

典型薄层黑土区前期坡面水蚀对土壤风蚀的影响

左小锋^{1,3}, 郑粉莉^{1,2*}, 张加琼^{1,2}, 王一菲¹, 桑琦明¹, 张勋昌⁴

(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, 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100; 3. 北京师范大学地理科学学部地表过程与资源生态国家重点实验室/防沙治沙教育部工程研究中心, 北京 100875; 4. 美国农业部农业研究局牧草地实验室, 俄克拉荷马厄尔雷诺 73036)

摘要: 为了探究东北黑土区水力风力叠加作用的多营力复合侵蚀机理, 该研究利用直流吹气式风洞对有、无前期降雨的地表进行风蚀试验, 对比分析前期坡面水蚀作用对黑土区坡耕地土壤风蚀的影响。结果显示: 不同降雨强度下前期坡面水蚀作用使土壤风蚀量明显减小, 即前期坡面水蚀作用对地表产生了明显抗风蚀效应。在 9、12 和 15 m/s 风速作用下, 50 和 100 mm/h 降雨强度的前期坡面水蚀作用产生的抗风蚀效率分别为 68.4%~96.2%和 77.2%~97.6%, 且随降雨强度增加, 其抗风蚀效率增大。土壤风蚀强度受前期坡面水蚀作用中降雨强度和风速的综合影响, 降雨强度的增加对土壤风蚀的抑制效果明显。前期坡面水蚀作用降低了土壤风蚀输沙量和输沙高度, 且风蚀输沙量随前期坡面水蚀作用中降雨强度的增大而减小。前期坡面水蚀作用对地表产生抗风蚀效应的主要原因一方面是前期降雨径流侵蚀作用对土壤的压实过程改变了土壤性质和地表形态, 使地表土壤抗剪强度和土壤紧实度增加, 从而提高了土壤结构的稳定性和抗风蚀能力; 另一方面前期降雨侵蚀作用使地表土壤颗粒分散并随径流流失, 减少了后期土壤风蚀的物质来源, 抑制了土壤风蚀的发生。该研究结果不仅揭示了前期坡面水蚀作用对黑土区土壤风蚀的影响机制, 也为针对性防治黑土坡面复合侵蚀和黑土资源的可持续利用提供了理论依据。

关键词: 侵蚀; 风; 水; 抗风蚀效应; 模拟试验; 薄层黑土区

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.006

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-12-0045-09

左小锋, 郑粉莉, 张加琼, 等. 典型薄层黑土区前期坡面水蚀对土壤风蚀的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12): 45-53. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.006 http://www.tcsae.org

Zuo Xiaofeng, Zheng Fenli, Zhang Jiaqiong, et al. Effect of previous sloping water erosion on soil wind erosion in typical thin layered Mollisol region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(12): 45-53. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.006 http://www.tcsae.org

0 引言

土壤侵蚀导致的生态退化是全球性的环境问题之一。近几十年来, 国内外学者致力于土壤侵蚀科学研究, 在土壤侵蚀类型与空间分布、水蚀和风蚀过程与机理及影响因素、侵蚀预报模型以及土壤侵蚀环境效应评价等方面取得了卓有成效的研究成果^[1-3]; 但多种侵蚀营力作用下的复合侵蚀研究相对较少。区域特殊的地理环境特征, 决定了多种侵蚀外营力(水力、风力、冻融和重力)在时空分布、能量供给、物质来源等方面相互耦合而形成复合、交替或交互作用的复杂关系^[4], 进而引发了严重的生态环境问题。因此, 关于多营力耦合作用的土壤复合侵蚀研究是目前国内外学者面临的重大研究课题。现有的研究根据复合侵蚀的主导动力因子将复合侵蚀划

分为风蚀与水蚀^[5]、冻融与风蚀^[6]、冻融与水蚀(包括融雪侵蚀和降雨侵蚀)^[7]、水蚀与重力侵蚀^[8]、耕作侵蚀与水蚀^[9]以及冻融-风蚀-水蚀^[10]等两个及两个以上侵蚀营力作用的多种复合侵蚀类型。与其他类型的复合侵蚀相比, 风力水力复合侵蚀分布范围较广, 侵蚀强度较高, 研究和治理也较为薄弱。在中国甚至形成了一条由东北向西南分布的风蚀水蚀交错带, 强烈的风水复合侵蚀导致这些区域生态环境更加脆弱, 故而其也被作为热点研究领域和前沿科学问题而备受学界关注^[11]。

近年来, 国内外学者围绕风水复合侵蚀的区域划分、时空变化、侵蚀特征、机理与过程等问题开展了一系列研究工作, 也获得了重要研究成果^[12-15], 然而依然存在诸多不足。风水复合侵蚀是风蚀和水蚀相互作用的结果, 以往的研究多关注前期风蚀对后期水蚀的影响, 且大多强调风力对水力产生的正向交互效应^[14,16], 而忽略了前期降雨产生的水蚀对土壤风蚀的影响。加上风水复合侵蚀的复杂性, 在野外无法正常开展, 从而影响风水复合侵蚀机理和过程的深入研究。尽管以往在水蚀对风蚀是否产生抑制效应方面进行了相关探讨, 例如, 张庆印等^[17]认为降雨产生的水蚀沟宽度和密度的增加对风蚀量产生了正向影响, 水蚀沟在一定深度范围内(4~8 cm), 其

收稿日期: 2021-01-01 修订日期: 2021-06-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFE0202900); 美丽中国生态文明建设科技工程专项(XDA23060502)

作者简介: 左小锋, 博士生, 研究方向为土壤侵蚀过程与机理。

Email: zxf397474560@163.com

*通信作者: 郑粉莉, 教授, 博士生导师, 研究方向为土壤侵蚀过程、预报和侵蚀环境效应评价。Email: flzh@ms.iswc.ac.cn

风蚀量随着沟深增加而增加; Singer 等^[18]从土壤性质的角度分析了土壤结皮对风蚀和水蚀的不同响应, 认为前期水蚀作用产生的土壤结皮会增加土壤强度, 从而减小风蚀。但 Zhang 等^[19]的研究结果表明, 水蚀改变了地表微地形(如细沟发生), 导致在一定范围内风蚀产沙量与细沟宽度和密度呈正相关关系; 然而, 由于风水复合侵蚀的环境因子和不同时段主导侵蚀力的差异性, 导致风力水力交替侵蚀研究结果差异较大, 且前期水蚀作用影响土壤风蚀的过程和机理研究尚不清楚。

