环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2019
Vol.40 No.9
第40卷 第9期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第40卷 第9期
2019年9月15日

目 次

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第40卷 第9期 2019年9月
Vol. 40, No. 9 Sep., 2019

风蚀扬尘抑尘剂效率测试方法与应用

秦建平[1], 李贝贝[1,2], 杨涛[1], 宋博[1,2], 黄玉虎[1*], 张春来[3]
(1. 北京市环境保护科学研究院, 国家城市环境污染控制工程技术研究中心, 北京 100037; 2. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 3. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 防沙治沙教育部工程研究中心, 北京 100875)

摘要: 风蚀扬尘抑尘剂是一种控制风蚀扬尘的有效措施, 探讨使用便携式风洞(PI-SWERL)测试风蚀扬尘抑尘剂效率的方法, 并对比国内外2种抑尘剂对风蚀扬尘 $PM_{2.5}$ 的抑制效率, 以研究喷洒方式、稀释倍数和风速对抑尘效率的影响. 结果表明: ① 按照推荐的稀释倍数分别配置G和Enviroseal(ES)抑尘剂水溶液并测试, 液滴喷洒方式对应的抑尘效率优于雾化喷洒方式, 在17.2 $m \cdot s^{-1}$(相当于8级风)风速时G抑尘剂效率(99.5%)优于ES抑尘剂(94.0%)和水(77.5%); ② 对稀释倍数为50、100、150、200和400倍的G抑尘剂进行测试, 在17.2 $m \cdot s^{-1}$ 风速时, 抑尘效率分别为99.7%、99.5%、99.7%、98.1%和95.9%, 可根据抑尘效率变化拐点确定抑尘剂最佳成本效益稀释倍数; 在13.1~17.2 $m \cdot s^{-1}$ 风速范围内, 抑尘效率随风速增加而增加. ③ 使用便携式风洞测试风蚀扬尘抑尘剂效率的方法, 可以量化抑尘剂对风蚀扬尘 $PM_{2.5}$ 的抑制效率, 建议对风蚀扬尘抑尘剂开展抑尘有效期和环境友好性测试.

关键词: 风蚀扬尘抑尘剂; 风蚀扬尘; $PM_{2.5}$ 抑制效率; 便携式风洞(PI-SWERL); 极大风速
中图分类号: X513 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2019)09-3935-07 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201901242

Application of Test Method for Dust Suppression Efficiency of Wind Erosion Dust Suppressant

QIN Jian-ping[1], LI Bei-bei[1,2], YANG Tao[1], SONG Bo[1,2], HUANG Yu-hu[1*], ZHANG Chun-lai[3]
(1. National Engineering Research Center of Urban Environmental Pollution Control, Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China; 2. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 3. Ministry of Education Engineering Center of Desertification and Blown-sand Control, State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Wind erosion dust suppressant is an effective measure for controlling wind erosion dust. This study used the Portable In-Situ Wind Erosion Laboratory (PI-SWERL) to evaluate the efficiency of domestic and foreign dust suppressants and to compare their control efficiency of $PM_{2.5}$ in terms of spraying methods, dilution factors, and wind speed. The following results were noted. ① According to the recommended dilution factor, G and Enviroseal (ES) dust suppressant solutions were treated and tested, respectively. The control efficiency of particulate matter with diameters less than 2.5 μm ($PM_{2.5}$) corresponding to the droplet spraying method was better than the atomized spraying method; the G dust suppressant efficiency, at 99.5%, was better than ES and water, at 94.0% and 77.5%, respectively, at 17.2 $m \cdot s^{-1}$, which is equivalent to grade 8 wind. ② The G dust suppressant with dilution factors of 50, 100, 150, 200, and 400 times was tested. The dust suppression efficiency at a wind speed of 17.2 $m \cdot s^{-1}$ was 99.7%, 99.5%, 99.7%, 98.1%, and 95.9%, respectively. The best cost-effective dilution factor of G dust suppressant was 150 times. The efficiency of dust suppressants increased when the wind speed increased between 13.1 $m \cdot s^{-1}$ and 17.2 $m \cdot s^{-1}$. ③ The method of using PI-SWERL to test the efficiency of wind erosion dust suppressant can quantify the suppression efficiency of dust suppressant on $PM_{2.5}$. It is recommended to conduct dust suppression during effective periods and to practice environmentally friendly methods of wind erosion dust suppression.

