关于风沙流与风成地貌

郑晓静

兰州大学力学系

提纲

- 研究背景与现状
- 风场与风沙流
- 沙丘场的形成与发展

全国第二次水土流失调查显示

背景

全国水土流失总面积356万km^2，水蚀165万km^2，风蚀191万km^2

风蚀面积 > 水蚀面积

80年代末至90年代末10年间

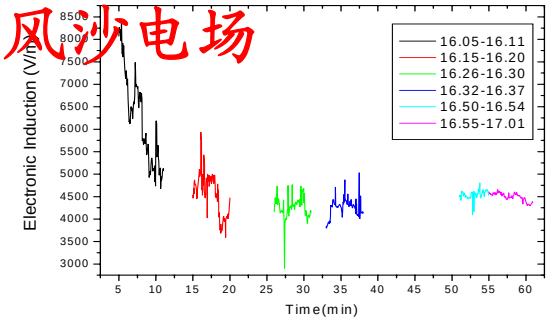
水蚀面积减少了14万平方公里

风蚀面积增加3万平方公里，且侵蚀强度升高

风蚀----风力对地表物质的分散，搬运和磨蚀

风 沙 运 动

风沙电场



背景

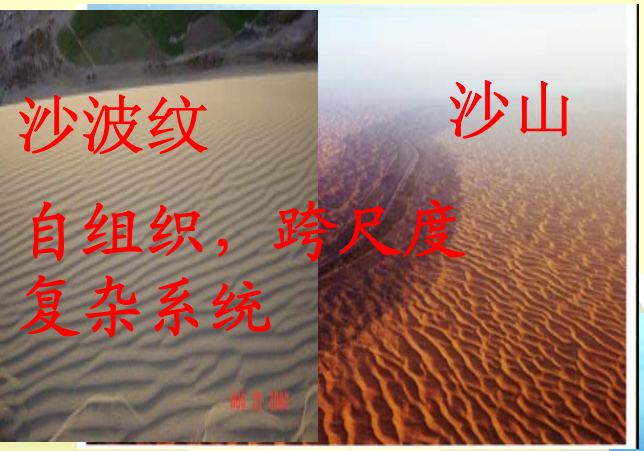
是典型的复杂系统(非线性,自组织...)

是多物理场耦合作用的

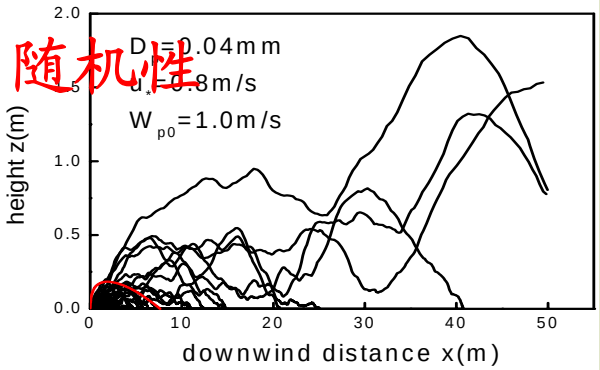
是多尺度的($10^{-4}m \sim 10^{-2}m \sim 10^{1\sim4}m$)

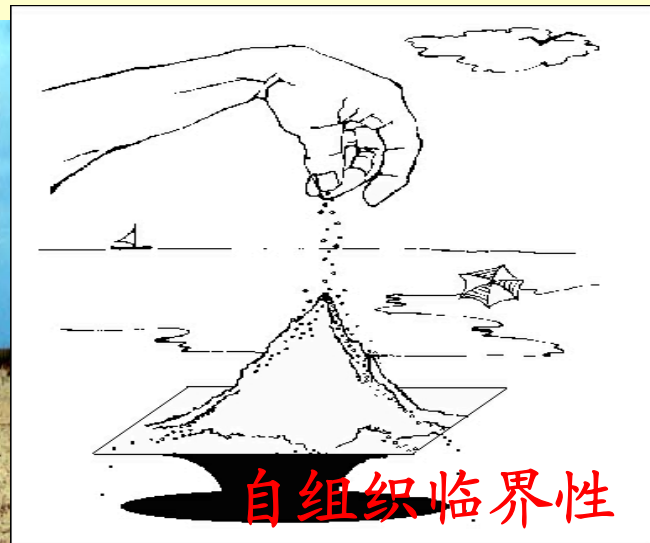
是具有随机性的.....

是一个科学前沿的共性和热点问题;



随机性

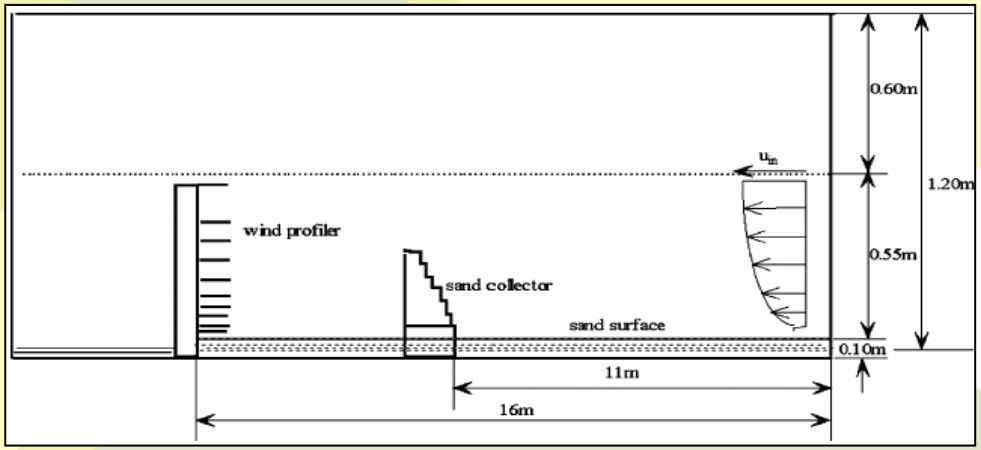


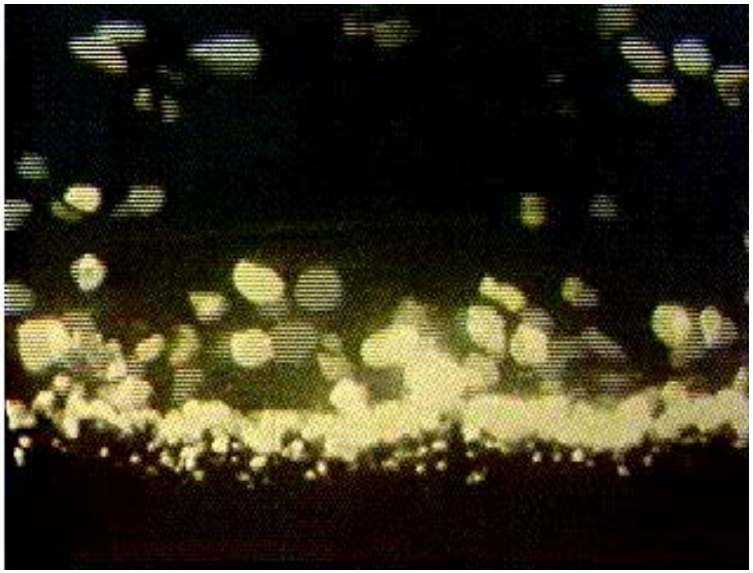


现状

实验方面

- 近地表的实时同步测量不够(大气，单点，单一量)
- 定性描述为主(风成地貌，风沙电，…)
- 定量描述不准确(风场，输沙率，…)





现状

连续介质力学??

Long-term suspension
(<20 μm)

1980s提出预测
宏观风沙流

初速度概率
密度分布

沙粒运动
类流体散体

Wind

t eddies

Short-term suspension

近地层风场
连续体

1960s开始研究
单颗沙粒运动轨迹

静电力

(70-500 μm)

热扩散方程
热对流方程

动地表沙床面
类固体散体

Creep (> 500 μm)

粒-床碰撞

0 μm)

现状

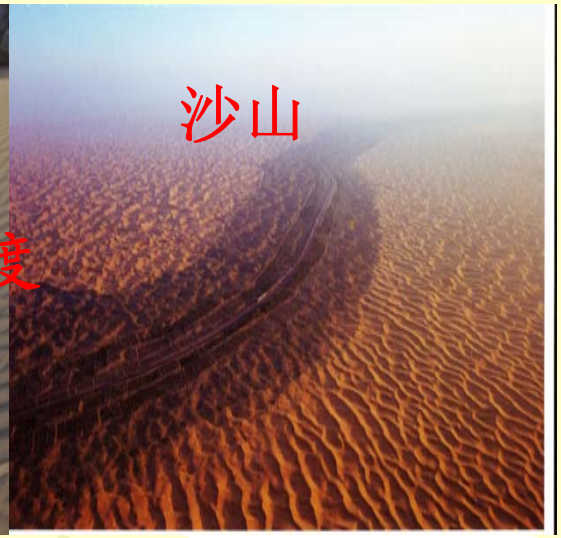
- 难以准确确定沙粒起跳速度和分布

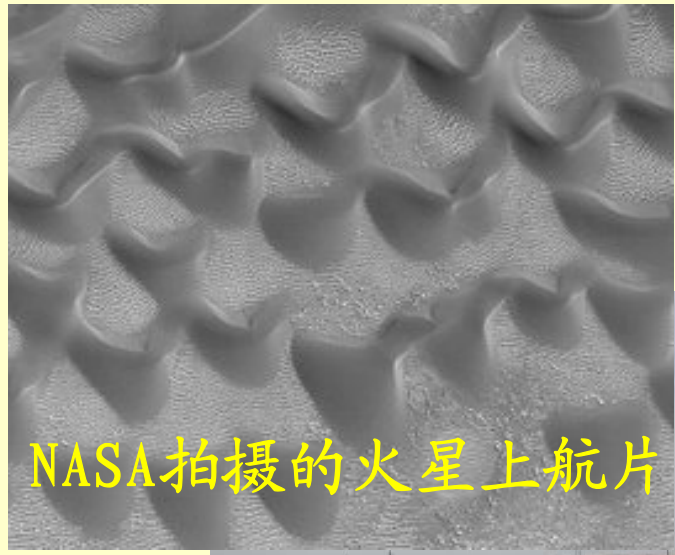
  碰撞实验：是在无风场下进行且多是针对单一粒径进行；

  照相判读：沙粒密度太高，主要是对近地表层5mm高度内；

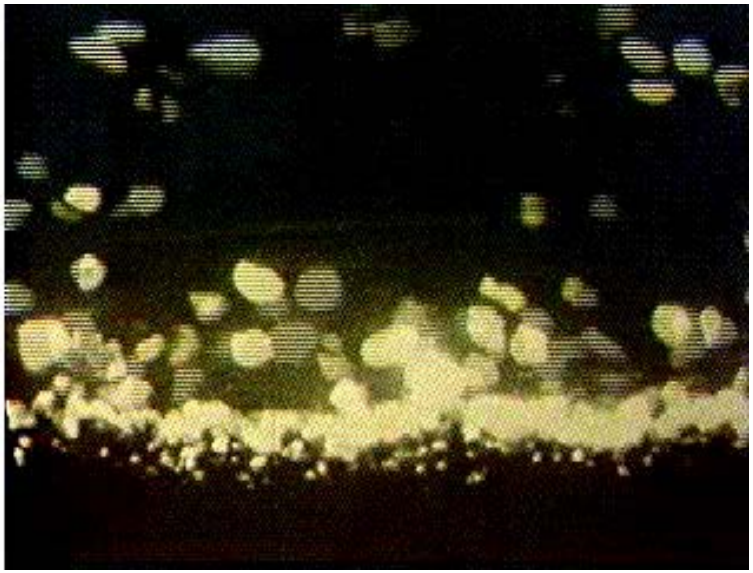
- “在风沙运动研究中已有的风沙运动的定量化理论模型还远未达到对输沙率进行可靠预测的程度；同时，还缺乏能够用于规范数学模型的有关风场和输沙率特征的可靠的实时测量” —— *Journal of Geophysical research* 主编 ***R.S. Anderson 1991***, ***Acta Mechanica***

- 计算机模拟：元胞自动机方法人为给定运动沙粒（1990s） 的若干规则的参数与实际参数缺乏联系





- 防固结构的主要尺寸基本来自长时间的经验摸索
  有效性？？



现状

连续介质力学??

Long-term suspension
(<20 μm)

1980s提出预测
宏观风沙流

初速度概率
密度分布

沙粒运动
类流体散体

Wind

t eddies

Short-term suspension

近地层风场
连续体

1960s开始研究
单颗沙粒运动轨迹

静电力

(70-500 μm)

热扩散方程
热对流方程

动地表沙床面
类固体散体

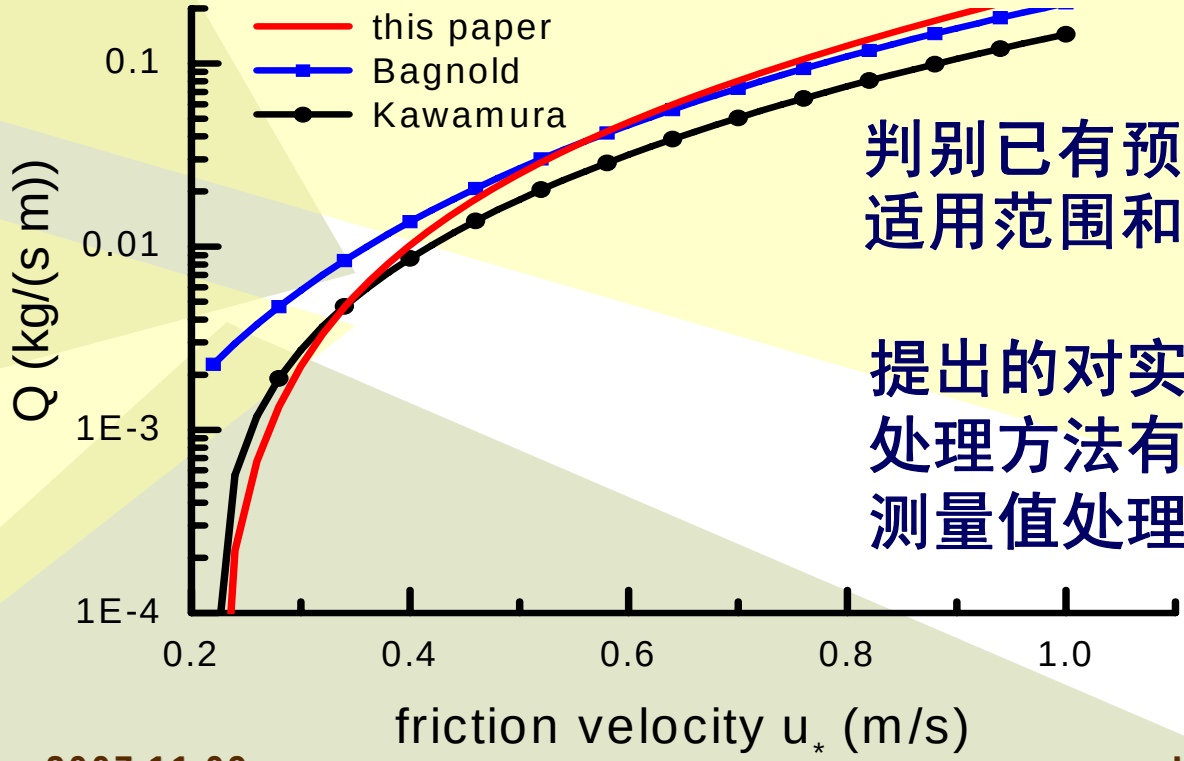
Creep (> 500 μm)

粒-床碰撞

0 μm)

单宽输沙率的计算公式

$$Q = \frac{1.25}{100w}\tilde{A}(u_*)\tilde{B}(u_*)\exp\left(\frac{4.5}{\tilde{B}(u_*)}\right)$$



判别已有预测公式的适用范围和有效性

提出的对实验结果的处理方法有助于提高测量值处理的精度

Experimental measurement of wind-sand flux and sand transport for naturally mixed sands

1. INTRODUCTION

Physical Review E，
V.66 (2002), 021305

Report of the Referee -- EQ8039/Zhou

This is an interesting and thorough piece of work. The authors have done a series of impressive experiments and amassed a lot of good data. These they then fit to sensible formulae inspired by the classical literature of the field.

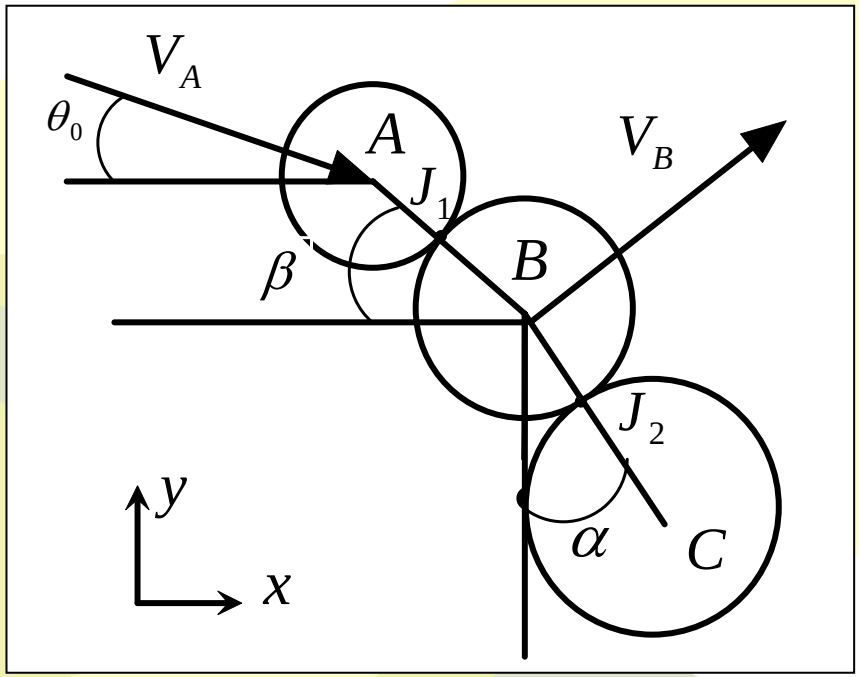
****

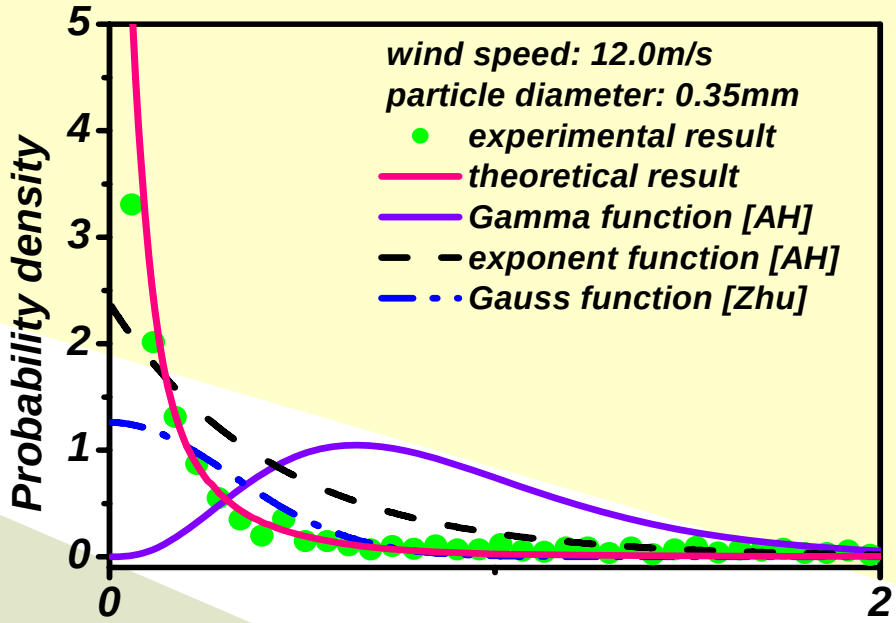
论文评审人报告——EQ8039：

这是一项引人关注且完整的研究。作者们完成了一系列给人深刻印象的实验,并积累了大量好的数据。受本领域经典工作的启示，他们拟合得到了切实可行的公式。

工作

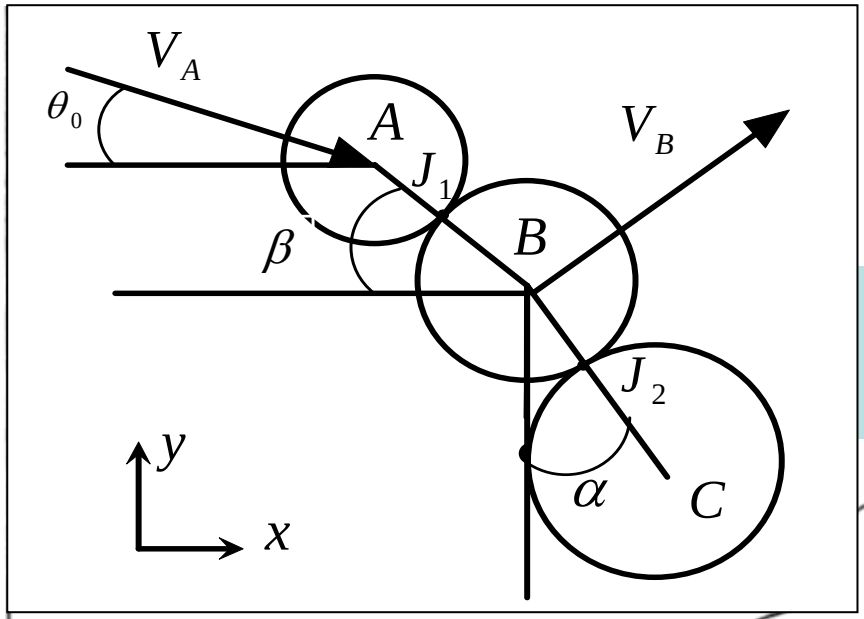
➢ 随机碰撞模型(JGR 2005)





(a) Vertical liftoff speed (m/s)

➢ 随机碰撞模型(JGR 2005)



1980s提出预测
宏观风沙流

初速度概率
密度分布

1960s开始研究
单颗沙粒运动轨迹

动地表沙床面
类固体散体

粒-床碰撞

Long-term suspension
(<20 μm)

Turbulent eddies

Saltation
(70-500 μm)

1.5 m

Creep (> 500 μm)

