

2015~2017年广西典型城市空气污染特征对比分析

陈记玲^{1,2}, 左艳秋¹, 冯琦¹, 黄俊³, 王洪强^{1,4,5*}

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

³中国科学院空天信息创新研究院, 北京

⁴广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 广西 桂林

⁵广西岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心, 广西 桂林

收稿日期: 2023年1月2日; 录用日期: 2023年1月31日; 发布日期: 2023年2月9日

摘要

通过中国空气质量在线监测分析平台最新数据, 分析了2015年3月1日至2018年2月28日广西典型城市大气污染特征及变化趋势, 并通过后向轨迹模式对污染物输送路径进行了统计分析。结果表明: 广西各城市的污染物年均浓度在总体上呈上升趋势, 但大气污染物浓度随年际变化的幅度较小, PM_{2.5}的年均浓度普遍高于国家二级标准; AQI、PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、CO、NO₂的浓度冬季高于夏季, 其浓度冬季高于夏季的比例依次为: 67.67%, 134.06%, 86.84%, 26.25%, 35.17%, 76.98%, O₃的浓度夏季高于冬季, 其夏季高于冬季的比例为7.65%; 利用HYSPLIT4后向轨迹模型, 模拟典型污染时段气团传输过程, 初步判断广西典型城市大气污染物的传输路径主要来自东北、西北和西部方向。

关键词

PM_{2.5}, O₃, 空气污染, 后向轨迹模型

Comparative Analysis of Air Pollution Characteristics in Typical Cities of Guangxi in the Past 2015~2017 Years

Jiling Chen^{1,2}, Yanqiu Zuo¹, Qi Feng¹, Jun Huang³, Hongqiang Wang^{1,4,5*}

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

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

³Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing

*通讯作者。

⁴Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology, Guilin Guangxi

⁵Guangxi Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Water Safety in Karst Areas, Guilin Guangxi

Received: Jan. 2nd, 2023; accepted: Jan. 31st, 2023; published: Feb. 9th, 2023

Abstract

Based on the latest data released by China Air Quality Online Monitoring and Analysis Platform (<http://www.aqistudy.cn/>), the characteristics and trends of atmospheric pollution in typical cities of Guangxi from 2015 to 2017 were analyzed, and the pollutant transport paths were analyzed by backward trajectory model. The results showed that the annual average concentration of pollutants in Guangxi cities showed an upward trend on the whole, but the annual average concentration of PM_{2.5} was generally higher than the national secondary standard; the air pollution in winter was more serious than that in summer, and the concentrations of AQI, PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, CO and NO₂ were higher than those in summer. The proportions in summer were 40.36%, 57.28%, 46.48%, 20.79%, 26.02%, 43.50% and the proportions in winter were 7.65% and 7.65%, respectively. The air mass transport process in typical pollution periods was simulated by using the backward air mass trajectory model to preliminarily judge the atmospheric characteristics of typical cities in Guangxi. The transport path of pollutants mainly comes from northeast, northwest and west directions.

Keywords

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

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

近年来,城市化的快速发展和工业化进程的加快对生态环境产生了巨大的影响,其中城市空气污染问题尤为突出[1][2][3][4]。空气质量与人类身体健康密切相关,短期接触和长期接触空气污染物都会对人体健康造成不利影响,如哮喘症状、眼部疾病、心血管和慢性心脏疾病等[5]。为有效改善大气污染问题,各级政府相继出台了《打赢蓝天保卫战三年行动方案》和《大气污染防治行动计划》等政策措施,对清洁燃料、建筑扬尘、交通尾气和燃煤锅炉有关的污染物进行有效控制[6]。然而,许多地区仍出现持续的重污染过程,特别是在秋冬季节[7]。目前,对空气污染的原因和机制进行了许多研究,人们发现空气污染的区域特征研究已成为改善城市空气污染问题的关键[8]。因此,研究城市空气污染的时间和空间分布特征,对空气污染的区域联合控制具有重要意义。

目前,国内外学者在空气污染区域特征方面进行了大量的研究,如 Zhang 等[9]通过采集成都市典型季节(2009~2010年)的 PM_{2.5} 样本,分析了城市地区 PM_{2.5} 的季节性污染特征和来源;Jain 等[10]通过 GC/MS 技术对北京城市大气中的细颗粒物的有机成分进行研究,发现煤炭燃烧和生物质燃烧排放的不同有机污染物呈现出明显不同的季节性特征,揭示了北京市空气污染的季节性特征;李晶鑫等[11]对 2013~2014 年全国各个城市的空气污染指数进行处理分析,揭示了我国大气污染物的时空分布特征及 SO₂ 质量浓度

年代变化; Liu 等[12]通过研究北京市区域的气态污染物(SO_2 、 NO_2 、 O_3 和 CO)的质量浓度和尺寸分布,揭示了区域雾霾的形成和演变机制。这些研究对了解城市空气污染的时空分布和治理具有重要意义,但目前各大城市地区的空气污染治理仍存在一定局限性:一方面,在空气污染物日益多样化的背景下,多种污染物的综合影响机制及污染源的时空分布仍然不够明确[13];相对于发达地区的大城市,如广州、上海和北京等地,对二线及以下的城市空气污染的研究仍相对缺乏[14]。

