

# Numerical Simulation Research of Sand-Arresting Mechanism of Upright Fence

Zhiqiang Wang, Baofeng Fu, Jian Zhao, Yifeng He

Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an Shaanxi  
Email: zhiqwang2010@sina.com

Received: May 29<sup>th</sup>, 2017; accepted: Jun. 17<sup>th</sup>, 2017; published: Jun. 20<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

Numerical simulation of flow field and sand saltation trajectory around the upright fence with  $\eta = 0$  and  $\eta = 40\%$  was performed with Eulerian-Lagrangian model, and the sand-arresting mechanism of upright fence was analyzed. The results show that, for well anti sand performance of upright fence, it is necessary to achieve the wind velocity decrement and ensuring that the sand saltation trajectory locate in low wind speed region. Numerical simulation research is beneficial complementarity for traditional experiment study, and is helpful to reveal the sand-arresting mechanism of upright fence.

## Keywords

Sand Hazard Control, Block Sand Barriers, Numerical Simulation, Sand-Arresting Mechanism

---

# 栅栏阻沙机理的数值模拟研究

王志强, 富宝锋, 赵 健, 何艺峰

西北核技术研究所, 陕西 西安  
Email: zhiqwang2010@sina.com

收稿日期: 2017年5月29日; 录用日期: 2017年6月17日; 发布日期: 2017年6月20日

---

## 摘 要

采用欧拉-拉格朗日方法, 数值计算0、40%两种疏透度栅栏周围的气流场和沙粒运动轨迹, 对栅栏的阻沙机理进行了更全面的分析。结果表明, 对来流风速实现大幅衰减并形成较大区域的低风速区, 和确保沙粒运动轨迹流经低风速区是栅栏具有良好阻沙性能的两个必须条件, 对进一步理解栅栏防护的动力

机制具有参考意义。

## 关键词

风沙防治, 阻沙栅栏, 数值模拟, 阻沙机理

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

阻沙措施作为机械防沙体系的重要组成部分, 在防沙工程中得到广泛应用, 其工作原理是在风场内产生一种拖曳力, 致使来流动量发生净损失, 使气流携带沙能力下降, 造成沙粒在阻沙措施附近沉积, 从而起到阻沙作用[1]。防护效益决定于阻沙措施的设计要素, 即形状、高度、疏透度、疏透度分布与方位[2], 以及防护区风沙流粒度组成等[3]。众多研究者通过测量、分析措施附近的风场, 如气流速度、湍流性能、剪切力、压力等参数来阐述阻沙措施的防护效益[4] [5] [6] [7], 并用栅栏对风速降低的幅度及其影响范围来判定阻沙效果。然而, 疏透度为零的紧密栅栏无论从对风速的衰减幅度还是从形成的低风速区范围角度均优于带有一定疏透度的孔隙栅栏, 但工程实践及有关风洞实验研究结果均指向疏透度在0.2~0.4的栅栏阻沙效果最佳[8], 单纯从气流场角度不能很好的解释这一现象。地表的风蚀过程本身就是一个非常复杂的现象, 对沙粒相的动态测量十分困难, 尽管现有的 PIV 技术已实现对沙粒相的动态测量, 但观测的尺度十分有限, 单次数据采集仅能反映沙粒运动轨迹的很小一部分。当前, 在栅栏阻沙机理方面, 尚缺少沙粒运动与风场特性相结合方面的研究。风沙活动本质上属于两相流问题, 本文依托现有气固两相流理论, 采用欧拉-拉格朗日模型对沙粒流经栅栏的物理过程进行数值模拟, 综合流场信息和沙粒的运动轨迹对影响沙粒沉积的主要因素进行了分析, 尝试对栅栏的阻沙机制进行更全面的剖析。

## 2. 研究方法

### 2.1. 数学模型

本文旨在获取沙粒在流经阻沙措施时的动态信息, 采二维欧拉-拉格朗日模型, 即气相作为连续相, 沙粒相为离散相, 模型中仅考虑重力和拖曳力[9], 沙粒相视为球型稀相, 不考虑沙粒之间的相互作用及沙粒与气流之间的耦合作用。

1) 气相连续方程和动量方程分别为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f) + \nabla(\alpha_f \rho_f \mathbf{v}_f) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f \mathbf{v}_f) + \nabla(\alpha_f \rho_f \mathbf{v}_f \mathbf{v}_f) = -\alpha_f \nabla p_f + \nabla(\alpha_f \boldsymbol{\tau}_f) \bar{\bar{v}}_f + \alpha_f \rho_f \mathbf{g} \quad (2)$$

