

秸秆覆盖对农田土壤风蚀及细颗粒物释放的影响

邱云霄¹, 黎燕武², 余新晓¹, 贾国栋¹, 孙乐乐³, 王渝淞¹

(1.北京林业大学水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室,北京 100083;2.江西核工业环境保护中心,南昌 330002;3.黄河勘测规划设计研究院有限公司,郑州 450000)

摘要: 为了确定保护性耕作措施对北京周边农田土壤风蚀及颗粒物释放的影响,通过风洞模拟试验,对比不同风速和不同覆盖度下农田土壤风蚀速率及 TSP、PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ 的释放差异,并分析了 4 种细颗粒物在风蚀物中的占比。结果表明:(1)当风速 < 12 m/s 时,秸秆覆盖度达到 20% 能显著降低风蚀速率,当风速 > 16 m/s 时,秸秆覆盖度需达到 40% 才能达到理想的防风蚀效果。(2)TSP、PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ 4 种细颗粒物的释放量与风速呈正指数函数关系,与覆盖度呈负指数函数关系;随风速的增加,4 种细颗粒物的释放能力为 A>B₁>B₂>B₃>B₄>B₅,当覆盖度 < 10% 或 > 60% 时,细颗粒物的释放量随风速增大差异逐渐减小;覆盖度达 60% 以上时,细颗粒物的释放量基本达到稳定值。(3)TSP、PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ 4 种细颗粒物在风蚀物中的占比随风速的增加而降低,当覆盖度 > 60% 时占比接近稳定。

关键词: 保护性耕作措施;农田;土壤风蚀;扬尘颗粒物

中图分类号:S157.4

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)04-0131-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.04.020

Effects of Straw Mulch on Soil Wind Erosion and Fine Particulate Matter Release in Farmland

QIU Yunxiao¹, LI Yanwu², YU Xinxiao¹, JIA Guodong¹, SUN Lele³, WANG Yusong¹

(1.Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, Ministry of

Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 2.Jiangxi Nuclear Industry Environmental Protection

Center, Nanchang 330002; 3.Yellow River Survey, Planning, Design and Research Institute Co., Ltd., Zhengzhou 450000)

Abstract: To study the influence of protective farming methods on wind erosion in farmland and particulate emission in the surrounding areas of Beijing city, the wind erosion rates of farmland and the emission situations of TSP, PM₁₀, PM_{2.5}, and PM₁ under different wind speeds and different degrees of coverage were compared by wind tunnel experiments, and the proportions of these 4 kinds of particulates in Aeolian deposits were analyzed. The results showed that: (1) When the wind speed is less than 12 m/s, a mere 20% of straw coverage would significantly lower the wind erosion rate, and when the wind speed is greater than 16 m/s, a coverage rate of at least 40% could resist wind erosion effectively. (2) The relationship between the emissions of TSP, PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁, and wind speed was a positive exponential function, and that with the coverage was a negative exponential function. As wind speed increases, the releasing abilities of 4 fine particulate matters could be represented like this: A>B₁>B₂>B₃>B₄>B₅. When the coverage rate was less than 10% or greater than 60%, the differences of bust sizes of fine particulates decreased as wind speed rose, and when the rate upped to more than 60%, the bust size tended to be stable. (3) The proportions of 4 fine particulates in Aeolian deposits decreased as the wind speeds increased, and the numbers became stable when the coverage rate was greater than 60%.

Keywords: protective tillage measures; farmland; soil wind erosion; dust particles

土壤风蚀是许多国家都面临的全球性环境问题。第三次水土流失普查数据^[1]显示,我国遭受风蚀灾害的地区主要集中在北方干旱和半干旱地区,全国风蚀总面

积达 195.70 万 hm², 占国土总面积的 20.6%, 且呈现出持续增加的趋势。风蚀对土壤颗粒的搬运和沉积作用直接影响土壤及其相关的农业活动, 旱作农田受其影响

收稿日期:2019-12-24

资助项目:坝上高原及华北北部山地沙化土地治理与沙产业技术研发及示范项目(2016YFC0500802);林果业生态环境功能提升协同创新中心项目(PXM2018_014207_000024)

第一作者:邱云霄(1995—),女,在读硕士研究生,主要从事森林水文和水土保持研究。E-mail:54289782@qq.com

通信作者:余新晓(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事森林水文和水土保持研究。E-mail:yuxinxiao111@126.com

极为严重^[2]。赵海鹏等^[3]的研究指出,我国北方土壤每年因风蚀导致的沙尘释放使土壤有机质、全氮、全磷分别损失 7×10^7 , 4×10^6 , 5×10^6 kg。土壤风蚀中的细颗粒物由于运动距离较远、且携带较多营养物质而被越来越多的学者关注。苑依笑等^[4]认为,农田土壤风蚀中损失的细颗粒物粒径主要集中在 $0 \sim 40 \mu\text{m}$,陈波等^[5]在北京南海子公园研究了细颗粒物的质量浓度变化特征发现,大风和降雨能有效清除细颗粒物。

