

气压脉动仪及湍流大气中的气压脉动频谱特征研究

卫茁睿¹ 张宏升^{1,†} 李倩惠¹ 任燕¹ 康凌² 王鹏飞³ 刘海波³

1. 北京大学物理学院大气与海洋科学系, 气候与海-气实验室, 北京 100871; 2. 北京大学环境科学与工程学院环境科学系, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100871; 3. 北京智阳科技有限公司, 北京 100107;

† 通信作者, E-mail: hsdq@pku.edu.cn

摘要 基于自制气压脉动仪在内蒙古科尔沁地区大气边界层与大气环境综合实验站 2019 年夏季的观测资料, 计算气压脉动特征参数, 分析气压频谱及气压标准差特征。结果表明, 自制气压脉动仪能够反映气压的快速变化, 频率响应接近 1 Hz; 气压脉动方差谱曲线在 0.0006~0.5 Hz 的频率范围内满足 n^{-2} 标度率, 峰值频率低于风速和温度; 不同稳定层结条件下的气压脉动归一化方差谱在高频区合并为一条曲线, 在低频区根据大气稳定度排列; 气压涨落对湍流能量的贡献主要体现在较大尺度上, 风速和温度主要体现在较小尺度上; 气压标准差和气压脉动强度存在明显的白天强、夜晚弱的日变化特征。

关键词 自制气压脉动仪; 气压快速涨落; 大气湍流动能; 气压方差谱分布

Research on the Fast-Response Air Pressure Sensor and Spectral Characteristics of the Pressure Fluctuations in the Turbulent Atmosphere

WEI Zhuorui¹, ZHANG Hongsheng^{1,†}, LI Qianhui¹, REN Yan¹, KANG Ling², WANG Pengfei³, LIU Haibo³

1. Laboratory for Climate and Oceanic-Atmosphere Studies, Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871; 2. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, Department of Environmental Science, Peking University, Beijing 100871; 3. Beijing Intell-Sun Technology Ltd., Beijing 100107;

† Corresponding author, E-mail: hsdq@pku.edu.cn

Abstract Based on the observational data of a self-developed fast-response air pressure sensor at the Atmospheric Boundary Layer and Atmospheric Environment Comprehensive Experimental Station in the Horqin area, Inner Mongolia in the summer of 2019, the characteristic parameters of the pressure fluctuations were calculated, and the spectral characteristics of the pressure fluctuations and the characteristics of the pressure standard deviation were studied. The results show that the self-developed fast-response air pressure sensor can reflect the rapid fluctuations of pressure, and the frequency response is close to 1 Hz. The variance spectra of the pressure fluctuations satisfy the n^{-2} scaling law in the frequency range from 0.0006 to 0.5 Hz, and the peak frequency is lower than that of the wind speed and temperature. The normalized variance spectra of pressure fluctuations under different atmospheric stabilities merge into a single line in the high-frequency range and distribute around the stability parameter in the low-frequency range. The contribution of pressure fluctuations to turbulent energy is mainly at larger scales, while that of the wind speed and temperature is mainly at smaller scales. The standard deviation and fluctuation intensity of the pressure have obvious diurnal variation characteristics, which is strong during the daytime and weak during the nighttime.

Key words self-developed fast-response air pressure sensor; pressure rapid fluctuations; atmospheric turbulent kinetic energy; distribution of the pressure variance spectra

大气压强(简称气压)是气象探测中最基本、最重要的气象参数之一^[1]。气压脉动在大气边界层中的湍流输送过程和地-气交换过程中扮演着重要角色^[2], 正确地掌握大气边界层气压演变规律和气压涨落结构特征, 对深入了解大气边界层动力学和热力学过程有着十分重要的意义^[3]。对气压要素时空演变规律及气压快速涨落特征的理解, 有助于人们充分地认识发生在大气边界层中的许多重要天气现象以及环境问题。例如, 夜间稳定边界层中的重力内波以及气压输送项在湍流动能收支方程中的贡献^[4-5]; 静稳天气条件下大气污染物输送及污染过程的发生和发展机制^[6]。尽管气压这一参数在大气动力学中的重要性已经广为人知, 但是气压快速涨落信号的观测依然有很大的难度, 相对于风速、温度和湿度, 乃至二氧化碳和甲烷等气态物质等气象和环境要素的快速涨落信息, 科学家对气压快速涨落的表现和分布以及标度率、统计特征和微观结构等湍流属性的认识尚不清楚^[2,7]。为了充分理解大气运动, 深入探究大气边界层难题, 提高天气预报效果, 迫切需要对气压信息进行高时间分辨率的精确测量和研究。

