

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.167>



青藏高原达则错沉积物有机碳同位素特征及古气候环境意义

李秀美^{1,2}, 范宝伟^{1,2}, 侯居峙³, 王明达⁴, 贺跃⁵

1. 信阳师范学院地理科学学院, 河南省水环境污染协同防治重点实验室, 豫南岩矿宝玉石鉴定及加工中心, 河南信阳 464000
2. 信阳市气候与环境演变重点实验室, 河南信阳 464000
3. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100101
4. 辽宁师范大学地理科学学院, 辽宁大连 116029
5. 河北地质大学地球科学学院, 河北石家庄 050031

摘要:通过对达则错沉积岩心有机质碳同位素($\delta^{13}\text{C}$)和碳氮比(C/N)的分析,结合岩心浮游生物记录、营养盐记录以及温度和降水记录,探讨了过去一千年达则错沉积物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 的气候环境指示意义.结果表明,达则错沉积物有机质主要以湖泊自生的水生生物碎屑混合物为主;过去一千年,达则错在受人类活动显著影响之前,气候变化是影响沉积物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 形成的主要因素,在1050~1200 AD和1450~1650 AD气候寒冷干燥时段有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著偏重,反之则相反;过去150年,湖泊沉积物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 显著偏重,主要受人类活动导致湖泊营养盐浓度变化影响.本研究还表明对于营养结构较为单一,且西藏拟溞为绝对优势动物物种的半对流型湖泊,应用C/N值判断湖泊有机质来源是不可靠的,需要综合湖泊地理背景谨慎判断.

关键词: C/N比值;有机碳同位素;气候变化;生态;达则错;青藏高原.

中图分类号: P532

文章编号: 1000-2383(2022)06-2275-12

收稿日期: 2021-07-02

Characteristics of Compositions of Organic Matter $\delta^{13}\text{C}$ in Lake Sediments from Dagze Co in Tibetan Plateau and Its Paleoclimatic and Paleoenvironmental Significance

Li Xiumei^{1,2}, Fan Baowei^{1,2}, Hou Juzhi³, Wang Mingda⁴, He Yue⁵

1. School of Geographic Sciences, Henan Key Laboratory for Synergistic Prevention of Water and Soil Environmental Pollution, Southern Henan Center for Mineral Rock and Gem-Jade Identification and Processing, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China
2. Xinyang Key Laboratory of Climate Change & Environmental Evolution, Xinyang 464000, China
3. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China
4. School of Geography, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China
5. School of Resources, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China

基金项目:国家自然科学基金项目(No.41901105);信阳师范学院“南湖学者奖励计划”青年项目.

作者简介:李秀美(1988-),女,副教授,博士,主要从事湖泊生物地球化学循环与气候环境变化研究. ORCID: 0000-0002-7541-9776.

E-mail: lixm@xynu.edu.cn

引用格式:李秀美,范宝伟,侯居峙,王明达,贺跃,2022.青藏高原达则错沉积物有机碳同位素特征及古气候环境意义.地球科学,47(6): 2275-2286.

Citation: Li Xiumei, Fan Baowei, Hou Juzhi, Wang Mingda, He Yue, 2022. Characteristics of Compositions of Organic Matter $\delta^{13}\text{C}$ in Lake Sediments from Dagze Co in Tibetan Plateau and Its Paleoclimatic and Paleoenvironmental Significance. *Earth Science*, 47(6): 2275-2286.

Abstract: Based on the analyses of $\delta^{13}\text{C}$ and C/N ratio of organic matter in Dagze Co sediments, combined with the records of plankton, nutrient salts, temperature and precipitation, the climatic and environmental implications of organic matter $\delta^{13}\text{C}$ in Dagze Co sediments during the past 1 000 years were discussed. The results indicate that organic matter of Dagze Co sediment was mainly composed of the autogenous aquatic bioclads from the lake. Prior to the significant impact of human activities during the past thousand years, climate change was the main factor affecting the formation of $\delta^{13}\text{C}$ in the Dagze Co sediments. The $\delta^{13}\text{C}$ value of organic matter was significantly heavier during the cold and dry periods of 1050–1200 AD and 1450–1650 AD, and was considerably lighter during the warmer and wetter periods of 950–1050 AD, 1200–1450 AD and 1650–1850 AD. However, in the past 150 years, the $\delta^{13}\text{C}$ of organic matter in lake sediments was dramatically heavier, which was mainly affected by changes in the concentration of nutrients caused by human activities. This study also shows that the application of C/N value to determine the source of organic matter in Dagze Co, which is semi-convective and with a single nutrient structure, is not reliable, and it is necessary to combine field factors.

Key words: C/N ratio; stable isotope composition of organic carbon ($\delta^{13}\text{C}$); climate change; ecology; Dagze Co; Tibetan plateau.

0 引言

过去 1 000 年气候变化能够为认识现代全球变暖 and 预测未来气候变化提供极有价值的洞察信息, 是国际过去全球变化 (past global changes, 简称 PAGES) 和气候变率与可预测性 (climate variability and predictability, CLIVAR) 计划最重要的研究内容之一. 青藏高原平均海拔为 4 500 m, 因其独特的地形与地理位置被称为全球气候变化的“起动机”与“放大器”, 是全球变化研究的重点区域 (郑度和陈述彭, 2001). 青藏高原及周边地区拥有广大的冰川、冻土和湖泊, 被称为“亚洲水塔”, 为陆地生态系统提供了重要的水资源. 深入研究青藏高原过去一千年气候变化可以为预测全球变暖背景下青藏高原水资源的变化趋势提供依据 (Chen *et al.*, 2020). 对青藏高原气象站观测数据的分析表明, 在过去的几十年里, 该区年平均气温升高幅度达到 $1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Chen *et al.*, 2014), 是全球平均升温幅度的 2 倍. 然而, 气象观测仅限于过去几十年, 要想获得过去更长时间尺度的气候记录需要借助沉积载体 (如湖泊沉积物、树轮、冰心、石笋; Chen *et al.*, 2020). 湖泊沉积物作为大陆气候环境变化的良好介质, 具有分布广泛、沉积速率大、连续性好、分辨率高和储存信息量大等优势, 能忠实记录湖区过去气候环境变迁的信息, 在揭示区域和全球气候变化研究中具有不可替代的地位 (王苏民和李健仁, 1991; Meyers, 2003; 周慧等, 2020).

总有机碳 (TOC)、总氮 (TN) 含量、C/N 比值 (原子比或摩尔比) 和有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 是湖泊沉积物古气候变化研究中的常用替代性指标, 近年来在古气候

环境重建中得到了广泛应用 (Meyers, 1997, 2003; 张恩楼等, 2002; 沈吉等, 2004; 范佳伟等, 2005; Wang *et al.*, 2012; 安显银等, 2020). 在目前的古湖泊学研究中, C/N 比值和 $\delta^{13}\text{C}$ 常被用来指示湖泊沉积物中不同来源有机质的贡献、湖泊生态系统结构变化以及湖泊古生产率变化等重要信息. 但到目前为止, 对湖泊沉积物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 的形成机理及其与古气候间的关系问题尚未形成一致的认识, 湖泊沉积物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 在解释古气候环境变化上存在多解性、复杂性和混乱性 (吴敬禄等, 1996; 吴敬禄和王苏民, 1996; 余俊清等, 2001). 因此, 对于特定地区的湖泊来说, 不能简单套用其他地区的模式来解释有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 与气候之间的关系, 需要结合沉积物其他环境代用指标综合分析来明确指标指示意义, 进而更准确地恢复古气候环境演变信息 (田庆春等, 2016).

