

基于 DEM 的沟谷特征点提取与分析

谢轶群¹, 朱红春^{1,2*}, 汤国安¹, 曾瑞安¹

(1. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023; 2. 山东科技大学测绘科学与工程学院, 青岛 266590)

摘要: 沟谷特征点是反映沟谷地貌空间形态分布的重要点位, 也是研究沟谷地貌演化过程与机理的关键要素。因此, 对不同沟谷特征点的有效提取, 是沟谷形态研究的重要基础。本文采用 DEM 及其在水文分析中的多种衍生数据, 通过流向追踪、邻域特征判断等一系列方法, 实现对径流节点、径流源点、汇流源点、潜在裂点与流域出口点的快速、准确提取。同时, 对沟谷特征点进行有效分级, 本文基于 Strahler 河流分级法建立了相应的分类标准, 对沟谷特征点进行了自动分类。通过使用陕西省宜君典型样区 5 m 分辨率的 DEM 数据进行实验, 发现新算法计算效率高, 结果准确, 对潜在裂点也进行了有效探测, 验证了算法的有效性。最后, 对特征点提取的数据影响进行了详细分析。

关键词: 沟谷特征点; DEM; 数字地形分析

DOI: 10.3724/SP.J.1047.2013.00061

1 引言

对沟谷地貌的研究, 分布式水文分析方法已发展为较成熟的体系与方法, 并广泛应用于相关的研究与应用中^[1-7]。其中, 形态机理的 D8 单流向算法, 已成为获取各种分布式水文数据的基础, 在沟谷地貌的研究中发挥着重要作用。沟谷地貌主要由流水侵蚀形成, 径流节点、径流源点、汇流源点、裂点及局部流域出口点是沟谷网络中重要的特征点, 它们不但控制着沟谷网络的空间形态格局, 也映射着沟谷地貌的发育与演化。

径流节点是水流量发生跃变的关键点位^[8-10]。易宏伟等(2003)提出了邻域汇流量分析的提取方法^[11], 但由于该方法阈值不稳定, 其精度和鲁棒性都无法保证; 刘晓等(2011)以矢量几何网络, 通过 ArcGIS 对径流节点及源点进行了准确提取^[12], 但该方法实现过程必须进行水系的矢栅转换及网络数据集的生成, 在流域选取范围或水系提取阈值等发生变化的情况下, 原有矢量网络及数据集都必须重新生成。因此, 该方法在实际应用中生成的数据量大, 效率较低。钱柯健、朱红春等(2012)通过汇流矩阵, 实现了径流节点的提取和分级^[13-14], 但是, 该方法中的阈值设置影响了提取和分级结果的准

确性, 由于该阈值在不同区域存在差异, 且无法准确估算和获取, 降低了其鲁棒性。综上, 径流节点的提取方法近年来已发展的较为成熟, 但各方法仍存在精度、效率或灵活性等缺陷。在径流源点的提取中, 除刘晓(2011)等以外, 还较少有研究涉及。此外, 影响沟谷网络发育的裂点及控制沟谷网络形态的汇流源点等重要特征点, 仍缺少相应的提取算法。由于沟谷特征点是沟谷地貌很多相关研究中的重要基础, 因此, 针对以往研究中存在的或还未有效解决的问题, 本文以 DEM 及其在水文分析中的衍生数据, 提出了一套相对完整的新提取方法, 不仅弥补了已有较成熟算法的不足, 使结果可同时在精度、效率与灵活性上取得较为满意的结果。其中, 在拥有完整流域数据的情况下, 新提取方法可以保证径流节点、径流源点、汇流源点、流域出口点的提取结果与手动提取一致, 实现了对裂点的有效探测, 并通过避免冗余计算保证了效率。最后, 通过建立相关标准, 本文对特征点进行了自动分类, 并对影响提取的数据因素进行了详细分析。

