

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2023.01.005

# 成都市 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 变化特征及其与气象因素的关系

李瑞

(成都师范学院史地与旅游学院, 四川 成都 611130)

**摘要:** 为研究气象因素对成都市大气细颗粒物 ( $PM_{2.5}$ )、可吸入颗粒物 ( $PM_{10}$ ) 的影响, 收集了 2015—2018 年成都市  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  的月平均浓度, 采用 Pearson 相关分析法, 分析了成都市  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  与气象条件的关系。结果表明: (1) 2015—2018 年, 成都市  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  年平均浓度虽然年际间差别较小, 但整体呈现逐年缓慢下降趋势, 2015 年以来成都市的一系列大气污染防治措施是  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  逐年缓慢下降的原因; 2015—2018 年成都市  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  浓度季节变化特征整体表现为冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季。(2) 不同气象因素对成都市  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  月平均浓度的影响程度不同, 降水量与气温是影响成都市  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  月平均浓度的主要因素, 两者与  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  呈较高的负线性相关, 其中  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  与降水量的相关系数均为  $-0.612$ , 与月平均气温的相关系数分别为  $-0.822$ 、 $-0.776$ , 降水会通过捕获大气中的颗粒物来去除  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ , 而温度的升高会加强  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  等污染物在垂直方向上的对流运动, 从而对成都市污染物浓度的降低起到重要作用; 日照时数、月平均风速、相对湿度等与  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  月平均浓度整体也呈现负相关, 但与降水量和气温相比, 日照时数、月平均风速与  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  月平均浓度的相关性较低, 而相对湿度与  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  月平均浓度的相关性则更加微弱, 表明相对湿度的变化对成都市  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  的积累和扩散影响很小。

**关键词:** 细颗粒物; 可吸入颗粒物; 气温; 降水量; 风速

中图分类号: K903; X513

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2023)01-047-012

## Variation characteristics of $PM_{2.5}$ and $PM_{10}$ in Chengdu and their correlation with meteorological factors

LI Rui

(School of History, Geography and Tourism, Chengdu Normal University, Chengdu 611130, China)

**Abstract:** To explore the characteristics of  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  in Chengdu, China, and their relationship with meteorological factors, monthly average concentrations of  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  in Chengdu from 2015 to 2018 were collected, and their relationships with meteorological factors were analyzed by using Pearson correlation analysis method. The results show that: (1) Due to the implementation of a series of air pollution control measures since 2015, the average annual concentration of  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$  in Chengdu shows a slowly decreasing trend year by year. And the seasonal  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$  concentration in Chengdu from 2015 to 2018 decreased in the order of winter, spring, autumn and summer. (2) Different meteorological factors have

基金项目: 成都师范学院校级科研项目 (CS18ZC03), 广西自然科学基金 (2018GXNSFBA138031)

作者简介: 李瑞 (1990-), 女, 四川雅安人, 硕士, 讲师, 主要从事环境与气候变化的研究。E-mail: 616569272@qq.com

收稿日期: 2021-06-03; 修改日期: 2021-07-29

different effects on the monthly average concentration of  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  in Chengdu. The concentrations of  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  show a high negative linear correlation with temperature and precipitation, which indicates that temperature and precipitation are two key factors affecting the monthly average concentrations of  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  in Chengdu. Sunshine duration, monthly average wind speed and relative humidity are also negatively correlated with  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  monthly average concentrations. However, compared with precipitation and temperature, the linear correlation between sunshine duration, monthly average wind speed and  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$  is lower, while the linear correlation between relative humidity and  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$  is even weaker, and less significant, indicating that the change of relative humidity has little effect on the accumulation and diffusion of  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  in Chengdu.

**Key words:** fine particulate matter; inhalable particles; temperature; precipitation; wind speed

## 0 引言

颗粒物是空气中普遍存在且危害较大的污染物之一,随着社会经济的快速发展、城市化进程的加快以及能源消耗的不断攀升,颗粒物已成为我国城市大气的首要污染物<sup>[1,2]</sup>。按粒径大小可把颗粒物分为总悬浮颗粒物(TSP)和可吸入颗粒物( $PM_{10}$ 和 $PM_{2.5}$ ),TSP是指空气动力学直径小于或等于100  $\mu\text{m}$ 的颗粒物, $PM_{10}$ 是指空气动力学直径小于或等于10  $\mu\text{m}$ 的颗粒物,其中空气动力学直径小于或等于2.5  $\mu\text{m}$ 的为 $PM_{2.5}$ 。 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 除了对空气能见度<sup>[3-5]</sup>、全球气候变化<sup>[6,7]</sup>等产生影响外,还对人体健康产生巨大危害,这是由于 $PM_{10}$ 能够进入人体的呼吸系统,沉积在咽喉与气管等上呼吸系统,而粒径更小的 $PM_{2.5}$ 能深入到细支气管和肺泡,且难以排出人体<sup>[8-12]</sup>。有研究表明:空气中可吸入颗粒物的浓度与呼吸系统疾病、心脑血管疾病等的发病率、死亡率有很强的正相关关系<sup>[13,14]</sup>。而我国相关指标的地面监测系统形成较晚,自2013年1月1日起,京津冀、长三角、珠三角区域及直辖市、省会城市和计划单列市共74个城市496个监测点位开展了包括 $PM_{2.5}$ 等6项指标的监测,并向公众实时发布空气质量信息。据中国环境监测总站2013年发布的空气质量指数来看,成都市空气质量指数较高,在2013年12个月中有8个月排名在74个城市中的前30%,已成为除京津冀、长三角、珠三角区域外的空气质量较差的城市,被戏称为“尘都”,是西南地区雾霾污染的高值中心。目前关于 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 的相关研究主要集中在京津冀<sup>[15-18]</sup>、长江三角洲<sup>[19-21]</sup>和珠江三角洲地区<sup>[22-25]</sup>,而在人口密集且空气污染形势严峻的四川盆地相关研究开展较晚且研究成果较少,为了认识并控制空气污染对该地区人体健康和社会经济发展的负面影响,迫切需要展开相关研究。

