doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.021

梯田区侵蚀地形因子随 DEM 分辨率变化的特征分析

张宏鸣[1]　杨勤科[2]　王　猛[1]　杨江涛[3]　王美丽[1]　晋　蓓[4]

(1. 西北农林科技大学信息工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 西北大学城市与环境学院, 西安 710069;
3. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100; 4. 西北农林科技大学经济管理学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 通过无人机航空摄影测量,获取高精度 DEM,分析提取的坡度、坡长和 LS 因子,同时通过分辨率的变化,计算并分析了这些参数的变化情况。研究表明:基于无人机获取的 DEM 能够较好地表达梯田地形特征,梯田地形因子分布特征与地形特征吻合,大值集中于梯田过渡的陡坡处,小值集中于田面。随着分辨率的降低,非梯田区坡度整体呈现衰减趋势,坡长呈现增长趋势,LS 先小幅增加,后由于坡度衰减明显,LS 呈现衰减趋势,但变化幅度不大;而梯田区随着分辨率的降低,小坡度和超大坡度所占比例均减小,平均坡度降低,但坡长增加显著,因此导致 LS 增长较显著,在 20 m 分辨率下,LS 因子被高估约 1/3。梯田通常作为水保措施因子单独来考虑,由于分辨率对地形因子影响较大,因此梯田区的地形因子估算需要考虑分辨率的影响。

关键词: 土壤侵蚀; 中国水土流失方程; 地形因子; 梯田; 数字高程模型

中图分类号: S157; TP79　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2017)10-0172-08

Analysis of DEM Resolution on Erosional Terrain Characteristics of Terrace Area

ZHANG Hongming[1]　YANG Qinke[2]　WANG Meng[1]　YANG Jiangtao[3]　WANG Meili[1]　JIN Bei[4]

(1. *College of Information Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
2. *College of Urban and Environmental Science*, *Northwest University*, *Xi'an* 710069, *China*
3. *College of Water Resource and Architectural Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
4. *College of Ecomomics Management*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: Terrain is a main environmental factor which affects the surface hydrology and soil erosion. Slope steepness, slope length and LS factor are important parameters in soil erosion model. As a water conservation measure, terraced field changes the surface morphology and affects slope steepness, slope length and LS factor. Terrain features of the terraced area based on low resolution DEM are fuzzy and difficult to be reasonably estimated due to the lacking of high precision. High resolution DEM, which was accessed by UAV aerial photogrammetry technology, was used to analyze slope steepness, slope length and LS factor under different resolutions. Meanwhile, the changes of these parameters were calculated and analyzed in a none terraced area with the same resolution changes as comparison. The result showed that the DEMs which were accessed by UAV can express the terrace terrain features in details. Distribution of terraced terrain factors coincided with topographic features. These features showed high values distributed in the ridge area and small values distributed in terrace surface. With the decrease of DEM resolutions, the slope steepness of none terraced areas was decreased while the slope length was increased, and LS value was increased firstly and then decreased because of the fast decrease of the slope steepness, but the variation range was relatively small. For terraced areas, the portion of both small and large part of the slope steepness was decreased, average slope steepness was also decreased. Slope length had a clear increasing trend, so as the LS factor. Under the resolution of 20 m, LS factor was overestimated for about 33%. Terracing is usually considered as a project factor in soil erosion models of

收稿日期: 2017-02-06　修回日期: 2017-04-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0403203)、国家自然科学基金项目(41771315、41301283、41371274、41301507、61402374)、欧盟地平线 2020 研究与创新计划项目(ISQAPER: 635750)、陕西省自然科学基础研究计划项目(2016JM6038)和西北农林科技大学基本科研业务费专项资金项目(2452015060)

作者简介: 张宏鸣(1979—),男,副教授,博士,主要从事空间大数据管理与区域土壤侵蚀评价研究,E-mail: zhm@nwsuaf.edu.cn

通信作者: 杨勤科(1962—),男,研究员,博士,主要从事区域土壤侵蚀评价和侵蚀地形研究,E-mail: qkyang@nwu.edu.cn

soil and water conservation measures. Due to the large influence of resolution on LS factors, the estimation of erosion in terraced field needs to consider the effect of resolution changes.

Key words: soil erosion; Chinese soil loss equation; topographic factor; terrace; DEM

引言

地形是土壤侵蚀和水土保持措施布设的重要影响因子，坡度、坡长和坡度坡长因子（Slope length and steepness factor，LS）成为侵蚀模型的重要参数[1-5]，且在世界范围的中小流域和区域土壤侵蚀评价中得到了广泛应用[6]。通常地形因子基于数字高程模型（Digital elevation model，DEM）来提取。DEM 的分辨率对地形因子的获取影响较大[7]，而 DEM 数据源及采集方式主要有 3 种[8-9]：①实地测量，这种方式精度高，但大尺度上工作量巨大。②地形图数字化，但部分栅格是空间插值的结果，真实地形的凹陷和凸起常常被忽略。③遥感，但地形的突变细节很难解译。近年来，DEM 获取技术发展迅速，航空摄影测量、干涉测量法、LiDAR（Light detection and ranging techniques），尤其是无人机技术，能够方便、快捷地获得较高精度的 DEM。

梯田是人类在坡耕地上探索的一种水土保持措施。梯田的修筑很大程度上开发了坡耕地的农业生长潜力，具有蓄水、保土作用[10]。我国梯田广泛分布在北方黄土高原区和南方低山丘陵区。梯田的修建，改变了地表起伏程度，使坡度、坡长等变化较大，受 DEM 获取方式、分辨率的限制等，梯田的地形特征一直很难有效地表现，进而侵蚀地形因子也无法真实反映梯田的影响。因此，前人的研究多集中在如何构建适合的梯田 DEM[10-12]，尽管在侵蚀模型中，考虑到梯田的水土保持作用，如通用土壤流失方程[2]的 P（工程）因子[13]，中国土壤侵蚀方程[3]中的 E（水土保持措施）因子。但是梯田地形条件下，提取的 LS 因子分布特征、梯田区 DEM 分辨率对 LS 因子的影响还鲜有报道。

