

王敏,胡春,赵福燕,等.基于 CALIPSO 卫星探测的 2007—2018 年西南地区平流层气溶胶的光学特性分析[J].沙漠与绿洲气象,2021,15(5):93-100.

doi: 10.12057/j.issn.1002-0799.2021.05.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



基于 CALIPSO 卫星探测的 2007—2018 年西南地区平流层气溶胶的光学特性分析

王 敏¹,胡 春^{1*},赵福燕¹,王 杰¹,潘红林²

(1.四川省气象探测数据中心,四川 成都 610000;2.中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所,新疆 乌鲁木齐 830002)

摘 要:基于 CALIPSO(Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations)卫星 2007—2018 年的 3 级平流层气溶胶廓线资料,分析了西南地区平流层气溶胶的光学特性。结果表明:在地理和季节上西南地区平流层气溶胶浓度较低;在夏季,西南地区平流层气溶胶光学厚度的均值出现最大值 0.000 7;平流层气溶胶总衰减后向散射值的廓线分布随着高度的增加而减小,在 10~11 km 高度出现最大值。这可能是由于对流层顶部和平流层底部之间气溶胶的相互交换。同时,平流层气溶胶总衰减后向散射值的纬向(22.5°~32.5°N)分布在 7 月出现均值最大值,为 $0.000\ 6 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$,而经向分布(90°~110°E)在 1 月出现最大值,为 $0.001\ 8 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。研究结果可为气候及环境的变化研究提供有力的科学依据。

关键词:平流层;气溶胶;CALIPSO;西南地区

中图分类号:X16

文献标识码:A

文章编号:1002-0799(2021)05-0093-08

平流层气溶胶是指进入到平流层的气溶胶粒子,通常包含火山喷发产生的火山灰,硫酸盐粒子以及对流层的烟尘进入到平流层等^[1-4]。一些研究表明,平流层气溶胶可以反射或吸收入射的太阳短波辐射,引起平流层的制冷或加热效应^[5-7]。平流层气溶胶能够与某些微量气体产生光化学作用,如氮氧化物,臭氧等,影响其收支平衡^[8-10]。此外,平流层气溶胶还能够间接影响对流层,如进入到对流层顶部的平流层气溶胶可能影响深对流云的微物理性质^[11-12]。余长明等^[13]在 2004 年利用武汉大学双波长激光雷达 2001 年 3 月—2002 年 1 月的观测数据,发现武汉上空平流层气溶胶在 16~20 km 间存在气溶胶层,且呈现夏季大、冬季小的分布特点;刘煜

等^[8]在 2007 年利用 SAGE II 卫星遥感资料,分析发现大的火山喷发对青藏高原平流层气溶胶产生较长的影响,其周期大约为 6 a。尚晶晶等^[11]在 2017 年利用 WRF-Chem 模式模拟 2006 年 8 月 1 日—9 月 1 日中国区域硫酸盐和黑碳气溶胶与云特性的相互作用,发现黑碳对云量的影响要大于硫酸盐,其原因可能是由于黑碳气溶胶直接辐射效应导致云层受热,而使得云粒子蒸发,云量减少。因此,平流层气溶胶在大气化学和辐射强迫中扮演着十分重要的角色。

目前,国内外对大气气溶胶的研究主要关注对流层气溶胶^[14-17],如沙尘、烟及海盐等气溶胶粒子,而对于平流层气溶胶的研究相对较少。沈吉等^[18]在 2019 年利用主动卫星遥感云—气溶胶激光雷达和红外探测者卫星(CALIPSO)2017 年 12 月—2018 年 11 月对流层气溶胶资料,分析得到长江三角洲地区全年中沙尘气溶胶出现的频率最高约占 37%,而在夏季烟尘和海盐气溶胶的出现频率要高于春、冬两季。此外,中国西南地区地形复杂,主要由四川盆地、

收稿日期:2020-07-20;修回日期:2021-06-20

基金项目:中国沙漠气象科学研究基金(Sqj2017014)

作者简介:王敏(1987—),女,工程师,主要从事激光大气探测研究。

E-mail:412084268@qq.com

通信作者:胡春(1974—),男,高级工程师,主要从事综合观测与研究。E-mail:327058748@qq.com.

山地及云贵和青藏高原组成,导致该地区天气及气候形势多变,进而对数值天气模式对该地区的天气预测提出更高的要求。且该地区不易进行地面观测,使得缺乏长期连续观测的平流层气溶胶数据(特别是平流层气溶胶垂直分布资料),平流层气溶胶对该地区的天气和气候的影响研究相对缺乏,特别是在观测层面,平流层气溶胶作为天气气候强迫因素,可约束该因素在数值模式中对该地区天气气候的预测作用。而 CALIPSO 卫星观测具有时空分辨率高的特点^[19-20],其搭载的激光雷达可弥补该区域平流层气溶胶连续垂直探测的数据。因此基于 CALIPSO 卫星 2007—2018 年的数据对西南地区平流层气溶胶光学特性进行分析研究是十分必要的,在此基础上可为西南地区平流层气溶胶对区域气候、天气的影响提供科学依据。此外,平流层气溶胶的研究,可为气候及环境的变化研究提供有力的科学依据,为云—气溶胶的相互作用研究提供基础。