东北黑土区常年遭受多种外营力(冻融、水力、风力等)耦合作用的复合侵蚀影响, 其中, 水力风力复合侵蚀在黑土区复合侵蚀中占有重要地位。近年来, 虽然诸多学者针对黑土区复合土壤侵蚀特征和侵蚀防治分区等方面开展了研究, 也取得了重要进展^[16,20-22], 但风水复合侵蚀过程和机理研究仍相对薄弱, 且当前研究较少关注前期坡面水蚀作用对土壤风蚀的影响, 从而导致复杂侵蚀环境下的土壤侵蚀过程及相应机制尚不明晰, 严重制约了黑土区土壤侵蚀防治措施的精准实施。为此, 本研究基于模拟降雨试验和风洞试验, 结合土壤力学性质测定等方法, 以前期无降雨仅风蚀试验处理为对照, 研究典型薄层黑土区前期坡面水蚀作用对土壤风蚀的影响效应, 进一步揭示水力风力叠加作用对土壤风蚀的影响机理, 以期为实现黑土区复合侵蚀阻控和地力维持双目标的黑土资源可持续利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤选取东北典型薄层黑土区(黑土层厚度小于 30 cm)黑龙江省宾州河流域(127°25'36"E, 45°45'22"N)坡耕地 20 cm 的耕层土壤。采用吸管法测得土壤各粒级质量百分比分别为: 砂粒(50~<2 000 μm) 9.3%, 粉粒(2~<50 μm) 61.3%和黏粒(<2 μm) 29.4%, 土壤质地为粉黏壤。耕层土壤容重为 1.20 g/cm³, pH 值为 6.1(水浸提法, 水土质量比 2.5:1), 有机质含量为 20.25 g/kg(重铬酸钾氧化-外加热法)。

模拟降雨试验装置采用侧喷式人工模拟降雨机(图 1a), 降雨前可调试降雨机喷头内孔板直径大小和降雨机上的阀门控制供水压力来调节降雨强度(雨强变化范围为 30~230 mm/h), 并通过调整降雨机的位置确定有效降雨区。雨滴降落高度为 6.5 m(降雨机支架高度为 5 m, 雨滴上喷高度为 1.5 m)。有效降雨面积大于 16 m², 降雨均匀度大于 85%^[23], 且能够较好地反映天然降雨的雨滴终速和雨滴动能。模拟试验所用的试验土槽为长 100 cm、宽 50 cm、高 15 cm 规格的自制风蚀、水蚀两用型钢槽, 由槽体(10 cm)以及槽身两侧和后端用合页连接的钢板(5 cm)组成, 前端可安装集流槽(图 1b), 在进行模拟试验时可根据实际需要进行组装。

模拟风蚀试验时采用的设备为自动控制风速的直流吹气式风洞(24.0 m×1.0 m×1.2 m)(图 2a), 由动力段、调节段、整流段、试验段、集沙段和导流段组成了风洞

主体部分, 并配备皮托管风速廓线仪、平口式多层集沙仪和电子天平等辅助设备(图 2b)。试验过程主要在试验段完成, 风速可调范围为 0~17 m/s, 风洞内截面风速具有较好的均匀性。

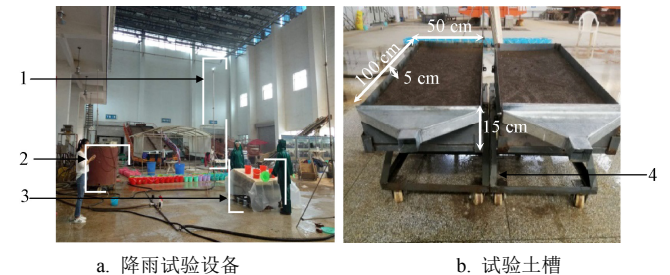


图 1 模拟降雨试验设备
Fig.1 Equipment of simulated rainfall experiment
注: 1. 模拟降雨机; 2. 供水设备; 3. 试验土槽; 4. 坡度调节架
Note: 1. Simulated rainfall device; 2. Water supply device; 3. Experimental soil box; 4. Slope adjustment shelf

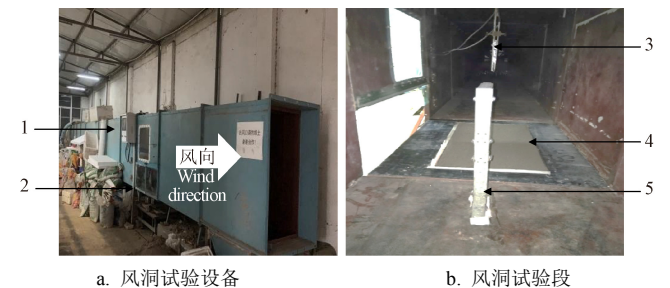


图 2 风洞试验设备
Fig.2 Facility of wind tunnel experiment
注: 1. 自动控制系统; 2. 风洞试验段; 3. 风速廓线仪; 4. 试验土槽; 5. 集沙仪
Note: 1. Automatic control system; 2. Test section of the wind tunnel; 3. Wind profiler; 4. Experimental soil box; 5. Sand sampler

1.2 试验设计

根据该地区特殊的气候条件和“漫川漫岗”等地理环境特征^[24], 结合课题组多年的野外观测数据, 本研究先进行前期的模拟降雨试验, 在此基础上, 待试验土槽表面土壤自然风干后再进行风洞试验, 从而模拟野外自然条件下晚春早夏季节发生的土壤表面先水蚀后风蚀的水蚀风蚀的叠加作用。同时, 以无前期降雨的风蚀处理结果作为对照, 分析前期坡面水蚀作用对土壤风蚀的影响效应。根据以往对东北黑土区侵蚀性降雨标准调查^[25-26]和野外现场观测结果, 填装试验土槽设计土壤容重为 1.20 g/cm³, 基于黑土区坡耕地地表坡度多介于 1°~7°, 故模拟降雨试验中设计地表坡度为 3°, 降雨强度为 50 和 100 mm/h(即 0.83、1.67 mm/min), 每场降雨历时 45 min。风洞试验的风速根据东北黑土区临界起沙风速(8 m/s)和极端瞬时最大风速(30 m/s), 设计 3 个试验风速(9、12、15 m/s), 风蚀试验时间为 20 min。

1.3 试验过程

1) 填装试验土槽。根据课题组对东北典型薄层黑土区宾州河流域土壤流失厚度野外调查、观测和试验研究结果^[27], 本试验采用深度为 10 cm 的土槽装填试验土壤(试验土槽底部 2 cm 细沙层, 上部 8 cm 土层), 可以满足试验要求。填装试验土壤前, 在底部钻有排水孔的土

槽下层先填装 2 cm 厚的细沙作为透水层，并覆盖纱布。然后根据测定的试验土壤含水率和试验设计的土壤容重 (1.20 g/cm^3) 计算填土所需的土壤质量，再进行分层填土。先填装细沙层上部 4 cm 土层，将其表层刮毛后再装填另外 4 cm 土层，填土过程中还需压实试验土槽边壁周围土壤，以此保证填土的均匀性和整体性，同时减少边界效应的影响。此外，本研究每完成 1 次完整试验后均要对试验土槽重新填土，以保证试验数据的重复性和可靠性。

