

文章编号:1672-3031(2021)04-0361-10

# 大通河降雨径流关系演变与水资源衰减初步研究

王芳, 王天慈, 白雁翎, 刘扬

(中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

**摘要:** 大通河位于祁连山区, 开发利用程度低, 实测径流基本为天然径流, 1956—2000年平均径流量28.95亿 $m^3$ 。在全球气候变暖的背景下, 降雨-径流关系发生了明显的改变, 以水文气象要素明显的分界点1997年进行分时段比较, 汛前径流明显衰减, 汛后上游径流明显增加, 中下游径流有一定减少, 年均水资源减少1.72亿 $m^3$ 。选择受冰川融水和冻土释水影响较小的中下游区间来水分析, 得到蒸发增加减少径流深38 mm。基于上中游分阶段径流比较认为, 枯季径流的增加来自冻结层下水的稳定释水, 春季径流的减少由季节性冻土释水疏干和陆面蒸发增加导致, 夏秋季径流的增加主要是冰川融水和冻结层上水转化成冻结层下水减少沼泽消耗所致。综合分析认为, 随着气温的继续升高, 冰川融水消失, 冻结层上水进一步转化, 伴随着源头沼泽的消失, 冻结层下水的增加对蒸发增加引起的水资源衰减有所缓减。

**关键词:** 大通河; 气候变化; 降雨径流关系; 冰川冻土; 水资源衰减

**中图分类号:** TV213.9

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13244/j.cnki.jiwhr.20200107

## 1 研究背景

气候变化是21世纪人类面临的重大挑战, IPCC《全球1.5℃增暖特别报告》指出<sup>[1]</sup>, 在全球升温超过1.5℃达到2.0℃时, 冰冻圈退化会引发一系列变化, 生态、粮食、水资源等都会进入高风险状态。青藏高原是全球气候变化最敏感的地区, 1998—2013年青藏高原气温的上升速率达0.25℃/10a<sup>[2]</sup>, 冰冻区进入加速退化的阶段。冰冻圈的变化正深刻影响着流域水文过程, 随着全球变暖, 冰川融雪量在一定时间内增加, 但在十年到百年尺度上越过“拐点”后将持续下降, 积雪融水以不断减小的速率呈下降趋势<sup>[3-4]</sup>。

降雨-径流关系决定了区域水资源的基本分布, 是水文水资源领域重点关注的问题。国内外学者的研究从探索降雨-径流关系的区域性规律<sup>[5-9]</sup>, 发展到基于降雨-径流关系进行水土资源开发影响下的水资源评价<sup>[10-12]</sup>。近几十年间, 全球气候变化叠加人类活动的影响, 水循环过程发生了相应的变化, 降雨径流的时空分布格局发生改变<sup>[13]</sup>。目前, 不同区域、不同下垫面改变程度、不同分析方法的研究, 对降雨-径流关系演变的认识存在差异。多项研究表明<sup>[14-16]</sup>, 三江源区的长江、澜沧江等西南部径流增加明显, 而东北部黄河源区呈显著减少趋势。在华北平原的济南三川流域研究表明径流影响为正效应<sup>[17]</sup>, 在潮河流域研究显示, 径流深和径流系数的下降趋势显著, 降水-径流关系变化剧烈<sup>[18]</sup>。对下垫面改变较大的黄土高原各流域的研究结论趋势一致, 在相同降雨条件下的产流量相对减幅达40%以上<sup>[19-20]</sup>。在长江上游嘉陵江流域的研究显示降雨量呈不显著的减少趋势, 径流明显减小, 而且1992年后降雨径流关系显著改变<sup>[21]</sup>。

大通河位于青藏高原东北边缘的祁连山区, 区域最大累积增温2.34℃, 目前开发利用程度较低。气候变化下径流的演变, 多集中于径流组成成分的变化分析, 包括对黑河上游年、季节总径流和基流的变化进行归因分析, 推断冻土活动层增厚导致产流机制变化进而使基流增加<sup>[22]</sup>; 对冻土变

收稿日期: 2020-06-24; 网络首发时间: 2021-05-11

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5020.TV.20210510.1303.001.html>

基金项目: 国家山水林田湖草生态保护修复试点项目; 国家重点研发计划课题(2018YFC0408103)

作者简介: 王芳(1965-), 博士, 教授级高级工程师, 主要从事生态水文研究。E-mail: wangf@iwhr.com

化及其对水文影响的模拟结果表明<sup>[23]</sup>，由土温升高造成的土壤液态水增加导致冷季径流显著增加。本文用传统的方法分析降雨-径流关系的演变，旨在揭示冰川融水与冻土释水掩盖下水资源衰减的潜在危机。

## 2 数据来源

**2.1 研究区概况** 大通河流域地貌上属于构造剥蚀中高山区，流域内近50%的地区在海拔3600 m以上，巨大山脉与断陷盆地相间。气候寒冷，年最大冻土深度2.5 m。1956—2000年多年平均降水量442.3 mm，集中在5—9月，潜在蒸发量1192 mm。大通河干流全长560.7 km，流域面积15 130 km<sup>2</sup>，多年平均(1956—2000年)径流量28.95亿 m<sup>3</sup>。

海拔3600 m以上的中高山区广泛发育寒土、冻土和冻岩，面积7571 km<sup>2</sup>。季节性冻土全区均有分布，河谷区冻结深度1~2 m，基岩山区冻结深度2.5 m，厚度随季节变化，一般年融冻期120 d左右，其余时间处于封冻期。强烈的寒冻风化剥蚀作用在源头和上游河谷地带形成了丰富的冻结含水层，地下水有随季节性变化的冻结层上水，也有稳定的冻结层下水。现代河流作用下形成的河流融区发育，因此河流的枯季径流相对较大。

流域内人口稀少，现有人口40.65万，主要分布在中下游的青海境内和下游甘肃境内。丰富的水资源成为青甘两省的主要供水水源，2014年建成纳子峡与石头峡两座大型水库，流域现状用水2.49亿 m<sup>3</sup>。建成3项跨流域引水工程，其中，引大入秦1994年通水，设计年引水量4.43亿 m<sup>3</sup>；引疏济金2003年通水，设计年引水量0.4亿 m<sup>3</sup>；引大济湟尚未通水。21世纪以来建成电站43座(含两座水库)，集中分布在中下游段。流域概况见图1。

