大气参数模式及其在辐射大气传输计算中的应用

魏合理[1],戴聪明[1],唐超礼[1,2],武鹏飞[1],黄宏华[1],李学彬[1],朱文越[1],饶瑞中[1],王英俭[1]

(1. 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;
2. 安徽理工大学 电气与信息工程学院,安徽 淮南 232001)

摘 要:大气辐射传输的计算精度在很大程度上依赖于大气参数的精度。建立局地的大气参数模式在光电工程的大气传输计算中将有重要应用。利用目前可获得的探空数据、卫星观测数据、地面站点的观测数据初步建立了我国不同地域的大气参数模式,包括地面至 120 km 高度的温度、湿度、气压的逐日、逐月、逐年高度分布廓线、地面能见度的月平均分布,覆盖我国 91 个气象探空台站。并把这些大气参数模式用在通用大气辐射传输计算软件(CART)中计算大气透过率和大气背景辐射。文中展示了 5 个台站的大气参数时空分布以及用 CART 计算的大气窗口波段的透过率、大气热背景辐射逐月分布及其在我国地域的空间分布。

关键词:大气参数模式; 辐射传输; 计算; 时空分布

中图分类号:P42 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201948.1203001

Atmospheric parameter model and its application in the calculation of atmospheric raditaive transfer

Wei Heli[1], Dai Congming[1], Tang Chaoli[1,2], Wu Pengfei[1], Huang Honghua[1], Li Xuebin[1], Zhu Wenyue[1], Rao Ruizhong[1], Wang Yingjian[1]

(1. Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. Institute of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: The calculation accuracy of atmospheric radiative transfer depends greatly on the precision of atmospheric parameters. The establishment of a local atmospheric parameter model plays an important role in the calculation of atmospheric radiative transfer for the photoelectric engineering. By using the data of currently available, including balloon-sounding data, satellite observation data, and some surface observation data at different areas in China, a preliminary model of atmospheric parameters was established, including the daily average, monthly average and yearly average profiles from the ground to 120 km of atmospheric temperature, humidity, air pressure, and density, as well as the monthly average of the ground visibility, covering the 91 observing stations in China. These parameters were integrated in the Combined Atmospheric Radiative Transfer calculation software (CART) to calculate atmospheric transmittance and atmospheric background radiation. The spatial distribution of atmospheric parameters of

收稿日期:2019-10-11; **修订日期**:2019-11-21

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(41505023);装备预研基金(41416020204)

作者简介:魏合理(1965-),男,研究员,博士生导师,主要从事红外辐射大气传输、卷云红外辐射特性方面的研究。
Email: hlwei@aiofm.ac.cn

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

5 stations and the monthly distribution of atmospheric thermal background radiation and its geographical distribution in China were shown in the paper.

Key words: atmopsheric parameters model; radiatvie transfer; calculation; temporal and spatial distribution

0 引 言

大气传输和大气背景辐射影响工作于大气中的光电测量设备性能[1],在设计和评估这些光电设备的性能时必须考虑大气传输特性和大气背景辐射特性。在空间目标辐射特性测量时,要获得目标本身的辐射特性就必须定量地扣除大气衰减的影响。大气传输修正是空间目标辐射特性测量的一个重要环节,其修正精度直接影响目标辐射特性的测量精度。

目前,一般采用大气辐射传输模式计算法来获得大气传输特性和大气背景辐射特性。近年来作者所在课题组研制了通用辐射大气传输软件 (CART)[2-3],可以根据大气参数用 CART 软件计算得到光电设备波段的大气透过率和背景辐射。和其他的大气辐射传输软件一样,CART 的计算精度很大程度上是由输入的大气参数的精度决定的。虽然根据实际测量的大气参数廓线可以得到较高的大气透过率和背景辐射的计算精度。但是在很多情况下无法获得完备的大气参数信息,此时采用符合当地条件的大气参数模式在大气传输和背景辐射计算中具有重要的应用价值。在光电设备的设计时,要确定其在特定地区的性能和作用距离时,符合当地的大气参数模式及其季节变化是必须考虑的因素。

