

我国西南地区吸收性气溶胶时空分布

王新莹^{1,2},李颖芳^{1,3},桂柯³,廖婷婷^{1*} (1.成都信息工程大学大气科学学院,高原大气与环境四川省重点实验室,四川成都 610225; 2.中山大学大气科学学院,广东珠海 510275; 3.中国气象科学研究院,大气成分与环境气象研究所,北京 100081)

摘要: 利用 2006–2017 年的 MERRA-2 再分析数据、CALIPSO 卫星反演数据以及欧洲中心(ECMWF)提供的 ERA5 再分析资料研究了西南地区吸收性气溶胶的时间变化趋势及空间分布特征.结果表明 2006–2017 年吸收性气溶胶四川盆地与云南南部整体呈下降趋势,同时存在季节性差异.CALIPSO 反演的烟尘气溶胶(主要由强吸收性的碳质气溶胶组成)的三维时空分布及演变趋势表明,云贵高原的黑碳气溶胶消光系数最大,四川盆地次之;从高度分布上来看,黑碳气溶胶在青藏高原的夏季能够被抬升至 8~10km(海平面高度以上)左右,而云贵高原黑碳气溶胶主要分布在 2~4km 左右,四川盆地则集中在 1~3km 左右.

关键词: 吸收性气溶胶; CALIOP; MERRA-2; 西南地区

中图分类号: X513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2021)07-3096-10

Spatial and temporal distribution of absorbing aerosol in Southwest China. WANG Xin-ying^{1,2}, LI Ying-fang^{1,3}, GUI Ke³, LIAO Ting-ting^{1*} (1. Plateau Atmospheric and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, College of Atmosphere Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China; 3. Key Laboratory of Atmospheric Chemistry, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China). *China Environmental Science*, 2021,41(7): 3096~3105

Abstract: We used MERRA-2 reanalysis data, CALIPSO satellite inversion data, and ERA5 reanalysis data to study the spatial and temporal distribution of absorbing aerosols over southwest China from 2006 to 2017. The Sichuan Basin and southern Yunnan had a downward overall trend, albeit with a strong seasonal signal. Second, analysis of the three-dimensional distribution of smoke demonstrated that the extinction coefficient of smoke in Yunnan-Guizhou Plateau and the Sichuan basin are both significant, with the Yunnan-Guizhou Plateau larger of the two. Third, smoke aerosols found to be lofted to about 8~10km (above sea level) in the summer over the Qinghai-Tibet Plateau, whereas they were mainly distributed between about 2~4km over the Yunnan-Guizhou Plateau and about 1~3km over the Sichuan Basin.

Key words: absorbing aerosol; CALIOP; MERRA-2; southwest of China

吸收性气溶胶对太阳辐射有强烈的吸收作用,可分为黑碳(BC)、有机碳(OC)以及沙尘(Dust).烟尘气溶胶(主要由 OC 和 BC 组成)作为一种对亚洲地区影响较大的吸收性气溶胶,在大气中经历一系列化学过程后可对大气产生增温或降温作用^[1-2];还可以通过其光散射效应对云微物理过程的影响,扰乱区域天气状况和全球辐射收支平衡^[3-4].此外,烟尘气溶胶可以降低源区和下风区的能见度和空气质量^[5];在长时间尺度上对云的垂直发展以及降水频率产生影响^[6].由于快速的城市化与工业化越来越多的气溶胶排放进入大气^[7],考虑到吸收性气溶胶在气候变化中所起的作用,许多科学家对吸收性气溶胶的气候效应、光学特征及分布特征进行了系统的研究.刘旻霞等^[8]研究发现临汾地区吸收性气溶胶为碳质主导,且西安为沙尘与碳质共同作用;侯灿等^[9]利用 CALIOP 数据分析气溶胶垂直结构发现不

同类型的沙尘气溶胶分布于地表及以上 3km 的不同位置;张国强等^[10]对宁夏吸收性气溶胶的时空分布进行了研究并分析了其主要影响因子;李逢帅等^[11]发现汽车尾气、工业排放以及建筑粉尘是甘肃省吸收性气溶胶的重要来源.

由于地理特征的不同,我国西南地区分为 3 部分:四川盆地、云贵高原以及青藏高原.四川盆地在经济高度发展的同时,区域排放加之人类经济活动导致了其吸收性气溶胶的积累^[12],常出现严重污染事件^[13-14];云贵高原地区排放量相对四川盆地来说较小,但受生物质燃烧影响较大^[15-16];青藏高原代表典型的清洁大气条件,是一个理想的评估人类活动影响的站点^[17].考

收稿日期: 2020-12-18

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0214003,2016YFA0602004);国家自然科学基金(9164426);四川省教育厅项目(15ZA0191)

* 责任作者, 讲师, ltt2014@cuit.edu.cn

虑到吸收性气溶胶对地面辐射收支所产生的影响以及对大气和环境造成的负面效应,以及目前对吸收性气溶胶的变化趋势,特别是空间三维分布研究较少,本研究利用统计方法,对我国西南地区吸收性气溶胶的三维时空分布及演变趋势进行研究,旨在为评估西南地区区域性气溶胶气候效应提供参考。

1 数据与方法

1.1 CALIOP 气溶胶产品数据

CALIPSO 能够获取气溶胶和云的垂直分布信息,辨别气溶胶和云的种类.(https://www-calipso.larc.nasa.gov/resources/calipso_users_guide/data_summaries/index.php)本文使用 2007 至 2016 年共 10a 的 CALIPSO Level2 夜间气溶胶廓线产品(05kmAPro,

V4. 20),其具有夜间探测阈值更低的优势^[18].数据水平分辨率为 5km,垂直分辨率在 0.5~8.2km 为 30m,在 8.2~20.2km 为 60m,本文中高度均指平均海平面上(a.m.s.l).由于 Level 2 数据产品是由 Level 1 反演得到,其结果存在不确定性,故本文质量控制(表 1),并根据研究目的和研究区域的特点对廓线进行筛选,以提高数据质量及可信度.CALIPSO V4 产品将气溶胶分为 6 种类型:清洁海洋型、沙尘、污染大陆型、清洁大陆型、污染沙尘型和烟尘气溶胶^[18-19].廓线描述标记产品(Atmospheric Volume Description, AVD)为 16 位二进制编码,当 1~3 位数字对应为十进制数 3 时确定该点为气溶胶类型,10~12 位数值对应为十进制数 6 时,确定该点为本文研究对象烟尘气溶胶(Elevated Smoke, ES).

