

基于 DEM 的沟缘线和坡脚线提取方法研究

李小曼^{1,2}, 王刚², 李锐³

(1. 陕西师范大学 旅游与环境学院, 陕西 西安 710062; 2. 武警工程学院 通信工程系, 陕西 西安 710086; 3. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 提出了一种基于 DEM 的沟缘线和坡脚线的提取方法, 该方法以沟缘线和坡脚线的形态特征为基础。沟缘线作为梁峁地和沟坡地的分界线位于凸坡上, 沟缘线象素以下的坡度应大于某一坡度值; 坡脚线作为沟坡地和沟底地的交界线位于凹坡上, 坡脚线象素以上的坡度应大于某一坡度值; 沟缘线和坡脚线上的象素都具有局部最大的坡度变化。利用这种特性进行沟缘线和坡脚线的提取, 易于实现。处理的速度快、效率高, 提取结果较准确。

关键词: DEM; 沟缘线; 坡脚线; 坡度变化率

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2008)01-0069-04

中图分类号: P208

A DEM Based Method for Extraction of Valley Shoulder Line and Slope Heel Line

LI Xiao-man^{1,2}, WANG Gang², LI Rui³

(1. College of Tourism and Environment Sciences, Shaanxi Normal

University, Xi'an, Shaanxi 710062, China; 2. Department of Communication Engineering

Arming Police Engineering College, Xi'an, Shaanxi 710086, China; 3. Institute of Soil and Water

Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The method for extraction of valley shoulder line and slope heel line is based on the shape features of valley shoulder line and slope heel line. Valley shoulder line is the boundary of upland and valley and is located on convex slope. Slope heel line is the boundary of valley slope and valley bottom and is located on concave slope. Both of them are characterized by the biggest local change in slope degree. Using these features in extraction, the method can provide sound flexibility and has high accuracy and high efficiency.

Keywords: DEM; valley shoulder line; slope heel line; change of slope

沟缘线和坡脚线是黄土高原地貌中重要的特征线, 沟缘线是正负两大地形(沟间地和沟谷地)的分界线, 是研究黄土地区土壤侵蚀和地貌发展的重要地貌特征线^[1]。沟缘线和坡脚线也是基本地貌类型划分的基础, 以黄土丘陵沟壑区为例, 梁峁地位于沟缘线以上, 沟坡地位于沟缘线以下坡脚线以上, 坡脚线以下至河床部分为沟底地。由于不同地貌区的坡度、切割程度等的不同, 土地利用也常以沟缘线和坡脚线作为分界线。因此对于沟缘线和坡脚线的提取研究具有重要的现实意义。数字高程模型(Digital Elevation Model, 简称 DEM), 是表示区域 D 上的三维向量有限序列, 用函数的形式描述为: $V_i = (X_i, Y_i, Z_i)$

($i = 1, 2, 3, \dots, n$) 式中 X_i, Y_i 是平面坐标, Z_i 是 (X_i, Y_i) 对应的高程。用高程来反映地形状况, 是提取沟缘线和坡脚线的常用信息源。DEM 结构模型则主要有规则格网模型、不规则三角网模型和等高线模型 3 种^[2-3], 本研究所使用的结构模型为其中的规则格网模型。

1 沟缘线和坡脚线的特征

1.1 沟缘线和坡脚线的地貌形态

沟缘线和坡脚线是构成沟谷的重要特征线, 对于黄土丘陵沟壑区由上向下可以表示为 3 个部分(如图 1 所示)^[1], 从上往下依次为梁峁地、沟坡地、沟底地,

收稿日期: 2007-09-17

修回日期: 2007-10-06

资助项目: 中国科学院知识创新重要项目“中国水土流失现状、趋势与对策研究”(KZCX2-YW-401)

作者简介: 李小曼(1974—), 女(汉族), 陕西省三原县人, 讲师, 博士生, 研究方向为地图学与地理信息系统。E-mail: wj.lxm@126.com。