2) 模拟降雨试验。试验土槽填装好后先移动至降雨区进行模拟降雨试验。在调整好试验土槽和降雨机的位置后，进行降雨强度的率定，从而保证每次降雨过程中的降雨均匀度能达到试验要求。正式降雨开始后观察坡面径流侵蚀情况，待坡面产流后记录产流时间，并接取第一个径流泥沙样，随后每隔 3 min 收集 1 次。降雨结束后，称取径流泥沙样质量，待泥沙完全沉降后倒掉上层清液，置于 105°C 的干燥箱中烘干，用 0.01 g 精度的电子天平称取烘干后的泥沙质量并计算。

3) 风洞试验。模拟降雨试验结束后，待试验土槽的土壤自然风干至表层土壤含水率约 5.14% (风干土含水率) 时，再进行风水同向 (坡面径流方向与风向相同) 的风洞试验。试验前先将试验土槽前端的集流槽拆卸，然后向下翻折与试验土槽槽体上部连接的钢板，以确保试验土槽表面土壤与风洞底板在同一高度。正式试验的风速以试验段轴心高度 600 mm 处的风速为基准，并利用其他高度 (距试验土槽表面上依次为 10、30、50、80、100、120、160、200 mm) 皮托管测定的结果绘制风速廓线。每个风速 (9、12 和 15 m/s) 下吹蚀 20 min。用精度为 1 g 的电子天平对试验前后的试验土槽分别进行称量，通过对比前后质量差值来计算土壤风蚀量。同时在试验土槽后端 10 cm 的位置 (风洞集沙段) 安装多层集沙仪，开口正对风的来向，收集不同高度的风蚀颗粒。待试验结束后装入塑封袋，用 0.000 1 g 精度的电子天平称量并进行相应计算。

1.4 数据处理

1.4.1 空气动力学粗糙度和摩阻风速计算

空气动力学粗糙度 z_0 是描述地表对气流阻抗的重要参数，可以通过风速廓线拟合计算获得。在风洞中进行试验时，其流场接近中性大气边界层，风速廓线一般满足如下公式：

$$u_z = \frac{u^*}{k} \ln \frac{z}{z_0} \quad (1)$$

式中 u_z 为高度 z 处的风速，m/s； u^* 为摩阻风速，m/s； k 为冯·卡曼常数，通常取值为 0.4。

通过试验土槽表面不同高度的风速进行曲线拟合得到风速廓线，其结果满足对数分布律，拟合关系式为^[28]

$$u_z = A + B \ln z \quad (2)$$

式中 A 、 B 为回归系数。

当 $u_z=0$ 时，可以得到空气动力学粗糙度 z_0 ：

$$z_0 = \exp(-A/B) \quad (3)$$

摩阻风速 u^* 是描述气流层之间剪切作用的物理量，根据 (2) 式和 (3) 式得到摩阻风速的计算公式为

$$u^* = kB \quad (4)$$

1.4.2 土壤风蚀速率及抗风蚀效率计算

土壤风蚀速率是指单位时间、单位面积的吹蚀量，可用式 (5) 计算。

$$R = \frac{W}{S \cdot T} \quad (5)$$

式中 W 表示风蚀前后试验土槽 (包括试验土壤) 的质量之差，g； S 表示试验土槽的面积， m^2 ； T 表示吹蚀时间，min。

前期坡面水蚀作用对地表抗风蚀效率计算公式^[29]为

$$\Delta R = \frac{R_i - R_0}{R_0} \times 100\% \quad (6)$$

式中 ΔR 为前期坡面水蚀作用对地表的抗风蚀效率，%； R_i 和 R_0 分别为前期不同降雨强度的水蚀作用下和仅风蚀试验处理下的土壤风蚀速率， $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$ 。

1.4.3 土壤抗剪强度测定

采用型号为 GEONOR7189 的十字板剪切仪分别测定了有、无前期坡面水蚀作用的地表土壤抗剪强度。土壤抗剪强度的计算公式^[30]如下：

$$\tau_f = \frac{2M}{\pi D^2 \left(H + \frac{D}{3} \right)} \quad (7)$$

式中 τ_f 为土壤的抗剪强度，kPa； M 为十字板剪切读数，kPa； D 为十字板的宽度，即圆柱土体的直径，mm； H 为十字板的高度，mm，本研究中 $H/D=2$ 。

1.4.4 土壤紧实度测定

在试验土槽中按照“S”型选定 9 个点，采用型号为 Spectrum SC 900 的土壤紧实度仪，分别测定有、无前期坡面水蚀作用的地表土壤紧实度。

2 结果与分析

2.1 前期坡面水蚀作用对地表粗糙度和力学特性的影响

由表 1 可知，对于仅风蚀试验 (I)、先 50 mm/h 降雨强度试验再风蚀试验 (II)、先 100 mm/h 降雨强度试验再风蚀试验 (III) 3 个试验处理，其空气动力学粗糙度分别为 0.030 4、0.007 8 和 0.004 4 cm，摩阻风速分别为 0.67、0.59 和 0.46 m/s，表明前期坡面水蚀作用使得地表粗糙度和摩阻风速有所减小，且随降雨强度的增加，地表粗糙度和摩阻风速减小幅度增加。因此，从空气动力学的角度，说明前期坡面水蚀作用减弱了地表的抗风蚀性。此外，通过对比不同试验处理下的地表侵蚀情况的变化 (图 3)，发现在仅风蚀试验处理下，大部分土壤细颗粒被吹蚀，地表出现了明显的粗化现象；土壤表面经过前期 50 mm/h 降雨强度的坡面水蚀作用后，地表出现了物理结皮，但仍有部分细颗粒附着在地表；而土壤表面经过前期 100 mm/h 降雨强度的水蚀作用后，地表形成了明显光滑致密的结皮，仅有少量的土壤颗粒存在。由此可知，尽管前期坡面水蚀作用降低了地表粗糙度，且随降雨强度增加而减小愈明显，但前期坡面水蚀作用使地表大量土壤颗粒分散并随地表径流流失，从而减少了后期土壤风蚀的物质来源。

不同试验处理下的地表抗剪强度和土壤紧实度见表 2，前期坡面水蚀作用增加了地表的土壤抗剪强度和土

壤紧实度, 结皮厚度也有所增加。在 50 和 100 mm/h 两个降雨强度的前期坡面水蚀作用下, 地表土壤抗剪强度分别为仅风蚀试验处理的 1.3 和 1.8 倍, 土壤紧实度分别为仅风蚀试验处理的 4.4 和 7.2 倍, 且前期坡面水蚀过程中降雨强度越大, 地表土壤抗剪强度和土壤紧实度越大, 土壤结皮厚度也越大。其中, 100 mm/h 降雨强度处理下的土壤抗剪强度和土壤紧实度分别为 50 mm/h 降雨强度处理下的 1.4 和 1.6 倍。说明前期降雨过程增加了表层土壤的强度, 二者的增加进一步说明前期不同降雨强度的坡面水蚀作用在对土壤压实过程中形成的物理结皮增加了土壤结构的稳定性, 提高了地表的抗风蚀能力。

