

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.04.018.

乔冰洁, 杨勤科, 王春梅, 等. 梯田对侵蚀地形指标的影响——以黄土丘陵第2副区为例[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 184-193.

QIAO Bingjie, YANG Qinke, WANG Chunmei, et al. Influence of Terrace on Erosional Topographic Index[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4): 184-193.

梯田对侵蚀地形指标的影响

——以黄土丘陵第2副区为例

乔冰洁¹, 杨勤科^{1,2}, 王春梅^{1,3}, 庞国伟^{1,2}, 黎恩丹¹

(1.西北大学 城市与环境学院, 西安 710127; 2.旱区生态水文与灾害防治国家林业和草原局重点实验室, 西安 710127; 3.西北大学 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 西安 710127)

摘要: [目的]探究人工地形(梯田)对地形指标的影响,分析修建梯田对土壤侵蚀过程的影响,为土壤侵蚀评价中梯田措施因子的确定提供科学依据。[方法]通过无人机航空摄影测量,获取纸坊沟流域高精度DEM数据,通过模拟原始坡面数据和构建水平梯田数据,并对这些数据提取坡度、坡长、坡度坡长因子、单位汇水面积和地形湿度指数,分析了这些因子的变化情况,认识梯田对侵蚀地形的影响。[结果](1) 梯田的修建使得坡度减缓、坡长截断、LS因子变小,随着梯田面积占比的增加,坡度、坡长、LS因子均呈减小趋势;梯田区,坡度、坡长、LS因子大致沿等高线呈条带状分布,非梯田区,坡度、坡长、LS因子从分水线向下逐渐增加,到沟底又逐渐变缓。(2) 梯田的修建使得单位汇水面积减小、地形湿度指数变大;单位汇水面积的空间格局与坡长比较类似,较高部位单位汇水面积较小、低洼部位较大;梯田区地形湿度指数与坡度有相反的空间分布格局,非梯田区地形湿度指数与单位汇水面积类似。(3) 微观尺度上,坡长、LS因子、单位汇水面积以及地形湿度指数均沿田面坡降方向呈增加趋势,在修建梯田或维护梯田时,应尽量保持田面水平或有微小反坡。(4) 根据梯田对LS因子的影响,研究区梯田的工程措施因子值可取0.26~0.37。[结论]修建梯田对黄土高原丘陵地区水土保持有较大贡献,可为黄土高原丘陵区修建梯田和土壤侵蚀评价提供参考。

关键词: 梯田; 高分辨率DEM; 地形因子; 单位汇水面积; 地形湿度指数

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)04-0184-10

Influence of Terrace on Erosional Topographic Index

—Taking the Second Sub-region of Loess Hill as an Example

QIAO Bingjie¹, YANG Qinke^{1,2}, WANG Chunmei^{1,3}, PANG Guowei^{1,2}, LI Endan¹

(1.College of Urban and Environment, Northwest University, Xi'an 710127, China; 2.Key Laboratory of Eco-hydrology and Disaster Prevention in Arid Areas, State Forestry and Grassland Administration, Xi'an 710127, China; 3.Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Northwest University, Xi'an 710127, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to explore the impact of artificial terrain (terraces) on topographic indicators, analyze the impact of building terraces on soil erosion process, and provide scientific basis for the determination of terraces measures in soil erosion assessment. [Methods] The high-resolution DEM data of Zhifanggou watershed were obtained through UAV aerial photogrammetry. Through simulating the original slope surface and constructing horizontal terraces, slope, slope length, slope length and steepness factor (LS), specific catchment area (SCA) and topographic wetness index (TWI) from these data were extracted, and the changes of these factors were analyzed to understand the impact of terraces on erosional terrain. [Results] (1) The construction of terraces reduced the slope, cut off the slope length and decreased the LS factor. With the increase of terrace area ratio, slope, slope length and LS factor all showed a decrea-

收稿日期: 2022-05-10

修回日期: 2022-06-16

资助项目: 国家重点研发计划“土壤修复决策支持系统研发”(2022YFE011530006)

第一作者: 乔冰洁(1998—), 女, 河南焦作人, 硕士研究生, 研究方向为区域土壤侵蚀调查与定量评价。E-mail: qiaobingjie@stumail.nwu.edu.cn

通信作者: 杨勤科(1962—), 男, 陕西陇县人, 博士, 教授, 主要从事区域土壤侵蚀评价与侵蚀地形分析。E-mail: qkyang@nwu.edu.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

sing trend. In the terraced area, the slope, slope length and LS factors were roughly distributed along the contour line in a strip; in the non-terraced area, the slope, slope length and LS factors gradually increased from the water dividing line downward, and then gradually slowed down to the valley bottom. (2) The construction of terraces reduced the SCA and increased the TWI. The spatial pattern of SCA was similar to that of slope length, the value was smaller in the higher part, and was larger in the lower part. The spatial distribution pattern of TWI in terraces was opposite to that of slope, and the spatial distribution pattern of TWI in non-terraces was similar to that of SCA. (3) At the micro scale, the slope length, LS factor, SCA and TWI all tended to increase in the direction of slope decline of the field surface. When constructing or maintaining the terraces, the field surface should be kept as horizon as possible or a slight reverse slope. (4) According to the influence of terraces on the LS factor, the engineering measure factor value of terraces in the study area should be taken as $0.26 \sim 0.37$. [Conclusion] The construction of terraces has a great contribution to soil and water conservation in the hilly areas of the Loess Plateau, and can provide a reference for the construction of terraces and soil erosion assessment in the hilly areas of the Loess Plateau.

Keywords: terrace; high-resolution DEM; terrain factor; specific catchment area; topographic wetness index

人类活动对自然环境要素和过程具有长期的、多方面的影响和作用,其中最为明显的形式之一是对地形的改变^[1]。修建梯田、淤地坝和治沟造地,是人为活动改造地形、造成人工地形的最主要形式^[2]。梯田改变了原始坡地的坡度、截断了坡面径流,进而减轻了坡地的土壤流失^[3],是黄河泥沙减少的重要因素之一^[4]。梯田被认为是最为重要的水土保持措施之一,也是最古老的水土保持措施之一^[5],并且在全球范围内有广泛的分布^[6]。作为一种人工地形,可以借助数字地形分析方法,分析认识梯田对地形和地表过程的影响^[7]。据调查,梯田的宽度从几米到几十米不等,现有的较高分辨率数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)大多数是基于地形图建立的,其上表达的是光滑、连续的地形表面,通常不能完整地表达梯田等人工地形信息^[8]。为此,土壤侵蚀和数字地形分析研究领域对梯田的表达及其影响展开了一系列研究,以期改进对地表的表达效果。

前人的研究集中在如何表达梯田地形,罗仪宁^[9]通过野外测量得到梯田坎等信息并将其纳入插值运算中,实现了对梯田地形的数字表达;祝士杰等^[10]提出了参数构建法和简易构建法两种构建梯田 DEM 的方法;李慧^[11]实现了快速构建、基于真实田坎信息以及 GPS RTK 技术 3 种构建梯田 DEM 的方法。在中低分辨率土壤侵蚀评价中,大多是将梯田作为水土保持措施因子^[12],较少考虑梯田对地形的影响^[13]。刘芬^[14]基于田坎特征线和 RTK 实测数据构建梯田 DEM,提取土壤侵蚀地形因子及对比原始 DEM 与梯田 DEM 下各因子的变化;王翊人^[15]、冯园^[16]等基于真实田坎的梯田 DEM 构建方法,将原始 DEM 与梯田 DEM 分别提取的坡度、坡长、坡度坡长因子进行对比分析;此

