

东北典型黑土区土壤侵蚀过程顺坡起垄垄沟水力学特征分析

李坤衡^{1,2}, 焦剑¹, 秦伟¹, 殷哲¹

(1.中国水利水电科学研究院,北京 100048;2.辽宁工程技术大学环境科学与工程学院,辽宁 阜新 123000)

摘要: 垄沟是垄作长缓坡耕地土壤侵蚀过程的重要汇流路径。明确垄沟的水力学特征,对于模拟东北典型黑土区垄作坡耕地土壤侵蚀过程至关重要。研究采用室内模拟降雨的方法,系统分析不同垄作方式、坡度、雨强等条件下垄沟的主要水力学参数和变量。结果表明:不同垄作方式下,坡面侵蚀量整体为窄垄>宽垄>无垄,并与坡度和雨强乘积呈线性正相关。水力半径随雨强和坡度的变化曲线呈对数关系;宽垄水力半径比窄垄高 8.4%~11.6%,平均为 10.0%。在坡度和雨强相同的情况下,宽垄垄沟糙率整体高于窄垄垄沟糙率;且在坡度递增后,宽垄垄沟糙率相较于窄垄垄沟减小幅度更弱。已有土壤侵蚀模型的坡面糙率建议取值低于本区实际观测值,需结合实际情况对其重新率定,其结果可为研究区土壤侵蚀过程模拟提供依据。

关键词: 东北黑土区; 土壤侵蚀; 曼宁公式; 水力半径; 糙率
中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2021)03-0077-06
DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.03.011

Hydraulic Characteristics of Longitudinal Ridges and Furrows in Soil Erosion in the Typical Black Soil Area of Northeast China

LI Kunheng^{1,2}, JIAO Jian¹, QIN Wei¹, YIN Zhe¹

(1.China Institute of Water Resource and Hydropower Research, Beijing 100048;
2.College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000)

Abstract: Ridge and furrow are the important confluence paths in soil erosion of long and gentle slope farmland. It is very important to understand the hydraulic characteristics of ridge and furrow for simulating the soil erosion process of slope farmland in typical black soil area of Northeast China. The main hydraulic parameters and variables of ridge and furrow under different ridge cultivation methods, slopes and rainfall intensities were systematically analyzed using indoor rainfall simulation method. Under different ridge planting patterns, the erosion amount were narrow ridge>wide ridge>no ridge, showing linear positive correlation with the product of slope and rainfall intensity. The variation curve of hydraulic radius with rainfall intensity and slope was logarithmic. The hydraulic radius of wide ridge was 8.4% to 11.6% higher than that of narrow ridge, with an average of 10.0%. Under the same slope and rainfall intensity, the roughness of wide ridge was higher than that of narrow ridge. Moreover, with the increase of slope, the decrease in roughness of wide ridge was weaker than that of narrow ridge. There was a significant difference between the recommended values of roughness in the existing soil erosion models and the observed values in this experiment. Therefore, it is necessary to recalibrate the roughness value for erosion process of long and gentle slope cultivated land under ridge cultivation in this area.

Keywords: Black Soil Area in Northeastern China; soil erosion; Manning formula; hydraulic radius; roughness

土壤侵蚀是世界范围内最大的环境问题之一,全球因水土流失及土地退化等原因丧失利用价值的土地已经超过 2 000 万 km²^[1]。在水土流失防治工作中,需要准确计算土壤侵蚀量,这个技术工具就是土壤侵蚀预报模型。就建模手段而言,土壤侵蚀预报模型可分为经验模型和机理模型^[2]。经验模型是对大量试验观测数据统计分析基础上建立的一系列数学公式。自 20 世纪 30 年代开始,水土流失定量预报工

收稿日期:2021-01-27
资助项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0507002);中央基本科研业务费专项重点项目(SE0145B132017)
第一作者:李坤衡(1993—),男,辽宁阜新人,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀机理研究。E-mail:1725338448@qq.com
通信作者:焦剑(1983—),男,陕西西安人,博士,高级工程师,主要从事土壤侵蚀和非点源污染研究。E-mail:68283847@qq.com

