

DOI: 10.11766/trxb202005040112

左小锋, 郑粉莉, 张加琼, 王一菲, 桑琦明, 张勋昌, 王磊, 王伦. 典型薄层黑土区前期地表风蚀作用影响坡面水蚀的研究[J]. 土壤学报, 2021, 58(5): 1145–1156.

ZUO Xiaofeng, ZHENG Fenli, ZHANG Jiaqiong, WANG Yifei, SANG Qiming, ZHANG Xunchang, WANG Lei, WANG Lun. Study on Effect of Surface Wind Erosion on Hillslope Water Erosion in Regions of Typical Thin Layered Mollisol at Early Stages[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(5): 1145–1156.

典型薄层黑土区前期地表风蚀作用影响坡面水蚀的研究*

左小锋¹, 郑粉莉^{1, 2†}, 张加琼^{1, 2}, 王一菲¹, 桑琦明¹, 张勋昌³, 王磊¹,
王伦¹

(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. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 3. 美国农业部农业研究局牧草地实验室, 美国 俄克拉荷马厄尔雷诺 73036)

摘 要: 水力、风力、冻融作用等多营力叠加的复合土壤侵蚀是东北黑土区土壤侵蚀的重要特征, 但目前该地区复合土壤侵蚀研究还相当薄弱, 进而影响黑土复合侵蚀防治措施的精准实施。采用室内风洞试验和模拟降雨试验相结合的方法, 分析前期地表风蚀作用对黑土坡面水蚀的影响。结果表明: (1) 前期地表风蚀作用使坡面产流时间明显滞后, 但其显著增加了坡面水蚀量 ($P < 0.05$), 且坡面径流和水蚀强度均随前期风蚀作用的风速增加而增加。(2) 前期地表风蚀作用对后期坡面水蚀产生了明显的正向效应, 地表风蚀作用对坡面水蚀的贡献随前期风蚀作用的风速增大而显著增加, 且雨强较小时前期地表风蚀作用对后期坡面水蚀的影响更加明显。在 50 和 100 mm·h⁻¹ 两种降雨强度下, 9、12 和 15 m·s⁻¹ 风速的风蚀作用对坡面水蚀量的贡献率分别为 24.2%、45.4%、80.3% 和 17.5%、26.3%、46.3%。(3) 地表风蚀作用增加坡面水蚀的主要原因一方面是前期风蚀作用使土壤抗侵蚀能力指标 (地表土壤抗剪强度和土壤硬度) 减小; 另一方面是风蚀过程中的风沙颗粒运动冲击、摩擦地表, 使坡面形成了风蚀凹痕微形态, 改变了后期坡面水蚀过程的径流路径, 加快了坡面径流汇集, 增加了坡面径流流速和减少了水流阻力, 从而增加了坡面径流侵蚀力和搬运能力; 此外, 前期风蚀作用也为后期坡面水蚀过程提供了侵蚀物质。本研究结果不仅丰富了复合土壤侵蚀理论, 也为黑土区土壤侵蚀防治提供了科学依据。

关键词: 风水复合土壤侵蚀; 正向效应; 侵蚀机理; 模拟试验; 薄层黑土区

中图分类号: S157.1 **文献标志码:** A

Study on Effect of Surface Wind Erosion on Hillslope Water Erosion in Regions of Typical Thin Layered Mollisol at Early Stages

ZUO Xiaofeng¹, ZHENG Fenli^{1, 2†}, ZHANG Jiaqiong^{1, 2}, WANG Yifei¹, SANG Qiming¹, ZHANG Xunchang³, WANG Lei¹, WANG Lun¹

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F

* 国家重点研发计划项目 (2016YFE0202900) 和美丽中国生态文明建设科技工程专项 (XDA23060502) 资助 Supported by the Strategic International Collaboration of Scientific and Technological Innovation for the National Key R&D Program of China (No. 2016YFE0202900), and Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (No. XDA23060502).

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: flzh@ms.iswc.ac.cn

作者简介: 左小锋 (1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀过程与机理研究工作。Email: zxf397474560@163.com

收稿日期: 2020-05-04; 收到修改稿日期: 2020-10-23; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2020-12-14

University, Yangling, Shannxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shannxi 712100, China; 3. Grazinglands Research Laboratory, USDA-Agricultural Research Service, El Reno 73036, USA)

Abstract: 【Objective】 Soil erosion in the Mollisol region of Northeast China is a compound process occurring under the joint effect of water, wind, freeze-thaw and other external forces. However, so far researches on compound soil erosions in this region are still far from adequate, thus affecting precise implementation of soil erosion control measures. 【Method】 This paper applied a research strategy of combining an indoor wind erosion simulation experiment with a simulated rainfall experiment to analyze effects of early-stage surface wind erosion on hillslope water erosion in the Mollisol region of China. 【Result】 Results showed: (1) the foregoing wind erosion significantly delayed the generation of hillslope runoff, but it significantly increased hillslope runoff and soil loss ($P < 0.05$), with both rates rising with wind velocity; (2) The foregoing wind erosion did have a positive effect on the following hillslope water erosion, and contribution of the former to the latter was increased significantly with rising wind velocity, but declined with rainfall intensity from 24.2%, 45.4%, 80.3%, down to 17.5%, 26.3% and 46.3%, respectively, when the wind was at 9, 12 and 15 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, respectively; (3) The contribution of wind erosion was attributed on the one side to the effect of wind erosion reducing soil erosion resistance by lowering shear strength and impactness of the surface soil, and on the other side, to the effect of wind erosion causing generation of aeolian sand particles that impacted and scrubbed the land surface in their wind-driving movement, thus forming micromorphology of wind erosion dents, and in turn altering runoff paths on the slope, speeding up pooling of runoff on the slope, increasing flow velocity and reducing flow resistance, and eventually intensifying surface runoff erosion and sediment transport. In addition, the foregoing wind erosion also provided erosion material for the later hillslope water erosion. 【Conclusion】 All the findings of this study not only enrich the theory of compound soil erosion, but also provide a scientific basis for soil erosion control in the Mollisol region of China.

Key words: Wind-water compound soil erosion; Positive effect; Erosion mechanism; Simulation experiment; Thin-layered Mollisol region

土壤风蚀和水蚀对全球生态环境造成的严重危害已受到广泛关注。目前关于风力或水力单独作用下的土壤侵蚀研究已取得了丰硕成果^[1-6],而对风力水力相互叠加相互作用的复合土壤侵蚀研究相对薄弱。近 10 多年来,有关风力和水力等多种侵蚀营力叠加或耦合作用形成的复合土壤侵蚀研究已成为研究的重点领域和热点问题。根据风力和水力在时间和空间上是否同步发生而产生的不同耦合关系,将风力水力复合侵蚀(风水复合侵蚀)分为风力水力(风水)共同侵蚀和风水交替侵蚀^[7],风水共同侵蚀的实质仍是水蚀,只是风力作用改变了降雨能量;风水交替侵蚀的实质是一种侵蚀营力通过对地表物质的侵蚀、搬运和沉积,为另一种侵蚀发生提供了物质基础,并重新塑造了地表侵蚀形态^[8];其侵蚀特点(包括能量供应^[9]、物质供应^[8]等)与单一外营力(风力或水力)侵蚀不尽相同^[10]。这种风水交替侵蚀表现为风力侵蚀和水力侵蚀在空间上的叠加和在时间上的交替,也是本文研究的内容。

