doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.018

# 分流对冲与多级扩容组合式自动集沙仪设计与试验

宋 涛<sup>1,2</sup> 陈 智<sup>1</sup> 边炳传<sup>2</sup> 刘海洋<sup>1</sup> 宣传忠<sup>1</sup> 司志民<sup>1</sup> (1. 内蒙古农业大学机电工程学院,呼和浩特 010018; 2. 泰山学院机械与工程学院,泰安 271000)

**摘要:**针对强风时自动集沙仪测量精度和集沙效率受扰动问题,提出了分流对冲与多级扩容组合降速法,设计了分流对冲与多级扩容组合式自动集沙仪,阐述了风沙分离器和数据无线采集系统的设计原理,并对风沙分离器降速 及分离性能、集沙仪抗强风干扰性能和集沙效率等进行了试验分析。结果表明,分流对冲与多级扩容组合式自动 集沙仪具备了抗强风干扰性能,可实时、连续和远距离无线采集数据,自由旋转的起动风速为4.23 m/s,等动力性 为92.94%,平均集沙效率为90.42%,当风速低于18 m/s时,粒径55.36 μm 以上的土样只要进入集沙仪,就可被 完全收集;数据无线采集系统的供电续航能力达31 h 以上,无障碍时信号传输距离为208.51 m,可较好地满足土壤 风蚀量的自动观测需求。

关键词:集沙仪;分流对冲与多级扩容;集沙效率;无线采集系统 中图分类号: S237 文献标识码: A 文章编号:1000-1298(2016)11-0134-08

# Design and Experiment of Shunt-hedging and Multi-stage Expansion Combined Automatic Sand Sampler

Song Tao<sup>1,2</sup> Chen Zhi<sup>1</sup> Bian Bingchuan<sup>2</sup> Liu Haiyang<sup>1</sup> Xuan Chuanzhong<sup>1</sup> Si Zhimin<sup>1</sup> (1. College of Machine and Electronics Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China 2. College of Machinery and Engineering, Taishan University, Taian 271000, China)

Abstract: Since the beginning of the new century, the research on the field observation and test equipment has been developed, and many important results have been achieved. To overcome the shortcomings and deficiencies of the current test equipment, improve the level of soil erosion theory, scientifically prevent and control soil erosion, developing more advanced and practical soil erosion test equipment has a great significance. For the problems of measuring accuracy of automatic sand sampler and sand collection efficiency affected by strong wind interference, a shunt-hedging and multi-stage expansion combined reducing velocity method was proposed, a shunt-hedging and multi-stage expansion combined automatic sand sampler was designed, design principle of sand separator and data wireless acquisition system were expounded, and a test and analysis on reducing velocity and separation performance of sand separator, anti strong wind interference performance and collection efficiency of sand sampler were carried out. The results showed that shunt-hedging and multi-stage expansion combined automatic sand sampler had anti strong wind interference performance and it could collect data in realtime, continuously and in a long distance wireless. The starting wind speed of free rotation was 4.23 m/s, equal dynamic property was 92.94%, average sand collection efficiency was 90.42%, when wind speed was less than 18 m/s, as long as soil samples which particle was greater than 55.36  $\mu$ m entered sand sampler, can be fully collected, power supply battery life of data wireless acquisition system was up to 31 h. The signal transmission distance was 208.51 m without obstacles, which can well meet

收稿日期:2016-05-03 修回日期:2016-06-01

基金项目:国家自然科学基金项目(41361058、41161045)

作者简介:宋涛(1979—),男,博士生,泰山学院讲师,主要从事环境控制工程及其技术装备研究,E-mail: stsong925@163.com

通信作者:陈智(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事环境控制工程及其技术装备研究,E-mail: sgchenzhi@ imau.edu.cn

the automatic observation need for soil erosion mass.

