

基于 KINEROS2 模型的降雨和坡长因子对土壤侵蚀过程影响的研究

安妙颖¹, 韩玉国^{1,2}, 吴玉恒¹, 周玥¹, 庞丹波¹, 孙若修¹

(1. 北京林业大学水土保持学院, 水土保持国家林业局重点实验室, 北京 100083;

2. 北京市水土保持工程技术研究中心, 北京 100083)

摘要: 以不同坡长(1,5,10,15,20 m)径流小区在不同降雨强度(25,50,75 mm/h)下人工模拟降雨试验为基础,通过 KINEROS2 模型对坡面侵蚀过程及侵蚀量进行模拟,对比分析不同坡长、降雨强度及其交互作用对坡面土壤侵蚀过程及侵蚀量的影响,并评价 KINEROS2 模型的模拟效果及适用性。结果表明:坡长与总径流量呈一元线性关系($R^2 > 0.990$),与总侵蚀量呈幂函数关系($R^2 > 0.900$);降雨强度与总径流量、总侵蚀量之间呈倍数关系增加,且总侵蚀量的增率是总径流量增率的 2~3 倍;坡长与降雨强度之间存在交互作用,坡长、降雨强度和降雨强度-坡长交互作用与径流量、侵蚀量呈显著相关关系,并在坡面径流和侵蚀过程中表现为正效应。坡面径流量主要受坡长、降雨强度和降雨强度-坡长交互作用三者综合影响。坡面侵蚀量主要受坡长和降雨强度-坡长交互作用的影响极显著,受降雨强度的影响较显著。KINEROS2 模型对径流过程的模拟优于侵蚀过程,对总侵蚀量的模拟优于总径流量,说明 KINEROS2 模型更适于对径流过程及总侵蚀量的模拟。从总体来看,KINEROS2 模型对径流小区坡面土壤侵蚀过程及侵蚀量模拟效果较好,说明 KINEROS2 模型在中国西北干旱半干旱地区小区尺度上有较好的适用性。

关键词: KINEROS2 模型; 坡长; 降雨强度; 径流侵蚀

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)04-0025-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.04.005

Effects of Rainfall and Slope Length Factors on Soil Erosion Process Based on KINEROS2 Model

AN Miaoying¹, HAN Yugu^{1,2}, WU Yuheng¹, ZHOU Yue¹, PANG Danbo¹, SUN Ruoxiu¹

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation, Beijing 100083; 2. Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation, Beijing 100083)

Abstract: In this study, the soil erosion process and erosion amount were simulated by KINEROS2 model according to the artificial simulation test of runoff plots with different slope length (1,5,10,15,20 m) under the different rainfall intensity (25,50,75 mm/h). The effects of different slope length, rainfall intensity and their interactions on soil erosion process and erosion amount were analyzed contrastively, and the simulation results and applicability of the KINEROS2 model were also evaluated. The results showed that the slope length was linear with the total runoff ($R^2 > 0.990$), and a power function relationship existed between slope length and total erosion amount ($R^2 > 0.900$). The total runoff and total amount of erosion increased in multiplies as rainfall intensity increased, and the increasing rate in total amount of erosion was 2~3 times higher than that of total runoff. There was an interaction between slope length and rainfall intensity, which showed a positive effect on slope runoff and erosion process. The effects of slope length and the interactions of rainfall intensity-slope length on slope erosion amount were more obvious than that of rainfall intensity. The simulation of runoff process and total erosion amount based on KINEROS2 model were better than that of erosion process and total runoff, respectively, indicating that the KINEROS2 model was more suitable for the simulation of runoff process and total erosion amount. Generally, the KINEROS2 model had a better simulation effect on slope soil erosion process and erosion amount of runoff plots, which showed that

收稿日期: 2017-02-17

资助项目: 国家自然科学基金项目“不同地形特征下坡面氮磷迁移的物理过程解析与模拟”(51309008)

第一作者: 安妙颖(1992—),女,硕士研究生,主要从事水土养分流失与模拟研究。E-mail: miaoying_an@bjfu.edu.cn

通信作者: 韩玉国(1979—),男,副教授,主要从事水土养分流失与模拟研究。E-mail: yghan@bjfu.edu.cn

KINEROS2 model had good applicability in plots scale in arid and semi-arid areas, northwest China.

