

# 一种基于下垫面变化的产汇流模型及其应用

方 堃

(山西省水土保持科学研究所, 山西 太原 030045)

**摘 要:** 为土地利用变化较大的流域构建产汇流模型时,下垫面的变化是一个极其重要的因素。利用中国科学院土地资源分类系统将流域分为不同的下垫面类型,在每一种下垫面上分别考虑蒸发和下渗要素的影响,运用超渗-蓄满耦合产流模式进行产流计算,并采用单位线汇流和线性水库模型演算至流域出口断面,从而构建了基于下垫面变化的产汇流模型。在模型率定和验证时,对大清河水系紫荆关流域的洪水序列作频率分析,以不同重现期的洪水序列分别对模型进行率定和验证。从模拟结果来看,模型结构基本反映了流域产汇流的各个环节,模拟结果能够满足研究精度要求。

**关键词:** 下垫面变化;水文模型;径流模拟;大清河流域

中图分类号:TV121.7; P333

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2012)01-0098-04

## Application of runoff yield and concentration model based on underlying surface change

FANG Kun

(Scientific Research Institute of Soil and Water Conservatio, Shanxi 030045, China)

**Abstract:** When building a runoff model based on the basin in which land-use changes are more, underlying surface change is an extremely important factor. By using the land resources classification system of Chinese Academy to divide the basin into some different land use types, consider separately the effects of evaporation and infiltration in every kind of underlying surface area, applying the runoff model coupling of infiltration-excess and saturation-excess runoff to do runoff calculations, using unit hydrograph and linear reservoir model to do the convergence calculations, thus runoff model based on underlying surface change was constructed. A frequency analysis was done for flood sequences of Zijingguan basin, before the model was calibrated and validated with flood sequences of different return periods. As a result of the simulation, the model structure basically reflected all aspects of runoff yield and concentration in the basin, simulation results can satisfy the required precision.

**Key words:** underlying surface change; hydrological model; runoff simulation; Daqinghe River Basin

21世纪以来,全球洪涝灾害的频率远远高于以往任何时期,由人类活动引起的下垫面变化是重要的原因之一。下垫面变化影响雨水的截留、下渗、蒸发等水文要素及其产汇流过程,并进而影响流域出口断面的流量过程,加大流域洪涝灾害发生的频率和强度<sup>[1]</sup>。

Calder<sup>[2]</sup>认为,影响水文的主要下垫面变化是造林和毁林、农业开发、湿地排水、道路建设以及城镇化等。20世纪70年代以来,下垫面变化的水文响应研究由传统的统计分析方法转向水文模型方法,由只关注下垫面变化造成的结果转向揭示下垫面变化对水文水资源影响的过程与机理。Onstad 和

Jamieson<sup>[3]</sup>于1970年最先尝试利用水文模型模拟下垫面变化对径流影响。国内学者也以水文模型为基础对不同地区展开过研究<sup>[4-5]</sup>。

下垫面变化通过对蒸发和下渗的影响直接作用于水文过程,这种影响应该直接反映在流域水文模型结构和参数中<sup>[6]</sup>。本文将基于下垫面分类、蓄满超渗耦合产流模型、单位线及线性水库汇流建立一个考虑下垫面变化的分布式流域水文模型,并以大清河水系紫荆关站以上流域为例,在对流域洪水序列进行频率分析的基础上,模拟了流域的径流过程,为我国北方半干旱半湿润地区的产汇流计算提供了可行的途径。

收稿日期:2011-05-09; 修回日期:2011-06-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50879051)

作者简介:方堃(1983-),男,山西太原人,助教,硕士,主要从事水文学及水资源研究。

1 下垫面分类

不同下垫面条件下的模型参数有很大差异,产流机制也不完全相同,因此需要将流域下垫面分类,分别研究不同下垫面条件下的产流机制,以便进行产流计算。根据中国科学院土地资源分类系统<sup>[7]</sup>的一级类型,将土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、城镇与建设用地 5 种类型(表 1)。

表 1 土地资源分类系统一级类型

| 编号 | 名称      | 备注                 |
|----|---------|--------------------|
| 1  | 耕地      | 草本种植物、水生种植物        |
| 2  | 林地      | 林地、灌木林             |
| 3  | 草地      | 以生长草本植物为主          |
| 4  | 水域      | 天然陆地水域和水利设施用地      |
| 5  | 城镇与建设用地 | 城乡居民点及其以外的工矿、交通等用地 |

