

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2019.03.001

## 光通信地面网络候选站址的大气信道特性统计检验

钱璇<sup>1,2</sup>, 姚永强<sup>1</sup>, 尹佳<sup>1,2</sup>, 魏合理<sup>3</sup>, 戴聪明<sup>3</sup>, 张长全<sup>4</sup>, 强希文<sup>5</sup>

(1 中国科学院国家天文台, 北京 100101;

2 中国科学院大学, 北京 100049;

3 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;

4 北京空间信息中继传输技术研究中心, 北京 100094;

5. 激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024 )

**摘要:** 激光通信地面站址的大气信道特性决定着设备性能的有效发挥。选择四个候选站址, 西藏阿里、青海德令哈、四川稻城和河北兴隆, 统计检验云量覆盖、大气透过率、天空辐射度和大气湍流等特征对激光通信的影响。结果显示, 单站可用度条件以阿里为最佳; 三站联合可用度以阿里-德令哈-兴隆最好, 在少云条件下(云量低于60%)全年可用度85%以上; 少云条件下的四站联合可用度在5~8月为91%~96%, 其它月份98%以上。四个候选站址的大气光学特性均能满足激光通信传输的要求。高海拔站址的大气透过率与辐射度有明显优势, 阿里、稻城的夜间大气相干长度在10 cm以上, 德令哈在8~12 cm间, 兴隆站在6 cm以上。在多站联合模式下应能在高海拔的少云区选择出足够高可用度的站址。

**关键词:** 激光通信; 可用度; 大气光学特性; 候选站址

中图分类号: TN929

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2019)03-0161-010

## Statistical Inspection of Atmospheric Channel Characteristics for Ground Candidate Sites for Optical Communication

QIAN Xuan<sup>1,2</sup>, YAO Yongqiang<sup>1</sup>, YIN Jia<sup>1,2</sup>, WEI Heli<sup>3</sup>, DAI Congming<sup>3</sup>,  
ZHANG Changquan<sup>4</sup>, QIANG Xiwen<sup>5</sup>

(1 National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

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

4 Beijing Space Information Relay Transmission Technology Research Center, Beijing 100094, China;

5 State Key Laboratory of Laser and Material Interaction, Xi'an 710024, China)

**基金项目:** Supported by National Natural Science Foundation of China(国家自然科学基金, 11203044, 11073031, 11373043, 11303055, 11103042)

**作者简介:** 钱璇(1985-), 女, 江苏人, 博士, 助理研究员, 主要从事天文选址远程研究、天文观测、大气条件等方面的研究。

**E-mail:** qianxuan@nao.csa.cn

**收稿日期:** 2018-03-14; **修改日期:** 2018-04-18

**Abstract:** The atmospheric channel characteristics of laser communication ground station determine the equipment performance. Four candidate sites, Ali in Tibet, Delingha in Qinghai, Daocheng in Sichuan, and Xinglong in Hebei China, were selected for statistical inspection of the effects on laser communication, including the factors of cloud coverage, atmospheric transmittance, sky background radiation, and atmospheric turbulence. It was shown that Ali is the best for single station availability; Ali-Delingha-Xinglong is the best for the three-station combined availability, more than 85% in full year under 60% cloudiness. For the four stations under 60% cloudiness, the combined availability can be 91%~96% in May to August, and reaches more than 98% in other months. The atmospheric optical properties of the four candidate sites meet requirement of laser communication. The high altitude sites have obvious advantages in atmospheric transmittance and background radiance. The atmosphere coherence length in night is larger than 10 cm in Ali and Daocheng, and 8~12 cm in Delingha, and just higher than 6 cm above for Xinglong. In multi-station combined mode, good sites, with sufficient high availability and meeting optical communication requirements, could be selected in high altitude and less cloud areas.

**Key words:** laser communication; availability; atmospheric optical characteristics; candidate site

## 1 引言

建立光学深空地面接收网是实现空天地一体化概念的有效方案,较空基接收站可极大地降低成本和风险。为了全面探索光学地面接收网,必须考虑激光束同大气层之间的相互作用。大气内的云、雾、霾等和其他降水可能带来激光信号的严重衰减,导致信号中断,通过气象分集或全球云层分布,能以较高概率至少在地面上的一个位置为光学链路提供一条无云视线(Cloud free line of sight, CFLOS)<sup>[1]</sup>,根据光通信系统的设计,接收来自空间的激光束、发射瞄准参考信标或上行链路指令激光时,都必须维持CFLOS,尤其当接收和发射终端不在地面同一位置时,这可能是需要重点考虑的问题。另外,大气分子和气溶胶对激光信号的吸收和散射导致的光频衰减,决定了从空间能接收或发射到空间的激光信号,选择不在强吸收带的激光波长十分关键。激光通信要求在白天和晚上都能以较高正确检测率工作,天空辐射或是由大气成分引起的阳光散射和反射,在确定链路性能时起重要作用。大气湍流会引起大气的光学折射率出现随机起伏,造成光束出现光强闪烁、漂移、扩展和到达角起伏等,使接收光信号受到干扰和通信误码率上升,影响光通信的稳定性。为了地球自转时能保证深空到地面数据传输的连续性,需组建望远镜网,因此,地面光学深空网络的站址选择是其关键性工作之一,需要选择在云量覆盖少且可统计预测、天空背景辐射低、大气湍流弱和大气高透射特性的地区建立发射站和接收站。

