

拉萨光学湍流探空测量与模式分析

韩亚娟^{1,2}, 吴晓庆^{1*}, 罗涛¹, 苏昶东^{1,2}, 青春¹, 吴骥^{1,2}, 杨期科^{1,2}, 张坤^{1,2}

¹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;

²中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230031

摘要 利用自行研制的湍流气象探空仪,对西藏拉萨的温度、风速、风向等常规气象参数廓线和 C_n^2 廓线进行探测。分析了湍流强度和常规气象参数随高度的变化趋势。比较了夜晚和早晨的湍流特征,发现8~15 km处两者均出现强湍流层,且8 km以上早晨的湍流强度大于夜晚的湍流强度。同时基于Hufnagel-Vally 5/7模式,利用探空数据拟合得到符合拉萨湍流特征的拉萨 C_n^2 经验模式。对此经验模式进行统计分析,结果进一步证明拉萨 C_n^2 经验模式能有效估算拉萨的湍流强度。最后,将拉萨与高美谷的探空数据进行对比分析,发现拉萨的风速较小对天文观测有利,但湍流强度较强对天文观测有一定影响。该研究为后续拉萨湍流廓线和天文台选址的研究提供了参考,并为光电工程的应用提供了技术支持。

关键词 大气光学; 光学湍流; 湍流廓线; 探空测量; 拉萨

中图分类号 P412.23

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0601002

Optical Turbulence Measurement over Lhasa Using a Meteorological Radiosonde and Model Analysis

Han Yajuan^{1,2}, Wu Xiaoqing^{1*}, Luo Tao¹, Su Changdong^{1,2}, Qing Chun¹, Wu Su^{1,2},
Yang Qike^{1,2}, Zhang Kun^{1,2}

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

²Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China,
Hefei, Anhui 230031, China

Abstract This paper describes the use of a self-made meteorological radiosonde for turbulence analysis to measure profiles of the turbulence parameter C_n^2 and meteorological parameters such as temperature, wind speed, and wind direction in Lhasa, Tibet. The trends of variation of turbulence intensity and meteorological parameters with height are analyzed. A comparison of the turbulence characteristics in the morning and evening reveals that a strong turbulence layer appears at 8–15 km at both these durations, but the turbulence intensity above 8 km in the morning is greater than that in the evening. Furthermore, based on the Hufnagel-Vally 5/7 model, the C_n^2 Lhasa model is fitted using the statistical average of all radiosonde data. The statistical analysis results show that the C_n^2 Lhasa model can effectively estimate the turbulence intensity above Lhasa. Finally, a comparison of the radiosonde data of Lhasa and Gaomeigu reveals that the wind speed in Lhasa is lower and favorable for astronomical observations, but the turbulence in Lhasa is stronger and reduces the quality of astronomical observations. These results provide a foundation for the study of turbulence profiles, observatory site selection, and support for the application of electro-optical engineering in Lhasa.

Key words atmospheric optics; optical turbulence; turbulent profile; sounding measurement; Lhasa

OCIS codes 010.1330; 010.1290; 060.4510

收稿日期: 2019-11-01; 修回日期: 2019-11-20; 录用日期: 2019-11-29

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA17010104)、国家自然科学基金(91752103,41576185)、中国科学院科技创新重点实验室基金(CXJJ-19S028)

* E-mail: xqw@aiofm.ac.cn

1 引 言

由温度改变引起的折射率的起伏,被称为大气光学湍流现象。表征大气光学湍流强度的参数为大气折射率结构常数(C_n^2),其随高度的分布称为大气光学湍流廓线。大气光学湍流不仅会影响天文望远镜的观测水平,还会干扰激光传输,降低光学遥感成像的质量,影响光通信信号的稳定性等^[1]。获得大气光学湍流廓线,对减弱大气光学湍流对各种仪器设备影响的选取和光学系统性能的改善至关重要。

