

# 半湿润地区农田土壤粉尘释放的风洞模拟研究

王仁德<sup>1,2,3</sup>, 邹学勇<sup>2,3</sup>, 赵婧妍<sup>2,3</sup>

(1.河北省科学院地理科学研究所, 河北 石家庄 050011; 2.北京师范大学地表过程与资源生态  
国家重点实验室, 北京 100875; 3.北京师范大学中国沙漠研究中心, 北京 100875)

**摘要:**采用风洞模拟手段对地处半湿润区的北京市农田土壤风蚀中的粉尘释放规律进行研究。结果表明,研究区农田粉尘释放强度随风速增大呈指数规律增大,粉尘在风蚀物的含量随风速增大呈指数规律降低。近地表粉尘质量流量随高度增加呈幂函数规律降低,在风蚀物中的含量随高度增加呈线性增大。粉尘粒径随风速增大而变粗,之后达到稳定状态。近地表粉尘粒度组成沿垂直方向的变化可以划分为两段,0~20 cm高度层的双峰态分布和20~60 cm高度层的三峰态分布。随着高度增加,释尘粒度组成变细。

**关键词:**土壤风蚀; 农田粉尘释放; 风洞模拟; 半湿润区

**中图分类号:** S157.1      **文章标识码:** A      **文章编号:** 1000-0690(2012)11-1364-06

土壤风蚀释放的粉尘是大气气溶胶的主要成分之一<sup>[1]</sup>,空气中的悬浮颗粒物(TSP)80%以上来源于自然地面的排放,人类活动的直接贡献很小<sup>[2]</sup>。这些悬浮的粉尘在大气物理和大气化学过程以及全球气候和生态系统中扮演着重要的角色<sup>[3]</sup>。干旱与半干旱地区的土壤风蚀和粉尘释放可以酿成严重的自然灾害,导致沙漠化、土地退化和沙尘暴的发生,影响国民经济发展、生产建设、生活环境质量甚至威胁到人们的生存<sup>[4]</sup>。由于粉尘颗粒运动距离长,影响范围大,对环境的危害也相对较大,因此土壤风蚀过程中粉尘颗粒的释放规律和机理是重要的研究内容<sup>[5]</sup>。

国内外学者通过野外观测试验和室内风洞实验对粉尘释放问题进行了较多研究<sup>[6,7]</sup>,提出粉尘释放的动力机制主要是跃移颗粒的冲击作用,并发展了一些半经验的模型用以计算粉尘释放流量<sup>[8]</sup>。这些模型在沙尘天气预报和全球粉尘循环中有广泛的应用。但由于目前对粉尘释放的物理机理和规律了解还不深,这些模型都难尽其全,或者比较简单,缺少对粉尘释放微观机制的描述,或者过于复杂,相关参数难以获得,应用十分不便。近几年,

有学者引入国外已建立的粉尘释放模型估算中国北方地区的粉尘释放量<sup>[9-12]</sup>。但由于中国各地自然环境差异很大,不同地区粉尘释放特征和模型参数不尽相同,引入模型的应用受到很大局限。因此,迫切需要加强对中国粉尘释放问题的研究,掌握各类沙尘源的粉尘释放特征,建立基于中国自然环境的粉尘释放模型。在野外调查、观测和采样的基础上,本研究采用风洞模拟手段,设计电镜拍照和软件分析的方法,对地处半湿润区的北京市农田土壤风蚀中的粉尘释放规律进行研究,揭示该地区农田风蚀中粉尘颗粒的运动规律,探索区域性粉尘释放模型的建立方法。

## 1 实验装置和方法

### 1.1 实验设备

风洞模拟实验在北京师范大学风沙环境与工程实验室风洞中进行。该风洞为直流吹气式风洞,长度66.6 m,其中实验段长24 m,正常实验截面(宽×高)3 m×2 m。实验轴心风速2~45 m/s连续可调。风洞实验段底板有风蚀槽预留开口,长1.5 m、宽0.45 m,下部有可自由升降的操作平台承载

