

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2020.0003

DING Yongjian, ZHAO Qudong, 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.]

# 中国冰冻圈水文未来变化及其对干旱区水安全的影响

丁永建<sup>1,2,3</sup>, 赵求东<sup>1,2</sup>, 吴锦奎<sup>2</sup>, 张世强<sup>4,5</sup>, 王生霞<sup>2</sup>, 苒亚平<sup>2</sup>,  
李向应<sup>6</sup>, 上官冬辉<sup>1</sup>, 韩海东<sup>2</sup>, 秦 甲<sup>2</sup>, 韩添丁<sup>1</sup>

(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 内陆河流域生态水文重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 西北大学 陕西省地表过程与环境承载力重点实验室, 陕西 西安 710027; 5. 西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安 710027; 6. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

**摘 要:** 受气候变暖持续影响, 中国冰冻圈水文过程正在发生着显著变化。在梳理已有过去冰冻圈融水变化基础上, 重点分析了冰冻圈融水径流未来变化特点, 尤其是对冰川融水拐点及温升 $2^{\circ}\text{C}$ 阈值情况下, 到2050年和21世纪末, 冰川融水的可能变化进行了辨析, 进而研判了冰冻圈水文变化对流域、重点是干旱区内陆河流域水安全的影响。研究表明, 中国未来大部分流域冰川融水径流总体呈现减少趋势, 并呈现冰川径流持续减少、在不久的将来出现峰值和持续增加三种情况; 单条冰川融水可能会出现拐点, 而且拐点是否出现和出现的时间与升温速率和冰川面积大小有关; 在流域尺度上, 冰川覆盖率较大、大型冰川面积占比较高的流域, 到2050年融水径流持续稳定增加; 冰川规模较小的流域, 冰川径流峰值早已出现; 介于上述两种情况之间的大多数流域, 冰川融水峰值在2020–2030年相继出现或变化呈现不显著增加或减少, 相对稳定; RCP情景温升 $2^{\circ}\text{C}$ 阈值下, 到21世纪末, 西北干旱区冰川融水量减少34%~74%。冰冻圈水文变化导致水源涵养能力下降、径流补给量减少、对水资源的调节作用减弱、流域径流变化幅度增加、发生旱涝的风险增加、春汛提前进而影响用水制度。

**关键词:** 冰冻圈水文; 冰川融水; 未来变化; 影响; 水安全

**中图分类号:** P333.9    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1000-0240(2020)01-0023-10

## 0 引言

全球约75%的淡水资源储存在冰冻圈中, 约1/6的世界人口直接生活在冰冻圈流域<sup>[1]</sup>。中国冰冻圈是中国及周边国家重要大江、大河的发源地(如印度河、恒河、雅鲁藏布江、长江、黄河、澜沧江、塔里木河、伊犁河、鄂毕河、阿穆尔河等), 更是“一带一路”干旱内陆河的水塔<sup>[2–3]</sup>。在气候变化的背景下, 冰冻圈对全球水文与水资源的影响巨大, 特别是水资源短缺地区, 如中国西部、中亚的内陆干旱区等。

随着气候变暖, 冰冻圈融化呈现加速变化之势<sup>[4]</sup>。冰冻圈融水径流总体也呈现增加趋势, 在中国西部冰冻圈地区, 径流增加和减少趋势的流域具有明显的分区, 分界线大约为河西走廊黑河双树寺水库–青海湖东部–黄河唐乃亥水文站一线; 该线以西山区河川径流基本呈增加趋势, 该线以东则径流呈总体减少趋势; 基本上反映了季风(高原和东亚)和西风多年来对西部冰冻圈流域河川径流的影响差异<sup>[5]</sup>。在东北冰冻圈地区, 黑龙江源区和松花江源区径流总体呈现增加趋势, 其他人类活动较为密集地区的径流则主要为减少趋势<sup>[6]</sup>。

收稿日期: 2020-04-17; 修订日期: 2020-05-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41730751; 41671056; 41871059)资助

作者简介: 丁永建(1958–), 男, 甘肃天水人, 研究员, 从事寒区水文与水资源、寒旱区环境与全球变化研究. E-mail: dyj@lzb.ac.cn

通信作者: 赵求东, 副研究员, 从事冰冻圈水文研究. E-mail: dsslab@163.com.

上述结果是针对整个冰冻圈流域径流变化而言的,其中既有冰冻圈融水的影响,也有降水变化的因素,西北西部受冰冻圈变化和降水增加共同作用,西北东部及东北地区冰冻圈影响偏弱,降水变化影响较大。就冰冻圈融水自身的变化而言,1960年以来,冰川径流整体上呈现增加之势,2000年以来加速显著。冰川融水变化也存在一定差异,主要与流域冰川规模有关,冰川规模大的流域,融水径流增加强劲,规模小的流域融水已减少<sup>[7-13]</sup>。

冻土水文较复杂,尽管直接观测困难,但观测仍是获取参数、理解基本过程的重要手段<sup>[14-19]</sup>。目前用同位素示踪、统计分析和模型模拟等方法在研究冻土水文过程中取得较好结果<sup>[16-24]</sup>。已有研究表明,多年冻土及季节冻土退化已经引起冬季(枯水期)径流增加、夏季径流减少、年内径流过程变缓,且变化的强度与流域多年冻土覆盖率有关<sup>[6,9,16,23,25-37]</sup>。

中国西部高海拔寒区过去50年融雪径流总体呈现增加趋势,积雪消融期提前、缩短,改变了流域年内径流过程线,并导致融雪径流峰值普遍提前,高山区降雪量伴随着降水量增加而增加是主要原因<sup>[6,13,24,38-42]</sup>。就整个积雪区而言,融雪径流的区域差异较大。东北地区,融雪径流总体呈现下降趋势<sup>[6,24,43-44]</sup>;西北地区,在20世纪80年代和90年代,融雪径流普遍增加,最大幅度可达20%<sup>[38]</sup>,1961年以来,新疆以增加为主<sup>[6]</sup>,青藏高原流域有增有减或变化不显著<sup>[6,40,45]</sup>。

