

西藏玛旁雍错和拉昂错水深、水质特征及现代沉积速率*

王君波, 彭萍, 马庆峰, 朱立平

(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 100101)

摘要: 基于 2009 年和 2010 年分别在玛旁雍错和拉昂错开展的 2 次野外湖泊调查, 本文简要报道这 2 个藏南内流水系湖泊的水深分布、湖水理化特征及湖泊现代沉积速率。测深结果显示玛旁雍错湖盆形状规则, 深水区坡度平缓, 最大水深为 72.6 m; 拉昂错北部为较浅的河流冲积扇, 通过狭长的水道与开阔的南部湖区相连, 南部湖区中心平坦, 实测最深处 49.03 m; 根据水深数据计算的玛旁雍错和拉昂错水量分别为 $1.462 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 和 $5.711 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。玛旁雍错湖水剖面水质在垂直方向上呈现明显的分层结构, 温跃层介于 25 ~ 35 m 之间, 温度梯度为 $0.17^\circ\text{C}/\text{m}$, 水体 pH、电导率和溶解氧在温跃层具有同步变化特征; 拉昂错湖水温跃层与玛旁雍错相比不明显, 5 ~ 15 m 间温度梯度为 $0.16^\circ\text{C}/\text{m}$, 湖水 pH 与溶解氧呈反相变化, 这可能与水生植物呼吸作用有关。2 个湖泊湖水的主要离子组成特征除 Ca^{2+} 外基本相同, 拉昂错主要离子浓度约为玛旁雍错的 3 倍, 而 Ca^{2+} 则约为玛旁雍错的 1/2; 利用 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 方法对玛旁雍错和拉昂错的短岩芯进行了测试, 结果表明 2 个湖泊近代沉积速率分别约为 0.31 mm/a 和 0.65 mm/a 。

关键词: 水深测量; 理化性质; 玛旁雍错; 拉昂错; 现代沉积速率; 青藏高原

Investigation of water depth, water quality and modern sedimentation rate in Mapam Yumco and La'ang Co, Tibet

WANG Junbo, PENG Ping, MA Qingfeng & ZHU Liping

(Key Laboratory of Tibetan Environment Changes and Land Surface Processes (TEL), Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, P. R. China)

Abstract: In this paper, we reported water depth, water quality and modern sedimentation rates of Mapam Yumco and La'ang Co, southern Tibet, based on field investigation conducted in 2009 and 2010, respectively. Bathymetric survey showed a rather regular shape of Mapam Yumco with a maximum depth of 72.6 m and flat in the middle part of the lake. In La'ang Co, there are shallow fluvial fans in the north part and open areas in the south, which are connected by a narrow channel. The deepest part of La'ang Co is 49.03 m which lies in southern basin. The water volumes of the two lakes are $1.462 \times 10^{10} \text{ m}^3$ and $5.711 \times 10^9 \text{ m}^3$, respectively, according to the calculation based on water depth data. For the physicochemical profile feature of Mapam Yumco, a thermocline existed between 25 - 35 m with a temperature gradient of $0.17^\circ\text{C}/\text{m}$. Conductivity, pH and dissolved oxygen showed synchronous abrupt changes in the thermocline. In La'ang Co, temperature decreased abruptly between 5 - 15 m with a gradient of $0.16^\circ\text{C}/\text{m}$. Meanwhile, pH changed to weak acid condition from surface to bottom, while the dissolved oxygen changed oppositely which may caused by respiration of aquatic plants. In Mapam Yumco and La'ang Co, major ionic composition showed similar features except Ca^{2+} , major ions in La'ang Co were approximately three times of Mapam Yumco in concentration, while Ca^{2+} was only half of Mapam Yumco. ^{210}Pb and ^{137}Cs method was used to determine the modern sedimentation rates of both lakes, the results showed that it was 0.31 mm/a and 0.65 mm/a in Mapam Yumco and La'ang Co, respectively.

Keywords: Bathymetric survey; physicochemical feature; Mapam Yumco; La'ang Co; modern sedimentation rate; Tibetan Plateau

玛旁雍错 ($30^\circ34' \sim 30^\circ47' \text{N}$, $81^\circ22' \sim 81^\circ27' \text{E}$) 和拉昂错 ($30^\circ40' \sim 30^\circ51' \text{N}$, $81^\circ06' \sim 81^\circ19' \text{E}$) 流域是藏南内流水系中为数不多的面积较大的内陆湖泊^[1], 由于玛旁雍错在宗教传统上的特殊地位, 在过去一个

* 国家自然科学基金项目(41071123, 41190082)和国家重点基础研究发展计划“973”项目(2012CB956100)联合资助。
2012-08-10 收稿; 2013-01-14 收修改稿。王君波, 男, 1977 年生, 博士, 副研究员; E-mail: wangjb@itpcas.ac.cn.

