DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2025.05.001
CSTR: 32220.14.gk202505001

探空气球尾流对光学湍流测量的影响

王志远[1,2,3]， 吴晓庆[2,3,4*]， 杨期科[2,3,4]， 胡晓丹[2,3,4]， 郭一鸣[2,3,4]

（1 安徽大学物质科学与信息技术研究院，安徽 合肥 230601；
2 中国科学院合肥物质科学研究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；
3 先进激光技术安徽省实验室，安徽 合肥 230037；
4 中国科学技术大学研究生院科学岛分院，安徽 合肥 230026）

摘 要： 使用球载温度脉动仪测量大气光学湍流时，上升气球产生的尾流会对其下方载荷的测量造成影响。为分析该影响，本文采用一个气球悬挂两个探空仪的方式，于2021年11月在湖南省怀化市进行了实验测量。首先采用Barat提出的尾流判断标准对气球下方不同位置进行了尾流评估，对比了气球下方不同位置测量的湍流强度；随后根据测量的折射率结构常数，比较了不同高度区间的相干长度和视宁度，得到气球下方不同位置的测量偏差对比。结果表明：在0～6 km高度处，30 m绳长测量结果受尾流影响明显；在6～15 km高度处，气球尾流因较大的风剪切而对测量影响较小；在15～30 km高度处虽然存在尾流影响，但该高度层大气光学湍流强度较弱，尾流影响对整层大气的光学参数贡献很小。本研究对未来光学湍流的探空测量工作有着重要的参考意义。

关 键 词： 大气光学; 光学湍流; 探空测量; 气球尾流

中 图 分 类 号： P412.23 **文 献 标 识 码：** A **文章编号：** 1673-6141(2025)05-559-012

Influence of sounding balloon wake on optical turbulence measurement

WANG Zhiyuan[1,2,3], *WU Xiaoqing*[2,3,4*], *YANG Qike*[2,3,4], *HU Xiaodan*[2,3,4], *GUO Yiming*[2,3,4]

(1 Institutes of Physical Science and Information Technology, Anhui University, Hefei 230601, China;
2 Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, HFIPS,
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
3 Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei 230037, China;
4 Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: When measuring atmospheric optical turbulence with a balloon-borne micro-thermometer, the wake caued by the rising balloon will affect the measurement of the thermometer below it. In order to analyze this effect, experimental measurements were carried out in Huaihua, Hunan Province, China, in November 2021 using the method of hanging two radiosondes under a balloon. Fistly, the wake evaluation standard proposed by Barat was used to evaluate the effects of the wake at different positions under the

基金项目： 国家自然科学基金 (91752103, 41576185), 中国科学院战略性先导科技专项 (A类) (XDA17010104)
作者简介： 王志远 (1998-)，安徽滁州人，硕士研究生，主要从事大气光学湍流测量方面的研究。E-mail: WangZhiyuan@mail.ustc.edu.cn
导师简介： 吴晓庆 (1963-)，安徽宣城人，博士，研究员，博士生导师，主要从事大气光学湍流测量与模式方面的研究。E-mail: xqwu@aiofm.ac.cn
收稿日期： 2022-07-29；**修改日期：** 2022-10-15
*通信作者。

balloon, and the turbulence intensity measured at different positions under the balloon was compared. Then, according to the measured refractive index structure constant, the coherence length and atmospheric seeing of different height were compared, and the measurement deviation comparison of different positions under the balloon was obtained. The results show that at altitudes of 0–6 km, the measurement result with a 30 m rope is significantly affected by the wake, at altitudes of 6 – 15 km, the balloon wake has little influence on the measurement due to larger wind shear, and at altitudes of 15–30 km, despite the existence of wake effects, they have little contribution to the optical parameters of the entire atmosphere due to the weak optical turbulence intensity in this altitude layer. This study has great reference significance for future sounding measurements of optical turbulence.

Key words: atmospheric optics; optic turbulence; sounding measurement; the balloon wake

0 引 言

当光波在大气中传播时，由大气湍流引起的空气折射率起伏会产生光束漂移、大气闪烁、相位起伏等现象，会严重影响天文观测和激光传输[1]。获得大气光学湍流廓线对各种光学系统的改善至关重要，其测量方法有气球探空测量、光学方法测量、雷达测量等。其中，气球探空测量是最直接的测量方式之一，它除了测量光学湍流廓线，还能测量其他气象参数 (温度、气压、湿度、风速等)，同时具有很高的垂直空间分辨率[2]。探空气球在测量中可使用不同的操作方式，一种是将探空仪悬挂在气球下方，在升空时进行测量，另一种是利用气球将探空仪携带到最高点，在气球爆炸后用降落伞给探空仪减速，在探空仪下降途中进行测量[3]。但对于第二种方式，探空仪在下降过程中，由于降落伞下降的速度会因空气密度的增加而减小，下降速度不可控，因此使用探空气球在上升过程中进行测量依然是主流的测量方式。

探空气球在上升过程中大致为球形，在水平方向随风漂移，在垂直方向上以大约 5 m/s 的速度上升，这不可避免地会在下方产生尾流[4,5]，尾流将会给下方探空仪的测量造成影响。当气球在白天升空时，太阳加热会导致气球球皮温度比周围环境温度更高；而在夜晚升空时，气球体积膨胀会导致气球球皮温度比周围环境温度更低。这使得流经气球球皮产生的尾流会将该温度变化传递给下方的传感器，影响温湿度测量[6]。减少尾流影响的最直接方式是增加探空仪和气球之间的距离，日本的 10 个气象站曾在 1968 年将探空测量使用的连接绳长度从 7 m 增加到 15 m，测得的昼夜温差有所降低，且温差的降低随高度增加越发明显[7,8]。

