

梯田对土壤侵蚀地形因子扰动特征研究

王翊人,赵牡丹*,冯园,张倩

西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安 710127

摘要: 地形因子是影响土壤侵蚀的重要因素,包括坡度、坡长等,通常基于 DEM 来提取,但目前构建的 DEM 总是局限于反映连续光滑的自然坡面,无法表现出梯田等人工地形的信息。在黄土高原地区,通过多年的治理,修筑了大面积梯田,极大地改变了地表微形态,影响了坡度和坡长,进而影响土壤侵蚀定量分析。以安塞县的梯田为实验对象,采用基于真实田坎的方法,构建嵌入梯田信息的 DEM(梯田 DEM),并对原始 DEM 与梯田 DEM 提取的坡度、坡长等地形因子以及计算得到的坡度坡长因子进行对比分析。结果表明:(1)基于真实田坎方法构建的梯田 DEM,能较好地反映田坎位置及形态;(2)与样区原始 DEM 相比,加入梯田信息后,地形因子的栅格数大幅度增加且基于梯田 DEM 提取的坡度、坡长、LS 因子明显减小,对土壤侵蚀定量分析有一定影响。该研究对地形因子提取和土壤侵蚀评价具有重要意义。

关键词: 梯田 DEM; 地形因子; 地形特征

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1000-2324(2017)01-0046-06

Disturbed Characteristics of Terraces against Terrain Factors in Soil Erosion

WANG Yi-ren, ZHAO Mu-dan*, FENG Yuan, ZHANG Qian

College of Urban and Environmental Science/Northwest University, Xi'an 710127, China

Abstract: Terrain factors include slope, slope length, etc. They are primary elements of soil erosion, which can impact surface runoff, erosion, sediment delivery, the influx and transport of aqueous and sand material. As a function of slope and slope length, LS factor is able to influence the appraisal of regional soil erosion as well. Interpolating the elevation information based on existing topographic map is the most common method for constructing DEM. Building terraces is an efficient facility for soil and water conservation engineering. However, they cannot be presented appropriately in topographic maps. Therefore, current DEMs are limited to represent natural landforms. They are unable to show the information of artificial landform like terraces. Moreover, the terrain factors based on DEM can not reflect the influence of terraces. Actually, large areas of terraces have been built in the Loess Plateau after several years' management. The terraces affect surface micro-morphology drastically, and make a great influence on the slope, slope length and quantitative analysis of soil erosion. We choose terraces in a basin in Ansai County as our case study area. The involved materials include DEM of Ansai(its scale is 1:10000, resolution is 5m) and a remotely sensed image with a resolution of 2.5m. Based on the improved rapid modeling method for terrace digital elevation model, we adopt the actual ridge-based method to construct the DEM with terraces' information (T-DEM), by integrating with high resolution remote sensing image. Using Spatial Analyst Module of ArcGIS and LS TOOL, slope, slope length and LS factor were extracted from original DEM and T-DEM, respectively. In comparison with the original DEM in sample region, slope, slope length and LS factor extracted by T-DEM are smaller and the quantity of raster cells is higher. More precisely, the average of slope decreased by 1/4 and its range increased. Slope length reduced by 5/6 and the proportion of short slope increased a lot. The positive correlation between slope, slope length and erosion amount shows the information of terraces will influence the final extraction results. It will then make some difference to slope factor, slope length factor and LS factor in soil erosion appraisal. Finally, the result of soil erosion appraisal will be impacted. In conclusion, terraces play an important role in terrain analysis based on DEM. This study has significant meaning for terrain factors extraction and soil erosion evaluation.