本文在前期研究基础上[14-19]，通过无人机航空摄影测量获取大面积、高精度梯田 DEM，同时对 DEM 进行降尺度变换，对不同分辨率下的 DEM 提取坡度、坡长、S 因子、L 因子和 LS 因子，分析其变化规律，同时对比地形图获取 DEM 提取的各个因子，进而为地形因子在梯田地形上的分布特征、变化过程、区域土壤侵蚀的定量评价提供理论支持。

1　数据基础及研究方法

1.1　研究区域

黄土高原是我国也是世界上水土流失最严重和生态环境最脆弱的地区之一，该区域的土壤侵蚀调查也成为较为迫切的需求。鉴于前期研究积累，同时为了进行对比说明，本文分别对无人机提取的梯田区 DEM 与地形图数字化获得的非梯田区 DEM 进行地形因子提取，并对比。

研究样区 1：甘肃榆中地区，为黄土高原梯田区。榆中地区山地较多，且坡大沟深、水土流土异常严重，长期以来水土流失异常严重，再加上干旱少雨，农业生产往往是广种薄收。为减少坡面水土流失程度和增加农作物产量，近 20 年，榆中人民在各类山坡坡面上修建梯田、鱼鳞坑等坡面水土保持工程[20]。因此该地区是典型黄土丘陵旱梯田区域。该实验样区 DEM 数据及所在黄土高原地区的位置，如图 1a 所示，梯田根据田面坡度的不同，一般分为水平梯田、坡式梯田、隔坡梯田和软埝梯田[21]，研究区以水平梯田为主。

研究样区 2：陕北县南沟流域[16]，如图 1b 所示。该流域地处黄土高原中部，面积约 44.85 km^2，是典型黄土丘陵地貌高原区代表，该地区沟谷发育充分，水土流失严重，比较适合做地形指标提取算法的测试，且该地区梯田较少，试验结果能够为黄土高原侵

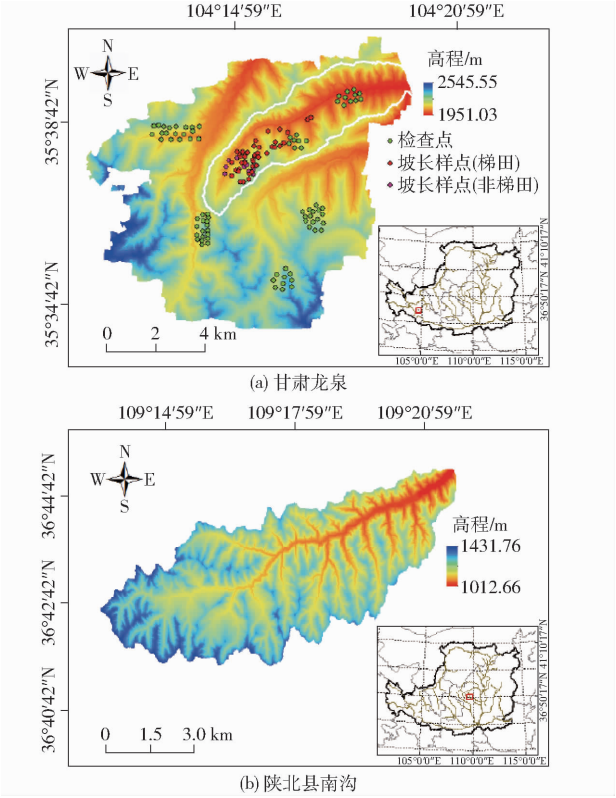

图 1　实验样区

Fig. 1　Study areas

蚀地形因子非梯田区的提取提供有力参考,同时也能够与梯田侵蚀地形因子计算结果进行对比。

1.2 数据基础

研究样区 1:于 2015 年 3 月份拍摄。低空无人机航摄影像点云数据生成的为数字表面模型(Digital surface model,DSM)[22],由于研究区所在范围在该段时间几乎没有植被覆盖,建筑用地较少,可通过对点云数据进行分类,分为地面点和非地面点两类,将非地面点作为噪声处理,通过滤波后得到剔除非地面点的 DEM。拍摄期,风力小于 4 级,天气晴朗,能见度高,飞行采用自动起飞/规划航线飞行/自动降落模式,全程总计耗时约 24 h。采用安翔动力公司开发的 AF1000 型无人机,翼展 2.7 m,质量 14 kg,航时 3 h,有效载荷 2 kg,飞行航高 90 m,搭载 SONYA5100 型相机,单幅影像尺寸约 340 m × 500 m,影像分辨率 0.05 m,基于精度要求,样区范围共布设 83 个地面控制点(图 1a,绿色点),主要分布在起飞点附近的梯田田坎、道路交叉口中心,使用 RTK 进行测量,可用于空三运算和精度检测。同时用这些点来检测影像集合定位精度,保证校正影像在侵蚀检测中的基本应用需求。数据处理采用 Agisoft photoscan 软件,导入影像、POS 数据及控制点数据,受计算能力限制,将整个区域等分成 25 个测区块进行处理,平均每块 5 000 幅左右照片,对每块逐一进行点云提取和立体模型建立,最后再进行合并、纹理提取。采用 Xian 1980 3 Degree GK CM 108E 投影,DEM 分辨率 0.5 m,30 000 行 × 24 000 列。本次实验采用相同的 83 个野外检查点对像控点中误差进行计算,高程中误差 0.32 m。研究区田坎高度在 0.5 ~ 5 m 之间,因此该精度能够表现梯田的基本特征。根据实验过程要求,再根据点云数据分别生成 1、2、5、10、15、20 m 分辨率 DEM。依据无人机影像制作的 1∶500 地形图的平面和高程精度均满足《1∶500 1∶1 000 1∶2 000 地形图航空摄影测量内业规范》对 1∶500 平地、丘陵的成图要求。

