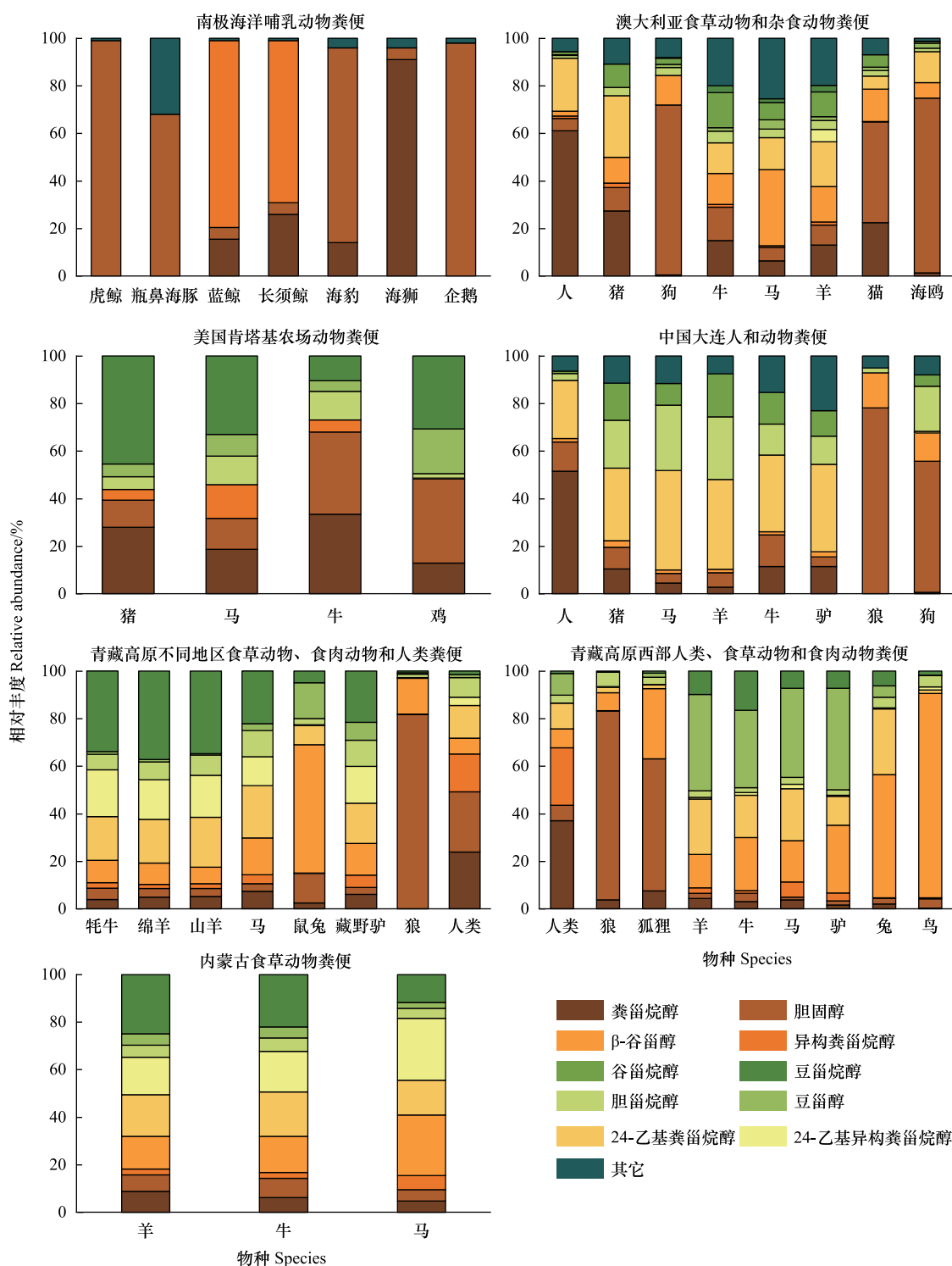


图 2 典型区域粪便甾醇分布的物种特异性

Fig.2 Species-specific distribution of fecal sterols in typical regions

等<sup>[33]</sup>发现人类粪便甾醇组成与饮食类型密切相关:以黄油和玉米油为膳食来源的受试者粪便中虽均以粪甾烷醇为主,但粪甾烷醇与胆固醇比值因油脂来源不同呈现显著差异。随后,基于海洋动物粪便的甾醇图谱<sup>[34]</sup>显示,齿鲸(虎鲸和瓶鼻海豚)、企鹅与海豹粪便以胆固醇为主,而海狮粪便粪甾烷醇占比突出,这种差异为评估海洋哺乳动物对海洋碳循环的贡献提供了地球化学证据。进一步聚焦陆地动物,Leeming 等<sup>[35]</sup>对澳大利亚

多物种的对比研究发现:人类粪便总甾醇含量约为其他物种的 4—5 倍且以粪甾烷醇为主;牛、羊、马等反刍动物粪便以  $\beta$ -谷甾醇和 24-乙基粪甾烷醇为主;狗、猫和海鸥粪便则富含胆固醇。Tyagi 等<sup>[36]</sup>对 4 种常见家养动物(猪、马、牛、鸡)的研究发现,马粪便中异构粪甾烷醇的含量显著高于猪、牛和鸡,马、猪粪便豆甾烷醇浓度较高,而鸡、牛粪便则富含胆固醇。上述证据表明,不同物种粪便甾醇的分布特征存在显著差异,可以作为区分物种来源的可靠生物标志物。

