DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2024.04.003

基于光学工程应用的全国陆地主要地区水平消光系数情况初步分析

吕炜煜， 陈德鹏， 胡 豪*， 张玉坤， 卿泽旭， 李 岩， 刘李辉，
姚 飞， 陈佩雷， 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陆地主要地区水平消光系数情况进行了研究。首先从总体平均情况、冷暖半年、昼夜变化等三个方面对相关历史数据进行了分析。分析结果表明：总体上水平消光系数的呈现北低南高的分布; 冷暖半年水平消光系数分布略有差别，暖半年水平消光系数低于冷半年的站点区域占较大面积; 昼夜变化中白天水平消光系数要比夜间的消光系数偏小。在基于总体平均情况、冷暖半年、昼夜变化讨论基础上进而讨论了全国陆地主要地区水平消光系数的区域分级情况，发现适合光学工程应用的 1 级区主要分布在我国北方及西部地区。研究结果有助于了解全国适于开展光学工程应用的区域，并可为进一步研究水平消光系数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; 能见度; 水平消光系数; 冷半年; 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(2024)04-418-011

Preliminary analysis on horizontal extinction coefficient in the main land areas of China based on optical engineering application

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

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

Abstract: The available extinction coefficient of the main land areas in China are studied from the perspective of optical engineering application. Firsty, the relevant historical data are analyzed from three aspects: overall average situation, half-year change of warm and cold weather, and diurnal change. Results show that the overall distribution of horizontal extinction coefficient is basically low in the north and high in the south. There are slight differences in the distribution of horizontal extinction coefficient between the cold and warm half year, with a larger area having a lower horizontal extinction coefficient in the warm half

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: 2021-10-26; **修改日期:** 2021-12-05

***通信作者**。E-mail: Huhao27@163.com

year than in the cold half year. As for the diurnal change, it is shown that the horizontal extinction coefficient during the daytime is lower than that at night. Furthermore, the regional classification of horizontal extinction coefficient in China is discussed on the basis of overall average, half-year change and dirunal variation, and it is found that the first level areas suitable for optical engineering application are mainly in the north and west of China. The result is helpful for understanding the regions suitable for optical engineering applications in whole country, and can provide support for further research on the quantitative impacts of horizontal extinction coefficient on optical engineering applications.

Key words: optical engineering; visibility; horizontal extinction coefficient; cold half year; warm half year; diurnal variation

0　引　言

在光电系统应用中，传输介质作为光电系统构成的基本要素，限制了光电系统整体性能表现[1]。对于气象与大气探测、卫星与航空遥感、光学侦察、大气污染监测、自适应光学、空间通信、空间目标探测、激光大气传输等光学工程，必须要考虑地球大气作为重要传输介质所造成的影响，而掌握光波在大气中的传播规律是分析和解决上述影响问题的基础。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]，对于空间通信、空间目标探测等实际工程应用，离散混浊大气介质的影响是应关注的重点之一，而能见度作为表征离散混浊大气介质混浊程度的重要参数，反映了大气状态与视程远近的关系[3]，体现了关注地区的大气环境质量。能见度通常是指视力正常的人在白天无云的天空背景下辨认出一个视角约为0.5°～5°黑色目标物轮廓和形体的最大距离，在夜间则是指能看到和确定出一定强度目标灯发光点的最大距离。从上述定义可以知道，能见度取决于目标物的能见距离，由大气透过率 (视线内大气气柱的光学特性)、目标和背景的亮度对比及观测者的视觉感应能力 (对比感阈) 等因素共同作用而定[4-8]。气象台 (站) 确定能见度的通常作法是选择若干距离和方位不等的目标物，并由基本固定且训练有素的人员来观测[9]，这些因素确定后，能见度就取决于当时的大气光学特性 (大气透过率)，在大气均匀分布的假设前提下，大气透过率由大气中分子和气溶胶对光波的消光特性决定[10]。在上述方法下得到的能见度是水平能见度，对于与空间目标观测相关的光电设备，斜程大气消光对背景-目标对比度、信噪比产生的影响会造成望远镜系统的探测能力降低，增加直观获取目标外形、基本结构的难度，从而干扰对目标的有效检测，影响到光电设备效能的发挥。考虑到斜程大气消光的复杂性，固然可采取模式、辐射计、激光雷达的办法进行定量分析[11-19]，但是由于中国地域辽阔、气候复杂，模式方法具有局限性，仪器测量的办法难以大范围推广，缺乏实用性。对于涉及光电设备选址的光学工程工作，会将一定厚度范围内的大气透过率作为特殊关注要素。在基于大气水平均匀分层的前提下，认为分子散射和气溶胶消光满足一般近似规律，再根据观测区域水平能见度 (水平大气消光系数) 的基本变化特征，来估算一定厚度范围内的大气透过率[20]。因此，从实用性、有效性、经济性的角度考虑，掌握关注区域的水平大气消光系数变化规律，是分析光学工程应用中大气透过率影响的基础性工作。水平能见度与其他气象观测要素类似，即区域气象观测要素变化特征可根据一定时期内的气象要素观测数据反映，因此，通过对气象台 (站) 能见度资料的分析，可以了解不同区域的水平消光系数变化特点，进而定量分析大气环境参数对光学工程的影响程度，实现为光学工程应用提供参考的