近年来,关于风水复合侵蚀方面的研究取得了

重要进展,诸多学者通过野外调查、风洞模拟和降雨模拟试验、模型模拟(USLE 模型)、同位素示踪技术(¹³⁷Cs、⁷Be)、粒度对比法等方法研究了风力水力复合侵蚀特征^[8]。脱登峰等^[10]采用先风洞试验后模拟降雨的方法,研究了风力和水力两相侵蚀条件下的坡面产流产沙特征,结果表明风蚀改变了降雨产沙随降雨强度变化的定量关系,且风蚀作用对水蚀产生了明显的正交互效应;王禹等^[11]结合¹³⁷Cs示踪技术和 USLE 模型模拟,区分东北厚层黑土区坡耕地水蚀和风蚀速率。海春兴等^[12]认为风力水力复合侵蚀并非两种侵蚀方式的简单相加,而是二者相互加速或减速的作用过程;但风力和水力二者交互作用增加或减小土壤侵蚀的程度仍不明确,其相互作用的机理也不甚清楚。此外,在风蚀作用对水蚀影响的机理研究中,主要集中在前一种侵蚀营力通过改变下垫面,从而影响后一种侵蚀营力作用下的侵蚀过程,如风蚀对地表物质的吹蚀和摩擦导致土壤表层质地粗化,形成沙波纹或风蚀凹痕微形态,使地表粗糙度增加,而地表形态的变化改变了降雨

过程的坡面径流路径和流速，进而影响水蚀过程的地表径流和侵蚀过程^[10-13]。尽管以往在风力水力复合侵蚀研究方面取得了一定的进展，但大多研究集中在我国黄土高原风蚀水蚀交错区，且风力和水力叠加作用下的坡面土壤侵蚀过程与机理研究仍较薄弱^[9]。因此，亟需加强风蚀和水蚀交互影响下的坡面土壤侵蚀过程与机理研究，以期为针对性开展复合土壤侵蚀防治提供理论指导。

东北黑土区特殊的地理环境特征决定了其坡面土壤侵蚀受降雨、风力、冻融和融雪径流等多种外营力的复合影响，其中主要以水蚀（包括降雨和融雪侵蚀）和风蚀为主^[14]。由于该地区晚春农田地表裸露且干旱多风，而夏季和秋季降雨集中，必然导致了两种外营力（风力和水力）作用下的复合土壤侵蚀在时间上更替和在空间上叠加的特征^[15]，从而进一步加剧了坡面土壤侵蚀。尽管以往对东北黑土区开展了大量的土壤侵蚀研究，但主要集中于单一侵蚀营力作用下的坡面水蚀研究，而对多种外营力相互作用的复合侵蚀研究相对较少，尤其对风力水力复合土壤侵蚀过程与机理研究更加薄弱。鉴于此，本研究以侵蚀严重的黑龙江省宾州河流域典型薄层黑土区为研究区，通过室内风洞试验和模拟降雨试验相结合的方法，研究前期地表风蚀作用对黑土坡面水蚀的影响，以期丰富多营力作用的复合侵蚀理论，并为黑土区土壤侵蚀防治提供理论支持。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验土壤采自黑龙江省宾县宾州河流域（127°25'36"E，45°45'22"N）坡耕地表层 0~20 cm 耕层土壤，该流域属于东北典型薄层黑土区（黑土层厚度小于 30 cm）^[16]，从 20 世纪 90 年代以来，一直被作为薄层黑土区和侵蚀严重区的典型代表^[17]，具有“漫川漫岗”和长缓坡（坡长为 500~2 000 m、坡度为 1°~7°）的地貌特点^[18]。该流域每年春季 3—4 月份为春耕春播季节，坡耕地大多裸露、土层疏松和土壤含水量较低，且每年 3—5 月份平均风速大、大风日数多，导致该时段极易形成强烈的土壤风蚀环境^[19-20]。而夏秋季降雨集中，其中 6—9 月的降雨量占全年总降雨量的 80%左右，容易造成风蚀后的水蚀发生。正是该流域特殊的地理环境特征，

导致坡耕地风水复合侵蚀在时间上的更替和在空间上的叠加^[15]。因此选取宾州河流域采集供试土壤，使其研究结果能较好地代表东北薄层黑土区坡面风水复合侵蚀的状况。

在野外坡耕地采样时，于晚春（4 月）起垄播种前通过野外调查，并结合 An 等^[21]基于 ¹³⁷Cs 对宾州河流域侵蚀量的估算，选取面积为 35 hm²、坡度介于 1°~7°的坡耕地为采样地，采用网格法，将采样地按照 10 m×10 m 的网格进行划分，并在每个网格内按“S 型”每隔 2 m 采集耕层 0~20 cm 深度的土壤样品 6~8 个（每个样点的土壤样品质量约 5 kg），然后将土壤样品装入编织袋后运回实验室。在实验室对采集的所有试验土壤，先去除作物秸秆和根系等杂物，然后将试验土样中长度为 3~8 cm 和宽度为 3~5 cm 大土块沿节理和裂隙掰成 3~5 块 2~3 cm 的小块后，再将所有土样充分混合均匀后装入编织袋，并置于阴凉干燥处备用。此外，在对试验土样的整个处理过程中不做研磨和过筛处理，最大可能保持土壤原有结构。

采用吸管法测定试验土壤各粒级含量，并采用美国农业部土壤质地分级制对试验土壤进行颗粒分级，其颗粒组成分别为：砂粒（0.05~2 mm）含量 9.3%，粉粒（0.002~0.05 mm）含量 61.3%，黏粒（<0.002 mm）含量 29.4%，土壤质地为粉黏壤，这一结果与王彬等^[22]对宾州河流域 6 个典型坡面采集的 178 个土壤样品的土壤质地判定结果相同。在冬季和初春的冻融循环作用下易造成该质地土壤结构和土壤性质发生改变，尤其是表层土壤变得疏松且细碎，加上春耕春播季节起垄对土壤的扰动作用，为风蚀提供了侵蚀物质；而夏秋季节降雨集中时，该质地土壤遇水黏结，透水性差，容易形成“上层滞水”现象，易产生地表径流，从而导致严重的水力侵蚀。因此该土壤质地对东北典型薄层黑土区坡耕地风水复合侵蚀有很大影响。采样地块的耕层土壤容重为 1.20 g·cm⁻³，pH（水浸提法，水土比 2.5:1）为 6.1，有机质（重铬酸钾氧化-外加热法）含量为 20.25 g·kg⁻¹。

1.2 试验设备

风洞试验和模拟降雨试验于 2018 年 6 月至 2019 年 10 月在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室人工模拟降雨大厅和风洞实验室进行。风洞试验采用自动控制风速的直流吹气式风洞设备，风洞尺寸为 24 m（长）×1 m（宽）×1.2 m（高），由

