

张玉枝, 马雪洋, 李倩, 等. 全球变暖对青藏高原不同补给类型湖泊生产力的影响 [J]. 地理科学, 2024, 44(2): 351-358. [Zhang Yuzhi, Ma Xueyang, Li Qian et al. Impact of global warming on lake productivity in different lakes on the Qinghai-Xizang Plateau. Scientia Geographica Sinica, 2024, 44(2): 351-358.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.20230175

全球变暖对青藏高原不同补给类型湖泊生产力的影响

张玉枝^{1,2}, 马雪洋³, 李倩¹, 任娇⁴

(1. 山西财经大学资源环境学院, 山西 太原 030006; 2. 兰州大学资源环境学院/西部环境教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 3. 西华师范大学环境科学与工程学院, 四川 南充 637009; 4. 山西财经大学资源型经济转型发展研究院, 山西 太原 030006)

摘要: 研究以青藏高原阿翁错和托素湖湖泊沉积物为研究对象, 通过多指标(总有机碳含量、有机碳同位素和有机碳埋藏速率等)综合分析, 重建不同补给类型湖泊的生产力变化及碳循环过程。结果显示: 全球变暖对不同类型湖泊的生产力的影响存在显著差异。在以降水和冰川融水为主要补给源的阿翁错, 全球变暖造成冰川融水补给增加。当指示冰川融水补给量变化的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ 值逐渐偏负时, 湖泊沉积物 TOC 含量逐渐升高; 指示冰川融水输入造成湖泊面积持续扩张, 营养物质增加, 湖泊生产力提高; 当湖泊面积扩张较快, 即冰川融水在短时间内快速输入时, TOC 含量下降, 可能是由于当冰川融水输入过多, 造成湖水温度下降过快时, 底栖藻类生产力下降, 进而湖泊固碳能力下降。对于受人类活动影响的托素湖, 全球变暖对湖泊水文过程及生产力的影响较小, $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ 值变化主要受控于农业灌溉活动引起的湖泊补给水量的变化。当 $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ 值升高时, TOC 含量增加; 推测是由于农业灌溉耗水量增加导致湖泊补给水量减少, 湖泊水位下降, 湖泊底部接收到更多光照, 湖泊生产力上升, 固碳能力随之上升。

关键词: 青藏高原; 湖泊; 气候变化; 湖泊生产力; 有机碳埋藏速率

中图分类号: K903 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2024)02-0351-08

湖泊, 作为巨大的碳源和碳汇, 其水文过程及碳循环过程对气候变化十分敏感^[1]。全球湖泊的碳埋藏速率为(0.09~0.16)Pg/a, 其中, 寒带地区的湖泊对全球碳埋藏速率的贡献为 24%^[2], 由此可见湖泊碳埋藏对全球碳循环过程具有重要意义。研究表明不同区域的湖泊生产力变化对全球变暖的响应不同, 主要取决于不同因素对湖泊水文过程以及营养输入的影响程度^[3]。随着全球变暖加剧, 气候变化及人类活动对湖泊水文、光合作用和碳埋藏等过程的影响更加显著^[3]。目前关于人类活动对湖泊碳埋藏速率的影响的研究较多, 但缺乏对南北极及青藏高

原等受人类活动影响较小的区域的关注; 且这些区域分布着大面积湖泊、泥炭及冻土^[4-5], 对于全球碳循环过程的影响不容忽视, 需要重点关注。

作为亚洲水塔的青藏高原, 其表面分布着大于 1 km² 的湖泊超过 1 000 个, 总面积超过 5×10⁴km²^[6]。随着全球变暖加剧, 冰川加速消融, 降水增多, 高原上的湖泊面积持续增加; 不同类型的湖泊经历了明显的扩张, 尤其是 20 世纪 90 年代末以来^[7], 不同类型的湖泊扩张程度显著不同。由于青藏高原受人类活动影响较小, 仅有青藏高原东北部的小范围内有相对密集的人口和农业活动, 气候变化是影响该区

收稿日期: 2022-09-01; **修订日期:** 2023-02-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42101157)、第二次青藏高原综合科学考察研究项目 (2019QZKK0605)、山西省基础研究计划资助项目 (20210302124441)、兰州大学西部环境教育部重点实验室开放基金及兰州大学中央高校基本业务费专项资金 (lzujbky-2022-kb04) 资助。[Foundation: National Natural Science Foundation of China (42101157), the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program (STEP) (2019QZKK0605), Basic Research Projects of Shanxi Province (20210302124441), the Open Foundation of MOE Key Laboratory of Western China's Environmental System, Lanzhou University and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (lzujbky-2022-kb04).]

作者简介: 张玉枝(1990—), 女, 山西祁县人, 讲师, 博士, 主要从事湖泊沉积与环境演化研究。E-mail: zhangyuzhilingyue@163.com

域水体初级生产力的主要因素^[8]；因此，青藏高原是开展气候变化对湖泊碳埋藏速率影响的理想区域。Wang 等^[9]基于目前已发表结果计算了青藏高原 20 多个湖泊的有机碳埋藏速率，结果显示大部分湖泊在 1950 年以来的有机碳埋藏速率高于之前的 50 a，并且温度和降水变化与有机碳埋藏速率呈正相关；但该研究并没有区分不同补给类型湖泊对温度和降水响应的差异。根据遥感影像的解译结果，受冰川融水补给的湖泊比不受冰川融水补给的湖泊扩张速度更快^[10]，这主要归因于 2 种类型湖泊补给源受控于不同气候因子变化。因此，在不同类型湖泊中，湖泊水文过程、湖泊生产力以及碳循环过程均存在差异^[11]，在研究时需要注意区分。

