

文章编号:2096 - 5389(2022)05 - 0010 - 09

2020 年西双版纳持续重霾天气成因和来源分析

字 冉¹, 孔 震¹, 明 蕊², 张启悦¹, 高婷婷¹, 王 利¹

(1. 云南省西双版纳傣族自治州气象局, 云南 景洪 666100; 2. 云南大学地球科学学院, 云南 昆明 650504)

摘 要:利用常规气象观测资料、环境监测站点的空气污染物浓度监测资料、欧洲中心(ECMWF)提供的 ERA-5 逐时 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 再分析资料和 NOAA 研发的 Hysplit 后向轨迹模式, 分析了 2020 年 3 月 29 日—4 月 5 日低纬高原的西双版纳地区持续性重度霾空气污染事件的特征、气象成因和污染物颗粒主要来源。结果表明:①重度霾污染期间, AQI 值及 $PM_{2.5}$ 浓度值有显著日变化特征, 表现为白天低、夜间高。②冷空气势力偏弱, 脊前暖平流使中低层大气增温, 有利于西双版纳地区大气层结的稳定, 无明显水汽输送带, 整个过程空气湿度较低, 连续 8 d 重度霾污染并未出现传统上高湿的气象霾特征。稳定的大气层结和逆温层削弱了大气在垂直方向上的对流交换。③受均压场控制, 地面和低空风速小, 较低的混合层厚度和较小的通风系数等共同作用, 使得污染物颗粒在水平和垂直方向上扩散受到抑制, 导致污染物颗粒聚集。④各污染物浓度值与 MODIS/Terra 卫星反演东南亚境外火源点数有显著相关性, 其中火源点个数与 AQI 正相关高达 0.5。⑤Hysplit 后向轨迹模式表明此次重霾污染过程中颗粒物的可能来源主要是缅甸马圭、曼德勒和东枝境外的输入型累积传输。西双版纳位于低纬高原地区, 受地形影响, 污染物积聚在景洪城区及周边澜沧江河谷地带之后, 很难通过水平输送离开, 这也是造成此次连续重度霾污染事件的重要原因。

关键词:西双版纳地区; 重度霾污染; 气象成因; Hysplit 后向轨迹

中图分类号: X513 **文献标识码:** A

The Causes and Sources of a Persistent Heavy Haze Pollution Event in Xishuangbanna Area during 2020

ZI Ran¹, KONG Zhen¹, MING Rui², ZHANG Qiyue¹, GAO Tingting¹, WANG Li¹

(1. Meteorological Bureau of Xishuangbanna Prefecture, Jinghong 666100, China;

2. School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650504, China)

Abstract: Based on conventional meteorological observations from Meteorological Bureau of Jinghong, the air pollutant mass concentration data from Jinghong Environmental Protection Bureau, and reanalysis data of ERA-5 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ from MFECW (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) and the Hysplit backward track model from NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), the characteristics and causes of a Persistent heavy pollution event in Xishuangbanna region on March 29 to April 5, 2020 were analyzed. The results show that the diurnal variation of AQI (Air Quality Index) and $PM_{2.5}$ concentration were lower in daytime and higher at night. The cold air is weak and prevailing zonal westerly winds during the pollution period at Low latitude plateau area. Meanwhile, warm advection ahead of a ridge that continuously moves eastwards greatly impacts on the increase of temperature in the middle and lower levels of atmosphere, which is favorable for the formation of the stable atmospheric stratification. There is no apparent vapor transfer and no classic wet haze feature. The convection and diffusion has been weakened by stable temperature stratification and atmospheric circulation. The horizontal and

收稿日期: 2021-08-06

第一作者简介: 字冉(1989—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事中短期天气预报和气候动力学研究工作, E-mail: 153407821@qq.com。

资助项目: 云南省科技厅科技计划项目基础研究专项(202101AT070003); 基于地基 MAX-DOAS 与卫星 S5P/TROPOMI 观测的生物资燃烧挥发性有机物排放研究。

vertical diffusion is reduced by lower mixing layer height and surface ventilation coefficient, which leads to increased concentrations of pollutants. There is positive correlation between the pollutant concentration and the numbers of ignition sources in Southeast Asia from MODIS/Terra satellite monitoring and retrieval. The correlation coefficient of AQI and the number of ignition is as high as 0.5. Furthermore, based on the Hysplit backward track model and the fire point data at that time, the influencing factors of heavy pollution weather in Xishuangbanna from March 29 to April 5, 2020 were analyzed. According to the analysis, the pollutants are mainly imported from Maqui Mandalay and East Branch, Myanmar. In addition, Xishuangbanna is located in Lancang River Valley. Such a local surrounding terrain blocks the subsequently horizontal transport of air pollutants after accumulating in xishuangbanna region, which is also a major reason for the occurrence of this pollution event.

Key words: Xishuangbanna region; heavy haze pollution; meteorological cause; the Hysplit backward track

0 引言

西双版纳位于云南的最南端,介于 $21.13^{\circ} \sim 22.6^{\circ}N$, $99.93^{\circ} \sim 101.83^{\circ}E$ 之间,与老挝、缅甸山水相连,和泰国、越南近邻,属北回归线以南的热带湿润区。西双版纳地处热带北部边缘,属热带季风气候,有中国唯一的热带雨林自然保护区,植物种类占全国的 $1/6$,森林覆盖率 80.8% 。州府景洪市是西双版纳州的政治、经济、文化中心,境内森林覆盖率为 85.04% ,城市绿地覆盖率为 48.96% ,澜沧江—湄公河纵贯全境^[1]。

