

水流分配策略随下坡坡度变化的多流向算法

秦承志¹, 李宝林¹, 朱阿兴^{1,2}, 杨 琳³, 裴 韬¹, 周成虎¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101; 2. Department of Geography, University of Wisconsin Madison, Madison, WI 53706, USA; 3 北京师范大学地理与遥感科学学院, 北京 100875)

摘要: 提出了一种新的多流向算法方法(MFD_{fg}), 其基本思想是水流分配策略应在空间上随着与下坡坡度相关的地形参数而变, 从而地形对水流分配的影响可以得到合理、有效的建模。比较分析表明, MFD_{fg} 采用以最大下坡坡度的线性函数对水流分配进行加权, 是较好的水流分配策略。应用实验表明, 与目前具代表性的单流向算法与多流向算法相比, MFD_{fg} 方法的结果可获得更合理的汇流面积。

关键词: 数字高程模型; 多流向算法; 水流分配策略; 下坡坡度

中图分类号: P338.9 文献标识码: A 文章编号: 1001-6791(2006)04-0450-07

流向的确定是地形分析的重要内容之一, 在分布式水文模型、流域特征提取、地形学、土壤侵蚀等研究中起着关键性的作用^[1~5]。流向的确定是基于一条基本假设, 即局域的水力坡度可用局域地形坡度进行估计^[2,6]。因此流向算法的设计与计算均以数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)作为数据源。栅格 DEM 由于其邻域结构整齐一致、算法容易实现、计算速度快等特点^[1,7], 在数字地形分析中得到了广泛的应用。自 20 世纪 80 年代以来, 出现了众多基于栅格 DEM、通过 3×3 邻域像素的高程值进行判断的流向算法^[1,5,8~10]。本文在前人研究的基础上, 提出一种新的多流向算法方法, 并在应用中予以检验。

1 流向算法的分类

根据所采用的流向模型是否使得每个像素点至多只有一个流向, 流向算法可分为两大类^[11]: 单流向算法(Single Flow Direction algorithm, SFD)和多流向算法(Multiple Flow Direction algorithm, MFD)。

1.1 单流向算法

D8 算法是最早出现的经典 SFD^[8], 其设计思想是水全部流向 8 邻域中处于最陡下坡方向上的那个像素, 这也是此后出现的多种单流向算法的基本出发点^[12~19]。

SFD 适于模拟水流在沟谷等地形中的汇流机制, 用于提取河网时有较好的效果^[9,20], 因其模型简单、应用方便而得到了广泛的应用。但 SFD 不适合于模拟在坡面上水流漫散流动的情况^[9], 其计算结果中经常出现大量不合理的平行流现象^[1,14]。

1.2 多流向算法

为解决 SFD 不适于模拟实际表面(尤其是漫散型表面)水流的问题, MFD 开始出现, 其基本水流分配策略以坡度加权为基础^[9,10], 可概括为

$$d_i = \frac{(\tan\beta_i)^p \times L_i}{\sum_{j=1}^8 (\tan\beta_j)^p \times L_j} \quad (1)$$

式中 d_i 为水流对第 i 号邻域像素的分配比例; $\tan\beta$ 为坡度; p 为水流分配权重; L_i 为对第 i 号邻域像素的等

收稿日期: 2005-01-10; 修订日期: 2005-03-29

基金项目: 中国科学院“百人计划”项目; 美国农业部资助项目(695F48900186); 国家自然科学基金资助项目(40501056, 40101028); 中国科学院地理科学与资源研究所创新项目(CXI0G-D02)

作者简介: 秦承志(1977-), 男, 山东蒙阴人, 博士后, 主要从事数字地形分析研究。E-mail: qincz@leis.ac.cn

高线长度加权因子, 定义为

$$L_i = \begin{cases} \frac{1}{2}, & \text{第 } i \text{ 号邻域像素高程低于中心像素, 且位于水平或垂直方向} \\ \frac{\sqrt{2}}{4}, & \text{第 } i \text{ 号邻域像素高程低于中心像素, 且位于对角线方向} \\ 0, & \text{第 } i \text{ 号邻域像素高程不低于中心像素} \end{cases} \quad (2)$$

