

· 专论与综述 ·

生物标志物在全新世古气候和古环境研究中的应用进展

王郑雷¹, 曾阳^{1,2}, 刘力宽^{1,2}, 张瑞峰¹, 李锦萍^{1,2*}, 程文瀚³

(1. 青海师范大学生命科学学院, 青海 西宁 810008; 2. 高原科学与可持续发展研究院, 青海 西宁 810008; 3. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026)

摘要:全新世作为最年轻的一个地质年代,其气候环境变化与人类社会发展息息相关。回顾了近年来全新世古气候和古环境研究的进展,总结了重建古气候和古环境的常用方法,重点介绍了生物标志物包括萜类化合物、长链烯酮、甘油二烷基甘油四醚、甾醇、烷基酯类、木质素和色素在该领域的应用,并提出了开发新型生物标志物、构建多指标体系,以及与地球微生物学、生物化学、微生物学等相关学科开展交叉研究等展望。

关键词:生物标志物;古气候;古环境;全新世

中图分类号:P597;P532

文献标志码:A

文章编号:1006-2009(2022)06-0009-05

Application of Biomarkers in Holocene Paleoclimate and Paleoenvironment, A Review

WANG Zheng-lei¹, ZENG Yang^{1,2}, LIU Li-kuan^{1,2}, ZHANG Rui-feng¹, LI Jin-ping^{1,2*}, CHENG Wen-han³

(1. College of Life Sciences, Qinghai Normal University, Xining, Qinghai 810008, China; 2. Academy of Plateau Science and Sustainability, Xining, Qinghai 810008, China; 3. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China)

Abstract: As one of the youngest geologic ages, the climate and environmental changes of Holocene are closely related to human social development. The research progress of Holocene paleoclimate and paleoenvironment in recent years was reviewed, and the common methods of reconstructing paleoclimate and paleoenvironment were summarized. The application of biomarkers, including terpenoids, long-chain alkenones, glycerol dialkyl glycerol tetraether, sterols, alkyl esters, lignin and pigments in this field was mainly introduced. The development of new biomarkers, the construction of multi-indicator system, and the cross research with geomicrobiology, biochemistry, microbiology and other related disciplines were proposed.

Key words: Biomarker; Paleoclimate; Paleoenvironment; Holocene

全新世始于约 11.7 ka 之前的新仙女木事件结束,虽然从整个地球的地质历史角度看全新世的气候相对温和,但在全新世范围内仍有明显的气候波动^[1]。近 2 ka 以来,气候变化对人类社会的发展存在明显的影响^[2]。为了更好地理解人与环境和气候的关系,对全球变化提供有效预测,并为应对未来全球变化提供决策依据,全新世气候环境变化研究已成为当前古气候和古环境研究的热点。

研究历史时期气候与环境变化的常见信息载体有冰芯、黄土、湖泊沉积、海洋沉积和沼泽泥炭沉积等。例如冰芯可以记录大气降水中的氢氧同位

素,重建降水量和温度变化历史,其中保存的气体亦可反映历史时期的空气成分^[3];湖泊作为全球生态系统的重要组成部分,汇集了全流域水生生态系统及地表径流带来的陆源物质输入,能综合反映

收稿日期:2022-03-05;修订日期:2022-08-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42076231);青海省重点研发与转化计划基金资助项目(2018-HZ-803);青海省药用植物资源综合利用与开发研究创新团队基金资助项目(2020-2023);青海省高端创新人才千人计划基金资助项目(2017年度)

作者简介:王郑雷(1996—),男,河南洛阳人,在读研究生,研究方向为资源生态学。

* 通信作者:李锦萍 E-mail: 2008ljp@163.com

湖区环境条件的关键信息,且多数湖泊沉积物记录具有较好的连续性,有助于获得良好的年代框架,因而在古环境变化研究中应用广泛^[4]。然而,这些传统指标重建的主要是气候指标,重建出的生态环境和人类活动历史信息较为简略,无法有针对性地重建生态环境历史^[5]。近年来,生物标志物在古环境和古气候研究中的应用为解决这一难题提供了有力的工具。

