

DOI: 10.5846/stxb201707151285

任柯蒙, 卫伟, 赵西宁, 冯天骄, 陈蝶. 基于水蚀预报模型的黄土高原水平阶减流阻蚀效应模拟. 生态学报, 2018, 38(14): 5067-5077.

Ren K M, Wei W, Zhao X N, Feng T J, Chen D. Simulation of the effects of level bench terraces on water erosion reduction in the Loess Plateau based on the WEPP model. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(14): 5067-5077.

基于水蚀预报模型的黄土高原水平阶减流阻蚀效应模拟

任柯蒙^{1,2}, 卫伟^{2,*}, 赵西宁^{3,4}, 冯天骄⁵, 陈蝶⁵

1 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室 杨凌 712100

2 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室 北京 100085

3 西北农林科技大学水土保持研究所 杨凌 712100

4 中国科学院水利部水土保持研究所 杨凌 712100

5 中国科学院大学资源与环境学院 北京 100049

摘要:黄土高原是我国土壤侵蚀最严重的地区,如何合理开展坡改梯工程对防治水土流失具有重要意义。本研究应用 WEPP 模型模拟坡面尺度降雨—侵蚀过程,模拟分析径流小区(10 m 坡长)在不同坡度的水土流失特征和二阶、三阶水平阶在不同台面宽度(1, 1.5, 2 m)的减流阻蚀效应。结果表明:1) 坡面尺度上,径流量和侵蚀量随坡度增加而增加。坡度达到 20°时,径流量随坡度增加保持稳定,产沙量增加趋势渐缓;2) 与坡面小区对比,二阶和三阶水平阶随台宽增加对地表径流调控率分别从 6.5% 增加到 61.2%,从 10.1% 增加到 69.7%;二阶水平阶在中(1.0 mm/min)、大(1.5 mm/min)雨强下,台面宽度大于 1.5 m 时产沙量小于坡面,泥沙调控率从 1.1% 增加到 68.8%,三阶水平阶泥沙调控率从 1.4% 增加到 82.3%;3) 依据单位台宽减沙量,合理设计水平阶,使其减沙效益最大化。小雨强(0.5 mm/min)时,二阶、三阶水平阶的台面宽度达到 1.5 m 和 1 m 时可发挥优良的水土保持效果;中雨强(1.0 mm/min)时,台宽 1.5 m 的三阶水平阶效果最佳;大雨强(1.5 mm/min)时,则以 2 m 台宽的三阶水平阶效果更好。应用 WEPP 模型为定量评价工程措施的水土保持效益提供技术支撑。

关键词: WEPP 模型; 坡度; 水平阶; 径流量; 产沙量; 台面宽度

Simulation of the effects of level bench terraces on water erosion reduction in the Loess Plateau based on the WEPP model

REN Kemeng^{1,2}, WEI Wei^{2,*}, ZHAO Xining^{3,4}, FENG Tianjiao⁵, CHEN Die⁵

1 Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

2 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

4 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

5 School of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The Loess Plateau is the most heavily eroded area in China. It is thus significant to conduct reasonable micro-landform re-establishment measures that can prevent and control soil and water loss. In this study, the WEPP model was used to simulate the rainfall-erosion process at a hillslope scale. The major purpose was to analyze the characteristics of soil erosion on different slopes and the effect of water loss reduction on two and three stages of level terraces (field widths of 1

基金项目:国家自然科学基金项目(41371123);国家重点研发计划(2016YFC0501701);中国科学院青年创新促进会项目

收稿日期:2017-07-15; 网络出版日期:2018-04-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: weiwei@rcees.ac.cn

<http://www.ecologica.cn>

m, 1.5 m, and 2 m). The following results were captured. First, runoff and sediment yield increased with increasing gradients and precipitation intensities, whereas runoff remained stable and sediment yield increased slowly with increasing gradients before reaching a critical slope gradient (20°). Second, when the field widths increased, the regulation rates of runoff increased from 6.5% to 61.2% and from 10.1% to 69.7%, under medium (1.0 mm/min) and strong (1.5 mm/min) rainfall intensity, respectively. Level terraces with two stages and field width greater than 1.5 m captured less sediment than the slopes. The regulation rates of sediment yield of the two- and three-stage level terraces increased from 1.1% to 68.8% and from 1.4% to 82.3%, respectively. Third, in order to maximize the efficiency of sediment reduction, the table width of level benches should be appropriately designed. When suffering from small (0.5 mm/min), medium (1.0 mm/min), and strong (1.5 mm/min) rainfall, three-stage level terraces with field widths of 1.0 m (1.5 m two-stage level terrace), 1.5 m, and 2.0 m can play prominent roles in water erosion control. By using the WEPP model, the results of this study can provide technical support for quantifying the efficiencies of engineering measures on soil conservation.

Key Words: WEPP model; slope gradient; level terrace; runoff; sediment yield; field width

黄土高原是我国土壤侵蚀最为严重的地区,水蚀面积占整个区域的 45%,其中,剧烈侵蚀(土壤侵蚀模数 $\geq 15000 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$) 占总面积的 5.7%^[1-2]。造成土壤侵蚀的主要原因包括自然因素(气象、水文、生物、地形地貌、土壤等)和人为因素(耕作、工程措施等)两个方面^[3]。其中,影响土壤侵蚀的人为因素占主导地位,人类对自然地貌不合理开采加剧了土壤侵蚀^[4]。坡度作为主要地貌形态特征,对坡面流速、土壤入渗和稳定性有重要作用,随着坡度的增加,入渗量减小,径流量增加,径流流速提高,土壤稳定性降低^[5-6]。大量研究表明,在一定条件和范围内,存在临界坡度使得土壤侵蚀随坡度先增加后减小,但因试验条件、推导理论和考虑因素等不同,使得不同研究中得到的临界坡度相差较大,通过理论推导得出的临界坡度普遍大于 40° ,而通过径流小区试验和模拟降雨实验的临界坡度小于 30° ^[7]。