2 超渗 - 蓄满耦合产流模型

针对半湿润半干旱地区的产流特点,采用超渗 - 蓄满耦合产流模型<sup>[8]</sup>,其核心是两条曲线的融合,即流域下渗分布曲线和流域蓄水容量分布曲线。前者计算下渗率空间分布不均匀情况下的超渗产流过程;后者计算土壤缺水量空间分布不均匀情况下的蓄满产流过程。

如果以地面下渗容量  $f_p$  为纵坐标,以小于等于该地面下渗容量所占的流域面积比重  $\alpha f$  为横坐标,则所得的曲线称为流域下渗容量分布曲线(图 1)。

其曲线函数形式可近似表示为:

$$\alpha f = 1 - \left(1 - \frac{f_p}{f_m}\right)^m \tag{1}$$

式中:  $f_m$  为流域最大的点下渗能力,mm;  $m$  为下渗容量分布曲线指数。

流域蓄水容量分布曲线是将流域内各地点包气带的蓄水容量,按从小到大的顺序排列得到的一条蓄水容量与相应面积关系的统计曲线见图 2。

蓄水容量曲线可由如下指数方程近似描述:

$$\frac{f}{F} = 1 - \left(1 - \frac{W'_m}{W_{mm}}\right)^b \tag{2}$$

式中:  $W'_m$  为各地点包气带蓄水容量值,mm;  $W_{mm}$  为其中最大值,mm;横坐标为面积的相对值  $f/F$ ,  $F$  是全流域面积,  $f$  为流域内包气带蓄水容量小于或等于  $W'_m$  的面积,曲线所围的面积为全流域平均的蓄水容量;  $b$  为蓄水容量分布曲线指数。

超渗 - 蓄满耦合产流是把超渗产流和蓄满产流

在垂向上进行组合的一种混合产流计算方法<sup>[9]</sup>。雨量  $PE$  到达地面,首先通过下渗分布曲线,划分为地面径流  $RC$  和下渗水量  $FA$ ,如图 1 所示。 $FA$  在向下的运动过程中,在土壤缺水量大的面积上,补充土壤含水量,不产流;在土壤缺水量小的面积上,补充土壤缺水量后,产生径流  $R$ 。将图 2 中雨量  $PE$  换成下渗量  $FA$ ,即蓄满产流模式中的雨量由超渗产流模式中的下渗量提供。

3 流域汇流

流域地表汇流计算可采用单位线法,河道汇流可采用马斯京根法。为了便于比较,该流域的汇流计算是直接利用海河水利委员会洪水预报系统所推荐的单位线。而把壤中流和地下径流的汇流概化为不同的线性水库汇流。

流域蒸散发计算采用三层蒸散发模式<sup>[10]</sup>。另外,模拟精度采用 Nash 效率系数  $E$ ,洪峰流量相对误差  $EQ$  和径流深相对误差  $ER$  进行评判,其表达式为:

$$E = \left[1 - \frac{\sum_i (Q_i - Q'_i)^2}{\sum_i (Q_i - \bar{Q})^2}\right] \times 100\% \tag{3}$$

$$EQ = \frac{Q_{\text{模拟}} - Q_{\text{实测}}}{Q_{\text{实测}}} \times 100\% \tag{4}$$

$$ER = \frac{R_{\text{模拟}} - R_{\text{实测}}}{R_{\text{实测}}} \times 100\% \tag{5}$$

式中:  $Q_i$  和  $Q'_i$  分别为实测径流流量和模拟径流流量;  $\bar{Q}$  为平均实测径流流量;  $Q_{\text{模拟}}$  为模拟洪峰流量;  $Q_{\text{实测}}$  为实测洪峰流量;  $R_{\text{模拟}}$  为模拟径流深;  $R_{\text{实测}}$  为实测径流深。

4 应用实例

4.1 大清河流域概况

大清河水系位于海河流域的中部,西起太行山区,东至渤海湾,北界永定河,南临子牙河。流域面积 43 060 km<sup>2</sup> (其中山区占 43%,平原占 57%),多年平均降雨量 500 ~ 700 mm,受海洋及地形影响,降雨量年际变化较大,多雨年和少雨年最大差 6.4 倍。降雨量年内分配也不均匀,冬春两季很少降雨,多以暴雨形式集中于 7 - 8 月份。紫荆关站以上流域面积为 1 760 km<sup>2</sup>。