目的。

在水平气象能见度定义中，对比感阈取值有0.02和0.05的区别，世界气象组织 (WMO) 将对比感阈取为0.05，我国气象台 (站) 在GB/T 35221-2017标准未采用前对比感阈值采取0.02，在该标准推行后采用0.05[21]，为了便于后续研究分析统一，在将能见度折算成水平大气消光系数时，对比感阈值均取0.02。中国地域广阔，气候多变，为保证空地通信和对空间目标观监的有效性，需要分析预选站点所在区域的历史天气变化情况，获取其基本变化特点，才能客观、准确地给出预选站点建议，确保地面站点分布合理有效。

本文利用全国陆地主要地区2000余个气象台 (站) 的气象历史资料 (1985－2005年) 对各站址的水平消光系数情况开展分析，在深入了解各站址水平消光系数总体平均、冷暖变化、昼夜情况的基础上，对工程应用的水平消光系数分布区域级别划分进行讨论，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

水平消光系数反映的是近地面水平路径条件下的大气消光情况。对于光学工程应用来说，首先应关注某一地区水平消光系数总体情况，初步预判该地区光电装备应用的可能效果; 在此基础上讨论水平消光系数在各种时间尺度上的分布特点，为工程应用中的“窗口”选择提供参考。

本研究中水平消光系数观测数据来自全国10个气象台 (站) 观测区域 (50～59区)，考虑到地理环境、经济条件和人员编制等因素影响，各区域能够提供观测的站址数量、数据计数有较大程度的区别，经过数据甄别、剔除之后的基本情况如表1所示。限于条件，表1中的观测数据仅是根据全国陆地主要地区台 (站) 能见度计算得到的水平消光系数观测情况，缺少台湾省、南海诸岛、沿海沿边及部分海岛的观测数据，但不影响对全国陆地主要地区水平消光系数情况进行分析。在分析过程中，对于风速、温度、湿度等气象因素对气溶胶的影响和人为因素导致的气溶胶变化非本研究关心重点，在此不予赘论。

表1 全国水平消光系数观测数据简况

Table 1 The brief of national meteorological data on horizontal extinction coefficient

Observation area	Number of stations	Record number	Observation area	Number of stations	Record number
50	105	3426369	55	24	1231390
51	101	4056610	56	287	8421388
52	85	3462211	57	513	13009415
53	306	7726468	58	391	9909603
54	388	10593737	59	214	6473433

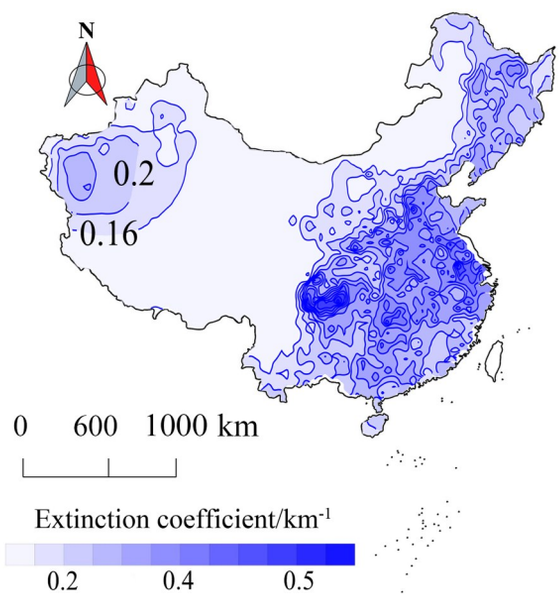
2 数据分析

2.1 总体平均情况

在光学工程应用尤其是选址中，从宏观上大尺度地理范围了解水平消光系数的基本分布情况是一项基本需求，这就需要对水平消光系数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，其结果可反映该地区水平消光系数变化的基本概况。