坡面尺度微地形改造是减少土壤侵蚀的有效措施之一,它是指人类根据科学研究或改造自然的实际需求,有目的地对下垫面原有形态结构进行二次改造和整理,通过增加地表起伏度、降低地面漫流的连通性,起到涵蓄水源的作用^[8]。水平阶作为一种微地形改造工程措施,通过调节降水在坡面的再分配过程,从而起到保水减沙、提高土壤肥力的作用,且因其操作简便,成本较低,被广泛应用于生态建设中^[9-11]。从机耕操作便利和田坎稳定性考虑,Ramos等^[12]对葡萄园庄园原始坡面进行优化设计的水平阶规格为田坎高(4.8 ± 3.0) m,台宽(6.2 ± 3.5) m。毛勇等^[13]从投资角度考虑发现坡度在 5° — 25° 时土坎水平梯田的最佳台面宽度为 1.5—4 m。可见人们会根据自己实际需求来设计不同水平阶规格,但是在一定的坡度条件下,如何优化设计水平阶台面宽度,从而最大限度的减少土壤侵蚀的定量研究十分稀缺。

水蚀预报模型(Water Erosion Prediction Project, WEPP)是基于物理过程模拟模型,以一天为步长,输入对侵蚀过程有重要影响的地形、土壤和植物特征,可模拟径流量和泥沙量^[14-15]。与其他侵蚀预报模型相比,WEPP模型可以更精确的预估坡面尺度水土流失情况^[16]。目前我国学者在WEPP模型方面做的研究表明:在单次降雨事件下模拟坡面侵蚀过程与实际侵蚀过程拟合度良好^[17]。为达到调控径流,阻沙防蚀的效果,我国学者从多个方面开展了系统研究:模拟了不同水平梯田设计参数下的侵蚀过程,认为WEPP模型对优化设计断面具有指导意义^[18];应用WEPP模型分析不同梯田配置的水土保持效应^[19];基于作物需水,将水窖与隔坡梯田结合,对隔坡梯田进行优化设计,对隔坡梯田设计具有参考价值^[20];运用WEPP模型,模拟不同坡度、不同种植密度的植物篱防蚀效果,提出不同坡度植物篱的最佳种植方式^[21]。但应用该模型评价水平阶的减流阻蚀效应及其台面宽度优化的研究较少。

综上所述,本研究旨在寻找临界坡度,基于水平阶台面宽度设计不同水平阶规格,分析不同水平阶规格对土壤侵蚀的影响规律,依据单位台宽减沙效益提出不同水平阶规格的最佳台面宽度,以期工程措施在流域治理及植被恢复中的设计与应用提供技术支撑。

<http://www.ecologica.cn>

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省定西市龙滩流域(35°43′—35°46′N, 104°27′—104°31′E), 流域面积 16.1 km², 海拔 1800—2200 m。该区属于典型的半干旱黄土丘陵区小流域, 地处半干旱大陆性气候区。据长期气候数据(1958 年—2016 年), 年平均气温 6.8 ℃, 平均无霜期 152 d, 平均日照时数 2052 h。年均降水量 386.3 mm, 降雨主要集中在 7—9 月份, 且多暴雨, 潜在蒸发量为 1649.0 mm, 年平均相对湿度 72%, 水分亏缺严重。该地区土质均一, 土壤以黄绵土为主。流域属典型草原地带, 本试验在柠条坡面径流小区上进行, 坡长 10 m, 坡度 26°, 坡向西偏南, 土壤容重(1.22±0.04) g/cm³, 植被覆盖度为 50%, 主要植被为骆驼蓬(*Peganum harmala*)、乌里苾芭(*Cymbaria dahurica*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus*)、长芒草(*Stipa bungeana*)。

1.2 数据库建立

WEPP 模型是包含水蚀相关参数最多的土壤侵蚀模型, 其参数的准确性对模拟结果尤为重要。WEPP 模型运行需要 4 个输入文件, 分别是气候文件、地形文件、土壤文件和管理措施文件。

气候文件源于 2015—2016 年龙滩自计式雨量计(HOBO, USA)观测站和自动气象站(Vantage Pro2, Davis, USA)的实测数据, 利用 WEPP 模型系统提供的独立程序断点气候生成器(BPCDG)生成气候文件。在情景设计中选择次降雨模式(single storm), 雨强根据黄土高原典型降雨特征^[22]设为小雨强(0.5 mm/min)、中雨强(1.0 mm/min)、大雨强(1.5 mm/min), 降雨历时 1 h。

土壤文件中的细沟间土壤可蚀性、细沟土壤可蚀性、土壤临界剪切力、有效水力传导系数通过土壤颗粒组成(表 1)手动算出的数值为基值^[23], 并通过率定获得最终参数。

表 1 WEPP 模型中的土壤特性
Table 1 Soil properties in WEPP model

土层深度 Soil depth/cm	砂粒含量 Sand content/%	粘粒含量 Clay content/%	有机质含量 Organic content/%	阳离子交换量 Cation exchange capacity/(mmol/kg)	岩屑含量 Rock content/%
0—10	24.0	9.7	2.0	9.9	0.0
10—20	19.7	9.7	1.6	6.8	0.0
20—40	17.4	10.0	1.4	6.7	0.0

地形文件根据试验小区实际情况获取, 设置坡面径流小区坡度 26°, 坡长 10 m; 水平阶径流小区坡度 26°, 坡长 10 m, 水平阶台面宽度 1.3 m。并在情景模拟中设置不同地形条件: 设置坡长均为 10 m, 坡度分别为 5°、10°、15°、20°、25°、30°的坡面; 基于不同水平阶台面宽度, 固定总坡长和田坎坡度, 设置不同水平阶规格见表 2。

表 2 水平阶规格设计
Table 2 Specification of Level terrace design

样地类型 Sample plot types	总坡长 Slope length/m	田坎坡度 Riser slope/°	台面宽度 Field width/m	田坎高度 Riser height/m	田坎宽度 Riser width/m
二阶水平阶 Two-stage level terrace	10	45	1.0	2.5	2.5
			1.5	2.1	2.1
			2.0	1.8	1.8
三阶水平阶 Three-stage level terrace	10	45	1.0	1.6	1.6
			1.5	1.2	1.2
			2.0	0.8	0.8

