

基于三方向搜索的 DEM 中洼地处理方法

李 辉¹, 陈晓玲^{2,3}, 张利华¹, 李长安¹

(1. 中国地质大学地球科学学院地理系, 湖北 武汉 430074; 2. 江西师范大学鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 江西 南昌 330027; 3. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079)

摘要: 数字高程模型 (DEM) 是流域参数提取的基础, 然而 DEM 中普遍存在的洼地和平地影响了流域水系的自动提取, 因此洼地去除方法成为研究的热点。针对现有洼地去除方法存在的问题, 提出了一种基于“三方向搜索”的洼地处理方法。该方法通过对洼地及其周围网格高程值增减来达到去除洼地的目的, 避免了传统填洼方法大规模的对 DEM 进行增高处理。实验结果表明, 该算法简单易行, 能有效的去除洼地, 消除 DEM 提取的河网中的伪河道及“平行线”现象; 且对 DEM 中高程值的改动较小, 从而较大限度的保留了原始地形信息。

关 键 词: 数字高程模型; 流域; 洼地; 三方向搜索; 河网

中图分类号: P208 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2009)04-0473-07

基于 DEM (Digital Elevation Model) 数据的流域地貌特征自动提取是进行流域空间模拟的基础技术^[1]。由网格 DEM 数据提取流域河网水系的方法很多, 而对洼地和平坦区域的处理又是整个处理过程中最费时和关键的步骤^[2]。平地 and 洼地水流的处理已成为直接影响流域水系特征自动提取的质量和效率的关键技术^[3]。除了自然界中真实的低洼地貌外, DEM 中的洼地源于生产过程中对网格单元高程值估算的偏大或偏小。偏小时将在地表形成凹陷型缺口, 而偏大时则沿着径流路径形成一个阻塞或堤坝型地表类型, 均使得水流不连续^[4]。

自 O Callaghan 等^[5]利用滤波平滑处理方法对 DEM 数据进行消除洼地处理以来, 国内外学者在此基础上相继做了大量的改进和研究。Jenson 等提出了 J&D 算法^[6], 该算法先将洼地逐步垫高成平地, 然后寻找出与具有流向的网格单元相邻的那些网格单元, 再确定这些网格单元的流向; 重复进行这一步骤直到所有的平地网格单元都确定了流向为止。Martz 等提出的方法是在填洼前先沿着水流路径计算各网格的集水面积, 然后根据集水面积判断洼地, 并进行填平处理和平地处理, 之后再反过来调整各网格集水面积^[7]。这两种方法都将流路约束在平坦区域内, 并且有可能出现多出口的情况, 因此通常会生成不真实的平行河道, 即“平行线”现象^[8]。Temme 等提出新的填洼算法, 解决了平行河道问题^[9]。孔凡哲等^[10]、谢顺平等^[3]、Zhu 等^[11]、徐精文等^[12]、刘学军等^[13]、吴艳兰等^[14]也提出一系列去除洼地算法或地形数据处理方法。这些方法对地形复杂性的适应性较强, 避免了平行河道、伪河道和奇异河道的产生, 使得生成的水系更加接近真实状况。

上述方法大都假定洼地均由 DEM 高程值偏小误差引起的, 因此通过增加洼地的高程值来消除之。而过高估计高程值也将造成周围网格成为洼地, 故 DEM 洼地去除算法应同时考虑以上两种情况产生的洼地。本文在分析国内外洼地处理方法的基础上, 提出了基于三方向搜索的洼地处理方法。该方法同时考虑 DEM 网格值偏大或偏小而产生洼地的情况, 在处理过程中对网格的高程值有增有减, 不但达到消除 DEM 中洼地的目的, 而且该方法还可以消除传统方法中“平行线”现象, 并对 DEM 数据改动较小, 较好保留了原始地形信息。

收稿日期: 2008-07-23

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划资助项目 (2007BAC23B05-03); 鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室开放基金资助项目 (PK2008003); 中国地质大学 (武汉) 优秀青年教师基金资助项目 (CUCQNL0823)

