

青藏高原纳木错流域冰雪融水径流量估算

陈飞^{1,2}, 蔡强国², 孙莉英^{2†}

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 100083, 北京; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环与地表过程重点实验室, 100101, 北京)

摘要: 冰川积雪是寒区固体水资源的重要组成部分, 在全球气候变暖背景下, 进行冰雪融水量的计算具有重要意义。本文以青藏高原纳木错流域为研究对象, 近40年, 纳木错流域气温增幅达到 $0.04\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{a}$, 所对应的是流域冰川年退缩率达到 $1.12\text{ km}^2/\text{a}$, 湖泊面积扩张速率达到 $2.1\text{ km}^2/\text{a}$ 。借助第1、2次中国冰川编目数据和MODIS遥感影像资料, 基于水量平衡建立冰川体积-融水径流量经验公式(包括冰川区降水量、冰川消融量、蒸发量和融水径流量等参数), 并采用SRM积雪消融模型(积雪覆盖衰减率、气温直减率、度日因子值和径流系数等参数), 分别对纳木错流域内的冰川和积雪融水径流量进行估算, 从而实现大尺度稀缺资料的高寒地区水文模拟。结果表明: 纳木错流域年均冰川融水径流量是2.99亿 m^3/a , 积雪融水径流量是8.10万 m^3/a , 冰川融水量约是积雪融水量的38倍。通过比较纳木错流域气温升高、冰川退缩和湖泊扩张之间的关系, 纳木错湖泊增加水量约为流域内冰川融水径流量的80%, 远高于季节性积雪融水的补给量; 因此, 可以推测随着气候变暖, 纳木错流域东南侧念青唐古拉山大面积冰川的急剧消融, 是造成纳木错湖泊扩张的重要原因之一。

关键词: 冰川; 积雪; 中国冰川编目; 积雪消融模型; 融水径流量

中图分类号: P343 文献标志码: A 文章编号: 1672-3007(2016)02-0127-10

DOI: 10.16843/j.sswc.2016.02.017

Estimation of meltwater runoff from glaciers and snow cover in Nam Co basin, Tibetan Plateau

Chen Fei^{1,2}, Cai Qiangguo², Sun Liying²

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, 100083, Beijing, China; 2. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, 100101, Beijing, China)

Abstract: [Background] Glacier and snowcover are the key parts of solid water resources in high alpine region, quantitative calculation of meltwater is of significance. Based on the data from the First and Second Glacier Inventory of China, the glacier area in Nam Co basin has shrunk 13.44 km^2 at a rate of $1.12\text{ km}^2/\text{a}$ in ten years. From the MODIS data (MOD10A2), the seasonal snow produced a large number of meltwater into Nam Co Lake. In the past forty years, the temperature increased at $0.04\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{a}$, the solid water resources (glacier) reduced by $111.73 \times 10^8\text{ m}^3$, and the lake area increased nearly 100 km^2 at rate of $2.1\text{ km}^2/\text{a}$. However, the correlation between temperature rising, glacier melting and lake

收稿日期: 2015-11-20 修回日期: 2016-01-24

项目名称: 国家自然科学基金重点项目“高海拔寒区融水土壤侵蚀机理与过程模拟研究”(41230746); 国家自然科学基金“不同质地黄土坡面水蚀动力-输沙过程耦合关系对侵蚀形态演化的响应机制”(41471229), “坡面水蚀动力与细沟发育形态的相互作用机制及其影响因素分析”(41271304)

第一作者简介: 陈飞(1986—), 男, 博士研究生。主要研究方向: 流域融水侵蚀机理与模拟。E-mail: fei-27@163.com

† 通信作者简介: 孙莉英(1978—), 女, 博士, 副研究员。主要研究方向: 水沙环境风险与控制等。E-mail: sunliying@igsrr.

expansion is not yet clear in Nam Co basin of the Tibetan Plateau, thus it was selected as the study area, where is covered with glaciers (141.88 km²) and snow (20%), aiming to better understand the hydrological processes in the high alpine region under the background of global warming. [**Methods**] The empirical equation was presented to quantify the meltwater amount from glacier on the basis of water balance theory. Empirical values were set for the variations in the equation, including the precipitation (406.70 mm), the evaporation (100.50 mm). The glacier ablation was calculated on the basis of the glacier volume variation. The Snowmelt Runoff Model (SRM) was used to calculate the runoff amount from snow melting in the Nam Co basin, using the WinSRM Version 1.11 software. The feasibility of the SRM was discussed and analyzed. The parameters of the SRM, including the degree day factor, runoff coefficient, lapse rate of temperature, recession coefficients and air temperature, were tested in Nam Co basin using the hydrological data, meteorological data and MODIS remote sensing data (MOD10A2). [**Results**] The results showed that the empirical equation and the SRM model could be used for the calculation of the meltwater runoff amount from glacier and seasonal snow in Nam Co basin. The calculated annual glacier meltwater runoff was 49.15 mm/a (2.99 × 10⁸ m³/a), and the annual snow meltwater runoff was 8.10 × 10⁶ m³/a. The glacier meltwater runoff was almost 38 times that of the seasonal snow. This meant the glacier meltwater was dominant water resources in the Nam Co basin. The lake area was enlarged with the glacier shrinking when temperature increased. The increased water amount with the lake expansion was nearly 80% of the calculated runoff amount from glacier melting, far more than the calculated meltwater runoff from the seasonal snow. [**Conclusions**] It is deduced that the dramatic glacier melting in the Nyainqentanglha Mountains at the southeast side of Nam Co basin may be the most important drive factor for the lake expansion in the study area. However, more measurement should be conducted in the high alpine region to improve the accuracy of the calculated results by SRM. Moreover, the correlation between the glacier shrink and the lake expansion should be further investigated.

