

西藏普莫雍错不同岩芯环境指标的对比研究及其反映的近 200 年来环境变化*

王君波¹, 朱立平¹, 鞠建廷², 谢曼平¹, 汪 勇¹

(1: 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, 北京 100085)

(2: 《中国科学》杂志社, 北京 100717)

摘 要: 在西藏南部普莫雍错不同位置处采集了四支岩芯沉积物, 对其中一支利用 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 方法建立了沉积物的年代序列, 并对其他三支岩芯的上部沉积物进行了总有机碳、无机碳、粒度及化学元素含量的分析. 结合沉积物年代, 对不同岩芯的环境代用指标进行对比, 讨论了该地区近 200 年来的环境变化状况. 结果表明, 不同位置处采集的岩芯其环境指标变化趋势在整体上具有一定的可比性, 但在细节变化与环境指标的数值上仍具有明显的差异, 显示了湖泊内部沉积状况的空间差异性, 这可能是由于采样点水深、水下地形以及与主要补给河流距离的不同而造成的. PY04 岩芯环境指标显示普莫雍错湖区环境在约 1900AD 之前较为稳定; 在约 1900–1940AD 之间湖区环境波动加剧, 地表侵蚀增强, 沉积速率加快; 湖区环境在 1940AD 左右发生了明显的变化, 温度显著升高, 沉积物粒度增大, 湖泊处于退缩状态, 表明湖泊环境向暖干化方向发展.

关键词: 湖泊沉积物; 多岩芯; 环境变化; 普莫雍错; 青藏高原

Environmental changes reflected by a comparative proxy study among multiple cores from Pumoyum Co, Tibet in the last 200 years

WANG Junbo¹, ZHU Liping¹, JU Jianting², XIE Manping¹ & WANG Yong¹

(1: *Key Laboratory of Tibetan Environment Changes and Land Surface Processes, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, P.R.China*)

(2: *Science in China Press, Beijing 100717, P.R.China*)

Abstract: Four sediment cores were collected at three sites from Pumoyum Co, Southern Tibet. Sedimentation age was constructed by using ^{210}Pb and ^{137}Cs measurements from one short core. Environmental proxies such as total organic carbon, inorganic carbon, grain size and element concentrations were analyzed for upper parts of other three cores. The proxies from different cores were compared and then environmental changes during the last ca. 200 years were discussed. Although proxies changing trends of different cores are similar, obvious differences appear in both detailed variations and proxies values, probably resulting from different water depth, underwater landform conditions and distances to rivers among the sites. Environment condition in this area was stable before 1900AD, but it fluctuated during 1900–1940AD with enhancement of surface erosion and increased sedimentation rate. Remarkable changes took place at about 1940AD, showing that the temperature increased greatly, grain size of sediments became coarser and the lake was in the state of shrinkage, indicating environment in this area changed to a warm/dry state.

Keywords: Lake sediment; multiple cores; environmental changes; Pumoyum Co; Tibetan Plateau

青藏高原湖泊沉积与环境演变研究已取得大量成果, 由于大部分湖泊沉积速率比较慢, 较高时间分辨率的记录较难获得, 因此已有的研究多以长尺度环境变化序列为主^[1-2]. 而近年来随着以 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 技术为基础的近代沉积速率测定方法的发展和普遍应用, 湖泊沉积所揭示的短尺度环境变化序列也受到研究者的重视, 获得了高原上不同地区湖泊沉积所记录的近 200 年来短尺度环境变化序列^[3-6].

* 国家自然科学基金项目(40871099, 40571172)资助. 2009-01-16 收稿; 2009-05-25 收修改稿. 王君波, 男, 1977 年生, 博士, 副研究员; E-mail: wangjb@itpcas.ac.cn.

然而, 湖泊沉积过程及沉积物在湖泊中的分布是非常复杂的, 目前青藏高原湖泊沉积研究多采用单一岩芯进行, 不同沉积位置的多岩芯对比研究开展甚少; 而单一岩芯对于整个湖泊沉积状况的代表性是一个重要的问题. 在已有的研究中, 虽然也有部分研究认为单一岩芯能对湖区环境变化的恢复提供足够的精确的信息^[7], 但大多数研究认为湖泊沉积物的空间分布差异应该受到重视, 在环境变化研究中应该采用多岩芯研究^[8-9].

在藏南普莫雍错, 长尺度岩芯对比研究已经揭示了不同位置岩芯间的差异性和相似性, 结果表明在万年时间尺度上, 不同位置岩芯在沉积速率、有机质累积速率等方面具有明显的差异性, 而在对特征时段气候环境状况的反映上则具有很好的相似性^[10]; 以此为基础本文对普莫雍错不同沉积部位的三支岩芯进行短尺度高分辨率的对比分析, 试图揭示其在百年时间尺度上的沉积异同性, 并结合近代沉积速率所确定的沉积物年代对湖区近 200 年来的环境变化进行初步研究.