湍流大气中气压脉动的观测存在较大的难度。一方面, 实际大气中气压脉动量只有气压平均值的约 $1/10^5$ ^[8], 气压脉动观测需要很高的测量精度; 另一方面, 气压不是完全的局地流动变量, 受大气风场等因素的影响较大, 任何放置在流场中的传感器都会干扰试图测量的气流^[9], 使之阻塞、偏转或变形, 产生动压场, “污染”静压场测量结果^[2,8,10-11]。在流体力学中, 静压指均匀不可压缩流体沿水平流线平稳流动时, 除滞点外其他各点的压力, 是由随流体移动的气压计测量到的压力; 动压也称速度压力或速压, 是受到气流流场干扰的压力值, 与流体质点的动能 $1/2\rho U^2$ 密切相关。均匀、平稳、不可压缩流体的伯努利方程为 $P+1/2\rho U^2=P_0$, 其中 P 为静压, $1/2\rho U^2$ 为动压, P_0 为总压^[12]。一般情况下, 气压即代表静压。本文涉及的“气压脉动”均指“大气静压脉动”。测量气压的方法有很多, 包括力平衡、谐振式和气体式等。常用的电测气压传感器有硅电容式、硅压阻式、硅谐振式、差动变压式、振弦式气压传感器等, 其中基于硅材料的气压传感器是未来气压测量技术发展的主要方向^[1]。目前, 这类气压传感器主要用于测量平均气压的慢响应仪器, 测量气压快速涨落的快响应仪器及相应研究较

少^[9,13-14]。

目前, 关于气压脉动频谱特性的研究较少。有学者借用常规的风速和温度等气象要素的湍流分析方法, 利用湍流理论和含气压快速涨落测量的实验, 探究气压脉动频谱曲线的形状和惯性副区的标度率等湍流参数特征。在理论研究方面, Monin 等^[15]将 Kolmogorov 局地湍流理论^[16]扩展到气压脉动特征研究中, 得到气压脉动方差谱的 Kolmogorov 标度率为 $n^{-7/3}$, 即 $S_p(n) \propto n^{-7/3}$ 或 $nS_p(n) \propto n^{-4/3}$ 。实验研究方面, 不同下垫面条件下的气压脉动观测结果显示, 没有公认的气压脉动方差谱的 Kolmogorov 标度率。例如, 麦田下垫面给出的气压脉动方差谱的 Kolmogorov 标度率为 $n^{-7/3}$ ^[5,17], 玉米地或落叶林下垫面的结果为 n^{-2} ^[18-19], 草原下垫面为 $n^{-5/3}$ ^[20-22]。

本文利用自主研发的气压脉动仪获取高频响应气压快速涨落信息, 将其中气压平均值与芬兰 Vaisala 公司的商用 PTB110 型气压计测量结果进行实时对比; 计算气压脉动方差谱, 分析和研判自制气压脉动仪的频率响应特征, 验证其测量结果的可靠性和可信度; 分析内蒙古科尔沁地区夏季气压标准差的日变化特征。

1 数据与方法

1.1 观测站点

如图 1 所示, 内蒙古科尔沁地区奈曼大气边界层与大气环境综合实验站(42°56'N, 120°42'E)位于中国内蒙古自治区通辽市奈曼旗以北 10 km 处, 地处科尔沁沙地东南边缘, 海拔高度约为 363 m。实验站所在地区为温带大陆性季风气候, 年平均气温约为 6.8℃, 年平均降水量约为 366 mm, 年平均蒸发量约为 1935 mm^[23], 是典型的半干旱地区。由于过度砍伐林木和过度放牧, 科尔沁地区荒漠化十分严重。实验站周围地形略微起伏, 地面粗糙度约为 0.1 m, 地貌特征以固定沙丘、流动和半流动沙丘为主^[24-26], 植被类型主要为低矮的灌木丛^[27-29], 在较大的范围内可以近似地视为均匀、平坦的下垫面^[24-27,30-31]。

1.2 数据获取

奈曼大气边界层与大气环境综合实验站观测平台是高度为 20 m 的气象观测铁塔, 观测仪器安装在塔体伸出的支臂上, 支臂远端距塔体约为 2 m。本文涉及的项目为塔层气象要素的平均值观测和湍流观测。

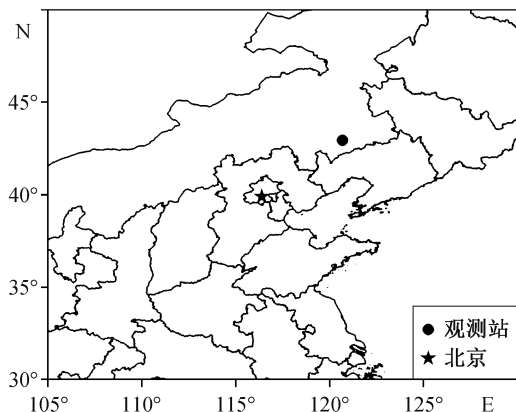


图 1 内蒙古奈曼大气边界层与大气环境综合实验站地理位置

Fig. 1 Geographical location of the Atmospheric Boundary Layer and Atmospheric Environment Comprehensive Experimental Station in Naiman, Inner Mongolia

气象要素的平均值观测包括 2, 4, 16 和 20 m 的平均风速(010C, Met One Instruments Inc., 美国)、2, 4, 8 和 16 m 的温度和湿度(HMP45C, Campbell Sci. Inc., 美国)以及 2 m 的气压(PTB110, Vaisala Co., 芬兰), 数据的时间分辨率为 10 min, 自动并连续记录。湍流观测包括 8 和 16 m 的涡动相关(eddy covariance, EC)系统。8 m 高度有三维超声风温仪(CSAT3, Campbell Sci. Inc., 美国)和开路式 CO₂/H₂O 气体红外分析仪(LI7500A, LI-COR Biosciences, 美国), 用于获取三维风速、超声虚温、水汽和 CO₂ 的快速涨落信息; 16 m 高度有三维超声风温仪(CSAT3B, Campbell Sci. Inc., 美国)。三维超声风温仪朝向正西方向(270°), 采样频率为 10 Hz, 自动连续采样。4, 8 和 16 m 的气压脉动观测采用自制气压脉动仪, 测量范围为 150~1150 hPa, 采样频率为 10 Hz, 频率响应约为 1 Hz, 精度不低于 0.05 hPa。为减小环境风场导致的动压对气压脉动测量的影响, 我们在每一台自制气压脉动仪上加装可减小动压扰动的静压传感器装置(230-61002 Gill Pressure Port, NovaLynx Corporation, 美国)。奈曼大气边界层与大气环境综合实验站的全部观测内容可参见文献[27]。本文涉及的观测时段为 2019 年 7 月 1—31 日。因 8 m 与 16 m 的气压频谱、标准差等信息差别不大, 故本文只展示 8 m 的湍流分析结果。