**收稿日期:** 2011-12-22; **修订日期:** 2012-02-10

**基金项目:** 国家自然科学基金青年项目(41101251)、国家自然科学基金面上项目(40971011)、河北省科学院博士基金项目(2012045337-1)资助。

**作者简介:** 王仁德(1980-),男,河北黄骅人,博士,助理研究员,主要从事土壤风蚀与风沙灾害防治方面的研究。Email: wangrendel0@163.com

风蚀土样。在风蚀槽上风向 1.5 m 处安装有风速廓线仪,可同时测定风洞底板以上 0.5、1、3、5、7、10、15、20、25、30、40、50、60、80 和 100 cm 15 个高度的风速。风蚀物采集使用的是北京市防沙治沙工程技术中心研制的新型平口式集沙仪。该仪器总高度 85 cm,沙尘采集高度 60 cm,采集梯度为 30 个连续的 2 cm×2 cm 进沙口,采集效率> 80%。

1.2 实验步骤和方法

实验所用风蚀土样是在京郊翻耕农田利用长 80 cm、宽 35 cm、高 20 cm 的土壤盒采集的原状土。土壤类型为潮土,质地较细,粉砂和粘土含量占 80%以上(表 1),在北京市平原区具有较好的代表性。实验开始前,先将样品连同土壤盒利用电子秤称重(电子秤量程为 1 g~150 kg),然后放入风洞实验段的风蚀槽内。实验按照风速由小到大的次序进行,包括 4、6、8、10、12 和 14 m/s 6 组风速,其中 4 和 6 m/s 风速持续时间为 30 min,8 和 10 m/s 风速持续时间为 20 min,12 和 14 m/s 风速持续时间为 10 min。一组实验完成后,将风蚀原状土取出,再一次在电子称上称重,然后放回实验平台。亦将集沙仪取出,放置新的集沙仪。为保证实验数据的准确性,重复上述实验一次。

1.3 粒度分析

由于所收集风蚀物粒径比较细而量很少,无法满足常规粒度测试方法要求,设计使用日本日立高新技术株式会社生产的 S-4800 冷场发射扫描电子显微镜对放大 200 倍后的风蚀物颗粒进行拍照,使用 MiVnt 图像分析软件系统对照片上所有颗粒的当量圆直径和体积等几何参数进行统计分析。每一高度统计样品颗粒数均在 2 000 个以上,保证结果的准确性。

2 结果与分析

2.1 粉尘粒径的确定

目前学术界对于土壤风蚀中释放粉尘的粒径没有明确界定。有研究表明<sup>[13]</sup>,粒径<100 μm 的细沙在大风中可能接近悬移状态,只有粒径<50 μm 的粉砂和黏土颗粒,由于体积细小、质量轻微,在空气中能够被风搬运很长距离。因此,目前大部分学者在相关研究中都将释尘粒径确定为 50 μm 以下<sup>[14]</sup>。对北京市大气降尘粒度分析也表明,降尘粒径范围在 0~80 μm 之间,粒径≤50 μm 部分是降尘主体,占降尘量 90% 以上。因此,将研究区地表释放粉尘的粒径确定为 50 μm 以下合理。

表 1 沉降法测得的土样粒度组成

Table 1 Soil particle size composition measured by sedimentation method						
粒径范围(mm)	≥2	1~2	0.5~1	0.25~0.5	0.1~0.25	0.05~0.1
百分含量(%)	0.37	0.22	0.52	0.61	2.34	34.36
粒径范围(mm)	0.02~0.05	0.01~0.02	0.005~0.01	0.002~0.005	0.001~0.002	≤0.001
百分含量(%)	28.05	7.14	6.91	2.54	3.07	13.88

本文同时分析粒径≤20 μm 和≤10 μm 部分粉尘释放规律。

2.2 粉尘释放强度

根据风洞模拟实验结果(图 1)。低风速时,粉尘释放强度较弱,4 m/s 风速条件下仅为 12.0 g/(m<sup>2</sup>·h)。随着风速增大,农田粉尘释放强度呈指数规律快速增加。14 m/s 风速时达到 61.3 g/(m<sup>2</sup>·h),是 4 m/s 风速时的 5 倍多。粒径≤20 μm 和≤10 μm 部分粉尘释放强度具有与此相同的变化趋势,相关系数都在 0.90 以上。研究区农田粉尘释放强度随风速变化如下:

$$Q_k = a_k \exp (b_k \cdot U) \tag{1}$$

式中, $Q_k$ 为粉尘释放强度[g/(m<sup>2</sup>·h)]; $U$ 为起尘风速(m/s); $a_k$ 、 $b_k$ 为经验系数,因释尘粒径 $k$ 取值不同而

