

# 复杂地形下海陆风对大气湍流的影响

许满满<sup>1,2,3</sup>, 邵士勇<sup>1\*</sup>, 刘庆<sup>1</sup>, 程雪玲<sup>4</sup>, 宋小全<sup>5</sup>

<sup>1</sup>中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;

<sup>2</sup>中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230026;

<sup>3</sup>中国电子科技集团公司第十一研究所固体激光技术重点实验室, 北京 100015;

<sup>4</sup>中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029;

<sup>5</sup>中国海洋大学信息科学与工程学院海洋技术系, 山东 青岛 266100

**摘要** 针对近海复杂地形下海陆风对大气湍流特性的影响, 在深圳市杨梅坑环境生态中心开展了大气湍流观测实验, 利用温度脉动仪、超声风速仪和测风雷达获得了大气折射率结构常数、大气声虚温、风速风向廓线等时间序列数据。通过分析海陆风对大气湍流的功率谱、各向同性和湍流动能耗散率的影响发现, 较陆风条件, 湍流在海风条件下发展得更充分。海风条件下各向同性系数接近甚至等于 1 的频率范围为 0.05~50 Hz, 速度功率谱幂率均接近 $-5/3$ ; 陆风条件下, 只有 0.8~10 Hz 频率范围内的大气湍流在极短时段表现出局部各向同性, 速度功率谱幂率均严重偏离 $-5/3$ 且整体偏大, 平均值在 $-1.3$ 左右。海陆风条件下湍流动能耗散率与湍流强度呈线性关系, 温度脉动仪和超声风速仪测得的数据拟合斜率分别为 1.1、0.76 和 0.73、0.28。研究结论为深化海洋环境下的激光传输研究提供了一定的参考。

**关键词** 大气光学; 海陆风; 小波变换; 功率谱; 各向同性; 湍流动能耗散率

中图分类号 P421

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1201002

## Influences of Sea and Land Winds on Atmospheric Turbulence Under Complex Terrain

Xu Manman<sup>1,2,3</sup>, Shao Shiyong<sup>1\*</sup>, Liu Qing<sup>1</sup>, Cheng Xueling<sup>4</sup>, Song Xiaoquan<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>2</sup>Science Island Branch of Graduates School, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

<sup>3</sup>Science and Technology on Solid-State Laser Laboratory, The 11th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100015, China;

<sup>4</sup>State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

<sup>5</sup>Department of Marine Technology, School of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China

**Abstract** To grasp the influences of sea and land winds on the atmospheric turbulence characteristics in an offshore complex terrain, an atmospheric turbulence field experiment was implemented at Yangmeikeng Environmental Ecology Center in Shenzhen city. The data involved in atmospheric refractive index structure constant, atmospheric sound virtual temperature, wind profile are obtained by the micro-thermal meter, ultrasonic anemometer and Doppler lidar. By analyzing the effects from sea and land winds on the power spectrum, isotropy, and energy dissipation rate of turbulence, we find that the turbulence in sea winds develops more fully than in land winds. In the sea winds, the frequency range of isotropic coefficients close or equal to 1 spans 0.05-50 Hz, and the speed

收稿日期: 2020-01-16; 修回日期: 2020-02-17; 录用日期: 2020-03-16

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0213102)、固体激光技术重点实验室开放基金(6142404180302)、国家自然科学基金(41475024)

\* E-mail: shaoshiyong@aiofm.ac.cn

spectral power law is near  $-5/3$ . In land winds, the atmospheric turbulence only shows an isotropy at very small proportion of time at 0.8-10 Hz. The speed spectral power law seriously deviates from  $-5/3$ , tends to a high value, and possesses an average value of  $-1.3$ . Under the conditions of sea and land winds, the relationship between turbulence energy dissipation rate and turbulence intensity is linear. The fitting slopes of data from the micro-thermal meter are 1.1 and 0.76, and those from the ultrasonic anemometer are 0.73 and 0.28, respectively. The conclusion here can provide some reference for the study on laser transmission in a marine environment.

**Key words** atmospheric optics; sea and land wind; wavelet transform; power spectrum; isotropic; turbulent energy dissipation rate

**OCIS codes** 010.1330; 010.1290; 010.7060

## 1 引 言

地面是大气的一个边界,这个边界上的输送过程影响了 100~3000 m 的大气,并产生了边界层<sup>[1]</sup>。大气边界层中出现湍流的频次非常高,这是边界层不同于其他大气层的一个显著特征。大气湍流的存在使得在其中传输的光波出现光强起伏、相位改变、光束漂移、闪烁及到达角起伏等各种效应<sup>[2]</sup>,而激光大气传输的绝大部分场景都与边界层有关,因此大气边界层中湍流的特性及其规律分析具有重要的意义。

