

宁夏农田土壤粉尘释放过程试验研究

南岭^{1,2}, 肖锋军¹, 董治宝^{1,3}

(1. 陕西师范大学旅游与环境学院, 西安 710062; 2. 宁夏大学西部发展研究中心, 银川 750021;
3. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所沙漠与沙漠化重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 为揭示农田土壤风蚀引起的粉尘释放特征, 以宁夏 4 种农田土壤为研究对象, 通过室内风洞模拟试验的方式, 对试验中粉尘释放进入气流的 PM₁₀ 进行实时监测, 以 PM₁₀ 浓度和 PM₁₀ 通量为指标分析了风速对粉尘释放的影响, 对比了不同土壤的粉尘释放能力。结果表明: 农田土壤风蚀中的粉尘释放具有瞬时性特征; 各土样的累积最大 PM₁₀ 通量随风速的变化趋势差异较大, 土样 PL 在风速 6~9 m/s 时引起的最大 PM₁₀ 通量变化最大, 土样 TX 和 YC 在风速 15~18 m/s 时引起最大 PM₁₀ 通量变化最大; 各土样的累积平均 PM₁₀ 通量随风速的变化趋势一致, 呈二次函数增大; 平均粉尘通量和风蚀量之间呈对数函数关系; 在研究所选 4 种宁夏农田土壤中, 粉尘释放能力在风速达到 9 m/s 后表现出一致且明显的差异, 从大到小依次为 PL>TX>YC>YN。

关键词: 农田土壤; 风蚀; 粉尘释放; PM₁₀

中图分类号: P951; S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2016)05-0135-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2016.05.023

An Experimental Study of Dust Emission Process on Cultivated Soils in Ningxia

NAN Ling^{1,2}, XIAO Fengjun¹, DONG Zhibao^{1,3}

(1. College of Tourism and Environment Sciences, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062; 2. Research Center for Western Development, Ningxia University, Yinchuan 750021; 3. Key Laboratory of Desert and Desertification, Cold and Arid Regions Environment and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

Abstract: To reveal the characteristics of dust emission caused by wind erosion of soil in the cultivated land, an indoor simulated wind tunnel experiment was conducted. In this study, we used soils sampled from the different cultivated land in the northern and middle Ningxia Autonomous Region to investigate the effect of wind speed on the dust emission. The PM₁₀ concentration was monitored and then the PM₁₀ flux was calculated basing on the concentration to compare capability of dust emission. The results showed that dust emission in the cultivated land was a instantaneous process which completed as soon as soil exposed to the wind. The trend of accumulated max PM₁₀ flux was complicated since the largest increase of PM₁₀ flux of PL occurred when the wind speed increased from 6 m/s to 9 m/s, while the largest increase of PM₁₀ flux of TX and YC occurs when the wind speed increased from 15 m/s to 18 m/s. The accumulated average PM₁₀ flux of every soil increased with wind speed in a similar trend which are quadratic functions. There was a logarithmic regression between average PM₁₀ flux and amount of wind erosion. The capability to dust emit of four soils listed in the order of PL>TX>YC>YN when the wind speed higher than 9 m/s.

Keywords: cultivated soil; wind erosion; dust emission; PM₁₀

土壤风蚀是导致干旱、半干旱地区土地退化和土地荒漠化进程最重要最直接的作用过程之一,也是很多国家面临的严重环境问题和全球环境问题的一个重要组成部分。我国风蚀总面积达 195.70 万 km², 占国土总面积的 20.6%, 且集中分布在北方, 其中以旱作农田风蚀最为严重^[1]。我国每年因风蚀损失土壤有机质、氮素和磷素达到 5.59×10⁷ t, 折合化肥约 2.68×10⁸ t^[2]。此外,

农田还是我国北方沙尘暴的重要尘源^[3]。

在风蚀过程中, 粉尘占总侵蚀量的 3%~40%, 但搬运的高度最高、距离最远, 是沙尘暴的主要构成部分。由于比较细小的土壤颗粒通常含较多的有机质和营养物质, 所以粉尘释放造成土壤有机质和植物营养物质的损失。土壤质地、土壤类型、土壤表面特征(植被覆盖、岩石、结皮等)等地表状况对粉尘释放

收稿日期: 2016-04-08

资助项目: 宁夏高等学校科学技术研究项目(NGY2013024); 国家自然科学基金项目(41401310)

