

文章编号: 2096-1618(2023)01-0083-09

# 成渝双城经济圈城市化特点对大气污染扩散条件的影响

孙元沛<sup>1</sup>, 程志刚<sup>2</sup>

(1. 成都信息工程大学, 四川 成都 610225; 2. 中国民用航空飞行学院, 四川 广汉 618307)

**摘要:**成渝双城经济圈在复杂大地形和独特盆地气象条件等影响下,一直是中国雾霾频发地之一。为探究成渝双城经济圈局地大气污染扩散气象条件的变化,针对成渝地区独特地形特点,根据地理分布与城市规模选取了成渝双城经济圈7个代表城市,分析了近21年来成渝双城经济圈的城市发展过程中大气污染扩散条件变化特征。结果表明:成渝双城经济圈城市化发展水平逐年增加,区域发展不均衡,表现为成都和重庆的城镇化率高于全国平均水平,成都平原经济区增幅较小,重庆、川东北经济区及川南经济区增幅较大,且2010年城市化发展明显放缓;2000-2018年成渝双城经济圈的空气质量逐年转好,西北部PM<sub>2.5</sub>降幅明显高于东南部;成渝双城经济圈的污染扩散能力时空差异明显,盆地边缘城市污染扩散能力优于盆地中心城市,土地城市化率低的城市好于土地城市化率高的城市,2010年之后,宜宾和南充污染扩散能力有比较明显的增强。

**关键词:**成渝双城经济圈;大气污染扩散条件;城市化;大气通风系数;混合层高度

**中图分类号:**P467

**文献标志码:**A

**doi:**10.16836/j.cnki.jcuit.2023.01.013

## 0 引言

2011年,国家发展改革委员会印发《成渝经济区区域规划》,2016年国务院批复《成渝城市群发展规划》,2020年1月,中央财经委员会第六次会议决定推动成渝地区双城经济圈建设,2021年10月,《成渝地区双城经济圈建设规划纲要》审议通过。随着城市社会经济发展,作为复杂大地形和独特盆地气象条件等影响下的成渝双城经济圈,也成为“三区十群”中仅次于京津冀的大气污染严重区域。

近年来,学者们围绕大气污染扩散条件、城市化发展水平等开展了大量的研究,提出了一些表征污染扩散条件的指标和城市分类标准。在污染扩散条件方面,王清川等<sup>[1]</sup>利用多年气象观测资料和空气质量检测资料,分析了风速、逆温层、静稳天气等气象因素对大气污染的影响;梅梅等<sup>[2]</sup>利用大气通风量研究大气污染扩散条件的历史变化趋势及其成因。在城市发展水平方面,联合国人居中心提出的城市发展指数(CDI)5项内容11个指标<sup>[3]</sup>以及包括3大类别42项指标的城市指标(UGI)<sup>[4]</sup>是有较强代表性的城市化质量评价体系;国内以方创琳、李明秋、陈明星等为代表,从三个方面构建了评价城市化质量的指标体系<sup>[5-7]</sup>。这些研究指标体系可分为:仅从城市化质量出发,以城市化内部各子系统为载体来构建综合评价体系;将人作为研究对象,注重居民生活的福利水平状况;强调城市化进程中城乡协调发展问题,通常用城乡收入差距比或城乡恩格尔系数之比进行衡量。除此以外,国内学者在成渝地区大气污染形成与时空分布、高

原-盆地气象过程与大气污染相互作用以及成渝地区大气污染联防联控等方面也取得了不少成果。但对城市化发展进程中大气污染扩散气象条件的分析较少,且多从气象要素和污染物出发。因此,考虑城市发展差异,以城市化过程为切入点,厘清成渝双城经济圈大气污染扩散条件的时空演变特征,可为成渝城市群大气污染联合防治、共建成渝双城生态圈提供基础理论依据和科学支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域及地理环境条件

