

# 黄河上游径流资源及其可能变化趋势分析

包为民<sup>1</sup>, 胡金虎<sup>2</sup>

(1. 河海大学水文系, 江苏 南京 210024; 2. 常州市水文水资源勘测局, 江苏 常州 213001)

摘要: 据黄河上游地理、气候特征, 提出了一个考虑封冻、融雪、变径流系数的大尺度流域水流模拟模型, 检验了模型的合理性和有效性, 进而分析了“温室效应”将对黄河上游 2030 年河川径流资源的影响。

关键词: 大尺度模型 实测资料检验 黄河上游 水资源 趋势分析

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2000)02-0015-04

中图分类号: P333.1

## Water Resources and Its Tendency in Upper Reaches of the Yellow River

BAO Wei-min<sup>1</sup>, HU Jin-hu<sup>2</sup>

(1. Hehai University, Nanjing 210098, PRC; 2. Changzhou Hydrological Station, Changzhou 213001, PRC)

**Abstract** A large scale hydrological simulation model was developed from the relation of temperature to melt water as well as varied ratio of runoff to rainfall. This model was applied in the upstream basins of the Yellow river. The testing results were satisfactory by comparison with the observed data for the simulated runoff in those basins. The tendency of water resource in the upper reaches of the Yellow river was analyzed.

**Keywords** large scale model; testing by observed data; the upper reaches of the Yellow river; water resources; tendency analysis

### 1 流域概况

黄河上游区上段地域广阔, 安宁渡以上流域面积为 243 868 km<sup>2</sup>, 地理、气候和水文特征空间变化大。贵德以上, 属青藏高原, 人烟稀少, 贵德以下, 安宁渡以上区间黄河沿岸附近部分为黄土高原。在河源区, 山岭起伏和缓, 河谷宽广, 河流发达, 湖泊众多, 沼泽分布广泛。如若尔盖山原沼泽区, 不仅沼泽率高, 而且是我国最大的一片高原沼泽; 还有如黄河源区的星宿海小湖群盆地, 大通河河源的祁连山河谷沼泽地等。

该流域降水空间分布十分不均。安宁渡以上, 沿黄河两岸, 以玛曲为降雨高中心, 往上往下均有沿河递减的趋势, 黄河沿、玛曲和安宁渡的多年平均降水分别为 308, 612 mm 和 200 mm; 支流流域年平均降水高于黄河沿岸。如洮河流域多年平均降水为 550 mm, 湟水和大通河流域为 520 mm, 局部站点高达 907 mm, 而黄河沿岸站多年平均只有 340 mm。

气温空间分布与地形高程变化有关, 地形高程越高, 气温越低。高寒地区, 年平均温度在 0℃ 以下。如黄河北岸的甘德站, 海拔高程为 3 750 m, 年平均气温为 -1.8℃, 封冻期长达 100 d 多。海拔高程在 4 000 m 以上, 发育有现代冰川, 雪线高约 5 000 m。

### 2 模型

据流域水文、气候和地理特征, 流域产流主要考虑混合产流和融雪径流 2 种产流机制。由于流域发育有冰川, 终年存在积雪, 所以融雪径流又分终年雪线以上和以下流域的模拟。混合产流模拟, 地面径流采用变径流系数法。计算公式为

$$R = a_R \cdot P_E \quad (1)$$

$$a_R = (1 - F_C / P_{max}) [1 - K_W (W_M - W) / W_M] \cdot P / P_{max} \quad (2)$$

式中:  $R$ ——地面径流;  $a_R$ ——变径流系数;  $P_E$ ——扣除雨间蒸发的降水;  $F_C$ ——稳定下渗率;  $K_W$ ——土壤含水量对径流系数的影响比重系数;  $W, W_M$ ——分别为土壤含水量和其上限;  $P, P_{max}$ ——分别为时段降水量和其上限。式 (2) 的理论和其详细推导过程参见文献 [1]。式 (1) 和 (2) 表示了地面径流的计算, 其实际下渗率:

$$f = P_E - R \quad (3)$$

这下渗的水, 首先补充土壤含水量。与此同时, 由于下垫面的非均匀性, 也会产生局部的地下径流。例如, 低洼地、沟边坡等处, 下雨容易使局部层蓄满而产生局部饱和壤中流; 地面径流在一定的地貌条件下,