试验小区选取植被为柠条,管理措施参数包括植物生长参数和种植参数,通过植被调查、参考文献或选取 WEPP 模型数据库中的同类植物确定^[24-28](表 3)。

表 3 柠条生物学特性参数

Table 3 Biological characteristics parameters of Caraganamicrophylla

参数 Parameters	柠条 Caragana microphylla	来源 Sources
生物能量转换率 Biomass energy ratio/(kg/MJ)	5	模型中同类植物
行距 Plant space in-row/cm	250	植被调查
植物生长最佳温度 Optimal temperature for plant growth/(°C)	20	牛西午等 ^[24]
植物停止生长最高温度 Maximum temperature that the growth of a perennial crop/(°C)	46	牛西午等 ^[24]
消光系数 Radiation extinction coefficient	0.47	刘胜等 ^[25]
径粗 Stem diameter/cm	1.2	植被调查
株高 Canopy height/cm	100	植被调查
最大叶面积指数 Maximum leaf area index	1.5	模型中同类植物
收获指数 Harvest index/%	75	李军等 ^[26]
根深 Root depth/cm	250	牛西午等 ^[27]
根冠比 Root to shoot ratio/%	550	牛西午等 ^[27]
最大根系生物量 Maximum root mass for a perennial crop/(kg/m ²)	0.37	张飞等 ^[28]

1.3 WEPP 模型运行机理

WEPP 模型是一种基于侵蚀过程的模型,其坡面版是 WEPP 模型中最基本的模型版本,模拟水平阶时,将坡面分成数段,设置多种土壤类型和多个管理措施^[29]。坡面侵蚀分为细沟侵蚀和细沟间侵蚀。细沟间侵蚀指雨滴击溅和坡面水流对土壤进行剥蚀和搬运的过程;细沟侵蚀指细沟内土壤所发生剥蚀、搬运和沉积的过程。WEPP 模型利用稳态泥沙连续方程来模拟泥沙运动,当水流剪切力大于临界土壤剪切力,且输沙率小于泥沙输移能力时,以搬运过程为主;当输沙率小于泥沙输移能力时,以沉积过程为主^[30]。

1.4 模型评价方法与指标计算

采用 Nash-Sutcliffe 效率系数(NSE)和决定系数(R^2)对率定参数进行验证。NSE 的计算公式为:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (1)$$

式中, O_i 为实测值; P_i 为模拟值; \bar{O} 为实测值的平均值。当 $NSE > 0.5$ 时,可以认为 WEPP 模型的模拟结果较好^[31]。

决定系数 R^2 (拟合优度)是回归方程拟合优度的一个度量,取值范围为 0—1,当 R^2 越接近 1,则表示实测值与预测值相关性越高。

$$R^2 = \left(\frac{n \sum P_i O_i - \sum O_i \sum P_i}{\sqrt{n \sum O_i^2 - (\sum O_i)^2} \times \sqrt{n \sum P_i^2 - (\sum P_i)^2}} \right)^2 \quad (2)$$

为了描述水平阶对径流泥沙的调控作用,分别引入径流和泥沙调控率的概念^[32]。径流调控率指布置某种调控措施后)径流量相对于对照条件下径流量的变化百分率;产沙调控率指布置某种调控措施后产沙量相对于对照条件下产沙量的变化百分率。可用下式表示:

$$C_w = \frac{W_s - W_o}{W_o} \quad (3)$$

$$C_s = \frac{G_s - G_o}{G_o} \quad (4)$$

式中: C_w 、 C_s 分别是径流调控率(%)和泥沙调控率(%); W_s 、 W_o 分别是调控措施后和原状坡面的径流量(mm); G_s 、 G_o 分别是调控措施后和原状坡面的产沙量(t/hm^2)。

为了更好的描述台面宽度的减蚀效益,引入单位台面宽度减沙量,其计算公式为:

$$D_s = \frac{0.1(G_s - G_o)}{L} \quad (5)$$

式中 D_s 为单位台宽减沙量(kg/m^3); G_s 、 G_o 与上述一致; L 为台面的总宽度(m)。

1.5 模型率定及模型有效性验证

2015 年和 2016 年生长季(5.1—10.31)降水量分别为 320.8、156.8 mm,雨量计共记录降雨事件 130 余次,其中引起较为明显水土流失现象的降雨事件共 21 场(微弱降雨不计)将降雨量由小到大排序每两场降雨划分为一组,每组中随机选取一组用来率定或验证^[29]。选用柠条坡面径流小区对土壤参数进行率定和验证。从图 1a、1c 可知率定小区径流量和产沙量的 NSE 分别为 0.90、0.77,图 1b、1d 验证小区径流量和产沙量分别为 0.79 和 0.63,说明模拟结果较好;从决定系数 R^2 看,率定小区径流量和产沙量的 R^2 分别为 0.92、0.81,验证小区径流量和产沙量的 R^2 分别为 0.82 和 0.78,模拟值与实测值拟合度良好,具有良好的相关性,因此 WEPP