MFD 的水流分配策略直接取决于 p 的选取。 p 值越大, MFD 所模拟的情况越类似于 SFD。实际上, SFD 所模拟的情况可视为 MFD 在极端情况($p \rightarrow +\infty$)时的特例^[21]。根据所采用的多方向水流分配策略, 现有 MFD 方法可大致概括为以下三类:

(1) p 值固定的单一水流分配策略 最初的 MFD 均采用式(1)所示的模型, 其差别仅在于 p 取值不同^[9, 10, 21]。其问题在于将一种固定的水流分配策略应用于所有地形, 忽略了地形特征对水流分配的不同作用。Moore 等以汇流面积阈值区分汇流地形或漫散流地形, 分别采用 SFD 和 MFD^[22], 但其水流分配策略仍显武断, 且由 MFD 向 SFD 的转变会导致计算出的汇流面积频率的无规律分布^[1], 同时汇流面积阈值的确定具有很强的经验性。

(2) p 值随汇流面积变化的水流分配策略 为考虑不同地形条件下水流分配的不同, Quinn 等^[23]首先按 Quinn 等^[10]方法计算汇流面积, 确定汇流面积阈值, 将 p 值变为随汇流面积而变化的函数:

$$p = (A / thresh + 1)^h \quad (3)$$

式中 A 为待计算像素的汇流面积; $thresh$ 为应用区域的汇流面积阈值; h 为一个正的经验常数, 其值越大则表明由 MFD 向 SFD 过渡的速度越快。因此 $thresh$ 和 h 值两个值的选取都会影响流向结果。Quinn 等^[23]和 Moore 等^[22]的思路启发了其后研究者将 MFD 与 SFD 相结合, 关注于如何根据汇流面积确定 p 值, 如 MFD-D8 方法^[24]和 SDFAA 方法^[25]。采用此类可变水流分配策略的现有各种 MFD 方法均基于汇流面积阈值的使用, 首先需以经典流向方法确定流向、计算汇流面积, 认为这样得到的汇流面积充分反映了地形对水流分配的影响, 这一假设削弱了现有此类方法的合理性。此外, 不同流向方法计算出的汇流面积可有很大差别^[26], 将会对结果的准确性产生影响。

(3) 由局域地形特征决定的混合式水流分配策略 Pilesjo 等^[27, 28]建立的基于局域形态的 MFD 方法分析 8 邻域像素的高程值所反映的凸凹形态, 区分邻域中所有可能被分配水流的独立单元(称为 Form), 依据 Form 涉及的像素数目决定此 Form 是以单流向或多流向模拟。由于微小的 DEM 误差可能完全改变 Form 的凸凹类型, 此方法对 DEM 的数据质量十分敏感。

三类 MFD 方法均存在明显的不足, 但 MFD 模型能较好地模拟水流在坡面等地形上的漫散流动, 其水流向周围所有低高程方向分配的思想较单流向法而言, 物理意义明确^[29], 更符合流向的实际情况。应用研究也表明, 在计算一些重要的水文学特征(如汇流面积、地形指数等)准确的空间模式时, MFD 明显优于 SFD 法^[9, 26, 30]。此外, MFD 的水流分配模型中可变的水流分配权重 p 也使得拓广其对于复杂地形的适用范围成为可能。

本文提出了一种水流分配策略随着地形而改变的 MFD 方法——MFD-fg, 以更合理地模拟地形变化对水流分配的影响, 并兼顾 SFD 与 MFD 的适用范围。对如何选择反映地形变化的指标、如何对应不同的地形特征确定水流分配策略以及应用效果的检验进行了研究。

2 采用可变水流分配策略的多流向算法(MFD-fg)