1 研究区概况

普莫雍错位于藏南山原湖盆谷地地区, 喜马拉雅山北麓一个山间盆地内, 地理位置为 90°13′-90°33′E, 28°30′-28°38′N. 湖泊最大长度 32.5km, 最大宽度 14.0km, 湖面面积 290.0km², 集水面积 1232.9km², 湖岸线长约 94.0km, 补给系数 4.2, 发育系数 1.56^[11]. 2004 年实测水位 5030m, 实测最大水深约 65m. 相对于该区其他湖泊, 普莫雍错的补给系数是比较小的, 这主要是由于该湖位于冰川的前缘, 冰雪融水充沛, 且海拔较高, 蒸发强度较小^[12].

普莫雍错主要依赖湖面降水和冰雪融水径流补给, 主要的入湖河流有 4 条(图 1), 其中以西岸入湖的加曲水量最大, 该河发源于湖泊南部的山地, 源头有大量的现代冰川和一些面积不大的冰川湖分布, 沿途有众多的支流汇入, 两次考察结果显示加曲的径流量占有入湖水量的近 80%^[13]. 湖中东北部有 3 个面积不大的石质小岛, 高出湖面约为 26-114m, 对东部湖区的水下地形变化及沉积过程形成影响. 湖泊最深处位于中部湖区的两个盆地, 西部湖区湖底坡度较小, 为水下冲积扇.

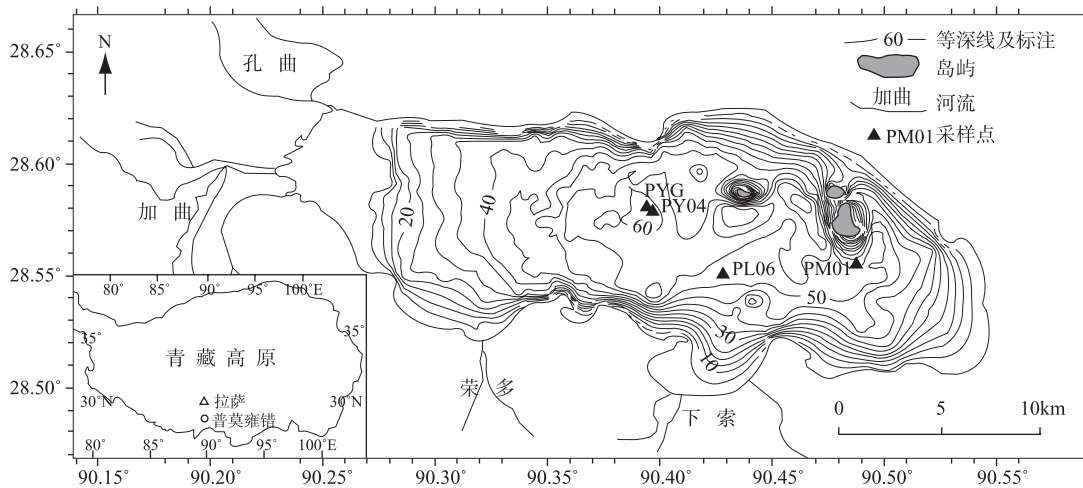


图 1 普莫雍错等深线及采样点位置

Fig.1 Map showing the isobath of Pumoyum Co and sampling sites

2 材料与方法

2.1 沉积物采样

在对全湖进行深度测量的基础上, 分别于 2001 年、2004 年和 2006 年在东部湖区(水深约 46.5m, 岩芯编号 PM01)、中部深水区(水深约 64.5m, 岩芯编号 PY04)和南部湖区(水深约 51.5m, 岩芯编号 PL06)采集了沉积物岩芯(图 1). 其中 PM01、PY04 和 PL06 三支岩芯用活塞采样器取得, 长度分别为 244cm、

386cm 和 370cm^[10]; 而编号为 PYG 的岩芯利用重力采样器取得, 全长为 45cm, 和 PY04 为同一采样位置. 采集的岩芯保存在 PVC 样管中, 在实验室中以 1cm 间隔进行分样.

2.2 沉积物定年

沉积物年代分析利用 PYG 短岩芯进行, 分析仪器为美国 Ortec 公司生产的高纯锗井型探测器(HPGe GWL)和 919 型多通道数字化谱控制器以及 IBM 微机构成的 γ 谱分析系统, 其中 ^{137}Cs 和 ^{226}Ra 标准样品由中国原子能研究院提供, ^{210}Pb 标准样品由英国利物浦大学制作, 测试分析在中国科学院南京地理与湖泊研究所完成.