1.3 数据处理

采用 EddyPro 软件(Advanced 6.2.1, LI-COR Biosciences, Inc., 美国)对大气湍流观测数据进行数据质量控制和预处理, 具体流程包括剔除湍流探测

系统给出的可疑数据判别与警告、野点剔除^[32]、二次坐标旋转^[33]和趋势项去除^[34]等, 同时剔除明显不合理的数值组。数据处理的平均时间长度为 30 min。为了避免外场实验中仪器安装架设和大气流场干扰等造成的误差, 对湍流数据进行严格的筛选, 剔除以下数据组: 风向与三维超声风温仪感应探头指向的夹角大于±90°; 平均风速小于 0.5 m/s 或大于 8 m/s; 摩擦速度小于 0.05 m/s; 感热通量绝对值小于 5 W/m²; 其他非常或存在明显错误的数值组。

1.4 自制气压脉动仪工作原理

如图 2 所示, 自制气压脉动仪由硅电容式压力传感器的气压感应器件、不锈钢的硬模盖板和强化热塑材料的外壳构成。硅电容式压力传感器的圆形硅隔膜和金属薄膜作为电容器的一个电极, 当薄膜感受压力而产生形变时, 薄膜与固定电极之间形成的电容量发生变化, 通过测量电路即可输出与电压有一定关系的电信号。其内部集成了去耦电路, 可以提高瞬态响应速度, 降低电源分配系统的阻抗, 可以抑制因负载变化而产生的噪声, 具备环境适应程度高、结构简单、分辨率高、非接触测量、可动态检测等优点。如图 3 所示, 静压传感器装置由间距很小的两个平行圆板组成, 自制气压脉动仪连接至这两个圆板上, 可以有效地降低气压入口处的空气速度, 从而减小因风场导致的动压扰动。

2 结果与讨论

2.1 自制气压脉动仪平均气压测量及验证

将自制气压脉动仪获取的 10 Hz 高频气压资料进行 10 min 平均, 与 PTB110 型气压计的测量结果相比较, 可见两者的变化趋势基本上一致(图 4)。

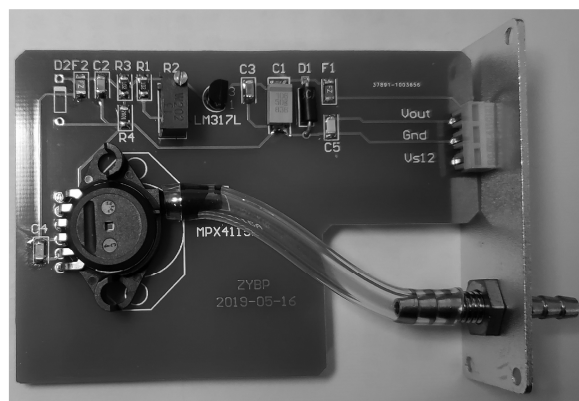


图 2 自制气压脉动仪

Fig. 2 Self-developed fast-response air pressure sensor



图3 静压传感器
Fig. 3 Static pressure port probe

自制气压脉动仪测量值略低的原因与两个传感器的安装高度差为6 m有关。由于本文关注气压涨落的变化,这个偏差也可以作为自制气压脉动仪的系统偏差进行考虑和处理,而系统偏差对气压脉动数值的影响可以忽略不计。

为便于比较,图5中自制气压脉动仪的气压测量值均叠加了系统偏差11 hPa。其中虚线代表1:1,实线为线性拟合线,拟合线斜率约为0.92,线性相关系数 $R^2 \approx 0.95$,说明两种仪器对平均气压测量具有一致性,也说明自制气压脉动仪测量结果具有可

靠性和稳定性。可以认为,自制气压脉动仪具有与商用的PTB110型气压计相同的反映平均气压及其变化趋势的能力。

两种仪器的采样频率不同(分别为10 Hz和10 min),为便于比较,均计算6 h时间长度的气压标准差 σ_p (hPa)。从图6可以看到,两种仪器得到的 σ_p 随时间的变化趋势基本上一致,在实验观测期间都低于1.5 hPa,自制气压脉动仪的 σ_p 比PTB110型气压计略大。图6还显示, σ_p 有一定的日变化趋势,白天较大,夜晚较小。

2.2 气压快速涨落分析

自制气压脉动仪的主要目的是获取和研究气压快速涨落信息。利用雷诺平均方法计算气压脉动 P' (Pa):

$$P' = P - \bar{P}$$

其中, P 为气压脉动仪测量的气压(Pa), \bar{P} 为30 min的平均气压(Pa)。图7为观测期间某一个30 min时间段气压脉动的时间序列,可以看到短时间内气压有明显的快速涨落,半小时内,气压涨落可达10 Pa以上,表明自制气压脉动仪具有捕获气压快速涨落的能力。