尾流对气球下方不同位置的影响程度不同，光学湍流测量又对温度非常敏感，因此对于尾流的要求也更为苛刻。Barat 等[9]、Jens 等[10]分别对尾流情况进行过相对理想化的分析与评估，在理论上给出了尾流影响的参考。Jumper 等[3]则在实验上对尾流影响光学湍流测量的问题进行了研究，采用同时 (间隔 1～5 min) 施放两个探空气球的方式，测量并分析了不同绳长测量温度结构常数 C_T^2 和折射率结构常数 C_n^2 的差别，发现使用短绳会遇到更多的尾流，然而其实验难以保证两个探空仪通过相同的大气环境，分不清实际大气环境和尾流造成两探空仪测量值的差异。至今为止，对气球尾流影响光学湍流测量的定量研究仍较为匮乏。

本文对 Jumper 等[3]的实验做了改进，在一个气球下方的不同位置悬挂两个探空仪同时测量光学湍流强度，使得两个探空仪近似通过相同的大气环境。使用 Barat[9] 提出的尾流判断标准对不同位置进行了尾流评估，并根据测量到的 C_n^2 廓线比较了相干长度 r_0 和视宁度 $\varepsilon_{\mathrm{FWHM}}$ 各自的测量差异，分析了气球尾流在不同高度

大气层对测量的影响。相比Jumper等[3]的实验，该方法更好地保证了两个探空仪经过同一路径，将时空不一致的环境影响因素降到了最低。

1　实验方法

1.1　探空仪介绍

实验地点位于湖南省怀化市 (110.00°N，27.57°E)，地面海拔约为250 m。探空实验采用的气球是1600 g规格的探空气球[11]，气球下方的探空仪采用中国科学院合肥物质科学研究院自行研制的湍流气象探空仪。该湍流气象探空仪［图1 (a)］有两路温度脉动测量通道，可同时进行独立测量，因此可根据研究内容进行多种组合测量方式：1) 两个通道分别接一对微温探头和一对固定电阻，可得到一条C_n^2廓线和仪器噪声廓线；2) 两个通道分别接一对微温探头，测量两个不同空间距离上 (如$r_1 = 0.5$ m，$r_2 = 1$ m) 的温度结构常数，得到两条C_n^2廓线；3) 一个通道接双点温度传感器，另一个通道接单点温度传感器，探空仪除得到一条C_n^2廓线外，还发送采样频率为40 Hz的原始数据，通过测量高空单点温度脉动信号进行高空温度谱特性研究[12,13]。本文主要采用第一种测量方式，即在测量C_n^2廓线的同时监测仪器测量的噪声情况。温度脉动仪采用放置于1 m长细杆两端的两个传感器测量空间相距1 m的两点的温度差。温度脉动仪的温度脉动统计平均为5 s，频率响应范围为0.1～30 Hz，传感器测量的最小温度标准差不大于0.002 ℃，等效噪声为2×10^{-18} $m^{-2/3}$。工作时，两个温度脉动仪的测量数据随经纬度、高度及其他常规气象参数一起分别由403 MHz和405 MHz载波发送并由地面两台接收机接收。探空仪和气球之间设置了30、60、90 m三个不同距离进行对比，图1 (b) 为其中某一次的探测照片。图2为探空仪两通道同时探测C_n^2和系统噪声等效C_n^2的一次实例结果。

图 1　实验设备。(a) 探空仪; (b) 分别在距气球60 m和90 m位置悬挂两个探空仪的气球

Fig. 1　Experimental equipment. (a) The radiosonde; (b) the balloon carrying two radiosondes at 60 m and 90 m from the balloon

探空实验测得四组与绳长实验相关的有效数据，包含早上和晚上的实验数据，具体记录如表1所示。

1.2　光学湍流参数测量

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条件，则温度结构常数C_T^2与空间中距离为r的两点间的温差满足

$$C_T^2 = \frac{\left\langle \left[T(\boldsymbol{x}) - T(\boldsymbol{x}+\boldsymbol{r}) \right]^2 \right\rangle}{r^{2/3}}, \tag{1}$$

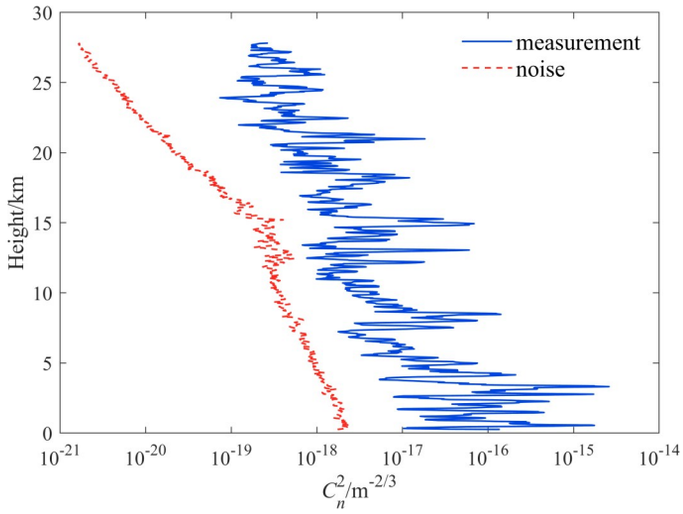


图 2 探空仪两通道同时探测折射率结构常数C_n^2和噪声的一次实例结果

Fig. 2 A case study of simultaneous detection of refractive index structure parameter C_n^2 and noise