Key words: wind erosion dust suppressant; wind erosion dust; control efficiency of $PM_{2.5}$; portable in-situ wind erosion laboratory (PI-SWERL); extreme wind speed

2017年全国338个城市以细颗粒物($PM_{2.5}$)为首要污染物的天数占重度及以上污染天数的74.2%, 在不扣除沙尘影响的情况下, $PM_{2.5}$ 年均浓度为44 $\mu g \cdot m^{-3}$, 比2016年下降6.4%[1]. 其中扬尘是城市大气颗粒物最主要的来源之一[2], 大气颗粒物源解析研究结果表明, 北京[3]、天津[4]和石家庄[5]的 $PM_{2.5}$ 来源中, 扬尘源占比分别为16.0%、30.0%和22.5%. 风蚀扬尘是扬尘源之一, 它是地表松散颗粒物在自然风作用下产生的扬尘[6], 主要发生于裸地[7]、料堆[8]和道路[9]等有松散颗粒物的表面, 这些风蚀扬尘排放潜势不容小觑. 文献[10]中提出严格落实工地物料堆放覆盖, 按月对裸地和拆迁地块进行监控等风蚀扬尘控制措施. 常用风蚀

收稿日期: 2019-01-28; **修订日期**: 2019-03-24
基金项目: 大气重污染成因与治理攻关项目(DQGG0208); 北京市环境保护科学研究院基金项目(2017-B-04)
作者简介: 秦建平(1981~), 男, 主要研究方向为扬尘污染控制, E-mail: qinjianping@cee.cn
* 通信作者, E-mail: huangyuhu@sina.com

扬尘控制措施包括防尘网和洒水. 近年来,“风蚀扬尘抑尘剂”作为一种新型风蚀扬尘控制措施,逐渐被人们认识和采用. 风蚀扬尘抑尘剂指利用天然或人工合成化学品的黏结力将粉尘粘结起来,在易扬尘物料表面形成稳定层的物质,抑制风蚀扬尘排放.

风蚀扬尘的产生机理十分复杂,风蚀扬尘抑尘剂的抑尘机理同样复杂,国内尚缺乏风蚀扬尘抑尘剂对风蚀扬尘 $PM_{2.5}$ 抑制效率的测试方法及数据,不利于风蚀扬尘抑尘剂的评价和推广使用. 可借鉴的测试方法包括以下 4 种:①使用风扇[11]或吹风机[12]对喷洒抑尘剂的物料进行吹蚀,称量计算物料损失量,试验成本低,但是风扇或吹风机无法模拟自然风,进而无法真实表征抑尘效率;②按照文献[13]对喷洒了抑尘剂的大面积裸地进行上下风向 $PM_{2.5}$ 浓度监测,该方法至少需要布置 4 台 $PM_{2.5}$ 采样器和气象仪,试验成本较高,且只有出现适合的风速风向条件,才能评估抑尘效率及其与风速的关系;③按照文献[14],将喷洒抑尘剂的煤放入大风洞,以 30 $m \cdot s^{-1}$ 或其他风速进行 5 min 吹蚀,称量计算煤尘损失量;④采用移动式风洞在野外测试抑尘效率,实验室大风洞和移动式风洞都存在体积大、操作复杂、试验成本高等缺点[15~18].

美国沙漠所研制的一款便携式风洞(PI-SWERL),可以用来测试风蚀扬尘排放特征[9,19,20],PI-SWERL 可以模拟不同大小的风剪切力[19],最高可以模拟 17.2 $m \cdot s^{-1}$(相当于 8 级风). PI-SWERL 的优点是便携性和易用性,可以由较少人员在较短时间内完成大量风蚀扬尘排放试验,所需试验地块面积小,抑尘剂使用量小;缺点是要求试验现场相对平整,试验面积小影响试验结果代表性,可以通过多个平行样品来弥补该缺点. PI-SWERL 被广泛用于易扬尘物料或裸地表面风蚀扬尘排放特征测试,如冲积扇裸地[21]、海滩[22]和沙漠[23,24]等,也用来测试风蚀扬尘抑尘剂对风蚀扬尘 PM_{10} 的抑制效率[21]等. 风蚀扬尘抑尘剂在国内还属于新鲜事物,本研究探讨了使用 PI-SWERL 测试风蚀扬尘抑尘剂效率的方法,对比测试国内外 2 种抑尘剂对风蚀扬尘 $PM_{2.5}$ 的抑制效率,研究抑尘剂喷洒方式、稀释倍数和风速对抑尘效率的影响,以期为风蚀扬尘抑尘剂的评价和推广使用提供技术支撑.

1 材料与方法

1.1 风蚀扬尘抑尘剂

2017 年 11 中旬(秋季),在北京市大兴区一块裸地现场,对国内 G 型和美国 Enviroseal MVA-60™ (ES)风蚀扬尘抑尘剂进行抑尘效率测试.

G 抑尘剂是国内一种土壤风蚀扬尘抑尘剂,它的主要成分为植物提取的天然聚合物乳液,其主体连续相为水,内含微米级液滴,表现为流动性好的白色不透明液体. 均匀喷洒后,随着水分蒸发,抑尘剂液滴内的天然聚合物通过沉淀交联作用,在土壤表面形成稳定层,抑制风蚀扬尘排放. 美国常用的抑尘剂产品包括水、卤化物、有机石油类产品、有机非石油类产品、合成聚合物、电化学抑尘剂、黏土添加剂和纤维混合覆盖物[25],高品质改性乙烯基-丙烯酸共聚物乳液[26] ES 抑尘剂是常用产品之一[25],它可促进土壤颗粒聚集,水分蒸发后,土壤表面形成坚韧耐用的壳,土壤获得更高的承载能力、抗压强度和防水能力,抑制风蚀扬尘排放. 选择 G 和 ES 这 2 种抑尘剂进行测试以对比其抑尘效率,并测试不同浓度 G 抑尘剂的效率,以验证测试方法的适用性.