生物体在经历漫长的地质环境改造之后,虽然大部分物质的结构和组成都会发生变化,但源自生物体的生物标志物可以保留遗传信息,其分布和地球化学组合特征可以反映历史生态信息^[6]。生物标志物研究的基本手段是通过现代沉积物及周边环境的研究,识别出指示特定生态环境或人类活动指标的生物标志物,再将其应用在时间序列载体上,重建历史时期的生态环境^[7]。今回顾近年来全新世古气候和古环境研究的进展,总结重建古气候和古环境的常用方法,重点介绍生物标志物在该领域的应用,并提出相关的研究展望。

1 传统标志物测量指标

在地球历史上,环境变化往往通过物理过程、化学过程和生命过程表现出来。因此,在古气候和古环境研究中,常用的代用指标主要分为物理指标、生物指标和化学指标。

1.1 物理指标

物理指标是通过研究沉积物的物理结构和性质在时间空间上的分布规律来推断古环境演化的指标,常用指标主要包括粒度和磁化率^[8]。磁化率主要由气候记录载体中磁性矿物的含量和种类决定,在黄土载体中的应用最为广泛^[9]。Tu等^[10]通过分析中国大陆架沉积物的敏感粒度分布,重建了全新世中国沿海沿岸流的变化,从而重建了驱动沿岸流的东亚冬季风变化。

1.2 生物指标

生物指标是指在沉积物中保存的孢粉、植硅体和植物化石等,这些信息保存了丰富的古气候和古环境记录^[11]。孢粉是最常用的生物学代用指标,其形体微小、分布广泛,可以精准重建特定物种的变化历史,有助于研究历史时期区域性植被的植物组成与环境特征^[12]。植硅体是土壤中生物硅的一种,可以反映细微环境变化和过去人类活动与植物间的联系^[13]。此外,在考古遗址中发现的炭化植

物化石等大植物遗存可以直接进行¹⁴C测年,并提供当时的人类农业和食谱信息^[14]。

1.3 化学指标

元素地球化学研究的对象丰富,其在古气候和古环境变化历史等研究中都是常用的代用指标^[15]。Sun等^[16]在南极湖泊沉积物中识别出9种生物标志物元素,重建了数千年来的企鹅数量变化,并研究了其与气候变化的相关性。在元素含量指标之外,稳定同位素比值可以进一步提供温度、降水和物质来源等古气候和古环境信息。Vachula等^[17]利用湖芯中双壳类壳体的稳定氢氧同位素,重建了过去11.5 ka阿拉斯加Wahoo湖流域的冰川进退情况。近年来,也有研究利用金属同位素重建人类活动对环境影响的历史^[18]。

2 生物标志物分析法

传统古气候和古环境研究中的物理指标和化学指标通常没有直接对应的气候和环境参数,载体中的信息可能在长时间的保存中受到外部因素的影响。近年来新兴的生物标志物指标一般有直接对应的标志生物和气候环境参数,并且可以在古气候载体中长期保存。这些生物标志物可被用于定量重建古生态演变,逐渐成为古气候和古环境研究中的有力工具^[19]。

2.1 萜类化合物

萜类化合物是由异戊二烯或异戊烷以各种方式连接而成的一类天然化合物,在自然界中广泛存在^[20],目前应用较多的主要是三环萜烷、四环萜烷、藿烷类、伽马蜡烷等。三环萜烷主要由微生物细胞膜中的三环类异戊二烯醇形成^[21];四环萜烷一般与陆源有机输入有关;藿烷来源与细菌中特定的藿烷聚醇有关^[22]。Belt等^[23]在加拿大北极群岛的海冰及沉积物中首次发现了萜类化合物IP25,由于其是硅藻在低温条件下合成,因而能够完整保存在沉积物中。近年有研究发现,IP25可以在沉积物中保存超过5.3 Ma^[24],可被用于长时间尺度的海冰重建。

2.2 长链烯酮

长链烯酮(Long-chain alkenones, LCAs)是由定鞭金藻(Haptophytes)合成的长链不饱和甲基酮或乙基酮,碳数范围在C₃₇~C₄₁之间,特征为含有不同数量(2~4个)的反式碳碳双键。长链烯酮的不饱和度与海表温度变化有很好的相关性,因而海洋

