

冰冻圈水文过程对黑河上游径流的影响分析

王宇涵, 杨大文, 雷慧闽, 杨汉波

(清华大学 水利水电工程系, 北京 100084)

摘要: 黑河上游处于高寒山区, 开展冰冻圈水文过程对径流的影响研究, 对于判断该地区径流变化趋势及其可持续性具有重要意义。本文应用基流分割、逐步多元回归等方法, 分析了1960—2013年黑河上游出山径流量的变化及其原因, 重点估计了融雪、冰川融化对径流的贡献, 探讨了土壤冻融过程对径流变化的可能影响。分析结果表明, 黑河上游山区河川径流在近54年间呈现上升趋势, 其中以基流部分的上升为主。降水与气温变化对河川径流上升均有较大贡献。导致春季径流增加的主要因素为温度、降水次之; 导致秋季径流增加的主要因素为降水、温度次之。夏季黑河上游东支的雨强有显著增大趋势(日雨量增幅为0.9 mm/10 a), 对于河川径流贡献的比例约为15%。黑河山区的逐年降雪量变化不显著, 冰川融化对径流增加的贡献小于10%。由此推断气温上升导致基流增加的主要原因是: 气温升高导致高寒山区冻土活动层增厚, 增加了土壤蓄水容量, 从而导致降雨下渗量增加和基流量增大。由于黑河上游冻土分布广泛, 未来气温持续上升的情况下, 这种产流机制变化导致的基流增加具有可持续性。

关键词: 黑河上游; 河川径流增加; 归因分析; 基流分割; 冰冻圈水文过程

中图分类号: TV121

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20150001

1 研究背景

黑河是我国第二大内陆河, 发源于祁连山, 上游为典型高寒山区气候, 径流受冰冻圈水文过程的影响^[1-3]; 中下游地区的气候干燥, 社会经济和自然生态都主要依赖于来自上游祁连山的径流。近几十年间黑河上游山区径流有逐年增加的趋势^[4-7], 探究径流变化的原因, 并判断这一变化是否具有趋势性和可持续性, 对制定未来黑河的治水方略与流域可持续发展规划都具有十分重要的意义。

以往研究表明, 近几十年黑河上游降水、气温均有上升趋势, 且均对径流增加有所贡献^[4, 7-8]。有别于低海拔的温带气候区, 地处高海拔寒冷山区的黑河上游径流与融雪、冰川融化和土壤冻融等冰冻圈水文过程有密切关系^[1-3]。研究表明, 黑河上游冰川及融雪径流约占总径流10%, 北大河上游冰川径流约占30%^[1]; 黑河上游冻土非常发育^[2], 土壤冻融过程与径流有密切关系^[2-3]。以往研究中缺乏对于降水、气温变化对径流变化影响程度的判断, 且对于冰冻圈水文过程对黑河上游径流变化的影响机理研究不足, 认识尚十分有限。

本文通过对逐日流量过程进行基流分割, 分析快径流和基流的变化趋势, 从而探究径流变化的机理; 采用统计回归方法, 探讨降水和气温变化对径流(总径流、基流、快径流)变化的影响程度。在此基础上, 重点探讨冰冻圈水文过程对黑河上游河川径流的影响。

收稿日期: 2015-01-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(91225302)

作者简介: 王宇涵(1993-), 男, 天津人, 博士生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: wangyuha14@mails.tsinghua.edu.cn