地貌部位之间的交界部分别对应几条重要的地貌线,由上到下分别为梁脊顶部的分水线、梁脊地与沟坡地之间的沟缘线、沟坡地和沟底地之间的坡脚线,沟底的沟谷线。对于一个具体的坡面纵剖面,由于发育状况不同,可能上述几部分不全包括,也可能除上面叙述的几个主要部分外可能还存在其它的地貌,但必然具有梁脊地部分,而对于存在强烈侵蚀的坡面,必然具有沟坡地部分,因此沟缘线和坡脚线必然存在。

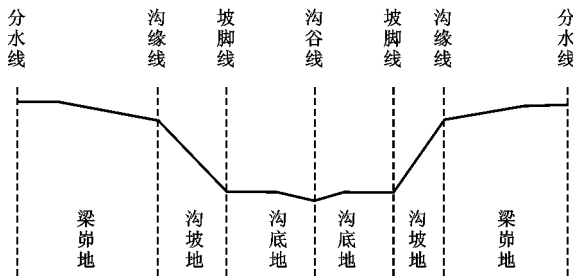


图 1 沟谷剖面形态示意图

沟缘线是坡度比较平缓的梁脊地和坡度较为陡峻的沟坡地类型的分界线,沟缘线处具有明显的坡度转折。坡脚线是坡度较为陡峻的沟坡地和坡度比较平缓的沟底地类型的分界线,坡脚线处也具有明显的坡度转折。

1.2 沟缘线和坡脚线的像素特征

根据沟缘线和坡脚线的地貌形态特征分析可知沟缘线和坡脚线的像素具有以下特征。

1.2.1 沟缘线的像素具有的特征 (1) 通过图 1 可以看出,梁脊地的坡度小于沟坡地,作为分界线沟缘线大多位于凸坡上。(2) 沟缘线上的像素具有局部最大的坡度变化。(3) 沟缘线像素以下的坡度应大于某一坡度值,具体值根据地区不同而定,一般在 20 左右。

1.2.2 坡脚线的像素具有的特征 (1) 由于沟坡地的坡度大于沟底地的坡度,坡脚线大多位于凹坡之上。(2) 坡脚线上的像素具有局部最大的坡度变化特征。(3) 坡脚线像素以上的坡度应大于某一坡度值,具体值根据地区不同而定,一般在 20 左右。

1.3 几个基本概念

(1) 坡度^[4]。坡度是表示地表面在该点倾斜程度的一个量,既有大小又有方向即矢量。坡度矢量从数学上来讲,其模等于地表曲面函数在该点的切平面与水平面夹角的正切。(2) 地面剖面曲率^[5]。指通过某一地面点的法向量且与该点坡度平行的法截面与地形曲面相交的曲线在该点的曲率,剖面曲率描述地形坡度的变化。地面剖面曲率是影响垂直方向坡形变化的主要因子,对区域地形有很好的指示意义,

是反映地形起伏变化特征的重要指标之一。剖面曲率是确定坡形以及提取诸如沟缘线、沟底线等地形转折线的重要定量地形指标。

2 沟缘线和坡脚线的提取方法

2.1 提取沟缘线与坡脚线算法流程

根据沟缘线与坡脚线的像素特征,提出了如下沟缘线和坡脚线的提取算法,分为以下几步。(1) 对 DEM 进行平滑处理消除微地貌的影响。(2) 计算坡度的变化率并保留局部最大点作为沟缘线或坡脚线点集。(3) 通过 DEM 划分正负地形,落在正地形的点集为沟缘线点集 A,落在负地形的点集为坡脚线点集 B。(4) 通过坡度限制剔除点集 A, B 中的伪点。(5) 对沟缘线和坡脚线进行细化,得到沟缘线点集 A₁ 和坡脚线点集 B₁。(6) 消除细化后点集 A₁, B₁ 中的孤立点。(7) 生成沟缘线和坡脚线。

2.2 提取沟缘线与坡脚线算法的实现

由于地形复杂地区地貌复杂,DEM 中存在很多琐碎的细节,这些细节会影响沟缘线和坡脚线提取的结果,为了减少或消除这种不良影响,在提取之前首先要对 DEM 进行平滑。研究中使用 3 × 3 空间均值滤波器进行平滑,该滤波器输出结果是包含在滤波器掩模邻域内像素的平均值^[6]。可以对 DEM 连续平滑多次,平滑的次数可以根据 DEM 的情况而定,实验中一般平滑 4 ~ 6 次。

