

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.025

# 分流对冲式集沙仪设计与性能试验\*

宋涛 陈智 麻乾 司志民 刘海洋 宣传忠

(内蒙古农业大学机电工程学院, 呼和浩特 010018)

**摘要:** 集沙仪是观测风沙流结构和研究风沙移动规律的必备仪器。针对强风环境下集沙仪内部风沙的有效分离问题,提出了分流气体对冲法,设计了分流对冲式集沙仪,阐述了分流气体对冲法的设计原理和分流对冲式集沙仪的参数分析理论,并在利用 Fluent 软件对其风沙分离器进行数值模拟的基础上进行了风洞试验验证和性能分析。结果表明,采用该方法的分流对冲式集沙仪具备了较高的降速性能和抗强风性能,排气口风速降幅达 88.44%,排沙口风速降幅达 90%,保证了集沙仪内部风沙的有效分离,平均集沙效率达 90.15%,等动力性达 93.27%,符合集沙仪设计的基本原则,制作成本低,能较好地满足风洞试验和风蚀观测要求。

**关键词:** 分流对冲式集沙仪 风沙分离器 集沙效率 设计 性能试验

**中图分类号:** S237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)09-0173-05

## Design and Performance Experiment of Shunt-hedging Sand Sampler

Song Tao Chen Zhi Ma Qian Si Zhimin Liu Haiyang Xuan Chuanzhong

(College of Machine and Electronics Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China)

**Abstract:** Sand sampler is necessary for studying sand flow structure and sand movement law. In order to solve the effective separation problem inside sand sampler under the strong wind environment, this paper proposed a diversion gas hedging method. A shunt-hedging sand sampler was designed, and the design principle of diversion gas hedging method and parameters analysis for shunt-hedging sand sampler were described. The wind tunnel experiment and performance analysis on a wind-sand separator were carried out by Fluent software based on numerical simulation. The results showed that the proposed shunt-hedging sand sampler showed a high deceleration and anti-strong winds performance. The deceleration magnitude of exhaust-port was 88.44%, and the deceleration magnitude of desilting-port was 90%, which ensured the effective separation of wind-sand inside a sand sampler. The average sampling efficiency was 90.15%, and the equal dynamic performance was 93.27%, which was consistent with the basic requirements of designing a sand sampler. It also had low production cost, and could better satisfy the needs of wind tunnel experiments and erosion observation.

**Key words:** Shunt-hedging sand sampler Wind-sand separator Sampling efficiency Design Performance experiment

### 引言

集沙仪是一种能够采集风蚀过程中随风搬运的沙尘颗粒的设备,是观测风沙流结构和研究风沙移动规律的必备仪器。从 Bagnold<sup>[1]</sup>设计了首台集沙

仪以来,多种类型、不同用途的集沙仪相继问世<sup>[2-6]</sup>。集沙效率是集沙仪的关键指标,而提高集沙效率最直接有效方法是保证风沙在集沙仪内部的有效分离。然而,当集沙仪在强风环境(风速约 10.8~13.8 m/s)下工作时,其分离效率往往波动很

收稿日期: 2015-02-27 修回日期: 2015-03-19

\* 国家自然科学基金资助项目(41361058,41161045)

作者简介: 宋涛,博士生,主要从事环境控制工程及技术装备研究,E-mail: stsong925@163.com

通讯作者: 陈智,教授,博士生导师,主要从事环境控制工程及技术装备研究,E-mail: sgchenzhi@imau.edu.cn

大。为解决此问题,许多集沙仪采用“扩大通道法”,即进沙通道逐渐扩大,形成扩散型变截面通道,先将气流速度降到足够低,再撞击挡板,迫使气流速度低于沙尘悬浮速度,实现风沙分离。本文提出了另一种风沙分离方法,即“分流气体对冲法”,就是先将气流分成两股,再让两股气流对冲,迫使气流速度大幅度降低至沙尘悬浮速度以下,实现风沙分离。

为此,本文设计一台分流对冲式集沙仪,在集沙仪的风沙分离器内部安装一个分流结构,引导气流发生分流、对冲,从而实现气流速度的大幅度降低,保证强风环境下集沙仪内部风沙的有效分离。