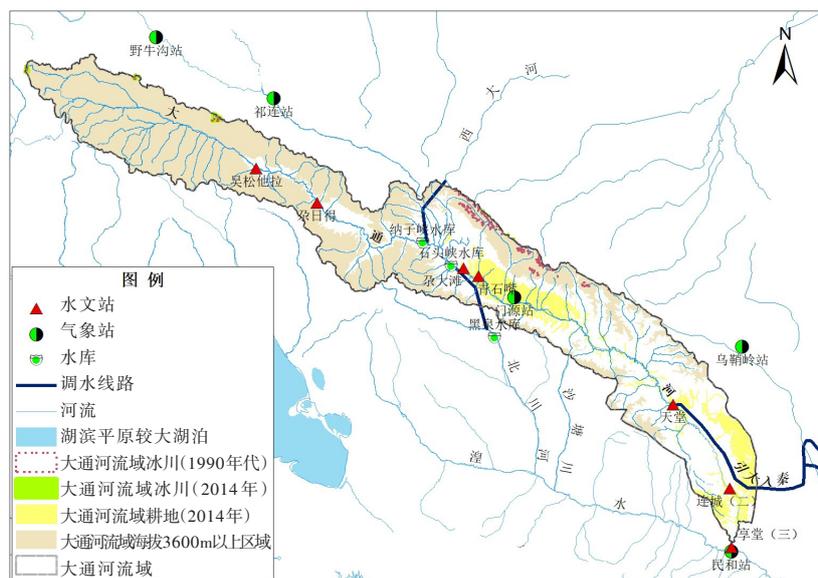


图1 研究区概况

**2.2 数据来源** 选择大通河流域的测站资料系列较长且受开发影响较小的尕日得、尕大滩/青石嘴、天堂寺三个站点进行分析，水文站的基本情况见表1。径流数据采用1960—2016年天然月径流过程，还原项相对简单，一是由青海省水文局完成尕日得站枯季径流还原(海拔高，枯季三月基本缺测)，以及2004年以后引疏济金的跨流域引水量及其水库蓄水对水文过程的改变；二是作者对尕大滩至天堂寺站的门源境内最大0.55亿 m<sup>3</sup>(实际耗水约0.30亿 m<sup>3</sup>)灌溉用水进行还原，主要用水过程发生在4—6月和9—10月的灌溉期间。

气象数据源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)和青海省水文局，包括流域内及周边的野牛沟、祁连、门源、乌鞘岭、民和5个气象站与尕日得、尕大滩雨量站1960—2016年的逐日数据，分

表1 水文站基本情况

站名	设站时间	控制面积/km <sup>2</sup>	备注
尕日得	1956—2016	4576	海拔高, 气候寒冷, 枯季 12—2月缺测
尕大滩/青石嘴	1954—2016	7812	尕大滩站 1954年8月建立, 2001年1月撤销, 在下游9km的青石嘴于1997年建站, 因此尕大滩和青石嘴实测资料合并使用
天堂寺	1976—2016	12 462	天堂寺站于1976年建站

布见图1。

### 3 结果分析

#### 3.1 水文气象要素演变

3.1.1 气温变化 气温变化在1990年代后期普遍存在增温速率增大的转折点, 本研究区作为青藏高原边缘地区, 采用M-K检验分析野牛沟、祁连、门源、乌鞘岭、民和五个站气温序列, 转折点分别是1993、2001、1996、2004、1997年, 各站点加权平均序列的转折点是1997年<sup>[24]</sup>, 综合青藏高原总体的突变趋势<sup>[25-27]</sup>, 选择1997年为分界点。典型站点祁连站的分析结果见图2。

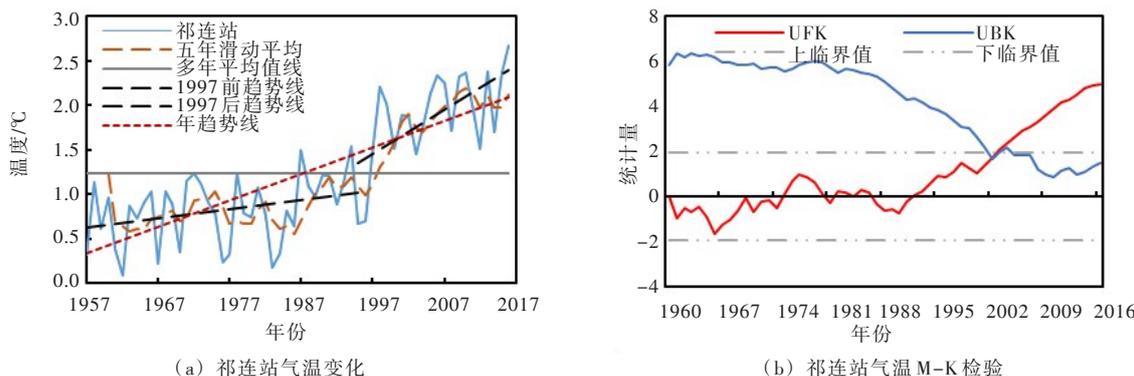


图2 祁连站年气温M-K检验结果

气温变化趋势: 1957(1960)—2016年各气象站的年平均温度以0.24~0.39℃/10a的速率在增加, 增温幅度最高的是海拔2800m左右的祁连站和门源站; 1997年以前, 祁连站和门源站总体呈小幅增温趋势, 而海拔3000~3300m的野牛沟站、乌鞘岭站总体呈减小趋势; 1997年以后, 气温增幅显著增加, 增温速率是1997年前的10倍, 海拔2800~3300m的四个站年增温率0.57~0.91℃/10a, 海拔1800m的民和站年增温率0.34℃/10a; 累积增温幅度最大的是海拔2800m左右的门源站和祁连站, 达到2.34℃, 其中1997年以后祁连站累积增温幅度最大, 增温幅度2.00℃。

3.1.2 降水变化 对野牛沟、祁连、门源、乌鞘岭、民和5个站的降雨进行M-K分析显示, 野牛沟和祁连站具有显著增加趋势, 线性增长率分别为14.5mm/10a和12.0mm/10a, 各自于1975年和1971年发生突变; 门源、乌鞘岭增加趋势不显著, 降雨序列没有发生突变; 民和站呈不显著下降趋势, 于2005年发生突变, 下降明显。大通河上游流域降水增长比中下游明显, 最下游处的民和站甚至为减小趋势, 各站降水变化见图3。

