

基于航片的黄土高原丘陵沟壑区沟谷侵蚀定量监测*

王辉 王天明 杨明博 熊友才 孙甜甜 施恭暎 葛剑平**

(北京师范大学生命科学学院, 北京 100875)

摘要 基于黄土丘陵沟壑区 1979 和 1993 年两期航片和地形图数据, 采用数字影像测量方法生成数字正射影像图和数字高程模型, 以地理信息系统为手段, 研究了黄土丘陵沟壑区的一条沟谷在中尺度时间上的面积及深度变化, 并对该变化的空间差异以及关键影响因子进行了分析. 结果表明: 1979—1993 年间, 研究区沟头前进了 8.5 m, 沟谷内的侵蚀模数为 $481.28 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 沟谷中部的侵蚀面积和侵蚀率最高, 侵蚀过程活跃, 存在的侵蚀风险最高; 沟头前进活跃, 坡度变陡, 存在较高的侵蚀风险; 出水口以沉积过程为主, 其侵蚀面积小于沉积面积, 沟的深度和沟谷坡度变小, 侵蚀风险较低.

关键词 沟谷侵蚀 侵蚀率 航片 地理信息系统 数字正射影像图 数字高程模型
文章编号 1001-9332(2008)01-0127-06 中图分类号 Q149 文献标识码 A

Quantitative monitoring of gully erosion in hilly-gully area of Loess Plateau based on aerial images. WANG Hui, WANG Tian-ming, YANG Ming-bo, XIONG You-cai, SUN Tian-tian, SHI Gong-jian, GE Jian-ping (College of Life Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China). -Chin. J. Appl. Ecol. 2008, 19(1): 127-132.

Abstract: Based on the aerial photographs in 1979 and 1993, and by using geographical information system (GIS) techniques, the digital elevation models (DEM) and digital orthophoto map (DOM) were constructed from the geomorphic changes in a chosen gully in the Loess hilly-gully area, and the spatial difference of the changes and their key affecting factors were analyzed. The results indicated that from 1979 to 1993, the gully head advanced actively (with a length of 8.5 meters and an erosion rate of $481.28 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), and the slope tended to become steeper, exhibiting a high erosion risk. The middle part of the gully had the largest newly eroded area and the highest erosion rate, and the erosion process was quite active, with the highest erosion risk. The water outlet was primarily endowed with deposition formation, whose eroded area was smaller than its deposition area, and the gully depth and slope were becoming less, with a lower erosion risk.

Key words: gully erosion; erosion rate; aerial photography; GIS; DOM; DEM.

由于独特的地貌形态、高的降雨侵蚀力和高强度的农业和人类活动, 黄土高原丘陵沟壑区是世界上水土流失最严重的地区之一, 每年的侵蚀率高达 $18\ 000 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. 沟谷侵蚀是黄土丘陵沟壑区的重要侵蚀类型之一, 沟蚀引起的土壤流失是沉淀物的主要来源, 其沉积过程造成河道和水库的淤积, 而沟头的不断前进则会损坏道路和建筑物, 严重危害农业生产的持续发展^[2-7]. 因此, 研究沟谷侵蚀的类型对沉淀物产生和土地退化的影响、预测沟谷侵蚀

的发展及其对环境、社会和经济的影响具有非常重要的意义^[8].

由于沟谷侵蚀研究需要大量野外调查以及长期的数据积累, 目前对沟谷侵蚀的研究相对较少^[9-10]. 已有的研究主要集中于沟谷侵蚀的成因、过程、预测和控制方面^[11-14]. 而常用的标准侵蚀样方的产沙率很难区分片蚀、面蚀、沟壁后退、沟道下切和沟头前进的产沙量. 随着摄影测量技术、数字图像处理技术、遥感和地理信息系统的快速发展, 采用多期航片可绘制沟谷的面积变化, 通过航片解译和地面测量可计算沟壁后退率和产沙率, 在沟谷侵蚀的连续监测和模拟上具有巨大的潜力. 很多研究已采用大比例尺航片计算集中流造成的土壤流失量^[15]、沟

* 国家重点基础研究发展规划项目(2002CB111507)和国家科技攻关资助项目(2004BA508B22).

** 通讯作者. E-mail: gejp@bnu.edu.cn

2007-01-09 收稿, 2007-11-13 接受.

