

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0102

HE Qingshan, YANG Jianping, CHEN Hongju, et al. Study on hydrological regulation function of glaciers in the cold region basins of western China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(5):1512–1522. [贺青山, 杨建平, 陈虹举, 等. 中国西部寒区流域冰川水文调节功能研究[J]. 冰川冻土, 2021, 43(5):1512–1522.]

中国西部寒区流域冰川水文调节功能研究

贺青山^{1,2}, 杨建平¹, 陈虹举^{1,2}, 王彦霞^{1,2}, 唐凡^{1,2}, 冀钦^{1,2}, 葛秋伶^{1,2}

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院冰冻圈科学国家重点实验室, 甘肃兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 冰川作为固体水库以“削峰填谷”的形式显著调节径流丰枯变化, 冰川的水文调节功能对于中国西北干旱区至关重要。使用现有VIC-CAS模型模拟得到中国西部寒区2014—2100年径流预估数据, 从趋势和波动变化相结合的视角, 基于径流变差系数法, 构建了冰川水文调节指数($Glacier_R$), 分析了9个寒区流域冰川径流变化的稳定性, 详细剖析了历史时期(1971—2010年)和未来到21世纪末这些流域冰川水文调节功能的强弱变化。结果表明: 历史时期及RCP2.6和RCP4.5情景下, 除长江流域外, 青藏高原其余流域的冰川径流减小时间节点为2020s, 西北内陆河流域则为2010s。历史时期及RCP2.6和RCP4.5情景下至21世纪末, 尽管西部寒区大部分流域的冰川径流呈减少趋势, 但波动幅度减小或无明显变化, 冰川径流稳定性增强或无变化。总体上, 西北内陆河流域的冰川水文调节功能较高, 青藏高原流域的冰川水文调节功能较低。RCP2.6和RCP4.5情景下, 至21世纪末, 西部寒区各流域冰川水文调节功能均呈现减弱趋势, 西北内陆河流域减弱更加显著, 如RCP4.5情景下, 木扎提河冰川水文调节功能降幅达25.4%, 而青藏高原各流域的冰川水文调节功能一直处于较低水平。从年代际变化来看, 1970s—2010s是寒区流域冰川水文调节功能较强的时期, 1980s和2000s两个时段冰川水文调节功能尤强; RCP2.6和RCP4.5情景下, 未来到21世纪末, 冰川调节功能明显减弱。减弱的时间节点不同, 最早为1970s, 最晚为2020s。

关键词: 寒区流域; 冰川径流; 稳定性; 冰川水文调节功能

中图分类号: P333.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2021)05-1512-11

0 引言

冰冻圈服务是最近几年由中国科学家率先提出的科学概念及新的重要研究领域^[1-2], 并于2020年在*Nature*发布^[3]。作为冰冻圈的功能与服务之一, 冰川的水文调节功能及其重要性正被逐渐认识。冰川作为固体水库表现出显著的调节径流变化的作用^[4-7], 相关研究最早发现于1961年^[8]; 之后, 在亚洲喜马拉雅山地区、欧洲阿尔卑斯山、北美洲落基山脉地区的冰川流域水文研究过程中, 相继观测与证实了冰川的径流调节作用^[9-15]。

目前有关冰川的水文调节作用, 尚缺乏有效的定量评估方法。纵观国内外研究现状, 相关重要研

究进展主要有两点: ①界定了流域径流有稳定调节作用的临界冰川覆盖率。相关研究表明, 冰川作为固体水库通过自身变化在年和季节尺度调节径流, 与没有冰川的流域相比, 有冰川覆盖的流域其径流变化小, 且更加稳定^[4,14,16], 而且冰川覆盖面积越大, 其对径流变化的影响就越强^[4,11]。加拿大落基山脉东坡南、北萨斯喀彻温河流域的研究显示, 当流域冰川覆盖率大于3%时, 冰川对径流的年内调节效果明显^[14], 而在中国西部地区主要流域, 当冰川覆盖率超过5%时, 冰川才具有显著的调节作用^[4]。②提出了判断冰川对流域径流具有调节作用的静态界定指标。Hopkinson等^[17]在研究加拿大阿尔伯塔省班夫弓河流域冰川消融对河流径流的影

收稿日期: 2021-06-17; 修订日期: 2021-09-17

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA23060704; XDA19070501)资助

作者简介: 贺青山, 博士研究生, 主要从事冰冻圈与区域可持续发展研究. E-mail: heqingshan@nieer.ac.cn

通信作者: 杨建平, 研究员, 主要从事气候变化风险与适应、冰冻圈与区域可持续发展研究. E-mail: jianping@lzb.ac.cn

响时,提出通过对比流域总径流量变差系数(C_B)与流域总径流量与冰川融水径流量之差的变差系数(C_W),来确定冰川是否对流域径流具有调节能力。该方法的优点是能够精确判定某一流域在研究时段或观测时段内冰川是否对河流径流具有调节功能,缺点是只从径流视角揭示冰川的调节作用/功能,无法判别冰川调节功能的强弱、无法表征这种调节功能的动态变化。最近10~20年以来,绝大多数研究主要集中于冰川物质与融水径流变化的未来预估方面^[17-22],有关冰川径流调节作用的评估方法及其定量成果研究则鲜见报道。

综上所述,当前有关冰川水文调节功能的研究尚处在定性认识水平,普遍认为随着冰川加速萎缩、物质亏损,冰川径流增加,但在到达峰值后快速减少,冰川的径流调节功能减弱或消失,将导致多数冰冻圈流域径流丰枯不均、灾害风险增加,特别是干旱地区流域^[6,18,20]。受全球气候持续增暖影响,冰川整体在变热、稳定性减弱^[23],未来冰川退缩的速度将不断增加,冰川变化可能超过所有模型模拟的预期,冰川变化引发的极端水文事件将进入高发期^[24]。这些变化势必对西部水资源持续利用、绿洲生态和环境安全以及社会经济可持续发展产生广

泛和深刻的影响^[25-26]。因此,从冰川调节功能切入,研究其定量评估方法,评估冰川水文调节功能及其变化,特别是极端变化对西北干旱区社会经济发展的影响是当前关注的焦点,也是国家的重要战略需求。

本文使用中国西部寒区流域的冰川径流及总径流模拟预估数据,从趋势与波动变化视角,分析冰川径流的稳定性,在此基础上依据径流变差系数法定义冰川水文调节指数,量化冰川径流调节功能,分析不同时期、RCP2.6和RCP4.5两种情景下冰川水文调节功能的动态变化,以为寒旱区水资源管理与合理使用提供参考。