第一作者: 南岭(1983—), 男, 甘肃西和人, 博士后, 助理研究员, 主要从事土壤风蚀与荒漠化研究。E-mail: nanling83@126.com

通信作者: 董治宝(1966—), 男, 陕西横山人, 博士, 教授, 主要从事风沙物理学方面的研究。E-mail: zbdong@lzb.ac.cn

有很大的影响^[4-5],这些地表状况控制风蚀的启动和粉尘释放的强度,地表状况通常通过粉尘释放的临界启动风速在粉尘释放模型中得以反映。由于粉尘颗粒的粒径很小,他们之间存在很强的粒间结合力,使其很难松散的存在于土壤之中。因此,粉尘颗粒的存在形式主要有 2 种:一种是包裹在粒径较大的土壤颗粒上(如沙粒)作为外衣的形式存在^[6],另一种是聚集在一起形成粒径在大约 20~300 μm 之间的土壤团粒^[7-8]。在自然界中,粉尘释放主要有 3 个独特的模式:(a)直接空气动力提升;(b)跃移沙粒冲击地表使粉尘颗粒从土壤团粒中释放出来;(c)土壤团粒在进行跃移运动时,由于冲击作用自身破碎从而释放出粉尘颗粒^[7-8]。其中(b)和(c)两个模式都是由土壤中的跃移颗粒引起的跃移轰击的结果。无论粉尘团粒自身跃移还是被跃移颗粒冲击从而释放出粉尘的过程都被称作沙爆^[8]。梅凡民等^[5]推断使不同粒径范围粉尘颗粒粘结到一起的结合能随粒度分布的变化规律不一样。在风蚀过程中,不同粒径土壤颗粒的风蚀质量通量随高度的变化表现出不一样的规律,沙粒的通量廓线呈指数函数^[9],而粉粒的通量廓线呈现三次幂函数的曲线形式^[10]。目前针对风蚀的相关研究中,基本上都以发生跃移的沙粒和粉粒等为主要部分的总风蚀通量为指标,而对风蚀所释放的粉尘的研究还有待深入,特别是对这一过程中粉尘浓度或粉尘通量动态变化的关注远远不够。

本研究针对宁夏北部的平罗、永宁和中部的同心、盐池 4 地的典型农田土壤,利用不同风速下的风

洞模拟试验,通过对 PM_{10} 的监测和分析,研究农田土壤风蚀过程中粉尘释放的规律及其动态变化特征,评价 4 种土壤的粉尘释放能力。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

宁夏回族自治区深居西北内陆高原,属典型的大陆性半干旱气候,雨季多集中在 6—9 月,具有冬寒长,夏暑短,雨雪稀少,气候干燥,风大沙多的特点。夏季基本没有酷暑;1 月平均气温在 $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,极端低温在 $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下。宁夏北部银川平原地势平坦,土层深厚,黄河斜贯其间,引水方便,利于自流灌溉,人们利用其优越的农业生产条件,建成引黄灌区,自古以来是宁夏农业生产的精华地带。宁夏中部干旱带在地形上表现为黄土高原向鄂尔多斯台地过渡。该区地处水蚀风蚀交错区,冬春季多干旱,土壤结构松散,沙粒含量大,植被覆盖度低,土地沙化严重。

1.2 试验土样采集

2016 年 1 月 22—27 日选择宁夏回族自治区北部银川平原的平罗县、永宁县和中部干旱带的同心县、盐池县的典型农田采集试验土样(表 1)。采用自制的试验土槽取原状土样,当时土壤处于冻结状态,便于取得原状土样,土样长度 50 cm,宽 20 cm,厚 5 cm。同时在相同位置另外采样,用马尔文激光粒度仪进行粒度分析。采集的原状土样置于样品箱内运回实验室,在室内条件下进行解冻,经一个月风干后供风洞模拟试验测试。

表 1 试验土样基本特征

编号	位置	采样点 经纬度	风干 含水量/%	土样 重量/g	土壤颗粒组成/%				
					<0.002 mm	0.002~0.05 mm	0.05~0.25 mm	0.25~1 mm	1~2 mm
PL	平罗县	38.855214N,106.500822E	1.1	5199	23.53	49.23	22.74	3.48	1.02
YN	永宁县	38.243181N,106.102744E	1.9	4012	28.79	45.04	16.21	6.79	3.17
TX	同心县	37.059046N,105.832671E	0.9	4902	11.05	61.42	25.47	2.06	0
YC	盐池县	37.872235N,107.182930E	0.9	4279	3.01	32.05	43.17	19.29	2.48