本文基于西部天文选址结果<sup>[2-5]</sup>,选择了四个候选站址对其大气信道特性进行统计检验,通过分析其激光通信地面观测条件的优劣,为星地激光通信地面站选址决策提供技术支撑。所选取的四个候选站址均属国内的优良站点。西藏阿里站(32.32°N, 80.03°E, 5050 m)位于藏西南天气最好地区,全年云量少,适合全天候的空间观测;青海德令哈站(37.37°N, 97.71°E, 3200 m)地处干旱地区,全年云量较少,可用观测概率较高;四川稻城站(29.15°N, 100.08°E, 4720 m)是西南地区的优良站点,仅夏季条件较差;河北兴隆站(40.39°N, 117.58°E, 960 m)地处华北地区,是国内成熟的天文光学观测基地。四个候选站址位置距离遥远,具备气候的相对独立性。

## 2 可用度条件

云量覆盖是大气信道可用性判定的最重要条件, 视线内存在云时, 链路会被阻挡, 决定性地影响到地面 - 空间光传播效率和空域视场。选用中国气象局整编的基本基准地面站的 1951~2008 年云量日值资料集, 分析四个站址的可用度条件。全天云量覆盖为 100%, 按云量  $\leq 10\%$ 、云量  $\leq 30\%$ 、云量  $\leq 60\%$ 、云量  $< 80\%$  四种条件作为全晴天、晴天、少云和多云的标准。通常以可用度表示云量满足上述标准的可用天数的概率。

### 2.1 单站可用度统计

图 1 分别给出了云量  $\leq 10\%$ 、云量  $\leq 30\%$ 、云量  $\leq 60\%$ 、云量  $< 80\%$  四种条件下各台站的可用度逐月变化趋势。整体来看, 各站址的春夏季节可用度较低, 秋冬季较高。阿里站在大多数月份优于其它站址, 冬季可用度条件与稻城站相差不多; 稻城站的冬季可用度最高, 但在夏季明显劣于其它站址; 德令哈和兴隆站的可用度相当, 兴隆站在多数月份略优于德令哈。

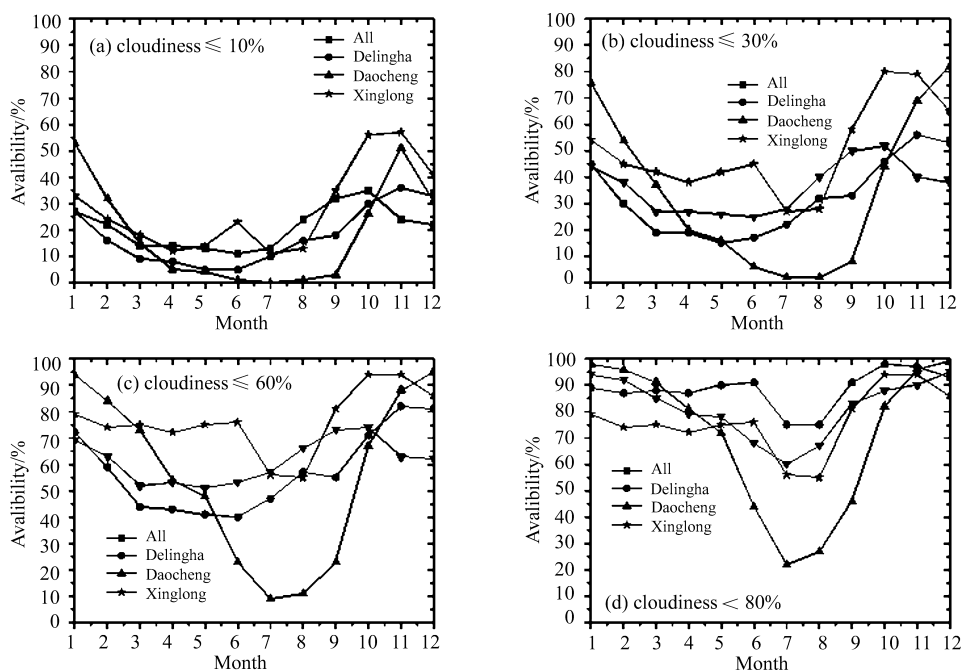


图 1 云量  $\leq 10\%$ (a)、 $\leq 30\%$ (b)、 $\leq 60\%$ (c)、 $< 80\%$ (d) 条件下四个站址的可用度季节变化

