

# 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

王翊人, 赵牡丹, 张倩, 张鹏

(西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安 710127)

**摘要:** [目的] 根据中国土壤流失方程(CSLE), 在降雨、土壤、植被等因子一定的条件下, 将梯田作为地形因子计算流域土壤侵蚀量, 并与梯田作为工程措施的计算结果进行对比分析, 为土壤侵蚀定量评价提供新的思路。[方法] 以黄土高原地区的纸坊沟流域和燕沟流域作为试验区, 利用 5 m 分辨率的 DEM, 0.3 m 分辨率的 WorldView 3, 30 m 分辨率的 Landsat 8 影像、降雨数据、土壤数据、土地利用等数据。[结果] (1) 在纸坊沟流域和燕沟流域, 坡式梯田作为地形因子的流域土壤侵蚀量大于梯田作为工程措施的流域土壤侵蚀量, 同时坡式梯田作为地形因子的流域土壤侵蚀量大于水平梯田作为地形因子的流域土壤侵蚀量, 而水平梯田作为地形因子的流域土壤侵蚀量与梯田作为工程措施的流域土壤侵蚀量的比较根据流域的不同结果不同。(2) 梯田占流域面积比例不同时, 随着梯田占比的升高, 梯田作为工程措施的流域土壤侵蚀量要明显低于梯田作为地形因子的流域土壤侵蚀量。[结论] 梯田作为地形因子和工程措施因子会对土壤侵蚀量计算产生一定影响, 梯田占比较大时差异明显。

**关键词:** 梯田; 地形因子; 工程措施因子; 土壤侵蚀定量评价; 中国土壤流失方程(CSLE)

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2017)02-0148-05

**中图分类号:** S157.1

**文献参数:** 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. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2017. 02. 022; Wang Yiren, Zhao Mudan, Zhang Qian, et al. Comparative Study of Quantitative Evaluation of Soil Erosion in Consideration of Terraces as Topographical Factor or Engineering One[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(2): 148-152. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2017. 02. 022

## Comparative Study of Quantitative Evaluation of Soil Erosion in Consideration of Terraces as Topographical Factor or Engineering One

WANG Yiren, ZHAO Mudan, ZHANG Qian, ZHANG Peng

(College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710127, China)

**Abstract:** [Objective] With the using of CSLE model, we calculated the soil loss in two situations under certain conditions of rainfall, soil and vegetation; taking terraces as a terrain factor or as an engineering measure factor. It was expected to provide a new idea for quantitative evaluation of soil erosion. [Methods] This thesis choose Zhifanggou watershed and Yangou watershed of Loess Plateau as experimental sample plots and used DEMs of the study regions with a resolution of 5 meters, images of WorldView 3 with a resolution of 0.3 meters and Landsat 8 with a resolution of 30 meters, precipitation data, soil data and land use data, etc. [Results] (1) In Zhifanggou watershed and Yangou watersheds, as a terrain factor, the calculated average soil loss of watershed in slope terraces are both greater than the ones taking terraces as an engineering measure factor. However, the comparison results between the average soil loss of watershed in level terraces and taking terraces as an engineering measure factor varied in different watersheds. (2) As the increase of the proportion of terraces, the average soil loss of watershed taking terraces as an engineering measure is much lower than the one taking terraces as a terrain factor. [Conclusion] Taking terraces as terrain factor or engineering measure factor can change the calculation of soil loss, especially when the proportion of terraces is larger.

**Keywords:** terraces; terrain factor; engineering measure factor; quantitative evaluation of soil erosion; CSLE

收稿日期: 2016-11-28

修回日期: 2016-12-19

资助项目: 国家自然科学基金项目“梯田对坡度坡长因子的扰动特征研究”(41271284)

第一作者: 王翊人(1992—), 女(汉族), 陕西省西安市人, 硕士研究生, 研究方向为数字地形分析。E-mail: 13572413437@163.com。

通讯作者: 赵牡丹(1969—), 女(汉族), 陕西省富平县人, 博士研究生, 副教授, 主要从事数字地形分析工作。E-mail: zmdan@nwu.edu.cn。