## 1 总体结构与工作原理

### 1.1 总体结构

分流对冲式集沙仪主要由风向标、防护罩、固定块、61828 深沟球轴承、底座、风沙分离器、旋转座、集沙盒和调整块等组成(图 1)。风沙分离器采用 1.5 mm 不锈钢板钣金焊接而成,质量约 1 kg。固定块由塑料车削而成,其余部件采用 Q235 钢质材料,以焊接为主,易加工,整体质量约 20 kg,制作成本低。

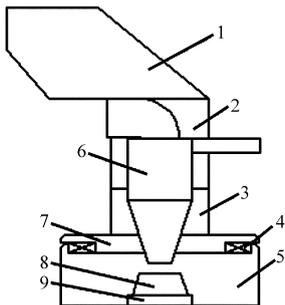


图 1 分流对冲式集沙仪示意图

Fig. 1 Schematic of shunt-hedging sand sampler

1. 风向标 2. 防护罩 3. 固定块 4. 61828 深沟球轴承 5. 底座
6. 风沙分离器 7. 旋转座 8. 集沙盒 9. 调整块

### 1.2 工作原理

当气流作用于风向标时,进气口就会正对来流方向,气流自由进入集沙仪的风沙分离器,在风沙分离器内部分流结构的影响下,气流速度出现大幅度衰减,当气流速度低于沙尘悬浮速度时,风沙开始分离,气体从排气口排出,沙尘则落入集沙盒。

### 1.3 强风环境影响

强风即 6 级风,风速约 10.8 ~ 13.8 m/s,陆面物象表现为大树枝摇动,电线有呼呼声,打雨伞行走有困难。沙尘悬浮速度是影响风沙分离的关键因素,也是确保强风干扰时风沙有效分离的关键指标。研究<sup>[7]</sup>认为,跃移颗粒(即粒径  $d_*$  为 0.1 ~ 0.5 mm)是

土壤风蚀研究的关键和重点内容。将粒径  $d_* = 0.1 \sim 0.5 \text{ mm}$  代入沙尘悬浮速度公式<sup>[8]</sup>

$$V_0 = 3.62 \sqrt{\frac{d_* (\rho_* - \rho)}{\rho}} \left\{ 1 - \left[ \frac{1.24 \left( \frac{M}{\rho_*} \right)^{\frac{1}{3}}}{D} \right]^2 \right\} \quad (1)$$

式中  $V_0$ ——沙尘悬浮速度, m/s

$d_*$ ——沙尘粒径, m

$\rho_*$ ——沙尘密度, kg/m<sup>3</sup>

$\rho$ ——地表空气密度, kg/m<sup>3</sup>

$c$ ——系数,取 0.4

$M$ ——沙尘质量, kg

$D$ ——分离筒体内径, m

可得  $V_0 = 2.7 \sim 6 \text{ m/s}$ ,即跃移颗粒的悬浮速度为 2.7 ~ 6 m/s。因此,当集沙仪在强风环境下工作时,若保证跃移颗粒能在其内部有效分离,不随气流从排气口排出,则排气口气流速度需降至 2.7 m/s 以下(即降幅需 80% 以上)。

## 2 风沙分离器设计

风沙分离器是分流对冲式集沙仪的关键部件,其性能决定了集沙仪的性能。

### 2.1 设计原理

由圆柱绕流理论可知,在边界层内,附着流动是主要流动形式,当气流在边界层尾部发生分离时,则会出现涡旋;在边界层外,自由绕流是主要流动形式,在绕流尾部也会出现涡旋。因此,只要结构体符合圆柱绕流条件,气流就会在结构体后面出现涡旋现象。当涡旋发生时,部分气流在逆压梯度的作用下形成逆流,与后续来流相互作用,设作用力为  $F$ ,在时间  $\Delta t > 0$  内,存在冲量  $F\Delta t > 0$ ,由动量守恒定律可知  $M\Delta v > 0$ ,动量损耗,气流速度必然降低。

