

# 突变地形特征在 DEM 上的表达

古云鹤, 杨勤科, 罗仪宁, 王雷, 王懿

(西北大学 城市与环境学院, 西安 710127)

**摘要:**黄土高原南部高塬沟壑区的地形, 存在比较明显的塬边线和沟缘线等突变地形特征线, 而这种地形特征在 DEM 表面的表达却缺乏必要研究。选长武县为研究区, 将 1:50 000 地形图(等高线、高程点和河流等专题层)及其手工提取的地形特征线(塬边线、沟缘线和坡脚线)数字化; 利用多要素构 TIN 方法和 Hutchinson 插值方法, 分别在有无地形特征线参与的情况下建立 10 m 分辨率规则格网的 DEM; 利用地图代数运算和频率统计等方法, 比较分析所建 DEM 表面的高程、坡度和剖面曲率等地形属性特征。结果表明: 在 ANUDEM 插值(Hutchinson 算法)情况下, 地形特征线的参与, 可显著改善 DEM 对地形特征的表达, 既避免了平三角, 又兼顾了地形的平滑和连续性特征; 而在构 TIN 建立 DEM 的情况下则无明显影响。

**关键词:** TIN; DEM; Hc-DEM; 地形特征线; 地形突变

中图分类号: P901; TP79

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2011)02-0174-06

## Representation of Eroded Geomorphological Features on the Digital Elevation Model (DEM)

GU Yun-he, YANG Qin-ke, LUO Yi-ning, WANG Lei, WANG Yi

(College of Urban and Environment Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China)

**Abstract:** The eroded geomorphological feature lines such as plateau edge lines and gully edge lines along with the discontinuous terrain are obviously existing in the gully area of the southern Loess Plateau, but the representation of this topographical feature in the DEM surface lacks of necessary research for how to represent that topographical feature lines. This paper selects Changwu County as the study region, and digitizes the 1:50 000 topographic maps (including contours, elevation points and rivers thematic layers) and its hand-drawn topographic features lines (including plateau sidelines, gully edge lines and the slope toe lines). This research established four rules grid DEMs with 10 m resolution, respectively using multi-element structuring TIN method and Hutchinson interpolation method, in the case of with or without topographic feature lines participation interpolation, and comparative analysis terrain attributes such as the surface elevation, slope and curvature characteristics between the four DEMs, by map algebra and frequency statistics method. The results show that, in ANUDEM interpolation (Hutchinson algorithm) case, representation of topographical feature in the DEM surface with topographical feature lines can be significantly improved, avoiding the flat triangle and taking into account both the smoothness and continuity of the terrain features, while topographical feature lines have useless impact on the DEM established by TIN.

**Key words:** TIN; DEM; Hc-DEM; topographical feature line; discontinuous

### 1 研究背景

数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)是一组有序数据阵列, 是通过高程数据对地形表面形

态的数字化表示<sup>[1-2]</sup>。通过 DEM 可以提取丰富的地形信息, 因此在流域水文和土壤侵蚀模拟分析等研究中得到广泛应用<sup>[3-4]</sup>。生成 DEM 时通常都将地表看成是一个高程变化构成的连续场, 忽略一些局地洼陷

和凸起,进而建立起一个具有连续、光滑表面特征的 DEM<sup>[5]</sup>。但是真实的地形也有高程的突变现象,如陡坎、阶梯状地形等,因而突变地形的表达受到重视。王春和胡鹏等提出了高保真 DEM 概念<sup>[6-8]</sup>,探讨了基于特征嵌入技术的新型格网 DEM 建立方法。车延国等在露天矿场精细 DEM 的建立中,采用在原始数据中加入台阶属性,使生成的 TIN 与实际地形相符<sup>[9]</sup>。ANUDEM 软件中包括了局地适应性算法<sup>[10-11]</sup>,力图处理地形的连续和突变。但总的来说,对于侵蚀环境下 DEM 表面上突变地形特征的表达,依然缺乏必要研究。

本研究在黄土高原南部的高塬沟壑区,将手工提取的突变地形要素纳入 DEM 生成过程,探讨在较高分辨率水平上探讨突变地形表达方法,以期提高 DEM 对地表模拟精度,为水文和土壤侵蚀模拟提供较高质量的 DEM 数据。