风机段、调节段、整流段、实验段、集沙段和导流段六部分组成。风速调节主要通过调节与风机配套的变频器(0~50 Hz)达到所设定的目标风速,风速在0~17 m·s⁻¹范围内连续可调。在风洞试验段中心位置安装9个不同高度(距试验土槽表面上依次为1、3、5、8、10、12、16、20和60 cm)的皮托管测定风速。试验的目标风速为风洞轴心高度(60 cm)测定的风速,其余8个皮托管测定试验土槽上方的风速廓线。

模拟降雨试验装置为中国科学院水利部水土保持研究所研制的侧喷式人工模拟降雨机。降雨强度通过降雨机喷头内孔板直径大小和降雨机上阀门控制供水压力进行调节,其降雨强度可调范围为30~230 mm·h⁻¹,有效降雨面积大于16 m²,降雨均匀度大于85%^[23]。降雨机支架高度为5 m,雨滴上喷高度为1.5 m,故实际雨滴降落高度为6.5 m。在试验过程中利用激光雨滴能谱仪(LPM)分别测定了不同降雨强度下的雨滴直径和雨滴速度,发现6.5 m的降雨高度可使88%的雨滴达到终点速度^[24];且模

拟的天然降雨动能可达95.3%以上^[25]。因此,在该条件下进行的模拟降雨试验可满足试验要求。在进行降雨试验前先将降雨机移动至试验土槽前后约2 m处,使降雨机喷头正对试验土槽中心线,确保试验土槽的降雨均匀度达到95%以上。

试验所用土槽由槽身和集流口组成,其槽身与集流口可分离。试验土槽为100 cm(长)×50 cm(宽)×15 cm(高)规格的风蚀、水蚀两用型钢槽,试验土槽后端和左右两侧上部5 cm与其下部10 cm槽体用合页连接,可上下自由翻折,以同时满足风洞试验和模拟降雨试验的需求。风洞试验时,将试验土槽合页连接的上部5 cm钢板向下翻折,以保证试验土壤表面与风洞底板平齐;而在模拟降雨试验过程中将试验土槽合页连接的上部5 cm钢板竖起,以防止土粒飞溅和地表径流溢出试验土槽;同时将集流口与槽身连接,以收集降雨过程的径流泥沙样。试验土槽底部的坡度调节架可调节相应的坡度,其调节范围为0°~20°。试验土槽实际填土高度为10 cm。试验设备如图1所示。

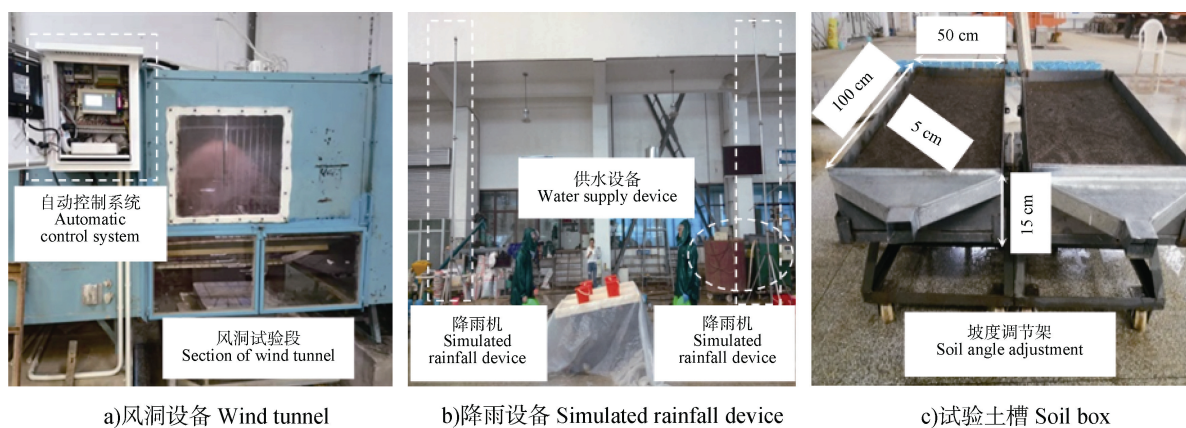


图1 试验设备

Fig. 1 Experimental apparatus

1.3 试验设计

为模拟东北黑土区坡耕地春夏交替季节农耕地的土壤侵蚀状况,本研究先进行风洞试验,然后在前期风蚀作用形成的下垫面形态基础上再进行风水同向(坡面径流方向与风速同向)的模拟降雨试验;同时,以前期地表无风蚀作用仅有降雨试验处理作为对照,分析风蚀作用对坡面水蚀的贡献。根据课题组野外多年观测资料,东北黑土区临界起沙风速约为8 m·s⁻¹(即5级风),极端瞬时最大风速可达

30 m·s⁻¹^[26],故风洞试验设计3个风速(9、12、15 m·s⁻¹)。参照东北黑土区侵蚀性降雨标准^[27],降雨主要为不超过1 h的短历时、高强度降雨^[28],且东北黑土区地面坡度一般为1°~8°^[26],大于5°的坡面土壤侵蚀强度达到中度或重度侵蚀^[29]。基于以上标准和田间实际情况,模拟降雨试验土壤前期含水量为51.4 g·kg⁻¹;地表坡度为7°,设计2个降雨强度(50、100 mm·h⁻¹),降雨历时为45 min。每个试验处理重复2次,具体试验设计如表1所示。

表 1 试验设计

Table 1 Experimental design

试验处理 Experimental treatment	风速 Wind velocity / (m·s ⁻¹)	降雨强度 Rainfall intensity / (mm·h ⁻¹)	试验目的 Experimental purpose
仅风蚀试验 ^① (I)	9、12 或 15	-	风蚀作用改变地表形态和粗糙度
仅降雨试验 (对照, II) ^②	-	50、100	前期无风蚀作用下的坡面水蚀过程
先风蚀试验后进行风水同向的降雨 试验 (径流方向与风向一致, III) ^③	9	50、100	前期地表风蚀作用对坡面水蚀的影响
	12	50、100	
	15	50、100	

①Slope subjected to wind erosion only (CK, I), ②Slope subjected to rainfall only (CK, II), ③Slope subjected to wind erosion first and then to rainfall causing runoff flowing the same direction as the wind (III)

1.4 试验步骤

(1) 填装试验土槽。为保证试验土槽在降雨过程中具有良好的透水性,在试验土槽底部均匀打孔,先在试验土槽底部填 2 cm 细沙,并在其上覆盖纱布,然后在沙层上部填装 8 cm 厚的试验土壤。根据野外现场测量,典型薄层黑土区坡耕地耕层土壤容重为 0.91~1.32 g·cm⁻³[16],平均值约为 1.20 g·cm⁻³,故本研究设计的土壤容重为 1.20 g·cm⁻³。试验土槽填土前,先测定试验土壤含水量(土壤质量含水量约为 51.4 g·kg⁻¹),然后根据土壤容重计算每层土层所需的土壤质量。填土时采用分层填土的方式进行,即按 4 cm 装填土后将表层刮毛再装填 4 cm 土层,以保证填土的均匀性和整体性。

(2) 风洞试验。为保证风洞试验过程中风速的均匀性,正式试验前需进行风速的率定。当率定风速与设计的目标风速间的误差小于 5%时,方可进行正式风洞试验。将填装好的试验土槽轻轻放入风洞内试验段,调整土槽高度使土体表面与风洞底板在同一高度,然后将试验土槽周边密封,以 60 cm 高度的轴心风速为基准,设定相应的目标风速(9、12 和 15 m·s⁻¹),同时测定不同高度的风速,试验历时 20 min。