2 沟谷特征点的因素分析

如图 1, 沟谷特征点主要由径流节点、径流源

收稿日期: 2012-11-09; 修回日期: 2012-12-24。

基金项目: 国家自然科学基金项目(40930531、41001294); 资源与环境信息系统国家重点实验室开放基金(2010KF0002SA)。

作者简介: 谢轶群(1991-), 男, 山东济南人, 目前, 主要研究月表 DEM 的目标识别及特征分析。E-mail: xieyiqun@126.com

* 通讯作者: 朱红春(1977-), 男, 山东泰安人, 副教授, 主要从事 DEM 数字地形分析。E-mail: sdny_xa@163.com

点、汇流源点、裂点及流域出口点组成。在 DEM 数据中,这 5 种沟谷特征点所表现出的特征也各不相同,这也为本文提取算法中的重要依据。本文将对沟谷特征点在 DEM 及其衍生数据中的特征进行分析。

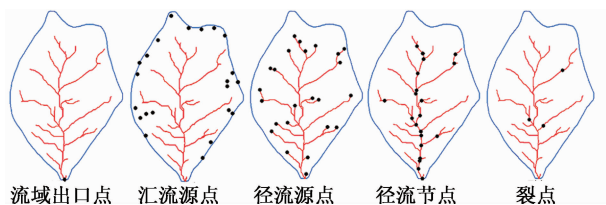


图 1 沟谷特征点

Fig. 1 Gully feature points

2.1 径流节点与径流源点的特征

径流节点为某流域河网中表征各级河流与上级河流交汇点的集合^[11];径流源点的定义尚存一定争议,本文重在探讨提取方法,不讨论概念性问题。为便于方法叙述,本文中的径流源点为基于 DEM 所提取水系网络的外围末梢点,即径流在空间形态上的起始点。此外,考虑到本研究中黄土高原地区的径流随季节降水有明显变化(可具体表现为水系汇流阈值的变化),为便于后续分析,此处的径流源点数目及位置同样随汇流阈值而变化。

在水文汇流特征上,径流节点是各支流的交汇处,具有汇流量跃变的特性。根据径流节点处交汇河流的数目,可以得到径流节点的汇水系数,其值与该点处交汇河流的数目相等。径流源点也具有一定的上游集水区,同样属于汇水点。这使得径流源点的汇流值相对其上游栅格也具有跃变的特征。因此,不同径流源点处的汇流值往往不同。

在空间结构上,根据径流节点的空间结构特征,可以对其级别进行划分,径流节点级别上的差异也是进行深入的地理特征分析和发育演进规律探索的重要依据^[14]。Strahler 提出了一种有效的河流分级方法^[15],即以河流源头部分为一级河流,两个一级河流交汇后形成二级河流,依此类推。根据该分级方法,可以河流级别对径流节点进行有效地分级,使得径流节点的级别比该节点处的河流级别低一级(在 Strahler 分级结果中,节点处栅格属于汇流后的新河流,其级别至少为二级)^[10]。朱红春等也采用此分级方法对径流节点

进行分级^[14]。

2.2 汇流源点描述

汇流源点是流域内汇流过程的起始点,即径流源点上游汇水值最小的点,位于不同河道集水区间的分水线附近,确定该点的原则是沿径流源点的逆流向方向进行延伸时路径与分水线的交点。通过汇流源点可以看出径流源点位置的变化趋势及程度。在由 DEM 提取而得的汇流矩阵中,随着水系提取阈值的减小,水系会逐渐向上游延伸,径流源点的位置也越来越接近汇流源点,当阈值降到最小值后,径流源点与汇流源点重合。

2.3 裂点分布

裂点为河谷纵剖面上高程落差陡增的点位。由于 DEM 数据的空间分辨率有限,且 D8 算法为单流向算法,使得裂点的位置很难精确地在 DEM 中表达出。此外,若 DEM 数据源为内插等高线获得,而非通过实测或遥感手段获取,则数据本身无法对裂点进行有效表达。因此,本文以 DEM 所提取的裂点视为潜在裂点。由于当径流中的水流量不同时,裂点处的侵蚀动力会有所变化,因此,可以根据裂点所处的河道级别,对裂点进行分级,这也是进一步研究沟谷发育的有利依据。