工作

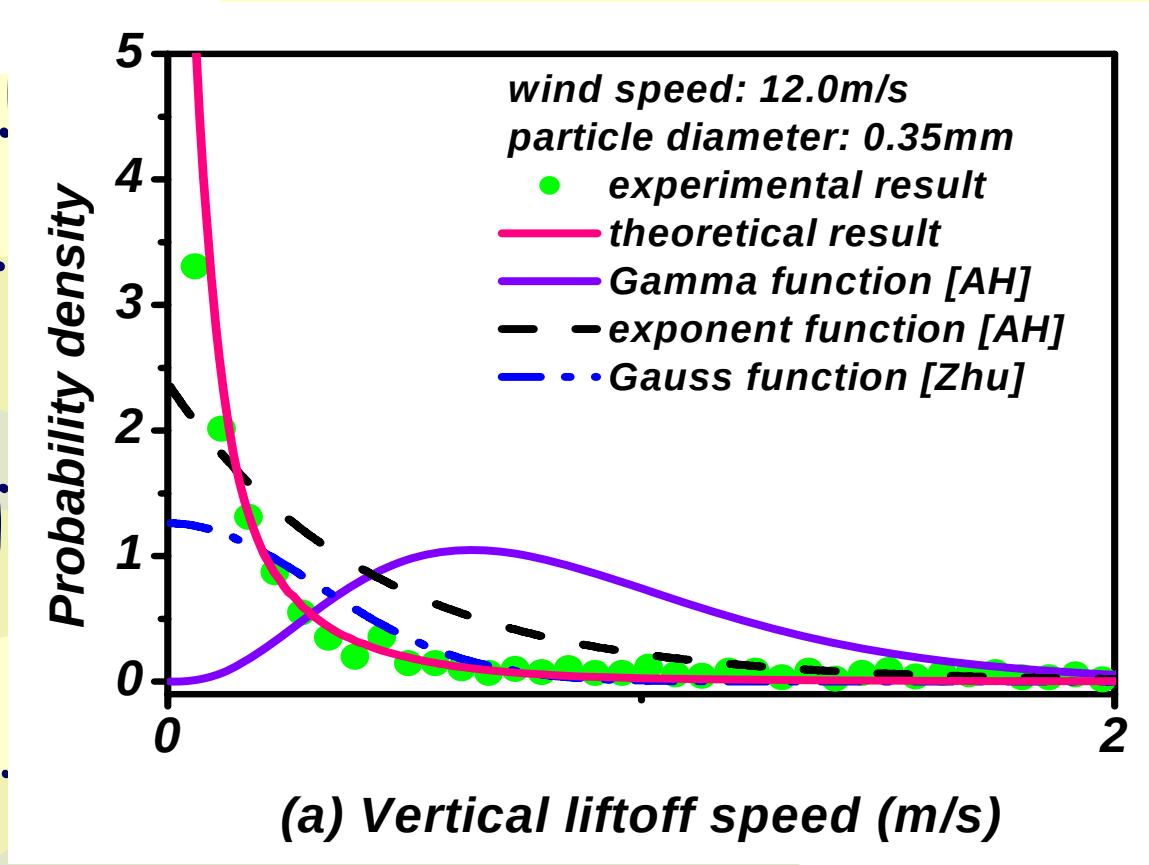
线速度

$$f_{U_{Ax}} = \iint \cdots \left| R_B^3 \right| d\theta_0 d\beta d\alpha dV_A$$

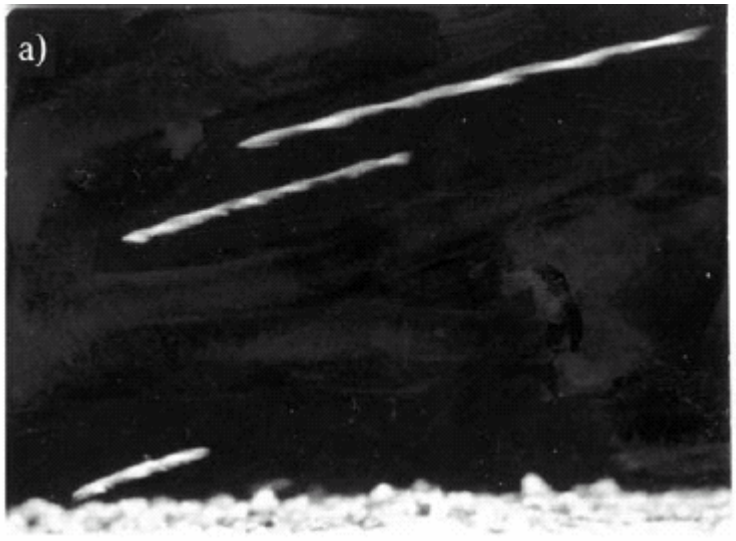
$$f_{U_{Ay}} = \iint \cdots \left| R_B^3 \right| d\theta_0 d\beta d\alpha dV_A$$

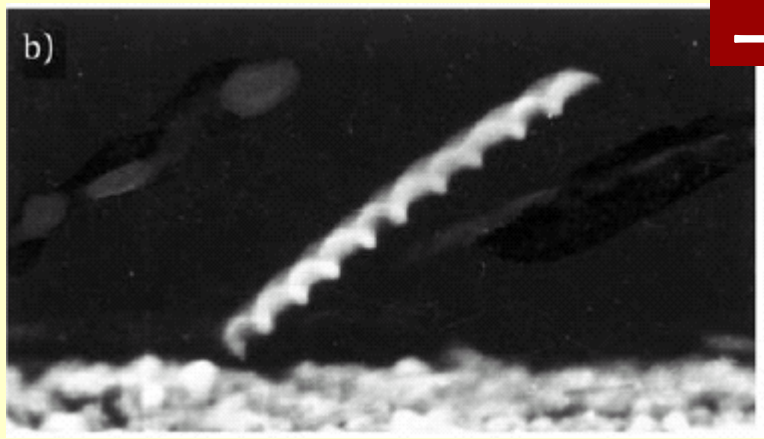
$$f_{U_{Bx}} = \iint \cdots \frac{\left| R_B^3 \right|}{\cos\alpha} d\theta_0 d\beta d\alpha dV_A$$

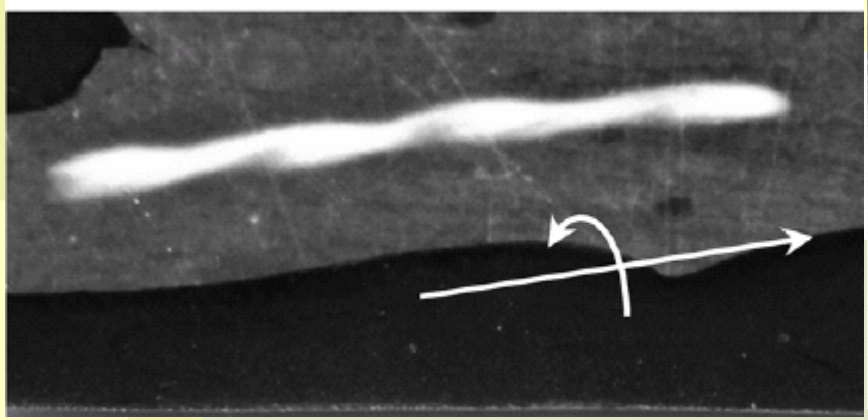
$$f_{U_{By}} = \iint \cdots \frac{\left| R_B^3 \right|}{\sin\alpha} d\theta_0 d\beta d\alpha dV_A$$

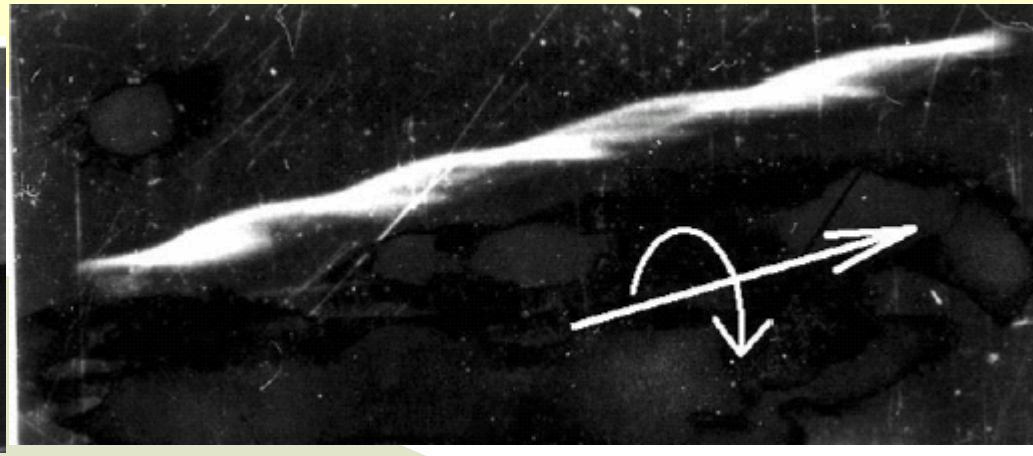


工作

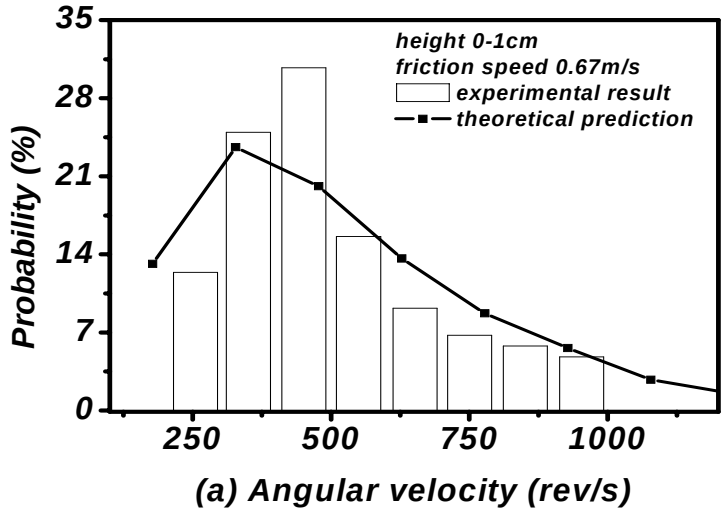








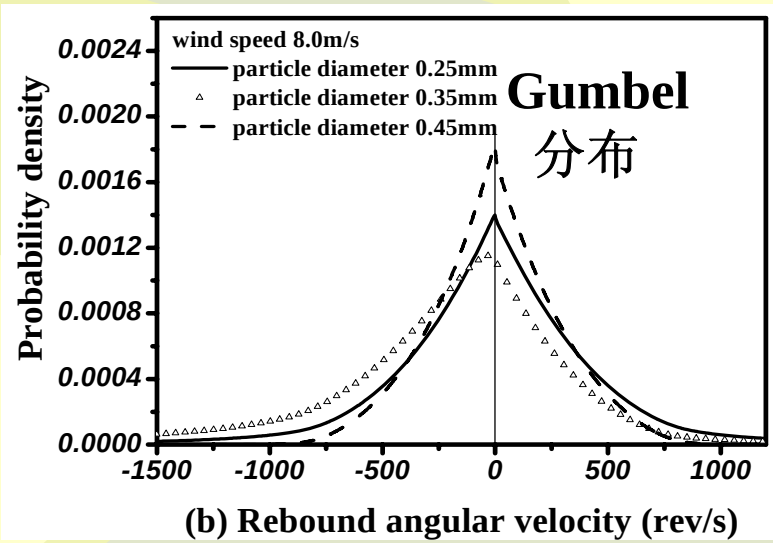
工作

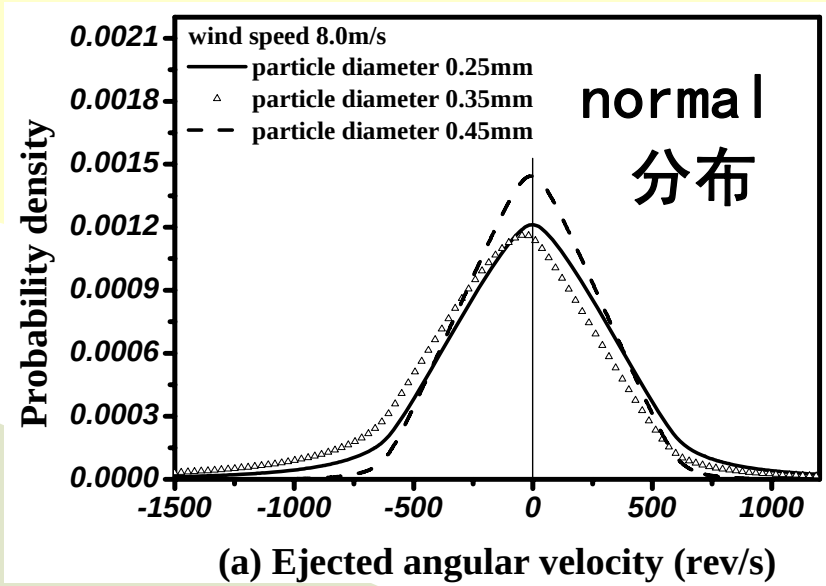


弥补了现有实验测量的局限性，是实现单颗粒研究向宏观风沙流预测的基础，为“磨蚀”现象的研究提供了理论依据。

——地学一区期刊*JGR*

与实验结果的比较

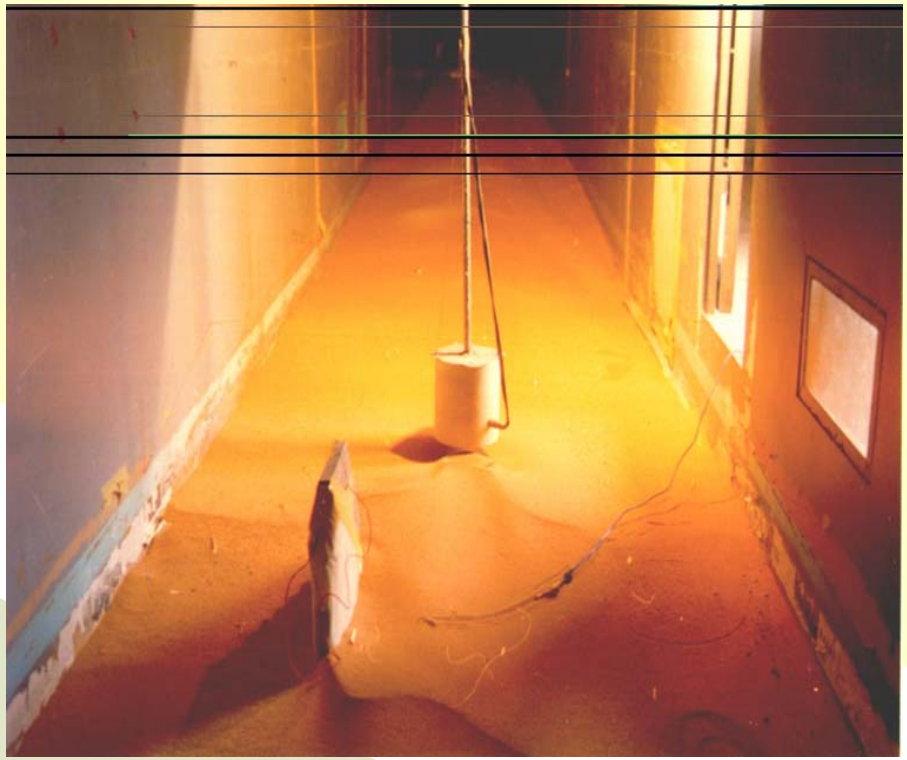




风沙电现象的风洞实验

工作

- 当“均匀沙” 粒径小于250微米时，运动沙粒带负电荷；当粒径大于500微米时，带正电荷；
- 风沙流中沙粒的荷质比随沙粒粒径和风速的增大而减小，随高度的上升而增加；
- 风沙流中的电场主要是由运动带电沙粒形成，其电场强度方向垂直地面向上，与晴天电场的方向相反；



工作

- 跃移

$$E_1(z)=\frac{\rho_g c D^3}{6\varepsilon_0}\left(\int_{z_0}^{z'}-\int_{z}^{d}\right)N_1(z')\arcsin\left[\frac{ab}{\sqrt{\left(a^2+(z'-z)^2\right)\left(b^2+(z'-z)^2\right)}}\right]dz'$$

- 悬移

$$E_2(z)=\frac{\rho_g c D^3}{6\varepsilon_0}\left(\int_{z_0}^{z'}-\int_{z}^{d}\right)N_2(z')\arcsin\left[\frac{ab}{\sqrt{\left(a^2+(z'-z)^2\right)\left(b^2+(z'-z)^2\right)}}\right]dz'$$

- 蠕移

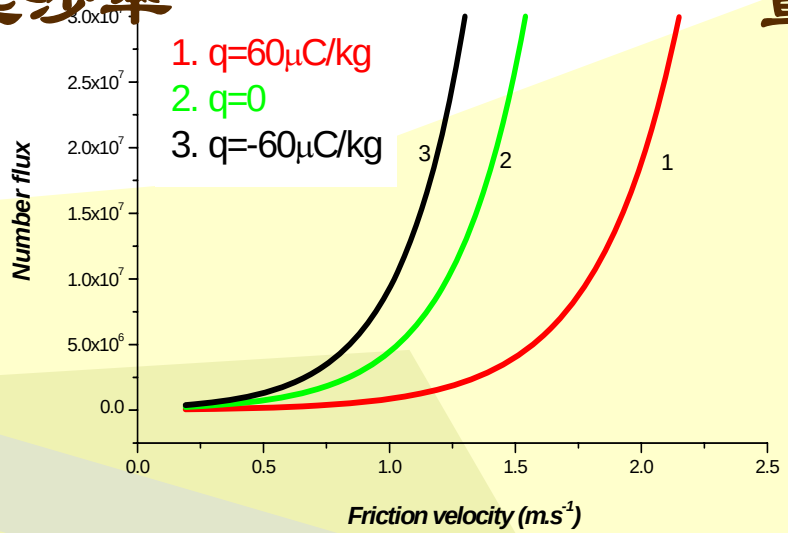
$$E_3(z)=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int_{-a}^{a}\int_{-b}^{b}\frac{\sigma z dx'dy'}{\left|x'^2+y'^2+z'^2\right|^{3/2}}=\frac{\sigma}{\pi\varepsilon_0}\arcsin\left(\frac{ab}{\sqrt{(a^2+z^2)(b^2+z^2)}}\right)$$

- 总电场

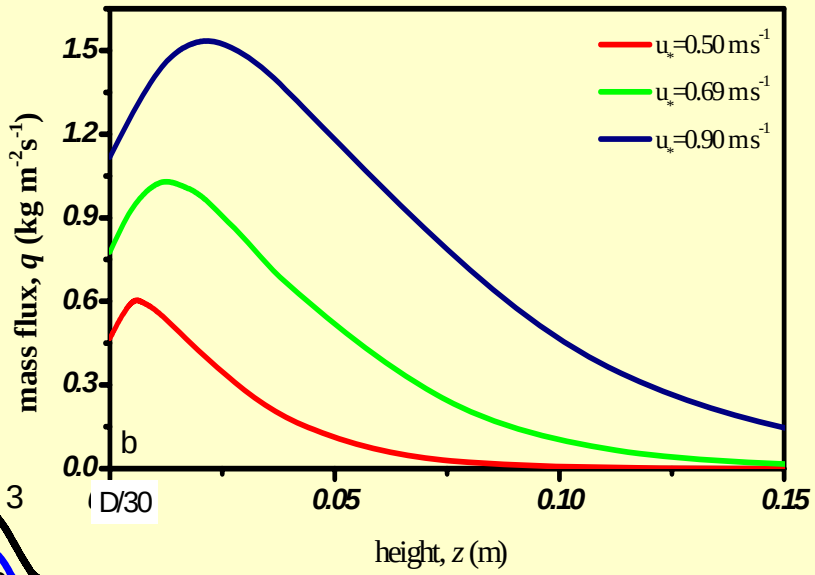
$$E=E_0+E_1(z)+E_2(z)+E_3(z)$$

工作

起沙率

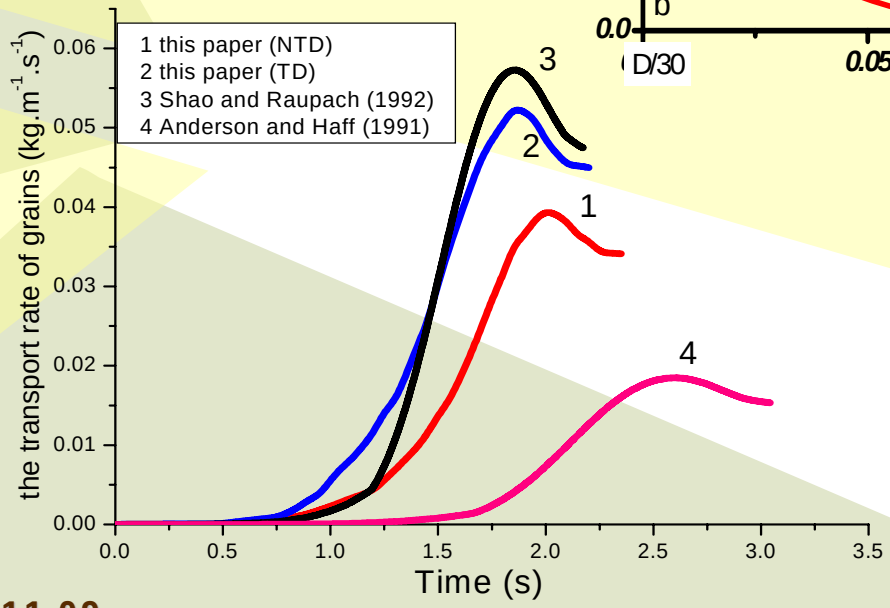


单位面积输沙率



单宽输沙率

JGR 2006

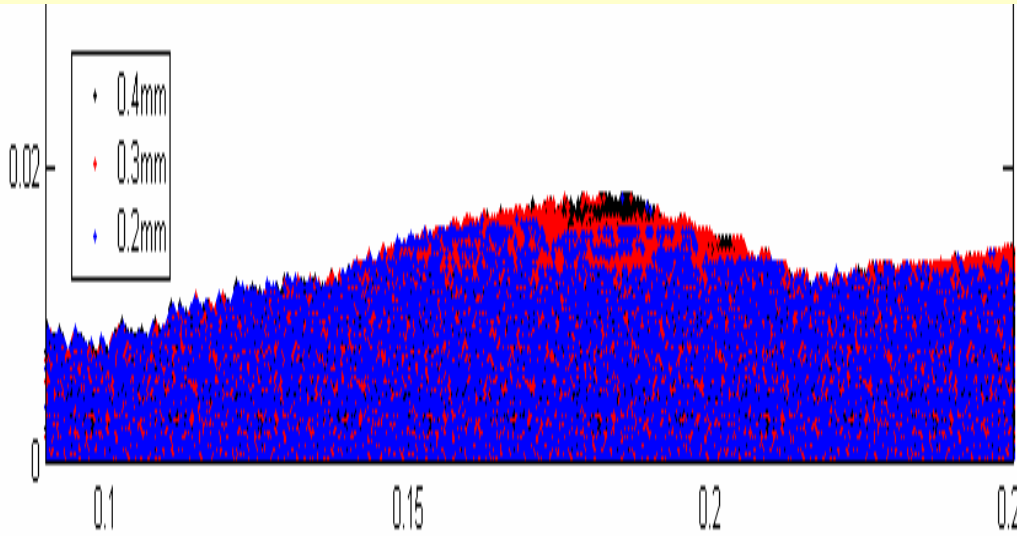


模型预测

工作

● 沙波纹的模拟(中国科学, 2007)