为了进一步分析自制气压脉动仪的气压脉动频率响应,图8分别给出日出前后(04:00—06:00)、正午(12:00—14:00)、日落前后(18:00—20:00)和夜晚(20:00—22:00)2 h时间长度的气压脉动方差谱曲线。图8的横轴为自然频率 n (Hz),纵轴为自然频率乘以归一化功率谱密度 $nS_p(n)/\sigma_p^2$,其中 $S_p(n)$ 为Welch平均周期图法^[35]计算的功率谱密度。可以看出,不同时段的气压脉动方差谱曲线基本上都在0.0006~0.5 Hz的频率区间内呈现下降趋势,斜率约为-1(即 $nS_p(n) \propto n^{-1}$),说明气压脉动方差谱满足 n^{-2}

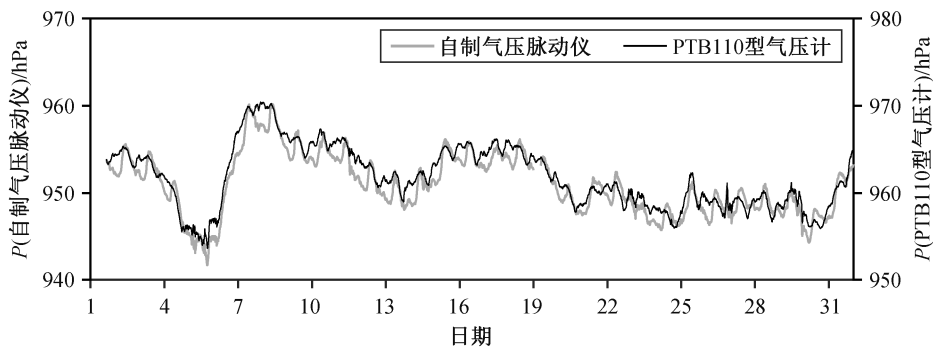


图4 2019年7月奈曼实验站自制气压脉动仪(8 m)与PTB110型气压计(2 m)获取的10 min平均气压时间序列对比
Fig. 4 Comparison of the time series of the 10-min mean pressure obtained by the self-developed fast-response air pressure sensor at 8 m and PTB110 barometer at 2 m at Naiman Station in July, 2019

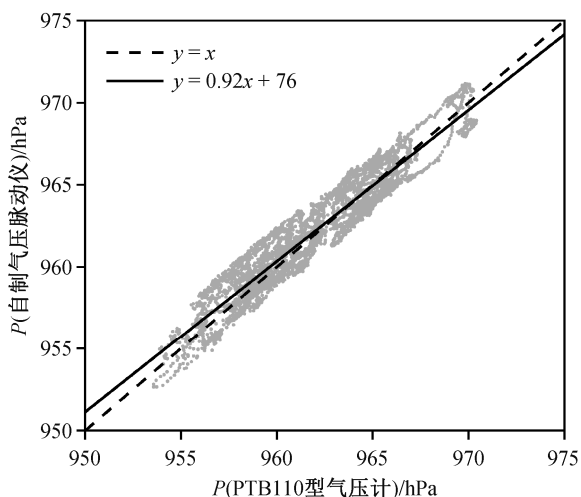


图 5 2019 年 7 月奈曼实验站自制气压脉动仪(8 m)与 PTB110 型气压计(2 m)测量结果散点图

Fig. 5 Scatter diagram of the measurements of the self-developed fast-response air pressure sensor at 8 m and PTB110 barometer at 2 m in Naiman Station in July, 2019

标度率(即 $S_p(n) \propto n^{-2}$), 验证了 Wei 等^[36]的研究结论: 在较为平坦的下垫面, 气压脉动方差谱的 Kolmogorov 标度率为 n^{-2} ; 峰值频率在 0.0006~0.0007 Hz 之间, 低于风速和温度脉动方差谱峰值频率(0.01~1 Hz), 这种现象应该与气压脉动具有更大的尺度有关^[4]。图 8 还显示, 自制气压脉动仪的时间响应频率接近 1 Hz。

综上所述, 自制气压脉动仪可以有效地反映气压快速涨落特征, 测得的气压脉动值可信, 比目前常用的气压测量仪器具有更高的时间响应频率和观测精度。

图 9 为不同大气稳定度下的气压脉动归一化方差谱, 其中谱线在高频附近的上翘为仪器噪声所致。图 9 的横轴为无量纲频率 $f=nz/u$; 纵轴为自然频率乘以归一化功率谱密度 $nS_p(n)/(c\sigma_p^2)$, 其中 c 为不同稳定度下的归一化参数; z/L 为常用的大气稳定度参数之一, 其中 z 为观测高度, L 为奥布霍夫

