

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2021101901

符传博, 徐文帅, 丹利, 等. 2015—2020年海南岛大气PM_{2.5}和PM₁₀的时空分布特征[J]. 环境化学, 2023, 42(2): 522-532.

FU Chuanbo, XU Wenshuai, DAN Li, et al. Characteristics of temporal and spatial distribution of atmospheric PM_{2.5} and PM₁₀ in Hainan island, Hainan Province from 2015 to 2020[J]. Environmental Chemistry, 2023, 42 (2): 522-532.

2015—2020年海南岛大气PM_{2.5}和PM₁₀的时空分布特征*

符传博^{1,4} 徐文帅^{2**} 丹利³ 佟金鹤^{1,4}

(1. 海南省气象科学研究所, 海口, 570203; 2. 海南省环境科学研究院, 海口, 571126; 3. 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候-环境重点实验室, 北京, 100029; 4. 海南省南海气象防灾减灾重点实验室, 海口, 570203)

摘要 基于2015—2020年海南省18个市县环境监测数据和气象观测数据, 结合Cressman客观差值、相关分析和气候倾向率等统计方法对PM_{2.5}和PM₁₀质量浓度时空分布特征进行深入分析. 结果表明, PM_{2.5}和PM₁₀质量浓度空间分布上均呈北半部高于南半部的特征, 同时2015—2020年均表现为快速下降的变化趋势, 趋势系数分别为-0.982 (PM_{2.5})和-0.935 (PM₁₀), 通过了99.9%的信度检验. PM_{2.5}和PM₁₀质量浓度有明显的季节变化特征, 冬季质量浓度最高, 秋季和春季次之, 夏季最低. PM_{2.5}和PM₁₀质量浓度呈现U形的逐月变化, 最低值出现在7月, 最高值出现在12月. PM_{2.5}和PM₁₀质量浓度呈“双峰双谷”型的日变化, 受人为活动影响较为显著. PM_{2.5}和PM₁₀与其他气态污染物都表现出较高的正相关性.

关键词 PM_{2.5}, PM₁₀, 时空分布, 海南省.

Characteristics of temporal and spatial distribution of atmospheric PM_{2.5} and PM₁₀ in Hainan island, Hainan Province from 2015 to 2020

FU Chuanbo^{1,4} XU Wenshuai^{2**} DAN Li³ TONG Jinhe^{1,4}

(1. Hainan Institute of Meteorological Science, Haikou, 570203, China; 2. Hainan Research Academy of Environmental Sciences, Haikou, 571126, China; 3. Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029, China; 4. Key Laboratory of South China Sea Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Hainan Province, Haikou, 570203, China)

Abstract Based on the environmental monitoring and meteorological data of 18 stations in Hainan island from 2015 to 2020, this study analyzed the characteristics of spatial and temporal distribution of PM_{2.5} and PM₁₀ concentration in Hainan island, using Cressman interpolated method, correlation analysis and climatic tendency rate. The results showed that the mass concentrations of PM_{2.5} and PM₁₀ were both higher in the northern half of Hainan island than in the southern half. They both showed a rapid decline trend from 2015 to 2020, with trend coefficients of -0.982 (PM_{2.5}) and -0.935 (PM₁₀), respectively, both exceeding the 99.9% confidence level. Additionally, PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations were higher in winter, followed by autumn and spring, and the lowest in summer. They showed a U-shaped change from month to month, with the lowest value in July and

2021年10月19日收稿(Received: October 19, 2021).

* 海南省自然科学基金(422RC802, 421QN0967), 国家自然科学基金(42065010, 42141017)和海南省重大科技计划项目(ZDKJ202007)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of Hainan (422RC802, 421QN0967), National Natural Science Foundation of China (42065010, 42141017) and Major Science and Technology Plan Project of Hainan (ZDKJ202007).

** 通信联系人 **Corresponding author**, E-mail: xuwenshuai@hotmail.com

highest value in December. Daily change of PM_{2.5} and PM₁₀ showed a "double peaks and double valleys" type, which was significantly affected by human activities. Moreover, both PM_{2.5} and PM₁₀ displayed a high positive correlation with other gaseous pollutants.

Keywords PM_{2.5}, PM₁₀, temporal and spatial distribution, Hainan Province.

近年来,随着我国城市化的加快和经济的快速增长,城市空气污染程度和大气污染防治问题越来越为人们所关注^[1-2]. 大气气溶胶体系中分散的各种粒子统一称为大气颗粒物,根据空气动力学等效直径大小可分为总悬浮颗粒物(total suspended particulate, TSP)、可吸入颗粒物(粒径<10 μm, inhalable particulate mater, PM₁₀),以及细颗粒物(粒径<2.5 μm, fine particulate matter, PM_{2.5}). 大气中颗粒物的增加会显著地影响环境和气候变化,如霾污染加剧^[3-4]、损害人体健康^[5]、延长低云寿命^[6]、抑制降水发生^[7]、影响季风强度和地气系统的辐射收支平衡^[8]等. PM_{2.5} 和 PM₁₀ 作为评价城市空气质量优劣的重要指标之一,2012 年被生态环境部纳入环境空气质量指数(AQI)中.

关于 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 方面的研究,国内外学者主要从时空分布特征^[9-10]、气象成因分析^[11-12]、化学组成特征^[13-14]、源解析^[15]以及健康效应^[16]等方面展开. 如李沈鑫等^[17]利用 2013—2015 年全国 413 个站点资料,分析了我国 PM_{2.5} 时空分布,发现大部分站点 PM_{2.5} 浓度呈下降趋势. 李宏艳等^[18]发现山西省冬季 PM_{2.5} 浓度最高,日变化为双峰分布特征. 董继元等^[19]的研究表明,兰州市 PM₁₀ 浓度与相对湿度存在显著线性负相关,大气能见度变化对 PM₁₀ 比较敏感. 夏丽等^[20]解析了长三角地区一次区域性污染过程中 PM_{2.5} 的来源及其光学特性,发现二次硝酸和二次硫酸是其主要来源,PM_{2.5} 的各类源对其质量浓度和消光系数的贡献效率存在差别. 此外还有很多类似的结果^[21-23],此处不一一列举.

目前国内针对 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 方面的研究主要集中在京津冀、珠三角和长三角等颗粒物污染较重的区域,而对空气质量相对较好地区的研究偏少^[24]. 海南省作为我国唯一一个热带海岛旅游省份,一直以生态自然环境良好著称,同时也十分缺乏全省尺度颗粒物时空分布的相关研究^[25]. 因此,本文基于 2015—2020 年海南省海南岛 18 个市县空气质量和气象监测数据,利用 Cressman 客观分析方法、回归分析和相关分析等统计手段,定量诊断 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的时空变化特征及其与气象因子和气态污染物的关系,通过更好地了解气象因子和气态污染物对颗粒物污染的内在机制,以为海南岛大气污染防治工作提供技术支撑.