4.2 流域洪水序列频率分析

考虑到模型对不同洪水序列的适用性,并为了提高模型的精度,需要对研究流域的洪水序列作频率分析,对各流域洪水进行分级。采用漫水河 1956

-2001 年洪水序列,按洪峰流量的大小进行分级,分为大于 10 年一遇、5~10 年一遇、小于 5 年一遇三个量级(表 2)。

| 表 2 紫荆关流域洪水分级情况统计表 |                          |
|--------------------|--------------------------|
| 重现期                | 洪水年份                     |
| 大于 10 年            | 1956、1963、1964、1996      |
| 5~10 年             | 1959、1973、1978、1979、1988 |
| 小于 5 年             | 其余年份                     |

4.3 模拟结果分析

根据流域的水文资料,率定产汇流模型中的各个待定参数,率定结果见表 3。选择紫荆关流域 1956-2001 年 15 场洪水进行模拟,其中大于 5 年一遇 7 场,小于 5 年一遇 8 场。用 1980 年前的洪水序列作为率定期,1980 年后的洪水序列作为验证期,计算时段 1 h。海河水利委员会洪水预报系统推荐大于 5 年一遇单位线和小于 5 年一遇单位线分别见图 3 和图 4,模型率定和验证的结果见表 4,部分径流过程的模拟结果见图 5 和图 6。

| 表 3 模型参数率定结果 |             | mm, mm/h, h <sup>-1</sup> |       |
|--------------|-------------|---------------------------|-------|
| 序号           | 参数名         | 参数含义                      | 参数值   |
| 1            | <i>W'm</i>  | 流域平均蓄水容量                  | 140   |
| 2            | <i>WLM</i>  | 流域下层蓄水容量                  | 80    |
| 3            | <i>B</i>    | 蓄水容量分布曲线的指数               | 0.3   |
| 4            | <i>M</i>    | 下渗容量分布曲线的指数               | 0.1   |
| 5            | <i>C</i>    | 深层蒸散发系数                   | 0.1   |
| 6            | <i>WUM1</i> | 耕地流域上层蓄水容量                | 10    |
| 7            | <i>K1</i>   | 耕地蒸发皿折算系数                 | 0.939 |
| 8            | <i>FC1</i>  | 耕地流域稳定下渗率                 | 2.409 |
| 9            | <i>KF1</i>  | 耕地 <i>Horton</i> 下渗曲线的指数  | 0.335 |
| 10           | <i>WUM2</i> | 林地流域上层蓄水容量                | 20    |
| 11           | <i>K2</i>   | 林地蒸发皿折算系数                 | 0.486 |
| 12           | <i>FC2</i>  | 林地流域稳定下渗率                 | 2.12  |
| 13           | <i>KF2</i>  | 林地 <i>Horton</i> 下渗曲线的指数  | 0.212 |
| 14           | <i>WUM3</i> | 草地流域上层蓄水容量                | 15    |
| 15           | <i>K3</i>   | 草地蒸发皿折算系数                 | 0.219 |
| 16           | <i>FC3</i>  | 草地流域稳定下渗率                 | 2.157 |
| 17           | <i>KF3</i>  | 草地 <i>Horton</i> 下渗曲线的指数  | 0.364 |
| 18           | <i>K4</i>   | 水域蒸发皿折算系数                 | 1.05  |
| 19           | <i>SM</i>   | 流域平均自由水容量                 | 30    |
| 20           | <i>EX</i>   | 自由水蓄水容量曲线的指数              | 1.5   |
| 21           | <i>KSS</i>  | 自由水蓄水库对壤中流的出流系数           | 0.33  |
| 22           | <i>KG</i>   | 自由水蓄水库对地下径流出流系数           | 0.4   |
| 23           | <i>KKSS</i> | 壤中流的退水系数                  | 0.9   |
| 24           | <i>KKG</i>  | 地下水库的消退系数                 | 0.99  |

