

文章编号:1671-8844(2005)06-010-06

黄河流域时变增益分布式水文模型 (I) ——模型的原理与结构

夏 军^{1,2}, 叶爱中¹, 王纲胜²

- (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:针对黄河流域气候变化与人类活动对流域水资源量的变化影响问题,建立了一大尺度分布式时变增益水文模型(DTVGM)。DTVGM 是系统论与物理机制相结合的水文模型。它能够在一定程度上解决无资料(缺资料)地区的水文问题(PUB)。模型主要分为自然情况下产流与人类活动影响两大模块。

关键词:黄河;分布式时变增益模型;气候变化;人类活动

中图分类号:TV 121.7 **文献标识码:**A

A distributed time-variant gain model applied to Yellow River (I): Model theories and structures

XIA Jun^{1,2}, YE Ai-zhong², WANG Gang-sheng¹

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

Abstract: According to the impact of climate changes and human activities on the flow regimes in the Yellow River, a distributed time-variant gain model (DTVGM) is developed. The large-scale DTVGM is a monthly water balance model and it is based on systems theory and physical mechanism. It can solve some hydrologic problems on predictions in ungauged basins (PUB). It has two sub-modules, natural runoff module and human activities module.

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

全球气候变化,人类活动的影响,变化环境下的水资源形成与演化规律已经是现代水科学研究的热点问题。由于社会经济发展,水资源问题愈来愈突出,给水文科学研究提出新的挑战。

分布式降雨径流模型是水文科学发展的前沿和方向,从 20 世纪 70 年代提出以来,已经有了长足的发展。它主要研究四种不同类型的问题,即:径流模拟;模拟人类活动(如森林砍伐,抽取地下水和灌溉)对径流的影响;水质和土壤侵蚀模拟;水文过

程物理机理的研究。分布式模型在国外有经典的网格尺度计算的 SHE、MIKE-SHE 模型^[1]、Top-model^[2]、划分子流域计算的 SWAT^[3] 模型、大尺度网格的 VIC 模型,这些模型各自有自己的优缺点,如网格计算的模型应用于实测数据详实,面积在几十 km² 的小流域的结果还是很好的。

黄河是中国的第二大河。然而,根据黄河下游山东段水文观测资料统计,黄河自 1972 年出现自然断流现象到 2002 年的 31 a 间,共有 20 a 出现断

收稿日期:2005-05-18

作者简介:夏 军(1954-),男,湖北广水人,教授、研究员,中科院“百人计划”入选者,国际水文科协水资源系统委员会副主席,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(No. 50239050,50279049)资助。

流^[4]. 尤其是进入 20 世纪 90 年代后, 每年断流的天数直线上升, 最多的 1997 年达到了 226 d. 要解决黄河面临的严重水问题, 首先必须研究如下问题: 如何量化气候变化与人类活动对水循环水资源的变化及影响, 这也是近代水科学面临的主要科学问题. 黄河的水问题研究不再是找其中的典型流域就能够研究清楚, 还需要从黄河全流域的角度来研究分析其水循环.

黄河是一条沙多水少的河流, 人类活动影响非常剧烈, 大量的水保工程、水库的修建几乎完全改变了黄河的天然降雨产流规律. 另外黄河流域的上游水文资料很少, 存在显著的 PUB 问题, 现有的分布式水文模型应用于黄河流域都无法得到很好的结果, 模拟精度不高. 本文针对黄河流域的特色, 以及时变增益分布式模型的优点, 建立了黄河流域时变增益分布式水循环模型. 该模型目的是通过模拟水循环的过程, 量化气候变化与人类活动影响对流域水资源的影响. 面对如此复杂的黄河, 本文试图解决以下问题:

(1) 传统意义上的分布式模型是纯物理机制的模型. 纯物理机制的模型复杂度很高, 所以模拟精度很难提高. 在黄河月分布式模型中采取了系统理论与物理机制结合的方法. 在每个单元中引入了时变增益产流模型的系统理论^[5,6], 这样发挥了分布式模型的优势又降低了模型的复杂度.