Keywords: Terrace DEM; terrain factors; topographic characteristics

黄土高原土层深厚,质地疏松,地形破碎,植被稀少,水土流失极为严重,是黄河泥沙的主要来源区^[1]。地形是影响土壤侵蚀的重要因素,在流域和区域尺度上地形因子大多基于 DEM 提取^[2]。

收稿日期: 2016-04-22

修回日期: 2016-05-31

基金项目: 梯田对坡度坡长因子的扰动特征研究(41271284)

作者简介: 王翊人(1992-),女,硕士研究生,主要从事数字地形分析工作. E-mail:13572413437@163.com

***通讯作者:** Author for correspondence. E-mail:zmudan@nwu.edu.cn

基于现有地形图,通过对高程信息的内插,是建立 DEM 的最主要方法。梯田是治理水土流失的最主要措施,但是由于这种地形特征没有在地形图上得到有效表达,因而 DEM 大多局限于光滑、连续的自然地表,忽略了局部一些凹陷和凸起等微地形信息,这样,基于 DEM 地区的侵蚀地形因子(坡度、坡长等)也就无法有效反映梯田的影响。梯田的修建改变了坡面微地形,使坡面坡度变缓、田坎部位变陡、坡长被截断,水流路径发生改变,同时影响了局部区域的坡度、坡长等地形因子的值,进而对土壤侵蚀评价造成影响。但由于现有商用 DEM 表面不表达梯田信息,因而也就无法获知梯田及其对地表水沙物质迁移转换的影响。尽管在通用土壤流失方程式中,特别是 CSLE 中,将梯田作为水土保持措施(E 因子值)来考虑,这种考虑并没有以梯田对地表水沙物质运移方式变化为基础,因而是不够完整的。因此研究建立嵌入梯田信息的 DEM 表面(本研究称为梯田 DEM),并在这种 DEM 上提取土壤侵蚀地形因子并分析梯田对地形因子的影响,对于改进土壤侵蚀地形因子、完善土壤侵蚀评价方法、评价水土保持工程措施的效益等具有重要理论和实际意义。国外广泛流行的 DEM 建立方法是通过澳大利亚国立大学 Hutchinson 教授提出 DEM 插值算法以及开发 ANUDEM 软件,建立水文地貌关系正确的 DEM(Hc-DEM)^[3]。关于梯田作为水土保持工程措施的定量化评价因子,Foster GR^[4]将梯田作为水保措施考虑,直接给通用土壤流失方程中的 P(水保措施因子)赋值为 0.5。国内对梯田的研究主要集中于梯田质量评价^[5,6]、梯田形态特征^[7,8]、梯田设计^[9]、梯田效益分析^[10]等方面,针对梯田 DEM 构建方法以及梯田对土壤侵蚀地形因子影响的研究较少,其中祝士杰^[11]等人提出了梯田 DEM 快速构建方法,李慧^[12]对梯田构建方法进行了总结讨论,这些研究为梯田表达和基于梯田 DEM 的分析提供了基础。本文主要讨论坡式梯田 DEM 的构建及其对地形因子提取的影响。


1 研究基础与方法

1.1 研究样区与数据基础

黄土高原梯田主要分布在黄土丘陵沟壑区及阶地、平原区,梯田面积总和占黄土高原梯田的 70%以上,地形因子特别是坡长应以流域为单元提取。本研究选择陕西省延安市安塞县东南部的一处典型的黄土高原丘陵沟壑区的小流域为研究样区,为了更加突出梯田对地形因子提取结果的影响,重点分析流域内梯田区。流域东西宽 1.6 km,南北长 1.8 km,地理坐标为东经 109°15'11"~109°16'17",北纬 36°43'19"~36°44'18"。该流域土壤侵蚀及治理情况具有一定代表性。本研究的数据基础包括安塞县 1:1 万 5 m 分辨率的 DEM 数据以及 2.5 m 分辨率的 SPOT 遥感影像数据。样区梯田的基本信息见表 1。

表 1 样区梯田基本信息

Table 1 Basic information of terrace in sample region

实验样区 Sample region	平均高程差/m Average difference of elevation/m	平均田坎高/m Average height of field ridge/m	平均田面宽度/m Average field width/m	平均坡度/(°) Average slope/(°)	梯田面积/hm ² Terrace Area/hm ²
	85.06	3.40	21.75	12.07	9.26