为了避免光学湍流对天文台选址的影响,全球的天文学家都在寻找适合天文观测的地址。中国西部得天独厚的地理优势和气候优势有利于天文观测,吸引了众多天文学家的关注。目前,对中国西部湍流特性的研究已经在阿里^[2-4]、那区^[5]、昌都^[6]等地区开展,但对拉萨湍流参数的研究仍不够深入。拉萨是西藏的政治、经济、文化和科教中心,位于青藏高原南部(91.13°E, 29.67°N),海拔约 3650 m,属于高原山地气候。该地区日照时间充足,晴夜多,降水少,空气干燥。早在 1989 年,Wang 等^[7]就曾指出拉萨可作为天文观测的候选地址进行进一步观测。王红帅^[8]曾利用 WRF(Weather Research and Forecasting)模型计算中国地区的光学湍流参数,结果表明青藏高原南部的视宁度、大气相干时间和等晕角较好,对天文观测有利。张永婧等^[9]曾根据地面风速、云量、水汽等气象参数,将中国分为 10 个天文候选区,结果表明青藏高原南部天文气候条件较好。

目前用于 C_n^2 廓线测量的设备众多,例如探空气球^[10]、MASS (Multi Aperture Scintillation Sensor)^[11]、SCIDAR (Scintillation Detection and Ranging)^[12]、SNODAR (Surface layer Non-Doppler Acoustic Radar)、Scintillometer^[13]等。其中,湍流气象探空仪作为直接测量湍流的典型手段,

可以获得 C_n^2 廓线和常规气象参数廓线,具有高时空分辨率的特点。然而,到目前为止还没有在拉萨开展过湍流探空实验。因此,有必要对拉萨进行探空测量,获取该地区的大气湍流廓线和相关湍流参数,进一步探究该地区的湍流强度垂直分布特点。

中国科学院合肥物质科学研究院于 2018 年 8 月利用自制的湍流气象探空仪首次对西藏拉萨的常规气象参数(温度、气压、湿度、风速、风向)廓线和 C_n^2 廓线进行测量研究。本研究利用 Hufnagel-Vally 5/7 (简称为 HV 5/7)模式和 AFGL AMOS 模式获得 C_n^2 廓线,并与实测廓线进行对比;分析了常规气象参数、 C_n^2 随高度的分布特征及可能的原因。对比早晨和夜晚湍流特征,利用实测的 C_n^2 廓线以 HV 5/7 模式为基础拟合得到拉萨 C_n^2 经验模式;最后与高美谷的 C_n^2 廓线、温度廓线进行了对比分析。

2 实验概况

2.1 实验介绍

2018 年 8 月 3 日至 8 月 18 日,中国科学院合肥物质科学研究院利用自行研制的湍流气象探空仪在青藏高原南部的西藏拉萨气象局开展了探空实验。该探空仪主要是在 GPS 电子气象探空仪的基础上附带微温脉动仪^[14]。微温脉动仪的统计平均时间为 5 s,频率响应范围是 0.1~30 Hz,温差标准差不大于 0.002 °C,等效 C_n^2 噪声为 $2 \times 10^{-18} \text{ m}^{-2/3}$ 。此次共施放 15 个热力湍流探空气球。每次施放探空气球的时间通常在早上 7:30 和晚上 7:30。探空气球的上升速度约为 5 m/s,垂直分辨率约 30 m。由于信号传输和天气干扰等其他原因,本研究选取了 7 份探空数据,其中 2 份早晨数据,5 份夜晚数据。每次探空结束,即可获得 C_n^2 、风速、气压、温度、相对湿度等参数的廓线分布。具体探空记录如表 1 所示。

表 1 拉萨探空记录

Table 1 Record of balloon soundings in Lhasa used in the paper

Balloon number	Launch date	Launch time (local time)	Termination time (local time)	Termination altitude (above sea level) /m
1 #	2018.08.14	07:38	08:59	31023.3
2 #	2018.08.15	07:24	08:51	30217.7
3 #	2018.08.14	19:40	21:05	30657.1
4 #	2018.08.14	22:52	23:58	28594.2
5 #	2018.08.16	19:19	20:43	31206.4
6 #	2018.08.08	19:16	20:38	26900.7
7 #	2018.08.13	19:23	20:29	23221.1

2.2 C_n^2 测量原理

对于充分发展的湍流,假设其满足 Kolmogorov 局地均匀各向同性的湍流理论,则温度结构常数 C_T^2 与空间两点(距离为 r)的温差满足

$$C_T^2 = \langle [T(x) - T(x+r)]^2 \rangle r^{-2/3}, \quad (1)$$

式中: $l_0 \ll r \ll L_0$; T 为大气温度,单位为 K; $T(x)$ 和 $T(x+r)$ 分别代表空间距离为 r 的两点温度; $\langle \cdot \rangle$ 代表系综平均; L_0 和 l_0 分别为湍流外尺度、内尺度。