Key words: sand sampler; shunt-hedging and multi-stage expansion; sand collection efficiency; wireless acquisition system

# 引言

2015年《第五次中国荒漠化和沙化土地监测》 显示,截止 2014 年,我国荒漠化土地面积为 261.16万 km<sup>2</sup>,占国土面积的27.2%,其中风蚀化 土地面积为172.12万km<sup>2</sup>,占荒漠化土地总面积的 65.91%。由于风蚀而导致的富含养分和具有较高 持水能力的土壤细颗粒的损失,是沙漠化过程中土 壤退化的主要机制<sup>[1]</sup>。21 世纪以来,围绕土壤风蚀 进行的野外观测与测试设备研究得到了空前发展, 取得了许多重要研究成果。其中,防治土壤风蚀和 抗风蚀效应的研究<sup>[2-5]</sup>为预测风蚀和制定防治风蚀 措施奠定了理论基础;各类集沙仪的研制<sup>[6-11]</sup>为研 究风蚀产生机理和风蚀过程的发生、发展和演化规 律提供了可靠的测试设备。野外观测是研究土壤风 蚀的最基本方法,通常是在试验区放置风速仪、集沙 仪等测试设备,对风蚀地表的一系列指标进行长期 定位观测。但是,由于受野外环境条件的限制,研究 人员无法在现场进行长时间连续观测,加之测试设 备的滞后,很大程度上影响了土壤风蚀理论的研究。 因此,研究更为先进实用的土壤风蚀测试设备对克 服目前测试设备的缺点与不足,提升土壤风蚀理论 研究水平,科学防治土壤风蚀具有重要意义。

现有集沙仪,一类是手动集沙仪,集沙盒为可拆装式,待风蚀观测完毕后,需要将集沙盒拆下拿回实验室进行沙尘称量,采用这类集沙仪不仅无法得到连续的观测数据,而且在一定程度上增加了人为劳动;另一类是自动集沙仪,集沙盒下设计了称量传感器,虽然减少了人为劳动,实现了集沙盒内沙尘质量的实时测量和记录,但是由于发生土壤风蚀地区的平均风速一般较大,风力不但扰动称量传感器,影响测量精度,而且也增大气流对沙尘的曳引力,影响集沙效率。

为此,本文提出分流对冲与多级扩容组合降速 法,设计自动集沙仪,以满足复杂多变的野外风蚀观 测需求,提高风蚀观测数据的科学性和可靠性。

# 1 总体结构与工作原理

分流对冲与多级扩容组合式自动集沙仪由风沙 分离器、旋转导向装置、数据无线采集系统、集沙盒、 底座等组成(图1)。其中,风沙分离器和数据无线 采集系统是该集沙仪的关键部件。 工作原理:当风沙流作用于导向板时,进气口对 准来流方向,风沙流进入风沙分离器,风沙发生分 离,尾气从排气口排出,沙尘落入集沙盒,集沙盒下 称量传感器采集到沙尘质量信号,经数据自动采集 系统对信号作相应处理后,无线传输至远处的上位 机软件,从而实现土壤风蚀量的远距离无线采集。





 1.导向板 2.挡风板 3.风沙分离器 4.旋转座 5.球轴承
 6.集沙盒 7.称量传感器 8.传输天线 9.数据自动采集与无 线传输模块 10.电源开关 11.充电孔 12.蓄电池

强风风速为 10.8~13.8 m/s,陆面表象为大树 枝摇动,打雨伞行走困难。受强风作用的气流进入 集沙仪,不仅会扰动称量传感器,而且也会重新携带 沙尘从排气口排出。假如强风气流进入集沙仪后, 速度出现大幅度降低,不仅低至沙尘悬浮速度以下, 气流无力携带沙尘,而且也低至无力扰动称量传感 器,那么强风作用时风力对称量传感器的扰动问题 和风沙在集沙仪内部的高效分离问题即可解决。可 见,强风作用时风力对称量传感器的扰动问题和风 沙在集沙仪内部的高效分离问题实质上就是降速问 题。