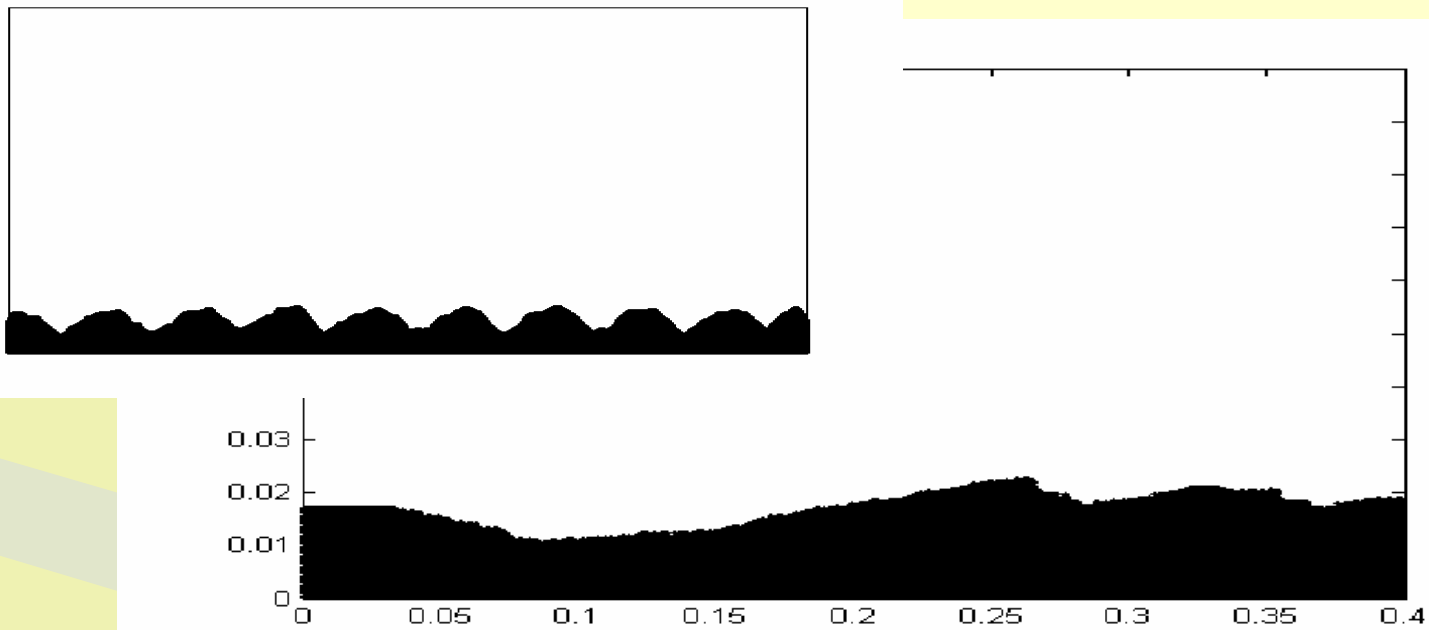
提出离散粒子追踪法，考虑了沙波纹形成过程中的3个主要环节：沙床上方的风沙流、
沙粒对沙床的碰撞
沙粒的跃移和蠕移



沙波纹的形状是非对称的，
迎风角：10.3(10cm)；
背风角：18.4(20-30cm)；
沙波纹的高度和长度随粒径和摩阻风速(0.4 ,0.7)增大；
高度：0.7cm (0.5-1.0cm) ；
长度：12.52cm(7-14cm)， 0.5

粗沙粒聚集在沙波纹的顶部，细沙粒堆积在沙波纹的底部，形成逆粒序迭片结构。

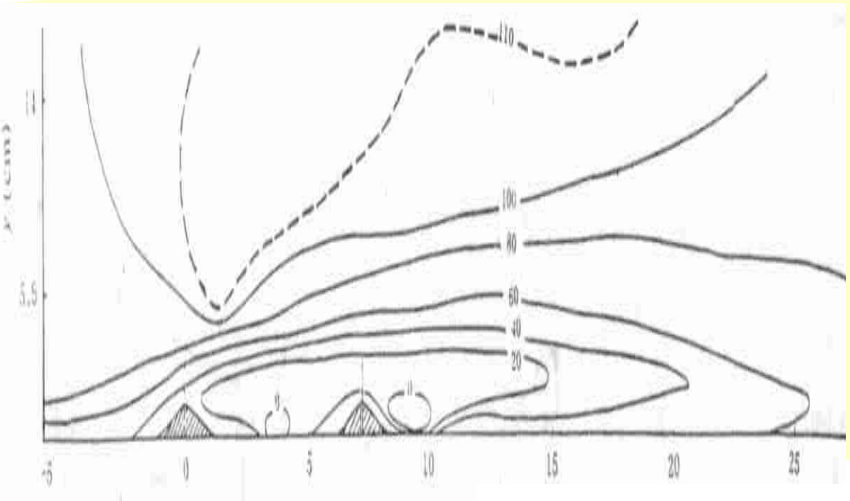
计算机模拟

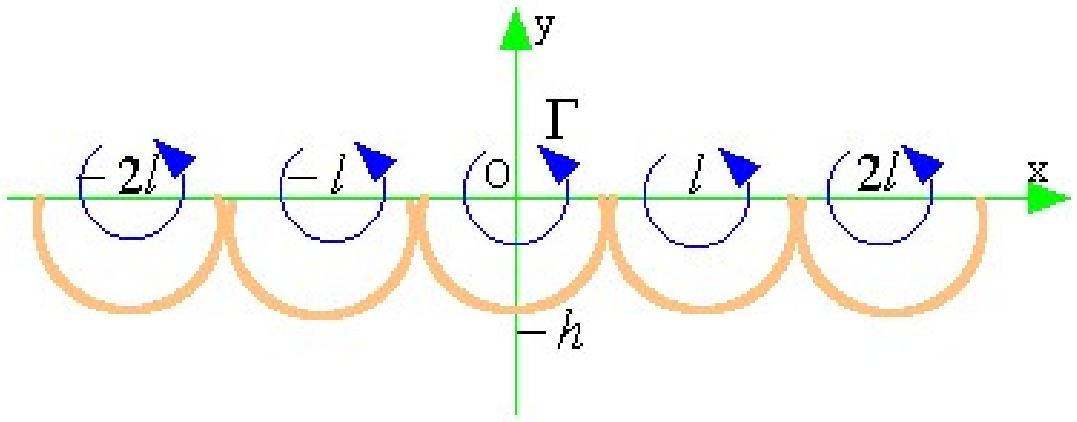


在稳定的风沙流的作用下，沙波纹的形态是不变的，
移动速度也是不变的；
模拟得到的沙波纹的移动速度在 $10^{-2}-10^{-4}\mathrm{m/s}$ 之间，
与风洞试验结果一致；
沙波纹的移动速度随着风速和地表温度增大。

●草方格(中国沙漠，2002)

工作



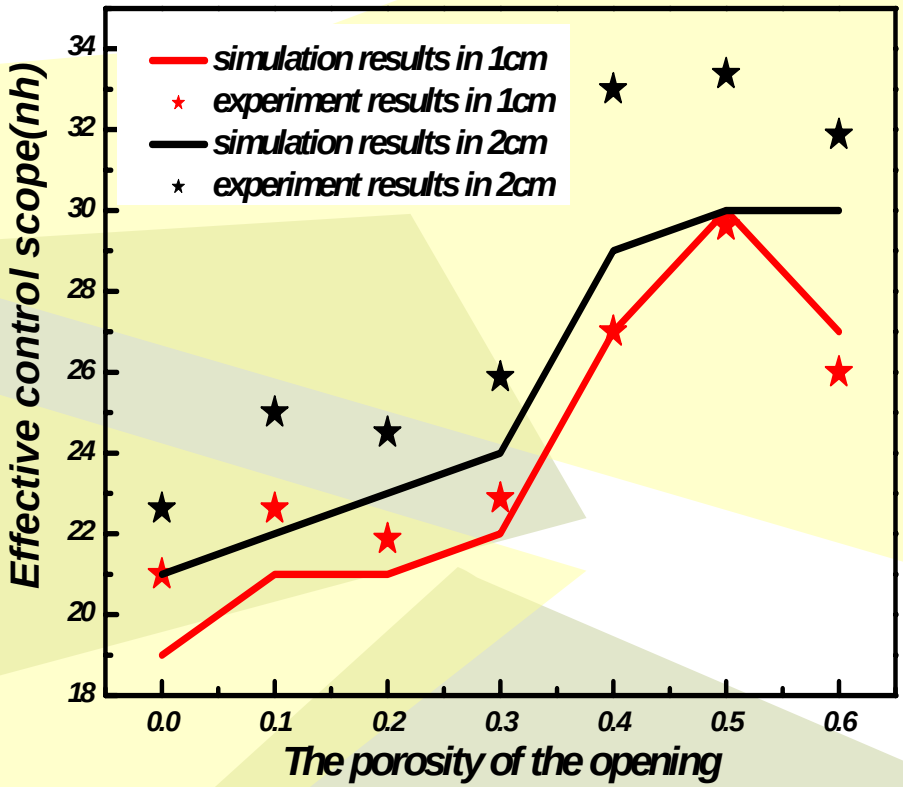


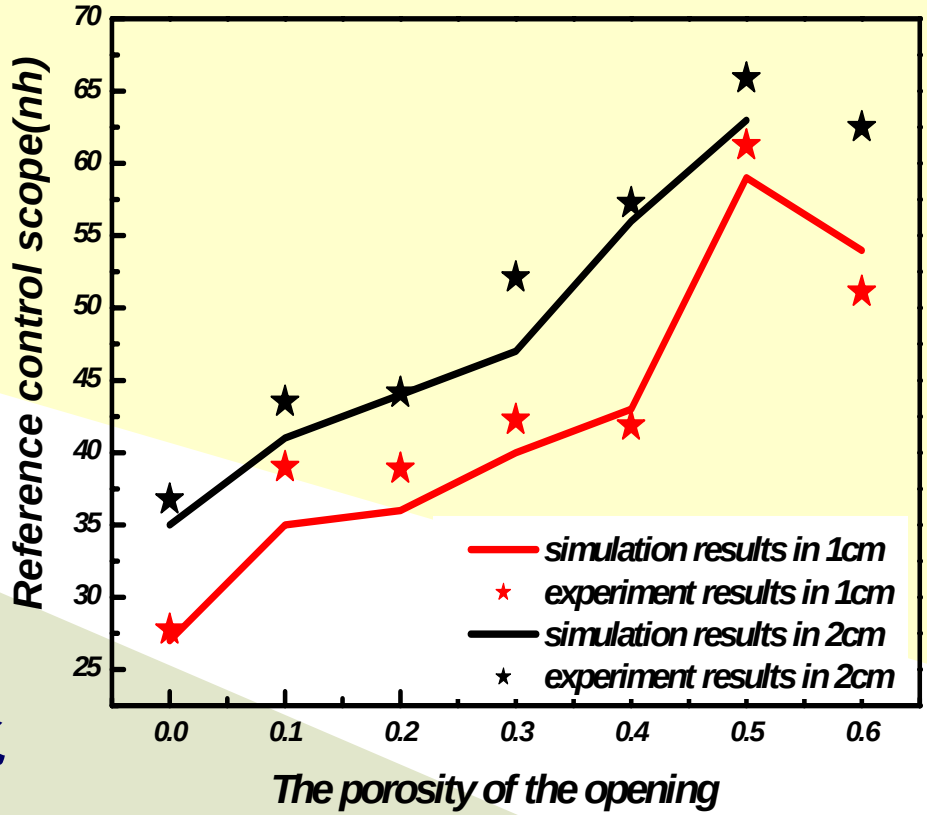
固沙结构

防沙栅栏的有效设计

工作

有效防护距离随孔隙度变化





恢复对照风速距离随孔隙度变化

课题验收专家组意见表

项目名称：中国北方沙漠化过程及其防治研究

课题名称：风沙运动的力学机理与土壤风蚀的定量评价

课题编号：G2000048702 得分：90

课题验收专家组听取了课题负责人的汇报和答辩，审阅了相关验收材料，经过讨论，一致同意通过对该课题的验收，并提出以下验收意见：

1、课题研究思路清晰，研究方案和技术路线设计科学合理，组织实施得力，全面完成了各项计划和考核指标，研究成果丰富，达到了预期目标。

2、课题取得了以下重要成果：1）实验发现气动起动的重要作用，给出了沙粒起动风速的计算公式，证实了蠕移输沙率比例并非常值；2）建立了单宽输沙率实验值处理精度的完整方法。提出随机粒-床碰撞模型和反演方法。实现了对多场合和多因素影响的宏观风沙流的理论模拟；3）建立了风蚀容忍量（T 值）模型，阐明了局地环流对金字塔沙丘形成的重要作用；4）对沙粒带电引发的风沙电场及其影响进行了实验研究和理论预测，揭示了风沙电场分布规律，确定了沙尘暴对电磁波的影响。

3、课题发表学术论文 90 篇，其中 SCI 论文 35 篇。提升了我国风沙运动研究的国际影响力。

4、课题组发挥了多学科交叉的优势，形成了良好协作的研究群体并开展了与国内外同行的广泛学术交流，提升了研究实力和创新能力。课题执行期间获 2 项“国家杰出青年基金”和 1 项“教育部优秀团队”培育计划等，在人才培养和团队建设方面取得显著成绩。

5、建议进一步加强风沙运动与沙漠化形成和演变宏观规律之间的关联研究。

项目首席科学家（签字）：

- 组织兰州大学和中科院寒旱所（原沙漠所）相关人员完成所主持的“973”项目的课题。该课题工作被评价为“提升了我国风沙运动研究的国际影响力”。
- 已在JGR上发表相关论文11篇；
- “的确展示出重要的贡献。其结论对于预测和考虑沙暴对关键结构的影响将是重要”。

---JGR评审意见

PRL 96, 158001 (2006) PHYSICAL REVIEW LETTERS week ending 21 APRIL 2006

Dynamics of Impact Cratering in Shallow Sand Layers

J F Boudet, Y Amarouchene, and H Kellay

Centre de Physique Moléculaire Optique et Hertzienne (UMR 5798), U Bordeaux 1, 351 cours de la Libération, 33405 Talence France

(Received 25 January 2006; published 19 April 2006)

velocity impacts Recently it was suggested that the use of granular materials in model experiments may shed some light on the complicated processes involved in crater formation for low velocity impacts on deep sand layers [5–9]

[8] X. I. Zheng, Z. T. Wang, and Z. G. Qiu, Eur. Phys. J. E 13, 321 (2004)

PRL 96, 018001 (2006) PHYSICAL REVIEW LETTERS week ending 13 JANUARY 2006

Aeolian Transport Layer

Murilo P. Almeida, José S. Andrade, Jr., and Hans J. Herrmann*

Departamento de Física, Universidade Federal do Ceará, 60455-900 Fortaleza, Ceará, Brazil

(Received 29 April 2005; revised manuscript received 23 September 2005; published 6 January 2006)

until a saturation is reached. The maximum number of grains a wind of given strength can carry through a unit area per unit time defines the saturated flux of sand q_s. This quantity has been measured by many authors in wind tunnel experiments and on the field, and numerous empirical expressions for its dependence on the strength of the wind have been proposed [4–9]. In previous studies theo-

[4] R. A. Bagnold, Proc. R. Soc. A **167**, 282 (1938).
[5] K. Lettau and H. Lettau, in *Exploring the World's Driest Climate*, edited by H. Lettau and K. Lettau (University of Wisconsin, Madison, 1978).
[6] B. T. Werner, J. Geol. **98**, 1 (1990).
[7] K. R. Rasmussen and H. E. Mikkelsen, Acta Mech. Suppl. **1**, 135 (1991).
[8] Y.-H. Zhou, X. Guo, and X. J. Zheng, Phys. Rev. E **66**, 021305 (2002).
[9] J. D. Iversen and K. R. Rasmussen, Sedimentology **46**, 723 (1999).

Available online at www.sciencedirect.com
SCIENCE DIRECT®
ELSEVIER
Planetary and Space Science 54 (2006) 273–286
Planetary and Space Science
www.elsevier.com/locate/pss

On possible release of microbe-containing particulates from a Mars lander spacecraft

Kenneth Harstad, Josette Bellan*

Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, M/S 125-109, 4800 Oak Grove Drive, Pasadena, CA 91109-8099, USA

Received 23 August 2005; received in revised form 7 December 2005; accepted 9 December 2005
Available online 30 January 2006

here. Also ignored here is the possible effect of electric charge on the saltating particle trajectories; as shown in Zheng et al. (2003), electrostatic force values up to that of the gravity force are indicated, depending greatly on the sand size distribution. The neglect of turbulence effects

Zheng, X.J., Huang, N., Zhou, Y.-H., 2003. Laboratory measurement of electrification of wind-blown sands and simulation of its effect on sand saltation movement. J. Geophys. Res. 108 (D10), 4322–4330.

Greg M. Stock, Catherine A. Riihimaki, and Robert S. Anderson – Age constraints on cave development and landscape evolution in the Bighorn Basin of Wyoming, USA. *Journal of Cave and Karst Studies*, v. 68, no. 2, p. 76–84.

AGE CONSTRAINTS ON CAVE DEVELOPMENT AND LANDSCAPE EVOLUTION IN THE BIGHORN BASIN OF WYOMING, USA

GREG M. STOCK*
Department of Geological Sciences, University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109-1005, USA, gstock@umich.edu, (734) 615-4076
CATHERINE A. RIIHIMAKI
Department of Geology, Bryn Mawr College, Bryn Mawr, PA 19010, USA, criihima@brynmawr.edu, (610) 526-7971
ROBERT S. ANDERSON
Department of Geological Sciences and Institute of Arctic and Alpine Research, University of Colorado, Boulder, CO 80309, USA, andersrs@colorado.edu, (303) 735-8169

Therefore, we interpret this deposit as eolian (windblown) in origin. Although this interpretation does not directly tie the deposit to a cave position near river level, we infer that this sand was in fact deposited when the cave entrance was very near the Bighorn River. This is because concentrations of eolian sand decrease rapidly with height above the ground surface (Zheng *et al.*, 2004; Anderson, 1986); even high winds usually do not mobilize sand grains of this size more than a few meters into the air. In addition, we did not identify any

Zheng, X., He, L., and Wu, J., 2004, Vertical profiles of mass flux for windblown sand movement: Journal of Geophysical Research, v. 109, B01106, doi: 10.1029/2003JB002656.

12 1　2006 年第 1 期　中国西部科技

草方格防风固沙技
塔里木河干流输水

陈志祥[1]

（[1] 新疆通力建设股份有限公司　库尔勒

摘　要：塔里木河干流输水堤全长 380.29Km，其
设计中在流沙严重地段采取适当的防风
沙固定方法，即生物固沙、机械固沙和化
为主要固沙措施，并对草方格的规格、材

关键词：输水堤防　草方格　防风固沙

（2）草方格规格确定。根据塔里木沙漠公路及兰州大学力学系王振亭等“草方格沙障尺寸分析的简单模型”研究结果，草方格的出露草头高度与最大间距的对应关系如表 1 所示。

表 1　出露草头高度与最大间距的对应关系　　单位：cm

草头高度	最大间距	草头高度	最大间距	草头高度	最大间距
1.0	5.387532	11.0	59.262750	21.0	113.138000
2.0	10.775050	12.0	64.650280	22.0	118.525500
3.0	16.162570	13.0	70.037800	23.0	123.913000
4.0	21.550090	14.0	75.425320	24.0	129.300600
5.0	26.937610	15.0	80.812840	25.0	134.688100
6.0	32.325140	16.0	86.200370	26.0	140.075600
7.0	37.712660	17.0	91.587890	27.0	145.463100
8.0	43.100190	18.0	96.975420	28.0	150.850600

2. 王振亭，郑晓静. 草方格沙障尺寸分析的简单模型. 中国沙漠，2002(3)

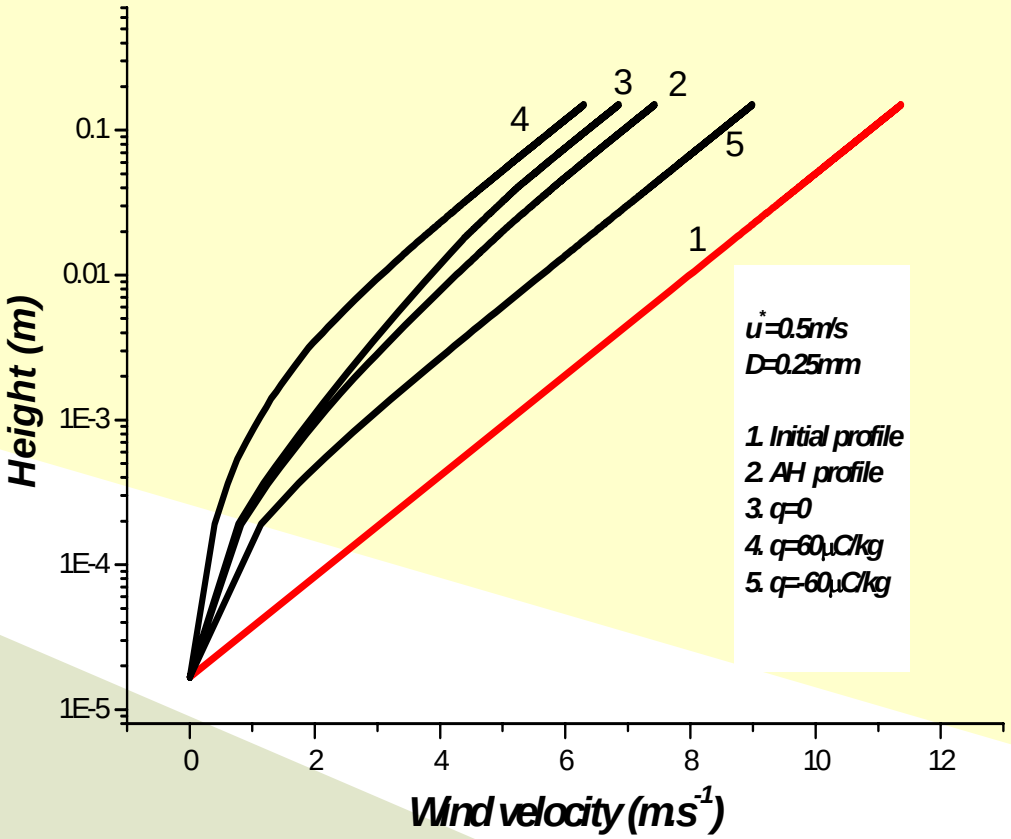
- *Workshop on Multiphase Turbulence: Dust Storms, Erosion, Hurricanes and Tornadoes (July 16-18 2007）*
- *Third China- Korea -Japan Joint Conference on Meteorology (Nov 14—16 2007)*
- 应邀参加2008亚洲流体力学大会并做大会报告
- 国家科技进步二等奖(2007, 2)

