

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2019.0018

CHEN Hongju, YANG Jianping, TAN Chunping. Estimating runoff variation in the future in a typical inland river based on the probability distribution method[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(4): 1299–1307. [陈虹举, 杨建平, 谭春萍. 基于概率分布法的典型内陆河流域径流未来变化[J]. 冰川冻土, 2020, 42(4): 1299–1307.]

基于概率分布法的典型内陆河流域径流未来变化

陈虹举^{1,2}, 杨建平², 谭春萍¹

(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: 基于黑河干流历史时期(1960–2012年)和RCPs(本文RCPs指RCP2.6、RCP4.5和RCP8.5三种情景)情景下预估的未来(2013–2100年)月平均流量和冰川融水数据,运用概率分布法和河道来水量距平法,分析了黑河干流出山径流量与冰川融水径流量及其极值的未来变化趋势与程度、径流丰枯变化以及冰川融水径流对黑河出山径流的补给与调节作用的变化。结果表明,相较历史时期,不同RCPs情景下未来黑河干流出山径流量将略呈增加态势,但不显著;月最大(7–8月)出山径流量将大幅度减少,不确定性降低,月最小(12月–翌年1月)出山径流量变化不明显。未来黑河干流,不同RCPs情景下枯水年的发生概率将增加2~3倍,偏枯水年在RCP2.6和RCP4.5情景下的发生概率亦将增大;黑河干流未来可能进入平水年,甚至枯水年。未来黑河干流年冰川融水径流与月最大冰川融水径流均显著减少,对黑河径流的补给与调节作用均降低。

关键词: 黑河; 流域径流量; 冰川融水径流量; 变化趋势; 概率分布

中图分类号: P338^{+.2} **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)04-1299-09

0 引言

全球气候变化对区域水文循环过程的影响是学术界一直高度关注的问题,而我国西北中高山径流形成区的水资源明显受气候变化的影响^[1-3]。在年降水量<200 mm的中国西北干旱区,其内陆河中下游主要依赖高山降水与冰雪融水供给。一方面,全球气候变化不仅影响高山区降水量的多寡,更影响降水的方式(降雨或降雪);另一方面,气候增暖显著影响被称为西北内陆河流域“固体水库”的冰川^[4-6],这两方面驱动干旱内陆河流域的水资源已发生明显变化,未来一段时间将进一步变化。在全球冰川呈退缩趋势的背景下^[7-12],过去几十年,受气候变暖影响,中国82.2%的冰川处于退缩状态,而且自21世纪以来,冰川退缩进一步加快^[7-8,11-16]。冰川加速退缩在短期内将增加河流流量,有利于中下游经济快速发展,但随着冰川资源逐渐耗尽,冰

川融水量将减少,这种变化将使依赖高山水资源供给的我国干旱内陆河流域的供水趋于紧张^[17-19],进而严重制约社会经济发展。因此,气候变化条件下冰川融水径流的极值变化及其在未来不同情景下的变化趋势,进而对河川径流的影响是当前科学家广泛关注的焦点。

从自然本底与社会经济角度而言,黑河流域是我国西北地区第二大内陆河流域,其跨越三个省份(青海、甘肃、内蒙古),不管是其地貌单元、径流形成与耗散,还是社会经济结构与发展水平,在干旱内陆地区具有很好的代表性^[2-3,6,20]。从战略定位而言,黑河流域位于我国21世纪“丝绸之路经济带”的中段,为重要能源通道,是甘肃省廊道经济发展的重要节点地区。而水资源将是实现上述功能的关键性因素。因此,在过去几十年,科研人员借助遥感、GIS技术手段与模型模拟方法已对冰川变化及

收稿日期: 2018-07-16; 修订日期: 2019-04-18

基金项目: “美丽中国”生态文明建设科技工程专项(XDA23060704)资助

作者简介: 陈虹举(1991–),男,甘肃会宁人,2017年在中国科学院西北生态环境资源研究院获硕士学位,现为中国科学院西北生态环境资源研究院在读博士研究生,从事冰冻圈环境变化影响、脆弱性与适应研究. E-mail: chen hong@lzb.ac.cn

通信作者: 杨建平,研究员,从事气候变化、冰冻圈变化的风险与适应研究. E-mail: jianping@lzb.ac.cn.

其水文影响,黑河干流出山径流变化及其对水资源的影响等进行了较详细研究与解读^[3,21-22]。然而,这些研究主要聚焦于年径流的变化及其影响,较少涉及径流极值变化及其未来趋势,尤其是使用概率方法研究径流极值变化的文献鲜见。本文基于1960—2012年(称为历史时期)的黑河干流月出山径流量数据,不同RCPs气候情景下(RCP2.6、RCP4.5和RCP8.5)模拟得到的2013—2100年干流月平均流量和冰川融水量数据,使用概率分布法与河道来水量距平法,对典型内陆河流域——黑河干流流域未来水资源变化趋势进行分析,并在出山径流量与冰川融水径流量两个层面,比较过去和未来两个时期二者的概率分布,以及未来冰川融水径流对河川径流的补给与调节变化,以期了解气候变化条件下出山径流量的未来变化趋势,未来水文干旱年发生的概率,以及冰川融水对未来极端水文干旱年的贡献。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

