

梯田建设和淤地坝淤积对土壤侵蚀影响的定量分析

高海东¹, 李占斌^{1,2}, 李鹏², 贾莲莲³, 张翔²

(1. 中国科学院、水利部水土保持研究所, 杨凌 712100;

2. 西安理工大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710048;

3. 水利部黄河水利委员会黄河上中游管理局, 西安 710021)

摘要: 为了研究梯田建设和淤地坝淤积对流域土壤侵蚀的影响, 本文首先建立了包含梯田、坡耕地、陡坡草地以及坝地在内的黄土高原丘陵沟壑区流域简化模型, 并定义了流域的先锋期、过渡期以及顶级期三个状态, 使用修正通用土壤流失方程 (RUSLE) 分析了不同时期的流域土壤侵蚀模数。结果显示: 先锋期与顶级期是流域水土保持治理的极限状态, 先锋期崩边线上部土壤侵蚀模数为 $299.56 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 下部土壤侵蚀模数为 $136.64 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 平均侵蚀模数为 $229.74 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$; 顶级期崩边线上部土壤侵蚀模数为 $39.10 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 下部土壤侵蚀模数为 $1.10 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 平均侵蚀模数为 $22.81 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$; 在过渡期, 随着梯田面积比例的增加, 崩边线上部土壤侵蚀模数呈指数减少, 而随着淤积高度的增加, 崩边线下部土壤侵蚀模数呈线性减少, 文章最后对这一结论进行了实证分析。

关键词: 水土保持; 黄土高原; 修正通用土壤流失方程; 演替

1 引言

黄土高原是世界上水土流失最严重地区, 为了遏制黄土高原的水土流失, 中国政府采取了一系列措施, 包括调整土地利用结构、恢复植被、改进耕作方式、在坡面修建梯田以及在沟道修建淤地坝等。从流域角度, 这些措施可以归为沟道措施和坡面措施两大类, 在黄土高原, 梯田是最主要的坡面措施, 淤地坝是最主要的沟道措施^[1]。梯田作为坡面治理工程中的主体, 可以变跑水、跑土、跑肥的“三跑田”为保水、保土、保肥的“三保田”^[2], 研究者从多个角度定量的评估了梯田的蓄水保土效应^[3-5]。关于淤地坝的水土保持效应研究, 大多从减沙效益角度出发, 分析了淤地坝的减沙效应, 如冉大川等人以及焦菊英等人在黄河中游地区的研究^[6-7]。

淤地坝建成后, 随着淤积高度的增加, 坝地淤埋了原来侵蚀严重的沟谷和沟床, 这些部位不再发生侵蚀。同时, 梯田修建后, 取代了原来侵蚀最严重的坡耕地, 从而降低了流域的土壤侵蚀。但是, 关于淤地坝不同淤高下以及流域不同梯田比例时的土壤侵蚀变化情况, 目前还鲜有研究报道。本文首先建立黄土高原丘陵沟壑区简化模型, 随后使用修正通用土壤流失方程 (RUSLE) 计算了淤地坝淤积和梯田修建过程中坡面的土壤侵蚀动态变化情况, 以期更深入的研究淤地坝和梯田的减蚀效应。

收稿日期: 2011-11-13; 修订日期: 2012-2-21

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (2011CB403302); 国家自然科学基金项目 (40971161; 41071182) [Foundation: National Key Basic Research Program of China (973 Program), No.2011CB403302; National Natural Science Foundation of China, No.40971161; No.41071182]

作者简介: 高海东, 男, 内蒙古乌审旗人, 博士研究生, 研究方向为土壤侵蚀与遥感。E-mail: hdgao@msn.cn

通讯作者: 李占斌, 男, 河南镇平人, 研究员, 博士生导师, 研究方向为土壤侵蚀与水土保持。E-mail: zbli@ms.iswc.ac.cn

2 水土保持治理下的流域演变模型

2.1 流域抽象

从分水岭至沟底,由崩边线、沟坡线将流域划分为三部分:梁崩坡位于崩边线以上,坡面较完整、平缓,多为面蚀和细沟侵蚀;沟谷坡位于崩边线以下,沟坡线以上,坡度较陡,多为切沟、冲沟以及崩塌等侵蚀形态;沟谷底是坡面径流汇流后洪水的通道,表现为沟底下切、沟岸扩张和沟头前进。

由于沟谷底面积较小,故将其归并到沟谷坡。据此,以崩边线为界,可以将坡面分为梁崩坡和沟谷坡两个单元。梁崩坡坡度多位于 $0\sim 30^\circ$ 左右,而在崩边线以下的坡度增大为 $35^\circ\sim 45^\circ$ 。根据黄土高原韭园沟、裴家崩、纸坊沟、岔巴沟以及吕二沟等流域统计,确定梁崩坡面积比例为57%,沟谷坡面积比例为43%。

为了确定坡面的水平投影坡长,以黄土高原丘陵沟壑区第一副区韭园沟流域为实体对象,在地理信息系统(GIS)软件支持下,将韭园沟数字高程模型(DEM)经过正负地形运算、填挖、汇流方向、累积汇流量计算以及重分类等过程,提取韭园沟流域山脊线和山谷线,并随机测量山脊线和山谷线之间的垂直距离,共143条,测量得最小值为46 m,最大值为191 m,平均值为105 m,标准差为25 m(图1)。因此确定坡面的投影长度为105 m,据此建立流域抽象模型的先锋期(图2)。