国内相关研究自 21 世纪初逐步深化。徐恒振等<sup>[37]</sup>通过分析中国大连地区样本,验证食草动物主要含 24-乙基粪甾烷醇,食肉动物以胆固醇为主,人类粪便则主要含粪甾烷醇;杂食动物因食性复杂,粪便甾醇组成呈现多样性。随后,韦洋洋<sup>[38]</sup>发现南极企鹅聚居地沉积环境富集胆固醇和胆甾烷醇,而海豹活动区沉积环境以胆固醇和异构粪甾烷醇为主,胆甾烷醇的含量极低。Li 等<sup>[39]</sup>分析了青藏高原不同区域食草动物、食肉动物和人类粪便甾醇分布特征,发现食草动物粪便中豆甾烷醇、24-乙基粪甾烷醇及其异构体浓度较高,食肉动物粪便富含胆固醇,人类粪便的优势甾醇为粪甾烷醇和胆固醇。李秀美等<sup>[40]</sup>进一步细化青藏高原西部夏达错地区物种的粪便甾醇分布特征,发现人类粪便以粪甾烷醇和异构粪甾烷醇为主,狐狸和狼粪便中优势甾醇为胆固醇,鸟类粪便  $\beta$ -谷甾醇占比超 85%,兔、驴、马、羊、牛等植食性动物粪便中含量较高的甾醇为豆甾醇、 $\beta$ -谷甾醇、24-乙基粪甾烷醇和谷甾烷醇。此外,对内蒙古地区食草动物(牛、羊、马)粪便的分析显示,各物种粪便甾醇均以植物甾醇为主,但不同物种粪便甾醇化合物比例存在差异<sup>[41]</sup>。

总体而言,人类粪便中粪甾烷醇的含量最高<sup>[40]</sup>,食草动物粪便中 24-乙基粪甾烷醇显著富集,胆固醇和粪甾烷醇的含量较低<sup>[2,35]</sup>,而食肉动物粪便则普遍以胆固醇含量最高<sup>[37]</sup>。

## 2.2 “甾醇指纹”的定量识别

不同物种因摄食习惯、消化系统和消化功能不同,其粪便中的粪甾醇种类和赋存也不同,可以进而形成不同独特的“甾醇指纹”<sup>[14]</sup>。基于特定甾醇的浓度组合或特征比值,可以识别粪便的生物来源(表 1)<sup>[11,18]</sup>,这使其成为环境监测与生态溯源研究中的关键评价指标。

表 1 判断粪便来源的甾醇比

Table 1 Determining sterol ratios of fecal origin

| 序号<br>No. | 甾醇比值<br>Fecal sterols ration                                      | 识别值<br>Outcome | 来源判断<br>Source judgment |
|-----------|-------------------------------------------------------------------|----------------|-------------------------|
| 1         | 粪甾烷醇/24-乙基粪甾烷醇 <sup>[42]</sup>                                    | >1.5<br><0.25  | 人类<br>食草动物              |
| 2         | 粪甾烷醇/(粪甾烷醇+24-乙基异构粪甾烷醇) <sup>[43]</sup>                           | >0.73<br><0.38 | 人类<br>食草动物              |
| 3         | (24-乙基粪甾烷醇/24-乙基异构粪甾烷醇)+(异构粪甾烷醇/粪甾烷醇) <sup>[3]</sup>              | 2.1—2.7        | 马                       |
| 4         | (粪甾烷醇+异构粪甾烷醇)/(粪甾烷醇+异构粪甾烷醇+24-乙基粪甾烷醇+24-乙基异构粪甾烷醇) <sup>[39]</sup> | >0.5<br><0.38  | 杂食动物<br>食草动物            |
| 5         | (粪甾烷醇+异构粪甾烷醇)/(24-乙基粪甾烷醇+24-乙基异构粪甾烷醇) <sup>[2]</sup>              | >1<br><1       | 杂食动物<br>反刍动物            |
| 6         | 胆甾烷醇/(胆甾烷醇+粪甾烷醇+异构粪甾烷醇) <sup>[44]</sup>                           | ≥0.5           | 鸟类                      |

Evershed 等<sup>[42]</sup>提出粪甾烷醇/24-乙基粪甾烷醇可用于区分人类和反刍动物的粪便输入:比值大于 1.5,表明主要受人类粪便污染;小于 0.25,表明主要受食草动物粪便污染。Leeming 等<sup>[43]</sup>对该指标进行了扩展,使用粪甾烷醇/(粪甾烷醇+24-乙基异构粪甾烷醇)估算人类和食草动物粪便的贡献:比值大于 0.73 代表仅受人类粪便污染,小于 0.38 代表仅受食草动物粪便污染,该方法的可靠性得到了 Prost 的验证<sup>[3]</sup>。为了进一步区分食草动物粪便,Prost 等<sup>[3]</sup>建立了一个新的比值:(24-乙基粪甾烷醇/24-乙基异构粪甾烷醇)+(异构粪甾烷醇/粪甾烷醇)来有效区分马粪便和其他食草动物粪便,这一结论在 Gill 等<sup>[45]</sup>的研究中得到进一步的验证。针对甾醇异构化过程的环境干扰,Li 等<sup>[39]</sup>提出(粪甾烷醇+异构粪甾烷醇)/(粪甾烷醇+异构粪甾烷醇+24-乙基粪甾烷醇+24-乙基异构粪甾烷醇)比值来区分人类粪便与其他动物粪便输入:比值>0.5 表示人类粪便,比值<0.38

代表其他动物粪便。由于狼粪便中该比值范围与食草动物粪便中存在重叠,该比值虽能有效区分人类粪便与其他动物粪便,但无法单独区分食草动物粪便与食肉动物粪便<sup>[39]</sup>。Bull 等<sup>[2]</sup>构建(粪甾烷醇+异构粪甾烷醇)/(24-乙基粪甾烷醇+24-乙基异构粪甾烷醇)比值来识别杂食动物(比值>1)和反刍动物(比值<1)。Devane 等<sup>[44]</sup>提出胆甾烷醇/(胆甾烷醇+粪甾烷醇+异构粪甾烷醇)可用于识别鸟类粪便,当比值大于 0.5 时,表明存在鸟类粪便污染。在东非<sup>[46]</sup>、西伯利亚<sup>[47]</sup>、青藏高原<sup>[48]</sup>等地的野生动物粪便样品研究发现,甾醇化合物不仅可以区分草食性动物、肉食性动物、杂食性动物,还可区分反刍和不反刍草食性动物。

综上所述,目前利用粪便甾醇指标可识别人类、草食性动物和肉食性动物。但由于某些物种间甾醇特征重叠,现有的方法难以对具体物种或动物类别进行精细划分。因此,需开展更系统的现代调查,构建高分辨率的物种特异性甾醇谱数据库,结合机器学习优化阈值动态调整,以提高分类精度,明确动物类群与甾醇指纹的定量关系。

