矿物岩石地球化学通报
Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry
Vol. 35 No. 4, July, 2016

青藏高原气候演变的湖相沉积有机地球化学记录
——以兹格塘错为例

金传芳[1,2], 李世杰[2,3], 陈炜[4], 曹长群[1]

1. 中国科学院 南京地质古生物研究所, 现代古生物学和地层学国家重点实验室, 南京 210008; 2. 中国科学院 南京地理与湖泊研究所, 湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008; 3. 中国科学院 地球化学研究所, 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081; 4. 中国科学院 南京地质古生物研究所, 中国科学院 资源地层学与古地理学重点实验室, 南京 210008

摘　要: 为探究青藏高原全新世夏季风最强、气候最湿润阶段这一争论议题,本文应用气相色谱仪(GC-FID)和气相色谱-高温热转变-同位素比值质谱仪(GC-TC-IRMS),分析了兹格塘错沉积岩心正构烷烃及其氢同位素特征。结果表明,兹格塘错岩心中主要以 n-$C_{15/16/17}$ 为主峰碳的短链正构烷烃占据主导地位,指示了湖泊自生浮游藻类与菌类等低等生物对湖泊沉积岩心中的有机质贡献高于大型水生植物和陆生高等植物表皮蜡质所产生的有机质。基于正构烷烃参数(如: 碳优势指数 CPI 值和平均碳链长度 ACL 值)及单体氢同位素比值在时间序列上的变化特征,指出兹格塘错流域的气候湿润期处于中全新世(5.8 ~ 2.7 cal ka BP),明显滞后于早全新世的太阳辐射最强期,这主要归结于该流域冰川融水补给的匮乏及局地环流的影响。

关　键　词: 正构烷烃; 单体氢同位素; 古气候; 湖相沉积物; 兹格塘错; 青藏高原

中图分类号: X142　　**文章编号:** 1007-2802(2016)04-0625-09　**doi:** 10.3969/j.issn.1007-2802.2016.04.003

Climate Changes on the Tibetan Plateau Inferred from Organic Geochemistry Records in Lake Sediments—A Case of Lake Zigetang Co

JIN Chuan-fang[1,2], LI Shi-jie[2,3], CHEN Wei[4], CAO Chang-qun[1]

1. *State Key Laboratory of Palaeobiology and Stratigraphy, Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing* 210008, *China*; 2. *State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing* 210008, *China*; 3. *State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang* 550081, *China*; 4. *Key Laboratory of Economic Stratigraphy and Palaeogeography, Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing* 210008, *China*

Abstract: In order to discuss which period was the strongest summer monsoon and the wetter conditions observed during the Holocene on the Tibetan Plateau, n-Alkanes and compound-specific hydrogen isotopes in sediments of Lake Zigetang Co were analyzed using gas chromatography(GC-FID) and gas chromatography-thermal conversion-isotope ratio mass spectrometry(GC-TC-IRMS). The results indicated that short chain n-alkanes C_{15}, C_{16} and C_{17}, which probably derived from aquatic algae, plankton and photosynthetic bacteria, dominated the n-alkane composition in lacustrine sediments of Lake Zigetang Co. The variation of n-alkane indicator ratios(e.g. ACL and CPI values) and δD values revealed that higher effective moisture availability at Lake Zigetang Co occurred in the middle Holocene(5.8 – 2.7 cal ka BP) that much later after the insolation maximum. This might be attributed to the absence of glacial meltwaters and local recycling of air masses in the catchment of Lake Zigetang Co.

Key words: n-alkanes; individual hydrogen isotopes; palaeoclimate; lake sediments; Lake Zigetang Co; Tibetan Plateau

湖泊沉积具有沉积连续、分辨率高、信息量丰富、剖面保存完整等特点,尤其是干旱、半干旱地区的封闭型湖泊沉积,在全球变化与区域响应方面具有不可替代的优势(沈吉等,2010)。早期湖泊沉积

收稿日期: 2016-05-05 收到,2016-06-23 改回
基金项目: 中国科学院战略性科技先导专项(XDA05120301)
第一作者简介: 金传芳(1982 –),女,博士后,研究方向: 湖泊沉积与环境演变、生物地球化学. E-mail: jinchuanfang@126.com.

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

气候变化的研究定量化程度不高，多采用一些常规的环境指标（如粒度、磁化率、元素、花粉等），定性地描述地质时期气候的冷暖与干湿变化（王苏民和张振克，1999；沈吉，2012）。近年来，逐渐兴起的分子化石指标，如生物标志化合物及其单体氢同位素在恢复古温度、古植被、古降水等方面具有较好的应用前景，逐步成为过去全球变化研究的重要手段之一（张杰和贾国东，2001；Huang *et al.*，2002；Zhang *et al.*，2004；郑艳红等，2005；Hu *et al.*，2014）。

正构烷烃是地质体中分布最广泛的类脂生物标志化合物之一，广泛存在于细菌与藻类（Han and Calvin，1969；Meyers，2003）、大型水生植物（Cranwell *et al.*，1987；Ficken *et al.*，2000）及高等植物（Eglinton and Haminlton，1967；Rielley *et al.*，1991）等生物体中。作为其生物母体气候变化响应的信息载体，正构烷烃饱和的分子结构特点与稳定性可以真实地还原气候、环境的变化过程（Schefuß *et al.*，2003；郑艳红等，2005）。20 世纪 90 年代末，随着色谱/热转化/同位素质谱仪（GC-TC-IRMS）分析技术用于单体脂类有机化合物氢同位素分析，使有机质氢同位素研究进入了分子水平。类脂化合物的单体氢同位素组成对突发性气候事件高度敏感，反映了生物合成时利用的水源的氢同位素组成和一些与水循环有关的有机地球化学信息，可以定量重建过去的温度、湿度、大气降水同位素的变化（Liu and Huang，2005；Hou *et al.*，2007）。

青藏高原是研究亚洲季风气候时空特征及其变化过程的关键地区之一。然而，针对高原全新世夏季风最强、气候最湿润阶段这一议题，古气候学界一直存在争议，需要在对古气候变化敏感的区域建立可靠的记录进一步加以讨论地处藏北高原的兹格塘错流域内无冰川活动且不受人类活动的直接影响，湖泊沉积记录能够敏感地反映气候环境的变化。笔者主要借助于色谱-质谱联用技术，对其沉积岩心中的生物标志化合物的分布特征及其单体氢同位素的组成进行了系统的研究和总结，探索了生物标志化合物在湖泊系统中的产生、运移及埋藏储存的过程及其气候环境指示意义。此外，基于正构烷烃及其氢同位素在时间序列上的变化特征，阐明了晚冰期以来该流域有效湿度的演变特征。这对理解青藏高原地区生态环境和古气候变化的空间差异具有十分重要的科学意义，为高原气候系统的研究开拓了新的思路。