国内外学者对大气边界层的湍流特性开展了大量工作。Taylor<sup>[3]</sup>利用气球和风杯的数据,得到了湍流动量具有涡动通量和非各向同性的结果。Kolmogorov<sup>[4]</sup>通过量纲分析的方法给出了著名的 $-5/3$ 定律。1954年,大气层的相似理论被提出。20世纪60年代,出现了超声风速仪和其他快速响应探测器,使用计算机对这些仪器获得的大量数据进行快速处理,大气湍流的观测具有了真正的实际意义。1968年,Kansas实验开创了大规模使用快速响应探测器并用可移动计算机进行实时数据处理的先河<sup>[5]</sup>。Kaimal等<sup>[6]</sup>应用Kansas实验的数据,给出了近地面湍流谱和互谱的研究结果,所有无量纲的速度功率谱和温度功率谱在惯性子区内满足Kolmogorov的 $-5/3$ 定律并具有各向同性的性质。曾宗泳等<sup>[7]</sup>统计分析了合肥西郊董铺水库附近复杂地形近地面的大量温度脉动功率谱,发现在复杂地形下,温度功率谱幂率偏大,在 $-3\sim-5/3$ 范围内。刘树华等<sup>[8]</sup>利用风速、温度和湿度湍流实验观测数据,计算分析了风速、温度和湿度功率谱在不同稳定度下的特征,证实惯性子区湍流能谱符合Kolmogorov的 $-5/3$ 定律。罗涛等<sup>[9]</sup>对水陆交界复杂下垫面的近地面层湍流特征进行了研究,发现下垫面对边界层湍流各向同性特性具有相当大的影响。吴晓庆等<sup>[10]</sup>使用超声虚温时间序列数据,对非Kolmogorov谱幂率进行了测量和分析,结果表明,

一维温度功率谱幂率在 $-1.9\sim-1.5$ 范围内的频数为77.9%,并且弱湍流时谱幂率曲线比Kolmogorov的 $-5/3$ 谱扁平。Melissa<sup>[11]</sup>等对非Kolmogorov湍流开展了相应的研究,发现等效折射率结构常数不仅和各向同性系数有关,还和内尺度函数有关。尽管已经开展了大量的研究,但关于海陆风影响湍流发展机制的理解仍然有不足之处。为适应光电系统在海洋领域的应用需求,需要加大对海洋边界层尤其是近海边界层湍流特性的研究,为海洋环境下的激光传输、激光通讯、光学成像等应用领域提供理论和数据支撑。

本文通过深圳海岸的大气湍流测量实验,获取了临海复杂地形下的湍流特征数据,利用傅里叶变换获得了速度场、温度场的功率谱,通过小波变换获得了湍流的各向同性系数,分析了湍流动能耗散率和湍流强度之间的关系,总结了海陆风对湍流特性的影响。

## 2 实验场地及测量设备

本实验于2019年9月至10月在深圳市龙岗区大鹏半岛进行,实验场地位于杨梅坑环境生态中心(22°32'N,114°37'E)。该中心建在紧靠海边山脉的半山腰处,面向大海,四周植被为常绿阔叶林,如图1所示。实验所用测量设备为中国科学院安徽光学精密仪器研究所研制的QHTP-2型温度脉动仪、中国科学院大气物理研究所研制的UAT-3型超声风速仪和中国海洋大学研制的Wind3d-6000型多普勒相干测风雷达,分别如图1中1、2、3所示。实验过程中使用一组温度脉动仪和超声风速仪,两者间距1 m,均安装于海拔130 m的测量塔迎风臂上(塔高4 m,下垫面为绿色植被);多普勒相干测风雷达位于测量塔斜下方水平距离为100 m的测量平台上,测量平台与测量塔的高度差为60 m。温度脉动仪用来获取表征湍流强度的折射率结构常数,超声风速仪通过获取风速风向及声虚温来间接获得折射率结构常数,多普勒相干测风雷达用来获取风速风向的垂直分布。

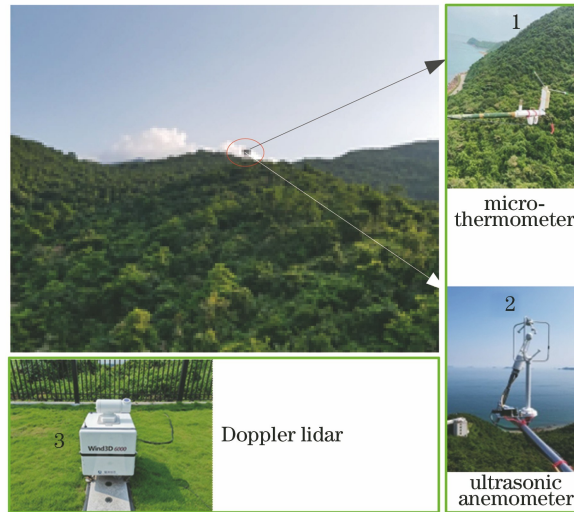


图 1 仪器安装环境

Fig. 1 Instrument installation environment

表 1 列出了温度脉动仪、超声风速仪和多普勒相干测风雷达的主要指标,三台设备相互配合,在杨梅坑环境生态中心开展了同步测量,为海陆风影响下的湍流特性分析提供了必要的大量数据。

表 1 测量设备的主要指标

Table 1 Main indexes of measuring instruments

Measuring instrument	Sample frequency	Resolution ratio	Measurement range
Micro-thermometer	0.1-30.0 Hz	$10^{-18} \text{ m}^{-2/3}$	$10^{-12} - 10^{-18} \text{ m}^{-2/3}$
Ultrasonic anemometer	10-100 Hz	$0.01 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$0-40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Doppler lidar	1-10 Hz	30 m	45-6000 m