有机碳埋藏速率是评价湖泊沉积物中固碳量的常用指标^[9]。由于有机质在下沉和埋藏过程中会发生分解并产生¹²CO₂，同时藻类的呼吸作用也释放¹²CO₂^[12]；此时参与光合作用过程的碳源不仅来自于大气 CO₂ 和碳酸氢根离子，还有部分来源于水生藻类呼吸和有机质分解作用产生的¹²CO₂。因此，有机碳埋藏速率仅能体现碳埋藏量变化，并不能识别光合作用过程中利用的不同来源的 C 的信号，因此无法全面反映实际的碳循环过程。通过有机碳含量与有机碳同位素值的对比关系，能够识别有机质中保留的碳源的信号^[12]。因此，将有机碳埋藏速率与有机碳同位素结合能够更全面地识别湖泊碳循环过程。

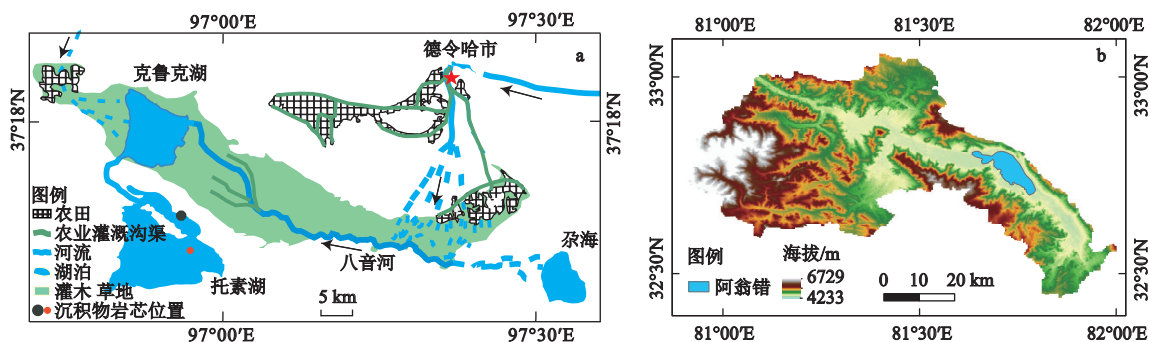
为了更清晰地认识全球变暖对青藏高原不同类型湖泊生产力及碳循环过程的影响，本研究选择了 2 个不同补给类型的封闭湖泊——阿翁错和托素

湖。阿翁错的主要补给源为降水及冰川融水，其中冰川融水主要通过地下水形式补给^[13]；托素湖为流域的尾间湖泊，其湖水补给受人类活动的影响^[14]。本研究重点关注各湖泊过去百年的水文过程对湖泊生产力变化的影响，利用碳酸盐碳氧同位素($\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$)，总有机碳(total organic carbon, 简称 TOC)含量，有机碳埋藏速率(organic carbon accumulation rate)以及有机碳同位素($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$)等指标，重点讨论全球变暖如何影响不同类型湖泊的生产力及碳埋藏速率的变化。

1 研究区概况

阿翁错(81°37'48"E~81°48'00"E, 32°42'00"N~32°48'36"N, 海拔 4430 m)位于青藏高原西部，是一个以降水和冰川融水补给为主的封闭湖泊，湖泊面积为 69 km²(图 1)。根据 2015 年野外调查的结果，湖泊最大水深约 6 m，湖水盐度 29.5 g/L，pH 为 9.2^[13]。在全球变暖背景下，湖泊受到大量的冰川融水补给，20 世纪 70 年代末以来湖泊面积呈现显著扩张^[13]。根据狮泉河气象站的观测数据(<http://data.cma.cn/>)，该区域年降水量低于 100 mm，年均温为 0.68℃(1972—2012 年)。

托素湖(96°50'00"E~97°03'00"E, 37°04'00"N~37°13'00"N, 海拔 2808 m)位于青藏高原东北部柴达木盆地的德令哈市(图 1a)。湖泊面积 145 km²，最大水深约 25 m。托素湖是一个咸水湖，湖水盐度为 35.7 g/L，pH 为 8.4。根据德令哈气象站 1956—2006 年的气象观测数据，该区域的年降水量约为 160 mm，年均温大约 4℃^[16]。托素湖是巴音河补给



a 图为托素湖流域概况，修改自付霞等^[14]，其中红色圆点为本研究钻孔位置，黑色圆点为 TSLC14-1 孔位置^[15]；

b 图为阿翁错流域，修改自 Zhang 等^[13]

图 1 研究区流域概况及采样位置

Fig.1 The study sites and sediment core locations

的尾间湖, 主要受降水及上游开放性湖泊克鲁克湖补给。托素湖及克鲁克湖上游分布着村落和农田。德令哈地区农业播种面积从 20 世纪 50 年代起逐渐增加, 在 20 世纪 90 年代后期达到峰值, 此后逐渐减少^[14]。

2 材料和方法

2015 年 7 月, 利用 UWITEC 平台在阿翁错中心水深 6 m 处 (81°45'36"E, 32°42'N) 钻取两根岩芯, 通过岩芯标志层对接成一根长为 445 cm 的完整岩芯 (AWC2015)。2017 年 8 月, 在托素湖湖泊中心水深 25 m 处利用重力钻获取一根长度为 55 cm 的岩芯 (TSL17G)。阿翁错及托素湖顶部的沉积物年龄通过测定沉积物中的 ²¹⁰Pb 比活度, 分别采用恒定放射性通量 (CRS) 模式和复合模式建立^[13,17], 本文仅讨论 1900 年以来各湖泊的生产力及碳埋藏速率变化过程。

