



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

姚檀栋^{①②}, 李治国^{①③}, 杨威^①, 郭学军^①, 朱立平^①, 康世昌^{①②}, 吴艳红^④, 余武生^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 冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000;

③ 中国科学院研究生院, 北京 100049;

④ 中国科学院对地观测与数字地球科学中心, 数字地球科学重点实验室, 北京 100190

E-mail: tdyao@itpcas.ac.cn

2009-06-30 收稿, 2010-02-26 接受

国家重点基础研究发展计划(2005CB422004)、国家自然科学基金重大国际合作项目(40810019001)、BRAHMATWINN(FP6-036952)和西藏自治区科技计划资助

摘要 雅鲁藏布江流域冰川正在强烈退缩并对湖泊过程产生了重大影响. 通过对雅鲁藏布江流域内冰川分布和大陆型冰川与海洋型冰川物质平衡变化的研究, 指出近期流域内冰川物质平衡呈强烈亏损状态. 结合纳木错湖和然乌湖地区冰川湖泊变化研究, 发现冰川物质平衡强烈亏损特征对湖泊变化具有重要影响, 主要表现为冰川融水对于近期湖泊面积扩大和湖泊水位上升的补给作用.

关键词

雅鲁藏布江流域
冰川分布
物质平衡
湖泊变化

雅鲁藏布江作为恒河的二级主干支流, 发源于喜马拉雅山北坡的杰马央宗冰川, 全长 2057 km, 流域面积 240480 km², 介于 80°12'~97°38'E, 27°26'~28°54'N. 雅鲁藏布江流出青藏高原后首先与布拉马普特拉河汇流, 然后在下游三角洲与恒河汇流, 最后注入印度洋的孟加拉湾.

雅鲁藏布江是世界上平均海拔最高的河流, 也是中国主要的海洋型冰川分布区. 雅鲁藏布江流域共有冰川 10816 条, 冰川面积约 14493 km², 冰储量约 1293 km³(表 1), 占整个青藏高原冰川数量(36918 条)的 29%, 面积(49903 km²)的 29% 和冰川储量(4572 km³)的 29%, 占中国冰川总数量、总面积和总储量约为 23%, 24% 和 23%, 占整个外流河区相应冰川总量的 56%, 61% 和 64%, 仅次于塔里木内流水系, 是中国冰川数量最多的外流水系^[1]. 流域内面积大于 100 km² 的冰川共有 4 条, 分别为夏曲冰川、恰青冰川、那龙冰川和来古冰川. 冰川编目记录的恰青冰川长度为 35.3 km, 面积为 206.7 km², 冰川末端低达

2900 m a.s.l., 是该流域内规模最大的冰川.

本区冰川季节性融水对于下游水资源利用起到重要的作用. 大约有 5 亿人口依靠恒河、布拉马普特拉河以及印度河这 3 条河的水资源来用于农业和经济活动^[2]. 而区域性的研究则显示, 冰川面积不断萎缩, 冰川湖泊扩张^[3-9]. 目前的问题是, 冰川湖泊遥感研究仅能从面积变化上分析其时空变化, 而对于冰川储量及冰川消融总量的定量研究则较为困难. 传统的方法是利用冰川物质平衡观测, 在冰川表面进行积累和消融观测, 从而定量研究冰川消融量, 进而估算冰川水资源的变化及其对于径流和湖泊的影响. 过去对于本流域的物质平衡及消融鲜有涉足, 从而限制了对于冰川补给作用的了解^[10,11]. 本文以雅鲁藏布江流域为研究对象, 侧重分析研究雅鲁藏布江流域内冰川分布特征, 同时选取两种不同类型的冰川作为研究对象, 阐明近期冰川物质平衡变化的主要特点, 进而估算冰川物质平衡变化对于冰川补给湖和冰川末端湖的影响.

英文版见: 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. Chinese Sci Bull, 2010, 55, doi: 10.1007/s11434-010-3213-5

1 冰川分布及其特征

中国冰川编目^[1]中将雅鲁藏布江流域划分为康布麻曲等10个支流域. 需要特别说明两点. 第一, 纳木错湖区虽然是一个封闭湖盆, 在流域划分上不属于雅鲁藏布江流域. 但在本文研究中, 因为要研究冰川物质平衡对湖泊的影响, 而纳木错正好是受雅鲁藏布江流域冰川补给的一个典型内陆封闭流域, 因此给予其特殊考虑. 纳木错流域在冰川编目时, 冰川数目为253条, 冰川面积约204 km². 帕隆藏布流域发育有冰川1378条, 冰川面积2703.74 km²(图1和表1). 第二, 在冰川编目中, 帕隆藏布是易贡藏布的一条支流, 但本文要特别研究易贡藏布上游来古冰川对其末端湖的影响, 因此从易贡藏布流域单独划分出帕隆藏布(图1和表1).

