

梯田 DEM 构建方法精度比较研究

张 鹏, 赵牡丹, 王翊人

(西北大学, 城市与环境学院, 西安 710100)

摘 要:在黄土高原地区,梯田作为重要水土保持措施之一,在减缓土壤侵蚀的同时也改变了局地范围的地表形态。顾及梯田地形 DEM 构建方法的提出极大地弥补了传统中低分辨率 DEM 不能表达梯田突变地形的缺陷,对于地表微形态分析、土壤侵蚀等地表过程评价等具有重要意义。从基于高程、坡度、坡长等地形属性特征分析、测量误差及地形描述误差评价三方面出发,以高精度激光点云数据为基准,深入探究不同梯田 DEM 构建方法对梯田地形的表达差异,并对其进行了精度评价。结果表明:(1)从测量误差和地形描述误差的描述结果来看,基于真实田坎法构建结果在各种地形因子的表达上整体误差更小,更接近梯田真实地表形态;(2)从地形特征因子分析结果可知,基于真实田坎法的 DEM 整体精度较高,对各种地形因子的描述更准确。(3)基于真实田坎法构建出的梯田 DEM 能够精确描述原始地表形态,但需要较多人力工作,适用于精度较高的梯田地形研究。

关键词:快速构建法;基于真实田坎法;地形特征分析;测量误差;地形描述误差

中图分类号:P208

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)05-0282-05

Assessment on the Accuracy of the Modeling Methods of Terrace DEM

ZHANG Peng, ZHAO Mudan, WANG Yiren

(College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an 710100, China)

Abstract: In the Loess Plateau region, the terrace, as one of the important soil and water conservation measures, has also changed the surface topography while controlling soil erosion. The DEM generating methods considering terrace information greatly compensated the expression defects of traditional DEM with medium and low precision for the terraced terrain, which is of great significance to the surface micromorphology analysis, soil erosion and other surface process evaluation. Taking the 1 m DEM (H-DEM) constructed by laser point cloud data as reference data, we explored the difference of representation for the terraced terrain and evaluated the accuracy of two modeling DEMs-the rapid modeling method for terrace DEM (K-DEM) and the actual ridge-based modeling method for terrace DEM (T-DEM) based on terrain topographic parameters analysis, measurement error, and the DEM terrain representation error (E_t). The results showed. (1) Based on the accuracy assessment results of the measurement error and E_t , the overall error of the terrain factor is smaller and closer to the T-DEM than K-DEM. (2) The difference of terrace topographic parameter described by elevation, slope and slope length indicates that K-DEM has a larger deviation from H-DEM in the position of terraced field and ridge, and the T-DEM is better. (3) T-DEM is able to describe the actual surface terrain more precisely, but requires more human work, which is more suitable for high-precision researches on terrace.

Keywords: K-DEM; T-DEM; topographic analysis; measurement error; terrain representation error

梯田是黄土高原地区最为重要的水土保持措施之一,不仅能够极大程度地减缓土壤侵蚀过程,而且具有很好的保水保肥作用,可提高坡耕地的土壤农业生长潜力^[1-3]。梯田在黄土高原地区分布广泛,包括水平梯田和坡式梯田大约 400 万 hm^2 ^[4],其修筑过程

一定程度上改变了自然地表微形态,使得坡面坡度变缓、坡长被截断、水流路径发生了变化,形成了突变地形。目前而言,DEM 一般是以现有地形图通过内插方法生成的,而中低分辨率 DEM 大多局限于反映光滑连续的自然地表,对自然陡坎、梯田等突变地形存

