

文章编号:1672-6561(2012)01-0079-12

青藏高原西南部塔若错湖泊沉积物记录的 近 300 年来气候环境变化

张小龙^{1,2,3}, 徐柏青^{1,2}, 李久乐^{1,2}, 谢 营^{1,2,3}, 高少鹏^{1,2}, 王 荣^{1,2}

(1. 中国科学院 青藏高原研究所, 北京 100085; 2. 中国科学院 青藏高原环境变化与
地表过程重点实验室, 北京 100085; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘 要:以青藏高原西南部塔若错的 34 cm 浅湖芯为研究对象, 对其沉积物样品进行总有机碳、无机碳、总氮、微量元素、正构烷烃含量及碳氮比等多项指标的分析测定。采用过剩²¹⁰Pb 和¹³⁷Cs 计年法对该湖芯进行了定年和沉积速率研究, 获得了近 300 年的连续湖泊沉积环境序列。在明确了各指标气候环境指示意义的前提下, 综合对比分析湖芯中各项气候环境指标, 并结合定年结果重建了塔若错湖区近 300 年来的气候环境变化。结果表明:塔若错湖区气候环境变化可分为 3 个明显阶段:早期为 1705~1778 年, 该地区气候环境温暖湿润, 湖区植被广泛发育; 中期为 1778~1860 年, 湖区处于小冰期末次阶段, 气候环境寒冷而湿润, 植被发育受阻; 后期为 1860 年至今, 为小冰期结束后偏暖干化时期。其中, 后期又可分为 3 个亚阶段:1860~1924 年, 湖区气候环境稍暖且干旱, 植被稍有发育; 1924~1969 年, 湖区气候环境呈现偏冷干特点, 植被发育暂缓; 1969 年至今, 湖区气候回暖, 环境干旱化有所缓解, 植被开始逐渐发育。在气候冷暖变化上, 该湖芯记录与古里雅冰芯记录和青海湖湖泊沉积记录都有较好的可对比性, 只是在起讫年代上存在一些差异。

关键词:气候环境变化; 微量元素; 正构烷烃; 总有机碳; 湖泊沉积物; 塔若错; 青藏高原

中图分类号:P532; P595

文献标志码:A

Climatic and environmental changes over the past about 300 years recorded by lake sediments in Taro Co, southwestern Tibetan Plateau

ZHANG Xiao-long^{1,2,3}, XU Bai-qing^{1,2}, LI Jiu-le^{1,2}, XIE Ying^{1,2,3},
GAO Shao-peng^{1,2}, WANG Mo^{1,2}

(1. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. Key Laboratory of Tibetan Environment Changes and Land Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The 34 cm sediment core, which was recovered from Taro Co, southwestern Tibetan Plateau, was investigated. The multiple indicators in the sediment including the contents of total organic carbon, inorganic carbon, total nitrogen, trace elements and *n*-alkanes and the ratio of carbon and nitrogen contents were measured. Sedimentation age and rate were analyzed by the method of excessive ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs dating in order to obtain the continuous sequence of lake sedimentary environment over the past about 300 years. On condition that definitely understanding the climatic and environmental implications of the indicators, the indicators in sediment core were analyzed synthetically and comparatively. Then, the climatic and environmental

收稿日期:2011-11-23

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(2009CB723901); 中国科学院重点基础研究发展计划项目(KZCX2-YW-Q09-03)

作者简介:张小龙(1987-), 男, 山东临沂人, 理学硕士研究生, 从事自然地理学研究, E-mail: zxl1986@itpcas.ac.cn。

changes in the region of Taro Co over the past about 300 years were reconstructed according to the dating results. The results showed that the climatic and environmental changes of Taro Co Region could be divided into three obvious stages. In the early stage from 1705 to 1778, the climate, which was warm and humid, fitted the vegetation best in the region. In the middle stage from 1778 to 1860, the last Little Ice Age came, and climate was wet and cold, and the growth of vegetation stopped in the region. In the last stage since 1860, the climate was warm and dry after the Little Ice Age in the region, and the stage could be divided into three small stages: from 1860 to 1924, the climate was dry and a little warm, and the vegetation grew a little; from 1924 to 1969, the climate was a little cold and dry, and the growth of vegetation stopped; since 1969, the climate was warm, and the drought was improved, and the vegetation grew gradually. The cold and warm alternately recorded by the sediments in Taro Co were highly consistent with that recorded by ice core in Guliya and lake sediments in Qinghai Lake; however, there were differences in the beginning and end years of the stages.

Key words: climatic and environmental changes; trace element; *n*-alkane; total organic carbon; lake sediment; Taro Co; Tibetan Plateau

0 引 言

湖泊是大气圈、生物圈和陆地水圈相互作用的联结点^[1],其形成与消失、收缩与扩张及其内、外生物组合种群的变动,受区域性大范围尺度的温湿条件变化的影响,而上述变化均被连续地、最大限度地保存在湖泊沉积物中^[2]。因此,湖泊沉积物可作为揭示历史时期区域乃至全球性气候环境变化的良好研究介质^[3-4]。近几十年来,通过分析湖泊沉积物中有机、无机地球化学指标的变化特征,进而反演历史时期区域性气候环境变化状况的方法,已成为古气候环境变化研究的重要手段之一^[5-10]。

青藏高原是气候环境变化的敏感区^[11],其自身气候环境变化是区域或全球气候环境变化的敏感指示器,并起着重要的反馈作用^[12-13]。目前对青藏高原历史时期气候环境变化的研究多以冰芯^[14-16]、树轮^[17-19]、湖芯^[4,5,7,20-23]为研究介质。研究区域主要集中在高原西北部、东北部以及偏东南区域,较少涉及高原西南部及其腹地地区^[24-25]。研究时间尺度也多以长时间尺度为主,短时间尺度的精细研究相对较少^[25]。近年来,随着全球气候环境变化研究的深入,青藏高原地区短时间尺度、较高分辨率的气候环境变化研究越来越受到重视^[25-26]。在青藏高原西南部腹地非冰川地区,由于受特殊自然地理条件的限制,地面观测资料及历史记录缺乏^[24,26],短时间尺度、较高分辨率气候环境变化的恢复受到很大制约。因此,笔者以该地区分布的内流湖塔若错为研究对象,通过对其沉积物中多项气候环境指标的综合对

比分析,从整体上揭示近几个世纪以来湖区周边区域性高分辨率气候环境变化,为重建历史时期区域性气候环境变化特征及探讨青藏高原古气候环境变化特征与机制提供科学依据。

1 材料与方法

塔若错(31°03'N~31°12'N,83°55'E~84°20'E)位于青藏高原西南部冈底斯山北麓(图1),是一个半封闭型高原湖泊。湖面海拔4 566.0 m,湖泊呈东西向延伸,面积约486.6 km²,流域面积约6 929.4 km²,湖泊补给系数14.2。湖水主要依赖河水 and 地下水补给,入湖河流有19条,其中以南面的毕多藏布最大,长约176.0 km,流域面积约5 186.0 km²。这些河流除局部高山附近有较大的冰雪融水汇入外,主要靠降水和地下水补给。湖水出流经东北角谷地(垭口海拔4 568.0 m)入独曲,后转注脚布曲,最终注入扎布耶茶卡^[27-28]。

该湖区位于西南季风控制区,属羌塘高寒草原半干旱气候,年均气温0℃~2℃,年降水量200 mm左右,降水大多集中在6~9月^[27-28]。该流域主要植被类型为高山草甸、高山草原、山地草原以及湖盆河谷隐域草甸,分别以小嵩草(*Kobresia pygmaea*)、紫花针茅(*Stipa purpurea*)、三角草(*Trikeria hookeri*)和藏北嵩草(*Kobresia littledlei*)为主^[29]。湖泊中水生植物主要为沉水植物,以篦齿眼子菜(*Potamogeton pectinatus*)、丝叶眼子菜(*Potamogeton filiformis*)和水毛茛(*Batrachium bungei*)为主^[30]。该流域出露岩层以全新统、上新统、古新

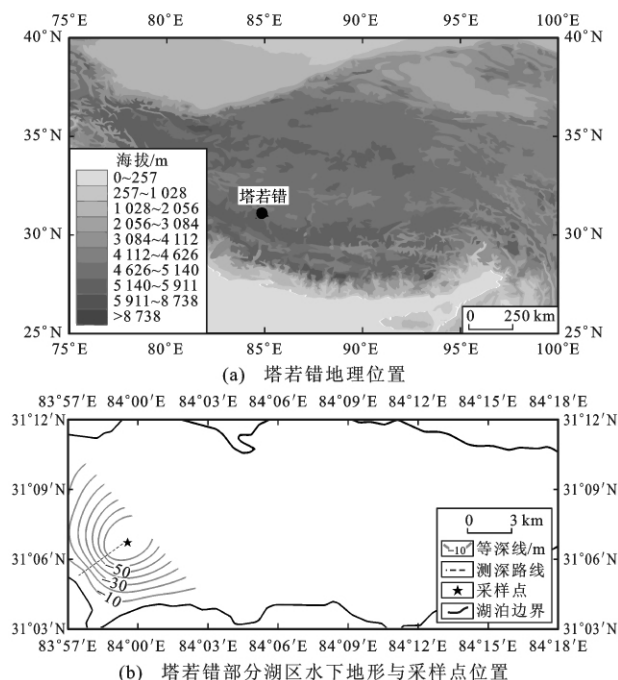


图 1 塔若错地理位置及部分湖区水下地形与采样点位置

Fig. 1 Location of Taro Co and the bathymetric lines of partly Taro Co and the coring site