1 实验部分(Experimental part)

1.1 数据资料

空气质量监测站点共有 32 个,数据源自海南省生态环境厅. 气象观测站点共有 18 个,气象数据来自海南省气象局. 空气质量监测要素中,PM₁₀、PM_{2.5} 和 CO 分别采用美国某公司点式 5030、FH62C14 和 48i 型监测仪器自动监测,而 O₃、SO₂ 和 NO₂ 采用瑞典某公司的长光程仪器进行监测^[26]. 气象要素包括降水量、平均气温、相对湿度、平均风速、日照时数、大气压和太阳总辐射,其中太阳总辐射只有海口市和三亚市两个站点. 数据时段都选取资料较为完整的 2015—2020 年,共计 6 a 的监测资料展开分析,站点地理位置分布见图 1 所示.

1.2 研究方法

在探讨海南岛 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度空间分布及季节特征的时候,用到了 Cressman 客观分析方法,该方法是基于 Cressman 客观分析函数,对有限区域内的猜测场进行逐步订正的方法,由于该方法插值结果与原始资料较为接近,误差较小^[27-28],并被广泛应用于各种数据分析和气候诊断中^[26,29].

气候倾向率采用公式(1)进行计算. 其中 y 表示 PM_{2.5} 或 PM₁₀ 质量浓度,样本量为 n ,共 6 a,用 x 表示 y 所对应的时间样本序列号,建立 x 与 y 之间的一元线性回归方程,见公式(1):

$$y_i = a + bx_i, \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中, a 为回归常数, b 为回归系数,其值为上升或下降的速率,即表示上升或下降的倾向度^[30], $b > 0$ 说明随时间 x 增加 y 呈上升趋势, $b < 0$ 说明随时间 x 增加 y 呈下降趋势.

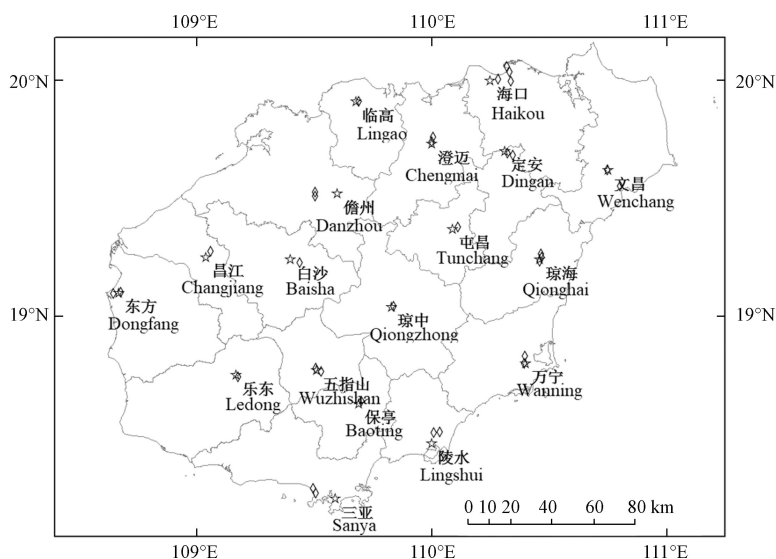


图 1 海南省海南岛空气质量监测站(32 站)及气象观测站(18 站)空间分布

Fig.1 Distribution of air quality monitoring stations (32 stations) and meteorology monitoring station (18 stations) in Hainan island

趋势系数 r_{xt} 采用公示(2)进行计算,该趋势系数定义为 n 个时刻(年)的要素序列与自然数列 1, 2, …, n 的相关系数:

$$r_{xt} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(i - \bar{i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (i - \bar{i})^2}} \quad (2)$$

其中, n 为年数. x_i 是第 i 年要素值, \bar{x} 为其样均值. $\bar{i} = (n+1)/2$. 显然, 这个值为正(负)时, 表示该要素在所计算的 n 年内有线性增(降)的趋势. r_{xt} 符合自由度 $n-2$ 的 t 分布, 其显著性通过 t 检验进行判断^[31].

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度的空间分布

为了解海南岛 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度的空间分布规律, 利用 Cressman 客观分析法对质量浓度进行空间插值, 其结果如图 2 所示. 从 $PM_{2.5}$ 质量浓度上看(图 2a), 海南岛 $PM_{2.5}$ 质量浓度呈现北半部高于南半部的分布特征. 北半部 $PM_{2.5}$ 质量浓度在 $16\text{--}21.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间, 超过 $18.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的市县主要分布在北部和西部, 最大值出现在临高县, 达到了 $21.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 昌江县第二, 为 $19.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 南半部地区 $PM_{2.5}$ 质量浓度总体偏低, 基本分布在 $13\text{--}16 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间, 其中最低值出现在中部的五指山市, 为 $13.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 从 PM_{10} 质量浓度上看(图 2b), 总体空间分布与 $PM_{2.5}$ 质量浓度一致, 也表现为北半部地区偏高于南半部地区. 最大值出现在海口市, 为 $35.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 东部的万宁市和北部内陆的屯昌县 $PM_{2.5}$ 质量浓度也超过了 $34 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 最小值出现在西南部的乐东县, 为 $23.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 海南岛 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度的空间分布可能与不同市县的气候环境和经济发展水平差异有很大关系^[32]. 海南岛大气颗粒物来源主要是本地排放和外源输送, 一方面受东亚季风、台风活动和海南岛地形的共同影响, 西北半部年降水量明显偏少于东南半部, 加之气温偏高, 水汽偏低, 植被相对稀少, 导致地表向大气输送的颗粒物比重偏大; 另一方面冬半年受冬季风影响, 低层东北气流携带北方大量大气颗粒物输送至海南岛, 导致北半部地区颗粒物浓度偏高, 而南半部由于五指山脉的阻挡作用, 颗粒物浓度维持较低水平. 环保部环境规划院^[33]的研究表明, 2015 年海南岛 $PM_{2.5}$ 的外源输送高达 72%.