图1 韭园沟流域山脊线山谷线提取结果图

Fig. 1 Results for extracting ridge line and valley line in Jiuyuangou watershed

2.2 流域演替模型

演替是生态学概念,指某一地段上一种生物群落被另一种生物群落所取代的过程。多数演替具有方向性,部分演替有周期性,生物群落从演替初期到形成稳定的成熟群落,一般都要经历先锋期、过渡期、顶极期三个阶段^[8]。借助在水土保持中,将演替过程中流域的最初状态定义为先锋期,此时,流域崩边线以上全部为坡耕地,崩边线以下全部为草地,流域具有最大的土壤流失量,流域的治理度为0%。

在水土保持措施的干扰下,流域上部逐渐被梯田占据,而下部逐渐被坝地“淹没”,此为流域的过渡期,过渡期是流域最长存在状态。以崩边线为界,包含有两个过程:

(1) 崩边线以上:为突进的梯田向下发展,取代坡耕地的“取代过程”。梯田的增加受控于四个因素,耕地需求、水土保持治理、坡改梯技术进步以及政策因素等。坡改梯不是每年都进行的,而是受到上述因素刺激后才发生的,因此,有别于淤地坝的缓慢淤积过程。梯田修建后,原来的坡耕地变为梯田,侵蚀模数大幅度减少。

(2) 崩边线以下:为缓慢的淤地坝向上淤积,淹没荒草地的“淹没过程”。淤地坝泥沙的淤积,抬高了侵蚀的基准面,“淹没”了流域下部的陡坡荒草地,降低了流域的土壤侵蚀量。

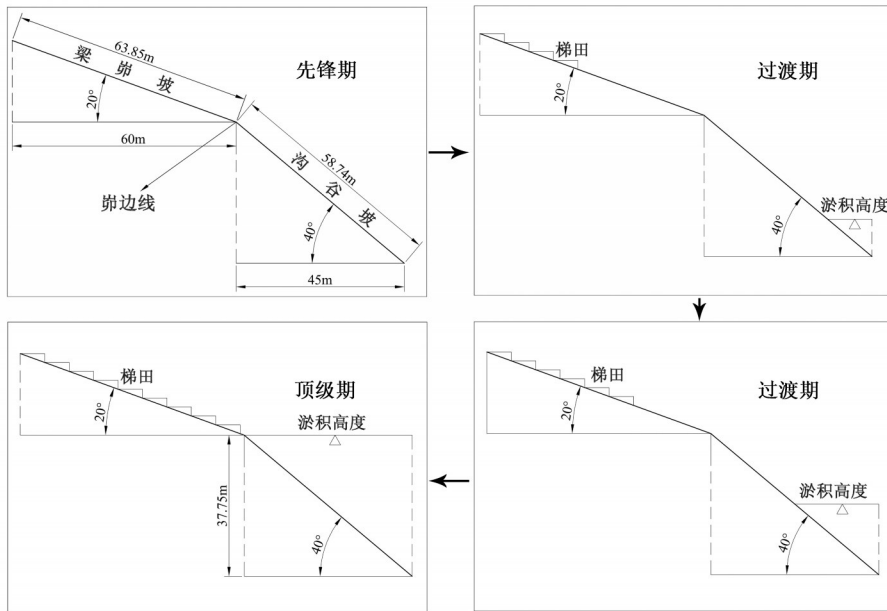


图2 水土保持治理演替模型

Fig. 2 The succession model for soil and water conservation

随着坡耕地和草地的减少, 淤地坝淤积速度越来越慢, 最后, 崩边线以上全部为梯田, 崩边线以下全部为坝地, 此时为顶级期, 是水土保持治理的极限, 治理度100%。

3 修正通用土壤流失方程 (RUSLE) 各因子确定

修正通用土壤流失方程 (RUSLE) 是目前世界上应用最广泛的水蚀预报经验模型。该方程能反应出影响土壤侵蚀单因子的改变对土壤侵蚀量的影响, 其表达式为:

$$A = R \cdot K \cdot S \cdot L \cdot C \cdot P \quad (1)$$

式中: A 是年平均土壤流失量, $t \times hm^{-2} \times a^{-1}$; R 是降雨侵蚀力因子, $MJ \times mm \times hm^{-2} \times h^{-1} \times a^{-1}$; K 是土壤可蚀性因子, $t \times hm^2 \times h \times hm^{-2} \times MJ^{-1} \times mm^{-1}$; S 是坡度因子; L 是坡长因子; C 是作物覆盖—管理因子; P 是水土保持措施因子。

坡面平均侵蚀量 \bar{A} 计算公式:

$$\bar{A} = \sum_{i=1}^n a_i A_i \quad (2)$$

式中: A_i 为第 i 类单元的侵蚀量, a_i 为第 i 类单元的面积比例。

3.1 降雨侵蚀力 (R)

修正通用土壤流失方程 (RUSLE) 预测土壤流失量时, 用 EI_{30} 作为降雨侵蚀力指标。受降雨过程资料限制, 许多学者提出了利用气象站常规降雨统计资料计算降雨侵蚀力的简易方法^[9-12]。穆

兴民等人采用章文波等人^[13]提出的降雨侵蚀力简易估算方法, 计算了陕北黄土高原及其周边站 1959-2002 年 40 多年的降雨侵蚀力(表 1)^[14]。本文采用表 1 的平均值 $1456 MJ \cdot mm \cdot$

表1 黄土高原部分站点多年平均降雨侵蚀力 ($MJ \cdot mm \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1}$)