如遇裂隙,会进入地下后又冒出等,这类径流也有地下径流的汇集特征。这里称这些具有地下径流汇流特征的量的总和为地面以下径流,并用流域蓄水容量曲线结构来模拟如下

$$R_G = f - W_M + W + W_M [1 - (f + A) W_{MM}]^{(1+B)} \quad (4)$$

$$A = W_{MM} [1 - (1 - W/W_M)^{1/(1+B)}] \quad (5)$$

式中:  $R_G$ ——地面以下径流深;  $B$ ——蓄水容量分布曲线指数,公式的详细理论及推导参见文献 [2];

$W_{MM}$ ——流域最大土壤含水量,  $W_{MM} = (1+B)W_M$

终年雪线以下流域只有冬季降雪累积,春暖融化,到春末夏初即融化殆尽。其模拟采用文献 [1] 中提出的变融雪因子法,计算公式为

$$R_N = T \cdot P \cdot S_{MC} \quad (6)$$

$$P = (P_0 + P) \cdot (1 - S_{MC}) \quad (7)$$

$$S_{MC} = \begin{cases} 1 \\ (T - T_B) / (T_M - T_B) \\ 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $R_N$ ——融雪径流深;  $T$ ——融雪径流系数;  $P$ ——雪的累积量;  $P_0$ ——上一时段雪的累积量;  $S_{MC}$ ——融雪因子系数;  $T$ ——月平均温度;  $T_B$ ,  $T_M$ ——分别为封冻和融雪临界温度。终年雪线以上流域,常年基本为固体降水,流域内积雪,冰川层厚而稳定,可以看作常数,其雪和冰川的融化径流主要取决于温度,模拟可据式 (7) 简化得

$$R_I = P_{sc} \cdot S_{MC} \quad (9)$$

式中:  $R_I$ ——雪和冰川的融化径流深;  $P_{sc}$ ——雪和冰川的融化能力。

### 3 河川径流模拟

为了充分检验模型结构和有效地模拟河川径流,选择了吉迈以上、吉迈—唐乃亥、小川—安宁渡、隆务河口、尕日得以上和红旗以上流域进行河川径流模拟。各流域的面积、资料、年份、站网选择见表 1

表 1 流域基本资料

编号	流域	面积 /km <sup>2</sup>	资料年份	流量站	蒸发站	气温站	雨量站数
1	吉迈	45019	1959—1967	吉迈	吉迈	玛多	2
2	吉迈—唐乃亥	76953	1978—1987	吉迈、唐乃亥	吉迈	玛多、红旗	5
3	小川—安宁渡	62098	1978—1987	小川、安宁渡	尕大滩、兰州	连城	5
4	尕日得	4576	1978—1987	尕日得	尕大滩	连城	1
5	红旗	24973	1978—1987	红旗	红旗	红旗	2
6	隆务河口	4959	1961—1970	隆务河口	黄南	红旗	1

这些流域的选择主要是考虑高寒区(吉迈)、沼泽区(尕日得)、产流高值区(吉迈—唐乃亥、红旗)和产流低值区(小川—安宁渡)的不同水文特征,会导致模型参数值的改变而选择的,红旗和隆务河口流域还作为唐乃亥—小川区间的指示流域。考虑到资料条件限制,各流域实测资料的模拟采用月时段间隔。模拟的结果见表 2 和表 3。表 2 中  $R$  和  $R_c$  分别为实测和计算的年径流深,  $\bar{R}$  和  $\bar{R}_c$  分别是实测和计算的年平均径流深,  $n$  是资料年数,  $D_c$  是确定性系数。表 3 作为例子较细地列出红旗流域的年径流深计算结果。表中  $W$  为以百分数表示的年径流深相对误差。

表 2 流域模拟结果

流域编号	$\bar{R}$ /mm	$\bar{R}_c$ /mm	$\frac{1}{n} \sum W_E$	$\sum W \sum R$	$D_c$
1	84.9	84.9	11.0	0.13	0.767
2	242.8	241.8	18.9	0.078	0.888
3	52.2	53.0	7.3	0.14	0.991
4	169.7	169.4	25.9	0.15	0.780
5	215.2	215.7	18.1	0.084	0.751
6	152.4	154.8	19.0	0.12	0.800