沉积物中的 C_{37} 长链烯酮可被用于定量重建历史时期的海表温度。Weiss 等^[25]在 2020 年探查了过去 1.1 ka 间的波罗的海沉积物,发现烯酮($\delta_2 H_{C_{37}}$)分布与波罗的海盐度有关,表明物种迁移与盐度变化相一致。Wang 等^[26]通过一种全新的长链烯酮(U_{37}^{ks})指标,成功重建了青海湖地区 2 ka 至今的气候变化。

2.3 甘油二烷基甘油四醚

甘油二烷基甘油四醚(Glycerol Dialkyl Glycerol TetraetherLipids, GDGTs)是由微生物合成的一类含有 4 个醚键的脂类化合物。在活体微生物细胞中, GDGTs 与头基(磷脂、葡萄糖等)可构成完整的极性类脂,微生物死亡后头基水解,而相对稳定的核心类脂 GDGTs 却可以在地质体中长期保存^[27]。2002 年的一项研究发现^[28],海洋泉古菌门(Crenarchaeota)遗留的 GDGTs 可被用于定量重建历史时期的海表温度。该研究通过与海表观测温度进行线性拟合,提出以含 86 个碳原子的 GDGTs 含量为基础 TEX_{86} , 作为定量重建海表温度的替代性指标^[29],并应用该指标发现南极半岛西侧海平面平均温度在全新世下降了 $3\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[30]。在海洋沉积环境之外,当前研究还将 GDGTs 广泛应用于泥炭^[31]、湖泊^[32]、石笋^[33]等不同环境的古气候和古环境记录载体中。

2.4 甾醇

甾醇是一种常见的生物标志物,普遍存在于真核生物中,对于保持细胞膜稳定性、生物繁殖和信号转导等过程具有重要作用。目前已被报道的植物甾醇超过 200 种^[34],甾醇和甾烷醇是实现生物功能和组成生物膜结构的一类重要化合物。研究发现,不同动植物的生物活动可以产生具有该物种特征的甾醇和甾烷醇^[35],并且可以在沉积环境中完整保存下来,从而为重建古生态环境提供有力工具。虽然有报道显示甾醇在温暖气候中会于数年内显著降解^[36],但在寒冷环境中其可保存数千年之久^[37]。近期有研究利用加拿大北极地区淡水沉积物中胆甾醇、豆甾醇和粪甾烷醇的记录,重建了过去 1 100 a 该地区的海鸟生态和原住民活动,发现该地区在中世纪暖期没有明显的生态系统发展,存在小规模的原住民活动,在小冰期之后海鸟数量显著上升^[38]。

2.5 烷基酯类

烷基酯类是植物蜡的重要成分,包括正构烷

烃、长链脂肪酸和正构烷醇等,这些化合物均源自短链脂肪酸前体,其碳链长度可作为植物生态的替代性指标。烷基酯类存在于各种生物体中,其碳链长度和碳同位素值之间的差异主要与不同生物的生理特征及当时的气候环境有关^[39]。烷基酯类的奇数碳分子与偶数碳分子的比值是最经典的烷基酯类指标,可用碳优势指数(CPI)或奇偶优势(OEP)来表示^[40]。此外,烷基酯类的加权平均链长(ACL)可被用于指示古生态环境变化^[41]。He 等^[42]综合利用 ACL 和 CPI 指标,重建了全新世尔海的水位变化。近年来随着分析技术的发展,烷基酯类单体碳同位素的差异受到越来越多的关注^[39],并被用于 C_3/C_4 植被历史的重建^[43]。

2.6 木质素

木质素是一类复杂的有机聚合物,其在维管植物和一些藻类的支持组织中形成重要的结构材料,也是构成植物细胞壁的重要成分。木质素具有丰度高、来源明确(仅来自陆生维管植物)、抗降解能力强等特点,是判断陆生维管植物有机物来源的一种优质有机示踪物^[44]。Korosi 等^[45]利用与木质素相关的酚类标志物,发现加拿大北极湖泊水域面积处于数百年内的最大值,导致湖泊周边植被大量被淹没,当地野牛的栖息地被严重挤压。刘晓杰等^[46]通过对东海内陆架 T06 岩心样品中木质素的测定,发现木质素含量及其相关参数可以在一定程度上指示东亚冬季风的变化,研究还以木质素为主要指标,重建了 8.8 ka B. P. 以来中国东海内陆架浙闽沿岸泥质区不同历史环境下陆源有机物的输送来源。