在可见光和近红外波段,忽略湿度的影响,温度变化是影响折射率变化的主要因素。因此近似认为折射率结构常数 C_n^2 可以直接由某一高度 h 处的气温 T 、气压 P 和 C_T^2 计算获得^[15-16],即

$$C_n^2(h) = \left[79 \times 10^{-6} \frac{P(h)}{T^2(h)} \right]^2 C_T^2(h), \quad (2)$$

式中: h 的单位为 m; P 的单位为 hPa; C_n^2 的单位为 $m^{-2/3}$ 。其中,温差的变化由温度脉动仪相距为 r 的一对微温探头获得,两者空间距离为 1 m。本实验中,微温探头为铂丝,电阻约 10 Ω ,直径约 20 μm 。通过不同位置处的微温探头,测量空间两点的温差 ΔT ,并将其转换为电阻的变化。再通过由一对微温探头组成的惠斯通电桥,将电阻的变化与电压的变化 ΔV 联系起来,得到 ΔV 与 ΔT 的正比关系,即

$$\Delta V = a \cdot \Delta T, \quad (3)$$

式中: a 为标定系数。因此,由(3)式获得两点处的温差,由(1)式惯性区距离为 r 的两点温差的平方平均得到 C_T^2 ,最后由(2)式得到 C_n^2 。

3 结果和分析

3.1 实测常规气象参数廓线及 C_n^2 廓线分析

利用上述所有探空数据,计算对应高度处的温

度梯度和风速梯度。为了定量描述,本研究每隔 100 m 对温度、气压、相对湿度、风速、风向、温度梯度、风速梯度、 C_T^2 和 C_n^2 进行统计平均,得到对应廓线,如图 1 所示。为了便于描述,本研究中若没有特殊说明,则所有高度均指相对地面高度(above ground level)。由图可知,对流层顶出现在 14 km 左右。近地面层内相对湿度随高度升高,3 km 处达到最大值,约为 80%;随后逐渐降低。风速随高度增大,24 km 左右到达最大值,近似为 26 m/s。风向在近地面到 15 km 范围内波动较大,15 km 以上趋于稳定。在 5 km 左右和对流层 15 km 左右温度梯度均出现剧烈变化,均对应图 1(i)中的强湍流层。风速梯度整体趋势变化不大。 C_T^2 在近地面较大,近地面至 0.9 km 随高度迅速减小,此后随高度逐渐变大。 C_n^2 在近地面最大,近地面至 0.9 km 随高度迅速递减;在对流层顶 14 km 附近存在强湍流层。

3.2 C_n^2 廓线实测值与模式估算值对比分析

国内外学者对不同实验地点进行长期的测量和统计分析,提出了不同的 C_n^2 廓线模式,包括 AFGL AMOS(Air Fore Geophysics Laboratory)模式和 Hufnagel 模式。本研究利用这两种模式,对拉萨的湍流强度进行了研究。

AFGL AMOS 模式是由 Good 等^[17] 和 Beland 等^[18] 基于十多年的探空气球数据获得的 C_n^2 廓线,而提出的 C_n^2 的经验公式。通过计算上述数据的算术平均,并进行多项式分段拟合,最终获得分段表达式。该探空气球施放于 Mt. Haleakala 上的 AMOS 观测站,具有高时空分辨率。AFGL AMOS 白天和夜间模式的具体表达式分别为

$$\lg(C_n^2) = \begin{cases} 0.0482 - 2.3416h - 0.7211h^2, & 3.052 \text{ km} < h \leq 3.54 \text{ km} \\ -17.4778 + 0.0320h + 0.0078h^2 + 1.5066 \exp \left[-0.5 \left(\frac{h - 4.4603}{0.0968} \right)^2 \right], & 3.54 \text{ km} < h \leq 5.1 \text{ km} \\ -16.5589 - 0.1424h + 0.0030h^2 + 1.5694 \exp \left[-0.5 \left(\frac{h - 16.6300}{4.8757} \right)^2 \right], & h > 5.1 \text{ km} \end{cases}, \quad (4)$$

$$\lg(C_n^2) = \begin{cases} -12.412 - 0.4713h - 0.0906h^2, & 3.052 \text{ km} < h \leq 5.2 \text{ km} \\ -17.1273 - 0.0301h - 0.0010h^2 + 0.5061 \exp \left[-0.5 \left(\frac{h - 15.0866}{3.2977} \right)^2 \right], & h > 5.2 \text{ km} \end{cases}, \quad (5)$$

