

生产建设项目工程堆积体土壤侵蚀预测模型构建

王文龙^{1,2}, 李建明^{2,3}, 康宏亮⁴, 郭明明⁵, 李宏伟⁶

(1.西北农林科技大学水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100; 3.长江水利委员会长江科学院, 武汉 430010; 4.长安大学土地工程学院, 西安 710054; 5.中国科学院东北地理与农业生态研究所, 哈尔滨 150081; 6.陕西省引汉济渭工程建设有限公司, 西安 710000)

摘要: 为建立适用于我国不同区域生产建设项目工程堆积体土壤侵蚀预测模型, 在通用土壤侵蚀模型 (universal soil loss equation, USLE) 框架下, 室内概化模拟不同土壤质地、坡度坡长、砾石质量分数等工况下的工程堆积体, 通过大量人工模拟降雨试验, 修订模型各因子, 构建工程堆积体土壤侵蚀量预测模型, 并对其进行验证。研究明确工程堆积体标准小区及各因子定义及计算方法, 提出采用土石质因子代替传统的土壤可蚀性因子以便更加符合工程堆积体实际, 构建以幂函数计算的坡度、坡长因子, 与砾石质量分数的指数函数计算的土石质因子和降雨侵蚀力因子相乘的工程堆积体侵蚀量预测模型。经率定与验证, 模型预测效果良好 ($R^2 > 0.8$), 且能适用于不同区域及工况下工程堆积体边坡土壤流失量预测, 该模型参数少且易获取并具有物理意义, 现场操作性和实用性强。研究成果为生产建设项目水土保持工作及水行政主管部门的监督执法提供技术指导及科学依据, 具有较大的科学意义与指导生产实践价值。

关键词: 工程堆积体; 预测模型; 土石质因子; 参数修订; 生产建设项目

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)03-0027-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.03.004

Soil Erosion Prediction Model for Spoil Heaps in Production and Construction Projects

WANG Wenlong^{1,2}, LI Jianming^{2,3}, KANG Hongliang⁴, GUO Mingming⁵, LI Hongwei⁶

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 3.Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010; 4.School of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054; 5.Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081; 6.Hanjiang-to-Weihe River Valley Water Diversion Project Construction Co. Ltd., Xi'an 710000)

Abstract: The study aims to establish a soil loss prediction model in spoil heaps of production and construction projects for different regions in our country. A series of indoors artificial simulated rainfall tests were carried out on the spoil heaps with different soil texture, slope length and gravel content. The soil loss prediction model of spoil heaps was established in the framework of Universal Soil Loss Equation (USLE), and the factor parameters were revised. The study clarified the definition of the standard plot of the engineering spoil heaps and the methods to calculate each factor and proposes to use the soil-rock factor to replace the traditionally used erodibility factor, as to be more consistent with the actual situation. The results showed that the power function is used to calculate the spoil heaps slope degree and slope length factor, and the soil and rock factor is calculated by the exponential function combined with the gravel mass fraction, which can effectively predict the rainfall events erosion of the spoil heaps. The calculation method of the model was to multiply rainfall erosivity, slope degree, slope length and soil and rock factor. The calibration and verification

收稿日期: 2022-10-20

资助项目: 水利部公益性行业专项(201201048, 201201047); 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB3-13); 国家自然科学基金项目(41701316)

第一作者: 王文龙(1964—), 男, 博士, 博士生导师, 研究员, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: wllwang@nwsuaf.edu.cn

通信作者: 王文龙(1964—), 男, 博士, 博士生导师, 研究员, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: wllwang@nwsuaf.edu.cn

showed the model prediction effect is good, which can be applied to different soil types of engineering spoil heaps. The parameters of each factor of the model were easy to obtain and had physical meaning, and the field operability and practicability were strong. Results provide technical guidance and scientific basis for the soil and water conservation work of production and construction projects and the supervision and law enforcement of water administrative departments, and have great scientific significance and production application and guiding value.

Keywords: spoil heaps; predictive model; soil and gravel factor; factor revision; production and construction projects

由美国农业部主导研发的经验性模型通用土壤流失方程^[1](universal soil loss equation, USLE), 主要用于农地或草地坡面多年平均土壤流失量的预测预报, 于 1965 年正式对外发表, 该机构于 1978 年开始对该模型进行修订, 修订后的模型修正通用土壤流失方程(revised universal soil loss equation, RUSLE)于 1997 年得到正式发表, 模型在美国乃至世界范围内得到广泛应用。USLE 及 RUSLE 对我国土壤侵蚀预测模型的研究具有积极促进作用。国内刘宝元等^[2]、江忠善等^[3]和蔡强国等^[4]为代表的不少学者以 USLE 为模板, 通过参数修正等方法尝试构建地方或区域的土壤侵蚀预测模型。另外根据地域差异, 先后提出东北漫岗丘陵^[5]、黄土高原^[6]、南方红壤区^[7]、滇东北山区^[8]、长江三峡库区^[9]和华南地区^[10]等区域土壤侵蚀预测模型, 取得系列成果。目前, 多数土壤侵蚀预测模型主要针对的是传统农耕地或荒地, 对模型是否适用于人为扰动强烈的生产建设项目土壤侵蚀量预测仍未形成共识。

现阶段, 生产建设项目土壤侵蚀已成为新增水土流失的主要来源之一^[11]。在欧洲等发达国家, 较早开始关注由生产建设项目导致的侵蚀问题, 重点集中在采矿废弃地的土地复垦及植被修复、公路铁路及水利工程等侵蚀边坡防治及恢复等方面^[12]。我国针对工程建设造成的侵蚀问题引发关注主要从 20 世纪 50 年代开始, 至 80 年代得到较大发展, 其中, 以采矿活动造成的水土流失问题为代表, 重点开展矿区废弃地的土地复垦方面研究, 至 90 年代, 为有效控制建设项目导致的侵蚀和土地退化问题, 专门组织研讨会探索对应防治策略^[13]。在该阶段, 中华人民共和国水土保持法的颁布, 为生产建设项目水土保持工作提供法律依据和技术支撑。随着生产建设项目土壤侵蚀与水土保持研究的持续深入, 如何准确预测生产建设项目造成的水土流失成为关键。将 USLE、RUSLE 等^[14]模型应用于煤矿开发过程中土壤侵蚀量预测方面取得系列成果。在我国, 针对生产建设项目新增水土流失量的研究主要通过自然观测、模拟降雨及冲刷试验等, 蔺明华等^[15]基于大量的模拟试验和观测结果, 提出数学模型法、新增土壤侵蚀系数法和水土流