1.2 PI-SWERL

PI-SWERL 由风洞腔体、旋转环、DustTrak8530 智能粉尘仪、控制箱和电脑组成[9]. 图 1 是 PI-SWERL 工作场景,将风洞腔体轻放在待测土壤表面,通过控制箱和电脑设置测试模式,控制风洞腔体内的旋转环转动形成转速梯度,产生一定强度的风剪切力,侵蚀土壤释放粉尘,使粉尘在风洞腔体内悬浮. 装有 $PM_{2.5}$ 切割头的 DustTrak8530 粉尘仪通过防静电管与风洞腔体连接,实时测量风洞腔体内的 $PM_{2.5}$ 浓度,量化土壤表面 $PM_{2.5}$ 的排放能力[27].

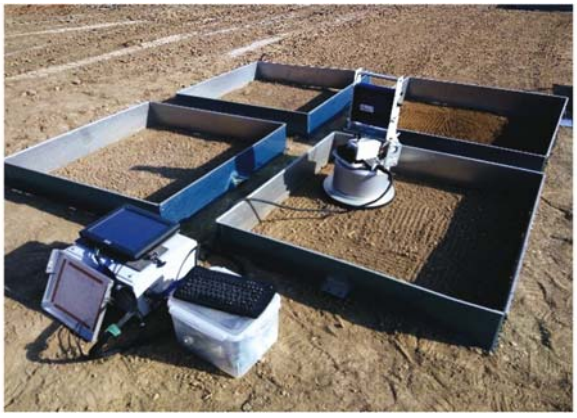

图 1 PI-SWERL 测试抑尘剂

Fig. 1 PI-SWERL used to test dust suppression efficiency

风蚀扬尘排放潜势测试流程如下:① 使用 PI-SWERL 斜坡模式确定试验现场土壤对应的旋转环最大转速;② 采用阶梯模式模拟测试不同风速下风蚀扬尘 $PM_{2.5}$ 排放潜势. 本研究采用的 PI-SWERL 阶梯模式设置了 6 个转速梯度,即 6 个风速梯度,PI-SWERL 旋转环转速与风速对应关系如表 1 所

示，当转速达到6 000 r·min^{-1}时，模拟风速相当于8 级风.

表 1　PI-SWERL 旋转环转速与风速对应关系

Table 1　Correspondence between PI-SWERL rotating ring speed and wind speed

转速 /r·min^{-1}	摩擦风速 /m·s^{-1}	10 m 高度处自然风速 /m·s^{-1}	自然风力等级
1 000	0.24	4.5	3
2 000	0.39	7.4	4
3 000	0.55	10.4	5
4 000	0.69	13.1	6
5 000	0.82	15.5	7
6 000	0.91	17.2	8

对风蚀扬尘影响最大的气象参数极大风速[28]是指给定时段内瞬时(一般指 1s)风速的最大值. 本文统计北京市 4 个区气象站点 2016 年逐日极大风速累积分布数据(见图 2)，极大风速≥17.2 m·s^{-1}(6 000 r·min^{-1})的天数仅占全年的0.4%，由此可见，PI-SWERL 模拟的最大风速与北京市极大风速范围是相匹配的，可以评价风蚀扬尘抑尘剂在北京市的使用. 此外，北京市极大风速≥15.5 m·s^{-1}(5 000 r·min^{-1})的天数占全年的1.5%，极大风速≥13.1 m·s^{-1}(4 000 r·min^{-1})的天数占全年的5.9%，极大风速 < 10.4 m·s^{-1}的天数占全年的81.9%.

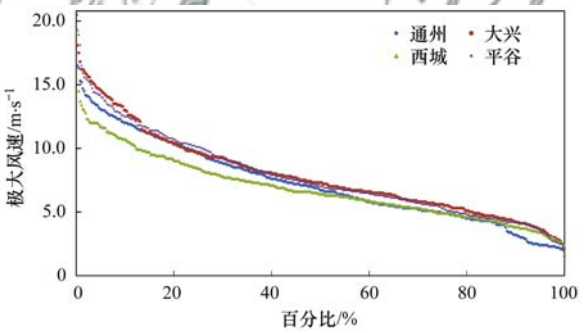

图 2　每日极大风速累积分布

Fig. 2　Daily extreme wind speed cumulative distribution

1.3　试验方法

按照北京市土壤类型分布，大兴区试验现场裸地为潮土[29]，对试验现场表层 2.5 cm 的土壤进行平整待测试. 采用梅花布点法在试验现场选取 6 个点位，使用 PI-SWERL 测试评估试验现场 $PM_{2.5}$ 排放潜势的均匀性. 然后，在平整后的土壤表面放置试验框(长×宽×高 = 1.2 m×1.2 m×0.2 m)，如图 1 所示. 试验框首先可以保证抑尘剂溶液喷洒面积的准确性，其次可以避免未喷洒区域土壤风蚀扬尘对喷洒区域的污染，将试验框内的土壤称为试验区.