随着经济发展,空气污染日趋严重。近年来,在云南大部分地区,特别是云南南部的西双版纳州,春季出现了连续数天甚至 10 d 以上的环境空气质量指数(AQI)达到中度及以上污染的级别,市区空气连续数日呈现浑浊现象,水平能见度 $<10\text{ km}$,而 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 则是主要污染源。霾的天气定义是:大量极细微的干尘粒等均匀地浮游在空中,使水平能见度 $<10.0\text{ km}$ 的空气普遍浑浊现象。霾使远处光亮物体微带黄、红色,使黑暗物体微带蓝色^[2]。已有的研究充分表明,霾作为一种主要的污染源,对人体健康和经济发展有非常重要的影响^[3-4]。以往众多研究都为霾天气过程的气象成因以及预报提供了大量的科学依据。王珊等^[5]分析发现,在不利气象条件下形成的高浓度颗粒物污染事件中,气压场偏弱,气压梯度力小,风速小,弱冷空气形成的下冷上暖的稳定性层结等天气形势有利于霾重污染的形成与维持。赵子菁等^[6]通过研究发现,相对湿度在 $50\% \sim 80\%$ 之间,尤其在 $70\% \sim 80\%$ 时,有利于南京市霾的发生。过宇飞等^[7]总结出了无锡市3种出现重度霾的地面天气形势类型。

在污染源相对稳定的条件下,气象条件对空气状况起主导作用^[8-9]。刘厚凤等^[10]总结了近年来

中国重污染过程气象特征,发现特定的流场、特殊的地形、污染物区域输送等因素造成重污染的污染气象特征;天气系统对污染物输送和污染物浓度有重要影响^[11-13]。

近年来,针对空气污染事件,国内外学者分别利用数值模拟、卫星遥感分析和数理统计等方法展开了广泛深入的研究。结果表明,大气可吸入颗粒物的时空分布与输送轨迹密切相关,远距离物质输送可导致大气污染在时空分布上的变化^[5,14-18]。通过分析气团轨迹来研究一个地区大气可吸入颗粒物的输送特征,已成为分析一个地区大气颗粒物来源的常用方法。后向轨迹模型被广泛用于对污染物长距离输送规律的研究,能较好地反应污染物的传输特征^[20,21]。

目前国内对大气污染天气过程的诸多研究已经取得了显著的成果,且和气象要素的关系都不尽相同,但以上研究主要集中在中国东部或较发达城市,对低纬高原的研究还甚少,其中涉及到被原始热带雨林所包围的西双版纳地区,春季大气污染的环流特征、物理扩散条件和污染物来源的研究还处于空白状况。因此,有必要对2020年春季西双版纳出现的首次连续 8 d 的重度霾污染过程的大气环境特征、气象条件影响及污染物颗粒主要来源进行分析,梳理成因,以期对地方大气污染防治、环境气象预报等提供科学参考。

1 资料与方法

本文所用气象资料来自景洪市气象局国家基本气象观测站2020年3月26日00时—4月10日23时逐小时观测资料,包括温度、能见度、相对湿度、风向风速、气压、降水等。气象探空资料选自距离景洪市最近的普洱市思茅区国家气象基准站的气象探空资料。

污染物数据(景洪市环境监测站的逐时空气污

染指数(AQI)、SO₂、PM_{2.5}、PM₁₀浓度、O₃-8h等空气污染物浓度数据)和空气污染等级均来源于景洪市环境保护局。

本文采用中华人民共和国国家标准(HJ633-2012)中环境空气质量指数(AQI)规定来认定景洪市城区空气污染等级标准(表1)。

表1 空气质量指数
Tab.1 Air Quality Index

空气质量指数	空气质量指数级别	空气质量指数类别
0~50	一级	优
51~100	二级	良
101~150	三级	轻度污染
151~200	四级	中度污染
201~300	五级	重度污染
>300	六级	严重污染

欧洲中心(ECMWF)提供的ERA-5的再分析资料的变量包括:逐小时17层风场、位势高度场、垂直速度及地面气压等。资料分辨率为0.25°×0.25°。

本文采用了Hysplit模式后向轨迹模拟方法。模型设置参数选择GDAS(Global Data Assimilation System)数据库。该数据库是美国国家环境预测中心(NCEP)的全球预报系统(GFS)模型使用的系统,其中包括全球0.5°×0.5°的气象观测数据。

上述资料选取时间段均为:2020年3月26日00时—4月10日23时。

2 结果分析

2.1 污染物浓度变化特征

按照环境空气质量指数(AQI)规定空气污染等级的标准(表1),由图1可见2020年3月29日—4月5日,西双版纳州景洪市发生了1次连续8d的重度污染的霾天气过程,持续时间长达184h。统计3月29日00时—4月7日00时景洪市逐小时各污染等级达标次数发现,达到中度、重度和严重污染的次数分别为62次、123次和7次,整个过程达到良的标准只有11次。

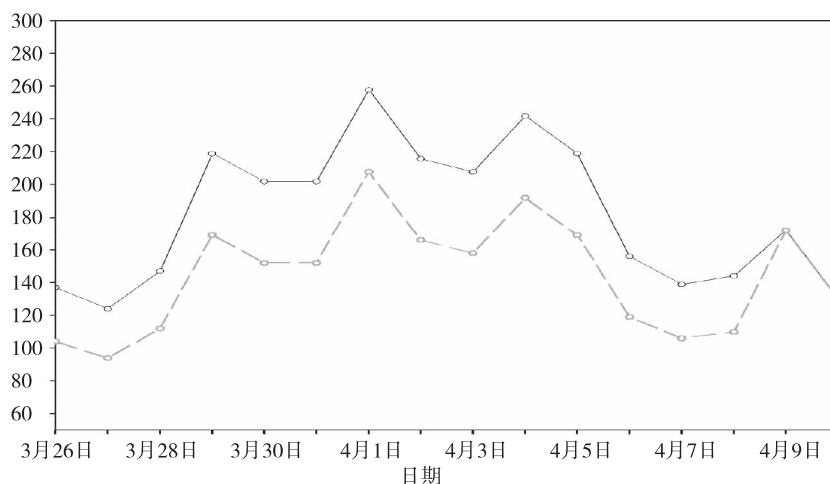


图1 2020年3月26日—4月10日日平均AQI和PM_{2.5}质量浓度图(实线为AQI值,虚线为PM_{2.5},单位:ug·m⁻³)

