

2018–2021 年春季云南空气质量变化规律及境外生物质燃烧影响分析

王莉莉^{1*} 金鑫^{1,2} 刘博雅^{1,2} 赵广娜³ 张磊^{1,2} 王庆鲁^{1,2} 辛金元¹ 王跃思^{1,2}

1 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 黑龙江省气象台, 哈尔滨 150001

摘要 近年云南春季的大气污染问题凸显, 成为打赢蓝天保卫战的关键阻力。本文基于地面监测和卫星遥感数据, 分析了 2018-2021 年春季云南空气质量变化, 并研究了气象要素和境外生物质燃烧对空气质量的影响。结果显示, 近 4 年全省春季超标 262 天 (含 6 天重污染), 占全年 91.3%, 滇南高达 96.8%; 污染集中在 3 月中旬至 4 月中旬, 2019 年污染最重, 2021 年次之, 但优天减少良天增加明显, 2020 年尽管污染物浓度最低, 但发生 6 天重污染; 空间分布表现为滇南远高于滇中和滇北, 且西双版纳最高, 占总超标天数的 27%, 但臭氧 (O₃) 滇西南和滇中最高, 以普洱为首; 超标天的首要污染物仍以 PM_{2.5} 为主, 但 2018 和 2019 年 O₃ 占比略高于 PM_{2.5}。总体 PM_{2.5} 和 O₃ 存在显著的正协同效应, 高臭氧促进 PM_{2.5} 二次生成。PM_{2.5} 和 O₃ 污染发生都与西南风和少降水密切相关, 叠加中高温、中低湿加剧 O₃ 污染发生, 叠加中高温和湿度易导致 PM_{2.5} 超标; 叠加中高温和中等湿度, 易形成 O₃ 和 PM_{2.5} 协同污染; 2019 年污染最重的气象成因是高温少雨。云南污染与东南亚当天及 1-3 天前的火点数均存在显著正相关, 且 PM_{2.5} 和 O₃ 分别与 2 天前和 1 天前的火点相关最强。总体而言, 在西南季风主导的不利气象条件下, 以中南半岛的缅甸为主的境外生物质燃烧是云南空气污染的重要来源, 加剧污染的二次生成。因此, 云南春季污染控制重点为, 构建完善的跨境大气污染防治机制, 在不利气象条件下加强对境外生物质燃烧的提前预警。

关键词 云南 PM_{2.5} 臭氧 气象要素 生物质燃烧

中图分类号: P402

Evolution characteristics of air quality and the impacts of biomass burning in foreign regions in Yunnan province in spring 2018-2021

WANG Lili¹ JIN Xin^{1,2} LIU Boya^{1,2} ZHAO Guangna ZHANG Lei^{1,2} WANG Qinglu^{1,2},
XIN Jinyuan¹ and WANG Yuesi^{1,2}

作者简介 王莉莉, 女, 1982 年出生, 博士, 主要研究方向为大气环境。E-mail: wll@mail.iap.ac.cn

***通讯作者** 王莉莉, E-mail: wll@mail.iap.ac.cn

资助项目 CERN 长期观测数据挖掘和数据年报编制项目 (KFJ-SW-YW043-3)、基金委面上项目 41775162、基金委国际(地区)合作与交流项目 42061130215、英国皇家学会牛顿高级学者基金 NAF\R\201354

Funded by Field Station Basic Research Project of the Chinese Academy of Sciences (KFJ-SW-YW043-3), the National Natural Science Foundation of China (No. 41775162, 42061130215), Royal Society-Newton Advanced Fellowship (NAF\R\201354)

收稿日期: 2022 年 3 月 22 日, **收修定稿:** 2022 年 7 月 22 日

1 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029

2 University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049

3 Meteorological Observatory of Heilongjiang Province, Harbin, 150001

Abstract Air pollution in Yunnan province in spring has been prominent in recent years, which becomes a key resistance for defending the blue sky. Evolution characteristics of air quality and the impacts of meteorological factors and biomass burning in foreign regions on air quality in Yunnan province during spring 2018-2021 were analyzed comprehensively, based on ground monitoring data and satellite remote sensing data. The results revealed that the non-attainment days had reached up to 262 days (including 6 heavy pollution days) in spring in the past four years, accounting for 91.3% for all cities and 96.8% in southern Yunnan of the whole year. For temporal distribution, the pollution was concentrated in mid-March to mid-April, and the heaviest was in 2019, followed by 2021 with decreasing excellent days and increasing fine days significantly. In 2020, the pollutant concentration was the lowest, but heavy pollution occurred for 6 days. For spatial distribution, the pollution in southern Yunnan was far higher than that in central and northern Yunnan, with the highest in Xishuangbanna accounting for 27% of all non-attainment days; but the ozone (O_3) concentration is the highest in southwest and central Yunnan, with the highest in Pu'er. $PM_{2.5}$ was the dominant primary pollutant during 2018-2021, but the proportion of O_3 as the primary pollutant in 2018 and 2019 was a little higher than that of $PM_{2.5}$. Generally, the relationship of $PM_{2.5}$ and O_3 shown a significantly positive synergistic effect, and high O_3 levels promoted secondary generation of $PM_{2.5}$. $PM_{2.5}$ and O_3 pollution was both associated with less precipitation and southwest wind; furthermore, combined with mid-high temperature and mid-low humidity, O_3 pollution easily occurred, and $PM_{2.5}$ pollution was related with mid-high temperature and mid-high humidity, and mid-high temperature and mid humidity caused synergistic pollution of O_3 and $PM_{2.5}$. Highest pollution in 2019 was associated with the highest temperature and the least precipitation. Air pollution in Yunnan was significantly positive correlated with the number of fire points in the day and 1-3 day lags, and the highest correlation for $PM_{2.5}$ and O_3 were 2 day lag and 1 day lag, respectively. Ultimately, in unfavorable meteorological conditions dominated by the southwestern monsoon, biomass burning in foreign regions, especially Myanmar in Indo-china Peninsula is the main source for air pollution in spring in Yunnan, which enhanced the secondary generation of air pollution. Thus, these results indicated that the focus of spring pollution control in Yunnan is to establish a perfect cross-border air pollution prevention and control mechanism and to strengthen the early warning of biomass burning in foreign regions under unfavorable weather conditions.