| 表 4 模型率定和验证结果 |        | mm, %, m <sup>3</sup> /s |           |             |            |            |       |
|---------------|--------|--------------------------|-----------|-------------|------------|------------|-------|
| 重现期           | 洪水编号   | 实测径流<br>深                | 模拟径流<br>深 | 径流深相<br>对误差 | 实测洪峰<br>流量 | 模拟洪峰流<br>量 | 确定系数  |
| 大于 5 年一遇      | 590803 | 87.7                     | 89.5      | -2.1        | 648        | 626        | 3.4   |
|               | 640812 | 60.5                     | 59.8      | 1.2         | 752        | 768        | -2.1  |
|               | 730819 | 20.8                     | 23.1      | -11.1       | 334        | 289        | 13.5  |
|               | 780826 | 30.7                     | 35.7      | -16.3       | 428        | 386        | 9.8   |
|               | 790815 | 21.3                     | 17.1      | 19.7        | 245        | 274        | -11.8 |
|               | 880804 | 39.2                     | 42.4      | -8.2        | 350        | 304        | 13.1  |
| 小于 5 年一遇      | 960730 | 75.8                     | 77.1      | -1.7        | 731        | 754        | -3.1  |
|               | 580710 | 11.9                     | 13.9      | -16.8       | 905        | 838        | 7.4   |
|               | 620707 | 19.0                     | 22.3      | -17.4       | 271        | 234        | 13.7  |
|               | 660712 | 7.1                      | 7.3       | -2.8        | 674        | 707        | -4.9  |
|               | 740731 | 11.2                     | 8.6       | 23.2        | 309        | 350        | -13.3 |
|               | 750812 | 6.4                      | 6.6       | -3.1        | 224        | 205        | 8.5   |
|               | 760718 | 10.9                     | 11.4      | -4.6        | 108        | 106        | 1.9   |
|               | 910610 | 6.4                      | 5.6       | 12.5        | 109        | 117        | -7.3  |
|               | 980705 | 4.5                      | 5.2       | -15.6       | 121        | 104        | 14.0  |
|               |        |                          |           |             |            |            | 0.75  |

由表 4 知,洪峰流量相对误差全部控制在 20% 以内,合格率 100%,拟合良好;径流深相对误差大部分控制在 20% 以内,合格率 93.3%,拟合良好。15 次模拟的模型效率系数超过 70%,而 4 次校核确定性系数全部超过 70%。这说明该模型模拟精度较高,适用于大清水系紫荆关流域这样半干旱半湿润区的产流特征。并为进一步模拟不同下垫面的产汇流特性,定量评估土地利用变化的水文响应提供了可能。

5 结 语

- (1) 采用中国科学院土地资源分类系统划分下垫面类型,并分别在不同下垫面上建立产流模型,反映不同下垫面的产流机理,便于定量评估土地利用变化的水文响应。
- (2) 对于地处半干旱半湿润区的流域,流域大多数地区产流模式不固定,既有超渗又有蓄满,两种模式常常交织在一起,鉴于这些特点,超渗产流和蓄满产流的耦合是非常必要的。
- (3) 建立了基于下垫面变化的产汇流模型,并选取大清水系紫荆关流域若干场洪水序列对模型进行率定和验证。模拟精度较高,模型结构基本反映了流域产汇流的各个环节,模拟结果能够满足研究精度要求。
- (4) 对大清水系紫荆关流域的洪水序列进行频率分析,在模型验证时将洪水序列分为大于 5 年