失系数法可用于工程建设侵蚀量的预测; 苏彩秀等^[16]着重指出, 相较于 USLE 模型, RUSLE 模型辅以 GIS 技术更加适用于工况复杂的工程建设项目侵蚀量预测工作, 该方面研究也将是今后研究者重点关注及行业发展趋势; 黄翌等^[17]以 RUSLE 结合数字地形分析、遥感影像融合等技术, 阐明黄土高原山地煤矿开采导致地表平均坡度和坡长在 10 年内呈减少趋势, 进而导致侵蚀量减少。目前, 工程建设区导致的土壤侵蚀预测模型的构建主要是以 USLE 或 RUSLE 为理论基础及框架, 但由于大部分的研究对象较单一, 用于构建模型的基础数据有限, 约束模型适用性及推广性。

综上所述, 对于生产建设项目土壤侵蚀规律已引起较多关注, 并取得一定进展, 对工程堆积体侵蚀机理的认识也在进一步加深。目前, 对生产建设项目土壤侵蚀预测模型尚未形成统一的标准, 且缺乏从大区域尺度的概化模型, 导致生产建设项目土壤侵蚀预测无法有效指导生产实践中各项水土保持措施的设计及效益发挥, 进一步使得水土保持方案中土壤侵蚀量预测缺乏必要的科学依据, 严重滞后于生产实际的需要。该研究基于前期大量野外调查, 室内概化堆积体, 通过对影响生产建设项目工程堆积体土壤侵蚀主要因子分别进行修订, 最终提出一个适用于不同土质类型及工况条件下工程堆积体的土壤侵蚀预测模型。为生产建设项目水土保持方案编制、水行政主管部门监督执法提供科学依据, 进一步完善我国土壤侵蚀模型研究的涵盖范围, 具有重要的科学意义与生产应用价值。

1 材料与方法

1.1 模型概化及因子定义

1.1.1 基本形式 USLE 模型表达为:

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

式中: A 为任一坡耕地在特定的降雨、作物管理制度及所采用的水土保持措施下, 单位面积年平均土壤流失量 $[t/(hm^2 \cdot a)]$; R 为降雨侵蚀力因子 $[(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h \cdot a)]$, 是单位降雨侵蚀指标, 如果融雪径流显著, 需要增加融雪因子; K 为土壤可蚀性因子 $[(t \cdot hm^2 \cdot h)/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)]$, 标准小区上单位

降雨侵蚀指标的土壤流失量; L 为坡长因子(无量纲),等于其他条件相同时实际坡长与22.13 m相比土壤流失量比值; S 为坡度因子(无量纲),等于其他条件相同时,实际坡度与9%坡度相比土壤流失量比值; C 为作物覆盖和管理因子(无量纲),等于其他条件相同时,特定植被和经营管理地块上的土壤流失与标准小区土壤流失量之比; P 为水土保持措施因子(无量纲),等于其他条件相同时,实行等高耕作,等高带状种植或修地埂、梯田等水土保持措施后的土壤流失与标准小区上土壤流失量之比。

在综合已有研究^[18]基础上,以USLE为蓝本,建立生产建设项目工程堆积体土壤侵蚀预测模型。由于工程堆积体在堆弃短期内没有作物覆盖和管理,缺少水土保持措施,因此,模型中的 C 与 P 均取值为1;另一方面,由于工程堆积体由人工堆填形成,物质组成复杂,与传统的坡面有较大区别,其中砾石掺杂是主要方面,USLE中可蚀性指土壤的可蚀性,对生产建设项目并不适用。因此,将表征堆积物质对侵蚀的敏感程度称为土石质因子(T)。最终确定生产建设项目工程堆积体土壤侵蚀预测模型基本形式,计算公式为:

$$A = R \cdot T \cdot LS \quad (2)$$

式中: A 为土壤流失量(t/hm^2); R 为降雨侵蚀力因子 $[(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h)]$; T 为土石质因子 $[(t \cdot hm^2 \cdot h)/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)]$; LS 为坡长坡度因子(无量纲)。

1.1.2 工程堆积体标准小区及因子定义 USLE的建立是基于农耕地标准小区而定,坡度为9%,坡长(均指投影坡长,特别提及的斜坡长指实际坡度下量测得到的坡面长度)为22.13 m,由于我国地域辽阔,不同地区间地形地貌差异大,与USLE有较大差异。基于前期对我国6大水蚀类型区共计368座工程堆积体各项参数的实地调查^[19],经统计分析,堆积体大部分是土石混合介质,其坡度的平均值为33.5°,斜坡长平均值为4.99 m。由于统计得到的坡度均值甚至超过自然休止角,对堆积体稳定性产生影响;同时,考虑室内试验装置的可操作性及安全性,结合野外工程堆积体实际情况,确定工程堆积体标准小区的坡度为25°,坡长为4.53 m(25°条件下斜坡长为5 m)。基于前期研究,重新明确生产建设项目工程堆积体标准小区和各因子定义。

(1)生产建设项目工程堆积体标准小区。坡度为25°,坡长为4.53 m,在人力及机械等外力作用下形成的裸露松散土石混合介质坡面。

(2)坡度因子(S)。借鉴USLE中坡度因子的计算方法,坡度因子指在工程堆积体标准小区条件下[即降雨侵蚀力因子(R)、土石质因子(T)和坡长因子(L)相同],实际坡度条件下产生的流失量与坡度

