

TOPMODEL 地形指数的计算

吴波¹, 张万昌²

(1. 国际地球系统科学研究所, 江苏 南京 210093;

2. 中国科学院 大气物理研究所 东亚区域气候环境重点实验室, 北京 100029)

摘要: 地形指数是 TOPMODEL (topography index, 也称湿润指数, wetness index) 中一个重要的输入参数, 它把流域饱和和缺水, 变动产流面积的概念紧密联系起来。根据定义介绍了它的计算方法, 解决了坡度为零的栅格的处理以及河道造成的地形指数值偏大的问题。并以两河口流域 (2818 km²) 分辨率为 60 m 的数字高程模型栅格网为例生成地形指数, 配合相应的气象数据和水文资料, 在 TOPMODEL 中进行了径流日模拟, 效率在 70% 左右。

关键词: 地形指数; TOPMODEL; 数字高程模型 (DEM); 两河口

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2006)05-0049-04

中图分类号: TV121, P333

Calculation of Topography Index for the TOPMODEL

WU Bo¹, ZHANG Wan-chang^{1,2}

(1. International Institute of Earth System Science, Nanjing University,

Nanjing 210093, Jiangxi Province, China; 2. Key Laboratory of Regional Climate-Environment

Research for Temperate East Asia (RCE-TEA), Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Topography index (wetness index) is a crucial kind of input data, which links the saturation deficit of a basin with the conception of variable contributing area. According to the definition of topography index, procedures of calculating the index were presented. Solutions to problems of processing grids with zero slope degree and expurgated deviations induced by the involvement of channels in computation were introduced. The index was derived from the DEM of the Lianghekou Basin with a solution of 60 m in this method, and then imported into TOPMODEL with a suitable data set. The result of daily runoff simulation turns out to be acceptable with about 70% prediction precision.

Keywords: topography index; TOPMODEL; DEM; Lianghekou Basin

TOPMODEL (topography based hydrological model) 是一个以地形为基础的半分布式水文模型, 由 Beven 和 Kirkby 于 1979 年提出。其主要特征是利用流域地貌指数 ($\ln a / \tan \beta$) 来反映水文现象、特别是径流运动的分布规律^[1]。该模型的特点是物理意义明确, 参数比较少, 模型结果简单。

在模型提出后的 20 a 多时间里, TOPMODEL 及其理论在水文学领域得到了比较广泛的应用, 并且随着国内外学者对该模型的研究和应用, 该模型的理论及构造一直在改进和发展之中^[2]。其中地形指数作为 TOPMODEL 中一个至关重要的输入参数, 也引起了众多的关注。它最先是由 Kirkby 和 Weyman^[3], Beven 等考虑到土壤传导率在空间上的异质性, 而提

出了“土壤—地形指数”的概念, 其表达形式为 $\ln[a / (T_0 \tan \beta)]$, 在比较了地形指数成功指示饱和现象的分布的各种研究之后, 发现地形指数并非总是很好地预报这种现象^[4]。在地形指数计算方面, 国外比较系统的讨论见于 Quinn 等探讨了地形指数的生成和使用的方法^[5], 其它的学者大都探讨地形指数的意义和改进。在国内, 虽然 TOPMODEL 已经被接受和使用, 如刘清娥等把 TOPMODEL 与传统的模型作了比较, 并探讨了模型改进的可能^[6]。陈仁升等在黑河干流山区流域研究了使用较大分辨率的 DEM 生成地形指数输入模型的可能性^[7]。韩杰等研究了考虑气象要素在空间上的分异的内插方法在模型中的使用^[8]。但是对地形指数的计算方法讨论比较少,

收稿日期: 2006-04-25

修稿日期: 2006-06-18

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (2006CB400502), (2001CB309404); 中国科学院“百人计划”择优支持项目 (8-057493); 中国科学院大气物理所东亚区域气候环境重点实验室开放基金资助

