慕士塔格观测站大气光学湍流特征研究



中国科学院新疆天文台
报告人：谷文博
指导老师：艾力·伊沙木丁研究员
海口 2025.11.27

提纲

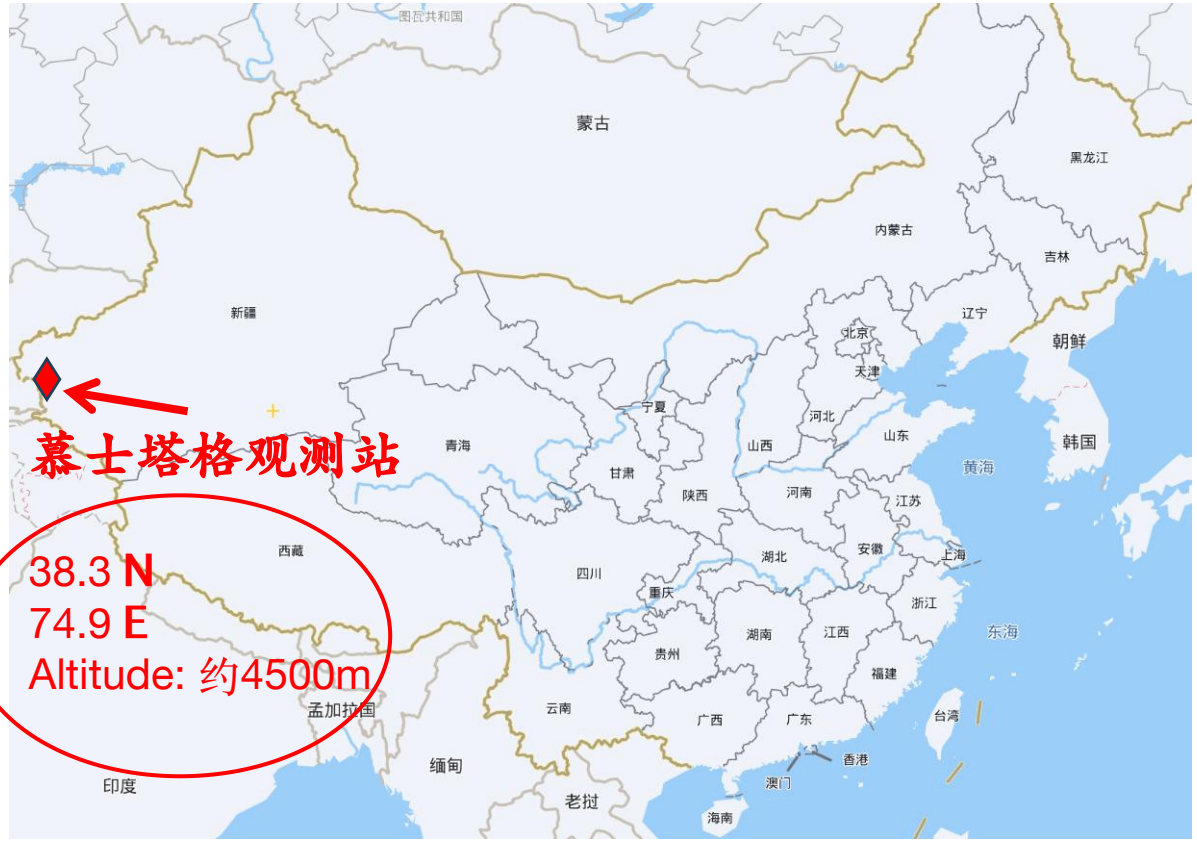
CONTENTS

1. 台址及背景介绍
2. 研究方法及研究结果
3. 下一步工作计划

1 台址及背景介绍

PART

1、台站位置





距离慕士塔格观测站最近的县城为喀什地区塔什库尔干县，公路里程约 90 公里。

距离慕士塔格观测站最大的城市为喀什市，公路里程约 210 公里。



海拔7546米
被称为“冰山之父”

慕士塔格观测站监测点分布：



监测周期：

南点：2017.1—2020.3

北1点：2017.8—今

北2点：2023.11—今

研究背景-大气光学湍流及视宁度

星光经过大气，会受到大气光学湍流的影响，湍流引起的折射率扰动会导致光波前畸变，影响望远镜成像质量，大气光学湍流强度由 折射率结构常数C_n^2 来度量.

DIMM差分像视宁度检测仪：通过测量大气湍流引起的恒星像位置抖动来衡量湍流状况，结果用视宁度(seeing)来表征



南京DIMM



法国DIMM

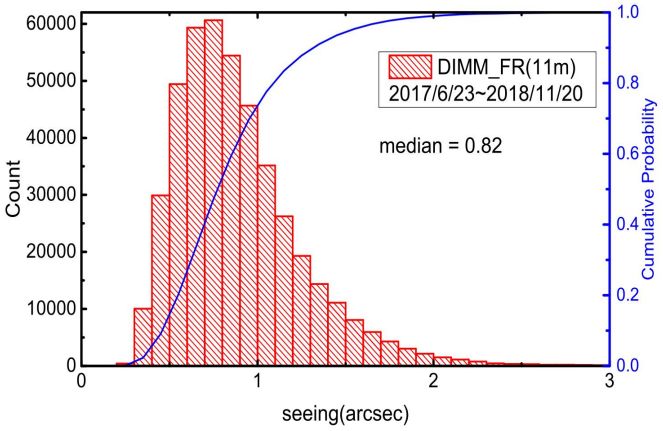
Parameter	French DIMM	NIAOT DIMM
Telescope Aperture (mm)	300	200
Focal Ratio	f/8	f/8
Focal Length (mm)	2400	1600
Number of Sub-apertures	2	4
Sub-aperture Diameter (mm)	51	50
Sub-aperture Separation (mm)	240	149
Detector / CCD Camera	DMK 33GX 174	Basler aca2040, 2k × 2k (5.5 μm)
Exposure Mode	Auto-adjusted (interlaced)	Fixed alternating (interlaced)
Exposure Time (ms)	0.5–1000 (auto-adjusted)	Alternating between 5 and 10 ms
Wavelength (nm)	550	500
Output Frequency	1 seeing value per 1000 images	1 seeing value per minute
Zero-Exposure Time Correction	Corrected to zero exposure time	Corrected to zero exposure time
Zenith Correction	Applied	Applied

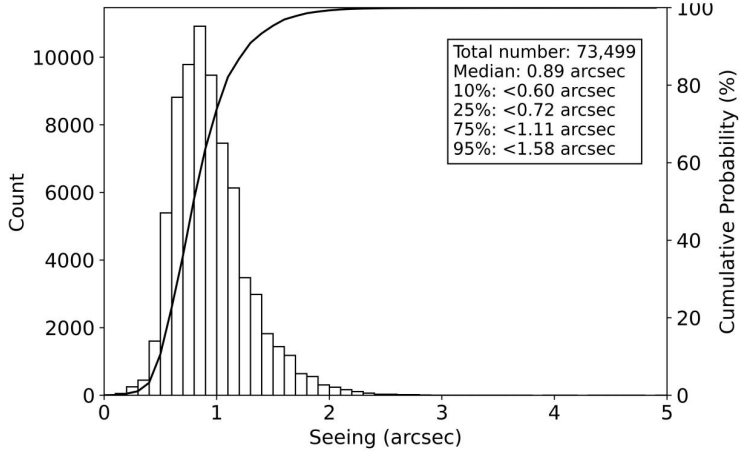
视宁度监测结果

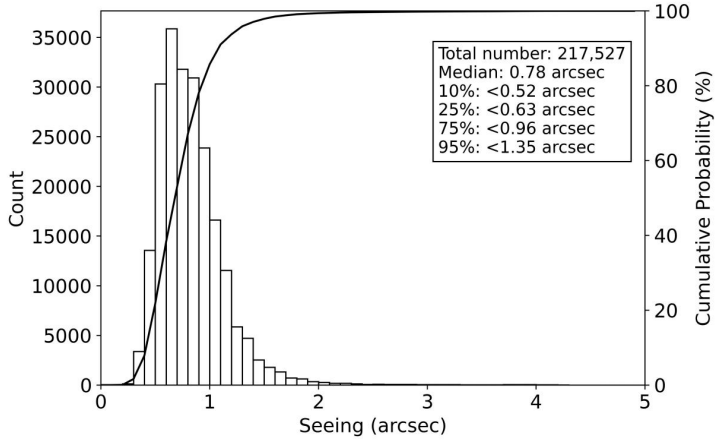












法国DIMM 11米高度
2017年6月——2018年11月
南点 中位seeing 0.82角秒

Xu J et al 2020.(RAA)

南京DIMM 6米高度
2018年12月——2023年9月
北1点 中位seeing 0.89角秒

Gu et al 2025.(MNRAS)