表 1 不同试验处理下土壤风蚀的风速廓线方程

Table 1 Wind speed profile equation of soil wind erosion in different experimental treatment						
试验处理 Experimental treatment	降雨强度 Rainfall intensity (mm·h ⁻¹)	<i>A</i>	<i>B</i>	决定系数 Determination coefficient <i>R</i> ²	空气动力学 粗糙度 Aerodynamic roughness/ cm	摩擦风速 Friction wind velocity (m·s ⁻¹)
I	0	8.07	1.69	0.91*	0.030 4	0.67
II	50	8.61	1.47	0.96*	0.007 8	0.59
III	100	9.75	1.14	0.89*	0.004 4	0.46

注: I 为前期无降雨仅风蚀试验处理(CK); II 为前期 50 mm·h⁻¹ 降雨强度的水蚀作用后再进行风蚀的试验处理; III 为前期 100 mm·h⁻¹ 降雨强度的水蚀作用后再进行风蚀的试验处理, 下同。不同试验处理下的风速廓线均符合 $u_z=A+B\ln z$ 对数方程, u_z 为高度 z 处的风速, A 、 B 为回归系数。
Note: I is the experimental treatment of wind erosion without rainfall (CK), II is the treatment of wind erosion after 50 mm·h⁻¹ rainfall; III is the treatment of wind erosion after 100 mm·h⁻¹ rainfall, the same below. The wind speed profiles under different experimental treatments are consistent with $u_z=A+B\ln z$ logarithmic equation, u_z is the wind speed at height z , A and B are regression coefficients.

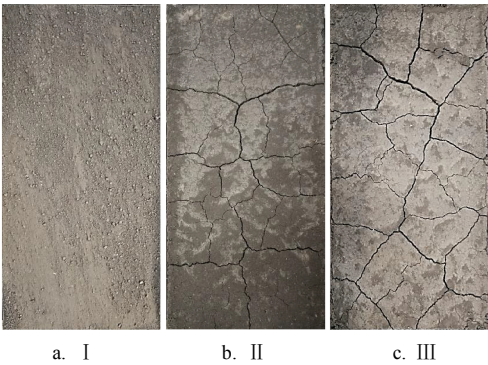


图 3 不同试验处理下的地表蚀积变化

Fig.3 Changes in surface erosion and deposition in different experimental treatments

表 2 不同试验处理下地表土壤抗剪强度、土壤紧实度对比

Table 2 Comparison of surface soil shear strength and soil compaction in different experimental treatments			kPa
试验处理 Experimental treatment	土壤抗剪强度 Soil shear strength	土壤紧实度 Soil compaction	
I	16.41±1.02a	20.73±1.20a	
II	21.34±2.03b	91.52±4.32b	
III	30.32±1.05c	148.94±6.51c	

注: 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 are mean ± standard deviation, and different letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$).

2.2 前期坡面水蚀作用对土壤风蚀特征的影响

2.2.1 前期坡面水蚀作用对土壤风蚀量的影响

前期不同试验处理下的土壤风蚀量变化表明(表 3),

前期坡面水蚀作用对土壤风蚀产生了明显的抗风蚀作用。不同试验处理中土壤风蚀量随风速的增大均呈现增加的趋势, 而以仅风蚀试验处理(I)下的土壤风蚀量最大, 且随前期坡面水蚀作用的降雨强度增加, 土壤风蚀强度呈下降趋势。在 9、12 和 15 m/s 风速下, 仅风蚀试验处理(I)的土壤风蚀量分别为 0.26、2.36 和 6.84 kg/m²; 而 3 个风速下试验处理 II 和 III 对应的土壤风蚀量分别为 0.08、0.12、0.26 kg/m² 和 0.06、0.10、0.16 kg/m², 说明前期坡面水蚀作用产生了明显的抗风蚀效应。其中, 与试验处理 I 相比(仅风蚀试验处理), 试验处理 II 在 9、12 和 15 m/s 风速下的土壤抗风蚀效率分别是 68.4%、94.9%和 96.2%, 试验处理 III 对应 3 个风速的土壤抗风蚀效率分别为 77.2%、95.9%和 97.6%; 且随前期坡面水蚀作用的降雨强度由 50 mm/h 增加到 100 mm/h 时, 地表抗风蚀效率增加 1.1%~12.9%。

表 3 不同试验处理下的土壤风蚀量对比

Table 3 Comparison of soil wind erosion amount in different experimental treatments				
试验处理 Experimental treatment	风速 Wind velocity/(m·s ⁻¹)	土壤风蚀量 Soil wind erosion amount/(kg·m ⁻²)	风蚀强度 Wind erosion intensity/(kg·m ⁻² ·h ⁻¹)	抗风蚀效率 Anti-erosion efficiency/%
I	9	0.26±0.01a	0.79±0.01a	-
	12	2.36±0.16b	7.07±0.02b	-
	15	6.84±0.46c	27.37±0.05c	-
II	9	0.08±0.01a	0.25±0.01a	68.4
	12	0.12±0.02b	0.36±0.02b	94.9
	15	0.26±0.01c	1.03±0.01c	96.2
III	9	0.06±0.01a	0.18±0.01a	77.2
	12	0.10±0.02b	0.29±0.02b	95.9
	15	0.16±0.02c	0.65±0.00c	97.6

注: 表中数据为平均值±标准差, 不同字母表示同一处理不同风速间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: The data in the table are mean ± standard deviation, and different letters indicate significant differences between different wind speeds in same experimental treatment ($P<0.05$).

