

# 黄河上游夏季流量对气候变化的响应 及未来趋势预估

刘彩红<sup>1,2</sup>, 杨延华<sup>1</sup>, 王振宇<sup>1</sup>

(1. 青海省气候中心, 西宁810001; 2. 青海省防灾减灾重点实验室, 西宁810001)

**摘 要:** 本文从气候变化的角度出发, 研究黄河上游龙羊峡水库夏季流量与流域气候条件的响应关系及流量预估模型, 并根据区域气候模式输出数据降尺度生成的未来气候情景, 对未来龙羊峡夏季水库流量进行了预估。结果表明: 近35年来, 黄河上游夏季气温升高、蒸发增大, 降水略有减少; 黄河上游龙羊峡水库平均入库流量呈递减趋势, 夏季流量对流域降水量、平均最高气温及最低气温的响应显著; 未来两个时期(2020s、2030s)龙羊峡夏季流量均较基准期(1988-2010年)减少, 但在不同气候变化情景下流量变化有所差异, 其中A2情景下夏季平均流量分别减少23.9%(2020s)和19.8%(2030s), B2情景下分别减少14.4%(2030s)和17.3%(2030s), 据此, 未来气候变化对黄河上游流域夏季流量的可能影响将弊大于利, 但仍具有较大不确定性。

**关 键 词:** 夏季流量; 气候变化; 响应; 趋势预估; 黄河上游; 龙羊峡

## 1 引言

黄河上游地处高寒地带, 是黄河流域的主要产流区和水源涵养区, 素以黄河流域的“水塔”而著称, 近年来, 在气候变化和人类活动的双重影响下, 黄河上游径流量减少, 生态系统恶化导致水资源供需矛盾日益突出, 从而制约了上游流域的经济发展, 并对黄河中下游地区水资源供给造成了严重威胁。目前, 国内外学者基于气候变化与黄河流量关系的研究已取得一定进展。如Huang等<sup>[1]</sup>认为气候变化是黄河上游径流减少的主要驱动力。蓝永超等研究指出<sup>[2-3]</sup>, 黄河源区径流与降水量、气温间存在较显著的非线性关系, 在全球变暖的气候背景下, 随着气温升高, 蒸发和下渗增加而使地表径流有所减少。孙卫国等<sup>[4]</sup>发现不同季节气候要素对河川径流的影响机制不同, 径流变化对区域气候异常的响应时间存在差异。李林等<sup>[5]</sup>研究表明, 降水量的减少, 特别是夏季降水量的减少, 直接导致了黄河上游流量的减少。上述研究成果大致说明了黄河上游流量的变化特征及其减少的成因。对于未来黄河上游径流量变化趋势, 赖祖铭<sup>[6]</sup>在考虑了冻土、积雪、湖泊和降水气温分布后, 建立模型对流量

进行了估算, 结果表明, 当气温升高2℃时, 即便黄河上游流域平均降水量增加10%, 年平均径流也将减少7%左右。但也有研究指出<sup>[7]</sup>, 未来30年里, 黄河上游的径流量将随降水量的增加而进入一个相对丰水的时期。

综合上述, 以往的研究往往侧重于统计分析, 对于黄河上游流量的预测也多集中于敏感性分析及假定气候情景下流量的粗略估算, 本研究基于区域气候模式系统PRECIS(Providing Regional Climates for Impacts Studies)输出数据降尺度生成的黄河上游未来气候情景<sup>[8-9]</sup>, 利用当下最新气象、水文观测资料构建气候-水文模型, 预测未来气候变化条件下黄河上游地区夏季水资源变化趋势, 以期为政府及水资源、环境管理部门提供决策依据。

## 2 资料与方法

### 2.1 资料来源

为保证资料的连续性和稳定性, 选取黄河上游流域玛多、达日、久治、同德、兴海、泽库、玛沁、甘德、贵南、河南、共和、红原、若尔盖及玛曲14个气象台站1976-2010年6-8月逐月平均气温、平均最高

收稿日期: 2011-02; 修订日期: 2011-06.