1 数据与方法

1.1 数据来源与处理

本研究数据来自 CALIPSO 卫星 2007—2018 年 3 级平流层气溶胶数据产品,其中 CALIPSO 卫星是美国 NASA 在 2006 年发射的一颗地球观测卫星,并是“A-Train”系列卫星成员之一,轨道高度为 705 km,周期为 16 d。相比被动卫星反演,该卫星上搭载的双波长(532 nm 和 1 064 nm)正交偏振激光雷达可以获取全球云和气溶胶的垂直内部结构^[21-22]。CALIPSO 搭载 3 个天顶视场的仪器(CALIOP, IIR, WFC),一个测量 1 064 nm 反向散射强度和两个测量 532 nm 反向散射信号的正交偏振分量的通道,用于观测气溶胶和微米级的云粒。CALIPSO 携带的可见光和近红外偏振传感器激光雷达用于观察地球气溶胶和云的相态。NASA 和法国国家空间研究中心的合作任务,目的是测量气溶胶和云层,以促进对长期气候变迁和气候变化性的预报。主要目的:提供全球气溶胶和云观测数据,用于研究云和气溶胶在调节地球气候中的作用,以及两者的相互作用。CALIPSO 能探测到的信号强度跨度达到 6 个量级,覆盖从地面以上 30~35 km 的无气溶胶情况下散射的信号。卫星飞行的轨道为太阳同步轨道,轨道高度 705 km,倾角 98.05°,升交点地方时 13:30。

本文选择的 2007—2018 年的 3 级夜间平流层气溶胶廓线产品于 2018 年 8 月释放(由于白天背景噪声大,CALIOP 对夜间的探测结果更为精确合

理^[23]),该产品的空间分辨率为 5°N、20°E 和高度 900 m,且由背景值和总气溶胶值两个数据分量组成。其中,背景值是移除云、气溶胶和极地层状云样本构成的数据;而总气溶胶值是移除云和极地层状云样本,保留气溶胶样本构成的数据。需要说明的是,总气溶胶值是包括火山灰、硫酸盐粒子、抬升的烟及极地层状云气溶胶的总和。

总衰减后向散射和光学厚度两个变量被用来分析平流层气溶胶的光学特性。其中,对背景值的总衰减后向散射变量在 $0 \sim 5.3 \times 10^{-4} \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 有效范围内进行质量控制,光学厚度在 $-0.05 \sim 0.06$ 有效范围内进行质量控制;对总气溶胶值的总衰减后向散射参数在 $0 \sim 6.3 \times 10^{-4} \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 有效范围内进行质量控制,光学厚度在 $-0.02 \sim 2$ 有效范围内进行质量控制。另外,对气象变量平流层平均位温在 300~1 250 K 有效范围内进行质量控制。需要指出的是,本文中四个季度划分分别为春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月)、冬季(12 月—翌年 2 月)。图 1 为研究区域示意图,西南地区($22.5^{\circ} \sim 32.5^{\circ} \text{N}$, $90^{\circ} \sim 110^{\circ} \text{E}$)包括四川、重庆、贵州、云南及西藏东南部。

1.2 研究方法

1.2.1 气溶胶光学特性指标

本文通过气溶胶的总衰减后向散射(Total Attenuated Background, TAB)和光学厚度(Aerosol Optical Depth, AOD)的背景值和总气溶胶值之间的差值,来确定西南地区平流层气溶胶的光学特性。公

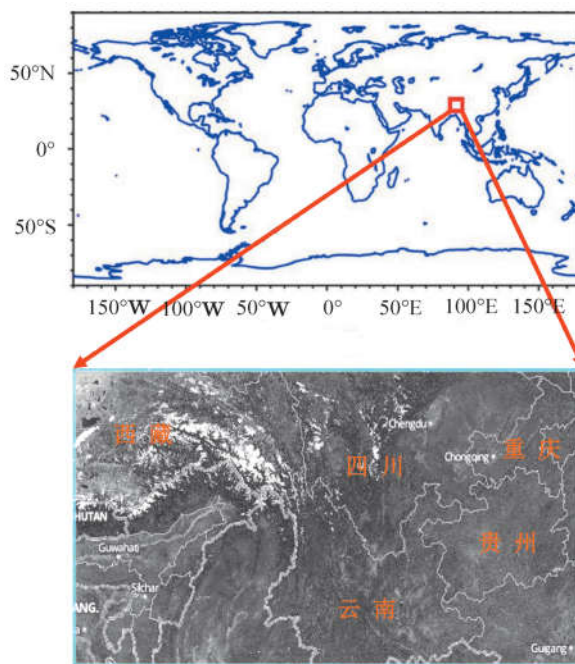


图1 研究区域示意图

式为:

$$A_{OD}=A_{ODall}-A_{ODbg}, \quad (1)$$

$$T_{AB}=T_{ABall}-T_{ABbg}. \quad (2)$$

式中, A_{OD} 为气溶胶光学厚度, T_{AB} 为气溶胶总衰减后向散射, 下标 all 表示总气溶胶值, 下标中的 bg 为 Background 缩写, 表示背景值。

1.2.2 数据分析指标

三维变量总衰减后向散射(T_{AB}), 表示 T_{AB} 的总气溶胶和背景气溶胶之间的差值。对该变量进行降维处理, 即纬向分布为变量在经度(Longitude)方向进行积分。同理, 径向分布为变量在纬度(Latitude)方向进行积分。其公式为:

$$T_{Mla}=\frac{\sum_{i=1}^N \cdot \sum_{lo=-170^{\circ}}^{170^{\circ}} T_{AB}}{N}. \quad (3)$$