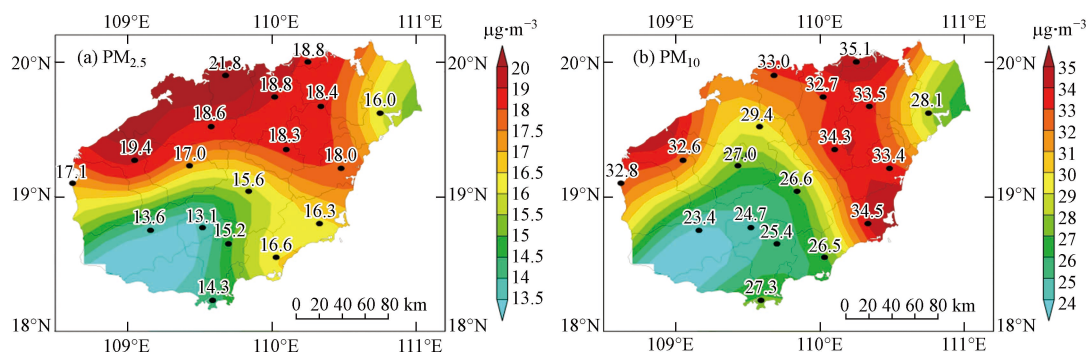


图2 海南岛年平均 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度空间分布

Fig.2 Spatial distribution of annual average of PM_{2.5} and PM₁₀ in Hainan island

2.2 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度的变化趋势

图3给出了海南省海南岛月平均 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度气候趋势系数空间分布. 从图3可以发现, 近6年海南岛各个市县 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度均表现为下降的变化趋势. 对于 PM_{2.5} 而言(图3a), 除了文昌市、万宁市和乐东县以外, 其余市县 PM_{2.5} 质量浓度的趋势系数均通过了95%的信度检验, 其中五指山市趋势系数超过了-0.4, 下降较为显著. 对于 PM₁₀ 而言(图3b), 趋势系数未通过信度检验的市县分别为文昌市、万宁市和儋州市, 其余市县 PM_{2.5} 质量浓度的趋势系数均通过了95%的信度检验. 与 PM_{2.5} 不同的是, 趋势系数超过-0.4的市县共有7个, 下降更为明显. 全省平均的 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度分别为 16.99 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 29.94 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (表1), 趋势系数分别为-0.982 和-0.935, 均通过了99.9%的信度检验.

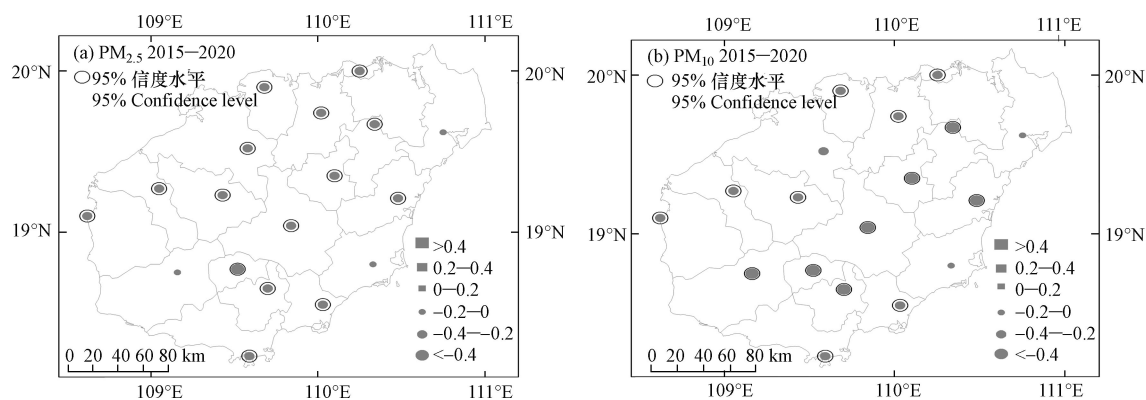


图3 海南岛月平均 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度气候趋势系数空间分布

Fig.3 Spatial distribution of climatic trend coefficients of monthly average PM_{2.5} and PM₁₀ in Hainan island

表1 2015—2020 年海南岛 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度年平均和四季变化特征

Table 1 Annual mean and seasonal variation characteristics of PM_{2.5} and PM₁₀ in Hainan island from 2015 to 2020

时段	PM _{2.5}				PM ₁₀				PM _{2.5} / PM ₁₀
	均值+标准差/ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) Mean value + mean square error	气候倾向率/ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{a}^{-1}$) Climatic trend rate	趋势系数 Trend coefficient	信度检验/% Confidence test	均值+标准差 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) Mean value + mean square error	气候倾向率/ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{a}^{-1}$) Climatic trend rate	趋势系数 Trend coefficient	信度检验/% Confidence test	
全年	16.99±2.17	-1.04	-0.982	99.9	29.94±3.72	-1.70	-0.935	99.9	0.57
春季	16.90±2.66	-1.09	-0.840	99	30.42±4.00	-1.89	-0.971	99.9	0.56
夏季	9.94±1.72	-0.79	-0.946	99.9	21.40±3.87	-1.64	-0.870	99	0.46
秋季	18.34±1.97	-0.33	-0.345	不显著	31.80±3.37	-0.71	-0.429	不显著	0.58
冬季	22.72±3.79	-1.81	-0.981	99.9	36.23±5.37	-2.49	-0.952	99.9	0.63

气候倾向率分别为-1.04 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{a}^{-1}$ 和-1.7 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{a}^{-1}$. 近年来国家和省政府高度重视生态环境保护工作, 并连续出台了多项针对海南省生态环境的保护政策, 如《国家生态文明试验区(海南)实施方案》

和《海南省全面加强生态环境保护坚决打好污染防治攻坚战行动方案》等,区域空气质量明显改善,2020年海南省空气质量优良天数较2018年上升2.0个百分点^[34],PM_{2.5}和PM₁₀持续下降.

气象因素对PM_{2.5}和PM₁₀质量浓度会有显著影响,表2进一步统计了2015—2020年海南岛PM_{2.5}和PM₁₀质量浓度与气象要素的对比.如2015年PM_{2.5}和PM₁₀质量浓度在近年中最高,分别为20.13 μg·m⁻³和36.9 μg·m⁻³,而降雨量明显偏少于其他年份,仅为1380.1 mm,太阳总辐射、日照时数和大气压明显偏大于其余年份,分别为16.28 MJ·m⁻²、6.22 h·d⁻¹和998.2 hPa.相对湿度总体偏低,平均风速偏大,气温偏高.一般而言,降水的清除作用会降低大气中颗粒物浓度,因此降雨量与颗粒物浓度呈负相关关系;太阳辐射偏强、日照时数偏长和气温偏高时,一方面光化学反应速率加快,大气中硫酸盐和硝酸盐颗粒增多,PM_{2.5}和PM₁₀二次来源增多;另一方面地表向大气输送的颗粒物增强,PM_{2.5}和PM₁₀一次来源也增多^[35],反之,太阳辐射偏弱、日照时数偏短和气温偏低时,有利于PM_{2.5}和PM₁₀浓度降低.风速偏大时,有利于本地污染物向外扩散,但同时会造成上游地区污染物向本地输送,冬半年海南岛位于东北季风下游区,低层偏北风携带的北方大气污染物对海南岛污染物浓度有较大影响^[36].值得关注的是,海南岛PM_{2.5}/PM₁₀从2015年至2017年缓慢上升,2017年达到最大值,为0.6,随后又表现为缓慢下降趋势,其内在机理还有待于进一步研究.

