

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2023.05.005

基于光学工程应用的全国陆地主要地区 云量概况初步分析

吕炜煜, 陈德鹏, 胡豪, 李岩, 刘李辉, 张玉坤,
姚飞, 陈佩雷, 卿泽旭, 郭欣

(中国电子科技集团第二十七研究所, 河南 郑州 450047)

摘要: 从光学工程应用的角度对全国云量情况进行了研究, 重点分析了全国陆地主要地区云量总体平均情况、冷暖半年、昼夜变化等三个方面云量历史数据, 研究结果表明: 全国陆地主要地区总云量和低云量分布区域基本呈北少南多的情况; 冷暖半年云量分布有较明显的差别, 暖半年云量高于冷半年的站点区域占全国较大面积; 昼夜云量分布区别主要体现在西部地区白天低云低值区会有中高云存在。在云量总体平均情况、冷暖半年、昼夜变化的分析基础上进而讨论了全国云量区域的分级情况, 结果表明适合光学工程应用的1级区主要分在北方。结果有助于了解全国适于开展光学工程应用的区域, 并可为进一步研究云量对光学工程应用产生的定量影响提供参考。

关键词: 光学工程; 云量级别; 总云量; 低云量; 冷暖半年; 昼夜变化

中图分类号: TN012; P427.1

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2023)05-445-013

Preliminary analysis on cloud cover in main land areas of China based on optical engineering application

LYU Weiyu, CHEN Depeng, HU Hao, LI Yan, LIU Lihui, ZHANG Yukun,
YAO Fei, CHEN Peilei, QING Zexu, GUO Xin

(The 27th Institution, China Electronic Corporation, Zhengzhou 450047, China)

Abstract: From the perspective of optical engineering application, the national cloud cover characteristics are studied, and the historical data of cloud cover in the main land areas of China in three aspects, namely, the overall average situation, the half-year change of warm and cold, and the diurnal variation, are analyzed in detail. The results show that the distribution of total cloud cover and low cloud cover in major land areas of China is basically less in the north and more in the south, and there are obvious differences in the distribution of cloud cover between the cold and warm half year, the site area where the cloud covers in the warm half year is higher than that in the cold half year is larger, and the cloud distribution difference between day and night is mainly reflected in the existence of a certain amount of medium and high clouds

基金项目: 国防科研项目 (TJ20203C030119)

作者简介: 吕炜煜 (1974-) 江苏南通人, 博士, 高级工程师, 主要从事激光和红外辐射传输应用研究。E-mail: wylv_0551@163.com

收稿日期: 2021-08-25; 修改日期: 2022-01-19

*通信作者。E-mail: Huhao27@163.com

in the low-value areas of low clouds during the daytime in western China. Then based on the analysis of the overall average, semi-annual and day-night variation of cloud cover, the classification of cloud cover regions in China is discussed, and it is shown that the 1 level areas suitable for optical engineering application are mainly in the north. This work is helpful to fully understand the suitable regions for optical engineering applications in whole country, and can provide support for further research on the quantitative impacts of cloud cover on optical engineering applications.

Key words: optical engineering; cloud cover levels; total cloud cover; low cloud cover; cold and warm of half year; diurnal variation

0 引言

地球大气作为影响光电系统性能的重要传输介质^[1],在气象与大气探测、卫星与航空遥感、光学侦查、大气污染监测、自适应光学、空间通信、空间目标探测、激光大气传输等多方面光电应用中发挥作用。研究光波在大气中的传播规律是了解和解决上述影响的基础。大气可划分为由微粒组成的离散混浊大气介质和有热运动分子构成的湍流大气介质^[2],在空间通信、空间目标探测、天文选址等实际光电工程应用中,离散混浊大气介质的影响是关注的重点之一。云作为悬浮在地表上的大气中的一种由大量微小水滴或冰晶或两者组成的可见聚合物,是大气运动过程的产物,直观表征了地表大气状态^[3,4],其对太阳辐射与地球辐射的作用又会对大气运动过程施以巨大影响,因此对于天气和气候的变化,云不仅是指示器,而且是调节器,在天气系统的辐射能量收支中起到支配作用^[5]。在众多云参数中,云量是重要的气候因子之一,云量的多寡反映了区域天气和气候的特征^[6]。通过对云量历史资料的分析,可以了解不同区域的云量覆盖情况。

对于空地、星地等链路通信来说,采取光学地面接收网获取卫星海量数据的方式相比空间配置接收站的方式,可以实现降低成本和风险的目的,但大气内的云会造成激光信号衰减,严重影响空地激光通信系统的性能^[7,8]。利用气象地面观测站的云量观测数据,判断预选站址在空地光学链路建立过程中无云视场(CFLOS)的满足水平^[9],从而为激光通信选址提供技术支撑。

对于空间目标监视任务来说,地对空监视作为一种主要方式,在目标监视的成像视场中,除了有点目标信息之外,通常还有云、大气散射等复杂的背景杂波^[10],该类背景辐射会降低信噪比,影响目标周围背景光学特性,使得对目标的捕获跟踪瞄准难度加大^[11,12]。采用类似激光通信地面站选址的办法,可以对地基光电系统应用区域云量情况进行判断,为光学工程应用中的光电设备站址选择、跟踪策略制定提供参考。

对于天文观测来说,云量作为天文选址工作的重要考察项目,是评判天文台址质量的重要指标之一,通过对云量数据的分析,可以客观评估观测区域气象条件,为合理安排天文观测计划提供指导,提高地基望远镜的工作效率^[13,14]。