基于以上圆柱绕流理论,设计了一个分流结构,该结构由楔形体和排气管组成(图 2)。气流在 A 点由楔形体分成 2 股,这 2 股气流在分流结构外表面和風沙分离器内表面之间形成边界层内外流动,在 B 点发生对冲和涡旋,气流相互作用,从而实现气流速度的大幅度降低。

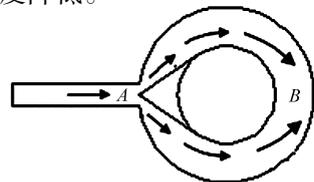


图 2 气流分流对冲示意图

Fig. 2 Schematic of airflow shunting and hedging

## 2.2 结构参数分析

风沙分离器设计应遵循3个基本原则<sup>[9-10]</sup>:等动力性、高效率性、非选择性。故由进气管、楔形体、排气管、圆筒体、锥筒体等组成(图3)。

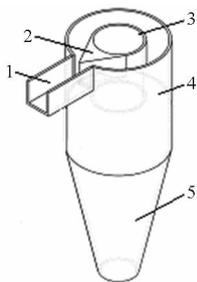


图3 风沙分离器示意图

Fig. 3 Schematic of wind-sand separator

1. 进气管 2. 楔形体 3. 排气管 4. 圆筒体 5. 锥筒体

### (1) 进气管参数

输沙率是气流在单位时间内单位宽度上搬运的沙量<sup>[11]</sup>,与进气口的相对宽度、相对高度无关,本设计进气口取宽12 mm、高32 mm。研究认为<sup>[12]</sup>,为防止沙粒沉积,进气管的水平部分应尽可能短些,故取65 mm。

### (2) 筒体参数

气流在对冲后势必下移,为了减缓气流的下移速度,可以适当增加筒体空间,故取圆筒体与锥筒体高度之比略大于1。风沙分离器筒体总高260 mm,根据放置高度,可采集0~300 mm的输沙通量。

### (3) 楔形体参数

为确保气流充分地分流对冲,楔形体附着在排气管上,高度与进气管直径相等,取32 mm,斜边与排气管相切,顶端距排气管中心线45 mm,与圆筒体半径相等。

### (4) 排气口与排沙口参数

为提高排气效果,排气口与排沙口直径之比取3:2,分别为60 mm和40 mm。排沙口与集沙盒之间留有间隙,让分离器有2个自由出口,集沙盒呈圆锥状,上口直径大于排沙口直径,取60 mm,这样不仅可以减缓排气口的排气负担,而且还可以减缓排沙口气流对集沙盒内沙尘的干扰。

### (5) 沙尘粒径收集范围

考虑到跃移颗粒是土壤风蚀研究的关键和重点内容,故该集沙仪以收集跃移颗粒为主,粒径 $d_* = 0.1 \sim 0.5$  mm。

## 2.3 数值模拟

利用 Gambit 软件建立风沙分离器三维模型,转入 Fluent 环境进行数值计算,假设进气口为自由流入口,排气口和排沙口为自由流出口,入口速度设置为13.5 m/s(强风环境),由于气流相对速度远远小

