

# 黄河上中游径流对气候变化的敏感性分析\*

王国庆 王云璋 康玲玲

(黄委会黄河水利科学研究院, 郑州 450003)

## 提 要

利用月水文模型, 采取假定气候方案, 分析了黄河上中游径流对气候变化的敏感性。结果表明, 径流对降水变化的响应敏感, 对气温变化的响应相对较弱, 如气温不变, 降水增加 10% 时, 径流量约增加 17%。如降水不变, 气温升高 1℃, 则径流减少 5% 左右。在区域上分布, 中游较上游对气候变化更为敏感。

关键词: 黄河上中游 径流 气候变化 敏感性

## 引 言

大气中不断增加的温室气体将引起全球性的气候变化, 可加剧某些地区的洪涝、干旱灾害, 对水文循环等方面产生重要影响, 气候变暖愈来愈引起人们的关注。20 世纪 70 年代末期, 由世界气象组织 (WMO)、联合国环境规划署 (UNEP)、国际水文科学协会 (IAHS) 等国际组织促进, 先后开展并实施了世界气候影响研究计划 (WCIP)、全球能量水循环试验 (GEWEX) 等项目的研究<sup>[1, 2]</sup>, 在 1985 年的 Villach 会议后, 我国加速了气候变化方面的研究, 并先后在“八五”、“九五”国家重大科技攻关项目中设立了与气候变化及其影响相关的课题<sup>[3, 4]</sup>。从目前的研究成果来看, 主要集中在区域气候特征的趋势性分析、与气候模型相耦合的流域水文模型研究以及气候变化对流域水文情势的影响分析等方面<sup>[5]</sup>。鉴于目前气候模型输出结果的精度较低, 依据其输出结果直接用来评价流域水资源变化还不现实, 因此, 多采用假定气候方案, 研究流域水资源对气候变化的响应。黄河水资源贫乏, 近年来, 受气候变化和人类活动的影响, 下游断流频繁, 地表径流量锐减, 水资源供需矛盾日益突出; 随着我国经济开发向中西部的战略转移, 水资源势必成为影响经济发展调整的制约因素<sup>[6]</sup>。研究气候变化对黄河流域径流的影响, 对流域水资源的开发利用及促进区域经济发展等方面具有重要意义。本文应用月水量平衡模型, 在对黄河各产流区间径流模拟的基础上, 采用假定气候方案, 分析了径流对气候变化的敏感性。

## 1 流域水文、气候特征

黄河位于我国北中部, 界于 32° ~ 42° N, 96° ~ 119° E 之间, 是我国第二大河; 集水面积

\* 国家重点基础研究项目 (编号 G1999043400) 和国家“九五”重点科技攻关项目 (编号: 96-908-03-02-03) 资助。  
2000-04-05 收到, 2000-08-04 收到修改稿。

75 万  $\text{km}^2$ , 其中花园口以上面积 73 万  $\text{km}^2$ , 约占流域总面积的 97%。

流域处于大陆性季风气候区, 多年平均降水量为 460 mm, 受地形等因素的影响, 降水分布由东南向西北递减, 地区差高达 4 倍, 降水年内分配不均, 汛期降水约占年总量的 70%; 平均年水面蒸发量为 1200 mm, 东南部较小, 约为 1000 mm, 西北部较大, 一般在 1500 mm 以上; 受强蒸发的影响, 水资源紧缺, 多年平均天然径流量为 560 亿  $\text{m}^3$ ; 因流域径流源于降水, 故其与降水具有类似的南多北少的分布格局。根据流域特征及水文、气候特点, 将上中游划分为 4 个主要产流区, 分别为: 兰州以上(简称 I 区)、头道拐至龙门区间(简称 II 区)、龙门至三门峡区间(简称 III 区)和三门峡至花园口区间(简称 IV 区); 统计表明, 这 4 个区域径流量可占流域总径流量的 90% 以上。