大气传输和背景辐射特性与大气分子、气溶胶及环境参数的空间分布有关。建立重要大气分子、气溶胶及环境参数的高度分布廓线, 对大气辐射传输计算非常重要。我国区域地理位置十分复杂,大气条件千变万化,在进行大气辐射传输研究时,简单地套用国外的标准大气模式在特定范围内应用可能会产生相当大的误差 [4], 因此需要建立我国区域的大气参数模式。

基于气象部门历年的探空数据、卫星观测数据和若干地区机场的能见度数据, 初步建立了我国区域内的大气参数平均廓线模式, 包括大气温度、气压、密度、水汽以及地面能见度的逐月和年平均大气参数模式,应用于辐射大气传输计算。

1 大气参数模式

参考文献[1]分析了影响大气传输重要的大气参数, 大气水汽和气溶胶是影响红外辐射大气传输的重要参数,并且在大气中的时空变化较大,在大气模式中必须重点考虑。大气温度是热辐射计算的重要参数;大气密度是反映大气质量变化的重要因子,在大气散射、折射等方面具有重要的应用。大气气溶胶的衰减可以粗略地用地面能见度和气溶胶类型来表征。因此,笔者在大气模式的研究中重点考虑了大气温度、气压、大气密度、水汽密度和地面能见度。至于微量气体成分,如二氧化碳、臭氧、甲烷、一氧化碳、氧化二氮等,相对上述大参数,等造成的大气衰减依赖于波长位置和光谱分辨率,在可见光波段,大气衰减相对于水汽等很小,对光的衰减小很多,或是其本身有些气体(如二氧化碳、甲烷)的时空变化范围不是太大, 这些气体成分含量的高度分布廓线目前采用相近纬度的标准大气模式[5]。

目前采用的数据源包括我国境内气象探空站点多年的气象探空数据、卫星遥感数据和若干机场地面观测的能见度数据。

1.1 探空数据

无线电气球探空是广泛使用的直接测量大气温度和湿度廓线的方法, 且具有几十年连续测量的数据, 为建立局地的大气模式提供了可靠的高精度数据。笔者利用国际气象组织的气球探空数据[6],下载了国内所有的探空站点的数据。考虑时间连续性和探空数据的精度,选取了全国如下的 91 个站点超过 20 年的数据, 数据的时间范围为 1991 年 1 月至 2010 年 12 月共 20 年,包括每天两次(北京时间 8 时和 20 时)的等压面的高度、大气温度、相对湿度、气压及风速风向等参数的高度分布 (风速风向模式不在文中讨论之列)。这 91 个探空站分布如图 1 所示。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

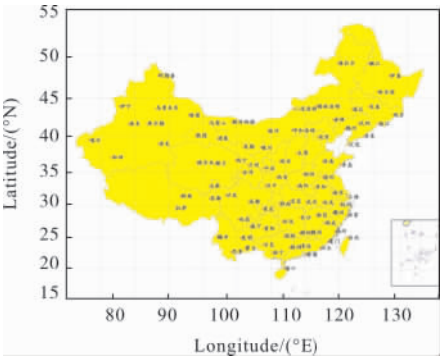


图 1 大气参数模式采用的探空站点

Fig.1 Site of sounding stations used in atmosphere parameters model

探空数据经过质量控制、异常点剔除、统计平均,得到各站点逐日、逐月和年平均的大气参数模式,包括大气温度廓线、气压廓线、大气密度廓线、水汽廓线。探空数据的测量高度一般接近 30 km,30 km 以上高度的温度廓线采用卫星数据 (见 1.3节)。探空气球测量的水汽廓线的最大高度一般到 10 km 左右,10 km 以上采用同纬度标准大气。

1.2 水汽总量的空间分布

在可见光到远红外波段,水汽有丰富的吸收线,对大气透过率和背景辐射有非常重要的影响,并且水汽含量的时空变化非常大。因此,笔者将下载的 91 个探空站点的水汽总量数据进行统计分析,得到全国各站点大气水汽密度的高度分布廓线,按日、月和年平均数据作为数据库,高度范围从当地地面海拔到 10 km 高度。