### 3 粪便甾醇在环境污染溯源与古生态重建领域的应用

#### 3.1 环境污染溯源研究

粪便甾醇在自然界中化学性质稳定,在生物地球化学研究中常被作为研究沉积有机物来源、沉积环境和环境污染状况等的特定生物标志物。早在 20 世纪 80 年代,研究者便开始利用粪便甾醇作为污水生物标志物,研究其在河口及近海水体和沉积物中的分布规律,为评估环境质量和污染状况提供重要依据。在巴西, Araujo 等<sup>[49]</sup>选取红树林沉积物中粪甾烷醇作为粪便污染的主要指标,结合粪甾酮、胆固醇等评估不同区域的污水污染程度。结果表明,在人口稀少、城市化程度低的区域粪甾烷醇水平较低,未受污水污染;靠近大都市的区域粪便甾醇浓度较高,受到中等程度的粪便污染。在污灌区,粪便甾醇可用于研究水土污染。向海清<sup>[50]</sup>在太原市小店污灌区的研究发现,长期污水灌溉显著增加了土壤中粪便甾醇的累积,且与地下水污染程度呈正相关,为农业污水回用风险评估提供了新方法。在海洋环境中,粪便甾醇的浓度与分布能够有效评估近海养殖及陆源排污对海洋生态的影响。徐恒振等<sup>[51]</sup>通过分析排污口海水与沉积物中粪便甾醇浓度,发现近岸区域粪便甾醇的富集程度与人类活动强度呈正相关。此外,粪便甾醇结合多源示踪指标可准确解析农村集水区污染特征。在爱尔兰农村流域的研究中,利用粪便甾醇结合荧光增白剂(FWC)、咖啡因、人工甜味剂等多参数指标,对农业牧场与化粪池废水污染进行区分。结果表明,甾醇与 FWC 等指标相结合能有效量化人类活动对地表水的贡献,并识别污染热点,尤其在化粪池密度高、土壤渗透性低的区域效果显著<sup>[52]</sup>。

目前,我国水污染日益加剧,给人类的生存带来严峻的挑战<sup>[53-55]</sup>。近年来甾醇作为一种粪便来源指示物,被广泛用于污水中粪便的检测<sup>[56-57]</sup>。在重庆南山老龙洞地下河的研究中,通过 GC-MS 分析悬浮物中的粪便甾醇,结合比值法,发现 3 月和 5 月该地下河主要受人类粪便影响,而 1 月则与家禽粪便污染相关,验证了甾醇在季节性污染源追踪中的有效性<sup>[58]</sup>。姚晓瑞<sup>[59]</sup>通过对新疆北部典型湖泊中 19 个沉积物样品进行分析,发现粪便甾醇在研究区域的湖泊沉积物中广泛存在,并通过甾醇的含量对湖泊污染程度进行了科学评估。Liu 等<sup>[60]</sup>通过甾醇比值评估新疆博斯腾湖和玛纳斯湖的污染状况,发现两湖均存在不同程度的粪便甾醇污染,污染来源主要包括生活污水的排放和农业活动的开展。综上所述,粪便甾醇作为一种稳定且具有特异性的生物标志物,在追踪和评估水体和沉积物中的粪便污染方面发挥着重要作用。此外,粪便甾醇与其他污染物指标的结合使用,能够进一步提高污染源追踪的准确性和效率,对保护和改善水环境质量具有重要意义。

#### 3.2 古生态重建研究

随着有机地球化学分析技术的发展,生物标志化合物已经成为重建古生物和古环境的重要手段<sup>[61]</sup>。其中,粪便甾醇能迅速沉积于湖泊沉积物等地质载体并在其中长期保存,被广泛应用于追踪人类及动物活动的历史动态,为解析人地关系与生态演化提供分子证据<sup>[5-8]</sup>。如图 3、图 4 所示,多个典型地区的沉积记录综合展现了该指标在重建古生物活动中的全球性应用潜力。在挪威北部,湖泊沉积物中的粪甾烷醇、异构粪甾烷醇、24-乙基粪甾烷醇和 24-乙基异构粪甾烷醇四种粪便甾醇含量的变化表明,约 2250 cal yr BP 人类和家畜首