基金项目: 中国气象局气候变化专项(CCSF2011-01)。

作者简介: 刘彩红(1981-), 女, 江苏沛县人, 硕士, 工程师, 主要从事气候诊断与预测工作。E-mail: lchwlj710@163.com

气温、平均最低气温及月降水量资料。

水文资料选用位于上游流域的龙羊峡水库自建库以来1988-2010年的入库流量。水库设计蓄水位2600 m,总库容247亿 $\text{m}^3$ ,调节库容194亿 $\text{m}^3$ ,是黄河上游第一座大型梯级电站,人称黄河“龙头”电站,因地势高寒,人类活动相对较少,故其流量变化可代表黄河上游水资源状况。未来情景资料是利用许吟隆等<sup>[8]</sup>对黄河上游地区未来两种排放情景下的模式输出数据。

## 2.2 计算方法

现行20 cm口径蒸发皿观测值受风速影响较大,且自身受热在一定程度上加大了晴天状态下的蒸发量,误差较大,文中蒸发量通过高桥浩一郎公式<sup>[10]</sup>来计算:

$$E = \frac{3100R}{3100 + 1.8R^2 \exp\left(\frac{43.4T}{235.0 + T}\right)} \quad (1)$$

式中: $E$ 为月蒸发量(mm); $R$ 为月降水量(mm); $T$ 为月平均气温( $^{\circ}\text{C}$ )。该公式虽是经验公式,但在物理上考虑了影响实际蒸发最主要的2个物理因子,并有实际观测资料做依据,反映出的蒸发特征与干旱半干旱地区实际状况相吻合<sup>[11]</sup>。因此,该公式适宜于黄河上游龙羊峡水库地区蒸发量的计算。

## 3 流量对气候变化的响应

### 3.1 气候要素分析

由流域多年平均水分平衡方程<sup>[12]</sup>可知,大气降水、地表蒸发和气温是影响流量的主要气象因子。黄河是以大气降水为主要补给源的河流<sup>[4]</sup>,因此,降水是流量演变的驱动因子。气温升高引起蒸发增加,也会使冰雪融水补给增多,从而改变流量的形成条件,是流量的重要影响因素。

#### 3.1.1 降水

自1976年起,黄河上游流域夏季降水量呈微弱的减少趋势,其减幅为1.5 mm/10a(图1),从年代际变化来看,降水波动较为明显,70年代中期-80年代初为降水减少时段,80年代中期开始进入多雨期,90年代后又经过一个低值阶段,进入21世纪降水有开始回升的趋势。就显著性水平而言,夏季降水量未达到0.05的置信水平。经统计,夏季不同等级 $\geq 0.1$  mm、 $\geq 10.0$  mm、 $\geq 25.0$  mm及 $\geq 50.0$  mm的降水日数分别以-0.29 mm/10a、0.07 mm/10a、

0.03 mm/10a及0.01 mm/10a的速率减少或增加,夏季变化趋势均相当微弱,雨日强度变化也不明显,气候倾向率仅为0.48 mm/d/10a,不同等级降水日数及雨日强度均未通过显著性检验。

#### 3.1.2 气温

近35年来,黄河上游流域夏季平均气温总体呈波动上升趋势,近10余年尤为显著,其气候倾向率为0.48 $^{\circ}\text{C}$ /10a(图2)。夏季平均最低、最高气温亦呈明显升高趋势,但最低气温的升温率(0.52 $^{\circ}\text{C}$ /10a)明显高于最高气温(0.44 $^{\circ}\text{C}$ /10a)和平均气温的升温率。经检验,平均气温和平均最低气温升温显著,均达到0.05的显著性水平。

#### 3.1.3 蒸发

1976-2010年黄河上游蒸发量总体表现为线性上升趋势(图3),气候倾向率为4.6 mm/10a,从6次多项式拟合的趋势来看,除70年代中期-80年代中期蒸发量略有增加外,其他时段年代际波动不明显,6-8月各月蒸发量均通过95%的信度检验,说明

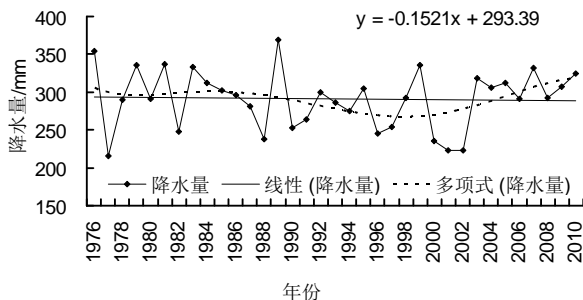


图1 1976-2010年黄河上游流域夏季降水量变化曲线  
Fig.1 Curve of summer precipitation in the the upper reaches of the Yellow River from 1976 to 2010