通讯作者: 杨大文(1966-), 四川人, 教授, 主要从事水文水资源研究。E-mail: yangdw@tsinghua.edu.cn

2 研究区概况及采用的资料

黑河发源于祁连山脉,干流全长约800 km,总流域面积约14万km²。黑河流域上游山区的海拔高程为2 000~5 500 m,平均年降水量约350 mm,多年平均气温不足2℃^[8]。以正义峡为出口的黑河上游山区包括以莺落峡为出口的黑河干流山区和以梨园堡为出口的梨园河山区。以鸳鸯池为出口的北大河上游山区包括以冰沟为出口的讨赖河山区和以新地为出口的洪水坝河山区。黑河干流莺落峡水文站以上的主要产流区有两条支流,分别是东支和西支,出口站点分别为祁连和扎马什克。黑河上游山区的海拔高程约3 000~5 500 m,属于寒区。降雪为降水组成的重要部分,融雪径流为春季径流的重要成分^[4]。海拔4 000 m以上有冰川分布,黑河山区共有冰川428条,总面积约130 km²,估计冰储量0.33万m³,冰川末端平均海拔4 100 m,雪线高度在海拔4 400~4 500 m之间^[9]。在气候变化条件下,冰川呈逐年退缩趋势^[10-11]。黑河上游冰川和多年积雪总面积约337 km²,占流域面积3.4%^[4]。黑河上游山区多年冻土和季节性冻土非常发育^[2],冻土对气候变化的敏感性强^[3]。气候变化条件下,黑河上游多年冻土地带有地温显著上升的趋势,以及有冻结指数显著下降和融化指数显著上升的趋势,表明黑河流域多年冻土正在变为季节性冻土^[12]。气温上升使祁连山地区多年冻土活动层以0.1~0.2 m/10 a的速率增厚^[13],季节性冻土冻结厚度逐年降低,活动层增厚^[14]。

流量资料来源于黑河流域的水文站观测,水文站分布如图1所示。其中,祁连、扎马什克、莺落峡、梨园堡、冰沟、新地水文站分别对应上游山区流域的控制站,其径流过程受人类影响小,是本文采用的站点。本文采用的径流数据为1960—2013年的逐日径流资料,冰沟水文站于2002年撤站,祁连水文站始建于1967年,两个站点的径流序列长度有所不同。

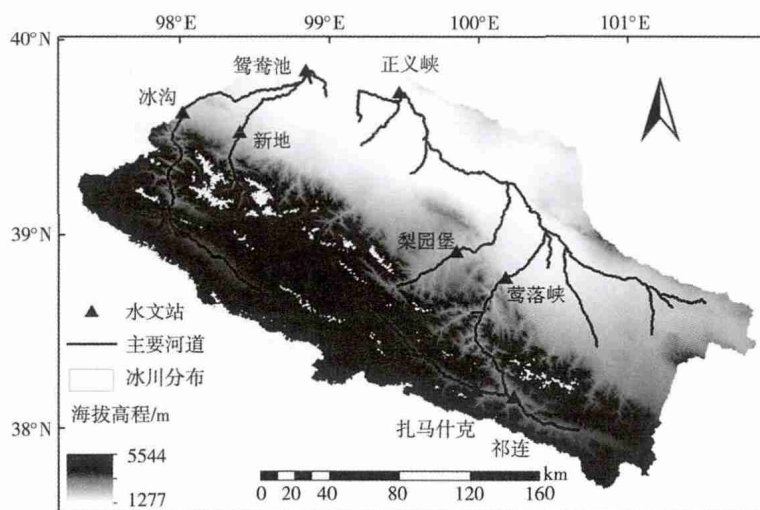


图1 黑河中上游地形

降水数据是国家气象信息中心提供的全国0.25°网格数据,该数据是由近3 000个站点数据资料插值得到,并广泛应用于水文水资源分析,有研究表明该数据在观测站点稀少的高原地区能够较好地反应降水的空间分布^[15]。该降水数据系列为1960—2013年,提供了逐日降水量。本文将0.25°网格数据重采样到研究区域的10 km网格上,用于计算各流域的平均降水量。