Key words Yunnan, $PM_{2.5}$, O_3 , Meteorological factors, Biomass burning

1 引言

云南地处低纬度的云贵高原, 得益于旅游为主环境资源、特殊的气候条件和大气污染管控措施的执行, 空气质量较好, 一直位居全国前列。从2013年《大气污染防治行动计划》到2018年又继续执行《打赢蓝天保卫战三年行动计划》, 云南省16城市平均优良天数比例继续提升, 基于《环境空气质量标准》(GB3095-2012)标准, 优良天数的比例从2015-2017年的97.3%~98.3%上升为2018-2020年的98.1%~98.9%, 16个城市年均值均达到国家空气质量二级标准 (<http://sthjt.yn.gov.cn/hjzl/hjzkgb/>)。但最近几年春季污染问题凸现, 2015-2019年春季滇北和滇中大部分城市 $PM_{2.5}$ 和臭氧(O_3)双升, 而滇西和滇东出现 $PM_{2.5}$ 下降但 O_3 升高(Zhao et al., 2020), 急需明确春季云南省空气质量的变化规律和成因, 加强 $PM_{2.5}$ 和 O_3 协同控制。

云南春季空气污染事件除了与本地排放有关, 境外生物质燃烧的污染物输送影响显著(吴润等, 2004, 张玉洽等, 2016)。2016-2017的模拟结果显示, 3-4月境外生物质燃烧对云南O₃贡献高达10ppb(Lu et al., 2019), 2020年3月底至4月初的一次污染过程分析显示, 境外生物质燃烧输入对云南地区PM_{2.5}贡献最大, 对滇南城市的贡献高达59%-80%(潘春梅 2021)。东南亚区域热带森林覆盖广泛, 且是大米主产区, 因此生物质燃烧现象普遍, 森林和灌木丛燃烧占绝大部分, 农业秸秆焚烧也占一定比例, 受降雨和作物收获季节影响, 火点主要集中在1-4月(Yin et al., 2019), 且主要集中在中南半岛(Yin, 2020)。生物质燃烧释放大量的VOCs、NO_x等气态前体物, 以及颗粒物(Koppmann et al., 2005, Wang et al., 2020, Sha et al., 2021), 在特殊的气象条件和风场作用下(Huang et al., 2020), 东南亚尤其是中南半岛的生物质燃烧是下游地区大气污染的主要来源(Lee et al., 2018, Marvin et al., 2021)。

此外, 不利气象条件也是云南省发生空气污染的重要客观外因。11月至次年4月的冬春季为旱季, 降水偏少, 不利于污染湿清除。研究指出温度25~35℃, 湿度20%~40%, 风速0~5 m/s及西南风向容易出现臭氧超标(潘春梅等, 2020)。云南省2015年3月18-22日发生的大范围颗粒物污染, “干性”弱南支槽活动, 降水偏少, 多大风的气候背景, 以及近地边界层逆温层结的不利气象条件, 叠加本地排放和境外污染输送共同导致(郭荣芬等, 2017)。西双版纳春季细颗粒物污染的主因为不利气候条件下的生物质焚烧境外输入(潘春梅 2021)。

因此, 本文全面分析云南省16个地市2018—2021年春季空气质量的时空变化, 以及PM_{2.5}和O₃的协同关系, 研究气象要素和境外生物质燃烧对空气质量的影响, 以期对云南省大气污染协同防控提供科学支撑。

2 数据资料

该研究中云南省16个地市2018—2021年污染物数据来源于中国环境监测总站 (<https://air.cnemc.cn:18007/>), 包括PM_{2.5}、PM₁₀、O₃、SO₂、NO₂和CO, 各城市均值由所有监测站点数据计算得到。PM_{2.5}超标日定义为日均值大于75 μg/m³, O₃超标日为O₃日8小时滑动平均最大值(MDA8 O₃)大于160 μg/m³, 本文所提到的O₃均指MDA8 O₃。气象数据选取8个城市, 分别为德宏、保山、昆明、临沧、普洱、玉溪、红河和西双版纳, 从中国气象局和中国生态系统研究网络(CERN)获取。卫星数据为MODIS C6.1版本火点数据 (https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/active_fire/), 分辨率为星下点1 km, 气溶胶光学厚度(AOD)为MODIS C61产品, 分辨率为1°, 甲醛柱浓度为OMI卫星的OMHCHOd V003产品, 分辨率为0.1°。

基于地理位置将云南省分为5个区域, 分别是滇中(昆明、玉溪、楚雄)、滇东北(昭通、曲靖)、滇东南(红河、文山)、滇西南(保山、德宏、普洱、临沧、西双版纳)、滇西北(迪庆、大理、丽江、怒江)。为研究区域传输对云南空气质量的影响, 利用HYSPLIT轨迹模式计算了72小时的后向轨迹 (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>), 气象场选取NCEP GDAS。

3 结果与讨论

3.1 云南空气质量演变特征

云南地区2018-2021年的超标天时空分布如图1a1和图1a2所示。从空间上看, 超标天主要集中在滇南地区, 尤其是滇西南, 滇北地区超标天数较少, 超标天呈由南至北依次减少的趋势。最南部的西双版纳的总超标天数最多达到了72天, 其次为普洱、红河、德宏和临沧, 滇北的迪庆和丽江则没有发生超标事件。超标天主要发生在春季, 共262天超标, 占全年超标天的91.3%, 滇西南和滇东南共计209天, 在全年中占比高达96.8%。西双版纳春季超标天最高, 为71天, 此外, 怒江、保山、德宏、临沧、大理、楚雄和普洱的超标天全部发生在春季。