黑河流域是我国西北地区第二大内陆河,流域范围介于98°~102°E, 37°50′~42°40′N之间,地跨青海、甘肃、内蒙古三省区,总面积为14.29×10⁴ km²。其中,黑河干流流域面积11.6×10⁴ km²^[23],并以莺落峡和正义峡为界,划分为上、中、下游。莺落峡以上的祁连山区为上游,气候阴湿寒冷,多年平均气温不足2℃,年降水量200~700 mm,年蒸发量约为700 mm,是黑河流域的产流区,高寒草地生态系统为主,森林以板块状分布其间,属水源涵养功能区。莺落峡至正义峡为中游,多年平均气温6~8℃,年降水量介于50~200 mm,年蒸发量为2 000~4 000 mm,是水资源的主要利用区,灌溉农业发达,为人工绿洲生态系统。正义峡以下为下游,多年平均气温8~10℃,年降水量为42 mm,蒸发量为3 755 mm,属极端干旱区,除河流沿岸和居延三角洲外,大部为沙漠戈壁,为荒漠生态系统。

1.2 数据来源

(1)径流实测数据:1960—2012年黑河干流莺落峡月出山径流量。

(2)径流模拟数据:该数据是在Variable Infiltration Capacity (VIC)模型中增加了冰川次网格化方案^[24],并将IPCC CMIP5 GCM多模式集合平均输出的未来情景数据进行统计降尺度(Delta方法),驱动VIC模型,从而得到不同RCPs情景下2013—

2100年黑河干流月出山平均流量和冰川融水量,该数据由陈仁升研究员提供。

(3)其他数据:研究区的基础地理数据,来源于国家自然科学基金委员会“中国西部环境与生态科学数据中心”。

1.3 研究方法

1.3.1 Mann-Kendall 检验法

文中使用突变检验法(M-K检验法),分析黑河干流流域历史时期出山径流量和RCP2.6、RCP4.5和RCP8.5情景下模拟得到的未来出山径流量序列的变化趋势,并检验部分要素是否发生突变现象,并诊断突变点发生的具体时间。具体过程如下:

M-K检验法进行突变检验时,对于具有 n 个样本的时间序列 $x(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ 构建秩序列:

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i, (k=2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

其中,

$$r_i = \begin{cases} +1, & x_i > x_j \\ 0, & x_i \leq x_j, \end{cases} (j = 1, 2, \dots, i) \quad (2)$$

可见,秩序列 S_k 是第 i 时刻数值大于 j 时刻数值个数的累计数。在时间序列随机独立的假定下,定义统计量:

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{Var(S_k)}}, (k=1, 2, 3, \dots, n) \quad (3)$$

其中, $E(S_k) = \frac{k(k-1)}{4}$,

$$Var(S_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72}, (2 \leq k \leq n)。$$

UF_k 为标准正态分布,它是按时间序列 x 顺序 x_1, x_2, \dots, x_n 计算出的统计量序列,给定显著性水平 α ,查正态分布表得出的临界值 U_α ,若 $|UF_k| > U_\alpha$,则表明序列存在明显的趋势变化,按时间序列 x 逆序 x_n, x_{n-1}, \dots, x_1 再重复上述过程,同时使 $UB_k = -UF_k, k=n, n-1, \dots, 1, UB_1=0$ 。通过分析统计序列 UB_k 和 UF_k ,可以进一步分析序列 x 的变化趋势,且可以明确突变的时间区域。若 $UF_k > 0$,表明序列呈上升趋势;若 $UF_k < 0$,则表明序列呈下降趋势。当它们超过临界直线时,表明上升或下降趋势显著。 UB_k 和 UF_k 曲线图中,如果这两条曲线出现交点,且交点在临界线之间,那么交点对应的时刻便是突变开始的时间。

1.3.2 概率分布法

概率分布法是指为了研究随机试验,需了解各种随机事件发生可能性的大小,以揭示这些事件的内在统计规律,刻画事件发生可能性大小的数量指

标。事件的概率表示一次试验某一个结果发生的可能性大小。若要全面了解试验,则必须知道试验的全部可能结果及各种可能结果发生的概率,即必须知道随机试验的概率分布^[25]。文中采用概率密度函数(PDF),运用直方图区间对径流数据分组,每个区间上径流值的大小或多寡用矩形高低表示,若干矩形排列的图表示频度直方图,即每一个小区间径流量分布频次与相应区间内径流观测值个数百分比例。根据概率密度函数定义,除去区间长度,形成相应时间段径流量概率密度函数的估计,从而确定取值点附近的可能性。由随机变量取值的概率规律,凸显黑河干流出山径流量、出山径流量月最大值与月最小值,以及冰川融水径流量月最大值的整体变化趋势。

1.3.3 丰平枯水年的划分方法

文中采用《水文情报预报规范》(GB/T 22482-2008)中的河道来水量距平百分率(I_r)作为划分径流丰平枯的标准。河道来水量距平是指研究时期内河道流量与多年同期平均流量的差值,河道来水量距平与多年平均值的百分比为河道来水距平百分率,其计算公式为:

$$I_r(\%) = \frac{R_w - R_0}{R_0} \times 100\%$$

(4)

式中: I_r 为河道来水量距平百分率; R_w 为河道流量(m^3); R_0 为河道多年平均流量(m^3)。河道来水量距平百分率可以用于确定水文干旱等级。

表1 河道来水量距平百分率 I_r 与丰枯等级指标
Table 1 Indicators of abundance divided with percentage of runoff anomalies (I_r)

划分标准	河道来水量距平百分率
特丰水年	$20\% \leq I_r$
偏丰水年	$10\% \leq I_r < 20\%$
平水年	$-10\% \leq I_r < 10\%$
偏枯水年	$-20\% \leq I_r < -10\%$
特枯水年	$I_r < -20\%$

2 结果与分析

2.1 黑河干流出山径流量的变化

2.1.1 基于统计分析的趋势变化

1960-2012年,黑河干流出山径流量增加趋势明显[图1(a)]。M-K突变检验结果[图1(b)]显示,出山径流量的突变点为2006年,之前,在波动中略有增加,之后其增速加快。其中 UF_k 曲线大部分处于临界值中间,2006年后增加趋势显著,达到95%的置信度水平。

