

东北黑土区农田土壤风蚀的影响因素及其数量关系

林 艺^{1,2}, 李和平^{1,2}, 肖 波^{1,2,3}

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 农业部华北耕地保育重点实验室, 北京 100193; 3. 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)

摘要: 为明确东北黑土区农田土壤风蚀的主要影响因素, 通过室内模拟试验, 对比分析了黑土在不同风速(5~14 m/s)、土壤含水量(2%~11%)以及秸秆覆盖率(0~80%)下的风蚀速率差异, 进而分析了风蚀速率与各因素之间的数量关系。结果表明, 黑土起沙风速略大于 5 m/s, 其风蚀速率随风速增大呈指数增加, 风速 14 m/s(含水量 2%)时的风蚀速率比 8 m/s 时增加了 11.6~42.7 倍。黑土风蚀速率随土壤含水量升高呈先增加后降低趋势; 在土壤含水量小于 5% 时随含水量升高而逐渐增加, 至含水量 5% 时达到峰值并逐渐降低, 至含水量 11% 时接近零。秸秆覆盖显著降低了黑土风蚀速率, 二者成近似指数函数关系; 秸秆覆盖率 20%(含水量 2%)时的风蚀速率比无覆盖减少了 72.6%~92.3%, 但秸秆覆盖率由 20% 增加至 80%(含水量 2%)后风蚀速率仅降低了 0.02~1.20 g/(m²·s), 幅度有限。研究表明, 风速、土壤含水量以及秸秆覆盖率均可显著影响东北黑土区农田土壤风蚀速率, 其权重依次为风速>土壤含水量>秸秆覆盖率。

关键词: 黑土地退化; 黑土风蚀; 风速; 土壤含水量; 秸秆覆盖率

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)04-0044-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.04.008

Influencing Factors of Wind Erosion and Their Quantitative Relationships with Erosion Rate in Black Soil Area of Northeast China

LIN Yi^{1,2}, LI Heping^{1,2}, XIAO Bo^{1,2,3}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193;

2. Key Laboratory of Arable Land Conservation in North China, Ministry of Agriculture, Beijing 100193;

3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: In order to identify the influencing factors of wind erosion in black soil area of Northeast China, the wind erosion rates of black soil under different wind speeds (5~14 m/s), soil water contents (2%~11%), and straw coverage rates (0~80%) were measured through a series of simulated wind experiments. Subsequently, the relationships between the wind erosion rate of black soil and the factors were quantitatively analyzed. The results showed that the black soil began to be eroded when the wind speed was slightly greater than 5 m/s, and wind erosion rate of black soil increased exponentially with increasing wind speed. The wind erosion rate under 14 m/s of wind speed (at 2% of soil water content) was 11.6~42.7 times higher than that under 8 m/s of wind speed. Moreover, the wind erosion rate of black soil increased with the increasing of soil water content when the soil water content was less than 5%, while it decreased with the increasing of soil water content when the soil water content was between 5% and 11%. Especially, the wind erosion rate of black soil was close to zero when the soil water content exceeded 11%. In addition, the wind erosion rate of black soil was significantly reduced by straw cover and an exponential relationship was found between them. For instance, the wind erosion rate of black soil with 20% of straw coverage (at 2% of soil water content) was 72.6%~92.3% lower than that of bare land. However, wind erosion rate was only decreased by 0.02~1.20 g/(m²·s) when the straw coverage increased from 20% to 80% (at 2% of soil water content). In conclusion, wind erosion rate of black soil was significantly affected by wind speed, soil water content, and straw coverage rate in Northeast of China in this study, and their importance in decreasing wind erosion listed in the order of wind speed>soil water content>straw coverage rate.

收稿日期: 2017-03-07

资助项目: 中央高校基本科研业务费专项(2017QC048)

第一作者: 林艺(1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事水土保持研究。E-mail: linyi@cau.edu.cn

通信作者: 肖波(1981—), 男, 博士, 副教授, 主要从事土壤物理和水土保持研究。E-mail: xiaobo@cau.edu.cn

Keywords: black soil degradation; wind erosion of black soil; wind speed; soil water content; straw coverage rate

东北黑土区是我国重要的玉米和粳稻商品粮供应地,粮食产量约占全国 1/5^[1]。黑土有机质含量高,土壤肥沃,生产力较高,是宝贵且不可再生的农业资源和财富。但近几十年来,由于农业生产强度加大,传统耕作方式落后,保护措施不足,黑土退化日益严重。1950s 至今 60 余年间,黑土有机质含量已从 6% 下降到 1.8%,黑土层厚度已由 60—70 cm 下降至 20—30 cm,甚至部分区域已露出成土母质^[2]。强烈的水土流失是黑土地退化的主要原因,其中风蚀是重要途径之一。黑土区冬春季大风频发,风力强劲,历时漫长,加之前茬作物收获后秸秆留存少,地表覆盖率低,土壤干燥,土质疏松,因此风蚀十分强烈^[3]。东北黑土区现有水土流失面积 27.59 万 km²,其中风蚀面积 3.4 万 km²,占总面积的 12.3%^[4]。风蚀搬运携带了大量细颗粒土壤及其吸附的有机物质,导致表层土壤颗粒变粗,严重破坏了土地生产力;同时造成春季播种后作物种子裸露,影响出苗。风蚀严重威胁了东北黑土区的农业生产和生态环境,制约了区域社会经济的可持续发展。