表 1 怀化市探空实验记录

Table 1 Record of balloon soundings in Huaihua City

Experiment number	Date	Launch time	Termination time	Termination altitude/km	Weather	Length of ropes/m
1	2021-11-18	07:58	09:52	33.90	Cloudy	30–60
2	2021-11-18	19:25	21:23	34.86	Sunny	60–90
3	2021-11-19	07:28	09:12	35.93	Cloudy	60–90
4	2021-11-19	18:34	20:40	33.79	Overcast	60–90

式中$l_0 < r < L_0$，l_0和L_0分别为惯性区的内尺度和外尺度；T为大气温度，单位为K；$\boldsymbol{x}$和$\boldsymbol{x}+\boldsymbol{r}$表示空间中两点的位置矢量，$r$为矢量$\boldsymbol{r}$的大小；〈…〉为系综平均。

在可见光和近红外波段，折射率对于湿度不敏感，受其影响可忽略不计，所以折射率n可近似表示为

$$n-1=\frac{79\times10^{-6}P}{T}, \tag{2}$$

式中P为压强，单位为hPa。由式 (1) 和式 (2) 可以得到折射率结构常数C_n^2与温度结构常数C_T^2的关系[14,15]

$$C_n^2=\left(79\times10^{-6}\frac{P}{T^2}\right)^2 C_T^2, \tag{3}$$

式中C_n^2被用于表征大气光学湍流的强度。可以通过测量温度结构常数来计算折射率结构常数，从而获得大气光学湍流强度。

空间中两点的温差变化可以由温度脉动仪上一对相距为r的微温探头获得。本实验选取的微温探头为18 Ω的铂丝，两端空间间隔选择为1 m。通过信号转换，将探头间的温差变化ΔT转变为电压变化ΔV

$$\Delta V=\alpha\Delta T, \tag{4}$$

式中α为标定系数。因此，可以根据式 (4) 测量到空间中距离为r的两点温差，再由式 (1) 计算两点温差的

系综平均得到C_T^2，最后由式 (3) 得到C_n^2。根据测得的C_n^2廓线，可计算得到与光学湍流相关的天文参数相干长度r_0和视宁度$\varepsilon_{\mathrm{FWHM}}$[16−18]，用于衡量整层大气的光学性质，计算公式为

$$r_0=\left[0.423\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2\int_0^{\infty}C_n^2(h)\,\mathrm{d}h\right]^{-3/5}, \tag{5}$$

$$\varepsilon_{\mathrm{FWHM}}=0.98\frac{\lambda}{r_0}=5.25\lambda^{-1/5}\left[\int_0^{\infty}C_n^2(h)\,\mathrm{d}h\right]^{3/5}, \tag{6}$$

式中λ为光波波长，取500 nm；h为距离地面高度。

1.3　Barat遭遇尾流的判断标准

在气球上升过程中，气球尾流因为风的水平切变会产生一定的倾斜，而载荷体积小，整体密度相对较高，可近似认为载荷处于气球正下方，如图3所示。

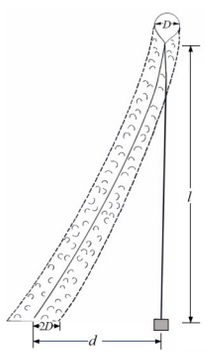


图 3　气球尾流

Fig. 3　The balloon wake

当风剪切值为S，载荷距离气球为l，气球上升速率为w时，那么载荷水平位置上的尾流与载荷的距离为水平风速在上升过程中的积分d[9]，即

$$d=\int_0^{t=l/w}(l-wt)\,S\mathrm{d}t=\frac{Sl^2}{2w}, \tag{7}$$

式中的风剪切值S可由经纬方向的风速u和v获得[19]，计算公式为

$$S=\left[\left(\frac{\partial u}{\partial h}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{\partial h}\right)^2\right]^{1/2}. \tag{8}$$

Barat等[9]在1984年给出一个判断尾流影响的标准：当$d>2D$ (D为气球直径) 时，尾流的影响就很小了。将$d=2D$带入式 (7)，可以得到粗略无尾流情况时的最小风剪切值S_{min}[3]

$$S_{\mathrm{min}}=\frac{4wD}{l^2}. \tag{9}$$

如果实际风剪切值大于S_{min}，则尾流距离气球较远，尾流影响可以忽略。由于气球在上升过程中的直径D不断增加，因此要计算气球直径随高度的变化。

气球上升的速度是缓慢变化的，可近似认为气球匀速上升。在垂直方向上受力平衡方程为[20]

$$\rho V g = \frac{1}{2} C_d A \rho w^2 + \left(m_{\text{payload}} + m_{\text{balloon}} + m_{\text{H}} \right) g , \tag{10}$$

$$\rho = \frac{PM}{RT} , \tag{11}$$

式中等式左边为气球浮力，等式右边第一项为气球所受空气阻力，第二项为系统质量之和，ρ、P、T分别为大气密度、压强和温度，V、A分别为气球的体积和迎风面积，C_d为气球在空气中的阻力系数 (取0.45)[21,22]，w为上升速率，m_{payload}、m_{balloon}、m_{H}分别为载荷质量 (包括探空仪和连接绳)、气球质量、氢气质量，M为空气平均摩尔质量 (近似值为28.9)[23]，R为理想气体常数。