2.1 MFD-fg 的基本思想

水流分配权重 p 值可变的水流分配策略使得地形因素对水流分配的决定性作用可能在 MFD 模型中得到体现。若利用直接反映局域地形变化的地形特征 e 建立水流分配函数 $f(e)$ 取代值 p , 可避免现有方法存在的问

题, 且具有比较明确的物理意义。我们将此方法称为 MFD-fg 方法(“-fg”代表 function of gradient)。

MFD-fg 方法有两方面关键问题: 地形特征 e 的选取以及水流分配函数 $f(e)$ 的确定。

2.2 选择地形特征 e

对地形特征 e 的选取需满足两条标准: 首先应能反映对水流分配变化有明显物理意义的地形特征; 其次, 其空间分布应比较平滑, 不应有过多强烈的突变现象。

在不同的地形特征下, 水流的分配比例变化很大: 当下坡坡度较陡时, 水流更易于从具有最大高程落差的方向迅速排出, 即更加倾向于 SFD 所模拟的情况; 而在下坡坡度较小时, 水流则更可能向周围各个高程较低的方向进行分配。因此下坡坡度对于水流分配具有明显的控制性作用。

与下坡坡度直接相关且可能对水流分配有明显作用的地形特征至少有 4 个: 坡度、最大下坡坡度、最小下坡坡度和平均下坡坡度。以实际 DEM 计算这 4 个地形特征, 以比较何者最适合作为地形特征。

实验区选自东北嫩江流域中一个典型的小流域地形(面积约为 $1.15 \text{ km} \times 1.5 \text{ km}$), 地形总体较平缓, DEM 分辨率为 10 m (图 1)。4 个地形特征的空间分布计算结果显示: 最小下坡坡度的空间分布图像最为杂乱, 最大下坡坡度、平均下坡坡度和坡度三者的空间分布比较类似, 但平均下坡坡度和坡度的图像中都有不少很明显的突变线存在, 而最大下坡坡度空间分布的变化则明显平滑, 极少有强烈的突变, 与 DEM 反映出的地形起伏相吻合(图 2)。因此, 取最大下坡坡度作为地形特征 e 。

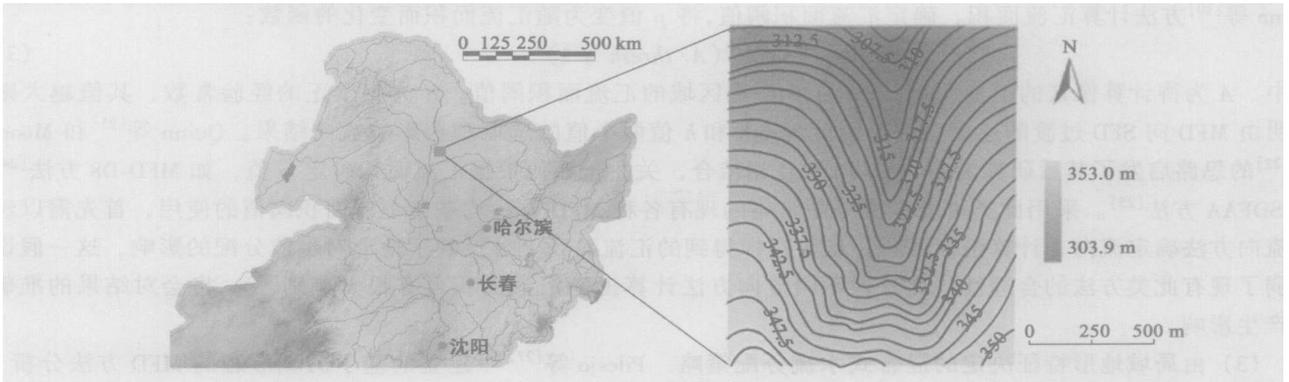
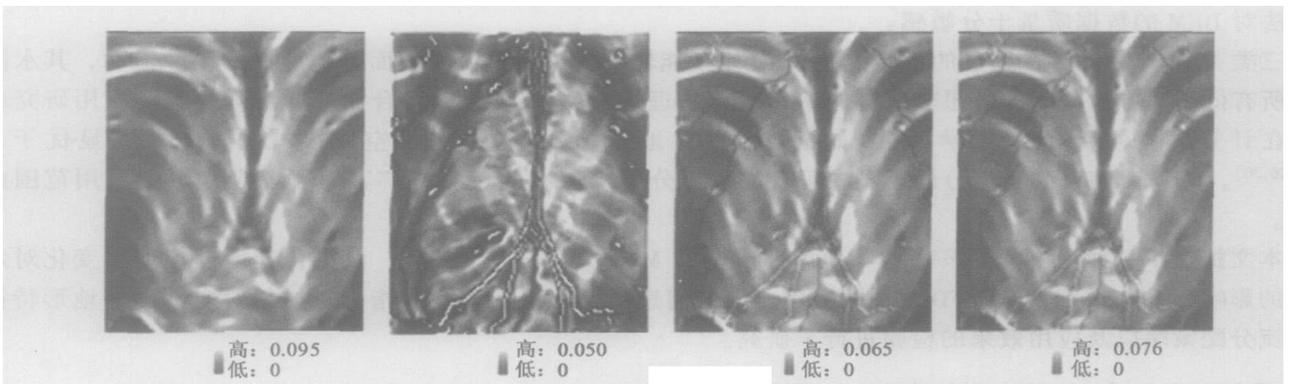