谷侵蚀引起的沉积物量^[16-18]和沟谷截面的变化情况^[19]。航片已成为沟谷侵蚀制图最有价值的工具^[20]。本研究选取陕北黄土丘陵沟壑区的一条沟谷为研究对象,采用数字影像测量的方法对小流域内沟谷面积和深度的变化进行监测,分析沟谷侵蚀的空间分布特点及关键影响因子,旨在揭示研究区沟谷侵蚀的特征,为预测沟谷未来的变化趋势和制定水土保持措施提供理论指导。

1 研究地区与研究方法

1.1 自然概况

研究区位于陕北黄土丘陵沟壑区。该区地形起伏变化大,地貌类型差异大,基底古地貌为起伏不平的丘陵,黄土堆积地貌亦呈波浪状起伏。经全新世时期的强烈侵蚀,山坡陡峭、沟谷纵横。沟谷与冲沟下切,地表严重破碎,沟间地以梁、峁为主,土壤疏松、坡面陡,面蚀和沟蚀严重。该区属大陆性半干旱季风气候,具有干旱少雨、洪旱灾害频繁、资源贫乏等特征。年均气温 7.9℃~10.0℃,年均降水量 511~637 mm,降水多集中于 7—9 月,多以暴雨形式出现,年均蒸发量 1 386~1 469 mm。

在研究区取长 1.30 km、面积 $8.34 \times 10^4 \text{ m}^2$ 的一条沟(35°34′—35°35′ N, 106°35′—106°36′ E)为研究对象。土壤类型为黄壤土,土壤密度为 $1.34 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。沟间地为农田,主要种植玉米和谷类作物。沟内主要植被覆盖类型为草本,覆盖率 50% 左右。沟坡上的灌木覆盖率低于 15%,乔木分布很少,其上有雨水冲刷形成的小细沟,深度达 20 cm。

1.2 研究方法

1.2.1 数据处理 基于研究区 1979 年(1:39000)和 1993 年(1:45000)两期航片和 1:10000 全要素地形图,采用数字影像测量的方法生成数字高程模型(DEM)与数字正射影像图(DOM)。在数字摄影测量软件 VirtuoZo 的支持下对航片进行内方位元素校正,参照全要素地形图利用空中三角形测量进行外方位元素校正,最后完成正射校正得到数字正射影像 DOM。对各立体像对进行特征点线(山脊线、山谷线、地形突变地区线、峰顶、谷底、鞍部及地形突变点)、非相关区(河流、沙滩、房屋群或阴影等)、无高差的水域区(湖泊、水库等)及森林覆盖区的量测,将格网上的各点通过立体观测编辑到地面上,生成单一像对的 DEM,通过接边镶嵌功能进行 DEM 拼接。DOM 精度为 0.5 m,DEM 水平精度为 2 m,误差在国家测量标准误差范围之内,采用北京 54 坐标

系统。

1.2.2 沟谷面积变化监测 沟的边界用沟沿线表示,沟沿线内的面积为沟谷面积。由于植被覆盖对图象判读的干扰,仅利用 DOM 对沟沿线进行定义比较困难,本研究利用 DEM 生成的阴影图、坡度图和剖面曲率图作为参照,并对不确定的沟沿线进行野外调查。在 ArcInfo 下采用手动数字化方式基于 DOM 提取两期沟谷的沟沿线,数字化时精确到一个栅格,以提高沟谷面积计算的精度。将两期沟谷边界图进行叠加,从沟头到出水口把整个沟的长轴等分为 8 部分,计算各部分沟谷面积的变化状况。

1.2.3 沟谷深度变化监测 利用两期 DEM 相减计算沟谷深度的变化。用 1993 年 DEM 减去 1979 年的 DEM 得到新的 GRID 图层,利用 GRID 里每个栅格的值反映沟谷的变化状况,负值代表沟谷侵蚀,正值代表沉积物生成,零代表基本不变。为提高深度变化监测的精度,必须减小 DEM 的误差。DEM 的误差有随机误差和系统误差两种来源,随机误差由像素匹配不精确造成,系统误差主要由空中三角形测量和地面控制点的偏差引起。为评价两期 DEM 的误差,将公路等稳定点的高程差的平均值作为系统误差值,将该值从计算结果中去除以校正误差。沿沟头到出水口等距离的取 8 个截面,在两期 DEM 里提取截面沿沟宽各点的高程值进行比较,分析 1979—1993 年间不同位置沟谷剖面的变化情况。

