黄河流域陕西段脆弱生态区砂质坡面侵蚀控制的有效植被盖度

李雨婷[1,2,3], 杨泽元[1,2,3], 史文海[1,2,3],
贺娟妮[4,5], 王周锋[1,2,3], 马 成[1,2,3,6], 于金乐[1,2,3]

(1.长安大学 水利与环境学院, 陕西 西安 710054; 2.旱区地下水与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 3.水利部旱区生态水文与水安全重点实验室, 陕西 西安 710054; 4.陕西地矿自然资源投资建设有限公司, 陕西 西安 710054; 5.汇金科技控股集团有限公司, 陕西 西安 710000; 6.甘肃省水利水电勘测设计研究院有限责任公司, 甘肃 兰州 730030)

摘 要: [目的]研究黄河流域陕西段生态脆弱区砂质坡面侵蚀规律,确定砂质坡面侵蚀控制的有效植被盖度,为矿山生态修复与水土保持提供理论参考和数据支撑。[方法]采用野外调查、原位监测与数值模拟相结合的研究方法,在陕西省渭南市合阳县洽川镇申东砂场布设3种坡度,4种坡长,3种植被情况,共计12个大区,48个野外径流小区,并构建研究区砂质坡面土壤水力侵蚀预测模型(WEPP);模拟坡面侵蚀规律,以产沙量减少系数增量($\triangle E_r$)突变为依据,确定砂质坡面土壤侵蚀控制的有效植被盖度。[结果]①基于野外原位监测数据,构建了研究区砂质坡面土壤侵蚀WEPP模型,对WEPP模型的参数进行了率定,获得了模型相关参数。②基于所建的WEPP模型和所获的参数,对砂质坡面侵蚀模拟表明,砂质坡面侵蚀存在临界雨强,在不同降雨、坡度、坡长时临界雨强不同。当雨强大于临界雨强时,相同雨强下砂质坡面径流量与产沙量随日降雨量的增大而增加,表现为:70 mm>50 mm>30 mm。砂质坡面径流量顺序为坡度:25°>15°>35°,坡长:24.4 m>12.2 m>30.0 m;砂质坡面产沙量顺序为坡度:35°>25°>15°,当最大雨强(PI_{max})<45 mm/h时,坡长:24.4 m>30.0 m>12.2 m;当PI_{max}>45 mm/h时,坡长:30.0 m>24.4 m>12.2 m。③数值模拟结果表明,以$\triangle E_r$=10%为依据,当坡度为15°和25°,控制砂质坡面侵蚀的有效植被盖度为20%~30%;当坡度为35°,其有效植被盖度为30%~40%。[结论]黄河流域陕西段砂质坡面侵蚀存在临界雨强,不同坡度、坡长、降雨与植被盖度存在不同的侵蚀规律,15°,25°和35°砂质坡面侵蚀控制的有效植被盖度分别为20%~30%,20%~30%,30%~40%。

关键词: 水力侵蚀预测模型(WEPP); 侵蚀控制有效植被盖度; 临界雨强; 坡面侵蚀; 生态修复; 脆弱生态区; 黄河流域

文献标识码: B **文章编号:** 1000-288X(2026)03-0277-13 **中图分类号:** S157.1, P641

文献参数: 李雨婷, 杨泽元, 史文海, 等.黄河流域陕西段脆弱生态区砂质坡面侵蚀控制的有效植被盖度[J].水土保持通报,2026,46(3):277-289. Li Yuting, Yang Zeyuan, Shi Wenhai, et al. Effective vegetation coverage of sandy slopes to control erosion in fragile ecological zone of Shaanxi section of Yellow River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(3):277-289.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.03.035 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.03.035**

Effective vegetation coverage of sandy slopes to control erosion in fragile ecological zone of Shaanxi section of Yellow River basin

Li Yuting[1,2,3], Yang Zeyuan[1,2,3], Shi Wenhai[1,2,3], He Juanni[4,5], Wang Zhoufeng[1,2,3], Ma Cheng[1,2,3,6], Yu Jinle[1,2,3]

(1.*School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi* 710054, *China*;
2.*Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region of the Ministry of Education*,

收稿日期:2025-11-26 **修回日期:**2025-12-21 **采用日期:**2025-12-24

资助项目:陕西省重点研发计划项目"黄河流域陕西段脆弱生态区植被生态安全保障技术研究与示范"(2022ZDLSF06-10),"陕北砂质高边坡水土流失治理关键技术与示范应用"(2023-ZDLSF-61);陕西林草生态系统碳汇功能提质增效技术研发与示范项目(2024SF-ZDCYL-05-08);西安市科技计划:中青年科技创新领军人才项目(25ZQRC00023);中央高校高新技术研究支持计划项目(300102294204)

第一作者:李雨婷(2001—),女(汉族),安徽省定远县人,硕士研究生,研究方向为水文学及水资源。Email:2023129019@chd.edu.cn。

通信作者:杨泽元(1969—),男(汉族),重庆市人,博士,教授,主要从事旱区地下水与生态环境关系研究。Email:yangzeyu@chd.edu.cn。
史文海(1986—),男(汉族),安徽省枞阳县人,博士,副教授,主要从事多尺度生态水文过程研究。Email:shiwenhai@chd.edu.cn。

Chang'an University, *Xi'an*, *Shaanxi* 710054, *China*; 3.*Key Laboratory of Eco-hydrology and Water Security in Arid and Semi-arid Regions of Ministry of Water Resources*, *Chang'an University*, *Xi'an*, *Shaanxi* 710054, *China*; 4.*Shaanxi G&M Natural Resources Investment Construction Co., Ltd.*, *Xi'an*, *Shaanxi* 710054, *China*; 5.*Huijin Technology Holding Group Corporation Limited*, *Xi'an*, *Shaanxi* 710000, *China*; 6.*Gansu Provincial Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Research Institute Co., Ltd.*, *Lanzhou*, *Gansu* 730030, *China*)

Abstract: [Objective] The erosion patterns of sandy slopes in ecologically fragile areas of the Shaanxi section of the Yellow River basin were investigated, and the effective vegetation coverage levels for erosion control on sandy slopes were determined, in order to provide theoretical reference and data support for mine ecological restoration and soil and water conservation. [Methods] A combination of field investigation, in-situ monitoring, and numerical simulation was adopted. 12 large areas and 48 field runoff plots with three slope gradients, four slope lengths, and three vegetation conditions were established at Shendong sand site, Hechuan Town, Heyang County, Weinan City, Shaanxi Province. A water erosion prediction project (WEPP) model for sandy slope soils in the study area was constructed, and the erosion patterns of sandy slopes were simulated. The effective vegetation coverage level for erosion control of sandy slopes was determined based on the abrupt change in the increment of sediment yield reduction coefficient (ΔE_r). [Results] ① Based on field in-situ monitoring data, a WEPP model for soil erosion on sandy slopes in the study area was constructed, and model parameters were calibrated to obtain the relevant parameters. ② Based on the constructed WEPP model and the obtained parameters, simulation results showed that there was a critical precipitation intensity (CPI), which varied under different precipitation conditions, slope gradients, and slope lengths. When precipitation intensity exceeded the critical precipitation intensity, the order of runoff and sediment yield of sandy slopes under the same precipitation intensity followed daily precipitation amount of 70 mm > 50 mm > 30 mm. The order of runoff was 25° > 15° > 35° for slope gradients, and 24.4 m > 12.2 m > 30.0 m for slope lengths. The order of sediment yield was 35° > 25° > 15° for slope gradients. If the maximum precipitation intensity (PI_{max}) < 45 mm/h, the order was 24.4 m > 30.0 m > 12.2 m for slope length. If PI_{max} > 45 mm/h, the order was 30.0 m > 24.4 m > 12.2 m. ③ Based on 'ΔE_r' with 10%, the numerical simulation results showed that the effective vegetation coverage for erosion control on sandy slopes was 20%—30% when the slope gradient was 15° and 25°, and 30%—40% when the slope gradient was 35°. [Conclusion] Sandy slope erosion in the Shaanxi section of the Yellow River basin has a critical precipitation intensity. Different slope gradients, slope lengths, precipitation, and vegetation coverage have different erosion patterns. The effective vegetation coverage for erosion control on sandy slopes with gradients of 15°, 25°, and 35° is 20%—30%, 20%—30%, and 30%—40%, respectively.