图 1 实验区 DEM

Fig 1 DEM of application area



(a) 最大下坡坡度

(b) 最小下坡坡度

(c) 平均下坡坡度

(d) 坡度

图 2 与坡度相关的地形特征

Fig. 2 Terrain features relating to the downslope gradient

2.3 水流分配函数的确定

对 $f(e)$ 的确定包括两方面: $f(e)$ 的函数类型及边界条件。基本原则是 $f(e)$ 能够合理地反映地形特征 e 的变化对水流分配的影响, 在此基础上函数的形式应尽量简单。对于已选定的地形特征 e , 当最大下坡坡度较大时, $f(e)$ 值应较大, 以模拟类似 SFD 的水流汇聚趋势; 当最大下坡坡度较小时, $f(e)$ 值应相应较小, 以模拟水流的漫散流动。我们认为最大下坡坡度的数值本身已充分显示了地形的陡峭及平缓程度, 因此取 $f(e)$ 为最大下坡坡度的线性函数。

对于 $f(e)$ 边界条件的确定需参考前人对水流分配权重 p 值的讨论, Freeman 通过仔细的分析, 认为 $p = 1.1$ 适合于模拟水流完全漫散流动的情况^[9]; 通常认为 $p = 10$ 时即可有效模拟单向流^[21, 23](图 3)。由此, $f(e)$ 的值域取为 $[1.1, 10]$ 。

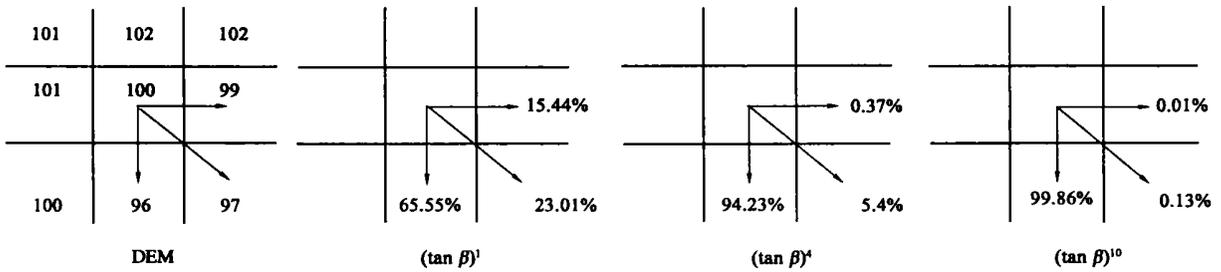


图 3 水流分配权重 p 的取值影响水流分配的示例(修改自 Quinn 等^[23])