在青藏高原分布着全球海拔最高、面积最大、数量最多的高原湖泊群 (王苏民和张振克, 1999). 深入理解湖泊有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 指标的气候指示意义有助于合理解释青藏高原过去气候环境变化. 因此, 本文选择位于藏北高原腹地的典型深水湖泊达则错为研究对象. 达则错属于碳酸盐型咸水湖泊, 其深水沉积过程不受人活动活动和风浪扰动干扰, 是研究过去气候环境变化的理想区域 (刘沙沙等, 2013). 本文通过对该湖泊沉积岩心沉积物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 和 C/N 进行分析, 综合湖泊地理背景, 判断湖泊沉积物有机质来源; 结合该湖泊沉积岩心的浮游生物记录、营养盐记录以及温度和降水指标记录, 深入探讨过去一千年以来湖泊沉积物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 的气候环境指示意义.

1 研究区概况

达则错(31.82°~31.98°N, 87.42°~87.65°E;图1)位于西藏自治区那曲地区尼玛县境内的一个断陷盆地中,属于半对流湖泊.湖泊呈北东—南西向分布,海拔为4 450 m,长为21.1 km,最大宽度为16.9 km,最大水深为38 m,湖泊面积和流域面积分别为245 km²和10 885 km².达则错属于碳酸盐型咸水湖,年蒸发量为2 302 mm,湖水主要依赖波仓藏布补给,结冰期为11月至次年4月(王明达等,2014).湖区气候严寒干燥,距离达则错150 km的申扎气象站(30.57°N, 88.38°E,海拔为4 672 m)数据显示该地区1981—2012年期间年均降水量为316 mm,90%降水量在7—9月;年均气温为0.55℃,年平均夏季温度(7—9月)8℃.根据2012年8月野外考察实地观测,达则错湖水pH为9.80~10.04,表层湖水盐度为14.69 g/L,随着深度增加盐度也随之增大,湖水底层盐度为21.41 g/L,温跃层和盐跃层分别在水深16~23 m处和水深25~29 m处;湖水透明度较小,塞氏盘深度为6 m;表层湖水溶解氧浓度为5.42 mg/L,底层湖水溶解氧浓度为0,23~24 m处溶解氧浓度最大为7.26 mg/L.湖区东部存在很多古湖岸阶地,最高的阶地比现代湖面高约为57 m,表明达则错对过去气候、环境变化响应敏感(乔程等,2010).

2 研究材料与方法

2.1 样品采集和预处理

2011年夏季和2012年夏季,使用Uwitec采样平台在达则错进行湖心样品的钻取,分别获得了DZC2011(长291 cm)和DZC2012(长76 cm)两根湖泊沉积物柱心.两次采样点位于同一点位(31.89°N, 87.55°E, 4 420 m),利用手持测深仪选取水深较深且地形相对平缓地区进行取样,采样点水深37 m(图1c).样品采集后用现场用Uwitec分样器按0.5 cm为间隔进行分样,分完后装入Nasco®whirl pak 无菌采样袋密封置于-20℃的冰箱中冷冻保存.实验前,将冷冻干燥机在-50℃状态下冷冻半小时,把沉积物从-20℃的冰箱中取出,打开样品袋封口,用无尘纸覆盖样品袋口并用皮筋固定,放入冷冻干燥机中,冷冻干燥样品至少72 h直至样品水分完全去除.

2.2 年龄测定

沉积柱年代学框架基于放射性同位素年代学方法(²¹⁰Pb、¹³⁷Cs和¹⁴C).²¹⁰Pb和¹³⁷Cs测试在中国科学院青藏高原研究所环境变化与地表过程重点实验室测试完成,采用高纯锗γ谱仪(ORTEC,仪器型号:GWL-120-15)进行.选择湖心上层样品(共计11个,1 cm等间距)进行²¹⁰Pb和¹³⁷Cs定年.将样品冷冻干燥后,磨碎至100目以下,称取5~7 g样品,装入7 mL离心管,密封3周后上机测试.达则错湖心顶部²¹⁰Pb与¹³⁷Cs测量数据见图2a.选择CRS(恒定通量模式)模式建立钻孔沉积年代序列.

岩心下部更老的年代靠AMS ¹⁴C测定方法测定.由于沉积物中没有发现适用于测年的陆生植物残体,因此本研究对岩心下部不同深度(20 cm、50 cm、100 cm、150 cm、200 cm、250 cm、289 cm)的样品进行全样有机质AMS ¹⁴C年龄测定.其中20 cm样品的AMS¹⁴C定年在美国BETA实验室完成测试,其余6个样品在北京大学加速器质谱中心完成测试.对获得的7个¹⁴C年代用INTCAL13树轮校正曲线进行日历年龄校正,并剔除碳库效应(2 552 a),最后运用Bacon软件计算得到整个沉积柱的年龄为3 100年.钻孔AMS ¹⁴C年龄校正结果正见图2b,湖心详细定年方法及结果参照文献(Li *et al.*, 2015).

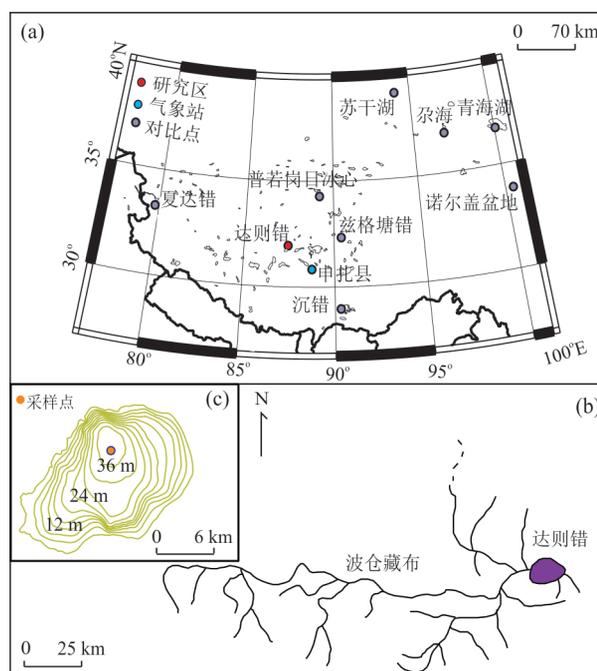


图1 达则错地理位置(a)、湖泊水系(b)和水深示意图(c)
Fig.1 Location map (a), drainage basin map (b), and bathymetry map (c) of Dagze Co

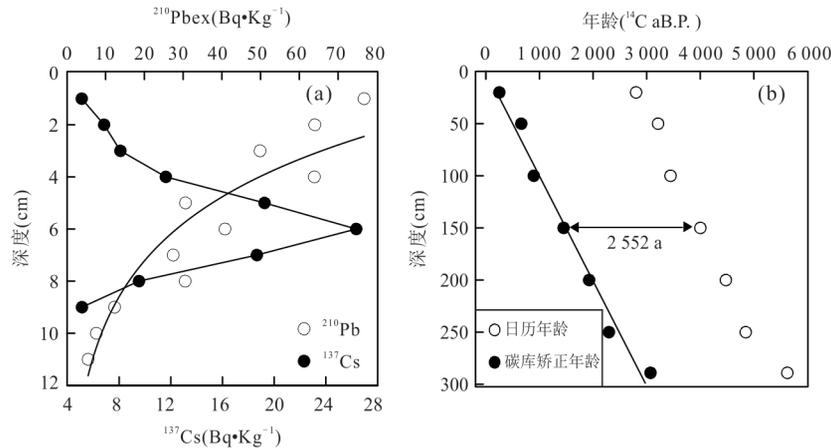


图2 达则错沉积物岩心年龄控制

Fig.2 Chronological controls for the Dagze sediment core

a. 湖心顶部²¹⁰Pb与¹³⁷Cs测年结果;b. 湖心钻孔的¹⁴C年龄校正

2.3 有机地球化学分析方法

本研究利用DZC2012沉积柱进行C/N比值和有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 等指标测试的分析,结合前期利用该岩心西藏拟蚤(*Daphnia tibetana*)残体含量重建的浮游生物记录(李秀美等,2021)、利用总氮含量重建的湖泊营养盐记录,以及利用DZC2011沉积柱烯酮和叶蜡脂肪酸氢同位素等有机指标重建的温度和降水记录,探究达则错湖泊沉积物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 的气候环境指示意义。