黄土高原是中国乃至全世界土壤侵蚀最强烈的地区,其原因是由于黄土高原的主要堆积物为黄土,其具有欠固结性(上部)、轻度超固结性(深部)和易侵蚀性等特点,且因为黄土高原地区的自然条件和人工影响,使得黄土高原地区的水土流失极为严重<sup>[1]</sup>。通过多年的治理与建设,在坡面上修建了大面积梯田,梯田在保水减沙的同时,其修建减缓了原始坡面的坡度,截断了坡长,使得地形因子发生了改变<sup>[2]</sup>,进而影响某一地区的土壤侵蚀量。目前在土壤侵蚀定量化评价的相关研究中,主要是将梯田作为水土保持措施<sup>[3-4]</sup>,如高海东等<sup>[5]</sup>在分析梯田建设和淤地坝淤积对土壤侵蚀的影响时,将梯田作为水土保持措施考虑;谢红霞等<sup>[6]</sup>在延河流域水土保持措施减蚀效应的分析中,将梯田作为工程措施。但是,将梯田作为水土保持措施或工程措施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。由于梯田主要通过改变微地形来减少土壤侵蚀量,本研究尝试从将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,此外,对纸坊沟流域划分子流域,讨论梯田占流域面积比例对土壤侵蚀量的影响,为土壤侵蚀的定量评价提供新的思路,对完善土壤侵蚀评价方法具有一定实际意义。

## 1 研究基础与方法

### 1.1 研究区域与数据基础

燕沟流域处于延安市南部,流域面积 46.88 km<sup>2</sup>。其中包含梯田群共 53 处,梯田总面积占流域面积的 8.74%,梯田分布较为均匀,且面积较小。土地资源较为丰富,但由于土壤侵蚀的影响,沟壑纵横,坡陡沟深,水土流失非常严重。

纸坊沟流域处于延安市安塞县,流域面积 8.27 km<sup>2</sup>。其中包含梯田群共 7 处,梯田总面积占流域面积的 8.85%,梯田主要分布在流域中部,与燕沟相比,面积较大。地形支离破碎,包含了黄土高原典型的塬、梁、峁地形,水土流失较为严重。所用数据详见表 1。

表 1 基础数据一览表

数据类型	分辨率/m	用途
DEM 数据	5	构建梯田 DEM
WorldView-3 影像(2015 年)	0.3	构建梯田 DEM
Landsat 8 影像(2015 年)	30	计算生物措施因子 $B$ 值
土地利用数据(2009 年)	—	计算 $B$ 值和耕作措施因子 $T$ 值
日降雨数据(2000 年)	—	计算降雨侵蚀力因子 $R$ 值
土壤数据	—	计算土壤可蚀性因子 $K$ 值
流域边界	—	流域裁剪

### 1.2 梯田 DEM 构建

梯田按形态特征分为水平梯田、坡式梯田、反坡梯田和复式梯田。燕沟流域和纸坊沟流域内梯田面积分别占各自流域的 8.71% 和 8.85%,以水平梯田为主,但本研究为了更加完善的表达流域地形特征,在测绘部门 1:1 万 5 m DEM 的基础上采用基于真实田坎的方法对流域内所有梯田分别构建水平与坡式梯田 DEM。刘芬<sup>[7]</sup>提出的基于真实田坎信息的梯田 DEM 构建方法,其主要方法是根据高精度遥感影像,对梯田田面的田坎特征线进行手动提取,保证了田坎特征线与真实田坎位置的一致性。其数学模型如图 1 所示。

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

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

式中: $\alpha$ ——梯田田面倾角; $\beta$ ——田坎坡度; $L$ ——田面宽度; $H$ ——两梯田田面高差; $d$ ——田坎高; $b$ ——田坎水平投影宽,即台沿线偏移量。

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;结合样区梯田田坎坡度  $\beta$  ( $\beta = 75^\circ$ ),并在两田面高差及梯田田面倾角  $\alpha$  (水平梯田  $\alpha = 0^\circ$  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 生成梯田样区 DEM。为了方便后期分析,需要将梯田区域的 DEM 镶嵌到原始 DEM,形成嵌入梯田信息的 DEM,采用 AML 语言编程实现。