作者简介: 李 辉 (1979 -), 男, 湖北枣阳人, 讲师, 博士, 主要从事 GIS 在流域管理中应用等研究。

E-mail: giantlee.fly@yahoo.com.cn

1 算法描述

三方向搜索算法使用同样的方法对洼地和平地进行处理, 因此本文将这两种地形统称为洼地。算法分为 3 步: 标识 DEM 中所有的洼地, 并为洼地找到出口; 通过三方向搜索为洼地找到一条最佳的流往其出口的路径; 依次修改路径上网格的高程值, 使洼地网格中的水能流出到出口网格。

1.1 洼地标识与流出点搜索

洼地是 DEM 中高程值小于或等于周围所有网格高程值的一个或一组网格。其搜索与标识通常使用 3×3 移动窗口进行: 首先比较窗口中心网格与周围 8 个网格之间的高程值, 如果中心网格的高程值均小于或等于周围 8 个网格的高程值, 则该中心网格将被标识为洼地; 移动窗口对下一个网格进行同样的判断。这样连续扫描整个 DEM 后, 就完成了对洼地和平地的标识。

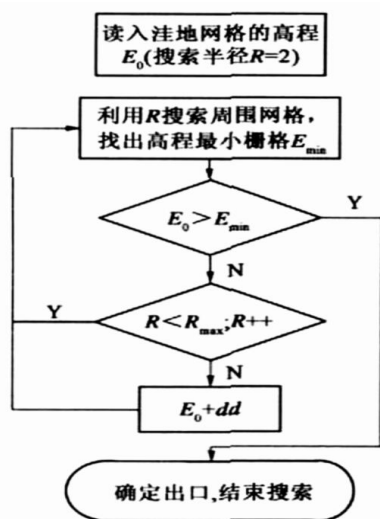


图 1 洼地出口栅格搜索流程图

Fig. 1 Searching flowchart of outlet cell for pit

在搜索洼地出口时, 设置不同的搜索半径 (以网格为单位), 由近及远地搜索洼地出口。即, 首先搜索半径 $R=2$ (即距离洼地 2 个网格) 的 16 个网格 ($8 \times R$ 个网格), 并找出 16 个网格中高程最小值 $E_{\min}$, 如果该值小于洼地的高程值, 则为洼地流出网格。如果最小值仍然大于洼地值, 则将搜索半径增加到 3 个网格, 找出 24 个网格的高程值最小值, 并与洼地高程值比较。这样依次增加搜索半径, 直到找出洼地流出点为止。考虑到当搜索半径变得很大时, 即便是找到了出口, 该出口可能已经没有太大意义。因此, 本文预先定义一个最大搜索半径 $R_{\max}$, 当搜索半径大于 $R_{\max}$ 、仍没有找到出口时, 则对洼地进行增高处理, 每次增高步长为 dd 。选择恰当的最大搜索半径和增高步长, 便可保证对所有洼地进行正确处理。洼地搜出口索算法流程如图 1 所示。

1.2 三方向搜索

(1) 三方向的定义 以洼地网格为中心, 将 DEM 所在平面划分为 8 个方向: 东 (E)、东南 (SE)、南 (S)、西南 (SW)、西 (E)、西北 (NW)、北 (N) 和东北 (NE)。

三方向就是根据出口相对洼地的位置, 每次沿最优的 3 个方向搜索洼地出口 (图 2)。例如, 假设出口在洼地的西北方向, 则搜索的三方向为 NW1、NW2 和 NW3。三方向作为搜索过程中的重要启发式条件, 将搜索范围限制在有限的区域, 从而提高了搜索效率, 并保证流出路径较短。

(2) 搜索路径 路径搜索是寻找一条从洼地到其出口之间的最优路径。首先根据洼地相对出口的位置, 确定第一次搜索的 3 个方向。比较搜索出的 3 个网格高程值, 将高程值最小的网格标记为路径网格, 作为下次搜索的起点网格, 同时判断该网格与出口的相对位置, 以确定下次搜索的 3 个方向。这样循环搜索, 直到抵达出口为止。最后根据洼地网格和出口网格之间的高程差及路径网格的个数来计算各路径网格的高程值, 并用该值替换原高程值。这样便在洼地和其出口之间形成一条高程值递减的连续流路。

假设对图 3(a) 所示的网格 DEM 进行填洼处理, 图中洼地网格的高程值为 445 (为了方便, 下面直接用高程值表示网格)。则搜索的步骤如下:

第 1 步, 以洼地 445 为起点, 搜索东南向 (SE) 3 个网格, 即搜索 449 (S), 453 (SE), 454 (E) 3 个网格, 并标记南向 (S) 449 为路径网格 (图 3(b) 中阴影区);

第 2 步, 以 449 为起点, 搜索东南向 (SE) 3 个网格, 即搜索 470 (S), 466 (SE), 453 (E) 3 个网格, 并标记东向

(E) 453 为路径网格(图 3(b)中阴影区);

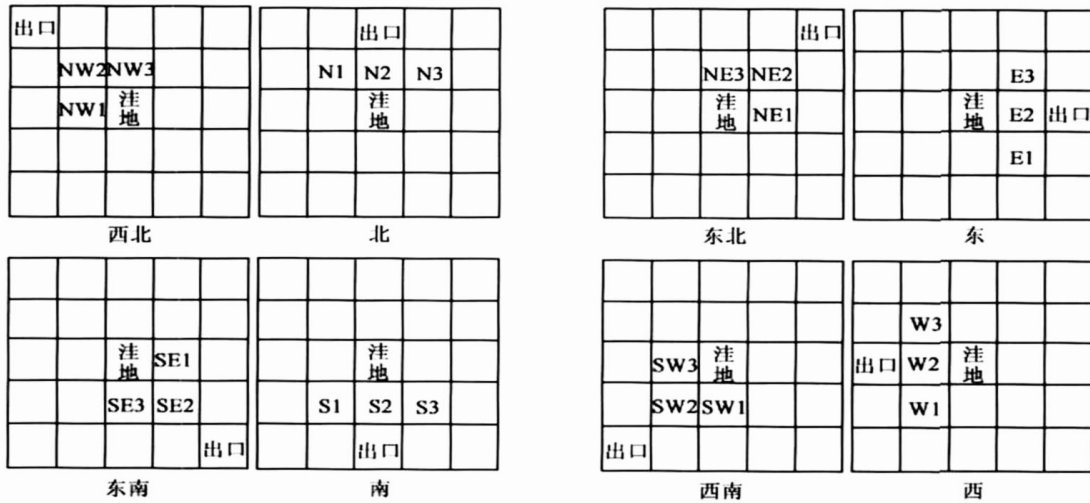


图2 三方向定义示意图

Fig.2 Definition of three-direction

第3步,以453为起点,搜索东南向(SE)3个网格,即搜索466(S),458(SE),461(E)3个网格,并标记东南向(SE)458为路径网格(图3(b)中阴影区);

第4步,以458为起点,直接到达洼地出口网格444。

最后根据洼地网格和出口网格之间的高程差及路径网格个数重新计算并修改路径网格高程值。本例中洼地网格的流路为:445(洼地)-449-453-458-444(出口),则可以计算出路径网格新的高程值为:445(洼地)-444.75-444.50-444.25-444(出口)。

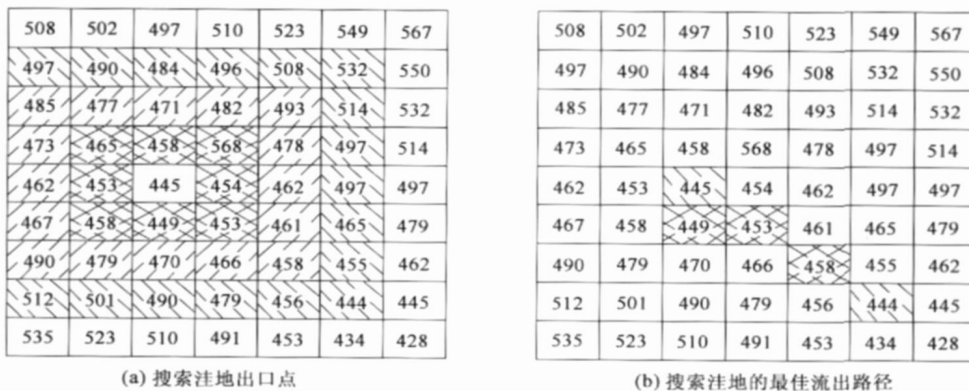


图3 搜索洼地出口点与搜索洼地的最佳流出路径示意图

Fig.3 Search for the outlet of pit and the best flow path

2 实验设计

为了检验三方向搜索处理算法的有效性,本文分别从河网提取的精度和原始地形信息保真度两方面,将该算法与J&D算法进行比较。之所以与该算法进行比较,是因为该算法比较经典,并广泛地被各种商用软件所采用(比如ArcHydro中便采用该算法),国内外大量填洼算法大都是以该算法为基准进行比较的。

