

# 集沙仪结构设计及其性能实验研究

王嘉珺<sup>1,2</sup>, 姬亚芹<sup>1,2</sup>, 赵雪艳<sup>1,2</sup>

(1. 南开大学 环境科学与工程学院, 天津 300071; 2. 国家环境保护城市空气颗粒物污染防治重点实验室, 天津 300071)

**摘 要:** 集沙仪作为专门用于收集风蚀颗粒的采样仪器对土壤风蚀研究具有重要意义。从通风屏的位置和面积, 形成通风屏的筛网目数和进沙口位置等方面设计了 16 种集沙仪。通过在风洞内进行的等动力性实验和采集率实验最终筛选出面积为 9 884 mm<sup>2</sup> 的通风屏位于集沙仪顶部, 进沙口凸出集沙仪迎风面的集沙仪是 16 种集沙仪中采集性能最好的集沙仪。其修正后的进沙口风速与实验风速比为 0.870; 对 0.10~0.25, 0.075~0.10 和 < 0.075 mm 粒径范围的土样, 各风速的平均采集率分别为 83.58%, 81.16% 和 60.93%, 适合采集跃移及部分悬移运动颗粒; 该集沙仪结构简单, 操作方便, 可采集同一位置不同高度的风蚀尘, 也可添加旋转装置用于野外观测, 符合室内外风蚀研究需要。

**关键词:** 风蚀; 集沙仪; 结构设计; 等动力性; 采集率

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)03-0116-07

中图分类号: S157.1

## Structural Design and Performance Experiment on a Sand Sampler

WANG Jia-jun<sup>1,2</sup>, JI Ya-qin<sup>1,2</sup>, ZHAO Xue-yan<sup>1,2</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Urban Ambient Air Particulate Matter Prevention and Control, Tianjin 300071, China)

**Abstract:** As the special equipment for collecting soil particles in wind erosion, research on sand sampler is of significance. Sixteen sand samplers were designed with the difference in respect of position, area and mesh size of the screen, as well as position of opening for sand collecting. Through isokinetic tests and collecting tests in the wind tunnel, performance of the sand sampler with a 120-mesh screen on the top and a protruded opening was considered to be the best of all sixteen. Its revised ratio of wind velocity at the opening to predetermined wind velocity is 0.870. Average collecting efficiency of soil with the particle size ranges of 0.10~0.25, 0.075~0.10 and <0.075 mm were 83.58%, 81.16% and 60.93%, respectively. It was suitable for collecting the saltation particles and part of suspension particles. In addition, the sand sampler with simple structure and simplified operation can collect wind erosion dusts at the different heights. It also meets the demands of indoor and outdoor researches if equipped with rotary apparatus.

**Keywords:** wind erosion; sand sampler; structural design; isokinetic performance; collecting efficiency

土壤风蚀是危害干旱、半干旱及部分半湿润地区的主要环境问题之一,也是这些地区土地沙漠化过程的重要组成部分和首要环节<sup>[1-2]</sup>。土壤风蚀不仅严重影响我国粮食安全和社会经济的可持续发展,而且风蚀产生的颗粒物尤其是细颗粒物不仅会导致空气质量下降,还会影响人类健康。因此,对土壤风蚀问题进行全面系统的研究,已成为防治土壤风蚀和提高环境空气质量的迫切需要。

集沙仪作为专门用于收集风蚀颗粒以研究风沙运动规律的采样仪器,其采样性能对于完成野外风蚀

观测和室内风洞实验研究具有重要意义。在以往的风蚀研究中,国内外已使用过多种不同结构的集沙仪<sup>[3]</sup>。

Bagnold<sup>[4]</sup>设计的垂直长口形集沙仪由于缺少旋转装置只能收集一个方向的风蚀土样,不适合用于野外采样。Chepil<sup>[5]</sup>将 Bagnold 集沙仪改为旋转式,但因不存在排气装置而不适于强烈风沙天气。May 等<sup>[6]</sup>设计的旋转杆采集器需要 12 伏的直流电旋转 U 形杆且在风速超过 10 m/s 后采集率下降。Fryear<sup>[7]</sup>研制的 BSNE 采集器操作方便,进沙口始终正对侵

蚀风向,可同时收集不同高度风蚀沙样,但其价格相对较贵。Janssen 和 Tetzlaff<sup>[8]</sup>设计的 SUSTRA 采集器因整体结构较复杂,只能采集单一高度的风蚀土样、采集率较低且随风速变化较大等缺点而未被推广应用。国内目前普遍采用的阶梯式、平口式以及遥测式集沙仪进沙口方向固定,不适宜用于野外观测,且未出现关于采样性能方面研究的相关报道。

