等高线图形概括在黄土高原沟谷侵蚀量估算中的应用

刘万青，张超超，王旭红
（西北大学 城市与环境学院，陕西 西安 710127）

摘　要：黄土高原是世界上土壤侵蚀最为严重的地区之一，沟谷侵蚀是其最重要的研究课题。为了从地理学角度估算沟谷侵蚀量，以 5 m×5 m 分辨率的 DEM 为实验数据，运用传统地图制图学领域的等高线图形简化技术，结合现代 GIS 三维分析与数据挖掘方法，对陕西省安塞县马家沟流域典型样区进行了实验研究。结果表明，对构成沟谷部位的等高线几何图形实施简化，即相当于在实验条件下对沟谷实行了“虚拟填充”，这种地形还原手法可用于模拟沟谷系统的形成和发展过程，对于探索单一沟谷或流域沟谷系统的长期演变过程，准确估算沟谷系统的侵蚀总量具有广泛的参考价值。

关键词：等高线图形简化；DEM 数据挖掘；地学分析；沟谷侵蚀量估算
文献标识码：B　　**文章编号**：1000-288X(2011)01-0128-04　　**中图分类号**：S157.1，P283.1

Estimating Total Gully Erosion in Loess Plateau Using Simplified Contour Maps

LIU Wan-qing, ZHANG Chao-chao, WANG Xu-hong
(*College of Urban and Environment, Northwest University, Xi'an, Shaanxi* 710127, *China*)

Abstract: One of the most severely eroded regions in the world is the Loess Plateau, where gully erosion is one of most important research topics. In order to estimate gully erosion from geographic perspective, Majiagou basin in Shaanxi Province as the study site was investigated using 5 m×5 m DEM as experimental data, combining three-dimensional analysis and data mining method in GIS, along with contour simplification technology in traditional cartography. The results mainly show that terrain indicators changed by simplifing a group of contours that consist of a gully, which is equivalent to that gully was virtually filled in the laboratory. This method as virtual restoration of terrain can be used to simulate the formation and development process of a gully or a system of gullies in long terms. The concepts and methods developed in this paper may have some enlightening values to estimate total erosion of a gully or gully system precisely.

Keywords: simplified contour map; DEM data mining; geographic analyst; gully erosion estimation

黄土高原土体深厚，土质疏松，水土流失严重，流水地貌及树枝状水系发育典型，是研究土壤侵蚀规律和实施水土保持实验的理想场所。然而，引起水土流失的自然与社会经济因素极其复杂，难以实现土壤侵蚀的精确定量和准确预报。多年来，围绕流域尺度上的坡面与沟谷二元侵蚀定量难题，国内外进行了大量研究，取得了丰富成果。其中，常规而有代表性的研究方法是通过野外定位观测站长期定点观测，并依据径流含沙量变化来推算统计时段输沙总量。该方法简单易行，定量准确，但费工费时费资金，无法大范围实施，同时也无法获取坡面侵蚀和沟谷侵蚀的分项统计数值。最早将沟谷作为独立侵蚀单元进行研究始于 20 世纪 80 年代[1-2]。之后，随着科学技术的发展，以遥感、地理信息系统、全球定位系统为代表的 3S 技术在土壤侵蚀研究领域获得了广泛应用，取得了重要研究成果[3-18]，其主流研究方法有 3 种。(1) 以 RS 为工具，利用多时相遥感影像解译信息来估算土壤侵蚀量和进行土壤侵蚀制图[3,14-16]。(2) 以 GIS 为工具，以 DEM 为数据源，利用数据挖掘技术获取数字地表信息[5-6,11-13]，为土壤二元侵蚀定量研究提供数据支持。(3) 利用 GPS 全球精确定位功能，改善和提高野外定位观测统计的精度与效率，实现对流域侵蚀敏感单元的动态监测[17]。