式中, T_M 为平均的总衰减后向散射值, N 为 2007—2018 年三级平流层气溶胶数据个数。lo 为经度(Longitude)缩写, la 为纬度(Latitude)缩写。

2 结果与分析

2.1 平均位温的季节变化特征

基于平流层内水汽含量少, 选择位温来分析西南地区平流层的气象条件的变化, 因为位温是干空气的一个重要的湿度参量^[24]。由图 2 可知, 西南地区平流层内的平均位温呈现由南向北逐渐减小的分布, 云南, 贵州等区域平均位温较大, 平均位温随着高度的增加而增加, 其中, 在 10~16 km, 位温增加的速率比 17~35 km 增加得快。这可能是因为对流层顶部和平流层底部之间的热量交换比平流层顶部要多和快^[25]。此外, 表 1 总结了西南地区四季平均位温的变化, 夏季的平均位温最大为 681 K, 冬季的平均位温最小为 672 K, 且春季和冬季的平均位温在西南地区波动较大。

2.2 光学厚度的季节变化特征

图 3 为西南地区平流层气溶胶光学厚度的背景值和总气溶胶值的季节分布。由图 3 可以看出, 西南地区的平流层气溶胶光学厚度的背景值和总气溶胶

表 1 2007—2018 年西南地区平流层位温最小值、最大值和平均值的季节分布 K

	春季	夏季	秋季	冬季
最小值	657	677	664	645
最大值	696	687	686	691
平均值	680	681	677	672

值由南向北逐渐增大, 且二者的数值波动在春季和冬季比夏季和秋季大, 这与上文分析的平均位温的变化分布相同。另外表 2 总结了西南地区四季二者的差值, 即平流层气溶胶光学厚度值。总的来说, 西南地区的平流层气溶胶的光学厚度四季分布的平均

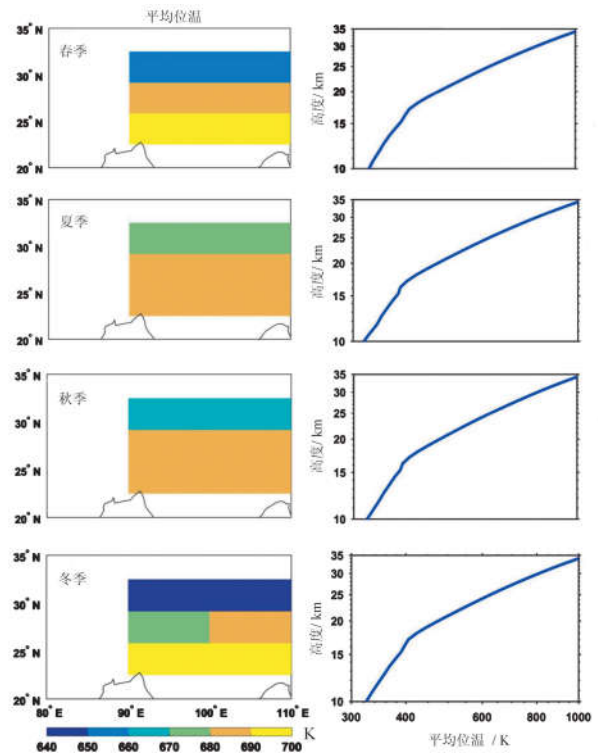


图 2 2007—2018 年西南地区平流层平均位温的季节分布

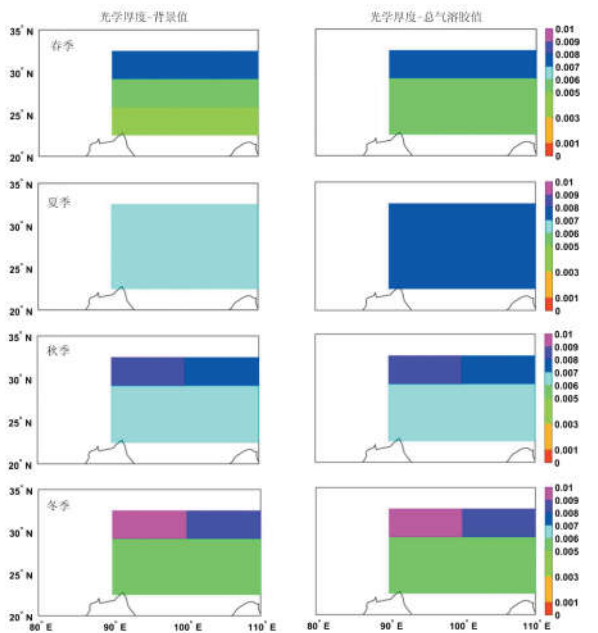


图 3 2007—2018 年西南地区平均光学厚度背景值和总气溶胶值的季节分布

表 2 2007—2018 年西南地区平均背景和总气溶胶光学厚度值的季节分布

	春季	夏季	秋季	冬季
背景值	0.005 9	0.006 6	0.007 1	0.006 6
总气溶胶	0.006 0	0.007 3	0.007 2	0.006 7
差值	0.000 1	0.000 7	0.000 1	0.000 1