一般情况下,涉及光电设备使用的工程选址可以参考激光通信地面站选取办法,其原则是要从地理位置、气候条件、后勤保障三个方面来考虑,将地面站选择在低纬度、高海拔、晴朗少云的地区,并且要确保该地区具备稳定的电力支撑,能够实现光纤网络传输信息。激光通信地面站的选择,须使地面站空域云层覆盖较小或者具有较小的云层光学厚度,从而减少云层对光链路的影响,提高星地光通信性能和光链路的可靠性。根据气象要素特点,合理选择天气变化较小的地面站址,减少天气对星地光通信的影响,既要

考虑站址天气的不相关性,使得各地面站之间距离足够远,其他地面站的天气情况与该地面站无关;也要顾及到各地面站间距不可太远,以免各星地链路天顶角相差过大,造成激光大气传输距离增长,使得激光损耗变大^[15]。中国地域广阔,气候多变,为保证空地通信、空间目标监视、天文观测等光学工程项目的有效性,需要分析预选站点区域地面气象观测要素的历史资料,获取基本变化特点,才能客观、准确地给出预选站点建议,确保地面站点选取合理有效。

本文通过对国家气象信息中心提供的全国陆地主要地区2400余个地面气象观测台(站)云量观测历史资料(1985—2005年)的分析,在深入了解各台(站)区域云量总体平均、冷暖变化、昼夜情况的基础上,对工程应用的云量分布区域级别进行讨论,相关分析结果可以为光学工程应用中的工程选址、目标监视等工作开展和任务筹划、评估提供客观的参考判据。

1 观测情况

云量即云遮蔽天空视野的成数,是指将地平以上全部天空划分成10份的情况下,为云所遮蔽的份数。地面观测中云量的单位用“成”表示,即10%,为使图示准确,采用百分制表示(即1成表示占空10%,依次类推,10成云表示满天皆有云,云占据天空100%)。云量包括总云量和低云量。总云量指观测时天空被所有云遮蔽的总成数,低云量指观测时天空被低云遮蔽的总成数^[3,4,16]。总云量和低云量是云量观测中两项指标,对于光学工程应用来说,首先了解某一地区总云量情况,则可初步预判该地区光电装备应用的可能效果,而进一步掌握该地区的低云量,可为目标跟踪策略选择提供参考。

本研究中云量观测数据基本情况如表1所示。全国观测区域划分为50~59共10个区域,因地理环境、经济条件等因素影响,各区域能够提供观测的台(站)数量、数据计数有所区别。限于条件,表1中的数据简况以及后文绘图所使用数据缺少台湾省、南海诸岛、沿海沿边及部分海岛的观测数据,但这不影响对全国陆地主要地区云量情况的分析。

表1 全国云量观测数据简况

Table 1 The brief of national meteorological data on cloud cover

Observation area	Number of stations	Record number
50	105	3492073
51	101	4399923
52	85	3540790
53	306	7848833
54	388	10796511
55	24	1271154
56	287	8639873
57	513	13512032
58	391	16730597
59	214	6903989

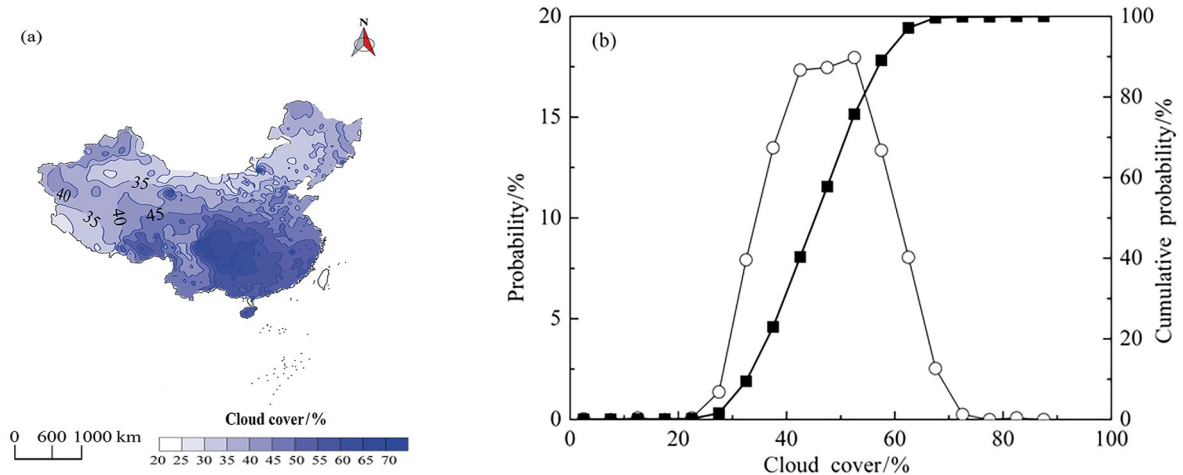
2 数据分析

2.1 总体平均情况

对于光学工程应用,在大范围地区内讨论站址分布规划是一项基础性的工作,需对全国各地地面气象观测台(站)的云量基本分布情况进行了解,以此作为站址选择的依据。首先从总体平均情况进行讨论,即利用历史观测数据进行算术平均,得到能基本反映该地区云量覆盖的情况。

(1) 总云量

图1(a)给出了全国各站址总云量平均值分布情况。由图可知,全国南北地区总云量分布基本呈北少南多的情况,南方总云量在60%以上的地区覆盖黔渝两地大部、川省中东部、湘鄂两省西部,长江以南区域呈现云量增多趋势,总云量在30%以下地区较少,主要有蒙区中部、甘西北部、新疆南疆中部、藏区西南部等区域。图1(b)给出对各站址总云量的概率及累积概率分布情况。由图可知,40%~55%总云量之间的站址数各占据15%以上的概率,从累积概率来看,总云量60%以下的站址数约为90%,总云量在30%的站址数低于10%,说明在总云量高的气象台(站)附近进行选址的可选余地较小。需指出的是,站址数并不代表面积,其反映的是人在自身活动区域范围内对大气活动的掌握程度,在人烟稀少区站址数相对会稀少,但对于选址工作来说,已有气象台(站)总云量可以作为在此台(站)附近选址定点的参考依据。



