

文章编号: 1003 - 7578(2005)05 - 073 - 05

# 基于 GRID 的流域动态水平衡模型研究\*

曾维华, 孙强, 杨志峰

(北京师范大学环境学院, 水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875)

**提 要:** 水量平衡研究是水资源评价、规划与管理的基础。以往的水平衡模型大多是基于流域、子流域, 为了以网格为单元动态模拟水平衡过程, 在本文中利用 GIS 工具建立了基于 GRID 的泾河流域动态水量平衡模型, 该模型空间尺度为 1km × 1km 网格, 时间尺度为月。模型的率定是利用泾河流域马莲河把口水文站的 1995 至 1997 年逐月实测径流数据, 由此获取了模型的主要参数。模型率定结果表明模拟径流曲线与实测径流曲线的变化趋势基本吻合, 模拟值和监测值的中值绝对误差为  $6.72\text{m}^3/\text{s}$ , 相关系数为 0.932。最后, 将所建模型用于泾河流域逐月逐网格的降水、蒸发、土壤蓄水与地下蓄水, 以及形成的径流总量的动态模拟。模拟结果表明泾河流域的径流量主要集中在流域南部与中部, 流域北部径流相对较低, 这与流域降水分布关系密切。泾河流域的土壤蓄水与地下蓄水量的分布类似, 且与径流有一定相关性。该模型模拟精度较高, 基本可以满足水资源评价、规划与管理的要求。

**关键词:** 动态水平衡; GIS; 泾河流域; GRID

**中图分类号:** TV213.4

**文献标识码:** A

自 1969 年 Freeze 和 Harlan 提出流域水文模型概念<sup>[1]</sup>之后, 欧洲学者于 1976 年研制出 SHE 模型<sup>[2]</sup>, 该模型综合考虑了蒸散发、植物截留、坡面和河网汇流, 土壤非饱和与饱和状态流, 融雪径流, 地表和地下水交换等水文过程。近年来, 流域水文模型得到飞速发展<sup>[3][4]</sup>, 国内最著名的流域水文模型应属河海大学开发的新安江模型; 此外, 还有学者将流域水文模型应用于对黄河流域产汇流研究<sup>[5]</sup>与水循环模拟<sup>[6][7]</sup>, 取得很大进展。

随着 GIS 在水文模拟中的广泛应用, 基于 GIS 的流域水文模型得到飞速发展。GIS 可以为流域水文模型提供详尽的背景环境描述, 利用 GIS 工具能够准确的内插得到空间参数, 对于模拟中尺度和大尺度流域的水文过程提供巨大支持<sup>[8]</sup>。郭生练等建立基于 DEM 分布式水文物理模型, 用数学物理方程详细描述了植物截留, 蒸散发, 融雪, 下渗, 地表地下径流和洪水演进等水文过程; 并以美国缅因州的 BBMW 流域为研究对象, 模拟该流域的降雨时空变化过程, 进行洪水预报, 取得理想的结果<sup>[9]</sup>。同传统的水文模拟模型相比, 基于 GIS 的水文模型, 把 DEM 作为一个基本的信息来源, 再配以遥感资料作为研究对象, 很大程度上改变了水文模拟中资料多, 难以获得的问题。

然而, 目前基于 GIS 流域水文模型大多有很多参数需要率定, 需要进行大量实地调查与监测, 其费用可想而知。实际上, 很多大尺度的流域水资源评价与规划, 不需要非常细致的流域水文模拟。本文利用 Mantoudi K. 等<sup>[10]</sup>提出的简单的基于 GRID 的逐月水平衡模拟模型, 经过适当的修正, 建立了泾河流域逐月水量平衡模拟模型。该模型需要输入的有降水与温度, 通过一个由描述降水、土壤水与地下水的假想蓄水池组成的相互连接的系统, 按 GRID 模拟水文循环过程。由于该模型的分布特征, 该模型可计算输出变量的空间分布; 进一步, 可生成沿河逐月径流; 最后, 利用流域把口水文站的径流实测值对模型进行标定, 水文监测站的观测值与计算值的比较(标定与验证)结果表明该模型能够很好地模拟泾河流域水文过程。