(3) 模拟降雨试验。风洞试验结束后,连接试验土槽的槽身和集流口,并将试验土槽合页连接的上部 5 cm 钢板竖起并固定即可进行模拟降雨试验,降雨之前先调整好试验土槽的坡度和位置,使径流方向与风向一致。为了保证降雨均匀度和降雨强度均达到试验要求,每次正式降雨前须对降雨强度进行率定。正式降雨开始后观察坡面产流情况,并记

录产流时间,待坡面产流后接取第一个径流泥沙样,随后按 3 min 间隔收集径流泥沙样。并用染色剂法(高锰酸钾溶液示踪法)测定坡面径流流速,并根据坡面水流流态将测量的坡面流速乘以修正系数得到坡面径流平均流速。降雨 45 min 后,称取径流泥沙样质量,静置倒掉上层清液,然后置于 105 °C 的干燥箱中烘干(24 h)并用精度为 0.01 g 的电子天平称取泥沙质量,进一步计算径流量和水蚀量。

1.5 指标测定

风蚀作用前后的地表粗糙度采用链条法^[30]在不同风速下分别测定:

$$C_r = [1 - L_2 / L_1] \times 100 \quad (1)$$

式中, C_r 表示地表粗糙度, L_1 为原始链条的长度 (mm), L_2 为链条置于坡面缩短后的水平长度 (mm)。

土壤抗剪强度采用型号为 GEONOR7189 的十字板剪切仪测定。

土壤硬度采用型号为 Spectrum SC 900 的土壤紧实度仪进行测定。

坡面径流的流速采用染色剂法进行测定,降雨过程中实际测得的径流流速为坡面最大流速,坡面径流平均流速的取值须根据坡面水流流态将坡面最大流速乘以修正系数^[31],其表达式如下:

$$V = kV_m \quad (2)$$

式中, V 为坡面径流平均流速 (cm·s⁻¹); V_m 为坡面径流最大流速 (cm·s⁻¹); k 为修正系数(层流和过渡流取值为 0.67,紊流为 0.8),本研究中 $k=0.67$ 。

Darcy-Weisbach 阻力系数 (f) 是表示水流在流动过程中受到土壤表面阻止其向下流动的力。

径流剪切力是在坡面形成径流后产生的克服土粒间作用力时的剪切力, 根据 Foster 和 Meyer^[32]提出的公式进行计算:

$$\tau = \gamma R J \quad (3)$$

式中, τ 为径流剪切力 ($\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$), γ 为水的重度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), $\gamma=\rho g$. R 为水力半径 (cm), 用坡面薄层水流的水深代替; J 为水力能坡 (Pa), 用坡度的正弦值表示。

1.6 数据处理与分析

数据统计分析与作图应用 Excel 2010 和 SPSS 22.0 软件完成, 将两个重复处理的数据进行误差分析, 当二者相对误差小于 10% 时, 认为试验的重复性较好和试验数据质量可靠; 然后利用 SPSS 22.0 软件中的方差分析 (最小显著性差异法) 进行各指标间的显著性检验。

2 结果

2.1 前期地表风蚀作用对黑土坡面径流和侵蚀的影响

前期地表风蚀作用通过改变坡面表层的微地貌和土壤性质, 影响后期降雨入渗和径流路径, 进而影响坡面径流和土壤侵蚀状况^[33]。表 2 表明, 与前

期无风蚀作用仅有模拟降雨试验处理 (试验处理 II) 相比, 前期地表风蚀作用影响后期降雨过程的坡面产流时间, 但不同风速的风蚀作用对后期降雨产流时间的影响存在差异; 坡面产流时间随着前期风蚀试验中风速的增大而逐渐延长。表 2 显示前期地表风蚀作用导致坡面径流量和水蚀量显著增加 ($P<0.05$)。对于前期无风蚀作用仅有模拟降雨试验处理 (试验处理 II), $50 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 降雨强度下的坡面径流量、水蚀量和径流含沙量分别为 23.8 mm 、 $116.9 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $4.9 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, $100 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 降雨强度下三者分别为 52.3 mm 、 $1124.9 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $22.1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。与试验处理 II 相比, 在 9 、 12 和 $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速的前期风蚀作用下, $50 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 降雨强度下的坡面径流量、水蚀量和径流含沙量分别增加 $8.2\%\sim 17.9\%$ 、 $21.9\%\sim 104.3\%$ 和 $12.7\%\sim 72.9\%$; $100 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 降雨强度下, 三者分别增加 $1.2\%\sim 8.8\%$ 、 $10.9\%\sim 49.5\%$ 和 $3.1\%\sim 32.7\%$ 。这说明 $50 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 降雨强度下前期地表风蚀作用对坡面径流量、水蚀量和径流含沙量的影响大于 $100 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 降雨强度。此外, 从表 2 可知, 三个风速下的风蚀作用对坡面径流量、水蚀量和径流含沙量的影响存在显著差异, 且三者皆随前期土壤风蚀作用的风速增大而增加。

2.2 前期地表风蚀作用对黑土坡面径流过程的影响

图 2 显示, 对于 $50 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 降雨强度的试验处理, 有/无前期风蚀作用下, 坡面径流强度随降雨历时的变化均呈增加的趋势; 而对于 $100 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 降雨强度的试验处理, 有/无前期风蚀作用下, 坡面径

表 2 有/无前期风蚀作用下的坡面径流量和水蚀量对比

Table 2 Comparison between slopes of the control and treatments in runoff and water erosion

降雨强度 Rainfall intensity / ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)	风速 Wind velocity/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	产流时间 Time of runoff initiation		径流量 Runoff		水蚀量 Soil erosion		含沙量 Sediment concentration	
		(平均值±标准差) ^① /min	相对误差 ^② /%	(平均值±标准差) /mm	相对误差 Relative error /%	(平均值±标准差) /($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)	相对误差 /%	(平均值±标准差) /($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	相对误差 /%
50	CK	19.3±1.25a	3.1	23.8±0.18a	5.3	116.9±5.42a	4.6	4.9±0.11a	4.9
	9	20.0±0.00ab	3.5	25.9±0.26b	0.3	145.2±13.62b	9.4	5.6±0.06b	1.2
	12	21.5±0.50ab	2.3	27.3±0.17c	0.9	169.9±9.09c	5.3	6.2±0.05c	1.0
	15	25.5±2.50c	9.8	28.1±0.21d	3.0	210.8±6.18d	2.9	8.4±0.09d	1.2
100	CK	5.0±0.57a	6.0	53.0±0.51a	1.0	1124.9±11.03a	1.7	22.1±1.03a	1.9
	9	5.2±0.15ab	2.9	54.0±0.12b	0.2	1321.6±6.90b	0.5	22.8±0.89ab	4.8
	12	6.5±0.50c	7.7	55.4±0.09c	0.5	1420.3±11.80c	0.8	25.7±0.11c	0.1
	15	7.5±0.50d	6.7	57.1±0.32d	2.0	1649.5±5.77d	0.3	29.0±0.29d	1.2

① mean ± standard deviation; ② Relative error 注: 同一列不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。Note: Different letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$).

