

赵平伟,杨力羽,李斌,等,2023. 滇西南地区  $\text{PM}_{2.5}$  时空变化特征及其季节性增强的成因分析[J]. 气象,49(1):87-98. Zhao P W, Yang L Y, Li B, et al, 2023. Spatio-temporal variation of  $\text{PM}_{2.5}$  and its causes of seasonal enhancement in southwest Yunnan [J]. Meteor Mon, 49(1):87-98(in Chinese).

## 滇西南地区 $\text{PM}_{2.5}$ 时空变化特征及其 季节性增强的成因分析\*

赵平伟<sup>1</sup> 杨力羽<sup>2</sup> 李斌<sup>1</sup> 尤文龙<sup>1</sup> 王佳妮<sup>1</sup> 史建武<sup>3</sup> 韦晶<sup>4</sup>

1 云南省临沧市气象局, 临沧 677099

2 昆明市生态环境科学研究院, 昆明 650032

3 昆明理工大学环境与工程学院, 昆明 650500

4 马里兰大学大气与海洋科学系地球系统科学跨学科研究中心, 马里兰州 20740 美国

**提 要:** 利用 CHAP  $\text{PM}_{2.5}$ 、MODIS MCD19A2、ERA5 再分析等数据集, 以及 SNPP/VIIRS 卫星监测火点等数据, 从污染物后向轨迹、环流形势、高低空动力结构配置等方面入手, 采用最小二乘法等多种分析方法对滇西南地区年均和四季  $\text{PM}_{2.5}$  浓度时空分布及季节性突增的成因进行探究。结果表明: 研究区  $\text{PM}_{2.5}$  浓度和气溶胶光学厚度空间分布均呈北低南高, 东弱西强;  $\text{PM}_{2.5}$  浓度年内 7 月最低、3 月最高。2—4 月稳定的污染源输送造成研究区春季  $\text{PM}_{2.5}$  浓度值高且波动较其余季节小, 但变化百分率空间分布差异更明显; 近 20 年  $\text{PM}_{2.5}$  浓度变化百分率减少程度以  $-30\% \sim -20\%$  居多, 夏、秋、冬季变化百分率则以小于  $-30\%$  为主。研究区紧邻的缅甸东部和老挝北部一年中超过 90% 的火点发生在 2—4 月, 在偏西气流引导下, 途经高火点区的偏西向(西南向)污染物短距离输送, 在上空中低层辐散的动力作用下造成下沉, 致使研究区  $\text{PM}_{2.5}$  浓度季节性升高。较大范围利于污染物扩散的气象条件和更多降水的清洗, 可减少境外大气污染物输送对滇西南地区  $\text{PM}_{2.5}$  污染的贡献。关键区境外火点数变化对  $\text{PM}_{2.5}$  浓度及气溶胶光学厚度的影响表现为显著正相关, 且其对  $\text{PM}_{2.5}$  的影响滞后于火点数变化 2 天左右, 二者相关程度由南向北逐渐减弱。

**关键词:**  $\text{PM}_{2.5}$  时空变化, 气象因素, 火点, 相关性, 滇西南地区

**中图分类号:** X16

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.080101

## Spatio-Temporal Variation of $\text{PM}_{2.5}$ and Its Causes of Seasonal Enhancement in Southwest Yunnan

ZHAO Pingwei<sup>1</sup> YANG Liyu<sup>2</sup> LI Bin<sup>1</sup> YOU Wenlong<sup>1</sup> WANG Jiani<sup>1</sup> SHI Jianwu<sup>3</sup> WEI Jing<sup>4</sup>

1 Lincang Meteorological Office of Yunnan Province, Lincang 677099

2 Research Institute of Ecological and Environmental Sciences of Kunming, Kunming 650032

3 Faculty of Environment Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500

4 Department of Atmospheric and Oceanic Science, Earth System Science Interdisciplinary Center,

University of Maryland, College Park, Maryland 20740, USA

**Abstract:** Using the data of CHAP  $\text{PM}_{2.5}$  and MODIS MCD19A2, the ERA5 reanalysis data and the SNPP/VIIRS satellite monitoring fire point data as well as the least squares method and other analytical methods, this paper explores the spatio-temporal distribution pattern of  $\text{PM}_{2.5}$  concentrations in southwest Yunnan

\* 国家可持续发展创新议程示范区专项(202104AC100001-A14)、国家自然科学基金项目(21966016)和国家重点研发计划(2019YFC0214405)共同资助

2022 年 1 月 19 日收稿; 2022 年 8 月 18 日收修定稿

第一作者: 赵平伟, 主要从事气象环境研究. E-mail: 7203956@qq.com

通讯作者: 史建武, 主要从事大气复合污染成因、监测、模拟研究, 大气污染防控策略研究. E-mail: shijianwu2000@sina.com

and the causes of seasonal bursts from the aspect of backward trajectory of pollutants, circulation situation, high and low air dynamic structure configuration, etc.. The results show that the spatial distribution of  $PM_{2.5}$  concentration and aerosol optical depth (AOD) in the study area are in the pattern of high values in the south and west but low values in the north and east. The  $PM_{2.5}$  concentration is the lowest in July but is the highest in March in a year. The stable transport of pollution sources from February to April causes the spring  $PM_{2.5}$  concentration value in the study area to be higher and the fluctuation to be smaller than in the other three seasons. However, the spatial distribution of the percentage change is more obvious. The percentage reduction in  $PM_{2.5}$  concentration in the past 20 years was mostly by from  $-30\%$  to  $-20\%$ , and the percentage change in summer, autumn and winter was mainly less than  $-30\%$ . More than  $90\%$  of the fire points in eastern Myanmar and northern Laos, which are adjacent to the study area, occur from February to April. Under the guidance of the westerly air flow, the westward (southwest-oriented) pollutants are transported over a short distance through the high-fire point area, causing subsidence under the dynamic action of low-layer radiation dispersion in the upper air, and resulting in a seasonal increase in  $PM_{2.5}$  concentration in the study area. A large range of meteorological conditions conducive to the spread of pollutants and the cleaning of more precipitation can reduce the contribution of overseas air pollutants to  $PM_{2.5}$  pollution in southwest Yunnan. The effects of changes in fire points outside the key areas on  $PM_{2.5}$  concentration and AOD show a significant positive correlation. Their effects on  $PM_{2.5}$  lagged behind the change in fire points by about 2 days, and the correlation between the two gradually weakens from south to north.

**Key words:** spatio-temporal variation of  $PM_{2.5}$ , meteorological factor, fire point, correlation, southwest Yunnan

## 引 言

$PM_{2.5}$  因其影响人体健康、大气能见度及气候辐射平衡而一直备受关注 (Nel, 2005; Ramanathan and Carmichael, 2008; Tao et al, 2011; Deng et al, 2012)。目前, 众多学者从  $PM_{2.5}$  时空动态变化特征 (姜磊等, 2018; 李欢欢等, 2021)、形成机理 (杨文涛等, 2020)、气象对其生消影响 (王振波等, 2019)、化学组分分析和区域传输 (刘素等, 2019; Hao et al, 2019; 张毓秀等, 2021; Sulaymon et al, 2020) 等不同角度展开分析并取得了较多有意义的研究成果。随着对  $PM_{2.5}$  研究的不断深入, 一些学者指出, 以站点实测数据为主的  $PM_{2.5}$  数据存在时间序列短、空间范围不连续等问题 (He et al, 2017; Chen et al, 2018; Xue et al, 2019; Li et al, 2019), 这在一定程度上限制了相关研究的深入。

近年来, 随着遥感技术和机器学习在空间连续近地表  $PM_{2.5}$  浓度估算中的应用 (Chen et al, 2019; Xiao et al, 2018; Xu et al, 2018; Wei et al, 2020; 2021), 较好地解决了站点数据存在的诸多不足。其

中, Wei et al (2020; 2021) 利用卫星遥感、人工智能和大数据生成的中国近地表长期、全覆盖、高分辨率、高质量大气污染物数据集, 即中国高分辨率高质量近地表空气污染 (China High Air Pollutant, CHAP) 数据集, 由于其更新快、种类多 (包含了  $PM_1$ 、 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 、 $O_3$ 、 $NO_2$ 、 $SO_2$  和 CO 共 7 种主要空气污染物)、模拟精度高、免费使用等优点, 目前主要被应用于人体健康研究领域 (Zhang et al, 2021; Xu et al, 2021; Xue et al, 2021; Wang et al, 2021; Geng et al, 2021)。

