

冻融作用对典型黑土土壤风蚀的影响

王一菲¹, 郑粉莉^{1,2}, 张加琼^{1,2}, 左小锋¹, 桑琦明¹, 张勋昌³, 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,厄尔雷诺 73036)

摘要: 东北黑土区农田晚春冻融作用通过改变土壤物理性质而对风蚀作用有重要影响。基于室内冻融模拟试验与风洞试验,分析了东北典型黑土区前期冻融作用对土壤风蚀的影响。试验处理包括3个土壤含水量(16.5%,24.8%,33.0%)、3个风速(9,12,15 m/s)、1次冻融循环。试验过程是先将装有不同含水量土壤的试验土槽进行冻融循环模拟,然后将冻融后的土壤在室温下自然风干(至其土壤含水量为6.0%~7.0%)后进行风洞试验。结果表明:前期土壤冻融作用显著增加了风蚀量和输沙量,试验条件下前期土壤冻融作用使风蚀强度增加23.5%~404.2%,使平均输沙率增加59.1%~305.3%,其增加幅度受土壤含水量和风速影响。同时有、无前期冻融作用处理下,风蚀强度和风蚀输沙率皆随风速的增加而显著增加,且风蚀强度随风速的变化遵循幂函数关系。在冻融作用下,不同土壤冻结含水量下土壤风蚀强度和输沙率的增幅排序皆为16.5%>33.0%>24.8%。风蚀输沙率随地表高度的增加呈指数递减,风蚀输沙主要集中在距地表40 cm的范围内,且冻融作用使风蚀输沙高度增加。

关键词: 冻融; 风蚀; 风速; 交互作用; 东北黑土区

中图分类号:S157.1 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2020)05-0034-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.05.005

Effects of Freeze-thaw on Wind Erosion in the Typical Mollisol Region

WANG Yifei¹, ZHENG Fenli^{1,2}, ZHANG Jiaqiong^{1,2},

ZUO Xiaofeng¹, SANG Qiming¹, ZHANG Xunchang³, WANG Lun¹

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2.Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100; 3.Grazinglands Research Laboratory, USDA-Agricultural Research Service, El Reno 73036)

Abstract: Freeze-thaw has an important effect on wind erosion by changing soil physical properties in the agricultural field of Chinese Mollisol region in late spring. The research analyzed the effects of previous freeze-thaw on wind erosion in agricultural fields based on simulated freeze-thaw and wind tunnel experiments. The experimental treatments included three initial soil moisture contents (16.5%, 24.8% and 33.0%), three wind speeds (9, 12 and 15 m/s), one freeze-thaw cycle, and non previous freeze-thaw experimental treatment was taken as a control. During the experiment, the soil box filled by tested soil samples with different initial moisture contents was firstly placed in the refrigerator to simulate freezing and thawing effect, and then it was air-dried in room temperature until its soil moisture content was approximately 6.0% to 7.0%. Late on, the soil box was placed into the wind tunnel to simulate soil loss by different wind speeds, respectively. The results showed that previous soil freeze-thaw significantly increased wind erosion rate and sediment delivery rate. At the experimental conditions, wind erosion intensity increased by 23.5% ~ 404.2% ($P<0.05$), and the average sediment delivery rate increased by 59.1%~305.3% ($P<0.05$), compared with the control treatment; and both increments were related to initial soil moisture content and wind speed. Meanwhile, the wind erosion and sediment delivery rates increased significantly with an increase of wind speed with/without previous soil freeze-thaw action, and the wind erosion intensity followed the power function with increasing of wind velocity. For the previous soil freeze-thaw treatment, the order of increments of wind erosion and sediment delivery rates under three initial soil moisture contents was 16.5% >

收稿日期:2020-03-19

资助项目: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子课题(XDA23060502)

(第一作者:王一菲(1995—),女,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀过程与机理研究。E-mail:wangyifei1988@126.com
通信作者:郑粉莉(1960—),女,教授,博士生导师,主要从事土壤侵蚀过程、预报和侵蚀环境效应评价研究。E-mail:flzh@ms.iswc.ac.cn

33.0% > 24.8%。Moreover, the sediment delivery rate decreased exponentially with an increase of surface height, the wind erosion material was mainly concentrated in the range of 40 cm above the surface; and the previous soil freeze-thaw action increased the sediment delivery height.

Keywords: freeze-thaw; wind erosion; wind speed; interaction; Chinese Mollisol region

东北黑土区土壤侵蚀严重,其中风蚀是重要的土壤侵蚀方式之一。黑土区风力侵蚀面积为 22 448.2 km²,占黑土区总土地面积的 11.1%^[1]。风蚀使得表层土壤颗粒粗化,土壤有机质及养分含量减少,严重影响土壤养分和土地生产力^[2]。另一方面,受特殊地理位置的影响,黑土区土壤侵蚀表现为多种侵蚀外营力耦合、多过程叠加和受冻融交替过程影响显著等特点^[3]。已有研究^[4]表明,受冻融作用影响的土壤未必全部发生冻融侵蚀,但更容易成为其他侵蚀营力的物质来源。黑土区春季解冻期由于农田地表裸露,表层土壤发生昼融夜冻现象,反复冻融循环使土壤结构破坏,土壤抗蚀能力降低,为后期风蚀提供丰富的沙物质^[5]。而晚春季节大风天气频繁,地表裸露,强劲的风力使得表层土壤干燥、疏松,使耕地风蚀作用更加强烈^[6]。加上前期土壤冻融循环对土壤结构的破坏,造成了农田土壤前期冻融侵蚀和后期风蚀在空间上相互叠加和时间上相互交替的现象^[7]。