本研究中碳酸盐碳氧同位素 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$)、碳氮比 (TOC/TN, C/N 比) 及有机碳同位素 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$) 的测试方法均与 Zhang 等^[18] 的实验步骤相同。托素湖岩芯 (TSL17G) 中的总有机碳 (TOC) 含量利用烧失量法获得^[17], 具体操作步骤如下: ① 将 10 mL 的坩埚在马弗炉中 (550℃) 煅烧 30 min, 去除坩埚中的有机质。置于干燥器中待冷却后用万分位天平称重, 记 M_1 ; ② 称取 0.5 g 经冷冻干燥的样品放入坩埚内, 在马弗炉中 (105℃) 烘干 12 h, 冷却后称重, 记 M_2 ; ③ 将坩埚再次置于马弗炉中 (550℃) 烧 4 h, 冷却后称重, 记 M_3 。样品中有机碳的计算公式如下^[19]:

$$TOC = 0.48 \times \left[\frac{(M_2 - M_3)}{(M_2 - M_1)} \times 100 \right] - 0.73$$

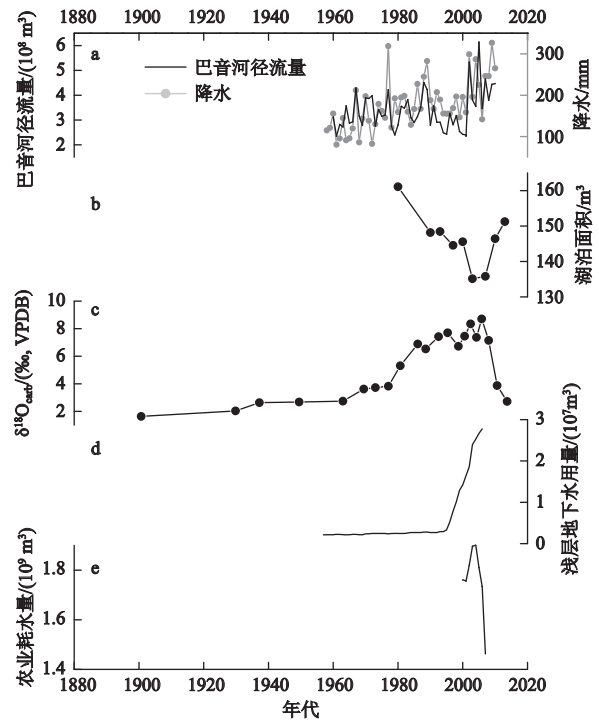
AWC2015 孔中有机碳含量 (TOC1) 通过 EA112 型元素分析仪测得。由于在前处理过程中将沉积物中的碳酸盐除去, 因此沉积物中实际的有机碳含量的计算公示为 $TOC = TOC1 \times (1 - \text{碳酸盐百分含量})$ 。有机碳埋藏速率 [$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$] 的计算公式为: $OCAR = MAR \times TOC \times 100$, 其中, MAR 为每层样品的质量累积速率 [$\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$], 由每层样品的干密度 (g/cm^3) 乘以沉积速率 (cm/a) 得出^[3]。

3 结果与讨论

3.1 指标意义

湖泊自生碳酸盐氧同位素组成 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$) 是反映

湖泊水文过程的重要指标^[20-21]。影响托素湖沉积物碳酸盐氧同位素变化的主要因素为湖泊补给水量/蒸发量比值变化^[14]。德令哈气象站观测数据显示 1965 年以来德令哈市的年蒸发量整体呈现下降趋势^[14], 而托素湖沉积物 $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ 值逐渐变高, 尤其是 1960 年以来持续偏正, 到 2008 年之后突然偏负; $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ 值指示的湖泊补给水量自 1960 年以后逐渐减少, 与区域降水呈现出不同的变化特征 (图 2)。这主要是由于托素湖的主要补给源不仅有降水, 同时受到巴音河河水补给^[14]。20 世纪 60 年以后, 德令哈农业开始发展, 70 年代后农业播种面积迅速增加^[22], 随着上游农业耕种耗水量增加 (图 2d, 2e), 造成巴音河下游水量减少^[14]; 20 世纪 90 年代出现了食品加工、制碱等工业^[23], 浅层地下水使用量增加^[24], 导致托素湖的补给水量进一步减少, 造成 $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ 值偏正; 2004 年之后, 农业耗水量减少, 更多地下水汇入托素湖, $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ 值逐渐偏负^[14]。同时, 湖泊面积的变化也反映了托素湖补给水量的变化, 如图 2b 所示, $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ 偏正 (偏负) 与湖泊面积缩小 (扩张) 一



a. 德令哈市 1958—2010 年降水变化 (器测数据, 灰色点线) 与巴音河径流量变化^[25] (黑色实线); b. 托素湖自 1976 年以来的湖泊面积变化^[7,26]; c. 托素湖 TSL17G 孔 $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ 值变化; d. 德令哈浅层地下水用量^[23]; e. 德令哈农业耗水量^[22]

图 2 托素湖碳酸盐氧同位素记录与区域资料对比

Fig.2 Comparisons of the $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ of Toson Lake with regional data