上述成果在一定程度上提高了土壤侵蚀定量的研究水平，缩短了研究周期，提高了工作效率。然而，在利用高分辨率 DEM 进行侵蚀定量估算方面，以往

收稿日期：2010-02-26　　**修回日期**：2010-08-15
资助项目：国家自然科学基金项目“不同地貌类型区遥感图像信息容量的差异性研究”(41071271)；陕西省自然科学基金项目“土地利用/土地覆盖遥感信息提取空间尺度效应研究”(2007D24)；陕西省教育厅专项科研计划项目“黄土高原土地覆盖遥感信息提取空间尺度效应研究”(08JK441)
作者简介：刘万青(1965—)，男(汉族)，陕西省澄城县人，硕士，副教授，研究方向为地图学与地理信息系统。E-mail：mclwq@yahoo.com.cn。

研究过于注重对各种侵蚀模型的验证与改进,在重视土壤侵蚀广泛性的同时,却忽视了侵蚀发生的地域分异性。尤其是在研究沟谷侵蚀单元时,忽视了 DEM 所表现出的数字地形特征与沟谷系统发生发展规律之间的内在联系。事实上,借助于三维可视化技术,高分辨率 DEM 可视为土壤侵蚀地貌的"活化石"或"电子沙盘",且完全可在 GIS 和 RS 的共同支持下,实现更深层次的地学数据挖掘和动态显示,进而更准确地估算出特定地貌侵蚀单元的土壤侵蚀量。

本文以黄土高原高分辨率 DEM 为数据源,运用地学数据挖掘技术,结合制图综合(尤其是图形简化)原理与方法,经由实验验证提出了一种新型的估算沟谷侵蚀总量的技术方案,研究成果对于解决黄土高原单一沟谷或沟谷系统的侵蚀定量难题具有广泛的参考价值。

1　实验材料与方法

1.1　实验样区

实验区域为陕西省安塞县的马家沟流域,介于 36°49′52″—36°56′40″N 和 109°9′36″—109°18′58″E 之间,流域中轴线呈 NW—ES 走向,总面积 73.77 km^2。地面海拔 1 052 ～ 1 643 m,平均坡度 29.6°,平均沟谷密度 7.1 km/km^2,平均地表剖面曲率 30.18°。实验样区 DEM 母本数据来源于中国科学院水利部水土保持研究所马家沟流域规划项目组,样区中心位置 109°11′36″E 和 36°55′49″N,DEM 栅格分辨率为 5 m×5 m,数据总量 274 行×209 列,样区面积约 143 hm^2。该数据集地形表达精确,可以满足实验要求。

1.2　实验方法

采用 ArcGIS 9.3 专业软件平台,实验基本流程如下。(1) 由原始 DEM 派生沟谷网络,生成沟谷分级数据;(2) 由原始 DEM 派生等高线,并以等高线"内插构 TIN";(3) 在"等高线+分级沟谷网络"图层叠置显示环境中,对沟谷等高线实施图形简化,生成"简化等高线"图层,进而"内插构 TIN";(4) 利用新、旧"TIN 图层"进行土方填挖运算,求算沟谷侵蚀总量。

1.2.1　*DEM 数据挖掘*　以 DEM 为基础,利用数据挖掘技术获取实验所需派生数据,作为估算沟谷侵蚀量的依据。实验采用的数据挖掘方法包括 GIS 水文分析法、地形表面分析法和地学统计分析法[19]。

GIS 水文分析法(hydrologic analyst)用于沟谷网络的自动提取与分级,旨在为等高线图形简化提供空间参考。地形表面分析法(surface analyst)用于派生等高线,作为等高线图形简化的基础数据;以图形简化前后的 2 种等高线图层为条件,运用表面分析模块中的"内插构 TIN"功能,分别生成新旧"TIN 图层",作为估算沟谷侵蚀量的依据。地学统计分析法(geo-statistics analyst)用于沟谷长度、沟谷面积、沟谷侵蚀总量等实验指标的统计运算。

此外,综合运用了 ArcGIS 空间分析法提取"沟沿线",作为划定沟谷图形简化区的边界指示。

1.2.2　*等高线图形简化*　图形简化是地图制图学"制图综合"研究领域的基本方法之一,常用于当新编地图比例尺缩小,图面载负量下降时,删除线条上次要的小弯曲来保留线状地理要素所固有的、典型的、重要的特征,使复杂图形变得简单明了和清晰易读[20]。删除小弯曲是制图的需要,但等高线修编必然会引起信息量损失,造成局部"地貌形态"(微地形)改变,本文正是利用了制图综合的这一特点来达到估算沟谷侵蚀量的目的。