Keywords: glacier; snow; Glacier Inventory of China; SRM; meltwater runoff

随着全球气候变暖形势加剧,寒区冰川积雪大量消融,导致冰雪融水径流增加,给生态环境带来严重威胁^[1]。青藏高原被称作“亚洲水塔”,区域内冰川积雪分布广泛,固体水资源量相当丰富。据中国第2次冰川编目统计资料,2008年青藏高原冰川面积达4万5045.2 km²^[2]。2003—2010年期间,青藏高原常年积雪分布面积约占整个青藏高原的13.3%^[3]。青藏高原作为气候敏感区和生态脆弱区,伴随着气温升高,固体水资源变化产生的生态影响更为显著。李治国^[4]研究发现,气候变化背景下,近50年青藏高原冰川以退缩为主,而湖泊水量以增加为主。段水强^[5]认为气温、降水和蒸发等因子都会对湖泊的水量平衡产生重要影响。辛晓冬^[6]对藏东南然乌湖流域,1980—2005年冰川和湖泊变化间关系进行分析,认为湖泊加速扩张,主要受到冰川退缩、融水径流量加大的影响。而青藏高原引起湖泊扩张的主要驱动力尚未清晰;因此,研究冰川融水与湖泊扩张的关系,对于揭示气候变暖背景

下,寒区冰雪消融规律具有非常重要的意义。

由于青藏高原环境恶劣,针对冰川积雪融水径流量的估算,传统定点实测方法局限性较大,一般采用寒区水文模拟的方法。寒区水文模型按照研究对象,可以分为冰川消融模型^[7]、积雪消融模型^[8]和冻土水文模型^[9];按照数据处理方式,可以分为基于气象因子的统计模型^[10-12]和基于物理机制的能量平衡模型^[13-14];按照水文过程,可以划分为融水产流模型^[15-16]和融水汇流模型^[17]。但由于青藏高原冰雪融水模拟研究,面临的主要问题是缺乏全面、同步的观测数据,较难实现大尺度的寒区水文模拟及验证^[18]。在地理信息技术的支持下,借助遥感影像资料,进行冰冻圈宏观区域的研究,非常高效便捷^[19]。随着地理信息系统的发展,在集总式水文模型的基础上,又产生了分布式冰雪消融模型^[20]。冰川消融一般借助多时相遥感影像资料,通过统计冰川规模参数变化来反映气候变化。例如,冯童等^[21]和孙美平等^[22]分别基于第1、2次中国冰川编目数

据,对近半个世纪叶尔羌河流域和祁连山的冰川变化进行了分析。而针对积雪消融应用较为广泛的就是SRM积雪消融模型。SRM模型首先由Martinec于1975年提出,1983年由NASA组织正式公布,已经在全球112个流域(面积0.76~91万7444 km²,海拔346~7690 m)成功通过了世界气象组织评价测试($R^2 > 0.8$)^[23]。SRM模型以MODIS积雪遥感资料为主要输入参数,在青藏高原气候环境恶劣,数据资料稀缺地区存在应用优势。

本文选取青藏高原纳木错流域为研究对象,针对研究区域范围较大、冰雪资源丰富、监测数据较少的情况,采用中国冰川编目数据和MODIS遥感影像资料,估算大尺度资料稀缺的高寒地区冰雪融水径流量。在此基础上,进一步探讨纳木错流域气温升高、冰川消融与湖泊扩张之间的关系,从而深化对全球气候变暖形势下高寒区冰雪消融规律的理解和认识。

1 研究区概况

纳木错流域位于青藏高原中南部(E 89°30′~91°25′, N 30°00′~1°10′),念青唐古拉山脉西段的北麓,流域面积1万610 km²。流域内具有开展地表过程及环境监测的各类高寒区环境介质,例如冰川、季节积雪、高山冻土、湖泊、高寒草原(草甸)和湿地等。作为高原亚大陆型冰川集中分布区之一,流域内冰川分布较广,并以小规模冰川(0.01~2.74 km²)为主,冰川分布总面积为182 km²。近40多年,纳木错流域气温增幅达到0.04 °C/a,所对应的是流域冰川年退缩率达到1.12 km²/a,湖泊面积扩张速率达到2.1 km²/a^[24]。另外,流域年均积雪覆盖约为20%,高海拔区域季节性积雪,在春末夏初,积雪消融产生大量融水,汇入纳木错湖泊。流域太阳辐射强,年平均气温低于0 °C。全年降水量主要集中在夏季6—10月份(92.7%),降水形态多以固体型降雪为主。

2 数据与方法

2.1 冰川融水量估算

中国2次冰川编目数据均以遥感影像资料的提取为主,详细记录冰川的面积、储量和长度等重要参数,为进行冰川体积-消融量的模拟估算提供数据支持。刘时银等^[25]根据第1次冰川编目资料,拟合了纳木错流域253条冰川面积和冰储量之间的关系:

$$V = 0.042S^{1.3565}, \quad R^2 = 0.9998. \quad (1)$$

式中: S 为冰川投影面积,km²; V 为冰川储量或体积,km³。

$$Q_g = \rho V_g. \quad (2)$$

式中: Q_g 为冰川消融量,mm; V_g 为冰川变化体积,km³;取冰的密度 $\rho = 0.9 \text{ g/cm}^3$ 。由于冰川表面强烈消融,几乎所有的下渗水(降雨和消融水)都以融水径流的形式流出,而且由于纳木错流域的冰川普遍短小,冰川融水流经短距离的山前地带,直接注入纳木错湖泊;因此,假定融水径流过程入渗量可以忽略。基于流域冰川区水量平衡方程式

$$P + Q_g = W_w + E. \quad (3)$$

式中: P 为冰川区降水量,mm; Q_g 为冰川消融量,mm; Q_w 为冰川区地表径流深,mm; E 为冰川表面蒸发量,mm。

通过获取纳木错流域冰川区年降水、冰川表面蒸发等参数,最终估算得到纳木错流域总径流量。最后,依据朱立平等^[26]获取纳木错流域冰川融水补给比例,得到流域的年均冰川融水径流量。