统一始新统和上侏罗统一下白垩统地层为主,岩性分布主要以泥岩、粉砂岩、砂砾岩、海相碎屑岩、含砾质泥岩以及泥灰岩等为主,风化程度较弱^[31]。

2010年9月7日,由中国科学院青藏高原研究所组织的中德野外考察队在塔若错湖区偏西位置(31°07.012'N,83°59.959'E,图1)水深约90 m处,采用重力采样器获取了长34 cm的湖芯样品。湖芯从水岩界面到底部是连续的,湖芯柱样通体为黑色的泥,分层不明显。湖芯自湖中提出后,现场沿垂直方向从水岩界面到湖芯底部按1 cm间隔连续进行分样,放入洁净的聚乙烯自封袋中密封保存,后带回北京置于冰柜中冷藏,以待实验室内各项指标的分析测定。其中,总氮含量(TN)测定是在北京林业大学森林生态与培育重点实验室完成的,其他测定工作均在中国科学院青藏高原研究所青藏高原环境变化与地表过程重点实验室完成。

各指标的具体测定过程描述如下:采用GWL-120-15型实验室井型高纯锆伽玛谱仪(美国ORTEC公司生产)对该湖芯上部14 cm序列样品进行了过剩²¹⁰Pb和¹³⁷Cs质量活度的测定,以用于湖芯年代序列的建立。实际测定前,将每个湖芯样品冷冻抽干后,研磨至粒径为0.071 mm,装于7 mL聚乙烯离心管中,精确称其质量,用帕拉胶密封静置1个月后进行测样。样品测定过程中,每个样品的测

定时间均为80 000 s。仪器测定标准源样品由中国原子能研究院制作。

沉积物微量元素含量(质量分数)采用电感耦合等离子质谱仪(X-7 series)进行测定。首先将冷冻干燥后的样品采用酸消解法进行溶解,具体消解步骤见文献^[32];然后上机进行微量元素含量测定。实验室仪器对该湖芯样品微量元素含量的测量相对标准偏差(RSD)均小于5%。

沉积物总有机碳含量(TOC)和无机碳含量(IC)采用岛津公司出产的TOC-V_{CPH}仪器进行测定。测量过程中分别先测定每个样品的总碳含量(TC)和IC,然后采用差减法获得样品的TOC。实验室仪器对该湖芯样品TC和IC的测定误差分别小于2%和3%。

TN采用凯氏定氮法进行测定。方法为每个样品称取500 mg于250 mL消化管中,加入5 mL浓硫酸和催化剂,于300 °C消煮炉上消煮3~4 h至消化管内液体为乳白色或蓝绿色,冷却后在半自动凯氏定氮仪上滴定,然后根据酸耗量和样品质量就可得到TN。碳氮比为TOC与TN的比值。实验室内该湖芯样品TN的分析误差小于0.1%。

生物标志物采用Polaris-Q GC/MS测量,用特征碎片离子和相对保留时间定性,用标准曲线法定量。前期将样品冷冻干燥,研磨至粒径为0.071 mm。采用索氏抽提法提取其中的可溶有机物,溶剂为二氯甲烷和甲醇(体积比为10:1),抽提72 h,在抽提过程中温度保持在55 °C左右,以保证回流次数每小时不低于10次,并且抽提过程中用纯铜片对抽提后溶液进行脱硫处理。抽提得到的溶液经氮气冷却浓缩后,采用柱层析法分离,采用的层析溶剂依次为80 mL正己烷、60 mL氯仿和40 mL甲醇,从而分别得到正构烷烃、芳烃和极性组分溶液。将层析所得正构烷烃溶液用柔和氮气流吹干,而后定容至300 μL,用Polaris-Q GC/MS对其各组分含量进行测定。

2 结果与讨论

2.1 湖芯年代序列的建立

短时间尺度湖泊沉积物定年多采用过剩²¹⁰Pb和¹³⁷Cs计年法^[33-34]。依据过剩²¹⁰Pb计年的模型主要有:CRS(恒定补给速率)模型^[20-21]和CIC(恒定初始浓度)模型^[35-36]。其中,CRS模型假定沉积物中过剩²¹⁰Pb的输入通量是恒定的,适用于沉积速率不稳定的序列;而CIC模型则假定沉积物中过剩²¹⁰Pb

的初始浓度是恒定的,适用于沉积速率较为稳定的序列。 ^{137}Cs 是一种从 20 世纪 50 年代开始的核试验的人工核素,其强度初始值与峰值所出现年份(如 1953、1963、1975、1986 年)可以作为时标点对所测沉积物年代进行验证^[33,37-38],使所测沉积物年代更加准确。

考虑到沉积速率可能发生变化,塔若错湖泊沉积物定年采用 CRS 模型。图 2 表明,塔若错上部 14 cm 沉积序列的过剩 ^{210}Pb 质量活度基本呈指数衰减规律,并且 ^{137}Cs 质量活度也具有明显的峰值。依据 CRS 模型算得塔若错湖泊沉积物平均沉积速率为 0.11 cm/年;在与 ^{137}Cs 时标点 1953 年(6.5 cm 深处)、1963 年(5.5 cm 深处)、1975 年(3.5 cm 深处)和 1986 年(2.5 cm 深处)相对应深度处的 CRS 年份分别为 1955、1963、1975、1983 年(图 2)。两者差别较小,表明采用 CRS 模型计算所得沉积物的平均沉积速率对塔若错湖泊沉积序列的年代进行重建是可行的。根据沉积物样品的平均沉积速率和柱子长度,获得塔若错 34 cm 湖芯约 300 年的连续沉积序列(1705~2005 年)。

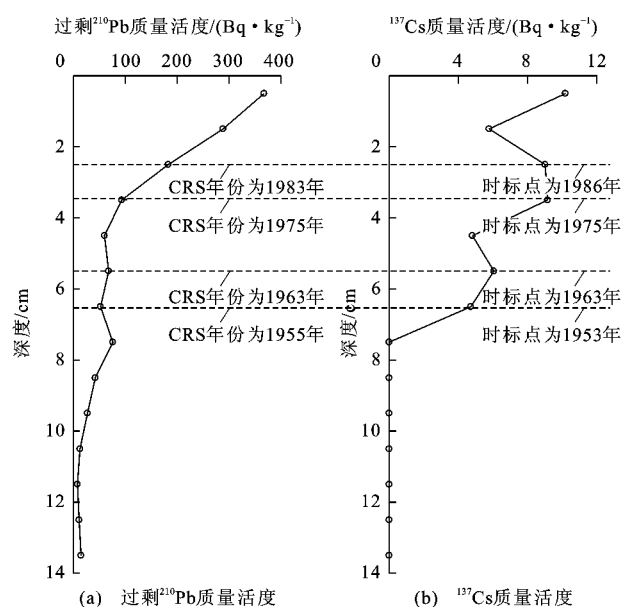


图 2 塔若错湖芯中过剩 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 质量活度随深度变化曲线
Fig. 2 Depth profiles of mass activities of the excessive ^{210}Pb and ^{137}Cs in sediment core from Taro Co

2.2 塔若错湖芯中各指标气候环境指示意义

2.2.1 TOC、TN、碳氮比和 IC

湖泊沉积物中总有机碳来源可分为两部分:一是自身内部输入,主要以水生生物贡献为主;二是外源输入,主要以流域内陆生植物的贡献为主^[20]。TN 则基本反映湖泊自身的营养状况。基于 TN 对

水生生物营养的限制,湖泊沉积物碳氮比则可以较好地反映沉积物中有机碳的来源。通常菌藻类植物的碳氮比为 4~10,而陆源脉管植物的碳氮比则在 20 以上^[39]。笔者所研究塔若错湖泊沉积物的碳氮比为 8~10(图 3),说明塔若错沉积物中 TOC 以内源输入为主。因此,塔若错湖泊沉积物中 TOC 应主要受湖泊内部生产力的影响。另一方面,研究还表明,当流域内降水增加或温度升高时,湖泊周边陆生植被发育较好,湖泊内部的生产力也较高;当流域内降水减少或温度降低时,流域内陆生植被发育较差,湖泊内部的生产力也降低^[40-41]。由此可见,塔若错湖泊沉积物中 TOC 的高低可能指示了湖区暖冷或湿干的沉积环境变化。