1.2.4 沟谷侵蚀率 借助两期 DEM 相减的高程差图层计算沟谷侵蚀量与沉积物的产生量。高程差在 95% 的置信区间内用来计算侵蚀量和沉积量,在 95% 置信区间外的用来确定沟谷变化范围。沉积物生成率的计算公式如下:

$$SPR = (ED \times GR^2 \times Bd) / (A \times T) \quad (1)$$

式中:SPR 为沉积物产生率($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$),其值 >0 时为侵蚀量, <0 时为沉积量;ED 为高程差的和(m);GR 为 DEM 栅格的分辨率(m),本研究分辨率为 2 m; B_d 为土壤密度($\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$);A 为沟谷面积(hm^2);T 为研究的时间跨度,本研究为 14 年。

2 结果与分析

2.1 沟谷面积变化

将两期沟谷线在 ArcInfo 下进行叠加,得到研究期间沟谷面积的变化状况(图 1)。叠加结果可分为两类:由于沟壁后退产生的新侵蚀区,原本为沟谷的地方被淤积的泥沙填充。从表 1 可以看出,距出水口 160 m 以内,新侵蚀区面积为 0,沟谷填充面积较大,

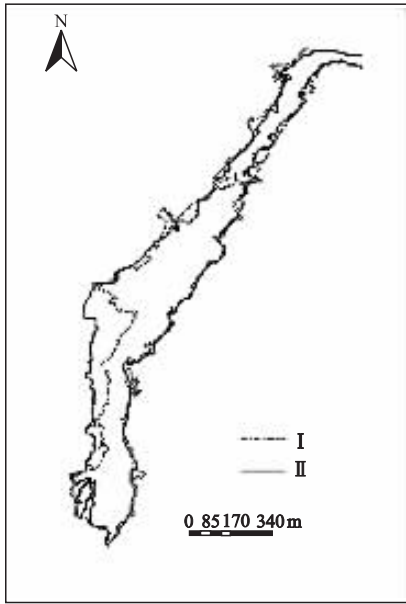


图 1 1979 (I) 和 1993 (II) 年的沟谷边界

Fig. 1 Boundary of gully area in 1979 (I) and 1993 (II).

表 1 沟谷面积变化

Tab. 1 Change in gully area

距出水口 距离 Distance from outlet (m)	沟谷面积 Gully area (m ²)			
	1979 年	1993 年	新侵蚀区 New erosion area	沟谷填充 Gully filled
0 ~ 160	6821.5	4992.5	0	1829.0
160 ~ 335	7494.0	5365.0	117.0	2246.0
335 ~ 510	10648.0	10270.0	1347.0	1725.0
510 ~ 685	17875.5	17173.0	380.5	1083.0
685 ~ 860	13802.0	22239.5	8437.5	0
860 ~ 1035	7286.0	11930.5	5588.5	944.0
1035 ~ 1210	11637.0	13812.0	2737.5	562.5
1210 ~ 1295	7813.0	6946.0	211.5	1078.5
总计 Total	83377.0	92728.5	18819.5	9468.0

主要以沉积过程为主 ; 距出水口 160 ~ 685 m , 新侵蚀区面积小于填充面积 , 沉积过程较强 , 侵蚀过程较弱 , 研究期间沟谷面积减小 ; 距出水口 685 ~ 1 210 m , 新侵蚀区面积大于填充面积 , 侵蚀过程较强而沉积过程较弱 . 距出水口 685 ~ 860 m 处的沟谷面积最大 , 在 14 年里的变化也最大 , 主要表现为西侧沟壁后退形成新的侵蚀区 , 沟谷填充面积为零 . 研究区的沟头狭长 , 1979—1993 年间沟头前进了 8.5 m , 但横截面面积较小 , 形成的新侵蚀区面积较小 , 此处的沟谷填充面积高于新侵蚀面积 . 距沟头较近区域的新侵蚀区面积大于沟谷填充面积 , 侵蚀过程活跃 , 沟谷面积变大 ; 距出水口较近区域的新侵蚀区面积小于沟谷填充面积 , 沉积过程活跃 , 沟谷面积变小 .