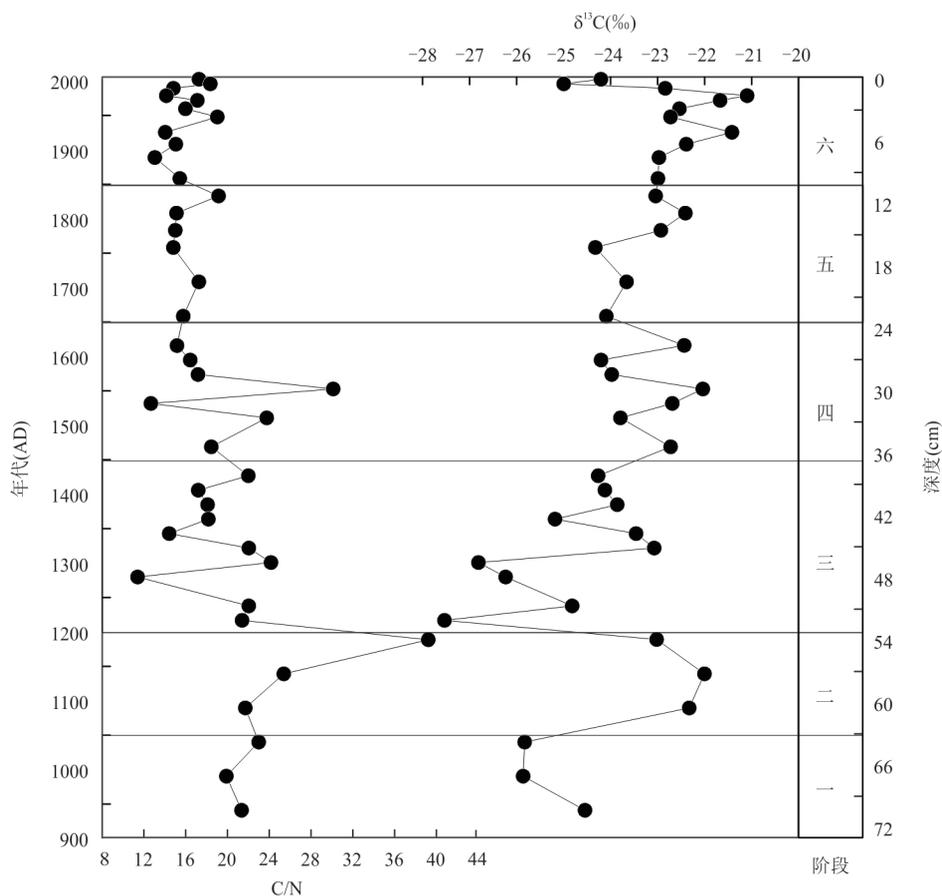
沉积物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 测试在中国科学院地球环境研究所完成,首先取研磨至100目的样品3~5 g置于烧杯内,加入80 mL稀HCl(浓度为15%),多次搅拌后静置24 h,完全除去碳酸盐后用蒸馏水冲洗至中性,60 °C以下烘干研磨待测;测试仪器为MAT252同位素质谱仪,测试结果以VPDB标准标示,测试误差约为 $\pm 0.1\%$ 。总氮含量在暨南大学生物研究中心测定,沉积物样品冷冻干燥后,去除杂质,经玛瑙研钵研磨后过100目尼龙筛保存备用,采用碱性过硫酸钾消解法测定(钱君龙等,1990)。总有机碳分析测试在中国科学院青藏高原研究所环境变化与地表过程实验室进行,样品冷冻干燥后,称取2份样品(100.0 mg),分别放置在两小舟(材料为耐高温陶瓷,TOC测试仪专用)内,用日本岛津公司生产的配有SSM-5000A固体样品进样附件的TOC-Vcph型总有机碳分析仪(重复测量的相对标准偏差(RSD) $< 1\%$)对样品进行分析测试,得到总碳(TC)和无机碳(IC)含量,通过差减法计算得到样品的总有机碳含量。C/N比值根据质量比乘以1.167得到。烯酮和叶蜡脂肪酸氢同位素的前处

理及测试分析步骤详见文献Li *et al.*(2015)。

3 实验结果

达则错DZC2012柱状样的C/N值和有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 分析结果如图3所示。C/N值变化范围在12~39,平均值为19,过去1 000年整体呈减小的趋势。有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值介于 -27.53% ~ -21.10% ,平均值为 -23.63% 。

整体上看,过去1 000年达则错C/N值和有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化特征可分为6个阶段。第一阶段(950~1050 AD),C/N值处于过去1 000年中的较高值,在20~23之间波动;有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 为过去1 000年的较小值且呈逐渐减小趋势,由 -24.55% 降至 -25.86% 。第二阶段(1050~1200 AD),C/N值和有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈现较高值,其中C/N呈逐渐增大趋势并在1150~1200 AD达到过去1 000年最高值;该阶段 $\delta^{13}\text{C}$ 值较高,在 -22.45% 左右波动。第三阶段(1200~1450 AD),C/N值和有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值较低,均呈现高幅度变化,此时段C/N值和 $\delta^{13}\text{C}$ 值均降至过去1 000年最低值。第四阶段(1450~1650 AD),C/N值仍保持高频高幅度变化,在13~30之间波动;有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值相对较高,在 -23.12% 左右波动;第五阶段(1650~1850 AD),C/N值较低且较为稳定,维持在16左右;有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值总体比上一阶段偏轻,在1750 AD左右降低至 -24.32% ,平均值为 -23.41% 。第六阶段(过去150年),C/N值维持在较低值; $\delta^{13}\text{C}$ 值呈波动增长趋势,在1980 AD左右达到过去一千年最高值,但在该阶段结束时期

图3 达则错沉积物C/N值和有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值Fig.3 C/N ratios and $\delta^{13}\text{C}$ of Dagze Co sediments

$\delta^{13}\text{C}$ 值剧烈降低。

4 讨论

4.1 达则错沉积物中有机质的主要来源

湖泊沉积物中有机质主要有两大来源:其来自湖泊内部的水生生物(内源);其来自湖泊周围的陆生生物(外源)。沉积记录中有机质的来源变化,对解释沉积物中有机质的相关地球化学指标(如有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 等)及其所蕴含的环境信息的变化具有重要影响(吴艳宏等,2007;张慧娟等,2018)。因此有机质来源的判断对精确解译与有机质相关的环境指标至关重要。

湖泊沉积物的有机质C/N值被广泛用于区分沉积物有机质的来源(Meyers,1994)。通常情况下,陆生高等植物和挺水植物富含纤维素,含有大量的碳,因此C/N值一般大于20;湖泊水生植物不含纤维素而富含蛋白质,含有大量的氮,其C/N比值为4~10;当C/N值在10~20时,指示了水生沉水或浮游植物,或者与陆生植物的混合来源(Meyers,