在描述失真,因而促成了顾及梯田地形 DEM 构建方法的产生。杨蕾等^[5]从遥感影像上对梯田田坎进行目视解译,通过加权取平均值法对田坎的高程进行赋值,实现了水平梯田的三维表达。周春寅等^[6]利用高程增量法、偏移线法构建 TIN,实现了坡式梯田的三维可视化表达。赵卫东等^[7]在 1:10 000 格网 DEM 的基础上提取了梯田的特征点、特征线以及周围边界,基于此构建了充分考虑梯田信息的 Grid-TIN 混合格网 DEM,可以实现对梯田形态的准确描述;祝士杰,汤国安等^[8]提出了梯田 DEM 快速构建方法,利用梯田约束特征线构建出了能够表达梯田地形的 DEM;罗仪宁^[9]基于野外数字测图和地形图数据获取了突变地形特征并利用 ANUDEM 软件将其表达为 DEM 中生成 Hc-DEM,以实现突变地形的表达;为了能够使 DEM 更真实地表达梯田地形,刘芬^[10]提出了基于真实田坎信息的梯田 DEM 构建方法,程德强等^[11]在其基础上又提出了基于梯田田面的梯田 DEM 构建方法,实现了对梯田信息的强化表达。这些均为基于 DEM 进行梯田信息的表达和分析研究奠定了基础。

虽然目前在梯田 DEM 的构建上已经有了一定的研究成果,已能初步实现梯田 DEM 的构建及对梯田地形信息的强化,但不同方法构建结果的精度差异分析并没有受到太多重视,不同构建方法在实际应用中的选择上缺乏一定依据性,而这些直接影响着相关梯田 DEM 研究的结果精度。因此,本研究提出对不同梯田 DEM 构建方法进行精度评价,分析探讨不同梯田 DEM 构建方法的优势与不足,为顾及梯田等突变地形的 DEM 表达研究提供参考,同时可促进对梯田 DEM 构建方法的完善。

1 数据源与研究方法

1.1 研究区与数据基础

选取延安市南部燕沟流域内的某一处梯田为研究样区。燕沟流域是黄土高原中部丘陵沟壑区第Ⅱ副区下的一个子流域,属于半湿润半干旱气候过渡带,地处北纬 36°28′—36°32′、东经 109°20′—109°35′。燕沟平均海拔为 1 198.7 m,年均降雨量为 558.4 mm,流域内沟壑纵横、坡陡沟深,土壤侵蚀量大,属于强度水土流失区域。选用的基础数据包括:墨卡托投影坐标系下的研究区 0.5 m 分辨率 Wordview-3 遥感影像、5 m 分辨率 DEM 数据以及基于激光点云数据构建的 1 m 分辨率 DEM 数据。其中激光点云数据是利用瑞士徕卡 HDS8800 三维激光扫描仪扫描梯田样区获取的,点云原始采样间隔为 12 mm,对其进行点云去噪、平滑滤波及重采样后构 TIN 再生成格网

DEM。5 m 分辨率 DEM 数据是利用遥感摄影测量方式制作生成的。

1.2 研究方法

本研究以燕沟流域梯田样区为研究对象,在 5 m 分辨率 DEM、高分遥感影像的数据支撑下,基于真实田坎信息^[10]和快速构建法^[8]对样区构建顾及梯田地形的 1 m 分辨率 DEM。以激光点云数据构建的 1 m 分辨率 DEM 作为参考,从高程、坡度、坡长等地形特征信息分析、测量误差及地形描述误差^[12-14]指标评价三方面入手,对不同方法构建的梯田 DEM 进行地形特征分析及精度评价,探究不同方法各自的优势及不足之处。

研究选择当前最被广泛应用的方法之二:快速构建法、基于真实田坎法来构建梯田 DEM 以实现 DEM 表面对梯田信息的表达。由于样区实际地形为坡式梯田,因此本研究构建的梯田 DEM 以坡式梯田为前提,其断面示意图(数学模型)如图 1 所示。