表 1 CALIPSO 气溶胶 EC 质量控制的条件概述
Table 1 Overview of the conditions for quality control of CALIPSO EC data

参数	筛选条件
消光系数(Extinction_Coefficient_532)	≥ 0 及 $\leq 1.25\text{km}^{-1}$
云-气溶胶区别分数(Cloud-Aerosol Discrimination,CAD)	≥ -100 及 ≤ -20
消光质量控制标识(Extinction QC flag,QC)	= 0, 1, 2, 16, 18
消光不确定性(Extinction uncertainty)	$\leq 10\text{km}^{-1}$
剔除近地表“清洁空气”样本	= 0km^{-1}

1.2 再分析产品

1.2.1 MERRA-2 气溶胶产品数据 Merra-2 再分析数据 (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications)可提供长期全球观测并对太空气溶胶观测的同化结果进行再分析,再分析的结果考虑了气候系统中气溶胶与其他物理过程之间发生的相互作用,提供了包括气溶胶数据、气象场和臭氧等的信息,并给出了不同类型气溶胶的特性,如黑碳、沙尘、有机碳、硫酸盐等^[20].本研究使用 2007~2016 年 MERRA-2 月产品数据集 tavg1_2d_aer_Nx (M2T1NXAER)中 500nm 处的 BC 和 OC 相关数据集,用于分析我国西南地区吸收性气溶胶光学厚度(AAOD)的空间分布与时间变化趋势.Merra-2 数据在经向与纬向上分别有 576 和 361 个格点,水平空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.625^\circ$.

1.2.2 ECMWF 气象数据 使用由欧洲中期数值预报中心(ECMWF)发布的第 5 代全球气候再分析数据产品 ERA5 数据集进行风场分析.ERA5 数据集分为 2 类:分气压层提供的数据以及单一层次的数据,

气压层数据包含了从 1000hPa(地面)到 1hPa 的 37 个气压层上的 16 个大气量,主要包括云量、位势高度、位势涡度、相对湿度、水平风速以及垂直风速等.为研究区域输送对于四川盆地以及云贵高原地区吸收性气溶胶分布的影响,使用不同气压层的月平均数据集中 850hpa 高度处的平均风场(<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-pressure-levels-monthly-means?tab=overview>).同时利用一元线性回归法分别计算了 AAOD 的季节以及年际变化趋势,即建立时间与变量的一元线性回归方程,通过对每个格点数据进行线性回归分析来了解 AAOD 的长期变化趋势.为检验变化趋势是否显著,对结果进行了 95%的显著性检验,通过显著性检验的格点用“+”标出,若通过显著性检验,则表明该格点变化趋势是显著的。

选取的空间尺度为 $22^\circ\text{N}\sim 40^\circ\text{N}$, $70^\circ\text{E}\sim 110^\circ\text{E}$,根据不同的地理和地貌特征,将西南地区划分成为 3 个地理单元:四川盆地、云贵高原和青藏高原,其区域划分边界如图 1 所示.根据研究区域的气候特点,

本文对季节作如下划分:3~5 月为春季,6~8 月为夏季,9~11 月为秋季,12 月~次年 2 月为冬季。

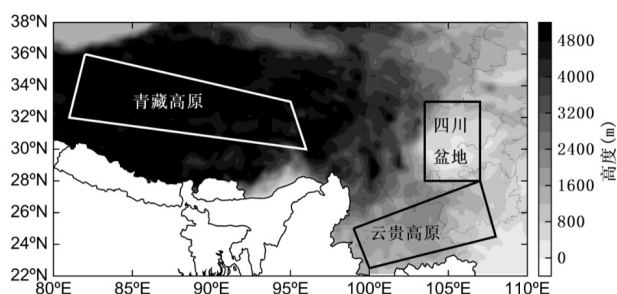


图 1 中国西南地区区域划分及地形

Fig.1 Regions as defined in this work (in boxes above) overlaid on top of the topographic height over southwestern China

2 结果与讨论

2.1 吸收性气溶胶空间分布及季节变化特征

从图 2 可以看出,四川盆地为 BC 的主要集中分布地区,呈现出冬季>秋季>春季>夏季的特征.冬季 AAOD 值可达到 0.056 以上;夏季最小但数值仍保持

在 0.035 以上,这说明四川盆地 BC 污染物主要与人为排放有关^[21].冬季气温低,风速小,相对湿度小且边界层高度低,污染物容易累积^[22],使得四川盆地冬季常出现重污染事件,表现为冬季四川盆地存在 BC AAOD 凸显值的特征^[23-24];夏季 BC 值最小,一部分原因是由于夏季是四川盆地降水发生的主要季节,而湿沉降是 BC 的主要清除方式之一;另一部分原因则是由于夏季天气炎热、大气对流旺盛、大气层结不稳定的条件利于 BC 扩散^[25].由于地形原因,四川盆地内部常为静风区,因此风速对 BC 变化的影响较小.在盆地内,风速与气溶胶光学厚度之间的弱相关也得到了研究的证实^[11,26].云贵高原地区也分布有一定的 BC,但仅在春季有较为明显的数值分布.云贵高原春季盛行偏西风,Zhu 等^[27]研究发现在缅甸地区上空存在上升气流,而在云贵高原附近存在下沉气流,缅甸北部存在的较厚的气溶胶层由盛行西风传输到研究区,故云贵高原春季 BC AAOD 的大值可能是来自源区的气溶胶经长距离输送到下风向区域的结果。

