

风沙流/沙尘暴与高雷诺数壁湍流野外观测

王萍

兰州大学土木工程与力学学院;西部灾害与环境力学教育部重点实验室,兰州 730000

摘要 风沙流与沙尘暴是发生在高雷诺数大气边界层中的气固两相流,对风沙流与沙尘暴的深入认识、准确预报和科学防治都要基于对风沙运动规律的认知和把握,因而需要借鉴高雷诺数湍流的研究成果。本文综述了高雷诺数壁湍流和风沙流/沙尘暴研究的现状,着重介绍了在中国民勤地区建立的沙尘暴与高雷诺数壁湍流野外观测站,以及基于观测站的观测列阵所获得的初步成果,展望了进一步的发展方向。

关键词 沙尘暴;高雷诺数壁湍流;观测列阵

具有固体壁面边界的湍流称为壁湍流,从边界层概念形成伊始,由于其在工程实际应用中的重要性,一直颇受流体力学研究的关注^[1]。大气表面层湍流是典型高雷诺数壁湍流流动,风沙运动是大气表面层湍流与颗粒物质相互作用的结果。沙(尘)粒在大气表面层湍流的裹挟下,形成了较低风速时近地表两米以下的风沙流和大风速时数百米高度的沙尘暴,引发了一系列的自然灾害与经济损失^[2-3]。2006年发布的《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》^[4]和2013年国务院通过的《全国防沙治沙规划(2011—2020年)》^[5]都将风沙灾害研究确立为面向国家重大战略需求的基础研究。要实现风沙灾害的准确预报和科学防治,必须深刻认识风沙灾害形成的机理和规律,必须充分借鉴湍流研究的最新研究成果。

1 高雷诺数壁湍流研究进展

受实验手段与计算条件的限制,早期所获得的对壁湍流的认识主要是基于中、低雷诺数情况,获得了很多经典的研究结果和普适性的流动规律,对工程问题起到了指导性的作用。但是,很多实际流动的雷诺数比计算甚至实验所能达到的雷诺数高几个量级。近十几年,中、高雷诺数壁湍流的数值计算与实验、观测逐渐发展起来,其分析结果对经典理论中的许多认识提出了极大的挑战。

高雷诺数时,一般认为壁湍流在重叠区的平均速度分布为对数形式,经典理论认为对数律中的参数卡门常数 κ (0.40~0.41)是不依赖于流动类型和雷诺数的普适常数^[6]。但

现在大量的证据却表明,卡门常数随雷诺数变化,并且雷诺数足够高时所逼近的数值与流动类型有关^[1,7],圆管湍流中卡门常数为 $\kappa=0.41\pm 0.02$ ^[8],边界层和槽道流动中其取值范围为 0.384~0.389^[9-11]。经典理论中认为对数区下界为 $y^+=30\sim 50$ (其中 y^+ 是以壁面摩擦速度 u_τ 和运动黏度 ν 标度的无量纲的距壁面高度)^[12],而新的研究结果发现,对数区下限随雷诺数增加而增高^[13-16]。高雷诺数时,除了近壁缓冲区峰值以外,湍动能在对数区还具有第二峰值^[17-18],意味着在这个位置上还存在一个湍动能的产生区域,若雷诺数足够高,对数区峰值甚至可能超过缓冲区第一峰值成为湍动能产生最为活跃的区域。此外,通过流动显示,实验和数值计算发现高雷诺数壁湍流外区存在所谓大尺度结构(large scale motions, LSMs)和超大尺度结构(very large scale motions, VLSMs),其流向尺度分别可达 2~3 倍边界层厚度^[19-20]和 10~50 倍边界层厚度^[20-23],携带了大部分流向湍动能和雷诺切应力,因此对能量和物质运输起着重要作用。更为重要的是,远离壁面的大尺度湍流结构对近壁小尺度运动有明显的调制作用^[21-22,24],即:内外区存在相互作用,这与已有近壁自维持机制(内外区相互独立,内区结构遵循特定的自维持循环来产生湍动能,无需外部触发即可完成自维持^[25])的观点明显对立。