注:此图基于国家自然资源部标准地图服务系统的标准地图[审图号:GS(2016)1584号]绘制,底图无修改

图1 全国总云量平均分布(a)与总云量平均概率分布图(b)

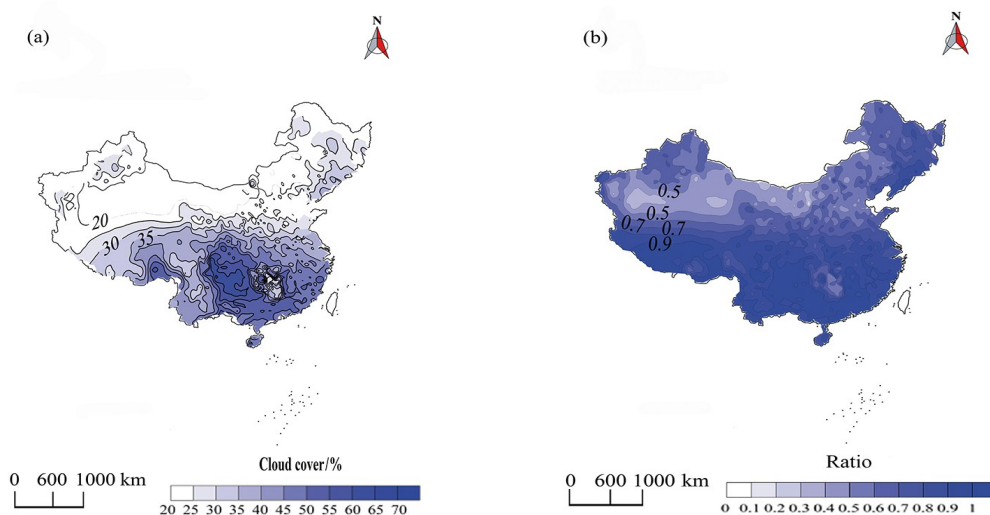
Fig. 1 The distribution of average total cloud cover over China (a) and probability distribution of average total cloud (b)

(2) 低云量

在地面气象要素观测中,低云是指云底高度一般在2500 m以下由水滴组成(在对流发展旺盛的情况下甚至是水滴、过冷水滴、冰晶的混合组成)的云^[17](卫星遥感方面则定义低云是指云顶气压大于等于680 hPa的云),表征了大气对流运动的发展程度。低云的出现,往往造成目标湮没在背景中,从而影响任务成功度。

因此, 对地区低云量分布特征进行深入了解, 有助于开展任务规划, 制定相应对策。

图 2 (a) 给出全国低云量的平均分布情况, 蒙中部及西部、宁北部、甘青两省西北部、新疆东部及南疆大部都是低云量低于 20% 的地区, 而黔和渝大部、川省中东部、湘鄂两省西部的低云量是全国最高的地区, 整体呈现北少南多、西北少东南多的情况。图 2 (b) 给出各站址低云量相对总云量的比值 (无量纲数) 分布情况。由图可知, 沿昆仑山脉、秦岭、江淮以南的地区, 低云量占主要成分, 即影响该地区的云族主要是低云族; 东北大部、新疆伊犁河谷、帕米尔地区的低云占比较相邻地区明显偏高, 甘青两省西北部、新疆东部及南疆则是中高云量对总云量的贡献较大。



注: 此图基于国家自然资源部标准地图服务系统的标准地图 [审图号: GS (2016) 1584 号] 绘制, 底图无修改

图 2 全国低云量总体平均分布 (a) 与低云量对总云量比值分布图 (b)

Fig. 2 The distribution of average low cloud (a) and low to total cloud cover distribution (b) over China

为进一步了解低云量与总云量在分布上的关系, 图 3 给出低云量与总云量比值的概率分布情况。由图可知, 低云量与总云量比值在 0.4 以下的概率不足 1%, 累积概率不足 2%, 说明低云量很少而总云量很多 (中高云量多) 的站址较少比值在 0.4 以上的累积概率快速增长, 0.55~0.85 之间的概率均大于 2%, 在 3% 左右缓慢起伏, 此时累积概率迅速提升, 比值在 0.85 以上时, 概率会迅速增加, 在 0.91~0.95 之间的概率大于 5%, 说明存在总云量低的地区低云量也低、总云量高的地区低云量也高这两种可能, 并且这两种可能性的站址数量较多, 蒙区和川东、黔的云量情况印证了此种可能性。为进一步了解低云量与总云量在分布上的关系, 图 3 给出低云量与总云量比值的概率分布情况。由图可知, 低云量与总云量比值在 0.4 以下的概率不足 1%, 累积概率不足 2%, 说明低云量很少而总云量很多 (中高云量多) 的站址较少比值在 0.4 以上的累积概率快速增长, 0.55~0.85 之间的概率均大于 2%, 在 3% 左右缓慢起伏, 此时累积概率迅速提升, 比值在 0.85 以上时, 概率会迅速增加, 在 0.91~0.95 之间的概率大于 5%, 说明存在总云量低的地区低云量也低、总云量高的地区低云量也高这两种可能, 并且这两种可能性的站址数量较多, 蒙区和川东、黔的云量情况印证了此种可能性。