在等高线地图上,小沟谷表现为"在同一地貌部位共同向高处弯曲"的等高线组合。一条沟谷发育于同一斜坡面上,因此在地图上构成沟谷的成组等高线便具有相似的图形几何特征。若从土壤侵蚀学的角度分析,沟谷是由坡面水流沿斜坡汇集至微型洼地,并经切蚀、侧蚀而逐渐形成,且随溯源侵蚀而不断向分水岭方向延伸的带状排水排沙渠道,其发育过程是一种持续动态演变的自然地表过程。本文依据该原理提出以沟沿线为标志,运用等高线图形简化手法,删除(或者"裁弯取直")那些构成沟谷的等高线弯曲,即可使目标沟谷所在地貌部位"恢复"至沟谷尚未发育前的完整坡面状态,进而运用数字地形分析法和地统计法计算目标沟谷的土壤侵蚀总量。

实验中,图形简化应当使被修编的等高线很自然地顺着沟谷两侧等高线的自然延伸方向和曲率通过谷地,从而恢复同一斜坡面上被删除谷地部位原始地貌的主体形态特征。同时还须注意以下 2 点:(1) 当修编、删除或"虚拟填充"一条特定沟谷时,应针对构成该沟谷的所有等高线弯曲进行操作,使简化后的等高线在总体上仍能保持相互协调的空间分布形态特征;(2) 当需要对复杂的沟谷系统进行图形简化时,应始终遵循"由低级到高级,由低海拔到高海拔"的简化次序。

此外,在实施沟谷等高线图形简化时,沟沿线[13]始终是简化部位的指示标志,它直接决定了简化操作的始末点。图 1 反映了发育于同一斜坡面上 4 条平行沟谷等高线的手工简化情形。由图 1 可见,细虚线型的等高线代表原始等高线图层,粗实线型的等高线为简化后的等高线图层,两者在由沟沿线圈定的区域

呈现出不重合状态，该状态正是理解“沟谷填充”和估算沟谷侵蚀总量的基础。

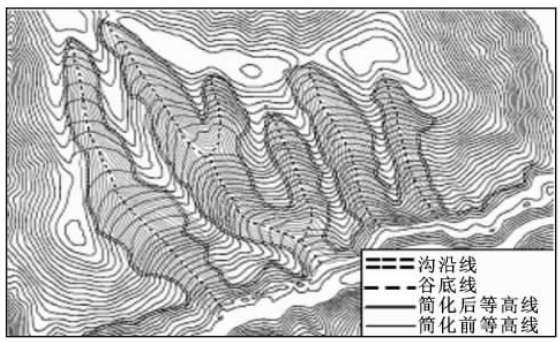


图1 沟谷部位等高线图形概括(“填平”谷地)示意

1.3 统计指标

实验采用的主要统计指标有：沟谷长度、沟谷面积、沟谷侵蚀总量。

沟谷长度和沟谷面积是指目标沟谷的沟谷线长度和由沟沿线围成的沟谷面积，统计单位分别为m和m^2。沟谷侵蚀总量是指目标沟谷或关联沟谷群由其初始发育状态(以最开始产生的细沟、浅沟为地貌标志)直到当前地貌状态(由DEM数据源所对应的具体时间决定)累积损失的土方量，统计量纲单位为m^3。

以图形简化前后的等高线图层为基础，利用ArcGIS软件3D Analyst工具集中的Create/Modify TIN工具，经内插计算生成TIN图层；利用Surface→Cut/Fill工具进行填挖方运算即可获取沟谷侵蚀总量的估算结果。

2 结果与分析

图2反映了原始等高线和简化等高线分别“构TIN”之后的三维可视化效果。其中，图2a为简化前的TIN图层，显示出当前地貌形态；图2b为简化后的TIN图层，显现出沟谷发育之前的原始地貌形态，其中浅色部分反映出“被填充”沟谷的3D可视化效果，其体积即为沟谷侵蚀土方量。