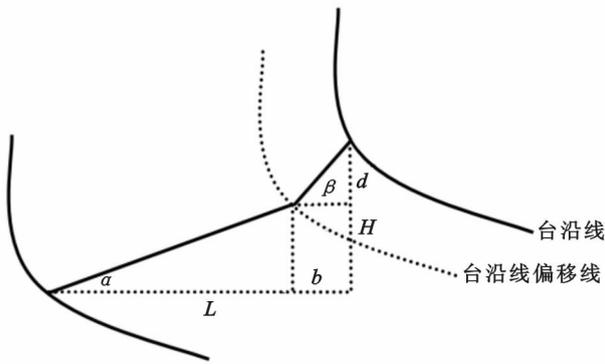
### 1.3 CSLE 各因子计算

本研究利用 CSLE 进行区域土壤侵蚀定量评价。CSLE 模型为<sup>[8]</sup>:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot B \cdot E \cdot T \quad (3)$$

式中: $A$ ——单位面积内的年土壤侵蚀量 ( $t/hm^2 \cdot a$ );  $R$ ——降雨侵蚀力因子 ( $MJ \cdot mm/hm^2 \cdot h \cdot a$ );  $K$ ——土壤可蚀性因子 ( $t \cdot hm^2 \cdot h/hm^2 \cdot MJ \cdot$

mm);  $L$ ——坡长因子;  $S$ ——坡度因子;  $B$ ——生物措施因子;  $E$ ——工程措施因子;  $T$ ——耕作措施因子。



注:  $\alpha$  为梯田田面倾角;  $\beta$  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。下同。

图 1 梯田剖面示意图

由于前期数据准备不足, 仅获得 2000 年降雨数据, 与土地利用数据时间不一致, 可能导致流域土壤侵蚀量计算结果出现偏差, 但由于本研究重点是对将梯田作为地形因子和工程措施在流域土壤侵蚀量计算结果的对比, 因此对研究本身没有影响。

1.3.1 降雨侵蚀力因子  $R$  采用章文波<sup>[9]</sup>提出的拟合算法计算 2000 年降雨侵蚀力图, 用克里金插值法对试验样区的降雨数据进行插值, 得到降雨侵蚀力数据。

1.3.2 土壤可蚀性因子  $K$  将土壤分为 5 类, 参照水利部水土保持监测中心的研究成果<sup>[10]</sup>, 对 5 种土壤类型的  $K$  值进行赋值, 将  $K$  值作为字段添加到土壤数据中, 通过将土壤数据的  $K$  值字段作为栅格数据的 Value 值进行矢量转栅格处理, 得到试验样区的土壤可蚀性数据。燕沟流域包括黄绵土、冲积土与复钙红黏土, 其  $K$  值分别为 0.056 9, 0.021 1 与 0.044 0;

表 3 不同坡度下的耕作措施因子值

坡度范围/(°)	≤5	5~10	10~15	15~20	20~25	>25
$T$ 值	0.100	0.221	0.305	0.575	0.735	0.800

1.4.2 工程措施因子  $E$  谢红霞<sup>[13]</sup>参考土壤侵蚀其他因子定义方法, 以有工程措施和无工程措施土壤侵蚀的比值定义为水土保持工程措施因子, 并且尝试提出工程措施因子的计算方法(公式 4), 由于难以获取淤地坝数据, 因此只将梯田作为试验样区内工程措施, 计算得出燕沟流域  $E$  值为 0.941, 纸坊沟流域  $E$  值为 0.951。

$$E = (1 - \frac{S_t}{S_d} \times \alpha) \quad (4)$$

式中:  $S_t$ ——梯田面积;  $S_d$ ——淤地坝控制面积;

纸坊沟流域包括黄绵土、冲积土与典型黑垆土, 其  $K$  值分别为 0.056 9, 0.021 1 与 0.054 5。

1.3.3 坡度坡长因子  $LS$  采用 LS-Tool<sup>[11]</sup> 提取坡度坡长因子, 不同的是, 梯田作为工程措施,  $LS$  的提取基于原始 DEM(未考虑梯田信息的 DEM)。梯田作为地形因子,  $LS$  的提取基于梯田 DEM 且认为试验样区中没有工程措施;

1.3.4 生物措施因子  $B$  基于 Landsat8 影像, 通过结构性植被指数的构建方法<sup>[12]</sup>, 得到基于土壤线的黄度指数与绿度指数, 反映反映样区结构性植被盖度, 结合土地利用数据, 从而确定  $B$  值(表 2)。

表 2 不同土地利用类型及不同植被盖度下的  $B$  值

土地利用类型	植被盖度/%	$B$ 值	土地利用类型	植被盖度/%	$B$ 值
林地	0~20	0.100	草地	0~20	0.450
	20~40	0.080		20~40	0.240
	40~60	0.060		40~60	0.150
	60~80	0.002		60~80	0.090
	80~100	0.004		80~100	0.043
水体	—	1	耕地	—	0.230
建设用地	—	0.900			