2.3 环境代用指标分析

粒度分析用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer2000 型激光粒度仪完成, 测量之前对样品进行去除有机质及碳酸盐胶结的处理, 仪器重复测量误差小于 3%^[14]; 总有机碳(TOC)和无机碳(IC)分析利用日本岛津公司 Shimadzu TOC-V_{CPH} 测量^[10], 分析误差小于 3%; 总氮(TN)利用凯式定氮法测定, 分析误差小于 0.1%^[15]; 微量元素含量利用美国 Thermo-Elemental 公司的 X-7 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定, 仪器的相对标准偏差(RSD)小于 3%, 实际分析误差(含前处理环节)一般小于 5%, 所有测量在中国科学院地理科学与资源研究所以及中国科学院青藏高原研究所进行.

3 结果

3.1 沉积物年代

对 PYG 短岩芯进行了 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 放射性活度的测试, 结果显示过剩 ^{210}Pb 比活度($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$)随深度的变化基本呈现指数衰减, 至 27cm 深度以下, ^{210}Pb 总强度和 ^{226}Ra 强度平衡, 过剩 ^{210}Pb 为零, 不再具有计年意义, 而 ^{137}Cs 也有较为明显的峰值(图 2). 利用 ^{210}Pb 衰变规律进行沉积物年代的推算一般有 CRS(Constant Rate of ^{210}Pb Supply, 恒定补给速率)和 CIC(Constant Initial Concentration, 恒定初始浓度)两种模式, 且 CRS 更为广泛应用^[16]. 利用 CRS 模型计算了 PYG 岩芯上部 27cm 长度所代表的年代, 并用 ^{137}Cs 峰值处的年份作为时标点进行了对照, 6.5cm 处峰值对应于 1963 年, CRS 模型计算的年代为 1969 年; 9.5cm 处 ^{137}Cs 开始出现的年份为 1954 年, CRS 模型计算的年代为 1956 年, 二者相差不大, 说明此年代序列较为准确, 27cm 岩芯代表了自 1811AD 以来近 200 年的变化.

3.2 岩芯间指标变化的对比

为了解不同位置处所采集的岩芯沉积物性质的异同, 首先对三个位置采集的岩芯间的环境指标随深度的变化趋势进行对比(图 3, 图 4). 三支岩芯上部 27cm 的 3 个环境指标虽然整体上表现出基本相同的变化趋势, 但从细节变化上仍然显示了明显的差异, 其中 IC 的差异最为明显, 特别是 PM01 岩芯上部约 5cm 处 TOC 和 IC 的变化趋势与其他二支岩芯有较大的不同(图 3).

图 3 中 TOC 和 IC 的变化表现出一定的规律性, 其中 PY04 的 TOC 含量最高, PL06 次之, PM01 最低; 而 IC 含量呈相反趋势, PM01 最高, PL06 次之, PY04 最低. 而代表平均粒径大小的粒度参数 $D[4,3]$ 却无明显规律, 在不同深度三条曲线都没有表现出明显的差异, 其绝对数值相差很小. 分别计算了三支岩芯 3 个环境指标的平均值, 更清晰地显示了这种差异(表 1). PY04 的平均 TOC 含量分别是 PM01 和 PL06 的 1.8 倍和 1.4 倍, 而 IC 平均含量只分别相当于 PM01 和 PL06 的 18% 和 47%; 这与在万年尺度上所进行的对比研究得到的结论一致, 说明沉积状况主要受水深影响^[10], 而三支岩芯的 $D[4,3]$ 平均值无明显差异.

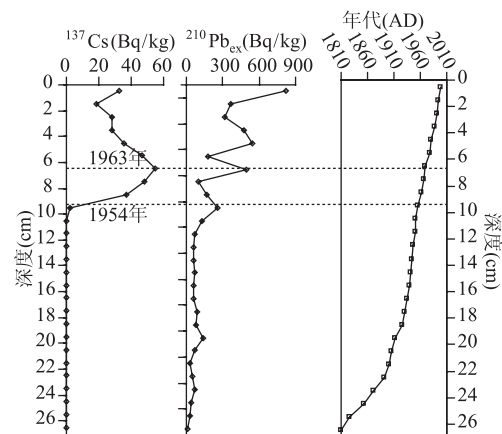


图 2 普莫雍错 PYG 孔 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 比活度及深度-年代对应关系

Fig.2 ^{210}Pb and ^{137}Cs activities and depth-age model of PYG core from Pumoyum Co