1 数据与方法

1.1 数据来源

本文选取中国西部寒区9个流域进行冰川水文调节功能研究,各流域分布情况详见图1。文中所用数据主要分为两部分:一是西部寒区流域年总径流量模拟及预估数据,二是年冰川径流量模拟及预估数据,数据来自国家重点基础研究发展计划项目“冰冻圈变化的影响与适应研究”第六课题组的研究成果^[6,22,27]。

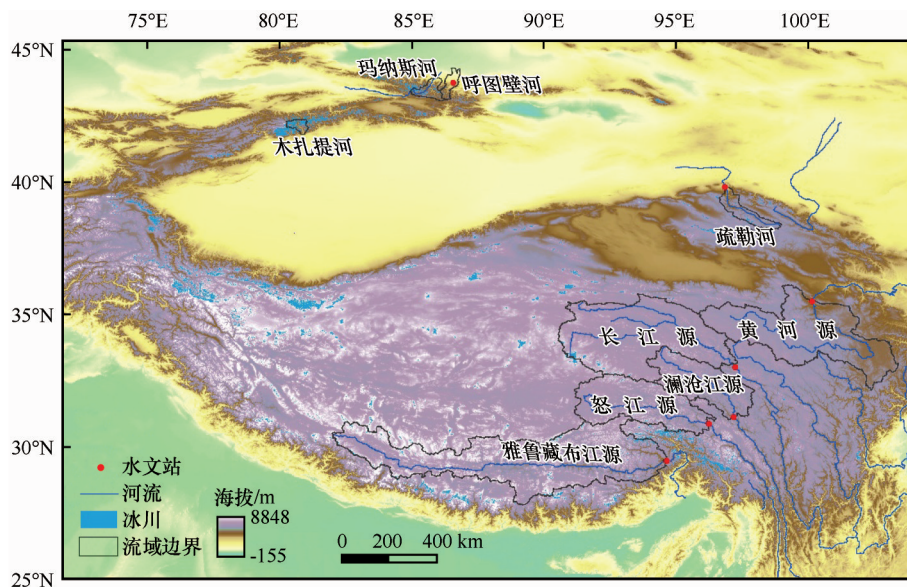


图1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area

该预估数据是运用CMIP5 RCP2.6和RCP4.5情景的统计降尺度气候模式结果驱动冰冻圈流域水文模型(VIC-CAS)而获得的。VIC-CAS模型数据输入包括气象强迫数据(日降水量,日平均风速,

日平均、最高和最低气温),未来气候情景数据,第一次冰川编目数据和土壤数据等。未来气候情景数据选取数据完整的19个GCM,采用QDM(bias-correction with quantile delta mapping)统计降尺度方

法^[28-29],对 GCM 的输出数据进行降尺度,提取研究流域 1971—2005 年和 RCP2.6 和 RCP4.5 排放情景下的 2041—2070 年的模拟数据,分析 2041—2070 年相比基准期(1971—2005 年)平均的气温和降水量变化情况。因不同气候模式在青藏高原和西北内陆地区表现有较大差异,青藏高原选取 5 个表现较好的 GCM 开展径流未来变化研究^[22],西北内陆地区选取 4 个表现较好的 GCM 开展径流的未来变化研究^[27],基准期为 1971—2013 年,预测期为 2014—2100 年(表 1)。冰川数据采用第一次冰川编目的数据作为模型的输入,第二次冰川编目的冰川数据作为模型

的校正和验证数据。利用观测的 1971—2005 年月径流数据和两次中国冰川编目的冰川面积变化数据开展模型多目标参数化校正和验证。月径流验证结果表明,通过调整模型参数,模型能够很准确地模拟率定期和验证期的月径流量。在模型校正期和验证期,月径流模拟的纳什效率系数(N_s)和确定系数(R^2)均高于 0.76,且模拟时段的相对偏差(Er)也很小,均小于 2%^[22,27]。由于 RCP2.6 和 RCP4.5 两种低中排放情景,能够较好反映研究区未来径流变化情况,故本研究除木扎提河采用了 RCP4.5 情景外,其余流域两种情景的变化均包括,详见表 1。

表 1 中国西部寒区流域径流数据统计

Table 1 Runoff data statistics in the cold region basins of western China

流域	冰川径流占总 径流比例/%	冰川面积占流域 面积比例/%	控制水文站	气候模式	RCP 情景		文献 来源
					RCP2.6	RCP4.5	
黄河源	0.35	0.10	唐乃亥水文站	CSIRO-MK3.6.0	√	√	[22]
长江源	3.73	0.89	直门达水文站	HadGEM2-ES	√	√	[22]
澜沧江源	1.34	0.41	昌都水文站	MIROC 5	√	√	[22]
怒江源	4.36	1.38	嘉玉桥水文站	MIROC-ESM	√	√	[22]
雅鲁藏布江源	5.48	2.08	奴下水文站	MIROC-ESM-CHEM	√	√	[22]
木扎提河	66.81	48.20	阿哈布隆水文站	BCC-CSM1.1(m)	—	√	[27]
呼图壁河	6.62	3.90	石门水文站	CanESM2	√	√	[6]
玛纳斯河	20.27	11.79	肯斯瓦特水文站	GFDL-CM3	√	√	[6]
疏勒河	23.10	3.54	昌马水文站	IPSL-CM5A-LR	√	√	[6]

注:冰川径流占总径流比例为 1971—2010 年的平均值。

1.2 研究方法

本文利用年冰川径流时间序列的变化趋势值和波动特征值分析冰川径流的稳定性,考虑到小的周期性波动对原始序列数据的干扰,分三个时段对各流域 40 年(1971—2010 年、2021—2060 年和 2061—2100 年)的年冰川径流数据进行 5 年滑动平均,再用 5 年滑动平均序列数据计算变化趋势值和波动特征值。

(1) 变化趋势值

建立中国西部寒区各流域历史时期及各 RCP 情景下年冰川径流时间序列,时间序列均为 40 年,以时间 t_i 为自变量,年冰川径流量 y_i 为因变量,建立一元线性回归方程。

$$\hat{y}_i = a + bt_i \quad (1)$$

式中: a 和 b 分别为回归常数和回归系数,利用最小二乘法求得。

(2) 波动特征值

y_i 与线性回归序列 \hat{y}_i 的残差绝对值序列用 z_i 表

示,建立以时间 t_i 为自变量,年冰川径流量残差绝对值序列 z_i 为因变量的一元线性回归方程。

$$\hat{z}_i = c + dt_i \quad (2)$$

同理,利用最小二乘法可求出回归常数 c 和回归系数 d 。

(3) 径流变差系数

Hopkinson 等^[17]在研究加拿大阿尔伯塔省班夫弓河流域冰川消融对河流径流的影响时,提出通过对比流域总径流量的变差系数(C_B)与非冰川径流量的变差系数(C_W)^[17],确定冰川对径流的调节能力,公式为

$$C_B = \sigma_B / R_B \quad (3)$$

$$C_W = \sigma_W / R_W \quad (4)$$

式中: C_B 为总径流量的变差系数; C_W 为非冰川径流量(总径流量减去冰川融水径流量)的变差系数; σ_B 为总径流量标准差; σ_W 为非冰川径流量标准差; R_B 为总径流量平均值; R_W 为非冰川径流量平均值。如果 $C_B < C_W$,表明冰川对流域径流具有调节作用。