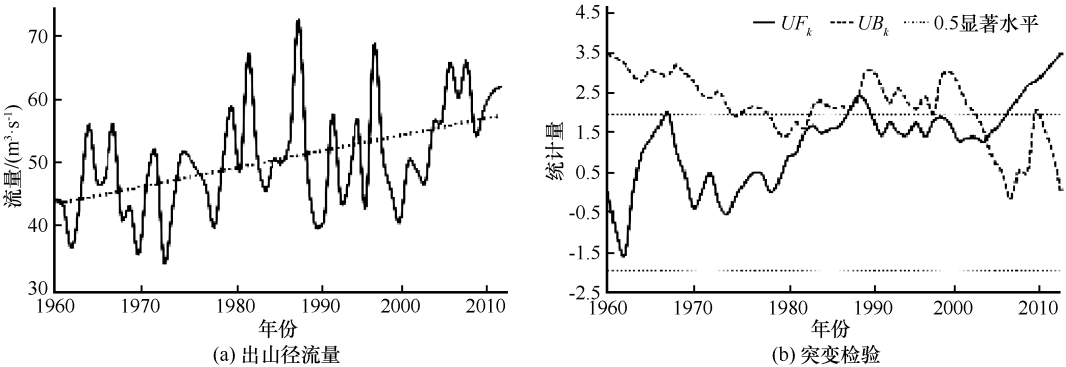


图1 1960-2012年黑河干流出山径流量变化(a)及突变检验(b)

Fig. 1 Annual variation of the runoff from the mountainous area of the Heihe River during 1960-2012 (a) and mutation test (b)

在RCP2.6情景下,黑河干流出山径流量略呈减少趋势(图2),RCP4.5情景下变化比较平稳(图3),而RCP8.5情景下增加趋势明显(图4)。M-K突变检验发现,RCP2.6情景下突变点为2090年,该年之前,出山径流量减少缓慢,以后,有急剧下降趋势。其中 UF_k 曲线一直处于临界值中间,表明径流量增加或减少并不显著。RCP4.5情景下的突变点为2074年,之前,出山径流量在波动中增加,之后,呈下降趋势,不过增加和减少趋势不显著。

RCP8.5情景下的突变点为2047年,这之前,出山径流量呈增加趋势,之后,出山径流量增加趋势更加明显,尤其是2066年后增加趋势更加显著。

可见,在不同RCPs情景下,21世纪黑河干流出山径流量变化迥异,只有在RCP8.5情景下呈增加趋势。M-K突变检验显示,随着排放浓度的加强,未来黑河干流出山径流量发生突变的时间将提前,RCP2.6、RCP4.5和RCP8.5情景下,突变点分别为2090年、2074年和2047年。

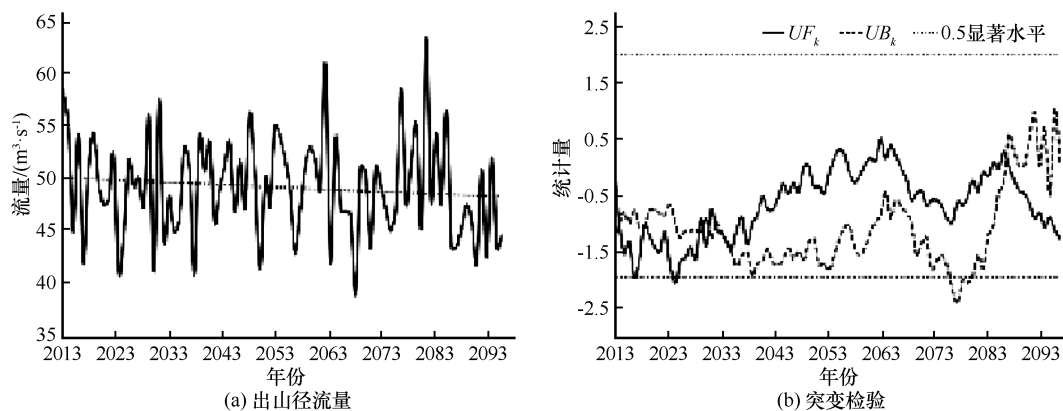


图2 RCP2.6情景下未来出山径流量变化(a)及突变检验(b)

Fig. 2 Annual variation of the runoff from the mountainous area of the Heihe River (a) and mutation test (b) under RCP2.6

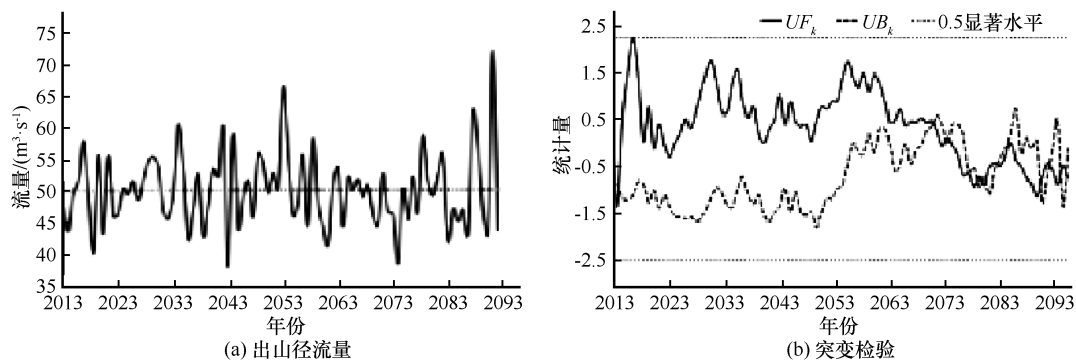


图3 RCP4.5情景下未来出山径流量变化(a)及突变检验(b)

