



# 基于监测的藏东南然乌湖现代过程: 湖泊对冰川融水的响应程度

鞠建廷\*, 朱立平, 黄磊, 杨瑞敏, 马庆峰, 胡星, 王永杰, 甄晓林

中国科学院青藏高原研究所, 环境变化与地表过程重点实验室, 北京 100101

\* 联系人, E-mail: Jujianing@itpcas.ac.cn

2014-06-17 收稿, 2014-10-08 接受, 2014-12-19 网络版发表

国家自然科学基金重大项目(41190082)、国家重大科学研究计划(2012CB956100)、国家自然科学基金重点项目(41130529)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-EW-113)和中国博士后基金(2012M520401)资助

**摘要** 青藏高原冰川和湖泊广布, 湖泊水质、沉积物对冰川变化的响应研究较为匮乏. 本文通过藏东南外流区第二大湖泊然乌湖监测的系统设计, 研究了湖泊对冰川的响应程度. 利用水位计对比然乌湖和各大补给河流水位与水温的关系, 发现冰川融水补给河流(曲尺河)对湖泊水量平衡的重要性; 利用水质多参数仪器定期监测湖泊和河流的水质参数的时空变化, 发现冰川融水对然乌湖温度的时空变化有重要影响, 导致水温自上而下降低, 流量小的季节湖泊温度差异变小; 自上游到下游电导率逐渐升高, 显现出离子浓度低的冰川融水对湖泊的冲淡效应, pH 随之变化; 甚至影响到了叶绿素含量的时空变化; 利用在上、中和下湖布设的沉积物捕获器监测沉积通量的时空变化, 发现沉积速率非常大, 通量具有上湖>中湖>下湖的规律, 且时间上各湖具有入湖流量大的季节大于小的季节的规律, 说明了冰川融水对然乌湖在沉积量方面的影响是决定性的. 总之, 然乌湖水体和沉积物能够高信度地响应上游冰川的变化, 然乌湖沉积物具有高分辨率反演该区域冰川和气候变化的潜力.

## 关键词

然乌湖  
冰湖  
时空变化  
沉积物捕获器  
水质多参数

与海洋沉积物相比, 湖泊沉积物的重要特点是沉积环境的局地性. 因此, 在利用湖泊沉积物反演过去环境变化时, 需要考虑到所在湖泊环境背景和湖盆特征, 这就导致代用指标与环境要素之间关系具有地域性特点. 因此加强湖泊环境代用指标的基础理论研究, 才能深入理解指标的环境指示意义<sup>[1]</sup>. 湖泊现代过程的研究有助于分析控制湖泊沉积物环境代用指标的过程, 正确理解代用指标的环境意义<sup>[2,3]</sup>. 正因为如此, 国际大陆科学钻探(ICDP)关于大陆湖泊科学钻探的项目一般涉及此方面的内容, 如在欧洲的Lake Ohrid<sup>[3]</sup>, 阿根廷的Laguna Potrok Aike<sup>[4]</sup>, 俄罗斯的Lake El'gygytyn<sup>[5]</sup>, 土耳其的Lake Van<sup>[6]</sup>.

青藏高原湖泊一般具有高、寒、早的特点, 且很多湖泊有冰川融水补给, 决定了环境代用指标的特殊性. 相对于其他区域, 青藏高原古湖泊研究开展的时间较晚, 基于湖泊现代沉积过程机理的直接证据还显不足, 可能会导致研究结果解释具有多解性和不确定性<sup>[7]</sup>, 因此青藏高原湖泊现代过程的研究就显得尤为必要. 在一个湖盆内, 已有的青藏高原现代过程研究主要集中在青海湖<sup>[8-13]</sup>、普莫雍错<sup>[14-17]</sup>和纳木错<sup>[2,18]</sup>. 目前研究方法多为利用湖盆流域不同部位表层沉积物或水体属性的空间和统计关系来研究湖泊现代过程, 但季节监测较少<sup>[18]</sup>. 利用沉积物捕获器和水质多参数等仪器对湖泊现代过程的进行动态监测的工作已经在青海湖和纳木错展开, 其中青海湖

**引用格式:** 鞠建廷, 朱立平, 黄磊, 等. 基于监测的藏东南然乌湖现代过程: 湖泊对冰川融水的响应程度. 科学通报, 2015, 60: 16-26

Ju J T, Zhu L P, Huang L, et al. Ranwu Lake, a proglacial lake with the potential to reflect glacial activity in SE Tibet (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 16-26, doi: 10.1360/N972014-00084

已有观测结果发表<sup>[19,20]</sup>。

青藏高原是世界上中低纬度地区最大的冰川分布中心<sup>[21]</sup>，大面积的冰川孕育了大量的冰湖。在全球变暖背景下，与冰川消融对湖泊的影响得到充分重视<sup>[21~24]</sup>相比较，利用冰川融水湖泊沉积物反演冰川变化研究还较少<sup>[25]</sup>；通过湖泊水质或者沉积物的现代过程研究湖泊对冰川融水响应程度的研究更是少见。鉴于冰湖能够提供冰川的模式、特征和行为等重要信息以及提高对过去、现在和未来的冰川消融影响的认识<sup>[26]</sup>，国际上已有大量的关于冰川湖泊对冰川变化的响应及其过程研究。例如，北美洲高纬度地区<sup>[27,28]</sup>、欧洲高纬度地区<sup>[29,30]</sup>、欧洲阿尔卑斯山冰川区<sup>[31~34]</sup>、南美山岳冰川区<sup>[35~37]</sup>和非洲山岳冰川区<sup>[38]</sup>。这些研究一般用碎屑沉积物通量(累积量)、干样容重、粒度、铁矿物、磁学参数、氢指数的大小指示冰川的进退，或者用有机质含量的一些指标反向指示冰川进退。对于有纹层的湖泊，首先纹层的出现往往是流域存在冰川的指示<sup>[39]</sup>；其次冰川细粒纹层的沉积速率、纹层厚度的大小指示冰川的进退<sup>[32]</sup>。而冰川的进退又受冬季降水<sup>[33]</sup>或者夏季气温<sup>[40~42]</sup>控制，或者两者都有关<sup>[43]</sup>。通过多参数相互比较或者与当地气象资料对比<sup>[40]</sup>，确定代用指标反演的冰川进退的气候意义。冰湖流域的现代过程研究也随着冰湖的古环境研究的深入逐步展开。对有纹层的湖泊，通过对湖泊沉积物捕获器监测数据与流域水文(水质)和气象数据对比，分析纹层的组成和气候意义<sup>[39,44,45]</sup>。虽然新西兰冰川湖泊观测表明，区域年降水量和径流量超过冰川覆盖度，控制着湖泊沉积物年通量的大小<sup>[46]</sup>，但是挪威Sætrevatnet冰湖的观测表明，夏季冰川融水量是控制湖泊悬移物运输的主要因素<sup>[47]</sup>。与挪威的冰湖相反，阿尔卑斯山区冰湖纹层的厚度并未记录20世纪以来冰川的退缩<sup>[48]</sup>。

随着我国青藏高原科研事业的发展，野外观测台站建设进展迅速。台站对湖泊的监测，无疑会推动青藏高原湖泊现代过程研究从静态向动态发展，势必会加深对湖泊现代过程的研究。藏东南地区是重要的冰湖分布区之一，其中然乌湖是中国科学院藏东南高山环境综合观测研究站常规观测区域。台站定时观测和监测湖泊的水位、入湖流量和水质等项目。本文基于藏东南站对然乌湖的观测，系统设计了监测方案，研究然乌湖的时空变化规律，重点关注湖泊水体或沉积物对冰川融水的响应程度。

## 1 研究区概况

然乌湖(图1, 海拔3920 m)位于青藏高原东南部，是雅鲁藏布江支流帕隆藏布源头的过水湖，藏东南外流湖区的第二大湖泊。湖区属高原温带季风湿润气候地区<sup>[49]</sup>。根据流域海拔4600 m处自动气象站(位置见图1)2005~2010年数据和模型模拟数据<sup>[50]</sup>，该区域年均温为 $-1.7^{\circ}\text{C}$ ( $-1.5^{\circ}\text{C}$ ~ $-2.1^{\circ}\text{C}$ )，日均温最高近 $9^{\circ}\text{C}$ 发生在8月份，最低近 $-14^{\circ}\text{C}$ ，发生在1月底；年降水量为552 mm(340~660 mm)，呈春季和夏季双峰型。

然乌湖位于外流区，面积20 km<sup>2</sup>，然乌湖呈河道型，总长29 km，平均宽约800 m<sup>[51]</sup>。利用SRTM数字高程模型提取的流域面积为1985 km<sup>2</sup>，基于LANDSAT OLI 2013年8月13日影像数据提取的流域内冰川面积为333 km<sup>2</sup>，占流域面积的16.8%。这些数据与文献<sup>[51]</sup>有较大差别，其中冰川面积减少了152 km<sup>2</sup>(31.3%)，可能说明了该区域冰川退缩的严重情形。湖体按形态分上、中、下三段(表1)。利用中海达测深仪测量深度后插值得到等深线如图1所示，深度等数据如表1所示。受杂质较多的冰川融水影响，湖水全年比较浑浊，只有春季湖冰融化后的短暂时间有约1 m的透明度。