(4) 冰川水文调节指数

基于上述径流变差系数,定义冰川水文调节指数,用于表征冰川调节功能的强弱,运用划分年代际的方法分析了冰川水文径流调节功能的动态变化,公式为

$$Glacier_R = C_B / C_w \quad (5)$$

式中: $Glacier_R$ 为冰川水文调节指数; C_B 、 C_w 含义同上。 $Glacier_R$ 值越小,表明冰川径流调节功能越大。

2 冰川径流稳定性分析

在气候学有关研究中,波动变化可以指示气候要素变化的振荡幅度,主要指气候要素变化的振荡强弱,可分为波动增强、波动减弱、无明显波动特征三种模态^[30]。从冰川径流变化来看,波动减弱则冰川径流变化幅度减小,稳定性增强,对当地有利;波动增强则冰川径流变化幅度增大,稳定性减弱,发生极端事件的可能性增加,对当地不利。中国西部寒区流域冰川径流变化趋势及冰川径流波动特征如表2所示。

就趋势变化而言,1971—2010年冰川径流呈现增加趋势的流域有长江源、澜沧江源、玛纳斯河和疏勒河。其中,长江源冰川径流增加幅度最大,增速为 $0.6 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot (10\text{a})^{-1}$,通过了0.01显著性水平检验。冰川径流呈现减少趋势的流域有黄河源、怒江源、雅鲁藏布江源、木扎提河和呼图壁河。其中,雅鲁藏布江源冰川径流减少幅度最大,减少速率为 $1.385 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot (10\text{a})^{-1}$,通过了0.01显著性水平检验。RCP2.6和RCP4.5情景下,青藏高原各流域的

冰川径流均呈现出比较明显的减少趋势。其中,雅鲁藏布江源冰川径流减少幅度最大,RCP2.6情景下,2021—2060年,该江源冰川径流减少速率为 $2.914 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。西北内陆地区各流域冰川径流变化呈现出不同的变化趋势。RCP2.6情景下,2021—2060年,冰川径流均呈现出减少趋势。其中,玛纳斯河冰川径流减少幅度最大,冰川径流减少速率为 $0.424 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。RCP4.5情景下,2061—2100年,呼图壁河的冰川径流呈现增加趋势,冰川径流增加速率为 $0.002 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。同时,木扎提河、玛纳斯河和疏勒河的冰川径流呈现减少趋势,其中,玛纳斯河冰川径流减少幅度最大,冰川径流减少速率为 $0.173 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。

就波动变化而言,1971—2010年中国西部寒区大部分流域的冰川径流波动幅度呈减小趋势,这些流域包括长江源、澜沧江源、怒江源、玛纳斯河和疏勒河。其中,怒江源冰川径流波动减弱幅度最大,波动特征值为 $-0.138 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。这表明上述5个流域的冰川径流处于从不稳定到稳定状态。黄河源、木扎提河、呼图壁河的冰川径流无明显波动,表明这3个流域的冰川径流处于较稳定状态。雅鲁藏布江的冰川径流波动幅度呈增强趋势,波动特征值为 $0.091 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot (10\text{a})^{-1}$,表明该流域的冰川径流处于不稳定状态。

RCP2.6和RCP4.5情景下,2021年至21世纪末,中国西部寒区大部分流域的冰川径流无明显波动,如黄河源、澜沧江源、木扎提河、呼图壁河和疏勒河的冰川径流波动特征值变化均很小,表明大部

表2 中国西部寒区流域冰川径流变化趋势及波动特征

Table 2 Variation trend and fluctuation characteristics of glacier runoff in the cold region basins of western China

时段	一元线性 回归方程的 回归系数	黄河源	长江源	澜沧 江源	怒江源	雅鲁藏 布江源	木扎 提河	呼图 壁河	玛纳 斯河	疏勒河
1971—2010年	变化趋势值 b	-0.00010	0.06040**	0.01270**	-0.07490**	-0.13850*	-0.00190**	-0.00110	0.00820	0.02510**
	波动特征值 d	-0.00070	-0.00350	-0.00270	-0.01380	0.00910	0.00004	-0.00010	-0.00220	-0.00170
2021—2060年 (RCP2.6)	变化趋势值 b	-0.00460**	-0.05060**	-0.02470**	-0.09060**	-0.29140**	—	-0.00110**	-0.03740**	-0.04200**
	波动特征值 d	0.00020	-0.00630**	-0.00020	-0.00140	0.00390	—	0.00004	-0.00290	0.00001
2061—2100年 (RCP2.6)	变化趋势值 b	-0.00040	-0.03340**	-0.00260**	-0.00920**	-0.04070**	—	-0.00030	-0.0070**	-0.00930**
	波动特征值 d	-0.00040	-0.00050	0.00002	-0.00040	0.00200	—	0.00001*	0.00030	0.00003
2021—2060年 (RCP4.5)	变化趋势值 b	-0.00380**	-0.05520**	-0.02790**	-0.0960**	-0.24130**	-0.00120**	-0.00190**	-0.04240**	-0.03860**
	波动特征值 d	-0.00050	-0.00390*	-0.00110*	-0.00550*	0.00330	0.00002	-0.00020	0.00170	0.00040
2061—2100年 (RCP4.5)	变化趋势值 b	-0.00410**	-0.05430**	-0.00500**	-0.02250**	-0.15520**	-0.00110**	0.00020	-0.01730**	-0.01450**
	波动特征值 d	0.00004	0.00170	0.00003	-0.00010	0.00850**	0.00004*	0.00003*	-0.00230**	0.00004**

注: *表示通过了0.05显著性水平检验, **表示通过了0.01显著性水平检验。

分流域冰川径流均处于较稳定状态。长江源、怒江源和玛纳斯河冰川径流波动幅度呈减弱趋势,表明冰川径流从不稳定变为稳定状态,其中,怒江源波动减弱趋势最明显,波动特征值从历史时期的 $-0.138 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot (10\text{a})^{-1}$ 变化为 $-0.001 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot (10\text{a})^{-1}$ (RCP4.5 情景)。RCP2.6 和 RCP4.5 情景下,2021—2060 年,雅鲁藏布江源冰川径流波动增强幅度呈减小趋势,2061—2100 年,冰川径流波动增强幅度呈增大趋势;RCP4.5 情景下,该流域的冰川径流波动特征值为 $0.085 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot (10\text{a})^{-1}$,通过了 0.01 显著性水平检验。这表明雅鲁藏布江源的冰川径流在未来时期将持续处于不稳定状态。

