

Comparative Analysis of Air Pollution Characteristics in Typical Cities of Yunnan Province in 2014-2017

Yiran Luo^{1,2}, Chengwei Zhong¹, Hongqiang Wang^{1,3*}

¹College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

²School of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning Guangxi

³Guangxi Key Laboratory of Environment Pollution Control Theory and Technology, Guilin Guangxi

Email: *sjhjgc@163.com

Received: Sep. 29th, 2019; accepted: Oct. 17th, 2019; published: Oct. 24th, 2019

Abstract

The air pollution data of 3 typical cities in Kunming, Qujing and Yuxi in January 1, 2014 to December 31, 2017 were collected in Yunnan province. Analyzing the time varied characteristics of PM_{2.5} and O₃, the backward trajectories of air masses during the two typical polluted observation periods in winter are discussed. The results showed that the concentration of PM_{2.5} decreased. There are obvious seasonal and temporal variations in the concentration level under the influence of pollution sources and meteorological conditions. The concentration of O₃ is increasing year after year. According to the backward trajectory of air masses at sampling points during two typical pollution observation periods in winter, the occurrence of heavy pollution weather in Yunnan is closely related to the superposition of external sources, most likely due to pollution in southwestern Yunnan and long-distance transmission from Burma and other countries.

Keywords

PM_{2.5}, O₃, Air Pollution, Backward Trajectory Analysis

2014~2017年云南省典型城市空气污染特征对比分析

罗意然^{1,2}, 钟承韡¹, 王洪强^{1,3*}

¹桂林理工大学, 环境科学与工程学院, 广西 桂林

²广西大学, 资源环境与材料学院, 广西 南宁

*通讯作者。

³广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 广西 桂林
Email: sjhjgc@163.com

收稿日期: 2019年9月29日; 录用日期: 2019年10月17日; 发布日期: 2019年10月24日

摘要

通过云南省昆明、曲靖和玉溪3个典型城市2014年1月1日~2017年12月31日空气污染状况数据, 分析了PM_{2.5}和O₃的时间变化特征, 讨论了冬季两个典型污染观测期间的气团后向轨迹。结果表明: 2014年至2017年PM_{2.5}质量浓度呈下降趋势, 浓度水平受污染源排放和气象条件影响, 存在明显的季节和时段变化特征; O₃浓度呈逐年上升的趋势; 冬季两个典型污染观测期间采样点的气团后向轨迹显示, 云南重污染天气的出现, 与外来源叠加有密切关系, 最可能的是云南西南部污染和来自缅甸等国家的长距离传输叠加导致。

关键词

PM_{2.5}, O₃, 空气污染, 后向轨迹分析

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

自2013年9月10日《大气污染防治行动计划》实施以来, 我国大气质量有明显改善, 统计2015年1月1日~2017年12月31日中国空气质量在线监测分析平台公布的367个城市中数据有效完整的320个城市的大气污染监测情况, PM_{2.5}年平均值分别为50.5 μg·m⁻³、47.0 μg·m⁻³和44.9 μg·m⁻³, 呈逐年下降趋势, 然而现状仍不容乐观, 2017年PM_{2.5}年平均值是目前我国《环境空气质量标准》(GB3095-2012)中规定的二类区35 μg·m⁻³限制的1.28倍, 320个城市中有235个城市超出我国PM_{2.5}二类区标准, 超标率高达73%, 若参照世界卫生组织给出的PM_{2.5}标准10 μg·m⁻³, 则320个城市中, 达标率为0。

空气污染没有安全阈值, 浓度越高, 危害越大, 每增加10 μg·m⁻³的PM_{2.5}浓度, 记忆力和注意力测试中的表现水准就会有相当于衰老两岁的下降危害, 而且总死亡率, 心肺疾病死亡和肺癌的死亡率会增加[1]。地表空气中的O₃对人体极为有害, 一些易于过敏的人长时间暴露在臭氧含量超过180 μg·m⁻³的环境中, 会产生皮肤刺痒、眼睛刺痛、呼吸不畅、咳嗽及鼻炎等症状。空气中每增加100 μg·m⁻³的O₃, 人的呼吸功能就会减弱3%。因此, 研究并尽快改善我国大气质量是目前急需解决的环境问题。

云南省地理位置特殊, 同时与缅甸、越南和老挝三个国家接壤, 云南省境内的空气质量既受到本地排放的影响, 也受到省外和国外的传输影响。1997年, 常蓉等[2]最先对云南省大气污染控制进行了探讨, 研究表明云南省大气污染主要来源于工业生产、居民生活和汽车废气, 以煤烟型为主。1997年, 沈鹰等[3]首次对云南省大气污染扩散输送特征进行了研究, 结果表明云南省大气稳定度以中性类居多, 频率占50%以上, 风速廓线指数值比平原地区大得多, 也比一般山区的大, 大气混合层高度春冬季较大, 夏秋季较小。另外, 罗燕等[4]利用2015年1月~2016年12月云南省16个城市大气污染物浓度监测结果与同期气象观测资料, 分析了云南大气污染物分布的时空特征及其与气温、相对湿度、云量、