Keywords: **water erosion prediction project (WEPP); effective vegetation coverage to control erosion; critical precipitation intensity (CPI); slope erosion; ecological restoration; fragile ecological zone; Yellow River basin**

坡面侵蚀在坡地生态系统中广泛存在[1],是黄土高原最突出的水土流失形式[2],对区域水资源管理、农业生产和生态环境保护构成严重威胁[3]。近年来,各国学者围绕坡面侵蚀的驱动机制、时空演化规律及内在的物理-生化耦合过程展开了多尺度、多学科交叉的系统研究。如Michalopoulou等[4]利用数字高程模型将坡长坡度因子(*LS*)应用于修正的通用土壤流失方程(RUSLE)模型中,用于土壤流失量的估计。Ahmed等[5]使用统计分析、机器学习和深度学习技术量化了印度古瓦哈提市流域的土壤侵蚀及其影响因素。Kinnell等[6]比较了土壤水力侵蚀预测模型(water erosion prediction project, WEPP)、修正的通用土壤流失方程2(RUSLE2)和改进的通用土壤流失方程(USLE-M)3种模型解释土壤流失的能力,结果表明在自然降雨条件下WEPP比RUSLE2和USLE-M具有更好的侵蚀建模能力,但在预测裸露休耕区土壤流失的能力较差。

影响坡面侵蚀的因素众多且往往相互作用,坡度、坡长、坡向、植被覆盖度与植被类型、土壤质地与结构、降雨强度与历时、前期土壤含水量、土地利用方式(耕作/撂荒/工程措施)、微地形(细沟、切沟)及人类扰动强度都会影响坡面侵蚀。在研究降雨过程

对坡面侵蚀的内在影响时,Kinnell等[7]认为需要考虑降雨“未达到稳态”的时间效应。Chen等[8]考虑人工边坡地形、坡度对砂土径流、产沙量的影响,模拟发现地形、坡度及其交互作用对径流、产沙量及整体水土流失均有极显著影响。Liu等[9]利用黄土高原3个站点数据得出土壤流失与坡长呈指数函数关系。Ma等[10]研究了作物-坡面相互作用对黄土高原边坡径流和产沙量的影响,发现不同作物、不同生长阶段对坡面侵蚀的影响不同。这些关于坡面侵蚀影响因素的研究往往是在室内试验基础上,多用单一参数估算侵蚀的影响。

黄河流域是中华民族和中华文明的重要发祥地,也是人类活动和经济发展的重要区域,黄河流域高质量发展是国家战略之一[11]。黄河流域陕西段西岸的坡面是土壤侵蚀预报与水土流失研究的基本单元[12],因此,对其进行坡面侵蚀研究是生态脆弱区矿山水土保持和生态修复的基础。本文以黄河流域陕西段脆弱生态区渭南市合阳县洽川镇申东砂场为研究对象,以土壤学、土壤水动力学和水文学理论为依据,采用野外调查与室内分析相结合,原位监测与数值模拟相结合的研究方法,对砂质坡面的侵蚀过程进行定量评价,揭示不同坡度坡长砂质坡面土壤侵蚀的水土保持效果,为黄河流域生态脆弱区矿山生态修复提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

合阳县位于陕西省渭南市(34°59′—35°26′N,109°58′—110°27′E),地处关中东北部、黄河西岸。合阳县地理位置优越,但地形复杂,呈阶梯状自东南向西北抬升,沟壑纵横,地貌类型多样,包括黄河河谷阶地、黄土台塬和低中山等。气候属暖温带半干旱大陆季风气候,光热资源丰富但降水偏少,多年平均降水量528.2 mm,从东南向西北递增,年际变幅大,降水年内分配极不均匀,7—9月占全年的56.8%,灾害天气频繁。研究区水系属黄河水系,该县多年平均径流总量4.66×10^7 m^3,折合径流深34.7 mm,水资源总量为1.30×10^8 m^3,总体水资源量偏少且地表水资源极贫乏,南北分布不均。土地总面积1.32×10^5 hm^2,其中耕地所占比例较大,土壤类型丰富,但侵蚀严重,是水土流失重点县[13]。合阳县原生植物以木本植物和草本植物为主,多分布于西北部山区和沟川地区,其中木本植物有银杏(*Ginkgo biloba*)、雪松(*Cedrus deodara*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、山楂(*Crataegus pinnatifida*)、柠条(*Caragana korshinskii*)等70多种,草本植物有草木樨(*Astragalus melilotoides*)、马棘(*Indigofera bungeana*)、蒺藜(*Tribulus terrestris*)、白茅(*Imperata cylindrica*)等100余种。合阳县现辖11镇1个街道办,截至2024年末常住人口35.24万人,城镇化率50.45%[14]。根据已有资料及各岩层露头[15],该地区主要包含下古生界奥陶系(O)、上古生界二叠系(P)、新近系(N)和第四系(Q)等地层。研究区典型坡面以粉砂土、粉砂壤土、砂土为主;在砂土坡面以上为近乎直立黄土剖面,夹有古土壤层。

1.2　试验设计

野外径流小区的建设具体包括:坡面修整、径流试验区围建、径流小区与径流桶连接、水分/温度监测点安装与布设、植株种植等,这些工作为后续的径流和产沙量研究提供了基础和相关数据。实地布设情况图如图1所示。

本试验共布设12个大区(A_1—A_{12}),全部为“直型斜坡”,坡面整体宽度统一为5 m,每个大区再均分成4个平行径流-泥沙观测小区。基于实地地形条件和不同坡度坡长的试验设计需要,设置3种坡度:15°,25°,35°;4种坡长:10,12.2,24.4和30 m;3种植被覆盖类型:自然植被、裸地、苜蓿地。每一个径流小区末端均连接有收集装置,分别为径流桶(径流泥沙样收集)、无底无盖泥沙桶(堆积泥沙样,对比观测)。具体坡面布设情况详见表1。

表1　坡面布设基本情况

Table 1　Basic information of slope layout

大区编号	坡度/(°)	坡长/m	坡地类型	小区编号	大区编号	坡度/(°)	坡长/m	坡地类型	小区编号
A_1	35	12.2	自然	1*,2*,3,4	A_7	35	24.4	苜蓿	25*,26*,27,28
A_2	35	12.2	裸地	5,6,7*,8*	A_8	35	24.4	裸地	29,30,31*,32*
A_3	15	10.0	苜蓿	9*,10*,11,12	A_9	35	24.4	苜蓿	33*,34*,35,36
A_4	15	10.0	裸地	13*,14*,15,16	A_{10}	35	24.4	裸地	37,38,39*,40*
A_5	25	10.0	裸地	17,18,19*,20*	A_{11}	35	30.0	裸地	41*,42*,43,44
A_6	25	10.0	苜蓿	21,22,23*,24*	A_{12}	35	30.0	苜蓿	45,46,47*,48*

注:*表示连接径流桶的小区,无标记则表示连接无底无盖泥沙桶。

a 大区布设全景



b 小区布设全景



c 径流桶和泥沙收集



d 小区植被状况

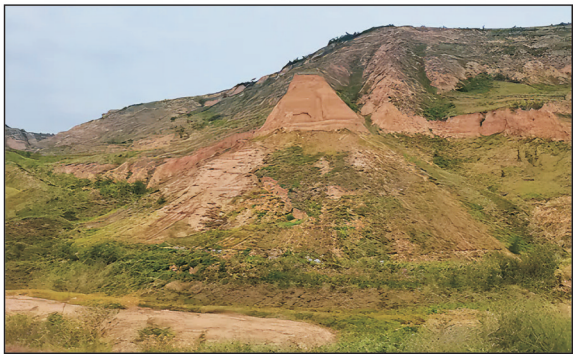


图 1 径流小区坡面布设情况

Fig.1 Layout of slope surface of runoff plot

1.3 模型参数实测分析

（1）植被盖度调查。采用多旋翼单镜头无人机（DJI Phantom 4 RTK）[16]航测，将无人机拍摄的照片输入图片处理软件 GIMP 中进行裁剪得到实景图，再将实景图输入 ArcGIS pro 中进行样本训练与重分类，得到植被覆盖图像与植被盖度，其中植被盖度为（枯草面积＋植被面积）/总面积×100%。2024 年 9 月 22 日的各径流小区植被盖度结果详见表 2。

表 2 野外径流区植被盖度

Table 2 Vegetation coverage table of field runoff plots

大区编号	主要植被类型	植被盖度/%
A_1	红瑞木、鹅绒藤（自然植被）	31.81
A_2	红瑞木、芦苇（裸地→自然）	43.61
A_3	苜蓿（人工种植）	82.39
A_4	狗尾草、角茴香（裸地→自然）	95.03
A_5	角茴香、红瑞木（裸地→自然）	69.75
A_6	苜蓿（人工种植）	81.20
A_7	苜蓿（人工种植）	76.07
A_8	茵陈蒿、角茴香（裸地→自然）	80.53
A_9	苜蓿（人工种植）	87.81
A_{10}	芦苇（裸地→自然）	72.66
A_{11}	芦苇（裸地→自然）	67.13
A_{12}	苜蓿（人工种植）	93.43