作在美国境内展开,并取得一系列研究成果。20 世纪 50—60 年代,通过对全国范围水土流失观测数据的整理和分析,美国开发了通用土壤流失方程 (USLE, universal soil loss equation)^[3]。此后针对 USLE 在实际应用中遇到的问题,于 1997 年正式发布了修订通用土壤流失方程 RUSLE^[4-5],增加了模型在土壤水蚀预报中的实用性。自 20 世纪 80 年代以来,基于土壤机理模型开始出现,其以土壤侵蚀的物理过程为基础,建立数理方程,从而预报给定时段内的土壤流失量。现有物理模型中,最具有代表性的是 WEPP(water erosion prediction project)^[6],能够模拟逐日各层土壤含水量变化及植物的生长和残茬分解,并能模拟耕作方式和土壤压实对土壤侵蚀的影响。欧盟几乎与美国同步开展机理模型研究^[7],于 1994 年推出欧洲土壤侵蚀模型 EUROSEM^[8],1998 年发布了基于地理信息系统的新版本^[9]。与此同时,澳大利亚开发了坡面次降雨侵蚀模型 GUEST (Griffith university erosion system template)^[10]。但是,上述机理模型中许多参数不易获取,必须通过一系列野外观测和室内模拟试验才能获得,因而限制其广泛应用^[11]。

在土壤水蚀坡面过程的模拟中,深入理解坡面流水力学特征是分析侵蚀动力规律的基础。目前,国内外在流速、水深、流态、阻力规律等方面已开展大量的研究工作。相关研究^[12]大多在室内土槽或室外小面积的土壤质地均一、地表平整的裸坡进行,对于垄作坡耕地,有关坡面流水力学特征的针对性研究很少^[13]。我国学者在对土壤侵蚀进行大量观测和研究的基础上,已建立许多区域性的土壤侵蚀经验模型^[14],用于计算坡面多年平均土壤流失量^[15]。但目前我国土壤侵蚀机理模型尚处于研究性阶段,尚未实现有效应用^[10]。对于不同耕作方式下坡面水力学参数取值分析研究很少,尚不能为土壤侵蚀机理模型的构建提供足够的理论支撑。

东北黑土区是我国重要的粮食生产基地,因过度开垦和耕作方式粗放,且在相当长的时期内未重视水土保持,目前本区水土流失日益严重,已对粮食安全构成威胁^[16-17]。目前,以土壤流失方程为代表的土壤侵蚀经验模型已开始在本区应用^[18]。但是,东北黑土区垄作长缓坡耕地产汇流特征极具特殊性^[19],已有土壤侵蚀模型参数难以对其直接应用,需开展试验观测,深入分析侵蚀机理过程。本文通过室内人工降雨模拟试验,模拟不同雨强、坡度和垄作方式下垄作长缓坡耕地土壤侵蚀过程,提出作为主要汇流路径的垄沟的主要水力学参数和变量,从而为土壤侵蚀过程模拟提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验用土壤来自黑龙江省克山县粮食沟小流域中顺坡起垄种植的长缓坡耕地。其所在地块地表坡度为 $3^{\circ}\sim 5^{\circ}$,土壤类型为黑土。土壤采集点地理坐标为 $48^{\circ}03'20''\text{N}$, $125^{\circ}49'19''\text{E}$,属于温带大陆性季风气候,年平均气温 3.0°C ,多年平均降水量 514.9 mm ,集中于 6—9 月。该小流域位于小兴安岭南麓,地处小兴安岭向松嫩平原的过渡地带,地形特征为漫川漫岗,坡缓坡长。种植农作物主要为大豆,田间作业以机械化为主。

人工降雨模拟试验在中国水利水电科学研究院延庆试验基地水土保持大厅开展。降雨设备为侧喷式人工降雨装置,采用计算机软件控制降雨雨强。降雨高度 13.8 m ,降雨均匀度 $>85\%$;试验土槽为 $8\text{ m}\times 3\text{ m}\times 1\text{ m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高)变坡土槽(图 1)。在土槽出水口采用翻斗式流量计测量产流过程径流量;并采用翻斗式自记雨量计测量模拟降雨雨量,其分辨率为 0.2 mm 。