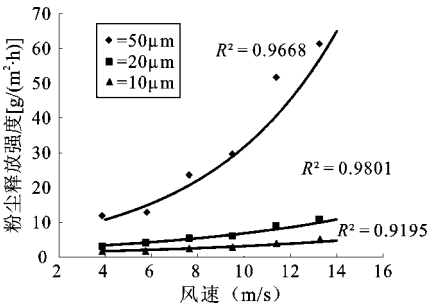


图 1 粉尘释放强度随风速的变化  
Fig.1 Change of dust emitting intensity with wind speed

变化。粉尘粒径越大,其释放强度随风速增加的幅度越大。

Nickling 等研究表明<sup>[15]</sup>,粉尘释放通量可以表

示为摩阻速度的幂函数,即是  $Fv \propto U^n$ ,  $n$  介于 2~5, 因地表形态而异。中国敦煌的野外实验也显示类似趋势<sup>[16]</sup>。本研究中粉尘释放强度随风速增大呈指数规律增加相关系数更大,这可能与半湿润区农田土壤质地较细,粉沙和黏土含量较高,可提供充足的粉尘释放源有关

### 2.3 释尘在风蚀物中的比例

对粉尘在风蚀物中的含量分析表明(图2),低风速时,粉尘在风蚀物中的含量较高,4 m/s 风速条件下达 59.95%。随着风速增大,粉尘在风蚀物中的比例不断降低,10 m/s 风速时为 34.47%,14 m/s 风速时仅为 22.63%。粉尘释放强度是随风速增大而增强的,而其在风蚀物中的含量则随风速增大而降低,说明风蚀物中粒径较粗的跃移颗粒流量随风速增加的更快。曲线拟合也表明,粉尘在风蚀物的占比随风速的增大呈指数规律降低,粒径  $\leq 20 \mu\text{m}$  和  $\leq 10 \mu\text{m}$  部分粉尘在风蚀物中的含量具有与此相同的变化趋势,相关系数都在 0.93 以上。根据粉尘释放的跃移轰击理论,土壤风蚀过程中粉尘的释放量与跃移颗粒流量成正比,这被许多学者的实验所证实<sup>[5]</sup>。本研究中,粉尘的释放量亦随跃移颗粒流量增大而增大,但是二者的比例关系并不是定值,而呈指数规律降低。这表明半湿润区土壤风蚀中,跃移颗粒的冲击作用效率(粉尘通量与跃移通量之比)是随着风速增大而降低的。这可能是因为该地区土壤微团粒结构发育,粉尘颗粒之间粘结力和结合能较大,较多的跃移颗粒动能用于破坏土壤微团粒结构,用于粉尘释放的动能减少。

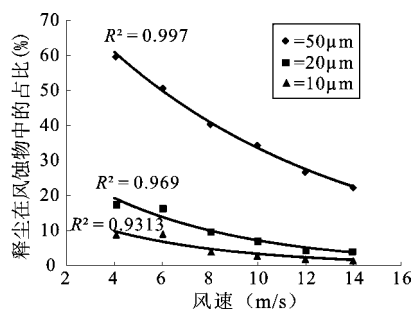


图2 释尘在风蚀物中的占比随风速的变化

Fig.2 Change of emitting dusts ratio in the wind material with wind speed

### 2.4 近地表释尘质量流量廓线

根据集沙仪采样结果(图3),随着高度增加,土壤风蚀物中粉尘质量流量呈逐渐减少的趋势,

近地表减少较快,向上随高度的增加,减少幅度越来越缓。如 10 m/s 风速条件下,地表 0~10 cm 高度内粉尘质量流量为 7.85 g/(m·h),20~30 cm 高度内为 1.93 g/(m·h),50~60 cm 高度内为 1.22 g/(m·h),比 0~10 cm 高度内粉尘质量流量减少近 85%,比 20~30 cm 高度减少 37%。曲线拟合也表明,随着高度增加,近地表粉尘质量流量呈幂函数规律降低,这与前人对粉尘质量流量廓线的研究结果一致<sup>[17]</sup>。

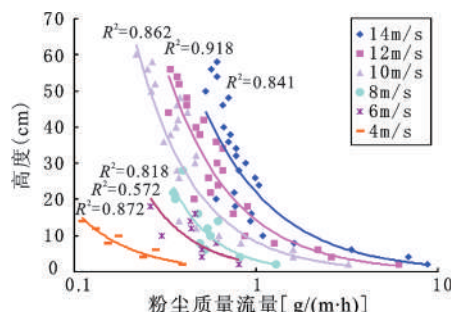


图3 粉尘质量流量的垂向变化

Fig.3 Vertical change of dusts mass flow

尽管随着高度增加,粉尘质量流量不断降低,但其在风蚀物中的占比却呈线性规律增加(图4)。如 10 m/s 风速条件下,0~10 cm 高度粉尘在风蚀物中的比例为 34.48%,10~20 cm 高度为 44.24%,20~30 cm 高度为 65.56%,30~40 cm 高度为 75.62%,40~50 cm 高度为 86.07%,50~60 cm 高度为 93.88%。可以预见,随着高度进一步增加,粉尘在风蚀物中的比例将达 100%。