以上勾勒的是过去60年中国冰冻圈水文变化的一些基本特征,对于流域水资源管理和规划而言,更加关注冰冻圈水文未来变化及其对流域水资源的潜在影响。本文在总结已有研究成果基础上,分析中国冰冻圈水文未来的变化及其对流域水资源的潜在影响、尤其是融水拐点和温升2℃阈值等热点问题。

## 1 预估的冰冻圈融水径流未来变化特点

冰冻圈水文变化的预估是了解其水文影响的重要手段。目前主要是利用气候模式模拟的气候情景数据作为水文模型的输入,通过数值模拟从而对未来冰冻圈水文进行预估。由于气候模式本身的不确定性以及其输出的结果也是全球大范围平均下的区域结果,分辨率低也会抹掉许多地方性气候变化信息。另外,在不同时期,不同研究者模拟

所用的气候情景不同,也会影响到模拟结果的相互比较。就预估的变化趋势而言,情景尽管可能不同,但未来变化增加或减少的方向可能存在着一致性,这也是下面分析的基本依据。

预估表明<sup>[10,46-48]</sup>,未来大部分流域冰川融水径流呈现减少趋势。相较于20世纪60年代,到21世纪末,RCP2.6(低)、RCP4.5(中)和RCP8.5(高)排放情景下,西北干旱区冰川面积分别减少约34%、61%和74%,冰川储量减少约45%、76%和86%,相应的冰川融水量减少约34%、62%和74%(图1)。未来冰川融水变化差异较大,西天山纳伦河的研究表明,面积小于1 km<sup>2</sup>的冰川加速退缩,到2066-2095年退缩减缓,面积可能只剩下8%左右,而面积较大的冰川,将呈现持续退缩状态,并持续到2100年<sup>[49]</sup>。意味着这样的流域,冰川融水在未来数十年内可能持续增加。而有研究则认为,天山部分地区在年尺度上尚未出现显著变化,但其夏季径流已呈现微弱减少趋势,如果气温上升趋势不变,夏季径流持续减少至21世纪末<sup>[50]</sup>。与此不同的是,众多研究表明天山大部分流域径流增加显著<sup>[12,47,51-52]</sup>。与天山不同,阿尔泰山地区在RCP4.5情景下,到2100年目前面积小于5 km<sup>2</sup>的冰川将全部消失,在RCP8.5情景下,面积在5~10 km<sup>2</sup>的冰川也将消失7%;在上述两种情景下,冰川融水径流均不会出现峰值<sup>[53]</sup>。可见阿尔泰山地区未来冰川退缩明显较天山地区要快,且冰川融水变化也存在显著差异。

预估显示,到2100年,在青藏高原的黄河、长江、澜沧江、怒江和雅鲁藏布江等流域,冰川面积将减少50%,除长江源在21世纪30年代达到峰值外,其他流域冰川径流在21世纪初已经超过峰值<sup>[48]</sup>(图1)。类似的研究认为,未来50年印度河、雅鲁藏布江、恒河和长江等流域冰川径流均有所减少<sup>[54]</sup>。而黄河上游冰川面积较少,河流受冰川融水影响甚微,这一结果潜在表明受冰川变化影响较大的流域,未来河流径流将减少,而受冰川融水影响不大的流域径流将增加,也就是降水增加所致。实际上像印度河、雅鲁藏布江、恒河这样的流域,尽管上游冰川面积较大,但与降水对河流的补给相比,冰川融水补给也是较小的,从河流径流未来变化的角度来看,其主要还是受降水变化影响更大。而类似的研究指出,青藏高原未来50年诸多流域的径流呈现不同程度的增加趋势,其中怒江、澜沧