致;因此,托素湖 $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ 值变化主要反映了流域人类活动强度对托素湖补给水量变化的影响。阿翁错 $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ 值变化则主要反映了全球变暖背景下冰川融水对湖泊的补给量变化^[13]。因此,2个湖泊的水文状况及受人类活动的影响程度均不同。

由于阿翁错及托素湖均位于干旱区,降水稀少,区域内陆生植被较少。 C/N 比的变化可以有效指示湖泊沉积物中有机质的来源^[27]。2个湖泊的 C/N 比值均小于 10(图 3f, 4f),指示湖泊沉积物中的有机质主要来源于湖泊内水生植物与藻类的贡献。因此,TOC 含量变化能够有效指示湖泊生产力的变化;同时,有机碳同位素 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值变化保存了湖泊内水生植物、藻类光合作用过程中利用的碳源变化的信号。由于阿翁错及托素湖均为碱性湖泊,湖水 pH 均超过 8,湖水中几乎没有溶解

CO_2 , 因此主要的碳源为碳酸氢根离子^[28]。由于碳酸氢根离子碳同位素相较于大气 CO_2 偏正约 8‰^[28];因此,碱性湖泊中有机质的碳同位素偏正。当藻类光合作用利用的碳源为湖水中的碳酸氢根离子时, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值越高,指示湖泊生产力越高^[28]。但当湖泊底栖藻类的光合作用加强时,呼吸作用也加强^[29],大量 $^{12}\text{CO}_2$ 被释放出来,直接参与到底栖藻类的光合作用过程中,造成合成的有机物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值偏负;湖泊生产力越高, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值越低。

湖泊不同位置的地形、生产力、碳源及水文条件等因素可能不同^[30],造成不同位置水深、光照、营养物质等条件存在差异,最终导致不同位置碳埋藏速率不同。研究表明:同一湖泊内不同位置的有机参数在时间序列上的变化大体相似^[3]。因此单一岩芯能够反映湖泊沉积物中有机碳埋藏速率变化的整体过程;不同位置沉积物中碳酸盐含量等化学指标记录的气候、环境变化等信息存在时间变化的一致性^[17]。

3.2 全球变暖对阿翁错碳湖泊生产力的影响

阿翁错湖泊沉积物 TOC 含量在近 100 a 的变化范围介于 1.0%~1.6%(图 3c),根据其变化将阿翁错近百年来湖泊生产力变化划分为 2 个阶段:第一阶段(1899—1972 年),TOC 含量逐渐缓慢下降(图 3c),到 1972 年达到最低值(1%),说明底栖藻类生产力逐渐降低;该阶段 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值及有机碳埋藏速率波动较小(图 3e, 3g)。第二阶段(1972—2000 年),TOC 含量快速上升,虽然在 1994—2000 年出现了快速下降,但随后一直保持上升趋势。有机碳埋藏速率与 TOC 含量变化一致,都在 1994—2000 年出现了短暂的低谷期。 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值变幅较大,在 1980 年后略微下降,随后又升高,2000 年之后出现快速偏负,从 2006 年开始偏正;与 TOC 含量总体呈现相反变化趋势。TOC 含量与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值整体呈反向变化,说明光合作用过程利用了更多呼吸作用产生的 $^{12}\text{CO}_2$ ^[29],造成合成的有机物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值偏负。

TOC 含量的波动变化说明阿翁错湖泊生产力发生了明显的变化,且 TOC 含量与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值的不一致变化说明用于光合作用过程的碳源可能发生了变化。影响阿翁错湖泊生产力变化的因素可能有:① 营养状况;② 温度;③ 湖泊底部光照强度。

阿翁错藻类生长所需营养物质主要来源于湖泊周围土壤中埋藏的各类元素及有机质。随着全球变暖加剧,区域温度持续升高导致冰川加速消融,湖泊面积快速扩张,原来的陆生植被生长区变成了