### 3 结果与讨论

#### 3.1 海陆风的识别及其对湍流强度的影响

实验地点位于近海边的山坡上,这种海陆交界复杂地形的近地面层大气受到具有截然不同的热力、动力性质的两种下垫面的影响。将从陆地下垫面吹来的风称为“陆风”,将从海洋下垫面吹来的风称为“海风”。观测结果表明,海风的时间远多于陆

风,因此选取具有典型海陆风转换特征的 2019 年 10 月 17 日观测结果进行研究。图 2(a)和图 2(b)中的风速及风向的日变化数据来自于多普勒测风雷达,该雷达每分钟测量 60 组数据,一天的连续测量数据为 86400 组,以分钟为单位进行平均处理,一天得到 1440 组数据。在图 2(b)中,折射率结构常数  $C_n^2$  的日变化数据来自于超声风速仪和温度脉动仪,超声风速仪一天获得 850 万组数据,温度脉动仪一

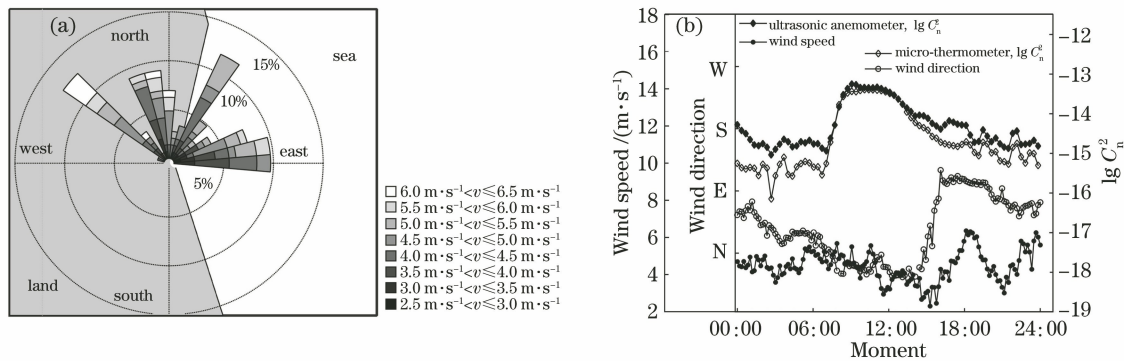


图 2 海拔 130 m 处的风速、风向和湍流强度。(a)风速和风向;(b)风向、风速及  $C_n^2$  的日变化

Fig. 2 Wind speed, wind direction and turbulence intensity at 130 m above sea level.

(a) Wind speed and wind direction; (b) diurnal variation of wind direction, wind speed and  $C_n^2$

天获得 17280 组数据,同样都进行分钟为单位的平均处理,一天均得到 1440 组数据。图 2(a)为该日的风速风向玫瑰图,其中  $v$  为风速。可以看出,该日的风向主要集中在东北向和西北向。根据实验地点所在的地理位置,可以判定东北方向的风主要来自海洋,西北方向的风主要来自陆地。从图 2(b)风向的日变化图中可以看出,在 6:00—15:00 时间段内,实验场地的风为陆风,其他时间段为海风。从风速的日变化图可以看到,风速大小为  $2\sim 7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。温度脉动仪和超声风速仪测得的大气折射率结构常数基本一致,均呈‘墨西哥帽’式的变化趋势。在 6:00 和 15:00 的海陆风交替时刻,折射率结构常数无明显变化,说明海陆风的切换对湍流强度无影响。

### 3.2 湍流各向同性和功率谱的日变化

小波变换具有良好的时频特性,非常适用于分析非平稳的湍流信号<sup>[12-14]</sup>。采用 Mallat 小波变换<sup>[15-16]</sup>的方法对海拔 130 m 处的湍流均匀各向同性进行了分析。根据多普勒相干测风雷达的数据,对海风数据和陆风数据进行筛选,得到陆风数据对应时间和海风数据对应时间的比例为 1:5,大多数

是来自正东方向的海风,为数据分析和解释的方便,定义正东方向为径向,正北方向为横向。

各向同性(ISO)系数的定义<sup>[14]</sup>为

$$I_{\text{ISO}} = \frac{2\sigma_w^m}{\sigma_u^m + \sigma_v^m}, \quad (1)$$

式中: $I_{\text{ISO}}$ 为各向同性系数; $\sigma_u^m$ 、 $\sigma_v^m$ 、 $\sigma_w^m$ 分别为径向风速、横向风速和垂直风速在频率  $m$  处的方差。ISO 系数描述了水平和垂直风速方差的偏差,其数值范围表征了湍流发展的充分程度。ISO 系数越接近 1,湍流各向同性越好,反之则越差。