2.1 简化前后的地貌形态特征分析

等高线简化前后的地貌形态变化可以用地面平均坡度、平均剖面曲率、等高线总长度和地表平均高程来表征。实验表明，图形简化前后，地面平均坡度由31.45°下降至29.34°，降低了6.71%；地表平均剖面曲率(区分正负值)由0.159 9减少至0.147 1，降低了8.01%；上述两项数值变化反映了沟谷等高线图形简化是造成地表坡度和剖面曲率降低的直接原因。等高线总长度由193 138.4 m减少至178 938.4 m，缩短了7.35%，是等高线“裁弯取直”的直接后果；地表平均高程由1 348.6 m增加至1 370.5 m，增高了1.62%，反映了沟谷等高线“裁弯取直”，实则相当于“沟谷填充”，必然导致平均海拔增高。此外，简化前地表剖面曲率的变化范围为－39.68～47.86，简化之后为－35.29～28.79，该组数据变化客观地反映了沟谷等高线简化所引起的“沟谷填充”，沟沿线和沟底线消失及坡度变化等一系列后果。

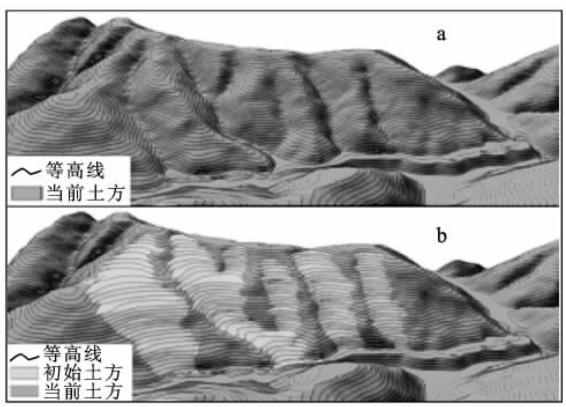


图2 新旧等高线图层构TIN后所获得的3D视觉效果

(图2a为当前地形，图2b浅色区为“被填平”谷地)

2.2 简化前后的土方量变化分析

由ArcGIS软件“3D Analyst”工具集中的“Surface Analysis－＞Area and Volume”工具求算出等高线简化前后，3D土方总量分别为147 237 242.36 m^3和149 314 065.22 m^3，两者差值为2 076 822.86 m^3。该值即为4条实验沟谷的土壤侵蚀总量，反映了实验当中等高线图形简化与沟谷土方量之间的因果关系。

表1表征了实验样区4条沟谷的实验指标统计值。由表1可见，沟谷面积与沟谷长度之间呈正比关系；沟谷长度、沟谷面积与沟谷侵蚀土方量(沟箱体积)之间关联性较弱，是土方量的一般性影响因素。而决定沟谷侵蚀土方量的主导性因素应为沟谷长度、面积和切割深度3项指标的尺度综合。

统计结果表明，4条沟谷自左向右的沟谷侵蚀土方量之比约为10∶8∶3∶1，其数量关系与图2之三维视觉效果基本吻合。

表1 实验样区目标沟谷群的土壤侵蚀总量统计

沟序	主沟长度/m	沟谷面积/m^2	侵蚀总量/m^3
左1	626.03	64 575.00	961 928.52
左2	630.59	75 000.00	755 828.66
左3	356.79	27 200.00	263 237.13
右1	322.00	17 850.00	95 828.55

3　结 论

(1) DEM 数据挖掘与等高线图形简化相结合,可以精确估算出以沟谷为代表的负地貌部位的土壤侵蚀量,该创新型的技术方案对于从纯地学角度研究不同空间尺度的土壤侵蚀定量问题具有一定参考价值。

(2) 本文提出的技术方案适用广泛,尤其适用于流水地貌极为发育的黄土高原地区。

(3) 黄土高原枝状水系发育,从流域尺度分析,大小水系的干支交汇构成了等级复杂的沟谷网络系统,以往有学者提出"水道分枝比"的概念,并证明它接近一个常数[21]。如果依本文思路深入探究,同样也能提出"沟谷侵蚀比"或"流域侵蚀比"的新概念,这将是未来研究的重要方向之一。