从冰川形态及分布规律来看, 雅鲁藏布江流域

悬冰川和冰斗-悬冰川的数量最多, 占全流域的52.4%, 冰斗冰川、冰斗-山谷冰川和山谷冰川分别占30%, 11.7%和5.9%, 平顶冰川只有4条. 76%的冰川面积小于1 km², 大于10 km²的冰川只有219条. 本区冰川分布特征表现为: 面积大的冰川数量比例小, 面积小的冰川数量比例大(图2).

从本流域内冰川分布的坡向来看, 雅鲁藏布江流域的大冰川主要集中在南坡、东南坡、东坡和西南坡坡向上. 从冰川数量看, 雅鲁藏布江流域冰川朝向为北、东北和西北的冰川共计6053条, 占总数量的56%, 但冰川面积为7260 km², 仅占总冰川面积的50%(表2); 而南、东南、西南和东朝向的冰川条数只有3851条, 占流域冰川总条数的36%, 但面积为6361.55 km², 占流域冰川总面积的44%; 从冰川的平均面积看, 东南朝向的冰川平均面积达2.45 km², 西朝向的冰川平均面积只有0.96 km². 冰川分布面积

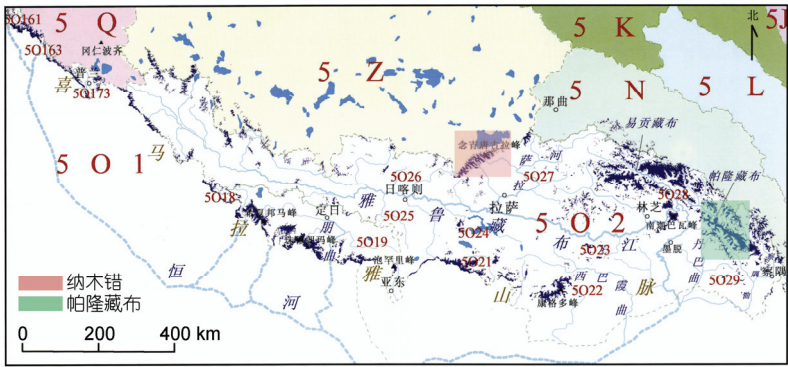


图1 雅鲁藏布江流域冰川分布示意图
据施雅风等人^[1]

表1 雅鲁藏布江流域各支流冰川分布

河流名称	冰川条数	冰川面积/km ²	冰储量/km ³	平均面积/km ²	平衡线高度/m a.s.l.
康布麻曲	25	47.30	4.00	1.89	5330~5630
洛扎雄曲	853	1083.26	84.55	1.27	4850~6323
西巴霞曲	649	768.70	57.69	1.18	5040~5950
央朗藏布	418	531.23	45.03	1.27	3390~5610
羊卓雍湖	144	229.85	26.02	1.60	5480~6300
年楚河等	932	1155.08	97.58	1.24	5170~6460
多雄藏布	1615	788.84	35.08	0.49	5510~6070
拉萨河等	1920	1672.06	113.81	0.86	4420~6040
易贡藏布	1724	3909.69	444.08	2.27	3370~5490
察隅河等	905	1399.25	106.85	1.55	3800~5480
帕隆藏布	1378	2703.74	268.33	1.96	3560~5980
纳木错	253	204.31	11.04	0.81	5720~5860
合计	10816	14493.31	1293.07	1.38	3370~6460