## 2 月水量平衡模型及径流模拟

针对黄河上中游地区的产流特点, 根据水平衡原理, 建立了月水量平衡模型<sup>[7-9]</sup>, 模型中考虑了地面径流、地下径流和融雪径流 3 种水源, 与众多的水文模型相比, 该模型具有结构简单、参数少易于率定、适用气象条件范围广等优点; 模型控制方程为:

$$\begin{aligned} R_{si} &= K_s \cdot \frac{S_{i-1}}{S_{\max}} \cdot P_i & R_{Gi} &= K_g \cdot S_{i-1} \\ R_{sni} &= K_{sn} \cdot e^{(T_i - 4)/8} \cdot S_{ni} & R_i &= R_{si} + R_{sni} + R_{Gi} \\ E_i &= E_w \cdot \frac{S_{i-1}}{S_{\max}} & S_i &= S_{i-1} + P_i - E_i - R_i \end{aligned}$$

式中  $R_{si}$ 、 $R_{Gi}$  和  $R_{sni}$  分别为地面、地下和融雪径流;  $S_i$ 、 $S_{i-1}$  为本月和上月土壤蓄水量;  $P_i$ 、 $E_i$  和  $R_i$  为月降水量、蒸散发量和计算径流量;  $E_w$  为月蒸发能力, 常以 E601 蒸发皿观测值代替或根据气象资料计算;  $S_{ni}$  为月积雪量, 可根据月降水量和气温线性估算<sup>[9]</sup>;  $T_i$  为月平均气温;  $S_{\max}$  为最大土壤蓄水量,  $K_s$  为地面径流折算系数,  $K_g$  为地下径流系数,  $K_{sn}$  为融雪径流系数。

根据流域实际情况初定模型参数, 输入月降水量、蒸发能力和平均气温资料, 以实测径流量为校核目标, 选 Nash 模型效率  $R^2$  和相对误差  $Re$  为目标函数, 采用 Rosenbrock 法与人机交互对话相结合的途径率定模型参数<sup>[8]</sup>,  $R^2$  越接近 1, 同时  $Re$  越接近 0, 说明模拟效果越好。

土壤含水量  $S_i$  是表征流域状态的中间变量, 在模型运行中, 先给出其初始值  $S_0$ , 再计算 3 种水源, 然后根据水量平衡原理依次迭代本时段和下一时段状态值  $S_i$  和  $S_{i+1}$ ; 一般取最大土壤含水量的一半作为初始值  $S_0$ , 为消除这种人为因素的影响, 可取系列的前两年作为预热期, 用后面的资料来率定参数, 为检验模型对流域的适应性, 一般还要预留 3~5 年资料进行模型检验, 只有在率定期和检验期模拟精度都满足要求的情况下, 才认为模型合格。

输入各区间逐月降水、水面蒸发量和气温资料, 利用 1960~1989 年资料率定模型参数, 用 1990~1994 年的资料检验模型; 表 1 中列出了模型参数及率定期和检验期的模拟效果, 图 1~4 中绘出了 1986~1994 年实测与计算径流量的拟合过程; 可以看出, 各区间

率定期和检验期模型效率系数均在 65 % 以上,最大相对误差为 6.8 %;径流量实测值与计算值拟合良好,说明模型对黄河径流具有较好的动态模拟效果,可用来分析气候变化对径流量的影响。

表 1 黄河流域各产流区模型参数及模拟效果

区间	模型参数				率定期		检验期	
	$S_{max}$	$K_s$	$K_g$	$K_{SH}$	$R^2(%)$	$Re(%)$	$R^2(%)$	$Re(%)$
I	190	0.1	0.2	0.2	72.7	2.7	74.5	5.3
II	250	0.09	0.03	0.5	70.8	-5.4	68.2	3.4
III	180	0.147	0.19	0.0	73.4	2.6	71.7	5.7
IV	160	0.325	0.145	0.0	67.3	3.5	70.2	6.8