按照推荐的抑尘剂与水稀释倍数(100 倍和 10 倍)分别配置 G 和 ES 抑尘剂溶液，采用手动气压喷壶，分别按照液滴喷洒和雾化喷洒 2 种喷洒方式，将 2 种抑尘剂溶液和水按照 2 L·m^{-2}的施用强度，横向和纵向交替均匀喷洒在试验区，在自然条件下至少风干 48 h.

每个试验区的面积允许 PI-SWERL 进行 4 次位置不重叠的测试，随机选取 3 个位置进行测试，然后求平均值. 每个测试周期为1 000 s，开始前会有持续 150 s 的洁净空气冲洗风洞腔体，保证试验区数据彼此不受干扰[20]，然后在 1 s 内将转速从 0 提升至1 000 r·min^{-1}. 1 000和2 000 r·min^{-1}每一级转速持续 60 s，后 4 级每一级持续 90 s，两级转速提升时间为 60 s，从6 000 r·min^{-1}降至 0 持续 70 s[20].

按照 5 种水稀释倍数(50、100、150、200 和 400 倍)分别配置 G 抑尘剂溶液，按照 2 L·m^{-2}的施用强度，以液滴喷洒方式在 6 个试验区分别喷洒不同稀释倍数的抑尘剂溶液和水，研究稀释倍数对抑尘效率的影响，确定抑尘剂最佳成本效益的稀释倍数.

2　结果与讨论

2.1　喷洒方式对抑尘效率的影响

本试验现场风蚀扬尘 $PM_{2.5}$ 排放潜势测试结果如图 3，风蚀扬尘 $PM_{2.5}$ 累积排放潜势处于 466.6 ~ 800.9 mg·m^{-2}，平均值为 595.5 mg·m^{-2}，标准偏差为 118.1 mg·m^{-2}，相对标准偏差为 19.8%，可认为试验现场风蚀扬尘排放潜势均匀，不同试验区测试结果具有可比性.

由图 3 可知，占全年总天数约 81.9% 的极大风速(<10.4 m·s^{-1}，对应转速 <3 000 r·min^{-1})在整个风蚀模拟过程中，$PM_{2.5}$ 累积排放潜势占总排放潜势的 1.1%；而占比较小的极大风速(≥15.5 m·s^{-1}，对应转速≥5 000 r·min^{-1})对应的累积排放潜势占总排放潜势的 64.2%. 由图 3 可知，从4 000 r·min^{-1}开始，累积排放潜势有了明显上升趋势. 因此，本研究仅讨论 PI-SWERL 模拟极大风速≥13.1 m·s^{-1}(对应转速≥4 000 r·min^{-1})时对抑尘效率的影响.

图 4 是不同喷洒方式下 G 和 ES 抑尘剂风蚀扬尘 $PM_{2.5}$ 累积排放潜势，结合未喷洒的试验区计算抑尘效率. 就整个风蚀过程而言，液滴喷洒方式对应的抑尘效率为 G(99.5%) > ES(94.0%) > 水(77.5%)，雾化喷洒方式对应的抑尘效率为 G(85.9%) > ES(34.0%) > 水(23.6%)，液滴喷洒方式的抑尘效率整体优于雾化喷洒方式，说明液滴