近年来,有关冻融和水力复合侵蚀、风水复合侵蚀已有较多研究成果,然而对于冻融和风蚀复合侵蚀的研究较为薄弱。目前,我国的冻融和风蚀复合侵蚀研究多集中在青藏高原地区和黄土高原地区。Xie 等^[8]基于冻融与风蚀相互作用的模拟试验发现,在青藏高原地区冻融循环通过降低土壤内黏聚力和土壤抗剪强度来增加土壤孔隙度,破坏土壤结构,从而导致土壤风蚀强度增加;且风蚀强度随冻融循环次数、土壤含水量、风速的增加而增加。孙宝洋^[9]对黄土高原土壤冻融对风蚀土壤可蚀性的研究表明,经过冻融后土壤风蚀强度显著增大($P < 0.05$);土壤冻结合水量是影响风蚀强度的主要原因,而风速对输沙率影响最大。近 10 多年来东北黑土区冻融作用对土壤风蚀影响的研究也取得了一定的研究成果。武欣慧等^[10]基于风蚀模型模拟发现,耕作层黑土风蚀量随冻融循环次数增加呈指数增加;Liu 等^[11]研究表明,与未经历冻融作用的试验相比,当表层土壤冻结合水量为 5%~7%时,经历 3~9 次冻融循环后,土壤风蚀强度增加 1.2~2.0 倍。而当前有关冻融过程中,不同土壤冻结合水量下冻融作用对土壤风蚀的影响研究还相对薄弱。为此,本研究通过设计不同土壤含水量(16.5%, 24.8%, 33.0%)和不同风速(9, 12, 15 m/s)的试验处理,分析冻融作用对典型黑土区土壤风蚀的影响,阐明土壤冻结合水量、风速和冻融循环的交互作用对土壤风蚀的影响,从而揭示

黑土区土壤冻融与风蚀复合侵蚀过程机理,为黑土侵蚀防治提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设备

供试土壤取自黑龙江省哈尔滨市克山县(125°10'57"—126°08'18"E, 47°50'51"—48°33'47"N)耕地表层(0—20 cm)土壤,土壤类型为典型黑土,土壤黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)、砂粒(0.05~2 mm)的含量分别为 40.6%, 48.7%, 10.7%。土壤有机质含量为 37 g/kg(重铬酸钾氧化—外加热法),土壤 pH 为 6.1(水浸提法,水土比 2.5:1)^[12]。该区属温带大陆性季风气候,年均降水量 510 mm,年均气温为 1.0 °C,年温差在 45 °C 左右。春季多风,3—5 月平均风速 > 8 m/s 的天数占总天数的 74.6%^[13],晚春和早夏冻融风力复合侵蚀频繁发生。

冻融设备采用 BD/BC-1780 温度可控冷冻冰柜(中山市新容声电设备有限公司生产),其体积为 310 cm(长)×90 cm(宽)×98 cm(深),有效容积 1 780 L,可同时放置 2 个试验土槽进行冻融试验(图 1a)。冰箱内放置量程为 -50~50 °C 的温度计,以测定冰箱内部温度。

试验土槽为风蚀、水蚀两用土槽,由槽身和集流口组成,槽身与集流口可分离。试验土槽规格为 100 cm(长)×50 cm(宽)×15 cm(深),试验土槽后端和左右两侧上部 5 cm 与其下部 10 cm 槽用可折叠合页连接,可上下自由翻折以同时满足风洞试验和降雨试验的需求。风洞模拟试验时,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(图 1c);而在模拟降雨试验过程中将试验土槽 3 边上部 5 cm 钢板竖起,并用螺丝将集流口与槽身固定,以防止地表径流溢出试验土槽。试验土槽的坡度调节范围为 0~20°。试验过程中,试验土槽实际填土厚度为 10 cm。

风洞模拟试验于 2018 年 6 月至 2019 年 11 月在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的风洞实验室完成。风洞试验采用自动控制风速的直流吹气式风洞设备(图 1b),风洞全长 24 m,高 1.2 m,宽 1 m,主要构成有风机段、调风段、整流段、试验段、集沙段和导流段 6 部分组成。风机通过配套变频器(0~50 Hz)调节风速,风速在 0~17 m/s 范围内连续可调。皮托管安置在试验段中心位置,共 9 个高度,分别

测定距试验土槽 1, 3, 5, 8, 10, 12, 16, 20, 60 cm 的风速(图 1c)。在风洞试验开始前进行风速率定, 试验的目标风速以风洞轴心高度(60 cm)测定的风速为基准, 其余 8 个皮托管测定试验土槽上方的风速廓线, 以确定风洞模拟的风速廓线与野外实际测定相似。在集沙段设置集沙仪,

用于收集不同高度的风蚀物质。集沙仪是由北京师范大学研制的多高度平口式集沙仪^[14], 集沙高度为 60 cm, 包含 30 个开口为 2 cm×2 cm 的连续进沙口, 进沙口与集沙盒连接, 风蚀物质通过进沙口进入集沙盒内(图 1c), 用于计算不同高度的风蚀输沙量。