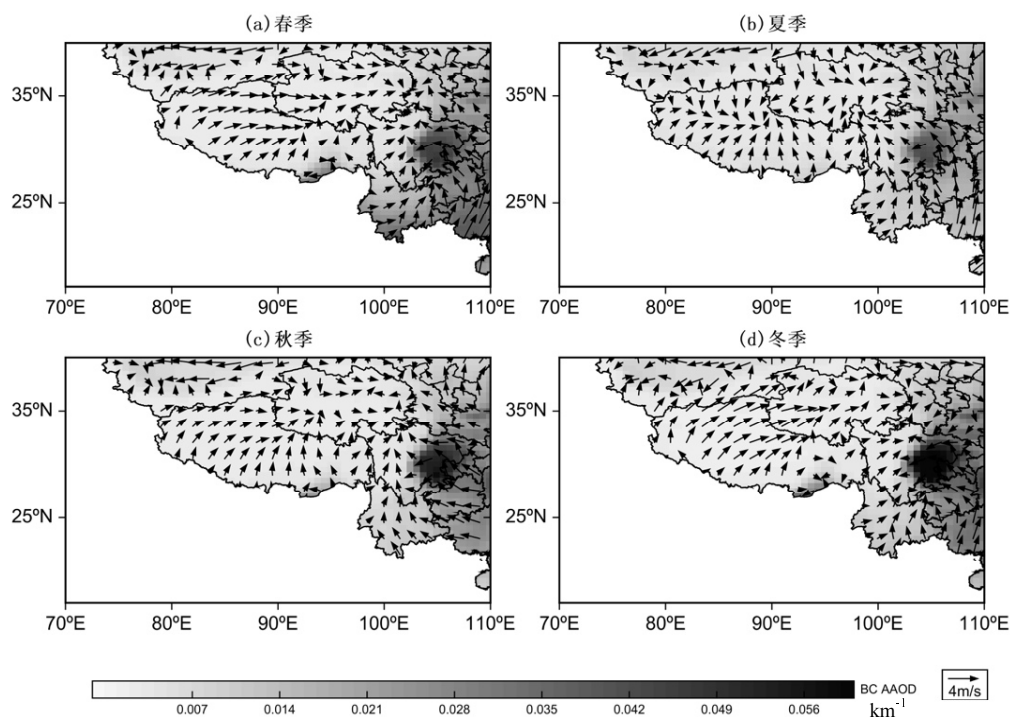


图 2 2007~2016 年 Merra-2BC AAOD 的季度均值与 850hPa 风场叠加分布

Fig.2 Climatological seasonal averages of BC AAOD (from MERRA-2) from 2007 to 2016 (stipples are the 850hpa wind field from ERA-5)

2.2 吸收性气溶胶时间变化趋势

由图 3 可见,最为明显的区域为印度北部恒河

流域、云贵高原南部地区以及四川盆地,三者均存在明显的减小趋势(-0.05/a 及以上),同时在河套上

游地区也发现了一定程度的增大趋势(小于 0.02/a). 四川盆地位于青藏高原的背风坡,在大地形的影响下当地的气象状况、污染物扩散条件较为固定;且与 OC、沙尘不同,四川盆地当地的 BC 除源于自然的生物质燃烧外,几乎全部来自于人为燃烧过程^[28].因此在四川盆地出现显著下降趋势可能与国家制定更为严格的排放政策与控制标准,污染物

的排放减少有关^[12].同时有研究对宁夏附近地区吸收性气溶胶的变化趋势进行分析,发现吸收性气溶胶含量存在规律性波动、总体上升的特征,与图 3 的结果一致,这与当地地理环境(黄土高原、冲积平原)条件有关,污染物不易扩散,使得在全国总体存在污染物下降趋势的背景下宁夏附近仍出现上升趋势^[29].

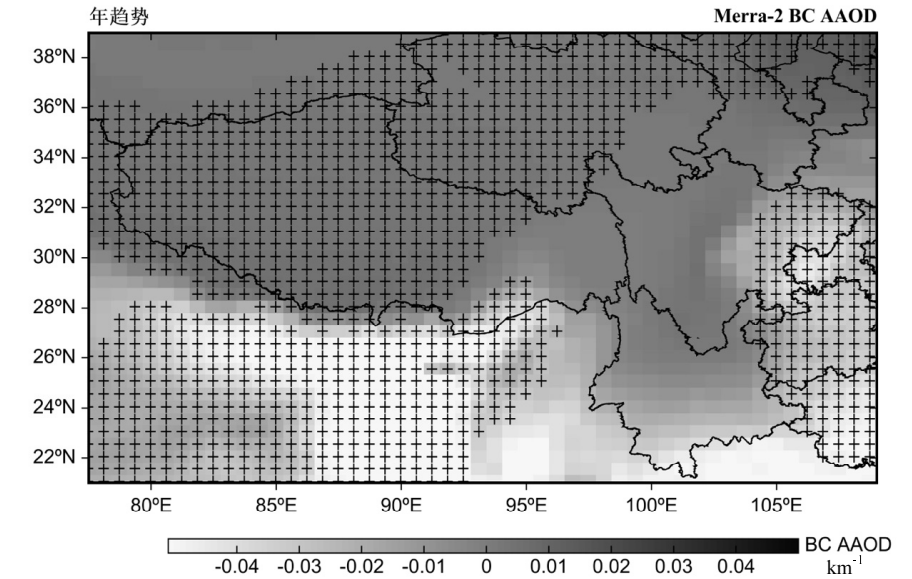


图 3 Merra-2BC AAOD 2007~2016 年年变化趋势分布

Fig.3 Annual trend from 2007 to 2016as calculated from MERRA-2BC AAOD

“+”表示通过 95%显著性检验的区域,下同

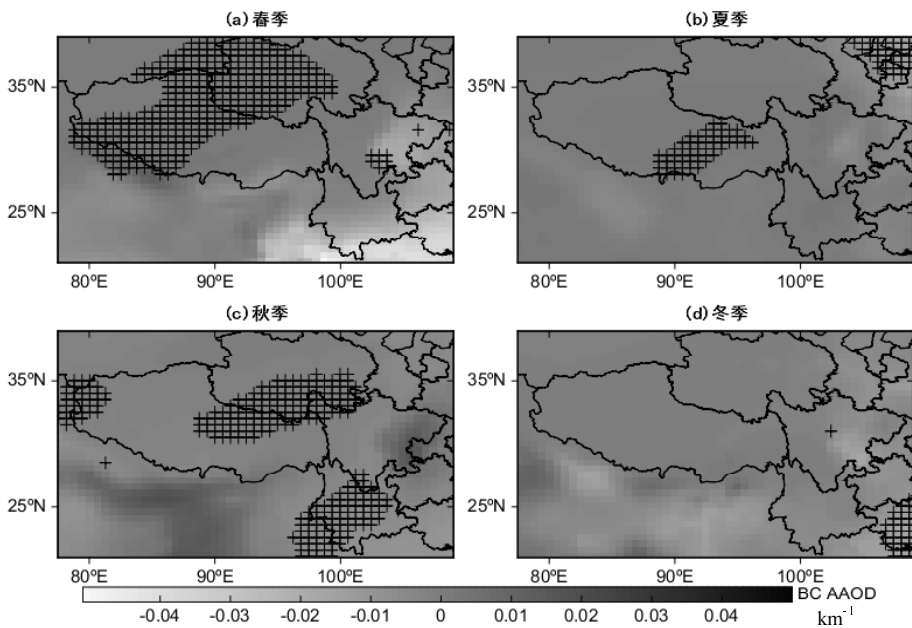


图 4 Merra-2BC AAOD 2007~2016 年的季度变化趋势分布

Fig.4 The seasonal trend distribution of MERRA-2BC AAOD from 2007 to 2016

由图 4 可以发现,四川盆地的 BC 含量在春季与冬季均出现了一定程度的下降,但仅有春季的趋势

系数分布通过了显著性检验;云贵高原南部地区在春秋冬 3 个季节均呈现不同程度的下降趋势,其中春季下降趋势最为明显.4 个季节中变化幅度最大的区域出现在春季的云贵高原南部地区,趋势系数可达到 $-0.05/a$.