细颗粒物由于粒径较小,通常不直接散布在土壤中,它们的存在形式一般分为 2 种:一是附着在粒径稍大的土壤颗粒外^[6];二是依靠颗粒间的结合力,聚集成粒径大约 $20 \sim 30 \mu\text{m}$ 的团粒结构^[7]。在风蚀过程中,细颗粒物的运动与土壤表面状况、土壤质地等密切相关^[8],南岭等^[9]的研究发现,黏粒含量越高的土样,粉尘的释放能力越强,但是能否体现该特性还与具体的耕作措施有关;朱升贺^[10]研究认为,尽管试样的地表粒度特征和含水率大概相同,但是由于人为的扰动导致颗粒或团聚体之间的结合能力受到干扰,最终导致试样的粉尘能力差异较大;庄国顺等^[11]研究了 2000 年沙尘暴期间北京空气中的气溶胶认为,细颗粒物是沙尘暴的重要组成部分,其中粒径 $< 9.0 \mu\text{m}$ 的部分占细颗粒物总量的 75% 以上,而农田是沙尘暴的重要来源。就农田土壤风蚀而言,保护性耕作措施是近年来较为有效的方法。国内外很多学者^[12-13]认为,在裸地上增加作物残茬覆盖和留茬等措施,可以有效降低农田土壤风蚀;赵永来等^[14]研究发现,40% 以上的覆盖度能明显提高启动风速,风速 $14 \sim 18 \text{ m/s}$ 时,作物覆盖度 60%~80% 能达到良好的防风蚀效果;范清成等^[15]研究了黄土高原北部土壤风蚀认为,宜采用秸秆覆盖及留茬 20 cm 结合来降低土壤风蚀;南岭等^[9]的研究认为,粉尘在风蚀量中的占比在弱风蚀条件下较大,强风蚀条件下较小。这些研究主要从颗粒物释放及保护性耕作措施对风蚀的影响方面展开,但是在保护性耕作措施下细颗粒物的释放规律还需进一步研究。本研究选取延庆县的典型农田土壤,在风洞中模拟不同风速和秸秆覆盖情况,通过对风蚀量、TSP、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_1 的监测和分析,研究风速和秸秆覆盖度对风蚀量和细颗粒物释放

的影响,并分析细颗粒物在风蚀物中的占比。

1 材料与方 法

1.1 采样点概况

延庆县地处北京西北部,位于华北平原和内蒙古高原的交接地带,延庆县东南北三面环山,西南部环水,属于大陆季风气候区,是干旱气候与半湿润气候、中温带与暖温带的过渡地带。夏季炎热多雨,冬季干旱寒冷,四季分明,全年平均气温 $8.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。延庆县年平均降水量 457.4 mm ,月降水分布不均,其中 7—8 月的降水量之和占全年降水量的 50% 以上。延庆县土壤所处地带为褐土地带,全县耕地面积 3.0 万 hm^2 ,其中玉米种植面积占耕地面积的 2/3 以上,每年产生玉米秸秆约 25 万 t,目前延庆县大力推广留茬免耕和秸秆还田等保护性耕作措施,每年保护农田土壤 1.3 万 hm^2 。

1.2 试验土样采集

2018 年 4 月在延庆县康庄镇附近进行样地调查(表 1),选取裸地和有玉米残茬覆盖的样地,样地大小 $100 \text{ m} \times 200 \text{ m}$,在样地对角线处随机布设 3 个 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 的小样方进行重复。尽量保证所选的 2 块样地地势平整,地质地貌类型和自然特征一致。在每个小样方取 $0 \sim 5 \text{ cm}$ 的表层土约 500 g 。用于风洞试验的土壤采样使用 $80 \text{ cm} \times 35 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ 的土箱在地势平坦的部位采集原状土,裸地取 1 箱土,玉米残茬覆盖的样地取 5 箱土。地表硬度采用指针式硬度计测定,每个样地测 10 次,取平均值。

将小样方取的土样带回实验室后,经风干过筛后采用马尔文激光粒度仪进行分析,采用美国分级标准对表层土壤粒径进行分类(表 2)。

表 1 样地基本信息

样地	样方	中心经纬度	土壤硬度 ($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	地表状况
覆盖	①	$115^\circ 54' 23.59'' \text{E}$, $41^\circ 50' 36.44'' \text{N}$	0.71	残茬覆盖度为 40.84%
	②		0.49	
	③		0.81	
传统耕地	①	$115^\circ 54' 38.46'' \text{E}$, $41^\circ 51' 35.64'' \text{N}$	0.29	—
	②		0.32	
	③		0.32	

表 2 土样颗粒组成

单位: mm

样地	粗砂粒 ($0.5 \sim 1.0 \text{ mm}$)	中砂粒 ($0.25 \sim 0.5 \text{ mm}$)	细砂粒 ($0.1 \sim 0.25 \text{ mm}$)	极细砂粒 ($0.05 \sim 0.1 \text{ mm}$)	粉粒 ($0.002 \sim 0.05 \text{ mm}$)	黏粒 ($< 0.002 \text{ mm}$)
覆盖地	0	1.08	14.56	31.47	49.21	3.68
传统耕地	0	0.51	9.14	26.85	60.69	2.81

1.3 风洞试验设计

风洞试验在北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室风沙环境工程技术模拟试验风洞内进行,

风洞属于直流吹气式风洞,其组成部分包括风扇、扩展段、整流段、收缩段、边界层发展段、试验段和皮托管等,全长 34.4 m ,其中试验段长度为 16 m ,高度和宽度均为