(1) 全国区域

图1给出了全国各站址总体水平消光系数平均值分布情况。从全国区域总体水平消光系数分布比较来看，呈现出西北边陲和东部较大值集中、中间区域数值相对偏小的特点，基本类似“哑铃”的情况，但此“哑铃”并非是一个平衡的“哑铃”，东部地区水平消光系数平均值明显偏大，特别是华北、川渝黔、长三角等地有水平消光系数大值较为集中的区域。水平消光系数偏小的区域主要集中在内蒙古、甘、新 (北部、东部)、青、藏、川 (西部)、滇等省 (区)，需进一步指出的是，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影响程度，在人烟稀少区域站址数相对会稀少。



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　全国水平消光系数总体平均分布

Fig. 1　The distribution of horizontal extinction coefficient over China

(2) 重点区域

由以上分析可知，全国范围内水平消光系数较为理想 (较小) 的地区主要分布在内蒙古、甘、新、青、藏、川、滇等省 (区)。根据能见度的分级[6]，能见度 10～20 km 为晴，20～50 km 为很晴，从工程应用选择较为严苛的标准考虑，将对比感阈取 0.05，则能见度为 20 km 时对应的水平消光系数为 0.15 km^{-1}，因此将 0.15 km^{-1} 作为限制“门槛”，小于 0.15 km^{-1} 的区域作为很晴的站址地区，可以考虑作为光学工程应用的理想参考区域。

表2给出上述7省 (区) 的水平消光系数观测站点数和理想站址数。由表可知，藏、青、内蒙古三省 (区)

表 2　重点地区理想站址简况

Table 2　The brief of ideal sites of key region

Province (Autonomous region)	Number of stations	Number of ideal locations	Province (Autonomous region)	Number of stations	Number of ideal locations
内蒙古	119	70	西藏	39	36
甘肃	85	27	四川	163	42
新疆	103	34	云南	126	31
青海	51	43			

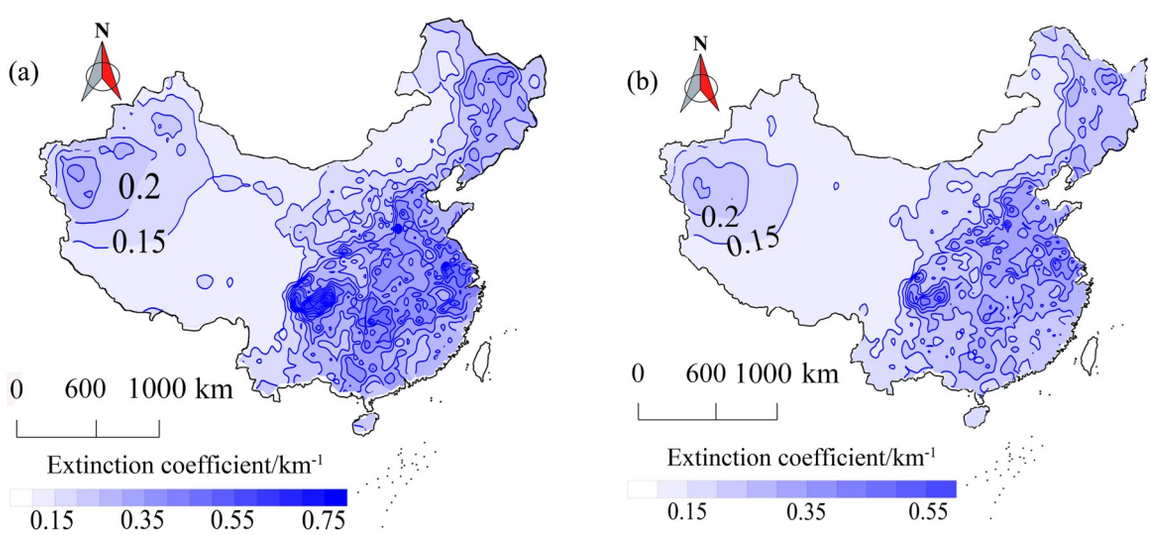
的理想站址数明显占比较高，分别为92.3%、84.3%、58.9%，四川的理想站址数目占比较低，仅为24.6%。从区域面积上来看，上述7省 (区) 都具备较大的优势，尤其是青海和西藏，单从水平消光系数来考虑，在空间尺度选择上具有较大的选择裕量。

2.2 冷暖半年变化情况

从我国的国土分布特点来看，国土的南北纬度和东西经度跨越范围大，在东西方向地形面貌差异明显，广阔的地域分布、多样的地理环境造成了气候的复杂性，很难用统一的时间节点划分全国各地季节，但从大气环流形势来看，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月至次年4月作为冷半年，对全国各地水平消光系数进行讨论。