综上所述,历史时期及 RCP2.6 和 RCP4.5 情景下至 21 世纪末,中国西部寒区大部分流域的冰川径流呈减少趋势,冰川径流的波动幅度减小或无明显

变化,冰川径流稳定性增强或无变化。

3 冰川水文调节功能变化分析

3.1 冰川径流年代际变化

1970s—2000s,青藏高原各流域冰川径流呈现波动变化趋势(图2),其中,雅鲁藏布江源的冰川融水径流量最大,多年平均值达 $27.90 \times 10^8 \text{ m}^3$ [图2(e)],怒江源次之,长江源、澜沧江源和黄河源的冰川融水径流量较小,多年平均值介于 $0.70 \times 10^8 \sim 4.54 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。RCP2.6 和 RCP4.5 情景下,2020s (2021—2030 年)长江源冰川径流继续增加,2030s (2031—2040 年)后开始下降[图2(b)],黄河源、澜沧江源、怒江和雅鲁藏布江源的冰川径流在 21 世纪初(2020s)已出现时间减弱节点。到 21 世纪末,青藏高原各流域冰川径流均呈现下降趋势。

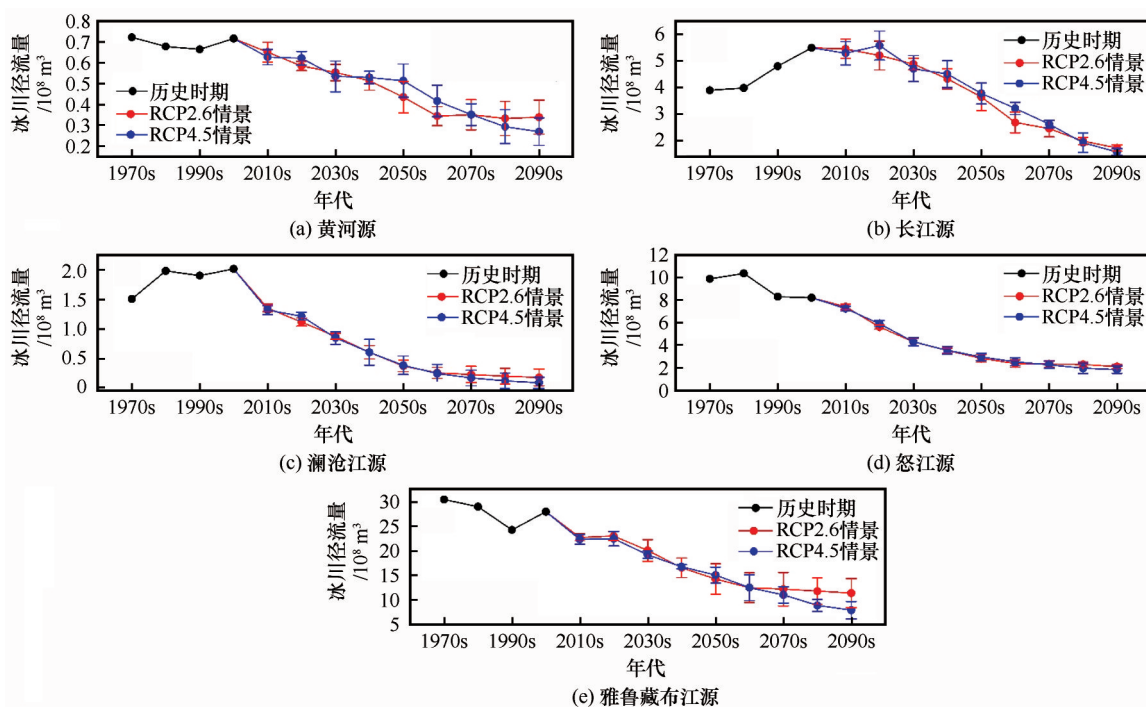


图2 RCP2.6 及 RCP4.5 情景下青藏高原流域冰川径流年代际变化

Fig. 2 Interdecadal variation of glacier runoff in the basins of the Qinghai-Tibet Plateau under RCP2.6 and RCP4.5 scenarios

西北内陆地区 4 个流域的冰川径流亦呈现波动变化趋势(图3)。1970s—2000s,木扎提河的冰川融水径流量最大[图3(d)],多年平均值为 $9.54 \times 10^8 \text{ m}^3$,玛纳斯河和疏勒河次之,呼图壁河的冰川融水径流量较小。RCP2.6 和 RCP4.5 情景下,21 世纪初(2010s)木扎提河、玛纳斯河和疏勒河的冰川径流达到最大值,2010s 后呈现下降趋势,出现时间减弱节点,木扎提河和疏勒河冰川径流减少趋势较明

显,呼图壁河的冰川径流呈现缓慢减少趋势。

3.2 冰川水文调节功能总体变化

历史时期(1971—2010 年),中国西部寒区各流域冰川水文调节功能呈现不同幅度变化(图4)。在西北内陆地区,各流域冰川水文调节功能变幅较大,其中,木扎提河冰川水文调节功能最高,冰川水文调节指数($Glacier_r$)为 0.303,疏勒河和玛纳斯河次之, $Glacier_r$ 分别为 0.747 和 0.779,呼图壁河最

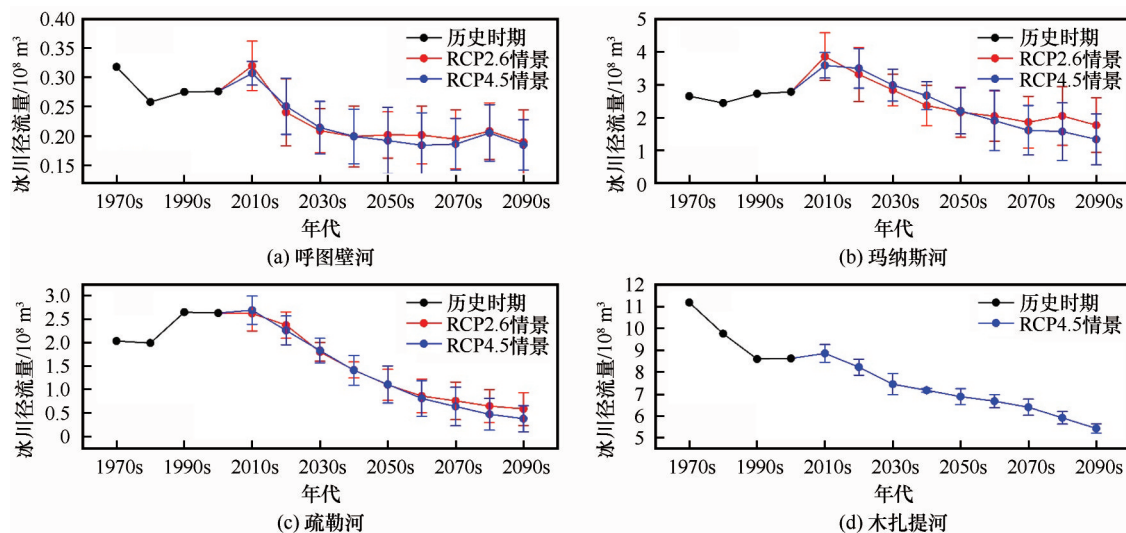


图3 RCP2.6及RCP4.5情景下西北内陆河流域冰川径流年代际变化

Fig. 3 Interdecadal variation of glacier runoff in the northwest inland river basins under RCP2.6 and RCP4.5 scenarios