2.4 流域出口点特征

流域出口点为流域的出水口,所有流域内部的水流量最终全部汇集到该点后才能流出,由此可见,在汇流矩阵中,流域出口点出的汇水值为该流域内部的最大值。在部分情况下,流域出口点处的侵蚀活动由于到达基岩而停止,或侵蚀与堆积能力达到平衡,这时流域出口点也成为局部侵蚀基准点,控制整个水系的发育。

3 基于 DEM 的沟谷特征点提取方法

本文的沟谷特征点提取以流向分析为核心,因此,无洼地 DEM 所提取的流向矩阵(D8 算法)为新算法的核心数据,是提取特征点时进行汇流判断、流向正逆追踪的基础。为便于对提取不同种类的沟谷特征点进行整合,本文对 5 种沟谷特征点进行了编码,每个沟谷特征点最终的编码由表 1 中的类型编码和级别编码连接而成。

表 1 沟谷特征点编码

Tab. 1 Codes of gully feature points

沟谷特征点	类型编码	级别编码
汇流源点	0	—
径流源点	1	—
径流节点	2	1, 2, 3, ...
裂点	3	1, 2, 3, ...
流域出口点	4	—

3.1 径流节点与径流源点的提取

用 D8 算法对水系进行提取时,要经过填洼、提取流向、提取汇流累积量几个步骤,最后,通过设置汇流量阈值得到水系。结合径流节点的定义可以发现,上述步骤提取所得的水系中,若一个栅格为径流节点,则其邻域 3×3 窗口内,一定满足:(1)至少存在 $N(N \geq 2)$ 个属于水系部分的栅格,其流向指向分析窗口中心;(2)窗口中心栅格具有流向。因为 D8 算法为单流向算法,所以,第一个条件说明,至少存在两条河流在分析窗口中心交汇;而第二个条件则说明分析窗口中心的栅格不为洼地点或流域出口点。反之,若一个栅格满足上述条件,则其一定为径流节点。因此,通过水系内部的流向判断可以准确地对两种沟谷特征点进行提取。设以汇流矩阵提取水系时使用的阈值为 λ ,流向矩阵中某栅格邻域 3×3 窗口范围内流向指向该栅格的数目为 N ,则窗口内径流节点与源点的判断流程如下:

(1)若中心栅格汇流值不小于 λ ,则将 N 置 0,提取非中心栅格的流向值 α_1 及汇流值 α_2 (设其流向指向中心时需具备的流向值为 β),转入(2);否则不作处理,移动邻域窗口至下一栅格;

(2)若 α_1 和 α_2 满足式(1),则 $N = N + 1$;依次遍历 8 个非中心栅格;

$$\begin{cases} \alpha_1 = \beta; \\ \alpha_2 = \lambda; \end{cases} \quad (1)$$

(3)若 $N \geq 2$,则中心栅格为径流节点, N 值为其汇水系数;若 $N = 0$,则中心栅格为径流源点;若 $N = 1$,则不作处理。

根据以上判断流程依次遍历流域内全部栅格点,即可准确提取出所有径流节点与源点。取径流节点处栅格所对应河流 Strahler 级别的低一级作为节点级别,并将该值连接在类型编码 2 后(表 1)输出至分级结果矩阵。此外,也可以汇水系数对径流节点进行分级。

3.2 汇流源点的抽取

汇流源点的提取需要以径流源点的结果矩阵作为基础数据进行追踪。汇流源点揭示了径流源点在降雨量增大时向上游区域的延伸方向,与径流源点间的坡长越长,越具有汇流源点的特性。因此,可以由径流源点开始,延上坡长值最大的方向进行追踪,提取流程如下:

(1)以径流源点所在栅格为追踪的初始单元;

(2)依次判断当前追踪单元邻域 3×3 窗口内的流向值 α_1 ,将 $\alpha_1 = \beta$ 的栅格的上坡长 1 提取出,放入集合 A;