表2 2015—2020年海南岛PM_{2.5}和PM₁₀质量浓度与气象要素的对比

Table 2 Comparison of PM_{2.5} and PM₁₀ and meteorological elements in Hainan island from 2015 to 2020

	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年
PM _{2.5} /(μg·m ⁻³)	20.13	18.41	17.68	17.02	15.38	13.33
PM ₁₀ /(μg·m ⁻³)	36.90	31.33	29.23	29.79	27.61	24.77
PM _{2.5} /PM ₁₀	0.55	0.59	0.60	0.57	0.56	0.54
平均气温/°C	25.13	24.70	24.67	24.43	25.49	25.08
降雨量/mm	1380.1	2218.8	1983.2	2086.7	1654.2	1610.1
太阳总辐射/(MJ·m ⁻²)	16.28	14.70	14.67	15.35	15.99	14.94
日照时数/(h·d ⁻¹)	6.22	5.35	5.16	5.35	5.79	5.06
相对湿度/%	81.66	83.40	83.61	82.49	80.99	80.96
平均风速/(m·s ⁻¹)	2.08	2.02	1.98	1.93	1.92	2.11
大气压/hPa	998.20	997.64	998.05	997.61	997.52	997.68

2.3 PM_{2.5}和PM₁₀质量浓度的季节变化

图4分别给出了海南岛4个季节PM_{2.5}和PM₁₀质量浓度空间分布.图4表明,海南岛PM_{2.5}和PM₁₀质量浓度有明显的季节变化特征,最大值均出现在冬季,秋季和春季次之,夏季最低,这与海南岛臭氧质量浓度不同^[36].从PM_{2.5}质量浓度空间分布上看(图4a),北半部地区PM_{2.5}质量浓度偏高于南半部地区,这与年平均PM_{2.5}质量浓度空间分布一致.从不同季节上看,春季PM_{2.5}质量浓度从西北向东南递减,西北部的昌江县、儋州市和临高县PM_{2.5}质量浓度超过了20 μg·m⁻³,而东部和南部沿海的文昌市、琼海市、万宁市、三亚市、乐东县和中部的五指山市PM_{2.5}质量浓度在15 μg·m⁻³以下.夏季海南岛PM_{2.5}质量浓度基本在12 μg·m⁻³以下,地区差异最小,其中西部、中部和南部部分市县在10 μg·m⁻³以下,最低值出现在东方市,为6.8 μg·m⁻³.东部的琼海市PM_{2.5}质量浓度最高,为12.5 μg·m⁻³.秋季海南岛大部分地区PM_{2.5}质量浓度较夏季有了较大增长,北部、西部和东部基本在19 μg·m⁻³以上,其中临高县和琼海市超过了20 μg·m⁻³,中部和南部维持在16 μg·m⁻³以下.冬季海南岛PM_{2.5}质量浓度最高,西部和北部大部分市县PM_{2.5}质量浓度超过了24 μg·m⁻³,其中最大值出现在临高县,为30 μg·m⁻³.中部和南部市县PM_{2.5}质量浓度维持在20 μg·m⁻³以下,其中最低值出现在五指山市,为15.9 μg·m⁻³.

PM₁₀质量浓度的空间分布(图4b),北半部地区PM₁₀质量浓度也高于南半部地区.春季PM₁₀质量浓度大值区主要分布在西北部市县,最大值为昌江县的38.3 μg·m⁻³,海口市和东方市PM₁₀质量浓度超过了35 μg·m⁻³,而东部的文昌市和西南部的乐东县在26 μg·m⁻³以下.夏季PM₁₀质量浓度总体较春季有明显下降,全省基本分布在18—25 μg·m⁻³之间,其中东部的万宁市为27.8 μg·m⁻³,全省最高.秋季全

省 PM₁₀ 质量浓度有所回升, 其中东部市县基本在 38 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上, 而西南部的乐东县只有 23 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 冬季是 PM₁₀ 质量浓度最高的季节, 北半部地区大部分市县 PM₁₀ 质量浓度升至 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上, 其中北部的临高县高达 43.9 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 海口市也有 43.8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, PM₁₀ 质量浓度较高. 南半部市县 PM₁₀ 质量浓度基本在 31 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下.