1 材料与方法

1.1 样品采集与定年

兹格塘错（32°00′～32°09′N，90°44′～90°57′E）地处藏北高原腹地、唐古拉山南坡东巧盆地内，是一个典型的高原封闭型湖泊（图 1a），其主要自然环境特征列于表 1。流域内没有冰川分布，湖泊补给主要依靠大气降水，水体的扩张与收缩能够直接反映西南季风的变化。2012 年 7 月，借助于奥地利 UWTEC 水上平台，利用活塞采样器在兹格塘错湖心水深 30 m 处钻取 8.8 m 长的无扰动的连续沉积岩心（图 1b）。采集后的岩心柱保存在 PVC 管中运回中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室进行分样，整根岩心以 1 cm 间隔分样，所获样品放至冰箱冷藏以待分析测试。

根据岩心剖面沉积物类型变化特征，选取 13 个不同深度有机碳同位素样品进行 AMS^{14}C 定年，年代测试工作在美国迈阿密 Beta 实验室完成。样品所获得的^{14}C 年代结果与其深度线性相关非常明显（图

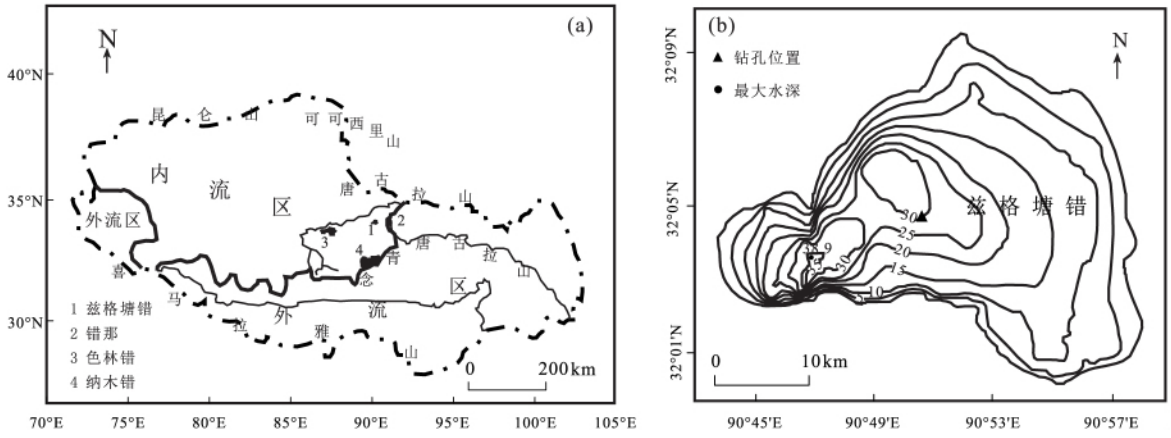


图 1 兹格塘错相对地理位置（a）和采样点分布图（b）

Fig. 1 Geographic location of Lake Zigetang Co（a）and sampling sites within Lake Zigetang Co（b）

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表1 兹格塘错气候环境特征一览表

Table 1 General geographical, climatological and limnological properties of Lake Zigetang Co

地理位置	32°05′N, 90°55′E
湖面海拔/m a. s. l.	4561
湖面面积/km^2	191.4
流域面积/km^2	3430.2
湖面/流域面积比	1∶19.8
最大水深/m	38.9
pH	9.9
盐度/(g/L)	41.1
湖泊类型	封闭性咸水湖
气候类型	高寒干旱半干旱
土壤类型	高山草原土
植被类型	高寒草原
湖泊补给类型	大气降水

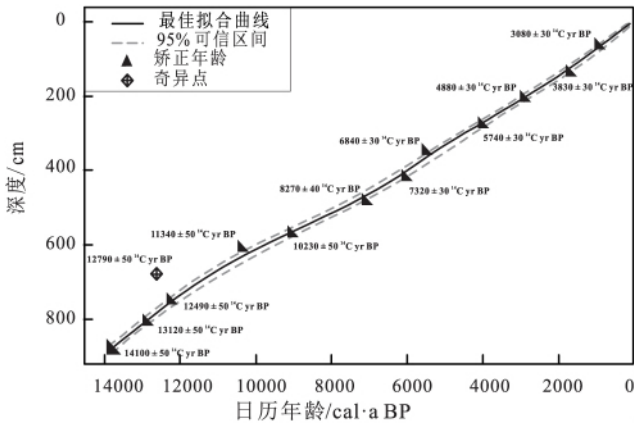


图2 兹格塘错沉积岩心深度-年代模型图

Fig. 2 Age-depth model for sediment core from Lake Zigetang Co(in calibrated years BP)

2),揭示兹格塘错沉积速率变化不大,沉积环境较为稳定。笔者将沉积岩心0~2 cm处的表层沉积物的^{14}C年龄(2060±50年)作为碳库效应对所测样品的^{14}C年龄进行修正。运用R软件中平滑曲线功能,将得到的测年结果矫正为日历年龄后并进行一定程度的平滑(平滑系数为0.3),而后建立了兹格塘错年代序列(图2)。图中的实线表示所测样品经模型矫正后的日历年龄的最佳拟合曲线,虚线表示95%可信度区间的年龄值。为了遵循沉积岩心年代下老上新的逻辑性,基于Bpeat软件的指导规则(Blaauw and Christen, 2005; Blaauw, 2010),679.5 cm处的样品测年结果作为奇异点去除。从兹格塘错的年代模型可以看出,该湖泊的沉积记录可追溯至13.8 cal ka BP,平均沉积速率为0.8 mm/a。这一沉积速率与运用^{210}Pb、^{137}Cs所测定的近代沉积速率0.77 mm/a基本吻合(Yao *et al.*,2008)。

1.2 正构烷烃组分萃取与气相色谱分析

样品分析在德国马普生物地球化学研究所完成。取约2 g岩心样品经冷冻干燥和研磨后,利用加速溶剂萃取仪(ASE-200,DIONEX Corp.,Sunnyvale,USA)在100℃及1.38×10^4 KPa压力条件下提取其中的可溶性有机质,循环2次,每次静态萃取15 min,溶剂为二氯甲烷和甲醇混合液(体积比9∶1)。抽提液通过硅胶柱洗脱分离,依次用正己烷、二氯甲烷与甲醇混合液(体积比1∶1)和甲醇进行洗脱,分别得到正构烷烃、芳烃和极性组分。

将分离好的正构烷烃组分通过气相色谱仪(GC-FID)进行测试分析。该仪器为美国Agilent Technologies公司生产,型号是Hewlett-Packard 7890。色谱条件:采用氢火焰离子检测器(FID),所用石英毛细管柱为DB-1柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm),进样口温度为290℃,FID检测器温度为300℃,H_2流速40 mL/min,空气流速400 mL/min,分流比1∶10。载气为氦气,进样量为2 μL,升温程序如下:始温80℃,恒温2 min,以10℃/min升至140℃,恒温0.5 min,再以4℃/min升至290℃,终温恒温15 min。在相同GC参数条件下分析包含已知正构烷烃同族体分子的标准化合物Indiana STD(n-C_{15}~n-C_{33}),通过与标样的保留时间的对照来确定样品各碳数正构烷烃分子的峰位置,并对不同碳数峰面积的积分确定其含量。