（2）土壤样本采集。土钻采取不同径流小区坡面坡中不同深度的土壤样品，用于后续室内试验分析。颗粒分析由长安大学水利与环境学院水资源与环境试验中心上海仪电 WJL-608 激光粒度仪测试完成。依据《土工试验方法标准（GB/T 50123—2019）》，用精度 0.01 g 电子天平称取 400 g 阴干土；采用四分法，依次通过 2 和 1 mm 的筛网进行对角线取样，筛余后，由激光粒度仪完成颗粒级配测定。根据美国农部制，各径流区对应的土壤质地详见表 3。

表 3 基于美国农业部制各径流区土壤质地

Table 3 Soil texture of each runoff area

区号	地表以下深度		
	100 mm	200 mm	300 mm
A_1	砂 土	砂 土	砂 土
A_2	粉砂土	粉砂土	粉砂土
A_3		粉砂土	
A_4	粉砂壤土	粉砂土	粉砂土
A_5	粉砂土	粉砂土	粉砂土
A_6		粉砂土	
A_7		粉砂土	
A_8		粉砂土	
A_9	粉砂土	粉砂壤土	粉砂土
A_{10}	粉砂土	粉砂土	粉砂土
A_{11}		粉砂土	
A_{12}		粉砂土	

（3）样品测定。土壤有机质（SOM）依据《土壤有机质的测定标准（HJ 615—2011）》，采用重铬酸钾

氧化-分光光度法[17]测定。阳离子交换量(CEC)依据环境保护部标准(HJ 889—2017),采用三氯化六氨合钴浸提-分光光度法[18]测定。有机质和阳离子交换量由陕西省杨凌新化生态科技有限公司测定。有机质测样62个,阳离子交换量测样24个。

(4)产流产沙量收集[19]。每次出现强降雨情况,在径流事件结束后,前往试验区,用卷尺测量并记录径流桶中径流深度;将径流桶内的径流样搅拌均匀后取样,带回实验室处理。完成测量和采样后,将径流桶清理干净以备下次径流监测。

径流样处理参考水利部2024年发布的《水土保持监测技术规范(SL/T 277—2024)》,同时为与后文WEPP模型模拟保持一致,径流量定义为径流桶内收集的水体积与径流小区面积之比(mm);产沙量定义为径流桶内泥沙质量与径流小区面积之比(kg/m^2)。

除径流泥沙实测数据为模型率定外,其他数据均为模型参数测定。

2　WEPP模型的构建

2.1　WEPP模型的基本原理

美国农业部开发的WEPP模型是一种基于连续时间的分布式水蚀模型,主要用于模拟和预测土壤侵蚀情况。模型包含多个功能模块,涵盖天气、土壤、植物生长、水分利用、水力和侵蚀等方面[20]。为刻画降雨条件下坡面的侵蚀过程,WEPP模型采用稳态输砂连续方程[21]

$$\frac{\mathrm{d}G}{\mathrm{d}x}=D_i+D_r \tag{1}$$

式中:x表示泥沙从坡面迁移至坡底最终堆积的距离(m);G表示输移率〔kg/(s·m)〕;D_i表示细沟间侵蚀速率〔$kg/(s\cdot m^2)$〕;D_r表示细沟侵蚀速率〔$kg/(s\cdot m^2)$〕。

由公式(1)可知,在WEPP模型中,降雨条件下的坡面侵蚀由细沟间侵蚀和细沟侵蚀[22]两部分组成。

2.2　WEPP模型数据库的建立

根据研究区的具体情况,依次建立坡型、气候、作物管理和土壤4个基础数据库[23]。

(1)坡型数据库。输入的坡长(Distance)数据是坡面的水平投影距离,坡度(Slope)数据是以百分数表示的数值,计算公式为

$$\text{Distance}=\text{实测坡长}\times\cos\alpha \tag{2}$$

$$\text{Slope}=\tan\alpha\times 100\% \tag{3}$$

式中:α为坡面角度的大小(°)。

(2)气候数据库。本文以合阳县的日序列气象资料为基础,建立“Heyang CHN”.par气候数据库。在此基础上,通过气象数据编辑器输入单次降雨的气象信息并保存,从而构建单次降雨[24]数据库。

(3)管理数据库(作物)。作物管理数据库涵盖8个子数据库。包括作物初始状态、植被类型、管理模式、留茬覆盖、耕作方式、是否放牧、植被收获和清理方式以及灌溉等多个参数。本次研究仅关注降雨条件下的坡面产流产沙,不涉及灌溉等作物管理措施。除干容重、植被盖度采用实测值外,其余参数采用模型默认值。

(4)土壤数据库。将通过室内试验测得的土壤相关参数,包括砂粒含量、粉粒含量、黏粒含量、有机质含量、岩屑含量以及阳离子交换量等,输入到土壤数据库中。土壤数据库是影响模拟结果和侵蚀过程的关键因素[25]。模型需要输入的土壤参数主要包括:已经测得的数据包括土壤反照率(soil albedo)和土壤初始饱和度(initial sat),而需要率定的参数有细沟间可蚀系数(inter rill erodibility)、细沟可蚀系数(rill erodibility)、土壤临界剪切力(critical shear)和有效水力传导系数(effective hydraulic conductivity)。相关参数的计算详见文献[26]。

3　模型参数的率定

用Nash-Sutcliffe效率系数(nash-sutcliffe efficiency coefficient, NSE)[27]来评估模型模拟值与实测值之间的一致性。NSE值越接近1,表明模型预测值与实测值的拟合程度越高。用决定系数(R^2)来衡量模拟值与实测值的拟合优度,R^2越接近1,说明模型的拟合效果越理想,模型的可信度也越高。

$$\mathrm{NSE}=1-\frac{\sum_{i=1}^{N}(m_i-o_i)}{\sum_{i=1}^{N}(o_i-\bar{o})} \tag{4}$$

$$R^2=\frac{\left[\sum_{i=1}^{N}(m_i-\bar{m})(o_i-\bar{o})\right]^2}{\sum_{i=1}^{N}(m_i-\bar{m})^2(o_i-\bar{o})^2} \tag{5}$$

式中:m_i,o_i分别表示第i个样本的模拟值和观测值;$\bar{m}$,$\bar{o}$分别表示模拟平均值和观测平均值;N为样本个数。

模拟数据选取2024年9月22日A_2—A_{12}区的径流量和产沙量,验证数据为2024年8月9日A_2—A_{12}区的径流量和产沙量,得到径流量和产沙量的率定和验证图(图2)。