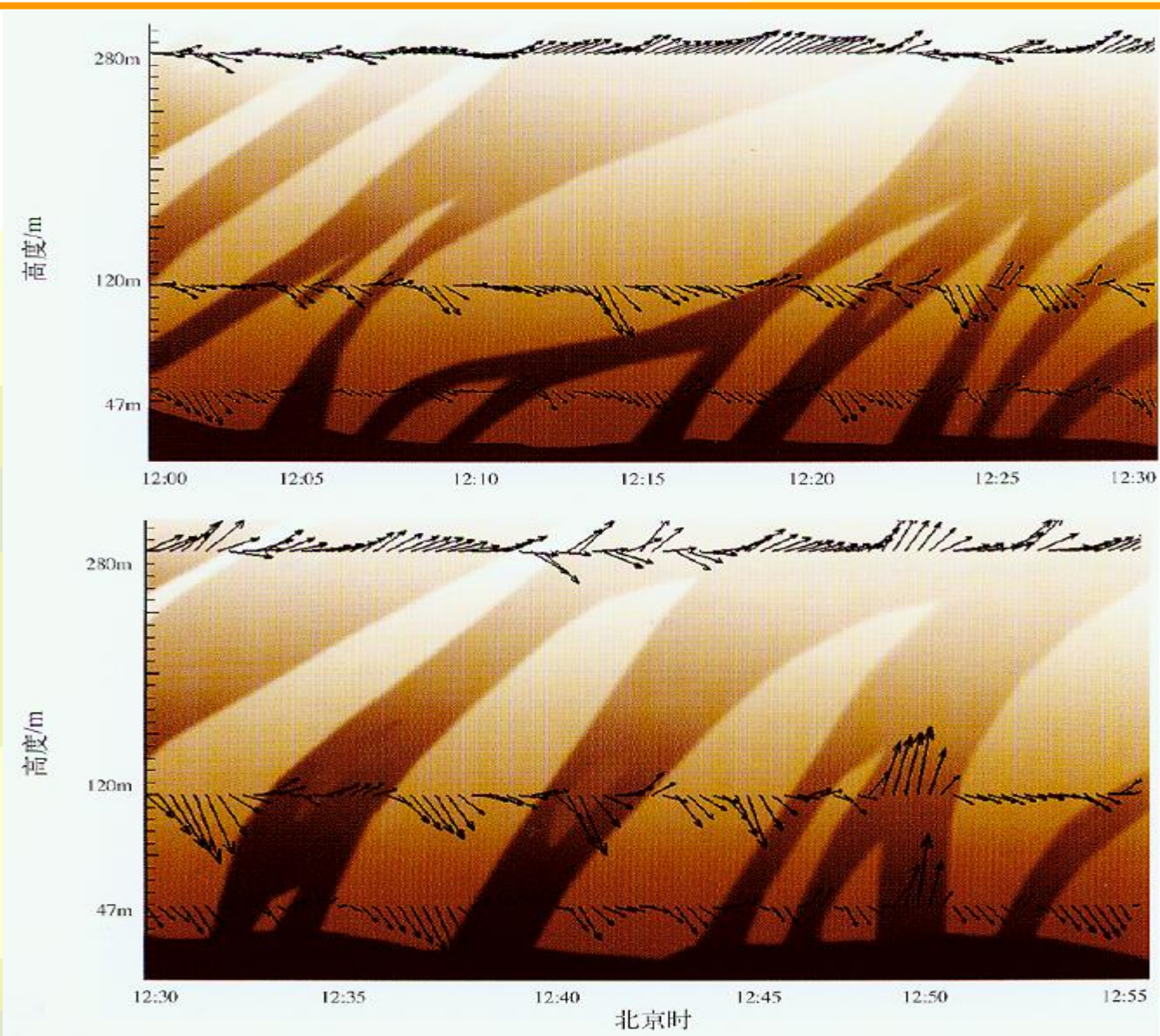
$$\rho\frac{\partial u}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial y}[\rho k^2y^2\left|\frac{\partial u}{\partial y}\right|\frac{\partial u}{\partial y}]+\int_{v_{0\min}}^{v_{0\max}}Nmf(v_0)[\frac{\ddot{x}_{\uparrow}(v_0)}{\left|\dot{y}_{\uparrow}(v_0)\right|}+\frac{\ddot{x}_{\downarrow}(v_0)}{\left|\dot{y}_{\downarrow}(v_0)\right|}]dv_0$$

$y=y_0=\frac{D}{30}$: $u=0$

$y\to\infty$: $ky\frac{du}{dy}=u_*$

$t=0$: $u(y)=\frac{u_*}{k}\ln\frac{y}{y_0}$



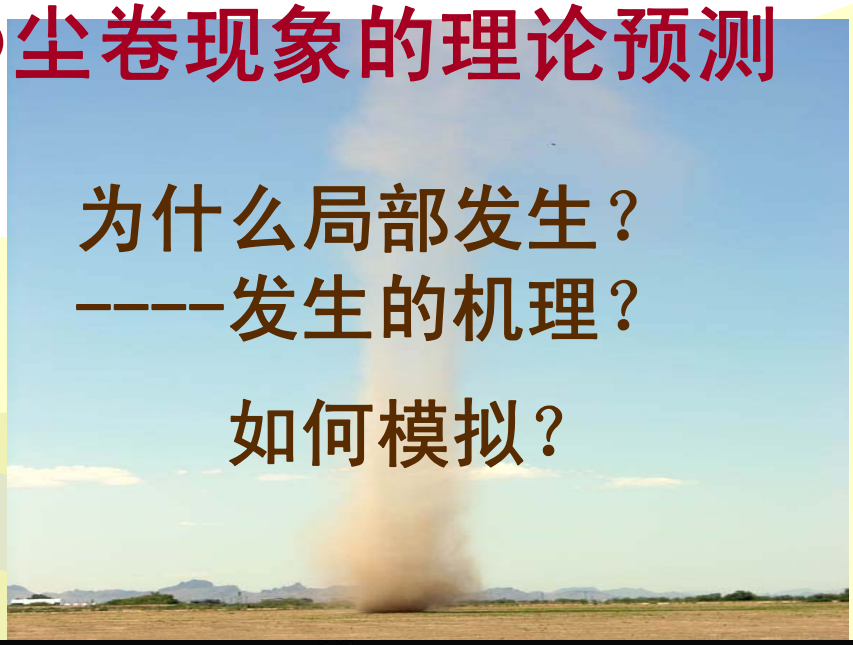

280m
120m
47m
高度/m
12:00
12:05
12:10
12:15
12:20
12:25
12:30
280m
120m
47m
高度/m
12:30
12:35
12:40
12:45
12:50
12:55
北京时

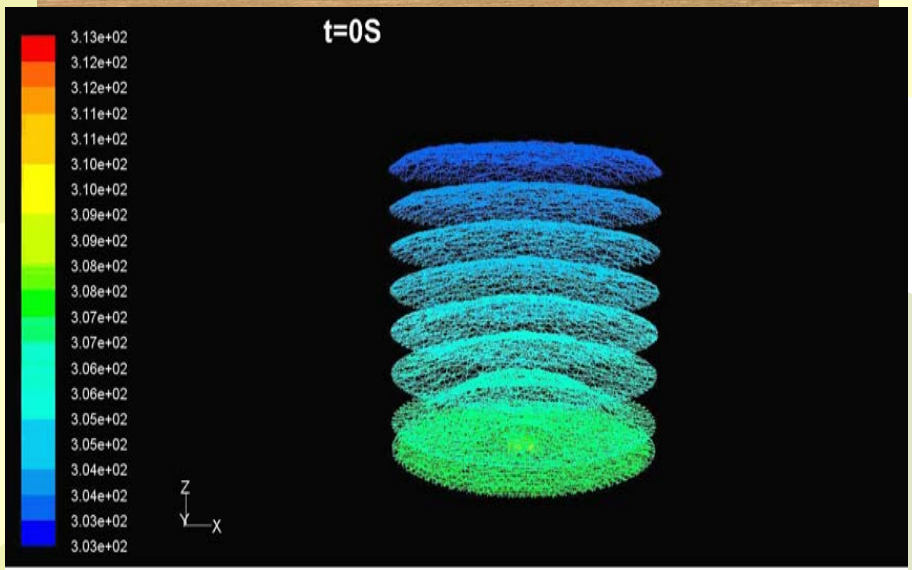
提纲

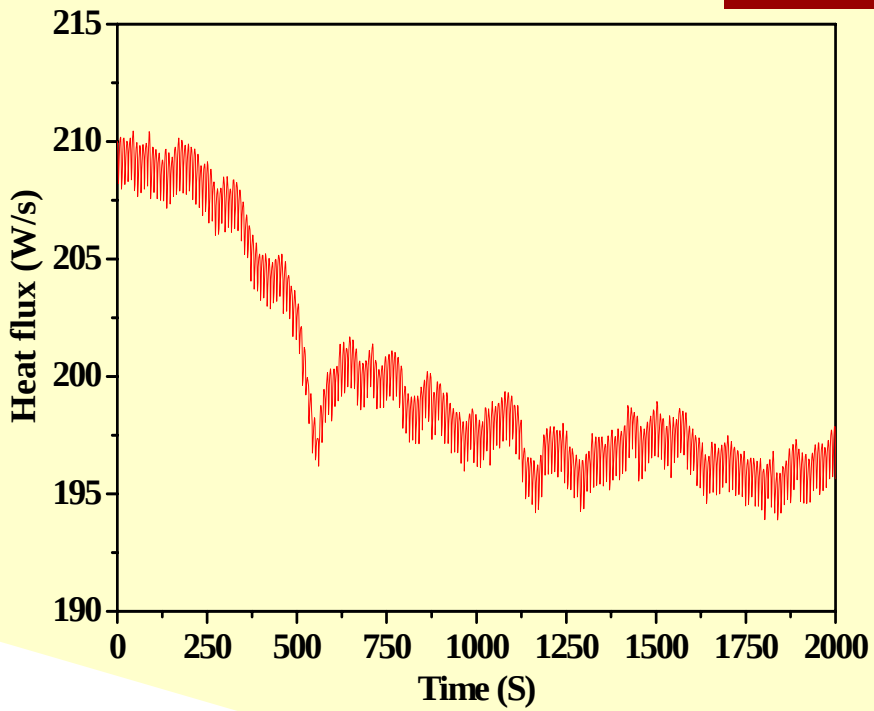
- 研究背景与现状
- 风场与风沙流
- 沙丘场的形成与发展

●尘卷现象的理论预测

工作

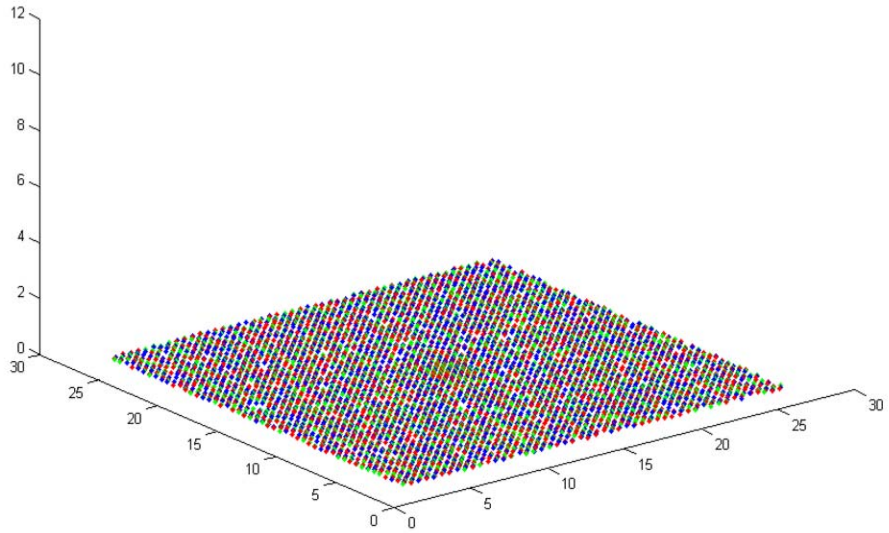


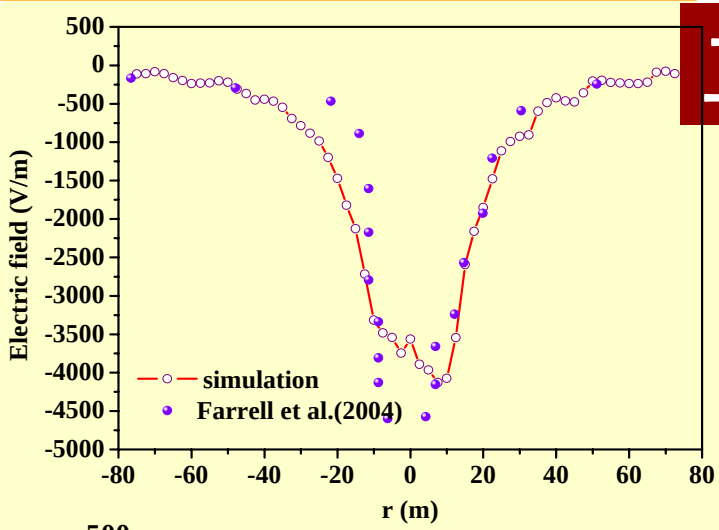


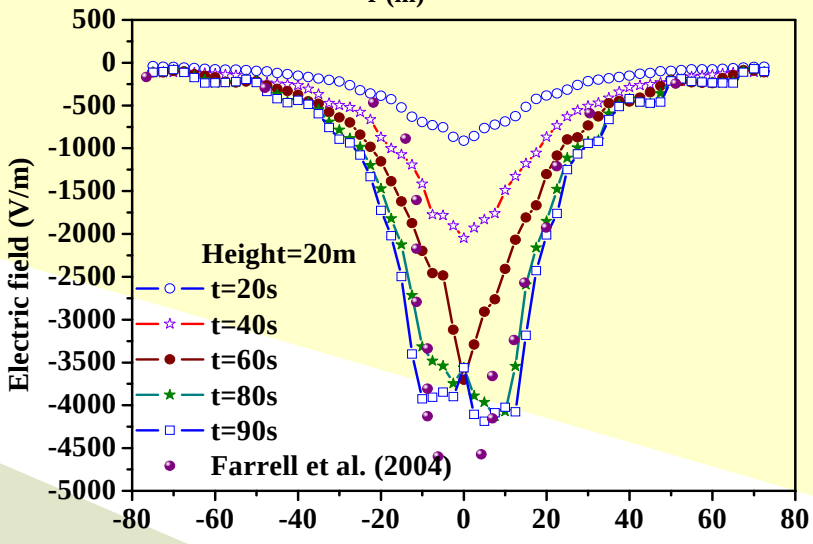


尘卷发生过程中地表
热流量随时间的变化

工作







不同时刻的尘卷电场强度分布

---t=80s达到稳定状态

工作

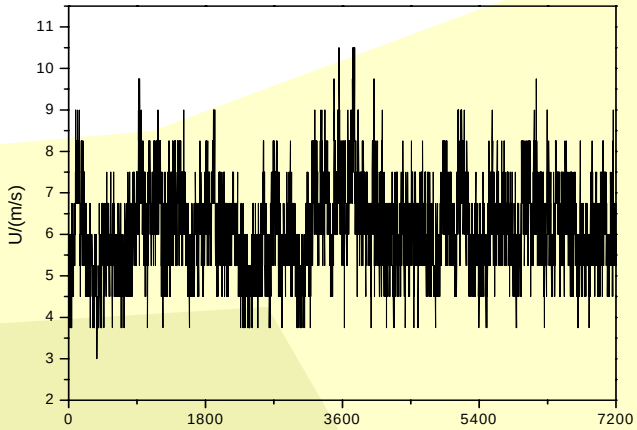
野外观测

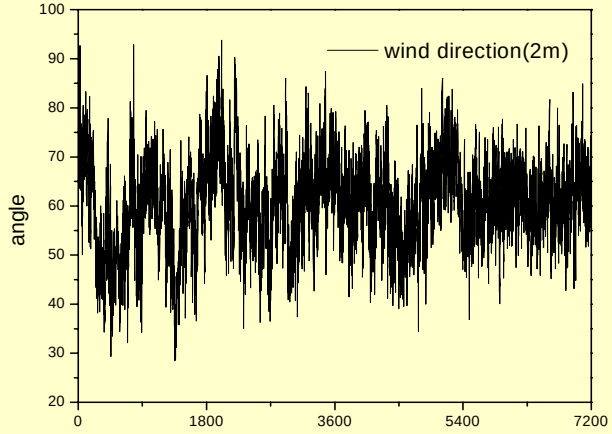
- 高频测量的压电式动能传感器，用来反应跃移颗粒的冲击，输出脉冲间隔内颗粒冲击的数目信号，得到风沙流强度。

- 风速风向传感器用来测量四个不同高度的水平风速和风向
- 临时闪存模块（微机）可自设记录数据的频率，并用它来储存和显示数据。可用它把野外测量的数据保存到电脑中。

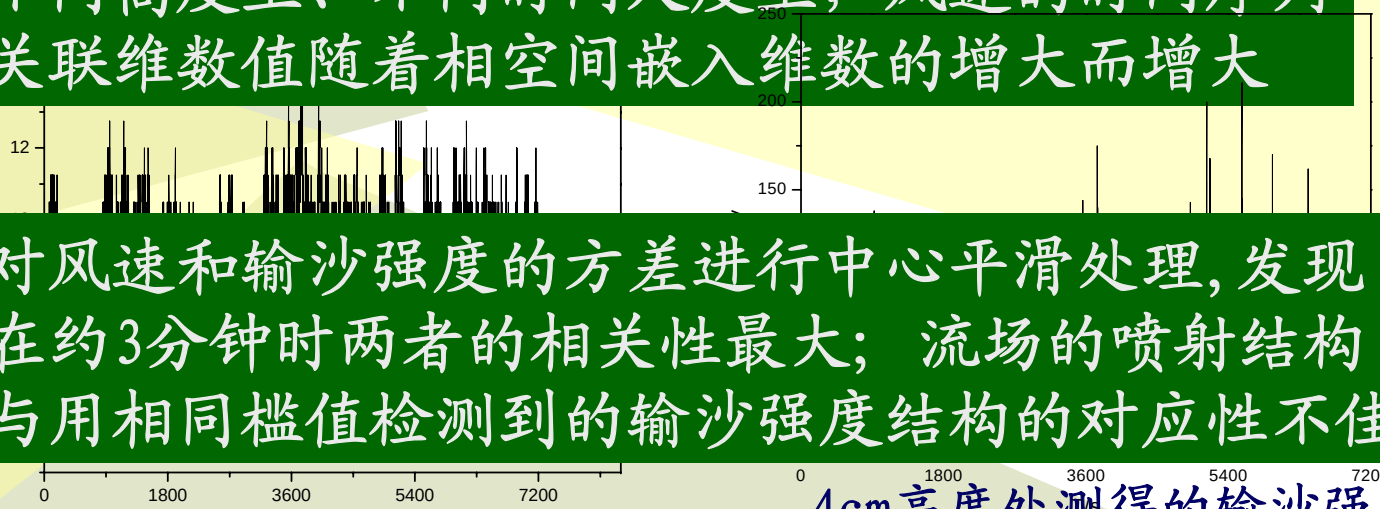
近地表风速和输沙强度的测量

工作





不同高度上、不同时间尺度上，风速的时间序列关联维数值随着相空间嵌入维数的增大而增大



对风速和输沙强度的方差进行中心平滑处理，发现在约3分钟时两者的相关性最大；流场的喷射结构与用相同槛值检测到的输沙强度结构的对应性不佳

2m高度处测得的风向（北偏东60度）

4cm高度处测得的输沙强度（D>0.15mm的沙粒个数）

工作

阵风特征量随高度的变化

沙丘	均值	标准差	标准差/均值	偏度	峰度	分形维数
12	6.02	1.08	0.179	0.250	2.77	1.68
54	7.81	1.34	0.172	0.262	2.60	1.70
99	8.12	1.38	0.170	0.229	2.57	1.70
200	8.52	1.42	0.167	0.212	2.34	1.70

平地3	均值	标准差	标准差/均值	偏度	峰度	分形维数
12	4.27	1.00	0.233	0.292	2.91	1.73
54	5.92	1.22	0.206	0.239	2.81	1.75
99	6.61	1.29	0.195	0.247	2.85	1.76
200	7.41	1.36	0.184	0.210	2.73	1.76

越接近地面阵风的相对脉动强度越大

阵风间歇性随高度增加而增强

接近地表的阵风的分形维数偏低

风速与输沙强度的比较

N/统计量	均值	标准差	标准差/均值	偏度(0)	峰度(3)
1	6.02	1.08	0.18	0.25	2.77
	10.51	14.94	1.42	2.84	14.71
2	6.02	1.08	0.18	0.30	2.96
	9.57	13.77	1.44	2.91	16.18
3	6.30	1.05	0.17	0.46	3.52
	15.73	22.01	1.40	3.25	17.34
4	6.20	0.91	0.15	0.14	2.95
	16.82	19.86	1.18	2.79	16.60