(2) 黄河流域的水保过程是黄河流域水资源减少的主要原因之一, 在黄河分布式时变增益模型中建立了覆被耗水模型, 通过流域中梯田、林地、草地、坝地等土地类型的面积来模拟水保工程的减水作用^[6].

(3) 黄河中游人类活动影响作用约占来水量减少的 57%, 其中很大一部分是农业的耗水^[7]. 耕地的面积、作物的类型等因素是农业用水量的主导因素, 综合考虑这些因素后, 在黄河分布式时变增益模型中建立了农业耗水模型, 通过模拟能够得出每个子流域的农业逐月耗水量.

(4) 在黄河分布式时变增益模型中加入了水库调度模块, 根据水库的调度规程及来水情况对其进行模拟. 黄河干流主要的超大型水库考虑了龙羊峡、刘家峡及三门峡水库, 水库对黄河流域的影响很大, 主要作用是对黄河源头区的产水在年内进行了重新分配, 对黄河的减水影响相对较小.

1 模型介绍

在黄河月分布式模型中, 采取的是小子流域产流、河道汇流的整体结构. 模型的原始数据需要降雨、流量、气温、蒸散发能力、土地利用、DEM、工农业用水、水保工程面积、水库位置、水库特征库容、水库电厂参数等. 进行基本的资料整理后, 通过三级分区将流域化整为零. 对一个大流域进行分区, 划分小子流域的方法进行计算是符合实际, 也是一种解决问题的有效方法^[8]. 功能分区的作用在于可以将具有相同功能的部分进行综合考虑, 减少冗余计算量. 但它又可以发挥分布式模型的优点, 给出流域在面上的空间信息. 此模型主要分为自然情况下产流模块与人类活动影响两大模块.

1.1 自然情况下产流模块

1.1.1 融雪模型

黄河流域的源头存在一片高寒山区, 冬季降雪要到春季才能融化, 所以研究黄河问题必须考虑到融雪问题. 融雪模型借鉴日尺度模型中“度日因子模型”^[9]的概念, 提出如下月融雪模型:

$$S_M = MF \cdot \left(\frac{T_{\text{snow}} + T_{\text{max}}}{2} - T_{\text{milt}} \right),$$

$$\text{或者 } S_M = MF \cdot (T_{\text{av}} - T_{\text{milt}}) \quad (1)$$

式中: S_M 为融雪水量, mm/mon; MF 为融雪率, mm/mon⁻¹, 随季节变化; T_{snow} 为雪盖表面气温, °C; T_{max} 为月最高气温, °C; T_{milt} 为融雪临界气温, °C; T_{av} 为月平均气温, °C.

1.1.2 时变增益产流模型

黄河流域属于半干旱半湿润地区, 降雨产流以超渗产流为主, 降雨产流关系是非线性的. 为了从系统理论抓住其非线性的本质, 本文采用了基于时变增益水文非线性系统模型 (Time Variant Gain Model, 简记为 TVGM). 它的概念是: 降雨径流的系统关系是非线性的, 其中重要的贡献是产流过程中土壤湿度 (即土壤含水量) 不同所引起的产流量变化. 时变增益非线性系统模型 (TVGM) 通过时变增益因子的引入, 可以描述水文循环系统的输入和输出之间的非线性关系, 其产流机制非常简单, 避免了 Richard 方程等物理机制带来的繁琐计算, 却能够获得与一般 Volterra 泛函级数相同的系统模拟结果.

用“落地雨量”表示上述落地雨和融雪出水之和, 子流域产生的地表径流可以表示为

$$RS = g_1 \cdot \left(\frac{AW}{AWC} \right)^{g_2} \cdot P \quad (2)$$

式中: AW 表示时段初的土壤湿度; AWC 是饱和土壤湿度; P 是降雨; g_1 与 g_2 是时变增益因子的有关参数, ($0 < g_1 < 1, 1 < g_2$) 其中 g_1 为土壤饱和后径流系数, g_2 为土壤水影响系数; .

具体的时变增益模型介绍请见参考文献[5]和[10].

1.1.3 蒸散发耦合模型

蒸散发分为潜在蒸散发与实际蒸散发, 本文的潜在蒸散发采用蒸发站实测的资料. 实际蒸散发采用考虑土壤湿度的 Bagrov 降雨蒸散发模型.