2.2 沟谷深度变化

沿出水口到沟头等距离选取 8 个截面 (图 2) , 然后以各截面沟宽为横轴、两期 DEM 提取的高程及高程差为纵轴分析不同截面和坡面位置的沟谷变化情况 (图 3) .



图 2 取样截面

Fig. 2 Sampling cross-sections.

A ~ H : 截面 Cross-sections. 下同 The same below.

截面 A 和 B 离出水口较近 , 其高程变化格局相似 , 在研究期间 , 两者的沟间地高程降低且均小于 5 m , 沟坡地和沟底地的高程升高 , 是水流携带的泥沙在此沉积所致 . 截面 C 距出水口处稍远 , 研究期间其沟间地的高程变化较小 , 两侧沟坡地的变化趋势相反 , 沟底地高程升高 , 沉积过程比较强烈 . 截面 D 和 E 位于沟的中部 , 变化格局相似 , 研究期间两者的沟间地高程均有不同程度的升高 , 沟坡地和沟底地高程降低 , 侵蚀过程比较强烈 , 侵蚀最严重处的沟底下切深度达 10 m 以上 . 截面 F 两侧的沟间地高程有不同幅度的升高 , 大部分沟坡地和沟底地的高程升高且幅度较大 , 小部分沟坡地高程受侵蚀降低且幅度较小 . 截面 G 和 H 距沟头较近 , 沟的坡度相对较缓 , 沟间地高程变化不明显 . 截面 G 距沟头稍远 , 研究期间其沟坡地的高程下降 , 侵蚀过程比较活跃 . 距沟头最近的截面 H 的高程最高 , 与沟间地的高程差减小 , 沟坡和沟底的坡度最缓 , 其中一侧高程降低达 5 m 左右 .