已有的研究表明 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 的污染程度除与污染物排放量、排放强度以及污染物质组成有关外,还与气象条件密切相关<sup>[26-28]</sup>,气象条件通过影响 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 的积累与扩散来影响其污染浓度的时空分布,因此研究 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 与气象条件的关系将有助于为 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 的预报与治理提供科学指导。 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 与气象条件的关系比较复杂,随时空不同而有所差异,研究区域不同,时间尺度不同,二者的关系也不尽相同,甚至相反。例如郭元喜等<sup>[29]</sup>分析了中国中东部秋季 $PM_{10}$ 与日气温之间的关系,结果表明 $PM_{10}$ 浓度与气温之间存在非常显著的负相关;而赵晨曦等<sup>[30]</sup>分析北京冬季 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10}$ 的质量浓度与气温的关系时,却得出 $PM_{10}$ 与气温呈正相关,两者结论完全相反。因此研究 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 与气象条件间的关系应根据时空条件不同来讨论,以获得符合实际情况的结果。

## 1 研究区概况

成都市位于四川省中部,四川盆地西部,介于  $102^{\circ}54' E \sim 104^{\circ}53' E$  和  $30^{\circ}05' N \sim 31^{\circ}26' N$  之间,全市东西长 192 km,南北宽 166 km,总面积 14335  $km^2$  (图 1)。全市地势差异显著,西北高,东南低。西部属于四川盆地边缘地区,以深丘和山地为主,海拔大多在 1000~3000 m 之间,最高处大邑县双河乡海拔为 5364 m,相对高度在 1000 m 左右;东部属于四川盆地盆底平原,是成都平原的腹地地带,地势平坦,海拔一般在 750 m 左右,最低处在简阳市沱江出境处河岸,海拔高度为 359 m。由于地表海拔高度差异显著,直接造成水、热等气候要素在空间分布上的不同。成都属于亚热带湿润季风气候区,热量丰富、雨量充沛、四季分明。多年平均气温在  $15.2 \sim 16.6^{\circ}C$  左右,最冷月(1月)平均气温为  $5^{\circ}C$  左右,最热月出现在 7 月,平均气温  $25^{\circ}C$  左右,全年无霜期大于 337 天,年平均降水量 873~1265 mm,降水主要集中在 5—9 月。

作为四川省省会城市,截至 2020 年,成都市辖锦江、青羊、金牛、武侯、成华、龙泉驿、青白江、新都、温江、双流、郫都、新津 12 个区,简阳、都江堰、彭州、邛崃、崇州 5 个县级市以及金堂、大邑、蒲江 3 个县。据第七次全国人口普查公报数据,成都市常住人口 20937757 人,占全省常住人口的 25.02%。2019 年成都市地区生产总值为 17013 亿元,占全省的 36.5%,第一产业生产总值为 612 亿,占全省的 12.7%,第二产业生产总值为 5245 亿元,占全省的 30.2%,第三产业生产总值为 11156 亿元,占全省的 45.6%。成都市是国务院批复确定的中国西部地区重要的中心城市,是中国西部地区经济规模最大、最具活力的城市,然而随着成都市社会经济的发展,人为活动向大气排放的各种污染物质的增多,近年来,成都市空气质量逐渐降低,目前已成为继北京、上海、广州等地雾霾较为严重的区域,逐渐引起社会各界的重视,从 2015 年开始,当地政府即出台一系列控制大气污染的政策。

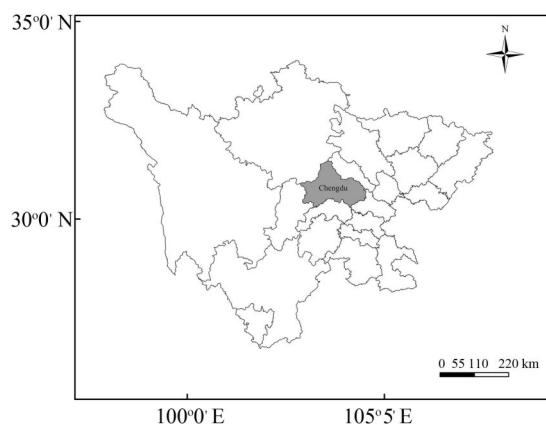


图 1 研究区

Fig. 1 Study area

## 2 数据来源

成都市 2015—2018 年各月  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  数据来源于中国环境监测总站发布的数据 (<http://www.cnemc.cn/>)。气象数据来源于成都市统计年鉴。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 成都市 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 变化特征

##### 3.1.1 成都市 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 年际变化特征

2015—2018年成都市 $PM_{2.5}$ 的逐年月平均浓度分别在 $35\sim 131$ 、 $30\sim 117$ 、 $20\sim 136$ 、 $24\sim 86\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 范围内波动,其中2017年成都市 $PM_{2.5}$ 月平均浓度波动相对其他年份较大,2015年次之,2018年月平均浓度波动最小(图2)。由各月平均浓度计算出2015—2018年 $PM_{2.5}$ 年平均浓度分别为 $64.2$ 、 $58$ 、 $56.1$ 、 $50.4\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,呈逐年缓慢下降趋势,年际间差别较小。根据我国«环境空气质量标准»(GB3095-2012)年均 $PM_{2.5}$ 限值( $35\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ )<sup>[31]</sup>,2015—2018年 $PM_{2.5}$ 年平均浓度分别为限值的 $1.8$ 、 $1.66$ 、 $1.6$ 、 $1.4$ 倍,严重超标。2015—2018年成都市 $PM_{10}$ 浓度年际变化趋势与 $PM_{2.5}$ 的变化趋势相似(图2、图3),但年际间变化较 $PM_{2.5}$ 大,年平均浓度分别为 $107.3$ 、 $96.9$ 、 $88.6$ 、 $80.5\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ (图4)。从2015年以来,成都市针对当地实际污染源情况出台了一系列控制大气污染的措施,例如2015年1月发布了«关于划定高污染燃料禁燃区的通告»,在中心城区划定了高污染燃料禁燃区,要求从2015年3月起在禁燃区内禁止使用、销售高污染燃料,不得新建、改建、扩建任何燃用高污染燃料的设备;2015年3月颁布了«四川省灰霾污染防治办法»,就工业废气粉尘污染、施工道路扬尘污染、车辆船舶排气污染和露天焚烧烟尘污染等提出一揽子具体防治措施;2015年5月发布了«关于高污染汽车限制通行区域和时段的通告»,从2015年10月1日起至2020年9月30日对高污染汽车实施限制通行措施;2017年9月通过了«成都市机动车和非道路移动机械排气污染防治办法»,对本行政区域机动车和非道路移动机械排气污染防治实施统一监督管理。系列减排政策的实施使成都市 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 年平均浓度均呈现逐年下降趋势。