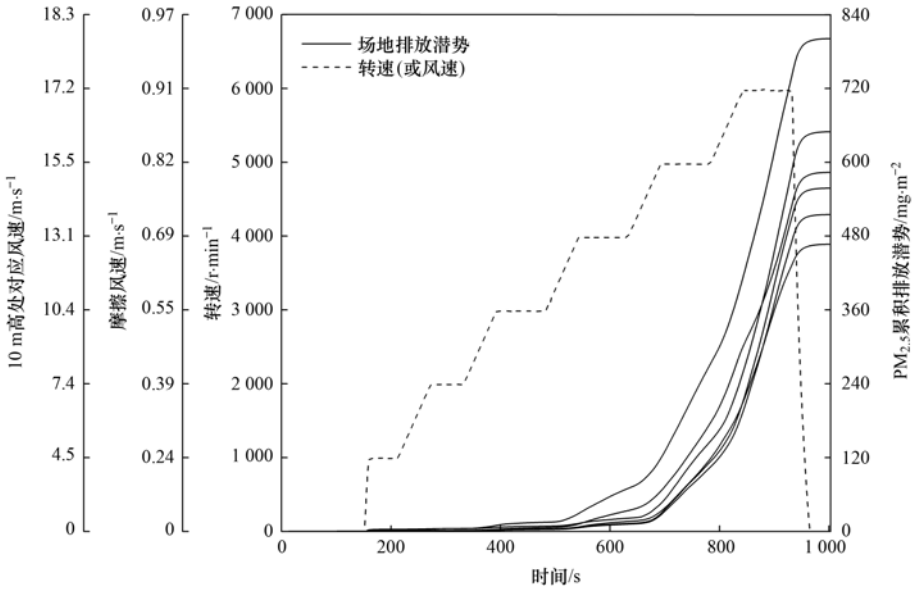

图 3 试验现场风蚀扬尘排放潜势均匀性

Fig. 3 Uniformity of wind erosion dust emission potential at the test site

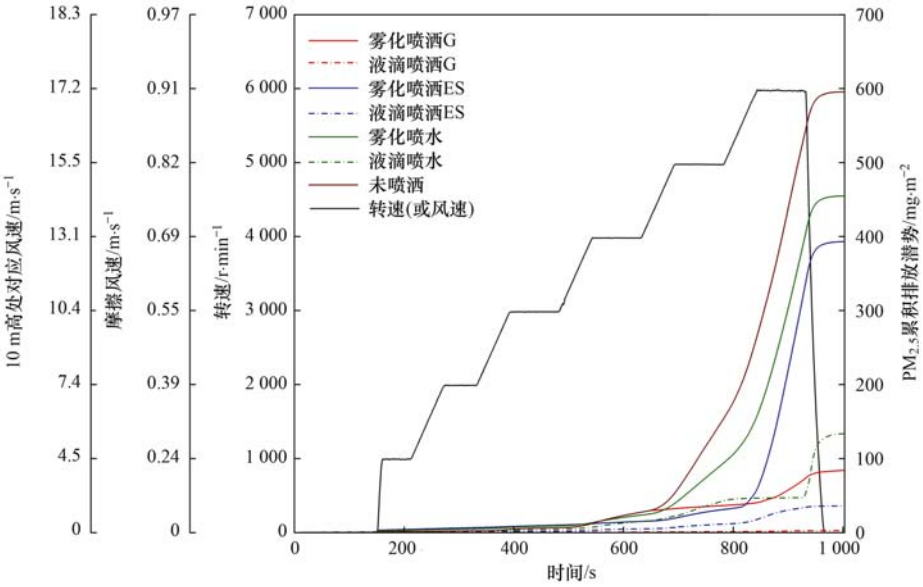

图 4 G 和 ES 抑尘剂喷洒方式对风蚀扬尘排放的影响

Fig. 4 Influence of spraying methods of dust suppressant ES and G on wind erosion dust emission

喷洒方式有利于抑尘剂渗入土壤，且容易在土壤表层形成稳定层.

由图 4 可知，旋转环转速 <4 000 r·min^{-1}时所有试验区 $PM_{2.5}$ 累积排放潜势都较小，当转速上升至6 000 r·min^{-1}时，雾化喷洒的试验区累积排放潜势有了大幅提高，说明大风破坏了抑尘剂在土壤表面形成的稳定层. 在液滴喷洒方式下，转速由4 000 r·min^{-1}增加至6 000 r·min^{-1}的过程中，G、ES 抑尘剂和水都保持较高抑尘效率，且效率随转速(风速)增加而增加(见表 2).

2.2 稀释倍数对抑尘效率的影响

图 5 是 G 抑尘剂不同稀释倍数对土壤风蚀扬尘 $PM_{2.5}$ 排放的影响. 在整个风蚀过程中，不同稀释倍数对风蚀扬尘 $PM_{2.5}$ 累积排放潜势的抑制效率(表 3)分别为 99.7% ±0.1%(稀释倍数 =150 倍)、99.7% ±0.1%(50 倍)、99.5% ±0.1%(100 倍)、98.1% ±1.9%(200 倍)、95.9% ±1.7%(400 倍)和 77.5% ±18.4%(100% 水)，G 抑尘剂在各种稀释倍数下都表现出良好的抑尘效率. 与相同施用强

表 2 不同转速下抑尘剂和水的效率

Table 2 Dust suppression efficiency at different ring speeds

喷洒方式	转速 /r·min^{-1}	效率/%		
		G 抑尘剂	ES 抑尘剂	水
液滴	4 000	97.6 ±0.4	81.8 ±1.0	44.7 ±28.0
	5 000	99.2 ±0.1	92.5 ±1.0	72.3 ±24.2
	6 000	99.5 ±0.1	94.0 ±6.2	77.5 ±18.4