流强度随降雨历时的变化均呈现先快速增加而后趋于稳定的变化趋势。对于有前期地表风蚀作用的降雨试验处理,三个风速下风蚀作用后的坡面径流强度变化规律基本一致;但与无前期风蚀作用仅有降雨试验处理相比,其径流强度的增加幅度存在差异,且不同降雨强度下出现稳定径流的时间也不相同。在降雨过程中,坡面径流的变化与土壤水分入渗密切相关。当土壤水分接近饱和时,降水入渗量很少,使入渗过程变化趋于相对稳定,从而坡面径流过程变化也趋于平稳,此时的径流强度也逐渐达到稳定^[34-35]。在 $50 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 降雨强度下,前期无风蚀作用仅有降雨试验处理中坡面平均径流强度为 $31.5 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,而经过前期不同风速 (9 、 12 和 $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) 的风蚀作用后坡面平均径流强度分别为 34.2 、 36.0 和 $37.1 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,其较前期无风蚀作用仅有降雨试验处理分别增加 8.8% 、 14.5% 和 37.1% ,

径流强度在 36 min 左右趋于稳定,稳定径流强度介于 $38.7\sim 44.2 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 之间。在 $100 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 降雨强度下,前期无风蚀作用仅有降雨试验处理中坡面平均径流强度为 $69.4 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,而前期经过不同风速 (9 、 12 和 $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) 的风蚀作用后坡面平均径流强度分别为 70.7 、 73.3 和 $75.2 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,其较前期无风蚀作用的降雨试验处理分别增加 1.9% 、 5.7% 和 8.4% ,径流强度达到稳定的时间缩短至 18 min 左右,稳定径流强度介于 $70.8\sim 85.2 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 之间。由此可知,与 $100 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 降雨强度相比,在 $50 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 降雨强度下,经过前期地表风蚀作用后坡面径流强度的增加幅度较大,其出现稳定径流的时间延迟了 18 min 。说明前期地表风蚀作用对坡面径流的影响在较小雨强下更为明显,而随着降雨强度增加,削弱了前期地表风蚀作用对坡面径流的影响^[33]。

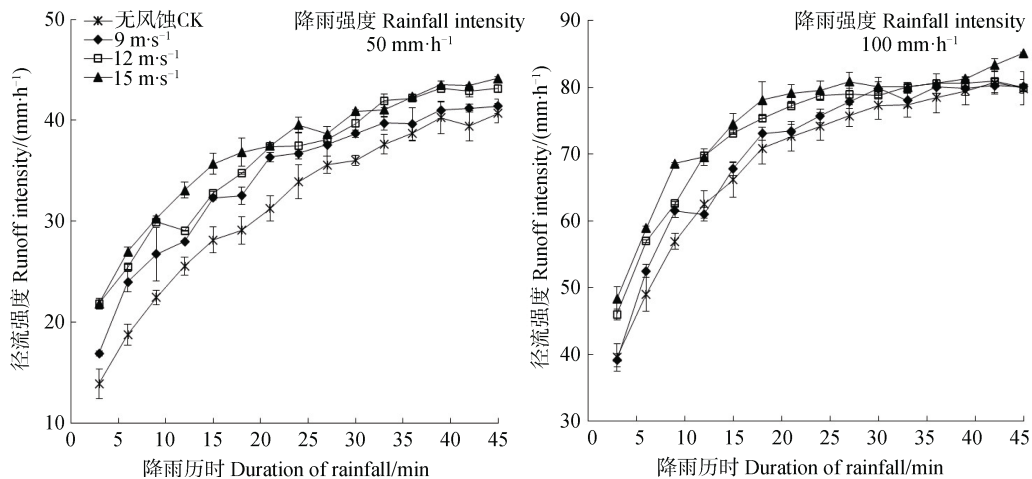


图2 有/无前期风蚀作用下的坡面径流强度变化过程

Fig. 2 Variation of slope runoff intensity as affected by foregoing wind erosion

2.3 前期地表风蚀作用对黑土坡面水蚀过程的影响

图3表明,在 $50 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 降雨强度下,前期无风蚀作用仅有降雨试验处理,坡面水蚀强度随降雨历时的变化呈现先增加后趋于稳定的变化趋势,坡面水蚀强度变化于 $0.3\sim 1.5 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ 之间。而对于前期地表风蚀作用后再进行降雨的试验处理,在三个风速的风蚀作用下,坡面水蚀强度随降雨历时的变化呈先增加后略有下降的变化趋势,坡面水蚀强度分别变化于 $0.4\sim 2.5$ 、 $0.4\sim 2.6$ 和 $0.5\sim 3.8 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ 之间。在 $100 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 降雨强度下,前期无风蚀作用仅有降雨试验处理,坡面水蚀强度随降雨历时的变化均呈现先快速增加后快速下降而后趋于稳定的变化趋势,其坡面水蚀强度变化于 $8.1\sim 18.3 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$

之间。而对于前期地表风蚀作用后再进行降雨的试验处理,在三个风速的前期地表风蚀作用下,坡面水蚀强度随降雨历时的变化均呈现先快速增加后快速下降而后波动变化的趋势,坡面水蚀强度分别变化于 $4.7\sim 19.2$ 、 $7.4\sim 22.2$ 和 $5.4\sim 23.2 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ 之间。

上述结果表明,前期地表风蚀作用改变了后期坡面水蚀过程,两个降雨强度下的坡面水蚀强度及其峰值均随前期地表风蚀作用的风速增大而增加;同时前期地表风蚀作用对坡面水蚀过程的影响也与降雨强度有关。这也表明东北黑土区坡耕地土壤侵蚀受前期地表风蚀作用的风速和降雨过程中降雨强度的综合影响。

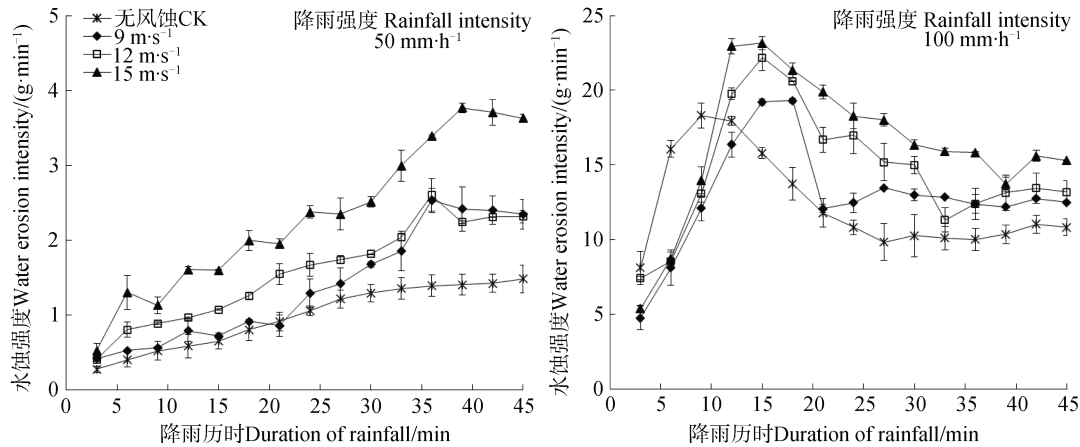


图3 有/无前期风蚀作用下的坡面水蚀强度变化过程

Fig. 3 Variation of slope water erosion intensity as affected by foregoing wind erosion