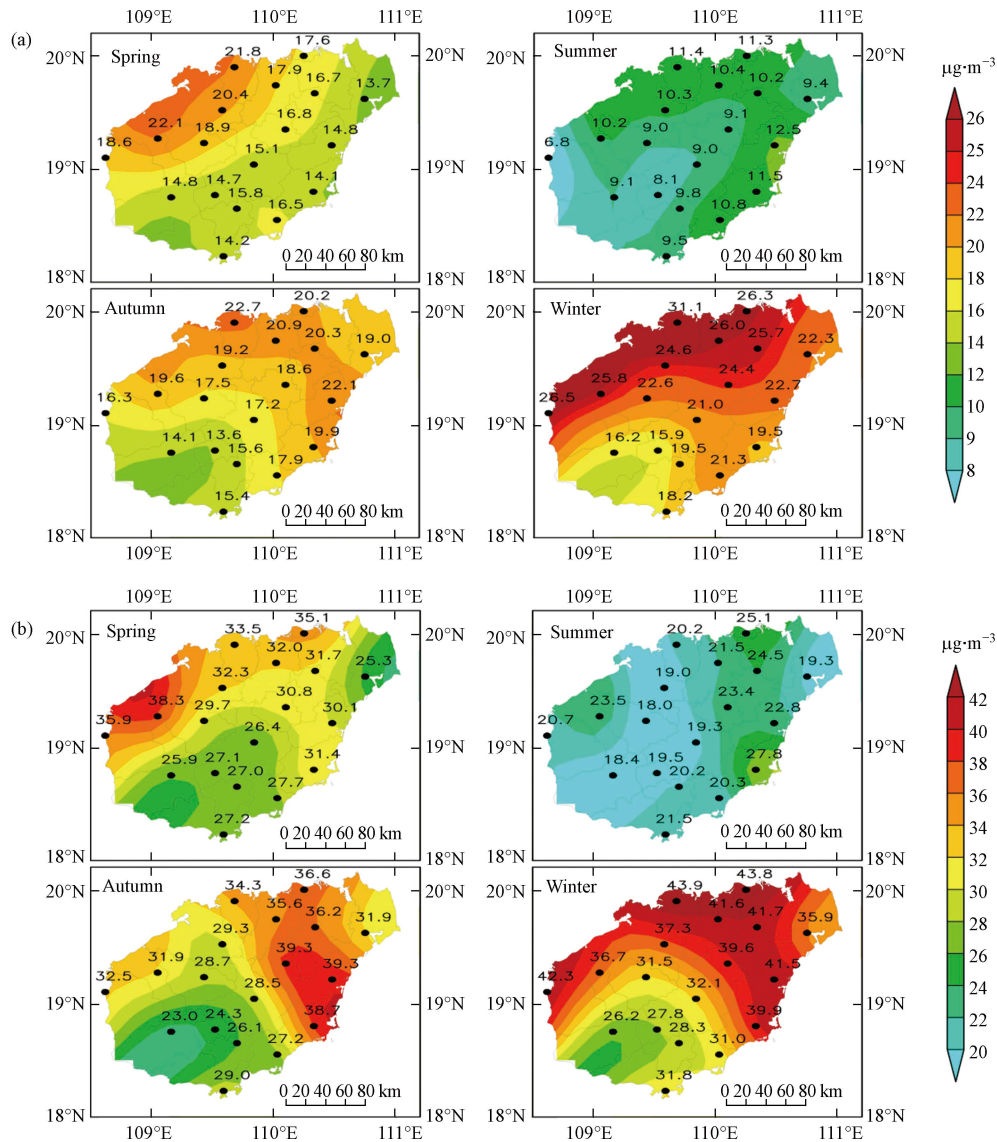


图 4 海南岛四季 PM_{2.5} 质量浓度(a)和 PM₁₀ 质量浓度(b)空间分布

Fig.4 Spatial distribution of PM_{2.5} (a) and PM₁₀ (b) concentration in Hainan island

总体而言, PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度有明显的季节变化特征, 春季影响海南岛的冷空气偏弱, 颗粒物高值区主要分布在西北地区, 东南部质量浓度偏低. 夏季是海南岛主要的降水季节, 受降水的清除作用, 大气颗粒物质量浓度总体偏低, PM_{2.5}/PM₁₀ 只为 0.46(表 1), 为 4 个季节最低. 秋季随着北方冷空气开始活跃, 偏北气流携带大量污染物影响海南岛, 导致颗粒物浓度上升^[25], 其中大气中 PM_{2.5} 比重加大, PM_{2.5}/PM₁₀ 上升至 0.58. 冬季影响海南岛的冷空气强度最强, 频次最高, 加之降水偏少, 海南岛 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度均达到最大值, PM_{2.5}/PM₁₀ 进一步上升至 0.63, 大气中 PM_{2.5} 比重最大. 结合表 1 可以发现, 春季、夏季和冬季 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度 2015—2020 年均表现为快速的下降趋势, 其趋势系数均通过信度检验. 而秋季 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度趋势系数分别为 -0.345 和 -0.429, 未通过信度检验. PM_{2.5} 和 PM₁₀ 除了直接排放的一次来源外, 还有二次来源. 二次来源主要由 SO₂ 和 NO₂ 等污染物反应生成硫酸盐和硝酸盐颗粒^[37]. 前人的研究发现秋季海南岛臭氧浓度有显著上升趋势^[26, 36], 光化学反应增强导致的 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的二次来源增多, 可能会对 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度产生影响.

2.4 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度的月际变化

根据全省 32 个空气质量监测站点 2015—2020 年 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度数据, 通过平均处理, 得到近 6 年平均的 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度逐月变化如图 5 所示. 从图 5 可以看出, PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度呈现 U 形的逐月变化特征, 同时二者表现出了较高的相关性, 即 PM_{2.5} 质量浓度较高的月份 PM₁₀ 质量浓度也偏高; 反之, PM_{2.5} 质量浓度较低的月份 PM₁₀ 质量浓度也偏低. 1 月至 4 月 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度总体变化不大, 其值分别分布在 20 和 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 附近, 5 月之后二者质量浓度快速下降, 并在 7 月达到最低值, 平均值分别为 9.55 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 20.47 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 8 月至 12 月又表现为快速上升趋势, 12 月份达到最高值, 分别为 23.18 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 37.74 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 从不同年份上看, 2015 年 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度最高, 随后逐年下降, 这与前面的分析结果一致. 对比而言, 各年份之间 PM_{2.5} 质量浓度较为接近, 而 PM₁₀ 质量浓度分布较为分散, 偏差较大.

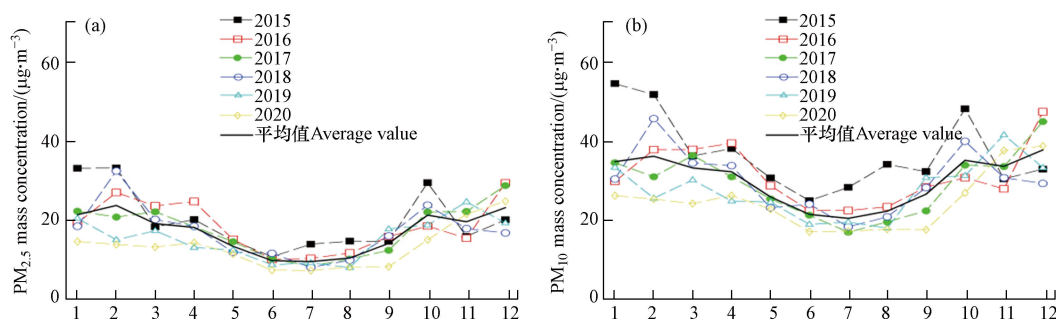


图 5 海南岛 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度月际变化

Fig.5 Monthly variations of PM_{2.5} and PM₁₀ in Hainan island

2.5 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度小时特征

对 2015—2020 年 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 小时质量浓度进行平均处理, 进而获得不同年份小时浓度变化规律如图 6 所示. 图 6 表明, PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度小时变化呈“双峰双谷”型, 峰值主要出现在 08:00—10:00 与 18:00—20:00 两个时段, 正好是人为活动相对较为频繁的时段, 与人们的上下班高峰期重合, 表明机动车排放是海南岛颗粒物主要来源之一. 夜间随着人为活动的减少, 加之没有太阳辐射, 气温偏低, 光化学反应弱, 因而 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度较低, 并在 06:00 附近达到最低值; 早上 07:00 之后, 随着工作日早高峰的来临, PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度快速上升, 在 09:00 附近达到第一个峰值; 10:00—18:00 时段 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度经历了先下降后上升的变化, 谷值出现在 14:00 附近, 其值偏小于第一个谷值(06:00 附近), 其原因可能是中午气温偏高, 湍流作用导致颗粒物垂直输送加强有关^[38]. 第二个峰值出现在 19:00 附近, 相比而言, 第二个峰值略偏高于第一个峰值. 从不同年份上看, PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度有逐年下降的趋势, 这与前面的分析一致. 此外, 日变化特征有逐年减弱的变化, 即 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度小时变化趋于平缓, 峰值和谷值不明显, 其成因还有待于进一步分析.