本文以江西省躁口水流域为例来验证三方向搜索方法。由于该流域处于偏远山区, 受人类活动影响小, 无断头河、湖塘、河堤等现象, 比较适合作为实验区。供试流域地形数据是经过补洞(fill void)处理^[15]的 SRTM DEM^[16], 尺寸为 248×281 , 网格边长为 91.7 m , 高程范围为 $110 \sim 513 \text{ m}$, 平均高程为 168 m , 标准差为 43.8 m 。实验分别使用本文方法和 J&D 算法对研究区 DEM 进行填洼处理, 并在此基础上提取水系, 然后将提取结果进行比较并与实际水系作对比, 以检验提取的精度。

在洼地处理过程中, 现有的方法均会对一些网格高程值进行修改。不同的方法对原始信息修改的程度也不一样, 即信息保真度不同。为了检验本文方法的信息保真度, 将本文方法和 J&D 算法的填洼处理的结果进行比较。实验数据仍然是经过补洞处理的边长为 91.7 m 的 SRTM DEM, 大小分别为 100×100 , 200×200 , 300×300 , 400×400 。

3 结果与讨论

3.1 提取精度

分别使用两种不同的洼地处理方法对 DEM 进行处理, 并在此基础上提取水系, 然后将提取的水系与实际水系进行比较, 结果如图 4 所示。从图可以看出, 两种预处理方法提取水系的结果基本一致。但本文方法在几处细节上要优于 J&D 算法: J&D 算法提取的水系中, 有四处平行河道; 而本文提出的算法这完全消除了平行河道(图 4(a)、图 4(b)圆圈所示)。