Fig.1 Seasonal variations of availabilities with cloudiness  $\leq 10\%$ (a)、 $\leq 30\%$ (b)、 $\leq 60\%$ (c) and  $< 80\%$ (d) of the four sites

云量 30% 以下时, 稻城站可用度的季节变化最大, 其冬季可用度最高, 而在夏季却是最低。云量 60% 以下的单站可用度全年分布在 40~95% 之间, 也只是稻城例外, 冬季高值达 95%, 夏季却低于 10%; 阿里站在夏季 7、8 月的可用度与兴隆、德令哈相当, 其余月份均较高。云量 80% 以下的可用度大都在 60% 以上, 阿里与稻城的冬季可用度高值在 95% 以上。就整体均值看, 阿里站的可用度较高, 德令哈的可用度较低、仅在少云条件下略优于稻城站。

### 2.2 三站联合可用度统计

三站联合可用度采用公式  $A = 1 - (1 - P_1) \times (1 - P_2) \times (1 - P_3)$  计算;  $A$  为可用度,  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  为各联合台站的云量覆盖 (单位 %)。分别在云量  $\leq 10\%$ 、云量  $\leq 30\%$ 、云量  $\leq 60\%$ 、云量  $< 80\%$  四种条

件下计算了三站联合可用度。

图 2 以 30% 云量以下、60% 云量以下为例, 给出了三站联合可用度的季节变化。在云量 30% 以下条件下, 三站联合可用度全年在 40% 以上, 秋冬季的高值达 95% 以上。德令哈 - 稻城 - 兴隆的联合可用度在大多月份中较低, 阿里 - 德令哈 - 兴隆的联合可用度普遍较高。稻城在夏季的低可用度特征明显地拉低了三站联合可用度。

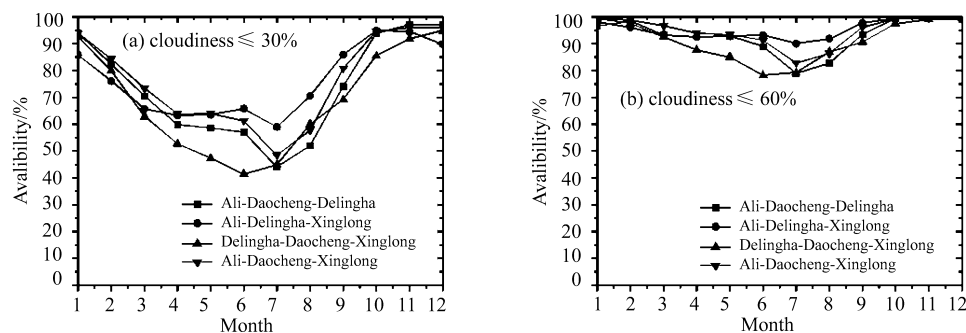


图 2 三站联合可用度季节变化趋势。(a) 云量  $\leq 30\%$ 、(b)  $\leq 60\%$

Fig.2 Seasonal variations of joint availabilities of three sites. (a) Cloudiness  $\leq 30\%$ , (b) cloudiness  $\leq 60\%$

在云量 60% 以下时, 全年的三站联合可用度多在 85% 以上, 秋冬季节高值可接近 100%, 德令哈 - 稻城 - 兴隆的三站联合可用度依然为最低。

### 2.3 四站联合可用度统计

四站联合可用度采用公式  $A = 1 - (1 - P_1) \times (1 - P_2) \times (1 - P_3) \times (1 - P_4)$  计算; 同样地分别在云量  $\leq 10\%$ 、云量  $\leq 30\%$ 、云量  $\leq 60\%$ 、云量  $< 80\%$  四种条件下计算了四站联合可用度。

表 1 不同云量覆盖条件下四站分集可用度统计

Table 1 Seasonal statistics of joint availability of the four sites

月	云量 $\leq 10\%$	云量 $\leq 30\%$	云量 $\leq 60\%$	云量 $< 80\%$
1	83.2	96.6	100	100
2	66.1	89.0	99.4	100
3	45.5	78.4	99.2	99.9
4	34.6	70.7	98.2	99.8
5	31.8	69.4	96.2	99.8
6	35.5	67.8	94.8	99.4
7	30.3	59.8	91.0	97.4
8	45.0	71.2	94.1	98.3
9	64.8	87.1	98.2	99.8
10	85.2	97.1	99.9	100
11	89.8	98.3	99.9	100
12	78.7	98.4	99.9	100