3.1.3 径流的年季变化趋势 大通河年季径流变化见图4和图5, 年均径流量的变化在中上游站表现出一致性, 尕日得和尕大滩1997年前的年均流量呈略微下降趋势, 1997年后上中游站点流量均呈明显升高趋势; 下游天堂寺站1997年前年均流量下降趋势明显, 1997年后年均流量基本维持稳定。按不同季节分析, 1997年以后, 春季表现出微弱的增长趋势, 夏季减小趋势明显, 秋冬季为明显的增长趋势。

3.2 降雨-径流关系演变 1997年前后的多年平均降雨-径流关系见表2和图6, 分析如下: (1)7月

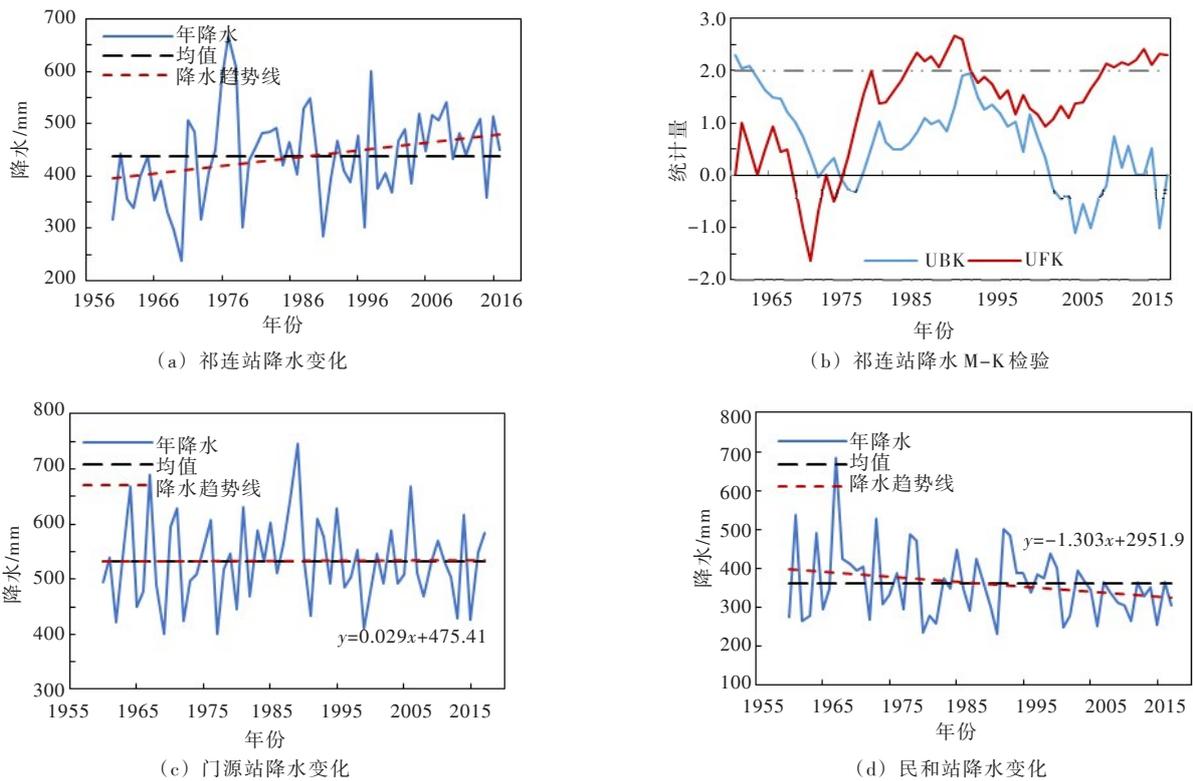


图3 典型站年降水变化趋势及祁连站 M-K 检验结果

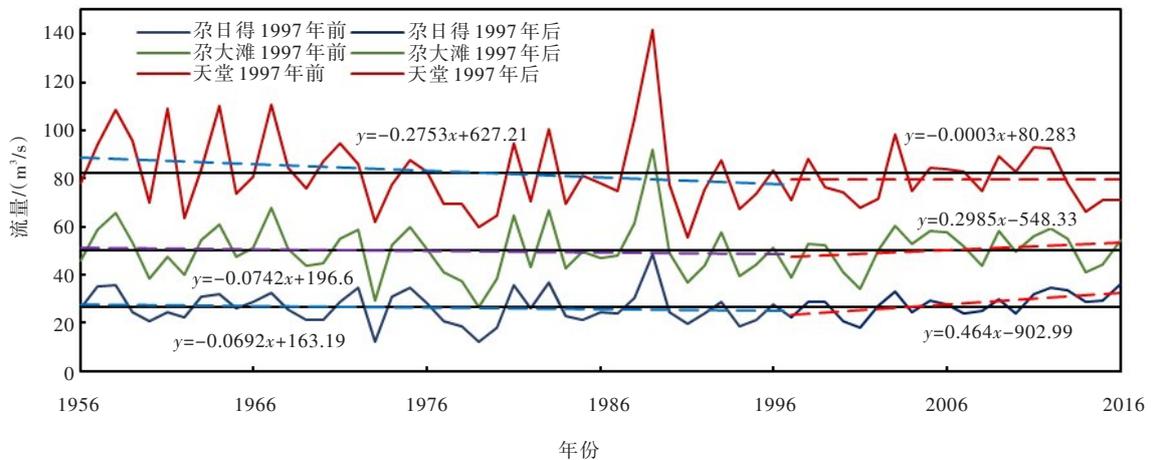


图4 尕日得、尕大滩、天堂寺水文站 1956—2016 年径流年变化趋势

份之前，1997年以后的降雨量较1997年以前明显增加，但三个站的径流量均显著减少，分析汛前单次降雨量，发现单次降雨量为0.1~5 mm，这个量级的雨量受下垫面与气候影响较大，气温升高，蒸散发耗散增加，因此出现雨量增加但径流量减少的情况；(2)7月份之后，1997年后比1997年前径流增加，但是越往下游增加的越少，很显然上游接受冰川融水和冻土释水的补给较大。