2.2 积雪融水量估算方法

SRM模型是一种使用度日因子法的概念性水文模型,用流域积雪覆盖率变化,控制产流过程,用气温因子控制其融雪过程,一般用于和实测径流的模拟对比、短期径流预测和气候变化的潜在影响评估3个方面,并在模拟和预测径流量上有着很好的精度^[27]。SRM模型的变量主要有积雪覆盖面积变化、气温和降水;而模型的输入变量主要包括积雪度日因子值、温度直减率、气温临界值、径流系数、退水系数和融水径流滞后时间等。

纳木错流域年均积雪覆盖超过20%,尤其是在流域东南侧念青唐古拉山脉沿线,分布着空间上集中、时间上持久的季节性积雪,春末夏初积雪消融产生大量融水汇入纳木错湖泊。2005年中科院青藏高原研究在此建站,已经初步积累一批气象和水文观测数据,便于SRM模型应用基本参数(度日因子、径流系数等)的提取;同时,MODIS遥感影像资料又可以为该区域的积雪变化提供数据支撑。针对纳木错流域范围较大(>1万 km²),位于高寒地区监测数据偏少的状况,可选择SRM模型,进行整个流域积雪融水径流量的模拟估算。本研究所应用SRM软件版本是WinSRM Version 1.11。

2.2.1 不同高度带的积雪面积衰减曲线 遥感数据提取的积雪面积是SRM模型非常重要的输入变量。很多国内外研究^[28-31]表明,采用MODIS数据到SRM模型,具有非常好的模拟效果。笔者选择

8 d合成的MODIS积雪数据MOD10A2作为主要输入数据源。MOD10A2 8 d合成数据的空间分辨率500 m,积雪识别率高达87.5%,便于使用该数据对积雪消融变化进行空间提取和分析^[32]。采用纳木错流域2004—2013年共10年的MODIS积雪覆盖资料(460张栅格图),通过统计MOD10A2影像,在纳木错流域融雪季节的积雪覆盖变化,确定流域的积雪覆盖率衰减曲线。将流域根据海拔高度划分为5个高程带,分别是A(4 718~4 730 m),B(4 730~5 000 m),C(5 000~5 300 m),D(5 300~5 600 m)和E(5 600~6 612 m)高程带。各个高程带的积雪覆盖率曲线如下图1所示。

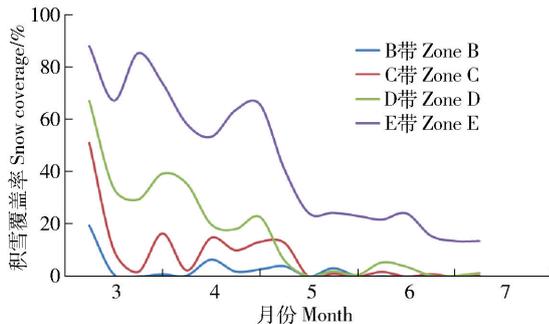


图1 纳木错流域融雪期积雪覆盖衰减曲线

Fig. 1 Depletion curves of the snow coverage in different zones of the Nam Co basin

由图1可见,纳木错流域海拔越高,积雪覆盖比率越大,但随着时间推移,各高程带积雪逐渐消融。其中,消融量最大的时间段是5月中旬。另外,海拔4 718~4 730 m的A高程带主要为纳木错湖泊,不存在长期积雪,因此,未进行统计和显示。

2.2.2 气温和降水 温度在融雪径流过程中起着十分重要的作用,通过气温直减率,将实测数据推算到各高程带的平均高度处。根据谢健等^[33]在念青唐古拉山脉的研究成果,确定纳木错流域气温直减率取值为0.65 °C/hm。设置气温临界值为2 °C,通

过降雨贡献面积的控制选项,确定降水形态在径流估算中的影响作用。

2.2.3 度日因子计算 度日因子被认为是SRM模型中最为敏感的参数之一。据万欣等^[34]的研究,纳木错流域积雪密度为0.15~0.20 g/cm³,度日因子按照公式4计算获取;另外,通过纳木错流域物质平衡花杆实测结果,该区域度日因子值设置为5.3 mm/(d·°C)。

$$a = 1.1 \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (4)$$

式中: a 为度日因子值,cm/(d·°C); ρ_s 为积雪密度,g/cm³; ρ_w 为水的密度,g/cm³。

2.2.4 径流系数 径流系数 α 是一定汇水面积内,径流深度与降水量的比值(0 < α < 1)。根据孜来布·阿不来提^[35]的研究,冰川融水径流系数值要明显高于降水,普遍可达0.6~0.8,结合曲嘎切流域水文观测资料,确定了纳木错流域融水径流系数取值为0.7。

2.2.5 退水系数 退水系数一般是用无降水或融雪时期,后一天径流量与前一天的比值,能够反映每日融水直接补给到径流量中的贡献比例。

$$k_{n+1} = xQ_n^{-y} \quad (5)$$

式中: k 为退水系数; Q 为日均流量,m³/s; x 和 y 为根据 Q_n 和 Q_{n+1} 的双对数散点图确定的2个常数。

表1列举中国寒区流域SRM积雪融水径流模拟过程中的退水系数,参照该系数的取值范围,本研究选取了寒区多个流域的融水径流退水系数,通过计算其算术平均值,最终确定了纳木错流域的退水系数方程中的2个常数 $x=1.05$, $y=-0.05$ 。