2.3 吸收性气溶胶三维分布特点

考虑到烟尘气溶胶以 BC 与 OC 为主,且 OC 在西南地区占比很小^[30],故可以用烟尘气溶胶的结果来描述 BC 气溶胶在研究区中的时空分布,用总消光系数(EC)来描述烟尘气溶胶在大气中的分布情况.从图 5 中可以看出,3 个区域 BC 的垂直分布存在明显的季节变化及区域特性:四川盆地 BC 浓度水平在夏秋季节较高,春季最小,且主要集中在 3km 以下,这表明四川盆地的 BC 气溶胶主要来自于本地源的贡

献.春季 BC 垂直廓线在 3km 左右存在一个小峰值;夏秋季节的高值与每年夏收和秋收之际相对应,此时四川盆地内存在大量的秸秆燃烧,排放的污染物导致了高值的出现^[31].

CALIPSO 中的气溶胶廓线产品较好的弥补了再分析数据产品中青藏高原处吸收性气溶胶的信息缺失.青藏高原的 BC 浓度明显低于四川盆地以及云贵高原,除夏季之外,其他 3 个季节均呈现由低层向高层递减的趋势,表明青藏高原的 BC 气溶胶主要来自低层向高层的输送.其中夏季浓度最高,在 6~8km 处存在一峰值,这是由于青藏高原夏季为热源,热力效应使得青藏高原有上升气流,边界层被抬升,使得 BC 沿着青藏高原斜坡向上输送^[32].

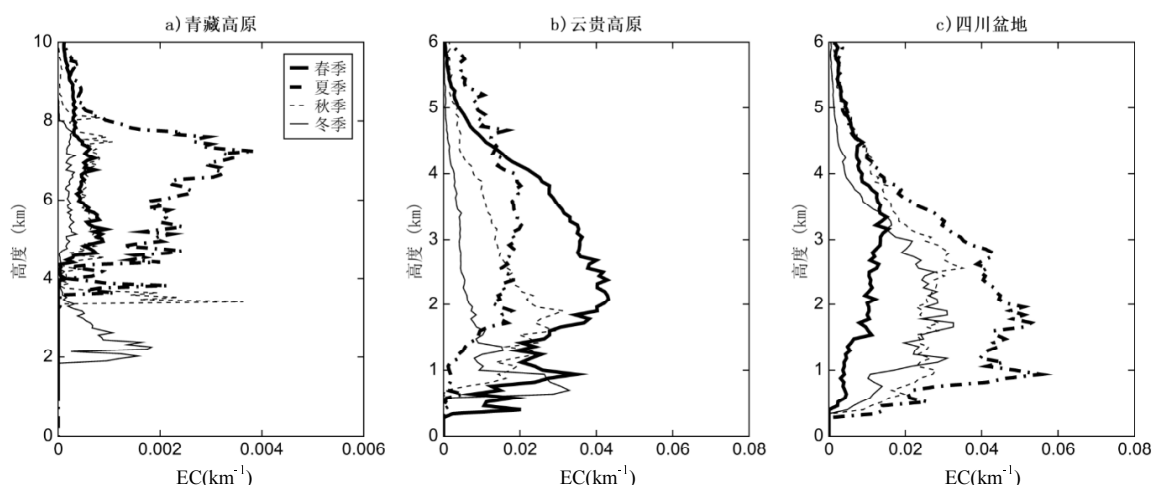


图 5 CALIPSO Level2 气溶胶廓线产品中烟尘气溶胶 EC 区域垂直廓线

Fig.5 Seasonal climatology of the CALIPSO level2 vertical extinction profile of smoke aerosols over the three regions used in this paper

云贵高原 BC 气溶胶浓度在 2~5km 的季节变化十分明显,春季 BC 浓度从低层至 5km 左右明显高于其他季节,利用再分析数据产品所得出的结论一致.且垂直廓线在 2~3km 左右形成一个峰值,由这种垂直结构可以推断,云贵高原上空 BC 分布除了由本地春耕时的生物质燃烧的低层排放产生外还存在高空输送,这可能受春季东南亚地区生物质燃烧排放的气溶胶高空输送的影响^[16,33].

相较于图 4,图 6 能清晰的看出 BC 不同层次的逐年浮动变化以及同一年份的垂直分布状况.3 个地区的 EC 分布均集中在 5km 以下;四川盆地的总 EC 最大,青藏高原最小.从时间变化上来看,云贵高原和

四川盆地从 2013 年起开始出现下降趋势,以四川盆地更明显.BC 气溶胶在青藏高原的抬升高度较高,可以被抬升到 8~10km 左右的高度;云贵高原 BC 气溶胶分布主要集中在 2~4km 左右;四川盆地则集中在 1~3km 左右.

如图 7 所示,青藏高原夏季烟层主要分布在海拔 6km 以上,印度恒河流域夏季烟尘气溶胶层高于其他季节,由于烟尘气溶胶是一种不易溶解的物质,不能被雨水清除,但它可以被提升到对流层上部并输送到青藏高原^[34];对云贵高原而言,春季 EC 值明显较高.在中国西南地区,干季(11 月至次年 4 月)生物质燃烧对空气质量影响较大,其相关污染物甚至可输送至东

北太平洋^[35].Zhu 等^[13]研究发现,东南亚的火灾点最多发生在 3 月和 4 月,且云贵高原受西风气流控制,

烟尘气溶胶可以随西风输送到我国西南地区,从而导致春季云贵高原出现烟尘气溶胶的高值.

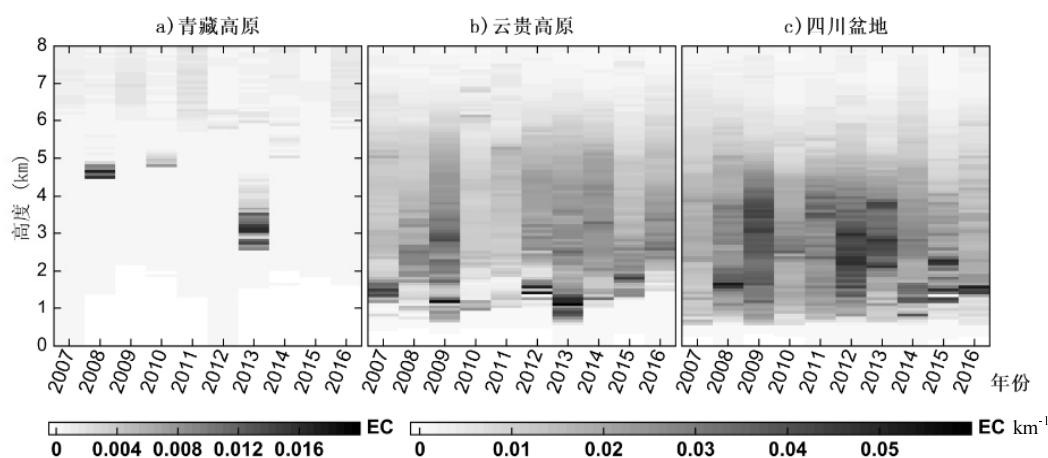


图 6 基于 CALIPSO Level2 气溶胶廓线产品得到的 2007~2016 年区域烟尘气溶胶 EC 垂直分布时间序列

Fig. 6 Time series of annual mean vertically resolved extinction coefficient of smoke aerosols over the three regions