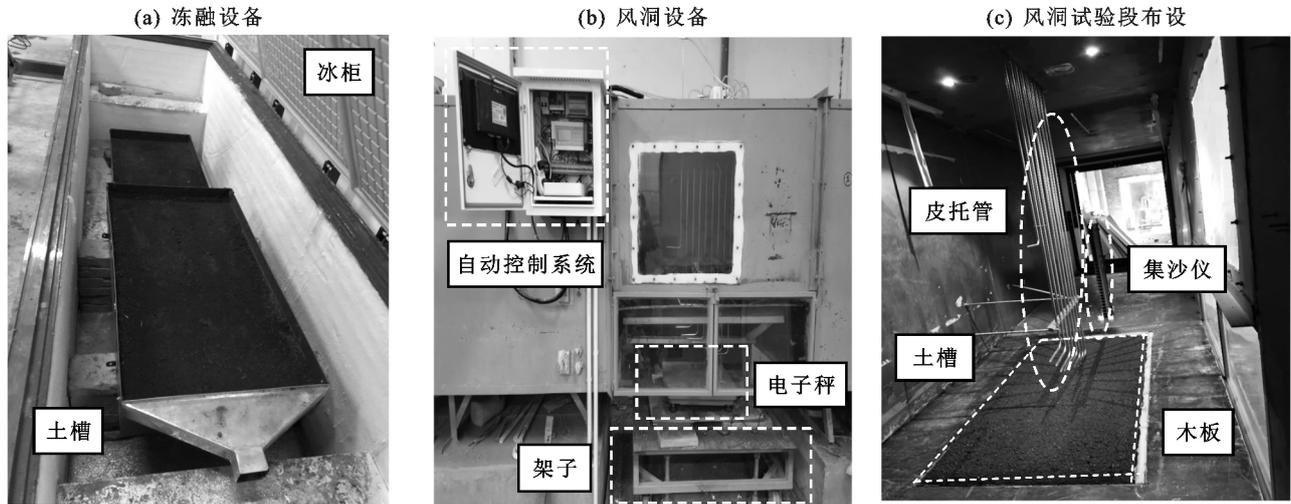


图 1 试验设备

1.2 试验设计

研究区农田 0—40 cm 土层土壤的田间持水量在 30%~34%^[15], 结合课题组实测资料, 设计 3 个土壤含水量, 分别为 16.5% (为 50% 田间持水量), 24.8% (为 75% 田间持水量) 和 33.0% (为 100% 田间持水量)(表 1)。东北黑土区耕层土壤临界起沙风速约为 8 m/s^[13], 结合实际风洞风速的可调范围, 试验设计 3 个风速, 分别为 9, 12, 15 m/s, 每场风洞试验的吹蚀时间为 20 min。根据野外现场测量, 研究区坡耕地耕层土壤容重为 0.91~1.32 g/cm³, 平均值约为 1.20 g/cm³, 故本研究设计的土壤容重为 1.20 g/cm³。根据东北地区的冬季气温变化和实际冻融条件, 为确保土槽中装填的土壤能完全冻结和完全解冻, 设定土壤冻结温度为 -15 °C, 解冻温度为室温, 冻结和融化时间均为 24 h。试验设计 1 次冻融循环, 并以未冻融处理作为对照。

1.3 试验步骤

1.3.1 装填试验土槽 将野外采集的试验黑土取回后风干, 剔除杂物, 将大土块按照土壤自然节理掰开以保护其原有结构, 并将土壤充分混合均匀备用。试验土槽填土时, 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。试验土槽填土前, 先测定试验土壤的含水量(土壤质量含水量约为 5.14%), 然后根据土壤容重计算每层土层所需的土壤质量。对于土壤含水量为 16.5% 的试验土壤, 为了使试验土壤水分充分均匀, 试验土槽填土前, 计算土壤含水量为 16.5% 所需要的水量, 用喷水壶缓慢加入到已称重的试验土壤中, 并

充分搅拌后用保鲜膜密封, 然后静置 12 h 后再填入试验土槽。填土时采用分层填土的方式进行, 即按 4 cm 土层装填后将表层刮毛再装填另外 4 cm 土层, 边装边均匀压实, 以保证填土的均匀性和整体性。试验土槽填好后用保鲜膜密封, 静置 2 天。对于土壤含水量为 24.8%, 33.0% 的试验土壤, 先按照土壤含水量为 16.5% 的步骤装填试验土槽, 再计算 2 个试验处理所需要的水量, 用喷水壶缓慢均匀地在试验土槽中洒水直至土壤含水量达到目标含水量, 然后用保鲜膜密封试验土槽并静置 2 天, 使试验土槽的土壤水分充分均匀。

表 1 试验设计

土壤含水量/%	冻融/无冻融	轴线风速/(m·s ⁻¹)	备注
16.5(50%FC)	无冻融	9, 12, 15	在 -15 °C 冻结 24 h, 在室温条件下融解 24 h; 土壤容重为 1.20 g/cm ³ ; 试验重复次数为 2 次
	冻融	9, 12, 15	
24.8(75%FC)	无冻融	9, 12, 15	
	冻融	9, 12, 15	
33.0(100%FC)	无冻融	9, 12, 15	
	冻融	9, 12, 15	

注: FC 为田间持水量; 对于无冻融作用的试验处理, 先将用保鲜膜密封的试验土槽静置 2 天后, 再让其自然风干, 当各试验土壤表层(0—5 cm)土壤含水量为 6.0%~7.0% 时, 方可进行风蚀试验; 对于有冻融作用的试验处理, 同样将用保鲜膜密封的试验土槽静置 2 天后, 将试验土槽冻结 24 h, 然后让试验土槽解冻 24 h, 当供试土槽的土壤完全解冻后进行自然风干, 且当试验土壤表层(0—5 cm)土壤含水量为 6.0%~7.0% 时, 方可进行风蚀试验。

1.3.2 冻融试验 将装填好的试验土槽用保鲜膜密封静置 2 天后, 放入冰柜中冻结, 冰柜中可以同时放

置 2 个试验土槽。设置冻结时间为 24 h,冻结过程完成后将试验土槽取出放置在避光处,在室温条件下解冻 24 h,以确保试验土槽中填装的土壤完全冻结和完全解冻。冻融结束后将试验土槽中的土壤自然风干,当各试验处理下的试验土槽表层(0—5 cm)土壤含水量为 6.0%~7.0%时,方可进行风蚀试验。

对于无冻融作用的试验处理,将装填好的试验土槽用保鲜膜密封静置 2 天后,让其自然风干;且与冻融试验处理类同,当各试验处理下的试验土槽表层(0—5 cm)土壤含水量为 6.0%~7.0%时,方可进行风蚀试验。