降水、风速、日照时数等气象要素的关系。结果表明：云南 SO_2 、 NO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 大气污染物浓度冬季最高，春秋季节次之，夏季最低； PM_{10} 、 O_3 平均浓度春季最高，冬季次之，夏季最低。 CO 平均浓度春秋季节最高、冬季次之，夏季最低。云南 CO 浓度与气象要素相关关系不显著，其明显的月变化主要与污染排放源的变化有关。 SO_2 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 及 NO_2 浓度在不同地区对不同气象要素敏感性不一致，地区差异性较大。尚小宴等[5]等利用普洱市环境监测站收集的普洱市思茅城区 2013~2014 年度 API 指数，对 API 指数进行时间序列分析和空间分析，包括 2013~2014 年 API 的质量状况、季节变化以及比较南北市区的 API 值。结果表明：普洱市城区的空气状况在 2013~2014 年度优良，夏季的空气质量最好，春季最差；空间上存在南北差异，南市区 API 指数低于北市区，南市区空气质量优于北市区。Qu 等[6]第一次分析了 2000~2006 年我国 86 个城市的 PM_{10} 浓度特征，曲靖的 PM_{10} 超过了 $80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。毕丽玫等[7]通过采集 $\text{PM}_{2.5}$ 四季环境样品，分析了昆明 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度及其 4 类化学组分特征。许燕婷等[8]基于 2014~2016 年中国环境保护部公布的城市空气质量指数(AQI)日报数据，综合运用空间插值法、空间自相关模型、核密度估计模型等空间数据统计模型探究中国城市空气质量时空分布及动态演进特征，结果显示：2014~2016 年中国城市 AQI 季节均值为：冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季，夏、秋两季空气质量空间分异格局不显著，春、冬两季的空间分异格局显著，呈北高南低、内陆高沿海低的季节性空间分布格局。程雪雁等[9]基于生态环境部发布的空气质量状况月报中京津冀城市群 13 市空气污染综合指数、主要污染物以及 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 CO 、 O_3 等 6 种污染物质量浓度数据，对京津冀城市群 2015~2018 年的空气污染状况的时空分布进行了可视化呈现与特征总结、解释，研究发现：河北省东部的唐山、西部的保定、石家庄以及南部的邢台、邯郸等城市空气品质较差；京津冀城市群的主要污染物是 $\text{PM}_{2.5}$ ，第 2 大主要污染物是 PM_{10} ，近几年来 O_3 逐渐成为京津冀城市群夏季的主要污染物；此外，6 大污染物中， PM_{10} 和 SO_2 在冬季有明显的空间集聚现象。随着国家“一带一路”、长江经济带等重大发展战略和一系列重大政策的实施，云南工业化进程不断加快，2015 年来，云南空气污染事件明显上升，其中最主要的是 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 污染。本文根据 2014 年 1 月 1 日至 2017 年 12 月 31 日云南省昆明、曲靖和玉溪 3 个城市的空气污染监测数据，分析了三个城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 的时间变化特征，以期科学有效地控制和治理大气污染提供科学参考。

2. 资料与分析方法

2.1. 数据处理

数据基于中国空气质量在线监测分析平台(<https://www.aqistudy.cn/>)，该平台每小时公布一次空气污染状况数据，包括 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 CO 、 NO_2 、 O_3 和 SO_2 的小时平均值，公布的数据包括昆明、曲靖和玉溪等云南省内 16 个城市或州(图 1)，由于各个点布设的时间不一致，本研究仅统计包含连续观测 4 年的 3 个典型城市(2014 年 1 月 1 日至 2017 年 12 月 31 日)，并基于日平均值进行统计，需要说明的是，数据首先剔除了异常值 0，并以日平均值统计分析导致云南空气污染最严重物质—— $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 的污染特征。

2.2. 研究方法

箱线图是一种可以简洁直观地表示数据分布特征的方法，用于反映一组或多组连续型定量数据分布的中心位置和散布范围。目前已见箱线图用于环境领域的分析研究，使复杂庞大的监测数据得以有规律地呈现出来[10][11][12]。本文用箱线图分析 $\text{PM}_{2.5}$ 、 O_3 数据规律，并对比各城市污染状况。箱线图与描述统计中的最大值、上四分位数、中位数、下四分位数、最小值这 5 个统计量密切相关，本研究所作的箱线图，剔除了极值，统计的须子范围在 5%~95%之间。



Figure 1. The distribution of the observation points
图 1. 观测点分布图

HYSPLIT—Hybrid Single Particle Lagrange Integrated Trajectory Model (即拉格朗日混合单粒子轨道模型), 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在过去 20 年间联合研发的一种用于计算和分析大气污染物输送、扩散轨迹的专业模型。该模型具有处理多种气象要素输入场、多种物理过程和不同类型污染物排放源功能的较为完整的输送、扩散和沉降模式, 已经被广泛地应用于多种污染物在各个地区的传输和扩散的研究中。采用 HYSPLIT 后向轨迹模式绘出云南省典型城市大气污染物输送, 该模式结合了大气水平和垂直运动, 在污染物输送、扩散和沉降等方面都有较完整的考虑, 被广泛的运用于分析大气污染过程[13] [14] [15]。