Fig. 3 Example of flow distributions with different flow distribution weight, p (adapted from Quinn et al. ^[23])

综上, 我们得到了 MFD-fg 方法的水流分配策略的函数形式:

$$d_i = \frac{(\tan \beta_i)^{f(e)} \times L_i}{\sum_{j=1}^8 (\tan \beta_j)^{f(e)} \times L_j}, \quad f(e) = \frac{e - e_{\min}}{e_{\max} - e_{\min}} \times (10 - 1.1) + 1.1 \quad (4)$$

式中 e 为最大下坡坡度; e_{\min} 、 e_{\max} 分别为区域中 e 的最小值和最大值。

3 MFD-fg 方法的应用及结果分析

3.1 对洼地与平区的处理

通常在 DEM 中会存在由误差等原因所导致的洼地或平区, 在应用流向算法时必须对此进行特殊处理^[13, 31]。对于洼地通常是在预处理中填为平区。对于平区问题通常有两种思路: ①在流向算法中予以单独考虑, 指定平区内像素的流向; ②对平区像素的高程值根据地形特征进行修正, 再对消除平区之后的 DEM 应用流向算法。后者既可在不改变 DEM 准确度的情况下使得所有像素(除最低高程像素外)都具有合理的下坡邻域像素, 又可降低流向算法的复杂度。因此, 在应用 MFD-fg 方法之前, 采用 Martz 等^[32]建立的填洼、平区像素高程修正方法进行 DEM 预处理。对其过程本文不予赘述。

3.2 MFD-fg 方法的应用结果

为了检验 MFD-fg 方法的应用效果, 对图 1 的 DEM 分别以 D8(代表性的 SFD 方法)、Quinn 等(1991)方法(代表性的 MFD 方法)和 MFD-fg 方法计算汇流面积(图 4)。目前, 对于流向算法(尤其是 MFD 方法)的效果仍缺乏有效的定量检验方法, 主要还是依靠直接判读流向结果或是由其计算得到的汇流面积来决定算法效果。为了辅助目视检验, 在汇流面积结果上叠加显示等高线。

三种方法计算出的汇流面积的值域相似, 但 D8 方法得到的汇流面积中(图 4(a)), 高值区域形成大量明显不合理的狭窄直线, 应用效果最差。Quinn 等(1991)方法得到的汇流面积则平滑许多(图 4(b)), 较合理地反映

出应用区平缓地形的汇流趋势。MFD-fg方法与Quinn等(1991)方法计算的结果总体特征一致,但结合等高线作进一步的比较,可发现MFD-fg方法得到的汇流面积(图4(c))在地形较陡的区域,汇流面积高值区域相对收拢变窄,即反映出更多的地形变化对水流分配的影响细节,应用效果优于Quinn等(1991)方法。