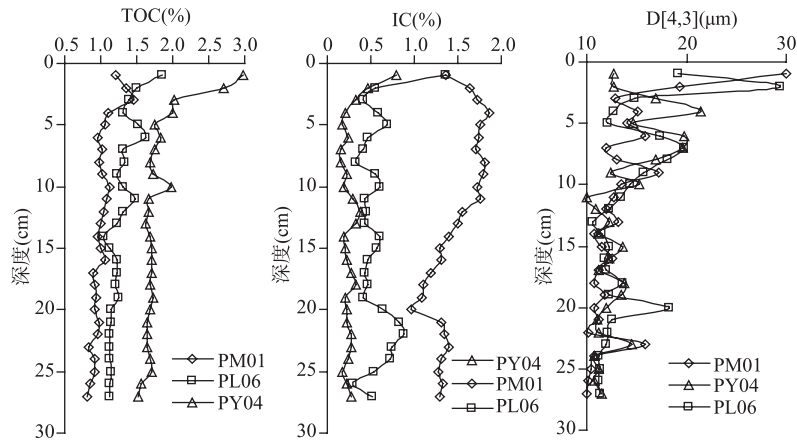


图3 普莫雍错不同岩芯 TOC、IC 与粒度(D[4,3])随深度变化的对比

Fig.3 Comparison of TOC, IC and grain size in different cores from Pumoyum Co

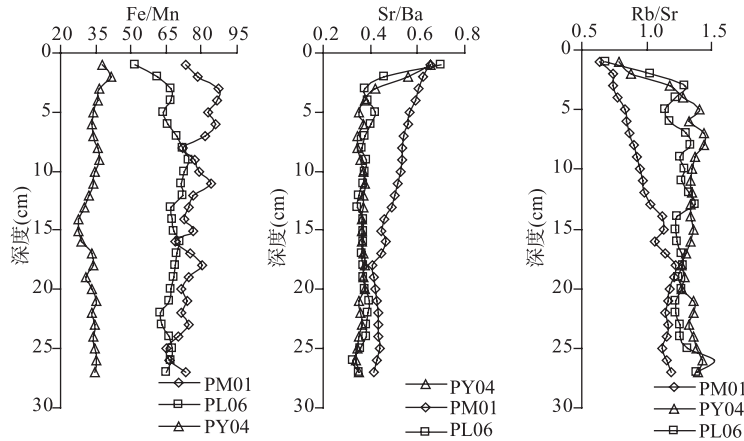


图4 普莫雍错不同岩芯 Fe/Mn、Sr/Ba 与 Rb/Sr 随深度变化的对比

Fig.4 Variations of Fe/Mn, Sr/Ba and Rb/Sr in different cores from Pumoyum Co

元素含量比值 Fe/Mn、Sr/Ba 和 Rb/Sr 也显示存在较大的不同(图 4), 特别是 Fe/Mn 比值在各点间差异较大, 而 Sr/Ba 和 Rb/Sr 比值则具有较好的相似性, 特别是在 PY04 和 PL06 岩芯中(表 1).

表 1 普莫雍错三支岩芯上部 27cm 环境指标平均值

Tab.1 Proxies average values of upper 27cm section in different cores from Pumoyum Co

岩芯	TOC(%)	IC(%)	D[4,3](μm)	Fe/Mn	Sr/Ba	Rb/Sr
PM01	1.01	1.47	13.28	75.71	0.48	1.03
PY04	1.80	0.27	13.47	33.86	0.38	1.31
PL06	1.28	0.57	14.20	67.21	0.39	1.25

3.3 PY04 岩芯近 200 年来环境指标变化特征

对 PM01 岩芯进行了 TN 的测定(图略), 从其变化的趋势来看, 与 PY04 的 TOC 具有较好的相似性, PM01 的 TN 分布在 0.12%–0.18%之间, 平均值为 0.14%, 而据此计算的 PM01 孔的 C/N 分布在 5–9 之间,

除个别值外 C/N 都小于 8, 平均值约为 7.5, 说明有机质主要来源于水生生物中浮游生物的贡献, 而几乎没有陆源高等植物碎屑的输入^[17-18]。

在约 1900AD 之前, 除平均粒径有一个突然变大的突出值外, PY04 岩芯的其它所有指标都十分平稳, 变化很小, 此阶段平均沉积速率显示了增加的趋势, 表明沉积物的补给在缓慢、稳定地增加(图 5)。沉积速率的增加并没有伴随着其他指标的相应波动, 也许是因为在此时期湖区环境较为稳定, 沉积的物质较为均一, 因而沉积物性质变化不大, 而沉积速率的增加可能反映了地表径流带来的物质增多。约 1900-1940AD 之间, TOC、Sr/Ba 和 Rb/Sr 仍然处于稳定状态, 而 IC、平均粒径及 Fe/Mn 都有明显的波动, 沉积速率在前期增加的基础上继续变大, 并达到整个序列的最大值。约 1940AD 之后, 各指标都显示了强烈的变化, 且波动也十分剧烈, 沉积速率在前期较高的水平上有一定程度的降低, 其后直到顶部基本都在平均值附近波动变化。