于声速,故将其按不可压缩流体进行处理,得出其速度场分布图(图4)。

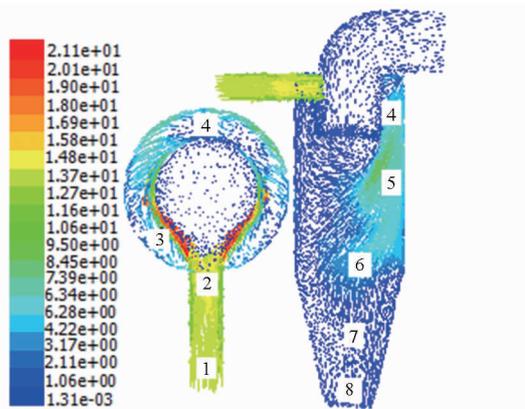


图4 风沙分离器速度场分布图

Fig. 4 Velocity field distribution of wind-sand separator

从图4看,气流附着楔形体表面时出现加速,绕流时出现降速,对冲后的气流沿圆筒体壁面下移至锥筒体壁面时又出现降速。将图4中标记的8个位置点气流速度进行数据处理,如图5所示,位置点1~4(分流结构起对冲和涡旋作用)气流速度波动较大,降幅约45%;位置点5~8(锥筒体壁面起回流作用)气流速度又降低了39%。很显然,2个阶段的总降幅约84%,排气口气流速度则降到了1.72 m/s以下,而排沙口气流速度也降到了2.11 m/s以下,均低于跃移颗粒的悬浮速度。因此,从数值模拟结果看,当集沙仪在强风环境下工作时,只要跃移颗粒随气流进入风沙分离器,就会被收集。

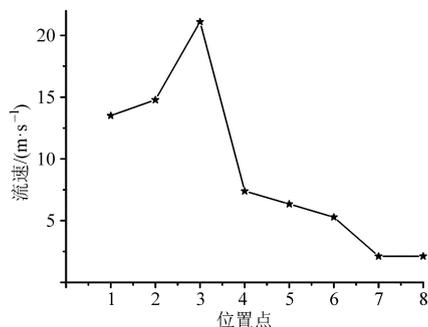


图5 流速变化趋势

Fig. 5 Airflow velocity changing trend

## 3 风洞试验

### 3.1 试验条件

风洞试验地点选在内蒙古农业大学研制的 OFDY-1.2 型移动式风蚀风洞实验室,该风洞试验段宽1 m,高1.2 m,风速由0~18 m/s连续可调,轴向几乎没有压力损失,壁面对风洞流场性能影响很小<sup>[13]</sup>。

### 3.2 试验方法

试验前,在风沙分离器上设计8个测点,其位置

与图4一致,这8个测点预先密封,试验过程中必须始终保持2个自由出口(即排气口和排沙口);将集沙仪放置于距风洞口150 cm处的试验段,进气口对准来流方向和风洞中心轴线,开启风机,稳定风速在13.5 m/s左右。

### 3.2.1 等动力性

将 Testo 425 型热敏风速仪探杆从风洞顶部试验孔伸入,探头置于进气口前方10 cm位置,与进气口中心线齐平,随机读取10个瞬态值(即参照风速);再将探头放置于排气口中心位置,对准来流方向,随机读取10个瞬态值(即进气口风速)。

### 3.2.2 沙尘粒径收集范围

将探头伸入分离器的楔形试验防护罩内,正对排气口的排气方向,随机读取10个瞬态值(即排气口风速)。

### 3.2.3 试验结果与模拟结果对比

将探头放置于分离器1号测点,并将探杆和孔之间的空隙密封,随机读取10个瞬态值;采用同样的试验方法测定2~8号测点的风速,每个测点随机读取10个瞬态值,取其均值。

### 3.2.4 集沙效率

试验沙样经自然干燥,用标准筛筛出粒径小于0.5 mm的混合沙样,取60份,每份10 kg。试验时,选取0.4、8.4、18.4、28.4、38.4 cm 5个采集高度,每个采集高度取9、12、15、18 m/s 4个试验风速。开启风机,待试验段风速达到预定风速后,开启沙样输送机,沙样在风洞内随风而起,形成风沙流(图6)。待沙样输送完毕后,关闭风机,将集沙盒内的沙样称量并记录数据,按以上步骤,每个试验风速重复3次,取其均值,集沙量小于0.01 g时不作记录。

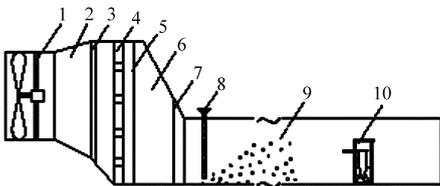


图6 集沙效率试验示意图

Fig. 6 Experimental schematic of sampling efficiency

1. 风机 2. 整流段 3. 多孔板 4. 蜂窝器 5. 阻尼网 6. 收缩段
7. 平行棒栅 8. 沙样输送机 9. 沙样 10. 集沙仪

## 3.3 试验结果与分析

### 3.3.1 等动力性结果

从表1看,进气口风速与参照风速均值之比为0.9327,即等动力性达93.27%。文献[14]研究表明,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。