入湖河流道主要有曲尺河(QCH)、真空弄巴(ZKNB)、然弄巴(RNB)3条，除此以外还有3条较大河流曲布河(QBH)、曲日河(QRH)和水电站河流(SDZ)。从流量看(表2)，曲尺河流量最大，主要发源于约10 km外的雅弄冰川的冰前湖——来古下湖，并且喜日弄普冰川和作求普冰川的融水也会通过流入来古上湖-来古下湖，对曲尺河产生影响。水体全年浑浊。曲日河源为帕隆4号(日弄巴冰川)和94号等冰川，水体颜色与曲尺河类似，比较浑浊，可能因为与冰川距离远的原因，水温要比曲尺河高。野外调查发现，曲布河基本为地下水补给。其他河流全年清澈，为非冰川补给。从水量上看，曲尺河，进一步说其上游的来古冰川融水对该湖可能有巨大的影响。

从成因上看，在湖区两侧发现大量的冰蚀残丘和羊背岩石，推断该湖可能为冰川挖蚀形成。从湖泊留在中湖内小岛悬崖上的水面痕迹来看，低水位期，2012年11月19日和2013年4月5日，水面距湖水年最高水位留下的痕迹分别为1.6和1.74 m，说明水面会有近2 m的波动，与文献<sup>[51]</sup>基本吻合。

## 2 材料和方法

2012年7月中、8月中、9月初、10月初、10月末、

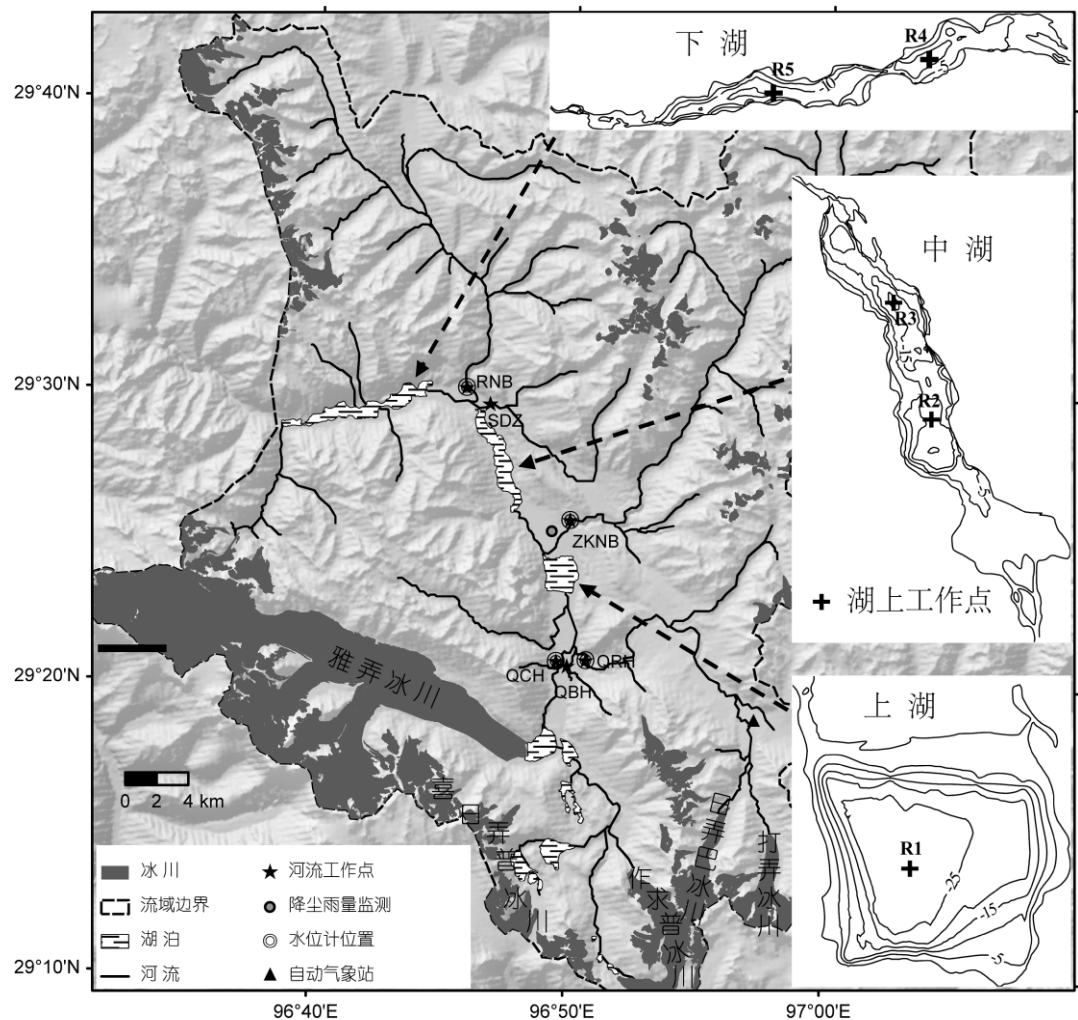


图1 然乌湖流域、水下地形图和采样、监测点示意图  
Figure 1 Catchment and isobath map of Ranwu Lake and sampling and observing sites

表1 然乌湖各湖基本数据  
Table 1 Basic data for Ranwu Lake

	名称	面积(km <sup>2</sup> )	平均深度(m)	最大深度(m)
上湖	雅错	4	18.6	28.2
中湖	安错	8	11.2	21.1
下湖	安目错	8	10.6	16.4

11月中、2013年4月初、7月，赴然乌湖野外监测、采样共9次，放置6个HOBO水位计(水温精度±0.5℃)、1架自制降尘捕获器(兼作雨量筒)、3套自制沉积物捕获器。

湖泊布置R1~R5处(图1)，利用HYDROLAB DS5水质多参数仪现场测试这5个点水体剖面的pH(精度±0.2)、溶解氧、叶绿素a、温度(精度±0.1℃)、电导

率(精度±1 μS cm<sup>-1</sup>)和环境光等水质数据。并且在6条主要入湖河流利用YSI手持水质多参数YSI ProPlus或HYDROLAB DS5监测水质。其中由于仪器在大气压低于0.66×10<sup>5</sup> Pa的高海拔地区不能校正溶解氧参数，因此溶解氧数据只能作为相对数值用来空间对比。部分采用YSI测得表层、底层水pH数据。

2012年7月，在然乌湖泊内放置2个HOBO水位计，分别位于中湖和下湖出口水面平静处，并在曲尺河(QCH)、曲日河(QRH)、真空弄巴(ZKNB)和然弄巴(RNB)4条主要河流放置水位计共4个(图1)，以监测湖泊、河流的水位和水温变化，收回4个，导出中湖、曲尺河(QCH)、曲日河(QRH)、真空弄巴(ZKNB) 2012年4~11月中湖和曲尺河水位水温数据一批，2012年7~11月曲日河、真空弄巴水位水温数据一批。

表 2 然乌湖入湖流量监测( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )  
Table 2 Inflow measurement of Ranwu Lake ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )

测量时间	测量方法	曲尺河	曲布河	曲日河	真空弄巴	水电站	然弄巴
1978-08 <sup>a)</sup>	机械式	139.2			53.2		52.4
2012-07-12	机械式		1.9			4.1	32.6
2012-09-04	机械式	90.1	1.2	16.3		2.7	
2013-10-13	YSI多普勒	16.925		1.197	4.323		3.878

a) 据文献[51]

鉴于本区冰缘黄土的发育和沙尘天气发生的频繁, 2012年7月, 在上湖和中湖之间的康沙村, 放置1套口径为60 cm的漏斗式自制降尘捕获器(位置见图1), 并兼作降水收集器和雨量筒. 获得2012年7月~2013年7月8日约1年6期样品和数据(表3).

2012年7月12日, 在然乌湖的R1, R2和R5处放置3套自制沉积物捕获器(图1), 以监测湖泊表层和底层沉积物的沉积通量的季节变化. 捕获器设计为上、下两层, 上层距水面1~2 m, 底层距底泥1~2 m; 每层有4根64 cm长、内径58 cm的PC管. 分别在2012年9月1日、2012年11月19日和2013年4月6日收回样品, 其中R5处成功收回3期样品, R2处收回2期样品, R1处收回的样品覆盖这个时间段, 但只分作2期.

### 3 结果和讨论

#### 3.1 自制粉尘捕获器监测的降水量及其有效性

60 cm口径自制雨量筒监测的然乌湖降水量如表3所示. 监测时段363 d内降水总量为447 mm, 与曲日河(QRH)上游自动气象站附近海拔4600 m处T200自动雨量计、实测和模拟的往年数据相比, 位于其往年年降水总量数据波动范围内.

观测时段内, T200自动雨量计记录了部分时段的雨量, 涵盖了自制雨量筒观测时段中的2012年7月

11日~10月1日. 此时段内, T200记录的降水量为206 mm, 与自制雨量筒记录的数据完全一致. 期间, 自制雨量筒记录的3个时段的降水量与T200记录的相对差距分别为-11.5%, -9.3%和20.6%. 这说明虽然由于海拔等因素的影响, 两监测点在不同时段的降水有一定差距, 但是与自动雨量筒的对比说明60 cm口径雨量筒能够用于估计本地夏季降水.

T200对降雪的观测不理想. 我们也尝试在该区域放置20 cm口径标准雨量筒, 也没有观测到降雪. 而60 cm口径雨量筒对11月到次年5月的有效记录说明了该种雨量筒对冬春降雪的有效记录.

因此, 利用60 cm口径漏斗式雨量筒, 尽量地减少测量间隔, 可能是监测本地降水量的有效手段之一.

#### 3.2 然乌湖入湖河流和湖泊水位、水温分析

将放置在曲尺河(QCH)、曲日河(QRH)、真空弄巴(ZKNB)和中湖出湖口处(LAKE)4个水位计的数据导出, 取温度( $T$ )和水位(Press)的日平均值分析如图2所示.