表 1 中列出了不同云量标准的四站联合可用度。明显地, 四站联合的观测可用度均有大幅提升。全晴天条件下, 全年的观测可用度在 30~90% 之间; 晴天条件下的联合可用度提升到了 60% 以上, 秋冬季节更

是在 95% 以上; 在云量 60% 以下少云时, 夏季的联合可用度在 91% 以上, 秋冬季达到了 99.9%; 在云量低于 80% 标准下, 全年联合可用度均在 97% 以上, 秋冬季达到 100%。

图 3 给出了云量在各标准条件下的四站联合可用度的季节变化。在云量 60% 以下标准时, 全年可用度均高于 91%; 云量 30% 以下的联合可用度的季节变化依然明显, 夏季最低 60%, 秋冬季高值 95% 以上。

以上统计检验说明, 采用多站联合模式, 可以在国内的少云区域选择出具有足够高的联合可用度的站址。

### 3 大气光学特性

影响激光传输的主要因素有大气分子和气溶胶粒子吸收和散射造成的衰减效应以及大气湍流引起的干扰效应。湍流干扰效应以各站址的大气相干长度及误码率范围来表征其条件优劣。衰减效应通过分

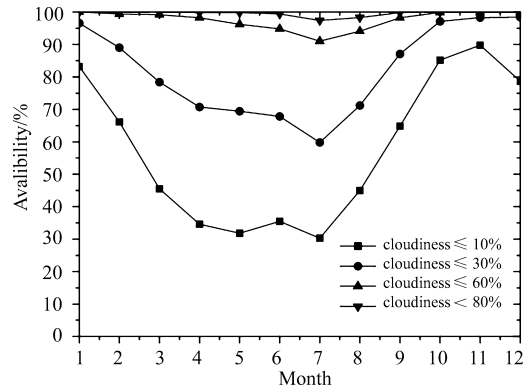


图 3 不同云量条件下四站联合可用度季节变化

Fig.3 Seasonal variations of joint availabilities of four sites with different cloudiness

表 2 对应于不同波长和天顶角的各站址在冬夏季的大气透过率统计

Table 2 Seasonal statistics of atmospheric transmittance at different wavelengths and zenith angles

台站	波长 (λ/μm)	夏季			冬季		
		10° 观测 天顶角	40° 观测 天顶角	70° 观测 天顶角	10° 观测 天顶角	40° 观测 天顶角	70° 观测 天顶角
阿里站	0.5	0.88	0.84	0.62	0.9	0.85	0.65
	0.671	0.94	0.91	0.76	0.95	0.92	0.8
	0.85	0.98	0.96	0.9	0.99	0.985	0.92
	1.064	0.99	0.98	0.92	0.995	0.99	0.96
德令哈站	0.5	0.84	0.76	0.5	0.85	0.8	0.56
	0.671	0.9	0.86	0.7	0.92	0.87	0.75
	0.85	0.94	0.92	0.85	0.96	0.95	0.88
	1.064	0.96	0.95	0.89	0.98	0.965	0.93
稻城站	0.5	0.87	0.83	0.6	0.89	0.85	0.64
	0.671	0.91	0.87	0.75	0.93	0.9	0.76
	0.85	0.96	0.95	0.89	0.985	0.98	0.92
	1.064	0.98	0.97	0.91	0.995	0.99	0.94
兴隆站	0.5	0.69	0.62	0.29	0.72	0.64	0.32
	0.671	0.78	0.73	0.48	0.79	0.74	0.5
	0.85	0.87	0.84	0.67	0.88	0.85	0.7
	1.064	0.9	0.87	0.74	0.91	0.89	0.75

析各站址不同波长处的大气透过率和天空辐射度来评价。

激光通信的应用波长范围一般在  $0.5\sim 2\ \mu\text{m}$  之间<sup>[1]</sup>。考虑了各种影响因素<sup>[6]</sup>, 大气辐射传输软件 Modtran4<sup>[7]</sup> 根据地理纬度和季节建立了不同的大气模型。鉴于国内各地区地理条件差异明显, 中国科学院大气成分与光学重点实验室进一步研发 CART 计算软件<sup>[8-10]</sup>, 提高了大气辐射传输计算结果的可靠性。采用 CART 软件分别计算了四个站点在  $0.5\sim 2\ \mu\text{m}$  波段的大气透过率和天空辐射度, 光谱分辨率  $1\ \text{cm}^{-1}$ 。计算采用北半球中纬度夏冬季大气模式, 以乡村模型描述气溶胶组成并选择能见度  $23\ \text{km}$ ; 主要考察白天情况, 太阳天顶角限制  $45^\circ$ , 观测方向与太阳的相对方位角为  $0^\circ$ 。在观测天顶角分别为  $10^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $70^\circ$  条件下, 分析各个站点的大气透过率和天空辐射度, 及其随观测天顶角变化的关系。