作者简介: 吴波 (1982-), 男 (汉族), 四川遂宁市人, 硕士研究生, 主要从事 GIS 及其在水文学中的应用方面的研究。电话: 13912946793,

E-mail: bobby0506-cn@163.com。

通讯作者: 张万昌, 电话 (010) 62040678, E-mail: zhangwc@nju.edu.cn。

仅孔凡哲等讨论了多流向算法计算地形指数的问题^[9]。另一方面,尽管 Beven 等发布了一个地形指数的计算软件,但这个软件对 DEM 的限制导致它在实际应用中存在诸多不便。有鉴于此,本文试图从地形指数的生成方法和步骤的角度进行探讨,希望有利于模型的推广。

1 模型的理论

TOPMODEL 把土壤定义为 3 层,依次为:根系层(root zone)、不饱和层(unstaturated zone),以及完全饱和层(saturated zone)。根系层被看做是一个水库,反映地表植被截留水分的能力,表示用于蒸散发的水量。当根系层蓄水达到上限时,水分将继续下渗成为不饱和层和饱和层输入条件。当不饱和层含水量达到饱和含水量时,土壤中的水以自由水的形态存在,并在重力作用下运动。由于垂直排水以及流域内侧向水分运动,一部分流域面积上的地下水水位被抬高到地表成为饱和面,在这些面上会发生产流。而饱和面在降水过程中是不断变化的,这就是 TOPMODEL 变动产流的概念。

在满足模型三大假设的前提下,任意点 i 在地下水水位之下深度 z 与流域平均地下水深度 \bar{z} 关系为:

$$z = \bar{z} - \frac{1}{f} \left[\ln \frac{a_i}{\tan \beta_i} - \bar{\lambda} \right] \quad (1)$$

式中: $\bar{\lambda} = \ln(a_i/\tan \beta_i)$ 的均值。式(1)是 TOPMODEL 最为重要的方程。它把地形指数(topography index, 也称湿润指数,wetness index)与流域饱和含水量、变动产流面积的概念联系在了一起。

对于式(1),在模型实现及一些文献中,在地下水深为 z_i 处用土壤缺水深 S_i 来表达,其关系如下^[10]:

$$S_i = (\theta_s - \theta_r) z_i = V_\theta z_i \quad (2)$$

式中: θ_s ——饱和土壤中的含水量; θ_r ——土壤中剩余的含水量; V_θ ——被称为孔隙度(porosity)。由此,式(2)就变成:

$$S = \bar{S} - m \left(\ln \frac{a_i}{\tan \beta_i} - \bar{\lambda} \right) \quad (3)$$

式中: $m = V_\theta/f$,是一个相当敏感的参数。

由 TOPMODEL 的基本理论可见,壤中流和变动饱和区的计算都直接只与地形指数相干,故正确计算地形指数是保证模型模拟结果有效的一个重要基础。

2 地形指数计算的 2 条途径

2.1 从 DEM 生成地形指数

从 DEM 生成地形指数,一般有 2 种算法,即单流向算法与多流向算法。多流向算法又有 D_8 多流

向算法和 D_∞ 算法。 D_∞ 算法由 Tarboton 提出,认为水滴有可能向邻近的 8 个栅格中的任意方向流去而区别于 D_8 多流向算法,它的水流方向的可能性是无穷多的,故此得名。这种无穷可能的方向的得到,是基于认为水流方向应该是毗邻各个栅格点下坡方向的 8 个三角形中,坡度最陡的方向^[10-11]。

Wolock 提出了计算 TOPMODEL 中地形指数的不同算法:单流向方向算法(Single flow direction)和多流向方向算法(Multiple flow direction),并且使用不同的 DEM 数据,对不同的算法得到的均值和方差进行比较,均值上单流向方向算法小于多流向方向算法;方差上单流向方向算法大于多流向方向算法,若用 TOPMODEL 比较水文特性空间形式的模拟值与观测值的差异,多流向方向算法比单流向方向算法更好地表示空间特性;若使用 TOPMODEL 进行流速与流量模拟时,这 2 种方法同样适用^[12]。