已有研究表明, 1—4 月东南亚地区生物质燃烧活动频繁, 其产生的气溶胶可快速进入自由对流层并向东远距离输送, 对大气化学和辐射强迫产生影响, 并进一步影响气候 (Kondo et al, 2004; Lee et al, 2014; Dong and Fu, 2015; 王继康等, 2021)。从卫星观测到的气溶胶光学厚度 (aerosol optical depth, AOD) 来看, 云南 AOD 相对较低, 属全国空气质量较好省份。但滇西南紧邻东南亚火点密集区, 近年来该地区空气质量波动较大, 尤其是 2—4 月所辖州 (市) 的  $PM_{2.5}$  浓度明显高于云南省其余地区, 空气质量排名属全省靠后。目前对该区域长时

间序列 PM<sub>2.5</sub> 浓度时空格局变化,上空大气动力作用对污染物输送过程中产生的影响,以及该区域 PM<sub>2.5</sub> 浓度与周边生物质燃烧关联性的深入研究较少。本文基于 CHAP PM<sub>2.5</sub> 等数据,从大气环流形势、污染物后向轨迹、高低空动力结构配置等方面入手,采用最小二乘法等多种分析方法对滇西南地区 PM<sub>2.5</sub> 时空演变特征、季节性突增原因、周边境外生物质燃烧火点数变化与研究区 PM<sub>2.5</sub> 浓度和 AOD 相关性进行分析,以期对滇西南地区大气污染防治提供科学依据。

## 1 研究区域概况

本文以地理气候特点为依据,根据中国气象地理区划(郭进修等,2006)划定为滇西南地区。研究区包括德宏、保山、临沧、普洱、西双版纳 5 个州(市)(21°10′~25°51′N,97°31′~102°19′E),为边疆多民族欠发达地区,国土面积为 11.9 万 km<sup>2</sup>,约占云南省总面积的 1/3。该地区距孟加拉湾逾 600 km,西北临青藏高原,西接缅甸,南连老挝和越南,国境线长达 2390.7 km,处于东亚季风和西南季风共同影响区,其气候特征主要表现为:立体型气候明显,年温差较小而日温差较大,干湿季分明,多年平均降水量为 1297 mm,其中干季(11 月至次年 5 月)降水量占年降水量的 24%,雨季(6—10 月)降水量占年降水量的 76%。境内海拔总体呈西北高,东南低,海拔高差达 3560 m,加之大小河流纵横切割,地形错综复杂,生境极为多样,植被覆盖率达 72.7%。

## 2 数据与研究方法

### 2.1 数据来源与处理

本研究数据主要包括:①滇西南地区 10 个国控监测站点(图 1 PM<sub>2.5</sub> 监测站点)逐日 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度数据来自全国城市空气质量实时发布平台(<https://air.cnemc.cn:18007/>),时段为 2015 年 1 月 1 日至 2020 年 12 月 31 日。②PM<sub>2.5</sub> 年均([https://zenodo.org/record/4660858#.YWADL\\_nHGEA](https://zenodo.org/record/4660858#.YWADL_nHGEA))和日均(<https://zenodo.org/record/4959828#.YWAFhvnHGEB>)质量浓度格网数据(0.01°×0.01°)采用 Wei et al (2020; 2021) 发布的 CHAP PM<sub>2.5</sub> 数据集,在日均浓度数据集基础上,采用算术

平均值计算得到滇西南地区 2013—2020 年逐月 PM<sub>2.5</sub> 浓度数据集,进而得到春(3—5 月)、夏(6—8 月)、秋(9—11 月)、冬(12 月至次年 2 月)逐季 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度数据集,研究区内所有像元 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度区域平均值为该时段滇西南地区的 PM<sub>2.5</sub> 浓度。③从美国国家海洋和大气管理局(NOAA)提供的 SNPP/VIIIRS 卫星火点数据([https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/active\\_fire/](https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/active_fire/))中提取得到东南亚大部地区(15°~29°N、90°~107°E)2013—2020 年逐日火点数据,进而处理得到 2013—2020 年逐年和年均累计火点栅格数据(0.1°×0.1°),以火点数的多少代表生物质燃烧程度。同时,考虑到东南亚地区生物质燃烧主要排放区域为缅甸东部和老挝北部,且缅甸生物质燃烧气溶胶是造成云南霾天气最主要的贡献源(王继康等,2021),我们以缅甸东部和老挝北部为核心区,并结合中低层大气环流形势,分析 2013—2020 年每年 2—4 月 20°~26°N、96°~103°E 范围境外(以下简称关键区)逐日累计火点数与滇西南地区、滇西南地区北部(24°N 以北)、中部(22.5°~24°N)和南部(22.5°N 以南)3 个区域(图 1)日平均 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的相关性。④对 NASA 最新发布 MODIS C6 版本 MCD19A2 数据中的 550 nm 波段进行处理得到研究区 AOD 数据,原始数据时间分辨率为 1 d,空间分辨率为 1 km,本文基于谷歌地球引擎(Google Earth Engine, GEE)将其进一步处理为 AOD 月产品数据,为更好减少无效值和缺失值,每个格点的值通过最大合成法生成月值,时段为 2013—2020 年。⑤后向轨迹分析使用的气象数据源于美国国家环境预报中心(NCEP)将常规气象资料和卫星观测资料经过全球大气数据

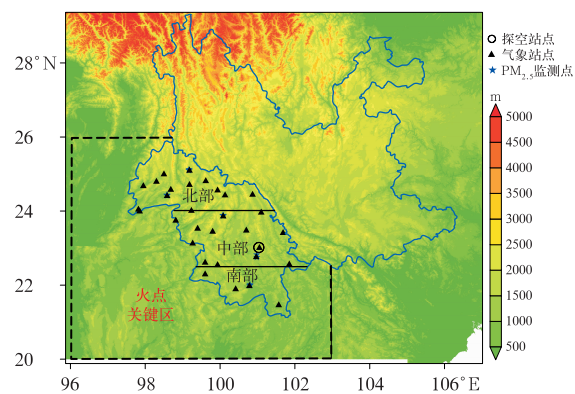


图1 研究区海拔(填色)及监测站点示意图  
Fig.1 Schematic diagram of altitude (colored) and observing stations of the study area

同化系统(Global Data Assimilation System, GDAS)同化后得到的 GDAS1( $1^\circ \times 1^\circ$ )数据。⑥滇西南地区普洱市主城区气象探空数据(图 1 探空站点)来源于普洱市气象局。此外,鉴于 ERA5 数据在云南复杂地形区域具有较高的精度(赵平伟等, 2021)和分辨率,文中 700 hPa 中低层环流形势、东南亚大部地区降水量、平均风速、大气边界层高度、925~100 hPa 散度场取自欧洲中心(ECMWF)最新发布的 ERA5 再分析数据集逐月气象数据( $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ )。

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 CHAP PM<sub>2.5</sub> 浓度变化特征分析方法

对四季和年 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度值与年份进行最小二乘法回归分析,得到回归方程的斜率,考虑到 PM<sub>2.5</sub> 空间分布上存在较大差异,不同地区 PM<sub>2.5</sub> 趋势值无可比性,以[年(季)PM<sub>2.5</sub> 质量浓度变化直线斜率/年(季)PM<sub>2.5</sub> 质量浓度均值]×(研究年数-1)×100%,得到各像元年(季)PM<sub>2.5</sub> 浓度变化率(单位:%),以此表征不同像元 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的变化趋势,文中年和四季 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度数据研究年数分别为 20 a 和 8 a,变化趋势显著性检验采用 F 检验。

### 2.2.2 污染物传输路径分析方法

利用 TrajStat 软件将滇西南地区代表站点临沧市主城区( $23.88^\circ\text{N}$ 、 $100.08^\circ\text{E}$ )和西双版纳州主城区( $22.0^\circ\text{N}$ 、 $100.8^\circ\text{E}$ )作为轨迹模拟起始点,起始高度为 500 m,该高度既能反映区域间气流的流动特征,又可减少地面摩擦力对其的影响(赵恒等, 2009)。每日计算 4 个时次(00、06、12、18 UTC),模拟 48 h 的后向轨迹,依据 Angle Distance 算法(Sirois and Bottenheim, 1995)和总空间方差(total spatial variance, TSV)(Draxler et al, 2022)的突变点进行聚类后向轨迹计算和聚类统计,以此判断气流轨迹的主要传输方向和途经区域。