将超声风速仪一天的 850 万组超声数据以 10 min 为间隔进行分割,并剔除数据坏点,每组取前  $2^{16}$  个数据进行小波分解,数据的处理方式详见文献[9]。对数据进行小波变换后,计算各尺度重构信号的方差,应用(1)式分别计算每组数据的 ISO 系数,海拔 130 m 处 ISO 系数的日变化结果如图 3 所示。从图中观察到,在海风时段内,湍流在  $0.2\sim 50.0\text{ Hz}$  内呈现出良好的各向同性,而在 6:00—15:00 的陆风时段内,湍流的各向同性有明显的衰弱,表现为白色区域缩小至  $1\sim 10\text{ Hz}$  甚至更窄范围内,转化时刻刚好与海陆风转换时刻对应。

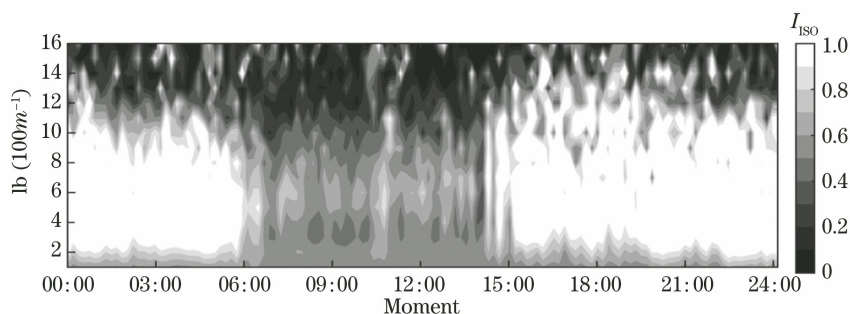


图 3 海拔 130 m 处 ISO 系数的日变化

Fig. 3 Diurnal variation of ISO at 130 m above sea level

对风速和温度数据进行同样的预处理,对每组  $2^{16}$  个数据进行傅里叶变换,获得每组数据的功率谱,利用得到的谱曲线找到惯性子区的位置,在惯性子区内进行拟合,得到拟合直线的斜率,数据的处理方式详见文献[8]。对每一组数据进行相同的操作,得出功率谱幂率(拟合曲线的斜率)的日变化特征,如图 4 所示。图 4(a)为温度功率谱幂率的日变化图,除极个别时段外,温度功率谱的幂率均偏离  $-5/3$  且整体偏大,表现出非 Kolmogorov 湍流的特性,海陆风及其转换未对其产生明显影响。图 4(b)、(c)、(d)分别为径向风速、横向风速、垂直风速功率谱幂率的日变化曲线,可以看出,径向风速、横向风速、垂直风速功率谱幂率均明显受到海陆风的

影响,在盛行陆风时段内速度功率谱幂率严重偏离  $-5/3$  并向大值方向发展,盛行海风时段内功率谱幂率则在  $-5/3$  附近  $\pm 0.1$  平均范围内波动。

### 3.3 湍流各向同性和功率谱的统计平均

由上述日变化分析可知,海陆风对湍流特性产生了重大影响,有必要对其统计规律进行梳理。我们获取了 2019 年 10 月 14 号—10 月 20 号超声风速仪测得的一周共 5950 万组数据。通过计算分别得到了海陆风的各向同性系数的统计平均分布,结果如图 5 所示。图 5(a)和图 5(b)分别为陆风、海风下湍流各向同性系数的分布,横坐标为时间变量,纵坐标为频率。可以看出,海风、陆风下湍流的各向同性系数的统计平均差别很大。海风条件下,各向同