对相关的问题与新现象的更为详细的描述详见 Marusic 等^[1]和 Smits 等^[26]的综述文章。这些新现象和新规律对湍流机理认识及其工程应用都非常重要。例如,卡门常数的取值对阻力的准确预测非常关键,因为大多数雷诺平均模拟方法(RANS)和大涡模拟(LES)方法的近壁模型基于对数律, κ 减

收稿日期:2016-12-20;修回日期:2017-01-31

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(11302090);兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(lzujbky-2016-k13);国家自然科学基金创新群体项目(11421062)

作者简介:王萍,副教授,研究方向为环境流体力学,电子信箱:wping@lzu.edu.cn

引用格式:王萍.风沙流/沙尘暴与高雷诺数壁湍流野外观测[J].科技导报,2017,35(3):37-42. doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2017.03.003

小2%会引起现代飞行器总阻力预测降低1%^[27]。数值模拟采用壁模型预测壁面剪切应力时,根据高雷诺数的新研究结果,必须考虑外区大尺度结构对壁面小尺度应力脉动的影响^[28]等。这都促使人们开展更高雷诺数条件下的研究,以了解壁湍流的动力学机理和雷诺数效应并更好的预测和控制湍流。

2 风沙流/沙尘暴研究

近地表跃移风沙流一直是风沙物理学研究的重点。自Bagnold^[29]以来,开展了大量沙粒起动与输送的研究,获得了许多基于平均流动参数和沙粒性质进行风沙流中输沙率/输沙通量预测的模型^[30-33]。不同于这些已有的研究视角,Zheng^[34]从非线性、多场耦合性、多尺度复杂系统的当今科学前沿共性问题的角度,以更为细致的野外观测和风洞实验以及更为精准的理论建模和所创建的更为有效的定量求解,在重新审视已有风沙物理学成果的基础上,创建了风沙环境力学这一新体系。Zheng等^[35]有关风沙流中沙粒荷质比和风沙电场的研究,不仅开启了对风沙电现象的风洞实验先河,并且通过理论建模和定量求解,揭示出沙粒带电对风沙流过程的影响^[36],使已有对风沙电现象的认识上升到科学层面。基于对风沙流的深刻认识,郑和她的学生提出的跨尺度模型^[37],实现了对沙丘形成演化过程的定量重现和沙漠边缘扩展速度的有效预测,这是一个前所未有的突破。

迄今为止,对沙尘暴的研究还远未达到令人满意的程度。沙尘数值模式在大气模式预报的气象信息的基础上,以风蚀模块提供的地表输沙与粉尘通量作为下边界条件,通过对传输模块中附加的粉尘输送方程进行求解,模拟粉尘浓度的时空分布,并据此进行沙尘暴的预报^[38-40]。在模式中,除了土壤参数不确定性^[41]等引起的误差以外,为加快预报计算速度而对流动控制方程进行平均化处理(采用RANS方法求解)、丢失湍流瞬时信息也是导致预报结果误差的重要原因。同样,在传输模块的沙尘粒子输送方程中,用梯度输送理论确定沙尘的扩散系数,忽略湍流影响。对于沙尘颗粒如何被湍流携带从地表向上输送至高空、进入对流层中上部等问题还缺乏准确的描述,直接影响沙尘暴数值预报的精度。