1 m。风洞内风速可调范围为 1~40 m/s, 采用皮托管连接微压计测量风速, 边界层厚度约为 120 mm。

1.4 试验方法

风洞模拟试验于 2018 年 4 月 24—27 日进行, 所有试验耗时 4 天。因野外残差高度一般为 10~30 cm, 因此在覆盖措施试验中, 采用长度为 5 cm、直径为 4 mm 的圆木棍模拟玉米秸秆, 以试验土槽的总面积为基础, 按照相应的覆盖比例铺设圆木棍表示覆盖措施, 共设置裸土(A)、覆盖度 10%(B1)、覆盖度 20%(B2)、覆盖度 40%(B3)、覆盖度 60%(B4)、覆盖度 80%(B5) 6 种处理, 每种处理 1 箱土, 在 6 个水平上设置 4, 8, 12, 16, 20 m/s 共 5 组风速从小到大依次进行吹蚀, 每种风速吹蚀 10 min, 共计 30 种处理, 每种处理重复 3 次, 并取平均值作为最终结果, 共计 90 次试验。

每次吹蚀结束后用备用土进行土面恢复, 并将土槽称重。土壤风蚀量通过使用电子秤(精度为 0.5 g) 测量前后重量差表示, 风蚀强度计算公式为:

$$W_d = \frac{Q}{s \times t} \quad (1)$$

式中: W_d 为风蚀速率($\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$); Q 为风蚀量(g); s 为风蚀面积(m^2); t 为吹蚀时间(min)。

在风洞试验中采用粉尘检测仪监测 TSP、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_1 4 种颗粒物的浓度。在距土槽的下风向 1 m 处放置粉尘检测仪, 设置 10, 30, 50 cm 3 个高度, 并设定每 30 s 测定 1 次粉尘浓度, 取平均值作为该高度的粉尘浓度, 由于预试验后未发现粉尘释放量随高度变化的趋势性, 因此取 3 个高度的平均值作为最终的粉尘浓度。经过风洞整合后的风可以认为是均匀的, 土槽中被吹起的粉尘均分布在风洞内, 且设置的 3 个高度的粉尘浓度的均值可以代表风洞内的平均粉尘浓度, 因此采用风洞试验段的断面积来计算粉尘释放量。在试验开始前用盖板盖住土样, 待风洞中的风速达到预定风速后, 先打开粉尘检测仪再移去盖板, 以保证试验的准确性。

粉尘释放量 q 计算公式为:

$$q = S \cdot v \cdot t \cdot \rho \quad (2)$$

式中: q 为粉尘释放量(mg); S 为风洞断面积(m^2); v 为风速(m/s); t 为吹蚀时间(s); ρ 为粉尘浓度(mg/m^3)。

2 结果与分析

2.1 不同风速对风蚀强度的影响

对设置的 6 种处理按照设定风速依次吹蚀。由图 1 可知, 各试样风蚀速率与风速呈正相关关系, 风蚀速率随风速增大呈先小幅上升后急速增加的趋势, 风速 4 m/s 时, 6 种秸秆覆盖度下风蚀速率皆较低, 最大值未超过 $3 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$; 风速 12 m/s 时, 6 种

秸秆覆盖度下风蚀速率分别为 6.83, 4.17, 2.92, 2.08, 1.67, 1.25 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$; 此后风蚀速率随风速增加增幅变大, 至 20 m/s 时, 6 种秸秆覆盖度下风蚀速率分别为 37.50, 17.50, 14.58, 9.17, 7.50, 5.42 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$, 比 4 m/s 时分别增加 11.84, 9.48, 10.66, 10.05, 16.85, 11.90 倍。风速的变化过程中, 随覆盖度的增加风蚀速率的增长率逐渐减小, 风速由 12 m/s 增加至 20 m/s 时, 不同覆盖度下风蚀速率的切线斜率依次为 2.80, 1.67, 1.46, 0.89, 0.73 和 0.52。可见, 不同覆盖度均能在一定程度上抑制土壤风蚀, 但在风速较小的情况下(4, 8 m/s)抑制效果不明显。

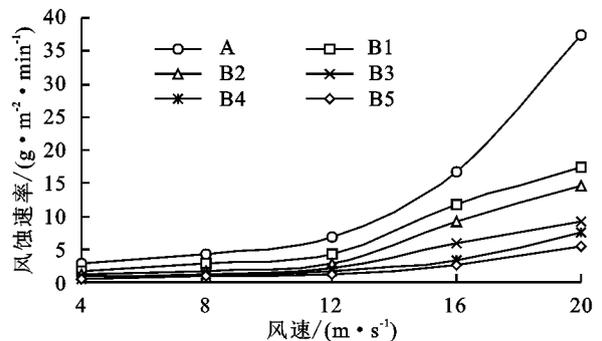


图 1 不同覆盖度下风蚀速率随风速的变化

2.2 不同覆盖度对风蚀强度的影响

A、B1、B2、B3、B4、B5 6 个不同覆盖度对风蚀强度的影响不同。由图 2 可知, 风蚀速率与覆盖度呈负相关关系, 随覆盖度的增加, 各风速下风蚀速率呈先急速下降后趋于平稳的趋势。在覆盖度由 0 增至 40% 的过程中, 各风速下的风蚀速率下降尤为明显。当风速 $> 12 \text{ m/s}$ 时风蚀速率对覆盖度的响应更明显, 4~12 m/s 风速下风蚀速率随覆盖度的变化较小, 覆盖度达到 20% 以后, 4, 8 m/s 风速下风蚀速率的变化曲线几乎重合。因此, 在大风天适当增加覆盖, 对风蚀可以起到很好的抑制作用。