受制于观测方法和研究手段,土壤风蚀研究整体较为薄弱,长期以来进展缓慢。自 1930s 开始,土壤风蚀研究进度明显加快,随后 WEQ(Wind Erosion Equation)、WEPS(Wind Erosion Prediction System)、RWEQ(Revised Wind Erosion Equation)以及 TEAM(Texas Erosion Analysis Model)等风蚀模型相继建立^[5-7],风蚀研究逐渐由试验观测转向理论分析和实践应用。近年来,国内外学者通过田间风蚀观测和风洞模拟试验,在不同地区对风蚀的影响因素、定量关系、发生过程、模拟预测以及环境危害等方面开展了一定研究^[8-9],但研究深度普遍有待加强。土壤风蚀影响因素众多,邹学勇等^[10]将风蚀影响因子分为风力侵蚀因子、粗糙干扰因子以及土壤抗蚀因子 3 类,分别对应风力侵蚀力、粗糙干扰力以及土壤抗蚀力。众多因素中,风速是风蚀的启动力,与风蚀强度成正相关关系^[11-12]。土壤水分能在土壤颗粒之间产生拉张力,从而增强颗粒之间的内聚力,降低土壤风蚀可蚀性^[13],增大土壤临界起沙风速^[14],因此土壤含水量与风蚀速率大多成负相关关系。地表覆盖对风蚀的影响较为复杂,它不仅能够通过覆盖地表、减少土壤裸露从而直接降低风蚀速率,同时还能通过提高地表粗糙度,削弱地表风速,增加土壤含水量等途径间接降低风蚀速率^[15-17]。大量研究证实,增加地表覆盖是减少农田风蚀最为有效且经济可行的一种手段,这也与当前大力推广的秸秆整株覆盖、秸秆粉碎覆盖、留茬免耕等保护性耕作方式吻合,因此得到了较大范围的推广应用。综上,农田土壤风蚀主要取决

于气候条件、土壤特征以及耕作方式等因素,但这些因素在不同区域差异极大,因此有必要对不同地区土壤风蚀的主控因素及其数量关系分别开展研究。

我国风蚀研究起步较晚,目前相关研究主要集中于干旱和半干旱地区的陕西、内蒙古、甘肃等省区^[18],对于东北黑土区考虑较少,研究不多。东北黑土区风害频繁,黑土疏松,风蚀强烈,加上该地区近年来大力推广保护性耕作方式,因此对该地区农田土壤风蚀的影响因素及其数量关系进行研究十分必要。本研究通过室内模拟试验,对比分析黑土在不同风速(5,8,10,12,14 m/s)、土壤含水量(2%,4%,6%,8%,11%)以及秸秆覆盖率(0,20%,40%,60%,80%)下的风蚀速率差异,分析东北黑土区农田土壤风蚀的主要影响因素及其数量关系,以期为东北黑土区保护性耕作方式的推广应用提供理论依据,为该地区农田风蚀防控提供指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于吉林省四平市梨树县的中国农业大学吉林梨树实验站。梨树县位于吉林省西南部,介于东经 123°45′—124°53′和北纬 43°02′—43°46′之间;地处松辽平原腹地,地势东南高、西北低,南部低山丘陵,中部波状平原,北部为东辽河冲积平原。该地区属北温带半湿润大陆季风性气候,四季分明,年平均气温 6℃,作物生长期日照、降水较充足,年降雨量 587 mm。春季干燥多风,夏季高温多雨,秋季天朗气爽,冬季寒冷多雪,间有暖冬。气候特点为雨热同步,能充分满足一年一熟作物的生长^[19]。大风天气主要发生在 3—5 月,2014—2016 年平均风速 3.3 m/s。

1.2 试验设计

试验设风速、土壤含水量以及秸秆覆盖率三因素。其中风速设 5,8,10,12,14 m/s 5 个水平,土壤质量含水量设 2%,4%,6%,8%,11% 5 个水平,秸秆覆盖率设 0,20%,40%,60%,80% 5 个水平,进行完全随机试验设计。共 75 种处理,每种处理重复 3 次,共计 225 个样本。

1.3 试验方法与指标测定

使用自制装置进行风蚀模拟试验。该装置使用大型风机(宏科 SF 4-2 固定式轴流风机,直径 400 mm)产生持续风力,并通过在 0~2 800 r/min 内调节风机转速以产生 0~14 m/s 范围的风速。

