

顾及梯田的 DEM 地形特征研究

冯园, 赵牡丹, 张鹏, 吴宇鑫

(西北大学 城市与环境学院, 西安 710100)

摘要:梯田地表作为一种特殊的经人工深度影响的地貌形态, 目前已成为在山丘地区具有经济效益和生态效益的土地资源。但是在当前强化推进土地资源管理数字化、信息化的今天, 对梯田的数字化表达以及分析还存在欠缺。本研究通过对数据的改造, 构建出顾及梯田的 DEM, 并从原始 DEM 与梯田 DEM 的剖面结构特征、高程特征以及地形因子特征等方面进行了对比分析。结果表明: (1) 基于真实田坎构建的梯田 DEM, 可较为准确且直观地反映梯田地形的特征。(2) 与原始 DEM 相比, 加入梯田信息后, 梯田 DEM 高程剖面图总体呈阶梯式分布, 转折部位明显, 且基于梯田 DEM 提取的坡度、坡长、LS 因子值明显减小, 反映修建梯田后地形因子的变化, 对进一步定量分析土壤侵蚀以及水土流失具有重大意义。

关键词:梯田; 梯田 DEM; 地形特征; 地形因子

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)04-0032-06

Study on Topographic Features of the Terraces DEM

FENG Yuan, ZHAO Mudan, ZHANG Peng, WU Yuxin

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

Abstract: As the special and artificial micro topography, terraces have already become land resources with economic and ecological benefits in the Loess Plateau. However, most existing DEMs hardly satisfy the realization of terrace terrain, and partial artificial landform information is lost. In this paper, we choose terraces in a basin in Ansai County as the case study area, the materials include DEM of Ansai (its scale is 1 : 10 000, resolution is 5 m) and a remotely sensed image with a resolution of 2.5 m. 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, topographic features and terrain factors (slope, slope length and LS factor) were extracted from Original DEM and T-DEM, respectively. The results show that: (1) T-DEM reflects terrace terrain accurately and intuitively; (2) in comparison with the Original DEM in sample region, profile features of elevation extracted by T-DEM distribute like a ladder were more consistent with the real topographic features; meanwhile, slope, slope length and LS factor extracted by T-DEM are smaller; more precisely, the average of slope decreased by almost a half and its range increased; the range of slope length reduced obviously and the average of slope decreased; LS is reduced by 90%. In conclusion, terraces play an important role in DEM-based terrain analysis. This research has the significant meaning for evaluating soil erosion.

Keywords: terrace; T-DEM; topographic features; terrain factors

黄土高原在全国地貌分布格局中属于第二阶梯, 是黄土沉积最厚、范围最广的地区, 也是黄河泥沙最主要的来源地和水土流失最剧烈的地区。地形是影响土壤侵蚀与水土流失的重要因素, 而 DEM 通常被视为提取各种丰富地形要素的信息源^[1-3]。为了有效

地治理水土流失, 近年来在黄土高原丘陵和山地修建了大规模的梯田^[4], 但目前 DEM 一般是以现有的地形图通过内插方法生成, 用来模拟光滑、连续的自然地表, 忽略了诸如陡坎、梯田这类普遍存在的自然或者人工突变微地形信息^[5-6]。而这些突变微地形使得

坡面坡度变缓、田坎部位变陡、坡长被截断,造成径流路、汇流方式的改变,进而影响土壤侵蚀评价的过程^[7-9]。以美国通用土壤流失方程(USLE)作为蓝本所建立的适应中国地区的中国土壤流失预报方程(CSLE),是将梯田作为水土保持的工程措施因子(E 因子)来考虑,并没有以梯田对地表水沙物质运移方式变化为基础。本研究在现有 DEM 数据和高分辨率遥感影像基础上,通过对数据的改造处理,构建出顾及梯田地形的 DEM,分析研究其地形特征,得出梯田对坡度、坡长、LS 因子等的影响,此研究对于改进土壤侵蚀地形因子、完善土壤侵蚀评价方法等具有重要理论和实际意义。目前对于梯田的研究主要集中在梯田质量评价^[10]、梯田形态特征^[11-12]、梯田设计^[13]、梯田效益分析^[14]等方面,针对梯田 DEM 构建方法以及梯田对地形特征影响的研究较少,赵卫东^[15]等通过在现有 1:1 万格网 DEM 数据基础上,加入梯田地形特征点、地形特征线和外围边界线作为约束地形的条件,建立出顾及梯田地形的 Grid-TIN 混合格网 DEM,在达到对研究区全局地形实现适当分辨率表达的基础上,可对梯田地形区域实现精细化表达;李慧^[16]提出基于真实田坎的梯田 DEM 构建方法,该方法依据高分辨率影像勾画梯田台阶边沿线,使用所在 DEM 栅格平均值作为台沿线的高程值,确定的田坎位置信息与高程信息更精确,更接近真实的梯田地形形态;程德强^[17]将 DEM 信息与高分辨率遥感影像信息有效结合,选择相关样区建立坡度与梯田田面宽度之间的函数对应关系,并基于该函数关系实现梯田田面的反演、分类、假彩色合成试验,从而强化了梯田信息的表达。这些研究都为梯田信息的表达以及基于梯田 DEM 的分析研究奠定了基础。本文主要讨论梯田 DEM 的建立,并从梯田 DEM 与原始 DEM 剖面结构特征、高程特征以及地形因子特征等方面进行对比分析,为进一步土壤侵蚀与水土流失研究提供基础。