Bagrov 降雨蒸散发模型^[11]认为降水 P 、实际蒸散发 ET_a 、潜在蒸散发 ET_p 存在如下的关系:

$$\frac{dET_a}{dP} = 1 - \left(\frac{ET_a}{ET_p} \right)^N \quad (3)$$

其中, N 为反映土壤类型及土地利用类型的参数, 该方程经过处理可以求得数字解.

$$d \left(\frac{ET_a}{ET_p} \right) = \left(1 - \left(\frac{ET_a}{ET_p} \right)^N \right) \cdot d \left(\frac{P}{ET_p} \right) \quad (4)$$

在 N 一定的情况下, 可以得到 $\frac{ET_a}{ET_p}$ 与 $\frac{P}{ET_p}$ 的

关系. $\frac{P}{ET_p}$ 可以由实际观测资料得到, N 可由地表及土壤情况确定, 则可以计算出实际蒸散发. 不难看出该模型中忽略了前期降雨量的影响, 即没有考虑土壤湿度的影响. 而在实际降雨产流中, 土壤湿度的影响是非常大的. 所以在做黄河月分布式模型中考虑了土壤湿度的影响, 采用了改进的 Bagrov 降雨蒸散发模型.

$$\frac{ET_a}{ET_p} = f \left(\frac{AW}{AWC}, KET_{Bagrov} \right) \quad (5)$$

$$\frac{ET_a}{ET_p} = \left[(1 - KAW) \cdot KET_{Bagrov} + KAW \cdot \frac{AW}{AWC} \right] \quad (6)$$

式中: KET_{Bagrov} 为 Bagrov 模型计算出来的实际蒸散与潜在蒸散的比值, 代表了计算时段内降雨对蒸散的贡献; 当 $f(AW/AWC, KET_{Bagrov}) > 1$ 时, 取为 1, KAW 为权重系数.

1.1.4 土壤水产流模型

土壤水产流是土壤湿度、实际蒸发与壤中流相互影响作用的结果^[12]. 通过水量平衡可以得到下式:

$$AW_{t+1} = \left[P_t - RS_t - ET_{at} + \left(1 - \frac{Kr}{2} \right) \cdot \right.$$

$$AW_t \left. \right] / \left[1 + \frac{Kr}{2} \right] \quad (7)$$

$$RSS_t = Kr \cdot \overline{AW_t} = Kr \cdot \frac{AW_t + AW_{t+1}}{2} \quad (8)$$

式中: AW_t 和 AW_{t+1} 分别表示 t 时段初和 t 时段末 ($t+1$ 时段初) 的土壤湿度; Kr 为土壤水出流系数; RSS_t 是壤中径流. 要注意的是 AW_{t+1} 必须满足 $0 < AW_{t+1} < AWC$, AWC 是饱和土湿.

1.1.5 子流域总产流

子流域总产流量即为地表水产流量与土壤水产流量之和, 也就是:

$$R = RS + RSS \quad (9)$$

式中: R , RS , RSS 分别表示子流域总产流量、地表水产流量和土壤水产流量, mm.

1.2 人类活动影响模块

以上产流模块主要是自然情况下的降雨产流过程, 即不考虑土地利用、覆被变化与人类活动的影响, 应用于人类活动影响较少的流域是可行的, 但在人类活动影响剧烈的区域是不合理的, 所以必须对其进行改进. 下面将具体分析人类活动的影响.

1.2.1 水保工程耗水模型

人类为了满足自己的生存要求, 总是在不断地征服自然、改造自然、甚至破坏自然, 受到自然的惩罚后开始保护自然. 这些都完全改变了天然的降雨产流模式. 此处将考虑覆被变化与水保工程的影响.