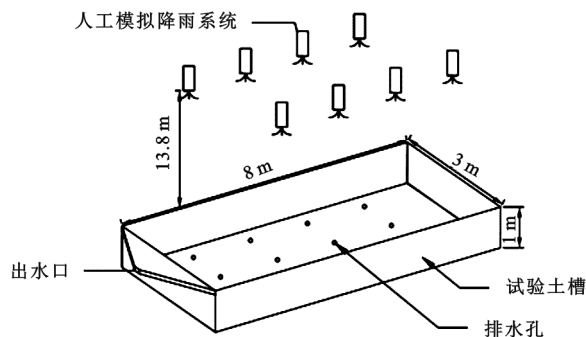


图 1 试验土槽示意

1.2 试验设计

采用正交试验设计。试验选取 3 种典型降雨强度 ($30, 50, 75\text{ mm/h}$)、3 种裸地垄作方式 (无垄、顺坡宽垄和顺坡窄垄)、2 种漫川漫岗区地表坡度 (3° 和 5°) 进行全面试验。

土槽装填土前,在试验土槽底部均匀打排水孔,用纱布填充试验土槽底部的排水孔,随后填入 20 cm 厚的细沙作为透水层。之后根据野外测定的犁底层、耕作层和垄层的厚度和土壤容重,将其分别装填入试验土槽。沙层之上填装 30 cm 厚、土壤容重为 1.35 g/cm^3 的犁底层和 30 cm 厚、土壤容重为 1.20 g/cm^3 的耕作层。装填过程采用分层填土,每 5 cm 为 1 层。填土时需将试验土槽四周边界压实,减少边界效应的影响。最后,在耕作层上按照野外调查获得的垄沟和垄台规格,修建垄层。按照典型黑土区机械化耕作方式,宽垄垄距为 110 cm ,垄台宽 70 cm ,垄沟宽 40 cm ,垄沟平均深度 10 cm ;窄垄垄距为 60 cm ,垄台宽 30 cm ,垄沟宽 30 cm ,垄沟平均深度 15 cm 。

设计每场试验降雨历时均为 45 min 。试验过程

中,每隔 3 min 在土槽出水口采集 1 次径流样品;同时,用直尺分别测量离左、右边界最近的 2 条垄沟内水流深度,测量点位于由坡顶至坡脚 1.0,3.0,5.0,7.0 m 处。每个试验处理进行 2 个重复。每次试验结束后,用烘箱在 105 °C 恒温条件下经过 24 h 烘干径流样品,测定其含沙量,进而计算侵蚀量。

1.3 垄沟水力学过程分析

坡面产汇流过程中,可视垄沟为土质明渠,且坡面各条垄沟水力学特征相同。地表水力学特征主要通过糙率 n 来体现。

$$n = (R_h^{2/3} \cdot J^{1/2}) / V_{OV} \quad (1)$$

式中: n 为综合反映垄沟壁面粗糙情况对水流影响的参数; R_h 为水力半径(m),是过流截面积与湿周长的比值,湿周长指径流与垄沟断面接触的周长,不包括与空气接触的周长部分; J 为水力坡降(m/m),即土槽坡度; V_{OV} 为垄沟内径流流速(m/s),由垄沟径流量除以过流截面积获得。研究视顺坡垄作情况下各条垄沟流量相等,依据土槽出口径流量推算 V_{OV} 。

$$V_{OV} = Q_r / (N_r \cdot R_r) \quad (2)$$

式中: Q_r 为土槽出口流量计测得的径流量(m^3/s); N_r 为土槽内垄沟数量; R_r 为垄沟内过流截面积(m^2)。

由公式(1)可知,反映侵蚀过程垄沟水力学特征的关键变量是 R_h 。研究在获得 n 取值的同时,建立 R_h 与雨强、坡度等影响因素之间的定量关系,从而为垄沟水力学特征的定量刻画提供依据。

2 结果与分析

2.1 不同垄作方式下土壤侵蚀特征

坡面径流深度和土壤侵蚀模数是描述土壤侵蚀特征的基本指标,根据试验数据分别建立径流深、侵蚀模数与坡度和雨强乘积的关系(图 2)。在不同垄作方式下,坡面径流深(D)和侵蚀模数(A)均随着坡度(S)和分钟雨强(I_m)的乘积增大而增大,并与 S 和 I_m 的乘积呈现显著的线性关系。在不同雨强和坡度下,顺坡宽垄坡面径流深比无垄坡面高 19.5%~24.3%,顺坡窄垄坡面径流深比无垄坡面高 5.0%~16.8%。坡面径流量整体呈现宽垄>窄垄>无垄。不同垄作方式下坡面侵蚀量呈现的规律与坡面径流量存在差异。在雨强和坡度较小时,坡面侵蚀量差异不显著;而随着雨强的增大,有垄坡面侵蚀量的增长幅度明显高于无垄作坡面,其中顺坡窄垄坡面侵蚀量增长幅度最大,最终呈现窄垄>宽垄>无垄。