一遇和小于5年一遇分别进行模拟,可以发现,模型

在模拟大洪水时比中小洪水适用性好,精度高。

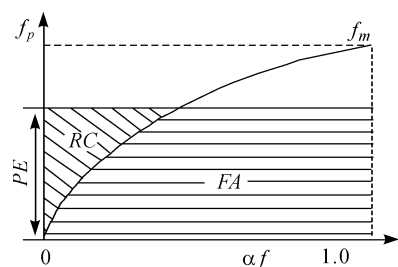


图1 下渗分布曲线示意图

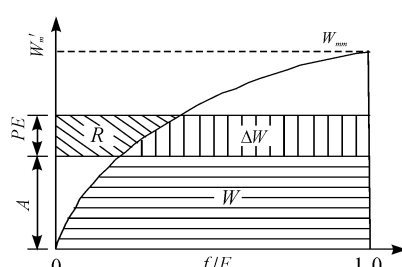


图2 流域蓄水容量分布曲线示意图

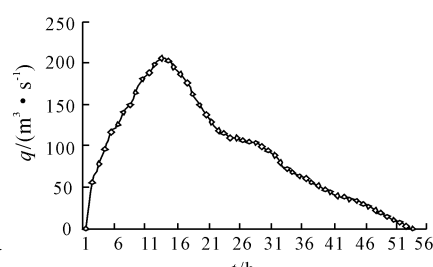


图3 大于5年一遇单位线

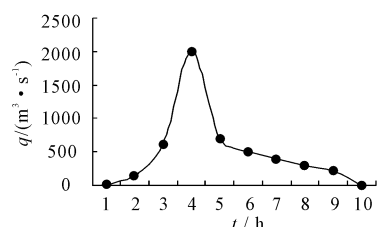


图4 小于5年一遇单位线

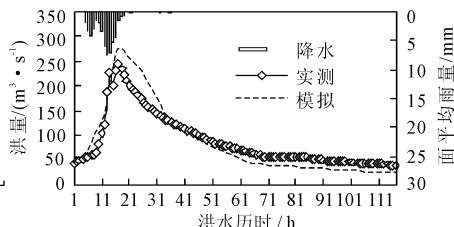


图5 790815次洪水过程模拟

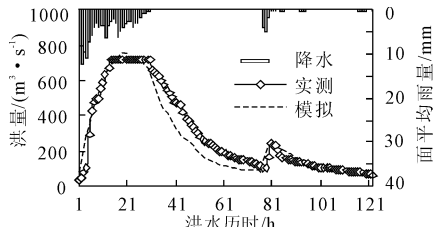


图6 960730次洪水过程模拟

## 参考文献:

- [1] Rogers P. Hydrology and water quality [C] // Meyer W B, Turner B II. Changes in land use and land cover: A global perspective. Cambridge: Cambridge University Press, 1994: 231 - 258.
- [2] Calder I R. Hydrologic effects of land - use change [C] // Maidment D R. Handbook of hydrology. New York: McGraw - Hill, 1993.
- [3] Onstad C A, Jmieson D G. Modeling the effects of land use modification on runoff [J]. Water Resource Research, 1970, 6(5): 1287 - 1295.
- [4] 郝芳华, 陈利群, 刘昌明, 等. 土地利用变化对产流和产沙的影响分析[J]. 水土保持学报, 2004, 18(3): 5 - 8.
- [5] 贺宝根, 高效江. 农田非点源污染研究中的降雨径流关系 - SCS 法的修正[J]. 环境科学研究, 2001, 14(3): 49 - 51.
- [6] 谢平, 朱勇, 陈广才, 等. 考虑土地利用/覆被变化的集总式流域水文模型及应用[J]. 山地学报, 2007, 25(3): 257 - 263.
- [7] 肖鹏峰, 刘顺喜, 冯学智, 等. 基于遥感的土地利用与覆被分类系统评述及代码转换[J]. 遥感信息, 2003(4): 54 - 58.
- [8] 锥文生, 胡春歧, 韩家田. 超渗和蓄满同时作用的产流模型研究[J]. 水土保持学报, 1992, 6(4): 6 - 13.
- [9] 瞿思敏, 包为民, 张明, 等. 新安江模型与垂向混合产流模型的比较[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2003, 31(4): 374 - 377.
- [10] 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.

(上接第97页)

- [14] Nie Y L, Hu C, Qu J H, et al. Efficient photodegradation of acid red B by immobilized ferrocene in the presence of UVA and  $H_2O_2$  [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 154(1 - 3): 146 - 152.
- [15] 丁春生, 秦树林, 郑遗凡, 等. 负载  $TiO_2$  光催化剂的制备表征及其降解效果[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(3): 431 - 436.
- [16] 崔玉民, 张文保.  $WO_3/TiO_2$  薄膜光催化降解 ARB 性能研究[J]. 稀有金属, 2008, 32(4): 489 - 492.
- [17] 李亚娟, 文晨. 新型纳米  $I - TiO_2$  催化降解酸性红 B 的研究[J]. 印染助剂, 2008, 25(7): 28 - 30.
- [18] Yang J, Zhang J, Zhu L W, et al. Synthesis of nano titania particles embedded in mesoporous SBA - 15: Characterization and photocatalytic activity [J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 137(2): 952 - 958.
- [19] Arpac E, Sayllkan F, Asiltürk M, et al. Photocatalytic performance of Sn - doped and undoped  $TiO_2$  nanostructured thin films under UV and vis - lights [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 140(1 - 2): 69 - 74.
- [20] 郝思秋, 陶红, 王璐, 等. 一种  $Ti/MCM - 22/MCM - 41$  复合材料及制备方法和应用[P]. 中国发明专利: ZL 200710045489.4 2010.5.19.
- [21] Mihályi R M, Lázár K, Kollár M, et al. Structure, acidity and redox properties of MCM - 22 ferrisilicate [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2008, 110(1): 51 - 63.