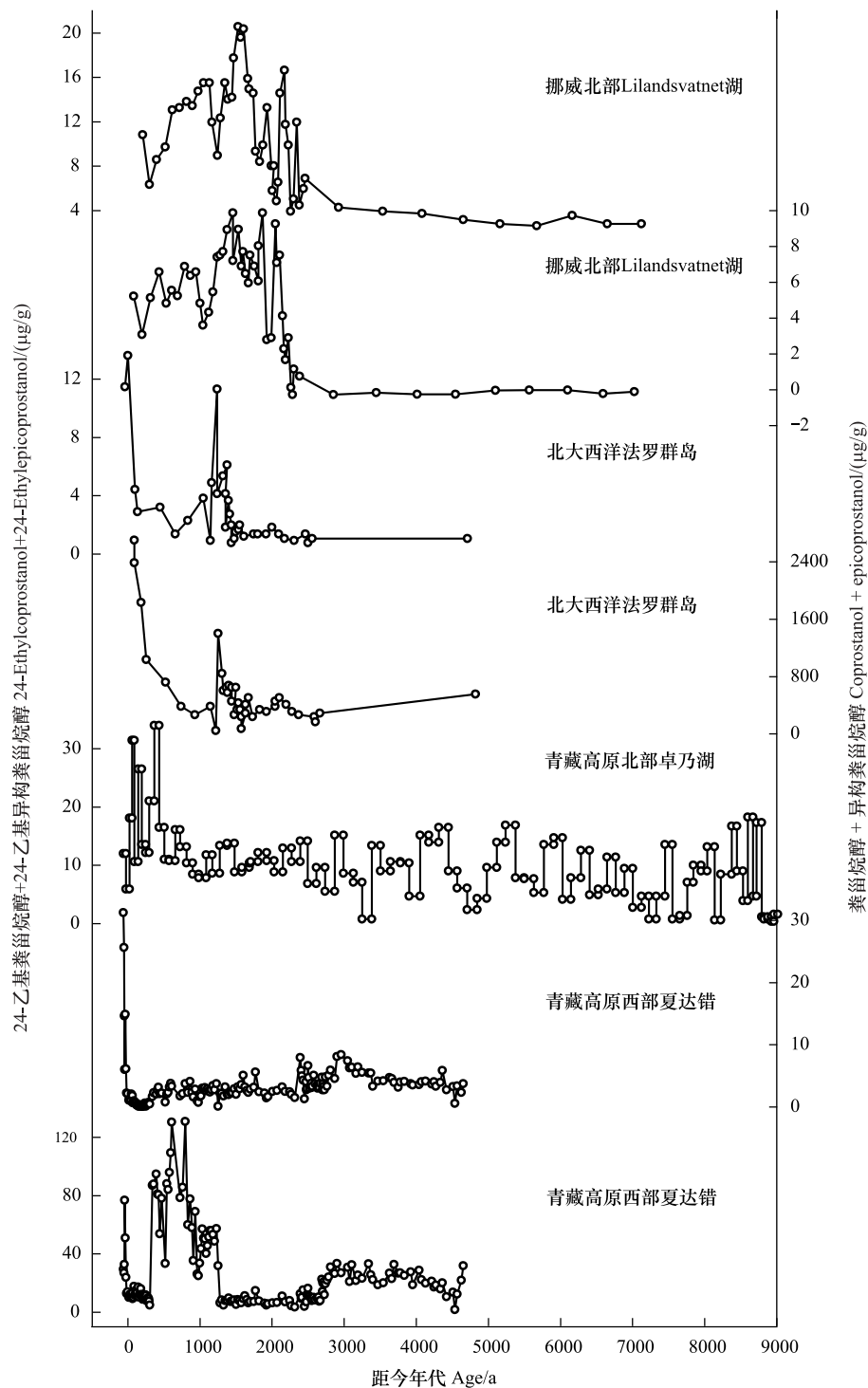


图3 早-中全新世以来不同地区基于粪便甾醇指标重建的古生物记录

Fig.3 Reconstructed paleontological records based on feces sterol indicators from different regions since the Early-Middle Holocene

次迁入该地区,并揭示了农业活动强度的变化,为理解人类与环境之间的相互作用提供了新的视角<sup>[11]</sup>。对北大西洋法罗群岛湖泊沉积物中的粪便甾醇研究显示,公元500年人类和家畜已抵达该地区,这一结果得到该地区沉积DNA的验证,进一步证实了粪便甾醇指示过去人类活动的可靠性<sup>[12]</sup>。在中美洲玛雅低地的伊坦湖沉积岩芯中,粪甾烷醇记录较好地指示了人口规模以及食草动物(如鹿等)活动强度的变化,结合当地古气候数据,阐明了气候变化对土地利用模式及社会兴衰的影响<sup>[9]</sup>。在青藏高原,粪便甾醇展示了其在高寒环境背