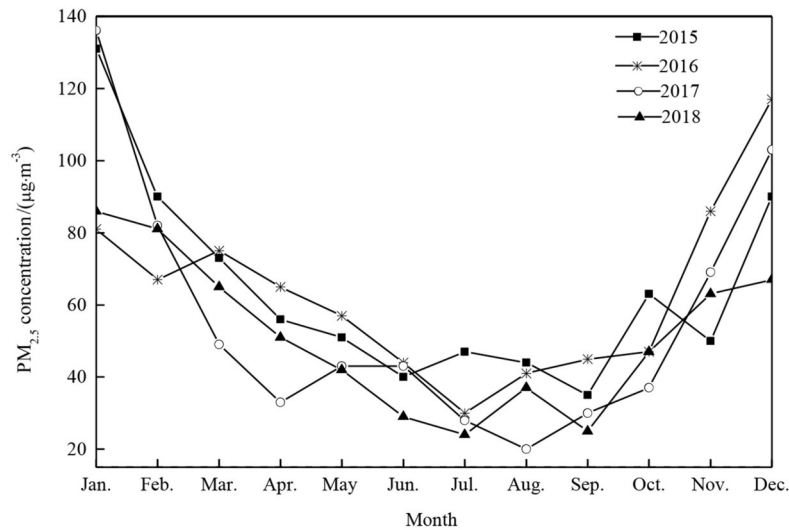


图2 2015—2018年成都市 $PM_{2.5}$ 月平均质量变化

Fig. 2 Change of  $PM_{2.5}$  monthly average mass concentration in Chengdu from 2015 to 2018

2015—2018年成都市 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 质量浓度比在 $0.49\sim 0.72$ 之间,平均值为 $0.60$ ,其中2015年在 $0.52\sim 0.69$ 之间,2016年在 $0.57\sim 0.65$ 之间,2017年在 $0.49\sim 0.72$ 之间,2018年在 $0.51\sim 0.72$ 之间,郭倩等<sup>[32]</sup>在研究成都市2015年12月26日至2016年1月6日一次典型空气重污染过程时也得出 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 质量浓度比维持在 $0.6\sim 0.7$ 间。说明不管是从日均值的尺度还是从月均值的尺度,在重污染天气情况下还是一般情况下,成都市

$PM_{2.5}/PM_{10}$  值均偏高。由于颗粒物的粒径越小越难以去除, 能长期悬浮在空气中, 因此  $PM_{2.5}$  占  $PM_{10}$  的比例越高, 说明其中粒径更小的颗粒物越多, 空气污染越严重。从  $PM_{2.5}/PM_{10}$  值还可以反映出污染源情况, 已有的研究表明, 二次污染物对  $PM_{2.5}$  贡献较大, 而扬尘、燃煤等对  $PM_{10}$  的贡献较大<sup>[33]</sup>。因此一般而言,  $PM_{2.5}/PM_{10}$  比值越小, 区域污染为传统煤烟型污染的可能性就越大; 比值越大, 区域污染为复合型污染的可能性越大。成都市 2015—2018 年  $PM_{2.5}/PM_{10}$  年均值分别为 0.59、0.60、0.61、0.62, 呈逐年增高趋势, 说明成都市大气环境首要颗粒污染物为  $PM_{2.5}$ , 其空气污染类型从煤烟型向扬尘、机动车尾气和煤烟混合型污染转变。这一结论与成都市《环境空气质量报告》显示的结论一致。

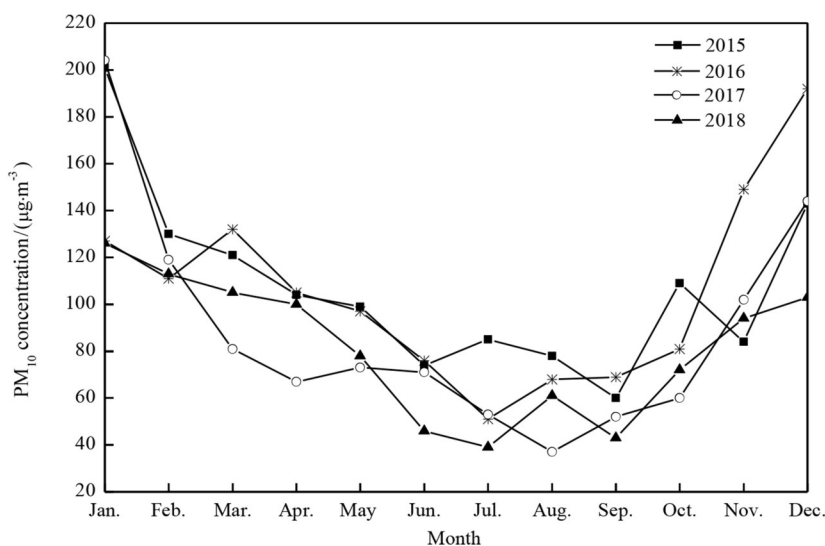


图 3 2015—2018 年成都市  $PM_{10}$  月平均质量变化

Fig. 3 Change of  $PM_{10}$  monthly average mass concentration in Chengdu from 2015 to 2018