### 3.1 大气透过率

表 2 给出对应于不同观测波长和天顶角的各站址在冬夏季的大气透过率统计结果简单比较即可看出, 观测波长增大, 大气透过率升高; 观测天顶角增大, 大气透过率下降; 冬季的大气透过率一般好于夏季; 台站海拔高度提高, 大气透过率也升高。这些结果均符合对大气信道特性的一般规律性认识。

在四个候选站址中, 阿里站的大气透过率最高, 对应于不同波段大都在  $90\%$  以上, 对应于观测天顶角  $70^\circ$  的低值也在  $60\%$  以上。稻城站和德令哈站的大气透过率大都在  $80\%$  以上; 低海拔的兴隆站相对较差, 大气透过率基本上是在  $60\%$  以上, 而短波长低仰角的透过率降到了  $50\%$  以下。图 4 给出了阿里站和兴隆站在冬季、观测天顶角  $10^\circ$  的大气透过率谱。

图 5 是以夏季、观测天顶角  $10^\circ$  为例, 给出对应于各波长的大气透过率随四个站址海拔高度的变化。

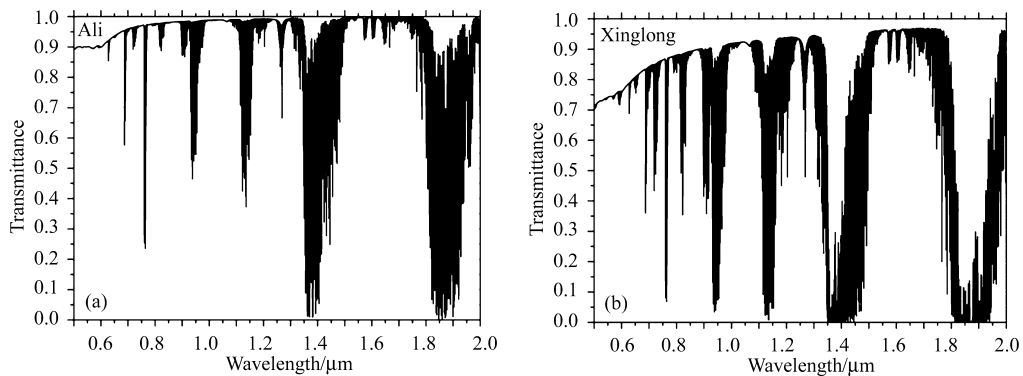


图 4 阿里、兴隆冬季观测天顶角  $10^\circ$  时的大气透过率谱

Fig.4 Spectrum of atmospheric transmittance of Ali and Xinglong, with a zenith angle of  $10^\circ$  in winter

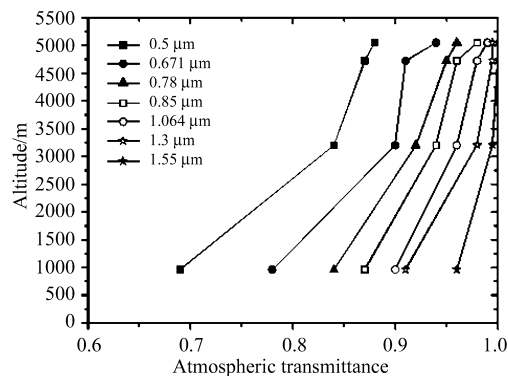


图 5 夏季观测天顶角  $10^\circ$  时, 对应各波长的大气透过率随海拔高度的变化

Fig.5 Variations of atmospheric transmittance with altitudes, with a zenith angle of  $10^\circ$  in summer

随着站址海拔高度的提高, 各个波长的大气透过率呈现出明显的递增; 随着观测波长的增大, 大气透过率逐步提高, 而海拔高度的影响也逐步减弱。

### 3.2 天空辐射度

表 3 给出对应于不同观测波长和天顶角的各站址在冬夏季的天空辐射度统计结果。天空辐射度同

表 3 不同波长处各站址冬夏季在不同天顶角的天空辐射度统计

Table 3 Statistics of irradiance with different zenith angles and wavelengths for the sites in summer and winter