## 2 研究方法

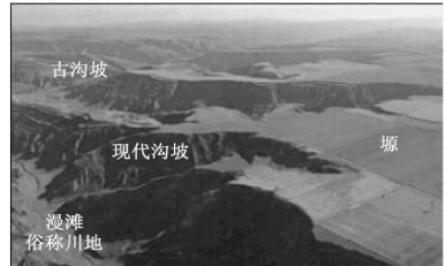
### 2.1 研究区域及数据基础

本次研究的区域选在长武县,东西跨越  $107^{\circ}30' - 108^{\circ}00'E$ ,长约 45 km,南北跨越  $35^{\circ}00' - 35^{\circ}20'N$ ,长度约为 37.5 km,工作区域面积大概为  $1\ 684.6\text{ km}^2$ 。该区属于黄土高原沟壑区,平坦的原面、倾斜的塬坡、古代沟坡、现代沟坡和河谷平地均有出现<sup>[12]</sup>(图 1),地形突变特征清晰明显,是研究突变地形表达的理想研究区。本次研究的数据基础为国家基础比例尺 1:5 万地形图,等高距为 10 m。纸质地图扫描后,对地形要素(等高线、高程点和水系)进行数字化、编辑处理,利用 ESRI coverage 格式,按标

准分幅建立地形数据库。投影采用高斯克吕格投影( $6^{\circ}$ 带),为了减少变形误差,采用研究区中央部位的经度( $107^{\circ}45'00''E$ )作为中央经线<sup>[13]</sup>。



a 地形结构示意图



b 实际地形示意图

图 1 黄土高原沟壑区示意图

### 2.2 地形特征线提取

因而根据研究区域的地形特征,在等高线基础上,手工提取了主要的地形特征线,主要包括:(1)塬边线是指平坦原面与具有一定坡度的古代沟坡地形的转折线,以坡度  $0.5^{\circ}$  为控制指标<sup>[12]</sup>,或以等高线突然变密为标志来勾绘(图 2a)。(2)沟缘线是指古代沟坡向更陡的现代沟坡之间的转折线。有 3 种形态,一是与塬边线重合(图 2b),二是经过一个经古代沟坡突然变陡直接进入沟谷(图 2c),三是有相对较缓的古代沟渐变现代沟坡;(3)坡脚线,是现代河流冲击物堆积形成的台地与沟坡之间的转折线。

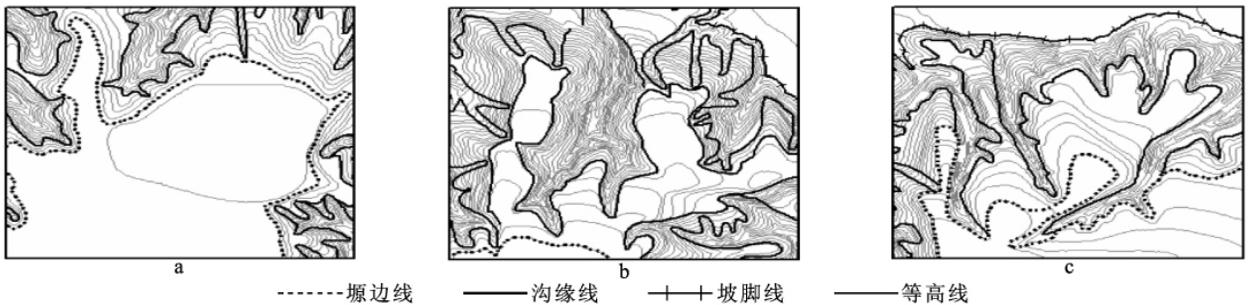


图 2 地形特征线

### 2.3 DEM 建立

本研究用两种常见方法建立 DEM。(1)多要素构 TIN 建立 DEM。通过等高线和高程点构 TIN,然后转成规则网格 DEM<sup>[14]</sup>。(2)用 Hutchinson 方法建立 DEM。利用等高线、高程点和地形特征线,运行 ANUDEM 软件<sup>[15]</sup>,建立 Hc-DEM。参考以往的研

究成果<sup>[16-18]</sup>,运行 ANUDEM 时,将第二糙度系数设立为 0.5,迭代次数设立为 20,分辨率设为 5 m,高程容差设为 5 m,得到最后的 Hc-DEM。本研究在以上两种方法的基础上,分别加入地形特征线,建立有无地形特征线的两组 DEM 数据,具体数据说明见表 1。