(1) 冷暖半年分布

图2 (a) 给出冷半年全国水平消光系数的分布情况。西北边陲的大值区域由新疆除去阿勒泰和哈密少许地区的新疆大部及藏西北地区组成，乌鲁木齐、阿克苏、喀什等地是冷半年西北地区水平消光系数的峰值区; 相较西北的东部地区则表现出水平消光系数急剧增加的形势，华北、中原、川渝、长三角等地是较为集中的水平消光系数峰值区。图2 (b) 反映了全国暖半年水平消光系数的分布情况。从整体趋势看，水平消光系数暖半年的分布规律与冷半年相比在空间总体分布上没有太大的明显差别，都体现出西北边陲和东部大值较为集中、中间区域偏小的特点，但暖半年的总体略小。



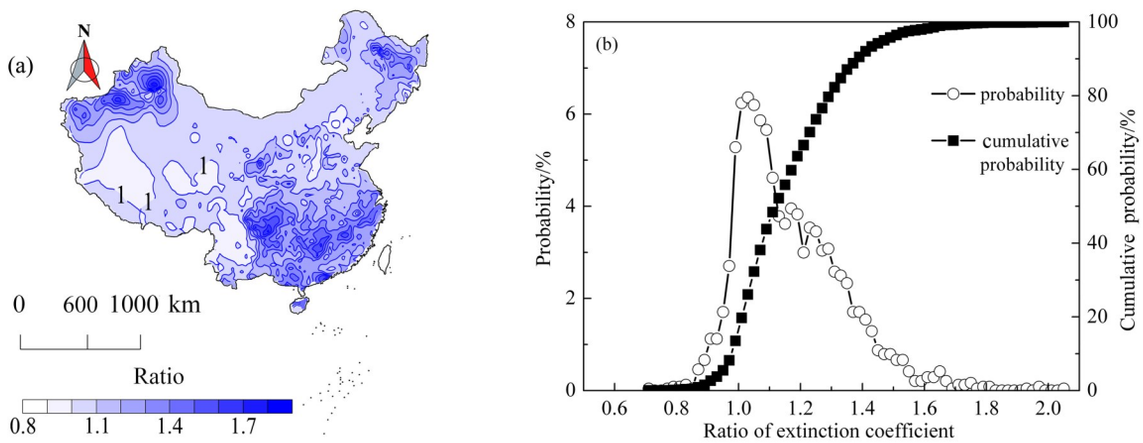
注：此图基于国家自然资源部标准地图服务系统的标准地图 [审图号：GS (2016) 1584号] 绘制，底图无修改。

图 2 全国冷半年 (a) 与暖半年 (b) 水平消光系数分布图

Fig. 2 The distribution of horizontal extinction coefficient in cold half year (a) and warm half year (b) over China

(2) 冷暖半年对比分析

图3 (a) 给出全国范围内冷暖半年水平消光系数比值的分布情况。从区域范围来看暖半年水平消光系数高于冷半年的区域偏小，即冷半年的水平消光系数总体上大于暖半年，冷暖半年水平消光系数比值的区间在 (0.7，2.0)。图3 (b) 反映的是冷暖半年水平消光系数比值的概率分布情况。由图可知，水平消光系数在冷半年低于暖半年的站址数小于20%，冷半年水平消光系数高于暖半年的比值区间主要分布在 (1.01，1.19)，占比高于40%。



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 3　全国暖冷半年水平消光系数比值分布图 (a) 与暖冷半年水平消光系数比值概率分布图 (b)

Fig. 3　The distribution of ratio on horizontal extinction coefficient in warm and cold half year over China (a) and probability distribution of horizontal extinction coefficient in warm to cold half year (b)

(3) 冷暖半年最值讨论

冷暖半年最值情况是指在冷半年、暖半年水平消光系数出现的最大值、最小值变化特点。对于光学工程应用来说，主要关心冷暖半年各月份最值的分布情形，为工程的时间、空间选择提供参考。表 3 给出冷半年 (1、2、3、4、11、12 月)、暖半年 (5、6、7、8、9、10 月) 水平消光系数最大值、最小值的各月占比情况。

由表 3 可知，冷半年的水平消光系数最大值占比最大的月份集中在 4 月份 (超过 60%)，即全国范围内在 4 月份出现较大的水平消光系数情况 (空气质量下降)；冷半年的水平消光系数最小值占比较大的月份为 1 月 (38.3%)、12 月 (26.8%)；暖半年水平消光系数最大值占比最大的月份主要为 7 月 (38.1%)、5 月 (30.4%)，其水平消光系数最小值占比较大的月份为 10 月 (48.1%)，其余月份 (5、6、7、8、9 月) 占比明显偏小。