2.2.2 土壤风蚀强度与降雨强度和风速的关系

上述结果表明, 对于水力-风力复合侵蚀, 前期坡面水蚀作用的降雨强度和风速是影响土壤风蚀的重要因素。风速是发生风蚀的动力因素, 其与风蚀强度呈正相关关系; 而前期水蚀作用的降雨强度对地表土壤风蚀的影响随降雨强度的增加明显减小。为了更好地反映土壤风蚀强度与前期水蚀作用下的降雨强度和风速之间的关系, 通过 Matlab R2017b 中 Surface Fitting Tool 进行了相关性拟合, 拟合过程中采用信赖域方法来获得最优经验回归方程。拟合的三维曲面图显示(图 4), 降雨强度和风速共同影响土壤风蚀强度, 即土壤风蚀强度随前期坡面水蚀作用中降雨强度的增大而减小, 随风速的增大而增加。其中, 与 50 mm/h 降雨强度试验相比, 前期 100 mm/h 降雨强度下坡面水蚀作用使土壤风蚀强度减小 8.5%~27.7%。与 15 m/s 风速相比, 前期坡面水蚀作用使 9、12 m/s 风速下的土壤风蚀强度分别减小 32.0%~46.2% 和 55.6%~65.1%。

通过 Matlab 工具拟合的的回归方程如下:

$$S = 0.9381I' \times 1.236^U \quad (R^2 = 0.877, n = 9) \quad (8)$$

式中 S 为土壤风蚀强度, kg/(m²·h); I' 为前期坡面水蚀作用

的降雨强度, mm/h; U 为后期土壤风蚀作用时的风速, m/s; n 为不同试验处理下的风蚀强度个数。

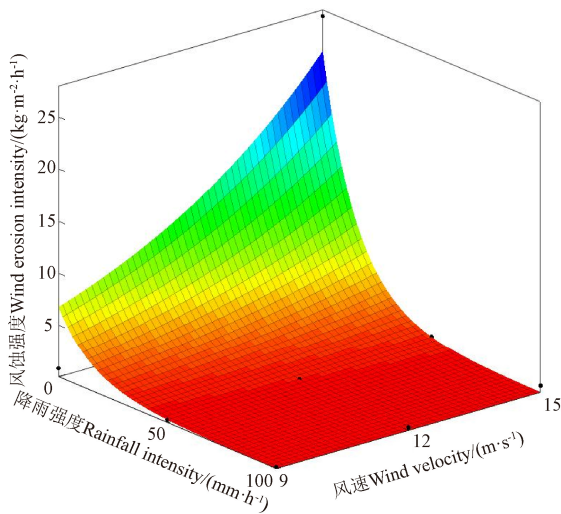


图 4 前期坡面水蚀作用下降雨强度和风速对土壤风蚀强度的影响

Fig.4 Effect of rainfall intensity and wind velocity on soil wind erosion intensity under the action of previous sloping water erosion

由式 (5) 可知, 对于前期仅风蚀试验处理, 土壤风蚀强度随风速的增加而增大, 对于前期水蚀作用后的试验处理, 尽管土壤风蚀强度随风速的增加有所增大, 但增加幅度很小。与风速的动力作用相比, 不同降雨强度的水蚀作用对土壤风蚀的抑制效果愈明显, 且在风速一定的条件下, 前期水蚀作用的降雨强度愈大, 土壤风蚀强度愈小。其原因主要与不同降雨强度条件下的雨滴能量大小造成地表土壤性质和地表形态的差异有关。

2.3 前期坡面水蚀作用对风蚀输沙量的影响

从表 4 可知, 不同试验处理下, 风蚀输沙量和输沙高度随风速的增大均有不同程度的增加, 且风速越大, 输沙量的增加幅度也越大。与前期无降雨仅风蚀试验处理相比, 前期坡面水蚀作用对土壤风蚀输沙量和输沙高度产生了较大影响, 前期不同降雨强度水蚀作用使土壤风蚀输沙量和输沙高度明显降低。其中, 在前期无降雨仅风蚀试验处理下, 9、12、15 m/s 风速下的风蚀输沙量分别为 0.41、5.10 和 22.24 g/m², 输沙高度基本在 40 cm 以下, 且大部分输沙量

主要集中在距地表 20 cm 的高度范围内。与无前期坡面水蚀作用相比, 50 和 100 mm/h 降雨强度的前期水蚀作用使 3 个风速下的风蚀输沙量分别减小 15.4%、89.4%、96.1%和 27.8%、93.3%、96.2%, 对应的风蚀输沙高度分别减小 8~12 和 14~16 cm, 说明前期坡面水蚀作用可以有效抑制土壤风蚀过程。表 4 还表明, 前期坡面水蚀作用使风蚀输沙量随降雨强度的增加而减少; 与 50 mm/h 降雨强度试验相比, 坡面经过前期 100 mm/h 降雨强度的水蚀作用后, 3 个风速下的土壤风蚀输沙量分别减小 5.1%、13.4%和 16.8%。由此说明, 前期不同降雨强度的坡面水蚀作用对土壤风蚀过程中风沙流的影响较大, 通过增加土壤水分并压实土壤结构可以削弱或抑制风沙流强度。

表 4 不同试验处理下的风蚀输沙量和输沙高度对比

Table 4 Comparison of wind erosion sediment transport and its height in different experimental treatments

试验处理 Experimental treatment	风速 Wind velocity / (m·s ⁻¹)	输沙高度 Sand transport height / cm	输沙量 Sediment transport / (g·m ⁻²)
I	9	40±4.76a	0.41±0.42a
	12	44±3.72a	5.10±2.18b
	15	50±2.51b	22.24±5.71c
II	9	28±2.00a	0.34±0.59a
	12	36±2.31b	0.54±0.11a
	15	38±4.24b	0.86±0.19a
III	9	26±1.73a	0.33±0.06a
	12	32±1.15b	0.47±0.19a
	15	34±3.16b	0.72±0.11a

图 5 显示, 不同试验处理下, 距地面各高度的风蚀输沙量随风速的增加而增大, 而且靠近地表高度的风蚀输沙量的增加幅度大于其上层高度的风蚀输沙量。通过输沙量和地表高度的关系拟合发现, 不同风速下土壤风蚀过程中输沙量随地表高度的变化均呈指数减小的变化趋势(表 5)。与无降雨仅风蚀试验处理相比, 经过前期坡面水蚀作用后, 各地表高度的风蚀输沙量均有所减小, 其减少幅度介于 11.3%~99.3%之间。图 5 还表明, 各地表高度风蚀输沙量对前期坡面水蚀作用中不同降雨强度的响应程度也存在差异; 其中, 100 mm/h 降雨强度下不同风速对应的各个高度风蚀输沙量的减小幅度较之 50 mm/h 降雨强度试验的减小幅度更大, 其减小幅度分别介于 15.2%~72.2%、11.3%~53.9%和 7.5%~58.7%之间。

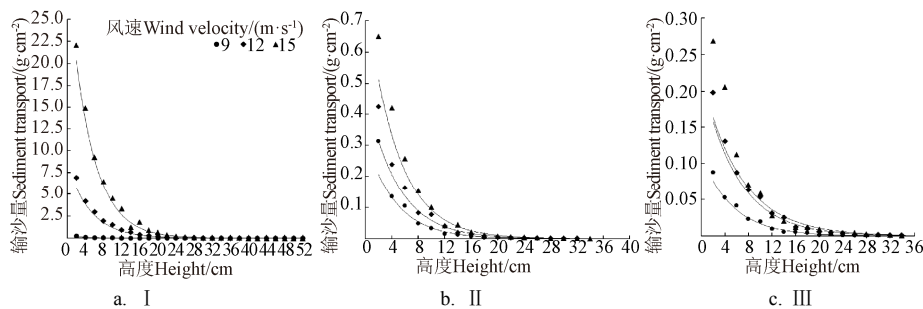


图 5 不同试验处理下风蚀输沙量随高度的变化

Fig.5 Change of sediment transport driven by wind with surface height in different experimental treatments