式中:  $\rho_f$ 、 $\mathbf{v}_f$ 、 $p_f$  分别为气相密度、速度和压力;  $\boldsymbol{\tau}_f$  为气相粘性应力张量;  $\alpha_f$  为气相体积分数。

2) 湍流模型采用标准  $\kappa$ - $\varepsilon$  双方程模型进行描述:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{cases} G_k = \mu_t \left( \frac{\partial \mu_t}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \\ G_b = -\beta g_i \frac{1}{\rho} \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \\ \beta = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \\ Y_M = 2\rho\varepsilon \frac{k}{\gamma RT} \\ M_t = \sqrt{k/a^2} \\ a = \sqrt{\gamma RT} \end{cases} \quad (5)$$

式中： $\varepsilon$ 、 $\mu_t$ 分别为湍动耗散率和湍动粘度； $G_k$ 是由于平均速度梯度引起的湍动能产生； $G_b$ 是由于浮力影响引起的湍动能产生； $Y_M$ 为可压缩湍流脉动膨胀对总的耗散率的影响； $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 为经验常数； $\sigma_k$ 、 $\sigma_\varepsilon$ 分别为湍动能和湍动耗散率对应的普朗特数； $u_i$ 为速度在*i*方向的分量； $\beta$ 为热膨胀系数； $M_t$ 为马赫数； $a$ 为声数； $Pr_t$ 为湍动普朗数。

3) 颗粒运动方程：

$$m_p \frac{du_p}{dt} = m_p g + F_{drag} \quad (6)$$

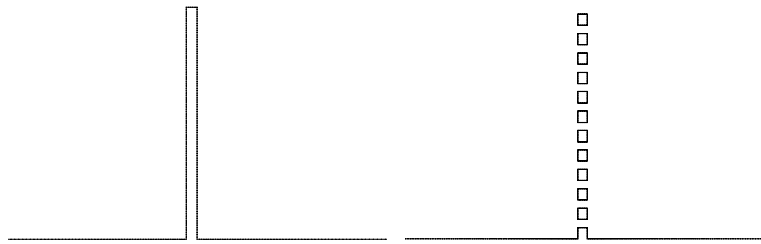
$$\begin{cases} F_{drag} = \frac{C_{d0}}{8} \pi d_p^2 \rho_f \alpha_f^2 |u_f - u_p| (u_f - u_p) \alpha_f^{-x} \\ x = 3.7 - 0.65 \exp \left[ -\left( 1.5 - \log Re_p \right)^2 / 2 \right] \\ C_{d0} = \left( 0.63 + \frac{4.8}{Re_p^{0.5}} \right)^2 \\ Re_p = \frac{\alpha_f \rho_f d_p |u_f - u_p|}{\mu_f} \end{cases} \quad (7)$$

式中： $m_p$ 为颗粒质量； $d_p$ 为颗粒直径； $u_p$ 为颗粒速度； $g$ 为重力加速度； $F_{drag}$ 为单颗粒所受的流体粘性阻力； $C_{d0}$ 为流体阻力系数； $Re_p$ 为颗粒雷诺数。

## 2.2. 计算问题描述

选取计算区域为高 20 m，长 80 m 的二维矩形区域，阻沙栅栏位于距进口 15 m 处，高度  $H$  为 2 m，分疏透度为 0 和 40% 两种，阻沙栅栏结构示意图见图 1。计算区域入口、出口、顶部分别采用 velocity-inlet、outflow 和 symmetry 边界条件进行描述，计算区域底部和栅栏表面采用 wall 边界条件进行描述。

入口风速廓线取对数率分布，2 m 高度处风速取 10、15 和 20 m·s<sup>-1</sup> 等 3 种。沙粒密度为 2650 kg·m<sup>-3</sup>，分 0.1、0.25 和 0.5 mm 等 3 种粒径，在距计算区域入口 10 m 处 0.1 m~1.0 m 高度范围内释放，每种粒径沙粒各释放 10 个，沙粒初速度方向为水平，速度大小详见表 1。



**Figure 1.** Schematic diagram of fence  
**图 1.** 阻沙栅栏结构示意图

**Table 1.** Sand grain ejection velocity  
**表 1.** 沙粒入射初速度

	粒径/mm		
初速度/m·s <sup>-1</sup>	0.1	0.25	0.5
风速/m·s <sup>-1</sup>			
10	5.45	4.85	3.59
15	8.25	7.45	5.74
20	11.08	10.6	7.98