# 2 风沙分离器设计

# 2.1 分流对冲与多级扩容组合降速法

分流对冲降速法是指将气流分成2股,让2股 气流反向对冲,以实现气流速度大幅度降低的方法。 文献[10]研究表明,采用该方法的分流对冲式风沙 分离器具备了较高的降速性能。所谓分流对冲与多级扩容组合降速法是指以分流对冲降速为基础,通过设计多级扩容结构以实现气流速度多次降低的方法。基于此方法,设计了分流对冲与多级扩容组合式风沙分离器,其结构模型如图2所示,由进气管、分流对冲腔、扩容腔、分离腔、上回流腔、下回流腔、排气管和楔形体组成。其中,进气管、扩容腔和分离腔设计成扩容结构,分别作为一级、二级和三级扩容。



Fig. 2 Structure model of shunt-hedging and multi-stage expansion combined sand separator

1.进气管 2. 楔形体 3. 排气管 4. 分流对冲腔 5. 扩容腔
 6. 上回流腔 7. 分离腔 8. 下回流腔

降速原理:强风气流进入进气管后,受一级扩容 影响,实现第1次降速;在分流对冲腔内部,楔形体 和排气管组成分流结构,气流由分流结构分成2股, 并在分流结构后面发生反向对冲,实现第2次降速; 对冲后的气流下行至扩容腔,受二级扩容影响,实现 第3次降速;进入上回流腔的气流受回流影响,实现 第4次降速;从上回流腔出口下行的气流受分离腔 的扩大空间影响,形成三级扩容,实现第5次降速; 分离腔内下行气流受下回流腔的回流影响,实现第 6次降速。通过这一系列的降速,将排沙口气流速 度降至更低。

#### 2.2 参数选择

# (1)进气管

进气管由等容段和扩容段 2 部分组成,等容段 起到稳定人口气流的作用,长度取 20 mm;扩容段起 到扩容降速的作用,长度取 100 mm,前端宽度取 15 mm、高度取 22.5 mm,后端宽度取 30 mm、高度取 45 mm。

(2)分流对冲腔、分离腔和扩容腔

分流对冲腔是气流分流对冲的空间,受进气管 扩容段后端的约束,高度取 45 mm,直径取 100 mm。 分离腔是风沙分离的空间,需要设计大一些,以便风 沙能较充分地降速和分离,故高度取 80 mm,直径取 150 mm。扩容腔位于分流对冲腔与分离腔之间,起 到对下行气流扩容降速的作用,其上端面和下端面 参数分别受分流对冲腔与分离腔的约束,高度取 25 mm。

#### (3)上回流腔和下回流腔

回流腔起到引导气流发生回流降速的作用。上 回流腔高度取45 mm,下回流腔高度取30 mm。上 回流腔出口小于下回流腔出口(排沙口),出口直径 分别取60 mm和90 mm,以形成扩容趋势。

(4) 排气管和楔形体

排气管起到排出尾气和缓解腔体内气动压力的 作用,呈直角状,直径取 60 mm,水平段长度取 165 mm,垂直段长度取 60 mm;楔形体附着在距离排 气管下端面 10 mm 处,与排气管相切,高度取 45 mm,尖端正对进气管径向中心轴线。

#### 2.3 数值模拟与分析

假设工况为常压、温度为 20℃,人口气流速度 为 13.8 m/s(强风),则从图 3 可以看出:①通过进 气管的一级扩容,气流速度由 13.8 m/s 降至 6.46 m/s,降速幅度为 53.19%。②通过分流对冲, 气流速度由 6.46 m/s 降至 2.16 m/s,降速幅度为 66.56%,并将气流由水平流动转变为垂直下行流 动。③通过扩容腔的二级扩容和上回流腔的回流作 用,很大程度地减缓了后续气流的降速压力。④通 过上回流腔出口与分离腔空间的三级扩容,气流速 度由 3.59 m/s 降至 2.87 m/s,降速幅度为 20.06%。 ⑤通过下回流腔的回流作用,气流速度由 2.87 m/s 降至 1.44 m/s,降速幅度为 49.83%。通过这一系 列的降速,气流速度从入口 13.8 m/s 到排沙口 1.44 m/s,降速幅度为 89.57%,大于分流对冲式风 沙分离器数值模拟的 82.46%<sup>[9]</sup>。