1.2 基于真实田坎的梯田 DEM 构建方法

祝士杰等^[11]利用梯田田坎台沿线的偏移线,实现了梯田 DEM 的快速构建,该方法具有快速、高效、易操作等特点,但固定等高距造成该方法在表达实际梯田田坎高度不一的特征时具有一定局限性,某种程度上制约了其对于梯田地形的有效数值模拟。本研究充分利用高分辨率遥感影像能够得到地物较为清晰的基本特征信息的特点,对快速构建法作进一步改进,提出基于真实田坎的梯田 DEM 构建方法。

依据田面平整程度来划分,可将梯田归纳为水平梯田、坡式梯田、隔坡梯田、软埝(埝地)四种类型^[13]。实际地形中,理论上的水平梯田很难找到,再为平整的梯田其表面均稍有起伏,因此本研究构建样区坡式梯田以作进一步分析。梯田基本参数如图 1 所示, α 为梯田田面倾角, β 为田坎坡

度, L 为田面宽度, H 为两梯田田面高差, d 为田坎高, b 为田坎水平投影宽, 即台沿线偏移量。

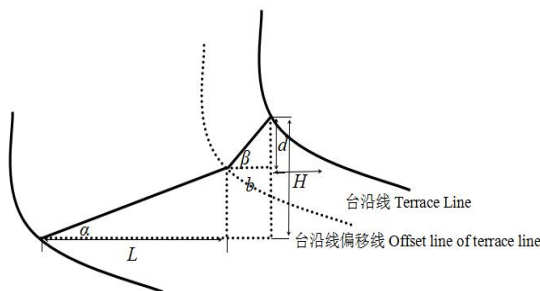


图 1 梯田剖面示意图

Fig.1 Terrace profile

$$d = H - L \tan \alpha \quad (1) \quad b = \cot \beta (H - L \tan \alpha) \quad (2)$$

其构建思路为: 首先在高精度遥感影像上对样区梯田田坎进行矢量化操作, 逐块勾绘田坎所在田面并求得各田面平均高程进行台沿线高程赋值; 其次根据表 1 样区梯田的基本信息, 结合表 2 确定样区梯田田坎坡度 β ($\beta=75^\circ$), 并在两田面高差及梯田田面倾角 α (坡式梯田 $\alpha=1^\circ$) 的基础上, 利用公式 2 计算得到台沿线偏移量, 对台沿线进行逐根偏移后进行高程修正, 其高程值为相应台沿线高程减去田坎高度 d (d 由公式 1 得到); 最后取高程为内插属性, 以台沿线及其偏移线为特征约束线, 构建 TIN 生成梯田 DEM。

表 2 梯田断面尺寸确定基本参考数值

Table 2 Basic references for the cross-sections of terraces' size

地面坡度/(°) Slope/(°)	田面宽度 L /m Field width L /m	田坎高度 d /m Field ridge height d /m	田坎坡度 β /(°) Field ridge slope/(°)
1~5	30~40	1.1~2.3	85~70
5~10	20~30	1.5~4.3	75~55
10~15	15~20	2.6~4.4	70~50
15~20	10~15	2.7~4.5	70~50
20~25	8~10	2.9~4.7	70~50

为验证此方法的有效性, 利用 ArcGIS 软件得到样区梯田 DEM 山体阴影并绘制高程剖面图, 由图 2(a)可看出样区 DEM 包含梯田信息, 结合图 2(b)分析, 原始 DEM 的高程剖面为平滑的曲线, 仅能表现出地形起伏趋势, 而梯田 DEM 的高程剖面总体呈明显的阶梯状分布, 并且能够较为准确的表达出梯田田坎高度、田面宽度等梯田信息, 说明基于真实田坎方法构建的梯田 DEM, 其田坎位置、形态与真实田坎基本吻合。