Tab. 1 The average rainfall erosivity over years on Loess Plateau

站名	多年平均值	站名	多年平均值
惠农	452	离石	1578
鄂托克旗	778	固原	1126
东胜	1351	环县	1148
伊金霍洛旗	1072	延安	2264
河曲	1198	隰县	1815
银川	393	介休	1458
陶乐	358	临汾	1626
榆林	1916	崆峒	1437
五寨	1146	西峰	1603
兴县	1535	长武	2027
盐池	751	洛川	2526
吴旗	1908	铜川	2346
横山	1600	运城	1956
绥德	1939	平均值	1456

hm²·h⁻¹，作为本次研究降雨侵蚀力值。

3.2 土壤可蚀性因子 (K)

K 因子反映了土壤对侵蚀的敏感性，K 值估算采用土壤侵蚀和生产力影响估算模型 (EP IC) 中的方法^[15]，利用土壤有机质和颗粒组成进行估算：

$$K = 0.1317 * \{0.2 + 0.3 \exp[-0.0256SAN(1 - SIL/100)]\} * [SIL/(CLA + SIL)] * 0.3 * \{1.0 - 0.25C/[C + \exp(3.72 - 2.95C)]\} * \{1.0 - 0.7SN_1/[SN_1 + \exp(-5.51 + 22.9SN_1)]\} \quad (3)$$

式中：SAN 为砂粒含量，%；SIL 为粉粒含量，%；CLA 为粘粒含量，%；C 为有机碳含量，%；SN₁ = 1 - SAN/100；0.1317 为美国制单位向国际制单位转化系数。

根据 EPIC 模型中 K 值计算公式，通过对韭园沟退耕坡地、坡耕地、退耕梯田、荒草地、坝地、梯田、梯田果园等不同土地利用类型进行采样分析，得土壤可蚀性 K 值变化于 0.034~0.043 之间，平均值为 0.039 (表 2)，相对偏差不超过 6%，因此，假设沟谷坡和梁峁坡的 K 值一致，取平均值 0.039 t×hm²×h×hm²×MJ⁻¹×mm⁻¹。

表 2 土壤可蚀性 K 值计算结果 (t×hm²×h×hm²×MJ⁻¹×mm⁻¹)

Tab. 2 Results for K values of soil erodibility						
样地类型	样地 1	样地 2	样地 3	样地 4	样地 5	平均值
坝地	0.038	0.040	0.038	0.037	0.039	0.038
坡耕地	0.034	0.037	0.036	0.038	0.040	0.037
退耕坡地	0.038	0.041	0.041	0.043	0.042	0.040
荒草地	0.040	0.038	0.038	0.041	0.037	0.039
梯田	0.035	0.039	0.036	0.038	0.041	0.038
退耕梯田	0.041	0.040	0.039	0.042	0.039	0.040

3.3 坡度因子 (S) 与坡长因子 (L)

土壤侵蚀随坡度的增加而增加，且增加速率加快。当坡度小于等于 5° 时，采用 McCool 等人 1987 年提出坡度因子 (S) 公式^[16]：

$$S = 10.8 \sin \theta + 0.03 \quad (4)$$

当坡度大于 5° 时，采用刘宝元提出的计算方法^[17]：

$$S = 16.8 \sin \theta - 0.05 \quad 5^\circ \leq \theta < 10^\circ$$

$$S = 21.9 \sin \theta - 0.96 \quad \theta \geq 10^\circ \quad (5)$$

根据绥德站王茂沟 22 座淤地坝的 GPS 差分监测结果^[18]，淤地坝淤积面纵比降变化于 0.21%~0.33% 之间，平均值为 0.29%，因此确定坝地坡度为 0.16°。S 因子计算结果见表 3。

表 3 坡度因子 (S) 与坡长指数 (m)

Tab. 3 Slope factor and slope length exponents

坡度 (°)	S	m
0.16	0.06	0.20
20.00	6.53	0.50
40.00	13.12	0.50

用于获取坡长因子的小区实测资料表明^[19-20]，水平投影坡长为 λ (m) 坡地上的平均侵蚀量按公式 (6) 变化：

$$L = (\lambda/22.1)^m \quad (6)$$

式中，22.1 是 RUSLE 采用的标准小区坡长 (m)，m 是可变的坡长指数，采用刘宝元提出的值^[21]：坡度小于等于 1° 时，取 0.2；大于 1°，小于等于 3° 时，取 0.3；大于 3°，小于等于 5° 时，取 0.4；大于 5° 时，取 0.5。

通过对王茂沟 22 座淤地坝淤积年限，淤积前高程和淤积后的 GPS 监测结果^[18] 计算得知，淤地坝的年平均淤积高度为 0.42 m×a⁻¹。

假设历年来沙条件一致，受地形影响，淤积高度与时间 (淤积年限) 关系应该为对数函数关系，但是由于降雨以及坡面产沙的不确定性影响，使淤积高度与时间的关系变得极为复杂。为了简化研究，假设淤积年限 (t) 和淤积高度 (H) 为简单的线性关系，即：

$$H = 0.42t \quad (7)$$

由于坝地坡度较小，因此，坝地的水平投影坡长 λ_D 为：

$$\lambda_D(t) = H/\tan(40^\circ) \quad (8)$$

草地的水平投影坡长 λ_G 为：

$$\lambda_G(t) = 45 - H/\tan(40^\circ) \quad (9)$$

这里，水平投影坡长为时间的函数。对于梯田水平投影坡长 λ_T 和坡耕地水平投影坡长 λ_S 来说，存在公式 (10) 所示关系：

$$\lambda_T(t) + \lambda_S(t) = 60 \tag{10}$$

3.4 作物覆盖—管理因子 (C) 与水土保持措施因子 (P)