研究样区 2:DEM 数据是基于 1∶10 000 数字地形图(包括等高线、高程点和河流),在 ANUDEM 软件下生成的 Hc - DEM(图 1b),数据分辨率为 2.5 m。1∶10 000 数字地形图由国家基础地理信息中心提供,符合文献[23]要求。在 ANUDEM 软件下分别生成分辨率为 2.5、5、10、15、20 m 数据。

1.3 提取方法

本文地形因子算法基于 LIU 等[3,5]的中国土壤侵蚀方程(CSLE),CSLE 中 LS 因子计算公式为

$$S=\begin{cases}10.8\sin\theta+0.03 & (\theta<5^\circ)\\ 16.8\sin\theta-0.05 & (5^\circ\leqslant\theta<10^\circ)\\ 21.9\sin\theta-0.96 & (\theta\geqslant10^\circ)\end{cases} \quad (1)$$

$$L=(\lambda/22.1)^m \quad (2)$$

$$m=\begin{cases}0.2 & (\theta\leqslant1^\circ)\\ 0.3 & (1^\circ<\theta\leqslant3^\circ)\\ 0.4 & (3^\circ<\theta\leqslant5^\circ)\\ 0.5 & (\theta>5^\circ)\end{cases} \quad (3)$$

式中 S——坡度因子

θ——DEM 提取的坡度,(°)

L——坡长因子

λ——DEM 提取的坡长,m

m——坡度坡长指数

22.1 m 为标准小区坡长。因为坡长计算考虑较周全,因此 LS 因子的计算使用 LS_TOOL[14-18]完成。

前人研究表明,高精度 DEM 上采用 D8 算法[24],提取 S 因子精度较高[25],因此本文坡度计算采用 D8 算法。L 因子的提取及基于等高距小于 0.7 m 的地形图获取的 DEM 上提取结果和真值更加接近[26]。因此本文对坡长分级结果的分析只针对 0.5 m 分辨率条件下。为了估算坡长的计算精度,本文选取 50 个样点(图 1a,红色和紫色),为剔除数据边界导致的误差影响,样点均位于一个完整流域内(图 1a,白色边界),根据 ZHANG 等[27]的方法,以田坎为起点,沿等高线垂线方向,在 ArcGIS 软件中测量样点坡长,作为参考值。梯田区坡长平均绝对值误差为 1.4 m,标准差 1.7 m,均方差 0.9 m。根据 RENARD 等[2]的研究表明,坡长在 10 m 内的误差对 LS 因子的影响均可接受。因此本文坡长可供 L 因子计算使用。

1.4 坡度坡长分级方法

根据文献[28]中对土壤侵蚀面蚀(片蚀)强度分级的规定将坡度分级为小坡度($\theta\leqslant5^\circ$)、中小坡度(5° ~ 8°)、中等坡度(8° ~ 15°)、中大坡度(15° ~ 25°)、大坡度(25° ~ 35°)、超大坡度($\theta>35^\circ$)。黄土坡面侵蚀过程中,有研究[29]表明 5 m 前后差异较大,魏天兴等[30]研究建议 15 m 为临界坡长,结合前人研究结果[31-32]和梯田宽度状况,将坡长分级为:短坡长($\lambda\leqslant5$ m)、中短坡长(5 ~ 15 m)、中等坡长(15 ~ 25 m)、中长坡长(25 ~ 50 m)、长坡长(50 ~ 100 m)、超长坡长($\lambda>100$ m)。

2 结果与分析

2.1 梯田侵蚀地形因子空间格局分析

0.5 m 分辨率下,研究区 1 的坡度范围为 0° ~ 87.97°,坡长范围为 0.25 ~ 180.35 m,LS 因子范围为 0.01 ~ 48.5。各项指标的频率分布和累积频率分布情况如图 2 所示,由于田面所占面积比例较大,因此,小坡度约占 18.69%、中小坡度约占 10.50%、

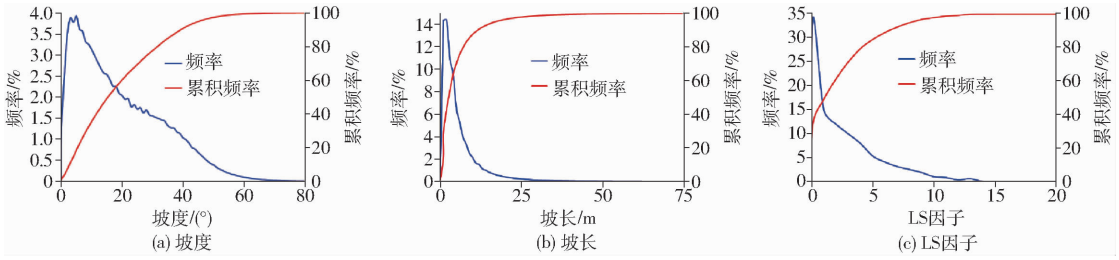

图 2　0.5 m 分辨率下地形因子的累积频率曲线

Fig. 2　Cumulative frequency and frequency curves of LS factor and its parameters in 0.5 m grid size

中等坡度约占 19.99%、中大坡度约占 20.29%、大坡度约占 15.43%、超大坡度约占 15.10%；由于 LS_TOOL在计算坡长时考虑了坡度变化引起的截断[14-18]，因此坡长在梯田边缘处的截断明显，90.64%坡长小于 12 m(图 2b)。L、S 和 LS 因子受坡度和坡长的共同作用，与梯田变化特征类似(表 1)。91.75%的 LS 因子小于 7(图 2c)，短坡长主要集中于梯田田面位置(表 1)。各指标平均值情况如表 1 所示(0.5 m)，平均坡度 18.68°，平均坡长 4.22 m，LS 因子平均值 2.36。由于 S 因子变化与坡度变化正相关，L 因子变化与坡长正相关，因此，本文主要对比坡度、坡长和 LS 因子。