事实上,近年来的相关研究都开始逐渐关注输沙与湍流结构之间的关系。床面沙粒的起动必定受近壁小尺度脉动直接影响:壁湍流数值模拟与测量表明壁面剪切应力脉动幅值可达0.4,且随雷诺数增加^[42],而对颗粒的直接测量结果显示,作用于光滑床面球形颗粒上的升力脉动强度(均方根与平均值的比值)可以达到2.8^[43],这意味着沙粒流体起动受近壁湍流脉动的影响不能忽略;由小波谱分析发现湍流与跃移输沙在不同的时空尺度上存在复杂相互作用,但近壁上抛(ejection)-下扫(sweep)型的湍流猝发事件与输沙模式之间不相关,输沙主要发生在流向风速脉动为正时^[44],因此推测跃移风沙流的输沙结构可能与发源于外区的大尺度或超大尺

度结构有关^[45]。此外,中国科学院大气物理研究所基于安装在气象塔47、120和280 m高度处的粉尘与超声风速仪的测量结果发现,冷锋后的大风常叠加有周期为3~6 min的阵风,阵风的波谷期有上升气流,沙尘上扬,波峰期有下沉气流,沙尘上扬受抑制,由此认为,阵风是沙尘上扬的关键^[46],但其观测位置距地表过高,没有测量对沙尘扬起至关重要的大气表面层对数区中下部的流动。最近,基于大气边界层大涡模拟湍流场数据的统计分析表明,湍流外区的低动量结构对应着壁面剪切应力极值,意味着一旦在极值壁面应力条件下沙尘颗粒脱离地表,就可能会暴露于某种“上升通道”中^[47]。尽管阵风与湍流研究中所定义的湍流结构的差别尚不完全清晰,但仅考虑平均流场显然无法描述沙尘上扬过程物理机制,必须基于流动结构特征进行分析和讨论。

3 风沙流/沙尘暴与高雷诺数壁湍流野外观测站

高雷诺数湍流与风沙流/沙尘暴的同步观测是解决上述问题的重要手段之一。首先,虽然也存在观测技术难度大、依赖测量环境、数据须严格筛选等问题,但作为目前地球上可以获得最高雷诺数(Re ,可达 10^{6-7})湍流流动(表1),大气边界层提供了一个研究高雷诺壁湍流的极好的流动条件。壁湍流大气边界层野外观测最早由犹他州大气边界层湍流环境科学测试站实现,该观测站建立在大盐湖沙漠的平坦沙面上,雷诺数达到了 6.28×10^5 。然而更高雷诺数情况下,湍流统计量和流动结构规律的变化趋势仍有待检验。其次,风沙流与沙尘暴的风洞实验与野外实际输沙过程的最大不同来自于尺度和相似性。除几何相似、动力相似等以外,湍流结构的差异也不可忽视。大气边界层的边界层高度约为 $O(10^3 \text{ m})$,湍流积分时间尺度为 $O(10^3 \text{ s})$,而环境风洞尺寸通常仅约为 $O(1 \text{ m})$,湍流积分时间尺度为 $O(1 \text{ s})$,导致对于相同性质的沙粒,所作用的湍流结构尺度有很大差别,基于野外观测数据定量分析湍流场中的输沙过程更为合理。此外,作为一类典型的气固两相流动,风沙流/沙尘暴中沙(尘)粒通过吸收部分湍动能,可能会改变湍流平均廓线、湍流脉动信号的能谱形状和尺度-含能关系等,进而改变湍流相干结构的几何特性和动力学演化行为,也是湍流多相流研究的重点和难点课题。因此,野外长期、多点、实时、同步观测,既是进一步研究高雷诺数湍流的有效途径,也有助于对风沙起动、输运过程、甚至颗粒湍流相互作用物理机制的理解。

为了研究高雷诺数壁湍流特征和雷诺数效应以及湍流对沙尘暴中沙尘输运的影响和相互作用,兰州大学风沙研究小组于2012年在位于中国西部巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠之间的青土湖的干涸湖床上($103^\circ 40' 03'' \text{ E}$, $39^\circ 12' 27'' \text{ N}$)建立了沙尘暴与高雷诺数壁湍流野外观测站(Qingtu Lake Observation Array, QLOA)。观测点位于春季西北方向季节性强风、特别是沙尘暴南下的路径上。来流上风向方圆10 km范围内,地表平坦起伏小于1 m,且无植被覆盖。野外观测仪器