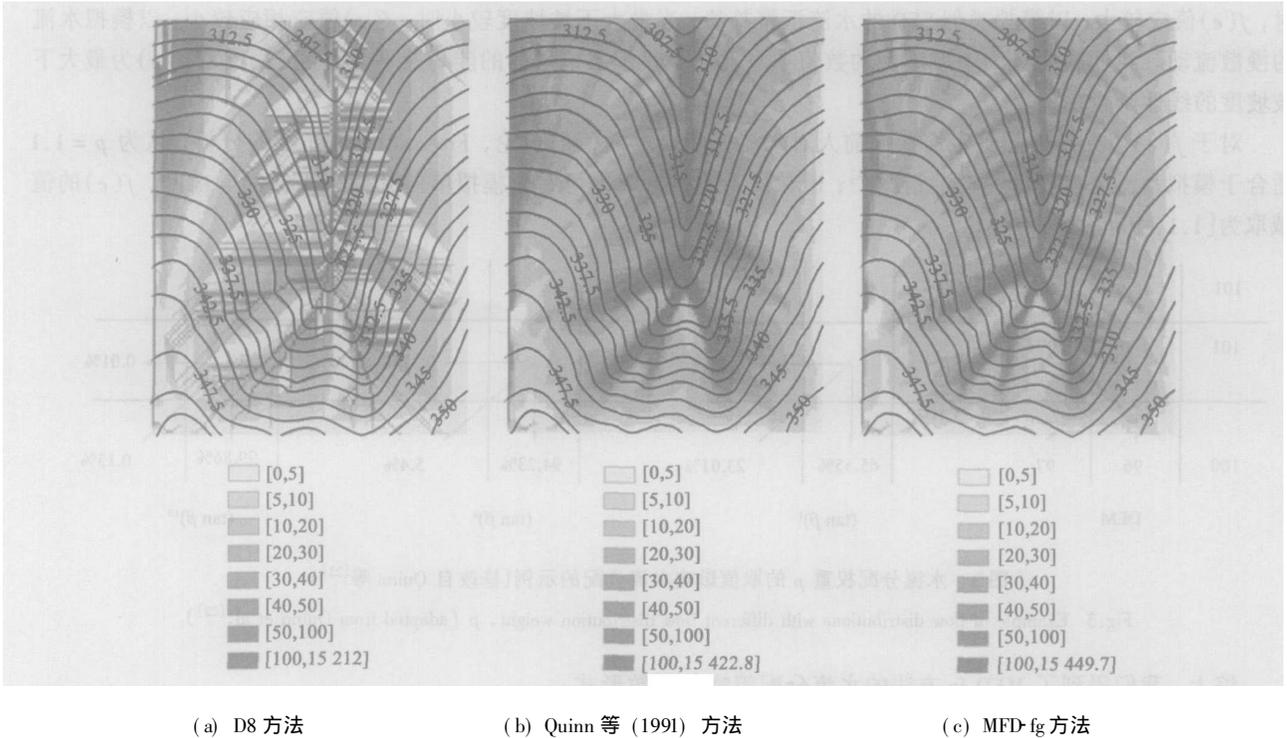


图 4 应用不同的流向算法方法计算出的汇流面积分布 (图例所表示的数值为汇流面积对应的像素数,对于MFD可不为整数)

Fig. 4 Flow accumulation computed by the different flow direction algorithm

4 讨 论

MFD模型允许水流向邻域中所有下坡像素点进行分配,从而克服了SFD模型令所有水流仅流向单一的最陡下坡方向所导致的水流过度汇集的问题。MFD模型采用水流分配权重对坡度进行指数加权的基本形式,具有很强的表达能力。但MFD能否合理地对于水流分配比例进行建模取决于MFD所采用的水流分配策略(即水流分配权重的确定)能否合理地反映地形因素对水流分配的影响。

本文所建立的MFD-fg方法采用水流分配权重 p 随最大下坡坡度的线性变化建立水流分配策略,不但能体现不同的地形条件对水流分配的影响差异,且无需为了估计水流分配权重而预先使用其它流向方法确定汇流面积分布及其阈值,因此MFD-fg随下坡坡度变化的水流分配策略具有更清晰的物理意义。与代表性的SFD和MFD方法的应用比较显示,MFD-fg方法得到的汇流面积更加合理,反映出地形变化影响水流分配的更加丰富、准确的细节信息。

选择不同的地形特征或是函数形式均会影响实际计算的水流分配比例,MFD-fg的水流分配策略是采用最大下坡坡度的线性函数,对于地形条件对水流分配的影响进行了相当程度的简化和概括。如何在此基础上更准确地模拟水流分配过程,还需要结合模拟实验的研究成果加以改进,这将是进一步研究的内容。

此外还有若干相关问题值得进一步研究。例如,对DEM中的洼地和平区的处理是所有流向算法共同面对的难题,目前尚无定解^[13,31]。此外,在使用流向算法计算汇流面积等重要的土壤、水文参数时,对结果的合理性、准确性目前缺乏定量的评价手段,这也直接影响着对流向算法正确性的检验。

参考文献:

- [1] Wilson J P, Gallant J C. Primary topographic attributes[A]. In: Wilson J P, Gallant J C (eds.) Terrain Analysis: Principles and Applications [C]. John Wiley & Sons, Inc, 2000, 51– 85.
- [2] Beven K J, Kirkby N J. A physically based variable contributing area model of basin hydrology[J]. Hydrological Sciences Bulletin, 1979, 24: 43– 69.
- [3] Moore I D, Grayson R B, Ladson A R. Digital terrain modeling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications[J]. Hydrological Processes, 1991, 5(1): 3– 30.
- [4] 吴险峰, 王中根, 刘昌明, 等. 基于 DEM 的数字降水径流模型——在黄河小花间的应用[J]. 地理学报, 2002, 57(6): 671– 678.
- [5] 李 丽, 郝振纯. 基于 DEM 的流域特征提取综述[J]. 地球科学进展, 2003, 18(2): 251– 256.
- [6] O’ Loughlin E M. Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis[J]. Water Resources Research, 1986, 22(5): 794– 804.
- [7] 卢振千, 吕妙儿, 黄杏元. 不规则三角网(TIN)在流域坡面汇流分析中的应用[J]. 测绘科学, 2001, 26(4): 45– 49.
- [8] O’ Callaghan J F, Mark D M. The extraction of drainage networks from digital elevation data[J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1984, 28: 323– 344.
- [9] Freeman T G. Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid[J]. Computers & Geosciences, 1991, 17: 413– 422.
- [10] Quinn P, Beven K, Chevalier P, *et al.* The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models [J]. Hydrological Processes, 1991, 5: 59– 79.
- [11] Bertolo F. Catchment delineation and characterization: A review[R]. Tech. Rep. EUR 19563 EN, Joint Res. Cent. Eur. Comm., Ispra, Italy, 2000, 36. (<http://agrienv.jrc.it/publications/pdfs/CatchRev.pdf>)
- [12] Matz L W, de Jong E. CATCH: a FORTRAN program for measuring catchment area from digital elevation models[J]. Computers & Geosciences, 1988, 14(5): 627– 640.
- [13] Jensen S K, Domingue J O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1988, 54: 1953– 1600.
- [14] Fairfield J, Leymarie P. Drainage networks from grid digital elevation models[J]. Water Resources Research, 1991, 27: 709– 717.
- [15] Lea N L. An aspect driven kinematic routing algorithm[A]. In: A J Parsons, A D Abrahams (eds.) Overland Flow: Hydraulics and Erosion Mechanics[C]. Chapman and Hall, NY, 1992.
- [16] Mitasova H, Hofierka J. Interpolation by regularized spline with tension, I, Theory and implementation[J]. Mathematical Geology, 1993a, 25: 641– 655.
- [17] Mitasova H, Hofierka J. Interpolation by regularized spline with tension, II, Application to terrain modeling and surface geometry analysis[J]. Mathematical Geology, 1993b, 25: 657– 669.
- [18] Costa Cabral M C, Buges S J. Digital elevation model networks (DEMON): a model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas[J]. Water Resources Research, 1994, 30(6): 1681– 1692.
- [19] Tarboton D G. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models[J]. Water Resources Research, 1997, 33: 309– 319.
- [20] 李昌峰, 刘存丽, 赵 锐. 数字地形分析技术在流域水文建模中的应用[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2004, 40(1): 96– 101.
- [21] Holmgren P. Multiple flow direction algorithms for runoff modeling in grid based elevation models: an empirical evaluation[J]. Hydrological Processes, 1994, 8: 327– 334.
- [22] Moore I D, Turner A K, Wilson J P, *et al.* GIS and land surface subsurface process modeling[A]. In: Goodchild M F, Parks B O, Steyaert L T (eds.) Geographic Information Systems and Environmental Modeling[C]. Oxford Univ. Press, Oxford, England, 1993, 196– 230.
- [23] Quinn P, 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.
- [24] Kiss R. Determination of drainage network in digital elevation models, utilities and limitations[J]. Journal of Hungarian Geomathematics,