已有的湖泊沉积学研究表明,湖泊碳酸盐沉积与气候环境变化密切相关^[42-43]。一般认为,湖泊沉积物中碳酸盐含量受控于湖水的咸淡变化(盐度变化)情况,而后者取决于湖区环境的干湿变化状况。因此,碳酸盐含量可间接指示湖区环境的干湿变化,即当湖泊流域环境较为干旱时,蒸发强烈,湖水咸化,湖水中 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 等离子的浓度升高,碳酸盐析出增多,湖泊沉积碳酸盐含量增加;反之,气候湿润,蒸发微弱,湖水淡化,则沉积物中碳酸盐溶解增加,含量减小^[44-45]。研究还发现,采用 TOC- V_{CPH} 仪器所测沉积物的 IC 与采用化学反应法所得的碳酸盐含量具有显著正相关关系,从而可用湖泊沉积物中 IC 代替碳酸盐含量间接指示湖区环境的干湿变化^[46-48]。

2.2.2 微量元素含量

封闭或半封闭湖泊流域内地表岩石或沉积物中化学元素经物理化学风化作用及生物地球化学作用不断淋溶、运移,最终在湖泊沉积物中累积。而物理化学风化作用及生物地球化学作用的强弱取决于流域气候环境变化情况。因此,湖泊沉积物元素地球化学特征便成为反映湖区古气候环境波动的有效指标^[45,49-51]。

塔若错湖芯中微量元素主要包括 Li、Sc、Ti、V、Cr、Co、Ni、Cu、Zn、As、Rb、Sr、Zr、Nb、Cd、Cs、Ba、Hf、Ta、Tl、Pb、Bi、Th 和 U 等 24 种元素(图 4、5)。这些元素可按其含量变化趋势初步分为 5 类元素组合。其中,第 1 类元素组合包括 Sc、Ti、V、Cr、Co、Cu、Zn、Nb、Cd、Ba、Tl、Pb、Th 等 13 种元素,该类元素含量自湖芯底部至 12 cm 深度处变化不大,11~12 cm 深度处元素含量迅速升高,11 cm 深处至表层元素含量则呈现降低趋势;第 2 类元素组合主要包括 Li、Ni、Sr 等 3 种元素,该类元素含量自湖芯底部到表层,整体呈波动中逐渐升高趋势;第 3 类主要为

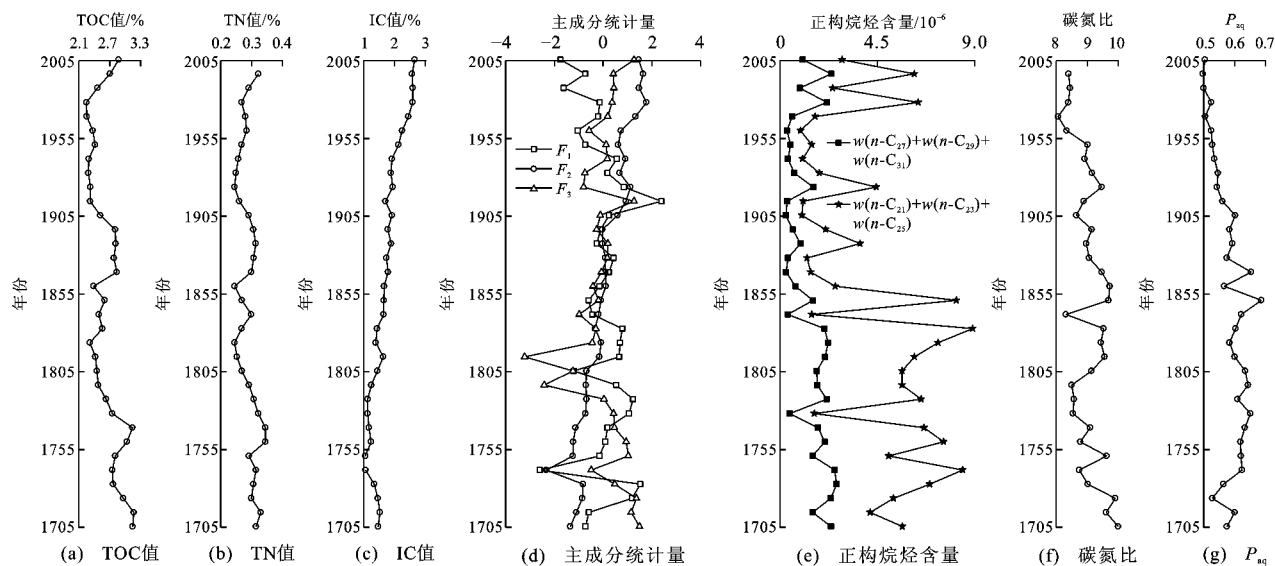


图 3 塔若错湖芯中各地球化学指标随时间变化曲线

Fig. 3 Time profiles of multiple geochemical indicators in sediment core from Taro Co

Rb、Cs、Ta、Bi、U 等 5 种元素的组合,该类元素含量自湖芯底部至表层,整体呈波动中逐渐降低趋势;第 4 类元素组合主要包括 Zr 和 Hf 元素,这 2 种元素含量自湖芯底部至 21 cm 深度处呈现波动中升高趋势,21~20 cm 深度处元素含量迅速降低,20 cm 深处至表层元素含量则呈波动中缓慢降低趋势;第 5 类元素组合主要为 As 元素,该元素含量自湖芯底部至 10 cm 深度处呈现波动中急剧下降趋势,10 cm 深度处至表层元素含量则呈现波动中升高趋势。

研究表明,采用元素含量或比值的组合变化方法重建沉积序列的气候环境会放大其指标对气候环境变化的响应,削弱各种扰动因素的影响^[3,52]。为了避免出现以上误差,笔者对塔若错湖泊沉积物中 Li、Sc、Ti、V、Cr、Co、Ni、Cu、Zn、As、Rb、Sr、Zr、Nb、Cd、Cs、Ba、Hf、Ta、Tl、Pb、Bi、Th 和 U 等 24 种微量元素含量及 TOC、IC 值进行多元统计主成分分析,选取相关系数绝对值大于 0.5 的变量(表 1 中数值为黑体部分)进行归纳分析,以获取准确可靠的环境信息。据此方法提取了 3 个最重要的主成分 F_1 、 F_2 、 F_3 ,代表了原始数据 80% 以上的信息(表 1)。

表 1 中,主成分 F_1 的方差贡献高达 49.64%,其与 Ba、Rb、Zn、Cu、Tl、Nb、Ti、Zr、Hf 含量等具有强的正相关关系(相关系数大于 0.5)。这些元素大致可分 4 类:亲铜元素(如 Cu、Zn、Cd、Tl、Pb);亲铁元素(如 Ti、V、Cr、Co、Ni);共生元素(Zr 和 Hf);表 1 中其他剩余分散或稀有元素^[53]。其中,亲铁和亲铜元素在表生地球化学风化过程中易被黏土矿物吸附,而 Rb、Sc 等分散或稀有元素也易在黑云母、角

闪石等黏土矿物中富集或被吸附,共生元素 Zr 和 Hf 在表生地球化学风化过程中较为稳定,多以锆石形式赋存于较粗颗粒的陆源碎屑物中^[53-54]。以上黏土矿物或陆源碎屑物多以颗粒态形式经流域侵蚀作用带至湖盆中沉积。而流域侵蚀作用的强弱与流域内植被覆盖程度及径流发育程度密切相关^[3,55],而径流发育程度又取决于流域内降水量。因此,主成分 F_1 在一定程度上表征了塔若错湖区侵蚀作用的强弱,其受流域内降水量与地表植被覆盖程度的影响。主成分 F_2 的方差贡献为 23.08%,其与 Li、Co、Ni、Sr 含量及 IC 呈显著正相关,而与 As、Cs、U 含量和 TOC 呈显著负相关。在表生地球化学风化过程中,湖泊流域内地表岩石或沉积物中 Li 和 Sr 元素极易被淋失至湖泊中,在湖泊盐度增大时, Li 和 Sr 元素便伴随碳酸盐和硅酸盐在湖泊中沉积下来,而 Co 和 Ni 元素则易被硅酸盐吸附沉积下来^[3,53]。元素 As、U、Cs 则极易被土壤中腐殖质吸附,伴随流域径流至湖泊中累积^[53]。当湖泊流域内环境较为干旱时,流域内径流发育差,湖泊盐度增大,湖泊沉积物中碳酸盐及 Li、Sr、Co、Ni 等元素含量较高,而 TOC 及 As、Cs、U 含量较低;反之亦然。因此,主成分 F_2 主要表征了塔若错湖区环境的干湿状况。主成分 F_3 方差贡献为 8.01%,其与 TOC 呈显著正相关,而与 Zr、Hf 含量呈显著负相关。湖泊沉积物中 Zr 和 Hf 多来源于湖区陆源碎屑物质,其含量与湖区降水量密切相关。而湖泊沉积物中 TOC 除与降水量有关外,还和温度密切相关。因此,主成分 F_3 主要表征了塔若错湖区环境温度的变化状况。

