

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2024.02.13

# 面向下一代事件视界望远镜的亚毫米波 望远镜的选址与评估

程远<sup>1,2,3</sup>, 路如森<sup>2,4</sup>, 沈志强<sup>2,4</sup>, 于威<sup>5</sup>

(1. 上海科技大学, 上海 201210; 2. 中国科学院上海天文台, 上海 200030; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 中国科学院射电天文重点实验室, 南京 210008; 5. 哈佛史密松天体物理中心, 剑桥 MA02138)

**摘要:** EHT 在 2019 年利用 VLBI 技术获得了首张黑洞照片, 为了满足黑洞动态成像的需求, 下一代 EHT 阵列会加入更多位于东半球的站点。中国的青藏高原是世界上平均海拔最高的地区, 独特的气象条件使其成为潜在的选址区域。使用 3 年 (2019–2021) 的 MERRA-2 数据, 对青藏高原地区的高频射电观测条件进行了初步评估, 一共包含 759 个数据格点。根据这些格点在不同季节不透明度的表现, 选出 4 个季节中各自最优的格点。结合目前已经建立站点的气象条件, 对这 4 个格点进行了评估, 评估主要考虑了可降水量、液体水路径、风速这 3 个气象因素。除此之外, 以 ALMA 望远镜阵列的气象条件为标准, 为新台站的选址划定了初步的范围。

**关键词:** EHT; 不透明度; 可降水量; 液态水路径

**中图分类号:** P112

**文献标识码:** A

## 1 引言

事件视界望远镜 (Event Horizon Telescope, EHT) 是一个观测频率为 230 GHz 的甚长基线干涉测量阵列<sup>[1]</sup>。2017 年, EHT 使用 6 个位置的 8 个台站对 M87 星系进行了观测, 并在 2019 年发布了位于 M87 星系中心的超大质量黑洞的图像<sup>[2–6]</sup>。在 2022 年, EHT 又发布了位于银河系中心的 Sgr A\* 黑洞图像<sup>[7–11]</sup>。

在下一步的观测计划中, 这个阵列会进一步增加位于东半球的望远镜, 进而实现对黑洞的 24 h 连续观测, 这就是下一代事件视界望远镜<sup>[12]</sup>。EHT 在选择新站点时会考虑很多因素<sup>[13]</sup>, 主要包括 2 点: (1) 新站点的位置能够具有好的 uv 覆盖; (2) 新站点的气象条件

收稿日期: 2023-03-07; 修回日期: 2023-03-31

资助项目: 国家自然科学基金 (11933007); 中国科学院基础前沿科学研究计划从 0 到 1 原始创新项目 (ZDBS-LY-SLH011); 上海市基础研究特区计划 (JCYJ-SHFY-2021-013); 中德马普伙伴小组项目

通讯作者: 路如森, rslu@shao.ac.cn

要满足 230 GHz 以上的高频射电观测条件。本文主要考虑青藏高原地区的气象条件, 因为青藏高原是世界上平均海拔最高的区域, 高海拔、低湿度的特殊环境使其成为天文观测的重要选址区域<sup>[14, 15]</sup>。本文利用美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 的第二代卫星数据再分析产品 (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications Version 2, MERRA-2) 所提供的数据<sup>[16]</sup>, 对青藏高原的气象条件进行全面的评估。

MERRA-2 数据将全球进行了网格化, 每个网格大小为  $0.625^\circ \times 0.5^\circ$  (纬度 $\times$ 经度), 我们所使用的数据包含青藏高原地区的 759 个格点。本文运用这些格点处 2019、2020、2021 这 3 年的气象数据, 结合大气模型 (atmospheream model, am) 脚本<sup>[17]</sup>, 计算了这些数据点在 230 GHz 频率的大气不透明度。在每个季节中选取不透明度最小值所在的地理位置作为一个目标, 这样选取了 4 个站点, 分别命名为春季最低 (MAMMin)、夏季最低 (JJAMin)、秋季最低 (SONMin)、冬季最低 (DJFMin)。除了所选取的这 4 个位置以外, 我们另外选取了 4 个格点作为评估的参考, 这 4 个格点分别是西藏羊八井 (YBG)、西藏阿里 (Ali)、阿塔卡马高频阵列 (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array, ALMA) 和南极地区穹顶 A (Dome A)。之所以选这些位置, 是因为在 EHT 的全球站点评估中将中国境内的羊八井设置为一个候选站点; 阿里地区位于西藏的西部, 中国科学院国家天文台已经在此地区的狮泉河镇建立了永久观测站, 这也是一块非常适合建立台站的地区; 位于南美洲阿塔卡马沙漠的 ALMA 是一个包含 66 台射电望远镜的干涉阵列, 海拔 5058 m, 与青藏高原气候条件相似; 位于南极洲海拔最高的 Dome A 是目前最适合进行高频观测的站点<sup>[18]</sup>。

影响高频观测最重要的气象因素是可降水量 (precipitable water vapor, PWV) 与液态水路径 (liquid water path, LWP), 我们对这 8 个站点的 *PWV* 与 *LWP* 进行了综合对比。除此以外, 风速也是考虑的重点, 因为高频台站对于站点风速的要求比较严格, 风速过大会影响望远镜的指向。除了 3 年数据的总体评估, 我们对这些站点在每个季节的观测条件也进行了对比。