1.3.3 风洞试验 为保证风洞试验过程中风速的稳定性和均匀性,正式试验前需要进行风速的率定,以风洞轴线风速(距土槽 60 cm 处风速)为准,当风速达到设计风速(± 0.1 m/s)时可进行风洞试验。将准备好的有冻融和无冻融的试验土槽放置在风洞试验段内,调节架子高度,使得土壤坡面与风洞底板齐平,然后用木板和泡沫板将试验土槽固定。每场风洞试验的吹蚀时间为 20 min。试验前后,用精度为 1 g 的电子天平将试验土槽与土壤称重,计算不同风速条件下的风蚀量。

风洞试验开始前,将集沙仪紧贴样品下风侧边沿安装,集沙口正对风的来向。风洞试验结束后,分别称重集沙仪每层集沙盒内的风蚀物质(精确到 0.000 1 g),计算风蚀输沙量。

1.3.4 土壤干团聚体测定 分别采集冻融前后的试验土槽表层 2 cm 的土样,对比冻融作用对土壤团聚体稳定性的影响。具体采样过程是在试验土槽内随机选取 3 个“S”形,在每个“S”形从上到下布设 4 个点,采集各点表层 2 cm 的试验土壤,并将采集的 4 个土壤样品混合,用四分法取样 100 g,随后用套筛进行干筛,套筛筛孔自上而下排列的顺序为 5, 2, 1, 0.5, 0.25 mm,分别收集各粒级团聚体,烘干称重计算各粒级团聚体的百分数。

1.3.5 数据分析 数据分析使用 SPSS 23.0 软件对数据进行 One-way ANOVA 分析,用最小显著性差异法(LSD)对试验结果进行多重比较,显著性判别的水平为 95%。

2 结果与分析

2.1 冻融作用对土壤风蚀强度的影响

前期冻融作用对土壤风蚀强度的影响受土壤含水量和风速的综合影响。土壤经过冻融作用后,风蚀强度显著增加($P < 0.05$),其中在土壤冻结合水量为 16.5%时风蚀强度呈极显著增加($P < 0.01$)。风蚀强度随风速的增加而增加,其中不同含水量下土壤风蚀强度随风速的增幅排序依次为 16.5% > 33.0% >

24.8%;在 3 个土壤含水量条件下,在 12, 15 m/s 风速下的风蚀强度分别是 9 m/s 风速下的风蚀强度的 1.88~4.67, 4.65~27.05 倍(表 2)。

与无冻融试验处理相比,当土壤含水量为 16.5%时,有前期冻融作用的土壤风蚀强度增加了 337.5%~404.2%;当土壤含水量为 24.8%和 33.0%时,其风蚀强度分别增加了 23.5%~114.0%和 54.7%~141.9%。表 2 还表明,前期冻融作用对土壤风蚀的影响程度随风速和土壤含水量的增加而相对减弱。

表 2 有、无前期冻融作用的土壤风蚀强度对比

土壤含水量/%	风速/ ($m \cdot s^{-1}$)	风蚀强度/($g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)		冻融作用增加风蚀强度的百分数/%
		无冻融	冻融	
16.5	9	72.0b	363.0a	404.2
	12	336.0b	1470.0a	337.5
	15	1948.0b	9676.0a	396.7
24.8	9	129.0b	276.0a	114.0
	12	372.0b	519.0a	39.5
	15	1040.0b	1284.0a	23.5
33.0	9	93.0b	225.0a	141.9
	12	366.0b	621.0a	69.7
	15	928.0b	1436.0a	54.7

注:同行不同小写字母表示有、无前期冻融处理间在 0.05 水平差异显著。

2.2 土壤含水量对土壤风蚀强度的影响

对于无前期冻融作用的试验处理,土壤风蚀强度随供试土壤含水量的变化较为复杂(表 3)。当风速为 9, 12 m/s 时,土壤含水量为 24.8%时的风蚀强度最大,其值分别为 129.0, 372.0 $g/(m^2 \cdot h)$,分别是 33.0%和 16.5%含水量下风蚀强度的 1.38~1.79, 1.02~1.10 倍。而当风速为 15 m/s 时,风蚀强度随土壤含水量的增加而减少;与 16.5%含水量相比,对应的 24.8%和 33.0%含水量的风蚀强度分别减少 46.6%和 52.4%。

表 3 不同土壤含水量下有、无前期冻融作用的土壤风蚀强度对比

风速/ ($m \cdot s^{-1}$)	土壤含水量/%	风蚀强度/($g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)			
		无冻融	增加/%	冻融	减少/%
9	16.5	72.0B		363.0A	
	24.8	129.0A	79.2	276.0AB	24.0
	33.0	93.0AB	29.2	225.0B	38.0
12	16.5	336.0A		1470.0A	
	24.8	372.0A	10.7	519.0B	64.7
	33.0	366.0A	8.9	621.0B	57.8
15	16.5	1948.0A		9676.0A	
	24.8	1040.0B	-46.6	1284.0B	86.7
	33.0	928.0B	-52.4	1436.0B	85.2

注:在相同风速下同列不同大写字母表示不同土壤含水量对应的风蚀强度之间在 0.05 水平差异显著。
对于有前期冻融作用的试验处理,不同风速下土

土壤冻结含水量对风蚀的影响表现出不同的规律(表 3)。当风速为 9 m/s 时,土壤风蚀强度随土壤冻结含水量的增加而减少;当风速为 12,15 m/s 时,当土壤冻结含水量由 16.5% 增加到 24.8% 时,土壤风蚀强度随土壤冻结含水量的增加而减少;而当土壤冻结含水量由 24.8% 增加到 33.0% 时,土壤风蚀强度随土壤冻结含水量的增加而增加。与 16.5% 的土壤冻结含水量相比,在 9 m/s 风速下 24.8% 和 33.0% 土壤冻结含水量下的土壤风蚀强度分别减少了 24.0% 和 38.0%,在 12 m/s 风速下二者分别减少了 64.7% 和 57.8%,在 15 m/s 风速下二者分别减少了 86.7% 和 85.2%。随着风速的增加,土壤冻结含水量为 16.5% 对应的风蚀强度与 24.8% 和 33.0% 含水量对应的风蚀强度间的差异也逐渐增大。