(1) 最大补给河流曲尺河(QCH). 9月份测量处河流中心深度大于4 m. 2012年4月11日放置, 水位在5月5日之前变化很小, 之后上升迅速, 6月1日达到一个高值, 之后下降, 到6月8日开始又迅速上升, 6月25日进入稳定高水位阶段, 之后到8月19日前后开始下

表 3 粉尘捕获器/雨量筒监测的粉尘通量和降水  
Table 3 Dust flux and precipitation observed by dust trap (rain gauge)

放置时间	取样时间	时间间隔(d)	沉积量(g)	沉积通量( $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ )	降水总量(mm)	日均降水量(mm)
2012-07-11	2012-08-16	37	0.55	0.05	74.10	2.00
2012-08-17	2012-09-04	19	0.43	0.08	47.92	2.52
2012-09-05	2012-10-01	27	0.35	0.05	83.64	3.10
2012-10-02	2012-11-19	49	0.7	0.05	63.66	1.3
2012-11-20	2013-04-05	137	8.31	0.21	59.24	0.43
2013-04-07	2013-06-08	64	—	—	84.88	1.33
2013-06-09	2013-07-08	30	0.56	0.07	33.25	1.11

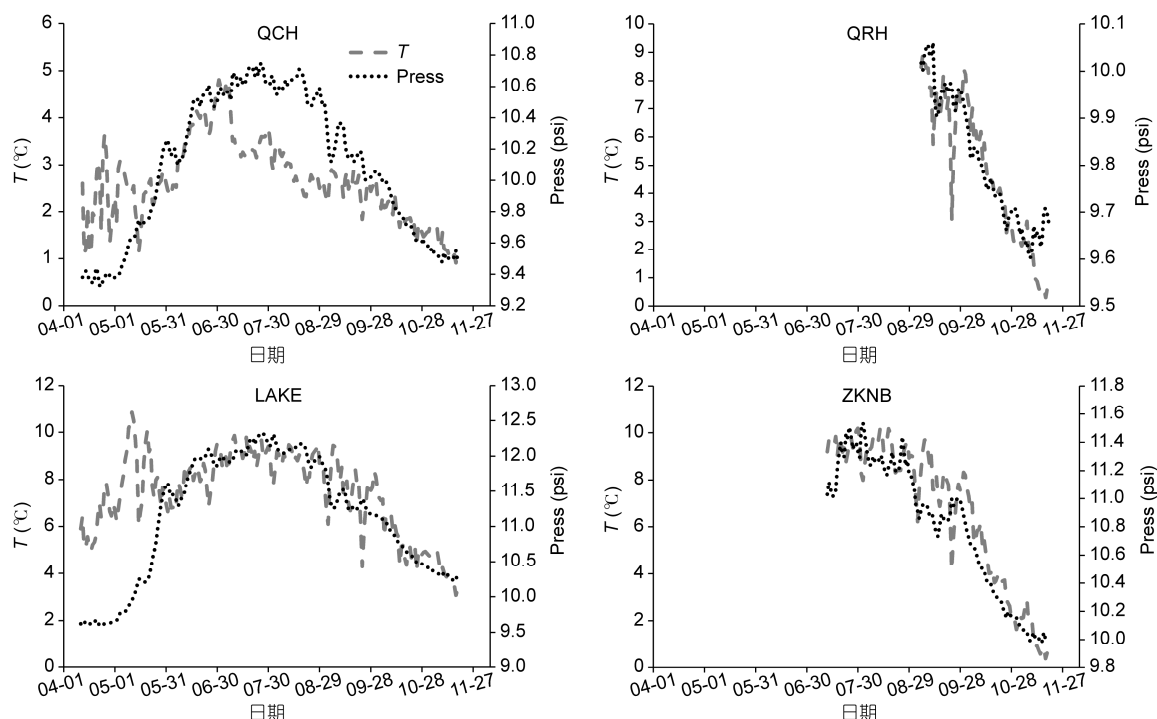


图2 2012年然乌湖流域河流湖泊水位、水温日均值变化。图中水位数据用压力(Press)表征,单位:psi(Pounds per square inch).  $1 \text{ psi} = 6.895 \times 10^3 \text{ Pa}$   
 Figure 2 Daily average variations of level and temperature of waters in Ranwu Lake and inflows. Water level is shown by water press (Press), in psi

降,一直到11月19日导出数据。观测时段平均水温  $2.64^\circ\text{C}$ ,为各水位计记录值中的最低值,最高温仅有  $4.81^\circ\text{C}$ ,是典型的冰川融水。水温变化大体上与水位一致,从4月初最低日均温  $1^\circ\text{C}$ 到7月1日  $4.81^\circ\text{C}$ ,之后迅速下降到7月18日的  $3.18^\circ\text{C}$ ,而后又开始阶段性上升到7月30日的  $3.78^\circ\text{C}$ ,之后进入下降通道。而8、9月份是自制雨量筒记录降水最多的季节(表3),说明此河流流量由温度决定的冰雪融水量大小控制。

4月初放置到6月6日,此段水温变化比较杂乱,可能是此时水位低,河流受气温影响明显。水位最高值阶段,水温出现较大波动,一直到8月19日前后,之后水温和水位同时开始下降。这可能与冰川融水的大量涌入降低了水温有关。

(2) 然乌湖(LAKE)。然乌湖水位变化趋势几乎与曲尺河一致。从统计关系上来看,2012年7~11月份曲尺河与然乌湖水位相关系数达到  $0.9945 (\alpha=0.01, \text{下同})$ ,说明了曲尺河的重要补给地位。从水温来看,首先比曲尺河高,而且在6月6日之前也存在可能受气温影响强烈的杂乱变化的阶段,但不存在夏季低温现象。同样在降水多的季节,没有出现明显的高湖面。

(3) 真空弄巴(ZKNB)和曲日河(QRH)放置时间

较短,总体特征都表现为水温与水位正相关,水温从  $9^\circ\text{C}$ 左右下降到  $0^\circ\text{C}$ 。其中真空弄巴(测量处最大深度不超过1 m)水位计7月份放置,9月末随着降水的增加(表3),水位出现一个曲尺河和湖面没有的峰值。类似的不同步,导致7~11月份水位相关系数降低为  $0.9739$ 。说明降水对该河影响较大。

曲日河水体与曲尺河类似浑浊,与真空弄巴和然乌湖相比,水位变化趋势比较一致。说明上游冰川对该河影响较大。水温比曲尺河高,可能与流程较长有关。

### 3.3 然乌湖入湖河流的理化性质的时空变化

对6条河4期不完整的水质参数对比如图S1所示。其中2012年9月4日只有曲尺河数据,曲布河(QCH)和曲日河(QRH)只有2012年11月和2013年4月数据。其中7和9月水质数据使用哈希多参数仪测得,其余用YSI手持水质多参数仪测量。

补给河流pH在  $7.5 \sim 9.4$ 范围内变化。电导率各河流差异较大,曲尺河最低在  $100 \mu\text{S cm}^{-1}$ 以下,地下水补给河流曲布河(QBH)最大,有  $600 \mu\text{S cm}^{-1}$ 之多,其他河流电导率在  $200 \mu\text{S cm}^{-1}$ 左右。从季节变化来看,

从7月份到次年4月份,两者基本上都有增加的趋势.从雨量监测来看,相对于其他月份,7~9月份是湿季.因此然乌湖电导率季节变化规律与青海湖流域河水总溶解固体(TDS)湿季大于干季的情况<sup>[8]</sup>相反,说明区域风化不是水化学季节变化的主导因素.水化学组成季节动态变化还要受降水量、冰雪融水和地表径流等因素影响<sup>[18]</sup>.从7月份到次年4月份基本上河流水位降低(图2),流量减少,因此河水理化性质显然是受到水流量大小的影响:流量越大,离子浓度越低,导致电导率和pH降低.曲尺河电导率9月份出现低值,但是水量不是最大,这可能与特殊的天气过程有关.9月初各水位计都记录了约2℃的降温.自动气象站数据表明,9月1~5日出现连续降水过程,9月2~6日气温日均值出现7℃的降温,气温从近7℃下降到9月4日的-0.4℃.气温的下降,可能影响了流域化学风化强度,减少了离子的输入量;再加上大气降水此时较多,冲淡了离子浓度,导致了9月份河水电导率的低值.

### 3.4 然乌湖水水质时空分析

将2012年7月中、9月初、11月中以及2013年4月初现场测的水质参数分别作图(图S2~S8).

(1) 温度( $T$ , 图S2). 首先从水平对比上来看,所有月份,温度自上湖到下湖(R1~R5)逐渐升高,显示了发源于雅弄等冰川的曲尺河冰冷河水(图2和S1)对该湖的影响.其中4月份,中湖(R2和R3)和下湖(R4和R5)分别呈现出温度空间差异小的特征,说明在补给流量低的情况下,即使狭长的中湖和下湖的水温也混合均匀.

垂直梯度上,上湖在7月份呈现出较明显温度分层,在13 m深度出现温跃层,但温跃层厚度很小.9月份消失,11月份完全混合,之后结冰期,4月份湖冰融化,表层水温在气温影响下会低于底层水.因此在热力分层上,上湖是个完全混合型湖泊,属于双季对流混合型湖泊.其他点位未出现稳定的温度分层.

季节变化上,7月份温度最高,9月份开始下降,所测月份11月份最低,4月份开始回升.

(2) pH(图S3)和电导率( $SpCond$ , 图S4). 季节变化非常明显:从7月到次年4月,pH从8左右上升到9.2左右;电导率也有此趋势,不过中间9月份数值有所下降.与河流一样,这说明,首先湖泊pH和电导率基本上受湖泊水量的稀释作用控制,9月份低值的原因

可能是因为温度骤降导致化学风化降低、降水的冲淡.