## 2 数据与分析

MERRA-2 是 NASA 发布的最新的现代卫星的气象再分析数据, 它使用了从近红外到微波的一系列仪器, 涵盖了全球任何区域的气象数据。它为基础的气象参数提供了非常可靠的测量值, 例如温度、压强、风速等, 对天文观测产生影响的水蒸气、云、臭氧等也提供了对应的数据。

影响高频射电观测的气象因素有很多, 在以往的选址中, 重点考虑的是站点的 *PWV*, 这种选址方法不能准确衡量站点的优劣, 而且 *PWV* 数据大多来自于地面气象站, 并不能全面衡量一个大的区域内的观测条件。我们使用的 MERRA-2 数据集包含了全球所有区域的气象数据, 它将全球进行网格化, 空间分辨率为  $0.625^\circ \times 0.5^\circ$  (纬度 $\times$ 经度)。利用这些数据我们可以非常全面地去衡量一个大范围区域内的气象条件, 进而选出其中最优的站点。

MERRA-2 产品中有很多类型的数据, 本文中使用了其中两种:

- (1) MERRA-2 inst3\_3d\_asm\_Np, 3 维 3 h 瞬时, 42 层压强;
- (2) MERRA-2 inst1\_2d\_asm\_Nx, 2 维 1 h 瞬时, 单层压强。

我们所分析的区域在  $76.25^{\circ}\text{E} \sim 96.25^{\circ}\text{E}$ 、 $28^{\circ}\text{N} \sim 39^{\circ}\text{N}$  之间, 一共包含 759 个地点, 涉及到西藏、新疆南部、青海西部。

我们使用了 am (atmospheric model) 软件用来计算不透明度、背景温度等辐射参数, 它可以为大气建立模型, 通过读取大气的的数据进而计算不同频率下的电磁波传播性质。我们使用 2019、2020、2021 这 3 年的数据, 并将这些数据分为春 (MAM)、夏 (JJA)、秋 (SON)、冬 (DJF) 4 个季节, 利用每个季节绝对湿度与臭氧的中位值去计算每个数据点的不透明度。这个处理流程涉及较多的数据读写与计算, 为了提升数据处理的效率, 我们将 3 年的原始数据全部写入本地数据库, 以便于后续统一处理每个格点的数据。

### 2.1 不透明度的分布

am 是一个用于计算光学深度、辐射转移等参数的工具, 这个程序可用于任何能够被建模为局部热力学平衡条件的窄束传播问题。利用 am 与相应的辐射模型, 结合 MERRA-2 的数据, 我们计算出所选区域中每个格点在每个季节的 230 GHz 天顶不透明度。图 1 所示为冬季 230 GHz 不透明度分布, 不透明度的最低值所在的位置被标注为 DJFMin。在使用 am 软件计算各站点不透明度时, 所使用的 amc 配置文件是 3 年数据中每个季节绝对湿度、臭氧、温度的中位值。在图 1 中, 春、夏、秋 3 个季节的不透明度最低值所在格点分别被标注为 MAMMin、JJAMin、SONMin。为了方便对比, 我们标注了 4 个西藏地区的重要地点: 拉萨 (Lhasa)、羊八井 (YBG)、日喀则 (Shigatse)、阿里 (Ali)。

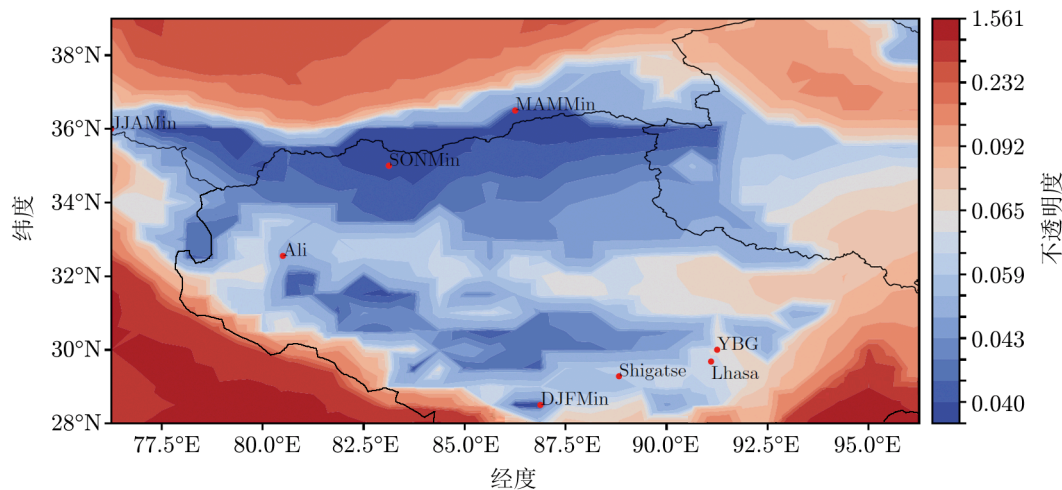


图 1 冬季 230 GHz 不透明度分布

除了每个季节不透明度最低值对应的 4 个格点, 我们也选取了 4 个其他站点作为参考: 位于南极洲的 Dome A 点是南极洲海拔最高的点, 也是目前地球上进行高频射电观测的最