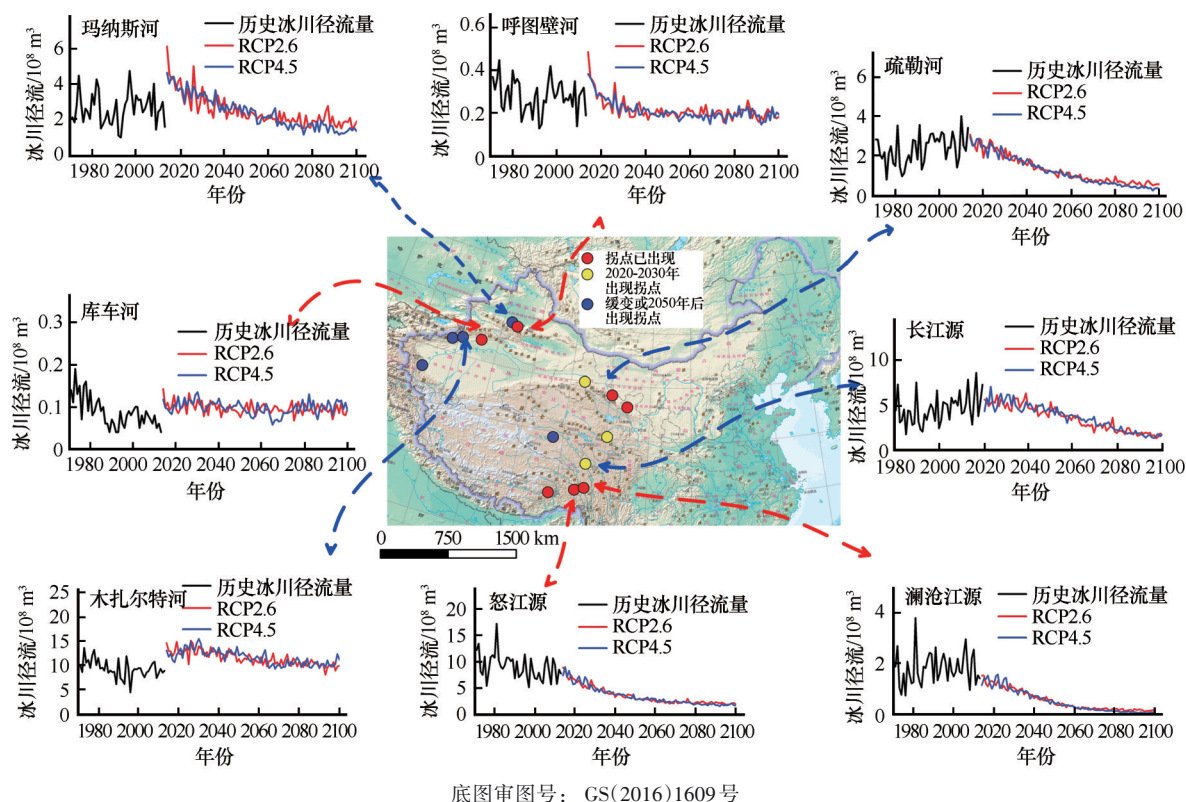


图1 预估2100年冰川融水径流变化(数据来源:文献[48],文献[6])

Fig. 1 Projection of glacier meltwater runoff changes until 2100 (data source: Reference [48], Reference [6])

江、黄河和长江流域上游径流增加主要由降水增加引起,而印度河流域上游径流增加的原因主要为冰川加速消融<sup>[55]</sup>。上述不同研究结果表明,在不同时空尺度、不同方法下,流域冰川融水变化的结果和认识有所差异。

总体来看,冰川融水径流未来变化可能呈现以下三种情况(图1):一是冰川径流持续减少,如库车河、呼图壁河、怒江<sup>[6,48]</sup>、石羊河<sup>[10]</sup>、黑河<sup>[11]</sup>等;二是在不久的将来出现峰值,如长江源、疏勒河<sup>[48,52]</sup>、乌鲁木齐河<sup>[12]</sup>等;三是至少在2050年前冰川融水不会出现显著下降或拐点,呈现稳定或持续增加趋势,如玛纳斯河、木扎尔特河<sup>[6,47]</sup>、阿克苏河<sup>[56]</sup>、叶尔羌河<sup>[46]</sup>等(图1和图2)。

融雪径流未来变化与过去基本相同,仍呈现融雪期明显提前,使消融早期的融雪径流明显增加,整个融雪过程向前推移。同时,由于积雪提前大量融化,后期相应积雪减少,从而改变了流域融雪径流年内分配。对于以积雪融水补给为主的河流,随着融雪径流的变化,会使整个流域径流年内分配发生较大改变<sup>[6]</sup>。例如,从预估的结果来看,在降水增加、气温升高的背景下,黄河源融雪径流显著下降,黑河和疏勒河略有增加,长江源呈现明显增加

趋势,各流域融雪峰值均前移,使整个流域径流期拉长。

冻土变化对径流影响的预估研究还较少,利用冰冻圈全要素流域水文模型(cryospheric basin hydrological model, CBHM)<sup>[11]</sup>,预估了未来三种排放情景下(RCP2.6、RCP4.5和RCP8.5)黑河流域多年冻土和径流变化。结果表明:相对于对照期(1960–2013年),在三种情景下,黑河流域在2100年多年冻土面积分别减少7.9%、13.9%和25.0%,而与之相应的流域总径流量差异不是很大,但不同情景下径流的年际波动差异较大<sup>[6]</sup>,似乎显示升温幅度对冻土水文过程的波动性有影响。

## 2 冰川融水拐点问题

冰川融水拐点是人们关注的热点。一般情况下,在气候持续变暖影响下,冰川融水增加,随着冰川萎缩,面积减小,冰川融水量必然会在某一时间段出现减少,这就是所谓冰川融水由增到减的拐点,也称为冰川融水变化的峰值。根据已有研究,对冰川融水是否出现拐点有以下基本认识。

对于单条冰川而言,冰川融水可能会出现拐





间也前后不一。因此,在流域尺度上是否出现冰川融水的峰值,情况较为复杂。总体来看,流域冰川融水的未来变化与整个流域不同大小冰川面积的组成情况有关(图2)。冰川覆盖率较大、大型冰川面积占比较高的流域,如阿克苏河<sup>[56]</sup>和叶尔羌河<sup>[46]</sup>流域,预估到2050年融水径流显示出持续稳定的增加趋势,这两个流域尽管面积小于1 km<sup>2</sup>冰川数量分别占76%和75%,但其面积比例只有10%和15%,很显然,即便小于1 km<sup>2</sup>冰川到2050年全部消失,流域仍然有大量冰川存在,尤其是面积超过10 km<sup>2</sup>冰川,其储量占据整个流域冰川的半壁江山,对冰川融水变化具有重要的稳定作用。上述结果是用SRES气候情景模拟的结果。最近用RCP情景预估的塔里木河流域冰川融水变化表明<sup>[58]</sup>,在各种情景下,达到峰值的时间为2030–2060年,这是对塔河冰川融水的预估结果,可作为进一步认识阿克苏河径流未来变化的参考。

对于冰川规模较小的流域,如石羊河<sup>[10]</sup>、黑河<sup>[11]</sup>、库车河和呼图壁河(图1)等,这类流域里规模较大的冰川很少。石羊河和黑河流域面积小于1 km<sup>2</sup>的冰川数量分别占到88%和96%,其冰川径流峰值早已出现,石羊河峰值出现在21世纪初左右<sup>[10]</sup>,而黑河融水径流自20世纪60年代以来呈现出持续减少,似乎并没出现所谓拐点。黑河冰川总面积较石羊河大,流域冰川覆盖率也高于石羊河,过去普遍认为石羊河冰川融水径流减少比黑河要严重,实际上黑河冰川要比石羊河衰退得更快,因为黑河流域小规模冰川数量更多。黑河和石羊河流域超过2 km<sup>2</sup>冰川分别有11条和12条,数量相差不大,但两个流域平均冰川面积分别为0.25 km<sup>2</sup>和0.41 km<sup>2</sup>,黑河冰川规模比石羊河小得多。从这种情况来看,黑河冰川径流很快会小于石羊河或趋同。