多世纪以来就为世人所广泛关注. 广为流传的是瑞典人斯文·赫定在 1907 年前后对玛旁雍错的调查, 据记载其测定的最大水深达 81.8 m; 1976 年中国科学院青藏高原综合科学考察队对玛旁雍错进行了较为详细的调查, 在水温垂直分布、湖水化学性质等方面获得了宝贵的资料^[2], 而作为位于同一流域甚至以前与玛旁雍错连为一体的姊妹湖——拉昂错则相对研究的很少, 目前湖泊基础资料几乎仍为空白.

全球气候变化特别是全球变暖对青藏高原湖泊造成了显著的影响, 由于大部分湖泊几乎不受人类活动的直接影响, 因而成为研究全球变化影响及区域响应的重要区域. 近年来, 研究者选择位于青藏高原不同气候区的不同类型湖泊进行了大量的考察工作, 在湖泊水深分布、水质特征、水化学组成及影响因素等方面取得了很多研究成果^[3-8], 这些考察和研究一方面丰富了青藏高原湖泊的基础资料, 另一方面为湖泊环境演变研究提供了基础.

在全球变暖导致冰川退缩、湖泊面积变化的背景下, 玛旁雍错和拉昂错流域因其内部具有完整的现代冰川、河流、封闭湖泊等水文要素而成为良好的研究地点. 基于遥感和 GIS 的研究显示, 该流域近三十年来冰川面积减少、湖泊退缩^[9-10]; 在近年来大部分湖泊面积扩张的情况下, 玛旁雍错面积变化不大, 甚至略有萎缩趋势^[11-12]; 由于补给和蒸发的差值不同, 玛旁雍错和拉昂错湖内盐分有较大的差异, 因而造成二者水色的差异^[13]. 以上研究都是基于遥感影像而获取的, 对湖泊本身的特征尚未涉及. 基于玛旁雍错和拉昂错在冰川-湖泊相互作用、水文过程、水循环、水文模型以及环境变化等方面较好的研究潜力, 笔者于 2009 年 9 月和 2010 年 7 月分别对玛旁雍错和拉昂错进行了调查, 本文简要报道这 2 个湖泊的水深、水质特征及现代沉积速率.

1 方法

玛旁雍错湖泊测深利用德国 Innomar Technologie GmbH 生产的沉积物回声测量仪 (Sediment Echo Sounder SES-96) 完成, 拉昂错测深利用广州中海达测绘仪器有限公司生产的 HD-27 数字单频测深仪 (外接同步 HD8500 型 GPS 接收器) 进行. 湖泊水量计算根据水深数据和经纬度坐标点利用 ARCMAP 和 Surfer 软件完成.

湖水理化性质测量利用美国哈希公司生产的 Hydrolab DS5 型多参数水质监测仪, 该仪器可同时测量温度、pH、电导率、溶解氧、光合有效辐射 (PAR) 以及水深等参数. 在玛旁雍错共测量了 13 个水质剖面, 剖面的深度为 0.3 ~ 58.1 m; 在拉昂错不同湖区的 6 个点位进行了水质剖面测量, 测点水深为 10.3 ~ 43.0 m. 此外, 用 2.5 L 有机玻璃采水样器在 2 个湖泊采集湖水样, 在离子色谱仪 IC (Dionex-ICS900) 下检测主要阴阳离子的浓度, 其中 HCO_3^- 浓度根据离子平衡原理利用其他离子的浓度估算而得出.

利用重力采样器在 2 个湖泊中采取了短岩芯, 其中玛旁雍错短岩芯 (MPG09-1) 长约 43 cm, 采样点水深约为 55 m, 位于开阔湖区 (图 1a); 拉昂错短岩芯 (LAG10-1) 长约 43.5 cm, 采样点水深约为 45 m, 位于主要湖区的中心开阔区 (图 1b). 短岩芯在野外按照 0.5 cm 间隔分样带回实验室, 利用 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 方法测定沉积速率, 具体测量仪器、方法及沉积速率计算方法参见文献 [14].

2 结果

2.1 水深分布

玛旁雍错湖盆形状较为规则, 从水下地形分布来看, 也显示了与流域湖盆较为相似的特征, 四周湖岸坡度都较为平缓, 中间深水区坡度更小, 超过 50 m 水深的区域面积较大, 实测最大水深 72.60 m, 位于中部深水开阔湖区的偏南部位置 (图 1a); 在北部浅水区, 测深过程中发现水下地形起伏较大, 可能存在湖泊低水位时期形成的沙丘.