成渝经济圈(27°N~33.5°N,101°E~110°E)是西部人口最为稠密、产业最为集中、城镇密度最高的区域<sup>[8]</sup>。本文研究区域参照《成渝地区双城经济圈建设规划纲要》。成渝双城经济圈地形复杂,地貌类型多样,是四川盆地的核心地带,地貌以丘陵为主,具有高湿和高静风频率与快速经济发展等特点,一直是中国大气污染严重的重点区域之一,雾霾频发。

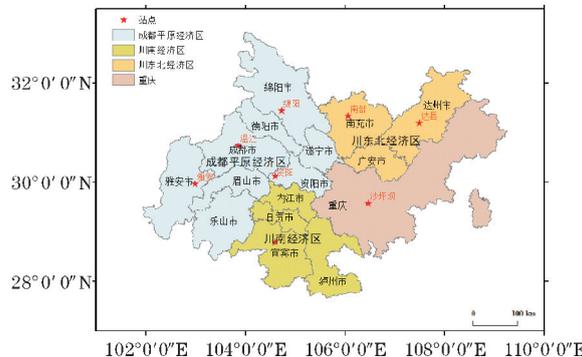


图1 成渝双城经济圈行政区域-站点分布图

收稿日期:2022-03-30

基金项目:四川省科技计划资助项目(2021YJ0310)

2016年9月四川省首次编制印发五大经济区发展规划,将整个四川省划分为五大经济区,即成都平原经济区、川南经济区、川东北经济区、攀西经济区、川西北生态示范区。其中成都平原经济区、川南经济区、川东北经济区属于成渝双城经济圈的范围,本文在这3个经济区分别选取代表城市进行大气污染扩散能力的对比分析。

## 1.2 资料来源

气象资料:研究区域内多个气象站的逐日地面观测数据,欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的ERA52000-2020年再分析资料,空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。

社会经济发展数据:2000-2020年四川统计年鉴、重庆统计年鉴、中国城市统计年鉴。

污染数据:达尔豪斯大学大气成分分析组发布的PM<sub>2.5</sub>浓度数据,时间为2000-2018年。

## 1.3 研究方法

### (1) 城镇化率(均按常住人口计算)

$$\text{城镇化率} = \text{城镇人口} / \text{总人口} \quad (1)$$

(2) 土地城市化率。土地城市化是由于城市化的推进,土地利用属性由农业用地转变为城市建设用地的过程。土地城市化是城市化过程的重要载体和最直观的反映。土地城市化率是评价一个城市土地城市化水平的核心指标<sup>[9]</sup>。

土地城市化率(LUR)为

$$\text{LUR} = (\text{UCA}/\text{UA}) \times 100\% \quad (2)$$

式中,UCA为城市建设用地面积,UA为城区面积。

(3) 大气通风系数。大气通风系数反映了大气边界层内通风情况,能较好地说明大气的扩散能力,值越大越有利于大气污染的扩散<sup>[10]</sup>。计算方法为大气边界层高度乘以边界层内的平均风速。

(4) 混合层高度。混合层高度也是衡量大气垂直扩散能力的因素之一,其对大气质量评估和污染物的存储量及分布起着重要作用<sup>[11]</sup>。混合层较低容易使污染物和水汽积聚,从而导致污染加重。混合层高度使用罗氏法计算,罗氏法考虑了大气稳定性、温度、露点温度、风速及纬度等因子,公式如下:

$$h = (121/6)(6-P)(T-T_d) + 0.169P(U_z + 0.257) / [12f \times \ln(Z/Z_0)] \quad (3)$$

其中, $h$ 为混合层高度(m); $P$ 为Pasquill稳定度级别,1~6; $T-T_d$ 为温度与露点温度差(°C); $Z$ 为离地面高度(m); $U_z$ 为离地面 $Z$ 高度的平均风速(m/s); $Z_0$ 为地表粗糙度(m); $f$ 为科氏力参数( $f = 2\Omega \sin\theta$ , $\Omega = 7.292 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$ , $\theta$ 为地理纬度)。