输沙强度的平均脉动强度是风速的平均脉动强度7倍以上

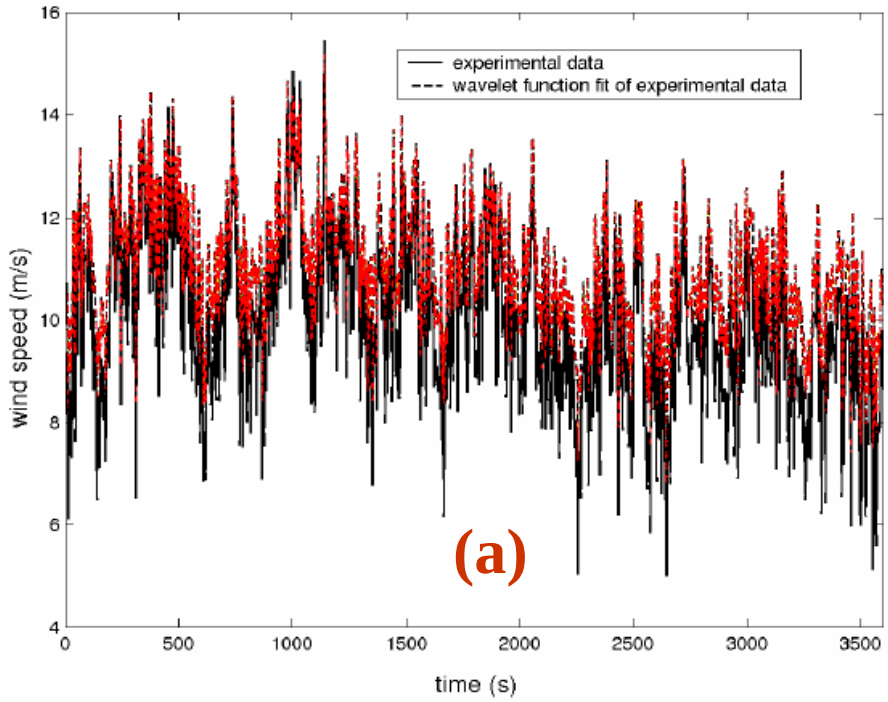
输沙强度的峰度是风速峰度的5倍左右

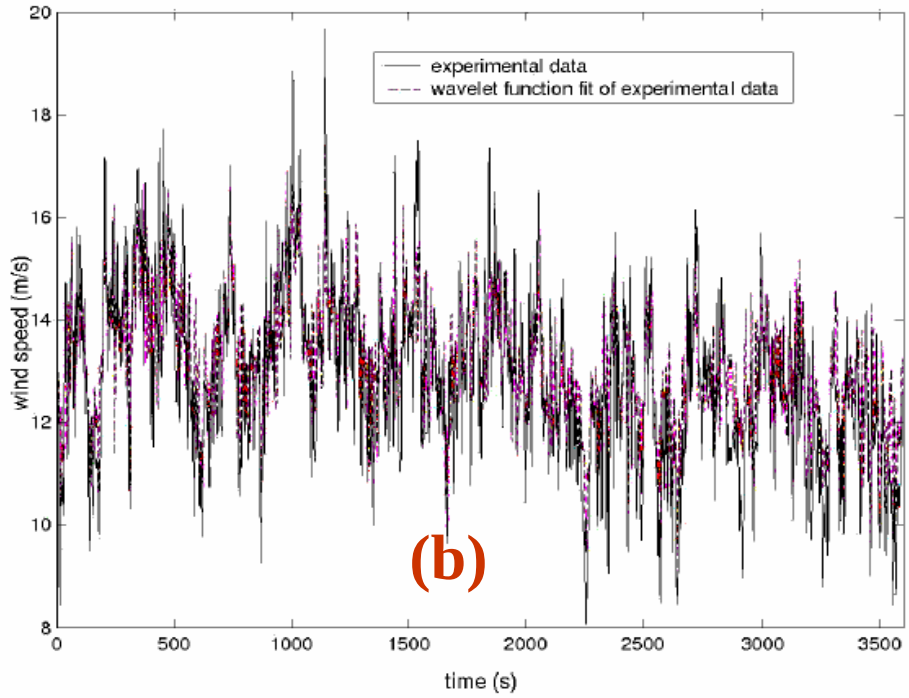
输沙强度的不稳定性和间歇性比风速的更为明显

工作

阵风拟合

$$u(y,t) \approx \sum_{k} \left(\overline{c}_{j,k} + A\ln(y) \right) \phi_{j,k}(t)$$

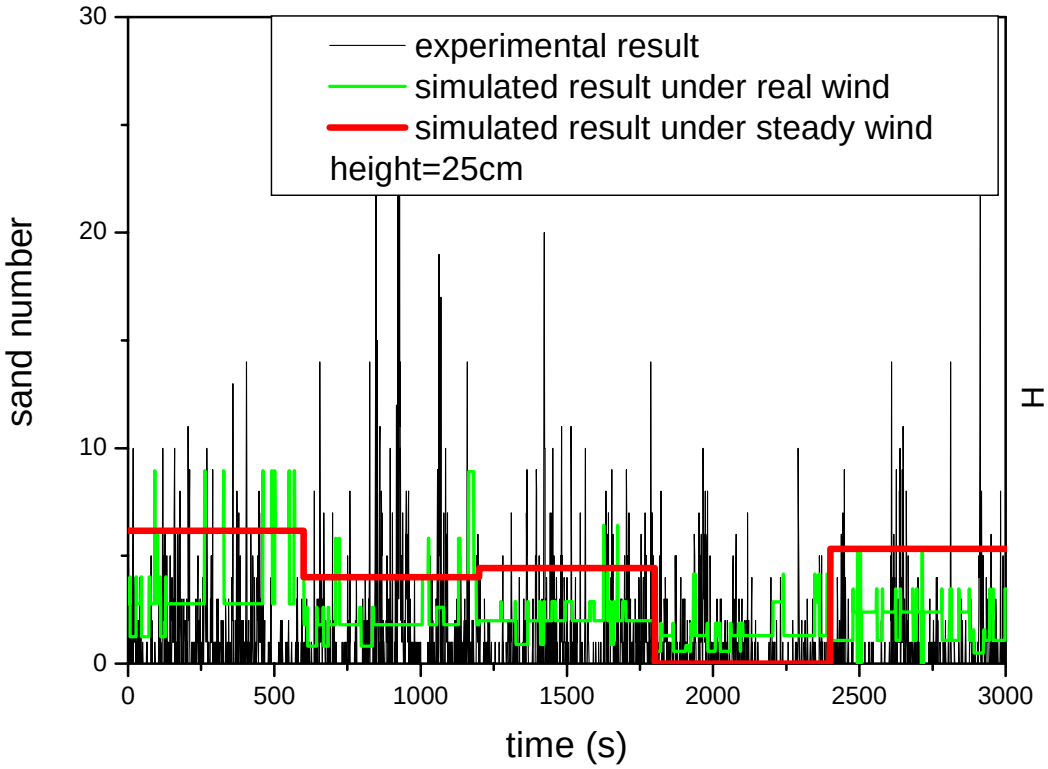


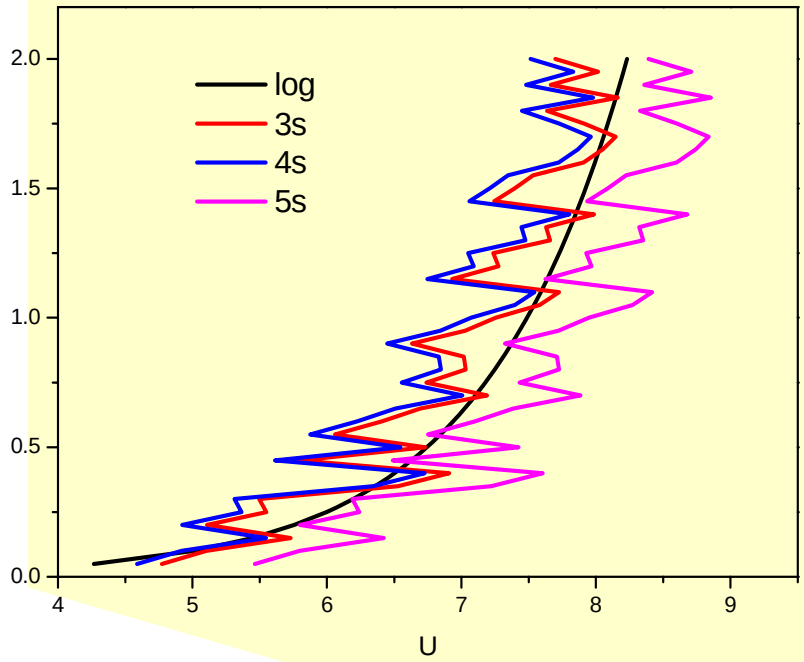


Wind speed *vs.* time at the height of (a) 57cm and (b) 204cm, at the tough of dune

工作

阵风作用下的输沙强度预测





明显不同与平稳风场情形

工作

阵风表示

给出描述近地表风场阵发特征的一般表达式

$$u(z,t_i)=U+\sigma\omega_1+p(\gamma)\cdot T_i\cdot(-1)^{i+1}-[k_1\log\left(\frac{h_0}{z}\right)+k_2+\omega_2(k_3\log\left(\frac{h_0}{z}\right)+k_4)]$$

随机部分 高斯噪声　　间歇部分 指数分布

$$\sigma=\sqrt{\sigma_u^2(1-\gamma)}$$

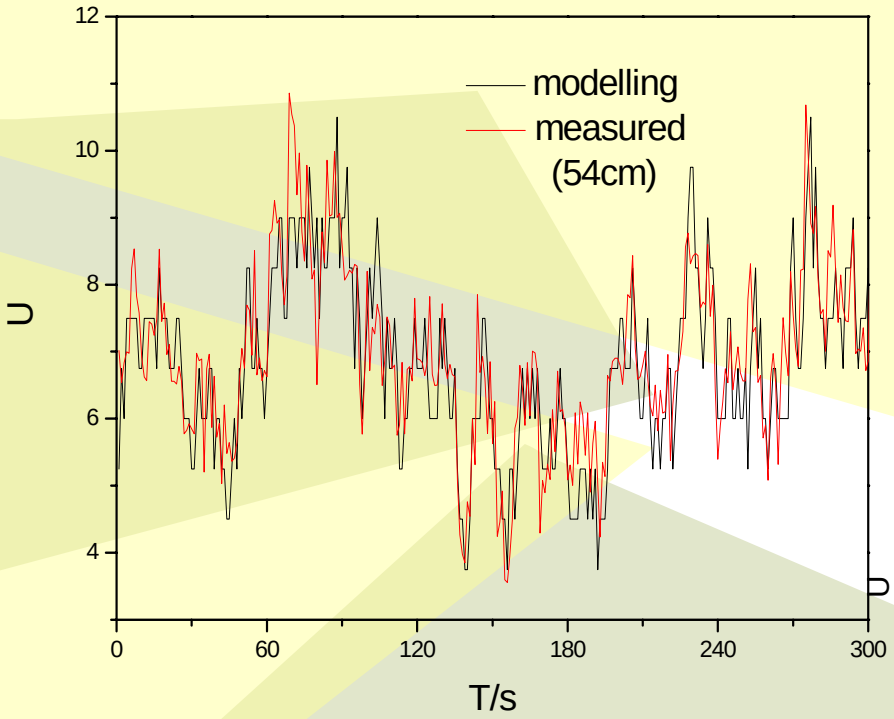
$$\gamma=0.8$$

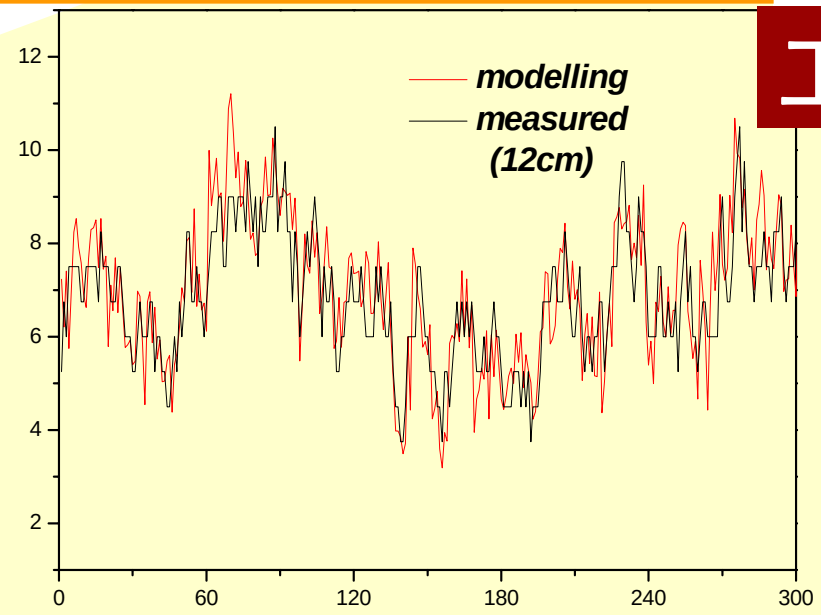
ω_1 ω_2 由计算机随机生成的标准正态随机数

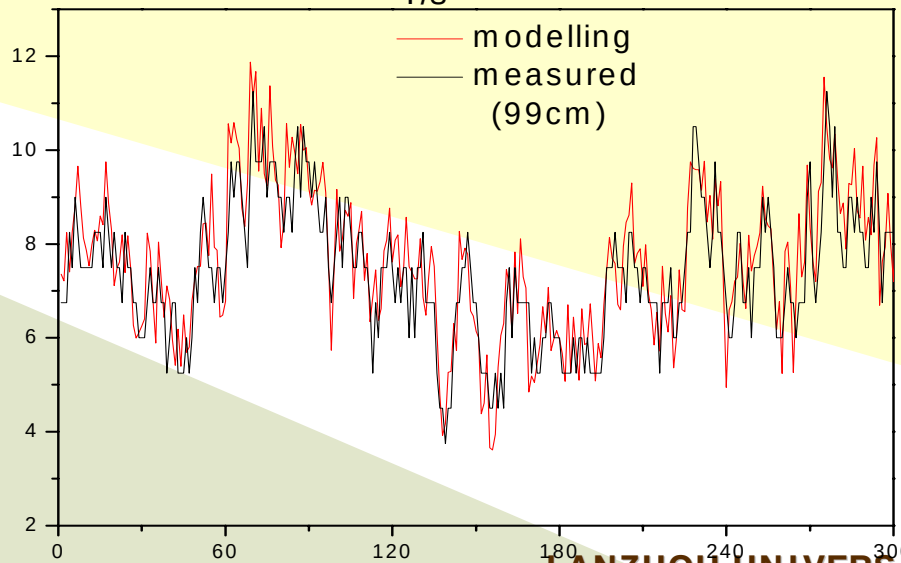
$$k_1=2.37\cdot u_*+0.07\ ,\ k_2=-0.3\ ,\ k_3=0.06\ ,\ k_4=0.56$$

工作

风场预测值与实验值的比较



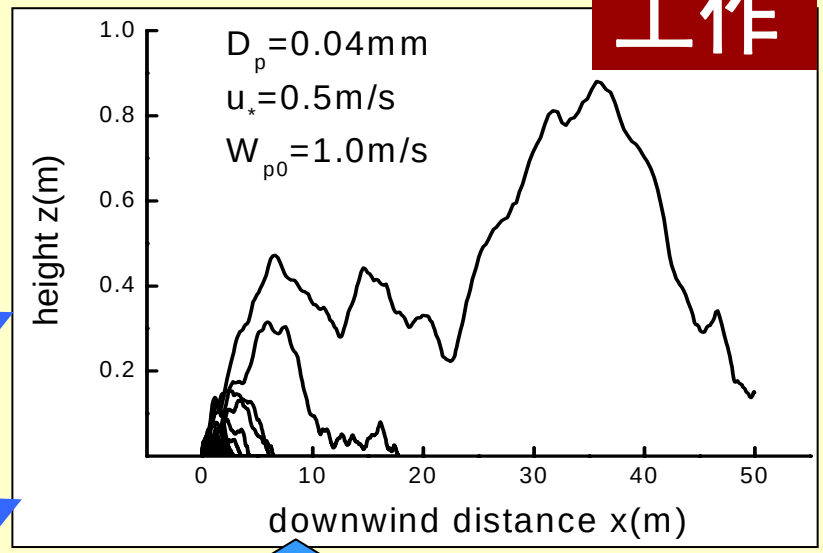




工作

沙尘的随机运动模型

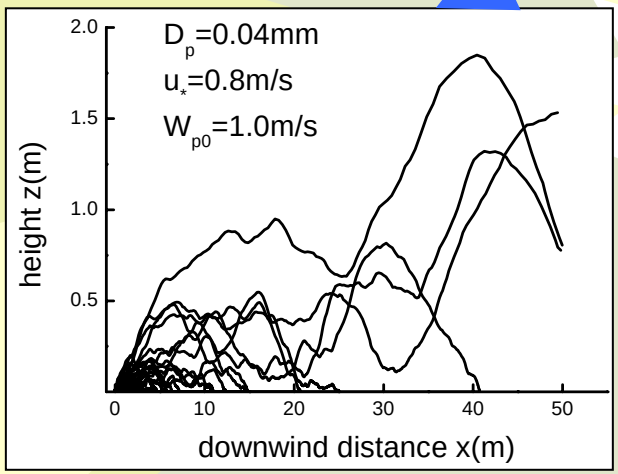
考虑风场的垂向脉动

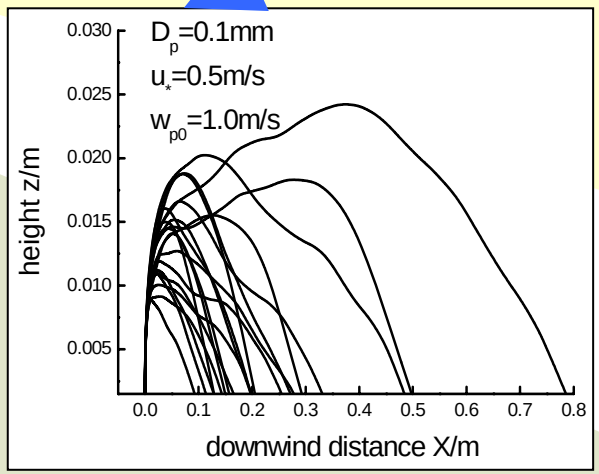


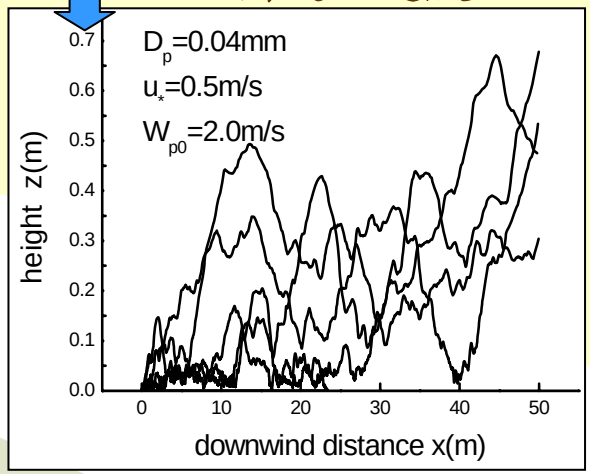
不同风速

不同粒径

不同起跳速度





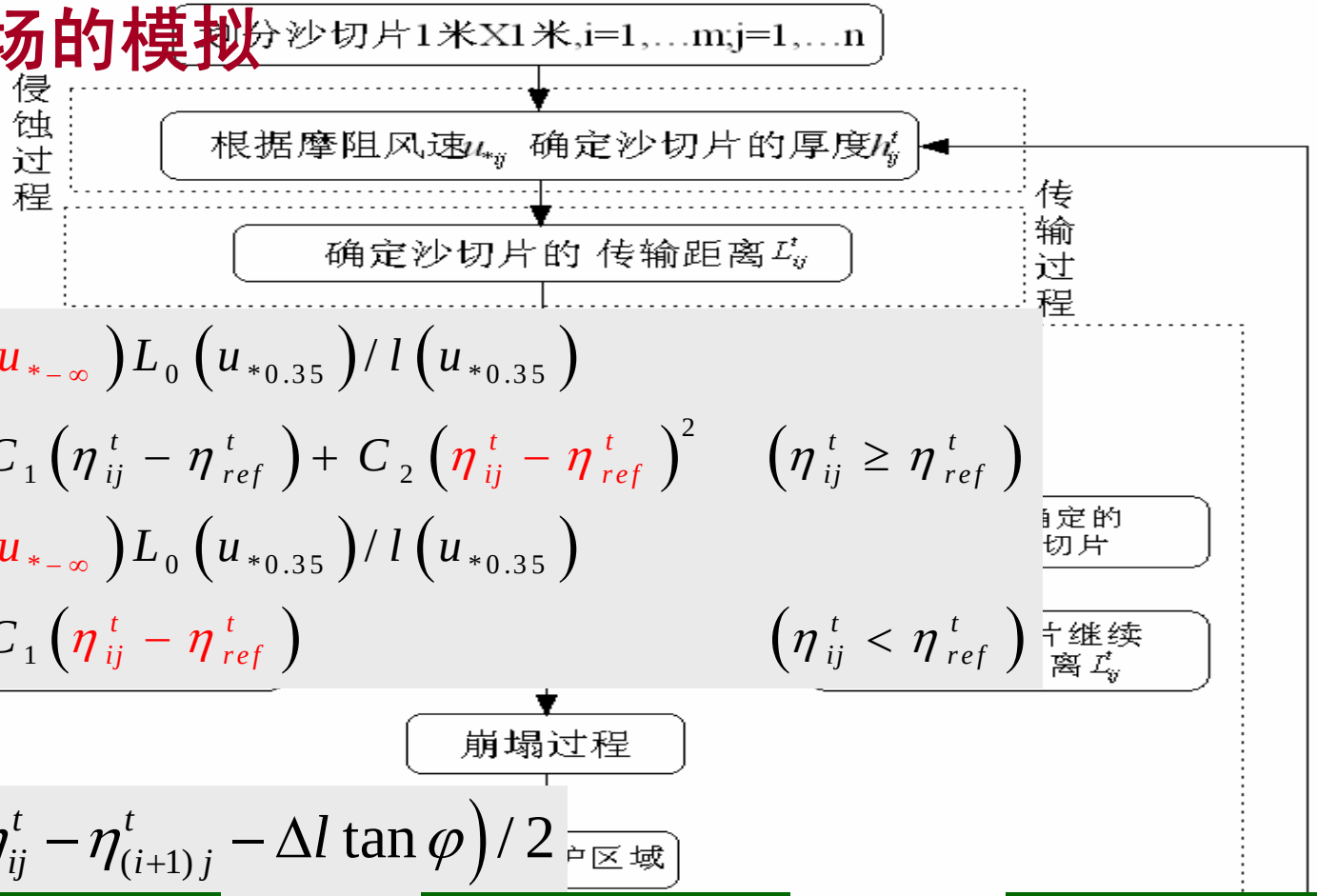


提纲

- 研究背景与现状
- 风场与风沙流
- 沙丘场的形成与发展

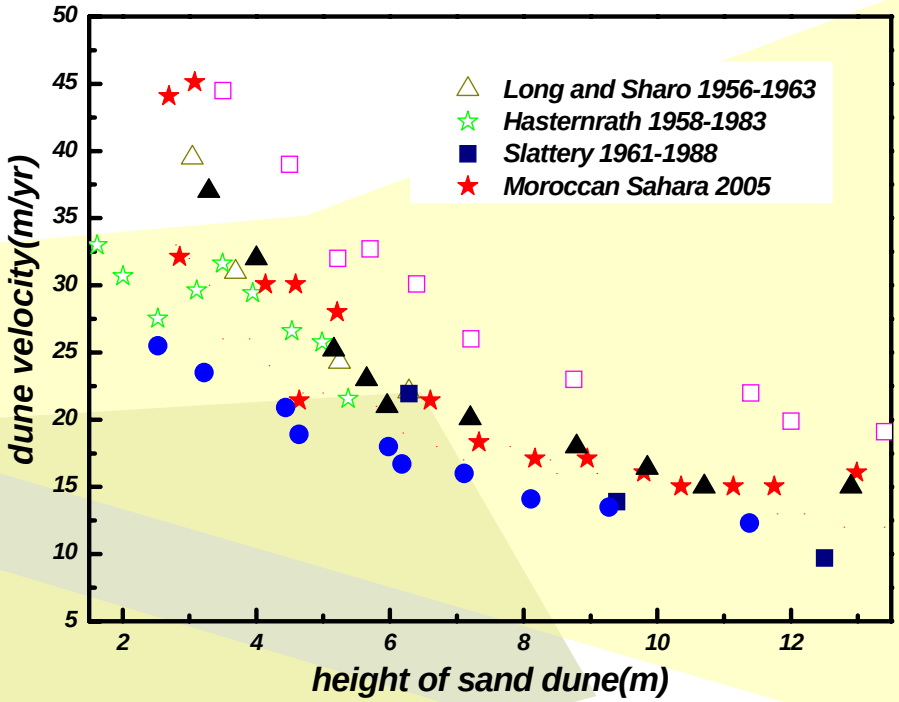
工作

- 沙丘场的模拟



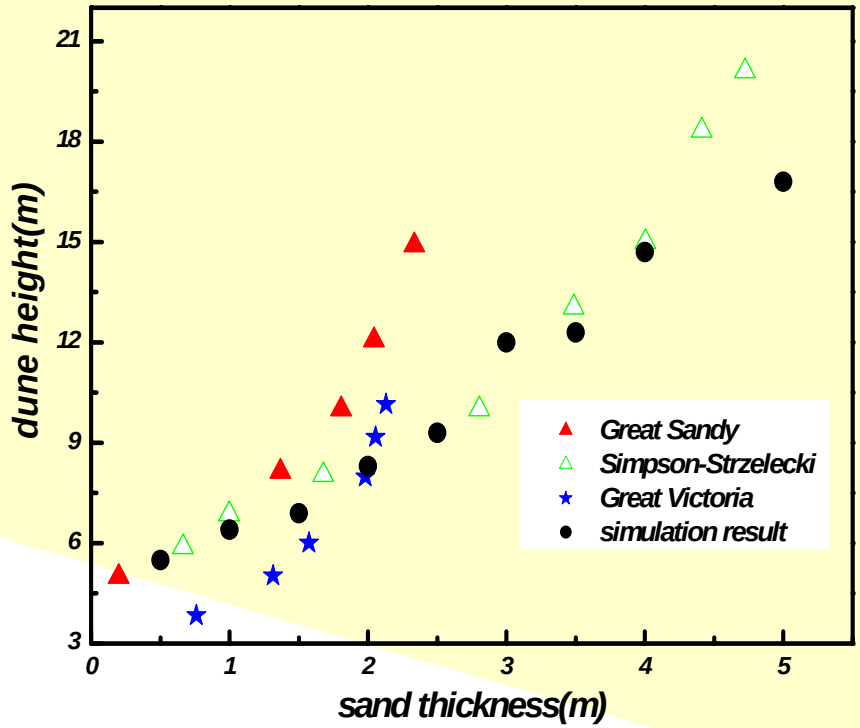
量级在微米左右的沙粒的运动 → 尺度在1米左右的沙切片运动 → 量级十米左右的沙丘的形态和移动