因此,设计一种结构简单、操作方便、采样性能好,尤其对环境空气影响较大的细颗粒物采集率较高的集沙仪是本研究的重点。

## 1 集沙仪结构设计

集沙仪两条重要的设计原则是等动力性和高效率性,分别是指集沙仪进沙口的风速等于没有安装集沙仪时的自然风速和集沙仪能够尽可能多地采集到来自进沙口方向的风蚀量,且二者关系密切<sup>[9-10]</sup>。集沙仪良好的内部排气情况对提高其采样性能至关重要,即保证其出入气流流速尽可能接近,进入集沙仪的风沙流中的气流顺利排出,而又不把沙带走<sup>[11-12]</sup>。集沙仪通风屏的位置和面积直接关系到集沙仪的内部排气情况<sup>[9-10,13]</sup>,同时通风屏筛网孔径对集沙仪的采集率也有明显影响。因此,本文主要从进沙口位置、通风屏的位置和面积以及形成通风屏筛网的目数

等方面设计了4种不同结构的集沙仪,每种集沙仪结构的通风屏筛网又分别设计为60,80,120和150目4种,总共16种不同的集沙仪。这些集沙仪大体形状相似,均主要由采沙盒和集沙盒2部分组成,二者在进行风蚀采样时通过中间密封性较好的插槽结合为一体,减小了缝隙对集沙仪采集率的影响,集沙仪进沙口均为高10 mm,宽20 mm;长300 mm的进沙通道以 $11^\circ$ 的角度逐渐向外扩展,形成了可使进入集沙仪的风沙流流速降低的扩散段,风沙流中的沙尘颗粒随流速降低沉降在集沙盒中,气流则依靠内外压差通过顶部或两侧不锈钢滤网所形成的通风屏排出,集沙仪采沙结束后,采沙盒可顺着插槽单独拿下取样。4种集沙仪结构如图1a—1d所示。集沙仪a:面积为 $9\,884\text{ mm}^2$ 的通风屏位于集沙仪顶部,进沙口凸出集沙仪迎风面,简称为顶凸结构。集沙仪b:面积为 $3\,000\text{ mm}^2$ (120 mm长 $\times$ 25 mm宽)的通风屏位于集沙仪采沙盒两侧对称位置,进沙口凸出集沙仪迎风面,简称为侧凸结构;集沙仪c:面积为 $10\,916\text{ mm}^2$ 的通风屏位于集沙仪顶部,进沙口不凸出迎风面且与顶部平齐,简称为顶平结构;集沙仪d:面积为 $3\,000\text{ mm}^2$ (长120 mm $\times$ 25 mm宽)的通风屏位于集沙仪采沙盒两侧对称位置,进沙口不凸出迎风面且与顶部平齐,简称为侧平结构。

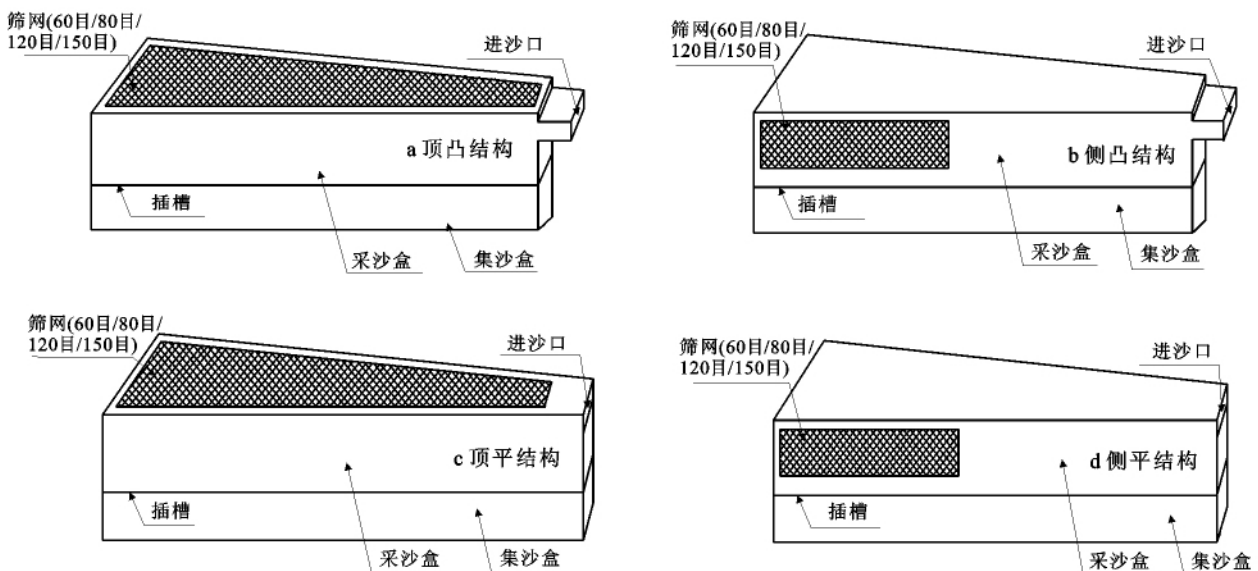


图1 集沙仪结构

## 2 实验设备与方法

### 2.1 实验设备

集沙仪的等动力性实验和采集率实验在南开大学研制的NK-1可移动式风蚀风洞内完成。该风洞

全长约15.9 m,由进气段、动力段、过渡段、转角段、稳定段、收缩段、实验段和尾部扩散段8个部分组成。实验段总长7.7 m,截面积为 $0.9\text{ m} \times 0.9\text{ m}$ 的矩形,收缩比为2。风速在 $0.3\sim 20\text{ m/s}$ 连续可调。实验使用PCL-818LS数据采集卡、压差传感器、变频器、信