(5) Spearman 相关分析。Spearman 相关分析主要用于描述两个连续或等级之间的相关程度,也是衡量两个变量的依赖性的非参数指标:

$$\sigma = 1 - \frac{6 \times \sum d_i^2}{n \times (n^2 - 1)} \quad (4)$$

其中: $\sigma$ 表示相关系数, $n$ 是观测值的总数量, $d_i$ 表示二列成对变量的等级差数。当样本数 $n < 50$ 时,通过查阅Spearman秩相关系数界值表来检验 $\sigma$ 的显著性,其中自由度为 $n-2$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 选取研究城市

根据2014年国务院印发的《关于调整城市规模划分标准的通知》,新的城市规模划分标准以城区常住人口为统计口径,将城市划分为五类七档:城区常住人口50万以下的城市为小城市,其中20万以上50万以下的城市为I型小城市,20万以下的城市为II型小城市;城区常住人口50万以上100万以下的城市为中等城市;城区常住人口100万以上500万以下的城市为大城市,其中300万以上500万以下的城市为I型大城市,100万以上300万以下的城市为II型大城市;城区常住人口500万以上1000万以下的城市为特大城市;城区常住人口1000万以上的城市为超大城市。

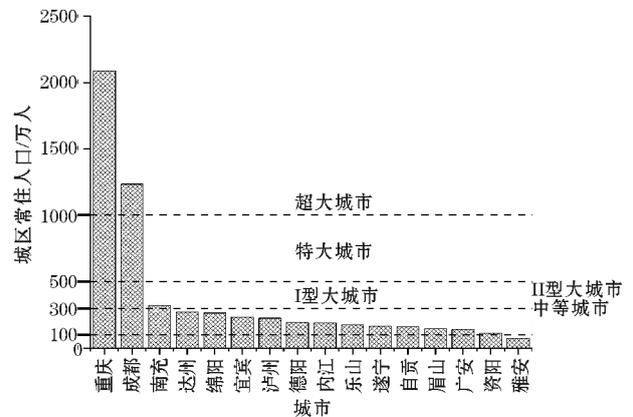


图2 成渝双城经济圈城市规模划分

为此成渝双城经济圈可以分为2个超大城市(重庆、成都),1个I型大城市(南充),12个II型大城市(达州、绵阳、宜宾、泸州、德阳、内江、乐山、遂宁、自贡、眉山、广安、资阳),1个中等城市(雅安)。为研究成渝双城经济圈中不同规模城市的城市发展对大气污染扩散能力的影响,在成都平原经济区、川南经济区、川东北经济区和重庆分别选取每个城市规模等级的第一个城市作为代表城市,即选成都、绵阳、雅安、宜宾、南充、达州、重庆7个代表城市(表1)。

表 1 城市规模

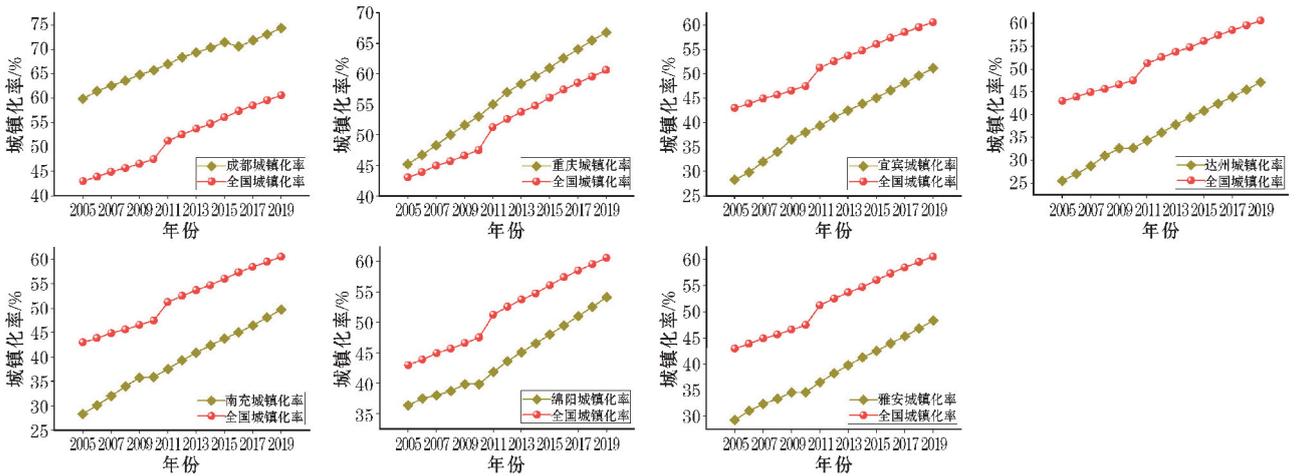
经济区	超大城市	特大城市	I 型大城市	II 型大城市	中等城市
成都平原经济区	成都	/	/	绵阳、德阳、乐山、遂宁、眉山、资阳	雅安
川南经济区	/	/	/	宜宾、泸州、内江、自贡	/
川东北经济区	/	/	南充	达州、广安	/
重庆	重庆	/	/	/	/