Fig.1 Daily average AQI and PM_{2.5} mass concentration from March 26 to April 10, 2020

(Solid line is AQI value, dashed line is PM_{2.5}, unit: ug·m⁻³)

据景洪市环保局监测,3月29日—4月5日景洪市区AQI日平均值为221,污染程度为重度污染,AQI日峰值出现在4月1日达到258(图2),特别是4月4日21时小时AQI已达328。对各污染物浓度成分分析可见,相应时段内PM_{2.5}平均浓度高于219 μg·m⁻³,特别是4月4日21时PM_{2.5}瞬时值超过278 μg·m⁻³。4月6日10时后随着PM_{2.5}浓度降低,AQI指数值开始回落,污染程度逐渐减轻,转为中度污染。

2020年3月29日—4月5日景洪市首要污染物为PM_{2.5},其质量浓度随时间演变呈现显著日变化特征(图2)。3月28日夜间开始,景洪市测站PM_{2.5}浓度出现快速上升趋势,在29日00时小时浓度达到第1个峰值(148 μg·m⁻³),之后有2~3h的回落;10时PM_{2.5}的质量浓度再次快速上升,于14时达到第2个峰值(203 μg·m⁻³),峰值过后略有回落,随后再次于21时达到第3个峰值(302 μg·m⁻³)。随后的几天内,PM_{2.5}的质量浓度亦出现上

述变化特征,且大部分时间段维持高位,均超过 200 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,造成了连续时段 AQI 爆表。总体而言,PM_{2.5}的质量浓度呈现白天低、夜间高的特征,最大值出现在凌晨,最小值出现在早上至午后。在本次

重度霾污染过程中,PM_{2.5}/PM₁₀的值达 82.6%,说明重度霾污染期间颗粒物质量浓度主要集中在粒径小于 2.5 μm 的粒径段内。

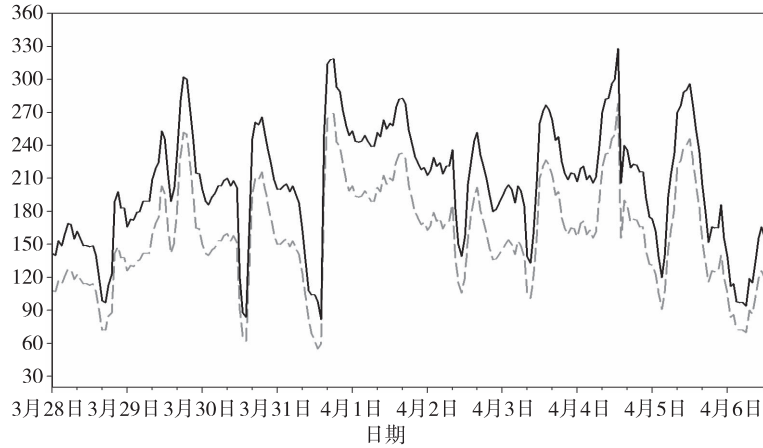


图2 2020年3月28日—4月7日逐小时景洪市AQI值和PM_{2.5}质量浓度(黑色实线为AQI值,虚线为PM_{2.5})

Fig.2 Hourly AQI value and PM_{2.5} mass concentration in Jinghong City from March 28 to April 7, 2020

(Solid black line is AQI value, dotted line is PM_{2.5})

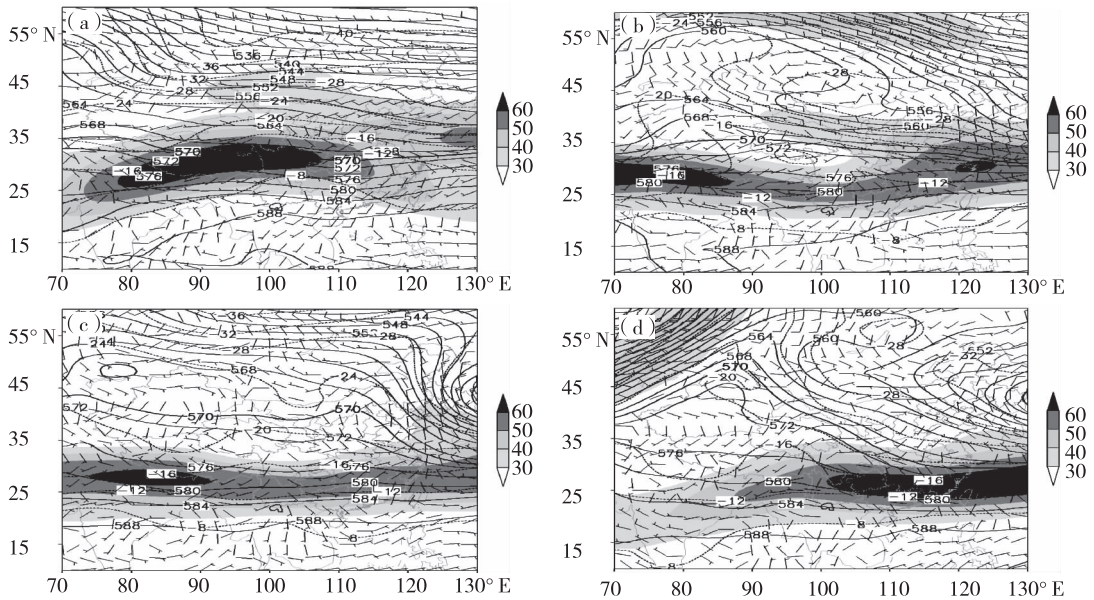


图3 2020年3月29日(a)、4月1日(b)、4月4日(c)和4月8日(d)20时500 hPa高度场

(黑色实线,单位:dagpm)和温度场(点线,单位:℃)、200 hPa大风区(阴影,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)及850 hPa风场(风羽)