2.4 前期地表风蚀作用对坡面水蚀的贡献

由表3可知,前期地表风蚀作用对坡面径流和侵蚀的贡献随前期地表风蚀作用的风速增大而显著增加。在 $50\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 降雨强度下,9、12和 $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速的前期地表风蚀作用对坡面径流量和水蚀量的贡献率分别为8.5%、14.5%、17.8%和24.2%、45.4%、80.3%;在 $100\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 降雨强度下,其对坡面径流量和水蚀量的贡献率分别为1.9%、4.6%、7.7%和17.5%、26.3%、46.3%。与 $100\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 降雨强度相比, $50\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 降雨强度下,三个风速的前期地表风蚀作用对坡面径流量和水蚀量的贡献率分别增加6.6%、9.9%、10.1%和6.7%、19.1%、34.0%。说明前期地表风蚀作用对后期坡面水蚀产生了正向效应^[10],且在小雨强下,前期地表风蚀作用对后期坡面径流和侵蚀贡献较大。

3 讨论

前期地表风蚀作用导致坡面表层土壤结构疏松、地表粗糙度和地表形态改变是影响后期坡面水蚀的重要原因。本研究试验过程中分别测定了前期三个风速下风蚀作用前后地表土壤抗剪强度和土壤硬度等土壤抗蚀性指标(表4),结果表明,9、12、 $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 三个风速下土壤抗剪强度和土壤硬度分别减小2.9%~8.2%和4.4%~12.3%。此外,有研究者通过对比分析风蚀过程中地表和集沙仪收集到的土壤颗粒组成,发现风蚀作用使地表土壤细颗粒明显减小,而粗颗粒有所增加^[36],脱登峰^[37]对比了有无风蚀作用后的地表土壤颗粒,发现风蚀作用

可以使表层(0~1 cm)土壤砂粒含量增加6.51%~6.74%,黏粒含量和粉粒含量分别降低7.65%~9.15%和17.94%~18.15%,说明前期风蚀作用导致地表土壤质地粗化,同时风力作用使土壤抗剪强度和土壤硬度降低,土壤变得相对疏松,从而破坏了土壤结构,改变了土壤性质,致使抗冲性降低^[38],这也是前期风蚀作用导致后期坡面水蚀量显著增加的重要原因。

试验过程还发现,由于风蚀过程中颗粒几何形状不规则、空间位置和受力状况不同的土壤团聚体颗粒碰撞、冲击地面沙粒时,一部分土壤颗粒会形成风沙流。本研究在风洞试验过程中分别测定了9、12、 $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 三个风速下的风蚀输沙量,其值分别为1.62、20.39和 $88.95\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,输沙高度基本在距地表50 cm以内,其中,0~20 cm高度范围的输沙量分别占总输沙量的92.9%、97.3%和98.4%,其与臧英和高焕文^[39]研究的跃移颗粒分布高度(30 cm以内)和占总输沙量的比例(50%~80%)皆相似,说明黑土坡面土壤风蚀颗粒的运动形式主要以蠕移和跃移为主。正是由于这部分运动颗粒在风沙运动中沿着一个活动基面滚动与滑动相互交替进行^[40],因此在地表形成不同深度、不同大小的风蚀凹痕微形态。与 $9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风速相比,12和 $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速下地表形成的风蚀凹痕在试验土槽的分布面积明显增加(图4)。坡面形成的这些风蚀凹痕一方面改变了降雨过程中坡面的径流路径,另一方面使坡面径流更加集中,使坡面流速增加,从而增加坡面径流连通性和径流侵蚀能力,使坡面水蚀量增加。表5表明,试验条件下前期地表风蚀作用使坡面径流平均流速增

表 3 前期地表风蚀作用对后期坡面径流和侵蚀的贡献

Table 3 Contribution of foregoing wind erosion to late-on runoff and erosion on hillslope

降雨强度 Rainfall intensity/ ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)	风速 Wind velocity ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	径流贡献率 Runoff contribution/%	侵蚀贡献率 Erosion contribution/%
50	9	8.5	24.2
	12	14.5	45.4
	15	17.8	80.3
100	9	1.9	17.5
	12	4.6	26.3
	15	7.7	46.3

表 4 不同风速作用下土壤抗蚀性指标的变化

Table 4 Variation of soil corrosion resistance indices relative to wind velocity

风速 Wind velocity ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	土壤抗蚀性指标 Soil corrosion resistance index	
	抗剪强度 Soil shear strength (kPa)	土壤硬度 Soil hardness (kPa)
无风蚀 CK	16.4±1.02a	20.7±1.2a
9	15.9±0.85ab	19.8±1.5ab
12	15.0±0.76c	18.8±0.68c
15	14.8±0.47c	18.1±1.06c

注：表中数据为平均值±标准差，同一列不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。Note: The data in the table are mean ± standard deviation, and different letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$).

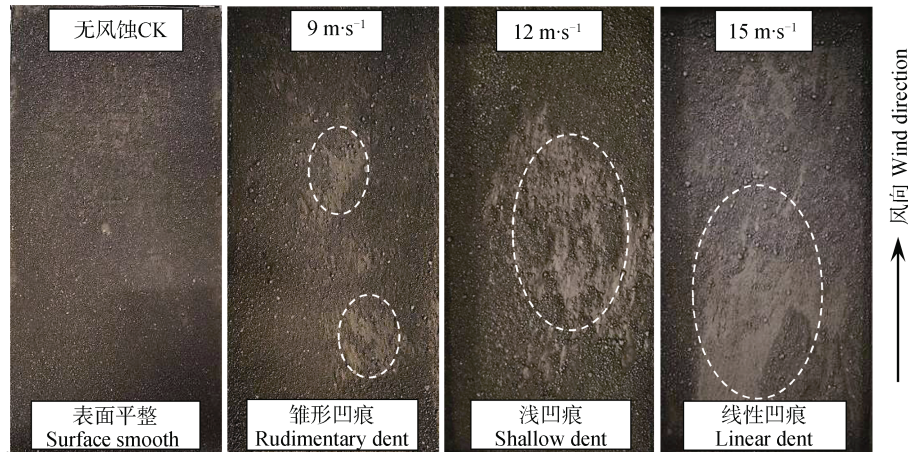


图 4 不同风速下风蚀作用前后地表微形态变化

Fig. 4 Changes in surface micro-morphology as affected by foregoing surface wind erosion relative to wind velocity

加 3.6%~29.1%，同时 Darcy-Weisbach 阻力系数减少 1.2%~27.4%，对应的径流剪切力增加 5.3%~30.0%，说明前期地表风蚀作用增大了后期坡面径流的紊乱程度和径流携沙能力^[41-42]，而径流剪切力的增加导致径流的剥蚀能力增加^[43]，从而进一步增加了坡面水蚀量。这也从侵蚀动力学角度解释了前期地表风蚀作

用加速了后期坡面水蚀的机理，并佐证了前期地表风蚀作用对后期坡面水蚀产生了正向效应。

此外，前期风蚀作用使地表粗糙度增大，且地表粗糙度随风速的增加而增大。与前期无风蚀作用仅有降雨试验处理相比，在 9、12 和 15 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速下地表粗糙度增加了 55.6%~90.6% (表 6)。地表粗糙度