截取研究区 DEM、光照晕渲图、可见光影像及部分分辨率下的计算结果，如图 3 所示，0.5 m 分辨率下，DEM、光照晕渲图与可见光影像对比，梯田的细节表现清晰，能够反映该类地形的变化特征。坡度、坡长、LS因子计算结果合理，也与地形特征吻合。与可见光影像对比，可以清晰地识别梯田田坎变化引起的坡度变化、坡长截断和 LS 因子的变化。如图 4 所示，短坡长(70.18%)集中于田面，中短坡长(12.65%)、中等坡长(10.79%)集中于梯田过渡区的陡坡坡底，中长坡长(4.13%)、长坡长(1.91%)和超长坡长(0.34%)集中于非梯田区

表 1　不同分辨率下的地形因子平均值(龙泉)

Tab. 1　Average LS value under different resolutions (Longquan Village)

分辨率/m	坡度/(°)	坡长/m	S 因子	L 因子	LS 因子
0.5	18.68	4.22	5.89	0.40	2.36
1	18.62	7.81	5.88	0.53	3.23
2	18.58	10.82	5.86	0.62	3.86
5	18.47	17.97	4.72	0.84	4.02
10	18.21	31.17	4.68	1.08	5.15
15	17.78	43.97	4.58	1.26	5.91
20	17.32	53.99	4.46	1.39	6.36

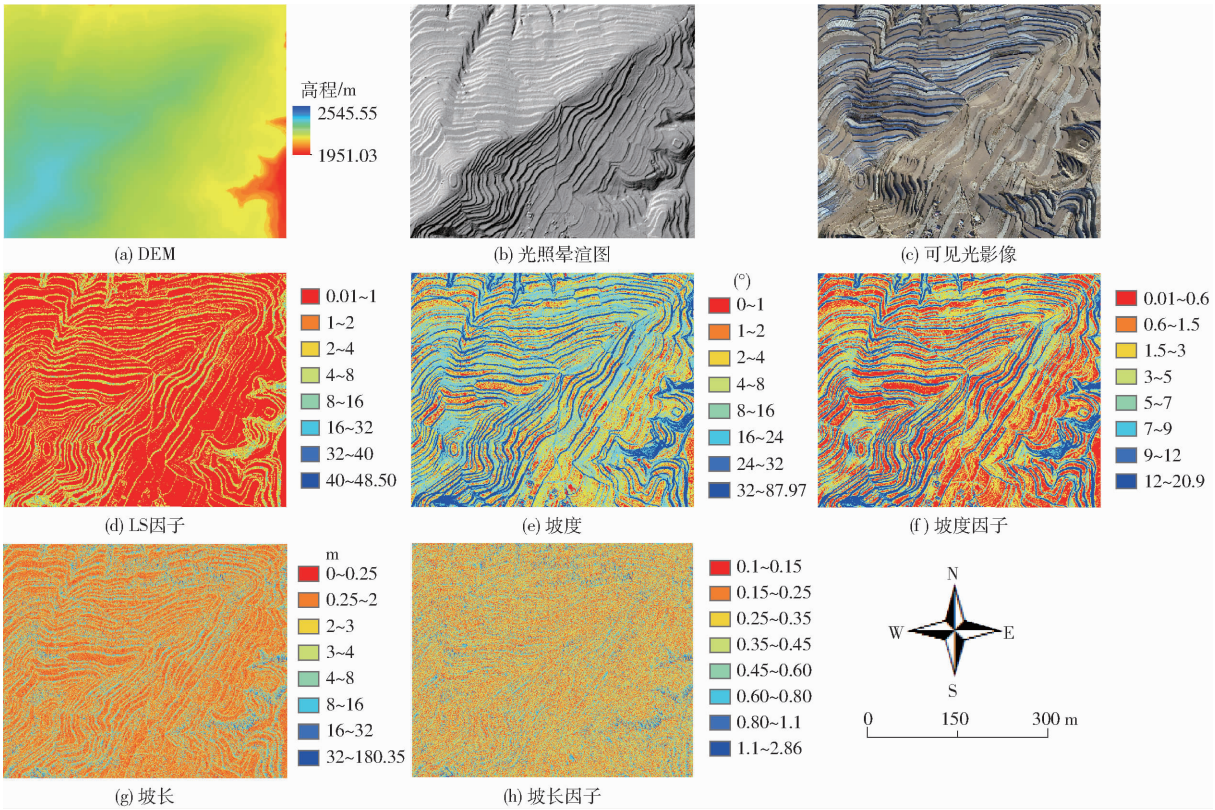

图 3　0.5 m 分辨率下侵蚀地形因子计算结果(龙泉)

Fig. 3　Average LS value under different resolutions (Longquan Village)

的坡面底部。坡度因子、坡长因子与坡度、坡长正相关,分布情况也与之对应。LS 因子分布情况与坡度分布相似,主要原因是 LS 因子受坡度影响比较大。基于无人机获取的 DEM,可清晰地表达梯田地形特征,且 LS 因子及其相关参数分布合理。