Fig.3 500 hPa height field (black solid line, unit: dagpm) and temperature field (dot line, unit: $^{\circ}\text{C}$), 200 hPa strong wind area (shadow, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and 850 hPa wind field (plume) at 20:00 on March 29 (a), April 1 (b), April 4 (c) and April 8 (d), 2020

2.2 大尺度环流背景

气象条件是影响污染物浓度的关键因素之一,天气形势对污染物扩散、传输、物理化学反应及干湿沉降等方面均有重要影响^[22-23]。本次大范围持续性重度霾污染天气过程产生于特定的大尺度稳定少变环流背景之下。

结合 AQI 指数逐日变化,分析本次重度霾污染

过程期间云南南部的天气形势。整个重度霾污染过程期间,云南上空环流维持稳定少变。3月27日—4月10日AQI日值进行排序,选取AQI日值排列前3的3月29日、4月1日、4月4日作为本次重度霾污染过程代表日,而4月8日作为重度霾污染过程结束日,分析重度霾污染期间各层高度场和温度场(图3a、b、c)可以看出,低纬度地区(15~25°

N)自青藏高原南部至两广地区上空环流形势比较平稳,整个云南省上空均为纬向型西风气流控制,且有短波槽活动,等高线和等温线同位相配合,无明显冷平流入侵,云南南部低纬高原地区冷空气势力偏弱,低层大气存在辐合切变。200 hPa大风区在整个重污染过程期间,在云南南部地区维持 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。同时,弱暖脊线(584 dagpm)在云南南部地区的维持,脊前暖平流对云南低纬高原地区中低层大气增温有一定影响,为稳定的大气层结创造了有利条件。与常见的中国东部地区污染过程环流背景不同的是,本次重度霾污染过程期间,云南低纬高原地区无明显西南暖湿气流的增强和配合,孟加拉湾水汽向云南南部输送偏弱,造成本

次重污染过程并未出现传统上高湿的气象霾特征;此外由于缺乏有利的动力和湿度条件,云南南部上空无法产生有效降水,导致低纬高原西双版纳地区空气污染维持。同时,云南南部受大范围均压场控制(图4),周边气压场较云南东北部分布比较稀疏,地面有暖倒槽发展,气压梯度力较小,导致地面和低空的风速很小,且景洪市常年属于静风区,整个重霾污染过程期间,近地面 10 m 风速小于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,不利于污染物的水平扩散,但却有利于夜间地面的辐射降温。至4月6日气压梯度力均维持较小,地面和低层风速并无明显增大,对污染物水平扩散无显著作用。因此4月6日20时后污染程度只是略有缓解,景洪市仍维持中度污染。

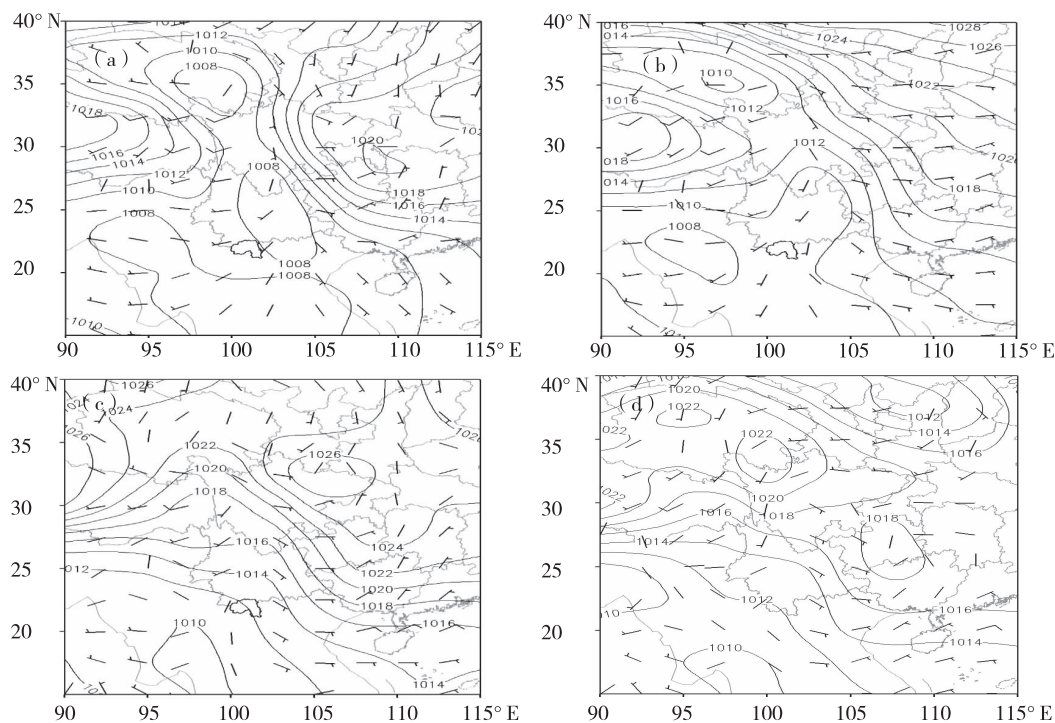


图4 2020年3月29日(a)、4月1日(b)、4月4日(c)和

4月8日(d)海平面气压场(等值线,单位:hPa)和10 m风场(风羽,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig.4 Sea level pressure field (contour lines, unit: hPa) and 10 m wind field (plume, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) on March 29 (a), April 1 (b), April 4 (c) and April 8 (d), 2020