国家气象信息中心气象数据共享网提供了研究区域及周边的12个气象站逐日气温数据。根据站点数据,考虑高程修正插值得到研究区10 km网格的逐日气温数据。

为了从降水数据中区分降雨和降雪,有学者针对我国不同地区进行了统计分析,得到了我国区分降雨与降雪的临界温度^[16-17]。本文采用相应区域的临界温度值来区分研究区的降雨和降雪,从而计算流域平均的降雨量和降雪量。研究区内的冰川分布及其面积数据来源于第一、二次冰川编目数据^[18-19],分别是1960年和2010年的冰川面积分布数据。基于该数据,本文计算了黑河上游各个流域的冰川面

积变化,估计了冰川储量变化和冰川融化径流量。

3 分析方法

本文从年和季节两个时间尺度分析黑河上游各流域的径流变化趋势和原因。四季的划分为:每年3—5月为春季,6—8月为夏季,9—11月为秋季,12—次年2月为冬季。考虑到冬季的降雪大多在春季融化,夏秋季的降水可能对冬、春季的基流有影响,为保证水文过程在年尺度上的周期性,本文将水文年起始季节设置为夏季,即一年为6月1日至次年5月31日。主要采用:河川径流的基流分割、冰川融化径流估计和逐步多元回归方法等。

3.1 基流分割 本文采用英国水文研究所提出的平滑最小值基流分割方法^[20-21]。该方法是基于流量(或水位)划分径流成分的常用方法,适用于基流比重较大的流域,分离结果可信度较高^[22]。以往的研究表明,平滑最小值方法相比数字滤波法,在祁连山地区有更好的应用效果^[23]。

平滑最小值基流分割方法将连续的径流序列划分为互不重叠的时段,确定每个时段中的最小流量值,然后在这些最小值中挑选满足一定条件的点组成各时段基流拐点,将拐点用直线连接并采用线性内插得到基流序列^[23]。根据流量数据情况可以采用不同的时段长度,通常流域面积越大时段长度越长^[24]。本文采用逐日径流数据,时间长度也取为1 d。

3.2 冰川融化径流估计 根据1960年和2010年的冰川面积,假设冰川面积逐年均匀变化,计算得到研究流域各年的冰川面积值。根据冰川所在位置的逐日气温,计算逐年的冰川积温,然后采用下式估计积雪和冰川的消融水当量。

$$MWE = DDF \cdot PAT \quad (1)$$

式中: MWE 为冰川或积雪的消融水当量,mm; DDF 为冰川或积雪消融的度日因子, $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$; PAT 为计算时段内(本文为1年)的正积温, $\text{d} \cdot ^\circ\text{C}$ 。

本文将积雪和冰川融化过程统一考虑如下:如果有积雪覆盖,先融积雪,积雪消融完毕再开始融化冰川^[25]。根据文献,黑河上游平均融冰的度日因子为 $7.2 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$,融雪的度日因子为 $4.1 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ^[26]。每年的冰川融化水深乘以当年的冰川面积,得到当年的冰川融化径流量。

为了估计冰川储量,本文采用冰川平均面积(S)及平均储量(V)的经验关系公式^[27],即:

$$V = 0.0336 S^{1.43} \quad (2)$$

由上式可以计算得到1960年和2010年的冰川储量,从而估计近50年的冰川储量变化。本文还比较了基于温度指数方法计算得到的逐年累积冰川消融径流量和基于冰川储量变化估计的冰川消融径流量,二者十分接近,从而验证了计算结果。

3.3 逐步多元回归方法 采用逐步线性回归的方法,对变化趋势显著(显著性水平为 $\alpha=0.1$,下同)的年(季节)总径流、基流和快径流成分的变化进行归因分析。以年径流量为例,若年降水量的变化趋势显著,则降水变化对径流的影响可用以下线性回归方程表示:

$$\frac{\Delta R}{\bar{R}} = \varepsilon_P \frac{\Delta P}{\bar{P}} \quad (3)$$

如果气温变化趋势也具有显著性,进一步考虑气温变化对径流的影响,回归方程改写为:

$$\frac{\Delta R}{\bar{R}} = \varepsilon_P \frac{\Delta P}{\bar{P}} + \varepsilon_T \frac{\Delta T}{\bar{T}} \quad (4)$$