## 2.2 城市发展水平分析

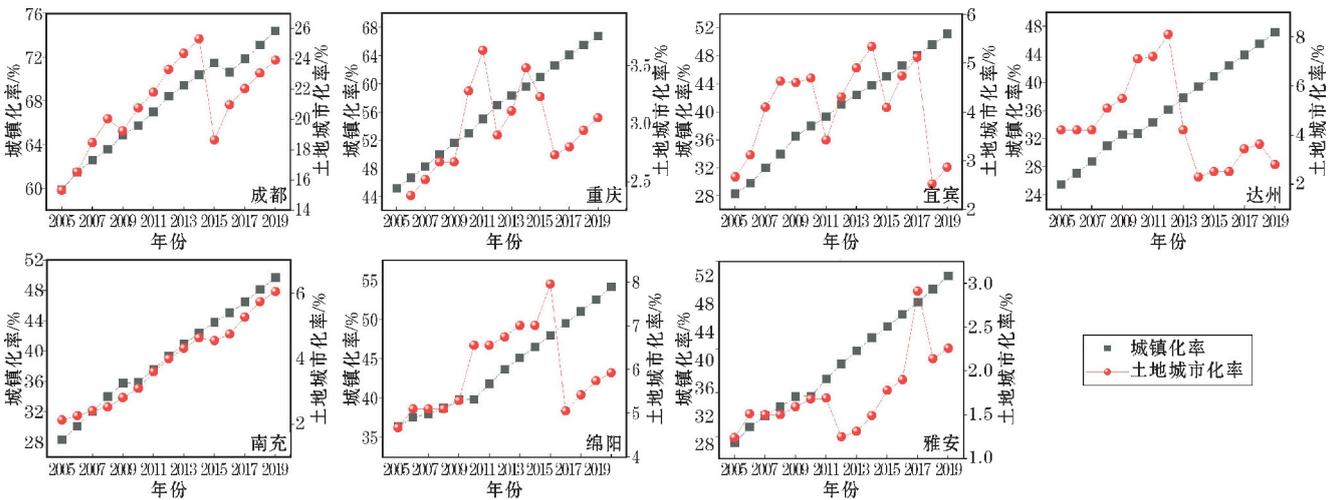
### 2.2.1 城镇化率

分析图 3(a)可知,2005-2019 年成都、重庆、宜宾、达州、南充、绵阳、雅安的城镇化率分别为 74.41%、66.80%、51.19%、47.14%、49.72%、54.13% 和 48.37%,相比于 2005 年的增幅分别为 14.51%、21.60%、22.89%、21.64%、21.42%、17.73% 和 19.07%。宜宾、达州、重庆、南充的城镇化率增幅相对较大,雅安、绵阳、成都的城镇化率相对较小。即成都

平原经济区的城镇化率增幅较小,重庆、川东北经济区和川南经济区的城镇化率增幅较大。2019 年中国的城镇化率为 60.60%,相比 2005 年增加了 17.61%,在成渝双城经济圈所选取的代表城市中,成都和重庆的城镇化率高于全国平均水平。其他城市的城镇化水平还未达到全国水平,是典型的双核经济圈。成都的城镇化增速稍低于全国水平,其他 6 个城市则保持着高于全国水平的城镇化增长速度。2010 年达州、南充、绵阳、雅安的城镇化率都出现了增长停滞现象,其他年份各城市的城镇化率均为逐年增长趋势。