表 3 冷暖半年水平消光系数最值月份分布概况

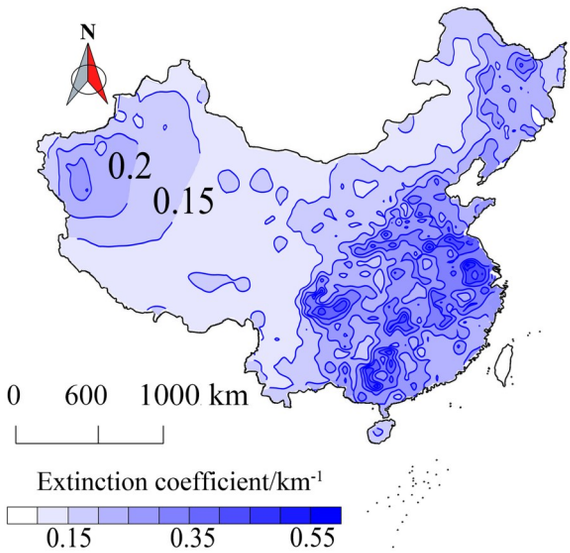
Table 3 The brief of monthly distribution on horizontal extinction coefficient of maximum and minimum in cold half year and warm half year

Percentage of max and min values	Cold half year						Warm half year					
	1	2	3	4	11	12	5	6	7	8	9	10
Max/%	6.1	3.0	8.7	60.3	17.0	4.9	30.4	12.0	38.1	7.4	4.3	7.8
Min/%	38.3	7.6	16.5	7.1	6.7	26.8	11.2	6.7	17.4	5.0	11.6	48.1

2.3　昼夜变化情况

(1) 白天分布

图 4 给出水平消光系数的白天分布情况。由图可知，西北的喀什、和田地区是水平消光系数的峰值区域。在东部的黑 (西南部、东北部)、吉 (中部)、辽 (中部)、津、冀 (西南)、晋 (西南部)、豫 (西部、东部)、陕 (关中)、川渝、湘 (中部)、桂 (中部、东部)、长三角则出现峰值中心。内蒙古 (除去中部)、甘 (除去东南部)、青、藏、新 (阿勒泰、哈密) 则是水平消光系数较小的区域。



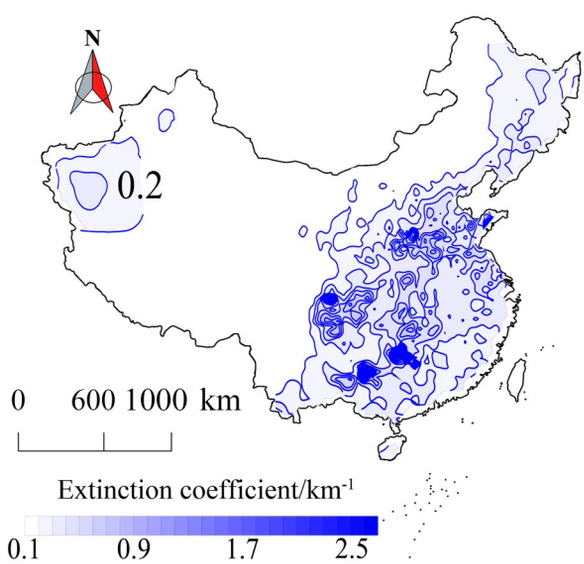
注：此图基于国家自然资源部标准地图服务系统的标准地图 [审图号：GS (2016) 1584 号] 绘制，底图无修改。

图 4 全国白天总水平消光系数分布

Fig. 4 Day distribution of horizontal extinction coefficient over China

(2) 夜间情况

夜间时段无太阳作为热源，地表边界层内气溶胶借助热力对流进行扩散的影响明显偏弱，因此气溶胶粒子会在近地面层沉降，近地面层的粒子数会有所增加，造成水平消光系数偏大。图 5 给出水平消光系数的夜间分布情况。由图可知，与白天相比，整体分布态势基本不变，即西部边陲和东部水平消光系数偏大，甘、青、藏、内蒙古 (东部、西部) 水平消光系数较小。值得关注的是山东半岛、晋南、桂 (西北)、湘 (南部)、川渝等地夜间的水平消光系数数值明显偏大，其中峰值中心数据的大小、位置与白天相比有所不同。