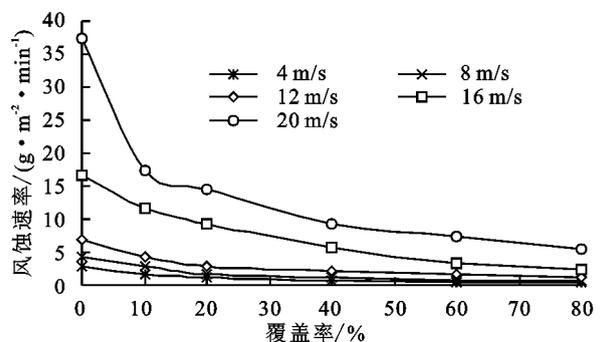


图 2 不同秸秆覆盖度的风蚀强度

2.3 不同风速下细颗粒物释放量差异

各细颗粒物的释放量与风速均呈正相关关系, 各覆盖度下细颗粒物的释放量均随风速的增大呈现增加趋势。将不同风速下的细颗粒物释放量与风速进行拟合, 二者近似服从指数函数规律, 图 3 中各条趋

势线的判定系数 R^2 均在 0.71 以上,以 TSP 的释放量

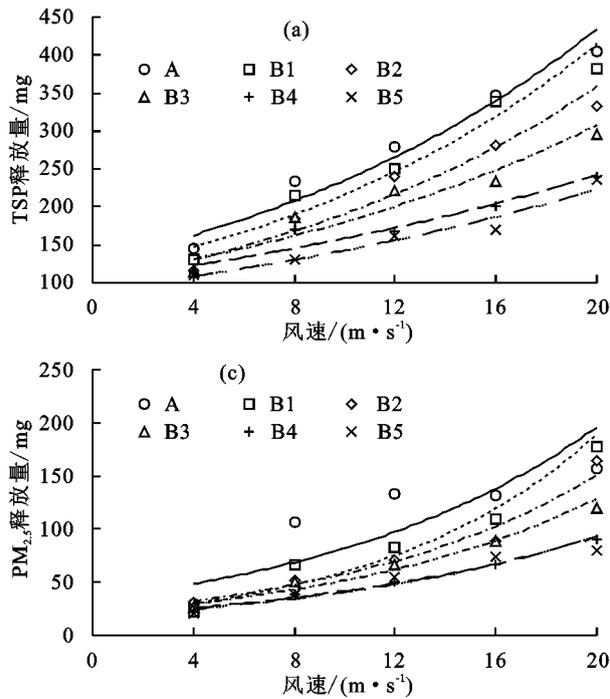


图 3 不同覆盖度下 TSP、PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ 含量随风速的变化

表 3 不同覆盖度下 TSP 释放量随风速变化的拟合曲线

处理	拟合方程	判定系数 R^2
A	$q = 127.33e^{0.0614v}$	0.9441
B1	$q = 112.95e^{0.0650v}$	0.9449
B2	$q = 101.68e^{0.0631v}$	0.9410
B3	$q = 105.73e^{0.0534v}$	0.9495
B4	$q = 103.75e^{0.0424v}$	0.9249
B5	$q = 91.049e^{0.0449v}$	0.9608