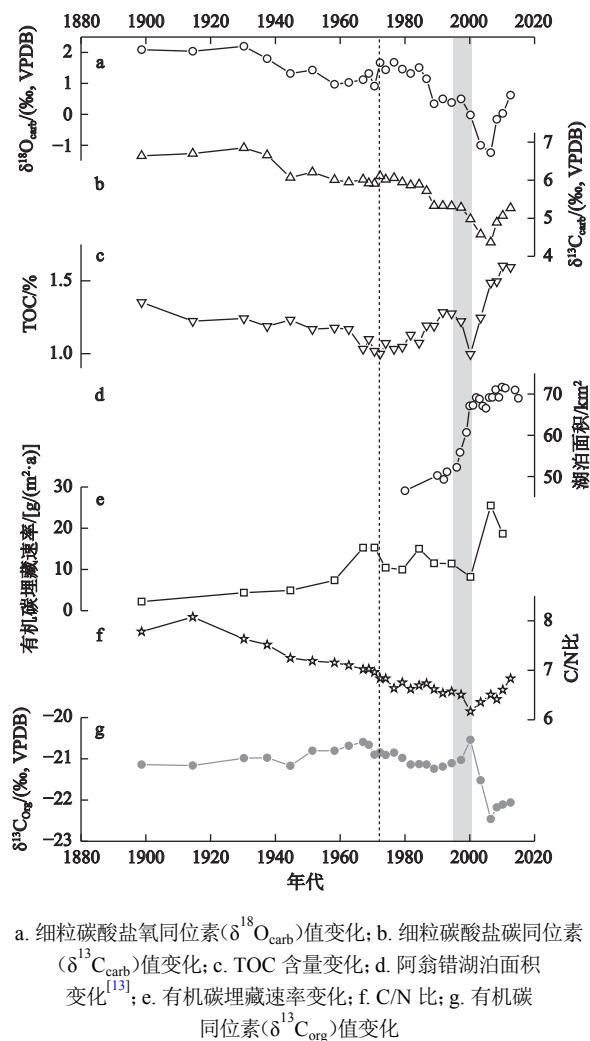


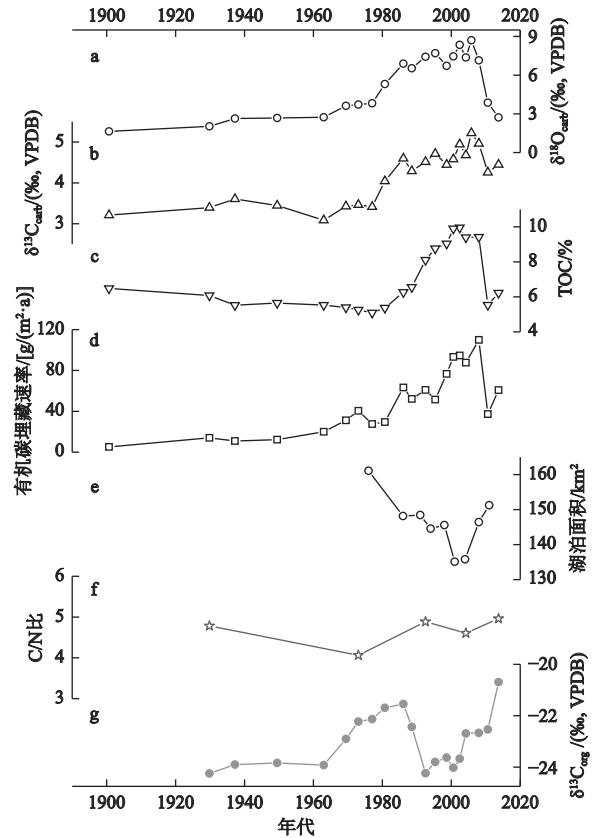
图 3 阿翁错 AWC2015 孔不同指标变化序列

Fig.3 The proxy-variations of Core AWC2015

湖泊底部。由于扩张区域位于湖泊边缘, 水位较低, 湖泊底部能够接收到充足的光照, 土壤中埋藏的有机质及各种元素为水生藻类生长提供了充足的营养物质, 湖泊生产力快速上升^[31], 有机碳埋藏速率也随之升高。值得注意的是, 1994—2000 年 TOC 含量与有机碳埋藏速率出现了急剧下降, 这可能与该时段湖泊面积加速扩张(图 3d)导致的湖水温度及湖泊底部光照条件变化紧密相关。由于阿翁错是一个受冰川融水补给的湖泊, 随着区域温度的快速升高^[13], 大量冰川融水在短时间内以地下水形式注入湖泊, 必然造成湖泊水体温度快速下降, 空气温度升高引起湖水温度上升的幅度远低于冰川融水输入造成的水温下降的幅度, 从而影响湖泊内底栖藻类光合作用过程, 最终导致湖泊生产力下降。随着 1998 年之后气温升高幅度减缓, 出现“增温停滞”现象^[32], 冰川消融速度减缓, 融水减少, 导致最终补给阿翁错的冰川融水减少, 湖泊扩张缓慢^[13]; 此时, 湖泊水温缓慢上升, 促进了湖泊内底栖藻类光合作用过程, TOC 含量上升, 有机碳埋藏速率上升^[29]。研究表明, 以地下水形式补给的冰川融水的浑浊度比地上径流补给明显偏低^[33], 因此, 冰川融水补给引起的湖水浑浊度变化对阿翁错湖泊底部光照条件的影响较小。总体来说, 阿翁错底栖藻类生产力变化主要受控于湖泊扩张过程中营养物质的变化以及冰川融水输入引起的湖水温度的变化。

3.3 全球变暖对托素湖湖泊生产力的影响

托素湖湖泊沉积物 $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 值、TOC 含量、有机碳埋藏速率及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值在近 100 a (尤其是 20 世纪 60 年代以来) 都表现出了显著的变化(图 4)。TOC 含量变化范围在 5.1%~10.0%, 有机碳埋藏速率在 5.2~110.0 $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 范围内波动, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值变化范围为 -24.3‰~-20.7‰。根据上述各指标的变化特征, 将托素湖近 100 a 来湖泊生产力变化划分成 4 个阶段: 第一阶段(1900—1963 年), $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 值偏负且波动较小, 指示区域气候较湿润; TOC 含量、有机碳埋藏速率及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值都偏小, 说明湖泊内部生产力较低, 固碳量较少。第二阶段(1963—1986 年), $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 值逐渐升高, 指示入湖水流/蒸发比值减小。托素湖的补给水量减少, 湖泊面积缩小, 水位下降; TOC 及有机碳埋藏速率仅有略微升高, 但 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值由 -23.9‰ 升高到 -21.5‰。第三阶段(1986—2004 年), $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 值达到近百年的最大值, 指示补给/蒸发比达



a. 细粒碳酸盐氧同位素($\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$)值变化; b. 细粒碳酸盐碳同位素($\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$)值变化; c. TOC 含量变化; d. 有机碳埋藏速率; e. 湖泊面积变化^[17, 26]; f. C/N 比; g. 有机碳同位素($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$)值变化