式中: h 为海拔高度,单位 km。

Hufnagel 模式最早是 Hufnagel 和 Stanley^[19] 根据中纬度区域的气球测量和星光闪烁数据获得

的,忽略了 3 km 以下湍流的强度。Urich^[20] 根据 Vally 提出的建议,新增了 3 km 以下的湍流强度,故能对 C_n^2 的整层廓线进行描述,即

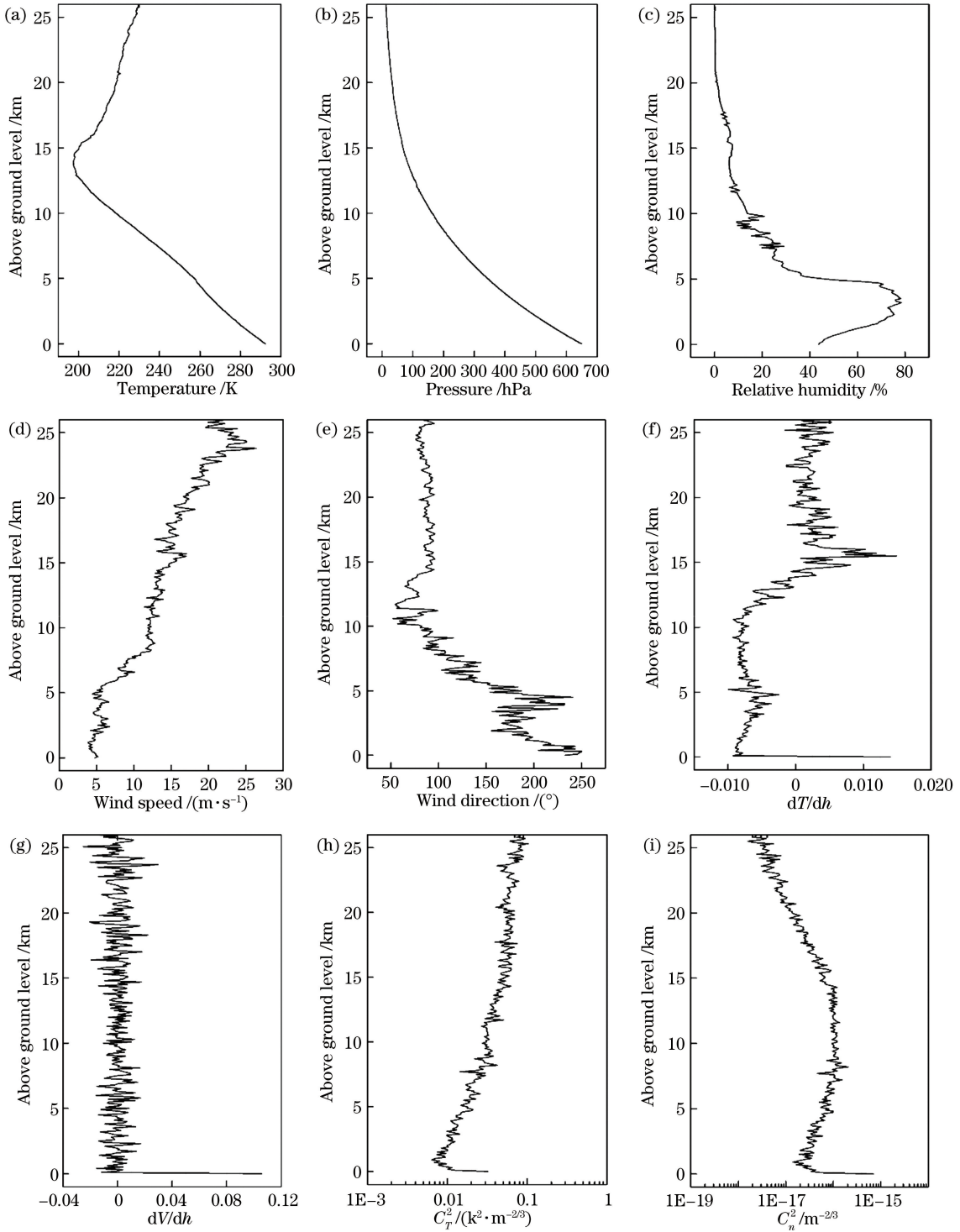


图 1 实测探空数据平均廓线。(a)温度;(b)气压;(c)相对湿度;(d)风速;(e)风向;(f)温度梯度;