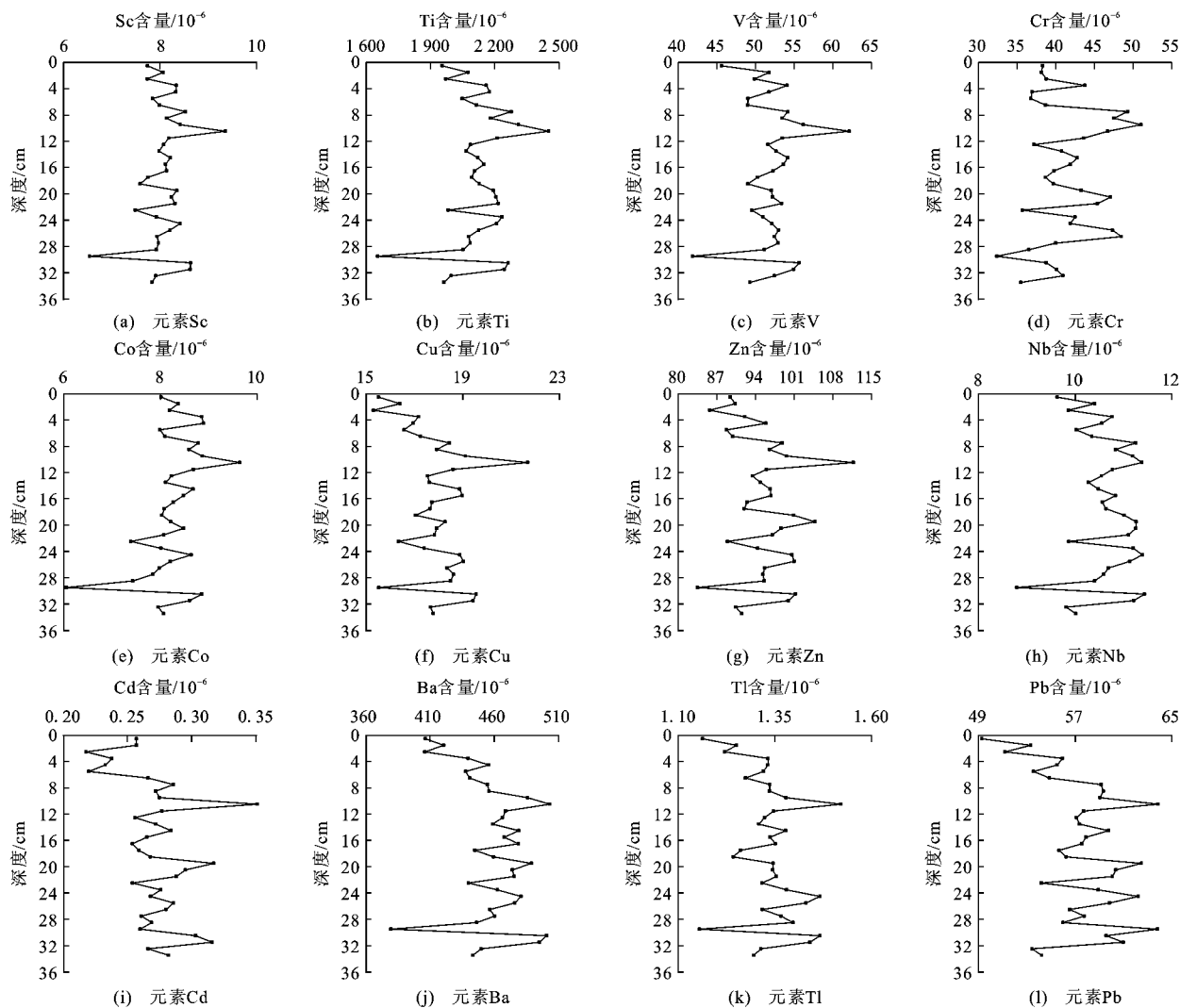


图 4 塔若错湖芯中 Sc、Ti、V、Cr、Co、Cu、Zn、Nb、Cd、Ba、Tl、Pb 含量随深度变化曲线

Fig. 4 Depth profiles of the contents of Sc, Ti, V, Cr, Co, Cu, Zn, Nb, Cd, Ba, Tl and Pb in sediment core from Taro Co

2.2.3 正构烷烃含量

分子有机地球化学研究表明,湖泊沉积物中不同生物起源的正构烷烃在运移和沉积过程中较大幅度地保留了原有的分子结构及生物遗存特征^[56]。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、组成及含量的改变^[57]。因此,湖泊沉积物中的正构烷烃除记录有物源信息外还有丰富的气候环境变化信息。

通常, $n\text{-C}_{26} \sim n\text{-C}_{33}$ 长链正构烷烃以 $n\text{-C}_{27}$ 、 $n\text{-C}_{29}$ 和 $n\text{-C}_{31}$ 为主峰,且具有明显奇偶优势,其碳优势指数大于 5。这类正构烷烃主要来源于陆生高等植物^[58]。以 $n\text{-C}_{21}$ 、 $n\text{-C}_{23}$ 或 $n\text{-C}_{25}$ 为主峰的中链正构烷烃 $n\text{-C}_{21} \sim n\text{-C}_{25}$ 主要来源于挺水、沉水或漂浮大型维管束植物^[59]。其可以根据正构烷烃参数 P_{aq} 来区分具体源

$$P_{aq} = (w(n\text{-C}_{23}) + w(n\text{-C}_{25})) / (w(n\text{-C}_{23}) + w(n\text{-C}_{25}) + w(n\text{-C}_{29}) + w(n\text{-C}_{31}))$$

陆生高等植物来源的 $P_{aq} < 0.1$, 挺水植物来源的 P_{aq} 值为 $0.1 \sim 0.4$, 而沉水或漂浮植物来源的 P_{aq} 值为 $0.4 \sim 1$ ^[59]。以 $n\text{-C}_{15}$ 、 $n\text{-C}_{17}$ 或 $n\text{-C}_{19}$ 为主峰,无奇偶优势的短链烷烃 $n\text{-C}_{14} \sim n\text{-C}_{20}$ 主要来源于浮游生物和光合细菌^[60]。因此,沉积物中正构烷烃组成可以较可靠地反映其有机质来源。塔若错湖泊沉积物中正构烷烃的 P_{aq} 值为 $0.5 \sim 0.7$ (图 3), 表明其主要来源于沉水或漂浮植物。由于实地湖泊考察未发现漂浮植物,因此塔若错湖泊沉积物中烷烃主要来源于沉水植物,再一次证实有机碳成分主要来自湖泊内源。

研究表明,干旱区湖泊沉积物中陆源正构烷烃的富集总是与流域内高降水量和降水强度有关^[7]。而当降水增加以及气候较为湿润时,湖泊沉积物中水生植物(尤其是沉水植物)来源的正构烷烃输入也