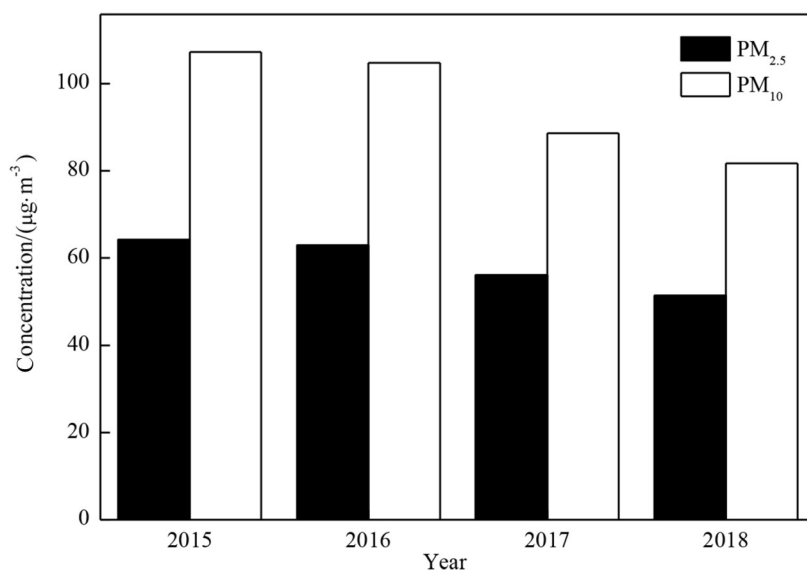


图 4 2015—2018 年成都市  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  年平均质量浓度

Fig. 4 Annual average mass concentration of  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$  in Chengdu from 2015 to 2018

### 3.1.2 成都市PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>季节变化特征

通过计算2015—2018年PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>累年月平均浓度,发现PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>在年内呈明显的季节变化(图5),浓度的高值出现在每年的冬季(12月—次年2月),春季(3—5月)PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>呈波动下降趋势,到夏季(6—8月)出现低值,从秋季(9—11月)开始两者浓度急剧上升。总体呈现"U"型逐月变化规律,与李名升等<sup>[1]</sup>研究我国城市PM<sub>10</sub>污染浓度季节变化得出的结论一致。2015—2018年成都市PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>浓度均为冬春高、秋夏低,这与张智胜等<sup>[34]</sup>研究2009—2010年成都城区PM<sub>2.5</sub>得出的秋冬高、春夏低的结果有所差异,且2015—2018年各季节PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>平均浓度也相应地远远低于张智胜2009—2010年统计得出的浓度。这再次说明成都市2015年以来的大气污染控制措施切实提高了成都市空气质量。2015—2018年成都市PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>值在各季节均较高(图6),季节间差距较小,PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>值由高到低的顺序为冬季>秋季>夏季>春季,反映二次污染物在秋冬季节的贡献率较高,这与张智胜等<sup>[34]</sup>的研究结果一致。

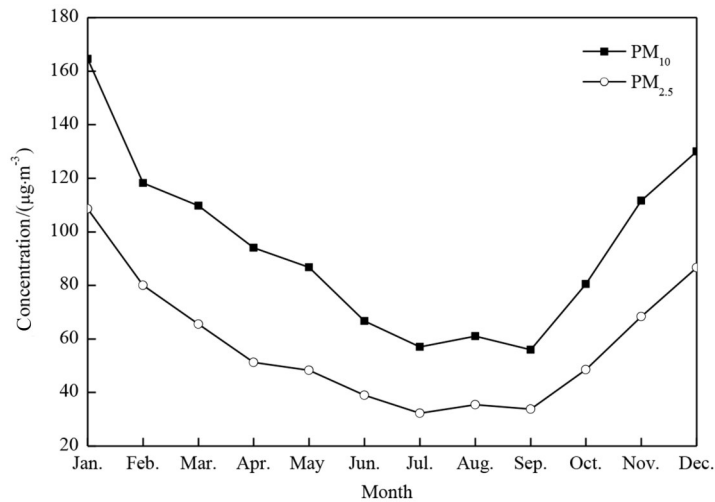


图5 2015—2018年PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>累年月平均浓度

Fig. 5 Variation of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> cumulative monthly average mass concentration in Chengdu from 2015 to 2018

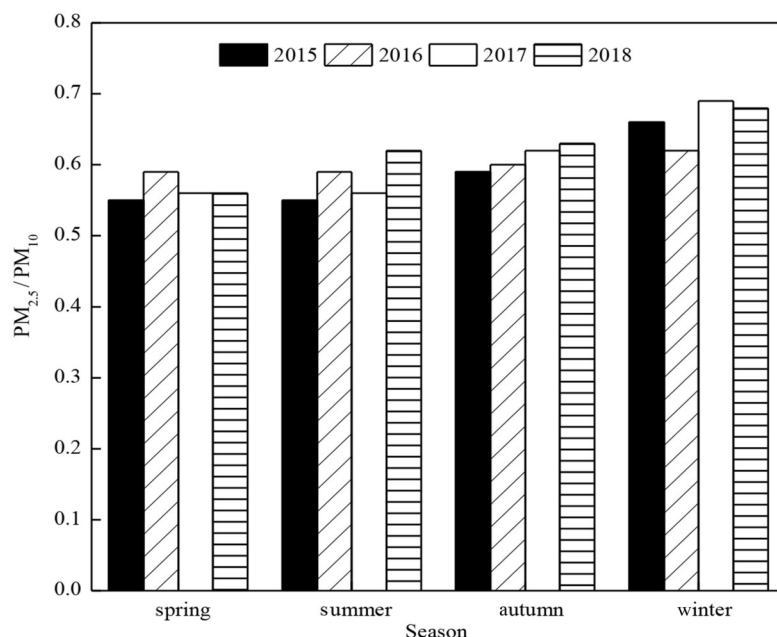
### 3.2 气象因素的年际变化和季节变化

图7为成都市2015—2018年间按月统计的各个气象要素值与PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>的月变化值。经计算得出,成都市2015—2018年年平均气温在16.5~16.8℃之间、年降水量在880.2~1141.4mm之间,气温、降水量年际变化较小,而两者的季节变化明显,其最低值出现在每年冬季,春季气温开始升高,降水量逐渐增多,到夏季气温和降水量为一年中最大值,进入秋季温度降低,降水量减少。2015—2018年年平均风速、日照时数、相对湿度等气象因素的年际间变化也较小,年平均风速在1.31~1.40m/s之间,日照时数在1038.4~1088.5h之间,相对湿度在81.3%~81.9%之间。日照时数、月平均风速的季节变化不如气温和降水量变化明显,但总体呈现春夏高、秋冬低的趋势,相对湿度在各月间的波动较大,总体上春夏低、秋冬高。