### 3.3.2 沙尘粒径收集结果

从表2看,排气口风速均值为1.56 m/s,低于数值模拟的1.72 m/s,降幅约88.44%。

表1 参照风速与进气口风速

Tab. 1 Reference wind speeds and inlet wind speeds

测点	风速瞬态值					均值
	参照	13.65	13.37	13.19	13.27	13.50
进气口	13.34	13.13	13.38	13.57	13.39	12.48
	12.35	12.75	12.57	12.26	12.42	
	12.65	12.61	12.37	12.28	12.57	

表2 排气口风速

Tab. 2 Exhaust-port wind speeds

测点	风速瞬态值					均值
	排气口	1.65	1.57	1.55	1.53	1.56
	1.58	1.56	1.55	1.53	1.51	

将试验值  $V_0 = 1.56$  m/s 代入式(1),可得  $d_* = 0.036$  mm,故分流对冲式集沙仪有可能收集粒径大于0.036 mm的沙尘。

### 3.3.3 试验结果与模拟结果

从表2和图7看,风洞试验结果明显低于数值模拟结果,可能因为数值模拟的边界条件是按照理想状态设置,而风洞试验却存在着多种干扰因素,比如风速不稳定因素、样机制作工艺粗糙因素等,这些干扰因素都有可能引起风沙分离器内部流场的变化。但是,降幅却是相近的,变化趋势也是一致的,说明数值模拟结果是可靠的。

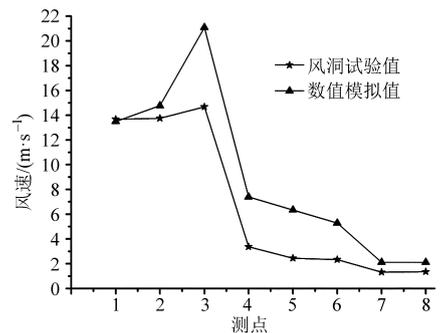


图7 风洞试验结果与数值模拟结果对比

Fig. 7 Comparison between wind tunnel experiment results and numerical simulation results

此外,排沙口(8号测点)风速试验值是1.35 m/s,降幅约90%,保证了风沙在排沙口的有效分离,同时也很大程度地减缓了排沙口气流对集沙盒内沙尘的干扰。

### 3.3.4 集沙效率结果

集沙效率是衡量集沙仪性能的重要指标<sup>[7]</sup>。由于该集沙仪进气口高度为32 mm,相比风洞试验段高度1200 mm,仅占2.67%,故对表3数据分析

表3 不同风速下各高度的平均集沙量

Tab.3 Average sampling amount of each height at different wind speeds g

采集高度/ cm	风速/(m·s <sup>-1</sup> )			
	9	12	15	18
0.4	124.74	95.24	75.21	58.27
8.4	2.02	2.49	2.91	3.06
18.4	0.15	0.78	1.16	1.45
28.4	0.03	0.15	0.36	0.76
38.4	0.01	0.01	0.04	0.11

时可忽略进气口高度,作近似计算。

将集沙量按相同风速、不同采集高度进行拟合,可得

$$q = az^b \quad (2)$$

式中  $q$ ——某采集高度的集沙量, g

$a$ 、 $b$ ——系数

$z$ ——采集高度, cm

再将采集量  $q$  积分,可得 0.4 ~ 38.4 cm 高度的

总采集量  $Q = \int_{0.4}^{38.4} qdz$  (即实测输沙量) (表4)。

表4 不同风速下垂直方向上的集沙量

Tab.4 Sampling amount in a vertical direction at different wind speeds

风速/ (m·s <sup>-1</sup> )	系数		实测总集 沙量/g
	$a$	$b$	
9	34.43	-1.405	103.81
12	30.89	-1.229	107.88
15	27.54	-1.097	111.01
18	23.62	-0.9858	109.98