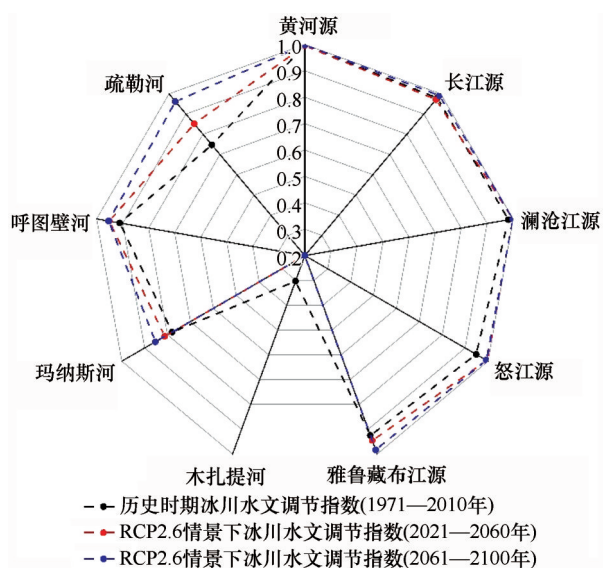


图4 历史时期及RCP2.6情景下中国西部寒区流域冰川水文调节指数总体变化

Fig. 4 Overall changes of glacier hydrological regulation index in the cold region basins of western China in historical period and under RCP2.6 scenario

低, $Glacier_R$ 为 0.911。在青藏高原, 5 大江源流域的冰川水文调节功能均处于较低水平, $Glacier_R$ 介于 0.925~0.997。

未来到 21 世纪末, 中国西部寒区各流域冰川水文调节功能均呈现不同程度的下降趋势 (图 4~5)。RCP2.6 情景下, 西北内陆地区 3 个流域中, 疏勒河冰川水文调节功能下降幅度最大, 降幅达 12.99%, 玛纳斯河次之, 降幅为 5.04%, 呼图壁河降幅最小 (图 4)。青藏高原的 5 个流域中, 雅鲁藏布江的冰川水文调节功能下降幅度最大, 降幅为

3.97%, 其余 4 个流域冰川水文调节功能一直处于较低水平, $Glacier_R$ 介于 0.972~1.000 (图 4)。RCP4.5 情景下, 西北内陆地区 4 个流域中, 木扎提河冰川水文调节功能下降幅度最大, 降幅达 25.40%, 疏勒河次之, 玛纳斯河和呼图壁河降幅很小 (图 5)。青藏高原的 5 个流域中, 长江源的冰川水文调节功能下降幅度最大, 降幅为 3.62%, 雅鲁藏布江源次之, 降幅为 2.15%, 其余 3 个流域冰川水文调节功能一直处于较低水平, $Glacier_R$ 介于 0.989~1.000 (图 5)。

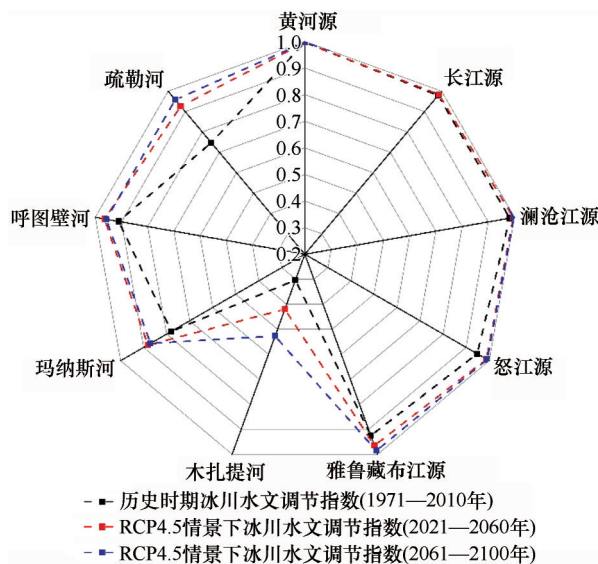


图5 历史时期及RCP4.5情景下中国西部寒区流域冰川水文调节指数总体变化

Fig. 5 Overall changes of glacier hydrological regulation index in the cold region basins of western China in historical period and under RCP4.5 scenario

3.3 冰川水文调节功能年代际变化

为了解西部寒区各流域冰川水文调节功能的动态变化,以10年作为一个时段,计算冰川水文调节指数,详细剖析过去至21世纪末冰川水文调节功能的年代际变化。

3.3.1 青藏高原流域

1970s—2090s,青藏高原五大江源流域的冰川水文调节功能在波动中呈减弱趋势(图6)。在这一总变化趋势下,可细分为三个阶段:1970s—2010s、

2010s—2050s 和 2050s—2090s。1970s—2010s,即历史时期,冰川水文调节功能呈现变化波动幅度大、调节功能强的特征(长江源除外);2010s—2050s,冰川水文调节功能变化明显有所缓和,但长江源流域呈现出较大差异性,此阶段其冰川水文调节功能增强,处于相对最强的调节功能期,只是RCP4.5情景下波动起伏较大,而RCP2.6下比较稳定。2050s—2090s,两种情景下各流域调节功能进一步减弱,并保持平稳状态。