供试土壤采自中国农业大学梨树实验站泉眼沟基地。在田间调查的基础上,依据土壤质地、地形、耕作历时等情况选择代表性田块,于 2016 年 7 月使用 10 cm 长×10 cm 宽×1.5 cm 高的风蚀盘采集表层原状土壤。对不同含水量处理,将所采集土样置于 105℃烘箱中 24

h 烘干后,依据设计的土壤质量含水量经过换算后,用滴管加入所需质量的蒸馏水并搅拌均匀,用塑料膜将风蚀盘封好防止水分蒸发,并静置 1 h 待土壤水分扩散均匀后开始风蚀试验。对不同秸秆覆盖率处理,将玉米秸秆剪成约 $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 大小的碎片后,依据设计的覆盖率将秸秆尽量均匀覆盖于风蚀盘表面,并用大孔尼龙网(网孔直径 1 cm)固定,其后开始风蚀试验。试验前将风蚀盘用分析天平称重(分辨率 0.01 g),其后将风蚀盘放于距风机 1 m 处的中心水平面上,调节风机转速至设定风速并用手持风速仪(TES AVM-07,风速测量范围 0~45 m/s)校正,至风速稳定后开始计时。每次吹蚀时间为 10 min,吹蚀结束后再次称重风蚀盘。试验前后风蚀盘质量的差值即为该时段的风蚀量,根据风蚀量计算得到风蚀速率。

供试土壤为黑土,按国际制分类土壤质地为粉砂质粘土(砂粒含量 17%,粉粒含量 46%,黏粒含量 37%),表层土壤有机质含量为 2.2%,土壤容重为 1.30 g/cm^3 , pH 值为 5.89,田间持水量 $0.37\text{ cm}^3/\text{cm}^3$,全氮含量 1.52 g/kg ,速效氮含量 88.14 mg/kg ,速效磷含量 38.27 mg/kg ,饱和导水率 2.43 cm/d 。

1.4 数据处理与分析

采用 SPSS 17.0 计算各处理的平均值和标准误差,同时进行单因素方差分析和两两比较,以检验不同处理的差异显著性;继而进行多元回归分析,获取风蚀量与各因素的回归方程;使用 Origin Pro 9.2 绘制图表,并进行线性和非线性拟合。

2 结果与分析

2.1 风速对风蚀速率的影响

不同土壤含水量和秸秆覆盖率下,土壤风蚀速率均与风速成正相关关系,二者近似服从指数函数规律(图 1)。以土壤含水量 2% 为例:风速 5 m/s 时地表几乎没有起沙,5 种秸秆覆盖率下的风蚀速率皆接近 0,表明黑土的起沙风速应大于 5 m/s;风速 8 m/s 时,5 种秸秆覆盖率下的风蚀速率分别为 1.39,0.11,0.21,0.13,0.09 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;此后风蚀速率随风速增大而逐渐增大,呈指数增长趋势,至风速 12 m/s 时风蚀盘已见底;至 14 m/s 时,风蚀速率达到峰值,5 种秸秆覆盖率下分别为 17.53,4.81,4.07,1.88,3.61 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,比 8 m/s 时分别增加了 11.6,42.7,18.3,13.5,39.1 倍。

风速对风蚀速率的影响在不同土壤含水量和秸秆覆盖率下略有不同。秸秆覆盖率较低时风蚀速率随风速的增加趋势较为平滑,不同风速下相对均匀;而秸秆覆盖率较高时,土壤风蚀速率在低风速($<10\text{ m/s}$)时随风速增加而增幅较小,但风速增大($>10\text{ m/s}$)后风蚀速率快速增加,表现出急剧升高的趋势,且这一差异在土壤含水量较高时表现更为明显。单因素方差分析结果显示,不同风速处理下的风蚀速率总体差异极显著($F>$

$38.21, P<0.001$);其中,5 m/s 和 8 m/s 风速时的风蚀速率差异不显著($P>0.33$),但 10,12,14 m/s 风速时的风蚀速率差异显著($P<0.002$),即高风速对土壤风蚀的影响大于低风速对土壤风蚀的影响。