为25°的工程堆积体产生的侵蚀量之比。

(3)坡长因子(L)。借鉴USLE中坡长因子的计算方法,坡长因子指在工程堆积体标准小区条件下[即降雨侵蚀力因子(R)、土石质因子(T)和坡度因子(S)相同],实际坡长条件下产生的流失量与坡长为4.53 m的工程堆积体产生的侵蚀量之比。

(4)土石质因子(T)。为在标准小区试验条件下(坡度为25°,坡长为4.53 m),单位降雨侵蚀力产生的堆积体侵蚀量,通过计算侵蚀量(A)与侵蚀影响因子乘积(RLS)之比得到。通过计算不同砾石质量分数(砾石质量与土石混合介质总质量之比)下的 T 可以得到 T 与砾石质量分数的定量关系。

(5)降雨侵蚀力因子(R)。 R 定义与USLE保持一致,指由降雨导致的侵蚀下垫面发生侵蚀的潜力,该因子主要与降雨时长、降雨强度及降雨量相关^[18]。

1.2 试验设计与标准化处理

1.2.1 试验设计 模拟降雨试验设计4个坡度(15°, 25°, 30°和35°),斜坡长设置为3, 5, 6.5, 12 m(在25°条件下的投影坡长分别为2.72, 4.53, 5.89, 10.88 m)。基于野外大量的调查^[11]统计表明,堆积体坡面以土石混合介质为主,且砾石质量分数集中在0~40%的占比超过90%,砾石粒径分布范围集中在10~36 mm,单个砾石的粒径只有在 $D > 10$ mm才呈现出明显的重力分选现象,且堆积体土石混合介质中的砾石并非是单一粒径组成,而是由多粒径组合而成。因此,试验砾石为机械碎石分选获取,以砾石能被搬运作为依据,确定粒径 $D < 50$ mm作为试验砾石,并将堆积体中的粒径划分为 $D < 14$ mm, $14 \text{ mm} < D < 25$ mm, $25 \text{ mm} < D < 50$ mm 3级,不同粒径的质量百分比为3:5:2,混合后的砾石与土壤充分混合形成堆积体土石混合介质。试验用土采用砂土、壤土、黏土3种类型,与配置好的砾石按照不同质量配比配置。

试验在中国科学院水利部水土保持研究所模拟降雨大厅完成,该实验室降雨装置的雨滴降落高度为16 m,能够有效模拟自然降雨的终点速度,降雨装置的降雨强度可调节范围为30~350 mm/h,均匀度 $> 90\%$ 。试验钢槽为自行研发并生产的可移动液压式变坡钢槽,尺寸包括为5.0 m $\times$ 1.0 m $\times$ 0.5 m, 6.5 m $\times$ 1.5 m $\times$ 0.5 m和12.0 m $\times$ 3.0 m $\times$ 0.5 m,试验槽坡度调整范围为0~36°^[11]。

试验所用砂土取自陕西榆林靖边县,具有土壤颗粒质地轻、粉砂粒含量多等特点;壤土在试验地(陕西杨凌)获取,土壤质地黏重;黏土取自江西省南昌市新建县,归属于红壤类别。堆积体是将经过筛分后的土壤与不同粒径混合砾石在装槽前均匀混合,土壤与砾石按照不同质量配比配置,分别设置0(纯土体),10%,

20%,30%。仅壤土做大砾石质量分数下(40%,50%)的降雨试验。

为使不同土壤质地工程堆积体具有可比性,先对试验土壤进行 6 mm 粒径筛分,使其处于相同水平,处理好的土壤与砾石通过人工多次搅拌均匀用于装填。装填深度为 40 cm,为模拟自然堆积体自然排水,底部首先装填 10 cm 细砂。装填土石混合介质共计 30 cm,分 3 层,每层 10 cm,各层按照设计容重进行压实并打毛,最表层不压实仅进行刮平,模拟堆积体表层松散特性。试验槽装填完成后放置 24 h 令其自然沉降,各层之间充分融合,随后用于模拟试验。

各工况下分别进行不同降雨强度的模拟试验,降雨强度分别设置为 60,90,120,150 mm/h。模拟降雨产流历时均设置为 45 min。

1.2.2 数据标准化处理 接取不同降雨强度及不同工况下工程堆积体产沙,测定次降雨产沙量。为使各组试验数据能够有效进行叠加及对比分析,各场次降雨试验计算的侵蚀量均换算为单位投影面积上的侵蚀量。

2 结果与分析

已有研究^[20]表明,USLE 适用于多年平均土壤流失量的预测,对单次降雨的侵蚀预测不适用。为此,采用多场次的结果叠加后再计算。将 4 种不同降雨强度条件下产生的土壤流失量之和用于建立模型,并进一步对模型中各因子分别进行修订。

2.1 坡长因子(L)修订

根据定义,生产建设项目工程堆积体坡长因子修订采用 2.72,4.53,5.89,10.88 m 4 种坡长试验数据,壤土试验槽宽度为 1.5 m。其中 2.72,5.89,10.88 m 均采用壤土试验数据,而坡长 4.53 m(标准小区坡长)采用砂土、壤土和黏土 3 种平均值作为计算值,砂土和黏土试验槽宽度为 1.0 m。降雨强度包括 60,90,120,150 mm/h 4 种类型。为避免重复考虑砾石影响,进行坡长和坡度因子修订时砾石质量分数为 0。

计算不同坡长下(2.72,4.53,5.89,10.88 m)4 次降雨的总侵蚀量与相同条件下标准小区坡长(4.53 m)的总侵蚀量之比,即可得到坡长因子(L)值。由表 1 可知,4 种坡长因子(L)值分别为 0.63,1.00,1.11,1.38。拟合坡长因子(L)与实际坡长与标准小区坡长比值($\lambda/4.53$)即为坡长因子(L)计算式。该研究提出的坡长因子 L 计算采用幂函数,得出幂函数指数为 0.552。

$$L=0.909(\lambda/4.53)^{0.552}, R^2=0.928, p=0.037 \quad (3)$$

已有研究^[21]表明,影响坡面侵蚀的地形中坡长是主要因子之一,该因子对坡面侵蚀及输沙发生发展过程具有显著影响,作用原理体现在改变侵蚀下垫

面的径流特性(包括流速、流量)进而改变径流挟沙力,最终改变土壤侵蚀强度。针对其计算方法,Foster 等^[22]研究提出,可以将不同坡长进行分段处理,各坡段的坡长因子均是其上游不同分段的因子累计;汤国安等^[23]研究进一步明确侵蚀模型中的坡长因子定义,是地面上一点沿水流方向到其流向起点的最大地面距离在水平面的投影长度;胡刚等^[24]研究黑土区地形因子算法表明,坡长指数采用与坡度相关的变值更加合理。以往研究^[18]主要是针对缓坡坡耕地、撂荒地等,针对生产建设项目坡长因子的修订目前研究较少。