1 试验材料与方法

1.1 研究样区与基础数据

试验样区选择的好坏会直接影响到试验结论,因此试验区域的选择应遵循科学性、易获取性、实用性,考虑梯田的分布范围、数据积累以及土壤侵蚀的典型性,此次试验样区选取安塞县中部的两个梯田区域。安塞县位于陕西省延安市北部,属于中温带大陆性半干旱季风气候,地处陕北内陆黄土高原,境内沟壑纵横、梁峁遍布。地理坐标为东经 $108^{\circ}51'44''$ — $109^{\circ}26'18''$,北纬 $36^{\circ}30'45''$ — $37^{\circ}19'31''$ 。全县海拔为 1 012~1 731.1 m,其平均海拔为 1 371.9 m。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(下文中将其称为原始 DEM)以及 2.5 m 分辨率的 Spot 遥感影像数据。

1.2 梯田 DEM 的建立

正确的建立梯田 DEM 是进行梯田 DEM 表面地形分析研究的基础。祝士杰和汤国安给出了快速构建梯田 DEM 的近似方法,该方法具有快速、易操作等特点,但是固有等高距使得构建结果中梯田田坎位置与真实田坎位置有出入^[18]。本研究充分利用高分辨率遥感影像能够得到较为清晰的地物基本特征信息的特点,对快速构建法作进一步改进,运用基于真实田坎的梯田 DEM 构建方法,根据高分辨率遥感影像手动勾绘梯田台阶边沿线特征线,使得梯田田坎与实际田坎位置、走势保持一致。根据梯田地形形态特征、结构规整性特征、几何特征等^[19-20],把梯田看作是一个相对独立的数学模型,建立梯田数字高程模型并进行相关研究分析。如图 1 所示:

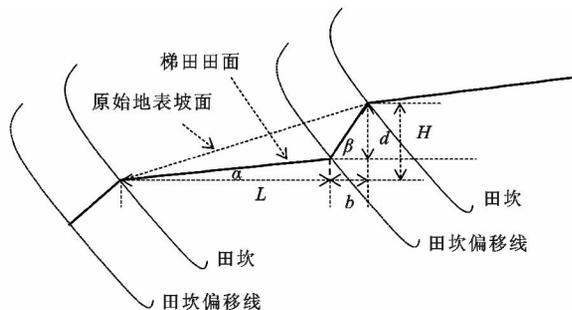


图 1 梯田剖面示意

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

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

式中: L 为梯田田面的宽(田面水平投影宽); α 为梯田田面倾角坡度; β 为田坎坡度; H 为梯田田面高程差(一个坎顶点到下一个坎顶点高程差); d 为田坎高(坎顶点到坎底点的高程差); b 为田坎水平投影宽。

首先,以高分辨率遥感影像作为底图,手动沿各梯田地块边界勾绘一组台沿线,在 DEM 基础上通过掩膜的方法提取各田块,获得各田块的高程值,把每块田面的平均高程值赋给相应的台沿线;其次,根据试验样区确定梯田基本参数(田面高程差 H 、田面宽度 L 、田面坡度 α 、田坎坡度 β 、求算 b 值),将台沿线水平偏移距离 b ,得到一组台沿偏移线,并对台沿偏移线高程赋值,其高程值为相应的台沿线高程值减去田坎差值 d (当田面坡度 $\alpha = 0$ 为水平梯田,当 $\alpha > 0$ 为坡式梯田);最后,以提取的两组台沿特征线高程为插值属性进行构建梯田 DEM。此方法构建的梯田 DEM,梯田田坎与真实田坎位置、形态吻合。

安塞县试验样区一(水平梯田):构建田面坡度 $\alpha = 0^{\circ}$, $\beta = 75^{\circ}$ 。试验样区二(坡式梯田):构建田面坡度 $\alpha = 1^{\circ}$, $\beta = 75^{\circ}$ 。梯田 DEM 图如图 2 和图 3 所示。

2 结果与分析

2.1 地形剖面特征分析

为了更好地反映梯田地形构造特征,绘制剖面

图显示梯田地面形态在垂直与水平两个方向高程、坡度的变化情况。以梯田样区最低点到最高点之间勾画一条直线, x 轴为水平距离, y 为高程值绘制高程剖面图。 x 轴为水平距离, y 轴为坡度值绘制坡度剖面图。