(3)取集合 A 中的最大值。若最大值为 0,则该单元为汇流源点,结束追踪;否则将 A 中与之对应的元素所在栅格设为新的追踪单元,转入步骤(2)。

依次对所有径流源点对应的汇流源点进行追踪后,得到汇流源点的结果矩阵。

3.3 潜在裂点的识别追踪

潜在裂点的提取也需要以径流源点的提取结果作为追踪源。根据裂点的定义,可以利用水系内部高程信息判断沿水流方向坡度及垂直曲率是否分别符合所设阈值 s 及 c 。其中,衡量坡度变化程度的 c 主要用来区分坡顶与坡底,在坡顶处,坡度沿流向逐渐增大,在坡底处则逐渐减小,因此 c 不得小于 1(在本案例中取值为 2)。考虑到 DEM 数据中的洼地在实际中具有蓄水能力,该方法采用无洼地 DEM 数据。建立空矩阵 NULL,其元素初值全部为 0,该矩阵用于记录已追踪过的径流区域,避免重复追踪增加程序运行的时耗。潜在裂点的追踪过程如下:

(1)建立数组 $H[3]$ 用于存储水系内相邻栅格的高程值。选择径流源点在流向矩阵中所指向的栅格作为初始追踪单元,将径流源点与追踪单元所在栅格的高程值分别存入 $H[0], H[1]$;

(2)将当前追踪单元在 NULL 阵中所对应的元素值置为 1。提取当前追踪单元在流向矩阵中所指向栅格的高程值,将其记入 $H[2]$;若数组 H 中的数据满足式(2)的条件,则将当前追踪单元标记为潜在裂点;

$$\begin{cases} \frac{H[1] - H[2]}{g} \geq s; \\ \frac{H[0] - H[1] + \epsilon}{H[1] - H[2] + \epsilon} \geq c; \end{cases} \quad (2)$$

其中, g 为 DEM 的分辨率, ϵ 为任意的极小数,

用来处理分母为 0 的情况。

(3) 将 $H[1]$ 、 $H[2]$ 中的数据分别存入 $H[0]$ 、 $H[1]$ ，以 $H[2]$ 所代表的栅格作为新的追踪单元，若新单元所指向栅格的流向值为空或为 1，则结束追踪；否则转入步骤(2)；

用以上追踪方法依次遍历所有的径流源点，即可完成追踪。接下来，对潜在裂点所在栅格的河流

级别值进行提取，则得到其级别。

3.4 流域出口点的提取

对流域出口点进行提取，可任选流域内一点沿水流方向追踪，直至下一点的流向为空值。若非单独提取该特征点，则将其提取融入裂点的追踪过程，以减少程序运行过程中的重复追踪行为。