表 1 工程堆积体坡长因子修订计算资料

降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	坡长/ m	单位面积侵蚀量/ (kg·m ⁻²)	相同坡长侵蚀量 之和/(kg·m ⁻²)	坡长 因子(L)
60	2.72	0.93	23.29	0.63
90	2.72	1.69		
120	2.72	7.92		
150	2.72	12.75		
60	4.53	0.67	36.92	1.00
90	4.53	1.86		
120	4.53	4.79		
150	4.53	14.03		
60	4.53	0.51	40.87	1.11
90	4.53	12.40		
120	4.53	20.38		
150	4.53	37.63		
60	4.53	0.55	51.08	1.38
90	4.53	2.33		
120	4.53	5.96		
150	4.53	9.64		
60	5.89	0.92	40.87	1.11
90	5.89	3.08		
120	5.89	18.00		
150	5.89	18.87		
60	10.88	3.00	51.08	1.38
90	10.88	4.53		
120	10.88	19.41		
150	10.88	24.15		

2.2 坡度因子(S)修订

根据定义,坡度因子修订采用 15°,25°,30°,35°的 4 个坡度试验数据,均采用壤土堆积体试验数据,试验槽宽度均为 1.0 m。降雨强度包括 60,90,120,150 mm/h 4 种。

计算不同坡度下(15°,25°,30°,35°)4 次降雨的总侵蚀量与相同条件下标准小区(25°)的总侵蚀量之比,即为模型中坡度因子(S)值。由表 2 可知,4 种坡度因子(S)分别为 0.63,1.00,0.92,1.51。坡度因子值的计算是拟合坡度因子(S)与实际坡度与标准小区坡度比值($\theta/25^\circ$)得到。该研究提出的坡度因子

(S)计算采用幂函数,其指数为 0.883。
 $S=0.966(\theta/25^{\circ})^{0.883}, R^2=0.823, p=0.093$ (4)

表 2 工程堆积体坡度因子修订计算资料

降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	坡度/ (°)	单位面积侵蚀量/ (kg·m ⁻²)	相同坡长侵蚀量 之和/(kg·m ⁻²)	坡度 因子(S)
60	15	0.32	9.44	0.63
90	15	0.37		
120	15	2.16		
150	15	6.59		
60	25	0.43	14.94	1.00
90	25	1.60		
120	25	4.64		
150	25	8.27		
60	30	0.37	13.68	0.92
90	30	0.47		
120	30	3.01		
150	30	9.83		
60	35	0.63	22.63	1.51
90	35	0.67		
120	35	7.90		
150	35	13.43		

坡度是影响坡面侵蚀地形因子的另一个主要特征,国内外学者们针对土壤侵蚀模型坡度因子也展开相关的研究。20 世纪 40 年代,Zingg^[25]通过对土壤侵蚀速率和地形因子的研究,用实证分析方法建立其相互间定量关系。在 RUSLE 中坡度因子计算采用坡度的正弦值^[26]。江忠善等^[27]基于坡面水蚀模型研究成果提出,我国坡度因子指数值变化为 1.2~1.6,主要集中在 1.30~1.45。吴普特等^[28]研究提出,坡面侵蚀量与坡度因子之间存在临界值,而非简单的线性关系,但由于研究目标及方法等不同导致临界坡度的数值有差异。

2.3 土石质因子(T)修订

生产建设项目工程堆积体相较于传统的坡面侵蚀在侵蚀下垫面物质组成上存在较大差异,不仅是包括传统土壤,更多的是混合不同含量以及粒径的砾石。由于土壤质地理化性质不同,尤其在砾石混合后,土壤与砾石之间的相互作用发生改变。该研究将工程堆积体中的土壤质地概化为砂土、壤土和黏土 3 种类型。修订土石质因子(T)时,坡度和坡长因子均在标准小区条件下开展(坡度 25°,坡长 4.53 m),降雨强度采用 60,90,120,150 mm/h 4 种,砾石质量分数为 0,10%,20%,30% 4 种。

根据定义,工程堆积体土石质因子(T)为标准小区上单位降雨侵蚀力堆积体产生的侵蚀量。因此,利用土壤侵蚀量(A)与侵蚀影响因子的乘积(B=RLS)间的正比关系来推求,为符合 USLE 的适用条

件,将多场降雨数据作为计算资料。研究将 A 与 B 的拟合关系式斜率作为土石质因子(T)值。在计算土石质因子(T)值时,需要确定降雨侵蚀力(R)和坡度坡长因子(LS)。

(1)降雨侵蚀力(R)。采用已有研究^[18]计算方法计算,具体为公式(5)~公式(7)。

$R=EI_{30}$ (5)

$E=\sum ep$ (6)

$$e=\begin{cases} 0.119+0.0873\lg I & (I\leq 76\text{ mm/h}) \\ 0.283 & (I>76\text{ mm/h}) \end{cases}$$
 (7)

式中:R 为降雨侵蚀力[(MJ·mm)/(hm²·h)];E 为降雨动能(MJ/hm²);I₃₀ 为一次降雨 30 min 最大降雨强度(mm/h);e 为单场降雨某一时段的降雨动能[MJ/(hm²·mm)];P 为对应时段的降雨量(mm);I 为对应时段的降雨强度(mm/h)。

