

基于数据拟合分析坡面土壤侵蚀的临界坡度

周程风^{1,2}, 金鑫^{1,2}, 宋颖¹, 李霞^{1,2},
刘浩楠^{1,2}, 翟婷^{1,2}, 赵振鑫^{1,2}, 施文飞^{1,2}

(1. 桂林理工大学 环境科学与工程学院, 广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 广西 桂林 541004;
2. 桂林理工大学 环境科学与工程学院, 岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心, 广西 桂林 541004)

摘要:通过不同雨强、坡度的多段模拟降雨实验,将坡度与坡面侵蚀模数进行二次多项式拟合,求得不同条件下坡面侵蚀的临界坡度。实验结果表明,临界坡度会随着雨强、降雨历时的变化而产生规律性变化。雨强越大,临界坡度越大,对坡面侵蚀临界坡度的影响越强烈;降雨历时增加,坡面侵蚀的临界坡度也随之增大,雨强越大,临界坡度增速越快,且增速拐点出现越早。在坡面侵蚀初期,坡度增加加强了坡面径流对坡面泥沙的搬运作用,减弱了坡面的减蚀作用,使得在一定坡度范围内坡度大的坡面细沟侵蚀开始时间晚于坡度小的坡面,这是临界坡度产生的原因之一。随着坡面侵蚀过程的发展,坡面侵蚀主要发生于细沟的边缘、侧壁和底部,不同坡度坡面单位时间内的侵蚀模数差值减少且趋于稳定,坡度对于侵蚀模数的影响逐渐减小,临界坡度逐渐消失。该研究可为完善黄土区的土壤侵蚀机理提供理论依据。

关键词:土壤侵蚀;人工坡面;模拟降雨;数据拟合;临界坡度

中图分类号:P341 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2022)01-0350-07

坡度对土壤侵蚀的影响十分显著^[1],也是土壤侵蚀研究的重点。大量研究显示,坡度增加,土壤侵蚀量也会随之不断增大,但这种趋势在达到某个坡度后发生变化,侵蚀量会在坡度继续上升时下降,这一趋势变化的临界点就成为临界坡度^[2]。

国内对于临界坡度的相关研究取得了许多成果和进展。陈法扬^[3]利用土槽开展的红壤坡面降雨实验研究表明:坡度小于 18°,土壤冲刷量随坡度增加而上升,但趋势比较平缓,侵蚀量与坡度并非呈线性关系,而是指数关系;当坡度大于 25°,土坡冲刷量反而减少,其认为主要原因在于土槽坡度变化导致的降雨投影面积不同。胡世雄等使用黄土,分层填土法,进行不同坡度、雨强和雨型的实验得出黄土坡面细沟间侵蚀和面蚀的临界坡度均保持在 22°~26°^[4]。史景汉通过布设径流小区进行试验得出年冲刷量最大值发生在 28°附近,地面坡度 10°以上侵蚀作用急剧增加,20°~30°时达到峰值,此后又趋于减少^[5]。刘志等的实验结果证明在不同坡度条件下,自然裸露坡面和人工松土坡面均在 10°~15°范围内侵蚀量增加速率最大,通过回归线型可知存

在侵蚀量随坡度变化的最大值,且两种处理的坡度转折值分别为 30.4°和 37.9°^[6]。苏远逸等^[7]通过室内模拟降雨试验得出坡面产流总量与坡面产沙总量随坡度的变化呈先升后降的二次函数关系,并且在 20°~25°存在函数的极大值点。赵晓光等^[8]通过在不同坡度坡面上对土壤结构的研究得出土壤临界坡度不是一个定值,它随着土壤的内部组成及降雨条件的变化而变化,变化幅度取决于降雨、坡面土壤性质等条件之间的相互作用,最终得出黄土高原土壤侵蚀的临界坡度为 21.4°~45°。

此外,还有学者从理论分析的角度对临界坡度进行研究。曹文洪通过理论分析方法得出,土壤侵蚀存在临界坡度,临界坡度应当大于 40°且不是一个定值,而是与坡面径流深、泥沙颗粒组成以及坡面植被覆盖等条件相关^[9]。靳长兴从坡面流能量理论角度对临界坡度进行了研究,结果表明,在坡面水流条件相同时,临界坡度为 24°~29°,受坡面径流深和坡面土壤的颗粒组成影响^[10]。李全胜等认为临界坡度变化的原因在于降雨倾角和风向,在垂直降雨的情况下,临界坡度应为 45°,迎风坡的临界坡