工作



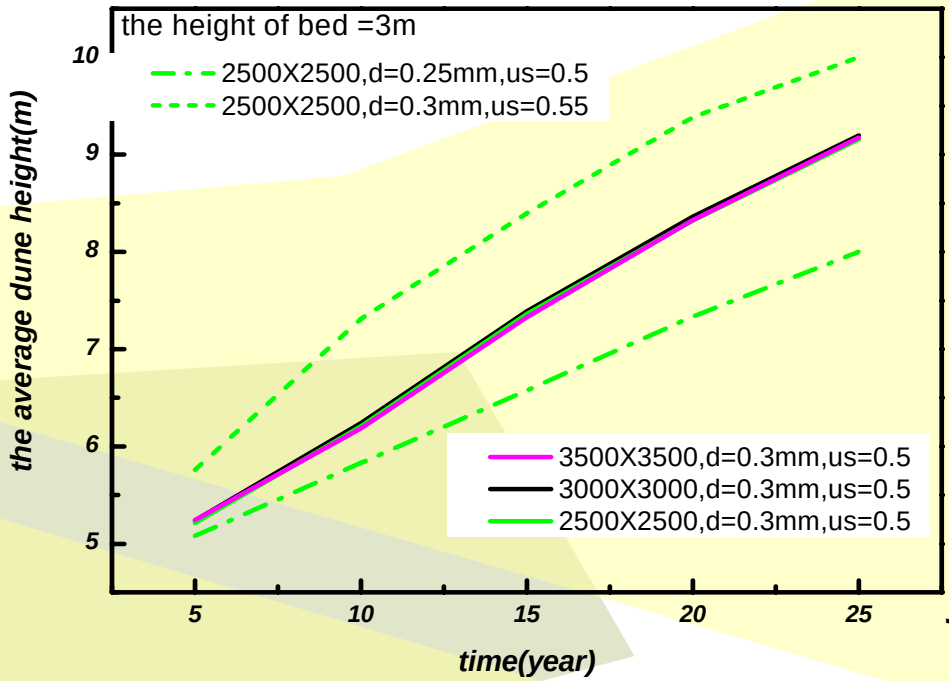
(■ , ☆ , △) *B. Andreotti, P. Claudin and S.Douady, Eur. Phys. J. B. 28, 321(2002).*

(★) *Hicham Elbelrhiti, Philippe Claudin and Bruno Andreotti, Nature. 437, 720(2005).*

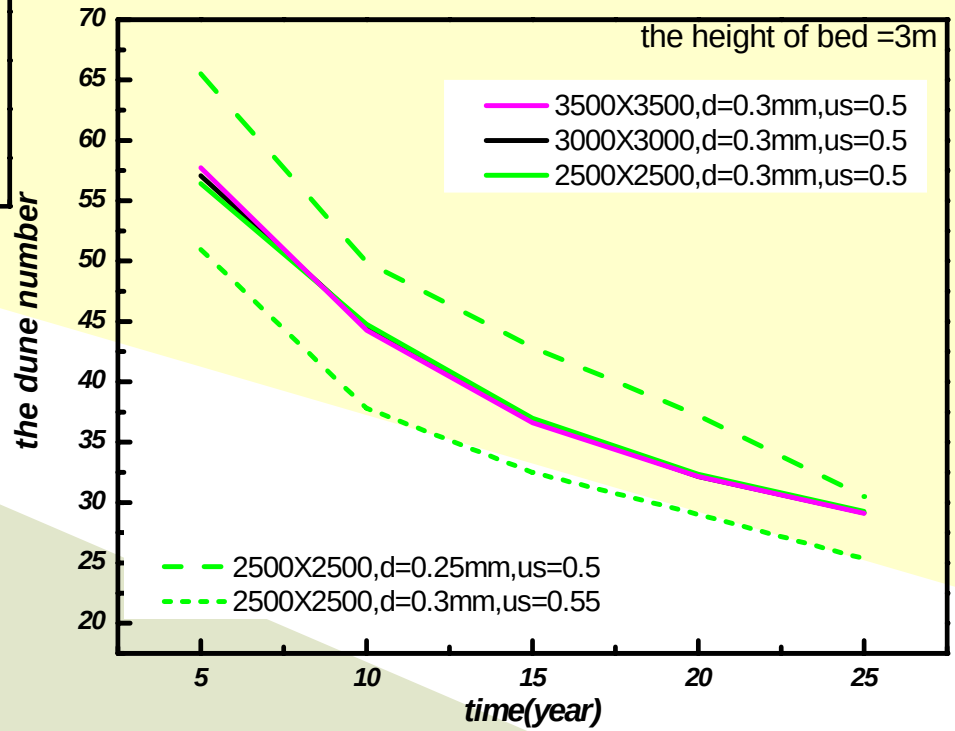


R.J. Wasson and R.Hyde, Nature. 304,337(1983).

工作



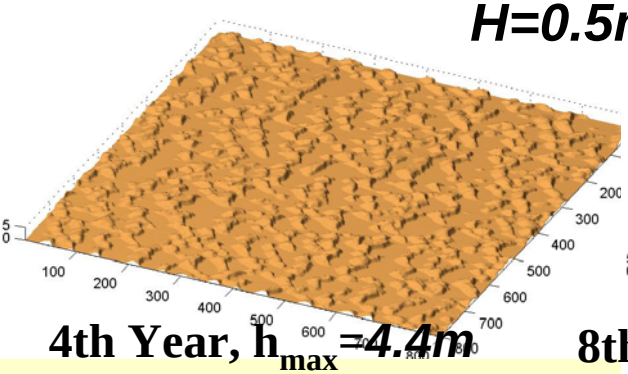
当风场强度增大时，沙丘平均高度增大，数量减少



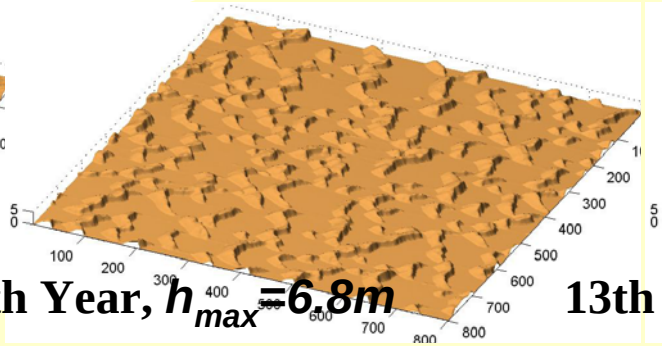
当沙粒粒径减小时，沙丘平均高度减小，数量增多

工作

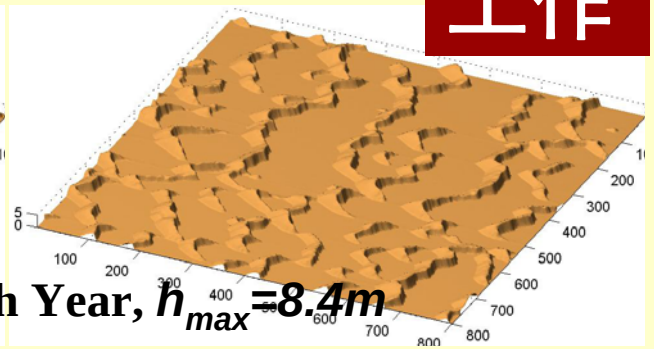
H=0.5m Us=0.5m/s D=0.3mm



4th Year, h_{max}=4.4m



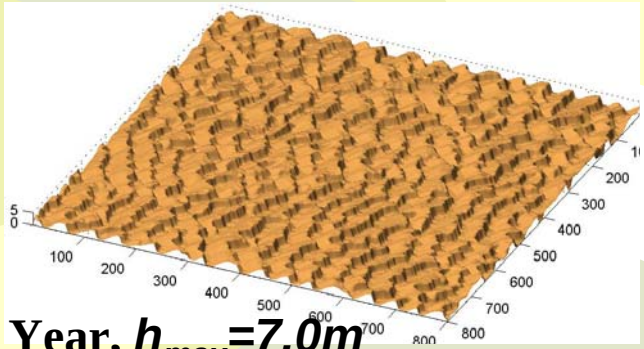
8th Year, h_{max}=6.8m



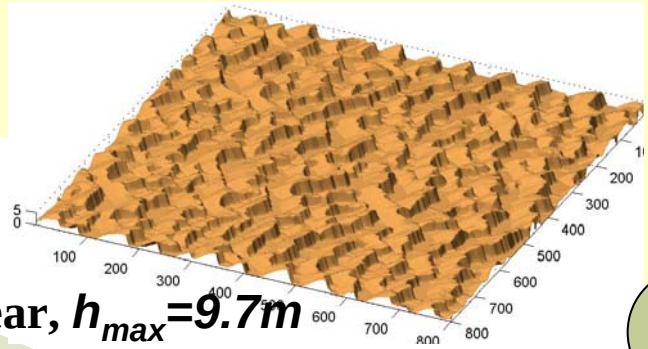
13th Year, h_{max}=8.4m

沙源少: 小的新月形沙丘逐步发展直至形成沙丘链

H=3m Us=0.5m/s D=0.3mm



5th Year, h_{max}=7.0m

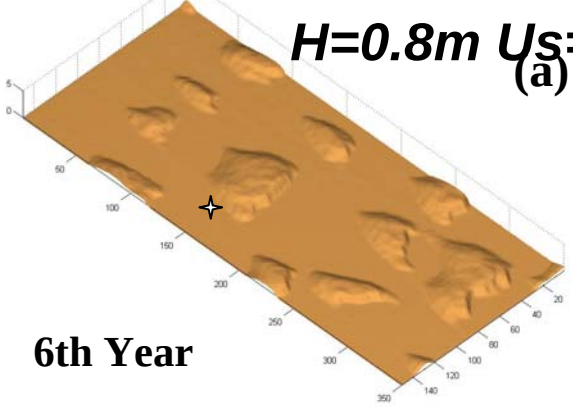


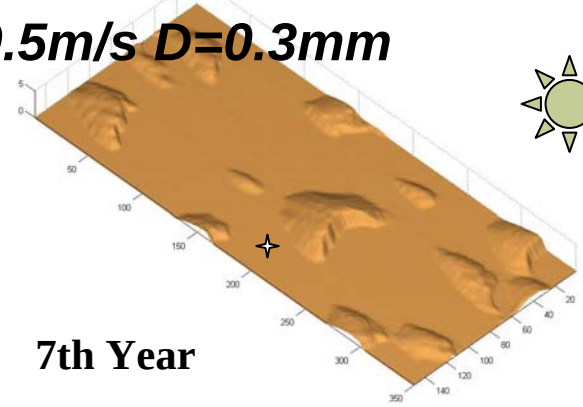
10th Year, h_{max}=9.7m

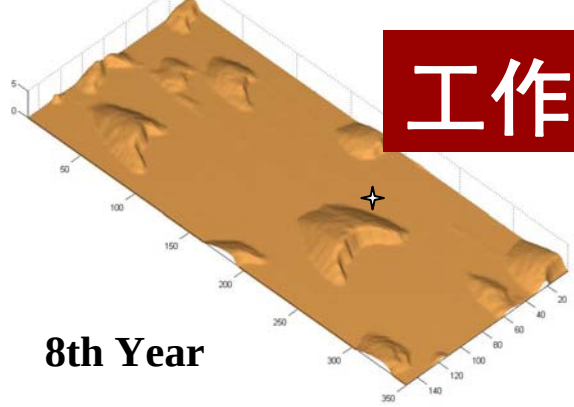
沙源多: 小的横向沙脊逐步发展成尺度壮大

H=0.8m Us=0.5m/s D=0.3mm

(a)

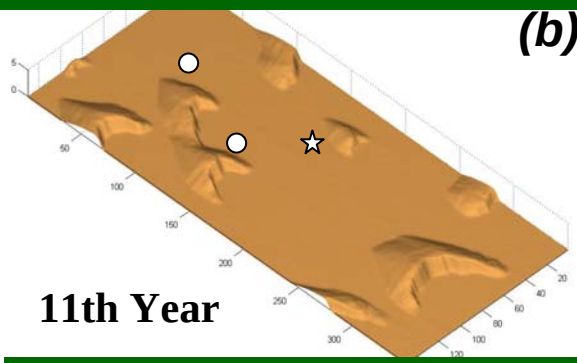


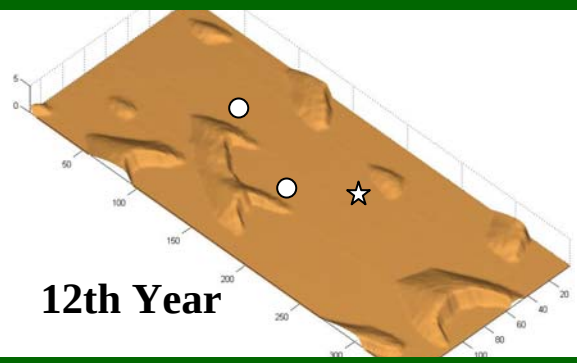


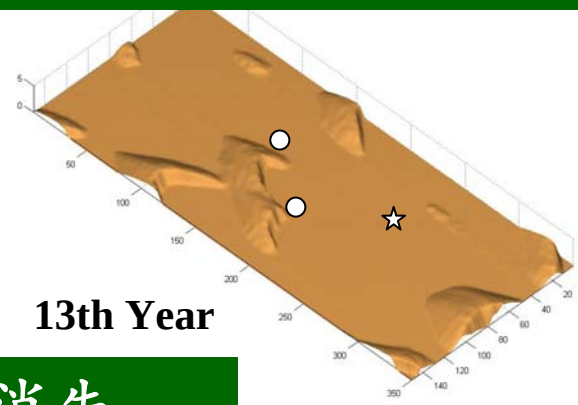


大沙丘后方的两个小沙丘，分别在第7年和第8年追赶上大沙丘后被大沙丘吞噬

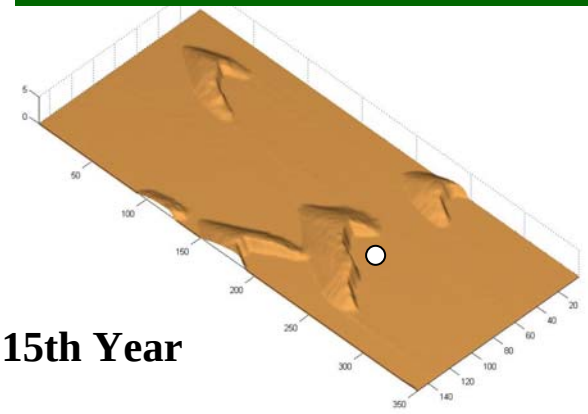
(b)

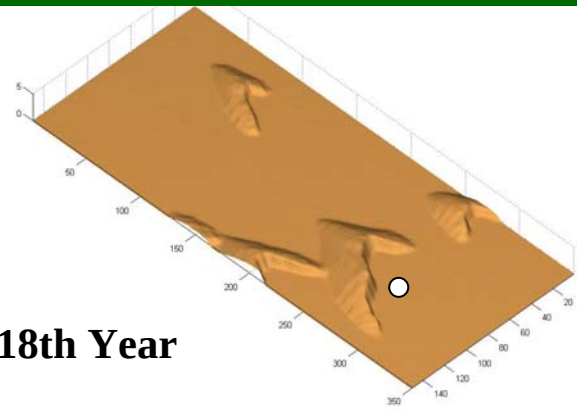






单个小沙丘⋆不能保持形态稳定:尺度减小并消失

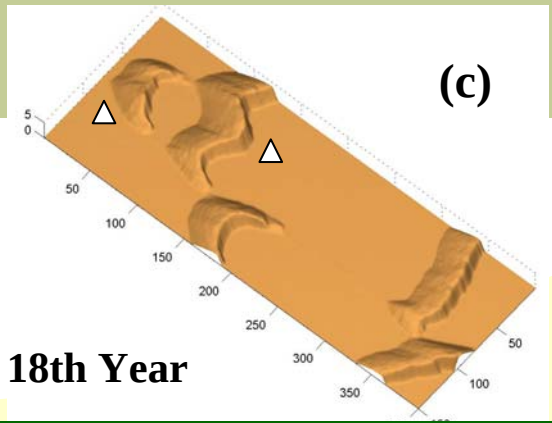




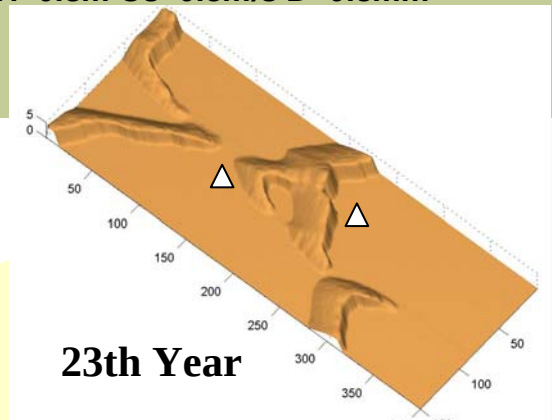
当两个尺度相同的沙丘侧向发生碰撞（●）后合并，如：第11年，第13年，第15年和第18年；

H=0.8m Us=0.5m/s D=0.3mm

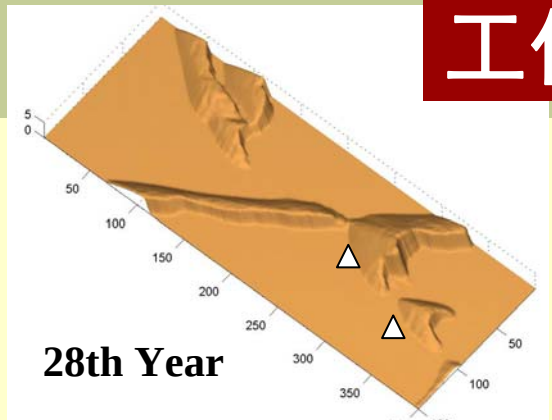
(c)



18th Year



23th Year

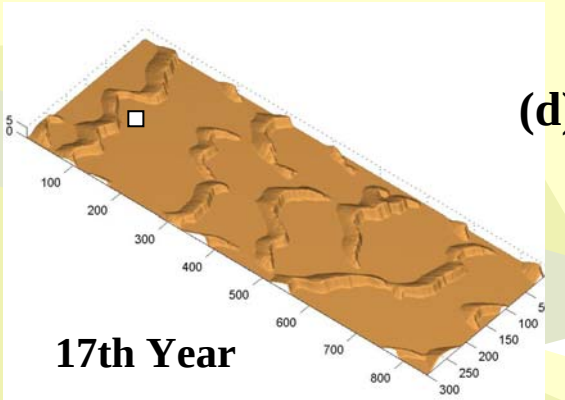


28th Year

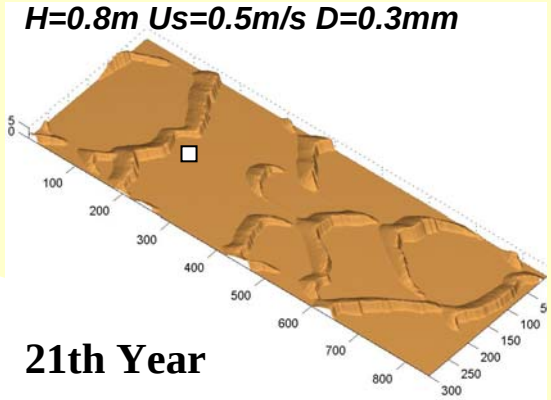
碰撞后也有可能出现一个沙丘“通过”另一沙丘的“孤波形为”

H=0.8m Us=0.5m/s D=0.3mm

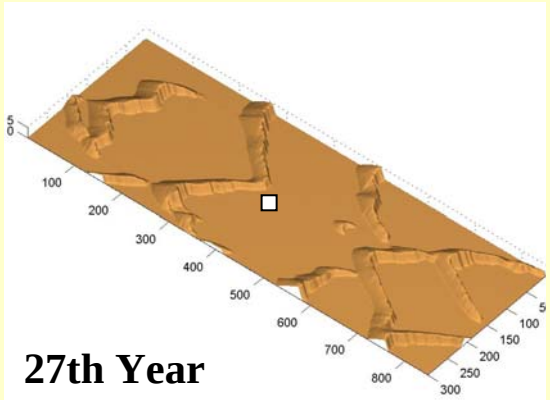
(d)