1.3 正构烷烃单体氢同位素测定

正构烷烃单体氢同位素的测定是在气相色谱-同位素比值质谱仪(GC-TC-IRMS)上进行的。气相色谱型号和同位素质谱仪型号分别为Hewlett-Packard 7890(Agilent Technologies,Palo Alto USA)、Delta V Plus Isotope Ratio MS(Thermo Fisher Scientific,Bremen,Germany),中间的高温热解装置由GC-CIII连接。色谱柱型号、参数设置及进样量与GC-FID分析相同。单个化合物经气相色谱分离后依次进入热解装置,并在1450℃下定量分解转换为H_2进入质谱仪进行氢同位素组成的测定,结果转换成相对于V-SMOW校准的千分偏差(‰)。调节使H_3因子稳定,大约每10个样品测定一次H_3因子,以观察仪器的稳定性和保证数据的可靠性。每个样品的正构烷烃单体氢同位素至少测3次,取其平均值。每分析3个样品后测定一次已知同位素组成的标准物质(Indiana STD),以保证所测样品氢同位素数据的准确性。沉积物样品中所有化合物测定的平均

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

标准偏差优于10‰，标准混合物所有化合物测定的平均标准偏差优于5‰。

2 结果与讨论

2.1 岩心正构烷烃分子特征及有机质来源

兹格塘错岩心大部分样品正构烷烃碳数分布范围为 n-C_{15} ~ n-C_{33}，呈单峰型分布，主峰碳为 $C_{15/16/17}$，且长链正构烷烃（链长大于21的正构烷烃）具有显著的奇碳数优势（图3），表明该湖泊的有机质主要源自于浮游藻类及光合细菌等低等生物。这一现象与该湖泊的水环境特征有着密切的关系。近年来，李世杰研究团队多次对兹格塘错进行实地考察，发现该湖泊为半混合型湖泊（李万春，2001），其特征主要表现为：湖上层为混合层，水体交换较为强烈，混合较为均匀，盐度较低，溶解氧较为丰富，且变化不大；湖下层为永滞层，厌氧，温度多相对稳定，盐度也比湖上层高；介于二者之间的为温跃层和化跃层，随着深度的增加，盐度和密度加大，且溶解氧急剧减少。显然，此类盐度较高且以厌氧为主的湖泊环境更加利于浮游藻类的增长和厌氧细菌的繁殖，对大型水生植物的生长反而不利。Wu等（2007）通过对兹格塘错湖泊沉积物总碳（TC）、总有机碳（TOC）、总氮（TN）、有机碳与总氮比值（TOC/TN）及有机质的碳同位素（$^{13}C_{org}$）的综合分析，结果表明，兹格塘错湖泊沉积物有机质亦以湖泊藻类为主，陆源有机质的贡献量不大，且难以区分。综合其他研究成果发现，这些复杂的微生物群落同样广泛存在于其他类似于兹格塘错湖泊环境的湖泊生态系统中，譬如，澳大利亚众多盐湖中发育有大量的底栖微生物（Bauld，1986）；大批的细菌与纤毛虫群落在印度中部的盐湖中得以生存与繁殖（Sarkar *et al.*，2014）；太平洋圣诞岛上的湖泊沉积物中检测出蓝藻的分布较为密集（Sachse and Sachs，2008）。

2.2 正构烷烃氢同位素比值特征及气候指示意义

由于岩心底部部分沉积物样品正规构烷烃含量整体上较低，低于仪器检测底限而缺少氢同位素值（13.8 ~ 12.6 cal ka BP），同时浓度极低的中等链长的正构烷烃导致该岩心中大部分样品检测出的 n-C_{23} 及 n-C_{25} 氢同位素比值误差较大，数据可信度较低。因此，笔者不对其进行深入的讨论，仅选择对兹格塘错湖泊沉积岩心正构烷烃总量贡献较大的短链正构烷烃 n-C_{15} 与 n-C_{17} 以及源于陆生高等植物的长链正构烷烃 n-C_{29} 与 n-C_{31} 进行深入地剖析。

在整个年代序列上，正构烷烃 n-C_{15} 和 n-C_{17} 的δD值变化特征极为相似（图4），两者的相关系数为0.92（图5）。即：在12.6 ~ 10.9 cal ka BP和5.8 ~ 2.7 cal ka BP期间，δD值较为偏负，反映湖水的蒸发作用减弱，有效湿度增加；而在10.9 ~ 5.8 cal ka BP及 ~ 2.7 cal ka BP这2个时间段，δD值较

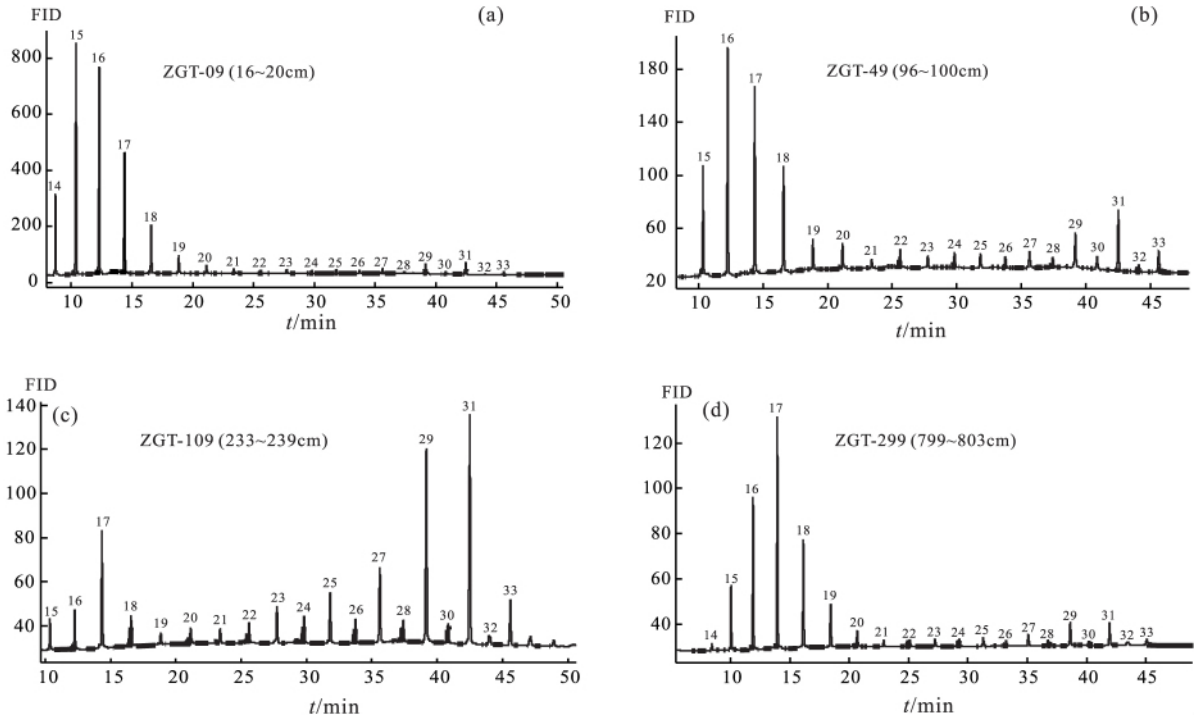


图3 兹格塘错湖泊沉积岩心典型样品正构烷烃气相色谱图

Fig. 3 Chromatogram of *n*-alkanes of typical samples from the lacustrine sediment in Lake Zigetang Co

