

地形指数若干计算方法探讨

解河海 ,黄国如

(河海大学水资源环境学院 ,江苏 南京 210098)

摘要 :根据地形指数的物理意义 ,论述了 3 种地形指数 $\ln(a/\tan\beta)$ 的计算方法 :单流向法、多流向法和改进的多流向法 .在对它们进行较为深入分析的基础上 ,着重检验了改进的多流向法的计算效果 .研究表明 ,改进的多流向法更加符合地形指数的物理意义 ,可以更好地反映地形对流域汇流的影响 ,为地形指数的计算提供更可靠的依据 .

关键词 :地形指数 ;TOPMODEL ;单流向法 ;多流向法 ;改进的多流向法

中图分类号 :P338 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980(2006)01-0046-05

Beven 等^[1]于 1979 年提出了一种基于地形指数^[2]的分布式流域水文模型 ,即 TOPMODEL(a topography based hydrological model).地形指数提出以来 ,已在水文模拟中得到了广泛应用 ,并成为一些以地形指数为基础的流域水文模型的重要参数^[3-5].在早期应用 TOPMODEL 时 ,常利用等高线地形图并采用人工方法计算 $\ln(a/\tan\beta)$ 指数 .随着栅格 DEM 的出现 ,该计算过程的自动化已成为可能 .地形指数的计算方法数以十计 ,但目前普遍采用单流向法和 Quinn 等^[6]提出的基于 D8 方法的多流向法 .一般而言 ,不同计算方法所得 $\ln(a/\tan\beta)$ 指数分布并不完全相同 .文献 [7] 对多流向法在计算 $\ln(a/\tan\beta)$ 指数时存在的问题进行了分析 ,并提出了具体的改进方法 ,即改进的多流向法 .本文在对单流向法、多流向法和改进的多流向法进行阐述的基础上 ,以 4 个研究流域为例 ,比较了 3 种不同方法所得地形指数的计算结果 ,并着重验证了经过改进的多流向法的计算效果 .

1 地形指数的计算方法

在早期 ,一般以等高线及与等高线正交的流线将流域划分为众多的坡面单元 ,然后分别计算每个坡面单元的地形指数^[1].目前已广泛使用 DEM 技术计算地形指数的空间分布 .但无论采用何种方法计算地形指数 $\ln(a/\tan\beta)$,都要分别计算 a 和 $\tan\beta$,然后才能得到 $\ln(a/\tan\beta)$.其中 a 为流经坡面任一点 i 处单位等高线长度的汇水面积 , $\tan\beta$ 为该点处的坡度 .计算 a 时首先应对径流路径进行分析 ,从而确定进入一个网格单元的总上坡面积 A 以及与流向垂直的有效等高线长度 L ,并计算 $a = A/L$.坡度 $\tan\beta$ 也应根据以上分析得到的径流路径进行计算 .

1.1 单流向法

单流向法计算比较简单 ,通常假定有效的等高线长度等于单元网格长度 ,而坡度即为顺坡方向的最大坡度 ,其中 a 定义为

$$a = \frac{A}{L} \tag{1}$$

式中 : A ——进入一个网格单元的总上坡面积 ; L ——有效等高线长度 ,也就是单元网格长度 .坡度定义为

$$\tan\beta = \frac{\Delta h}{\Delta l} \tag{2}$$

式中 : Δh ——相邻栅格间的高程差 ; Δl ——相邻栅格中心的距离 ,主方向 Δl 等于单元网格长度 ,对角线方向 Δl 等于 $\sqrt{2}$ × 单元网格长度 .

收稿日期 :2005-04-11
基金项目 :国家自然科学基金资助项目(50309002) ;水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放基金资助项目(2005)
作者简介 :解河海(1978—) ,男 ,河南商丘人 ,硕士研究生 ,主要从事流域水文模拟及水文预报研究 .