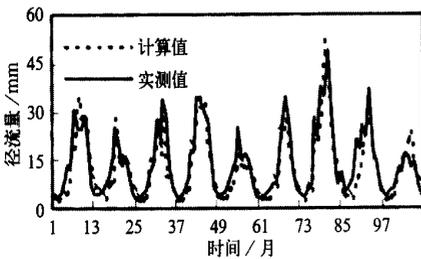


图 1 I 区实测与计算径流量过程

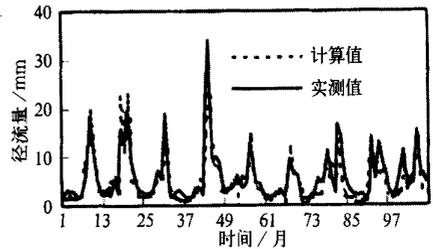


图 2 II 区实测与计算径流量过程

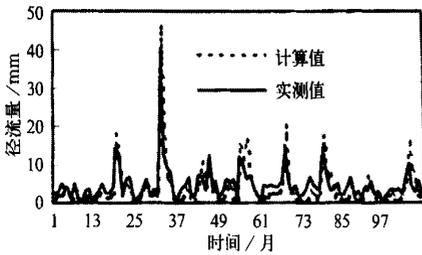


图 3 III区实测与计算径流量过程

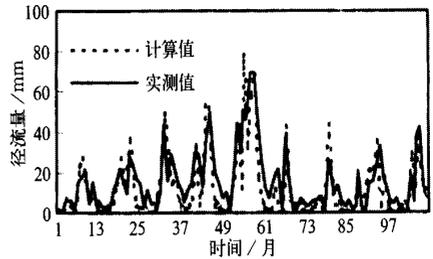


图 4 IV区实测与计算径流量过程

### 3 黄河上中游径流对气候变化的敏感性分析

#### 3.1 气温变化对蒸发能力的影响

蒸发是水文循环、水量转化中的一个关键环节,气温变化对蒸发能力的影响是研究气候变化对径流影响的重要内容。统计表明:气温与蒸发能力之间具有较好的指数函数关系;通过建立黄河 11 个站月蒸发能力与月平均气温间的指数型统计关系式,估算各站蒸发能力在平均气温升高 1 °C、2 °C 情况下的变化(表 2)。

表 2 黄河上中游 11 站蒸发能力在不同升温情况下的变化率 %

$\Delta T$	玛多	兰州	岷县	西宁	中宁	榆林	延安	太原	天水	西安	郑州
+1 °C	5.24	5.78	5.66	5.88	5.59	6.78	6.59	6.66	6.31	5.44	5.02
+2 °C	10.76	11.90	11.65	11.97	11.79	14.02	13.61	14.78	13.03	11.18	10.10

由表可以看出:在气温升高 1℃和 2℃的情况下,上中游蒸发能力分别增加 5%~7%和 10%~15%;在地域分布上,中游榆林、延安、太原和天水站的变化幅度较大,分别为 6.3%~6.8%和 13%~15%;其余各站增加幅度较小,分别在 5.5%和 11%左右。

### 3.2 黄河上中游径流量对气候变化的敏感性分析

根据赵宗慈提供的 7 种 GCMs 模型输出的未来 CO<sub>2</sub> 倍增条件下的区域气温、降水变化情景可以看出,尽管各气候模型的输出结果存在差异<sup>[3,10]</sup>,但其总趋势一致表明:未来的几十年内,黄河上中游平均气温约升高 1~2.5℃,降水有不同程度的增减。根据未来气候的可能变化趋势,采用假定气候方案,分析径流对气候变化的敏感性。假定的气候方案为:降水变化为 ±20%、±10%和不变,同时气温保持不变及升高 1℃、2℃共 15 种组合。

分析径流对气候变化的敏感性,首先假定气候变化不改变气候因子的时空分布,并且未来将重现降水、气温和蒸发缩放后的序列。利用月水量平衡模型计算各气候情景下的径流量及气候变化对径流的影响(表 3)。