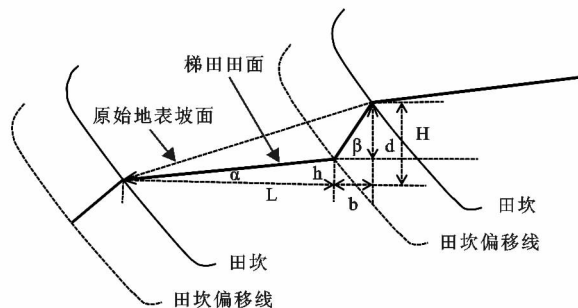


图 1 坡式梯田断面示意图

图 1 中 α 表示梯田田面倾角; β 表示田坎坡度; L 表示梯田田面水平投影宽度; H 表示上下两田面之间的高程差; h 表示田坎偏移线与田坎的高差(田坎偏移线原始高程); b 和 d 分别表示田坎偏移线相对田坎在水平方向与垂直方向偏移的距离和高差。由图 1 可以得知:

$$d = H - L \tan \alpha \quad (1)$$

$$b = \cot \beta (H - L \tan \alpha) \quad (2)$$

$$h = \frac{LH}{(L + H \cot \beta - L \tan \alpha \cot \beta)} \quad (3)$$

快速构建法根据梯田特征线提取方法的不同,分为参数构建法和简易构建法。参数构建法具体步骤有:取梯田范围内最低的田坎高程为 E ,以 E 为初始高程,田坎高度 H 为等高距,采用 DEM 自动提取等高线方法提取田坎线;再以 $(E+h)$ (公式 2—3) 为田坎偏移线的初始高程, H 为等高距,利用提取等高线法提取台沿线偏移线;将田坎偏移线高程降低修正值 Δh ,其中 $\Delta h = h - L \tan \alpha$ 。 α 的大小决定梯田类型, $\alpha > 0$ 为坡式梯田, $\alpha = 0$ 为水平梯田, $\alpha < 0$ 为反坡梯田。以两组约束线高程为内插属性构 TIN,转化为格网 DEM。简易构建法适用于一些无法获取全部构建参数值的情况中,通过

科学估计田坎高度 H ，再通过提取等高线法获得梯田特征线，实现快速构建梯田 DEM。

刘芬^[10]利用高分影像和 5 m 分辨率 DEM 获取梯田特征线的位置与高程信息，并基于此构建能反映真实梯田信息的 1 m 分辨率 DEM。基于真实田坎法构建梯田 DEM 过程主要有四步：通过高分辨率遥感影像绘制每块梯田田面所对应的田坎线（台沿线）；在 DEM 基础上通过掩膜的方式获取每块田面的高程平均值，并将其看作为对应田坎线的高程值；根据试验样区地形情况确定梯田基本参数（ α 和 β ），利用田坎线与田坎偏移线的数学关系对田坎线水平偏移距离 b 得到田坎偏移线，并高程做差 d 得到田坎偏移线高程值；最后，利用多组田坎线与田坎偏移线通过构 TIN 的方式实现梯田 DEM 的构建。

经过对研究区 5 m 分辨率 DEM 原始坡度进行分析、对真实梯田样区细致考量以及借鉴前人研究成果^[15-16]后，选取的梯田构建参数为：田面坡度 $\alpha=5^\circ$ （梯田区域平均坡度）、田坎坡度 $\beta=70^\circ$ 。基于各参数构建样区 1 m 分辨率的梯田 DEM，利用 ArcGIS、LS_Tool^[17] 软件对不同方法构建出的梯田 DEM 进行坡度（三阶差分法）、坡长（D8 算法）提取，结果如图 2 所示。