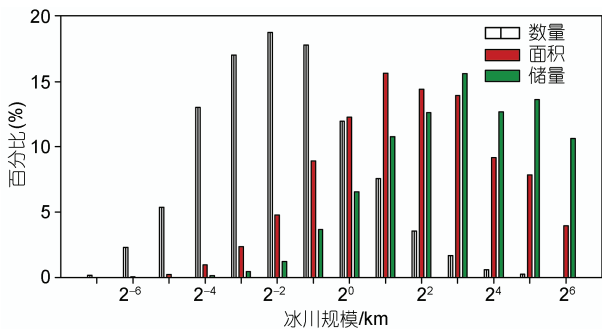


图 2 雅鲁藏布江流域冰川数量、面积与储量的分布

的朝向差异充分说明了印度季风影响的重要性。同时，冰川平均平衡线的海拔高度也在印度季风影响的坡向最低。对雅鲁藏布江流域 10816 条冰川的雪线分析表明，平衡线的高度变化在 3370~6460 m a.s.l.之间，呈从西到东递低趋势(图 3)。雪线最高的冰川为年楚河流域编号为 5O251A0010 冰川，最低的为帕隆藏布流域编号为 5O281B0550 的冰川。通过分析各朝向冰川雪线的分布趋势，东向和南向的冰川平均雪线低于本区平均雪线超过 100 m(表 3)。这种与北半球大部分山地冰川雪线南北坡分布完全相反的特征，也说明了印度季风降水的重要影响。

2 冰川物质平衡特征

物质平衡是冰川表面积累量与消融量的代数之和^[12]，反映了冰川表面单位面积上相对于上一个冰川物质平衡年末冰面的平均升降变化状况。因此，零平衡线是冰川响应气候变化最敏感的指标，也是研

究冰川与其他过程相互作用的关键指标。关于物质平衡的计算，一般是根据野外观测资料，分别计算出各测点的纯积累量和纯消融量^[13]，将计算结果标在大比例尺的冰川图上，绘制冰川积累和消融等值线图或用等高线法，从图上确定出冰川零平衡线高度，分别量测出每相邻两等值线或等高线间的积累和消融面积，然后逐步计算出整个冰川的纯积累量和纯消融量以及物质平衡。刘潮海等人^[14]和蒲健辰等人^[15-17]对不同冰川物质平衡的研究表明，用等值线法和等高线法计算出的结果很接近，而且后者较前者更简便。因此，我们对物质平衡的计算也采用较为简便的等高线法计算。据此，整个冰川的物质平衡(B)为 $B = C + A = \sum S_{cp}c_p + \sum S_{ap}a_p$ ，式中， C 为纯积累量； A 为纯消融量； S_{cp} 和 S_{ap} 分别为积累区和消融区相邻两等值线或等高线间的投影面积； c_p 和 a_p 分别为平均积累深度和平均消融深度。本研究中采用花杆观测单点物质平衡： $b_n = b_i + b_s + b_{si}$ ，其中 b_n ， b_i ，

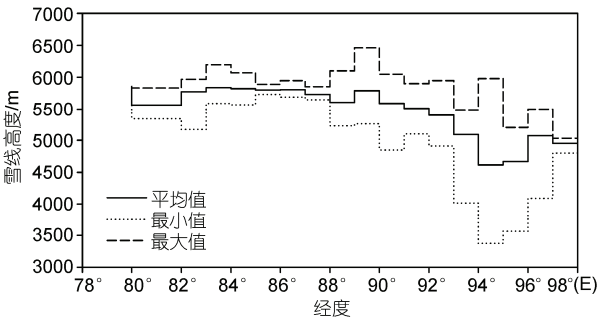


图 3 雅鲁藏布江流域雪线高度随经度的变化

表 2 雅鲁藏布江流域各朝向冰川分布

冰川朝向	冰川条数	冰川面积/km ²	冰储量/km ³	平均面积/km ²	平衡线高度/m a.s.l.
北	1665	2180.46	194.54	1.31	3390~6185
西	912	871.70	54.13	0.96	4290~6300
西北	2073	2164.97	160.40	1.04	3370~6130
东	979	1443.58	143.60	1.47	3800~6070
南	760	1068.81	81.84	1.41	3800~6460
东南	1075	2629.93	331.29	2.45	3710~5990
西南	1037	1219.23	86.30	1.18	3850~6040
东北	2315	2914.63	240.96	1.26	3640~6323
合计	10816	14493.31	1293.07	1.38	3370~6460

表 3 雅鲁藏布江流域各朝向冰川平均雪线之差值

朝向	东	北	东北	西北	南	东南	西南	西
各朝向平均雪线高度/m	5240	5338	5400	5378	5239	5306	5342	5343
与平均雪线的差值/m	-104	-6	+56	+34	-105	-38	-2	-1

b_s 和 b_{si} 分别代表为单点物质平衡、冰川冰、积雪和附加冰平衡值。整个冰川的物质平衡(B_n)通过不同高度的面积加权计算: $B_n = \sum b_j S_j$, b_j 和 S_j 分别为不同高度区间的净物质平衡和等高线间投影面积。利用公式 $h = \frac{B}{S} \times 1000$, 可以得到冰川物质平衡更为直观的水当量(mm w.e.)。式中 h 为水当量高度(mm w.e.), B 为冰川的物质平衡(m^3), S 为冰川的总面积(m^2)。