介于上述两种情况之间的大多数流域,冰川规模有大有小,尽管面积小于1 km<sup>2</sup>冰川占比很高,但仍有一定数量的大型冰川存在,冰川融水峰值在2020–2030年相继出现或变化相对稳定,如疏勒河、玛纳斯河<sup>[6,52]</sup>以及乌鲁木齐河流域<sup>[7]</sup>、长江源和木扎尔特河(图1)等。玛纳斯河和木扎尔特河流域冰川径流未来变化属于较平稳类型,玛纳斯河流域小于1 km<sup>2</sup>冰川数量占到90%,但流域内超过2 km<sup>2</sup>冰川面积占到50%以上,更有20余条面积超过10 km<sup>2</sup>冰川,这些大型冰川在整个流域冰川融水变

化中可起到稳定径流的作用。类似的流域还有很多,如西天山纳伦河流域,预估在2040年左右冰川融水达到峰值<sup>[49]</sup>。

总之,冰川融水未来变化与流域冰川面积大小的组成有密切关系,以图2中1 km<sup>2</sup>冰川数量和面积(图中红点)为线,随着这条线向右移动,两条累计曲线越接近,冰川融水减小越显著;相反,这条线越向左移动,冰川融水趋于稳定或增加。这一结果表明,在流域尺度上预估未来冰川融水变化,必须考虑流域冰川规模的组成才能获得较好结果。

### 3 温升2℃对干旱区水资源的影响

由上不难看出,尽管不同时期、不同气候情景、不同方法给出的结果存在一定差异,根据已有的预估结果判断,中国未来冰川融水变化巨大。利用改进VIC模型<sup>[2,47–48]</sup>,模拟温升2℃阈值对中国干旱区冰川融水和山区总径流未来变化的预估显示,相较于20世纪60年代,到21世纪末,在RCP2.6(低)、RCP4.5(中)和RCP8.5(高)排放情景下,西北干旱区冰川面积分别减少约34%、61%和74%,冰川储量减少约45%、76%和86%,相应的冰川融水量减少约34%、62%和74%。其中,中等排放(RCP4.5)情景下,2045年全球平均气温相对于工业革命前温升2℃时,冰川面积和储量分别缩减约37%和50%,冰川融水量减少37%。表1给出了温升2℃情景下中国干旱区若干河流冰川融水与出山径流的变化。可以看出,一些冰川规模较大的流域,冰川融水可能还持续增加,如玛纳斯河和木扎尔特河,而冰川规模较小的流域,融水径流均呈现大幅减少甚至消失,如澜沧江源、怒江源、库车河和黑河等(图2)。

冰川融水对流域水资源的影响程度不仅与冰川融水变化过程、程度有关,也取决于流域总的径流变化情况,也就是说在流域尺度上,未来升温对冰川融水的影响及降水增减对流域降雨径流的影响决定着整个流域未来径流的走向。在RCP4.5中等排放情景下,全球平均温升2℃的2045年前后,受冰川加速消融及降水增加的共同影响,中国西北干旱区主要流域的径流量普遍增加(表1),降水增加的贡献趋于主导地位。到21世纪末,相对于2045年前后,径流量减少约10%~30%,部分流域可达50%以上。到21世纪末,在冰川规模较小的流域,大多数冰川将消失(图3),如阿尔泰山地区

表1 温升2℃情景下中国干旱区若干河流冰川融水与出山径流的变化

Table 1 The possible change of the glacier meltwater and mountain runoff of some rivers in Chinese arid areas under 2℃ warming scenario

流域	冰川面积变化/%	冰川径流变化/%	总径流变化/%
库车河	-33.4	-38.8	-8.5
木扎尔特河	-13.6	+9.8	+13.6
呼图壁河	-24.1	-18.9	+19.2
玛纳斯河	-22.7	+5.2	+35.3
黑河	-100.0	-100.0	-5.6
疏勒河	-46.6	-22.2	+25.1
黄河源	-25.2	-18.5	+16.7
长江源	-32.2	-8.5	+37.9
澜沧江源	-61.5	-57.9	+27.3
怒江源	-49.6	-49.1	+18.2

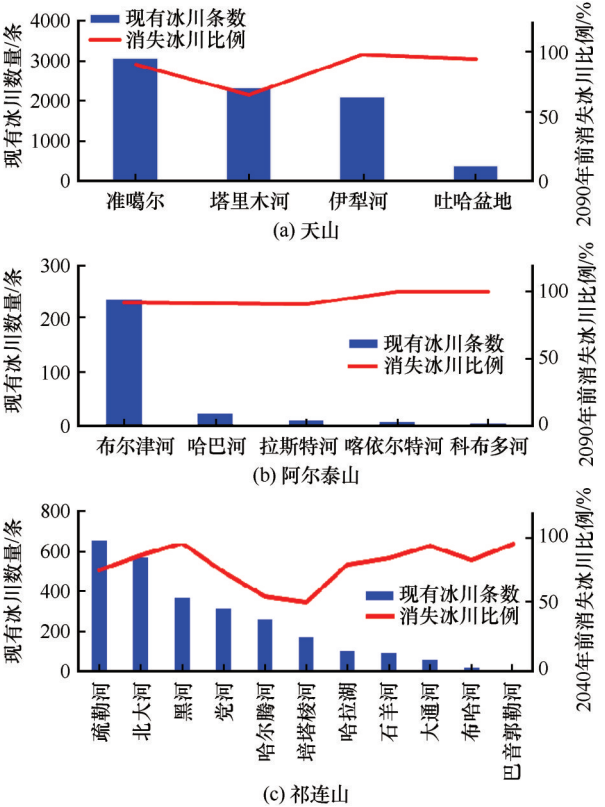


图3 干旱区部分流域现有冰川数量及RCP4.5情景下可能消失的冰川比例(数据来源:文献[12])