5 个地区的经纬度和海拔高度如表 1 所示,5 个地区分别代表东南、西南、华北、西北和青藏高原地区。图 2 选择了 5 个不同地区地面到 10 km 高度年平均水汽含量廓线。可以看出,平均水汽含量总是随高度迅速递减的,水汽主要集中在对流层底部,对于低海拔地区,10 km 高度以下水汽含量占整层大气水汽总量的 99%。近地面到对流层下部高度区域,同一高度上水汽密度主要由纬度决定,北半球纬度越低,水汽含量越大,如 1 km 高度上,厦门水汽密度大于成都,然后是喀什和北京,按纬度升高水汽密度降低。

表 1 5 个站点的海拔和经纬度

Tab.1 Altitude, longitude, and latitude of 5 sites

Area	Xiamen	Chengdu	Beijing	Kashi	Lasa
Altitude/m	139	508	55	1 291	3 650
Longitude/(°E)	118.08	104.01	116.27	75.98	91.13
Latitude/(°N)	24.47	30.66	39.93	39.47	29.66

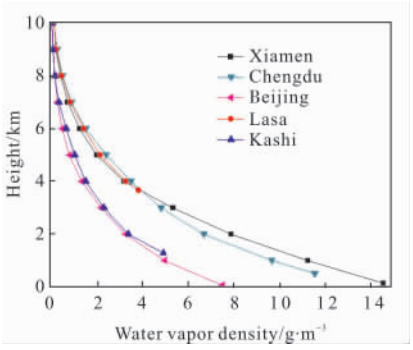


图 2 5 个地区年平均大气水汽含量廓线

Fig.2 Water vapor content profile of atmosphere for the 5 areas

路径中的水汽总量是决定红外波段大气透过率的重要参数,这些参数可由一些观测设备直接或间接地测量得到,如气球探空、太阳光度计、微波辐射计、激光雷达、GPS、卫星遥感等方法。笔者把水汽廓线按高度积分,得到全国各站点整层大气水汽总量的逐日和月平均值,对全国地区进行插值得到全国水汽总量的分布图。水汽总量 W 的表达式:

$$W=\int_{h_0}^{120}\rho(h)\mathrm{d}h$$

图 3 是这 5 个地区大气水汽总量逐月平均的变化。可以看出:水汽总量的季节变化明显,从冬天最小的 1 月开始增大,到 7 月最大,然后减小。不同地区水汽含量季节变化差异很大,比如北京地区夏季

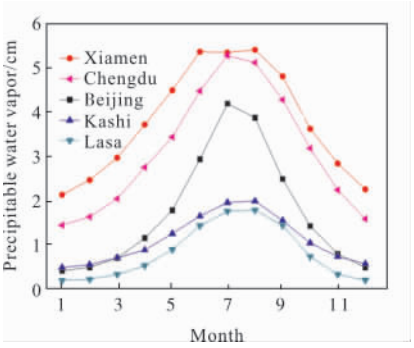


图 3 5 个地区大气水汽总量的逐月平均变化

Fig.3 Monthly average variation of precipitable water vapor for 5 areas

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

水汽总量是冬季的 10 倍以上,而厦门地区夏季水汽总量是冬季的 3 倍不到。水汽总量与纬度、季节和当地的海拔高度有关。厦门地区因为纬度低、海拔低,在这五个地区中水汽含量最大;尽管拉萨纬度不是最高,但因其海拔 3.65 km 远高于其他 4 个地区,所以,其水汽总量最小。

图 4 是依据图 1 的 91 个站点的平均水汽总量,按等值线画出的全国范围内年平均水汽总量分布图。从年平均图上可以看出:我国北方的水汽总量小,南方水汽总量大;东部地区水汽总量大于同纬度西北内陆地区。由藏西南一直到青海地区北部及新疆大部分地区,水汽总量的年平均值均低于 1 cm。由此往东南方向,水汽总量迅速增大,在四川地区达到一个峰值 3.3 cm,云贵高原的水汽总量也超过了 2 cm,东部地区由北向南逐渐增大,在南部沿海和海南地区,水汽总量都超过了 4 cm。总得说来,由于我国西高东低的地理状况,我国地区水汽总量东边比西边大,南方比北方大。