1.3 试验设备

1.3.1 风洞 土壤风蚀风洞模拟试验利用陕西师范大学旅游与环境学院环境动力学实验室风洞完成,该风洞为直流闭口吹气式低速风洞,风洞总体长度为 20 m。试验段横截面积 50 cm(宽)×60 cm(高),长度为 10 m,为铝合金框架嵌套钢化玻璃,便于肉眼观测和仪器观测;风洞试验段的风速为 3~35 m/s 连续可调。

1.3.2 粉尘仪 本研究使用 DUSTTRAK 8533 粉尘仪监测风蚀模拟试验中的粉尘浓度。DUSTTRAK 8533 使用电池供电,自动记录数据资料,光散射激光光度计可以实现实时读取粉尘的质量浓度。DUSTTRAK 8533 使用特有的鞘气系统隔离了气溶胶和光学室,这样保证了光学元件的清洁,延长了其寿命。DUSTTRAK 8533 粉尘监测仪采用的激光光

度计可以同时测量 5 个不同粒径段的质量浓度分布,分别对应 PM_1 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_4 、 PM_{10} 和总 PM (<15 μm)。该设备监测的粉尘浓度范围为 0.001~150 mg/m^3 ,监测时间间隔 1~60 s 可调,采样流量 3.0 L/min。本研究中时间间隔设置为 1 s,粉尘通道选择为 PM_{10} 进行分析。

1.4 试验方法

本研究风蚀风洞模拟试验 2016 年 2 月 29 日进行,所有试验总共耗时近 8 h,在 1 天内完成。试验风速(试验段 3 m 处 30 cm 高度测得的进场风速)共设置了 3,6,9,12,15,18 m/s 共 6 组风速,根据从小到大的顺序依次分别对 4 个土样进行吹蚀,每组试验持续吹蚀时间均为 10 min。试验开始前,先将土样连同土槽利用电子秤称重(电子秤量程为 0.01 g~30

kg),然后放入风洞试验段5 m处中轴位置;一组试验完成后,将试验土槽整体取出,再一次在电子称上称重,然后放回风洞。粉尘监测点设置于土样下风方向3 m处,高度20 cm,采用取样软管连接至风洞外部的粉尘仪。土样放置到风洞内后先用盖板盖住,在开启风洞后调节风洞风速达到预定风速后,首先开启粉尘监测仪,随后从试验段顶部开口迅速移走土样盖板,使土样暴露于预定风速发生侵蚀和粉尘释放。

2 结果与分析

2.1 粉尘释放过程动态特征

在本试验中设定的最低风速(3 m/s),所有被试土样均未发生明显的粉尘释放。在风速更大时(≥ 6 m/s),开始发生粉尘释放。通过对试验中 PM_{10} 浓度的分析发现,土壤暴露于一定速度以上的气流之后, PM_{10} 浓度即刻升高到明显突出的峰值,之后又迅速降低至接近于背景值的水平,随后以一个很小的波动范围保持在这一水平,直到试验结束。以土样TX为例(图1),风速为3 m/s时,没有出现明显的突出值;风速增大到6 m/s时, PM_{10} 浓度开始出现明显的突出值,但超过 0.1 mg/m^3 的突出值仅维持了3 s ($0.497, 0.474, 0.2 \text{ mg/m}^3$);9 m/s时超过 0.1 mg/m^3 的突出值则共维持4 s;12 m/s时超过 0.1 mg/m^3 的突出值维持3 s,风速15 m/s时维持4 s,风速18 m/s时维持4 s。整个试验过程持续10 min, PM_{10} 浓度的突出值仅仅出现在土壤暴露于气流之后数秒之内,这说明粉尘释放是瞬间完成的。本试验中的其他土样(PL、YN、YC), PM_{10} 浓度的变化曲线表现出相同的变化模式,都是迅速上升,接着迅速下降,未出现某一风速时粉尘浓度在较高水平持续一段时间的现象。 PM_{10} 浓度的上述变化模式,说明土壤风蚀引起的粉尘释放过程具有瞬时性,并不是一个持续的过程。