值较小。其中,夏季光学厚度的平均值最大为 0.000 7,其余 3 个季节都为 0.000 1,这可能是因为夏季的对流活动较强,造成气溶胶粒子在对流层和平流层之间交换^[26-27],使得位于对流层的气溶胶在平流层被激光雷达捕捉到。

2.3 总衰减后向散射纬向和径向的月变化特征

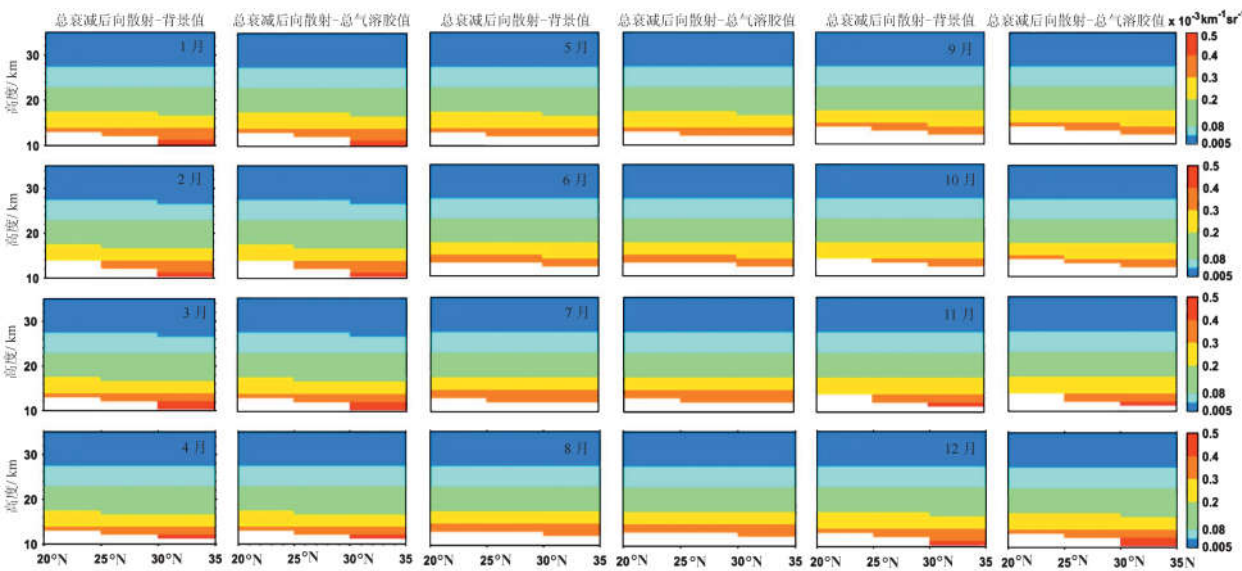


图 4 2007—2018 年西南地区总衰减后向散射背景值和总气溶胶值纬向的月变化

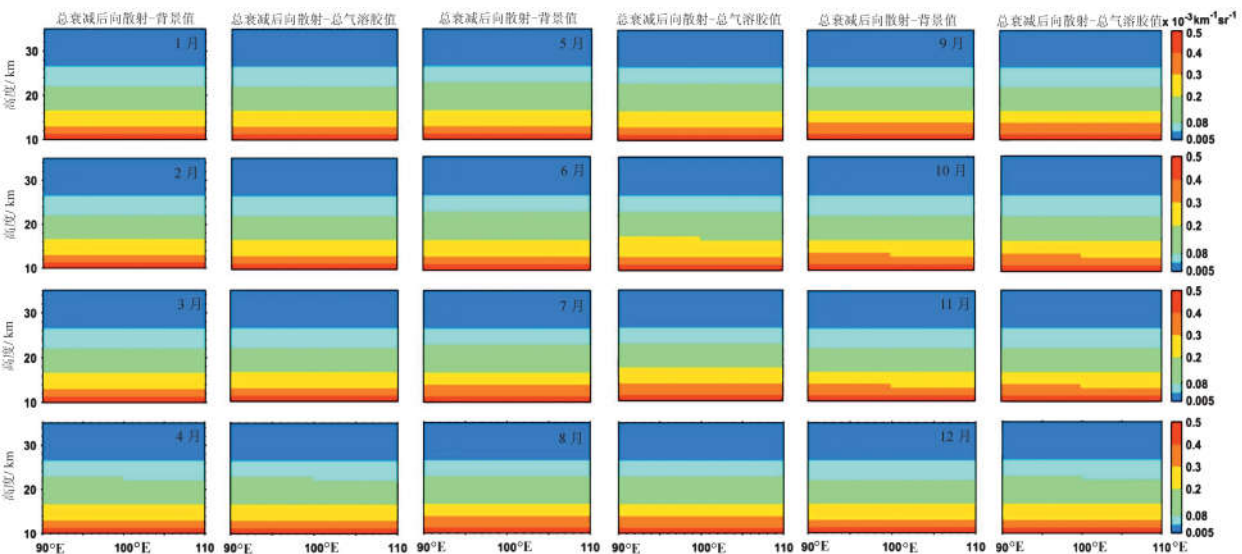


图 5 2007—2018 年西南地区总衰减后向散射背景值和总气溶胶值经向的月变化

2007—2018 年西南地区平流层气溶胶总衰减后向散射纬向的月变化见图 4。12 个月份总衰减后向散射都表现为数值的大小随着高度的增加而减小,即在 11~12 km 高度处存在最大值。这可能是由于平流层底部和对流层顶部之间因大气动力作用,致使二者之间的气溶胶粒子相互交换作用增强^[26-27]。以及由于气溶胶粒子自身的重量,而使其出现分层分布,即重量大的气溶胶粒子因重力而分布在下层。相反,重量小的气溶胶粒子分布在上层。此外,在 10 km 处出现总衰减后向散射的无效值,在图 4 中显示为白色区域。