Fig. 3 Annual variation of the runoff from the mountainous area of the Heihe River (a) and mutation test (b) under RCP4.5

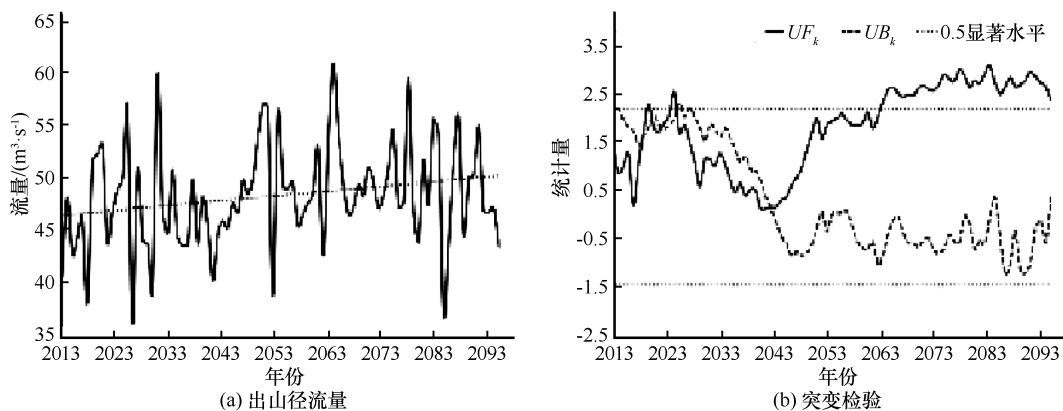


图4 RCP8.5情景下未来出山径流量变化(a)及突变检验(b)

Fig. 4 Annual variation of the runoff from the mountainous area of the Heihe River (a) and mutation test (b) under RCP8.5

2.1.2 基于概率分布法的未来变化

以1960–2012年(历史时期)为基准时段,用该时段的黑河干流年出山径流量与月最大值(7–8月)与最小值(12月–翌年1月)的概率密度函数(PDF)与RCPs情景下模拟的相应结果的概率密度函数比较,发现基准时段与RCPs情景下的模拟结果均服从广义极值分布,其中位置参数 μ (均值)反映径流量的变化规律,值越大,表明径流量越大;

尺度参数(标准差 δ)反映模拟结果的离散程度,值越大,不确定性越大。

相较历史时期,在RCP2.6情景下,未来黑河干流年出山径流量概率密度函数的均值 μ 将可能增大1.08%,RCP4.5和RCP8.5情景下,分别将增大0.37%和1.39%,标准差 δ 总体减少,不确定性降低(图5)。而对于黑河干流月最大出山径流量(主要集中在7–8月),在RCP2.6情景下均值 μ 将减

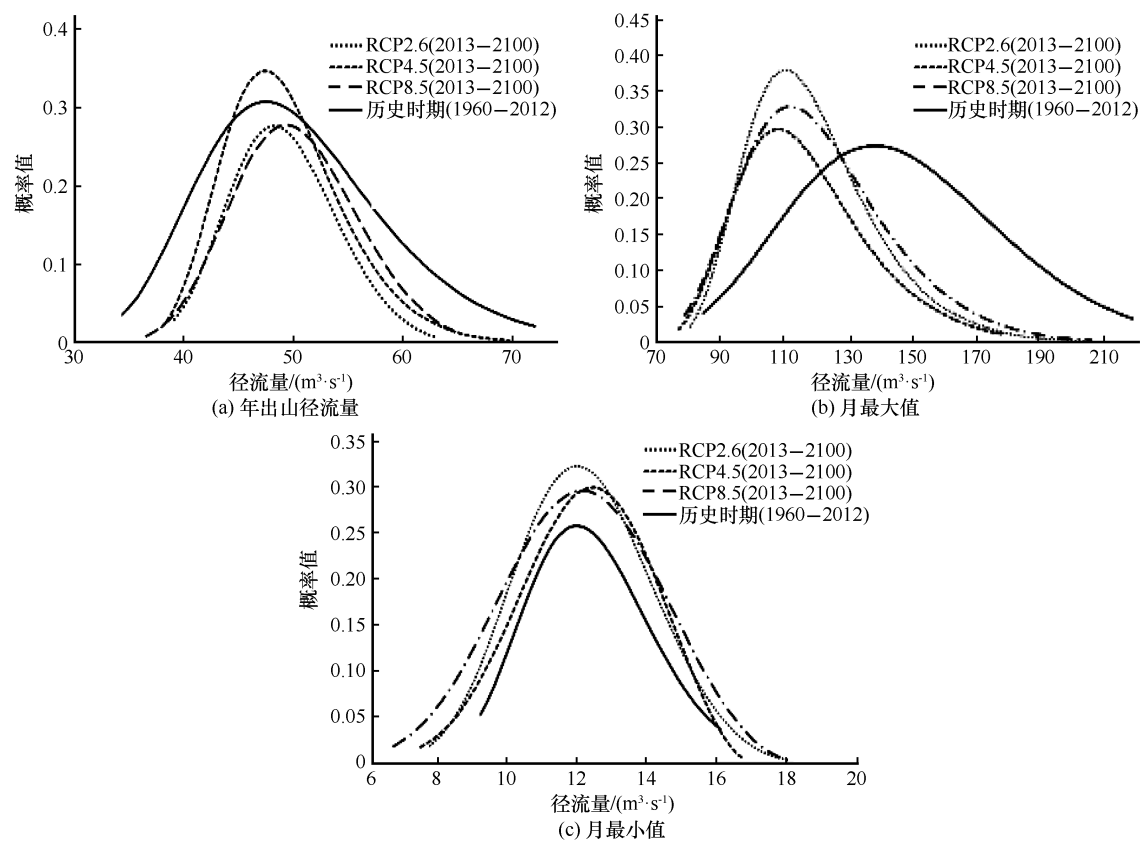


图5 历史时期(1960 – 2012年)和不同RCPs情景预估的未来(2013 – 2100年)黑河干流年出山径流量(a)、月最大值(b)、月最小值(c)概率密度函数