法国DIMM 10米高度
2023年12月——2024年6月
北2点 中位seeing 0.78角秒

DIMM 测量的seeing代表从该高度到大气层顶的整条路径上，所有大气光学湍流对星光的模糊效应，无法区分各层之间的湍流状况

$$\epsilon = 5.25\lambda^{-1/5}\left[\int_{h_0}^{\infty} C_n^2(z)\mathrm{d}z\right]^{\frac{3}{5}}$$

研究近地面及各高度层光学湍流强度C_n^2的时空特征，可对评估台址优劣性，望远镜建设设计（例如建设高度合理规避近地面的强湍流层），自适应光学系统的设计与优化有重要作用

自由大气(Free Atmosphere.FA)
几乎不受地表影响，湍流由高空风切变与急流触发，强度较弱，尺度更小、变化更快。

边界层(Boundary Layer.BL)
高度通常约 300 m –1 km不等；其湍流主要由地表感热对流和风切变共同激发，贡献了大气总体湍流能量的主要部分。

近地面层(Surface Layer.SL)：
地表以上 0至几十米不等，受地面热力交换与摩擦作用、强湍流主要集中区域。

高层大气光学湍流特征研究

近地面光学湍流特征研究

2 PART

研究方法及研究结果

2.1 近地层光学湍流及气象监测

监测条件——30 米铁塔 2021年10月-2024年6月

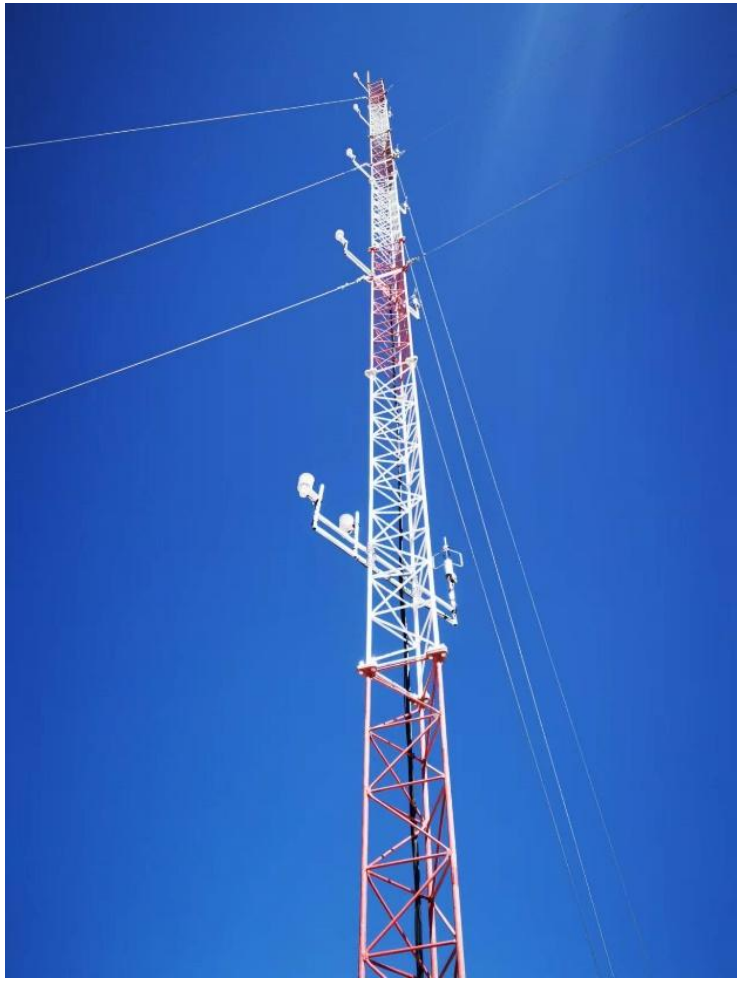
5层超声波风速仪

5层温度传感器(6m，12m，18m，24m，30m)

相对湿度传感器

气压传感器

Sensor	Main Performance Parameters	Output frequency
Young 81000	Wind speed resolution: 0.01 m/s Wind direction resolution: 0.1 ° Sonic temperature resolution: 0.01°C	20 Hz
Young 41342	Temperature resolution: 0.1°C	1/30 Hz
Young 61302V	Atmospheric pressure resolution: 0.2 hPa	1/30 Hz
Young 41382VC	Relative humidity resolution: 0.1% RH	1/30 Hz



2.1 近地层光学湍流 ——研究方法

湍流源于大气中折射率的随机波动，这些波动在可见光和近红外波段主要由温度扰动驱动，其强度以折射率结构常数 C_n^2 来衡量

1、由温度起伏引起的光学湍流，空间上相距ρ的两点温度在统计学意义下给出温度结构函数：

$$D_T(\rho) = \langle (T(r) - T(r+\rho))^2 \rangle$$

2、对于时间序列温度测量，根据泰勒冻结假设，换算为以时间为变量，Δt是两次测量的时间间隔，温度结构函数计算如下：

$$D_T(v\Delta t) = \langle (T(t) - T(t+\Delta t))^2 \rangle$$

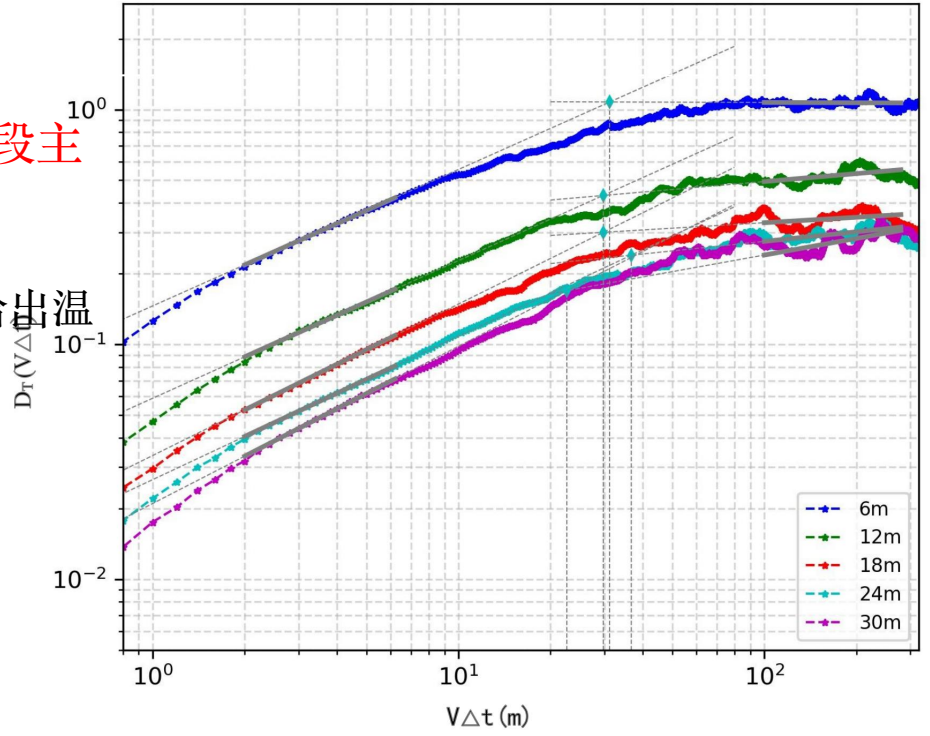
3、如果某一时间段的湍流发展满足局地均匀各向同性湍流理论，温度结构函数在惯性区域内与尺度ρ的关系为：$D_T(\rho) = C_T^2 \rho^{2/3}$