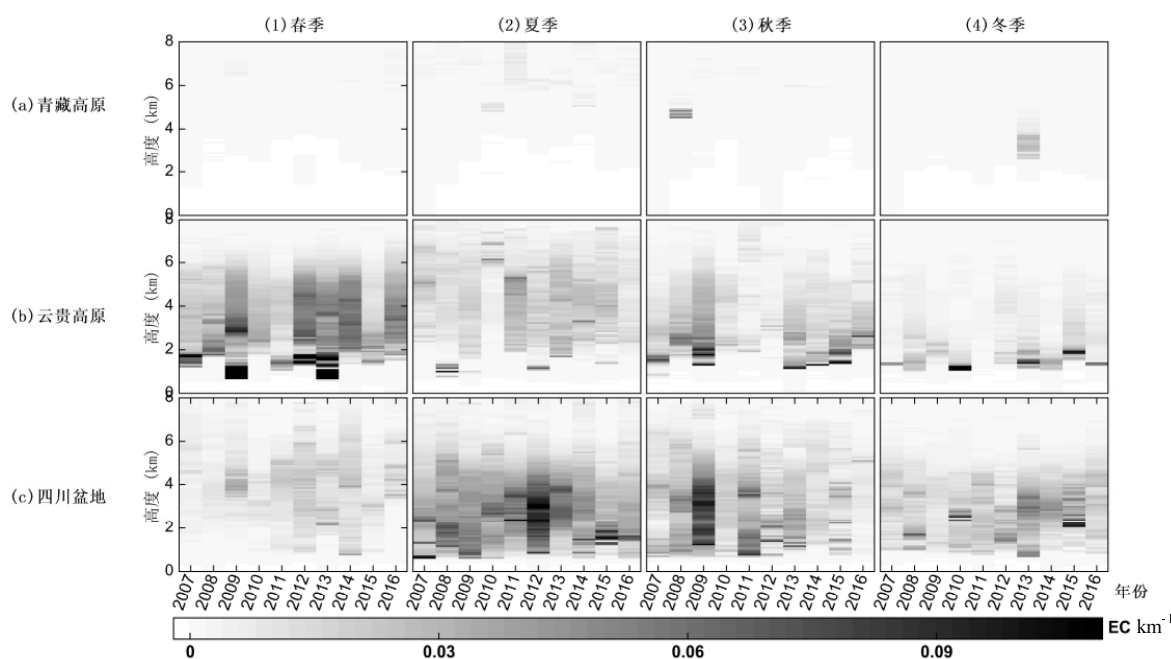


图 7 基于 CALIPSO Level2 气溶胶廓线产品得到的 2007~2016 年区域烟尘气溶胶 EC 随海拔高度逐年季节变化

Fig.7 Time series of year-by-year seasonally averaged mean vertically resolved extinction coefficient of smoke aerosols, over the three regions

青藏高原与四川盆地的最大值均出现在夏季,与图 2 中该区域最大值出现于冬季的结果不符.可能与主导 AAOD 的气溶胶类型不同有关,有研究发现四川盆地在冬季污染大陆型气溶胶以及污染性沙尘占比较大,人为因素影响显著,而 BC 气溶胶占比较小^[36].云贵高原的分布则与图 2 春季数值最大的结果较为相符,说明 BC 对当地的 AAOD 影响最为主要.

2.3.2 三维分布特征 在垂直方向上以 1km 为间隔,分层显示 1~6kmEC 的垂直分布,并分别选取经过 3 个研究区域的代表性经纬度剖面进行分析,即 85°E,95°E,105°E 作纬向平均,选取 24°N,32°N,38°N 经向平均.

由图 8 可以看出,西南地区存在明显的东高西低,南高北低的分布特点:BC 气溶胶主要分布在青藏高原东南部人类活动频繁的恒河平原和青藏高

原东部的四川、贵州一带,高度在 4km 以下,明显的 大值则分布在 3km 以下.

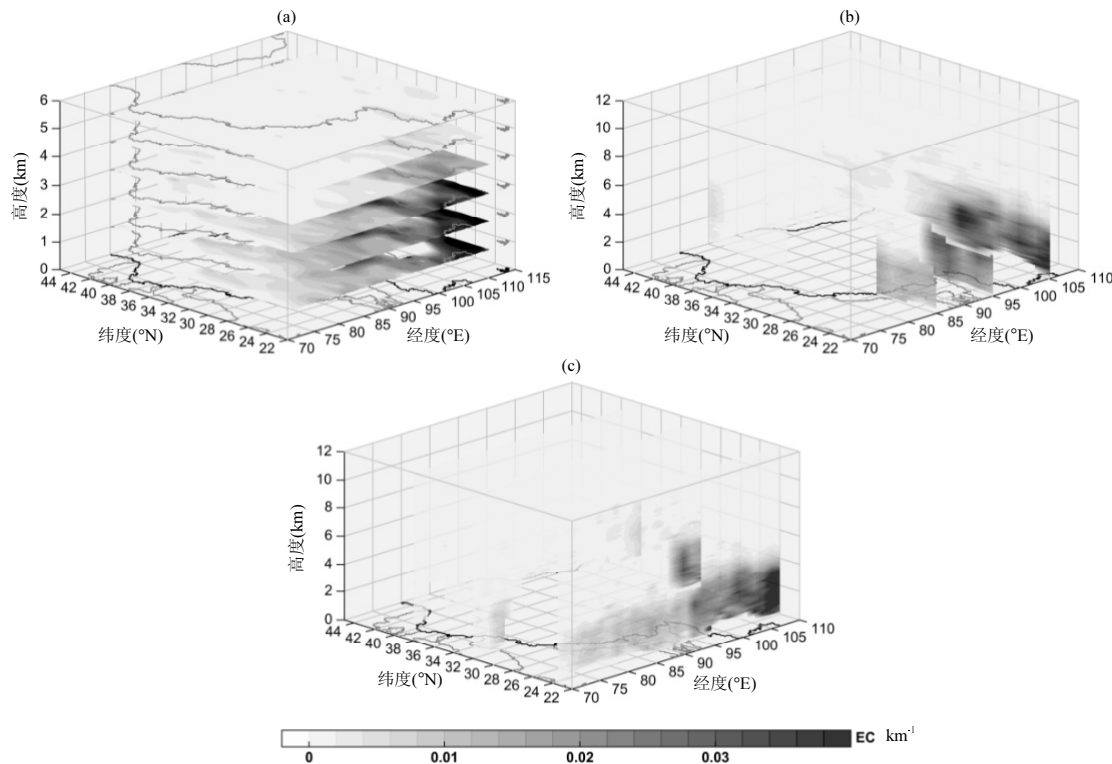


图 8 基于 CALIPSO Level2 气溶胶廓线产品得到的 2007~2016 年烟尘气溶胶 EC 三维分布
Fig.8 Three-dimensional EC distribution of smoke aerosols compiled from 2007 to 2016 using multiple passes of CALIPSO level2 aerosol profile products
(a)垂直分层;(b)纬向平均;(c)经向平均