气团对一个地区影响的路径主要与当地气压系统维持的位置及移动规律相关, 也和地形地貌的特点及局地的环流密不可分。HYSPLIT 模型的轨迹计算原理如下: 假设一个被动示踪粒子随风运动, t 时刻处于 $P(t)$ 位置, 时间步长 Δt 后的位置 $P(t+\Delta t)$ 为(其中 V 为风速):

$$P(t+\Delta t) = P(t) + 0.5[V(P, t) + V(P', t+\Delta t)]\Delta t$$

式中, P' 为一个中间猜想位置, 计算过程中对时间步长 Δt 的要求是:

$$P(t+\Delta t) = P(t) + V(P, t)\Delta t$$

$\Delta t \cdot U_{\max}$ 小于 0.75 倍的网格距(U_{\max} 为最大风速, 由气块上一时刻的最大迁移速度决定)。计算中如果轨迹点超出模型上边界则轨迹终止, 如果轨迹点到达地面则沿地表继续运行[16]。

3. 结果与讨论

3.1. 年际变化特征

利用 2014 年 1 月 1 日至 2017 年 12 月 31 日观测云南典型城市(昆明、曲靖、玉溪)获得的 $PM_{2.5}$ 浓度小时平均值数据, 可得到 4 年的三市 $PM_{2.5}$ 浓度的年际变化特征, 结果示于图 2。

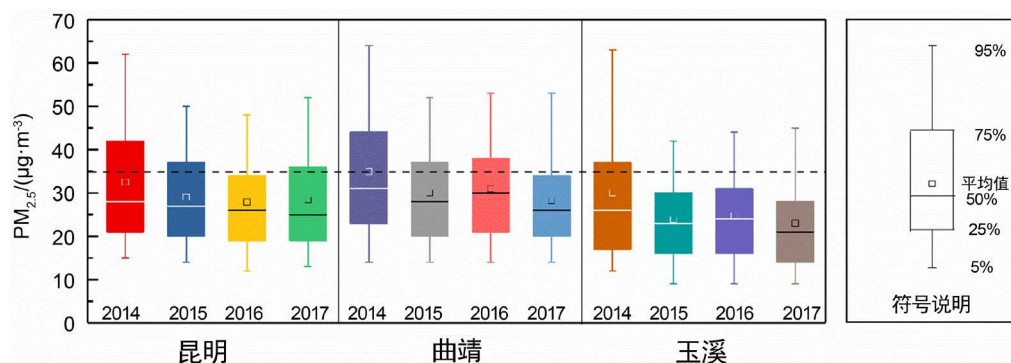


Figure 2. Characteristics of PM_{2.5} interannual variation in three cities of Yunnan province (2014-2017)
图 2. 云南三市 PM_{2.5} 年际变化特征图(2014~2017)

对图 2 进行分析,从整体来看,2014~2017 年 PM_{2.5} 浓度整体呈下降趋势,3 个城市的 PM_{2.5} 浓度年平均均值均在国家《环境空气质量标准》(GB3095-2012)二级标准(35 µg·m⁻³)范围之内。2014 年昆明(32.51 µg·m⁻³)、曲靖(34.94 µg·m⁻³)、玉溪(30.02 µg·m⁻³)三市的 PM_{2.5} 平均值较高,曲靖最高。2015 年以后,空气质量状况得到进一步提升,PM_{2.5} 浓度平均值呈下降趋势。从三个城市之间的比较来看,玉溪的 PM_{2.5} 浓度值最低(23.88 µg·m⁻³),其次是昆明(28.44 µg·m⁻³),最后是曲靖(29.71 µg·m⁻³)。从 3 个城市 PM_{2.5} 浓度分布来看,各城市中位数绝大部分位于四分位距箱体偏下位置,且下触须长度明显短于上触须的长度,说明数据呈偏态分布。2014 年至 2017 年三市中位数分别为昆明 28 µg·m⁻³、27 µg·m⁻³、26 µg·m⁻³ 和 25 µg·m⁻³,曲靖 31 µg·m⁻³、28 µg·m⁻³、30 µg·m⁻³ 和 26 µg·m⁻³,玉溪 26 µg·m⁻³、23 µg·m⁻³、24 µg·m⁻³ 和 21 µg·m⁻³。

为了便于对比,表 1 给出了相近年份其他典型城市 PM_{2.5} 浓度平均值。

Table 1. Typical city contrastive analysis
表 1. 典型城市对比分析

地点	时间(年)	PM _{2.5} 浓度(µg·m ⁻³)	文献
加拿大, 多伦多	2013~2015	8.19	[17]
印度, 新德里	2014	153	[18]
瑞士, 日内瓦	2011~2012	15	[19]
江苏, 常州	2015~2016	64.9	[20]
珠江三角洲	2013~2015	40.35	[21]
浙江, 宁波	2012~2013	51.4	[22]
上海	2014~2015	54.05	[23]
北京	2014	87.74	[24]
福建, 厦门	2016	27.25	[25]
昆明	2014~2017	29.45	本研究
曲靖	2014~2017	31.02	本研究
玉溪	2014~2017	25.41	本研究

从表 1 中可以看出,云南省典型城市的 PM_{2.5} 浓度与我国其他城市、地区相比,处于较优水平,这与云南先后制定实施的《昆明市确保环境空气质量达百分之百优良行动计划》、《昆明市机动车排气污染

防治条例》等一系列政策是分不开的[26]。同时,曲靖市执行《曲靖市大气污染防治行动计划》,有效遏制了道路施工、铁路建设、建筑施工等施工场地扬尘,改善环境空气质量[27]。