收稿日期:2021-09-03

基金项目:国家自然科学基金(51369009);广西自然科学基金(2016GXNSFAA380116)。

作者简介:周程风(1994—),男,安徽蚌埠人,桂林理工大学环境科学与工程学院,硕士研究生,研究方向为水文物理规律;通信作者宋颖(1970—),女,北京人,桂林理工大学环境科学与工程学院,高级工程师,硕士,研究方向为水文物理规律。

度更大,与降雨倾角呈正相关;在背风坡临界坡度更小,与降雨倾角呈负相关^[11]。罗斌等^[12]从坡面水流速度、能量和泥沙搬运能力等方面进行研究,得出临界坡度的变化受土壤颗粒组成、土壤内部摩擦力、泥沙颗粒在水流中的下沉速度等多种因素影响,南方地区坡面侵蚀的临界坡度为 $35^{\circ}\sim 43^{\circ}$ 。刘青泉等^[13]使用运动波理论进行研究,得出临界坡度随泥沙颗粒组成、容重、坡面糙率、坡面细沟内水流的长度、整体雨量及土壤摩擦力等因子变化,其变化范围为 $41.5^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 。

影响土壤侵蚀的因素较多且各个因素间关系较为复杂,土壤侵蚀过程由溅蚀、面蚀到细沟侵蚀,再到浅沟侵蚀,切沟侵蚀不断发展变化^[14],导致了不同学者^[15]在不同地区、不同条件下进行的实验结论产生差异,在相同区域的不同场地也会因坡面本身的性质差异导致实验结果的不同^[16];理论推理中,不同学者的推理方法不同,得出的结论也有较大的差异。李凤英等认为在对临界坡度进行的过程中,不同学者得出不同结论的主要原因在于研究场地所处地区、研究对象及其他边界条件的不同导致的^[17]。

临界坡度的差异来源于问题的复杂性和理论推导的不完善,因此,通过大量实验数据拟合来推求坡面的临界坡度可以解决理论推导中难以解决的问题。通过人工坡面实验,能够使得土壤坡面的整体性质自上坡面到下坡面尽可能保持一致。室内模拟降雨^[18]则能够有效避免降雨倾角、风向等其他因素对实验的影响。当对临界坡度的变化趋势进行研究时,需要进行大量坡度相近的坡面侵蚀实验,而当坡度相近时,实验过程中的土壤坡面性质对坡面侵蚀过程的影响比重增大,使得实验结果难以表达临界坡度变化的真实趋势,这可能也是前人通过实验方法研究临界坡度时无法取得一个定值的原因之一。本文借助 MATLAB、Python 等软件,使用数据拟合的方法大大减少了相近坡度实验,加大了不同实验间的坡度差距,使得不同实验的坡面侵蚀差异增大,减小了坡面差异对坡面侵蚀过程的影响,使得对不同条件下临界坡度的研究成为可能。

1 材料与方法

1.1 实验概况

研究采用人工降雨模拟实验,实验设施由模拟降雨器和变坡度土槽装置组成。实验土槽的长度、宽度、深度为 $400\text{ cm}\times 120\text{ cm}\times 80\text{ cm}$;人工模拟降雨设备为全自动降雨器,该降雨器位于实验土槽上

方,配有旋转下喷式大、中、小 3 个喷头组合,喷头高度为 6 m,使得雨滴的粒径及降雨动能尽量接近自然降雨^[19]。

实验用土为陕西榆林岔巴沟表层黄土,无植被破坏,有天然杂草,因此有机质含量较高。成土母质是黄土,颗粒组成以粉粒占优势,透水能力较差,土体垂直节理发育。土壤颗粒的机械组成为小于 $2\text{ }\mu\text{m}$ 部分占比为 2.8%; $2\sim 50\text{ }\mu\text{m}$ 部分占比为 71.79%;大于 $50\text{ }\mu\text{m}$ 部分占比为 25.41%。土壤经风干后,过 1 cm 的筛网剔除天然杂草、石砾以及较大的土壤结块,不研磨,最大限度地保持原状土的特性。为保证土槽内土壤结构组成和湿度状态与天然破面类似,先在土槽底部覆盖 10 cm 细沙,细沙上层使用纱布与土槽内土壤分开,填土时使用分层填土方法,每 10 cm 一层进行压实,保证土槽内容重的均一性。完成一组实验后,去除表层 10 cm 土壤。每次降雨实验前 24 h,选用 30 mm/h 雨强预降雨,降雨至坡面产生积水,并用隔水布覆盖并静置 24 h。预降雨的目的时为了保证每场实验开始时坡面土壤含水率相同,也能够有效减少坡面不同位置的差异^[20]。