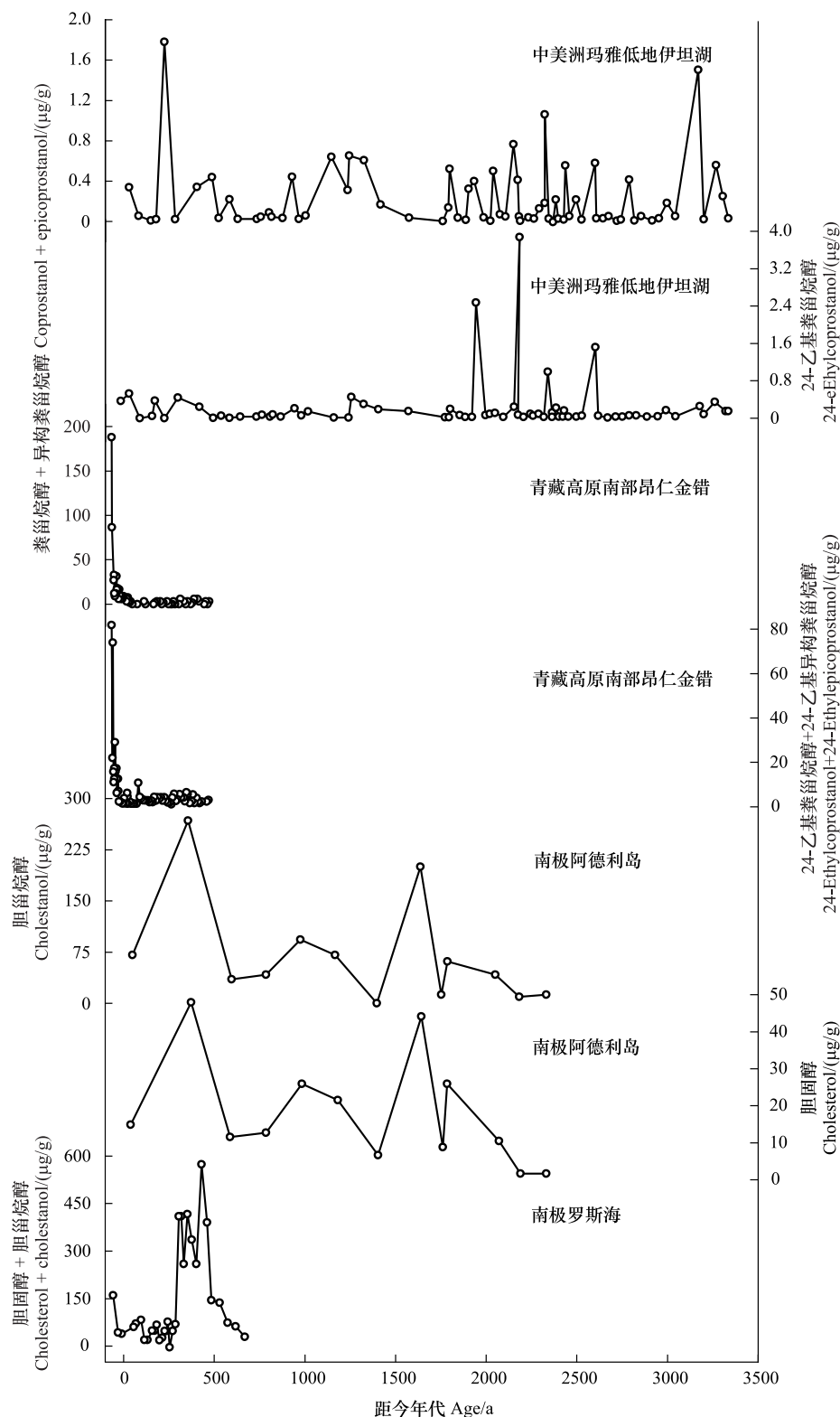


图 4 晚全新世以来不同地区基于粪便甾醇指标重建的古生物记录

Fig.4 Reconstructed paleontological records based on feces sterol indicators from different regions since the Late Holocene

景下重建古生物活动的潜力。Wang 等<sup>[25]</sup>利用青藏高原北部卓乃湖沉积岩芯粪便甾醇,重建了该地区全新世以来藏羚羊的种群规模变化,并揭示了其对环境变化的响应。在青藏高原西部<sup>[8]</sup>,研究者通过分析夏达错湖

泊沉积物样品中的粪便甾醇记录,获得了高原西部晚全新世第一条高分辨率的古人类活动记录和反刍动物数量变化记录。在青藏高原南部,Li 等<sup>[7,39]</sup>基于昂仁金错湖泊沉积物中的粪便甾醇指标重建了该地区小冰期以来人类活动和食草动物数量变化。上述研究表明,粪便甾醇指标不仅能捕捉千年尺度的人类活动信号,还可解析气候-社会耦合机制,为人地关系研究提供了可靠的分子证据。

通过分析粪化石样品中粪便甾醇的种类与含量,还可以获取过去边防基层军事机构的动物利用情况。例如,黄有良等<sup>[41]</sup>通过分析新疆克亚克库都克烽燧遗址粪化石样品中粪便甾醇的种类与含量,发现烽燧周边长期生活一定数量的家畜,包括杂食性犬类和羊、马等食草动物,这些牲畜维持并丰富了官兵的日常生活。此外,粪便甾醇在极地生态研究中展现出独特优势,可以很好的指示历史时期企鹅、海豹等动物的种群变化。例如,在南极阿德利岛<sup>[13]</sup>,研究者利用沉积物中的粪便甾醇重建了过去 2400 年来企鹅种群数量变化。在南极罗斯海地区<sup>[62]</sup>,基于沉积物中胆固醇和胆甾烷醇含量,重建了过去 700 年企鹅种群的变化,揭示了气候变化对企鹅种群的影响。韦洋洋利用异构粪甾烷醇和胆甾烷醇重建了历史时期东南极蒲福岛地区海豹和企鹅种群数量变化,并通过对比水生藻类变化情况,发现生物粪便输入为藻类生长提供了充足的营养物质<sup>[38]</sup>。这些研究为理解生物活动与自然环境之间的相互作用提供了科学基础,有助于更全面地评估生物活动对自然环境的长期影响。

#### 4 问题与展望

粪便甾醇作为地质环境研究中新兴的生物标志物,近年来在人类活动示踪、古生态重建及环境污染溯源等领域展现出独特的应用价值,然而,其存在的问题也是不容忽视的,主要有以下几个方面:

(1) 现代过程研究的全链条量化不足。现有研究对粪便甾醇的“摄入-代谢-排泄-沉积”全链条机制的系统性解析仍存在显著空白。不同地区的生物因摄食习惯不同以及消化功能存在差异等,动物粪便的甾醇种类和含量也可能存在差异。例如,青藏高原地区人类粪便中粪甾烷醇约占总甾醇的 38%<sup>[40]</sup>,而在低纬度地区(如大连)人类粪便中粪甾烷醇约占总甾醇的 52%<sup>[37]</sup>。此外,季节变化对甾醇特征的影响尚未明确—冬季干草与夏季鲜草可能导致食草动物粪便中甾醇的含量发生变化,环境因素(如盐度、pH、有机质)对粪便甾醇的保存也会产生一定的影响<sup>[63]</sup>,但相关动态监测网络尚未建立。未来需系统解析甾醇的“来源-迁移-转化-保存”全链条机制,重点研究区域环境差异对动物代谢的影响。

(2) 分类精度提升与标准化方法构建。现有研究表明,基于粪便甾醇指纹特征可有效区分人类活动排泄物、食草动物及反刍动物粪便来源,但其分类精度仍受限于种间甾醇特征重叠、沉积后生作用的环境干扰及现有数据库亚种分辨率不足等问题。因此,结合机器学习算法开发多维特征分类模型以及建立区域性与全球性粪便甾醇参考数据库至关重要<sup>[52]</sup>。此外,目前粪便甾醇主要依赖特定甾醇比值和代谢产物的分布对食草动物和食肉动物进行划分<sup>[3,47]</sup>。然而,不同物种的甾醇含量因肠道菌群代谢效率和饮食复杂性存在显著差异,导致标准化不足,因此,建议结合稳定同位素( $\delta^{13}\text{C}$ -甾醇)和微生物基因组学技术,揭示生物肠道菌群的区域适应性特征。同时,开发基于深度学习的多维分类模型(如卷积神经网络、随机森林),整合甾醇指纹、同位素特征以及环境参数,从而提升种间分辨率。

(3) 古生态重建的可靠性优化。粪便甾醇作为一种重要的生物标志物,近年来常被用作重建古生物的有效代用指标<sup>[3,64-65]</sup>。虽然粪便甾醇在沉积物中难以降解,但在某些条件下(如高温或微生物活动旺盛的环境)仍可能发生变化<sup>[66]</sup>。这种降解或转化可能进一步影响其作为生物标志物的有效性。因此,需要进一步研究环境因素(如盐度、pH 值、温度、有机质含量等)对粪便甾醇保存和转化的影响,以建立更准确的定量模型。此外,由于粪便甾醇的来源多样且微生物转化过程复杂,在未来重建古生物群落时,应注重将粪便甾醇与其他环境指标(如孢粉、冰芯、有机碳等)相结合,构建多指标综合分析体系<sup>[65-67]</sup>,以提高重建结果的准确性。此外,针对高分辨率古环境重建,需开发超高灵敏度检测技术(如二维气相色谱-飞行时间质谱)以应对低浓度甾醇信号提取难题。