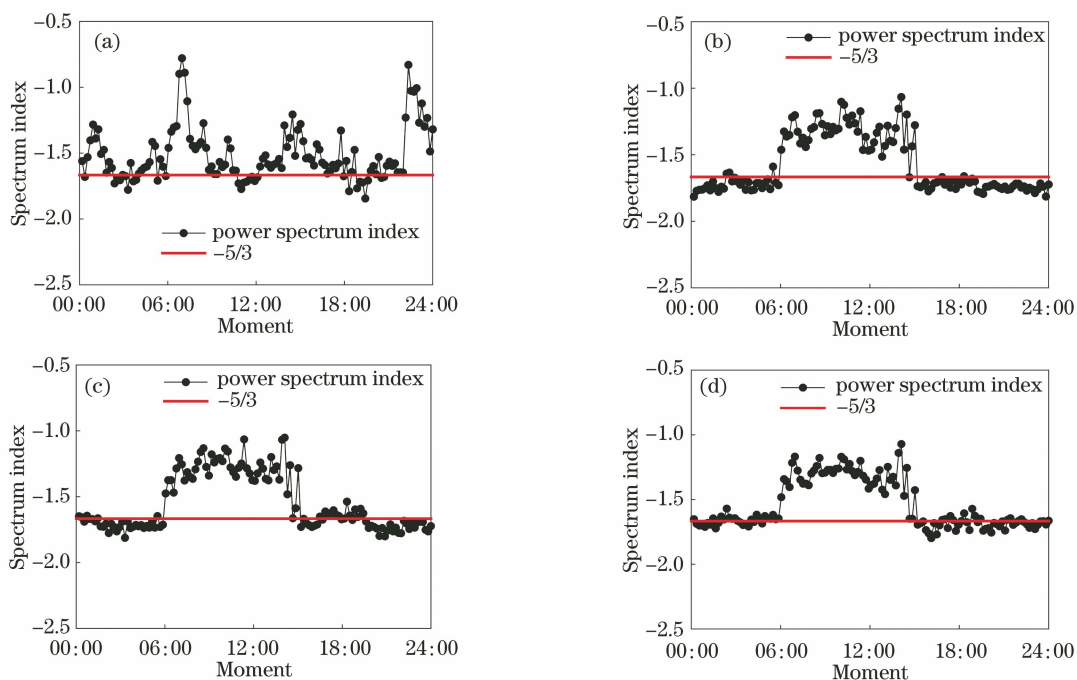


图 4 海拔 130 m 处功率谱幂率的日变化。(a)温度;(b)径向风速;(c)横向风速;(d)垂直风速  
Fig. 4 Diurnal variation of power spectrum indices at 130 m above sea level. (a) Temperature;  
(b) radial speed; (c) horizontal speed; (d) vertical speed

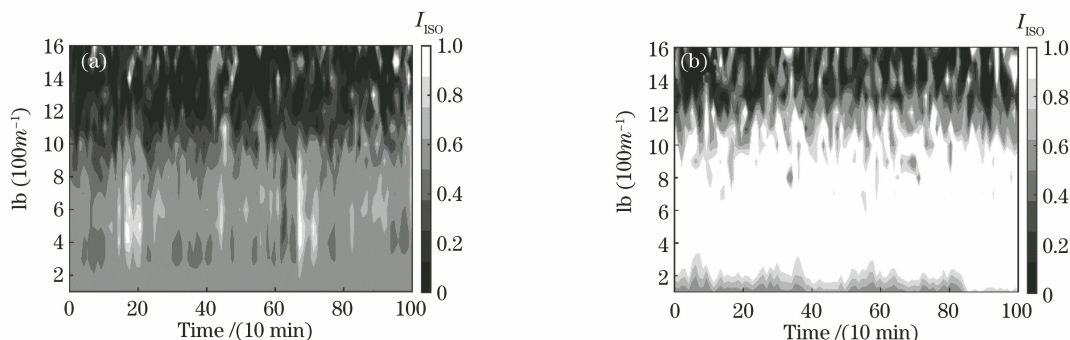


图 5 各向同性系数分布。(a)陆风;(b)海风  
Fig. 5 ISO exponents. (a) Land wind; (b) sea wind

性系数接近甚至等于 1 的频率范围为 0.05 ~ 50.00 Hz,其中 0.05~0.80 Hz 区间为间歇性各向同性,0.8~50.0 Hz 区间为完全各向同性;而陆风条件下,只有 0.8~10.0 Hz 区间在极短时间内表现出局部各向同性,大部分时段整个频率段内几乎均为非各向同性,表明陆风下湍流发展得非常不充分。

对海陆风下的湍流功率谱进行了分析,结果如图 6 所示。图 6(a)~(d)分别为湍流的温度、径向风速、横向风速和垂直风速的功率谱幂率变化。可以看到,海陆风条件下温度功率谱幂率的变化范围较大,整体上均向  $-5/3$  方向发展且无明显变化规律。三个方向上的风速功率谱幂率在海陆风条件下与上述温度功率谱日变化结果呈现出明显的特

征。海风条件下,速度功率谱幂率均接近  $-5/3$ ,表现出 Kolmogorov 湍流的特性,陆风条件下,速度功率谱幂率均严重偏离  $-5/3$  且整体偏大,平均值在  $-1.3$  左右,表现出非 Kolmogorov 湍流的特性。

海陆风湍流的各向同性和速度功率谱幂率反映了两种下垫面截然不同的性质:陆地粗糙度大,不同方位角上粗糙度和使湍流发展的热动力分布不均匀;海面粗糙度小,不同方位角上粗糙度和使湍流发展的热动力分布大致相同。受下垫面的影响,陆风的近地面湍流得不到充分发展,其各向同性很差,导致湍流速度功率谱幂率均大于  $-5/3$ ;海风的湍流获得了充分发展,各向同性和湍流速度功率谱均接近 Kolmogorov 湍流。