2.7 色素

沉积物中包含的色素是重建古环境的一个重要指标。生物遗体在沉积后,受氧化分解等作用影响,虽然多数色素被分解,但仍有部分色素会长久保存^[47]。沉积色素是一类对环境变化很敏感的化合物,在沉积过程中能够保留历史时期的环境信息。沉积物色素的含量和种类作为研究气候变化、湖泊富营养状况、水流波动及人类活动等的代用指标^[48],具有广阔的应用前景。色素的类型多样,在不同植物体内的含量也不同。Tönno 等^[49]分离了爱沙尼亚普佩斯湖 182 个样品中的沉积色素,发现在过去的万年间,沉积物中的色素含量从底层到上层有增加趋势,表明湖泊营养状况随时间逐渐增加。

3 结论与展望

在传统指标的基础上,生物标志物能够进一步提供更有针对性的古气候、古环境和古生态信息。针对相关领域的研究,提出以下建议与展望。

(1)在生态演替中人类活动往往与自然因素的影响相互叠加,如何将二者输入有机质对“源-汇”过程的影响进行区分,是目前研究的重点更是难点。通过生物学研究或调研现代环境,开发新型生物标志物,可以有针对性地解决该难点问题。

(2)无论是传统指标还是生物标志物,单一指标能够提供的古气候、古环境和古生态信息必然有限。应针对研究目标,选用多个替代性指标,并充分考虑人为因素和外来因素输入对实验结果的干扰,通过多指标体系构建丰富的古气候、古环境和古生态信息。

(3)对于生物标志物,还应与地球微生物学、生物化学、微生物学等相关学科进行交叉研究,才能深刻理解生物标志物背后的化学和地质学原理,充分挖掘相关指标的古环境和古生态意义。

[参考文献]