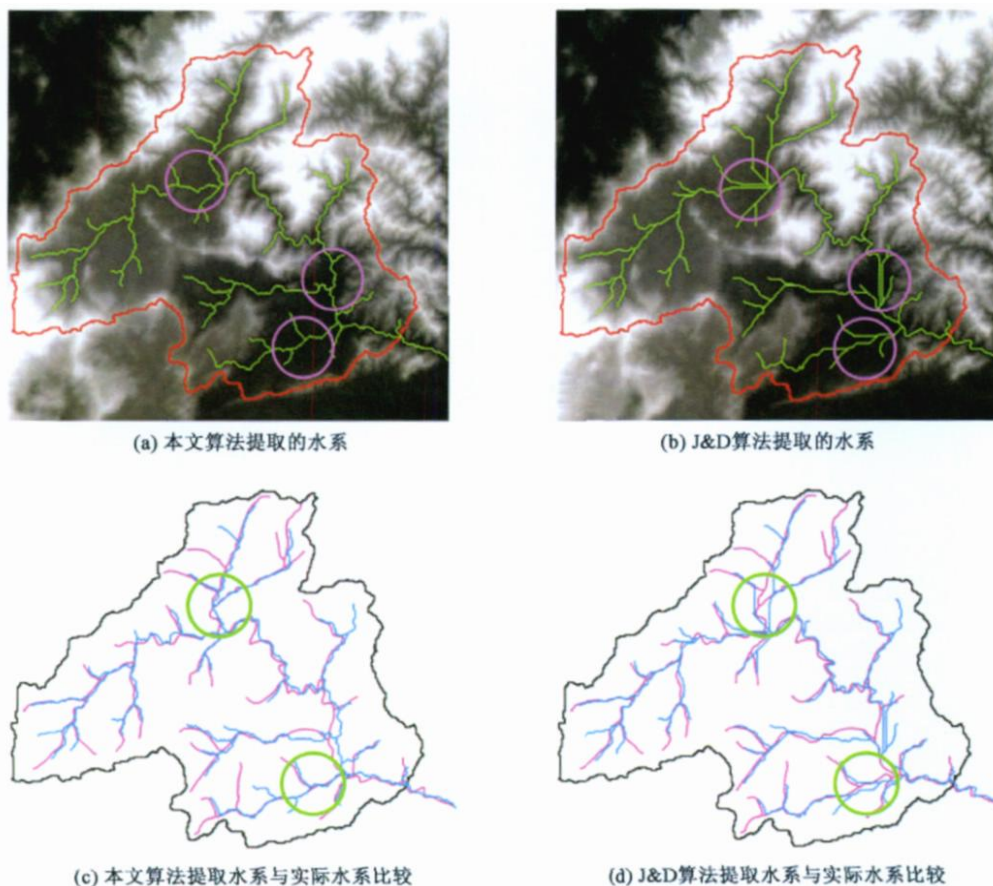


图 4 本文算法及 J&D 算法提取水系及与数字线画图中水系比较

Fig. 4 Comparison of watercourse generated based on the proposed method and J&D method with the real watercourse

进一步将不同方法处理后的提取结果分别与实际水系比较,发现DEM提取的水系和实际水系比较吻合(图4(c),图4(d))。而本文方法提取的河网更光滑连续,提取的平坦区域水系与实际更接近(图4(c),图4(d)中圆圈所示)。

经典的洼地处理算法先将DEM中的洼地增高形成平地,然后再对平地赋流向^[6]。由于流向是随机赋予的,所以在平坦地区容易出现上述的“平行线”现象。从图4(a)中也可以看出,平行线主要出现在平坦区域。很多学者研究过“平行线”现象,并提出了相应的改进方法^[17-20]。三方向搜索算法从根本上改变了洼地处理方法,这样不论是洼地还是平地都有确定的流向,因此本文方法从根本上消除了平行河道。然而,水系的形成受多种自然和人文因素的综合影响,地形因素只是其中的一个重要因子,仅从地形中提取水系,必定会与现实的水系有出入。如想使这方面的研究走向真正的实用化,还需要在这个领域进行许多细致深入的工作,利用人工智能和模式识别等多种手段,来实现自动提取合理的水流线。

3.2 信息保真度

由于本文方法对高程值有增有减,因此将增减高程的绝对值之和作为最后评估指标。表1为两种方法对DEM高程修改的结果。从表中可以看出,本文方法对4种试验DEM的累计修改值分别为1476、1646、2752、3901 m,而J&D方法的累计修改值分别为2036、2645、3064、5602 m。显然本文的方法对DEM高程值的修改要小,在保留原始数据信息方面比J&D方法要好。

表1 三方向搜索算法和J&D算法对DEM高程值修改的比较

Table 1 Comparisons of modified elevations based on J&D method and the proposed method

DEM 尺寸	三方向搜索算法			J&D 算法
	累计增加高度/m	累计减少高度/m	累计改变高度/m	累计改变高度/m
100 ×100	690	786	1476	2036
200 ×200	756	890	1646	2645
400 ×400	1225	1527	2752	3064
500 ×500	1865	2036	3901	5602

传统的增高处理方法假设洼地是由于DEM生产过程中的插值误差、截断误差和空间分辨率限制产生的误差引起的,且误差导致网格高程值偏低,从而产生洼地^[17]。而事实上,误差也将产生高地,这些高地可能会导致其周围的网格不能排水而成为洼地。因此,洼地处理方法不仅要对洼地进行增高处理,恰当的时候还要对高地进行削平^[20]。然而目前为止,还没有很好的方法能区分DEM中由于过低或过高估计高程而形成的洼地,但在处理方法中引入这种思想无疑是有益的尝试。三方向搜索方法正是基于这种思想,对DEM高程有增有减,从而减小了对DEM的修改,保留了更多的原始地形信息。

3.3 讨论

三方向搜索算法的关键是路径搜索。搜索分为盲目搜索和启发式搜索,盲目搜索不考虑给定问题所具有的特定知识,按照事先安排好的某种固定顺序进行穷举式搜索,因此效率比较低,例如传统的Dijkstra算法^[21];而启发式搜索能够通过检测来确定合理的待扩展节点的顺序,首先扩展最有希望的节点,也称为有信息搜索,例如A*算法^[22]。三方向搜索算法也属于启发式算法,在搜索过程中,根据终点所处的位置,每次按照最优的三个方向搜索出通往终点的一个结点,再以此结点为基础,搜索出下一结点,直到抵达终点。与其它图形搜索算法一样,三方向搜索算法也可能会搜索地图上的大块区域。但它一开始就直面终点方向,且每走一步,便重新判断终点的位置,则距离终点近一步,因此总能到达终点。