粉尘释放的瞬时性特征,应该是由于粉尘释放过程农田土壤表面的粉尘物源有限造成的。当土壤暴露于气流作用下时,能被当前气流移动的粉尘颗粒立刻受力进入气流,土壤表面当前风速下的可释放粉尘迅速枯竭,进而使粉尘浓度下降。但每一级风速的气流又不足以使土壤表面的粉尘全部被侵蚀造成粉尘

释放,所以不同风速都会产生粉尘释放,但持续时间都极为短暂。这说明尽管 PM_{10} 的粒径范围很小($\leq 10 \mu\text{m}$),但粉尘颗粒之间的结合强度还有着较大的差异,使其从土壤表面脱离需要不同的气流剪切力,最终表现为不同的试验风速都会有 PM_{10} 释放,而不同结合强度的粉尘颗粒量取决于土壤理化性质。图1中不同风速下 PM_{10} 浓度曲线峰值之间的差异正是上述原因在风蚀中作用的结果。

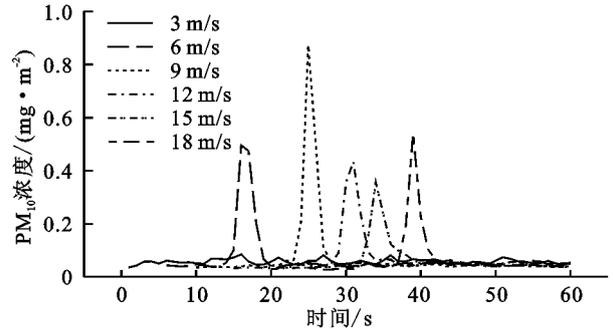


图1 土样TX在不同风速下的 PM_{10} 浓度变化曲线

2.2 风速对粉尘释放的影响

将试验中粉尘仪监测到的 PM_{10} 浓度与风速相乘得到 PM_{10} 通量。本试验中模拟吹蚀是对同一土样由设定风速从小到大依次吹蚀,所以各风速下的 PM_{10} 通量由当前风速得到的 PM_{10} 通量和之前风速的 PM_{10} 通量累加得到。各土样在粉尘释放过程都具有瞬时性的相似特征,但试验过程中的 PM_{10} 通量的平均值、最大值等统计参数存在一定的差异,通过它们可以一定程度上反映不同土壤的粉尘释放特征。

图2a为各土样在不同风速下吹蚀得到的累积最大 PM_{10} 通量。土样PL的累积最大 PM_{10} 通量在风速从6 m/s增大到9 m/s时陡然增大,9 m/s以上风速随风速平稳增大,且远高于其它土样;土样TX产生的累积最大 PM_{10} 通量在9 m/s和18 m/s时的增量明显大于其它风速;土样YC则在18 m/s时累积最大 PM_{10} 通量增量最大,但总体上一直小于土样PL和TX;而土样YN随风速的变化最为平缓。图2b为各土样在不同风速下得到的累积平均 PM_{10} 通量,不同土样之间差异较小,且整体上表现出一致的趋势: PM_{10} 通量随风速的增大增大,呈二次函数关系($R^2 > 0.99$)。

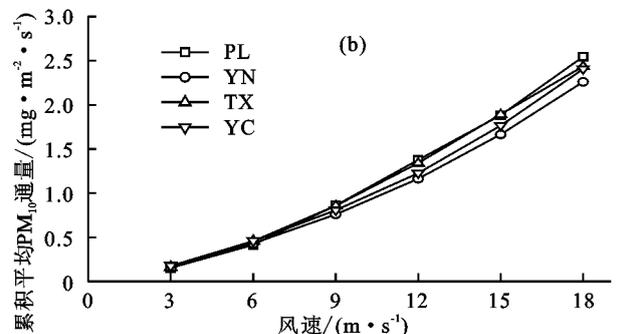
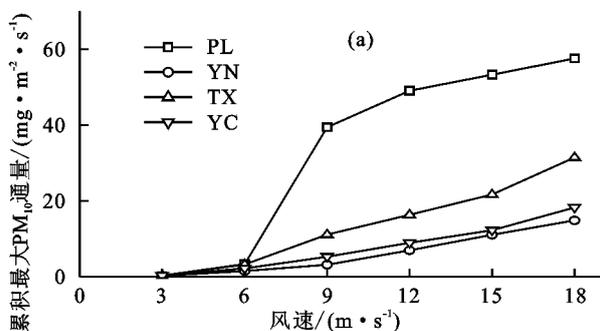