(g)风速梯度;(h)温度结构常数;(i)折射率结构常数

Fig. 1 Average profiles of measured data by sounding balloons. (a) Temperature; (b) pressure; (c) relative humidity;

(d) wind speed; (e) wind direction; (f) temperature gradient; (g) wind speed gradient; (h) C_T^2 ; (i) C_n^2

$$C_n^2(h) = 8.2 \times 10^{-16} W^2 (h/10)^{10} \exp(-h) + 2.7 \times 10^{-16} \exp(-h/1.5) + A \exp(-h/0.1), \quad (6)$$

$$W^2 = \frac{1}{15} \int_5^{20} V^2(h) dh, \quad (7)$$

式中: W 代表 5 ~ 20 km 高度处的方均根风速, 单位是 m/s; $V(h)$ 为某一高度处的风速, 单位是 m/s; A 是描述大气近地面光学湍流强度的参量。可调参数 W 和 A 可以通过固定等晕角和相干长度来选取。当等晕角为 $7 \mu\text{rad}$, 相干长度为 5 cm ($\lambda = 0.5 \mu\text{m}$) 时, 对应的 $A = 1.7 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$, $W = 21 \text{ m/s}$, 即为常用的 HV 5/7 模式。

图 2 展示了拉萨早晨和夜晚的平均湍流廓线, 以及对应的 AFGL AMOS 和 HV 5/7 模式估算值。从图中可以看出, 实测 C_n^2 廓线、AFGL AMOS 夜间模式和 HV 5/7 模式估算值有相同的特点: 近地面湍流强度通常最强, C_n^2 在近地面层随高度急剧减小; C_n^2 在平流层随高度逐渐减小; 对流层均包含强湍流层, 但强湍流层的位置有所不同。值得指出的是, AFGL AMOS 白天模式在近地面层出现强湍流薄层, 此时湍流强度最大。

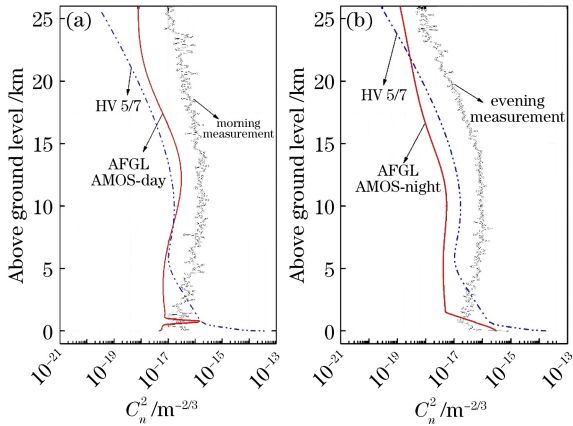


图 2 实测早晨和夜晚 C_n^2 廓线平均值与模式值。

(a) 早晨; (b) 夜晚

Fig. 2 Measured mean C_n^2 profiles in the morning and evening and model value. (a) In the morning; (b) in the evening

3.3 C_n^2 经验模式的建立及统计分析

3.3.1 C_n^2 经验模式的建立

目前用于测量大气光学湍流廓线的方法众多, 但大多数测量方法都需要花费巨大的人力、物力、财力。因此有必要发展大气光学湍流廓线模式来估算大气光学湍流强度。基于 HV 5/7 模式, 对拉萨所有 C_n^2 廓线进行统计平均, 并拟合得到符合该地区湍流强度变化特征的统计平均模式, 在此称为拉萨 C_n^2 经验模式 (C_n^2 Lhasa model), 具体表达式为

$$C_n^2 = 1.85 \times 10^{-19} h^{5.15} \exp(-h/1.82) + 3.55 \times 10^{-17} \exp(-h/7.47) + 6.6 \times 10^{-16} \exp(-h/0.0018). \quad (8)$$

图 3 为早晨、夜晚、早晚平均的 C_n^2 廓线以及拟合得到的 C_n^2 经验模式廓线。由图中可以看出, 早晚的 C_n^2 廓线从近地面到 8 km 处较为一致; 8 ~ 15 km 范围均出现强湍流层, 但 8 km 以上夜晚的湍流强度小于早晨的湍流强度。与早晨相比, 夜晚湍流强度波动较小, 大气较为稳定。拟合得到的拉萨 C_n^2 经验模式, 不管是从整体变化趋势还是从量级上都能基本完成对拉萨实测 C_n^2 廓线的估算, 进而反映该地区湍流强度的变化规律。