考虑到本文中生成的 DEM 是使用 TOPMODEL 进行流量模拟,以及单流向方向算法的简单性,本文选择 D_8 单流向方向算法。

2.2 概念化估算

一些学者认为,模型关于地形与地下水之间的关系假设,无非是为了提供一个非线性流域贡献面积。为此,不通过 DEM 计算而概念化估计地形指数的方法也被采纳,这些研究通过假设地形指数的 γ 分布来表达流域内的水文相似性^[13-14]。这种做法的好处在于它对于物理实在的、简化的依赖性减弱了,而它的弱点则在于引入了新的参数,其客观意义被减弱^[15]。

3 研究区介绍以及数据准备

汉江上游地区位于秦岭南麓,是我国华中自然地理区的组成部分,具有北亚热带落叶阔叶林与常绿阔叶林—黄棕壤与黄褐土地带的自然综合特征。汉江由西向东横贯该区,从白河县出境,在区内全长 610 km,流域面积为 59 696 km²。流域内地貌条件复杂,气候变化多样,垂直差异明显,很适合进行径流模拟研究。本文选择位于汉江上游地区中部的两河口流域为研究区,其地理位置为陕南的中部地区,控制站点位于汉江支流子午河流域的两河口水文站(33°16'N,108°04'E),集水面积为 2 816 km²。海拔范围 360~2 960 m,平均气温变化在 7.7℃~15.7℃之间,常年降水变化在 730~1 230 mm 之间。土壤类型主要有黄褐土、黄棕壤、山地棕壤和冲积土、水稻土。植被可分为森林、野生植物和传统经济栽培作物,森林主要树种为华山松、油松和栎等^[15-16]。

模型驱动所需要的数据包括 1981—1985 年的气象数据和流量数据,以及地形数据。其中地形数据来源于研究区的 60 m 分辨率的 USGS 格式的 DEM。

4 地形指数由 DEM 生成

4.1 坡度 $\tan\beta$ 的生成

根据地形指数的定义,要分别求出每个栅格的坡度 $\tan\beta$ 和上游贡献面积 α 。坡度 $\tan\beta$ 的计算首先要找出落差最大的一个栅格,然后根据落差最大栅格与当前栅格的位置关系,确定坡度的计算。若该栅格在当前栅格的上、下、左、右任意一个方向上,则坡度为这 2 个栅格高程差与 DEM 分辨率之商;若该栅格在当前栅格的对角线上,则坡度为当前栅格与其对角线上该栅格的高程差除以 $\sqrt{2}$ 倍 DEM 分辨率的商值。

4.2 上游贡献面积 α 的计算

上游贡献面积 α 的定义为,该栅格的总上坡面积 A 与流向垂直方向的单位等高线长度 L 之商。由于当前栅格也应该纳入计算,所以有:

$$A = (N + 1) \times a \quad (4)$$

式中: N ——所有对当前栅格有贡献的上坡栅格数;
 a ——单位栅格的面积。

单位等高线长度 L 的计算要分 2 种情况,当流向垂直于栅格边时, L 与 DEM 分辨率相等;当流向沿对角线时, L 是 DEM 分辨率的 $\sqrt{2}$ 倍。

为了得到上游贡献面积 α ,只需要再求出对每个栅格有贡献的栅格数 N ,其计算分两步,第一步是计算各栅格的流向;第二步则是根据流向计算各个栅格的 N 值。

流向可以由已有的软件生成,不再详述,通常得到的流向是由 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128 这 8 个数代表的,其表示的方向如图 1 所示,根据图 1 的流向编码,可得到如图 2 的回溯方向编码。