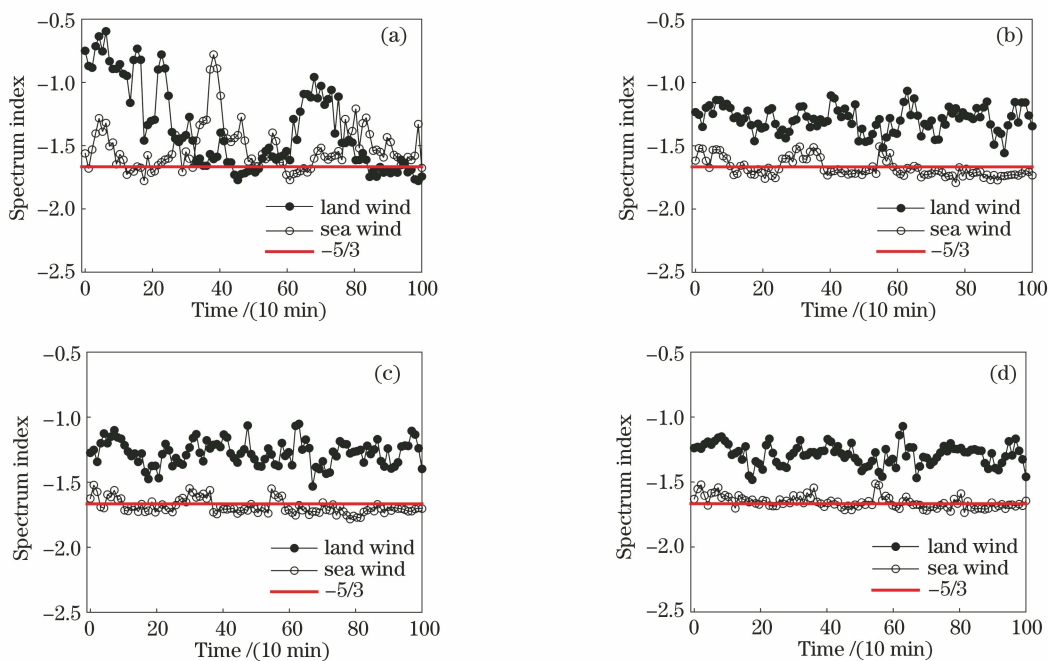


图 6 海陆风下的功率谱幂率。(a)温度;(b)径向风速;(c)横向风速;(d)垂直风速  
Fig. 6 Power spectrum indices of sea and land winds. (a) Temperature; (b) radial speed; (c) horizontal speed; (d) vertical speed

### 3.4 海陆风的湍流动能耗散率

实验期间采用超声风速仪和温度脉动仪两个测量设备获得折射率结构常数,两种设备在测量折射率结构常数时各有优劣。图 7 展示了超声风速仪和温度脉动仪的系统噪声  $C_n^2$ 。经过连续 60 h 的对比测试,超声风速仪测量的虚温平均灵敏度为 0.01 K,而温度脉动仪的温度平均灵敏度为 0.001 K,超声风速仪的系统噪声  $C_n^2$  高于温度脉动仪两个数量级。在统计条件下,由于信噪比过低,超声风速仪对低于  $10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$  的湍流强度不敏感。此外,在实验过程中,利用超声虚温  $T' = T(1 + 0.3192e/P)$  计算超声风速仪  $C_n^2$ ,其中  $T$ 、 $e$  和  $P$  分别为大气温度、水汽压和大气压,因此虚温略高于大气温度。由于虚

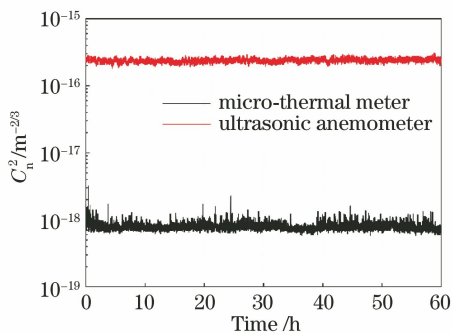


图 7 超声风速仪和温度脉动仪的  $C_n^2$   
Fig. 7 System noise equivalent  $C_n^2$  test of ultrasonic anemometer and micro-thermal meter

温转化成大气温度需要的水汽压无法直接测量,因此基于虚温直接计算  $C_n^2$  的结果略微偏大。温度脉动仪的探测灵敏度高,有利于弱湍流的测量,超声风速仪的探测频率高,有利于频谱分析,且两者的结果能够相互验证湍流演变规律和数据的可靠性,因此将两者的结果列在一起进行比较分析。

对温度脉动仪和超声风速仪实验期间的折射率结构常数进行统计分析,获得的月平均日变化如图 8 所示。在 9 月—10 月连续 40 d 获得的数据中,挑选出日变化数据完整且天气状况良好的 20 d 数据进行统计平均,温度脉动仪和超声风速仪使用同时段数据,由于两者的数据密度不同,均统一进行以分钟为单位的平均处理,并在此基础上进行日变化数据的平均处理。两者均检测到湍流强度具有昼夜循

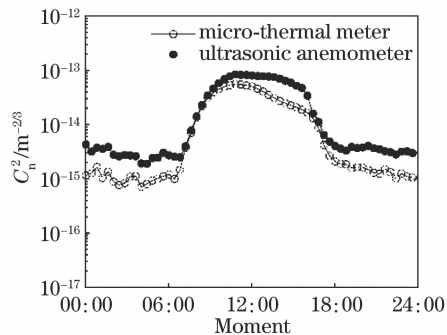


图 8  $C_n^2$  的月平均日变化特征  
Fig. 8 Monthly mean diurnal variation characteristics of  $C_n^2$

环变化的特征。白天湍流强度高,夜间湍流强度减弱,呈现出‘墨西哥帽’式的日变化结构。对比温度脉动仪和超声风速仪测得的湍流强度变化可知,白天两者的差别不大,夜间超声风速仪的测量值明显高于温度脉动仪的测量值。