电导率还有一个较为明显的特征,自上湖到下湖,电导率在各个月份逐渐增加.又一次说明,作为冰川融水补给的曲尺河,电导率低,湖区越靠近曲尺河,离子浓度越低.说明湖水电导率值以及与此有关的TDS等指标,能够反映冰川融水的大小.

(3) 氧化还原电位(ORP, 图S5)和溶解氧(LDO, 图S6). 溶解氧的空间变化,在7和9月份表现为从上湖到下湖降低,可能与曲尺河对然乌湖的补给有关,越靠近然乌湖,流动性越大,氧气含量越高,所以到了11月和次年4月,温度差异虽然还有,但是溶解氧含量差别已经不再显现.

ORP为正值,反映了水为氧化环境.但是由于ORP无法温度校正,同时还与pH等有关,因此其空间和季节变化可能主要受温度控制,同时受pH变化的影响.

(4) 叶绿素 $a$ 含量(Chl, 图S7)和光合有效辐射(PAR, 图S8). 叶绿素 $a$ 含量7和9月份在空间上表现为自上游到下游降低,这也可以说明上面提到的溶解氧在这两个月份存在的相同的变化趋势.这可能与曲尺河输送有关.7月份测得曲尺河叶绿素含量为 $1\text{ mg L}^{-1}$ ,高于湖泊含量.

垂直方向上叶绿素含量变大,底层水出现高值.这与蓝藻细菌(Cyanobacteria)浓度垂直变化(未发表数据)一致.这种底层水高值(deep chlorophyll maxima, DCM)现象,常发生于具有温度分层的贫营养型湖泊中<sup>[52]</sup>.蓝藻细菌是造成DCM的主要原因之一.贫营养型湖水中特殊的种属形状如丝状蓝藻,浮力降低,适合在底部生活,躲避了上层浮游动物的掠食<sup>[53]</sup>.青藏高原其他湖泊也出现类似特征,如在藏南的普莫雍错数据<sup>[54]</sup>表明底层叶绿素也随蓝藻细菌增加而增加.无论是普莫雍错还是美国密歇根湖<sup>[55]</sup>、苏必利尔湖<sup>[56]</sup>,DCM出现深度都是在湖下层(滞水层)上部,且水体都比较透明.这与然乌湖有很大不同.然乌湖DCM深度在7月自温跃层开始,一直到底部;4月自逆温层开始一直到底部;其他月份也是在底部高值.这可能与河流补给,尤其是曲尺河的补给有关.曲尺河水温低,悬移物含量高,密度大,且叶绿素 $a$ 值高,可能从底部补给湖泊,与以上提到的因素一起,导致DCM在整个下层水,包括底部出现高值.

PAR参数上下游的变化不明显,基本上从开始

深度就为0, 水体的浑浊程度上下游差别不大. 季节上来看, 4月份, PAR大约到5 m时递减为0, 11月份0值深度浅些, 表明湖泊在浑浊冰川融水入湖河流流量小时环境光参数较高.

因此, 无论是从叶绿素含量还是环境光代表的透明度的时空变化来看, 湖泊都蕴含着冰川融水大小的显著信号.

3.5 然乌湖粉尘、沉积物通量分析

(i) 粉尘通量. 冰缘区风力搬运比较强烈<sup>[57]</sup>. 这对利用湖相沉积物恢复古环境带来了困难, 有必要评价其对湖泊沉积通量的贡献. 本区粉尘活动强烈, 将冰川带来的粉砂、黏土吹扬到湖泊中; 沉积在陆地上的则形成冰缘黄土. 野外调查发现, 冬季沙尘暴比较强烈. 因此有必要通过监测现代粉尘活动评估其对湖相沉积物的贡献.

2012年7月份开始在上湖和中湖之间架设了粉尘捕获器, 目前共收集了6期数据(表3). 从沉积通量上来看, 降水量多的季节沉积量小, 最大沉积通量发生在冬季, 沉积速率达到每天 $0.21\text{ g m}^{-2}$ , 其他季节粉尘通量不在同一个量级. 其对然乌沉积物的贡献将在下文结合沉积通量进行分析.

(ii) 湖泊沉积通量. 然乌湖水非常浑浊, 为监测沉积物的沉积速率和沉积通量, 分析控制性因素, 在上、中、下湖放置了沉积物捕获器, 目前共收集了3次, 分别是7~9月, 9~11月, 11月~次年4月(表4), 其中两个已经安全过冬. R2位置处在2013年4月份野外取样时没有找到.

捕获器设计为上下两层. 从3个湖的沉积通量对

比来看, 无论在哪个季节, 都是上湖>中湖>下湖的关系. 这说明越靠近曲尺河, 得到的沉积物就会越多. 因此, 从沉积量的空间变化角度来说, 曲尺河对然乌湖的贡献是决定性的.

从沉积量的季节变化上来看, 3次监测时段沉积通量依次降低. 以R5下层为例, 7~9月份捕获器监测的通量为 $0.49\text{ g d}^{-1}$ , 9~11月份为前一时段的57%, 11月~次年4月时段通量不到7~9月份的5%, 不是一个数量级. 三个时段湖泊水位正好依次降低, 说明沉积通量的季节变化也与补给河流、尤其是曲尺河的流量具有正向关系.

沉积物捕获器是由4根内径为58 mm的PC管组成. 在然乌湖, 1 cm长管径为68 mm岩芯的干重为40 g左右(未发表数据). 基于监测的沉积通量, 结合湖泊水位计监测的流量变化, 估算得知上(R1)、中(R2)、下(R5)湖每年大约沉积厚度分别约为2, 1和0.5 cm. 野外重力岩芯采样时发现, 然乌湖岩芯层理明显. 高沉积速率和层理明显, 表明该湖具有高分辨率反演过去环境变化, 尤其是冰川变化的潜力.

根据已有粉尘监测数据, 然乌湖粉尘捕获器可能捕获12 g粉尘(表3), 换算成68 mm内径岩芯的量约为0.15 g, 相对于上中下湖每年约80, 40和20 g的沉积通量, 粉尘贡献可以忽略.

总之, 无论是从沉积通量的季节变化还是空间差异, 都能说明冰川融水河流曲尺河对然乌湖沉积通量的影响是决定性的.

4 结论

通过对然乌湖监测的系统设计, 分析了水位计

表 4 湖泊沉积物捕获器监测的沉积通量  
Table 4 Lake sediment flux observed by sediment traps

位置	点号	放置时间	取样时间	沉积量(g)		单位时间沉积量( $\text{g d}^{-1}$ )	
				上层	下层	上层	下层
上湖	R1	2012-07-12	2012-09-01	33.46	90.40	0.64	1.74
中湖	R2	2012-07-12	2012-09-01	30.50	51.82	0.59	1.00
下湖	R5	2012-07-12	2012-09-01	17.52	25.64	0.34	0.49
中湖	R2	2012-09-01	2012-11-19	16.31	28.77	0.20	0.36
下湖	R5	2012-09-01	2012-11-19	9.45	22.35	0.12	0.28
上湖	R1	2012-09-01	2013-04-06	29.73	68.87	0.14	0.32
下湖	R5	2012-09-01	2013-04-06	11.73	25.64	0.054	0.118
下湖	R5	2012-11-19	2013-04-06	2.28	3.29	0.016	0.024

监测的然乌湖及其补给河流的水位、水温的变化规律和关系,水质多参数监测的河流与湖泊水质的时空变化规律,以及粉尘捕获器/雨量筒和湖泊沉积物捕获器监测的粉尘(降水)通量季节变化和湖泊沉积物沉积通量的时空变化规律,发现了最大补给河流曲尺河对该湖补给、湖水理化性质和沉积通量方面的决定性的影响。曲尺河是条冰川融水河流,这也就意味着冰川融水对该湖的影响巨大。另一方面,湖水的水位、理化性质,以及湖泊沉积物通量和理化性质蕴含了来古冰川,尤其是雅弄冰川变化的丰富信息。沉积物通量监测发现,然乌湖沉积速率非常大,沉积物具有高分辨率反映冰川变化的潜力。鉴于该区气象、冰川和湖泊监测资料的匮乏,因此利用然乌湖沉积物至少能够恢复过去几百年来冰川、气象甚至地貌变化的高分辨率历史。

随着监测和研究的继续进行,该流域以下关键问题可能期待在较短时间内解决:

(1) 湖泊水量平衡模式的建立。在各主要入湖河流和出湖河流处放置的水位计只能定性监测径流量的大小,定量的变化有待于利用实测流量与水位计数据建立定量关系。2013年底,在该流域不同部位放置了雨量筒,2014年4月已在中湖附近安置1套自动气象站。这些都有助于该湖水量平衡的建立。

(2) 沉积物理化性质与气象要素及其冰川融水大小之间的关系。进一步细分沉积物捕获器的监测时段,分析沉积物通量、粒度、元素组成等性质与气象要素和冰川融水之间的关系。

(3) 钻取湖泊岩芯,通过纹层等可能的定年技术,恢复过去几百年来环境变化的历史,填补该区环境变化历史研究的空白。

**致谢** 感谢中国科学院藏东南高山环境综合观测研究站的大力支持。中国科学院青藏高原研究所的汪勇博士、彭萍博士和张继峰博士以及云南师范大学谢曼平博士参加了野外考察工作,中国科学院青藏高原研究所王君波副研究员和冯金良研究员对野外采样进行了指导,杨威副研究员提供气象站数据,刘勇勤研究员提供细菌对比数据,在此特致谢忱。