由表 3 可知,对于无前期冻融作用试验处理,在 9 m/s 风速下,土壤含水量为 16.5% 对应的风蚀强度与土壤含水量为 24.8% 时对应的风蚀强度之间呈显著差异($P < 0.05$),而其与 33.0% 土壤含水量对应的风蚀强度之间无显著差异;同时土壤含水量为 24.8% 和 33.0% 对应的风蚀强度之间也无显著差异。在 12 m/s 风速下,风蚀强度在 3 个土壤含水量之间无显著差异。在 15 m/s 风速下,土壤含水量为 16.5% 对应的风蚀强度与土壤含水量为 24.8% 和 33.0% 对应的风蚀强度之间均呈显著差异($P < 0.05$),但土壤含水量为 24.8% 和 33.0% 对应的风蚀强度之间无显著差异。

对于有前期冻融作用的试验处理,在 9 m/s 的风速下,土壤冻结含水量为 16.5% 对应的风蚀强度与土壤冻结含水量为 33.0% 对应的风蚀强度之间呈显著差异($P < 0.05$),而其与土壤冻结含水量为 24.8% 对应的风蚀强度之间无显著差异;同时土壤冻结含水量为 24.8% 和 33.0% 对应的风蚀强度之间无显著差异。在 12,15 m/s 风速下,16.5% 土壤冻结含水量下的风蚀强度与 24.8% 和 33.0% 含水量下对应的风蚀强度之间均呈显著差异($P < 0.05$),而土壤冻结含水量为 24.8% 和 33.0% 对应的风蚀强度之间无显著差异。再次说明了前期冻融作用改变了土壤含水量对

风蚀的影响。

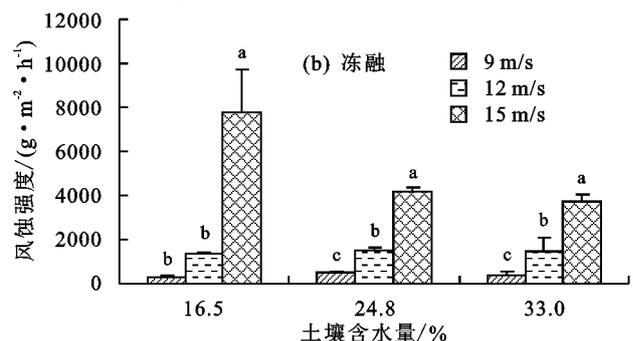
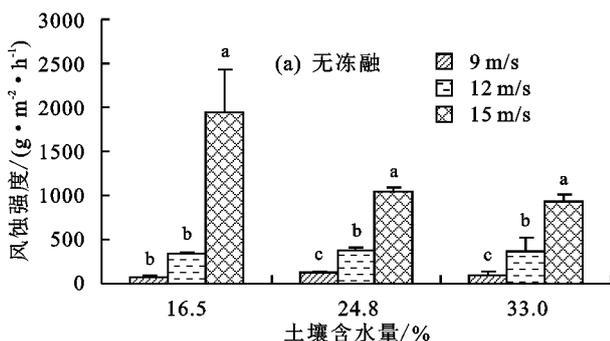
2.3 风速与风蚀强度的关系

无论是否有前期冻融作用,风蚀强度皆随风速的增加而显著增加($P < 0.05$)。风蚀强度随风速的变化遵循幂函数关系(表 4),除了 24.8% 含水量下经过冻融作用的风蚀强度与风速拟合方程的幂指数 < 3 以外,其余处理下风蚀强度与风速拟合方程的幂指数均 > 3 。对于无前期冻融作用试验处理,在 3 个土壤含水量条件下,在 12,15 m/s 风速下的风蚀强度分别是 9 m/s 的风速下风蚀强度的 2.88~4.67,8.06~27.06 倍;而对于有前期冻融作用试验处理,在 3 个土壤含水量条件下,在 12,15 m/s 风速下的风蚀强度分别是 9 m/s 风速下的 1.88~4.05,4.65~26.66 倍。尤其是对于 16.5% 土壤含水量,土壤风蚀强度随风速的增加幅度最大,与 9 m/s 的风速相比,有、无前期冻融作用试验处理的风蚀强度在 15 m/s 风速下分别增加 26.66,27.06 倍;33.0% 土壤含水量下的风蚀强度随风速的增加幅度次之,与 9 m/s 的风速相比,有、无前期冻融作用试验处理的风蚀强度在 15 m/s 风速下分别增加 6.38,9.98 倍;而以 24.8% 土壤含水量下风蚀强度随风速的增加幅度最小,与 9 m/s 的风速相比,有、无前期冻融作用试验处理的风蚀强度在 15 m/s 风速下分别增加 4.65,8.06 倍。图 2 还表明,不同土壤含水量下,前期冻融试验处理下的风蚀强度增加幅度小于无前期冻融试验处理下的风蚀强度增加幅度,再次说明前期冻融作用对风蚀强度的影响受土壤含水量和风速的综合影响。

表 4 风蚀强度与风速的曲线拟合方程

土壤含水量/%	冻融/无冻融	拟合曲线方程	相关系数 (R^2)
16.5	无冻融	$y = 5e - 5x^{6.404}$	0.9878
	冻融	$y = 0.0003x^{6.353}$	0.9752
24.8	无冻融	$y = 0.0164x^{4.0668}$	0.9959
	冻融	$y = 0.3770x^{2.9711}$	0.9695
33.0	无冻融	$y = 0.0047x^{4.5156}$	0.9986
	冻融	$y = 0.0777x^{3.6238}$	0.9997