尽管云南省的空气质量在全国的排名居前列,但同国外的一些国家相比,污染状况堪忧。

从图3中很明显可以看到我国PM_{2.5}污染严重,空气质量整体在世界上倒数第二,仅比孟加拉国略强,印度排名第三。我们国家位列世界第二大经济体,但所带来的空气污染愈发严重,且目前的状况不容乐观。世界卫生组织2016年城市空气质量数据显示(表2世界卫生组织公布2016年中国主要城市空气质量排名(部分)),中国大陆城市PM_{2.5}年平均值最低为三亚(全球2972个城市中排第1572位),玉溪、曲靖、昆明的排名分别为2433、2470和2522,处于世界排名靠后位置。

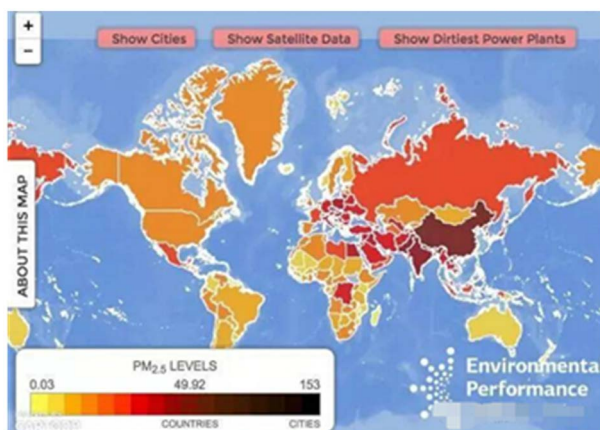


Figure 3. Global PM_{2.5} distribution diagram announced by environmental performance index (2016)

图3. EPI发布的全球PM_{2.5}分布图(2016年)

Table 2. The world health organization reports the air quality ranking of major cities in China in 2016 (part)

表2. 世界卫生组织公布2016年中国主要城市空气质量排名(部分)

城市	PM _{2.5} 年均值($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	全球排名
三亚	15	1572
海口	22	2140
玉溪	30	2433
曲靖	32	2470
昆明	34	2522
宁波	45	2671
兰州	58	2796

除PM_{2.5}对大气污染产生了较大贡献以外,O₃也是致使云南省空气污染重要成分。臭氧的氧化性可以导致大气中的SO₂、NO₂、VOCs被氧化并逐渐凝结成颗粒物,从而增加了PM_{2.5}的浓度,使雾霾更严重。控制臭氧污染比控制PM_{2.5}和其他空气污染物更具挑战性。当O₃位于15 km至25 km的平流层中时,它是地球的保护伞,阻挡地球上的生物免受紫外线侵扰;而在近地面,氮氧化物(主要来自机动车、发电厂、燃煤锅炉和水泥炉窑等)和挥发性有机物(主要来自于机动车、石化工业排放和有机溶剂挥发)等化合物受高温、太阳辐射催化形成O₃,就成了污染物,O₃浓度一般会在下午3点左右到达峰值,故侦测O₃浓度可作为判定空气污染程度的指标之一。

云南地处中低纬高原地区, 较中国其它地区地面能够接收到更多的紫外辐射, 有利于臭氧的产生; 同时, 云南处于西南季风区, 季风的活动带来暖湿气流使得大气不稳定, 易产生强对流导致多云天气, 抑制近地面臭氧的生成, 加之云南复杂的地形和天气状况, 使得研究云南近地面臭氧浓度的变化成因分析十分困难。本文利用 2014 年 1 月 1 日至 2017 年 12 月 31 日观测云南典型城市(昆明、曲靖、玉溪)获得的 O_3 -8h 浓度(O_3 -8h 浓度是指臭氧 8 h 的滑动平均浓度)小时平均值数据, 可得到 4 年的三市 O_3 -8h 浓度的年际变化特征, 结果示于图 4。

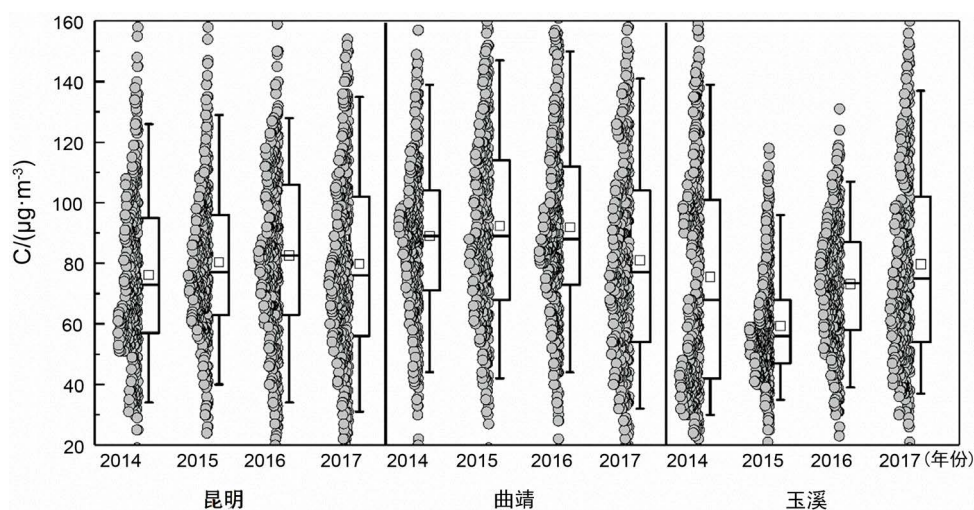


Figure 4. Annual variation characteristics of O_3 -8h in three cities of Yunnan province (2014-2017)