环境空气质量监测站提供大量的时间性数据,这些数据以空气质量指数(AQI)值或其他有意义的指数传达给公众,这些指数取决于目的、时间尺度以及一系列基于流行病学研究的子指数。美国环境保护署(US EPA)最初在 1999 年实施使用空气质量指数,并将六种关键的空气污染物来定义 AOI: 细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)、粗颗粒物(PM_{10})、一氧化碳(CO)、二氧化氮(NO_2)、臭氧(O_3)和二氧化硫(SO_2) [15]。鉴于空气污染的快速变化,有必要确定污染物的时间和空间变化特征以及它们与气象条件的关系,并评估空气质量的变化,以制定预防和控制措施。在本研究中,我们对广西 14 个典型城市 2015~2017 年的空气污染物数据进行处理和分析,目的在于: 1) 评价广西地区空气质量指数(AQI)值以及可吸入颗粒物和气态污染物浓度变化趋势; 2) 确定空气污染物浓度的时间和空间特征; 3) 探究广西主要城市空气污染的来源规律,并根据其后向轨迹线对典型城市的空气污染来源进行分析。

2. 数据处理

2.1. 数据来源

广西壮族自治区 14 个典型城市环境空气质量监测站点数分布如图 1 所示。



Figure 1. Distribution of observation points

图 1. 观测点分布图

数据基于中国空气质量在线监测分析平台(<http://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,公布的数据包括南宁、柳州和桂林等广西壮族自治区内 14 个城市,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 3 年的 14 个典型城市(2015 年 3 月 1 日至 2018 年 2 月 28 日),其中, $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 CO 、 NO_2 和 SO_2 基于 24 h 平均值进行统计, O_3 基于日最大 8 h 平均值进行统计(数据首先剔除了异常值 0)。

2.2. 研究方法

空气污染状况由空气质量指数(AQI)评价,其中包括与颗粒悬浮物、 $\text{PM}_{2.5}$ 有关的数据,以及 8 h 平均 O_3 浓度的指数[16]。AQI 将常规监测的空气污染物浓度简化为概念性的指数形式,将空气状况和空气污

染情况进行分级以表征城市的空气质量[14]。此外,根据国家空气质量标准, $AQI < 50$ 表示环境空气质量良好; $51 \leq AQI < 100$ 表示环境空气质量中等; $101 \leq AQI < 150$ 表示环境空气质量轻度污染; $151 \leq AQI < 200$ 表示环境空气质量中度污染; $201 \leq AQI < 300$ 表示环境空气质量重度污染; $AQI > 300$ 表示环境空气质量严重污染[17]。

HYSPLIT-Hybrid Single Particle Lagrange Integrated Trajectory Model, 即拉格朗日混合单粒子轨道模型, 用于计算和分析大气污染物输送、扩散轨迹, 该模型具有处理多种气象要素入场、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, 已经被广泛应用于多种污染物在各个地区的传输和扩散的研究中[18] [19]。本研究采用混合单粒子拉格朗日综合轨迹(HYSPLIT-4)背向轨迹模拟模型和全球数据同化系统(GDAS)的 0.5×0.5 度分辨率的气象数据, 了解不同季节、不同风向和风速下气团对空气污染过程的影响。

3. 结果与讨论

3.1. 年际变化特征

根据 2012 年发布的《环境空气质量标准》, 分为“基本项目”和“其他项目”, 分别规定了环境空气污染物浓度限值(如表 1)。其中“基本项目”包括颗粒物($PM_{2.5}$)、颗粒物(PM_{10})、二氧化硫(SO_2)、一氧化碳(CO)、二氧化氮(NO_2)、臭氧(O_3)。

Table 1. Basic environmental control limits of ambient air pollutants [19]

表 1. 环境空气污染物基本项目控制限值[19]

序号	污染物项目	平均时间	浓度限值	单位
1	颗粒物($PM_{2.5}$)	年平均	35	$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
2	颗粒物(PM_{10})	年平均	70	$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
3	二氧化硫(SO_2)	年平均	60	$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
4	一氧化碳(CO)	24 h 平均	4	$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
5	二氧化氮(NO_2)	年平均	40	$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
6	臭氧(O_3)	日最大 8 h 平均	160	$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

将 2015~2017 年广西 14 个城市的大气污染物进行年际平均(如图 2)。由图 2 分析可知, 相较于 2015 年, 2016 年的 AQI 、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 NO_2 、 O_3_{8h} 浓度有上升的趋势, SO_2 、CO 浓度有下降趋势, 其污染物上升比例依次为 10.19%, 11.40%, 10.17%, 16.66%, 12.70%, -2.53%, -3.72%; 2017 年相较于 2016 年, AQI 、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、CO 浓度有下降趋势, NO_2 、 O_3_{8h} 浓度有上升的趋势, 其污染物上升的比例依次为 -3.50%, -7.33%, -3.65%, -9.64%, -0.22%, 4.66%, 2.60%。可见, 广西 2015~2017 年大气污染物浓度随年际变化的幅度较小。广西 2015 年的大气污染物浓度较低, 2016 年的大气污染物浓度较高, 与 2016 年相比, 2017 年的大气污染物浓度有所下降, 说明广西的大气污染情况有明显好转, 但 O_3 污染未得到改善。结合表 1 和图 2 分析可知, 2015 年的 AQI 、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 NO_2 、CO、 O_3_{8h} 年均浓度均低于国家二级浓度限值(2015 年 $PM_{2.5}$ 浓度为 $34.96 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$); 但 2016 年、2017 年的年均 $PM_{2.5}$ 浓度均有上升且高于国家二级浓度限值(2016 年 $PM_{2.5}$ 为 $38.94 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 2017 年 $PM_{2.5}$ 为 $36.09 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)。从分析的数据来看, 近年来影响广西大气污染的主要污染物为 $PM_{2.5}$ 。随着经济的发展和城市化进程的加快, 广西区内的工业发展迅速, 机动车数量急剧上升, 工业废气及汽车尾气的排放、扬尘、二次污染以及生物质的燃烧都是造成 $PM_{2.5}$ 浓度上升的原因。虽然 2015~2017 年广西总体环境空气质量一直保持着良好的