号放大器以及工业控制计算机所组成的数据采集系统来实现对风洞风速的控制以及风速数据的采集处理。

## 2.2 等动力性实验方法

将集沙仪安装在位于风洞实验段入口下风向 7.0 m 处的风洞轴线上,距风洞底部 46 cm 高度处,集沙仪进沙口沿风洞纵轴对准风向。从贴近集沙仪进沙口边缘处钻孔,竖直插入并固定 3 cm 长的不锈钢针头使其底端与进沙口上壁保持平齐,将 1.5 mm 直径皮托管牢固套在针头上端,用于测量集沙仪的进沙口静压。测定总压的皮托管被固定在距实验段入口 1.8 m 的中轴位置上,其开口距离风洞顶面 30 cm。通过计算机控制设定的风洞实验段入口处轴线位置风速即实验风速,测量全、静压的皮托管与压差传感器相连,将所获的压差信号进行处理即得到集沙仪实时的进沙口风速,每个进沙口风速测定值是指在 1 min 内连续测得的 60 个瞬时风速值的平均值。集沙仪在风洞内的安装情况如图 2a 所示。

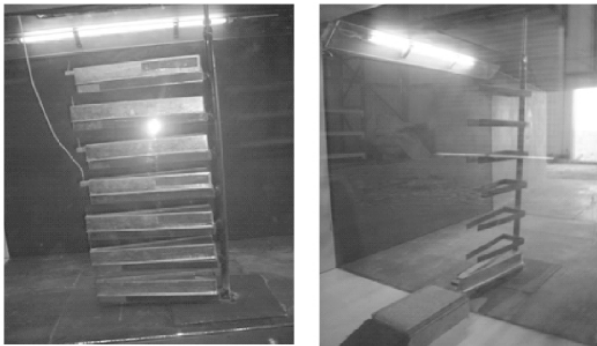


图 2 等动力性实验集沙仪和采集率实验集沙仪在风洞内的位置

## 2.3 采集率实验方法

供试土样分为 5 种粒径:0.5~1.0,0.25~0.5

和 0.10~0.25 mm 这 3 个粒径范围的土壤颗粒以跃移运动为主;0.075~0.10 mm 和 <0.075 mm 这 2 个粒径范围的土壤颗粒以悬移运动为主。实验时,将集沙仪安装在风洞实验段入口 6.5 m 的中轴线处并使其进沙口指向实验段上风向,集沙仪进沙口中部距风洞底部 60 mm。将土样均匀装满在位于集沙仪上风向距集沙仪进沙口 30 mm 的光滑托盘(200 mm 长×100 mm 宽×5 mm 高)内,托盘顶部与集沙仪进沙口中部保持在同一高度且集沙仪对准托盘宽边正中。集沙仪在风洞内的布置情况如图 2b 所示。

实验前通过用电子秤称重确定托盘内与集沙仪进沙口宽度相同的沙带重量  $m_g, m_g$  是供沙重量,即集沙仪采集率为 100% 所采集到的沙量;启动风洞,通过变频器手动调节 2 种实验风速(12 m/s 和 15 m/s),使风洞风速在 10 s 内达到设定值,至托盘内的土样均被吹走时停止吹风。取下集沙盒,对其实际所采集到的土壤颗粒称重,记为  $m_c$ ,采集率为  $E = m_c/m_g$ 。每种实验风速重复 1 次实验,实验结果取平均值。

## 3 结果与讨论

### 3.1 通风屏面积变化对等动力性的影响

对设计出的 16 个不同的集沙仪进行等动力性实验,为了观察同一集沙仪不同通风屏面积对等动力性的影响,实验时使用胶带密封的方法来改变每个集沙仪的通风屏面积 6 次。通风屏面积大小的变化如表 1 所示。实际上,通风孔即真正起到气流通风作用的通风屏实际净孔面积,通风孔面积是通风屏面积乘以通风屏筛网目数所对应的孔隙度,通风屏筛网为 60, 80, 120 和 150 目所对应的孔隙度分别为 33.8%, 30.4%, 30.6% 和 37.7%。后文中的  $r$  即代表通风孔面积与进沙口面积之比。

表 1 不同结构集沙仪通风屏面积变化

集沙仪结构	通风屏面积/mm <sup>2</sup>					
	1 次	2 次	3 次	4 次	5 次	6 次
顶凸结构	2 613	4 839	6 680	8 134	9 202	9 884
侧凸结构、侧平结构	1 000	2 000	3 000	4 000	5 000	6 000
顶平结构	2 785	5 183	7 196	8 822	10 062	10 916