图 4. 云南三市 O_3 -8h 年际变化特征图(2014~2017)

对图 4 进行分析, 从整体来看, 2014~2016 年昆明、曲靖 O_3 -8h 浓度呈逐年上升趋势, 2017 年情况好转, 浓度明显下降; 玉溪则相反, 2014 年玉溪 O_3 -8h 浓度较高, 达到 $75.47 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 2015 年浓度显著下降, 并从 2015~2017 年逐年增加, 各城市四分距箱体所在的区间, 玉溪的箱体整体所在区间低于其他城市, 臭氧污染较轻。从 3 个城市 O_3 -8h 浓度分布来看, 可见各城市中位数均位于四分位距箱体中间或中间偏上位置, 说明数据呈偏态分布。

3.2. 月、季变化特征

$PM_{2.5}$ 浓度水平受污染源排放和气象条件影响, 存在明显的季节和时段变化特征。总体趋势大致表现为冬春季高, 夏秋季低。在同一地区, 不同的月、季的气候或者环境条件变化均可造成 $PM_{2.5}$ 浓度的规律性波动。

图 5 给出了云南典型城市 2014~2017 年 $PM_{2.5}$ 浓度月平均值的变化情况, 从中可以看出, 各年份 $PM_{2.5}$ 浓度月平均值的最小值几乎都出现在 6、7、8 月, 最高值则几乎都出现在该年 12 月和来年 1、2 月。为了便于分析研究, 将春季定为 3~5 月, 夏季定为 6~8 月, 秋季定为 9~11 月, 冬季定为当年 12 月~来年 2 月。冬季大气层结较稳定, 易出现辐射逆温现象, 不利于颗粒物的扩散迁移, 使其浓度发生累计而增大。夏季光照强烈, 大气层结极不稳定, 有利于颗粒物等污染物的稀释扩散, 另外, 夏季降水频次增多, 降水对大气环境有较好的清洗作用, 这些因素都有效降低了颗粒物浓度值。

图 6 给出了云南典型城市 2014~2017 年 O_3 浓度月平均值的变化情况, 从中可以看出, 各年 O_3 浓度月平均值的最小值几乎都出现在 12、1、2 月, 最高值则几乎都出现在 3 月、4 和 5 月, 与 $PM_{2.5}$ 浓度规律明显不同。

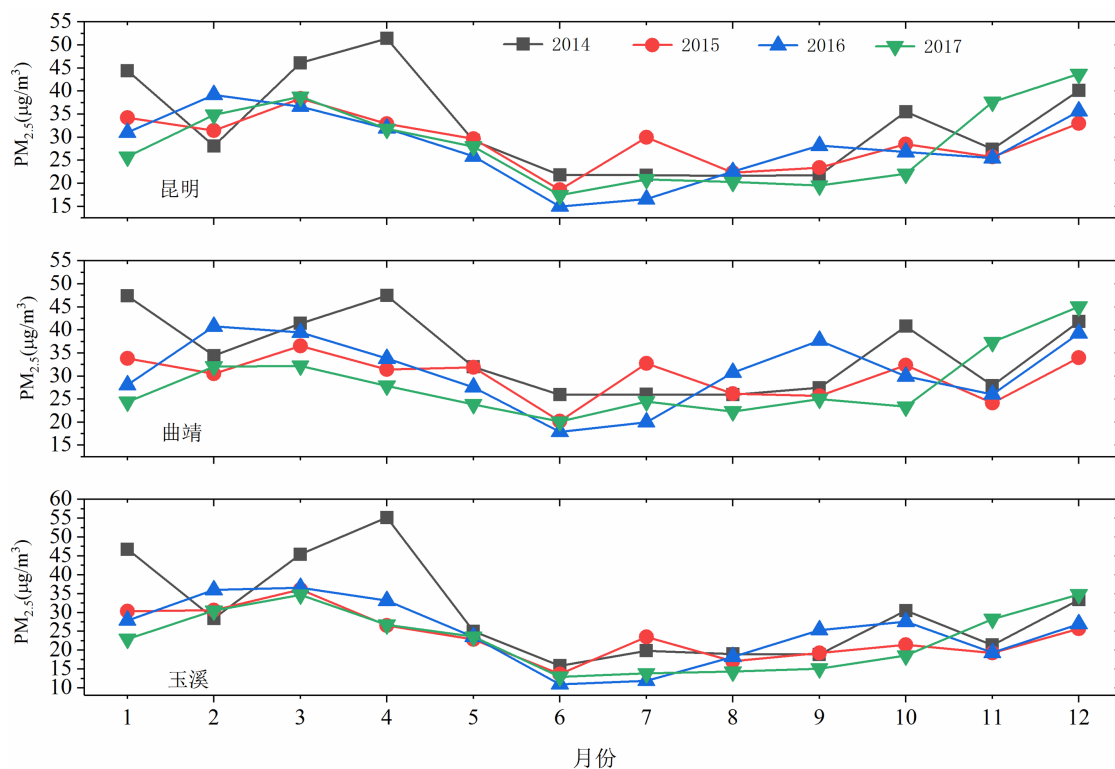


Figure 5. The average monthly average of PM_{2.5} concentration in the typical cities of Yunnan in 2014-2017
 图 5. 2014~2017 年云南典型城市 PM_{2.5} 浓度月平均值曲线