拉昂错湖体形状非常不规则, 略呈汤勺状, 且湖中出露多个岛屿, 北部湖区为深度 10 m 左右面积较小的开阔湖区, 为河流冲积扇; 中间部分是狭长的连接处, 水深也不超过 30 m; 南部为较大的开阔湖区, 中心部分平坦, 水深超过 45 m, 最大实测水深为 49.03 m, 位于中间开阔湖区的偏南位置 (图 1b); 西部湖湾处未进行实测, 从地形、河流补给和岛屿分布情况推测, 应该为较浅的水下冲积扇区域, 位于深水区的小岛四周都非常陡峭.

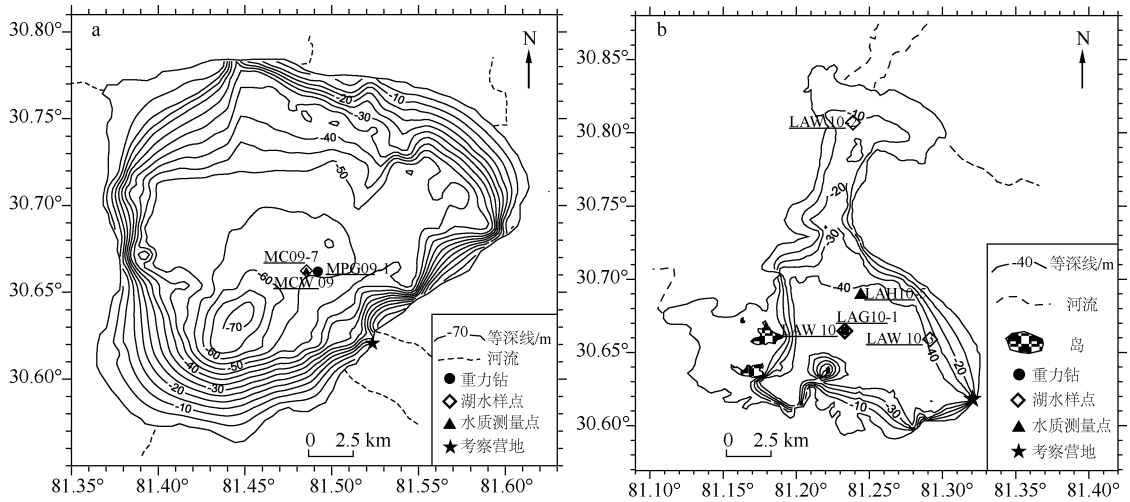


图1 玛旁雍错(a)和拉昂错(b)等深线图及采样点位置

Fig. 1 Isobath of Mapam Yumco(a), La'ang Co(b) and the distribution of sampling sites

2.2 湖水理化性质

MC09-7(图2a)是玛旁雍错野外实测样点中最深的水质剖面(深度58 m,图1a),湖水温度分层明显,表层水温在0~25 m之间稳定在10.4℃左右,温跃层介于25~35 m之间,温度梯度为0.17℃/m,在35 m以下水温变化趋缓,底层水温稳定在7.2℃左右.受温度梯度变化的影响,pH值逐渐递减,从表层至底层的湖水pH介于9.6~7.2之间,呈碱性至弱碱性的变化趋势.玛旁雍错是淡水湖,湖水盐度为0.27 ppt,湖水电导率值介于532~546 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 之间.水质剖面MC09-7电导率从表层至底层呈现明显的降低趋势,尤其是介于25~35 m的温跃层间.溶解氧在表层至30 m水深之间变化不大,约为10.6 mg/L,但是随着深度进一步增加,溶解氧呈现显著阶梯型降低趋势,底层水的溶解氧为8.5 mg/L.光合有效辐射是表征湖水透光程度的参数,在剖面MC09-7中,光合有效辐射在表层至30 m水深之间,由1633 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 急剧降至30 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,在50 m水深以下维持在1 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,30 m水层内的衰减系数为0.17 m^{-1} .

拉昂错水质剖面LAH 10-5(图2b)位于开阔湖区偏北位置(深度40.5 m,图1b),在5~10 m水深之间水温变化明显,温度梯度为0.16℃/m,在10~30 m之间水温缓慢降低到8.3℃并维持至底层.pH在表层至10 m水深之间变化显著,介于8.9~6.0之间,由表层的弱碱性变为弱酸性.随着深度的增加,pH值有缓慢回升趋势,但仍然维持在7.0以下,底层湖水环境仍为弱酸条件.湖水剖面电导率变化介于1452~1460 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 之间,在水温迅速降低的5~10 m水深间有显著降低,随后又缓慢升高.溶解氧从表层开始有所升高,但总体变化不大,介于10.9~11.1 mg/L之间,30 m水深以下呈明显降低趋势.光合有效辐射在表层急剧降低,但从整个剖面来看透光性较好,30 m水层内的衰减系数为0.15 m^{-1} .