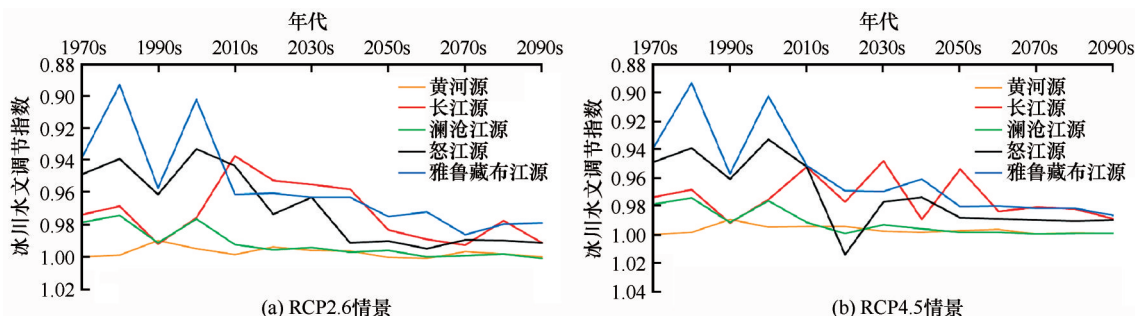


图6 历史时期及各RCP情景下青藏高原流域冰川水文调节指数年代际变化

Fig. 6 Interdecadal variation of glacier hydrological regulation index in the basins of the Qinghai-Tibet Plateau in historical period and under RCP scenarios : RCP2. 6 scenario (a), and RCP4. 5 scenario (b)

五大江源流域比较而言,雅鲁藏布江源流域冰川水文调节功能最大,在历史时期和2050s—2090s RCP2.6情景下表现尤为明显;其他江源区依次为怒江源、长江源、澜沧江源与黄河源流域(1970s—2010s)。黄河源流域冰川水文调节功能最小,且在整个研究时期保持在一个较低水平, $Glacier_r$ 介于0.99~1.00。图6显示,五大江源流域冰川水文调节功能减弱的起始时间节点存在一定差异,雅鲁藏布江源和澜沧江源流域为1980s,怒江源流域为2000s,长江源流域为2010s,黄河源流域为1990s。尽管存在这种不同,但一个事实就是,2010s以来青藏高原五大江源流域冰川水文调节功能均已处于减弱状态,1970s—2010s是青藏高原冰川水文调节功能较强的时期。

3.3.2 西北内陆河流域

1970s至21世纪末,西北内陆地区各流域冰川水文调节功能亦表现为减弱趋势。其中,1970s—2010s调节功能相对较强,且变化起伏较大,位于祁连山西部的疏勒河流域和天山北麓的玛纳斯河流域冰川水文调节功能变化尤为剧烈(图7);2010s之后,不论是RCP2.6,还是RCP4.5情景,冰川调节功能变化明显减弱,除疏勒河流域减弱幅度较大之外,其他流域变化相对和缓。

在西北内陆地区,研究流域的冰川水文调节功能变化迥异。位于天山南坡的木扎提河调节功能相对最强,1970s—2090s尽管其调节功能呈减弱趋势,但在RCP4.5情景下其 $Glacier_r$ 仍介于0.20~0.51,表明其调节功能处于较高水平。疏勒河流域的冰川水文调节功能仅次于木扎提河流域,但其在历史时期变化剧烈,2000s后快速减弱。玛纳斯河流域冰川水文调节功能变化阶段性特征明显,以2020s年代为界,RCP2.6情景下2020s之前波动中增强,2020s之后波动中减弱,RCP4.5情景下2020s之前减弱较快,2020s之后减弱比较和缓。呼图壁河冰川调节功能较小,变化和缓,且一直保持较稳定水平(图7)。

西北内陆河诸流域冰川径流调节功能变化的拐点亦存在一定差异。木扎提河(RCP4.5)、呼图壁河(RCP2.6和RCP4.5)自1970s之后冰川调节功能就一直处于减弱态势;玛纳斯河流域在两种RCP情景下表现不同,RCP2.6情景下存在两个拐点,分别为1990s和2020s,而在RCP4.5情景下,拐点只为1990s[图7(b)];疏勒河流域调节功能减弱的时间节点为2000s。

综上所述,中国西部寒区流域冰川水文调节功能处于减弱态势,1970s—2010s是相对最强的冰川

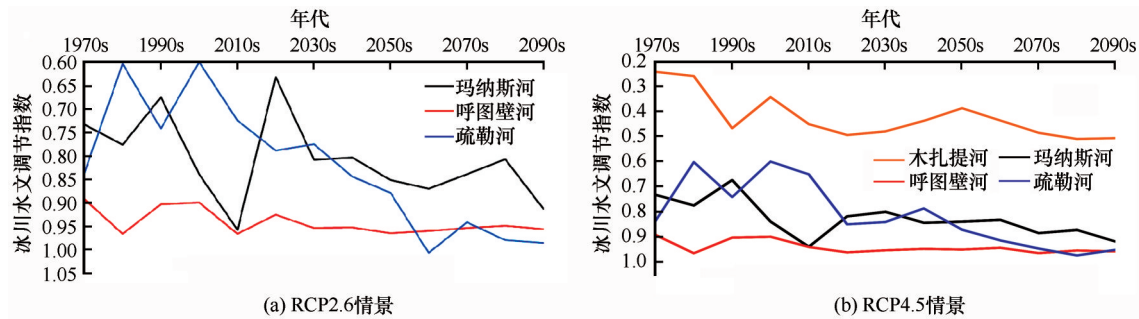


图7 历史时期及各RCP情景下西北内陆河流域冰川水文调节指数年代际变化

Fig. 7 Interdecadal variation of glacier hydrological regulation index in the northwest inland river basins in historical period and under RCP scenarios: RCP2. 6 scenario (a), and RCP4. 5 scenario (b)

调节功能期,在RCP2.6和RCP4.5情景下,未来到21世纪末,冰川调节功能明显减弱。减弱的时间节点各流域不同,最早为1970s,最晚为2020s,早晚相差50 a。各流域因冰川性质、规模等异同,调节功能大小呈现一定的差异,总体上西北内陆河流域冰川调节功能较高,青藏高原流域冰川水文调节功能一直处于较低水平。

4 讨论

过去半个多世纪,青藏高原和西北内陆地区的气温升高是个不争的事实^[31-32],受全球气候变暖影响,冰川稳定性减弱^[23],未来冰川继续退缩,冰川水文调节功能也将持续减弱。青藏高原和西北内陆地区冰川水文功能调节变化存在较大差异,青藏高原冰川水文调节功能一直处于较低水平,西北内陆地区冰川水文调节功能处于较高水平,主要原因是冰川径流贡献率不同。青藏高原五大江源流域的冰川径流贡献率介于0.35%~5.48%,而西北内陆河流域冰川径流贡献率介于6.62%~66.81%,西北内陆地区各流域冰川径流贡献率较高,青藏高原各流域冰川径流贡献率一直处于较低水平。

作为冰川三大功能之一的径流调节功能,对中国西部干旱内陆河流域尤为重要,冰川径流调节功能减弱或消失将可能引起流域径流丰枯不均,导致极端干旱和洪涝灾害风险增大,对西北干旱区内陆河流域产生深刻影响^[25-26]。本文基于现有中国西部寒区流域的径流模拟预估数据,在分析冰川径流稳定性的基础上,定义了一个冰川水文调节指数,量化了冰川水文调节功能,明晰了不同时期、两种RCP情景下冰川调节功能的未来变化。在径流变差系数法的基础上,定义了冰川径流调节指数,但该方法只考虑了总径流和冰川径流,仍具有一定的