### 2.2.3 CWT 分析方法

在得到污染物传输路径的基础上,利用浓度权重轨迹分析法(concentration weighted trajectory, CWT)计算轨迹经过网格的污染物对受体点的相对浓度贡献大小,CWT 计算公式如下:

$$C_{ij} = \frac{\sum_{l=1}^M C_l t_{ijl}}{\sum_{l=1}^M t_{ijl}} \quad (1)$$

式中: $C_{ij}$  为网格( $i, j$ )的平均权重浓度, $M$  表示轨迹总条数, $i$  和  $j$  分别代表经度和纬度, $C_l$  为轨迹  $l$  经过网格( $i, j$ )时的污染物浓度, $t_{ijl}$  是轨迹  $l$  经过网格( $i, j$ )的停留时间, $C_{ij}$  高值网格区域是对受体点细颗粒物 PM<sub>2.5</sub> 污染有贡献的主要外来源区。

为减小计算误差,引入权重因子  $W_{ij}$  来降低偏远网格带来的影响,进而计算得到  $WCWT_{ij}$ 。权重因子  $W_{ij}$  的赋值主要取决于轨迹经过的某一网格端点数  $n_{ij}$  与该网格平均端点数  $n_{ave}$ ,  $W_{ij}$  和  $WCWT_{ij}$  计算公式如下:

$$W_{ij} = \begin{cases} 1 & 3n_{ave} < n_{ij} \\ 0.7 & 1.5n_{ave} < n_{ij} \leq 3n_{ave} \\ 0.42 & n_{ave} < n_{ij} \leq 1.5n_{ave} \\ 0.05 & n_{ij} \leq n_{ave} \end{cases} \quad (2)$$

$$WCWT_{ij} = C_{ij} W_{ij} \quad (3)$$

此外,采用皮尔逊相关系数对火点数与 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度及 AOD 相关性进行分析。

## 3 结果与分析

### 3.1 PM<sub>2.5</sub> 变化特征

#### 3.1.1 PM<sub>2.5</sub> 时空变化特征

通过对 2001—2020 年滇西南地区各像元 PM<sub>2.5</sub> 年均质量浓度空间分布和变化百分率(图 2a, 2c)进行分析。由图可见,滇西南地区年均 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度整体表现为北低南高,东弱西强的分布特征。年均 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度值  $\leq 35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  的像元占滇西南地区国土面积的 61.6%,  $35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} <$  年均 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度值  $\leq 40 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  的像元占 36%,而  $> 40 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  的像元仅占 2.4%,主要集中在南部的西双版纳州。过去 20 年,研究区年均 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度值变化百分率主要表现为减弱趋势,减少程度以  $-30\% \sim -20\%$  居多,占研究区的 59.4%, 28.6% 的区域年均 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度值变化百分率小于  $-30\%$ 。

Wei et al(2020; 2021)发布的 CHAP PM<sub>2.5</sub> 日浓度数据集最早为 2013 年,受数据限制,本文仅对研究区 2013—2020 年四季 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度时空变化特征进行分析。由图 2b 可见,春季 PM<sub>2.5</sub> 浓度值  $\geq 45 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  的区域达 25.9%,  $\leq 35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  的区域仅为 11.7%。各像元 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度变化百分率表现出一定的差异性,87.1% 的国土面积为减弱区

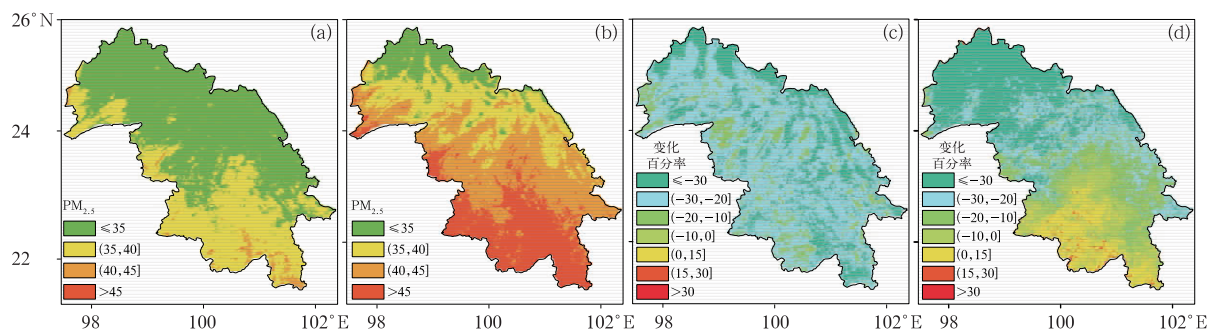


图2 (a,c)2001—2020年年均和(b,d)2013—2020年春季滇西南地区

(a,b)PM<sub>2.5</sub>质量浓度(单位:  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ), (c,d)变化百分率(单位: % )空间分布

Fig. 2 (a, b) PM<sub>2.5</sub> concentrations (unit:  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ), and (c, d) percentage change (unit: %) in southwest Yunnan for (a, c) the annual averages of 2001—2020 and (b, d) that in spring from 2013 to 2020

域,集中在研究区中部及以北;南部的普洱和西双版纳中部及以西表现为增长趋势,增幅集中在0~15%(图2d)。夏、秋、冬季PM<sub>2.5</sub>质量浓度值基本在 $35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以下,PM<sub>2.5</sub>质量浓度空间分布差异较小,三个季节变化百分率<-30%的区域面积超过97%(图略)。整体来看,滇西南地区春、夏、秋、冬和年均PM<sub>2.5</sub>质量浓度分别为41、21、23、31和 $31 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

### 3.1.2 PM<sub>2.5</sub>质量浓度年内分布特征

图3为2013—2020年滇西南地区CHAP PM<sub>2.5</sub>质量浓度和近地面10个国控监测站点PM<sub>2.5</sub>平均质量浓度(受观测时段限制,时段为2015—2020年)年内变化分布,由图3可得,监测站点PM<sub>2.5</sub>质量浓度和CHAP PM<sub>2.5</sub>质量浓度年内变化趋势表现一致,整体上看,PM<sub>2.5</sub>质量浓度干季(11月至次年5月)波动大,雨季(6—10月)波动小;全年滇西南地区PM<sub>2.5</sub>质量浓度7月最低,站点PM<sub>2.5</sub>

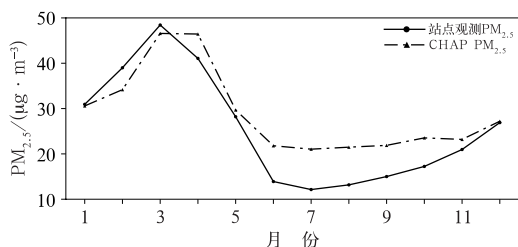


图3 滇西南地区站点PM<sub>2.5</sub>和CHAP PM<sub>2.5</sub>质量浓度逐日演变

Fig. 3 Daily evolutions of mass concentration of the PM<sub>2.5</sub> at stations and CHAP PM<sub>2.5</sub> in southwest Yunnan

(CHAP PM<sub>2.5</sub>)质量浓度为 $12 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ( $21 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ),之后呈缓慢增长趋势,进入12月后PM<sub>2.5</sub>质量浓度急剧增长并在3月达到峰值,为 $48 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ( $47 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ),4月后又急剧减少。

### 3.2 2—4月滇西南地区PM<sub>2.5</sub>质量浓度突增原因

由上可见,干季11月至次年1月滇西南地区空气质量观测站和CHAP模拟观测得到的PM<sub>2.5</sub>质量浓度平均值分别为 $26 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $27 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,2—4月则分别为 $43 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $42 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,两个不同时段PM<sub>2.5</sub>质量浓度均值分别相差高达 $17 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $15 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。为探明研究区2—4月PM<sub>2.5</sub>质量浓度突增原因,围绕东南亚大部地区火点时空分布特征、中低层大气环流形势、污染物扩散后向轨迹、动力结构配置、境外关键区火点数与PM<sub>2.5</sub>质量浓度和AOD相关性等方面进行深入分析。