外,王翊人等^[17]还从梯田作为地形因子的角度出发,计算土壤侵蚀量并分析其结果与将梯田作为工程措施的土壤侵蚀量的差异;张宏鸣等^[18]基于无人机数据建立 DEM,分析梯田区侵蚀地形因子随分辨率的变化。Pijl 等^[7]通过对比遥感方法和基于实地调查的方法,以解释梯田损毁发生的位置。已有对梯田地形分析的研究,较多采用了提取田坎线构建模拟梯田 DEM 的方法,对田坎位置表达比较准确,但对田面的表达不够真实,是一种比较理想化的梯田地形模型。基于这种模拟的梯田 DEM 提取的地形属性指标较难完整地反映梯田对侵蚀地形属性指标的影响及其在微观上的变化,同时现有研究对地形指标的考虑不够全面,梯田对土壤侵蚀和土壤水分的潜在影响多大、局地尺度上如何分异,依然有待研究。

本文基于低空无人机测量生产的高分辨率 DEM,从人为地形角度,全面分析梯田对坡度、坡长、坡度坡长因子、单位汇水面积和地形湿度指数等土壤侵蚀和水文地貌属性指标的影响,以期降低坡面径流和土壤侵蚀模拟计算中因梯田信息不足而产生的不确定性,促进人为地貌的研究。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区选择在陕西省安塞县纸坊沟流域的一个支沟($36^{\circ}42'42''$ — $36^{\circ}46'28''$ N, $109^{\circ}13'46''$ — $109^{\circ}16'03''$ E, 图 1),位于黄土丘陵第 2 副区。退耕还林前,土壤侵蚀十分严重。研究区流域面积 2.6 km^2 ,梯田总面积 0.44 km^2 ,占研究区面积的 16.9% ,梯田主要分布在流域下游右岸的塌地和梁峁缓坡。为了研究梯田对地形的影响,根据研究区地形特征,将河网网

值设置为 5 000 m² 进行水系提取和流域提取,结合数字正射影像图(digital orthophoto map, DOM),选择基本无梯田的(梯田占 5%,以下简称样区 1)、沟间地梯田占一半的(梯田占 35%,以下简称样区 2)和沟间地几乎全为梯田(梯田占 76%,以下简称样区 3)的典型小流域各 1 个(图 1—2)。

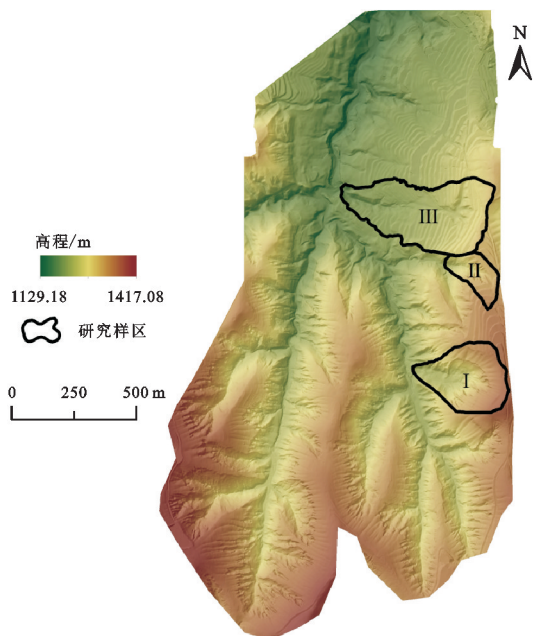


图 1 研究区位置

1.2 基础数据

本研究所用数据包括真实数据和模拟数据两部分(表 1)。

1.2.1 真实数据 本研究的基础数据为无人机获取的梯田区 DEM 影像、DOM 影像(图 2A—F),分辨率为 1 m。无人机航摄和处理由专业机构制作,满足 1:500 地形图航空摄影测量内业规范^[19]要求。数据采用高斯-克吕格投影,按 3°分带。中央子午线为东经 108°,坐标纵轴向西平移 500 km,不加带号;平面坐标系统采用 2000 国家大地坐标系;高程基准采用 1985 国家高程基准,坐标单位为 m。其中,样区 2 上的梯田田面约有 3°的正向坡,样区 3 上的梯田田面约有 6°的反向坡。

1.2.2 模拟数据 为了模拟修建梯田前后各地形指标的变化,需要对真实数据做出相应处理。包括:(1)对含梯田信息的真实数据 DEM₂ 和 DEM₃(图 2E,F)滤掉梯田信息,模拟其原始自然坡面。在模拟原始自然坡面时,参考 Tarolli 等^[20]对试验样区的 DEM 进行移动窗口的低通滤波处理,从 15 m 的窗口大小依次递增,结合剖面图及山体阴影图,选择窗口为 21 m 的滤波结果作为样区 2 和样区 3 的模拟原始自然坡面 DEM_{2f} 和 DEM_{3f}(图 2G,H),该窗口下能滤掉大部分的梯田信息;(2)对 DEM₁(图 2D),DEM_{3f}(图 2H)数据在沟沿

线以上区域构建含水平梯田信息的模拟理想梯田 DEM_{1t},DEM_{3t}(图 2I,J)。

依据《水土保持工程设计规范》^[21],利用祝士杰等^[10]提出的梯田简易构建法,实现 DEM_{1t} 和 DEM_{3t} 的构建,具体方式为:(1)以 E 为起始高程, H (即田坎高度)为等高距提取等高线,获得梯田区的田面外沿约束线。(2)以 $(E+h)$ 为起始高程(h 为高程偏移值,且 $h < H$), H 为等高距提取等高线,获得梯田区的田面内沿约束线。(3)对田面内沿约束线进行等高线高程值修正,将所有等高线高程值降低修正值 h ,当高程修正值 $\Delta h = h$ 时,构建的梯田类型为水平梯田。(4)以高程为内插属性,对两种约束线构建 TIN,并转化为规则格网 DEM,生成梯田田块 DEM。通过调整参数值,使得田面坡度为 0°。

1.3 地形指标及其计算

1.3.1 地形指标 地形对地表过程有多种影响,考虑到地形对坡地水文、土壤侵蚀的影响,本研究主要采用坡度(θ)、坡长(λ)、LS 因子(slope length and steepness factor, LS)、单位汇水面积(specific catchment area, SCA)以及地形湿度指数(topographic wetness index, TWI)等指标。各指标简介如下:

(1)坡度。坡度是坡地相对于水平地面的倾斜程度,数字地形分析中,坡度通过对高程表面的求导来计算。本研究对坡度的计算采样精度较高、稳定性较好的 Evans 算法^[22]。坡度计算公式为:

$$(p, q) = \left(\frac{\partial z}{\partial x}, \frac{\partial z}{\partial y} \right) \quad (1)$$

$$\theta = \frac{180}{\pi} \times \arctan \sqrt{p^2 + q^2} \quad (2)$$

式中: θ 为坡度(°); z 为高程(m); x 和 y 为东西方向和南北方向的距离(m); p 和 q 为高程在坐标轴 x 和 y 方向的变化率(无量纲); π 为圆周率; $\frac{180}{\pi}$ 为弧度转换为度的转换系数。

(2)坡长。坡长是指地表径流源点到坡度减小直至有沉积出现地方之间,或到可以辨识的沟道之间的水平距离^[23],单位为 m。坡长计算公式可表示为:

$$\lambda_{x_i, y_j} = \int_{x_0, y_0}^{x_i, y_j} \lambda_c dx \quad (3)$$

式中: λ_{x_i, y_j} 为点 (x_i, y_j) 处的坡长;积分下限 (x_0, y_0) 和上限 (x_i, y_j) 分别为径流源点和终点; λ_c 为单元坡长。