研究表明,黄土高原丘陵沟壑区主要农作物的C值玉米为0.28、豆类为0.51、马铃薯为0.47、谷子为0.53^[22],主要的草地类型红豆草、草木樨、沙打旺、苜蓿C值分别为0.174、0.083、0.071、0.264^[23]。坝地主要作物为玉米,坡耕地主要作物为马铃薯、豆类,草地为红豆草和草木樨等,梯田主要作物为小米以及豆类,据此,我们估算坝地、坡耕地、草地以及梯田的C值(表4)。

表4 坝地 (D)、坡耕地 (S)、草地 (G)、梯田 (T) 的C值
Tab. 4 The C values for dam farmland, slope farmland, grassland and terrace

类型	坝地	坡耕地	草地	梯田
主要覆被	玉米	马铃薯、豆类	红豆草, 草木樨	小米、豆类
C值	0.28	0.49	0.1285	0.52

吴发启等人根据小区和水平梯田的观测值^[4],水平梯田可以减少坡面侵蚀87.7%(表5),因此将梯田的P因子确定为0.123,其他类型P因子值为1。

表5 黄土高原水平梯田蓄水保土效益

Tab. 5 The benefits of soil and water conservation of level terrace on Loess Plateau

试验站	蓄水效益 (%)	保土效益 (%)
西峰	97.5	98.4
绥德	86.4	88.7
离石	70.5	71.3
延安	92.6	91.6
耀县	73.1	74.6
彬县	93.6	94.9
淳化	93.1	94.5
平均	86.7	87.7

4 水土保持治理演替条件下的土壤侵蚀模数变化

4.1 坝地淤积和梯田建设过程中土壤侵蚀动态的理论分析

先锋期与顶级期土壤侵蚀模数:先锋期和顶级期代表了流域演替的两个极限状态。先锋期崩边线上部全为坡耕地,侵蚀模数为299.56 t×hm⁻²×a⁻¹,下部全为草地,侵蚀模数为136.64 t×hm⁻²×a⁻¹,平均侵蚀模数为229.74 t×hm⁻²×a⁻¹;顶级期崩边线上部全为梯田,侵蚀模数为39.10 t×hm⁻²×a⁻¹,下部全为坝地,侵蚀模数为1.10 t×hm⁻²×a⁻¹,平均侵蚀模数为22.81 t×hm⁻²×a⁻¹。因此,在整个土壤侵蚀治理期间,流域的侵蚀模数变化于22.81 t×hm⁻²×a⁻¹~229.74 t×hm⁻²×a⁻¹之间,最大值为最小值的10倍左右。

崩边线以上的梯田扩张过程(表6):随着梯田比例的增加,土壤侵蚀模数从最大的299.56 t×hm⁻²×a⁻¹下降到最小的39.10 t×hm⁻²×a⁻¹。

使用指数函数 $y = ae^{bx}$ 拟合梯田比例与侵蚀模数之间的关系(图3),当x等于0时,即梯田比例为0时,侵蚀模数y等于截距a,因此定义a为基准侵蚀模数,即全部为坡耕地时,崩边线以上的侵蚀模数,因此,a与崩边线位置有关(表7)。系数b为侵蚀速率,即梯田每增加一个百分点,侵蚀模数降低为原来的e^b倍,与崩边线的位置无关。

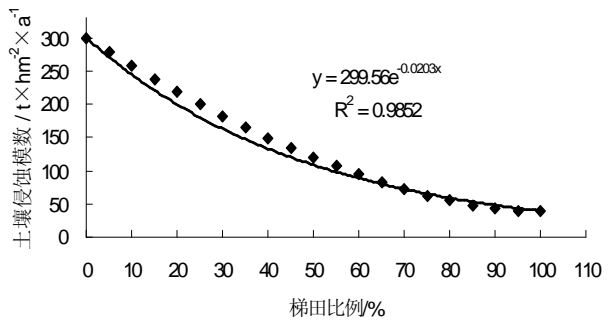


图3 梯田比例与土壤侵蚀关系

Fig. 3 The relationship between proportion of terraces and soil erosion

崩边线以下的坝地淹没过程:随着淤地坝的抬升,崩边线以下土壤侵蚀逐渐降低(表8),从最高的136.64 t×hm⁻²×a⁻¹,降至1.10 t×hm⁻²×a⁻¹,且呈线性减少,拟合方程为 $y = -ax + b$ 形式(图4)。

截距b为基准侵蚀模数,随着崩边线的上移,基准侵蚀模数增加。a为侵蚀减少速率,随着崩边线的上移,侵蚀减少速率在增加(表9)。

表6 梯田扩张过程中崩边线以上土壤侵蚀变化
Tab. 6 Soil erosion changes in hills with terrace expansion