图 3 为不同雨强和坡度下无垄作、顺坡宽垄和顺坡窄垄坡面产流过程差异。坡面顺坡起垄后,可形成稳定集中的汇流路径,在不同雨强下,其产流早于无

垄作坡面发生,径流强度高于无垄作坡面。坡度为 3°时,顺坡宽垄坡面次产流径流量比无垄作坡面高 19.9%~39.7%,平均为 29.4%;坡度为 5°时前者比后者高 24.4%~30.7%,平均为 27.8%。顺坡宽垄次产流径流量仅比窄垄高 7.8%,但两者的垄沟过流断面形态存在显著差异。在不同的雨强和坡度组合下,次降雨产流径流深均为宽垄>窄垄>无垄(图 3)。坡面产汇流过程中,垄沟沟底形成稳定的水面,宽垄坡面水面面积占坡面总面积比例平均为 28.0%,窄垄坡面这一比例为 21.7%。因水面的径流系数接近于 1,明显高于土壤表面,因此宽垄和窄垄的裸地坡面产流量明显高于无垄作坡面,且宽垄坡面径流量大于窄垄坡面。在雨强和坡度都较小时,侵蚀过程中侵蚀模数的大小顺序为宽垄>无垄>窄垄(图 4a),但其差别并不显著。此种状况下,垄沟径流流速相对较小,雨滴击溅和径流冲刷强度有限,垄沟边坡和沟底未发生显著形变,特别是在 12~15 min 坡面流速较稳定后,其侵蚀量相对无垄坡面未显著增加。当雨强和坡度明显增加后,雨滴击溅和径流冲刷强度显著增加,垄沟沟底和边坡开始发生显著形变,致使土壤侵蚀量显著增加。以雨强 75 mm/h、坡度 5°的坡面侵蚀过程为例,宽垄垄沟内径流流速变化于 3.49~7.31 cm/s,平均为 6.41 cm/s;窄垄垄沟内径流流速变化为 5.49~9.29 cm/s,平均为 8.33 cm/s,比宽垄高 30.0%。在更大径流流速冲刷下,窄垄坡面土壤侵蚀强度更高(图 4b)。

2.2 侵蚀过程水力半径 R_h 变化

水力半径是曼宁公式中的重要变量,是过流截面积与湿周长的比值。相同坡度下,雨强的增大使坡面径流深度增加,坡面径流与垄沟接触面增大,导致 R_h 增大。随着坡度上升,坡面流速增加,坡面径流深度减小, R_h 也随之减小。由此建立水力半径 R_h 与分钟雨强和坡度(I_m/S)比值之间的定量关系(图 5)。

$$\text{宽垄: } R_h = 0.250 \ln(I_m/S) - 0.017 (R^2 = 0.81, P < 0.01) \quad (3)$$

$$\text{窄垄: } R_h = 0.206 \ln(I_m/S) + 0.170 (R^2 = 0.82, P < 0.01) \quad (4)$$

可见,两者之间呈显著对数递增关系。在顺坡窄垄和宽垄 2 种垄作方式下,宽垄的 R_h 比窄垄高 8.4%~11.6%,平均为 10.0%。

2.3 侵蚀过程垄沟糙率

本文中曼宁糙率系数 n 可反映垄沟的粗糙程度对水流的阻滞作用。由图 6 可知,在不同坡度和雨强组合条件下, n 变化为 0.082~0.229,平均为 0.145。

窄垄 5°坡面垄沟 n 值相对较低;窄垄 3°坡面雨强为 30 mm/h 时, n 值最高;除此之外, n 主要变化为 0.12~0.18。宽垄的 n 变化幅度小于窄垄。SWAT 模型建议垄作裸露坡面糙率取值范围为 0.06~0.12, 平均为 0.09^[20], 该值明显低于本试验测量值。东北典型黑

土区坡度较缓, 汇流过程中垄沟内径流深度较浅, 多不超过 2 cm, 使得垄沟糙率有所增加。在进行本区坡面土壤侵蚀过程模拟时, 不宜直接使用国外已有模型参数值, 应结合本区自然地理环境和耕作特征, 根据试验数据对模型参数进行修订。