1994)。湖泊沉积物中有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 与有机质来源关系密切(张恩楼等,2002)。按照光合作用途径不同,陆生植物可以划分为 C_3 、 C_4 和CAM植物。一般来说, C_3 植物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 -34‰ ~ -22‰ ,平均值为 -27‰ ; C_4 植物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 较高,在 -19‰ ~ -9‰ ,平均值为 -13‰ ;CAM植物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 介于 C_3 和 C_4 之间(Smith *et al.*,1971)。水生植物根据光合作用所需 CO_2 的来源与大气中 CO_2 的关系,划分为浮游藻类、挺水植物和沉水植物。挺水植物一般直接利用大气中的 CO_2 进行光合作用,与陆生 C_3 类植物的有机碳同位素具有很好的对比性,通常为 -30‰ ~ -24‰ ;沉水植物的光合作用和生长受到水体溶解 CO_2 的影响,其生长较大程度地利用湖水中溶解的 HCO_3^- ,其有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏正,变化范围在 -20‰ ~ -12‰ ;浮游植物若利用与大气保持平衡的湖水中溶解的 CO_2 作为光合作用的碳源,则其有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值与陆生 C_3 植物的有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值接近;若湖水中溶解的 CO_2 严重亏损,浮游植物将主要利用湖水中的 HCO_3^- 作为碳源,则其有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值

显著偏正 (Stuiver, 1975). 根据 Meyers (1994) 的研究, 综合利用湖泊沉积物的有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 C/N 值可以有效区分沉积物中有机质的来源.

本研究将达则错沉积物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 与 C/N 值的实验结果与前人鉴定湖泊沉积物有机碳来源的成果进行对比结合, 判断达则错沉积物有机质的来源 (图 4). 达则错有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化范围在 $-27.53\text{‰} \sim -21.10\text{‰}$, 平均值为 -23.63‰ , 表明沉积物有机质可能来源于 C_3 植物、挺水植物、浮游植物或者三者的混合来源. 达则错沉积物 C/N 值变化范围在 12~39, 平均值为 19, 大部分沉积物有机质 C/N 值在 10~20, 表明这些湖泊有机质为水生沉水或浮游植物, 或者与陆生植物的混合来源. 综合达则错沉积物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 与 C/N 值 (图 4), 推断达则错沉积物中有机质可能来源于 C_3 植物与湖泊自生藻类的混合来源.

然而, 有研究指出 C/N 值受生物活动、水团运动以及有机物再悬浮等多种因素影响 (刘文臣等, 1998). 利用 C/N 值判断有机物的来源有时是不可靠的 (刘文臣等, 1998; 吴艳宏等, 2007), 需要综合湖泊地理背景谨慎判断. 本课题组于 2011 年和 2012 年夏季对达则错进行了实地考察. 现场考察发现达则错周边植被覆盖率很低, 湖泊内部没有水生维管束植物, 浮游藻类是湖泊中唯一的初级生产者, 也是湖泊内生有机物的初级来源. 因此, 达则错盐湖沉积物中有机质主要来源于湖泊自生的水生生物碎屑混合物, 而陆源高等植物输入的贡献率较低,

这与刘沙沙等 (2013) 对达则错表层沉积物有机碳来源的研究结果一致. 那么, 应用 C/N 值判断该湖泊有机质来源可靠性的较低的原因是什么呢? 本研究认为, 这与湖泊食物网结构以及湖水分层、翻转等水文性质有关. 达则错为无鱼湖泊, 湖泊食物网结构简单. 西藏拟蚤生物量占平均生物量的 82.3%, 为达则错的绝对优势动物物种, 以浮游藻类为食且没有被捕食的压力, 在食物链中处于最高营养级, 并在有机沉积形成中发挥着重要作用 (刘沙沙等, 2013). 达则错沉积颗粒物的镜下鉴别及统计数据显示湖泊沉积物有机质基本全为内源的西藏拟蚤粪粒及残体 (刘沙沙等, 2013). 西藏拟蚤粪粒及残体表面附着一层碳酸盐微粒, 可以有效抵御微生物的分解, 并加速了这些物质穿过盐梯度层沉降沉积于湖底 (刘沙沙等, 2013). 此外, 达则错属于半对流湖泊, 20 m 水深以下湖水与上层湖水不发生混合, 且底层湖水溶解氧浓度为 0 (王明达等, 2014). 湖泊深水区底部处于强还原环境, 不利于有机质的分解, 造成碳氮比值相对较高. 因此对于营养结构较为单一, 且西藏拟蚤为绝对优势动物物种的无鱼、半对流型湖泊, 应用 C/N 值判断湖泊有机质来源是不可靠的, 需要综合湖泊地理背景谨慎判断.

综上所述, 西藏拟蚤通过对浮游藻类进行摄食和转化, 对达则错有机沉积形成发挥着重要作用. 达则错盐湖沉积物中有机质主要来源于湖泊自生的水生生物碎屑混合物 (西藏拟蚤粪粒及残体占绝大部分).

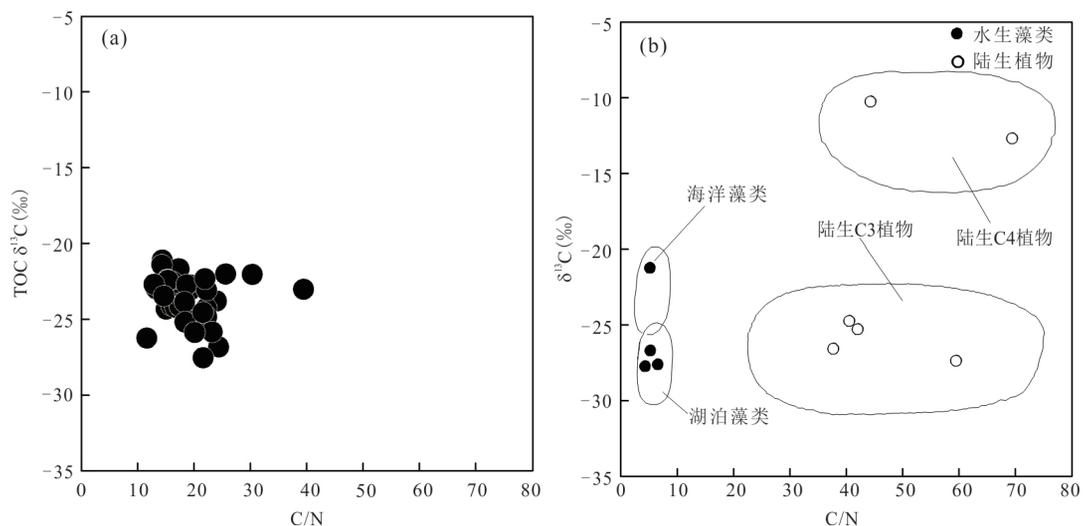


图4 达则错湖泊沉积物有机质来源鉴别图

Fig.4 The identification charts of organic matter source in the sediments of Dagze Co

a. 达则错沉积物有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与 C/N 比值; b. Meyers (1994) 中湖泊沉积物主要来源植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与 C/N 比值

4.2 达则错沉积物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 的指示意义

对于内源有机质为主的湖泊,影响湖泊沉积物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 的因素很多,如水介质的硬度、温度、降水、湖泊营养水平与初级生产力、沉积环境以及沉积物的后期保存等(吴敬禄和王苏民,1996).为了明确达则错沉积物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 指示的环境意义,将其与前期重建的该湖泊沉积岩心的浮游生物记录、营养盐记录以及温度和降水指标记录进行对比,深入探讨湖泊沉积物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 的气候环境指示意义(图5).