(3)LS 因子。LS 因子是地表裸露条件下,地形对土壤侵蚀影响的无量纲指标^[23]。本文用 CSLE 模型的算法^[12]计算 LS 因子。

(4)单位汇水面积。单位汇水面积是单位长度等高线上游的汇水面积^[23],单位为 m²/m。

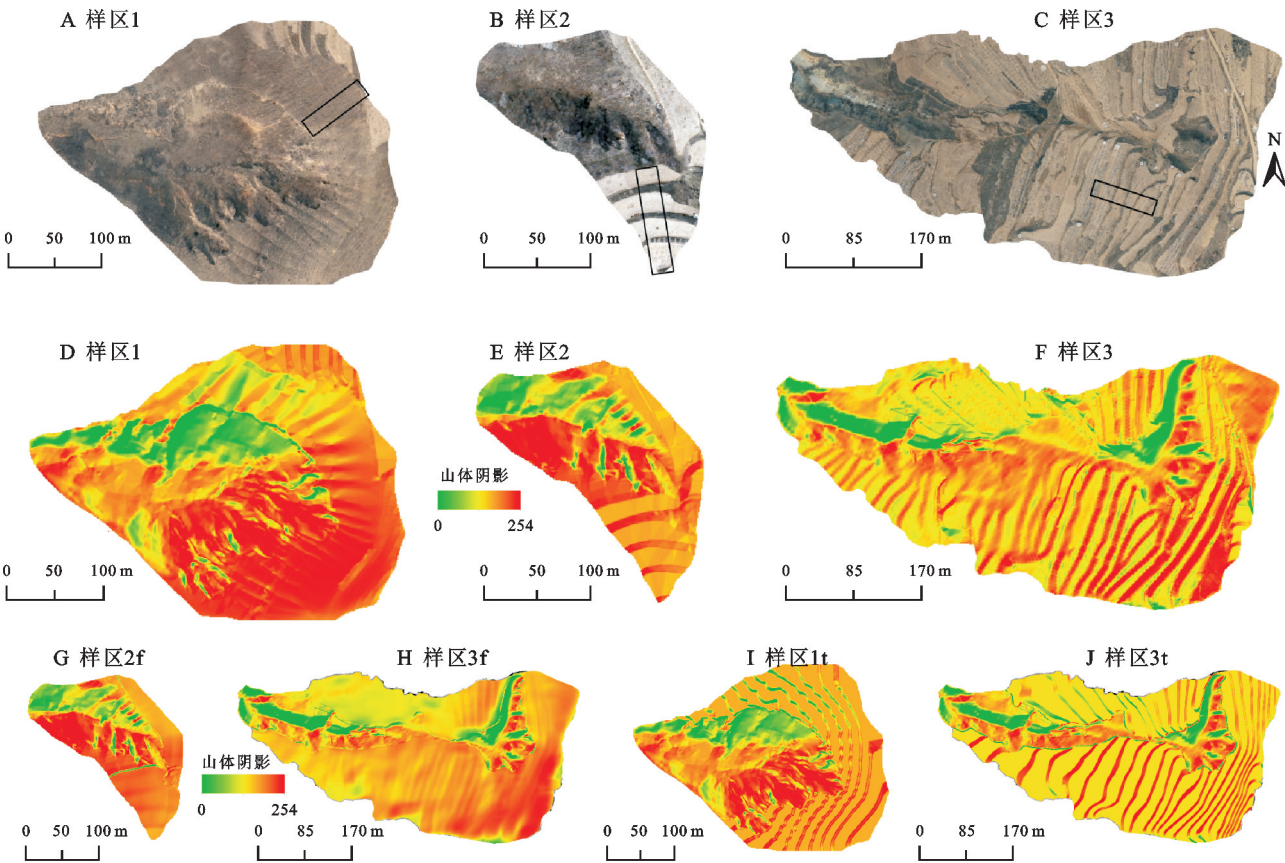


图 2 试验研究样区 DOM 和山体阴影

表 1 DEM 数据

数据类别	数据	简要说明
真实数据	DEM ₁	样区 1 的航测 DEM 原始数据
	DEM ₂	样区 2 的航测 DEM 原始数据
	DEM ₃	样区 3 的航测 DEM 原始数据
模拟数据	DEM _f	基于 DEM ₂ , 经滤波恢复的自然坡面数据
	DEM _{3f}	基于 DEM ₃ , 经滤波恢复的自然坡面数据
	DEM _{1t}	基于 DEM ₁ 构建的模拟梯田 DEM 数据
	DEM _{3t}	基于 DEM _{3f} 构建的模拟梯田 DEM 数据

(5) 地形湿度指数。地形湿度指数是由 Beven 等^[24]提出的用于反映土壤水分空间分布特征的无量纲参数。TWI 的计算公式为:

$$TWI = \ln\left(\frac{SCA}{\tan\beta}\right)$$

(4)

式中:TWI 为地形湿度指数;SCA 为地表 *i* 点的单位等高线长度上的汇流面积; β 为该点处的坡度。

1.3.2 指标计算 本研究利用 Python 编程计算坡度,用前期开发的地形因子提取工具软件(*LS_Tool*)^[25]提取坡长和 *LS* 因子,利用 SAGA GIS 软件^[26]提取单位汇水面积、地形湿度指数。对于坡长、*LS* 因子、单位汇水面积以及地形湿度指数而言,流向是决定其分布的主要因素,对因子的计算至关重要。梯田地形坡度较为平缓,水流特征主要以漫流为主,适合采用多流向算法来模拟其流向特征,因此对坡长、*LS* 因子、单位

汇水面积以及地形湿度指数的计算均选取多流向算法 D-Infinity 算法^[27]。

1.4 分析方法

从微小流域(无梯田、一半梯田和几乎全部梯田)、景观(梯田区,差不多是正地形)和田块(带状断面)尺度上,从统计特征和空间格局两个方面,分析梯田建设对侵蚀和水文地形指标的影响。

从基本无梯田到基本全部为梯田,地形指标变化量(ΔT_{a-w})、某单元修建梯田前后地形指标变化量(ΔT_{a-s})分别用下式计算:

$$\Delta T_{a-w} = \frac{T_{a-ow} - T_{a-tw}}{T_{a-ow}} \times 100\%$$

(5)

$$\Delta T_{a-s} = \frac{T_{a-os} - T_{a-ts}}{T_{a-os}} \times 100\%$$

(6)

式中: T_a 为前述计算的指标,如坡度、坡长、*LS*、SCA、TWI 中的任意一个; T_{a-w} 和 T_{a-s} 为微小流域尺度和景观尺度; T_{a-ow} 和 T_{a-tw} 分别为微小流域尺度下原始坡面和梯田坡面的地形指标; T_{a-os} 和 T_{a-ts} 分别为景观尺度下原始坡面和梯田坡面的地形指标。

在 3 个样区的梯田区,以 20 m 的宽度,垂直于等高线的方向确定一条带状区域范围,以 2 m 的步长生成若干个采样区域,按采样区域统计各指标均值,生成高程与各指标对应的带状剖面图,分析坡长等指

标与高程的局地关系,其带状剖面位置见图2A中黑色方框区域所示。

2 结果与分析

2.1 梯田对侵蚀地形因子影响

2.1.1 梯田对坡度的影响 研究区典型小流域坡度计算结果(图3)表明,样区1从分水线向下逐渐变陡,然后到沟底又逐渐变缓,其统计分布基本呈单峰近正态分布

(图4A)。样区2,3,坡度呈田面-田坎组合形式大致沿等高线呈条带状分布,田面坡度较小、田坎坡度较大。样区坡度的统计分布呈双峰分布,在 5° 和 43° 有两个峰,分别表示缓坡和梯田田面组合、陡坡和田坎组合这两种地形(图4B—C)。在流域尺度上,3类流域的坡度均值分别为 32.4° , 28.9° , 17.5° 。由无梯田到基本全部为梯田,随着梯田面积占比的增加,总体呈减小趋势。据公式(5)计算结果,平均坡度减小46.0%。