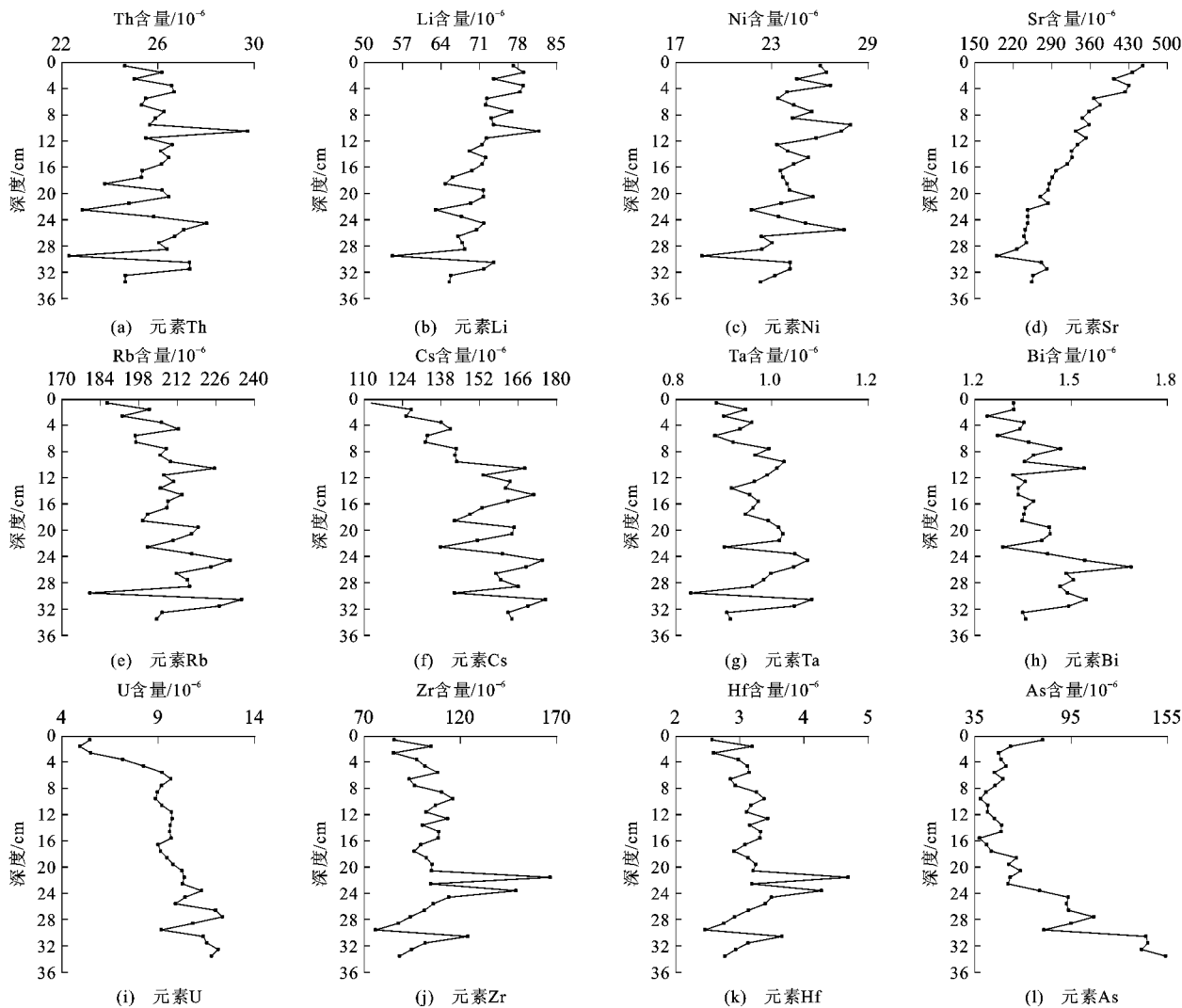


图 5 塔若错湖芯中 Th、Li、Ni、Sr、Rb、Cs、Ta、Bi、U、Zr、Hf、As 含量随深度变化曲线

Fig. 5 Depth profiles of the contents of Th, Li, Ni, Sr, Rb, Cs, Ta, Bi, U, Zr, Hf and As in sediment core from Taro Co

增强^[61-62]。因此,塔若错湖泊沉积中正构烷烃 $w(n-C_{27}) + w(n-C_{29}) + w(n-C_{31})$ 以及 $w(n-C_{21}) + w(n-C_{23}) + w(n-C_{25})$ 能够清晰地反映湖区植被与气候变化状况。

2.3 塔若错湖芯记录的近 300 年来气候环境变化

在明确塔若错湖泊沉积物年代及各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(图 3),精细地揭示了塔若错湖区近 300 年来的气候环境变化特征。

1705~1778 年塔若错湖芯中微量元素主成分 F_3 处于高值阶段,表明该时期塔若错湖区气候温暖,较低的主成分 F_2 和 IC 则指示该时期湖区环境湿润。较高的 TOC 及陆生高等植物和沉水植物来源的正构烷烃 $w(n-C_{27}) + w(n-C_{29}) + w(n-C_{31})$ 以及 $w(n-C_{21}) + w(n-C_{23}) + w(n-C_{25})$ 指示该时期湖内外生产力较高,湖区植被繁盛。尽管湖区植被繁盛,但是由于较高的

降水量导致湖区侵蚀作用较强,湖芯中黏土矿物却不断累积,所以主成分 F_1 呈现高值。

1778~1860 年较低的主成分 F_3 指示湖区环境温度最低。湖芯中 IC 相对较低但呈现升高趋势,主成分 F_1 整体较高但呈降低趋势,表明该时期湖区降水量虽呈现减少趋势但环境依旧相对湿润。较低的温度导致植被发育受阻,湖内外生产力偏低,湖泊沉积物中 TOC 较低。由于环境较为湿润,流域侵蚀作用相对较强,湖泊沉积物中沉水植物和陆生高等植物来源的正构烷烃 $w(n-C_{27}) + w(n-C_{29}) + w(n-C_{31})$ 以及 $w(n-C_{21}) + w(n-C_{23}) + w(n-C_{25})$ 输入仍然较高。该时期湖泊沉积物所记录的冷气候与青藏高原地区所发生的小冰期末次冷波动相对应^[5,15-18,21,43]。

1860 年至今,主成分 F_3 呈现升高趋势,但在 1924~1969 年有低值波动,表明该时期湖区气候逐渐回暖,有冷的波动。较低的主成分 F_1 及呈现升

表 1 塔若错湖泊沉积物主成分分析结果
Tab. 1 Principal component analysis results of lake sediment from Taro Co

主成分	F_1	F_2	F_3
$w(\text{Li})$	0.43	0.82	0.26
$w(\text{Sc})$	0.88	0.37	0.19
$w(\text{Ti})$	0.90	0.36	-0.11
$w(\text{V})$	0.87	0.26	0.13
$w(\text{Cr})$	0.66	0.26	-0.17
$w(\text{Co})$	0.72	0.60	0.18
$w(\text{Ni})$	0.53	0.69	0.15
$w(\text{Cu})$	0.91	-0.15	0.22
$w(\text{Zn})$	0.91	0.01	0.05
$w(\text{As})$	0.09	-0.63	0.46
$w(\text{Rb})$	0.91	-0.21	0.11
$w(\text{Sr})$	-0.17	0.95	0.14
$w(\text{Zr})$	0.52	0.02	-0.72
$w(\text{Nb})$	0.91	0.13	-0.18
$w(\text{Cd})$	0.73	-0.27	0.12
$w(\text{Cs})$	0.70	-0.60	0.13
$w(\text{Ba})$	0.93	-0.08	-0.07
$w(\text{Hf})$	0.56	-0.05	-0.70
$w(\text{Ta})$	0.89	-0.10	-0.15
$w(\text{Tl})$	0.91	-0.13	0.07
$w(\text{Pb})$	0.64	-0.36	-0.22
$w(\text{Bi})$	0.59	-0.49	0.17
$w(\text{Th})$	0.81	0.22	0.35
$w(\text{U})$	0.39	-0.79	-0.03
TOC 值	-0.13	-0.60	0.51
IC 值	-0.33	0.91	0.09

注: $w(\cdot)$ 为元素或化合物的质量分数。

高趋势的较高的 IC 和主成分 F_2 表明, 该时期湖区环境呈现干旱化特点。值得注意的是, 1969 年后 IC 和主成分 F_2 升高趋势有所缓解甚至呈降低状态, 这表明 1969 年后湖区降水有所增加, 环境干旱化有所缓解。因此, 1860 年后塔若错湖区气候环境变化又可以分为 3 个亚阶段。第 1 阶段为 1860~1924 年, 气候的回暖导致湖区植被稍有发育, 湖内外生产力增加, 沉积物中 TOC 较高, 但由于环境较为干旱, 沉积物中正构烷烃 $w(n\text{-C}_{27}) + w(n\text{-C}_{29}) + w(n\text{-C}_{31})$ 以及 $w(n\text{-C}_{21}) + w(n\text{-C}_{23}) + w(n\text{-C}_{25})$ 输入较少。后期较低的 TOC 及较高的主成分 F_1 表明湖区植被覆盖程度降低, 流域侵蚀作用加强。第 2 阶段为 1924~1969 年, 该时期湖区气候的冷波动

致使湖区植被发育暂缓, 湖内外生产力下降, 沉积物中 TOC 较低, 依旧干旱的环境使得沉积物中陆源植物和沉水植物正构烷烃 $w(n\text{-C}_{27}) + w(n\text{-C}_{29}) + w(n\text{-C}_{31})$ 以及 $w(n\text{-C}_{21}) + w(n\text{-C}_{23}) + w(n\text{-C}_{25})$ 输入依然较少。第 3 阶段为 1969 年至今, 该时期湖区气候温暖, 环境稍有变湿趋势, 干旱化有所缓解, 湖泊内外植被逐渐发育, 湖泊沉积物中 TOC、陆源正构烷烃 $w(n\text{-C}_{27}) + w(n\text{-C}_{29}) + w(n\text{-C}_{31})$ 和沉水植物正构烷烃 $w(n\text{-C}_{21}) + w(n\text{-C}_{23}) + w(n\text{-C}_{25})$ 呈现增加趋势。