(a) 代表城市城镇化率与全国平均水平对比



(b) 代表城市城镇化率与土地城市化率对比

图 3 代表城市城镇化率与全国平均水平及土地城市化率对比图

中国的土地城市化增速远远快于人口城市化,造成城市化虚高现象<sup>[12]</sup>。而图3(b)中代表城市的土地城市化斜率小于人口城市化,说明成渝双城经济圈的城市化是较为优质的城市化过程,吸引人口流入能力较强,达到了良性发展。土地城市化的变化一定程度上反映了下垫面的变化情况<sup>[13]</sup>。但由于市区范围的不断调整和一些行政区域的划分,土地城市化的变动受到城市发展的影响。除南充,其他代表城市的土地城市化率都受到了行政区划调整的影响。由2005-2019年各城市的土地城市化率变化范围可知,成渝双城经济圈的土地城市化发展水平不均衡。截至2019年,成都、南充、绵阳、重庆、宜宾、达州和雅安的土地城市化率分别为23.91%、6.05%、5.93%、3.05%、2.87%、2.81%和2.26%。只有成都的土地城市化率达到了20%以上,其他城市的土地城市化水平都较低。绵阳和南充的土地城市化率相对较高,达到6%左右,其他几个城市的土地城市化率都小于3.5%。虽然重庆的人口城镇化率较高,但城镇化发展不均衡,在

土地城市化方面远远落后于成渝双城经济圈的大部分城市。即中心城区发达,其他地区发展滞后。

城镇化率的变动部分主要来自农业剩余劳动力向城镇转移产生的流动人口,城镇化率反映了一个经济体的产业结构、就业结构等深层次经济、社会结构的演变状况<sup>[14]</sup>。如图4,成都和重庆作为国家中心城市,城镇化发展经历了高速发展阶段,处于加速阶段向成熟阶段的过渡期,增长速度较为缓慢,2016年成都甚至出现了负增长。大中型城市则相对保持着较快的城镇化率增长趋势。2010年是成渝双城经济圈城市化的一个比较明显的时间节点,2010年各城市的城镇化率增速都明显减小,两个超大城市的城镇化率增速相对减小,大中型城市的城镇化率则基本上停止增长。2011-2019年,除重庆之外的6个城市的城镇化增速基本都表现出先减后增的趋势,在2015年前后城镇化增长速度最慢。相比于其他城市城镇化的稳步增长,绵阳2010年之后相比2010年之前的城镇化率增速有了大幅度提升。