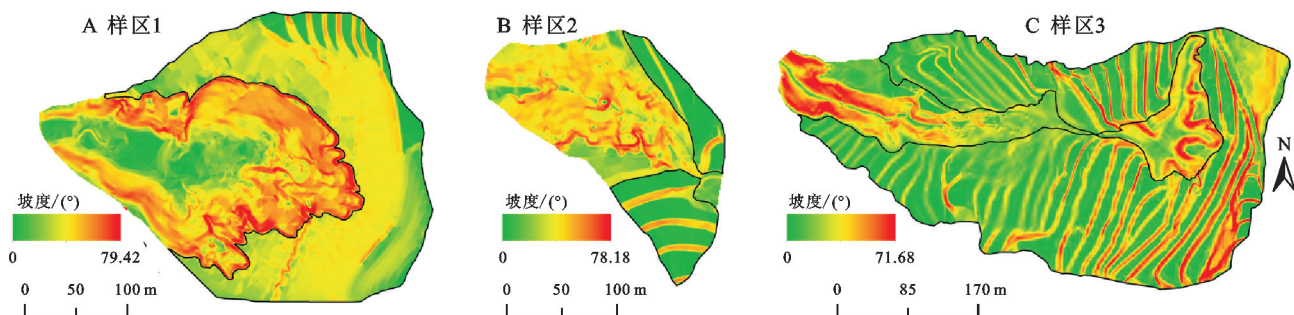


图3 坡度空间格局(黑色区域为梯田区边界)

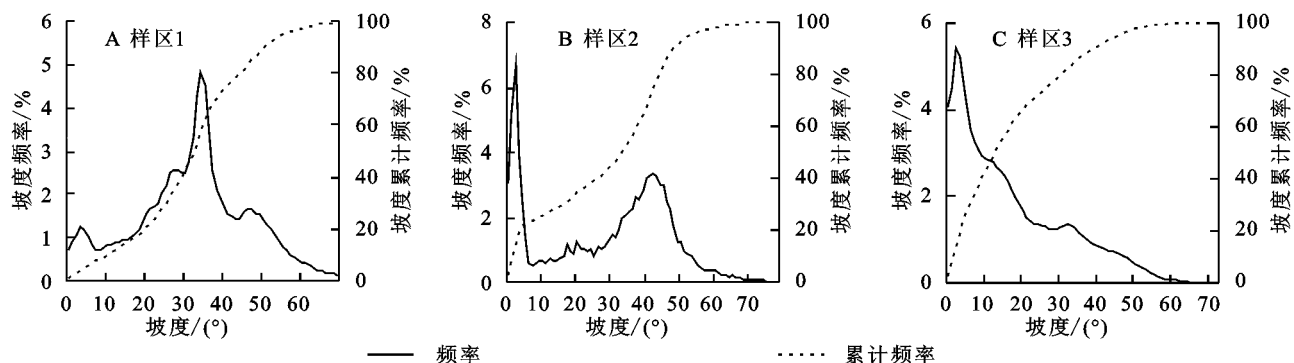


图4 坡度统计分布

3个样区的梯田区的统计表明,修建梯田后坡度通常会降低,3个样区的坡度分别由自然坡面下的 27.6° , 14.7° , 14.3° 变为修建梯田后的 15.8° , 12.5° , 14.6° 。据公式(6)计算,坡度平均减小18.7%。从田面—田坎看,3个样区的田面坡度分别为 0.6° , 3.5° , 6.3° ,田坎坡度分别为 51.7° , 36.6° , 28.0° 。梯田的修建,较大地减缓局部地形,但是田坎坡度明显增加,如果不经常维护则有垮塌的危险^[7]。至于样区3在梯田修建前后坡度有些许增加,原因有两个方面,首先是该样区坡度整体比较小,其次是该样区的田面坡度

偏大并且有横向坡。基于模拟数据(DEM3t)计算坡度并统计的结果表明,修建梯田后的坡度为 11.9° ,小于自然坡面的坡度(14.3°)。

2.1.2 梯田对坡长的影响 研究区典型小流域坡长计算结果(图5)表明,样区1坡长从分水岭向下其值逐渐增加。样区2和样区3坡长大致沿等高线呈条带状分布。在流域尺度上,3个样区的坡长均呈正偏态单峰分布(图6),但低值比例逐渐增加。均值分别为35.4,21.9,16.3 m,据公式(5)计算结果,由无梯田到基本全部为梯田,平均坡长减小54.0%。

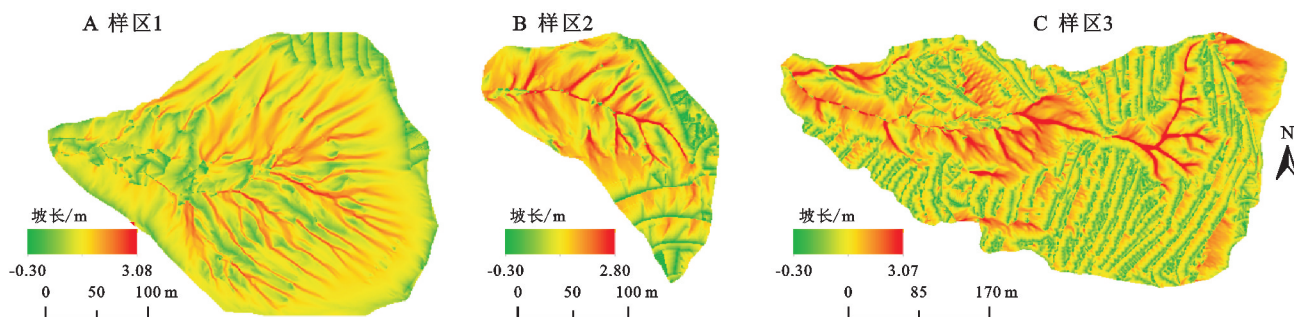


图5 坡长空间格局(经过对数变换)

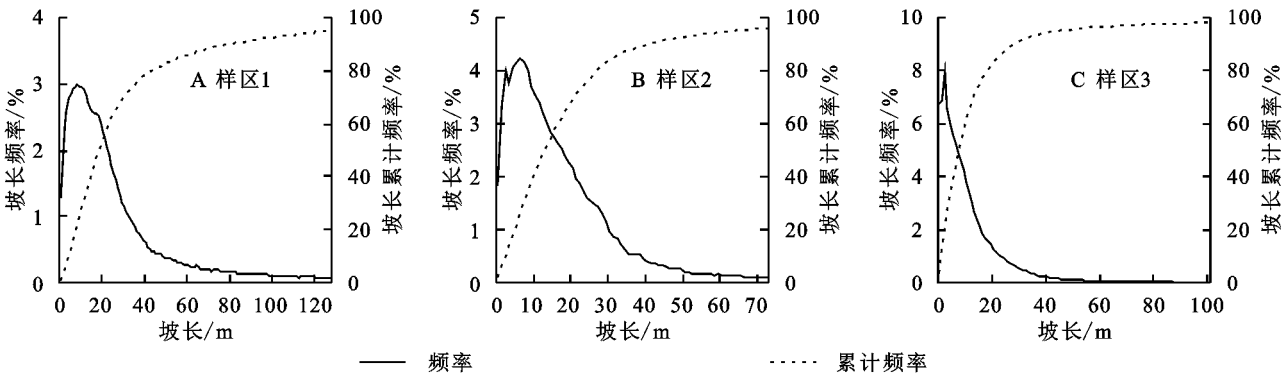


图 6 坡长统计分布

梯田区统计表明,修建梯田后坡长明显减小,3 个样区的坡长分别由自然坡面下的 30.46,23.03,43.61 m,变为修建梯田后的 1.34,8.65,9.04 m。据公式(6)计算,平均减小 79.09%。基于模拟数据(DEM_{3t})计算坡长为 1.61 m,远小于自然坡面(43.61 m)和坡式梯田的坡长(9.04 m)。由此可见,在修建梯田或梯田维