假设气球在升空过程中保持为理想球体，其体积V与迎风面积A分别为

$$V = \frac{4\pi}{3} \left(\frac{D}{2} \right)^3 , \tag{12}$$

$$A = 4\pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 . \tag{13}$$

由式 (10)—(13)，根据探空仪测量得到的温度、压强和上升速度可求得气球直径变化D，再由式 (9) 可以计算得到在气球升空过程中探空仪不受气球尾流影响所需的最小风剪切值。若实际风剪切值大于这个最小剪切值，则气球尾流的影响较小，可以忽略；若小于这个最小风剪切值，则气球尾流对测量有影响。

2 分析与讨论

2.1 遭遇尾流的可能性评估

图4是一次探空实例，气球施放时间为2021年11月18日上午07:58，探空过程中的气象参数与气球直径随高度变化如图4所示。由图可以看到，在地面直径只有2 m的气球，在30 km以上的高空，其直径可以达到8 m。因此，气球尾流的影响理应随着高度的增加而逐渐增大。依据式 (9)，将气球的直径变化代入到Barat提出的最小风剪切标准中，即可得到三种不同绳长避免尾流所需的最小风剪切值。由式 (8)，可以利用探空仪实测的经纬向风速计算得到相应的实际风剪切值。

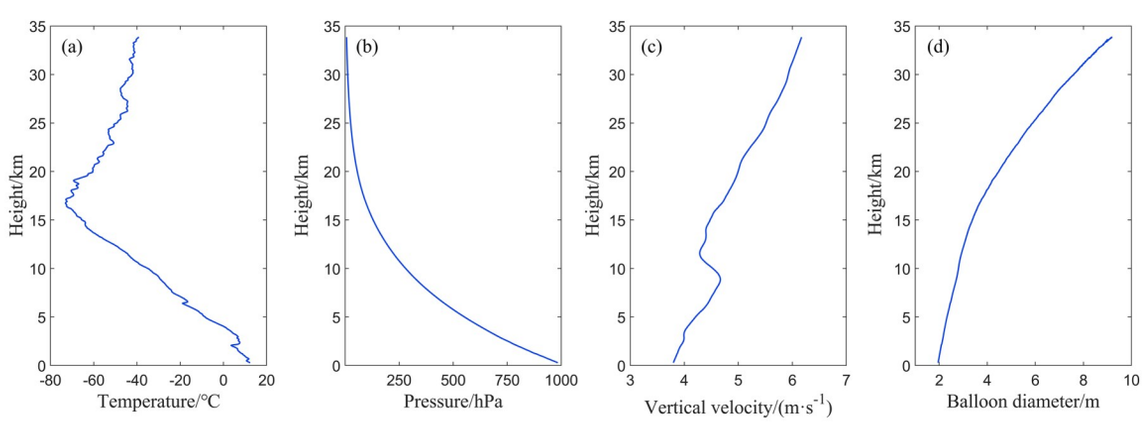


图 4 2021年11月18日上午07:58施放的探空气球在探空过程中的气象参数和气球状态。
(a) 温度; (b) 气压; (c) 气球垂直速度; (d) 气球直径

Fig. 4 Meteorological parameters and balloon status during the sounding process of the sounding balloon launched at 07:58 am on November 18, 2021. (a) Temperature; (b) pressure; (c) balloon vertical velocity; (d) balloon diameter

图5为四次实验中气球的实际风剪切测量值与避开尾流所需的最小风剪切值对比。通过风剪切值的对比可以发现，气球尾流在不同高度有不同的影响情况：在0～6 km处，气球体积小，30 m绳长会受到尾流影响，60 m 和90 m绳长不受尾流影响；在6～15 km处，风剪切值明显变大，30 m绳长受到尾流影响小，60 m和90 m绳长不受尾流影响；在15～30 km处，气球体积增大，探空仪避开尾流所需的最小风剪切值也变大，30 m绳长受尾流影响明显，60 m绳长可能受到尾流影响，90 m绳长不受尾流影响。