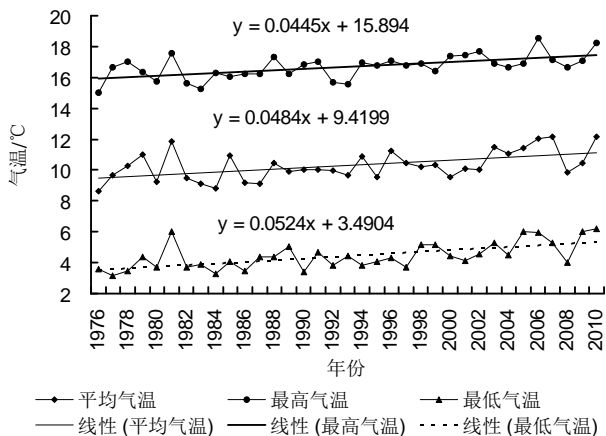


图2 1976-2010年黄河上游流域夏季气温变化曲线  
Fig.2 Curve of summer temperature in upper reaches of the Yellow River from 1976 to 2010

黄河上游夏季蒸发量呈显著增大趋势。

**3.2 黄河上游龙羊峡水库入库流量变化分析**

**3.2.1 夏季入库流量变化趋势**

图4为1988-2010年龙羊峡水库年平均入库流量变化曲线。近23a来龙羊峡年平均入库流量呈递减趋势,其速率为-33.0 m<sup>3</sup>/s/10a,但未达到显著性水平。流量在年代际的变化上经历了5个干、湿阶段,呈现“大-小-大-小-大”的变化趋势,这与降水时间序列变化存在很好的对应关系,进一步说明黄河上游流量对夏季降水异常有较强的响应。

**3.2.2 夏季入库流量丰枯变化**

根据径流的丰、枯评定标准<sup>[13]</sup>,将龙羊峡入库径流量按其模比系数 $K$  ( $K=W_i/W_m$ ,  $W_i$ 为某年年径流量,  $W_m$ 为多年平均径流量)依照表1标准分成5个丰、枯级别。1988-2010年,特枯共出现11年,偏枯4年,特丰6年,偏丰2年,未出现过平水;枯年(特枯、偏枯)出现频率达65.2%。由此可见,龙羊峡自建库以来,夏季流量多以枯水为主,这与建库后该地区的夏季气温升高、降水减少、蒸发加大等气候变化趋势密切相关。且特丰及特枯出现频率高达73.9%,说明随着气候异常不断加剧,黄河上游流量出现极端变化的比重加大。

**3.3 黄河上游龙羊峡夏季流量对气候变化的响应**

**3.3.1 流量对降水的响应**

由1988-2010年黄河上游流域夏季降水量和流量标准化曲线(图5)及相关系数表可以看出(表2):

①两者年际波动具有较好的一致性,相关系数达0.75,表明降水对流量具有决定性影响;

②6-8月各月降水均表现出与流量的高相关,说明夏季降水量对流量的影响具有一定的持续性;

③从区域气候变化的影响机制来看,黄河上游夏季降水变化减少了水库来水量,而温度升高增加了河流的蒸发状况,这种气候变化导致近年来流量减少。

**3.3.2 流量对气温的响应**

气温对流量的主要影响表现在以下4个方面:

①影响冰川和积雪的消融;

②影响流域总蒸散量;

③改变流域高山区降水形态;

④改变流域下垫面与

近地面层空气之间的温差,从而形成流域小气候。有关气候数值模拟推算了气温变化对流量造成的可能影响:若降水不变,气温升高4℃时,流域径流

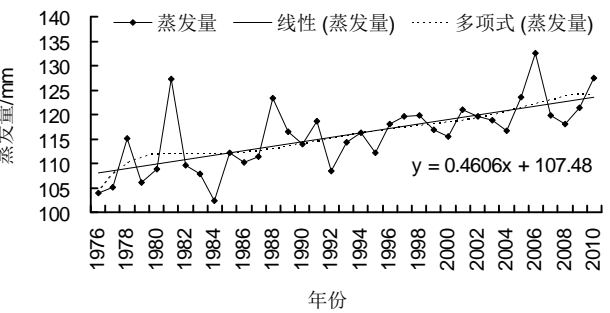


图3 1976-2010年黄河上游流域夏季平均入库流量变化曲线  
Fig.3 Curve of summer evaporation in the upper reaches of the Yellow River from 1976 to 2010

