

文章编号:1671-8844(2006)04-029-04

# 黄河流域时变增益分布式水文模型( ) ——模型的校检与应用

叶爱中<sup>1</sup>, 夏 军<sup>1,2</sup>, 王纲胜<sup>2</sup>

- (1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;  
2. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101)

**摘要:**针对分布式水文的应用问题,结合黄河流域时变增益分布式水文模型,在黄河流域进行了实例研究.对黄河干流 17 个主要流量控制站进行了连续径流模拟.模拟总水量同实测总水量的相对误差在 5% 以内,其中有 11 个站效率系数(确定性系数)在 0.8 以上,其余的也在 0.7 以上.最后,运用模型分析了气候变化与人类活动对黄河流域降雨产流的影响.

**关键词:**分布式时变增益模型;气候变化;人类活动;黄河

**中图分类号:**TV 121.7 **文献标志码:**A

## A distributed time-varying gain model applied to Yellow River Basin

YE Aizhong<sup>1</sup>, XIA Jun<sup>1,2</sup>, WANG Gangsheng<sup>2</sup>

- (1. State Key Lab. of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Key Lab. of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

**Abstract:** There is a gap between theory and application of distributed hydrology model. According to the application of distributed hydrology model, this paper has carried out a case study on the Yellow River Basin. Observed stream flow at 17 hydrological stations along the main river was used to calibrate the model. The relative errors between simulated and observed water yields were within 5%; among the 17 sites, the Nash-Sutcliffe Efficiency Criteria (NSECs) of the 11 sites were greater than 0.80, while all NSECs were greater than 0.70. Finally, the paper analyzed the impact of climate changes and human activities on the Yellow River Basin.

**Key words:** distributed time-varying gain model; climate changes; human activities; Yellow River

分布式水文模型最早在 20 世纪 70 年代就提出了.自第一个严格意义上的分布式流域水文模型 SHE(System Hydrology European)于 1986 年提出之后,分布式流域水文模型已成为当今水文学领域中研究的热点、难点和重点之一<sup>[1]</sup>.20 年来分布式模型在理论上取得了重要的进展,但其应用研究一直未得到很好的发展.在我国,至今几乎没有

生产单位将分布式模型应用于洪水预报.所以分布式模型的应用研究同理论研究同样重要.

黄河发源于青海高原巴颜喀拉山北麓约古宗列盆地,蜿蜒东流,穿越黄土高原及黄淮海大平原,注入渤海.干流全长 5 464 km,水面落差 4 480 m.流域总面积 79.5 万 km<sup>2</sup>(含内流区面积 4.2 万 km<sup>2</sup>).黄河流域界于北纬 32°至 42°,东经 96°至

收稿日期:2005-05-18

作者简介:叶爱中(1978-),男,安徽安庆人,博士生,主要从事水文学及水资源科学研究工作.

基金项目:国家自然科学基金项目(50239050),高等学校博士点基金项目(20040486038)资助.

119 之间,南北相差 10 个纬度,东西跨越 23 个经度.流域内石山区占 29%,黄土和丘陵区占 46%,风沙区占 11%,平原区占 14%.各地自然景观差异很大,尤其有世界上最大的黄土高原,土壤侵蚀十分严重.流域内降雨时空分布极不均匀,从西北到东南递增,年均雨量从 100 mm 到 1 000 mm 以上.主要降雨集中于 6~9 月,占 1 年的 70%.多年平均径流深在 80 mm 左右(花园口站).年水面蒸发在 850 mm 到 1 200 mm 之间.多年平均实际蒸发在 400 mm 左右.近 10 年来由于人类活动与气候变化的影响,径流减小,使黄河多次出现断流.迫切需要定性、定量的认识气候变化与人类活动对水循环的影响<sup>[2]</sup>.

利用黄河流域分布式时变增益水文模型<sup>[3]</sup>对黄河干流水文站流量的模拟,本文尝试通过情景分析,在一定的程度上定量的认识气候变化与人类活动对黄河流域水循环的影响.

## 1 模型应用

### 1.1 资料预处理

采取了来自于美国地质勘探局(United States Geological Survey :USGS)网站分辨率为 1 000 m ×1 000 m 的 DEM,利用 GIS 与作者自行开发的软件,直接从 DEM 中生成了每个网格的坡度、坡向、流向、水流累积值,按照一定的阈值提取河网、划分子流域.划分子流域给的阈值是 100 km<sup>2</sup>,这样将全流域划分为 3 153 个子流域.雨量资料整理后选择了代表性较好的 639 个雨量站,通过数据同化技术<sup>[4]</sup>得到每个网格的雨量值,然后计算出每个子流域的实测降雨量.潜在蒸发采用了黄河流域(含周边)的 140 个气象站资料,同样计算出每个子流域的潜在蒸发.黄河干流控制流量站中选择了 17 个流量站资料.主要大中型水库有 9 个,其中 5 个是周调节以下的,只有 4 个库容大于 15 亿 m<sup>3</sup>的季调节以上的水库,分别是龙羊峡、刘家峡、三门峡与小浪底.水保工程资料参考文献[5].