4月8日(图3d)随着高原弱槽东移,云南南部上空西北气流增强,低层辐合切变较重度污染期间有所减弱,对污染物有一定清除作用。但从海平面气压场上看(图4d),等压线仍比较稀疏,气压梯度力维持较小,地面和低层风速无明显增大,说明低层风速在整个持续重霾污染至结束期间,对污染物的清除并无显著作用。

2.3 大气层结稳定度分析

大气边界层中温度层结会影响污染物的输送和扩散过程,低空逆温层厚度增加和混合层高度的

降低都有利于 $\text{PM}_{2.5}$ 堆积进而导致污染加重^[9,22]。同时湿度对大气污染的维持也起到非常重要的作用。利用距离景洪市最近的普洱市思茅站的探空资料分析本次重霾污染过程AQI高峰时段(4月1日、4月4日)温度和露点的垂直分布。4月1日08时和4月4日08时,在近地层975~850 hPa有一段贴地逆温,近地面温度层结较为稳定,600~400 hPa有不同程度的逆温层,但整层较干。逆温结构和稳定温度层结的存在,一定程度上会抑制大气的湍流和热力交换,导致空气中污染颗粒不能有效在垂直

方向上扩散,有利于污染浓度持续的升高。到夜间,贴地逆温被破坏,但上、下温差小,且在 600 ~ 500 hPa 仍存在逆温,污染物仍无法得到有效扩散稀释,污染物颗粒在中低层以下不断累积,有利于夜间至凌晨出现重霾污染的日峰值。同时在高污染时间段内,中低层温度露点差较高层减小,再加上大气相对稳定,澜沧江横穿过景洪市,且周围属原始热带雨林区域,夜间相对湿度明显高于白天,使得景洪市及周边地区近地面水汽在边界层不断积累,最终通过霾粒子的吸湿性增长使得污染物浓度不断升高,并在夜间达到污染物浓度日峰值。

2.4 重度霾污染过程近地面气象要素特征

对 2020 年 3 月 28 日—4 月 7 日景洪站地面相对湿度、最小能见度等气象要素的变化关系进行分析(图 5)。对比 $PM_{2.5}$ 浓度(图 2)和最小能见度(图 5)的时间演变可以看出,整个重度霾污染过程期间, $PM_{2.5}$ 浓度和能见度均存在明显的日变化。除午后 14—17 时有短暂的能见度较好外,其余时段均出现了 5 km 以下的能见度。随着 $PM_{2.5}$ 浓度的增加,景洪市区的能见度也迅速降低。在 4 月 4 日 $PM_{2.5}$ 浓度峰值期间,最小能见度降低至 2.725 km,而随着后期 $PM_{2.5}$ 浓度降低,能见度也逐渐好转(图 5)。持续性污染事件的发生需从与气象雾霾形成关系最密切的湿度条件分析。重霾污染期间景洪市相对湿度存在明显的凌晨至清晨高位,午后至傍晚(15—18 时)低位的日变化,夜间和早晨在 50% ~ 70%,午后降低至 40% 以下,但即便在清晨湿度较大时,相对湿度也在 80% 以下,空气中的饱和度仍不够,难以形成雾或降水,这也是景洪市 3 月底—4 月初连续 8 d 出现重度霾污染空气污染的主要原因之一。通过计算发现,在研究时段内,温度露点差与 AQI 指数变化存在显著负相关关系,相关系数达 -0.3(相关性在 0.01 层上显著),即温度露点差越小,AQI 指数越高。景洪站白天温度露点差大于夜间,午后温度露点差达到极大值,对应 AQI 指数降低;午夜到清晨,温度露点差降到最低,污染进一步加强,表明虽然整个重度霾污染过程,景洪平均相对湿度仅有 43%,3 月下旬—4 月上旬西双版纳地区恰逢干季,且 2020 年冬春伴有严重气象干旱,空气湿度较低,但空气湿度的日变化对此次污染物的变化亦有重要影响,湿度的增加为颗粒物吸湿增长提供了一定的气象条件,有利于空气污染的维持。

2.5 水平和垂直扩散条件

风向风速作为污染物在边界层内远距离传输和扩散的重要因子,决定了区域性污染天气过程的

持续时间和污染物浓度的变化。分析低层(925 ~ 850 hPa)的风场发现(图略),在整个高污染阶段内贴地层风向有频繁的偏南风与偏北风的转变,且风速均小于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,中低层(500 hPa 以下)受较为平直偏西风影响,且风速均小于 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。统计重度霾污染时段景洪市城区地面风频可知,大部分时段风速小于 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,均以静小风为主,4 月 1 日和 4 月 4 日风向转变频繁。弱风速和多变风向对污染物的平流输送作用小,因此污染物水平扩散能力弱,有利于污染物浓度的积累。

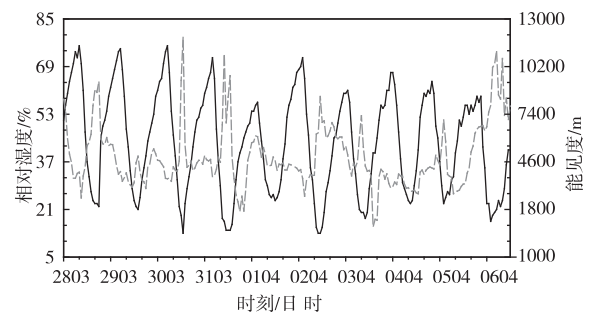


图 5 2020 年 3 月 28 日—4 月 7 日景洪站最小能见度(虚线,单位:m)、相对湿度(实线,单位:%)逐时变化
Fig. 5 Hourly changes of minimum visibility (dashed line, unit: m) and relative humidity (solid line, unit: %) at Jinghong Station from March 28 to April 7, 2020

从 4 月 7 日 08 时开始,近地层风向转变偏西或西北风,但风速仅维持在 $1 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,仍不利于污染物在水平方向的扩散。说明本次重度霾污染的缓解并未出现明显的转北风及风速增强现象。