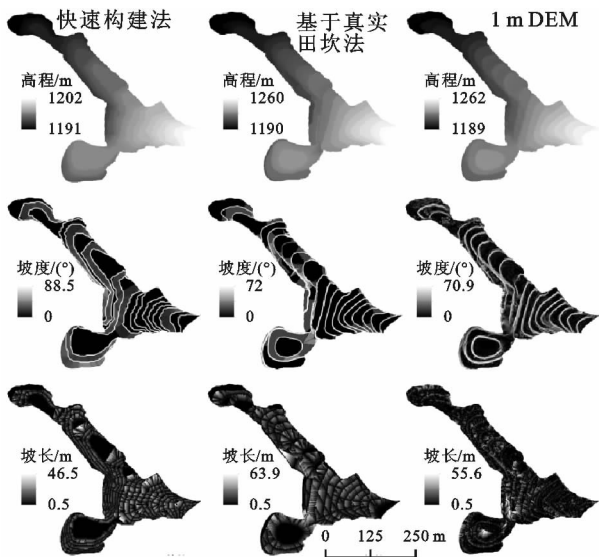


图 2 基于不同方法构建的 DEM 及其地形因子提取

2 结果与分析

2.1 地形特征分析

地形属性指标是表达与研究地表形态最为有效的参数指标，也是 DEM 精度高低最直观的表征。由图 2 可知，激光点云数据构建的 DEM 梯田特征明显，梯田田面和田坎信息表达清晰，其他两种方法构建出的梯田 DEM 同样具备完整的梯田信息。因快速构建法和基于真实田坎法均是通过 TIN-Grid 方式构建梯田 DEM 的，所以表达出的地形因子不如点

云数据构建出的 1 m 分辨率 DEM 自然圆滑，存在一些三角面状区域，在坡长信息的表达中较为明显。对图 2 中地形属性指标的特征值进行统计，结果如表 1 所示（表中将基于点云数据构建出的梯田 DEM、基于真实田坎法构建出的梯田 DEM 以及快速构建法构建出的梯田 DEM 分别用 H-DEM、T-DEM、K-DEM 表示，下文亦同）。结合表 1 来讲，快速构建法表达出的梯田 DEM 对高程信息和坡度信息摆动较大，而基于真实田坎法的构建结果与 1 m DEM 相差较小，更接近真实值；从坡长信息特征值的对比中可以明显看出，除最大值外快速构建法表达出的坡长特征更接近 1 m DEM。

表 1 不同 DEM 地形因子特征分布值统计

DEM 类型	地形因子	最小值	最大值	平均值	标准差
H-DEM	高程/m	1189.15	1261.80	1221.93	17.04
	坡度/(°)	0	70.91	13.22	14.85
	坡长/m	0.49	55.56	2.94	3.28
K-DEM	高程/m	1190.87	1262.44	1224.37	17.62
	坡度/(°)	0	68.46	12.05	16.20
	坡长/m	0.47	46.54	3.61	3.50
T-DEM	高程/m	1190.25	1260.41	1221.83	17.25
	坡度/(°)	0	71.90	12.59	15.51
	坡长/m	0.53	63.90	5.51	5.59

图 3 为基于不同梯田 DEM 对其高程、坡度和坡长特征分布值进行统计分析的结果。高程剖面图和频率曲线图显示出 T-DEM 高程信息的分布与 H-DEM 紧密相随，其高程值摆幅也较小，各高程值段分布均匀，而 K-DEM 的高程信息摆动相对较大，对梯田高程值整体有抬升作用，同时对田坎和田面位置信息的表达存在微小偏差，这是由于快速构建法的梯田特征线是沿地形等高线提取的且其田面宽度和田坎高的取值均是统一值，而真实的梯田是综合考虑诸多因素建造而成的，各个田面的田面宽度和田坎高度也不尽相同，由此造成了其梯田特征线、面与真实地表的差异；在坡度信息的频率曲线图中，K-DEM 和 T-DEM 的频率曲线摆动较大，没有 H-DEM 平滑自然，尤其是快速构建法。在坡度为 $1^\circ\sim7^\circ$ 处存在一个较宽的波峰，其频率值远高于其他值处的频率值，说明梯田大部分区域（梯田田面）的坡度值处于这一范围内，同时 3 种 DEM 在 $1^\circ\sim7^\circ$ 处的波峰并没有完全重合，与 H-DEM 相比，其他两者波峰均向右发生了偏移，在坡度中值区域，K-DEM 和 T-DEM 的频率值均小于 H-DEM，在两端极值区域，两者频率值又大于 H-DEM，说明两种构建方法对坡度值的表达均存在极端化趋势。总的来看，T-DEM 对坡度信息的表达

