

近百年来湖泊有机碳与无机碳埋藏响应流域开发的协同变化 ——以石林喀斯特地区为例*

王 露, 陈光杰**, 黄林培, 孔令阳, 李 蕊, 韩桥花, 李 平, 索 旗, 周 起

(云南师范大学地理学部, 云南省高原地理过程与环境变化重点实验室, 昆明 650500)

摘 要: 有机碳和无机碳的流域输出是湖泊碳埋藏的重要驱动因子, 而喀斯特地区无机碳循环具有反应迅速且对人类活动影响敏感的特点。在流域开发持续增强的背景下, 喀斯特地区湖泊有机碳和无机碳的来源、含量与埋藏通量可能会出现同步变化的协同模式。本文以云南省石林喀斯特地区流域土地利用类型不同的两个中型湖泊(长湖、月湖)开展对比分析, 通过对沉积物钻孔的土壤侵蚀强度(磁化率)、流域外源输入(C:N 比值)、水动力(粒度)、营养盐(总氮、总磷)、藻类生产力(叶绿素色素)等代用指标的分析, 结合监测数据和历史资料重建了两个湖泊环境变化的近百年历史, 并定量识别了有机碳和无机碳埋藏响应流域开发的变化特征与协同模式。沉积物磁化率和 C:N 比值结果揭示了流域地表侵蚀和外源输入的阶段特征, 同时总氮和总磷含量记录了长湖和月湖营养水平上升的长期模式。在流域森林覆被较高(33.43%)的长湖中, 全岩和有机质 C:N 比值分别与磁化率信号呈显著正相关($r=0.95$ 和 $0.89, P<0.001$), 且与无机碳和有机碳含量呈显著负相关($r=-0.94, P<0.001$ 和 $r=-0.52, P=0.01$), 反映了森林植被退化时流域碳输出的减少对沉积物碳含量的影响。而在流域耕地覆被为主(60.98%)的月湖中, 全岩和有机质 C:N 比值与磁化率信号呈显著负相关($r=-0.54, P<0.01$ 和 $r=-0.67, P<0.001$), 且全岩 C:N 比值与无机碳含量($P=0.15$)无显著关系, 反映了耕作强度的增加可能促进了水体富营养化和内源输入的增强。在两个湖泊中, 营养水平的上升和内源生产力的增加促进了有机碳含量的快速增加。进一步分析表明, 近百年来长湖有机碳与无机碳含量变化的同步性明显($r=0.54, P<0.001$)而在月湖中无显著关系($P=0.20, P>0.05$)。两个湖泊中沉积通量的变化均与全岩 C:N 比值呈显著正相关($r=0.48$ 和 $0.45, P\leq 0.001$), 且有机碳与无机碳埋藏通量均呈现同步变化的显著特征($r=0.72$ 和 $0.85, P<0.001$)。其中长湖的无机碳埋藏通量显著高于有机碳埋藏通量, 而月湖的有机碳埋藏通量略高于无机碳埋藏通量, 反映了岩溶地区流域外源输入和水体富营养化的差异性驱动影响。在流域开发增强的梯度下, 森林退化会降低流域碳输出的负荷, 而农业扩张和水体富营养化会促进藻类生长和内源有机碳的累积。因此, 流域土地利用和水体营养水平对湖泊无机碳和有机碳埋藏变化的长期轨迹和协同模式产生了重要影响, 对喀斯特地区的碳库评估需要考虑无机碳循环的重要性。

关键词: 喀斯特区; 植被退化; 富营养化; 碳埋藏; 协同变化

Synchronic changes of lake organic and inorganic carbon burial in response to catchment development over the past century: A case study of Shilin Karst area*

Wang Lu, Chen Guangjie**, Huang Linpei, Kong Lingyang, Li Rui, Han Qiaohua, Li Ping, Suo Qi & Zhou Qi
(Provincial Key Laboratory of Plateau Geographical Processes and Environmental Change, Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, P.R.China)

Abstract: Catchment-scale exports of organic and inorganic carbon plays an important role in affecting the lake sediment carbon burial. Inorganic carbon cycling in Karst landscapes is sensitive to human activities due to the rapid kinetics of carbonate dissolution. As with intensive watershed development, the source, content and burial loading of organic and inorganic carbon in Karst region may show a synchronous change. This study selected two medium-sized lakes (Lake Changhu and Lake Yuehu) with contras-

* 2021-11-29 收稿; 2022-01-22 收修改稿。

国家重点研发计划项目(2017YFA0605202)、国家自然科学基金项目(42171072, 41771239)和云南省院士工作站项目(202005AF150005)联合资助。

** 通信作者; E-mail: guangjiechen@gmail.com.

ting land uses patterns in the Shilin Karst area of central Yunnan for sediment surveys. With the proxies analyses for soil erosion (i.e. magnetic susceptibility (MS)), catchment allochthonous input (C:N ratio), lake hydrology (particle size), nutrient levels (total phosphorus and nitrogen) and primary production (i.e. algal pigments), together with monitoring data and historical records, the history of limnological changes and catchment development over the last century for both lakes were reconstructed. Furthermore, long-term variation and synchronic pattern of sediment organic carbon (OC) and inorganic carbon (IC) burial in the context of catchment development were quantified. The sediment MS signal recorded the fluctuation in soil erosion intensity and a general pattern of long-term nutrient enrichment in both lakes. In Lake Changhu, with a higher land cover of forest (33.43%), the bulk and organic C:N ratios were positively related with the MS signal ($r=0.95$ and 0.89 , $P<0.001$) but showed a negative relationship with sediment inorganic and organic carbon content ($r=-0.94$, $P<0.001$ and -0.52 , $P=0.01$), respectively, reflecting a significant impact of catchment carbon input. In Lake Yuehu, with a current land cover dominated by the cropland (60.98%), the bulk and organic C:N ratios were negatively related with the MS signal ($r=-0.54$, $P<0.01$ and -0.67 , $P<0.001$) and the bulk C:N ratio showed no relationship with the sediment inorganic content ($P=0.15$), reflecting that the cropland expansion may have enhanced lake eutrophication and autochthonous input. In both lakes, nutrient enrichment and algal production enhanced the rapid OC accumulation. Additional analyses showed that there existed a significantly synchronous change between OC and IC content in Lake Changhu ($r=0.54$, $P<0.001$) but not in Lake Yuehu ($P=0.20$, $P>0.05$). In both lakes, sediment loading was positively related with bulk C:N ratio ($r=0.48$ and 0.45 , $P\leq 0.001$), and there also existed a significantly synchronous change between OC and IC loadings ($r=0.72$ and 0.85 , $P<0.001$). Furthermore, the IC burial rate was significantly higher than that of OC in Lake Changhu, while IC consistently lower than OC in the nutrient-rich Lake Yuehu, reflecting differential forcing of vegetation degradation and lake eutrophication. With the intensive development in watershed, forest degradation can reduce the loading of catchment carbon export, while agricultural expansion and eutrophication would promote the growth of algae and the OC accumulation rate. Therefore, land use and lake nutrient levels can significantly impact the long-term trajectory and synchronic variation of sediment OC and IC burial. Thus, IC cycling should be considered in the regional assessment of carbon stock in karst areas.

Keywords: Karst landscape; vegetation degradation; eutrophication; carbon burial; synchronic variation

湖泊是陆地水圈的重要碳库,流域输出过程和土地利用类型是影响湖泊碳埋藏的重要因子^[1].最新估算表明,陆地输出到内陆水体的碳通量为 5.1 Pg C/a 且呈逐年增加趋势,可能对全球陆地遗失碳汇产生了重要贡献^[2].陆地生态系统中,森林有机碳的 44% 存储在土壤中^[3],植物残体和腐殖质是土壤陆源有机质的主要组成部分.随着森林砍伐的增强,植物凋落物减少导致了土壤有机碳含量逐渐降低^[4-6],流域输出到湖泊水体的有机碳通量也随之降低^[7].随着森林等植被的持续退化,土壤 CO_2 浓度下降同时地表径流深度下降、土壤表层含水量降低,导致流域地表的溶蚀作用减弱和溶解性无机碳 (DIC) 输出降低^[8-10];而土壤有机质分解产生的有机酸降低,也叠加导致了流域 DIC 输出的减少^[11].因此在森林退化的背景下,流域碳输出负荷的减少可能导致了湖泊总有机碳 (TOC) 和无机碳 (TIC) 埋藏量出现持续下降的同步特征^[12-13].

随着人口快速增长和社会经济的持续发展,大量的森林被转变为农业耕地^[14].耕地化肥使用量的增加可以导致湖泊营养水平上升^[15-16],从而促进了湖泊藻类的生长和初级生产力的增加^[17-18].藻类死亡后有机残体沉积在湖泊底部,从而促进了湖泊有机碳的埋藏^[19].藻类光合作用吸收了水体中大量的 DIC,导致了水体 pH 上升和无机碳化学平衡的变化,可以促进自生碳酸盐沉淀和 TIC 埋藏^[20];同时,藻类可作为碳酸盐结晶核促进碳酸盐沉淀,促进湖泊无机碳埋藏^[21].因此在流域农业扩张的背景下,水体富营养化可以导致湖泊有机碳和无机碳埋藏量出现同步上升的协同效应.