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

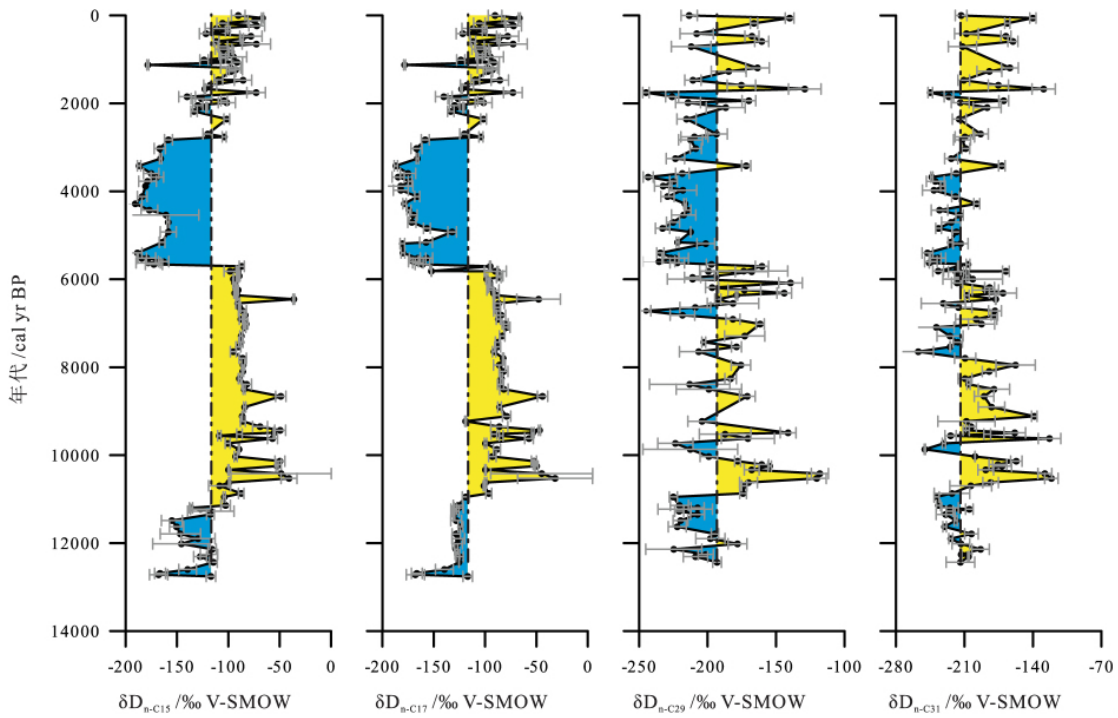


图4 兹格塘错湖泊沉积岩心中不同链长正构烷烃氢同位素比值随时间序列的变化

Fig. 4 Variation in δD values of different chain *n*-alkanes in lake sediments from Lake Zigetang Co

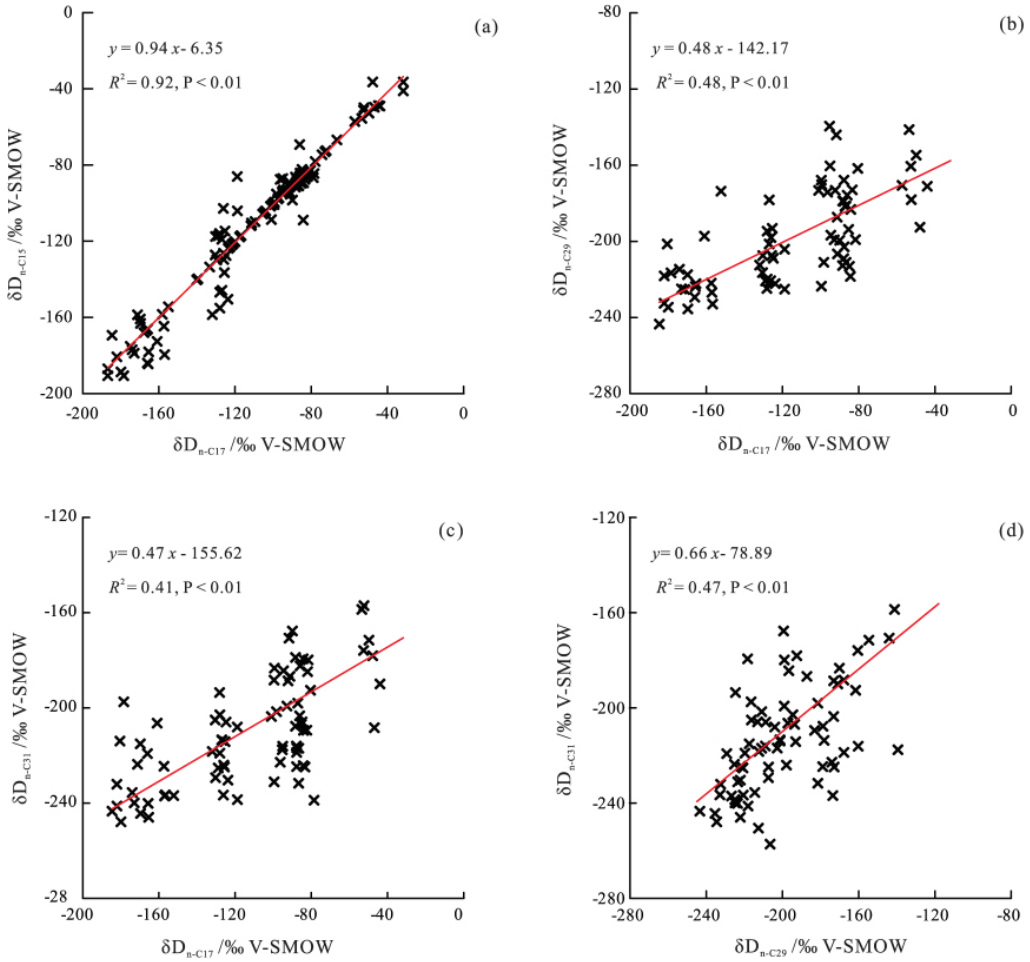


图5 兹格塘错湖泊沉积岩心中不同链长正构烷烃的δD值相关分析

Fig. 5 Correlation of δD values of different chain *n*-alkanes in lake sediments from Zigetang Co