综上所述, 前期坡面水蚀作用对土壤风蚀过程产生了抑制作用, 其明显降低风蚀输沙量和输沙高度。这可能是因为前期降雨过程中雨滴打击和径流冲刷形

成的物理结皮, 以及坡面表层残留的少量土壤颗粒降低了地表粗糙度, 从而减弱了地表土壤颗粒的起跳高度和输沙量。

表 5 不同试验处理下的风蚀输沙量随地表高度变化的曲线拟合方程

Table 5 Curve-fitting equation of wind erosion sediment transport with surface height in different experimental treatments

试验处理 Experimental treatment	风速 Wind velocity (m·s ⁻¹)	拟合曲线方程 Curve-fitting equation	决定系数 Determination coefficient R ²
I	9	$y = 6.386 4e^{-0.775x}$	0.90*
	12	$y = 8.463 4e^{-0.196x}$	0.97*
	15	$y = 30.619e^{-0.204x}$	0.99*
II	9	$y = 0.322 3e^{-0.223x}$	0.97*
	12	$y = 0.48e^{-0.211x}$	0.97*
	15	$y = 0.788 3e^{-0.215x}$	0.99*
III	9	$y = 0.207 2e^{-0.183x}$	0.97*
	12	$y = 0.352 7e^{-0.171x}$	0.95*
	15	$y = 0.784 4e^{-0.202x}$	0.94*

注: y 表示风蚀输沙量, x 表示地表高度。

Note: y represents wind erosion sediment transport, x represents surface height.

3 讨 论

本研究中前期坡面水蚀作用对后期土壤风蚀产生了明显的抗风蚀效应, 该结论与 Yang 等^[31]研究结果一致, 其原因主要是前期水蚀作用对坡面表层土壤性质和地表形态的改变, 进而影响后期土壤风蚀及其过程。有研究表明, 土壤性质对风蚀有显著影响, 且细颗粒和有机质含量较低的土壤在自然条件下更易被风蚀^[32]。不同土壤类型的前期水蚀作用对后期土壤风蚀的抑制效果存在差异^[31,33]。本研究中试验土壤为典型薄层黑土, 土壤质地为粉黏壤, 其黏粒含量和有机质含量较高, 颗粒之间聚合力较强。在降雨初期的雨滴击溅过程中, 表层土壤团聚体发生崩解破碎, 细颗粒堵塞土壤孔隙而形成致密的结皮层, 此过程在空气动力学角度表现为空气动力学粗糙度 (z_0) 和摩阻风速均减小 (表 1), 且随前期坡面水蚀作用的降雨强度增加减小愈明显。空气动力学粗糙度 (z_0) 是反映土壤表面空气动力学特征的重要参数, 一般认为 z_0 愈大, 则地表对风速的削弱作用愈显著^[28]。但本研究结果表明, 50、100 mm/h 降雨强度的前期坡面水蚀作用下, 地表土壤抗剪强度和土壤紧实度均有不同程度的增加, 且降雨强度越大, 土壤抗剪强度和土壤紧实度越大。说明前期降雨过程中雨滴打击地表以及后期形成径流对土壤产生了压实作用, 另外, 降雨过程中土壤水分与土壤颗粒之间较大的黏聚力增加了土壤结构的稳定性, 从而提高了地表的抗风蚀能力^[34]。

降雨过程中降雨强度和地表径流均是影响地表形态变化的重要因素, 且随着降雨强度增加, 雨滴能量和径流侵蚀能力皆增大, 其对地表形态的影响也越大。雨滴的击溅作用破坏土壤表面颗粒, 使其分散、分离, 同时发生不同方向的跃迁位移^[35], 再加上地表径流的冲刷, 两种过程均会造成地表形态的改变, 进而影响土壤风蚀。对于仅风蚀试验处理, 风蚀后的土壤表面发生了明显粗化 (图 3a)。而前期不同降雨强度的坡面水蚀作用后, 地表形成了土壤结皮, 其对土壤抵抗风蚀作用有显著影响。与 100 mm/h 降雨强度相比, 在 50 mm/h 降雨强度下,

由于雨滴动能较小, 且径流搬运能力较弱, 大量的土壤颗粒被分散后一部分随径流流失, 另一部分富集在地表 (图 3b), 但相较于前期无降雨仅风蚀试验处理而言, 其不同风速作用下的土壤风蚀量均较小; 而 100 mm/h 降雨强度作用下的坡面在雨滴打击作用下形成光滑致密的土壤结皮 (图 3c), 土壤结皮的形成不仅影响后续降雨过程中的土壤入渗, 某种程度上将增加地表径流并导致土壤水蚀加剧。另一方面, 降雨形成的土壤结皮风干后, 土壤表面相对稳定性增强^[36], 地表土壤结皮强度的增加使得风蚀过程中土壤颗粒在床面跳动时减少了对地表的磨蚀^[37], 同时前期坡面水蚀作用后残留在地表的土壤颗粒明显减少, 在一定程度上减少了后期土壤风蚀的物质来源, 从而抑制了风蚀的发生。这也是土壤风蚀量随前期坡面水蚀作用的降雨强度增加而减少的重要原因, 同时也解释了相对于风速和空气动力学粗糙度的变化, 降雨强度的增加对后期土壤风蚀强度的削弱作用越明显这一结论。

另外, 在 100 mm/h 降雨强度试验处理下, 坡面水蚀形式由最初的溅蚀发展为片蚀, 并随着降雨历时的增加, 在降雨后期逐渐发育出现细沟雏形, 进而发展成为细沟侵蚀, 导致地表粗糙度明显增加, 使前期坡面水蚀作用对后期土壤风蚀作用的抑制程度增大, 进而使后期风蚀过程中土壤风蚀量减少。相关研究表明^[38], 坡面水蚀演变为细沟侵蚀后, 在进一步的风蚀过程会产生“狭管效应”, 从而加剧风蚀, 这一结果有待于进一步深入研究。

4 结 论

前期不同降雨强度的坡面水蚀作用后的土壤风蚀量明显减小, 其对地表产生了抗风蚀效应, 其中, 在 50 和 100 mm/h 降雨强度试验处理下, 不同风速作用下的抗风蚀效率分别为 68.4%~96.2%和 77.2%~97.6%, 且随降雨强度增加, 其抗风蚀效率越大。土壤风蚀强度受前期坡面水蚀作用中降雨强度和风速的综合影响, 土壤风蚀强度随降雨强度的增大而减少, 随风速的增大而增加。但降雨强度的增加对土壤风蚀的抑制效果愈明显。