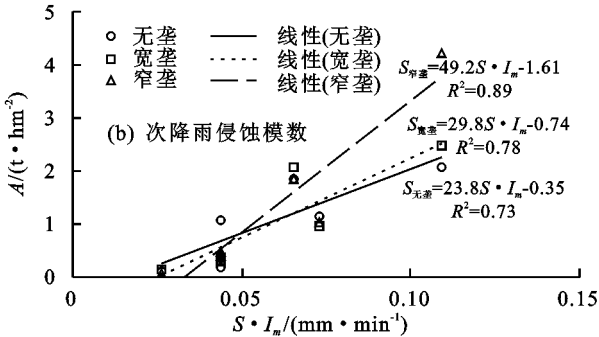
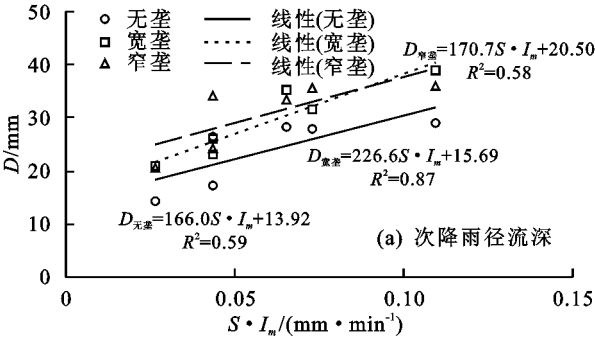


图 2 不同垄作方式下坡度和分钟雨强乘积与次降雨径流深和侵蚀模数的关系

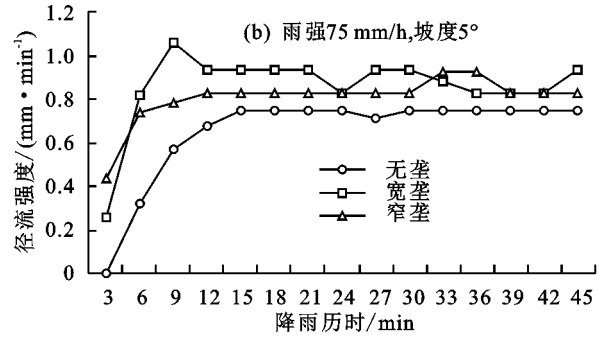
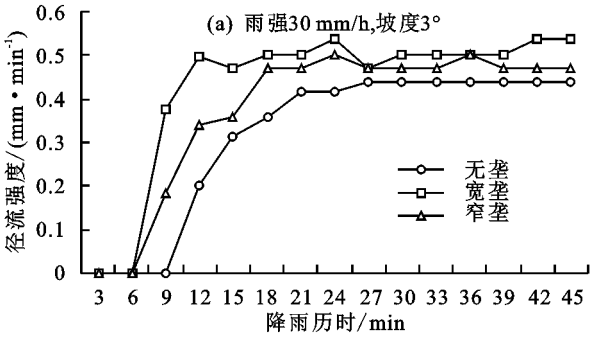


图 3 典型雨强和坡度组合下侵蚀过程径流强度变化

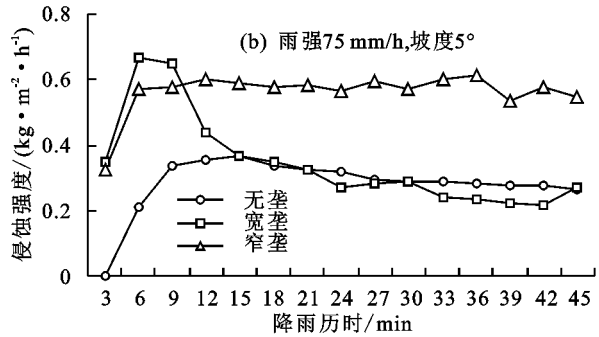
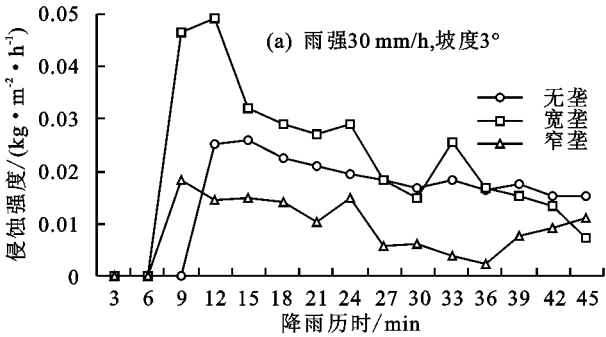