从表 2 和表 3 结果看,该模型模拟具有较高的精

度。从表 2 的各流域综合结果看,计算的年平均径流深与其实测值十分接近,说明模型满足水量平衡基本定律;多年平均的年径流深模拟误差最大只有 25.9 mm,最小为 7.3 mm,相对误差均小于 15%,流量过程模拟的有效性系数也较高,均在 0.75 以上。

表 3 红旗流域年径流深计算结果

年份	$R$ /mm	$R_c$ /mm	$R - R_c$	$\delta$
1978	265.7	247.3	18.4	6.92
1979	264.1	246.3	17.8	6.74
1980	155.0	172.2	-17.2	-11.1
1981	242.6	227.1	15.5	6.39
1982	170.3	161.8	8.5	4.99
1983	201.0	239.2	-38.2	-19.0
1984	264.9	282.2	-17.3	-6.53
1985	249.3	224.3	25.0	10.0
1986	187.6	184.2	3.4	1.81
1987	151.8	171.8	-20.0	-13.2

从表 3 的逐年径流深比较情况看,也颇令人满意。从这些代表性流域的模型检验结果看,模型可以用于安宁渡以上流域月径流系列的模拟及其有关的

分析目的

### 4 “温室效应”影响分析

“温室效应”就是由于大气系统中二氧化碳之类气体的增加,破坏臭氧层,减少其对太阳光紫外线辐射的吸收能力,导致全球平均气温的升高和由此引起的气候等一系列变化。河川径流的变化,是其中一个重要变化,且对水资源利用,乃至国民经济的发展关系密切,值得深入研究。

分析“温室效应”对黄河安宁渡以上流域径流的影响,考虑到温度对终年雪线以上和以下流域水量影响机制的显著差异,把流域分为吉迈以上、吉迈—唐乃亥、唐乃亥—小川、小川—安宁渡 4 个区域。吉迈站以上流域,终年雪线以上的面积占有较大比例,以下各区依次减少。在终年雪线以上流域,温度的升高,一

方面增加了流域蒸发,导致河川径流的减少;另一方面,温度的升高,又导致冰川、雪的融化径流增加而使河川径流增加。而在终年雪线以下的流域,温度的升高,以增加流域蒸发散减少河川径流的影响为主。

2030 年“温室效应”引起的温度和降水的变化预测,采用了大气环流模型(GCMS)中的 7 个子模型,表 4 是其预测结果。这 7 个模型预测的降水和气温,空间上以经纬度  $5^{\circ} \times 5^{\circ}$  为 1 网格,时间上把 1 a 分为 4 个时期。 $D_P$  是以百分数形式表示的时期降水变化率,公式表示为