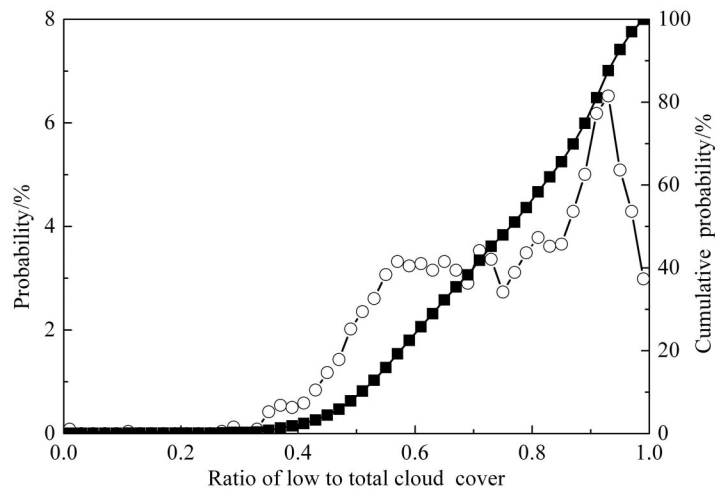


图3 低云量对总云量比值概率分布图

Fig. 3 Probability and cumulative probability distribution of low to total cloud cover

(3) 重点区域

由以上分析可知,全国范围内云量理想(较低)地区主要分布在西部地区,可将该地区视为开展光学工程应用的重点区域予以关注。从工程应用角度来考虑,选择总云量5成作为限制“门槛”(即实现地面对空间目标的观测可能存在50%的概率),总云量小于5成的区域可以作为光学工程应用的理想参考区域。在实际理想站址选择上,可以将符合“门槛”条件的气象台(站)其代表区域作为理想站址的选择区域。

表2给出上述7省(区)的云量观测站点数和理想站址数。由表可知,新、蒙、青等三省(区)的理想站址数明显占比较高,分别为100%、97.5%、96.1%;四川的理想站址数目占比较低,仅为20.9%。从区域面积上来看,蒙、甘、新、青、藏等五省(区)都具备较大的优势,尤其是新、蒙、青等三地区,单从总云量来考虑,在空间尺度选择上具有较大的选择裕量。

表2 重点区域理想站址简况

Table 2 The brief of ideal locations of key region

Province (Autonomous region)	Number of stations	Number of ideal locations
内蒙古	119	116
甘肃	85	61
新疆	103	103
青海	51	49
西藏	39	28
四川	163	34
云南	126	89

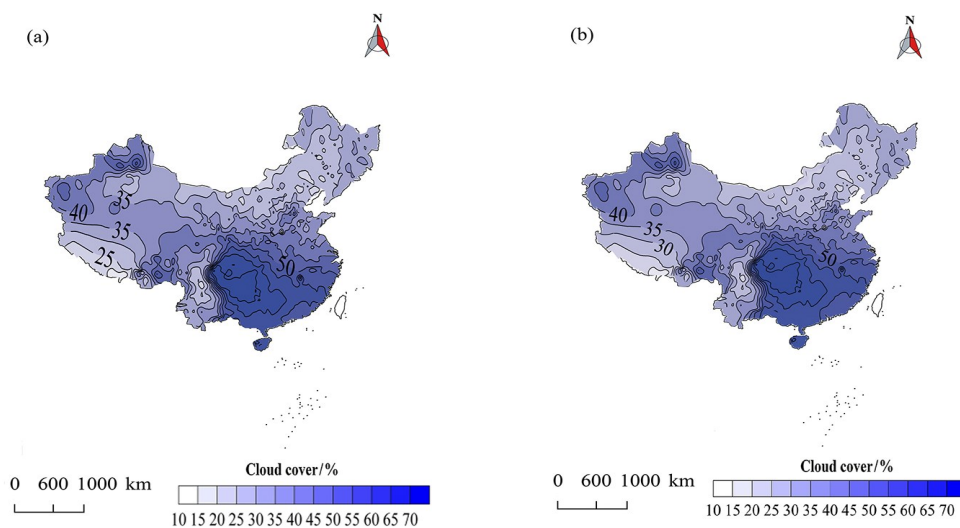
2.2 冷暖半年变化情况

由于我国南北纬度跨越范围大,东西方向地形面貌差异明显,因此地域广阔带来的气候复杂性,很难用统一的时间节点划分各地季节,但从整体环流形势来看,每年的5月、10月是北半球环流大幅调整时期,

各地气候会因此受到影响。为分析简便起见,以5—10月作为暖半年,11月—次年4月作为冷半年,对全国各地总云量、低云量进行讨论。

(1) 冷半年

图4(a)给出冷半年全国总云量的分布情况。总体来看,黔、渝、川东、鄂西、湘西、桂北是全国总云量最多的地区,在上述地区往东南方向的粤、赣、闽、浙地区总云量略轻,新疆伊犁和喀什地区也有总云量大于40%的区域;总云量低值区较为零碎,主要集中在新疆南疆北部、甘西北、蒙及辽两地区的部分区域、滇北、川南、藏西南等地。图4(b)给出了全国冷半年低云量的分布情况。由图可知,冷半年低云分布与图2(a)所示的全年低云情况相比有一定差别,但与冷半年全国总云量相比,在空间总体分布上没有明显差别,这说明在冷半年云量高值区域低云量依然是总云量的主要贡献者,其他地区如昆仑山沿线、青南部、蒙、华北一带则是中高云量对总云量具有一定的贡献。