1.2 实验处理

将土槽的坡度调整到相应的坡度后,在土槽的顶部放置防水布,以避免前期降雨不均匀对实验的影响。经过降雨器开启 10 min 后降雨逐渐稳定,将防水布揭开,从雨滴落到坡面上开始计时。记录坡面出现明显产流的时间为产流时间。产生径流后,用 1 000 mL 量筒采集坡面径流样本,每 3 min 采集 1 个样本,用秒表记录采样时间和时长,并记录样本体积和重量。使用烘干称重法来测定样品中沉积物含量:将收集到的样品沉积 12 h 以上,抽出上层清液,将剩余的泥沙沉积物样品倒入烧杯中,放入 105°C 的烘箱中烘烤 24 h,冷却后取出称量,得到泥沙净重。

实验雨强根据中国黄土地区的降雨强度进行选择,由于坡面侵蚀主要发生于较大雨强条件下,因此选取 45、55、65、75 mm/h 4 种雨强,以此模拟黄土地区短期强降雨。选择 5° 、 10° 、 15° 、 20° 4 个坡度进行试验。

1.3 数据处理

通过泥沙净重得到各时段侵蚀量,为避免坡度不同导致的乘雨面积不同,引入侵蚀模数对坡面侵蚀过程进行量化分析,求得各时段坡面每平方米侵蚀量。实验结果显示,坡度与侵蚀量的关系呈先增

加后减少的非线性关系,这与陈法扬^[3]在不同坡度的土壤侵蚀量的研究中的结论相同,根据数据变化趋势,选择使用多项式函数进行拟合(图 1)。经过对比,对数据进行二次函数拟合产生的残差范数最小,精度最高,也与苏远逸等^[7]对于坡度与侵蚀量的研究结果相同,因此选用二次多项式函数拟合,得到临界坡度值(表 1)。

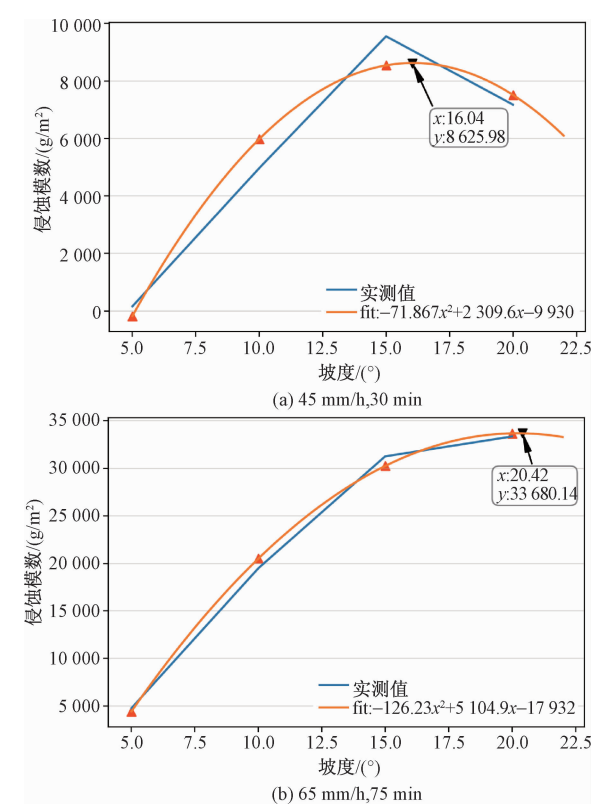


图 1 临界坡度拟合图

表 1 不同降雨雨强和降雨历时的临界坡度拟合值
单位: (°)

雨强/ (mm/h)	降雨历时/min				
	30	45	60	75	90
45	16.04	16.99	17.33	18.75	20.2
55	15.52	16.2	16.84	17.82	19.17
65	15.56	17.63	18.32	20.42	23.05
75	15.94	17.82	20.56	22.06	24.87

2 结果与分析

拟合结果显示,临界坡度并不是一个定值,而是会随着雨强、降雨历时的变化产生规律性的变化,这说明了临界坡度与雨强,降雨历时之间存在一定的关系。在临界坡度的研究方面,前人多集中于寻找一个特定的临界坡度值或一个临界坡度存在的区间,在不同降雨条件对临界坡度的影响方面研究较少。实验结果表明,同雨强条件下,坡面侵