Fig. 3 The numbers in existence and disappearance proportions of glaciers under RCP4.5 global emission scenario in the Tianshan Mts., Altay Mts. and Qilian Mts. (data source: Reference [12])

90%的冰川可能消失,而祁连山大部分流域到2040年前可能有60%以上的冰川消失。这些流域到时降水将主导流域径流变化,预估流域径流量比1960-2000年多10%~20%,主要来自于降水增加

的贡献,而未来降水的变化还存在较大的不确定性。可见,全球温升2℃以后,流域冰川稳定径流的作用减弱或消失,将会导致一些小型河流和过去以冰川融水为主的河流断流,河川径流丰枯变化明显,局地性旱涝灾害加剧,在枯水季节或年份将可能出现区域性水危机。在绝大多数冰川消失以后,一旦降水减少、气候变干,西北干旱区将会出现区域性的长期水危机。因此,低于RCP4.5排放情景发展且将全球气温控制在2℃温升以内,是保障西北干旱区河川径流稳定的关键。

4 冰冻圈水文变化对水安全的影响

冰冻圈水源涵养作用的变化,影响水源涵养能力(图4)。随着冰川面积减小、积雪期缩短、冻土退化,冰冻圈的水源涵养能力将受到较大影响。首先是冰冻圈的水源面积整体减小,水源萎缩,其次是冰冻圈的“冷岛”效应减弱,水汽凝结能力受到影响,流域水分内循环在高海拔地区凝聚效应可能会改变,这些影响总体可能导致冰冻圈原有的水源涵养能力降低。

未来冰冻圈融水径流补给量显著减少,有些流域冰川融水补给可能随着冰川的消亡而消失。随着冰冻圈的加速退化,冰冻圈融水的整体补给能力在降低,流域水资源风险、尤其是干旱区水资源风险增大(图4)。随着冰川萎缩特别是大量小型冰川的消失和高山冻土退化,将导致西北干旱区一些冰川融水比例较高的、以小型冰川为主的河流在干旱月份、年份成为无源之河,出现断流。

冰冻圈融水变化对干旱区带来的最大风险是其调节作用的降低甚至消失(图4)。冰冻圈融水的调丰补枯作用十分重要<sup>[59]</sup>,尤其在干旱区内陆河流域。尽管有些流域冰川融水补给量不大,但其对径流仍具有一定的调节能力,如黑河<sup>[11]</sup>、库车河<sup>[6]</sup>、乌鲁木齐河<sup>[60]</sup>等。随着冰川面积的减小,冰川融水对径流的年和多年调节能力可能丧失,残存的冰川只能在极端干旱月、旬还能发挥一定的调节作用。有些冰川消失的流域,在完全受降雨径流控制下,流域径流变差系数增大、年内和多年波动幅度增加,极端干旱和洪涝发生的风险增大。同时,由于未来干旱区降雨增加的可能性较大,荒漠植被可能趋好,多样性增加,但由于降雨的波动性较大,导致脆弱的荒漠生态系统受损的风险增加。目前,调节能力主要是针对冰川而言的,多年冻土和积雪融



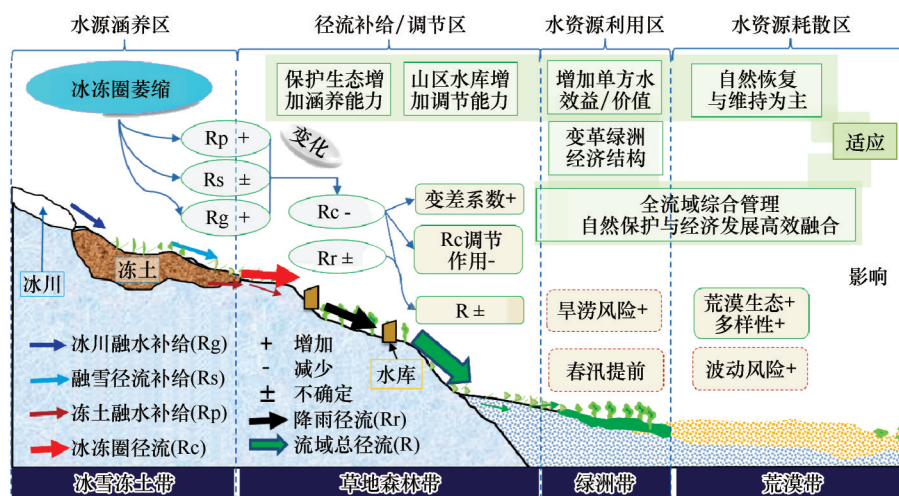


图4 干旱区内陆河流域冰冻圈水文变化影响与适应解析图

Fig. 4 Analytic diagram of cryospheric hydrology change effect and adaption in arid inland river basins

水也在一定程度上具有调节能力,如多年冻土持续融化,其释放水量受温度影响且滞后性突出,对多年、几十年甚至更长时间尺度上的旱涝可能具有调节作用,但目前这方面的研究还不够,亟待加强。

综上所述,面对冰冻圈径流变化的影响,加强流域年调节能力、增加多年调节能力是应对冰川萎缩及气候变化影响的重要手段;加强山区流域生态保护、增强整个流域不同下垫面各自的水源涵养功能,是弥补冰冻圈水源涵养功能减弱的重要途径;提高单方水产出效益、变革性地调整经济结构是确保干旱区水资源持续利用的根本出路;重新审视干旱区农业发展与生态保护的关系,开拓发展思路是确保西北干旱区国家战略稳定实施的必然选择。