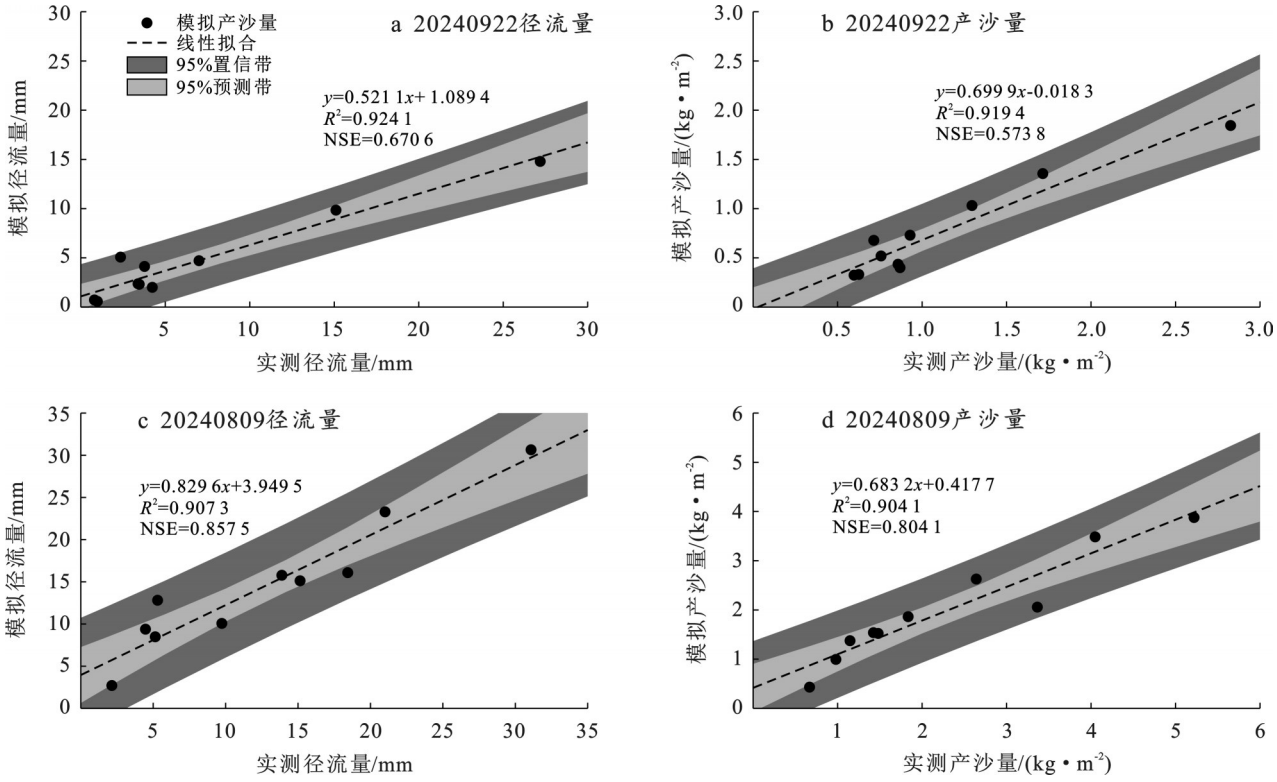


图2 模型参数的模拟和验证

Fig.2 Simulation and validation of model parameters

经过率定,模拟值与实测值的分布偏离程度较小,均位于95%置信带与预测带内。同时,R^2均高于0.9,NSE均高于0.5,这表明WEPP模型适用于合阳径流小区砂质坡面的产流产沙模拟。总体上来看,在R^2相近情况下,2024年8月9日径流量和侵蚀量的NSE更高,拟合效果更好。即大降雨量与雨强条件下拟合效果更好。经过率定获得的土壤参数取值详见表4。

表4 WEPP模型土壤参数率定值

Table 4 Calibration values of soil parameters in WEPP

区号	细沟间可蚀系数/(kg·s·m^{-4})	细沟可蚀系数/(s·m^{-1})	土壤临界剪切力/Pa	有效水力传导系数/(mm·h^{-1})
A_2	2.73 E+06	0.291 8	0.028 9	4.910 9
A_3	2.73 E+06	4.122 2	0.334 1	5.229 4
A_4	2.73 E+06	5.121 8	0.108 4	0.074 7
A_5	2.73 E+06	0.051 0	1.232 3	0.824 3
A_6	2.73 E+06	5.121 8	0.335 8	4.106 3
A_8	2.73 E+06	0.123 9	0.419 4	1.498 7
A_9	2.73 E+06	0.622 4	0.335 9	2.591 4
A_{10}	2.73 E+06	0.261 9	0.695 6	1.773 7
A_{11}	2.73 E+06	1.522 6	0.331 6	3.852 8
A_{12}	2.73 E+06	3.122 5	0.336 5	6.014 3

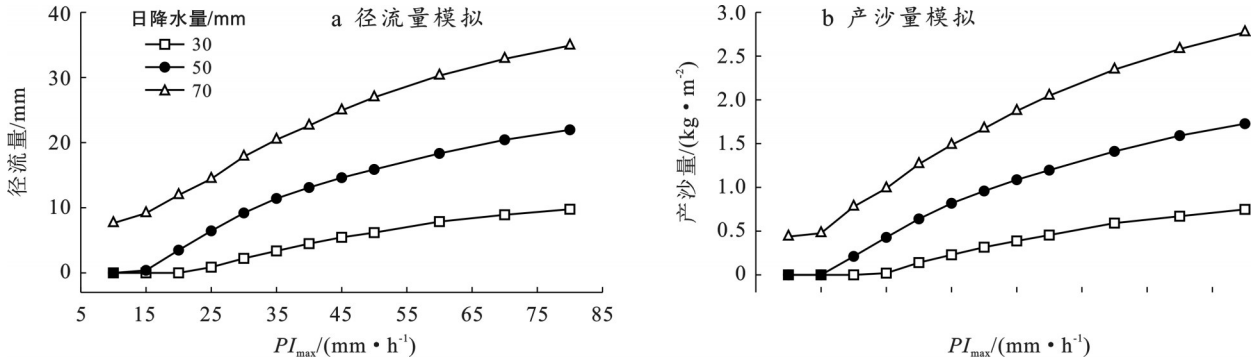
注:因装置原因A_1,A_7未观测到径流量和产沙量。

4 坡面侵蚀影响因素分析

4.1 降雨量与雨强因素

根据《降水量等级(GB/T 28592—2012)》,基于2024年10月之前研究区内近70次降雨特征的统计分析,设置30,50和70 mm这3种日降雨量情况,最大雨强(PI_{max})从10 mm/h开始逐倍增加,根据所建立的WEPP模型和已率定出的相关参数,逐坡进行模拟。以A_6坡面为例,分析降雨量与降雨强度对径流量和产沙量的影响。其他坡面规律类似。从图3可知,不同日降雨量下发生径流或产沙存在临界雨强,当小于临界雨强时,无径流或产沙发生。当日降雨量为30 mm时,发生径流与产沙的临界雨强分别为21.99,23.01 mm/h;当日降雨量为50 mm时,发生径流与产沙的临界雨强分别为16,17 mm/h;当日降雨量为70 mm时,发生径流与产沙的临界雨强小于7 mm/h。当雨强大于临界雨强,降雨量相同时,初期径流量和产沙量随雨强增大线性增加,雨强越大,直线斜率越大;随雨强进一步增大,径流量和产沙量增速变缓。在雨强相同时,日降雨量70是50 mm径流量的1.59~24.11倍;对应产沙量的1.61~3.70倍,且随着雨强增加倍数缩小。更大的降雨强度意味着坡面单位时间内获得更多的降水量,更快地形成径流。

在降雨初期,由于径流形成时间较短,雨水在坡面停留时间有限,来不及充分下渗,大部分迅速汇集成流,因此径流量增加较快;随着降雨量持续、降雨时长延长,雨水与土壤接触时间变长,土壤入渗趋于稳定,入渗水量增加,径流量增速逐渐变缓。降雨强度增大,地表冲刷力增强,产沙量显著上升,在降雨初期,地表的泥沙容易被冲刷,随着降雨的持续,地表逐渐被冲刷干净,产沙量增加速率逐渐变缓。



注:数据来源于WEPP模型模拟结果。图4—8同。

图3　不同降雨强度下A_6坡面径流量和产沙量模拟

Fig.3　Simulation of runoff and sediment yield on slope A_6 under different rainfall intensities

4.2　坡度因素

以A_3,A_6坡面为例分析坡度对径流量和产沙量的影响,两坡面坡长均为10 m,种植苜蓿,对应坡度15°,25°,因A_2坡长12.2 m,坡面的水平投影距离Distance较为接近,坡度为35°,作为近似对比参考。日降雨50 mm条件下,不同坡度时坡面的产流产沙随雨强变化如图4所示。从图4可知,与降雨量类似,不同坡度的径流量和产沙量也存在临界雨强,日降雨50 mm,15°,25°,35°径流量的临界雨强分别为18.1 mm/h,14.3 mm/h,20.2 mm/h,产沙量的临界雨强分别为21.25 mm/h,16.75 mm/h,20.2 mm/h。随着坡度的增加,径流量25°>15°>35°,虽然坡度增加通常增加径流量,但A_2区为原位坡,植被盖度较低,土壤质地为粉砂土,降水易于下渗形成地下径流从而导致径流量较小。在(近似)相同水平投影长度和发生侵蚀的雨强条件下,随着坡度的增加(从15°到35°),产沙量显著增加。35°坡度是25°坡度对应产沙量的1.49~1.91倍,且随着雨强增加对应倍数增大;25°坡度是15°坡度对应产沙量的2.23~8.09倍,且随着雨强增加对应倍数减小。