在雅鲁藏布江流域, 两类冰川的物质平衡变化是有代表性的。第一类是大陆性冰川, 第二类是海洋性冰川。这两类冰川变化的不同特征对冰川补给的湖泊影响也是不同的。因此, 我们分别考虑两类不同性质的冰川来研究其物质平衡过程与特征。

我们所研究的大陆型冰川是扎当冰川, 位于念青唐古拉山主峰的东北坡的纳木错湖上游($30^{\circ}28'34''N$, $90^{\circ}38'43''E$), 冰川朝向北西北。该冰川长 2.5 km, 面积 1.98 km^2 , 多年平均雪线为 5800 m a.s.l., 冰川末端 5500 m a.s.l., 在冰川编目中, 属于大陆型冰川。此冰川的第一次观测始于 2005 年 8 月 30 日, 当时观测和

计算的结果是代表 2005/2006 年物质平衡的值, 物质平衡量为 $-6.1470 \times 10^6 m^3$, 相当于 $-1576 mm w.e.$ 。最近根据 2007 年 9 月 18 日 ASTER 卫星遥感影像, 重新计算了该冰川面积, 并重新计算了 2005/2006 年该冰川的物质平衡为 $-1143 mm w.e.$, 小于周广鹏等人^[18]的计算结果。尽管两者有计算值的差异, 但都表明该冰川处于较大负平衡, 也揭示了该冰川处于强烈的退缩状态的原因。

我们所研究的海洋型冰川是位于岗日嘎布山脉帕隆藏布源头的 6 条冰川(分别为帕隆 4 号、10 号、12 号、94 号和德木拉冰川)及波密附近的 24K 冰川。对这 6 条冰川近 3 年来物质平衡的研究表明, 虽然存在着年际间的差异, 但都呈现负平衡状态。从这 6 条冰川的物质平衡看, 冰川物质平衡与冰川面积间有一种负相关关系, 即冰川面积越小, 冰川物质亏损相对越大。大冰川物质亏损相对较小, 可能是由于大冰川拥有较大的积累面积, 因此可以延伸到较高海拔的地区从而获得更多降水。对于面积较小的冰川来讲, 由于积累区面积很小或者根本没有积累区, 冰川

表 4 扎当冰川物质平衡计算结果

冰川名称	冰川面积/ km^2	观测年	零平衡线高度/m	纯积累			纯消融			物质平衡		
				积累区面积/ km^2	积累量/ $10^4 m^3$	积累深度/mm	消融区面积/ km^2	消融量/ $10^4 m^3$	消融深度/mm	净平衡量/ $10^4 m^3$	平均值/mm w.e.	消融区面积所占比例(%)
扎当	1.79	2005/2006	5840	0.144	10.5	722	1.642	-214.6	-1307	-204.1	-1143	92
		2006/2007	5780	0.355	32.2	905	1.431	-182.0	-1272	-149.8	-838	80
		2007/2008	5640	1.428	60.3	422	0.358	-23.1	-645	37.2	208	20

表 5 藏东南帕隆藏布流域 6 条冰川的物质平衡值(单位: mm w.e.)