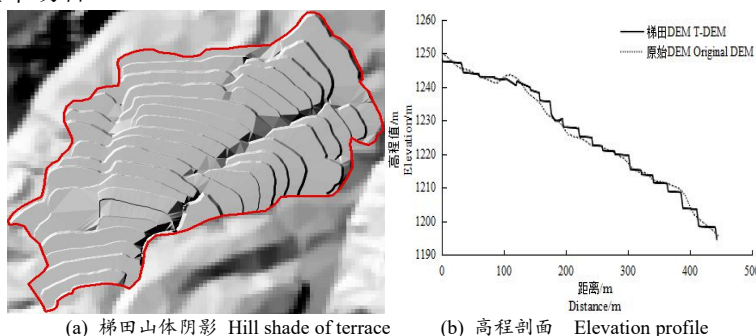


图 2 基于真实田坎构建 DEM

Fig.2 Construction of DEM based on actual ridge

2 结果与分析

地形是最主要的环境要素之一, 包括坡度、坡长和坡型等, 直接影响地表径流、侵蚀产沙的发生和水沙物质的汇集与传输^[14]。坡度、坡长作为定量计算土壤流失的重要指标和土壤侵蚀模型中的必要参数^[15], 其变化必会导致分析结果出现偏差。为研究梯田对土壤侵蚀地形因子提取的影响, 基于原始 DEM 与梯田 DEM 分别提取的坡度、坡长以及计算得到的坡度坡长因子进行分析。

2.1 梯田 DEM 对坡度的影响

坡度是地面高程在空间上的变化率，即高程的一阶导数。坡度的计算通常基于 DEM 并用邻域分析等方法提取。在各种土壤侵蚀模型中，坡度均是主要的地形因子^[16]。利用 ArcGIS 软件空间分析模块中的坡度工具求取实验样区原始 DEM 与梯田 DEM 的坡度，在此数据基础上绘制坡度频率及累积频率曲线。

通过样区原始 DEM 与梯田 DEM 的坡度频率及累积频率曲线分析可得，加入梯田信息后，样区内小坡度比重增加、中等坡度比重减少，且出现了一些大坡度栅格，其中基于原始 DEM 提取的坡度主要集中于 5°~20°，频率曲线大致呈正态分布，在 9°处出现峰值；而基于梯田 DEM 提取的坡度绝大多数集中在 0°~3°，频率曲线呈偏态分布，在 0°处出现峰值，且梯田 DEM 的坡度累积频率曲线在 56°之后趋于平缓的直线，即 56°之后的坡度频率基本趋近于 0，说明大坡度栅格的表现并不明显。同时，实验样区原始 DEM 与梯田 DEM 在平均坡度、坡度范围等指标上表现出较大差异，且梯田的构建导致了 DEM 平均坡度的减缓以及坡度范围的增加，其中平均坡度减少至原始 DEM 的 3/4，结合谢红霞^[17]改进后的提取黄土高原坡度因子的方法可得基于原始 DEM 与坡度 DEM 提取的坡度因子将会具有一定差异。即梯田的构建会使得坡度值等相关属性发生变化，进而影响坡度因子提取以及土壤侵蚀评价结果。

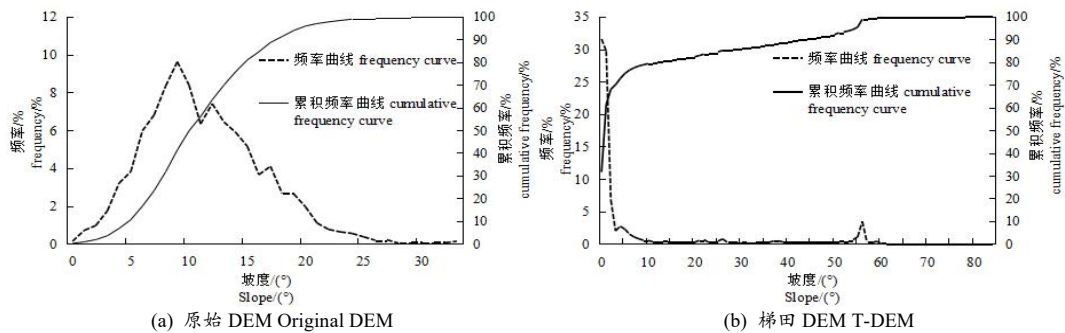


图 3 样区原始 DEM、梯田 DEM 坡度的频率及累积频率曲线

Fig.3 The slope frequency curve and cumulative frequency curve of original DEM and T-DEM