4、判断出满足局地均匀各向同性湍流条件，温度结构常数C_T^2也可直接由测量数据计算出

$$C_T^2 = \langle [T(t) - T(t+\delta t)]^2 \cdot [v(t)\delta t]^{-2/3} \rangle$$

5、计算出折射率结构常数：

$$C_n^2 = 6.24 \times 10^{-9} C_T^2 \cdot P^2 \cdot T^{-4}$$



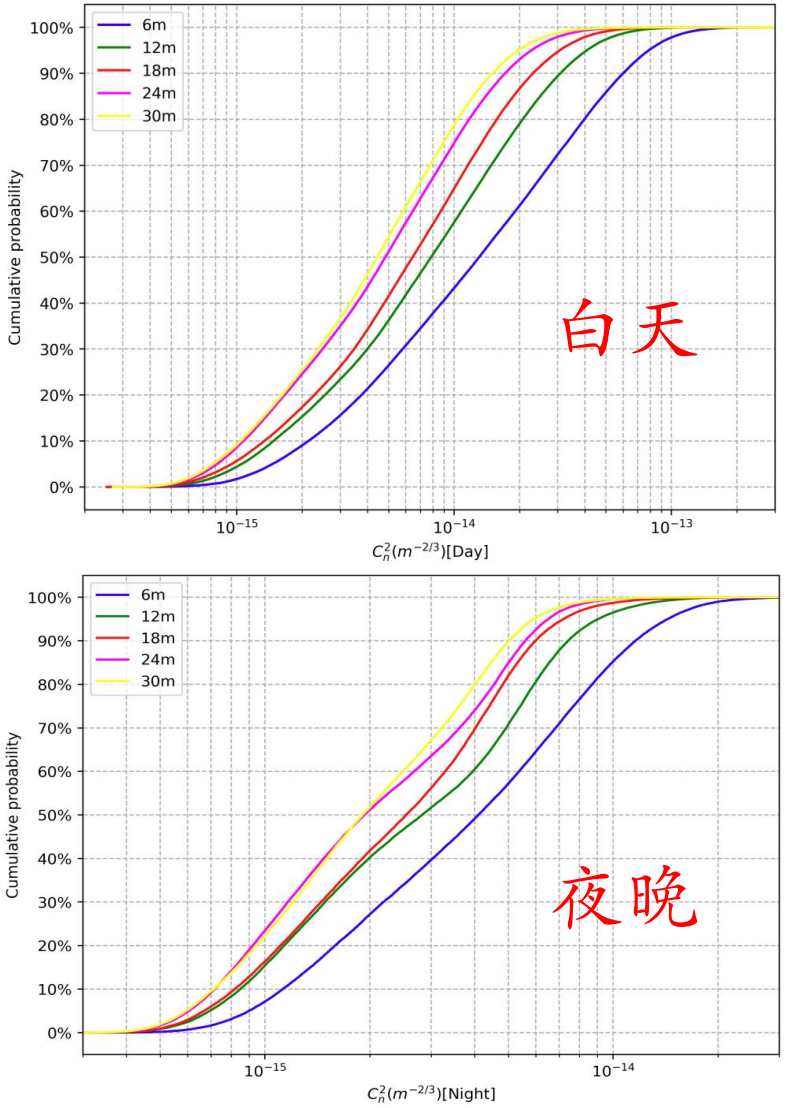
1、每15min构建一个结构函数
2、判断线性区域内斜率是否满足Kolmogorov湍流谱
3、满足则用公式4，5计算

Kolmogorov, A. 1941
Aristidi E et al 2015.（MNRAS）
Gu et al 2024.（MNRAS）

监测结果——近地层光学湍流

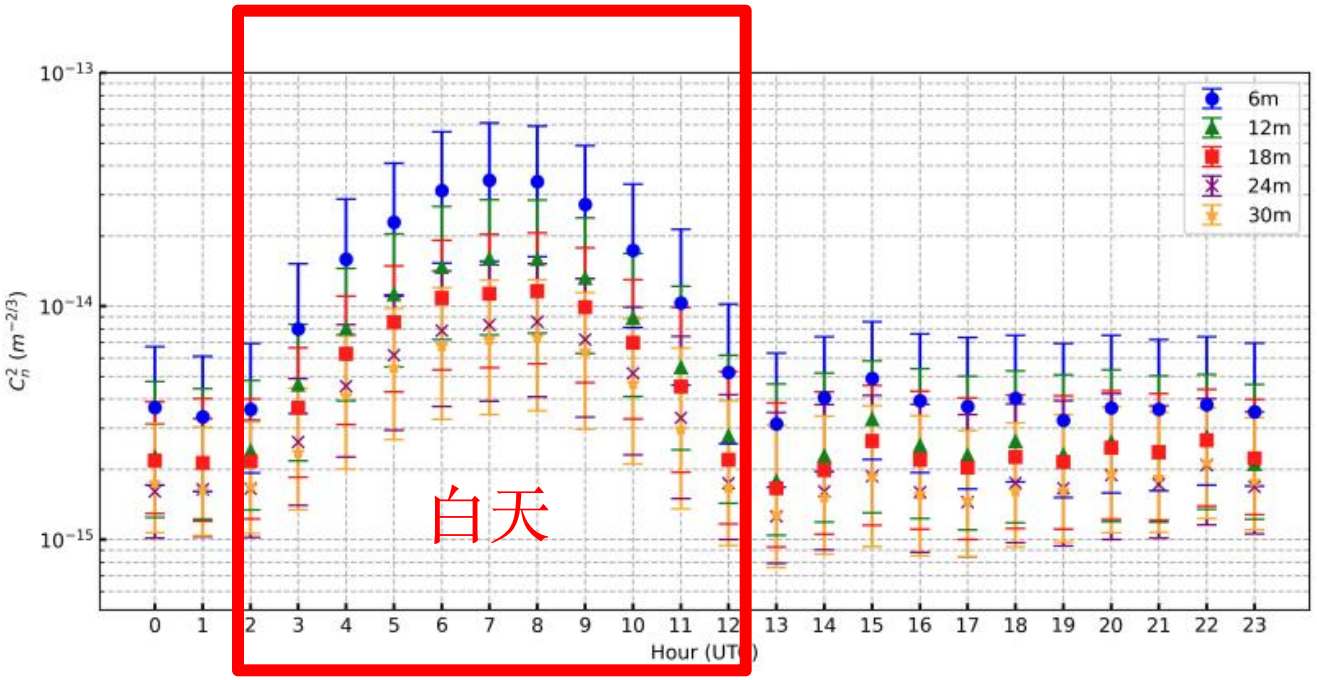
Height [m]	C_n^2 (Total) [$10^{-15}m^{-2/3}$]	C_n^2 (Spring) [$10^{-15}m^{-2/3}$]	C_n^2 (Summer) [$10^{-15}m^{-2/3}$]	C_n^2 (Autumn) [$10^{-15}m^{-2/3}$]	C_n^2 (Winter) [$10^{-15}m^{-2/3}$]
6	9.4 [26.2, 3.5]	11.9 [33.7, 4.0]	12.1 [35.1, 2.9]	9.3 [23.1, 3.7]	7.2 [15.5, 3.4]
12	5.7 [13.7, 2.2]	7.0 [17.4, 2.6]	5.8 [16.5, 1.6]	5.6 [12.2, 2.2]	5.2 [9.7, 2.5]
18	4.7 [10.8, 2.0]	5.9 [13.7, 2.5]	4.5 [12.3, 1.4]	4.6 [9.6, 2.0]	4.5 [8.1, 2.3]
24	3.9 [8.3, 1.5]	4.6 [10.2, 1.8]	3.3 [9.0, 1.2]	3.7 [7.5, 1.6]	4.0 [6.9, 1.9]
30	3.6 [7.5, 1.5]	4.2 [9.1, 1.8]	3.0 [7.8, 1.2]	3.4 [6.8, 1.6]	3.7 [6.5, 1.9]