4 讨论与结论

4.1 不同位置岩芯环境代用指标的差异及其环境意义

同一湖泊中不同位置处岩芯序列的差异早已为研究者所重视, 并有研究者对沉积物在湖泊中的分布机制进行了研究^[19]。从普莫雍错三支短岩芯的若干环境指标来看, 其序列的趋势变化和数值变化都显示了一定的相似性和差异性。

TOC 的变化虽然从其整体变化趋势上来说具有一定的可比性, 但其具体数值的差异性及细节变化的不同仍是最显著的, 其中处于湖泊中心最深处的 PY04 岩芯的平均 TOC 含量最高, 由于沉积物中有机质主要来源于湖泊内部浮游生物的贡献, 而沉积物在湖泊内部由于入湖河流、水下地形坡度、沉积物再悬移、生物扰动等因素的影响具有向沉积中心移动的动力, 因此 PY04 岩芯中 TOC 的高值显示了沉积物集中(sediment focusing)机制的发生^[19]; PM01 岩芯由于水深较小, 且采样点位于斜坡上不利于沉积物的保存, 因而其 TOC 含量最低。而从 IC 的平均数据来看, PY04 的值最低, PM01 最高, 且二者相差了 5 倍之多, 这可能与湖泊中不同水深处无机碳酸盐(主要是碳酸钙)的形成和保存条件有关^[20]。在普莫雍错中, 湖水中的 CaCO_3 沉淀是沉积物中碳酸盐的重要来源^[21], 水深越大, 温度较低的水体体积越大, 由于温度低 CaCO_3 的溶解度增加因而不利于 CaCO_3 的形成和保存, 这可能是 PY04 岩芯中 IC 含量最低的原因。

沉积物粒度指标作为沉积水动力条件的反映, 一般受水深、水下地形、河流补给及降水形成的坡面径流等因素的影响。本研究中三支岩芯的平均粒径从数值上没有表现出明显的规律性, 呈现出交错状态, 特别是 10cm 以上层段, 说明影响沉积水动力条件的因素较为复杂, 且在不同点可能主控因素并不相同, 因而很难识别出造成这种分布特征的影响因素。然而, 从整体趋势来看, 三支岩芯的粒度指标都显示了增加的趋势, 反映 10cm 以上层段具有较强的水动力条件。

Fe/Mn 比值在各岩芯中变化较小, 但岩芯间的差异却较大, 显示了随采样点深度增加而减小的趋势, 沉积物中的 Fe/Mn 比值受水体氧化还原状况与沉积物来源控制。对于普莫雍错来说, 这 3 个采样点所处的深度其水温无明显差异, 而溶解氧也都处于基本饱和状态^[22], 其水化学性质也差异很小^[21], 因而其氧化还原条件应该基本相同。造成 Fe/Mn 比值出现明显差异的原因可能是物源条件的不同。对 Fe 和 Mn 的含量进一步分析可以发现, 三支岩芯中 Fe 的实际含量只有很小的差异, 而 Mn 的含量显示出较大的不同, 因而造成了 Fe/Mn 比值的差异; PY04 岩芯的 Mn 含量最大, 可能与此处(全湖最大的沉积中心, 且是 3 个采样点中距离河流补给最近的点)的 Mn 随地表物质进入湖泊的富集堆积有关, 其原因可能与西部主要补给河流带入较多的含 Mn 的陆源碎屑有关。

Sr/Ba 和 Rb/Sr 比值在三个岩芯中差异较小, 特别是在 PY04 和 PL06 岩芯中二者更为接近, 显示了 Sr/Ba 比值增加和 Rb/Sr 降低的相似的整体趋势。在三支岩芯中, PM01 岩芯中的 Sr 含量最高而 Rb 和 Ba 的含量最低是造成其 Sr/Ba 最大而 Rb/Sr 最小的原因, 这与 PM01 岩芯中 IC 的含量最高也是一致的, 因为在湖泊沉积物中 Sr 和 Ca 往往共生, 因而其含量也具有相关变化。整体来看, 相比于其他指标, 这两个指标的空间分布的差异较小, 指标变化的相似性是其主要特征。

湖泊沉积物总有机碳含量反映了其内源和外源有机质输入和保存的状况, 主要受陆源植被及湖泊水生生物的影响, 而 C/N 可以反映有机质的来源情况^[18]. 对青藏高原主要生态系统净初级生产力的估算结果表明, 无论是年内变化还是整个高原面上的空间变化都与温度呈较好的相关性^[23], 这说明温度对于青藏高原上有机质的形成起决定性作用, 而湖泊沉积物总氮含量则代表了湖泊的营养状况, 同样受到温度的影响, 因此普莫雍错的 TOC 和 TN 可以代表湖区环境的温度变化状况.