式中: ΔR 、 ΔP 、 ΔT 为年平均量 R_i 、 P_i 、 T_i 与多年平均量 \bar{R} 、 \bar{P} 、 \bar{T} 的差值; ε_P 、 ε_T 分别为降水、温度对径流的弹性系数^[28]。

根据降水、气温和径流序列回归得到的弹性系数 ε_P 、 ε_T 值,采用下式分别计算由降水量变化和气温变化导致的径流量变化,即:

$$\Delta R_P = \varepsilon_P \frac{\bar{R}}{\bar{P}} \Delta P; \Delta R_T = \varepsilon_T \frac{\bar{R}}{\bar{T}} \Delta T \quad (5)$$

4 结果分析

4.1 降水、气温及径流的变化趋势 表1和表2分别为年和季节尺度上各研究流域的平均降水、平均气温、径流(分为总径流、基流、快径流)的变化趋势。趋势检验采用 Mann-Kendall 方法,显著性水平取为 $\alpha=0.1$ ^[29]。

表1 年尺度降水、气温、径流变化趋势

流域(水文站)	降水/(mm/10a)	气温/(℃/10a)	总径流/(mm/10a)	基流/(mm/10a)	快径流/(mm/10a)
黑河东支(祁连)	10.9	0.38	10.8	10.2	0.6*
黑河西支(扎马什克)	14.4	0.41	11.7	9.8	1.9
黑河上游(莺落峡)	13.6	0.40	10.8	7.3	3.3
梨园河(梨园堡)	12.2	0.42	9.6	7.0	2.7
讨赖河(冰沟)	4.2*	0.40	2.2*	2.4*	0.2*
洪水坝河(新地)	4.6*	0.41	3.3*	5.6*	-1.9*

注:显著性水平取为 $\alpha=0.1$; * 表示变化趋势不显著(下同)。

表2 季节尺度降水、气温、径流变化趋势

流域(水文站)		降水/(mm/10a)	气温/(℃/10a)	总径流/(mm/10a)	基流/(mm/10a)	快径流/(mm/10a)
黑河东支 (祁连)	春	5.2	0.33	1.5	1.4	0.1*
	夏	4.2*	0.43	3.6	3.2	0.6*
	秋	2.5*	0.35	3.5	3.5	0.1*
	冬	-0.1*	0.43	1.4	1.4	0*
黑河西支 (扎马什克)	春	5.4	0.42	1.3	1.1	0.1*
	夏	4.4*	0.48	6.7	5.1	1.9
	秋	4.9	0.39	4.1	3.8	0.4*
	冬	1.4	0.40	0.8	0.8	-0.1
黑河上游 (莺落峡)	春	6.0	0.40	2.2	0.7	1.5
	夏	3.1*	0.57	3.9	3.7	0.3*
	秋	5.1	0.38	4.1	3.1	0.9
	冬	1.5	0.51	1.0	0.4	0.7
梨园河 (梨园堡)	春	6.1	0.42	0.2*	-0.3*	0.5
	夏	0.3*	0.43	3.6*	3.3*	0.2*
	秋	4.0	0.39	5.3	3.6	1.6
	冬	3.2	0.50	2.4	1.9	0.5
讨赖河 (冰沟)	春	-2.0*	0.30	0.4*	0.3*	0.2*
	夏	4.0*	0.24	0.2*	0.4*	0.0*
	秋	2.3*	0.35	1.2*	1.3*	0.2*
	冬	-1.8*	0.51	0.2*	0.6*	-0.3*
洪水坝河 (新地)	春	-1.7*	0.43	0.7*	0.8*	-0.1*
	夏	5.9*	0.46	1.7*	3.2*	-2.0*
	秋	2.2*	0.33	1.7	1.6	0.1*
	冬	-2.8*	0.36	0.0*	0.0*	-0.1*