研究表明,大气上下层的交换对污染物在垂直方向上的扩散稀释有一定作用^[27-28]。从城区整层垂直速度和散度场分布可见(图 6),3 月 27 日—4 月 1 日 850 hPa 以下低层维持的辐合和弱的上升运动;800 hPa 以上下沉运动随高度增强,中心位于中层 500 ~ 600 hPa,说明污染物随着低层气流辐合上升,但中层的下沉运动阻止了污染物的向上扩散,使得污染物在中低层以下的大气中堆积并长时间维持,导致 3 月 27 日起污染物浓度持续升高,城区污染进一步加重。4 月 1 日午后开始,低层辐合显著增强,期间伴随上升运动向上延伸至 500 hPa 且强度明显增强,辐合最强时段出现在 4 月 4—5 日,恰好对应重度霾污染期间 AQI 较高位时段。但值得注意的是,重度霾污染高位时段(4 月 1—5 日)内,中低层均表现为气流辐合,说明城区上空较低层辐合,中层辐散的上下层交换作用是存在的,且大气中下层交换较前期变强,使得低层堆积的污染

物向上得到一定的扩散稀释。中下层垂直交换运动的增强却对应污染 AQI 高峰值时段的出现,这可能与污染物高空气流长距离输送有关^[15,18]。

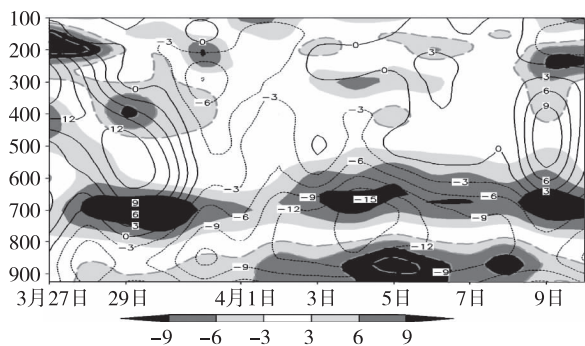


图6 2020年3月28日—4月7日景洪垂直速度和散度(等值线为垂直速度,实线为正值,点线为负值,单位为 $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$;阴影为散度,长虚线所围阴影区为负值,单位为 $10^{-5}\cdot\text{s}^{-1}$)

Fig. 6 Jinghong vertical velocity and divergence from March 28 to April 7, 2020 (contour line is vertical velocity, solid line is positive value, dot line is negative value, unit: $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$; The shadow is divergence, and the shadow area enclosed by the long dashed line is negative, unit: $10^{-5}\cdot\text{s}^{-1}$)

2.6 混合层厚度变化特征

一般而言,混合层越厚,通风系数越高,对应污染物在垂直方向上稀释和扩散能力越强,污染物的浓度越低;反之,越有利于污染物的积累。

本文采用国标法^[24]计算景洪市城区上空大气混合层厚度(图略)。在重度霾污染期间,景洪市城区平均混合层高度为870 m,地表通风系数平均值为 $686\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$;污染峰值时段混合层高度最小值仅为65 m,出现在4月4日20时,通风系数仅有 $30.9\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$,对应AQI骤增,可见局地高污染主要是污染物在较低高度的混合层内大量累积所致,并出现连续数小时的严重污染。从4月6日夜间之后,混合层高度和地表通风系数呈现增加趋势,10日达到1100 m以上,地表通风系数也 $1264\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$,表明混合层厚度和地表通风系数的增强有利于污染物在垂直方向上的扩散。

计算重度霾污染期间景洪市城区逐小时混合层厚度和通风系数(图略)。统计发现,混合层厚度和通风系数两者变化大致相同,有白天高、夜间低的日变化特征,最大值出现在08时,最小值出现在20时,这是由于08时地面10 m风速最强。此外,混合层厚度和通风系数与AQI日变化存在明显的负相关,这可能与夜间地面辐射导致的快速降温有关,在近地层更容易形成逆温,使得湍流无法得到有效发展,混合层厚度较低;夜间静稳小风加上较

低的边界层厚度使得通风系数也较小,两者最终导致污染物在混合层高度以下集聚,得不到有效的扩散和稀释,造成夜间污染物浓度的攀升。

2.7 重度污染过程与东南亚季节性烧荒的关系

近年来,由于东南亚国家春季大范围烧荒,生物焚烧产生的颗粒物等污染物持续不断向云南省传输和积累,且2020年春季北方冷空气南下影响云南的势力较弱,恰逢冬春持续性严重的干旱,空气中湿度小,环境空气中细颗粒物浓度被不断推高,造成云南南部严重的区域性污染。卫星观测数据资料显示,2018、2019年3月6日—4月5日东南亚境外火源点个数分别为1404和2548个,2020年徒增至16882个,可见与2018年、2019年同期相比,2020年春季东南亚国家火点数量为持续快速增加的态势。

火源点个数与AQI指数、大气各污染物浓度均呈现显著正相关关系,尤其是AQI指数、臭氧浓度与火源点个数的相关系数分别高达0.502和0.514(相关性在0.01层上显著)。通过对比2015—2020年春季景洪市城区AQI指数与火源点个数发现,当火源点偏多时,AQI指数较高;当火源点较少时,AQI指数较低。当有降水发生时,即使火源点多,AQI指数也明显偏低。可见,近年来东南亚地区春季大规模烧荒可能是导致云南南部出现季节性空气重度霾污染的主要原因,2020年火点数量的徒增,是造成该年西双版纳地区春季出现连续霾污染天气较前2 a明显严重的原因之一。

3 景洪市本次重度霾首日后向轨迹特征分析

为进一步明确境外东南亚国家季节性连续烧荒产生的颗粒物污染物是否与本次西双版纳地区连续多日重度霾污染过程有关,下文对本次过程霾后向轨迹特征进行分析。

3.1 模式简介

Hysplit模型是由美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的空气资源实验室和澳大利亚气象局共同研发的用于计算和分析大气污染物输送、扩散轨迹的专业模型,目前已经被广泛应用于多种污染物在各个地区的传输和扩散的研究中^[25-26]。Hysplit后向轨迹模拟可用于解释所选定目标地区的污染颗粒物或气流是由于什么来源造成的^[13-15,17,27]。