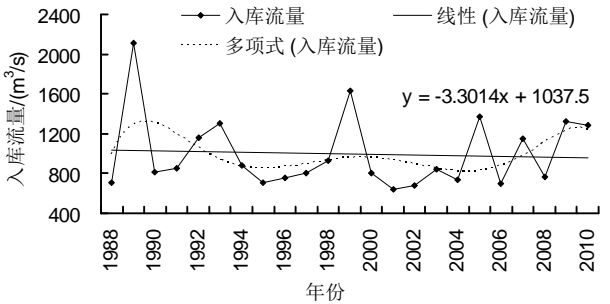


图4 1988-2010年龙羊峡夏季蒸发量变化曲线  
Fig.4 Curve of summer mean incoming flow for Longyangxia Reservoir from 1988 to 2010

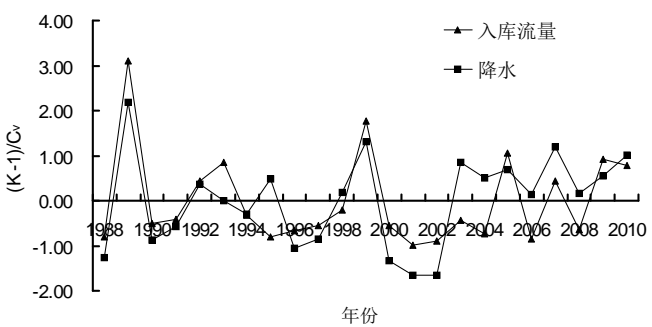


图5 1988-2010年黄河上游夏季降水量和龙羊峡入库流量标准化曲线  
Fig.5 Standardized curve of summer precipitation and incoming flow in the upper reaches of the Yellow River from 1988 to 2010

表1 1988-2010年龙羊峡水库入库径流丰枯频率对比

Tab.1 Wet and dry frequency of runoff for Longyangxia Reservoir from 1988 to 2010

级别	特丰	偏丰	平水	偏枯	特枯
划分标准	$K > 1.17$	$1.04 < K \leq 1.17$	$0.97 \leq K < 1.03$	$0.84 \leq K < 0.96$	$K < 0.84$
频次	6	2	0	4	11
频率/%	26.1	8.7	0	17.4	47.8



量可减少15%左右<sup>[9]</sup>。据此,黄河上游流域夏季平均最低气温、平均最高气温和平均气温变化逐年分别以0.52℃/10a、0.44℃/10a和0.48℃/10a的速率升高,对其流量的减少起到了推波助澜的作用。表2列出了气温与龙羊峡入库流量的相关系数。由表2可以看出:①平均气温、最高气温与流量总体上呈负相关关系,但后者更为显著,表明在黄河上游最高气温升高对于加大流域蒸发量导致流量补给减少的作用突出。②夏季流量对夏季最低气温的响应显著,因平均最低气温的显著上升,必然加大冰雪消融量,进而加大了流量中的冰雪融水补给量。③气温对流量的影响同样具有持续性,并以最高、最低气温的持续性影响突出。

3.3.3 流量对蒸发的响应

蒸发的改变容易引起土壤含水量、区域水量平衡结构的变化。由黄河上游流域蒸发量与龙羊峡流量的相关系数表可以反映陆面蒸发与流量的相互关系(表2)。可以看出:①蒸发量( $E$ )普遍与流量( $Q$ )呈负相关关系,表明蒸发量作为地表水平衡当中重要的支出项,蒸发量的增大必然导致流量的减少,反之亦然,其物理意义是显著的;②夏季流量对夏季蒸发的响应相对不敏感,未通过显著性检验,说明在干旱半干旱的黄河上游流域,夏季流量主要受降水和气温变化的综合作用,这与相关结论相吻合<sup>[14]</sup>。