17th Year

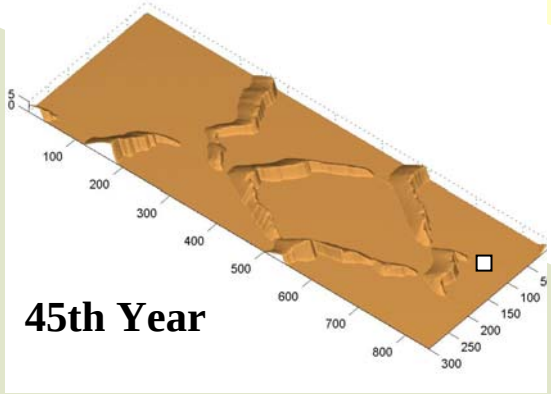


21th Year



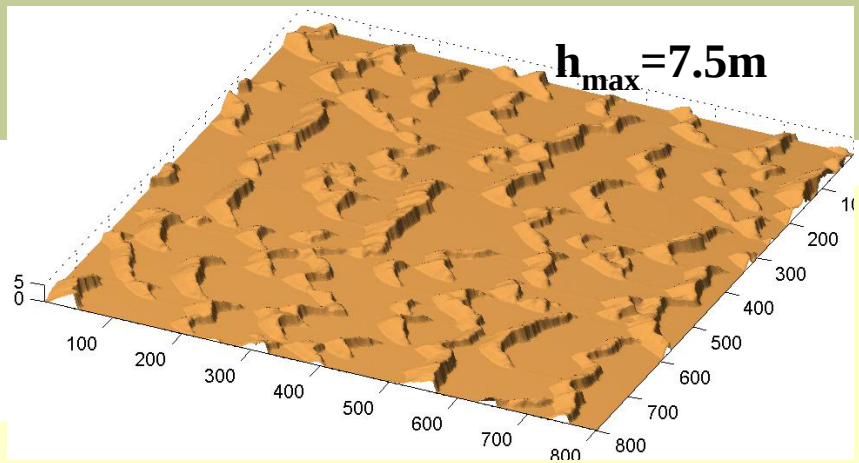
27th Year

38th Year

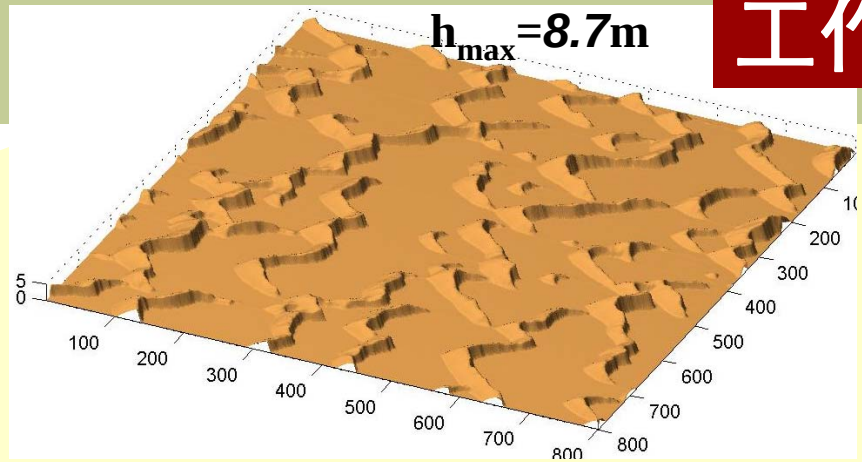


45th Year

新月形沙丘链的形态
也会发生变化和分离

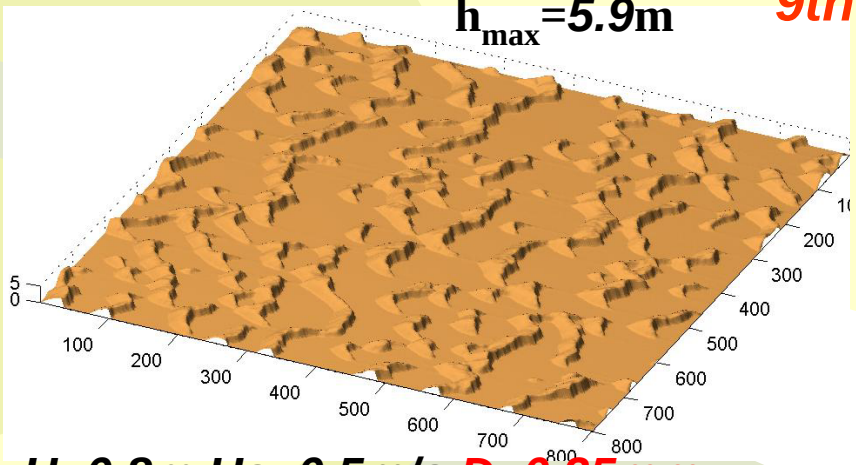


H=0.8m Us=0.5m/s D=0.3mm

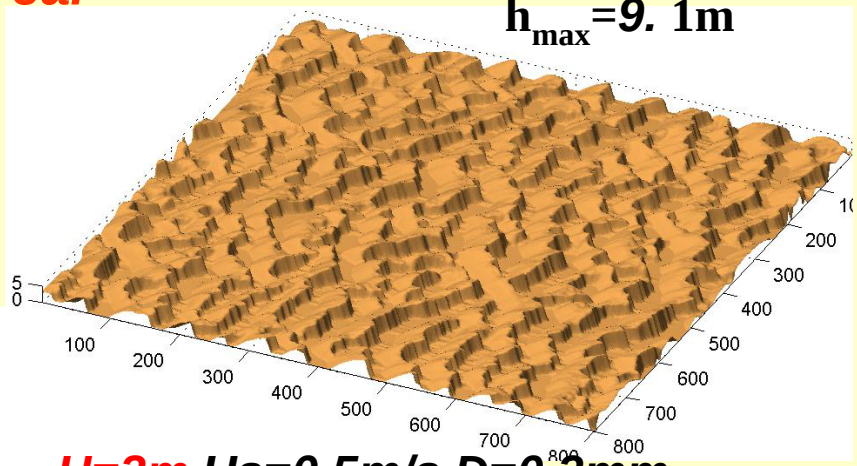


H=0.8m Us=0.55m/s D=0.3mm

9th Year



H=0.8m Us=0.5m/s D=0.25mm



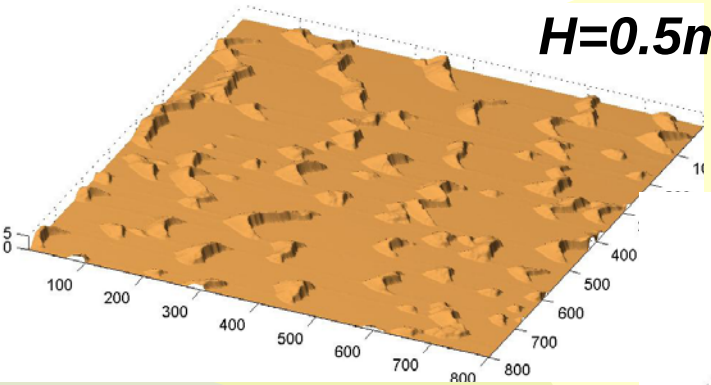
H=3m Us=0.5m/s D=0.3mm

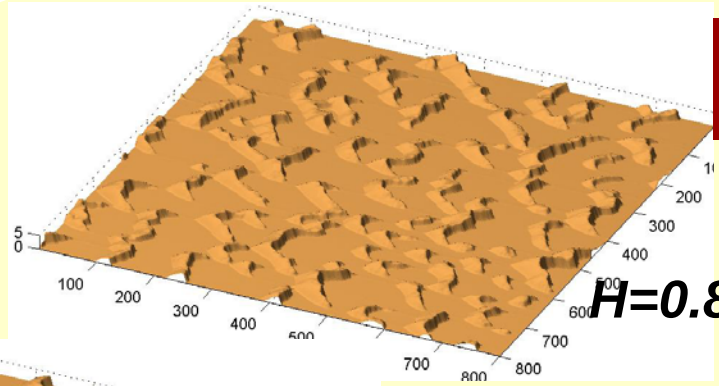
在相同的时间内，来流风场强度和沙粒粒径
导致沙丘场中沙丘数量减少尺度增大

- 临界沙源厚度

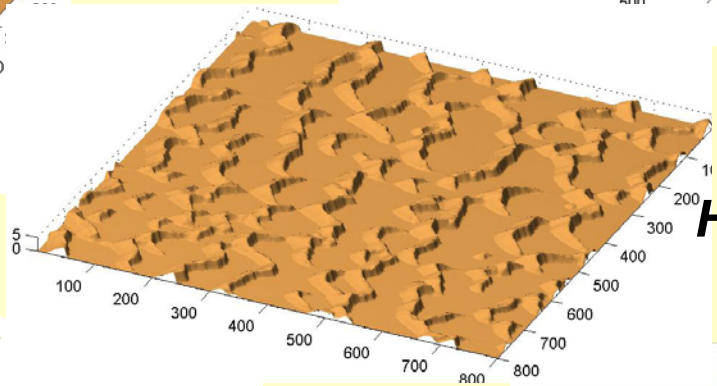
工作

H=0.5m



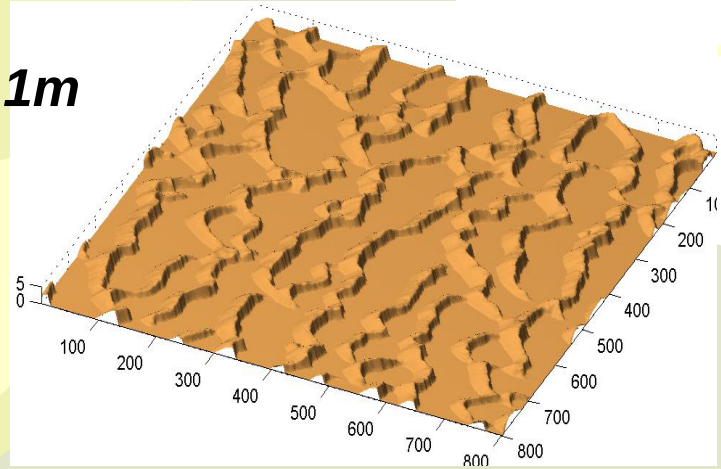


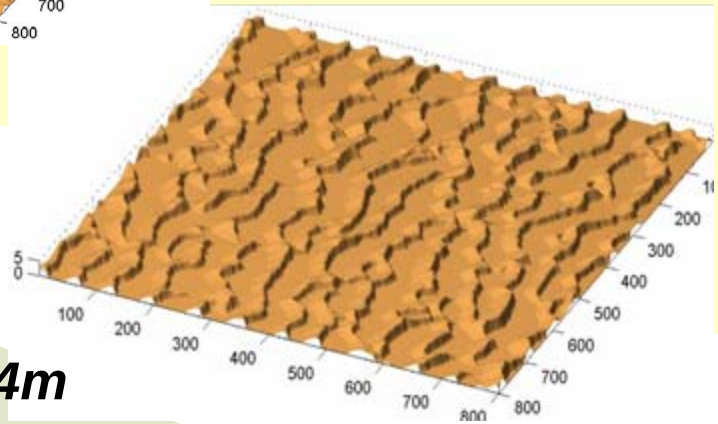
H=0.8m



H=1.0m

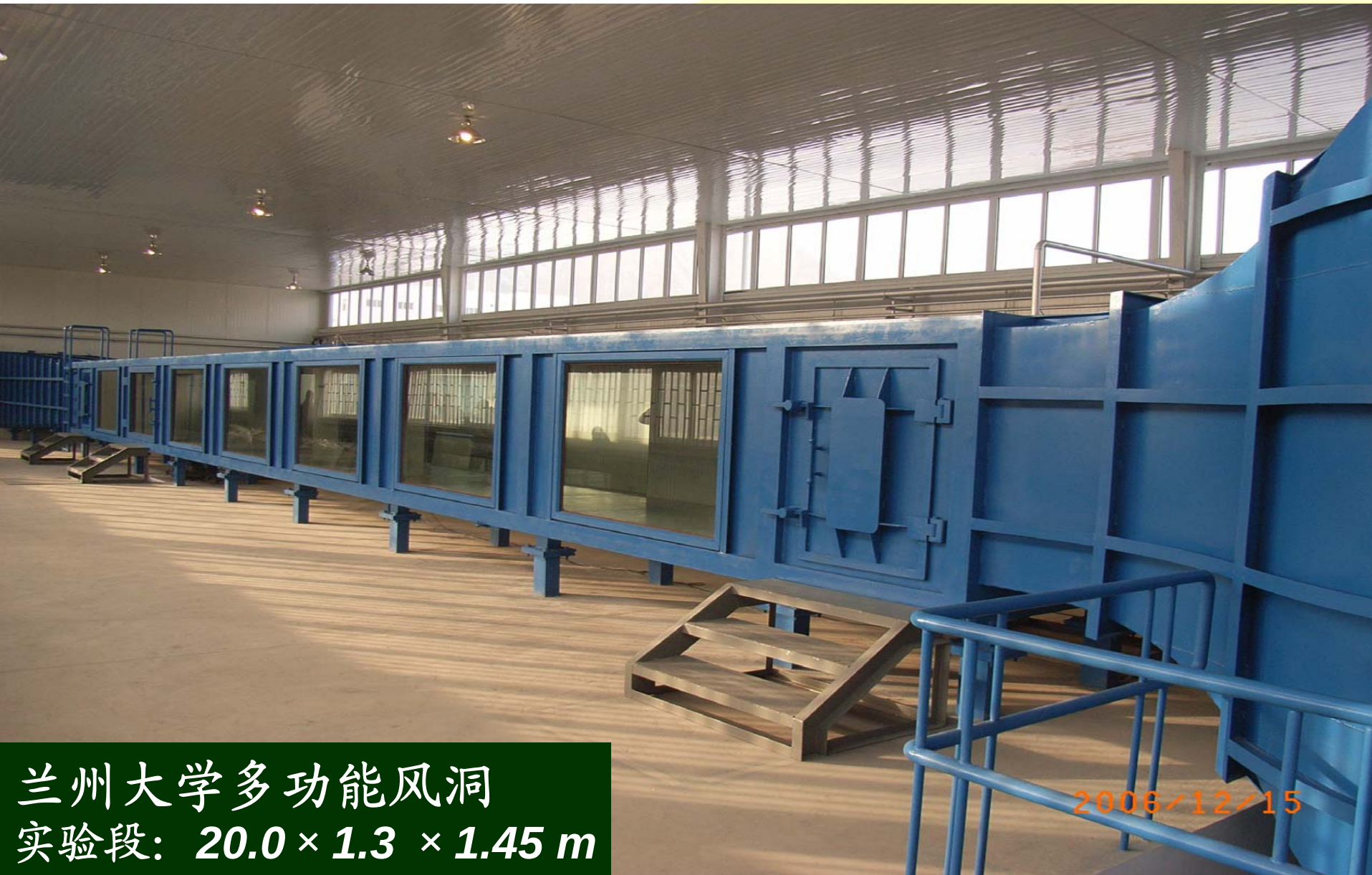
H=1.1m



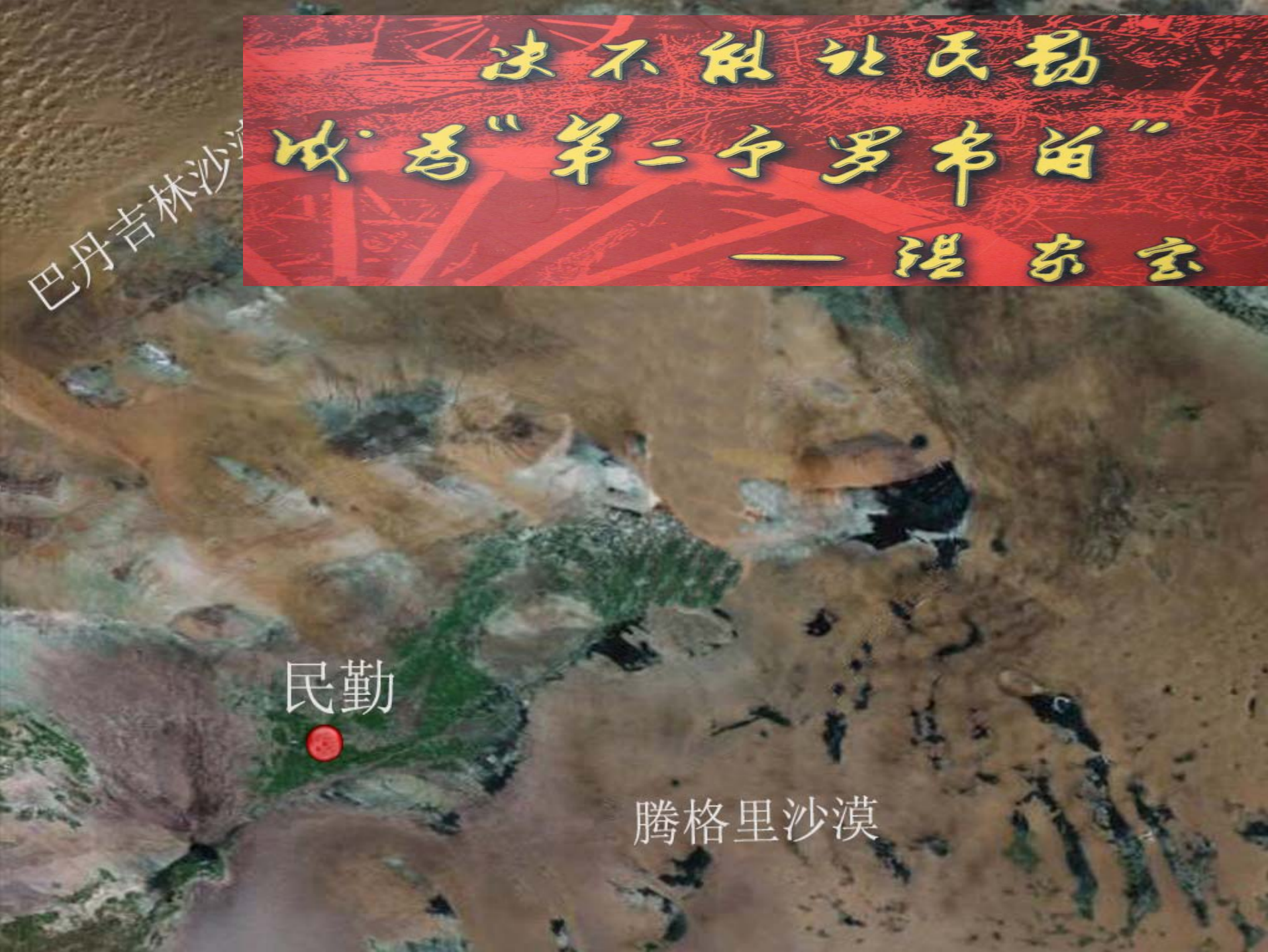


H=1.4m

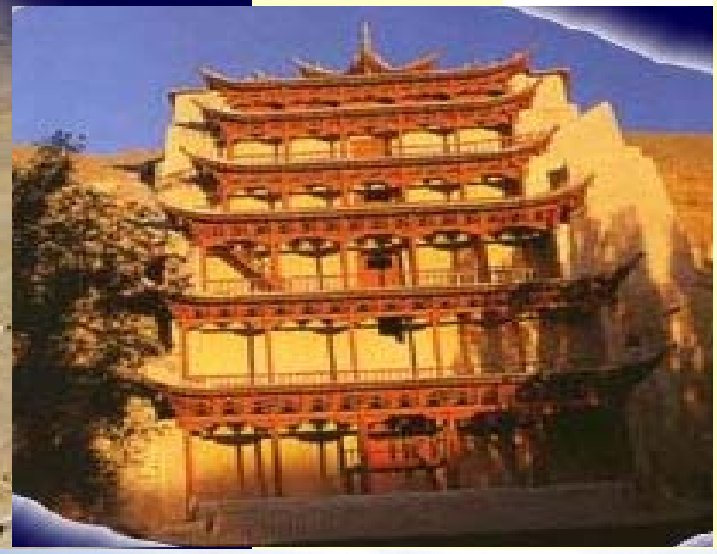
9th Year



兰州大学多功能风洞
实验段：*20.0 × 1.3 × 1.45 m*


决不能让民勤
成为“第二个罗布泊”
——温家宝
巴丹吉林沙
民勤
腾格里沙漠

思考



植被各因素的影响，
其它材料与结构，
与风沙流的相互作用

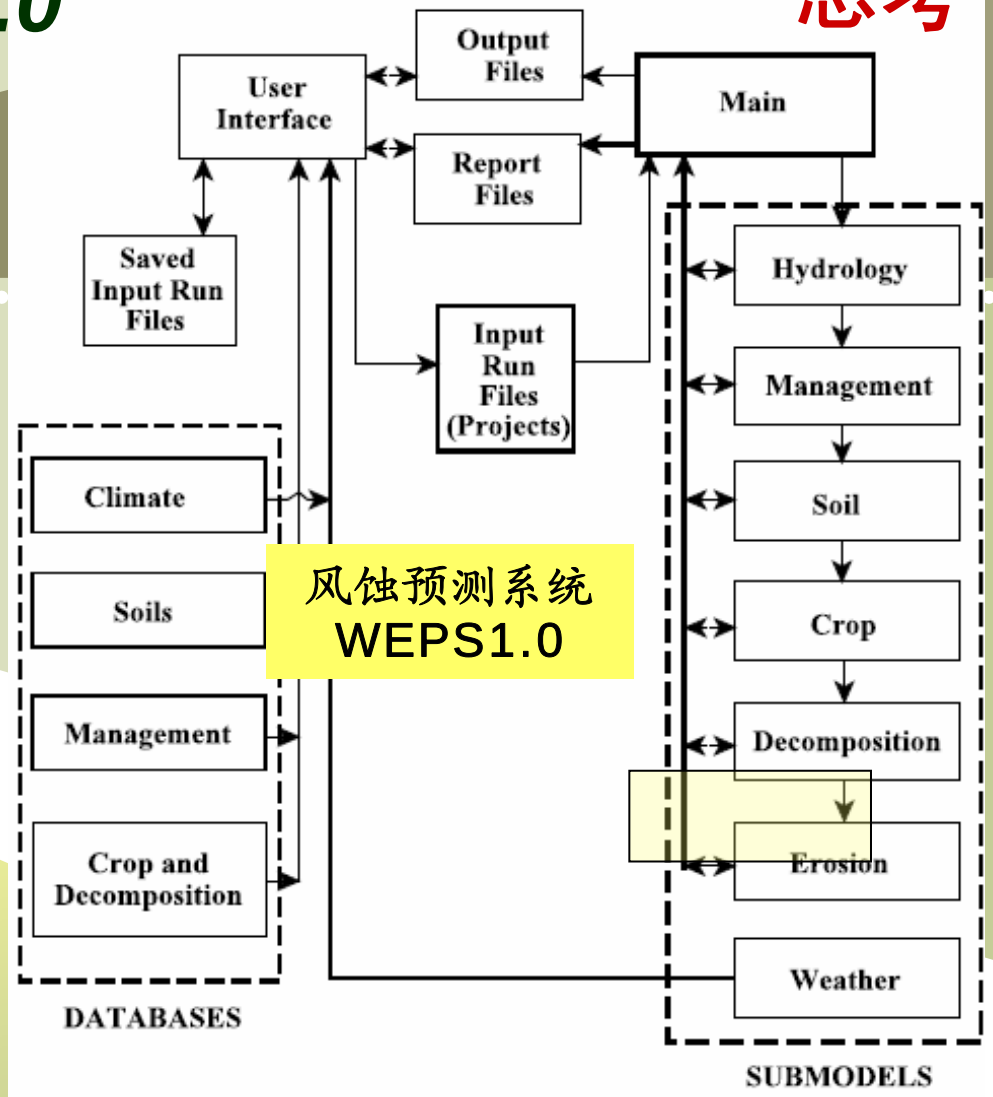
风蚀预测系统 *WEPS1.0*

-----美国2003年

针对美国大平原区，可以预测不同农业管理措施下，风蚀量、农田受危害的程度、粉尘的释放量等，并可以对农田管理模式进行评价

但其核心的风蚀方程还是经验型方程

思考



修正风蚀方程RWEQ

思考

土壤风蚀量

$$SL = (2x/s^2)Q_{max}(\exp(-(x/s)^2))$$

$$Q_{max} = 109.8(WF \times EF \times SCF \times K' \times COG)$$

风蚀临界长度

$$150.7(WF \times EF \times SCF \times K' \times COG)^{-0.371} = s$$

风力因子

$$W_f \frac{\rho}{g} SW \times SD$$

气象因子

土壤湿度

积雪覆盖因子

植被因子

土壤结皮因子

土壤粗糙度

土壤可蚀性成分

$$\frac{29.09 + o.31S_a + 0.17Si + S_a/Cl - 2.59OM - 0.95C_aCO_3}{100}$$

$$\frac{1}{1 + 0.0066Cl^2 + 0.021OM^2}$$

沙粒含量

粉粒含量

沙粒与粘粒含量之比

有机质含量

粘粒含量

有机质含量

修正风蚀预报方程RWEQ

思考

土壤风蚀量

$$SL = (2x/s^2)Q_{max}(\exp(-(x/s)^2))$$

$$Q_{max} = 109.8(WF \times EF \times SCF \times K' \times COG)$$

风蚀临界长度

风力因子

各因子如何确定？

$$W_f \frac{\rho}{g} SW \times SD$$

各因子间的相互关系？

植被因子

土壤湿度

积雪覆盖因子

土壤粗糙度

是否是简单相乘？

$$\frac{29.09 + o.31S_a + 0.17Si + S_a / Cl -}{100}$$

系数是否具有普适性？

沙粒含量

粉

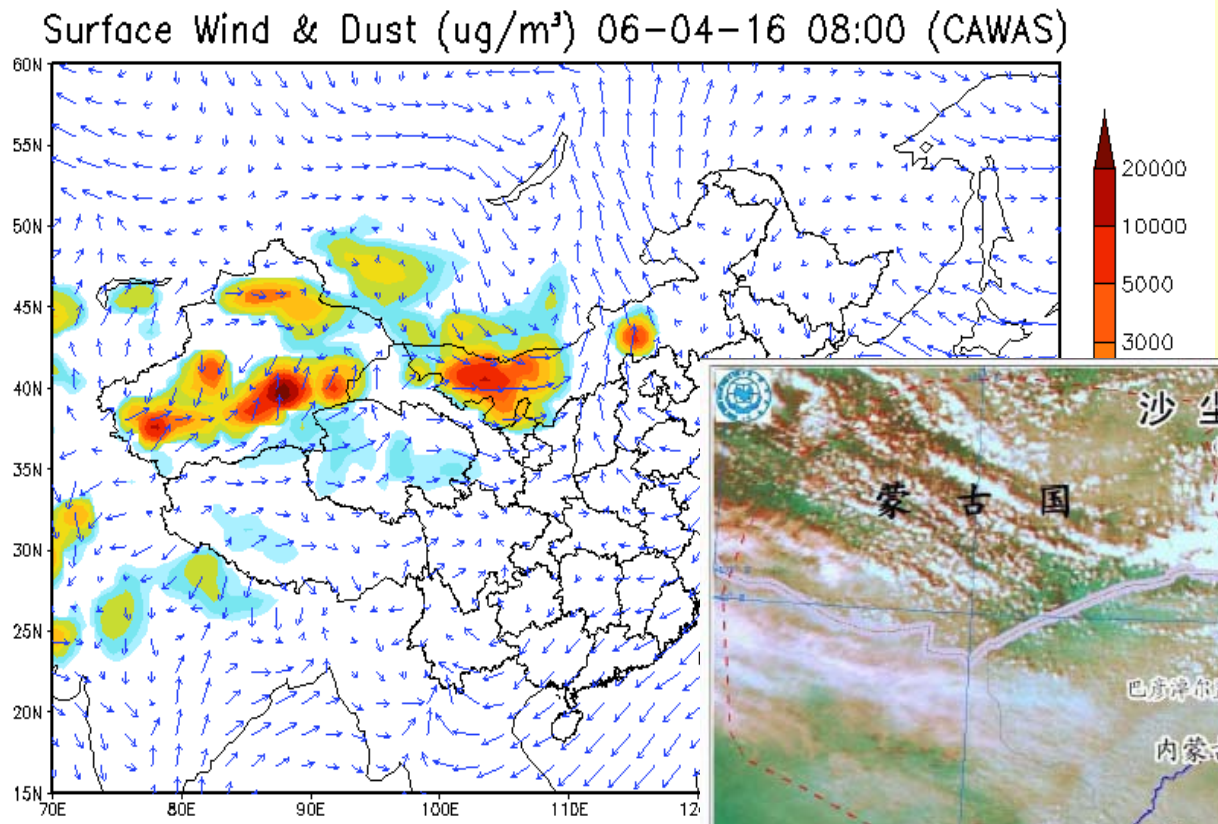
含量之比

如何给出准确、实用的风蚀方程？

思考

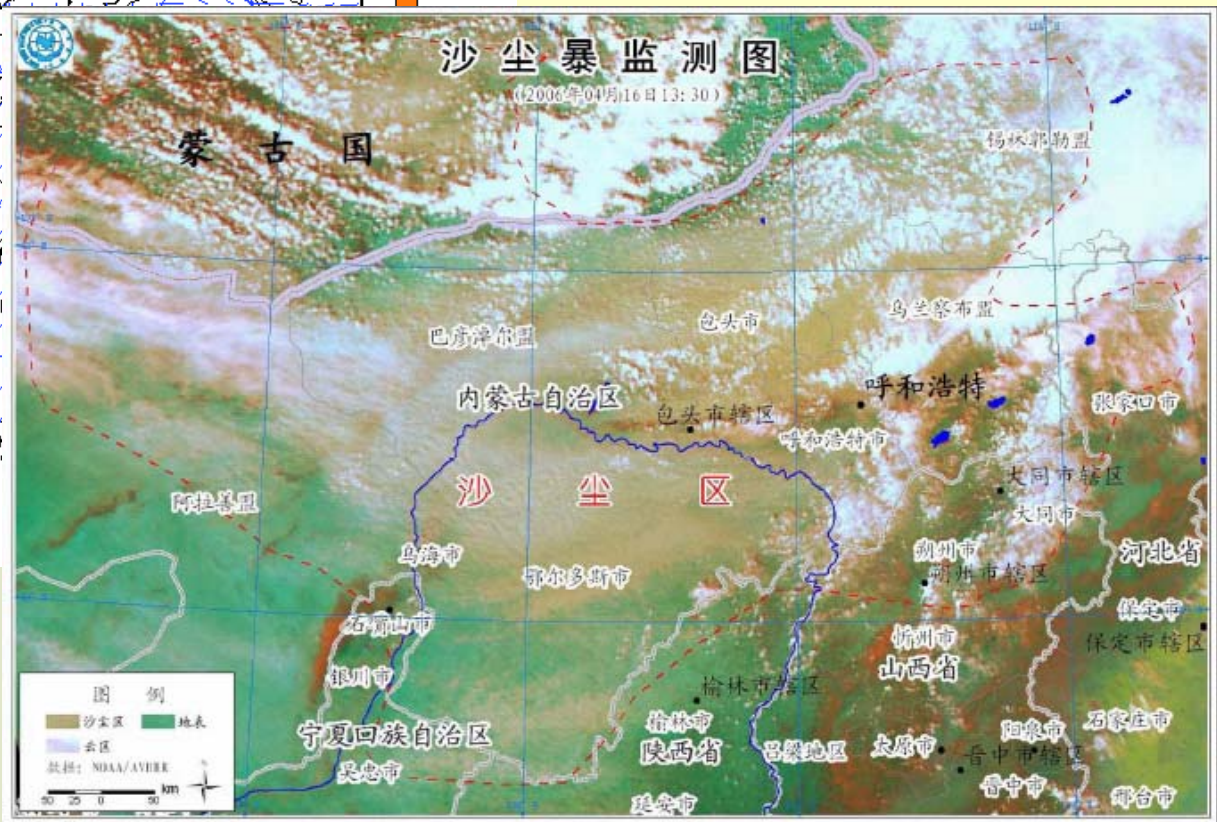