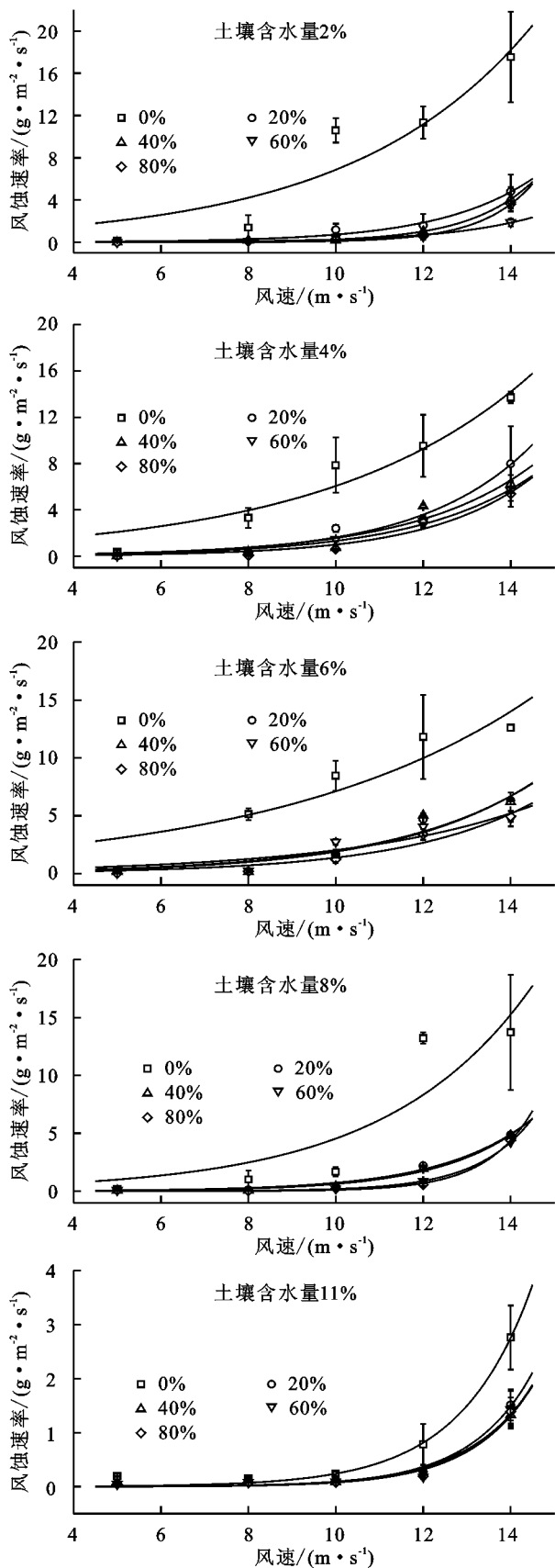


图 1 黑土风蚀速率与风速的关系

2.2 土壤含水量对风蚀速率的影响

从图2可以看出,不同风速和秸秆覆盖率下,风蚀速率随土壤含水量增加呈先增加后降低的趋势(仅无秸秆覆盖处理在10 m/s和12 m/s风速下的风蚀速率随土壤含水量变化无明显规律),且存在明显的阈值。以风速8 m/s为例:土壤含水量2%时,5种秸秆覆盖率下的风蚀速率分别为1.39,0.11,0.21,0.13,0.09 g/(m²·s),此后风蚀速率随土壤含水量增大而逐渐增大;至土壤含水量4%时,5种秸秆覆盖率下的风蚀速率分别为3.31,0.36,0.39,0.14,0.05 g/(m²·s);至土壤含水量6%时,5种秸秆覆盖率下的风蚀速率分别为5.14,0.22,0.16,0.24,0.18 g/(m²·s),此后风蚀速率随土壤含水量增大而逐渐减小;至土壤含水量8%时,5种秸秆覆盖率下的风蚀速率分别为1.01,0.12,0.06,0.04,0.02 g/(m²·s);当土壤含水量增加至11%时,5种秸秆覆盖率下的风蚀速率分别为0.15,0.09,0.08,0.08,0.07 g/(m²·s),接近于0。可见,土壤含水量小于4%时风蚀速率随土壤含水量增加而增加,土壤含水量大于6%时风蚀速率随土壤含水量增加而降低,即风蚀速率在土壤含水量4%和6%之间存在一个阈值(约为5%)。单因素方差分析结果显示,不同土壤含水量处理下的风蚀速率总体存在极显著差异($F > 7.32, P < 0.001$);但两两比较结果显示,仅土壤含水量为11%的风蚀速率显著($P < 0.006$)低于土壤含水量为2%,4%,6%,8%的风蚀速率,而土壤含水量为2%,4%,6%,8%的风蚀速率之间差异不显著($P > 0.18$)。

从图2可以看出,风蚀速率随土壤含水量增加呈先增加后降低的趋势,但风蚀速率的增加速率大于其降低速率,即风蚀速率随土壤含水量快速增加、缓慢降低。在低含水量阶段(<5%),随土壤含水量增加风蚀速率迅速增加;当风蚀速率达到峰值后(土壤含水量约5%时),风蚀速率变化趋于平缓,处于轻微风蚀阶段;当土壤含水量到达临界值(11%)后,土壤基本不会发生风蚀。风蚀速率随土壤含水量的变化趋势在不同风速和秸秆覆盖率下基本一致。秸秆覆盖率越高,风蚀速率随土壤含水量的波动越小;风速越大,风蚀速率随土壤含水量的波动越大。

2.3 秸秆覆盖率对风蚀速率的影响

黑土风蚀速率与秸秆覆盖率成指数函数关系(图3),即风蚀速率随秸秆覆盖率增加而降低,尤其是秸秆覆盖率由0增加至20%时风蚀速率大幅降低,其后降幅平缓。以土壤含水量2%为例:秸秆覆盖率为0时,5种风速下的风蚀速率分别为0.13,1.39,10.60,11.34,17.53 g/(m²·s);而秸秆覆盖率为20%时,5种风速下的风蚀速率分别为0.01,0.11,1.19,1.60,4.81 g/(m²·s),比秸秆覆盖率0时分别减少了92.3%,92.1%,88.8%,85.9%,72.6%;当秸秆覆盖率达到20%后,风蚀速率变化趋于缓慢,此时增加秸秆覆盖率对风蚀速率影

响并不明显;当秸秆覆盖率达到80%时,5种风速下的风蚀速率分别为0.01,0.09,0.29,0.59,3.61 g/(m²·s),比秸秆覆盖率20%时分别仅降低了0,0.02,0.90,1.01,1.20 g/(m²·s),降低幅度非常有限。