2.4 塔若错沉积环境序列与青藏高原其他地区环境序列的比较

将塔若错湖泊沉积记录与青藏高原西昆仑山区的古里雅冰芯记录^[63]和东北部地区的青海湖湖泊沉积记录^[21]相对比, 结果见表 2。

表 2 塔若错湖泊沉积记录与古里雅冰芯和青海湖湖泊沉积记录对比

Tab. 2 Comparison of the sediment record of Taro Co with ice core of Guliya and sediment record of Qinghai Lake

古里雅冰芯记录		青海湖湖泊沉积记录		塔若错湖泊沉积记录	
时段	气候特点	时段	气候特点	时段	气候特点
1691~1790 年	暖	1680~1770 年	暖	1705~1778 年	暖
1791~1880 年	冷	1770~1870 年	冷	1778~1860 年	冷
1881~1990 年	暖	1870~1920 年	暖	1860~1924 年	暖
		1920~1960 年	冷	1924~1969 年	冷
		1960~2000 年	暖	1969~2005 年	暖

从表 2 中可以看出, 在 1705~1778 年塔若错湖泊沉积记录该时期湖区气候较暖, 古里雅冰芯记录和青海湖湖泊沉积记录也都反映该时期气候较暖。但是塔若错湖泊沉积记录该暖期结束年代(由于塔若错 1705 年前无记录, 所以在此只探讨结束年代)为 1778 年, 这早于古里雅冰芯记录的 1790 年, 但和青海湖湖泊沉积记录的 1770 年较为接近。这可能是由于分辨率和分析精度差异所引起, 古里雅冰芯记录为高分辨率的逐年记录^[63], 而青海湖湖泊沉积记录年代分辨率为 8 年左右^[21], 这和塔若错湖芯 9 年左右的年代分辨率较为接近。同样, 在其他冷暖时期, 塔若错湖泊沉积记录与古里雅冰芯记录、青海湖湖泊沉积记录也都有很好的一致性, 但在起讫年代上塔若错湖泊沉积记录与古里雅冰芯记录差异较大而与青海湖湖泊沉积记录差异较小。在 20 世纪 20 年代至 60 年代, 塔若错湖泊沉积和青海湖湖泊沉积都记录该时期气候较冷, 而古里雅冰芯中记录不明显。由于青海湖位于西南、东南和西风交汇区

而古里雅冰芯位于西风控制区,在该时段的冷暖变化记录上出现与本研究结果的一致或差异性可能是上述大气环流引起的区域气候环境不同造成的。

总的来说,塔若错湖泊沉积记录在气候冷暖变化上与古里雅冰芯记录和青海湖湖泊沉积记录具有较好的可比性,但在气候变化的起讫年代上存在一些差异,一方面可能与分辨率和分析精度差异有关,另一方面可能是由区域气候环境不同造成的。

3 结 语

(1)塔若错湖泊沉积物中有机碳输入以内源为主,尤其是沉水植物的输入。总有机碳含量高低受温度和降水的共同影响。

(2)塔若错湖泊沉积物中微量元素含量的主成分 F_1 表征了湖泊流域侵蚀作用的强弱,以及受湖区降水量和植被覆盖程度的影响;其主成分 F_2 表征了湖区环境的干湿状况;其主成分 F_3 表征了湖区的温度状况。

(3)近 300 年来,塔若错湖区气候环境变化可以分为 3 个明显阶段。早期为 1705~1778 年,该时期湖区环境气候温暖湿润,植被繁盛。中期为 1778~1860 年,该时期为湖区小冰期阶段,湖区植被发育受阻,气候环境寒冷而湿润。后期为 1860 年以来小冰期结束后偏暖干化时期,该时期又可分为 3 个亚阶段:第 1 阶段为 1860~1924 年,气候环境稍暖且干旱,湖区植被稍有发育;第 2 阶段为 1924~1969 年,该时期气候环境呈现偏干冷特点,湖区植被发育暂缓;第 3 阶段为 1969 年至今,湖区气候回暖,环境干旱化有所缓解,植被开始逐渐发育。

(4)塔若错湖泊沉积记录的气候冷暖变化与古里雅冰芯记录和青海湖湖泊记录都具有较好的可比性,但在起讫年代上存在一些差异。分析造成这种差异的可能原因是分辨率和分析精度以及区域气候环境差异。

中国科学院青藏高原研究所王小萍副研究员及德国马普生物地球化学研究所 Gerd Gleixner、Franziska Günter、Roman Witt 在野外及湖芯样品采集中给予了帮助,中国科学院青藏高原研究所宗继彪、林长贵、杨瑞敏和宫晓倩硕士研究生在本文撰写过程中给予了大力帮助,在此一并谢忱。

参 考 文 献 :

References :

[1] 沈 吉. 湖泊沉积研究的历史进展与展望[J]. 湖泊科学,

2009,21(3):307-313.

SHEN Ji. Progress and prospect of palaeolimnology research in China[J]. Journal of Lake Sciences, 2009, 21(3): 307-313. (in Chinese)

[2] 王苏民. 湖泊沉积学[J]. 地球科学进展, 1991, 6(6): 62-63.

Wang Su-min. Lacustrine sedimentology[J]. Advances in Earth Science, 1991, 6(6): 62-63. (in Chinese)

[3] 陈敬安,万国江,陈振楼,等. 洱海沉积物化学元素与古气候演化[J]. 地球化学, 1999, 28(6): 562-570.

CHEN Jing-an, WAN Guo-jiang, CHEN Zhen-lou, et al. Chemical elements in sediments of Lake Erhai and palaeoclimate evolution[J]. Geochimica, 1999, 28(6): 562-570. (in Chinese)

[4] 朱立平,鞠建廷,王君波,等. 湖芯沉积物揭示的末次冰消开始时期普莫雍错湖区环境变化[J]. 第四纪研究, 2006, 26(5): 772-780.

ZHU Li-ping, JU Jian-ting, WANG Jun-bo, et al. Environmental changes recorded in core sediments from the Pumoyum Co of the Tibetan Plateau during the initial stage of the last deglacial period[J]. Quaternary Sciences, 2006, 26(5): 772-780. (in Chinese)

[5] 吴艳宏,李世杰,夏威岚. 可可西里苟仁错湖泊沉积物元素地球化学特征及其环境意义[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(3): 64-68.

WU Yan-hong, LI Shi-jie, XIA Wei-lan. Element geochemistry of lake sediment from Gouren Co, Kekexili, Qinghai-Xizang Plateau and its significance for climate variation[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2004, 26(3): 64-68. (in Chinese)

[6] 李红春,朱照宇. 美国西部 Owens 湖地球化学记录及其古气候意义[J]. 第四纪研究, 2002, 22(6): 578-588.

LI Hong-chun, ZHU Zhao-yu. Geochemical records and their paleoclimate significance in Owens Lake, western USA[J]. Quaternary Sciences, 2002, 22(6): 578-588. (in Chinese)

[7] 朱立平,王君波,林 晓,等. 西藏纳木错深水湖芯反映的 8.4 ka 以来气候环境变化[J]. 第四纪研究, 2007, 27(4): 588-597.

ZHU Li-ping, WANG Jun-bo, LIN Xiao, et al. Environmental changes reflected by core sediments since 8.4 ka in Nam Co, central Tibet of China[J]. Quaternary Sciences, 2007, 27(4): 588-597. (in Chinese)

[8] 蒲 阳,张虎才,王永莉,等. 青藏高原冰蚀湖沉积物正构烷烃记录的气候和环境变化信息:以希门错为例[J]. 科学通报, 2011, 56(14): 1132-1139.

PU Yang, ZHANG Hu-cai, WANG Yong-li, et al. Climatic and environmental implications from *n*-alkanes in glacially eroded lake sediments in Tibetan Plateau: an example from Ximen Co[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(14): 1132-1139. (in Chinese)

[9] 朱正杰,李 航,双 燕,等. 青海湖地区近 1 ka 来气候变化机制[J]. 成都理工大学学报:自然科学版, 2010, 37(6): 632-637.