### 1.2 模拟计算

按 100 km<sup>2</sup>最小面积划分子流域,全黄河流域可分为 3 153 个子流域.通过子流域的产流计算得到每个分区的流量过程,通过河道演算及水库调节给出全流域的水情信息.

针对不同的功能,本文对黄河流域进行了不同的分区:

#### (1) 水保分区

根据收集的资料以及黄河流域的特色,按照水保工程将黄河流域划分为 11 个分区,分别是:兰州以上,兰州 - 安宁渡,安宁渡 - 下河沿,下河沿 - 石嘴山,石嘴山 - 头道拐,汾河流域,河龙区间,北洛河,泾河,渭河,花园口以下.

#### (2) 人类用水分区

根据灌区与城乡、工矿、居民用地将黄河流域划分为 9 个分区,分别是:兰州以上,兰州 - 石嘴山,石嘴山 - 头道拐,头道拐 - 龙门,龙门 - 潼关,潼关 - 花园口,花园口 - 高村,高村 - 艾山,艾山 - 利津.石嘴山至头道拐之间是黄河上一大灌区,该区产水量少,而耗水量却很大.

### 1.3 模拟结果

根据黄河干流的实际情况本文选择了干流 17 个站模拟,模拟时间为 1977—1989 年,时间尺度是月.

模拟结果见表 1、图 1. 17 个站中有 11 个效率系数在 0.8 以上,其他也在 0.75 左右,水量平衡误差控制在 5%以内.黄河的上游(兰州以上)主要是大草原,人类活动影响很小.兰州以上的模拟结果效率系数可达 0.84,水量平衡误差控制在 3%,说明该模型是可行的.其中小川站效果略差的原因在于上游的龙羊峡与刘家峡水库的人为调蓄作用.中游人类活动影响尤其剧烈,模型主要的工作在于模拟人类的用水与水保工程的影响,水资源消耗主要

表 1 黄河干流流量模拟结果

序号	站名	效率系数	相关系数	水量平衡
1	唐乃亥	0.870	0.934	1.023
2	贵德	0.842	0.919	1.031
3	小川	0.834	0.917	0.980
4	兰州	0.840	0.926	0.947
5	安宁渡	0.846	0.924	0.984
6	下河沿	0.837	0.919	0.983
7	石嘴山	0.817	0.906	1.001
8	头道拐	0.762	0.875	0.999
9	吴堡	0.749	0.867	0.976
10	龙门	0.706	0.841	0.986
11	潼关	0.751	0.875	1.009
12	三门峡	0.761	0.877	1.017
13	小浪底	0.761	0.879	1.033
14	花园口	0.779	0.883	0.991
15	高村	0.746	0.868	1.014
16	艾山	0.720	0.858	0.970
17	利津	0.704	0.847	1.020