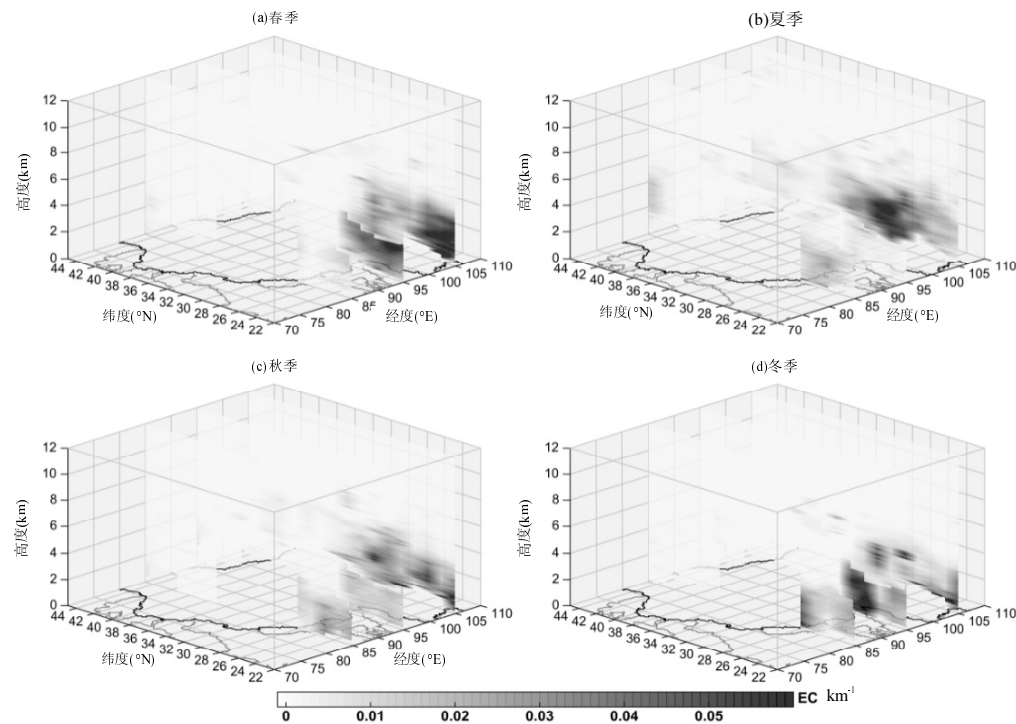


图 9 基于 CALIPSO Level2 气溶胶廓线产品得到的烟尘气溶胶 EC 不同季节三维经向平均
Fig.9 Three-dimensional meridional average of smoke aerosol EC in different seasons based on CALIPSO level2 aerosol profile products

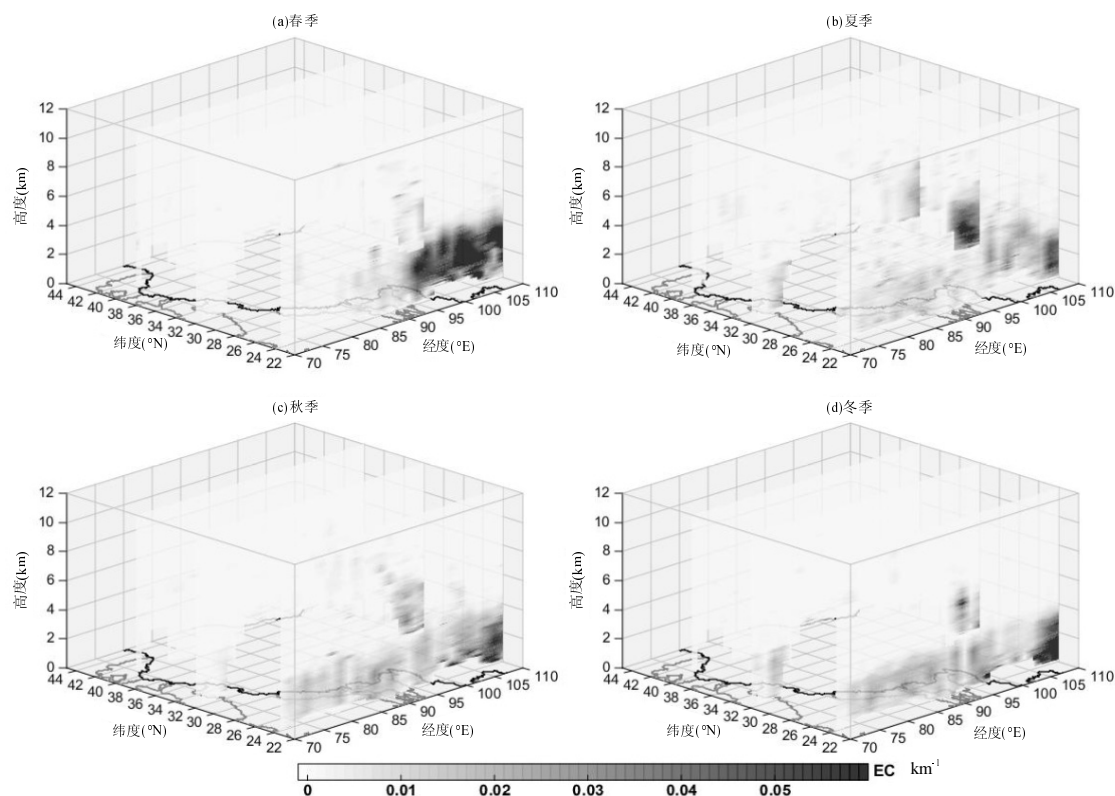


图 10 基于 CALIOP Level2 廓线产品得到的烟尘气溶胶 EC 不同季节三维纬向平均

Fig.10 Three-dimension zonal mean of smoke aerosol EC in different seasons based on CALIOP level2profile products

从图 9,图 10 可以看出,青藏高原东南部以及云贵高原 BC 的季节分布均呈现春冬高,夏秋低的特点.冬季四川盆地上空 2~3km 处存在一个 EC 的高值(约为 0.06km^{-1}),说明当地存在高空输送,可能与东南亚在干季的生物质燃烧有关^[26,36].