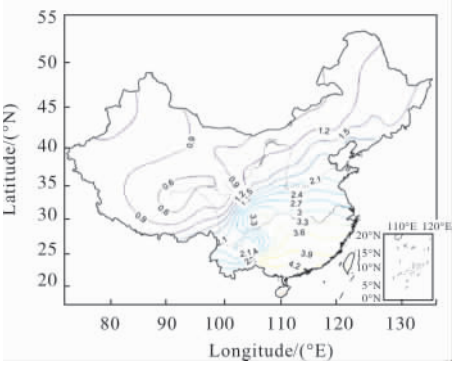


图 4 全国水汽总量的年平均值分布图(单位:cm)

Fig.4 Yearly average distribution of precipitable water vapor over China(Unit: cm)

水汽含量不仅季节变化大,而且起伏方差也大,这对于实际应用有一定的影响。笔者利用历年探空站点数据,并根据地面实时测量的大气参数值,结合逐日平均模式提出了一种构建实时大气温度和水汽含量廓线的方法[7],对厦门地区用 1 年的探空数据检验,构建的水汽密度廓线及整层大气水汽总量与实际探空测量的廓线进行对比,结果表明:模拟构建的对流层以下的温度廓线偏差小于 2.5 K,气压基本保持不变一致;水汽密度廓线在晴天条件下与真实廓线吻合较好,水汽总量偏差小于 15 %,此方法可在一些光学工程中有得到应用。

1.3 卫星数据

探空数据一般只能测量 30 km 高度以下的大气参数廓线。此高度之上的平流层中上部到中间层高度的大气温度、密度廓线数据采用 SABER (Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry)[8] 卫星遥感数据。SABER 是搭载在 TIMED 卫星平台上,用于观测中间层、低热层区域(30~180 km 高度)大气分子临边发射辐射的 10 通道宽带辐射计,用来研究这一层结的大气结构(温度、密度和气压随高度的如何变化)、化学、动力、输运等过程;利用这些辐射数据可以反演中高层大气温度、密度和微量气体成分等参数的高度分布廓线,覆盖了全球 83°S~83°N 区域。

笔者收集了全球尺度 SABER 卫星探测器观测的中高层大气温度和臭氧浓度廓线,包含 2002~2015 年共 14 年的探测资料,经过统计分析,得到了我国各地区高空的逐月平均温度和大气密度的廓线。

图 5 是结合探空数据和卫星数据统计平均的上述 5 个地区年平均温度廓线,25 km 以下用探空数据,高度分辨率为 1 km;25~120 km 高度范围用

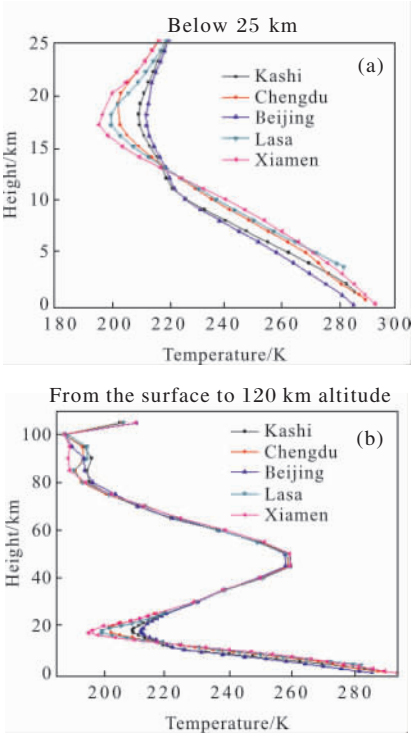


图 5 基于探空和卫星数据的 5 个地区年平均温度廓线

Fig.5 Yearly average temperature profiles at 5 areas based on sounding and satellite data