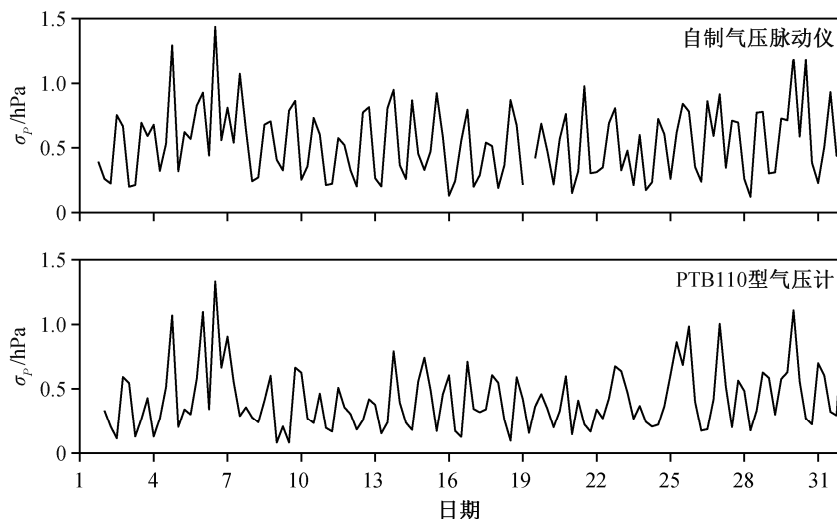


图 6 2019 年 7 月奈曼实验站气压标准差的时间序列

Fig. 6 Comparison of the pressure standard deviations obtained in Naiman Station in July, 2019

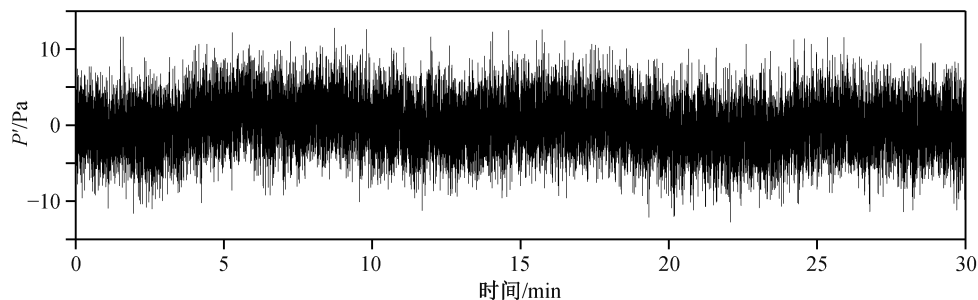
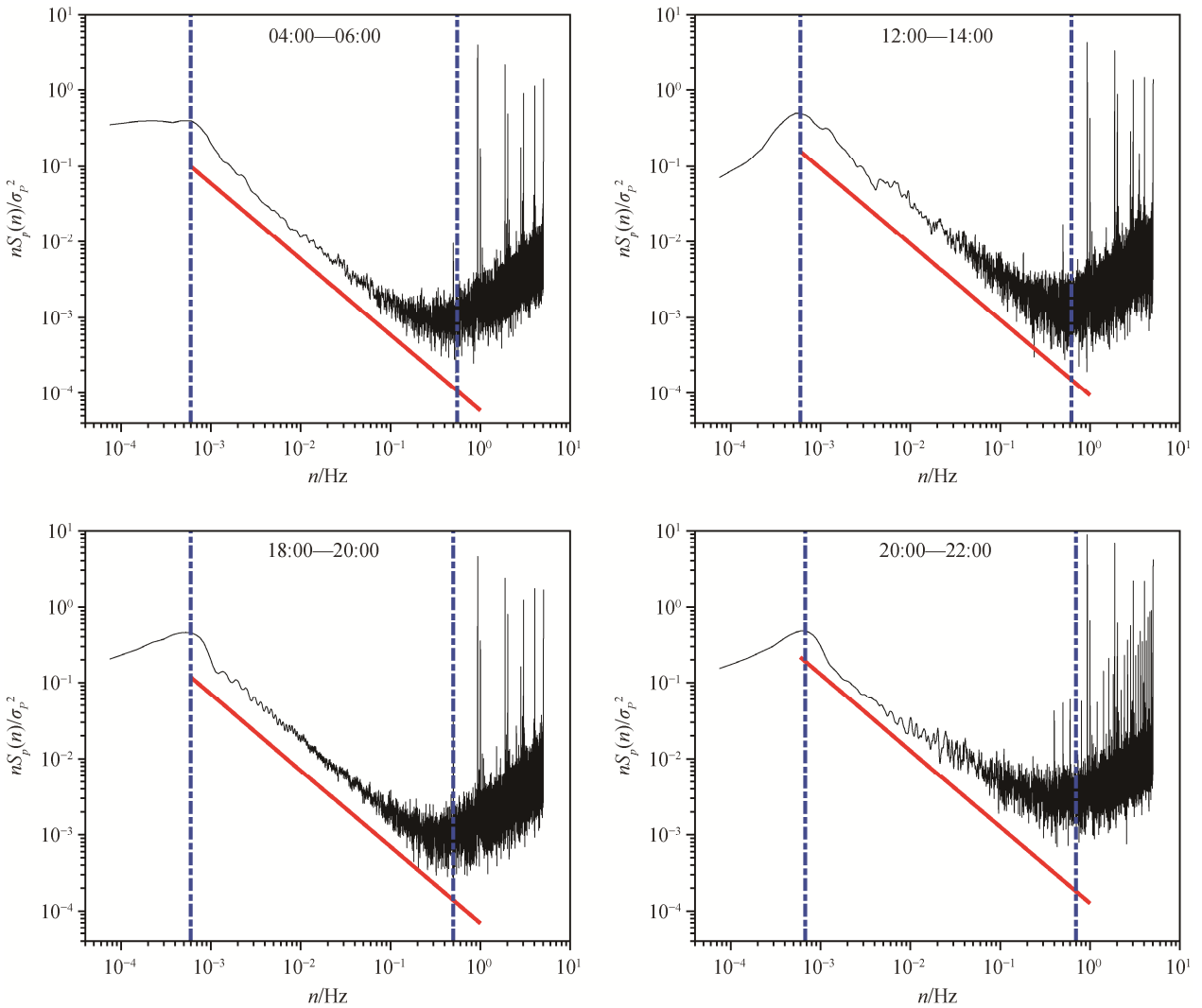