$$D_P = (P_{2030} - P_{\text{目前}}) / P_{\text{目前}} \times 100\% \quad (10)$$

式中:  $D_T$ ——时期平均温度差,用公式表示为

$$D_T = T_{2030} - T_{\text{目前}} \quad (11)$$

式中:  $T$ ——时期平均温度,  $P$ ——时期降水量

表 4 2030 年降水变幅温度差预测结果

节点 经纬度	月 份	GFDL		GISS		LLNL		MPI		OSU		UKMOL		UKMOH	
		$D_P / \%$	$D_T / ^{\circ}\text{C}$												
97.5°, 32.5°	12-2	2.6	7.6	5.8	0.77	3.9	1.26	-0.2	1.0	5.7	0.76	4.8	0.88	-0.4	0.87
	3-5	6.3	0.8	1.1	0.65	5.7	0.85	5.3	0.82	5.8	0.66	8.6	1.06	4.9	1.02
	6-8	3.0	1.04	11.5	0.75	1.9	1.5	3.1	0.87	-0.80	0.895	0.79	-0.4	1.13	
	9-11	1.0	0.96	2.0	0.77	-0.1	1.2	-1.8	0.91	0.0	0.89	3.7	1.05	2.1	1.17
102.5°, 32.5°	12-2	1.4	0.78	5.7	0.75	4.0	1.12	-0.1	1.05	6.8	0.73	3.9	0.95	3.6	0.95
	3-5	4.7	0.78	6.5	0.63	6.5	0.89	7.1	0.91	4.6	0.66	7.3	1.12	6.2	1.06
	6-8	-0.9	1.02	0.4	0.82	-1.9	1.48	6.4	0.64	1.0	0.92	3.3	0.75	-3.3	1.1
	9-11	0.3	0.91	2.1	0.79	2.1	1.1	-1.5	0.91	0.0	0.87	3.5	1.12	-1.1	1.17
107.5°, 32.5°	12-2	1.8	0.78	5.4	0.9	4.6	1.05	3.3	1.23	5.9	0.71	3.4	1.02	8.2	1.1
	3-5	4.2	0.76	6.1	0.73	6.8	0.97	6.2	0.82	3.0	0.68	4.3	1.15	4.8	1.04
	6-8	-3.5	0.89	-0.4	0.86	-4.5	1.52	6.9	0.46	4.2	0.84	-1.2	0.76	-3.6	1.19
	9-11	-0.2	0.81	2.5	0.88	0.9	1.08	-1.4	0.82	2.0	0.76	1.6	1.05	-3.8	1.15
97.5°, 37.5°	12-2	2.9	0.87	5.3	0.83	6.6	1.08	-2.0	1.23	4.2	0.71	4.7	0.69	3.8	0.91
	3-5	5.8	0.8	2.7	0.68	1.5	0.67	2.0	1.28	6.1	0.63	5.3	0.89	2.9	1.06
	6-8	2.9	1.2	8.0	0.54	2.8	1.38	9.7	0.55	-3.2	0.89	4.7	0.93	-2.1	1.36
	9-11	2.7	1.07	4.6	0.75	0.9	1.08	4.0	1.0	0.0	0.73	4.9	0.93	-0.3	1.23
102.5°, 37.5°	12-2	3.9	0.89	5.8	0.75	7.1	1.01	0.2	1.28	2.3	0.68	4.7	0.76	2.7	0.97
	3-5	7.9	0.76	7.2	0.65	4.7	0.79	-1.8	1.18	5.3	0.68	9.7	1.03	3.8	1.10
	6-8	0.8	1.17	0.0	0.56	-0.6	1.46	13.2	0.55	-3.0	0.94	3.3	0.82	-2.8	1.36
	9-11	0.7	1.02	2.6	0.73	-1.2	1.18	6.0	1.0	-0.7	0.76	5.8	0.98	-1.1	1.23
107.5°, 37.5°	12-2	5.2	0.87	5.2	0.68	7.5	0.93	8.9	1.23	0.6	0.68	3.4	0.86	3.1	1.06
	3-5	7.8	0.78	6.1	0.72	9.9	0.95	-3.0	1.09	3.0	0.71	5.9	1.06	1.8	1.15
	6-8	-0.7	1.04	-1.1	0.63	-4.3	1.62	12.2	0.55	0.4	0.92	1.7	0.73	3.1	1.32
	9-11	-0.2	0.89	2.6	0.75	-4.6	1.34	5.4	0.91	0.8	0.76	5.0	0.99	-3.1	1.21

注: 该表格内容由赵宗兹提供, GFDL, GISS, LLNL, MPI, OSU, UKMOL 和 UKMKH 分别是大气环流模型中 7 个子模型的名称。

黄河安宁渡以上流域在经度  $95^{\circ}$ 、 $106^{\circ}$  和纬度  $32^{\circ}$ 、 $39^{\circ}$  之间,采用经纬网络节点为  $(97.5^{\circ}, 32.5^{\circ})$ 、 $(97.5^{\circ}, 37.5^{\circ})$ 、 $(102.5^{\circ}, 32.5^{\circ})$ 、 $(102.5^{\circ}, 37.5^{\circ})$ 、

$(107.5^{\circ}, 32.5^{\circ})$  和  $(107.5^{\circ}, 37.5^{\circ})$  上的预测值,各区域上具体资料观测站的气温、降水变化用覆盖各区域节点上的值求算术平均获得。

表 5 2030年气候变化对区域水量影响分析

区 域	GFDL	GISS	LLNL	MPI	OSU	UKMOL	UKMOH
吉迈以上	5.5	6.9	5.5	8.8	2.8	8.0	3.5
吉迈—唐乃亥	2.1	5.1	1.0	6.6	-0.4	5.5	-1.3
唐乃亥—小川	1.2	4.4	-0.8	8.0	0.4	4.9	-2.2
小川—安宁渡	0.2	4.3	-2.2	9.2	-0.5	4.3	-3.6
全流域	2.0	4.9	0.6	7.5	0.2	5.5	-1.2