3 结果与讨论

3.1 纳木错流域冰川融水径流量估算

采用ArcGIS 10.0统计2次冰川编目数据,纳

表1 SRM积雪融水径流模拟退水系数

Tab. 1 Simulated recession coefficients of SRM in different basins

流域 Basin	方程常数 Constants of equation		来源 Sources
	x	y	
天山巩乃斯河流域 Gongnaisi River	0.99	-0.042 3	马虹等 Ma Hong, et al ^[28]
长江源区冬克玛底河 Dongkemadi River	0.95	-0.05	刘俊峰等 Liu Junfeng, et al ^[29]
黑河流域 Heihe River	1.032 4	-0.071 2	李弘毅等 Li Hongyi, et al ^[30]
青海湖流域 Qinghai Lake	1.01	-0.03	Zhang Guoqing, et al ^[31]
塔什库尔干河流域 Taxkorgan River	1.20	-0.074 1	刘文等 Liu Wen, et al ^[36]
乌鲁木齐河源区 Urumqi River	1.139 9	-0.040 7	怀保娟 Huai Baojuan ^[37]

木错流域冰川总面积由 195.89 km² 缩减为 182.45 km², 退缩速率达到 1.12 km²/a, 代入式(1) 可得冰川总体积由 53.99 km³ 变为 49.03 km³, 再代入式(2), 估算冰川年均消融量达到 0.41 km³, 即 4.10 亿 m³/a, 再除以冰川区分布面积, 则换算成冰川消融年均水当量 49.15 mm/a。通过查阅文献, 获得纳木错流域扎当冰川(5 400 m) 区域的降水量和冰川表面蒸发量, 并用来代表整个流域冰川区水量平衡

方程中降水量和蒸发量的参数取值, 结合冰川消融量代入式(3), 得到流域冰川区地表总径流深为 355.35 mm(表 2)。朱立平等^[26] 的研究结果是, 纳木错流域 1971—1991 年和 1992—2004 年, 冰川融水补给比例分别是 8.55% 和 11.48%, 流域冰川融水补给比例平均为 10.02%, 据此, 推算纳木错流域冰川年均径流深是 35.61 mm, 换算成融水径流量是 2.99 亿 m³/a。

表 2 纳木错流域冰川区水量平衡方程参数

Tab. 2 Water balance factors in the glacier area of Nam Co basin

参数指标 Parameter	时间段 Periods	平均值 Mean value	来源 Source
冰川区降水量 Precipitation in the glacier area/mm	1971—2008	406.70	康世昌等 Kang Shichang, et al ^[38]
冰川表面蒸发量 Glacier surface evaporation/mm	2009—2011	100.50	康世昌等 Kang Shichang, et al ^[38]
冰川消融量 Glacier ablation/mm	2002—2014	49.15	
冰川区地表径流深 Runoff depth in the glacier area/mm	—	355.35	

针对纳木错流域冰川消融的研究大都借助于多时相遥感影像资料, 通过统计冰川规模参数的变化来反映气候变化的影响, 研究内容主要包括冰川自动提取方法、冰川变化特性、冰川消融对气候变化响应规律、冰川融水量与湖泊水量的平衡关系等 4 个方面^[39-41]。在全球气候变暖背景下, 纳木错流域冰川退缩加剧, 并对该区域的整个环境产生较大影响; 但由于缺乏足够的站点数据, 这些研究只关注了纳木错流域冰川消融量, 针对冰川融水径流量的研究较少, 仅在流域中的扎当冰川(< 2 km²) 进行了长期、系统的观测和模拟, 包括冰川物质能量平衡的消融规律监测^[42], 夏季冰川融水径流规律模拟^[43-44] 等。笔者充分利用 2 次冰川编目数据, 通过建立水量平衡的方法, 估算纳木错流域的冰川融水量, 为青藏高原稀缺资料地区冰川消融研究, 提供一种简单方法。通过对比纳木错流域的冰川退缩率和年均融水径流量, 可以推算出在现有气候环境等条件不变的情况下, 纳木错流域冰川将在 200 年内消融殆尽。

3.2 纳木错流域积雪融水量估算

通过输入 SRM 积雪消融模拟软件各参数(图 2), 对纳木错流域积雪融水径流量进行估算。SRM 积雪消融模型的模拟结果显示, 纳木错流域年均融雪径流量模拟预测值达到 80.95 万 m³。每年春末夏初(5 月份), 季节性积雪提供数量可观的融水, 7—8 月份尽管整个流域融水径流量最大, 但主要是由冰川消融补给为主, 此时积雪融水量相对较少。对比流域内冰川年均融水径流量 2.99 亿 m³/a, 是

季节性积雪年均融水径流量的 38 倍。

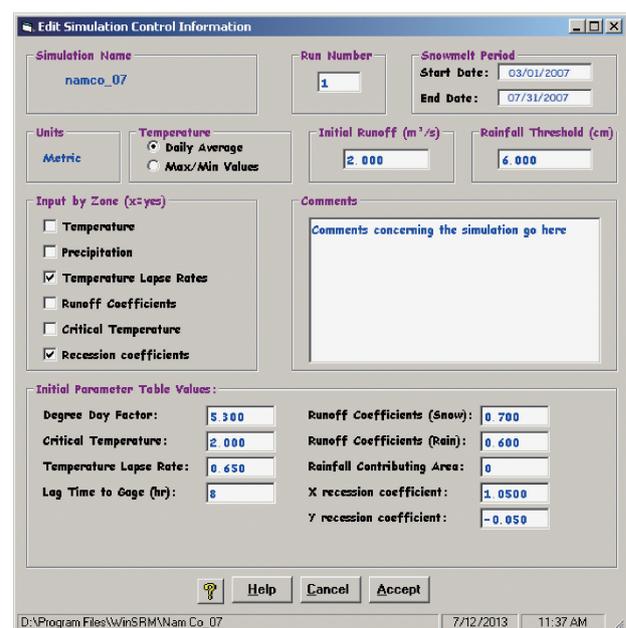


图 2 SRM 模拟软件参数设置

Fig. 2 Parameters of SRM

国内外学者针对纳木错流域积雪消融的研究, 目前主要集中于季节性积雪分布变化^[45-46] 和消融特性^[47], 较少涉及到积雪融水量的估算。笔者借助于 MODIS 遥感影像资料和气象水文数据, 结合高寒区其他流域 SRM 模型应用参数, 从而实现了青藏高原大尺度的积雪融水径流量估算; 但由于纳木错流域范围较大, 缺少水文径流数据, 目前, 只进行流域季节性积雪融水径流量的模拟预测, 并未与整个流域积雪融水径流的实测数据进行对比验证。