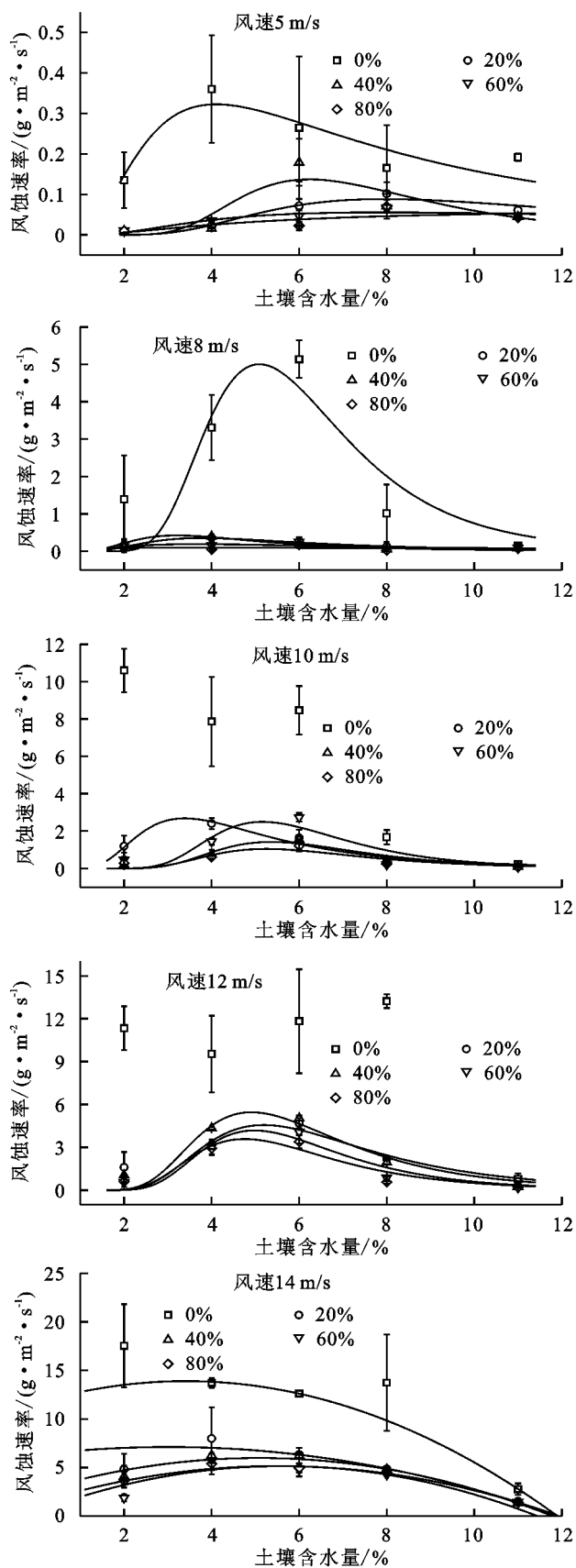


图2 黑土风蚀速率与土壤含水量的关系

不同土壤含水量和风速下,秸秆覆盖率对风蚀速率的影响基本一致(图 3)。在最小风速 5 m/s 时,5 种土壤含水量下不同秸秆覆盖率的风蚀速率均接近 0,表明低风速时秸秆覆盖率对风蚀速率影响有限。另外,随着土壤含水量增加,风蚀速率随秸秆覆盖率的变化趋势总体一致,但曲线斜率逐渐减小,表明风蚀速率的减小速率逐渐变缓。

单因素方差分析结果显示,不同秸秆覆盖下的风蚀速率总体差异极显著($F > 23.78, P < 0.001$);其中,有秸秆覆盖和无秸秆覆盖之间差异极显著($P < 0.001$),但 4 种秸秆覆盖率(20%, 40%, 60%, 80%)之间差异不显著($P > 0.66$)。

2.4 风蚀速率与相关因素的回归分析

对土壤风蚀速率和土壤含水量、风速、秸秆覆盖率进行回归分析,结果显示,回归方程的决定系数为 0.510,标准误差为 2.654, F 值为 105.299,回归效果较好。从表 1 可知,回归结果中各影响因子的 P 值均小于 0.001,表明风速、土壤含水量、秸秆覆盖率均对风蚀速率影响极显著;风蚀速率与风速成正相关关系(回归系数为正值),与土壤含水量和秸秆覆盖率成负相关关系(回归系数为负值);风蚀速率的回归系数绝对值最大(0.673),其次为土壤含水量为(0.273)和秸秆覆盖率(0.051),表明风速对风蚀速率的影响大于土壤含水量和秸秆覆盖率。

