

龙羊峡水库人工增雨增水效果评估

郑国恩¹, 包为民², 瞿思敏²

(1. 福建省人民政府防汛抗旱办公室 福建 福州 350001; 2. 河海大学水文水资源及环境学院 江苏 南京 210098)

摘要 根据 1997、1998 年 4 至 9 月, 在黄河上游地区所进行的人工增水试验, 用混合产流水文模型对增雨效果进行评估, 获得了比传统方法更合理、更可信的结果。

关键词 黄河上游; 人工降雨; 效果评估

中图分类号 P481 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2002)02-0058-05

1 流域概况

龙羊峡水库位于黄河上游青海省境内, 控制流域面积 13.1 万 km^2 。唐乃亥为水库入库站, 控制面积为 12.2 万 km^2 。吉迈—唐乃亥区间面积为 76 957 km^2 。黄河上游海拔高度大部分在 3 000 m 以上, 有大面积的湖泊、沼泽和草原。3 个水文站把黄河上游划分为 3 块区域, 即吉迈站以上的河源区、吉迈—玛曲区间和玛曲—唐乃亥区间。

吉—玛河段位于积石山的南侧和东侧, 吉迈—久治区间多高山峡谷和草甸, 支流中下游河谷多森林灌丛。久治—玛曲区间主要支流黑河、白河, 其两河流域大部分是宽广平坦的草滩, 多沼泽。吉—玛区是上游降雨最多的地区, 是主要产流区。

玛—唐区位于积石山北侧, 河谷左岸分水岭多在 5 000 m 以上, 较大支流切木曲、曲什安、大河坝等河汇流快, 流量变化大。右岸支流泽曲河上游多沼泽、草地, 坡面较平坦, 河底坡度较缓, 调蓄作用大。

该流域水汽主要来源于印度洋孟加拉湾上空的西南暖湿气流, 也有一部分来自西方和东南方的水汽。由于群山起伏, 有利于气流垂直运动, 夏秋季节高原湿润, 雨多, 但降水强度一般不大。降水集中在 5~9 月, 占年雨量的 80% 以上。按青海省气候划分, 吉—玛区属湿润区, 玛—唐区属半湿润区。

黄河上游干流主要水文站有吉迈、玛曲、军功、唐乃亥等站。雨情站点十分稀少, 特别是吉迈站控制流域面积 4.5 万 km^2 , 无一个雨量点。

2 模型简介

增雨增水效果评估, 较常用的方法是回归分析法。回归分析法由于没有明确的物理概念, 评估的结果可信度差。本研究把垂向混合产流模型应用于增水估计, 探讨其方法的合理性和可行性, 并与传统方法进行了比较。

2.1 垂向混合产流模型

垂向混合产流水文模型属于概念性模型, 概念性模型的结构和参数具有明确的物理概念。它既可考虑从输入到输出过程中系统的复杂作用, 又能周密考虑降雨时、空变化和流域状态对径流的影响。在实际应用中可根据其规律解决流域内、外资料缺乏情况下的资料外延问题。

通过对我国水文、气象、流域特征等资料的分析论证, 经过长期实践, 河海大学提出了超渗和蓄满 2 种产流模式模型^[1], 前者适用于干旱地区, 后者适用于湿润地区。但在不少流域发现, 超渗和蓄满 2 种产流模式存在于同一流域中。在这些流域, 有些洪水是蓄满产流, 有些是超渗产流。同一场洪水, 前期是超渗产流, 后期又变为蓄满产流。对一个流域 2 种产流机制并存并有机结合起来的模型, 称为混合产流模型。显然, 对于一个实

际流域而言,混合产流是实际发生的,其他两种产流机制都是概化的。

本研究流域属于两种产流机制并存的大流域,宜采用分布式模型。将流域划分单元面积,单元面积模型计算过程见图 1,其结构的详细描述见文献[2]。

2.2 线性回归模型

线性回归模型属于随机模型。设 x 为自变量, y 为因变量,其相应的直线关系为

$$y = a + bx \tag{1}$$

式中 a 和 b 为待定的 2 个参数。

3 模型参数率定

本成果的降雨径流模型采用混合产流模型,通过径流模拟计算率定模型参数。线性回归模型的参数采用最小二乘法确定。

3.1 混合模型径流模拟及参数率定

对于黄河上游人工增雨、增水的估计,重点应考虑产流参数的率定,适当考虑汇流参数,可将时段取为旬,称为旬模型。为进一步论证模型的可靠性、适用性,充分考虑水文要素的时间变化,时段取为日,以减少时段均化和差分法所引起的误差,称为日模型。