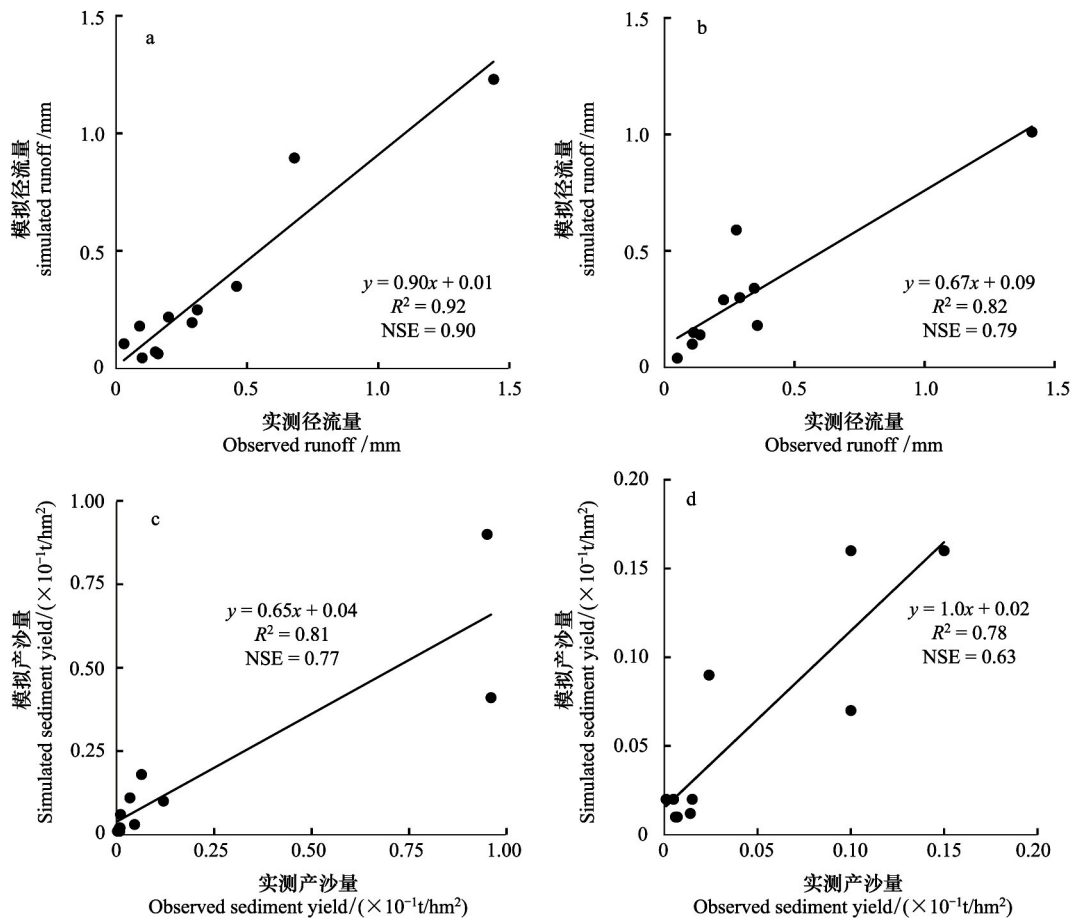


图 1 土壤参数率定结果验证

Fig.1 Validation of soil parameter of WEPP

a. 率定小区径流量对比; b. 验证小区径流量对比; c. 率定小区土壤侵蚀量对比; d. 验证小区土壤侵蚀量对比; NSE 为 Nash-Sutcliffe 效率系数; WEPP: 水蚀预报模型, Water Erosion Prediction Project

模型的模拟结果可以较好反映坡面的实际情况。最终土壤参数率定结果见表 4。

表 4 WEPP 模型中的土壤参数
Table 4 Soil parameters in WEPP model

参数 Parameters	细沟间可蚀性 Interill erodibility	细沟可蚀性 Rill erodibility / (s/m)	临界剪切力 Critical shear stress /Pa	有效水力导水系数 Effective hydraulic conductivity / (mm/h)
参数值 Parameter values	6.995×10^6	0.026	3.5	12.2

为验证 WEPP 模型模拟水平阶的有效性,对柠条水平阶径流小区进行模拟验证,由图 2 知径流量和产沙量模拟值和实测值的决定系数分别为 0.80 和 0.87, NSE 为 0.72 和 0.60, 表明模型可以有效反映水平阶的水文过程。

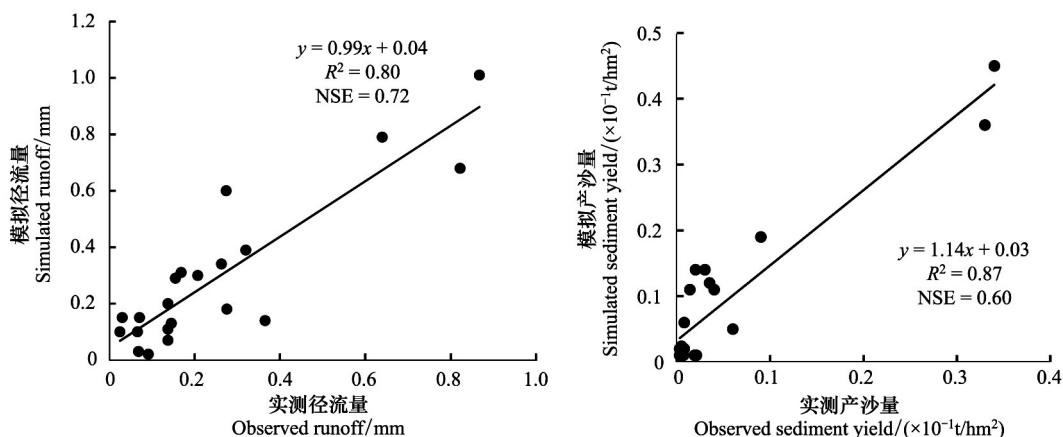


图 2 验证水平阶有效性

Fig.2 Validate the effectiveness of level terrace

2 结果

2.1 坡度变化对产流产沙过程的影响

采用 WEPP 模型模拟柠条坡面小区不同坡度下的土壤侵蚀规律,为合理开展整地措施提供理论依据。从图 3 可知,同一雨强条件下,径流量随坡度的逐渐增加呈增加趋势,但坡度大于 20° 后,径流值不再变化,保持稳定。而在不同雨强下,水土流失与雨强和坡度(小于 20°) 呈正比,且在小雨强时,径流量增加最为明显,增加了 1.9 倍,中、大雨强时径流量分别增加了 1.2 倍、1.1 倍。此外,由图 3 可知,产沙量随坡度增加,也呈增加态势,但增加幅度却并不一致。当坡度从 5° 变化到 10° 时,不同雨强下的产沙量增幅明显,其中小雨强下的产沙增加了 4.7 倍,增加幅度最大,而中雨强和大雨强增加了 2.6 倍、2.1 倍。在 20° 以上,产沙量增加放缓,变化倍数约 1 倍左右。

2.2 水平阶规格对侵蚀的调控作用

水平阶台面宽度可以有效蓄流阻沙,因此为研究水平阶台面宽度对径流的拦截作用,根据以上所述,选取径流临界坡度 20° 的柠条坡面径流小区为研究对象,比较坡面径流小区与相同小区尺寸不同水平阶规格下的土壤侵蚀变化。