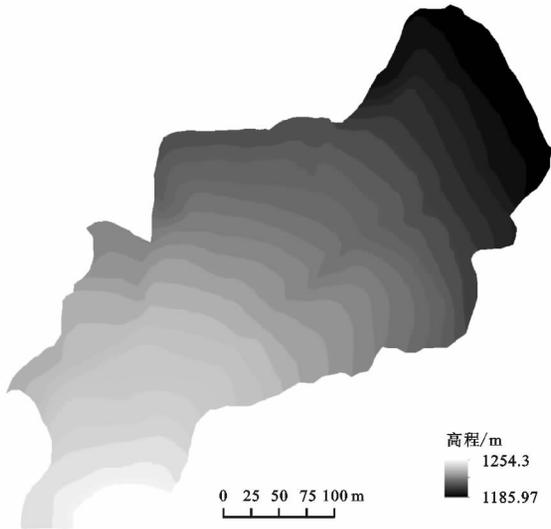


图 2 水平梯田 DEM

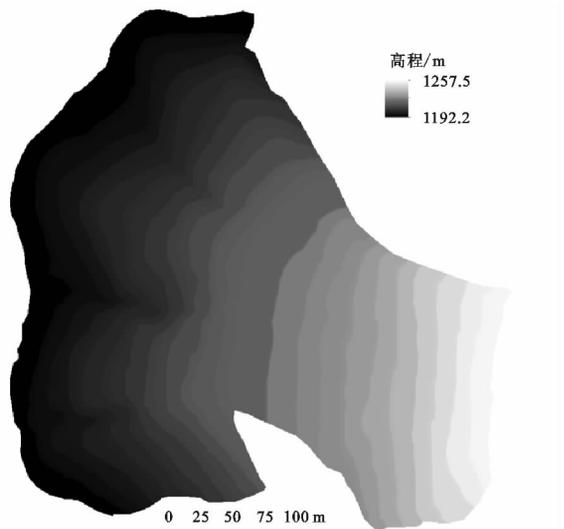


图 3 坡式梯田 DEM

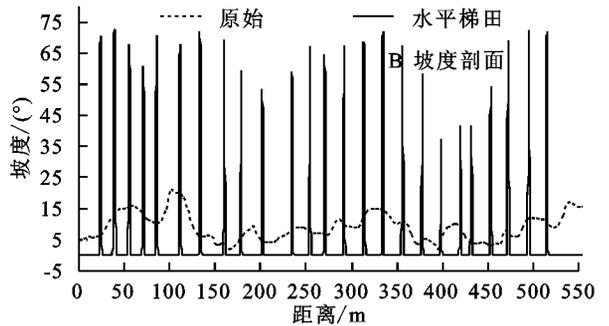
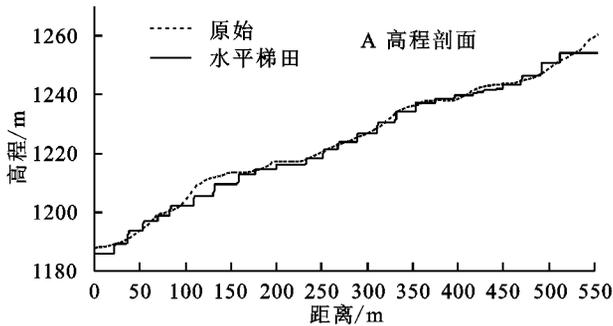


图 4 水平梯田高程剖面图与坡度剖面图

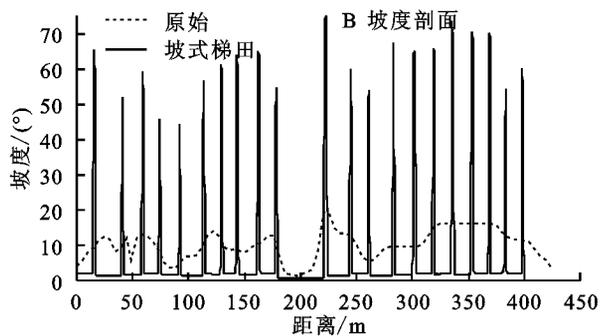
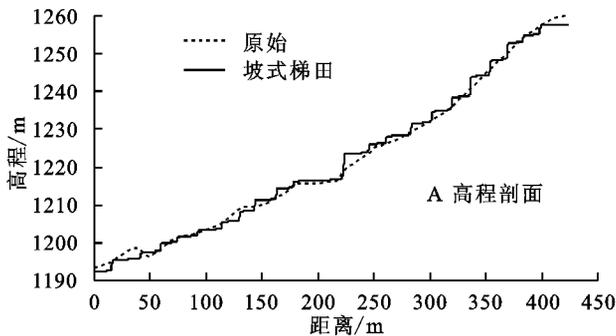