沟缘线位于凸坡上,坡脚线位于凹坡上,提取时通过 DEM 将地貌分为正(凸)地貌和负(凹)地貌。区分正负地貌的原理是使用矩形窗口对 DEM 进行扫描统计,如果某点处高程大于矩形窗口内高程的均值,则此点为正地貌点,否则为负地貌点;矩形窗口的大小可取 3 × 3, 5 × 5, 7 × 7 等。判定式如式 1 所示。

$$f_{ZF} = \begin{cases} 1 & H_i - (H_1 + H_2 + \dots + H_n)/n > 0 \\ -1 & H_i - (H_1 + H_2 + \dots + H_n)/n \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:“1”——正地貌;“-1”——负地貌;设 f_{ZF} ——正负地貌指数; H ——高程; i ——地表任意一点, 1, 2, ..., n ——以 i 为中心矩形窗口内的点。

格网 DEM 的坡度是在图 2 所示 3 × 3 的窗口(以下叙述如无特殊说明, 3 × 3 的格网都使用图 2 编号)内计算,利用微分方法,计算公式如式(2)。

$$S = \arctan \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \quad (2)$$

式中: S ——坡度; f_x ——X 方向上的高程变化率; f_y ——Y 方向上的高程变化率。

对 f_x 和 f_y 的求解采用三次带权差分^[7], 计算表达式如式 3 所示。

$$\begin{cases} f_x = \frac{Z_2 + 2Z_1 + Z_8 - Z_4 - 2Z_5 - Z_6}{8D} \\ f_y = \frac{Z_4 + 2Z_3 + Z_2 - Z_6 - 2Z_7 - Z_8}{8D} \end{cases} \quad (3)$$

式中: Z ——高程; D ——格网的间距。

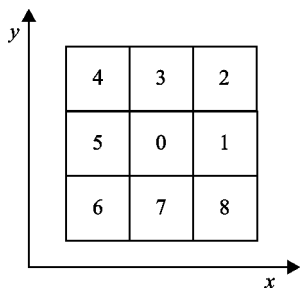


图 2 DEM 3 × 3 局部移动窗口

$$S_0 = \tan^{-1} \left(\frac{a_2 + 2a_1 + a_8 + a_4 - 2a_5 - a_6}{8D} \right)^2 + \left(\frac{a_4 + 2a_3 + a_2 - a_6 - 2a_7 - a_8}{8D} \right)^2 \quad (4)$$

$$\begin{cases} S_0 - S_1 > 0 \\ S_0 - S_5 > 0 \\ S_0 - S_4 > 0 \\ S_0 - S_8 > 0 \end{cases} \text{ 或 } \begin{cases} S_0 - S_3 > 0 \\ S_0 - S_7 > 0 \\ S_0 - S_2 > 0 \\ S_0 - S_6 > 0 \end{cases} \quad (5)$$

具有坡度变化率局部最大特性的点可能是沟缘线或坡脚线上的点,再根据 DEM 正负地貌的划分,将这些点分成落在正地貌的点集 A 和落在负地貌的点集 B ,点集 A 为沟缘线点集,点集 B 为坡脚线点集,此时对点集中的点还需通过后续的步骤进一步筛选,才能最终形成沟缘线和坡脚线。

根据对沟缘线和坡脚线特征的分析,沟缘线与坡脚线附近有一个坡度范围,因此通过坡度小于某一阈值可以删除点集中部分伪点,试验中取阈值为 25° 。

用上述方法确定的沟缘线和坡脚线的点,在局部位置上构成了沟缘线和坡脚线的宽带,这些宽带部位应做细化处理,最终形成只有一个网格宽度的特征点,这里使用改进后的 Hilditch 细线化算法处理,改进后的 Hilditch 细线化算法的原理如下^[9-10]:设沟缘线点、坡脚线点格网单元的值为 1,非沟缘线点、坡脚线点格网单元的值为 0,定义如图 3 的 Hilditch 细化函数模板和以下函数 ($k=1,2,\dots,8$)。

$$A(k) = \begin{cases} 1, & P_k \text{ 为沟缘线点或坡脚线点} \\ 0, & P_k \text{ 为非沟缘线点或坡脚线点} \end{cases} \quad (6)$$