研究表明,进沙口风速与实验风速之比达到 0.91 以上的集沙仪就认为其基本符合等动力性要求<sup>[14-15]</sup>。另外,由于洞壁阻塞效应即集沙仪在风洞内对气流的阻塞使气流流通面积减小,而风洞洞壁限制了流线向外弯曲,产生了一个轴向速度增量,相当于使来流速度增加。因此,对受到洞壁干扰的集沙仪进沙口风速与实验风速之比做出修正,其修正方法如下<sup>[16]</sup>:

$$(u_i/u_r)' = (u_i/u_r)(1-2\mu) \quad (1)$$

式中: $u_i$ ——实测集沙仪进沙口处风速(m/s);  $u_r$ ——风洞实验风速(m/s); 本实验设定  $u_r$  为 9 m/s;  $(u_i/u_r)'$ ——修正后的  $u_i/u_r$ ;  $\mu$ ——阻塞修正系数。其中,

$$\mu = \Delta V_x/V_\infty = S/S' - 1 \quad (2)$$

式中: $\Delta V_x$ ——阻塞效应引起速度增量;  $V_\infty$ ——来流

速度;  $S$ ——风洞截面积;  $S'$ ——受集沙仪阻挡后的风洞截面积。经计算,  $\mu$  为 0.05, 代入式(1)中,  $(u_i/u_r)'$  为  $u_i/u_r$  乘以 0.9。

本文认为集沙仪在不同通风屏面积下的  $(u_i/u_r)'$  大多大于 0.8 就符合等动力性要求。据此筛选出的 8 种集沙仪在不同通风屏面积下的  $(u_i/u_r)'$ — $r$  关系如图 3 所示。图 3 中 a—h 依次表示顶凸结构通风屏筛网为 60, 80 和 120 目的集沙仪; 侧凸结构通风屏筛网为 60, 80 和 120 目的集沙仪; 顶平结构通风屏筛网为 120 目和 150 目的集沙仪。从图 3 中可以看出, 随着集沙仪通风屏面积的增大, 其进沙口风速开始时增大较快, 之后增大速度逐渐变慢。图 3 中显示出各集沙仪

的  $(u_i/u_r)'$ — $r$  之间均呈对数关系, 且  $R^2$  不低于 0.87。

然后对筛选出的每一种集沙仪确定一个固定的通风屏面积, 以确保其等动力性最佳。最后确定的具有固定通风屏面积的集沙仪是: 顶凸结构通风屏面积达到最大时通风屏筛网为 60, 80 和 120 目的集沙仪, 侧凸结构通风屏面积达到最大时通风屏筛网为 60, 80 和 120 目的集沙仪, 顶平结构通风屏面积为 8 822 mm<sup>2</sup> 时通风屏筛网为 120 目和 150 目的集沙仪。这 8 个具有固定通风屏面积的集沙仪在本文中均分别简称为顶凸 60、顶凸 80、顶凸 120、侧凸 60、侧凸 80、侧凸 120、顶平 120 和顶平 150, 其  $(u_i/u_r)'$  依次为 0.979, 0.905, 0.855, 0.849, 0.839, 1.041, 0.864 和 0.856。