- [1] MAYEWSKI P A, ROHLING E E, STAGER J C, et al. Holocene climate variability [J]. *Quaternary Research*, 2004, 62 (3): 243 - 255.
- [2] SCHEFFRAN J, BRZOSKA M, KOMINEK J, et al. Climate change and violent conflict [J]. *Science*, 2012, 336 (6083): 869 - 871.
- [3] KOBASHI T, SEVERINGHAUS J P, KAWAMURA K. Argon and nitrogen isotopes of trapped air in the GISP2 ice core during the Holocene epoch (0 - 11 500 B. P.): Methodology and implications for gas loss processes [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, 72 (19): 4675 - 4686.
- [4] WILLIAMSON C E, SAROS J E, VINCENT W F, et al. Lakes and reservoirs as sentinels, integrators, and regulators of climate change [J]. *Limnology and Oceanography*, 2009, 54 (6): 2273 - 2282.
- [5] BELL M A, BLAIS J M. Paleolimnology in support of archeology: a review of past investigations and a proposed framework for future study design [J]. *Journal of Paleolimnology*, 2020, 65: 1 - 32.
- [6] 郑秀娟, 杜远生, 朱筱敏, 等. 中国古地理学近十年主要进展 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2021, 40 (1): 94 - 114.
- [7] 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.
- [8] 刘建兴, 石学法, 吴永华, 等. 东海外陆架厚层砂质沉积岩石磁学特征 [J]. *海洋科学进展*, 2020, 38 (3): 435 - 445.
- [9] 刘秀铭, 刘东生, HELLER F, 等. 黄土频率磁化率与古气候冷暖变换 [J]. *第四纪研究*, 1990, 10 (1): 42 - 50.
- [10] TU L Y, ZHOU X, CHENG W H, et al. Holocene East Asian winter monsoon changes reconstructed by sensitive grain size of sediments from Chinese coastal seas: A review [J]. *Quaternary International*, 2017, 440: 82 - 90.
- [11] SCHMIDT R, KAMENIK C, ROTH M. Siliceous algae-based seasonal temperature inference and indicator pollen tracking ca. 4 000 years of climate/land use dependency in the southern Austrian Alps [J]. *Journal of Paleolimnology*, 2007, 38 (4): 541 - 554.
- [12] 沈吉, 刘兴起, MATSUMOTO R, 等. 晚冰期以来青海湖沉积物多指标高分辨率的古气候演化 [J]. *中国科学: D 辑*, 2004, 34 (6): 582 - 589.
- [13] 何跃, 张甘霖. 热带地区玄武岩发育土壤中的生物硅及其发生学意义 [J]. *土壤学报*, 2010, 47 (3): 385 - 392.
- [14] 唐领余, 毛礼米, 吕新苗, 等. 第四纪沉积物中重要蕨类孢子和微体藻类的古生态环境指示意义 [J]. *科学通报*, 2013, 58 (20): 1969 - 1983.
- [15] 谢建磊, 赵宝成, 战庆, 等. 元素地球化学在古环境和古生态研究中的应用综述 [J]. *上海国土资源*, 2015 (3): 64 - 70.
- [16] SUN L, XIE Z, ZHAO J. A 3 000-year record of penguin populations [J]. *Nature*, 2000, 407 (6806): 858 - 867.
- [17] VACHULA R S, CHIPMAN M L, HU F S. Holocene climatic change in the Alaskan Arctic as inferred from oxygen-isotope and lake-sediment analyses at Wahoo Lake [J]. *The Holocene*, 2017, 27 (11): 1631 - 1644.
- [18] 李文博, 林建宇, 周强, 等. 骆马湖现代沉积物¹³⁷Cs 和²¹⁰Pb_{ex}的测定分析与环境指示意义 [J]. *环境监测管理与技术*, 2021, 33 (5): 41 - 45.
- [19] 周锡强, 陈代钊, 刘牧, 等. 中国沉积学发展战略: 沉积地球化学研究现状与展望 [J]. *沉积学报*, 2017, 35 (6): 1293 - 1316.
- [20] PERVEEN S. Introductory chapter: terpenes and terpenoids [M]. [S. l.]: Books LLC, Wiki Series, 2018.
- [21] AZEVEDO D A, AQUINO N F R, SIMONEIT B R T, et al. Novel series of tricyclic aromatic terpanes characterized in Tasmanian tasmanite [J]. *Organic Geochemistry*, 1992, 18 (1): 9 - 16.
- [22] OURISSON G, ROHMER M, PORALLA K. Prokaryotic hopanoids and other polyterpenoid sterol surrogates [J]. *Annu Rev Microbiol*, 1987, 41: 301 - 333.
- [23] BELT S T, MASSÉ G, ROWLAND S J, et al. A novel chemical fossil of palaeo sea ice: IP25 [J]. *Organic Geochemistry*, 2006, 38 (1): 16 - 27.
- [24] VOLKMAN J K, BARRETT S M, DUNSTAN G A. C₂₅ and C₃₀ highly branched isoprenoid alkenes in laboratory cultures of two marine diatoms [J]. *Organic Geochemistry*, 1994, 21 (3/4): 407 - 414.
- [25] WEISS G M, MASSALSKA B, HENNEKAM R, et al. Alkenene distributions and hydrogen isotope ratios show changes in haptophyte species and source water in the Holocene Baltic Sea [J].

- Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2020, 21(2): 1–15.
- [26] WANG Z, LIU Z, ZHANG F, et al. A new approach for reconstructing Holocene temperatures from a multi-species long chain alkenone record from Lake Qinghai on the northeastern Tibetan Plateau[J]. Organic Geochemistry, 2015, 88: 50–58.
- [27] SCHOUTEN S, HOPMANS E C, DAMSTÉ J S S. The organic geochemistry of glycerol dialkyl glycerol tetraether lipids: A review [J]. Organic Geochemistry, 2013, 54: 19–61.
- [28] SCHOUTEN S, HOPMANS E C, SCHEFUß E, et al. Distributional variations in marine crenarchaeotal membrane lipids: a new tool for reconstructing ancient sea water temperatures [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2002, 204(1): 265–274.
- [29] KIM J H, SCHOUTEN S, HOPMANS E C, et al. Global sediment core-top calibration of the TEX₈₆ paleothermometer in the ocean [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2008, 72(4): 1154–1173.
- [30] JIA G, RAO Z, ZHANG J, et al. Tetraether biomarker records from a loess-paleosol sequence in the western Chinese Loess Plateau [J]. Front Microbiol, 2013, 4: 199–207.
- [31] HUGUET A, FOSSE C, LAGGOUN-DÉFARGE F, et al. Occurrence and distribution of glycerol dialkyl glycerol tetraethers in a French peat bog [J]. Organic Geochemistry, 2010, 41(6): 559–572.
- [32] 李婧婧, 谢树成. 微生物四醚膜脂化合物在湖泊环境中的研究进展 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2015, 34(2): 277–284.
- [33] 张佳皓, 黄钰莹, 王灿发, 等. 湖北清江和尚洞石笋 GDGTs 来源: 5,6-甲基支链 GDGTs 和 brGMGTs 新证据 [J]. 第四纪研究, 2020, 40(4): 992–1007.
- [34] 耿慧霞, 于仁成, 颜天, 等. 应用甾醇类生物标志物追踪绿潮后期漂浮绿藻沉降区的方法 [J]. 海洋与湖沼, 2018, 49(5): 1094–1102.
- [35] VOLKMAN J K. A review of sterol markers for marine and terrigenous organic matter [J]. Organic Geochemistry, 1986, 9(2): 83–99.
- [36] CARREIRA R S, WAGENER A L R, READMAN J W. Sterols as markers of sewage contamination in a tropical urban estuary (Guanabara Bay, Brazil): space-time variations [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2004, 60(4): 587–598.
- [37] KAZUKO O, TSUTOMU M, HIDESHIGE T. Diagenesis of biomarkers in Biwa Lake sediments over 1 million years [J]. Organic Geochemistry, 1990, 16(4/5/6): 805–813.
- [38] CHENG W, KIMPE L E, MALLORY M L, et al. An ~ 1 100 yr record of human and seabird occupation in the High Arctic inferred from pond sediments [J]. Geology, 2020, 49(5): 510–514.
- [39] LIU J Z, AN Z S. Leaf wax *n*-alkane carbon isotope values vary among major terrestrial plant groups: Different responses to precipitation amount and temperature, and implications for paleoenvironmental reconstruction [J]. Earth-Science Reviews, 2020, 202: 103081–103090.
- [40] BRAY E E, EVANS E D. Distribution of *n*-paraffins as a clue to recognition of source beds [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1961, 22(1): 2–15.
- [41] CRANWELL P A. Chain-length distribution of *n*-alkanes from lake sediments in relation to post-glacial environmental change [J]. Freshwater Biology, 1973, 3: 259–265.
- [42] HE Y, ZHENG Y, PAN A, et al. Biomarker-based reconstructions of Holocene lake-level changes at Lake Gahai on the northeastern Tibetan Plateau [J]. The Holocene, 2014, 24(4): 405–412.
- [43] XUE J, DANG X, TANG C, et al. Fidelity of plant-wax molecular and carbon isotope ratios in a Holocene paleosol sequence from the Chinese Loess Plateau [J]. Organic Geochemistry, 2016, 101: 176–183.
- [44] HEDGES J I, MANN D C. The lignin geochemistry of marine sediments from the southern Washington coast [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1979, 43(11): 1809–1818.
- [45] KOROSI J B, THIENPONT J R, PISARIC M F, et al. Broad-scale lake expansion and flooding inundates essential wood bison habitat [J]. Nat Commun, 2017, 8: 14510–14523.
- [46] 刘晓杰, 季银利, 向荣, 等. 东海内陆架岩心中木质素的沉积记录 [J]. 沉积学报, 2022, 40(2): 525–533.
- [47] HEIDKE I, SCHOLZ D, HOFFMANN T. Lignin oxidation products as a potential proxy for vegetation and environmental changes in speleothems and cave drip water—a first record from the Herbslabrynth, central Germany [J]. Climate of the Past, 2019, 15(3): 1025–1037.
- [48] SOMA Y, TANAKA A, SOMA M. Composition and vertical profiles of photosynthetic pigments in the sediment of Lake Kasumigaura [J]. Geochemical Journal, 1995, 29(2): 107–113.
- [49] TÖNNO I, NAUTS K, BELLE S, et al. Holocene shifts in the primary producer community of large, shallow European Lake Peipsi, inferred from sediment pigment analysis [J]. Journal of Paleolimnology, 2019, 61(4): 403–417.

本栏目编辑 姚朝英

启 事

本刊已加入《中国学术期刊(光盘版)》、万方数据-数字化期刊群、重庆维普中文科技期刊数据库,凡被录用的稿件将同时在相关数据库产品中进行网络出版或提供信息服务,其作者著作权使用费与本刊稿酬一并支付。如作者不同意将文章编入数据库,请在来稿中注明,本刊将做适当处理。