对玛旁雍错湖水剖面MCW 09检测7个10 m间隔的水样离子浓度,结果显示主要阳离子中平均浓度大小顺序为 $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$,其平均浓度分别为49.09、28.73、26.86和5.97 mg/L;而主要阴离子顺序为 $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{F}^-$,其平均浓度分别为300.71、29.37、13.83和1.17 mg/L(表1),可见 HCO_3^- 和 Na^+ 是占优势的离子,据此计算湖水平均矿化度为455.7 mg/L.

在拉昂错则检测3个水样点(LAW 10-1、LAW 10-2、LAW 10-3)的表层和底层水样离子浓度,结果显示主要阳离子中平均浓度大小顺序为 $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+}$,其平均浓度分别为176.02、107.49、20.20和12.95 mg/L;而主要阴离子平均浓度大小顺序为 $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{F}^-$,其平均浓度分别为813.61、107.20、68.78和2.98 mg/L(表1),可见拉昂错湖水中 HCO_3^- 和 Na^+ 也是占优势的离子,据此计算湖水平均矿化度为1309.3 mg/L.

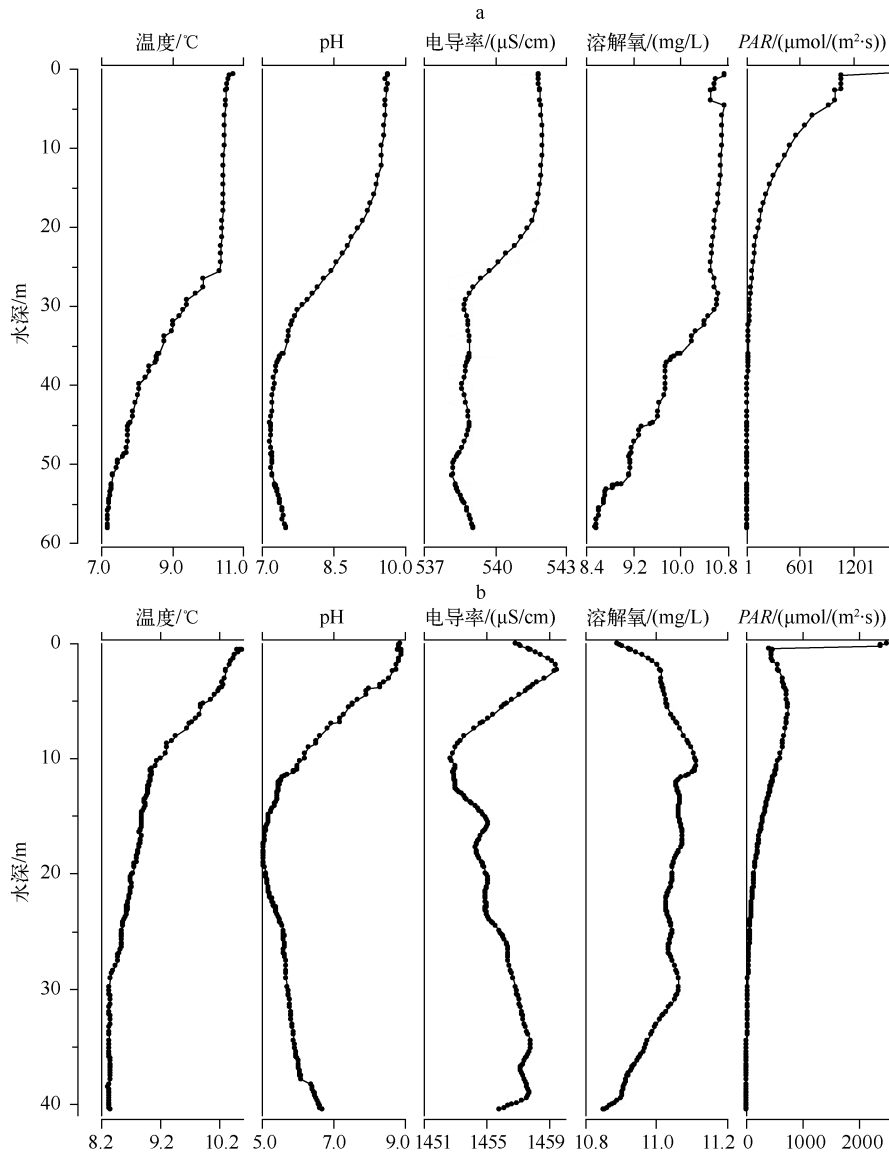


图2 玛旁雍错(a)和拉昂错(b)典型水质剖面

Fig. 2 Typical limnological profiles of Mapam Yumco(a) and La'ang Co(b)