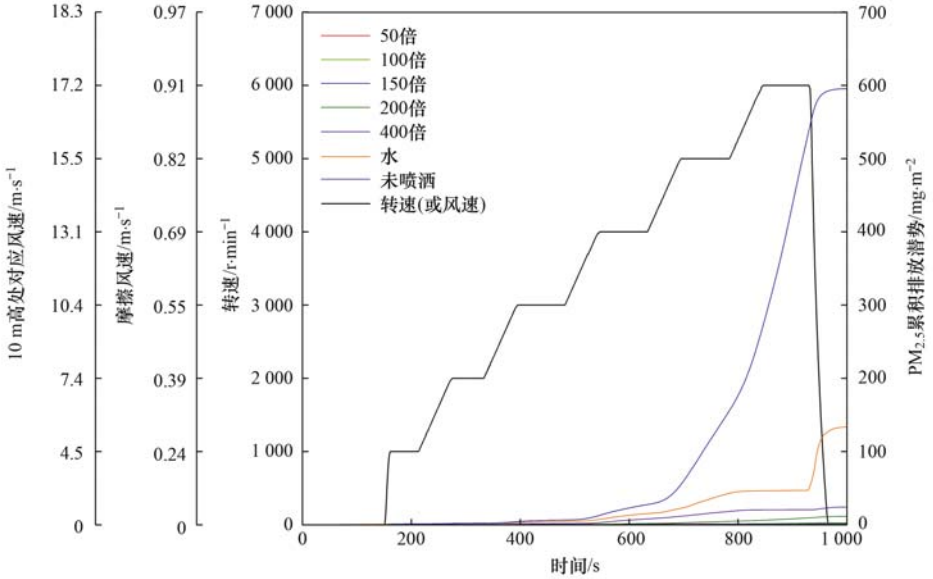

图 5　G 抑尘剂稀释倍数对风蚀扬尘排放的影响

Fig. 5　Effect of dilution factor of dust suppressant G on wind erosion dust emission

度的水相比，不同稀释倍数的 G 抑尘剂控制效率提高了 81.8% ~98.8%，效率增幅为 17%.

图 6 是风速对 G 抑尘剂风蚀扬尘 $PM_{2.5}$ 抑制效率的影响，当模拟极大风速为 17.2 $m \cdot s^{-1}$ 时，不同稀释倍数(400 ~ 50 倍) G 抑尘剂的风蚀扬尘 $PM_{2.5}$ 抑制效率为 95.9% ~99.7%，标准偏差在 0.07% ~1.93% 范围内. 随着稀释倍数减小，效率逐渐增大，稀释倍数 150 倍是抑尘效率曲线的拐点，此浓度下抑尘效率上升至 99.7%，且抑尘效率不再随稀释倍数降低而升高，保持在 99.7% 左右.

表 3 是不同风速下不同浓度 G 型抑尘剂对 $PM_{2.5}$ 的控制效率. 抑尘效率在 4 000 $r \cdot min^{-1}$ 和 5 000 $r \cdot min^{-1}$ 转速下呈现出与 6 000 $r \cdot min^{-1}$ 相同的“浓度-效率”规律，在稀释倍数 150 倍时出现的拐点更加明显，而且风速越大抑尘效率越高. 以 150 倍为例，G 抑尘剂在 4 000、5 000 和 6 000 $r \cdot min^{-1}$ 时的抑尘效率分别为 97.2% ±0.6%、99.3% ±0.1% 和 99.7% ±0.1%，相对水的抑尘效率分别提高了 95.0% ±1.1%、97.6% ±0.5% 和 98.8% ±0.3%. 综合考虑抑尘剂效率和治理成本[30]，确定 G 抑尘剂的最佳稀释倍数为 150 倍. 建议继续对风蚀扬尘抑尘剂开展抑尘有效期和环境友好性测试.

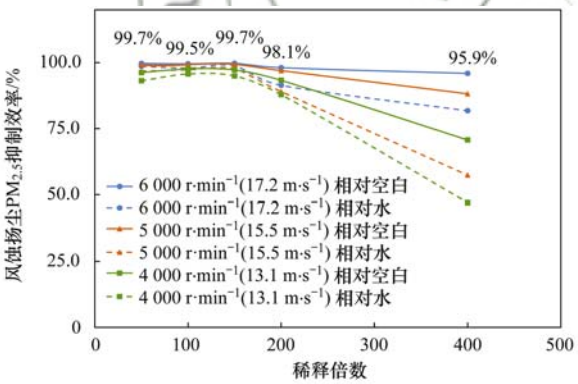

图 6　风速对 G 抑尘剂抑尘效率的影响

Fig. 6　Influence of wind speed on dust suppression efficiency of G dust suppressant

表 3　不同风速下不同稀释倍数 G 抑尘剂 $PM_{2.5}$ 抑制效率/%

Table 3　Efficiency of different dilution factors of G dust suppressant at different wind speeds/%

稀释倍数	4 000 $r \cdot min^{-1}$		5 000 $r \cdot min^{-1}$		6 000 $r \cdot min^{-1}$	
	相对空白	相对水	相对空白	相对水	相对空白	相对水
50	96.2 ±0.8	93.1 ±1.5	99.1 ±0.2	96.8 ±0.7	99.7 ±0.1	98.6 ±0.3
100	97.6 ±0.4	95.7 ±0.7	99.2 ±0.1	97.3 ±0.5	99.5 ±0.1	97.9 ±0.3
150	97.2 ±0.6	95.0 ±1.1	99.3 ±0.1	97.6 ±0.5	99.7 ±0.1	98.8 ±0.3
200	93.3 ±0.5	87.9 ±0.9	97.0 ±1.6	89.0 ±6.0	98.1 ±1.9	91.4 ±7.8
400	70.7 ±26.6	47.1 ±48.5	88.2 ±4.7	57.4 ±17.0	95.9 ±1.7	81.8 ±6.9

3　结论

(1) 便携式风洞(PI-SWERL)模拟的最大风速与北京市极大风速范围相匹配，可以用于风蚀扬尘抑尘剂效率测试. 采用液滴和雾化两种喷洒方式，按照 2 $L \cdot m^{-2}$ 的施用强度分别喷洒水和稀释后的 G、ES 抑尘剂，模拟风速 17.2 $m \cdot s^{-1}$ 时，液滴喷洒方式对应的抑尘效率为 G(99.5%) > ES(94.0%)

>水(77.5%),雾化喷洒方式对应的抑尘效率为 G(85.9%)>ES(34.0%)>水(23.6%),液滴喷洒方式抑尘效率优于雾化喷洒方式.