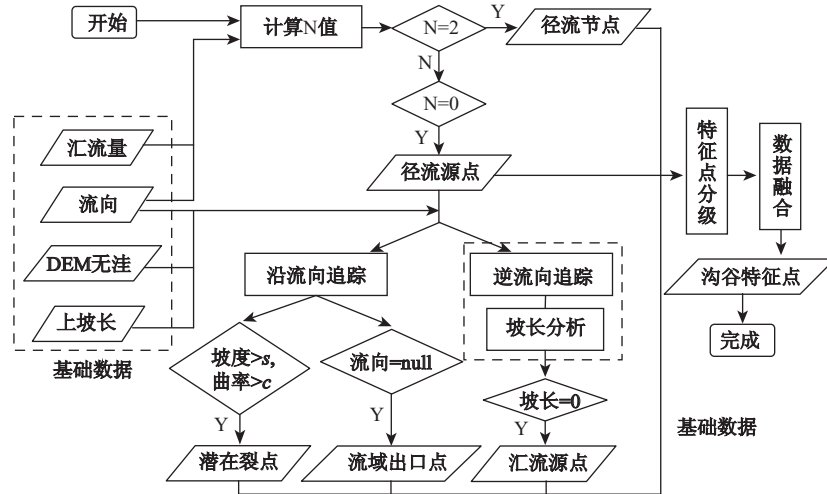


图 2 算法流程图

Fig. 2 Overall architecture of the algorithm

3.5 点数据融合

当所有点提取完成后，将各结果矩阵相加，即可得沟谷特征点的结果矩阵。在相加过程中，若某类特征点包含多个结果子集，则仅选取一个矩阵进行融合；此外，部分栅格处可能存在两种或两种以上的特征点，需要根据其在分析过程中的重要性进行选择。在无特别分析需求的情况下，本文对 3 种可能重合的沟谷特征点所推荐的重要性排序为：流域出口点 > 裂点 > 径流节点。首先，流域出口点在流域内具有唯一性，是重要控制点位，应该予以保留；其次，在 DEM 中可提取的裂点数目非常有限，而径流节点的数目则通常较多，个别的缺失通常难以对整体造成影响，因此，当裂点与径流节点重合时，首先应考虑保留裂点。若以矢量点形式进行融合，则不存在需要因位置重叠而舍去部分特征点的问题。

4 提取结果与分析

本文以位于陕西宜君地区的黄土残塬丘陵沟

壑区为研究样区，以国家测绘局标准化生产的 5m 分辨率 DEM 为基本数据源。该地区溯源侵蚀较为强烈，而溯源侵蚀也是导致沟谷特征点空间格局发生变化的重要因素之一，对沟谷地貌的演变也有重要影响。

4.1 沟谷特征点的提取

图 3 给出了新算法在实验样区的提取结果，包括各种沟谷特征点的单一提取结果及合并后的整体结果，其中各类特征点均为未分级的结果。可以

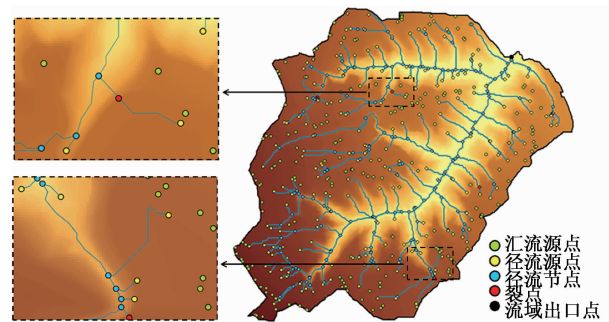


图 3 宜君实验样区沟谷特征点提取结果

Fig. 3 Results of the extraction of gully feature points in the test area in Yijun County, Shaanxi Province

看出,对于 D8 算法提取的水系,新算法在对完整流域内的径流节点、径流源点、汇流源点及流域出口点的提取结果中,确保了提取结果的准确性;在对裂点的提取上,受 DEM 数据本身的影响,结果不能保证完全准确,但揭示了潜在裂点所在的位置,为点模式的沟谷发育研究创造了有利的条件,也在最大限度上保证了所建立的沟谷特征点模型的完整性。图 4 所示为根据 Strahler 河流级别划分所得出的径流节点及裂点的分级结果。在实验样区所提取的各种沟谷特征点数目如表 2 所示,径流节点与潜在裂点的分级结果如表 3 所示。

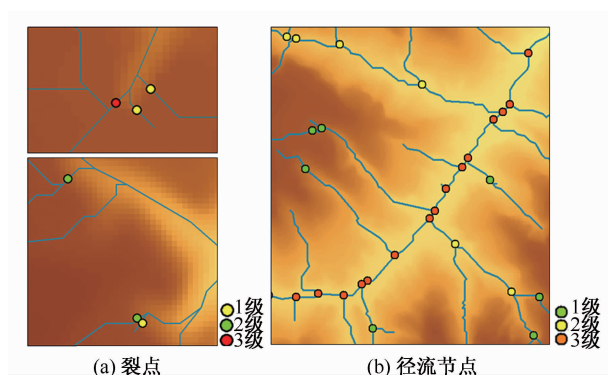


图 4 裂点与径流节点分级结果

Fig. 4 Orders of knickpoint and runoff nodes

4.2 结果分析

对不同细节程度的径流网络进行提取时,径流源点的位置和数目都会相应变化,径流节点的数目也随节点减少而改变。以汇流量提取水系时,通过设置不同阈值,可以有效地反映其随径流网络细节程度的变化特征。因此,本文通过设置不同的汇水