表1 一些代表性的高雷诺数壁湍流实验、观测研究及数值计算情况

Table 1 Several representative experiments, observations and numerical simulations on high Reynolds number wall turbulence

	机构/设备名称	最大 Re_τ	边界层厚度 δ/m	方式
室内实验	普林斯顿大学 High Reynolds number pipe flow facility (SuperPipe) ^[48]	9.82×10^4	0.0647	管道
	普林斯顿大学 High Reynolds number Test Facility (HRTF, SuperTunnel) ^[49]	7.25×10^4	0.291	风洞湍流边界层
	新罕布什尔大学 The flow physics facility (FPF) ^[50]	1.97×10^4	0.6885	风洞湍流边界层
	墨尔本大学 The Walter Basset Aerodynamics Laboratory ^[51]	2.99×10^4	0.388	风洞湍流边界层
	The US Navy's William B. Morgan Large Cavitation Channel (LCC) ^[52]	6.88×10^4	0.1135	水槽边界层
	美国海军学院 The High Reynolds Number Turbulent Channel Flow facility ^[53]	6.0×10^3	0.0125	水槽槽道
数值模拟	韩国科学技术学院 ^[54]	3.0×10^3	—	DNS 管道流动
	瑞典皇家工学院 ^[55]	1.35×10^3	—	DNS 湍流边界层
	马德里理工大学 ^[56]	2.0×10^3	—	DNS 湍流边界层
	德克萨斯州立大学奥斯丁分校 (2015年) ^[57]	5.2×10^3	—	DNS 槽道流动
野外观测	犹他州大气边界层湍流环境科学测试站 (SLTEST) ^[58]	$\sim 6.28 \times 10^5$	~ 60	大气边界层净风场

分别布置在21个塔架上,1个观测主塔高32 m,其余20个为高5 m的观测辅塔,其中8个辅塔等间距 $L_{st}=30$ m布置在主塔的上风向,另外12个分别等间距 $L_{sp}=5$ m沿展向布置在主塔的两侧,由此构成一个可以实现沿流向0.24 km、展向0.06 km、垂向32 m的三维空间的观测阵列。主塔和辅塔的地基用水泥加固处理,并用两层三条斜拉的钢绳固定。观测仪器包括:30台英国Gill公司的型号为R3-50的三维超声风速仪以及30台美国Campbell公司的型号为CSAT-3B的三维超声风速仪,可同时测量三维风速、风向和温度;11台TSI公司生产的粉尘浓度观测仪DUSTTRAK 8530,配合超声风速仪测量某些特征高度的PM10浓度;自行研制的三维电场测量仪,以1Hz频率测量三维风沙电场;近地表输沙强度测量仪SPC,安装在2 m以下高度,用于测量跃移风沙流强度(图1~图2)。

QQLOA是世界上迄今仅有的含沙流动全场同步观测、目前可测雷诺数最高、沙尘暴过程信息最齐全的野外观测阵列。特别是,已经基于此阵列对50余场沙尘暴过程进行了包括风速和粉尘浓度在内的全场观测,这对风沙流和沙尘暴以及高雷诺数壁湍流方面的研究奠定了坚实基础。