增加台面宽度与阶数可以减少径流量(图 4)。在小雨强(0.5 mm/min) 时,相比于自然坡面,水平阶为二阶时台面宽度从 1 m 增加到 2 m,径流调控率从 31.9% 增加到 61.2%,当阶数变为三阶时,径流调控率从 49.4% 增加到 69.7%;中雨强(1 mm/min) 时,台面宽度从 1 m 增加到 2 m,二阶和三水平阶的径流调控率分别从

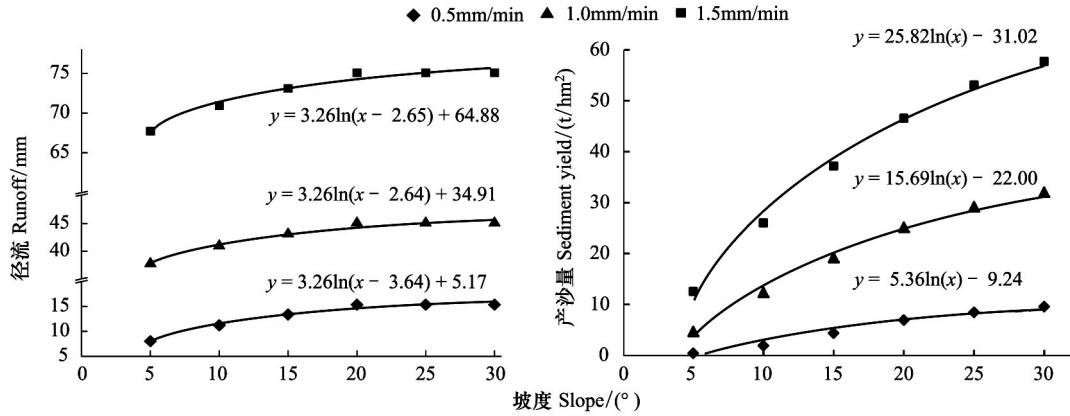


图 3 不同雨强下坡度变化对产流产沙的影响

Fig.3 Effects of slope on runoff and sediment yield under different rainfall intensity

10.9%增加到 20.9% ,16.8%增加到 23.8%;大雨强(1.5 mm/min)时,台面宽度从 1 m 增加到 2 m ,二阶和三阶水平阶的径流调控率从 6.5%增加到 12.6% ,10.1%增加到 14.3%。台面越宽,径流调控效果越好,与二阶水平阶相比,三阶水平阶可更有效减少坡面径流量。

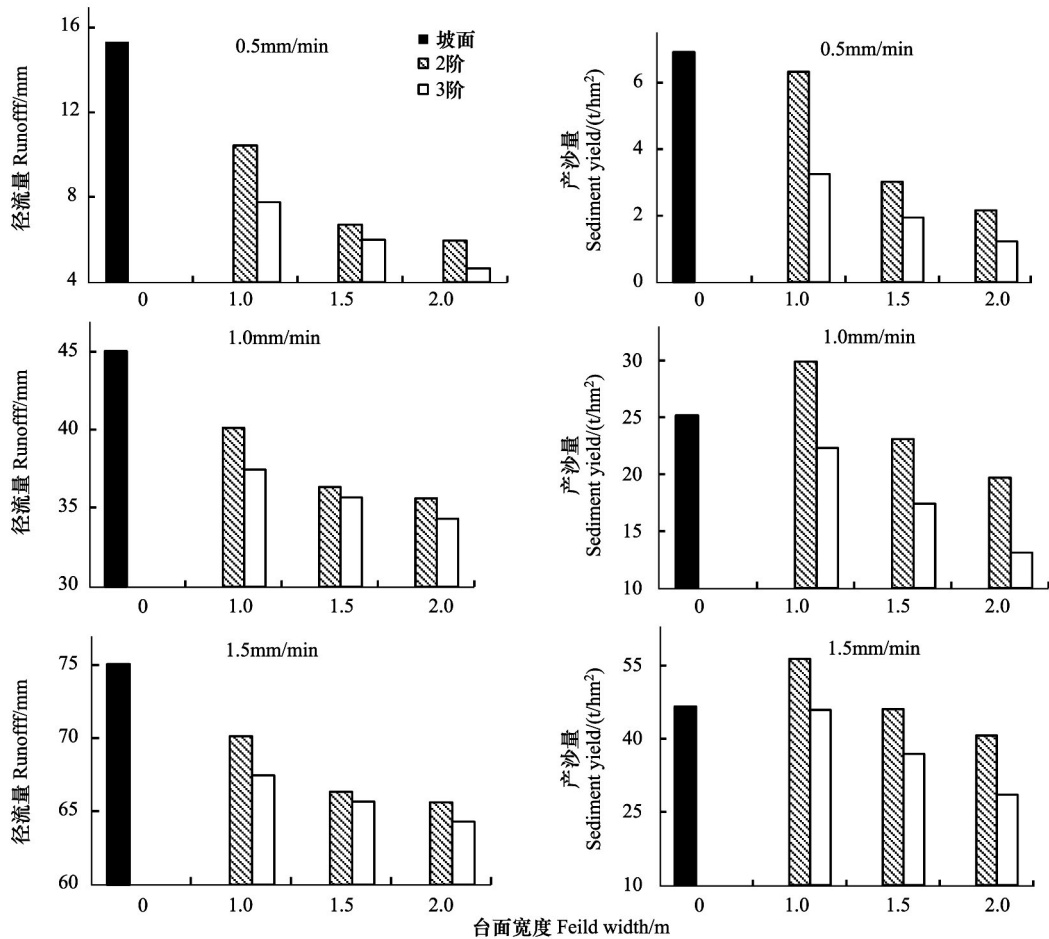


图 4 不同雨强下产流产沙量随不同水平阶规格的变化

Fig.4 Effects of level terrace specification on runoff and sediment yield under different rainfall intensities