可见,采用分流对冲与多级扩容组合降速法的 风沙分离器的降速性能有了较大提高。

#### 2.4 降速及分离效率试验

#### 2.4.1 试验条件

试验地点选在内蒙古农业大学环境与能源工程 学科实验室,无外界风力干扰,常压,室内温度20~ 23℃。采用的设备:微型风洞<sup>[12]</sup>1台,电子秤(精度 0.01g)1台,32目标准筛1个,Testo 425型热敏风 速仪1部,BT2001型激光粒度分布仪1台,刻度尺 1把,胶布1捆,土样收集袋6个,分流对冲与多级 扩容组合式风沙分离器1个、集沙盒1个,输沙漏斗 1个,称沙容器1个,土样收集盒6个,试验架1个, 调整板若干。

2.4.2 试验方法

(1)测试排沙口下方气流速度

试验前,调整风沙分离器进气口正对微型风洞 试验段中心轴线。试验时,将风速仪探头从微型风 洞试验段测速孔伸入,置于试验段中心轴线位置,对 准来流方向,开启风机,待风速稳定至13.8 m/s(强 风)时,再将风速仪探头分别置于距离排沙口0、10、 20、30、40、50、60、70、80 mm的水平面内,正对排沙 口排气方向,在水平面内缓慢移动探头,随机读取 10 个瞬时值。

(2)测试风沙分离效率和粒径收集范围

试验土样取自内蒙古农业大学科技园试验田, 将试验土样自然干燥,从干燥后的土样中称取1kg, 利用恒温箱干燥法,在105℃干燥箱内将土样干燥 6~8h至恒质量,测得自然干燥后土样的含水率为 1.34%。筛出粒径小于0.5 mm的混合土样,取 15份,每份1kg。

试验时,取6、9、12、15、18 m/s5个试验风速。 待微型风洞试验段风速稳定至试验风速时,往输沙 漏斗内添加土样,添加时间不少于5 min,每个风速 做3次。将每次试验后集沙盒收集的土样称量,按 相同风速取均值,用于分析分离效率;相同风速采用 同一个土样收集袋,用于分析排气口排出土样的粒 径分布范围。

分析土样粒径时,采用湿法测试。测试前,先用 清水在粒度分布仪测试系统内循环若干次,以洗净 管道。测试时,将土样添加到分析腔,冲洗土样收集 袋的水土混合物也添加到分析腔。

2.4.3 试验结果与分析

(1) 排沙口下方气流速度分析

从图 4 可以看出,距离排沙口越远,气流速度越 小。当距离排沙口 60 mm 时,气流速度降至 0.19 m/s,处于静风状态;当距离进一步增大时,气 流速度有所降低,但降低幅度不大。这说明在设计 集沙盒时,只要集沙盒底部距离排沙口达 60 mm 以 上,就可消除排沙口气流对集沙盒下称量传感器的 扰动。



Fig. 4 Airflow velocity below desilting mouth

(2) 粒径收集范围分析

从图 5 可以看出,当试验风速为 6~18 m/s 时, 排气口排出土样的粒径分别分布于 8.059、17.05、 29.12、40.15、55.36 μm以下。这说明随风速增大, 排气口排出土样的粒径也随之增大,当风速低于 18 m/s时,粒径大于 55.36 μm 的土样只要进入风沙 分离器,就可被完全分离和收集。

(3)风沙分离效率分析

风沙分离效率是风沙分离后集沙盒收集到的 沙尘质量与风沙分离前的沙尘质量之比。每次试 验的输沙量为1kg,则可得风速为6~18 m/s 时风 沙分离器的风沙分离效率,如图6所示,风沙分离 效率随试验风速增大而略有减小,但减小幅度不 大。