1.2 多流向法

多流向法是将任一单元的累计上坡面积 A 分配到所有的顺坡方向, 目前普遍使用的方法为 Quinn 等^[6]提出的 D8 计算方法. 将所有方向分为主方向和对角方向, 累计面积可以汇集到 8 个流向, 每一个流向的累计面积是通过等高线长度加权得到的. 图 1(a)为某个单元网格的流向图, 图 1(b)为相应于该单元网格的有效等高线图, 其中的数字表示高程值, K_i ($i = 1, 2, 3$) 为与入流方向垂直的等高线长, L_j ($j = 1, 2, 3, 4$) 为与出流方向垂直的等高线长, 它们的取值取决于流向, 主方向权重为 0.5, 对角方向的权重为 0.35. 此外, 进入每一个顺坡方向的累计面积 A_j 与该方向的坡度成比例, 故坡度较大的方向将得到较多的累计面积. 累计面积 A_j 定义为

$$A_j = A \frac{L_j \tan \beta_j}{\sum_{j=1}^n (L_j \tan \beta_j)} \quad (3)$$

根据多流向法的思想, 其有效等高线长度 L 应为

$$L = \sum_{j=1}^n L_j \quad (4)$$

式中 n 为出流方向的总数. 单位有效等高线长度的汇水面积 a 也可由式 (1) 计算得到.

假定该单元网格的坡度为各顺坡方向坡度的加权平均, 则有

$$\tan \beta = \frac{\sum_{j=1}^n (L_j \tan \beta_j)}{\sum_{j=1}^n L_j} \quad (5)$$

则

$$\frac{a}{\tan \beta} = \frac{A}{\sum_{j=1}^n (L_j \tan \beta_j)} \quad (6)$$

所以该网格的地形指数为

$$\ln \left(\frac{a}{\tan \beta} \right) = \ln \left[\frac{A}{\sum_{j=1}^n (L_j \tan \beta_j)} \right] \quad (7)$$

1.3 改进的多流向法

地形指数 $\ln(a/\tan \beta)$ 不仅反映了径流在任一位置上的累积趋势(以 a 表示), 而且也反映了重力使径流顺坡移动的趋势(以 $\tan \beta$ 表示). 对欲计算 $\ln(a/\tan \beta)$ 指数值的网格单元来讲, 前者针对径流流入情况, 后者针对径流流出情况. 因此, 计算 a 值时所用的有效等高线应为垂直于入流方向的等高线, 而不是计算 $\tan \beta$ 所用的等高线^[7]. 故式 (3) 利用 L_j 计算出有效等高线长度 L 是不合理的, 会导致计算出的 a 也不合理, 应改为

$$a = \frac{A}{\sum_{i=1}^m K_i} \quad (8)$$

式中 m 为入流方向的总数. 据式 (8), 式 (6) 应写为

$$\frac{a}{\tan \beta} = \frac{A}{\sum_{j=1}^n (L_j \tan \beta_j)} \frac{\sum_{j=1}^n L_j}{\sum_{i=1}^m K_i} \quad (9)$$

则

$$\ln \left(\frac{a}{\tan \beta} \right) = \ln \left[\frac{A}{\sum_{j=1}^n (L_j \tan \beta_j)} \right] + \ln \left(\sum_{j=1}^n L_j \right) - \ln \left(\sum_{i=1}^m K_i \right) \quad (10)$$

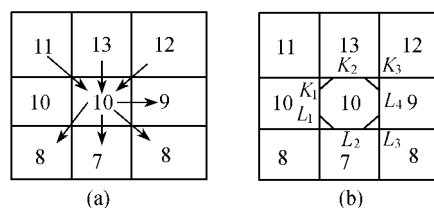


图 1 多流向径流分配方法

Fig.1 Multiple flow direction algorithm for runoff distribution

改进的多流向法所得到的地形指数比多流向法多了一项,即 $\ln(\sum_{j=1}^n L_j / \sum_{i=1}^m K_i)$. 文献[4]通过分析得出如下结论:进、出欲计算 $\ln(a/\tan\beta)$ 的单元网格的径流方向数 m 和 n 差别越大,则计算的结果差值就越大. 最大差值出现在以下2种情况:径流从1对角流入、从其他7个方向流出以及从7个方向流入、从1对角流出.在这2种极端情况下,由 L_j 计算的 a 值与由 K_i 计算的 a 值之比分别为8.71和1/8.71,计算出的 $\ln(a/\tan\beta)$ 值相差2.16. 文献[7]仅对单点地形指数进行了计算,并分析了2种极限情况下的地形指数的差异.但对于整个流域而言,地形指数出现最大差值的概率较小.改进的多流向法对 $\ln(a/\tan\beta)$ 分布的影响究竟如何,值得探讨.