局限性,在下一步研究中,尚需考虑冰川区温度和降水量,以期全面刻画冰川径流调节功能,逼近其真实变化状态。

5 结论

本文使用中国西部寒区流域的冰川径流及总径流模拟和预估数据,从趋势与波动变化两方面,分析了冰川径流的稳定性。在此基础上,探讨冰川水文调节功能的定量评估方法,量化冰川径流调节功能,并详细剖析了其过去及未来变化,得到如下主要结论:

(1)历史时期及RCP2.6和RCP4.5情景下,青藏高原和西北内陆地区各流域的冰川径流减小时间节点不同。长江源冰川径流减小时间节点为2030s,青藏高原其余流域冰川径流减小时间节点为2020s,西北内陆地区各流域冰川径流减小时间节点为2010s。

(2)历史时期及RCP2.6和RCP4.5情景下,到21世纪末,除雅鲁藏布江流域冰川径流大幅减少,稳定性减弱之外,中国西部寒区大部分流域的冰川径流虽呈减少趋势,但波动幅度减小或无明显波动变化,基本处于稳定状态。

(3)总体上,西北内陆河流域的冰川水文调节功能较高,青藏高原流域的冰川水文调节功能较低。在所有研究流域中,木扎提河流域的冰川水文调节功能最高。RCP2.6和RCP4.5情景下,中国西部寒区各流域冰川水文调节功能均呈现减弱趋势,西北内陆河流域的冰川水文调节功能减弱尤为显著,RCP2.6情景下,疏勒河流域减弱幅度最大,达到12.99%,RCP4.5情景下,木扎提河减弱幅度最大,达到25.40%,青藏高原各流域的冰川水文调节功能一直处于较低水平。

(4)年代际变化上,1970s—2000s中国寒区流域冰川水文调节功能大多以增强为主。长江源、澜沧江源、怒江源、雅鲁藏布江源、木扎提河和疏勒河流域的冰川水文调节功能均表现为增强趋势,1970s—2010s是冰川水文调节功能最强的时期。RCP2.6和RCP4.5情景下,2010s—2090s,中国西部寒区流域冰川水文调节功能明显减弱。减弱的时间节点变化较大,最早为1970s,最晚为2020s。

致谢:中国科学院西北生态环境资源研究院赵求东副研究员为本论文写作提供了数据支持,在此表示诚挚感谢。

参考文献(References):

- [1] Xiao Cunde, Wang Shijin, Qin Dahe. A preliminary study on cryosphere service function and its value estimation [J]. *Climate Change Research*, 2016, 12(1): 45-52. [效存德, 王世金, 秦大河. 冰冻圈服务功能及其价值评估初探[J]. 气候变化研究进展, 2016, 12(1): 45-52.]
- [2] Xiao Cunde, Su Bo, Wang Xiaoming, et al. Cascading risks to the deterioration in cryospheric functions and services[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(19): 1975-1984. [效存德, 苏勃, 王小明, 等. 冰冻圈功能及其服务衰退的级联风险[J]. 科学通报, 2019, 64(19): 1975-1984.]
- [3] Immerzeel W W, Lutz A F, Andrade M, et al. Importance and vulnerability of the world's water towers[J]. *Nature*, 2020, 577(7790): 364-369.
- [4] Ye Baisheng, Han Tianding, Ding Yongjian. Some changing characteristics of glacier streamflow in Northwest China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1999, 21(1): 54-58. [叶佰生, 韩添丁, 丁永建. 西北地区冰川径流变化的某些特征[J]. 冰川冻土, 1999, 21(1): 54-58.]
- [5] Ding Yongjian, Zhang Shiqiang, Chen Rensheng. Introduction to cold region hydrology [M]. Beijing: Science Press, 2017. [丁永建, 张世强, 陈仁升. 寒区水文导论[M]. 北京: 科学出版社, 2017.]
- [6] Chen Rensheng, Zhang Shiqiang, Yang Yong, et al. The impacts of cryospheric changes on cold region runoff in western China [M]. Beijing: Science Press, 2019. [陈仁升, 张世强, 阳勇, 等. 冰冻圈变化对中国西部寒区径流的影响[M]. 北京: 科学出版社, 2019.]
- [7] Ding Yongjian, Zhang Shiqiang, Chen Rensheng. Cryospheric hydrology: decode the largest freshwater reservoir on earth [J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2020, 35(4): 414-424. [丁永建, 张世强, 陈仁升. 冰冻圈水文学: 解密地球最大淡水水库[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(4): 414-424.]
- [8] Meier M F, Tangborn W V. Distinctive characteristics of glacier runoff [M]// US Geological Survey professional paper: No. 424 (B). Reston, VA, USA: US Geological Survey, 1961: 14-16.
- [9] Yang Zhenjiang. Glacier water resources in China [M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1991. [杨针娘. 中国冰川水资源[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1991.]
- [10] Immerzeel W W, van Beek L P, Bierkens M F. Climate change will affect the Asian water towers [J]. *Science*, 2010, 328(5984): 1382-1385.
- [11] Chen J, Ohmura A. On the influence of alpine glaciers on runoff [M]// Lang H, Musy A. *Hydrology in mountainous regions: IAHS publication No. 193*. Wallingford, UK: International Association of Hydrological Sciences, 1990: 117-125.
- [12] Farinotti D, Usselman S, Huss M, et al. Runoff evolution in the Swiss Alps: projections for selected high-alpine catchments based on ENSEMBLES scenarios [J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26: 1909-1924.
- [13] Uhlmann B, Jordan F, Beniston M. Modelling runoff in a Swiss glacierized catchment: part II: daily discharge and glacier evolution in the Findelen basin in a progressively warmer climate [J]. *International Journal of Climatology*, 2013, 33(5): 1301-1307.
- [14] Comeau L E L, Pietroniro A, Demuth M N. Glacier contribution to the North and South Saskatchewan Rivers [J]. *Hydrological Processes*, 2009, 23: 2640-2653.
- [15] Krimmel R M, Tangborn W V. South Cascade Glacier: the moderating effect of glaciers on runoff [C]// *Proceedings of the Western Snow Conference, 42nd Annual Meeting*, Anchorage, Alaska, 1974: 9-13.
- [16] Fountain A G, Tangborn W V. The effect of glaciers on streamflow variations [J]. *Water Resources Research*, 1985, 21(4): 579-586.
- [17] Hopkinson C, Young G J. The effect of glacier wastage on the flow of the Bow River at Banff, Alberta, 1951-1993 [J]. *Hydrological Processes*, 1998, 12: 1745-1762.
- [18] Horton P, Schaefer B, Mezghani A, et al. Assessment of climate-change impacts on alpine discharge regimes with climate model uncertainty [J]. *Hydrological Processes*, 2006, 20(10): 2091-2109.
- [19] Huss M. Present and future contribution of glacier storage change to runoff from macroscale drainage basins in Europe [J]. *Water Resources Research*, 2011, 47: W07511.
- [20] Immerzeel W, Beek L P, Konz M, et al. Hydrological response to climate change in a glacierized catchment in the Himalayas [J]. *Climatic Change*, 2012, 110: 721-736.
- [21] Pellicciotti F, Carenzo M, Bordoy R, et al. Changes in glaciers in the Swiss Alps and impact on basin hydrology: current state of the art and future research [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 493: 1152-1170.
- [22] Zhao Quidong, Ding Yongjian, Wang Jian, et al. Projecting climate change impacts on hydrological processes on the Tibetan Plateau with model calibration against the glacier inventory data and observed streamflow [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 573: 60-81.
- [23] Ding Yongjian, Zhang Shiqiang, Zhao Lin, et al. Global warming weakening the inherent stability of glaciers and permafrost [J]. *Science Bulletin*, 2019, 64(4): 245-253.
- [24] Ding Yongjian, Xiao Cunde. Cryosphere changes and their impacts [M]. Beijing: Science Press, 2019. [丁永建, 效存德. 冰冻圈变化及其影响[M]. 北京: 科学出版社, 2019.]
- [25] Ding Yongjian, Zhao Quidong, Wu Jinkui, et al. The future changes of Chinese cryospheric hydrology and their impacts on water security in arid areas [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(1): 23-32. [丁永建, 赵求东, 吴锦奎, 等. 中国冰冻圈水文未来变化及其对干旱区水安全的影响[J]. 冰川冻土, 2020, 42(1): 23-32.]
- [26] Ding Yongjian, Zhang Shiqiang, Wu Jinkui, et al. Recent progress on studies on cryospheric hydrological processes changes in China [J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(5): 690-702. [丁永建, 张世强, 吴锦奎, 等. 中国冰冻圈水