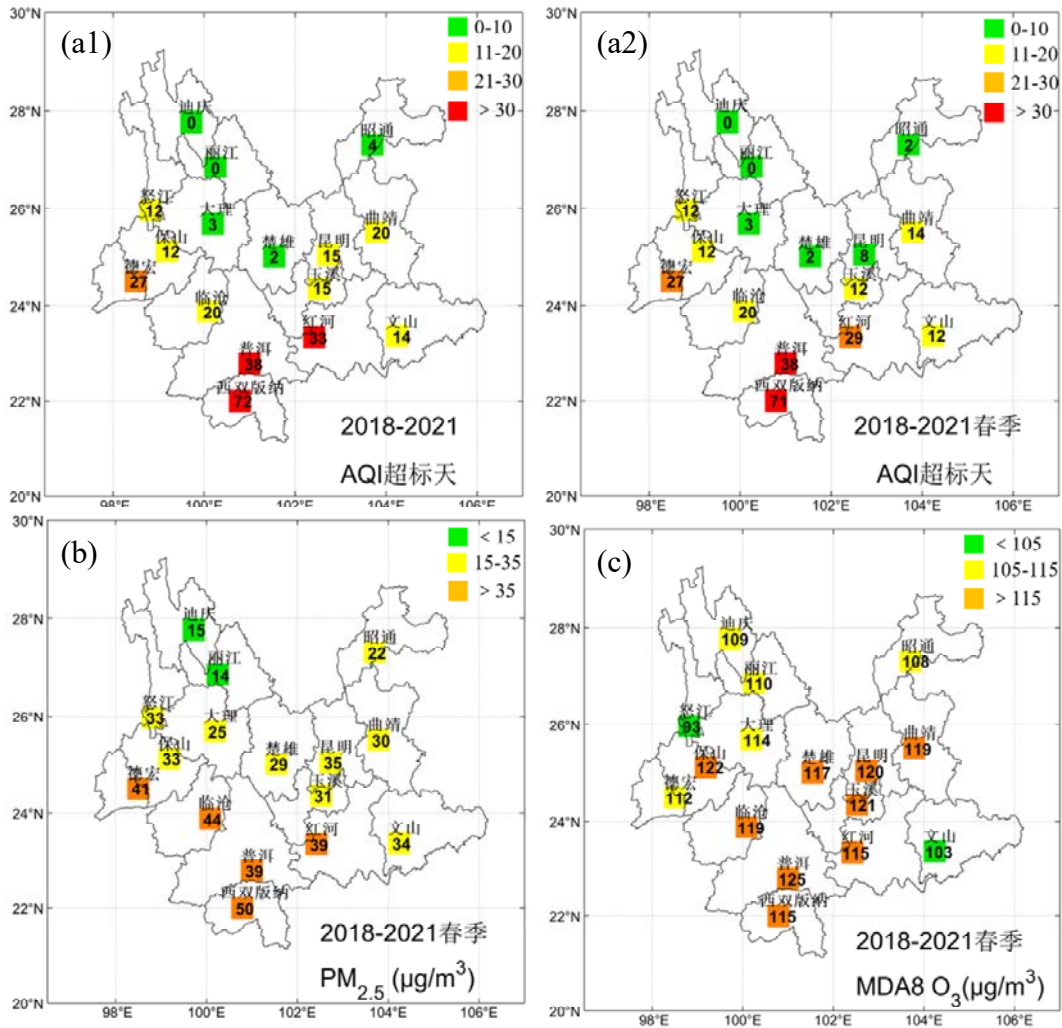


图1 云南省2018-2021年(a1)超标天、(a2)春季超标天、(b)春季PM_{2.5}浓度以及(c)春季MDA8 O₃浓度的空间分布
 Fig.1 Spatial distribution of (a1) non-attainment days, (a2) non-attainment days in spring, (b) PM_{2.5} concentration in spring and (c) MDA8 O₃ concentration in spring from 2018 to 2021 in Yunnan Province

云南地区2018-2021年春季的PM_{2.5}和MDA8 O₃空间浓度分布如图1b和图1c所示。高PM_{2.5}浓度出现在滇南的西双版纳、临沧、德宏、普洱和红河(50µg/m³>44µg/m³>41µg/m³>39µg/m³=39µg/m³)，迪庆(15µg/m³)和丽江(14µg/m³)的PM_{2.5}浓度则最低。整体PM_{2.5}污染空间分布表现为滇西南(41µg/m³)>滇东南(37 µg/m³)>滇中(32 µg/m³)>滇东北(26 µg/m³)>滇西北(22 µg/m³)。不同于超标天和PM_{2.5}浓度的空间分布情况，高浓度臭氧主要集中在滇中(保山、楚雄、昆明、玉溪、曲靖)和滇南(临沧、普洱、红河、西双版纳)，其中普洱市的臭氧浓度最高为125 µg/m³。云南地区边缘城市怒江(93 µg/m³)和文山(103 µg/m³)的臭氧浓度值则最低。整体而言，O₃浓度滇西南和滇中最高(118 µg/m³)，滇东北次之(113 µg/m³)，滇东南和滇东北最低(108 µg/m³)。

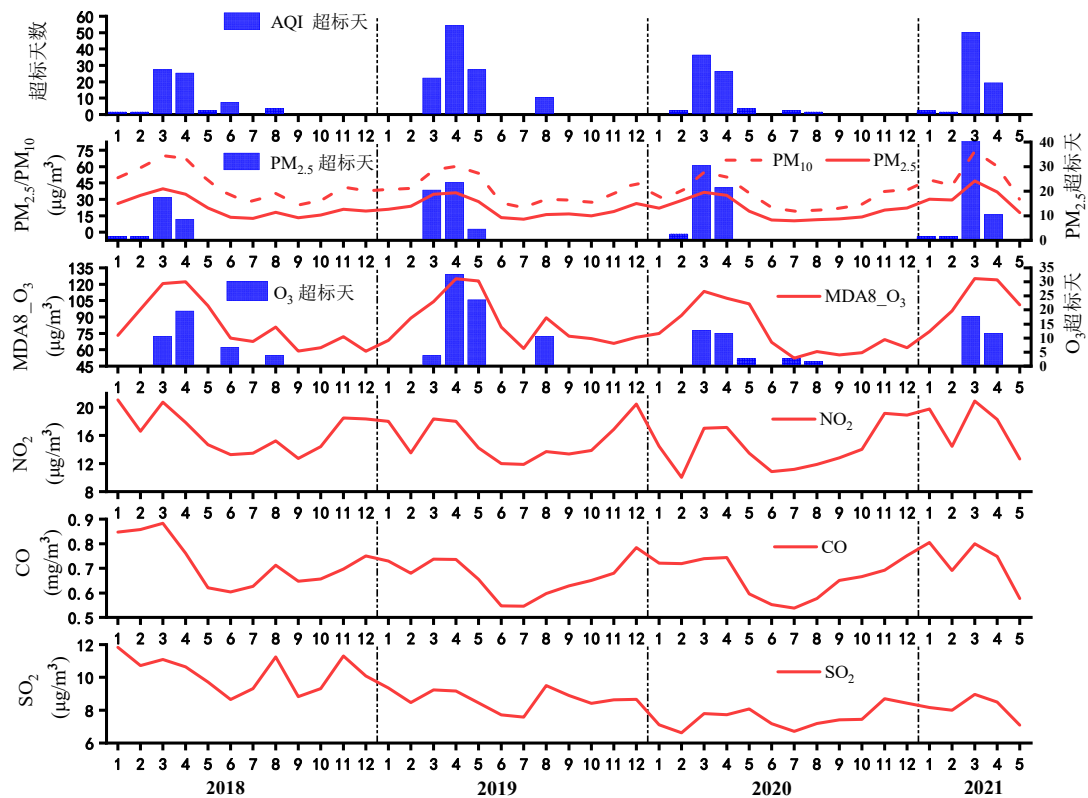


图2 云南省 2018-2021 年大气污染物浓度和超标天的逐月变化图

Fig.2 Monthly variation of atmospheric pollutants and non-attainment days in Yunnan Province from 2018 to 2021

表 1 2018-2021 年春季云南省大气污染和气象要素统计结果

Table 1 Statistical results of atmospheric pollutants and meteorological factors in spring during 2018-2021 in Yunnan province