湖泊沉积物粒度分布特征能够反映沉积时的水动力状况, 对于以冰融水和大气降水共同补给的普莫雍错来说, 其湖泊水动力状况取决于气温和降水两个因素, 不同时间尺度其主导因素不同, 对于短时间尺度来说, 粒度变化可能更多地指示了湖区降水变化^[24]. 湖泊沉积物无机碳主要来源于湖泊外源碳酸盐和自生碳酸盐, 其中外源碳酸盐是指流域母岩风化物质由地表径流带入的成分, 而自生碳酸盐主要是指湖泊水体中无机化学沉积作用产生的沉淀及生物壳体碳酸盐成分^[25]. 湖泊沉积物无机碳含量总体上反映了有效湿度与干燥度的变化, 直接受控于温度及其引起的蒸发量变化^[26].

湖泊沉积物中元素含量的变化受很多环境因素的影响, 对环境变化的响应较为复杂. 部分元素比值常被用来作为环境变化的代用指标. 作为较为活跃的元素, Fe/Mn 变化一般受制于湖泊环境氧化还原条件的变化, 湖泊水深越大, 氧化性越弱. 在这种情况下, 由于 Fe²⁺要比 Mn²⁺更容易被氧化, 而 Mn 的氢氧化物要比 Fe 的氧化物更容易还原, 因此当 Fe/Mn 出现高值时可以认为湖泊处于缺氧的还原环境, 而低值指示氧化环境, 反映较低的湖面或者较高的温度^[27]. Sr/Ba 的变化主要取决于它们在水中的溶解能力和水体体积的关系, 当湖水体积缩小时 Ba 离子浓度升高从而从湖水中析出, 造成湖水中 Sr/Ba 比升高, 因此 Sr/Ba 高值代表湖泊收缩, 水体体积减小, 当不考虑其他因素的影响时, Sr/Ba 与 Fe/Mn 的变化应该具有相反的特征^[3]. Rb/Sr 常被用来恢复湖区化学风化历史或者作为指示夏季风环流强度的代用指标^[28-29].

4.2 普莫雍错近 200 年来环境变化特征

普莫雍错深水岩芯 PY04 岩芯近 200 年来的记录表明(图 5), 湖区环境在约 1900AD 之前较为稳定, TOC、IC 和 Sr/Ba 等较低的值说明此阶段湖泊应该处于一个相对冷湿的环境背景下, 平均粒径较小说明此阶段的地表径流强度不大, 沉积速率也比较低, 但在后期有急剧增加的趋势并在约 1900AD 左右达到一个较高的水平. 在约 1900-1940AD 之间, TOC 和 Sr/Ba 仍然维持较低的稳定状态, 其他指标都有明显的波动, 粒度的波动增大和持续增加的沉积速率反映此时段内湖泊接受较多的地表物质, 表明地表侵蚀加剧; 而 Fe/Mn 的波动变低表明 Mn 的富集在增强, 反映了进入湖泊的地表物质的增加.

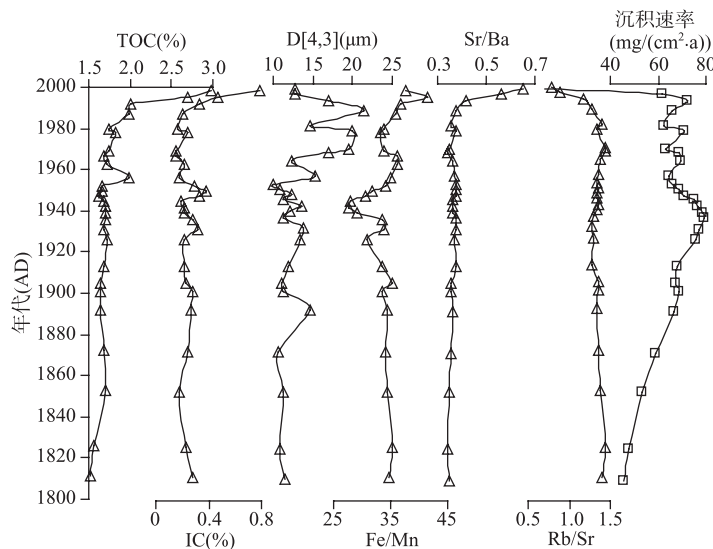


图 5 普莫雍错 PY04 岩芯近 200 年来部分环境代用指标的变化

Fig.5 Variations in environmental proxies during the recent 200 years in PY04 core from Pumoyum Co

各环境指标的变化表明湖区环境在 1940AD 左右发生了明显的变化, TOC 显示湖区温度明显上升, 有机质的生产和累积速率增加; 虽然粒度增加也许指示了较多的地表径流的出现, 但 IC 和 Sr/Ba 也都出现增大的趋势显示了湖泊仍然处于退缩状态, 说明较多的地表径流不足以弥补温度上升带来的蒸发加强. Fe/Mn 的波动上升指示湖泊水环境的氧化性降低, 在还原环境状态下, Fe、Mn 都容易变成可溶状态从而使沉积物中二者的含量都降低, 而 Mn 在还原环境下比 Fe 更容易变成可溶态^[30], 这可能是造成这一阶段 Fe/Mn 升高的原因. 沉积速率波动剧烈但无明显增加或降低趋势, 说明此阶段环境状况波动复杂.