图 4 典型雨强和坡度组合下侵蚀过程的侵蚀强度变化

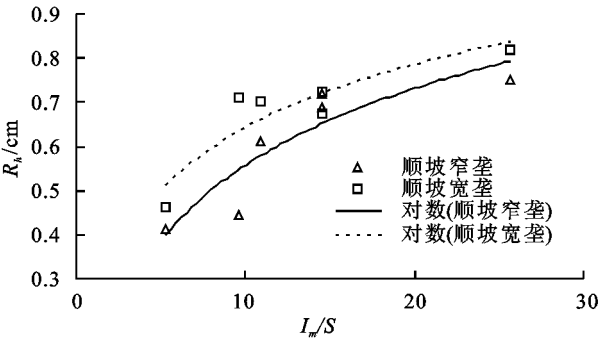


图 5 水力半径与分钟雨强和坡度比值的关系

在雨强相同时, 坡度由 3°上升到 5°后, 不同雨强下, 顺坡宽垄垄沟糙率 n_1 分别下降 18.7%, 15.9% 和 5.9%, 平均为 12.2%; 窄垄垄沟糙率 n_2 分别下降 59.8%, 38.3%, 29.1%。可见, 坡度的上升减小坡面糙率, 减弱垄

沟对坡面径流的阻滞能力。坡度为 3°时, 在 30, 50, 75 mm/h 3 种雨强下条件, 顺坡宽垄垄沟糙率 n_1 比窄垄垄沟糙率 n_2 分别高出一 34.5%, 36.8% 和 6.9%, 坡度为 5°时, 在 3 种雨强下, 顺坡宽垄垄沟糙率 n_1 比窄垄垄沟糙率 n_2 分别高出 32.6%, 86.6% 和 42.0%, 并且顺坡宽垄垄沟糙率 n_1 相较于窄垄垄沟糙率 n_2 在坡度上升后减小幅度更小。由此可见, 东北典型黑土区宽垄垄作方式相较于窄垄对坡面径流的阻滞作用更大, 可降低坡面流速, 减少径流对坡面的侵蚀冲刷。

图 7 为侵蚀过程垄沟糙率变化, 其中 n 为 30, 50, 75 mm/h 雨强下 n 的平均值。坡度为 3°的条件下, 前 15 min 内垄沟 n 明显高于 15 min 之后的 n 值。坡度为 5°的条件下, 两者之间差异并不显著。