可见,当风速为6~18 m/s时,分流对冲与多级

Fig. 5 Particle size distribution range of soil sample in exhaust port when wind speed was 6 ~ 18 m/s

扩容组合式风沙分离器具有较高的风沙分离效率, 平均分离效率为 99.78%。



#### 3 数据无线采集系统设计

数据无线采集系统起到实时、连续和远距离无 线采集数据的作用,其程序框图如7所示。数据无 线采集系统由自动称量模块、数据无线采集模块和 上位机数据处理软件组成。各模块功能如图 8 所 示,悬臂梁式称量传感器通过桥式应变片的电阻变 化将沙尘质量信号转变为可测量的电压信号,并将 电压信号传输给自动称量模块的信号调理电路,该 电路采用了 HX711 高精度 A/D 转换芯片,具有将 微弱的电压信号放大128倍的功能,并集成了滤波 器,自动滤除放大信号中 50 Hz 的工频干扰。信号 调理电路还具有管理电源的功能,为自动称量模块 和数据无线采集模块提供电源供应。单片机控制模 块通过串行通信方式与自动称量模块、数据无线传 输模块连接,对自动称量模块传输来的数据进行读 取、处理、打包和发送。数据无线传输模块的任务是 实现信道建立、数据的无线传输、数据包的 CRC 校 验等功能。数据无线接收模块是采用带 USB 接口 的 WLK01L39 无线模块,直接与计算机串口相连 接,实现数据在无线传输模块与无线接收模块之间

的收发,将数据包传输给上位机数据处理软件。上 位机软件接收到数据包后,根据数据的类型信息对 数据进行解析、处理,并对处理后的数据每1s储存 一次,即为当前集沙量,从而实现实时、连续和远距 离无线采集数据的功能。

数据无线采集系统采用的是9V电路,通过 12V转9V微型变压器与12V蓄电池相连,集沙仪 底座设有充电孔,配备了12V铅酸蓄电池专用充电 器和12V车载逆变器,可对蓄电池进行直流和交流 充电。

# 4 集沙仪性能试验

#### 4.1 试验设备

分流对冲与多级扩容组合式自动集沙仪1台, 便携式计算机1台,Testo 425型热敏风速仪1部、 50m皮卷尺1把,200g砝码1个,32目标准筛1个, 电子秆(载量30kg)1台,1m刻度尺1把,量角器 1个,调整板若干。

#### 4.2 试验方法

4.2.1 测试供电续航能力

试验地点选在内蒙古农业大学环境与能源工程 学科实验室,无外界风力干扰,常压,室外温度为 -2~5℃。通过控制实验室门窗的开启角度,调整 室内温度分别为20~25℃、10~20℃和0~10℃。 开启数据采集系统,开始计时,待上位机软件无法接 收到信号时,停止试验,记录试验时间,即为各温度 时供电续航能力,重复做3次,取均值。

4.2.2 测试数据无线传输距离

试验地点选在内蒙古农业大学西区操场,常压,



图 7 数据无线采集系统程序框图(LabVIEW)

Fig. 7 Program diagram of data wireless collection system (LabVIEW)



Fig. 8 Each module function diagram of data wireless collection system

环境温度为 7 ~ 10℃。将集沙仪置于操场北面,集 沙盒内放置 200 g 砝码,开启数据采集系统,试验人 员手持计算机向南移动,待数据传输出现丢包现象 时,标记所处位置,所测距离即为无障碍时数据无线 传输距离,重复做 3 次,取均值。再以东墙(厚 32 cm)为障碍,向东移动,所测距离即为有障碍时数 据无线传输距离。

#### 4.2.3 测试自由旋转起动风速

试验地点选在内蒙古农业大学 0FDY - 1.2 型 移动式风蚀风洞<sup>[13]</sup>,无外界风力干扰,常压,室温 7~10℃。试验前,将集沙仪置于距风洞口 150 cm 处试验段,调整集沙仪进气口对准风洞试验段中心 轴线。试验时,将进气口采集方向分别偏离风洞中 心轴线 15°、30°、60°和 90°。试验人员将风速仪探 头从风洞顶部测速孔伸入,对准来流方向和风洞中 心轴线,开启风机,待集沙仪发生旋转且进气口对准 来流方向时,稳定风速,随机读取 10 个瞬时值,取均 值,即为自由旋转起动风速。按此方法,每个夹角重 复做 3 次。