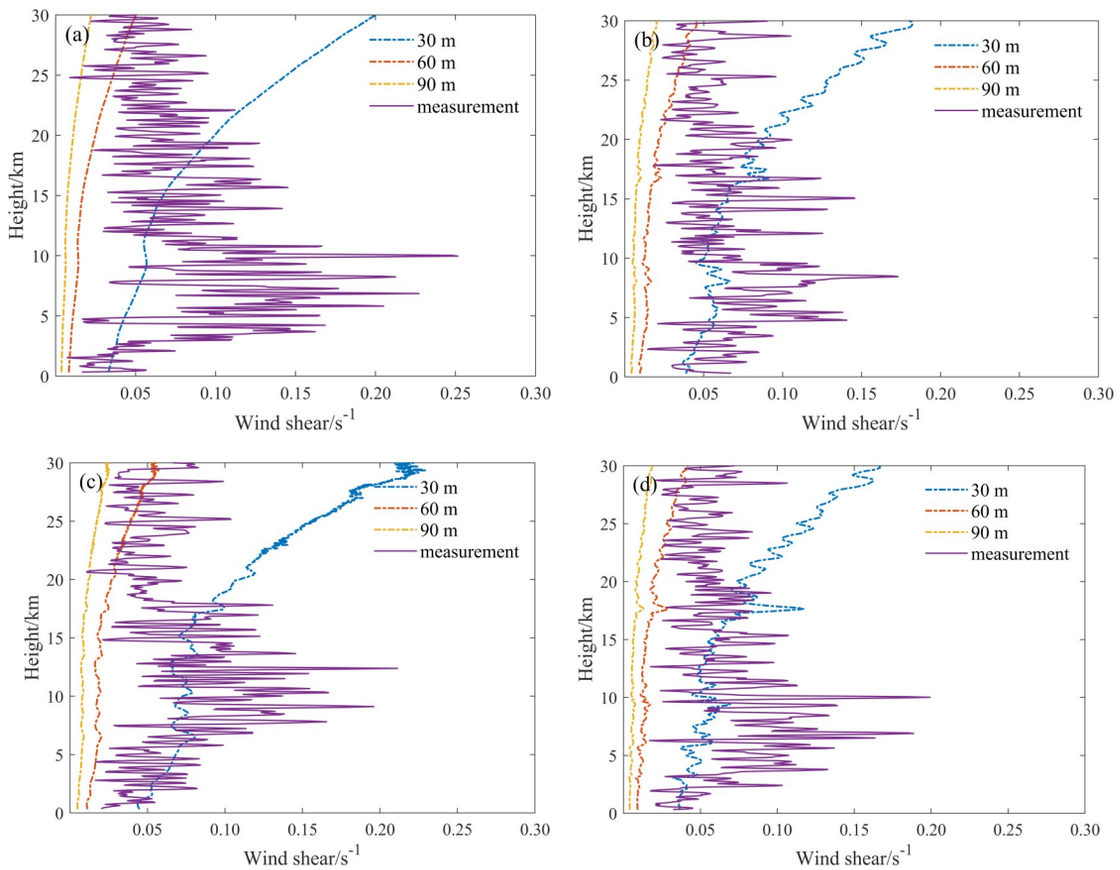


图 5　实际风剪切测量值与30、60、90 m绳长避开尾流所需的最小风剪切值。(a) 2021年11月18日上午; (b) 2021年11月18日晚上; (c) 2021年11月19日上午; (d) 2021年11月19日晚上

Fig. 5　The measured wind shear and the minimum wind shear required to avoid wake for rope lengths of 30, 60, 90 m. (a) Morning of November 18, 2021; (b) evening of November 18, 2021; (c) morning of November 19, 2021; (d) evening of November 19, 2021

2.2　不同高度尾流影响的定量评估

在表1的相关条件下测得的几次C_n^2廓线如图6所示。

将以上各廓线按照风剪切的尾流分析分为三个高度区间进行C_n^2的频数统计，查看气球下方不同位置的C_n^2分布随高度的变化情况。在各高度区间内，每100 m取一个C_n^2均值，C_n^2频数统计如图7所示。由图可知，在不同绳长测量的C_n^2频数对比中，30 m绳长在三个高度区间均比60 m绳长测到更强的湍流，60 m绳长和90 m绳长在C_n^2的测量上并没有显现出明显差异。尾流情况在不同高度区间有所不同，不同高度区间内的整体C_n^2强度也不相同，因此可以分段计算各高度区间内不同绳长测得的相干长度r_0和视宁度$\varepsilon_{\mathrm{FWHM}}$，并计算各自的相对偏差$E_{\mathrm{MR}}$，分段查看尾流影响光学参数结果的程度。