文献[59]对QLOA所得观测数据进行严格和规范的提取以及细致、深入分析后指出:QLOA的观测数据是可靠的,且

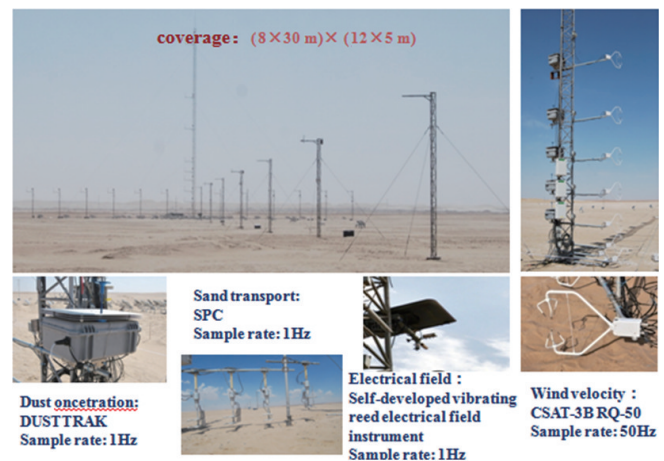
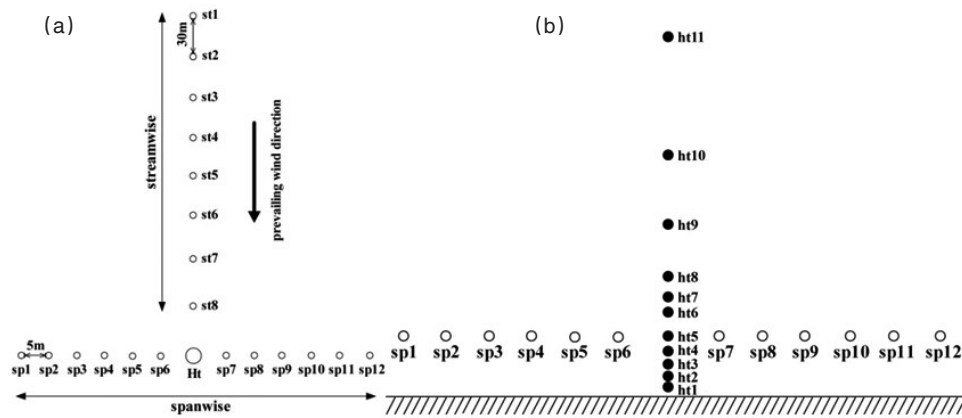


图1 观测阵列及安装观测设备的照片

Fig. 1 Photographs of observation arrays and instruments installed

可用于规范湍流边界层研究。这一工作在《Journal of Fluid Mechanics》上发表,是中国学者在这一流体力学界著名国际期刊上发表的第一篇野外观测文章,引起国际湍流界特别是高雷诺数壁湍流研究学者的极大兴趣和关注,认为QLOA观测站令人印象深刻,所获得的数据是独一无二的、对湍流研



(a) 俯视图, 空心圆以及 $spi(i=1, 2, \dots, 12)$, $stj(j=1, 2, \dots, 8)$ 为超声风速仪沿展向和流向的编号;
(b) 沿主塔(黑点)和沿展向(空心圆)布置图

图2 超声风速仪布置^[59]

Fig. 2 Schematics of sonic anemometers installation

究领域非常有价值的数据库^[60]。

基于对 QLOA 观测数据的分析, 文献[59]证实了在更高雷诺数条件下, 大气表面层中也存在超大尺度湍流结构 VLMSs; 超大尺度湍流结构的含能随高度上升而增加, 不同于以往在中低雷诺数情形的实验结果; 流向速度预乘谱中、低波数区域谱线随高度的变化存在一个“翻转”现象, 与低雷诺数边界层实验存在显著差异, 通过分析, 还给出了这一新规律所包含的新的内在机制: 即意味着大气表面层中除了自下而上的近壁能量循环之外, 还可能存在着其他能量来源, 例如, 在表面层外存在着更大尺度“涡”的自上而下的剪切破碎过程。该的结果加深了对大气表面层中超大尺度结构形成与演化的新认识, 也为进一步深入揭示大气表面层中物质传输(如沙尘暴过程等)机制奠定了基础。

4 结论与展望

大气边界层空气流动是典型的高雷诺数壁湍流流动, 发生在大气边界层中的风沙流/沙尘暴是沙尘颗粒与湍流相互作用的结果。实现沙尘暴的准确预报须基于对高雷诺数湍流、颗粒-湍流相互作用机制的深入认识, 而不应仅限于简化的物理模型。