注: y 为风速强度($g/(m^2 \cdot h)$); x 为风速(m/s)。



注: 图柱上方同一土壤含水量下的不同小写字母表示在不同风速对应的风蚀强度之间在 0.05 水平差异显著。

图 2 有、无冻融作用下土壤风蚀强度随风速的变化

2.4 风蚀输沙率随输沙高度的变化

由表 5 可知,在相同土壤含水量和风速条件下,经过冻融试验处理的风蚀输沙率显著大于无冻融试验处理的风蚀输沙率($P < 0.05$)。对于无前期冻融作用试验处理,3 个土壤含水量的平均输沙率分别为 15.2、2.2、2.7 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$ 。对于有前期冻融试验处理,3 个土壤冻结含水量的平均输沙率分别为 61.6、3.5、4.5 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$,其较无前期冻融作用试验处理增加了 59.1%~305.3%,其中土壤冻结含水量为 16.5%对应的风蚀输沙率的增幅最大,33.0%土壤含水量下的风蚀输沙率增幅次之,24.8%土壤含水量下风蚀输沙率增幅最小。

表 5 有、无前期冻融作用下的风蚀输沙率对比

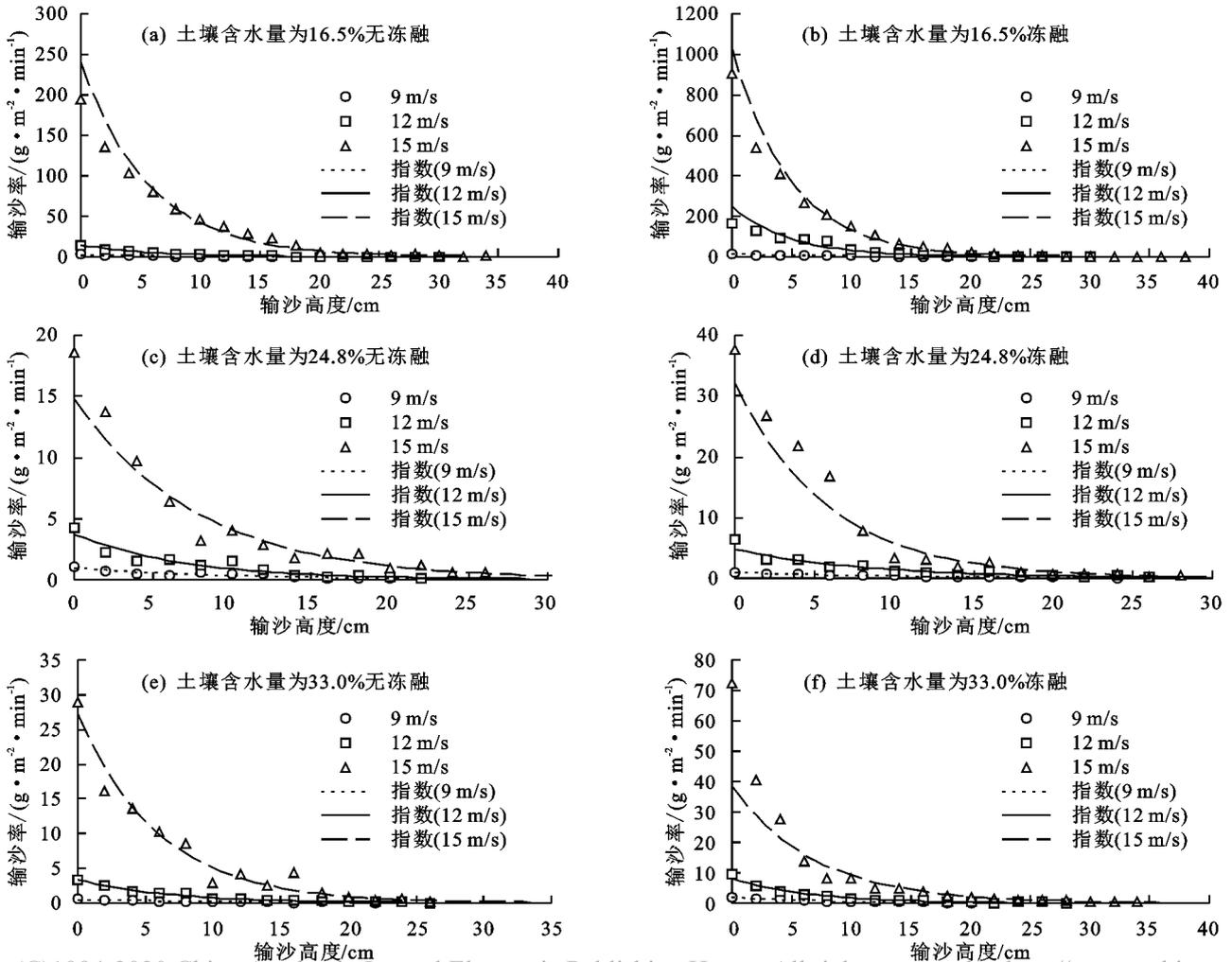
土壤含水量/%	平均输沙率/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1})$		冻融作用增加风蚀输沙率的百分数/%
	无冻融	冻融	
16.5	15.2±0.2b	61.6±5.8a	305.3
24.8	2.2±0.3b	3.5±0.2a	59.1
33.0	2.7±0.6b	4.5±0.8a	66.7