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

为富集，揭示了温度较高，湖面蒸发较强，湖水浓缩，盐度升高，有效湿度较低。正构烷烃 n-C_{15} 和 n-C_{17} 的 δD 值在年代序列上极其相似的变化规律可能由于这两类正构烷烃同族体分子的生物来源比较相似。以 n-$C_{15/17}$ 为主峰碳的短链正构烷烃主要自于浮游藻类、光合细菌等低等生物，而氢同位素由湖水传递给这些微生物体所吸收的水分，并进而传递给其所生物合成的正构烷烃过程中，主要受生物因素的控制。另外，这两类微生物群落对外界环境变化的响应和对水分利用吸收途径等也基本趋于一致。

与短链正构烷烃相比，长链正构烷烃 n-C_{29} 和 n-C_{31} 的单体 δD 值更多地受制于当地的环境因素。在 12.6 ~ 10.9 cal ka BP 和 5.8 ~ 2.7 cal ka BP 期间，δD 值呈现偏负的态势，表明流域内水汽较多、湖水蒸发较弱，相对湿度较高；而在 10.9 ~ 5.8 cal ka BP及 ~ 2.7 cal ka BP之间，δD 值相比其他 2 个阶段总体上更为偏正，说明流域内蒸发旺盛，有效湿度显著降低，气候呈现逐步旱化的趋势。尤其在 10.9 ~ 5.8 cal ka BP期间，正构烷烃 n-C_{29} 的 δD 值变化幅度较大，体现出不稳定的特征，说明早全新世的气候波动较大。这一气候特征在青藏高原其他湖泊沉积记录中也有所反映（Gasse *et al.*，1991；Shen *et al.*，2005）。

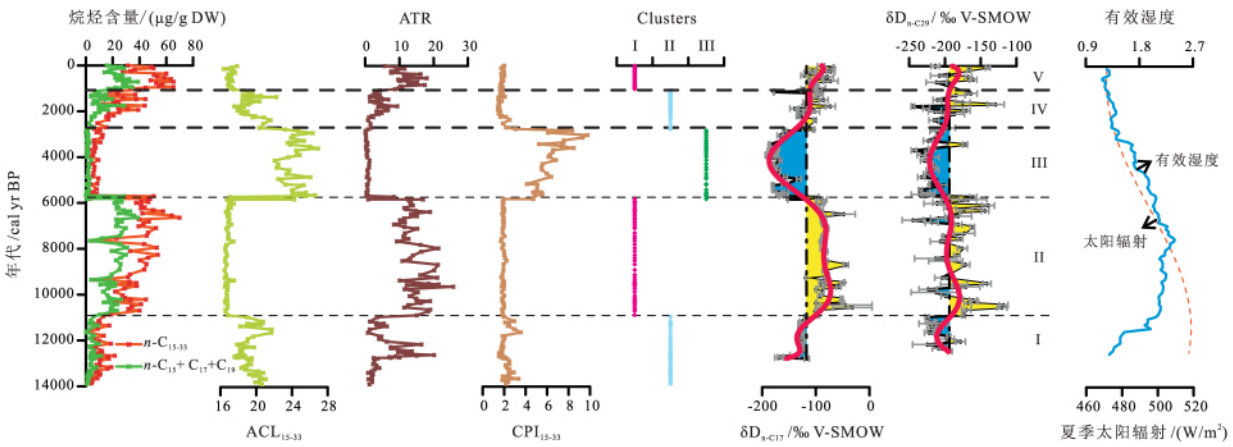
2.3 晚冰期以来流域气候环境演变特征及驱动机制

分子有机地球化学研究表明，湖泊沉积物不同生物起源的正构烷烃在运移和沉积过程中较大程度地保留了原有的分子结构及生物遗存特征（Meyers and Ishiwatari，1993）。而且，在活的生物体中，正构烷烃对气候环境变化反映比较敏感，后者微弱的变化便会引起正构烷烃分布特征、组成及含量的变化（郑艳红等，2005）。因此，湖泊沉积物中的正构烷烃除记录有物源信息以外还有丰富的气候环境变化信息。正构烷烃相关参数作为半定量化指标可以揭示其有机质来源及地质时期气候变化。例如，湖泊内、外源优势比 ATR 值已被越来越多地用于鉴别有机质的来源，同时，它也可作为一个有效的气候信号记录了区域的环境信息（Herzschuh *et al.*，2005）。ATR 值越高，表明气候相对较为湿润；ATR 值降低，则指示较为干冷的气候环境。地处高原寒冷气候区的湖泊，气温应该是影响生物生长的主导因素，碳优势指数 CPI 值一定程度上可以反映温度的变化，即：在较冷的气候条件下，CPI 值升高；在较为温暖的情况下，CPI 值则呈现下降的趋势（Pu *et al.*，2010）。此外，正构烷烃氢同位素比值（δD）受环境条件和生物化学过程的影响，具有记录氢同位素组成的潜能，对古气候/古环境重建起着至关重要的作用（Seki *et al.*，2010）。陆生高等植物来源长链正构烷烃的 δD 值（如 n-C_{29}）可能记录了大气降水的氢同位素组成，可以反映源区降水变化特征，主要受当地气温、降水量、相对湿度等气候条件控制（Guenther *et al.*，2013）；而代表水生生物来源的正构烷烃氢同位素比值（如：n-C_{17}）记录了湖水的氢同位素组成，间接反映流域的生态环境，如：有效湿度、植被类型等（Pagani *et al.*，2006）。在明确兹格塘错沉积岩心年代及各代用指标的气候环境指示意义后，将各指标进行综合对比分析研究，精细地揭示了该流域 13.8 ka cal BP（晚冰期）以来的气候环境变化特征，主要将其划分为以下 5 个阶段（图 6）：

第Ⅰ阶段 13.8 ~ 10.9 cal ka BP（8.8 ~ 6.9 m）：该阶段处于冰期阶段的晚期。较低的 ATR 值可以推断该时期的气候环境以寒冷为主。显然，寒冷的气候环境不利于浮游藻类的生长和细菌的繁殖，故短链正构烷烃的含量较低。不稳定的沉积环境也可能导致正构烷烃的含量偏低。另外，干冷的气候条件也不利于植被的发育。正构烷烃 n-C_{17} 及 n-C_{29} 的氢同位素比值体现了较为偏负的特征。这一现象表明该流域湖面蒸发较为微弱，流域内植物蒸腾并不旺盛，从而导致可利用的有效湿度颇丰。