表 5 有/无前期风蚀作用下的坡面水流水动力学参数

Table 5 Hydrodynamic parameters of the surface runoff relative to wind velocity

降雨强度 Rainfall intensity / (mm·h ⁻¹)	风速 Wind velocity / (m·s ⁻¹)	平均流速 Mean flow velocity / (cm·s ⁻¹)	Darcy-Weisbach 阻力系数 Darcy-Weisbach Resistance coefficient	径流剪切力 Flow shear stress / (N·m ⁻²)
50	无风蚀 CK	2.48	29.77	2.29
	9	2.69	26.68	2.41
	12	2.87	24.52	2.53
	15	3.20	21.63	2.77
100	无风蚀 CK	4.94	8.20	2.41
	9	5.12	8.10	2.65
	12	5.31	8.07	2.89
	15	5.57	7.88	3.13

表 6 不同风速下风蚀作用前后地表粗糙度对比

Table 6 Surface roughness of the slope relative to wind velocity

风速 Wind velocity / (m·s ⁻¹)	平均地表粗糙度 Mean surface roughness			风蚀深度 Wind erosion depth /cm
	风蚀前 Before wind erosion	风蚀后 After wind erosion	增加百分数 Increasing percentage/%	
9	1.8	2.8	55.6	0.23
12	2.4	4.2	75.0	0.48
15	3.2	6.1	90.6	0.76

的增加,增大了坡面降雨入渗,从而延长了坡面径流发生时间,这也可能是前期地表风蚀作用使坡面径流发生时间滞后的重要原因。但另一方面,地表粗糙度的增加也加剧了降雨侵蚀的潜在能力^[31]。由于前期地表风蚀作用使地表松散粗颗粒富集,为后期坡面径流侵蚀提供了物质来源,最终导致坡面径流含沙量增加;而坡面径流量和含沙量的增加,导致坡面水蚀量增加。

4 结 论

本研究通过室内风洞试验和模拟降雨试验相结合的方法,分析了前期地表风蚀作用对黑土坡面水蚀的影响,结果表明,前期地表风蚀作用显著增加了坡面径流量和水蚀量 ($P < 0.05$),改变了后期坡面水蚀过程,其对后期坡面水蚀产生了明显的正向效应,且前期地表风蚀作用对后期坡面水蚀的贡献与风速和降雨强度均明显相关;前期地表风蚀作用导

致后期坡面水蚀增加的主要原因是风蚀作用使土壤抗侵蚀能力指标(地表土壤抗剪强度和土壤硬度)减少;增加了后期坡面径流的紊乱程度和径流携沙能力,同时径流剪切力增加导致径流的剥蚀能力增加,从而进一步增加了坡面水蚀量。此外,风蚀作用使地表粗糙度增加 55.6%~90.6%,使地表松散粗颗粒富集,加剧了降雨侵蚀的潜在能力,并为后期降雨侵蚀提供了物质来源。

参考文献 (References)

- [1] Zhang G P, Zhang Z X, Liu J Y. Spatial distribution of aeolian erosion of soil and its driving factors in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56 (2): 146—158. [张国平, 张增祥, 刘纪远. 中国土壤风力侵蚀空间格局及驱动因子分析[J]. *地理学报*, 2001, 56 (2): 146—158.]
- [2] Römken M J M, Helming K, Prasad S N. Soil erosion under different rainfall intensities, surface roughness, and soil water regimes[J]. *Catena*, 2002, 46 (2/3): 103—123.
- [3] Woodruff N P, Siddoway F H. A wind erosion equation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1965, 29 (5): 602—608.

- [4] Hagen L J. A wind erosion prediction system to meet the users need[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1991, 46 (2): 107—111.
- [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) [J]. 1997.
- [6] 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.
- [7] Yang H M, Wang J A, Zou X Y, et al. Progress and prospect of research on wind-water complex erosion[J]. *Journal of Desert Research*, 2016, 36(4): 962—971. [杨会民, 王静爱, 邹学勇, 等. 风水复合侵蚀研究进展与展望[J]. *中国沙漠*, 2016, 36 (4): 962—971.]
- [8] Song Y, Liu L Y, Yan P. A review on complex erosion by wind and water research[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61 (1): 77—88. [宋阳, 刘连友, 严平. 风水复合侵蚀研究述评[J]. *地理学报*, 2006, 61 (1): 77—88.]
- [9] Li Q Y, Cai Q G, Fang H Y. Advances in complex erosion of wind and water and ecological restoration[J]. *Progress in Geography*, 2010, 29 (1): 65—72. [李秋艳, 蔡强国, 方海燕. 风水复合侵蚀与生态恢复研究进展[J]. *地理科学进展*, 2010, 29 (1): 65—72.]
- [10] Tuo D F, Xu M X, Zheng S Q, et al. Sediment-yielding process and its mechanisms of slope erosion in wind-water erosion crisscross region of Loess Plateau, Northwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23 (12): 3281—3287. [脱登峰, 许明祥, 郑世清, 等. 黄土高原风蚀水蚀交错区侵蚀产沙过程及机理[J]. *应用生态学报*, 2012, 23 (12): 3281—3287.]
- [11] Wang Y, Yang M Y, Liu P L. Contribution partition of water and wind erosion on cultivated slopes in northeast black soil region of China[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2010, 24 (4): 790—795. [王禹, 杨明义, 刘普灵. 东北黑土区坡耕地水蚀与风蚀速率的定量区分[J]. *核农学报*, 2010, 24 (4): 790—795.]
- [12] Hai C X, Shi P J, Liu B Y, et al. Research status of wind and water double erosion and its main study content in future[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16 (2): 50—52, 56. [海春兴, 史培军, 刘宝元, 等. 风水两相侵蚀研究现状及我国今后风水蚀的主要研究内容[J]. *水土保持学报*, 2002, 16 (2): 50—52, 56.]
- [13] Li J L, Cai Q G, Sun L Y, et al. Reviewing on factors and critical conditions of rill erosion[J]. *Progress in Geography*, 2010, 29 (11): 1319—1325. [李君兰, 蔡强国, 孙莉英, 等. 细沟侵蚀影响因素和临界条件研究进展[J]. *地理科学进展*, 2010, 29 (11): 1319—1325.]
- [14] Fan H M, Cai Q G, Wang H S. Condition of soil erosion in phaeozem region of northeast China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18 (2): 66—70. [范昊明, 蔡强国, 王红闪. 中国东北黑土区土壤侵蚀环境[J]. *水土保持学报*, 2004, 18 (2): 66—70.]
- [15] Zheng F L, Zhang J Q, Liu G, et al. Characteristics of soil erosion on sloping farmlands and key fields for studying compound soil erosion caused by multi-forces in mollisol region of northeast China[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39 (4): 314—319. [郑粉莉, 张加琼, 刘刚, 等. 东北黑土区坡耕地土壤侵蚀特征与多营力复合侵蚀的研究重点[J]. *水土保持通报*, 2019, 39 (4): 314—319.]
- [16] Ministry of Water Resources. Prevention and control of soil and water loss and ecological security in China (Northeast Black Soil Region Volume) [M]. Beijing: Science Press, 2010. [水利部. 中国水土流失防治与生态安全(东北黑土区卷) [M]. 北京: 科学出版社, 2010.]
- [17] Shen B, Fan J R, Pan Q B, et al. General situation of pilot project of comprehensive prevention and control of soil and water loss of chernozem region in northeast of China[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2003 (11): 7—8. [沈波, 范建荣, 潘庆宾, 等. 东北黑土区水土流失综合防治试点工程项目概况[J]. *中国水土保持*, 2003 (11): 7—8.]
- [18] Yan B X, Yang Y H, Liu X T, et al. Soil erosion status and evolution trend in the black soil region of northeastern China[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2008 (12): 26—30. [阎百兴, 杨育红, 刘兴土, 等. 东北黑土区土壤侵蚀现状与演变趋势[J]. *中国水土保持*, 2008 (12): 26—30.]
- [19] Yang X, Guo J F, Liu H H, et al. Soil wind erosion environment in black soil region in northeastern China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, 26(4): 4443—4448. [杨新, 郭江峰, 刘洪鹤, 等. 东北典型黑土区土壤风蚀环境分析[J]. *地理科学*, 2006, 26 (4): 443—448.]
- [20] Zhang X L, Zhou Q Q, Chen W W, et al. Observation and modeling of black soil wind-blown erosion from cropland in Northeastern China[J]. *Aeolian Research*, 2015, 19: 153—162.
- [21] An J, Zheng F L, Wang B. Using ¹³⁷Cs technique to investigate the spatial distribution of erosion and deposition regimes for a small catchment in the black soil region, Northeast China[J]. *Catena*, 2014, 123: 243—251.
- [22] Wang B, Zheng F L, An J, et al. Comparative study of particle size distribution by laser diffraction method and pipette method in black soil region of northeast China[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, 29 (2): 134—139, 143. [王彬, 郑粉莉, 安娟, 等. 激光衍射法与吸管法对东北黑土区土壤粒径分布测定的差异性研究[J]. *水土保持通报*, 2009, 29 (2): 134—139, 143.]
- [23] Zheng F L, Zhao J. Introduction to artificial rainfall simulation hall and rainfall simulation equipment[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 11 (4):