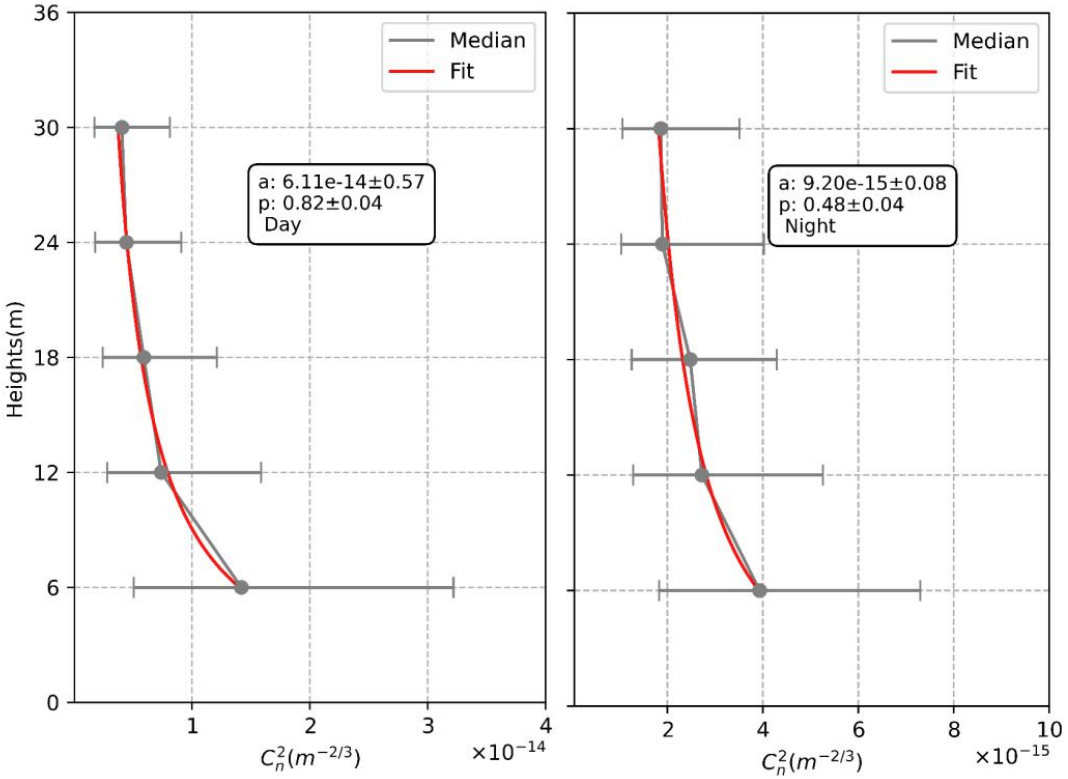
光学湍流强度C_n^2夏季最强，冬季最弱，随高度增高C_n^2减小



Gu et al 2024.（MNRAS）

监测结果——近地层光学湍流





光学湍流强度C_n^2有显著日变化特征，白天C_n^2在太阳热辐射机制驱动下明显增强，夜间地表冷却后逐渐减弱并趋于稳定

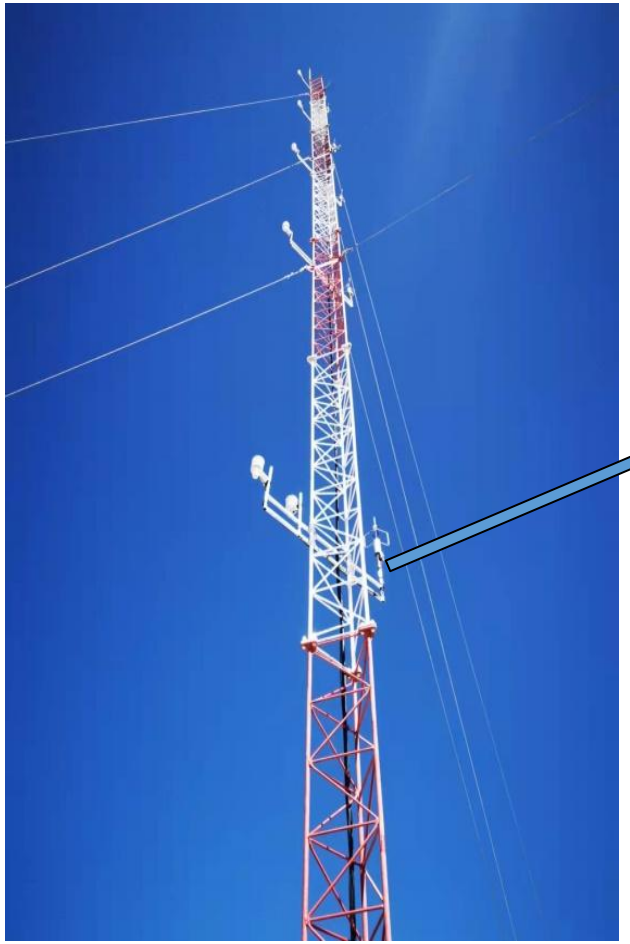
$$C_n^2(z) = A \cdot z^{-p}$$

$$C_{nDay}^2 = (6.11 \pm 0.57) \times 10^{-14} \cdot z^{-0.82\pm0.04}$$

$$C_{nNight}^2 = (0.92 \pm 0.08) \times 10^{-14} \cdot z^{-0.48\pm0.04}$$

Gu et al 2024.（MNRAS）

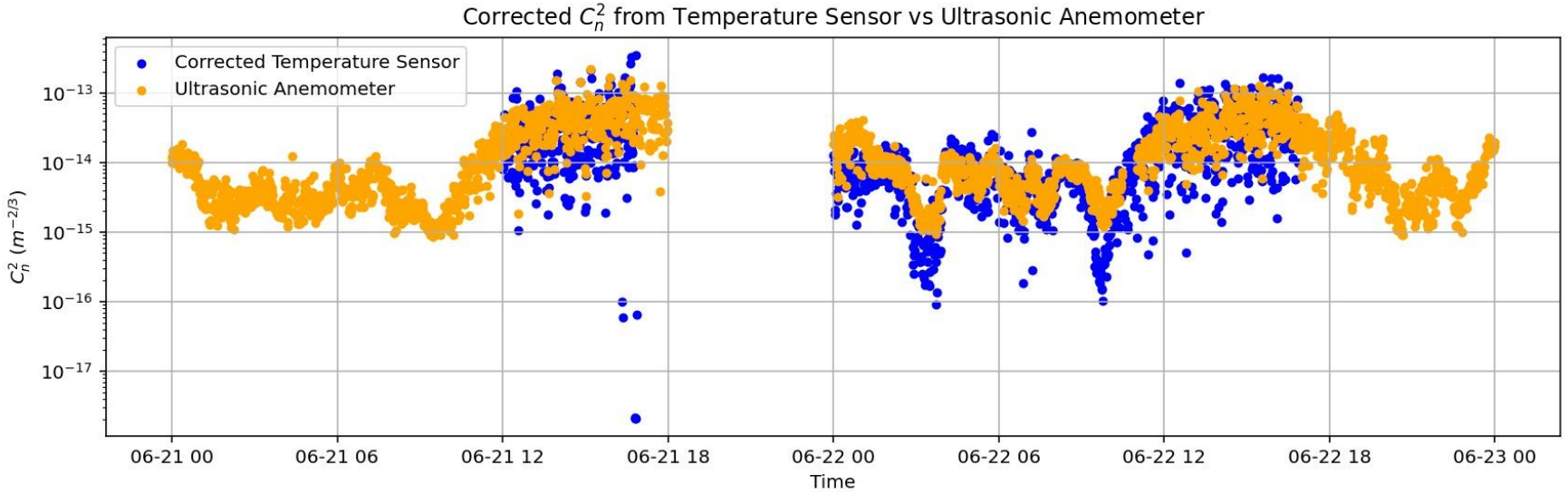
监测结果——近地层光学湍流





温度脉动仪：
每秒输出一组C_n^2，
温度，气压参数

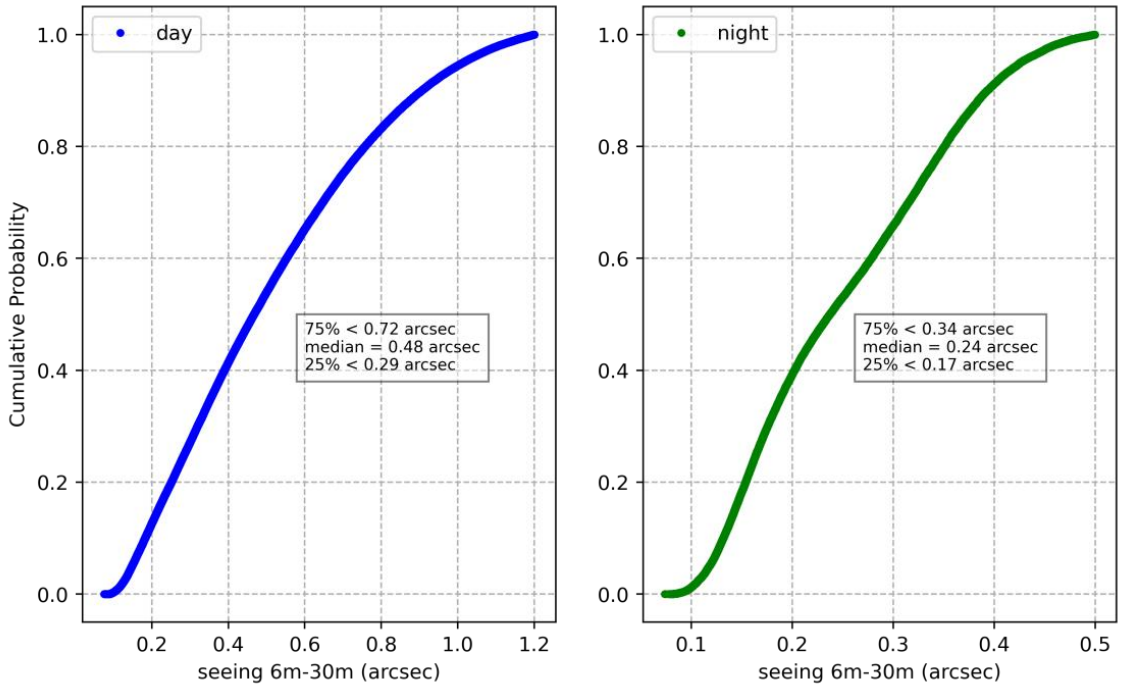
超声风速仪