不同截面的沟间地、沟坡地和沟底地的变化格

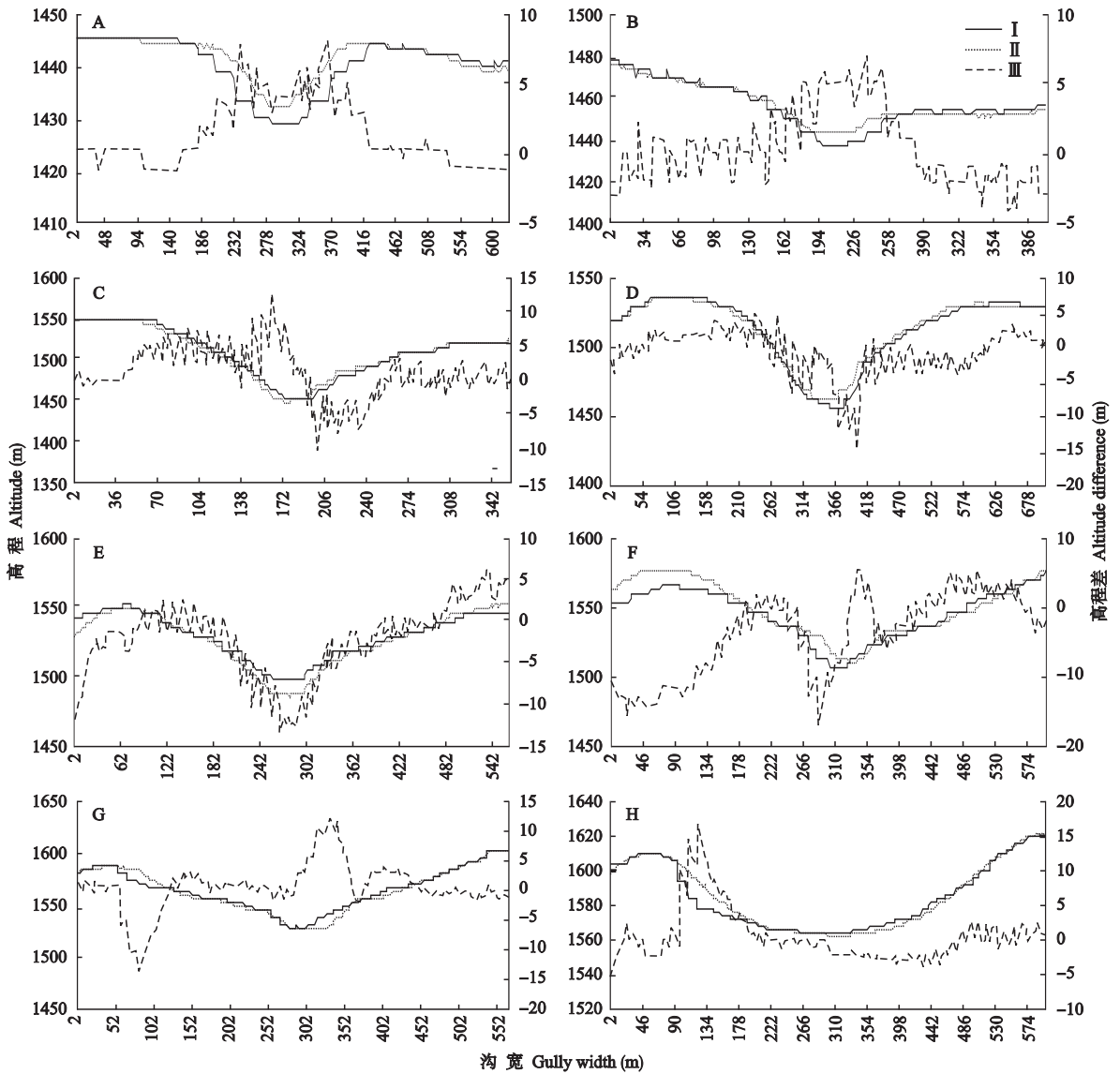


图3 1979—1993年截面的高程变化

Fig. 3 Altitude change of cross-sections from 1979 to 1993

I : 1979年高程 Altitude in 1979 ; II : 1993年高程 Altitude in 1993 ; III : 1979与1993年的高程差 Altitude difference between 1979 and 1993.

局不同. 研究期间, 离出水口较近处的沟底高程升高, 侵蚀过程不明显而沉积过程较明显. 沟中部的沟底高程降低且幅度较大, 侵蚀过程活跃而沉积过程不明显. 距沟头较近的截面的沟底高程降低, 但其降幅小于沟的中部, 此处以侵蚀过程为主. 新形成的沟头深度较小, 坡度较缓. 研究区的沟间地为梯田, 人为干扰较大, 与沟坡地和沟底地相比, 沟间地反映出的自然过程较少.

沟谷变化是一个受多因素影响的复杂过程, 主要包括地形、岩石、土壤、植被、气候以及人为干扰等因素. 本研究选取一条沟为研究对象, 因此岩石、土壤、气候的空间差异不大, 影响沟谷变化空间分布差异的主要是地形、植被覆盖和人为干扰因子. 利用

DEM 计算生成坡度图, 提取不同部位的坡度, 得到 1979、1993 年沟头、沟谷中部和出水口处的坡度分别为 $14^{\circ} \sim 32^{\circ}$ 、 $52^{\circ} \sim 68^{\circ}$ 和 $14^{\circ} \sim 36^{\circ}$ 、 $26^{\circ} \sim 42^{\circ}$ 、 $47^{\circ} \sim 55^{\circ}$ 和 $14^{\circ} \sim 27^{\circ}$. 结合沟谷各部分的变化进行比较分析, 陡坡的侵蚀量明显高于缓坡, 在其它影响因子相同的情况下, 陡坡的侵蚀风险高于缓坡. 该沟的沟头活跃, 沟的中部仍具有高侵蚀风险, 可通过人为变陡坡为缓坡, 以减小风险. 野外调查结果表明, 同一沟坡截面上缓坡的植被覆盖率高于陡坡. 由于缓坡受到径流的冲刷作用较小, 植被生长稳定, 地表粗糙度增大, 分散地表径流, 又减小了对地表的冲刷作用, 因此, 植被生长稳定的缓坡的侵蚀风险减小. 沟谷中部的沟坡较陡且植被覆盖率很低, 侵蚀量和侵

蚀风险都较高。由于耕作措施和不合理的土地利用,尤其是沟两侧的部分农田在7、8月处于休耕养墒阶段,导致沟间地表无植被覆盖,干旱的气候使得土壤表层形成结皮,增加了进入沟谷的径流量和侵蚀风险。