(4) 沟谷侵蚀是地表二元侵蚀研究领域的重要研究方向,由于同一沟谷中地面点的地表过程关联性极强,因此,从理论上讲,只要预知任意时段任意地点的地面高程变化量,即可依据该关联性质较为准确地估算出相应时段的土壤侵蚀总量,对于推动土壤侵蚀学和自然地表过程研究具有重要意义。

致谢:中国科学院水利部水土保持研究所陈云明博士,马家沟流域规划项目组对本研究提供了数据支持,特此表示感谢!

[参 考 文 献]

[1] Foster G R. Understanding ephemeral gully erosion [M]// Soil Conservation. Washington D C: National Academy of Science Press, 1986:90-125.

[2] 景可.黄土高原沟谷侵蚀研究[J].地理科学,1986(4):340-346.

[3] Plalacio J L, Lopez J. Videography: An alternative remote sensing tool for gully erosion[J]. ITC Journal, 1994(3):233-237.

[4] Poesen J, Vandaele K , van Wesemael B. Contribution of gully erosion to sediment production on cultivated lands and rangelands[M]// Walling D E. Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives. Wallingford: IAHS Press, 1996:251-266.

[5] Derose R C, Gomez B, Marden M, et al. Gully erosion in Mangatu Forest, New Zealand, estimated from digital elevation models[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1998,23:104-105.

[6] Bett H D, DeRose R C. Digital elevation models as a tool for monitoring gully erosion[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geo-information, 1999(1):90-101.

[7] Nachtergaele J, Poesen J. Assessment of soil losses by ephemeral gully erosion using high altitude (stereo) aerial photographs[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1999,24:693-706.

[8] 刘秉正,吴发启.黄土源区沟谷侵蚀与发展[J].西北林学院学报, 1993,8(2):7-15.

[9] 刘增文,李雅素.黄土残塬区侵蚀沟谷分类研究[J].中国水土保持, 2003(9):28-30.

[10] 费祥俊,邵学军.泥沙源区沟谷输沙能力的计算方法[J].泥沙研究, 2004(1):1-8.

[11] 汪邦稳,杨勤科,刘志红,等.基于 DEM 和 GIS 的修正通用土壤流失方程地形因子值的提取[J].中国水土保持科学,2007,5(2):18-23.

[12] 杨勤科,郭伟玲,张宏鸣,等.基于 GIS 和 DEM 的流域侵蚀学坡度坡长因子计算方法[J].水土保持通报,2010,30(2):203-206.

[13] 刘万青,陈云明,张超超,等.基于 DEM 的黄土高原小流域规划空间数据挖掘[J].水土保持通报,2010,30(2):229-232.

[14] 李斌兵,郑粉莉,张鹏.黄土高原丘陵沟壑区小流域浅沟和切沟侵蚀区的界定[J].水土保持通报, 2008,28(5):16-20.

[15] 胡文生,蔡强国,陈浩.利用数字摄影测量方法估算半干旱区小流域沟谷侵蚀产沙[J].地球信息科学, 2008,10(4):533-538.

[16] 王辉,王天明,杨明博,等.基于航片的黄土高原丘陵沟壑区沟谷侵蚀定量监测[J].应用生态学报, 2008,19(1):127-132.

[17] Wu Y, Cheng H. Monitoring of gully erosion on the Loess Plateau of China using a global positioning system [J]. Catena, 2005,63(2/3):154-166.

[18] Gutiérrez Á G, Schnabel S, Contador F L. Gully erosion, land use and topographical thresholds during the last 60 years in a small rangeland catchments in S W Spain[J]. Land Degradation & Development, 2009,20(5):535-550.

[19] 汤国安,杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M].北京:科学出版社,2006:363-456.

[20] 袁勘省.现代地图学教程[M].北京:科学出版社, 2007:238-245.

[21] 承继成,江美球.流域地貌数学模型[M].北京:科学出版社,1986:10-19.