## 2.4 分析方法

本研究主要使用差值分析和频率分析的方法。即对不同类型的 DEM 进行栅格差值计算,并且统计坡度及坡长的频率,包括累积频率,分析不同类型的 DEM 坡度、剖面曲率分布特征。

表 1 DEM 数据产品简要说明

数据名称	简要说明
DEM1x	无特征线 DEM
TIN-DEM1	利用等高线、高程点构 TIN 生成的 DEM
Hc-DEM1	利用等高线、高程点,用 ANUDEM 软件生成的 DEM
DEM2x	有地形特征线 DEM
TIN-DEM2	利用等高线、高程点和地形特征线构 TIN 生成的 DEM
Hc-DEM2	利用等高线、高程点和地形特征线用 ANUDEM 软件生成的 DEM

## 3 结果与分析

### 3.1 有无地形特征线的 DEM 之间的比较

3.1.1 TIN-DEM1 和 TIN-DEM2 的比较 从图 3 可以看出,有无加入地形特征线,对于构 TIN 生成的 DEM 是基本没有影响的。从两种 TIN-DEM 的差值图像(图 3c)上看,两种 TIN-DEM 的高程差异在 20 之内,而且只有部分区域有差别,大部分保持一致。从图 4 可以看出,两种 TIN-DEM 的差值图像,相差为 0~1 m 区间的栅格面积占了主要部分,图上表明,绝大部分面积的高程差是小于 0.5 m 的,表 2 是从图 4 得出的统计结果,更为清晰的显示,50%的面积高程差(绝对值)小于等于 0.0005 m,占面积 95%以上的都是高差小于等于 0.1 m,而大于 0.1 m 的只占共 5%,大于 1 m 的仅仅占 1%,可以说明两种 DEM 基本相同。这主要是因为 TIN 这种特殊的格式,已经可以满足突变地形的表达,因此不需要添加地形特征线对其进行约束。

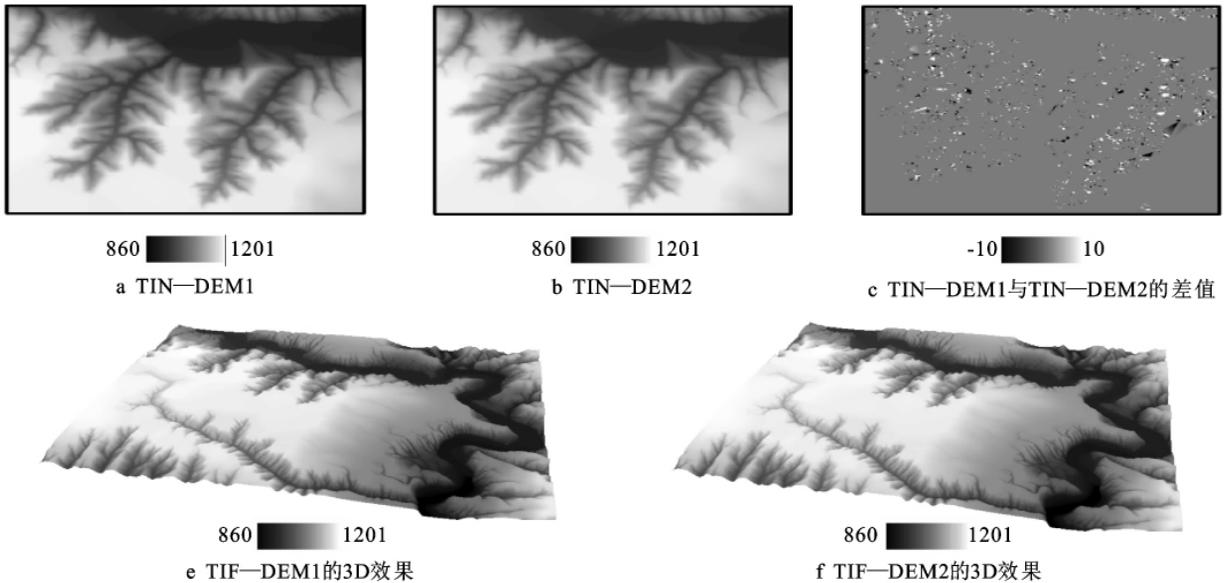


图 3 TIN-DEM1 与 TIN-DEM2 之间的比较

表 2 不同范围的两种 TIN-DEM 的高程差异统计

累积频率/%	50	90	95	99	100
高差绝对值范围/m	$\leq 0.0005$	$\leq 0.5$	$\leq 0.1$	$\leq 1$	$\leq 10$