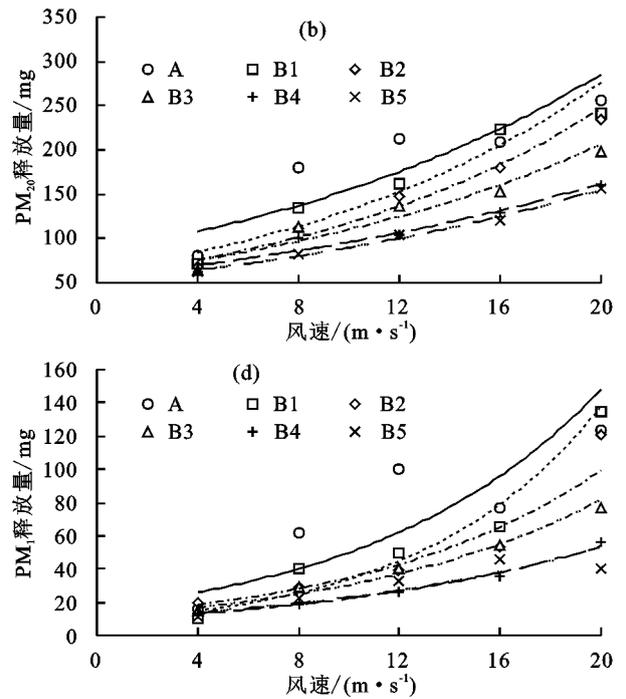
注: q 为粉尘释放量(mg); v 为风速(m/s)。

随着风速的增加, TSP 的释放量呈现不同的释放速率, A、B1、B2、B3 试样在图 3a 中的平均斜率分别为 17.00, 16.75, 14.27, 11.05, 而试样 B4、B5 的平均斜率为 7.46 和 7.16, 说明 60% 和 80% 的秸秆覆盖降低了总悬浮颗粒物对风速变化的敏感程度, 而 A 和 B1 覆盖度下风速的增加对 TSP 释放量影响的程度很接近。PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ 3 种细颗粒物的释放量在随风速的变化过程中以 PM₁₀ 的释放量最多, PM₁ 释放量最小, 由图 3b、图 3c、图 3d 可知, A 和 B1 试样随风速的增加, 细颗粒物释放能力逐渐接近, 在风速达到 20 m/s 时 2 个试样的 PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ 释放能力差异较小, 可以预见继续增大风速 2 个试样的粉尘释放能力会更加接近; 在风速逐渐增大的过程中, B4、B5 试样的粉尘释放能力始终非常接近, PM_{2.5} 和 PM₁ 的释放量与风速的拟合曲线几乎重合, 表明这种情况下风速对土样的细颗粒物释放能力影响较小。

2.4 不同覆盖度下细颗粒物释放的差异

为了得到细颗粒物释放量与覆盖度之间的关系, 建立二者之间的拟合曲线(图 4), 二者近似服从负指数函

为例, 趋势线方程及 R^2 见表 3。



数关系, 各条趋势线的判定系数 R^2 均在 0.68 以上, 以 TSP 的释放量为例, 趋势线方程及 R^2 见表 4。在相同的风速和覆盖条件下, PM₁₀ 的释放量最大, PM₁ 的释放量最小, 这与土壤的种类和细颗粒物的质量有密切关系。对比 5 个水平风速下的试验结果可知, 4 m/s 风速下 4 种细颗粒物的释放量随覆盖度变化较小。TSP 释放量与覆盖度拟合曲线见图 4a。4 m/s 风速下 TSP 释放量随覆盖度增加减小的最慢, 平均斜率仅为 -2.78; 20 m/s 风速下 TSP 释放量随覆盖度增加减小的最快, 平均斜率为 -0.40。图 4b、图 4c、图 4d 均呈现出细颗粒物粒径越小受覆盖度影响越小的趋势, 在覆盖度增加的过程中, PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ 的平均释放量分别为 142.15, 77.07, 48.62 mg, 变化速率也随粒径减小而降低。覆盖度达 60% 后, 再增大覆盖度, PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ 的释放量变化不显著, 这表明 60% 的覆盖度下 3 种颗粒物的释放量基本达到最小值, 继续增加覆盖度细颗粒物的释放量不会有明显的降低。

2.5 细颗粒物在风蚀物中的占比

细颗粒物在风蚀物中的占比采用扬尘释放量和风蚀量的比值表示(表 5)。在不同的覆盖度下, 各颗粒物在风蚀物中的占比均随风速的增大而逐渐降低。以裸地为例, TSP、PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ 在风蚀物中的占比在风速增大过程中分别降低 3.78%, 3.04%, 1.77%, 0.96%。在一组吹蚀试验中, 4 种颗粒物的在风蚀物中的占比为 TSP > PM₁₀ > PM_{2.5} > PM₁。风速一定时, 当覆盖度从 0 增加到 60% 过程中, 各颗粒物在风蚀物中的占比均呈现增加趋势, 以 4 m/s 风速条件为

例,覆盖度从 0 增加到 60% 的过程中,4 种颗粒物在风蚀物中的占比较上一个覆盖度分别增加 0.11%, 7.11%, 6.39%, 17.27%, 随着覆盖度的增加,大颗粒

物的运动受到抑制,细颗粒物的释放愈加明显。由表 5 可知,覆盖度由 60% 增加到 80% 过程中细颗粒物的释放量变化不大,甚至还有下降现象。

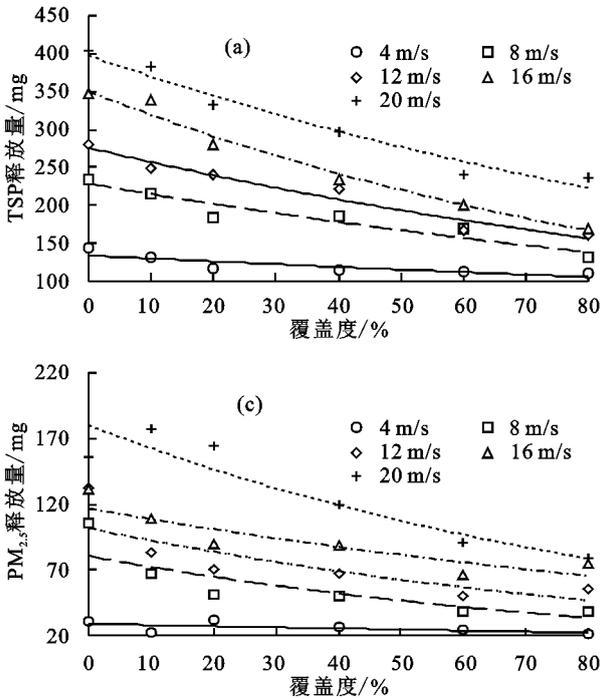


图 4 不同风速下 TSP、PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ 含量随覆盖度的变化

表 4 不同风速下 TSP 释放量随覆盖度变化的拟合曲线

风速/ (m · s ⁻¹)	拟合方程	判定 系数 R ²
4	$q = 97.47e^{-0.007f}$	0.9575
8	$q = 350.26e^{-0.009f}$	0.9852
12	$q = 276.02e^{-0.007f}$	0.9558
16	$q = 228.75e^{-0.006f}$	0.9031
20	$q = 133.73e^{-0.003f}$	0.9167