3.3 纳木错湖泊扩张与流域冰雪融水量关系

基于不同时期卫星遥感影像,对比纳木错流域湖泊和冰川面积的动态变化,进一步讨论气候变化

背景下,冰雪融水量对地表水资源变化的影响。查阅资料,获取纳木错流域近半个世纪湖泊面积变化情况(表3)。

表3 纳木错湖泊不同时期面积变化

Tab.3 Variations of Nam Co lake area in different periods

面积变化 Area change/km ²	变化率 Change rate/(km ² ·a ⁻¹)	时间段 Period	来源 Source
20.52	1.03	1970—1991	Wu Yanhong, et al ^[48]
17.63	1.76	1991—2000	
24.00	1.10	1970—1991	陈锋等 Chen Feng, et al ^[39]
24.90	2.80	1991—2000	
23.70	3.40	2000—2007	
32.09	1.07	1970—2000	马颖钊等 Ma Yingzhao, et al ^[49]
51.30	6.41	2000—2009	

近半个世纪纳木错流域湖泊面积持续增加,尤其近几年,湖泊扩增率明显加快。一些研究认为,冰川消融加剧、高山冻土退化及降水量增加,均可引起纳木错湖泊的扩张^[50]。纳木错是典型的内陆封闭湖泊,Zhou Shiqiao 等^[51]采用水量平衡方法,将纳木错流域划分为冰川区和非冰川区,2008年基于2个区域不同的径流系数,对湖泊水量进行估算,结果表明:降水和冰川融水分别占到入湖总水量的23%~28%和7%~22%。吴艳红等^[48]估算纳木错湖泊总储水量为816.85亿m³,2007年单纯季节性积雪消融量与湖泊总水量大概相差4个数量级;再根据研究,纳木错湖泊水量从1971—2004年,湖泊面积扩增95.38km²,而湖泊水量增加80.54亿m³。比较同时段流域内的冰川变化,冰川面积减少30.72km²,固态水储量减少111.73亿m³。

气温、降水和蒸发的变化,对湖泊的补给和消耗产生重要影响。其中,气温升高引起的冰川加速融化,是其中最为活跃的因子,而降雨和蒸发变化,则可以直接影响水量平衡的变化。纳木错流域东南侧念青唐古拉山冰川以小型冰川为主,对气候变化的响应更为敏感^[52]。通过搜集流域临近6个国家级气象站点(班戈、当雄、拉萨、那曲、申扎和日喀则)多年气象数据,在ArcGIS软件中进行插值处理,获得纳木错流域年均温数据(图3)。从1970年开始,纳木错流域气温增幅达到0.04℃/a,尤其近年来,增温幅度更为明显。而与之对应的则是流域冰川退缩加剧(冰川退缩率1.12km²/a),冰川融水径流量将近3亿m³/a,湖泊水量剧增(湖泊面积扩增率2.1km²/a),湖泊水量多年平均增加水量2.37亿m³/a,由此粗略推算,纳木错湖泊增加水量约为流域内冰

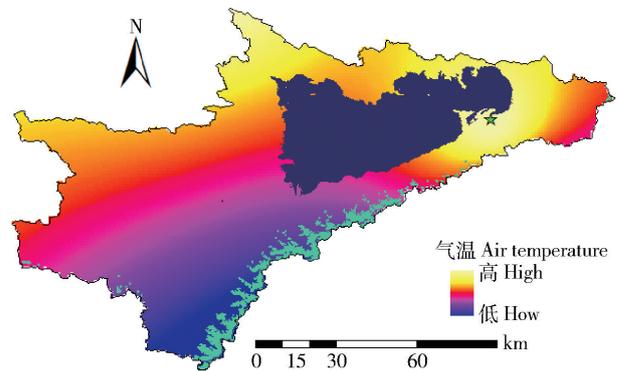


图3 纳木错流域气温插值(克里金法)

Fig.3 Air temperature interpolation in Nam Co basin (Kriging)

川融水量的80%,并远高于季节性积雪融水的补给量。高坛光等^[53]采用气温-辐射融冰法和ANDER-SIN与BRAUN融雪模拟方法,发现曲嘎切流域冰川消融补给占到整个流域的一半以上,随着流域降水的增加,冰川消融量虽在逐年增加,但在总径流的比例却逐渐减少。张国帅等^[54]通过径流分割法,对曲嘎切流域内冰川区和非冰川区产流进行分割,结果表明,冰川融水对流域径流的补给占到总径流量的60%~80%;因此,冰川融水在纳木错流域冰川分布区域占据着主要的径流补给来源。GaoTanguang等^[55]在J2000模型基础上,设计纳木错湖泊水位模拟的J2000水量平衡模型,情景模拟结果显示,纳木错湖泊水位上升是气温和降水双重作用影响的结果。由此可以推断,忽略降雨变化和积雪、冻土消融的补给,该区域冰川加剧消融所产生的大量融水径流,是构成纳木错湖泊扩张的重要原因之一;然而,在大尺度稀缺资料的高寒地区,仍需要结合遥感影像资料,加大观测工作,并进一步深入探讨气候变暖