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

SABER 卫星遥感数据,高度分辨率为 5 km。从中可以看出,不同地区温度随高度变化趋势一致,但数值有很大的差别,特别是地表、对流层顶和中间层顶的温度,随地域有超过 20 ℃的差别,与同纬度标准大气相比,温度也有明显的差别。

1.4 能见度的地域分布

从 The weather underground 网站上下载了全国 42 个代表城市近年的能见度数据,对这些数据进行统计得到每个城市的能见度的年平均值和月平均值,将这些数据插值到我国各个地区,做出我国范围内能见度的分布图。

图 6 是这 5 个地区地面能见度逐月平均的变化。可以看出各个地区能见度有明显的不同,拉萨地区能见度常年在 30 km 以上;喀什地区夏季 5~10 月能见度较高,而北京地区春季秋季能见度较高。成都地区月平均能见度全年都很低,在 3.4~6.2 km 范围内,夏季 4~8 月稍高,冬季 11~1 月较低。

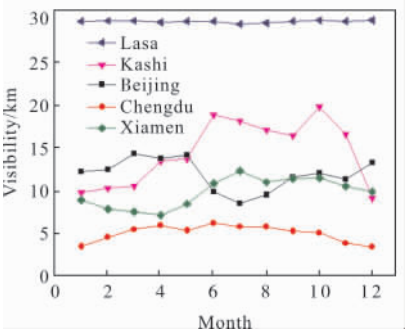


图 6 5 个地区大气能见度的逐月平均变化

Fig.6 Monthly average variation of visibility for 5 areas

图 7 是能见度年平均值在全国范围的等值线分布,从图中可以看出四川盆地是能见度的一个低值中心,由四川盆地沿中原地区华北平原,能见度都低于 15 km,处在低值范围内,长江中下游地区也是一个能见度低值区,能见度在 10 km 左右。因为冬季乌鲁木齐地区能见度太低,在新疆以乌鲁木齐为中心的附近区域也形成了一个低值区。能见度高的地区主要分布在青藏高原、新疆(除乌鲁木齐外)、华北、东北北部和川西南地区。

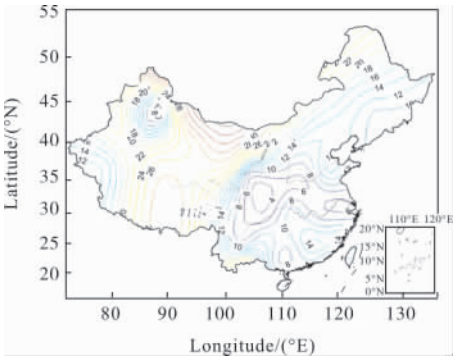


图 7 全国能见度分布图(单位:km)

Fig.7 Distribution of visibility over China(Unit: km)

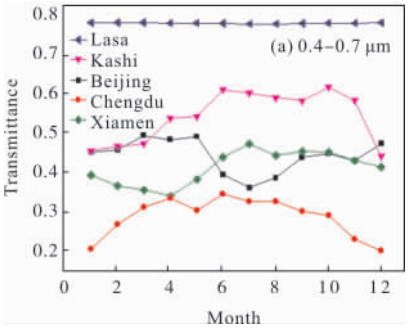
2 大气参数模式在辐射传输计算中的应用

笔者研制了通用辐射大气传输软件(CART)[2-3],可以根据大气参数廓线计算得到光电设备波段的大气透过率和背景辐射。CART 计算的大气透过率和背景辐射由大气参数廓线来决定。此节中,根据上述我国不同地域的大气参数模式,计算了工程上常用的可见光 0.4~0.7 μm、中波红外 3~5 μm 和长波红外 8~12 μm 3 个大气“窗口”波段的整层大气透过率和大气顶向上的长波背景辐射的全国分布和季节变化,供有关工程参考。

2.1 整层大气透过率的季节变化

分别将上述 5 个站点的 1~12 月的大气模式导入 CART 软件中,并且根据不同站点、不同月份的大气参数对 CART 软件中的参数进行设置,计算了 3 个大气窗区(0.4~0.7 μm,3~5 μm 和 8~12 μm)的整层大气(地面到 100 km 高度)、垂直(天顶角为 0°)的平均大气透过率。3 个波段的平均透过率随月份的变化分别如图 8(a)~(c)所示。