第Ⅱ阶段 10.9 ~ 5.8 cal ka BP（6.9 ~ 3.9 m）：该阶段属于早中全新世。与前一阶段相比，短链正构烷烃含量大幅度增长，这主要得益于早全新世温暖的气候条件使得厌氧微生物大量地分解有机质。同样，较低的 ACL 值与较高的 ATR 值指示了该区域相对较为温暖的气候环境。然而，正构烷烃丰度大约在 9.3 cal ka BP和 7.6 cal ka BP急剧下降，参照其他资料对比分析（如：孢粉、介形虫等），该阶段属于特殊冷事件（Herzschuh *et al.*，2006；张宏亮等，2014）。同样，全新世早期强烈的气候波动在青藏高原其他湖泊沉积记录中也有所体现（Gasse *et al.*，1991；Shen *et al.*，2005），究其原因还尚未清晰，有待进一步探索。进入早全新世后，随着太阳辐射强度的增大（图 6），气温逐渐升高，湖面蒸发愈发强烈，从而导致正构烷烃 n-C_{17} 的 δD 值较上一阶段明显增高。同时，具有记录源区大气降水潜能的正构烷烃 n-C_{29} 的 δD 值也存在一定程度的提升，但变化幅度较大，表明该时期气候较为干燥，但波动较大。这一现象得到了孢粉结果的验证，Herzschuh 等

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



图中红色的实线代表 δD 值在时间序列上的大致变化趋势,误差线即为 δD 值的标准差,代表其变化幅度

图 6 兹格塘错湖泊岩心正构烷烃总量(n-C_{15-33})与短链正构烷烃含量(n-C_{15} + n-C_{17} + n-C_{19})、正构烷烃参数(ACL、ATR 和 CPI 值)、正构烷烃分布模式以及单体氢同位素在时间序列上的变化、中亚季风区的有效湿度变化曲线(据 Herzschuh,2006)、北纬 32°地区夏季太阳辐射强度的变化曲线(据 Berger and Loutre,1991)

Fig. 6 Total amounts of n-alkanes (n-C_{15} + n-C_{17} + n-C_{19} and n-C_{15-33}), n-alkane indicator ratios (ACL, ATR and CPI values), variations in distribution of cluster Ⅰ to Ⅲ, and hydrogen isotope values (δD) of n-C_{17} and n-C_{29} of Zigetang Co record. The curve of effective moisture in the monsoonal Central Asia (after Herzschuh, 2006) and the solar insolation at 32°N in June (after Berger and Loutre, 1991) are shown as well

(2006)指出全新世早期气候整体上呈现干旱化的趋势,但同时具有不稳定的特征。由于受太阳活动的影响,全新世早期西南季风增强,降水增加的同时温度也在升高,从而导致流域内的蒸发量增大。相比其毗邻的冰川融水补给类型的湖泊如纳木错(Mügler *et al.*,2010; Günther *et al.*,2015)、色林错(Gu *et al.*,1993)及帕鲁错(Bird *et al.*,2014),由于兹格塘错流域内没有冰川分布,缺乏冰川融水补给,湖泊主要依靠大气降水补给,随着气温的升高,湖区蒸发愈发强烈,其强度可能超越西南季风所带来的降水。因此,记录湖水氢同位素组成的正构烷烃 n-C_{17}的 δD 值偏正,进而反映兹格塘错流域该时期可以利用的有效湿度较低。

第Ⅲ阶段 5.8 ~ 2.7 cal ka BP(3.9 ~ 2.0 m):该阶段属于中晚全新世,是兹格塘错地区最为湿润的时期。短链正构烷烃的含量降至最低,指示湖中菌、藻类等低等生物发育程度较低。CPI 值显著提高,ATR 值则降至最低,表明该时段的气候以湿润为主要特征。温湿的气候条件使得源于陆生高等植物的长链正构烷烃对湖泊沉积物中的有机质含量的贡献有所增加,与该流域孢粉指示结果相一致。Herzschuh 等(2006)指出 5000 cal a BP 左右,兹格塘错流域湿生草本植物莎草 *Cyperaceae* 含量显著增加。正构烷烃 n-C_{17}和 n-C_{29}的 δD 值均处于整个全新世的低值段,揭示该流域气候较为湿润,湖泊可能处于高水位期。这是由于太阳辐射减弱,气温逐渐降低,相应地湖面蒸发量减少,从而导致湖水的 δD 值降低,并在湖泊沉积岩心的生物有机体中记录下来。Yao 等(2013)通过对青藏高原 $\delta^{18}O$ 值的分布特征,将青藏高原划分为季风区、过渡区和西风区等 3 个区。据此,兹格塘错流域处于过渡地带,受来自印度洋西南季风控制的同时,从某种程度上来讲,西风带对该地区的气候环境也有一定的影响。特别是在中全新世以后,随着太阳辐射的减弱,亚洲季风开始衰退,西风影响的范围逐步扩大,也可能给该流域带来充裕的降水。兹格塘错湖泊沉积岩心中的碳酸盐与可溶性盐的低值记录亦指示了该时段湖泊水位上升,水体扩张,水质淡化,水体矿化度低,气候相对较为湿润(李世杰等,2009)。同样,对兹格塘错湖区孢粉指标的分析结果表明,7.3 ~ 4.4 cal ka BP期间兹格塘错地区的植被的优势种为草原植被,进一步证实该流域在这一时期的水汽较为充足,湿度较大(Herzschuh *et al.*,2006)。

第Ⅳ阶段 2.7 ~ 1.1 cal ka BP(2.0 ~ 0.8 m):该阶段属于晚全新世。短链正构烷烃含量由此前的低值阶段再次大幅度增长,导致其 CPI 及 ACL 值再度降低,表明此阶段的湖泊浮游藻类迅猛增长、细菌加速繁殖,湖泊生产力逐渐提升。此阶段的 ATR 值较上一阶段显著提高,反映了该区由前期的

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

较为湿润逐渐变得干旱。降水的减少加剧了湖面的蒸发，导致湖水盐度升高，从而减少生物有机体细胞内的结合水与外界水体的交换，使得结合水频繁地在细胞内循环，导致氢同位素大量富集并记录在脂类化合物中（如源于浮游菌、藻类的正构烷烃 n-C_{17} 的 δD 值明显偏正）。此阶段正构烷烃 n-C_{29} 的 δD 值波动较大，但整体上呈现偏正的态势，反映气候尽管存在一定程度的波动，总体则较为偏干，降水减少，湖泊蒸发增强，湖泊水位降低，水体盐度开始增加。

第Ⅳ阶段 1.1 ~ 0 cal ka BP（0.8 ~ 0 m）：伴随着短链正构烷烃含量进一步增长，兹格塘错湖泊 ATR 值逐渐升高，ACL 值呈逐渐降低的态势，反映了湖区相对暖干的气候特征。从某种程度上来讲，可能受中世纪暖期的影响，加之兹格塘错流域内无冰川分布，气温升高没有增加冰川融水补给，蒸发变强所致。由正构烷烃 n-C_{29} 的 δD 值的变化特征可以判断该时段的气候总体上较为偏干但是会出现间隙性的湿润期。这主要是因为夏季风的逐渐减弱，降水逐渐减少，水汽输入减小，导致流域内的有效湿度降低，湖泊水位下降。其中，短暂的湿润期可能对应小冰期阶段。张宏亮等（2014）通过兹格塘错湖泊沉积岩心中的介形虫 $\delta^{18}O$ 同位素分析表明，该流域 1.0 cal ka BP 以来 $\delta^{18}O$ 比值较高，湖泊水位下降，大约在 0.5 cal ka BP 时期，$\delta^{18}O$ 值开始降低，湖泊水位开始上升，对应于小冰期时的气候特征。