梯田比例 (%)	梯田投影坡长 (m)	坡耕地投影坡长 (m)	梯田侵蚀模数 (t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	坡耕地侵蚀模数 (t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	平均侵蚀模数 (t·hm ⁻² ·a ⁻¹)
0	0.00	60.00	0.00	299.56	299.56
5	3.00	57.00	8.74	291.97	277.81
10	6.00	54.00	12.36	284.19	257.00
15	9.00	51.00	15.14	276.18	237.02
20	12.00	48.00	17.49	267.93	217.84
25	15.00	45.00	19.55	259.42	199.46
30	18.00	42.00	21.42	250.63	181.86
35	21.00	39.00	23.13	241.51	165.08
40	24.00	36.00	24.73	232.04	149.11
45	27.00	33.00	26.23	222.16	133.99
50	30.00	30.00	27.65	211.82	119.73
55	33.00	27.00	29.00	200.95	106.38
60	36.00	24.00	30.29	189.46	93.96
65	39.00	21.00	31.52	177.22	82.52
70	42.00	18.00	32.71	164.07	72.12
75	45.00	15.00	33.86	149.78	62.84
80	48.00	12.00	34.97	133.97	54.77
85	51.00	9.00	36.05	116.02	48.05
90	54.00	6.00	37.09	94.73	42.86
95	57.00	3.00	38.11	66.98	39.55
100	60.00	0.00	39.10	0.00	39.10

R: 1456 MJ·mm·hm⁻²·h⁻¹; K: 0.039 t·hm⁻²·h·hm⁻²·MJ⁻¹·mm⁻¹; S: 6.534; m: 0.5; C_r: 0.52; C_s: 0.49; P: 0.123

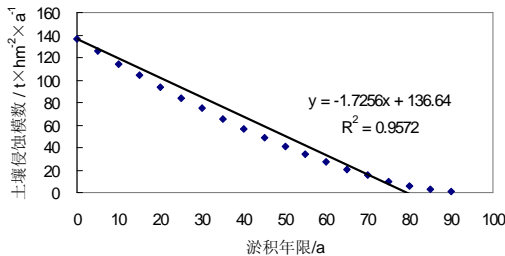


图4 淤积年限与土壤侵蚀关系

Fig. 4 The relationship between silting-up period and soil erosion

4.2 实例分析

本文选择关地沟四号坝作为对象进行分析。关地沟四号坝位于韭园沟支沟王茂沟，建于1959年，设有溢洪道，坝控面积39.78 hm²，其中崩边线以上面积为26.09 hm²(图5)。

对于坝地淤高，分别设置现状条件下、淤高10 m、淤高20 m、淤高30 m、淤高40 m、淤高50 m等6种情景。将1:1万地形数据通过Hutchinson插值方法^[24]获得数字高程模型(DEM)，通过设定不同的淤积高度，采用Van Remortel^[25]等人编写的ArcInfo宏语言(AML)程序计算坡度坡长因子(图6)。降雨侵蚀力选择表1中的绥德值，土壤可蚀性(K)采用表2值，作物覆盖-管理因子(C)采用表4值，水土保持措施因子(P)取0.123。

在6种情景下，流域的平均侵蚀模数分别为107.58 t·hm⁻²·a⁻¹、103.32 t·hm⁻²·a⁻¹、

表7 基准侵蚀模数(系数a)与崩边线位置
Tab. 7 The relationship between reference erosion modulus and demarcation of hill and gully slope

崩边线位置 (%)	梁崩坡投影坡长 (%)	沟谷坡投影坡长 (%)	a
25	78.75	26.25	450.43
30	73.50	31.50	406.15
35	68.25	36.75	363.42
40	63.00	42.00	322.30
45	57.75	47.25	282.87
50	52.50	52.50	245.18
55	47.25	57.75	209.34
60	42.00	63.00	175.44
65	36.75	68.25	143.60
70	31.50	73.50	113.95
75	26.25	78.75	86.69

注：崩边线位置定义为崩边线至沟谷底的投影长与整个坡面投影长的比值。

表8 坝地淹没过程中崩边线以下土壤侵蚀动态变化

Tab. 8 Soil erosion changes on gully slopes with check-dam land submerging

淤积年 (a)	坝地投影坡长 (m)	草地投影坡长 (m)	坝地侵蚀模数 (t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	草地侵蚀模数 (t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	平均侵蚀模数 (t·hm ⁻² ·a ⁻¹)
0	0.00	45.00	0.00	136.64	136.64
5	2.50	42.50	0.62	132.79	125.45
10	5.00	40.00	0.71	128.82	114.59
15	7.50	37.50	0.77	124.73	104.07
20	10.00	35.00	0.81	120.50	93.91
25	12.50	32.50	0.85	116.12	84.10
30	15.00	30.00	0.88	111.56	74.67
35	17.50	27.50	0.91	106.82	65.63
40	20.00	25.00	0.94	101.84	57.00
45	22.50	22.50	0.96	96.62	48.79
50	25.00	20.00	0.98	91.09	41.03
55	27.50	17.50	1.00	85.21	33.75
60	30.00	15.00	1.01	78.89	26.97
65	32.50	12.50	1.03	72.01	20.75
70	35.00	10.00	1.05	64.41	15.13
75	37.50	7.50	1.06	55.78	10.18
80	40.00	5.00	1.07	45.55	6.02
85	42.50	2.50	1.09	32.21	2.82
90	45.00	0.00	1.10	0.00	1.10

R: 1456 MJ mm hm⁻² h⁻¹; K: 0.039 t·hm⁻²·h·hm⁻²·MJ⁻¹·mm⁻¹; S_D: 0.06; S_G: 13.12; m_D: 0.2; m_G: 0.5; C_D: 0.28; C_G: 0.1285

99.53 t·hm⁻²·a⁻¹、92.02 t·hm⁻²·a⁻¹、85.27 t·hm⁻²·a⁻¹、以及75.99 t·hm⁻²·a⁻¹。以淤积高度和平均土壤侵蚀模数进行线性拟合, 拟合公式为 $y = -0.6275x + 109.64$, R² 为 0.975, 高于指数拟合 R²。且系数 b 接近现状条件下的侵蚀模数。