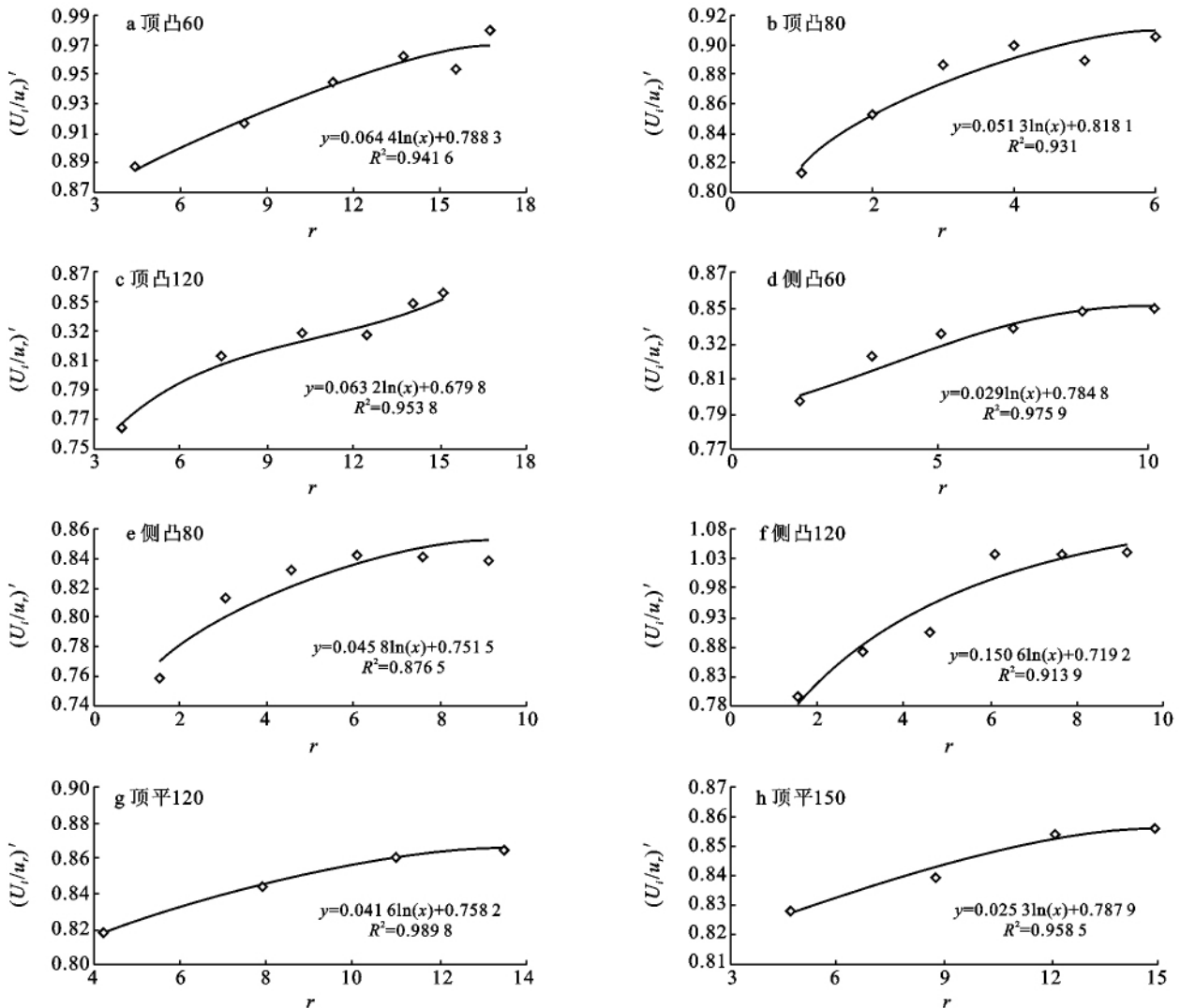


图 3 筛选出的集沙仪在不同通风屏面积下的修正的进沙口风速与实验风速比  $(u_i/u_r)'$  和通风孔面积与进沙口面积比  $r$  的关系

### 3.2 风速变化对集沙仪等动力性的影响

良好集沙仪的等动力性不应因风速的变化而发生较大改变。为了判断风速变化对已筛选出的 8 种具有固定通风屏面积集沙仪的等动力性是否有影响,

本文将改变 9 m/s 的实验风速分别为 6, 12, 15 和 18 m/s, 以相同的方法测定集沙仪进沙口风速, 这 8 种集沙仪在不同实验风速下的  $u_r$  与  $(u_i/u_r)'$  之间的关系如图 4 所示。

结果表明,这 8 种集沙仪在不同实验风速下,  $(u_i/u_r)'$  均大于 0.8, 均符合等动力性要求, 这 8 种集沙仪的实验风速和集沙仪进沙口风速与实验风速比