#### 3.2.1 东南亚大部地区火点变化分析

为探明周边生物质燃烧情况,对2013—2020年东南亚大部地区年均累计火点空间分布(图4a)进行分析,发现在 $100 \text{ km}^2$ 格点上,滇西南地区年均累计火点数基本少于25个 $\cdot \text{a}^{-1}$ ,而西部和南部毗邻的缅甸东部和老挝北部均为火点数大值区,部分区域 $100 \text{ km}^2$ 格点上年均累计火点数超过250个 $\cdot \text{a}^{-1}$ ,小部分超过350个 $\cdot \text{a}^{-1}$ ,少数超过1000个 $\cdot \text{a}^{-1}$ 。为滤掉波动,更好反映出日火点变化趋势,对近8年年均逐日火点数进行10 d滑动平均(图4b),发现年内火点数从11月开始缓慢上升,进入1月后上升激烈,3月下旬初达到顶峰,火点数接近13000个 $\cdot \text{d}^{-1}$ ,4月上旬火点数呈现小幅波动,日高火点



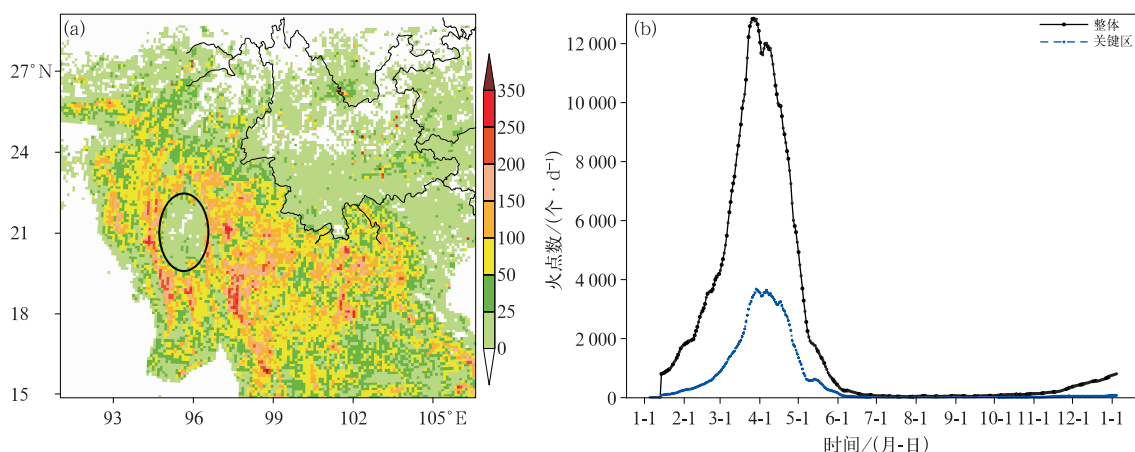


图 4 2013—2020 年东南亚大部地区(a)年均累计火点[单位:个 $\cdot$ a $^{-1}$  $\cdot$ (100 km) $^{-2}$ ]空间分布及(b)年均 10 d 滑动火点数变化  
(椭圆:工业相对发达区域)

Fig. 4 (a) Spatial distribution of annual average cumulative fire spots [unit: number $\cdot$ a $^{-1}$  $\cdot$ (100 km) $^{-2}$ ] and (b) annually-averaged 10 d sliding fire points change in most parts of Southeast Asia from 2013 to 2020  
(ellipse: area of relatively developed industry)

持续到 4 月中旬,5 月后急剧下降,6—9 月为日火点数低值区,基本少于 100 个 $\cdot$ d $^{-1}$ 。关键区滑动火点数年内分布变化与东南亚大部地区整体一致。2—4 月东南亚大部地区火点数在全年中的占比达 85.6%,关键区火点数集中程度更高,达 90.8%。

通过分析 2013—2020 年东南亚大部地区逐年累计火点分布(图略),发现逐年累计火点空间分布与多年平均累计火点数分布极为相似,缅甸北部及中部椭圆区(图 4a)属缅甸的火点低发区,结合全球碳排放网格数据(Global Carbon Grid v1.0, <http://gidmodel.org.cn/>)和 Gong et al(2020)制作发布的全球土地利用分类图(10 m $\times$ 10 m,图略),我们发现椭圆区为整个缅甸碳排放大值区和建筑群区,说明该区域可能为缅甸工业相对发达区域,而火点数大值区多为耕地,同时火点集中在 2—4 月,火点应为春耕烧荒引发。

### 3.2.2 干季不同时段后向轨迹聚类分析对比

对比近 8 年干季 11 月至次年 1 月(图 5a)和 2—4 月(图 5b)研究区及周边中低层平均大气环流,2 个时段上东南亚大部地区中低空 700 hPa 环流形势较为相似,均受偏西气流控制,缅甸中部以北区域为研究区的上风方,2—4 月缅甸至滇西南一带风速较 11 月至次年 1 月偏大(约为 2 m $\cdot$ s $^{-1}$ )。

同时,通过 TSV 方法做后向轨迹分析。由

图 5c 和 5d 可见,11 月至次年 1 月临沧和西双版纳两个受体点后向轨迹分别可聚类为 3 类和 4 类;2—4 月则均可聚类为 4 类。各传输路径和方向表示气流到达受体点前经过的区域,传输距离可判断气流传输速度,传输距离越短,气流中所携带污染物越易发生沉降。可见,干季 2 个不同时段聚类轨迹出现概率和输送距离存在一定差异,但污染物主要传输方位和途经区域较相似:11 月至次年 1 月,临沧受体点聚类轨迹主要来自于西南和偏西两个方位,二者总占比约为 92%,途经缅甸;西双版纳受体点聚类轨迹西南向和偏南向分别约占总比的 63%、37%,途经缅甸和老挝西北部。2—4 月,临沧受体点聚类轨迹主要来自于偏西向,污染轨迹聚类占比约达 96%,途经缅甸;西双版纳点 4 条聚类轨迹均为途经缅甸的西南向。2—4 月由于风速较 11 月至次年 1 月大,气流到达 2 个受体点的传输距离更远,但占比较大的聚类轨迹传输距离仍较短,且途经缅甸火点高发区,大量生物质燃烧产生的污染物被气流携带抵达受体点,易在滇西南地区发生沉降而增大 PM<sub>2.5</sub>质量浓度。对比 2 个受体点,西双版纳点聚类轨迹传输距离较临沧点短,途经火点更为密集,更易造成 PM<sub>2.5</sub>质量浓度升高。

综上所述,雨季境外生物质燃烧活动弱,对研究区 PM<sub>2.5</sub>质量浓度的影响可忽略不计,加之降雨集

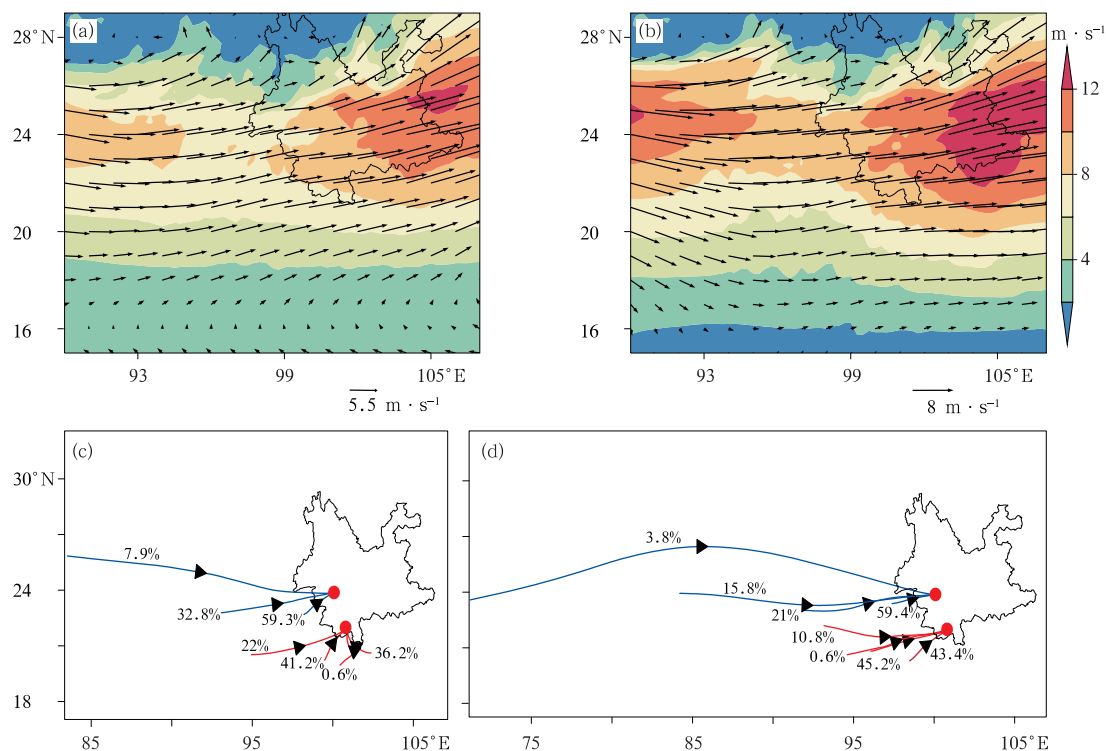


图5 2013—2020年东南亚大部地区(a,c)11月至次年1月和(b,d)2—4月的(a,b)700 hPa平均环流形势及(c,d)临沧(蓝色)和西双版纳(红色)受体点污染物后向轨迹聚类(图5c,5d中百分数表示聚类轨迹占比)