## 5 结论

受气候变暖持续影响,中国冰川、积雪和冻土正在发生着显著变化,对冰冻圈水文未来变化影响巨大。本文在梳理已有研究成果的基础上,综合分析了冰冻圈融水径流未来变化特点,重点对融水拐点和温升 $2^{\circ}\text{C}$ 阈值情况下,到2050年和21世纪末,冰川融水的可能变化进行了辨析。在此基础上研判了冰冻圈水文变化对流域、重点是干旱区内陆河流域水安全的影响。主要结论如下:

(1) 未来大部分流域冰川融水径流呈现减少趋势,但差异性较大。可能呈现三种情况,一是冰川径流持续减少,如库车河、呼图壁河、怒江、石羊河和黑河等;二是在不久的将来出现峰值,如长江源、疏勒河、乌鲁木齐河等;三是至少在2050年前冰川融水不会出现显著下降或拐点,呈现稳定或持

续增加趋势,如玛纳斯河、木扎尔特河、阿克苏河、叶尔羌河等。融雪径流未来变化呈现融雪期明显提前,消融早期的融雪径流明显增加,整个融雪过程向前推移。冻土融水径流未来变化及其对流域的影响情况不明。

(2) 对于单条冰川而言,冰川融水可能会出现拐点,而且拐点是否出现和出现的时间与升温速率和冰川面积大小有关。升温速率对冰川融水拐点的影响很大,相同大小的冰川,升温速率不同,融水出现拐点的时间不一,甚至不会出现显著的拐点。在流域尺度上,由于不同面积大小的冰川融水响应过程不同,冰川融水的未来变化过程与整个流域不同大小冰川面积的组成有关。冰川覆盖率较大、大型冰川面积占比较高的流域,预估到2050年融水径流显示出持续稳定的增加趋势;冰川规模较小的流域,冰川径流峰值早已出现;介于上述两种情况之间的大多数流域,冰川融水峰值在2020—2030年相继出现或变化呈现不显著增加或减少,相对稳定。

(3) 温升 $2^{\circ}\text{C}$ 阈值下,相较于20世纪60年代,到21世纪末,RCP2.6、RCP4.5和RCP8.5排放情景下,西北干旱区冰川储量减少约45%、76%和86%,相应的冰川融水量减少约34%、62%和74%。大多数冰川较小的流域,70%以上冰川会消失。

(4) 冰冻圈水文变化通过流域水源涵养、径流补给和水资源调节功能的改变而对流域水安全产生影响。随着冰冻圈水文变化,其水源涵养能力下降、径流补给量减少、对水资源的调节作用减弱,流域径流变化幅度的增加会导致流域发生旱涝的

风险增加、春汛提前进而影响用水制度。荒漠区生态系统和多样性也会受冰冻圈调节作用的减弱而风险增加。

## 参考文献(References):

- [1] Barnett T P, Adam J C, Lettenmaier D P. Potential impacts of warming climate on water availability in snow-dominated regions[J]. *Nature*, 2005, 438(7066): 303 – 309.
- [2] 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.]
- [3] Yao Tandong, Wu Guangjian, Xu Baiqing, et al. Asian water tower change and its impacts[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(11): 1203 – 1209. [姚檀栋, 邬光剑, 徐柏青, 等. “亚洲水塔”变化与影响[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1203 – 1209.]
- [4] 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.
- [5] Qin Jia, Liu Yuejia, Chang Yaping, et al. Regional runoff variation and its response to climate change and human activities in Northwest China[J/OL]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75 [2020-05-18]. <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12665-016-6187-z>.
- [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] Li Zhongqin, Li Kaiming, Wang Lin. Study on recent glacier changes and their impact on water resources in Xinjiang, North Western China[J]. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(1): 96 – 106. [李忠勤, 李开明, 王林. 新疆冰川近期变化及其对水资源的影响研究[J]. 第四纪研究, 2010, 30(1): 96 – 106.]
- [8] Li Kaiming, Li Zhongqin, Gao Wenyu, et al. Recent glacial retreat and its effect on water resources in eastern Xinjiang[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(33): 3596 – 3604.
- [9] 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.]
- [10] Zhang Shiqiang, Gao Xin, Zhang Xiaowen. Glacial runoff likely reached peak in the mountainous areas of the Shiyang River basin, China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2015, 12(2): 382 – 395.
- [11] Chen Rensheng, Wang Gang, Yang Yong, et al. Effects of cryospheric change on alpine hydrology: combining a model with observations in the upper reaches of the Hei River, China[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123: 3414 – 3442.
- [12] Li Zhongqin. The mass balance and dynamic processes simulations of mountain glaciers[M]. Beijing: Science Press, 2019. [李忠勤. 山地冰川物质平衡和动力过程模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2019.]
- [13] Ding Yongjian, Xiao Cunde. The study of cryospheric changes and their impacts: comprehensive volume[M]. Beijing: Science Press, 2019. [丁永建, 效存德. 冰冻圈变化及其影响研究: 综合卷[M]. 北京: 科学出版社, 2019.]
- [14] Chen R S, Song Y X, Kang E S, et al. A cryosphere-hydrology observation system in a small alpine watershed in the Qilian Mountains of China and its meteorological gradient[J]. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2014, 46(2): 505 – 523.
- [15] Wang Genxu, Zhang Yinsheng. Theory and practice of eco-hydrology in cold regions[M]. Beijing: Science Press, 2016. [王根绪, 张寅生. 寒区生态水文学理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2016.]
- [16] Kalyuzhnyi I, Lavrov S. Basic physical processes and regularities of winter and spring river runoff formation under climate warming conditions[J]. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2012, 37: 47 – 56.
- [17] Kalyuzhnyi I, Lavrov S. Mechanism of the influence of soil freezing depth on winter runoff[J]. *Water Resource*, 2017, 44: 604 – 613.
- [18] Kalyuzhnyi I, Lavrov S. Variability of frost depth in the Volga River basin and its impact on runoff formation in winter and spring under climate change[J]. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2016, 41: 487 – 496.
- [19] Wang Genxu, Mao Tianxu, Chang Juan, et al. Processes of runoff generation operating during the spring and autumn seasons in a permafrost catchment on semi-arid plateaus[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 550: 307 – 317.
- [20] Karra S, Painter S L, Lichtner P C. Three-phase numerical model for subsurface hydrology in permafrost-affected regions (PFLOTRAN-ICE v1.0)[J]. *The Cryosphere*, 2014, 8(5): 1935 – 1950.
- [21] Painter S L, Moulton J D, Wilson C J. Modeling challenges for predicting hydrologic response to degrading permafrost[J]. *Hydrogeology Journal*, 2013, 21(1): 221 – 224.
- [22] Li Zongxing, Li Zongjie, Feng Qi, et al. Runoff dominated by supra-permafrost water in the source region of the Yangtze River using environmental isotopes[J/OL]. *Journal of Hydrology*, 2020, 582 [2020-05-19]. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124506>.
- [23] Song Chunlin, Wang Genxu, Mao Tianxu, et al. Linkage between permafrost distribution and river runoff changes across the Arctic and the Tibetan Plateau[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2020, 63(2): 292 – 302.
- [24] Sun Jiaqi, Wan Xiaojun, Cao Yongqiang, et al. Analysis of spatial and temporal evolution of hydrological and meteorological elements in Nenjiang River basin, China[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, 37: 941 – 961.
- [25] Bayard D, Stähli M, Parriaux A, et al. The influence of seasonally frozen soil on the snowmelt runoff at two Alpine sites in southern Switzerland[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 309(1/2/3/4): 66 – 84.
- [26] Li Pixue, Zhang Zhanhai, Liu Jiping. Dominant climate factors influencing the Arctic runoff and association between the Arctic runoff and sea ice[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 29(5): 10 – 20.
- [27] Niu Li, Ye Baisheng, Li Jin, et al. Effect of permafrost degradation on hydrological processes in typical basins with various permafrost coverage in Western China[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2011, 54(4): 615 – 624.
- [28] Lu Yin hao, Ye Baisheng, Li Chong. Changes of runoff of the Hailar River basin in the southern margin of permafrost zone, Northeast China during 1958 – 2008[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(2): 394 – 402. [陆胤昊, 叶柏生, 李翀. 近 50 年来我国东北多年冻土区南缘海拉尔河流域