蚀过程中,在 5°~15°,侵蚀量随坡度增加明显增加。15°~20°附近,侵蚀量增速放缓,侵蚀量达到最大值,说明当坡度达到 15°后,侵蚀量随坡度增加的增量不断减少,且当坡度继续上升时,侵蚀量会随坡度增加呈下降趋势(图 2)。这说明侵蚀量并不会随着坡度的不断增大而一直增大,在达到某一坡度值后,侵蚀量不再随坡度增加而增加,反而下降^[21],表明在坡面侵蚀过程中存在临界坡度,这也与前人的研究结果相同^[22]。使用多元线性回归计算雨强和降雨历时对临界坡度的影响情况,得出雨强和降雨历时与临界坡度均为正相关,雨强对临界坡度的影响占比为 43%,降雨历时对临界坡度影响占比为 40.3%。

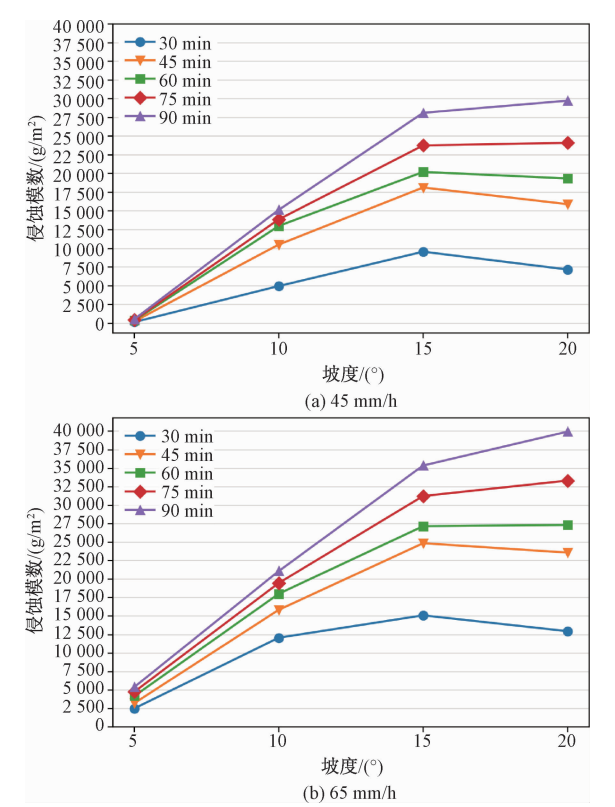


图 2 雨强侵蚀模数坡度图

2.1 雨强对临界坡度的影响

如图 3 所示,雨强增大,临界坡度也会随之增大。45 mm/h 和 55 mm/h 雨强条件下,临界坡度随侵蚀过程的发展变化较小,雨强较小,坡面侵蚀发展速度较慢,坡面形态的变化幅度较小,临界坡度在降雨前期变化不大,近似线性缓慢上升;75 min 后由于降雨量的累积,坡面形态开始出现变化,临界坡度的变化率开始上升。65 mm/h 雨强条件下,临界坡度的变化明显,在前 60 min 呈现线性上升趋势,60 min 后上升速率变大,与 55 mm/h 雨强条件的差距显。75 mm/h 雨强条件下,由于雨强较大,

坡面土壤侵蚀迅速发展,临界坡度随侵蚀过程的发展变化明显,临界坡度大于其他雨强条件,且随侵蚀过程的发展,与较小雨强条件下的临界坡度差值逐渐增大。不同雨强的临界坡度值差距不断扩大,是由于不同降雨序列的细沟侵蚀量是不同的^[23]。雨强每增加 10 mm/h,也就是增加的降雨量相同时,侵蚀量的增加有所不同,雨强越大侵蚀模数的增量越大。随着坡面侵蚀过程的不断发展,雨强对坡面侵蚀的影响逐渐增强。