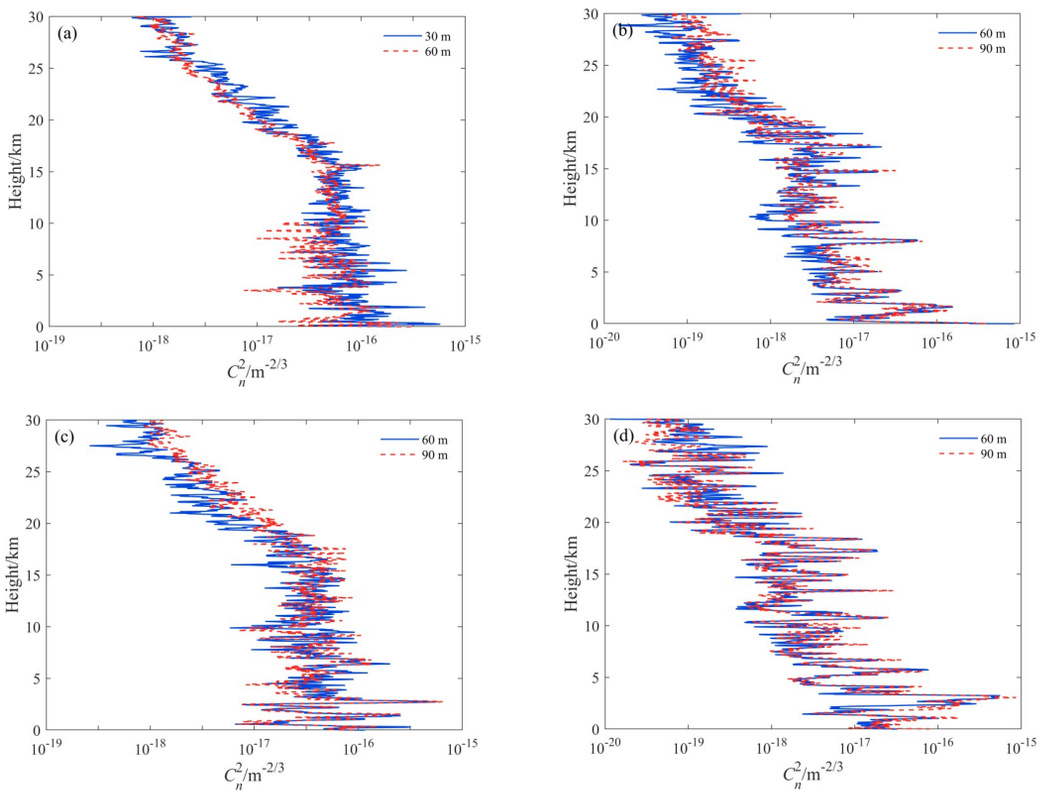
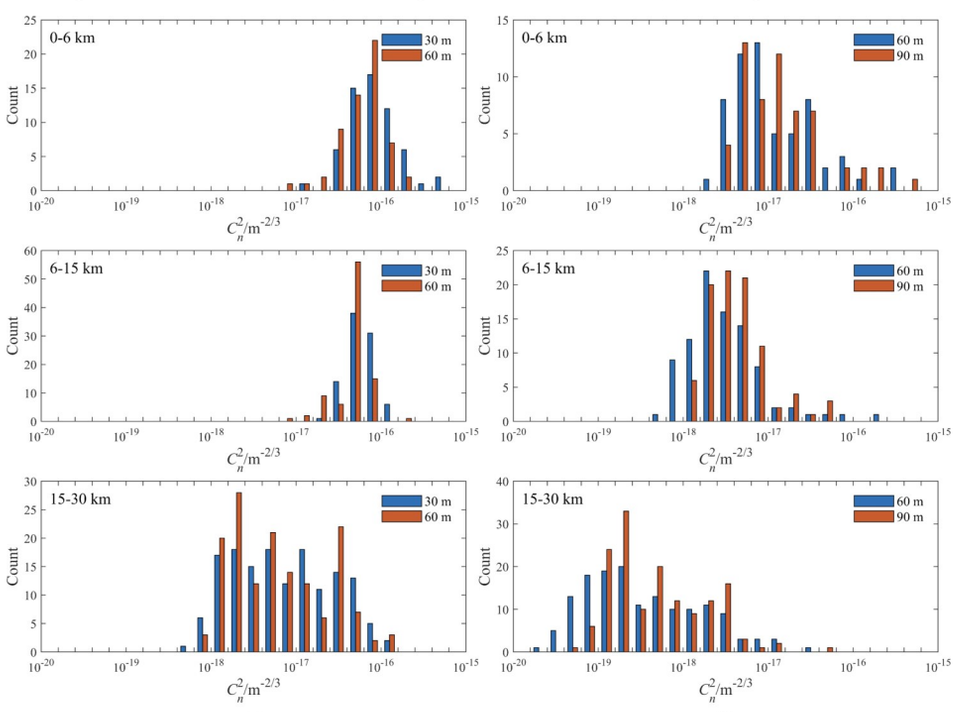


图 6 不同绳长配置下两个探空仪测量获得的C_n^2廓线。(a) 2021 年 11 月 18 日上午; (b) 2021 年 11 月 18 日晚上; (c) 2021 年 11 月 19 日上午; (d) 2021 年 11 月 19 日晚上

Fig. 6 C_n^2 profiles measured by the two radiosondes with different rope length configurations. (a) Morning of November 18, 2021; (b) evening of November 18, 2021; (c) morning of November 19, 2021; (d) evening of November 19, 2021