注:同行不同小写字母表示不同处理间在 0.05 水平差异显著。

无论是否有前期冻融处理,土壤含水量为 16.5%对应的平均输沙率均大于土壤含水量为 24.8%和 33.0%

对应的平均输沙率(表 5)。对于无前期冻融作用的试验处理,土壤含水量为 16.5%的平均输沙率分别是土壤含水量为 24.8%和 33.0%的平均输沙率的 6.9, 5.6 倍($P < 0.01$)。对于有前期冻融试验处理,前者分别是后二者的 17.6, 13.7 倍($P < 0.01$)。可见,前期土壤冻融作用明显增加了风蚀输沙率,且风蚀输沙率大小与土壤含水量有关。

由图 3 可知,不同土壤含水量条件下,无论是否有前期冻融作用,风蚀输沙率均随地表高度的增加而减少,且其随地面高度的变化符合指数函数变化规律,其拟合度达到 0.88 以上,且风蚀输沙率均随风速的增加而增加。对于有冻融作用试验处理,风速为 15 m/s 时的输沙率是 9 m/s 风速下输沙率的 16.0~30.8 倍($P < 0.01$),是 12 m/s 风速下输沙率的 3.4~5.3 倍($P < 0.01$);对于无冻融作用的试验处理,风速为 15 m/s 时的输沙率是 9 m/s 风速下输沙率的 12.1~51.7 倍($P < 0.01$),是 12 m/s 风速下输沙率的 3.4~12.9 倍($P < 0.01$)。当土壤含水量为 24.8%时,有冻融作用的风蚀输沙率随风速增加的幅度大于无冻融作用,但在土壤含水量为 16.5%和 33.0%时,有冻融作用的风蚀输沙率随风速增加的幅度小于无冻融作用。



(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>
图 3 风蚀输沙率随输沙高度的变化

图 3 还表明,在不同试验条件下风蚀输沙主要集中在距地表 40 cm 的范围内,且 70% 以上的风蚀物质集中在距地表 10 cm 的范围内。与无前期冻融试验处理相比,相同土壤含水量条件下冻融作用使风蚀输沙高度增加 0~8 cm。对于有冻融试验处理,输沙高度在土壤含水量为 16.5% 时最大,其输沙高度较土壤含水量为 24.8% 和 33.0% 的输沙高度增加 0~8 cm;且随风速增加,不同土壤含水量之间的输沙高度差异也随之增加。对于无冻融试验处理,输沙高度也在土壤含水量为 16.5% 时最大,其输沙高度较土壤含水量为 24.8% 和 33.0% 的输沙高度增加 0~10 cm。

3 讨论

土壤经过前期冻融作用后,土壤风蚀强度显著增加,风蚀水平甚至可以达到全年其他时期风蚀水平的数倍^[16]。孙宝洋等^[17]对内蒙古地区土壤风蚀强度进行实地检测发现,4—5 月,由于气候干燥,冻融后土壤松散,风蚀强度最大,其值为全年平均风蚀强度的 2~3 倍。冻融对风蚀的影响主要是通过冻融作用影响土壤结构特征,降低土壤抗风蚀性,进而影响土壤风蚀强度^[18]。图 4 表明,与未经过前期冻融处理的土壤相比,土壤经过冻融后,当土壤含水量分别为 16.5%、24.8% 和 33.0% 时,>5 mm 的团聚体分别减少了 21.8%、32.9%、44.4%,<1 mm 的团聚体分别增加了 0.3%、5.0%、10.7%。说明冻融作用使得土壤中大团聚体破碎,易侵蚀颗粒增加,从而增加了风蚀。

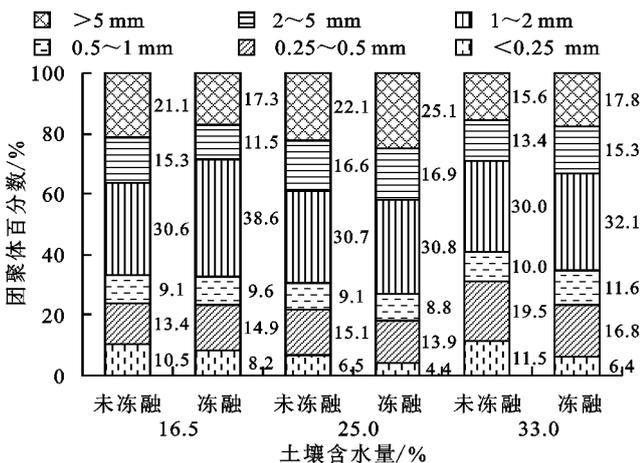


图 4 冻融作用对土壤干团聚体稳定性的影响

当土壤水分在蒸发的过程中,表层土壤收缩,与下层土壤分离形成结皮^[19],其对土壤相对起到保护作用,使土壤抗风蚀性增加^[20-21]。Rajot 等^[22]研究表明,表层土壤形成物理结皮后,细颗粒土壤减少 2 倍。土壤结皮的强度与土壤质地、土壤含水量等因素有关^[21],土壤含水量为 16.5% 时土壤形成的结皮强度较小,当风速增大时,结皮被破坏,风蚀强度剧增;而土壤含水量为 24.8%

与 33.0% 的土壤在水分蒸发的过程中形成的结皮强度较大。产生的结皮强度越大,风蚀过程中的颗粒撞击越难导致土壤结皮的保护作用衰减^[23]。因此风速越大,土壤含水量为 16.5% 的土壤风蚀强度与其他含水量条件的土壤风蚀强度差距越大。在土壤经历冻融后,与土壤含水量为 16.5% 相比,虽然土壤含水量为 24.8% 和 33.0% 的供试土壤 <1 mm 的团聚体增幅较大,但是由于土壤细颗粒含量的增加,使得表土的黏聚力增加,促进了土壤结皮的形成^[24]。因此,土壤经过冻融后,土壤含水量为 24.8% 和 33.0% 条件下土壤风蚀强度小于土壤含水量为 16.5% 的土壤的风蚀强度。这也说明,在东北地区冬季降雪量较小、气温较低的情况下,土壤冻融风蚀发生得更加剧烈。