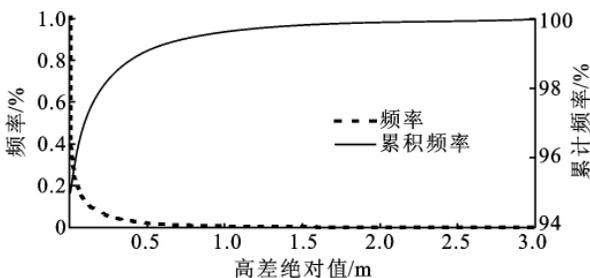


图 4 TIN-DEM1 与 TIN-DEM2 差值图的高程差异累积频率曲线

3.1.2 Hc-DEM1 和 Hc-DEM2 的比较 从图 5 可以看出,不加入地形特征线的 Hc-DEM 在地形突变的区域(塍边)亮度较大,高程较高,呈先凸后降状,属于渐变;塍边线外侧的凸出,与样条插值原理相适应。而加入地形特征线的 Hc-DEM 则呈突变状,且无凸出(如图 6 所示)。从二者的差值图上(图 5c)高程差异主要集中在塍边、现代沟坡及川道边缘等坡度剧烈变化的区域。从两种 DEM 的光照模拟图(图 5d 和 e)上可以看出,Hc-DEM2 中凡是发生了突变部位由于加入地形特征线,表达清晰、转折明显,而 Hc-DEM1 在这些地区做了光滑处理,转折模糊。说明加入地形特征线对表现突变地形还是较为成功的。从以上对两组有无地形特征线的 DEM 对比我们可以得出