2 计算实例

选用4个具有不同气候、地形特点的代表性流域(表1)对上述3种方法进行比较研究.将单流向法、多流向法及改进的多流向法应用于以上4个研究流域,得到的地形指数的特征值见表2.

表1 研究流域基本情况

Table 1 Basic characteristics for studied basin

流域名称	流域面积/ km ²	DEM 栅格 大小/m	栅格 数目	流 域 特 性
Slapton	0.94	20	51×71	英国小实验流域,湿润地区,植被良好,年平均降雨量 1 035 mm
星丰	42.00	25	313×324	东江流域的子流域,湿润地区,植被良好,年平均降雨量 1 865 mm
连平	38.10	25	299×329	东江流域的子流域,湿润地区,植被良好,年平均降雨量 2 085 mm
岔巴沟	205.00	50	442×368	黄河流域的子流域,半干旱地区,流域侵蚀,年平均降雨量 450 mm

表2 不同方法所得到的研究流域地形指数 $\ln(a/\tan\beta)$ 的特征值

Table 2 Characteristic values of topographic index $\ln(a/\tan\beta)$ for studied basin obtained from three methods

流域名称	Slapton			星丰			连平			岔巴沟		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
单流向法	15.92	3.62	7.23	23.05	3.04	7.60	20.65	1.55	7.01	24.07	0.94	7.96
多流向法	16.95	4.68	7.74	23.91	3.43	8.18	21.84	2.73	7.58	25.11	0.73	8.30
改进的多流向法	14.79	4.71	7.68	21.93	3.43	8.14	20.08	2.79	7.55	23.21	0.73	8.26

从表2可以看出,在所有4个研究流域中,采用改进的多流向法所得到的地形指数的最大值比单流向法和多流向法的要小,均值比单流向法计算结果要大,但略低于多流向法,最小值与多流向法较为接近.除了岔巴沟流域外,最小值比单流向法大.之所以出现以上结果,可以从地形指数的物理意义加以解释.改进的多流向法的地形指数比多流向法多了一项,即 $\ln(\sum_{j=1}^n L_j / \sum_{i=1}^m K_i)$. 地形指数的高值区域通常位于河道网格中,一般情况下河道网格的入流方向个数大于出流方向个数,即 $\sum_{j=1}^n L_j < \sum_{i=1}^m K_i$,所以用改进的多流向法得到的地形指数的最大值往往小于多流向法的最大值.另一方面,地形指数的低值区域通常出现在流域的上游部分或者流域的边界处,在此区域内的大部分网格可能从单一方向流入而从多个方向流出该网格单元,即 $\sum_{j=1}^n L_j > \sum_{i=1}^m K_i$,所以用改进的多流向法得到的地形指数的最小值一般会大于多流向法的最小值.地形指数的平均值是通过对流域上各个网格点的计算结果取算术平均得到的.在上坡累计面积 A 不变的情况下,单位等高线长度的汇水面积 a 仅与垂直于流向的有效等高线长度有关,单流向法的有效等高线长度为单元网格长度,而多流向法的有效等高线长度为与各出流方向垂直的有效等高线长度之和,改进的多流向法的有效等高线长度为与入流方向垂直的有效等高线长度之和;单流向法取最大坡度方向计算坡度 $\tan\beta$,而多流向法和改进的多流向法皆采用各个顺坡方向坡度的加权平均值来计算 $\tan\beta$.由于上述原因,这些网格点上的地形指数的计算结果难以判定.