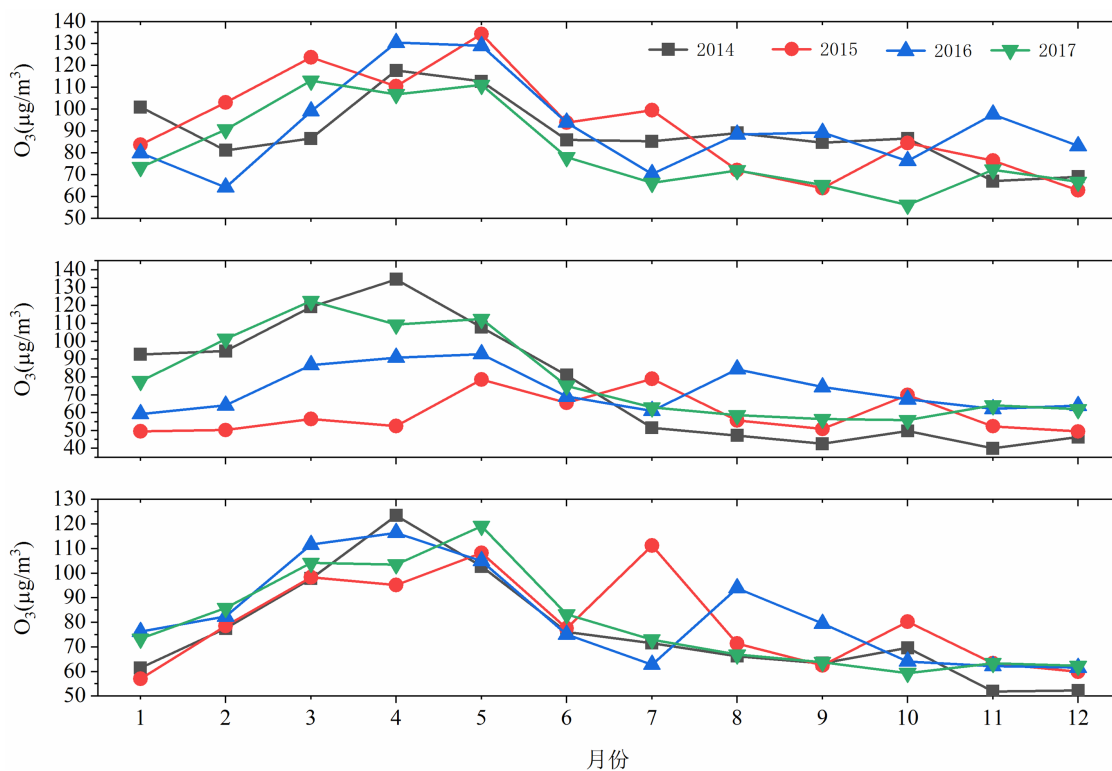


Figure 6. The average monthly average of O₃ concentration in the typical cities of Yunnan in 2014-2017
 图 6. 2014~2017 年云南典型城市 O₃ 浓度月平均值曲线

3.3. 后向轨迹分析

2017年冬季,昆明市有两次污染较严重的时间段2017年12月4日至2017年12月11日、2017年12月21日至2017年12月31日,为了探究其可能的外来源,选取了昆明市(25.25N, 102.72E)作为源定位,通过后向轨迹模型绘制了昆明市2017年12月4日($PM_{2.5}$ 日均浓度 $40 \mu g \cdot m^{-3}$)和2017年12月7日($PM_{2.5}$ 日均浓度 $58 \mu g \cdot m^{-3}$)、2017年12月23日($PM_{2.5}$ 日均浓度 $44 \mu g \cdot m^{-3}$)和2017年12月25日($PM_{2.5}$ 日均浓度 $101 \mu g \cdot m^{-3}$)气团72 h后向轨迹图,见图7和图8,图中绘制了两个高度,分别是100米和1000米,100米代表近地层,1000代表边界层中上部。