(2)在模拟极大风速 17.2 $m \cdot s^{-1}$条件下,不同稀释倍数(50~400 倍)G 抑尘剂的风蚀扬尘 $PM_{2.5}$ 抑制效率为 95.9%~99.7%,并且根据抑尘效率变化拐点确定抑尘剂最佳成本效益对应的稀释倍数.大风会破坏抑尘剂或水在易扬尘物料表面形成的稳定层,进而增加风蚀扬尘排放,但是在 13.1~17.2 $m \cdot s^{-1}$风速范围内,抑尘效率随风速增加而增加.

(3)使用便携式风洞(PI-SWERL)测试风蚀扬尘抑尘剂效率可以量化喷洒抑尘剂对风蚀扬尘 $PM_{2.5}$的控制效率,该方法可以科学选择抑尘剂最佳成本效益对应的稀释倍数.

参考文献:

[1] 生态环境部. 2017 中国生态环境状况公报[R]. 北京:生态环境部, 2018.

[2] 胡敏, 唐倩, 彭剑飞, 等. 我国大气颗粒物来源及特征分析[J]. 环境与可持续发展, 2011, **36**(5): 15-19.
Hu M, Tang Q, Peng J F, *et al*. Study on characterization and source apportionment of atmospheric particulate matter in China[J]. Environment and Sustainable Development, 2011, **36**(5): 15-19.

[3] 北京市环境保护局. 最新科研成果新一轮北京市 $PM_{2.5}$来源解析正式发布[EB/OL]. http://www.bjepb.gov.cn/bjhrb/xxgk/jgzn/jgsz/jjgjgszjzz/xcjyc/xwfb/832588/index.html, 2018-05-14.

[4] 天津市生态环境保护局. 天津召开新闻发布会 发布颗粒物源解析结果 扬尘成为首要污染物[EB/OL]. http://hjbh.tj.gov.cn/news/news_headtitle/201410/t20141009_570.html, 2014-10-09.

[5] 中国环境监测总站. 石家庄市大气污染源解析结果公布 大气污染元凶现行[EB/OL]. http://www.cnemc.cn/gzdt/dfxx/201409/t20140918_656827.shtml, 2014-09-18.

[6] 田刚, 黄玉虎, 樊守彬. 扬尘污染控制[M]. 北京:中国环境出版社, 2013. 119-123.
Tian G, Huang Y H, Fan S B. Fugitive dust control[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2013. 119-123.

[7] 李贝贝, 秦建平, 祁丽荣, 等. 城市道路行道树树池裸地扬尘排放特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(3): 1031-1039.
Li B B, Qin J P, Qi L R, *et al*. Emission characteristics of wind erosion dust from topsoil of urban roadside-tree pool[J]. Environmental Science, 2018, **39**(3): 1031-1039.

[8] 黄玉虎, 韩凯丽, 陈丽媛, 等. 北京市混凝土搅拌站扬尘排放因子及排放清单[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(10): 3699-3707.
Huang Y H, Han K L, Chen L Y, *et al*. Emission factor and inventory for fugitive dust from concrete batching plants in Beijing[J]. China Environmental Science, 2017, **37**(10): 3699-3707.

[9] 李贝贝, 韩凯丽, 秦建平, 等. 北京市混凝土搅拌站风蚀扬尘排放特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(9): 4078-4085.
Li B B, Han K L, Qin J P, *et al*. Emission characteristics of wind-eroded dust from concrete batching plants in Beijing[J]. Environmental Science, 2018, **39**(9): 4078-4085.

[10] 北京市人民政府办公厅. 北京市蓝天保卫战 2018 年行动计划[Z]. 2018-03-21.

[11] 蒋耀东, 黄娟, 张雷, 等. 基于脲酶诱导碳酸钙沉淀的新型扬尘抑制剂[J]. 环境工程学报, 2017, **11**(9): 5097-5103.
Jiang Y D, Huang J, Zhang L, *et al*. New dust-depressor using urease induced calcite precipitation[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, **11**(9): 5097-5103.

[12] 郑云海, 田森林, 李林, 等. 基于表面活性剂的施工扬尘抑尘剂及其性能[J]. 环境工程学报, 2017, **11**(4): 2391-2396.
Zheng Y H, Tian S L, Li L, *et al*. Surfactant based suppressants for reducing fugitive dust in construction sites[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, **11**(4): 2391-2396.