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 全国夜间总水平消光系数分布

Fig. 5 Night distribution of horizontal extinction coefficient over China

(3) 最值分析

对于白天和夜间水平消光系数最值的讨论，可以进一步认清在关注区域内最值出现的时段，为光学仪器的标校和跟踪策略选择制定好相应的预案。

图6给出白天水平消光系数最值的概率和累积概率分布情况。其中图6 (a) 中的水平消光系数最大值在14时的概率占比最大 (超过70%)，其余时段占比均在10%以下，因此概率和累积概率均在14时出现阶跃。相比较而言，水平消光系数最小值的概率曲线则出现较多的起伏，图6 (b) 表明在白天水平消光系数最小值较易出现的时间分别是8、11、12、14时，概率分别为19.5%、20.5%、22.1%、19.9%，累积概率分别为19.5%、44.4%、66.5%、88.2%，水平消光系数最小值不易出现的时间分别是9时、13时、16－18时，概率占比均在5%以下。

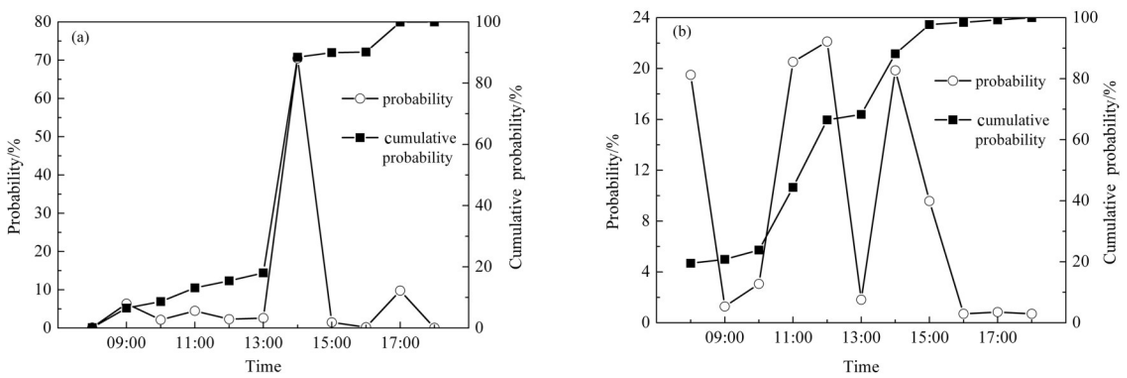


图 6　水平消光系数白天最大值概率分布图 (a) 与最小值概率分布图 (b)

Fig. 6　Probability distribution of horizontal extinction coefficient of maximum (a) and minimum (b) in daytime

图7给出夜间水平消光系数最值的概率和累积概率分布情况。图7 (a) 表明，水平消光系数最大值概率占比大的时间有23时 (21.7%)、0时 (23.0%)，其余时段占比有所起伏，1时的水平消光系数最大值概率占比相比0时和2时明显偏小。图7 (b) 表明，夜间水平消光系数最小值较易出现的时间分别是0时 (33.1%)、2时 (21.1%)，值得注意的是1时的水平消光系数最大值概率占比也相对较小 (5.5%)。

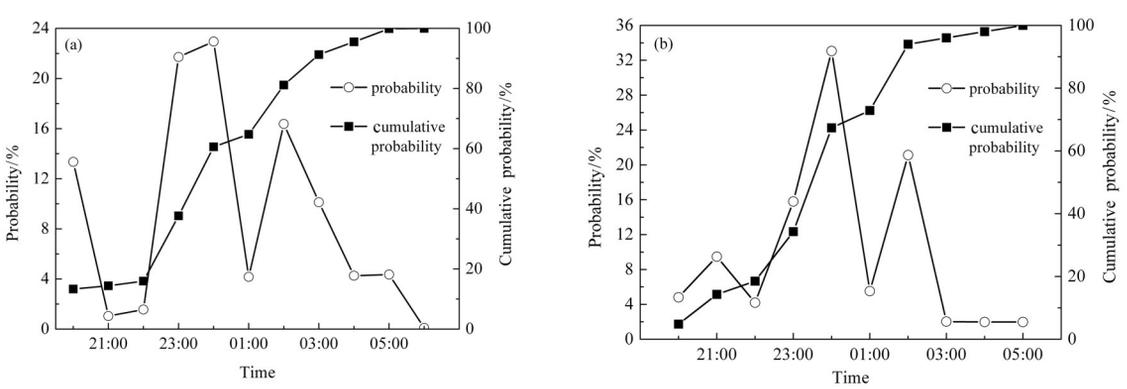


图 7　水平消光系数夜间最大值 (a) 和最小值 (b) 概率分布图

Fig. 7　Probability distribution of horizontal extinction coefficient of maximum (a) and minimum (b) in nighttime