在民勤青土湖所建立的沙尘暴与高雷诺数壁湍流野外观测站 QLOA 可以开展净风场与含沙尘流场的多物理量、实时、同步观测, 积累了大量的观测数据并基于观测数据获得了湍流结构演化、沙尘-湍流相互作用等方面的相关分析结果, 得到了国际同行的认可。作为国际上一流的、有特色的观测站, 有理由相信并期待, 只要能够继续坚持下去, 获得更有意义的观测数据和结果, QLOA 必将能够成为一个国际性的研究基地, 极大推动高雷诺数湍流与湍流多相流的研究, 提高中国在相关领域的影响力。

参考文献 (References)

- [1] Marusic I, Mckeen B J, Monkewitz P A, et al. Wall-bounded turbulent flows at high Reynolds numbers: Recent advances and key issues[J]. *Physics of Fluids*, 2010, 22(6):1-58.
- [2] 王式功, 董光荣, 陈惠忠, 等. 沙尘暴研究的进展[J]. *中国沙漠*, 2000, 20(4): 349-356.
- [3] 史培军, 王一谋. 我国沙尘暴灾害及其研究进展与展望[J]. *自然灾害学报*, 2000, 9(3): 71-77.
- [4] 国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)[EB/OL]. [2016-12-31]http://www.most.gov.cn/mostinfo/xinxifenlei/gjkjgh/200811/t20081129_65774.htm.
- [5] 全国防沙治沙规划(2011—2020年)[EB/OL]. [2016-12-31]. http://www.forestry.gov.cn/CommonAction.do?dispatch=more&colid=218&p=10.
- [6] Schlichting H, Gersten K. *Boundary layer theory*[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2000.
- [7] Klewicki J C. Reynolds number dependence, scaling, and dynamics of turbulent boundary layers[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2010, 132(9): 094001.
- [8] Bailey S C C, Vallikivi M, Hultmark M, et al. Estimating the value of von Kármán's constant in turbulent pipe flow[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2014, 749:79-98.
- [9] Chauhan K A, Nagib H M, Monkewitz P A. Evidence on non-universality of Karman constant[J]. *Progress in Turbulence II*, 2007, 109: 159-163.
- [10] Zanon E S, Durst F, Nagib H. Evaluating the law of the wall in two-dimensional fully developed turbulent channel flows[J]. *Physics of Fluids*, 2003, 15(10): 3079-3089.
- [11] Monty J P. *Developments in smooth wall turbulent duct flows* [D]. University of Melbourne, Department of Mechanical and Manufacturing Engineering, 2005.
- [12] Pope S B. *Turbulent flows*[M]. Oxford: Cambridge University Press, 2000.
- [13] Zagarola M V, Smits A J. Mean-flow scaling of turbulent pipe flow[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1998, 373(1): 33-79.