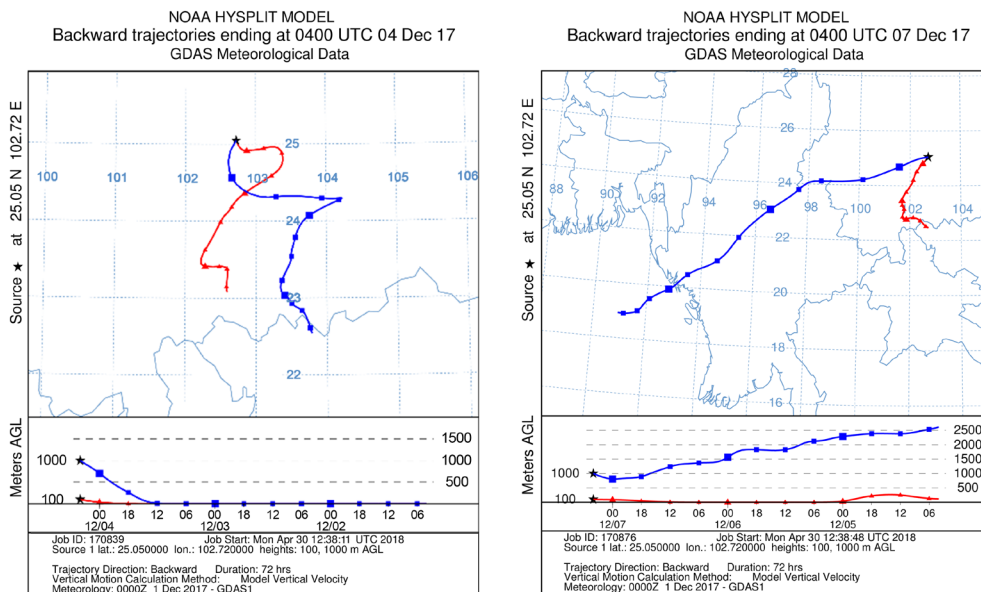


Figure 7. Backward trajectories of 72 h on 4 December 2017 and 7 December 2017 (The first figure)
图7. 2017年12月4日和2017年12月7日(UCT 04时)72 h后向轨迹(第一组)

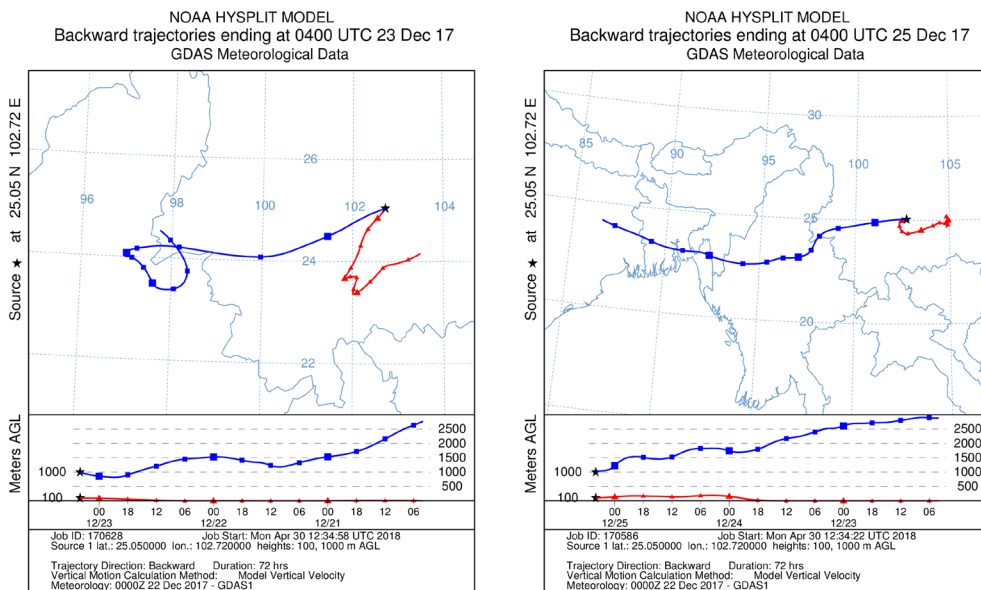


Figure 8. Backward trajectories of 72 h on 23 December 2017 and 25 December 2017 (The second figure)
图8. 2017年12月23日和2017年12月25日(UCT 04时)72 h后向轨迹(第二组)

通过图 7 和图 8 污染前后的对比可以发现, 无论是 2017 年 12 月上旬还是下旬, 污染物浓度较高的天, 1000 米高度气团均主要来自于云南西南部及缅甸的长距离输送。气团途经区域有大型工业集中地昆明安宁市[28], 来自于东南亚国家越南、老挝、缅甸长距离输送的 PAHs [29]也是导致空气污染相对增加的原因之一。

因此, 云南重污染天气的出现, 可能与外来源叠加有密切关系, 最可能的是云南西南部污染和来自缅甸等国家的长距离传输导致。

4. 结论

1) 2014~2017 年云南省典型城市 PM_{2.5} 浓度整体呈下降趋势, 在我国处于较优水平, 但同国外的一些国家相比, 仍有一定差距。

2) PM_{2.5} 浓度水平受污染源排放和气象条件影响, 存在明显的季节和时段变化特征, 总体趋势大致表现为冬春季高, 夏秋季低, 浓度的变化与天气背景密切相关。

3) 2014~2016 年昆明、曲靖 O₃-8h 浓度呈逐年上升趋势, 到了 2017 年情况好转, 浓度明显下降; 玉溪则相反, 2014 年玉溪 O₃-8h 浓度较高, 达到 75.47 μg·m⁻³, 2015 年浓度显著下降, 2015~2017 年逐年增加。

4) 冬季两个典型污染观测期间采样点的气团后向轨迹显示, 云南重污染天气的出现, 可能与外来源叠加有密切关系, 最可能的是云南西南部污染和来自缅甸等国家的长距离传输叠加导致。