全球喀斯特地区约占陆地面积的 15%,云南地区喀斯特地区广泛分布,占全省国土面积的 28.17%^[22].碳酸盐在化学风化过程中具有反应快速且消耗大量 CO_2 的特征,导致喀斯特地区水体无机碳含量比非喀斯特地区高 6~10 倍.因此,喀斯特地区内陆水体碳循环对人类活动和流域土地利用的响应十分敏感^[23-24].目前对于内陆水体碳库的研究主要集中于有机碳埋藏^[25-27],缺乏对沉积物无机碳埋藏的定量估算及其与有机碳协同变化的模式识别.对喀斯特地区湖泊有机碳和无机碳的变化模式及其驱动机制的研究是识别喀斯特地区碳循环的重要内容,也是精准评估全球碳汇遗失的关键问题之一.

为了识别喀斯特地区不同土地利用类型下湖泊有机碳和无机碳埋藏变化的长期特征及其协同关系,本研究以位于喀斯特地区但具有不同土地利用历史的两个云南湖泊为研究对象,通过沉积物的多指标记录重

建和湖泊对比分析,识别近百年来湖泊碳埋藏的变化历史、有机碳与无机碳的协同变化模式及其与流域开发类型的关系. 本研究拟解决的关键科学问题包括:(1)森林退化和流域侵蚀增强下,湖泊有机碳和无机碳含量是否出现了同步减少;(2)农业开发增强和营养水平上升的背景下,湖泊有机碳和无机碳含量是否出现了长期增加的同步特征;(3)喀斯特地区流域开发类型不同的湖泊中,近百年来有机碳和无机碳埋藏速率是否随着流域外源和湖泊内源输入的影响出现了协同变化的长期模式.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

长湖(24°43'N, 103°25'E; 1907 m. a.s.l.)和月湖(24°50'N, 103°27'E; 1906 m a.s.l.)位于云南省中部地区石林县(图 1),流域基岩均为碳酸盐且溶蚀地貌广泛发育^[28]. 长湖的水体面积为 1.5 km²,最大水深 13.2 m、平均水深 6.4 m,流域面积 12.09 km²;月湖为岩溶洼地积水形成的天然湖泊,水域面积 3.0 km²,最大水深 4.7 m、平均水深 2.9 m,流域面积 12.89 km². 长湖和月湖目前都为湖泊型水库,长湖以降水补给为主,月湖除降水补给之外,还经历多次库外引水工程. 近百年以来,文献记录显示长湖和月湖均经历了湖泊筑坝和坝体加高的过程. 其中,长湖在 1949 年之前筑坝,1957 年坝体加高至 8 m;月湖则经历数次筑坝和坝体改造工程,坝体最高为 9.5 m^[29-30].

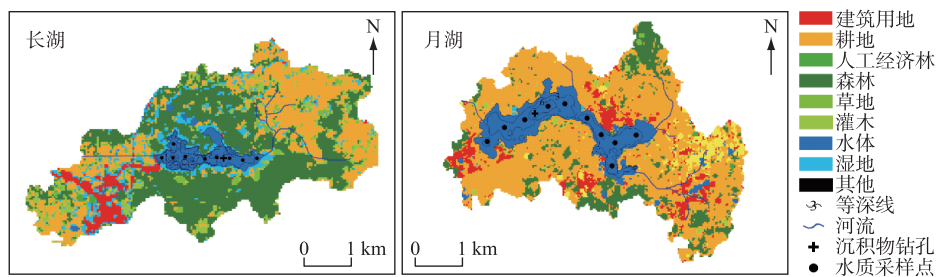


图 1 长湖和月湖的流域土地利用类型及采样点位置

Fig.1 Site map showing land-use cover and sampling locations of Lake Changhu and Lake Yuehu

研究区为亚热带高原季风气候区,以亚热带季风气候为主. 近 60 年的气象监测数据分析显示(图 2),石林地区平均气温总体呈上升趋势,而降水量则出现较大的波动,平均风速总体持续下降. 1959—1990 年间年平均气温为(16.26±0.65)℃(均值±1 SD),且气温相对稳定;1991—2019 年间出现增温趋势(增温幅度约为 0.78℃),年均气温为(17.04±0.68)℃. 近 60 年来降水量波动较大,多年平均降水量为(879.75±176.61)mm. 历史记录显示,森林覆盖度从 1949 年的 26%左右下降到 1972 年的 19.5%,而后从 1986 年的 22.89%增加到 1996 年的 31.8%^[29-30].

水质调查数据显示,长湖和月湖的水化学数据和水质指标呈现较大差异(表 1). 长湖的水体 pH 略低于月湖,其 DIC 浓度明显高于月湖,而两个湖泊水体的 DOC 浓度无显著差别. 长湖水体的透明度明显高于月湖,长湖水体的总磷(TP)和叶绿素(Chl.a)浓度均显著低于月湖,而水体总氮(TN)浓度相似,总体表明了长湖的营养水平等级和初级生产力显著低于月湖. 社会统计资料显示(图 2),1960s 以来石林县

表 1 石林县长湖和月湖的流域与湖沼学基本特征
Tab.1 Summary of catchment and limnological features of Lake Changhu and Lake Yuehu

参数	长湖	月湖
流域面积/km ²	12.09	12.89
湖泊面积/km ²	1.5	3.0
最大水深/m	13.2	4.7
平均水深/m	6.41±4.33	2.92±1.03
森林覆盖率/%	33.43	12.99
农田覆盖率/%	27.78	60.98
pH	8.81±0.10	8.95±0.24
溶解性无机碳/(mg/L)	26.92±3.89	15.76±4.97
溶解性有机碳/(mg/L)	8.55±0.84	8.50±1.60
透明度/m	2.55±0.45	0.68±0.47
总磷/(μg/L)	14.07±3.17	66.78±35.19
总氮/(mg/L)	0.77±0.11	0.68±0.23
叶绿素 a/(μg/L)	1.75±0.75	13.79±12.21

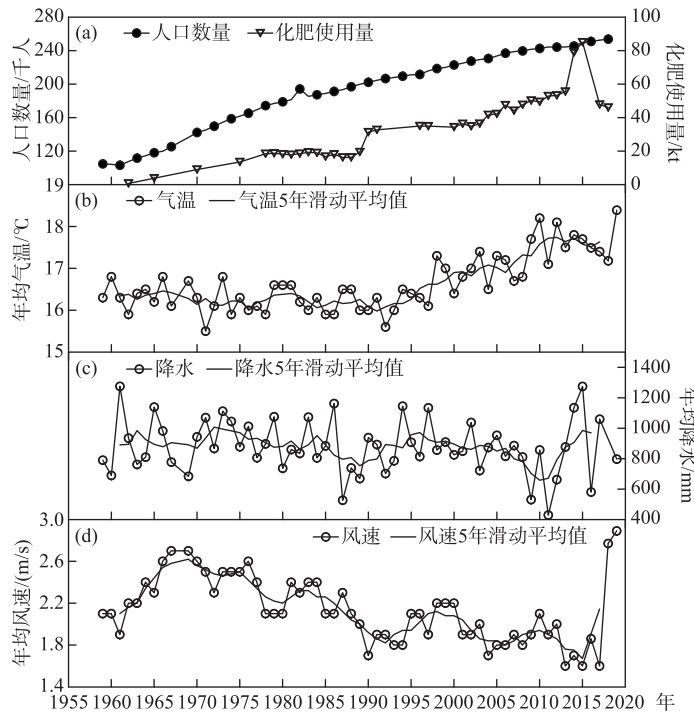


图 2 1958 年以来石林县人口数量、化肥使用量(a)以及气温(b)、降水(c)、风速(d)年平均数据

Fig.2 Time-series data showing the change of population size and fertilizer use (a), as well as the annual variation in air temperature (b), precipitation (c) and wind speed (d) in Shilin County since 1958

人口数量和化肥使用量呈逐年增加的趋势,尤其是 1990 年开始化肥使用量增加明显^[29-31]。

1.2 土地利用二级分类数据提取

本研究利用 2015 年 Landsat TM/OLI 遥感影像,采用辐射校准、大气校正和几何校正等方法处理遥感数据提取了两个湖泊和流域面积。将修正的归一化差水指数(MNDWI)值与 Otsu 算法相结合,自适应地确定提取湖表面积的最佳分割阈值^[32]。同时结合 2015 年 Google Earth 卫星地图,提取了两个流域的土地利用二级分类数据(图 1)。土地利用二级分类结果显示(表 1),长湖流域以森林覆被为主(占比 33.43%),耕地面积次之(占比 27.28%);月湖流域以农业用地为主(占比 60.98%),森林面积较低(占比 12.99%)。

1.3 沉积物采集与年代测定

2018 年 4 月开展湖泊沉积物采集工作,使用瑞典 HTH 重力采样器分别在长湖(24°42'58"N, 103°25'21"E; 钻孔编号:SLCH-GC2, 采样水深 5.3 m, 钻孔长度 44 cm)和月湖(24°50'24"N, 103°26'26"E; 钻孔编号:SLYH-GC1, 采样水深 4.5 m, 钻孔长度 28 cm)提取沉积岩芯,分别获取平行样(SLCH-GC1、SLYH-GC3)用于年代学测定。所有沉积样品均在野外完成分样,钻孔顶部 5 cm 按 0.5 cm 间隔分样,5 cm 以后分样间隔为 1 cm。沉积物样品放置在 4°C 低温箱中避光保存,带回实验室后进行冷藏保存。