背景下,冰川和湖泊的响应关系。

4 结论

纳木错流域冰川融水量采用冰川体积-径流量经验公式进行估算,流域年均冰川融水径流量是2.99亿 m^3/a ;积雪融水量采用SRM模型进行估算,流域年均积雪融水径流量是810万 m^3/a ,冰川融水量约是积雪融水量的38倍。本研究实现了稀缺资料的高寒地区冰川积雪融水量估算,并通过对比纳木错流域气温变化、冰川退缩和湖泊扩张之间的关系,可以初步推测随着气候变暖,纳木错流域东南侧念青唐古拉山大规模冰川的急剧消融,是造成纳木错湖泊扩张的重要原因之一。

5 参考文献

- [1] Swift D A, Nienow P W, Hoey T B. Basal sediment evacuation by subglacial meltwater: suspended sediment transport from Haut Glacier d'Arolla, Switzerland [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2005, 30(7): 867.
- [2] 姚檀栋,秦大河,沈永平,等. 青藏高原冰冻圈变化及其对区域水循环和生态条件的影响[J]. *自然杂志*, 2013, 35(3): 179.
Yao Tandong, Qin Dahe, Shen Yongping, et al. Cryospheric changes and their impacts on regional water cycle and ecological conditions in the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Chinese Journal of Nature*, 2013, 35(3): 179. (in Chinese)
- [3] 孙燕华,黄晓东,王玮,等. 2003—2010年青藏高原积雪及雪水当量的时空变化[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(6): 1337.
Sun Yanhua, Huang Xiaodong, Wang Wei, et al. Spatio-temporal changes of snow cover and snow water equivalent in the Tibetan Plateau during 2003—2010 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(6): 1337. (in Chinese)
- [4] 李治国. 近50 a气候变化背景下青藏高原冰川和湖泊变化[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(8): 1431.
Li Zhiguo. Glaciers and lakes changes on the Qinghai-Tibet Plateau under climate change in the past 50 years [J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(8): 1431. (in Chinese)
- [5] 段水强,曹广超,刘敦,等. 青海羌塘盆地近期湖泊扩张特征及成因[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(5): 1237.
Duan Shuiqiang, Cao Guangchao, Liu Tao, et al. The recent expansion features and cause of formation of the lakes in Qinghai Qiangtang Basin [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(5): 1237. (in Chinese)
- [6] 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研究[J]. *冰川冻土*, 2009, 31(1): 19.
Xin Xiaodong, Yao Tandong, Ye Qinghua, et al. Study of the fluctuations of glaciers and lakes around the Ranwu Lake of southeast Tibetan Plateau using remote sensing [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(1): 19. (in Chinese)
- [7] 包为民,瞿思敏. 冰川消融耦合模型研究[J]. *水科学进展*, 2001, 12(3): 318.
Bao Weimin, Qu Simin. Study on glaciology simulation model [J]. *Advances in Water Science*, 2001, 12(3): 318. (in Chinese)
- [8] 李弘毅,王建. 积雪水文模拟中的关键问题及其研究进展[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(2): 430.
Li Hongyi, Wang Jian. Key research topics and their advances on modeling snow hydrological processes [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(2): 430. (in Chinese)
- [9] 孙颖娜,付强,姜宁,等. 寒区冻土水文模拟模型研究若干进展[J]. *水文*, 2008, 28(4): 1.
Sun Yingna, Fu Qiang, Jiang Ning, et al. Research on hydrological frozen soil simulation model for cold area [J]. *Journal of China Hydrology*, 2008, 28(4): 1. (in Chinese)
- [10] Hock R. A distribute temperature-index ice and snowmelt model including potential direct solar radiation [J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 45(149): 101.
- [11] Hock R. Temperature index melt modeling in mountain areas [J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 282(1/4): 104.
- [12] 张勇,刘时银. 度日模型在冰川与积雪研究中的应用进展[J]. *冰川冻土*, 2006, 28(1): 101.
Zhang Yong, Liu Shiyin. Progress of the application of degree day model to study glaciers and snow cover [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(1): 101. (in Chinese)
- [13] Oerlemans J. Climate sensitivity of glaciers in southern Norway: application of an energy-balance model to Nigardsbreen, Hellstugubreen and Alftobreen [J]. *Journal of Glaciology*, 1992, 38(129): 223.
- [14] 张寅生,姚檀栋,蒲健辰. 我国大陆性山地冰川对气候变化的响应[J]. *冰川冻土*, 1998, 20(1): 3.
Zhang Yinsheng, Yao Tandong, Pu Jianchen. The Response of continental-type glaciers to climate change in China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1998, 20(1): 3. (in Chinese)