黑河干流上游流域的年降水有显著增加趋势,在季节尺度上,春季、秋季、冬季降水有显著增加趋势,夏季降水变化趋势不显著;年平均气温和各季节气温都有显著上升趋势。黑河上游(祁连、扎马什克和莺落峡水文站)的年河川径流量有显著增加趋势,且总径流与基流的增加趋势接近,快径流变化趋势不显著,说明径流的增加主要来自于基流。梨园河流域降水、气温以及径流变化趋势与黑河干流上游类似,总径流的增加同样来自于基流。北大河流域(讨赖河、洪水坝河)降水变化趋势不显著,气温有显著增加趋势,径流变化趋势不显著。

4.2 降水和气温变化对径流的影响 根据上述趋势分析结果,对径流变化趋势显著的祁连、扎马什克、莺落峡和梨园堡4个站点对应的4个山区流域进行径流变化原因分析。表3为年尺度上该4个流域径流变化的气候弹性系数,即当年降水量增加10 mm时年径流量的变化和当年平均气温上升1℃时年径流量的变化,以及根据气候弹性系数和实际的年降水量、年平均气温的变化估计的流域径流变化量(即气候变化对径流的影响程度)。

由表3可见,降水和温度的变化都对径流变化有影响,降水、温度的影响程度相当。4个流域降水与气温变化对径流变化影响程度总和均在80 %左右,说明二者基本解释了年尺度上径流的变化。因此可以认为,年尺度上,降水与气温的变化为径流变化的主要因素,且二者影响程度相当。

表3 年尺度降水和气温变化对径流变化的影响

流域(水文站)	降水增加10mm的 径流变化/mm	降水增加对径流的 影响程度/mm	气温升高1℃的 径流变化/mm	气温升高对径流的 影响程度/mm
黑河东支(祁连)	3.9	4.2(39%)	11.9	4.5(42%)
黑河西支(扎马什克)	3.4	4.8(41%)	12.4	4.7(40%)
黑河上游(莺落峡)	3.4	4.5(42%)	11.3	4.5(42%)
梨园河(梨园堡)	3.2	3.9(40%)	9.2	3.9(40%)

表4 季节尺度降水和气温变化对径流变化的影响

流域(水文站)	春		夏		秋		冬	
	降水	气温	降水	气温	降水	气温	降水	气温
黑河东支(祁连)	39%	41%	不显著	不显著	不显著	23%	不显著	31%
黑河西支(扎马什克)	28%	50%	不显著	不显著	48%	22%	23%	32%
黑河上游(莺落峡)	25%	55%	不显著	不显著	51%	21%	不显著	37%
梨园河(梨园堡)	/	/	/	/	45%	23%	11%	27%

注：不显著 表明降水或气温变化不显著,或径流与该要素的相关关系不显著；/ 表示径流本身变化不显著。

从表4可见,春季气温上升对径流变化起主要贡献,影响程度约40 % ~ 50 %。春季降水增加也有一定贡献,影响程度约20 % ~ 30 %。夏季降水和气温对径流变化的影响不显著。其中,夏季降水本身变化不显著,温度变化虽然显著但与径流变化无显著相关性。秋季降水增加对于径流增加起主要作用,影响程度约40 %,秋季气温增加对秋季径流变化的影响程度约20 %。冬季降水和温度变化都对径流增加有一定贡献,影响程度均为20 %左右,但冬季径流量小且变化率较低,因此对年径流量的影响不大。

祁连、扎马什克和莺落峡3个站点的夏季径流均有上升趋势,而降水变化不显著、温度对径流影响不显著,为此本文进一步分析了夏季降雨强的变化趋势。本文对1960—2013年夏季日雨量超过10 mm的降雨进行了统计分析,黑河上游东支的雨强有显著增大趋势(日雨量增幅为0.9 mm/10 a)。在逐步多元回归分析中加入雨强项,结果表明雨强增大(除去降水量变化的影响)对于河川径流贡献的比例约为15 %。