Fig. 5 Probability density functions of annual runoff (a), monthly maximum runoff (b), monthly minimum runoff (c) from the mountainous area of the Heihe Rive in historical period (1960 – 2012) and under RCP2. 6, RCP4. 5, RCP8. 5 (2013 – 2100)

少 17. 43%，在 RCP4. 5 和 RCP8. 5 情景下，将可能减少 19. 25% 和 16. 72%，标准差 δ 也减少，不确定性降低；月最小出山径流量(主要在 12 月 – 翌年 1 月)在未来 RCPs 情景下，均值 μ 变化不大，标准差 δ 总体增大。

以上变化表明，未来(2013 – 2100 年)黑河干流年出山径流量将呈增加趋势，不确定性降低，分布更加集中。但据 μ 值增加幅度，这种增加不显著。而月最大出山径流量未来将可能大幅减少，不确定

性降低。月最小出山径流量未来变化趋势不明显，不确定性增加。

2. 1. 3 21 世纪丰枯变化

依据出山径流量概率密度函数(PDF)和丰枯水年划分等级，统计历史时期和 RCPs 情景下不同丰枯水年发生的概率(表 2)。相较于历史时期，在 RCP2. 6 情景下，未来特丰水年将可能减少 10 倍多，RCP4. 5 和 RCP8. 5 情景下减少约 3 倍左右。偏丰水年在 RCP2. 6 和 RCP4. 5 情景下略有减少，而

表2 历史时期和不同RCPs情景下黑河干流出山径流量丰枯水年的划分及发生概率

Table 2 Division and occurrence probability of the runoff from the mountainous area of the Heihe Rive in the historical period and different RCPs scenarios

划分标准	实测(1960 – 2012年)	RCP2. 6(2013 – 2100年)	RCP4. 5(2013 – 2100年)	RCP8. 5(2013 – 2100年)
特丰水年	0. 13	0. 01	0. 04	0. 05
偏丰水年	0. 13	0. 09	0. 10	0. 14
平水年	0. 44	0. 66	0. 61	0. 62
偏枯水年	0. 20	0. 21	0. 23	0. 17
特枯水年	0. 11	0. 03	0. 03	0. 03

在RCP8.5情景下又有所增加。表2显示,未来出现平水年的概率将增加20%左右。在RCP2.6和RCP4.5情景下,偏枯水年发生概率也将增加。在不同RCPs情景下,特枯水年发生概率将减小。

综上所述,未来黑河干流可能进入平水年,甚至枯水年,而且出山径流量的季节分配亦可能发生一定改变,7-8月出山径流量将减少。7-8月正是黑河流域中下游农业灌溉高峰时期,亦是黑河向下游分水时期,出山径流量减少不仅将显著影响农业灌溉用水,可能导致农业减产,同时影响下游分水量,可能使已经好转的生态又趋向恶化。

2.2 黑河干流冰川融水径流及其补给与调节功能的变化

作为高山固体水库,冰川对河川径流起着补给与多年调节作用。在高温少雨的干旱年,冰川消融加强,储存于冰川上的大量冰融化补给河流,使河流的水量有所增加;相反,在多雨低温的丰水年,又有大量的降水被储存于冰川,使河流的水量减少。黑河流域分布冰川1 078条,冰川面积420.55 km²,冰储量13.67 km³[26]。冰川融水补给率是冰川融水径流量与河川径流量的百分比。20世纪80年

代早期,王宗太等[26]在编纂祁连山区冰川目录时,估算的黑河干流莺落峡水文站的冰川融水补给率为3.6%。之后,高鑫等[27]利用度日模型研究了河西内陆河流域冰川融水的近期变化,发现在1961-2006年间,气候变暖,冰川融化加强,河西内陆河流域冰川融水增加。受冰川融水增加,黑河流域冰川融水补给率增大,变化于5%~15%之间[27]。随着气候持续变暖,冰川冰体进一步融化,未来黑河流域冰川融水径流的变化如何,冰川融水径流对河川径流的补给与调节作用又如何变化,下文对此展开分析。

2.2.1 冰川融水径流量的未来变化

在RCP2.6情景下,黑河干流冰川融水径流量概率密度函数均值 μ 与历史时期持平,而在RCP4.5和RCP8.5情景下,均值 μ 约减少20%和32.4%(图6)。在黑河流域,最大冰川融水径流量出现在每年7-8月。在RCP2.6情景下,冰川融水径流最大值的概率分布均值 μ 将减少15.0%,RCP4.5和RCP8.5情景下,均值 μ 将可能分别减少17.42%和22.28%。总体上均值 μ 将减少,标准差 δ 增加。