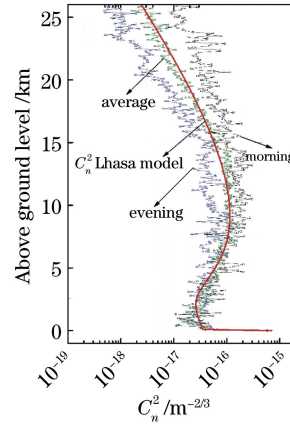


图 3 实测早晨、夜晚和早晚平均 C_n^2 廓线及 C_n^2 经验模式廓线

Fig. 3 C_n^2 profiles measured in the morning/evening, or averaged and estimated using C_n^2 Lhasa model

3.3.2 统计结果

为了定量地描述拉萨 C_n^2 经验模式的估算效果, 本研究使用 4 个统计量, 分别为: 平均相对误差 (MRE)、方均根误差 (RMSE)、平均偏差 (BIAS) 以及相关系数 (R_{xy}) 对 $\lg(C_n^2)$ 进行统计分析。统计量的具体表达式为

$$E_{MR} = \frac{\sum_{i=1}^N \left| \frac{X_i - Y_i}{N} \right|}{\left| \sum_{i=1}^N \frac{X_i}{N} \right|} \times 100\%, \quad (9)$$

$$E_{RMS} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(X_i - Y_i)^2}{N}}, \quad (10)$$

$$E_{BIAS} = \sum_{i=1}^N \frac{X_i - Y_i}{N} = \bar{X} - \bar{Y}, \quad (11)$$

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}}, \quad (12)$$

式中: X_i 和 Y_i 分别代表第 i 个高度上探空气球实测和 C_n^2 经验模式估算的 $\lg(C_n^2)$; N 代表对应的 (X_i ,

Y_i)数据个数; \bar{X} 和 \bar{Y} 分别代表实测值和估算值的平均值。

统计结果如表2所示: C_n^2 经验模式的平均相对误差(E_{MR})在1%以下;方均根误差(E_{RMS})不超过0.20;平均偏差(E_{BIAS})为-0.01;相关系数(R_{xy})为0.97。因此,误差分析证实了拉萨 C_n^2 经验模式的有效性。

表2 拉萨探空测量的 $\lg(C_n^2)$ 的统计分析

Table 2 Statistical analysis for $\lg(C_n^2)$ obtained by balloon soundings

Model	MRE	RMSE	BIAS	R_{xy}
C_n^2 Lhasa model	0.60%	0.13	-0.01	0.97

4 丽江高美谷和西藏拉萨探空数据对比分析

高美谷观测站坐落于云南省丽江市(100.0°E, 26.7°N),海拔约3227 m,具有高原山地和亚热带季风气候。本研究对丽江高美谷与西藏拉萨的探空数据分别进行统计平均,便于对比分析。表3为高美谷探空记录。

图4为拉萨和高美谷温度、风速和 C_n^2 的平均廓线对比。从图4(a)可以看出,拉萨和高美谷对流层顶分别出现在14 km和15 km左右。在距地面2 km左右,高美谷地区出现逆温现象,对应于图4(c)中薄的强湍流层。由图4(c)可知,两者在15 km附近均出现强湍流层。

表3 丽江高美谷探空记录

Table 3 Record of balloon soundings in Gaomeigu used in the paper

Balloon number	Launch date	Launch time (local time)	Termination time (local time)	Termination altitude (above sea level) /m
1#	2013.04.06	11:11	12:36	30148
2#	2013.04.07	01:28	04:44	31421
3#	2013.04.08	01:32	03:16	28714
4#	2013.04.13	23:06	00:55	31678
5#	2013.04.14	05:17	07:14	32467
6#	2013.04.21	01:00	02:52	30473
7#	2013.04.23	21:07	22:54	31383