本研究利用²¹⁰Pb 和¹³⁷Cs 测年方法建立了沉积物样品近百年来年代序列。测定样品按钻孔深度 0~15 cm 测样间隔为 1 cm, 15 cm 以下深度间隔 2 cm, 利用美国 Canberra 公司生产的高纯锗探测器测定放射性核素²¹⁰Pb 和¹³⁷Cs 比活度,并应用恒定补给速率模型(CRS)建立该钻孔的年代-深度时间系列^[33]。

1.4 沉积物指标分析

沉积物低频磁化率(χ_{LF})可以反映流域地表侵蚀强度的变化^[34]。具体测定方法为:将冷冻干燥至恒重的沉积物装入 1 cm³ 的无磁聚苯乙烯测试盒内并压实,放入 MS-2 型磁化率仪(英国 Bartington 公司)进行测试,测得低频(465 Hz)磁化率(测量精度为±1%)。样品测试在中国科学院南京地理与湖泊研究所完成。

沉积物样品的粒径组成通过马尔文激光粒度仪来测试^[35]。样品处理的具体方法包括:称取 0.5 g 冷冻干燥至恒重的沉积物样品置于烧杯之中,在恒温水浴锅中隔水加热,加入适量 10% 的 H_2O_2 以去除有机质,加入足量 10% HCl 以去除碳酸盐,充分反应之后加入约 100 mL 去离子水,静置 24 h 之后去除上清液。加入 10 mL 的 5 mol/L 的六偏磷酸钠分散剂,超声波震荡 10 min 之后进行仪器测定。依据粒径大小分为黏土 (<2 μm)、粉砂 (2~63 μm) 和砂 (>64 μm),并计算中值粒径大小。

沉积物 TP 含量的测定采用碱熔—钼锑抗分光光度法^[36]。具体方法为:称取 0.25 g 冷冻干燥至恒重的沉积物样品,置于镍坩埚之中,加入几滴无水乙醇湿润样品,加入 2 g 氢氧化钠,平铺于样品表面,盖上坩埚盖;放入马弗炉之内分别经 400 和 640°C 加热 15 min,冷却后取出,在坩埚内加入 10 mL 去离子水加热至 80°C,待熔块溶解后,将所有溶液转移至 50 mL 离心管之中,再用 10 mL 3 mol/L 的硫酸溶液分 3 次润洗坩埚,将所有溶液转移至离心管中,以 3500 转/min 离心分离 10 min,将所有上清液转移至 100 mL 容量瓶,用去离子水定容。取 10 mL 样品置于 50 mL 比色管中,向比色管中加入 2~3 滴 0.002 g/mL 的 2,4 二硝基酚指示剂,加入 1 mL 0.1 g/mL 的抗坏血酸溶液,混匀,30 s 后加入 2 mL 0.13 g/mL 的钼酸盐溶液,充分混匀,室温下放置 15 min,用 30 mm 比色皿在 700 nm 波长处测量吸光度,最后计算含量。

沉积物 Chl. *a* 含量采用紫外分光光度法^[37]进行测定。具体步骤包括:称取 0.3~0.5 g 冷冻干燥至恒重的样品于 50 mL 聚乙烯离心管中,加入 90% 丙酮 25 mL,避光静置 10 h,采用 0.45 μm 针头过滤器过滤于 100 mL 容量瓶中,重复上述步骤,反复萃取 4 次,滤液均移至容量瓶中,用 90% 丙酮定容至 100 mL 待测。取上述提取液 10 mL,用紫外可见分光光度计测定在 666 nm 波长的吸光值,即为 Chl. *a* 的特征吸收峰,读出其吸光值 A_{666} ,空白样为 90% 丙酮,吸光值为 A_0 。由下列公式求出沉积物 Chl. *a* 含量 ($\mu g/g$)。

$$Chl.a = (A_{666} - A_0) / \text{样品有机质含量} \times 100\% \quad (1)$$

沉积物样品的总碳 (TC)、TOC、TN 含量使用 Flash EA 元素分析仪 (美国 Thermo Scientific 公司),采用快速燃烧法测定^[38],TIC 含量的计算采用 TC 和 TOC 的差值获得。围绕沉积物 TOC 和 TIC 等指标的干重含量数据,结合年代模型和沉积速率计算每个样品在单位面积上每年累积的总量 (即埋藏通量)。以上沉积物样品的测试与分析在云南省高原地理过程与环境变化重点实验室完成。

1.5 数理统计分析

本研究的数据分析中首先对环境数据进行标准化转换,使数值更符合正态分布。应用多元线性回归模型对响应变量中的显著驱动因子进行识别,其中选取方差膨胀系数 (VIF) < 20 的环境因子进行基于 AIC 信息准则的前向选择,以此来识别关键环境因子及其驱动方向和驱动强度^[39]。本研究中的沉积物地层图和散点图在 Grapher (13.0 版本) 中完成,流域土地利用、采样点分布和等深线图在 ArcMap (10.4 版本) 中完成,数据统计分析主要在 R (4.0.3 版本) 中完成。

2 结果

2.1 年代模型建立

长湖年代序列显示 (图 3),沉积物 ^{210}Pb 比活度随深度增加总体呈衰减趋势,钻孔顶部 20 cm 呈指数级的下降趋势,且 ^{137}Cs 比活度的峰值出现在 18.5 cm。根据 CRS 深度—年代模型建立了该钻孔的年代学模型,结果表明 ^{137}Cs 比活度的峰值为 1957 年左右,与 1963 年左右北半球核试验导致的大气 ^{137}Cs 峰值基本一致。钻孔的沉积通量由底部向顶部呈现出先下降再上升后下降的趋势 (平均沉积通量为 $(0.04 \pm 0.01) g / (cm^2 \cdot a)$),最大沉积通量出现在钻孔 10~11 cm 处 ($0.06 g / (cm^2 \cdot a)$)。

月湖沉积年代序列显示 (图 3),沉积物 ^{210}Pb 比活度随深度增加总体呈指数衰减趋势。而 ^{137}Cs 比活度的峰值出现在 24.5 cm,可能反映了 Cs 作为一种可移动元素在碱性湖泊中垂直运移能力的增强^[40]。因此,本文以 ^{210}Pb 沉积记录建立了 CRS 深度—年代模型作为该钻孔的年代学模型。钻孔的沉积通量由底部向顶部呈现出先上升再下降后上升的趋势,其平均沉积通量 ($(0.09 \pm 0.04) g / (cm^2 \cdot a)$) 显著高于长湖,最大沉积通量出现在 9~10 cm (沉积速率为 $0.17 g / (cm^2 \cdot a)$)。

2.2 沉积物粒度与磁化率指标的变化特征

两个湖泊的粒度组成均以粉砂为主,且近几十年来均出现了一定程度的波动 (图 4a, 4g)。长湖中值粒径

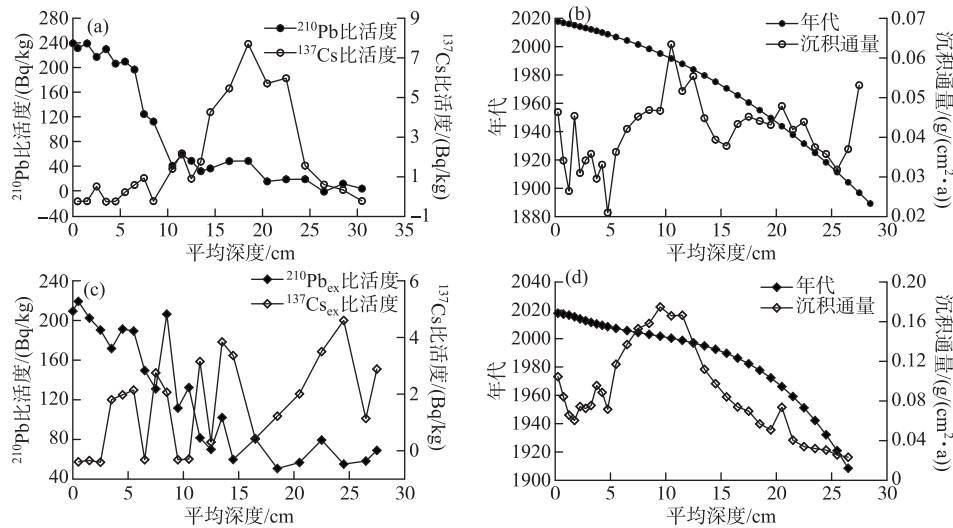


图3 长湖(a,b)和月湖(c,d)中沉积物 ^{210}Pb 、 ^{137}Cs 比活度曲线和CRS年代模型结果与沉积速率
Fig.3 Depth profiles showing unsupported ^{210}Pb and ^{137}Cs activities, CRS-based sediment ages and sediment flux for Lake Changhu (a, b) and Lake Yuehu (c, d)

为 $(6.83 \pm 2.08) \mu\text{m}$,岩性以粉砂为主(49.64%~74.60%)。其中1925—2000年期间,总体来看长湖中值粒径变化不大(平均值为 $(5.63 \pm 1.85) \mu\text{m}$),黏土含量波动下降但保持较高比例(平均值为 $30.92\% \pm 4.73\%$),粉砂占比呈波动下降趋势(平均值为 $57.76\% \pm 5.84\%$);2000—2018年期间,长湖中值粒径增大(平均值为 $(8.31 \pm 1.20) \mu\text{m}$),黏土占比下降(平均值为 $21.19\% \pm 3.95\%$)而粉砂占比升高(平均值为 $69.69\% \pm 3.20\%$)。月湖沉积物中值粒径为 $(5.12 \pm 1.22) \mu\text{m}$,岩性以粉砂为主(53.16%~66.84%)。在1921—2000年期间,月湖中值粒径的变幅较小(平均值为 $(4.51 \pm 0.61) \mu\text{m}$),黏土含量波动下降(平均值为 $32.67\% \pm 2.25\%$)而粉砂占比总体呈波动上升趋势(平均值为 $61.76\% \pm 2.80\%$);而2000—2018年期间,中值粒径(平均值为 $(5.69 \pm 1.37) \mu\text{m}$)和粒径不同组分均出现了多次快速波动。