产沙量从图 4 可知,水平阶可以削弱产沙能力。小雨强时,二阶水平阶的泥沙调控率在台面宽度从 1 m

增加到 2 m 时,泥沙调控率分别从 8.4% 增加到 68.8%, 53% 增加到 82.3%; 中、大雨强时,水平阶台面宽度在 1 m 时,二阶水平阶的产沙量比自然坡面分别高 18.9% 和 21.0%,当台面宽度为 1.5 m 时开始减少产沙,泥沙调控率分别从 8.1% 增加到 21.7%, 1.1% 增加到 12.7%。而三阶水平阶在不同台面宽度时均可以减少产沙量,其调控范围为 1.7%—82.3%。

2.3 水平阶不同单位台宽的侵蚀调控效益对比

产沙量的变化与径流相比较为复杂。由表 5 可知,在小雨强时,三阶水平阶不同台宽的单位台宽减沙量没有明显变化,而二阶水平阶在台宽是 1.5 m 时单位台宽减沙量达到最大值 0.13 kg/m³; 中雨强时,二阶水平阶在台宽为 1.5 m 时开始起到拦截泥沙的作用,且在 2 m 台宽时单位台宽减沙量达到最大值 0.14 kg/m³。三阶水平阶在台面宽度 1.5 m 时,单位台宽减沙量增加最大,增加 1.9 倍;大雨强时,二阶水平阶在 2 m 台宽时的单位台宽减沙量远大于 1.5 m 台宽的单位台宽减沙量,而三阶水平阶台面宽度是 1 m 时单位台宽减沙量为 0.02 kg/m³,随着台面宽度的增加,其效能逐渐体现,在台宽 2 m 时单位台宽减沙量达到最大值 0.3 kg/m³。

表 5 不同规格的水平阶单位台宽减沙量

Table 5 Sediment reductions of unit field width under different standards of the level terrace

雨强 Rainfall intensity /(mm/min)	样地类型 Sample plot types	台面宽度 Field widths /m	产沙量 Sediment yield /(t/hm ²)	单位台宽减沙量 Sediment reductions of unit field width/(×10 kg/m ³)	
0.5	坡面	/	6.9	/	
		二阶水平阶	1.0	6.3	0.3
		1.5	3.0	1.3	
		2.0	2.2	1.2	
	三阶水平阶	1.0	3.2	1.2	
		1.5	1.9	1.1	
		2.0	1.2	0.9	
		1.0	25.2	/	
1.0	坡面	/	25.2	/	
		二阶水平阶	1.0	30.0	/
		1.5	23.1	0.7	
		2.0	19.7	1.4	
	三阶水平阶	1.0	22.3	0.9	
		1.5	17.4	1.7	
		2.0	13.1	2.0	
		1.5	46.6	/	
1.5	坡面	/	46.6	/	
		二阶水平阶	1.0	56.4	/
		1.5	46.1	0.2	
		2.0	40.7	1.5	
	三阶水平阶	1.0	45.9	0.2	
		1.5	36.9	2.2	
		2.0	28.5	3.0	

3 讨论

坡度是影响坡面土壤侵蚀的重要地形因子之一,其大小能够决定径流的冲刷与搬运能力^[33]。Nassif 和 Wilson^[34]进行模拟降雨试验发现存在一个临界坡度使得径流量达到峰值后不随坡度增加而变化。本研究通过 WEPP 模型模拟坡度与径流的关系,也得到与之相似的结果,当坡度达到 20°时,径流量随坡度增加无变化。原因从入渗特性角度分析,坡度与累积入渗量呈反比,当坡度较小时,入渗量随坡度变化较大,当坡度较大时,入渗随坡度变化不明显^[35]。有研究表明当坡度小于 18°时,入渗量随坡度变化较大,但当坡度大于 18°

后入渗量随坡度的变化将不明显^[36]。土壤侵蚀随坡度变化存在类似规律。Mccool 等^[37] 发现存在转折坡度, 坡度超过一定限度时, 侵蚀量反而随坡度增大而减小。在此基础上, Horton^[38] 从坡面流理论角度, 通过曼宁公式得出坡度转折角为 57° 。国内学者陈永宗^[39] 对黄土高原径流小区研究发现临界坡度是 25° 或者 28° 。由于理论推导只考虑径流冲刷而忽略了雨滴击溅对坡面的溅蚀作用, 导致理论推导的临界坡度普遍高于试验值^[40]。存在临界坡度的原因可以从承雨面积角度解释, 将斜坡面积平均分配到水平投影上时, 则单位面积上承受的雨量变小, 单位面积冲刷量也相应减小, 即坡度到达一定值时, 坡度越大, 侵蚀反而减小^[41-42]。本研究通过 WEPP 模型模拟结果得到随着坡度增加, 土壤侵蚀量也在随之增加, 但当坡度大于 20° 时, 土壤侵蚀量增长放缓, 但仍呈增加趋势。这可能是由于设计的坡度并未达到临界坡度。

水平阶对水文效应的影响除受到雨强等自然因素外, 其自身结构也是影响水文过程的重要因素。景维杰^[43] 研究了不同间距水平阶的保水效果发现水平阶间距从 4 m 缩减到 1 m, 土壤含水量从 11.8% 增加到 18%, 说明水平阶密度越大越能有效拦截地表径流, 增加土壤含水量。董莉等^[44]、王建文等^[45] 在元谋干热河谷区的径流小区布设的水平阶规格分别为: 每隔 3 m 布设台宽 1 m 的水平阶和每隔 0.8 m 布设 0.8 m 的水平阶, 与对照(无水平阶)相比, 径流拦截率分别为 69.74% 和 33.68%, 说明不仅水平阶间距对水土流失有影响外, 台面宽度对其也有一定作用。本研究中, 我们发现二阶和三阶水平阶随台宽(1, 1.5, 2 m) 增加对地表径流调控率分别从 6.5% 增加到 61.2%, 从 10.1% 增加到 69.7%, 说明水平阶的阻流作用表现为随台面宽度的增加其减流能力越大。但是, 由于水平阶的结构分为田坎和台面, 在单位坡长条件下, 增加台宽势必会增加田坎坡度。田坎越陡峭, 水分损失越严重, 发生土壤侵蚀的可能性越大^[46-47]。本研究应用 WEPP 模型模拟水平阶对土壤侵蚀的影响是田坎与台面共同作用的结果。本研究从台面宽度减蚀效果发现: 当雨强较大时, 二阶水平阶在 1 m 台宽时的产沙量高于坡面小区, 说明台面宽度是 1 m 时水平阶未起到减沙作用, 因此在设计水平阶规格时, 考虑合理的台面宽度是十分必要的。