对于崩边线以上部分, 我们设立没有梯田、坡度 15° 以下全为梯田、坡度 25° 以下全为梯田、坡耕地全为梯田以及崩边线上部全为梯田等 5 种梯田分布情景。5 种情景下, 梯田面积占崩边线以上面积的

比例分别为 0.00%、12.33%、25.01%、78.78% 以及 100.00%。在此 5 种情景下, 崩边线上部的平均侵蚀模数分别为 149.58 t·hm⁻²·a⁻¹、144.54 t·hm⁻²·a⁻¹、115.97 t·hm⁻²·a⁻¹、38.76 t·hm⁻²·a⁻¹ 以及 29.80 t·hm⁻²·a⁻¹。拟合梯田比例与侵蚀模数的关系, 发现指数拟合的 R² 为 0.987, 略高于线性拟合的 0.980, 指数拟合公式为 $y = 166.83e^{-0.0175x}$, 截距与梯田比例为 0.00% 时接近。

4.3 讨论

目前, 已有学者研究了淤地坝淤积后流域的重力侵蚀变化情况^[26-27], 研究者使用土力学建模软件, 分析了淤地坝淤积后流域的力学变化特性, 并建立了侵蚀基准面抬升高度与最大位移、安全系数、稳定系数、滑塌体积之间的关系。随着淤积高度的抬升, 不仅对流域的重力侵蚀产生影响, 对黄土高原丘陵沟壑区的主要侵蚀形态水力侵蚀^[28]也产生影响,

表9 系数 a, b 与崩边线位置

Tab. 9 Coefficients a and b and demarcation of hill and gully slope

崩边线位置 (%)	梁崩坡投影 坡长 (m)	沟谷坡投影 坡长 (m)	a	b	R ²
25	78.75	26.25	1.3332	60.88	0.9660
30	73.50	31.50	1.4650	80.02	0.9661
35	68.25	36.75	1.5862	100.84	0.9662
40	63.00	42.00	1.6988	123.20	0.9663
45	57.75	47.25	1.8071	147.01	0.9678
50	52.50	52.50	1.9043	172.18	0.9663
55	47.25	57.75	1.9644	198.65	0.9584
60	42.00	63.00	2.0566	226.34	0.9593
65	36.75	68.25	2.1450	255.22	0.9599
70	31.50	73.50	2.2298	285.22	0.9605
75	26.25	78.75	2.3115	316.32	0.9610

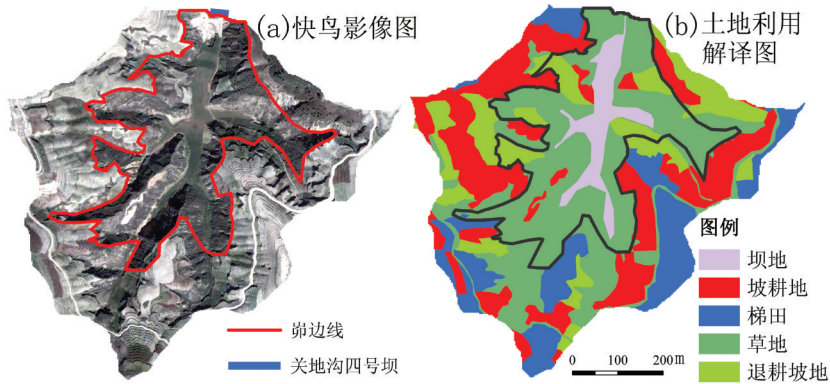


图5 关地沟四号坝控区域快鸟影像图及土地利用图

Fig. 5 The QuickBird image and Lucc map in Guandigou check-dam No.4

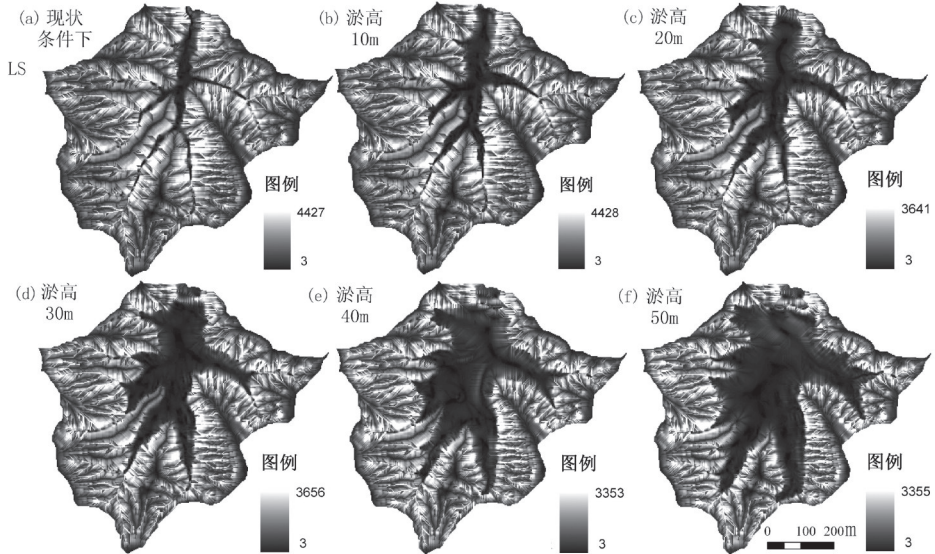


图6 不同淤高下的坡度坡长因子计算结果图

Fig. 6 The results of LS under different silting-up thicknesses

而淤积高度的变化对水力侵蚀的影响，目前还没有研究报道，本文使用RUSLE，通过建立流域的抽象模型，定量的揭示了淤积高度的增加对流域的水力侵蚀影响。

刘世梁等使用WEPP模型研究了不同梯田数量对土壤流失量的影响，结果显示，在同一坡度，随着梯田数目增加，土壤流失量有所降低，特别是坡度大于10°时，梯田建设有助于减少土壤流失量^[29]，这与本文结论一致。