水平,但是随着广西北部湾经济区的开发上升为国家发展战略,广西经济开发、工业化和城市化发展迅速,使得大气环境保护所面临的压力日益增大。

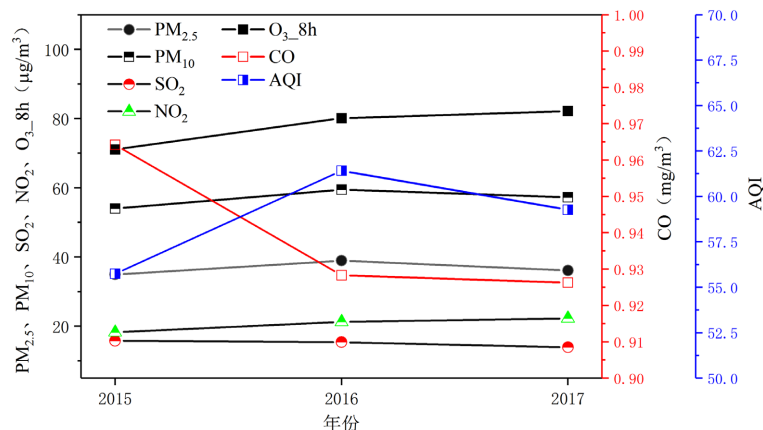


Figure 2. Characteristics of interannual variation in Guangxi
图 2. 广西年际变化特征

3.2. 季节变化特征

3.2.1. 广西季节变化特征分析

为了分析广西典型城市大气污染物质量浓度的季节变化规律,按气象学划分四季[20],将 2015~2017 年广西 14 个城市的大气污染物进行季节平均(如图 3)。夏季(6~8 月)除 O_{3_8h} 外,其它污染物浓度均为全年最低,平均值 AQI 为 46.15、PM_{2.5} 为 23.54 µg·m⁻³、PM₁₀ 为 41.52 µg·m⁻³、SO₂ 为 13.37 µg·m⁻³、CO 为 0.82 mg·m⁻³、NO₂ 为 15.63 µg·m⁻³、O_{3_8h} 为 78.65 µg·m⁻³。而冬季(12 月~次年 2 月)除 O_{3_8h} 外,其它污染物浓度均为全年最高,平均值 AQI 为 77.38、PM_{2.5} 为 55.10 µg·m⁻³、PM₁₀ 为 77.56 µg·m⁻³、SO₂ 为 16.88 µg·m⁻³、CO 为 1.11 mg·m⁻³、NO₂ 为 27.66µg·m⁻³、O_{3_8h} 为 73.06 µg·m⁻³ (略低于春季平均值 79.68 µg·m⁻³)。春季(3 月~5 月)、秋季(9 月~11 月)两季污染物浓度季节平均值较为接近,除 O_{3_8h} 外,介于冬、夏之间。AQI、PM_{2.5} 和 PM₁₀ 平均浓度随季节变化相对较大,其中 AQI 冬季平均浓度较夏季高 31.23,PM_{2.5} 冬季平均浓度较夏季高 31.56 µg·m⁻³,PM₁₀ 冬季平均浓度较夏季高 36.05 µg·m⁻³,冬季浓度接近于夏季的两倍;SO₂、CO、NO₂ 和 O_{3_8h} 平均浓度随季节变化不大,其中 SO₂ 冬季平均浓度较夏季高 3.51 µg·m⁻³,

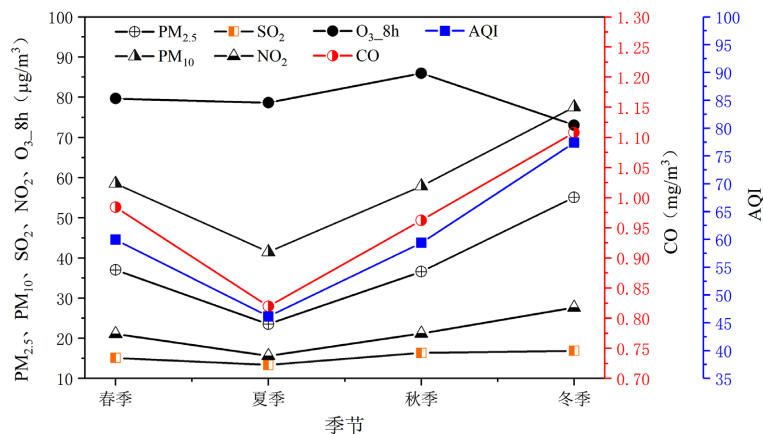


Figure 3. Seasonal mean of air pollutants
图 3. 大气污染物季节平均值

CO 冬季平均浓度较夏季高 $0.29 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, NO_2 冬季平均浓度较夏季高 $12.03 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 而 O_3 _8h 秋季(O_3 _8h 浓度秋季最高)平均浓度较冬季仅高 $12.93 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。 O_3 _8h 浓度夏季 > 冬季是由于夏季天气等适合生成光化学污染[21], 气温高、紫外线强, 机动车排放的污染物中, 含大量的氮氧化物和挥发性有机物, 它们在太阳照射下, 会发生一系列反应, 生成臭氧[22]。