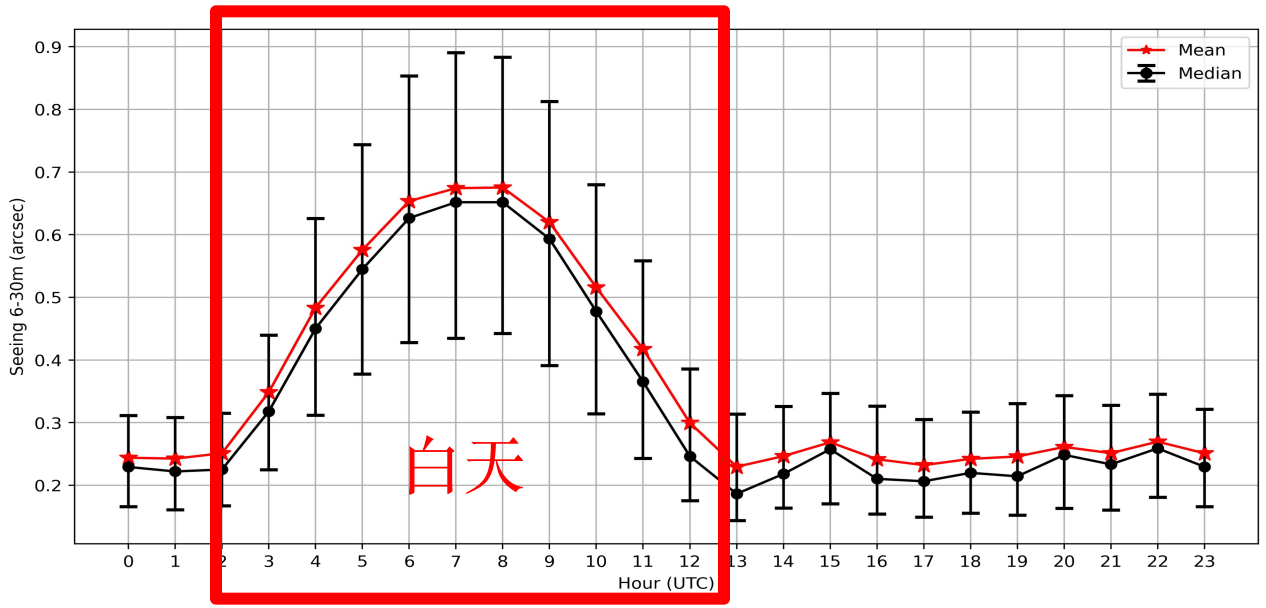


监测结果——近地层光学湍流

$$\epsilon = 5.25\lambda^{-\frac{1}{5}} \left[\int_{h_0}^{h_1} C_n^2(z) dz \right]^{\frac{3}{5}}$$

6-30m高度层间seeing中值：
白天：0.48角秒
夜间：0.24角秒

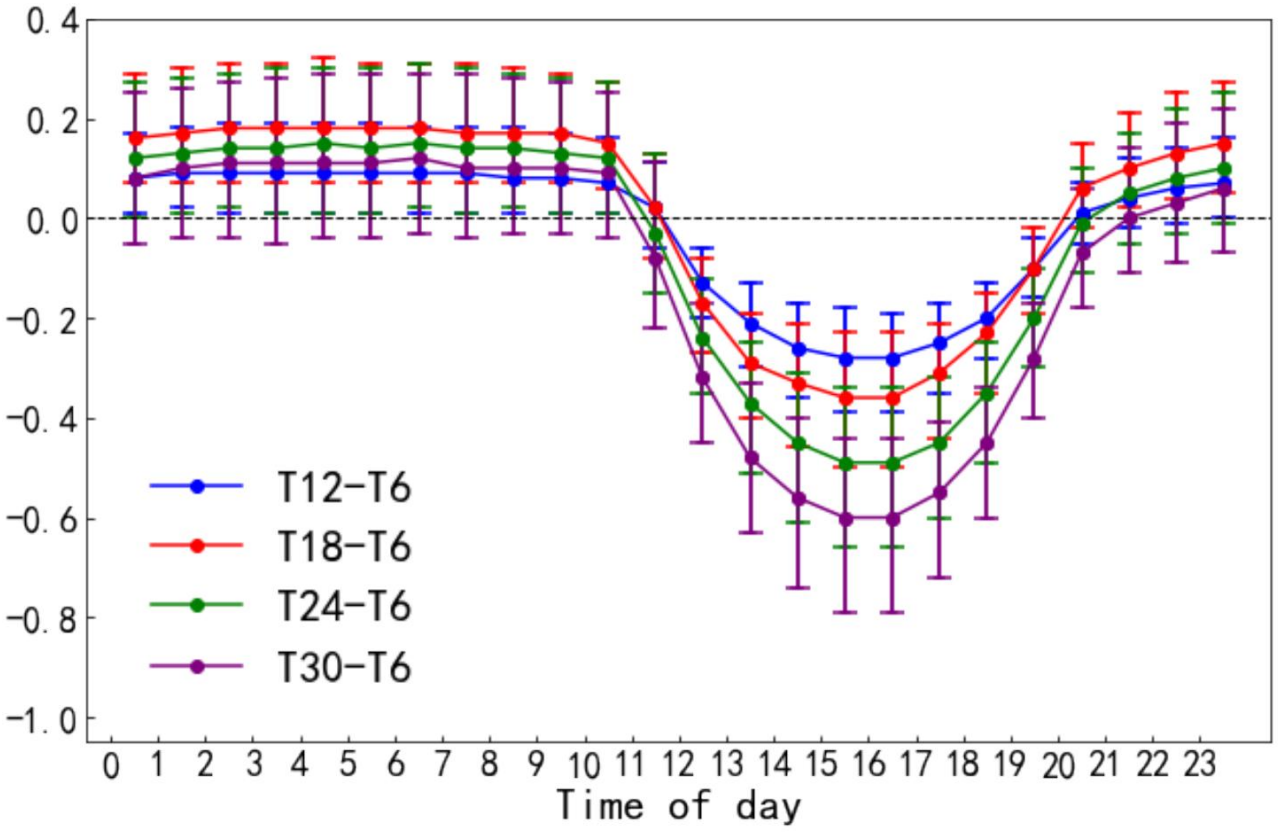




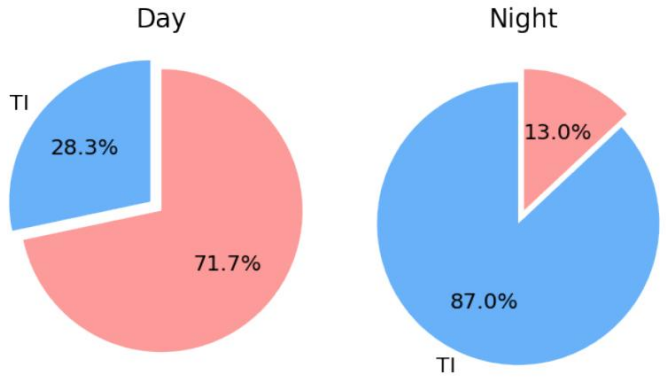
6-30m层间seeing有显著日变化特征，日出后地表加热引发大气对流增强，导致seeing恶化，正午达到顶峰，夜间seeing较弱且比较稳定。

Gu et al 2024.（MNRAS）

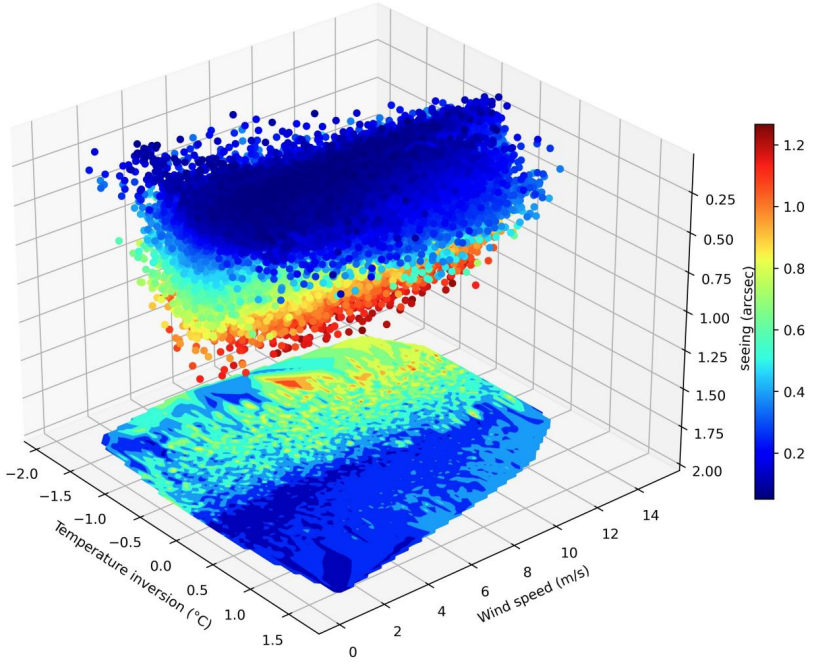
监测结果—近地层逆温与视宁度



各高度温度与6m高度的温度差值



6-18m高度温度逆转比例



近地层seeing，逆温和风速关系3D图

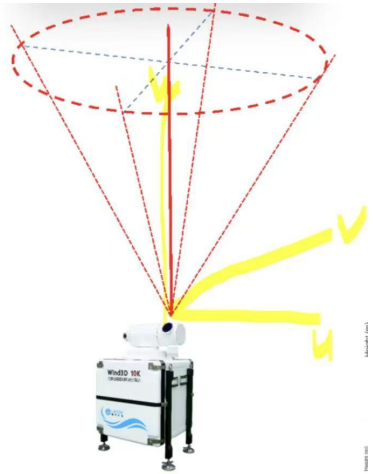
Zhang et al, 2025,Atmosphere
Gu et al, 2024,MNRAS