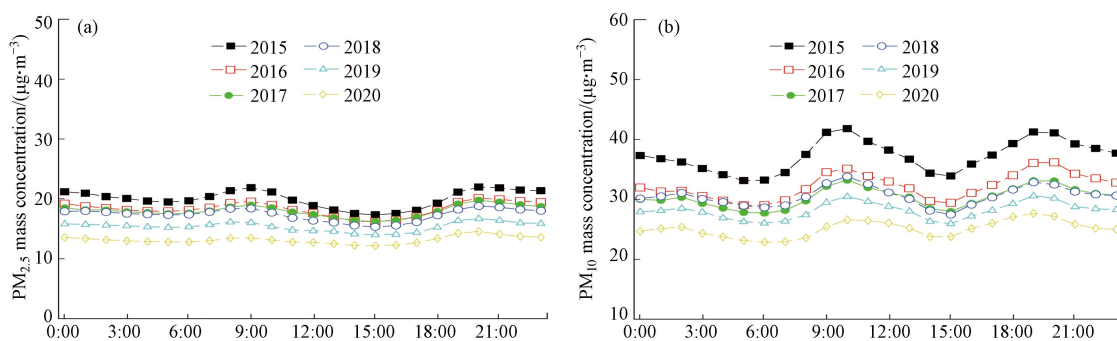


图 6 海南省 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度日变化

Fig.6 Daily variations of PM_{2.5} and PM₁₀ in Hainan Province

2.6 大气污染物质量浓度相关性分析

大气颗粒物的来源分为一次源和二次源, 海南省经济社会发展持续且稳定, 一次源包括城市扬尘、机动车尾气尘、建筑水泥尘、煤烟尘和海盐粒子等; 二次源包括光化学反应生成的硫酸盐、硝酸盐

和有机碳等^[39]. 为分析 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 与气态污染物之间的关系, 对 2015—2020 年全省 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO 和 O₃-8 h(日最大 8 h 平均浓度)进行日平均处理, 然后进行相关性分析(表 3). 从表 3 中可以看出, PM_{2.5}、PM₁₀ 与其它气态污染物都表现出较高的正相关性, 各类大气污染物的排放量变化都会直接影响到海南岛 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度, 其中与 O₃-8h 质量浓度的相关性最强, 相关系数分别为 0.784(PM_{2.5})和 0.810(PM₁₀), 因此海南省海南岛进行大气污染防治时, 必须采取综合治理措施. PM_{2.5} 和 PM₁₀ 与气态污染物相关系数从大到小排列为: O₃-8 h>NO₂>SO₂>CO.

表 3 2015—2020 年海南岛大气污染物浓度相关性分析

Table 3 Correlation analysis of air pollutants in mass concentrations during 2015 to 2020 in Hainan island

	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂	NO ₂	CO	O ₃ -8 h
PM _{2.5}	1.000					
PM ₁₀	0.961**	1.000				
SO ₂	0.509**	0.503**	1.000			
NO ₂	0.618**	0.582**	0.278	1.000		
CO	0.467**	0.419**	0.081	0.608**	1.000	
O ₃ -8h	0.784**	0.810**	0.437**	0.442**	0.290**	1.000

**表示相关极显著($P<0.01$). $n=2192$ (6年).

3 结论 (Conclusion)

(1) 2015—2020 年海南省海南岛 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度空间分布上均呈北半部高于南半部的特点, 大值区略有差异, PM_{2.5} 质量浓度大值区主要分布在西北部地区, PM₁₀ 质量浓度大值区主要分布在北部和东部地区. 分布特征与不同市县的气候环境和经济发展水平差异有很大关系. 年际变化表明, 2015—2020 年海南岛各个市县 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度均表现为快速下降的变化趋势, 趋势系数分别为 -0.982(PM_{2.5})和 -0.935(PM₁₀), 均通过了 99.9% 的信度检验. 气候倾向率分别为 $-1.04 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $-1.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{a}^{-1}$.

(2) 海南岛 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度有明显的季节变化特征, 冬季质量浓度最高, 秋季和春季次之, 夏季最低. 月际变化分析表明, PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度呈现 U 形的逐月变化特征, 最低值出现在 7 月份, 平均值分别为 $9.55 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $20.47 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 12 月份出现最高值, 分别为 $23.18 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $37.74 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 日变化分析表明, PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度小时变化呈“双峰双谷”型, 受人为活动影响较为显著. 此外, PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度小时变化有逐年趋于平缓的变化特征.

(3) PM_{2.5} 和 PM₁₀ 与其它气态污染物都表现出较高的正相关性, 相关系数从大到小排列为: O₃-8 h>NO₂>SO₂>CO, 且都通过了 99.9% 的信度检验, 因此海南省必须采取综合治理措施对海南岛进行大气污染防治.

参考文献 (References)

- [1] 符传博, 丹利. 大气污染加剧对中国区域散射辐射比例的影响 [J]. 科学通报, 2018, 63(25): 2655-2665.
FU C B, DAN L. Influence of intensified air pollution on the sunny diffuse radiation fraction in China [J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(25): 2655-2665 (in Chinese).
- [2] 杨文涛, 黄慧坤, 魏东升, 等. 大气污染联合治理分区视角下的中国 PM_{2.5} 关联关系时空变异特征分析 [J]. 环境科学, 2020, 41(5): 72-80.
YANG W T, HUANG H K, WEI D S, et al. Spatio-temporal variation of PM_{2.5} related relationships in China from the perspective of air pollution regional linkage control and prevention [J]. Environmental Science, 2020, 41(5): 72-80 (in Chinese).
- [3] 徐祥德, 王寅钧, 赵天良, 等. 中国大地形东侧霾空间分布“避风港”效应及其“气候调节”影响下的年代际变异 [J]. 科学通报, 2015, 60(12): 1132-1143.
XU X D, WANG Y J, ZHAO T L, et al. ‘Harbor’ effect of large topography on haze distribution in eastern China and its climate modulation on decadal variations in haze [J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(12): 1132-1143 (in Chinese).