图 5 坡式梯田高程剖面图与坡度剖面图

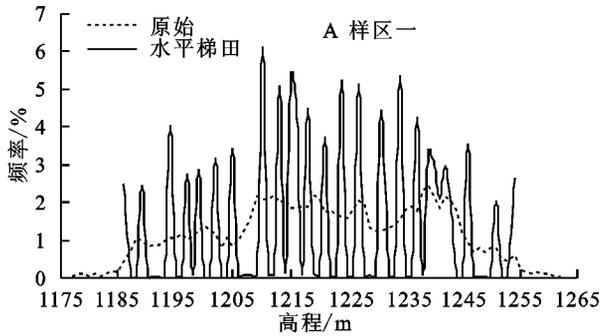
水平梯田地形剖面分布见图 4,原始 DEM 高程剖面图是一条比较光滑曲线,大致反映地表走势;构建的梯田 DEM 高程剖面图是一条呈台阶式变化曲线,很好反映了梯田细部地形高低变化情况,田块高程差在 2~3 m,田面宽度变化多样,相对田面宽度比较窄。原始 DEM 坡度剖面曲线比较粗略反映地表坡度变化,其坡度值分布范围为 $0^{\circ}\sim 2^{\circ}$;梯田 DEM 坡度剖面图曲线很好反映梯田陡缓变化,转折部位明显,田坎处地形陡直,坡度最大值达到 70° 。

坡式梯田地形剖面分布见图 5,原始 DEM 高程剖面图是一条比较光滑的曲线,整体凹凸变化不明显;构建的梯田 DEM 高程剖面图是一条阶梯式变化的曲线,田坎转折部位变化明显,垂直方向可以反映田块高程差 1~5 m,田面宽度在 10~30 m,大部分田面比较窄。原始 DEM 大致反映地表坡度变化情况,坡度差值变化相对比较小,丢失部分细部地形坡度信息,陡直处地形坡度几乎被光滑;梯田 DEM 坡度信息表达比较完整,田面坡度在 $0^{\circ}\sim 2^{\circ}$,田坎附近

的地形坡度值达到 $65^{\circ}\sim 75^{\circ}$,很好反映梯田地形坡度陡缓剧烈变化信息。

2.2 高程特征分析

高程可以宏观的反映某一区域地势高低、地表形



态等,因此,导出 DEM 高程属性值,以高程值为 x 轴,高程值栅格数占整个样区栅格总数比值为 y 轴绘制 DEM 高程频率曲线分布图,对梯田 DEM 与原始 DEM 高程值进行比较分析。

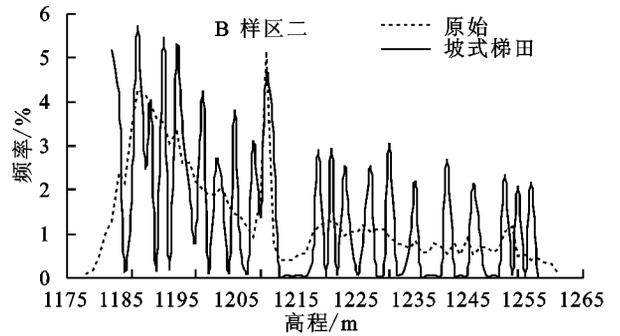


图 6 原始 DEM 与梯田 DEM 的高程频率曲线

DEM 高程频率曲线整体变化比较光滑、平缓,比较模糊表达地表信息,其高程值范围为 $1\ 177\sim 1\ 260\text{ m}$,频率值基本为 3% 左右。水平梯田 DEM 高程值集中于 $1\ 180\sim 1\ 256\text{ m}$,高程频率曲线呈波浪式变化,由于田面与田坎交替出现,因此高程频率曲线波峰与波谷交替出现,每块田面内高程值几乎都相同,栅格个数多,高程频率值大;每块田坎高程值不相同,栅格个数少,高程频率值小,符合人工—自然梯田地形特征(图 6A)。

DEM 高程值范围 $1\ 188\sim 1\ 261\text{ m}$,频率曲线值在 $1\%\sim 5\%$,高程频率曲线大致反映出地表走势,地形细节表达比较模糊。构建的坡式梯田 DEM 高程值集中分布于 $1\ 190\sim 1\ 259\text{ m}$,高程频率曲线呈波浪式变化,波峰与波谷交替出现,田面与田坎转折

部位明显,很好再现了梯田地形特征。说明加入地形特征线进行约束,能较好反映梯田边界突变地形特征(图 6B)。

2.3 地形因子特征分析

2.3.1 梯田 DEM 与原始 DEM 坡度特征比较 坡度是地面高程在空间上的变化率,即高程的一阶导数。可以反映某一地区地势倾斜、陡缓变化情况。坡度的陡缓直接决定水流流速,影响水流侵蚀力和冲刷了,在各种土壤侵蚀模型中,坡度均是一种主要地形因子^[21]。利用 ArcGIS 软件空间分析模块中的 slope 工具求取试验样区原始 DEM 与梯田 DEM 的坡度,以坡度值为 x 轴,每一坡度栅格数占整个样区栅格总数比值为 y 轴绘制 DEM 坡度频率曲线分布图。以分析嵌入梯田信息对坡度计算结果的影响。

A 样区一(水平梯田)

B 样区二(坡式梯田)