ZHU Zheng-jie, LI Hang, SHUANG Yan, et al. Mechanism of

- climate changes in the Qinghai Lake Area during the last 1 000 years[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science and Technology Edition, 2010, 37(6): 632-637. (in Chinese)
- [10] 沈华东, 于 革. 青藏高原兹格塘错流域 50 年来湖泊水量对气候变化响应的模拟研究[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(3): 282-287.
SHEN Hua-dong, YU Ge. Simulation study on hydrological response of water quantity to climate change in Zigetang Lake of Tibetan Plateau during the past 50 years[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(3): 282-287. (in Chinese)
- [11] 冯 松, 汤懋仓, 王冬梅. 青藏高原是我国气候变化启动区的新证据[J]. 科学通报, 1998, 43(6): 633-636.
FENG Song, TANG Mao-cang, WANG Dong-mei. New evidence for the Qinghai-Xizang(Tibet) Plateau as a pilot region of climatic fluctuation in China[J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(6): 633-636. (in Chinese)
- [12] 郑 度, 姚檀栋, 丁 林, 等. 青藏高原隆升与环境效应[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
ZHENG Du, YAO Tan-dong, DING Lin, et al. Uplifting of Tibetan Plateau with its environmental effects[M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese)
- [13] 姚檀栋, 朱立平. 青藏高原环境变化对全球变化的响应及其适应对策[J]. 地球科学进展, 2006, 21(5): 459-464.
YAO Tan-dong, ZHU Li-ping. The response of environmental changes on Tibetan Plateau to global changes and adaptation strategy[J]. Advances in Earth Science, 2006, 21(5): 459-464. (in Chinese)
- [14] 姚檀栋, THOMPSON L G, 施雅风, 等. 古里雅冰芯中末次间冰期以来气候变化记录研究[J]. 中国科学: D 辑, 1997, 27(5): 447-452.
YAO Tan-dong, THOMPSON L G, SHI Ya-feng, et al. Climate variation since the Last Interglaciation recorded in the Guliya ice core[J]. Science in China: Series D, 1997, 27(5): 447-452. (in Chinese)
- [15] 姚檀栋, 谢自楚, 武筱聆, 等. 敦德冰帽中的小冰期气候记录[J]. 中国科学: B 辑, 1990, 20(11): 1196-1201.
YAO Tan-dong, XIE Zi-chu, WU Xiao-ling, et al. Climatic records since the Little Ice Age from the Dundu ice cap[J]. Science in China: Series B, 1990, 20(11): 1196-1201. (in Chinese)
- [16] THOMPSON L G, YAO T D, MOSLEY-THOMPSON E, et al. A high-resolution millennial record of the South Asian monsoon from Himalayan ice cores[J]. Science, 2000, 289: 1916-1919.
- [17] 刘晓宏, 秦大河, 邵雪梅, 等. 祁连山中部过去近千年温度变化的树轮记录[J]. 中国科学: D 辑, 2004, 34(1): 89-95.
LIU Xiao-hong, QIN Da-he, SHAO Xue-mei, et al. Temperature variations recovered from tree-rings in the middle Qilian Mountain over the last millennium[J]. Science in China: Series D, 2004, 34(1): 89-95. (in Chinese)
- [18] 康兴成, GRAMLICH L J, SHPPARD P. 青海都兰地区 1 835 年来的气候变化——来自树轮资料[J]. 第四纪研究, 1997, 17(1): 70-75.
KANG Xing-cheng, GRAUMLICH L J, SHEPPARD P. The last 1 835 years climate changes inferred from tree ring records in Dulan Region, Qinghai, China[J]. Quaternary Sciences, 1997, 17(1): 70-75. (in Chinese)
- [19] 邵雪梅, 黄 磊, 刘洪滨, 等. 树轮记录的青海德令哈地区千年降水变化[J]. 中国科学: D 辑, 2004, 34(2): 145-153.
SHAO Xue-mei, HUANG Lei, LIU Hong-bin, et al. Reconstruction of precipitation variation from tree rings in recent 1 000 years in Delingha, Qinghai[J]. Science in China: Series D, 2004, 34(2): 145-153. (in Chinese)
- [20] 朱立平, 王君波, 陈 玲, 等. 藏南沉湖湖泊沉积多指标揭示的 20 000 年以来环境变化[J]. 地理学报, 2004, 59(4): 514-524.
ZHU Li-ping, WANG Jun-bo, CHEN Ling, et al. 20 000-year environmental change reflected by multidisciplinary lake sediments in Chen Co, southern Tibet[J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(4): 514-524. (in Chinese)
- [21] 沈 吉, 张恩楼, 夏威岚. 青海湖近千年来气候环境变化的湖泊沉积记录[J]. 第四纪研究, 2001, 21(6): 508-513.
SHEN Ji, ZHANG En-lou, XIA Wei-lan. Records from lake sediments of the Qinghai Lake to mirror climatic and environmental changes of the past about 1 000 years[J]. Quaternary Sciences, 2001, 21(6): 508-513. (in Chinese)
- [22] GASSE F, ARNOLD M, FONTES J C, et al. A 13 000-year climate record from western Tibet[J]. Nature, 1991, 353: 742-745.
- [23] 李久乐, 徐柏青, 林树标, 等. 青藏高原南部枪勇错冰前湖泊沉积记录的近千年来冰川与气候变化[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(4): 402-411.
LI Jiu-le, XU Bai-qing, LIN Shu-biao, et al. Glacier and climate changes over the past millennium recorded by proglacial sediment sequence from Qiangyong Lake, southern Tibetan Plateau[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(4): 402-411. (in Chinese)
- [24] 李潮流, 康世昌. 青藏高原不同时段气候变化的研究综述[J]. 地理学报, 2006, 61(3): 327-335.
LI Chao-liu, KANG Shi-chang. Review of studies in climate change over the Tibetan Plateau[J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(3): 327-335. (in Chinese)
- [25] 王君波, 朱立平. 青藏高原湖泊沉积与环境演变研究: 现状与展望[J]. 地理科学进展, 2005, 24(5): 1-12.
WANG Jun-bo, ZHU Li-ping. Environmental change reflected by lake sediments on Tibetan Plateau: progress and prospect[J]. Progress in Geography, 2005, 24(5): 1-12. (in Chinese)
- [26] 杨 保, 施雅风, 李恒鹏. 过去 2 ka 气候变化研究进展[J]. 地球科学进展, 2002, 17(1): 110-117.
YANG Bao, SHI Ya-feng, LI Heng-peng. Some advances in climatic change over the past two millennia[J]. Advances in Earth Science, 2002, 17(1): 110-117. (in Chinese)
- [27] 王苏民, 窦鸿身, 陈克造, 等. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1998.