2.2 梯田 DEM 对坡长的影响

坡长是地表距离沿着流水线方向的积分。杨勤科^[18]在对 DEM 流域提取坡长时认为从径流发生点到泥沙汇集过程结束点之间的距离，就是流域土壤侵蚀评价中所应用的坡长（式 3）。

$$\lambda_{x_i, y_i} = \int_{x_0, y_0}^{x_i, y_i} \lambda_c dx \tag{3}$$

式中， λ_{x_i, y_i} 为坐标点 (x_i, y_i) 处的坡长， (x_0, y_0) 和 (x_i, y_i) 为径流源点和终点， λ_c 为流路上每个栅格的坡长。

基于上述原理，以样区梯田所在流域为单元，在 GIS 环境下，根据杨勤科^[18]对 DEM 流域提取坡长的方法，借助其开发的流域 LS 计算工具对原始 DEM 与梯田 DEM 提取坡长，基本方法为：基于较高分辨率 DEM，根据水流来向和流向关系，定义局部高点作为坡长累计计算起点，从高到低，通过不断寻求径流结束点的方式，利用多重循环和迭代方法，完成对累计坡长的计算。并将提取结果分为短坡(0~50 m)、中长坡(50~100 m)、长坡（100~300 m）、超长坡（>300 m）四个级别^[19]，同时绘制样区原始 DEM 与梯田 DEM 的坡长频率及累积频率曲线作为进一步分析的数据基础。

表 2 样区原始 DEM 与梯田 DEM 坡长提取结果

Table 2 Slope length's extracted results of original DEM and T-DEM in sample regions

类型 Type	平均坡长/m Average slope length/m	短坡比重/% Proportion of short slope/%	中长坡比重/% Proportion of medium slope/%	长坡比重/% Proportion of long slope/%	超长坡比重/% Proportion of overlong slope/%
原始 DEM	48.57	74.97	15.10	8.08	1.85
梯田 DEM	8.46	99.54	0.34	0.10	0.01

结合表 2 可得，对原始 DEM 提取的坡长主要集中于短坡、中长坡，而对梯田 DEM 提取的坡长 99%以上集中在短坡，且梯田 DEM 相较原始 DEM 平均坡长、坡长范围总体呈减小趋势，其中平均

坡长减少至原始 DEM 的 1/6。同时,对实验样区原始 DEM 与梯田 DEM 的坡长频率及累积频率曲线分析可得,加入梯田信息后,梯田 DEM 坡长栅格量大幅度增加。原始 DEM 频率曲线变化剧烈,梯田 DEM 频率曲线呈递减趋势且累积频率曲线在坡长较短的位置趋于直线。另外,黄土高原有关坡长与侵蚀之间关系的研究均表明,在一定的坡长范围内,侵蚀量随坡长的增长而增长^[20]。因此,梯田 DEM 与原始 DEM 在坡长提取结果上具有的较大差异,必将对坡长因子以及土壤侵蚀定量分析等研究产生影响。

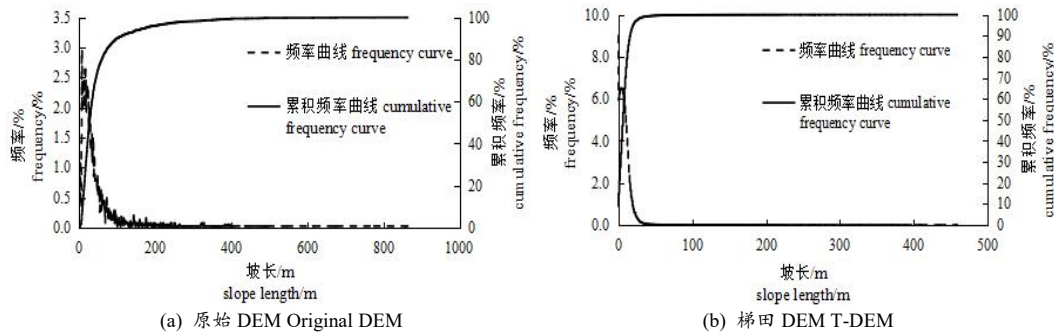


图 4 样区原始 DEM、梯田 DEM 坡长的频率及累积频率曲线

Fig.4 The slope length frequency curve and cumulative frequency curve of original DEM and T-DEM