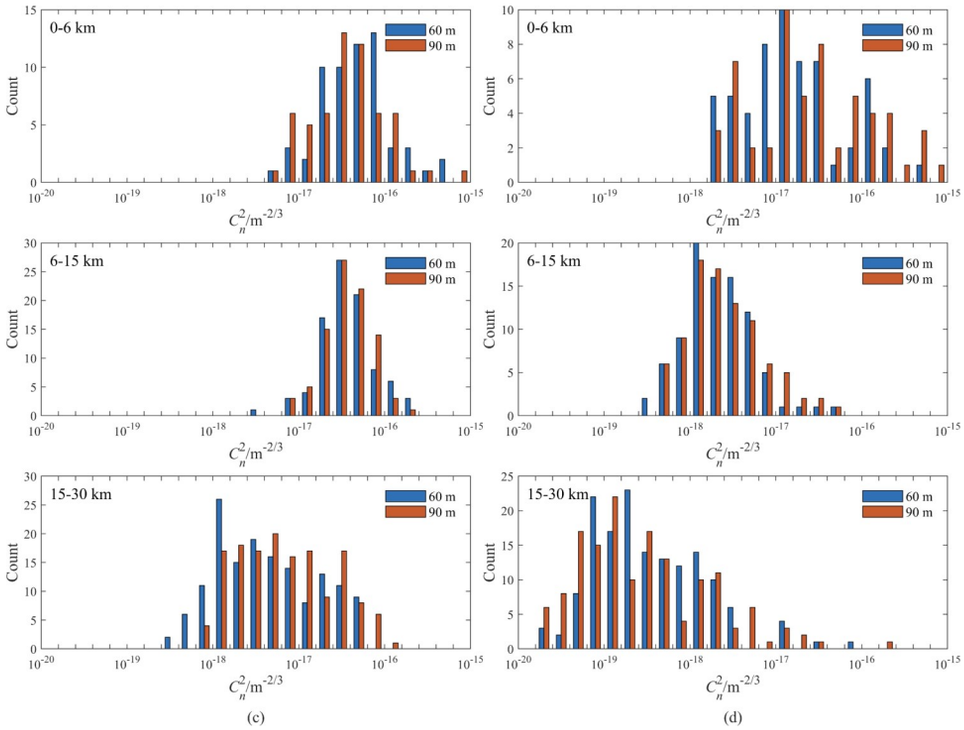


图 7　2021 年四次实验中各高度区间不同绳长配置的两个探空仪测量得到的 C_n^2 频数统计。

(a) 11 月 18 日上午; (b) 11 月 18 日晚上; (c) 11 月 19 日上午; (d) 11 月 19 日晚上

Fig. 7　Statistics of C_n^2 count at different altitude intervals from the two radiosondes with different rope lengths in four experiments conducted in 2021. (a) Morning, November 18; (b) evening, November 18; (c) morning, November 19; (d) evening, November 19

表 2－4 分别给出了在 0～6 km、6～15 km、15～30 km 高度区间内不同绳长配置下的光学湍流测量值。由表可以发现，在 0～6 km 范围内，30 m 绳长明显比 60 m 绳长测得更多的湍流，这主要是由于尾流造成的；在 6～15 km 范围内，实际风剪切值变大，尾流影响程度减小，30、60、90 m 绳长之间的光学湍流测量偏差都在 10% 左右，这对于变化范围有数个量级的 C_n^2 来说是一个较小的偏差，这一偏差主要是由湍流起伏造成的分层现象引起的；在 15～30 km 范围内，气球体积变大、实际风剪切值变小，导致尾流影响变大了一些，但这一高度区间内的大气湍流强度较弱，对于整层大气的光学参数贡献较小。

表 2　0～6 km 高度区间不同绳长配置下探空仪获得的光学湍流参数

Table 2　Optical turbulence parameters obtained by radiosondes with different rope lengths in the 0–6 km altitude interval

Experiment number	Launch time	Length of rope/m	r_0/cm	E_{MR} of r_0/%	ε_{FWHM}/(″)	E_{MR} of ε_{FWHM}/%
1	2021-11-18 07:58	30	7.96	63	1.27	−39
		60	12.95		0.78	
2	2021-11-18 19:25	60	20.61	−9	0.49	10
		90	18.68		0.54	
3	2021-11-19 07:28	60	10.74	8	0.94	−8
		90	11.64		0.87	
4	2021-11-19 18:34	60	12.59	−11	0.80	13
		90	11.18		0.90	

表3 6～15 km高度区间不同绳长配置下探空仪获得的光学湍流参数

Table 3 Optical turbulence parameters obtained by radiosondes with different rope lengths in the 6–15 km altitude interval

Experiment number	Launch time	Length of rope/m	r_0/cm	E_{MR} of r_0/%	ε_{FWHM}/(″)	E_{MR} of ε_{FWHM}/%
1	2021-11-18 07:58	30	10.01	18	1.01	−15
		60	11.84		0.85	
2	2021-11-18 19:25	60	39.12	−9	0.26	10
		90	35.57		0.28	
3	2021-11-19 07:28	60	10.94	6	0.92	−5
		90	11.56		0.87	
4	2021-11-19 18:34	60	49.93	−9	0.20	10
		90	45.24		0.22	

表4 15～30 km高度区间不同绳长配置下探空仪获得的光学湍流参数

Table 4 Optical turbulence parameters obtained by radiosondes with different rope lengths in the 15–30 km altitude interval

Experiment number	Launch time	Length of rope/m	r_0/cm	E_{MR} of r_0/%	ε_{FWHM}/(″)	E_{MR} of ε_{FWHM}/%
1	2021-11-18 07:58	30	17.47	14	0.58	−13
		60	20.00		0.51	
2	2021-11-18 19:25	60	68.80	14	0.15	−12
		90	78.24		0.13	
3	2021-11-19 07:28	60	22.23	−21	0.45	26
		90	17.60		0.57	
4	2021-11-19 18:34	60	74.94	−1	0.13	1
		90	74.02		0.14	

2.3 整层积分量的比对

由测量到的完整C_n^2廓线计算积分相干长度r_0和视宁度ε_{FWHM}，可用于衡量整层大气的光学性质。不同绳长的测量结果及相对偏差如表5所示。由表可以看到，使用30 m和60 m绳长测量得到的光学参数有较大偏差，相干长度和视宁度的相对偏差超过20%。而60 m和90 m绳长测得的光学参数均相差较小，三次实验测得的相干长度和视宁度的相对偏差在2%～12%之间。因此，在使用1600 g及更小规格的气球进行整层大气的光学湍流测量时，气球尾流对于气球下方距离大于60 m的仪器影响较小。

表5 不同绳长测量得到的积分光学湍流参数对比

Table 5 Integral optical turbulence parameters obtained from measurements with different rope lengths

Experiment number	Launch time	Length of rope/m	r_0/cm	E_{MR} of r_0/%	ε_{FWHM}/(″)	E_{MR} of ε_{FWHM}/%
1	2021-11-18 07:58	30	5.32	36	1.90	−26
		60	7.22		1.40	
2	2021-11-18 19:25	60	16.30	8	0.62	8
		90	15.05		0.67	
3	2021-11-19 07:28	60	6.57	2	1.54	2
		90	6.69		1.51	
4	2021-11-19 18:34	60	11.56	11	0.87	12
		90	10.32		0.98	