- 文过程变化研究新进展[J]. 水科学进展, 2020, 31(5): 690-702.]
- [27] Zhao Qiudong, Zhao Chuancheng, Qin Yan, et al. Response of the hydrological processes to climate change in the Muzati River basin with high glacierization, southern slope of the Tianshan Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(4): 1285-1298. [赵求东, 赵传成, 秦艳, 等. 天山南坡高冰川覆盖率的木扎提河流域水文过程对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2020, 42(4): 1285-1298.]
- [28] Cannon A J, Sobie S R, Murdock T Q. Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: how well do methods preserve changes in quantiles and extremes? [J]. Journal of Climate, 2015, 28(17): 6938-6959.
- [29] Eum H I, Cannon A J. Intercomparison of projected changes in climate extremes for South Korea: application of trend preserving statistical downscaling methods to the CMIP5 ensemble [J]. International Journal of Climatology, 2017, 37(8): 3381-3397.
- [30] Shi Peijun, Sun Shao, Wang Ming, et al. Climate change regionalization in China (1961-2010) [J]. Scientia Sinica Terrae, 2014, 44(10): 2294-2306. [史培军, 孙劭, 汪明, 等. 中国气候变化区划(1961-2010年) [J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(10): 2294-2306.]
- [31] Ye Baisheng, Ding Yongjian, Jiao Keqin, et al. The response of river discharge to climate warming in cold region over China [J]. Quaternary Sciences, 2012, 32(1): 103-110. [叶柏生, 丁永建, 焦克勤, 等. 我国寒区径流对气候变暖的响应[J]. 第四纪研究, 2012, 32(1): 103-110.]
- [32] Chen Yaning, Li Zhi, Fan Yuting, et al. Research progress on the impact of climate change on water resources in the arid region of Northwest China [J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(9): 1295-1304. [陈亚宁, 李稚, 范煜婷, 等. 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展[J]. 地理学报, 2014, 69(9): 1295-1304.]

Study on hydrological regulation function of glaciers in the cold region basins of western China

HE Qingshan^{1,2}, YANG Jianping¹, CHEN Hongju^{1,2}, WANG Yanxia^{1,2},
TANG Fan^{1,2}, JI Qin^{1,2}, GE Qiuling^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: As a solid reservoir, glaciers play a significant role in regulating the variation of runoff abundance and dieback in the form of “peak-cutting and valley-filling”. The hydrological regulation function of glaciers is very important in cold regions, especially in the arid regions of Northwest China. The runoff estimation data from 2014 to 2100 were simulated by the VIC-CAS model in the cold region of western China. With perspectives of combinations of trend and fluctuation characteristics, glacier hydrological regulation index ($Glacier_R$) was constructed based on the runoff variation coefficient method to analyze the stability of glacier runoff in 9 cold region basins of western China. The changes of the hydrological regulation function of glaciers in these basins are analyzed in detail during the historical period (1971—2010) and in the future to the end of the 21st century. The results show that: In the historical period and under the RCP2.6 and RCP4.5 scenarios, except for the Yangtze River basin, the decrease time node of glacier runoff in other basins of the Tibetan Plateau is 2020s, and that in the northwest inland basins is 2010s. In historical period and under the global emission scenarios of RCP2.6 and RCP4.5 to the end of the 21st century, although the glacier runoff in most of cold region basins in western China showed a decreasing trend, the fluctuation range decreased or had no obvious change, and the stability of glacier runoff increased or had no change. Overall, hydrological regulation function of glaciers is high in the northwest inland river basins, while function is low in the basins of the Qinghai-Tibet Plateau. Under the global emission scenarios of RCP2.6 and RCP4.5, to the end of the 21st century, the hydrological regulation function of glaciers showed a weakening trend in all cold region basins of western China, and the weakening was more significant in the inland river basins of Northwest China. Under the global emission scenario of RCP4.5, the hydrological regulation function of glaciers in the Muzati River decreased by 25.4%, and all the basins of the Qinghai-Tibet Plateau remained at a low level. With the perspective of decadal variation, the hydrological regulation function of glaciers in the cold region basins of western China was strong during the period of 1970s—2010s, especially in the 1980s and 2000s. Under the global emission scenarios of RCP2.6 and RCP4.5, the hydrological function of glaciers showed a weakening trend obviously in the future to the end of 21st century. The earliest time node in the cold region basins is 1970s, and the latest is 2020s.

Key words: cold region basins; glacier runoff; stability; hydrological regulation function of glaciers

(责任编辑: 许民; 编辑: 武俊杰)