4 黄河上游夏季流量气候-水文模型的建立

由上述统计结果,黄河上游龙羊峡夏季入库流量与同期降水量、平均最高、最低气温序列的相关系数分别为0.75、0.41和0.43,均通过0.01或0.05的信度显著性检验。且由各要素标准偏差、极值比和变异系数来看(表3),黄河上游夏季降水、最低气温及流量的变异程度较大,平均气温和蒸发变化相对缓和。径流的变异程度远大于降水和气温,表明降水、气温变化会被放大并反映在径流上。所以,本文认为代表区域水分供应和热力条件的降水量、平均最高气温、平均最低气温是影响黄河上游流域夏季流量变化的主要气候要素。

为显现以上气候因子对龙羊峡夏季入库流量的综合影响,给出各因子倚流量的回归方程:

$$Q=3513.664+3.592R-264.036R_{\max}+199.057T_{\min}$$
(2)

式中: $Q$ 为夏季入库流量( $\text{m}^3/\text{s}$ ); $R$ 为夏季降水量( $\text{mm}$ ); $T_{\max}$ 夏季平均最高气温( $^{\circ}\text{C}$ ); $T_{\min}$ 为夏季平均最低气温( $^{\circ}\text{C}$ )。上式的复相关系数为0.68, $F=12.831$ ,通过0.05显著性水平检验,说明回归方程及各因子的方程贡献是显著的。图6为实测值与方程模拟值的对比曲线,多数年份拟合很好,平均相对误差为11.9%,表明该方程用于估算龙羊峡夏

表2 龙羊峡入库流量与上游流域同期各气候要素的相关系数  
Tab.2 Correlation of input flow of Longyangxia Reservoir and climatic factors in the upper reaches of the Yellow River

		$R/\text{mm}$	$T/^{\circ}\text{C}$	$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	$T_{\min}/^{\circ}\text{C}$	$E/\text{mm}$
$Q/(\text{m}^3/\text{s})$	6月	0.62***	-0.01	-0.32*	0.35*	-0.26
	7月	0.71***	-0.02	-0.27	0.37*	-0.04
	8月	0.52***	-0.16	-0.51***	0.33*	-0.14
	夏季	0.75***	-0.02	-0.41**	0.43**	-0.09

注:\*,\*\*,\*\*\* 分别表示通过了0.1、0.05、0.01信度的检验。

表3 黄河上游流域1988–2010年夏季水文气象要素特征值  
Tab.3 Summer statistical values of hydrological and meteorological factors in the upper reaches of the Yellow River during 1988–2010

	均值	最大值	最小值	极值比	标准偏差	变异系数
$Q$	997.9	2113.3	644.3	3.3	358.4	0.36
$R$	286.1	369.0	222.6	1.7	380.8	0.14
$T$	10.3	11.6	9.3	1.2	0.6	0.04
$T_{\max}$	17.0	18.5	15.6	1.2	0.7	0.05
$T_{\min}$	4.7	6.2	3.4	1.8	0.8	0.17
$E$	118.9	132.6	108.4	1.2	5.0	0.04

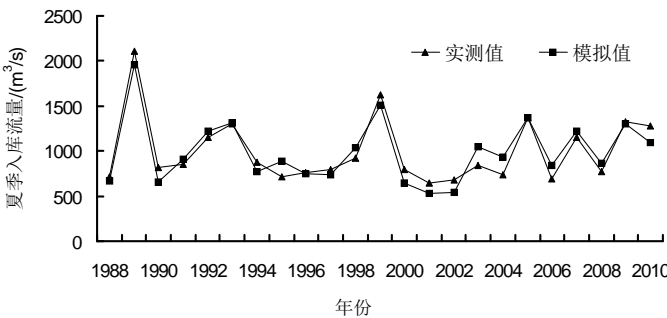


图6 龙羊峡水库夏季入库流量实测值与模拟值对比曲线  
Fig.6 Comparison between observed and simulated summer mean flow for Longyangxia Reservoir