水平阶通过缩短坡长, 增加雨水入渗来削弱土壤侵蚀。本研究通过分析单位台面宽度的减蚀能力为水平阶设计提供科学依据。模拟小雨强(0.5 mm/min) 时, 二阶、三阶水平阶分别在台宽 1.5 m 和 1 m 时, 单位台宽减沙量最大分别为 0.13 kg/m^3 和 0.12 kg/m^3 。随着雨强变大, 单位台宽减沙量呈增加趋势且存在一个临界台宽使得其变化倍数呈减小趋势。说明单位台宽减沙量存在临界值。其原因可能是, 在降雨一定情况下, 有效台宽范围内可有效减少土壤侵蚀, 当台宽超过该范围时可视为无效台宽。类似地, 李萍^[48] 在设计不同规格鱼鳞坑时发现, 如果设计的鱼鳞坑面积过大, 没有足量雨水汇集, 不但使土壤蒸散量有所增加, 而且也增加了整地费用, 同时地表破坏面积增大, 增加了水蚀风险。因此在实际地形改造时, 应合理考虑工程面积, 面积过大或过小均不利于水保措施发挥作用。

4 结论

(1) 基于 WEPP 模型模拟不同坡度的土壤侵蚀规律: 径流量和侵蚀量随坡度增加而增加。坡度达到 20° 时, 径流量随坡度增加保持稳定, 产沙量增加趋势渐缓。

(2) 与坡面小区对比, 二阶和三阶水平阶随台宽增加对地表径流调控率分别从 6.5% 增加到 61.2%, 从 10.1% 增加到 69.7%; 二阶水平阶在中(1.0 mm/min)、大(1.5 mm/min) 雨强下, 台面宽度大于 1.5 m 时产沙量小于坡面, 泥沙调控率从 1.1% 增加到 68.8%, 三阶水平阶泥沙调控率从 1.4% 增加到 82.3%。

(3) 单位台宽减沙量可以作为优化台面宽度的一个重要指标。以模拟的 10 m 坡长为例, 小雨强(0.5 mm/min) 时, 二阶和三阶水平阶的台面宽度达到 1.5 m 和 1 m 时即可发挥优良的水土保持效益, 其单位台宽减沙量最大, 分别为 0.13 kg/m^3 和 0.12 kg/m^3 ; 遭遇中雨强(1 mm/min) 时, 台宽 1.5 m 的三阶水平阶效果最佳, 其最大单位台宽减沙量为 0.17 kg/m^3 ; 大雨强(0.5 mm/min) 时, 台宽 2 m 的三阶水平阶效益最好, 其最大单位台宽减沙量为 0.30 kg/m^3 。

参考文献(References):

- [1] Han F P, Ren L L, Zhang X C, Li Z B. The WEPP model application in a small watershed in the Loess Plateau. *PLoS One*, 2016, 11(3): e0148445.
- [2] 高海东, 李占斌, 李鹏, 贾莲莲, 徐国策, 任宗萍, 庞国伟, 赵宾华. 基于土壤侵蚀控制制度的黄土高原水土流失治理潜力研究. *地理学报*, 2015, 70(9): 1503-1515.
- [3] 史志华, 宋长青. 土壤水蚀过程研究回顾. *水土保持学报*, 2016, 30(5): 1-10.
- [4] 王红兵, 许炯心, 颜明. 影响土壤侵蚀的社会经济因素研究进展. *地理科学进展*, 2011, 30(3): 268-274.
- [5] 陈晓安, 蔡强国, 张利超, 蔡俊谕, 郑明国, 聂斌斌. 黄土丘陵沟壑区坡面土壤侵蚀的临界坡度. *山地学报*, 2010, 28(4): 415-421.
- [6] 张晴雯, 雷廷武, 潘英华, 高佩玲. 细沟侵蚀可蚀性参数及土壤临界抗剪应力的有理(实验)求解方法. *中国科学院研究生院学报*, 2004, 21(4): 468-475.
- [7] 刘松波, 庄春兰, 孟琳琳. 坡度对坡面侵蚀产沙响应的研究. *中国水土保持*, 2009, (5): 44-47.
- [8] 卫伟, 余韵, 贾福岩, 杨磊, 陈利顶. 微地形改造的生态环境效应研究进展. *生态学报*, 2013, 33(20): 6462-6469.
- [9] Sharda V N, Sena D R, Shrimali S S, Kholo O P S. Effects of an intercrop-based conservation bench terrace system on resource conservation and crop yields in a sub-humid climate in India. *Transactions of the ASABE*, 2013, 56(4): 1411-1425.
- [10] 于洋, 卫伟, 陈利顶, 冯天骄, 杨磊, 张涵丹. 黄土丘陵区坡面整地和植被耦合下的土壤水分特征. *生态学报*, 2016, 36(11): 3441-3449.
- [11] 冯天骄, 卫伟, 陈利顶, 于洋, 杨磊, 张涵丹. 陇中黄土区坡面整地和植被类型对土壤化学性状的影响. *生态学报*, 2016, 36(11): 3216-3225.
- [12] Ramos M C, Cots-Folch R, Martínez-Casasnovas J A. Sustainability of modern land terracing for vineyard plantation in a Mediterranean mountain environment — the case of the Priorat region (NE Spain). *Geomorphology*, 2007, 86(1/2): 1-11.
- [13] 毛勇, 魏新平, 乔永杰. 土地整理中水平梯田田面宽度优化研究. *人民长江*, 2008, 39(13): 70-71.
- [14] Brooks E S, Dobre M, Elliot W J, Wu J Q, Boll J. Watershed-scale evaluation of the Water Erosion Prediction Project (WEPP) model in the Lake Tahoe basin. *Journal of Hydrology*, 2016, 533: 389-402.
- [15] Saia S M, Brooks E S, Easton Z M, Baffaut C, Boll J, Steenhuis T S. Incorporating pesticide transport into the WEPP model for mulch tillage and no tillage plots with an underlying claypan soil. *Applied Engineering in Agriculture*, 2013, 29(3): 373-382.
- [16] Flanagan D C, Nearing M A. USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation. NSERL Report No. 10[R]. West Lafayette, Indiana: USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, 1995.
- [17] 王建勋, 郑粉莉, 江忠善, 张勋昌. 基于 WEPP 的黄土丘陵区不同坡长条件下坡面土壤侵蚀预测. *北京林业大学学报*, 2008, 30(2): 151-156.
- [18] 余长洪, 李就好, 陈凯, 姜俊红, 韦歆娜. 基于 WEPP 模型的砖红壤区坡耕地水平梯田优化设计. *云南农业大学学报: 自然科学*, 2016, 31(1): 148-152.
- [19] 刘世梁, 王聪, 张希来, 杨珏婕, 邱扬, 王军. 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): 59-62, 68-68.
- [20] 梁改革, 高建恩, 韩浩, 孟岩, 幸定武, 赵文君. 基于作物需水与降雨径流调控的隔坡梯田结构优化. *中国水土保持科学*, 2011, 9(1): 24-32.
- [21] 熊勤学, 刘章勇, 姚桂枝, 李本洲. 基于水蚀预报模型的丹江口坡地农田植物篱防蚀效应评价. *应用生态学报*, 2010, 21(9): 2383-2388.
- [22] 李毅, 邵明安. 雨强对黄土坡面土壤水分入渗及再分布的影响. *应用生态学报*, 2006, 17(12): 2271-2276.
- [23] Flanagan D C, Livingston S J. USDA-Water Erosion Prediction Project (WEPP) Version 95.7 User Summary. NSERL Report No.11[R]. West Lafayette, Indiana: USDA-Agricultural Research Service, 1995.
- [24] 牛西午. 柠条生物学特性研究. *华北农学报*, 1998, 13(4): 122-129.
- [25] 刘胜. 黄土高原半干旱区人工林林分消光特性及辐射热量平衡研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2006.
- [26] 李军, 邵明安, 张兴昌. 黄土高原地区 EPIC 模型数据库组建. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2004, 32(8): 21-26.
- [27] 牛西午, 丁玉川, 张强, 徐强. 柠条根系发育特征及有关生理特性研究. *西北植物学报*, 2003, 23(5): 860-865.
- [28] 张飞, 陈云明, 王耀凤, 王琳琳. 黄土丘陵半干旱区柠条林对土壤物理性质及有机质的影响. *水土保持研究*, 2010, 17(3): 105-109.
- [29] Flanagan D C, Frankenberger J R, Ascough II J C. WEPP: model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 2012, 55(4): 1463-1477.
- [30] Nearing M A, Foster G R, Lane L J, Finkner S C. A process-based soil erosion model for USDA-water erosion prediction project technology. *Transactions of the ASAE*, 1989, 32(5): 1587-1593.