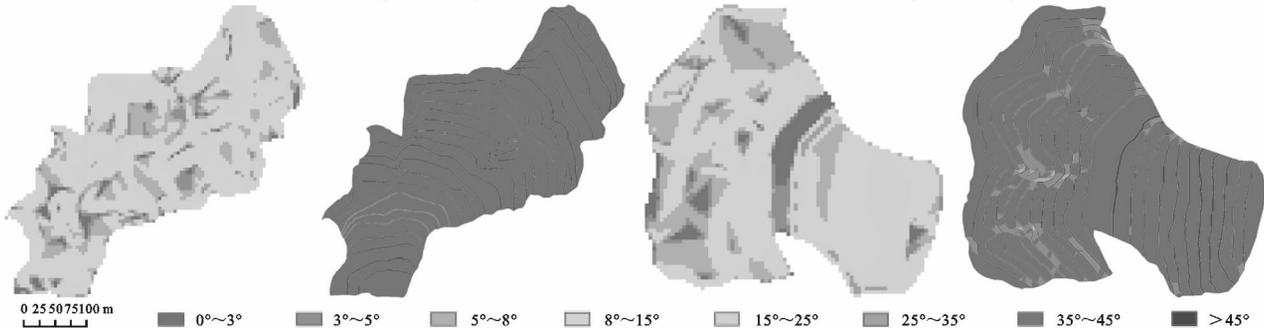


图 7 基于原始 DEM 与梯田 DEM 提取的坡度

结合图 7、图 8 可得,样区一原始 DEM 的坡度主要分布在 $0^{\circ}\sim 43^{\circ}$,平均坡度为 12.5° ,在 10° 处出现峰值;而基于水平梯田 DEM 提取的坡度值的范围扩展到 $0^{\circ}\sim 75^{\circ}$,且集中分布在 0° ,坡度值为 0° 的坡度占比达到 87.2% ,平均坡度为 5.2° 。样区二原始 DEM 坡度的分布范围为 $0^{\circ}\sim 32^{\circ}$,平均坡度为 10.3° ,在 9° 处出现峰值;而基于坡式梯田 DEM 提取的坡度值范围

也同样扩展到 $0^{\circ}\sim 75^{\circ}$,且近 88% 集中分布在 5° 以内,平均坡度 6.8° ,大坡度栅格增加。该分析结果表明原始 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,其中大坡度栅格的增加,表明构建的梯田 DEM 能有效表达地表陡坎地形信息。

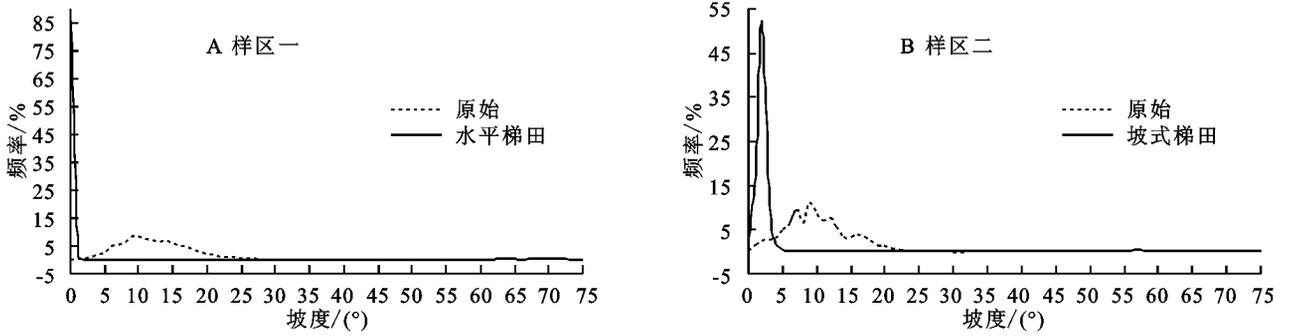


图 8 原始 DEM 与梯田 DEM 的坡度频率曲线

2.3.2 梯田 DEM 与原始 DEM 坡长特征分析 坡长是地表距离沿着流水线方向的积分,是壤侵蚀研究中的重要因子,坡面的长度决定地面径流速度、水流冲刷力和侵蚀力,坡面越长,水流冲刷力和侵蚀力越强,坡面土壤侵蚀程度越大。在 GIS 环境下,根据杨

勤科^[22]教授对 DEM 流域提取坡长的方法,借助其开发的流域 LS_TOOL 工具对原始 DEM 与梯田 DEM 提取坡长,以坡长值为 x 轴,每一坡长栅格数占样区总栅格数比值为 y 轴绘制坡长频率分布图,以分析嵌入梯田信息对坡度计算结果的影响。