[13] HJ/T 55-2000, 大气污染物无组织排放监测技术导则[S].

[14] TB/T 3210.1-2009, 铁路煤炭运输抑尘技术条件 第 1 部分:抑尘剂[S].

[15] Liu Y H, Nie W, Jin H, *et al*. Solidifying dust suppressant based on modified chitosan and experimental study on its dust suppression performance[J]. Adsorption Science & Technology, 2017, **36**(1-2): 640-654.

[16] Genis A, Vulfson L, Ben-Asher J. Combating wind erosion of sandy soils and crop damage in the coastal deserts: wind tunnel experiments[J]. Aeolian Research, 2013, **9**: 69-73.

[17] Han Z, Wang T, Dong Z, *et al*. Chemical stabilization of mobile dunefields along a highway in the Taklimakan Desert of China[J]. Journal of Arid Environments, 2007, **68**(2): 260-270.

[18] Hong S W, Lee I B, Seo I H, *et al*. Measurement and prediction of soil erosion in dry field using portable wind erosion tunnel[J]. Biosystems Engineering, 2014, **118**: 68-82.

[19] Etyemezian V, Nikolich G, Ahonen S, *et al*. The Portable In Situ Wind Erosion Laboratory (PI-SWERL): a new method to measure PM10 windblown dust properties and potential for emissions[J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**(18): 3789-3796.

[20] Wang X L, Chow J C, Kohl S D, *et al*. Wind erosion potential for fugitive dust sources in the Athabasca Oil Sands Region[J]. Aeolian Research, 2015, **18**: 121-134.

[21] Kavouras I G, Etyemezian V, Nikolich G, *et al*. A new technique for characterizing the efficacy of fugitive dust suppressants[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2009, **59**(5): 603-612.

[22] King J, Etyemezian V, Sweeney M, *et al*. Dust emission variability at the Salton Sea, California, USA[J]. Aeolian Research, 2011, **3**(1): 67-79.

[23] von Holdt J R, Eckardt F D, Wiggs G F S. Landsat identifies aeolian dust emission dynamics at the landform scale[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, **198**: 229-243.

[24] Gillies J A, Etyemezian V, Kuhns H, *et al*. Dust emissions created by low-level rotary-winged aircraft flight over desert surfaces[J]. Atmospheric Environment, 2010, **44**(8): 1043-1053.

[25] Piechota T C, van Ee J, Batista J, *et al*. Potential environmental impacts of dust suppressants: "avoiding another Times Beach"[R]. Nevada: United States Environmental Protection Agency, 2004.

[26] Enviroseal Corporation. Installation guidelines for Enviroseal MVA-60 used for erosion control[EB/OL]. https://docs.wixstatic.com/ugd/f52013_081efa62e8c446c8a7be408e7e1cda95.pdf, 2003-07-21.

[27] Sweeney M R, Fischer B, Wermers K, *et al*. Eolian and fluvial modification of Missouri River sandbars deposited by the 2011

flood, USA[J]. Geomorphology, 2019, **327**: 111-125.
[28] US EPA. Emission factor documentation for AP-42, Section 13.2.5 Industrial wind erosion[R]. Washington DC: United States Environmental Protection Agency, 2006.
[29] 赵峰, 韩煜. 基于 Region Manager 的北京土壤可风蚀性研究[J]. 水土保持研究, 2008, **15**(6): 24-27.
Zhao F, Han Y. Study on soil erodibilities by wind in Beijing based on Region Manager[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, **15**(6): 24-27.
[30] Inyang H I, Bae S, Pando M A. Contaminant dust suppression materials: a cost-effectiveness estimation methodology[J]. Measurement, 2016, **93**: 563-571.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠. 全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献). 国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示). 作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjkx.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写. 论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过 20 字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于 300 字,以第三人称写. 摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论. 英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等,科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目. 图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一. 表用三线表. 图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI). 论文中物理计量单位用字母符号表示,如 mg(毫克),m(米),h(小时)等. 科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用 1,1.1,1.1.1 的形式,左起顶格书写, 3 级以下标题可用(1),(2)……表示,后缩 2 格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体. 生物的拉丁学名为斜体. 缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示. 文献按文中出现的先后次序编排. 常见文献书写格式为:

期刊:作者(外文也要姓列名前). 论文名[J]. 期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者. 书名[M]. 出版地:出版社,年. 起页-止页.

会议文集:作者. 论文名[A]. 见(In):编者. 文集名[C]. 出版地:出版社(单位),年. 起页-止页.

学位论文:作者. 论文名[D]. 保存地:保存单位,年份.

报告:作者. 论文名[R]. 出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者. 专利题名[P]. 专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投. 编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节. 在 3 个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等. 编辑部邮政地址:北京市 2871 信箱;邮编:100085;电话:010-62941102,010-62849343;传真:010-62849343;E-mail:hjkx@rcees.ac.cn;网址:www.hjkx.ac.cn

HUANJING KEXUE Vol. 40 No. 9
Environmental Science (monthly) Sep. 15, 2019

CONTENTS