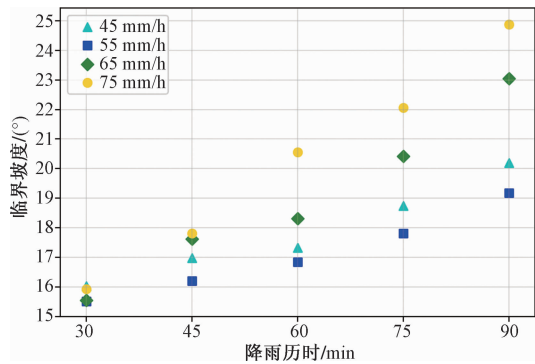


图3 不同雨强下临界坡度的变化

2.2 降雨历时对临界坡度的影响

由表 2 可知,降雨历时增加,坡面侵蚀的临界坡度也随之增大。当降雨历时达到 60 min 后,各个雨强临界坡度的增速明显加快,且雨强越大,临界坡度增速越快。分析原因在于,坡面侵蚀早期由于坡度的增加对坡面径流和溅蚀作用产生的不同影响,细沟侵蚀开始的时间不同,在一定坡度范围内,坡度较小的坡面细沟侵蚀开始时间较早,坡度增加对坡面侵蚀的影响由促进逐步转变为抑制,这成了临界坡度产生的原因之一。随着降雨历时的不断增加,细沟进入发育阶段,坡度因素对坡面侵蚀的影响发生改变,坡度越大,细沟侵蚀的发育速度越快,侵蚀量越大,此时坡度的增加对坡面侵蚀有促进作用。降雨早期不同坡度细沟侵蚀开始的时间不同,在一定范围内,坡度较小的坡面细沟侵蚀开始较早,导致坡度较小的坡面总侵蚀模数大于坡度较大的坡面。随降雨历时增加,坡度大的坡面时段侵蚀量更大,总侵蚀量差距减小,坡度越大,差距减小的速度越快,因此临界坡度随降雨历时增大而增大。表明随坡面土壤侵蚀不断发展,临界坡度也在不断变化。

2.3 侵蚀过程对临界坡度的影响

使用线性回归方法对侵蚀模数的时段增量进行研究,得出雨强与侵蚀模数增量呈正相关,降雨

表 2 拟合临界坡度值与验证值 单位:(°)

类型	降雨历时/min				
	30	45	60	75	90
拟合值	15.56	17.63	18.32	20.42	23.05
检验值	16.1	17.84	18.31	20.27	22.37

历时与侵蚀模数增量呈负相关,雨强对侵蚀模数增量的影响大于降雨时长对侵蚀模数增量的影响。如图 4 所示,同雨强条件下,侵蚀模数的时段增量在前 15 min 较小,在 15~45 min 时间段内侵蚀模数较大,在 45~60 min 时间段侵蚀模数增量迅速减少,之后保持相对稳定。整体来看,坡度较大,侵蚀模数增量也较大,但坡面侵蚀过程在初期受到坡面性质的细微变化影响,导致坡面产流时间和侵蚀量的变化,因此前 15 min 的侵蚀模数存在一定的随机性。将前 30 min 的侵蚀模数作为一个整体进行分析可以得出,相同雨强条件下,15°坡面在前 30 min 的侵蚀模数大于 20°坡面,侵蚀过程包括土壤颗粒的分离和搬运两部分,在坡面侵蚀初期,侵蚀以细沟间侵蚀为主,坡面径流分散,只具有颗粒的搬运能力,对坡面土壤颗粒的分离能力可以忽略,溅蚀对于坡面的侵蚀作用主要体现为对土壤颗粒的分离能力,而溅蚀作用的搬运能力较弱^[24]。当坡度增大,坡面径流动能增大,使得坡面径流的搬运能力增强,加剧了坡面侵蚀。当坡度达到一定程度时,坡面径流的搬运能力就足以携带溅蚀分离的绝大部分颗粒,因此坡面径流动能的增加对坡面侵蚀不再产生决定性影响,即坡度继续增加已经不能使侵蚀量继续增加。且根据 Ricardo S. S. Amorim 等人的研究,坡面溅蚀与坡度的 0.68 次方相关,坡面溅蚀量会随坡度的增加而减少。当坡度增大到一定程度时,坡面径流动能的增加无法使侵蚀量增加,溅蚀分离的土壤颗粒随坡度的增加而减少,导致了此时坡度增加,侵蚀量反而下降,进而导致 15°坡面细沟侵蚀发生时间早于 20°坡面从而导致了 20°时,0~15 min 的侵蚀模数小于 15°坡面。

15~30 min 时间段,侵蚀量相比前 15 min 大幅上升,这是由于降雨进行了一段时间后,坡面侵蚀过程由最初的溅蚀和面蚀为主,逐渐向细沟侵蚀过度。30~45 min,侵蚀量与前一时间段变化幅度不大,继续维持在较高的水平,细沟侵蚀不断发展,细沟网络处于形成的过程中,在细沟的形成和相互连通过程中,侵蚀量较大。45~60 min,侵蚀量明显下降,此时细沟发育基本稳定,细沟网络基本形成,坡面产流由细沟网络迅速汇集流动,侵蚀主要发生于