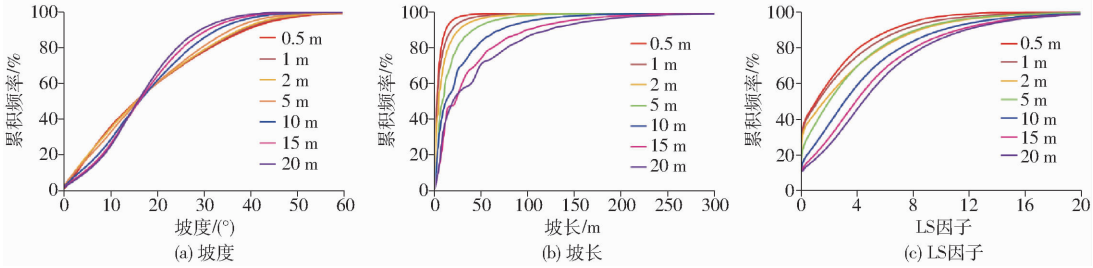

图 4 不同分辨率下地形因子的累积频率曲线

Fig. 4 Cumulative frequency curves of terrain factor under different cell sizes

2.2 不同分辨率下侵蚀地形因子变化特征

基于不同分辨率的 DEM,分别进行坡度、坡长、坡度因子、坡长因子和 LS 因子计算,结果平均值如表 1 所示。分辨率由高到低变化,平均坡度下降,平均坡长增加,受该变化影响,S 因子降低,L 因子升高,LS 因子增加。通过该变化规律可以看到,在 0.5 ~ 20 m 分辨率的变化过程中,坡度衰减了约 24.35%,坡长增加了约 246.65%。从空间分布特征来看,随着分辨率降低(栅格尺寸上升),梯田地形特征逐渐模糊,坡度、坡长的变化逐渐无法反映梯田变化特征,只能反映该区域的大概地形变化。因此,在梯田区域,分辨率的降低对坡长影响较大,主要原因是由于坡度变化程度的降低,导致坡长截断效果下降;坡长增加,L 因子增加,S 因子下降,但由于 L 因子增加的较多,最终导致 LS 因子增加,增加了 169.75%,也就是说,如果参照前人的建议[23],以 0.5 m DEM 计算结果为参考值,梯田区域即使常用的 5 ~ 10 m 高分辨率的 DEM,LS 因子也被高估了超过 1/3,根据不同分辨率下 LS 因子值增加比例,建立可供参考的回归方程,$R^2 = 0.96$,用于参考 LS 因子被高估的数量关系,可用于修正梯田区低分辨率 DEM 条件下的 LS 因子计算结果

$$y = 0.000\,2x^3 - 0.009\,2x^2 + 0.182\,1x + 0.105 \quad (0.5\ \text{m} \leqslant x \leqslant 20\ \text{m}) \tag{4}$$

式中 y——相对 0.5 m 分辨率 LS 因子增长比例

x——分辨率

由于 CSLE 中梯田作为水保措施单独考虑,因此该变化规律也可以用来修正工程因子,进而获得更加精准的侵蚀结果。

坡度、坡长、LS 因子的累积频率结果如图 4 所示,为了更加直观地表达地形因子分布的范围,统计各因子分布的四分位数,绘制箱线图(图 5),直线的顶点和最低点为最大值(高位)和最小值(低位)位置,灰色矩形的上边和下边,分别是 75%(Q3)和 25%(Q1)的位置,矩形中的横实线为 50% 位置(中点)。

(1)坡度变化情况:累积频率 50% 附近(图 4a),所对应的坡度为 16°左右,以此为分割,随着分辨率增大,小于 16°的坡度点增加,大于 16°的坡度点减少,45° ~ 50°范围的坡度与 0° ~ 5°坡度范围的点减少较多,与图 6 相对应,随着分辨率的降低,较小的坡度(红色)和较大的坡度(深蓝)呈现减少趋势,该特征与已有的非梯田的坡度研究报道有所不同[33],由于梯田区平地和突变区域较多,随着分辨率的降低,这些区域的特征被平滑掉,因此小坡度和超大坡度均呈现减小趋势,该变化在图 5a 中更加明显,中点位置几乎没有变化,Q1 和 Q3 位置向中点移动,最大值变小。

(2)坡长变化情况:随着分辨率的降低,坡长平均值增加明显,短坡长减少,中等坡长和中长坡长增加(图 4b),Q1、中值、Q3 和最大值均增加(图 5b),Q1 和 Q3 之间的范围也在增加,但增加的幅度没有