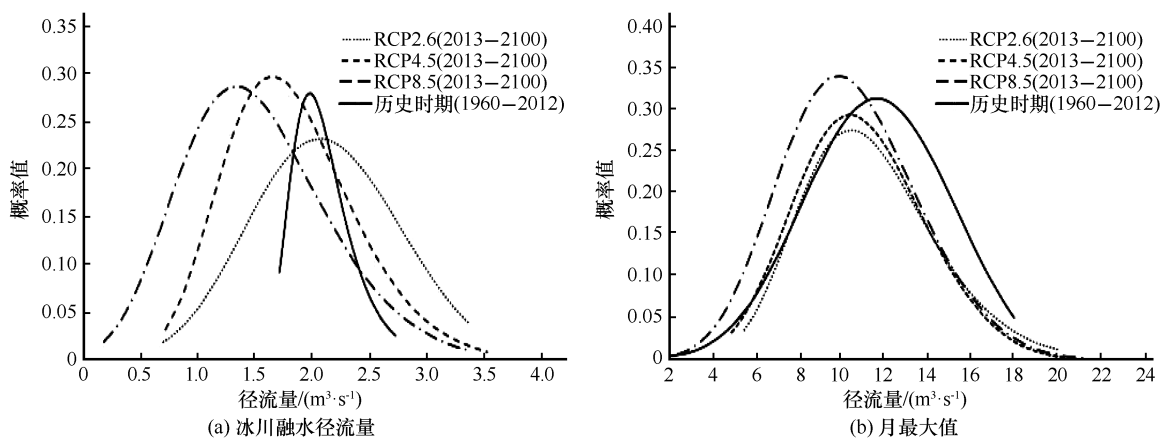


图6 历史时期(1960-2012年)和不同RCPs情景下预估的黑河干流年冰川融水径流量(a)以及月最大值(b)的概率密度函数
Fig. 6 Probability density functions of annual glacial melt water runoff (a) and monthly maximum glacial melt water runoff (b) from the mountainous area of the Heihe River in historical period (1960-2012) and under RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 (2013-2100)

上述分析表明,未来(2013-2100年)黑河干流年冰川融水径流量呈减少趋势,冰川融水径流量月最大值亦呈减少趋势,不确定性增加。

2.2.2 冰川融水对黑河干流的补给与调节作用

图7显示,随着黑河干流河道来水距平百分率的增加,冰川融水对黑河干流的补给率在减小,补给量减少。在历史时期(1960-2012年),黑河干流

出山径流量每增加1%,冰川融水对黑河干流的补给率就减少0.04%。RCP2.6、RCP4.5和RCP8.5情景下,未来(2013-2100年)分别减少0.02%、0.02%和0.03%。然而,当河道来水距平小于-22.5%时,即干旱年份,冰川融水对黑河干流出山径流量的补给率就大,分别为4.54%(1960-2012年)、4.65%、(RCP2.6)、3.98%(RCP4.5)和3.50%(RCP8.5)。

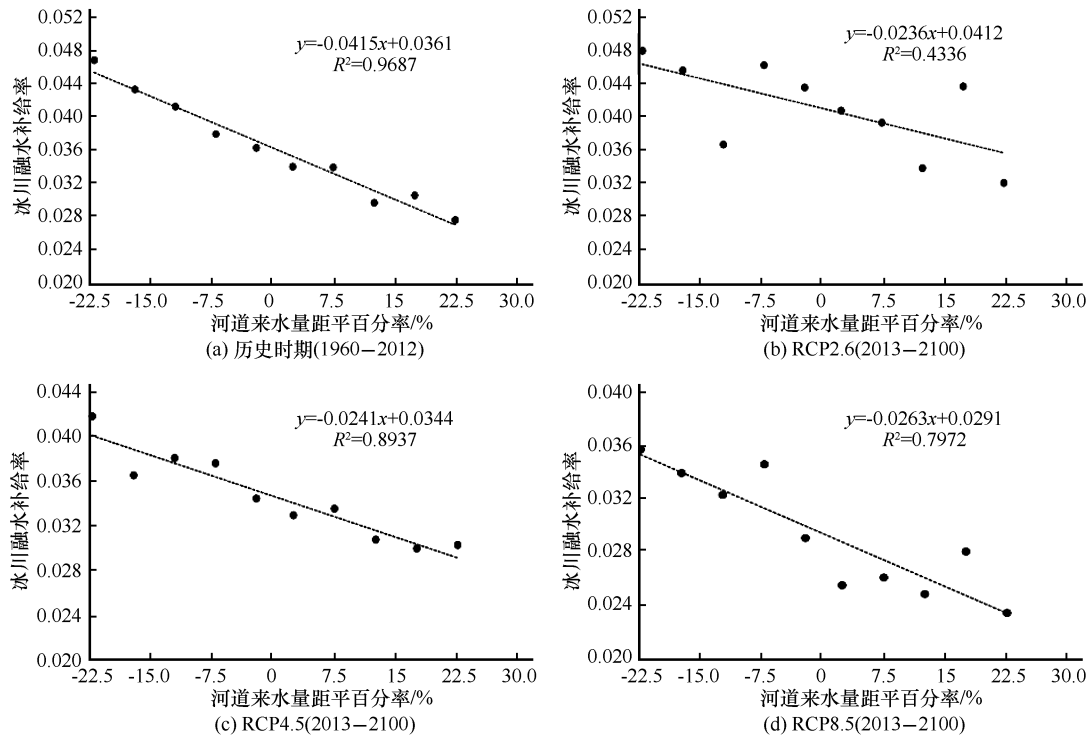


图7 不同河道来水量情况下冰川融水对河流的补给率

Fig. 7 Recharge rates of glacial melt water to river in different situations: in the historical period (1960 – 2012) (a), and under RCP2. 6 (2013 – 2100) (b), RCP4. 5 (2013 – 2100) (c) and RCP8. 5 (2013 – 2100) (d)

相比较而言,未来只有在RCP2.6情景下,枯水年冰川融水对黑河干流的补给率与历史时期接近,RCP4.5和RCP8.5情景下,枯水年冰川融水对黑河干流的补给率远小于历史时期。表明未来冰川融水对黑河干流的补给将减小,调节作用将降低。

3 结论

(1) 历史时期(1960 – 2012年)黑河干流出山径流量明显增加。但不同RCPs情景下,21世纪(2013 – 2100年)出山径流量变化不一,在RCP2.6情景下,出山径流量略有减少,RCP4.5情景下变化不大,而RCP8.5情景下呈增加趋势。M-K突变检验显示,随着排放浓度增大,未来黑河干流出山径流量发生突变的时间将提前,RCP2.6、RCP4.5和RCP8.5情景下,突变点分别为2090年、2074年和2047年。