图 4 托素湖 TSL17G 孔不同指标变化序列

Fig.4 The proxy-variations of Core TSL17G

到最低值。托素湖的补给水量进一步减少^[14], 湖泊面积进一步缩小(图 4e); 该阶段 TOC 含量以及有机碳埋藏速率明显上升, TOC 含量为近 100 a 来最高值, 指示湖泊水生生产力高; 但 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 迅速下降并维持在 -23‰ 以下。第四阶段(2004—2014 年), $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 值逐渐降低, 指示湖泊补给水量增加, TOC 含量及有机碳埋藏速率下降, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值上升。

影响托素湖湖泊生产力的因素主要有: ① 湖泊底部接收的光照强度; ② 温度。从 $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ 值与 TOC 含量的变化可以看出(图 4a, 4c), TOC 含量的快速变化与湖泊补给量有直接关系。湖泊补给量变化直接决定湖泊水位高低, 湖泊水位高低决定了湖泊底部能够接收的光照强弱, 进而影响到光合作用过程及生产力的变化。20 世纪 60 年代以后, 随着农业耗水量增多^[14], 最终补给托素湖的水量减少, 湖泊水位降低, 湖泊底部接收到更多光照, 促进了底栖藻类的光合作用过程, 湖泊生产力提高。在全

球变暖背景下, 德令哈近 60 a 来的温度持续升高^[16], 温度升高不仅促进了光合作用, 同时也增强了呼吸作用。但温度对光合作用及呼吸作用的影响不及水位变化引起的湖泊底部光照条件对湖泊生产力的影响大; 2000 年之后, 空气温度虽然上升缓慢^[34], 但湖泊生产力仍保持在较高水平, 但随着湖泊面积扩大(图 4e), 湖泊水位上升, 湖泊生产力依然出现了明显下降(图 4c)。因此全球变暖对湖泊生产力的影响远不及人类活动造成的影响大, 且湖泊生态环境对人类活动影响的响应十分敏感。

TSL17G 孔中 TOC 含量与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值整体呈现相反的变化, 而同一湖泊中的 TSLC14-1 孔的结果显示 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值与湖泊水位变化成正相关关系^[15], 这可能是由于 TSLC14-1 孔所处位置水深较浅(12 m), 而且靠近湖岸^[15], 风浪作用能够加速湖泊上下层之间 CO_2 交换, 使得湖泊水体中的 CO_2 与空气 CO_2 充分交换, 底栖藻类能够持续利用空气 CO_2 作为碳源进行光合作用。而 TSL17G 孔中 TOC 含量与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值的相反变化说明湖泊底栖藻类光合作用利用的碳源不仅来自于湖水中的 HCO_3^- 离子, 还有藻类呼吸和分解作用产生的 $^{12}\text{CO}_2$ 。从第一阶段到第二阶段, TOC 含量并没有明显升高, 但 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值明显偏正(图 4g)。这可能是由于随着农业耗水量的增加, 河流补给量减少, 湖泊面积缩小(图 4e), 水位下降, 湖水中的 CO_2 与空气 CO_2 有更充分的交换。第三阶段, 当 TOC 含量迅速增加时, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值反而快速偏负。这可能是由于当湖泊生产力较高时, 合成的有机质较多, 因此呼吸作用产生的 $^{12}\text{CO}_2$ 较多, 且分布在藻类周围, 可直接被底栖藻类光合作用利用^[29]。因此, 当湖泊水生藻类光合作用过程加强时, 有机碳同位素反而会偏负。

4 结论

全球变暖对青藏高原不同类型湖泊的碳埋藏速率的影响存在显著差异, 不同因素通过影响湖泊水位、水温变化及营养物质输入来影响湖泊生产力变化, 从而影响湖泊有机碳埋藏速率。以降水和冰川融水为主要补给源的阿翁错, 气温升高导致更多冰川融水注入湖泊, 引起湖面扩张, 土壤中埋藏的各类元素为底栖藻类生长提供了丰富的营养物质, 湖泊生产力提高; 但当大量冰川融水快速注入湖泊时, 湖水温度迅速下降, 导致湖泊生产力下降, 有机碳埋藏速率降低。对于受到人类活动影响的托素湖,

即使在降水总体增加的情况下, 当农业播种面积增加时, 农业耗水量增加导致湖泊补给水量仍然减少; 湖泊水位下降导致湖泊底部光照条件变好, 湖泊生产力提高, 固碳量增加。全球变暖造成的气温变化不及人类活动对湖泊生产力的影响显著。综上所述, 不论是气候要素变化还是人类活动, 影响湖泊碳循环过程主要是通过调节湖泊水位、湖泊水体温度及营养物质输入等因素来影响藻类的光合作用过程, 进而影响湖泊固碳量及碳埋藏速率等。

需要注意的是, 对于水深较深且生产力较高的湖泊, 不同位置碳循环过程可能不同, 需要根据有机碳含量与有机碳同位素值的关系具体判定。因此, 在分析湖泊生产力及碳循环过程时需综合考虑不同要素的影响。

参考文献(References):