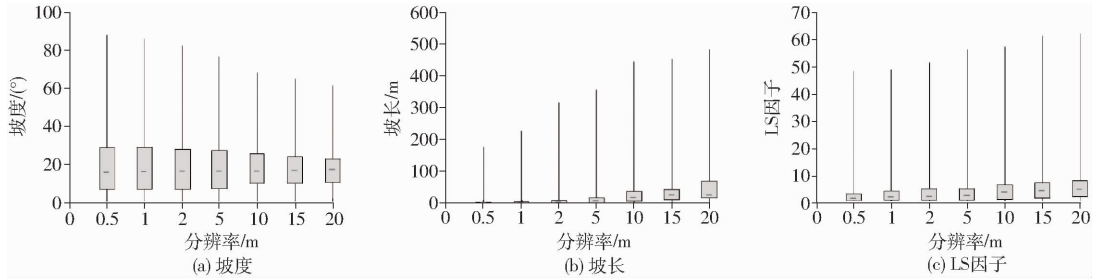

图 5 不同分辨率下地形因子箱线图

Fig. 5 Box-plot of terrian factors under different resolutions

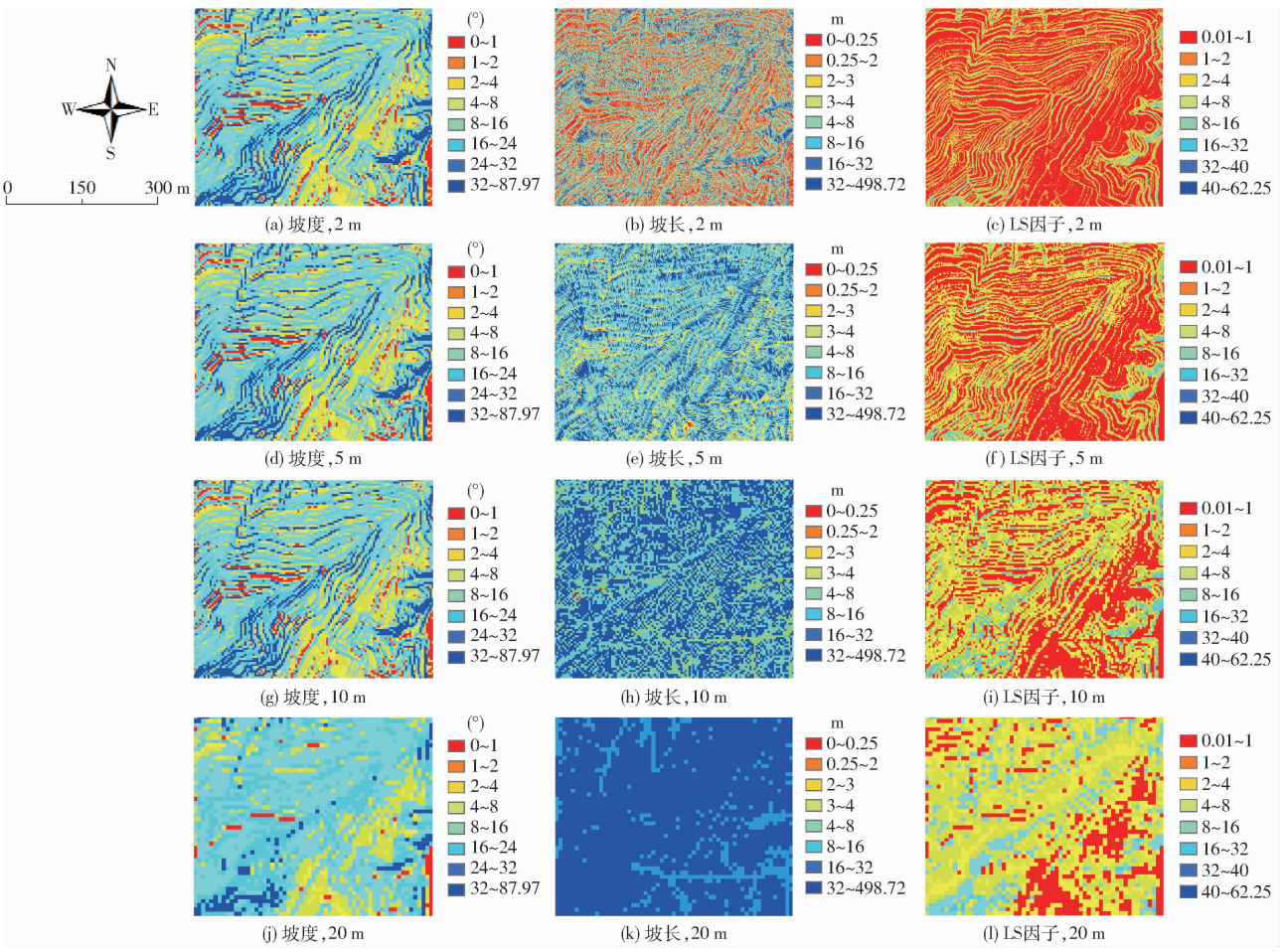

图 6　不同分辨率下侵蚀地形因子及坡度坡长计算结果（龙泉）

Fig. 6　Average slope, slope length and LS value under different resolutions (Longquan Village)

最大值增加的幅度大，表明分辨率对坡长的最大值影响较大，使得 Q3 与最大值之间的距离增幅较大，主要原因是在分辨率降低的过程中，田坎信息逐渐丢失，使得坡长连续，因此增长显著。

（3）LS 因子变化情况：随分辨率降低，累积频率曲线表现为右移（图 4c），即小值点所占比例减小，大值点比例增加，由图 5c 可看到，最小值、Q1、中值点、Q3 和最大值随分辨率降低逐渐上移；与坡长变化相似，随着分辨率降低，LS 因子增大，但显著性不如坡长明显，中值点变化较明显的是在 5 ~ 10 m 分辨率的过程，这与坡长的中值变化特征基本一致；在平均坡度变小条件下，LS 因子却随坡长的增加而增大，说明 LS 因子受坡长影响较大，也即在梯田区域分辨率下降对坡长影响较大，进而导致对 LS 因子的影响较大。

为了进一步检验分辨率、坡长、坡度、对 LS 因子的影响，采用 Canoco5 的主成分分析方法（PCA）进行评估[34]，PCA 通过线性变换将原始数据变换为一组各维度线性无关的表示，可用于表示各特征分量的相关关系，坐标无量纲。计算结果如图 7 所示。分辨率使用栅格尺寸，带箭头直线代表 4 个参数，直线间的夹角代表 4 个参数间的相关性，夹角小于 90°说明正相关，夹角越小相关性越显著。夹角大于 90°说明负相关，夹角越大负相关性越显著。

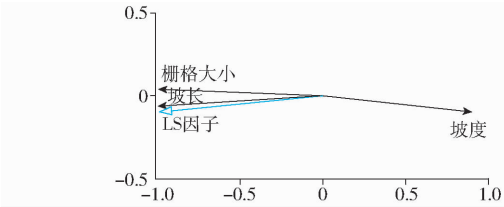

图 7　分辨率、坡度、坡长、LS 因子的 PCA 分析

Fig. 7　PCA analysis for resolution, slope steepness, slope length and LS factor

栅格尺寸的反向延长线与坡度的夹角小于栅格尺寸与坡长的夹角，栅格尺寸的变化对坡长的影响大于对坡度的影响。在栅格尺寸增加的过程中，坡长对 LS 因子的影响最大，且正相关；坡度对 LS 因子的影响次之，是负相关；栅格尺寸对 LS 因子的影响最小，为正相关，该结果与统计特征结果相吻合，也即在分辨率降低的过程中，坡长的改变大于坡度的改变，进而使得坡长的变化趋势影响了 LS 因子的变化趋势。