### 3. 结果与分析

#### 3.1. 阻沙栅栏结构与风场特征

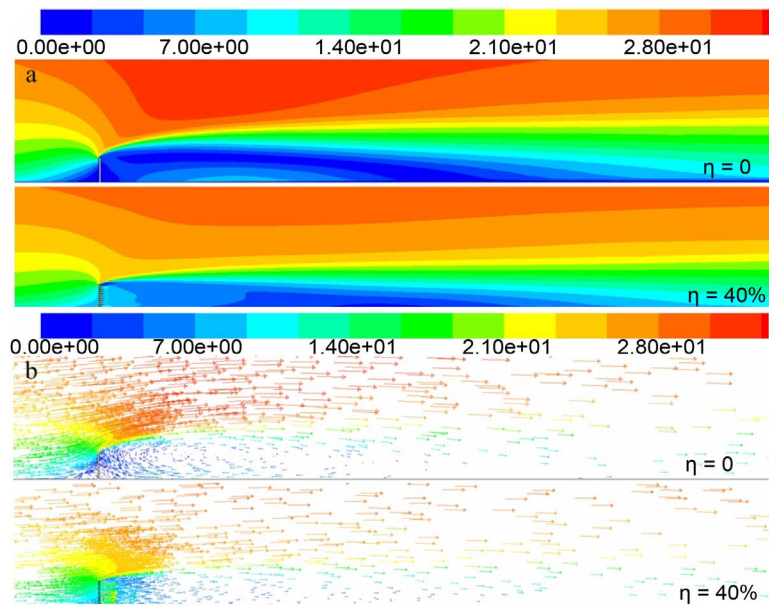
阻沙措施形成的二次流场是促使沙粒沉积的根源，疏透度与风场关系是当前有关阻沙栅栏方面的研究热点。对于特定的阻沙措施，风场结构与风速无关[10]，本文以 20 m·s<sup>-1</sup> 风速为例，给出了疏透度为 0% 和 40% 两种阻沙栅栏附近的风速等值线、速度矢量图(见 图 2)。

从 图 2(a) 可以看出，受栅栏阻挡气流在栅栏前端被迫加速抬升(无孔隙的全部抬升，有孔隙的部分抬升)，在栅栏顶部形成一个速度等值线密集的剪切层，且沿风向逐渐减弱并向地面附着，在迎风侧和背风侧分别形成一个小的和大的弱风区，这是有无孔隙的栅栏所形成二次流场的相同之处。两者区别在于紧密型栅栏后弱风区为一回流涡区，而疏透度为 40% 的孔隙栅栏后则未出现涡区，且前者对风速衰减更多、低风速区域更大。上述风场计算结果与罗万银等[11]的风洞实验结果基本一致，他们的实验结果表明当疏透度大于 30% 后栅栏后端将不再出现回流现象。

#### 3.2. 沙粒流经阻沙措施时的运动轨迹

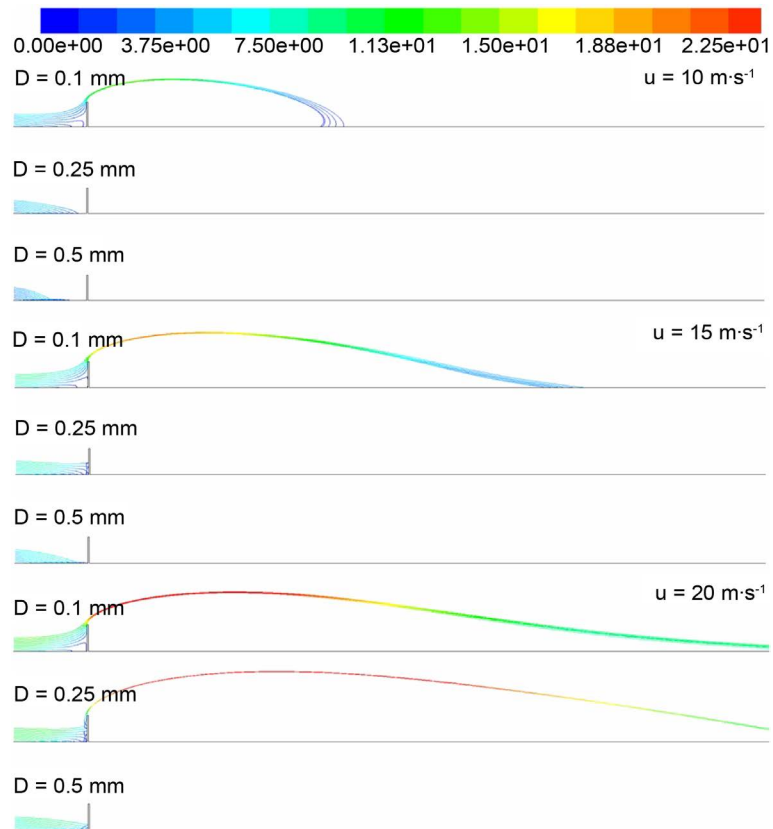
图 3 为沙粒流经疏透度为 0 栅栏时的运动轨迹及速度变化图。由 图 3 可看出，沙粒在遭遇紧密型栅栏阻挡时会发生两种行为，一种是在栅栏前端 1 H 范围内沉积，一种是从栅栏顶端越过栅栏。沙粒的行为与其粒径和风速密切相关，总体上有如下特点：越过栅栏的能力随粒径减小而增强，随风速增大而加强，如 0.1 mm 沙粒三种风速下均能越过栅栏，0.25 mm 沙粒仅在 20 m·s<sup>-1</sup> 风速下部分越过栅栏，而 0.5 mm 沙粒三种风速下均未能越过栅栏；越过栅栏后沙粒落回地面的附着点距栅栏的距离随风速增大而增大，低风速下小粒径沙粒会随回流气流发生反向运动，随风速增大这种现象则消失。