3 讨论

本研究表明,风速是黑土风蚀最为重要的影响因素,风蚀速率随风速增大呈指数增加。这一结果与部分学者的研究结果一致,如 Liu 等^[20]在中国东北的新垦草地开展的室内风洞模拟试验,王仁德等^[21]在北京半湿润区进行的野外观测试验都通过曲线拟合的方法得出风蚀量随风速的变化服从指数函数的规律。然而,刘铁军等^[22]在内蒙古旱作耕地进行的风洞模拟试验,何文清等^[23]在北方农牧交错带的风洞试验都表明风蚀速率与风速呈幂函数关系。此外,也有学者指出^[24],9 m/s 风速基本上是风蚀物空间动态发生变化的临界点。低于临界风速,风蚀物收集量与高度符合指数曲线变化规律,高于临界风速,二者符合幂函数曲线变化规律。土壤风蚀速率与风速的数量关系可能取决于土壤基本理化属性;黑土有机质含量较高、土质疏松,微团聚体丰富、可蚀性颗粒较少,这可能是决定其数量关系的重要原因。同时,本研究发现,高风速对土壤风蚀的影响大于低风速,这是因为低风速时土壤抗风蚀能力较为稳定,且吹蚀的部分土壤颗粒与地表覆盖摩擦、碰撞后又回到土壤,故风蚀速率较小;而当风速增大(> 10 m/s)后,土壤的稳定性遭到破坏,抗风蚀能力变弱。

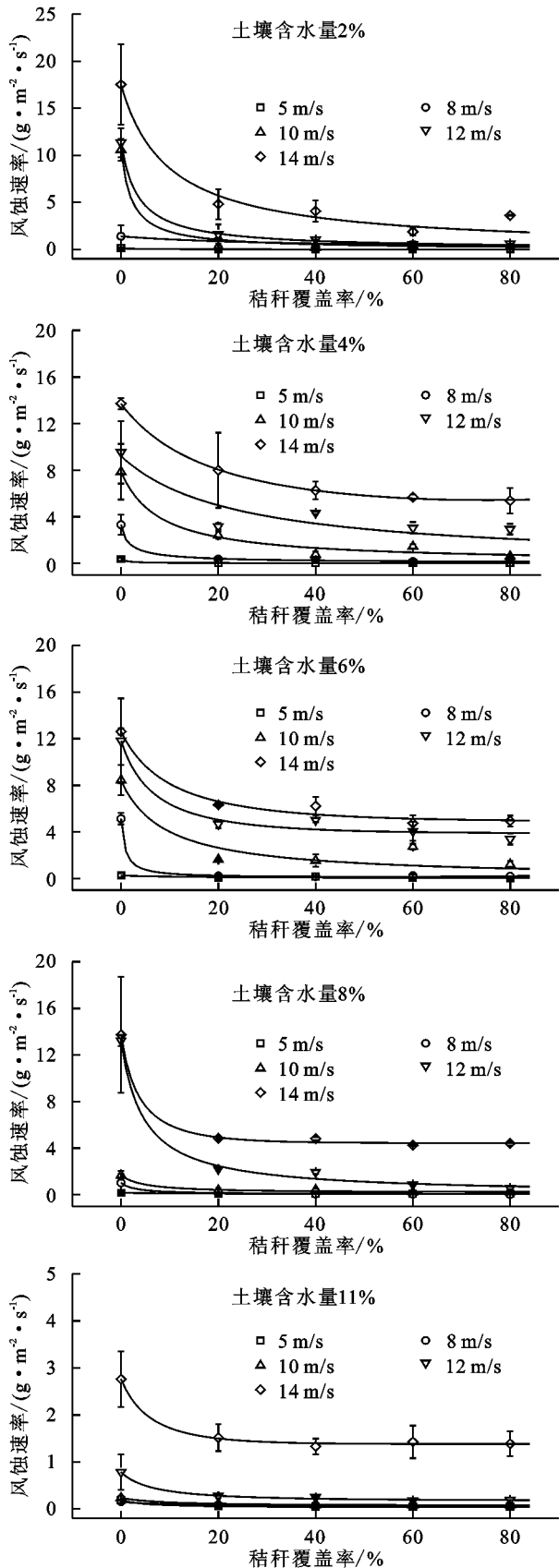


图 3 黑土风蚀速率与秸秆覆盖率的关系

表 1 黑土风蚀速率与相关因素的线性回归分析结果

影响因素	回归系数	标准误差	t 值	P 值
风速	0.673	0.048	14.014	< 0.001
土壤含水量	-0.273	0.049	-5.624	< 0.001
秸秆覆盖率	-0.051	0.005	-9.691	< 0.001

何文清等^[11]在内蒙古武川县开展的研究风蚀影响因子的风洞试验,以及董治宝等^[12]对土壤起动风速的研究的结果都表明,风蚀速率随土壤含水量增大而减小。而本研究得出,在土壤含水量为2%时,随含水量的增加,风蚀速率随之增大;随后当含水量到5%左右,土壤的风蚀速率达到峰值;其后随着土壤含水量的增大风蚀速率逐渐减小。这种差异很有可能是由于在低含水量时,土壤的抗风蚀能力不稳定造成的。如王涛等^[25]通过风洞模拟试验发现,沙土水分含量低于2%时抗风蚀能力变化大,高于2%时抗风蚀能力比较稳定;并且土壤风蚀量随含水量的变化过程具有还变与都变区间交替出现的动态超稳定平衡行为;刘铁军等^[22]研究认为,黑土表层土壤含水量大于7%的地表难以发生土壤侵蚀;何文清等^[23]研究指出,6%土壤含水量是土壤风蚀由重变轻的一个转折点,且风蚀速率与土壤水分含量呈对数函数关系。同时,也有研究认为,风蚀强度与土壤含水量的关系因土壤类型的不同而不同^[14]。本研究中黑土土壤粒径较小,易形成团聚体,抗剪切和抗风蚀能力较强;土壤含水量增大可能会破坏其良好的团聚体结构,使风蚀速率增大。当土壤含水量较高(大于5%左右)时,受土壤颗粒间薄膜水的作用,土粒分离所需要的作用力也较大,对应的风蚀速率逐渐变小。