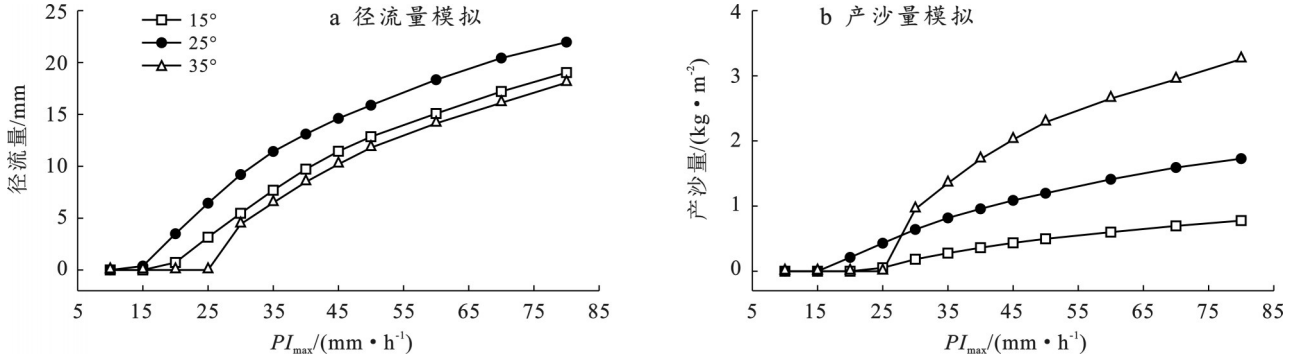


图4　不同坡度下径流量和产沙量模拟

Fig.4　Simulation of runoff and sediment yield under different slope angles

4.3　坡长因素

以A_2,A_{10},A_{11}坡面为例分析坡长对径流量和产沙量的影响,3个坡面均为自然植被35°坡,对应坡长12.2,24.4和30.0 m。日降雨50 mm条件下,在不同坡长条件下坡面的径流产沙随雨强变化如图5所示。从图5可知,与坡度类似,不同坡长的径流量和产沙量也存在临界雨强,日降雨50 mm时,12.2,24.4和30.0 m坡长发生径流与产沙的临界雨强分别为20.15,<5.00和21.10 mm/h。对于同一坡度,当发生侵蚀雨强时,坡面径流量由大到小顺序为:坡长24.4 m>12.2 m>30.0 m,这是因为较长的坡长可能导致土壤在坡面停留时间长,更多的水分有机会渗透到土壤中,较长的坡长可能导致更复杂的坡面形态,如小的沟壑和凹陷,这些地形特征可以暂时储存水分,减少径流。当PI_{max}<45 mm/h时,产沙量表现为:24.4 m>30.0 m>12.2 m,大雨强时产沙量表现为:30.0 m>

24.4 m＞12.2 m。在大雨强条件下,随着坡长的增加,产沙量显著增加,30 m坡长条件下产沙量随PI_{max}增长的幅度最大。在相同PI_{max}条件下,30.0 m坡长是24.4 m坡长对应产沙量的0.24～1.54倍,且随着雨强增加对应倍数增大;24.4 m坡长是12.2 m坡长对应产沙量的1.33～2.69倍,且随着雨强增加对应倍数减小。

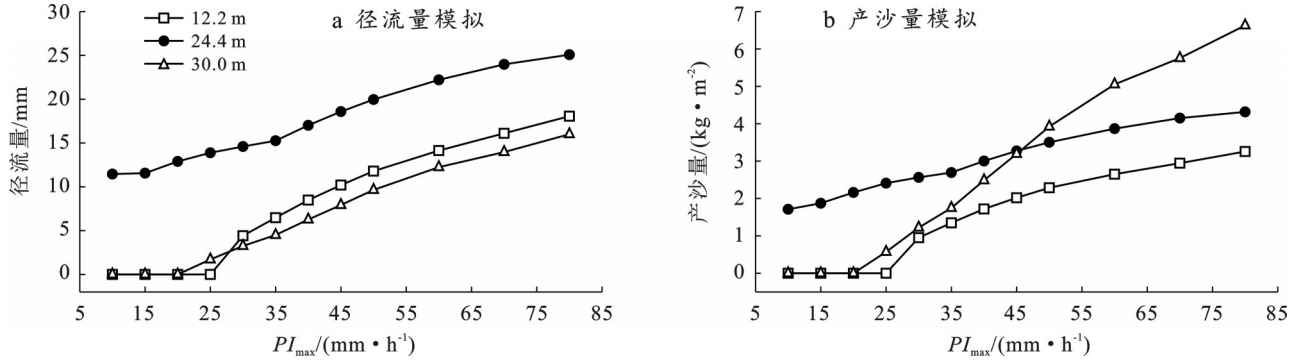


图5 不同坡长下径流量和产沙量模拟

Fig.5 Simulation of runoff and sediment yield under different slope lengths

4.4 植被盖度因素

设置3种侵蚀性降雨雨强条件:小雨强(15 mm/h)、中雨强(25 mm/h)、大雨强(35 mm/h);将植被盖度设置为:0%(裸地),20%,40%,60%,80%,90%,100%。

4.4.1 砂质坡面侵蚀随植被盖度的变化规律

使用所建的WEPP模型和获得的参数进行模拟,分析在不同日降雨量、降雨强度条件下,A_3坡面产沙量随植被盖度变化如图6所示。由图6可知,当降雨量较低时,产沙量较低,随着降雨量增大,产沙量增大,以大雨强为例,日降雨量70 mm是50 mm对应产沙量的2.10倍,日降雨量50 mm是30 mm对应产沙量的5.89倍。不同降雨强度下,产沙量由大到小的顺序为:大雨强＞中雨强＞小雨强。当降雨量相同时,随着植被盖度的增加,产沙量显著减少,以日降雨量50 mm条件下大雨强为例,当植被盖度较低时(0%～10%),产沙量相对较高,随着植被盖度增加,产沙量迅速下降。从0%～50%～100%植被盖度,产沙量从2.143 kg/m^{2}降至0.389 kg/m^2,再降至0.259 kg/m^2,分别减少了87.9%,81.8%。

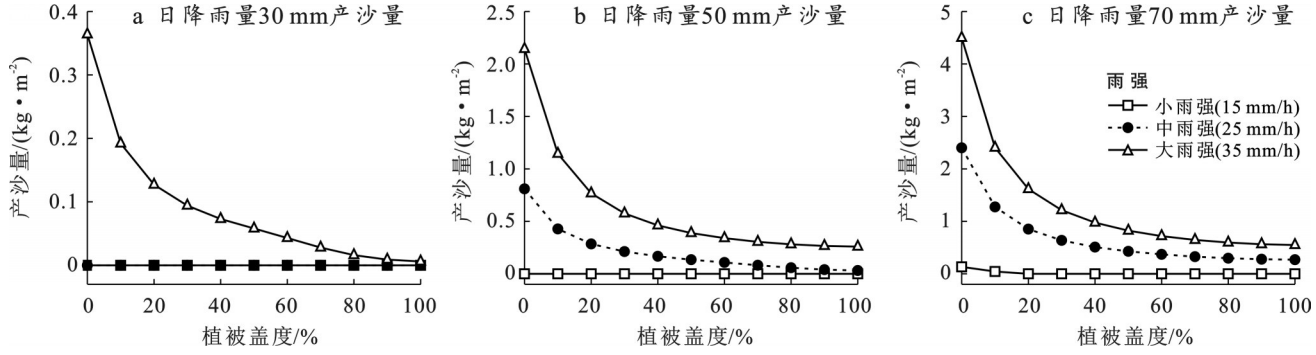


图6 不同植被盖度下A_3坡面产沙量

Fig.6 Sediment yield of slope A_3 under different vegetation coverage

4.4.2 侵蚀控制有效植被盖度确定

侵蚀控制有效植被盖度指生态修复过程中,砂质坡面侵蚀量显著降低,水土保持效益显著增大的最经济的植被盖度。采用公式(6)来计算不同植被覆盖度坡面的产沙量减少系数[28](E_r)。E_r值越高,坡面减沙效果越显著,表明植被覆盖度对砂质坡面水土保持效果越佳。

$$E_r=\frac{G_0-G_n}{G_0}\times 100\% \quad (6)$$

式中:E_r为坡面产沙量减少系数;G_0为裸地状态下产沙量(kg/m^2);G_n为植被盖度为n的产沙量(kg/m^2)。

以A_2,A_3,A_6坡面为例分析不同坡度条件下植被盖度对侵蚀量的影响,日降雨50 mm条件下,不同坡度坡面的产沙量和产沙量减少系数随植被盖度变化如图7所示。

当砂质坡面坡度为15°,小雨强时不发生侵蚀;中、大雨强,当植被盖度为10%,"E_r"值分别为47.2%

和46.6%,植被减沙效益显著;当植被盖度达到30%,E_r值分别为73.8%,73.1%;当植被盖度达到100%,E_r值分别可达到96.0%,87.9%。以中雨强为例,从裸地~50%~100%植被盖度,产沙量就从0.81 kg/m^{2}迅速下降到0.135 kg/m^{2}再降至0.032 kg/m^2,E_r值分别为0%,83.3%,96.0%。当砂质坡面坡度为25°,小雨强时发生侵蚀,同样植被盖度下比中大雨强有更高的E_r值,40%植被盖度下小雨强E_r即可达到100%,表明在强降雨条件下,植被对坡面的保护作用更为重要。40%植被盖度下小雨强E_r即可达到100%,而中雨强、大雨强E_r分别可达到77.8%,77.2%。当砂质坡面坡度为35°,小雨强不发生侵蚀;中、大雨强与15°坡面相似,但小于40%植被盖度时增长略缓,当植被盖度达到40%,中、大雨强E_r值分别为58.6%,56.6%;当植被盖度达到100%,中、大雨强E_r值分别可达到89.5%,88.3%。从裸地状态到50%植被盖度再到100%植被盖度,产沙量就从4.542 kg/m^{2}迅速下降到1.676 kg/m^{2}再到0.533 kg/m^2,E_r值分别为0%,63.1%和88.3%,对应所需侵蚀控制有效植被盖度高于15°和25°坡度。