高层大气光学湍流及特征研究

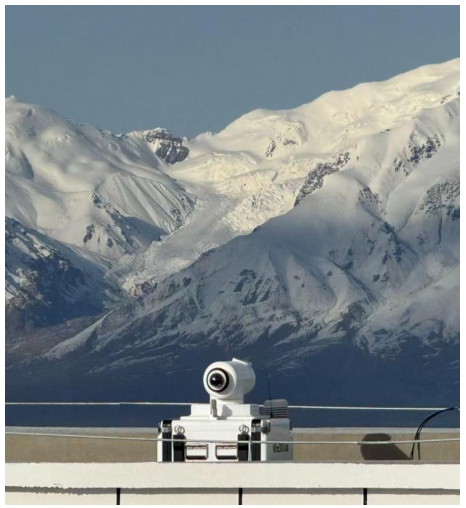
监测条件：多普勒测风激光雷达wind6000

监测周期：2023年1月-今

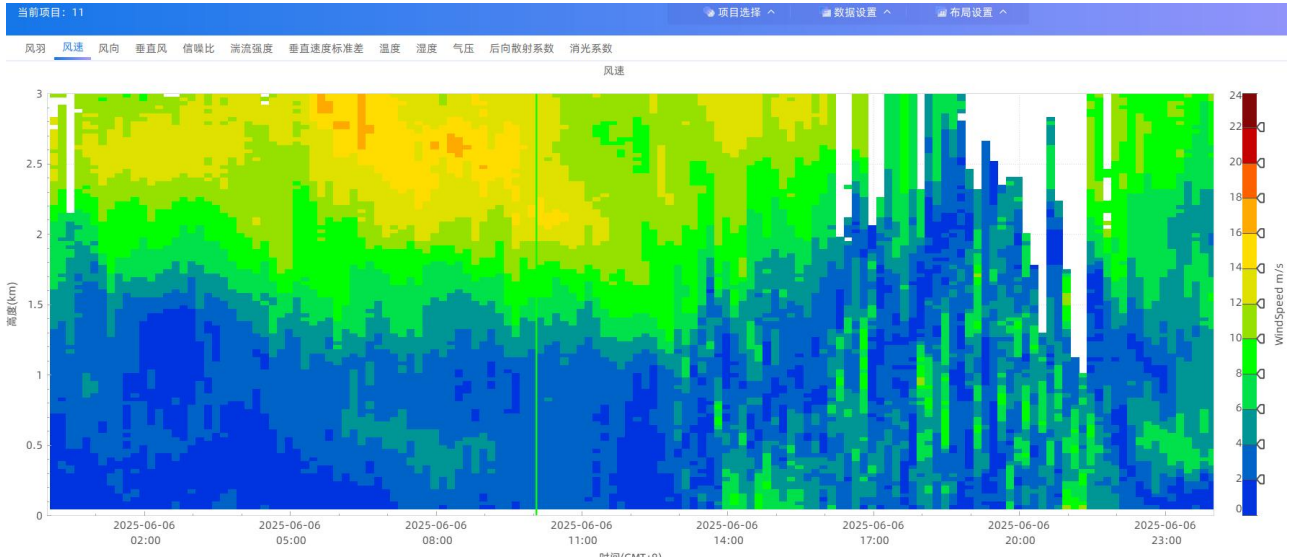
监测位置：台址周边、台址北1点

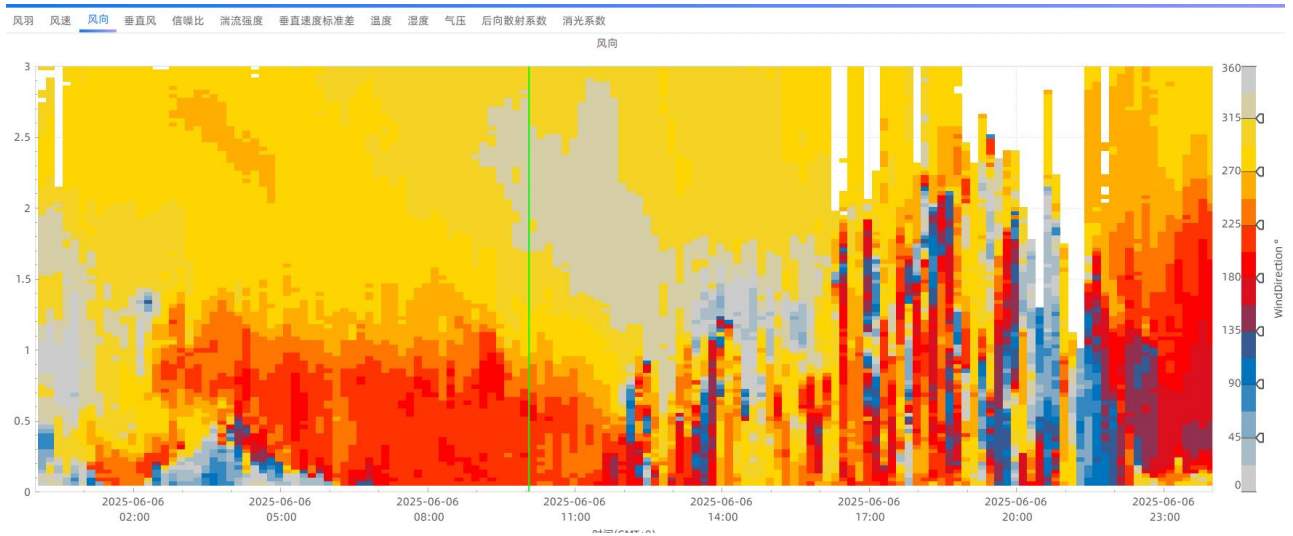


DBS扫描模式



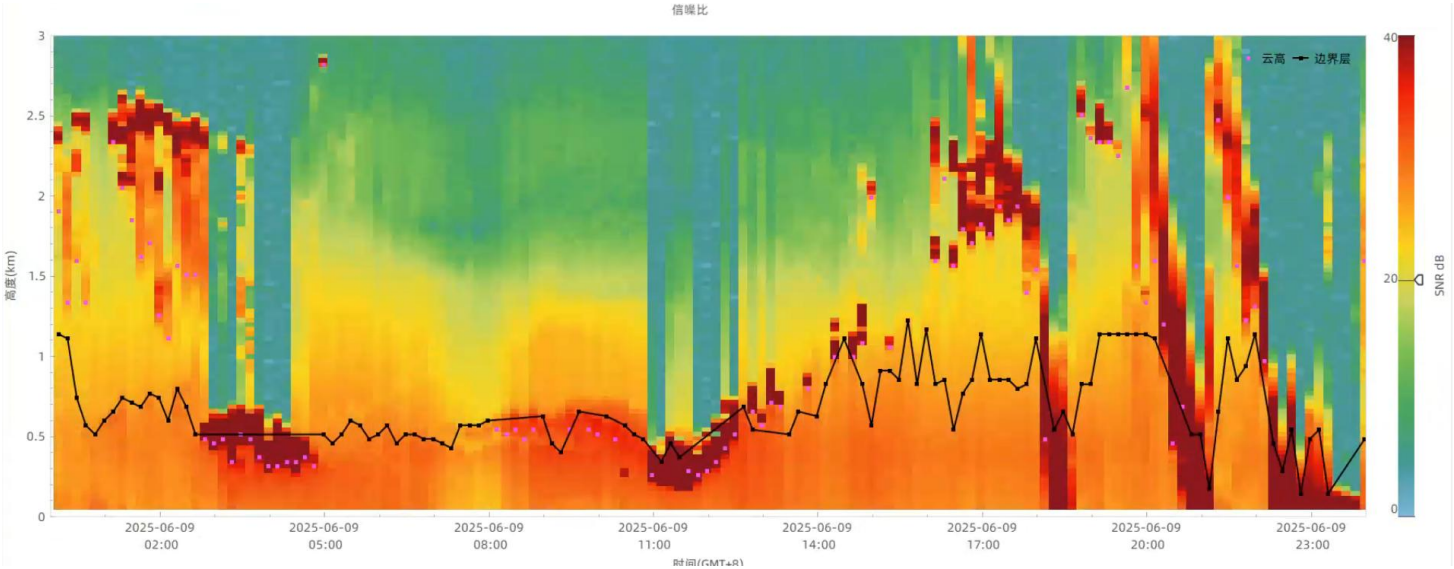
测量范围	50~3000米
风速测量精度	0.1m/s
风速测量量程	0~50m/s
风向测量精度	≤2°
工作温度	-30°C~40°C