- [31] Moriasi D N , Arnold J G , van Liew M W , Bingner R L , Harmel R D , Veith T L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE* , 2007 , 50(3) : 885-900.
- [32] 吴淑芳, 吴普特, 宋维秀, 卜崇峰. 坡面调控措施下的水沙输出过程及减流减沙效应研究. *水利学报*, 2010, 41(7) : 870-875.
- [33] 刘志, 江忠善. 降雨因素和坡度对片蚀影响的研究. *水土保持通报*, 1994, 14(6) : 19-22.
- [34] Nassif S H , Wilson E M. The influence of slope and rain intensity on runoff and infiltration. *Hydrological Sciences Bulletin* , 1975 , 20(4) : 539-553.
- [35] 王丽, 王力, 王全九. 不同坡度坡耕地土壤氮磷的流失与迁移过程. *水土保持学报*, 2015, 29(2) : 69-75.
- [36] 胡世雄, 靳长兴. 坡面土壤侵蚀临界坡度问题的理论与实验研究. *地理学报*, 1999, 54(4) : 347-356.
- [37] McCool D K , Brown L C , Foster G R , Mutchler C K , Meyer L D. Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation. *Transactions of the ASAE* , 1987 , 30(5) : 1387-1396.
- [38] Horton R E. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *GSA Bulletin* , 1945 , 56(3) : 275-370.
- [39] 陈永宗. 黄河中游黄土丘陵区坡地的侵蚀发育//中国科学院地质所. 中国科学院地理研究所地理集刊(10) . 北京: 科学出版社, 1976.
- [40] 王秀英, 曹文洪, 陈东. 土壤侵蚀与地表坡度关系研究. *泥沙研究*, 1998, (2) : 36-41.
- [41] 靳长兴. 坡度在坡面侵蚀中的作用. *地理研究*, 1996, 15(3) : 57-63.
- [42] 靳长兴. 论坡面侵蚀的临界坡度. *地理学报*, 1995, 50(3) : 234-239.
- [43] 景维杰, 韩蕊莲, 侯庆春, 梁宗锁. 不同间距水平阶集水及造林效果的研究. *西北林学院学报*, 2004, 19(3) : 38-40.
- [44] 董莉, 王克勤, 陈志中. 元谋干热河谷坡地水平阶整地的效益分析. *中国水土保持*, 2011, (10) : 7-9.
- [45] 王建文, 熊文森, 刘安平, 刘海, 梁少琳. 元谋干热河谷坡面造林整地截流减沙作用研究. *西南林业大学学报*, 2011, 31(6) : 31-35.
- [46] Cao S X , Chen L , Feng Q , Liu Z D. Soft-riser bench terrace design for the hilly loess region of Shaanxi Province , China. *Landscape and Urban Planning* , 2007 , 80(1/2) : 184-191.
- [47] Lü H S , Zhu Y H , Skaggs T H , Yu Z B. Comparison of measured and simulated water storage in dryland terraces of the Loess Plateau , China. *Agricultural Water Management* , 2009 , 96(2) : 299-306.
- [48] 李萍, 朱清科, 王晶, 谢静, 邝高明, 雷声坤, 谭泉. 半干旱黄土丘陵沟壑区不同规格鱼鳞坑集水效果研究. *灌溉排水学报*, 2011, 30(5) : 91-94.