图2 各土样在不同风速下的累积最大 PM_{10} 通量和累积平均 PM_{10} 通量

最大 PM_{10} 通量反映了土壤表面粉尘颗粒对于气流的敏感性,其值越大,说明粉尘颗粒对于气流抬升作用的响应越明显,而平均 PM_{10} 通量反映了整个试验过程中粉尘释放的情况。风蚀发生时表现出一定的时距效应,即随着风蚀时间的持续,有限沙源地表的可风蚀物减少,风蚀强度降低。对于粉尘释放而言,时距效应尤为明显,随着风蚀的发生,粉尘释放量迅速降低到一个相对较低的水平。因此不同土壤之间的最大 PM_{10} 通量差异较大,但平均 PM_{10} 通量之间差异很小,表现出一致的趋势。

2.3 不同土样之间的粉尘释放能力

4 个供试土样在 9 m/s 以上风速时的累积最大 PM_{10} 通量在 9 m/s 以上风速时大小顺序一致,从大到小依次是 $PL > TX > YC > YN$,在 18 m/s 时分别达到 57.576,31.479,18.276,14.886 $mg/(m^2 \cdot s)$;累积平均 PM_{10} 通量顺序在在 9 m/s 以上风速与累积最大 PM_{10} 通量一致,在 18 m/s 时的累积平均 PM_{10} 通量分别为 2.437,2.547,2.262,2.406 $mg/(m^2 \cdot s)$ 。根据以上结果可以判断,4 个土样的粉尘释放能力从大到小依次是 $PL > TX > YC > YN$ 。

从 4 种土样的粒度组成看,土样 PL 和 YN 的粘粒含量最高(表 1),但两者在粉尘释放能力上的表现截然相反。可以推断,较高的粘粒含量提供了高粉尘释放能力的可能性,但是否实现这一可能性最终还取决于耕作制度。土样 YN 采自长期实施水旱轮作耕作制度的农田,在较高的粘粒含量的条件下形成大量的团粒结构,使得土壤表面较少独立存在的土壤颗粒,在风蚀发生时便抑制了粉尘的释放。土样 PL 采自灌溉农田,前期的翻耕在田间形成大量的块状结构,在一定前期含水量的条件下经历冻融过程后,土块表面的颗粒剥离成独立的土壤颗粒,在风蚀发生时成为粉尘释放的来源。土样 TX 和 YC 采自宁夏中部干旱带,粘粒含量低,结构松散,因此二者土壤粒度对粉尘释放能力的决定性作用较大,土样 TX 相对于 YC 较高的粘粒含量可以一定程度上解释其粉尘释放能力大于 YC 的原因。

土壤湿度是影响土壤粉尘释放能力的一个重要因素,4 个供试土样在风干后土壤湿度之间存在着明显的差异(表 1)。但在土样经历风干过程后,这些土壤湿度的差异很可能主要来自于下层土样内部土壤湿度的差异,而土样表面的粉尘颗粒部分的含水量会趋于相同。因此各土样之间土壤湿度对粉尘释放的影响在风蚀模拟试验中趋于一致,但土壤湿度在冻融过程中是影响土壤结构的最重要因子,土样 YN 可能由于其先期土壤湿度有利于形成良好的团粒结构,进而抑制了粉尘的释放;而土样 PL 则可能由于没有达到形成良好结构的先期湿度,加之其本身较高的粘粒含量,在试验中便表现出最高的粉尘释放能力。