由此可见, AQI、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 随季节变化较大, 即受气象条件变化的影响显著, 而 SO_2 、CO、 NO_2 和 O_3 _8h 随季节变化较小, 即受气象条件变化的影响不显著; 冬季(除 O_3 _8h 外)各污染物浓度最高, 春秋次之, 夏季(O_3 _8h)各污染物浓度最低, 说明大气环境质量以冬季最差, 春秋次之, 夏季最好[23]。

3.2.2. 典型城市季节变化特征分析

将 2015~2017 年广西 4 个典型城市(南宁、百色、柳州和防城港)的大气污染物进行季节平均(如表 2)。从表 2 中可以看到, 南宁市 O_3 _8h 浓度秋季最高, 冬季最低, 春夏次之, 且四个季节的 O_3 _8h 浓度均低于国家二级浓度标准; AQI、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、CO、 NO_2 浓度均为冬季最高, 夏季最低, 春秋次之, 除秋、冬季节的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和冬季的 PM_{10} 浓度高于国家二级浓度标准外, 其它污染物浓度均低于国家二级浓度标准。百色市 O_3 _8h 浓度春季最高, 冬季最低, 夏秋次之, 且四个季节的 O_3 _8h 浓度均低于国家二级浓度标准; AQI、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、CO、 NO_2 浓度均为冬季最高, 夏季最低, 春秋次之, 除春、冬季节的 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度高于国家二级浓度标准外, 其它污染物浓度均低于国家二级浓度标准。柳州市 O_3 _8h 浓度夏季最高, 冬季最低, 春秋次之, 且四个季节的 O_3 _8h 浓度均低于国家二级浓度标准; AQI、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、CO、 NO_2 浓度均为冬季最高, 夏季最低, 春秋次之, 除春、秋、冬季节的 $\text{PM}_{2.5}$ 和冬季的 PM_{10} 浓度高于国家二级浓度标准外, 其它污染物浓度均低于国家二级浓度标准。防城港市 O_3 _8h 浓度秋季最高, 春季最低, 冬夏次之, SO_2 浓度冬季最高, 春季最低, 夏秋次之, 且四个季节的 O_3 _8h、 SO_2 浓度均低于国家二级浓度标准; AQI、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、CO、 NO_2 浓度均为冬季最高, 夏季最低, 春秋次之, 除冬季的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高于国家二级浓度标准外, 其他污染物浓度均低于国家二级浓度标准。根据往年气象规律, 广西冬季气温较低, 秋冬季节易受静稳天气、雨水较少、天气干燥等不利气象条件的影响, 不利于大气污染物的扩散, 而夏季气温较高, 热对流旺盛, 水汽输送好, 扩散条件较好, 利于产生降水, 对污染物的净化作用显著。

Table 2. Comparative analysis of typical cities

表 2. 典型城市对比分析

		AQI	$\text{PM}_{2.5}$	PM_{10}	SO_2	CO	NO_2	O_3 _8h
南宁市	春季	57.41	35.00	61.55	10.55	0.97	31.09	75.62
	夏季	46.22	22.91	46.08	9.21	0.81	25.23	77.99
	秋季	59.22	36.43	64.33	12.99	0.96	34.34	81.44
	冬季	74.59	52.38	78.58	15.23	1.14	41.53	65.03
百色市	春季	66.03	44.03	71.08	19.11	1.01	17.03	88.77
	夏季	47.43	28.04	46.17	10.71	0.72	11.30	75.10
	秋季	58.28	37.97	60.40	14.66	0.74	16.56	77.45
	冬季	79.28	57.44	79.12	20.99	0.94	24.19	60.44
柳州市	春季	67.85	44.65	67.44	18.68	1.03	25.14	87.92
	夏季	52.08	28.38	47.76	14.75	0.91	18.62	90.51
	秋季	63.14	42.90	66.86	24.36	1.04	23.63	85.83
	冬季	86.48	63.33	86.67	26.08	1.18	29.75	68.13

Continued

防城港市	春季	48.01	27.57	47.11	8.08	0.78	15.54	60.02
	夏季	34.38	16.07	30.53	8.40	0.72	11.99	60.28
	秋季	53.22	30.55	49.02	9.46	0.88	16.93	85.75
	冬季	65.27	45.38	63.52	10.67	0.94	21.33	77.73

从4个典型城市的大气污染物浓度季节变化可知,冬季的大气环境质量较差,夏季的大气环境质量较好。夏季由于大气混合层厚度相对于其他季节较厚,容纳污染物的空间比较大,太阳辐射的热力作用使混合层内湍流作用增强,从而有利于大气的稀释、扩散;冬季混合层厚度最小,且易受静稳天气影响,湍流强度最弱,不利于大气污染物的扩散[24],因此造成了冬季大气环境质量较差,夏季大气环境质量较好。