三方向搜索算法需恰当选取最大搜索半径 $R_{\max}$ 和洼地的增高步长 dd 。 $R_{\max}$ 过大,可能使搜索的范围过大,搜索出来的洼地出口也没有实际意义。 $R_{\max}$ 过小,可能很难为洼地找到出口网格,这样洼地便被增高。增高步长 dd 的选择也要恰当。若过大,可能会更多造成新的洼地;若过小,可能要通过多次循环达到预期的高程,会增加处理时间。因此, $R_{\max}$ 和 dd 的选择是该方法处理的关键。不同的区域DEM的最佳 $R_{\max}$ 和 dd 的值不同,一般通过若干实验来确定。

4 结 论

针对现有 DEM 洼地处理方法中存在的问题, 本文提出了三方向搜索算法。该算法首先确定洼地出口, 然后寻找一条路径, 使得水从洼地流到其出口所经过的路径满足:

(1) 距离最短, 即洼地距其出口的距离最短。

(2) 代价最小, 即对 DEM 高程值的改动最小。最后根据洼地和其出口之间的高程差依次修改所经过网格的高程。这样便很好的解决了洼地水流不连续的问题。该方法简单易于实现, 通过对 DEM 高程值增减来去除洼地, 避免了传统处理过程中只增不减的情况。经三方向搜索算法后的 DEM 提取的河网连续光滑, 无平行河道; 且该方法对原始 DEM 的修改较少, 能较大限度的保留了原始地形信息。

参考文献:

- [1] 邬伦, 汪大明, 张毅. 基于 DEM 的水流方向算法研究[J]. 中国图象图形学报, 2006, 11(7): 998-1003. (WU Lun, WANG Da-ming, ZHANG Yi. Research on the algorithms of the flow direction determination in ditches extraction based on grid DEM[J]. Journal of Image and Graphics, 2006, 11(7): 998-1003. (in Chinese))
- [2] 王建平, 任立良, 吴益. 一种新的 DEM 填洼处理算法[J]. 地球信息科学, 2005, 7(3): 51-54. (WANG Jian-ping, REN Li-liang, WU Yi. A new algorithm to process depressions in digital elevation model[J]. Geo-information Science, 2005, 7(3): 51-54. (in Chinese))
- [3] 谢顺平, 都金康, 王腊春. 利用 DEM 提取流域水系时洼地与平地的处理方法[J]. 水科学进展, 2005, 16(4): 535-540. (XIE Shun-ping, DU Jin-kang, WANG La-chun. Methods for processing depression and flat areas in extracting drainage networks based on the DEM[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(4): 535-540. (in Chinese))
- [4] MARTZ L W, GARBRECHT J. The treatment of flat area and depressions in automated drainage analysis of raster digital elevation model[J]. Hydro Process, 1998, 12: 843-855.
- [5] O CALLAGHAN F, MARK D M. The extraction of drainage networks from digital elevation data[J]. Computer Vision, Graphics and Image Processing, 1984, 28: 323-344.
- [6] JENSON S K, DOMINGUE J O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographical system analysis[J]. Photogram Engine Remote Sensing, 1988, 54: 1593-1600.
- [7] MARTZ 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.
- [8] TRIBE A. Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation models: A review and a new method[J]. Journal of Hydrology, 1992, 139: 263-293.
- [9] TEMME A J A M, SCHOORL J M, VELDKAMP A. Algorithm for dealing with depressions in dynamic landscape evolution models[J]. Computers & Geosciences, 2006, 32: 452-461.
- [10] 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. (KONG Fan-zhe, RUI Xiao-fang. New method for treating flat areas and closed depressions in the digital elevation model[J]. Advances in Water Science, 2003, 14(3): 290-294. (in Chinese))
- [11] ZHU Q, TIAN Y X, ZHAO J. An efficient depression processing algorithm for hydrologic analysis[J]. Computers & Geosciences, 2006, 32(5): 615-623.
- [12] 刘学军, 王永君, 任政, 等. 基于不规则三角网的河网提取算法[J]. 水利学报, 2008, 39(1): 27-34. (LIU Xue-jun, WANG Yong-jun, REN Zheng, et al. Algorithm for extracting drainage network based on triangulated irregular network[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(1): 27-34. (in Chinese))
- [13] 徐精文, 张万昌, 符凉斌. 适用于大尺度水文气候模式的 DEM 洼地填充和平坦区处理的新方法[J]. 水利学报, 2007, 38(12): 1414-1420. (XU Jing-wen, ZHANG Wan-chang, FU Cong-bin. A new method for treating the depressions and flat areas in DEM for large-scale hydrology and climate models[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(12): 1414-1420. (in Chinese))
- [14] 吴艳兰, 胡鹏, 刘永琼. 基于地图代数的数字地表流线模拟研究[J]. 水科学进展, 2007, 18(3): 356-361. (WU Yan-lan, HU