护时,使田面呈水平或微小的反坡效果较好。从田面和田坎组合看,坡长的微观变化是:田面上,水平梯田保持一个比较低的定值(图 7A),坡式梯田从田面内沿向田面外沿增加(图 7B),反坡梯田从田面外沿向田面内沿增加(图 7C);田坎上坡长自田坎上沿向田坎下沿增加。

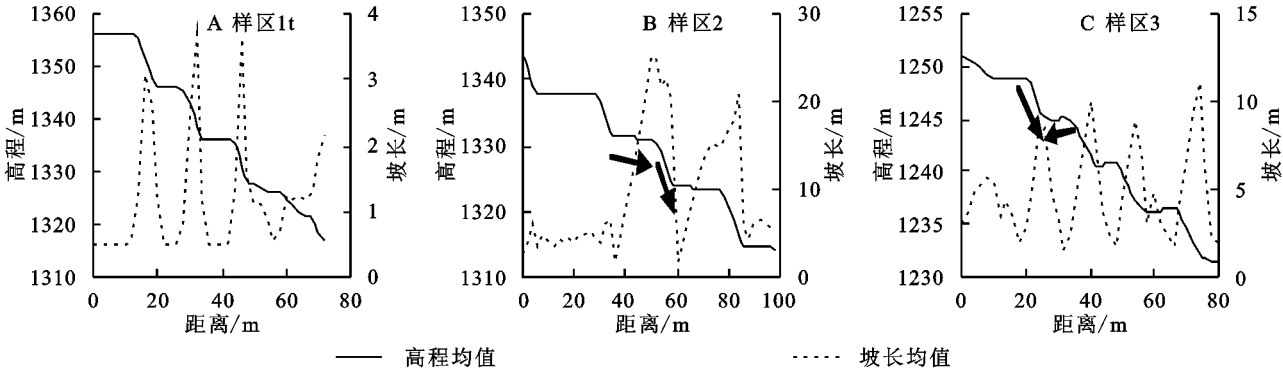


图 7 坡长—高程关系

2.1.3 梯田对 LS 因子的影响 如图 8 所示,样区 1 的 LS 因子图与坡度和坡长一样显得自然光滑;在梁岭顶部、沟谷地等地形平缓处, LS 值较小,在沟壑等坡度较陡处, LS 值较大。而样区 2 和样区 3 的 LS 因子也

大致沿等高线呈条带状分布。在流域尺度上,3 个样区的 LS 因子统计分布(图 9)与坡度类似(图 4),均值分别为 9.96,7.47,3.67,据公式(5)计算结果,由无梯田到基本全部为梯田, LS 因子均值减小 63.2%。

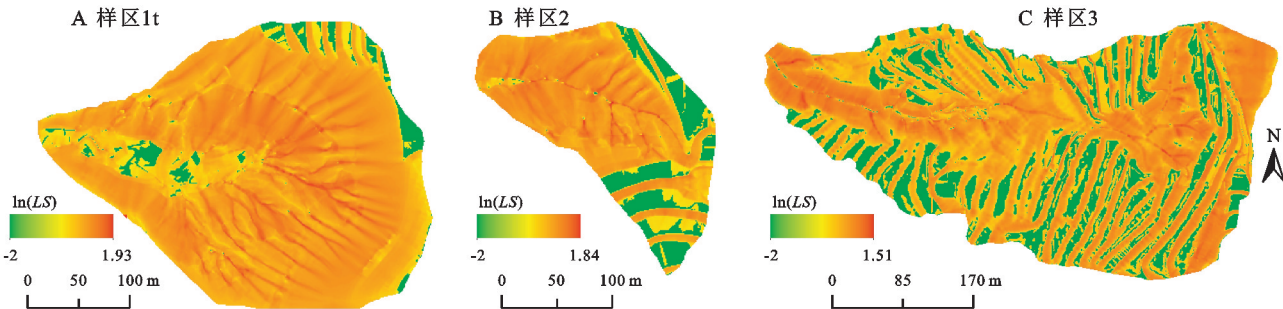


图 8 LS 空间格局(经过 \ln 变换)

梯田区统计表明,修建梯田后 LS 因子明显减小,3 个样区的 LS 因子分别由自然坡面下的 8.55,4.42,5.00,变为修建梯田后的 1.40,2.24,2.60,据公式(6)计算,平均减小 59.6%。基于模拟数据(DEM_{3t})计算 LS 因子值为 1.24,小于自然坡面(5.00)和坡式梯田的 LS 因子值(2.60)。可见,梯田的修建,使 LS 因子减小,较大的

降低了地形对土壤的潜力。着眼田面和田坎序列, LS 因子的微观变化是:水平田面上, LS 因子保持一个比较低的定值(图 10A);田面有正向坡时, LS 因子从田面内沿向田面外沿增加(图 10B);田面有反向坡时, LS 因子从田面外沿向田面内沿增加(图 10C);田坎上,坡长自田坎上沿向田坎下沿增加。