20 世纪 50 年代 TOC 指标显示温度在达到较高的水平之后出现下降的趋势, 并在 60 年代中期下降到一个接近 40 年代以前的水平, 这一变化过程在其他指标中都有不同程度的反映. 20 世纪 60 年代中期以后所有指标都较为一致地显示了湖区温度升高, 同时蒸发加强、地表流水增强但风化程度降低、湖泊收缩, 即普莫雍错地区环境向暖干化方向发展, 这一趋势在 20 世纪 80 年代以后表现尤为明显, 这些变化趋势与青藏高原中部地区的湖泊具有相似性^[5-6]. 而 2004 年野外考察时湖泊处于高湖面状态并出现外泄, 显示这一暖干化的发展趋势又有新的动向^[13].

利用器测资料对青藏高原地区近 40 年来气候变化的研究已有很多^[31-33], 其基本结果是气温明显升高, 降水增加但区域及年代际差异较大, 蒸发量整体呈下降趋势, 但 60 年代初和 80 年代初气候有突变现象且 60 年代、70 年代多异常偏冷年份^[31-32]. 在这种气候变化的背景下, 部分区域地表径流由于温度的升高而增加, 但其受降水的影响存在不确定性^[34]; 同时很多湖泊出现了水位上升、湖面扩大的趋势^[35-36], 但调查和实测资料显示藏南羊卓雍错近百年来(1992 年以前)水位整体上呈平缓下降趋势, 特别是 60 年代中期到 90 年代水位下降明显^[37], 该流域中沉错的 pH 值和矿化度近 30 年来处于增加状态, 也显示了湖泊的萎缩趋势^[38].

从本研究中 PY04 环境指标所指示的普莫雍错地区近 200 年来环境变化状况来看, 20 世纪 60 年代以来, TOC 指示的温度变化较好的响应了区域气候变化情况, 特别是 60 年代初及 80 年代初的两次拐点以及 60 年代的较冷期; 粒度指标指示的水动力条件的变化则显示了地表流水的增强, 可能与温度升高导致的冰融水增加和湖区降水量的增加都有关系; 但是 IC、Sr/Ba 指示的湖泊收缩状态却与青藏高原整体蒸发量下降、大部分湖泊扩张的现象不一致, 而与同一区域内羊卓雍错和沉错的变化一致, 其原因也许是普莫雍错所处的藏南地区更多地受西南季风的控制.

致谢: 实验分析得到中国科学院南京地理与湖泊研究所夏威岚高级工程师、中国科学院地理科学与资源研究所杨京蓉高级工程师以及中国科学院青藏高原研究所高少鹏工程师的帮助; 冯金良、刘录三、吴艳红、林晓、甄晓林、彭萍及日本东海大学部分合作人员参加了野外采样工作, 在此一并表示感谢.

5 参考文献

- [1] 王苏民, 张振克. 中国湖泊沉积与环境演变研究的新进展. 科学通报, 1999, **44**(6): 579-587.
- [2] 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. 地理科学进展, 2005, **24**(5): 1-12.
- [3] 朱立平, 陈玲, 李炳元等. 西昆仑山南红山湖沉积反映的过去 150 年湖区环境变化. 中国科学(D 辑), 2001, **31**(7): 601-607.
- [4] 吴敬禄, Schleser GH, 王苏民等. 青藏高原东部兴措湖近 0.2ka 来的气候定量复原. 中国科学(D 辑), 2001, **31**(12): 1024-1030.
- [5] 吴艳宏, 王苏民, 夏威岚等. 青藏高原中部 0.2ka 来的环境变化. 中国科学(D 辑), 2001, **31**(增刊): 264-268.
- [6] 王荣, 羊向东, 朱立平. 西藏纳木错过去 200 年来的环境变化. 第四纪研究, 2006, **26**(5): 791-798.
- [7] Charles DF, Dixit SS, Cumming BF *et al.* Variability in diatom and chrysophyte assemblages and inferred pH: paleolimnological studies of Big Moose Lake, New York, USA. *Journal of Paleolimnology*, 1991, **5**: 267-284.
- [8] Lamoureux S. Spatial and interannual variations in sedimentation patterns recorded in nonglacial varved sediments from the Canadian High Arctic. *Journal of Paleolimnology*, 1999, **21**: 73-84.
- [9] Schiefer E. Depositional regimes and areal continuity of sedimentation in a montane lake basin, British Columbia, Canada. *Journal of Paleolimnology*, 2006, **35**: 617-628.