Keywords: KINEROS2 model; slope length; rainfall intensity; runoff erosion

水土流失是全球性环境问题,它不仅制约农业经济的可持续发展,而且严重影响社会生态环境建设^[1]。坡面作为水土流失的初始单元,主要受降雨强度、坡长、降雨历时等因素影响^[2]。其中,降雨强度是坡面侵蚀的根本原因与原动力,是影响坡面侵蚀的主要降雨因素。坡长是影响坡面径流汇水过程、侵蚀类型、产沙过程等的主要地形因素。众多国内外学者已经对降雨强度、坡长与坡面径流量和侵蚀量的关系做了大量研究^[3-5],但坡长与降雨强度之间的交互作用对坡面径流量和侵蚀量的影响却鲜有研究。近年来,国内外学者开始采用模型模拟的方式研究坡面土壤侵蚀,如 WEPP、SWAT 等模型^[6-7],但这些模型普遍存在运行所需数据量大、参数多、对数据完整性要求高、修正复杂等问题。本文采用的 KINEROS2 (A Kinematic Runoff and Erosion Model) 模型是基于运动学上面向事件的分布式径流侵蚀模型,在模拟过程中所需数据量小,适应不同土壤类型,并且能充分考虑地表植被截流、土壤下渗、地表径流和侵蚀等因素对径流侵蚀过程的影响。因此,与传统的经验模型相比,KINEROS2 模型具有更广阔的应用空间。我国学者史志华等^[8]应用 KINEROS2 模型对土质道路侵蚀过程进行了模拟,发现 KINEROS2 在模拟径流总量上效果较好,在土壤侵蚀过程的模拟中模拟结果相对较差;Goodrich 等^[9]在 KINEROS2 模型的应用与校正中发现 KINEROS2 模型在阿曼干旱半干旱地区流域尺度上有较好的适用性。但是通过运用 KINEROS2 模型模拟不同坡长和降雨强度下坡面径流侵蚀过程的变化特征还有所欠缺,同时也缺乏 KINEROS2 在中国西北干旱半干旱区以及小区尺度的应用。

因此,本文在现有研究成果的基础上,通过将人工模拟降雨试验和 KINEROS2 模型模拟相结合,探讨 KINEROS2 模型对径流侵蚀过程和径流侵蚀量的模拟效果及适用性,并通过统计学的方法研究不同坡长和降雨强度及其交互作用与坡面径流量、侵蚀量的关系,为 KINEROS2 模型进一步在中国干旱半干旱地区的应用提供依据,也为坡面径流泥沙迁移理论和预测坡面水土流失提供科学理论与方法。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

该试验于 2015 年 6—8 月在内蒙古呼和浩特市和林格尔县试验基地开展。试验地位于东经 111°41', 北纬 40°12', 平均海拔 1 050 m, 属内蒙古高原向黄土高原的过渡地带, 属中温带大陆性季风气候, 年平均气温 6.2

℃, 最高气温为 37.9 ℃, 最低气温为 -31.7 ℃。年平均降水分布极不均匀, 大部分降水发生在每年的 7—9 月, 多年平均降雨量为 417.5 mm, 一天内最大降雨量为 99 mm。试验区土壤类型为全新世以来由玄武岩基岩风化发育的暗栗钙土。土壤质地为砂壤土, 其中黏土占 89.55%, 粉粒占 5.43%, 砂粒占 5.02%, pH 为 8.40, 土壤容重为 1.52 g/cm³。

1.2 试验设计

本试验共布设了 5 个不同坡长的径流小区, 每个坡长设 3 个径流小区, 坡长分别为 1.5, 10, 15, 20 m, 坡宽均为 5 m, 坡度均为 5°, 小区内均无植被覆盖。试验采用侧喷式降雨装置。每个试验小区从坡面底部开始在试验小区的两个长边上每隔 5 m 并列设置 3 个喷头(型号: hunter-A), 喷头分别绑在 3 根铁管的 3 m 高处, 喷头间距为 5 cm, 位于坡面四个角上的喷头旋转角度设为 90°, 坡面中间的喷头旋转角度设为 180°。试验中每个喷头的降雨强度设为 25 mm/h, 通过调节喷头打开数量控制降雨强度, 降雨强度设置为 25, 50, 75 mm/h 3 个水平。试验设定每个降雨强度为一组, 在 3 个不同径流小区同时试验。每次降雨试验前 1 天对坡面进行 25 mm/h 雨强的预降雨, 至坡面即将产流为止。每组试验之间需将径流小区用塑料布覆盖并静置 7~10 d, 以减少自然降水及蒸发的影响, 使土壤水分分布接近自然状态。此外, 每组试验前需将径流小区内因降雨产生的坡面细沟填平, 以消除上场降雨对地表造成的影响。试验中, 雨滴的中数直径为 1.4 mm, 速度为 5.2 m/s, 雨滴能量为 13.52 J/(mm·m²), 均匀度为 75%。

降雨开始后, 记录降雨时间。坡面产流时间以坡面径流汇流至 PVC 管出口处为准, 记录产流时间。产流开始后设置不等间距采样间隔, 采用径流桶收集产流后 0~1, 2~3, 5~6, 10~11, 20~21, 30~31 min 的径流样。测定径流样及总样的体积, 在搅拌均匀后取 500 mL 水沙混合样, 经静置、烘干后, 计算产流产沙总量。

1.3 KINEROS2 模型

KINEROS2 是由美国农业部农业研究中心于 20 世纪 70 年代开发的基于次降雨的分布式物理模型, 它可以用来描述小型农业和城市流域中地表截流、入渗、地表径流、土壤侵蚀等的物理过程^[10]。在 KINEROS2 模型中, 流域被划分为串联形式的坡面和沟道, 主要由矩形坡面、开放式梯形沟道、封闭式圆形管道和小型蓄水池组成。模型中流域的每一个组分均有相应的输入参数, 通过设置参数描述其地形特征和

降雨特征。模型主要通过输入描述地形特征的文件(.PAR)和描述降雨量的文件(.PRE),采用一维运动力学偏微分方程和有限差分方法进行模拟运算,运算结果由文件(.OUT)输出。输出文件内容包括产流、产沙过程值、径流误差值、泥沙产量、洪峰流量、总入渗量、总降雨量、总径流量等。因本试验不涉及沟道部分,因而只采用模型中的坡面组分进行径流量与侵蚀量的模拟。