之间均呈线性关系, 而且直线较为平直, 斜率都很小, 接近于 0。这说明实验风速的变化对这 8 种集沙仪的等动力性影响并不大。

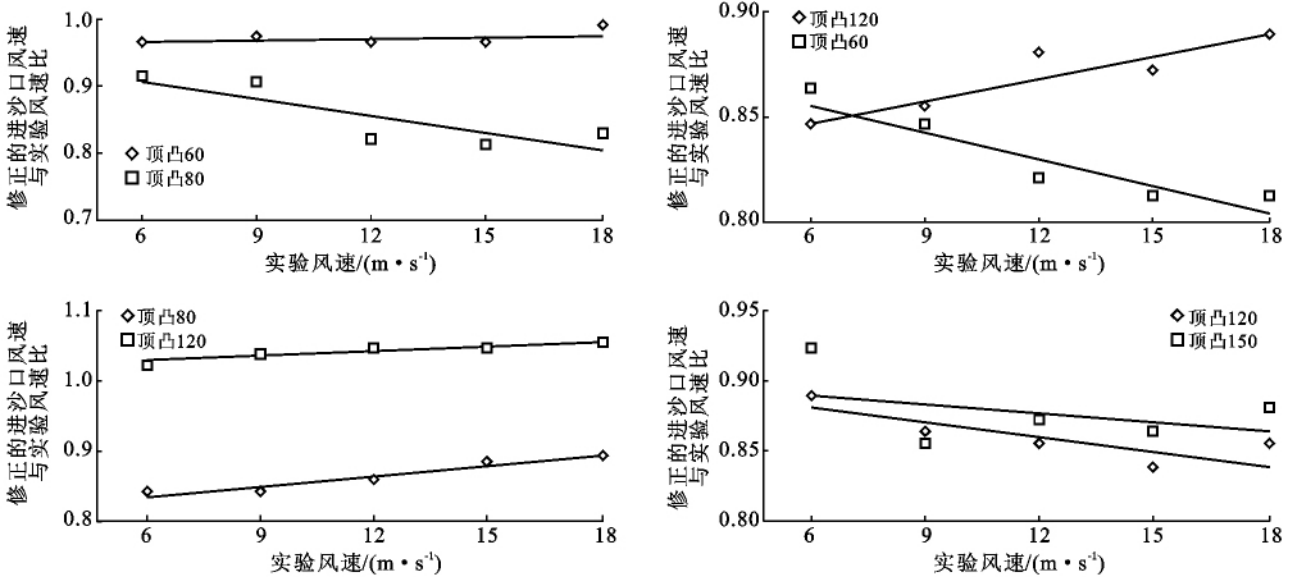


图 4 实验风速和集沙仪进沙口风速与实验风速比之间的关系

### 3.3 集沙仪采集率实验

筛选出的 8 种集沙仪在不同风速下对不同粒径土样采集率的对比情况如图 5 所示。图 5 表明, 对于 0.5~1.0, 0.25~0.5 和 0.10~0.25 mm 这 3 个粒径范围土样, 顶凸 120 在不同风速下的采集率及其均值在 8 种集沙仪中均为最大。而对于 0.075~0.10 mm 和 <0.075 mm 粒径范围的土样, 顶凸 80 在 12 m/s 下的采集率及不同风速下采集率均值在 8 种集沙仪中为最大, 其次为顶凸 120; 顶凸 120 在 15 m/s 下的采集率在 8 种集沙仪中最大。这说明顶凸 120 对跃

移形式运动颗粒的采集率最高, 顶凸 80 和顶凸 120 对悬移形式运动颗粒的采集率较高。

因此, 鉴于本文目的是筛选出对跃移运动颗粒, 特别是对悬移运动颗粒采集率较高的集沙仪, 这 8 种集沙仪中顶凸 80 和顶凸 120 较符合要求。又因为除 0.10~0.25 mm 粒径范围土样外, 顶凸 120 对其它粒径范围土样的采集率随风速的变化明显小于顶凸 80。因此, 最终认为顶凸 120 是本文设计的 16 种集沙仪中采集性能最好的集沙仪。

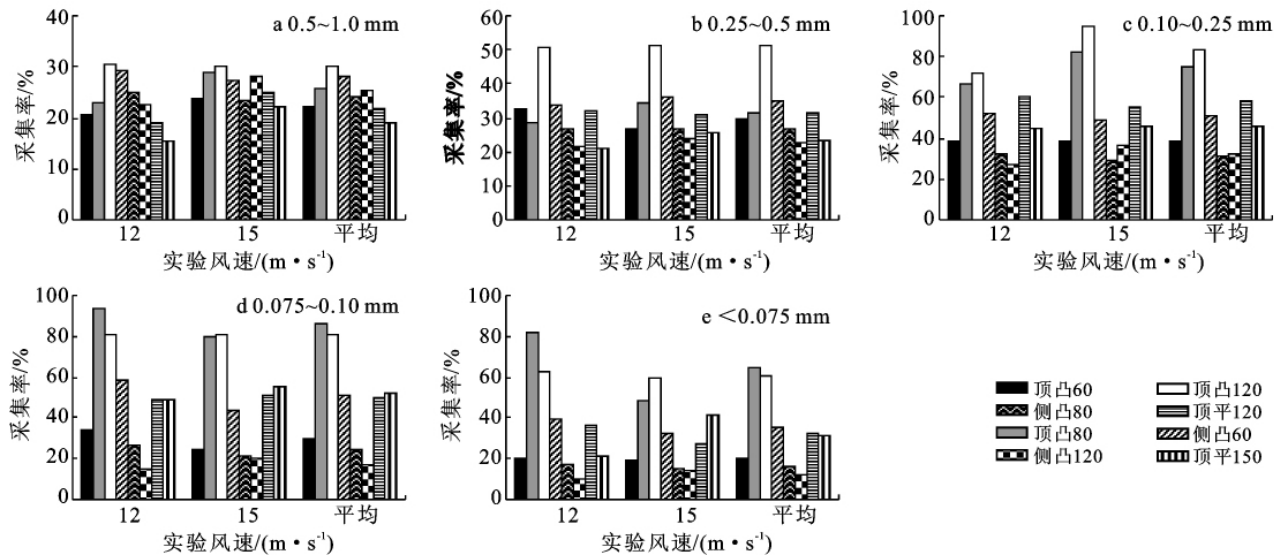


图 5 8 种集沙仪在不同风速下对不同粒径土样的采集率对比

### 3.4 多种集沙仪对比分析

为了进一步了解本文研制的集沙仪的集沙特性,将其与目前国内外近年来一些常用的集沙仪进行比较分析。

表2为国内外近年来几种常用集沙仪的优缺点对比。通过比较发现,这些常用集沙仪的问题主要集中在几个方面:野外观测适用性、有无采样性能测定,对细颗粒物的采集情况及制作成本。相对于表内列举的几种集沙仪,本文研制的顶凸120集沙仪性能较好,等动力性较高,修正后的进沙口风速与实验风速比均值为0.870;采集率较高,对0.10~0.25 mm粒