更接近 H-DEM;从坡长(自然对数)频率曲线图可以看出梯田地形主要以短坡为主,超过一半区域坡长值小于 4.5 m,且短坡坡长值都比较集中。K-DEM 在坡长信息的表达中整体与 H-DEM 更为接近,但是在短坡长值处的频率(坡长为 0.5 m)存在过于偏大的现象。T-DEM 提取出的坡长(自然对数)曲线除在短坡区域更接近 H-DEM 外,长坡值(坡长大于 10 m)频率要高于其他两者,这也是其坡长平均值和标准差值大于其他两者的原因,对应地坡长累计频率曲线图中 T-DEM 坡长值到 36 m 时累计频率曲线才达到稳定,远大于其他两种 DEM 对应的坡长稳定值。

2.2 测量误差分析

DEM 数据在不考虑粗差和系统误差时,其数据误差基本由随机误差构成,通常以有限的采样点为样本,利用中误差(RMSE)来衡量 DEM 数据精度。为避免中误差作为唯一指标的绝对性,研究除中误差外,另选标准差(SD)和平均绝对误差(MAE)作为 DEM 数据误差的评定指标,其计算公式如表 2 所示(设 H-DEM 的特征值为 Z ,另外两种 DEM 数据的特征值为 z ,则误差 $\epsilon = Z - z$, n 为样本点个数)。在梯田样区内选取 200 个采样点,分别提取不同 DEM 及其地形特征因子在每个采样点处的特征值,并以点云高精度数据构建的 DEM 为参考,统计不同方法下 3 种地形特征因子的误差分布情况,见表 3。

与 H-DEM 相比,两种构建方法对 3 种地形特征因子均存在一定的表达误差。对于高程和坡度因子,基于真实田坎法的 3 种误差指标均小于快速构建法,说明基于真实田坎法表达出的高程和坡度信息的稳定性、整体误差大小及误差极值情况均高于快速构建法,因此在这两个因子的表达上基于真实田坎法要优于快速构建法。而从坡长因子的误差描述中可看出快速构建法对坡长因子的表达更准确一些,与上文地形特征分析中的结果正好吻合。

2.3 地形描述误差分析

即使 DEM 高程点上的误差均为零时,有限的栅格采样点也只能实现对真实地表的近似模拟,汤国安将这种情况下构建出的模拟地形与真实地形之间的差异称为地形描述误差^[14],并基于此提出了 DEM 地形描述精度数学模型来量化地形描述误差。通过栅格窗口分析法即可求取地形描述误差(E_t),当分析窗口为 3×3 时,DEM 中某一栅格单元(第 i 行,第 j 列)的 E_t 可表示为:

$$E_t(i,j)=H(i,j)-(H(i-1,j-1)+H(i-1,j+(1)+H(i+1,j-1)+H(i+1,j+(1)))/4$$

(1)