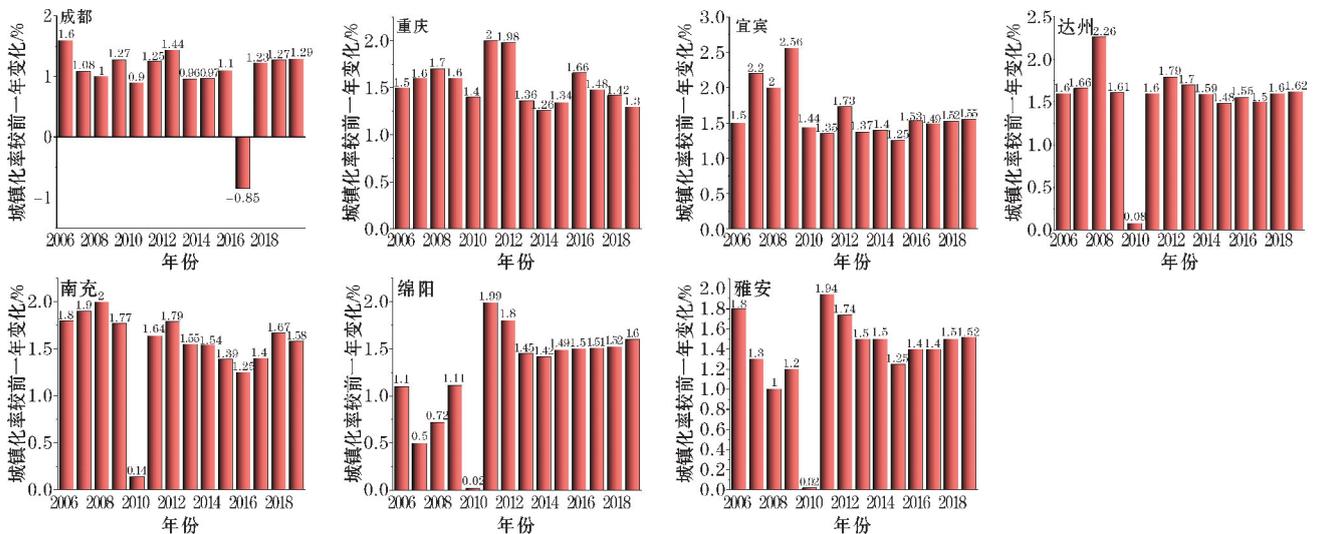


图4 代表城市城镇化率相对于前一年的变化值

## 2.2.2 产业结构

由图5可知,根据成渝双城经济圈各个城市的地区生产总值的第一、二、三产业占比,2019年第三产业在地区生产总值中占比过半的城市有成都(65.60%)、重庆(53.20%)。每个城市的第一产业都呈现出缓慢增长趋势,第二、三产业的发展则不同。除宜宾属于“二三一”类型,其他6个城市都属于“三二一”类型,即第三产业占主导。成都1999年就属于“三二一”类型,其他城市转变为“三二一”类型的时间

分别是:重庆2001年;达州、南充、绵阳2017年;雅安2019年。在成渝双城经济圈中,除成都重庆两核之外,2017年是大部分城市在产业结构上向城市化迈进的一个重要节点。相对于1999年,2019年宜宾、达州、重庆、绵阳、成都、雅安、南充的第二产业占比变化情况分别为7.29%、-1.18%、-1.82%、-2.52%、-13.91%、-16.58%、-20.46%,宜宾的第二产业占比略有增大,其他城市减小,南充的第二产业占比减少最多。