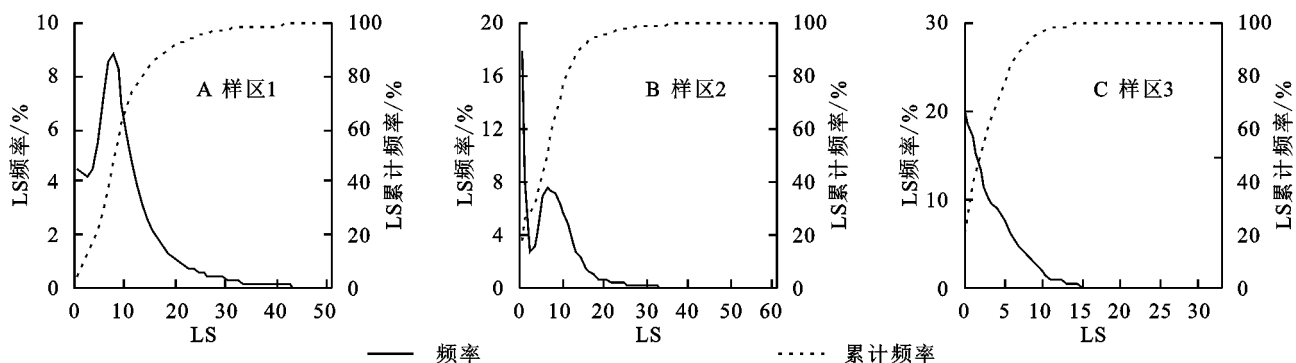


图9 LS 统计分布

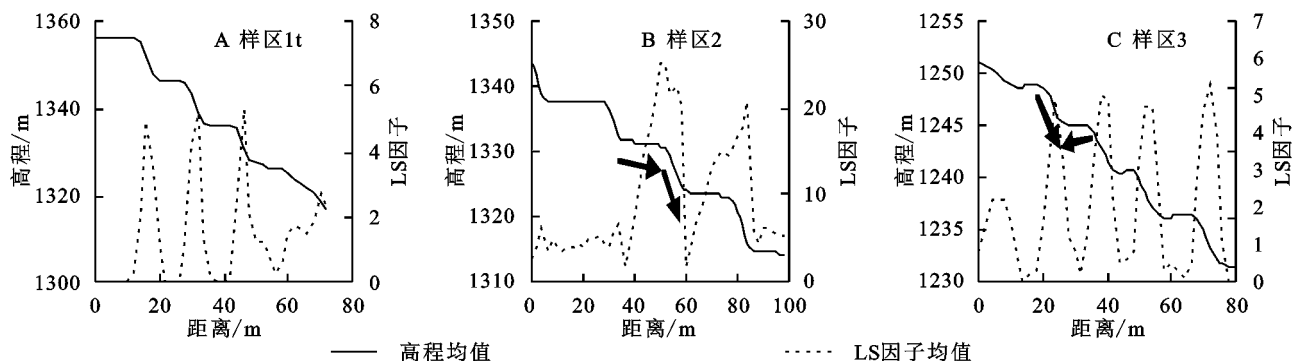


图10 LS—高程关系

2.2 梯田对水文地形因子影响

2.2.1 梯田对单位汇水面积的影响 研究区典型小流域单位汇水面积(SCA)计算结果(图11)表明,单位汇水面积的空间格局与坡长(图5)比较类似。较高部位单

位汇水面积较小、低洼部位较大。3个样区流域的单位汇水面积统计分布(图12)均呈正偏态单峰分布。由无基本梯田到基本全部梯田,单位汇水面积对数值的均值分别为2.83,2.46,2.36 m^2/m ,呈减小趋势。

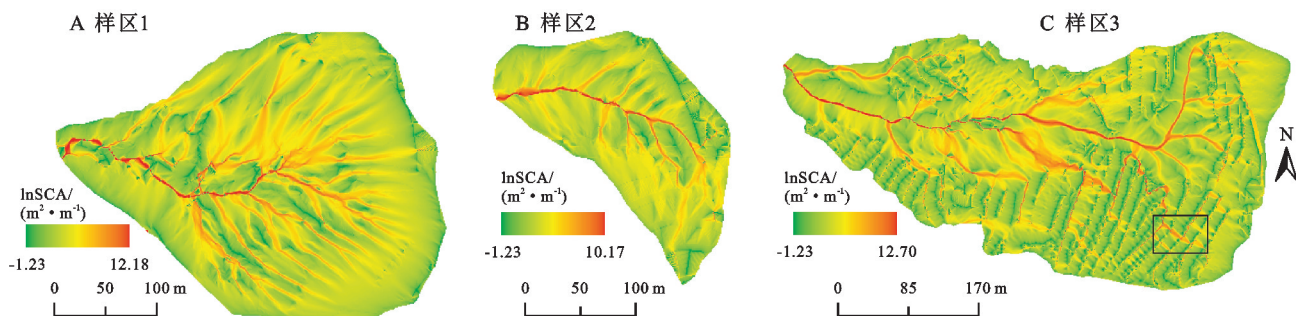


图11 单位汇水面积空间格局(经过ln变换)

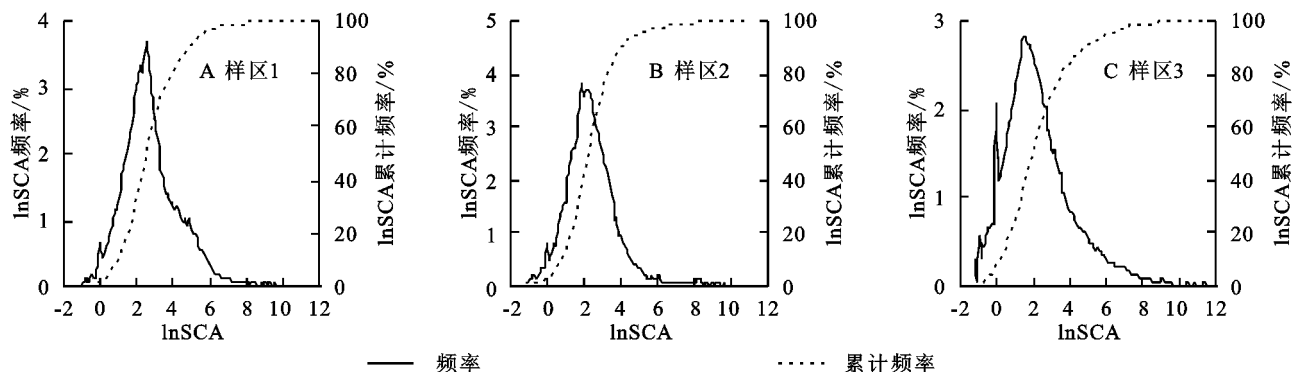


图12 单位汇水面积统计分布图(经过ln变换)

从微观结构看,与坡长不同的是,由于局地凹地的影响,潜在的地表径流路径(单位汇水面积的高值)会切穿田面(图13)。就梯田区看,修建梯田后单位

汇水面积有所增加,3个样区的单位汇水面积均值分别由自然坡面下的36.17,22.91,83.25 m^2/m 变为修建梯田后的39.06,23.30,107.18 m^2/m 。据公式(6)

计算,平均增加 13.1%。这表明修建梯田后,有较好蓄水保墒效益。

着眼田面和田坎序列(图 14),单位汇水面积大致沿坡降方向增加,在局地低洼处汇流增加,单位汇水面积出现较大值,有可能发生切沟并导致梯田损毁^[28]。

2.2.2 梯田对地形湿度指数的影响 研究区典型小流域地形湿度指数(TWI)计算结果(图 15)表明,样区 1 地形湿度指数从分水岭向下其值逐渐增加(图 15A)。而样区 2 和样区 3 地形湿度指数呈不明显的条带状分布,田面处地形湿度指数值较大,田坎处地形湿度指数值较小(图 15B—C)。对于梯田区,其空间分布格局与坡度有相反的空间分布特征,田面坡度较小,地形湿度指数较大,田坎坡度较大,地形湿度指数较小;非梯田区,其空间分布格局与单位汇水面积类似,沟谷地等低洼地形处,单位汇水面积较大,地形

湿度指数也较大。统计分布也呈正偏态单峰(图 16),均值分别为 4.00,4.15,4.51,呈递增趋势。在流域尺度上,据公式(5)计算结果,从无梯田到基本上全为梯田,地形湿度指数增大 12.8%。