2.3 沟谷侵蚀率

本研究的沟谷侵蚀率为 $(481.28 \pm 17) \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。Jiang 等^[1]计算的黄土丘陵沟壑区的侵蚀率为 $18\,000 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (相当于 $180 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)。地中海地区法国东南部荒地的侵蚀率为 $190 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[21]。岷江地区年平均侵蚀模数分别为 832.64 、 $1\,048.74$ 和 $1\,362.11 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ ^[22]。说明不同地区的侵蚀率不能通过数字表面进行简单的比较,因为沟谷侵蚀的风险受多因子共同影响,而各影响因子之间还存在交叉作用。利用RUSLE模型和坡面水动力角度研究土壤侵蚀也证明植被覆盖、坡面坡度、坡长、田间管理和水土保持措施等对土壤侵蚀的影响是相互联系的^[23-24]。即使在相同地区,不同尺度的侵蚀率也不能直接比较,需要进行尺度转换。尺度转换作为土壤侵蚀研究的一个重要问题,不仅需要多学科的交流,将新的理论、方法和计算机模拟、遥感、GIS等技术引进尺度转换的研究中,更需要在实际问题中不断探索,进行理论与技术的创新。不同尺度流域之间侵蚀产沙和输移究竟有什么样的内在联系,小流域所获得的研究成果是否能推广应用到大中流域,已成为迫切需要解决的重要科学问题。

3 结 语

遥感和地理信息系统在沟谷监测和侵蚀率计算中具有很大的应用潜力。虽然航片的分辨率限制了监测的精度,但可通过与地形图数据结合校正误差,并利用立体相对测量获得DEM,可方便有效地对沟谷中尺度时间的面积和体积变化进行监测。对沟谷进行分段可监测沟谷变化的空间差异,并以此为基础分析该差异的影响因子。DEM叠加的截面分析使由坡面的侵蚀过程和沉积过程共同引起的沟谷深度变化在空间上得到了更直观的显示。

对沟谷面积和体积的变化分析结果表明,1979—1993年间由于沟谷侵蚀过程和沉积物生成过程的影响导致沟谷的面积和深度发生了较大变化,沟头前进了 8.5 m ,形成的新侵蚀区面积虽然不大,但由于沟头坡度较陡,侵蚀风险仍然较大。沟谷中部形成的新侵蚀区面积最大,该部分的侵蚀过程比较活跃,这与坡度陡、植被覆盖率低有关,另外农

田耕作措施的不合理也容易在沟间地土壤表层形成结皮,增加沟坡的径流量和侵蚀率。出水口的沉积面积大于新侵蚀面积,沉积物多在出水口沉积,沟谷深度和面积均减小。

航片的比例尺是沟谷面积监测精度的关键,应满足研究时间尺度的要求。如1~10年的小时间尺度要求航片的比例尺较大,而大于50年的大时间尺度可选择比例尺稍小的航片。DEM的数据通过对航片立体像对进行测量获得,而航片的比例尺、底片的扫描精度、相机的内方位元素、地面控制点的选择以及数据的预处理过程都会影响DEM的质量。因此,只有在上述影响因素均比较合理的情况下,提取的DEM才可以方便准确地测量大范围地表信息的变化,从而获得精确的测量结果。