3　结　论

在使用探空气球测量光学湍流时，气球尾流是一个影响测量准确性的重要因素。在实验中，我们利用一个探空气球悬挂两个探空仪的方式同时进行C_n^2廓线的测量，来探究下方不同位置的尾流对光学湍流测量的影响。结果显示，对于此次使用的1600 g探空气球来说，在0～6 km处，气球尾流对气球下方30 m处探空仪影响较大；在6～15 km处，风剪切值较大，气球尾流的影响会因为风剪切值变大而减小；在15 km以上，气球体积的变大使得尾流更容易产生，但这一区间光学湍流强度弱，对于整层大气的测量影响较小。在使用1600 g及更小规格的气球进行光学湍流观测时，使用60 m及以上长度的连接绳测量的结果都是可以接受的。

事实上，气球尾流对于光学湍流测量的影响并不是简单的问题。比如，探空气球有多种规格，其升空后膨胀的体积不尽相同，产生的尾流影响距离也不同，并且，施放探空气球的不同人员可能有不同的研究目的，对于测量精度也会有不同要求。因此，对于气球尾流对湍流测量的影响还需要进一步的研究。本次实验获取的数据较少，后期将开展更多实验，以期在气球尾流对光学湍流测量影响的问题上获得更精确的定量描述。

参考文献:

[1] 饶瑞中. 现代大气光学 [M]. 北京: 科学出版社, 2012: 415-475.

[2] Wu X Q. Atmospheric optical turbulence, model and measurement techniques [J]. *Journal of Anhui Normal University (Natural Science)*, 2006: 29(2): 103-107.
吴晓庆. 大气光学湍流、模式与测量技术 [J]. 安徽师范大学学报 (自然科学版), 2006. 29(2): 103-107.

[3] Jumper G, Tracy P, Murphy E. Simultaneous balloon launches to investigate wake effects on thermosonde results [C]. *34th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference*. June 23-26, 2003, Orlando, Florida, USA. AIAA, 2003: 3605.

[4] Taneda S. Visual observations of the flow past a sphere at Reynolds numbers between 10^4 and 10^6 [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1978, 85(1): 187-192.

[5] Kräuchi A, Philipona R, Romanens G, *et al*. Controlled weather balloon ascents and descents for atmospheric research and climate monitoring [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, 9(3): 929-938.

[6] Tiefenau H K E, Gebbeken A. Influence of meteorological balloons on temperature measurements with radiosondes: Nighttime cooling and daylight heating [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1989, 6(1): 36-42.

[7] Gaffen D J. Temporal inhomogeneities in radiosonde temperature records [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1994, 99(D2): 3667-3676.

[8] Suzuki S, Asahi M. Influence of solar radiation on temperature measurement before and after the change of the length of suspension used for the Japanese radiosonde observation [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1978, 56(1): 61-64.

[9] Barat J, Cot C, Sidi C. On the measurement of the turbulence dissipation rate from rising balloons [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1984, 1(3): 270-275.

[10] Jens S, Gerding M, Schneider A, *et al*. Evaluation of wake influence on high-resolution balloon-sonde measurements [J].

Atmospheric Measurement Techniques, 2019, 12(8): 4191-4210.

[11] China Meteorological Bureau of the People's Republic of China. 1600 g meteorological balloon: QX/T 44-2006 [S]. Beijing: China Quality and Standards Publishing, 2006.
中国气象局. 1600克气象气球: QX/T 44-2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.

[12] 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): 137-151.
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): 137-151.

[13] 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.

[14] Tatarskii V I. *The Effects of the Turbulent Atmosphere on Wave Propagation* [M]. Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations, 1971: 66-80.

[15] 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.

[16] Han Y J, Wu X Q, Luo T, *et al*. New C_n^2 statistical model based on first radiosonde turbulence observation over Lhasa [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2020, 37(6): 995-1001.

[17] Fried D L. Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium for very long and very short exposures [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1966, 56(10): 1372-1379.

[18] Roddier F. The effects of atmospheric turbulence in optical astronomy [J]. *Progress in Optics*, 1981, 19: 281-376.

[19] Qing C, Wu X Q, Li X B, *et al*. Mesoscale optical turbulence simulations above Tibetan Plateau: First attempt [J]. *Optics Express*, 2020, 28(4): 4571-4586.

[20] Zhu H J, Li F Z, Shen Z P, *et al*. Analysis of buoyancy change of latex ballon and simulation of vertical trajectory [J]. *China Rubber Industry*, 2021, 68(1): 17-24.
朱华健, 李凡珠, 谌志鹏, 等. 乳胶气球浮力变化分析与垂直运动轨迹模拟 [J]. 橡胶工业, 2021, 68(1): 17-24.

[21] Palumbo R, Russo M, Filippone E, *et al*. ACHAB: Analysis code for high-altitude balloons [C]. *AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit*. August 20-23, 2007, Hilton Head, South Carolina, USA. AIAA, 2007: 6642.

[22] Musso I, Cardillo A, Cosentino O, *et al*. A balloon trajectory prediction system [J]. *Advances in Space Research*, 2004, 33(10): 1722-1726.

[23] Palumbo R. *A Simulation Model for Trajectory Forecast, Performance Analysis and Aerospace Mission Planning with High Altitude Zero Pressure Balloons* [D]. Naploli: Università degli Studi di Napoli Federico II, 2008.