低频磁化率信号的结果显示,长湖和月湖呈现出不同的磁化率变化轨迹(图4c,4i)。1925—1990年间,长湖低频磁化率呈现出缓慢上升的趋势,1990—2005年期间呈现出快速下降的变化特征,磁化率信号自2005年开始快速降低并稳定在低值,指示了地表侵蚀强度呈现逐步增加然后快速减弱的波动轨迹。月湖的结果显示,1921—2010年期间磁化率强度呈现比较稳定的变化特征,而磁化率信号在2010年后呈现出快速上升的趋势可能指示了耕地扩张和地表侵蚀增强。

进一步的数据分析表明,长湖中值粒径和磁化率信号之间呈显著的负相关关系($r = -0.60, P < 0.001$),而月湖中值粒径和磁化率之间呈显著的正相关关系($r = 0.38, P < 0.05$)。由此可见,1990年开始深水型的长湖中粒度指标可能反映了细颗粒物物质的增加与流域植被的逐步恢复,如磁化率信号与黏土含量之间呈显著正相关关系($r = 0.69, P < 0.001$),而与粉砂之间呈显著负相关关系($r = -0.77, P < 0.001$);月湖出现了磁化率与中值粒径的同步变化,可能反映了浅水湖区水文波动对极端干旱事件的响应更加敏感。

2.3 沉积物营养盐与藻类色素的变化特征

营养盐含量的结果显示,长湖TP含量变化范围为0.31~1.27 mg/g(平均值为 $(0.66 \pm 0.41) \text{mg/g}$)、TN含量变化范围为2.61~19.00 mg/g(平均值为 $(8.76 \pm 6.71) \text{mg/g}$),且具有明显的阶段性特征。1925—2000年之间,TP和TN含量总体维持在较低的水平(平均值分别为 (0.33 ± 0.02) 和 $(3.12 \pm 0.47) \text{mg/g}$),2000年之后快速增加至 (1.08 ± 0.25) 和 $(15.70 \pm 3.61) \text{mg/g}$ 。月湖TP含量的变化范围为0.55~0.80 mg/g(平均值为 $(0.64 \pm 0.07) \text{mg/g}$)、TN含量为3.10~5.81 mg/g(平均值为 $(4.30 \pm 0.75) \text{mg/g}$),也具有明显的阶段性特征。月湖TP含量变化特征与长湖相似,1921—2000年之间TP含量基本维持在较低的水平(平均值为 (0.60 ± 0.02))

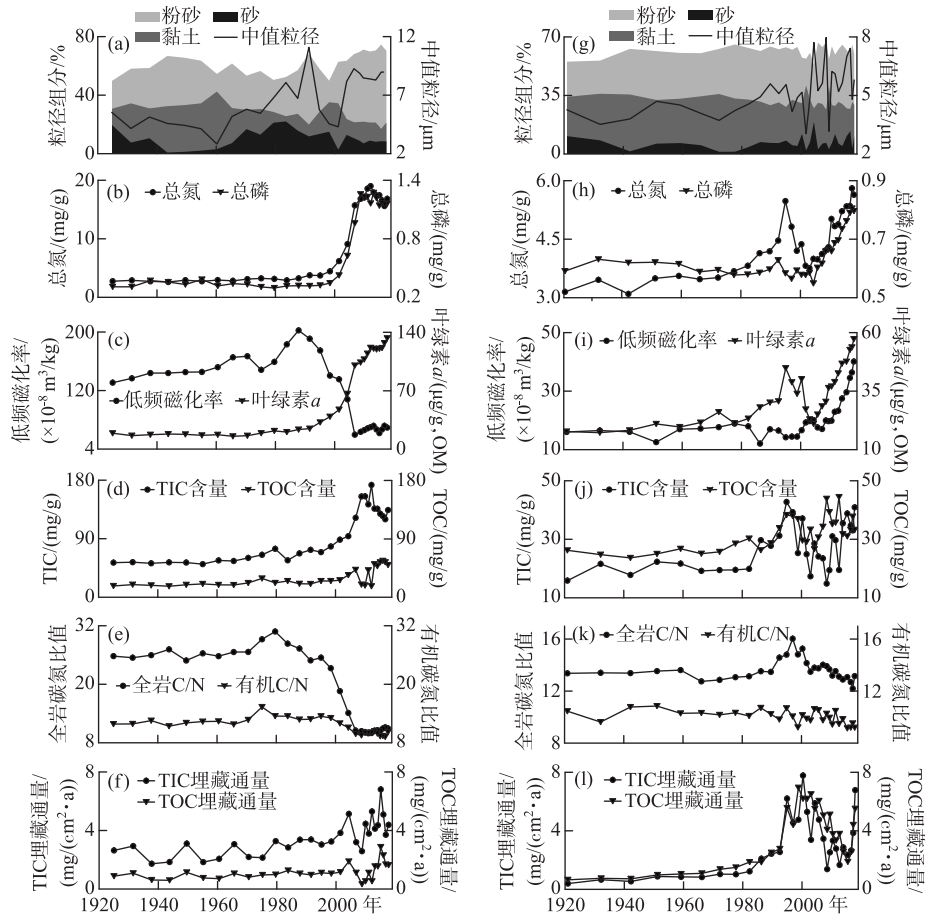


图4 长湖(a~f)和月湖(g~l)近百年以来沉积物粒度、总氮和总磷、低频磁化率和叶绿素a、总有机碳和总无机碳含量、全岩碳氮比和有机碳氮比、总有机碳埋藏通量和总无机碳埋藏通量的长期变化趋势

Fig.4 Time series showing changes in sediment grain sizes, total nitrogen and total phosphorus, low frequency susceptibility and sediment chlorophyll-a, total organic carbon and total inorganic carbon content, total organic carbon and total inorganic carbon flux in Lake Changhu (a-f) and Lake Yuehu (g-l)

mg/g),而2000年之后快速增加至 (0.68 ± 0.08) mg/g. TN含量(平均值为 (3.92 ± 0.63) mg/g)在1921—2000年之间呈上升趋势,2000年之后呈现出先下降后上升的波动趋势(平均值为 (4.67 ± 0.65) mg/g).对比分析表明,长湖和月湖中沉积物TP和TN含量均呈现显著的正相关关系($r=0.98$ 和 0.67 , $P < 0.001$).因此,在后续的数据分析中使用TN指标指代营养盐水平的长期变化特征.

Chl.a含量的结果显示,长湖和月湖在过去一百年来均呈现藻类生物量增加的长期趋势.其中,长湖Chl.a含量平均值为 (60.04 ± 46.24) $\mu\text{g/g}$ (变化范围为 $15.62 \sim 132.90$ $\mu\text{g/g}$),在1925—2000年之前藻类生物量呈现出缓慢上升的趋势(平均值为 (21.10 ± 6.19) $\mu\text{g/g}$),而2000年开始藻类生物量呈加速增加的特征(平均值为 (107.95 ± 23.68) $\mu\text{g/g}$).月湖Chl.a含量的波动范围为 $17.26 \sim 57.24$ $\mu\text{g/g}$ (平均值为 (32.28 ± 11.36) $\mu\text{g/g}$),在1921—1995年之前呈现缓慢上升的总体趋势(平均值为 (24.61 ± 7.29) $\mu\text{g/g}$);1995年开始藻类生物量总体较高(含量为 (37.83 ± 10.25) $\mu\text{g/g}$),呈现出先下降后上升的波动变化且自2005年开始出现快速增

加的趋势. 统计结果显示, 月湖和长湖沉积物 Chl.*a* 含量均随 TN 含量的增加而显著增加 ($r=0.99$ 和 0.95 , $P<0.001$).