模型参数设置中,从5个坡长的径流小区中各选择一个来设置 KINEROS2 模型的参数。通过参照模型使用经验,并结合实际相应修改输入参数,将输出结果与实际观测结果进行对比,修正模型参数。参数修正过程中范围如表1所示。根据模型使用经验^[11],被修正的参数包括:曼宁系数(Man)、土壤密度(D_s)、土壤孔隙度(Por)、土壤饱和导水率(K_s)、毛细管张力(G)、溅蚀系数(S_p)、土壤粘结系数(Coh)等。

表1 KINEROS2 模型参数取值范围

参数	取值范围	默认值
土壤密度/($g \cdot cm^{-3}$)	2.60~2.80	2.65
土壤孔隙度/%	0.351~0.555	0.458
饱和导水率/($mm \cdot h^{-1}$)	0.20~12.00	—
毛细管张力/mm	30~540	0
雨滴溅蚀系数/($s \cdot m^{-1}$)	500~6000	—
土壤粘结系数/(s^{-1})	0.001~0.1	0.05
曼宁系数	0.01~0.1	0.035

模型检验采用模型修正后的参数模拟各个径流小区的次降雨试验,将模拟值与实测值对比,模拟结果如表2所示。模拟效果采用相对误差(Relative Error, RE)来评价。

1.4 数据处理

试验数据用 SigmaPlot 12.5 软件作图,用 R 语言进行一元线性回归及多元线性回归,采用 SPSS 20.0 统计软件进行偏相关分析和方差分析($\alpha=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 坡面径流过程和侵蚀过程

2.1.1 径流过程分析 基于修正后的模型参数,利用 KINEROS2 模型分别模拟 1,5,10,15,20 m 坡长径流小区在 25,50,75 mm/h 降雨强度下单次降雨的径流过程,模拟结果与实测数据见图1。由图1可知,试验实测值与模型模拟的径流过程趋势一致,呈先增加后趋于稳定的变化规律。这主要是因为降雨初期,坡面径流主要以入渗和地表径流为主,当地表土壤饱和之后,降雨主要以蓄满产流为主^[12]。从图1还可看出,降雨强度对坡面产流时间有较大影响,随着降雨强度增加,坡面产流时间提前,而在相同降雨强度下坡长对坡面产流时间的影响较小。当降雨强度为 25 mm/h 时,坡面产流时间均在 11 min 左右,随着降雨强度增加到 50 mm/h,坡面产流时间与降

雨强度为 25 mm/h 时相比提前了将近 1/2,在降雨强度为 75 mm/h 时产流时间与 25 mm/h 相比提前了约 75%,说明坡面产流时间受降雨强度影响较大。同时,随着坡长的增加,坡面面积增大,单位时间内坡面径流量也越大。当坡长由 1 m 增加到 5 m 时,径流量增加了 4.30~4.53 倍,坡长由 5 m 增加到 10 m 时,坡面径流增加了 1.54~1.90 倍,坡长由 10 m 增加到 15 m 时,径流量增加了 1.36~1.59 倍,坡长由 15 m 增加到 20 m 时径流量增加了 1.21~1.32 倍,说明随着坡长的增加径流量增长率有减缓的趋势。