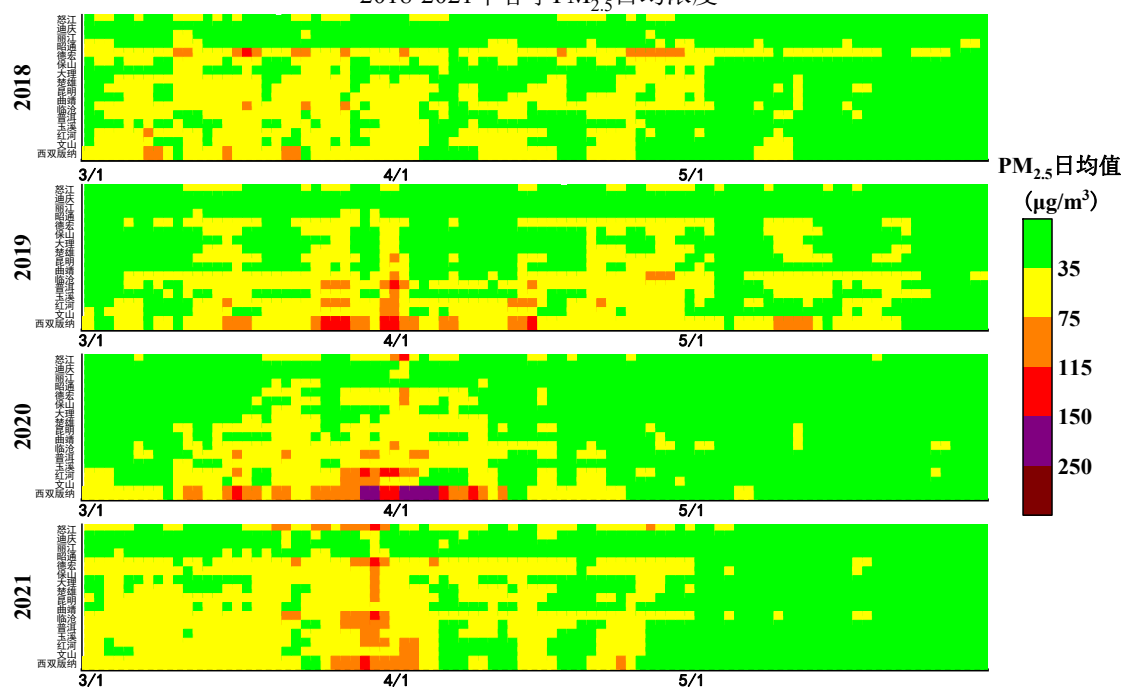
	超标 天数*	PM2.5 [#] µg/m ³	MDA_O3 [#] µg/m ³	温度 °C	相对湿度 %	风速 m/s	降水 mm	西南风 频次%
2018-03	46	48/40	128/121	17.2	61	1.5	1.2	60.5
2018-04	(24)	41/35	128/122	19.8	62	1.5	1.2	60.8
2018-05		25/22	101/100	21.7	70	1.4	3.7	61.3
2019-03	94	44/35	111/104	17.4	59	1.7	0.5	68.1
2019-04	(50)	47/36	133/125	21.5	54	1.6	0.6	67.1
2019-05		35/28	129/123	24.5	54	1.6	0.9	61.3
2020-03	60	46/36	120/113	18.7	52	2.3	0.3	71.0
2020-04	(11)	41/34	112/107	19.2	60	2.0	2.2	55.8
2020-05		21/19	103/102	23.2	61	1.8	1.9	62.9
2021-03	62	56/47	131/125	18.4	51	2.4	0.2	78.6
2021-04	(15)	44/37	127/124	20.5	59	2.1	1.5	62.9
2021-05		20/18	99/101	22.7	66	2.0	2.4	64.1

*为每年春季总的超标天数，括号内为超标时臭氧为首要污染物的天数；[#]表示/的左侧为 8 个有气象数据的城市均值，右侧为全省浓度均值；西南风定义为风向在 180-270°。

云南 2018-2021 年大气污染物浓度和超标天的月变化如图 2 所示。云南超标天主要集中在 3-5 月，PM_{2.5} 超标天只出现在春季的 3-4 月，而 AQI 和 O₃ 的超标天除了出现在春季(3-5 月)外还出现在夏季(6-8 月)。超标天的首要污染物是 PM_{2.5} 和 O₃，PM_{2.5} 和 O₃ 的高浓度值也同它们出现超标天事件的月份一致，主要出现在春季的 3-4 月，PM_{2.5} 和 O₃ 协同污染都发生在春季。总体而言，如表 1 所示，2018-2021 年春季云南超标天数总体呈上升趋势，其中 2019 年污染最重，超标天数最多（94 天），2020 和 2021 超标天相当，为 60 天和 62 天，2018 年污染天最少，为 45 天；超标天中 PM_{2.5} 仍为最主要的首要污染物，4 年平均约 60%，但年度超标天的首要污染物也有不同，2018 和 2019 主要为 O₃，占比 53%，而 2020 和 2021 为 PM_{2.5}，占比高达 82%和 76%。

如图 2 所示，在污染物浓度季节变化上，一次污染物方面，NO₂ 和 CO 的月浓度变化具有一致性，1-4 月最高，5-7 月最低，2018-2021 年的最高月浓度分别达到了 21 μg/m³ 和 0.88 mg/m³，2018-2020 年浓度逐年降低，但 2021 年又反弹增加；SO₂ 的季节变化与 NO₂ 和 CO 略有不同，除了 1-4 月高值外，11-12 月以及 8 月浓度值都较高，最高月浓度值出现在 2018 年 1 月(12 μg/m³)，但该污染物 2018-2021 年呈明显的下降趋势。上述一次污染变化主要因为 SO₂ 主要来自工业燃煤、柴油汽车等，而 NO_x 和 CO 除了上述来源，机动车排放、生物质燃烧贡献都较大，所以 SO₂ 下降显示出云南省清洁空气行动计划成效显著，但因为境外生物质燃烧影响，导致 NO_x 和 CO 的减排效果不显著。细颗粒物 PM_{2.5} 和粗颗粒物 PM₁₀ 具有相同的浓度变化趋势，最高浓度值出现在春季 3-4 月，其中 2021 年的 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度分别达到了 47 μg/m³ 和 74 μg/m³；MDA8 O₃ 与颗粒物类似，主要春季（3-4）达到峰值，其他月份浓度较低，表现为春季>夏季>冬季>秋季的显著季节变化特征，2018-2021 年的最高 MDA8 O₃ 浓度出现在 2019 年 4 月，为 125 μg/m³。

2018-2021年春季PM_{2.5}日均浓度



注：从上至下的城市依次为：怒江、迪庆、丽江、昭通、德宏、保山、大理、楚雄、昆明、曲靖、临沧、普洱、玉溪、红河、文山、西双版纳，为云南省 16 市由北至南的空间分布顺序

图 3. 2018-2021 年春季云南省 16 个地市 PM_{2.5} 浓度逐日变化

Fig.3 The daily variation of PM_{2.5} concentration in spring between 2018 and 2021 in 16 cities of Yunnan Province