\* 收稿日期: 2005 - 03 - 06。

基金项目: 国家自然科学基金(70273005), 国家高科技研究发展计划(2003AA601010)。

作者简介: 曾维华(1965 - ), 男, 博士, 副教授, zengwh@bnu.edu.cn, 8610 - 58800486。

其模拟结果基本可以满足流域水资源评价、规划与管理工作的。

### 1 基于 GRID 的流域逐月水量平衡模型

基于 GRID 的流域逐月水量平衡模型通过一个由描述雪累积、土壤水与地下水的假想蓄水池组成的相互连接的系统,模拟水资源的转化过程,计算出流域逐月径流量,并以流域把口水文站的径流监测值对模型进行校验。该模型是基于网格(GRID)的,将流域划分为若干的网格,每个网格作为一个水文单元,根据模型对每一个网格进行模拟,计算出每个网格逐月的净径流量,将各网格的净径流量汇总即为各流域出口的径流量。

应用此水平衡模型来对泾河流域进行模拟,需要对其做一定的修正和调整:

- 1) 由于地理条件限制,泾河流域几乎没有降雪,也没有积雪蓄水池的环节,其降水均由降雨所组成;
- 2) 土壤水分蒸腾的实际蒸发量由潜在蒸发量乘和作物系数推算求得,而潜在蒸发量的计算通过彭曼方程实现,可直接作为输入量;具体模型如图 1 所示。

图中描述了包括积降水、蒸发、土壤水蓄水池、地下水蓄水池、径流的水循环系统。系统的输入包括降水、实际蒸发量;系统的参数包括不透水性(v)、土壤存储负荷(K)、土壤含水的退水系数(k)与地下水退水系数( ) ;系统的输出结果包括:土壤水分蒸发损失总量(E)、土壤水蓄水池的蓄水量(S)、地下水蓄水池的需水量(G)与总径流量(Q)。

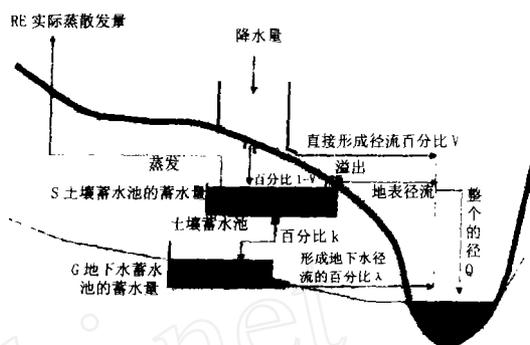


图 1 基于 GRID 的简单水平衡模型示意图  
Fig. 1 Sketch map of the GRID - based simple water balance model

$$\text{系统的水平衡方程为: } P - E = S + G + Q \tag{1}$$

对第 n 个时段某个水文单元来说,该单元产生的净径流量 Q 由下式计算得到:

$$Q_n = Q_p + Q_s + Q_g \tag{2}$$

其中  $Q_p$  为降水落在地表上直接形成的径流量,  $Q_p = P_n \times v$ ;  $Q_s$  为土壤水蓄水池溢满形成的壤中流量,  $Q_s = S_n - K$ , 如果  $S_n < K$ , 则  $Q_s = 0$ ;  $Q_g$  为地下水蓄水池对河流补给所形成的地下径流量,  $Q_g = S_n \times k \times \lambda$ 。在这个水文过程中,土壤水蓄水池的蓄水量经过了中间过程即,  $S_n [ S_{n-1} + P_n \times (1 - v) - E_n ] \times (1 - k)$ , 表示在上一个月的土壤水蓄水池的蓄水量 ( $S_{n-1}$ ) 的基础上,加上当月降水量对土壤水的补充 ( $P_n \times (1 - v)$ ), 去除当月的实际蒸发量 ( $E_n$ ) 以及下渗到地下水蓄水池的部分水量之后得到的中间量 ( $S_n$ ), 将土壤蓄水池的中间量  $S_n$  同土壤存储负荷 ( $K$ ) 相比较, 如果  $S_n > K$ , 则发生溢满形成壤中流  $Q_s = S_n - K, S_n = K$ ; 如果  $S_n < K$ , 则未发生溢满现象,  $Q_s = 0, S_n = S_n$ 。