结论,用 TIN 方法建立 DEM,地形特征线影响不大,而 Hutchinson 方法建立 DEM,地形特征线影响较大。

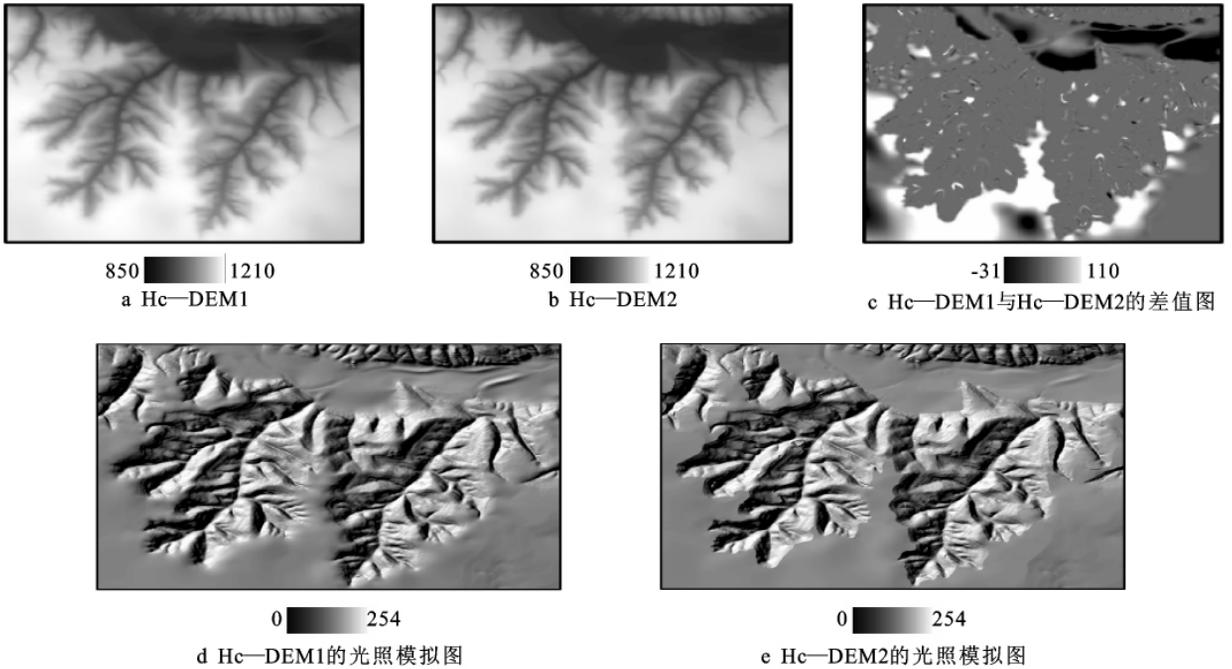


图 5 Hc-DEM1 与 Hc-DEM2 之间的比较

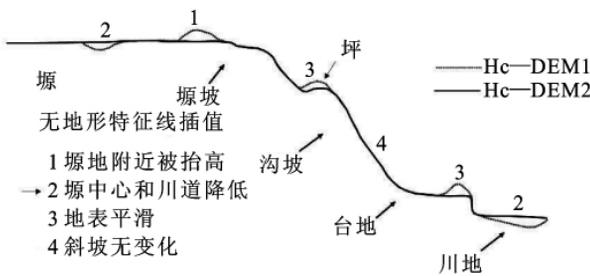


图 6 有无地形特征线的 Hc-DEM 对地形表示影响的示意图

### 3.2 加入地形特征线的 DEM 间的比较

加入地形特征线之后的 DEM 之间的比较,是指

TIN-DEM2 与 Hc-DEM2 的比较。从两种 DEM 的光照模拟图局部区域放大可以看到, Hc-DEM2 与 TIN-DEM2 相比, 有较大的优势。首先, TIN-DEM2 不能很好的表现河流等水文要素, Hc-DEM2 表现河流十分明显(图 7a), 而 TIN-DEM2 则基本表现不出来(图 7d)。其次, 由于在建不规则三角网时, 参与插值的数据不同, 三角形的位置也不同, 故而 TIN-DEM2 表面保留了一些平三角(如图 7e), 而 Hc-DEM 却没有(图 7b)。最后, 在局部细节上, TIN-DEM2 无法表现出地表的平滑和连续性(图 7f), 而 Hc-DEM2 却能较好的表现出来(图 7c)。