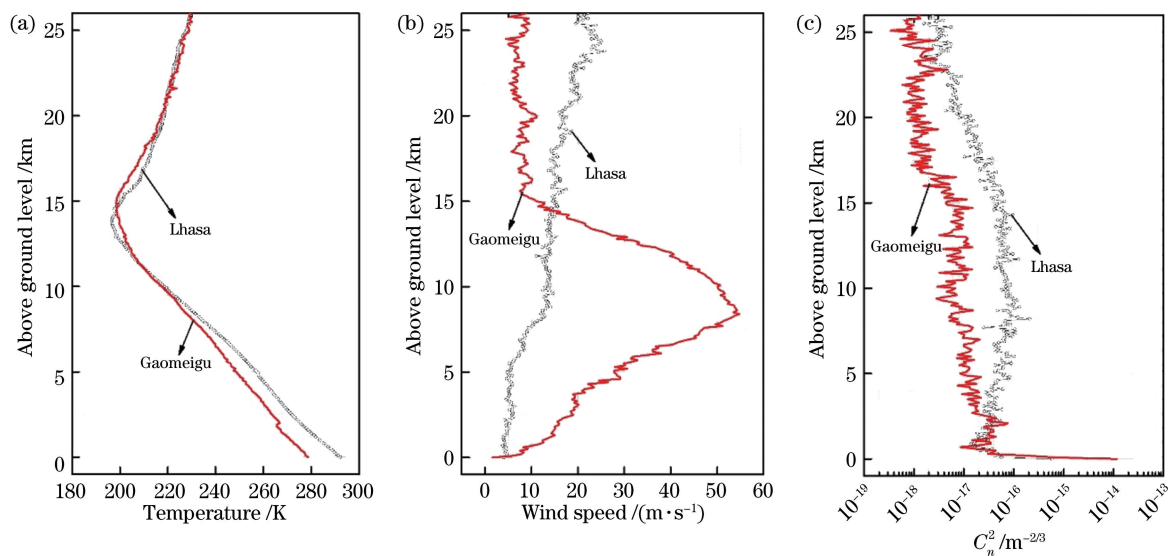


图4 拉萨和高美谷探空实测的平均廓线。(a)温度廓线;(b)风速廓线;(c) C_n^2 廓线

Fig. 4 Average profiles measured by balloon soundings in Gaomeigu and Lhasa. (a) Temperature; (b) wind speed; (c) C_n^2 profile

5 结 论

利用自行研制的湍流气象探空仪,获得了拉萨的 C_n^2 廓线、 C_T^2 廓线和常规气象参数廓线。实验发现,在 $10^{-20} \sim 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ 范围内,该地区大气光学湍流强度在地表附近最强,在近地面层随高度急剧减弱,在对流层顶 14 km 附近出现强湍流层。强湍流层的出现似乎与温度梯度的大小以及对流层顶高度相对应,再次印证了光学湍流的产生与温度梯度有关的结论^[21-22]。在大气稳定的状态下,对流层顶附近会出现较强的湍流层,这可能是冷暖空气相遇、强对流天气发生、重力波等造成的湍流强度变化^[23]。对比早晨和夜晚的湍流廓线发现,高于 8 km 夜晚湍流强度逐渐小于早晨湍流强度,但两者强湍流层均出现在 8~15 km。利用本次实验有限的探空数据,基于 HV 5/7 模式拟合得到拉萨 C_n^2 经验模式,该模式能在一定程度上重现实验结果,但不能有效地反映大气光学湍流复杂的细节特征,存在一定的局限性,需要大量的探空数据结果进行不断地修正。

通过拉萨和高美谷温度、风速、 C_n^2 廓线的对比可以看出,两者风速和 C_n^2 变化趋势有所不同。拉萨无明显的高空急流,高美谷在 9 km 左右存在高空急流。高美谷湍流强度小于拉萨。两地 C_n^2 廓线和风速的差异,这可能是由于地理位置和气候的不同造成的。与高美谷相比,拉萨较小的风速适合于天文观测,但较强的光学湍流却对天文观测不利。这也体现出天文台址的选取是一个长期而复杂的过程,应该综合考虑各方面的因素。