**3.3 基于水文站天然径流分析流域总径流量变化** 在降雨-径流关系演变的基础上，分析现状气候变化下流域水资源量发生的改变，发现尕日得以上断面1997年以后年径流量增加了4946万 $m^3$ ，中下游站点径流量则显著减少，尕大滩-尕日得区间1997年后径流量减少了3812万 $m^3$ ，天堂寺-尕大滩区间1997年后径流量减少了1.16亿 $m^3$ (见表3)，并以该减少量折算天堂寺以下流域减少量0.67亿 $m^3$ ，则1997年后流域年均总径流量减少1.72亿 $m^3$ 。

**3.4 基于中下游区间来水分析陆域蒸发变化** 大通河是一条开发程度低的河流，河流含水层饱和，

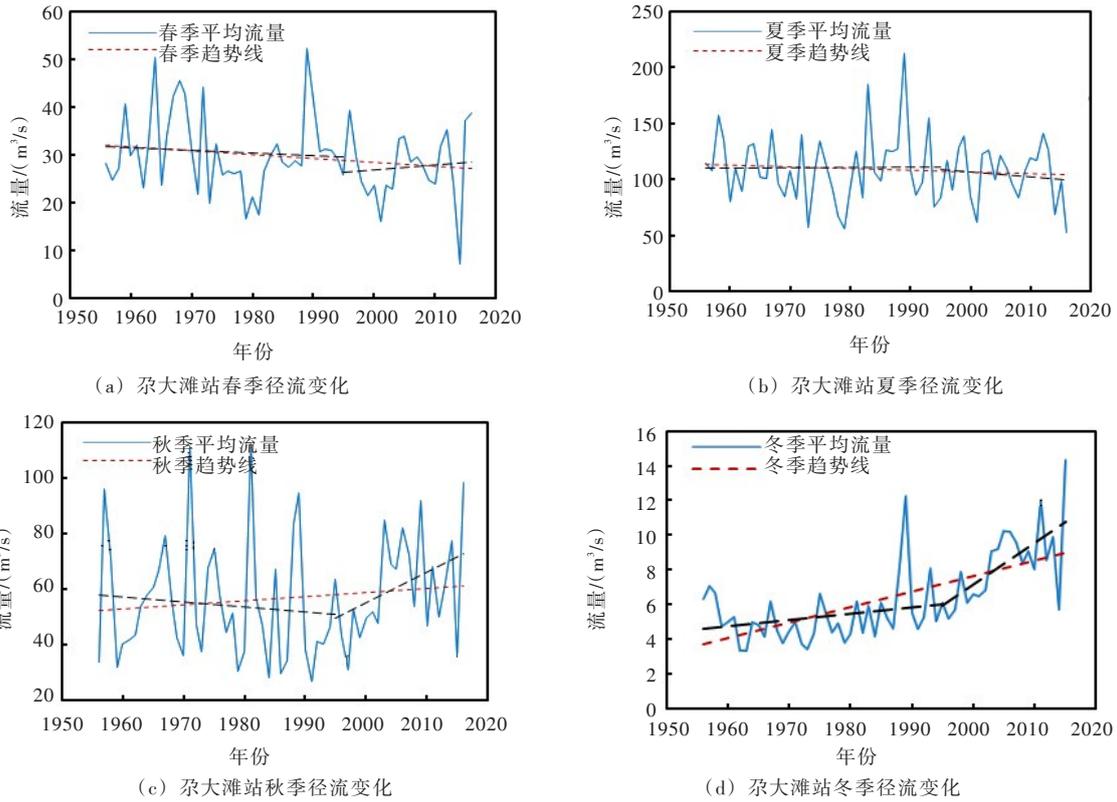


图5 大通河季节径流变化趋势

表2 各站点断面以上1997年后与1997年前降雨量的变化量

(单位: mm)

站点	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	全年
尕日得	1.3	2.3	6.8	14.6	21.3	5.9	-12.6	-2.1	0.9	-10.7	-3.5	0.4	24.7
尕大滩	0.9	1.5	4.9	11.4	19.4	5.0	-6.6	1.8	5.6	-6.9	-2.3	0.3	35.0
天堂寺	1.0	1.9	5.7	12.3	17.1	7.1	-9.3	-0.8	2.7	-8.7	-3.1	0.2	26.2

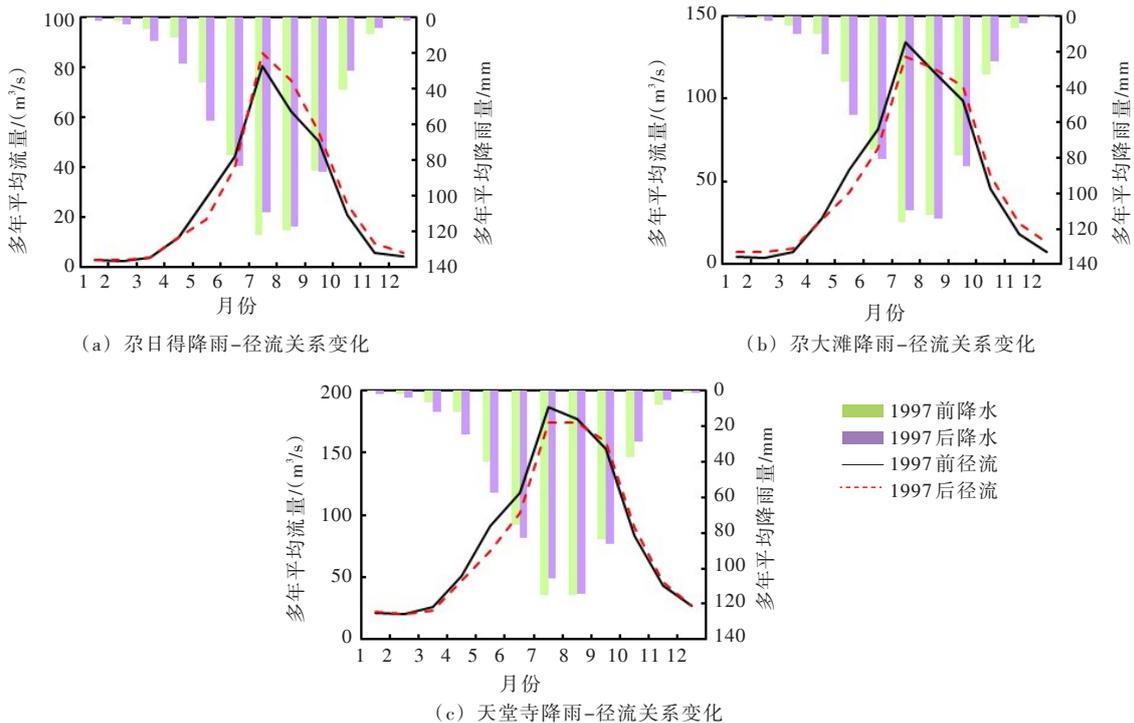


图6 各水文站点降雨-径流关系图

表3 流域1997年后与1997年前总径流量变化量

(单位: 万 m<sup>3</sup>)