黄土高原的地貌类型主要有丘陵、塬、梁、峁和沟谷等，淤地坝是黄土高原特有的水土保持工程，本文修正通用土壤流失方程(RUSLE)各因子的确定也参考了黄土高原地区的研究成果，由于黄土塬区地貌类型不满足本文的简化模型，因此本文的结论适用于黄土高原丘陵以及梁、峁和沟谷等地区。

为简化研究，本文讨论了梯田和淤地坝两种水土保持措施，而未考虑草地、林地以及耕作等其他措施，未来研究中，应加入草地和林地等水土保持措施，使研究结果更符合实际。

参考文献 (References)

- [1] Tang Keli. Soil and Water Conservation in China. Beijing: Science Press, 2004: 387-573. [唐克丽. 中国水土保持. 北京: 科学出版社, 2004: 387-573.]
- [2] Wu Faqi, Zhang Yubin, Song Juanli et al. Current state and development trend of research on environmental effect of level terrace. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(5): 28-31. [吴发启, 张玉斌, 宋娟丽 等. 水平梯田环境效应的研究现状及其发展趋势. 水土保持学报, 2003, 17(5): 28-31.]
- [3] Jiao Juying, Wang Wanzhong, Li Jing. Analysis on soil and water conservation benefit of level terrace under different rainfall condition in loess hilly region. Journal of Soil and Water Conservation, 1999, 5(3): 59-63. [焦菊英, 王万忠, 李靖. 黄土丘陵区不同降雨条件下水平梯田的减水减沙效益分析. 水土保持学报, 1999, 5(3): 59-63.]
- [4] Wu Faqi, Zhang Yubin, Wang Jian. Study on the benefits of level terrace on soil and water conservation. Science of Soil and Water Conservation, 2004, 2(1): 34-37. [吴发启, 张玉斌, 王健. 黄土高原水平梯田的蓄水保土效益分析. 中国水土保持科学, 2004, 2(1): 34-37.]
- [5] Kang Lingling, Bao Hongzhe. Analysis and confirm of the indexes of water storage and sediment trapping on the terrace of different type regions at the Loess Plateau. Science of Soil and Water Conservation, 2005, 3(2): 51-56. [康玲玲, 鲍宏喆. 黄土高原不同类型区梯田蓄水拦沙指标的分析与确定. 中国水土保持科学, 2005, 3(2): 51-56.]
- [6] Ran Dachuan, Luo Quanhua, Liu Bin et al. Effect of soil-retaining dams on flood and sediment reduction in middle reaches of Yellow River. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 5(5): 7-13. [冉大川, 罗全华, 刘斌 等. 黄河中游地区淤地坝减洪减沙及减蚀作用研究. 水利学报, 2004, 5(5): 7-13.]
- [7] Jiao Juyin, Wang Wanzhong, Li Jing et al. Silting land and sediment blocking benefit of check dam in hilly and gully region on the Loess Plateau. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(6): 302-306. [焦菊英, 王万忠, 李靖 等. 黄土高原丘陵沟壑区淤地坝的淤地拦沙效益分析. 农业工程学报, 2003, 19(6): 302-306.]
- [8] Sun Ruyong, Li Bo, Zhuge Yang et al. General Ecology. Beijing: Higher Education Press, 1993: 163-172. [孙濡泳, 李博, 诸葛阳 等. 普通生态学. 北京: 高等教育出版社, 1993: 163-172.]
- [9] Renard K G, Freimund J R. Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. J. Hydrol., 1994, 174: 287-306.
- [10] Yu B, Rosewell C J. A robust estimator of the R-factor for the universal soil loss equation. Transactions of the ASAE, 1996, 39: 559-561.
- [11] Ferro V, Porto P, Yu B. A comparative study of rainfall erosivity estimation for southern Italy and southeastern Australia. Hydrological Sciences Journal, 1999, 44: 3-24.
- [12] Richardson C W, Foster G R. Estimation of erosion index from daily rainfall amount. Transactions of the ASAE, 1983, 26: 153-156.
- [13] Zhang Wenbo, Xie Yun, Liu Baoyuan. Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts. Scientia Geographica Sinica, 2002, 22(6): 705-711. [章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究. 地理科学, 2002, 22(6): 705-711.]
- [14] Mu Xingmin, Dai Hailun, Gao Peng et al. Spatial-temporal characteristics of rainfall erosivity in northern Shaanxi region in the Loess Plateau. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(3): 37-43. [穆兴民, 戴海伦, 高鹏 等. 陕北黄土高原降雨侵蚀力时空变化研究. 干旱区资源与环境, 2010, 24(3): 37-43.]
- [15] Sharpley A N, Williams J R. EPIC-erosion/productivity impact calculator: 1. Model documentation. United States Department of Agriculture, No.1768, Part 1, 1990: 235pp.
- [16] McCool D K, Brown L G, Foster G R et al. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation. Transactions of the ASAE, 1987, 30(5): 1387-1396.
- [17] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes. Transactions of the ASAE, 1994, 37(6): 1835-1840.
- [18] Dang Weiqin, Wang Xiao, Ma Sanbao et al. Dam System Monitoring Method and Evaluation System Study in a Small Catchment of the Loess Plateau. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2008: 140-150. [党维勤, 王晓, 马三保 等. 黄土高原小流域坝系监测方法及评价系统研究. 郑州: 黄河水利出版社, 2008: 140-150.]
- [19] 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). Washington D. C.: U.S. Department of Agriculture, 1997: USDA Agriculture Handbook No.703: 404.
- [20] Liu Baoyuan, Xie Yun, Zhang Keli. Soil Loss Prediction Model. Beijing: China Scientific & Technical Publishers, 2001: 90-113. [刘宝元, 谢云, 张科利. 土壤侵蚀预报模型. 北京: 中国科学技术出版社, 2001: 90-113.]
- [21] Liu B Y, Nearing M A, Shi P J. Slope length effects on soil loss for steep slopes. Soil Science Society of American Journal, 2000, 64 (5): 226-228.