- Peng, LIU Yong-qiong. Digital simulation of flow paths on the earth's surface based on map algebra[J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(3): 356-361. (in Chinese))
- [15] CAI X B, CHEN X L, LI H, et al. A simple method to improve the SRTM DEM based on Landsat ETM+ image[C]. *Proc SPIE Int Soc Opt Eng.* [S. l.]: SPIE, 2005: 117-122.
- [16] OLA H, GIACOMO F, RAFAEL L B. Characterization and quantification of data voids in the shuttle radar topography mission data[J]. *IEEE geoscience and remote sensing letters*, 2005, 2(2): 177-181.
- [17] JURGEN G, LAWRENCE W M. The assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models[J]. *Journal of hydrology*, 1997, 193: 204-213.
- [18] PLANCHON O, DARBOUX F. A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models[J]. *Catena*, 2001, 46: 159-176.
- [19] MARTZ L W, GARBRECHT J. Automated extraction of drainage network and watershed data from digital elevation models[J]. *Water Resources Bulletin*, 1993, 39(6): 901-908.
- [20] MARTZ L W, GARBRECHT J. An outlet breaching algorithm for the treatment of closed depressions in a raster DEM[J]. *Computers & Geosciences*, 1999, 25(7): 835-844.
- [21] 孙汉昌, 朱华勇. 基于概率地图方法的无人机路径规划研究[J]. *系统仿真学报*, 2006, 18(11): 3050-3054. (SUN Han-chang, ZHU Hua-yong. Study on path planning for UAV based on probabilistic roadmap method[J]. *Journal of system simulation*, 2006, 18(11): 3050-3054. (in Chinese))
- [22] 陈刚, 付少锋, 周利华. A*算法在游戏地图寻径中的几种改进策略研究[J]. *科学技术与工程*, 2007, 7(15): 3731-3736. (CHEN Gang, FU Shao-feng, ZHOU Li-hua. Research on improving A* algorithm in game map path finding[J]. *Science Technology and Engineering*, 2007, 7(15): 3731-3736. (in Chinese))

Depression removal method for grid DEM based on three-direction search^{*}

LI Hui¹, CHEN Xiao-ling^{2,3}, ZHANG Li-hua¹, LI Chang-an¹

(1. Geography department, China University of Geoscience, Wuhan 430074, China;

2. Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Ministry of Education, Jiangxi Normal University, Nanchang 330027, China;

3. State Key Lab of Information Engineering in Surveying Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: The Digital Elevation Model (DEM) is the fundamental data source to extract the watershed parameters. However, the depressions and flat areas commonly exist due to the errors in the production of DEM. Various methods are thus proposed to remove the depressions and flat area in DEM. Most of the methods assume that the depressions are caused mainly by the underestimation of DEM values. In fact, the overestimation can also cause the depressions in the nearby grid cells. In this paper, a new method based on three-direction search is presented to handle the problems by both raising and reducing the DEM values. The result suggests that the proposed method is easy to implement and can eliminate the "parallel river" in the result, and makes less modification of the original DEM values only to keep the original information to the largest extent.

Key words: Digital Elevation Model (DEM); watershed; depression; three-direction search; river network

^{*} The study is financially supported by the National Key Technology R&D Program of China during the 11th Five-year Plan Period (No. 2007BAC23B05-03).