优点；位于南美洲阿塔卡马沙漠的 ALMA 望远镜是目前最好的高频综合孔径望远镜；位于西藏的阿里地区被称为亚洲的阿塔卡马，国家天文台 (NAOC) 已经在此地区的狮泉河镇建立了永久观测站；在 EHT 的选址中，西藏的羊八井是国内唯一的候选站点。本文一共研究了 8 个站点，它们的位置信息见表 1。该表列出的坐标是该站点在 MERRA-2 数据网格中所在格点的坐标。由于卫星数据空间分辨率的限制，格点是一片区域，并不是一个精确的地理位置，而我们选取的参考站点是在这些格点内，因此以格点的坐标代表站点。

表 1 站点位置

站点	MAMMin	JJAMin	SONMin	DJFMin	YBG	Dome A	ALMA	Ali
经度	86.25°E	76.25°E	83.125°E	86.875°E	91.25°E	77.5°E	67.5°W	80°E
纬度	36.5°N	36°N	35°N	28.5°N	30°N	80.5°S	23.0°S	32.5°N

图 2 展示了每个站点不透明度随季节的变化，彩色线表示 6 个国内的站点，黑色虚线代表了 ALMA，黑色点划线代表 Dome A。由于 ALMA 与 Dome A 位于南半球，为了便于对比，我们将 ALMA 的冬季与夏季数据进行交换，春季与秋季数据进行交换，Dome A 四季的数据区别不明显，因此没有对其进行交换。可以看出，Dome A 作为目前公认的全球最优站点，每个季节的不透明度都是最低的。我们选取的 4 个位置在秋、冬季节的不透明度与 ALMA 近似，在春季稍逊于 ALMA，在夏季时差距更大。全年来看，JJAMin 和 SONMin 可以达到 ALMA 的观测条件。从图中还可以看出，羊八井并不是一个非常理想的站点。除了夏季以外，我们所选的 4 个位置的不透明度与 ALMA 差距不大。图 2 对应的数据展示在表 2 中。

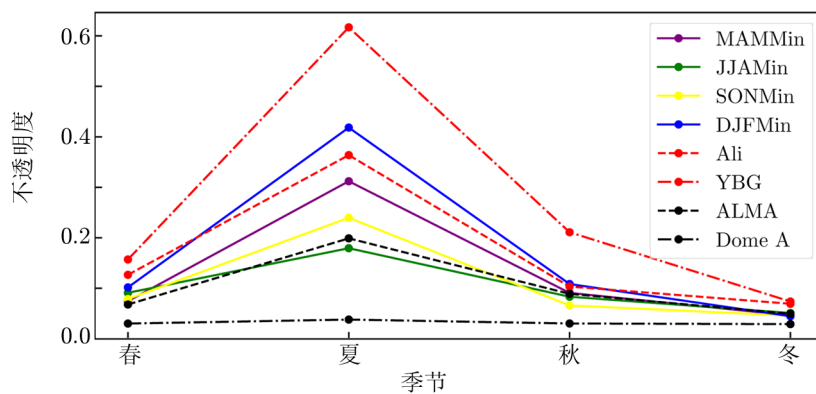


图 2 每个站点不透明度随季节的变化

表 2 站点不透明度随季节的变化

站点	春	夏	秋	冬
MAMMin	0.067	0.305	0.083	0.039
JJAMin	0.083	0.172	0.076	0.043
SONMin	0.071	0.232	0.058	0.038
DJFMin	0.094	0.411	0.101	0.037
YBG	0.150	0.610	0.204	0.066
Ali	0.119	0.356	0.096	0.062
ALMA	0.081	0.042	0.061	0.191
Dome A	0.023	0.021	0.0237	0.031

### 3 站点的综合评估

#### 3.1 站点评估的依据

气象条件对高频射电观测有诸多方面影响, 其中最直接的是  $PWV$ , 它也是对远红外波段天文学观测影响最严重的因素<sup>[19, 30]</sup>。 $PWV$  是大气中水蒸气在竖直方向的积分, 表达式为:

$$PWV = \frac{1}{\rho g} \int_{p_0}^0 q dp, \quad (1)$$

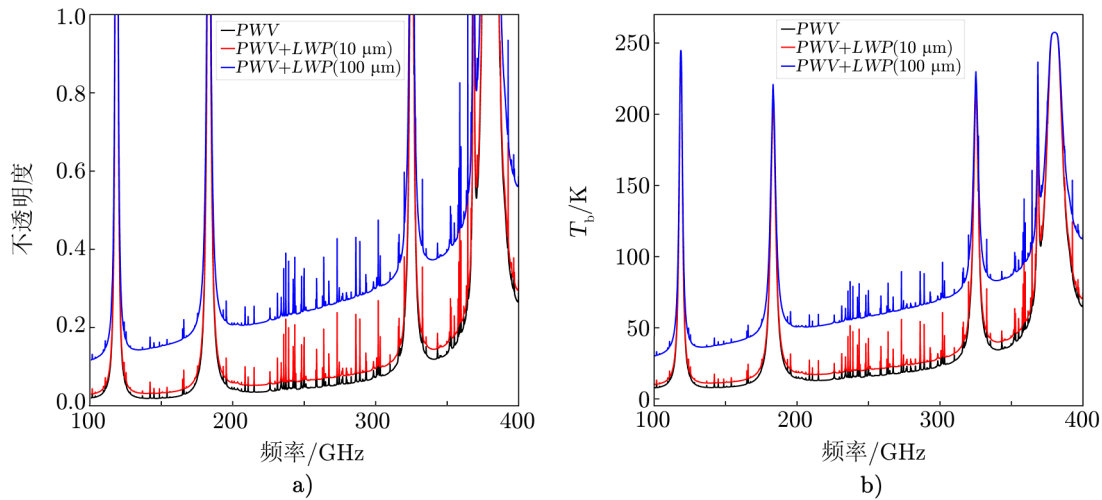
其中,  $\rho$  是液态水密度,  $g$  是重力加速度,  $p_0$  是地面压强,  $q$  是绝对湿度随压强的变化函数。 $PWV$  是预测天气时非常可靠的参考量, 现有的高海拔干燥地区的  $PWV$  测量地点相对较少, 测量点之间的距离太远<sup>[20, 21]</sup>, 提升测量  $PWV$  的空间与时间分辨率可以更有效地对天气进行预测<sup>[22, 23]</sup>。目前对于  $PWV$  的测量大多是通过星载平台使用红外光结合地面站进行, 例如星载设备 GOES-R<sup>[21]</sup>。地面站的数目过少可能导致空间分辨率下降, 这也是在初步选址之后仍然需要在候选站点处建立实验站的原因, 增加地面站数目获取更多的地面数据可以使选址更加可靠。卫星数据空间分辨率还不足以达到准确选址的要求。以 MERRA-2 数据为例, 它的空间分辨率对应的地面距离在 50 km 左右, 是一个格点的大小。最终站点的位置所处的范围肯定要远小于这个数值, 因此我们的工作可以为未来选址确定一个较大的范围, 具体的建站位置还需要地面站点的数据来确定。