- 177—178. [郑粉莉, 赵军. 人工模拟降雨大厅及模拟降雨设备简介[J]. 水土保持研究, 2004, 11(4): 177—178.]
- [24] Zheng F L. Study on interrill erosion and rill erosion on slope farmland of loess area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(1): 95—103. [郑粉莉. 黄土区坡耕地细沟间侵蚀和细沟侵蚀的研究[J]. 土壤学报, 1998, 35(1): 95—103.]
- [25] Fan R S, Li Z B. Artificial rainfall device for soil erosion study[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1991, 5(2): 38—45. [范荣生, 李占斌. 用于降雨侵蚀的人工模拟降雨装置实验研究[J]. 水土保持学报, 1991, 5(2): 38—45.]
- [26] Zhang X P, Liang A Z, Shen Y, et al. Erosion characteristics of black soils in northeast China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, 26(6): 687—692. [张晓平, 梁爱珍, 申艳, 等. 东北黑土水土流失特点[J]. 地理科学, 2006, 26(6): 687—692.]
- [27] Gao F, Zhan M, Zhan H. Study on farmland erosive rainfall standard in black soil region[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 1989(11): 19—21. [高峰, 詹敏, 战辉. 黑土区农地侵蚀性降雨标准研究[J]. 中国水土保持, 1989(11): 19—21.]
- [28] Zhan M, Li Z C, Xin Y L. On the relationship between precipitation parameter and soil erosion[J]. *Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College*, 1998(1): 40—43. [詹敏, 厉占才, 信玉林. 黑土侵蚀区降雨参数与土壤流失关系[J]. 黑龙江水专学报, 1998(1): 40—43.]
- [29] Liu B Y, Yan B X, Shen B, et al. Current status and comprehensive control strategies of soil erosion for cultivated land in the Northeastern black soil area of China[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2008, 6(1): 1—8. [刘宝元, 阎百兴, 沈波, 等. 东北黑土区农地水土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.]
- [30] Saleh A. Soil roughness measurement: Chain method[J]. *Journal of Soil & Water Conservation*, 1993, 48(6): 527—529.
- [31] Li G, Abrahams A D, Atkinson J F. Correction factors in the determination of mean velocity of overland flow[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1996, 21(6): 509—515.
- [32] Foster G R, Meyer L D. A closed-form soil erosion equation for upland areas[EB/OL]. 1972.
- [33] Tuo D F, Xu M X, Zheng S Q, et al. Effects of wind and water double erosion on characteristics of runoff and sediment from slope lands[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(18): 142—148. [脱登峰, 许明祥, 郑世清, 等. 风水两相侵蚀对坡面产流产沙特性的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(18): 142—148.]
- [34] Wang Z H, Zhang F B, Yang M Y, et al. Effect of vegetation utilization on runoff and sediment production on grain-for-green slopes in the wind-water erosion crisscross region[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(12): 3907—3916. [王子豪, 张凤宝, 杨明义, 等. 水蚀风蚀交错区退耕坡面植被利用对产流产沙的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(12): 3907—3916.]
- [35] Mu W B, Yu F L, Li C Z, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on runoff and soil moisture content on different growing stages of spring maize[J]. *Water*, 2015, 7(12): 2990—3008.
- [36] Ha S. Preliminary study on physical and chemical characteristics of wind-blown sediment in Bashang Region of Hebei Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1997, 17(1): 1—6. [哈斯. 河北坝上地区土壤风蚀物理化学性质初步研究[J]. 水土保持通报, 1997, 17(1): 1—6.]
- [37] Tuo D F. The study of the soil degradation mechanism in wind-water erosion crisscross region on the Loess Plateau[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2016. [脱登峰. 黄土高原水蚀风蚀交错区土壤退化机理研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2016.]
- [38] Breshears D D, Whicker J J, Johansen M P, et al. Wind and water erosion and transport in semi-arid shrubland, grassland and forest ecosystems: Quantifying dominance of horizontal wind-driven transport[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2003, 28(11): 1189—1209.
- [39] Zang Y, Gao H W. Research on occurrence mechanism and control technology of wind erosion in agricultural lands[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2002, 18(3): 195—198. [臧英, 高焕文. 国外农田风蚀发生机理与防治技术的研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(3): 195—198.]
- [40] Ling Y Q, Wu Z. Experimentation on the dynamic photography of the movement of sand-driving wind[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1980, 35(2): 174—181. [凌裕泉, 吴正. 风沙运动的动态摄影实验[J]. 地理学报, 1980, 35(2): 174—181.]
- [41] Helming K, Römkens M J M, Prasad S N. Surface roughness related processes of runoff and soil loss: A flume study[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62(1): 243—250.
- [42] Tuo D F, Xu M X, Gao L Q, et al. Changed surface roughness by wind erosion accelerates water erosion[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(1): 105—114.
- [43] Nearing M A, Norton L D, Bulgakov D A, et al. Hydraulics and erosion in eroding rills[J]. *Water Resources Research*, 1997, 33(4): 865—876.

(责任编辑: 檀满枝)