冰川名称	冰川面积/ km^2	观测年	零平衡线高度/m	纯积累			纯消融			物质平衡		
				积累区面积/ km^2	积累量/ $10^4 m^3$	积累深度/mm	消融区面积/ km^2	消融量/ $10^4 m^3$	消融深度/mm	净平衡量/ $10^4 m^3$	平均值/mm w.e.	消融区面积所占比例(%)
94 号	2.51	2005/2006	5412	0.52	41.0	793	1.99	270.5	1356	-229.5	-913	80
		2006/2007	5333	1.08	47.2	437	1.43	110.9	775	-63.7	-254	60
		2007/2008	5423	0.50	45.6	910	2.01	316.3	1573	-270.6	-1078	80
12 号	0.21	2005/2006		0.00	0.0	0	0.21	30.4	1449	-30.4	-1449	100
		2006/2007		0.00	0.0	0	0.21	22.1	1050	-22.1	-1050	100
		2007/2008		0.00	0.0	0	0.21	29.6	1410	-29.6	-1410	100
10 号	2.04	2005/2006	5429	0.66	126.9	1917	1.38	264.7	1918	-137.8	-675	70
		2006/2007	5419	0.72	184.4	2547	1.31	242.0	1847	-57.6	-283	60
		2007/2008	5445	0.63	149.0	2350	1.41	270.0	1917	-121.0	-593	70
4 号	11.71	2005/2006	5452	5.47	575.9	1053	6.24	1431.0	2292	-855.1	-730	50
		2006/2007	5341	6.34	1175.3	1854	5.37	1186.7	2210	-11.4	-10	50
德木拉 ^{a)}	0.47	2006/2008		0.00	0.0	0	0.47	66.6	1416	-66.6	-1416	100
24K	2.74	2007/2008		0.00	0.0	0	2.74	333.9	1219	-333.9	-1219	100

a) 德木拉冰川物质平衡为 2006/2008 年间的平均值

的净积累量很少或者根本没有. 因此, 这些冰川显示出强烈的负物质平衡值. 如 12 号冰川负值较大, 平均值约为 -1.3 m w.e. 12 号冰川如此大物质亏损的主要原因是由于其较小的面积及其特殊的面积-海拔分布所致. 这条冰川分布在 $5120\sim 5300 \text{ m a.s.l.}$ 范围内, 南支冰川面积仅为 0.21 km^2 . 如此低的面积-海拔分布和较小的面积必然导致强烈的冰体消融及有限的物质积累, 从而致使其具有较大的物质亏损. 24K 冰川是一表碛覆盖型冰川. Yang 等人^[19]认为, 24K 冰川消融强烈的主要原因是由于冰川表面被一层较薄的表碛覆盖, 因此会减小冰面反照率和增加短波辐射的吸收, 从而导致冰川强烈消融.

3 冰川物质平衡变化对湖泊的影响

雅鲁藏布江流域湖泊的分类, 也牵涉到整个青藏高原湖泊的分类. 由于冰川的存在和影响, 青藏高原湖泊的分类也需要细化. 首先上是冰川的存在产生了依附于冰川的湖泊类型(湖泊和冰川接触), 可称之为冰川湖, 主要有冰面湖和冰川末端湖两类, 偶尔也出现冰下湖; 其次是不依附于冰川的湖泊类型(湖泊不和冰川接触), 可称之为非冰川湖, 视其是否受冰川影响也可分为两类, 即冰川补给湖和非冰川补给湖. 因此, 笼统地将冰川湖的两类与非冰川湖的两类合在一起, 就有冰面湖、冰川末端湖、冰川补给湖和非冰川补给湖. 雅鲁藏布江流域的冰川补给着大量的各种类型的湖泊. 纳木错这一高原面(4500 m a.s.l.)上最大的湖泊就受到念青唐古拉冰川的补给. 因此, 通过解剖纳木错研究冰川物质平衡变化对冰川补给湖的影响具有重要的意义. 20 世纪 70 年代纳木错湖面面积为 1941 km^2 , 现在湖泊面积已扩大到 1982 km^2 以上^[20], 介于 $90^\circ 16'\sim 91^\circ 03'\text{E}$, $30^\circ 30'\sim 30^\circ 55'\text{N}$ 之间(图 1), 纳木错流域面积达 10610 km^2 , 跨越范围 $89^\circ 21'\sim 91^\circ 23'\text{E}$, $29^\circ 56'\sim 31^\circ 7'\text{N}$. 对于这样一个高原大湖湖面面积增大原因的澄清, 将有助于对整个青藏高原水循环过程特征的理解. 其次, 纳木错湖虽是一个冰川径流补给湖, 但补给比例并不大. 根据冰川编目结果^[1], 流域东南部发育现代冰川 253 条, 冰川面积约 204 km^2 , 冰川冰储量 11 km^3 . 也就是说, 冰川面积约占整个湖泊面积的 11%, 占流域面积的比例更小, 约 2%. 由于这些冰川的融水流经短距离的山前地带呈辫梳状直接注入纳木错湖, 冰川物质平衡过程(和冰川径流过程)如何影响青藏高原冰川补

给湖的变化, 也许可以从纳木错流域破解.