有研究指出,在较单一的物源控制条件下,有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 指标能很好地反映温度变化(吴敬禄等,2000).达则错沉积物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值(图5c)与温度(图5f)有较好的对应关系:在1050~1200 AD和1450~1650 AD两个明显的低温时段,沉积物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著偏重;而在950~1050 AD、1200~1450 AD和1650~1850 AD等温暖时期,沉积物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 偏轻.进一步研究发现,气候变化通过改变湖泊理化性质和营养盐浓度间接影响湖泊初级和次级生产力(李秀美等,2021),进而影响达则错沉积物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 组成.达则错湖泊沉积基本上是自然过程的内生沉积,湖泊沉积物 TOC 可以指示过去的生产力变化.通常认为,温度升高会导致湖泊生产力增大(Mooij *et al.*, 2005).然而,达则错过去一千年的定量温度记录和湖泊生产力却呈现出相反的关系.冷期,特别是在1050~1200 AD的低温时段内,TOC 含量显著增长,湖泊生产力高.达则错湖泊内生有机物的初级来源为浮游藻类,浮游藻类生产率与湖泊营养状况和表层水温度密切相关,且浮游藻类光合作用中的碳同位素分馏与水体中溶解 CO_2 含量和 HCO_3^- 的比例有关.冷期,湖水硬度大,湖水的热稳定性降低,湖底沉积物的氮、磷等营养元素上涌,湖泊营养盐浓度升高(图5b),浮游藻类产量增大,水体中 CO_2 被迅速吸收, HCO_3^- 成为浮游藻类的主要碳源,浮游藻类 $\delta^{13}\text{C}$ 偏重.达则错沉积岩心中有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值与西藏拟蚤含量之间存在显著的非线性相关关系(图6; $r=0.703$, $P<0.0001$),西藏拟蚤含量高的时期,有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏重(图5).这是因为达则错属于无鱼湖泊,西藏拟蚤以浮游藻类为食且没有被捕食的压力,冷期浮游藻类产量增大给西藏拟蚤带来了丰富的食物,西藏拟蚤繁盛.由于西藏拟蚤在摄取浮游藻类过程中有机碳同位素发生分馏富集,造成西藏拟蚤的 $\delta^{13}\text{C}$ 比所食浮游藻

类偏正.因此,冷期达则错沉积物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著偏重.

反之,暖期(950~1050 AD、1200~1450 AD、1650~1850 AD),冰川融化,达则错沉积物叶蜡氢同位素指示湖区降水增多(Li *et al.*, 2015)(图5g),湖水淡化,湖水硬度降低,湖水中溶解的大气 CO_2 量增大,浮游藻类合成有机质中 $\delta^{13}\text{C}$ 偏负.加之暖期湖泊热稳定性较好,温跃层深度以下湖水与上部湖水基本不发生混合,湖底营养盐不上涌,湖水营养盐含量低,因食物缺乏、养分浓度低导致西藏拟蚤数量降低,有机碳同位素的分流富集作用减弱,因此沉积物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 偏轻.

过去150年达则错气候温暖,气温与1200~1450 AD时段相当.然而沉积物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 在该时段显著偏重,并达到过去1000年最高值.表明过去150年达则错有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 变化的主控因素与过去1000年其他时段不同.该时段达则错沉积物营养盐含量突增并达到过去1000年峰值(图5b).这一时段湖泊营养盐浓度的增长主要受人类活动导致的大气沉降影响(李秀美等,2021).达则错自1850年以来 TN 含量的增长趋势与达索普冰心记录的硝酸盐浓度的上升趋势相一致,而近期对达则错附近冰心的研究表明,近百年来高原中部硝酸盐浓度的上升主要受人类活动导致的氮沉降影响,进一步证实人类活动导致的大气沉降可能是该时段达则错湖泊养分含量剧增的主要原因(李秀美等,2021).随着湖泊营养盐浓度升高,浮游藻类产量增大,水体中 CO_2 被迅速吸收, HCO_3^- 成为浮游藻类的主要碳源,导致浮游藻类 $\delta^{13}\text{C}$ 偏重.对日本大沼湖的研究也发现,20世纪80年代后,由于畜牧养殖和旅游开发等人类活动的影响,营养物质的输入增加了大沼湖水体的氮磷含量,提高了湖泊的初级生产力,导致此时期 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏重(孙伟伟等,2014).此外,湖泊营养水平的上升增强了浮游植物和浮游动物在有机碳传输过程上的耦合,导致了浮游植物和浮游动物碳同位素的同步富集(Grey *et al.*, 2000; Ngochera and Bootsma, 2011).因此,过去150年达则错沉积物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 变化主要受人类活动导致的湖泊营养盐浓度的增长所致.

4.3 区域对比

过去1000年,在达则错受到人类活动显著影响之前(即950~1850 AD),湖泊沉积物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值与温度有较好的对应关系:在低温时段,沉积物