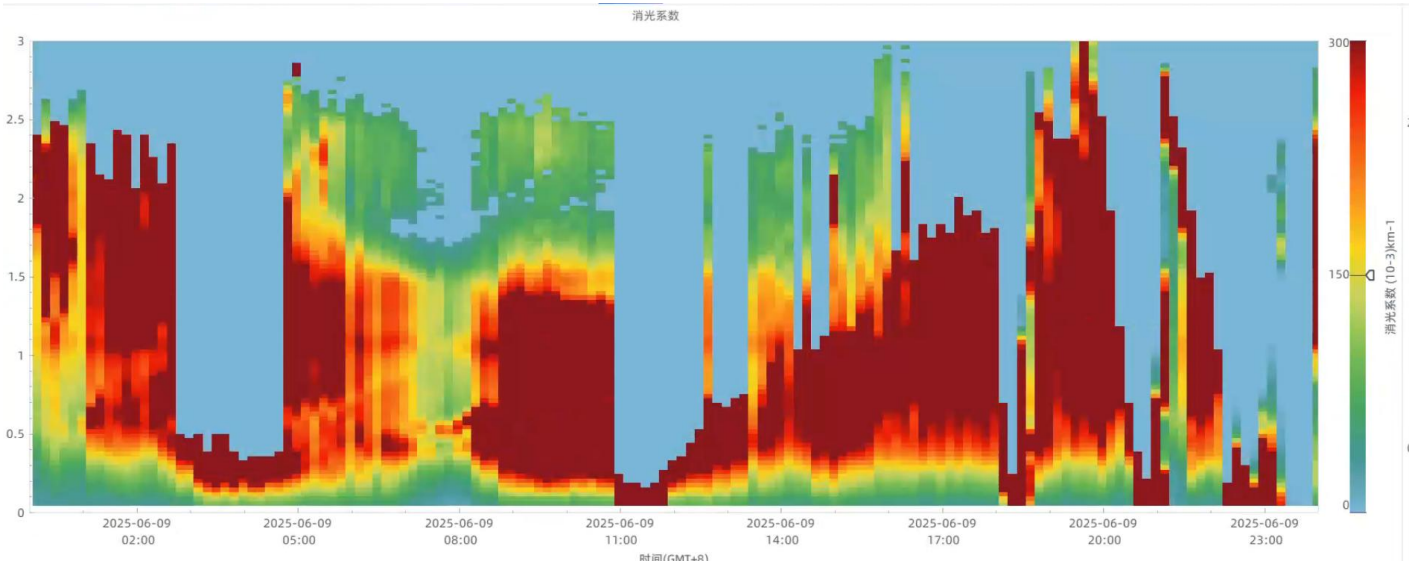




高层大气光学湍流及特征研究

监测条件： 多普勒测风激光雷达wind6000

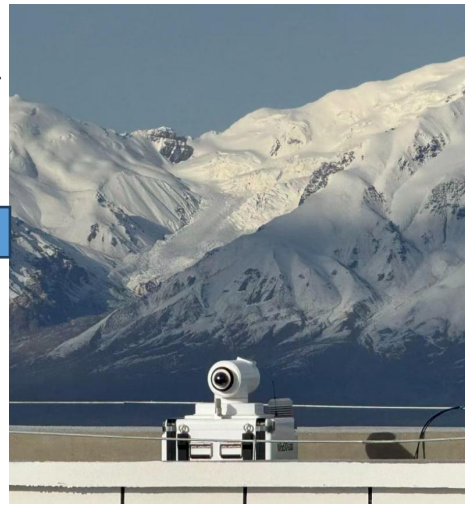




高层大气光学湍流及特征研究

每30m一层的
风速风向

C_n^2



地面数据推导
的温度、气压

$$T_h = T_{h_0} - 6.5 \times 10^{-3}\,\mathrm{h},$$

$$P_h = P_{h_0} \times 10^2 \times \left(T_h / T_{h_0}\right)^{5.256},$$

美国标准大气模型USSA-76

U.S. Standard Atmosphere, 1976 - NASA Technical Reports Server (NTRS)

研究方法：

$$C_n^2 = a^2 L_0^{4/3} M^2, \quad (1)$$

式中：$a^2 = 2.8$；L_0 为外尺度；M 为位势折射率梯度。L_0 由外尺度模式基于温度梯度 $\mathrm{d}T/\mathrm{d}h$ 和水平风的垂直切变 S 估算。在对流层以下，L_0 可表示为

$$L_0 = 0.1^{4/3} \times 10^{0.362 + 16.728 \times S - 192.347 \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}h}}, \quad (2)$$

式中：S 用经向风 u 和纬向风 v 计算，u 和 v 由激光雷达观测径向风速反演得出。位势折射率梯度 M 可由温度、压强及位温 [illegible]湿空

$$S = \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial h}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial h}\right)^2},$$

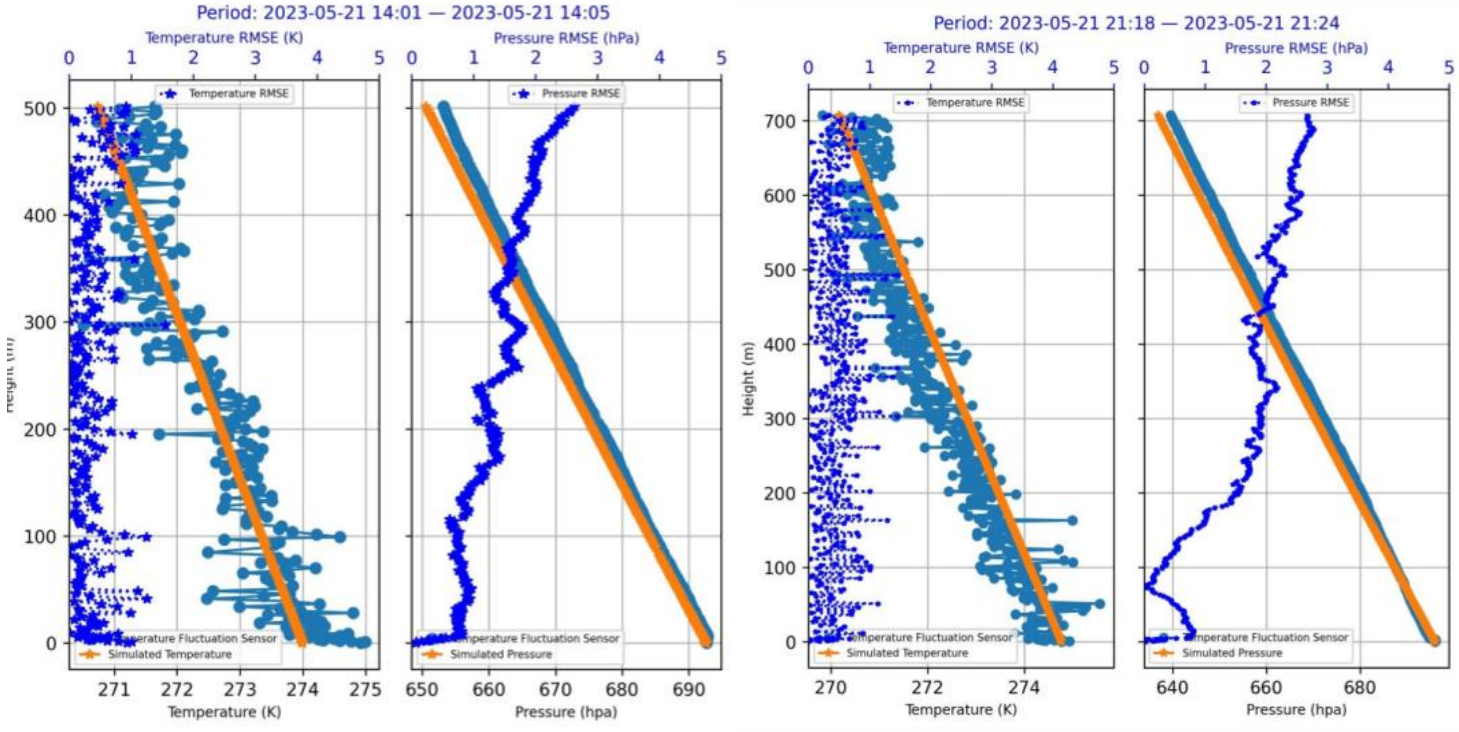
$$\theta = T\left(\frac{1000}{P}\right)^{0.286},$$

$$M = \frac{79 \times 10^{-6} \times P}{T^2} \times \frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}h},$$

jin et al 2021.