秸秆覆盖主要是通过覆盖地表、增加下垫面粗糙度阻碍以及沙粒运动这3种生态过程来缓解气流对地表的侵蚀作用^[26]。本研究发现,有秸秆覆盖比起无秸秆覆盖可以有效的减小土壤风蚀。这与黄高宝等^[27]在甘肃河西地区进行的保护性耕作对土壤风蚀影响的试验,以及Mendez等^[28]在阿根廷草原半干旱地区对不同耕作方式下土壤风蚀的研究结果一致。而随着秸秆覆盖率增加,黑土风蚀速率降低幅度却很有限,这与另一些研究的结论有些出入,如尚润阳等^[26]研究发现随着地表覆盖率从10%增加到40%,临界侵蚀风速和地表粗糙长度增加,而风蚀强度大幅度减少;孙悦超等^[17]认为要达到有效防治农田土壤风蚀的目的,保护性耕作农田应具有50%以上的植被覆盖率。而本研究表明,地表覆盖率在20%时,已经具有很好的抗风蚀作用,而从20%增加到80%,风蚀速率的变化并不明显,这可能是由于秸秆覆盖能有效削弱风力。在20%的秸秆覆盖率下,近地面的风速已被削弱至黑土起沙风速附近;此后随着地表覆盖率增加,近地面的风速继续减小,但风蚀速率已经不会发生大的变化。另外,在风蚀过程中,一些被吹起的土壤颗粒与地表秸秆发生摩擦、碰撞后又回到土

壤,这可能也是20%覆盖率后风蚀速率的减小速率逐渐变缓的原因。

风蚀是多因素共同作用的结果,但各因素对风蚀的影响程度并不相同。李玄姝等^[29]的研究表明,土壤含水量与风蚀量的关系最大,是影响风蚀量的关键因子。本研究表明,在影响风蚀速率的秸秆覆盖率、风速、土壤含水量3个因素中,风速对风蚀速率的影响最大,其次为土壤含水量,而地表覆盖率对风蚀速率的影响最小。国内有一些研究表明风速的大小受植被覆盖率、土壤含水量及土壤质地等多种因素的共同影响^[14]。如司志民等^[30]的研究表明,地表覆盖率的增大能明显降低近地面风速;董治宝等^[12]研究发现,表层土壤中的水分子与土壤颗粒之间的黏附力增大了颗粒之间的黏聚力,使得沙粒不易起动,增大起动风速。但总体上针对其相互作用的研究还不够深入,有待进一步探究。尽管本试验表明风速对黑土风蚀速率的影响程度大于土壤含水量和秸秆覆盖率,但相比于风速、土壤含水量两种不可控的影响因素,秸秆覆盖不仅可以直接降低黑土风蚀速率,而且还可通过降低近地表风速和提高土壤含水量间接减少土壤风蚀。因此,秸秆覆盖仍然是减少黑土风蚀的重要措施和最有效的手段。

4 结论

(1)黑土起沙风速略大于5 m/s,风蚀速率随风速增大呈指数规律递增,高风速对土壤风蚀的影响大于低风速对土壤风蚀的影响。

(2)风蚀速率随土壤含水量增加呈先增加后降低的趋势;随着土壤含水量增大,风蚀速率先增大至土壤含水量约5%时达到峰值;后逐渐减少,且风蚀速率的降低速率小于其增加速率;至土壤含水量到达11%时,土壤基本不会发生风蚀。

(3)风蚀速率随秸秆覆盖率增大而减小,近似服从指数函数规律。秸秆覆盖下的黑土风蚀速率远小于无秸秆覆盖下的风蚀速率;黑土风蚀速率随秸秆覆盖率增加而逐渐降低,但降低的幅度有限。

(4)风速、土壤含水量以及秸秆覆盖率三因素均可显著影响东北黑土区农田土壤风蚀速率;其中风速对风蚀速率的影响程度最大,其次为土壤含水量,而秸秆覆盖率对风蚀速率的影响最小。

参考文献:

- [1] 孟令钦,李勇.东北黑土区坡耕地侵蚀沟发育机理初探[J].水土保持学报,2009,23(1):7-11.
- [2] 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.
- [3] 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(12):153-162.
- [4] 李智广. 中国水土流失现状与动态变化[J]. *中国水利*, 2009(7):8-11.
- [5] Wagner L E. A history of Wind Erosion Prediction Models in the United States Department of Agriculture: The Wind Erosion Prediction System (WEPS)[J]. *Aeolian Research*, 2013,10(9):9-24.
- [6] Tatarko J, Sporcic M A, Skidmore E L. A history of wind erosion prediction models in the United States Department of Agriculture prior to the Wind Erosion Prediction System[J]. *Aeolian Research*, 2013,10(9):3-8.
- [7] Youssef F, Visser S, Karssenberg D, et al. Calibration of RWEQ in a patchy landscape; a first step towards a regional scale wind erosion model[J]. *Aeolian Research*, 2012,3(4):467-476.
- [8] Kang L Q, Guo L J, Gu Z M, et al. Wind tunnel experimental investigation of sand velocity in aeolian sand transport[J]. *Geomorphology*, 2008,97(3/4):438-450.
- [9] Masri Z, van Donk S, Bruggeman A, et al. Post-harvest summer tillage to control wind erosion in the Khannasser Valley, Syria[J]. *Aeolian Research*, 2015,17(6):219-229.
- [10] 邹学勇, 张春来, 程宏, 等. 土壤风蚀模型中的影响因子分类与表达[J]. *地球科学进展*, 2014,29(8):875-889.
- [11] 何文清, 赵彩霞, 高旺盛, 等. 不同土地利用方式下土壤风蚀主要影响因子研究: 以内蒙古武川县为例[J]. *应用生态学报*, 2005,16(11):2092-2096.
- [12] 董治宝, 钱广强. 关于土壤水分对风蚀起动风速影响研究的现状与问题[J]. *土壤学报*, 2007,44(5):934-942.
- [13] Pye K, Tsoar H. *Aeolian sand and sand dunes*[M]. London: Springer Verlag, 2009:110-113.
- [14] 移小勇, 赵哈林, 李玉霖, 等. 科尔沁沙地不同风沙土的风蚀特征[J]. *水土保持学报*, 2006,20(2):10-13, 53.
- [15] 王训明, 郎丽丽, 花婷, 等. 戈壁砾石覆盖度与风蚀强度关系实验研究[J]. *中国沙漠*, 2013,33(2):313-319.
- [16] Jia H L, Wang G, Guo L, et al. Wind erosion control utilizing standing corn residue in Northeast China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015,153(12):112-119.
- [17] 孙悦超, 麻硕士, 陈智, 等. 植被盖度和残茬高度对保护性耕作农田防风蚀效果的影响[J]. *农业工程学报*, 2010,26(8):156-159.
- [18] 王仁德, 邹学勇, 吴晓旭, 等. 半湿润区农田风蚀物垂直分布特征[J]. *水土保持学报*, 2009,23(5):39-43.
- [19] 张丽, 刘吉平, 陈智文. 吉林省梨树县保护性耕作土壤养分空间变异性研究[J]. *吉林农业科学*, 2014,39(3):36-41.
- [20] Liu L Y, Shi P J, Zou X Y, et al. Short-term dynamics of wind erosion of three newly cultivated grassland soils in Northern China [J]. *Geoderma*, 2003,115(1/2):55-64.
- [21] 王仁德, 邹学勇, 赵婧妍. 半湿润区农田土壤风蚀的风洞模拟研究[J]. *中国沙漠*, 2012,32(3):640-646.
- [22] 刘铁军, 赵显波, 赵爱国, 等. 东北黑土地土壤风蚀风洞模拟试验研究[J]. *水土保持学报*, 2013,27(2):67-70.
- [23] 何文清, 高旺盛, 妥德宝, 等. 北方农牧交错带土壤风蚀沙化影响因子的风洞试验研究[J]. *水土保持学报*, 2004,18(3):1-4, 8.
- [24] 赵沛义, 妥德宝, 李焕春, 等. 土壤含水率及物理性砂粒含量对风蚀模数影响的风洞模拟[J]. *农业工程学报*, 2012,28(24):188-195.
- [25] 王涛, 吴薇, 赵哈林, 等. 科尔沁地区现代沙漠化过程的驱动因素分析[J]. *中国沙漠*, 2004,24(5):519-528.
- [26] 尚润阳, 祁有祥, 赵廷宁, 等. 植被对风及土壤风蚀影响的野外观测研究[J]. *水土保持研究*, 2006,13(4):37-39.
- [27] 黄高宝, 于爱忠, 郭清毅, 等. 甘肃河西冬小麦保护性耕作对土壤风蚀影响的风洞试验研究[J]. *土壤学报*, 2007,44(6):968-973.
- [28] Mendez M J, Buschiazzi D E. Wind erosion risk in agricultural soils under different tillage systems in the semiarid Pampas of Argentina[J]. *Soil and Tillage Research*, 2010,106(2):311-316.
- [29] 李玄姝, 常春平, 王仁德. 河北坝上土地利用方式对农田土壤风蚀的影响[J]. *中国沙漠*, 2014,34(1):23-28.
- [30] 司志民, 刘海洋, 陈智, 等. 植被盖度和灌木带状配置对近地表风速廓线的影响[J]. *农机化研究*, 2016(10):178-182.