聚焦共性科学问题

- 环境流动与输运的模型建立与求解
- 气、液、固界面的耦合
- 多相、多组分、多过程以及多尺度的耦合分析
- 可控条件实验的尺度效应


Surface Wind & Dust (ug/m³) 06-04-16 08:00 (CAWAS)
60N
55N
50N
45N
40N
35N
30N
25N
20N
15N
70E
80E
90E
100E
110E
20000
10000
5000
3000

思考

起沙机制


沙尘暴监测图
蒙古国
内蒙古自治区
呼和浩特
包头市
沙尘区
宁夏回族自治区
陕西省
山西省
河北省
图例
沙尘区
地表
云区
数据：NOAA/AVHRR

下垫面

思考

复杂流动(二维, 三维, 湍流结构, 大尺度, 多尺度)

复杂下垫面

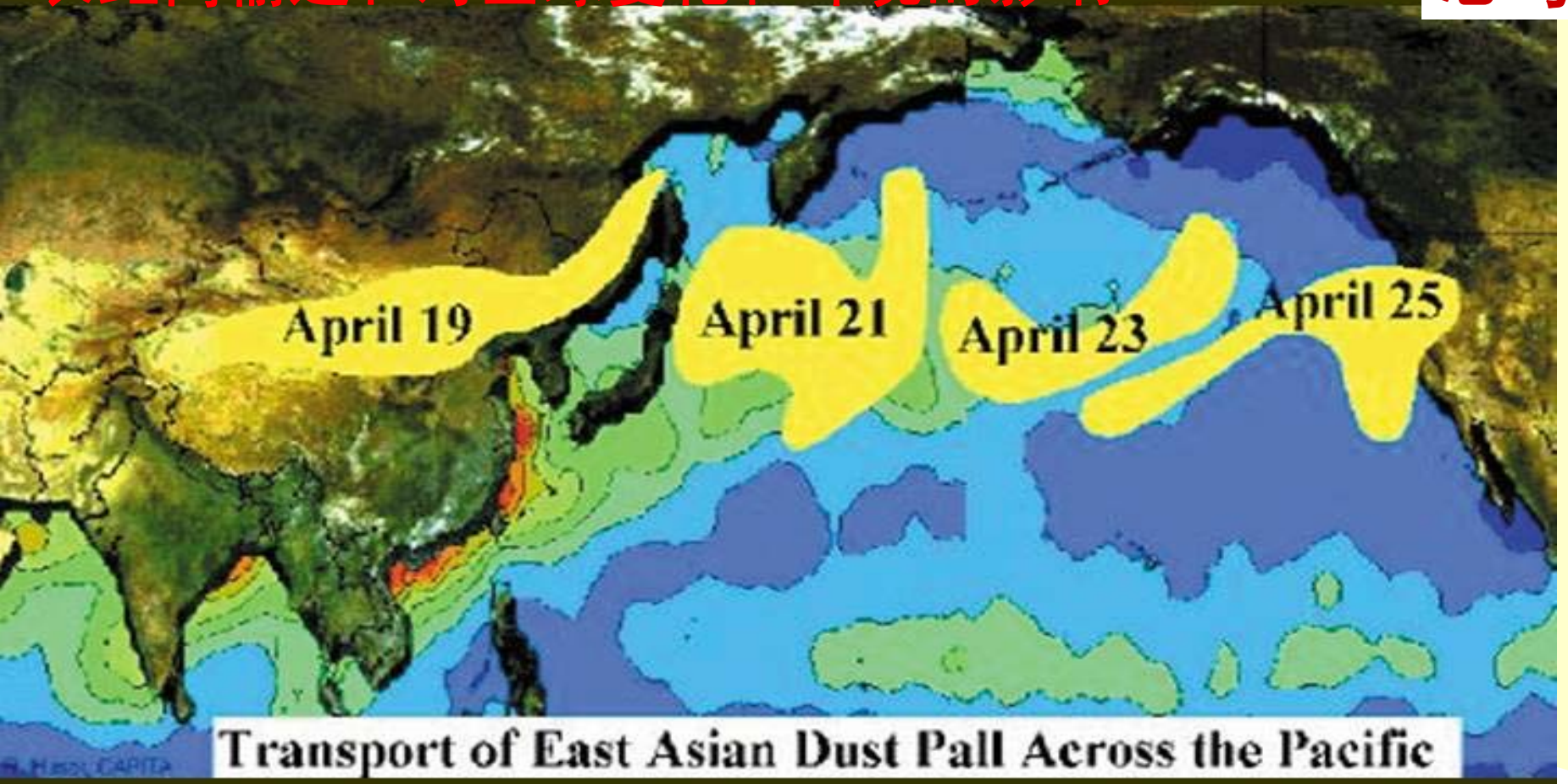
多场(热, 电...)

多相(气, 固, 液)

观测, 模拟, 预报

长距离输运和对全球变化和环境的影响

思考



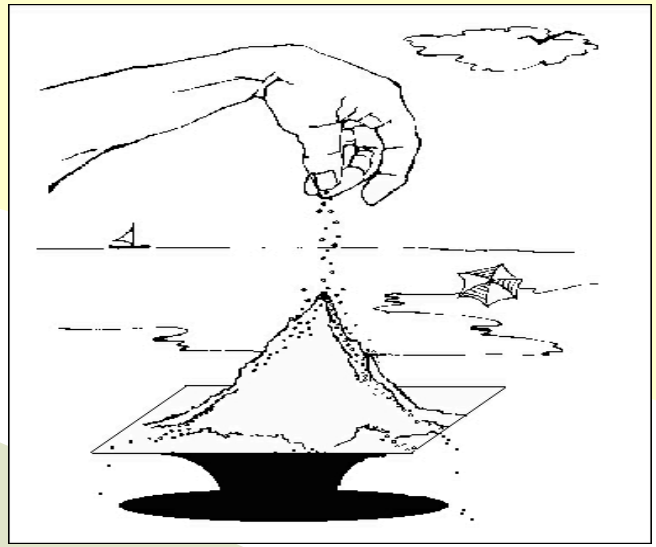
思考

- 多尺度科学是21世纪的挑战
- 不同尺度上有不同的结构层次及不同的演化物理和速率
- 耦合了多个长度和时间尺度现象

(风沙流，沙尘暴，风成地貌，全球变化，沙崩……)

发展多尺度科学的方法既是一个需要有是一个机遇

有潜在效益的研究方向???




谢 谢 !

沙尘的随机运动模型

风场：二维随机风场，仅具有垂向脉动

沙尘受力：仅受重力和拖曳力作用

$$\frac{dU_p}{dt}=\frac{K}{\alpha}(U_f-U_p),\qquad t=0:\ U_p=U_{p0}$$

$$\frac{dW_p}{dt}=-g+\frac{K}{\alpha}\left(W_f-W_p\right),\qquad t=0:\ W_p=W_{p0}$$

$\alpha=D_p{}^2\rho_p/18\nu\rho_f$ 沙尘对湍流脉动的响应时间

K 沙尘雷诺数对Stokes区发生偏离时引入的系数

其中 $W_f=\overline{W}_f+w_f, U_f=\overline{U}_f$

$W_p=\overline{W}_p+w_p, U_p=\overline{U}_p$

2000.11.09

考虑均匀稳定风场 $$dw_f(t) = -\frac{w_f(t)}{\tau_L}dt + \sigma_w\left(\frac{2}{\tau_L}\right)^{1/2} d\mu$$

拉格朗日积分时间尺度 $\tau_L = a_1 z / u_*$

脉动速度方差 $\sigma_w = a_2 u_*$

考虑到轨迹分叉效应，积分时间尺度沿着沙尘轨迹进行修正

$$T_L^* = \tau_L \Big/ \left[1 \Big/ \left(1 + A_1\left(\frac{V_R}{\sigma_w}\right)^{2/3}\left(\frac{\tau_L}{\Delta t}\right)^{1/3}\right)\right]$$

其中 $a_1 = 0.4$ $a_2 = 1.3$ $A_1 = 0.5$

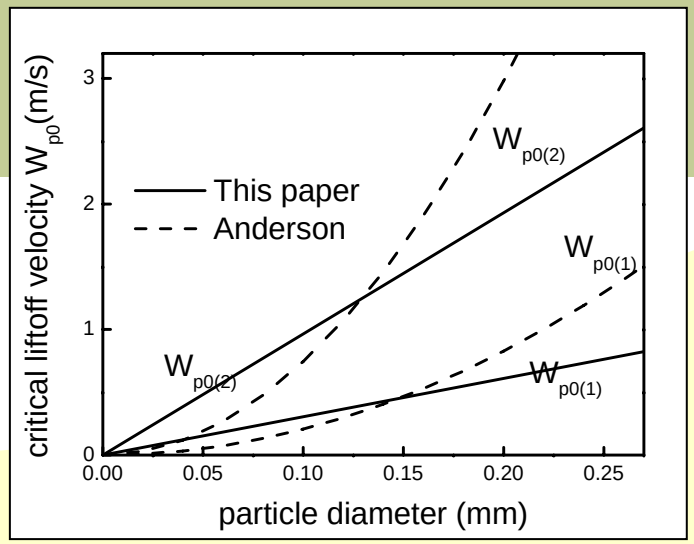
当达到沉降末速度以后 $$\frac{dw_p}{dt} = \frac{K}{\alpha}\left(w_f - w_p\right)$$

进行复立叶变换可得沙尘与气流的能量谱密度之间满足

$$E_w^p(\omega_0) = \frac{(K/\alpha)^2}{\left[(K/\alpha)^2 + \omega_0^2\right]} E_w(\omega_0)$$

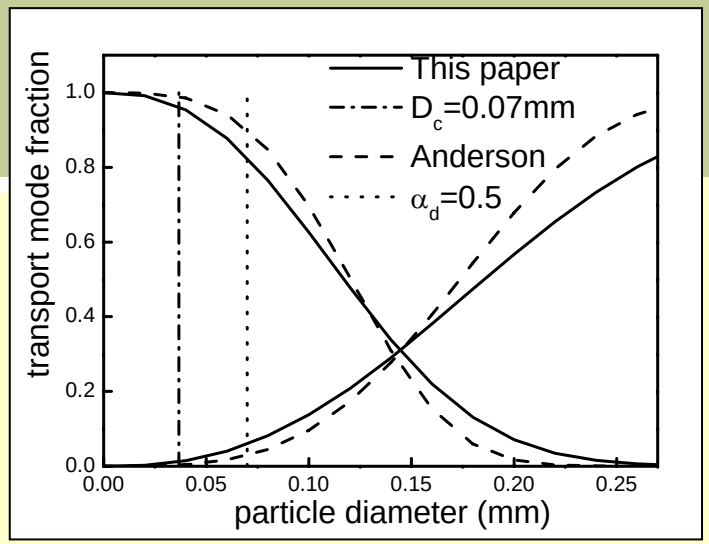
垂直速度方差是一个重要参数可通过对能量谱密度的积分得到

$$\sigma_w^{p^2} = \int_{-\infty}^{\infty} E_w^p(\omega) d\omega = \frac{\sigma_w^2}{(1 + \alpha / K\tau_L)}$$



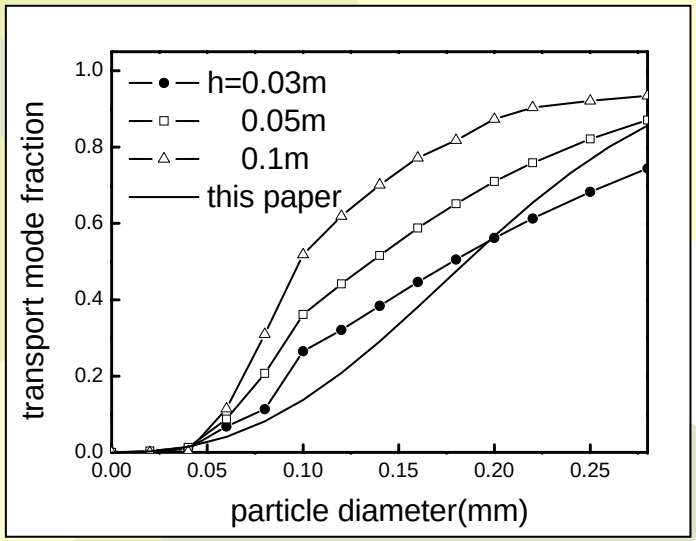
沙尘颗粒的临界起跳速度

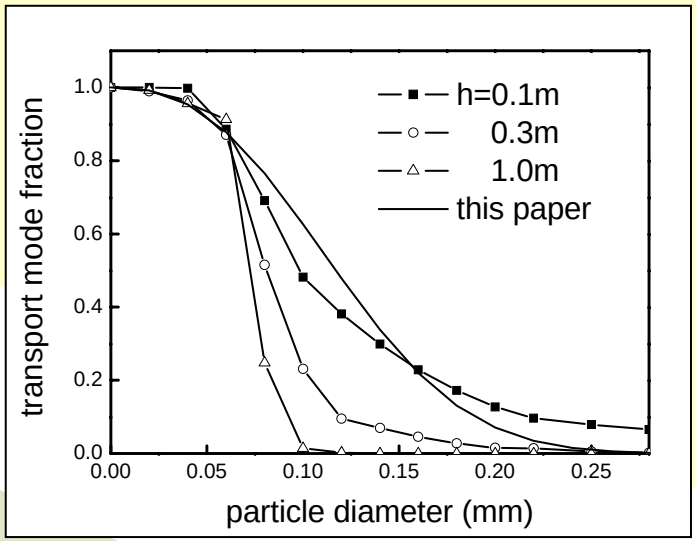
u=0. 5m/s*



跃移和悬移传输组分

u=0. 5m/s*





距离床面不同高度处的轨迹统计数量*u*=0. 5m/s*（非耦合）

(a)跃移统计量 (b)悬移统计量