Fig. 5 (a, b) Average 700 hPa stream field in most part of Southwest Asia and (c, d) urban pollutant backward trajectory clustering in Lincang (blue) and Xishuangbanna (red) in (a, c) November—January, (b, d) February—April from 2013 to 2020  
(In Figs. 5c and 5d, percentage represents the proportion of clustering trajectories)

中,所起冲刷作用强,使得6—10月研究区PM<sub>2.5</sub>质量浓度小、变化平稳。干季,在中低层环流形势较相似前提下,火点时空分布及污染物传输路径表明2—4月上风方春耕烧荒生物质产生的污染物在偏西气流引导下到达滇西南地区。

### 3.2.3 污染物扩散动力条件分析

为探明研究区上空动力结构配置,分析了近8年2—4月滇西南地区纬度(21°~26°N)和散度平均的经度-高度分布(图6)。由图可见,火点高发的缅甸西部海拔较滇西南地区低,接壤区海拔由西向东逐步升高,95.6°~97°E范围近地面层散度值为 $-8 \times 10^{-6} \sim -1.4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,而850~750 hPa散度值为 $6 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,形成地面辐合、中低层辐散的动力结构搭配(红色实线区)。同时,较大范围生物质燃烧有助于地面热低压的形成,使得所产生的污染物易被抬升到一定高度,并在偏西气流引导

和地形抬升作用下输送到研究区上空。

研究区上空中低层800~600 hPa(蓝色虚线区)散度值达到 $8.0 \times 10^{-6} \sim 1.6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,99.5°E附近散度值大于 $2.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,输送到此高度上的污染物在较强辐散作用下易随气流下沉抵达地面,进而导致2—4月研究区PM<sub>2.5</sub>质量浓度升高。由此可见,2—4月上风方稳定的污染源,利于污染物下沉的中低层大气动力配置,从动力学角度解释了上文得到的滇西南地区春季PM<sub>2.5</sub>质量浓度高而波动较其余季节小的原因。

### 3.2.4 2—4月PM<sub>2.5</sub>质量浓度极端月份对比分析

为更准确地对比不同年份研究区2—4月PM<sub>2.5</sub>质量浓度存在的差异及其成因,使用2015—2020年PM<sub>2.5</sub>质量浓度实测数据进行对比分析,发现各年2—4月PM<sub>2.5</sub>平均质量浓度相差不大,为 $41 \sim 47 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,但不同年份月PM<sub>2.5</sub>质量浓度存

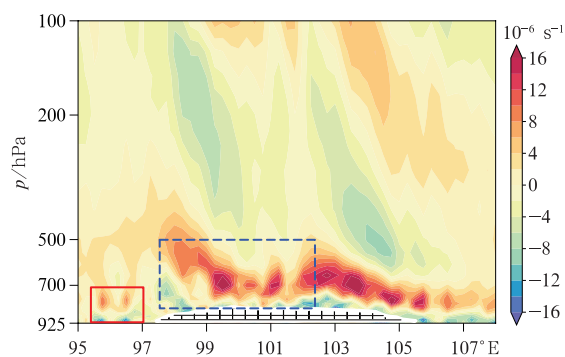


图6 2013—2020年2—4月研究区平均纬度(21°~26°N)和散度的经度-高度分布(填色:散度,红色实线区:缅甸中部中低空至地面散度分布,蓝色虚线区:滇西南地区中低层散度分布,网格区域:平均海拔高度)

Fig. 6 Longitude-height distribution of average latitude (21°–26°N) and divergence in the study area in February–April from 2013 to 2020 (colored: divergence, red box: divergence distribution of low-altitude to ground in central Myanmar, blue dashed box: divergence distribution of low-middle in southwest Yunnan Province in China, grid area: average altitude)

在较大差异(图7a)。2015年和2019年,2个年份2月关键区日均火点数分别为678个和691个,但2015年2月 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度值高达 $50 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,2019年仅为 $30 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,二者相差达 $20 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。通过分析2个年份2月研究区普洱市主城区逐日08时气象探空数据中的850 hPa高度与地面(约870 hPa高度)温度差值(图7b),发现两个高度区间(近地面层200 m)2015年2月仅有2 d未出现逆温层,而2019年2月有近半日数未出现逆温层。同时,使用2015年2月气象要素值减去2019年2月气象要素值,分析研究区及上风方大范围大气边界层高度、降水量及平均风速差值空间分布(图7c~7e)。通常风速越大、大气边界层高度越高,越利于污染物的扩散;降雨越多,越有利于污染物的清除(Tai et al., 2010; 杜川利等, 2014; 郁珍艳等, 2017; 栾天等, 2019; Volná and Hladký, 2020)。研究区2019年2月大气边界层高度较2015年2月高50~150 m,而上风方部分区域则高出150 m以上;研究区大部分区域2019年2月降水量较2015年2月多20 mm以上,上风方大部分地区多出10~40 mm;

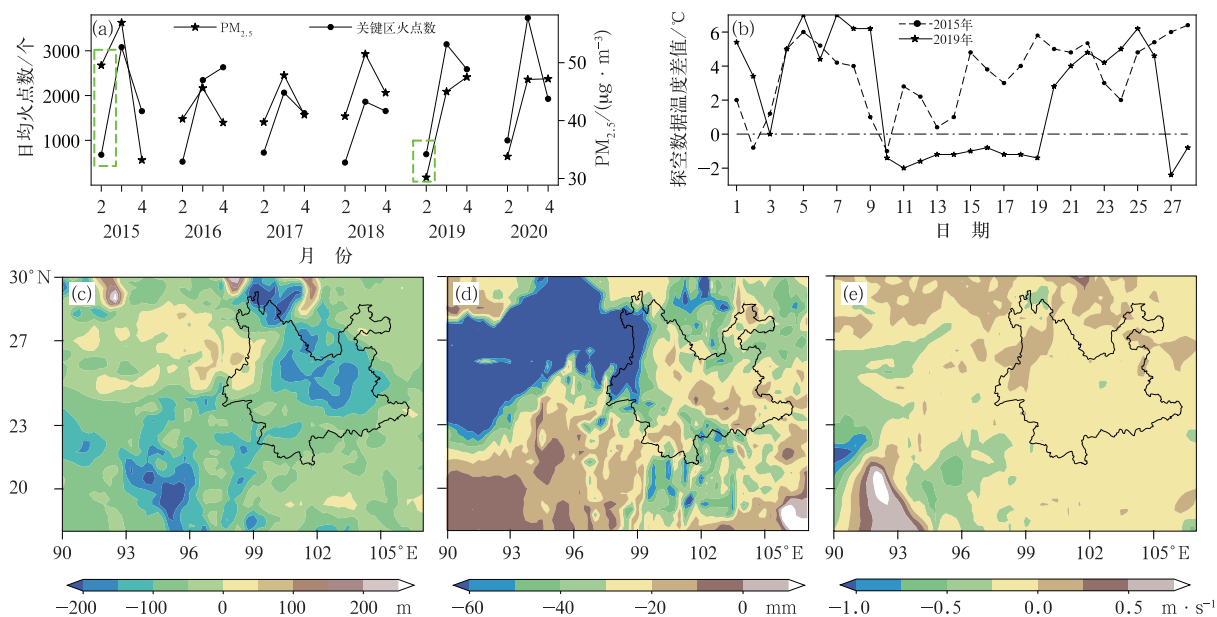


图7 (a)2015—2020年2—4月 $\text{PM}_{2.5}$ 月质量浓度与关键区日均火点变化,2015年和2019年的2月  
(b)逐日08时850 hPa与地面温度、(c)大气边界层高度、(d)降水量和(e)平均风速的差值  
(图7a中2个绿色虚线框突出表示2015年和2019年的2月数据)