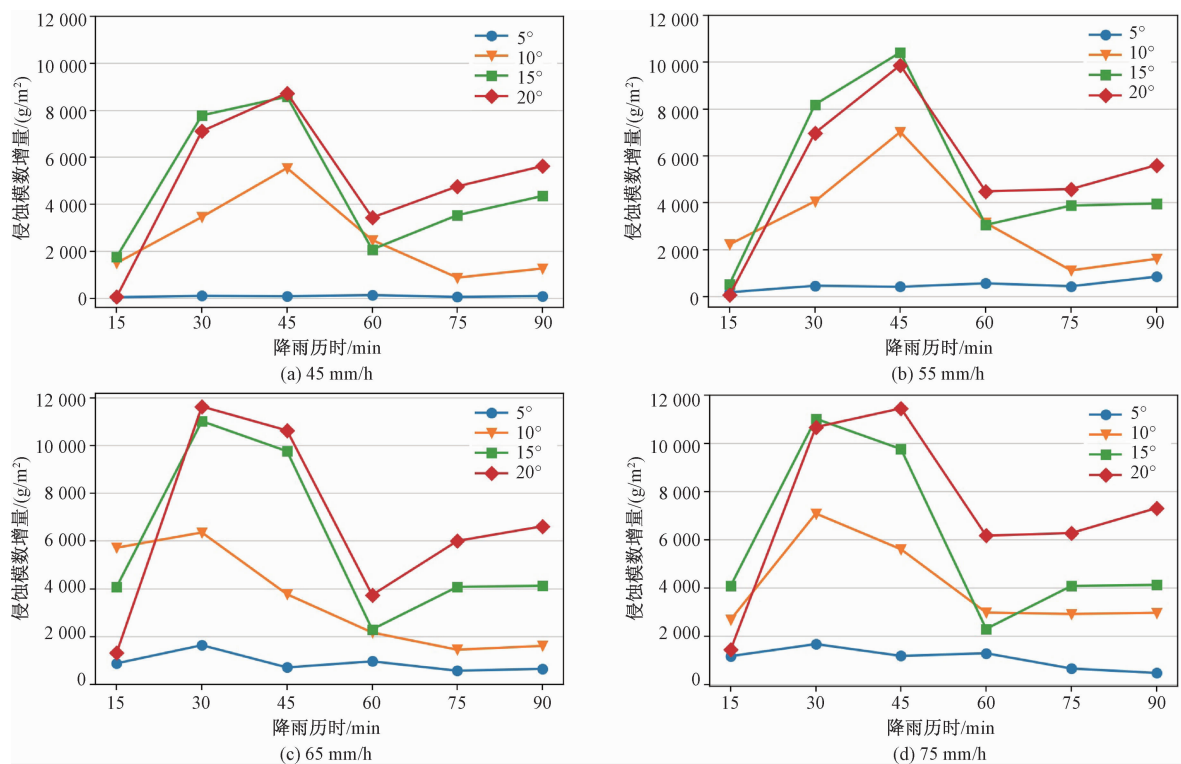


图 4 时段侵蚀量变化图

细沟内的下切作用和对细沟侧壁的侵蚀作用,侵蚀量较少。60 min 之后,侵蚀量总体变化幅度较小,且存在小幅的上升,在细沟网络发育基本完全的情况下,侵蚀主要存在于已形成的细沟内部,新的细沟产生数量很少且会迅速汇入已存在的细沟,单位时间的侵蚀量变化幅度较小,时段间侵蚀量趋于稳定。

2.4 长降雨历时条件下的临界坡度变化

为探究降雨历时对临界坡度的影响,进行了 20°和 25°,总降雨时长 360 min 的实验。如图 5 所示,在实验的前 45 min,20°坡面的侵蚀模数大于 25°坡面,90 min 后,25°坡面的侵蚀模数明显大于 20°坡面,且在 90~360 min,两个坡度的侵蚀量差距基本保持不变。由图 5(b)也可以看出,在 90 min 后,20°和 25°坡面的时段侵蚀量在一定幅度内震荡。由此可以看出,当降雨历时不断增加,坡面侵蚀过程中,细沟逐步向切沟发展时,坡度对于侵蚀量的影响逐渐减小,时段侵蚀量趋于稳定。临界坡度在坡面土壤侵蚀前期,即细沟间侵蚀阶段和细沟侵蚀的发育阶段较为显著,随着降雨历时的增加,侵蚀过程的不断发展演化,临界坡度现象逐渐消失。