3.1.1 旬模型模拟

黄河上游雨情站网稀少,70 年代末以来增加了一些雨量点,故采用 1979~1986 年(1986 年后无年鉴等详细资料提供)历史资料模拟进行模型检验及参数率定。

根据均匀性、代表性、资料的可靠性和连续性等原则选择的雨量站为吉迈、阿万仓、玛曲、南木塘、东倾沟、巴滩、拉曲、贵德等 9 站。蒸发量取巴滩、隆务河口 2 站的均值。

经调试确定的参数值如表 1 所示。

表 1 旬模型参数
Table 1 Parameters for ten-day model

K	WM	B	BF	FC	KF	KI	CS	CI	CG	KE	XE
0.5	240	0.2	0.5	4.5	10	0.35	0.6	0.8	0.95	1	0.35

由降雨、蒸发资料 and 上列模型参数,经产汇流计算所得成果统计如表 2 所示。确定性系数在 0.7 以上,最高达 0.917(1984 年),计算流量过程和实测值拟合较为理想。年径流相对误差除 1982 年较大(达 28%)外,一般在 5% 以下。峰值相对误差基本在 20% 以下,大部分年份相对误差在 10% 以内,峰现时间误差在一个时段以内。

表 2 模拟成果(旬模型)
Table 2 Simulation results(ten-day model)

年份	年降水量 /mm	实测年径流量 /mm	计算年径流量 /mm	相对误差 /%	实测流量峰值 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	计算流量峰值 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	相对误差 /%	确定性系数 DC
1979	398	225	217	3.56	2020	2103	4.11	0.891
1980	377	199	200	0.50	1690	1700	0.59	0.832
1981	489	307	303	1.30	4870	3882	20.00	0.892
1982	391	283	203	28.0	1970	1887	4.21	0.713
1983	496	314	316	0.64	3260	2872	12.00	0.852
1984	403	242	243	0.41	2820	2672	5.25	0.917
1985	442	257	268	4.28	3580	3102	13.00	0.844
1986	381	220	208	5.45	2070	1942	6.18	0.713

3.1.2 日模型

吉迈—唐乃亥区间选用的雨量点为:吉迈、当洛、阿万仓、唐克、若尔盖、玛曲、军功、东倾沟、巴滩、南木塘

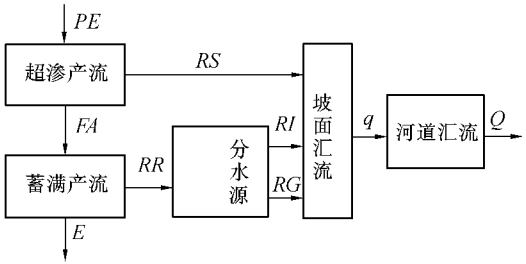


图 1 模型计算框图
Fig.1 Block diagram of model calculation

等 10 站. 选用 1981 ~ 1986 年日资料 ,经调试率定后得到的模型参数和模拟结果如表 3、表 4 所示.

表 3 日模型参数
Table 3 Parameters for one-day model

<i>K</i>	<i>WM</i>	<i>B</i>	<i>BF</i>	<i>FC</i>	<i>KF</i>	<i>KI</i>	<i>CS</i>	<i>CI</i>	<i>CG</i>	<i>KE</i>	<i>XE</i>
0.6	240	0.2	0.4	3	10	0.35	0.68	0.85	0.995	1	0.1

表 4 日模型模拟成果
Table 4 Simulation results of one-day model

年 份	实测径流深 <i>R</i> /mm	计算径流深 <i>RC</i> /mm	绝对误差 ΔR	相对误差 /%	确定性系数 <i>DC</i>
1981	191.8	189.5	- 2.3	1.2	0.859
1982	167.7	162.1	- 5.6	3.3	0.701
1983	189.6	195.0	5.4	2.8	0.927
1984	144.8	144.0	- 0.8	0.6	0.901
1985	137.3	141.0	3.7	2.7	0.702
1986	112.4	110.6	- 1.8	1.6	0.736

表 4 表明 ,径流深相对误差在 5% 以下 ,好于旬模型成果 ,而确定性系数与旬模型相当.
综上所述 ,不管旬模型和日模型 ,计算径流值和实测径流值拟合均较佳 ,模拟效果良好 ,精度较高. 这表明混合产流模型适用于黄河上游地区 ,率定的模型参数较为合理. 鉴于 1997 和 1998 年能提供的水文资料只有旬资料 ,故对增水效果评估时采用旬模型.