2.3 梯田 DEM 对坡度坡长因子的影响

LS 因子是坡度和坡长的函数,在 USLE 和 RUSLE 中,用 LS 因子表示地形对土壤流失的影响。流域尺度的 LS 因子计算是区域土壤侵蚀评价的重要基础,为了解梯田对 LS 因子的影响,遵循杨勤科^[18]对 DEM 流域计算坡度坡长因子的方法,借助其开发的流域 LS 计算工具计算流域内原始 DEM 与梯田 DEM 的 LS 因子,基本方法为:根据坡面水文学和土壤侵蚀学原理,基于上述章节提取的坡长,利用 D8 算法提取坡度,结合陡坡 LS 因子公式(式 4~5)^[21]计算流域 LS 专题层。

$$S = \begin{cases} 10.8 \sin \theta + 0.036 & \theta < 5^\circ \\ 16.8 \sin \theta - 0.5 & 5^\circ \leq \theta < 10^\circ \\ 21.9 \sin \theta - 0.96 & \theta \geq 10^\circ \end{cases} \quad (4)$$

式中, S 为坡度因子, θ 为由 DEM 提取的坡度值。

$$L = (\lambda / 22.1)^m, m = \begin{cases} 0.2 & \theta \leq 1^\circ \\ 0.3 & 1^\circ < \theta \leq 3^\circ \\ 0.4 & 3^\circ < \theta \leq 5^\circ \\ 0.5 & \theta > 5^\circ \end{cases} \quad (5)$$

式中, L 为坡长因子, λ 为由 DEM 提取的坡长, m 坡度坡长指数。

同时绘制 LS 因子频率曲线,以分析嵌入梯田信息对 LS 因子计算结果的影响。

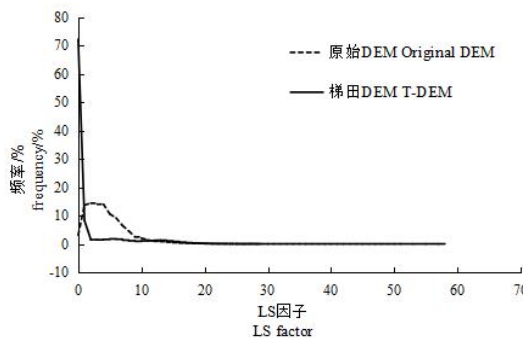


图 5 样区原始 DEM、梯田 DEM 的 LS 因子频率曲线

Fig.5 LS factor frequency curve of original DEM and T-DEM in sample regions

结合图 5 分析可得,实验样区基于原始 DEM 提取的 LS 因子范围在 0~29 之间波动,且 LS 因子的频率变化主要集中于 0~10 范围内;而基于梯田 DEM 提取的 LS 因子范围在 0~58 之间波动,其频率主要在 0~1 范围内变化,尤其 72%左右集中于 0 值并在 0 值后呈直线下降趋势。同时基于上述坡

度、坡长的提取结果,假设 USLE 公式中其他因子以及梯田作为工程措施因子的系数均一定,且 USLE 公式中各因子均为相乘关系,因此基于梯田 DEM 提取的 LS 因子理论上应当减少至基于原始 DEM 提取的 LS 因子的 1/8。该分析结果说明梯田的构建导致了实验样区 LS 因子值的减少以及变化范围的增加,提取的 LS 因子大多集中于 0 值并呈直线下降状态,以上变化均会对土壤侵蚀评价结果造成影响。