参 考 文 献

- [1] Hutt D L. Modeling and measurements of atmospheric optical turbulence over land[J]. Optical Engineering, 1999, 38(8): 1288-1295.
- [2] Liu L Y, Yao Y Q, Vernin J, et al. Atmospheric turbulence measurements at Ali observatory, Tibet [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8444: 844464.
- [3] Ye Q Z, Su M, Li H, et al. Tibet's Ali: asia's Atacama? [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, 2016, 457(1): L1-L4.
- [4] Qian X, Yao Y Q, Wang H S, et al. The characteristics at the Ali observatory based on radiosonde observations [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2018, 130(994): 125002.
- [5] Li M S, Ma Y M, Ma W Q, et al. Analysis of turbulence characteristics over the northern Tibetan Plateau area [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2006, 23(4): 579-585.
- [6] Bian L G, Xu X D, Lu L H, et al. Analyses of turbulence parameters in the near-surface layer at Qamdo of the Southeastern Tibetan Plateau [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2003, 20(3): 369-378.
- [7] Wang S G, Lan S Z, Jiang S Y, et al. Preliminary investigation on potential astronomical sites in Tibet [J]. Publications of Shanxi Observatory, 1989, 12(1/2): 1-17.
- [8] Wang H S. Modeling research of practice on atmospheric optical turbulence [D]. Beijing: National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, 2012: 69-74.
王红帅. 大气光学湍流模型研究与实践 [D]. 北京: 中国科学院国家天文台, 2012: 69-74.
- [9] Zhang Y J, Wang P X, Yao Y Q, et al. Climate regionalization in China for astronomical observations [J]. Science in China Series G-Physics, Mechanics & Astronomy (in Chinese), 2010, 40(10): 1302-1314.
张永婧, 王盘兴, 姚永强, 等. 中国天文学气象条件的地域分布 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2010, 40(10): 1302-1314.
- [10] Marks R D, Vernin J, Azouit M, et al. Antarctic site testing-microthermal measurements of surface-layer seeing at the South Pole [J]. Astronomy and Astrophysics Supplement Series, 1996, 118(2): 385-390.
- [11] Kornilov V, Tokovinin A, Shatsky N, et al. Combined MASS-DIMM instruments for atmospheric turbulence studies [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2007, 382(3): 1268-1278.
- [12] Avila R, Vernin J, Masciadri E. Whole atmospheric-turbulence profiling with generalized scidar [J]. Applied Optics, 1997, 36(30): 7898-7905.
- [13] Vernin J, Roddier F. Experimental determination of two-dimensional spatiotemporal power spectra of stellar light scintillation evidence for a multilayer structure of the air turbulence in the upper troposphere [J]. Journal of the Optical Society of America, 1973, 63(3): 270-273.
- [14] Cai J, Li X B, Zhan G W, et al. A new model for the profiles of optical turbulence outer scale and C_n^2 on the coast [J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(1): 014206.
蔡俊, 李学彬, 詹国伟, 等. 一个新的海边光学湍流外尺度和 C_n^2 的廓线模式 [J]. 物理学报, 2018, 67(1): 014206.

- [15] Tatarskii V I. The effects of the turbulent atmosphere on wave propagation [M]. Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations, 1971: 66-80.
- [16] Lawrence R S, Ochs G R, Clifford S F. Measurements of atmospheric turbulence relevant to optical propagation[J]. Journal of the Optical Society of America, 1970, 60(6): 826-830.
- [17] Good R E, Beland R R, Murphy E A, et al. Atmospheric models of optical turbulence [J]. Proceedings of SPIE, 1988, 0928: 165-186.
- [18] Beland R R, Brown J H, Good R E, et al. Optical turbulence characterization of AMOS[R]. Air Force Geophysics Lab, 1985: AFGL-TR-88-0153.
- [19] Hufnagel R E, Stanley N R. Modulation transfer function associated with image transmission through turbulent media[J]. Journal of the Optical Society of America, 1964, 54(1): 52-61.
- [20] Ulrich P B. Hufnagel-Valley profiles for specified values of the coherence length and isoplanatic angle [R]. WJ Schafer Associates, 1988: MA-TN-88-013.
- [21] Qing C, Wu X Q, Li X B, et al. Estimation of atmospheric optical turbulence profile by WRF model at Gaomeigu [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(9): 0913001.
青春, 吴晓庆, 李学彬, 等. WRF 模式估算丽江高美古大气光学湍流廓线 [J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0913001.
- [22] Qing C, Wu X Q, Li X B, et al. Research on simulating atmospheric optical turbulence in typical area[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0501001.
青春, 吴晓庆, 李学彬, 等. 典型地区高空大气光学湍流模拟研究 [J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0501001.
- [23] Wu X Q, Qian X M, Huang H H, et al. Measurements of seeing, isoplanatic angle, and coherence time by using balloon-borne microthermal probes at Gaomeigu [J]. Acta Astronomica Sinica, 2014, 55(2): 144-153.
吴晓庆, 钱仙妹, 黄宏华, 等. 丽江高美古视宁度、等晕角及相干时间的探空测量 [J]. 天文学报, 2014, 55(2): 144-153.