32	64	128
16		1
8	4	2

图 1 水流方向编码

2	4	8
1		16
128	64	32

图 2 回溯方向编码

图 2 代表的意义是:如果当前栅格的左方、左下方、下方、右下方、右方、右上方、上方、左上方分别为 1, 128, 64, 32, 16, 8, 4, 2 的时候,则表示对应栅格的水会流向当前栅格。为计算出对每个栅格的总上坡

贡献栅格数目,本文根据图 2 的方向矩阵采用深度优先算法在 DEM 里从流域出水点沿流向向上回溯的办法进行计算。

4.3 计算 $\ln\alpha/\tan\beta$

在得到了各栅格的坡度和上游贡献面积之后,就可以根据地形指数的定义式 $\ln\alpha/\tan\beta$ 来计算了。在计算过程中要有可能会碰到坡度值为 0 的情况;通常的处理方法是把这个点去掉不算,认为此点对产流贡献不大。然而事实上平坦的地区也是产流的,而且这样的处理方法也增加了模型的误差。

为此,本文对坡度为 0 点的处理方法是,用该栅格最毗邻的坡度非零栅格中坡度值最小的那个值来代替当前栅格的坡度值。

$\ln\alpha/\tan\beta$ 的计算步骤为:(1) 以逐次递增一个栅格的搜索范围在当前栅格周围的 8, 16, 32……的范围内搜索,直到找到至少一个非零的栅格点;(2) 找出搜索出的坡度非零栅格点中最小坡度;(3) 把最小坡度值取代当前栅格点的坡度。

除此之外,还要进一步排除河道的干扰。如果一个栅格,在一种阈值条件下是包含河道的,却被当做并不包含河道的集水区,则地形指数值较大的栅格数就会增加,地形指数的分布曲线将向值较高的一端偏移,最终造成地形指数的平均值增大。这通过设定河道阈值(CIT)来确定^[5]。通过这个阈值来判断一个栅格是否包含河道;若一个栅格的上游贡献面积大于 CIT,则可以认为有河道从这个栅格流过,那么这个栅格就不被认为是一个集水区,它的地形指数不用计算;而对那些上游贡献面积小于 CIT 的栅格,则认为它没有包含河道,可以作为集水区,其地形指数的计算不会导致最终的指数值偏高。

由于 CIT 的值与分辨率和流域大小都有关系,所以目前没有自动的方法来确定。根据 Beven 的建议^[1,15],本文采用了半手工的方法设定河道阈值,确定出来的 CIT 为 0.07 km²。所有上游贡献面积大于该阈值处的栅格都被认为是河道,并不计算其地形指数值。最后计算得出的地形指数结果如附图 3 所示。

5 模型运行结果

把计算出来的地形指数输入 TOPMODEL 中,以确定性系数为评价标准^[17],在 1981—1983 年期间用实测流量数据率定后结果如表 1 所示,率定期精度为 74.6%,结果如图 3 所示。

在保持模型参数不变的前提下,将 1984—1985 年的气象数据输入模型,在校验期模型运行精度为 67%,得到的结果如图 4 所示。

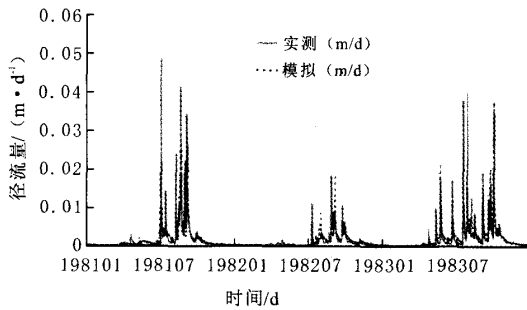


图 3 TOPMODEL 在率定期的模拟结果

表 1 TOPMODEL 在两河口率定期的参数值

参数	描述	单位	率定结果
m	土壤孔隙尺度	m	0.009 5
T_0	饱和导水率	m^2/d	2.000 0
$S_{R_{max}}$	根层最大缺水深	m	0.020 0
S_{R_0}	根层初始含水量	m	0.000 2