(2) 相较历史时期,未来(2013 – 2100年)黑河干流出山径流量将略呈增加态势,不同RCPs情景下概率密度函数的均值 μ 将增大0.37% ~ 1.39%,但不显著,不确定性降低。未来最大出山径流量将可能大幅减少,不同RCPs情景下概率密度函数的

均值 μ 将减少16.72% ~ 19.25%,不确定性降低,而最小出山径流量变化趋势不明显。

(3) 2013 – 2100年黑河干流冰川融水径流呈减少趋势,RCP4.5和RCP8.5情景下概率密度函数的均值 μ 将分别减少20%和32.4%,对黑河流域的补给与调节作用将降低。只有在RCP2.6情景下,在枯水年份,冰川融水径流对黑河出山径流的补给作用与历史时期接近。

(4) 未来黑河干流流域不同RCPs情景下枯水年的发生概率是历史时期的2 ~ 3倍,偏枯水年在RCP2.6和RCP4.5情景下的发生概率亦将增大,只有在RCP8.5情景下的发生概率减小。在不同RCPs情景下,特丰水年和偏丰水年发生的概率也将减小。可能进入平水年,甚至枯水年,而且出山径流量的季节分配亦可能发生一定改变,7 – 8月出山径流量将减少。

黑河流域是中国内陆河流域的典型代表,文中首次使用概率分布法对黑河干流出山径流量与冰川融水径流的未来变化特征与程度进行了研究。虽然在VIC模型中增加了冰川次网格化方案,在一定程度上提高了模拟精度($R^2 \approx 0.8$),但由于受寒区水文过程精准刻画的制约和CIMP5多模式输出的

气候情景预估数据的不确定性等因素,黑河干流出山径流量与冰川融水径流量预估具有一定的不确定性,从而使文中概率分布变化、丰枯变化以及冰川融水径流对河川径流的补给与调节作用变化分析亦具有一定的不确定性,故尚需在未来进一步提高模拟精度,为黑河流域生态建设、产业布局、下游调水与水资源适应性管理提供科学支撑。

参考文献(References):

- [1] He Jianqiao, Song Gaoju, Jiang Xi, et al. Relation between glacial meltwater runoff and mountainous runoff in 2006 in four typical river basins of Heihe River water system[J]. Journal of Desert Research, 2008, 28(6): 1186 – 1189. [贺建桥, 宋高举, 蒋熹, 等. 2006年黑河水系典型流域冰川融水径流与出山径流的关系[J]. 中国沙漠, 2008, 28(6): 1186 – 1189.]
- [2] Li Dongliang, Feng Jianying, Chen Lei, et al. Study on inter-decadal change of Heihe runoff and Qilian mountain's climate [J]. Plateau Meteorology, 2003, 22(2): 104 – 110. [李栋梁, 冯建英, 陈雷, 等. 黑河流量和祁连山气候的年代际变化[J]. 高原气象, 2003, 22(2): 104 – 110.]
- [3] Lan Yongchao, Ding Yongjian, Liu Jinqi, et al. Change of water resources in mountainous area of Heihe River under global-warming scene[J]. Journal of Desert Research, 2005, 25(6): 863 – 868. [蓝永超, 丁永建, 刘进琪, 等. 全球气候变暖情景下黑河山区流域水资源的变化[J]. 中国沙漠, 2005, 25(6): 863 – 868.]
- [4] Yang Zhenniang. Glacier water resources in China[M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1991. [杨针娘. 中国冰川水资源[M]. 甘肃科学技术出版社, 1991.]
- [5] 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.
- [6] Yang Zhenniang, Cao Zhen tang, Wang Qiang. Qilian mountain in Heihe River basin, the characteristics of space-time distribution of precipitation [C]//Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology, Chinese Academy of Sciences. Beijing: Science Press, 1992: 110 – 112. [杨针娘, 曹真堂, 王强. 祁连山黑河流域降水时空分布特征[C]//中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊. 北京: 科学出版社, 1992: 110 – 112.]
- [7] Ren Jiawen, Qin Dahe, Kang Shichang, et al. Glacier variations and climate warming and drying in the central Himalayas [J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(1): 65 – 69.
- [8] Liu Shiyin, Ding Yongjian, Li Jing, et al. Glaciers in response to recent climate warming in western China[J]. Quaternary Sciences, 2006, 26(5): 762 – 771. [刘时银, 丁永建, 李晶, 等. 中国西部冰川对近期气候变暖的响应[J]. 第四纪研究, 2006, 26(5): 762 – 771.]
- [9] Solomon S, Qin D, Manning M, et al. IPCC. Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2007.
- [10] Arendt A A. Geophysics. Assessing the status of Alaska's glaciers[J]. Science, 2011, 332(6033): 1044 – 1045.
- [11] Bie Qiang, Qiang Wenli, Wang Chao, et al. Monitoring glacier variation in the upper reaches of the Heihe River based on remote sensing in 1960 – 2010[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(3): 574 – 582. [别强, 强文丽, 王超, 等. 1960 – 2010年黑河流域冰川变化的遥感监测[J]. 冰川冻土, 2013, 35(3): 574 – 582.]
- [12] Xiang Lingzhi, Liu Zhihong, Liu Jinbao, et al. Variation of glaciers and its response to climate change in Bomi County of Tibet Autonomous region in 1980 – 2010[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(3): 593 – 600. [向灵芝, 刘志红, 柳锦宝, 等. 1980 – 2010年西藏波密地区典型冰川变化特征及其对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2013, 35(3): 593 – 600.]
- [13] Kang Shichang, Chen Feng, Ye Qinghua, et al. Glacier retreating dramatically on the Mt. Nyainqentanglha during the last 40 years [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(6): 869 – 873. [康世昌, 陈锋, 叶庆华, 等. 1970 – 2007年西藏念青唐古拉峰南、北坡冰川显著退缩[J]. 冰川冻土, 2007, 29(6): 869 – 873.]
- [14] Li Zhongqin, Shen Yongping, Wang Feiteng, et al. Response of glacier melting to climate change: take Urumqi Glacier No. 1 as an example [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(3): 333 – 342. [李忠勤, 沈永平, 王飞腾, 等. 冰川消融对气候变化的响应——以乌鲁木齐河源1号冰川为例[J]. 冰川冻土, 2007, 29(3): 333 – 342.]
- [15] Wang Liping, Xie Zichu, Liu Shiyin, et al. Glacierized area variation and its response to climate change in Qangtang Plateau during 1970 – 2000[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(5): 979 – 990. [王利平, 谢自楚, 刘时银, 等. 1970 – 2000年羌塘高原冰川变化及其预测研究[J]. 冰川冻土, 2011, 33(5): 979 – 990.]
- [16] Lan Yongru, Liu Gaohuan, Shao Xuemei. Variation of the Melang Glacier in Mount Kawa Karpo in the past 40 years, based on dendrochronology[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(6): 1229 – 1234. [蓝永如, 刘高焕, 邵雪梅. 近40 a来基于树轮年代学的梅里雪山明永冰川变化研究[J]. 冰川冻土, 2011, 33(6): 1229 – 1234.]
- [17] Bank T W. World development indicators 2003 [M]. World Bank, 2008.
- [18] Programme U N D, Office H D R. Human Development Report 2006[R]. New York: New York Oxford University Press, 2006, 45(100): 155 – 191.
- [19] Wgiii I. Climate change 2007. Mitigation of climate change: Working Group III Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC[R]. Computational Geometry, 2007: 1 – 21.
- [20] Lai Zuming. Study on response of the changes of runoff in the mountain area of the inland river basin to global warming [C]//Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology, Chinese Academy of Sciences. Beijing: Science Press, 1992: 64 – 70. [赖祖铭. 甘肃内陆河流域变化及其气候影响[C]//中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊. 北京: 科学出版社, 1992: 64 – 70.]
- [21] Gao Qianzhao, Yang Xinyuan. Study of the changes of climate and runoff in the mountain area of the inland river basin under global warming [C]//Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology, Chinese Academy of Sciences. Beijing: Science Press, 1985: 131 – 141. [高前兆, 杨新源. 甘肃河西内陆河径流特征与冰川补给[C]//中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊. 北京: 科学出版社, 1985: 131 – 141.]
- [22] Shi Yafeng. Estimation of the water resources affected by climatic warming and glacier shrinkage before 2050 in west China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, 23(4): 333 – 341. [施雅风. 2050年前气候变暖冰川萎缩对水资源影响情景预估[J]. 冰川冻土, 2001, 23(4): 333 – 341.]