3 结论

3.1 从水平分布上看,西南地区 BC 分布呈较明显的季节特征,大致为冬季>秋季>春季>夏季.冬季四川盆地气温低、风速小、湿度大,边界层高度低等原因导致了 AAOD 凸显值的出现;夏季 BC 值最小,与当季扩散清除条件较好有关.云贵高原春季的较大值则受南亚东南亚地区生物质燃烧的区域输送作用影响较大.

3.2 从垂直分布上看,CALIPSO 反演的烟尘气溶胶垂直廓线在四川盆地的结果与再分析数据的水平分布结果不符,这可能与研究区主导 AAOD 的气溶胶类型不同有关:四川盆地的冬季气溶胶类型以污染大陆型以及污染性沙尘为主,而文章中使用的烟尘气溶胶在研究区所占的比例较小,导致结果有所偏差.云贵高原两种数据结果较为符合,说明当地吸

收性气溶胶的主导类型即为烟尘气溶胶(西南地区即为 BC 气溶胶).

3.3 从时间变化上看,再分析数据的结果表明变化趋势存在明显的季节性差异:春季与冬季 BC 在四川盆地均出现了一定程度的下降;在云贵高原南部地区,春季则存在最为明显的下降趋势.

参考文献:

- [1] Markowicz K M, Zawadzka-Manko O, Lisok J, et al. The impact of moderately absorbing aerosol on surface sensible, latent, and net radiative fluxes during the summer of 2015 in Central Europe [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2020,151:105627.
- [2] Cai J X, Guan Z Y, Ma F H. Possible combined influences of absorbing aerosols and anomalous atmospheric circulation on summertime diurnal temperature range variation over the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2016,(6):97-113.
- [3] Johnson B T, Shine K P, Forster P M. The semi-direct aerosol effect: Impact of absorbing aerosols on marine stratocumulus [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2010,130(599):1407-1422.
- [4] TR Bolaño-Ortiz, Pascual-Flores R M, Al López-Noreña, et al. Assessment of absorbing aerosols on austral spring snow albedo reduction by several basins in the Central Andes of Chile from daily satellite observations (2000-2016) and a case study with the WRF-

- Chem model [J]. *SN Applied Sciences*, 2019,1(11):1352-1365.
- [5] Garcia-Menendez F, Hu Y, Odman M T. Simulating smoke transport from wildland fires with a regional-scale air quality model: Sensitivity to spatiotemporal allocation of fire emissions [J]. *Science of the Total Environment*, 2014,493(15):544-553.
- [6] Li Z, Niu F, Fan J, et al. Long-term impacts of aerosols on the vertical development of clouds and precipitation [J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4(12):888-894.
- [7] 白莹莹,张德军,杨世琦,等.川渝地区雾霾时空分布特征及影响因子分析 [J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2018,43(11):112-119.
- Bai Y Y, Zhang D J, Yang S Q, et al. Spatial and temporal distribution characteristics and influencing factors analysis of smog in Sichuan---Chongqing [J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 2018,43(11):112-119.
- [8] 刘旻霞,李 亮,于瑞新,等.汾渭平原吸收性气溶胶时空演化及潜在源区分析 [J]. *环境科学*, 2021,42(06):2634-2647.
- Liu M X, Li L, Yu R X, et al. Analysis of space-time and potential source of absorbing aerosol in Fenwei Plain [J]. *Environmental Science*, 2021,42(6):2634-2647.
- [9] 侯 灿,张 峰,黄 勇,等.华北地区沙尘天气垂直气溶胶直接辐射强迫 [J]. *中国环境科学*, 2020,40(12):5169-5181.
- Hou C, Zhang F, Huang Y, et al. Vertical distribution of aerosol direct radiative forcing in dust events over north China [J]. *China Environmental Science*, 2020,40(12):5169-5181.
- [10] 张国强,巨天珍,王勤花,等.宁夏吸收性气溶胶时空分布及其影响因素研究 [J]. *中国环境科学*, 2020,40(6):54-63.
- Zhang G Q, Ju T Z, Wang Q H, et al. Studying on spatial and temporal distribution of absorbent aerosols and its influencing factors in Ningxia [J]. *China Environmental Science*, 2020,40(6):54-63.
- [11] 李逢帅,巨天珍,马 超,等.基于卫星遥感的甘肃省吸收性气溶胶的研究 [J]. *中国环境科学*, 2019,39(10):4082-4092.
- Li F S, Ju T Z, Ma C, et al. Absorption aerosol in Gansu Province based on satellite remote sensing [J]. *China Environmental Science*, 2019,39(10):4082-4092.
- [12] 宋明昊,张小玲,袁 亮,等.成都冬季一次持续污染过程气象成因及气溶胶垂直结构和演变特征 [J]. *环境科学学报*, 2020,40(2):408-417.
- Song M H, Zhang X L, Yuan L, et al. Meteorological effects and aerosol vertical structure and evolution characteristics of a continuous pollution process in winter in Chengdu [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020,40(2):408-417.
- [13] Liao T, Wang S, Ai J, et al. Heavy pollution episodes, transport pathways and potential sources of $PM_{2.5}$ during the winter of 2013 in Chengdu (China) [J]. *Science of the Total Environment*, 2017,584-585(apr.15):1056-1065.
- [14] Tao J, Zhang L, Cao J, et al. Characterization and source apportionment of aerosol light extinction in Chengdu, southwest China [J]. *Atmospheric Environment*, 2014,95(oct.):552-562.
- [15] 周 茹,朱 君.东南亚生物质燃烧输送影响我国西南气溶胶辐射特性研究 [J]. *中国环境科学*, 2020,40(4):1429-1436.
- Zhou R, Zhu J. Study on the influence of transport of biomass burning materials from Southeast Asia on aerosol radiation effects in Southwest China [J]. *China Environmental Science*, 2020,40(4):1429-1436.
- [16] 张玉洽,杨迎春,李 杰,等.东南亚生物质燃烧对我国春季 $PM_{2.5}$ 质量浓度影响的数值模拟 [J]. *环境科学研究*, 2016,29(7):952-962.
- Zhang Y Q, Yang Y C, Li J, et al. Modeling the Impacts of Biomass Burning in Southeast Asia on $PM_{2.5}$ over China in Spring [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016,29(7):952-962.
- [17] 殷秀峰,康世昌,张强弓,等.青藏高原内陆大气污染物科学研究——以纳木错站为例 [J]. *自然杂志*, 2020,42(5):373-378.
- Yin X F, Kang S C, Zhang Q G, et al. Study of air pollutants in the inland Tibetan Plateau (Nam Co Station) [J]. *Chinese Journal of Nature*, 2020,42(5):373-378.
- [18] Winker D M, Vaughan M A, Omar A, et al. Overview of the CALIPSO mission and CALIOP data processing algorithms [J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2009,26(11):2310-2323.
- [19] Omar A H, Winker D M, Kittaka C, et al. The CALIPSO automated aerosol classification and lidar ratio selection algorithm [J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2009,26(10):1994-2014.
- [20] 贾 瑞,刘玉芝,吴楚樵,等.2007~2017 年中国沙尘气溶胶的三维分布特征及输送过程 [J]. *中国沙漠*, 2019,(6):108-117.
- Jia R, Liu Y Z, Wu C Q, et al. Three-dimensional distribution and transport process of dust aerosols over China from 2007 to 2017 [J]. *Journal of Desert Research*, 2019,(6):108-117.
- [21] 单晓丽.中南半岛生物质燃烧排放的跨界输送及对我国南部 AOD 影响的研究 [D]. 济南:山东农业大学, 2016.
- Dan X L. Study on the Transboundary Transport of Biomass Burning Emissions over Indo-China and Its Influence to the Aerosol Optical Depth over Southern China [D]. Jinan: Shandong Agricultural University, 2016.
- [22] Rui Jia, Min Luo, Yuzhi Liu, et al. Anthropogenic aerosol pollution over the Eastern slope of the Tibetan Plateau [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2019,36(8):847-862.
- [23] 艾 泽,陈权亮.四川地区气溶胶光学厚度时空分布及其与气象因子相关性分析 [J]. *四川环境*, 2019,38(4):79-86.
- Ai Z, Chen Q L. Temporal and apatial distribution of aerosol optical depth in Sichuan and its correlation with meteorological factors [J]. *Sichuan Environment*, 2019,38(4):79-86.
- [24] 欧阳正午,廖婷婷,陈科艺,等.2014~2017 年四川盆地与京津冀地区冬季空气停滞特征及大气质量改善评估对比分析 [J]. *环境科学学报*, 2019,39(7):2353-2361.
- Ou Yang Z W, Liao T T, Chen K Y, et al. Comparative analysis of winter air stagnation characteristics and air quality improvement assessment in Sichuan Basin and Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2014 to 2017 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019,39(7):2353-2361.
- [25] 郭晓梅,陈 娟,赵天良,等.1961~2010 年四川盆地霾气候特征及其影响因子 [J]. *气象与环境学报*, 2014,(6):102-109.
- Guo X M, Chen J, Zhao T L, et al. Climate characteristics of haze and its impacting factors from 1961 to 2010 in Sichuan basin [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2014,30(6):100-107.
- [26] Yang Y, Liao H, Lou S. Increase in winter haze over eastern China in recent decades: Roles of variations in meteorological parameters and anthropogenic emissions [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2016,121(21):13050-13065.