前期坡面水蚀作用对土壤风蚀过程有重要影响。前期坡面水蚀作用后的土壤风蚀输沙量和输沙高度均有所减小。其中, 在 9、12 和 15 m/s 风速的风蚀作用下, 50 和 100 mm/h 降雨强度的前期坡面水蚀作用使得风蚀输沙量分别减小 15.4%、89.4%、96.1%和 27.8%、93.3%、96.2%, 对应的输沙高度分别减小 8~12 和 14~16 cm。土壤风蚀输沙量随前期坡面水蚀作用中降雨强度的增大而减小, 而随地表高度的变化均呈现指数减小的变化趋势。

前期不同降雨强度的坡面水蚀作用改变了土壤性质和地表形态, 其中, 空气动力学粗糙度减小增加了土壤风蚀的可能性, 但降雨形成的土壤结皮增大了地表土壤抗剪强度和土壤紧实度, 导致土壤结构稳定性增加, 抗风蚀能力增强; 同时, 前期坡面水蚀作用减少了地表残留的土壤颗粒, 减少了土壤风蚀的物质来源, 抑制了土壤风蚀的发生。

[参 考 文 献]

- [1] 李占斌, 朱冰冰, 李鹏. 土壤侵蚀与水土保持研究进展[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 802-809.
Li Zhangbin, Zhu Bingbing, Li Peng. Advancement in study on soil erosion and soil and water conservation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 802-809. (in Chinese with English abstract)
- [2] 史志华, 刘前进, 张含玉, 等. 近十年土壤侵蚀与水土保持研究进展与展望[J]. 土壤学报, 2020, 57(5): 1117-1127.
Shi Zhihua, Liu Qianjin, Zhang Hanyu, et al. Study on soil erosion and conservation in the past 10 years: progress and prospects[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(5): 1117-1127. (in Chinese with English abstract)
- [3] 郑粉莉, 王占礼, 杨勤科. 我国土壤侵蚀科学研究回顾和展望[J]. 自然杂志, 2008, 30(1): 12-16, 63.
Zheng Fenli, Wang Zhanli, Yang Qinke. The retrospection and prospect on soil erosion research in China[J]. Chinese Journal of Nature, 2008, 30(1): 12-16, 63. (in Chinese with English abstract)
- [4] 张攀, 姚文艺, 刘国彬, 等. 土壤复合侵蚀研究进展与展望[J]. 农业工程学报, 2019, 35(24): 154-161.
Zhang Pan, Yao Wenyi, Liu Guobin, et al. Research progress and prospects of complex soil erosion[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(24): 154-161. (in Chinese with English abstract)
- [5] Ta W Q, Wang H B, Jia X P. Aeolian process-induced hyper-concentrated flow in a desert watershed[J]. Journal of Hydrology, 2014, 511: 220-228.
- [6] Liu T, Xu X, Yang J. Experimental study on the effect of freezing-thawing cycles on wind erosion of black soil in Northeast China[J]. Cold Regions Science and Technology, 2017, 136: 1-8
- [7] Ferrick M G, Gatto L W. Quantifying the effect of a freeze - thaw cycle on soil erosion: laboratory experiments[J]. Earth Surface Processes & Landforms, 2010, 30(10): 1305-1326.
- [8] Rengers F K, Tucker G E. The evolution of gully headcut morphology: A case study using terrestrial laser scanning and hydrological monitoring[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2015, 40(10): 1304-1317
- [9] 苏正安, 张建辉, 聂小军. 紫色土坡耕地土壤物理性质空间变异对土壤侵蚀的响应[J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 54-60.
Su Zheng'an, Zhang Jianhui, Nie Xiaojun. Response of spatial variability of soil physical properties to soil erosion in purple soil slope farmland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(5): 54-60. (in Chinese with English abstract)
- [10] 何煦, 桑琦明, 郑粉莉, 等. 东北不同黑土厚度区多营力作用的坡面土壤侵蚀试验研究[J]. 水土保持学报, 2021, 35(1): 103-109, 115.
He Xu, Sang Qiming, Zheng Fenli, et al. An experimental study on impact of multiples agent actions on sloping water erosion in different mollic thickness regions of northeast China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(1): 103-109, 115. (in Chinese with English abstract)
- [11] Bullard J E, McTainsh G H. Aeolian-fluvial interactions in dryland environments: Examples, concepts and Australia case study[J]. Progress in Physical Geography, 2003, 27(4): 471-501.
- [12] Bullard J E, Livingstone I. Interactions between aeolian and fluvial systems in dryland environments[J]. Area, 2002, 34(1): 8-16.
- [13] Ta W Q, Wang H B, Jia X P. The contribution of aeolian processes to fluvial sediment yield from a desert watershed in the Ordos Plateau, China[J]. Hydrological Processes, 2015, 29(1): 80-89.
- [14] 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.
- [15] Zhang J Q, Yang M Y, Sun X J, et al. Estimation of wind and water erosion based on slope aspects in the crisscross region of the Chinese Loess Plateau[J]. Journal of Soils and Sediments, 2018, 18(4): 1620-1631.
- [16] 左小锋, 郑粉莉, 张加琼, 等. 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. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20201211.1713.002.html>.
Zuo Xiaofeng, Zheng Fenli, Zhang Jiaqiong, et al. Study via an experiment 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. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20201211.1713.002.html>. (in Chinese with English abstract)
- [17] 张庆印, 樊军, 张晓萍. 水蚀对风蚀影响的室内模拟试验[J]. 水土保持学报, 2012, 26(2): 75-79.
Zhang Qingyin, Fan Jun, Zhang Xiaoping. Effects of water erosion on wind erosion in wind tunnel[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(2): 75-79. (in Chinese with English abstract)
- [18] Singer M J, Shainberg I. Mineral soil surface crusts and wind and water erosion[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2004, 29(9): 1065-1075.
- [19] Zhang Q Y, Fan J, Zhang X P. Effects of simulated wind followed by rain on runoff and sediment yield from a sandy loessial soil with rills[J]. Journal of Soils and Sediments, 2016, 16(9): 2306-2315.
- [20] 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.