其中特别指出的是  $S_{n-1}$ , 表示上一个月的土壤蓄水池的蓄水量, 而对于模拟序列的第一个月则没有这个确定值, 本文用水文单元模拟序列前三个月的实际蒸发值的和来代替该单元的初始土壤蓄水池的蓄水量。因为在序列的前几个月的降水量很微小, 相比之下实际蒸发很大, 可以认为其实际蒸发量全部是由土壤蓄水池的蓄水量提供的, 因此用序列前三个月的实际蒸发值的和来代替该单元的初始土壤蓄水池的蓄水量有一定的依据, 但也会带来一定误差, 在初始的几个月模拟出的结果会是偏小。

### 2 泾河流域逐月水量平衡模拟

泾河是黄河的二级支流, 是渭河的最大支流, 干流全长 455km, 流域面积约为 45421km<sup>2</sup> (图 2)。支流共有 8 条, 呈扇形分布, 其中, 左岸有三水河、马莲河、蒲河、茹河、洪河, 右岸有 河、黑河、达溪河等 (图 3)。

由于水文数据资料的缺乏, 本文采用泾河流域最大的支流马莲河流域来进行水平衡模拟实验, 利用马莲河到泾河的把口水文站的实测径流数据进行参数标定, 再将参数推广到整个泾河流域, 模拟整个泾河流域。图 4 为马莲河流域与把口水文站的位置。马莲河流域是泾河最大的子流域, 流域为 19019 km<sup>2</sup>, 按 1km × 1km 划分网格, 马莲河流域将被划分为 19019 个水文单元, 河流域的把口站点为雨落坪, 如图 3 中黑点所示。时间尺度采用 95 - 97 年的逐月的数据资料, 组成 36 个月的连续时间序列。水文气象数据来源于泾河流域及周边地区 21 个气象站点 (图 2), 数据资料包括降水量、气压、水汽压、温度、日照时数等。

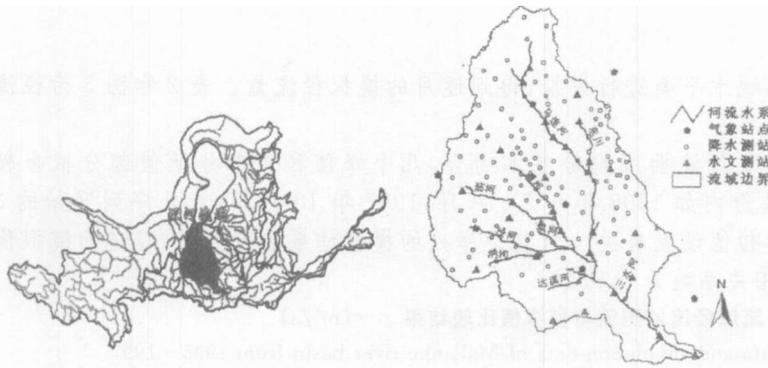


图 2 泾河流域位置示意图与泾河流域水系图

Fig.2 Sketch map of the position and water system of Jin river basin

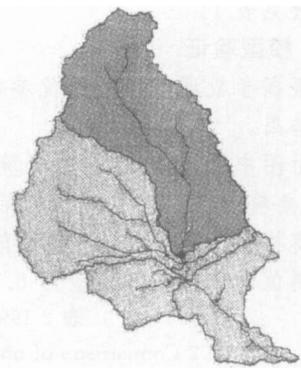


图 3 马莲河流域位置示意图

Fig.3 Sketch map of the position of Manlian River basin

### 2.1 模型输入数据预处理

根据彭曼 - 蒙特斯方程,利用气压、水汽压、温度、日照时数等数据计算各站点的潜在蒸发量,对计算结果进行 Kriging 插值,计算整个流域范围内的潜在蒸发量,而后根据作物系数计算出流域范围内的实际蒸发量。对各站点的降水量进行 Kriging 插值,得到流域范围内的降水量。降水和实际蒸发 Kriging 插值结果栅格的大小(cell size)选择为 1km ×1km,同流域所划分的水文单元一致。图 4 以 1995 年 7 月为例,显示出马莲河流域降水和实际蒸发的插值结果,网格单位为 1km ×1km。Kriging 的结果为 ArcInfo GRID 栅格数据,在 Arctoolbox 中将其转化 Ascii 的数据格式以供模拟计算做输入。