- 径流变化特征分析[J]. 冰川冻土, 2014, 36(2): 394–402.]
- [29] Lan Cuo, Zhang Yongxin, Bohn T J, et al. Frozen soil degradation and its effects on surface hydrology in the northern Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(16): 8276–8298.
- [30] Liljedahl A K, Boike J, Daanen R P, et al. Pan-Arctic ice-wedge degradation in warming permafrost and its influence on tundra hydrology[J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9: 312–318.
- [31] Qin Jia, Ding Yongjian, Han Tianding. Identification of the factors influencing the baseflow in the permafrost region of the northeastern Qinghai-Tibet Plateau [J/OL]. *Water*, 2017, 9 [2020-05-19]. <https://www.mdpi.com/2073-4441/9/9/666>.
- [32] Gao Bing, Yang Dawen, Qin Yue, et al. Change in frozen grounds and its effect on regional hydrology in the upper Heihe basin, on the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *The Cryosphere*, 2018, 12(2): 657–673.
- [33] Wang Xiqiang, Chen Rensheng, Han Chuntan, et al. Changes in river discharge in typical mountain permafrost catchments, northwestern China [J]. *Quaternary International*, 2019, 519: 32–41.
- [34] Gibson J, Yib Y, Birks S. Isotopic tracing of hydrologic drivers including permafrost thaw status for lakes across North-eastern Alberta, Canada: a 16-year, 50-lake assessment [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 403(3/4): 352–359.
- [35] Yang Yuzhong, Wu Qingbai, Jin Huijun, et al. Delineating the hydrological processes and hydraulic connectivities under permafrost degradation on northeastern Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 569: 359–372.
- [36] van Huissteden J. Thawing permafrost: permafrost carbon in a warming Arctic [M]. London: Springer, 2020.
- [37] Ma Qiang, Jin Huijun, Bense V F, et al. Impacts of degrading permafrost on streamflow in the source area of Yellow River on the Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2019, 10(4): 225–239.
- [38] Ye Baisheng, Ding Yongjian, Kang Ersi, et al. Response of the snowmelt and glacier runoff to the climate warming-up in the last 40 years in Xinjiang Autonomous Region, China [J]. *Science in China: Series D*, 1999, 42(Suppl 1): 44–51.
- [39] Shen Yongping, Su Hongchao, Wang Guoya, et al. The responses of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang (I): hydrological effect [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(3): 513–527. [沈永平, 苏宏超, 王国亚, 等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(I): 水文效应 [J]. 冰川冻土, 2013, 35(3): 513–527.]
- [40] Wang Rui, Yao Zhijun, Liu Zhaoifei, et al. Snow cover variability and snowmelt in a high-altitude ungauged catchment [J]. *Hydrological Processes*, 2015, 29(17): 3665–3676.
- [41] Zhang Feiyun, Bai Lei, Li Lanhai, et al. Sensitivity of runoff to climatic variability in the northern and southern slopes of the Middle Tianshan Mountains, China [J]. *Journal of Arid Land*, 2016, 8(5): 681–693.
- [42] Zhang Wei, Kang Shichang, Shen Yongping, et al. Response of snow hydrological processes to a changing climate during 1961 to 2016 in the headwater of Irtysh River basin, Chinese Altai Mountains [J]. *Journal of Mountain Science*, 2017, 14(11): 2295–2310.
- [43] Li Fengping, Zhang Guangxin, Xu Y J. Spatiotemporal variability of climate and streamflow in the Songhua River basin, North-east China [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 514: 53–64.
- [44] Zhu Jingliang. Snowmelt runoff characteristics and its influence factors in Songhuajiang River [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015. [朱景亮. 松花江流域融雪产流特征及其影响因素研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.]
- [45] Zhang Guoqing, Xie Hongjie, Yao Tandong, et al. Quantitative water resources assessment of Qinghai Lake basin using Snowmelt Runoff Model (SRM) [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 976–987.
- [46] Zhang Shiqiang, Ye Baisheng, Liu Shiyin, et al. A modified monthly degree-day model for evaluating glacier runoff changes in China: part II: application [J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26(11): 1697–1706.
- [47] Zhao Qiudong, Zhang Shiqiang, Ding Yongjian, et al. Modeling hydrologic response to climate change and shrinking glaciers in the highly glacierized Kunma Like River catchment, Central Tian Shan [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2015, 16(6): 2383–2402.
- [48] Zhao Qiudong, 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.
- [49] Gan Rong, Luo Yi, Zuo Qiting, et al. Effects of projected climate change on the glacier and runoff generation in the Naryn River basin, Central Asia [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 523: 240–251.
- [50] Sorg A, Bolch T, Stoffel M, et al. Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia) [J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(10): 725–731.
- [51] Gao Xin, Ye Baisheng, Zhang Shiqiang, et al. Glacier runoff variation and its influence on river runoff during 1961–2006 in the Tarim River basin, China [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2010, 53(6): 880–891.
- [52] Zhang Zhihua, Deng Shifan, Zhao Qiudong, et al. Projected glacier meltwater and river run-off changes in the upper reach of the Shule River basin, north-eastern edge of the Tibetan Plateau [J]. *Hydrological Processes*, 2019, 33: 1059–1074.
- [53] Zhang Yong, Enomoto H, Ohata T, et al. Projections of glacier change in the Altai Mountains under twenty-first century climate scenarios [J]. *Climate Dynamic*, 2016, 47: 2935–2953.
- [54] Immerzeel W W, van Beek L P H, Bierkens M F P. Climate change will affect the Asian water towers [J]. *Science*, 2010, 328(5984): 1382–1385.
- [55] Su F, Zhang L, Ou T, et al. Hydrological response to future climate changes for the major upstream river basins in the Tibetan Plateau [J]. *Global and Planetary Change*, 2016, 136: 82–95.
- [56] Gao Xin. Change of glacier water resource [D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2010. [高鑫. 中国冰川水资源变化 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.]
- [57] Zhang Yiqing, Luo Yi, Sun Lin. Quantifying future changes in glacier melt and river runoff in the headwaters of the Urumqi River, China [J/OL]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75 [2020-05-19]. <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12665-016-5563-z>.
- [58] Huss M, Hock R. Global-scale hydrological response to future glacier mass loss [J]. *Nature Climate Change*, 2018, 8(2): 135–140.
- [59] Pritchard H D. Asia's shrinking glaciers protect large populations from drought stress [J]. *Nature*, 2019, 569(7758): 649–654.