$PWV$  是以气态形式在大气中存在的水, 大气中也有以液态形式存在的水, 例如云层中的水, 也会对亚毫米波产生强烈吸收。在气象学中通常以物理量液态水路径 ( $LWP$ ) 来表示云层中液态水的含量<sup>[24]</sup>, 它是大气中两点之间液态水含量的积分。对于某一个观测点, 整个大气柱的  $LWP$  定义为:

$$LWP = \frac{1}{g} \int_{p_0}^0 r_L dp, \quad (2)$$

其中,  $r_L$  是大气中液态水混合比随压强变化的函数。 $LWP$  可以通过微波辐射计等主动或被动遥感近似反演而得出<sup>[25, 26]</sup>,  $LWP$  表征云量。随着  $LWP$  的增加, 云层的辐射吸收率也会增加。对于高频射电观测,  $LWP$  的影响并不如  $PWV$  明显, 但是我们依然考虑了这

个量。图3展示了  $PWV$  与  $LWP$  对不同频率观测的影响，可以看出  $10\ \mu\text{m}$  和  $100\ \mu\text{m}$  的  $LWP$  对观测产生影响的区别：随着频率的增加， $LWP$  的影响逐渐增加。



注：a)  $LWP$  对不透明度的影响；b)  $LWP$  对普朗克亮温度的影响。

图3  $LWP$  对观测条件的影响

除了  $PWV$  和  $LWP$  这两个与水有关的因素以外，我们在工作中还考虑了风速。一个地区的风速不会对观测产生直接的影响，但是会对望远镜的指向造成干扰。观测时望远镜需要跟踪目标，过大的风速会使得望远镜产生晃动而造成目标丢失，因此风速也是选址时需要考虑的问题。

### 3.2 水的影响

尽管气态水在大气中的比例很低，但是依然会对毫米和亚毫米波长的电磁波产生很强的吸收， $PWV$  是衡量高频射电望远镜站点最重要的因素。除了  $PWV$  这种气态水以外，包含在云层内的液态水也是影响高频观测的重要因素，在毫米波与微波波段，液态水滴会产生很强的散射，同时也会影响观测的背景温度<sup>[19, 27]</sup>。

我们使用3年的数据对8个站点的  $PWV$  和  $LWP$  进行了对比，结果如图4所示，其中红线代表  $LWP$  与  $PWV$  各自的中位值，每张图的右上角标注了  $LWP$  的中位值。比较特别的是 ALMA，它的  $LWP$  中位值是0，可见该站点的云量极其稀少。我们所选的 JJAMin 站点  $LWP$  较高，这是该站点一个比较大的劣势。Dome A 的  $LWP$  中位值为  $0.104\ \mu\text{m}$ ，这样的  $LWP$  对观测的影响很小，其余站点的  $LWP$  均在  $10\ \mu\text{m}$  以下。

### 3.3 风速的评估

MERRA-2 提供了许多关于风速的数据，我们使用的是距地面 50 m 高处的气速。风速数据分为东西与南北 2 个方向，将这 2 个方向的数据进行矢量合成就是总的风速。图5展示了8个站点3年风速数据的累积分布函数图像，可 Dome A 在风速方面表现不佳，这是由南极地区特殊的气象条件导致的。我们所选取的 JJAMin 表现最优，它只有极少数的大