区间	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	全年
尕日得	-16	46	1	123	-2378	-1207	1430	3315	1044	1181	1010	396	4946
尕大滩-尕日得	833	815	594	-317	-1292	-1970	-3720	-2728	1249	901	658	1165	-3812
天堂寺-尕大滩	-407	-858	-1370	-864	-1527	-853	-1266	-1389	-588	-110	-1061	-1352	-11645

可以认为径流基本不衰减, 尕大滩与天堂寺区间径流受冰川融水和冻土释水的影响相对较小, 因此, 选择尕大滩与天堂寺区间在1997年前后的径流差来反映蒸散发的情况, 区间降雨径流1997年前后平均过程见图7。

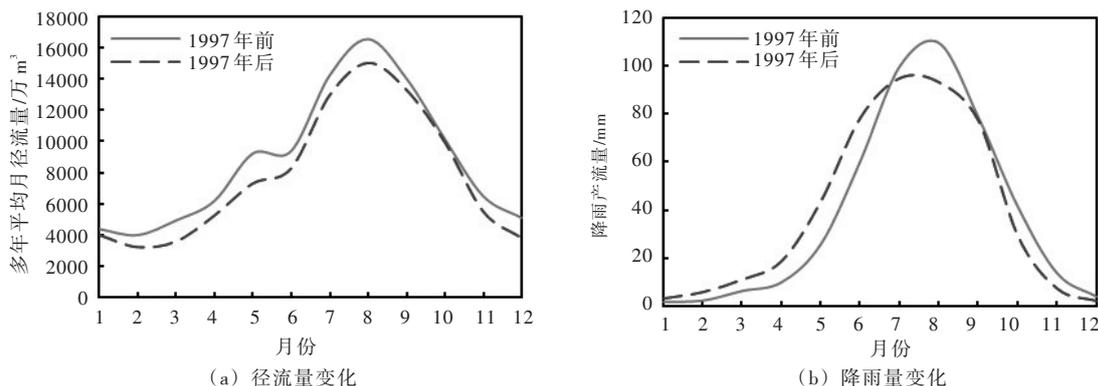


图7 尕大滩-天堂寺区间降雨、径流变化

尕大滩与天堂寺的区间面积是4650 km<sup>2</sup>, 1997年前两断面之间年际区间径流是10.47亿 m<sup>3</sup>, 1997年以后是9.33亿 m<sup>3</sup>, 如果降水相近就相当于年际区间蒸散发量增加了1.14亿 m<sup>3</sup>; 事实上区间降水总体上是增加的, 径流与降水变化见图7, 各月的蒸发增加计算见表4。折算到单位面积的年蒸发增加量大约是3.8万 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>, 相当于径流深减少大约38 mm。

**3.5 基于上中游站降雨径流关系演变分析冻土释水与冰川融水变化** 祁连山区多年冻土发育, 冻土区的地下水<sup>[28]</sup>可分为冻结层上水、冻结层下水和融区地下水三种类型, 冻结层上水接受大气降水补给, 具有上层滞水和潜水特征, 冻结层下水具有承压性质和比较稳定的动态特征, 接受河谷融区的补给。大通河上游冻土季节性融化深度有4~6 m, 河谷融区含水层厚20~50 m, 上层滞水的特点, 形成面积1878 km<sup>2</sup>的沼泽, 随气候变化, 到2014年沼泽面积减少了42%, 间接反映出冻结层上水在关键的生长季节出现亏缺, 不能满足沼泽植物生长所需。从降雨径流关系来看(图6), 春季径流严重亏缺, 正好印证了这一点。另外, 枯季径流在1997年以后大幅度增加, 说明是不受季节改变的冻结

表4 尕大滩-天堂寺站区间多年平均蒸散发改变量

(单位: 万 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>)

项目	时间	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	合计
径流量 /万 m <sup>3</sup>	1997前 R <sub>97B</sub>	4427	4021	4961	6176	9110	9411	14160	16358	14118	10228	6564	5166	104700
	1997后 R <sub>97A</sub>	4020	3163	3592	5344	7583	8548	12894	14968	13558	10219	5503	3814	93289
	ΔR <sub>97A-97B</sub>	-407	-858	-1370	-864	-1527	-853	-1266	-1389	-588	-110	-1061	-1352	-11645
降雨量 /mm	1997前 P <sub>97B</sub>	1.2	2.4	8.0	15.3	46.0	76.3	112.5	119.4	91.8	44.4	11.2	2.1	530.6
	1997后 P <sub>97A</sub>	2.5	4.9	15.0	29.1	59.4	86.8	98.7	114.6	89.6	32.8	6.9	2.3	542.4
	P <sub>97A-97B</sub>	1.3	2.5	6.9	13.8	13.5	10.4	-13.8	-4.8	-2.2	-11.7	-4.3	0.2	11.8
单位面积 蒸散发改 变量	ΔP <sub>97</sub> ·γ- ΔR <sub>97</sub> /S	0.130	0.266	0.519	0.634	0.767	0.521	0.281	0.143	0.049	0.113	0.088	0.297	3.809

注: γ为产流系数, 取值0.325; S为区间流域面积4650km<sup>2</sup>; 考虑7月和10月降水减少影响明显, 7月单位面积蒸散发改变量采用6、8、9三月均值, 10月采用9月值。