2.4 沉积物碳含量、碳氮比值和碳埋藏通量的变化特征

长湖 TOC 含量为 (29.70 ± 13.24) mg/g (变化范围为 17.32~56.42 mg/g), 显著低于 TIC 含量 ((92.51 ± 38.73) mg/g; 变化范围为 50.91~172.68 mg/g), 两个指标均呈缓慢上升的长期趋势 (图 4d). 在 1925—2000 年期间, TOC 含量变化相对比较平稳 (平均值为 (21.57 ± 3.21) mg/g), 2000 年之后总体呈波动上升的趋势 (平均值为 (36.69 ± 14.05) mg/g). 而 TIC 含量在 1925—2009 年期间 (平均值为 (75.63 ± 30.40) mg/g) 出现总体上升的长期趋势并在 2009 年达到峰值, 2009 年之后呈下降趋势 (平均值为 (136.83 ± 15.14) mg/g). 月湖的沉积物 TOC 含量平均为 (31.84 ± 5.51) mg/g (变化范围为 23.64~44.44 mg/g), 总体高于 TIC 平均值 ((26.65 ± 7.92) mg/g; 变化范围为 14.85~42.76 mg/g), 近百年来两个指标均呈现较大的波动且同步变化特征较为明显 (图 4j). 其中 1921—1995 年期间, TOC (平均值为 (27.93 ± 3.98) mg/g) 和 TIC (平均值为 (23.75 ± 7.06) mg/g) 总体均呈上升趋势. 1995 年开始, TOC 出现较大波动 (平均值为 (34.85 ± 4.67) mg/g), 并在 2004 年达到此阶段的最低值 (26.64 mg/g); 而 TIC 也呈先下降后上升的变化趋势 (平均值为 (29.49 ± 7.84) mg/g), 在 2008 年左右达到最低值 (14.85 mg/g). 相关分析 (图 5b) 表明, 长湖和月湖中沉积物 Chl.*a* 含量均与 TOC 含量呈显著正相关关系 ($r=0.71$ 和 0.68 , $P<0.001$), 表明了随着水体的富营养化内源有机质对 TOC 组成的贡献持续增加. 同时 TOC 与 TIC 含量的长期变化在长湖中呈现显著正相关 ($r=0.54$, $P<0.001$) 而在月湖中无明显关系 ($r=0.20$, $P>0.05$), 指示了月湖中沉积物 TOC 与 TIC 在来源上具有较强的差异性 (图 5c).

长湖沉积物全岩 C/N 值和有机 C/N 值呈现同步变化的趋势, 且 2005 年以来两个比值分布范围相似 (图 4e). 1925—1985 年之间两个比值均呈缓慢上升的变化趋势 (平均值分别为 26.90 ± 1.66 和 12.60 ± 1.02), 1985—2005 年期间全岩 C/N 值快速下降 (平均值为 22.27 ± 4.54); 在 2005—2018 年期间全岩 C/N 值均低于 12 (平均值为 10.51 ± 0.37), 且接近于有机 C/N 值的分布范围 (平均值为 9.82 ± 0.37). 月湖沉积物的全岩 C/N 值在 1921—1995 年期间呈缓慢上升的变化趋势 (平均值为 13.50 ± 0.57), 1995—2018 年之间快速下降 (13.71 ± 0.91); 有机 C/N 值 (10.02 ± 0.50) 在近百年间总体呈缓慢下降的趋势, 比值总体变化不显著 (图 4k). 统计分析显示, 全岩 C/N 比值和有机 C/N 比值在长湖中呈现显著的正相关 ($r=0.90$, $P<0.001$) 而在月湖中不显著 ($r=0.17$, $P=0.35$), 表明了流域外源输入对月湖沉积物有机质组成的影响较弱.

进一步的数据分析表明 (图 5d, 5e), 长湖全岩 C/N 比值和有机 C/N 比值均与磁化率信号呈显著正相关 ($r=0.95$ 和 0.89 , $P<0.001$), 而月湖全岩和有机碳 C/N 值均与磁化率信号呈显著负相关 ($r=-0.54$, $P<0.01$ 和 $r=-0.67$, $P<0.001$). 同时, 全岩 C/N 比值与沉积物 TIC 含量在长湖呈显著负相关 ($r=-0.94$, $P<0.001$), 而在月湖无显著相关性 ($r=0.27$, $P=0.15$), 但有机 C/N 比值与 TOC 含量在长湖和月湖中均呈负相关 ($r=-0.52$, $P<0.001$ 和 $r=-0.49$, $P<0.01$). 上述结果表明, 长湖沉积物碳含量受流域外源输入的长期影响, 而两个湖泊中有机碳含量的变化同时受内源有机质的显著影响.

碳埋藏通量的总体分布上, TIC 埋藏通量在长湖中高于月湖, 而 TOC 埋藏通量在月湖显著高于长湖 (图 4f, 4l). 其中, 长湖 TOC 埋藏通量平均值为 (1.15 ± 0.54) mg/($\text{cm}^2\cdot\text{a}$) (变化范围为 0.33~2.87 mg/($\text{cm}^2\cdot\text{a}$)), 显著低于 TIC 埋藏通量 (平均值为 (3.43 ± 1.17) mg/($\text{cm}^2\cdot\text{a}$); 变化范围为 1.72~6.81 mg/($\text{cm}^2\cdot\text{a}$)). 在 1925—2005 年期间, TOC 和 TIC 埋藏通量总体呈缓慢增加的趋势 (平均值分别为 (1.01 ± 0.28) 和 (2.87 ± 0.82) mg/($\text{cm}^2\cdot\text{a}$)), 而在 2005 年之后波动较大 (平均值分别为 (1.38 ± 0.74) 和 (4.34 ± 1.08) mg/($\text{cm}^2\cdot\text{a}$)), 呈现先降低后增加再降低的变化趋势. 而月湖中 (图 4l), TOC 埋藏通量平均值为 (3.44 ± 1.99) mg/($\text{cm}^2\cdot\text{a}$) (变化范围为 0.65~6.95 mg/($\text{cm}^2\cdot\text{a}$)), 略高于 TIC 埋藏通量 (平均值为 (2.93 ± 1.97) mg/($\text{cm}^2\cdot\text{a}$); 变化范围为 0.39~7.78 mg/($\text{cm}^2\cdot\text{a}$)). 其中在 1925—1985 年期间, 月湖 TOC 和 TIC 埋藏通量缓慢增长 (平均值分别为 (1.02 ± 0.29) 和 (0.78 ± 0.21) mg/($\text{cm}^2\cdot\text{a}$)), 而后到 2000 年左右出现快速增长 (平均值分别为 (4.01 ± 1.91) 和 (3.95 ± 2.12) mg/($\text{cm}^2\cdot\text{a}$)), 自 2000 年开始则呈现出持续下降并在近年快速上升的波动趋势 (平均值分别为 (4.42 ± 1.39) 和 (3.53 ± 1.49) mg/($\text{cm}^2\cdot\text{a}$)). 相关分析表明, 长湖和月湖中沉积通量的变化均与全岩 C:N 比值呈显著正相关 ($r=0.48$ 和 0.45 , $P\leq 0.01$), 指示了流域外源输入均促进了两个湖泊沉积通量的显著上升. 同时, 两个湖泊中沉积物 TOC 和 TIC 埋藏通量均呈显著正相关 ($r=0.72$ 和 0.85 , $P<0.001$), 反映了沉积通量的变

化对两个湖泊碳埋藏速率的主控作用(图 5f).

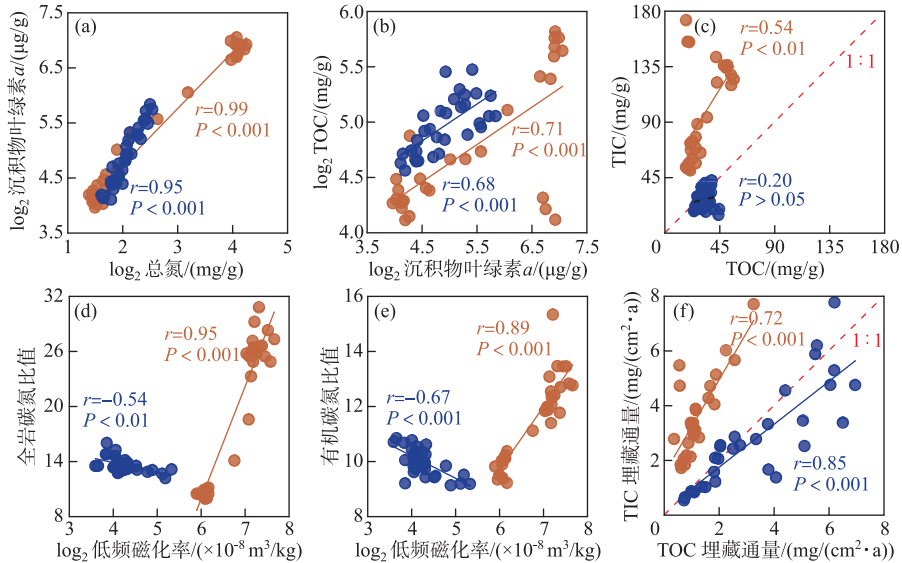


图 5 长湖(橙色圆圈)和月湖(蓝色圆圈)中沉积物有机碳和无机碳含量、埋藏通量与其潜在影响因素代用指标的关系识别

Fig.5 Scatter plots showing the relationship among sediment TOC and TIC contents, fluxes and affecting factors in Lake Changhu (orange circles) and Lake Yuehu (blue circles), respectively

3 讨论

3.1 植被退化下湖泊碳含量的变化特征与流域输入影响

流域植被的发育程度与土壤有机碳含量之间呈现紧密耦合的特征,流域植被退化通常导致土壤有机碳储量与输出量的减少^[4,41-42]. 已有研究表明,入湖磁性矿物的组成受流域植被类型、生长状况、流域侵蚀和风化强度的影响,应用沉积物磁化率信号可以可靠地示踪流域植被演替的过程和地表侵蚀强度的变化^[34]. 长湖沉积物的低频磁化率信号从 1950s 出现了持续上升而自 1990 年开始快速下降,反映了森林植被近 70 年来先退化后恢复的长期趋势. 这与该地区记载的森林覆盖率变化轨迹基本一致^[30],如从 1949 年的 26% 和 1972 年的 19.5% 逐步上升到 1996 年的 31.8% 和 2015 年的 33.4% (表 1). 长湖沉积物全岩和有机质 C:N 比值与磁化率信号均呈现了显著的正相关关系(图 5d,5e),表明了地表侵蚀作用的增强明显促进了流域外源输入的增加. 同时,随着沉积物 C:N 比值的上升长湖有机碳和无机碳含量均出现了显著下降,表明了流域植被的退化降低了流域碳输出的负荷和湖泊碳含量的累积. 相比而言,在森林覆盖率较低的月湖中,TOC 含量与磁化率的关系不显著而与 Chl. *a* 含量显著相关,且全岩和有机质 C:N 比值之间的变化无显著相关性,均指示了湖泊碳埋藏的长期变化受流域外源影响较弱. 因此,森林覆盖率较高的湖泊中流域植被退化的过程可以显著降低流域有机碳的输出与湖泊沉积物的碳埋藏.