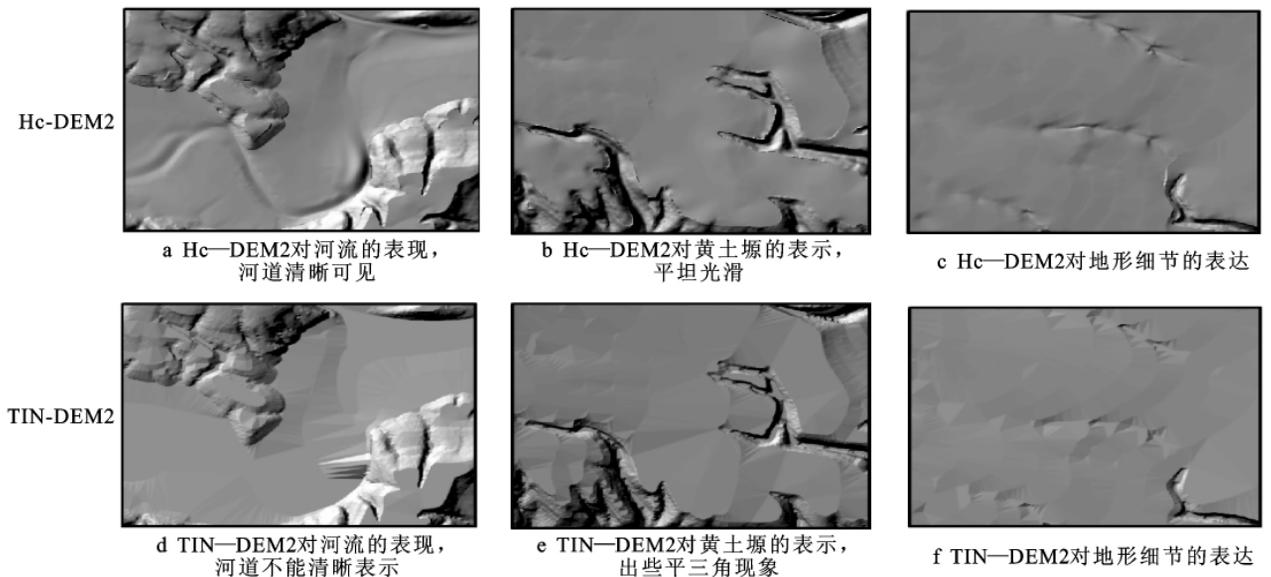


图 7 TIN-DEM2 与 Hc-DEM2 的比较

### 3.3 不同 DEM 的坡度和剖面曲率比较

坡度和剖面曲率是两个基本且重要的地形因子, 本文用求取坡度变化率的办法提取剖面曲率, 并对两种不同的 Hc-DEM 的坡度和曲率进行了统计(见表 3), 并分别做了剖面曲率的频率和累积频率曲线图(图 8—9)。从表 3 中可以看出, 加入地形特征线的 Hc-DEM 坡度及剖面曲率数值的最大值变大, 标准差变大, 但是平均值变小。这是因为经过地形特征线的约束后, 地表的陡坡和平坦地区的面积都相应增大, 从图 8 和图 9 上分别看坡度和剖面曲率的累积频率曲线, 坡度较小的地区增加较陡坡增加的多, 坡度

(图 10c)和剖面曲率(图 11c)变化最大的地区集中于地形特征线附近, 这些地区正是地形失真比较大的地区。因此加入地形特征线后, Hc-DEM 能更好的表现地形的平滑和突变特征。

表 3 坡度及剖面曲率统计

项目	最小值	最大值	平均值	标准差
Slope <sub>Hc-DEM1</sub>	0	66.99	13.20	13.16
Slope <sub>Hc-DEM2</sub>	0	84.71	12.48	13.66
Curvature <sub>Hc-DEM1</sub>	3.9	80.10	13.13	15.29
Curvature <sub>Hc-DEM2</sub>	0.001	83.49	13.08	17.50

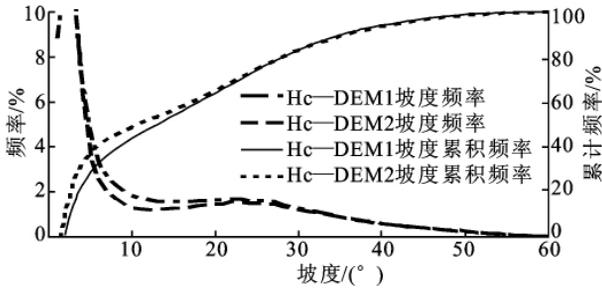


图 8 坡度频率与累积频率曲线

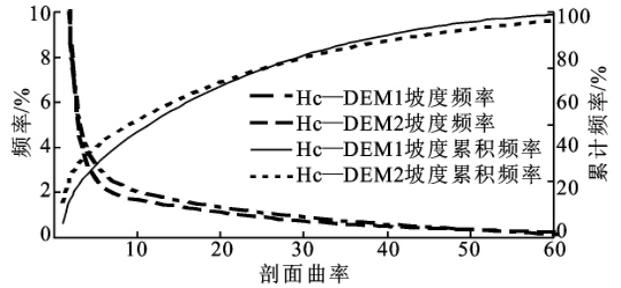
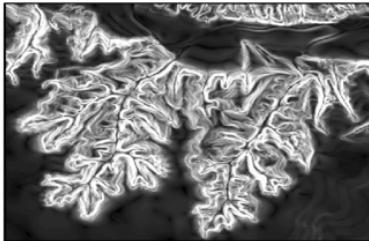
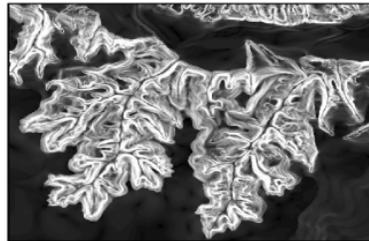