近年来针对纳木错湖开展了多方面的研究^[20~24]. 其中一个热点问题就是现代冰川退缩对纳木错湖泊的现代过程影响有多大. 鲁安新等人^[20]和 Wu 等人^[21]都在研究中肯定了纳木错湖近期的湖水位上升和湖泊面积扩大的特征. 朱立平等人^[23]认为, 虽然冰川融水年径流补给在整个纳木错湖泊年入湖水量中所占比例不大(不到 10%), 或者说降水量补给是年入湖水量的主要组成部分, 但由于近期冰川融水增加剧烈和冰川融水径流蒸发损失少的特点, 近期纳木错湖泊面积扩大是冰川融水和降水二者共同作用的结果. 根据他们的研究, 1970~2004 年, 纳木错湖水量增加使 1970 年时的湖泊水位上升约 3 m (图 4).

由于水文过程的复杂性, 不可能完全准确地计算冰川的贡献, 但目前的物质平衡研究结果可以作估算的基础. 冰川可以通过 3 个途径对湖水量增加做出贡献. 最重要的途经是冰面融化产生的融水, 其次是冰川末端退缩时产生的融水, 同时还有冰川底部融化产生的融水. 作为保守计算, 我们对以上 3 个途径产生的冰川融水量, 都取最低值. 对于冰面融化一项, 我们取物质平衡平均量; 对冰内融水一项, 我们没有观测值, 暂取 0; 由于从冰川末端到湖泊距离较短, 蒸发对冰川融水径流的影响可以忽略不计. 对冰川末端退缩一项, 我们取 1970 年和 2004 年减少的冰川面积、采用朱立平等人^[23]为纳木错流域建立的计算冰川体积的经验公式

$$V=0.042S^{1.3565},$$

分别计算 1970 年时的冰川储量和 2004 年时的冰川储量, 并取 2 个时期的差值即可. 朱立平等人^[23]计算, 1970~2004 年纳木错冰川面积减少了 30.72 km^2 . 同期内湖泊面积增加了 95.38 km^2 . 关于冰川物质负平衡贡献, 取表 4 中 2005/2006 和 2006/2007 两年的平均值约 -990 mm w.e. 由此, 可以估算出冰川物质负平衡过程中的冰面消融对纳木错湖水位上升的贡献超过 40%. 朱立平等人^[23]估算, 1970 年以来冰川面积减少产生的冰川融水对湖水位上升的贡献可达 60%. 因此, 我们认为冰川物质平衡对纳木错湖水位上升和湖水面积扩大, 起了关键作用, 在湖水位升高的 3 m 中, 冰川负物质平衡的贡献超过 1.5 m , 或者说冰川负物质平衡过程的贡献超过湖水位总上升量的 50%.