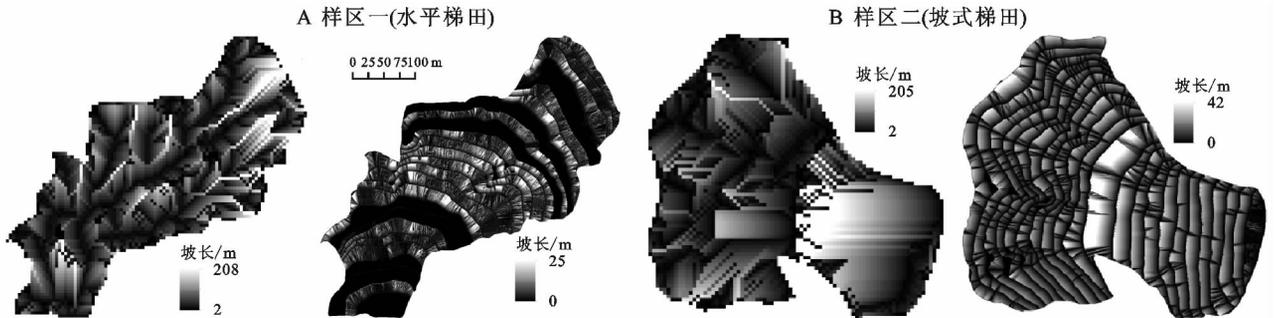


图 9 基于原始 DEM 与梯田 DEM 提取的坡长

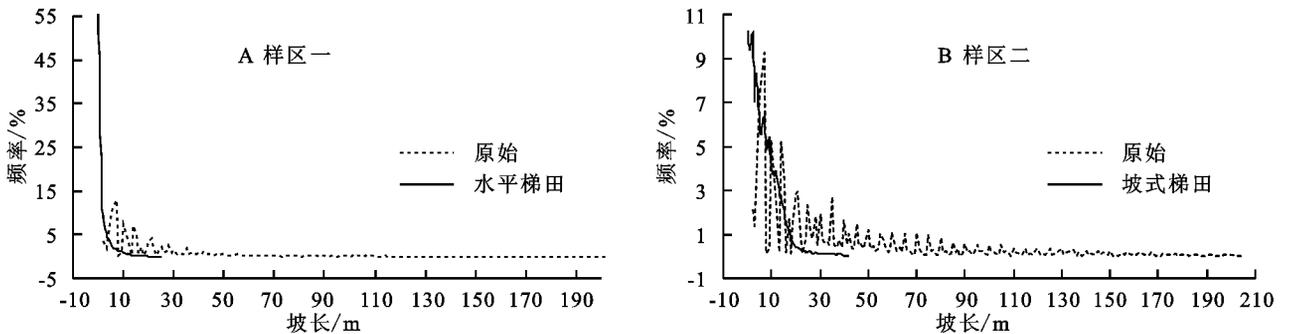


图 10 原始 DEM 与梯田 DEM 的坡长频率曲线

结合图 9、图 10 可得,样区一原始 DEM 坡长 2~208 m,坡面长度集中在 30 m 以内,平均坡长为 22.9 m;水平梯田 DEM 坡长范围缩减至 0~25 m,田面坡长为 0 m,坡面长度在 10 m 以内频率值达到 97.3%。样区二,原始 DEM 坡长范围在 2~205 m,集中于 50 m 以内,坡长频率曲线呈波浪式,平均坡长 40.2 m;坡式梯田 DEM 坡长分布在 0~42 m,平均坡长 6.7 m。分析可得梯田 DEM 相较原始 DEM 平均坡长、坡长范围总体呈减小趋势。研究表明,黄土高原地区在一定坡长范围内,土壤侵蚀量随坡长的增加而增加^[23],因此,梯田的构建将对土壤侵蚀的定量评价产生影响。

2.3.3 梯田 DEM 与原始 DEM 坡度坡长特征分析 LS 是坡度和坡长的函数,流域尺度中 LS 因子

是评价黄土高原各类地形侵蚀强度的重要因子。为了解梯田对 LS 的影响,借助 LS_TOOL 工具计算流域内原始 DEM 与梯田 DEM 的 LS 因子。同时以 LS 因子值为 x 轴,每一 LS 因子值栅格数占总栅格数比值为 y 轴绘制坡度坡长因子频率曲线图,以分析嵌入梯田信息对 LS 因子计算结果的影响。

结合图 11、图 12 可得,样区一原始 DEM 的 LS 值范围在 0~29 波动,且 LS 因子频率变化主要集中在 0~10,频率曲线峰值出现在 1 附近且达到 18.7%,而基于水平梯田 DEM 提取的 LS 因子值范围在 0~21 波动;样区二,原始 DEM 值范围在 0~27 波动,且 LS 因子频率变化主要集中在 0~12,而基于坡式梯田提取的 LS 因子值范围也在 0~27 波动。水平梯田 DEM 与坡式梯田