2.4 工程应用分析

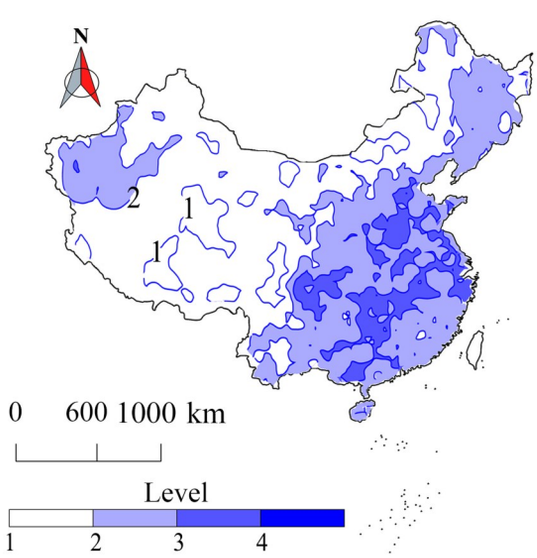
针对工程应用，将水平消光系数的总体平均、冷暖半年情况、昼夜变化综合考虑，为讨论方便，参照上文提及的水平消光系数σ为0.15 km^{-1}和能见度划分级别，给出工程应用的水平消光系数分布区域的可用划分等级，如表4所示。

表4 水平消光系数分布区域级别对应表

Table 4 Correspondence table for regional level of horizontal extinction coefficient distribution

Level	Condition	Evaluation
1	$\sigma < 0.15$	Excellent
2	$0.15 \leqslant \sigma < 0.3$	Good
3	$0.3 \leqslant \sigma < 0.75$	Avgrage
4	$\sigma \geqslant 0.75$	Poor

在实际处理过程中，将总体平均、冷暖情况、昼夜变化这三种情形下的水平消光系数对应的水平消光系数级别逐步聚类合并 (即首先针对每个站址三种情形的水平消光系数进行level分级，然后两两合并，取level值较高情形作为合并结果，最后合并出一个level值)，得到综合上述情形的全国水平消光系数分布分级情况，如图8所示，由于满足4级区面积相对很小，可忽略不计。根据图8所示，全国水平消光系数分级可划分为1、2、3三个区域，仅从水平消光系数考虑工程应用的可行性与便利性，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，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级区则面临窗口不多的问题，作为光学工程应用站址并不合适。全国的1级区面积并不大，主要集中在北方的内蒙古 (西部、东部)、青 (西部、南部)、新疆哈密、西藏 (中部、东南部) 滇 (中部) 等地，2级区占地范围较广，主要在内蒙古、甘、新、青、藏、川西、滇北、琼等地，3级区主要在华北、中原、川渝、桂、湘、赣、长三角等地。



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 全国水平消光系数分级区域

Fig. 8 National horizontal extinction coefficient 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水平消光系数情况的分析，可以明确：

1) 从总体平均来看，水平消光系数分布区域呈现出西北边陲及东南地区大的情况，而在两者之间的高原和山地地区水平消光系数总体较小。

2) 在冷暖半年比较中，冷半年的水平消光系数相比暖半年的略为偏大，从全国分布上来看二者态势相似，主要不同处在于冷半年的水平消光系数从台 (站) 数量或分布面积上都略大于暖半年。

3) 对于水平消光系数的昼夜分布情况来说，白天水平消光系数要比夜间的消光系数偏小，从全国分布特征看昼夜并无明显区别，但白天14时水平消光系数最大值和夜间0时水平消光系数最小值的概率较高。

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采用分级方法，定量直观地得到了全国陆地主要地区适合开展光电设备应用的区域概况，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，适合光电工程尤其是光电设备大范围选址、任务应用的理想区域，可以从内蒙古、甘、新、青、藏、川西、滇中等地选择。

在后续工作中，重点将继续研究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: Copublished by Infrared Information Analysis Center and SPIE Optical Engineering Press, 1993: 3-7.

[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] Xu S Z. *Fundamentals of Atmospheric Physics* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1993.
许绍祖. 大气物理学基础 [M]. 北京: 气象出版社, 1993.

[4] Sheng P X. *Atmospheric Physics* [M]. 2nd ed. Beijing: Peking University Press, 2013: 470-477.
盛裴轩. 大气物理学 [M]. 2版. 北京: 北京大学出版社, 2013: 470-477.

[5] Zhao B L, Zhang A C. *Principle of Atmospheric Detection* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1987.
赵柏林, 张霭琛. 大气探测原理 [M]. 北京: 气象出版社, 1987.