在西南喀斯特地区,沉积物无机碳埋藏的变化与流域植被的砍伐历史密切相关^[43-44]. 植物生长所产生的有机酸会加速基岩风化,导致流域无机碳输出量增加^[45]. 而植被的退化不仅会降低径流深度还会导致土壤的含水率降低、化学风化减弱,从而导致流域 DIC 输出量的降低^[10,46]. 沉积物结果表明,TIC 含量与全岩 C:N 比值在长湖中呈现出显著的负相关($r=-0.94$, $P < 0.001$),而在月湖中无显著关系($r=0.27$, $P=0.15$),表明森林等植被的持续退化导致了长湖无机碳含量的下降,这与刘园园等在泸沽湖的研究结果相似^[45]. 同时湖泊水化学特征的现代调查显示,流域森林覆盖率较高的长湖中水体 DIC 浓度显著高于月湖(表 1),表明了植被发育可以促进土壤的淋溶作用和化学风化作用,从而促进了流域土壤 DIC 的输出和湖泊无机碳的

埋藏.

3.2 富营养化背景下湖泊碳含量的变化特征及内源输入影响

流域人口与农业活动的扩张通常会导致营养输入负荷的上升和水体富营养化程度的加剧,而藻类的生长和初级生产力的提升会促进湖泊有机碳的埋藏^[19]. 自 1950s 以来,全球农业开发强度持续增强,耕地面积快速增加,化肥使用量急剧上升,导致了湖泊营养水平的迅速增加^[47]. 同时,N、P 等营养盐直接受到水库修建与湖泊筑坝的拦蓄作用影响出现富营养化过程的加速^[48]. 现代调查数据显示,石林地区人口和化肥使用量自 1990 年开始出现快速增加(图 2a),同期两个湖泊的沉积物营养盐均出现了累积速率的明显增加(图 4).

农业扩张过程中,水体富营养化的持续增加促进了初级生产力和内源有机质的增加,导致湖泊有机碳的埋藏量快速上升^[49-50]. 研究表明,月湖营养盐的增加促进了藻类的生长($r=0.95, P<0.001$; 图 5a), TOC 含量随沉积物叶绿素的增加呈现出显著的上升($r=0.68, P<0.001$; 图 5b). 同时农业生产过程中产生的大量有机质残体也会随地表径流进入湖泊,叠加促进了湖泊有机碳含量的上升^[51]. 而在营养水平较低的长湖中流域耕地面积占比相对较小,且较月湖具有更高的沉积物有机质 C:N 比值(分别为 11.53 ± 1.50 和 9.99 ± 0.50). 由此可见,土壤有机质的输入可能是长湖 TOC 的重要来源之一.

近百年来,营养水平的上升均促进了湖泊 TOC 和 TIC 含量的总体增加(图 5f). 营养输入的增加直接促进了湖泊藻类生长,而藻类可作为碳酸盐沉淀的结晶核促使碳酸盐快速沉淀,从而导致无机碳埋藏量的协同增加^[52]. 同时藻源有机质具有分解速度快的特征,经微生物分解矿化产生的 DIC 也会促进无机碳埋藏^[53]. 两个湖泊的对比分析进一步表明,TIC 和 TOC 含量的同步变化在长湖中十分明显,而在月湖中却不显著(图 5c),可能反映了营养水平较高的月湖中藻类等内源有机质的驱动影响显著,而流域外源输入对长湖碳埋藏的变化具有更高的贡献率. 而近几十年来该研究区的增温明显(图 2b),有机质矿化速率直接受到水温的控制,藻类高分解速率的协同作用可以增强有机碳的分解作用与无机碳的埋藏效率^[54]. 因此,有机碳向无机碳转化的速率增加可能有利于有机碳和无机碳协同变化关系的减弱. 同时在流域农业开发的背景下,农业耕作频次和灌溉强度可以改变土壤无机碳的裸露强度,碳酸盐溶蚀和化学风化作用的变化可以调节流域 DIC 输出量^[55-56],从而影响湖泊沉积物无机碳的累积特征及其与有机碳变化的同步关系.

3.3 西南喀斯特地区湖泊有机碳和无机碳埋藏通量的协同变化模式

两个湖泊的记录显示,有机碳和无机碳的埋藏通量均出现显著同步的变化特征,但其变化轨迹差异明显. 在长湖和月湖中,无机碳埋藏通量随有机碳埋藏呈现显著同步的特征($r=0.72$ 和 $0.85, P<0.001$),且沉积通量均呈现了与全岩 C:N 比值的显著正相关关系,指示了流域外源输入对沉积物累积通量的重要影响. 随着流域人类活动和开发强度的增强,流域土地利用逐渐成为影响湖泊沉积物碳埋藏的重要因子^[57]. 已有研究表明,云南湖泊营养水平的持续上升加速了沉积物碳埋藏^[58]. 在云贵高原富营养水体中,沉积物地球化学指标均指示了有机碳埋藏量总体增加的过程^[45,59]. 1990 年开始长湖流域的侵蚀强度持续减弱(图 2c),外源碳的输入增加可能导致了 TIC 和 TOC 埋藏通量的小幅度上升(图 5f). 而 2000 年后随着水体营养水平的上升内源碳的累积增加,促进了长湖有机碳与无机碳埋藏通量的同步增加,与月湖碳埋藏的长期特征相似. 在营养水平较高的月湖中,有机碳和无机碳埋藏通量呈现出先同步增加随后同步降低的长期趋势. 随着月湖水体 TN 输入的持续增加,藻类增加导致了有机碳和无机碳埋藏量同步上升且在 2000 年左右达到峰值. 随后地表侵蚀增强、流域碳输出减弱,同期 N、P 等营养物质的输入加速增加($r=0.63$ 和 $0.85, P<0.001$),而 TOC 和 TIC 埋藏通量却呈现持续降低且不太同步的变化特征. 由于持续的区域升温和极端干旱事件等可以加速有机质的矿化和温室气体(如 CO_2)的释放,降低的有机碳埋藏效率和增强的无机碳累积特征与滇池等富营养湖泊的近现代模式类似^[58]. 同时在两个湖泊中,沉积通量均在 2000 年左右开始出现总体下降的趋势(图 3),同期水体富营养化和内源藻类贡献持续增加,可能反映了流域输入的相对贡献降低(如 C:N 比值下降)可能导致了沉积通量和碳埋藏通量的下降.

研究表明,土地覆盖类型与流域开发强度的差异可以导致湖泊碳源和累积负荷的不同. 如在较低营养水平的长湖中无机碳埋藏通量显著高于有机碳埋藏通量,而在富营养化的月湖中有机碳埋藏通量稍高于无机碳埋藏通量. 西南季风区具有雨热同期的气候特征,区域降水和气温的同步波动可以促进湖泊无机

碳与有机碳的协同变化. 流域降水增加和气温升高可以加速流域的化学风化作用, 导致河流 DIC 通量增加^[56], 促进湖泊无机碳的埋藏. 其中降水增加导致土壤淋溶作用增强, 从而增加了土壤有机碳的输出^[60], 陆源碳通过流域地表径流进入内陆水体^[61]. 同时植被覆盖度直接影响流域土壤侵蚀强度, 土地利用方式不同时流域土壤的侵蚀强度差异明显^[10,62]. 同时, 农业开发通过影响土壤理化性质可以改变碳酸盐溶蚀速率和无机碳输出^[55-56]. 研究表明, 裸地和农耕地侵蚀速率最高, 森林土壤的侵蚀速率最低^[63]. 在森林覆盖率较高的长湖中, 沉积物有机碳和无机碳埋藏速率呈现出同步增加的变化趋势, 但与泸沽湖沉积物有机碳埋藏速率随森林砍伐和土壤侵蚀增强而降低的模式不同^[64]. 其中泸沽湖的流域森林规模化砍伐主要出现于 1950s^[45], 而本研究中两个湖泊位于流域开发历史悠久的滇中地区, 在富营养化阶段之前(如 2000 年之前)长湖中有机碳和无机碳埋藏速率变化不大, 这与植被退化与流域侵蚀强度长期稳定的流域(如程海)中湖泊碳埋藏变化较小的长期模式一致^[45].