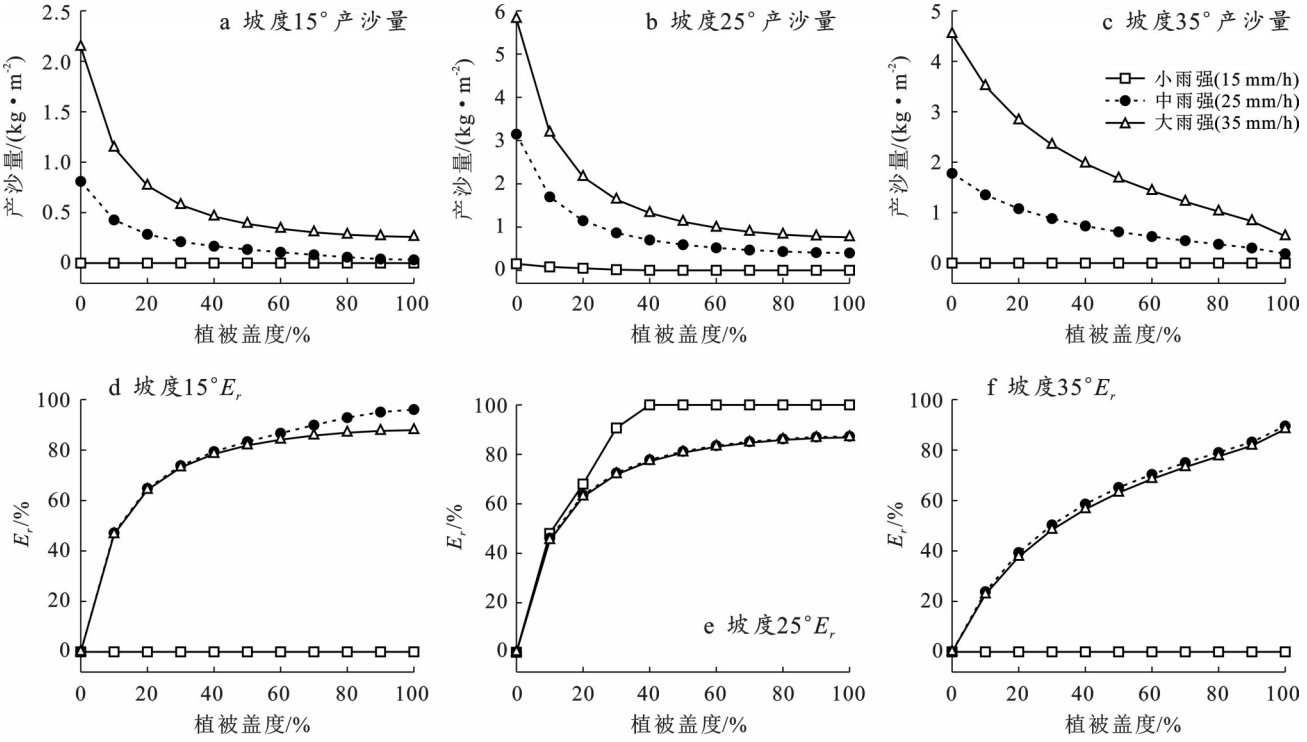


图7　不同植被盖度下不同坡度坡面产沙量和产沙量减少系数(E_r)模拟

Fig.7　Sediment yield and its reduction coefficient of slopes with different slopes under different vegetation coverage

为了比较随植被盖度增加,E_r的变化ΔE_r(式7),绘制ΔE_r与植被盖度关系图(图8)。

$$\Delta E_{r_i} = E_{r_{i+1}} - E_{r_i} \qquad (7)$$

式中:ΔE_{r_i}为植被盖度为i的产沙量减少系数增量;$E_{r_{i+1}}$为裸地植被盖度为$i+1$的产沙量减少系数;E_{r_i}为植被盖度为i的产沙量减少系数。

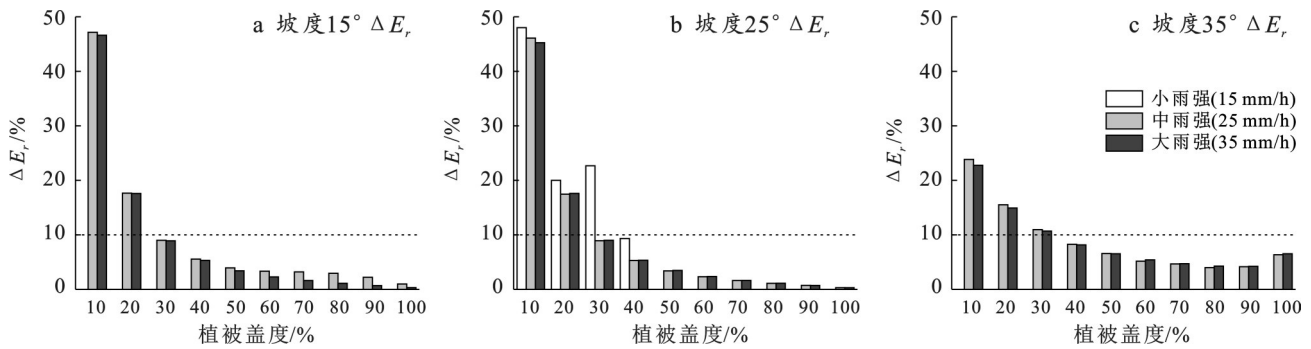


图8　不同植被盖度与坡度坡面产流产沙减少系数变化率(ΔE_r)模拟

Fig.8　Variation of reduction coefficient (ΔE_r) on slopes with different slope angles under different vegetation coverage

从图8可知，$\triangle E_r$为10%是一个突变点，当$\triangle E_r$>10%，$\triangle E_r$变化剧烈；当$\triangle E_r$<10%，$\triangle E_r$变化趋于平缓。以$\triangle E_r$=10%为依据，确定侵蚀控制有效植被盖度，当坡度为15°，25°时，有效控制砂质坡面流失的植被盖度为20%～30%；当坡度为35°时，有效控制砂质坡面流失的植被盖度为30%～40%。

以A_2，A_{10}，A_{11}坡面为例分析不同坡长条件下植被盖度对侵蚀量的影响。由于坡度较大，在不同坡长条件下，随着植被覆盖度的增加，产沙量都呈现出下降的趋势；大雨强的产沙量都较高且始终高于中雨强和小雨强；E_r随着植被覆盖度的增加而增加；小雨强时，随着植被盖度增加最终可以达到的E_r值较大，植被对减少产沙的效果更为显著。35°坡度不同坡长时有效控制坡面侵蚀的有效植被盖度仍为30%～40%。

5 讨 论

5.1 降雨特征对坡面产流产沙的影响

本研究结果表明，不同日降雨量坡面径流量与产沙量存在临界雨强，当雨强小于临界雨强时，无径流或产沙量；当雨强大于临界雨强时，随着降雨强度的增加，径流量和产沙量均增加，增长速率随着雨强的增加而变缓。李建明等[29]关于自然降雨特征和作物覆盖对三峡库区紫色土坡耕地产流产沙影响的研究中也提出临界雨强，裸坡（15°），25°，15°，10°和5°作物覆盖小区的临界降雨量分别为6，16，14，21和19 mm，临界降雨强度分别为1.1，3.6，2.7，3.3和3.2 mm/h，临界最大30 min降雨强度分别为1.2，5.7，3.8，7.6和5.6 mm/h。本研究临界雨强偏高，主要因研究区土壤质地多为粉砂土，导水率较大，雨水入渗较快，因此坡面产流产沙的临界雨强偏大。产流产沙规律方面与龙琪等[30]关于黄土坡面细沟侵蚀强度的空间分布及形态分异特征的研究结论一致。