为进一步分析云南省主要污染 $PM_{2.5}$ 和 O_3 在春季的演变规律，绘制了 16 个地市 2018-2021 年春季的 $PM_{2.5}$ 和 $MDA8_O_3$ 的日历图（图 3&4）。从空间上看，高 $PM_{2.5}$ 浓度主要出现在滇南，区域相对集中，发生超标频次最高的城市是西双版纳，而高 $MDA8_O_3$ 浓度则在滇南和滇中，相比 $PM_{2.5}$ 其分布较为分散且覆盖区域更多；从时间上看，污染主要发生在 3 月中旬至 4 月中旬，但在 2019 年臭氧在 4 月中旬到 5 月仍频繁出现超标， $PM_{2.5}$ 在 2020 年 3 月低到 4 月初出现频繁的区域污染，且导致重度污染发生，全部发生在西双版纳。 $PM_{2.5}$ 污染和 O_3 污染相比较，前者比后者的污染频次更高， $PM_{2.5}$ 超标天为 168 天，臭氧为 134 天，并且 $PM_{2.5}$ 导致的污染程度更重，轻、中度和重度污染都有发生，但臭氧仅发生轻度和中度污染。在春季 262 个超标天中，轻度污染的天数最多（92%），中度和重度污染天数分别为 18 天和 6 天，首要污染物在轻度污染天中 $PM_{2.5}$ 和 O_3 分别为 54% 和 46%，但在重和中度污染时，首要污染物均为 $PM_{2.5}$ 。不同城市的首要污染物也有差异，除迪庆、丽江没有超标天外，以臭氧为主的有，普洱（23 天臭氧为首要，15 天是 $PM_{2.5}$ 为首要）、曲靖（14 天，0）、玉溪（9，2）、保山（10 天，2 天）、昆明（6 天，2 天）、昭通（2 天、0），其他城市 $PM_{2.5}$ 作为首要污染物的超标天远高于臭氧，主要有西双版纳（62 天、9 天）、红河（21 天，8 天）、德宏（20 天，6 天）和临沧（14 天，6 天）。

整体而言，如图 3、图 4 和表 1 所示，2019 年污染最重，超标天高达 94 天， $PM_{2.5}$ 和 O_3 分别为 33 和 117 $\mu g/m^3$ ，其中滇南 $PM_{2.5}$ 高达 43 $\mu g/m^3$ ，滇中 O_3 高达 122 $\mu g/m^3$ ；其次为 2021 年，虽然仅有 62 天超标，但因为优天减少良天增加， $PM_{2.5}$ 和 O_3 浓度与 2019 相当；2020 年污染物浓度最低，主要因为优天比例最高，但超标天与 2021 相当，且出现 6 天的重污染；2018 年尽管超标天数最少，但污染物浓度不是最低，主要与当年良天比例较多有关。

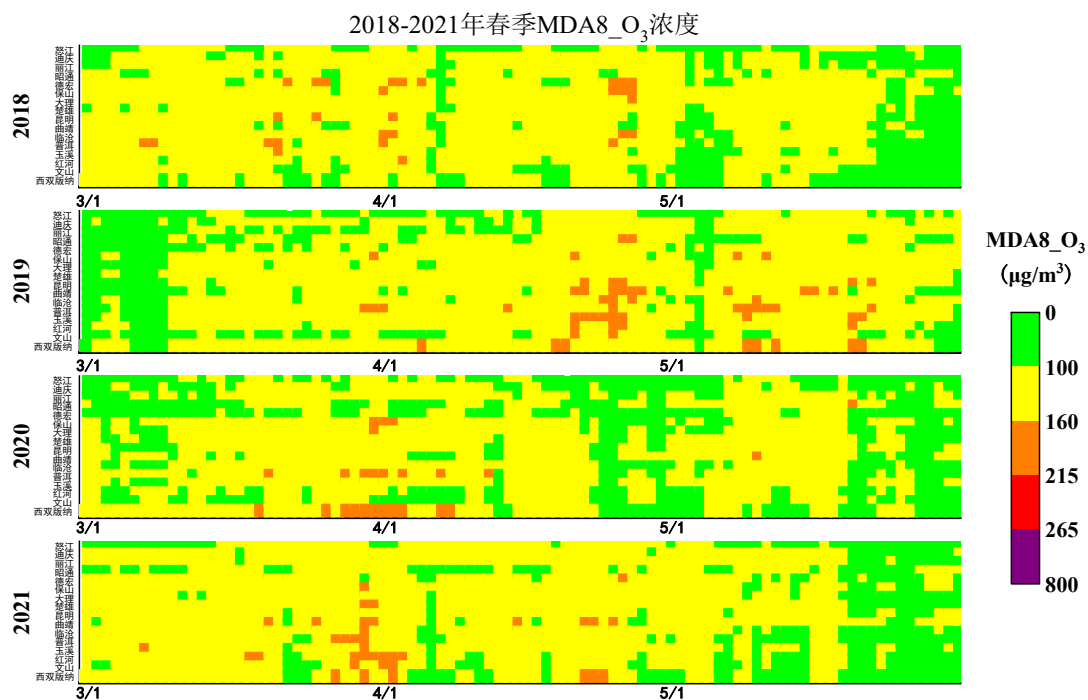


图 4 同图 3，但为 $MDA8_O_3$
Fig.4 Same as Fig.3, but for $MDA8_O_3$

云南省污染主要表现为二次污染特征， $PM_{2.5}/PM_{10}$ 的比值平均为 0.58，污染天时两者比值为 0.68； $PM_{2.5}$ 和 O_3 同时超标有 40 天，占超标天的 15%，此时 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 高达 0.71，集

中在滇西南的西双版纳、普洱、德宏，占 97.5%。如图 5 所示，PM_{2.5}和臭氧具有明显的协同污染特征，PM_{2.5}和 O₃为显著正相关，相关系数为 0.5，尤其空气质量指数大于 150 时，臭氧几乎都超标，大气氧化性更强，促进颗粒物二次生成，PM_{2.5}占 PM₁₀的比例高达 0.9，且都发生在西双版纳。