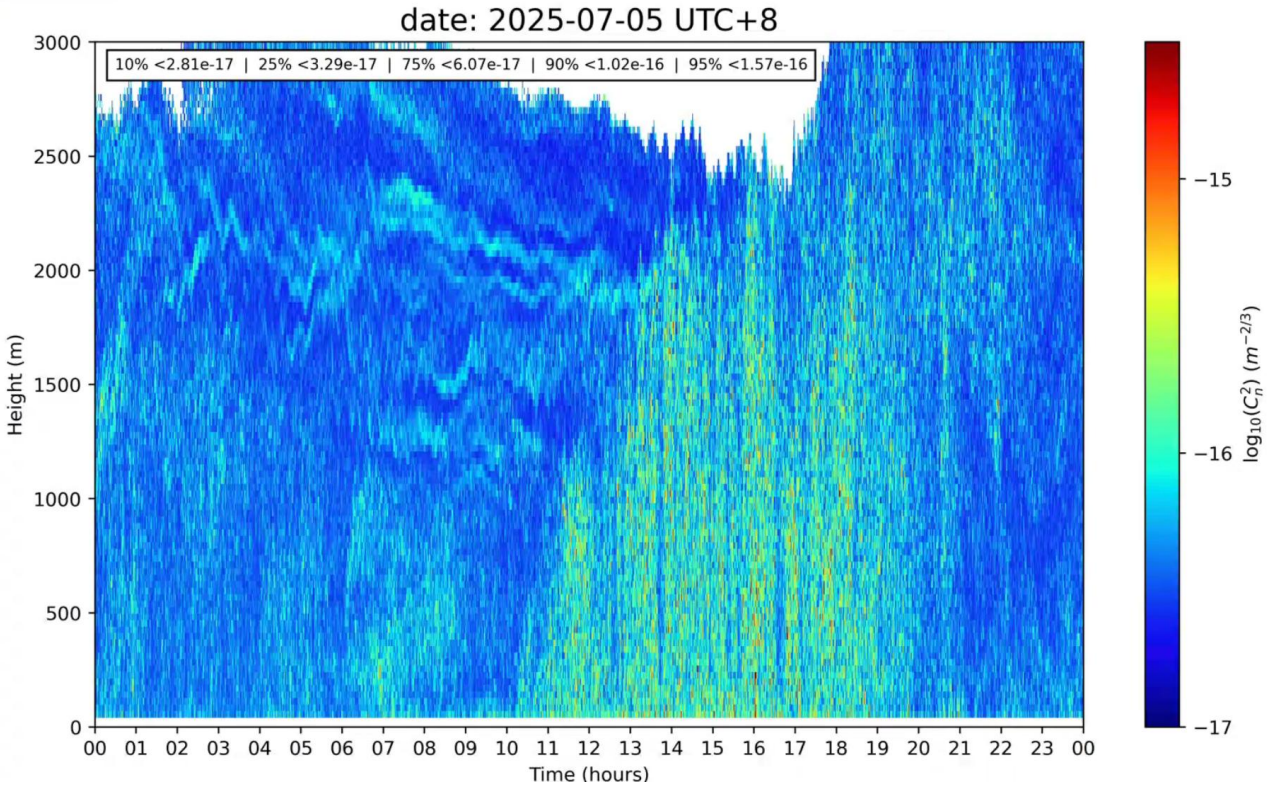
高层大气光学湍流及特征研究

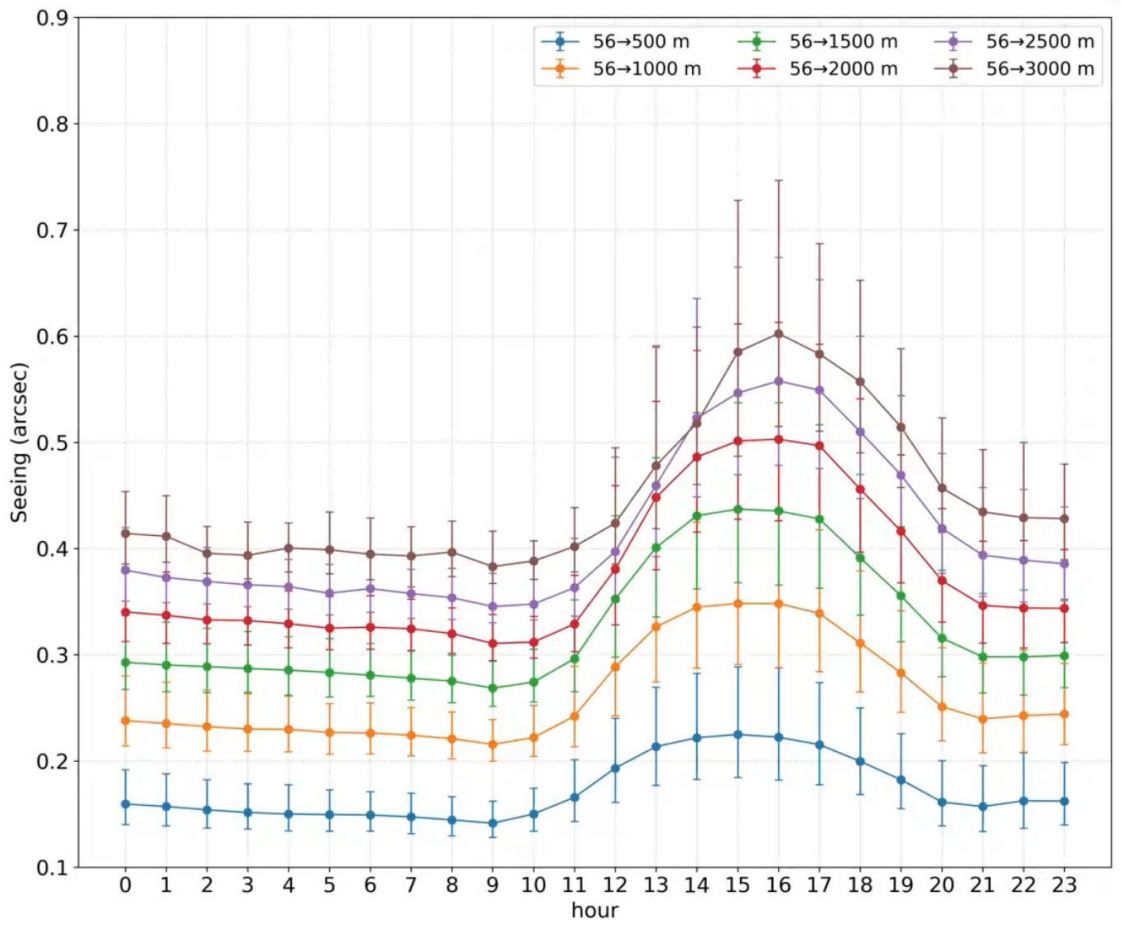




无人机飞行验证美国标准大气模型USSA-76在慕士塔格台址适用性

高层大气光学湍流及特征研究

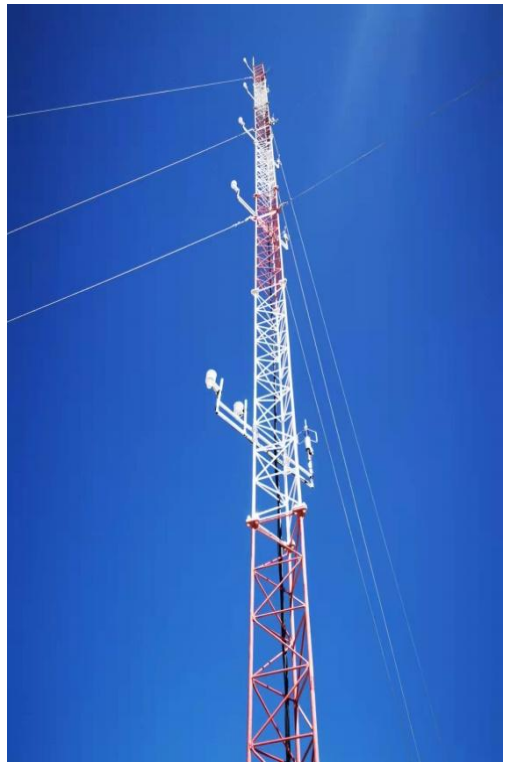




3 PART

下一步工作计划

北1点大气光学湍流参数同步监测



近地面层
6-30m高度



高层大气
50m-3000m高度



整层大气
6m高度法国DIMM

总结

在慕士塔格台址，北1点6m高度的中位视宁度为0.89角秒，北2点10m高度的中位视宁度为0.78角秒，近地湍流和高层湍流展示出较为显著的日变化和空间分布特征。6至30米高度之间的白天和夜间中位视宁度分别为0.48和0.24角秒。白天和夜间的C_n^2与高度的关系分别为$\boldsymbol{h}^{-0.82}$和$\boldsymbol{h}^{-0.48}$。夏季的湍流强度高，最佳观测季节为晚秋至冬季。

综上，慕士塔格台址具有成为中国西部优秀天文观测台址的巨大潜力


谢谢大家!