- [15] 张勇,刘时银,丁永建. 中国西部冰川度日因子的空间变化特征[J]. 地理学报, 2006, 61(1): 89.
Zhang Yong, Liu Shiyin, Ding Yongjian. Spatial variation of degree-day factors on the observed glaciers in western China [J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(1):89. (in Chinese)
- [16] 崔玉环,叶柏生,王杰,等. 乌鲁木齐河源1号冰川度日因子时空变化特征[J]. 冰川冻土, 2010, 32(2): 265.
Cui Yuhuan, Ye Bosheng, Wang Jie, et al. Analysis of the spatial-temporal variations of the positive degree day factors on the Glacier No. 1 at the head waters of the Urumqi River [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(2):265. (in Chinese)
- [17] Flowers G E, Clarke G K C. A multicomponent couple model of glacier hydrology, 1, theory and synthetic examples [J]. Journal of Geophysical Research, 2002, 107(B11):2287
- [18] Konya K, Matsumoto T, Naruse R. Surface heat balance and spatially distributed ablation modeling at Koryto Glacier, Kamchatka Peninsula, Russia [J]. Geografiska Annaler, Series A: Physical Geography, 2004, 86(4):337.
- [19] 曹梅盛,李新,陈贤章,等. 冰冻圈遥感[M]. 北京:科学出版社, 2006: 119-123.
Cao Meisheng, Li Xin, Chen Xianzhang, et al. Remote sensing of cryosphere [M]. Beijing: Science Press, 2006:119-123. (in Chinese)
- [20] 陈仁升,康尔泗,丁永建. 中国高寒区水文学中的一些认识和参数[J]. 水科学进展, 2014, 25(3): 307.
Chen Rensheng, Kang Ersi, Ding Yongjian. Some knowledge on and parameters of China's alpine hydrology [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(3): 307. (in Chinese)
- [21] 冯童,刘时银,徐君利,等. 1968—2009年叶尔羌河流域冰川变化:基于第一、二次中国冰川编目数据[J]. 冰川冻土, 2015,37(1):1.
Feng Tong, Liu Shiyin, Xu Junli, et al. Glacier change of the Yarkant River basin from 1968 to 2009 derived from the First and Second Glacier Inventories of China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(1):1. (in Chinese)
- [22] 孙美平,刘时银,姚晓军,等. 近50年来祁连山冰川变化:基于中国第一、二次冰川编目数据[J]. 地理学报, 2015, 70(9):1402.
Sun Meiping, Liu Shiyin, Yao Xiaojun, et al. Glacier changes in the Qilian Mountains in the past half century: based on the revised First and Second Chinese Glacier Inventory [J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(9):1402. (in Chinese)
- [23] Martinec J, Rango A, Roberts R. Snowmelt Runoff Model (SRM) user's manual. Updated Edition 2005, WinSRM 1. 10 [R]. USDA Jornada Experimental Range, New Mexico State University, Las Cruces, USA. <http://hydrolab.arsusda.gov/cgi-bin/srmhome>.
- [24] 施雅风. 简明中国冰川目录[M]. 上海:上海科学普及出版社,2005:170-180.
Shi Yafeng. Concise glacier inventory of China [M]. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 2005:170-180. (in Chinese)
- [25] 刘时银,姚晓军,郭万钦,等. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状[J]. 地理学报, 2015, 70(1):3.
Liu Shiyin, Yao Xiaojun, Guo Wanqin, et al. The contemporary glaciers in China based on the Second Chinese Glacier Inventory [J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(1):3. (in Chinese)
- [26] 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[J]. 科学通报, 2010,55(18):1789.
Zhu Liping, Xie Manping, Wu Yanhong. Quantitative analysis of lake area variations and the influence from 1971 to 2004 in the Nam Co Basin of the Tibetan Plateau [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(18):1789. (in Chinese)
- [27] 穆振侠. 高寒山区降水垂直分布规律及融雪径流模拟研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2010:172-198.
Mu Zhenxia. Research on vertical distribution law of precipitation and snowmelt runoff simulation in high cold alpine areas [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2010: 172-198. (in Chinese)
- [28] 马虹,程国栋. SRM融雪径流模型在西天山巩乃斯河流域的应用实验[J]. 科学通报,2003,48(19):2088.
Ma Hong, Cheng Guodong. Snowmelt runoff model applied in the Gongnaisi River [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(19):2088. (in Chinese)
- [29] 刘俊峰,杨建平,陈仁升,等. SRM融雪径流模型在长江源区冬克玛底河流域的应用[J]. 地理学报, 2006, 61(11): 1149.
Liu Junfeng, Yang Jianping, Chen Rensheng, et al. The simulation of snowmelt runoff model in the Dongkemadi River Basin, headwater of the Yangtze River [J]. Acta Geographic Sinica, 2006, 61(11):1149. (in Chinese)
- [30] 李弘毅,王建. SRM融雪径流模型在黑河流域上游的模拟研究[J]. 冰川冻土,2008,30(5):769.