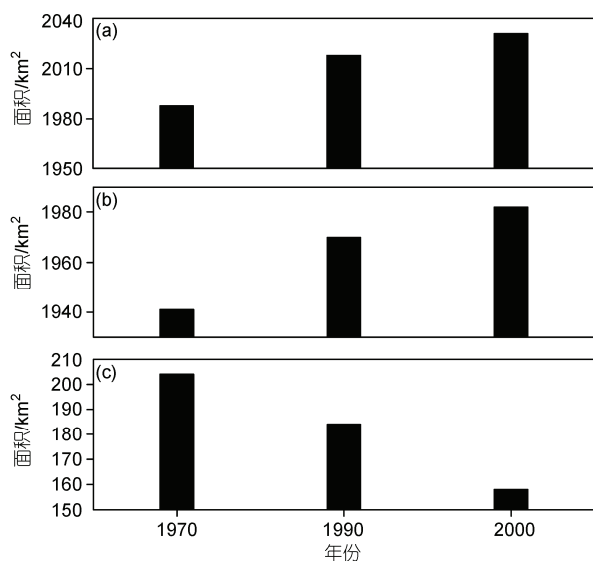


图4 纳木错流域内所有湖泊面积(a)、纳木错湖泊面积(b)和流域内冰川面积(c)自1970年以来不同时间段的变化

冰川物质平衡变化对冰川末端湖的影响可通过然乌湖流域的冰川末端湖进行研究。然乌湖不是封闭湖。因此理论上讲,随着来水量增大不会出现湖泊面积扩大的过程。但此湖比较特殊。首先,汇入湖中的河流均源于周围山脊上的冰雪前缘,湖内局部地区水很深,湖泊两岸呈槽谷状,湖底为冰川刨蚀而成,湖泊出口处为堰塞湖结构。前人的研究认为,大约在200年前,现今出口处右岸发生过山体崩塌,因堆积物堵塞河道形成湖泊^[24]。但根据我们野外观测的结果,此处堵塞河道的“山体崩塌物”应该是当年冰川后退遗留的冰碛物。因此,然乌湖是由冰川堆积物形成,而非山体崩塌。目前没有该湖1970年以来30多年的详细资料,但根据然乌湖流域的地形图数据和各期遥感影像数据研究,近25年来然乌湖流域湖泊面积逐年增加的事实是明确的:1980年湖泊面积为29.79 km²,到2005年面积增加到33.27 km²,湖泊面积增加了3.48 km²,增加比例为11.68%;1980~1988年,湖泊面积增加了0.86 km²,增加比例为2.89%;1988~2001年,湖泊面积增加了1.56 km²,增加比例为5.09%;2001~2005年,湖泊面积增加了1.06 km²,增加比例为3.29%。由此可见,然乌湖流域湖泊面积呈加速扩大的趋势。根本原因是伴随着冰川物质亏损加剧,大量冰川融水汇入湖泊。由于然乌湖冰碛物堆积的堤坝较高,流出然乌湖的水量只能通过冰碛物各砾石间的缝隙流到下游。随着冰川物质亏损加

大和上游来水量的加大,仅靠砾石间间距通过的水量已不足以分流上游来水量,因此导致湖泊面积扩大。

来古冰川(雅弄冰川)面积191.45 km²。其末端湖(冰碛湖)的扩张是近年来冰川物质不断亏损的例证。伴随着来古冰川强烈的物质亏损以及由此导致的冰川强烈退缩,冰川面积缩小,但湖泊面积增大。1980年时,末端湖面积只有0.42 km²,1991年时增大到0.71 km²,2000年时增大到2.22 km²,2005年时更增加到2.55 km²。在1980~2005年间,该湖泊面积扩大了5倍多(图5)。表5中94号冰川的平均消融深度约为1234 mm w.e.,若取来古冰川的60%为夏季消融区,那么该冰川的冰川融水量为 1.4×10^8 m³。若按辛晓东等人^[7]提出的1980年以来此流域冰川面积平均减小约6%的数据,那么来古冰川过去20多年来消失冰川部分贡献的水量可达到 0.14×10^8 m³。只是由于来古湖本身和下游的然乌湖是半外流湖,额外的来水量可部分地排泄到下游,因此冰川湖面积增大仍在一定范围之内。如果是封闭湖泊,则这一地区负物质平衡过程的作用远大于纳木错湖区。

4 结论

印度季风的影响导致雅鲁藏布江流域内迎风坡的冰川密集分布,冰川雪线高度也在印度季风影响

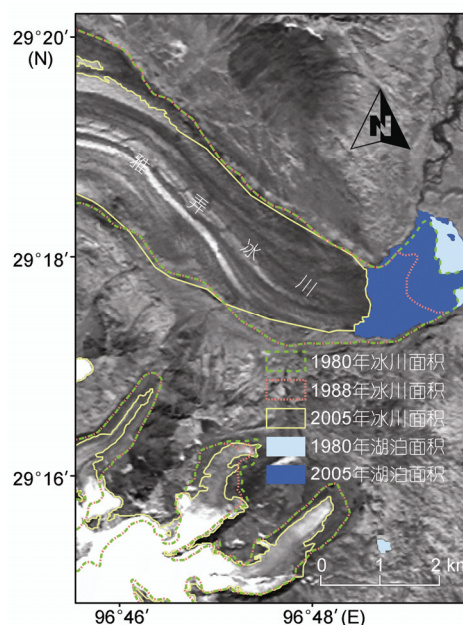


图5 1980~2005年然乌湖流域雅弄冰川末端退缩及其冰碛湖泊面积扩大

强烈地区呈现降低趋势. 近期雅鲁藏布江流域两种不同类型的冰川, 即大陆型冰川和海洋型冰川均呈现较强的物质亏损, 而且面积小的冰川的物质亏损比面积大的冰川的物质亏损更强烈. 冰川物质的负平衡状态导致冰川补给湖和冰川末端湖的过程发生

变化. 在纳木错和然乌湖地区、特别是来古冰川末端湖, 近几十年来湖面积的增大与冰川负物质平衡状态加剧、冰川融水对于湖泊的补给过程加强有直接关系. 我们的估算说明, 近期冰川物质亏损是这些湖泊面积扩大及湖水水位上涨的重要原因.