4. 后向轨迹分析

后向轨迹分析根据数据每年均匀选取污染较高的日子,采用后向气团轨迹模型(HYSPLIT4),模拟典型污染时段气团传输过程,研究污染主要来源方向。计算机支持下的模拟(空气污染模拟)是研究和认识空气污染的主要手段之一,它具有再现过去和预测未来的双重功能。后向轨迹分析是研究区域性污染问题中常用的方法[25][26],因此本文应用美国NOAA研制的轨迹模式HYSPLIT4(Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated)[27],初步探讨广西典型城市主要大气污染物的来源规律,并根据其后向轨迹线对典型城市的大气污染来源进行分析。

南宁市共选取10个典型污染时段,根据后向轨迹显示,有80%典型污染时段的1500 m污染物来自西部的印度地区。通过分析污染物较重时段的后向轨迹发现,500 m的较重污染物来自我国的湖南地区,1000 m的较重污染物来自西部的阿拉伯海,1500 m的较重污染物来自西部的印度地区(如图4)。分析污染物较轻时500 m来自于南部珠江口地区,1000 m和1500 m的较轻污染物来自西部的印度地区(如图5),由此得知南宁市的污染物主要来源于西部的印度地区,并且受西部方向高海拔和我国东北方向的低海拔影响。

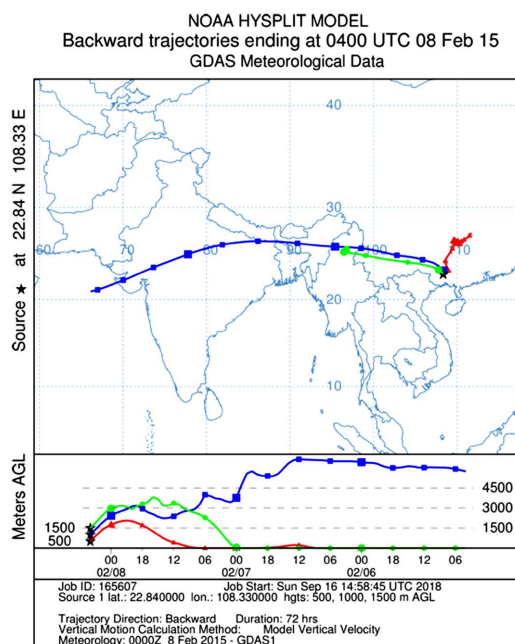


Figure 4. Heavy pollution sources in Nanning

图4. 南宁市重污染源

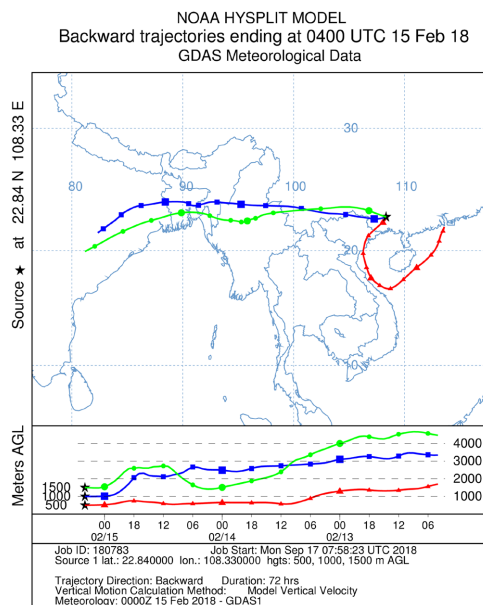


Figure 5. Light pollution sources in Nanning
图 5. 南宁市轻污染源

桂林市共选取了 12 个典型的污染时间点作后向轨迹图, 整体污染程度相对于其他城市来说较低, 结果显示的 58.33% 时间段的 500 m 污染物来源于我国东北地区, 1500 m 污染物来源于西部地区占 33.33%, 西北地区占 25%, 西南地区占 16.67%。通过分析污染较重时段的后向轨迹发现, 500 m 较重污染物主要来自我国东北方向, 1000 m 较重污染物来自于西南偏南方向, 1500 m 来自于西南方向到南海地区(如图 6), 分析污染较轻时段的后向轨迹发现, 污染较轻时污染物主要来自东北方向到西北方向(如图 7), 因此桂林市污染物主要来源于西部的印度地区, 并且该地区的空气质量受西部地区、西北地区和西南地区方向的高海拔影响以及我国东北方向的低海拔影响。