表1 玛旁雍错和拉昂错湖水主要离子组成特征(mg/L)

Tab. 1 Major ions composition of lake water from Mapam Yumco and La'ang Co

湖泊	统计量	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
玛旁雍错	最小值	46.20	5.59	26.74	25.53	1.04	13.03	26.51	283.82
	平均值	49.09	5.97	28.73	26.86	1.17	13.83	29.37	300.71
	最大值	52.30	6.60	32.79	28.98	1.29	14.29	38.38	324.78
拉昂错	最小值	172.55	19.88	105.52	10.44	2.89	67.25	104.13	803.06
	平均值	176.02	20.28	107.49	12.95	2.98	68.78	107.20	813.61
	最大值	182.52	20.86	111.13	14.69	3.22	70.80	111.43	845.71

2.3 现代沉积速率

玛旁雍错和拉昂错短岩芯的 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 的测试结果如图3、图4所示,基于过剩 ^{210}Pb 活度分别用CRS(恒定补给速率)和CIC(常量初始浓度)方法计算沉积速率^[14],并与 ^{137}Cs 的峰值进行了对比,结果显示利用CIC方法得出的平均沉积速率与 ^{137}Cs 的时标较为接近,且从计算结果来看,其拟合曲线的方差解释量(R^2)分别为0.7904和0.7558,说明拟合效果较好,也指示这2个湖泊的近代沉积速率都较为稳定,因而本文采用此方法的结果。

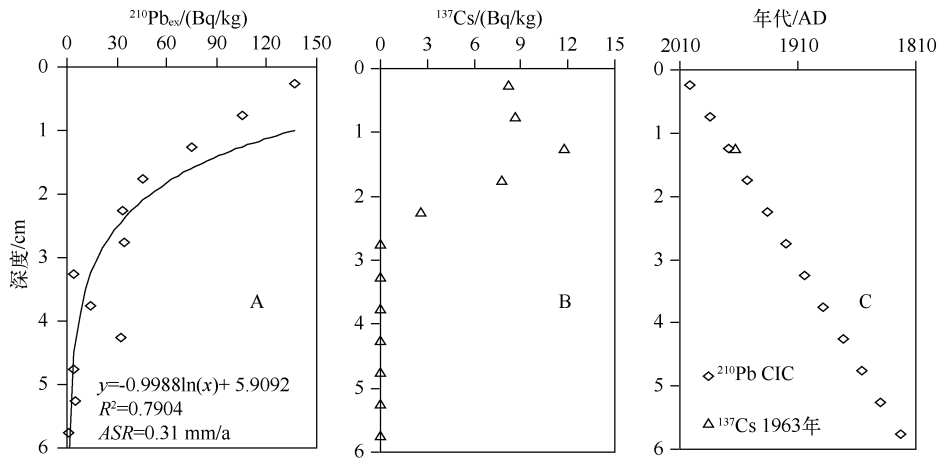


图3 玛旁雍错 PMG 09-1 岩芯 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 随深度的变化及年代-深度关系

Fig. 3 ^{210}Pb and ^{137}Cs activities and age - depth model of gravity core PMG 09-1 from Mapam Yumco

玛旁雍错 MPG09-1 岩芯在 6 cm 深度处(图中取样品中间位置深度为 5.75 cm,下同)过剩 ^{210}Pb 活度接近于零,据此利用CIC方法计算出的平均沉积速率(ASR)为 0.31 mm/a(图3A); ^{137}Cs 活度非常低,3 cm 深度处开始检测到 ^{137}Cs 的活度,峰值出现在 1.5 cm 处,活度值为 11.73 Bq/kg(图3B);利用平均沉积速率获得的年代-深度关系与 ^{137}Cs 峰值处对应于 1963 年进行对比,可以发现二者吻合很好(图3C),说明本研究中获得的平均沉积速率具有较好的可信度。

拉昂错 LAG 10-1 岩芯的过剩 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 的活度值与玛旁雍错的较为相似,说明这 2 个湖区接受的核素沉降值非常接近。LAG10-1 岩芯在 9 cm 深度处过剩 ^{210}Pb 活度接近于零,利用CIC方法计算得出平均沉积速率(ASR)为 0.65 mm/a(图4A); ^{137}Cs 在 5 cm 深度处开始出现,峰值为 3.5 cm,活度值为 11.67 Bq/kg(图4B),2.5 和 1.5 cm 深度处各出现一个较高值,反映了该湖表层沉积物可能扰动较为剧烈的特征,此处取 3.5 cm 处的峰值作为 1963 年的年龄时标;图4C 显示了利用CIC方法计算出的年代-深度关系与 1963 年的 ^{137}Cs 峰值对应很好。由此可见,拉昂错的近代平均沉积速率约是玛旁雍错的 2 倍。