(2)地形因子(LS)计算。根据公式(3)和公式(4)计算可得 25°的坡度因子 S=0.966,坡长 4.53 m 的坡长因子 L=0.909,最终可计算得 LS=0.878。

2.3.1 砂土土石质因子(T) 在生产建设项目工程堆积体标准小区条件下,获取砂土工程堆积体在砾石质量分数 0~30%下的侵蚀量(A)与侵蚀影响因子(B),进而计算土石质因子(T),结果见表 3。

拟合砂土工程堆积体 4 种不同砾石质量分数条件下侵蚀量(A)与侵蚀影响因子(B=RLS)之间的关系,即为砂土土石质因子(T)值,结果见图 1。

由图 1 可知,砂土工程堆积体在砾石质量分数为 0(纯土体),10%,20%,30%时的土石质因子(T)分别为 0.072 8,0.052 0,0.035 3,0.030 0 [(t·hm²·h)/(hm²·MJ·mm)]。含砾石堆积体的土石质因子均小于纯土堆积体,且随着砾石质量分数增大土石质因子(T)减小,递减幅度为 28.57%~58.79%。

为计算任意砾石质量分数的砂土堆积体土石质因子(T)值,建立土石质因子(T)与砾石质量分数(D_i)之间关系。

$T=0.071e^{-3.047D_i}, R^2=0.976, p=0.012$ (8)

式中:砾石质量分数(D_i)取小数,取值范围为 0≤D_i<1.0,当 D_i=1.0 时代表下垫面全为石子,不会被侵蚀,在该研究中不考虑该极端情况。

2.3.2 壤土土石质因子(T) 在生产建设项目工程堆积体标准小区条件下,获取壤土工程堆积体在砾石质量分数 0~30%下的侵蚀量(A)与侵蚀影响因子(B),结果见表 4。

计算壤土在 4 种砾石质量分数条件下的侵蚀量(A)与侵蚀影响因子(B=RLS)之间关系,即为不同砾石质量分数下壤土土石质因子(T),结果见图 2。

表 3 砂土堆积体土石质因子(T)计算

砾石质量 分数/%	降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	降雨侵蚀力(R)/ (10 ⁷ ·MJ·mm·hm ⁻² ·h ⁻¹)	地形因子 (LS)	侵蚀量(A)/ (10 ⁶ ·t·hm ⁻²)	侵蚀影响因子(RLS)/ (10 ⁷ ·MJ·mm·hm ⁻² ·h ⁻¹)	土石质因子(T)/ (t·hm ² ·h·hm ⁻² ·MJ ⁻¹ ·mm ⁻¹)
0	60	0.92	0.878	0.05	0.80	0.0063
	90	2.17	0.878	1.24	1.91	0.0650
	120	3.49	0.878	2.04	3.06	0.0665
	150	5.46	0.878	3.76	4.79	0.0785
10	60	1.22	0.878	0.39	1.07	0.0362
	90	2.46	0.878	0.48	2.16	0.0223
	120	3.98	0.878	1.56	3.49	0.0447
	150	5.12	0.878	2.89	4.50	0.0642
20	60	1.00	0.878	0.30	0.88	0.0334
	90	2.51	0.878	0.42	2.20	0.0193
	120	3.27	0.878	1.35	2.87	0.0470
	150	5.08	0.878	1.54	4.46	0.0345
30	60	0.90	0.878	0.24	0.80	0.0306
	90	1.88	0.878	0.64	1.65	0.0384
	120	3.27	0.878	0.74	2.87	0.0256
	150	5.31	0.878	1.43	4.67	0.0306

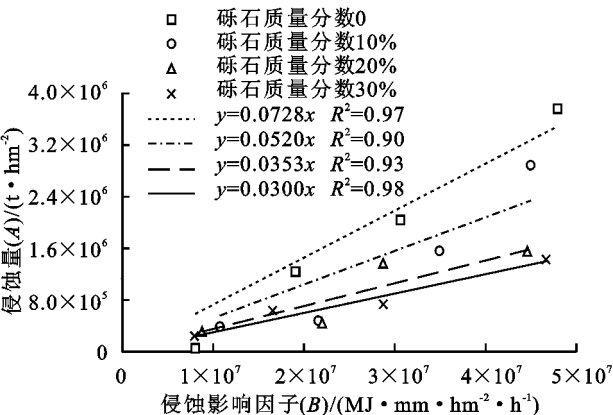


图 1 砂土不同砾石质量分数侵蚀量(A)与侵蚀影响因子(B=RLS)拟合关系

由图 2 可知,壤土工程堆积体在砾石质量分数为 0(纯土体),10%,20%和 30%时的土石质因子(T)

分别为 0.025 9,0.016 6,0.014 1,0.009 1 [(t·hm²·h)/(hm²·MJ·mm)]。与砂土堆积体分析结果一致,含砾石堆积体的土石质因子均小于纯土堆积体,随着砾石质量分数增大土石质因子(T)减少 35.91%~64.86%。

建立不同砾石质量分数下的壤土堆积体土石质因子(T)值与砾石质量分数(D_i)之间的定量关系,可以计算得到任意砾石质量分数下的土石质因子(T)值。

$$T=0.025e^{-3.301D_i}, R^2=0.972, p=0.014 \quad (9)$$

2.3.3 黏土土石质因子(T) 相对于砂土和壤土,黏土具有颗粒粗、黏性强且易黏结等特性,使得径流在坡面入渗减少,加速径流产生并导致侵蚀发生提前。在生产建设项目工程堆积体标准小区条件下,获取黏土工程堆积体在砾石质量分数 0~30%下的侵蚀量与侵蚀影响因子(表 5)。