- [27] Zhu J, Xia X, Che H, et al. Study of aerosol optical properties at Kunming in southwest China and long-range transport of biomass burning aerosols from North Burma [J]. Atmos. Res., 2016,169:237–247.
- [28] 张美根,徐永福,张仁健,等.东亚地区春季黑碳气溶胶源排放及其浓度分布 [J]. 地球物理学报, 2003,48(1):46–51.
Zhang M G, Xu Y F, Zhang R J, Emissions and concentration distributions of black carbon aerosol in East Asia during the springtime [J]. Chinese Journal Of Geophysics, 2003,48(1):46–51.
- [29] 张国强,巨天珍,王勤花,等.宁夏吸收性气溶胶时空分布及其影响因素研究 [J]. 中国环境科学, 2020,40(6):54–63.
Zhang G Q, Ju T Z, Wang Q H, et al. Studying on spatial and temporal distribution of absorbent aerosols and its influencing factors in Ningxia [J]. China Environmental Science, 2020,40(6):54–63.
- [30] Kang L, Chen S, Huang J, et al. The spatial and temporal distributions of absorbing aerosols over East Asia [J]. Remote Sens., 2017,9(10): 1050–1070.
- [31] 张 思,刘志红,佟洪金,等.基于遥感数据的秸秆焚烧源排放清单及时空分布特征 [J]. 环境科学研究, 2019,32(4):627–635.
Zhang S, Liu Z H, Tong H J, et al. Emission inventory of crop straw field burning and its temporal and spatial allocation based on remote sensing data [J]. Research of Environmental Sciences, 2019,32(4): 627–635.
- [32] 李宛鸿,范广洲.盛夏高原涡生成频数与初夏大气环流背景场的关系 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2020,42(1):103–111.
Li W H, Fan G Z. Relationship Between the frequency of Tibetan Plateau vortex generation in midsummer and the background field of atmospheric circulation in early Summer [J]. Journal of Southwest University, 2020,42(1):103–111.
- [33] J. Zhu, X. Xia, H. Che, et al. Study of aerosol optical properties at Kunming in southwest China and long-range transport of biomass burning aerosols from North Burma [J]. Atmospheric Research, 2016, 169:237–247.
- [34] Xu C, Ma Y M, You C, et al. The regional distribution characteristics of aerosol optical depth over the Tibetan Plateau [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015,15(20):15683–15710.
- [35] Kondo, Y. Impacts of biomass burning in Southeast Asia on ozone and reactive nitrogen over the western Pacific in spring [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2004,109(D15):2890–2898.
- [36] Chn Q X, Huang C L, et al. Spatio-temporal distribution of major aerosol types over China based on MODIS products between 2008 and 2017 [J]. Atmosphere (Basel), 2020,11(7):703–722.

作者简介：王新莹(1998-),女,黑龙江牡丹江人,中山大学硕士研究生,主要研究方向为大气气溶胶。

《中国环境科学》喜获 中国科协精品科技期刊 TOP50 项目资助

《中国环境科学》2015 年 6 月获得中国科协精品科技期刊 TOP50 项目资助.中国科协精品科技期刊 TOP50 项目按照“以奖促建”的原则,通过以奖代补方式,遴选支持一批高端精品科技期刊,形成学科导航期刊集群.推动其加快成长为促进科技知识生产传播的重要渠道、促进学术交流的重要平台和促进学术生态建设的苗圃花坛,为我国科技期刊的发展发挥示范引领作用.经过专家评审和公示,最终确定入选的期刊均为学术影响力强、引证指标好、在学术交流与学科建设中起到重要作用、服务科技工作者成效显著、学术出版道德规范的优秀中文科技期刊.