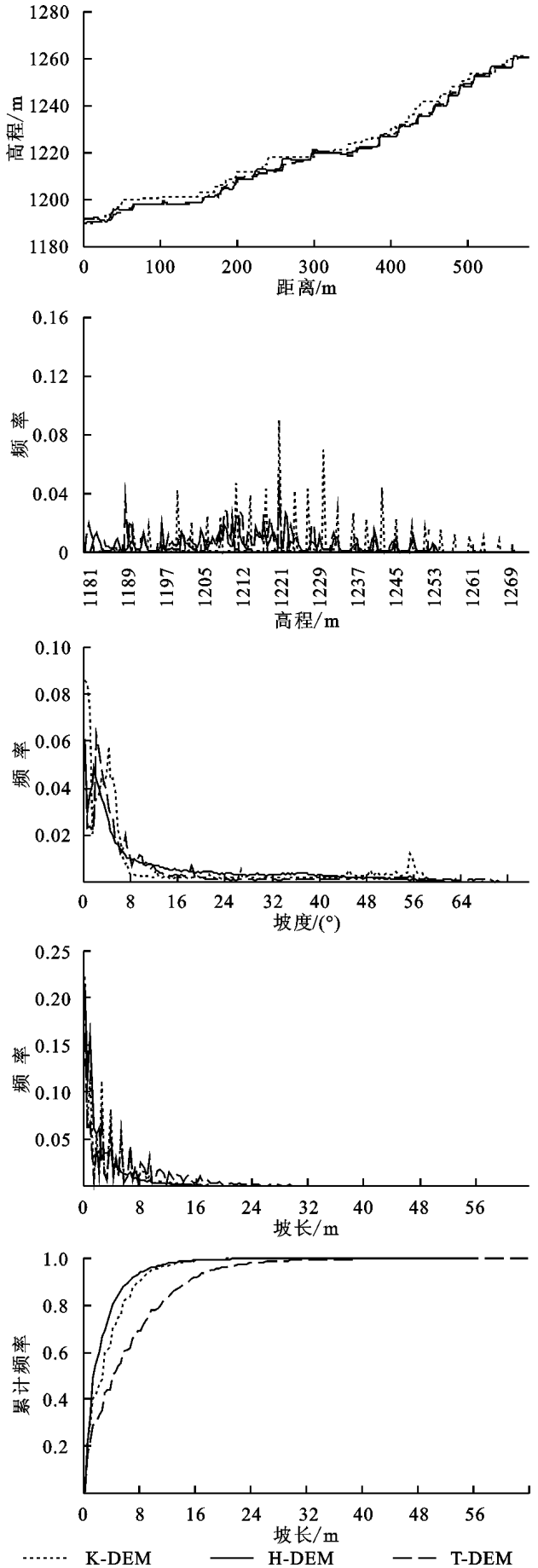


图 3 不同地形特征因子分布值统计

表 2 数值精度模型

名称	中误差(RMSE)	标准差(SD)	平均误差(ME)
公式	$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \epsilon_i^2}{n}}$	$SD=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\epsilon_i - ME)^2}{n}}$	$ME=\frac{\sum_{i=1}^n \epsilon_i}{n}$

表 3 不同构建方法误差分布统计

误差指标	快速构建法			基于真实田坎法		
	高程/m	坡度/(°)	坡长/m	高程/m	坡度/(°)	坡长/m
中误差	3.01	3.87	3.86	1.65	3.31	4.38
标准差	2.47	3.84	4.08	1.62	3.27	4.44
平均绝对误差	2.49	2.89	3.11	1.15	2.52	3.61

由地形描述误差数学模型可看出,当 DEM 分辨率为 d 时,提取出的地形描述误差分辨率为 2 d。在 ArcGIS 软件中利用 Python 编码可实现 3 种梯田 DEM 的 E_i 值提取,表 4 为不同梯田 DEM 地形描述误差的特征分布值统计结果。

表 4 不同梯田 DEM 的 E_i 特征分布值统计

特征值类型 DEM 类型	最小值	最大值	平均值	标准差
H-DEM	-2.01	3.23	0.0036	0.192
K-DEM	-3.47	3.66	0.0091	0.387
T-DEM	-4.16	5.08	0.0062	0.293

从表 4 可以看出:H-DEM 的收敛性最高,数据波动最小,也就意味着最接近地表真实值。K-DEM 的 E_i 值的平均值和标准差值最大,分别为 0.009 1、0.387,说明其 E_i 值变化起伏较大;T-DEM 的 E_i 值波动范围最广,其最大值和最小值分别为 5.08 和 -4.16,但是平均值和标准差的数值表明其相对更稳定,与 H-DEM 更为接近。总之,从地形描述误差表达出的信息来看,基于真实田坎法能够在整体上更好地描述实际地表,而快速构建法在最大、最小误差上与 H-DEM 相近,但在整体的地形描述精度上要稍弱于基于真实田坎法。