表 4 壤土堆积体土石质因子(T)计算

砾石质量 分数/%	降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	降雨侵蚀力(R)/ (10 ⁷ ·MJ·mm·hm ⁻² ·h ⁻¹)	地形因子 (LS)	侵蚀量(A)/ (10 ⁶ ·t·hm ⁻²)	侵蚀影响因子(RLS)/ (10 ⁷ ·MJ·mm·hm ⁻² ·h ⁻¹)	土石质因子(T)/ (t·hm ² ·h·hm ⁻² ·MJ ⁻¹ ·mm ⁻¹)
0	60	0.84	0.878	0.07	0.74	0.0091
	90	1.86	0.878	0.19	1.63	0.0114
	120	3.23	0.878	0.48	2.83	0.0169
	150	4.96	0.878	1.40	4.36	0.0322
10	60	0.85	0.878	0.05	0.74	0.0070
	90	1.80	0.878	0.17	1.58	0.0108
	120	3.22	0.878	0.45	2.83	0.0159
	150	4.94	0.878	0.78	4.34	0.0180
20	60	0.81	0.878	0.04	0.71	0.0057
	90	1.85	0.878	0.11	1.62	0.0065
	120	3.21	0.878	0.39	2.82	0.0139
	150	4.97	0.878	0.67	4.36	0.0154
30	60	0.83	0.878	0.04	0.73	0.0053
	90	1.88	0.878	0.06	1.65	0.0038
	120	3.24	0.878	0.24	2.85	0.0084
	150	5.01	0.878	0.45	4.40	0.0102

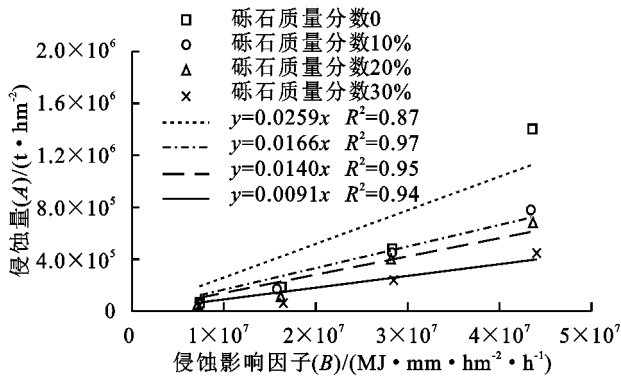


图 2 壤土不同砾石质量分数侵蚀量(A)与侵蚀影响因子(B=RLS)拟合关系

拟合黏土工程堆积体 4 种不同砾石质量分数条件下侵蚀量(A)与侵蚀影响因子(B=RLS)之间关系,即为黏土土石质因子(T)值(图 3)。

由图 3 可知,黏土工程堆积体在砾石质量分数为 0(纯土体),10%,20%,30%时的土石质因子(T)分别为 0.020 1,0.017 2,0.012 9,0.009 6 [(t·hm²·h)/(hm²·MJ·mm)]。黏土堆积体随砾石质量分数增大,土石质因子(T)减少 14.43%~52.24%。

为计算得到任意砾石质量分数下的黏土土石质因子(T)值,构建土石质因子(T)与砾石质量分数(D_i)的定量关系。

$$T=0.021e^{-2.505D_i},R^2=0.982,p=0.009 \quad (10)$$

表 5 黏土堆积体土石质因子(T)计算

砾石质量 分数/%	降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	降雨侵蚀力(R)/ (10 ⁷ ·MJ·mm·hm ⁻² ·h ⁻¹)	地形因子 (LS)	侵蚀量(A)/ (10 ⁵ ·t·hm ⁻²)	侵蚀影响因子(RLS)/ (10 ⁷ ·MJ·mm·hm ⁻² ·h ⁻¹)	土石质因子(T)/ (t·hm ² ·h·hm ⁻² ·MJ ⁻¹ ·mm ⁻¹)
0	60	0.95	0.878	0.55	0.84	0.0066
	90	1.97	0.878	2.33	1.73	0.0135
	120	3.32	0.878	5.96	2.91	0.0205
	150	5.13	0.878	9.64	4.50	0.0214
10	60	0.09	0.878	0.80	0.08	0.0103
	90	1.95	0.878	1.54	1.71	0.0090
	120	3.28	0.878	5.07	2.89	0.0176
	150	5.12	0.878	8.29	4.50	0.0184
20	60	0.91	0.878	0.80	0.80	0.0100
	90	1.87	0.878	2.01	1.65	0.0122
	120	3.33	0.878	3.24	2.92	0.0111
	150	5.18	0.878	6.30	4.55	0.0139
30	60	0.90	0.878	0.69	0.79	0.0087
	90	1.92	0.878	2.20	1.69	0.0130
	120	3.29	0.878	3.22	2.89	0.0111
	150	5.01	0.878	3.74	4.40	0.0085

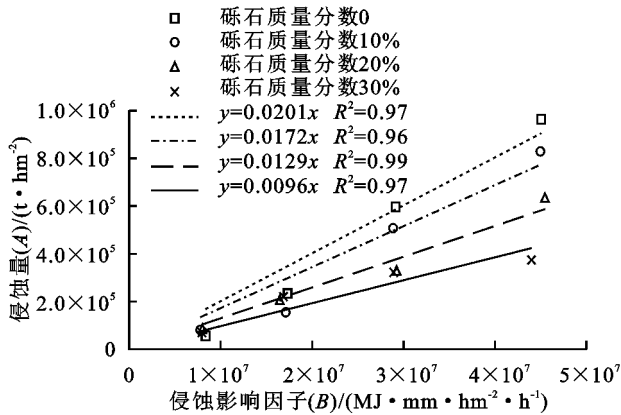


图 3 黏土不同砾石质量分数侵蚀量(A)与侵蚀影响因子(B=RLS)关系

2.4 模型框架

通过上述分析,确定生产建设项目工程堆积体土壤侵蚀量预测模型,见公式(11)。

$$A=\begin{cases} 0.283PI_{30}\cdot(ae^{-bD_i})\cdot0.909(\lambda/4.53)^{0.552}\cdot0.966(\theta/25)^{0.883} & (I>76\text{ mm/h}) \\ (0.119+0.0873\lg I)PI_{30}\cdot(ae^{-bD_i})\cdot0.909(\lambda/4.53)^{0.552}\cdot0.966(\theta/25)^{0.883} & (I\leq76\text{ mm/h}) \end{cases} \quad (11)$$