参考文献

- [1] Jiang D, Qi L, Tan J. Soil erosion and conservation in the Wuding River Valley, China// Morgan RPC, ed. Soil Conservation: Problems and Prospects. Chichester: John Wiley and Sons, 1981
- [2] De Vente J, Poesen J, Verstraeten G. The application of semi-quantitative methods and reservoir sedimentation rates for the prediction of basin sediment yield in Spain. *Journal of Hydrology*, 2005, **305**: 63-86
- [3] Huon S, Bellanger B, Bonte PH, et al. Monitoring soil organic carbon erosion with isotopic tracers, two case studies on cultivated tropical catchments with steep slopes// Roose EJ, ed. Soil Erosion and Carbon Dynamics. Boca: CRC Press, 2006
- [4] Menendez-Duarte R, Marquinez J, Fernandez-Menendez S, et al. Incised channels and gully erosion in Northern Iberian Peninsula: Controls and geomorphic setting. *Catena*, 2007, **71**(2): 267-278
- [5] Krause AK, Franks SW, Kalma JD, et al. Multi-parameter finger printing of sediment deposition in a small gullied catchment in SE Australia. *Catena*, 2003, **53**(4): 327-348
- [6] Hu G, Wu YQ, Liu BY, et al. Short-term gully retreat rates over rolling hill areas in black soil of Northeast China. *Catena*, 2007, **71**(2): 321-329
- [7] Wasson RJ, Caitecheon G, Murray AS, et al. Sourcing sediment using multiple tracers in the catchment of Lake Argyle, northwestern Australia. *Environmental Management*, 2002, **29**(5): 634-646
- [8] Wainwright J, Mathys N, Esteves M. Gully erosion in mountain areas: Processes, measurement, modelling and regionalization. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2006, **31**: 133-134
- [9] Capra A, Scicolone B. Ephemeral gully erosion in a wheat-cultivated area in Sicily (Italy). *Biosystem Engineering*, 2002, **83**(1): 119-126
- [10] Vandaele K. Assessment of factors affecting ephemeral

- gully erosion in cultivated catchments of the Belgian loam belt// Wicherek S, ed. Farm Land Erosion in Temperate Plains Environment and Hills. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1993: 125-136
- [11] Donker NHW, Damen MCJ. Gully system development and an assessment of gully initiation risk in Miocene deposits near Daroca-Spain. *Zeitschrift fur Geomorphologie NF*, 1984, **49**(supp): 37-50
- [12] Stocking MA. Examination of the factors controlling gully growth// De Boodt M, Gabriels D, eds. Assessment of Erosion. Chichester: John Wiley and Sons, 1980: 505-520
- [13] Martinez-Casasnovas JA, Anton-Fernandez C, Ramos MC. Sediment production in large gullies of the Mediterranean area(NE Spain) from high-resolution digital elevation models and geographical information systems analysis. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2003, **28**(5): 443-456
- [14] Williams AR, Morgan RPC. Geomorphological mapping applied to soil erosion evaluation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1976, **31**(4): 164-168
- [15] Daba S, Rieger W, Strauss P. Assessment of gully erosion in eastern Ethiopia using photogrammetric techniques. *Catena*, 2003, **50**(2): 273-291
- [16] Betts HD, Trustrum NA, DeRose RC. Geomorphic changes in a complex gully system measured from sequential digital elevation models, and implications for management. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2003, **28**(10): 1043-1058
- [17] Thomas AW, Welch R, Jordan TR. Quantifying concentrated-flow erosion on cropland with aerial photogrammetry. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1986, **41**: 249-252
- [18] DeRose RC, Gomez B, Marden M, et al. Gully erosion in Mangatu forest, New Zealand, estimated from digital elevation models. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1998, **23**: 1045-1053
- [19] Ritchie JC, Grissinger EH, Murphey JB, et al. Measuring channel and gully cross-sections with an airborne laser altimeter. *Hydrological Processes*, 1994, **8**: 237-243
- [20] Martinez-Casasnovas JA. A spatial information technology approach for the mapping and quantification of gully erosion. *Catena*, 2003, **50**(2): 293-308
- [21] Bufalo M, Nahon D. Erosional processes of Mediterranean badlands: A new erosivity index for predicting sediment yield from gully erosion. *Geoderma*, 1992, **52**: 133-147
- [22] He X-Y(何兴元), Hu Z-B(胡志斌), Li Y-H(李月辉), et al. Dynamics of soil erosion at upper reaches of Minjiang River based on GIS. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 2005, **16**(12): 690-694 (in Chinese)
- [23] Zhang Y(张岩), Yuan J-P(袁建平), Liu B-Y(刘宝元). Advance in researches on vegetation cover and management factor in the soil erosion prediction model. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 2002, **13**(8): 690-694 (in Chinese)
- [24] Qin F-C(秦富仓), Yu X-X(余新晓), Zhang M-L(张满良), et al. Mechanism of watershed soil erosion control by vegetation. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 2005, **16**(9): 1618-1622 (in Chinese)

作者简介 王辉,女,1981年生,博士研究生.主要从事生态系统生态学和景观生态学研究,发表论文10篇. E-mail: bnuweimei@163.com

责任编辑 杨弘