总衰减后向散射背景值和总气溶胶值的经向分布见图 5。与图 4 相似,12 个月份的总衰减后向散射

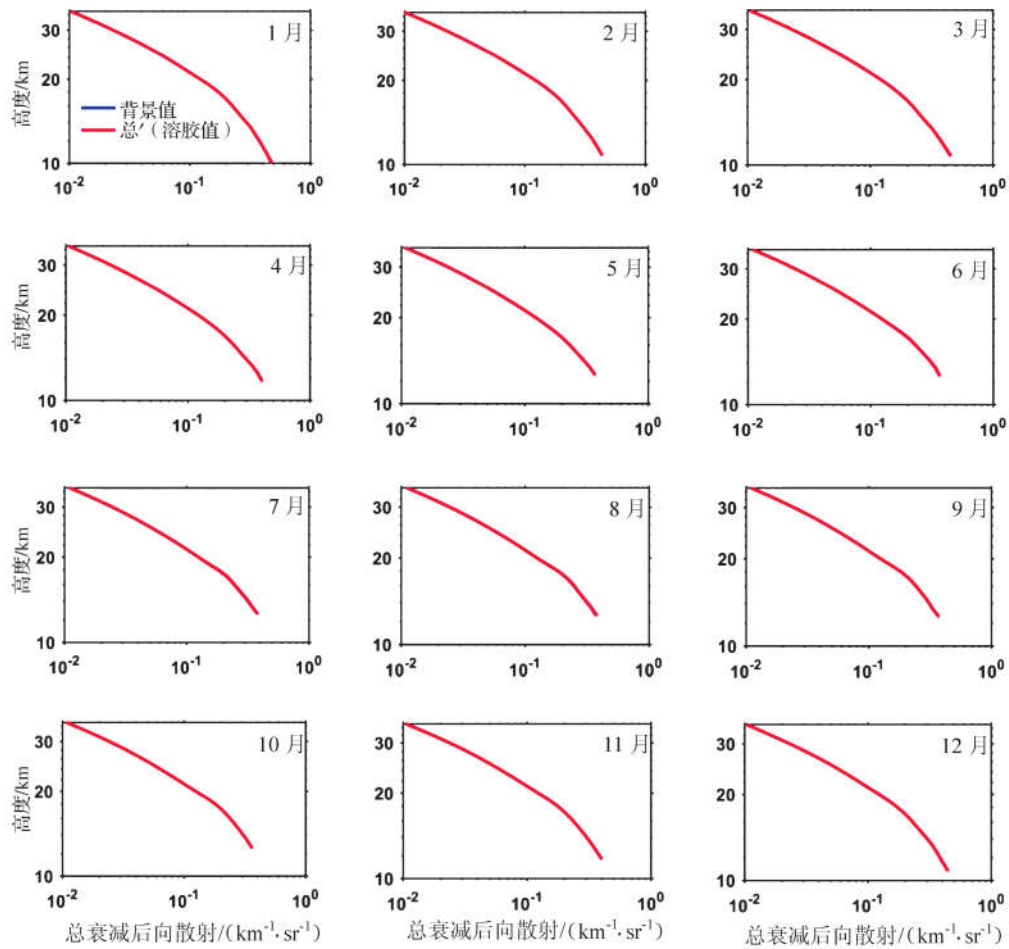


图 6 2007—2018 年西南地区总衰减后向散射平均背景值和总气溶胶值的纬向廓线的月际分布

的分布都随着高度的增加而减小。其中,总衰减后向散射数值在 $0.08 \times 10^{-3} \sim 0.2 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 所占的比例最大,其位于 18~22 km,即图 5 中浅绿色区域。

2.4 总衰减后向散射纬向和径向廓线的月变化

图 6 是总衰减后向散射的纬向廓线的月际变化分布。为了更清晰地表达结果,图中横坐标和纵坐标的值都取对数,且横坐标值为小数点后三位。总体来说,在 12 个月份的全部高度上总衰减后向散射的背景值和总气溶胶值之间的差异较小,即平流层气溶胶浓度较小。

图 7 是总衰减后向散射的经向廓线的月际变化分布。与图 6 分布相似,经向上平流层气溶胶的浓度较少,且与高度呈反比的关系,即随着高度的增加而减少。其中在 16 km 的高度处,总衰减后向散射值出现拐点。需要指出的是,总衰减后向散射值的廓线分布与平均位温的廓线分布(图 2)呈反比关系。这可以解释为平流层内位温随着高度的增加而升高,即存在逆温现象,致使粒子在该层的扩散能力减弱,相应的平流层气溶胶浓度分布与高度呈现反比的关系。

此外,表 3 总结了月间平流层气溶胶总衰减后向散射平均值的变化分布。其中,6、7、8 月在纬向上的分布出现最大值,分别为 $0.000 5 \times 10^{-3}$, $0.000 6 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 和 $0.000 4 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$;而在经向上 1 月出现最大值 $0.001 8 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。