4个区域 2030年受气候要素变化影响分析的水量变化结果见表 5 表中水量变化用百分比表示。从表 5 结果看,4个区域 2030年水量受气候变化影响,吉迈以上 7个模型结果均呈增加趋势,吉迈—唐乃亥和唐乃亥—小川区间 5个增加,2个减少,小川—安宁渡区间是 4个增加,3个减少,各块 2030年水量变化受终年雪线以上的面积比例影响明显。例如,用 GFDL, GISS, LLNL, UKMOL和 UKMIH 5个模型预测的气候要素变化计算的 2030年水量变幅,以吉迈以上增幅最大,以下各区呈单一递减,其中 LLNL和 UKMOH还有变幅为负的结果。

## 5 结 语

黄河上游区上段,属高寒区,流域上发育有一定比例面积的冰川和终年积雪。本文把这面积上的融化径流模拟和终年雪线以下面积的融雪径流模拟分开来,符合实际情况,并经 6个区域实测资料的模拟分析,效果较好,证明模型结构较合理。高寒区水文规律研究,尚是一个薄弱环节,本文模型的成功应用,对促进高寒区水文规律的研究起到积极作用。安宁渡以上 2030年温室效应影响分析,考虑到终年雪线以上面积比例的不同,把流域分为 4块,既能获得较详细的空间变化结果,又能利用空间信息间接检验其分析结果的合理性,使得分析结果的可信度更高。

### 参 考 文 献

- [1] 包为民.中大流域水沙耦合模拟物理概念模型[J].水科学进展,1994,4(2):287-292.
- [2] 赵人俊.流域水文模拟[M].北京:水利电力出版社,1984.

## 《水肥耦合效应与协同管理》一书出版

水肥是植物生长发育的基础物质。20世纪以来,世界食物生产水平的大幅度提高主要依赖于灌溉和化学肥料的使用。但近半个世纪以来,随着环境问题,特别是与农业生产过程相关的水资源短缺、农产品污染、水污染和温室气体的倍增等问题的日趋严重,人们越来越认识到,作为化肥和淡水的最大用户——农业,其生产过程再也不能盲目扩大水肥的用量,而应该设法大幅度的提高水肥生产率。在土壤中,水分和养分二者融为一体,对植物生育和光合作用既相互促进,又相互制约。同时,随系统科学在农业科学研究中的深入渗透,也使人们对农业生产中水肥与植物关系的复杂问题研究成为可能。因此,水肥耦合效应的综合研究应运而生。基于上述思想和多人多年的研究成果,《水肥耦合效应与协同管理》一书在中国林业出版社的支持下成功地出版了。

《水肥耦合效应与协同管理》一书,由水分生态工作者穆兴民副研究员组织,众多参与国家“七五”—“九五”科技攻关的学者和研究工作者共同撰写完成。该著作的基本特点是,回顾了我国水肥关系研究的历史;以系统科学思想为指导,采用统一的试验设计方法,分别研究了水肥对农作物和林草生长的耦合效应;建立了水肥耦合效应的概念;总结和分析了田间水肥的协同管理模式。本书以水肥耦合效应研究为基础,以提高水肥生产率的协同管理为目标,内容系统,资料翔实,对指导干旱、半干旱地区的农、林、果、草生产具有一定的参考价值。

《水肥耦合与协同管理》一书共分六章,第一章为水肥耦合效应的基本原理;第二章为水肥耦合效应的生理生态基础;第三、四、五章是水肥对不同农林草等几种植物的耦合效应,第六章为水肥协同效应管理技术,附录对水肥耦合效应组合试验方法做了简要介绍。本书可供广大农业科研人员、在校师生及从事生产实践的干部和群众参考。

《水肥耦合与协同管理》一书,已由中国林业出版社出版,现已开始发行,定价 16元(包括邮寄费)。欲购者请与中国科学院水土保持研究所王文龙联系,需发票者请在汇款时说明。

地址:陕西省杨陵区西农路 26号

邮编:712100