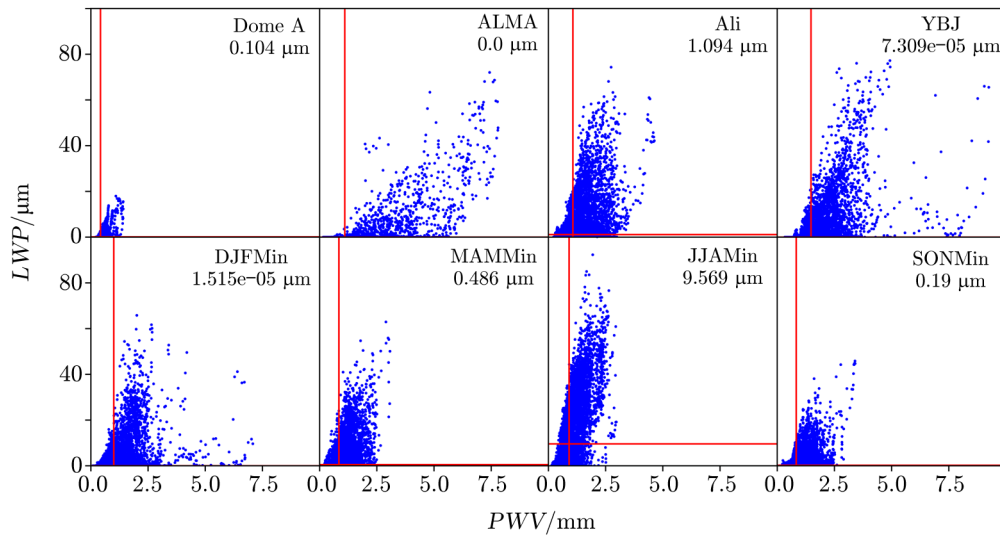


图 4 LWP 与 PWV 数据

风天气。EHT 所选取的羊八井站点在风速方面表现也很好, 我们所选取的 4 个位置中有 2 个的风速条件优于 ALMA。表 3 列出每一个站点风速超过 10 m/s 的比例, 可以看出, 除了 SONMin 站点外, 国内的其他 5 个站点风速条件都优于 ALMA。

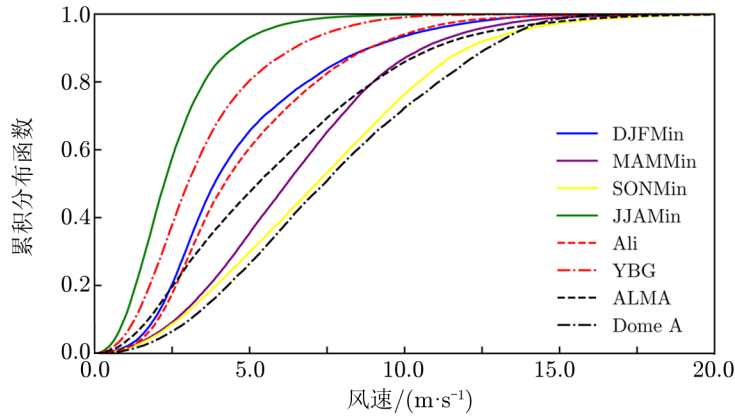


图 5 风速的累积分布函数

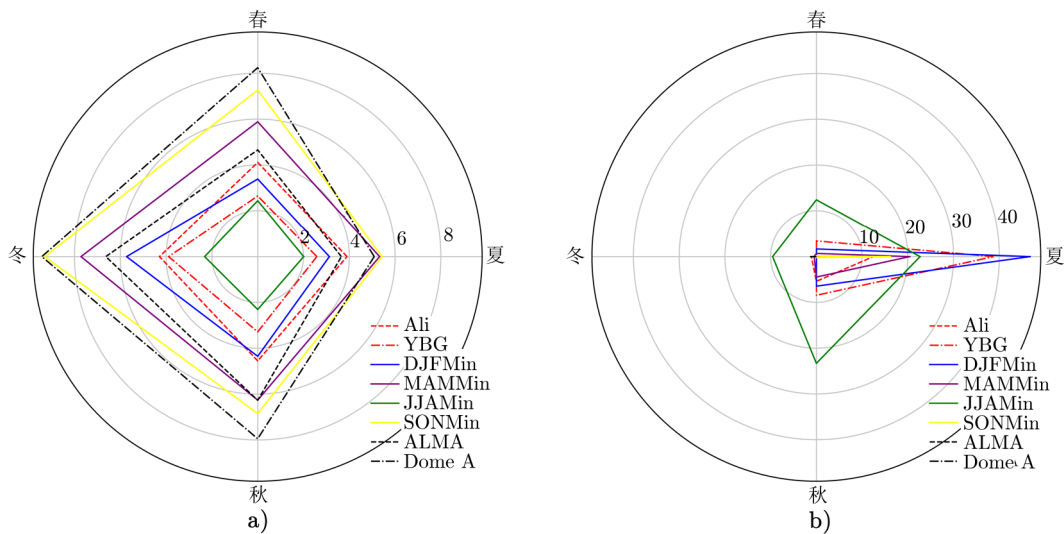
表 3 各站点风速超过 10 m/s 的比例

站点	JJAMin	YBG	Ali	DJFMin	MAMMin	ALMA	SONMin	Dome A
比例/(%)	0.23	0.97	5.95	6.56	13.01	14.13	23.61	27.66



### 3.4 季节之间的区别

为了进一步区分各位置的特征，我们对不同季节的风速与  $LWP$  数据进行了对比。8 个站点风速与  $LWP$  的季节分布情况见图 6，这里的数值是 3 年数据中每个站点的季节中位值，为了方便对比，我们将 Dome A 与 ALMA 的春、夏与秋、冬季节进行了互换。在图 6a) 中，风速情况最优的站点是 JJAMin，它的风速条件在每个季节中都是最优的；Dome A 在每个季节的风速条件都不好，这是南极地区普遍的气象特点；Ali、YBG、DJFMin 这 3 个格点的风速条件都优于 ALMA。SOMMin 的风速条件也比较差，在之前的讨论中，该站点的不透明度与 ALMA 近似，但是风速条件差很多。综合来看，这 8 个格点都是冬季风速最大，夏季风速最小，风速随季节有一定变化。