DEM的LS值频率曲线走势大体一致,从0附近频率值90%急剧下降。该分析结果说明梯田的构建导致试验

区的LS因子值减小,且大多集中于0值。以上变化将均会对土壤侵蚀评价结果造成影响。

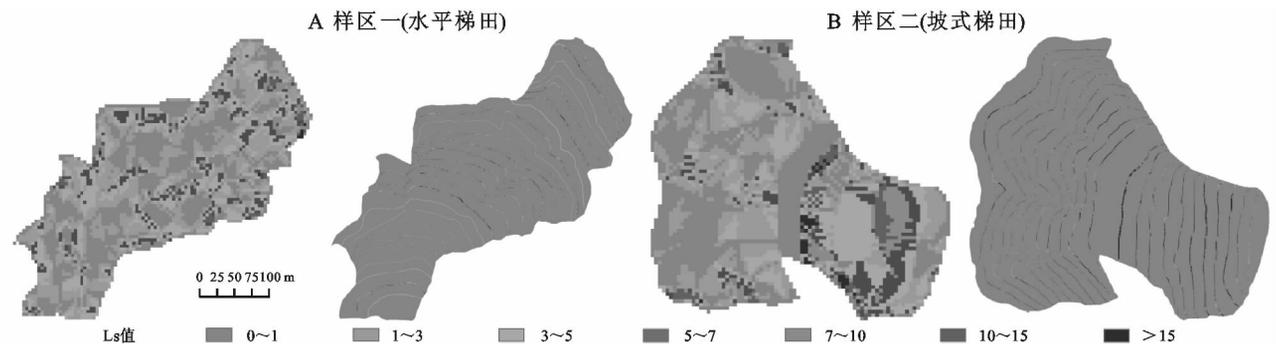


图11 基于原始DEM与梯田DEM提取的LS因子

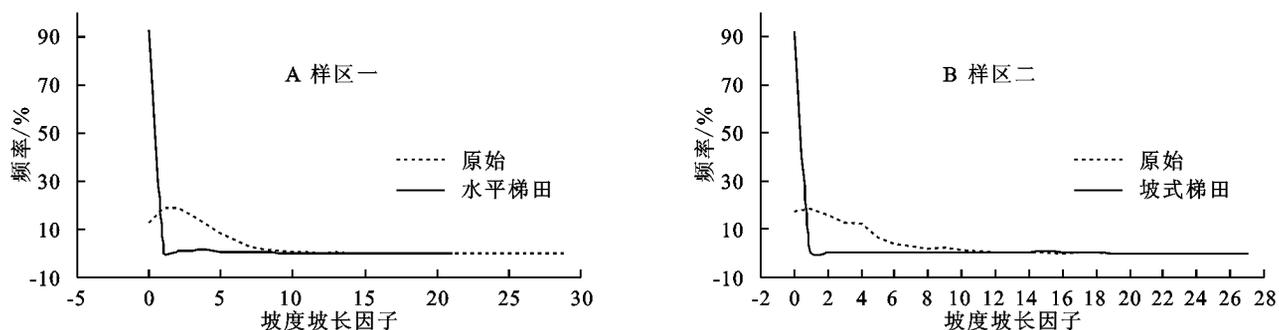


图12 原始DEM与梯田DEM的LS频率曲线

3 结论

(1) 由于考虑梯田地形因素,加入地形特征线构建梯田DEM,田坎与真实梯田田坎位置、形态基本一致,呈阶梯状分布,接近真实地表。

(2) 梯田DEM具有独特的地形结构特征。原始DEM高程剖面图整体是一条平滑曲线;梯田DEM高程总体呈阶梯式分布,转折部位明显。梯田DEM坡度剖面图田面坡度为 $0^{\circ}\sim 3^{\circ}$,田坎附近地形坡度大约为 $70^{\circ}\sim 80^{\circ}$;原始DEM坡度基本在 $0^{\circ}\sim 25^{\circ}$,坡度差值变化范围相对较小,田坎边界特征比较模糊。对于梯田DEM高程特征,高程值有些部位被消减,有些部位被抬高,高差大的部位应该有相当一部分是由于加入陡坎信息产生。

(3) 与原始DEM相比,梯田DEM平均坡度减小、小坡度比重明显增加且大坡度栅格频率占比显著新增,说明地形由“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,这些地区也正是原始DEM中地形失真较严重的区域。构建的梯田DEM坡长缩短,LS值减小,表明梯田地形土壤侵蚀强度减少,这与梯田具有良好的保水保土保肥作用一致,因此在土壤侵蚀模型地形因素计算时应将梯田考虑在内。

(4) 文章仅探讨了梯田DEM的地形特征以及对土壤侵蚀地形因子提取结果的影响,今后可对完整流

域内梯田地形对土壤侵蚀的影响做定量化的评价,以此可获得更完善、更全面的研究结果。

参考文献:

- [1] 汤国安,刘学军,吕国年,等. 数字高程模型及地学分析的原理与方法[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [2] 高海东,李占斌,李鹏,等. 梯田建设和淤地坝淤积对土壤侵蚀影响的定量分析[J]. 地理学报,2012,67(5):599-608.
- [3] 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.
- [4] 古云鹤,杨勤科,罗仪宁,等. 突变地形特征在DEM上的表达[J]. 水土保持研究,2011,18(2):174-179.
- [5] Hutchinson M F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits[J]. Journal of Hydrology,1989,106(3):211-232.
- [6] 汤国安. 我国数字高程模型与数字地形分析研究进展[J]. 地理学报,2014,69(9):1305-1325.
- [7] 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.
- [8] 张照录. 基于DEM通用土壤流失方程地形因子的算法设计与优化[J]. 水土保持研究,2007,14(3):203-205.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.