- 2004, 2: 16– 29 (http://ttkde4.sci.u-szeged.hu/foldtan/geomatematikai_szakosztaly/JHG/Vol02/Kiss_Richard_JHG.pdf)
- [25] Kim S, Lee H. A digital elevation analysis: a spatially distributed flow apportioning algorithm[J]. *Hydrological Processes*, 2004, 18: 1777– 1794.
- [26] Wolock D M, McCabe G J. Comparison of single and multiple flow direction algorithms for computing topographic parameters[J]. *Water Resources Research*, 1995, 31(5): 1315– 1324.
- [27] Pilesjo P, Zhou Q, Harrie L. Estimating flow distribution over Digital Elevation Models using a form– based algorithm[J]. *Geographic Information Sciences*, 1998, 4(1– 2): 44– 51. (<http://www.lantm.lth.se/personal/lars/jgis98.pdf>)
- [28] Pilesjo P, Zhou Q. Estimating surface water flow distribution for urban runoff simulation using gridded digital terrain models[A]. In: *Proceedings of the 3rd International Workshop on Urban 3D/ Multimedia Mapping*[C], Shibasaki R and Shi Z eds, 12– 14 Sept, Tokyo, 2000.
- [29] 熊立华, 郭生练, K O Connor. 利用 DEM 提取地貌指数的方法述评[J]. *水科学进展*, 2002, 13(6): 775– 780.
- [30] Moore I D, Lewis A, Gallant J C. Terrain attributes: estimation methods and scale effects[A]. In: *Jakeman A J, Beck M B, McAleer M J (eds). Modelling Change in Environmental Systems*[C]. New York: Wiley, 1993, 189– 214.
- [31] 孔凡哲, 芮孝芳. 处理 DEM 中闭合洼地和平坦区域的一种新方法[J]. *水科学进展*, 2003, 14(3): 290– 294.
- [32] Martz L W, Garbrecht J. The treatment of flat areas and depressions in automated drainage analysis of raster digital elevation models[J]. *Hydrological Processes*, 1998, 12: 843– 855.

Multiple flow direction algorithm with flow partition scheme based on downslope gradient^{*}

QIN Cheng-zhi¹, LI Bao-lin¹, ZHU A-xing^{1,2}, YANG Lin³, PEI Tao¹, ZHOU Cheng-hu¹

(1. *State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural*

Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. Department of Geography, University of Wisconsin Madison, Madison, WI 53706, USA;

3. College of Geography and Remote Sensing Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The estimation of flow direction is an important aspect in digital terrain analysis. There are two basic flow direction algorithms: the single flow direction algorithm (SFD) and the multiple flow direction algorithm (MFD). SFD only allows flow to follow in the steepest downslope direction and is not suited for modeling the dispersal flow over slope. MFD allows flow to be distributed to all downhill neighbor cells. The currently three kinds of flow partition schemes are used by MFD algorithms: (1) weighting the flow apportioning with constant exponent which will result in too diverging flow pattern; (2) using an accumulation-based exponent which requires the accumulation distribution and an appropriate accumulation threshold determined mainly by using SFD or MFD; and (3) the “Form based” MFD based on the analysis of the topographic form of a surface facet which is too sensitive to DEM’s error. This paper presents a new MFD algorithm, MFD-fg. The basic idea of MFD-fg is that the flow partition scheme should spatially vary as the terrain changes so that the effect of the local terrain condition on the flow distribution can be reasonably modelled with the clear physical meanings. The experiments show that the linear function of the maximum downslope is an appropriate approach to measure the flow apportioning. Our experiment shows that the new approach, compared with SFD and other MFD approaches, get more reasonable flow accumulation index.

Key words: digital terrain analysis; multiple flow direction algorithm; flow partition scheme; downslope

^{*} The study is financially supported by “One Hundred Talents Program” of CAS; and the National Natural Science Foundation of China (No 40501056; 40101028); and “Knowledge Innovation Program” of Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS (CXIOG D02).