3 结论与讨论

(1) 采用基于真实田坎方法构建的梯田 DEM,其田坎位置、形态与真实情况基本一致,能较好地反映真实地表。

(2) 加入梯田信息后,平均坡度减小、小坡度比重增加且新增大坡度栅格,说明由“平缓”的原始 DEM 变为“有棱角”的梯田 DEM,可以推断坡度变化剧烈部位应集中于梯田特征线附近,这些地区正是地形失真较严重的区域。基于梯田 DEM 提取的坡度绝大多数集中在 $0^{\circ}\sim 3^{\circ}$,而原始 DEM 在该范围内所占比重相对较少,这与梯田田面地势平坦相符合;基于梯田 DEM 提取的坡度出现大数值的情况与梯田具有陡直台阶地形一致。通常侵蚀量与坡度成正相关,因此坡度的变化必将导致汇流时间、径流能量、侵蚀量发生改变,进而影响土壤侵蚀评价中坡度因子的计算,最终影响土壤侵蚀评价结果。

(3) 基于梯田 DEM 的坡长缩短,LS 值减小,这表明梯田田面地形平坦,其土壤侵蚀强度远小于其他区域,这与梯田具有良好的保水保土作用一致,因此在土壤侵蚀模型计算时应考虑梯田。

(4) 坡度、坡长、LS 因子等主要地形因子可以反映总体地貌形态的特征,与原始 DEM 相比,基于梯田 DEM 计算的梯田地形的坡长、坡度、坡度坡长因子等对于水保参数更加准确、有效。

(5) 另外,文章仅讨论样区内梯田对土壤侵蚀地形因子提取结果的影响,梯田对土壤侵蚀的定量化影响应以流域为基础进行分析,而流域对地形因子提取等相关研究的影响程度受流域内梯田面积、梯田位置、所属地貌类型等因素共同作用,会在以后作进一步研究。

参考文献

- [1] 吴礼福.黄土高原土壤侵蚀模型及其应用[J].水土保持通报,1996,16(5):29-35
- [2] 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(1):25-31,45
- [3] 杨勤科,师维娟, Mcvicar TR,等.水文地貌关系正确 DEM 的建立方法[J].中国水土保持科学,2007,5(4):1-6
- [4] Foster GR, Highfill RE. Effect of terraces on soil loss: USLE P factor values for terraces[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1983,38(1):48-51
- [5] 陈勇,刘京,刘举.黄土高原梯田质量评价系统设计研究[J].干旱地区农业研究,2007,25(6):227-230
- [6] 焦菊英,王万中.黄土高原水平梯田质量及水土保持效果的分析[J].农业工程学报,1999,15(2):65-69
- [7] 王妍,张超,宋维峰,等.元阳梯田空间分布特征研究[J].水土保持研究,2013,20(2):103-107
- [8] 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
- [9] 霍建立,李花,赵志刚,等.水平梯田设计与施工综合分析及应用[J].河北水利,2013(6):29
- [10] 霍云霄,朱冰冰.黄土丘陵区水平梯田保水保土效益分析[J].水土保持研究,2013,20(5):24-28
- [11] 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
- [12] 李慧.梯田 DEM 构建方法研究[D].西安:西北大学,2014
- [13] 唐克丽.中国水土保持[M].北京:科学出版社,2004:411
- [14] 杨勤科.区域水土流失监测与评价[M].郑州:黄河水利出版社,2015:73-107
- [15] 孔亚平,张科利,曹龙熹.土壤侵蚀研究中的坡长因子评价问题[J].水土保持研究,2008,15(4):43-47,52
- [16] 高华端,李锐.区域土壤侵蚀过程的地形因子效应[J].亚热带水土保持,2006,18(2):6-9,14
- [17] 谢红霞.延河流域土壤侵蚀时空变化及水土保持环境效应评价研究[D].西安:陕西师范大学,2008
- [18] 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):203-206,211
- [19] 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
- [20] 秦伟,朱清科,张岩.通用土壤流失方程中的坡长因子研究进展[J].中国水土保持科学,2010,8(2):117-124
- [21] 水利部水土保持监测中心.第 4 次全国土壤侵蚀普查技术规程[Z].2009