主要是因为 3° 的坡面垄沟内径流流速略慢,在产流

初期未形成稳定层流,使 n 偏高。

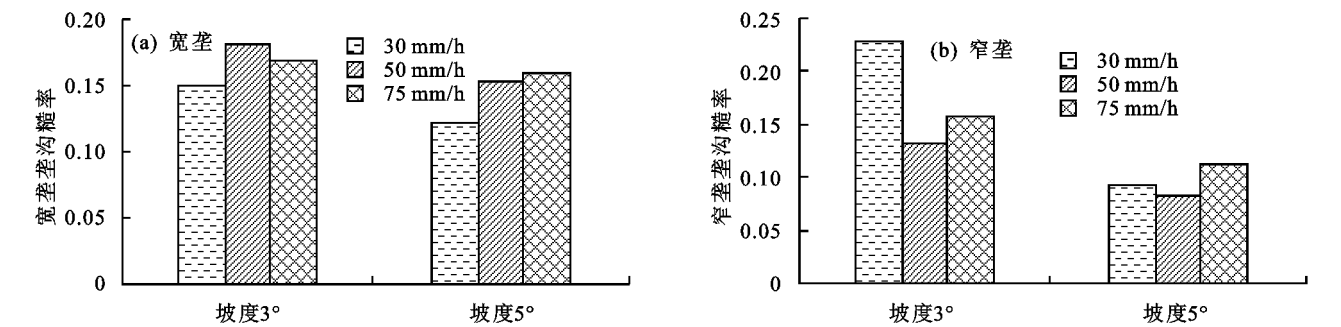


图 6 宽垄和窄垄垄沟糙率

运用曼宁公式分析典型黑土区不同垄作方式下坡面水力学特征的过程中,糙率 n 是一个极为重要的参数,对坡面径流流速有着直接影响。由本文中不同垄作方式下垄沟糙率 n 变化情况可知,在 2 种坡度下,宽垄垄沟糙率 n 整体大于窄垄垄作。在雨强 75 mm/h、坡度 5° 时,宽垄垄沟 n 比窄垄高 42%,坡面流速和土壤侵蚀模数分别比窄垄低 30% 和 52%;窄垄的垄作方式为坡面径流提供断面宽度更窄的汇流路径,增加坡面流速,且窄垄垄沟两侧边坡的坡度较宽垄更陡,致使侵蚀加剧。由此可知,当强降雨发生时,宽垄垄作方式相较于窄垄,具有更好的水土保持效应,这与前人^[21]的研究结果一致。本试验在 45 min 的降雨历时中,降雨初期 n 值存在较大波动,这是因为在降雨初始阶段,垄沟底部未形成稳定径流,沟内径流流速较小, n 值较大。而随着降雨的持续,坡面汇流逐渐稳定,促使垄沟内糙率系数趋于稳定。相关研究^[22]表明,在分析坡面阻力规律时发现,坡面阻力与坡度、雨强和地表粗糙度等因素密切相关。随着坡度和雨强的增加,为坡面径流提供了更大的势能和动能,缩短坡面径流汇流的时间,提升坡面径流流速。随着降雨历时的延长,土壤表面逐渐光滑,结皮形成趋向完整。东北地区黑土的团聚度较高,胶结性强,在经过降雨初期雨滴打击分散大团聚体后导致结皮形成,土壤表面变得光滑,土壤上层颗粒变得更加紧实^[23-24]。这也是随着降雨历时的延长, n 值减小的原因之一。

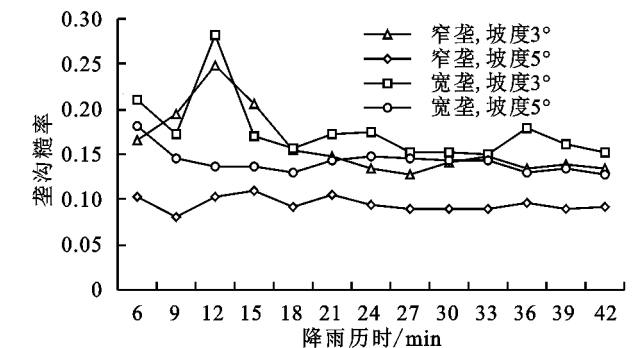


图 7 侵蚀过程垄沟糙率变化

3 结论

(1)在不同垄作方式下,坡面径流深(D)和侵蚀模数(A)均随着坡度(S)和雨强(I_m)乘积的增大而增大,并呈现显著的线性关系。坡面径流量整体呈现宽垄>窄垄>无垄。在雨强和坡度较小时,三者坡面侵蚀量差异不显著;而随着雨强的增大,侵蚀量高低呈现窄垄>宽垄>无垄。

(2)水力半径 R_h 与分钟雨强和坡度(I_m/S)比值之间呈显著的对数递增关系。在顺坡窄垄和宽垄 2 种垄作方式下,宽垄的 R_h 比窄垄高 8.4%~11.6%,平均为 10.0%。

(3)在坡度和雨强相同的情况下,宽垄垄沟糙率 n_1 明显高于窄垄垄沟糙率 n_2 ,并且在坡度上升后, n_1 相较于 n_2 在坡度上升后减小幅度更小。宽垄的垄作方式更适用于东北典型黑土区。东北典型黑土区宽垄垄作方式相较于窄垄对坡面径流的阻滞作用更大,可降低坡面流速,减少径流对坡面的侵蚀冲刷。

(4)研究测定垄沟糙率 n 变化为 0.082~0.229,平均为 0.145。SWAT 模型建议垄作裸露坡面 n 取值范围为 0.06~0.12,平均为 0.09,明显低于本试验测量值。东北典型黑土区坡度较缓,汇流过程中垄沟内径流深度较浅,使得垄沟糙率有所增加。在进行本区坡面土壤侵蚀过程模拟时,不宜直接使用国外已有模型参数值,应结合本区自然地理环境和耕作特征,根据试验数据对模型参数进行修订。