4.3 冰冻圈水文过程对径流的影响 表5所示为流域平均降雪变化趋势,多年平均的降雪与降水的比例为0.10 ~ 0.14。黑河东支、黑河上游和梨园河3个流域降雪变化均不显著,黑河西支降雪有上升趋势,但上升幅度小(1.2 mm/10 a),融雪量增加对径流增加的影响不足10 %;降雨有显著的上升趋势,且变化趋势与总降水量相近。因此认为气温变化对径流的影响不是融雪径流增加导致的。

表6为1960和2010年黑河上游山区冰川面积、体积数据及基于度日因子法估计的冰川融化径流变化趋势。结果显示,东部黑河上游冰川径流略有上升趋势,但趋势均小于1 mm/10 a。黑河干流及梨园河的冰川融化导致的径流增加量占各自年总径流增加量的比例不足10 %。由此可见,气温升高加速冰川融化对黑河上游径流量增加的贡献率较小。

表5 降雨和降雪变化趋势分析结果

流域(控制水文站)	多年平均的降雪/降水比例	年降雪量变化趋势/(mm/10a)	年降雨量变化趋势/(mm/10a)
黑河东支(祁连)	0.11	0.6*	7.2
黑河西支(扎马什克)	0.14	1.2	10.6
黑河上游(莺落峡)	0.11	0.4*	11.8
梨园河(梨园堡)	0.10	0.2*	12.0

表6 黑河上游山区冰川面积及冰川径流变化

流域 (控制水文站)	冰川面积/km ²		冰川储量/亿 m ³		近 54 年冰川融化径流变化 (万 m ³ /10a)
	1960 年	2010 年	1960 年	2010 年	
黑河东支(祁连)	12.5	6.5	2.1	0.9	70(0.3mm/10a)
黑河西支(扎马什克)	42.5	20.4	8.8	3.3	302(0.6mm/10a)
黑河上游(莺落峡)	67.3	31.1	13.5	5.3	440(0.4mm/10a)
梨园河(梨园堡)	18.2	9.6	3.4	1.3	115(0.6mm/10a)

黑河干流和梨园河流域的降雪量变化不显著,冰川融化对径流增加的贡献小于 10 %。但是,气温升高对径流增加的影响程度达 40 %,因此认为,气温升高导致的基流增加的主要原因可能是由于冻土变化,从而改变了流域产流机制。在冻土广泛分布的黑河上游山区,气温升高导致冻土活动层增厚,从而增加了土壤的蓄水容量,降雨下渗量增加导致基流量增大。这与以往研究中黑河山区冻土活动层显著增厚的结论^[12-14]吻合,也可以很好地解释总径流量增加主要来源于基流增加的事实。在气温持续升高的气候变化条件下,冻土活动层会继续增厚,因此这种产流机制的变化在未来将是持续性的;加之降雨有增加趋势,这就意味着未来黑河上游山区的基流还有增加的趋势,基流增加有益于维持径流的可持续性。

5 结论与讨论

本文依据径流、降水、气温资料探究了黑河上游山区各流域的降水、气温及出山口径流变化趋势,应用逐步多元回归方法分析降水、气温变化对径流变化的影响,讨论了冰冻圈水文过程对径流变化的可能影响,得到如下结论:(1)1960—2013年间,黑河干流和梨园河出山口的年总径流显著增加,趋势为 10 mm/10 a;基流变化趋势与总径流相近,快径流变化趋势不显著,说明径流变化主要来源于基流变化;上游山区的年降水量显著上升,趋势为 10~15 mm/10 a。北大河上游流域降水和出山径流量变化不显著。(2)黑河干流和梨园河上游山区流域的降水增加和气温上升是出山径流增加的主要原因。在年尺度上,降水增加和气温上升对径流增加的贡献程度相近,均在 40 %左右。在季节尺度上,径流在各个季节均有所增加,但导致径流增加的原因不同。导致春季径流增加主要因素为气温升高、其次为降水增加;秋季主要为降水增加,其次为气温升高。夏季祁连站降雨强度明显增大,对河川径流增加有显著贡献。(3)黑河干流和梨园河上游山区流域的年降雪量变化趋势不显著,融雪径流对河川径流的影响不显著;冰川融化径流增加幅度较小,约占总径流增加的 10 %。由此推断,气温上升导致基流增加的主要原因可能是:气温升高导致高寒山区冻土活动层增厚,增加了土壤蓄水容量,从而导致降雨下渗量增加和基流量增大。黑河上游冻土分布广泛,在气温持续上升的条件下,这种产流机制的变化导致的基流增加在未来具有可持续性。