阈值,对径流节点、径流源点在不同径流网络细节程度下的变化特征进行研究。

表 2 宜君实验样区沟谷特征点提取结果

Tab. 2 Results of gully feature points in Yijun test area

沟谷特征点	提取数目
汇流源点	180
径流源点	180
径流节点	177
潜在裂点	11
流域出口点	1

表 3 宜君实验样区沟谷特征点分级结果

Tab. 3 Orders of gully feature points in Yijun test area

沟谷特征点	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级
径流节点	74	47	51	5	0
潜在裂点	7	2	1	0	1

通过图 5 可以看出,径流节点及源点随汇水阈值的变化具有明显的非线性特征(反比例函数曲线),当汇水累积阈值达到一定程度时,径流节点、源点的数目发生变化剧烈,反映出径流网络较高频率的出现与消失,而汇水累积阈值低于该程度时,径流节点与源点的变化则趋于稳定。该规律说明:特征点信息的提取与径流网络细节程度之间存在密切的关联关系。此外,图 5 中也给出了径流节点与源点数目间的相关关系,从中可以看出,两者间存在明显的线性相关关系;根据上文建立的径流节点分类标准,这也说明水系中的节点主要为一级节点。

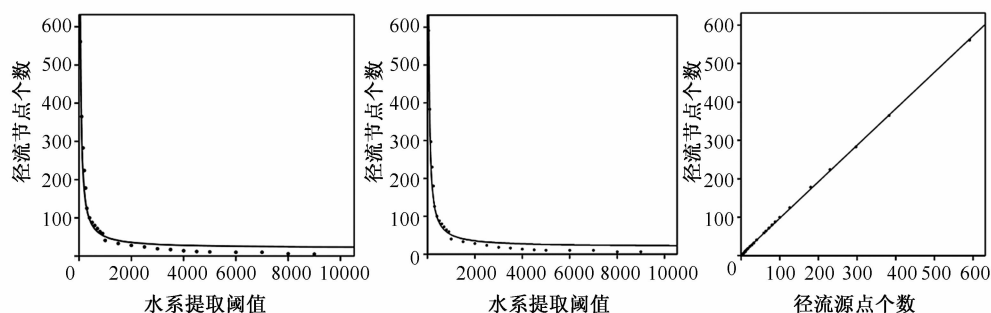


图 5 沟谷特征点数目与汇流阈值的关系

Fig. 5 Relationship between sum of gully feature points and confluence threshold

4.3 流域边界对提取结果的影响分析

若提取时使用的 DEM 数据没有包含完整的流

域,则依据 D8 算法得到的水系的完整性会存在一定误差,给后续的沟谷特征点提取造成影响,而这也是 DEM 与 D8 算法提取沟谷特征点方法必须面

临的问题。

图 6 中左右两矩阵分别表示了当流域不完整时水系的提取所受到的影响,其中,实线部分为 DEM 中已包含的流域区域,而虚线部分表示未包含区域,栅格值代表其流向。以径流节点为例,在左侧矩阵中,中心栅格位置应为径流节点,但由于 DEM 空间范围的限制,第一行的中间栅格无法被提取出,导致该径流节点被遗漏;右侧矩阵中的中心栅格本应属于水系部分,但由于其汇流累积量丢失了图幅外汇入的三个支流的供给,因此,该栅格的流向值在提取中会被当作噪声去除,使得下侧中心栅格所表示的径流节点被遗漏。此外,汇流量的缺失也会使得径流源点的位置向下游偏移,增大了提取结果在空间位置上的误差。当然,在数据外部的汇流源点、裂点、流域出口点等也无法被提取。