式中:砂土的 a=0.071,b=3.047;壤土的 a=0.025,b=3.301;黏土的 a=0.021,b=2.505;D_i为砾石质量分数(%),0≤D_i<1.0;θ为实际坡度(°);λ为实际坡长(m),计算时需要换算为投影坡长。

2.5 模型验证

该试验在建立模型过程中壤土采用的降雨试验是完全组合,同时,砂土和黏土完成坡度、坡长、砾石质量分数的正交试验。剔除用于模型建立的试验数据,将砂土、壤土和黏土的其他降雨场次获得的实际侵蚀量数据与模型拟合的预测值进行对比,其中,砂土和黏土堆积体分别采用 16 组降雨数据,壤土堆积体砾石质量分数在 0~30%的 72 场降雨数据,以及壤土堆积体在砾石质量分数 40%~50%的 8 场降雨数据。4 种条件下,拟合侵蚀量实测值与预测值。拟合结果(图 4)表明,模型对砂土和黏土堆积体侵蚀量预测值均高于实测值,而对壤土堆积体预测值低于实测值。对砂土、黏土、壤土、壤土砾石质量分数 40%,

50%的预测拟合方程 R^2 分别为 0.82, 0.83, 0.97, 0.99。模型对壤土大砾石质量分数及黏土堆积体的拟合效果较砂土和壤土堆积体拟合效果好,但方程经检验均有效,可用于生产建设工程堆积体土壤侵蚀量的预测。

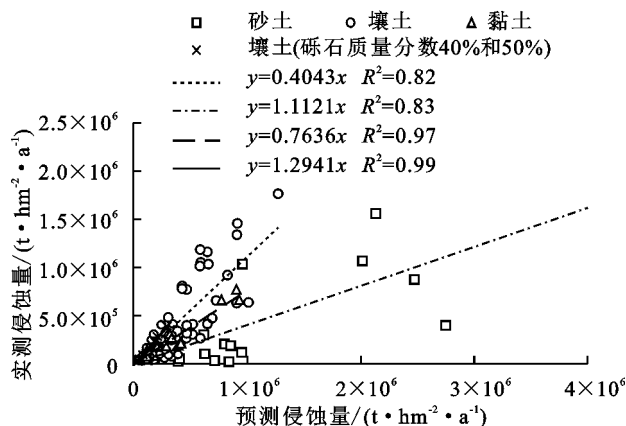


图 4 降雨实测值与模型预测值关系

为进一步验证该模型的适用性,对比牛耀彬等^[29]在陕西完成的 5 场(壤土,砾石质量分数 0)和杨兴等^[30]在四川完成的 14 场工程堆积体模拟降雨试验(黏土,砾石质量分数分别为 3%, 15%, 35%, 55%, 75%)的实测值与应用该模型计算得到的预测值。由图 5 可知,利用模型计算得到的预测值与实测值之间均存在较好的线性拟合关系($R^2 \geq 0.90$),其中,针对陕西不含砾石堆积体的 5 场预测结果与实测值之间的平均误差为 8.19%,对四川完成的 14 场不同砾石质量分数(3%~75%)堆积体的预测结果与实测值之间的平均误差为 15.37%。

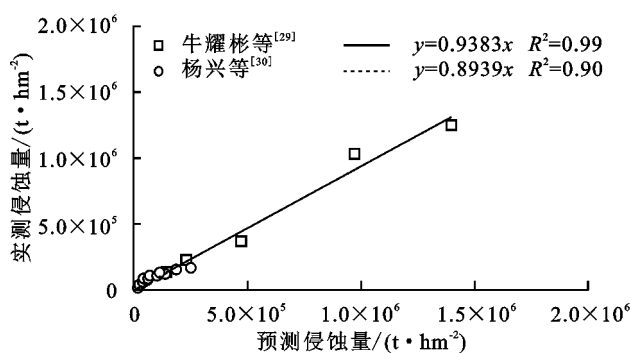


图 5 模型适用性验证

3 结论

(1)借鉴 USLE 建模思路,提出生产建设工程堆积体标准小区及模型各因子定义,对各因子构建修正计算方法。由于工程堆积体受人为扰动大,且堆积物质组成中含有不同类型、粒径及含量的砾石,借鉴土壤可蚀性定义提出土石质因子概念。

(2)借鉴已有坡度、坡长因子计算方法研究,提出以幂函数计算生产建设工程堆积体坡度及坡长

因子,其幂指数分别为 0.883, 0.552。

(3)以砂土、壤土及黏土将我国生产建设工程划分为 3 大类型区,并根据堆积体中土壤和砾石不同质量比例分别计算生产建设工程堆积体土石质因子,提出以指数函数能有效计算土石质因子。在砾石质量分数相同条件下,堆积体土石质因子呈现为砂土>壤土>黏土,随着砾石质量分数增大,土石质因子减小,即堆积体中砾石具有减少侵蚀的作用,且大砾石质量分数效果更加显著。

(4)建立生产建设工程堆积体土壤侵蚀预测模型,给出各因子的具体表达式,经率定与验证,模型预测效果较好。该模型能够适用于不同土质及工况下工程堆积体土壤侵蚀量预测,普适性强,各因子参数具有一定的物理意义,且易获取,具有很强的现场操作性和实用性。

参考文献:

- [1] Renard K G, Foster G R. RUSLE revised: Status, question, answers, and the future[J]. Soil and Water Conservation, 1997, 49(3): 213-220.
- [2] 刘宝元, 谢云, 张科利. 土壤侵蚀预报模型[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001.
- [3] 江忠善, 王志强, 刘志. 黄土丘陵区小流域土壤侵蚀空间变化定量研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(1): 1-9.
- [4] 蔡强国, 刘纪根. 关于我国土壤侵蚀模型研究进展[J]. 地理科学进展, 2003, 22(3): 242-250.
- [5] 张宪奎, 许靖华, 卢秀琴, 等. 黑龙江省土壤流失方程的研究[J]. 水土保持通报, 1992, 12(4): 1-9, 18.
- [6] 张岩, 刘宪春, 李智广, 等. 利用侵蚀模型普查黄土高原土壤侵蚀状况[J]. 农业工程学报, 2012, 28(10): 165-171.
- [7] 杨武德, 陈宝林, 睦国平, 等. 红壤坡地不同利用方式土壤侵蚀模型研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(1): 52-58, 68.
- [8] 杨子生. 滇东北山区坡耕地土壤流失方程研究[J]. 水土保持通报, 1999, 19(1): 1-9.
- [9] 杨艳生, 史德明, 吕喜玺. 长江三峡区的坡面土壤流失量和入江泥沙量研究[J]. 水土保持学报, 1991, 5(3): 22-28.
- [10] 陈法扬, 王志明. 通用土壤流失方程在小良水土保持试验站的应用[J]. 水土保持通报, 1992, 12(1): 23-41.
- [11] 李建明, 牛俊, 王文龙, 等. 不同土质工程堆积体径流产沙差异[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14): 187-194.
- [12] Wolman M G, Schick A P. Effects of construction on fluvial sediment, urban and suburban areas of Maryland[J]. Water Resources Research, 1967, 3(2): 451-464.
- [13] 杨健, 高照良, 李永红. 国内外开展开发建设工程研究进展的初步分析[J]. 中外企业家, 2010(7): 6-9.

- 河流域水文资料[M].郑州:水利部黄河水利委员会,1970.
- [16] 李二辉,穆兴民,赵广举.1919—2010 年黄河上中游区径流量变化分析[J].水科学进展,2014,25(2):155-163.
- [17] 王光辉.近 60 年黄河干流径流泥沙变异性分析[D].北京:清华大学,2019.
- [18] 高照良,付艳玲,张建军,等.近 50 年黄河中游流域水沙过程及对退耕的响应[J].农业工程学报,2013,29(6):99-105.
- [19] 李勃.黄河径流和输沙格局演变及其驱动因素研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2020.
- [20] 杨坤,刘仲秋,雷坤,等.1957—2018 年永定河流域降雨时空演变规律研究[J/OL].中国农村水利水电:1-17 [2022-11-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1419.TV.20220913.1117.024.html>.
- [21] 冉大川,刘斌,付良勇,等.双累积曲线计算水土保持减水减沙效益方法探讨[J].人民黄河,1996(6):24-25.
- [22] 颜明,张守红,许炯心,等.风水两相变化对黄河中游支流粗泥沙的影响[J].水土保持学报,2010,24(2):25-29.
- [23] Zhang X, She D L. Quantifying the sediment reduction efficiency of key dams in the coarse sandy hilly catchments region of the yellow river basin, Chian[J].Journal of Hydrology,2021,602:e126721.
- [24] 高健翎,高燕,马红斌,等.黄土高原近 70 年水土流失治理特征研究[J].人民黄河,2019,41(11):65-69,84.
- [25] 高宗军,冯国平.黄河水沙变化趋势及成因分析[J].地下水,2020,42(1):147-151.
- [26] 史辅成,张冉.近期黄河水沙量锐减的原因分析及认识[J].人民黄河,2013,35(7):1-3.
- [27] 刘晓燕.关于黄河水沙形势及对策的思考[J].人民黄河,2020,42(9):34-40.
- [28] 胡春宏,张晓明.论黄河水沙变化趋势预测研究的若干问题[J].水利学报,2018,49(9):1028-1039.

(上接第 34 页)

- [14] Aksoy H, Kavvas M L. A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models [J].Catena,2005,64(2/3):247-271.
- [15] 蔺明华,杜靖澳,张瑞.黄河中游地区开发建设新增水土流失预测方法研究[J].水土保持通报,2006,26(1):61-67.
- [16] 苏彩秀,黄成敏,唐亚,等.工程建设中产生的水土流失评估研究进展[J].水土保持研究,2006,13(6):168-170,174.
- [17] 黄翌,汪云甲,王猛,等.黄土高原山地采煤沉陷对土壤侵蚀的影响[J].农业工程学报,2014,30(1):228-235.
- [18] 程冬兵,张平仓,张长伟,等.工程开挖面土壤侵蚀模型的构建[J].农业工程学报,2014,30(10):106-112.
- [19] 马洪超,谢永生,赵暄,等.工程堆积体标准小区界定与可蚀性因子改进[J].水土保持学报,2016,30(3):59-64.
- [20] 谢云,林燕,张岩.通用土壤流失方程的发展与应用[J].地理科学进展,2003,22(3):279-287.
- [21] 黎四龙,蔡强国,吴淑安,等.坡长对径流及侵蚀的影响[J].干旱区资源与环境,1998,12(1):29-34.
- [22] Foster G R, Wischmerier W H. Evaluating irregular slopes for soil loss prediction[J].Transactions of American Society of Agricultural,1974,17(2):305-309.
- [23] 汤国安,刘学军,闫国年.数字高程模型及地学分析的原理与方法[M].北京:科学出版社,2005.
- [24] 胡刚,宋慧,刘宝元,等.黑土区基准坡长和 LS 算法对地形因子的影响[J].农业工程学报,2015,31(3):166-173.
- [25] Zingg A W. Degree and length of land slope as it affects soil loss in runoff[J].Agricultural Engineering,1940,21:59-64.
- [26] Mc Cool D K, Brown L C, Foster G R, et al. Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation [J].Transactions of ASAE,1987,30(5):1387-1396.
- [27] 江忠善,郑粉莉,武敏.中国坡面水蚀预报模型研究[J].泥沙研究,2005(4):1-6.
- [28] 吴普特,周佩华.地表坡度与薄层水流侵蚀关系的研究[J].水土保持通报,1993,13(3):1-5.
- [29] 牛耀彬,吴旭,高照良,等.降雨和上方来水条件下工程堆积体坡面土壤侵蚀特征[J].农业工程学报,2020,36(8):69-77.
- [30] 杨兴,张家喜,彭培好,等.模拟降雨条件下不同砾石含量工程边坡土壤侵蚀及水动力学特征[J].水土保持通报,2019,39(6):9-15.