此外,从本文的分析结果来看,北大河的径流比较稳定(没有显著变化趋势),而黑河干流的径流量有显著增加趋势。这可能与径流来源有关,北大河上游的冰川和融雪径流约占总径流量的 30 %,而黑河干流上游的冰川和融雪径流仅不足总径流量的 10 %。冰川和融雪径流比较稳定,而降雨径流变化较大,这不仅是由于降雨量的变化,也和气温升高导致冻土活动层增厚改变降雨产流机

制等有关。

需要指出,本文采用的基流分割方法有待于采用小流域的试验数据及流域同位素观测结果作进一步验证;线性回归方法对降水和气温变化对径流的影响归因分析结果,以及针对冰冻圈水文过程变化对径流的影响分析等,需要在今后的研究中结合试验流域的观测和分布式水文模型进一步深入分析和讨论。

参 考 文 献:

- [1] 张光辉,聂振龙,张翠云,等.黑河流域走廊平原地下水补给变异特征与机制[J].水利学报,2005,36(6):715-720.
- [2] 王庆峰,张廷军,吴吉春,等.祁连山区黑河上游多年冻土分布考察[J].冰川冻土,2013,35(1):19-29.
- [3] 杨建平,杨岁桥,李曼,等.中国冻土对气候变化的脆弱性[J].冰川冻土,2013,35(6):1436-1445.
- [4] 王建,李硕.气候变化对中国内陆干旱山区融雪径流的影响[J].中国科学:地球科学,2005,35(7):664-670.
- [5] 程国栋,肖洪浪,徐中民,等.中国西北内陆河水问题及其应对策略——以黑河流域为例[J].冰川冻土,2006,28(3):406-413.
- [6] 李栋梁,刘洪兰.黑河流量对祁连山气候年代际变化的响应[J].中国沙漠,2004,24(4):385-391.
- [7] 蓝永超,丁永建,沈永平,等.河西内陆河流域出山径流对气候转型的响应[J].冰川冻土,2003,25(2):188-192.
- [8] 李占玲,王小娟.黑河中上游气象要素单调变化趋势分析[J].地理研究,2011,30(11):2059-2066.
- [9] 王璞玉,李忠勤,高闻宇,等.气候变化背景下近50年来黑河流域冰川资源变化特征分析[J].资源科学,2011,33(3):399-407.
- [10] 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.
- [11] Yang Yong, Chen Rensheng, Ji Xibin. Variations of glaciers in the Yeniugou watershed of Heihe River basin from 1956 to 2003[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(1):100-106.
- [12] Wang Qingfeng, Zhang Tingjun, Peng Xiaoqing, et al. Recent changes in ground surface thermal regimes in the context of air temperature warming over the Heihe River Basin, China[J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2014, 6(4):273-281.
- [13] 张中琼,吴青柏.气候变化情景下青藏高原多年冻土活动层厚度变化预测[J].冰川冻土,2012,34(3):505-511.
- [14] Wang Qingfeng, Zhang TingJun. Spatiotemporal variations of maximum seasonal freeze depth in 1950s-2007 over the Heihe River Basin, Northwest China[J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2014, 6(3):209-218.
- [15] 沈艳,冯明农,张洪政,等.我国逐日降水量格点化方法[J].应用气象学报,2010,21(3):279-286.
- [16] 韩春坛,陈仁升,刘俊峰,等.固液态降水分离方法探讨[J].冰川冻土,2010,32(2):249-256.
- [17] 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):307-317.
- [18] 王宗太,刘潮海,尤根祥,等.中国冰川目录(1)祁连山区[M].北京:北京科学出版社,1982.
- [19] Guo Wanqin, Liu Shiyin, et al. The Second Glacier Inventory Dataset of China (Version 1.0)[J]. Cold and Arid Regions Science Data Center at Lanzhou, 2014. Doi:10.3972/glacier.001.2013.db.
- [20] Institute of Hydrology. Low flow studies: Research Report[M]. Wallingford, U K.: Institute of Hydrology, 1980.
- [21] Nathan R J, McMahon T A. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses[J]. Water Resources Research, 1990, 26(7):1465-1473.
- [22] Smakhtin V U. Low flow hydrology: a review[J]. Journal of Hydrology, 2001, 240(3-4):147-186.
- [23] 董薇薇,丁永建,魏霞.祁连山疏勒河上游基流变化及其影响因素分析[J].冰川冻土,2014,36(3):661-669.