该集沙仪进气口宽 12 mm,故在 12 mm 宽度上的理论采集量为 120 g(即实际输沙量)。由于集沙

效率是集沙仪实测输沙量与实际输沙量之比<sup>[15]</sup>,故可得集沙仪在不同风速下的集沙效率(图8)。

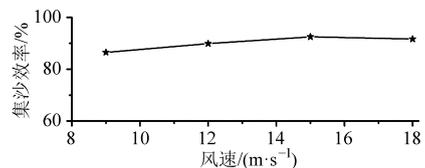


图8 集沙效率随风速变化曲线

Fig.8 Sampling efficiency vs wind speeds

从图8看,集沙效率随风速变化较为平稳,在 9 ~ 18 m/s 风速下,其值介于 86.5% ~ 92.5% 之间,平均集沙效率为 90.15%,虽然高于 BSNE 集沙仪(90%)<sup>[2,12]</sup>、低于 WITSEG 集沙仪(91%)<sup>[2]</sup>,但是这些数据之间的可比性却不大,因为研究<sup>[2]</sup>认为,同一个集沙仪,检验方法不同,得出的集沙效率也不同,更何况对于不同集沙仪,完全相同的试验条件是很难满足的,而且集沙效率受很多因素的影响,其检验方法也是需要深入研究的问题。

## 4 结论

(1)对比风洞试验结果,风沙分离器速度场的数值模拟结果是可靠的。

(2)针对强风环境下风沙有效分离问题,分流气体对冲法是可行的。采用该方法的分流对冲式集沙仪具备了较高的降速性能和抗强风性能,排气口风速降幅达 88.44%,排沙口风速降幅达 90%,保证了集沙仪内部风沙的有效分离,从经验公式推算,有可能收集粒径大于 0.036 mm 的沙尘,但有待试验验证,平均集沙效率达 90.15%,等动力性达 93.27%,符合集沙仪设计的基本原则,能较好地满足风洞试验和风蚀观测要求。

## 参 考 文 献

- Bagnold R A. The physics of blown sand and desert dunes [M]. London: Methun, 1941: 265 - 266.
- 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)
- Shao Y, McTainsh G H, Leys J F, et al. Efficiencies of sediment samplers for wind erosion measurement[J]. Australian Journal Soil Research, 1993, 31(4): 519 - 531.
- 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 - 49.  
Zang Ying, Gao Huanwen. Structural design and performance test of dust sampler for wind erosion measurements[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(3): 46 - 49. (in Chinese)
- 赵满全, 王金莲, 刘汉涛, 等. 集沙仪结构参数对集沙效率的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 140 - 145.  
Zhao Manquan, Wang Jinlian, Liu Hantao, et al. Effects of configuration parameters of sand sampler on sand collection efficiency [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(3): 140 - 145. (in Chinese)
- 李莹, 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)
- 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.