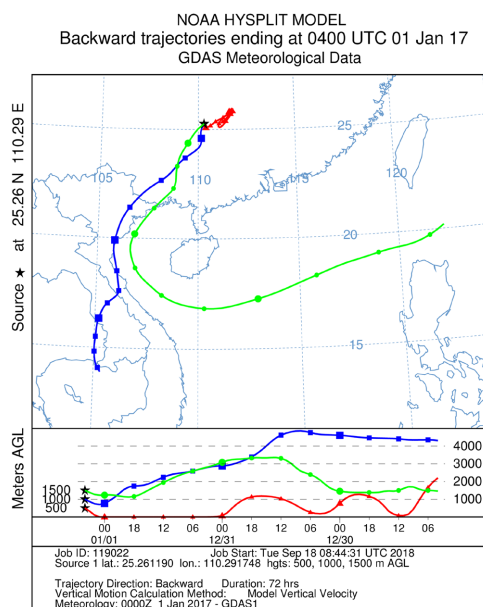


Figure 6. Heavy pollution sources in Guilin
图 6. 桂林市重污染源

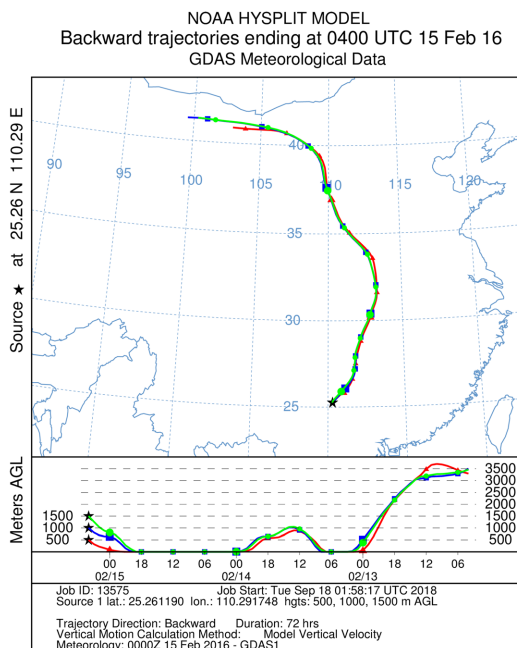


Figure 7. Light pollution sources in Guilin
图 7. 桂林市轻污染源

百色市共选取 12 个典型时间点作图，结果显示 41.67% 的后向轨迹污染物来自于西北偏西地区(如图 8)，除此之外，41.67% 时间段的 1500 m 污染物来自于西北地区，33.33% 时间段的 1500 m 污染物来自于西南地区，66.67% 时间段的 500 m 污染物来自于东北地区。1500 m 较重污染物主要来自于西北方向，500 m 和 1000 m 主要来自东北方向的湖南省(如图 9)，由此得知百色市的污染物主要来自西部地区，且西北方向的高海拔地区和东北方向的低海拔地区对百色市的污染程度起主要的作用。

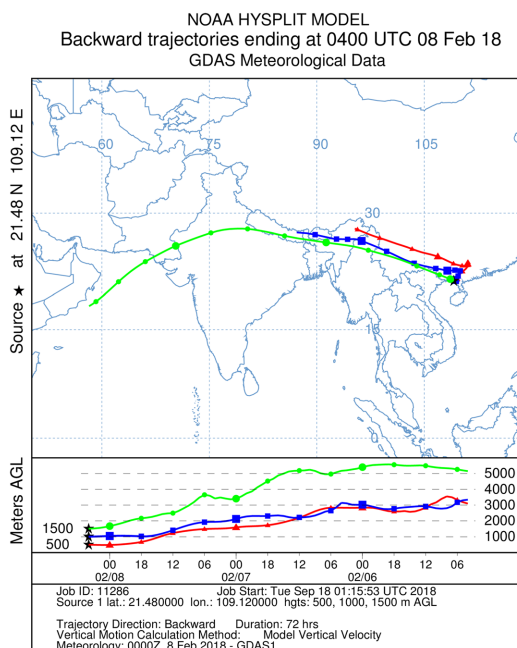


Figure 8. Main sources of pollution in Baise
图 8. 百色市主要污染源

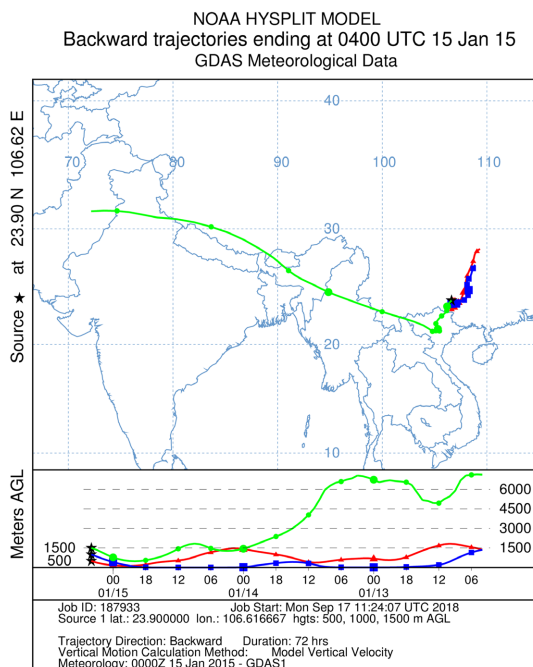


Figure 9. Heavy pollution sources in Baise
图 9. 百色市重污染源

柳州市共选取 10 个典型污染时间点作图，整体污染程度相较于其他城市来说较高，其中 70% 的后向轨迹显示污染物来源于东北方向(如图 10)，并通过分析污染较重时段和污染较轻时段的后向轨迹发现，污染较重时污染物主要来自东北方向(如图 11)，污染较轻时段污染物也是来源于东北方向(如图 12)，由此可以得出柳州市的污染物主要受东北方向地区影响。