季入库流量具有一定的可信度,同时也说明气候变化是影响黄河上游流域水资源变化的最主要因素。

5 未来气候变化情景下黄河上游夏季流量预测

5.1 未来气候情景评价

由于气候变化具有不确定性,评估时应考虑多种排放情景带来的可能性。本节基于IPCC 2000年发布的《排放情景特别报告》(SRES)<sup>[15]</sup>中构建的A2、B2两种温室气体排放方案,其中A2强调经济发展,温室气体排放量较大;B2强调可持续发展,更注重环保,温室气体排放量增长相对缓慢;根据对黄河上游地区未来两种排放情景下的预测结果,应用统计降尺度方法输出的龙羊峡地区日平均最高气温( $T_{\max}$ )、平均最低气温( $T_{\min}$ )、降水量( $R$ )序列,经统计处理,建立了未来2个时期(2020s、2030s)夏季的气候情景(表4)。以龙羊峡建库以来观测时期(1988-2010年)为基准期,在两种排放情景下,未来2个时期气温一致升高,降水量减少,夏季平均最高气温将分别升高3.0℃、2.9℃(A2情景)和2.7℃、3.2℃(B2情景),平均最低气温将分别升高2.6℃、2.5℃(A2情景)和2.4℃、2.7℃(B2情景),降水量分别减少40.9%、38.4%(A2情景)和34.5%、35.7%(B2情景),减幅较大。

综合以上结果,龙羊峡地区未来20年持续增温的趋势不可避免,最高气温增幅较最低气温大,降水相对基准期偏少显著。赵传燕等<sup>[16]</sup>利用IPCC提供的模式集成结果及观测资料,通过建立大尺度气候状况与区域地理位置和海拔的统计降尺度关系,并将其应用于AOGCMs输出的大尺度气候信息,预估了西北地区未来的气候变化情景,预计未来30a降水减少的地区在高原区,青海省最为显著。这一结论与本文研究结果较一致。林而达等<sup>[17]</sup>曾指出,对于模式模拟结果,气温模拟的可信度较高,降水模拟的不确定性很大,赵宗慈等<sup>[18]</sup>的研究也证明上述推论,因而上述预测结果仍具有较大的不确定性。

5.2 未来气候情景下龙羊峡水库夏季流量分析

根据上节建立的流量预估模型,利用

模式输出的未来情景资料,针对入库流量对气候响应情况进行分析。图7为未来20a两种不同排放情景下龙羊峡夏季入库流量的响应变化情况,就趋势来看,未来20a流量保持平稳变化,2020s平均流量分别为758.9 m<sup>3</sup>/s(A2情景)、854.8 m<sup>3</sup>/s(B2情景),2030s平均流量分别为800.4 m<sup>3</sup>/s(A2情景)、823.4 m<sup>3</sup>/s(B2情景)。因气温升高、降水显著减少,且冰雪融水主要集中在9月后,夏季气温升高对于加大流域蒸发量导致流量补给的减少作用要大于其升高致使冰雪融水的补给作用,未来2个时期夏季平均流量在设定排放情景下均较基准期(1988-2010年)减少,A2情景下平均流量分别减少23.9%(2020s)和19.8%(2030s),B2情景下分别减少14.4%(2020s)和17.3%(2030s),这一结论也与某些研究结果相吻合,如赵芳芳等<sup>[19]</sup>通过统计降尺度SDS情景模拟表明,黄河源区未来径流量的减少趋势不可避免,未来3个时期(2020s、2050s和2080s)的年平均流量将分别减少24.15%、31.79%和41.33%。但值得注意的是,龙羊峡夏季流量在未来不同气候变化情景下流量变化有所差异,在A2情景下,未来20年降水逐渐增加,气温略有降低,入库流量有回升的趋势,而B2情景则相反,流量在未来20年间持续减少。虽然黄河上游未来流量的增减存在着较大的不确定性。但随着社会经济的进一步发展,黄河流域用水

表4 未来气候变化情景下龙羊峡上游流域气候预测值  
Tab.4 Climate prediction in the upper reaches  
of Yellow River above Longyangxia Reservoir in future

排放情景	$R/\%$		$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$		$T_{\min}/^{\circ}\text{C}$	
	2020s	2030s	2020s	2030s	2020s	2030s
A2	-40.9	-38.4	3.0	2.9	2.6	2.5
B2	-34.5	-35.7	2.7	3.2	2.4	2.7

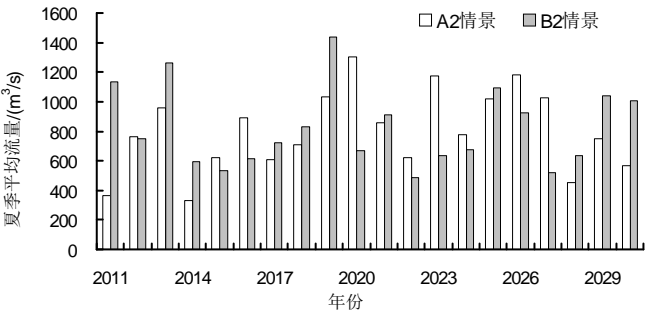


图7 未来20年两种排放情景下龙羊峡水库入库流量响应变化  
Fig.7 Variation of input flow in future 20 years with two emission scenarios