比较图 8(a)和图 6 可以看出:可见光 0.4~0.7 μm 波段的大气透过率和地面能见度密切相关。拉萨地区大气透过率大,全年基本没有变化,都在 0.8 左右;喀什地区冬季大气透过率低,春季随着月份变化不断增大,6~10 月比较稳定,大概在 0.6 左右,12 月和 1 月较低;北京地区,春秋季大气透过率较好,冬夏较低;厦门地区则是 7 月的大气透过率最大,4 月



(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

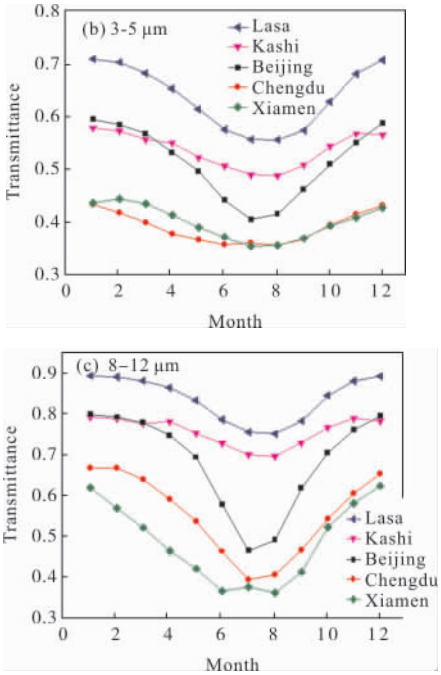


图 8 5 个地区 3 个波段大气透过率随月份的变化

Fig.8 Monthly average transmittances at three wavebands for 5 areas

最小;成都地区全年的大气透过率都较低,都在 0.35 以下，究其原因是成都地区大气能见度每月的平均值都很低。

3~5 μm 波段的透过率的变化主要受水汽总量和大气气溶胶含量的共同影响。从图 8(b)中可以看出:在 3~5 μm 波段,我国大部分地区夏季的大气透过率最低,冬季达到最大值,北京地区的季节变化更加明显,这是由于夏季水汽含量较大,而冬季大气比较干燥;在这 5 个站点中,拉萨的大气透过率最大,其次是喀什,大气透过率较小的站点是厦门和成都,厦门是沿海城市,大气中的水汽含量比其他地区高,成都能见度低，水汽含量也大。8~12 μm 波段的透过率的变化主要受水汽总量的影响，其次受大气气溶胶的影响。从图 8(c)可以看出:8~12 μm 波段的大气透过率季节变化情况和 3~5 μm 波段相似,都是夏季的大气透过率较低,冬季达到最大值;在这 5个站点中,拉萨和喀什的大气透过率都比较高,而且随月份的变化幅度不大，其余 3 个地区的季节变化就比较明显，其中北京地区的大气透过率变化幅度最大,冬季的 1 月份达到 0.8,而夏季的 7 月份则只有 0.46 左右，参见图 3 就可以看出这是因为北京地区的水汽含量冬夏变化巨大造成的。厦门地区透过率最小是因为水汽含量最大的原因。

2.2 大气顶向外的长波热辐射的季节变化

使用 CART 软件计算这 5 个地区 8~12 μm 大气顶向上和在地表大气向下的热辐射随月份的变化,不同的站点选择不同的地表类型,不同的月份使用相应月份的平均大气模式及平均地表温度，结果如图 9 所示。其中,图 9(a)为在大气顶向上的热辐射,图 9(b)为在地表大气向下的热辐射。