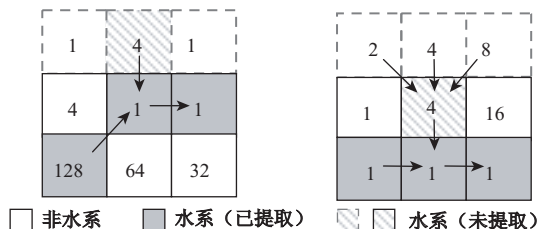


图 6 流域完整性对水系提取的影响

Fig. 6 Impact of watershed integrity on drainage network extraction

在 DEM 数据中,流域内的某个栅格对该流域汇流累积量值的总贡献量,为其初始水量(通常为 1)在该流域中流经的栅格总数。图 7 表示了黄土沟壑区内 5m 分辨率 DEM 所对应的汇流贡献矩阵。若对 DEM 边界范围不断进行压缩,则被舍去部分的汇流总贡献量会越来越大。虽然图 7(b)中边界部分的平均汇流贡献值相比中心处较小,但是由于其对应的元素总数大,因此,其汇流总贡献量仍然较大。在由流域边界向内压缩的情况下,边界处的栅格为流域内汇流贡献值最高的群体,这将加剧汇流总量的损失。

式(3)所示为样区 DEM 边界去除范围(四周各去除的行、列数)与汇流损失量(去除栅格部分的汇流总贡献量)之间的线性关系。由于 DEM 流域内每个栅格的汇流贡献值都对应着不同的汇水区域,因此,流域数据的不完整将导致内部不同区域损失汇流值的情况各不相同,进而难以通过改变水系提取的阈值对其进行完整的修复。

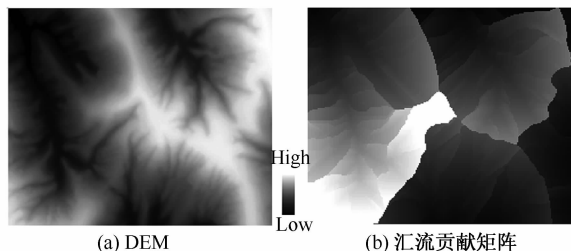


图 7 汇流贡献矩阵示意图

Fig. 7 Confluence contribution matrix

$$y = 4.4 \cdot 10^4 \cdot x + 4.658 \cdot 10^4 \quad (3)$$

其中, x 为 DEM 边界去除范围, y 为汇流损失量。

5 结论

本文提出了一套基于 DEM 的沟谷特征点提取方法,实现了对径流节点、径流源点、汇流源点、潜在裂点及局部流域出口点的准确、快速提取,并通过建立标准对特征点进行了有效分类,为沟谷特征点的研究提供了重要数据基础。通过进一步对实验样区内的点提取结果及数据进行分析,亦得出以下结论:(1)径流源点沟谷特征点的提取结果与径流网络的细节程度之间存在密切的关联关系;(2)流域 DEM 的完整程度将会对水系提取结果造成较大影响,进而影响特征点的准确提取,因此,数据源的完整程度对点的提取十分重要。

今后的工作将重点进行一体化沟谷特征点组织结构模型的设计与建立,并以此对沟谷地貌的空间形态格局和发育演化机理进行深入的分析。

参考文献:

- [1] 朱庆,田一翔,张叶廷,等. 从规则格网 DEM 自动提取汇水区域及其子区域的方法[J]. 测绘学报, 2005, 34(2): 129 - 133.
- [2] 赵晨辉,吴耀国,孙庆义. 基于 GIS 的分布式流域水文模型[J]. 水资源与水工程学报, 2006, 17(1): 39 - 43.
- [3] 刘学军,王永君,龚健雅,等. DEM 流域网络提取算法的误差特性分析[J]. 测绘学报, 2007, 36(2): 224 - 230.
- [4] 李俊,汤国安,张婷,等. 利用 DEM 提取陕北黄土高原沟谷网络的汇流阈值研究[J]. 水土保持通报, 2007, 27(2): 77 - 78.
- [5] 陈俊明,林广发,杨志海,等. 数字河网提取的影响参数优化分析[J]. 地球信息科学学报, 2011, 13(1): 32 - 37.
- [6] Garbrecht J, Martz L W. Automated channel ordering and node indexing for raster channel networks [J].