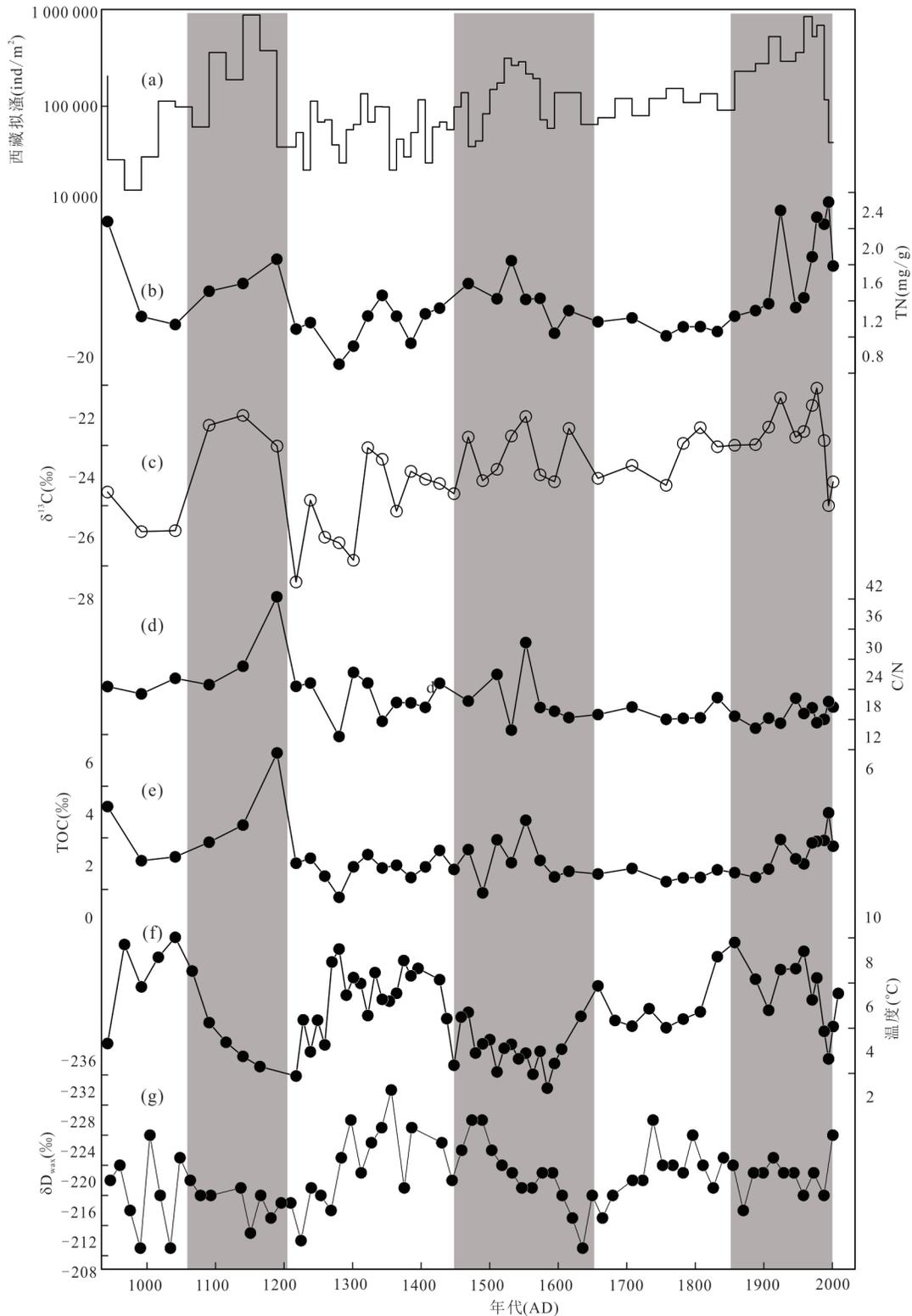


图5 过去1000年达则错西藏拟蚤(a)、总氮含量(b)、 $\delta^{13}\text{C}$ 值(c)、C/N比值(d)、TOC含量(e)、温度记录(f)以及叶蜡单体氢同位素记录(g)

Fig.5 The number of *Daphnia tibetana* (a), TN content (b), $\delta^{13}\text{C}$ (c), C/N ratio (d), TOC content (e), temperature record (f) and $\delta\text{D}_{\text{wax}}$ record (g) at Dagze Co in the past 1000 years

有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著偏重;而在较温暖时期,沉积物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 偏轻.这与青海湖(张恩楼等,2002)、沉错

(王君波和朱立平,2007)以及青藏高原东部若尔盖盆地(吴敬禄和王苏民,1996)的研究结果相近.而

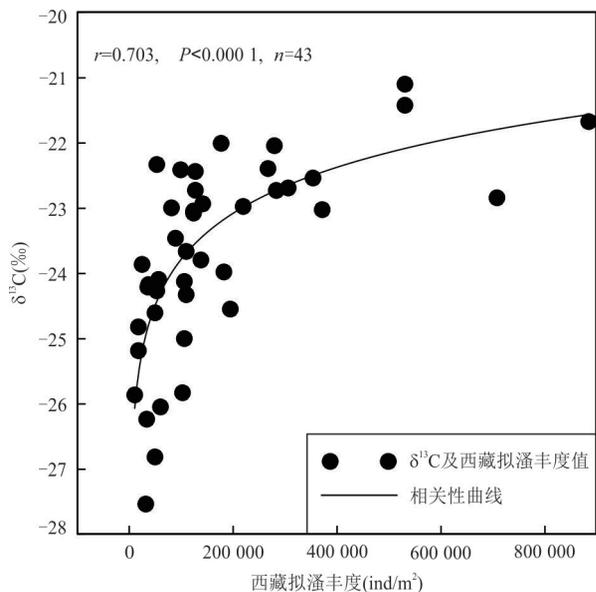


图6 达则错沉积物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ vs. 西藏拟溞相关性

Fig.6 The correlation between $\delta^{13}\text{C}$ and the *Daphnia tibetana* abundance in lake sediments of Dagze Co

对青藏高原中部兹格塘错(吴艳宏等,2007)的研究发现,湖泊沉积物中有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 组成随环境气温的升高而富集重碳同位素.因此不同湖泊沉积物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 指示的气候意义是不同的(吴敬禄等,1996).这与不同湖泊沉积物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 的形成机理有关.青海湖和若尔盖盆地沉积物有机质主要贡献者均为陆生C3类植物,气候温暖时,C3类植物较为繁盛,气温升高促进光合作用进一步加强以及受同位素动力作用影响,C3类植物 $\delta^{13}\text{C}$ 偏负;反之,冷期,C3植物减少,沉积物 $\delta^{13}\text{C}$ 增高(吴敬禄和王苏民,1996;张恩楼等,2002).沉错湖泊沉积物中有机质主要来源于湖泊自身沉水植物的贡献,在冷期时,沉错的冰融水补给削弱,湖面下降,湖水体积减小,湖水硬度增大,碳酸氢根离子浓度下降,沉水植物为生存需要不得不加大光合作用的强度,导致它们富集较多的 $\delta^{13}\text{C}$,从而使 $\delta^{13}\text{C}$ 值增大;暖期的情形相反(王君波和朱立平,2007).可见虽然达则错与青海湖、沉错和若尔盖盆地沉积物中有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值与气温均呈负相关关系,但是由于其沉积物有机质来源不同,有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值对气温响应的内在机理并不相同.兹格塘错与达则错湖泊都属于碳酸盐型咸水湖,湖泊有机质均以内源为主且有机物的初级来源均为浮游藻类,然而2个湖泊有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 对温度的响应却相反,这与2个湖泊浮游植物生长的主控因素不同有关.达则错为半对流湖,冷期湖泊热稳定

性降低,深水层的养分补给促进了藻类的繁殖;然而兹格塘错在温暖期浮游藻类生产力较高.浮游藻类繁盛会迅速吸收水体中 CO_2 , HCO_3^- 成为浮游藻类的主要碳源,导致浮游藻类 $\delta^{13}\text{C}$ 偏重,因此,达则错在冷期, $\delta^{13}\text{C}$ 偏重,而兹格塘错在暖期, $\delta^{13}\text{C}$ 偏重.综上所述,不同湖泊的理化性质、沉积物有机质来源、沉积物后期保存、湖泊初级生产力等有很大差异,导致湖泊沉积物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值与气候之间的关系没有固定的模式.

过去1000年达则错叶蜡脂肪酸氢同位素反映该区降水同位素信号,可以指示季风降水量的变化,降水同位素越偏负,指示季风降水量越多(Li *et al.*, 2015).综合达则错岩心沉积物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 、TOC记录以及烯酮和叶蜡脂肪酸氢同位素重建的温度和降水记录,显示在过去1000年中,达则错气候表现为冷干与暖湿的气候特征(图5).这与青藏高原东北部的万象洞(Zhang *et al.*, 2008)和青海湖(Liu *et al.*, 2006)、高原中部的普若岗日冰心(Thompson *et al.*, 2006),以及高原西南部的夏达错(Li *et al.*, 2019)表现出相似的气候特征,而与高原东北部苏干湖和尕斯库勒湖表现出不同的气候特征(He *et al.*, 2013),后者显示为冷湿—暖干的气候特征.因此,过去1000年青藏高原气候变化表现出显著的区域性特征.青藏高原气候变化的显著性区域性特征可能与季风与西风环流对青藏高原的交互影响有关(李秀美等,2019),具体机制有待进一步研究探讨.

5 结论

过去1000年以来达则错湖泊沉积物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 变化比较明显(变化范围介于 -27.53‰ ~ -21.10‰),反映了湖区过去1000年以来经历了显著的气候环境变化.在湖区受到人类活动显著影响之前,气候变化通过影响湖泊的热稳定性、湖水硬度等理化性质间接影响湖泊初级和次级生产力,进而影响沉积物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 的形成.1050~1200 AD和1450~1650 AD气候较为寒冷干燥的时段,湖水热稳定性降低,湖水硬度增大,湖泊营养盐浓度升高,浮游藻类产量增大,浮游藻类主要以水体中 HCO_3^- 为碳源, $\delta^{13}\text{C}$ 偏重.冷期繁盛的西藏拟溞在摄取浮游藻类过程中有机碳同位素发生分馏富集,造成西藏拟溞的 $\delta^{13}\text{C}$ 比所食浮游藻类偏正,沉积物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著偏重.反之,在950~1050 AD、

1200~1450 AD 和 1650~1850 AD 气候较为温暖湿润的阶段,湖泊热稳定性较好,营养盐含量低,湖泊生产力和湖水硬度降低,湖水中溶解的大气 CO₂ 量增大,浮游藻类合成有机质 δ¹³C 偏负.过去 150 年,沉积物有机质 δ¹³C 主要受人类活动导致的泊营养盐浓度变化影响.