## 参考文献

- Shen J. Spatiotemporal variations of Chinese lakes and their driving mechanisms since the Last Glacial Maximum: A review and synthesis of lacustrine sediment archives. *Chin Sci Bull*, 2013, 58: 17–31 [沈吉. 末次盛冰期以来中国湖泊时空演变及驱动机制研究综述: 来自湖泊沉积的证据. 科学通报, 2012, 57: 3228–3242]
- Wang Y, Zhu L P, Wang J B, et al. The spatial distribution and sedimentary processes of organic matter in surface sediments of Nam Co, Central Tibetan Plateau. *Chin Sci Bull*, 2012, 57: 4753–4764 [汪勇, 朱立平, 王君波, 等. 青藏高原中部纳木错湖泊表层沉积物有机质空间分布及其揭示的沉积过程. 科学通报, 2012, 57: 3090–3099]
- Vogel H, Wessels M, Albrecht C, et al. Spatial variability of recent sedimentation in Lake Ohrid (Albania/Macedonia). *Biogeosciences*, 2010, 7: 3333–3342
- Kastner S, Ohlendorf C, Haberzettl T, et al. Southern hemispheric westerlies control the spatial distribution of modern sediments in Laguna Potrok Aike, Argentina. *J Paleolimn*, 2010, 44: 887–902
- Wennrich V, Francke A, Dehnert A, et al. Modern sedimentation patterns in Lake El'gygytyn, NE Russia, derived from surface sediment and inlet streams samples. *Clim Past*, 2013, 9: 135–148
- Stockhecke M, Anselmetti F S, Meydan A, et al. The annual particle cycle in Lake Van (Turkey). *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecol*, 2012, 333–334: 148–159
- Henderso A G, Holmes J A. Palaeolimnological evidence for environmental change over the past millennium from Lake Qinghai sediments: A review and future research perspective. *Quat Int*, 2009, 194: 134–147
- Xu H, Hou Z H, An Z S, et al. Major ion chemistry of waters in Lake Qinghai catchments, NE Qinghai-Tibet Plateau, China. *Quat Int*, 2010, 212: 35–43
- Xu H, Liu B, Wu F. Spatial and temporal variations of Rb/Sr ratios of the bulk surface sediments in Lake Qinghai. *Geochem Trans*, 2010, 11: 3
- Xu H, Liu X Y, An Z S, et al. Spatial pattern of modern sedimentation rate of Qinghai Lake and a preliminary estimate of the sediment flux. *Chin Sci Bull*, 2010, 55: 621–627 [徐海, 刘晓燕, 安芷生, 等. 青海湖现代沉积速率空间分布及沉积通量初步研究. 科学通报, 2010, 55: 384–390]



- 11 Jin Z D, Yu J M, Wang S M, et al. Constraints on water chemistry by chemical weathering in the Lake Qinghai catchment, northeastern Tibetan Plateau (China): Clues from Sr and its isotopic geochemistry. *Hydrogeol J*, 2009, 17: 2037–2048
- 12 Xiao J, Jin Z D, Zhang F, et al. Major ion geochemistry of shallow groundwater in the Qinghai Lake catchment, NE Qinghai-Tibet Plateau. *Environ Earth Sci*, 2012, 67: 1331–1344
- 13 Li X Z, Liu W G, Xu L M. Carbon isotopes in surface-sediment carbonates of modern Lake Qinghai (Qinghai-Tibet Plateau): Implications for lake evolution in arid areas. *Chem Geol*, 2012, 300–301: 88–96
- 14 Zhu L P, Ju J T, Wang J B, et al. Further discussion about the features of Lake Puma Yum Co, South Tibet, China. *Limnology*, 2010, 11: 281–287
- 15 Zhu L P, Ju J T, Wang Y, et al. Composition, spatial distribution, and environmental significance of water ions in Pumayum Co catchment, southern Tibet. *J Geogr Sci*, 2010, 20: 109–120
- 16 Ju J T, Zhu L P, Wang J B, et al. Water and sediment chemistry of Lake Pumayum Co, South Tibet, China: Implications for interpreting sediment carbonate. *J Paleolimnol*, 2010, 43: 463–474
- 17 Ju J T, Zhu L P, Feng J L, et al. Hydrodynamic process of Tibetan Plateau lake revealed by grain size: Case study of Pumayum Co. *Chin Sci Bull*, 2012, 57: 2433–2441 [鞠建廷, 朱立平, 冯金良, 等. 粒度揭示的青藏高原湖泊水动力现代过程: 以藏南普莫雍错为例. 科学通报, 2012, 57: 1775–1784]
- 18 Wang J B, Ju J T, Zhu L P. Water chemistry variations of lake and inflowing rivers between pre- and post-monsoon season in Nam Co, Tibet (in Chinese). *Sci Geogr Sin*, 2013, 33: 90–96 [王君波, 鞠建廷, 朱立平. 季风期前后西藏纳木错湖水及入湖河流水化学特征变化. 地理科学, 2013, 33: 90–96]
- 19 Jin Z D, Zhang F, Li F C, et al. Seasonal and interannual variations of the lake water parameters and particle flux in Lake Qinghai: A time-series sediment trap study (in Chinese). *J Earth Environ*, 2013, 4: 1306–1313 [金章东, 张飞, 李福春, 等. 青海湖湖水性质、颗粒物沉积通量季节和年际变化——来自沉积物捕获器的研究. 地球环境学报, 2013, 4: 1306–1313]
- 20 Jin Z D, Zhang F, You Z F, et al. Time-series sediment trap and a deployment in Lake Qinghai (in Chinese). *J Earth Environ*, 2013, 4: 1301–1305, 1313 [金章东, 张飞, 游镇烽, 等. 时间序列沉积物捕获器(sediment trap)及其在青海湖的放置. 地球环境学报, 2013, 4: 1301–1305, 1313]
- 21 Yao T D. Glacial fluctuations and its impacts on lakes in the southern Tibetan Plateau. *Chin Sci Bull*, 2010, 55: 2071 [姚檀栋. 青藏高原南部冰川变化及其对湖泊的影响. 科学通报, 2010, 55: 1749]
- 22 Yao T D, Li Z G, Yang W, et al. Glacial distribution and mass balance in the Yarlung Zangbo River and its influence on lakes. *Chin Sci Bull*, 2010, 55: 2072–2078 [姚檀栋, 李治国, 杨威, 等. 雅鲁藏布江流域冰川分布和物质平衡特征及其对湖泊的影响. 科学通报, 2010, 55: 1750–1756]
- 23 Zhu L P, Xie M P, Wu Y H. Quantitative analysis of lake area variations and the influence factors from 1971 to 2004 in the Nam Co basin of the Tibetan Plateau. *Chin Sci Bull*, 2010, 55: 1294–1303 [朱立平, 谢曼平, 吴艳红. 西藏纳木错 1971~2004 年湖泊面积变化及其原因的定量分析. 科学通报, 2010, 55: 1789–1798]
- 24 Xin X D, Yao T D, Ye Q H, et al. Study of the fluctuations of glaciers and lake around the Ranwu Lake of Southeast Tibetan Plateau using remote sensing (in Chinese). *J Glaciol Geocryol*, 2009, 31: 19–26 [辛晓东, 姚檀栋, 叶庆华, 等. 1980~2005 藏东南然乌湖流域冰川湖泊变化研究. 冰川冻土, 2009, 31: 19–26]
- 25 Li J L, Xu B Q, Lin S B, et al. Glacier and climate changes over the past millennium recorded by proglacial sediment sequence from Qiangyong Lake, southern Tibetan Plateau (in Chinese). *J Earth Sci Environ*, 2011, 33: 402–411 [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. 地球科学与环境学报, 2011, 33: 402–411]
- 26 Carrivick J L, Tweed F S. Proglacial lakes: Character, behaviour and geological importance. *Quat Sci Rev*, 2013, 78: 34–52
- 27 McKay N P, Kaufman D S. Holocene climate and glacier variability at Hallet and Greyling Lakes, Chugach Mountains, south-central Alaska. *J Paleolimnol*, 2009, 41: 143–159
- 28 Leonard E M, Reasoner M A. A continuous Holocene glacial record inferred from proglacial lake sediments in Banff National Park, Alberta, Canada. *Quatern Res*, 1999, 51: 1–13
- 29 Bakke J, Lie Ø, Nesje A, et al. Utilizing physical sediment variability in glacier-fed lakes for continuous glacier reconstructions during the Holocene, northern Fjellfonna, Western Norway. *Holocene*, 2005, 15: 161–176
- 30 Larsen D J, Miller G H, Geirsdottir A, et al. A 3000-year varved record of glacier activity and climate change from the proglacial lake Hvitarvatn, Iceland. *Quat Sci Rev*, 2011, 30: 2715–2731
- 31 Leemann A, Niessen F. Holocene glacial activity and climatic variations in the Swiss Alps: Reconstructing a continuous record from proglacial lake sediments. *Holocene*, 1994, 4: 259–268
- 32 Chapron E, Fain X, Magand O, et al. Reconstructing recent environmental changes from proglacial lake sediments in the Western Alps (Lake Blanc Huez, 2543 m a.s.l., Grandes Rousses Massif, France). *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecon*, 2007, 252: 586–600