- [14] McKeon B J, Li J, Jiang W, Morrison J F, et al. Further observations on the mean velocity distribution in fully developed pipe flow[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2004, 501: 135-147
- [15] Nagib H M, Chauhan K A, Monkewitz P A. Approach to an Asymptotic State for Zero Pressure Gradient Turbulent Boundary Layers[J]. *Philosophical Transactions*, 2007, 365(1852):755-770.
- [16] Jimenez J, Moser R D. What are we learning from simulating wall turbulence? [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A-Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2007, 365(1852): 715-732.
- [17] Marusic I, Kunkel G J. Streamwise turbulence intensity formulation for flat-plate boundary layers[J]. *Physics of Fluids*, 2003, 15(8): 2461-2464.
- [18] Hoyas S, Jimenez J. Scaling of the velocity fluctuations in turbulent channels up to $Re\tau=2003$ [J]. *Physics of Fluids*, 2006, 18(1): L41.
- [19] Zhou J, Adrian R, Balachandar S, Kendall T. Mechanisms for generating coherent packets of hairpin vortices in channel flow[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1999, 387(1): 353-396.
- [20] Balakumar B J, Adrian R J. Large- and very-large-scale motions in channel and boundary-layer flows[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A-Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2007, 365(1852): 665-681.
- [21] Guala M, Hommema S E, Adrian R J. Large-scale and very-large-scale motions in turbulent pipe flow[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2006, 554: 521-542.
- [22] Hutchins N, Marusic I. Large-scale influences in near-wall turbulence [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A-Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2007, 365(1852): 647-664.
- [23] Monty J P, Chong M S. Turbulent channel flow: comparison of streamwise velocity data from experiments and direct numerical simulation [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2009, 633: 461-474.
- [24] Mathis R, Hutchins N, Marusic I. Large-scale amplitude modulation of the small-scale structures in turbulent boundary layers[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2009, 628: 311-337.
- [25] Panton R L. Overview of the self-sustaining mechanisms of wall turbulence[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2001, 37(4): 341-383.
- [26] Smits A, McKeon B, Marusic I. High-Reynolds number wall turbulence[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2011, 43(1): 353-375.
- [27] George W K. Is there a universal log law for turbulent wall-bounded flows?[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A-Mathematical Physical & Engineering Sciences*, 2007, 365(365): 789-806.
- [28] Mathis R, Marusic I, Chernyshenko S I, et al. Estimating wall-shear-stress fluctuations given an outer region input[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2013, 715(1): 163-180.
- [29] Bagnold R A. *The physics of blown sand and desert dune*[M]. London: Methuen, 1941.
- [30] Owen P R. Saltation of uniform grains in air[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1964, 20(2): 225-242.
- [31] White B R. Soil transport by winds on Mars[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1979, 4(B9): 4643 - 4651.
- [32] Ungar J E, Haff P K. Steady-state saltation in air[J]. *Sedimentology*, 1987, 34(2): 289 - 299
- [33] Sauermaun G, Kroy K, Herrmann H J. A continuum saltation model for sand dunes[J]. *Physics Review E*, 2001, 64: 031305.
- [34] Zheng X J. *Mechanics of Wind-blown Sand Movements*[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2009.
- [35] Zheng X J, Huang N, Zhou Y. Laboratory measurement of electrification of wind-blown sands and simulation of its effect on sand saltation movement[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2003, 108(D10): 231-231.
- [36] Zheng X J, Huang N, Zhou Y H. The effect of electrostatic force on the evolution of sand saltation cloud[J]. *The European Physical Journal E*, 2006, 19: 129-138.
- [37] Bo T L, Zheng X J. The formation and evolution of aeolian dune fields under unidirectional wind[J]. *Geomorphology*, 2011, 134(3): 408-416.
- [38] 姜金荣, 张小曳, 迟学斌, 等. 沙尘暴数值预报模式CUACE-Dust的并行与优化[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2010(增1): 52-55.
- [39] 李耀辉, 赵建华, 薛纪善, 等. 基于GRAPES的西北地区沙尘暴数值预报模式及其应用研究[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(9):999-1011.
- [40] Lu H, Shao Y. Toward quantitative prediction of dust storms: an integrated wind erosion modelling system and its applications[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2001, 16(3): 233-249.
- [41] Shao Y. *Physics and modeling of wind erosion* [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [42] Schlatter P, Örlü R. Assessment of direct numerical simulation data of turbulent boundary layers[J]. *Indian Journal of Pediatrics*, 2010, 659(4): 116-126.
- [43] Mollinger A M, Nieuwstadt F T M. Measurement of the lift force on a particle fixed to the wall in the viscous sublayer of a fully developed turbulent boundary layer[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1996, 316: 285-306.
- [44] Leenders J K, van Boxel J H, Sterk G. Wind forces and related saltation transport[J]. *Geomorphology*, 2005, 71: 357-372.
- [45] Baas A C W. Wavelet power spectra of aeolian sand transport by boundary layer turbulence[J]. *Geophysical research letters*, 2006, 33(5): L05403.
- [46] Zeng Q, Cheng X, Hu F, et al. Gustiness and coherent structure of strong winds and their role in dust emission and entrainment[J]. *Advances in atmospheric sciences*, 2010, 27(1): 1-13.
- [47] Jacob C, Anderson W. Conditionally averaged large-scale motions in the neutral atmospheric boundary layer: insights for aeolian processes [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2017, 162(1): 21-41..
- [48] Hultmark, Marcus. A theory for the streamwise turbulent fluctuations in high Reynolds number pipe flow[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2012, 707(3): 575-584.
- [49] Vallikivi M, Ganapathisubramani B, Smits A. Spectral scaling in boundary layers and pipes at very high Reynolds numbers[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2015, 771: 303-326.
- [50] Vincenti P, Klewicki J, Morrill-Winter C, et al. Streamwise velocity statistics in turbulent boundary layers that spatially develop to high Reynolds number[J]. *Experiments in Fluids*, 2013, 54(12): 1629.
- [51] Squire D T, Morrill-Winter C, Hutchins N, et al. Comparison of turbulent boundary layers over smooth and rough surfaces up to high Reynolds numbers[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2016, 795: 210 - 240.
- [52] Winkel E S, Cutbirth J M, Ceccio S L, et al. Turbulence profiles from a smooth flat-plate turbulent boundary layer at high Reynolds number [J]. *Experimental Thermal & Fluid Science*, 2012, 40(40): 140-149.
- [53] Schultz M P, Flack K A. Reynolds-number scaling of turbulent channel flow[J]. *Physics of Fluids*, 2013, 25(2): 011702-159.
- [54] Ahn J, Lee J H, Jin L, et al. Direct numerical simulation of a 30R long turbulent pipe flow at $Re\tau = 3008$ [J]. *Physics of Fluids*, 2015, 27(6): 065110.