一般我们能够得到的覆被变化资料是不同覆被的面积. 从土地利用图上能够得到的覆被类型是 25 种, 一般综合考虑其中主要的 5 种类型, 分别是耕地、林地、草地、水域、沙漠. 人类修建的水保工程主要有梯田、林地、草地、淤堤坝等. 不同的覆被类型其对降雨产流的影响能力是不同的, 定义每种覆被的影响能力为 i (i), 其表示的意义是若某流域的覆被只有一种类型, 且覆盖度为 100% 时, 流域单位产流(或降雨)被减少的量. 假设实际减少的量同流域的覆盖度成正比. 则以上自然情况下产流模型计算的产流就变为

$$R = R(1 - \sum_{i=1}^n \frac{iS_i}{S}) \quad (10)$$

式中: S_i 为植被面积; S 为子流域总面积; R 为经过截留后的的产流; i 为不同的覆被类型; n 为覆被类型总数; i 为表示对产流的影响能力.

或将以上模型降雨转换为经过影响后的实际降水:

$$P = (1 - \sum_{i=1}^n \frac{i S_i}{S}) \cdot P \quad (11)$$

式中, i 表示对降雨的影响能力.

据统计发现 $i(i)$ 在不同时期是不同的,如在枯水期可能会等于 1,而在汛期相对要小一点.对于不同的雨强 $i(i)$ 是不同的,一般随着雨强的增大而减小.所以 $i(i)$ 是雨强、降水历时、土壤湿度(前期降雨)的函数(定性分析见图 1).

$$i = f(I, t, A_w) \quad (12)$$

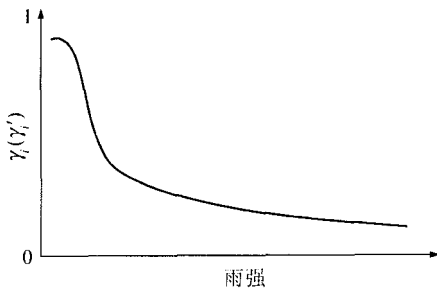


图 1 $i(i)$ 同雨强关系图

I 为雨强; t 为降雨历时; A_w 为土壤湿度.

在黄河分布式时变增益模型中,考虑到模型的复杂度及实现的可行性,本文针对不同的植被类型,每个月给出不同的值.

受植被影响而损失的水量主要是产生了无效的蒸散发,在模型中将这部分水量补充到蒸散发中.则实际蒸散发变为

$$ETa = ETa + R - R \quad (13)$$

1.2.2 人类用水模型

人类用水主要包括农业用水、工业用水、生活用水等.在干旱半干旱地区人类的用水占水资源的比重越来越大、甚至是全部的水资源.尤其是农业用水,大面积的漫灌造成河流的断流.在分布式水文模型中必须要考虑这部分的影响.

人类用水中以农业用水为主.农业灌溉用水由灌溉的面积及作物的种类决定,本文中考虑到可行性与实用性,采用下式模拟农业用水.

$$I_r = j S_1 / S \quad (14)$$

式中: j 为农业耗水不同月的分配,由灌溉时期确定($j = 1, 2, \dots, 12$); S_1 为农业的单位面积年耗水量,mm,由作物的类型及灌溉方式确定,一般有实测资料; S_1 为耕地面积; j 、理论上 是随时间变化的,并且气候、人类需求、以及先进的灌溉技术使用

都将改变其值.在短时间内 j 、变化不是很大.

农业用水除了部分回归到了流域中,大部分还是被蒸散发消耗.此处的 R 是扣除了灌溉回归后的农业耗水,该部分水量在模型中最终加到蒸散发中.

除了农业用水,流域中的工业用水、生活用水的比重较小,在模型中进行综合考虑,加入 W (表示工业、生活用水)项. W 是工业产值 In 、人口总数 P_0 、城乡、工矿、居民用地面积 S_5 的函数即:

$$W = f(In, P_0, S_5) \quad (15)$$

W 随着工业产值、人类生活水平的提高是快速增大,所以其影响程度也越来越大.

考虑人类用水后的产流量变为

$$R = R - j S_1 / S - W \quad (16)$$

则实际蒸散发变为

$$ETa = ETa + R - R \quad (17)$$

1.2.3 水库调度模型

人类为了防洪,减少洪涝灾害的损失,在河道上大量的修筑水库,水库主要作用是防洪、发电.水库在水文循环中的主要作用是改变水量的时空分配,对水量的变化影响相对较小.