注：a) 风速的季节中位值 (单位为 m/s)；b)  $LWP$  的季节中位值 (单位为  $\mu\text{m}$ )。

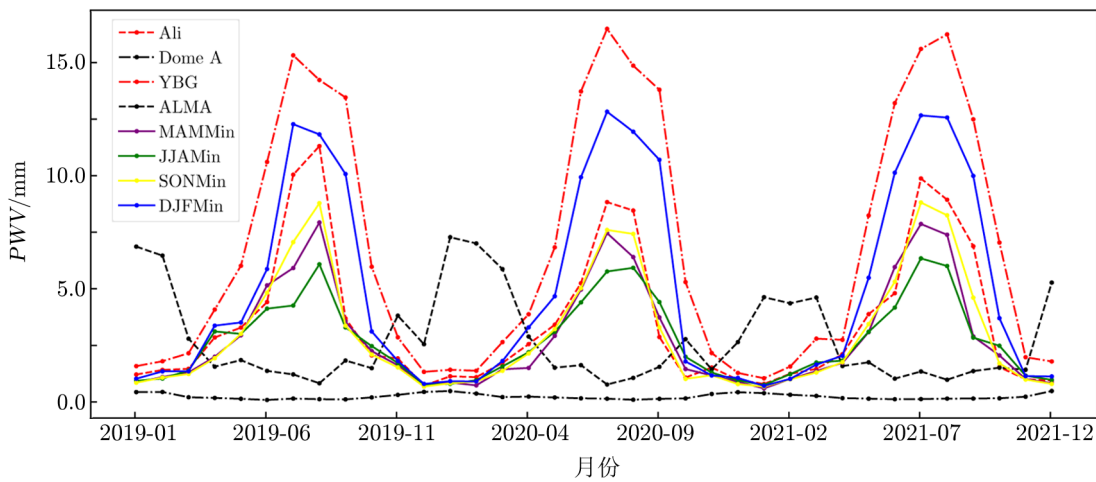
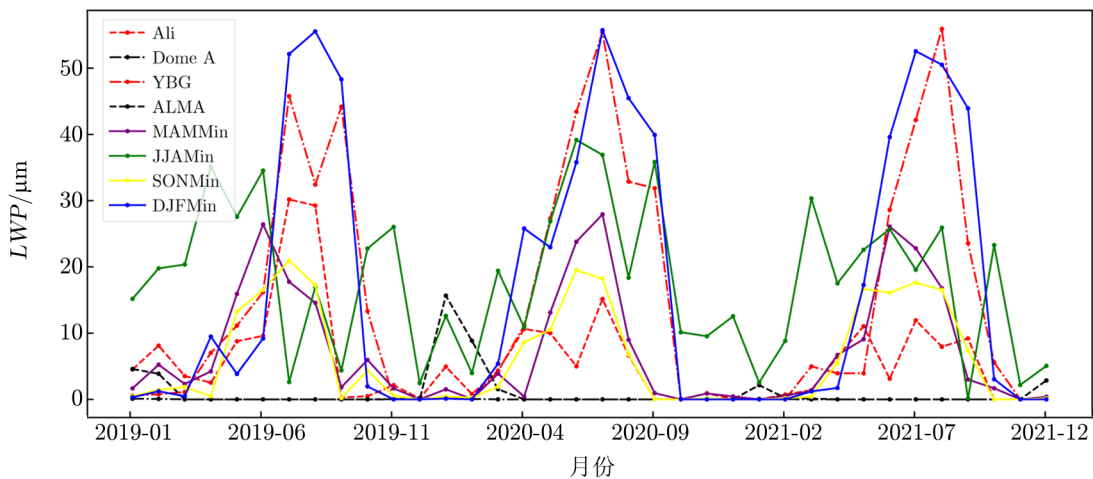
图 6 风速与  $LWP$  在不同季节的分布

图 6b) 展示了每个格点的  $LWP$  随季节的变化。可以看出，除了 JJAMin 之外，其余格点在冬季的  $LWP$  都非常低，而且季节差异明显，都集中在夏季。ALMA 与 Dome A 的  $LWP$  在每个季节都非常低，以至于在图上很难看到黑色的虚线与点划线，这也反映出了青藏高原地区站点的一个共有的缺点就是  $LWP$  过高，不过都集中于夏季，在春、秋季节较低，冬季可以与 Dome A 一样低。我们所选的 JJAMin 在夏季  $LWP$  是最高的，但是在冬季非常低，春、秋两季也低于  $10 \mu\text{m}$ ，其他 4 个站点也表现出相似的特征，可以推断西藏地区不太适合在夏季进行高频观测。