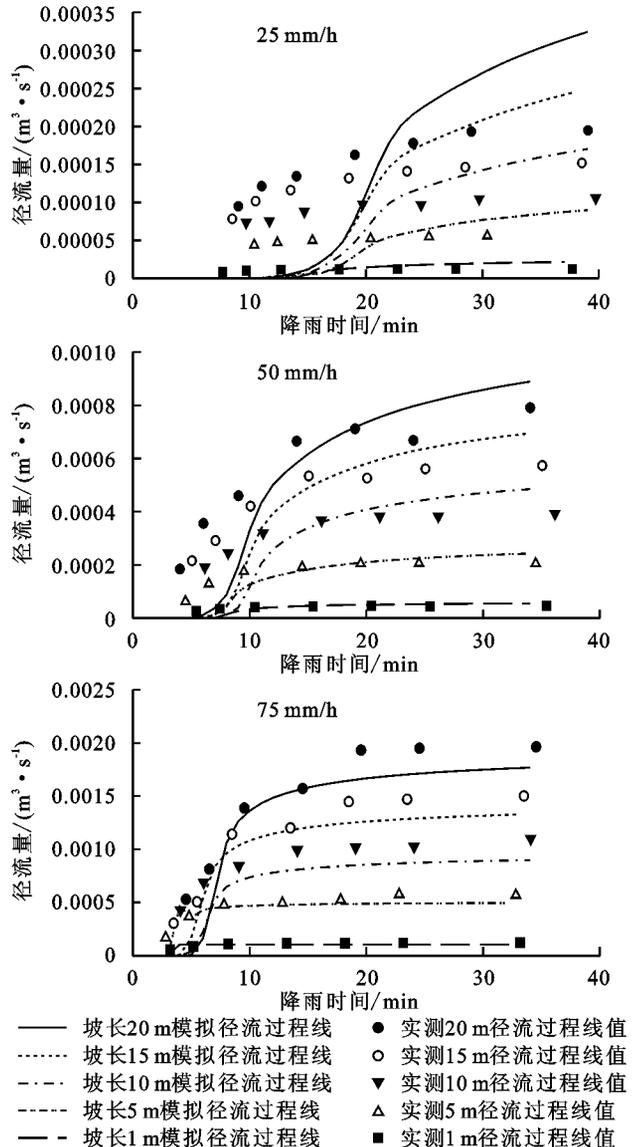


图1 不同降雨强度、不同坡长径流小区的径流过程模拟值与实测值对比

2.1.2 侵蚀过程分析 通过 KINEROS2 模型分别模拟 1,5,10,15,20 m 坡长条件径流小区在 25,50,75 mm/h 降雨强度下单次降雨的侵蚀过程,模拟结果与实测数据见图2。由图2可以看出,当坡长为 1,5,10 m 时实测数据与模拟过程趋势十分接近,相对误差为 0.17%~28.91%;当坡长为 15,20 m 时,实测数据相对误差增大到 5.60%~33.66%,说明

KINEROS2 模型对坡面侵蚀过程量的模拟在 1, 5, 10 m 的坡长时优于 15 m 和 20 m, 但总体增长趋势一致。坡面侵蚀过程均表现为先急速增长后趋于平缓的趋势, 且坡长越长增率越大。当坡长一定时, 随着降雨强度的增加, 坡面侵蚀量增加了 2.20~7.00 倍。当降雨强度一定时, 随着坡长的增加, 坡面侵蚀量增加了 1.30~10.80 倍, 主要原因是坡长越长, 坡面片蚀面积越大, 更多坡面泥沙随径流流出坡面, 导致坡面侵蚀量随坡长的增加而增加^[13]。当降雨强度与坡长同时增大时, 坡面侵蚀量增加为原来的 6.70~54.10 倍, 且降雨强度和坡长越大, 侵蚀量增量越大。综上可知, 随着降雨强度和坡长的增加, 坡面侵蚀量均有所增大, 但两者综合影响远大于降雨强度和坡长单独增加时的增加量, 说明坡面侵蚀过程中坡长和降雨强度两因子之间存在交互作用。

长对坡面产流有重要的影响。由表 2 可知, 在不同的降雨强度下, 坡面总产流量随着坡长的增加而增加。将坡长与实测总径流量作回归分析, 得出坡长(X)与坡面总产流量(Y)呈一元线性关系(表 3), 表达式为: $Y=a+bX$ 。从回归方程来看, 降雨强度越大, 回归方程的斜率也越大, 说明降雨强度对坡面总径流的影响随着降雨强度的增大而增大, 与实际经验相吻合。从表 3 可以看出, 模型对坡面总径流量的模拟值与实测值接近, 相对误差为 0.16%~11.31%, 说明 KINEROS2 模型对坡面总径流量的模拟效果较好。

表 2 不同坡长、不同降雨强度下总径流量、总侵蚀量实测值与模拟值对比

坡长/m	项目	降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	实测值	模拟值	RE/%
1	径流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	25	0.021	0.023	6.97
		50	0.078	0.016	0.16
	侵蚀量/ kg	25	0.082	0.080	1.90
		50	0.271	0.270	0.35
	径流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	75	0.203	0.187	8.10
		75	0.758	0.762	0.27
5	径流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	25	0.097	0.095	2.55
		50	0.336	0.326	3.10
	侵蚀量/ kg	25	0.053	0.052	0.62
		50	2.525	2.500	0.98
	径流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	75	7.507	7.600	1.24
		75	0.176	0.175	0.67
10	径流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	25	0.641	0.639	0.28
		50	1.404	1.414	0.73
	侵蚀量/ kg	25	1.553	1.570	1.70
		50	27.310	27.320	0.03
	径流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	75	61.159	61.040	0.19
		75	0.240	0.241	0.16
15	径流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	25	0.892	0.888	0.43
		50	2.232	1.980	11.31
	侵蚀量/ kg	25	11.961	11.940	0.17
		50	84.171	83.870	0.36
	径流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	75	320.741	321.190	0.14
		75	0.303	0.309	2.12
20	径流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	25	1.084	1.120	3.37
		50	2.961	2.717	8.25
	侵蚀量/ kg	25	17.391	17.370	0.12
		50	116.433	112.900	3.03
	径流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	75	560.942	557.870	0.55
		75	560.942	557.870	0.55

2.2.2 坡长与总侵蚀量的关系 由表 2 可知, 坡面总侵蚀量随着坡长的增加急剧增加。经拟合得出, 坡面总侵蚀量与坡长间呈幂函数关系(表 3), 其表达式为: $m=a \times l^b$ 。式中: m 为坡面产沙总量(kg); l 为坡长(m)。此外, 随着降雨强度的增加, 幂函数常数项 a 、 b 均在增加, 也证实了随着降雨强度的增加产沙量增加。通过将总侵蚀量的模拟值与实测值进行对比, 从表 2 还可发现, KINEROS2 模型能真实反映坡面实际产沙的情况, 且 KINEROS2 对总侵蚀量的模拟