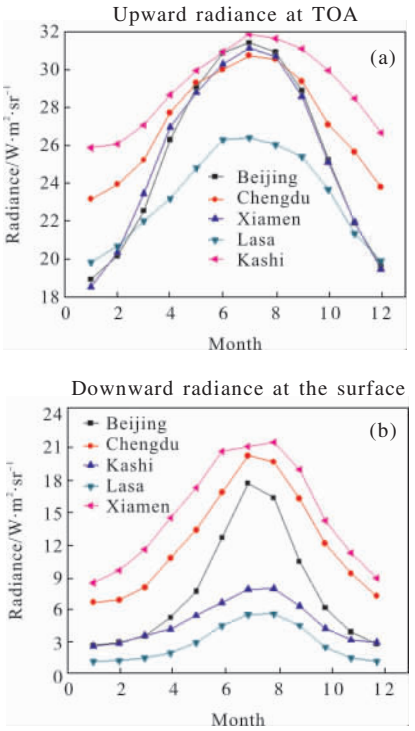


图 9 5 个地区 8~12 μm 波段热辐射随月份的变化

Fig.9 Monthly thermal radiation at 5 areas within 8-12 μm waveband

从图中可以看出：这些站点的热辐射随月份的变化规律很相似,都是夏季大、冬季小,在 1 月份最小,然后逐渐增大,到 7 月份达到最大,之后随月份变化逐渐降低。在这 5 个站点中,厦门地区的热辐射比其他站点高,拉萨站点在夏季的总热辐射最小,北京的总热辐射随季节变化最明显。这主要是由各地区地表温度、大气温度廓线和水汽廓线综合因素决定的。图 9(a)中大气顶的热辐射是透过大气的地表辐射和大气辐射的总和，变化趋势与各地的月平均地表温度的月平均一致;图 9(b)中,大气向下的热辐射主要受大气温度和水汽含量变化的影响，变化趋

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

势与图 3 中水汽总量的变化趋势一致。

2.3 大气透过率的地域分布

使用 CART 软件对 91 个探空站点计算各个站点在不同波段的平均大气透过率。在使用 CART 软件进行计算时，自定义大气模式使用的是根据探空数据统计平均各个站点的大气参数模式。近地面气溶胶模式根据地域不同可以选择不同类型，如沿海城市选择海洋型、内陆城市选择城市型、西北干旱地区选择沙漠型，气溶胶折射率种类也相应地选为海洋型、大陆型和沙漠型，0~10 km 气溶胶高度分布模式为 MODTRAN 高度分布，10~30 km 气溶胶高度分布为背景平流层。能见度使用的则是根据上述 42个城市的数据按空间插值到这 91 个探空站点的能见度数据。观测高度为各个站点的海拔高度，目标高度为 100 km，观测天顶角为 0°。图 10 展示了可见光 0.4~0.7 μm 波段整层大气透过率在我国地区的空间分布。可见光波段的大气透过率主要受大气气溶胶浓度的影响，比较图 7 就可以看出：可见光波段的整层大气透过率与能见度的空间变化相似，在四川盆地是一个低值区，平均大气透过率仅为 0.2 左右，极大值出现在青藏高原、川西地区，新疆西部帕米尔高原、华北和东北北部透过率也较高。这主要是由于在可见光波段气溶胶衰减贡献较大，而气溶胶光学厚度与地面能见度具有负相关性，从而导致整层大气透过率与能见度正相关。

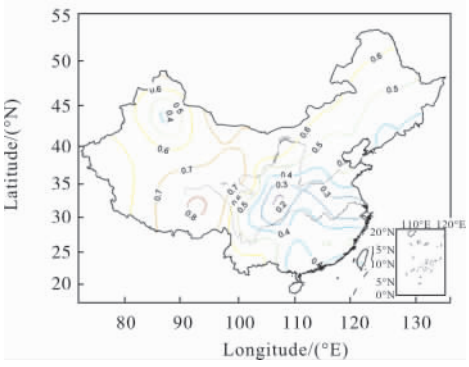


图 10 全国 0.4~0.7 μm 年平均大气透过率分布

Fig.10 Distribution of average atmospheric transmittance within 0.4–0.7 μm waveband over China