顺坡垄作的垄沟糙率 n 主要受降雨强度、雨型、坡度等因素的影响,今后应进一步深入研究垄作方式、雨强、坡度对坡面径流流速的影响和坡面侵蚀的问题,为深入分析东北黑土区坡面土壤侵蚀过程提供理论依据和数据支撑。

参考文献:

[1] 王涛.走向世界的中国沙漠化防治的研究与实践[J].中国沙漠,2001,21(1):1-4.
[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,2001:1-2.
- [3] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the rocky mountains [M]. Agriculture Handbook No.282. Washington D. C: USDA,1965.
- [4] Hudson N. Soil conservation[M]. 3rd. USA: Iowa State University Press,1995.
- [5] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)[M]. National Technical Information Service, United States Department of Agriculture (USDA),1997.
- [6] Flanagan D C, M A Nearing. USDA-water erosion prediction project-hillslope profile and watershed model documentation[M]. NSERL. Rep. No.10. USDA-ARS Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette,Indiana 47907,1995.
- [7] Balkema. Soil erosion in the European Community: Impact of changing agriculture (edited by Chisci G, Morgan R P C)[C]// Rotterdam: Proceedings of a seminar on land degradation due to hydrological phenomena in hilly areas: Impact of change of land use and management,1985.
- [8] Morgan R P C, Quinton J N, Rickson R J. Modelling methodology for soil erosion assessment and soil conservation design: The EUROSEM approach[J]. Outlook on Agriculture,1994,23:5-9.
- [9] Morgan R P C, Quinton J N, Smith RE, et al. The European soil erosion model (EUROSEM): A dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments[J]. Earth Surface Processes Landforms,1998,23:527-544.
- [10] 谢云,岳天雨.土壤侵蚀模型在水土保持实践中的应用[J].中国水土保持科学,2018,16(1):25-37.
- [11] Shoemaker L, Dai T, Koenig J. TMDL model evaluation and research needs [R]. Cincinnati: Remediation and Pollution Control Division, National Risk Management Research Laboratory,2005:23-25.
- [12] Geng R, Zhang G H, Ma Q H, et al. Soil resistance to runoff on steep croplands in Eastern China[J]. Catena, 2017,152:18-28.
- [13] 孙立全,吴淑芳,郭慧莉,等.人工掏挖坡面侵蚀微地貌演化及其水力学特性分析[J].水科学进展,2017,28(5):720-728.
- [14] 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.
- [15] Liu B Y, Zhang K L, Xie Y. An empirical soil loss equation[C]// Beijing: Proceedings-Process of soil erosion and its environment effect (Vol.II),2002:21-25.
- [16] 李发鹏,李景玉,徐宗学.东北黑土区土壤退化及水土流失研究现状[J].水土保持研究,2006,13(3):50-54.
- [17] 刘宝元,阎百兴,沈波,等.东北黑土区农地土壤流失现状与综合治理对策[J].中国水土保持科学,2008,6(1):1-8.
- [18] 焦剑.东北地区土壤侵蚀空间变化特征研究[J].水土保持研究,2010,17(3):1-6.
- [19] Xu X M, Zheng F L, Wilson G V, et al. Comparison of runoff and soil loss in different tillage systems in the Mollisol region of Northeast China[J]. Soil and Tillage Research,2018,177:1-11.
- [20] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. Soil and water assessment tool: theoretical documentation, version 2005 [M]. Temple, Texas: Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agriculture Research Service and Blackland Research Centre, Texas Agriculture Experiment Station,2005:252-255.
- [21] 汪顺生,刘东鑫,孟鹏涛,等.不同种植模式冬小麦产量与耗水量的模糊综合评判[J].农业工程学报,2016,32(1):161-166.
- [22] 张永东,吴淑芳,冯浩,等.土壤侵蚀过程中坡面流水力学特性及侵蚀动力研究评述[J].土壤,2013,45(1):26-33.
- [23] 李宁宁,张光辉,王浩,等.黄土丘陵沟壑区生物结皮对土壤抗蚀性能的影响[J].中国水土保持科学,2020,18(1):42-48.
- [24] 胡霞,蔡强国,刘连有,等.人工降雨条件下几种土壤结皮发育特征[J].土壤学报,2005,42(3):504-507.