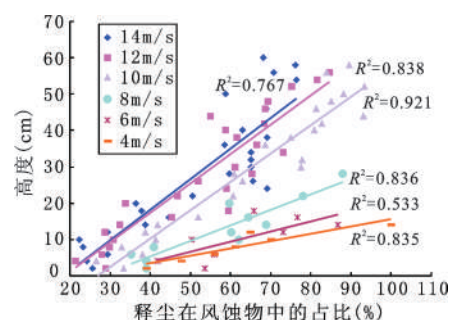


图4 释尘在风蚀物中占比的垂向变化

Fig.4 Vertical change of emitting dusts percentage in the wind material

各高度层粉尘质量流量均随着风速增大呈增加的趋势,并且大体遵循指数函数变化规律(图5),这与总的粉尘释放强度随风速的变化趋势是一致的。各高度层粉尘在风蚀物中的比例均随风



速的增大而降低,并且遵循指数函数变化规律(图6),这与总释尘在风蚀物中占比随风速的变化趋势也是一致的。可见,近地表粉尘质量流量变化具有较好的规律性,随着高度增加呈指数规律减少,随着风速增大呈指数规律增大,而其在风蚀物中的含量则随着高度的增加呈线性规律增加,随着风速增大呈指数规律降低。

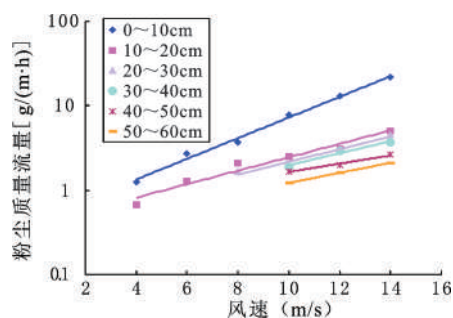


图5 不同高度粉尘质量流量随风速的变化

Fig.5 Change of dusts mass flow with wind speed in different high degrees

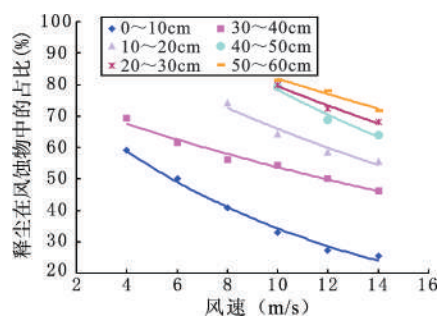


图6 不同高度层释尘在风蚀物中的占比随风速的变化

Fig.6 Change of emitting dusts percentage with wind speed in different high degrees

## 2.5 释尘粒度组成特征

对释尘粒度组成分析表明(表2),各级风速下释放粉尘都以粒径在20~50  $\mu\text{m}$  的尘粒为主,占到释尘总量的65%以上,并且随着风速增大其含量不断增加。其它几个粒级的粉尘含量则较低,合计仅占到释尘总量的35%以下,且其含量均随风速增大而降低。从实验结果可以看出,当风速达到12 m/s 以上时,释放粉尘的粒度组成随风速变化不再显著。据此可以推断,研究区农田释放粉尘的粒度组成随风速增大而变粗,但当风速达到一定程度后,释尘粒度组成达到一种相对的稳定状态,不再随风速的增大而显著变化,这可能与土壤质地的限制作用有关。实验用风蚀原土中粒

径为20~50  $\mu\text{m}$  的粉沙占土壤中粉沙和黏土含量的46%,明显低于其在释尘中的含量。农田地表持续的粉尘释放使土壤中粒径20~50  $\mu\text{m}$  粉沙不断损失。当风速达到一定程度后,土壤中粉尘的供应达到极限,风速的进一步增大将不能显著改变释放粉尘的粒度组成。如果高强度的粉尘释放不断持续下去,释尘粒度组成还有可能变细,Alfaro 等人的研究证明了这一点<sup>[18,19]</sup>。

表2 不同风速下释放粉尘粒度组成特征( $\mu\text{m}$ )