表 3 黄河上中游主要产流区不同气候情景下径流量的变化率

%

$\Delta P/P$	I 区			II 区			III 区			IV 区		
	0℃	1℃	2℃	0℃	1℃	2℃	0℃	1℃	2℃	0℃	1℃	2℃
-20	-23.4	-26.5	-29.3	-30.8	-34.8	-38.3	-32.8	-36.4	-39.6	-31.7	-34.4	-36.8
-10	-12	-15.5	-18.7	-16.0	-20.8	-24.9	-18.0	-23	-27.1	-16.5	-19.7	-22.5
0	0.0	-4.0	-7.7	0.0	-5.5	-10.3	0.0	-6.6	-12.3	0.0	-3.7	-7.0
+10	12.5	8.0	3.9	19.0	11.3	5.4	21.2	12.2	5.1	17.7	13.5	9.7
+20	25.5	20.4	15.9	39.9	30.7	23.2	45.6	34.6	25.0	36.5	31.7	27.5

由表可以看出:(1)径流随降水的增加而增大,随气温的升高而减小;(2)径流对降水变化的响应较对气温变化的响应更为显著;当气温保持不变,降水增加 10%时,4 个区间的径流量将增加 12%~22%;而当降水不变,气温升高 1℃时,径流量将减少 3%~7%;(3)气温对径流的影响随降水的增加而更为明显;随降水减少,气温对径流的影响不明显;(4)4 个区域中,中游 II 区和 III 区对气候变化较为敏感,而 I 区对气候变化的响应相对较弱;究其原因,主要由于上游较中游更为湿润且具有显著的融雪径流所致。(5)在 15 种假定的气候情景中,最为不利的情景是气温升高 2℃,同时降水减少 20%,在这种情况下,径流量将减少 30%~40%。

## 4 结 语

利用水文模拟途径,采取假定气候方案,分析了黄河上中游径流对气候变化的响应。结果表明,径流对降水变化的响应较对气温变化的响应显著,中游地区较上游地区对气候变化敏感。全球变暖是当今世界面临的重大环境问题,限于资料及科技水平,目前还很难精确给出未来的气候变化情景,根据气候变化的可能趋势,分析流域径流对气候变化的敏感性,对水资源的科学管理和合理调配利用等方面具有重要意义。

## 参 考 文 献

- 1 Gleick P H. Global climatic changes and regional hydrology: Impacts and respond. The Influence of Climatic Changes and Climatic Variability on the Hydrologic Regime and Water Resources (proceeding of the Vancouver symposium, August), 1978a.
- 2 WMO. Water resources and climate change: sensitivity of water resources systems to climate change and variability. WMO/ TO, 1987.
- 3 刘春霖. 气候变化对水文水资源影响及适应对策研究. 85-913-03-03 专题技术报告, 北京: 水利部水利信息中心, 1996.
- 4 施亚风. 中国气候与海面变化及其趋势和影响——气候变化对西北华北水资源的影响. 济南: 山东科学技术出版社, 1992.
- 5 Schultz G A, Hornbogen M, Viterbo P, et al. Coupling large scale hydrological and atmospheric model. IAHS Special Publications, 1995.
- 6 贺秀正, 杨彦平. 黄河断流对下游影响及对策. 第二届多沙河川整治与管理学术研讨会论文集, 郑州, 1999.
- 7 Conway D. A water balance model for the upper blue Nile in Ethiopia. *Hydrological Sciences Journal*, 1997, 142(2).
- 8 赵人俊. 流域水文模拟. 北京: 水利电力出版社, 1981.
- 9 王国庆, 张建中. 融雪径流模型及唐乃亥站的应用. *西北水资源与水工程*, 1997, (3).
- 10 Houghton J T, Jenkins G J, Ephraums J J. Climate change: The IPCC scientific assessment. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

## ANALYSIS ON THE SENSITIVITY OF RUNOFF IN YELLOW RIVER TO CLIMATE CHANGE

Wang Guoqing Wang Yunzhang Kang Lingling  
(Institute of Hydraulic Research of YRCC, Zhengzhou 450003)

### Abstract

Effects of climate change on runoff in Yellow River are studied with hypothetical scenarios using the monthly hydrological model. The results show that runoff is less sensitive to temperature change but more sensitive to precipitation change, and runoff in the middle reaches is more sensitive to climate change than that in upper reaches. While temperature increases 1 °C, runoff in Yellow River decreases 5%; while precipitation changes 10%, runoff changes about 17%.

**Key words:** Yellow River Runoff Climate Sensitivity