5.2 不同坡度和坡长对坡面产流产沙的影响

本研究结果表明，不同坡度的坡面径流量与产沙量存在临界雨强。当雨强大于临界雨强时，随着坡度的增加，产沙量显著增加，但径流量先增加后减少。王婷婷等[31]研究发现，随着坡度增加，连续降雨时东北黑土区坡面径流量和产沙量均趋于增加，产流率呈现先增加后趋于平稳的变化特征。这与本研究的坡面产沙规律相似，但与产流随坡度变化规律方面存在差异，原因可能是该研究仅2种坡度（5°，10°）且坡度较缓，土壤质地为壤土，而本研究径流小区的坡度较大（15°，25°，35°），土壤质地多为粉砂土，因此坡度范围内存在临界坡度阈值。

不同坡长坡面径流量与产沙量存在临界雨强。当雨强大于临界雨强时，随着坡长的增加，产沙量显著增加，但径流量先增加后减少。径流量随坡长变化规律与高儒学等[32]的喀斯特坡耕地坡面侵蚀研究结果相符，该试验研究了坡长为5，10，15，20，25 m的径流小区在次降雨条件下土壤侵蚀随坡长的变化规律，发现年内径流深随坡长增加表现为先增大再减小。产沙方面与付兴涛等[33]的研究结果相符，该试验设计2，4，6，8，10 m共5种坡长，相近雨强下，坡面产沙量随坡长的延长而增加，同时认为1.2 mm/min是低丘缓坡经济林地侵蚀性降雨的下限，与本研究临界雨强值不同的原因可能是气候环境、土壤岩性和植被类型不同。

5.3 不同植被盖度对坡面产流产沙的影响

随着植被盖度的增加，无论是哪种坡度或降雨强度，产沙量都显著减少，而E_r值显著增加。这一结果与王瑞红等[34]关于三峡库区边坡减蚀的室内模拟降雨的研究基本相符，将植被盖度50%～60%视为三峡库区消落带库岸边坡有效控制坡面泥沙流失的临界盖度。三峡库区边坡岩性为砾质砂土，坡度45°，坡长约0.849 m，受限于试验装置坡度大，坡长短，临界植被盖度较大。

本研究于2023年基于同样的场地进行过类似研究（表5），在降雨量监测数据系列长度上，本研究在马成[35]的研究基础上增加了2024年降雨系列数据，有效降低了极端降雨对模拟结果的干扰，剔除了个别小区的场地差异对试验模拟结果的影响。在模型参数率定方面，马成监测期内两次侵蚀性降雨量差距较大，无法排除降雨对参数率定的影响；本研究两次降雨数据特征值相近，便于对照分析；马成使用单次降雨数据，以部分径流小区为模拟数据，另一部分径流小区为验证数据进行土壤参数的验证，本次研究利用两次不同的降雨情况，将所有采集到数据的小区土壤参数都进行了率定。在侵蚀控制有效植被盖度的确定方面，马成将15°，25°，35°坡面的侵蚀控制有效植被盖度确定为25%～30%，30%～40%，20%～30%；本研究表明坡度15°，25°，35°，砂质坡面侵蚀控制有效植被盖度分别为20%～30%，30%～40%。相较于马成定性分析E_r变化确定侵蚀控制有效植被盖度，本研究引入$\triangle E_r$定量分析E_r的变化，找到$\triangle E_r$的突变点，以$\triangle E_r$=10%为依据，确定对应的侵蚀控制有效植被盖度，结果更科学严谨。

6 结 论

（1）WEPP模型建立与参数率定。本研究基于

野外实测数据,构建了陕西省渭南市合阳县申东砂场的砂质坡面径流小区的WEPP模型,并通过参数率定获得了模型各个参数值,进一步优化了模型的预测能力。

表5　与课题组前期研究成果比较

Table 5　Research differences between before and now

差异比较		马成[35]		本研究	
降雨监测数据系列长度		2022—2024年		2022—2025年	
降雨数据	日期	20230820	20230919	20240717	20240909
	日降雨量/(mm·d^{-1})	76.2	49.8	35.6	20.6
	降雨历时/h	20	13	2	2
	PI_{max}/(mm·h^{-1})	13.8	20.2	75.6	62.4
模型参数率定		使用单次降雨数据,以部分径流小区为模拟数据,另一部分径流小区为验证数据		通过两次不同的降雨,将所有采集到数据的小区土壤参数都进行了率定	
侵蚀控制有效植被盖度	15°	25%～30%		20%～30%	
	25°	30%～40%		20%～30%	
	35°	20%～30%		30%～40%	

(2)利用所建的WEPP模型和所获取的相关参数,对砂质坡面不同降雨量、坡度、坡长的径流量与产沙量进行模拟,模拟结果表明:①砂质坡面径流与产沙量在不同降雨、坡度、坡长时存在临界雨强,当低于临界雨强时,无径流或产沙发生。当日降雨量为50 mm时,发生径流或产沙的临界雨强分别为16和17 mm/h;对于25°砂质坡面,发生径流或产沙的临界雨强分别为14.3和16.75 mm/h,当坡长为24.4 m时,发生径流或产沙的临界雨强小于5 mm/h。②当雨强大于临界雨强,降雨量相同时,初期径流量与产沙量随雨强增大线性增加,雨强越大,直线斜率越大;随雨强增加,坡面径流量和产沙量均增加,但增速渐缓。雨强相同时,坡面径流量与产沙量由大到小的顺序为日降雨量70 mm>50 mm>30 mm。③当雨强大于临界雨强时,坡面径流量顺序为坡度25°>15°>35°;产沙量顺序为35°>25°>15°。④当雨强大于临界雨强时,砂质坡面径流量的顺序为坡长24.4 m>12.2 m>30.0 m;当PI_{max}<45 mm/h时,砂质坡面产沙量顺序为:24.4 m>30.0 m>12.2 m;当PI_{max}>45 mm/h时,砂质坡面产沙量的顺序为:30.0 m>24.4 m>12.2 m。

(3)砂质坡面侵蚀控制有效植被盖度确定。基于WEPP模型模拟结果可知,坡度15°和25°,35°有效控制砂质坡面侵蚀的植被盖度分别为20%～30%,30%～40%。

(4)建议开展不同坡度、侵蚀控制有效植被盖度下砂质坡面包气带水分-养分承载力研究,为砂质坡面生态修复和生态环境良性循环发展提供科学依据。

参考文献(References)

[1] Balasubramanian A. Soil erosion: Causes and effects [J]. Centre for Advanced Studies in Earth Science, University of Mysore, Mysore, 2017,12:1-7.

[2] Wang Jing, Lu Pingda, Valente D, et al.Analysis of soil erosion characteristics in small watershed of the loess tableland plateau of China [J]. Ecological Indicators, 2022,137:108765.

[3] Song Shijie, Niu Ruilin, Yang Shuai, et al. Effects of coal mining subsidence on loess slope morphology and soil erosion in the middle reaches of the Yellow River [J]. Applied Sciences, 2025,15(10):5684.

[4] Michalopoulou M, Depountis N, Nikolakopoulos K, et al. The significance of digital elevation models in the calculation of *LS* factor and soil erosion [J]. Land, 2022,11(9):1592.

[5] Ahmed I A, Talukdar S, Baig M R I, et al. Quantifying soil erosion and influential factors in Guwahati's urban watershed using statistical analysis, machine and deep learning [J]. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2024,33:101088.

[6] Kinnell P I A. Comparing WEPP with USLE based models: The role of bare fallow runoff and soil loss plots [J].Soil and Tillage Research, 2025,248:106413.

[7] Kinnell P I A. The influence of time and other factors on soil loss produced by rain-impacted flow under artificial rainfall [J]. Journal of Hydrology, 2020,587:125004.

[8] Chen Tao, Shu Jisen, Han Liu, et al. Modeling the effects of topography and slope gradient of an artificially formed slope on runoff, sediment yield, water and soil loss of sandy soil [J]. Catena, 2022,212:106060.

[9] Liu B Y, Nearing M A, Shi P J, et al. Slope length

effects on soil loss for steep slopes [J]. Soil Science Society of America Journal, 2000,64(5):1759-1763.

[10] Ma Bo, Liu Gang, Ma Fan, et al. Effects of crop-slope interaction on slope runoff and erosion in the Loess Plateau [J]. Acta Agriculturae Scandinavica (Section B: Soil & Plant Science), 2018,69(1):12-25.

[11] Qi Yanbing, Li Yike, Cao Chenyang, et al. Impact assessment of river evolution in the Yellow River using ecohydraulic model [J]. Ecohydrology, 2025, 18(3): e70046.