本研究还表明对于营养结构较为单一,且西藏拟溞为绝对优势动物物种的无鱼、半对流型湖泊,应用 C/N 值判断湖泊有机质来源是不可靠的,需要综合湖泊地理背景谨慎判断.本文的研究结果为进一步利用达则错深钻有机质 δ¹³C 指标揭示青藏高原过去气候环境变化提供了基础.

References

- An, X. Y., Zhang, Y. J., Zhu, T. X., et al., 2020. Stable Carbon Isotope Perturbations Recorded in Triassic Tulong Group-Qulonggongba Formation of South Tibet. *Earth Science*, 45(8): 2964–2977(in Chinese with English abstract).
- Chen, B., Zhang, X., Tao, J., et al., 2014. The Impact of Climate Change and Anthropogenic Activities on Alpine Grassland over the Qinghai-Tibet Plateau. *Agricultural Forest Meteorology*, 189–190: 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.01.002>
- Chen, F., Zhang, J., Liu, J., et al., 2020. Climate Change, Vegetation History, and Landscape Responses on the Tibetan Plateau during the Holocene: A Comprehensive Review. *Quaternary Science Reviews*, 243. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106444>
- Fan, J. W., Xiao, J. L., Wen, R., L., et al., 2005. Holocene Environment Variations Recorded by Stable Carbon and Nitrogen Isotopes of Sedimentary Organic Matter from Dalilake in Inner Mongolia. *Quaternary Sciences*, 35(4): 856–870(in Chinese with English abstract).
- Grey, J., Jones, R. I., Sleep, D., 2000. Stable Isotope Analysis of the Origins of Zooplankton Carbon in Lakes of Differing Trophic State. *Oecologia*, 123(2): 232–240. <https://doi.org/10.1007/s004420051010>
- He, Y. X., Zhao, C., Wang, Z., et al., 2013. Late Holocene Coupled Moisture and Temperature Changes on the Northern Tibetan Plateau. *Quaternary Science Reviews*, 80: 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.08.017>
- Li, X. M., Hou, J. Z., Wang, M. D., et al., 2019. Influence of Monsoon and Westerlies on Holocene Climate Change in the Tibetan Plateau: Isotopic Evidence. *Quaternary Sciences*, 39(3): 678–686(in Chinese with English abstract).
- Li, X. M., Hou, J. Z., Wang, M. D., et al., 2021. Ecosystem Changes and Possible Mechanisms of Dagze Co in the Tibetan Plateau during the Past 1 000 Years. *Journal of Lake Sciences*, 33(4): 1276–1288(in Chinese with English abstract).
- Li, X. M., Liang, J., Hou, J. Z., et al., 2015. Centennial-Scale Climate Variability during the Past 2 000 Years on the Central Tibetan Plateau. *Holocene*, 25(6): 892–899. <https://doi.org/10.1177/0959683615572852>
- Li, X. M., Wang, M. D., Hou, J. Z., 2019. Centennial-Scale Climate Variability during the Past 2000 Years Derived from Lacustrine Sediment on the Western Tibetan Plateau. *Quaternary International*, 510: 65–75. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.12.018>.
- Liu, S. S., Jia, Q. X., Liu, X. F., et al., 2013. The Depositional Environment and Organic Sediment Component of Dagze Co, a Saline Lake in Tibet, China. *Acta Ecologica Sinica*, 33(18): 5785–5793(in Chinese with English abstract).
- Liu, W. C., Wang, R., Li, C. L., 1998. C/N Ratios of Particulate Organic Matter in the East China Sea. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 29(5): 467–470(in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. H., Henderson, A. C. G., Huang, Y. S., 2006. Alkenone-Based Reconstruction of Late-Holocene Surface Temperature and Salinity Changes in Lake Qinghai, China. *Geophysical Research Letters*, 33: L09707. <https://doi.org/10.1029/2006GL026151>.
- Meyers, P. A., 1994. Preservation of Elemental and Isotopic Source Identification of Sedimentary Organic Matter. *Chemical Geology*, 114(3–4): 289–302. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)90059-0](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)90059-0)
- Meyers, P. A., 1997. Organic Geochemical Proxies of Paleooceanographic, Paleolimnologic, and Paleoclimatic Processes. *Organic Geochemistry*, 27(5–6): 213–250.
- 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. [https://doi.org/10.1016/s0146-6380\(02\)00168-7](https://doi.org/10.1016/s0146-6380(02)00168-7)
- Mooij, W. M., Hülsmann, S., de Senerpont Domis, L. N., et al., 2005. The Impact of Climate Change on Lakes in the Netherlands: A Review. *Aquatic Ecology*, 39(4): 381–400. <https://doi.org/10.1007/s10452-005-9008-0>
- Ngochera, M. J., Bootsma, H. A., 2011. Temporal Trends of Phytoplankton and Zooplankton Stable Isotope Composition in Tropical Lake Malawi. *Journal of Great Lakes Re-*