$$A(0) = \begin{cases} 1, & P_0 \text{ 为沟缘线点或坡脚线点} \\ 0, & P_0 \text{ 为非沟缘线点或坡脚线点} \\ -1, & P_0 \text{ 为待剔除沟缘线点或坡脚线点} \end{cases} \quad (7)$$

$$B(k) = 1 - |A(k)| \quad (8)$$

对于 3×3 的格网,任一格网点的坡度的变化率,相应坡度的计算,使用带权值差分算法计算。对于 3×3 的格网, i 号格网点的坡度为 $a_i, i=1,2,\dots,8$ 。格网中心点的坡度变化率记为 S_0, D 为格网的间距。计算式如式 4。

沟缘线和坡脚线沿着某一方向上具有局部坡度变化率最大的特点,沟缘线和坡脚线可以看成由一系列离散的点构成的“链”,如果沿着沟缘线和坡脚线的法线方向,穿过某一沟缘线点或坡脚线点做一短剖面,那么沟缘线点或坡脚线点的坡度变化率必高于其两侧相邻数据点的坡度变化率,在 3×3 的格网中各点的坡度变化率为 $S_i, i=0,1,2,\dots,8$ 。中间“0”号点的坡度变化率 S_0 ,满足式 5 的条件,则该点是坡度变化率局部最大点^[8]。

$$C(k) = \begin{cases} 1, & A(k) = 1 \\ 0, & A(k) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

P_4	P_3	P_2
P_5	P_0	P_1
P_6	P_7	P_8

图 3 Hilditch 细化函数模板

$$D(k) = \begin{cases} 1, & |A(k)| = 1 \\ 0, & |A(k)| = 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} E(k) = 1 - |D(k)| \\ E(9) = E(1) \end{cases} \quad (11)$$

$$F = \underset{i=n}{\text{min}} [E(i) - E(i+1) E(i+2)] \quad (12)$$

$n = \{1, 3, 5, 7\}$

$$G(k) = F \quad (13)$$

$k=0,1,\dots,8$; F 是 $A(k)=0$ 时的 F 值。利用式(6) - (13),细化过程如下。

(1) 将模板沿扫描线方向移动,遍历所有的 DEM 网格。当下列 5 个条件全部满足时,中心栅格单元 P_0 赋予 -1,否则不作任何改变。 $A(0) = 1$ (中心栅格为沟缘线点或坡脚线点); $F = \underset{i=n}{\text{min}} B(2i - 1), n = \{1, 2, 3, 4\}$ (中心栅格位于沟缘线或坡脚线点宽带边缘); $\underset{i=n}{\text{min}} |A(2i - 1) - 2|, n = \{1, 2, 3, 4\}$ (不消除端点); $F = 1$ (保留连接性); $A(i) = -1$, 或 $G(i) = 1, i = \{1, 2, \dots, 8\}$ (线宽为 2 的部分只消除一侧)。

(2) 在第 1 步处理结束后,将已赋 - 1 的栅格值全部置为 0,再次执行第 1 步,如此反复直至第 1 步处理的结果不再有 - 1 的栅格出现,处理结束。细化后在点集中存在一些孤立点,应当将这些点删除。在 3×3 的格网中,如果中心点满足式 14 的条件在该点为孤立点,则从点集中删除这些点。

$$\begin{cases} P_0 = 1 \\ 8 \\ P_i = 1 \end{cases} \quad (14)$$

经过上述步骤的处理后所得点集即为沟缘线和

坡脚线的点集,接下来通过 ERDAS 提供的“栅格到矢量的转换功能(raster to vector)”,可以生成沟缘线和坡脚线。

3 实例与结论

选取如图 4 所示的 DEM。实验使用的 DEM 所属区域是陕北县南沟流域,DEM 的水平栅格分辨率为 15 m。图 5 为相应的坡度图,图 6 为提取的坡脚线,图 7 为提取的沟缘线。