量将进一步增长,黄河上游的水资源供需形势不容乐观。

## 6 结论

(1) 1976-2010年,黄河上游流域夏季降水微弱减少,年代际波动明显;平均气温总体呈波动上升趋势,气候倾向率为 $0.48^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ;蒸发量显著增大。

(2) 1988-2010年,黄河上游龙羊峡水库夏季平均入库流量呈现递减趋势,其速率为 $-33.0\text{ m}^3/\text{s}/10\text{a}$ 。自建库以来,夏季入库流量多以枯水年为主,且随着气候异常不断加剧,流量出现极端变化比重加大。

(3) 水库入库流量对降水量、平均最高气温及最低气温的响应显著,因此代表区域水分供应和热力条件的降水量、平均最高气温、平均最低气温是影响黄河上游水资源变化的主要气候要素。

(4) 在未来两种排放情景下,预测2020s黄河上游流域入库流量可能减少23.9%(A2情景)或14.4%(B2情景),到2030年可能减少19.8%(A2情景)或17.3%(B2情景)。

## 7 讨论

黄河上游流域气候在总体上出现气温升高、降水减少和蒸发增大趋势,这些气候要素对流量的变化起着决定性的作用。据此,可以建立较高精度的入库流量气候模型,进而利用该模型定量评估气候变化对入库流量的影响,亦可预评估未来气候变化对入库流量的可能影响。

本文基于IPCC 2000年发布的《排放情景特别报告》中的温室气体排放方案,进行了两种排放情景下的流量预估,但限于未来气候变化趋势预估这一问题的复杂性和目前的技术水平,对未来气候变化情景的准确预测有很大的难度,所以预测结果亦具有较大的不确定性,但本研究结果对水库短期内的决策管理,仍具有重要的指导意义。

## 参考文献

[1] Huang Q, Zhao X H. Factors affecting runoff change in the upper reaches of the Yellow River. *Progress in Natu-*

- ral Science, 2004, 14(9): 811-816.
- [2] 蓝永超, 文军, 赵国辉, 等. 黄河河源区径流对气候变化的敏感性分析. *冰川冻土*, 2010, 32(1): 176-181.
- [3] 蓝永超, 林舒, 李州英, 等. 近50a来黄河上游水循环要素变化分析. *中国沙漠*, 2006, 26(5): 849-854.
- [4] 孙卫国, 程炳岩, 李荣. 黄河源区径流量的季节变化及其与区域气候的小波相关. *中国沙漠*, 2010, 30 (3): 712-721.
- [5] 李林, 汪青春, 张国胜, 等. 黄河上游气候变化对地表水的影响. *地理学报*, 2004, 59(5): 716-722.
- [6] 赖祖铭. 气候变化对青藏高原大江河径流的影响. *冰川冻土*, 1996, 18(增刊): 31-43.
- [7] 蓝永超, 林舒, 李州英, 等. 近50a来黄河上游水循环要素变化分析. *中国沙漠*, 2006, 26(5): 849-854.
- [8] 许吟隆, 张颖娴, 林万涛, 等. “三江源”地区未来气候变化的模拟分析. *气候与环境研究*, 2007, 12(5): 667-675.
- [9] 范丽军, 符宗斌, 陈德亮. 统计降尺度方法对未来气候变化情景预估的研究进展. *地球科学进展*, 2005, 20(3): 320-329.
- [10] 高桥浩一郎. 从月平均气温、月降水量来推算蒸发量的公式. *天气*, 1979, 26(12): 29-32.
- [11] 李林, 李凤霞, 郭安红, 等. 近43年来“三江源”地区气候变化趋势及其突变研究. *自然资源学报*, 2006, 21(1): 79-85.
- [12] 孙卫国. *气候资源学*. 北京:气象出版社, 2008: 150-220.
- [13] 施雅风. 气候变化对西北华北水资源的影响. 济南: 山东科学出版社, 1995: 127-141.
- [14] 常国刚, 李林, 朱西德. 黄河源区地表水资源变化及其影响因子研究. *地理学报*, 2007, 62(3): 312-320.
- [15] Nakicenovic N, Alcamo J, Davis G, et al. *Special Report on Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the International Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, U.S.A.: Cambridge University Press, 2000: 599-611.
- [16] 赵传燕, 南忠仁, 程国栋, 等. 统计降尺度对西北地区未来气候变化预估. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2008, 44 (5): 12-18.
- [17] 林而达, 许吟隆, 蒋金鹤, 等. 气候变化国家评估报(II)气候变化的影响与适应. *气候变化研究进展*, 2006, 2(2): 51-61.
- [18] 赵宗慈, 丁一汇, 徐影, 等. 人类活动对20世纪中国西北地区气候变化影响监测和21世纪预测. *气候与环境研究*, 2003, 8(1): 26-34.
- [19] 赵芳芳, 徐宗学. 黄河源区未来气候变化的水文响应. *资源科学*, 2009, 31(5): 722-731.