图 4 为沙粒流经疏透度为 40% 栅栏时的运动轨迹及速度变化图。由 图 4 可见，沙粒在遭遇栅栏时一部分会在前端沉积，一部分会穿过栅栏在后端沉积，沙粒穿过栅栏的能力与紧密型类似，不同之处在于沙粒是在栅栏孔隙而不是其顶端穿过，同时附着点与栅栏的距离也远远小于紧密型栅栏。



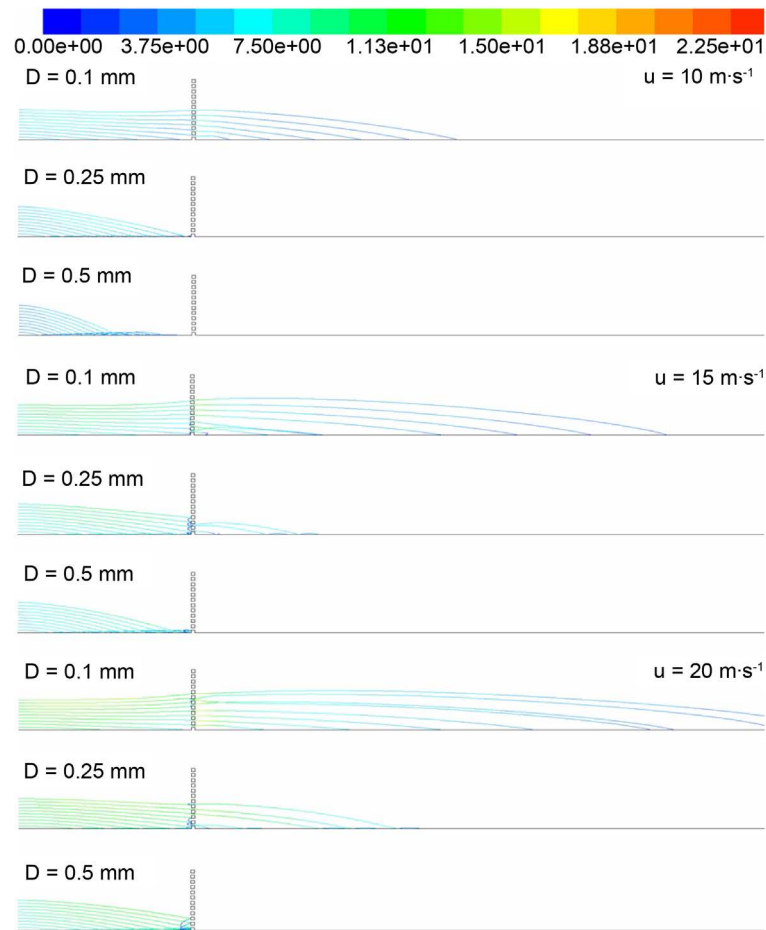
**Figure 2.** The wind field characteristics around the fence ((a) The distribution of wind speed, (b) The vectors of wind speed)

**图 2.** 阻沙栅栏结构示意图两种疏透度栅栏附近流场特征((a) 速度分布, (b) 速度矢量分布)



**Figure 3.** Tracks and velocity of different diameter around the fence with  $\eta = 0$  under different wind velocity ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

**图 3.** 沙粒流经紧密型栅栏时的轨迹及其速度变化( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )



**Figure 4.** Tracks and velocity of different diameter around the fence with  $\eta = 40\%$  under different wind velocity ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