### 3.3 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>变化与气象条件的关系

#### 3.3.1 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>月平均浓度与月平均气温、降水量的关系

气温、相对湿度、风速等气象条件对于PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>的污染具有一定的扩散、稀释和积累作用,因此相关研究的开展对PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>污染预报和控制具有重要作用。从图7中可明显看出气温与降水量的季节变化明显,呈现出冬季低、夏季高的特征,这种变化与PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>月平均浓度的冬季高、夏季低的季节变化明显相

图6 2015—2018年 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 值的季节变化Fig. 6 Seasonal variation of  $PM_{2.5}/PM_{10}$  from 2015 to 2018

反; 将成都市  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}/PM_{10}$  值与月平均气温、降水量、相对湿度、日照时数、月平均风速等气象条件作 Pearson 相关分析, 发现  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  的月平均浓度与月平均气温具有较高的线性相关关系, 相关系数分别为  $-0.822$ 、 $-0.776$  (见表 1)。这与赵晨曦等<sup>[30]</sup>的研究结果相似, 表明当平均气温高时, 近地面的热动力引起的对流运动强烈,  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  等污染物可随对流运动扩散, 对污染物浓度降低起到重要作用; 反之, 当气温低时, 对流运动较弱, 不利于污染物扩散, 污染物在近地面积累, 浓度升高。  $PM_{2.5}/PM_{10}$  值与月平均气温也具有较高的线性相关关系, 相关系数为  $-0.626$ , 表明气温越高, 对流运动越强烈时, 大气中粒径较小的颗粒物更容易随大气扩散而稀释。降水同样能影响  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  的垂直方向上的运动<sup>[35]</sup>, 成都市  $PM_{2.5}$  与  $PM_{10}$  的月平均浓度随降水量的增加而降低, 由于  $PM_{2.5}$  与  $PM_{10}$  之间高度相关 (相关系数为  $0.928$ ), 因此两者与降水量的相关系数均为  $-0.612$ , 表明降水对大气中的  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  具有一定去除作用。降水量大时, 大气中的水滴在降落的过程中不断捕集颗粒物, 将  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  等从大气中带入到降水中, 并随降水降落地表。  $PM_{2.5}/PM_{10}$  值与月平均降水为低度线性相关关系, 相关系数为  $-0.363$ , 表明降水量对  $PM_{2.5}$  具有一定去除作用, 但去除作用并不显著。

### 3.3.2 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 月平均浓度与日照时数、月平均风速、相对湿度的关系

从图 7 中可看出日照时数、月平均风速、相对湿度等气象要素各月间存在一定程度的波动, 其季节变化不如气温和降水明显, 与  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  月平均浓度的变化趋势总体相反。通过 Pearson 相关分析, 发现日照时数、月平均风速、相对湿度等与  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  月平均浓度呈负相关, 其中日照时数、月平均风速与  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  月平均浓度为低度的线性相关关系 (表 1)。风是影响  $PM_{10}$  横向水平运动的关键因素, 周天雄等<sup>[36]</sup>研究了常州市风速与  $PM_{2.5}$  的关系, 得出当平均风速  $3.1\sim 4.0$  m/s 时, 空气质量指数达到 1 级的概率较大;  $2.1\sim 3.0$  m/s 时, 空气质量指数基本能维持 2 级;  $1.1\sim 2.0$  m/s 或以下时, 空气质量可能出现中度污染。风速的提高能加快  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  的扩散, 起到降低污染浓度的作用。本研究的结论与前人的研究结论一致, 即风速大小与  $PM_{2.5}$  浓度呈显著负相关。成都市地处盆地地区, 四面环山, 郭晓梅<sup>[37]</sup>进行的盆地重霾期间地形影响的模拟实验表明: 地