(4) 污染溯源技术的整合应用。在环境污染领域, 尽管粪便甾醇可以提供污染源的定量评估, 但单独使用时可能无法完全区分人类和动物粪便的贡献, 因此, 需结合多化学指标(如咖啡因、荧光增白剂、人工甜味剂等)更加全面有效的区分人类与动物粪便<sup>[52]</sup>, 在未来的研究中可以引入贝叶斯混合模型, 结合线性回归与机器学习来量化多污染源贡献率。

(5) 进一步丰富应用场景。目前对粪便甾醇的研究多聚焦于湖泊、河口、近海水体、土壤等环境介质<sup>[3, 39, 56, 68]</sup>, 主要用于古生物重建和追踪环境污染源。粪便甾醇作为一种特定生物标志物, 在未来的生态研究中具有很大的潜力, 因此, 未来研究中可进一步加强对粪便甾醇在不同介质中的研究, 例如, 探究粪便甾醇在高原/极地冰芯、喀斯特洞穴沉积以及人类活动遗址的适用性, 进而完善粪便甾醇的功能体系。

尽管粪便甾醇在国内古生态应用中的研究较为薄弱, 但是其作为一种高特异性的生物标志物, 为古生物重建提供了关键证据, 尤其在揭示区域食草动物活动强度、人类活动强度及其影响因素等方面具有重要意义。因此, 未来研究中需进一步加强对粪便甾醇现代过程调查, 深入理解其传输、沉积和保存过程及其机制, 构建全球性、区域性数据库; 突破单一指标局限, 结合多种指标和古 DNA 技术, 进一步了解牧业传播与气候变化的互动机制, 为评估现代人类活动的生态风险提供历史参考。

#### 参考文献 (References):

- [1] Volkman J K, Barrett S M, Blackburn S I, Mansour M P, Sikes E L, Gelin F. Microalgal biomarkers: a review of recent research developments. *Organic Geochemistry*, 1998, 29(5/6/7): 1163-1179.
- [2] Bull I D, Lockheart M J, Elhmmali M M, Roberts D J, Evershed R P. The origin of faeces by means of biomarker detection. *Environment International*, 2002, 27(8): 647-654.
- [3] Prost K, Birk J J, Lehnndorff E, Gerlach R, Amelung W. Steroid biomarkers revisited-improved source identification of faecal remains in archaeological soil material. *PLOS One*, 2017, 12(1): e0164882.
- [4] Bull I D, Simpson I A, Dockrill S J, Evershed R P. Organic geochemical evidence for the origin of ancient anthropogenic soil deposits at Tofts Ness, Sanday, Orkney. *Organic Geochemistry*, 1999, 30(7): 535-556.
- [5] Bethell P H, Goad L J, Evershed R P, Ottaway J. The study of molecular markers of human activity: the use of coprostanol in the soil as an indicator of human faecal material. *Journal of Archaeological Science*, 1994, 21(5): 619-632.
- [6] Schroeter N, Lauterbach S, Stebich M, Kalanke J, Mingram J, Yildiz C, Schouten S, Gleixner G. Biomolecular evidence of early human occupation of a high-altitude site in western central Asia during the Holocene. *Frontiers in Earth Science*, 2020, 8: 20.
- [7] Li C L, Zhu L P, Ma Q F, Ju J T, Cheng J J, Aquino- López M A, Zhang R, Kou Q Q, Lü X M, Wang J B. Relationship between human activities and environmental changes in the southern Tibetan Plateau since the Little Ice Age. *Science of The Total Environment*, 2024, 943: 173741.
- [8] Li X M, Liu S T, Ji K J, Hou X H, Yuan K, Hou J Z, Niu J Q, Yan J H, Yan W, Wang Y F, Wang Y. Late Holocene human population change revealed by fecal stanol records and its response to environmental evolution at Xiada Co on the western Tibetan Plateau. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2024, 636: 111993.
- [9] Keenan B, Imfeld A, Johnston K, Breckenridge A, Gélinas Y, Douglas P M J. Molecular evidence for human population change associated with climate events in the Maya Lowlands. *Quaternary Science Reviews*, 2021, 258: 106904.
- [10] Li X M, Liu S T, Fan B W, Hou J Z, Wang M D. Validating the potential application of  $\delta^2\text{H}_{\text{wax}}$  and soil  $\text{brGDGTs}$  in paleoelevation estimates on the southern slopes of the Himalaya. *Quaternary Science Reviews*, 2023, 318: 108306.
- [11] D'Anjou R M, Bradley R S, Balascio N L, Finkelstein D B. Climate impacts on human settlement and agricultural activities in northern Norway revealed through sediment biogeochemistry. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(50): 20332-20337.
- [12] Curtin L, D'Andrea W J, Balascio N L, Shirazi S, Shapiro B, de Wet G A, Bradley R S, Bakke J. Sedimentary DNA and molecular evidence for early human occupation of the Faroe Islands. *Communications Earth & Environment*, 2021, 2: 253.
- [13] Wang J J, Wang Y H, Wang X M, Sun L G. Penguins and vegetations on ardley island, *Antarctica*: evolution in the past 2, 400years. *Polar Biology*, 2007, 30(11): 1475-1481.
- [14] Grimalt J O, Fernandez P, Bayona J M, Albaiges J. Assessment of fecal sterols and ketones as indicators of urban sewage inputs to coastal waters. *Environmental Science and Technology*, 1990, 24(3): 357-363.