3.2 空气污染与气象要素的关系

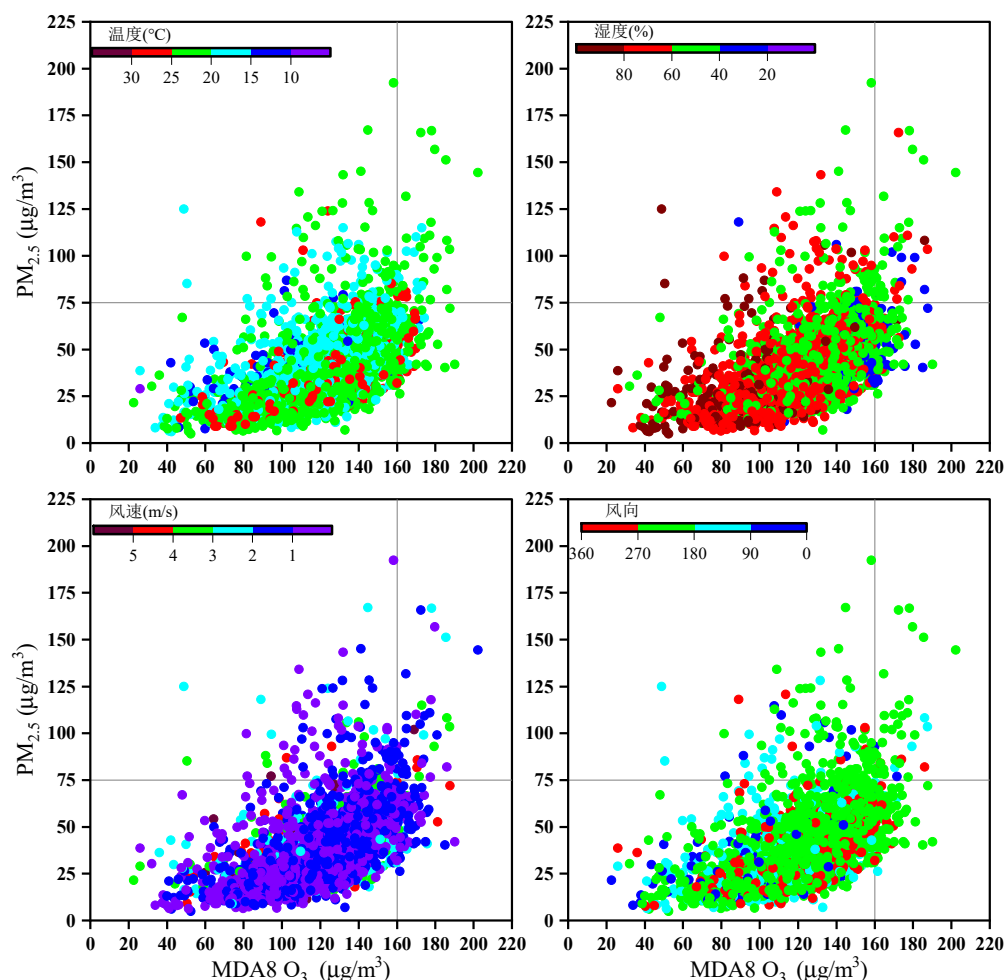


图 5 云南省 8 个城市不同气象要素下 PM_{2.5}和 O₃散点图。8 个城市分别为德宏、保山、昆明、临沧、普洱、玉溪、红河和西双版纳

Fig. 5 Scatter plots of PM_{2.5}和 O₃ including 8 cites in different meteorological factors

2018-2021 年春季云南省气象要素统计结果（表 1）显示，春季云南主要受西南季风影响，西南风频次为 55.8~78.1%，且 3 月最高；春季是云南的干季，降水相对较少，且从 3 到 5 月降水逐渐增加。如图 5 显示的 PM_{2.5}和 O₃和不同气象要素的关系，O₃污染发生主要气象条件为中高温，中低湿，少降水和西南风加剧，而 PM_{2.5}超标主要与中高温，中高湿，少降水和西南风有关；O₃和 PM_{2.5}协同污染主要气象条件为温度 22℃（15~27℃），湿度 52%（28%~87%），西南风 1.9 m/s（0~5 m/s）。2019 年污染最严重，尤其臭氧超标频次较多的主要气象原因是，该年受厄尔尼诺现象影响，为气候异常年，温度最高（17.4~24.5℃）、湿度较低（54~59%）、降水最少（4 和 5 月同期最低）、西南风频次较高，这样的气象条件利于臭氧光化学反应。2020 年也属于气候异常年，尤其 3 月 16~4 月 10 日的高污染事件，日均温度介于 18.1~24.9℃，日最高温度介于 26.8~31.5℃，相对湿度介于 47%~69%，风速 0.3~

2.3 m/s, 高温、中等湿度和西南风主控, 即利于周边境外生物质燃烧的污染输送, 又加剧污染的二次生成, $PM_{2.5}$ 占 PM_{10} 的比例为 0.78, 该污染事件在 4 月 10 日降水后污染才得以清除。2018 年在 4 年中环境空气质量最好, 为典型的丰水年, 气温为 4 年中最低, 降水量丰沛又平均, 起到很好的湿清除作用, 污染天数最低。

3.3 空气污染与境外生物质燃烧的关系

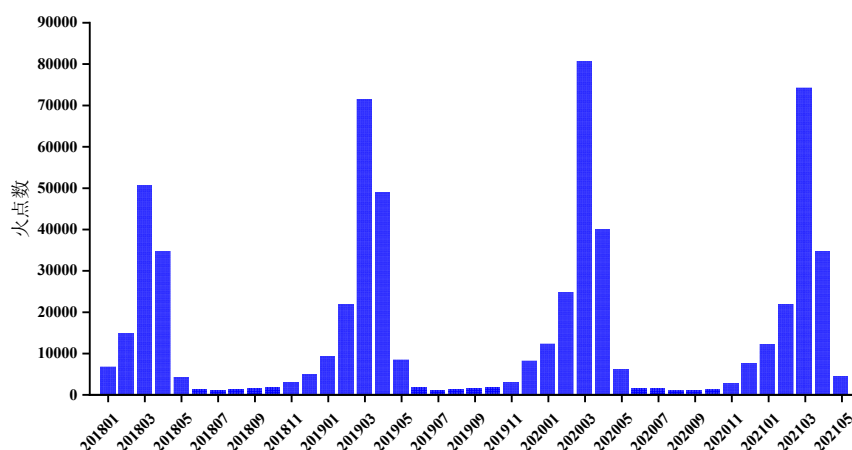


图 6 2018-2021 云南省及周边 MODIS 火点数目逐月分布图(经纬度范围 15-30°N, 85-110°E)
Fig.6 Monthly distribution of MODIS fire counts in Yunnan Province and its surroundings from 2018 to 2021 (Longitude and Latitude range: 15-30 °N, 85-110 °E)

覆盖云南和东南亚中南半岛、经纬度范围在 15-30°N, 85-110°E 的火点数目和分布图见图 6 和图 7。火点较高的月份主要集中在 1-5 月、11-12 月, 最高的季节为春季, 并且 3 月最多、4 月次之、5 月最少。总体 3 和 4 月份的火点数目明显高于其他月份, 其中 2020 年 3 月的火点数目更是超过了 8000, 这与云南省的逐月空气污染变化较为一致, 如 2019 年春季空气污染最重, 对应火点数据也最高, 而 2020 年 3 月底到 4 月初的重污染事件, 也与这期间火点异常高密切相关。火点的季节变化特征也主要与雨季的分布密切相关, 春季为干季, 降水少, 温度高, 容易引发森林火灾, 同时这一季节又是作物收获季, 农田的秸秆焚烧也较为普遍(Yin et al., 2019, Yin 2020), 2019 年春季最高的火点与该年气候异常(高温少雨)密切相关。以影响云南最显著的 3 月中旬到 4 月中旬的火点空间分布进行分析, 结果显示, 与中国南部比邻的国家, 尤其是中南半岛的缅甸和老挝等国家, 其火点数远高于我国云南和周边省市, 尤其 2019 和 2020 年临近云南的缅甸东部以及老挝北部的火点异常多, 是造成云南尤其是滇南的空气污染的主要排放来源。