在流域中,考虑水库必须从上游到下游逐级的计算,单个水库的调度如图 2.

水库的入流可以由库区的降雨径流模拟得到.针对每个时段的调度主要考虑以下几个方面:

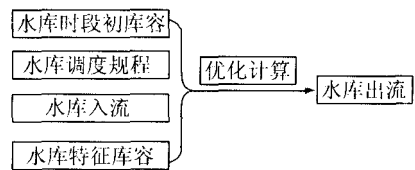


图 2 单个水库调度图

(1) 水库的死库容:保证水库不能低于死库容运行;

(2) 水库的汛限水位:水库汛期蓄水一般不能超过汛限水位运行;

(3) 生态需水最小流量:水库的出流要保证最小生态需水流量;

(4) 发电效益最大化:在满足防洪要求后充分考虑到发电的效益.

在黄河分布式时变增益模型中具体调度方案如下:

汛期(一般 4~10 月):

(1) 若水库水位在汛限水位与死水位之间,出

库流量等于机组满发流量,相对入库水量不足的水量则由水库补充,直至水库到死水位,多余的水量存入水库中直至水库蓄至汛限水位;

(2) 若水库水位大于汛限水位,需要进行优化计算,到设计洪水位后出库等于入库;

(3) 若水库水位小于死水位时,当入库流量大于等于机组满发流量时,出库流量等于机组满发流量,多余的水存入水库中,当入库流量小于机组满发流量时,出库等于入库。

非汛期:

(1) 若水库水位在正常蓄水位与死水位之间,水库按照生态需水最小流量出库,相对入库水量不足的水由水库补充,多余的水存入水库中;

(2) 若水库水位大于正常蓄水位,出库等于入库;

(3) 若水库水位小于死水位,入库流量小于生态需水最小流量,出库等于入库,若入库流量大于等于生态需水最小流量,出库等于生态需水最小流量。

对于流域中的多级水库,优先考虑上游水库,在计算下游入库时,不仅要考虑库区的产水,同时考虑上游水库库容的调蓄作用,调度过程参考图 3。

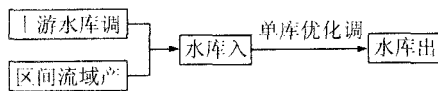


图3 梯级水库调度图

1.3 模型整体框架

模型整体流程图见图 4、5^[8]：

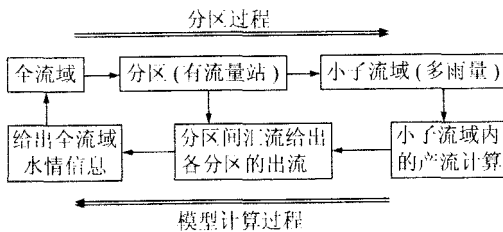


图4 模型整体流程图

2 结束语

黄河流域面积大,主河道成“几”字形,由于水土的流失,流域中有上万条沟壑。黄河流域受人类活动影响非常剧烈。由于水库的大量修建与农业用水,人类已经基本控制了黄河的流量。建立分布式模型有很大的难度。本文采用了系统理论与物理

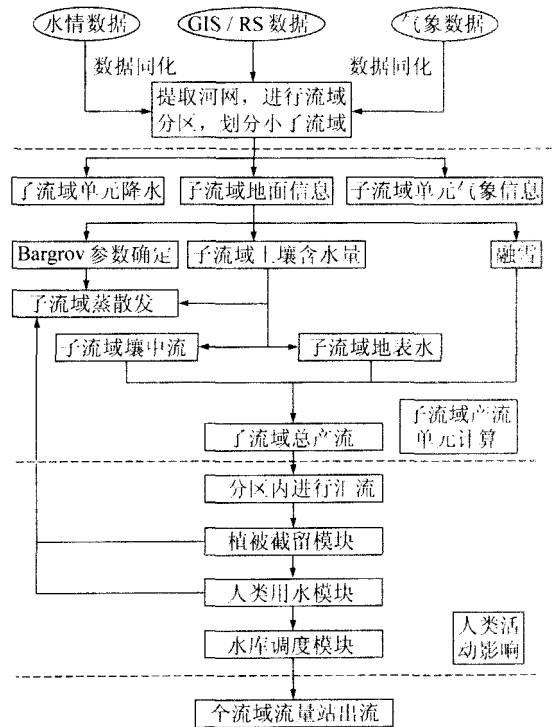


图5 模型计算流程图

机制结合的方法,建立了黄河流域分布式时变增益水文模型。该模型在子流域中进行产流计算,并且考虑到了土地利用及覆被变化对流域降水产流的影响。由于人类活动的影响,流域中的降雨产流情况已经有了很大的变化,该模型通过对水保工程、人类用水、水库的建模,模拟了人类活动的影响。