- [22] Zhang Yan, Liu Baoyuan, Shi Peijun et al. Crop cover factor estimating for soil loss prediction. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(7): 1050-1056. [张岩, 刘宝元, 史培军 等. 黄土高原土壤侵蚀作物覆盖因子计算. *生态学报*, 2001, 21(7): 1050-1056.]
- [23] Zhang Yan, Liu Baoyuan, Zhang Qingchun et al. Effect of different vegetation types on soil erosion by water. *Acta Botanica Sinica*, 2003, 45(10): 1204-1209.
- [24] Hutchinson M F. New procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology*, 1989, 106(3/4): 211-232.
- [25] Van Remortel R, Hamilton M, Hicky R. Estimating the LS factor for RUSLE through iterative slope length processing of digital elevation data. *Cartography*, 2001, 30(1): 27-35.
- [26] Wei Xia, Li Xungui, Li Zhanbin et al. Study on the adjust-control effect of check dam on gravity erosion of slope-gully systems in the Loess Plateau. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition*, 2009, 41(6): 856-861. [魏霞, 李勋贵, 李占斌 等. 淤地坝对黄土高原坡沟系统重力侵蚀调控研究. *西安建筑科技大学学报: 自然科学版*, 2009, 41(6): 856-861.]
- [27] Yu Guoqiang, Li Zhanbin, Zhang Xia et al. Numerical simulation of gravitational erosion in slope-gully system on Loess Plateau. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(5): 809-816. [于国强, 李占斌, 张霞 等. 黄土高原坡沟系统重力侵蚀数值模拟研究. *土壤学报*, 2010, 47(5): 809-816.]
- [28] Li Tiejian. Simulation of gravitational erosion in river basins on Loess Plateau. *Journal of Tianjin University*, 2008, 41(9): 1136-1141. [李铁建. 黄土沟壑区流域重力侵蚀模拟. *天津大学学报*, 2008, 41(9): 1136-1141.]
- [29] Liu Shiliang, Wang Cong, Zhang Xilai et al. Soil and water conservation effect of different terrace configurations in land consolidation project. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(4): 59-68. [刘世梁, 王聪, 张希来 等. 土地整理中不同梯田空间配置的水土保持效应. *水土保持学报*, 2011, 25(4): 59-68.]

Influences of Terrace Construction and Check Dam Silting-up on Soil Erosion

GAO Haidong¹, LI Zhanbin^{1,2}, LI Peng², JIA Lianlian³, ZHANG Xiang²

(1. Institute of Soil and Water Conservation, CAS and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China)

(2. Key Lab of Northwest Water Resources and Environment Ecology of Ministry of Education, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

(3. Upper and Middle Yellow River Bureau, Yellow River Conservancy Commission of the Ministry of Water Resources, Xi'an 710021, China)

Abstract: To research the terrace construction and check dam silting-up soil erosion effects, this paper firstly established a generalized model consisting of terrace, slope land, steep slope grassland, and check dam land in hilly and gully region of Loess Plateau, defined the pioneer phase, transitional phase and climax phase. Then it used the revised universal soil loss equation (RUSLE) to analyze soil erosion modulus in different periods. The results showed that pioneer phase and climax phase are the limit state of soil and water conservation. In pioneer phase, soil erosion modulus is $299.56 \text{ t} \times \text{hm}^{-2} \times \text{a}^{-1}$ and $136.64 \text{ t} \times \text{hm}^{-2} \times \text{a}^{-1}$ in the upper and lower parts of demarcation of hill and gully slope, respectively, and the average erosion modulus is $229.74 \text{ t} \times \text{hm}^{-2} \times \text{a}^{-1}$. In climax phase, soil erosion modulus is $39.10 \text{ t} \times \text{hm}^{-2} \times \text{a}^{-1}$ and $1.10 \text{ t} \times \text{hm}^{-2} \times \text{a}^{-1}$ in the upper and lower parts, and the average erosion modulus is $22.81 \text{ t} \times \text{hm}^{-2} \times \text{a}^{-1}$. In the transitional phase, with the increase of the ratio of the terrace, soil erosion modulus index is reduced at upper Mao sideline; with the increase of the sedimentation of the height, soil erosion modulus shows a linear decrease at lower Mao sideline.

Key words: soil and water conservation; Loess Plateau; RUSLE; succession