径范围土样的各风速平均采集率为83.58%,对0.075~0.10 mm粒径范围土样的各风速平均采集率为81.16%,对<0.075 mm粒径范围土样的各风速平均采集率为60.93%。说明该集沙仪对跃移形式运动颗粒和部分悬移形式运动颗粒的采集率较高,适合采集跃移及部分悬移运动颗粒。该集沙仪结构简单、造价便宜、操作方便,可采集同一位置不同高度的风蚀尘,基本符合移动式风蚀风洞实验要求。在野外风蚀采样中,可以增加旋转装置,使其灵活转动,能保证集沙仪进沙口始终正对侵蚀风向,适用于进行长期野外观测。

表2 国内外几种集沙仪优缺点对比

集沙仪类型	优点	缺点
MWAC集沙仪 <sup>[8]</sup>	结构简单,携带方便,可时刻正对侵蚀风向,同一位置可采集不同高度尘粒	进沙口面积较小,采集到的沙样少,不能满足风蚀的研究需要
BSNE集沙仪 <sup>[7]</sup>	制作简单,操作方便,进沙口能始终指向侵蚀风向,可单点采集不同高度尘粒,采样量满足风蚀研究需要	成品购置价格昂贵
阶梯式集沙仪 <sup>[12]</sup>	可收集距地面20 cm高度内的尘粒	进沙口方向固定,不利于野外观测,缺少相关采样性能的测定
遥测式集沙仪 <sup>[17]</sup>	实现野外输沙量的自动测定和记录	进沙口方向固定,不利于野外观测,没有相关采样性能的测定
布袋式集沙仪 <sup>[18]</sup>	结构简单,便于携带,可单点采集不同高度不同风向的沙尘颗粒	未对其等动力性和对小于100 μm的悬移运动颗粒采集率进行测定
旋风分离式集沙仪 <sup>[19]</sup>	突破传统重力分离取样原理,可单点采集不同高度不同风向的沙尘颗粒	未对其对小于100 μm的悬移运动颗粒采集率进行测定
一种风蚀模拟试验装置 <sup>[20]</sup>	结构简单,体积小,携带轻便,采集数据有一定的可靠性	在使用过程中,尤其是野外风蚀观测中难以有效收集风蚀沙尘颗粒用于后期进一步分析研究

## 4 结论

(1) 通过对设计出的16个不同的集沙仪进行等动力性实验,筛选出8个等动力性较好的集沙仪。实验发现这8个集沙仪的修正后的进沙口风速与实验风速比 $(u_i/u_e)'$ 和通风孔面积与进沙口面积比 $(r)$ 之间均呈对数关系,且 $R^2$ 大于0.87,然后对筛选出的每一种集沙仪确定一个固定的通风屏面积,以确保其等动力性最佳。实验风速变化对这8种具有固定通风屏面积的集沙仪的等动力性影响不大。

(2) 对筛选出的8种具有固定通风屏面积的集沙仪进行采集率实验,通过各因素综合比较,最终认为通风屏面积为9 884 mm<sup>2</sup>的顶凸120集沙仪是16种集沙仪中采集性能最好的,其等动力性较好,修正后的进沙口风速与实验风速比均值为0.870,对0.10~0.25,0.075~0.10和<0.075 mm粒径范围土样的各风速平均采集率分别为83.58%,81.16%和60.93%。通过与国内外目前使用的多种集沙仪的优

缺点比较后认为,该集沙仪采样性能较好,适合采集跃移及部分悬移运动颗粒,结构简单,造价便宜,操作方便,可采集同一位置不同高度的风蚀尘,基本符合移动式风蚀风洞实验要求。

(3) 由于风洞内的风况是简单的单一风向,因此在风洞实验中集沙仪无需旋转。但在野外风蚀采样中,可以增加旋转装置,使其可灵活转动,能保证集沙仪进沙口始终正对侵蚀风向,适用于进行长期野外观测。

### [参考文献]

- [1] 董光荣,李长治,高尚玉,等.关于土壤风蚀风洞模拟实验的某些结果[J].科学通报,1987(4):297-301.
- [2] 孙悦超,麻硕士,陈智,等.阴山北麓干旱半干旱区地表土壤风蚀测试与分析[J].农业工程学报,2007,23(12):1-5.
- [3] 臧英,高焕文.土壤风蚀采沙器的结构与性能试验研究[J].农业工程学报,2006,22(3):46-50.
- [4] Bagnold R A. The physics of blown sand and desert dunes[M]. London: Methuen, 1941:265-266.
- [5] Chepil W S. Width of field strips to control wind erosion