- 33 Guyard H, Chapron E, St-Onge G, et al. Late-Holocene NAO and oceanic forcing on high-altitude proglacial sedimentation (Lake Bramant, Western French Alps). *Holocene*, 2013, 23: 1163–1172
- 34 Simonneau A, Chapron E, Garcon M, et al. Tracking Holocene glacial and high-altitude alpine environments fluctuations from minerogenic and organic markers in proglacial lake sediments (Lake Blanc Huez, Western French Alps). *Quat Sci Rev*, 2014, 89: 27–43
- 35 Rodbell D T, Seltzer G O, Mark B G. Clastic sediment flux to tropical Andean lakes: records of glaciation and soil erosion. *Quat Sci Rev*, 2008, 27: 1612–1626
- 36 Stansell N D, Polissar P J, Abbott M B. Proglacial lake sediment records reveal Holocene climate changes in the Venezuelan Andes. *Quat Sci Rev*, 2014, 89: 44–55
- 37 Stansell N D, Rodbell D T, Abbott M B. Proglacial lake sediment records of Holocene climate change in the western Cordillera of Peru. *Quat Sci Rev*, 2013, 70: 1–14
- 38 Rietti-Shati M, Shemesh A, Karlen W. A 3000-year climatic record from biogenic silica oxygen isotopes in an equatorial high-altitude lake. *Science*, 1998, 281: 980–982
- 39 Leemann A, Niessen F. Varve formation and the climatic record in an Alpine proglacial lake: Calibrating annually-laminated sediments against hydrological and meteorological data. *Holocene*, 1994, 4: 1–8
- 40 Cook T L, Bradley R S, Stoner J S, et al. Five thousand years of sediment transfer in a high arctic watershed recorded in annually laminated sediments from Lower Murray Lake, Ellesmere Island, Nunavut, Canada. *J Paleolimnol*, 2009, 41: 77–94
- 41 Thomas E K, Briner J P. Climate of the past millennium inferred from varved proglacial lake sediments on northeast Baffin Island, Arctic Canada. *J Paleolimnol*, 2009, 41: 209–224
- 42 Loso M G. Summer temperatures during the Medieval Warm Period and Little Ice Age inferred from varved proglacial lake sediments in southern Alaska. *J Paleolimnol*, 2009, 41: 117–128
- 43 Ariztegui D, Bianchi M M, Masferro J, et al. Interhemispheric synchrony of Late-glacial climatic instability as recorded in proglacial Lake Mascardi, Argentina. *J Quat Sci*, 1997, 12: 333–338
- 44 Ojala A E K, Kosonen E, Weckström J, et al. Seasonal formation of clastic-biogenic varves: The potential for palaeoenvironmental interpretations. *GFF*, 2013, 135: 237–248
- 45 Francus P, Bradley R S, Lewis T, et al. Limnological and sedimentary processes at Sawtooth Lake, Canadian High Arctic, and their influence on varve formation. *J Paleolimnol*, 2008, 40: 963–985
- 46 Hicks D M, McSaveney M J, Chinn T J H. Sedimentation in Proglacial Ivory Lake, Southern Alps, New Zealand. *Arctic Alpine Res*, 1990, 22: 26–42
- 47 Liermann S, Beylich A A, van Welden A. Contemporary suspended sediment transfer and accumulation processes in the small proglacial Sætrevatnet sub-catchment, Bødalen, western Norway. *Geomorphology*, 2012, 167–168: 91–101
- 48 Hinderera M, Kastowski M, Kamelger A, et al. River loads and modern denudation of the Alps—A review. *Earth-Sci Rev*, 2013, 118: 11–44
- 49 Gao Y X, Jiang S K, Zhang Y G, et al. *Climate in Tibet* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1984 [高由禧, 蒋世逵, 张谊光, 等. 西藏气候. 北京: 科学出版社, 1984]
- 50 Yang W, Yao T D, Guo X F, et al. Mass balance of a maritime glacier on the southeast Tibetan Plateau and its climatic sensitivity. *J Geophys Res: Atmos*, 2013, 118: 1–16
- 51 Guan Z H, Chen C Y, Ou Y X, et al. *Rivers and Lakes in Tibet* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1984 [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]
- 52 Serizawa H, Amemiya T, Itoh K. Effects of buoyancy, transparency and zooplankton feeding on surface maxima and deep maxima: Comprehensive mathematical model for vertical distribution in cyanobacterial biomass. *Ecol Model*, 2010, 221: 2028–2037
- 53 Camacho A. On the occurrence and ecological features of deep chlorophyll maxima (DCM) in Spanish stratified lakes. *Limnetica*, 2006, 25: 453–478
- 54 Liu Y Q, Yao T D, Zhu L P, et al. Bacterial diversity of freshwater Alpine Lake Puma Yumco on the Tibetan Plateau. *Geomicrobiol J*, 2009, 26: 131–145
- 55 Pothoven S A, Fahnenstiel G L. Recent change in summer chlorophyll *a* dynamics of southeastern Lake Michigan. *J Great Lakes Res*, 2013, 39: 287–294
- 56 Barbiero R P, Tuchman M L. The deep chlorophyll maximum in Lake Superior Richard. *J Great Lakes Res*, 2004, 30(Suppl 1): 256–268
- 57 Bullard J E, Austin M J. Dust generation on a proglacial floodplain, West Greenland. *Aeolian Res*, 2011, 3: 43–54

# Ranwu Lake, a proglacial lake with the potential to reflect glacial activity in SE Tibet

JU JianTing, ZHU LiPing, HUANG Lei, YANG RuiMin, MA QingFeng, HU Xing, WANG YongJie & ZHEN XiaoLin

Key Laboratory of Tibetan Environment Changes and Land Surface Processes, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Vast lakes and glaciers are distributed across the Tibetan Plateau. However, the study of the response of lake water quality and sediment to glacier variation is relatively deficient. Ranwu Lake is the second largest lake in the outflow areain SE Tibet. This paper monitored the degree of response of the lake to glaciers. Glacier melt influenced the lake directly, which is illustrated by the fact that the Quchi River, the largest inflow and a glacier melt river, dominates many aspects of the lake, including the water level, seasonal and spatial water temperature, conductivity, pH, and even chlorophyll *a* content. Depositional flux analysis measured by sediment traps showed that the fluxes decrease from the upper to the lower lake with a greater flux in the summer than during other seasons, reflecting the dominant influence of Quchi River on the lake. To conclude, the waters and sediment of Ranwu Lake clearly respond to the glacier variation. The sediment in Ranwu Lake has great potential to reflect variations in the nearby glaciers with high temporal resolution.