# 4.2.4 测试等动力性

将风速仪探头置于集沙仪进气口前方 10 cm 位 置,与进气口中心线齐平,随机读取 10 个瞬时值,即 为参照风速;再将探头置于进气口中心位置,随机读 取 10 个瞬时值,即为进气口风速。

# 4.2.5 测试抗强风干扰性能

稳定风速至18 m/s,开启数据无线采集系统,在 不输送土样的情况下,观察上位机软件的集沙量波 形图变化趋势,测试10min,以分析集沙仪排沙口气 流是否对称量传感器存在扰动影响。

#### 4.2.6 测试集沙效率

试验土样取自内蒙古农业大学科技园试验田, 利用烘干法测得自然干燥后土样的含水率为 1.41%。筛出粒径小于 0.5 mm 的混合土样,取 35 份,每份 10 kg。

试验前,调整集沙仪进气口下端距离风洞底 板分别为1、4、8、16、22、32、40 cm,每个采集高 度分别取6、9、12、15、18 m/s5个试验风速。试 验时,稳定至试验风速,依次开启数据采集系统 和土样输送装置,待土样输送完毕、上位机软件 的当前集沙量为零且保持不变时,保存累计集沙 量数据。

#### 4.3 试验结果与分析

4.3.1 供电续航能力分析

从表1可知,当集沙仪工作于0~25℃环境时, 数据无线采集系统的供电续航能力大于31h,且随 温度变化,供电时间的浮动值低于0.91%。这说明 集沙仪数据无线采集系统的供电性能稳定,能较好 地适应昼夜温差较大的内蒙风蚀观测环境。

# 4.3.2 数据无线传输距离分析

从表1可知,当无障碍干扰时,数据无线传输的 平均距离为208.51m;当有32 cm墙干扰时,平均距 离仅为76.63 m。这说明集沙仪数据无线传输系统 受障碍干扰的影响较大,适合无较大障碍干扰的风 蚀观测环境。

# 4.3.3 自由旋转起动风速分析

从表1可知,集沙仪自由旋转的起动风速随偏 角增大而减小。当偏角为15°时,起动风速均值为 4.23 m/s,明显大于其他偏角的起动风速,故可作为 集沙仪自由旋转的最大起动风速,也就是说,当风速 达到4.23 m/s时,不论集沙仪进气口处于何方向, 均能对准来流方向。

## 4.3.4 等动力性分析

测得进气口风速为 12.76 m/s,参照风速为 13.73 m/s,两者比值为 0.929 4,即等动力性为 92.94%,文献[14-16]研究认为,进气口风速与参 照风速之比达到 0.91 以上的集沙仪可认为其基本 符合等动力性要求。

	衣 I	果沙区に	上月已几人	短剱	掂	
Tab. 1	Perfor	mance tes	t data	of s	and	sample

试验序号 —	ſ	供电续航能力/h			数据无线传输距离/m		自由旋转起动风速/(m·s <sup>-1</sup> )			
	20 ~ 25 ℃	10 ~ 20°C	0 ~ 10°C	无障碍	32 cm 障碍	15°	30°	60°	90°	
1	31.73	31.87	32.11	209.95	73.63	4.23	4.08	4.11	3.86	
2	31.64	31.96	31.94	212.24	76.32	4.19	4.15	4.07	3.92	
3	31.89	31.94	32.07	203.33	78.15	4.28	4.22	3.92	3.97	
均值	31.75	31.92	32.04	208.51	76.63	4.23	4.15	4.03	3.92	