3 结论

在地理和季节上,西南地区平流层气溶胶浓度较低,具体表现为在纬向和径向的月际变化廓线分布上,平流层气溶胶总衰减后向散射的背景值和总气溶胶值的垂直廓线基本重叠。相对于春季,秋季和冬季,夏季平流层气溶胶光学厚度的均值出现最大值 0.000 7,该季节分布与余长明等^[13]人的结果相似。平流层气溶胶总衰减后向散射值的纬向和经向分布都随着高度的增加而减小,其中最大值出现在 10~11 km 高度,其原因可能与平流层气溶胶粒子的重量有关,即质量越大的粒子分布于下层,该分布特点与 Pan^[23]研究的结果相似。在夏季二者廓线在 16 km 出现拐点,在 6、7、8 月,分别出现最大气溶胶总衰

表3 2007—2018年西南地区平均总衰减后向散射背景和总气溶胶值的月际分布 $\text{km}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$

月	纬向			经向		
	背景值	总气溶胶值	差值	背景值	总气溶胶值	差值
1月	$0.113\ 0\times 10^{-3}$	$0.113\ 1\times 10^{-3}$	$0.000\ 1\times 10^{-3}$	$0.128\ 5\times 10^{-3}$	$0.130\ 3\times 10^{-3}$	$0.001\ 8\times 10^{-3}$
2月	$0.104\ 9\times 10^{-3}$	$0.105\ 0\times 10^{-3}$	$0.000\ 1\times 10^{-3}$	$0.128\ 5\times 10^{-3}$	$0.128\ 5\times 10^{-3}$	$0.000\ 0\times 10^{-3}$
3月	$0.108\ 0\times 10^{-3}$	$0.108\ 2\times 10^{-3}$	$0.000\ 2\times 10^{-3}$	$0.129\ 0\times 10^{-3}$	$0.129\ 0\times 10^{-3}$	$0.000\ 0\times 10^{-3}$
4月	$0.105\ 2\times 10^{-3}$	$0.105\ 3\times 10^{-3}$	$0.000\ 1\times 10^{-3}$	$0.130\ 0\times 10^{-3}$	$0.130\ 1\times 10^{-3}$	$0.000\ 1\times 10^{-3}$
5月	$0.102\ 9\times 10^{-3}$	$0.103\ 1\times 10^{-3}$	$0.000\ 2\times 10^{-3}$	$0.131\ 2\times 10^{-3}$	$0.131\ 3\times 10^{-3}$	$0.000\ 1\times 10^{-3}$
6月	$0.101\ 3\times 10^{-3}$	$0.101\ 8\times 10^{-3}$	$0.000\ 5\times 10^{-3}$	$0.132\ 5\times 10^{-3}$	$0.132\ 5\times 10^{-3}$	$0.000\ 0\times 10^{-3}$
7月	$0.106\ 6\times 10^{-3}$	$0.107\ 2\times 10^{-3}$	$0.000\ 6\times 10^{-3}$	$0.134\ 2\times 10^{-3}$	$0.134\ 5\times 10^{-3}$	$0.000\ 3\times 10^{-3}$
8月	$0.103\ 7\times 10^{-3}$	$0.104\ 1\times 10^{-3}$	$0.000\ 4\times 10^{-3}$	$0.134\ 5\times 10^{-3}$	$0.134\ 8\times 10^{-3}$	$0.000\ 3\times 10^{-3}$
9月	$0.099\ 9\times 10^{-3}$	$0.100\ 1\times 10^{-3}$	$0.000\ 2\times 10^{-3}$	$0.134\ 4\times 10^{-3}$	$0.134\ 6\times 10^{-3}$	$0.000\ 2\times 10^{-3}$
10月	$0.098\ 4\times 10^{-3}$	$0.098\ 5\times 10^{-3}$	$0.000\ 1\times 10^{-3}$	$0.131\ 9\times 10^{-3}$	$0.132\ 1\times 10^{-3}$	$0.000\ 2\times 10^{-3}$
11月	$0.103\ 8\times 10^{-3}$	$0.103\ 8\times 10^{-3}$	$0.000\ 0\times 10^{-3}$	$0.131\ 7\times 10^{-3}$	$0.131\ 8\times 10^{-3}$	$0.000\ 1\times 10^{-3}$
12月	$0.109\ 8\times 10^{-3}$	$0.109\ 9\times 10^{-3}$	$0.000\ 1\times 10^{-3}$	$0.131\ 1\times 10^{-3}$	$0.131\ 1\times 10^{-3}$	$0.000\ 0\times 10^{-3}$