2.3 非梯田区侵蚀地形因子变化特征

对研究区 2,不同分辨率下的 DEM 计算得到的坡度、坡长、坡度因子、坡长因子和 LS 因子如表 2 所示。非梯田区与梯田区的坡度、坡长变化趋势基本一致,但非梯田区比梯田区的 LS 因子值大较多,这与梯田作为水保措施一致。非梯田区 LS 因子在 5 m 分辨率以下表现为增长,5 m 以上表现为递减,在 20 m 分辨率处,LS 因子结果与 2.5 m 结果接近。当分辨率大于 5 m 时,随着分辨率的降低,坡度衰减,坡长增加,部分地形细节消失,导致坡度截断因子作用下降,连续长坡增多,因此坡长增加明显,但坡度衰减幅度大于坡长增加幅度,LS 因子表现为衰减。

表 2 不同分辨率下的地形因子平均值(县南沟)

Tab.2 Average LS value under different resolutions at Xiannangou Catchment

栅格尺寸/m	坡度/(°)	坡长/m	S 因子	L 因子	LS 因子
2.5	28.46	121.42	7.51	3.32	16.92
5	28.13	169.91	7.42	4.21	17.11
10	26.76	178.79	7.20	4.33	17.06
15	25.44	199.83	6.71	4.63	16.88
20	23.57	214.31	6.22	4.79	16.71

3 讨论

(1)根据梯田地形因子分布特征,平坦田面的 LS 因子较小,田坎的 LS 因子较大,田面的出现使得 LS 因子降低明显,尽管田坎的存在使得 LS 因子也存在一定的大值,但由于坡长的截断作用,使得 LS 因子的增长并不显著,进而使得最终计算的侵蚀量减小,这与梯田作为水保措施的作用一致,因此梯田地区,采用高精度的 DEM 来估算土壤侵蚀十分必要。

(2)本文仅讨论了梯田和非梯田区地形因子的计算结果的变化特征,地形因子的提取受流向、沟道等地形特征影响,而梯田的出现使得汇流、河网等均发生了改变,这些结果是否合理将直接影响地形因子的提取,进而影响土壤侵蚀评价,因此高分辨率下梯田地区的地形分析需要做进一步研究。

4 结论

(1)基于无人机航空摄影测量获得的 0.5 m 分辨率 DEM 能够基本反映梯田地形特征,对田坎等表现效果良好,适合于快速、大面积范围的精准地形参数提取。

(2)梯田区坡度、坡长受梯田地形特征影响较大。小坡度、短坡长集中在梯田田面平坦位置,超大坡度、中短坡长和中等坡长集中在两田面过渡的田坎部位或无梯田的长坡底部,坡长截断效果明显,因此短坡长较多,但随着分辨率的降低,梯田区的坡度分布呈现明显的向中心集中的趋势。

(3)对于梯田区,分辨率的降低坡长受到的影响大于坡度受到的影响,这一作用直接体现在 LS 因子上,使得 LS 因子随分辨率降低而增大,随着分辨率下降,5 m 分辨率以上 LS 因子增大超过了 100%,也即梯田地区过低的分辨率将高估侵蚀量。非梯田区的 LS 因子随着分辨率降低,在小幅升高后持续降低,与 2.5 m 分辨率对比,20 m 的分辨率计算结果偏差不大。与梯田区 LS 因子相比,非梯田区域 LS 因子较大,20 m 以下分辨率对 LS 因子影响较弱。

参 考 文 献

1 杨勤科, 郭明航, 李智广,等. 全国土壤侵蚀地形因子提取与初步分析[J]. 中国水土保持, 2013(10): 17 - 21.

2 RENARD K G, FOSTER G R, WEESIES G A, et al. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)[M]. USDA - Agriculture Handbook, vol. 703,1997.

3 LIU B Y, ZHANG K L, XIE Y. An empirical soil loss equation[C]// Proceedings of 12th ISCO. Beijing. Tsinghua Press, 2002: 143 - 149.

4 WISCHMEIER W H, SMITH D D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning with universal soil loss equation(USLE)[M]. USDA - Agriculture Handbook, vol. 703,1997.

5 LIU B Y, NEARING M A, SHI P J, et al. Slope length effects on soil loss for steep slopes[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(5): 1759 - 1763.

6 杨勤科, 李锐, 曹明明. 区域土壤侵蚀定量研究的国内外进展[J]. 地球科学进展, 2006, 21(9): 31 - 38.
YANG Qinke, LI Rui, CAO Mingming. Advances of quantitative assessment on regional soil erosion[J]. Advances in Earth Science, 2006, 21(9): 31 - 38. (in Chinese)

7 FU S H, CAO L X, LIU B Y, et al. Effects of DEM grid size on predicting soil loss from small watersheds in China[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(5): 2141 - 2151.

8 ZHANG H, YANG Q, LI R, et al. Extension of a GIS procedure for calculating the RUSLE equation LS factor[J]. Computers & Geosciences, 2013, 52: 177 - 188.

9 OUEDRAOGO M M, DEGRE A, DEBOUCHE C, et al. The evaluation of unmanned aerial system-based photogrammetry and terrestrial laser scanning to generate DEMs of agricultural watersheds[J]. Geomorphology, 2014,214:339 - 355.

10 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.
LUO Yining. Study on DEM surface topography abrupt change of expression[D]. Xi'an: Northwest University, 2011. (in Chinese)

11 李慧. 梯田 DEM 构建方法研究[D]. 西安:西北大学, 2014.