3 讨论与结论

本次对玛旁雍错的水深测定较为详细地绘制了该湖的水下地形分布,并确定玛旁雍错目前的最大水深为 72.6 m,由于调查测线基本上覆盖了所有湖区,特别是中间开阔湖区测线分布较为密集,因而可以确定水深数据不会有大的遗漏。关于瑞典人斯文·赫定 1907 年对玛旁雍错的水深测定,目前有两种版本流传,一种是其最大实测水深是 81.8 m,根据 1976 年中国科学院组织的科学考察而出版的《西藏河流与湖泊》中关于玛旁雍错没有详细的水深数据,仅提到了斯文·赫定实测最大水深是 81.8 m,并据此估算了玛旁雍错的贮水量达 $200 \times 10^8 \text{ m}^3$,使其成为地球上高海拔地区淡水最多的湖泊之一^[2]。之后 1998 年出版的较为权威的《中国湖泊志》中玛旁雍错的资料也使用了这一数据及结论^[1]。2008 年姚檀栋等^[15]的《青藏高原及毗邻地区冰川湖泊图》上也将玛旁雍错的最大水深标注为 81.8 m,显然这些说法都来自于相同的文献,经查应该是 1917 年在瑞典出版的基于斯文·赫定第三次探险考察活动的《Southern Tibet》,然而笔者未能查证此数据的

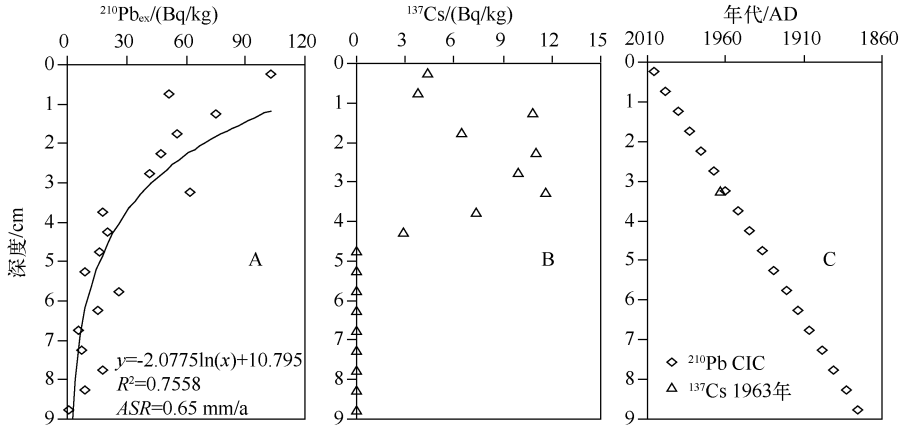


图4 拉昂错 LAG 10-1 岩芯 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 随深度的变化及年代-深度关系

Fig. 4 ^{210}Pb and ^{137}Cs activities and age - depth model of gravity core LAG 10-1 from La'ang Co

可靠性。

第二种版本则可见于中文出版物中,新疆人民出版社亚洲探险之旅丛书《失踪雪域 750 天》是斯文·赫定考察日记式的著作,该书详细记录了斯文·赫定在 1907 年 7 月 27 日夜晩和 8 月 7 日白天对玛旁雍错的两次考察,期间测得的最大水深是 77 m^[16]。虽无法确定斯文·赫定当时测量时的精确路线及最大水深的位置,但根据其描述可判断其测线主要在南部湖区,即玛旁雍错的深水区,且绳测的结果应该较为准确,因而基本上可以把斯文·赫定测得的 77 m 作为玛旁雍错当时的最大水深。

根据以上数据,则可推断与 1907 年相比,现在的玛旁雍错湖面至少下降了 4.4 m,若取第一种说法的 81.8 m 作为当时的最大水深,则湖面至少下降了 9.2 m。玛旁雍错现在湖水水量约为 $146 \times 10^8 \text{ m}^3$,也比当时估算的约 $200 \times 10^8 \text{ m}^3$ 减少了很多。玛旁雍错主要依靠湖面降水补给,现在湖水变浅说明与 1907 年相比湖泊补给减少了,反推 20 世纪初期玛旁雍错流域降水量较大。青海湖近百年来(1880s—1980s)水位下降了约 12 m,20 世纪初期同样维持了高湖面直到 1930s 湖面开始迅速下降^[17];同样位于藏南地区的羊卓雍错近百年(1912—1992 年)水位变化在 4~5 m 之间,且水位呈平缓下降趋势^[18]。说明这些湖泊近百年来水位变化具有相似的特征,而 20 世纪初期是一个降水较多的湿润时期。