图 7 自制气压脉动仪 30 min 气压脉动时间序列

Fig. 7 Time series of the pressure fluctuations of the self-developed fast-response air pressure sensor during 30 min intervals



红色实线的斜率为-1；左侧蓝色点画线为气压脉动方差谱的峰值频率，右侧蓝色点画线反映气压脉动仪的频率响应性能

图 8 不同时间的气压脉动方差谱

Fig. 8 Variance spectra of the pressure fluctuations during different time periods

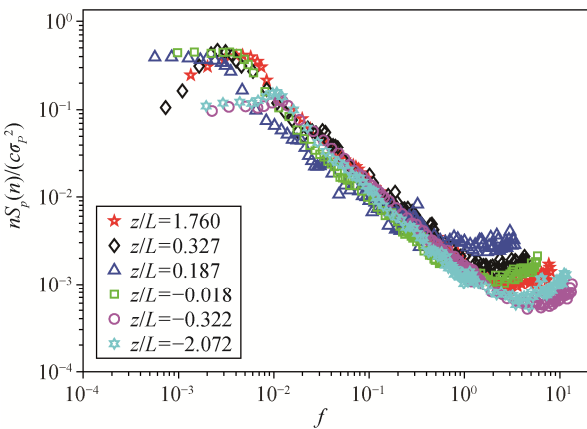


图 9 不同稳定层结条件的气压脉动归一化方差谱

Fig. 9 Normalized variance spectra of the pressure fluctuations under different atmospheric stabilities

(Obukhov)长度。可以看到，不同大气稳定度下的气压脉动归一化方差谱曲线在高频部分($0.02 < f < 1$)合并为一条曲线，而在低频部分($f < 0.02$)根据大气稳定度排列散开，验证了Wei等^[36]的结论：不同的大气稳定层结条件下，气压脉动归一化方差谱的这一现象与三维风速和温度脉动的归一化方差谱^[37]一致。但是，气压脉动归一化方差谱的峰值频率比Kaimal等^[38]计算的风速脉动归一化方差谱低1~2个量级，比温度脉动归一化方差谱约低1个量级，这仍与气压的尺度比风速和温度更大有关^[4]。同时，说明气压脉动对湍流动能的贡献主要在低频部分或较大尺度，而风速和温度脉动对湍流动能的贡献主要在高频部分或较小尺度。

2.3 气压标准差日变化特征

利用 2019 年 7 月奈曼实验站的气压快速涨落数据计算 30 min 平均的气压标准差 σ_p , 同时利用 EC 系统的三维超声风温仪观测的三维风速脉动数据, 计算湍流动能 TKE:

$$TKE = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})。$$

图 10 显示观测期间相应的 σ_p 和 TKE 的平均日变化, 可见气压标准差在夜间较小, 自日出后开始增大, 上午 10:00 左右达到最大值, 然后减小, 正午之后维持一个较大值, 下午 16:00 左右开始剧烈减小, 日落之后维持一个较小值, 一天之内的变化幅度为 0~0.4 hPa。

在大气湍流研究中, 湍流强度与风速标准差相关。虽然气压标准差不能直接反映湍流强度, 但某一时段的气压标准差 σ_p 可以表征该时段气压脉动 P' 的涨落强度, σ_p 越大表示该时段 P' 的涨落强度越大, 间接地说明湍流活动也越强, 反之亦然。图 10 中 σ_p 与 TKE 平均日变化趋势基本上一致, 证实了上述结论。

夜间地表辐射冷却, 通常在近地面形成逆温层, 大气层结稳定, 湍流活动较弱; 白天地表受太阳强

烈加热, 大气边界层中产生对流热泡, 大气层结不稳定, 湍流活动较强。因此, TKE 夜间较小, 日出后开始增大, 13:00 左右达到最大值, 然后逐渐减小 (图 10(b))。 σ_p 白天强、夜晚弱的特点恰好反映气压脉动白天强于夜晚, 这与白天不稳定边界层湍流充分发展, 夜晚稳定边界层湍流活动相对较弱的规律一致。利用自制气压脉动仪获取的气压脉动可以较好地给出气压标准差, 有助于计算与气压脉动相关的湍流统计参量, 研究气压脉动的湍流特征, 为进一步研究气压涨落对大气湍流运动的影响和作用奠定基础。

3 结论

本文利用内蒙古科尔沁地区奈曼大气边界层与大气环境综合实验站观测资料, 给出自制气压脉动仪气压快速涨落测量频率响应等特性, 验证了其观测数据的可靠性; 采用 Welch 平均周期图法, 研究气压脉动方差谱特征以及气压标准差日变化规律, 结论如下。