生物质燃烧排放大量的以黑碳和有机物为主的颗粒物, 以及以 CO 、 NO_x 和 $VOCs$ 为主的气态污染物(Koppmann et al., 2005, Reid et al., 2005, Reid et al., 2005), 并且生物质燃烧排放 $VOCs$ 中, 对臭氧生成潜势贡献较大的醛类和芳香烃占比很高 (Sha et al., 2021), 易于臭氧生成, 从而导致传输过程中气团具有较高的氧化性, 也加剧了颗粒物的二次转化生成, 导致臭氧和 $PM_{2.5}$ 具有正的协同效应。如图 7b 和 7c 所示, 2018-2021 年 MODIS 卫星的气溶胶光学厚度 (AOD) 分布与 OMI HCHO 分布与火点空间分布有一定的一致性, 高值主要出现在泰国、老挝、越南、缅甸东部以及中国广西, 不一致之处, 主要因为 AOD 和 HCHO 除了火排放贡献外, 也与当地其他人为污染排放密切相关, 但总体而言中南半岛国家的污染远高

于云南。整体而言，2020 年的空气污染最为严重，2019 和 2021 年的污染状况相差不大，这也是 2020 年云南出现重污染天气的主要原因之一。

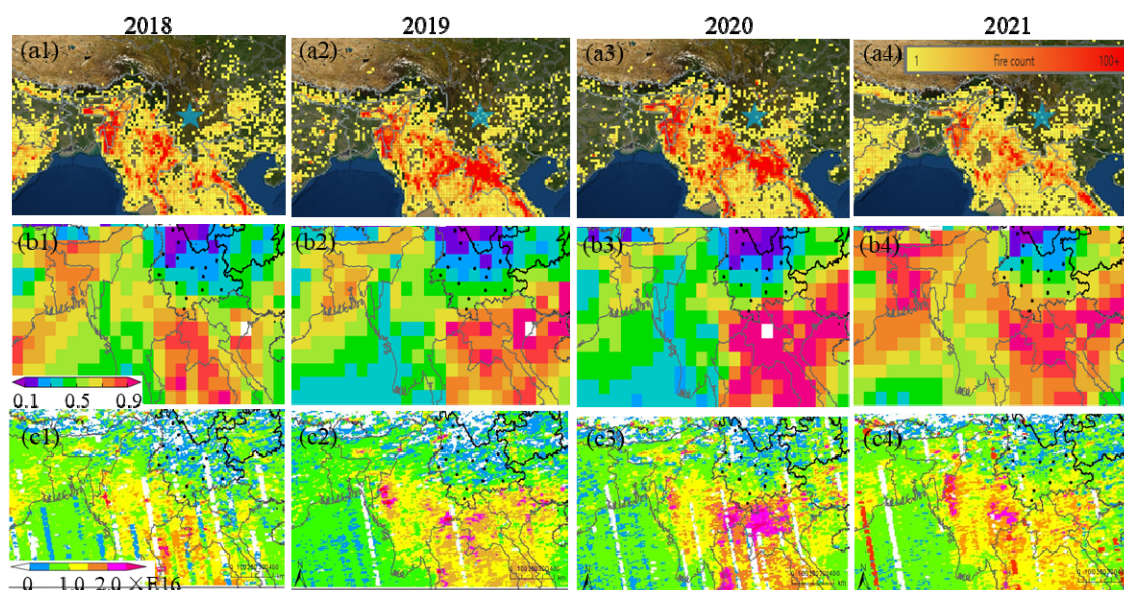


图 7. 2018-2021 年 3 月中旬至 4 月中旬(a)MODIS 火点分布图(区域范围 15-30°N, 85-110°E, 五角星为云南省), (b) MODIS 气溶胶光学厚度 (AOD) 空间分布, (c) OMI HCHO 空间分布

Fig.7 Spatial distribution of (a) MODIS fire counts (Regional range: 15-30°N, 85-110°E, five-pointed star is Yunnan Province), (b) MODIS AOD, (c) OMI HCHO during mid-March and mid-April from 2018 to 2021

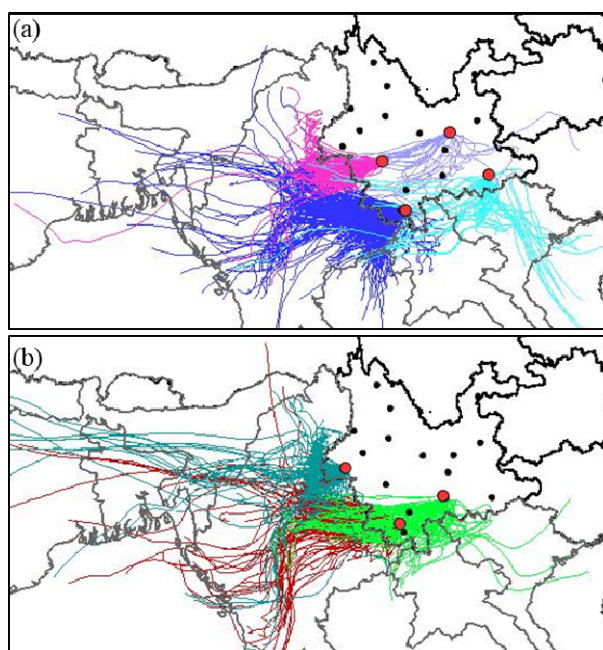


图 8 云南省 7 个城市春季污染日的 72 小时后向轨迹分布图

Fig.8 72 hour backward trajectory distribution of spring pollution days in 7 cities of Yunnan Province

分析主要污染城市在超标日的 72 h 后向轨迹发现, 滇西南 4 个城市的后向轨迹都有经过火点数目较多的缅甸东部, 尤其是污染较高城市如西双版纳, 主要经过缅甸东部, 还有泰国和老挝北部, 其轨迹与高火点区域完全吻合, 德宏的后向轨迹线最远可延申至印度东部地区, 此处火点数目也较高; 滇东南红河的后向轨迹主要经过云南南部和老挝北部, 后者火点也较多; 而昆明和滇东南文山的后向轨迹分别主要经过云南省内地区和越南, 这两地火点较少。相关分析发现污染物浓度与火点个数显著正相关, 全省和滇南的 $PM_{2.5}$ 与火点相关系数为 0.62 和 0.66, 臭氧则为 0.37 和 0.47, 南部城市相关性更强。此外, 由于生物质燃烧排放的污染传输到云南有一定的时间滞后, 所以统计污染物浓度与滞后几天的火点个数的关系, 发现滞后 1-3 天的相关性较强, $PM_{2.5}$ 为 0.69~0.72(全省)和 0.73~0.76(滇南), O_3 为 0.32~0.39(全省)和 0.39~0.48(滇南), 且 $PM_{2.5}$ 与滞后 2 天的火点相关性最高, 而 O_3 相关性最高为滞后 1 天。因此, 缅甸东部和老挝北部等的中南半岛境外国家生物质燃烧输送是云南尤其是滇南城市污染的主要来源。总体而言, 在西南季风主导下, 境外尤其是中南半岛的生物质燃烧是云南空气污染的重要来源, 在不利气象条件下加剧污染的二次生成。所以, 云南春季污染控制重点为, 在不利气象条件下加强对境外生物质燃烧的提前预警, 构建完善的跨境大气污染应急预案体系和防控机制。