3.2 回归模型参数确定

1997 和 1998 两年的人工增雨试验 ,在吉迈—军功水文站区间流域进行 ,该区间是径流的影响区 ,故可作目标区 ,军功—唐乃亥水文站区间流域为对比区. 军功水文站 1981 年开始有资料 ,统计历史资料为 1981 ~ 1996 年 ,每年统计时间为 4 月下旬至 10 月 ,统计历年目标区区间流量 Q_y 和对比区区间流量 Q_x ,相应的流量关系有线性趋势 ,故采用下列方程 :

$$Q_y = a + bQ_x \tag{2}$$

根据 16 年资料分析 ,并用最小二乘法确定的参数为

$$Q_y = 341.7 + 2.14Q_x \tag{3}$$

4 增 雨 估 计

青海省泽库、河南、久治和甘肃省玛曲及四川省若尔盖一带 ,即黄河河曲地区 ,是黄河上游降雨集中区域 ,是可能获得增水效益的地区 ,2 年增水作业也是在该区域进行的. 由于 1997 和 1998 年试验区域略有差异 ,故这 2 年的目标区和对比区选择的雨量点也不一样 ,建立的方程也有差异.

4.1 目标区和对比区雨量关系分析

4.1.1 1997 年雨量关系

1997 年 6 ~ 9 月主要在久治、玛曲、若尔盖地区进行人工增雨. 目标区选择河南、玛曲、久治 3 站 ,对比区选择同德、大武、吉迈 3 站. 采用邻近的 1987 ~ 1995 年资料系列 ,分别统计月的区域平均雨量. 经分析 ,目标区雨量 y 和对比区雨量 x 的关系为

$$y = ax^b \tag{4}$$

方程两边取对数 ,变为一元线性方程

$$y' = a' + bx' \tag{5}$$

式中 $y' = \lg y$, $x' = \lg x$, $a' = \lg a$. 用最小二乘法 ,分别确定得 6 ~ 9 月的回归方程为

6 月份 $y' = 0.3722 + 0.7892x'$ (6)

7 月份 $y' = 0.7807 + 0.6397x'$ (7)

8 月份 $y' = 0.6801 + 0.6255x'$ (8)

9 月份 $y' = 0.3068 + 0.86x'$ (9)

4.1.2 1998 年雨量关系分析

1998 年人工增雨作业范围有扩大 ,如吉迈站 1997 年不受人工增雨影响 ,1998 年处在影响范围 ,因此目标区和对比区的雨量有差异 ,根据 1998 年人工试验情况 ,目标区的雨量点为吉迈、久治、玛曲、若尔盖等 4 站 ,对比区的雨量点为同德、泽库、大武、甘德等 4 站 .选择 1976 ~ 1996 年资料系列 ,统计目标区和对比区平均月雨量 ,经分析 ,二者关系呈直线趋势 ,可建立线性回归方程 ,并采用最小二乘法确定系数 ,目标区降雨量 P_y' 和对比区降雨量 P_x 回归方程式为

5 6 月份

$$P_y' = 48.9 + 0.596P_x$$

(10)

7 8 月份

$$P_y' = 23.8 + 1.021P_x$$

(11)

9 月份

$$P_y' = 19.1 + 1.145P_x$$

(12)

4.2 增雨估计

增雨计算公式为

$$\Delta P = P_y - P_y'$$

(13)

式中 : P_y ——目标区降雨实测值 ; P_y' ——目标区降雨估算值 .

1997 ,1998 年的增雨估计分别见表 5、表 6 .1997 年 6 ~ 9 月合计增雨 29.1 mm ,相对增雨为 8.7% .1998 年 5 ~ 9 月合计增雨为 82.9 mm ,相对增雨为 18.1% .1998 年增雨比 1997 年更为明显 .计算结果表明 ,人工增雨是有效的 .