Table 2 Size composition of emitting dusts in different wind speeds

风速 (m/s)	粒度等级				
	50~20	20~10	10~5	5~1	<1
4	66.16	14.91	10.81	7.71	0.42
6	72.32	13.53	8.35	5.47	0.33
8	74.11	14.78	7.34	3.60	0.17
10	80.79	11.11	5.40	2.61	0.09
12	82.87	9.44	4.78	2.76	0.15
14	82.02	9.54	5.21	3.09	0.14

对近地表各高度层释尘平均粒径的统计表明(图7),随着高度增加,各级风速下的释尘平均粒径均呈线性规律降低,相关系数在0.7以上。低风速时,释尘平均粒径在垂直方向上减小较快,随着风速增大,释尘平均粒径在垂直方向上减小的速度变缓。当风速达到10 m/s 以上时,释尘平均粒径沿垂直方向的递减速度趋于稳定。

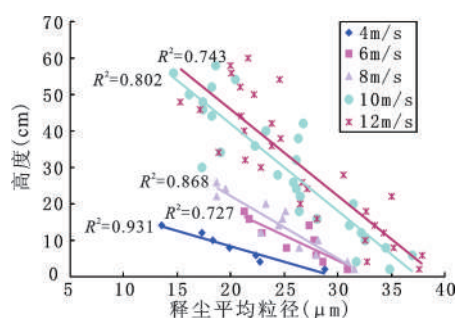


图7 释尘平均粒径的垂向变化

Fig.7 Vertical change of emitting dusts average particle size

根据对12 m/s 风速条件下各高度层释尘粒度组成分析结果(图8),大体可将不同高度层释尘粒度组成分布曲线划分为两种形式。近地表0~10 cm 与10~20 cm 高度层的释尘粒度组成比较相似,呈双峰态分布,只是0~10 cm 高度层在粗粒径部分的峰值相对较大,在细粒径部分的峰值相对较小。

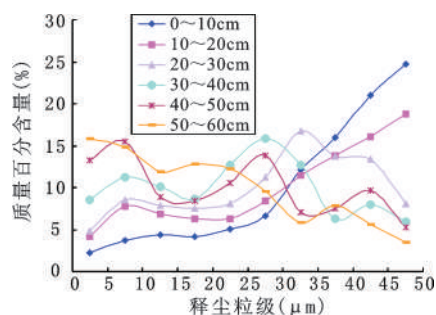


图8 12 m/s 风速下近地表各高度层释尘粒度组成  
Fig.8 Emitting dusts size composition of different high layers near-surface with 12 m/s wind speed

20~30、30~40、40~50 与 50~60 cm 高度层的释尘粒度组成比较相似,均呈三峰态分布,只是随着高度增加,粗粒径部分的峰值逐渐减小,细粒径部分的峰值逐渐增大,释尘粒度组成有沿垂直方向逐步变细趋势,与上面对释尘平均粒径分析结果一致。

### 3 结 论

本文通过风洞模拟实验,对半湿润区农田土壤风蚀中的粉尘释放规律进行研究,得到一些有意义的结果。

1) 半湿润区农田土壤风蚀中的粉尘释放强度随着风速增大呈指数规律增大,粉尘在风蚀物中的含量则随风速的增大呈指数规律降低。

2) 随着高度增加,近地表粉尘质量流量呈幂函数规律降低,但其在风蚀物中的占比却呈线性规律增加。各高度层粉尘质量流量及其在风蚀物中的占比,随风速和高度的变化都具有与此相同的变化趋势。

3) 释尘粒径随风速增大而变粗,但当风速达到一定程度后,释尘粒度组成趋于稳定。随着高度增加,各级风速下的释尘平均粒径均呈线性规律降低,释尘粒度组成变细。近地表释尘粒度组成沿垂直方向的变化可以划分为两段,0~20 cm 高度层的释尘粒度组成呈双峰态分布,20~60 cm 高度层呈三峰态分布。

### 参考文献:

[1] Tegen I, Lacis A A. Modeling of particle size distribution and its influence on the radioactive properties of mineral dust aerosol[J].