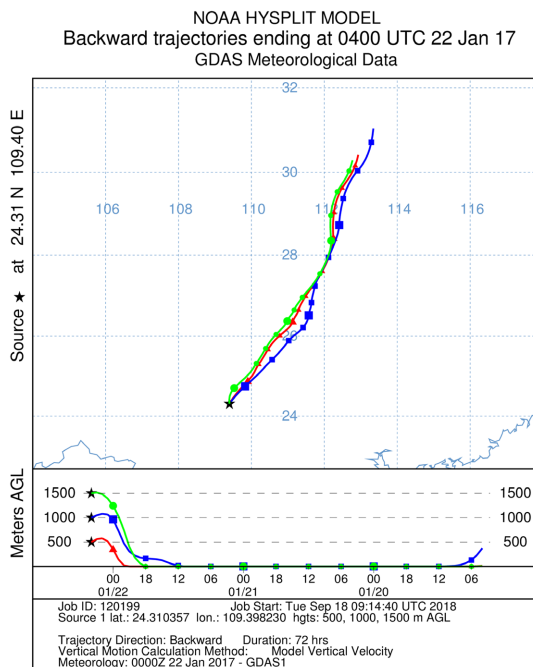


Figure 10. Main sources of pollution in Liuzhou
图 10. 柳州市主要污染源

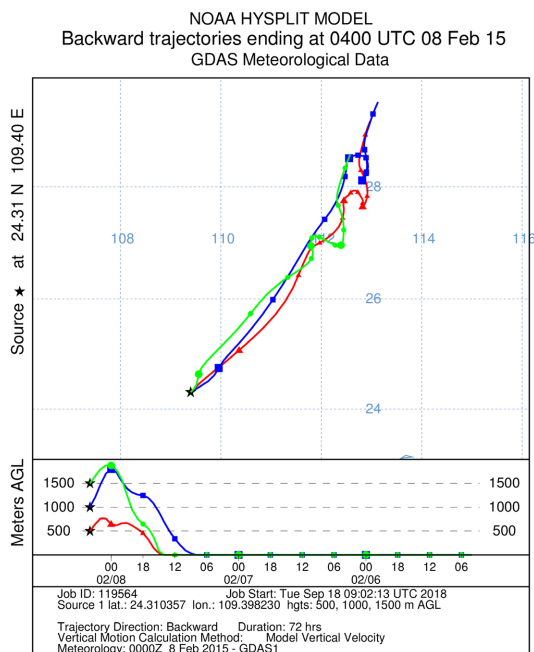


Figure 11. Heavy pollution sources in Liuzhou
图 11. 柳州市重污染源

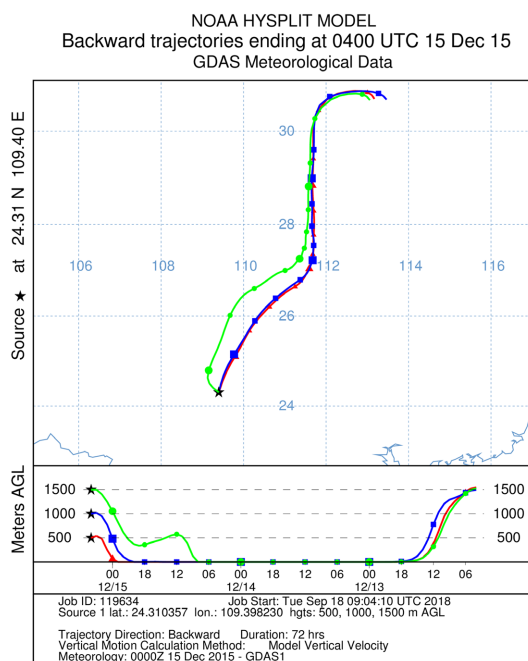


Figure 12. Light pollution sources in Liuzhou
图 12. 柳州市轻污染源

5. 结论

1) 2015~2017 年广西典型城市空气污染物浓度随年际变化的幅度较小。2017 年的大气污染物浓度有所下降，说明广西的大气污染情况有明显好转，但 O_3 污染未得到改善；2016 年、2017 年的年均 $PM_{2.5}$ 浓度较高，均高于国家二级浓度限值。因此，近年来影响广西大气污染的主要污染物为 $PM_{2.5}$ 。

2) 广西 14 个典型城市中存在明显的季节和时段变化, 并且 PM_{2.5} 受气象条件和污染源的影响较大, 总体趋势为冬季(除 O₃_{8h} 外)各污染物浓度最高, 春秋次之, 夏季(O₃_{8h})各污染物浓度最低, 说明大气环境质量以冬季最差, 春秋次之, 夏季最好。

3) 广西典型城市观测期间采样点的气团后向轨迹显示, 大气污染物主要来源于西部的印度地区、西北地区以及我国的东北地区。污染物来源规律主要为 1000 m 和 1500 m 污染较重时段的污染物主要来自西部的印度地区和西北地区方向, 500 m 较重时段的污染物主要来自我国的东北地区方向、西北部和西部的印度地区的高海拔地区和东北部的低海拔地区对广西空气质量起主要影响。此外, 西北部和西部的高海拔地区以及东北部的低纬度地区有利于污染物的扩散, 将污染物输送到广西地区, 因此造成广西空气污染主要受西北部、西部和东北部地区的影响。