层下水增加；汛后径流的增加，尤其是上游尕日得站的增加非常明显，很显然是有冰川融水补给，同时汛期降水补给冻结层上水，以冻结层上水不断排泄补给河流。

3.5.1 从枯季径流变化分析冻结层下水变化量 由表3可知，上游尕日得站因为冻结1—3月份基本上没有变化(尕日得站枯季缺测，还原数据不一定反应真实情况)，以12月来看，月均增加量396万 $m^3$ ；中上游尕大滩站枯季12月到次年2月，枯季径流各月稳定增加的是1080万 $m^3$ ，年总增加量以尕大滩断面计算，即1.30亿 $m^3$ 。

3.5.2 从尕日得站春季4—6月径流减少分析冻结层上水的变化量 冻结层上水主要分布在上游，1997年后实测的径流中还有降水增加的径流量、蒸发增加减少的径流量和冻结层下径流增加量，所以反应冻结层上水的减少量，要在实测径流变化量的基础上再考虑这些变化量，根据水平衡分析(见表5)，冻结层上水减少量0.30亿 $m^3$ 。

表5 尕日得站4—6月水文要素变化分析

尕日得	径流量/万 $m^3$	备注
径流变化量 $\Delta R$	-3462	表3中尕日得站4—6月1997年前后径流变化量
降雨产流量 $\Delta P_R$	+6217	根据表2确定尕日得以上4—6月降雨增加共计41.8mm，产流系数0.325；流域面积4576 $km^2$
蒸发变化量 $\Delta E_R$	+7843	表4中4—6月总蒸发增加2.069万 $m^3/km^2$ ，断面以上面积4576 $km^2$ 扣除裸岩776 $km^2$
冻结层下水 $\Delta RUD$	+1188	以表3尕日得站12月份的增加量(396万 $m^3$ /月)作为稳定的增加量
冻结层上水 $\Delta RUP$	-3024	$\Delta R = \Delta P_R - \Delta E_R + \Delta RUD + \Delta RUP$

3.5.3 从尕日得夏秋季7—10月径流变化分析上游冰川融水变化量和冻结层上层下水转化量 从前面3.2节降雨-径流关系的演变分析可知，7—10月份冰川融水和冻土释水的增加，可以从三个直观的部分估算，一是由降雨减少引起的产流减少，二是蒸发增加减少的径流量，三是图表上显示的净增加量，该净增加量中含有冻结层下水稳定增加量，以及原本被沼泽消耗的冻结层上水转化为冻结层下水。水平衡各要素变化量见表6，冰川融水与冻结层上层下水转化量共计1.50亿 $m^3$ 。

3.5.4 从尕日得到尕大滩区间夏秋季7—10月径流变化分析两站区间冰川融水变化量 原理与3.5.3相同，各水平衡要素的变化量见表7，分析发现冰川融水量与1997年之前的均值相比，平均每年减少0.38亿 $m^3$ ，事实上，根据1:10万土地利用图，该区间的冰川面积1990年代有69 $km^2$ ，2014年只有0.013 $km^2$ 。根据王宁练等人<sup>[27]</sup>的研究，在全球增温1.5 $^{\circ}C$ ，青藏高原地区将升温2.1 $^{\circ}C$ 的情况下，河西走廊诸河的冰川融水在2030年之前就出现峰值，之后冰川融水将逐渐减少。大通河流域所在的祁连山区个别站点累积升温已经达到2.34 $^{\circ}C$ ，从本文分析结果来看，尕日得到尕大滩区间的冰川消融已经过了极限，在现有减少径流1.72亿 $m^3$ 中，有0.38亿 $m^3$ 是冰川融水减少量。

表6 尕日得站7—10月水文要素变化分析

尕日得	径流量/万 $m^3$	备注
径流变化量 $\Delta R$	+6970	表3中尕日得站7—10月1997年前后径流变化量总和
降雨产流量 $\Delta P_R$	-3644	根据表2确定尕日得以上7—10月降雨减少共计24.5mm，产流系数0.325
蒸发变化量 $\Delta E_R$	2974	表4中7—10月总蒸发增加0.65万 $m^3/km^2$ ，断面以上面积4576 $km^2$
冻结层上水 $\Delta RUP$	-3024	见表5
冻结层下水 $\Delta RUD$	+1584	以表3尕大滩断面以上12月份的增加量(396万 $m^3$ /月)作为稳定的增加量
冰川融水和冻结层上 转层下水 $\Delta IRU$	15028	$\Delta R = \Delta P_R - \Delta E_R + \Delta RUD + \Delta RUP + \Delta IRU$

3.6 水资源衰减初步分析 根据上述分析，以1997年为分界点，1997年后水资源减少1.72亿 $m^3$ ，该减少量是蒸发增加减少水资源量与冰川融水和冻土释水增加水资源量综合的结果。中上游总的冻结层下水1.30亿 $m^3$ 的增加量和上游汛后冰川融水和冻结层上层下水转化1.50亿 $m^3$ 的增加量，主要来自上游永久冻土变薄的释水，以及冻结层上水转化成冻结层下水，近800 $km^2$ 沼泽退化减少的消耗量。根据3.4节蒸发分析，中游区1997年以后单位面积年平均蒸发增加量约3.8万 $m^3/km^2$ ，以该结果代表全

表7 尕日得到尕大滩区间7—10月水文要素变化分析

尕日得	径流量/万 m <sup>3</sup>	备注
径流变化量 $\Delta R$	-4298	表3中尕大滩-尕日得7—10月径流变化量总和
降雨产流量 $\Delta P_R$	-642	表2尕大滩7—10月降雨减少共计6.1mm, 表1区间面积3236km <sup>2</sup> , 产流系数0.325
蒸发变化量 $\Delta E_R$	2103	表4中7—10月总蒸发增加0.65万 m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> , 面积3236km <sup>2</sup>
冻结层下水 $\Delta RUD$	+3471	以表3尕大滩-尕日得区间11—2月份增加量均值(868万 m <sup>3</sup> /月)作为稳定的增加量
冻结层上水 $\Delta RUP$	-1197	以尕日得冻结层上水减少量按面积则算, 尕日得/区间冻土面积4432km <sup>2</sup> /1705km <sup>2</sup>
冰川融水量 $\Delta I_R$	-3827	$\Delta R = \Delta P_R - \Delta E_R + \Delta RUD + \Delta RUP + \Delta I_R$