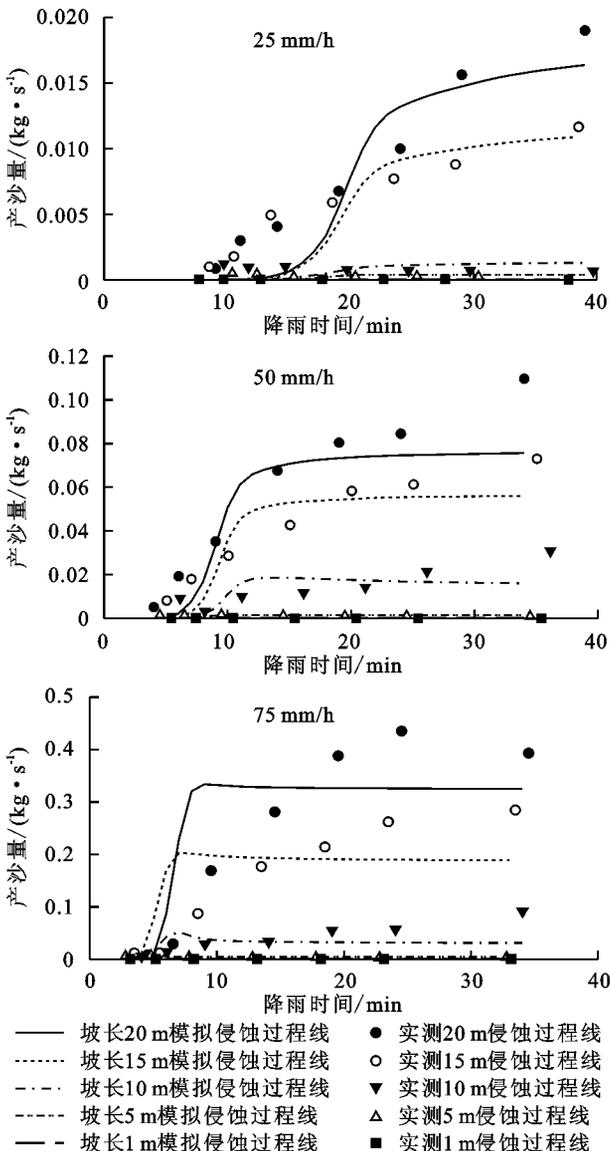


图 2 不同降雨强度、不同坡长径流小区的侵蚀过程模拟值与实测值对比

2.2 坡长与总径流量和总侵蚀量的关系

2.2.1 坡长与总径流量的关系 在降雨过程中, 坡

(相对误差为 0.03%~3.03%)效果优于总径流量(相对误差为 0.16%~11.31%)。

表3 不同坡长与坡面总径流量、总侵蚀量关系

降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	总径流量		总侵蚀量	
	回归方程	R ²	回归方程	R ²
25	$Y=0.018+0.015X$	0.992	$m=0.055I^{1.786}$	0.920
50	$Y=0.062+0.533X$	0.990	$m=0.194I^{2.113}$	0.964
75	$Y=0.091+0.142X$	0.995	$m=0.489I^{2.239}$	0.955

2.3 降雨强度与总径流量和总侵蚀量的关系

2.3.1 降雨强度与总径流量的关系 从表2可以看出,随着降雨强度的增大,坡面总径流量增加,尤其当降雨强度从 50 mm/h 增加到 75 mm/h 时,总径流量的增量最大。当降雨强度为 25 mm/h 时,降雨强度对坡面总产流量影响不大,此时坡长是产流的主导因子;当降雨强度增加到 50 mm/h,坡面总产流量与 25 mm/h 强度时相比分别增加了 3.63, 3.45, 3.64, 3.70, 3.58倍;当降雨强度增加到 75 mm/h 时,坡面总产流与 25 mm/h 相比增加了 9.46, 9.34, 7.97, 9.27, 9.79 倍,说明当降雨强度到达一定数值时对坡面的总产流量有决定性的作用,成为坡面产流的主导因素。表2中不同降雨强度坡面总产流量的模拟值与实测值增长趋势一致,在 25 mm/h 和 50 mm/h 雨强时,模拟相对误差在 0.16%~6.97%之间,而在 75 mm/h 雨强时相对误差为 0.73%~11.31%,说明 KINEROS2 模型对坡面总径流量的模拟误差随着降雨强度的增加有增加的趋势。

2.3.2 降雨强度与总侵蚀量的关系 从表2可以看出,随着降雨强度的增大坡面总产沙量急剧增加。当降雨强度为 25 mm/h,雨滴能量较小,对坡面造成的土壤侵蚀较小,产沙量较低;当降雨强度为 50 mm/h,坡面总产沙量分别增加到 25 mm/h 降雨强度的 3.32, 4.73, 17.58, 7.03, 6.69 倍;当降雨强度为 75 mm/h 时,坡面总产沙量增加到 25 mm/h 时的 9.29, 14.08, 39.37, 26.82, 32.25 倍。KINEROS2 模型对不同降雨强度的坡面总产沙量模拟值与实测值增长趋势一致,误差较小。KINEROS2 模型对 25 mm/h 雨强下侵蚀量模拟相对误差在 0.12%~1.90%之间,对 50 mm/h 雨强下侵蚀量模拟相对误差在 0.03%~3.03%之间,对 75 mm/h 雨强时的降雨试验模拟效果最佳,相对误差在 0.14%~1.24%之间。此外,KINEROS2 模型对坡面总侵蚀量的模拟误差随着降雨强度的增加有减小的趋势。