Journal of Geophysical Research, 1996, **101**(D14): 19237-19244.  
[2] Chow J C. A laboratory resuspension chamber to measure fugitive dust size distributions and chemical compositions[J]. Atmospheric Environment, 1994, **28**: 34-63.  
[3] Harrison S P, Kohfeld K E, Roelandt C, et al. The role of dust in climate changes today, the last glacial maximum and in the future [J]. Earth Science Reviews, 2001, **54**: 43-80.  
[4] 王 涛, 吴 薇, 薛 娟, 等. 中国北方沙漠化土地时空演变分析[J]. 中国沙漠, 2003, **23**(3): 230~235.  
[5] 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.  
[6] Gillette D A. Threshold friction velocities for dust production for agricultural soils[J]. Journal of Geophysical Research, 1988, **93**: 12645-12662.  
[7] Shao Y, Raupach M R, Findlater P A. The effect of saltation bombardment on the entrainment of dust by wind[J]. J Geophys Res, 1993, **98**: 12719-12726.  
[8] 梅凡民, 张小曳, 鹿化熠, 等. 若干风蚀粉尘释放模型述评[J]. 中国沙漠, 2004, **24**(6): 791~797.  
[9] Zhang X Y, Arimoto R, An Z S. Dust emission from Chinese desert sources linked to variations in atmospheric circulation [J]. Journal of Geophysical Research, 1997, **102**: 28041-28047.  
[10] 宣 捷. 中国北方地面起沙总量分布[J]. 环境科学学报, 2000, **20**(4): 426~430.  
[11] 梅凡民, 张小曳, 曹军骥, 等. 定量评价中国北方粉尘源区地表覆盖类型对表土风蚀强度的影响[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, **24**(1): 119~124.  
[12] 车慧正, 张小曳, 李 杨, 等. DPM 模型计算中国北方沙漠地区粉尘释放通量[J]. 干旱区资源与环境, 2005, **19**(5): 49~55.  
[13] 吴 正. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2010.  
[14] Cowherd C, Bohn J R, Cuscino T. Iron and steel plant open source fugitive emission evaluation[R]. 1979, EPA 2600/22792103.  
[15] Nickling W G, Gilles J A. Dust emission and transport in Mali, West Africa[J]. Sedimentology, 1993, **40**: 859-868.  
[16] Joussaume S. Three dimensional simulations of the atmospheric cycle of desert dust particles using a general circulation model [J]. Journal of Geophysical Research, 1990, **95**(D2): 1909-1941.  
[17] Fryrear D W, Saleh A. Field wind erosion: Vertical distribution [J]. Soil Sci, 1993, **155**: 294-300.  
[18] Alfaro S C, Gaudichet A, Gomes L, et al. Modeling the size distribution of a soil aerosol produced by sandblasting[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, **102** (D10): 11239- 1249.  
[19] Alfaro S C, Gaudichet A, Gomes L, et al. Mineral aerosol production by wind erosion : aerosol particle size and binding energies[J]. Geophysical Research Letters, 1998, **25** (7): 991-994.

## Farmland Soil Dust Emission in Semi-humid Areas by Wind-tunnel Simulation

WANG Ren-de<sup>1,2,3</sup>, ZOU Xue-yong<sup>2,3</sup>, ZHAO Jing-yan<sup>2,3</sup>

(1. *Institute of Geographical Sciences, Hebei Science College, Shijiazhaung, Hebei 050011, China*; 2. *State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*; 3. *China Center of Desert Research at Beijing Normal University, Beijing 100875, China*)

**Abstracts:** Farmland dust emission law in Beijing area that locates in sub-humid areas is studied in the paper by means of wind-tunnel simulation on the basis of field survey, observation and samples collection. The results show that the intensity of farmland dust emission increases exponentially with wind speed increasing, the dust proportion in wind-erosion particles decreases exponentially with wind speed increasing. Near-surface dust mass flow follows the power function decreasing rule with height increasing. Its proportion in erosion particles increases linearly with height increasing. It has a similar trend of dusts mass flow and its proportion in wind-erosion particles in all layers. So there is a well regularity of dusts movement in near-surface that the dusts mass flow increases exponentially with wind speed increasing and decreases with height increasing, and its proportion in wind-erosion particles decreases exponentially with wind speed increasing and increases linearly with height increasing. The dusts coarsen with wind speed increasing and then reach a steady state. The dust particles become thinner with height increasing. The average particle size decreases linearly with height increasing, which is faster in low wind speed and becomes slower with wind increasing. The change of dust particles composition along the vertical direction in near-surface can be divided into two sections: it presents the bimodal distribution in 0-20cm height layer, and presents the trimodal distribution in 20-60cm height layer.

**Key words:** soil wind erosion; farmland dust emission; wind tunnel simulation; semi-humid areas