### 3.5 青藏高原地区的综合评估

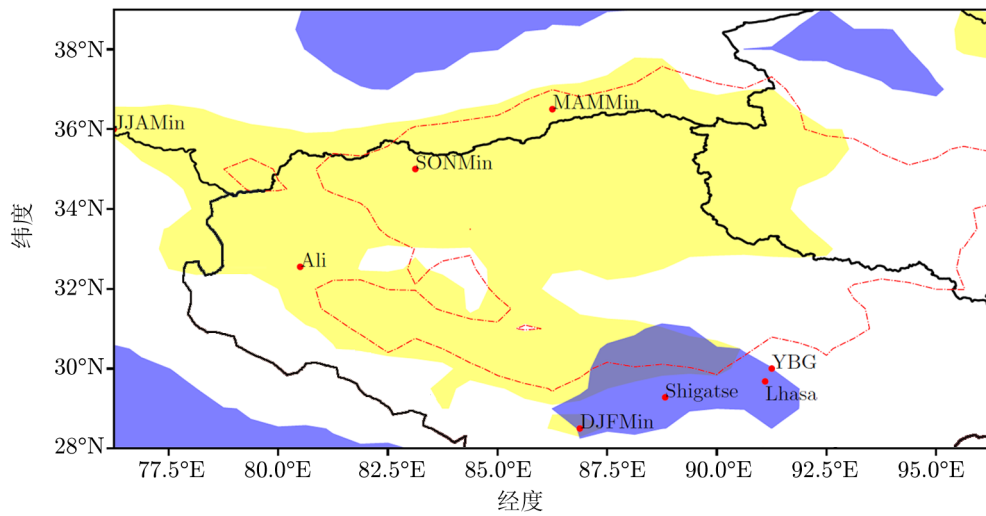
除了  $PWV$  与  $LWP$  随季节的变化以外，我们也考虑了这两个物理量中位值在 3 年内每个月的变化，结果见图 7 与图 8。可见 Dome A 点的  $PWV$  与  $LWP$  随月份的变化很小，这与图 6b) 的结论一致。ALMA 的  $LWP$  只有在当地夏季出现峰值，其余月份均为 0。国



图 7  $PWV$  随月份的变化图 8  $LWP$  随月份的变化

内站点中 MAMMin、JJAMin、SONMin 这 3 个站点的  $PWV$  可以达到 ALMA 的标准, 但是  $LWP$  均与 ALMA 相差较大。

之前的讨论以及  $PWV$  与  $LWP$  的逐月变化, 都显示了青藏高原地区冬季的优秀观测条件。我们以 ALMA 冬季的  $PWV$ 、 $LWP$ 、风速这 3 个物理量的中位值为标准, 对青藏高原地区的冬季观测条件进行综合评估。ALMA 冬季  $PWV$  中位值为 1.104 mm,  $LWP$  中位值为 0, 风速中位值为 6.634 m/s。我们将 ALMA 的  $PWV$  与风速中位值设置为参考标准,  $LWP$  标准设置为 0.001  $\mu\text{m}$ , 对青藏高原地区每个格点的冬季中位值做评估, 结果见图 9。图中黄色区域代表冬季  $PWV$  中位值低于 1.104 mm, 蓝色区域代表冬季  $LWP$  中位值低于 0.001  $\mu\text{m}$ , 红色点划线以外的区域代表冬季风速中位值低于 6.634 m/s。由图可见, 在日喀



注：黄色区域代表  $PWV < 1.104$  mm，蓝色区域代表  $LWP < 0.001$   $\mu\text{m}$ ，红色点划线以外的区域代表风速小于  $6.634$  m/s。

图9 满足 ALMA 标准的区域

则附近有 2 块小区域全部满足这 3 个标准，我们所选的 DJFMin 点处在其中一块区域的边缘上，这说明冬季青藏高原地区存在与 ALMA 近似的观测区域。

## 4 结论与展望

结合 MERRA-2 数据对本文所涉及的 8 个格点进行综合评估，我们认为青藏高原地区适合建设高频射电望远镜。6 个位于国内的格点（我们所选取的 4 个格点以及 Ali 和 YBG），大致可以展示出西藏地区的气候特点。在西藏北部与新疆交界处的 JJAMin 与 SONMin 虽然在不透明度方面表现很好，但是 JJAMin 的  $LWP$  很高，SONMin 的缺点在于风速太大，在夏季甚至超过了 Dome A，因此这 2 个格点并不是我们所寻找的理想目标。我们所选取的另外 2 个格点 DJFMin 与 MAMMin 综合来看是很不错的候选站点，在风速方面 MAMMin 与 ALMA 基本近似，DJFMin 要优于 ALMA，除夏季以外，这 2 个格点的  $LWP$  中位值都低于  $10$   $\mu\text{m}$ ，虽然差于 ALMA 但是在可接受范围内。在不透明度方面，除了夏季以外，这 2 个格点与 ALMA 差别不大，在冬季甚至优于 ALMA，因此这 2 个位置可以作为候选站点。

除了我们所选的 4 个格点以外，西藏境内的 Ali 与 YBG 在风速方面优于 ALMA，除夏季外  $LWP$  都低于  $10$   $\mu\text{m}$ ，但是在不透明度方面较差，YBG 站点也不是我们的理想目标，Ali 要相对好一些。Ali、DJFMin 和 MAMMin 这 3 个位置是各气象方面综合来看最优的。

EHT 下一步的主要观测目标是银心黑洞<sup>[29]</sup>，目标源在南天，因此对于站点的选取应该尽可能地选在南方，而 MAMMin 处在青藏高原北部，所以 MAMMin 不适合作为 EHT 的候选站点。DJFMin 是很理想的目标站点，我们考虑过它可能会受到珠穆朗玛峰的遮挡，珠

穆朗玛峰在该站点南方 57 km 处, 两者海拔分别为 5 163 m 与 8 848 m, 俯仰大概为  $3.7^\circ$ , 因此受到的遮挡可以忽略不计。该格点可以作为 EHT 的候选区域。