3.2 模拟内容

利用Hysplit后向轨迹模式对景洪市本次重度霾污染典型日的气团运动轨迹进行分析,得到气团

携带污染物颗粒的运动路径。选择景洪市城区(100.7833°E, 22°N)为起始点,起始时间为重度霾污染首日(2020年3月29日)00时,时间间隔为6h,分别选取距离100 m、500 m和1000 m高度,对本次重度霾污染过程首日2020年3月29日进行72 h后向轨迹模拟。

3.3 模拟结果分析

图7为3月29日重度霾污染发生前的72 h累计过程。

低层气团(100 m)由中层途径缅甸南部的马圭、曼德勒地区,进入缅甸的东枝下沉并转为偏东气流,经大约60 h抵达景洪市。

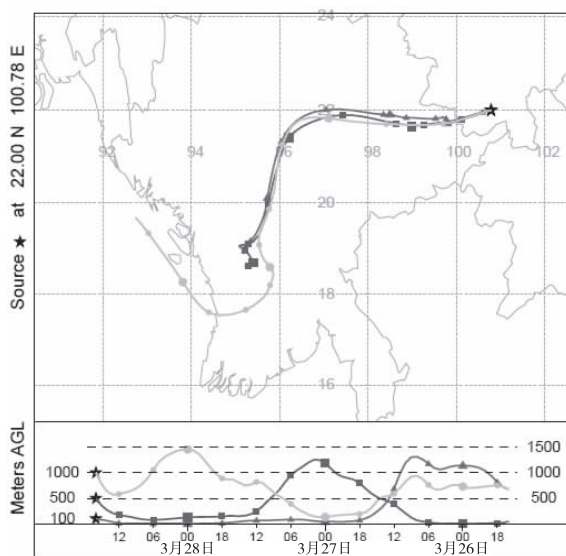


图7 Hysplit模拟的景洪市重度污染首日(2020年3月29日00时)72 h向后轨迹

Fig. 7 Backward trajectory of heavy pollution in Jinghong City simulated by Hysplit at 72 hours on the first day (00:00 on March 29, 2020)

中层气团(500 m)来自缅甸马圭南部地区的近地层气团,26日20时前气团移动缓慢,18 h内移动不超过1个纬度,且均在近地层活动,26日20时气团开始上升并向东北方向移动。27日08时气团到达曼德勒地区,并出现下沉。27日20时接近近地层,之后保持较低的高度向东移动。28日20时进入我国西双版纳州勐海县地区,并开始逐渐上升至500 m高空,到达景洪市区上空。

高层气团(1000 m)来自孟加拉湾,先向南流动,经过泰国南部,26日20时转为向东北方向移动,同时气团开始逐渐下沉。27日08时气团下沉至缅甸南部勃固附近的近地层,之后逐渐向东北方向移动,移动过程中气团上升,并于28日08时再次移动至缅甸东枝附近(97°E, 22°N)地区,此时气团

升至高空距地1500 m高度处,之后继续向东移动,移动过程中气团有所下沉,于3月29日00时移至景洪市1000 m高度上空。

可见,此次重度污染首日气团中的颗粒物主要来自缅甸马圭、曼德勒和东枝境外的输入型累积传输。无论低层、中层还是高层的气团,自源地向东北或向东传输进入景洪市上空,途径地区正是东南亚国家生物质焚烧的严重地区,焚烧产生的颗粒物等污染物在气团传输过程中持续累积。且进入东枝地区向东传输的过程中,气团的移动速度变缓慢,不断推高环境空气中细颗粒物浓度,气团垂直方向上下层混合作用,使得大气中颗粒物充分混合,从而造成西双版纳地区区域性霾污染。

4 地形影响

西双版纳州在横断山系纵谷区南端,地处澜沧江大断裂带两侧、澜沧江河谷地带,北部是无量山尾梢,西部是怒山余脉。景洪市城区位于澜沧江和流沙河之间的低洼河谷地带,四面环山,城区海拔552.7 m,地势较周边低,空气湿度较大。受周边地形阻挡的影响,污染物在下沉气流的控制下聚集在西双版纳地区及景洪城区后,很难通过水平输送离开,这也是造成此次连续重度污染的原因之一。

5 结论

①本次重度霾污染过程具有持续时间长、污染物浓度值高的特征,且污染期间污染物浓度值有显著日变化,表现为白天低、夜间高,最大值出现在凌晨,最小值出现在早上至午后。本次连续8 d的重度霾污染并未出现传统上高湿的气象霾特征,其污染期间颗粒物质量浓度主要集中在粒径小于 $2.5 \mu\text{m}$ 的粒径段内。

②本次重度霾污染期间云南低纬高原地区冷空气势力偏弱,弱暖脊在云南南部地区的维持,脊前暖平流使中低层大气增温,有益于西双版纳地区大气层结的稳定,无明显水汽输送带存在,整个过程空气湿度较低。

③西双版纳州受均压场控制且有暖倒槽发展,由于气压梯度力小,低空及地面风速很小,且受周边地形阻挡的影响,景洪市城区常年属于静风区,对污染物的水平扩散不利。

④贴地逆温、中性温度层结使污染物在中低层不断积累,低空风向高频转换、较低的混合层厚度和较小的通风系数共同作用,使得污染物在水平和垂直方向上的扩散受到抑制,进而不断推高污染物