图 9 为超声风速仪测得的湍流动能  $K_{KET}$  和湍流动能耗散率  $\epsilon$  的日变化特征,使用一天的 17280 组数据,对每分钟获得的数据进行平均处理,并给出日变化图。可以看出,两者同样具有明显的昼夜变化特征,而且两者的变化趋势较一致,呈现出线性关系,相关系数为 0.95。图 10 统计了湍流动能和湍流强度之间的关系,超声风速仪使用了 51840 组数据,对每分钟获得的数据进行平均处理,得到 4320 组数据,温度脉动仪使用了 4320 组数据,温度脉动仪和超声风速仪的统计结果显示,湍流强度和湍流动能均呈正相关,两者线性拟合的斜率分别为 0.81 和 0.56。

由于湍流动能和湍流强度呈正相关,湍流动能

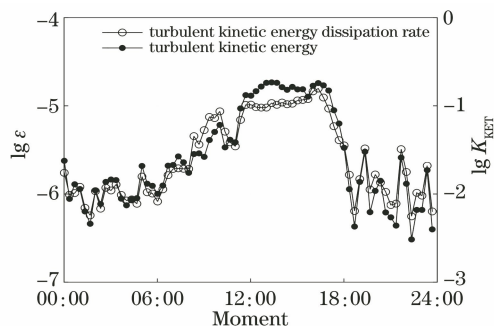


图 9  $K_{KET}$  和  $\epsilon$  的日变化特征

Fig. 9 Diurnal variation characteristics of  $K_{KET}$  and  $\epsilon$

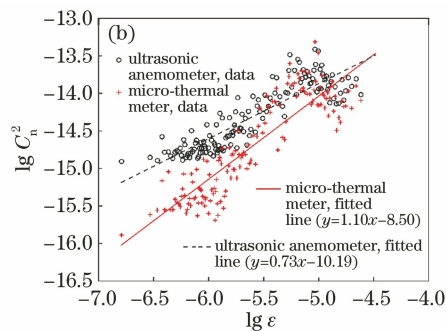
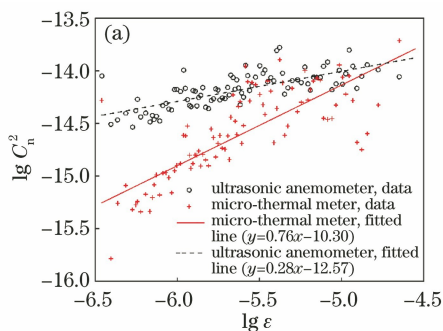


图 11 不同条件下  $\epsilon$  和  $C_n^2$  的关系。(a) 陆风;(b) 海风

Fig. 11 Relationships between  $\epsilon$  and  $C_n^2$  under different conditions. (a) Land wind; (b) sea wind

## 4 结 论

利用 2019 年 9 月—10 月在深圳沿海获得的观测数据,研究了复杂下垫面下海陆风对近海大气边界层湍流特性的影响。分析了海陆风交替情况下湍

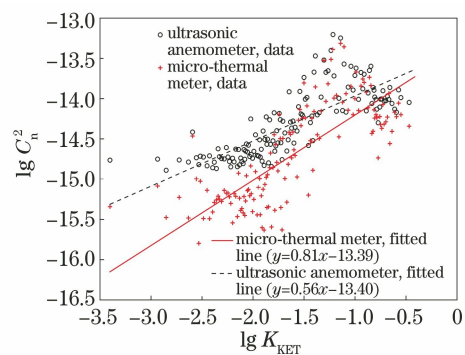


图 10  $K_{KET}$  与  $C_n^2$  的关系

Fig. 10 Relationship between  $K_{KET}$  and  $C_n^2$

耗散率和湍流强度必然也存在某种联系,为了更好地展示温度脉动仪和超声风速仪在海陆风条件下测得的折射率结构常数  $C_n^2$  和湍流动能耗散率  $\epsilon$  之间的关系,图 11 采用了双对数坐标。使用 2019 年 10 月 14 日—10 月 20 日的的数据,其中超声风速仪数据 5950 万组,温脉动仪数据 12 万组。对于海风和陆风来说,  $\lg C_n^2$  和  $\lg \epsilon$  均呈现出统计上的正比线性关系,即随着湍流强度的增强,湍流动能耗散率值也逐渐增大。在陆风和海风条件下,温度脉动仪测量结果的线性拟合斜率分别为 0.76 和 1.1,超声风速仪测量结果的线性拟合斜率分别为 0.28 和 0.73,表明与陆风条件相比,在同样的动能耗散率区间,海风条件下湍流强度的增长更快,这是海风条件下湍流发展更为充分和惯性子区较大的必然结果,与前面的论述形成了相互印证;同时也证明了超声风速仪对弱湍流不够敏感,导致其数值范围窄于同等条件下的温度脉动仪测量数值范围,从而引起斜率偏小。