- [1] Cole J, Caraco N, Kling G et al. Carbon dioxide supersaturation in the surface waters of lakes[J]. *Science*, 1994, 265: 1568-1570.
- [2] Anderson N J, Heathcote A J, Engstrom D R. Anthropogenic alternation of nutrient supply increases the global freshwater carbon sink[J]. *Science Advances*, 2020, 6: 1-8.
- [3] Lin Q, Liu E F, Zhang E L et al. Spatial variation of organic carbon sequestration in large lakes and implications for carbon stock quantification[J]. *Catena*, 2021, 208: 105768.
- [4] Stevenson M A, McGowan S, Pearson E J et al. Anthropocene climate warming enhances autochthonous carbon cycling in an upland Arctic lake, Disko Island, West Greenland[J]. *Biogeosciences*, 2021, 18: 2465-2485.
- [5] Liu J B, Liu H X, Chen H et al. Anthropogenic warming reduces the carbon accumulation of Tibetan Plateau peatlands[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2022, 281: 107449.
- [6] 张国庆, 王蒙蒙, 周涛, 等. 青藏高原湖泊面积、水位和水量变化遥感监测研究进展[J]. *遥感学报*, 2022, 26(1): 115-125. [Zhang Guoqing, Wang Mengmeng, Zhou Tao et al. Progress in remote sensing monitoring of lake area, water level, and volume changes on the Tibetan Plateau. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022, 26(1): 115-125.]
- [7] Zhang G Q, Yao T D, Piao S L et al. Extensive and drastically different alpine lake changes on Asia's high plateaus during the past four decades[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44: 252-260.
- [8] Jia J J, Wang Y F, Lu Y et al. Driving mechanisms of gross primary geographical patterns for Qinghai-Tibet Plateau lake systems[J]. *Science of Total Environment*, 2021, 791: 148286.
- [9] Wang M, Wu J H, Chen H et al. Temporal-spatial pattern of organic carbon sequestration by Chinese lakes since 1850[J]. *Limnology and Oceanography*, 2018, 63: 1283-1297.

- [10] Zhang G Q, Yao T D, Xie H J et al. An inventory of glacial lakes in the Third Pole region and their changes in response to global warming[J]. *Global Planet Change*, 2015, 131: 148-157.
- [11] Cardille J A, Carpenter S R, Foley J A et al. Climate change and lakes: Estimating sensitivities of water and carbon budgets[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114: G03011.
- [12] Striegl R G, Kortelainen P, Chanton J P et al. Carbon dioxide partial pressure and ^{13}C content of north temperate and boreal lakes at spring ice melt[J]. *Limnology and Oceanography*, 2001, 46: 941-945.
- [13] Zhang Y Z, Jones M, Zhang J W et al. Can $\delta^{18}\text{O}$ help indicate the causes of recent lake area expansion on the western Tibetan Plateau? A case study from Aweng Co[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2021, 65: 169-180.
- [14] 付霞, 张家武, 王林, 等. 近期人类活动对湖泊沉积记录的影响——以托素湖为例[J]. *第四纪研究*, 2016, 36(6): 1456-1465. [Fu Xia, Zhang Jiawu, Wang Lin et al. Recent human impacts on sedimentary record: A case from Lake Toson. *Quaternary Research*, 2016, 36(6): 1456-1465.]
- [15] Li X Z, Zhou X, Liu W G et al. Carbon and oxygen isotopic records from Lake Tuosu over the last 120 years in the Qaidam Basin, Northwestern China: The implications for paleoenvironmental reconstruction[J]. *Global Planet Change*, 2016, 141: 54-62.
- [16] Li X Z, Liu W G, Xu L M. Stable oxygen isotope of ostracods in recent sediments of Lake Gahai in the Qaidam Basin, Northwest China: The implications for paleoclimatic reconstruction[J]. *Global Planet Change*, 2012, 94-95: 13-19.
- [17] 丁宗艳, 张家武, 杨盼盼, 等. 柴达木盆地托素湖不同位置岩芯沉积物指标对比及其环境意义[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(1): 259-270. [Ding Zongyan, Zhang Jiawu, Yang Panpan et al. Comparison of sediment proxies of cores and their environmental significance at different locations of Lake Toson in Qaidam Basin. *Journal of Lake Science*, 2020, 32(1): 259-270.]
- [18] Zhang Y Z, Zhang J W, McGowan S et al. Climatic and environmental change in the western Tibetan Plateau during the Holocene, recorded by lake sediments from Aweng Co[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2021, 259: 106889.
- [19] Håkanson L, Jansson M. Principles of lake sedimentology[M]. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer-Verlag, 1983.
- [20] Leng M J, Marshall J D. Palaeoclimate interpretation of stable isotope data from lake sediment archives[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2004, 23: 811-831.
- [21] Craig H. The measurement of oxygen isotope palaeotemperatures[M]//Tongiorgi E. Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Palaeotemperatures. Pisa, Consiglio Nazionale delle Ricerche Laboratorio di Geologia Nucleare, 1965: 161-182.
- [22] 德令哈市地方编纂委员会. 德令哈市志[M]. 北京: 方志出版社, 2014. [Delingha Local Chronicles Compilation Committee. De-lingha Chronicles. Beijing: China Local Records Press, 2014.]
- [23] 刘晓雪, 温忠辉, 束龙仓, 等. 近40年可鲁克湖-托素湖面积变化及影响因素分析[J]. *水资源保护*, 2014, 30(1): 28-33. [Liu Xiaoxue, Wen Zhonghui, Shu Longcang et al. Analysis of surface area changes of Keluke and Tuosu Lakes over past 40 years and influencing factors. *Water Resources Protection*, 2014, 30(1): 28-33.]
- [24] 冯林传. 巴音河山前冲洪积平原地下水资源开发利用研究[D]. 西安: 长安大学, 2011. [Feng Linchuan. Study on groundwater resource development of piedmont alluvial plain in Bayin River. Xi'an: Chang'an University, 2011.]
- [25] 杨炳超, 顾小凡, 党学亚, 等. 青海省巴音河流域地下水对河流洪水入渗的响应特征研究[J]. *水利与建筑工程学报*, 2021, 19(4): 180-185. [Yang Bingchao, Gu Xiaofan, Dang Xueya et al. Response characteristics of groundwater to flood infiltration in Bayin River Basin, Qinghai Province. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2021, 19(4): 180-185.]
- [26] Zhang G. Long-term sequence dataset of lake area on the Tibetan Plateau (1970—2013)[DB]. A Big Earth Data Platform for Three Poles. 2018. DOI: 10.11888/Lake.tpe.249466.file.
- [27] Bernasconi S M, Barbieri A, Simona M. Carbon and nitrogen isotope variations in sedimenting organic matter in Lake Lugano[J]. *Limnology and Oceanography*, 1997, 42: 1755-1765.
- [28] Meyers P A, Teranes J L. Sediment organic matter[M]// Last W M et al. Tracking environmental change using lake sediments, Physical and Geochemical Techniques, vol. 2. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [29] Staehr P A, Sand-Jensen K. Seasonal changes in temperature and nutrient control of photosynthesis, respiration and growth of natural phytoplankton communities[J]. *Freshwater Biology*, 2006, 51: 249-262.
- [30] Tolu J, Rydberg J, Meyer-Jacob C et al. Spatial variability of organic matter molecular composition and elemental geochemistry in surface sediments of a small boreal Swedish lake[J]. *Biogeosciences*, 2017, 14(7): 1773-1792.
- [31] Zhang C, Zhao C, Zhou A F et al. Late Holocene lacustrine environmental and ecological changes caused by anthropogenic activities in the Chinese Loess Plateau[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2019, 203: 266-277.
- [32] Kosaka Y, Xie S P. Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling[J]. *Nature*, 2013, 501: 403-407.
- [33] Ward J V, Malard F, Tockner K et al. Influence of ground water on surface water conditions in a glacial flood plain of the Swiss Alps[J]. *Hydrological Processes*, 1999, 13: 277-293.
- [34] Zhao Y, Yu Z C, Chen F H et al. Sensitive response of desert vegetation to moisture change based on a near-annual resolution pollen record from Gahai Lake in the Qaidam Basin, Northwest China[J]. *Global Planet Change*, 2008, 62: 107-114.