注: 此图基于国家自然资源部标准地图服务系统的标准地图 [审图号: GS (2016) 1584号] 绘制,底图无修改

图 4 全国冷半年总云量 (a) 与低云量 (b) 分布图

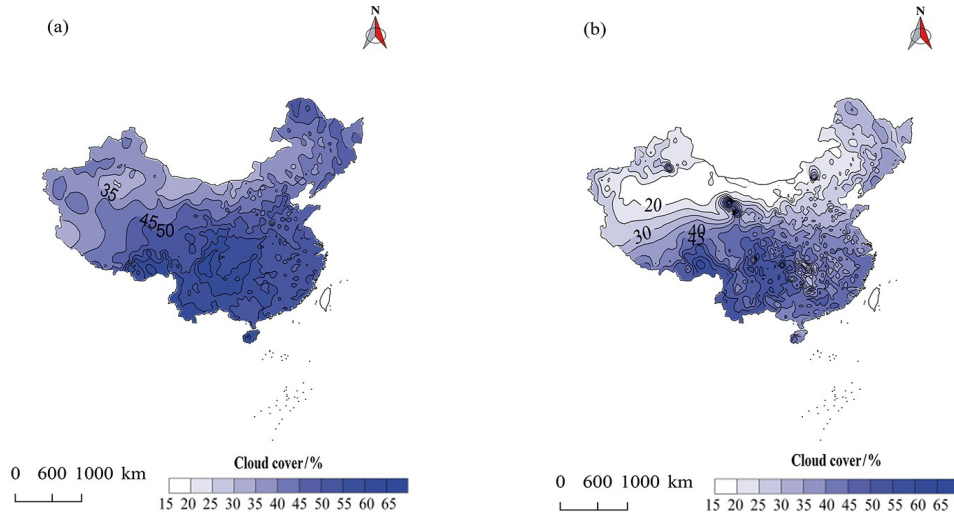
Fig. 4 The distribution of total cloud cover (a) and low cloud cover (b) in cold half year over China

(2) 暖半年

图5(a)是暖半年总云量的全国分布情况。由图可知,相比图4(a)中川巴黔地区的总云量高值区,暖半年的云量分布相比冷半年的情况具有明显差别,其总云量高值分布中心西移,藏东南有明显的云量高值区,新疆的云量高值区集中在阿勒泰北部、伊犁、喀什等三地,东北地区中部总云量略多。图5(b)给出了暖半年低云量的全国分布情况。由图可知,暖半年与冷半年的低云量区别更为明显,在暖半年中,低云量更为集中在个别较小区域;与图4(b)显示的川滇以东、长江以南大范围的低云量高值区相比,同样的空间范围,仅有较少地区低云量高值区比较集中,北方尤其是西北地区低云量低值区范围在暖半年明显增大。

(3) 冷暖半年对比分析

图6(a)给出了全国总云量暖、冷半年比值分布情况。由图可知,暖半年云量低于冷半年的区域偏小,主要集中在中南、东南及新疆西部边陲。根据图6(b)所示,暖半年云量高于冷半年的站点约占近70%,其

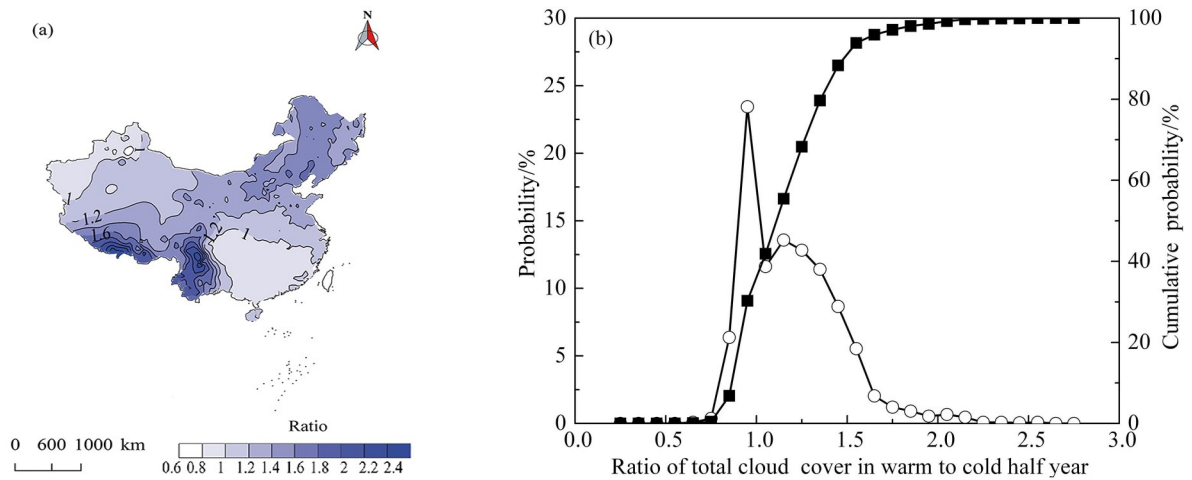


注: 此图基于国家自然资源部标准地图服务系统的标准地图 [审图号: GS (2016) 1584 号] 绘制, 底图无修改

图 5 全国暖半年总云量 (a) 与低云量 (b) 分布图

Fig. 5 The distribution of total cloud cover (a) and low cloud cover (b) in warm half year over China

中主要比值区间在 (1, 1.5), 站址数占比约为 58%; 在暖半年云量与冷半年接近的站点中, 比值区间在 (0.95, 1) 的站址数占比为 23.4%。



注: 此图基于国家自然资源部标准地图服务系统的标准地图 [审图号: GS (2016) 1584 号] 绘制, 底图无修改

图 6 全国暖、冷半年总云量比值 (a) 与总云量比值概率 (b) 分布图

Fig. 6 The distribution of ratio on total cloud cover (a) and probability distribution of ratio of total cloud cover (b) in warm to cold half year over China