3 结论

兹格塘错沉积岩心有机地球化学记录初步显示，正构烷烃分子分布特征及其参数（如：ACL、CPI 及 ATR 值）与气候的变化密切相关。此外，正构烷烃单体氢同位素亦清晰地记录了有效湿度的变化，具有很好的古气候、古环境意义。

参考文献（References）：

Bauld J. 1986. Benthic microbial communities of Australian saline lakes. In: De Deckker P, Williams W D, eds. Limnology in Australia. Netherlands: Springer, 96 – 111

Berger A, Loutre M F. 1991. Insolation values for the climate of the last 10 million years. Quaternary Science Reviews, 10(4): 297 – 317

Blaauw M, Christen J A. 2005. Radiocarbon peat chronologies and environmental change. Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics), 54(4): 805 – 816

Blaauw M. 2010. Methods and code for 'classical' age-modelling of radiocarbon sequences. Quaternary Geochronology, 5(5): 512 – 518

Cranwell P A, Eglinton G, Robinson N. 1987. Lipids of aquatic organisms as potential contributors to lacustrine sediments – Ⅱ. Organic Geochemistry, 11(6): 513 – 527

Eglinton G, Hamilton R J. 1967. Leaf epicuticular waxes. Science, 156(3780): 1322 – 1335

Ficken K J, Li B, Swain D L, Eglinton G. 2000. An n-alkane proxy for the sedimentary input of submerged/floating freshwater aquatic macrophytes. Organic Geochemistry, 31(7 – 8): 745 – 749

Gasse F, Arnold M, Fontes J C, Fort M, Gibert E, Huc A, Li B F, Li Y F, Liu Q, Melieres F, Van Campo E, Wang F B, Zhang Q S. 1991. A 13,000 – year climate record from western Tibet. Nature, 353(6346): 742 – 745

Gu Z Y, Liu J Q, Yuan B Y, Liu D S, Liu R M, Liu Y, Yaskawa K. 1993. Monsoon variations of the Qinghai-Xizang Plateau during the last 12,000 years— Geochemical evidence from the sediments in the Siling Lake. Chinese Science Bulletin, 38(7): 577 – 581

Guenther F, Aichner B, Siegwolf R, Xu B Q, Yao T D, Gleixner G. 2013. A synthesis of hydrogen isotope variability and its hydrological significance at the Qinghai-Tibetan Plateau. Quaternary International, 313 – 314: 3 – 16

Günther F, Witt R, Schouten S, Mäusbacher R, Daut G, Zhu L P, Xu B Q, Yao T D, Gleixner G. 2015. Quaternary ecological responses and impacts of the Indian Ocean Summer Monsoon at Nam Co, Southern Tibetan Plateau. Quaternary Science Reviews, 112: 66 – 77

Han J, Calvin M. 1969. Hydrocarbon distribution of algae and bacteria, and microbiological activity in sediments. Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America, 64(2): 436 – 443

Herzschuh U, Zhang C J, Mischke S, Herzschuh R, Mohammadi F, Mingram B, Kürschner H, Riedel F. 2005. A late quaternary lake record from the Qilian Mountains (NW China): Evolution of the primary production and the water depth reconstructed from macrofossil, pollen, biomarker, and isotope data. Global and Planetary Change, 46(1 – 4): 361 – 379

Herzschuh U. 2006. Palaeo-moisture evolution in monsoonal Central Asia during the last 50,000 years. Quaternary Science Reviews, 25(1 – 2): 163 – 178

Herzschuh U, Winter K, Wünnemann B, Li S J. 2006. A general cooling trend on the central Tibetan Plateau throughout the Holocene recorded by the Lake Zigetang pollen spectra. Quaternary International, 154 – 155: 113 – 121

Hou J Z, D'Andrea W J, MacDonald D, Huang Y S. 2007. Hydrogen isotopic variability in leaf waxes among terrestrial and aquatic plants around Blood Pond, Massachusetts (USA). Organic Geochemistry, 38(6): 977 – 984

Hu X, Zhu L P, Wang Y, Wang J B, Peng P, Ma Q F, Hu J F, Lin X. 2014. Climatic significance of n-alkanes and their compound-specific δD values from lake surface sediments on the Southwestern Tibetan Plateau. Chinese Science Bulletin, 59(24): 3022 – 3033

Huang Y S, Shuman B, Wang Y, Webb III T. 2002. Hydrogen isotope ratios of palmitic acid in lacustrine sediments record late Quaternary climate variations. Geology, 30(12): 1103 – 1106

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Liu W G, Huang Y S. 2005. Compound specific *D/H* ratios and molecular distributions of higher plant leaf waxes as novel paleoenvironmental indicators in the Chinese Loess Plateau. Organic Geochemistry, 36(6): 851 – 860

Meyers P A, Ishiwatari R. 1993. Lacustrine organic geochemistry — an overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments. Organic Geochemistry, 20(7): 867 – 900

Meyers P A. 2003. Applications of organic geochemistry to paleolimnological reconstructions: A summary of examples from the Laurentian Great Lakes. Organic Geochemistry, 34(2): 261 – 289

Mügler I, Gleixner G, Günther F, Mäusbacher R, Daut G, Schütt B, Berking J, Schwalb A, Schwark L, Xu B, Yao T, Zhu L, Yi C. 2010. A multi-proxy approach to reconstruct hydrological changes and Holocene climate development of Nam Co, Central Tibet. Journal of Paleolimnology, 43(4): 625 – 648

Pagani M, Pedentchouk N, Huber M, Sluijs A, Schouten S, Brinkhuis H, Damsté J S S, Dickens G R, the Expedition 302 Scientists. 2006. Arctic hydrology during global warming at the Palaeocene/Eocene thermal maximum. Nature, 442(7103): 671 – 675

Pu Y, Zhang H C, Lei G L, Chang F Q, Yang M S, Zhang W X, Lei Y B, Yang L Q, Pang Y Z. 2010. Climate variability recorded by *n*-alkanes of paleolake sediment in Qaidam Basin on the northeast Tibetan Plateau in late MIS 3. Science China Earth Sciences, 53(6): 863 – 870

Rielley G, Collier R J, Jones D M, Eglinton G. 1991. The biogeochemistry of Ellesmere Lake, U. K. – 1: Source correlation of leaf wax inputs to the sedimentary lipid record. Organic Geochemistry, 17(6): 901 – 912