2.4 降雨强度和坡长对坡面侵蚀的综合影响

根据已有的交互分析方法^[14],通过构建带 $X_1 X_2$ 项的回归模型 $Y=aX_1+bX_2+cX_3 X_2+e$ 来分析两个自变量间的交互效应。式中:Y 为因变量; X_1 、 X_2 为主效应项; $X_1 X_2$ 为交互效应项; a 、 b 、 c 为变量系

数; e 为随机误差。对建立的回归模型进行 F 检验,当 F 检验达到 $P<0.05$ 时,认为因变量与自变量之间存在显著线性关系,即回归方程显著。基于上述理论,分别以总径流量(R)和总侵蚀量(S)作为因变量,讨论分析降雨强度(I)和坡长(L)之间是否存在显著的交互效应。利用 R 语言软件对降雨强度(I)、坡长(L)、降雨强度—坡长交互作用(LI)进行多元线性回归方程拟合得到:

$$R=0.675I+0.573L+0.426LI-4.44\times 10^{-11} \\ R^2=0.966 \quad (1)$$

$$S=0.495I+0.564L+0.535LI+2.22\times 10^{-11} \\ R^2=0.849 \quad (2)$$

式中: R 为坡面总径流量(m^3); S 为坡面总侵蚀量(kg); I 为降雨强度(mm/h); L 为坡长(m);LI 为降雨强度—坡长交互作用。

公式(1)和公式(2)为将数据标准化后得到的坡面总径流量、总侵蚀量与降雨强度、坡长及降雨强度—坡度交互作用的标准化方程,拟合方程的 F 检验均达到 $P<0.01$ 极显著水平,说明降雨强度(I)与坡长(L)之间存在交互作用。回归方程表明,降雨强度、坡长、降雨强度—坡长交互作用在坡面径流量和侵蚀量变化过程中均起促进作用。

为了深入探讨降雨强度和坡长相互作用对坡面侵蚀的综合影响,分别对降雨强度(I)、坡长(L)、降雨强度—坡长交互作用(LI)与坡面产流时间、总径流量和总侵蚀量进行偏相关分析,采用双侧检验来检验其显著性。由表4可知,坡面产流时间与降雨强度的相关关系极为显著(相关系数为 0.891, $P<0.01$),而与坡长、降雨强度—坡长交互作用不显著,说明降雨强度对坡面产流时间起决定性作用,坡长与降雨强度—坡长交互作用对坡面产流时间影响较小。坡面径流量与降雨强度、坡长和降雨强度—坡长交互作用相关关系均极显著(相关系数分别为 0.965, 0.952, 0.918, $P<0.01$)。在降雨过程中,降雨量和坡面面积对坡面径流量有重要影响,其中降雨量随着降雨强度的增加而增加,坡面面积随着坡长的增加而增加,降雨强度—坡长交互作用共同促进径流量的增加,三者共同影响径流量。坡面侵蚀量与坡长、降雨强度—坡长交互作用关系最为密切,降雨强度次之,其中坡长和降雨强度—坡长交互作用对坡面侵蚀量影响极显著($P<0.01$),降雨强度对侵蚀量的影响较显著($P<0.05$),表明 3 个因素在坡面侵蚀过程中均起主导作用。坡长主要通过增加坡面承雨面积和径流流路来影响径流侵蚀力,降雨强度主要通过增加雨滴击溅侵蚀能力和增加地表径流紊动性来增加地表水层的侵蚀力。降雨强度与坡长因子共同作用更加剧了坡面侵蚀。

表 4 降雨强度、坡长及其交互作用与坡面总径流量、总侵蚀量的相关分析

项目	降雨强度(I)	坡长(L)	降雨强度-坡长(LI)
产流时间	-0.891**	-0.143	0.341
径流量	0.965**	0.952**	0.918**
侵蚀量	0.787*	0.824**	0.809**

注: * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$ 。

3 讨论

本研究发现, KINEROS2 模型能准确模拟次降雨下坡面径流过程和侵蚀过程, 且对径流过程线的模拟效果优于侵蚀过程。这与史志华等^[8]得出 KINEROS2 模型对土质道路的水文过程的模拟更接近实测值, 而对土壤侵蚀过程的模拟效果相对较差的结论相一致。这种现象可能是因为模型参数较多针对径流而设。本研究中对 KINEROS2 对次降雨下总径流量和总侵蚀量的模拟效果较好, 且对总侵蚀量的模拟优于总径流量, 说明 KINEROS2 模型能够准确反映单次降雨坡面径流和泥沙流失的总量。Goodrich 等^[9]认为 KINEROS2 模型可以通过输入准确的参数模拟产流产沙量, 并用来预测坡面的土壤侵蚀。Martínez-Carreras 等和 Morgan 等^[15-16]认为 KINEROS2 模型在侵蚀地区应用正确的模型参数值时具有较高的精度。本研究中采用径流小区作为试验对象, 不同于史志华和 Al-Qurashi 等^[8,11]对大流域和土质道路作为试验对象的研究, 说明 KINEROS2 在我国西北干旱半干旱地区小区尺度上也有较好的适用性。