Fig. 7 (a) Average  $\text{PM}_{2.5}$  mass concentration and the change of daily average fire point in key areas in February–April from 2015 to 2020, (b) temperature difference between 850 hPa and the ground at 08:00 BT day by day, (c) planetary boundary layer height difference, (d) precipitation difference and (e) average wind speed difference in February of 2015 and 2019 (In Fig. 7a two green dashed boxes correspond to the data in February of 2015 and 2019)



月均风速 2019 年 2 月较 2015 年 2 月略高,上风方部分区域风速高出  $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

此外,利用 CWT 计算 2015 年和 2019 年的 2 月滇西南地区 PM<sub>2.5</sub>潜在源区权重质量浓度数值,以反映潜在污染源区的污染程度。由 CWT 分析结果可见(图 8),2 个时段 WCWT 所模拟的潜在源区中,2015 年 2 月缅甸东部、临沧境内西南部这些污染源区对临沧市 PM<sub>2.5</sub> 污染贡献值较大,为  $30 \sim 50 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,而缅甸东部区域对西双版纳 PM<sub>2.5</sub> 污染贡献值超过  $50 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,局部超过了  $100 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。2019 年 2 月,缅甸东部对临沧和西双版纳 PM<sub>2.5</sub> 污染贡献值较 2015 年明显减小,为  $20 \sim 40 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

由上可见,相对于 2015 年 2 月,2019 年 2 月上风方至研究区存在较大范围更有利于污染物扩散的气象条件,同时更多的降水清洗,使污染物在传输途中得以削弱,从而减少了境外大气污染物输送对滇西南地区 PM<sub>2.5</sub> 污染的贡献。同时,2015 年 2 月近地面层 200 m 高度存在更长时间的逆温层,使得大气层结比较稳定,PM<sub>2.5</sub> 质量浓度易维持高值(何慧根等,2021)。

### 3.2.5 火点数与滇西南地区 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度及其 AOD 的相关性分析

图 9 给出了 2013—2020 年 2—4 月滇西南地区及不同部位日均 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度变化与境外关键区日火点数相关系数分析结果。由图可得,滇西南地区及不同部位 2—4 月日 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度变化与境外关键区火点数变化表现为显著的正相关,但相关

程度随年份不同存在一定差异,这可能是因为滇西南上风方生物质燃烧所产生的污染物对滇西南地区的影响机理较为复杂。PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的积累、生消除受火点数变化影响外,污染物在传输过程中还受到大气边界层变化和天气环流形势及其他较多因素的影响,且其中任何一个量的变化将引起其他量的响应,导致途中产生气粒转化等更为复杂的大气化学反应(娄梦筠,2019)。同一年中,除 2016 年关键区日火点数与滞后 1 d 的 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度相关性最为密切外,其余年份关键区火点数与滞后 2 d 的日 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度相关性最强,相关系数大多高于 0.5。就研究区不同部位 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度与火点数的相关程度来看,滇西南地区南部与火点相关性最强,其次为中部,滇西南地区北部与火点的相关性表现稍弱,但北部与火点的相关系数也大都具有统计学意义( $P < 0.01$ )。

分析 2013—2020 年滇西南地区 AOD、2—4 月 AOD 和关键区逐月火点数与研究区逐月 AOD 值相关系数空间分布(图 10),发现滇西南地区年均 AOD 值在大部地区小于 0.055,大于 0.06 的区域范围较小,位于西双版纳州中部以南地区。2—4 月 AOD 值较年均值虽明显升高,但也大都小于 0.09, AOD 值  $> 0.1$  的高值区主要分布在西双版纳州普洱市西部和南部。境外关键区月累计火点数与月 AOD 时间序列所有格点值呈显著正相关分布( $P < 0.01$ ),相关系数也表现为由北向南增大,强相关(相关系数  $> 0.7$ )区域占研究区的 86.6%。

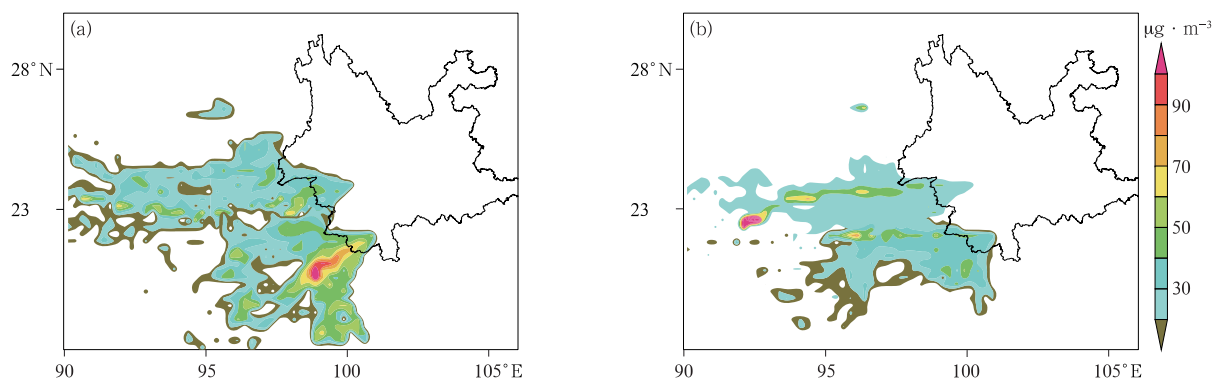


图 8 (a)2015 年 2 月和(b)2019 年 2 月滇西南地区临沧和西双版纳受体点 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度 CWT 分析

Fig. 8 Concentration weighted trajectory (CWT) of PM<sub>2.5</sub> at Lincang and Xishuangbanna sites in southwest Yunnan in February of (a) 2015 and (b) 2019

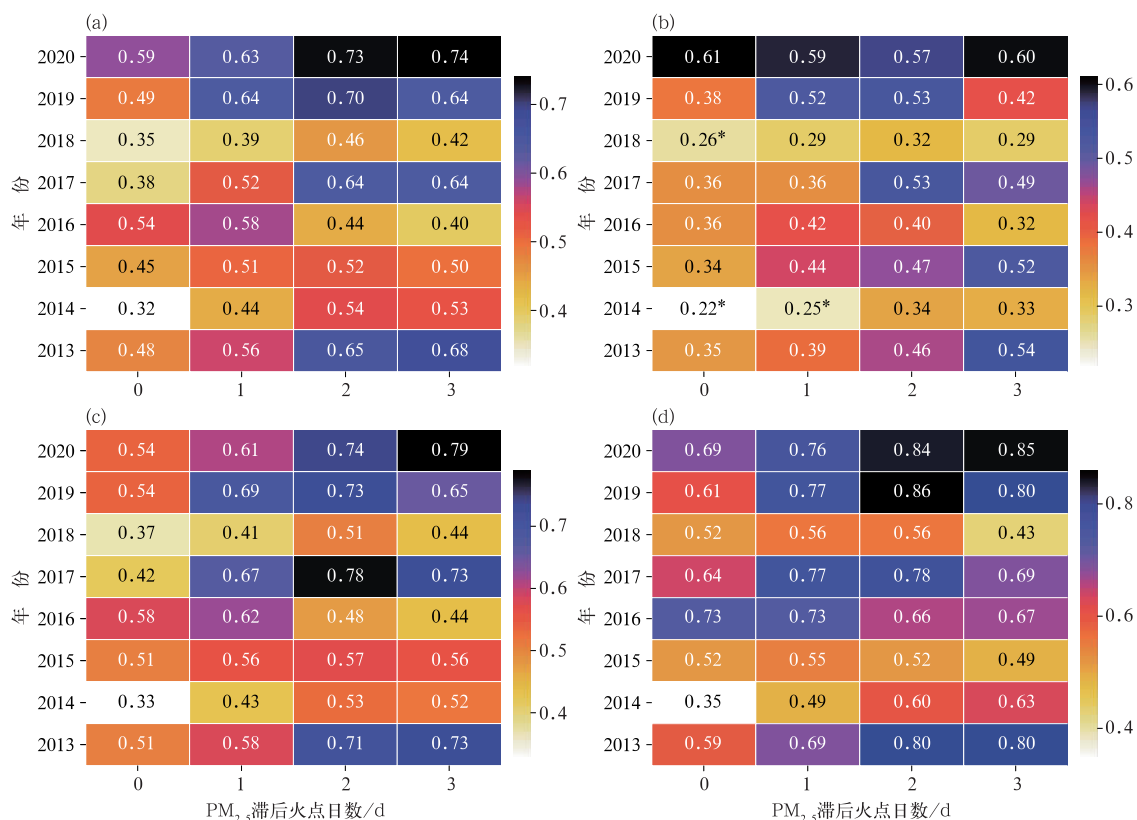


图 9 2013—2020 年 2—4 月关键区日火点数和(a)滇西南地区及其(b)北部、(c)中部和 (d)南部  $PM_{2.5}$  质量浓度的相关性

(\* 表示相关系数未通过 0.01 显著性水平检验)