对于含河道的网格,由于其汇水面积包含了河岸两边坡面的汇流面积以及该网格以上的汇流面积,如不对河道网格做一定的处理,将会增加流域的平均地形指数以及地形指数高值部分的网格数,从而使地形指数

的分布函数发生变化^[8-9]. 为了消除河道网格对地形指数分布函数的影响,将生成河道的起始临界值作为 A_{CT} 上限值. 汇水面积大于该上限值的网格被定义为河道,对应的汇水面积取为起始临界值. 但起始临界值究竟取多大较为合适,至今尚无统一论. 本文利用地形指数的平均值与之建立相关关系并分析了 A_{CT} 的取值,计算结果见图 2. 该图给出了星丰和连平 2 个流域的地形指数的平均值随 A_{CT} 变化的曲线. 从中可以看出,当 A_{CT} 达到 4 km^2 时,随着 A_{CT} 的增加,地形指数的平均值达到一个比较稳定的值. 该 A_{CT} 值可能为最佳的起始临界值. 此时星丰和连平 2 个流域的地形指数的平均值分别为 8.182 和 7.583,和改进多流向法的计算结果相似.

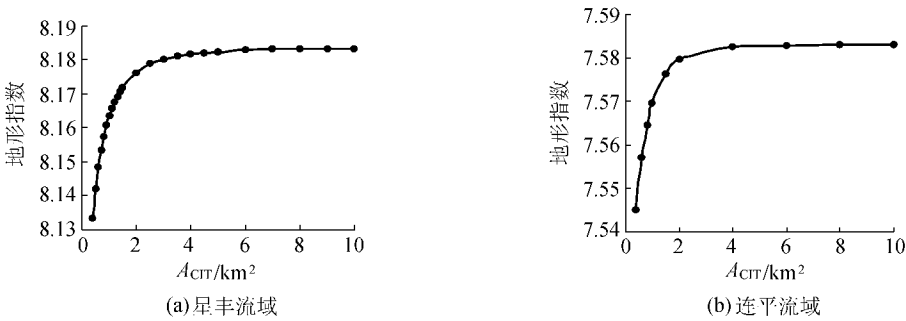


图 2 由不同的 A_{CT} 所得到的地形指数的平均值曲线

Fig.2 Average topographic index $\ln(a/\tan\beta)$ value for each A_{CT}

3 种计算方法所得到的地形指数频率分布如图 3 所示. 从图 3 可以看出 3 种方法所得到的地形指数频率分布高值区变化趋势是相似的,单流向法和多流向法计算的高值较大,改进的多流向法的高值减小,单流向法计算的频率分布曲线的高值部分有起伏,3 种方法所得的低值部分的计算结果有些差异,而单流向法的低值部分偏高.