流各向同性和功率谱斜率的日变化特征,在统计分析的基础上总结了两者的规律,获取了湍流强度和湍流动能耗散率的关系,主要结论如下。

1) 海风条件下的各向同性优于陆风,原因可能是测量塔处于迎风面,海风经过广阔的海水下垫面

后吹向测量设备,大气湍流得以充分发展;陆风越过山顶斜向下吹,受到地形和植被拖曳的严重影响,到达测量设备时湍流尚未得到充分发展。

2) 测量地点观测期间海风与陆风的时间之比为 5:1,大多数时间盛行海风。海风条件下,各向同性系数接近甚至等于 1 的频率范围为 0.05 ~ 50.00 Hz,其中 0.05 ~ 0.80 Hz 区间为间歇性各向同性,而 0.8 ~ 50.0 Hz 区间为完全各向同性,速度功率谱幂率均接近  $-5/3$ ;陆风条件下,只有 0.8 ~ 10.0 Hz 区间在极短时间内表现出局部各向同性,大部分时段整个频段内几乎均为非各向同性,速度功率谱幂率均严重偏离  $-5/3$  且整体偏大,平均值在  $-1.3$  左右。

3) 随着湍流动能耗散率值的增大,湍流强度呈增强的趋势,两者的对数值呈线性相关。温度脉动仪测得的海陆风条件下湍流动能耗散率和湍流强度的拟合曲线的斜率分别为 1.1 和 0.76,超声风速仪测得的海陆风条件下湍流动能耗散率和湍流强度的拟合曲线的斜率分别为 0.73 和 0.28,说明海风条件下湍流强度增长的速度更快。

### 参 考 文 献

- [1] Stull R B . An Introduction to boundary layer meteorology[M]. Yang C X, Transl. Beijing: China Meteorological Press, 1988: 1-2.  
斯塔尔. 边界层气象学导论[M]. 杨长新, 译. 北京: 气象出版社, 1988: 1-2.
- [2] Rao R Z. Light propagation in the turbulent atmosphere [M]. Hefei: Anhui Science and Technology Press, 2012:6-8.  
饶瑞中. 光在湍流大气中的传播[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 2012: 6-8.
- [3] Taylor G I. Statistical theory of turbulence-II [J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1935, 151(873): 444-454.
- [4] Kolmogorov A N. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers [J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical and Physical Sciences, 1991, 434(1890): 9-13.
- [5] Haugen D A, Kaimal J C, Bradley E F. An experimental study of Reynolds stress and heat flux in the atmospheric surface layer [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1971, 97(412): 168-180.
- [6] Kaimal J C, Wyngaard J C, Izumi Y, et al. Spectral characteristics of surface-layer turbulence [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1972, 98(417): 563-589.
- [7] Zeng Z Y, Yuan R M, Tan K, et al. The spectrum of temperature in the surface layer over complicated terrain [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 1998, 15(2): 134-139.  
曾宗泳, 袁仁民, 谭焜, 等. 复杂地形近地面温度谱 [J]. 量子电子学报, 1998, 15(2): 134-139.
- [8] Liu S H, Li J, Liu H P, et al. Characteristics of turbulence spectra and local isotropy in EBEX-2000 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2005, 29(2): 213-224.  
刘树华, 李洁, 刘和平, 等. 在 EBEX-2000 实验资料中湍流谱和局地各向同性特征 [J]. 大气科学, 2005, 29(2): 213-224.
- [9] Luo T, Yuan R M, Wu X Q, et al. Turbulent characteristics of atmospheric boundary layer under complex underlying using discrete orthogonal wavelet transform [J]. Plateau Meteorology, 2008, 27(6): 1195-1204.  
罗涛, 袁仁民, 吴晓庆, 等. 正交小波变换研究复杂下垫面边界层的湍流特征 [J]. 高原气象, 2008, 27(6): 1195-1204.
- [10] Wu X Q, Huang Y B, et al. Measurement of non-Kolmogorov turbulence characteristic parameter in atmospheric surface layer [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6):0601001.  
吴晓庆, 黄印博, 等. 近地面层大气非 Kolmogorov 湍流特征参数测量 [J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0601001.
- [11] Melissa B, Larry A, Italo T. Calculating structure function constant from measured  $C_n^2$  in non-Kolmogorov and anisotropic turbulence including inner scale effects [J]. Applied Optics, 2019, 58: 6813-6819.
- [12] Li X, Hu F, Pu Y F, et al. Identification of coherent structures of turbulence at the atmospheric surface layer [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2002, 19(4): 687-698.
- [13] Chen Z Y, Sun J N, Yuan R M, et al. An analysis of convective boundary layer eddy structure in water tank by orthonormal wavelet [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(6): 964-970.  
陈子贇, 孙鉴泞, 袁仁民, 等. 对流槽湍流涡旋结构特征的小波分析 [J]. 地球物理学报, 2004, 47(6): 964-970.
- [14] Kulkarni J R, Sadani L K, Murthy B S. Wavelet analysis of intermittent turbulent transport in the atmospheric surface layer over a monsoon trough region [J]. Boundary-Layer Meteorology, 1999, 90(2): 217-239.
- [15] Daubechies I, Heil C. Ten lectures on wavelets [J]. Computers in Physics, 1992, 6(6): 697.
- [16] Mallat S G . Multiresolution approximations and wavelet orthonormal bases of  $L^2(R)$  [J]. Transactions of the American Mathematical Society, 1989, 315(1):69-87.