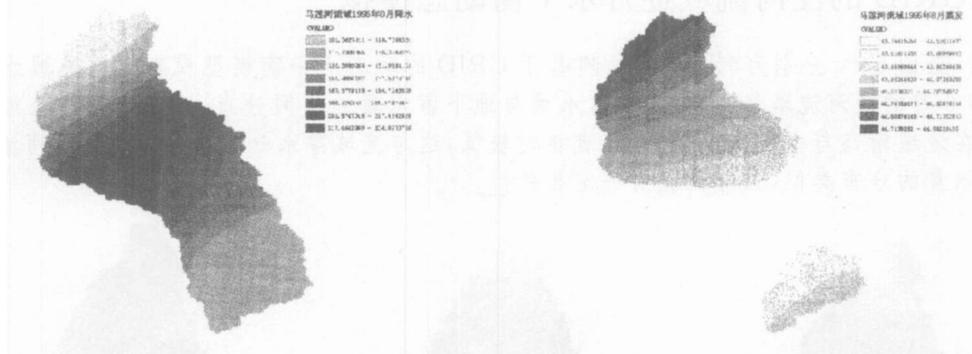


图 4 马莲河流域降水(左)和实际蒸发(右)插值结果

Fig.4 Interpolation results of the practice precipitation and evaporation on Manlian River basin

### 2.2 模型参数率定

基于 GRID 流域逐月水平衡模拟模型有四个参数:不透水性( $v$ )、土壤存储负荷( $K$ )、土壤含水的退水系数( $k$ )与地下水退水系数( $\lambda$ ),其中不透水性( $v$ )和土壤存储负荷( $K$ )同流域下垫面性质密切相关。

表 1 流域水平衡模型模拟参数列表

Tab.1 Parameters list of the water balance model on the river basin

	不透水性 ( $v$ )	土壤存储负荷 ( $K$ )	土壤水退水系数 ( $k$ )	地下水退水系数 ( $\lambda$ )
域值范围	0.05 - 0.30	100 - 200mm	0 - 0.2	0 - 0.1
择优结果	0.075	180mm	0.087	0.028

首先,根据该模型以往模拟的经验得出的参数值和泾河流域实际下垫面性质,给出各参数的域值范围。本模型将整个流域下垫面性质均匀化,利用流域内最具典型性的土壤类型和植被覆盖度来进行参数的选择,整个流域选择相同的参数。其次,分别计算不同的参数组合下的把口径流量,并与把口站实测经流量进行比较;利用试探法,根据模拟量同径流量的误差来调整输入参数,直至选出同实测径流量拟合最好的最优参数。确定的各参数的域值范围与最后选择的最优参数见

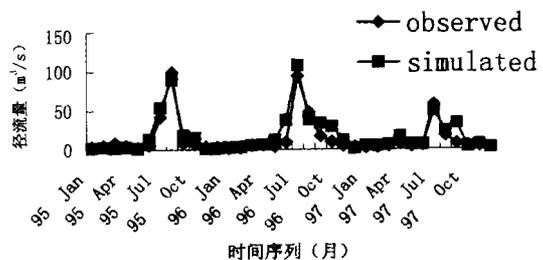


图 5 马莲河流域 1995 - 1997 年径流模拟结果

Fig.5 Runoff simulation results of

Manlian river basin from 1995 to 1997

表 1。

### 2.3 模型验证

根据参数调整得到最优参数值,对流域水平衡进行模拟,得到逐月的模拟径流量。表 2 和图 5 为径流模拟结果。

由图中可以看出,模拟径流曲线和实测径流曲线趋势基本吻合,几个峰值和大部分低值部分拟合较好,误差较大的出现在峰值前后的几个月份内如 1996 年 6 月、10 月,1997 年 10 月等,此外序列开始的 3 个月模拟值普遍偏小,这与土壤蓄水量的初值设置有关。对整个序列的模拟结果进行分析,径流的模拟值和监测值的中值绝对误差为  $6.72\text{m}^3/\text{s}$ ,相关系数为 0.932。

表 2 1995 - 1997 年流域径流监测值与模拟值比较结果 (m<sup>3</sup>/s)