4 结论

对位于喀斯特地区两个湖泊的对比分析表明, 流域土地利用方式和开发强度不同会导致湖泊碳源和碳埋藏变化的长期轨迹出现差异. 沉积物多指标分析表明, 近百年来长湖和月湖的地表侵蚀强度、流域输入贡献和湖泊营养水平出现了明显变化. 其中长湖的有机碳和无机碳埋藏受到流域外源输入的影响明显, 而随着营养水平的上升长湖和月湖的有机碳来源逐渐以内源藻类为主(如 C:N 比值下降). 在森林覆盖较高的长湖中, 随着流域植被和地表侵蚀的波动变化湖泊有机碳和无机碳含量和埋藏通量均呈现了显著同步的变化特征. 而耕地面积占比和营养水平较高的月湖中, 随着农业开发的增强和湖泊富营养化的持续, 初级生产力的增加促进了沉积物有机碳埋藏的上升, 且与长湖近来营养水平和有机碳埋藏通量上升的模式类似. 在区域增温和内源藻类贡献增加的背景下, 增强的有机质矿化作用等作用可能导致了有机碳与无机碳含量变化的同步性降低. 同时两个湖泊中, 沉积通量均随着外源输入强度的变化出现了显著波动, 可能加强了有机碳和无机碳埋藏通量的协同变化特征. 因此在喀斯特地区, 流域土地利用类型和强度的不同导致了湖泊碳累积的变化轨迹差异明显, 同时在流域输出和水体富营养化的共同驱动下湖泊有机碳和无机碳埋藏通量出现了同步变化的长期模式.

5 参考文献

- [1] Heathcote AJ, Anderson NJ, Prairie YT *et al.* Large increases in carbon burial in northern lakes during the Anthropocene. *Nature Communications*, 2015, **6**: 10016. DOI: 10.1038/ncomms10016.
- [2] Drake TW, Raymond PA, Spencer RGM. Terrestrial carbon inputs to inland waters; A current synthesis of estimates and uncertainty. *Limnology and Oceanography Letters*, 2018, **3**(3): 132-142. DOI: 10.1002/lol2.10055.
- [3] Pan YD, Birdsey RA, Fang JY *et al.* A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 2011, **333** (6045): 988-993. DOI: 10.1126/science.1201609.
- [4] Woodbury PB, Heath LS, Smith JE. Land use change effects on forest carbon cycling throughout the southern United States. *Journal of Environmental Quality*, 2006, **35**(4): 1348-1363. DOI: 10.2134/jeq2005.0148.
- [5] Yan YP, Cao JH, Yin H *et al.* Influences of land use on storage and decomposition rate of soil organic carbon in Karst area. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2011, **31**(5): 13-17. [严毅萍, 曹建华, 尹辉等. 典型岩溶区不同土地利用方式对土壤有机碳储量及其矿化速率的影响. 水土保持通报, 2011, **31**(5): 13-17.]
- [6] Wang SQ, Zhou CH, Li KR *et al.* Analysis on spatial distribution characteristics of soil organic carbon reservoir in China. *Acta Geographica Sinica*, 2000, **55**(5): 533-544. DOI: 10.3321/j.issn: 0375-5444.2000.05.003. [王绍强, 周成虎, 李克让等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析. 地理学报, 2000, **55**(5): 533-544.]
- [7] Tranvik LJ, Jansson M. Terrestrial export of organic carbon. *Nature*, 2002, **415** (6874): 861-862. DOI: 10.1038/415861b.
- [8] Zeng QR, Liu ZH, Chen B *et al.* Carbonate weathering-related carbon sink fluxes under different land uses: A case study from the Shawan Simulation Test Site, Puding, Southwest China. *Chemical Geology*, 2017, **474**: 58-71. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2017.10.023.
- [9] Zhang C. Carbonate rock dissolution rates in different landuses and their carbon sink effect. *Chinese Science Bulletin*, 2011,

- 56(26): 2174-2180. DOI: 10.1007/s11434-011-4404-4.[章程. 不同土地利用下的岩溶作用强度及其碳汇效应. 科学通报, 2011, 56(26): 2174-2180.]
- [10] Liao HK, Long J. Variation of soil organic carbon under different vegetation types in Karst mountain areas of Guizhou Province, Southwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(9): 2253-2258. DOI: 10.13287/j.1001-9332.2011.0317.[廖洪凯, 龙健. 喀斯特山区不同植被类型土壤有机碳的变化. 应用生态学报, 2011, 22(9): 2253-2258.]
- [11] Kelly EF, Oliver CA, Hilinsk TE. The effect of plants on mineral weathering. *Biogeochemistry*, 1998, 42: 21-53.
- [12] Meyer-Jacob C, Tolu J, Bigler C *et al.* Early land use and centennial scale changes in lake-water organic carbon prior to contemporary monitoring. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(21): 6579-6584. DOI: 10.1073/pnas.1501505112.
- [13] Xu C, Lin CF, Liu XF *et al.* Effects of forest conversion on concentrations and fluxes of dissolved organic carbon in runoff. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2017, 37(1): 84-92. DOI: 10.5846/stxb201607291557.[胥超, 林成芳, 刘小飞等. 森林转换对地表径流可溶性有机碳输出浓度和通量的影响. 生态学报, 2017, 37(1): 84-92.]
- [14] Houghton RA. The Worldwide Extent of Land-use Change: In the last few centuries, and particularly in the last several decades, effects of land-use change have become global. *BioScience*, 1994, 44(5): 305-313. DOI: 10.2307/1312380.
- [15] Shen J, Xue B, Wu JL eds. Lake sedimentation and environmental evolution. Beijing: Science Press, 2010.[沈吉, 薛滨, 吴敬祿. 湖泊沉积与环境演化. 北京: 科学出版社, 2010.]
- [16] Kang WG, Chen GJ, Wang JY *et al.* Identification of the long-term patterns of catchment development and diatom community changes in Xihu Lake, Dali, Yunnan, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(3): 1001-1012. DOI: 10.13287/j.1001-9332.201703.040.[康文刚, 陈光杰, 王教元等. 大理西湖流域开发历史与硅藻群落变化的模式识别. 应用生态学报, 2017, 28(3): 1001-1012.]
- [17] Wang JY, Chen GJ, Huang LP *et al.* Spatio-temporal patterns and drivers of cyanobacteria blooms in Erhai Lake, Southwest China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2017, 37(14): 4831-4842. DOI: 10.5846/stxb201604200740.[王教元, 陈光杰, 黄林培等. 洱海蓝藻爆发的时空特征及影响因子. 生态学报, 2017, 37(14): 4831-4842.]
- [18] Dong XH, Yang XD, Wang R. Diatom indicative species of eutrophication of the lakes in the middle and lower reach regions of Yangtze River. *China Environmental Science*, 2006, 26(5): 570-574. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-6923.2006.05.014.[董旭辉, 羊向东, 王荣. 长江中下游地区湖泊富营养化的硅藻指示性属种. 中国环境科学, 2006, 26(5): 570-574.]
- [19] Anderson NJ, Bennion H, Lotter AF. Lake eutrophication and its implications for organic carbon sequestration in Europe. *Global Change Biology*, 2014, 20(9): 2741-2751. DOI: 10.1111/gcb.12584.
- [20] Wetzel RG ed. Limnology-lake and river ecosystems. London: Elsevier, 2001.
- [21] Li W, Liu LP, Cao L *et al.* Research status and prospect of biological precipitation of carbonate. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(6): 597-605. DOI: 10.3321/j.issn: 1001-8166.2009.06.004.[李为, 刘丽萍, 曹龙等. 碳酸盐生物沉积作用的研究现状与展望. 地球科学进展, 2009, 24(6): 597-605.]
- [22] Wu YH, Chen XM. Status and controls of rocky desertification in karst mountainous areas of Yunnan Province. *Yunnan Water Power*, 2017, 33(3): 57-60.[吴应红, 陈学敏. 云南省喀斯特山区石漠化现状与治理措施. 云南水力发电, 2017, 33(3): 57-60.]
- [23] Hartmann J, Jansen N, Dürr HH *et al.* Global CO₂-consumption by chemical weathering: What is the contribution of highly active weathering regions?. *Global and Planetary Change*, 2009, 69(4): 185-194. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2009.07.007.
- [24] Yi YB, Zhong J, Bao HY *et al.* The impacts of reservoirs on the sources and transport of riverine organic carbon in the Karst area: A multi-tracer study. *Water Research*, 2021, 194: 116933. DOI: 10.1016/j.watres.2021.116933.
- [25] Minor EC, Oyler AR. Dissolved organic matter in large lakes: A key but understudied component of the carbon cycle. *Biogeochemistry*, 2021: 1-24. DOI: 10.1007/s10533-020-00733-z.
- [26] Lai S, Wan HB, Tang F *et al.* Characteristics and source analysis of organic carbon buried in sediments of Fuxian Lake. *China Environmental Science*, 2020, 40(3): 1246-1256.[赖珊, 万宏滨, 唐芳等. 抚仙湖沉积物有机碳埋藏特征及来源解析. 中国环境科学, 2020, 40(3): 1246-1256.]
- [27] Hao S, Zhou AF, Zhang XN *et al.* Progress of research on the burial efficiency of organic carbon and its influencing factors