参考文献

- 1 施雅风, 刘潮海, 王宗太, 等. 简明中国冰川编目. 上海: 上海科学普及出版社, 2005. 139—152
- 2 Cruz R V, Harasawa H, Lal M, et al. Asian, in climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. In: Parry M L, Canziani O F, Palutikof J P, et al, eds. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 469—506
- 3 晋锐, 车涛, 李新, 等. 基于遥感和 GIS 的西藏朋曲流域冰川变化研究. 冰川冻土, 2004, 26: 261—266
- 4 姚檀栋, 刘时银, 蒲健辰, 等. 高亚洲冰川的近期退缩及其对西北水资源的影响. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 34: 535—543
- 5 Yao T D, Pu J C, Lu A X, et al. Recent glacial retreat and its impact on hydrological processes on the Tibetan Plateau, China, and surrounding regions. Arct Antarct Alp Res, 2007, 39: 642—650
- 6 刘时银, 上官冬辉, 丁永建, 等. 20 世纪初以来青藏高原东南部岗日嘎布山的冰川变化. 冰川冻土, 2005, 27: 55—63
- 7 辛晓冬, 姚檀栋, 叶庆华, 等. 1980~2005 年藏东南然乌湖流域冰川湖泊变化遥感研究. 冰川冻土, 2009, 31: 19—26
- 8 杨威, 姚檀栋, 徐柏青, 等. 青藏高原东南部岗日嘎布地区冰川严重损耗与退缩. 科学通报, 2008, 53: 2091—2095
- 9 刘时银, 谢自楚, 刘潮海, 等. 冰川物质平衡与冰川波动. 见: 施雅风, 主编. 中国冰川与环境——现在、过去和将来. 北京: 科学出版社, 2000. 101—103
- 10 李吉均, 郑本兴, 杨锡金, 等. 西藏冰川. 北京: 科学出版社, 1986. 140—148
- 11 Liu S Y, Xie Z C, Song G P, et al. Mass balance of Kangwure (flat-top) Glacier on the north side of Mt. Xixiabangma, China. Bull Glacier Res, 1996, 14: 37—43
- 12 Paterson W S B. The Physics of Glaciers. 2nd ed. New York: Pergamon Press, 1981
- 13 谢自楚, 张金华. 中国冰川的物质平衡. 见: 中国冰川概论. 北京: 科学出版社, 1981. 67—94
- 14 刘潮海, M B 盖洛夫. 乌鲁木齐河源 1 号冰川物质平衡过程研究. 见: 中国科学院兰州冰川冻土研究所, 编. 天山冰川观测试验站年报, 1989, 8: 1—23
- 15 蒲健辰, 姚檀栋. 冬克玛底支冰川物质平衡研究. 见: 姚檀栋, 上田丰, 编. 青藏高原冰川气候与环境. 北京: 科学出版社, 1993. 60—68
- 16 蒲健辰, 姚檀栋. 西大滩煤矿冰川的物质平衡观测研究. 见: 姚檀栋, 上田丰, 编. 青藏高原冰川气候与环境. 北京: 科学出版社, 1993. 69—73
- 17 蒲健辰, 姚檀栋, 段克勤, 等. 祁连山七一冰川物质平衡的最新观测结果. 冰川冻土, 2005, 27: 199—204
- 18 周广鹏, 姚檀栋, 康世昌, 等. 青藏高原中部扎当冰川物质平衡研究. 冰川冻土, 2007, 29: 360—365
- 19 Yang W, Yao T D, Xu B Q, et al. Influence of supraglacial debris on the summer ablation and mass balance in the 24K Glacier, south-eastern Tibetan Plateau. Geogr Ann, 2010, 92: 353—360
- 20 鲁安新, 姚檀栋, 王丽红, 等. 青藏高原典型冰川和湖泊变化遥感研究. 冰川冻土, 2005, 27: 783—792
- 21 Wu Y H, Zhu L P. The response of lake-glacier variations to climate change in Nam Co Catchment, central Tibetan Plateau, during 1970—2000. J Geogr Sci, 2008, 18: 177—189
- 22 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 中国冰川目录Ⅶ. 北京: 科学出版社, 1988
- 23 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 关志华, 陈传友, 区域雄, 等. 西藏河流与湖泊. 北京: 科学出版社, 1984