流域, 不考虑1781 km<sup>2</sup>裸岩砾石(来自2014年1:10万土地利用图)的蒸发, 流域蒸发减少的径流量约5.1亿 m<sup>3</sup>, 占径流总量的18%, 考虑上游降水的增加量, 流域水资源变化量总体平衡。未来继续增温, 冰川融水越过极限消失, 减少水资源量大约0.3亿 m<sup>3</sup>(杨针娘, 1996), 源头支撑1878 km<sup>2</sup>沼泽的冻结含水层进一步融通, 冻结层上水进一步转化为冻结层下水, 新增最大转化量按照现状的沼泽退化面积和冻结层上水转化量比例折算是1.7亿 m<sup>3</sup>。不考虑降水的变化, 未来一定时间内随着源头沼泽的消失, 流域水资源总的增加量大约4.2亿 m<sup>3</sup>, 对蒸发增加引起的水资源衰减有所缓减。

#### 4 结论

(1)大通河所在的祁连山区增温明显, 最大累计增温可达2.34℃, 超过了国际上认定人类社会能够适应的增温极限2℃。近60年水文气象数据分析显示, 气温在1997年突变, 此后增温速率升高至0.57℃~0.91℃/10a; 流域降水的变化上下游差异较大, 上游有明显的增加趋势, 中游基本不变, 下游明显减少; 径流1997年以前呈明显减少趋势, 之后上中游呈现增长趋势, 下游基本不变。

(2)降雨-径流关系在汛前、汛后表现出显著差异, 7月份之前, 1997年后降水量增加, 但径流量却明显减少; 7月份之后, 径流量明显增加, 而且上游站增加显著, 中下游两站增加量逐渐减少。以三个水文站分区计算水资源变化量, 上游水资源呈增加趋势, 增加量0.50亿 m<sup>3</sup>, 中下游减少明显, 流域年均总水资源量较1997年前减少1.72亿 m<sup>3</sup>。

(3)以受冰川融水和冻土释水影响较小的中下游尕大滩与天堂寺区间来水比较, 发现以蒸发增加减少径流深约38 mm。以上中游尕日得和尕大滩的分阶段径流比较认为, 来自冻结层下水稳定增加的枯季径流尕大滩站平均1080万 m<sup>3</sup>/月; 季节性冻土(冻结层上水)春季亏缺0.30亿 m<sup>3</sup>, 随后在雨季蓄满并逐渐排泄, 改变径流过程; 冰川融水与冻结层上层下转化量在尕日得站1997年以后增加1.50亿 m<sup>3</sup>, 在尕日得到尕大滩区间则减少0.38亿 m<sup>3</sup>。

(4)初步分析认为, 1997年以后以蒸发增加导致径流减少约5.1亿 m<sup>3</sup>, 占水资源总量的18%; 基于水文站实测径流分析的减少量是1.72亿 m<sup>3</sup>。随着气温的继续升高, 冰川融水消失, 冻结层上水进一步转化, 伴随着源头沼泽的消失, 冻结层下水的增加对蒸发增加引起的水资源衰减有所缓减。

#### 5 建议

(1)建立气候变化对水资源影响的危机意识。IPCC第六次报告中的《全球1.5℃增暖特别报告》指出地球升温2℃时面临缺水问题的人数将是升温1.5℃时的两倍。已有研究显示, 650个喜马拉雅冰川从1975年到2000年冰川表面平均每年下沉22 cm, 从2000年到2016年平均每年减少43 cm, 大通河的初步结果是对该观点的验证。这些变化说明, 不可逆转的全球变暖水资源危机就在不远的将来。

(2)扭转单纯保护是最佳应对的观念。气候变化的影响从国际到国内都已上升到气候安全的高度<sup>[29]</sup>。效存德<sup>[30]</sup>、郑国光等<sup>[31]</sup>提出气候安全是我国粮食安全、水资源安全、生态安全及其他安全的重要前提。强调要科学研判青藏高原冰川雪山融化、冻土变化等对国家安全可能造成的重大风险和威胁。因此, 从气候安全角度出发, 应对气候变化不是单纯保护下的被动适应, 而是从牵动安全包