**Ranwu Lake, proglacial lake, spatial and temporal variation, sediment traps, water quality multiprobs**

doi: 10.1360/N972014-00084

## 补充材料

图 S1 然乌湖流域河流水质参数季节变化

图 S2 然乌湖水温 *T* 时空分布图

图 S3 然乌湖 pH 时空分布图

图 S4 然乌湖电导率 SpCond 时空分布图

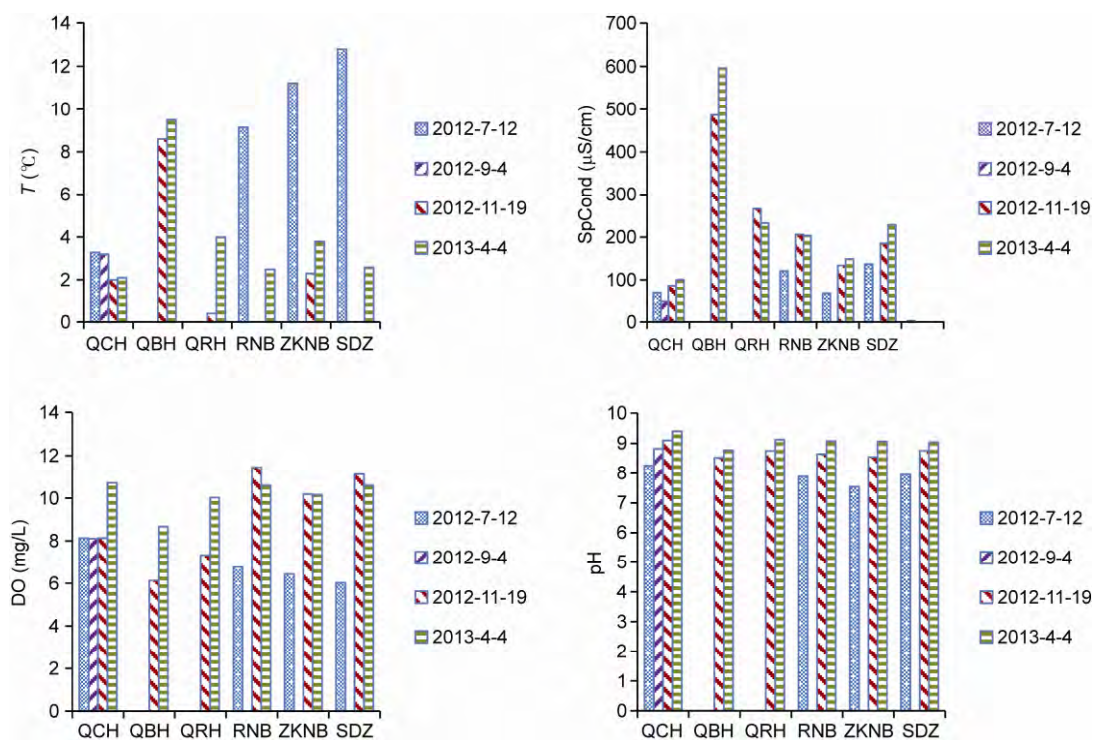
图 S5 然乌湖氧化还原电位 ORP 时空分布图

图 S6 然乌湖溶解氧 LDO 时空分布图

图 S7 然乌湖叶绿素 *a* 时空分布图

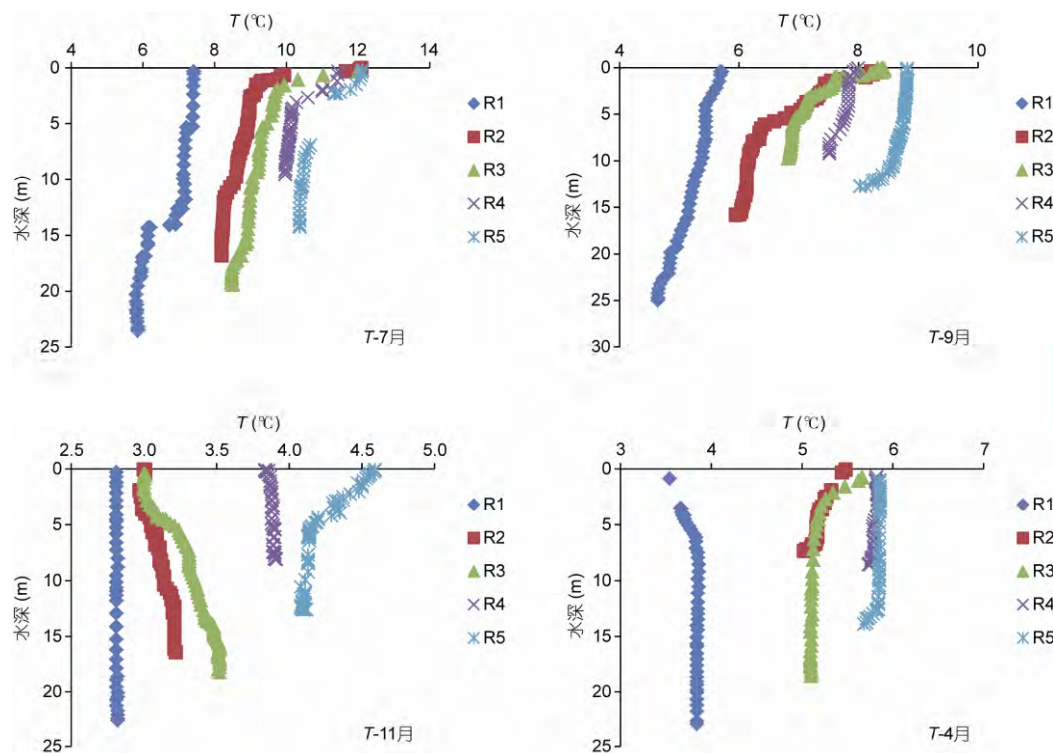
图 S8 然乌湖环境光 PAR 时空分布图

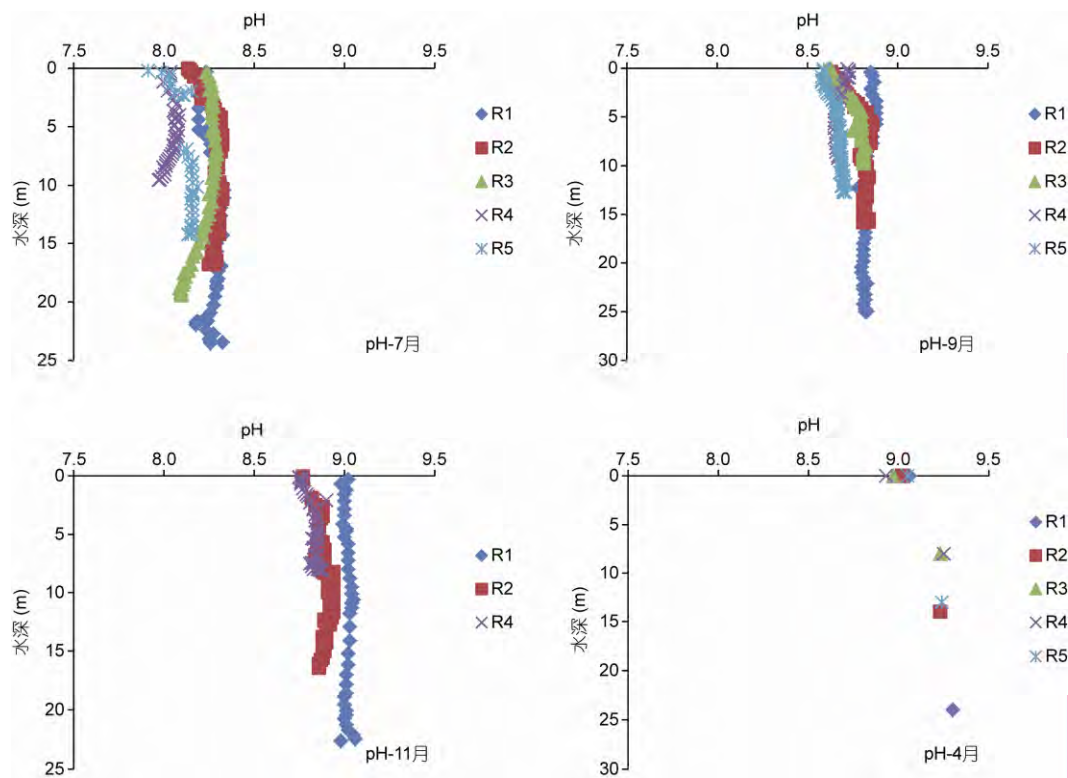
本文以上补充材料见网络版 [csb.scichina.com](http://csb.scichina.com). 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.



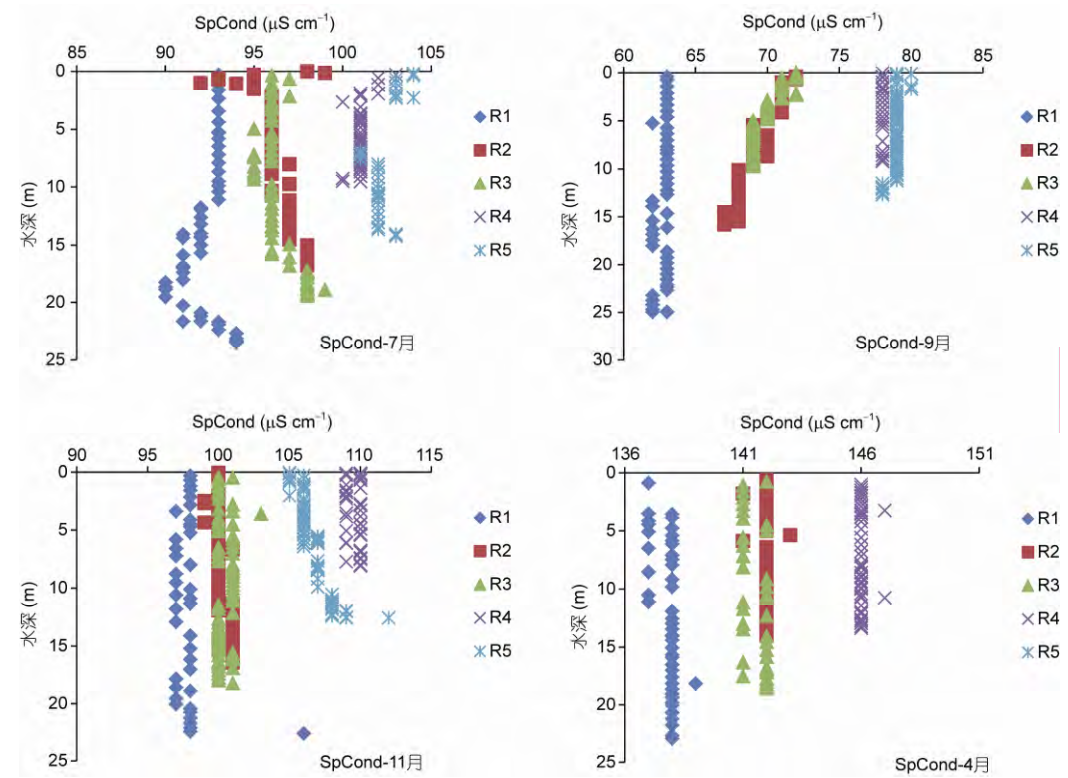
图S1 然乌湖流域河流水质参数季节变化

Figure S1 Seasonal variations of water quality parameters in inflows of Ranwu Lake.

图S2 然乌湖水温 $T$ 时空分布图. 月份为2012年7, 9和11月和2013年4月, 下同Figure S2 Temporal and spatial variations of lake water temperature ( $T$ ). Months are July, September and November of 2012 and April of 2013. The same below.

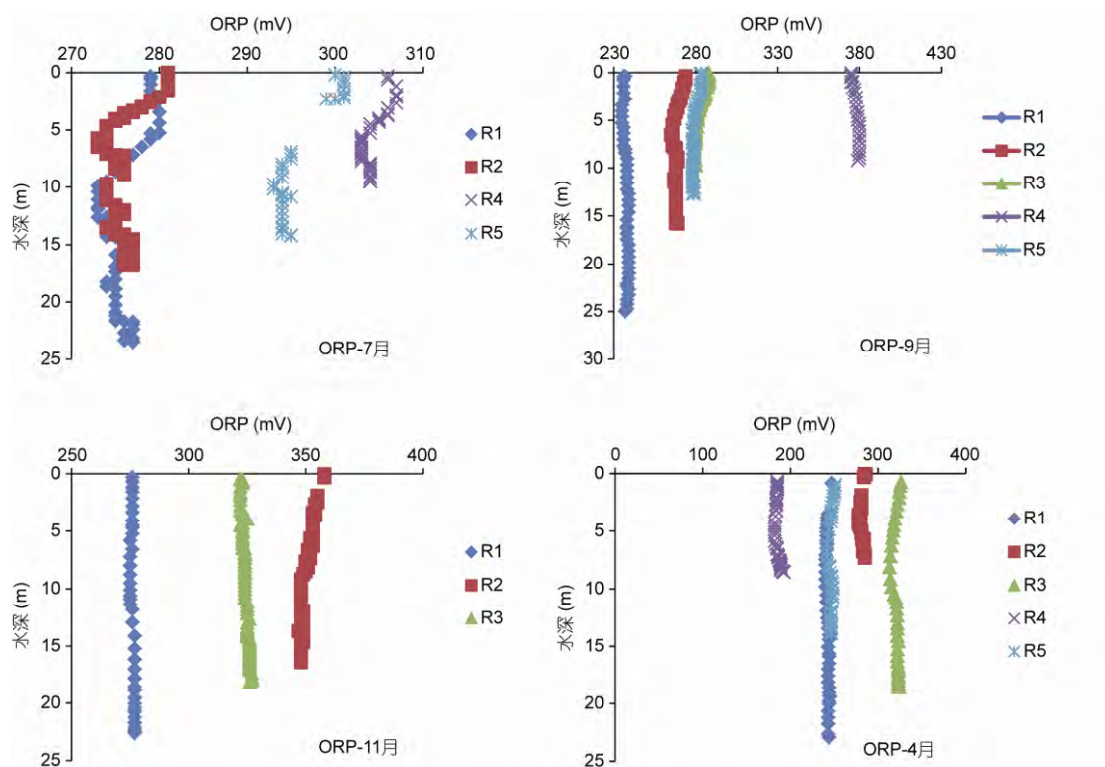


图S3 然乌湖pH时空分布图  
Figure S3 Temporal and spatial variations of lake water pH.