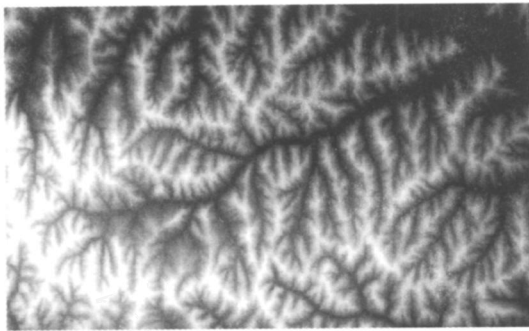


图 4 县南沟流域 DEM 图

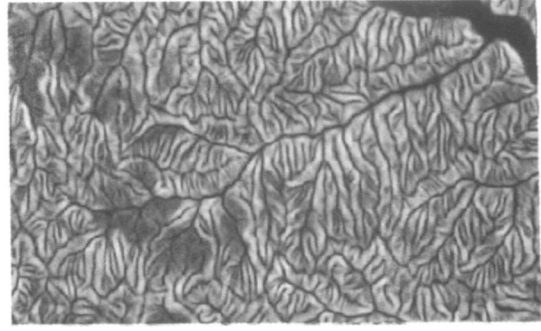


图 5 县南沟流域坡度图

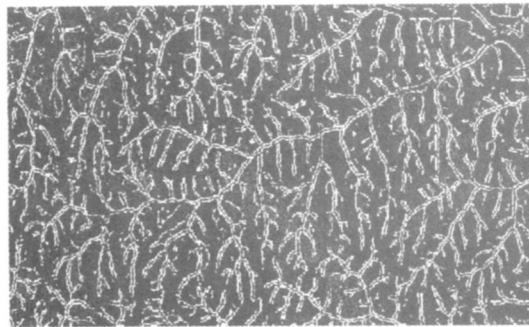


图 6 坡脚线的提取结果

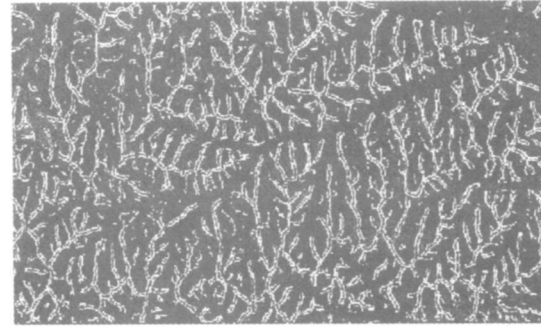


图 7 沟缘线的提取结果

本文提出的沟缘线和坡脚线的提取算法,通过实验验证可得到以下结论。(1) 该算法能较准确地进行沟缘线和坡脚线的提取,提取结果符合实际情况。(2) 提出的提取方法计算过程简单,易于编程实现,处理的速度快,效率高。(3) 由于地形的复杂性导致提取的结果个别地方需要进行手工编辑。

[参 考 文 献]

- [1] 闫国年,钱亚东.基于栅格数字高程模型自动提取黄土地貌沟缘线技术研究[J].地理科学,1998,18(6):567—573.
- [2] 汤国安,刘学军,闫国年.数字高程模型及地学分析的原理与方法[M].北京:科学出版社,2005:2—30.
- [3] Hutchinson M F, Gallant J C. Geographical Information Systems[M]. New York:John Wiley and Sons, 1999: 105—124.
- [4] 李志林,朱庆.数字高程模型(2版)[M].武昌:武汉大学出版社,2003:216—233.
- [5] Tian Xiang Yue, Chen Shu Peng, Xu Bing, et al. A curve-theorem based approach for change detection and its application to Yellow River delta[J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23 (11): 2283—2292.
- [6] Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods 著.阮秋琦,阮宇智译.数字图像处理(2版)[M].北京:电子工业出版社, 2003:233—240.
- [7] Horn B K P. Hill shading and the reflectance map[J]. Proceedings of IEEE, 1981, 69(1): 14—47.
- [8] 周启鸣,刘学军.数字地形分析[M].北京:科学出版社, 2006:87—95, 144—150, 255—256.
- [9] 孙家广.计算机图形学[M].北京:科学出版社,1998: 8—200.
- [10] 岳天祥,杜正平,宋敦江.高精度曲面建模与实时空间模拟[J].中国图像图形学报, 2007, 12(9): 1659—1664.