- [4] 丁一汇, 柳艳菊. 近50年我国雾和霾的长期变化特征及其与大气湿度的关系 [J]. 中国科学:地球科学, 2014, 44(1): 37-48.
DING Y H, LIU Y J. Analysis of long-term variations of fog and haze in China in recent 50 years and their relations with atmospheric humidity [J]. Science China:Earth Sciences, 2014, 44(1): 37-48(in Chinese).
- [5] 李勇, 廖琴, 赵秀阁, 等. 近PM_{2.5}污染对我国健康负担和经济损失的影响 [J]. 环境科学, 2021, 42(4): 1688-1695.
LI Y, LIAO Q, ZHAO X, et al. Influence of PM_{2.5} pollution on health burden and economic loss in China [J]. Environmental Science, 2021, 42(4): 1688-1695(in Chinese).
- [6] FU C, DAN L. The variation of cloud amount and light rainy days under heavy pollution over South China during 1960—2009 [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(3): 2369-2376.
- [7] LIU S, XING J, ZHAO B, et al. Understanding of aerosol-climate interactions in china: Aerosol impacts on solar radiation, temperature, cloud, and precipitation and its changes under future climate and emission scenarios [J]. Current Pollution Reports, 2019, 5: 36-51.
- [8] 吴国雄, 李占清, 符淙斌, 等. 气溶胶与东亚季风相互影响的研究进展 [J]. 中国科学:地球科学, 2015, 45(11): 1609-1627.
WU G X, LI Z Q, FU C B, et al. Advances in studying interactions between aerosols and monsoon in China [J]. Science China:Earth Sciences, 2015, 45(11): 1609-1627(in Chinese).
- [9] 侯素霞, 张鉴达, 李静. 上海市大气污染物时空分布及其相关性因子分析 [J]. 生态环境学报, 2021, 30(6): 1220-1228.
HOU S X, ZHANG J D, LI J, et al. Analysis of spatiotemporal distribution and correlation factors of atmospheric pollutants in Shanghai City [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, 30(6): 1220-1228(in Chinese).
- [10] 周磊, 武建军, 贾瑞静, 等. 京津冀PM_{2.5}时空分布特征及其污染风险因素 [J]. 环境科学研究, 2016, 29(4): 483-493.
ZHOU L, WU J J, JIA R J, et al. Investigation of temporal-spatial characteristics and underlying risk factors of PM_{2.5} pollution in Beijing-tianjin-Hebei area [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(4): 483-493(in Chinese).
- [11] 李会霞, 史兴民. 西安市PM_{2.5}时空分布特征及气象成因 [J]. 生态环境学报, 2016, 25(2): 266-271.
LI H X, SHI X M. Temporal and spatial distribution, meteorological factors of PM_{2.5} in Xi'an City [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(2): 266-271(in Chinese).
- [12] 马雁军, 李晓岚, 张云海, 等. 2016年12月沈阳地区一次持续性重污染天气成因机制分析 [J]. 环境化学, 2020, 39(12): 3346-3352.
MA Y J, LI X L, ZHANG Y H, et al. Analysis of the mechanism of a heavy pollution in December 2016 at Shenyang [J]. Environmental Chemistry, 2020, 39(12): 3346-3352(in Chinese).
- [13] 张仁健, 徐永福, 韩志伟. ACE-Asia期间北京PM_{2.5}的化学特征及其来源分析 [J]. 科学通报, 2003, 48(7): 730-733.
ZHANG R J, XU Y F, HAN Z W. Chemical characteristics and source analysis of PM_{2.5} in Beijing during ACE-Asia [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(7): 730-733(in Chinese).
- [14] 王羽琴, 李升苹, 陈庆彩, 等. 西安市大气PM_{2.5}的化学组分及其来源 [J]. 环境化学, 2021, 40(5): 1425-1435.
WANG Y Q, LI S P, CHEN Q C, et al. Study on chemical composition and pollution source of atmospheric PM_{2.5} in Xi'an City [J]. Environmental Chemistry, 2021, 40(5): 1425-1435(in Chinese).
- [15] 肖浩, 肖化云, 吴攀, 等. 贵阳秋季PM_{2.5}水溶性离子组成特征及来源解析 [J]. 环境化学, 2019, 38(3): 548-555.
XIAO H, XIAO H Y, WU P, et al. Composition and source analysis of water-soluble in PM_{2.5} during autumn in Guiyang [J]. Environmental Chemistry, 2019, 38(3): 548-555(in Chinese).
- [16] 曾贤刚, 阮芳芳, 彭彦彦. 基于空间网格尺度的中国PM_{2.5}污染健康效应空间分布 [J]. 中国环境科学, 2019, 39(6): 2624-2632.
ZENG X G, RUAN F F, PENG Y Y, et al. Health effects' spatial distribution analysis of PM_{2.5} pollution in China based on spatial grid scale [J]. China Environmental Science, 2019, 39(6): 2624-2632(in Chinese).
- [17] 李沈鑫, 邹滨, 刘兴权, 等. 2013-2015年中国PM_{2.5}污染状况时空变化 [J]. 环境科学研究, 2017, 30(5): 678-687.
LI S X, ZOU B, LIU X Q, et al. Pollution status and spatial-temporal variations of PM_{2.5} in China during 2013-2015 [J]. Research of Environmental Sciences, 2017, 30(5): 678-687(in Chinese).
- [18] 李宏艳, 高雪莹, 李宏宇, 等. 山西省大气PM_{2.5}污染时空分布特征 [J]. 环境化学, 2018, 37(5): 913-923.
LI H Y, GAO X Y, LI H Y, et al. Spatial-temporal distribution and variation characteristics of PM_{2.5} in Shanxi [J]. Environmental Chemistry, 2018, 37(5): 913-923(in Chinese).
- [19] 董继元, 刘兴荣, 张本忠, 等. 兰州市大气相对湿度与PM₁₀浓度和大气能见度的相关性分析 [J]. 生态环境学报, 2015, 24(12): 1995-2001.
DONG J Y, LIU X R, ZHANG B Z, et al. Relationships among relative humidity, PM₁₀ concentration and atmospheric visibility in Lanzhou [J]. Ecology and Environment Sciences, 2015, 24(12): 1995-2001(in Chinese).
- [20] 夏丽, 朱彬, 王红磊, 等. 长三角地区一次区域污染过程中细颗粒物的来源解析及其光学特性 [J]. 环境科学, 2021, 42(2): 556-563.
XIA L, ZHU B, WANG H L, et al. Source apportionment and optical properties of fine particles associated with regional pollution in