[12] Li Huichun, Guan Qingyu, Sun Yunfan, et al. Spatiotemporal analysis of the quantitative attribution of soil water erosion in the upper reaches of the Yellow River basin based on the RUSLE-TLSD model [J]. Catena, 2022,212:106081.

[13] 管艳宁.浅析合阳县设施农业发展现状及对策[J].种子科技,2020,38(2):106-107.
Guan Yanning. Analysis on the development status and countermeasures of facility agriculture in Heyang County [J]. Seed Science & Technology, 2020,38(2): 106-107.

[14] 陶玲,薛向宇,任汉儒,等.黄河陕西段表层沉积物重金属空间分异影响因子及来源解析[J].环境科学,2026,47(1):244-255.
Tao Ling, Xue Xiangyu, Ren Hanru, et al.Analysis of the influencing factors and sources of spatial differentiation of heavy metals in surface sediments of the Shaanxi section of the Yellow River [J]. Environmental Science, 2026,47(1):244-255.

[15] 沈永东.合阳县北郭村黄土滑坡特征及其复活成因探究[D].陕西 西安:西北大学,2021.
Shen Yongdong. Characteristics of loess landslide in Beiguo village, Heyang County and its resurrection causes [D]. Xi'an, Shaanxi: Northwest University, 2021.

[16] 梁喜幸,戴志军,黄鹄,等.基于无人机航测的红树林潮滩地貌高程反演[J].海洋科学进展,2024,42(2):384-399.
Liang Xixing, Dai Zhijun, Huang Hu, et al. Elevation inversion of mangrove tidal flat geomorphology based on UAV aerial survey [J]. Advances in Marine Science, 2024,42(2):384-399.

[17] 王合玲.艾比湖流域土壤有机质与影响因素响应关系研究[D].新疆 乌鲁木齐:新疆大学,2013.
Wang Heling. Response relationship study on soil organic matter and related influencing factors in Ebinur Lake Basin [D]. Urumqi, Xinjiang: Xinjiang University, 2013.

[18] Bhayunagiri I B P, Saifulloh M. Mapping of subak area boundaries and soil fertility for agricultural land conservation [J]. Geographia Technica, 2022,17(2):208-219.

[19] Zhang Bin, Yang Yansheng, Zepp H. Effect of vegetation restoration on soil and water erosion and nutrient losses of a severely eroded clayey Plinthudult in southeastern China [J]. Catena, 2004,57(1):77-90.

[20] Laflen J M, Elliot W J, Simanton J R, et al. WEPP: Soil erodibility experiments for rangeland and cropland soils [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1991,46(1):39-44.

[21] 隗晓琪,吴松柏.坡形对坡面侵蚀过程的影响机制研究[J].中国农村水利水电,2023(7):117-123.
Wei Xiaoqi, Wu Songbai. Research on the effects of the slope shape on the soil erosion process on the sloping surface [J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(7):117-123.

[22] Flanagan D C, Ascough J C, Nearing M A, et al. The water erosion prediction project (WEPP) model [M]// Landscape Erosion and Evolution Modeling. Boston, MA: Springer US, 2001:145-199.

[23] 孙芳媛.不同耕作措施对坡耕地水土流失的影响[D].广东 广州:华南农业大学,2017.
Sun Fangyuan. Effects of different cultivation measures on soil erosion of sloping farmland [D]. Guangzhou, Guangdong: South China Agricultural University, 2017.

[24] 胡云华,贺秀斌,郭丰.CLIGEN天气发生器在长江上游地区的适用性评价[J].中国水土保持科学,2013(6):58-65.
Hu Yunhua, He Xiubin, Guo Feng. An applicability assessment of the weather generator CLIGEN used in the upper Yangtze River [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2013(6):58-65.

[25] Akin A A, Nguyen G, Sheshukov A Y. Infiltration-based variability of soil erodibility parameters evaluated with the jet erosion test [J]. Water, 2024,16(7):981.

[26] 余新晓,秦富仓.流域侵蚀动力学[M].北京:科学出版社,2007.
Yu Xinxiao, Qin Fucang. Erosion Dynamics of Watershed [M]. Beijing: Science Press, 2007.

[27] 杜波.WEPP模型在岩溶石漠化地区适用性评价:以关岭享乐小流域为例[D].贵州 贵阳:贵州大学,2017.
Du Bo. Applicability evaluation of WEPP model in karst rocky desertification area [D]. Guiyang, Guizhou: Guizhou University, 2017.

[28] Niu Lele, Hu Jinfei, Li Pengfei, et al. The effect of vegetation restoration on erosion processes and runoff on a hillslope under simulated rainfall [J]. Water, 2025, 17(16):2411.

[29] 李建明,丁文峰,冉文建,等.自然降雨特征和作物覆盖对三峡库区紫色土坡耕地产流产沙影响[J].农业工程

学报,2025,41(8):137-146.
Li Jianming, Ding Wenfeng, Ran Wenjian, et al. Effects of natural rainfall characteristics and crop coverage on runoff and sediment yield in purple soil slope cultivated land in the Three Gorges reservoir area [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025,41(8):137-146.

[30] 龙琪,韩剑桥,何育聪,等.黄土坡面细沟侵蚀强度的空间分布及形态分异特征[J].水土保持学报,2022,36(1):1-7.
Long Qi, Han Jianqiao, He Yucong, et al. Spatial distribution of rill erosion intensity on loess slope and its morphology differentiation characteristics [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(1):1-7.

[31] 王婷婷,沈海鸥,梁羽石,等.不同坡度条件下连续降雨及汇流对黑土坡面侵蚀的影响[J].水土保持学报,2025,39(2):12-20.
Wang Tingting, Shen Haiou, Liang Yushi, et al. Effects of continuous rainfall and runoff under different slope conditions on hillslope soil erosion in the black soil region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025,39(2):12-20.

[32] 高儒学,高华端,宋江平,等.坡长对贵州喀斯特区黄壤坡耕地土壤侵蚀的影响[J].水土保持研究,2018,25(2):53-57.
Gao Ruxue, Gao Huaduan, Song Jiangping, et al. Influence of slope length on soil erosion in yellow sloping farmland of Karst [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018,25(2):53-57.

[33] 付兴涛,张丽萍,叶碎高,等.经济林地坡长对侵蚀产流动态过程影响的模拟试验研究[J].水土保持学报,2009,23(5):5-9.
Fu Xingtao, Zhang Liping, Ye Suigao, et al. Simulated study on influence of slope length on erosion runoff yield process in economic forest [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009,23(5):5-9.

[34] 王瑞红,李明鑫,张瀚,等.不同植被盖度对三峡库区边坡减蚀的室内模拟降雨研究[J].水土保持学报,2023,37(1):59-64.
Wang Ruihong, Li Mingxin, Zhang Han, et al. Study on indoor simulated rainfall with different vegetation coverage on slope erosion reduction in the Three Gorges reservoir area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(1):59-64.

[35] 马成.黄河流域陕西段脆弱生态区坡面侵蚀特征与有效植被盖度研究[D].陕西 西安:长安大学,2024.
Ma Cheng. The slope erosion characteristics and effective vegetation coverage in the vulnerable ecological regions in the Shaanxi section of the Yellow River basin [D]. Xi'an, Shaanxi: Chang'an University, 2024.

(上接第 276 页)

[21] 孟健.腐殖酸肥料在农业生产中的应用进展[J].新农业,2024(12):60-61.
Meng Jian. Application progress of humic acid fertilizer in agricultural production [J]. Xin Nongye, 2024(12):60-61.

[22] 曹卫东,包兴国,徐昌旭,等.中国绿肥科研60年回顾与未来展望[J].植物营养与肥料学报,2017,23(6):1450-1461.
Cao Weidong, Bao Xingguo, Xu Changxu, et al. Reviews and prospects on science and technology of green manure in China [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2017,23(6):1450-1461.

[23] 山仑,邓西平,苏佩,等.挖掘作物抗旱节水潜力:作物对多变低水环境的适应与调节[J].中国农业科技导报,2000,2(2):66-70.
Shan Lun, Deng Xiping, Su Pei, et al. Exploitation of crop drought resistance and water-saving potentials: Adaptability of the crops to the low and variable water conditions [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2000,2(2):66-70.

[24] 田露,刘景辉,赵宝平,等.保水剂和微生物菌肥配施对旱作土壤理化性质和燕麦产量的影响[J].中国土壤与肥料,2021(4):109-117.
Tian Lu, Liu Jinghui, Zhao Baoping, et al. Effects of the combination of super absorbent polymer and microbial fertilizer on soil physical and chemical properties and oat yield in dry farmland [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2021(4):109-117.