2.4 大气向上的热辐射的地域分布

图 11 是 8~12 μm 波段大气热辐射全国分布图，从图中可以看出：我国的热辐射分布是南方大，北方小，东部比西部大，以拉萨为中心成为了一个热辐射低值中心，其周边青海等地形成了一个低值区。如前所述，8~12 μm 波段大气窗口的热辐射主要是由各地表温度、大气温度廓线和水汽廓线综合因素决定的，我国西高东低、气候南部高温高湿造成 8~12 μm 波段大气窗口热辐射和大气透过率这种空间地域分布。

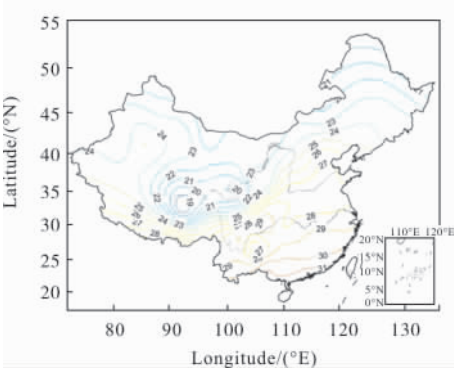


图 11 全国范围内 8~12 μm 大气总热辐射分布

Fig.11 Distribution of upward thermal radiation within 8–12 μm waveband over China

3 结 论

基于我国气象部门多年的探空数据、卫星观测数据、定点观测的数据初步建立了我国不同地域的大气参数模式，包括地面至 100 km 高度的温度、湿度、气压廓线、地面能见度、地表温度、水汽总量等参数，并应用到辐射传输计算中。根据这些模式，采用通用大气辐射传输软件 CART 计算了我国不同地域的大气传输和背景特性的地域变化和季节变化。

随着大气参数模式的不断丰富和完善，符合我国不同地域的大气模式将在光电工程的大气传输和环境背景辐射特性计算中发挥重要作用。

参考文献：

[1] Wei Heli, Dai Congming. Research of atmospheric transfer correction in radiance measurement: atmospheric radiative transfer model and the analysis of key atmospheric parameters [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2014, 43(3): 884–890. (in Chinese)
魏合理, 戴聪明. 辐射特性测量大气传输修正研究:大气辐射传输模式和关键大气参数分析 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 884–890.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[2] 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)及其在目标辐射特性测量中的应用 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12): 3360-3366.

[3] Wei Heli, Chen Xiuhong, Rao Ruizhong, et al. A moderate-spectral-resolution transmittance model based on fitting the line-by-line calculation [J]. ***Optics Express***, 2007, 15(13): 8360-8370.

[4] Rao Ruizhong, Qiao Yanli, Wei Heli, et al. Research and application on optical properties of atmosphere in typical regions of China [J]. ***Journal of Atmospheric and Environmental Optics***, 2007, 2(6): 401-408. (in Chinese)
饶瑞中, 乔延利, 魏合理, 等. 中国典型地区大气光学特性及其应用[J].大气与环境光学学报, 2007, 2(6): 401-408.

[5] NOAA, NASA, USAF. Standard Atmosphere(U.S. 1976) [M].Translated by Ren Xianmiao, Qian Zhimin. Beijing: Science Press, 1982. (in Chinese)
美国国家海洋和大气局, 国家宇航局和美国空军部. 标准大气(美国 1976)[M].任现淼,钱志民, 译. 北京: 科学出版社, 1982.

[6] Durre I, Vose R S, Wuertz D B. Overview of the integrated global radiosondearchive[J]. ***J Climate***, 2006, 19(1): 53-68.

[7] Qin Qibing, Wei Heli. Construction of real-time atmospheric parameter profiles based on average radiosonde profiles andsurface meteological datas [J]. ***Journal of Atmospheric and Environmental Optics***, 2013, 8(3): 161-168. (in Chinese)
秦琦冰, 魏合理. 基于平均探空廓线和地表实测数据构建大气参数廓线的方法研究 [J]. 大气与环境光学学报, 2013, 8(3): 161-168.

[8] Mlynczak M G. Energetics of the mesosphere and lower thermosphere and the SABER experiment[J]. ***Adv Space Res***, 1997, 206: 1177-1183.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net