## 1.4 不同土地利用类型及不同植被盖度下的 $B$ 值

1.4.1 耕作措施因子  $T$  由于难以通过实地调查获取试验样区全面的耕作措施数据, 本研究主要根据延河流域的耕作习惯进行赋值<sup>[13]</sup>, 计算中主要考虑等高耕作措施的影响, 对覆盖、免耕少耕等保护性耕作措施不加以考虑。参照水利部水土保持监测中心的研究成果<sup>[10]</sup>, 耕作措施因子值主要根据不同坡度条件下等高耕作减少土壤流失来确定(表 3), 没有耕作措施的地区赋值为 1。

$S$ ——土地面积;  $\alpha, \beta$ ——梯田和淤地坝的减沙系数。其中关于梯田的减沙效益, 已有大量研究, 不同质量的梯田其减水减沙效益不同。本研究选择不同质量梯田的多年平均减沙系数作为流域减沙系数。

## 2 结果与分析

采用燕沟流域及纸坊沟流域的降雨侵蚀力数据、土壤可蚀性数据、地形因子数据和含有梯田信息的地形因子数据、生物措施因子数据、耕作措施因子数据等, 选择中国土壤流失方程 CSLE, 分析将梯田作为

地形因子和工程措施计算的土壤侵蚀量的差异,并讨论梯田占流域面积的比例对土壤侵蚀量的影响。

## 2.1 梯田对土壤侵蚀量的影响

利用 CSLE 得到燕沟流域与纸坊沟流域的土壤侵蚀图(分析中提及的土壤侵蚀量均为平均值)如图 2 所示。

结合图 2 可以看出,燕沟流域考虑梯田作为工程措施的土壤侵蚀量为  $12\ 384\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。水平梯田作为地形因子的燕沟流域土壤侵蚀量为  $12\ 293\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,坡式梯田作为地形因子的燕沟流域土壤侵蚀量为  $12\ 415\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。根据数据可得:土壤

侵蚀量由大到小依次为:坡式梯田作为地形因子的土壤侵蚀量 $>$ 梯田作为工程措施的土壤侵蚀量 $>$ 水平梯田作为地形因子的土壤侵蚀量。其中,梯田作为工程措施的土壤侵蚀量比坡式梯田作为地形因子的土壤侵蚀量减少了  $31\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,比水平梯田作为地形因子的土壤侵蚀量增加了  $91\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。因此可以得出,燕沟流域中,将梯田作为地形因子和将梯田作为工程措施纳入到 CSLE 中得出的土壤侵蚀量存在差异,但差异不明显;梯田作为工程措施的土壤侵蚀量大于水平梯田作为地形因子的土壤侵蚀量,小于坡式梯田作为地形因子的土壤侵蚀量。