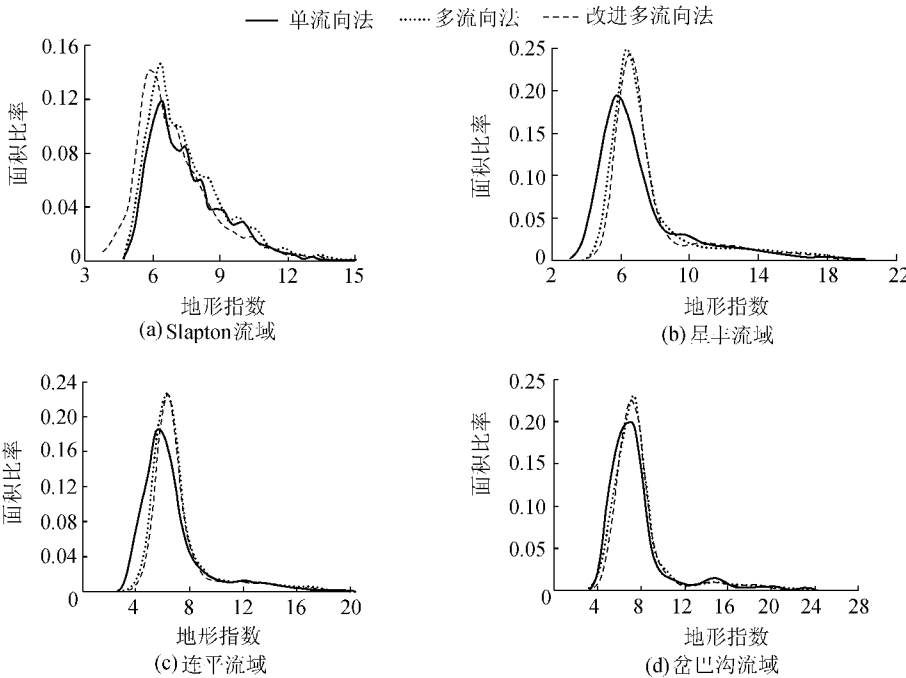


图 3 4 个研究流域地形指数 $\ln(a/\tan\beta)$ 的概率密度分布曲线

Fig.3 Probability density distribution curve of topographic index $\ln(a/\tan\beta)$ for four studied basins

3 结 论

单流向法和多流向法为目前较为常用的 2 类地形指数计算方法. 文献 [7] 从地形指数的物理意义出发,充分考虑了上坡汇流的等高线和顺坡的有效等高线的差异,采用了经过改进的多流向法进行地形指数的计算,得到了更加符合地形指数物理意义的计算方法. 本文以 4 个具有不同气候和地形条件的研究流域为例,

采用3种地形指数计算方法进行了比较分析.计算结果表明:多流向法与改进的多流向法的频率曲线较为相似,但现行多流向法的高值部分稍大,可能是河道影响的结果.2种多流向法的低值部分相差不大.

改进的多流向法更好地反映了地形对流域汇流的影响,为地形指数的计算提供了更可靠的依据.

参考文献:

- [1] BEVEN K, KIRKBY M J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology[J]. Hydrological Science Bulletin, 1979, 24(1): 43-69.
- [2] QUINN P F, BEVEN K J, LAMB R. The $\ln(a/\tan\beta)$ index: how to calculate it and how to use it within the TOPMODEL framework[J]. Hydrological Processes, 1995, 9: 161-182.
- [3] O'LOUGHLIN E M. Predictions of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis[J]. Water Resources Research, 1986, 22(5): 794-804.
- [4] IBBITT R, WOODS R. Re-Scaling the topographic index to improve representation of physical processes in catchment models[J]. Journal of Hydrology, 2004, 293: 205-218.
- [5] BARLING R D, MOORE L D, GRAYSIN R B. A quasi-dynamic wetness index for characterizing the spatial distribution of zones of surface saturation and soil water content[J]. Water Resources Research, 1994, 30(4): 1029-1044.
- [6] QUINN P, BEVEN K J, PLANCHON O. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models[J]. Hydrological Processes, 1991, 5(1): 59-79.
- [7] 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(1): 41-45.
- [8] QUINN P F, BEVEN K J, LAMP R. The $\ln(a/\tan\beta)$ index: how to calculate it and how to use it within the TOPMODEL framework[J]. Hydrological Processes, 1995, 9(2): 161-182.
- [9] 邓慧平, 李秀彬. 地形指数的物理意义分析[J]. 地理科学进展, 2002, 21(2): 103-110.

Some calculation methods for topographic index

XIE He-hai, HUANG Guo-ru

(College of Water Resources and Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Three calculation methods for topographic index $\ln(a/\tan\beta)$, i. e. the single flow direction algorithm, the multiple flow direction algorithm, and the improved multiple flow direction algorithm, were discussed according to the physical meaning of topographic index, with focus placed on the effect of the improved multiple flow direction algorithm. The result shows that the improved multiple flow direction algorithm accords much better with the physical meaning of topographic index, and can reflect the impact of topography on flow concentration of river basins. The method provides a more reliable basis for topographic index calculation.

Key words: topographic index; TOPMODEL; single flow direction algorithm; multiple flow direction algorithm; improved multiple flow direction algorithm