2.5 拟合临界坡度的验证

得到不同雨强和降雨历时条件下的临界坡

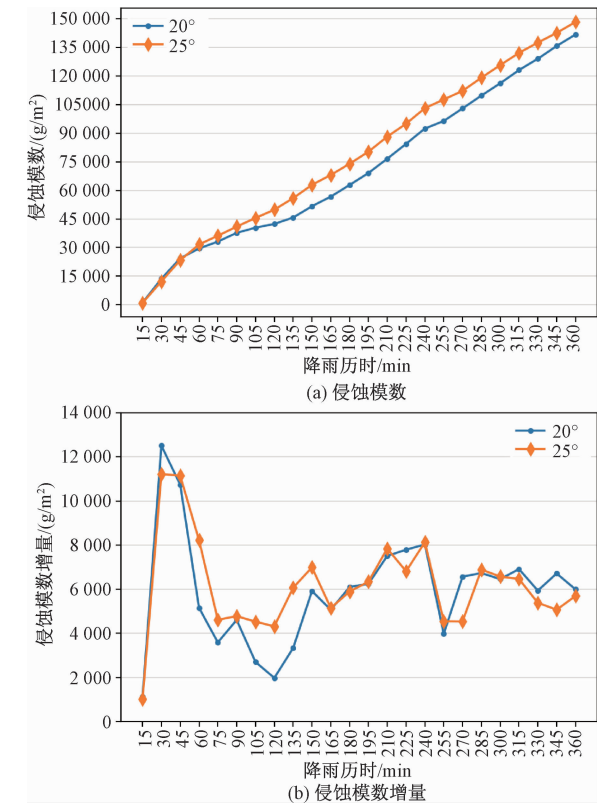


图 5 360 min 侵蚀量图

度后,使用 65 mm/h 雨强 25°坡面的侵蚀模数数据与原有数据再次进行数据拟合,得到的验证值

与拟合值的误差小于 5%,证明了通过数据拟合得到临界坡度的准确性。说明数据拟合临界坡度可以通过离散的侵蚀模数得到 25°以下临界坡度的连续性变化趋势。通过对拟合值与验证值的比较可以看出,使用数据拟合方法可以使用坡度相对较少的侵蚀数据得到较为完整和准确的临界坡度值。

3 结论

通过室内模拟降雨实验,对坡面土壤侵蚀的临界坡度进行研究。通过实验,得到不同雨强,不同降雨历时的坡面侵蚀量,使用曲线拟合得到临界坡度值。通过分析不同雨强、降雨历时情况下临界坡度的变化,得出雨强、降雨历时对临界坡度的影响,得到以下结论:

1)雨强增大,临界坡度也会随之增大,且随着降雨历时的增加,雨强对临界坡度的影响也会增强。大雨强条件下临界坡度随雨强的增长率大于小雨强。随着降雨历时的增加,坡面侵蚀的临界坡度增加。降雨历时达到 60 min 后,各雨强的临界坡度增速明显加快,雨强越大,临界坡度增速越快,且增速加快的时间点越早。

2)坡面侵蚀初期,由于坡度的增加对坡面径流和溅蚀作用产生的不同影响,坡面侵蚀模数呈现先升后降的趋势,导致了细沟侵蚀开始的时间产生差异,使得坡度增加到一定程度后,坡度较大的坡面侵蚀模数小于坡度较小的坡面,这是坡面侵蚀临界坡度产生的原因之一。

3)随着坡面侵蚀的不断发展,细沟网络形态逐渐稳定,此时坡面径流大部分汇集到细沟中,侵蚀主要发生于对细沟边缘、侧壁和细沟底部,不同坡度的坡面单位时间内的侵蚀模数差距减小且趋于稳定,坡度对于侵蚀模数的影响逐渐减小,临界坡度逐渐消失。

参考文献

[1] 李叶,吴玉柏,俞双恩,等.坡度对扰动黄棕壤土壤侵蚀的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(1):20-24.

[2] 彭华.土壤侵蚀临界坡度研究进展[J].水土保持科技情报,2004(2):30-32.

[3] 陈法扬.不同坡度对土壤冲刷量影响试验[J].中国水土保持,1985(2):18-19.

[4] 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[J].地理学报,1999(4):3-5.

[5] 史景汉.黄丘一区坡面水土流失规律的研究[J].中国水土保持,1991(7):26-31.

[6] 刘志,江忠善.降雨因素和坡度对片蚀影响的研究[J].水土保持通报,1994,14(6):19-22,61

[7] 苏远逸,李鹏,任宗萍,等.坡度对黄土坡面产流产沙过程及水沙关系的影响[J].水土保持研究,2020,27(2):118-122.