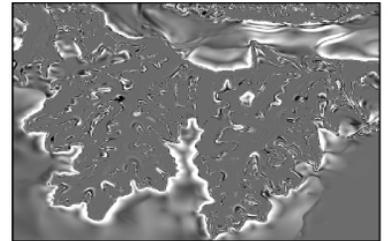
图 9 剖面曲率频率与累积频率曲线



a Hc-DEM1提取的坡度

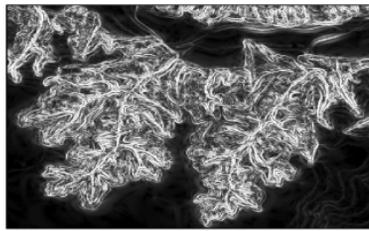


b Hc-DEM2提取的坡度

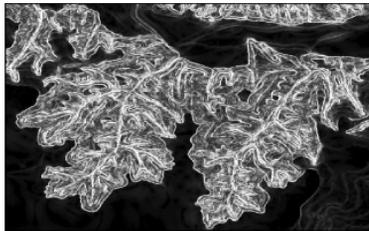


c Hc-DEM1与Hc-DEM2提取的坡度差值图

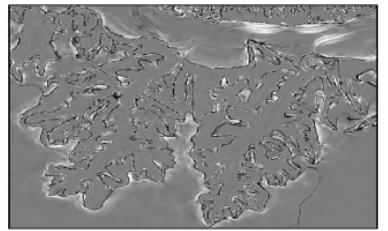
图 10 Hc-DEM1 与 Hc-DEM2 之间坡度的比较



a Hc-DEM1提取的曲率



b Hc-DEM2提取的曲率



c Hc-DEM1与Hc-DEM2提取的曲率差值图

图 11 Hc-DEM1 与 Hc-DEM2 之间曲率的比较

从两种坡度数据的绝对差值统计数据(表 4)来看, 50%的面积坡度差小于等于 0.5°, 75%的面积小于 2°, 90%的面积小于 5°, 95%小于等于 15°, 99%的面积小于等于 16°, 只有 1%的面积差是小于等于 74°。有从两种剖面曲率数据的绝对差值统计数据来看, 50%的剖面曲率差小于等于 1, 75%的面积小于 4, 90%的面积小于 14, 95%小于等于 22, 99%的面积小于等于 43, 只有 1%的面积差是小于等于 82。这说明两种 Hc-DEM 提取的坡度和剖面曲率在大部分

是相同的, 因此差异较小的范围较大, 只有在发生突变的区域变化较大, 因此差异的极值比较大。

表 4 坡度差异统计表

累积频率/%	50	75	90	95	99	100
剖面曲率差范围	≤0.5	≤2	≤5	≤15	≤16	≤74

表 5 剖面曲率差异统计表

累积频率/%	50	75	90	95	99	100
剖面曲率差范围	≤1	≤4	≤14	≤22	≤43	≤82

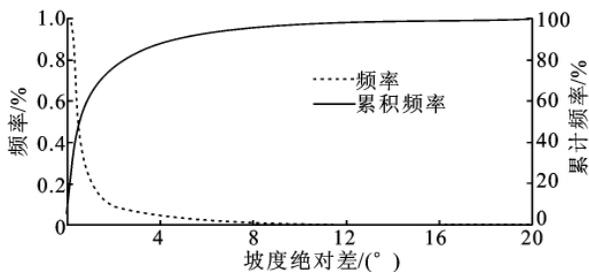


图 12 两种坡度的差异累积频率

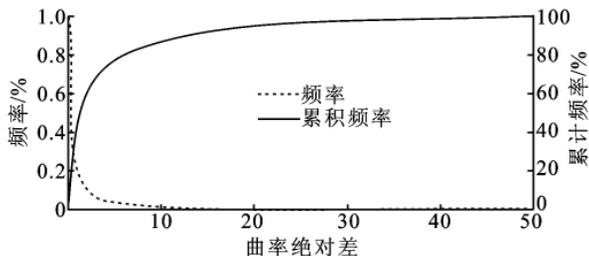


图 13 两种剖面曲率的差异累积频率

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

(1)通过 Hc-DEM1 和 Hc-DEM2 比较可以看出,增加地形特征线,对基于 Hutchinson 方法建立的 DEM,在塬边及现代沟坡的边缘等坡度变化剧烈的地区进行约束,显著改善 DEM 对突变地形的表达;通过 TIN-DEM1 和 TIN-DEM2 的比较可以看出,对多要素构 TIN 方法建立的 DEM,由于 TIN 结构的特殊结构,自身对突变地形有良好表达,加入地形特征线对构 TIN 的结果影响不大,因而改善程度不大。