Tab. 2 Comparison of observation data and simulation data of Malianhe river basin from 1995 - 1997

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
监测值	2.8	4.7	8.1	4.5	2.1	5.4	42.5	100.0	8.3	6.8	3.9	3.5
95 模拟值	1.6	2.7	1.7	2.7	1.5	13.7	54.8	90.7	18.9	16.0	1.3	1.8
误差值	-1.2	-2.0	-6.4	-1.7	-0.6	8.3	12.3	-9.3	10.6	9.2	-2.6	-1.7
监测值	1.8	2.2	5.6	6.0	3.9	9.5	94.7	48.5	17.2	9.7	4.7	3.4
96 模拟值	2.8	3.4	6.0	6.5	12.6	38.2	108.6	38.7	34.4	30.0	12.3	1.6
误差值	1.1	1.3	0.4	0.5	8.7	28.8	13.9	-9.8	17.2	20.3	7.6	-1.8
监测值	2.4	2.7	4.3	7.2	4.2	5.6	58.3	18.0	7.6	4.9	4.2	2.7
97 模拟值	5.1	4.8	6.4	17.1	6.5	6.5	50.0	23.8	34.4	3.9	6.4	2.3
误差值	2.8	2.1	2.2	9.9	2.3	0.9	-8.3	5.8	26.8	-1.1	2.1	-0.5

### 3 基于 GRID 的泾河流域逐月水平衡动态模拟

图 6 - a 至图 6 - c 分别为利用本文所建基于 GRID 的动态水平衡模型模拟泾河流域水平衡过程得到的 1996 年 6 月的泾河流域径流量、土壤蓄水量与地下蓄水量的空间分布。由此可见,泾河流域的径流量主要集中在流域南部与中部,流域北部径流相对较低,这与流域降水分布关系密切。泾河流域的土壤蓄水与地下蓄水量的分布类似,且与径流有一定相关性。

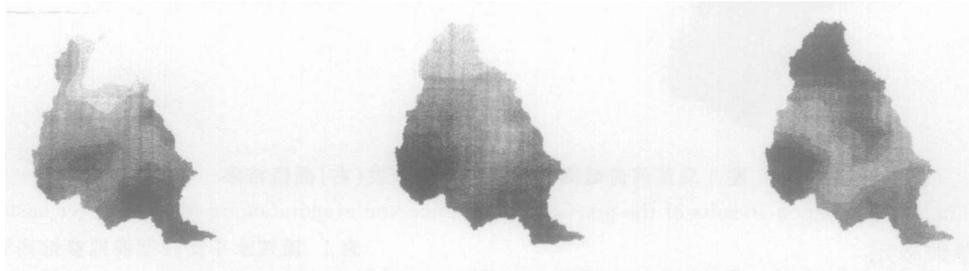


图 6 - a 径流量      图 6 - b 土壤水蓄水量      图 6 - c 地下水蓄水量  
Fig. 6 - a Runoff distribution    6 - b Soil water distribution    6 - c Ground water distribution

### 4 结论

本文根据泾河流域实际情况,对 Mantoudi K. 等提出的基于 GIS 的简单水平衡模型进行了相应的修订;并利用泾河流域的子流域马莲河流域的实测径流对模型进行了标定与验证,建立了基于 GRID 的泾河流域逐月水量平衡模拟模型。模型率定结果表明径流模拟曲线与实测曲线的变化趋势基本吻合,模拟值和监测值的中值绝对误差为  $6.72\text{m}^3/\text{s}$ ,相关系数为 0.932。最后,利用本文所建模型动态模拟了泾河流域 1995 - 1997 年逐月水循环过程。动态模拟结果表明泾河流域的径流量主要集中在流域南部与中部,流域北部径流相对较低,这与流域降水分布关系密切。泾河流域的土壤蓄水与地下蓄水量的分布与径流分布类似,这说明土壤蓄水、地下蓄水与径流有一定相关性。由此可见,本文所建模型具有一定精度,基本可以满足水资源评价、规划与管理的需要。

相比其它基于 GIS 的流域水文模型,本文所建立的基于 GIS 的简单水平衡模型的特点在于:

本文所建模型是建立在对流域水循环系统的按网格单元概化基础上,概化不失系统的完整性及其各子系统间的联系;因此该模型对流域水循环系统得描述是简单而完整的,模拟结果完全可以反映实际情