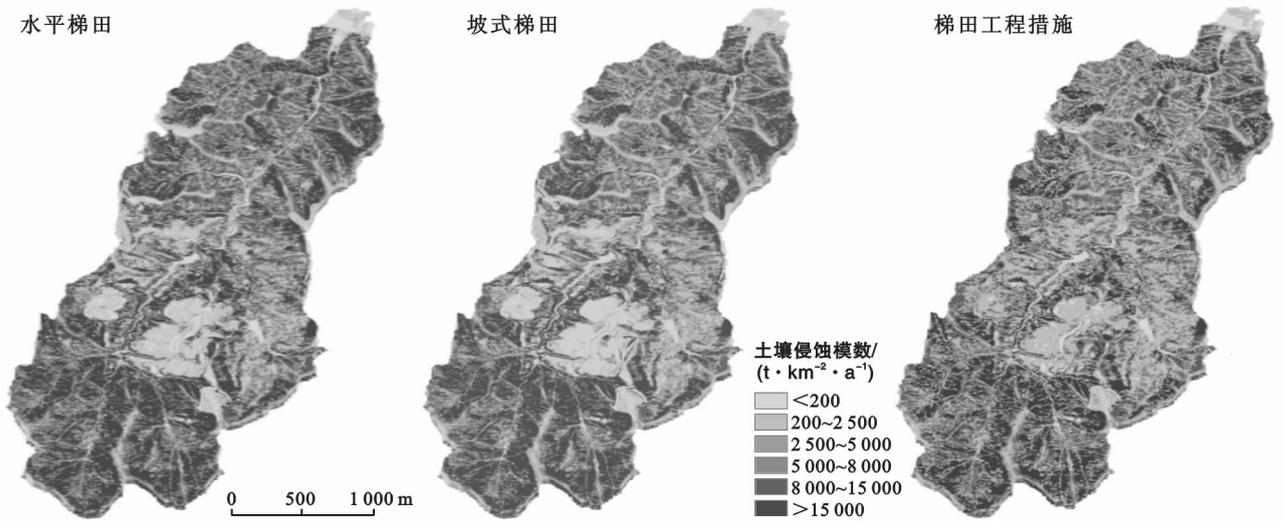


图 2 燕沟流域不同情况下的土壤侵蚀强度分布

结合图 3 可以看出,纸坊沟流域考虑梯田作为工程措施的土壤侵蚀量为  $12\ 523\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。水平梯田作为地形因子的纸坊沟流域土壤侵蚀量为  $12\ 663\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,坡式梯田作为地形因子的纸坊沟流域土壤侵蚀量为  $12\ 772\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。

根据数据资料可得,土壤侵蚀量由大到小依次为:坡式梯田作为地形因子的土壤侵蚀量 $>$ 水平梯田作为地形因子的土壤侵蚀量 $>$ 梯田作为工程措施的土壤侵蚀量。其中,梯田作为工程措施的土壤侵蚀量低于梯田作为地形因子的土壤侵蚀量,比水平梯田作为地形因子的土壤侵蚀量减少了  $140\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,比坡式梯田作为地形因子的土壤侵蚀量减少了  $249\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。因此可以得出,纸坊沟流域中,将梯田

作为地形因子和工程措施得出的土壤侵蚀量存在差异且差异同样不明显。

## 2.2 梯田占流域面积的比例对土壤侵蚀量的影响

在燕沟流域和纸坊沟流域,将梯田作为工程措施和地形因子对土壤侵蚀量的影响较小。燕沟流域与纸坊沟流域内梯田占流域面积的比例(简称梯田占比)都为 8%左右,所占比例较小导致结果差异不明显,因此,为了详细说明梯田对土壤侵蚀量的影响,采用水文分析<sup>[14]</sup>的方法,将纸坊沟流域划分为更小的子流域,计算不同梯田占比下各子流域的土壤侵蚀量,同时,作为比较基准,需要计算未考虑梯田信息的土壤侵蚀量。表 4 为在纸坊沟流域选取的几个不同梯田占比的子流域的分析结果。

表 4 不同梯田占比对土壤侵蚀量的影响

	t/(km <sup>2</sup> ·a)				
梯田占比/%	8.74	35.33	58.84	64.37	100
未考虑梯田信息的土壤侵蚀量	13 136.43	12 252.50	10 616.44	6 454.68	4 683.96
水平梯田土壤侵蚀量	12 643.71	10 972.58	8 486.18	2 974.72	2 220.59
坡式梯田土壤侵蚀量	12 749.92	11 257.65	8 670.87	3 963.25	2 220.59
作为工程措施的土壤侵蚀量	12 492.75	8 980.47	5 849.66	3 284.51	1 110.10