6 结 论

地形指数作为 TOPMODEL 中一个重要的输入参数,对于降水的响应是重要的。本文对坡度为零处栅格的处理和对河道对地形指数的干扰的处理,从两河口流域的模拟结果看,从率定期和校验期的精度来看,都是可接受的,因而可推断这种对地形指数的处理方法是可行的。然而令人遗憾的是,由于实际土壤水分图不可获取,使得地形指数的计算结果不能够得到直接的检验,只能够从模拟结果间接推断其合理性。由于本文所采用的地形指数计算方法并没有考虑到地表情况,如植被、土壤渗透率等的差异,今后的工作,在于依据考虑地表的植被覆盖情况、土壤渗透率等在空间分布上的差异,以期更好地表达自然界的陆地水文过程。

[参 考 文 献]

- [1] Beven K J, Kirkby M J. A physically based variable contributing area model of basin hydrology Hydrol[J]. Sci. Bull, 1979,24(1):43—69.
- [2] Zhang W C, Li X, Cheng G D, et al. An experimental study of TOPOMODEL on a small mountainous watershed in Northwestern China. Proceedings on Science and Technology Conference between Mainland China and Chinese Taipei, 2002. 26—35.
- [3] Kirkby M J. Hydrograph modelling strategies[M]. in: Peel R, Chisholm M, Haggett P. Process in Physical and Human Geography, Heinemann, London. 1975, 69—90.
- [4] Beven K J. Linking parameters across scales: surgrid, pa-

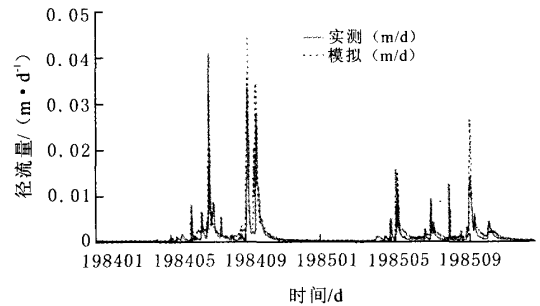


图 4 TOPMODEL 在校验期的模拟结果

- rameterisations and scale dependent hydrological models [J]. Hydrol Process, 1995(9):507—525.
- [5] Quinn P F, Beven K J, Lamb R. The $\ln(a/\tan)$ index: how to calculate it and how to use it in the TOPMODEL framework[J]. Hydrol Process, 1995(9):161—182.
- [6] 刘青娥, 复军, 王中根. TOPMODEL 模型几个问题的研究[J]. 水电能源科学, 2003(21):41—44.
- [7] 陈仁升, 康尔泗, 杨建平, 等. TOPMODEL 模型在黑河干流出山径流模拟中的应用[J]. 中国沙漠, 2003(23): 428—434.
- [8] 韩杰, 张万昌, 赵登忠. 基于 TOPMODEL 的黑河水资源探讨[J]. 农村生态研究, 2004(20):16—20.
- [9] 孔凡哲, 芮孝芳. TOPMODEL 中地形指数计算方法的探讨[J]. 水科学进展, 2003(14):41—45.
- [10] Keith Beven. Rainfall-runoff Modelling[M]. England: John Wiley&Sons, 2001.
- [11] Tarboton D G. A New Method for the Determination of Flow Directions and Contributing Areas in Grid Digital Elevation Models[J]. Water Resources Research, 1997, 33(2):309—319.
- [12] Wolock D M. Simulating the variable source area concept of stream flow generation with the watershed model TOPMODEL[R]. US Geol Surv Water Resour InvestRep, 1993. 93—4124.
- [13] Franchini M, Wendling J, Obled Ch, Todini E. Some notes about the TOPMODEL sensitivity to basin topography[J]. J. Hydrol., 1996, 175:293—338.
- [14] Sivapalan M, Wood E F, Beven K J. On hydrological similarity: 3. A dimensionless flood frequency distribution [J]. Wat. Resour. Res. 1990, 26:43—58.
- [15] Beven K J. TOPMODEL: a critique, Hydrol. Process., 1997, 11(9):1069—1086
- [16] 中国自然资源丛书编辑委员会. 中国自然资源丛书. 陕西卷[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1995. 3—6.
- [17] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models[J]. J Hydrol, 1970, 10:282—290.