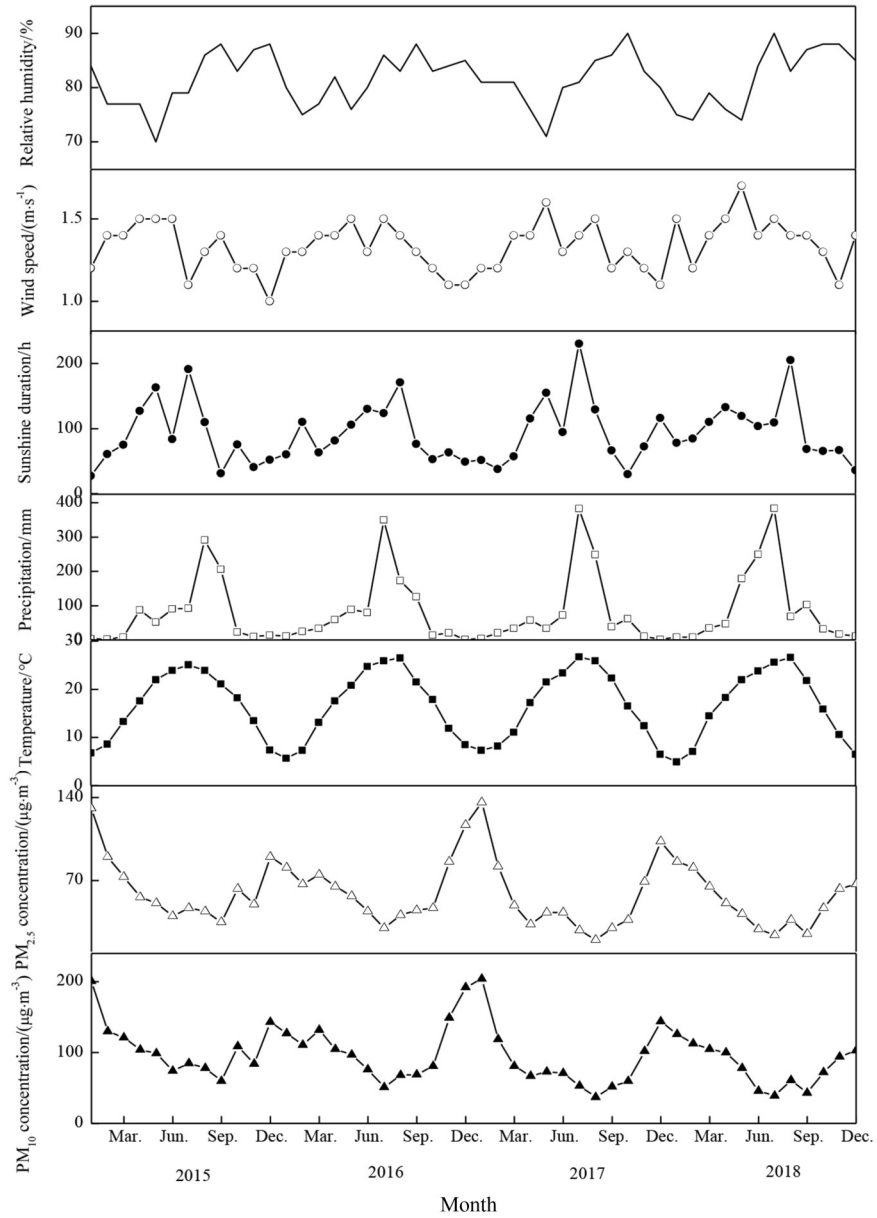


图7 成都市2015—2018年气象要素月变化

Fig. 7 Monthly variation of meteorological factors in Chengdu in from 2015 to 2018

表1 成都市PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>月平均浓度与气象因素的Pearson相关系数

Table 1 Pearson correlation matrix between PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> monthly average concentration and meteorological factors in Chengdu City

	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>	Monthly average temperature	Monthly average precipitation	Monthly average relative humidity	Sunshine duration	Monthly average wind speed
PM <sub>2.5</sub>	1	0.982**	-0.822**	-0.612**	-0.16	-0.440**	-0.493**
PM <sub>10</sub>	0.982**	1	-0.776**	-0.612**	-0.214	-0.399**	-0.458**
PM <sub>2.5</sub> /PM <sub>10</sub>	0.599**	0.404**	-0.626**	-0.363*	0.196	-0.450**	-0.428**

注: \*\* 表示在置信度(双测)为0.01时,相关性是显著的; \* 表示在置信度(双测)为0.05时,相关性是显著的



形作用使得四川盆地内大部分地区地面10 m处风速减少约1.5 m/s,地面2 m处温度升高约10 °C,边界层高度降低约100~150 m。地形作用使得盆地区域内PM<sub>2.5</sub>浓度偏高,贡献率约70%。由于受到地形的影响,成都市常年处于静风环境,2015—2018年间风速在1.0~1.7 m/s之间,均值为1.3 m/s,总体风速较小,对促进PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>的扩散作用比较有限。PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>值与风速之间也呈低度线性相关性,相关系数为-0.428,同样显示出成都市风速对细颗粒物占比无明显影响。日照时数的增强能使热力对流,热力和机械湍流的综合作用加强,有助于破坏地面逆温层结构,提高污染物垂直扩散的作用。冬半年(10月—次年3月)太阳直射南半球,成都市日照时数较少;夏半年太阳直射点位于北半球,成都市日照时数较多,此时间段内日照时数的增强在一定程度上有助于成都市PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>的扩散。而相对湿度与PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>月平均浓度之间为微弱的线性相关关系,且相关性不显著,说明相对湿度的变化对PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>的积累和扩散影响很小。

## 4 结 论

1) 2015—2018年成都市PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>的年平均浓度逐年缓慢降低,这归功于2015年以来成都市的一系列大气污染控制措施的实行。2015—2018年成都市PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>浓度为冬春高、秋夏低,这与前人研究得出的秋冬高、春夏低的结果有所差异,且2015—2018年各季节PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>平均浓度也相应地远远低于2009—2010年统计得出的浓度,再次说明2015年以来成都市实行的大气污染控制措施切实提高了成都市空气质量。成都市2015—2018年间PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>值在0.49~0.72之间,平均值为0.60,从2015—2018年PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>的各年均值来看,该值偏高并呈逐年升高趋势,说明成都市大气环境首要污染物为PM<sub>2.5</sub>,其空气污染类型从煤烟型向扬尘、机动车尾气和煤烟混合型污染转变。2015—2018年成都市PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>值总体上秋冬高、春夏低,PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>值在各季节均较高,季节间差距较小。

2) PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>与气象条件的相关性分析表明,PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>的月平均浓度与月平均气温具有较高的线性相关关系,相关系数分别为-0.822、-0.776,表明温度升高,对流运动增强,加强了PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>等污染物垂向对流运动,对成都市污染物浓度降低起到重要作用。水对大气中PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>具有一定去除作用,2015—2018年PM<sub>2.5</sub>与PM<sub>10</sub>的月平均浓度随降水量的增加而降低,呈负相关,PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>与降水量的相关系数均为-0.612。日照时数、月平均风速、相对湿度等与PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>月平均浓度呈负相关,其中日照时数、月平均风速与PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>月平均浓度为低度的线性相关关系,由于2015—2018年间风速在1.0~1.7 m/s之间,均值为1.3 m/s,总体风速较小,因此对促进PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>的扩散作用有限;而相对湿度与PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>月平均浓度为微弱的线性相关关系,且相关性不显著。

## 参考文献:

- [1] Li M S, Zhang J H, Zhang Y J, *et al.* Spatio-temporal pattern changes of ambient air PM<sub>10</sub> pollution in China from 2002 to 2012 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(11): 1504-1512.  
李名升, 张建辉, 张殷俊, 等. 近10年中国大气PM<sub>10</sub>污染时空格局演变 [J]. 地理学报, 2013, 68(11): 1504-1512.
- [2] 中华人民共和国环境保护部. 中国环境质量报告2011 [R]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013.