况;最终得到的模拟结果证实了这一点。

本文所建模型具有需要的参数少少的特点。一般的流域水文模型的参数大多十几,甚至几十个;而本文所建的基于 GRID 的简单水平衡模型只需要估算 4 个参数。通过把口水文站点的径流数据进行模型率定与验证,使得模型的可靠性更高。通常含有大量参数的流域水文模型的参数大多是靠经验公式或实际测量,前者的准确性大打折扣,而后者是建立在大量人力、物力与财力基础上的。

本文所建模型具有分布的动态特征,可按网格水文单元逐月模拟主要水文因子(降水、蒸发、地表径流、地下径流与土壤水)。如此精度的时间尺度与空间尺度基本可以满足流域水资源评价、规划与管理的需求。

### 参考文献

- [1]Costa Cabralmc, Burges S. J. Digital elevation model networks: a model of flow over hillslopes for computation of contribution and dispersal areas [J]. Water Resources, 1994, 30(6): 1681 - 1692.
- [2]Abbott M. B. An introduction to the European Hydrological System [J]. Journal of Hydrology, 1986, 87(1): 45 - 47.
- [3]Chongyu Xu. Application of Water Balance Models to Different Climatic Regions in China for Water Resources Assessment [J]. Water Resources Management, 1997, (11): 51 - 67.
- [4]Jonathan I., Matondo. Water resources assessment for Zambezi River Basin[J], Water international, 1998, 23(4): 256 - 262.
- [5]赵卫民、郝芳华. 黄河若干水文问题研究的回顾和展望, 黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理研究和进展[M], 郑州:黄河水利出版社, 2001: 58 - 82.
- [6]王浩、秦大庸. 多尺度区域水循环过程模拟进展与二元水循环模式的研究, 黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理研究和进展[M], 郑州:黄河水利出版社, 2001: 34 - 42.
- [7]郭生练、李兰. 分布式流域水文模型水文物理模型的研究现状与进展, 黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理研究和进展[M], 郑州:黄河水利出版社, 2001: 51 - 57.
- [8]万洪涛, 周成虎, 万庆等. 地理信息系统与水文模型集成研究述评[J]. 水科学进展, 2001, 12(4): 560 - 568.
- [9]郭生练, 熊立华, 杨井等. 分布式流域水文模型的应用和检验[J], 武汉大学学报(工学版), 2001, 34(1): 1 - 5.
- [10]Mantoudi K., N. Mamassis and D. Koutsoyiannis, Simple water balance model using a geographical information system[C], 26th General Assembly of the European Geophysical Society, Nice - France, 25 - 30 March 2001.

## Research on GRID - based Dynamic Water Balance Model of Jin River Basin

ZEN G Wei - hua, SUN Qiang, YANG Zhi - feng

(chool of Environment, Beijing Normal University; State Key Laboratory of Water Environmental Simulation, Beijing 100875, China)

### Abstract

Research on water balance is the basis on water resources assessment, planning and management. Most of the former water balance model is basis on the river basin or sub - basin. In this paper, GRID - based dynamic water balance model was developed using the GIS tools in order to model the process of water balance in the GIRD unit. The space scale of the model is 1km 1km GRID, and the time scale is month. The model was calibrated by the runoff data on - the - spot survey month by month from 1995 to 1997. The model calibration result revealed that trend of the simulation runoff line was inoculated with the observation runoff line, its medium absolute error is  $6.72 \text{ m}^3/\text{s}$ , and the correlation coefficient is 0.932. At the end, the model was used in simulation of the progress of hydrological cycle on Jin river basin, and obtained the precipitation, evaporation, soil water and groundwater of every grids month by month. The simulation results revealed that the runoff of Jin river basin is focused on the south and middle of the river basin, the runoff on the north of the river basin is lower oppositely. This distribution is related with the precipitation distribution. The soil water and groundwater has the similar distribution with the runoff. This represents that the soil water and groundwater distribution has some correlation. All of this represent that the model fitted the observed data quite well, and could satisfy the needs of the water resources assessment, planning and management in the main.

**Keywords:** Dynamic water balance; GIS; Jin river basin; GRID