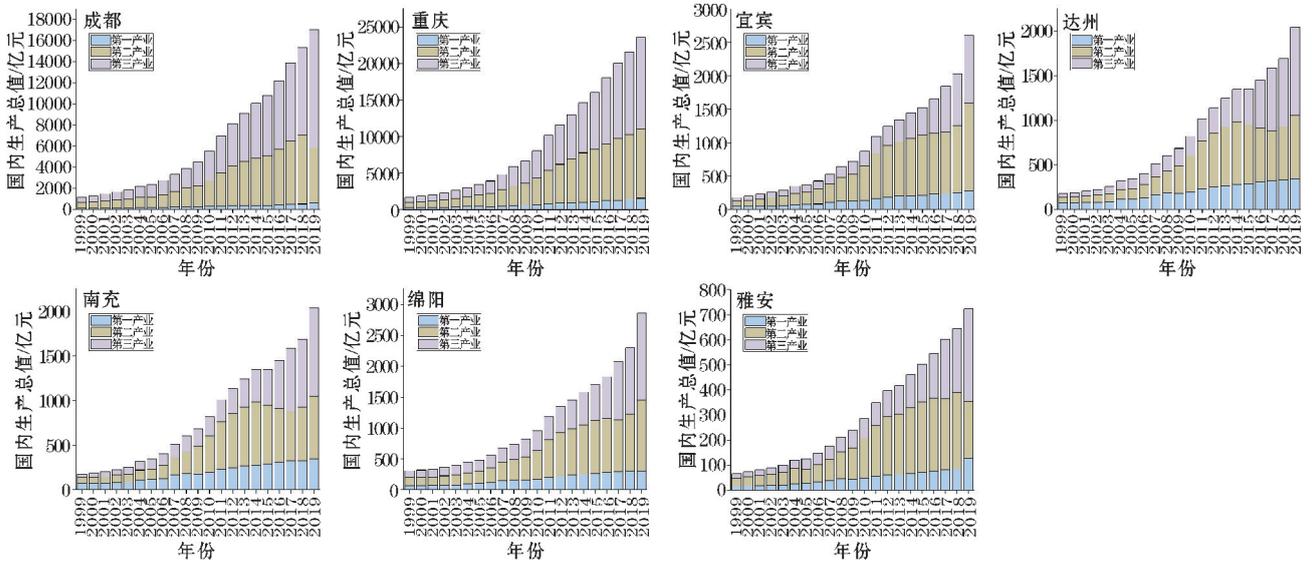


图5 代表城市的产业结构变化情况

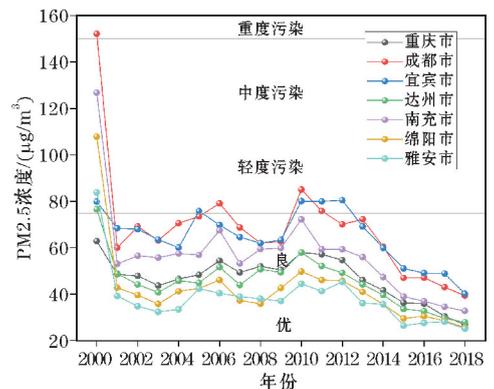
综上所述,2000–2020年成渝双城经济圈7个代表城市的城镇化发展进程不断推进,城镇化水平逐年增高,产业结构逐渐向发达城市转变,第三产业逐渐发展壮大。在2000年前后,两个超大城市成都和重庆的产业结构就发展成为了发达地区的“三二一”结构;大城市基本在2017年前后达到;而中等城市的代表雅安则在2019年转变为“三二一”结构。超大城市的城市化增速放缓,大城市、中等城市的城市化进程保持较为稳定的速度推进。成渝双城经济圈的城镇化发展存在两个重要的时间节点,即2010年和2015年。2010年7个代表城市的城镇化率增速都有明显减小,两个超大城市的城镇化率增速相对减小,大中型城市的城镇化率则基本上停止增长。2011年随着中国进入十二五规划,全国城镇化率出现了比较大幅度的增加,本文所研究的成渝双城经济圈代表城市也符合全国城镇化发展规律,在2011年之后恢复了增长。以2015年为节点,十二五期间大中型城市的城镇化率增长速度有所减慢,十三五期间大中型城市的城镇化发展基本保持较慢速度的平稳增长。

### 2.3 PM<sub>2.5</sub> 浓度变化特征

目前,中国根据PM<sub>2.5</sub>浓度划分空气质量标准如下,优:0~35 μg/m<sup>3</sup>;良:35~75 μg/m<sup>3</sup>;轻度污染:75~115 μg/m<sup>3</sup>;中度污染:115~150 μg/m<sup>3</sup>;重度污染:150~250 μg/m<sup>3</sup>;严重污染:大于250 μg/m<sup>3</sup>及以上。

分析图6可知,各代表城市的空气质量在2000年都比较差,2001年PM<sub>2.5</sub>浓度都出现了大幅度的减小,除了成都和宜宾,其他城市的PM<sub>2.5</sub>浓度都达到了优良标准。2000–2018年,7个代表城市中,只有重庆的PM<sub>2.5</sub>浓度一直处于优良标准。成都和宜宾的空气质量则相对较差,成都在2006年、2010年和2011年为轻度污染;宜宾在2005年、2010–2012年为轻度