台 站	波长 ( $\lambda/\mu\text{m}$ )	夏季			冬季		
		10°	40°	70°	10°	40°	70°
阿里站	0.5	0.77	2.42	3.23	0.51	1.42	3.15
	0.671	0.57	2.02	2.77	0.32	1.12	2.64
	0.85	0.27	0.98	1.40	0.14	0.52	1.27
	1.064	0.21	0.74	1.08	0.1	0.37	0.9
德令哈站	0.5	1.19	3.85	3.23	0.75	2.19	4.51
	0.671	0.98	3.49	2.77	0.53	1.91	4.23
	0.85	0.5	1.83	1.40	0.26	0.98	2.22
	1.064	0.4	1.47	1.08	0.19	0.75	1.71
稻城站	0.5	0.82	2.58	3.40	0.54	1.49	3.29
	0.671	0.62	2.18	2.96	0.34	1.19	2.79
	0.85	0.3	1.08	1.51	0.15	0.56	1.35
	1.064	0.23	0.81	1.17	0.11	0.4	0.97
兴隆站	0.5	2.26	9.30	7.11	1.51	4.90	8.30
	0.671	2.22	10.5	8.42	1.38	5.35	9.98
	0.85	1.25	6.40	5.22	0.77	3.21	6.28
	1.064	1.08	5.79	4.70	0.65	2.83	5.63

注: 夏冬季节 10°、40°、70° 不同观测天顶角对应的各站址天空辐射度采用科学计数法 (E-07)[W/(cm<sup>2</sup>·sr·μm)].

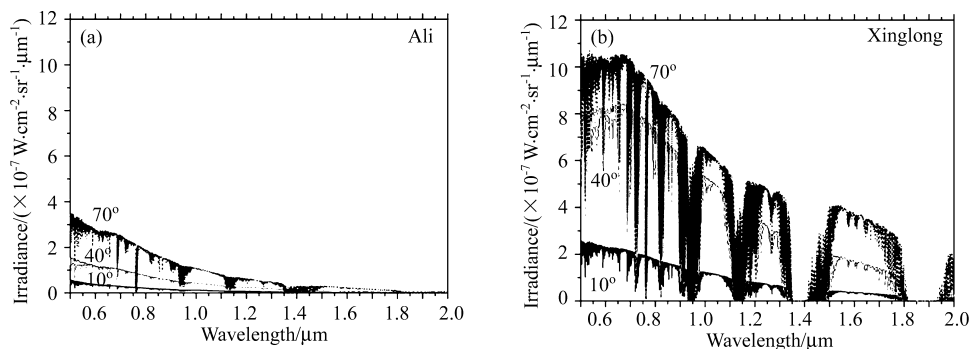


图 6 在天顶角为 10°、40°、70°, 太阳天顶角为 45°, 能见度为 23 km 时, (a) 阿里和 (b) 兴隆冬季的天空辐射谱

Fig.6 Spectrum of sky irradiance of (a) Ali and (b) Xinglong in winter with zenith angles of 10°、40°、70°, under the conditions of solar zenith angle 45°and visibility of 23km

样与站址海拔高度关系密切,在所选站址中,阿里和稻城的辐射度最小,兴隆站的辐射度相对较大。观测波长增大,辐射度降低;观测天顶角增加,辐射度也明显增大;各站址的夏季辐射度明显高于冬季。

图 6 所示为在太阳天顶角为  $45^\circ$ 、能见度为 23 km 时,观测天顶角为  $10^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $70^\circ$  的阿里和兴隆的冬季天空辐射谱。天空辐射度随着观测天顶角的增大有明显升高;天空辐射度随波长增加而减小的趋势与站址局地的大气辐射温度相关。阿里站的天空辐射度优于兴隆站,应与站址的海拔高度和冬季上空的大气温度分布都有关系。

图 7 是以夏季、观测天顶角  $10^\circ$  为例,给出各波长的辐射度随海拔高度的变化。对应于各个观测波长的天空辐射度随着海拔高度增大而明显减小;随着观测波长的增大,天空辐射度逐步减小,同时海拔高度的影响也逐步减弱。选取高海拔站址,可有效减少天空辐射度的影响。

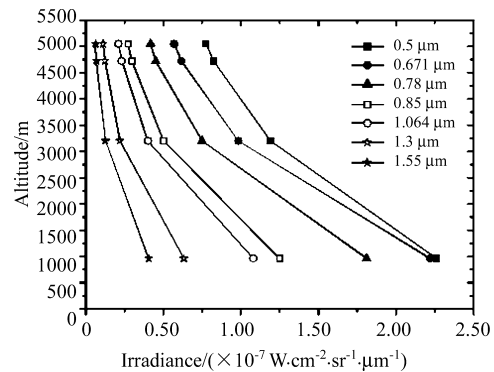


图 7 夏季观测天顶角  $10^\circ$  时对应各波长的天空辐射度随海拔高度的变化

Fig.7 Variations of sky irradiance with altitude, with a zenith angle of  $10^\circ$  in summer

### 3.3 大气湍流效应

对于星地激光相干探测通信链路,大气湍流易使光场的空间相干性受到破坏。相干激光通信系统对入射光场的波前相位极为敏感,波前畸变会造成接收光场的空间相干性退化严重,相干效率急剧下降,误码率大大增加。