- Wang Yu, Yang Mingyi, Liu Puling. 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. (in Chinese with English abstract)
- [21] 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.
- Zheng Fenli, Zhang Jiaqiong, Liu Gang, 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. (in Chinese with English abstract)
- [22] 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.
- Shen Bo, Fan Jianrong, Pan Qingbin, et al. Overview of the pilot project of integrated soil erosion control in northeast black soil area[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2003(11): 7-8. (in Chinese with English abstract)
- [23] 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.
- Zheng Fenli, Zhao Jun. Introduction to artificial rainfall simulation hall and rainfall simulation equipment[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 11(4): 177-178. (in Chinese with English abstract)
- [24] 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): 30-34.
- Yan Baixing, Yang Yuhong, Liu Xingtu, et al. Status and evolution trend of soil erosion in black soil area of Northeast China[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2008(12): 30-34. (in Chinese with English abstract)
- [25] 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.
- [26] 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.
- Gao Feng, Zhan Min, Zhan Hui. Study on farmland erosive rainfall standard in black soil region[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 1989(11): 19-21. (in Chinese with English abstract)
- [27] 何超, 王磊, 郑粉莉, 等. 垄作方式对薄层黑土区坡面土壤侵蚀的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(5): 24-28.
- He Chao, Wang Lei, Zheng Fenli, et al. Effects of ridge tillage on hillslope soil erosion in thin layer black soil region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(5): 24-28. (in Chinese with English abstract)
- [28] 张春来, 邹学勇, 董光荣, 等. 耕作土壤表面的空气动力学粗糙度及其对土壤风蚀的影响[J]. *中国沙漠*, 2002, 22(5): 66-68.
- Zhang Chunlai, Zou Xueyong, Dong Guangrong, et al. Aerodynamic roughness of cultivated soil and its influence on soil erosion by wind in a wind tunnel[J]. *Journal of Desert Research*, 2002, 22(5): 66-68. (in Chinese with English abstract)
- [29] 任宏晶, 李生字, 雷加强, 等. 不同覆盖度沙粒胶结体风蚀抑制效益研究[J]. *干旱区地理*, 2020, 43(1): 56-63.
- Ren Hongjing, Li Shengyu, Lei Jiaqiang, et al. Field experiment about inhibitory effects on wind erosion of sand cemented bodies with different coverage[J]. *Arid Land Geography*, 2020, 43(1): 56-63. (in Chinese with English abstract)
- [30] 刘窑军, 王天巍, 蔡崇法, 等. 植被恢复对三峡库区土质道路边坡抗剪强度的影响[J]. *土壤学报*, 2013, 50(2): 396-404.
- Liu Yaojun, Wang Tianwei, Cai Chongfa, et al. Effect of vegetation restoration on soil shear strength of roadside slopes of unpaved roads in the three-gorges reservoir area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(2): 396-404. (in Chinese with English abstract)
- [31] Yang H M, Zou X Y, Wang J A, et al. An experimental study on the influences of water erosion on wind erosion in arid and semi-arid regions[J]. *Journal of Arid Land*, 2019, 11(2): 208-216.
- [32] Yan Y C, Wu L H, Xin X P, et al. How rain-formed soil crust affects wind erosion in a semiarid steppe in northern China[J]. *Geoderma*, 2015, 249/250: 79-86.
- [33] 宋阳, 严平, 刘连友, 等. 威连滩冲沟砂黄土的风蚀与降雨侵蚀模拟实验[J]. *中国沙漠*, 2007, 27(5): 814-819.
- Song Yang, Yan Ping, Liu Lianyou et al. Simulated experiment of erosion by wind and rainfall on sandy loess in Weiliantan gully[J]. *Journal of Desert Research*, 2007, 27(5): 814-819. (in Chinese with English abstract)
- [34] Wiggs G, Baird A J, Atherton R J. The dynamic effects of moisture on the entrainment and transport of sand by wind[J]. *Geomorphology*, 2004, 59(1/4): 13-30.
- [35] Legout C, Legu dois S, Bissonnais Y L, et al. Splash distance and size distributions for various soils[J]. *Geoderma*, 2005, 124(3/4): 279-292.
- [36] 路培, 王林华, 吴发启. 不同降雨强度下土壤结皮强度对侵蚀的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(8): 141-146.
- Lu Pei, Wang Linhua, Wu Faqi. Effect of soil crust strength on erosion under different rainfall intensity[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(8): 141-146. (in Chinese with English abstract)
- [37] Rice M A, Mcewan I K, Mullins C E. A conceptual model of wind erosion of soil surfaces by saltating particles[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1999, 24(5): 383-392.
- [38] Sadeghian M R, Mitchell J K. Response of surface roughness storage to rainfall on tilled soil[J]. *Transactions of the ASAE*, 1988, 33(6): 1875-1881.

Effect of previous sloping water erosion on soil wind erosion in typical thin layered Mollisol region

Zuo Xiaofeng^{1,3}, Zheng Fenli^{1,2*}, Zhang Jiaqiong^{1,2}, Wang Yifei¹, Sang Qiming¹, Zhang Xunchang⁴

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation CAS & MWR, Yangling 712100, China; 3. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology/MOE Engineering Research Center of Desertification and Blown-sand Control, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 4. Grazinglands Research Laboratory, USDA-Agricultural Research Service, El Reno 73036, USA)

Abstract: The sloping farmlands in the Mollisol region of northeast China have the characteristics of multi-agent compound soil erosion followed by snow-melt runoff erosion and then wind erosion in spring. However, the current researches on compound soil erosion in this region are still rather weak, which affects the accurate implementation of the prevention and control measures of compound soil erosion. This paper applied an approach of combining indoor simulated rainfall experiment with wind tunnel simulation experiment to analyze previous sloping water erosion effects on the soil wind erosion in the Mollisol region of northeast China. The results showed that the amount of soil wind erosion significantly reduced after the previous sloping water erosion at 50 and 100 mm/h rainfall intensities, i.e., previous sloping water erosion action produced obvious an anti-wind erosion effect. Under the action of wind speeds of 9, 12 and 15 m/s, the anti-wind erosion efficiencies produced by the previous sloping water erosion at the rainfall intensities of 50 and 100 mm/h are 68.4%-96.2% and 77.2%-97.6%, respectively; with an increase of rainfall intensity, the anti-wind erosion effect increased. The soil wind erosion rate after previous sloping water erosion action was comprehensively affected by the rainfall intensity in previous sloping water erosion and wind velocity in later soil wind erosion. With increasing of rainfall intensity, the inhibiting effect of soil wind erosion caused by previous sloping water erosion action was greater. The previous sloping water erosion action reduced wind erosion delivery and its height, and wind erosion delivery decreased with the increase of rainfall intensity of the previous sloping water erosion. The main reasons for the anti-wind erosion effect caused by the previous sloping water erosion were that the soil compaction processes caused by previous sloping rainfall and runoff altered soil physical-mechanic properties and surface morphology, which caused an increase of surface soil shear strength and soil hardness, and then enhanced soil structure stability and anti-wind erosion ability, and inhibited wind erosion occurrence. The research findings of this study not only reveal the mechanism of previous sloping water erosion affecting soil wind erosion in the Mollisol region of northeast China, but also provide a theoretical basis for preventing compound erosion and sustainably utilization of Mollisol resources.

Keywords: erosion; wind; water; anti-wind erosion effect; simulated experiment; thin layer Mollisol region