本文所使用的 MERRA-2 数据是卫星数据再分析产品, 虽然它的准确性在很多工作中得到了证实, 但是它与地面数据依然存在一定偏差<sup>[28]</sup>。在实际建立站点之前需要进一步分析地面的数据, 才能在 MERRA-2 的网格内部找到准确的台站选址, 这也是我们下一步的计划。除此之外, 从 20 世纪 90 年代开始, 受全球变暖的影响, 青藏高原地区逐渐变得潮湿<sup>[31-33]</sup>, 这必然会对我们的选址工作造成困难。我们的工作是对青藏高原地区进行初步评估, 并只使用了 3 年的数据 (时间跨度较小); 下一步的工作中计划使用 1980—2020 这 40 年的 MERRA-2 数据, 进行更全面的评估并且描述具体站点的气候变化。

### 参考文献:

- [1] Sheperd D, Eric A, Don B, et al. In *astro2010: The Astronomy and Astrophysics Decadal Survey*, 2010: 68
- [2] Event Horizon Telescope Collaboration. *ApJ*, 2019, 875: L1
- [3] Event Horizon Telescope Collaboration. *ApJ*, 2019, 875: L2
- [4] Event Horizon Telescope Collaboration. *ApJ*, 2019, 875: L3
- [5] Event Horizon Telescope Collaboration. *ApJ*, 2019, 875: L4
- [6] Event Horizon Telescope Collaboration. *ApJ*, 2019, 875: L5
- [7] Event Horizon Telescope Collaboration. *ApJ*, 2022, 930: L12
- [8] Event Horizon Telescope Collaboration. *ApJ*, 2022, 930: L13
- [9] Event Horizon Telescope Collaboration. *ApJ*, 2022, 930: L14
- [10] Event Horizon Telescope Collaboration. *ApJ*, 2022, 930: L15
- [11] Event Horizon Telescope Collaboration. *ApJ*, 2022, 930: L16
- [12] Blackburn L, Pesce D W, Johnson M D, et al. *ApJ*, 2020, 894: 31
- [13] Raymond A W, Palumbo D, Paine S N, et al. *ApJS*, 2021, 253: 5
- [14] Ye Q, Su M, Li H, et al. *MNRAS*, 2016, 457: L1
- [15] Kuo C. *ApJ*, 2017, 848: 64
- [16] Gelaro R, McCarty W, Suárez M J, et al. *Journal of Climate*, 2017, 30: 5419
- [17] Paine S. <https://zenodo.org/records/6774376>, 2022
- [18] Shi S, Paine S, Yao Q, et al. *Nature Astronomy*, 2016, 1: 1
- [19] Lay O P, Halverson N W. *ApJ*, 2000, 543: 787
- [20] Maussion F, Scherer D, Molg T, et al. *Journal of Climate*, 2014, 27: 1910
- [21] Schmit T J, Griffith P, Gunshor M M, et al. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2017, 98: 681
- [22] Chen B, Dai W, Liu Z, et al. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, 11: 5153
- [23] Marcus S, Kim J, Chin T, et al. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2007, 46: 1828
- [24] Turner D D, Vogelmann A M, Austin R T, et al. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2007, 88: 177
- [25] Wentz F J. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102: 8703
- [26] Hilburn K A, Wentz F J. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2008, 47: 778
- [27] Bussmann R S, Holzapfel W L, Kuo C L. *ApJ*, 2005, 622: 1343
- [28] Li Y, Liu Y, Li S. *arXiv:1709.09053*, 2017
- [29] Doeleman S S, Weintroub J, Rogers A E E. *Nature*, 2008, 455: 78

- [30] Minier V, Olmi L, Durand G, et al. *EAS Publications Series*, 2010, 40: 269  
[31] Yang K, Wu H, Qin J, et al. *Global and Planetary Change*, 2014, 112: 79  
[32] Zhang Q, Evans M N, Lyu L. *Nature Communications*, 2015, 6: 1  
[33] Sun J, Yang K, Guo W, et al. *Journal of Climate*, 2020, 33: 8507

## Site Selection and Evaluation of Submillimeter Wave Telescopes for Next-Generation Event Horizon Telescopes

CHENG Yuan<sup>1,2,3</sup>, LU Ru-sen<sup>2,4</sup>, SHEN Zhi-qiang<sup>2,4</sup>, YU Wei<sup>5</sup>

(1. *ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China*; 2. *Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China*; 3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 4. *Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*; 5. *Center for Astrophysics | Harvard & Smithsonian, Cambridge, MA02138, USA*)

**Abstract:** In 2019, the Event Horizon Telescope (EHT) used very long baseline interferometry to capture the first-ever image of a black hole. To meet the demand for dynamic imaging of black holes, the next generation of the EHT array will incorporate more stations located in the eastern hemisphere. The Tibet Plateau in China is the highest region on average elevation in the world, and its unique meteorological conditions make it a potential candidate for site selection. In this paper, we conducted a preliminary evaluation of the high-frequency radio observation conditions in the Tibet Plateau region using MERRA-2 data from the past three years (2019–2021), consisting of 759 data grid points. Based on the opacity performance of these grid points in different seasons, we selected the optimal grid points for each of the four seasons. In addition to the meteorological conditions of the already established sites, we evaluated these four grid points based on three meteorological factors: precipitable water vapor (PWV), liquid water path (LWP), and wind speed. Furthermore, using the meteorological conditions of the Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) as a standard, we defined the preliminary range for the site selection of the new station.

**Key words:** EHT; opacity; PWV; LWP