- [J]. Kan. Agric. Exp. Sta. Tech. Bull., 1957, 92: 1-16.
- [6] May K R, Pomeroy N P, Hibbs S. Sampling techniques for large wind borne particles [J]. Journal of Aerosol Science, 1976, 7(1): 53-62.
- [7] Fryrear D W. A field dust sampler [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1986, 41(2): 117-120.
- [8] Goossens D, Offer Z Y. Wind tunnel and field calibration of six aeolian dust samplers [J]. Atmospheric Environment, 2000, 34(7): 1043-1057.
- [9] Stout J E, Fryrear D W. Performance of a windblown-particle sample [J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32(6): 2041-2045.
- [10] 荣姣凤, 高焕文, 李胜. 风蚀集沙仪的等动力性实验研究 [J]. 中国水土保持, 2004(5): 17-19.
- [11] 李长治, 董光荣, 石蒙沂. 平口式集沙仪的研制 [J]. 中国沙漠, 1987, 7(3): 49-56.
- [12] 李振山, 倪晋仁, 刘贤万. 垂直点阵集沙仪的集沙效率 [J]. 泥沙研究, 2003(1): 24-32.
- [13] 臧英. 保护性耕作防治土壤风蚀的实验研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2003.
- [14] Shao Y, McTainsh G H, Leys J E, et al. Efficiencies of sediment samplers for wind erosion measurement [J]. Australian Journal Soil Research, 1993, 31(4): 519-531.
- [15] Cornelis W M, Gabriels D. A simple low-cost sand catcher for wind-tunnel simulations [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2003, 28(9): 1033-1041.
- [16] 王铁成. 空气动力学实验技术 [M]. 修订版. 北京: 航空工业出版社, 1995: 168-169.
- [17] 高征锐, 赵爱国. 遥测集沙仪的研制 [J]. 中国沙漠, 1983(1): 32-36.
- [18] 王金莲. 布袋式集沙仪结构参数度集沙效率影响的试验研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2008.
- [19] 赵满全, 付丽宏, 王金莲, 等. 旋风分离式集沙仪在风洞内集沙效率的试验研究 [J]. 中国沙漠, 2009, 29(6): 1009-1014.
- [20] 海春兴. 河北坝上土地利用与土壤风蚀的动力学过程研究 [D]. 北京: 北京师范大学, 2003.

(上接第 50 页)

[参 考 文 献]

- [1] 樊有赋, 陈晔, 秦寿发, 等. 超累积植物与重金属污染的植物修复技术 [J]. 河北农业科学, 2007, 11(5): 73-75.
- [2] 李梅, 曾德华. 重金属污染的植物修复研究进展 [J]. 贵州农业科学, 2007, 35(3): 135-138.
- [3] 王新, 贾永锋, 杨树, 落叶松对土壤重金属的吸收及修复研究 [J]. 生态环境, 2007, 16(2): 432-436.
- [4] 国家环境保护局、国家技术监督局, 中华人民共和国国家标准. GB/T17138—1997, GB/T17139—1997, GB/T17140—1997 [S]. 北京: 中国环境出版社, 1997.
- [5] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [6] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. Geojournal, 1969, 2(3): 108-118.
- [7] Forstner U, Muller G. Concentrations of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in river sediments: geochemical background, man's influence and environmental impact [J]. Geojournal, 1981, 2(5): 417-432.
- [8] 樊金柱. 中国北方煤矸石堆积地生态环境特征与植被建设研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2006.
- [9] 张铨, 韩国才, 陈慧, 等. 黄土高原煤矿区矸石中重金属对土壤污染的研究 [J]. 煤炭学报, 2008, 33(10): 1141-1146.
- [10] 栾以玲, 姜志林, 吴永刚. 栖霞山矿区植物对重金属元素富集能力的探讨 [J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2008, 32(6): 69-72.

(上接第 85 页)

- [11] 王俊, 李凤民, 贾宇, 等. 半干旱黄土区苜蓿草地轮作农田土壤氮、磷和有机质变化 [J]. 应用生态学报, 2005, 16(3): 439-444.
- [12] 袁宝财, 达海莉, 王琛. 宁夏经济的新亮点: 苜蓿 [J]. 内蒙古畜牧科学, 2001, 22(2): 33-35.
- [13] 杨改河. 旱区农业理论与实践 [M]. 北京: 世界图书出版社, 1993: 166-167.
- [14] 荆新海, 田魁祥. 河北省黑龙港地区苜蓿发展与水分生态系统分析 [J]. 农业现代化研究, 1992, 13(4): 218-222.
- [15] 杨文耀. 阴山丘陵旱农区豆科牧草在轮作周期中的用养培肥效应 [J]. 内蒙古草业, 1994(3): 30-33.
- [16] 刘沛松, 贾志宽, 李军, 等. 宁南旱区草粮轮作系统中紫花苜蓿适宜利用年限研究 [J]. 草业学报, 2008, 17(3): 31-39.
- [17] 刘孟雨, 但野利秋, 刘会灵. 苜蓿改良的盐碱土壤对小麦的效应研究: 对小麦生长及产量的影响 [J]. 生态农业研究, 1998, 6(2): 58-60.
- [18] 张春霞, 郝明德, 李丽霞. 黄土高原沟壑区苜蓿地土壤碳、氮、磷组分的变化 [J]. 草地学报, 2005, 13(1): 66-70.
- [19] 刘沛松, 贾志宽, 李军, 等. 不同轮作方式对退化苜蓿草地水分影响及产量效益比较研究 [J]. 西北农业学报, 2010, 19(10): 70-77.
- [20] 刘沛松, 贾志宽, 李军, 等. 宁南旱区不同草粮轮作方式中前茬对春小麦产量和土壤性状的影响 [J]. 水土保持学报, 2008, 22(5): 146-152.