注: q 为粉尘释放量 (mg); f 为覆盖度 (%)。

从图 5 可以看出,随着风速的增加,总的颗粒物占比呈下降趋势,以覆盖度为 60% 为例,风速从 4 m/s 增至 20 m/s 的过程中,TSP、PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ 4 种颗粒物在风蚀物中的占比依次为 42.52%, 32.84%, 23.25%, 14.40%, 8.41%。图 5 中折线呈现出先增长而后增速放缓的趋势,覆盖度 60% 是明显的转折点,此时颗粒物在扬尘中的比例基本达到最大值,继续增加覆盖度,颗粒物在风蚀物中的占比变化不明显。

3 讨论

本研究结果可知,风蚀速率随风速增加而增大,进一步分析可得,图 1 中 A、B1、B2、B3、B4、B5 5 种处理下风速与风蚀速率之间拟合曲线的判定系数分别为 0.969 1, 0.975 1, 0.958 6, 0.974 3, 0.998 9, 0.990 7, 表明二者呈现极显著的指数函数关系,这与王仁德等^[16]在北京郊区对农田风蚀的研究结论一致。对于风速与风蚀速率的关系也有学者得到不同的结论,如刘铁军等^[17]在风洞模拟试验中得出风蚀速率与风速

呈幂函数关系。本试验中风速达到 12 m/s 时,风蚀速率具有明显的转折点,赵云^[18]在探究保护性耕作措施对农田风蚀的试验中也得到风速在 12.5 m/s 时风蚀量突然增加的结果。在风蚀速率与覆盖度的研究中发现,风速较低时 (<12 m/s),覆盖度在 20% 能达到较好的防风蚀效果,这与林艺等^[19]在东北黑土区对农田土壤风蚀的研究结果一致;风速 >16 m/s 时秸秆覆盖度需达到 40% 才能明显降低风蚀速率,这与孙悦超等^[20]的研究结果接近,即农田覆盖度在 50% 时能达到良好的防风蚀效果。

不同风速和秸秆覆盖度下,裸地的细颗粒物释放能力最强,这与土样的粒径组成密切相关,传统耕地土样中粉粒占 60.69%,极细沙粒 26.85%,细砂粒占 9.14%,而覆盖地中粉粒、极细沙粒、细砂粒分别占 49.21%, 31.47%, 14.56%,这可能是裸地比覆盖地风蚀速率更大的原因之一。辜艳丹^[21]在干旱半干旱地区土壤粉尘释放的研究中认为,随风速的增大,植被覆盖、土壤含水率等因素对细颗粒物的释放影响越来越小,质地不同但团粒分布相似的样品在地表摩阻风速达到 1.4 m/s 后粉尘释放通量很难找出差异,这与本文的研究结果相似,试样 A 和 B1 及 B4 和 B5 随风速的增大颗粒物释放能力逐渐接近,这是因为细颗粒物的释放是在跃移颗粒的动能足以抵消细颗粒物之间的结合力时发生的,而秸秆覆盖通过减小试样与气流的接触面积,以及增加接触面粗糙度来降低风速,

B1 试样覆盖度较低,大风可以提供足够的动能释放颗粒物,因此试样 A 和 B1 在风速较大时的细颗粒物释放量呈现接近趋势;试样 B4、B5 由于秸秆覆盖度大,试验中的风速不足以为细颗粒物提供足够的能量脱离土壤微团颗粒体,因此两者的释放量随风速变化时也很接近,可以预见,如果风速足够大,PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ 在各覆盖度下的释放量将会更加接近。有学者在研究细颗粒物释放时认为 PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ 的释放量除了在量级上的差异,变化规律基本相同,如王雅倩^[22]在研究裸露农田土壤的起尘规律中,得到 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的变化规律与本试验结果类似。