LI Hui. Research on terrace DEM building[D]. Xi'an: Northwest University, 2014. (in Chinese)
12 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 – 70,82.
ZHU Shijie, TANG Guoan, ZHANG Wei, et al. Rapid modeling method for terrace dgital elevation model[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2011(4): 68 – 70,82. (in Chinese)
13 FOSTER G R, HIGHFILL R E. Effect of terraces on soil loss: USLE P factor values for terraces[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1983, 38(1): 48 – 51.
14 张宏鸣, 杨勤科, 李锐, 等. 流域分布式侵蚀学坡长的估算方法研究[J]. 水利学报, 2012,43(4): 437 – 444.
ZHANG Hongming, YANG Qinke, LI Rui, et al. Research on the estimation of slope length in distributed watershed erosion[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(4): 437 – 444. (in Chinese)
15 张宏鸣, 杨勤科, 李锐, 等. 基于 GIS 和多流向算法的流域坡度与坡长估算[J]. 农业工程学报, 2012, 28(10): 159 – 164. http://www.tcsae.org/nygcxb/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20121025& journal _id = nygcxb. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.10.025.
ZHANG Hongming, YANG Qinke, LI Rui, et al. Estimation methods of slope gradient and slope length in watershed based on GIS and multiple flow direction algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(10): 159 – 164. (in Chinese)
16 张宏鸣, 杨勤科, 刘晴蕊, 等. 基于 GIS 的区域坡度坡长因子提取算法[J]. 计算机工程, 2010, 36(9): 246 – 248.
ZHANG Hongming, YANG Qinke, LIU Qingrui, et al. Regional slope length and slope steepness factor extraction algorithm based on GIS[J]. Computer Engineering, 2010, 36(9): 246 – 248. (in Chinese)
17 杨勤科,郭伟玲,张宏鸣,等. 基于 DEM 的流域坡度坡长因子计算方法研究初报[J]. 水土保持通报, 2010, 30(2): 203 – 206.
YANG Qinke, GUO Weiling, ZHANG Hongming, et al. Method of extracting LS factor at watershed scale based on DEM[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(2): 203 – 206. (in Chinese)
18 ZHANG H, YAO Z, YANG Q, et al. An integrated algorithm to evaluate flow direction and flow accumulation in flat regions of hydrologically corrected DEMs[J]. CATENA, 2017, 151: 174 – 181.
19 张宏鸣, 宋泽鲁, 杨江涛, 等. DEM 超分辨率重构对梯田坡度提取的影响研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017,48(1): 112 – 118,138. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170115& journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.015.
ZHANG Hongming, SONG Zelu, YANG Jiangtao, et al. Influence of DEM super-resolution reconstruction on terracedfield slope extraction[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 112 – 118,138. (in Chinese)
20 赵卫东, 汤国安, 徐媛, 等. 梯田地形形态特征及其综合数字分类研究[J]. 水土保持通报, 2013, 33(1): 295 – 300.
ZHAO Weidong, TANG Guoan, XU Yuan, et al. Terrace morphological characteristics and its comprehensive digital classification [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(1): 295 – 300. (in Chinese)
21 唐克丽. 中国水土保持[M]. 北京: 科学出版社,2004.
22 RUZGIENÉ B, BERTEŠKA T, GEČYTE S, et al. The surface modelling based on UAV photogrammetry and qualitative estimation[J]. Measurement, 2015, 73: 619 – 627.
23 CH/T 1015.1—2007　基础地理信息数字产品 1:10 000　1:50 000 生产技术规程　第 1 部分:数字线划图(DLG)[S].2007.
24 O'CALLAGHAN J F, MARK D M. The extraction of drainage networks from digital elevation data[J]. Computer Vision, Graphics & Image Processing, 1984, 28(3): 323 – 344.
25 LIU H, FOHRER N, HÖRMANN G, et al. Suitability of S factor algorithms for soil loss estimation at gently sloped landscapes [J]. CATENA, 2009, 77(3): 248 – 255.
26 MCCOOL D K, BROWN L C, FOSTER G R, et al. Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation[J]. Transactions of the ASAE, 1987, 30(5): 1387 – 1396.
27 ZHANG H, YANG Q, LI R, et al. Extension of a GIS procedure for calculating the RUSLE equation LS factor[J]. Computers & Geosciences, 2013, 52: 177 – 188.
28 SL190—2007　土壤侵蚀分类分级标准[S].2007.
29 汪晓勇, 郑粉莉. 黄土坡面坡长对侵蚀-搬运过程的影响研究[J]. 水土保持通报, 2008, 28(3): 1 – 4.
WANG Xiaoyong, ZHENG Fenli. Effects of slope length on detachment and transport processes on a Loessial hillslope[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, 28(3): 1 – 4. (in Chinese)
30 魏天兴, 朱金兆. 黄土残塬沟壑区坡度和坡长对土壤侵蚀的影响分析[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(1): 59 – 62.
WEI Tianxing, ZHU Jinzhao. Effects of slope length and grade on soil erosion in the gully regions in Loess Plateau[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2002, 24(1): 59 – 62. (in Chinese)
31 郭伟玲, 杨勤科, 程琳, 等. 区域土壤侵蚀定量评价中的坡长因子尺度变换方法[J]. 中国水土保持科学, 2010, 8(4): 73 – 78.
GUO Weiling, YANG Qinke, CHENG Lin, et al. Re-scaling method of slope length factor in the soil erosion assessent of regional scale[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2010, 8(4): 73 – 78. (in Chinese)
32 陈晓安, 蔡强国, 张利超, 等. 黄土丘陵沟壑区不同雨强下坡长对坡面土壤侵蚀的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42(3): 721 – 725.
CHEN Xiao'an, CAI Qiangguo, ZHANG Lichao, et al. Impact of slope length on soil erosion under different rainfall intensity in a hilly loess region on the Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(3): 721 – 725. (in Chinese)
33 刘红艳, 杨勤科, 王春梅, 等. 坡度随水平分辨率变化及其空间格局研究[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2012,37(1): 105 – 109.
LIU Hongyan, YANG Qinke, WANG Chunmei, et al. Changes of DEM derived slope with horizontal resolution and their spatial distribution[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012,37(1): 105 – 109. (in Chinese)
34 ŠMILAUER P, LEPŠ J. Multivariate analysis of ecological data using CANOCO 5[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.