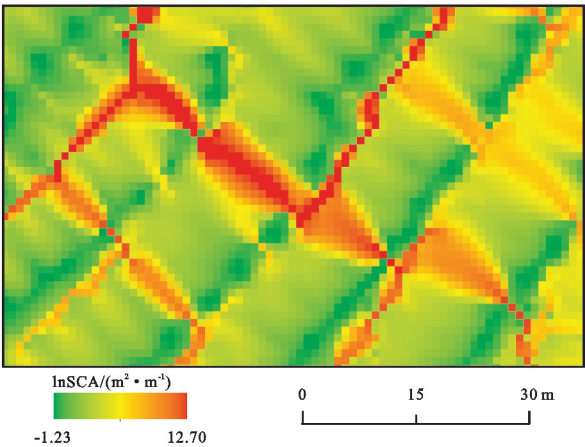


图 13 样区 3 局地凹地单位汇水面积

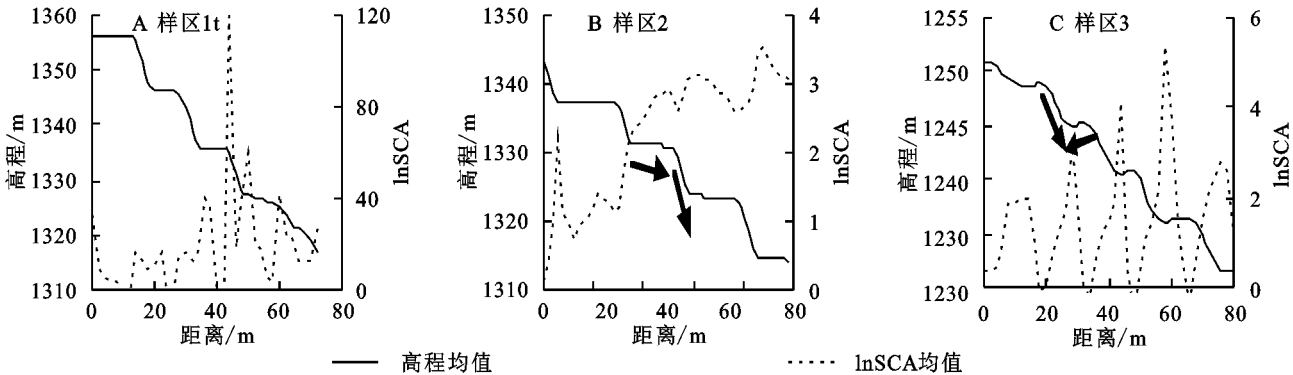


图 14 单位汇水面积—高程关系

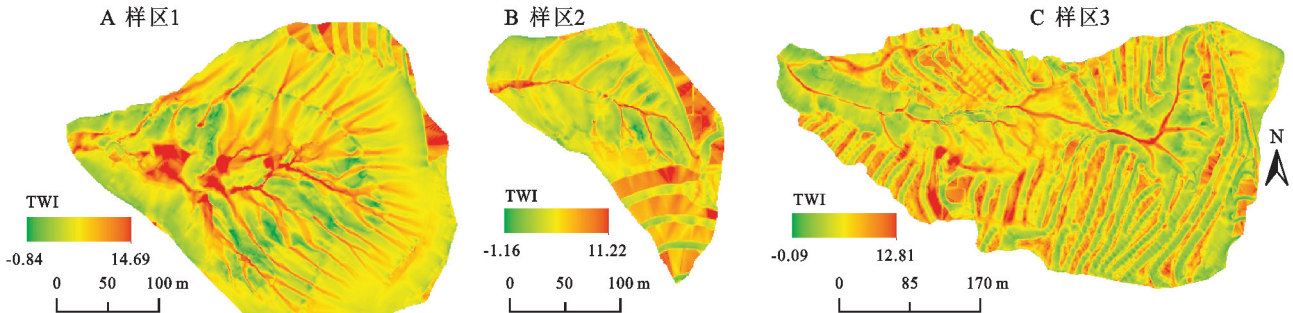


图 15 地形湿度指数空间格局

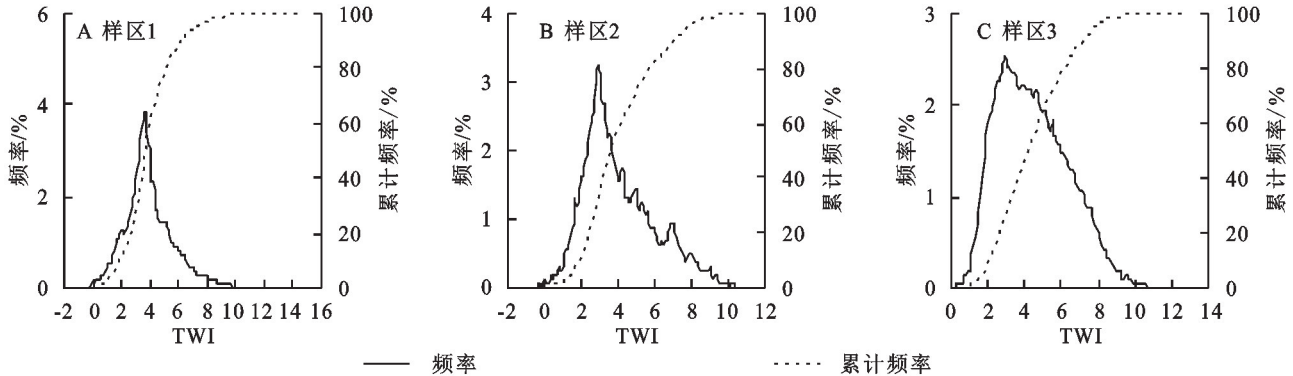


图 16 地形湿度指数统计分布

就梯田区看,3个样区的地形湿度指数分别由自然坡面下的4.05,4.27,5.10变为修建梯田后的6.65,5.53,4.72。从田面-田坎看,3个样区的田面地形湿度指数分别为8.78,6.45,5.73,田坎地形湿度指数分别为1.88,3.02,3.07,梯田的修建,较大程度上增加了局部土壤水分。理论上修建梯田后地形湿度指数

会增加,但样区3修建梯田前后地形湿度指数有所减小,这可能是由于梯田田面坡度较大,导致样区3修建梯田后地形湿度指数值偏小。

从田坎-田面组合特征看(图17),无论是坡式梯田、反坡梯田还是水平梯田,田面的地形湿度指数均大于田坎,基本上沿坡降方向增加。

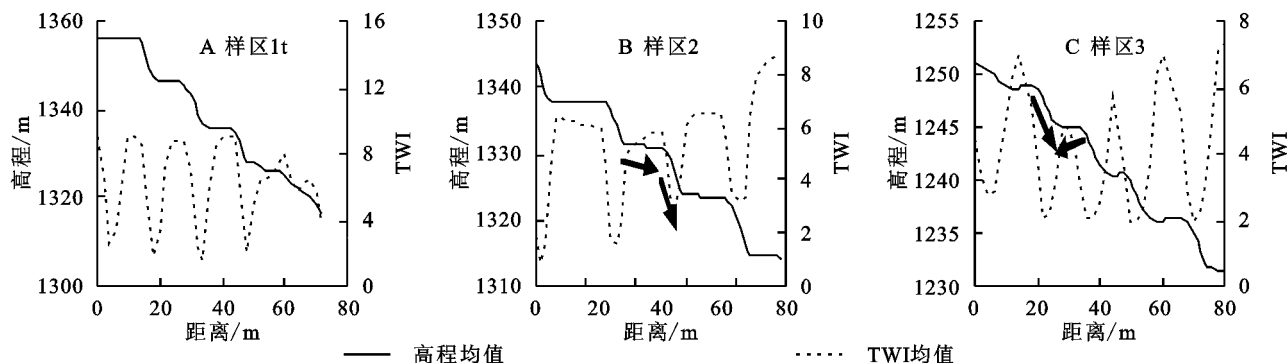


图17 地形湿度指数(TWI)-高程关系

2.3 梯田水土保持效益的讨论

作为一种最为传统的、效益最为明显的水土保持措施,梯田修建的目的是截断径流、减缓径流流速、拦蓄上坡来沙,从而减轻土壤侵蚀及其向河流的输沙^[4]。梯田的修建,使得连续并且相对光滑的自然表面变为阶梯状,由较长的自然坡变为若干个较短的坡段,使得平均坡度逐渐变缓、坡长变短、 LS 因子变小。本研究在微流域(或集水区)尺度上,从基本无梯田到基本均为梯田,在梯田质量一般情况下,坡度、坡长和 LS 因子减少的幅度分别为46.0%,54.0%,63.2%,假如修成水平梯田,则减少的幅度分别为50.6%,75.60%,74.4%(表2)。由此推算,梯田的工程措施因子(E)的值约为0.26~0.37(1减去 LS 因子的减幅就是 E 因子),这与现有基于小区观测的研究结论基本吻合,如Zhao等^[29]在全国范围内对梯田水保效益的分析(0.32~0.33),全国水土保持监测技术规程^[30]对坡式和隔坡梯田的 E 因子的规定(0.241 8),这可为土壤侵蚀评价中梯田措施因子的确定提供科学依据。