Sachse D, Sachs J P. 2008. Inverse relationship between D/H fractionation in cyanobacterial lipids and salinity in Christmas Island saline ponds. Geochimica et Cosmochimica Acta, 72(3): 793 – 806

Sarkar S, Wilkes H, Prasad S, Brauer A, Riedel N, Stebich M, Basavaiah N, Sachse D. 2014. Spatial heterogeneity in lipid biomarker distributions in the catchment and sediments of a crater lake in central India. Organic Geochemistry, 66: 125 – 136

Schefuß E, Ratmeyer V, Stuut J B W, Jansen J H F, Sinninghe-Damsté J S. 2003. Carbon isotope analyses of *n*-alkanes in dust from the lower atmosphere over the central eastern Atlantic. Geochimica et Cosmochimica Acta, 67(10): 1757 – 1767

Seki O, Nakatsuka T, Shibata H, Kawamura K. 2010. A compound-specific *n*-alkanes $\delta^{13}C$ and δD approach for assessing source and delivery processes of terrestrial organic matter within a forested watershed in northern Japan. Geochimica et Cosmochimica Acta, 74(2): 599 – 613

Shen J, Liu X Q, Wang S M, Matsumoto R. 2005. Palaeoclimatic changes in the Qinghai Lake area during the last 18,000 years. Quaternary International, 136(1): 131 – 140

Wu Y H, Lücke A, Wünnemann B, Li S J, Wang S M. 2007. Holocene climate change in the Central Tibetan Plateau inferred by lacustrine sediment geochemical records. Science in China Series D: Earth Sciences, 50(10): 1548 – 1555

Yao S C, Li S J, Zhang H C. 2008. ^{210}Pb and ^{137}Cs dating of sediments from Zigetang Lake, Tibetan Plateau. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 278(1): 55 – 58

Yao T D, Masson-Delmotte V, Gao J, Yu W S, Yang X X, Risi C, Sturm C, Werner M, Zhao H B, He Y, Ren W, Tian L D, Shi C M, Hou S G. 2013. A review of climatic controls on $\delta^{18}O$ in precipitation over the Tibetan Plateau: Observations and simulations. Reviews of Geophysics, 51(4): 525 – 548

Zhang Z H, Zhao M X, Yang X D, Wang S M, Jiang X Z, Oldfield F, Eglinton G. 2004. A hydrocarbon biomarker record for the last 40 kyr of plant input to Lake Heqing, southwestern China. Organic Geochemistry, 35(5): 595 – 613

李世杰, Wünnemann B, 夏威岚, 于守兵, 沈德福, 姜永见. 2009. 青藏高原兹格塘错沉积记录的全新世水位变化事件及其原因初步研究. 地学前缘, 16(6): 162 – 167

李万春. 2001. 青藏高原湖泊现代过程研究: 以兹格塘错为例. 博士学位论文. 南京: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 31 – 36

沈吉, 薛滨, 吴敬禄, 吴艳宏, 刘兴起, 羊向东, 刘健, 王苏民. 2010. 湖泊沉积与环境演化. 北京: 科学出版社, 13 – 19

沈吉. 2012. 末次盛冰期以来中国湖泊时空演变及驱动机制研究综述: 来自湖泊沉积的证据. 科学通报, 57(34): 3228 – 3242

王苏民, 张振克. 1999. 中国湖泊沉积与环境演变研究的新进展. 科学通报, 44(6): 579 – 587

张宏亮, 刘青利, 李世杰, 方相林, 张吉献, 李婷. 2014. 青藏高原兹格塘错沉积物介形虫壳体同位素. 山地学报, 32(3): 373 – 379

张杰, 贾国东. 2001. 植物正构烷烃及其单体氢同位素在古环境研究中的应用. 地球科学进展, 24(8): 874 – 881

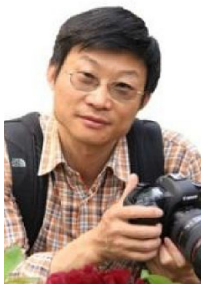
郑艳红, 程鹏, 周卫健. 2005. 正构烷烃及单体碳同位素的古植被与古气候意义. 海洋地质与第四纪地质, 25(1): 99 – 104

(本文责任编辑: 龚超颖)

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

专栏作者简介

陈敬安，中国科学院地球化学研究所副所长，研究员。长期从事湖泊与环境研究，先后主持国家自然科学基金重点项目1项、国家自然科学基金面上项目5项、国家科技支撑计划课题与贵州省科技攻关项目等课题多项。在国内外重要学术期刊上发表论文100余篇，其中SCI收录论文20余篇。科研成果获国家环境保护部环境保护科学技术一等奖1项，二等奖1项，曾获侯德封矿物岩石地球化学青年科学家奖，全球变化START青年科学家奖。



张成君，兰州大学教授、博士生导师。长期从事岩石地球化学、环境地球化学和有机地球化学教学和科研工作，先后主持、参与多项国家自然科学基金面上和重点项目。为中国质谱学会会员、甘肃省环境科学学会会员、《地质论评》编委。发表100多篇论文。获得教育部科技进步一等奖1项和甘肃省自然科学二等奖1项。

宋以龙，中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室在读硕士，主要研究方向为湖泊生物地球化学循环。

金传芳，中国科学院南京地质古生物研究所在站博士后，主要从事生物地球化学及古环境重建研究。

吴敬禄，中国科学院南京地理与湖泊研究所研究员，博士生导师，从事湖泊环境与同位素地球化学方面的研究。发表论文100余篇，其中SCI收录刊物发表论文40多篇。2006年获得“湖泊沉积与区域环境变化”国家自然科学二等奖。担任“Environmental Processes”、“干旱区研究”等国内外刊物编委。2003年以来为中国矿物岩石地球化学学会理事。

薛滨，中国科学院南京地理与湖泊研究所研究员，博士生导师，湖泊与环境国家重点实验室副主任。江苏省“333高层次人才培养工程”入选者，江苏省青联常委。长期从事湖泊环境相关的科研以及管理工作，先后主持科技部“973”课题2项、科技部基础性调查课题1项、国家自然科学基金4项、江苏省自然科学基金1项等，参与主持中国科学院方向项目、国家自然科学基金重点项目、国家水专项等课题研究多项，在一系列重要刊物上发表论文100余篇，合作主编专著6部。

李玲玲，中国科学院南京地理与湖泊研究所在读博士研究生。自然地理专业，研究方向为湖泊沉积物CH_4生物地球化学循环。主要从事湖泊沉积物中CH_4的产生、氧化及沉积物-水界面释放的研究，并探讨湖泊富营养化和全球变暖等对湖泊CH_4动态的影响。利用有机碳、CH_4及其碳同位素沉积记录，结合叶绿素等表征的湖泊初级生产力的碳输入，综合研究CH_4在湖泊碳循环中的重要性。

沈贝贝，2014年考入中国科学院南京地理与湖泊研究所，在读研究生，主要从事湖泊环境化学研究。

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net