**图 4.** 沙粒流经疏透度为 40% 栅栏时的轨迹及其速度变化 ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

#### 4. 讨论

综合图 2 和图 3 不难看出，紧密型栅栏对沙粒的拦截作用主要发生在前端，通过顶端越过栅栏的沙粒运动轨迹主要在气流的剪切加速区，沙粒在这里会被气流加速，风速越大时加速效果越明显，除低风速下小颗粒会随回流气流反向运动沉积在栅栏的后端，其余情况下会随剪切气流回落到栅栏后部远端的风速恢复区，栅栏对这部分沙粒拦截作用十分有限。同时也可发现，虽然紧密型栅栏后端对风速衰减效果很好，低风速区域也很大，但沙粒并非流经该区域，而是处于风速远高于来流风速的剪切层内。结合图 2 和图 4 可以发现，遭遇具有一定疏透度的孔隙栅栏时沙粒是从栅栏孔隙通过，虽然其间也会经历一个加速过程，但这个作用非常微弱，更重要的是穿越栅栏以后，沙粒进入了栅栏后端的低风速区，能量得到进一步衰减，因此很快发生大量沉积。这很好解释了对风速衰减更低低风速区域更大的紧密型栅栏阻沙效果却不如孔隙栅栏这一现象。由此可见，若使栅栏具备良好的阻沙能力必须同时满足两个条件：一是能够对来流风速进行大幅衰减，形成尽可能大的弱风区；二是促使来流沙粒进入弱风区。

#### 5. 结论

本文采用欧拉 - 拉格朗日方法在栅栏流场中引入沙粒相，同时计算了流场和沙粒运动轨迹及速度，较单纯的以气流场论述栅栏的防护更为直观有效，深化了对栅栏阻沙机理的认识。同时也获得如下重要

认识, 阻沙措施若具有良好的阻沙性能必须同时满足两个条件, 一是能够对来流风速进行大幅衰减, 形成尽可能大的弱风区; 二是促使来流沙粒进入弱风区, 对阻沙措施的设计具有重要参考意义。

## 资助信息

本文得到国防环境安全专项资金资助(项目号: WZ20160402)。

## 参考文献 (References)

- [1] Raine, J.K. and Stevenson, D.C. (1977) Wind Protection by Model Fences in a Simulated Atmospheric Boundary. *Journal of Industrial Aerodynamics*, **2**, 159-180. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(77\)90015-0](https://doi.org/10.1016/0167-6105(77)90015-0)
- [2] Comelis, W.M. and Gabriels, D. (2005) Optimal Windbreak Design for Wind-Erosion Control. *Journal of Arid Environments*, **61**, 315-332. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2004.10.005>
- [3] 汪言在, 张春来, 董一帆, 等. 塔克拉玛干沙漠石油公路中段防沙体系粒度特征及沉积作用浅析[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(12): 94-102.
- [4] Loeffler, A.E., Gordon, A.M. and Gillespie, T.J. (1992) Optical Porosity and Wind Speed Reduction by Coniferous Windbreaks in Southern Ontario. *Agroforestry Systems*, **17**, 119-133. <https://doi.org/10.1007/BF00053117>
- [5] Wilson, J.D. (1997) A Field Study of the Mean Pressure about a Windbreak. *Boundary-Layer Meteorology*, **85**, 327-358. <https://doi.org/10.1023/A:1000582917218>
- [6] Lee, S.J. and Kim, H.B. (1998) Velocity Field Measurements of Flow around a Triangular Prism behind a Porous Fence. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **77/78**, 521-530. [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(98\)00169-X](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(98)00169-X)
- [7] Lee, S.J. and Park, C.W. (1999) Surface Pressure Characteristics on a Triangular Prism Located behind a Porous Fence. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **80**, 69-83. [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(98\)00195-0](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(98)00195-0)
- [8] Lee, S.J., Park, K.C. and Park, K.W. (2002) Wind Tunnel Observations about the Shelter Effect of Porous Fences on the Sand Particle Movements. *Atmospheric Environment*, **36**, 1453-1463. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00578-7](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00578-7)
- [9] Kawamura, R. (1951) Study on Sand Movement by Wind. *Science & Technology*, **5**, 95-112.
- [10] Zhang, H., Brandle, J.R., Hodges, L., et al. (1995) The Relationship between Open Windspeed and Windspeed Reduction in Shelter. *Agroforestry Systems*, **32**, 297-311. <https://doi.org/10.1007/BF00711717>
- [11] 罗万银, 董治宝, 钱广强, 等. 栅栏绕流减速效应风洞实验模拟[J]. 中国沙漠, 2010, 30(1): 1-7.

### 期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [ag@hanspub.org](mailto:ag@hanspub.org)