表 5 不同覆盖度和风速条件下扬尘在风蚀物中的占比变化

覆盖度/ %	风速/ (m·s ⁻¹)	TSP/ %	PM ₁₀ / %	PM _{2.5} / %	PM ₁ / %	总值/ %
0	4	4.68	3.61	2.12	1.23	11.64
	8	4.13	2.32	0.87	0.45	7.77
	12	3.41	2.59	1.62	1.22	8.84
	16	1.74	1.05	0.66	0.38	3.83
	20	0.90	0.57	0.35	0.27	2.09
10	4	6.53	3.57	1.13	0.52	11.75
	8	6.16	3.84	1.92	1.15	13.07
	12	4.99	3.24	1.67	1.00	10.90
	16	2.42	1.59	0.78	0.47	5.26
	20	1.82	1.15	0.84	0.64	4.45
20	4	9.23	5.60	2.57	1.46	18.86
	8	7.73	4.54	2.11	1.32	15.70
	12	6.86	4.23	2.01	1.11	14.21
	16	2.55	1.63	0.81	0.49	5.48
	20	1.90	1.34	0.94	0.69	4.87
40	4	12.40	7.61	3.33	1.91	25.25
	8	11.43	6.51	2.59	1.46	21.99
	12	8.83	5.44	2.68	1.62	18.57
	16	3.35	2.18	1.27	0.77	7.57
	20	2.69	1.80	1.09	0.70	6.28
60	4	22.37	12.67	4.83	2.65	42.52
	8	16.98	10.10	3.86	1.90	32.84
	12	11.15	6.99	3.35	1.76	23.25
	16	6.68	4.32	2.20	1.20	14.40
	20	3.70	2.45	1.40	0.86	8.41
80	4	22.00	12.62	4.21	2.20	41.03
	8	13.04	8.24	3.85	2.21	27.34
	12	10.72	6.91	3.66	2.20	23.49
	16	5.66	4.02	2.47	1.54	13.69
	20	3.64	2.41	1.22	0.63	7.90

王仁德等^[23]在宁夏农田土壤粉尘释放的研究中发现,风蚀物中粗颗粒物的跃移流量相对于细颗粒物的释放量而言随风速增加的更快,这与本研究中同一覆盖度下细颗粒物在风蚀物中的占比随风速增大而降低的结果一致;南岭等^[9]也认为,土壤中细颗粒物的释放比粗颗粒的跃移和蠕移更容易发生。王仁德等^[23]在研究中还对比了 10, 20, 50 μm 的释尘在风蚀物中的占比,得出的结论与本研究中同一覆盖度下

TSP、PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ 4 种细颗粒物随风速变化的趋势一致。结果与分析中覆盖度达到 60% 以后再增加覆盖度,颗粒物在风蚀物中的占比呈降低趋势,这可能是因为覆盖度过高限制了风蚀,打乱了颗粒物在风蚀中的占比随覆盖度的变化规律。

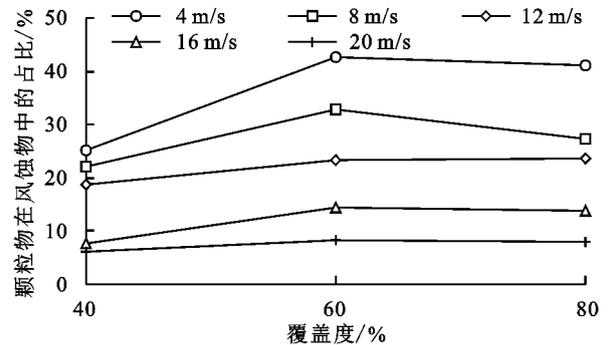


图 5 60%~80%覆盖度下颗粒物在风蚀物中的占比

4 结论

(1) 秸秆覆盖可以有效防治农田土壤风蚀,风蚀速率与风速之间呈近似指数函数关系,当风速 < 12 m/s 时,秸秆覆盖度达到 20% 能显著降低风蚀速率,但当风速 > 16 m/s 时,秸秆覆盖度需达到 40% 才能达到理想的防风蚀效果。通过保护性耕作措施减轻北京周边农田土壤风蚀,将秸秆覆盖度控制在 40% 左右能达到有效降低风速,防止农田土壤养分流失的目的。

(2) TSP、PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ 4 种细颗粒物的释放量与风速呈正指数函数关系,随风速的增加,4 种细颗粒物的释放能力 A > B1 > B2 > B3 > B4 > B5,当覆盖度 < 10% 或 > 60% 时,细颗粒物的释放量随风速增大差异逐渐减小;细颗粒物的释放量与覆盖度呈负指数关系,颗粒物粒径越小对覆盖度的变化越不敏感,覆盖度达 60% 以上时,细颗粒物的释放量基本达到稳定值。

(3) 4 种颗粒物在风蚀物中含量为 TSP > PM₁₀ > PM_{2.5} > PM₁,细颗粒物在风蚀物中的占比随风速的增加更多粗颗粒被启动而降低,在覆盖度 60% 时基本达到最大值。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 董治宝, 董光荣, 陈广庭. 以北方旱作农田为重点开展我国的土壤风蚀研究[J]. 干旱区资源与环境, 1996, 10(2): 31-37.
- [3] 赵海鹏, 宋宏权, 刘鹏飞, 等. 1980—2015 年风蚀影响下中国北方土壤有机质与养分流失时空特征[J]. 地理研究, 2019, 38(11): 1-12.
- [4] 苑依笑, 王仁德, 常春平, 等. 风蚀作用下农田土壤细颗粒的粒度损失特征及其对土壤性质影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(2): 104-109, 119.