3 结论

不同方法构建的梯田 DEM 均能表达出梯田地形特征,梯田田面和田坎特征清晰,但是不同构建方法各有优势与不足:(1) 从测量误差和地形描述误差的误差指标统计和对比分析结果来看,相比快速构建法,基于真实田坎法的构建结果在各种地形因子的表达上整体误差更小,更接近梯田真实地表形态。(2) 从地形特征分析结果可知,快速构建法构建出的梯田 DEM 在梯田田面和田坎位置的描述上与真实梯田地表存在偏差,这是其构建方法本身决定的。基于真实田坎法则整体精度较高,对各种地形因子的描述更准确。(3) 快速构建法虽构建精度较低,但具有快速简单、省时省力的优势,在大面积的梯田 DEM 构建中具有优势;基于真实田坎法构建出的梯田 DEM 能够精确地描述原始地表形态,适用于精度较高的梯田地形研究中,但在遥感影像中梯田特征线的自动提取上存在改善的空间。

同时梯田特征线、面要素(田面数、田坎线位置)和梯田参数(田面倾角、田坎坡度)是其构建精度高低的决定性因素,须谨慎确定;三维激光扫描数据对田面田坎信息的描述准确度很高,虽然目前仅限于小范围区域且其数据成本较高,但不可否认的是,三维激光数据未来必然会成为最为常用的地形数据之一。

参考文献:

- [1] 康玲玲,鲍宏韩,刘工斌,等.黄土高原不同类型区梯田蓄水拦沙指标的分析与确定[J].中国水土保持科学,2005,3(2):39-43.
- [2] 刘晓燕,王富贵,杨胜天,等.黄土丘陵沟壑区水平梯田减沙作用研究[J].水利学报,2014,45(7):793-800.
- [3] 吴发启,张玉斌,王健.黄土高原水平梯田的蓄水保土效益分析[J].中国水土保持科学,2004,2(1):34-37.
- [4] 马红斌,李晶晶,何兴照,等.黄土高原水平梯田现状及减沙作用分析[J].人民黄河,2015,37(2):89-93.
- [5] 杨蕾,李天文,王伟星,等.黄土高原微地貌之梯田三维建模方法探讨[J].西北大学学报:自然科学版,2006,36(2):321-324.
- [6] 周春寅,赵卫东,钱家忠.基于多尺度 DTM 的坡式梯田三维可视化研究[J].地理与地理信息科学,2011,27(6):41-44+49.
- [7] 赵卫东,徐媛,马雷,等.顾及梯田地形的 Grid-TIN 混合格网数字高程模型研究[J].地理与地理信息科学,2013,29(2):11-16,127.
- [8] 祝士杰,汤国安,张维,等.梯田 DEM 快速构建方法研究[J].测绘通报,2011(4):68-70.
- [9] 罗仪宁. DEM 表面地形突变特征表达方法研究[D].西安:西北大学,2011.
- [10] 刘芬.黄土高原梯田 DEM 地形特征研究[D].西安:西北大学,2015.
- [11] 程德强,高春留,赵牡丹,等.基于 DEM 与遥感影像数据的梯田信息强化表达研究[J].干旱区资源与环境,2016,30(11):124-130.
- [12] 胡鹏,吴艳兰,胡海.数字高程模型精度评定的基本理论[J].地球信息科学学报,2003,5(3):64-70.
- [13] 王光霞,朱长青,史文中,等.数字高程模型地形描述精度的研究[J].测绘学报,2004,33(2):168-173.
- [14] 汤国安,龚健雅,陈正江,等.数字高程模型地形描述精度量化模拟研究[J].测绘学报,2001,30(4):361-365.
- [15] 赵华.梯田规划设计中田块规格标准分析[J].水土保持应用技术,2001(5):20-22.
- [16] 王翊人.梯田 DEM 构建方法精度评价[D].西安:西北大学,2017.
- [17] 张宏鸣.流域分布式土壤侵蚀学坡长提取与分析[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2012.