- [15] Hatcher P G, McGillivray P A. Sewage contamination in the New York bight. coprostanol as an indicator. *Environmental Science & Technology*, 1979, 13(10): 1225-1229.
- [16] Green G, Skerratt J H, Leeming R, Nichols P D. Hydrocarbon and coprostanol levels in seawater, sea-ice algae and sediments near Davis station in eastern *Antarctica*; a regional survey and preliminary results for a field fuel spill experiment. *Marine Pollution Bulletin*, 1992, 25(9/10/11/12): 293-302.
- [17] Venkatesan M I, Mirsadeghi F H. Coprostanol as sewage tracer in McMurdo sound, *Antarctica*. *Marine Pollution Bulletin*, 1992, 25(9/10/11/12): 328-333.
- [18] Sherwin M R, Van Vleet E S, Fossato V U, Dolci F. Coprostanol (5 $\beta$ -cholestan-3 $\beta$ -ol) in lagoonal sediments and mussels of Venice, Italy. *Marine Pollution Bulletin*, 1993, 26(9): 501-507.
- [19] Gendre F, Beck C, Ruch P, Kubler B. Human impacts on coral ecosystems at Mauritius island; coprostanol in surface sediments. *Ecologiae Geologicae Helvetiae*, 1994, 87(2): 357-367.
- [20] Takada H, Farrington J W, Bothner M H, Johnson C G, Tripp B W. Transport of sludge-derived organic pollutants to deep-sea sediments at deep water dump site 106. *Environmental Science & Technology*, 1994, 28(6): 1062-1072.
- [21] Wang J Z, Guan Y F, Ni H G, Liu G J, Zeng E Y. Fecal steroids in riverine runoff of the Pearl River Delta, South China; levels, potential sources and inputs to the coastal ocean. *Journal of Environmental Monitoring*, 2010, 12(1): 280-286.
- [22] 黄婧, 王新明, 孙立广. 东南极戴维站企鹅粪土沉积物有机地球化学特征. *极地研究*, 2009, 21(2): 141-150.
- [23] Bull I D, Evershed R P, Betancourt P P. An organic geochemical investigation of the practice of manuring at a Minoan site on Psira Island, Crete. *Geoarchaeology*, 2001, 16(2): 223-242.
- [24] Sistiaga A, Berna F, Laursen R, Goldberg P. Steroidal biomarker analysis of a 14, 000 years old putative human coprolite from Paisley Cave, Oregon. *Journal of Archaeological Science*, 2014, 41: 813-817.
- [25] Wang Z, Qu Q, Ma D W, Hou X H, Ji K J, Gao X X, Yuan K, Zang T G, Hou J Z. Responses of Tibetan *Antelope* population to environment changes during the Holocene. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2024, 641: 112132.
- [26] Bu M. Natural bioactive sterol 5 $\alpha$ , 8 $\alpha$ -endoperoxides as drug lead compounds. *Medicinal Chemistry*, 2014, 4(10): 709-716.
- [27] Yang Z Y, Hollebone B P, Wang Z D, Yang C, Brown C, Landriault M. Method development for forensic identification of biodiesel based on chemical fingerprints and corresponding diagnostic ratios. *Forensic Science International*, 2014, 234: 86-94.
- [28] Nytoft H P, Bojesen-Koefoed J A, Christiansen F G. C<sub>26</sub> and C<sub>28</sub>-C<sub>34</sub> 28-norhopanes in sediments and petroleum. *Organic Geochemistry*, 2000, 31(1): 25-39.
- [29] 梁作兵, 沈立成, 孙玉川, 王尊波, 江泽利, 张媚, 廖昱, 谢正兰, 张远瞩. 青木关地下河中溶解态甾醇来源及迁移、转化特征. *环境科学*, 2015, 36(11): 4074-4080.
- [30] Volkman J K. A review of sterol markers for marine and terrigenous organic matter. *Organic Geochemistry*, 1986, 9(2): 83-99.
- [31] Barrett S M, Volkman J K, Dunstan G A, LeRoi J M. Sterols of 14 species of marine diatoms (bacillariophyta). *Journal of Phycology*, 1995, 31(3): 360-369.
- [32] Krivtsov V, Brendler A, Watling R, Liddell K, Staines H J. Some aspects of forest soil and litter ecology in the Dawyck Cryptogamic Sanctuary with a particular reference to fungi. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(3): 813-834.
- [33] Eneroth P, Hellström K, Ryhage R. Identification and quantification of neutral fecal steroids by gas-liquid chromatography and mass spectrometry: studies of human excretion during two dietary regimens. *Journal of Lipid Research*, 1964, 5(2): 245-262.
- [34] Venkatesan M I, Santiago C A. Sterols in ocean sediments; novel tracers to examine habitats of cetaceans, pinnipeds, penguins and humans. *Marine Biology*, 1989, 102(4): 431-437.
- [35] Leeming R, Ball A, Ashbolt N, Nichols P. Using faecal sterols from humans and animals to distinguish faecal pollution in receiving waters. *Water Research*, 1996, 30(12): 2893-2900.
- [36] Tyagi P, Edwards D R, Coyne M S. Use of selected chemical markers in combination with a multiple regression model to assess the contribution of domesticated animal sources of fecal pollution in the environment. *Chemosphere*, 2007, 69(10): 1617-1624.
- [37] 徐恒振, 马新东, 王洪艳, 周传光, 姚子伟. 粪便源指纹及其鉴别研究. *海洋环境科学*, 2013, 32(1): 141-146.
- [38] 韦洋洋. 南极典型地区湖泊沉积物中脂类生物标志物及同位素地球化学研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- [39] Li C L, Zhu L P, Ju J T, Ma Q F, Wang J B, Kou Q Q. Impacts of human and herbivorous feces on lake surface sediments of the Tibetan Plateau based on fecal stanol proxies. *Ecological Indicators*, 2024, 158: 111487.
- [40] 李秀美, 刘苏涛, 侯居峙, 袁侃, 侯孝欢, 冀克家. 青藏高原阿里地区不同物种粪便中甾醇分布特征及指示意义. *地理科学*, 2024, 44(7): 1123-1132.
- [41] 黄有良, 胡兴军, 董惟妙, 李志伦, 陈林, 杨瑞, 曹凯喻, 芦永秀, 周爱锋. 新疆克亚克库都克唐代烽燧遗址粪化石脂质记录的动物利用.

地理科学, 2024, 44(11): 2051-2059.