- Shen Shuanghe, Sheng Qiong. Changes in pan evaporation and its cause in China in the last 45 years [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2008, 66(3):452-460. (in Chinese)
- 18 栾兆擎, 章光新, 邓伟, 等. 松嫩平原 50 年来气温及降水变化分析[J]. *中国农业气象*, 2007, 28(4):355-358.  
Luan Zhaoqing, Zhang Guangxin, Deng Wei, et al. Studies on changes of air temperature and precipitation for last 50 years in Songnen Plain [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2007, 28(4):355-358. (in Chinese)
- 19 魏清顺, 孙西欢, 刘在伦. 导流器几何参数对潜水泵性能影响的通径分析[J]. *排灌机械工程学报*, 2014, 32(3):202-207.  
Wei Qingshun, Sun Xihuan, Liu Zailun. Path analysis of effects of diffuser geometric parameters on performance of submersible pump [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2014, 32(3):202-207. (in Chinese)
- 20 冯禹, 崔宁博, 魏新平, 等. 川中丘陵区参考作物蒸散量时空变化特征与成因分析[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(14):78-86.  
Feng Yu, Cui Ningbo, Wei Xinping, et al. Temporal-spatial distribution characteristics and causes analysis of reference crop evapotranspiration in hilly area of central Sichuan [J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(14):78-86. (in Chinese)
- 21 蔡甲冰, 刘钰, 许迪, 等. 基于通径分析原理的冬小麦缺水诊断指标敏感性分析[J]. *水利学报*, 2008, 39(1):83-90.  
Cai Jiabing, Liu Yu, Xu Di, et al. Sensitivity analysis on water deficit indicator of winter wheat based on path analysis theory[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(1):83-90. (in Chinese)
- 22 杨琪, 张勃, 尹海霞, 等. 甘肃河东地区近 50 年小麦需水量变化趋势及影响因子[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(11):3074-3081.  
Yang Qi, Zhang Bo, Yin Haixia, et al. Change trend of wheat water requirement and related affecting factors in Hedong Region of Gansu Province, Northwest China in recent 50 years[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(11):3074-3081. (in Chinese)
- 23 马志红, 许蓬蓬, 朱自玺, 等. 河南省冬小麦灌溉需水量及年型特征[J]. *气象与环境科学*, 2009, 32(4):60-64.  
Ma Zhihong, Xu Pengpeng, Zhu Zixi, et al. Irrigation water requirement for winter wheat and its year pattern characteristics in Henan Province [J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2009, 32(4):60-64. (in Chinese)
- 24 姬兴杰, 朱业玉, 顾万龙. 河南省参考作物蒸散量变化特征及其气候影响分析[J]. *中国农业气象*, 2013, 34(1):14-22.  
Ji Xingjie, Zhu Yeyu, Gu Wanlong. Analysis on trends in annual reference crop evapotranspiration and its impact climatic factors in Henan Province during 1971 to 2010[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2013, 34(1):14-22. (in Chinese)
- 25 McVicar T R, Niel T G V, Li L T, et al. Spatially distributing monthly reference evapotranspiration and pan evaporation considering topographic influences [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 338:196-220.
- 26 倪广恒, 李新红, 丛振涛, 等. 中国参考作物腾发量时空变化特性分析[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(5):1-4.  
Ni Guangheng, Li Xinhong, Cong Zhentao, et al. Temporal and spatial characteristics of reference evapotranspiration in China [J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(5):1-4. (in Chinese)
- 27 刘晓英, 李玉中, 郝卫平. 华北主要作物需水量近 50 年变化趋势及原因[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(10):155-159.  
Liu Xiaoying, Li Yuzhong, Hao Weiping. Trend and causes of water requirement of main crops in North China in recent 50 years [J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(10):155-159. (in Chinese)
- 28 宋妮, 孙景生, 王景雷, 等. 河南省冬小麦需水量的时空变化及影响因素[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(6):1693-1700.  
Song Ni, Sun Jingsheng, Wang Jinglei, et al. Temporal and spatial variation of water requirement of winter wheat and its influencing factors in Henan Province [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(6):1693-1700. (in Chinese)

(上接第 177 页)

- 8 吕子剑, 曹文仲, 刘今. 不同粒径固体颗粒的悬浮速度计算及测试[J]. *化学工程*, 1997, 25(5):42-46.  
Lü Zijian, Cao Wenzhong, Liu Jin. Research of suspension of particle in reactor[J]. *Chemical Engineering*, 1997, 25(5):42-46. (in Chinese)
- 9 Stout J E, Fryrear D W. Performance of a wind blown-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试验研究[J]. *中国水土保持*, 2004(5):17-19.  
Rong Jiaofeng, Gao Huanwen, Li Sheng. Experimental and study on equidynamic of sand collector in wind erosion[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2004(5):17-19. (in Chinese)
- 11 朱朝云, 丁国栋, 杨明远. *风沙物理学*[M]. 北京:中国林业出版社, 1992.
- 12 胡杨. 集沙仪的性能实验[J]. *世界沙漠研究*, 1994(1):42-46.  
Hu Yang. Performance experiment on sand sampler[J]. *World Desert Research*, 1994(1):42-46. (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. Thetest and evaluation of characteristic of aerodynamics on portable erosion wind tunnel[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- 14 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.
- 15 Goossens D, Offer Z, London G. Wind tunnel and field calibration of five aeolian sand traps[J]. *Geomorphology*, 2000, 35(3-4):233-252.