玛旁雍错和拉昂错同属藏南湖区,地质及气候条件相似^[2],但是相比之下,玛旁雍错周边河流比拉昂错多,接纳了更多来自北部及东部低地的冰川融水,在相同的气候条件下湖水盐度比拉昂错更低^[13],因而 2 个湖泊在湖水电导率上存在着近 3 倍差异。从 2 个湖泊湖水的主要离子组成来看, HCO_3^- 和 Na^+ 都是占主要优势的离子,且 2 个湖泊主要阴离子浓度大小顺序也一致,主要阳离子中除 Ca^{2+} 的浓度外,其余离子浓度也都显示了相似的浓度大小顺序。拉昂错 Ca^{2+} 的浓度约是玛旁雍错的 1/2,而其余离子浓度平均为玛旁雍错离子浓度的 3 倍左右(表 1)。拉昂错湖水中较低的 Ca^{2+} 浓度与湖水中 CaCO_3 的沉淀有关,这与纳木错湖水具有相似性^[19]。

2 个湖泊水质剖面测试于不同年份几乎相同的时间段内,剖面表层水与底层水的温差相近,但是剖面水温变化趋势却存在很大差异。玛旁雍错湖水呈现稳定的正温层分布,与青藏高原其他湖泊相比有着相似的热学特征^[8],而拉昂错湖水温度从表层至底层呈现急剧递减趋势。考虑到玛旁雍错补给来源远多于拉昂错,冷的冰川融水大量汇入湖中,上、下水层密度存在差异引起湖水混合运动,而且玛旁雍错较深的湖盆环境可能更有利于湖水的均匀混合。但是,拉昂错的补给主要来自于北部冰川融水补给,南部湖盆也相对较宽浅,湖水温度变化相对单调,未达到稳定分层,水温呈现缓慢降低趋势。因此,推测 2 个湖泊剖面水温的差异可能是由于补给不同叠加湖泊深度差异造成的。玛旁雍错湖水剖面酸碱度相对稳定,从表层至底层保持碱性-弱碱性变化,说明湖水混合相对均匀。但是拉昂错 10 m 深度以下呈现出明显的弱酸性变化,对比溶解氧变化来看,pH 与溶解氧呈现反相变化趋势,可能溶解氧的丰富程度与水体酸碱度间存在着某种联系。而野外

采样中发现拉昂错表层沉积物呈罕见的泥黑色且夹杂大量植物碎屑,推测该湖水生植物相对茂盛,生物呼吸作用占优势,释放更多 CO_2 到水体中,导致下层水体 pH 呈弱酸性. 对比湖水光学性质来看,玛旁雍错和拉昂错湖水 30 m 水层内的光合有效辐射衰减系数分别为 0.17 m^{-1} 和 0.15 m^{-1} ,与纳木错(0.12 m^{-1})^[3,4] 和普莫雍错(0.15 m^{-1})^[5]、扎日南木错(0.14 m^{-1}) 和当惹雍错(0.16 m^{-1})^[8] 有很好的可比性.

与前人在 1976 年 7 月份进行的测量相比^[2],玛旁雍错的水温分布趋势非常一致,其温跃层深度及湖底温度非常接近,说明 30 余年来该湖水体的温度结构变化不大,只是前人测量的湖水表面最大水温约为 12°C ,应该与测量季节的不同有关. 1976 年考察时湖水矿化度约为 405.8 mg/L ^[2],而本次考察根据湖水主要离子含量计算的矿化度约为 455.7 mg/L ,反映玛旁雍错湖水正在变咸,水面下降和水量的减少都是湖水变咸的直接原因. 1976 年不同测点的湖水表层 pH 为 $8.0 \sim 8.4$,而现在该湖上层水的 pH 已高达 9.6,若排除不同仪器所带来的差异,则玛旁雍错湖水的 pH 值在过去 30 多年来具有明显的增加,也反映了湖水的咸化过程. 玛旁雍错湖水 pH 值和矿化度的升高与藏南羊卓雍错流域若干个湖泊的情况一致,即该流域内湖水的 pH 和矿化度从 1979 年以来总体上也呈增加趋势^[20].