坡长是造成水土流失的主要地形因子之一。本文通过研究坡长与总径流量、总侵蚀量之间的关系, 发现坡长与总径流量之间呈一元线性关系, 与总侵蚀量之间呈幂函数关系。该研究结果与许海超等^[17]通过室内试验得出的坡面累积径流量随坡长呈线性关系增大, 累积产沙量随坡长的增大而增大的结论一致。付兴涛等^[18]在对红壤区土壤侵蚀的研究中也发现坡面的产沙量与坡长之间存在幂函数增长的关系, 但增量有减少的趋势。这主要是因为红壤区土壤中矿物质含量高、粘性强、质地较粘重, 在土壤侵蚀过程中较砂壤土更容易发生沉积。一些学者认为随着坡长的增加, 径流量增加, 但侵蚀量减弱, 这可能是由于随着坡长的增加, 泥沙在迁移过程中进行一定的沉积, 加之土壤性质与地形因素的影响, 导致侵蚀量减小^[13]。

降雨强度对坡面水土流失的影响一方面通过雨滴击溅地表使土壤颗粒松散化后随径流迁移造成土的流失, 另一方面通过不同的降雨强度在一定的土壤入渗条件下产生不同的地表径流而造成坡面水的流失。本研究表明, 在降雨强度小于 50 mm/h 时, 坡面总径流量和总侵蚀量随着降雨强度的增加而增加, 此时增量由降雨强度和坡长共同影响。当降雨强度

超过 50 mm/h 时, 坡面的总径流量和总侵蚀量随降雨强度的增加大幅度增加, 此时降雨强度是造成坡面水土流失的主要因子。张会茹等^[19]通过人工模拟降雨试验得出坡面总径流量与总侵蚀量随着雨强的增大明显增大, 当雨强为 75 mm/h 时总侵蚀量远大于雨强为 50 mm/h 时; 李桂芳等^[20]认为降雨强度对坡面产流产沙的影响显著大于其他地形因子。这主要是因为当降雨强度增加时, 单位时间内降雨量增大, 当降雨量逐渐超过土壤的实际入渗能力达到饱和状态时, 大量的降雨都变成地表径流。同时随着降雨强度的增加, 雨滴对坡面稳定土壤表层侵蚀也随之增大, 因而侵蚀量增加。

本研究发现降雨强度与坡长之间存在交互作用, 且主效应坡长、降雨强度及其交互效应在坡面土壤侵蚀过程中均表现为正效应, 这与李桂芳等^[20]得出的降雨强度、坡长与径流量、侵蚀量之间存在交互作用的结论一致。本研究发现产流时间与降雨强度呈显著负相关关系(相关系数为 0.891), 说明降雨强度越大, 产流时间提前越显著; 而坡长及降雨强度-坡长交互作用对产流时间的影响并不显著, 说明降雨强度是影响产流时间的主导因子。这主要是因为降雨强度越大, 单位时间内降雨量越多, 坡面土壤到达饱和的时间越短, 导致产流时间提前。坡面径流量主要受坡长、降雨强度和降雨强度-坡长交互作用三者共同的影响。坡面侵蚀量受坡长和降雨强度-坡长交互作用的影响极显著, 受降雨强度的影响较显著, 说明降雨强度、坡长、降雨强度-坡长交互作用对坡面土壤侵蚀都有较大的影响。

4 结论

不同降雨强度对坡面产流产沙影响大有不同, 随着降雨强度的增大坡面总径流量、总侵蚀量均增大。降雨强度对坡面总侵蚀量的增率是坡面总径流量增率的两倍。降雨强度一定时, 坡长与总径流量呈一元线性关系, 与总产沙量呈幂函数关系。随着降雨强度的增大, 回归方程的系数明显增大。

通过分别建立的标准系数方程可知, 坡长与降雨强度之间存在交互作用, 且两个主效应与交互效应对径流量和侵蚀量的影响均表现为正效应。坡面径流量主要受坡长、降雨强度和降雨强度-坡长交互作用三者共同的影响。坡面侵蚀量受坡长和降雨强度-坡长交互作用的影响极显著, 受降雨强度的影响较显著。

KINEROS2 模型对径流过程的模拟优于侵蚀过程, 对总侵蚀量的模拟优于总径流量, 说明 KINEROS2 模型更适用于模拟径流过程及总侵蚀量。KINEROS2 模型对该地区径流小区模拟降雨试验效果较好, 说明 KINEROS2 模型在我国干旱半干旱地区的

小区尺度上也有较好的适用性,但是 KINEROS2 模型在该地区其他尺度(如:流域尺度等)及其他地区范围内的适用性仍需进一步研究。

参考文献:

- [1] 王全九,赵光旭,陶汪海,等. 径流冲刷条件下坡地养分随地表径流迁移数学模型[J]. 农业机械学报,2016,47(7):189-195.
- [2] 李秀霞,倪晋仁. 土壤侵蚀及其影响因素空间相关性分析[J]. 地理科学进展,2009,28(2):161-166.
- [3] 孙飞达,王立,龙瑞军,等. 黄土丘陵区不同降雨强度对农地土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持研究,2007,14(2):16-18.
- [4] 霍云梅,毕华兴,朱永杰,等. 模拟降雨条件下南方典型粘土坡面土壤侵蚀过程及其影响因素[J]. 水土保持学报,2015,29(4):23-26.
- [5] 郑伟,王中美. 贵州喀斯特地区降雨强度对土壤侵蚀特征的影响[J]. 水土保持研究,2016,23(6):333-339.
- [6] 王建勋,郑粉莉,江忠善,等. WEPP 模型坡面版在黄土丘陵沟壑区的适用性评价:以坡长因子为例[J]. 水土保持通报,2007,27(2):50-55.
- [7] 刘伟,安伟,杨敏,等. 基于 SWAT 模型的三峡库区大宁河流域产流产沙模拟及土壤侵蚀研究[J]. 水土保持学报,2016,30(4):49-56.
- [8] 史志华,方怒放,李璐,等. 应用 KINEROS2 模型对土质道路侵蚀过程的模拟[J]. 地理研究,2010,29(3):408-415.
- [9] Goodrich D C, Burns I S, Unkrich C L, et al. KINEROS2/AGWA: Model use, calibration, and validation [J]. Transactions of the Asabe,2012,55(4):1561-1574.
- [10] Ziegler A D, Giambelluca T W, Sutherland R A. Erosion prediction on unpaved mountain roads in northern Thailand: Validation of dynamic erodibility modelling using KINEROS2[J]. Hydrological Processes,2001,15

(3):337-358.

- [11] Al-Qurashi, Aisha, McIntyre, et al. Application of the Kinos2 rainfall-runoff model to an arid catchment in Oman[J]. Journal of Hydrology,2008,355(1/4):91-105.
- [12] 詹道江,徐向阳,陈元芳. 工程水文学[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010:125-126.
- [13] 于文华,闫训海. 坡长对水土流失影响的研究现状及展望[J]. 中国水土保持,2012(7):46-47.
- [14] Toothaker L E. Multiple regression: Testing and interpreting interactions[J]. Journal of the Operational Research Society,1994,45(1):119-120.
- [15] Martinez-Carreras N, Soler M, Hernández E, et al. Simulating badland erosion with KINEROS2 in a small Mediterranean mountain basin (Vallcebre, Eastern Pyrenees)[J]. Catena,2007,71(1):145-154.
- [16] Morgan R P C, Quinton J N, Smith R E. The European soil erosion model (EUROSEM): A dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments[J]. Earth Surface Processes and Landforms,2015,23(6):527-544.
- [17] 许海超,李子君,林锦阔,等. 燕山土石山区降雨和下垫面条件对坡面侵蚀产沙的影响[J]. 山地学报,2016,34(1):46-53.
- [18] 付兴涛,张丽萍. 红壤丘陵区坡长对作物覆盖耕地土壤侵蚀的影响[J]. 农业工程学报,2014,30(5):91-98.
- [19] 张会茹,郑粉莉. 不同降雨强度下地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响[J]. 水土保持学报,2011,25(3):40-43.
- [20] 李桂芳,郑粉莉,卢嘉,等. 降雨和地形因子对黑土坡面土壤侵蚀过程的影响[J]. 农业机械学报,2015,46(4):147-154.

(上接第 10 页)

- [7] 李秋艳,蔡强国,方海燕. 风水复合侵蚀与生态恢复研究进展[J]. 地理科学进展,2010,29(1):65-72.
- [8] 海春兴,史培军,刘宝元,等. 风水两相侵蚀研究现状及我国今后风水蚀的主要研究内容[J]. 水土保持学报,2002,16(2):50-52.
- [9] 杨岩岩,刘连友,曹恒武. 沙漠—黄土过渡带风水复合侵蚀营力特征:以靖边县为例[J]. 干旱区研究,2012,29(4):692-698.
- [10] 王涛,屈建军,姚正毅,等. 北方农牧交错带风水蚀复合区水土流失现状与综合治理对策[J]. 中国水土保持科学,2008,6(1):28-36.
- [11] 邹亚荣,张增祥,王长有,等. 中国风水侵蚀交错区分布特征分析[J]. 干旱区研究,2003,20(1):67-70.
- [12] 汤珊珊,李占斌,任宗萍,等. 覆沙坡面产流产沙过程试验研究[J]. 水土保持学报,2015,29(5):25-28.

- [13] Breshears D D,Whicker J J,Johansen M P,et al. Wind and water erosion and transport in semi-arid shrubland, grassland and forest ecosystems: Quantifying dominance of horizontal wind-driven transport[J]. Earth Surface Processes and Landforms,2003,28(11):1189-1209.
- [14] Visser S M,Sterk G,Ribolzi O. Techniques for simultaneous quantification of wind and water erosion in semi-arid regions[J]. Journal of Arid Environments,2004,59(4):699-717.
- [15] 张庆印,樊军,张晓萍. 水蚀对风蚀影响的室内模拟试验[J]. 水土保持学报,2012,26(2):75-79.
- [16] 脱登峰,许明祥,郑世清,等. 风水两相侵蚀对坡面产流产沙特性的影响[J]. 农业工程学报,2012,28(18):142-148.
- [17] 张辉,李鹏,鲁克新,等. 东柳沟流域表土粒度分布特征及可风蚀性研究[J]. 水土保持学报,2016,30(5):272-278.