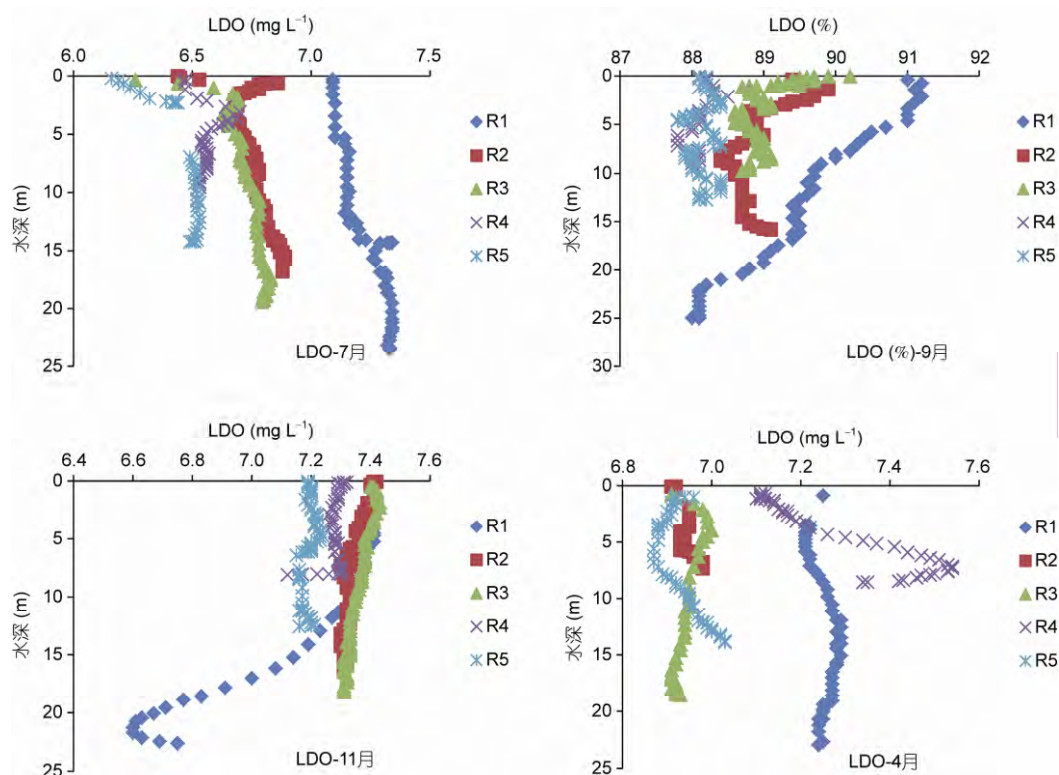
图S4 然乌湖电导率SpCond时空分布图  
Figure S4 Temporal and spatial variations of lake water conductivity (SpCond).





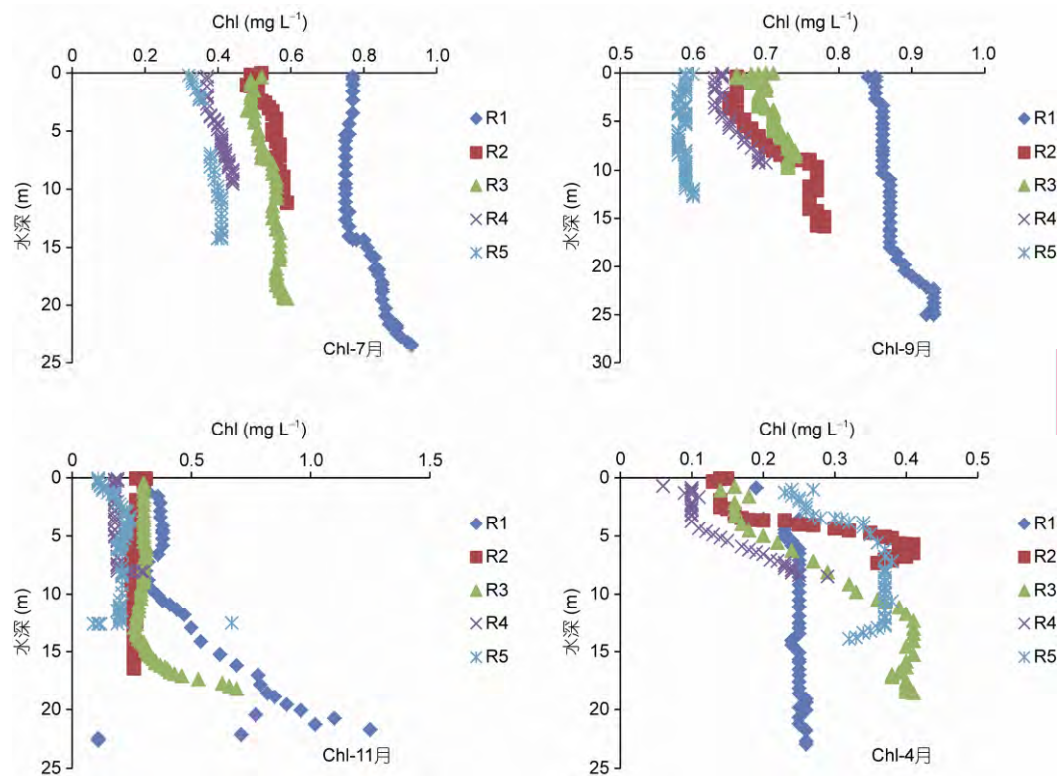
图S5 然乌湖氧化还原电位ORP时空分布图

Figure S5 Temporal and spatial variations of lake water oxidation reduction potential (ORP).

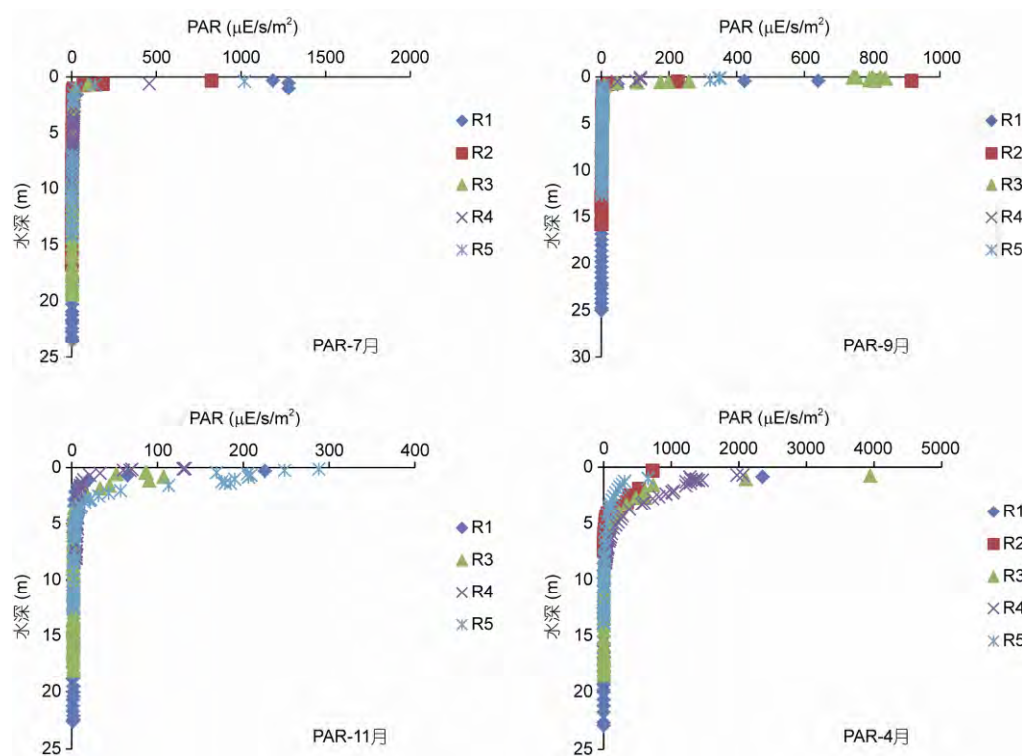


图S6 然乌湖溶解氧LDO时空分布图

Figure S6 Temporal and spatial variations of lake water dissolved oxygen (LDO).



图S7 然乌湖叶绿素 $a$  (Chl)时空分布图  
Figure S7 Temporal and spatial variations of lake water chlorophyll *a* (Chl).



图S8 然乌湖环境光PAR时空分布图  
Figure S8 Temporal and spatial variations of lake water photosynthetically active radiation (PAR).