- 松林枯落物持水能力及水质的影响[J].东北林业大学学报,2015,43(8):46-49,70.
- [16] 赵鸿雁,吴钦孝,刘国彬.黄土高原人工油松林水文生态效应[J].生态学报,2003,23(2):376-379.
- [17] 李超,董希斌,宋启亮.大兴安岭白桦低质林皆伐改造后枯落物水文效应[J].东北林业大学学报,2013,41(10):23-27.
- [18] 饶良懿,朱金兆,毕华兴.重庆四面山森林枯落物和土壤水文效应[J].北京林业大学学报,2005,27(1):33-37.
- [19] 程金花,张洪江,余新晓,等.贡嘎山冷杉纯林地被物及土壤持水特性[J].北京林业大学学报,2002,24(3):45-49.
- [20] 张君玉,程金花,张洪江,等.晋西黄土丘陵区 3 个树种人工林枯落物的持水特性[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2012,40(10):69-74,81.
- [21] 庞梦丽,朱辰光,翟博超,等.河北省太行山区 3 种人工水土保持林枯落物及土壤水文效应[J].水土保持通报,2017,37(1):51-56.
- [22] 胡晓聪,黄乾亮,金亮.西双版纳热带山地雨林枯落物及其土壤水文功能[J].应用生态学报,2017,28(1):55-63.
- [23] Qi F, Zhang R H, Liu X, et al. Soil particle size distribution characteristics of different land-use types in the Funiu mountainous region [J]. Soil and Tillage Research,2018,184:45-51.
- [24] 惠淑荣,秦莹,刘强,等.辽东地区日本落叶松人工林凋落物层的持水性能研究[J].沈阳农业大学学报,2011,42(3):311-315.
- [25] 侯瑞萍,张克斌,郝智如.造林密度对樟子松人工林枯落物和土壤持水能力的影响[J].生态环境学报,2015,24(4):624-630.
- [26] 周志立,张丽玮,陈倩,等.木兰围场 3 种典型林分枯落物及土壤持水能力[J].水土保持学报,2015,29(1):207-213.
- [27] Zhao Y, Feng Q, Yang H D. Soil salinity distribution and its relationship with soil particle size in the lower reaches of Heihe River, Northwestern China[J]. Environmental Earth Sciences,2016,75(9):810.
- [28] 吴晓光,姚云峰,迟文峰,等.1990—2015 年内蒙古高原土壤风蚀时空差异特征分析[J].中国农业大学学报,2020,25(3):117-127.
- [29] 魏雅丽,贺玉晓,金杰,等.元谋干热河谷典型植被枯落物持水能力研究[J].干旱区资源与环境,2014,28(3):181-186.
- [30] 卢振启,黄秋嫻,杨新兵.河北雾灵山不同海拔油松人工林枯落物及土壤水文效应研究[J].水土保持学报,2014,28(1):112-116.
- [31] Du S, Yamanaka N, Yamamoto F, et al. The effect of climate on radial growth of *Quercus liaotungensis* forest trees in Loess Plateau, China[J]. Dendrochronologia,2007,25(01):29-36.
- [32] 赵赫然,王辉,黄蓉.华家岭防护林带土壤理化特性研究[J].干旱区资源与环境,2014,28(11):139-144.

(上接第 136 页)

- [5] 陈波,李少宁,鲁绍伟,等.北京大兴南海子公园 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度变化特征[J].生态科学,2016,35(2):104-110.
- [6] Bullard J E, McTainsh G H, Pudmenzky C. Aeolian abrasion and modes of fine particle production from natural red dune sands: An experimental study[J]. Sedimentology,2004,51(5):1103-1125.
- [7] Shao Y. A model for mineral dust emission[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2001, 106 (17): 20239-20254.
- [8] 梅凡民,张小曳,鹿化煌,等.若干风蚀粉尘释放模型述评[J].中国沙漠,2004,24(6):791-797.
- [9] 南岭,董治宝.西部地区沙产业发展探讨[J].现代农业科技,2016(23):267-268.
- [10] 朱升贺.农田地表粉尘释放特征野外实验研究[D].兰州:兰州大学,2018.
- [11] 庄国顺,郭敬华,袁蕙,等.2000 年我国沙尘暴的组成、来源、粒径分布及其对全球环境的影响[J].科学通报,2001,46(3):191-197.
- [12] 孙悦超,麻硕士,陈智.保护性耕作农田和柠条带状配置草地防风蚀效果的风洞测试[J].农业工程学报,2017,33(11):140-146.
- [13] 赵永来,麻硕士,陈智,等.保护性耕作农田对近地表风速阻挡效果分析[J].农业工程学报,2011,27(10):33-38.
- [14] 赵永来,陈智,孙悦超,等.作物残茬覆盖农田地表土壤抗风蚀效应试验[J].农业机械学报,2011,42(6):38-42,37.
- [15] 范清成,王飞,穆兴民,等.保护性耕作对土壤风蚀的影响[J].中国水土保持科学,2011,9(3):1-5.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 赵云.黄土区保护性耕作防土壤风蚀的风洞模拟实验研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2013.
- [19] 林艺,李和平,肖波.东北黑土区农田土壤风蚀的影响因素及其数量关系[J].水土保持学报,2017,31(4):44-50.
- [20] 孙悦超,麻硕士,陈智,等.保护性耕作农田抗风蚀效应多因素回归分析[J].农业工程学报,2010,26(10):151-155.
- [21] 辜艳丹.干旱半干旱地区土壤的粉尘释放研究[D].兰州:兰州大学,2009.
- [22] 王雅倩.基于风洞实验的裸露农田土壤 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 起尘特征研究[D].天津:天津师范大学,2019.
- [23] 王仁德,邹学勇,赵婧妍.半湿润地区农田土壤粉尘释放的风洞模拟研究[J].地理科学,2012,32(11):1364-1369.