- [3] Mu Q, Zhang S Q. An evaluation of the economic loss due to the heavy haze during January 2013 in China [J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(11): 2087-2094.  
穆泉, 张世秋. 2013年1月中国大面积雾霾事件直接社会经济损失评估 [J]. 中国环境科学, 2013, 33(11): 2087-2094.
- [4] Ma Z Q, Zhao X J, Meng W, *et al.* Comparison of influence of fog and haze on visibility in Beijing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, 25(11): 1208-1214.  
马志强, 赵秀娟, 孟伟, 等. 雾和霾对北京地区大气能见度影响对比分析 [J]. 环境科学研究, 2012, 25(11): 1208-1214.
- [5] Gong S Y, Feng J L. Relationships among relative humidity,  $PM_{10}$  concentration and atmospheric visibility in Shanghai [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, 25(6): 628-632.  
龚识懿, 冯加良. 上海地区大气相对湿度与 $PM_{10}$ 浓度和大气能见度的相关性分析 [J]. 环境科学研究, 2012, 25(6): 628-632.
- [6] Tai A P K, Mickley L J, Jacob D J. Correlations between fine particulate matter ( $PM_{2.5}$ ) and meteorological variables in the United States: Implications for the sensitivity of  $PM_{2.5}$  to climate change [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(32): 3976-3984.
- [7] Menon S, Hansen J, Nazarenko L, *et al.* Climate effects of black carbon aerosols in China and India [J]. *Science*, 2002, 297(5590): 2250-2253.
- [8] Zhang Q, Jiang X J, Tong D, *et al.* Transboundary health impacts of transported global air pollution and international trade [J]. *Nature*. 2017, 543(7647): 705-709.
- [9] Yang H B, Zou X D, Wang H Y, *et al.* Study progress on  $PM_{2.5}$  in atmospheric environment [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2012, 28(3): 77-82.  
杨洪斌, 邹旭东, 汪宏宇, 等. 大气环境中 $PM_{2.5}$ 的研究进展与展望 [J]. 气象与环境学报, 2012, 28(3): 77-82.
- [10] Bai Z N. *The Effect of Ambient Particulate Matter ( $PM_{2.5}/PM_{10}$ ) on Hospital Admissions for Lower Respiratory Tract Infection: A Case-Crossover Study in Shi Jiazhuang, China* [D]. Shijiazhuang: Hebei Medical University, 2015.  
白子娜. 石家庄市大气颗粒物( $PM_{2.5}/PM_{10}$ )对下呼吸道感染住院影响的病例交叉研究 [D]. 石家庄: 河北医科大学, 2015.
- [11] Pope III C A, Burnett R T, Thun M J, *et al.* Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution [J]. *JAMA*, 2002, 287(9): 1132-1141.
- [12] Li Y P, Liu H F, Zhou H, *et al.* Contamination characteristics and health risk assessment of toxic heavy metals in  $PM_{2.5}$  in Chengdu [J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(7): 2225-2232.  
李友平, 刘慧芳, 周洪, 等. 成都市 $PM_{2.5}$ 中有毒重金属污染特征及健康风险评估 [J]. 中国环境科学, 2015, 35(7): 2225-2232.
- [13] Heft-Neal S, Burney J, Bendavid E, *et al.* Robust relationship between air quality and infant mortality in Africa [J]. *Nature*, 2018, 559(7713): 254-258.
- [14] Yuan S, Wang J X, Jiang Q Q, *et al.* Long-term exposure to  $PM_{2.5}$  and stroke: A systematic review and meta-analysis of cohort studies [J]. *Environmental Research*, 2019, 177: 108587.
- [15] Dao X, Zhang L L, Wang C, *et al.* Characteristics of mass and ionic compounds of atmospheric particles in winter and summer of Beijing-Tianjin-Hebei area, China [J]. *Environmental Chemistry*, 2015, 34(1): 60-69  
刀谓, 张霖琳, 王超, 等. 京津冀冬季与夏季 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 及其水溶性离子组分区域性污染特征分析 [J]. 环境化学, 2015, 34(1): 60-69.
- [16] Wang Z S, Li Y T, Chen T, *et al.* Spatial-temporal characteristics of  $PM_{2.5}$  in Beijing in 2013 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(1): 110-120.  
王占山, 李云婷, 陈添, 等. 2013年北京市 $PM_{2.5}$ 的时空分布 [J]. 地理学报, 2015, 70(1): 110-120.
- [17] Zhang G L, Zhang T H, Chen B, *et al.* Pollutant characteristics analysis during APEC summit in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2017, 12(3): 184-194.