分布式模型的最大优点在于其能够模拟空间变异性,它可以划分到网格或子流域上进行计算。正因为其划分得过细,则在应用中带来了许多的问题,如计算量过大,输入误差累积导致计算结果误差过大。关于黄河流域时变增益分布式水文模型的应用将在后续文章中详细介绍。

参考文献:

[1] Beven K. J. Rainfall-Runoff Modelling [M]. John Wiley & Sons Ltd, 2001. 136-145, 162-166, 176-285.

[2] 郭生练,熊立华,杨井,等.基于DEM的分布式流域水文物理模型[J].武汉水利电力大学学报,2000,33(6):1-5.

[3] Arnold J G, Williams J R, Srinivasan R, King K W. Model Theory of Swat. USA, Agricultural Research Service Grassland, Soil and Water Research Laboratory, 1997.

[4] 吴凯,谢贤群,刘恩民,黄河断流概况、变化规律及

- 其预测[J]. 地理研究, 1998, 17(2):125-130.
- [5] 夏 军,王纲胜,吕爱锋,等. 分布式时变增益流域水循环模拟[J]. 地理学报, 2003, 58(5):789-196.
- [6] XIA Jun, WANG Gang-sheng, YE Ai-zhong. A distributed monthly water balance model for analysing impacts of band cover change on flow regimes [J]. Pedosphere, 2005, 15(6):761-767.
- [7] 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.
- [8] 王中根,刘昌明,左其亭,等. 基于DEM的分布式水文模型构建方法[J]. 地理科学进展, 2002, 21(5):430-439.
- [9] 杨针娘,曾群柱. 冰川水文学[M]. 重庆:重庆出版社, 1999.
- [10] Xia J. A system approach to real time hydrological forecasts in watersheds [J]. Water International, 2002, 27(1):87-97.
- [11] Terpstra J, Mazijk A. Computer aided evaluation of planning scenarios to assess the impact of land-use changes on water balance [J]. Phys. Chem. Earth (B), 2001, 26(7-8):523-527.
- [12] Singh V P. 水文系统:流域模拟[M]. 赵卫民等译. 郑州:黄河水利出版社, 1999.

(上接第9页)

- R/S 分析法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2002, 35(2):10-12.
- [8] 谢 平,陈广才,李 德,等. 水文变异综合诊断方法及其应用研究[J]. 水电能源科学, 2005, 23(2):11-14.
- [9] 曲小红,石生新,荣丰涛. 降雨径流系列的一致性分析[J]. 山西水利科技, 1999(1):34-37.
- [10] 薛联青,崔广柏,陈凯麒. 非平稳时间序列的动态水位神经网络预报模型[J]. 湖泊科学, 2002, 14(1):19-24.
- [11] 张学成,王 玲,高贵成,等. 黄河流域降雨径流关系动态分析[J]. 水利水电技术, 2001, 32(8):1-5.
- [12] 谢 平. 考虑土地利用及覆被变化的流域水文模型[A]. 郭生练. 水问题研究与进展[C]. 武汉:湖北科学技术出版社, 2003, 19-27.
- [13] 谢 平,郑泽权. 水文频率计算有约束加权适线法[J]. 武汉水利电力大学学报, 2000, 33(1):49-52.
- [14] 周志革. 一种计算随机变量函数均值和标准差的方法[J]. 机械强度, 2001, 23(1):107-110.
- [15] 崔维成,徐向东,邱强. 一种快速计算随机变量函数均值与标准差的新方法[J]. 船舶力学, 1998(6):50-60.