已有的研究显示,青藏高原上的湖泊现代沉积速率大多比较低,基本上都是每年毫米的沉积量,甚至低于此数值. 如纳木错多支岩芯指示的现代沉积速率为 $0.43 \sim 0.98 \text{ mm/a}$,与青藏高原第一大湖——青海湖较为接近^[13]. 由于较低的沉积速率,以及核素沉降后可能发生的沉积后过程特别是 ^{137}Cs 的垂直迁移,致使在一些湖泊中利用 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 方法进行现代沉积速率的研究较为困难,尤其是在一些湖泊中 ^{137}Cs 并无峰值出现,因而结果准确性较差. 本研究中的玛旁雍错和拉昂错近代平均沉积速率分别为 0.31 mm/a 和 0.65 mm/a ,且利用 ^{210}Pb 计算的平均沉积速率得到了 ^{137}Cs 年龄时标较好的验证,因而具有较好的可信度.

作为藏南内流区 2 个重要的湖泊,除了玛旁雍错仍将以其第一神湖的声誉继续受到世人瞩目外,它也会和拉昂错一起在全球变化、水循环和人类活动的影响与适应等重要科学研究领域受到越来越多的关注. 本文基于初步考察所报道的玛旁雍错和拉昂错的水深、水质特征以及现代沉积速率将会为该地区的水量平衡、水文模型、湖泊流域管理和过去环境变化研究等提供基础资料 and 重要参考.

致谢:德国耶拿大学地理系 Dr. Gerhard D 参与了部分野外工作,中国科学院青藏高原研究所高少鹏高级工程师完成了 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 测试,杨瑞敏在湖泊水量计算中给予了帮助,野外考察过程中得到了当地政府相关部门的协助和支持,在此一并表示感谢.

5 参考文献

- [1] 王苏民,窦鸿身. 中国湖泊志. 北京:科学出版社,1998:1-580.
- [2] 关志华,陈传友,区裕雄等. 西藏河流与湖泊. 北京:科学出版社,1984:1-238.
- [3] 王君波,朱立平,Gerhard D 等. 西藏纳木错水深分布及现代湖沼学特征初步分析. 湖泊科学,2009,21(1):129-135.
- [4] Wang JB, Zhu LP, Daut G *et al.* Investigation of bathymetry and water quality of Lake Nam Co, the largest lake on the central Tibetan Plateau, China. *Limnology*, 2009, 10: 149-158.
- [5] Mitamura O, Seike Y, Kondo K *et al.* First investigation of ultraoligotrophic alpine Lake Puma Yumco in the pre-Himalaya, China. *Limnology*, 2003, 4: 167-175.
- [6] 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.
- [7] Zhu LP, Ju JT, Wang JB *et al.* Further discussion about the features of Lake Puma Yum Co, South Tibet, China. *Limnology*, 2010, 11: 281-287.
- [8] 王君波,彭萍,马庆峰等. 西藏当惹雍错和扎日南木错现代湖泊基本特征. 湖泊科学,2010,22(4):630-634.
- [9] 郭柳平,叶庆华,姚檀栋等. 基于 GIS 的玛旁雍错流域冰川地貌及现代冰川湖泊变化研究. 冰川冻土,2007,29(4):517-524.
- [10] 叶庆华,姚檀栋,郑红星等. 西藏玛旁雍错流域冰川与湖泊变化及其对气候变化的响应. 地理研究,2008,27(5):1178-1190.
- [11] 牛沂芳,李才兴,刁晓环等. 卫星遥感检测高原湖泊水面变化及与气候变化分析. 干旱区地理,2008,31(2):284-290.

- [12] 拉巴, 边多, 次珍等. 西藏玛旁雍错流域湖泊面积变化及成因分析. 干旱区研究, 2012, 29(6): 992-996.
- [13] 万玮, 冯学智, 肖鹏峰等. 青藏高原玛旁雍错和拉昂错水色差异遥感分析. 遥感技术与应用, 2008, 23(6): 667-671.
- [14] 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. 第四纪研究, 2011, 31(3): 535-543.
- [15] 姚檀栋, 任贾文, 徐柏青. 青藏高原及毗邻地区冰川湖泊图: 中文版. 西安: 西安地图出版社, 2008.
- [16] 斯文·赫定著. 包菁萍译. 失踪雪域750天. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 2000: 4.
- [17] 冯松, 汤懋苍, 周陆生. 青海湖近600年的水位变化. 湖泊科学, 2000, 12(3): 205-210.
- [18] 刘天仇. 西藏羊卓雍错水位动态研究. 地理科学, 1995, 15(1): 55-62.
- [19] Wang JB, Zhu LP, Wang Y *et al.* Comparisons between the chemical compositions of lake water, inflowing river water, and the lake sediment in Nam Co, central Tibetan Plateau, China and their controlling mechanisms. *Journal of Great Lakes Research*, 2010, 36: 587-595.
- [20] 张雪芹, 孙瑞, 朱立平. 藏南羊卓雍错流域主要湖泊水质状况及其评价. 冰川冻土, 2012, 34(4): 950-958.