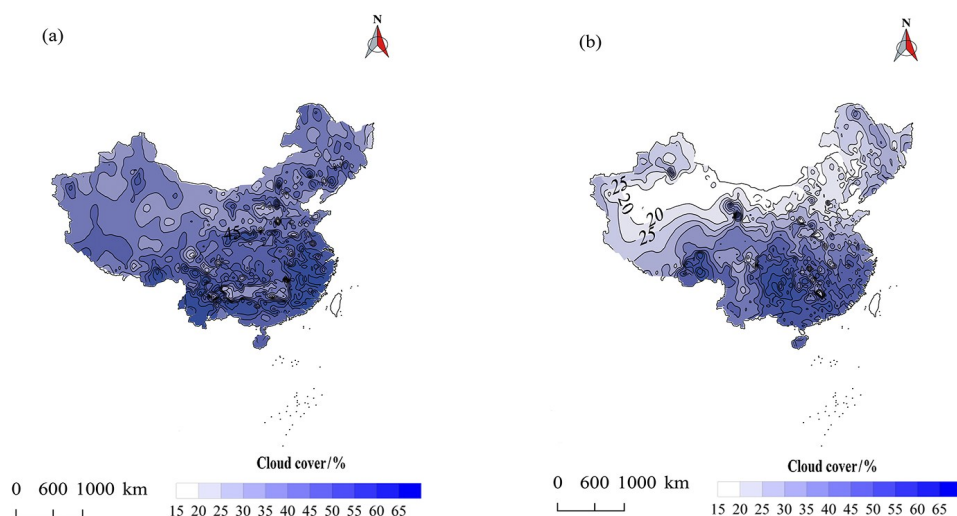
2.3 昼夜变化情况

在光学工程开展过程中, 有时需区分昼夜进行任务安排, 参考天文夜的概念^[13]: 太阳升起时, 其视圆面

上边缘与地平线相切的时刻定义为日出时刻,太阳下落时,其视圆面上边缘与地平线相切的时刻定义为日落时刻。为讨论问题方便起见,将日出时刻与日落时刻之间的时间段定义为白天(昼),其余时间为夜间。

(1) 白天分布

图7(a)给出白天总云量分布情况。由图可知,藏东南沿滇桂粤一带、粤浙沪苏沿海地区、太行山、燕山、长白山、阿勒泰、天山、喀什等地区是白天总云量较高的地区。图7(b)给出了白天低云量分布情况。由图可知,蒙中部及西部、宁北部、甘西北、新疆东部及南疆大部都是低云量低值区,西北地区的伊犁、甘陇南等地是低云量高值区域,藏东南、川东、渝、滇、湘西及华南、东南、江浙、秦岭地区存在低云集中的区域。



注:此图基于国家自然资源部标准地图服务系统的标准地图[审图号:GS(2016)1584号]绘制,底图无修改

图7 全国白天总云量(a)与低云量(b)分布图

Fig. 7 Day distribution of total cloud cover (a) and low cloud cover (b) over China

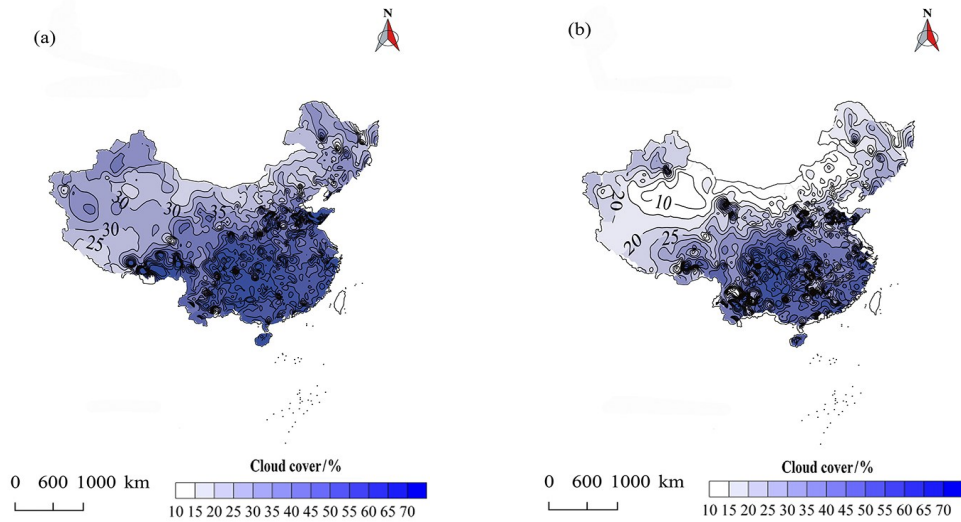
(2) 夜间情况

夜间相较白天的辐射、对流情况均有较大不同,因此二者云量情况有所区别。图8(a)表明,总云量30%以下的地域主要为新疆东部、甘西北、蒙区大部地区,西藏东南、100°E以东与38°N以南的区域是夜间总云量较多的区域。图8(b)显示,夜间低云量分布与总云量分布的区域较为类似,个别区域如蒙区东部、藏西南部低云区虽有少量的低云存在,但相比别的地区,总云量并不占优势,因此总云量的分布相对较少。

综合白天和夜间情况,从空间分布上来看,西北地区及西藏地区的总云量在白天和夜间有明显区别,低云量亦是如此;在上述地区的白天低云低值地区会有一定量的中高云存在,夜间则该种现象不明显。

(3) 对比分析

图9给出夜间与白天云量比值的概率和累积概率分布情况。其中图9(a)所示夜间与白天总云量比值为0.85、0.95、1.05的概率占比最大,分别占16%、29%、19%,所对应的累积概率分别为31%、59%、78%。相比较而言,夜间与白天低云量比值的概率和累积概率分布与总云量情况相类似,图9(b)反映出低云量比值为0.85、0.95、1.05的概率占比最大,分别占12%、19%、16%,所对应的累积概率分别为37%、57%、73%。