致 谢

感谢中国空气质量在线监测分析平台的数据支持。

基金项目

广西科技计划项目(2018GXNSFBA281082)、广西教育厅基金(2017KY0261)、桂林理工大学博士(后)科研启动金。

参考文献

- [1] Underwood, E. (2017) The Polluted Brain. *Science*, **355**, 342-345. <https://doi.org/10.1126/science.355.6323.342>
- [2] 常蓉. 云南省大气污染控制探讨[J]. 环境科学导刊, 1997(4): 13-16.
- [3] 沈鹰, 董海京. 云南省大气污染扩散输送特征研究[J]. 中国环境科学, 1997(4): 360-364.
- [4] 罗燕, 陈新梅, 田永丽. 2015-2016 年云南省主要城市大气污染物浓度特征及其与气象要素的关系[J]. 环境科学导刊, 2018, 37(6): 40-45.
- [5] 尚小宴, 罗兆杰, 李金文. 普洱市思茅城区空气污染指数 API 时空分布特征研究[J]. 环境科学导刊, 2015, 34(6): 48-50+54.
- [6] Qu, W.J., Arimoto, R., Zhang, X.Y., *et al.* (2010) Spatial Distribution and Interannual Variation of Surface PM₁₀ Concentrations over Eighty-Six Chinese Cities. *Atmospheric Chemistry & Physics*, **10**, 5641-5662. <https://doi.org/10.5194/acp-10-5641-2010>
- [7] 毕丽玫. 高原城市昆明大气 PM_{2.5} 污染特征及与气象条件相关性分析研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2015.
- [8] 许燕婷, 刘兴诏, 王振波. 基于 AQI 指数的中国城市空气质量时空分布特征[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2019, 37(1): 187-196.
- [9] 程雪雁, 朱磊, 周艺萱. 2015-2018 年京津冀城市群空气污染时空变化特征[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2019(4): 523-531.
- [10] 王洪强, 贺千山, 陈勇航, 等. 2008-2012 年上海黑碳浓度变化特征分析[J]. 环境科学, 2014, 35(4): 1215-1222.

- [11] Yu, T.Y. (2010) Characterization of Ambient PM_{2.5} Concentrations. *Atmospheric Environment*, **44**, 2902-2912. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.04.034>
- [12] Xie, Y.Y., et al. (2015) Spatiotemporal Variations of PM_{2.5} and PM₁₀ Concentrations between 31 Chinese Cities and Their Relationships with SO₂, NO₂, CO and O₃. *Particuology*, **20**, 141-149. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2015.01.003>
- [13] Zhou, M., Qiao, L.P., Zhu, S.H., et al. (2016) Chemical Characteristics of Particulate Matters and Trajectory Influence on Air Quality in Shanghai During the Heavy Haze Episode in December, 2013. *Environmental Science*, **37**, 1179.
- [14] Tahri, M., Benchrif, A., Bounakhla, M., et al. (2017) Seasonal Variation and Risk Assessment of PM_{2.5} and PM_{2.5-10} in the Ambient Air of Kenitra, Morocco. *Environmental Science Processes & Impacts*, **19**, 1427-1436. <https://doi.org/10.1039/C7EM00286F>
- [15] Bella, D., Culpepper, J., Khaimova, J., et al. (2016) Characterization of Pollution Transport into Texas Using OMI and TES Satellite, GIS and *in Situ* Data, and HYSPLIT Back Trajectory Analyses: Implications for TCEQ State Implementation Plans. *Air Quality Atmosphere & Health*, **9**, 569-588. <https://doi.org/10.1007/s11869-015-0363-2>
- [16] 戚佳明. 基于 HYSPLIT 模型的大气 CO₂ 传输研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2014.
- [17] Cui, S.L. (2017) Temporal and Spatial Variations of PM_{2.5}, Surface O₃, and Smog in Ontario, Canada. University of Toronto, Toronto.
- [18] 周志民, 王慧丽, 张鹏岩. 印度空气污染情况超过中国[J]. 生态经济(中文版), 2016, 32(4): 2-5.
- [19] Meier, R., Eeftens, M., Phuleria, H.C., et al. (2015) Differences in Indoor versus Outdoor Concentrations of Ultrafine Particles, PM_{2.5}, PM Absorbance and NO₂ in Swiss Homes. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, **25**, 499-505. <https://doi.org/10.1038/jes.2015.3>
- [20] 周天雄, 王国强, 匡汉祎, 等. 常州市 PM_{2.5} 气候统计[J]. 农业与技术, 2017, 37(7): 144-145.
- [21] 庄欣, 黄晓锋, 陈多宏, 等. 基于日变化特征的珠江三角洲大气污染空间分布研究[J]. 中国环境科学, 2017, 37(6): 2001-2006.
- [22] 俞科爱, 徐宏辉, 黄旋旋, 等. 宁波秋冬季空气污染变化特征及污染物后向轨迹分析[J]. 浙江气象, 2015, 36(1): 27-31.
- [23] 刘超, 花丛, 康志明. 2014-2015 年上海地区冬夏季大气污染特征及其污染源分析[J]. 气象, 2017, 43(7): 823-830.
- [24] 韩力慧, 张鹏, 张海亮, 等. 北京市大气细颗粒物污染与来源解析研究[J]. 中国环境科学, 2016, 36(11): 3203-3210.
- [25] 许晓芬, 欧启通. 厦门市 PM_{2.5} 浓度的多元统计分析与预测[J]. 统计学与应用, 2017, 6(3): 311-319.
- [26] 洪尚群. 明确防治重点: 蓝天长春春城——春城昆明的大气污染治理启示[J]. 环境保护, 2013, 41(11): 32-33.
- [27] 冯小宇. 云南曲靖市: 扬尘污染防治环境保护专项执法行动取得实效[J]. 中国环境监察, 2017(4): 38-39.
- [28] 陈春燕. 安宁市大气环境容量预测初探[J]. 民营科技, 2015(8): 242-244.
- [29] 黄璐. 玉溪市大气 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中多环芳烃(PAHs)污染特征及来源研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2016.