- Computers & Geosciences, 1997, 23(9): 961 - 966.
- [7] Gartsman B I, Bugayets A N, Tegai N D, *et al.* Analysis of the structure of riversystems and the prospects for modeling hydrological processes [J]. *Geography and Natural Resources*, 2008, 29(2): 116 - 123.
- [8] Dawes W R, Short D. The significance of topology for modeling the surface hydrology of fluvial landscapes [J]. *Water Resources Research*, 1994, 30(4): 1045 - 1055.
- [9] 李军锋, 李天文, 陈正江, 等. 基于 DEM 的黄土高原丘陵沟壑区沟谷网络节点研究 [J]. *干旱区地理*, 2005, 28(3): 386 - 391.
- [10] 李军锋, 李天文, 陈正江, 等. 基于 DEM 的沟谷网络节点水流累积量研究 [J]. *山地学报*, 2005, 23(2): 228 - 234.
- [11] 易红伟, 汤国安, 刘咏梅, 等. 河网径流节点及其基于 DEM 的自动提取 [J]. *水土保持学报*, 2003, 17(3): 108 - 111.
- [12] 刘晓, 王雷, 高佩玲. 利用几何网络提取河网径流节点的方法研究 [J]. *测绘科学*, 2011, 36(5): 85 - 86.
- [13] 钱柯健, 朱红春, 李发源. 一种基于 DEM 汇水累积量的径流节点提取方法 [J]. *测绘科学*, 2012, 37(1): 28 - 29.
- [14] 朱红春, 汤国安, 吴良超, 等. 基于地貌结构与汇水特征的沟谷节点提取与分析——以陕北黄土高原为例 [J]. *水科学进展*, 2012, 23(1): 7 - 13.
- [15] Strahler A N. Quantitative analysis of watershed geomorphology [J]. *Transactions of the American Geophysical Union*, 1957, 38(6): 913 - 920.

Extraction and Analysis of Gully Feature Points Based on DEMs

XIE Yiqun¹, ZHU Hongchun^{1,2}, TANG Guoan¹ and ZENG Ruian¹

(1. *School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China;*

2. *College of Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China*)

Abstract: Gully feature points (GFPs) are crucial for studies on spatial pattern and evolution of gully landforms, and the extraction of the GFPs is the basis of related researches. Previously, scholars have made different methods for GFP detection and most are about runoff nodes. However, these methods are still not integral and have deficiencies in either accuracy or computational efficiency as analyzed in this paper. Thus, based on detailed analysis of DEMs and their derivatives, a series of new algorithms are proposed to improve the performance of GFP detection (including runoff nodes, river heads, confluence origins, potential knickpoints and outlets) by trace of flow direction and neighborhood feature judgment. The methods examine the essential features of GFPs and most thresholds used are invariable in different kinds of landforms. Thus, both the robustness and efficiency of the extraction are improved by the new algorithms. As orders of nodes and knickpoints are important in further analyses, criteria for automatic order classification are also established based on Strahler rules. By using 5m resolution DEMs in the test area in Yijun County, Shaanxi Province, experiments are made to test the methods' ability in both GFP extraction and classification. The results of runoff nodes, river heads, confluence origins and outlets are consistent with manual marks. The detected potential knickpoints also create favorable conditions for researches on gully evolution and guarantee the integrity of GFPs to the maximum extent. Preliminary analyses are made using the GFP results and reflect the variation characteristics of the sum of GFPs as rainfall changes. Finally, the impact of watershed completeness on the accuracy of GFP extraction is discussed in details. It shows that both the loss of stream pixels and confluence accumulations could cause the omission of the points. As the influences brought by data incompleteness can hardly be removed in the extraction process, it is crucial to guarantee that the boundaries of watersheds are within the data extent.

Key words: gully feature point; DEM; digital terrain analysis