浓度,导致连续多日重度霾污染天气的出现。相对湿度的日变化导致污染物粒子吸湿增长在夜间较白天明显增强,对应AQI在夜间到达日峰值。

⑤东南亚地区春季长期大面积烧荒,生物质焚烧产生的颗粒物等污染物不断向云南省传输并持续累积,不断推高环境空气中细颗粒物浓度,是造成此次连续重度污染事件的主要原因。境外火点个数与AQI及大气各污染物浓度呈显著正相关,2020年火点数量的陡增,是造成西双版纳地区2020年春季出现连续污染天气较前2a明显严重的原因之一。

⑥由Hysplit后向轨迹模式得到的72h后向轨迹表明,景洪市城区此次霾污染过程中颗粒物可能来源主要是缅甸马圭、曼德勒和东枝境外的输入型累积传输。无论低层、中层还是高层的气团,途径地区正是东南亚国家生物质焚烧的严重地区,进入东枝地区向东传输的过程中,气团的移动速度变缓慢,焚烧产生的颗粒物等污染物在气团传输过程中持续累积,不断推高环境空气中细颗粒物浓度,气团垂直方向上下层混合作用,使得大气中颗粒物充分混合,从而造成区域性重度霾污染。

参考文献

- [1] 西双版纳傣族自治州人民政府. 西双版纳概况[OL]. [2020-8-17] https://www.xsbn.gov.cn/88_news_detail_dhtml?news_id=34206.
- [2] 全国气象防灾减灾标准化技术委员会. 霾的观测和预报等级: QX/T113-201[S]. 北京:中国气象局,2015.
- [3] 肖红,张保森,魏百慧. 霾天气的危害与预防途径[J]. 湖北气象, 2006(3):44.
- [4] 郭青,罗碧瑜,曾东好,等. 气象条件对梅州城区臭氧浓度的影响研究[J]. 中低纬山地气象,2018,42(6):26-30.
- [5] 王珊,廖婷婷,王莉莉,等. 西安一次霾重污染过程大气环境特征及气象条件影响分析[J]. 环境科学学报,2015,35(11):3452-3462.
- [6] 赵子箐,魏永杰,张祥志,等. 南京市霾天气与主要气象条件的相关分析[J]. 中国环境科学,2015,35(12):3570-3580.
- [7] 过宇飞,刘端阳,周彬,等. 无锡市霾天气特征及影响因子研究[J]. 气象,2013,39(10):84-94.
- [8] 白莹莹,杨世琦,刘川,等. 重庆雾和霾的气候特征分析[J]. 中低纬山地气象,2018,42(3):33-37.
- [9] 周兆媛,张时煌,高庆先,等. 京津冀地区气象要素对空气质量的影响及未来变化趋势分析[J]. 资源科学,2014,36(1):191-199.
- [10] 刘厚凤,杨欣,陈义珍,等. 中国重霾过程污染气象研究进展[J]. 生态环境学报,2015,24(11):1917-1922.
- [11] 许艺馨. 贵港市污染天气分型及污染气象特征研究[J]. 中低纬山地气象,2020,44(6):9-17.
- [12] 李颖敏,范绍佳,张人文. 2008年秋季珠江三角洲污染气象分析[J]. 中国环境科学,2011,31(10):1585-1591.
- [13] 郝巨飞,齐佳慧,李永占,等. 邢台市颗粒污染物变化特征和后向轨迹分析[J]. 中国环境监测,2018,34(5):51-58.
- [14] 徐祥德,周丽,周秀骥,等. 城市环境大气重污染过程周边源影响域[J]. 中国科学(D辑),2004,34(10):958-966.
- [15] 黄健,颜鹏,Roland R Draxler. 利用HYSPLIT-4模式分析珠海地湘SO₂浓度的变化规律[J]. 热带气象学报,2002,18(4):407-413.
- [16] 王亚,杨令. 湖南省近46a雾霾天气时空分布特征分析[J]. 中低纬山地气象,2018,42(6):50-53.
- [17] 戚月肯,谭季肯,孙长. 一次强沙尘暴长距离输送的数值模拟研究[J]. 浙江大学学报:理学版,2006,33(2):216-222.
- [18] 颜鹏,房秀梅,李兴生,等. 临安地区地SO₂变化规律及其源地分析[J]. 应用气象学报,1999,10(3):267-275.
- [19] 吴兑,廖国莲,邓雪娇,等. 珠江三角洲霾天气的近地层输送条件研究[J]. 应用气象学报,2008,21(1):1-9.
- [20] 秦娟娟,王静,程建光,等. 2008年青岛市一次典型大气外来源输送污染过程分析[J]. 气象与环境学报,2010,26(6):35-39.
- [21] LEE Y C, YANG X, WENIG M. Transport of dusts from East Asian and non-East Asian sources to Hong Kong during dust storm related events 1996-2007[J]. Atmospheric Environment,2010,44(30):3728-3738.
- [22] 郑秋萍,王宏,林长城,等. 海峡西岸沿海城市群大气污染物浓度特征及其与天气形势的关系[J]. 环境科学学报,2013,33(2):356-363.
- [23] 肖娟,范绍佳,苏冉. 2011年10月珠江三角洲一次区域性空气污染过程特征分析[J]. 环境科学学报,2014,34(2):290-296.
- [24] 蒋维崧,孙鉴泞,曹文俊,等. 空气污染气象学教程[M]. 北京:气象出版社,2004:1-16.
- [25] ARIF M, KUMAR R, KUMAR R, et al. Ambient Black Carbon PM_{2.5} and PM₁₀ at Patna; Influence of anthropogenic emissions and brick kilns[J]. Science of the Total Environment,2017,624:1387-1400.
- [26] TAHRI M, BENCHRIF A, BOUNAKHLA M, et al. Seasonal variation and risk assessment of PM_{2.5} and PM_{2.5-10} in the ambient air of Kenitra Morocco [J]. Environmental Science Processes & Impacts,2017,19(11):1427-1436.
- [27] 赵恒,王体健,江飞,等. 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,2009,25(2):181-186.