- [55] Sillero J A, Jiménez J, Moser R D. One-point statistics for turbulent wall-bounded flows at Reynolds numbers up to $\delta^+ \approx 2000$ [J]. *Physics of Fluids*, 2013, 25(10): 5102.
- [56] Schlatter P, Örlü R. Turbulent boundary layers at moderate Reynolds numbers: inflow length and tripping effects[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2012, 710(5): 5-34.
- [57] Lee M, Malaya N, Moser R D. Direct numerical simulation of turbulent channel flow up to $Re\tau \approx 5200$ [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2015, 774(4): 395-415.
- [58] Hutchins N, Chauhan K, Marusic I, et al. Towards reconciling the large-scale structure of turbulent boundary layers in the atmosphere and laboratory[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2012, 145(2): 273-306.
- [59] Wang G H, Zheng X J. Very large scale motions in the atmospheric surfacelayer: A field investigation[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2016, 802: 464-489.
- [60] 兰州大学举办“高雷诺数湍流国际研讨会”[EB/OL]. (2016-10-14). <http://news.lzu.edu.cn/c/201610/41419.html>.

Field observations on wind-blown sand/dust storm and high Reynolds wall turbulence

WANG Ping

Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China; Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract Wind-blown sand and dust storm are typical gas-solid two phase flow occur in high Reynolds atmospheric boundary layer turbulence. Better understanding, accurate prediction and effective controlling of wind-blown sand and dust storm all rely on knowledges of sand/dust particle movement, and therefore on the research results on high Reynolds wall turbulence: The driving force of particle movement. After a briefly review on high Reynolds wall turbulence and sand/dust storm researches, the Qingtu Lake Observation Array (QLOA) established in Minqin county was introduced in detail. Preliminary results achieved in the light of observed data and outlook were described.

Keywords sand/dust storm; high Reynolds number wall turbulence; observation array

(责任编辑 刘志远)