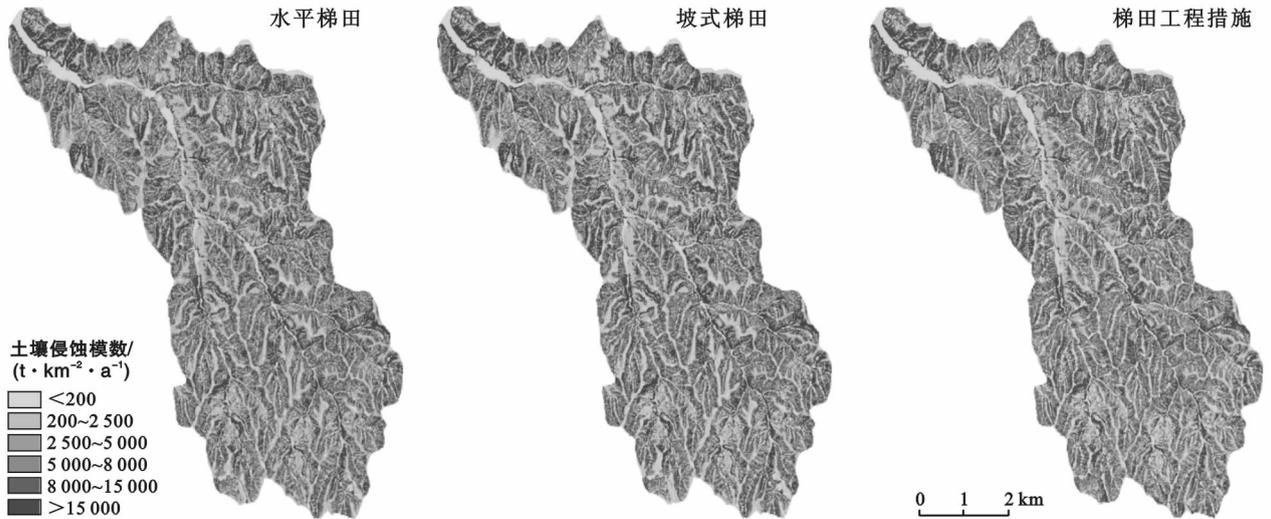


图 3 纸坊沟流域不同情况下的土壤侵蚀强度分布

结合表 4 可得,不同梯田占比下整体呈现出坡式梯田作为地形因子的土壤侵蚀量>水平梯田作为地形因子的土壤侵蚀量>梯田作为工程措施的土壤侵蚀量,说明梯田信息的加入能减少流域土壤侵蚀量,且水平梯田比坡式梯田具有更好的效果。对数据作进一步处理得到表 5。为直接比较将梯田作为工程措施和地形因子的不同,对水平梯田作为地形因子

和坡式梯田作为地形因子的土壤侵蚀量减少率取平均值。可以看出,梯田占比较小时,作为工程措施和地形因子的土壤侵蚀量减少率之间的差距较小,但随着梯田占比的增大,作为工程措施和地形因子的土壤侵蚀量减少率之间的差距随之增加,且作为工程措施的土壤侵蚀量减少率明显大于作为地形因子的减少率。

表 5 不同梯田占比对土壤侵蚀量的影响

					%
梯田所占比例	8.74	35.33	58.84	64.37	100
作为地形因子的土壤侵蚀量减少率	3.4	10.2	19.2	44.89	52.59
作为工程措施的土壤侵蚀量减少率	4.9	26.7	44.9	49.11	76.3

### 3 结论

(1) 在燕沟流域和纸坊沟流域,将梯田作为工程措施和地形因子的土壤侵蚀量之间存在一定差异。其中,坡式梯田作为地形因子的土壤侵蚀量均大于梯田作为工程措施的土壤侵蚀量,而水平梯田作为地形因子的土壤侵蚀量与梯田作为工程措施的土壤侵蚀量之间的比较根据流域的不同结果不同。

(2) 在纸坊沟子流域,随着流域中梯田占比的提高,梯田作为工程措施和地形因子的土壤侵蚀量的差距随之增加,即将梯田作为工程措施的土壤侵蚀量明显低于将梯田作为地形因子的土壤侵蚀量。总之,流域中梯田占比较小时,将梯田作为工程措施或地形因子对土壤侵蚀量的影响较小,但随着梯田占比的提高,将梯田作为工程措施的土壤侵蚀量明显要低。需要说明的是,本研究在比较梯田作为地形因子和工程措施因子的土壤侵蚀量时,与相关研究结果相比,土壤侵蚀量的计算偏高,但本研究重点是提供一种针对

梯田分布较多区域进行土壤侵蚀评价时的新思路,待数据或条件许可时进一步对其进行验证。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 王占礼,邵明安. 黄土高原典型地区土壤侵蚀共性与特点[J]. 山地学报,2001,19(1):87-91.
- [2] 康玲玲,鲍宏喆,刘立斌,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):51-56.
- [3] 刘斌涛,宋春风,史展,等. 西南土石山区土壤流失方程坡度因子修正算法研究[J]. 中国水土保持,2015(8):49-51.
- [4] 赵磊,袁国林,张琰,等. 基于 GIS 和 USLE 模型对滇池宝象河流域土壤侵蚀量的研究[J]. 水土保持通报,2007,27(3):42-46.
- [5] 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.
- [6] 谢红霞,杨勤科,李锐,等. 延河流域水土保持措施减蚀效应分析[J]. 中国水土保持科学,2010,8(4):13-19.