(2)从 TIN-DEM2 和 Hc-DEM2 的比较可以看出,增加了地形特征线的 Hc-DEM,既避免了 TIN-DEM 表面的平三角,改善了水文地貌关系,又表达了地形的光滑和连续性特征,同时使突变部位得到强化,地形的突变特征得到良好表达。进而使这种通过加特征线、主要利用 ANUDEM 局部适应性算法,建立生产 DEM 表达的地形更加真实,能更好地表达黄土高原沟壑区的地形特征。

### 4.2 讨论

通过加特征线的方法生产的 Hc-DEM,可以克服 TIN-DEM 自身的缺点,又能很好的表达突变地形。在本次研究中,手工提取了塬边线、沟缘线、坡脚线 3 类地形特征线。然而,提取的所有地形特征线,其表现的突变特征并不一致,特别是沟缘线,由于其性质的差异性,表达的突变程度也各不一样。因此,具有什么样特征的地形特征线必须参与插值,什么样的线可以忽略,都是进一步研究的内容。另外,在已有研究基础上<sup>[19]</sup>,沟缘线等地形特征线的自动提取方法,还值得进一步探讨。

致谢:完成论文的过程中,得到了牛亮的帮助,对此表示感谢。

### 参考文献:

- [1] Moore I D, Grayson R B, Landson A R. Digital Terrain Modelling; a Review of Hydrological, Geomorphological, and Biological Applications [J]. Hydrological Processes, 1991, 5(1): 3-30.
- [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.
- [3] 王中根, 刘昌明, 左其亭, 等. 基于 DEM 的分布式水文模型构建方法[J]. 地理科学进展, 2002, 21(3): 430-439.
- [4] 杨勤科, 赵牡丹, 刘咏梅, 等. DEM 与区域土壤侵蚀地形因子研究[J]. 地理信息世界, 2009, 7(1): 25-31.
- [5] Hutchinson M. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits[J]. Journal of Hydrology, 1989, 106: 211-232.
- [6] 王春, 刘学军, 汤国安, 等. 格网 DEM 地形模拟的形态保真度研究[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2009, 34(2): 147-149.
- [7] 王春, 刘学军, 汤国安, 等. 特征嵌入式数字高程模型研究[M]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2009, 34(10): 1149-1154.
- [8] 胡鹏, 杨传勇, 吴艳兰, 等. 新数字高程模型理论、方法、标准和应用[M]. 北京: 测绘出版社, 2007.
- [9] 车延国, 李兰勇. 露天矿采场精细 DEM 建立[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007, 26(6): 841-844.
- [10] 杨勤科, Tim R M, 李领涛, 等. ANUDEM—专业化数字高程模型插值算法及其特点[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(3): 36-40.
- [11] Hutchinson M F. ANUDEM Version 5. 1 User Guide [M]. Canberra: A. N. U. Centre for Resource and Environmental Studies, 2004.
- [12] 刘元保, 唐克丽. 国内外坡度分级和王东沟试验区的坡度组成[J]. 水土保持通报, 1987, 5(3): 59-65.
- [13] 国家测绘局. CH/T 1015. 1-2007 基础地理信息数字产品 1: 10000, 1: 50000 生产技术规程第 1 部分: 数字线划图(DLG)[S]. 北京: 测绘出版社, 2007.
- [14] 国家测绘局. CH/T 1015. 2-2007 基础地理信息数字产品 1: 10000, 1: 50000 生产技术规程第 2 部分: 数字高程模型(DEM)[S]. 北京: 测绘出版社, 2007.
- [15] Hutchinson M. ANUDEM Version 5. 2 [M/OL]. 2010, <http://fennerschool.anu.edu.au/publications/software/anudem.php>.
- [16] 张彩霞, 杨勤科, 段建军. 高分辨率数字高程模型的构建方法[J]. 水利学报, 2006, 37(8): 1009-1014.
- [17] 杨勤科, 张彩霞, 李领涛, 等. 基于信息含量分析法确定 DEM 分辨率的方法研究[J]. 长江科学院院报, 2006, 23(5): 21-23.
- [18] 师维娟, 杨勤科, 赵东波, 等. 中分辨率水文地貌关系正确 DEM 建立方法研究: 以黄土丘陵区为例[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2007, 35(2): 143-148.
- [19] 朱红春, 汤国安, 张友顺, 等. 基于 DEM 提取黄土丘陵区沟沿线[J]. 水土保持通报, 2003, 23(5): 43-45.