注: 此图基于国家自然资源部标准地图服务系统的标准地图 [审图号: GS (2016) 1584 号] 绘制, 底图无修改

图 8 全国夜间总云量 (a) 与低云量 (b) 分布图

Fig. 8 Night distribution of total cloud cover (a) and low cloud cover (b) over China

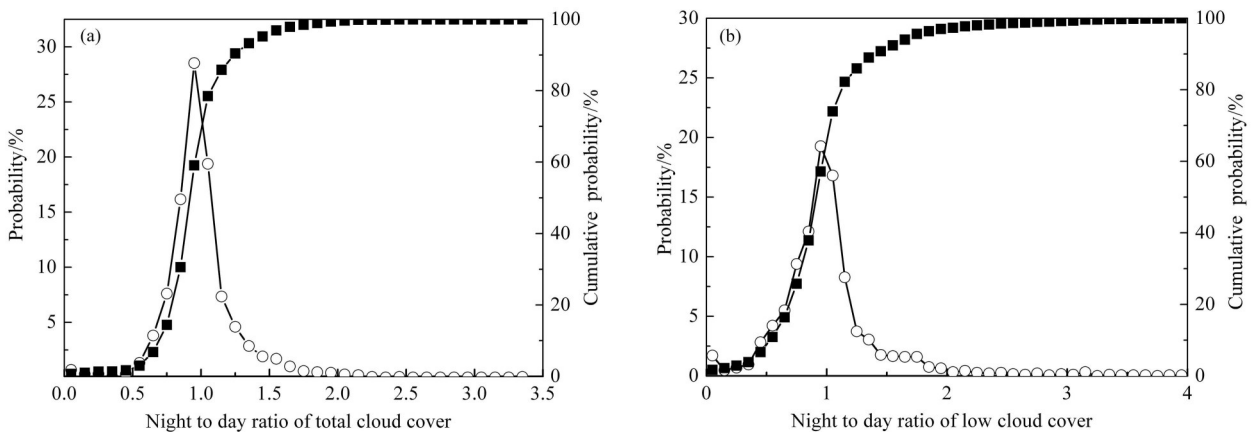


图 9 全国总云量 (a) 与低云量 (b) 的夜间与白天比值概率分布图

Fig. 9 Probability distribution of night to day ratio of total cloud cover (a) and low cloud cover (b) over China

2.4 工程应用分析

在工程应用中, 要综合考虑总云量和低云量的总体分布、冷暖情况、昼夜变化, 即首先根据云量的基本特征从空间可以优选的站址进行初步研究, 其次根据不同时间尺度可选择的优选站点进一步分析。为讨论方便, 参照天空状况与云量对照情况 (GB/T 35222-2017), 给出工程应用的云量分布区域的划分等级类别 (无量纲数), 如表 3 所示。确定云量级别的判据是首先根据 Condition 1 对应的条件来确定地区云量级别 (Level), 若 Condition 2 对应的条件所确定云量级别大于 Condition 1 对应的条件所确定地区云量级别, 则采用 Condition 2 对应条件所确定的云量级别。

在实际处理过程中, 将总体分布、冷暖情况、昼夜变化这三种情形下的总云量和低云量对应的云量级别逐步聚类合并 (即首先针对每个站址三种情形的云量进行 Level 分级, 然后两两合并, 取 Level 值较高情形作

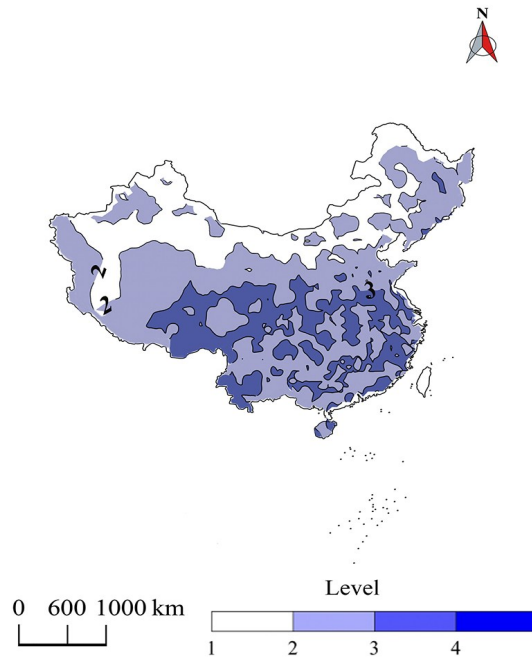
表 3 云量分布区域级别对应表

Table 3 Correspondence table for regional level of cloud cover distribution

Level	Condition 1	Condition 2
1	天空中无云	总云量 1~3 成
2	天空中有低云 1~3 成	总云量 4~5 成
3	天空中有低云 4~7 成	总云量 6~10 成
4	天空中有低云 8 成以上	

为合并结果, 最后合并出一个 Level 值), 得到如图 10 所示全国云量分布分级情况 (由于满足 4 的区域面积积极小, 可忽略不计)。

由图可知, 按照云量分级全国可划分为 1、2、3 三个区域, 其中 1 级区是明显较适合开展光学工程应用的区域, 2 级区次之, 3 级区最次。全国 1 级区主要集中在北方的蒙区大部、甘西大部、青北部、新疆准噶尔盆地与塔里木盆地的大部、藏西部的小部等地区, 3 级区主要在西藏东部和秦岭、淮河以南的地区, 2 级区占国土范围较广。综合考虑工程应用的可行性与便利性, 1 级区较为合适, 3 级区最次, 位于 1 区附近的 2 级区具有可应用的窗口, 3 级区附近的 2 级区则窗口不多, 作为光学工程应用站址并不合适。