### 3 结论

综合考虑造成同一高速公路各路段沿线水土流失的施工因素,建立了多层次、多指标的针对同一高速公路施工期水土流失影响的评价体系,以水土流失影响指数(SW II)作为高速公路施工期水土流失影响严重程度的最终评价指标,并结合客观赋权法中的熵值法确定各评价指标的权重值,根据评价体系中各参考指标的熵值所提供的信息量大小得到各评价指标的权重值。

(1) 排除了人为因素的干扰,更加客观、科学的确定高速公路施工期水土流失重点路域,为水土保持措施的实施提供参考。

(2) 通过对梁平至忠县 9 段路段水土流失影响评价,确定了水土流失较为严重的区域,并将其划定为水土流失重点防护区域。

(3) 通过梁平至忠县 9 段路段的水土流失影响评价,验证了该多层次、多指标的高速公路施工期水土流失影响评价体系的合理性,为其他路段的水土流失影响评价提供了有力的参考。

#### [ 参 考 文 献 ]

[1] 赵廷宁,张峥,陈吉虎. 高速公路项目水土流失影响指数的应用研究[J]. 水土保持通报,2014,34(2):116-119.  
 [2] 王金娟,陈宗伟,江玉林. 高速公路施工期水土流失影响因素及其防治措施[J]. 水土保持研究,2006,13(5):120-123.  
 [3] 明道贵. 高速公路建设水土流失与水土保持研究[D]. 河北 石家庄:河北工业大学,2006.

[4] 王金娟,陈宗伟,江玉林. 高速公路施工期水土流失影响因素及其防治措施[J]. 水土保持研究,2006,13(5):120-123.  
 [5] 王进鑫,毛泽秦. 平凉纸坊沟流域水土流失影响因素及其相关关系分析[J]. 水土保持研究,2011,18(1):101-104.  
 [6] 尹晓静. 高速公路建设水土流失成因与水土保持策略[J]. 水土保持应用技术,2012(4):48-49.  
 [7] 宋马俊. 安全评价方法科学性与适应性论证研究[J]. 电力安全技术,2007,9(4):28-31.  
 [8] 陈雷. 我国水上交通安全宏观评估的研究[D]. 辽宁 大连:大连海事大学,2007.  
 [9] 姜德文. 开发建设项目水土保持损益分析研究[D]. 北京:北京林业大学,2007.  
 [10] 张峥高速公路项目水土流失影响指数应用研究[D]. 北京:北京林业大学,2014.  
 [11] 方青,邓其,潘晓东. 基于可拓理论的高速公路事故动态预警方法[J]. 公路工程,2013,38(4):115-119.  
 [12] 张翔宇. 公路建设项目水土流失防治分区探讨[J]. 山西建筑,2011(18):120-122.  
 [13] 叶斌. 基于改进熵值法的内河水运评价研究[D]. 四川 成都:成都理工大学,2012.  
 [14] 杨元玲. 寿险公司信用评级的财务状况研究[D]. 四川 成都:西南财经大学,2013.  
 [15] 贾明璐,王富喜,毛爱华. 基于熵值法的山东省城镇化质量测度及空间差异分析[J]. 地理科学,2013,33(11):1323-1329.  
 [16] 曹银贵,赵丽,朱永明. 主成分分析法和熵值法在农村居民点集约利用评价中的比较[J]. 农业工程学报,2012,28(7):235-242.

(上接第 152 页)

[7] 刘芬. 黄土高原梯田 DEM 地形特征研究[D]. 陕西 西安:西北大学,2015.  
 [8] Liu Baoyuan, Zhang Keli, Xie Yun. An Empirical Soil Loss Equation [C]. Beijing: 12th ISCO Conference, 2002.  
 [9] 章文波,付金生. 不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J]. 资源科学,2003,25(1):35-41.  
 [10] 刘宝元. 西北黄土高原区土壤侵蚀预报模型开发项目研究成果报告[R]. 北京:水利部水土保持监测中心,2006.

[11] 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.  
 [12] 李京忠. 区域水土流失结构性植被因子遥感提取研究:以延河流域为例[D]. 陕西 西安:西北大学,2009.  
 [13] 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]. 陕西 西安:陕西师范大学,2008.  
 [14] 宋向阳,吴发启,赵龙山,等. 基于 DEM 的延河流域水文特征提取与分析[J]. 干旱地区农业研究,2012,30(4):200-206.