括水资源安全方面来应对未来风险。

(3)加强水资源调配,未雨绸缪。本文根据大通河天然径流上、下游站的比较给出基于实测区间径流分析的蒸发增加量,以及水资源变化的趋势,旨在揭示目前多数河流总径流变化不大的真正成因。根据王宁练、姚檀栋等人的研究成果<sup>[32]</sup>,在全球增温1.5℃,青藏高原地区将升温2.1℃的情况下,河西走廊诸河在2030年之前就出现冰川融水的峰值。从数量上来看,这种减少即便是气候暖湿化也远远不能弥补。所以要考虑低海拔产水区水资源衰减的情况,加强水资源的周济调配,确保社会经济的可持续发展。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] IPCC . Special report on global warming of 1.5℃ [M] . UK: Cambridge University Press , 2018 .
- [ 2 ] YAO T, XUE K, CHEN D, et al . Recent Third Pole 's rapid warming accompanies cryospheric melt and water cycle intensification and interactions between monsoon and environment multidisciplinary approach with observations, modeling, and analysis[J] . Bulletin of the American Meteorological Society, 2019, 100(3): 423-444 .
- [ 3 ] 苏勃,高学杰,效存德 . IPCC《全球1.5℃增暖特别报告》冰冻圈变化及其影响解读[J] . 气候变化研究进展, 2019, 15(4): 395-403 .
- [ 4 ] KRASTING J P, BROCCOLI A J, DIXON K W, et al . Future changes in Northern Hemisphere snowfall[J] . Journal of Climate, 2013, 26 (20): 7813-7828 .
- [ 5 ] 李致家,于莎莎,李巧玲,等 . 降雨-径流关系的区域规律[J] . 河海大学学报(自然科学版), 2012(6): 597-604 .
- [ 6 ] 董弟文,阿布都热合曼·哈力克,王大伟,等 . 近60年和田河源区径流特征及对气候变化的响应[J] . 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 16(6): 536-543 .
- [ 7 ] 邓元倩,李致家,刘甲奇,等 . 半湿润半干旱地区降雨径流关系的区域规律[J] . 水电能源科学, 2018, 36(5): 13-16 .
- [ 8 ] 武晟,汪志荣,张建丰,等 . 不同下垫面径流系数与雨强及时关系的实验研究[J] . 中国农业大学学报, 2006, 11(5): 55-59 .
- [ 9 ] 李巧玲,李致家,陈利者,等 . 半湿润半干旱流域降雨径流关系及下垫面相似性[J] . 河海大学学报(自然科学版), 2015(43): 95-99 .
- [ 10 ] 谢平,陈广才,陈丽 . 变化环境下基于降雨径流关系的水资源评价[J] . 资源科学, 2009, 31(1): 69-74 .
- [ 11 ] 周峰,覃姗,岳春芳,等 . 基于SRM模型的金沟河流域融雪径流模拟[J] . 中国水利水电科学研究院学报, 2020, 18(5): 395-400 .
- [ 12 ] 樊慧静,赵红莉,蒋云钟 . 气候变化条件下流域径流演变趋势分析[J] . 资源科学, 2015, 37(10): 173-180 .
- [ 13 ] 郭爱军,畅建霞,王义民,等 . 近50年泾河流域降雨-径流关系变化及驱动因素定量分析[J] . 农业工程学报, 2015(14): 173-179 .
- [ 14 ] 张永勇,张士锋,翟晓燕,等 . 三江源区径流演变及其对气候变化的响应[J] . 地理学报, 2012, 67(1): 71-82 .
- [ 15 ] 张昂 . 黄河源区汛期径流模拟与预测[D] . 北京:清华大学, 2016 .
- [ 16 ] GAO J, JIAO K, WU S, et al . Past and future effects of climate change on spatially heterogeneous vegetation activity in China [J] . Earth's Future, 2017(5): 679-692 .
- [ 17 ] 刘丽芳,王中根,姜爱华,等 . 近50年济南三川流域降雨-径流关系变化分析[J] . 南水北调与水利科技, 2018, 16(1): 38-43, 72 .
- [ 18 ] 杨默远,桑燕芳,王中根,等 . 潮河流域降水-径流关系变化及驱动因子识别[J] . 地理研究, 2014, 33(9): 1658-1667 .
- [ 19 ] HAN J, GAO J, LUO H . Changes and implications of the relationship between rainfall, runoff and sediment load in the Wuding River basin on the Chinese Loess Plateau[J] . Catena, 2019, 175: 228-235 .
- [ 20 ] CHIYUAN M, HAIYAN Z, JUYING J, et al . The changing relationship between rainfall and surface runoff on

- the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, 125(8): e2019JD032053.
- [ 21 ] 宋萌勃, 陈吉琴. 嘉陵江西汉水流域降水径流关系变化分析[J]. *人民长江*, 2014(14): 13-16.
- [ 22 ] 王宇涵, 杨大文, 雷慧闽, 等. 冰冻圈水文过程对黑河上游径流的影响分析[J]. *水利学报*, 2015, 46(9): 1064-1071.
- [ 23 ] CHIEW F H S. Estimation of rainfall elasticity of streamflow in Australia [J]. *Hydrologic Science Journal*, 2006, 51: 613-625.
- [ 24 ] 白雁翎, 王芳, 刘扬. 大通河上游径流演变及驱动因素定量分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2021, 19(1): 103-110, 167.
- [ 25 ] 施雅风. 简明中国冰川目录[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2005.
- [ 26 ] GUO W Q, LIU S Y, XU L, et al. The second Chinese glacier inventory: data, methods and results[J]. *Journal of Glaciology*, 2016, 61(226): 357-372.
- [ 27 ] 王宁练, 姚檀栋, 徐柏青, 等. 全球变暖背景下青藏高原及周边地区冰川变化的时空格局与趋势及影响[J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(11): 1220-1232.
- [ 28 ] 郭鹏飞. 论祁连山多年冻土区的地下水分类[J]. *冰川冻土*, 1984, 6(1): 79-84.
- [ 29 ] 刘长松. 我国低碳发展面临的形势分析与政策导向[J]. *中国经贸导刊*, 2017(21): 56-58.
- [ 30 ] 效存德, 秦大河, 任贾文, 等. 冰冻圈关键地区雪冰化学的时空分布及环境指示意义[J]. *冰川冻土*, 2002(5): 22-29.
- [ 31 ] 郑国光. 科学应对全球气候变暖 提高粮食安全保障能力[J]. *求是*, 2009(23): 47-49.
- [ 32 ] 王宁练, 姚檀栋. 20世纪全球变暖的冰冻圈证据[J]. *地球科学进展*, 2001, 16(1): 98-105.

## The relationship evolution of rainfall and runoff and preliminary study of water resource attenuation

WANG Fang, WANG Tianci, BAI Yanling, LIU Yang

(Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** Datong river basin is located in Qilian mountain area and has a low degree of development and utilization. The measured runoff is basically natural runoff, with an annual average runoff of 2.895 billion m<sup>3</sup>. With the global climate change, the rainfall-runoff relationship has changed significantly. The evolution of hydrological elements took 1997 as an obvious dividing point. The analysis of the rainfall-runoff relationship shows that the pre-flood runoff decreases significantly. After the flood season, the upstream runoff increases significantly, the middle and downstream runoff decreases to some extent, and the annual total water resources decrease by 172 million m<sup>3</sup>. Based on the comparison of the inflow water between the sections in the middle and lower reaches, the runoff decrease dominated by evaporation is 38,010 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>. Based on the comparison of runoff at different periods between the upper and middle reaches, the increase of runoff in the dry season comes from the steady release of water from the frozen soil. The decrease of spring runoff is caused by the release of water from the seasonal frozen soil and the increase of land surface evaporation. The increase of runoff in summer and autumn is mainly caused by glacial melt water and conversion of water above the frozen layer to water in the frozen layer. According to the comprehensive analysis, as the temperature continues to rise, the glacier melt water disappears, and the water above the frozen layer is further transformed. With the increase of the water in the frozen layer, the source swamp disappears, and the attenuation of water resources caused by the increase of evaporation is slowed down.

**Keywords:** Datong river; climate change; relationship between rainfall and runoff; glacier and permafrost; water resource attenuation

(责任编辑: 王学风)