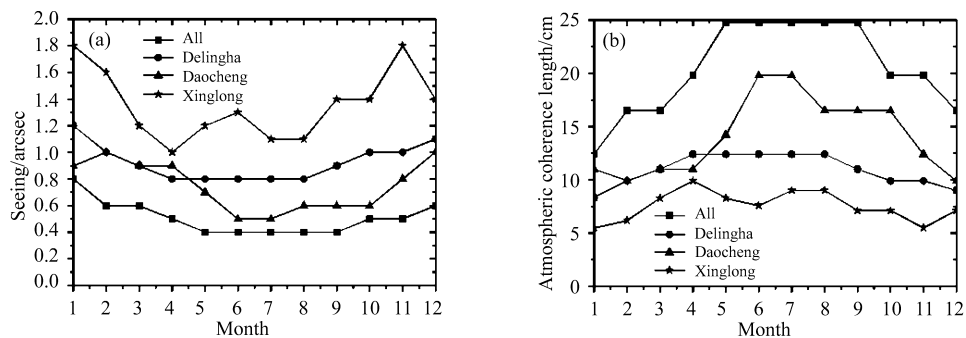


图 8 各台站视宁度 (a) 和大气相干长度 (b) 的季节变化趋势

Fig.8 Seasonal variations of seeing (a) and atmospheric coherence length (b) of each site

图 8 所示为基于大气模式 WRF 计算统计的各站址夜间视宁度及大气相干长度的逐月变化。阿里站的视宁度条件最好,大气相干长度都在 12 cm 以上,4~11 月期间大气相干长度可达 20 cm 以上。德令哈的视宁度多在 1 角秒以下,对应的大气相干长度在 12 cm 左右,秋冬季节稍差。稻城站的视宁度条件也很好,对应的大气相干长度在夏秋季节 16 cm 以上,冬春季节 10 cm 左右。兴隆站的视宁度相对较差,对应的大气相干长度均在 10 cm 以下,11~2 月期间只有 6 cm 左右。

实际上,各台站的视宁度模式计算结果一般要比实测值低,虽然其年变化趋势大体一致。前期选址结果<sup>[2,11-13]</sup>,阿里站实测夜间视宁度年均值在 0.84 角秒左右,稻城站的实测夜间视宁度 0.92 角秒,这两个站址夜间视宁度条件较好,对应的大气相干长度在 10~12 cm 程度。兴隆站和德令哈的实测夜间视宁度中值分别为 1.3 角秒<sup>[14]</sup>和 1.58 角秒<sup>[15]</sup>,对应的大气相干长度为 6~8 cm 程度。



在星地光通信实验中,一般在大气相干长度 10 cm 以上时,星地信道传输 5 Gps 的误码率优于  $10^{-9}$ ;大气相干长度在 6 cm 时误码率在  $10^{-5}$  量级,可以认为基本满足光通讯要求。由此标准来看,兴隆站和德令哈的大气相干长度在 6~8 cm,阿里站与稻城站的大气相干长度均在 10~12 cm;因此所选四个站址的夜间视宁度条件均可以满足光通信的要求。

## 4 结 论

对西藏阿里、青海德令哈、四川稻城和河北兴隆四个地面光学候选站址的大气信道特性进行统计检验,分析了云量覆盖、大气透过率、天空辐射度和大气湍流等条件的优劣,为光通信地面光学接收网站址选择决策提供基础数据。

四个候选站址距离遥远,为相对独立气候区。单站的可用度条件以阿里为最佳、稻城较差。三站联合可用度以阿里-德令哈-兴隆最好,在云量  $\leq 60\%$  条件下全年的可用度在 85% 以上。四站联合可用度在云量  $\leq 60\%$  条件下,5~8 月为 91%~96%,其它月份均在 98% 以上。说明在多站联合模式下应可能在国内的少云区域选择出足够高可用度的站址。

四个候选站址的大气光学特性基本上均能满足激光通信传输的要求。西部的高海拔站址具有明显优势,随着海拔高度增加,大气透过率提高、背景辐射度降低。阿里、稻城站址的夜间大气相干长度的逐月分布均在 10 cm 以上;德令哈站的大气相干长度基本在 8~12 cm 间;兴隆站相对较差,其月均大气相干长度多在 6~10 cm 范围。

对四个候选站址的大气信道特性的统计检验表明,阿里站海拔高,其云量、透过率、辐射度和视宁度条件均占优;稻城站也是海拔较高,透过率、辐射度和视宁度条件均优,但其夏季云量条件明显为最差;德令哈的海拔高度、云量、透过率、辐射度和视宁度条件均处中等,较为平衡;兴隆站已为发展成熟的东部站址,其海拔较低,在透过率、辐射度及视宁度方面相对较差。