[6] Su Y, Wan M. *High Energy Laser System* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004: 123-126.
苏 毅, 万 敏. 高能激光系统 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 123-126.

[7] Qiu Y J. *Atmospheric Aerosol Physics* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2020: 189-192.
邱玉珺. 大气气溶胶物理学 [M]. 北京: 气象出版社, 2020: 189-192.

[8] Wu J, Yang C P, Liu J B. *Theory of Light Transmission in the Atmosphere* [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2005: 36-37.

吴 健, 杨春平, 刘建斌. 大气中的光传输理论 [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2005: 36-37.

[9] Song Z F. *Fundamentals of Applied Atmospheric Optics: Light Wave Transmission in the Atmosphere and Remote Sensing Application* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1990: 218-220.
宋正方. 应用大气光学基础: 光波在大气中的传输与遥感应用 [M]. 北京: 气象出版社, 1990: 218-220.

[10] Majumdar A K, Ricklin J C. *Free-Space Laser Communications: Principles and Advances* [M]. New York, NY: Springer New York, 2008.

[11] Mao K B, Qin Z H. The transmission model of atmospheric radiation and the computationof transmittance of MODTRAN [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2004, 27(4): 1-3.
毛克彪, 覃志豪. 大气辐射传输模型及MODTRAN中透过率计算 [J]. 测绘与空间地理信息, 2004, 27(4): 1-3.

[12] Sun Y Y, Dong H, Bi Z H, *et al*. Inter-comparison of models for radiative transfer in the atmosphere [J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2004, 16(2): 149-153.
孙毅义, 董 浩, 毕朝辉, 等. 大气辐射传输模型的比较研究 [J]. 强激光与粒子束, 2004, 16 (2): 149-153.

[13] Sun Y Y, Li Z P, Yang B. High resolution radiative transfer model FASCOD2 [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1997, 14(1): 75-80.
孙毅义, 李治平, 杨 波. 高分辨率大气传输模型FASCOD2 [J]. 量子电子学报, 1997, 14(1): 75-80.

[14] Anderson G P, Wang J X, Hoke M L, *et al*. History of one family of atmospheric radiative transfer codes [C]. *Satellite Remote Sensing, Proc. SPIE 2309*, *Passive Infrared Remote Sensing of Clouds and the Atmospheric Ⅱ*, September 26-30, 1994, Rome, Italy. SPIE, 1994, 2309: 170 -183.

[15] Berk A, Anderson G P, Bernsteinm L S, *et al*. MODTRAN4 radiative transfer modeling for atmospherric correction [C]. *International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation, Proc. SPIE 3756, Optical Spectroscopic Techniques and Instrumentation for Atmospheric and Space Research Ⅲ*, October 20, 1999, Denver, CO, USA. SPIE, 1999, 3756: 348-353.

[16] James G C, Wang J X, Anderson G P. FASCODE: An update and applications in atmospheric remote sensing [C]. *International Symposium on Optics, Imagine, and Instrumentation, Proc. SPIE 1994, Optical Spectroscopic Techniques and Instrumentation for Atmospheric and Space Research*, July 24-29, 1994, San Diego, CA, USA. SPIE, 1994, 2266: 613-623.

[17] Zhou J, Yue G M, Qi F D, *et al*. Optical properties of aerosol derived from lidar measurements [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1998, 15(2): 140-148.
周 军, 岳古明, 戚福第, 等. 大气气溶胶光学特性激光雷达探测 [J]. 量子电子学报, 1998, 15(2): 140-148.

[18] Fan W, Wang Y, Rao R Z. Measurement of the atmospheric transmittance from visible to near infrared bands [J]. *Acta Photonica Sinica*. 2006, 35(3): 402-407.
范 伟, 王 毅, 饶瑞中. 可见到近红外波段整层大气光谱透过率的测量研究 [J]. 光子学报. 2006, 35(3): 402-407.

[19] Zhan J, Guo R P, Rao R Z. Measurement of atmospheric transmittance in the visible and near-infrared [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2006, 1(3): 179-183.
詹 杰, 郭瑞鹏, 饶瑞中. 可见到近红外波段整层大气透过率的测量 [J]. 大气与环境光学学报. 2006, 1(3): 179-183.

[20] Zhou X J, Tao S C, Yao K Y. *Advanced Atmospheric Physics* [M]. Beijing: Meteorological Press, 1991: 87-91.
周秀骥, 陶善昌, 姚克亚. 高等大气物理学 [M]. 北京: 气象出版社, 1991: 87-91.

[21] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 地面气象观测规范 总则: GB/T 35221—2017 [S]. 2017.