2.4 土壤风蚀量与粉尘释放的关系

土壤风蚀量在风速从 3 m/s 增大到 6 m/s 时没有明显的变化,土样 TX 甚至发生减小的情况。在风速增加到 9 m/s 以后,风蚀量开始随着风速增大明显增大(图 3)。通过比较分析风速对风蚀量的影响发现,土样 PL 表现出与其它土样较大的差异。从 2.3 章节可知,土样 PL 具有最大的粉尘释放能力,但其风蚀量随风速增大的程度远远小于其它 3 个土样。特别是出现最大粉尘通量峰值的 9 m/s 风速,土样 PL 的风蚀量不到土样 TX 的 1/2(4 g)。而土样 YN 粉尘释放能力最小,但在风速增大到 18 m/s 后,却产生了最大的风蚀量(97 g)。土样 PL 的特点是由于其同时具有较多的粘粒和块状结构,块状结构增大地表粗糙度,更好地抑制了风蚀中跃移的发生,因此产生的风蚀量不大但粉尘释放能力最强。土样 YN 则存在大量的团粒结构,较难产生粉尘,但当风速增大后,大量的团粒结构颗粒开始发生跃移和蠕移,产生较大的风蚀量。这可能是由于土样 YN 中细小颗粒的缺乏,使得蠕移更容易发生。

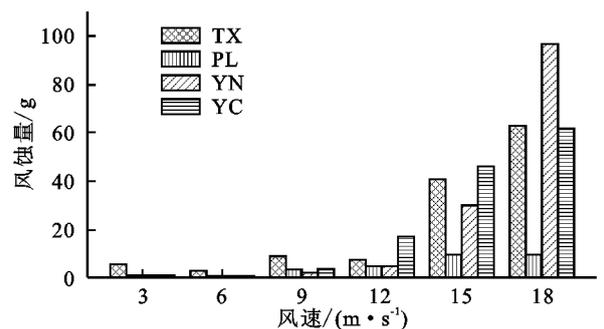


图 3 各土样在不同风速时的风蚀量

对试验中所有风速下的风蚀量和平均 PM_{10} 通量作回归分析,发现平均 PM_{10} 通量和风蚀量之间呈对数函数关系($y=0.2395+0.1994\lg x, R^2=0.6756$)。这说明土壤粉尘释放比风蚀中的跃移和蠕移更容易发生。在较低风速时,首先发生粉尘释放,而土壤颗粒的跃移和蠕移尚未大规模发生。当风速增大后,粉尘的增大程度受到土壤表面粉尘物源的限制,而较大粒径和质量的土壤颗粒在更大风速下移动的更多,引起风蚀量大幅度提高。可以判断,在风速较小时,总侵蚀量中粉尘所占的比例较大;当风速增大时,总侵蚀量中粉尘所占的比例会越来越小。而邢茂等^[10]认为,对于给定的土地地表,不同粒径的粉尘流量和沙粒流量的比与它们在地表的质量比呈正比,比例系数与风速无关。这与本研究的结果矛盾,原因可能是由于其采用的土样是由不同粒径的沙粒和粉粒按不同比例混合而成^[10],土壤颗粒之间没有不同程度的粘结力;而本试验的土样为原状土样,在自然状态下土壤表面的粉尘颗粒之间形成了强弱程度不同的粘结力。

3 讨论

本试验中的土样面积较小(0.1 m^2),相对于野外

实际发生风蚀的面积,可以视为点尺度。农田土壤粉尘释放过程的瞬时性在点尺度上有效,这一特征在更大尺度上有何表现,还有待进一步研究。土壤粉尘释放过程的瞬时性特征证明粉尘释放是受粉尘物源限制的一个过程,因此通过确定土壤表面的粉尘总量可以准确评价土壤的最大粉尘释放能力。然而即使在 PM_{10} 相对较小的粒径范围内($<10\ \mu\text{m}$),粉尘颗粒之间也存在着不同的粘结强度,使得不同风速下粉尘释放通量有着较大的差异。此外风蚀过程中的引起粉尘释放的悬移和形成风蚀量主要部分的跃移不同步,因此评价土壤风蚀可蚀性时应对粉尘的悬移和土壤颗粒的跃移区别对待,分别对其进行更深入的研究,以期更为透彻地认识风蚀过程机理,更准确地评价不同土壤的风蚀可蚀性。

土壤粉尘释放能力可以看作是土壤可蚀性针对土壤风蚀引起的粉尘释放的具体应用,即单位侵蚀风力下风蚀产生的粉尘通量。到目前为止,如何确定单位侵蚀风力尚未明确,在这一背景下可以将土壤粉尘释放能力定义为特定侵蚀风力下土壤风蚀产生的粉尘通量具有一定的现实意义,否则很难对不同研究得到的土壤粉尘释放能力进行比较,例如本试验中对土壤粉尘释放能力的评价是基于 $18\ \text{m/s}$ 以下风速模拟试验的结果。特定侵蚀风力具体设定为何值最为合理,也是一个需要探讨的问题,设定的过高会导致高估土壤粉尘释放能力,设定的过低又不足以反映土壤真实的粉尘释放潜力。