4 结论

通过对 2018-2021 年春季云南省 16 个地市空气质量演变特征、气象成因和境外生物质燃烧影响分析, 本文得到如下结论:

(1) 2018-2021 年全省春季超标 262 天, 占全年 91.3%, 以西双版纳为首的滇南最多; 超标天的首要污染物 2018 和 2019 年 O_3 为主 (53%), 2020 和 2021 年则为 $PM_{2.5}$ (82%和 76%)。

(2) 2019 年污染最重 (94 天超标), 2021 年超标天下降, 但污染浓度与 2019 相当; 2020 年污染物浓度最低, 但出现 6 天重污染; 污染主要发生在 3 月中旬至 4 月中旬。

(3) $PM_{2.5}$ 污染空间分布为滇西南>滇东南>滇中>滇东北>滇西北, 但 O_3 浓度滇西南和滇中最高。 $PM_{2.5}$ 和 O_3 正的协同效应显著, 高臭氧加剧粒子二次生成。

(4) 污染的不利气象条件都与少降水和西南风有关, O_3 污染主要中高温, 中低湿, 而 $PM_{2.5}$ 超标主要中高温度和湿度; 两者协同污染为温度 15~27°C, 湿度 28%~87%, 西南风 0~5m/s。

(5) 近年云南对境内污染管控效果显著, 但以中南半岛为主的境外生物质燃烧叠加不利气象, 导致污染年际波动较大, 境外火点传输存在 1-3 天的滞后响应。

参考文献 (References)

- 郭荣芬, 黎成超, 邓聪, 等, 2017.“2015·3·22”云南大范围空气污染事件气象成因分析 [J]. 灾害学, 32(03): 91-95. Guo Rongfen, Li Chengchao, Deng, Cong, et al. 2017. Meteorological causes for a wide range of air pollution in Yunnan Province on March 22, 2015 [J]. Journal of Catastrophology, 32(03): 91-95.
- Huang H Y, Wang S H, Huang W X, et al. 2020. Influence of synoptic dynamic meteorology on the long range transport of Indochina biomass burning aerosols [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 125:3, e2019JD031260. doi:10.1029/2019JD031260.
- Koppmann R, Czapiewski K V, Reid J S. 2005. A review of biomass burning emissions, part I: gaseous emissions of carbon monoxide, methane, volatile organic compounds, and nitrogen containing compounds [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 5(5): 10455-10516.

- Lee H H, Iraqui O, Gu Y, et al. 2018. Impacts of air pollutants from fire and non-fire emissions on the regional air quality in Southeast Asia [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18:6141-6156.
- Lu X, Zhang L, Chen Y, et al. 2019. Exploring 2016-2017 surface ozone pollution over China: source contributions and meteorological influences [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19:8339-8361.
- Marvin M R, Palmer P I, Latter B G, et al. 2021. Photochemical environment over Southeast Asia primed for hazardous ozone levels with influx of nitrogen oxides from seasonal biomass burning [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21:1917-1935.
- 潘春梅, 2021. 中南半岛春季生物质燃烧对云南省空气质量影响研究[M]. 云南师范大学硕士论文, 70pp. Pan Chunmei. 2021. Study on the impact of biomass burning on air quality in Yunnan Province in spring over Indo-China Peninsula. Master dissertation (in Chinese), Yunnan Normal University, 70pp.
- 潘春梅, 朱翔, 王健, 等, 2020. 云南省 2019 年臭氧污染特征及影响因素研究 [J]. *环境科学与技术*, 43(10): 156-164. Pan Chunmei, Zhu Xiang, Wang Jian, et al. 2020. Characteristics and influencing factors of ozone pollution in Yunnan Province in 2019 [J]. *Environmental Science & Technology*, 43(10): 156-164.
- Reid J S, Eck T F, Christopher S A, et al. 2005b. A review of biomass burning emissions part III: intensive optical properties of biomass burning particles. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5(3): 827-849.
- Reid J, Koppmann R, Eck T, et al. 2005a. A review of biomass burning emissions part II: intensive physical properties of biomass burning particles. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5(3): 799-825.
- Sha Q, Zhu M, Huang H, et al. 2021. A newly integrated dataset of volatile organic compounds (VOCs) source profiles and implications for the future development of VOCs profiles in China [J]. *Science of The Total Environment*, 793:148348. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.148348.
- Wang Q, Wang L, Li X, et al. 2020. Emission characteristics of size distribution, chemical composition and light absorption of particles from field-scale crop residue burning in Northeast China [J]. *Science of The Total Environment*, 710: 136304. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.136304.
- 吴润, 蒋维楣, 陈新梅, 等, 2004. 生物质燃烧对东南亚及中国南方对流层臭氧含量影响的模拟研究 [J]. *环境科学*, 25:2, 1-6. Wu Jian, Jiang Weimei, Chen Xinmei, et al. 2004. Simulation of Effects to Tropospheric Ozone over South East Asia and South China from Biomass Burning [J]. *Environmental Science*, 25:2, 1-6.
- Yin S, 2020. Biomass burning spatiotemporal variations over South and Southeast Asia [J]. *Environment International*, 145:106153. doi:10.1016/j.envint.2020.106153.
- Yin S, Wang X, Zhang X, et al. 2019. Influence of biomass burning on local air pollution in mainland Southeast Asia from 2001 to 2016 [J]. *Environmental Pollution*, 254:112949. doi:10.1016/j.envpol.2019.07.117.
- 张玉洽, 杨迎春, 李杰, 等, 2016. 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*, 29:7, 952-962. Zhang Yuqia, Yang Yingchun, Li Jie, et al. 2016. Modeling the impacts of biomass burning in southeast Asia on PM_{2.5} over China in spring [J]. *Research of Environmental Sciences*, 29:7, 952-962.
- Zhao S, Yin D, Yu Y, et al. 2020. PM_{2.5} and O₃ pollution during 2015-2019 over 367 Chinese cities: Spatiotemporal variations, meteorological and topographical impacts [J]. *Environmental Pollution*, 264:114694. doi:10.1016/j.envpol.2020.114694.