Fig. 9 Correlation between number of solar fire points in key districts and  $PM_{2.5}$  mass concentration in (a) southwest Yunnan, (b) northern, (c) central and (d) southern of southwest Yunnan in February—April from 2013 to 2020

(\* indicates that the correlation coefficient does not pass the 0.01 significance level test)

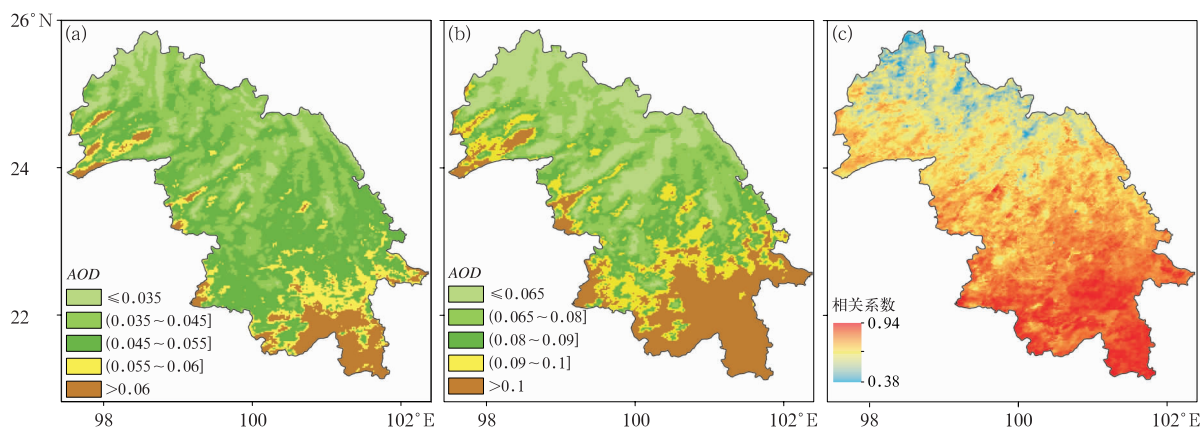


图 10 2013—2020 年滇西南地区(a)年均 AOD, (b)2—4 月 AOD 及(c)关键区月累计火点数与月 AOD 相关系数空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of (a) annual average AOD, (b) annual average AOD in February—April and (c) monthly cumulative number of fire points in key areas and monthly AOD correlation coefficient in southwest Yunnan from 2013 to 2020

## 4 结 论

(1)滇西南地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度与 AOD 空间分布呈北低南高,东弱西强。近 20 年年 PM<sub>2.5</sub> 浓度值波动较小,主要表现为减弱趋势,减少程度以 -30%~-20% 居多。研究区大部分区域春季 PM<sub>2.5</sub> 浓度值较其余季节波动较小,PM<sub>2.5</sub> 浓度和变化百分率空间差异最为明显,但其余季节 PM<sub>2.5</sub> 浓度减弱程度较春季大。

(2)年内研究区 PM<sub>2.5</sub> 浓度表现为 7 月最低、3 月最高分布形式;干季中 2—4 月滇西南地区周边境外火点集中高发,途经缅甸高火点区的偏西向(西南向)污染物短距离输送,在中低层辐散的动力结构配置下造成下沉,致 PM<sub>2.5</sub> 浓度季节性升高。

(3)较大范围利于污染物扩散的风速、大气边界层高度和更多的降水清洗,可在传输途中有效削减污染强度,减少境外大气污染物输送对滇西南地区 PM<sub>2.5</sub> 污染贡献。

(4)2—4 月滇西南地区及不同部位日 PM<sub>2.5</sub> 浓度变化与境外火点数变化表现为显著的正相关性,且前者变化滞后于后者约 2 d,二者相关程度表现为由南向北减弱的趋势。

## 参考文献

- 杜川利,唐晓,李星敏,等,2014.城市边界层高度变化特征与颗粒物浓度影响分析[J].高原气象,33(5):1383-1392. Du C L, Tang X, Li X M, et al, 2014. Calculations of planetary boundary layer height and its relationship with particle size concentration in Xi'an City[J]. Plateau Meteor, 33(5):1383-1392(in Chinese).
- 郭进修,王秀荣,王维国,2006.中国气象地理区划手册[M].北京:气象出版社:54. Guo J X, Wang X R, Wang W G, 2006. Handbook of Meteorological Geography and Regionalization of China[M]. Beijing:China Meteorological Press:54(in Chinese).
- 何慧根,唐红玉,李永华,等,2021.2014—2018年重庆主城区大气污染的特征及其与大气环流之间的关系[J].气象,47(10):1233-1245. He H G, Tang H Y, Li Y H, et al, 2021. Characteristics of air pollution and its relationship with atmospheric circulation in Chongqing City from 2014 to 2018[J]. Meteor Mon, 47(10):1233-1245(in Chinese).
- 姜磊,周海峰,赖志柱,等,2018.中国城市 PM<sub>2.5</sub> 时空动态变化特征分析:2015—2017 年[J].环境科学学报,38(10):3816-3825. Jiang L, Zhou H F, Lai Z Z, et al, 2018. Analysis of spatio-temporal characteristic of PM<sub>2.5</sub> concentrations of Chinese cities: 2015—2017[J]. Acta Sci Circumst, 38(10):3816-3825(in Chinese).
- 李欢欢,牛臻,张凯,等,2021.保定市 2013—2019 年秋季冬季污染物浓度变化特征[J].中国环境科学,41(7):3076-3087. Li H H, Niu

- C, Zhang K, et al, 2021. Variation characteristics of pollutant concentration in autumn and winter from 2013 to 2019 in Baoding City[J]. China Environ Sci, 41(7):3076-3087(in Chinese).
- 刘素,马彤,杨艳,等,2019.太原市冬季 PM<sub>2.5</sub> 化学组分特征与来源解析[J].环境科学,40(4):1537-1544. Liu S, Ma T, Yang Y, et al, 2019. Chemical composition characteristics and source apportionment of PM<sub>2.5</sub> during winter in Taiyuan[J]. Environ Sci, 40(4):1537-1544(in Chinese).
- 娄梦筠,2019.我国不同地区大气边界层与 PM<sub>2.5</sub> 相互作用的观测研究[D].北京:中国气象科学研究院. Lou M J, 2019. On the atmospheric boundary layer and PM<sub>2.5</sub> interaction in China: a perspective from radiosonde observations [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences(in Chinese).
- 栾天,郭学良,张天航,等,2019.不同降水强度对 PM<sub>2.5</sub> 的清除作用及影响因素[J].应用气象学报,30(3):279-291. Luan T, Guo X L, Zhang T H, et al, 2019. The scavenging process and physical removing mechanism of pollutant aerosols by different precipitation intensities[J]. J Appl Meteor Sci, 30(3):279-291(in Chinese).
- 王继康,江琪,尤媛,等,2021.东南亚生物质燃烧对我国霾和降水的影响[J].气象,47(3):348-358. Wang J K, Jiang Q, You Y, et al, 2021. Effects of biomass burning aerosol in Southeast Asia on haze and precipitation over China[J]. Meteor Mon, 47(3):348-358(in Chinese).
- 王振波,梁龙武,王旭静,2019.中国城市群地区 PM<sub>2.5</sub> 时空演变格局及其影响因素[J].地理学报,74(12):2614-2630. Wang Z B, Liang L W, Wang X J, 2019. Spatio-temporal evolution patterns and influencing factors of PM<sub>2.5</sub> in Chinese urban agglomerations[J]. Acta Geogr Sin, 74(12):2614-2630(in Chinese).
- 杨文涛,譙鹏,刘贤赵,等,2020.2011—2017 年中国 PM<sub>2.5</sub> 多尺度时空分异特征分析[J].环境科学,41(12):5236-5244. Yang W T, Qiao P, Liu X Z, et al, 2020. Analysis of multi-scale spatio-temporal differentiation characteristics of PM<sub>2.5</sub> in China from 2011 to 2017[J]. Environ Sci, 41(12):5236-5244(in Chinese).
- 郁珍艳,李正泉,高大伟,等,2017.浙江省空气质量与大气自净能力的特征分析[J].气象,43(3):323-332. Yu Z Y, Li Z Q, Gao D W, et al, 2017. Feature analysis of air quality and atmospheric self-purification capability in Zhejiang[J]. Meteor Mon, 43(3):323-332(in Chinese).
- 张毓秀,任万辉,王嘉禾,等,2021.沈阳市冬季不同污染程度 PM<sub>2.5</sub> 中 OC 和 EC 污染特征[J].中国环境科学,41(7):3066-3075. Zhang Y X, Ren W H, Wang J H, et al, 2021. Characteristics of organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) under different pollution levels of PM<sub>2.5</sub> during winter in Shenyang[J]. China Environ Sci, 41(7):3066-3075(in Chinese).
- 赵恒,王体健,江飞,等,2009.利用后向轨迹模式研究 TRACE-P 期间香港大气污染物的来源[J].热带气象学报,25(2):181-186. Zhao H, Wang T J, Jiang F, et al, 2009. Investigation into the source of air pollutants to Hong Kong by using backward trajectory method during the TRACE-P campaign[J]. J Trop Meteor, 25(2):181-186(in Chinese).
- 赵平伟,李斌,王佳妮,等,2021.GPM IMERG 和 ERA5 降水数据精度在云南复杂地形区域的评估检验[J].气象科技,49(1):