[60] Gao Hongkai, Li Hong, Zheng Duan, et al. Modelling glacier variation and its impact on water resource in the Urumqi Glacier

No. 1 in Central Asia[J]. Science of The Total Environment, 2018, 644: 1160 – 1170.

## The future changes of Chinese cryospheric hydrology and their impacts on water security in arid areas

DING Yongjian<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Qiudong<sup>1,2</sup>, WU Jinkui<sup>2</sup>, ZHANG Shiqiang<sup>4,5</sup>, WANG Shengxia<sup>2</sup>,  
CHANG Yaping<sup>2</sup>, LI Xiangying<sup>6</sup>, SHANGGUAN Donghui<sup>1</sup>, HAN Haidong<sup>2</sup>,  
QIN Jia<sup>2</sup>, HAN Tianding<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Key Laboratory of Ecohydrology of Inland River Basin, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Northwest University, Xi'an 710027, China; 5. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710027, China; 6. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Continuously affected by climate warming, the hydrological processes are undergoing significant changes in Chinese cryosphere. Based on the summaries of the past changes of cryospheric meltwater, this paper focuses on the analysis of the future change characteristics of the cryospheric meltwater runoff, especially the tipping point of glacier meltwater and possible trend of glacier meltwater corresponding to an air temperature rise threshold of 2.0 °C by the middle and end of the 21st century. Furthermore, we study the impacts of cryospheric hydrological changes on water security of river basins, especially in arid inland river basins. The results show that the glacier meltwater runoff will decrease in most catchments of China. The future changes of glacier runoff will show three types: continued decrease, reaching peak in the near future and sustainable increase in catchment scale. The meltwater of single glacier will likely reach tipping point in future. And there are good relationships between the occurrence time of tipping point and the rising temperature rate and glacier size. The glacier runoff will still increase steadily until 2050 in the high glacierized basins consisted of large glaciers. While the glacier runoff has reached the tipping point in small glacierized basins. For other glacier catchments, the glacier runoff will reach peak point or show no significant change until 2020 – 2030. Overall, the glacier meltwater will decrease by 34% – 74% in northwest arid regions corresponding to an air temperature rise threshold of 2.0 °C under RCP global emission scenarios by the end of the 21st century. The cryospheric hydrology changes will lead to the decrease of water supply, conservation and regulation capacity, the increase of variation coefficient of annual runoff and drought/flood risk, and the advance of spring flood, which can further affect the water utilization system.

**Key words:** cryospheric hydrology; glacier meltwater; future change; impacts; water security

(责任编辑: 陈仁升; 编辑: 武俊杰)