- the Yangtze River Delta [J]. *Environmental Science*, 2021, 42(2): 556-563 (in Chinese).
- [21] 董小艳, 王琼, 杨一兵, 等. 2017年春节期间北京市城区和郊区大气PM_{2.5}及其中多环芳烃的污染特征 [J]. *环境化学*, 2018, 37(10): 101-108.
DONG X Y, WANG Q, YANG Y B, et al. Characterization of ambient PM_{2.5} and PAHs during 2017 Spring Festival in urban and suburb areas of Beijing [J]. *Environmental Chemistry*, 2018, 37(10): 101-108 (in Chinese).
- [22] 雷雨, 张小玲, 康平, 等. 川南自贡市大气颗粒物污染特征及传输路径与潜在源分析 [J]. *环境科学*, 2020, 41(7): 3021-3030.
LEI Y, ZHANG X L, KANG P, et al. Analysis of transport pathways and potential sources of atmospheric particulate matter in Zigong, in south of Sichuan Province [J]. *Environmental Sciences*, 2020, 41(7): 3021-3030 (in Chinese).
- [23] 郭春晔, 王颖, 刘灏, 等. 甘肃省区域颗粒物时空分布特征及传输路径 [J]. *中国环境科学*, 2021, 41(9): 3990-4000.
GUO C Y, WANG Y, LIU H, et al. Spatial and temporal distribution characteristics and transport path analysis of regional particulate matter over Gansu Province [J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(9): 3990-4000 (in Chinese).
- [24] LIU G, LI J, WU D, et al. Chemical composition and source apportionment of the ambient PM_{2.5} in Hangzhou, China [J]. *China Particuology*, 2015, 18(1): 135-143.
- [25] 宋娜, 徐虹, 毕晓辉, 等. 海口市PM_{2.5}和PM₁₀来源解析 [J]. *环境科学研究*, 2015, 28(10): 1501-1509.
SONG N, XU H, BI X H, et al. Source apportionment of PM_{2.5} and PM₁₀ in Haikou [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(10): 1501-1509 (in Chinese).
- [26] 符传博, 徐文帅, 丹利, 等. 2015-2018年海南省城市臭氧时空分布特征 [J]. *环境化学*, 2020, 39(10): 2823-2832.
FU C B, XU W S, DAN L, et al. Spatiotemporal distribution of ozone in cities of Hainan from 2015 to 2018 [J]. *Environmental Chemistry*, 2020, 39(10): 2823-2832 (in Chinese).
- [27] CRESSMAN G W. An operational objective analysis system [J]. *Monthly Weather Review*, 1959, 87(10): 367-374.
- [28] 冯锦明, 赵天保, 张英娟. 基于台站降水资料对不同空间内插方法的比较 [J]. *气候与环境研究*, 2004, 9(2): 261-277.
FENG J M, ZHAO T B, ZHANG Y J. Intercomparison of spatial interpolation based on observed precipitation data [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2004, 9(2): 261-277 (in Chinese).
- [29] 胡娅敏, 丁一汇, 廖菲. 江淮地区梅雨的新定义及其气候特征 [J]. *大气科学*, 2008, 32(1): 103-114.
HU Y M, DING Y H, LIAO F. A study of updated definition and climatological characters of Meiyu Season in the Yangtze-Huaihe Rigion [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(1): 103-114 (in Chinese).
- [30] 符传博, 唐家翔, 丹利, 等. 1960~2013年我国霾污染的时空变化 [J]. *环境科学*, 2016, 37(9): 3237-3248.
FU C B, TANG J X, DAN L, et al. Temporal and spatial variation of haze pollution over China from 1960 to 2013 [J]. *Environmental Science*, 2016, 37(9): 3237-3248 (in Chinese).
- [31] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 2版. 北京: 气象出版社, 2007.
WEI F Y. Climate statistical diagnosing and prediction [M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 2007 (in Chinese)
- [32] 王春乙. 海南气候 [M]. 北京: 气象出版社, 2014.
WANG C Y. Hainan climate [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2014 (in Chinese)
- [33] 环保部环境规划院. 北京的PM_{2.5}真是河北刮来的? [J]. *中国经济周刊*, 2016, 28: 9.
Environmental Planning Institute of the Ministry of Environmental Protection. Is Beijing's PM_{2.5} really from Heibei Province? [J]. *China Economic Weekly*, 2016, 28: 9 (in Chinese).
- [34] 海南省生态环境厅. 2020年海南省生态环境状况公报 [ED/OL]. [2021-10-07].
Hainan Department of Ecological Environment. 2020 ecological environmental status bulletin of Hainan [ED/OL]. [2021-10-07] (in Chinese)
- [35] 武晓红, 宋丽红, 李秋玲, 等. 太原市城区大气PM_{2.5}和PM₁₀时空分布特征 [J]. *生态环境学报*, 2021, 30(4): 756-762.
WU X H, SONG L H, LI Q L, et al. Characteristics of temporal and spatial distribution of atmospheric PM_{2.5} and PM₁₀ in Urban Taiyuan, China [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2021, 30(4): 756-762 (in Chinese).
- [36] 符传博, 丹利, 唐家翔, 等. 海南省城市臭氧污染特征及气象学成因 [M]. 北京: 气象出版社, 2021.
FU C B, DAN L, TANG J X, et al. Characteristics and meteorological causes of urban ozone pollution in Hainan Province [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2021 (in Chinese)
- [37] 符传博, 周航. 中国城市臭氧的形成机理及污染影响因素研究进展 [J]. *中国环境监测*, 2021, 37(2): 33-43.
FU C B, ZHOU H. Research progress on the formation mechanism and impact factors of urban ozone pollution in China [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2021, 37(2): 33-43 (in Chinese).
- [38] 廖志恒, 许欣祺, 谢洁岚, 等. 珠三角地区日最大混合层高度及其对区域空气质量的影响 [J]. *气象与环境学报*, 2019, 35(5): 85-92.
LIAO Z H, XU X Q, XIE J L, et al. Daily maximum mixing height and its effects on air quality in the Pearl River Delta region [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2019, 35(5): 85-92 (in Chinese).
- [39] 苏超. 海口市环境空气质量、污染特征及其影响因素研究 [D]. 海口: 海南大学, 2016.
SU C. The research on Haikou air quality, pollution characteristics and its influence factors [D]. Haikou: Hainan University (in Chinese)