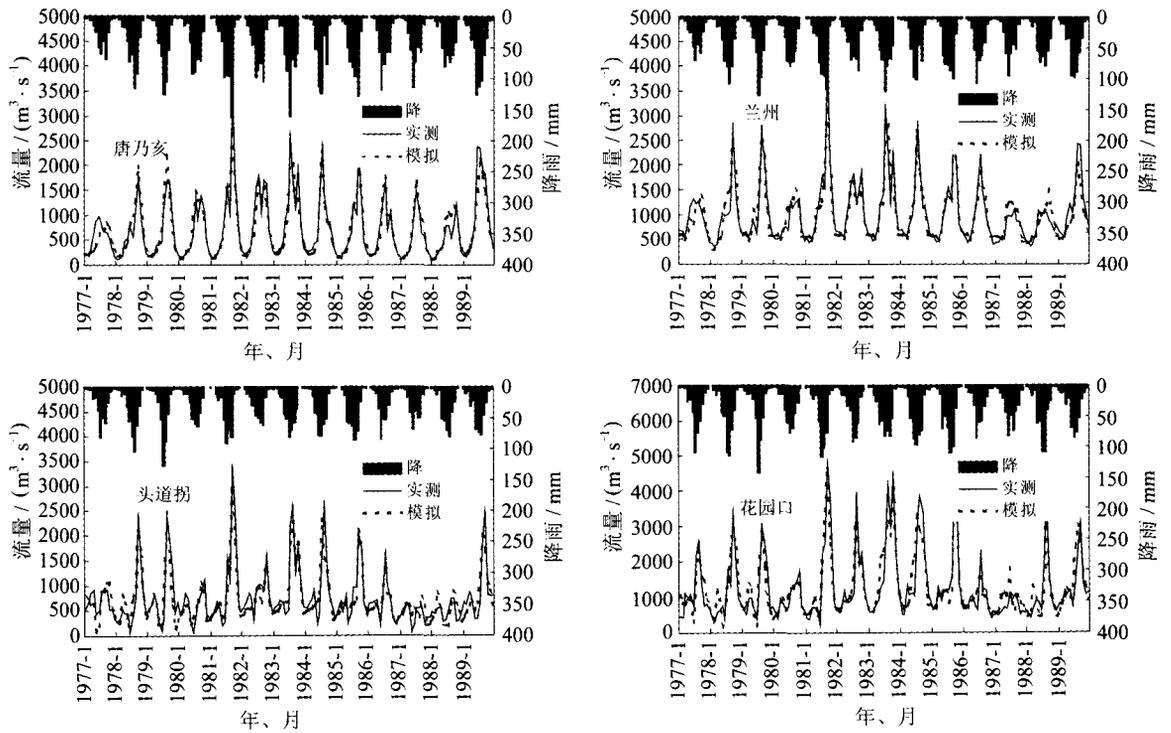


图 1 干流流量站降雨径流模拟过程线

是农业用水,由于人类活动的不确定性,该区模拟效率系数略低,但也基本在 0.75 以上,水量平衡误差控制在 5% 以内。

整体而言,黄河月分布式模型对全黄河流域 17 个流量站模拟的结果较好,在线型上与实测保持一致。模型模拟检验评价指标:相关系数 =

$$\frac{(Q_c - \bar{Q}_c)(Q_o - \bar{Q}_o)}{\sqrt{(Q_c - \bar{Q}_c)^2 (Q_o - \bar{Q}_o)^2}}$$

模拟与实测总水

量之比 =  $\frac{Q_c}{Q_o}$ ; 模型效率系数  $R =$

$$\left[ 1 - \frac{(Q_c - Q_o)^2}{(Q_o - \bar{Q}_o)^2} \right] \times 100\%$$

$Q_o, Q_c, \bar{Q}_c, \bar{Q}_o$  为

实测、模拟流量和实测、模拟流量均值。

## 2 情景分析

研究全黄河的目的在于研究人类活动与覆被变化对黄河流域水循环的影响,以下就用建好的黄河分布式时变增益模型对黄河全流域进行分析。影响黄河流域水循环的因素主要有以下几个方面。

### 2.1 气候变化(降雨影响)分析

在 1977—1989 年实测降雨资料基础上,将黄河流域各个区间降雨变化 10%,对应的流量变化

见表 2(人类用水假设不变)。从表 2 中数据不难看出兰州以上是黄河流域主要的产流区,降雨变化对流域产流影响剧烈。兰州到头道拐之间是黄河的耗散区,该区年均降雨少,集中了黄河流域的主要灌区,降雨对产流影响较小。头道拐以下有黄河的无定河、渭河、泾河、汾河、北洛河几大支流,降雨变化对下游产流影响较大。黄河流域降雨增加 10% 比