- [10] Wang JB, Zhu LP, 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. *Journal of Paleolimnology*, 2009, **42**(3): 303-315.
- [11] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998: 405.
- [12] 关志华, 陈传友, 区裕雄等. 西藏河流与湖泊. 北京: 科学出版社, 1984: 115-215.
- [13] 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湖区环境变化. 第四纪研究, 2006, **26**(5): 772-780.
- [14] 王君波, 朱立平. 不同前处理对湖泊沉积物粒度测量结果的影响. 湖泊科学, 2005, **17**(1): 17-23.
- [15] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978: 62-70.
- [16] Appleby PG. Chronostratigraphic techniques in recent sediments. In: Last WM, Smol JP eds. Tracking environmental change using lake sediments. Volume 1: Basin analysis, Coring, and Chronological Techniques. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001: 171-203.
- [17] 中国科学院兰州地质研究所, 中国科学院水生生物研究所, 中国科学院微生物研究所等. 青海湖综合考察报告. 北京: 科学出版社, 1979: 140-169.
- [18] Krishnamurthy RV, Bhattacharya SK, Sheela K. Palaeoclimatic changes deduced from $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ and C/N ratios of Karewa lake sediments, India. *Nature*, 1986, **323**: 150-152.
- [19] Hilton J, Lishman JP, Allen PV. The dominant processes of sediment distribution and focusing in a small, eutrophic, monomictic lake. *Limnology and Oceanography*, 1986, **31**(1): 125-133.
- [20] Håkanson L, Jansson M. Principles of lake sedimentology. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer-Verlag, 1983: 316.
- [21] 鞠建廷, 朱立平, 汪勇等. 藏南普莫雍错流域水体离子的组成与空间分布及其环境意义初步研究. 湖泊科学, 2008, **20**(5): 591-599.
- [22] Murakami T, Terai H, Yoshiyama Y *et al.* The second investigation of Lake Puma Yum Co located in the Southern Tibetan Plateau, China. *Limnology*, 2007, **8**: 331-335.
- [23] 周才平, 欧阳华, 王勤学等. 青藏高原主要生态系统净初级生产力估算. 地理学报, 2004, **59**(1): 74-79.
- [24] 陈敬安, 万国江, 张峰等. 不同时间尺度下的湖泊沉积物环境记录——以沉积物粒度为例. 中国科学(D 辑), 2003, **33**(6): 563-568.
- [25] 陈敬安, 万国江, 汪福顺等. 湖泊现代沉积物碳环境记录研究. 中国科学(D 辑), 2002, **32**(1): 73-80.
- [26] 李世杰, 区荣康, 朱照宇等. 24 万年来西昆仑山甜水海湖岩芯碳酸盐含量变化与气候环境演化. 湖泊科学, 1998, **10**(2): 58-65.
- [27] Wersin P, Höhener P, Giovanoli R *et al.* Early diagenetic influences on iron transformations in a freshwater lake sediment. *Chemical Geology*, 1991, **90**: 233-252.
- [28] 金章东, 王苏民, 沈吉等. 小冰期弱化学风化的湖泊沉积记录. 中国科学(D 辑), 2001, **31**(3): 221-225.
- [29] 申洪源, 贾玉连, 李徐生等. 内蒙古黄旗海不同粒级湖泊沉积物 Rb、Sr 组成与环境变化. 地理学报, 2006, **61**(11): 1208-1217.
- [30] Boyle JF. Inorganic geochemical methods in paleolimnology. In: Last WM, Smol JP eds. Tracking environmental change using lake sediments, vol 2: physical and geochemical methods. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001: 83-142.
- [31] 杜军, 周顺武, 唐叔乙. 西藏近 40 年气温变化的气候特征分析. 应用气象学报, 2000, **11**(2): 221-227.
- [32] 杜军. 西藏高原近 40 年的气温变化. 地理学报, 2001, **56**(6): 682-690.
- [33] 杜军, 马玉才. 西藏高原降水变化趋势的气候分析. 地理学报, 2004, **59**(3): 375-382.
- [34] 张菲, 刘景时, 巩同梁等. 喜马拉雅山北坡卡鲁雄曲径流与气候变化. 地理学报, 2006, **61**(11): 1141-1148.
- [35] 边多, 杨志刚, 李林等. 近 30 年来西藏那曲地区湖泊变化对气候波动的响应. 地理学报, 2006, **61**(5): 510-518.
- [36] 吴艳红, 朱立平, 叶庆华等. 纳木错流域近三十年来湖泊—冰川变化对气候的响应. 地理学报, 2007, **62**(3): 300-311.
- [37] 刘天仇. 西藏羊卓雍错水位动态研究. 地理科学, 1995, **15**(1): 55-62.
- [38] 朱立平, 王君波, Anton Brancelj. 藏南沉错沉积物水蚤残体组合对环境变化响应. 科学通报, 2005, **50**(14): 1490-1497.