# Impacts of Climate Change on the Summer Flow and Estimates of the Future Trends in the Upper Reaches of the Yellow River

LIU Caihong<sup>1,2</sup>, YANGYanhua<sup>1</sup>, WANG Zhenyu<sup>1</sup>

(1. Qinghai Climate Centre, Xining 810001, China;

2. Qinghai Key Laboratory of Disaster Preventing and Reducing, Xining 810001, China)

**Abstract:** In this paper, characteristics of surface water resources and climate above the Longyangxia Reservoir areas, lying in the upper reaches of the Yellow River, were analyzed through summer meteorological and flow observations, with the examination of the feedbacks and interactions between water resources and climate. On the basis of analyses, a prediction model of the flow into the reservoir was established. And in terms of future climate scenarios provided by means of the down-scaling climate model, the flow under different emission scenarios was predicted. After the study, some significant conclusions were drawn in the paper. Firstly, the results indicate that variations of temperatures have been oscillating with a rising trend in the upper reaches of the Yellow River from 1976 to 2010, with a rising rate of 0.48°C in every 10 years. Annual precipitation shows a faint reducing trend, and presents an obvious inter-annual and inter-decadal oscillation. There is a significant increase in evaporation, and this trend has a higher general relationship with temperatures. Secondly, the summer flow of Longyangxia Reservoir decreases from 1988 to 2010 with a rate of -33.0 m<sup>3</sup>/s every 10 years. Since Longyangxia Reservoir was established, in most years the flow is less than the average, and with growing climate anomalies, the proportion of extreme changes in flow rate increases. Thirdly, it is found that precipitation, mean maximum temperature and minimum temperature have a great influence on the summer flows into the reservoir. Meanwhile, it was indicated that climate change is the primary factor affecting the flows into the reservoir. In addition, parameters of the model were tuned satisfactorily in order to reliably estimate the summer flows into the reservoir. Through calculation, in future, under the A2 scenario, summer mean maximum temperature has risen by 3.0 and 2.9°C compared with the period 1988-2010, minimum temperature has increased by 2.6 and 2.5°C and precipitation decreased by 40.9% and 38.4% in the 2020s and 2050 respectively, and under the B2 scenarios, summer mean maximum temperature has risen by 2.7 and 3.2°C, minimum temperatures has increased by 2.4 and 2.7°C and precipitation decreased by 34.5% and 35.7% in the 2020s and 2050 respectively. In summary, it is observed that temperature will continue to rise and precipitation will decrease obviously in future in the upper reaches of the Yellow River. So the predicted results show that the summer flows into the Longyangxia Reservoir will decrease in the 2020s and 2030s compared with the baseline specified data from 1988 to 2010. Under different emission scenarios, the flows show obvious differences due to the combined effect of changes in temperature and precipitation. The summer flows would decrease by 23.9% and 19.8% in the 2020s and 2030s respectively, under the A2 scenario; and decrease by 14.4% and 17.3% in the 2020s and 2030s under the B2 scenario. Therefore, damages of the effects of climate change on the summer flows in the upper reaches of the Yellow River generally outweigh potential benefits, but with great uncertainty in the predictions.

**Key words:** summer flow; climate change; response; prediction; the upper reaches of the Yellow River; Longyangxia Reservoir

本文引用格式:

刘彩红, 杨延华, 王振宇. 黄河上游夏季流量对气候变化的响应及未来趋势预估. 地理科学进展, 2012, 31(7): 846-852.