表2 有梯田流域与无梯田流域侵蚀地形指标值及其变化量

样区	坡度/(°)	坡长/m	LS
样区1	32.4	35.40	9.96
样区2	28.9	21.90	7.47
样区3	17.5	16.30	3.67
样区3t	16.0	8.64	2.55
变化量1/%	46.0	54.00	63.20
变化量2/%	50.6	75.60	74.40

注:变化量1为真实梯田下坡度、坡长和 LS 减少的量(即样区1到样区3的变化量);变化量2为基于理想数据(DEM3t)(即假设修建成水平梯田的情形)下坡度、坡长和 LS 减少的量(即样区1到样区3t的变化量)。

地形是影响土壤剥蚀、搬运和沉积的重要因素。

田面的横向和纵向坡度,都对水沙运移有较大的影响。就纵向坡度看,无纵向坡度的水平梯田对水沙物质阻滞效果较好。坡地使水沙物质向下坡方向汇集,如果坡度偏大有可能会使田面径流冲毁田坎。反坡梯田使水沙物质由外向内汇集,梯田内侧水分的集中,同样对田坎的稳定性构成威胁。就横向坡度来看,局部低洼处形成水分汇集,进而成为侵蚀沟产沙的源头,对田面安全也会构成威胁。因此,梯田修建时,避免坡式梯田,修成水平梯田或较小坡度的反坡梯田,以便发挥更好的水保效益。

3 结论与展望

(1) 梯田的修建使坡度减缓、坡长截断、 LS 因子变小。在流域尺度上,随着流域内梯田面积占比的增加,坡度减小46.0%、坡长减小54.0%、 LS 因子减小63.2%。梯田区,坡度、坡长、 LS 因子呈田面-田坎组合形式大致沿等高线呈条带状分布,非梯田区,坡度、坡长、 LS 因子从分水线向下逐渐增加,到沟底又逐渐变缓。微观尺度上,坡长和 LS 因子均沿田面坡降方向,整体呈增加趋势,田坎处的值大于田面上的值。如修建成水平梯田,坡度、坡长和 LS 因子减少分别为50.6%,75.6%,74.4%。根据 LS 减少,梯田的工程措施因子值为0.26~0.37。

(2) 梯田的修建使得单位汇水面积减小、地形湿度指数变大。单位汇水面积的空间格局与坡长比较类似,较高部位单位汇水面积较小、低洼部位较大;对于地形湿度指数,其梯田区与坡度有相反的空间分布特征,非梯田区与单位汇水面积类似。在流域尺度上,随着流域内梯田面积占比的增加,单位汇水面积对数值呈减小趋势,地形湿度指数增大12.8%。微观

尺度上,整体沿田面坡降方向呈增加趋势,田面上的横向坡导致田面局部低洼处单位汇水面积出现较大值,有发生切沟的潜在危险。在修建梯田或维护梯田时,应尽量保持田面水平或有微小反坡。

(3) 基于滤波的模拟数据和模拟梯田数据可能会与真实数据计算的结果有所不同,但我们认为不会改变梯田对地形指标影响的性质。后续研究中,将选取近期修建梯田和前期无梯田的同一小流域数据进行对比分析,并尝试在黄土丘陵区选择更多的小流域样本进行分析,以便得到更具普适意义的科学认识。

致谢:南京师范大学汤国安教授提供了本研究所用的 DOM 和 DEM 数据,特此致谢。

参考文献:

- [1] Tarolli P. High-resolution topography for understanding Earth surface processes: Opportunities and Challenges [J]. *Geomorphology*, 2014, 216: 295-312.
- [2] Pang G, Yang Q, Wang C, et al. Quantitative assessment of the influence of terrace and check dam construction on watershed topography [J]. *Frontiers of Earth Science*, 2020, 14(2): 360-375.
- [3] Chen D, Wei W, Chen L. Effects of terracing practices on water erosion control in China: A meta-analysis [J]. *Earth-Science Reviews*, 2017, 173: 109-121.
- [4] 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.
- [5] Dotterweich M. The history of human-induced soil erosion: Geomorphic legacies, early descriptions and research, and the development of soil conservation: A global synopsis [J]. *Geomorphology*, 2013, 201: 1-34.
- [6] Wei W, Chen D, Wang L, et al. Global synthesis of the classifications, distributions, benefits and issues of terracing [J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 159: 388-403.
- [7] Pijl A, Quarella E, Vogel T A, et al. Remote sensing vs. field-based monitoring of agricultural terrace degradation [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2021, 9(1): 1-10.
- [8] 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, 2(1): 25-31, 45.
- [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] 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.
- [11] 李慧.梯田 DEM 构建方法研究[D].西安:西北大学,2014.
- [12] Liu B Y, Zhang K L, Xie Y. An Empirical Soil Loss Equation [C] // *Proceedings 12th International Soil Conservation Organization Conference*, Vol. II: Process of Soil Erosion and Its Environment Effect. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [13] 杨昕,汤国安,刘学军,等.数字地形分析的理论、方法与应用[J].*地理学报*, 2009, 64(9): 1058-1070.
- [14] 刘芬.黄土高原梯田 DEM 地形特征研究[D].西安:西北大学,2015.
- [15] 王翊人,赵牡丹,冯园,等.梯田对土壤侵蚀地形因子扰动特征研究[J].*山东农业大学学报:自然科学版*, 2017, 48(1): 46-51.
- [16] 冯园,赵牡丹,张鹏,等.顾及梯田的 DEM 地形特征研究[J].*水土保持研究*, 2017, 27(4): 32-45.
- [17] 王翊人,赵牡丹,张倩,等.梯田作为地形因子和工程措施对土壤侵蚀定量评价影响的对比研究[J].*水土保持通报*, 2017, 37(2): 148-152, 157.
- [18] 张宏鸣,杨勤科,王猛,等.梯田区侵蚀地形因子随 DEM 分辨率变化的特征分析[J].*农业机械学报*, 2017, 48(10): 172-179.
- [19] 国家测绘局测绘标准化研究所. 1:500 1:1000 1:2000 地形图航空摄影测量内业规范 GB/T 7930—2008 [S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [20] Tarolli P, Calligaro S, Cazorzi F, et al. Recognition of surface flow processes influenced by roads and trails in mountain areas using high-resolution topography [J]. *European Journal of Remote Sensing*, 2013, 46(1): 176-197.
- [21] 水利部水利水电规划设计总院,黄河勘测规划设计有限公司.水土保持工程设计规范 GB 51018—2014 [S]. 北京:中国计划出版社,2014.
- [22] Evans I S. An integrated system of terrain analysis and slope mapping [J]. *Zeitschrift Fur Geomorphologie*, 1980, 36: 274-295.
- [23] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning (No.537) [M]. Washington D C: US Department of Agriculture, Science and Education Administration, 1978.
- [24] Beven K J, Kirkby M J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology [J]. *Hydrological Sciences Bulletin*, 1979, 24(1): 43-69.
- [26] Conrad O, Bechtel B, Bock M, et al. System for automated geoscientific analyses (SAGA) v.2.1.4 [J]. *Geoscientific Model Development*, 2015, 8(7): 1991-2007.
- [27] Tarboton D G. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models [J]. *Water Resources Research*, 1997, 33(2): 309-319.
- [28] 林祚顶,刘宝元,丛佩娟,等.山东临朐 2019 年“8·10”特大暴雨水土保持调查 [J].*水土保持学报*, 2021, 35(1): 149-153.
- [29] Zhao J, Yang Z, Govers G. Soil and water conservation measures reduce soil and water losses in China but not down to background levels: Evidence from erosion plot data [J]. *Geoderma*, 2019, 337: 729-741.
- [30] 中华人民共和国水利部.水土保持监测技术规程 SL 277—2002 [S]. 北京:中国水利水电出版社,2002.