- Li Hongyi, Wang Jian. The snowmelt runoff model applied in the upper Heihe River Basin [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(5):769. (in Chinese)
- [31] Zhang Guoqing, Xie Hongjie, Yao Tandong, et al. Quantitative water resources assessment of Qinghai Lake basin using Snowmelt Runoff Model (SRM) [J]. 2014, 519(A):976.
- [32] 黄晓东, 张学通, 李霞, 等. 北疆牧区 MODIS 积雪产品 MOD10A1 和 MOD10A2 的精度分析与评价[J]. 冰川冻土, 2007, 29(5):722.
Huang Xiaodong, Zhang Xuetong, Li Xia, et al. Accuracy analysis for MODIS snow products of MOD10A1 and MOD10A2 in northern Xinjiang Area [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(5):722. (in Chinese)
- [33] 谢健, 刘景时, 杜明远, 等. 念青唐古拉山西段高海拔陆-气系统水热特征[J]. 地理科学进展, 2010, 29(2):151.
Xie Jian, Liu Jingshi, Du Mingyuan, et al. Hydrothermal characteristics of the land-atmospheric system in an alpine area of west Nyainqentanglha Mountains [J]. *Progress in Geography*, 2010, 29(2):151. (in Chinese)
- [34] 万欣, 康世昌, 李延峰, 等. 2007—2011 年西藏纳木错流域积雪时空变化及其影响因素分析[J]. 冰川冻土, 2013, 35(6):1400.
Wan Xin, Kang Shichang, Li Yanfeng, et al. Temporal and spatial variations of snow cover and its effect factors in the Nam Co basin, Tibetan Plateau, 2007—2011 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(6):1400. (in Chinese)
- [35] 孜来布·阿不来提. 基于 GIS 与 RS 的融雪径流模型在乌鲁木齐河的应用[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2012:22-29
Zilaibu Abulaiti. Snowmelt runoff model based on GIS and RS in the Urumqi River [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2012:22-29. (in Chinese)
- [36] 刘文, 李智录, 李抗彬. SRM 融雪径流模型在塔什库尔干河流域的应用研究[J]. 水利技术监督, 2007, 15(3):43.
Liu Wen, Li Zhilu, Li Kangbin. Snowmelt runoff model applied in the Taxkorgan River [J]. *Technical Supervision in Water Resources*, 2007, 15(3):43. (in Chinese)
- [37] 怀抱娟, 李忠勤, 孙美平, 等. SRM 融雪径流模型在乌鲁木齐河源区的应用研究[J]. 干旱区地理, 2013, 36(1):41.
Huai Baojuan, Li Zhongqin, Sun Meiping, et al. Snowmelt runoff model applied in the headwaters region of Urumqi River [J]. *Arid Land Geography*, 2013, 36(1):41. (in Chinese)
- [38] 康世昌, 杨永平, 朱立平, 等. 青藏高原纳木错流域现代环境过程及其变化[M]. 北京:气象出版社, 2011:185-196.
Kang Shichang, Yang Yongping, Zhu Liping, et al. Modern environmental processes and changes in the Nam Co Basin, Tibetan Plateau [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2011:185-196. (in Chinese)
- [39] 陈锋, 康世昌, 张拥军, 等. 纳木错流域冰川和湖泊变化对气候变化的响应[J]. 山地学报, 2009, 27(6):641.
Chen Feng, Kang Shichang, Zhang Yongjun, et al. Glaciers and lake change in response to climate change in the Nam Co basin, Tibet [J]. *Journal of Mountain Science*, 2009, 27(6):641. (in Chinese)
- [40] Bolch T, Yao Tandong, Kang Shichang, et al. A glacier inventory for the western Nyainqentanglha Range and the Nam Co Basin, Tibet, and glacier changes 1976—2009 [J]. *The Cryosphere*, 2010, 4(3):419.
- [41] Wang Xu, Florian S, Zhou Aiguo, et al. Glacier and glacial lake changes and their relationship in the context of climate change, Central Tibetan Plateau 1972—2010 [J]. *Global and Planetary Change*, 2013, 111(12):246.
- [42] 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[J]. 冰川冻土, 2007, 29(3):360.
Zhou Guangpeng, Yao Tandong, Kang Shichang, et al. Mass balance of the Zhadang Glacier in the central Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(3):360. (in Chinese)
- [43] Yu Wusheng, Yao Tandong, Kang Shichang, et al. Different region climate regimes and topography affect the changes in area and mass balance of glaciers on the north and south slopes of the same glacierized massif (the West Nyainqentanglha Range, Tibetan Plateau) [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 495(2):64.
- [44] 高坛光, 康世昌, 周石砢, 等. 纳木错曲嘎切流域夏季冰川水文特征初步研究[J]. 冰川冻土, 2009, 31(4):725.
Gao Tanguang, Kang Shichang, Zhou Shiqiao, et al. A study of the summer hydrological features of glaciers in the Qugaqie River, Nam Co Basin [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(4):725. (in Chinese)
- [45] Kropacek J, Chen Feng, Markus Alle, et al. Temporal

- and spatial aspects of snow distribution in the Nam Co Basin on the Tibetan Plateau from MODIS data[J]. *Remote Sensing*, 2010, 2(12): 2700.
- [46] Zhang Bing, Wu Yanhong, Lei Liping, et al. Monitoring changes of snow cover, lake and vegetation phenology in Nam Co Lake Basin (Tibetan Plateau) using remote SENSING (2000—2009) [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2013, 39(2): 224.
- [47] 陈飞,蔡强国,孙莉英,等. 纳木错流域冰雪消融特性研究及融水量估算[J]. *山地学报*, 2015, 33(4): 465.
Chen Fei, Cai Qiangguo, Sun Liying, et al. Melting characteristics and ablation calculation in Nam Co basin [J]. *Mountain Research*, 2015, 33(4):465. (in Chinese)
- [48] Wu Yanhong, Zhu Liping. The response of lake-glacier area change to climate variations in Nam Co Basin, central Tibetan Plateau, during the last three decades [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2008, 18(2):177.
- [49] 马颖钊,易朝路,吴家章,等. 1970—2009年纳木错湖泊面积扩张的遥感卫星观测证据及原因之商榷[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(1):81.
Ma Yingzhao, Yi Chaolu, Wu Jiazhang, et al. Lake surface expansion of Nam Co during 1970—2009: evidence of satellite remote sensing and cause analysis [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(1):81. (in Chinese)
- [50] Zhu Liping, Xie Manping, Wu Yanhong. Quantitative analysis of lake area variations and the influence factors from 1971 to 2004 in the Nam Co Basin of the Tibetan Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(13): 1294.
- [51] Zhou Shiqiao, Kang Shichang, Chen Feng, et al. Water balance observations reveal significant subsurface water seepage from Lake Nam Co, south-central Tibetan Plateau. *Journal of Hydrology*, 2013, 491(1): 89.
- [52] Wang Xin, Xie Zichu, Li Qiaoyuan, et al. Sensitivity analysis of glacier systems to climate warming in China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2008, 18(2): 190.
- [53] 高坛光. 青藏高原纳木错流域水文过程观测与模拟研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2011:18-36.
Gao Tanguang. Analysis and simulation of the hydrological processes in the Nam Co Basin, Tibetan Plateau [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2011:18-36. (in Chinese)
- [54] 张国帅. 青藏高原纳木错流域扎当冰川能量物质平衡和冰川径流过程研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2013:69-84.
Zhang Guoshuai. A study of Zhadang glacier energy and mass balance and its hydrological processes in Nam Co basin, central Tibetan Plateau [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2013:69-84. (in Chinese)
- [55] Gao Tanguang, Kang Shichang, Krause P, et al. A test of J2000 model in a glacierized catchment in the central Tibetan Plateau [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 65(6):1651.