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

国家重点研发计划项目(2018YFC1506304)资助。

参考文献

- [1] Hka, B., Rca, B. and St, C. (2012) Ambient Air Pollution, Climate Change, and Population Health in China. *Environment International*, **42**, 10-19. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2011.03.003>
- [2] 孔珊珊, 刘厚凤, 陈义珍. 基于后向轨迹模式的北京市 PM_{2.5} 来源分布及传输特征探讨[J]. 中国环境管理, 2017, 9(1): 86-90.
- [3] 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.
- [4] 张雷光, 王君平. 我国大气污染及气象因素对人体健康影响的探讨[J]. 临床医药文献电子杂志, 2016, 3(6): 1186, 1188.
- [5] Wu, S., Ni, Y., Li, H., et al. (2016) Short-Term Exposure to High Ambient Air Pollution Increases Airway Inflammation and Respiratory Symptoms in Chronic Obstructive Pulmonary Disease Patients in Beijing, China. *Environment International*, **94**, 76-82. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.05.004>
- [6] Lang, J., Cheng, S., Zhou, Y., et al. (2014) Air Pollutant Emissions from On-Road Vehicles in China, 1999-2011. *Science of the Total Environment*, **496**, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.07.021>
- [7] Yang, Y., Liu, X., Qu, Y., et al. (2015) Formation Mechanism of Continuous Extreme Haze Episodes in the Megacity Beijing, China, in January 2013. *Atmospheric Research*, **155**, 192-203. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.11.023>
- [8] Guo, S., Hu, M., Zamora, M.L., et al. (2014) Elucidating Severe Urban Haze Formation in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **111**, 17373-17378. <https://doi.org/10.1073/pnas.1419604111>
- [9] Huang, W., Long, E. (2014) The Relationship between PM_{2.5} and Meteorological Conditions in Chengdu and the Impact of Urban Spatial Morphology. *Environmental Monitoring in China*, **30**, 93-99.
- [10] Jain, S., Sharma, S., Vijayan, N., et al. (2020) Seasonal Characteristics of Aerosols (PM_{2.5} and PM₁₀) and Their Source Apportionment Using PMF: A Four Year Study over Delhi, India. *Environmental Pollution*, **262**, Article ID: 114337. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114337>
- [11] 李景鑫, 陈思宇, 王式功, 等. 2013-2014 年我国大气污染物的时空分布特征及 SO₂ 质量浓度年代际变化[J]. 中国科技论文, 2017, 12(3): 336-345.
- [12] Liu, X., Li, J., Qu, Y., et al. (2013) Formation and Evolution Mechanism of Regional Haze: A Case Study in the Megacity Beijing, China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **13**, 4501-4514. <https://doi.org/10.5194/acp-13-4501-2013>
- [13] Wang, G., Zhao, J., Jiang, R., et al. (2015) Rat Lung Response to Ozone and Fine Particulate Matter (PM_{2.5}) Exposures. *Environmental Toxicology*, **30**, 343-356. <https://doi.org/10.1002/tox.21912>
- [14] 王洪强, 潘惠妹, 廖雷, 等. 2015-2017 年安徽典型城市空气污染特征对比分析[J]. 桂林理工大学学报, 2020, 40(1): 168-176.

- [15] Lin, M., Chen, Y., Burnett, R.T., *et al.* (2002) The Influence of Ambient Coarse Particulate Matter on Asthma Hospitalization in Children: Case-Crossover and Time-Series Analyses. *Environmental Health Perspectives*, **110**, 575-581. <https://doi.org/10.1289/ehp.02110575>
- [16] Kermani, M., Bahrami, A., Aghaei, M., *et al.* (2014) Comparative Investigation of Air Quality Index (AQI) for Six Industrial Cities of Iran. *Studies in Medical Sciences*, **25**, 810-819.
- [17] Mao, J.Y., Chen, Z.M., Jiang, Z.K., *et al.* (2021) A Comparative Study on air Pollution Characteristics in Four Key Cities during 2013 in Guangxi Province, China. *Sustainability*, **13**, 1612. <https://doi.org/10.3390/su13041612>
- [18] Wang, Y., Zhang, X., Arimoto, R. (2006) The Contribution from Distant Dust Sources to the Atmospheric Particulate Matter Loadings at Xi'an, China during Spring. *Science of the Total Environment*, **368**, 875-883. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.03.040>
- [19] 李莉, 蔡鋈琳, 周敏. 2013年12月中国中东部地区严重灰霾期间上海市颗粒物的输送途径及潜在源区贡献分析[J]. 环境科学, 2015(7): 2327-2336.
- [20] 陈彬彬, 林长城, 杨凯, 等. 福州市大气污染时空变化及其与气象条件关系[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(B06): 125-128, 132.
- [21] 谢雨竹, 潘月鹏, 倪长健, 等. 成都市区夏季大气污染物浓度时空变化特征分析[J]. 环境科学学报, 2015, 35(4): 975-983.
- [22] 杨小露, 李海波, 李成, 等. 武汉市大气污染特征及变化趋势[J]. 湖北大学学报: 自然科学版, 2017, 39(4): 361-366.
- [23] 李婷婷, 尉鹏, 程水源, 等. 2005-2014年中三角城市群大气污染特征及变化趋势[J]. 环境工程学报, 2017, 11(5): 2977-2984.
- [24] 刘永祺, 李大鹏, 倪长健. 重庆市大气污染特征及其影响因素分析[J]. 四川环境, 2009, 28(3): 28-32.
- [25] Brankov, E., Rao, S.T. and Porter, P.S. (1998) A Trajectory-Clustering-Correlation Methodology for Examining the Long-Range Transport of Air Pollutants. *Atmospheric Environment*, **32**, 1525-1534. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00388-9](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00388-9)
- [26] Miller, J.M. (1987) Use of Back Air Trajectories in Interpreting Atmospheric Chemistry Data: A Review and Bibliography.
- [27] Draxler, R.R. (2018) NOAA Technical Memorandum ERL ARL-224 Description of the Hysplit_4 Modeling System.