# 4.3.5 抗强风干扰性能分析

如图 9 所示,当风速为 18 m/s 时,上位机软件 的集沙量波形图无波动现象,当前集沙量和累计集 沙量始终为 0,这说明试验过程中称量传感器未受 到排沙口气流的扰动,也就是说,此时集沙仪具备了 抗强风干扰性能。

4.3.6 集沙效率分析

将各风速时上位机软件的累计集沙量数据进行 整理,如表2所示,当风速一定时,累计集沙量随采 集高度的增加而大幅度降低。





表 2 各风速时进气口宽度(15 mm)的实测集沙量 Tab.2 Sand amount of inlet width (15 mm) at each wind speed

风速/	各采集高度的集沙量/g						拟合方程系数		决定系数	总集沙	
$(m \cdot s^{-1})$	1 cm	4 cm	8 cm	16 cm	22 cm	32 cm	40 cm	a	b	$R^2$	量/g
6	52.9	9.80	2.4	0.6	0.1	0	0	52.99	-1.314	0.9981	115.77
9	47.3	11.1	3.4	1.1	0.8	0.1	0	47.44	- 1. 150	0.9971	134.40
12	45.7	10.9	3.7	1.3	1.0	0.2	0	45.82	- 1. 125	0. 997 7	135.44
15	41.4	10.6	4.1	1.5	1.2	0.3	0	41.53	- 1.066	0. 997 6	136.11
18	38.2	10.4	4.4	1.6	1.3	0.4	0	38.34	- 1.019	0.9973	136.58

利用 Matlab 软件对集沙量按相同风速、不同采 集高度进行方程拟合,集沙量随采集高度呈幂函数 分布,拟合方程为

$$q = az^b \tag{1}$$

式中 q----某采集高度的集沙量,g

a、b——拟合方程的系数

z----采集高度, cm

将式(1)在高度区间[1,40]上积分,可得各风速时进气口宽度(15 mm)的实测集沙量,如表 2 所示。风洞试验段宽度 1 m 的实际输沙量为 10 kg,则 15 mm 宽度(进气口宽度)的实际输沙量为 150 g,故可得风速为 6~18 m/s 时集沙仪的集沙效率分别为

77. 18%、89. 6%、90. 29%、90. 74% 和 91. 05%。

当风速为 6 m/s 时,虽然已达到土样的起动风速,但是部分土样未能随风而起形成风沙流,而是沿地表蠕移,甚至仍有部分土样未被吹起而残留在风洞底板,故本文设计的集沙仪不适合 6 m/s 以下风速时的测量,因此在计算集沙仪的平均集沙效率时应舍去风速 6 m/s 时的集沙效率,可得平均集沙效率为 90.42%。

# 5 结论

(1)当风速低于18 m/s时,粒径55.36 μm以上的土样只要进入分流对冲与多级扩容组合式自动集

沙仪,就可被完全收集。

(2)风沙分离器的平均分离效率为99.78%,集 沙仪的平均集沙效率为90.42%。当风速、土壤粒 径分布、采集时间等一定时,集沙仪进气口的土样采 集效率和风沙分离器的分离效率是影响集沙仪集沙 效率的主要因子,若要进一步提高集沙效率,关键是 提高进气口的土样采集效率。 (3)分流对冲与多级扩容组合式自动集沙仪具 备了抗强风干扰性能,可实时、连续和远距离无线采 集数据,自由旋转的起动风速为4.23 m/s,等动力性 为92.94%,平均集沙效率为90.42%,数据无线采 集系统的供电续航能力达31 h 以上,无障碍时信号 传输距离为208.51 m,可较好地满足土壤风蚀量的 自动观测需求。