- 114-123. Zhao P W, Li B, Wang J N, et al, 2021. Accuracy evaluation and comparison of GPM IMERG and ERA5 precipitation products over complex terrain of Yunnan[J]. Meteor Sci Technol, 49(1): 114-123 (in Chinese).
- Chen G B, Li S S, Knibbs L D, et al, 2018. A machine learning method to estimate  $PM_{2.5}$  concentrations across China with remote sensing, meteorological and land use information[J]. Sci Total Environ, 636: 52-60.
- Chen Z Y, Zhang T H, Zhang R, et al, 2019. Extreme gradient boosting model to estimate  $PM_{2.5}$  concentrations with missing-filled satellite data in China[J]. Atmos Environ, 202: 180-189.
- Deng J J, Du K, Wang K, et al, 2012. Long-term atmospheric visibility trend in Southeast China, 1973—2010[J]. Atmos Environ, 59: 11-21.
- Dong X Y, Fu J S, 2015. Understanding interannual variations of biomass burning from Peninsular Southeast Asia, part II: variability and different influences in lower and higher atmosphere levels[J]. Atmos Environ, 115: 9-18.
- Draxler R R, Stunder B, Rolph G D, et al, 2022[2022-01-31]. HYSPLIT User's Guide[EB/OL]. [https://www.arl.noaa.gov/wp\\_arl/wp-content/uploads/documents/reports/hysplit\\_user\\_guide.pdf](https://www.arl.noaa.gov/wp_arl/wp-content/uploads/documents/reports/hysplit_user_guide.pdf).
- Geng G N, Xiao Q Y, Liu S G, et al, 2021. Tracking air pollution in China: Near real-time  $PM_{2.5}$  retrievals from multisource data fusion[J]. Environ Sci Technol, 55(17): 12106-12115.
- Gong P, Li X C, Wang J, et al, 2020. Annual maps of global artificial impervious area (GAIA) between 1985 and 2018[J]. Remote Sens Environ, 236: 111510.
- Hao T Y, Cai Z Y, Chen S C, et al, 2019. Transport pathways and potential source regions of  $PM_{2.5}$  on the west coast of Bohai Bay during 2009—2018[J]. Atmosphere, 10(6): 345.
- He Q Q, Zhang M, Huang B, et al, 2017. MODIS 3 km and 10 km aerosol optical depth for China: evaluation and comparison[J]. Atmos Environ, 153: 150-162.
- Kondo Y, Morino Y, Takegawa N, et al, 2004. Impacts of biomass burning in Southeast Asia on ozone and reactive nitrogen over the western Pacific in spring[J]. J Geophys Res: Atmos, 109(D15): D15S12.
- Lee D, Sud Y C, Oreopoulos L, et al, 2014. Modeling the influences of aerosols on pre-monsoon circulation and rainfall over Southeast Asia[J]. Atmos Chem Phys, 14(13): 6853-6866.
- Li K, Jacob D J, Liao H, et al, 2019. A two-pollutant strategy for improving ozone and particulate air quality in China[J]. Nat Geosci, 12(11): 906-910.
- Nel A, 2005. Air pollution-related illness: effects of particles[J]. Science, 308(5723): 804-806.
- Ramanathan V, Carmichael G, 2008. Global and regional climate changes due to black carbon[J]. Nat Geosci, 1(4): 221-227.
- Sirois A, Bottenheim J W, 1995. Use of backward trajectories to interpret the 5-year record of PAN and  $O_3$  ambient air concentrations at Kejimikujik National Park, Nova Scotia[J]. J Geophys Res: Atmos, 100(D2): 2867-2881.
- Sulaymon I D, Mei X D, Yang S J, et al, 2020.  $PM_{2.5}$  in Abuja, Nigeria: Chemical characterization, source apportionment, temporal variations, transport pathways and the health risks assessment[J]. Atmos Res, 237: 104833.
- Tai A P K, Mickley L J, Jacob D J, 2010. Correlations between fine particulate matter ( $PM_{2.5}$ ) and meteorological variables in the United States: Implications for the sensitivity of  $PM_{2.5}$  to climate change[J]. Atmos Environ, 44(32): 3976-3984.
- Tao Y B, Zhong L J, Huang X L, et al, 2011. Acute mortality effects of carbon monoxide in the Pearl River Delta of China[J]. Sci Total Environ, 410-411: 34-40.
- Volná V, Hladký D, 2020. Detailed assessment of the effects of meteorological conditions on  $PM_{10}$  concentrations in the northeastern part of the Czech Republic[J]. Atmosphere, 11(5): 497.
- Wang H, Yin P, Fan W H, et al, 2021. Mortality risk associated with short-term exposure to particulate matter in China: estimating error and implication[J]. Environ Sci Technol, 55(2): 1110-1121.
- Wei J, Li Z Q, Cribb M, et al, 2020. Improved 1km resolution  $PM_{2.5}$  estimates across China using enhanced space-time extremely randomized trees[J]. Atmos Chem Phys, 20(6): 3273-3289.
- Wei J, Li Z Q, Lyapustin A, et al, 2021. Reconstructing 1-km-resolution high-quality  $PM_{2.5}$  data records from 2000 to 2018 in China: spatiotemporal variations and policy implications[J]. Remote Sens Environ, 252: 112136.
- Xiao Q Y, Chang H H, Geng G N, et al, 2018. An ensemble machine-learning model to predict historical  $PM_{2.5}$  concentrations in China from satellite data[J]. Environ Sci Technol, 52(22): 13260-13269.
- Xu H, Guo B, Qian W, et al, 2021. Dietary pattern and long-term effects of particulate matter on blood pressure: a large cross-sectional study in Chinese adults[J]. Hypertension, 78(1): 184-194.
- Xu Y M, Ho H C, Wong M S, et al, 2018. Evaluation of machine learning techniques with multiple remote sensing datasets in estimating monthly concentrations of ground-level  $PM_{2.5}$ [J]. Environ Pollut, 242: 1417-1426.
- Xue T, Zheng Y X, Tong D, et al, 2019. Spatiotemporal continuous estimates of  $PM_{2.5}$  concentrations in China, 2000—2016: a machine learning method with inputs from satellites, chemical transport model, and ground observations[J]. Environ Int, 123: 345-357.
- Xue W H, Zhang J, Zhong C, et al, 2021. Spatiotemporal  $PM_{2.5}$  variations and its response to the industrial structure from 2000 to 2018 in the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. J Clean Prod, 279: 123742.
- Zhang Y Q, Wei J, Shi Y Q, et al, 2021. Early-life exposure to submicron particulate air pollution in relation to asthma development in Chinese preschool children[J]. J Allergy Clin Immunol, 148(3): 771-782. e12.

(本文责编:何晓欢)