- WANG Su-min, DOU Hong-shen, CHEN Ke-zao, et al. Records of lakes in China[M]. Beijing: Science Press, 1998. (in Chinese)
- [28] 关志华,陈传友,区裕雄,等. 西藏河流与湖泊[M]. 北京:科学出版社,1984.
- GUAN Zhi-hua, CHEN Chuan-you, OU Yu-xiong, et al. The rivers and lakes in Tibet[M]. Beijing: Science Press, 1984. (in Chinese)
- [29] 牟新待,邓立友,谷安琳,等. 西藏草原[M]. 北京:科学出版社,1992.
- MOU Xin-dai, DENG Li-you, GU An-lin, et al. Rangelands in Tibet[M]. Beijing: Science Press, 1992. (in Chinese)
- [30] 王 东. 青藏高原水生植物地理研究[D]. 武汉:武汉大学, 2003.
- WANG Dong. The geography of aquatic vascular plants of Qinghai-Xizang(Tibet) Plateau[D]. Wuhan: Wuhan University, 2003. (in Chinese)
- [31] 夏代祥,刘世坤. 西藏自治区区域地质志[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1993.
- XIA Dai-xiang, LIU Shi-kun. Regional geology in Tibet Region[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1993. (in Chinese)
- [32] WU G J, XU B Q, ZHANG C L, et al. Geochemistry of dust aerosol over the eastern Pamirs[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, 73(4): 977-989.
- [33] 王君波,朱立平,汪 勇,等. 西藏纳木错现代沉积速率的空间分布特征及近 60 年来的变化研究[J]. *第四纪研究*, 2011, 31(3): 535-543.
- WANG Jun-bo, ZHU Li-ping, WANG Yong, et al. Spatial variability of recent sedimentation rate and variations in the past 60 years in Nam Co, Tibetan Plateau, China[J]. *Quaternary Sciences*, 2011, 31(3): 535-543. (in Chinese)
- [34] 万国江. 现代沉积的²¹⁰Pb 计年[J]. *第四纪研究*, 1997, 17(3): 230-239.
- WAN Guo-jiang. ²¹⁰Pb dating for recent sedimentation[J]. *Quaternary Sciences*, 1997, 17(3): 230-239. (in Chinese)
- [35] APPLEBY P G, OLDFIELD F. The assessment of ²¹⁰Pb data from sites with varying sediment accumulation rates[J]. *Hydrobiologia*, 1983, 103(1): 29-35.
- [36] 王 荣,羊向东,朱立平. 西藏纳木错过去 200 年来的环境变化[J]. *第四纪研究*, 2006, 26(5): 791-798.
- WANG Rong, YANG Xiang-dong, ZHU Li-ping. Environmental changes of Namu Co, Xizang during the past 200 years[J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(5): 791-798. (in Chinese)
- [37] 万国江,林文祝,黄荣贵,等. 红枫湖沉积物¹³⁷Cs 垂直剖面的计年特征及侵蚀示踪[J]. *科学通报*, 1990, 35(19): 1487-1490.
- WAN Guo-jiang, LIN Wen-zhu, HUANG Rong-gui, et al. Dating characteristic and erosion traces of Cs-137 vertical profiles in Hongfeng Lake sediments[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1990, 35(19): 1487-1490. (in Chinese)
- [38] 张 燕,彭补拙,陈 捷,等. 借助¹³⁷Cs 估算滇池沉积量[J]. *地理学报*, 2005, 60(1): 71-78.
- ZHANG Yan, PENG Bu-zhuo, CHEN Jie, et al. Evaluation of sediment accumulation in Dianchi Lake using ¹³⁷Cs dating[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(1): 71-78. (in Chinese)
- [39] MEYERS P A. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter[J]. *Chemical Geology*, 1994, 114(3/4): 289-302.
- [40] 王永波,刘兴起,羊向东,等. 可可西里库赛湖揭示的青藏高原北部近 4 000 年来的干湿变化[J]. *湖泊科学*, 2008, 20(5): 605-612.
- WANG Yong-bo, LIU Xing-qi, YANG Xiang-dong, et al. A 4 000-year moisture evolution recorded by sediments of Lake Kusai in the Hoh Xil Area, northern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, 20(5): 605-612. (in Chinese)
- [41] XIAO J L, WU J T, SI B, et al. Holocene climate changes in the monsoon/arid transition reflected by carbon concentration in Daihai Lake of Inner Mongolia[J]. *The Holocene*, 2006, 16(4): 551-560.
- [42] 王云飞. 青海湖、岱海的湖泊碳酸盐化学沉积与气候环境变化[J]. *海洋与湖沼*, 1993, 24(1): 31-36.
- WANG Yun-fei. Lacustrine carbonate chemical sedimentation and climatic-environmental evolution: a case study of Qinghai Lake and Daihai Lake[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1993, 24(1): 31-36. (in Chinese)
- [43] 李世杰,王小天,夏威岚,等. 青藏高原苟鲁错湖泊沉积记录的小冰期气候变化[J]. *第四纪研究*, 2004, 24(5): 578-584.
- LI Shi-jie, WANG Xiao-tian, XIA Wei-lan, et al. The Little Ice Age climate fluctuations derived from lake sediments of Goulu Co, Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Quaternary Sciences*, 2004, 24(5): 578-584. (in Chinese)
- [44] 曹建廷,沈 吉,王苏民. 内蒙古岱海湖泊沉积记录的小冰期气候环境[J]. *湖泊科学*, 2000, 12(2): 97-104.
- CAO Jian-ting, SHEN Ji, WANG Su-min. A preliminary study of climate change during the Little Ice Age inferred from lacustrine sediments in Daihai Lake, Inner Mongolia[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2000, 12(2): 97-104. (in Chinese)
- [45] 李明慧,康世昌. 青藏高原湖泊沉积物对古气候环境变化的响应[J]. *盐湖研究*, 2007, 15(1): 63-72.
- LI Ming-hui, KANG Shi-chang. Responses of lake sediments to palaeoenvironmental and palaeoclimatic changes in Tibetan Plateau[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2007, 15(1): 63-72. (in Chinese)
- [46] 吕新苗,朱立平, NISHIMURA M, 等. 西藏南部普莫雍错 19 cal ka BP 以来高分辨率环境记录[J]. *科学通报*, 2011, 56(24): 2006-2016.
- LU Xin-miao, ZHU Li-ping, NISHIMURA M, et al. A high-resolution environmental change record since 19 cal ka BP in Pumoyum Co, southern Tibet[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(24): 2006-2016. (in Chinese)
- [47] WANG J B, ZHU L P, NISHIMURA M, et al. Spatial variability and correlation of environmental proxies during the past 18 000 years among multiple cores from Lake Pumoyum Co, Tibet, China

- [J]. Journal of Paleolimnology, 2009, 42(3): 303-315.
- [48] JU J T, ZHU L P, WANG J B, et al. Water and sediment chemistry of Lake Pumoyum Co, South Tibet, China; implications for interpreting sediment carbonate[J]. Journal of Paleolimnology, 2010, 43(3): 463-474.
- [49] 金章东. 湖泊沉积物的矿物组成、成因、环境指示及研究进展[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(1): 34-44.
JIN Zhang-dong. Composition, origin and environmental interpretation of minerals in lake sediments and recent progress[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(1): 34-44. (in Chinese)
- [50] 王苏民, 张振克. 中国湖泊沉积与环境演变研究的新进展[J]. 科学通报, 1999, 44(6): 579-587.
WANG Su-min, ZHANG Zhen-ke. New progress of lake sediments and environmental changes research in China[J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(6): 579-587. (in Chinese)
- [51] 孙千里, 肖举乐, 刘 韬. 岱海沉积物元素地球化学特征反映的末次冰期以来季风/干旱过渡区的水热条件变迁[J]. 第四纪研究, 2010, 30(6): 1121-1130.
SUN Qian-li, XIAO Ju-le, LIU Tao. Hydrothermal status in the monsoon/arid transition belt of China since the Last Glaciation inferred from geochemical characteristics of the sediment cores at Daihai Lake[J]. Quaternary Sciences, 2010, 30(6): 1121-1130. (in Chinese)
- [52] 罗 超, 彭子成, 杨 东, 等. 多元地球化学指标指示的 32~9 ka BP 罗布泊地区环境及其对全球变化的响应[J]. 地球化学, 2008, 37(2): 139-148.
LUO Chao, PENG Zi-cheng, YANG Dong, et al. Paleoclimate of Lop Nur and the response to global change by geochemical elements multi-analysis[J]. Geochimica, 2008, 37(2): 139-148. (in Chinese)
- [53] 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 等. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
LIU Ying-jun, CAO Li-ming, LI Zhao-lin, et al. Geochemistry of the elements[M]. Beijing: Science Press, 1984. (in Chinese)
- [54] 陈诗越, 王苏民, 金章东, 等. 青藏高原中部湖泊沉积物中 Zr/Rb 值及其环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(4): 35-38.
CHEN Shi-yue, WANG Su-min, JIN Zhang-dong, et al. Variation of Zr/Rb ratios in lacustrine sediments of the central Tibetan Plateau and its environment implications[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2003, 23(4): 35-38. (in Chinese)
- [55] 李晶莹, 张 经. 流域盆地的风化作用与全球气候变化[J]. 地球科学进展, 2002, 17(3): 411-419.
LI Jing-ying, ZHANG Jing. Weathering of watershed basins and global climatic change[J]. Advances in Earth Science, 2002, 17(3): 411-419. (in Chinese)
- [56] MEYERS P A, ISHIWATARI R. Lacustrine organic geochemistry: an overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments[J]. Organic Geochemistry, 1993, 20(7): 867-900.
- [57] 郑艳红, 程 鹏, 周卫建. 正构烷烃及单体碳同位素的古植被与古气候意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25(1): 99-104.
ZHENG Yan-hong, CHENG Peng, ZHOU Wei-jian. Paleo-vegetation and paleo-climate *n*-alkanes and compound-specific carbon isotope compositions[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2005, 25(1): 99-104. (in Chinese)
- [58] MEYERS P A. Applications of organic geochemistry to paleolimnological reconstructions: a summary of examples from the Laurentian Great Lakes[J]. Organic Geochemistry, 2003, 34(2): 261-289.
- [59] FICKEN K J, LI B, SWAIN D L, et al. An *n*-alkane proxy for the sedimentary input of submerged/floating freshwater aquatic macrophytes[J]. Organic Geochemistry, 2000, 31(7/8): 745-749.
- [60] SACHSE D, RADKE J, GLEIXNER G. Hydrogen isotope ratios of recent lacustrine sedimentary *n*-alkanes record modern climate variability[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2004, 68(23): 4877-4889.
- [61] ZHENG Y H, ZHOU W J, MEYERS P A, et al. Lipid biomarkers in the Zoige-Hongyuan peat deposit: indicators of Holocene climate changes in West China[J]. Organic Geochemistry, 2007, 38(11): 1927-1940.
- [62] 段 毅, 郑朝阳, 吴保祥. 若尔盖沼泽环境中植物和沉积单体正构烷烃氢同位素组成特征及其成因关系[J]. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(6): 745-750.
DUAN Yi, ZHENG Chao-yang, WU Bao-xiang. Hydrogen isotopic characteristics and their genetic relationships for individual *n*-alkanes in plants and sediments from Zoigê marsh sedimentary environment[J]. Science in China: Earth Science, 2010, 40(6): 745-750. (in Chinese)
- [63] 姚檀栋, 秦大河, 田立德, 等. 青藏高原 2 ka 来温度与降水变化——古里雅冰芯记录[J]. 中国科学: D 辑, 1996, 26(4): 348-353.
YAO Tan-dong, QIN Da-he, TIAN Li-de, et al. Variations in temperature and precipitation in the past 2 000 years on the Xizang (Tibet) Plateau—Guliya ice core record[J]. Science in China: Series D, 1996, 26(4): 348-353. (in Chinese)