表 2 降雨变化对黄河流域产流的影响 %

站名	唐乃亥	兰州以上	兰州头道拐	头道拐花园口	全流域
	+10% - 10%	+10% - 10%	+10% - 10%	+10% - 10%	+10% - 10%
唐乃亥	10.1 - 9.7	10.1 - 9.7	0 0	0 0	10.1 - 9.7
贵德	10.2 - 9.6	10.5 - 9.9	0 0	0 0	10.5 - 9.9
小川	8.4 - 7.2	10.8 - 9.6	0 0	0 0	10.8 - 9.6
兰州	7.5 - 6.5	11.1 - 9.8	0 0	0 0	11.1 - 9.8
安宁渡	7.4 - 6.5	11.0 - 9.8	0.5 - 0.4	0 0	11.4 - 10.3
下河沿	7.4 - 6.5	11.0 - 9.8	0.7 - 0.6	0 0	11.6 - 10.4
石嘴山	7.8 - 6.8	11.5 - 10.3	1.0 - 0.9	0 0	12.5 - 11.2
头道拐	9.7 - 8.0	14.2 - 12.0	1.2 - 0.9	0 0	15.5 - 13.1
吴堡	10.5 - 6.9	14.7 - 11.0	2.3 - 1.0	2.5 0	17.2 - 13.1
龙门	9.4 - 6.3	13.4 - 10.0	2.0 - 1.0	3.8 - 1.5	17.3 - 13.5
潼关	7.2 - 4.8	10.2 - 7.6	1.6 - 0.7	9.5 - 6.6	19.7 - 15.8
三门峡	7.0 - 4.8	9.9 - 7.5	1.6 - 0.8	9.6 - 6.7	19.4 - 15.9
小浪底	7.0 - 4.7	9.9 - 7.4	1.6 - 0.7	9.9 - 6.9	19.5 - 15.9
花园口	6.6 - 4.5	9.3 - 7.0	1.5 - 0.7	11.0 - 7.9	20.1 - 16.4
高村	7.2 - 4.8	10.0 - 7.6	1.6 - 0.7	11.8 - 8.5	21.9 - 17.8
艾山	8.0 - 5.2	11.3 - 8.3	1.8 - 0.8	13.3 - 9.6	26.1 - 21.0
利津	9.1 - 5.8	12.9 - 9.4	2.0 - 1.0	15.0 - 10.9	29.9 - 24.0

减少 10% 影响剧烈. 全黄河流域降水增加 10% 可引起花园口站流量 20.1% 的变化, 原因是人类用水减少了黄河干流的天然流量. 当降水增大时, 若人类用水基本保持不变甚至减少将导致产流变化比例比降水的变化比例大.

## 2.2 人类活动影响分析

黄河流域人类活动影响十分的剧烈, 为量化黄河流域人类活动, 此处运用模型模拟了天然的降雨产流量, 同加入人类活动影响模块后的产流量进行对比, 所用的资料是 1977 - 1989 年降雨径流资料. 从表 3 中可看出, 若没有人类活动的影响, 即不计算工农业用水与水保工程的影响, 花园口站天然产流

表 3 没有人类活动影响下黄河流域产流增加比例

序 号	水文测 站	实测年 平均径 流量 $W_0$	模拟年 平均径 流量 $W_1$	没有人类影 响的年平均 径流量 $W_2$	变化百分比 $(W_2 - W_1) / W_1$
1	唐乃亥	228	233	233	0.00
2	贵德	223	230	230	0.00
3	小川	284	278	278	0.00
4	兰州	327	309	309	0.00
5	安宁渡	318	313	322	2.83
6	下河沿	318	313	326	4.09
7	石嘴山	296	296	332	12.16
8	头道拐	237	237	333	40.51
9	吴堡	257	251	358	41.63
10	龙门	279	275	393	42.29
11	潼关	363	366	573	57.02
12	三门峡	363	369	579	57.85
13	小浪底	361	373	586	59.00
14	花园口	397	393	626	58.69
15	高村	361	366	629	72.85
16	艾山	333	323	648	97.60
17	利津	278	284	652	132.37

(多年平均) 比实际多 58.9%, 利津站多 129.6%, 源头由于受人类活动影响较小, 影响仅仅 5.3%.

## 3 结 语

通过本模型在黄河全流域的应用, 模拟了干流的 17 个流量站, 模拟的结果效率系数均在 0.8 左右, 水量平衡相对误差低于 5%, 说明该模型在黄河流域的应用是很成功的.

通过情景分析, 发现黄河全流域降雨增加 10% 比减少 10% 影响剧烈. 全黄河流域降水增加 10% 可引起花园口站流量 20.1% 的变化. 说明气候变化的影响对黄河流域的水循环是非常大的. 若没有人类活动的影响, 即不计算工农业用水与水保工程的影响, 花园口站天然产流(多年平均) 比实际多 58.9%, 利津站多 129.6%, 源头由于受人类活动影响较小, 几乎没有变化. 即若没有人类的活动影响花园口的年径流量将达到 629 亿  $m^3$ .

## 参考文献:

- [1] 熊立华, 郭生练. 分布式流域水文模型[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [2] 刘昌明, 张学成. 黄河干流实际来水量不断减少的成因分析[J]. 地理学报, 2004, 59(3): 323-330.
- [3] 夏 军, 叶爱中, 王纲胜. 黄河流域时变增益分布式水文模型( )—模型的原理与结构[J]. 武汉大学学报(工学版). 2005, 38(6): 10-15.
- [4] 杨大文, 李 柳, 倪广恒, 等. 分布式水文模型在黄河流域的应用[J]. 地理学报, 2004, 59(1): 143-154.
- [5] 汪 岗, 范 昭. 黄河水沙变化研究(第 2 卷)[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2002.