表 5 1997 年增雨量估算
Table 5 Estimation of rainfall increased by artificial rain for 1997

时间	估计式	实测 P_x /mm	实测 P_y /mm	估计 P_y' /mm	增雨量 /mm	相对增量 /%
6 月	(6)	71.7	75.2	69.0	6.2	8.24
7 月	(7)	109.7	118.3	121.8	- 3.5	- 2.96
8 月	(8)	87.3	97.8	78.3	19.50	19.90
9 月	(9)	57.6	73.0	66.1	6.9	9.45

表 6 1998 年增雨量估算
Table 6 Estimation of rainfall increased by artificial rain for 1998

时间	估计式	实测 P_x /mm	实测 P_y /mm	估计 P_y' /mm	增雨量 /mm	相对增量 /%
5 月	(10)	61.1	102.7	85.3	17.4	16.9
6 月	(10)	75.4	95.8	93.5	2.3	2.4
7 月	(11)	75.4	127.1	100.8	26.3	20.7
8 月	(11)	86.8	144.6	112.4	32.2	22.3
9 月	(12)	41.1	70.9	66.2	4.7	6.63

5 增 水 估 计

5.1 混合模型计算

根据目标区实测的降雨、蒸发、流量等资料 ,按已率定好的参数 ,用混合产流模型计算径流量 ,又据目标区估计的未受人工降雨作用的降雨量计算未受人工增雨影响的径流量 ,二者之差即为增水量 .

5.1.1 1997 年增水估计

6 ~ 10 月增水 1.31 亿 m^3 ,考虑飞机作业(5 6 月份)的增加水量为 0.736 亿 m^3 ,合计为 2.046 亿 m^3 .模拟的增水量折合目标区的增水为 8.74mm ,径流系数为 0.30 左右 .这与枯水年份 1986 年 6 ~ 10 月的径流系数相比 ,略大一些 .这表明 ,在增雨正确的前提下 ,模拟计算的结果是相当合理的 .从模拟的情况看 ,实际增水可能还要多 ,因为增雨增加的部分径流要在 11 月及以后的时间才能慢慢流出来 ,特别是地下径流部分 .

5.1.2 1998 年增水估计

5 ~ 10 月增水约为 4.24 亿 m^3 ,折合目标区的增水约为 26.3 mm ,径流系数为 0.32 左右 ,与历史上相同情况下的年份径流系数相近 ,模拟计算的结果是比较合理的 .

5.2 两种模型估计比较

表 7 列出了 2 种模型所估计的增水量. 1998 年的增水估计 ,两种方法较接近 ,而 1997 年流量回归模型估计增水量为负值 ,不合理. 究其原因 ,主要是方法本身的缺陷. 因为回归关系是一种统计平均关系 ,属于黑箱子方法 ,用于外延 ,必然存在误差 ,遇偏离平均大的特殊年份 ,就会出现负值. 而概念性模型 ,由于其结构、参数都有明确的物理概念 ,不会出现不合理的评估结果. 因此 ,概念性模型的评估结果要比回归模型合理可靠.

6 结 语

a. 混合产流水文模型概念明确、结构合理、通用性好 ,模拟黄河上游吉迈—唐乃亥区间径流 ,拟合精度高. 表明选择的模型是合适的.

b. 回归模型是一种简单实用的方法 ,反映了样本的平均情况 ,代表了统计规律 ,但在特殊情况下误差很大 ,如 1997 年增水计算就得出了不合理的负值. 因此 ,概念性模型的评估结果要比回归模型合理.

c. 计算表明 ,黄河上游人工增水效果明显 ,试验是成功的.

综上所述 ,人工增水是有效的. 建议延长人工试验系列 ,加强水文、气象的研究 ,以便推动人工增水事业的进一步发展.

参考文献 :

[1] 赵人俊. 流域水文模拟——新安江模型与陕北模型[M]. 北京 :水利电力出版社 ,1984. 32 ~ 70.
[2] 包为民. 黄土地区流域水沙模拟概念与应用[M]. 南京 :河海大学出版社 ,1995. 26 ~ 48.

Evaluation of Effect of Artificial Rain Induced Runoff
Increase on Longyangxia Reservoir

ZHENG Guo-en¹ , BAO Wei-min² ,ZHAI Si-min²

(1. Flood Protecting Office of Fujian Province , Fuzhou 350001 , China ;
2. College of Water Resources and Environment , Hohai Univ. , Nanjing 210098 , China)

Abstract : Based on artificial rain tests performed on the upper Yellow River from April to September of 1997 and 1998 , a hydrologic runoff model is applied to the evaluation of the effect of artificial rain , and the result is found to be more reasonable and reliable than that of the conventional model.

Key words : upper Yellow River ; artificial rain ; effect evaluation