## 参考文献:

- [1] Hemmati H. *Deep Space Optical Communications* [M]. Translated by Beijing Institute of Tracking and Communication Technology. Beijing: Tsinghua University Press, 2009(in Chinese).  
Hemmati H. 深空光通信 [M]. 北京跟踪与通信技术研究所译. 北京:清华大学出版社, 2009.
- [2] Yao Y Q, Wang H S, Liu L Y, et al. Site characterization studies in high plateau of Tibet [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, **8444**: 84441K.
- [3] Zhang Yongjing, Wang Panxing, Yao Yongqiang, et al. Climate regionalization in China for astronomical observations [J]. *Chinese Sciences*, 2010, **40**(10): 1-13(in Chinese).  
张永婧,王盘兴,姚永强,等. 中国天文气象条件的地域分布 [J]. 中国科学, 2010, **40**(10): 1-13.
- [4] Qian Xuan, Wang Panxing, Yao Yongqiang, et al. Time variation of astro-climate conditions in China [J]. *Chinese Sciences*, 2011, **41**(7): 1-15(in Chinese).  
钱璇,王盘兴,姚永强,等. 中国天文气象条件的时变特征 [J]. 中国科学, 2011, **41**(7): 1-15.
- [5] Qian Xuan, Yao Yongqiang, Zhang Yongjing. A cloudiness survey in the large ground-based solar telescope site survey [J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2012, **53**(5): 426-440(in Chinese).  
钱璇,姚永强,张永婧. 大型地面太阳望远镜选址云量调查 [J]. 天文学报, 2012, **53**(5): 426-440.

- [6] Rao Ruizhong. *Modern Atmospheric Optics* [M]. Beijing: Science Press, 2012(in Chinese).  
饶瑞中. 现代大气光学 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [7] Berk A, Bernstein A S, Robertson D C. MODTRAN: A Moderate Resolution Model for LOWTRAN 7 [R]. Air Force Geophysics Laboratory Technical Report GL-TR-89-0122, Hanscom Air Force Base, Massachusetts, 1989.
- [8] Wei Heli, Chen Xiuhong, Rao Ruizhong. Introduction to the combined atmospheric radiative transfer software CART [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, **2**(6): 446-450(in Chinese).  
魏合理, 陈秀红, 饶瑞中. 通用大气辐射传输软件 CART 介绍 [J]. 大气与环境光学学报, 2007, **2**(6): 446-450.
- [9] Wei Heli, Chen Xiuhong, Dai Congming. Combined atmospheric radiative transfer(CART) model and its applications [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(12): 3360-3366(in Chinese).  
魏合理, 陈秀红, 戴聪明. 通用大气辐射传输软件 (CART) 及其应用 [J]. 红外与激光工程, 2012, **41**(12): 3360-3366.
- [10] Dai Congming, Zhang Zhiyong, Ma Li, et al. Measuring and analysis of atmospheric transfer and environment background character on infrared telescope site [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(12): 1-7(in Chinese).  
戴聪明, 张志勇, 马力, 等. 红外望远镜站址大气传输和环境背景特性的测量分析研究 [J]. 红外与激光工程, 2016, **45**(12): 1-7.
- [11] Wang Hongshuai, Yao Yongqiang, Qian Xuan, et al. The method of modeling atmospheric optical turbulence [J]. *Acta Astronomical Sinica*, 2012, **53**(6): 527-537(in Chinese).  
王红帅, 姚永强, 钱璇, 等. 大气光学湍流模型计算方法 [J]. 天文学报, 2012, **53**(6): 527-537.
- [12] Wang Hongshuai, Yao Yongqiang, Liu Liyong. Forecast of atmosphere optical turbulence at Ali site by weather research and forecasting model [J]. *Acta Optical Sinica*, 2013, **33**(3): 0301006.(in Chinese)  
王红帅, 姚永强, 刘立勇. 基于天气预报模式预报阿里天文站大气光学湍流 [J]. 光学学报, 2013, **33**(3): 0301006.
- [13] Wang Hongshuai. *Modeling Research on Atmospheric Optical Turbulence* [D]. Beijing: Doctorial Dissertation of University of Chinese Academy of Sciences, 2012(in Chinese).  
王红帅. 大气光学湍流模型研究. 北京: 中国科学院大学博士论文, 2012.
- [14] Zhang Jicheng. *Astronomical Observing Conditions of Xinglong Observatory and Performance Enhancement* [D]. Weihai: Doctorial Dissertation of Shandong Univerdity, 2016(in Chinese).  
张记成. 兴隆观测基地天文观测条件分析及性能提升研究 [D]. 威海: 山东大学 (威海分校) 博士论文, 2016.
- [15] Tian J F, Deng L C, Zhang X B, et al. Optical observing conditions at Delingha station [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2016, **128**(968): 105003.