- [23] Chen Xuelin. The ecological water dispatching in the Heihe River from 2000 to 2004[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006, 20(2): 104 – 108. [陈学林. 2000 – 2004年黑河流域生态调水[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(2): 104 – 108.]
- [24] Zhao Qiudong, Ye Baisheng, Ding Yongjian, et al. Coupling a glacier melt model to the variable Infiltration Capacity (VIC) model for hydrological modeling in north-western China[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 68(1): 87 – 101.
- [25] Baidu Encyclopedia . Probability distribution[EB/OL]. [2017-06-15]. <http://baike.baidu.com/view/45323.htm>. [百度百科. 概率分布[EB/OL]. [2017-06-15]. <http://baike.baidu.com/view/45323.htm>.]
- [26] Wang Zongtai. Glacier inventory of China: I: Qilian mountains [R]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology, CAS, 1981. [王宗太. 中国冰川目录: I: 祁连山区[R]. 兰州: 中国科学院兰州冰川冻土研究所, 1981.]
- [27] Gao Xin, Zhang Shiqiang, Ye Baisheng, et al. Recent changes of glacier runoff in the Hexi inland river basin[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(3): 344 – 350. [高鑫, 张世强, 叶柏生, 等. 河西内陆河流域冰川融水近期变化[J]. 水科学进展, 2011, 22(3): 344 – 350.]

Estimating runoff variation in the future in a typical inland river based on the probability distribution method

CHEN Hongju^{1,2}, YANG Jianping², TAN Chunping¹

(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: The future (2013 – 2100) monthly mean runoff and glacial melt water from the mountainous area of the Heihe River are estimated based the data in historical periods (1960 – 2012) and forecasted in represented concentration pathway (RCP) scenarios (RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5), using the probability distribution method and the river water flow anomaly method. The results show that compared with the historical period, the future runoff from the mountainous area of the river will increase slightly in different scenarios, but it is not significant. The maximum monthly (July to August) mountain runoff will be greatly reduced, the uncertainty will be reduced too, as well as the monthly minimum mountain runoff (December to January of the next year); the change in runoff in the mountain areas will be not obvious; in the future, the occurrence probability of dry years in mountainous areas under different RCPs scenarios will increase by 2 to 3 times, and the probability of occurrence of dry years in RCP2.6 and RCP4.5 scenarios will also increase; the Heihe mainstream will enter median water year, even more dry. In the future, the glacial melt water runoff and the monthly maximum glacial melt water runoff of the river will significantly reduce, so do the ability of supply and regulation of the Heihe River runoff.

Key words: Heihe River; runoff; meltwater runoff; variation tendency; probability distribution

(责任编辑: 上官冬辉; 编辑: 周成林)