[8] 赵晓光,吴发启,刘秉正,等.再论土壤侵蚀的坡度界限[J].水土保持研究,1999(2):43-47.

[9] 曹文洪.土壤侵蚀的坡度界限研究[J].水土保持通报,1993,13(4):1-5.

[10] 靳长兴.论坡面侵蚀的临界坡度[J].地理学报,1995,50(3):234-239.

[11] 李全胜,王兆骞.坡面承雨强度和土壤侵蚀临界坡度的理论探讨[J].水土保持学报,1995,9(3):50-53.

[12] 罗斌,陈强,黄少强.南方花岗岩地区坡面侵蚀临界坡度探讨[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1999,5(6):67-70.

[13] 刘青泉,陈力,李家春.坡度对坡面土壤侵蚀的影响分析[J].应用数学和力学,2001,22(5):449-457.

[14] 刘青泉,李家春,陈力,等.坡面流及土壤侵蚀动力学(Ⅱ):土壤侵蚀[J].力学进展,2004(4):493-506.

[15] 吴良杰,薄景山,牛洁.黄土地区地形特征参数分布特征的统计分析[J].科学技术与工程,2021,21(21):8797-8806.

[16] 陈晓安,蔡强国,张利超,等.黄土丘陵沟壑区坡面土壤侵蚀的临界坡度[J].山地学报,2010,28(4):415-421.

[17] 李凤英,何小武,周春火.坡度影响土壤侵蚀研究进展[J].水土保持研究,2008,15(6):229-231.

[18] 牛永振,李张楠,栾清华,等.不同坡面单元人工降雨产流试验与分析[J].科学技术与工程,2021,21(20):8389-8394

[19] 金鑫,李霞,宋颖,等.偏最小二乘模型在黄土坡面土壤侵蚀中的应用研究[J].中国农村水利水电,2020(12):117-121.

[20] 金鑫,刘喆,王春振,等.人工黄土坡面重力侵蚀数值模拟[J].中国农村水利水电,2020(8):40-45.

[21] GOVERS G. Rill erosion on arable land in Central Belgium; Rates, controls and predictability [J]. Elsevier, 1991,18(2):133-155.

[22] YAIR A, KLEIN M. The influence of surface properties on flow and erosion processes on debris covered slopes in an arid area[J]. Elsevier, 1973,1:1-8.

[23] RÖMKENS M J M, HELMING K, PRASAD S N. Soil erosion under different rainfall intensities, surface roughness, and soil water regimes[J]. Catena, 2002, 46(2): 2-3.

[24] YAO C. Rill erosion initiation and effect of DEM resolution on erosion prediction. [D]. Washington: Washington State University, 2009.

Analysis of Critical Slope of Slope Soil Erosion Based on Data Fitting

ZHOU Chengfeng^{1,2}, JIN Xin^{1,2}, SONG Ying¹, LI Xia^{1,2},
LIU Haonan^{1,2}, ZHAI Ting^{1,2}, ZHAO Zhenxin^{1,2}, SHI Wenfei^{1,2}

(1. Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology, College Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi 541004, China; 2. Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Water Safety in Karst Area, College Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: Through multi-stage simulated rainfall experiments with different rain intensities and slopes, the slope and slope erosion modulus are fitted with quadratic polynomials to obtain the critical slope of slope erosion under different conditions. The experimental results show that the critical slope will change regularly with the change of rainfall intensity and rainfall duration. The greater the rain intensity, the greater the critical slope, and the stronger the impact on the critical slope of slope erosion. As the rainfall duration increases, the critical slope of slope erosion also increases. The greater the rain intensity, the faster the critical slope growth rate and the earlier the inflection point of the growth rate appears. In the initial stage of slope erosion, the slope increase strengthens the transport effect of slope runoff on the slope surface sediment and weakens the splash erosion effect of the slope surface, so that within a certain slope range, the onset of rill erosion on the slope surface with a large slope is later than the slope slope, which is one of the reasons for the critical slope. With the development of slope erosion process, slope erosion mainly occurs on the edges, sidewalls and bottom of rills. The difference in erosion modulus per unit time of slopes with different slopes decreases and tends to stabilize. The impact gradually decreases, and the critical slope gradually disappears. This study can provide a theoretical basis for improving the mechanism of soil erosion in the loess area.

Keywords: soil erosion; artificial slope; simulated rainfall; curve fitting; critical slope