1) 自制气压脉动仪能够有效地捕捉气压快速涨落信息, 平均气压变化趋势与 PTB110 型气压计一致, 说明其观测数据可靠、可信。

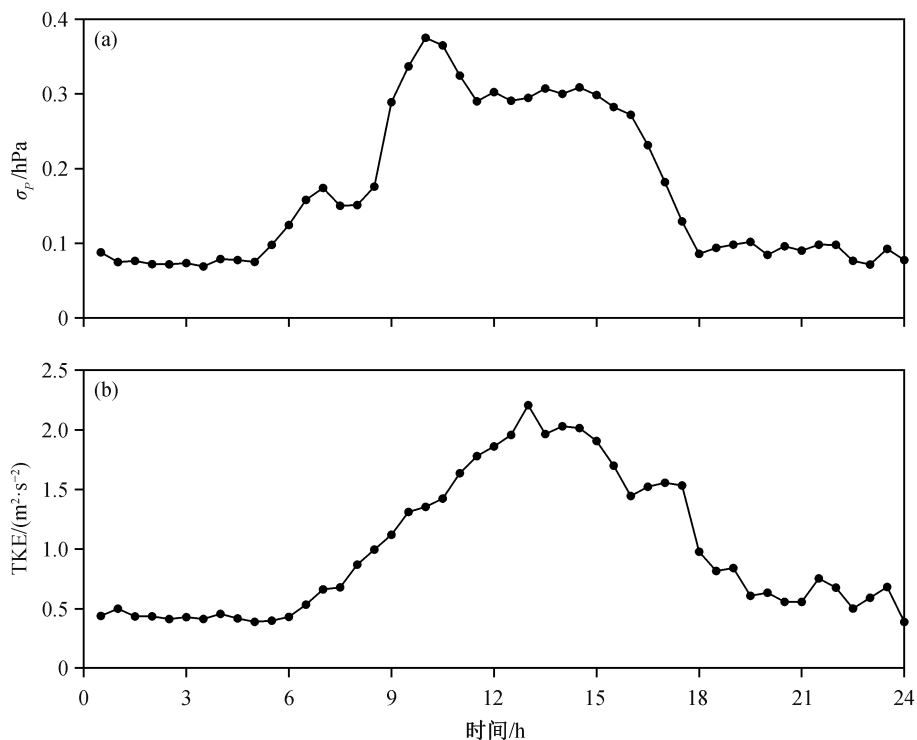


图 10 2019 年 7 月奈曼实验站 σ_p (a) 和 TKE (b) 平均日变化
Fig. 10 Average diurnal variations of σ_p (a) and TKE (b) in Naiman Station in July, 2019

2) 气压脉动方差谱显示, 自制气压脉动仪的响应频率接近 1 Hz, 气压脉动方差谱在 0.0006~0.5 Hz 的频率范围内满足 n^{-2} 标度率; 峰值频率低于风速和温度, 可能与气压的尺度比风速和温度更大有关。不同大气稳定层结条件的气压脉动归一化方差谱曲线在较高频区合并为一条曲线, 在较低频区根据大气稳定度参数排列; 气压脉动主要对较大尺度的湍流动能有贡献, 而风速和温度对湍流动能的贡献体现在较小尺度上。

3) 气压脉动标准差有较明显的日变化规律, 夜间较弱, 日出后逐渐增大, 正午前后达到最大值, 随后逐渐减小; 气压标准差可在一定程度上反映气压脉动的强度, 说明气压脉动强度也存在白天强、夜晚弱的日变化特征, 与白天不稳定边界层湍流充分发展, 夜晚稳定边界层湍流活动较弱的湍流运动特征相符。