变化特征的分析,表明大气降水是驱动径流变化的主要因子;而气温变化的影响是,若气温偏低起到了加速降水对径流的驱动能力,气温偏高却起到了减弱降水对径流的驱动影响。另外也分析了下垫面蓄水和水利工程建设对挠力河中下游径流变化的驱动作用。上述研究分析的内容方法和结果,在我国相关的学科领域中是不多见的。本文对于在气候变暖背景下规划三江平原特别是挠力河流域治理和水资源综合利用,实现农业可持续发展具有现实和长远意义。

对于大气降水和水利工程对径流的驱动作用的关系,如何定量分析各自的贡献以及水面的蒸发驱动作用和这些因素的驱动机理等方面还需进一步研究。

参考文献:

- [1] 刘兴土. 三江平原沼泽湿地的蓄水与调洪功能[J]. 湿地科学, 2007, 5(1): 64-68.
- [2] 陈刚起, 张文芬. 三江平原沼泽对河川径流影响的初步探讨[J]. 地理科学, 1982, 2(3): 254-263.
- [3] 王薇, 李传奇. 蓄滞洪区的功能、价值与多目标利用[J]. 水利发展研究, 2004, (9): 26-28.
- [4] 陈刚起. 三江平原沼泽径流的试验研究[C]// 黄锡畴. 中国沼泽研究. 北京: 科学出版社, 1989: 120-125.
- [5] 于宏敏, 刘赫男, 潘华盛, 等. 黑龙江七星河湿地面积锐减原因的研究[J]. 自然灾害学报, 2013, 23(6): 234-239.
- [6] 张建云, 章四龙, 王金星, 等. 近 50 年来中国六大流域年际径流变化趋势研究[J]. 水科学进展, 2007, 18(2): 230-234.
- [7] 潘华盛, 张桂华, 李向东. 气候变暖对黑龙江省水资源的影响及对策[J]. 黑龙江水专学报, 2004, 31(1): 1-4.
- [8] 李彩侠, 李倩, 王雅珍, 等. 近 52 年黑龙江省农业气候资源变化特征分析[J]. 水土保持研究, 2014, 21(6): 187-192.
- [9] 王英, 曹明奎, 陶波, 等. 全球气候变化背景下中国降水量空间格局的变化特征[J]. 地理研究, 2006, 25(6): 1031-1040.
- [10] 陈晶, 杨帆, 田宝兴, 等. 黑龙江省黑土区近 50 年来四季气温时空变化特征分析[J]. 水土保持研究, 2013, 20(3): 1-5.
- [11] 王国庆, 张建云, 刘九夫, 等. 气候变化和人类活动对河川径流影响的定量分析[J]. 中国水利, 2008(2): 55-58.
- [12] 林凯荣, 何艳虎, 陈晓宏. 气候变化及人类活动对东江流域径流影响的贡献分解研究[J]. 水利学报, 2012, 43(11): 1312-1321.
- [13] 刘春葵, 夏军. 气候变暖条件下水文循环变化监测与归因研究的几点认识[J]. 气候变化研究进展, 2010, 6(5): 313-318.
- [14] 李峰平, 张光新, 董李勤. 气候变化对水循环与水资源的影响研究综述[J]. 地理科学, 2013, 33(4): 458-464.
- [15] 陈亚宁, 李稚, 范煜婷, 等. 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展[J]. 地理学报, 2014, 69(9): 1295-1304.
- [16] 王国庆, 张建云, 贺瑞敏. 环境变化对黄河中游汾河径流情势的影响研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(6): 853-858.
- [17] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [18] 黄嘉佑, 李黄. 气象中的谱分析[M]. 北京: 气象出版社, 1984.
- [19] 周秀杰, 王凤玲, 潘华盛, 等. 近 60 年来黑龙江省与东北及全国气温变化特点分析[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(2): 124-129.
- [20] 潘华盛, 王勇, 邹滨, 等. 黑龙江省 2012 年后由暖干转暖湿型气候变化及预测分析[J]. 黑龙江大学学报, 2013, 4(3): 45-50.
- [21] 潘华盛, 刘育生. 三江平原天气气候与农业[M]. 北京: 气象出版社, 1991.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 霍云霏, 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.
- [15] 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.
- [16] 李慧. 梯田 DEM 构建方法研究[D]. 西安: 西北大学, 2014.
- [17] 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.
- [18] 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, 9(4): 68-70, 82.
- [19] 张宝国, 吴倩, 陈桂英, 等. 关于低山丘陵区水平梯田断面优化设计的探讨[J]. 水土保持应用技术, 2007(2): 31-33.
- [20] 赵华. 梯田规划设计中田块规格标准分析[J]. 水土保持科技情报, 2001(5): 20-22.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.

(上接第 37 页)