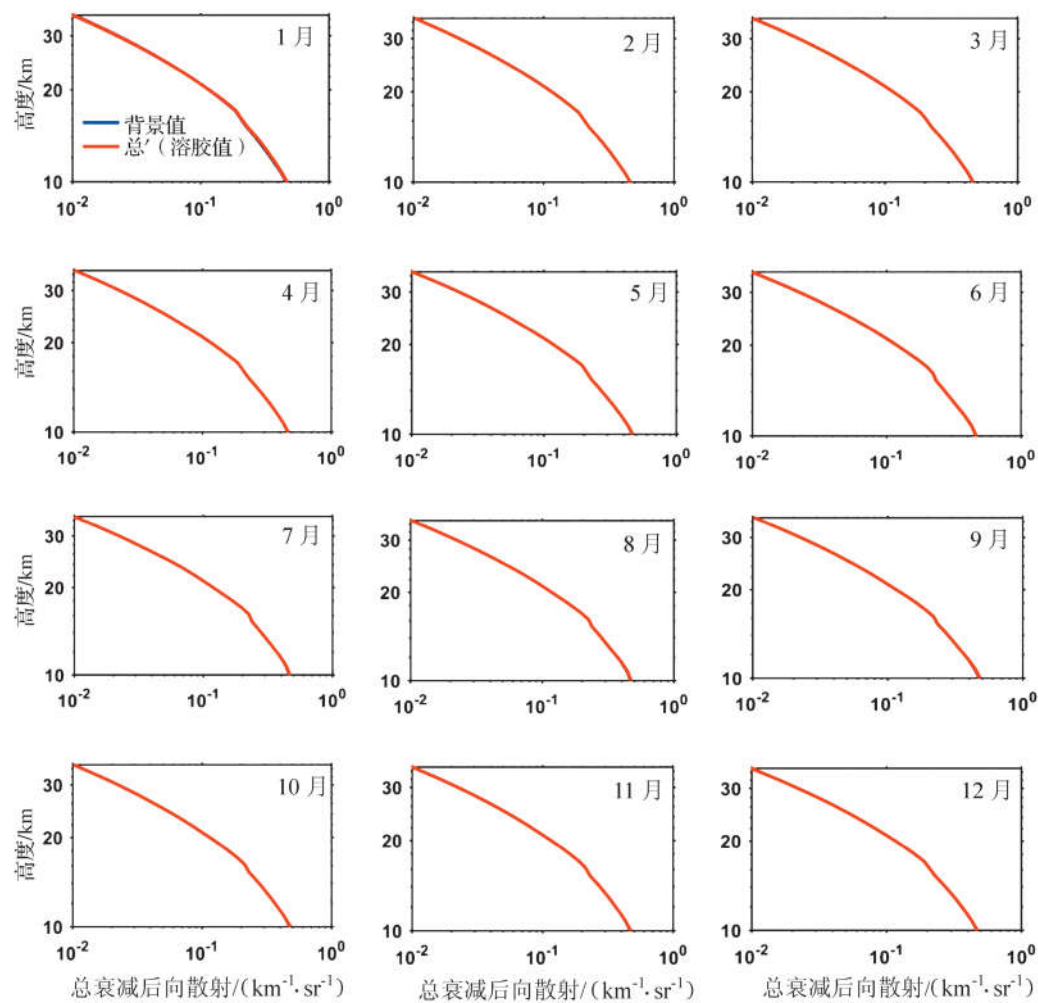


图7 2007—2018年西南地区总衰减后向散射平均背景值和总气溶胶值的经向廓线的月际分布

减后向散射值 $0.000\ 5 \times 10^{-3}$ 、 $0.000\ 6 \times 10^{-3}$ 、 $0.000\ 4 \times 10^{-3}\ \text{km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。需要指出的是,平均位温的廓线分布和气溶胶总衰减后向散射廓线分布呈反比,且在高度 15~16 km 处均出现一个拐点,这需要进一步研究。

在近地层大气中气溶胶停留时间较短,只有在干燥地区停留时间稍长一些,可以维持几个星期。到目前为止,全球低层还没有较长时间的累积资料,它们中大部分被沉降和清洗消除。进入平流层的气溶胶停留时间较长,这将对气候产生影响。大气中的气溶胶对辐射状况有很大影响,悬浮在大气中的气溶胶粒子能吸收和反射太阳辐射,它能阻拦部分太阳辐射,特别是减少紫外线通过,使到达地面的太阳辐射减弱。根据实测资料和理论上的估计,认为平流层气溶胶总量增大 $0.8 \times 10^{-6}\ \text{g/cm}^2$,太阳辐射总量减弱 1%,太阳辐射总量的减少将导致地面温度降低约 $1.5\ ^\circ\text{C}$ 。另一方面,大气中气溶胶的增加,丰富了大气凝结核,使云量、降水量、雾的频率增多,对地表起冷却作用。又因气溶胶微粒吸收短波辐射而增热,它和射入太阳辐射减弱的结果可以引起能量重新分配。气溶胶对气候变化的影响问题较为复杂,有待进一步深入研究。

参考文献:

- [1] McCormick M P, Trepte C R, Thomason L W. Atmospheric effects of the Mt Pinatubo eruption[J]. *Nature*, 1995, 373 (6513): 399–404.
- [2] 许黎, 樊小标, 石广玉, 等. 对流层平流层气溶胶粒子的形态和化学组成[J]. *气象学报*, 1998(5): 40–48.
- [3] 徐群. 本世纪最大的一次平流层气溶胶事件[J]. *气象科学*, 1993(3): 327–336.
- [4] 申南竹. 平流层中气溶胶含量增加 [J]. *环境科学*, 1990 (6): 85.
- [5] 赵高祥, 汪宏七. 平流层火山气溶胶对长波辐射的影响 [J]. *红外与毫米波学报*, 1995(2): 112–118.
- [6] Angell J K. Comparisons of stratospheric warming following Agung, El Chichon and Pinatubo volcanic eruptions[J]. *Geophys Res Lett*, 1993, 20: 715–718.
- [7] 汪宏七, 赵高祥. 火山气溶胶的辐射影响[J]. *大气科学*, 1992, 16(6): 755–760.
- [8] 刘煜, 郭彩丽, 李维亮, 等. 青藏高原平流层臭氧和气溶胶的变化趋势研究[J]. *气象学报*, 2007(6): 938–945.
- [9] 周任君, 陈月娟, 毕云, 等. 青藏高原上空气溶胶含量的分布特征及其与臭氧的关系[J]. *高原气象*, 2008(3): 500–508.
- [10] Johnston P V, McKenzie R L, Keys J G, et al. Observations of depleted stratospheric NO_2 following the Pinatubo volcanic eruption [J]. *Geophysical Research Letters*, 1992, 19(2): 211–213.
- [11] 尚晶晶, 廖宏, 符瑜, 等. 夏季硫酸盐和黑碳气溶胶对中国云特性的影响[J]. *热带气象学报*, 2017, 33(4): 451–466.
- [12] Minnis P, Harrison E F, Stowe L L, et al. Radiative climate forcing by the mount pinatubo eruption [J]. *Science*, 1993, 259(5100): 1411–1415.
- [13] 余长明, 易帆. 武汉上空平流层气溶胶的激光雷达探测结果的初步分析[J]. *空间科学学报*, 2004, 24(4): 261–268.
- [14] LI Z, WANG Y, GUO J, et al. East Asian study of tropospheric aerosols and their impact on regional clouds, precipitation, and climate (EAST-AIRCPC) [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124 (23): 13026–13054.
- [15] Prasad P, Raman M R, Ratnam M V, et al. Nocturnal, seasonal and intra-annual variability of tropospheric aerosols observed using ground-based and space-borne lidars over a tropical location of India [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, 213: 185–198.
- [16] 张杰, 唐从国. 干旱区一次春季沙尘过程的大气气溶胶垂直分布结构及其特征[J]. *高原气象*, 2012, 31(1): 156–166.
- [17] 张芝娟, 陈斌, 贾瑞, 等. 全球不同类型气溶胶光学厚度的时空分布特征[J]. *高原气象*, 2019, 38(3): 660–672.
- [18] 沈吉, 曹念文. 2018 年中国长江三角洲地区气溶胶的垂直分布特征[J]. *环境科学*, 2019, 40(11): 4743–4745.
- [19] 卢乃锰, 郑伟, 王新, 等. 气象卫星及其产品在天气气候分析和环境灾害监测中的应用概述[J]. *海洋气象学报*, 2017, 37(1): 20–30.
- [20] 刘闯, 葛成辉. 美国对地观测系统(EOS)中分辨率成像光谱仪(MODIS)遥感数据的特点与应用[J]. *遥感信息*, 2000(3): 45–48.
- [21] 宿兴涛, 郑军, 李学刚. 基于 CALIPSO 资料的东亚地区气溶胶垂直分布特征分析 [J]. *装备环境工程*, 2019, 16 (6): 138–144.
- [22] Hunt W H, Winker D M, Vaughan M A, et al. CALIPSO Lidar description and performance assessment[J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2008, 26 (7): 1214–1228.
- [23] PAN H, WANG M, KUMAR K R, et al. Seasonal and vertical distributions of aerosol type extinction coefficients with an emphasis on the impact of dust aerosol on the microphysical properties of cirrus over the Taklimakan Desert in Northwest China [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, 203: 216–227.
- [24] 周玉淑, 朱科锋. 湿大气的广义位温与干大气位温及饱

- 和湿大气相当位温的比较 [J]. 气象学报, 2010, 68(5): 612-616.
- [25] 李刚, 王颢樾, 柴素盈, 等. 利用探空资料对对流层—平流层热力结构的分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2014, 36(3): 384-391.
- [26] 卞建春, 范秋君, 严仁娣. 夏季青藏高原对流层—平流层交换过程及其气候效应的若干问题[J]. 气象科技进展, 2013, 3(2): 22-28.
- [27] 姜学恭, 陈受钧, 顾润源, 等. 沙尘暴过程中沙尘对流层—平流层输送的数值模拟初步分析 [J]. 气象学报, 2012, 70(6): 1223-1234.

Optical Properties of Stratosphere Aerosol in Southwestern China from CALIPSO Satellite Detection During 2007–2018

WANG Min¹, HU Chun¹, ZHAO Fuyan¹, WANG Jie¹, PAN Honglin²

(1. Sichuan Meteorological Observation Data Center, Chengdu 610000, China;

2. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China)

Abstract Based on level 3 stratosphere aerosol profile data retrieved from CALIPSO during 2007–2018, optical properties of stratospheric aerosols over the southwestern China are analyzed. The results are as follows: stratospheric aerosol shows relatively low concentration in the study area with consistent seasonal and geographical distributions, and the maximum Aerosol optical depth (*AOD*) is 0.000 7 in summer. The vertical distribution of total attenuated backscatter (*TAB*) increases as the altitude decreases, and the maximum value occurs at the height from 10 km to 11 km. It could be attributed to the aerosol exchange between the top troposphere and bottom stratosphere. In addition, the maximum zonal distributions (22.5°~32.5°N) of *TAB* occurs in July with a value of $0.000\ 6 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1} \text{ sr}^{-1}$, the meridian maximum (90°~110°E) of *TAB* occurs in January with a value of $0.001\ 8 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1} \text{ sr}^{-1}$.

Key words stratosphere; aerosol; CALIPSO; southwestern China