4 结论

(1) 前期冻融作用对风蚀强度的影响受土壤含水量和风速的综合影响。土壤经过冻融后,风蚀强度显著增加($P < 0.05$),其增幅为 23.5%~404.2%;其中不同土壤含水量下土壤风蚀强度随风速的增幅排序依次为 16.5% > 33.0% > 24.8%。前期冻融作用改变了土壤含水量对风蚀的影响,对于无前期冻融作用的试验处理,在 9, 12 m/s 的风速下,土壤含水量为 24.8% 对应的风蚀强度最大,当风速达到 15 m/s 时,土壤含水量为 16.5% 对应的风蚀强度最大;对于有前期冻融作用的试验处理,土壤冻结合含水量为 16.5% 的风蚀强度最大。有、无前期冻融作用处理下,风蚀强度皆随风速的增加而显著增加,且风蚀强度随风速的变化遵循幂函数关系。

(2) 前期土壤冻融作用对风蚀输沙率也有重要影响,经过前期冻融作用后,风蚀平均输沙率显著增加($P < 0.05$),其增幅为 59.1%~305.3%。不同土壤含水量下风蚀输沙率增幅排序依次为 16.5% > 33.0% > 24.8%;风蚀输沙率大小与土壤含水量有关,有、无前期冻融试验处理下,土壤含水量为 16.5% 的平均输沙率均大于土壤含水量为 24.8% 和 33.0% 的平均输沙率,前者是后二者的 5.6~17.6 倍。同时,有、无前期冻融作用处理下,风蚀输沙率皆随风速的增加而增加,在 24.8% 土壤含水量下,有冻融作用的风蚀输沙率随风速增加的幅度大于无冻融作用;而在 16.5% 和 33.0% 土壤含水量下,有冻融作用的风蚀输沙率随风速增加的幅度小于无冻融作用。

(3) 风蚀输沙率随地表高度的增加呈指数递减,风蚀输沙主要集中在距地表 40 cm 的范围内,与无冻融试验处理相比,相同土壤含水量条件下冻融作用使风蚀输沙高度增加 0~8 cm。

(4)土壤冻融过程中,土壤大团聚体破碎和易吹蚀颗粒的增加是导致土壤冻融作用增加土壤风蚀量的主要原因;同时,不同土壤含水量之间土壤表层形成结皮的强度差异也对风蚀强度产生重要影响。

参考文献:

- [1] 刘铁军, 珊丹, 郭建英, 等. 东北黑土区土壤风力侵蚀及发展趋势分析[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(36): 22387-22389.
- [2] 李胜龙, 李和平, 林艺, 等. 东北地区不同耕作方式农田土壤风蚀特征[J]. 水土保持学报, 2019, 33(4): 110-118.
- [3] 张科利, 刘宏远. 东北黑土区冻融侵蚀研究进展与展望[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(1): 17-24.
- [4] Sharratt B S, Lindstrom M J, Benoit G R, et al. Runoff and soil erosion during spring thaw in the northern US corn belt[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 55(4): 487-494.
- [5] 谢胜波, 屈建军, 韩庆杰. 青藏高原冻融风蚀形成机理的实验研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(2): 64-68.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Xie S B, Qu J J, Xu X T, et al. Interactions between freeze-thaw actions, wind erosion desertification, and permafrost in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Natural Hazards, 2017, 85(2): 829-850.
- [9] 孙宝洋. 季节性冻融对黄土高原风水蚀交错区土壤可蚀性作用机理研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [10] 武欣慧, 刘铁军, 孙贺阳. 考虑冻融作用的东北黑土地耕作土壤风蚀统计模型研究[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(6): 147-152.
- [11] Liu T J, Xu X T, 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.
- [12] 王彬, 郑粉莉, 王玉玺. 东北典型薄层黑土区土壤可蚀性模型适用性分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 126-131.
- [13] 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.
- [14] 王仁德, 李庆, 常春平, 等. 新型平口式集沙仪对不同粒径颗粒的收集效率[J]. 中国沙漠, 2018, 38(4): 734-738.
- [15] 邹文秀, 韩晓增, 陆欣春, 等. 不同土地利用方式对黑土剖面土壤物理性质的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 187-193.
- [16] Li F R, Zhao L Y, Zhang H, et al. Wind erosion and airborne dust deposition in farmland during spring in the Horqin Sandy Land of eastern Inner Mongolia, China[J]. Soil and Tillage Research, 2004, 75(2): 121-130.
- [17] 孙宝洋, 李占斌, 张洋, 等. 黄河内蒙古支流“十大孔兑”区风蚀强度时空变化特征[J]. 农业工程学报, 2016, 32(17): 112-119.
- [18] Bullock M S, Larney F J, Izaurralde R C, et al. Overwinter changes in wind erodibility of clay loam soils in southern alberta[J]. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65(2): 423-430.
- [19] 林成谷. 土壤学(北方本)[M]. 北京: 农业出版社, 1983: 112-113.
- [20] 贺大良, 邹本功, 李长治, 等. 地表风蚀物理过程风洞实验的初步研究[J]. 中国沙漠, 1986, 6(1): 25-31.
- [21] 李晓丽, 申向东. 结皮土壤的抗风蚀性分析[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(2): 203-207.
- [22] Rajot J L, Alfaro S C, Gomes L, et al. Soil crusting on sandy soils and its influence on wind erosion[J]. Catena, 2003, 53: 1-16.
- [23] Goossens D. Effect of soil crusting on the emission and transport of wind-eroded sediment: Field measurements on loamy sandy soil[J]. Geomorphology, 2004, 58(1/4): 145-160.
- [24] Diouf B, Skidmore E L, Layton J B, et al. Stabilizing fine sand by adding clay: Laboratory wind tunnel study[J]. Soil Technology, 1990, 3(1): 21-31.