注: 此图基于国家自然资源部标准地图服务系统的标准地图 [审图号: GS (2016) 1584 号] 绘制, 底图无修改

图 10 全国云量分级区域

Fig. 10 National cloud cover classification

3 结 论

通过从总体平均情况、冷暖半年、昼夜变化等三个方面云量情况的分析, 可以明确:

- 1) 从总体平均来看, 全国总云量分布基本呈北少南多的情况, 低云量与此类似; 出现总云量低的地区

低云量也低、总云量高的地区低云量也高这两种情况的站址数量较多。

2) 在冷暖半年比较中, 暖半年的云量分布相比冷半年的情况具有明显差别, 其总云量高值分布中心西移, 同样的空间范围, 仅有较少地区低云量高值区比较集中, 北方尤其是西北地区低云量低值区范围在暖半年明显增大。暖半年云量低于冷半年的区域偏小, 暖半年云量高于冷半年的站点区域占较大面积。

3) 对于云量的昼夜分布情况来说, 总云量与低云量在白天和夜间的区别体现在空间分布上主要是在西部地区, 在上述地区的白天低云低值区会有一些的中高云存在。

在基于总体平均情况、冷暖半年、昼夜变化讨论基础上进一步了解到全国云量区域的分级情况, 1级区和毗邻1级区的2级区是适合开展光学工程应用的区域。

在后续工作中, 将重点讨论光学工程应用中其他气象要素变化特点, 并进一步分析各类要素共同作用下对光学工程应用带来的定量影响程度。

致谢: 感谢国家气象信息中心给予的数据服务, 文元宏工程师在分析过程中给予了宝贵的技术支持。

参考文献:

- [1] Smith F G. *The Infrared and Electro-Optical Systems Handbook, Vol. 2: Atmospheric Propagation of Radiation* [M]. Ann Arbor, Michigan USA and Bellingham, Washington USA: Infrared Information Analysis Center and SPIE Optical Engineering Press, 1993: 1.
- [2] Rao R Z. *Modern Atmospheric Optics* [M]. Beijing: Science Press, 2012: 1.
饶瑞中. 现代大气光学 [M]. 北京: 科学出版社, 2012: 1.
- [3] 朱炳海, 王鹏飞, 束嘉鑫. 气象学词典 [Z]. 上海: 上海辞书出版社, 1985: 116-118.
- [4] 大气科学辞典编委会. 大气科学辞典 [Z]. 北京: 气象出版社, 1994: 754-757.
- [5] Qiu J H, Lu D R, Chen H B, et al. Modern research progresses in atmospheric physics [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, 27 (4): 628-652.
邱金桓, 吕达仁, 陈洪滨, 等. 现代大气物理学研究进展 [J]. 大气科学, 2003, 27 (4): 628-652.
- [6] 石广玉. 大气辐射学 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 134-135.
- [7] Jiang H L, Tong S F, Zhang L Z, et al. *The Technologies and Systems of Space Laser Communication* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 54.
姜会林, 佟首峰, 张立中, 等. 空间激光通信技术与系统 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 54.
- [8] Piazzolla S, Slobin S. Statistics of link blockage due to cloud cover for free-space optical communications using NCDC surface weather observation data [C]. *High-Power Lasers and Applications. Proc SPIE 4635, Free-Space Laser Communication Technologies XIV*, San Jose, California, USA. 2002, 4635: 138-149.
- [9] Hemmati H. *Deep Space Optical Communications* [M]. Wang P, Sun W, Transl. Beijing: Tsinghua University Press, 2009: 98-101.
Hamid Hemmati. 深空光通信 [M]. 王平, 孙威, 译. 北京: 清华大学出版社, 2009: 98-101.
- [10] Xiong W, Xie J W. *Introduction to Opto-Electronic Tracking and Control System* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009: 118.
熊伟, 谢剑薇. 光电跟踪控制系统导论 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 118.

- [11] Editorial board of Essentials of Laser for High Technology. *Essentials of Laser for High Technology* [M]. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 2003: 473-476.
高技术要览 (激光卷) 编委会. 高技术要览 (激光卷) [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2003: 473-476.
- [12] Robinson S R. *Infrared and Electro-Optical systems Handbook, Vol. 8: Emerging Systems and Technologies* [M]. Ann Arbor, Michigan USA and Bellingham, Washington USA: Infrared Information Analysis Center and SPIE Optical Engineering Press, 1993: 353-356.
- [13] Fan L, Lei C M, Shi D D, *et al.* Analysis of nighttime infrared cloud cover at Yaoan astronomical station [J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2017, 58 (2) : 47-54.
樊亮, 雷成明, 师冬冬, 等. 姚安天文观测站的夜间红外云量特征分析 [J]. 天文学报, 2017, 58(2): 47-54.
- [14] Yin J, Yao Y Q, Wang H S, *et al.* A method to measure cloudiness of all-sky images in No-moon nights [J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2012, 53(3): 230-239.
尹佳, 姚永强, 王红帅, 等. 天文选址的夜间云量处理方法 [J]. 天文学报, 2012, 53(3): 230-239.
- [15] Cheng H W, Tong S F, Zhang P, *et al.* *General Technology of Satellite Laser Communications* [M]. Beijing: Science Press, 2020: 46-49.
程洪玮, 佟首峰, 张鹏, 等. 卫星激光通信总体技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2020: 46-49.
- [16] China National Committee for Terminology in Science and Technology. Chinese Terms in Atmospheric Science [Z]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2009: 7.
全国科学技术名词审定委员会. 大气科学名词 [Z]. 3版. 北京: 科学出版社, 2009: 7.
- [17] GB/T 35222—2017. Specifications for surface meteorological observation—Cloud [S]. Beijing: China Standards Press, 2017.
GB/T 35222—2017. 地面气象观测规范 云 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.