致谢 郑舒文女士帮助收集和整理数据, 中国科学院大气物理研究所和天津市气象科学研究所提供实验支持, 在此致以诚挚的谢意。

参考文献

- [1] 姜明波, 魏洪峰, 杜智涛, 等. 气压测量仪器的现状及发展 // 2011 年度气象水文海洋仪器学术交流会. 保山, 2011: 173-179
- [2] Katul G G, Albertson J D, Parlange M B, et al. The "inactive" eddy motion and the large-scale turbulent pressure fluctuations in the dynamic sublayer. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1996, 53(17): 2512-2524
- [3] Hristov T S. Correcting distortions in measurements of atmospheric pressure fluctuations. *Boundary-layer Meteorology*, 2008, 129(3): 497-507
- [4] Cuxart J, Morales G, Terradellas E, et al. Study of coherent structures and estimation of the pressure transport terms for the nocturnal stable boundary layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 2002, 105(2): 305-328
- [5] Maitani T, Seo T. Estimates of velocity-pressure and velocity-pressure gradient interactions in the surface layer over plant canopies. *Boundary-Layer Meteorology*, 1985, 33(1): 51-60
- [6] 王体健, 高太长, 张宏昇, 等. 新中国成立 70 年来的中国大气科学研究: 大气物理与大气环境篇. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49(12): 1833-1874
- [7] Tsuji Y, Fransson J H M, Alfredsson P H, et al. Pressure statistics and their scaling in high-Reynolds-number turbulent boundary layers. *Journal of Fluid Mechanics*, 2007, 585: 1-40
- [8] Wilczak J M, Bedard Jr A J. A new turbulence microbarometer and its evaluation using the budget of horizontal heat flux. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2004, 21(8): 1170-1181
- [9] Dobson F, Hasse L, Davis R. Air-sea interaction: instruments and methods // Air pressure measurement techniques. New York: Plenum Press, 1980: 231-253
- [10] Liberzon D, Shemer L. An inexpensive method for measurements of static pressure fluctuations. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2010, 27(4): 776-784
- [11] Viana S, Yague C, Maqueda G, et al. Study of the surface pressure fluctuations generated by waves and turbulence in the nocturnal boundary layer during SABLES2006 field campaign. *Física de la Tierra*, 2007, 19: 55-71
- [12] Anderson Jr J D. Fundamentals of aerodynamics. New York: Tata McGraw-Hill Education, 2010
- [13] Bedard Jr A J, Meade H B. The design and use of sensitive pressure-jump sensors to detect thunderstorm gust fronts. Part I: Pressure-jump detector design. *Journal of Applied Meteorology*, 1977, 16(10): 1049-1055
- [14] McBean G A, Elliott J A. The vertical transports of kinetic energy by turbulence and pressure in the boundary layer. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1975, 32(4): 753-766
- [15] Monin A S, Yaglom A M. Statistical fluid mechanics. Cambridge, MA: The MIT Press, 1975
- [16] Kolmogorov A N. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 1941, 30(4): 301-305
- [17] George W K, Beuther P D, Arndt R E A. Pressure spectra in turbulent free shear flows. *J Fluid Mech*, 1984, 148: 155-191
- [18] Kimball B A, Lemon E R. Spectra of air pressure fluctuations at the soil surface. *Journal of Geophysical Research*, 1970, 75(33): 6771-6777
- [19] Sigmon J T, Knoerr K R, Shaughnessy E J. Micro-scale pressure fluctuations in a mature deciduous forest. *Boundary-Layer Meteorology*, 1983, 27(4): 345-

358

- [20] Ding M, Nguyen K X, Liu S, et al. Investigation of the pressure-strain-rate correlation and pressure fluctuations in convective and near neutral atmospheric surface layers. *Journal of Fluid Mechanics*, 2018, 854: 88–120
- [21] Elliott J A. Microscale pressure fluctuations measured within the lower atmospheric boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics*, 1972, 53(2): 351–384
- [22] Wilczak J M, Oncley S P, Bedard Jr A J. Turbulent pressure fluctuations in the atmospheric surface layer // Tenth Symposium on Turbulence and Diffusion. Portland, 1992: 167–170
- [23] Wang X, Zhao X, Li Y L, et al. Responses of soil respiration to simulated precipitation and nitrogen, phosphorus additions in Horqin Sandy Land of northeastern China. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2013, 22(5): 1463–1471
- [24] Ju T, Li X, Zhang H, et al. Effects of soil moisture on dust emission from 2011 to 2015 observed over the Horqin Sandy Land area, China. *Aeolian Research*, 2018, 32: 14–23
- [25] Ju T, Li X, Zhang H, et al. Parameterization of dust flux emitted by convective turbulent dust emission (CTDE) over the Horqin Sandy Land area. *Atmospheric Environment*, 2018, 187: 62–69
- [26] 李倩惠, 张宏升, 鞠婷婷, 等. 华北北部半干旱地区夏季大气边界层特征的实验研究. *北京大学学报(自然科学版)*, 2020, 56(2): 215–222
- [27] Li X, Zhang H. Size distribution of dust aerosols observed over the Horqin Sandy Land in Inner Mongolia, China. *Aeolian Research*, 2015, 17: 231–239
- [28] Park S U, Park M S. Aerosol size distributions observed at Naiman in the Asian dust source region of Inner Mongolia. *Atmospheric Environment*, 2014, 82: 17–23
- [29] Zhao H L, Zhou R L, Su Y Z, et al. Shrub facilitation of desert land restoration in the Horqin Sand Land of Inner Mongolia. *Ecological Engineering*, 2007, 31(1): 1–8
- [30] 李晓岚, 张宏升. 内蒙古科尔沁沙地临界起沙阈值的范围确定. *气象学报*, 2016, 74(1): 76–88
- [31] 张鹏, 张宏升, 杜金林, 等. 科尔沁沙地地区地表温度的确定和分析. *北京大学学报(自然科学版)*, 2011, 47(4): 655–663
- [32] Vickers D, Mahrt L. Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1997, 14(3): 512–526
- [33] Wilczak J M, Oncley S P, Stage S A. Sonic anemometer tilt correction algorithms. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, 99(1): 127–150
- [34] Finnigan J J, Clement R, Malhi Y, et al. A re-evaluation of long-term flux measurement techniques part I: averaging and coordinate rotation. *Boundary-Layer Meteorology*, 2003, 107(1): 1–48
- [35] Welch P. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, 1967, 15(2): 70–73
- [36] Wei Z R, Zhang H S, Ren Y, et al. Study on the characteristics of the pressure fluctuations and their contribution to turbulence kinetic energy. *Atmospheric Research*, 2021, 258: 105634
- [37] Panofsky H A, Dutton J A. *Atmospheric turbulence: models and methods for engineering applications*. New York: John Wiley & Sons, 1984
- [38] Kaimal J C, Wyngaard J C J, Izumi Y, et al. Spectral characteristics of surface-layer turbulence. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1972, 98: 563–589