- 张国龙, 张廷瀚, 陈斌, 等. APEC期间京津冀地区污染物变化特征分析 [J]. 大气与环境光学学报, 2017, 12(3): 184-194.
- [18] Liu D M, Huang J, Gao S P, *et al.* The pollution level and influencing factors of atmospheric particulates from traffic in Beijing City during spring [J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(2): 228-233.
- 刘大猛, 黄杰, 高少鹏, 等. 北京市区春季交通源大气颗粒物污染水平及其影响因素 [J]. 地学前缘, 2006, 13(2): 228-233.
- [19] Wei Y X, Tong Y Q, Yin Y, *et al.* The variety of main air pollutants concentration and its relationship with meteorological condition in Nanjing City [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2009, 32(3): 451-457.
- 魏玉香, 童尧青, 银燕, 等. 南京SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>和PM<sub>10</sub>变化特征及其与气象条件的关系 [J]. 大气科学学报, 2009, 32(3): 451-457.
- [20] Li L, Chen C H, Huang C, *et al.* Regional air pollution characteristics simulation of O<sub>3</sub> and PM<sub>10</sub> over Yangtze River Delta region [J]. *Environmental Science*, 2008, 29(1): 237-245.
- 李莉, 陈长虹, 黄成, 等. 长江三角洲地区大气O<sub>3</sub>和PM<sub>10</sub>的区域污染特征模拟 [J]. 环境科学, 2008, 29(1): 237-245.
- [21] Yun L L, Zhang T S, Lu F, *et al.* Analysis of air pollutants during process of a haze in Wuxi City [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*. 2015, 10(1): 22-30.
- 云龙龙, 张天舒, 陆钊, 等. 无锡市一次霾形成过程大气污染物特征分析 [J]. 大气与环境光学学报, 2015, 10(1): 22-30.
- [22] Zhang H Y, Wang X S, Lu K D, *et al.* Impact of typical meteorological conditions on the O<sub>3</sub> and PM<sub>10</sub> pollution episodes in the Pearl River Delta in autumn [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2014, 50(3): 565-576.
- 张浩月, 王雪松, 陆克定, 等. 珠江三角洲秋季典型气象条件对O<sub>3</sub>和PM<sub>10</sub>污染的影响 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2014, 50(3): 565-576.
- [23] Liu N, Wang X S, Hu Y T, *et al.* Numerical simulation and process analysis of PM<sub>10</sub> pollution over the Pearl River Delta in autumn [J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(9): 1537-1545.
- 刘宁, 王雪松, 胡泳涛, 等. 珠江三角洲秋季PM<sub>10</sub>污染模拟与形成过程分析 [J]. 中国环境科学, 2012, 32(9): 1537-1545.
- [24] Hu X Y, Li Y P, Li J F, *et al.* Interaction of ambient PM<sub>10</sub> among the cities over the Pearl River Delta [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2011, 47(3): 519-524.
- 胡晓宇, 李云鹏, 李金凤, 等. 珠江三角洲城市群PM<sub>10</sub>的相互影响研究 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2011, 47(3): 519-524.
- [25] Du J H, Huang X, He L Y, *et al.* Pollution characteristics of mercury in fine particles (PM<sub>2.5</sub>) in Shenzhen City [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2010, 23(6): 667-673.
- 杜金花, 黄晓锋, 何凌燕, 等. 深圳市大气细粒子(PM<sub>2.5</sub>)中汞的污染特征 [J]. 环境科学研究, 2010, 23(6): 667-673.
- [26] Zhang X Y, Sun J Y, Wang Y Q, *et al.* Factors contributing to haze and fog in China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(13): 1178-1187.
- 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 我国雾-霾成因及其治理的思考 [J]. 科学通报, 2013, 58(13): 1178-1187.
- [27] Bao Z E, Chen L H, Li K W, *et al.* Meteorological and chemical impacts on PM<sub>2.5</sub> during a haze episode in a heavily polluted basin city of Eastern China [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 250: 520-529.
- [28] Li Z H, Tu X P. Winter space-time distribution of boundary layer meteorological elements with their relation to fog formation in Chongqing urban districts [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 1993, 16(3): 329-333.
- 李子华, 涂晓萍. 重庆市冬季边界层气象要素的时空分布及与成雾的关系 [J]. 南京气象学院学报, 1993, 16(3): 329-333.
- [29] Guo Y X, Gong D Y, Wang W S, *et al.* Spatiotemporal variation of PM<sub>10</sub> concentration and its relationship with autumn daily temperature over Central and Eastern China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(9): 1155-1164.
- 郭元喜, 龚道溢, 汪文珊, 等. 中国中东部秋季PM<sub>10</sub>时空变化及其与日气温的关系 [J]. 地理学报, 2012, 67(9): 1155-1164.

- [30] Zhao C X, Wang Y Q, Wang Y J, *et al.* Temporal and spatial distribution of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> pollution status and the correlation of particulate matters and meteorological factors during winter and spring in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2014, 35(2): 418-427.  
赵晨曦, 王云琦, 王玉杰, 等. 北京地区冬春PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>污染水平时空分布及其与气象条件的关系 [J]. 环境科学, 2014, 35(2): 418-427.
- [31] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Ambient air quality standard: GB 3095—2012 [S]. Beijing: China Environment Science Press, 2016.  
国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 环境空气质量标准: GB 3095—2012 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2016.
- [32] Guo Q, Wang J Y, Zhou Z H, *et al.* Characteristics and reason analysis of a typical heavy air pollution event in Chengdu [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(2): 629-639.  
郭倩, 汪嘉杨, 周子航, 等. 成都市一次典型空气重污染过程特征及成因分析 [J]. 环境科学学报, 2018, 38(2): 629-639.
- [33] Cao J L, Wang M S, Han W S, *et al.* Spatio-temporal distribution characteristics of PM<sub>2.5</sub> in Henan Province [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2018, 13(1): 42-51.  
曹景丽, 王明仕, 韩文生, 等. 河南省PM<sub>2.5</sub>时空分布特征研究 [J]. 大气与环境光学学报, 2018, 13(1): 42-51.
- [34] Zhang Z S, Tao J, Xie S D, *et al.* Seasonal variations and source apportionment of PM<sub>2.5</sub> at urban area of Chengdu [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(11): 2947-2952.  
张智胜, 陶俊, 谢绍东, 等. 成都城区PM<sub>2.5</sub>季节污染特征及来源解析 [J]. 环境科学学报, 2013, 33(11): 2947-2952.
- [35] Zheng X X, Zhao W J, Yan X, *et al.* Spatial and temporal variation of PM<sub>2.5</sub> in Beijing City after rain [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(5): 797-805.  
郑晓霞, 赵文吉, 晏星, 等. 降雨过程后北京城区PM<sub>2.5</sub>日时空变化研究 [J]. 生态环境学报, 2014, 23(5): 797-805.
- [36] Zhou T X, Wang G Q, Kuang H Y, *et al.* Analysis of the relationship between PM<sub>2.5</sub> and wind direction and speed in Changzhou [J]. *Agriculture and Technology*, 2017, 37(9): 140-141.  
周天雄, 王国强, 匡汉祎, 等. 常州市PM<sub>2.5</sub>与风向风速关系分析 [J]. 农业与技术, 2017, 37(9): 140-141.
- [37] Guo X M. *Observed and Simulated Research on Climate Characteristic of Air Quality and the Topographic Induced Effects in Sichuan Basin* [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2016.  
郭晓梅. 四川盆地空气质量气候特征及其大地形影响效应的观测模拟研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2016.