TOPMODEL地形指数的计算

作者: [吴波](#), [张万昌](#), [WU Bo](#), [ZHANG Wan-chang](#)
作者单位: [吴波, WU Bo\(国际地球系统科学研究所, 江苏, 南京, 210093\)](#), [张万昌, ZHANG Wan-chang\(中国科学院, 大气物理研究所, 东亚区域气候环境重点实验室, 北京, 100029\)](#)
刊名: [水土保持通报](#) **ISTIC** **PKU**
英文刊名: [BULLETIN OF SOIL AND WATER CONSERVATION](#)
年, 卷(期): 2006, 26(5)
被引用次数: 2次

参考文献(17条)

1. [Beven K J; Kirkby M J A physically based variable contributing area model of basin hydrology Hydrol 1979\(01\)](#)
2. [Zhang W C; Li X; Cheng G D An experimental study of TOPMODEL on a small mountainous watershed in Northwestern China 2002](#)
3. [Kirkby M J Hydrograph modelling strategies 1975](#)
4. [Beven K J Linking parameters across scales: surgrid, parameterisations and scale dependent hydrological models 1995\(09\)](#)
5. [Quinn P F; Beven K J; Lamb R The ln\(a/tan\) index: how to calculate it and how to use it in the TOPMODEL framework \[外文期刊\] 1995\(09\)](#)
6. [刘青娥; 夏军; 王中根 TOPMODEL模型几个问题的研究 \[期刊论文\]-水电能源科学 2003\(2\)](#)
7. [陈仁升; 康尔泗; 杨建平 TOPMODEL模型在黑河干流出山径流模拟中的应用 \[期刊论文\]-中国沙漠 2003\(4\)](#)
8. [韩杰; 张万昌; 赵登忠 基于TOPMODEL的黑河水资源探讨 \[期刊论文\]-农村生态研究 2004\(20\)](#)
9. [林凡哲; 芮孝芳 TOPMODEL中地形指数计算方法的探讨 \[期刊论文\]-水科学进展 2003\(1\)](#)
10. [Keith Beven Rainfall-runoff Modelling 2001](#)
11. [Tarboton D G A New Method for the Determination of Flow Directions and Contributing Areas in Grid Digital Elevation Models \[外文期刊\] 1997\(02\)](#)
12. [Wolock D M Simulating the variable source area concept of stream flow generation with the watershed model TOPMODEL 1993](#)
13. [Franchini M; Wendling J; Obled Ch; Todini E Some notes about the TOPMODEL sensitivity to basin topography 1996](#)
14. [Sivapalan M; Wood E F; Beven K J On hydrological similarity: 3. A dimensionless flood frequency distribution 1990](#)
15. [Beven K J TOPMODEL: a critique \[外文期刊\] 1997\(09\)](#)
16. [《中国自然资源丛书》编辑委员会 中国自然资源丛书·陕西卷 1995](#)
17. [Nash J E; Sutcliffe J V River flow forecasting through conceptual models 1970](#)

引证文献(2条)

1. [黄晴; 张万昌 地形指数算法设计对分布式水文模型径流模拟影响研究 \[期刊论文\]-水电能源科学 2008\(6\)](#)
2. [史玉品; 刘兴盛; 刘龙庆; 张防修 Topmodel在故县水库入库流量预报中的应用 \[期刊论文\]-水资源与水工程学报 2013\(3\)](#)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_stbctb200605013.aspx