- search, 37: 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2010.09.004>
- Qian, J. L., Zhang, L. D., Yue, M. L., 1990. Determination of Total Nitrogen and Phosphorus in Soil by Persulfate Digestion. *Soils*, 22(5): 258–262(in Chinese with English abstract).
- Qiao, C., Luo, J. C., Sheng, Y. W., et al., 2010. Analysis on Lake Changes since Ancient and Modern Ages Using Remote Sensing in Dagze Co, Tibetan Plateau. *Journal of Lake Sciences*, 22(1):98–102(in Chinese with English abstract).
- Shen, J., Liu, X. Q., Matsumoto, R., et al., 2004. A High-Resolution Climatic Change since the Late Glacial Age Inferred from Multi-Proxy of Sediments in Qinghai Lake. *Science in China (Series D)*, 34(6):582–589(in Chinese).
- Smith, B. N., Epstein, S., Physiology, P., 1971. Two Categories of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ Ratios for Higher Plants. *Plant Physiology*, 47(3): 380–384. <https://doi.org/10.1104/pp.47.3.380>
- Stuiver, M., 1975. Climate versus Changes in ^{13}C Content of the Organic Component of Lake Sediments during the Late Quaternary. *Quaternary Research*, 5(2): 251–261. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(75\)90027-7](https://doi.org/10.1016/0033-5894(75)90027-7)
- Sun, W. W., Shen, J., Zhang, E. L., et al., 2014. Characteristics of Organic Stable Carbon Isotope and C/N Ratio of Sediments in Lake Onuma, Japan and Their Environmental Implications for the Last 400 Years. *Quaternary Sciences*, 34(6):1306–1313(in Chinese with English abstract).
- Tian, Q. C., Yang, T. B., Shi, P. H., 2016. Variation Characteristics and Influencing Factors of Organic Carbon Isotope from Palaeolake Sediments in Hoh Xil Area. *Acta Sedi-mentologica Sinica*, 34(2): 260–267(in Chinese with English abstract).
- Thompson, L. G., Mosley-Thompson, E., Davis, D. E., et al., 2006. Ice Core Evidence for Asynchronous Glaciation on the Tibetan Plateau. *Quaternary International*, 154–155: 3–10. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2006.02.001>
- Wang, J. B., Zhu, L. P., 2007. The Response of Organic Matter $\delta^{13}\text{C}$ to Cold/Warm Fluctuation of Chen Co Lake Sediment, Southern Tibet. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 27(2): 113–120(in Chinese with English abstract).
- Wang, M. D., Hou, J. Z., Lei, Y. B., 2014. Classification of Tibetan Lakes Based on Variations in Seasonal Lake Water Temperature. *Chinese Science Bulletin*, 59(31):3095–3103(in Chinese).
- Wang, S. M., Li, J. R., 1991. Lacustrine Sediments—An Indicator of Historical Climatic Variation—The Case of Qinghai Lake and Daihai Lake. *Chinese Science Bulletin*, 36(1):54–56(in Chinese).
- Wang, S. M., Zhang, Z. K., 1999. Advance and Prospects of Lake Sediments and Environmental Changes Study in China. *Chinese Science Bulletin*, 44(6): 579–587(in Chinese).
- Wang, Y., Zhu, L. P., Wang, J. B., et al., 2012. The Spatial Distribution and Sedimentary Processes of Organic Matter in Surface Sediments of Nam Co, Central Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 57(36): 4753–4764. <https://doi.org/10.1007/s11434-012-5500-9>
- Wu, J. L., Andreas, L., Li, S. J., et al., 2000. Modern Climatic Signals from Records of Contents of TOC and $\delta^{13}\text{C}$ in the Xingcuo Lake Sediments in Eastern Tibetan Plateau, China. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 20(4): 37–42(in Chinese with English abstract).
- Wu, J. L., Wang, S. M., 1996. Climate versus Changes in $\delta^{13}\text{C}$ Values of the Organic Matter in Lake Sediments. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 16(2):103–109(in Chinese with English abstract).
- Wu, J. L., Wang, S. M., Shen, J., 1996. Informations of Climate and Environment Deduced from the Organic Matter $\delta^{13}\text{C}$ of Lacustrine Sediments. *Journal of Lake Science*, 8(2): 113–118(in Chinese with English abstract).
- Wu, Y. H., Andreas, L., Bernd, W., 2007. Lacustrine Sedimentary Geochemical Records of Holocene Climate Changes in the Central Tibetan Plateau. *Science in China (Series D)*, 37(9):1185–1191(in Chinese).
- Yu, J. Q., Wang, X. Y., Li, J., et al., 2001. Paleoenvironmental Interpretations on Organic Carbon Isotopic Records from Lake Sediments: A Critique. *Journal of Lake Science*, 13(1):72–78(in Chinese with English abstract).
- Zhang, E. L., Shen, J., Xia, W. L., et al., 2002. Environmental Records from Organic Carbon and Its Isotope of Qinghai Lake Sediment. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 22(2):105–108(in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. J., Yang, G. F., Chen, Z. H., et al., 2018. Distribution of N-Alkane Indicative of Paleoclimatic Change in Paleolake of Yanqing, Beijing. *Earth Science*, 43(11): 4120–4127(in Chinese with English abstract).
- Zhang, P., Cheng, H., Edwards, R. L., et al., 2008. A Test of Climate, Sun, and Culture Relationships from an 1810 Year Chinese Cave Record. *Science*, 322(5903): 940–942. <https://doi.org/10.1126/science.1163965>
- Zheng, D., Chen, S. P., 2001. Progress and Disciplinary Frontiers of Geographical Research. *Advance in Earth Sciences*, 16(5):599–606(in Chinese with English abstract).
- Zhou, H., Wu, L., Ma, C. M., et al., 2020. Holocene Environ-

mental Evolution Recorded by Multi-Proxies from Lacustrine Sediments of the Hangbu River Valley, Lake Chaohu Basin, East China. *Journal of Lake Sciences*, 32(6):1869–1881(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

安显银,张予杰,朱同兴,等,2020.西藏聂拉木三叠系土隆群一曲龙共巴组稳定碳同位素组成及对比.地球科学,45(8):2964–2977.

范佳伟,肖举乐,温锐林,等,2005.内蒙古达里湖全新世有机碳氮同位素记录与环境演变.第四纪研究,35(4):856–870.

李秀美,侯居峙,王明达,等,2019.季风与西风对青藏高原全新世气候变化的影响:同位素证据.第四纪研究,39(3):678–686.

李秀美,侯居峙,王明达,等,2021.青藏高原达则错近1000年来生态系统变化及可能机制.湖泊科学,33(4):1276–1288.

刘沙沙,贾沁贤,刘喜方,等,2013.西藏达则错盐湖沉积背景与有机沉积结构.生态学报,33(18):5785–5793.

刘文臣,王荣,李超伦,1998.东海颗粒有机物中的碳氮比.海洋与湖沼,29(5):467–470.

钱君龙,张连弟,乐美麟,1990.过硫酸盐消化法测定土壤全氮全磷.土壤,22(5):258–262.

乔程,骆剑承,盛永伟,等,2010.青藏高原湖泊古今变化的遥感分析:以达则错为例.湖泊科学,22(1):98–102.

沈吉,刘兴起,Matsumoto, R.,等,2004.晚冰期以来青海湖沉积物多指标高分辨率的古气候演化.中国科学(D辑),34(6):582–589.

孙伟伟,沈吉,张恩楼,等,2014.日本大沼湖沉积物碳氮比值、有机碳同位素特征及其近400年的古气候环境意义.第四纪研究,34(6):1306–1313.

田庆春,杨太保,石培宏,2016.可可西里古湖泊沉积物有机

碳 $\delta^{13}\text{C}$ 变化特征及其影响因素.沉积学报,34(2):260–267.

王君波,朱立平,2007.藏南沉错沉积物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 对湖区环境冷暖变化的响应.海洋地质与第四纪地质,27(2):113–120.

王明达,侯居峙,类延斌,2014.青藏高原不同类型湖泊温度季节性变化及其分类.科学通报,59(31):3095–3103.

王苏民,李建仁,1991.湖泊沉积:研究历史气候的有效手段:以青海湖、岱海为例.科学通报,36(1):54–56.

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.

吴敬禄,Luecke, A.,李世杰,等,2000.兴措湖沉积物有机碳及其同位素记录揭示的近代气候与环境.海洋地质与第四纪地质,20(4):37–42.

吴敬禄,王苏民,1996.湖泊沉积物中有机质碳同位素特征及其古气候.海洋地质与第四纪地质,16(2):103–109.

吴敬禄,王苏民,沈吉,1996.湖泊沉积物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 所揭示的环境气候信息.湖泊科学,8(2):113–118.

吴艳宏,Lücke, A., Wünnemann, B.,等,2007.青藏高原中部全新世气候变化的湖泊沉积地球化学记录.中国科学(D辑),37(9):1185–1191.

余俊清,王小燕,李军,等,2001.湖泊沉积有机碳同位素与环境变化的研究进展.湖泊科学,13(1):72–78.

张恩楼,沈吉,夏威夷,等,2002.青海湖沉积物有机碳及其同位素的气候环境信息.海洋地质与第四纪地质,22(2):105–108.

张慧娟,杨桂芳,陈正洪,等,2018.北京延庆古湖正构烷烃分布特征及古气候意义.地球科学,43(11):4120–4127.

郑度,陈述彭,2001.地理学研究进展与前沿领域.地球科学进展,16(5):599–606.

周慧,吴立,马春梅,等,2020.巢湖杭埠河流域湖相沉积物多指标揭示的全新世以来环境演变.湖泊科学,32(6):1869–1881.