- [24] 董晓华,邓霞,薄会娟,等.平滑最小值法与数字滤波法在流域径流分割中的应用比较[J].三峡大学学报:自然科学版,2010,32(2):1-4.
- [25] 高鑫,叶柏生,张世强,等.1961~2006年塔里木河流域冰川融水变化及其对径流的影响[J].中国科学:地球科学,2010,40(5):654-665.
- [26] 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):89-98.
- [27] 刘时银,沈永平,孙文新,等.祁连山西段小冰期以来的冰川变化研究[J].冰川冻土,2002,24(3):227-233.
- [28] Ma Huan ,Yang Dawen ,Tan Soon Keat ,et al . Impact of climate variability and human activity on streamflow decrease in the Miyun Reservoir catchment[J] . Journal of Hydrology ,2010 ,389 :317-324 .
- [29] 宋晓猛,张建云,占车生,等.气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J].水利学报,2013,44(7):779-790.

Impact of cryosphere hydrological processes on the river runoff in the upper reaches of Heihe River

WANG Yuhan , YANG Dawen , LEI Huimin , YANG Hanbo

(Department of Hydraulic Engineering , Tsinghua University , Beijing 100084 , China)

Abstract : The upper reach of the Heihe River is located in alpine mountain area , exploring on the effect of the cryosphere hydrological process on runoff is of significance to diagnose the change of runoff and its sustainability. This study uses a method of base flow separation and a stepwise multiple regression model to investigate the reasons for the runoff changes in the upstream of Heihe River during 1960-2013. The contribution of snowmelt and glacier melt to runoff is particularly estimated to explore the possible influences of soil freezing and thawing on runoff changes. The results show an increasing trend of the total runoff from the upper reach in the past 54 years , dominated by the changes in base flow. Changes in precipitation and air temperature had great contribution to the increasing runoff. In spring , the dominant factor causing the increasing runoff was the air temperature rather than the precipitation ; while in autumn ,precipitation was the dominant factor rather than air temperature. In summer ,rainfall intensity had a significant increasing trend (daily rainfall increase of 0.9 mm/10 a) in the east branch of the upper reach , which contributed to runoff by about 15 % . Changes of snowfall in mountainous region were not significant , and glacier melt runoff contributed less than 10 % to the runoff increase. Therefore , the possible reason for the increase of base flow is rising temperature thickened the active permafrost layers , which leads to the increase of soil water storage capacity , and finally results in the increase of rainfall infiltration and base flow. Because of the wide distribution of permafrost in the upper reach , the increase of base flow caused by this change of runoff mechanism will be continuous in the future as the rising air temperature.

Key words : upstream of Heihe River ; river runoff change ; attribution analysis ; base flow separation ; cryosphere hydrological processes

(责任编辑:王成丽)