#### 参考文献

- 1 赵哈林,周瑞莲,苏永中,等. 我国北方半干旱地区土壤的沙漠化演变过程与机制[J].水土保持学报,2007,21(3):1-6. ZHAO Halin, ZHOU Ruilian, SU Yongzhong, et al. Processes and mechanisms of soil desertification in semiarid areas, Northern China[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2007,21(3):1-6.(in Chinese)
- 2 臧英,高焕文,周建忠.保护性耕作对农田土壤风蚀影响的试验研究[J].农业工程学报,2003,19(2):56-60. ZANG Ying, GAO Huanwen, ZHOU Jianzhong. Experimental study on soil erosion by wind under conservation tillage [J]. Transactions of the CSAE, 2003,19(2):56-60.(in Chinese)
- 3 冯晓静,高焕文,李洪文,等. 北方农牧交错带风蚀对农田土壤特性的影响[J]. 农业机械学报,2007,38(5):51-54. FENG Xiaojing, GAO Huanwen, LI Hongwen, et al. Effect of wind erosion in agro-pastoral regions on soil characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2007,38(5):51-54. (in Chinese)
- 4 赵永来,陈智,孙悦超,等.作物残差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.
  ZHAO Yonglai, CHEN Zhi, SUN Yuechao, et al. Testing on anti-wind erosion effect of soil for crop stubble coverage farmlands
  [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(6):38-42. (in Chinese)
- 5 麻硕士,陈智.土壤风蚀测试与控制技术[M].北京:科学出版社,2010.
- 6 董治宝,孙宏义,赵爱国. WITSEG 集沙仪风洞用多路集沙仪[J].中国沙漠,2003,23(6):714-720. DONG Zhibao, SUN Hongyi, ZHAO Aiguo. WITSEG sampler: a segmented sand sampler for wind tunnel test[J]. Journal of Desert Research, 2003, 23(6): 714-720. (in Chinese)
- 7 顾正萌,郭烈锦,张西民.新型主动式竖直集沙仪研制[J].西安交通大学学报,2006,40(9):1088 1089. GU Zhengmeng, GUO Liejin, ZHANG Ximin. Development of a new type of active vertical sand trap[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006,40(9):1088 - 1089. (in Chinese)
- 8 付丽宏,赵满全.旋风分离式集沙仪设计与试验研究[J].农机化研究,2007(10):102-105. FU Lihong,ZHAO Manquan. Study on sand sampler of gas cyclones and swirl[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007(10):102-105.(in Chinese)
- 9 李荧,史永革,蒋富强.全风向梯度集沙仪的研制[J].铁道技术监督,2012,40(2):41-43. LI Ying, SHI Yongge, JIANG Fuqiang. Study on the all wind direction gradient sand sampler[J]. China Academy of Railway Sciences,2012,40(2):41-43. (in Chinese)
- 10 宋涛,陈智,麻乾,等.分流对冲式集沙仪设计及性能试验[J].农业机械学报,2015,46(9):173-177.
  SONG Tao, CHEN Zhi, MA Qian, et al. Design and performance experiment of shunt-hedging sand sampler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(9):173-177. (in Chinese)
- 11 刘海洋,常佳丽,陈智,等. 全自动多通道农田无线集沙仪的设计研究[J]. 农业机械学报,2016,47(6):53-60. LIU Haiyang, CHANG Jiali, CHEN Zhi, et al. Study on automatic multi-channel wireless agricultural sand sampler [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(6):53-60. (in Chinese)
- 12 刘海洋,孔丽丽,陈智,等. 可移动微型低速风洞的设计与试验[J].农机化研究,2016(9):244-249. LIU Haiyang, KONG Lili, CHEN Zhi, et al. Design and experiment of portable mini low-speed wind tunnel[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2016(9):244-249. (in Chinese)
- 13 段学友.可移动式风蚀风洞流空气动力学特性的测试与评价[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2005. DUAN Xueyou. The test and evaluation of characteristic of aerodynamics on portable erosion wind tunnel[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University,2005. (in Chinese)
- 14 王嘉珺,姬亚芹,赵雪艳.集沙仪结构设计及其性能实验研究[J].水土保持通报,2012,32(3):116-121. WANG Jiajun, JI Yaqin, ZHAO Xueyan. Structural design and performance experiment on a sand sampler[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012,32(3):116-121.(in Chinese)
- 15 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.
- 16 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.