- [42] Evershed R P, Bethell P H. Application of multimolecular biomarker techniques to the identification of fecal material in archaeological soils and sediments//Archaeological Chemistry. Washington, DC: American Chemical Society, 1996: 157-172.
- [43] Leeming R, Latham V, Rayner M, Nichols P. Detecting and distinguishing sources of sewage pollution in Australian inland and coastal waters and sediments//Molecular Markers in Environmental Geochemistry. Washington, DC: American Chemical Society, 1997: 306-319.
- [44] Devane M L, Wood D, Chappell A, Robson B, Webster-Brown J, Gilpin B J. Identifying avian sources of faecal contamination using sterol analysis. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, 187(10): 625.
- [45] Gill F L, Dewhurst R J, Dungait J A J, Evershed R P, Ives L, Li C S, Pancost R D, Sullivan M, Bera S, Bull I D. Archaeol: a biomarker for foregut fermentation in modern and ancient herbivorous mammals. Organic Geochemistry, 2010, 41(5): 467-472.
- [46] Kemp A C, Vane C H, Kim A W, Dutton C L, Kemp S K, Parnell A C. Fecal steroids as a potential tool for conservation paleobiology in East Africa. Biodiversity and Conservation, 2022, 31(1): 183-209.
- [47] Harrault L, Milek K, Jardé E, Jeanneau L, Derrien M, Anderson D G. Faecal biomarkers can distinguish specific mammalian species in modern and past environments. PLoS One, 2019, 14(2): e0211119.
- [48] 冀克家. 江错纹层沉积物生标揭示的青藏高原中部历史时期气候变化与人类活动[D]. 北京: 中国科学院大学, 2022.
- [49] Araújo M P, Hamacher C, de Oliveira Farias C, Soares M L G. Fecal sterols as sewage contamination indicators in Brazilian mangroves. Marine Pollution Bulletin, 2021, 165: 112149.
- [50] 向青清. 粪甾醇作为水土污染指标的研究——以太原市小店污灌区为例[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2012.
- [51] 徐恒振, 刘星, 姚子伟. 粪固醇作为海洋环境中粪便污染指示物的研究. 海洋环境科学, 2010, 29(6): 777-780.
- [52] Dubber D, Brophy L, O'Connell D, Behan P, Danaher M, Evans C, Geary P, Misstear B, Gill L. The use of sterol profiles, supported with other faecal source tracking methods, to apportion septic tanks contamination in rural catchments. Environmental Pollution, 2024, 341: 122884.
- [53] 周夏飞, 於方, 刘琦, 曹国志, 马国霞, 杨威杉. 东江流域突发水污染风险分区研究. 生态学报, 2020, 40(14): 4813-4822.
- [54] 梁红霞, 余志晟, 刘如钢, 张洪勋, 吴钢. 分子标记物在禽类粪便污染溯源中的研究及应用进展. 生态学报, 2021, 41(3): 1006-1014.
- [55] 黄杰, 李永乐. 淮河生态经济带城市生态韧性空间差异及动态演进. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2024, 37(1): 1-10.
- [56] 卢冰, 张海生, 武光海, 周怀阳, 陈荣华, 朱纯, 姚龙奎, 王自磐. 楚科奇海和白令海沉积地层中甾醇的物源组成及其周边气候效应. 极地研究, 2005, 17(3): 183-192.
- [57] 马海青, 冯环, 王旭晨. 渤海湾和胶州湾表层沉积物中甾醇的分布和来源. 海洋科学, 2009, 33(6): 73-79, 85.
- [58] 廖昱, 孙玉川, 王尊波, 梁作兵, 张远瞩. 甾醇对南山老龙洞地下河粪便污染的指示. 环境科学, 2016, 37(8): 3034-3040.
- [59] 姚晓瑞. 新疆北部典型湖泊沉积物中甾醇分布状况及其环境行为研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2013.
- [60] Liu J, Yao X R, Lu J J, Qiao X W, Liu Z L, Li S M. Distribution and factors affecting adsorption of sterols in the surface sediments of Bosten Lake and Manas Lake, Xinjiang. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(6): 5892-5901.
- [61] Bell M A, Blais J M. Paleolimnology in support of archeology: a review of past investigations and a proposed framework for future study design. Journal of Paleolimnology, 2021, 65(1): 1-32.
- [62] Yang L J, Sun L G, Emslie S D, Xie Z Q, Huang T, Gao Y S, Yang W Q, Chu Z D, Wang Y H. Oceanographic mechanisms and penguin population increases during the Little Ice Age in the southern Ross Sea, Antarctica. Earth and Planetary Science Letters, 2018, 481: 136-142.
- [63] 张晓蕾, 薛文平, 徐恒振, 马新东. 近海沉积物对粪固醇的等温吸附和热力学研究. 环境科学, 2012, 33(10): 3547-3553.
- [64] Blong J C, Whelton H L, van Asperen E N, Bull I D, Shillito L-M. Sequential biomolecular, macrofossil, and microfossil extraction from coprolites for reconstructing past behavior and environments. Frontiers in Ecology and Evolution, 2023, 11(1): 131-294.
- [65] Chen X, Wang J J, Jin J, Nie Y G, Zheng Z Q, Xue Y L, Kong W D, Cheng W H, Zhang J F, Liang L W, Yang Y, Emslie S D, Liu X D. Microbial hydrogenation of cholesterol to coprostanol by anaerobic bacteria: evidence from Antarctic lacustrine sediment. Biogeochemistry, 2024, 167(9): 1107-1122.
- [66] Nishimura M, Koyama T. The occurrence of stanols in various living organisms and the behavior of sterols in contemporary sediments. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1977, 41(3): 379-385.
- [67] Biache C, Philp R P. The use of sterol distributions combined with compound specific isotope analyses as a tool to identify the origin of fecal contamination in rivers. Water Research, 2013, 47(3): 1201-1208.
- [68] Reeves A D, Patton D. Faecal sterols as indicators of sewage contamination in estuarine sediments of the Tay Estuary, Scotland: an extended baseline survey. Hydrology and Earth System Sciences, 2005, 9(1/2): 81-94.