Impact of global warming on lake productivity in different lakes on the Qinghai-Xizang Plateau

Zhang Yuzhi^{1,2}, Ma Xueyang³, Li Qian¹, Ren Jiao⁴

(1. College of Research and Environment, Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan 030006, Shanxi, China; 2. College of Earth and Environmental Sciences, Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education), Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, China West Normal University, Nanchong 637009, Sichuan, China; 4. Research Institute of Transition of Resource-based Economics, Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan 030006, Shanxi, China)

Abstract: Understanding the relationship between climate change and the lake ecosystem variations is crucial for studying the impact of global warming on the lake carbon cycling process. However, less is known of how lake ecosystem variations responding to the global warming in different lakes on the Qinghai-Xizang Plateau (TP) where thousands of lakes distributed. Here we present comparison researches from Aweng Co (81°37'48"E-81°48'00"E, 32°42'00"N-32°48'36"N, 4 430 m a.s.l.) and Toson Lake (96°50'00"E-97°03'00"E, 37°04'00"N-37°13'00"N, 2 808 m), they are closed lakes with different hydrological process. Aweng Co (pH is 9.2, salinity is 29.5 g/L) is mainly supplied by glacier melt water via groundwater and precipitation. And Toson Lake (pH is 8.4, salinity is 35.7 g/L) is at the end of Bayin River drainage basin, and it is fed by precipitation and the flowing from Herleg Lake. There are villages and farmland in the upstream of the Toson Lake. Two sediment cores were drilled from the lake center in Aweng Co and Toson Lake, they were AWC2015 (445 cm) and TSL17G (55 cm), respectively. The top sediment of AWC2015 and TSL17G were measured by ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs. We focused on the lake carbon cycling process in the two lakes in recent 100 years. Multi-proxy including organic carbon isotope, total organic carbon content and organic carbon accumulation rate were measured to reconstruct the lake productivities and carbon burial rates in two lakes. Results showed that global warming had different impacts on the photosynthetic process in different lakes depending on the lake level, actual temperature and sunlight at the lake bottom. In Aweng Co, when the values of $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ tended to be negative, and TOC content increased, indicating that more glacier melt water supplied the lake, resulting in expanding of the lake area, more nutrient supplying the lake, and improving of the lake productivity consequently. However, when plenty of glacier melt water flowed into the lake in short time and the water temperature decreased rapidly, slowing down the photosynthetic process and resulting in decreased carbon burial rate consequently. In the human-disturbed lake, the variations of $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ and TOC content indicated that human activity played more important roles in driving aquatic biomass by influencing sunlight at the lake bottom via lake level change. With the increasing of water consumption for agriculture, the water that finally supplied the lake would decrease, and resulted in lower lake level and more light reaching the lake bottom, favoring the growth of the benthic algae, and the organic carbon burial rate increased finally, and vice versa. Therefore, global warming had different impacts on the carbon cycling process in lakes with different hydrological process.

Key words: the Qinghai-Xizang Plateau; lakes; climate change; lake productivity; organic carbon burial rate