目前一般认为,有3类过程可导致粉尘的释放,即湍流应力对粉尘颗粒的直接抬升、跃移冲击引起土壤团粒的溅射、跃移颗粒的冲击导致粉尘团粒的分离和释放^[4]。崔梦淳等^[11]在利用PI—SWERL研究腾格里沙漠和毛乌素沙地的粉尘释放能力时,对比了不同粉尘释放模式的粉尘浓度变化过程。通过与本试验结果的对比,可以判断本研究中农田土壤的粉尘释放过程为粉尘直接抬升模式。在弱风蚀条件(不发生跃移冲击)下,当以单独颗粒形式存在的粉尘颗粒受到的空气动力大于重力和粘结力时,作为单独颗粒存在的粉尘颗粒被风直接卷入空气中,而附有粉尘颗粒的沙粒和土壤团粒不发生跃移,不产生粉尘释放;在风力增大后,以单独颗粒形式存在的粉尘颗粒消耗殆尽。土壤中的团粒开始发生跃移,但其冲击释放的粉尘有限。所以农田土壤的粉尘释放主要以气流直接抬升作用为主。

4 结论

(1)农田土壤风蚀中的粉尘释放具有瞬时性特征,土壤粉尘释放在土壤暴露于可蚀风速下之后迅速完成,在点尺度上土壤粉尘释放不是一个持续的过程。

(2)累积最大 PM_{10} 通量随风速变化的过程在不

同土壤之间表现出较大的差异。土样PL在风速从 $6\ \text{m/s}$ 增大到 $9\ \text{m/s}$ 时增量远高于其他土样,土样TX和YC在风速从 $15\ \text{m/s}$ 增大到 $18\ \text{m/s}$ 时的增量最大,土样YN的变化最为平缓。各土样累积平均 PM_{10} 通量随风速的变化趋势一致,随风速增大呈二次函数增大。

(3)对本研究中的4种宁夏农田土壤而言,平均 PM_{10} 通量和风蚀量之间呈对数函数关系。这是因为风速增大引起粉尘释放量的增量小于风蚀量的增量,粉尘对风蚀量的贡献在弱风蚀条件下较大,在强风蚀条件下较小。

(4)本研究所选的4种宁夏农田土壤中,粉尘释放能力从大到小依次为 $PL > TX > YC > YN$ 。土壤粒度组成和耕作制度决定农田土壤粉尘释放能力的最重要因素。土样PL由于翻耕形成的土块结构能够降低风蚀量,但具有最高的粉尘释放能力;土样YN中的团粒结构能够有效降低土壤粉尘释放能力,但对于强风蚀条件下土壤跃移和蠕移的控制作用远弱于粉尘释放;土样TX和YC结构松散,其粉尘释放能力主要由土壤粒度组成决定。

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] 罗万银,董治宝. 风蚀对土壤养分及碳循环影响的研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 2005, 24(4):75-83.
- [3] 李锋. 沙尘暴物质来源的研究进展综述[J]. 林业资源管理, 2009(1):101-106.
- [4] Shao Y, Lu H. A simple expression for wind erosion threshold friction velocity[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2000, 105(17):22437-22443.
- [5] 梅凡民,张小曳,鹿化煜,等. 若干风蚀粉尘释放模型述评[J]. 中国沙漠, 2004, 24(6):791-797.
- [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] Shao Y. Physics and modelling of wind erosion[M]. 2th revised and expanded edition. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2008:57-68.
- [9] Dong Z, Liu X, Wang H, et al. The flux profile of a blowing sand cloud: a wind tunnel investigation[J]. Geomorphology, 2003, 49(3):219-230.
- [10] 邢茂,郭烈锦. 土壤风蚀中粉尘释放规律研究[J]. 中国科学:G辑, 2008, 38(8):984-998.
- [11] 崔梦淳,鹿化煜,冯晗,等. 便携式粉尘观测仪测定腾格里沙漠和毛乌素沙地 PM_{10} 释放通量[J]. 科学通报, 2015, 60(17):1621-1630.