- in lacustrine sediments. *Journal of Earth Environment*, 2017, **8**(4): 292-306. DOI: 10.7515/JEE201704002.[郝盛吞, 周爱锋, 张晓楠等. 湖泊沉积有机碳埋藏效率及其影响要素研究进展. 地球环境学报, 2017, **8**(4): 292-306.]
- [28] Zhao HX. Risk analysis and reinforcements of Yuehu Reservoir in Shilin County. Proceeding of 2016 Annual Academic Conference of Yunnan Hydraulic Engineering Society, 2016: 6.[赵红兴. 石林县月湖水库病险分析及除险加固措施. 云南省水利学会 2016 年度学术年会论文集, 2016: 6.]
- [29] Committee of Lunan Yi Autonomous County Annals Compilation Kunming ed. Lunan Yi Autonomous County Annals, The Nationalities Publishing House of Yunnan, 1996.[昆明市路南彝族自治县志编纂委员会. 路南彝族自治县志. 昆明: 云南民族出版社, 1996.]
- [30] Committee of Shilin Yi Autonomous County annals compilation Kunming ed. Shilin Yi Autonomous County Annals. Kunming: The Nationalities Publishing House of Yunnan, 2006.[石林县彝族自治县志编纂委员会. 石林彝族自治县志. 昆明: 云南民族出版社, 2006.]
- [31] Statistic Bureau of Kunming, Yunnan Central New District Bureau of Statistics, Kunming Investigation Team, National Bureau of Statistics eds. Kunming statistical yearbook. Beijing: China Statistics Press, 2020.[昆明市统计局, 云南滇中新区统计局, 国家统计局昆明调查队. 昆明统计年鉴-2020. 北京: 中国统计出版社, 2020.]
- [32] Liu XL, Shi ZT, Huang GC *et al.* Time series remote sensing data-based identification of the dominant factor for inland lake surface area change: Anthropogenic activities or natural events?. *Remote Sensing*, 2020, **12**(4): 612. DOI: 10.3390/rs12040612.
- [33] Appleby PG. Chronostratigraphic techniques in recent sediments. Tracking environmental change using lake sediments. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001: 171-203. DOI: 10.1007/0-306-47669-x_9.
- [34] Dearing JA, Elnor JK, Haphey-Wood CM. Recent sediment flux and erosional processes in a Welsh upland lake-catchment based on magnetic susceptibility measurements. *Quaternary Research*, 1981, **16**(3): 356-372. DOI: 10.1016/0033-5894(81)90016-8.
- [35] Konert M, Vandenberghe J. Comparison of laser grain size analysis with pipette and sieve analysis: A solution for the underestimation of the clay fraction. *Sedimentology*, 1997, **44**(3): 523-535. DOI: 10.1046/j.1365-3091.1997.d01-38.x.
- [36] Ministry of Environmental Protection. Soil-determination of total phosphorus by alkali fusion-Mo-Sb Anti spectrophotometric method(HJ 632—2011), 2012.[环境保护部. 土壤总磷的测定—碱熔-钼锑抗分光光度法(HJ 632—2011), 2012.]
- [37] Swain EB. Measurement and interpretation of sedimentary pigments. *Freshwater Biology*, 1985, **15**(1): 53-75. DOI: 10.1111/j.1365-2427.1985.tb00696.x.
- [38] Meyers PA, Jane LT eds. Sediment organic matter. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 2001.
- [39] Legendre P, Legendre L eds. Numerical ecology; 2nd English edition. Amsterdam: Elsevier, 1988.
- [40] Wu JL, Gagan MK, Jiang XZ *et al.* Sedimentary geochemical evidence for recent eutrophication of Lake Chenghai, Yunnan, China. *Journal of Paleolimnology*, 2004, **32**(1): 85-94. DOI: 10.1023/b: jopl.0000025290.09365.98.
- [41] Murty D, Kirschbaum MUF, McMurtrie RE *et al.* Does conversion of forest to agricultural land change soil carbon and nitrogen? a review of the literature. *Global Change Biology*, 2002, **8**(2): 105-123. DOI: 10.1046/j.1354-1013.2001.00459.x.
- [42] Wei XR, Shao MG, Gale W *et al.* Global pattern of soil carbon losses due to the conversion of forests to agricultural land. *Scientific Reports*, 2014, **4**: 4062. DOI: 10.1038/srep04062.
- [43] Hodell DA, Brenner M, Kanfoush SL *et al.* Paleoclimate of southwestern China for the past 50, 000 yr inferred from lake sediment records. *Quaternary Research*, 1999, **52**(3): 369-380. DOI: 10.1006/qres.1999.2072.
- [44] Wu D, Chen XM, Lv FY *et al.* Decoupled early Holocene summer temperature and monsoon precipitation in southwest China. *Quaternary Science Reviews*, 2018, **193**: 54-67. DOI: 10.1016/j.quascirev.2018.05.038.
- [45] Liu YY, Chen GJ, Meyer-Jacob C *et al.* Land-use and climate controls on aquatic carbon cycling and phototrophs in Karst lakes of southwest China. *Science of the Total Environment*, 2021, **751**: 141738. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141738.
- [46] Zeng SB, Liu ZH, Kaufmann G. Sensitivity of the global carbonate weathering carbon-sink flux to climate and land-use changes. *Nature Communications*, 2019, **10**: 5749. DOI: 10.1038/s41467-019-13772-4.
- [47] Steffen W, Broadgate W, Deutsch L *et al.* The trajectory of the anthropocene: The great acceleration. *The Anthropocene Review*, 2015, **2**(1): 81-98. DOI: 10.1177/2053019614564785.
- [48] Powers SM, Tank JL, Robertson DM. Control of nitrogen and phosphorus transport by reservoirs in agricultural landscapes.

- Biogeochemistry*, 2015, **124**(1/2/3): 417-439. DOI: 10.1007/s10533-015-0106-3.
- [49] Liu D, Du YX, Yu SJ *et al.* Human activities determine quantity and composition of dissolved organic matter in lakes along the Yangtze River. *Water Research*, 2020, **168**: 115132. DOI: 10.1016/j.watres.2019.115132.
- [50] Zhou YQ, Davidson TA, Yao XL *et al.* How autochthonous dissolved organic matter responds to eutrophication and climate warming: Evidence from a cross-continental data analysis and experiments. *Earth-Science Reviews*, 2018, **185**: 928-937. DOI: 10.1016/j.earscirev.2018.08.013.
- [51] Anderson NJ, Engstrom DR, Leavitt PR *et al.* Changes in coupled carbon-nitrogen dynamics in a tundra ecosystem predate post-1950 regional warming. *Communications Earth & Environment*, 2020, (1): 38. DOI: 10.1038/s43247-020-00036-z.
- [52] Robbins LL, Blackwelder PL. Biochemical and ultrastructural evidence for the origin of whittings: A biologically induced calcium carbonate precipitation mechanism. *Geology*, 1992, **20**(5): 464. DOI: 10.1130/0091-7613(1992)0200464:baueft>2.3.co;2.
- [53] Hulthe G, Hult S, Hall POJ. Effect of oxygen on degradation rate of refractory and labile organic matter in continental margin sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, **62**(8): 1319-1328. DOI: 10.1016/S0016-7037(98)00044-1.
- [54] Gudasz C, Bastviken D, Steger K *et al.* Temperature-controlled organic carbon mineralization in lake sediments. *Nature*, 2010, **466**(7305): 478-481. DOI: 10.1038/nature09186.
- [55] Raymond PA, Cole JJ. Increase in the export of alkalinity from North America's largest river. *Science*, 2003, **301**(5629): 88-91. DOI: 10.1126/science.1083788.
- [56] Raymond PA, Oh NH, Turner RE *et al.* Anthropogenically enhanced fluxes of water and carbon from the Mississippi River. *Nature*, 2008, **451**(7177): 449-452. DOI: 10.1038/nature06505.
- [57] Don A, Schumacher J, Freibauer A. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks—a meta-analysis. *Global Change Biology*, 2011, **17**(4): 1658-1670. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2010.02336.x.
- [58] Huang CC, Yao L, Zhang YL *et al.* Spatial and temporal variation in autochthonous and allochthonous contributors to increased organic carbon and nitrogen burial in a plateau lake. *Science of the Total Environment*, 2017, **603/604**: 390-400. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.06.118.
- [59] Qin Y, Hao F, Zhang D *et al.* Accumulation of organic carbon in a large canyon reservoir in Karstic area, Southwest China. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2020, **27**(20): 25163-25172. DOI: 10.1007/s11356-020-08724-1.
- [60] Hein CJ, Usman M, Eglinton TI *et al.* Millennial-scale hydroclimate control of tropical soil carbon storage. *Nature*, 2020, **581**(7806): 63-66. DOI: 10.1038/s41586-020-2233-9.
- [61] Steffen W, Sanderson A, Tyson P *et al.* Global change and the earth system. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005. DOI: 10.1007/b137870.
- [62] Jing ZP, Tao FX. On the relationship between chemical weathering of carbonate rocks and the missing carbon sinks: A case study on the watershed of the Hongfeng Reservoir, Guizhou Province, southwest China. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2020, **39**(5): 999-1013. DOI: 10.19658/j.issn.1007-2802.2020.39.076. [京志平, 陶发祥. 碳酸盐岩的化学风化与失踪碳汇的关系: 以贵州红枫水库流域为例. 矿物岩石地球化学通报, 2020, **39**(5): 999-1013.]
- [63] Aneseyee AB, Elias E, Soromessa T *et al.* Land use/land cover change effect on soil erosion and sediment delivery in the Winike watershed, Omo Gibe Basin, Ethiopia. *Science of the Total Environment*, 2020, **728**: 138776. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138776.
- [64] Lin Q, Liu EF, Zhang EL *et al.* Organic carbon burial in a large, deep alpine lake (southwest China) in response to changes in climate, land use and nutrient supply over the past ~100 years. *CATENA*, 2021, **202**: 105240. DOI: 10.1016/j.catena.2021.105240.