污染。2018年,成都和宜宾的PM<sub>2.5</sub>浓度为良,其他5个市都达到了优。2010年之后,7个代表城市的PM<sub>2.5</sub>浓度基本上逐年减小,空气质量好转。2018年成都、重庆、宜宾、达州、南充、绵阳、雅安PM<sub>2.5</sub>年均浓度分别为39.36 μg·m<sup>-3</sup>、26.87 μg·m<sup>-3</sup>、40.15 μg·m<sup>-3</sup>、27.98 μg·m<sup>-3</sup>、32.75 μg·m<sup>-3</sup>、25.60 μg·m<sup>-3</sup>和25.11 μg·m<sup>-3</sup>,较2000年分别下降74.13%、57.26%、49.74%、63.47%、74.16%、76.27%和70.07%,且2000年成都、南充、绵阳的PM<sub>2.5</sub>浓度明显高于雅安、宜宾、达州、重庆,但在2018年末,各城市的PM<sub>2.5</sub>年均浓度差距已经相对较小,成都、南充、绵阳和雅安的降幅更为明显。总体来看2000–2018年各城市的PM<sub>2.5</sub>浓度下降显著。

图6 代表城市的PM<sub>2.5</sub>浓度变化

### 2.4 气象条件分析

#### 2.4.1 地面气象要素对比分析

对7个代表城市的基本气象要素变化特征进行分析(图7)发现,2000–2020年成都、重庆、宜宾、达州、南充、绵阳、雅安的年平均气温分别是16.50℃、18.90℃、10.80℃、17.70℃、12.30℃、17.30℃、

16.80℃。成都、重庆、达州、绵阳、雅安温度偏高,宜宾、南充温度偏低。相对于2000年,2020年南充、宜宾、达州、重庆、绵阳、雅安和成都的温度变化值分别为8.19℃、7.30℃、1.06℃、0.10℃、0.73℃、0.70℃和0.36℃,南充和宜宾增温明显。成都、重庆、宜宾、达州、南充、绵阳、雅安的年降水量分别为2.21mm、3.18mm、2.74mm、3.42mm、2.90mm、2.36mm、4.50mm。重庆、达州、雅安的降水量较大,成都、绵阳则相对较小。相对于2000年,2020年成都、宜宾、绵阳、雅安、重庆、南充和达州的降水量变化值分别为2.51mm、2.21mm、1.02mm、0.80mm、0.37mm、-0.13mm和-0.82mm。成都、宜宾的降水量有较为明显的增加。南充和达州出现了降水量减少的现象。

分析7个代表城市2000-2004年、2005-2009年、2010-2014年、2015-2020年的四季风速可知,7个代表城市的风速都以小风(风速 $\leq 2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )为主。南充、绵阳、重庆的风速偏大,宜宾、雅安的风速相对较小。2000-2020年,成都、宜宾、南充和绵阳的风速呈增加趋势,宜宾的风速在近几年有了大幅度增加,为2000年的2.6倍;重庆、达州和雅安的风速略微减小。

综合来看,7个代表城市中,重庆、绵阳、雅安、达

州的地面气象要素条件较有利于污染物的扩散。重庆的气象条件主要以高温、多降水为主,对污染物的湿清洁作用和风吹散污染物的效果都比较突出<sup>[15]</sup>;绵阳的温度相对较高,风速相对较大,有利于风吹散污染物;雅安的湿度相对较高,降水量是7个代表城市中最大的,达到了4.50mm,大约是成都平均降水量的2倍,但风速相对较小,因此雅安对污染物的湿清洁作用更为显著;达州的降水量为3.42mm,仅次于雅安,达州的湿清洁作用也相对较好。这与PM<sub>2.5</sub>的污染情况也一致,雅安、绵阳、达州、重庆在7个代表城市中相对空气质量较高,这4个城市PM<sub>2.5</sub>浓度一直保持在较低水平。这几个城市相对靠近盆地边缘,而分布于四川盆地盆底中部的成都、南充和宜宾则受复杂大地形和独特盆地气象条件等的影响更大。周围高耸的山脉使盆地内部成为封闭区域,不利于污染物水平运输或垂直扩散<sup>[16]</sup>,盆地上空受地形影响形成下沉气流抑制污染物扩散,盆地近地面贴地逆温与高空气流下沉增温形成脱地逆温,使得盆地内大气层结稳定<sup>[17]</sup>。且受周围青藏高原和云贵高原大地形的作用,大气环流形势独特,空气湿度大,有利于气溶胶离子吸湿增长<sup>[18]</sup>。

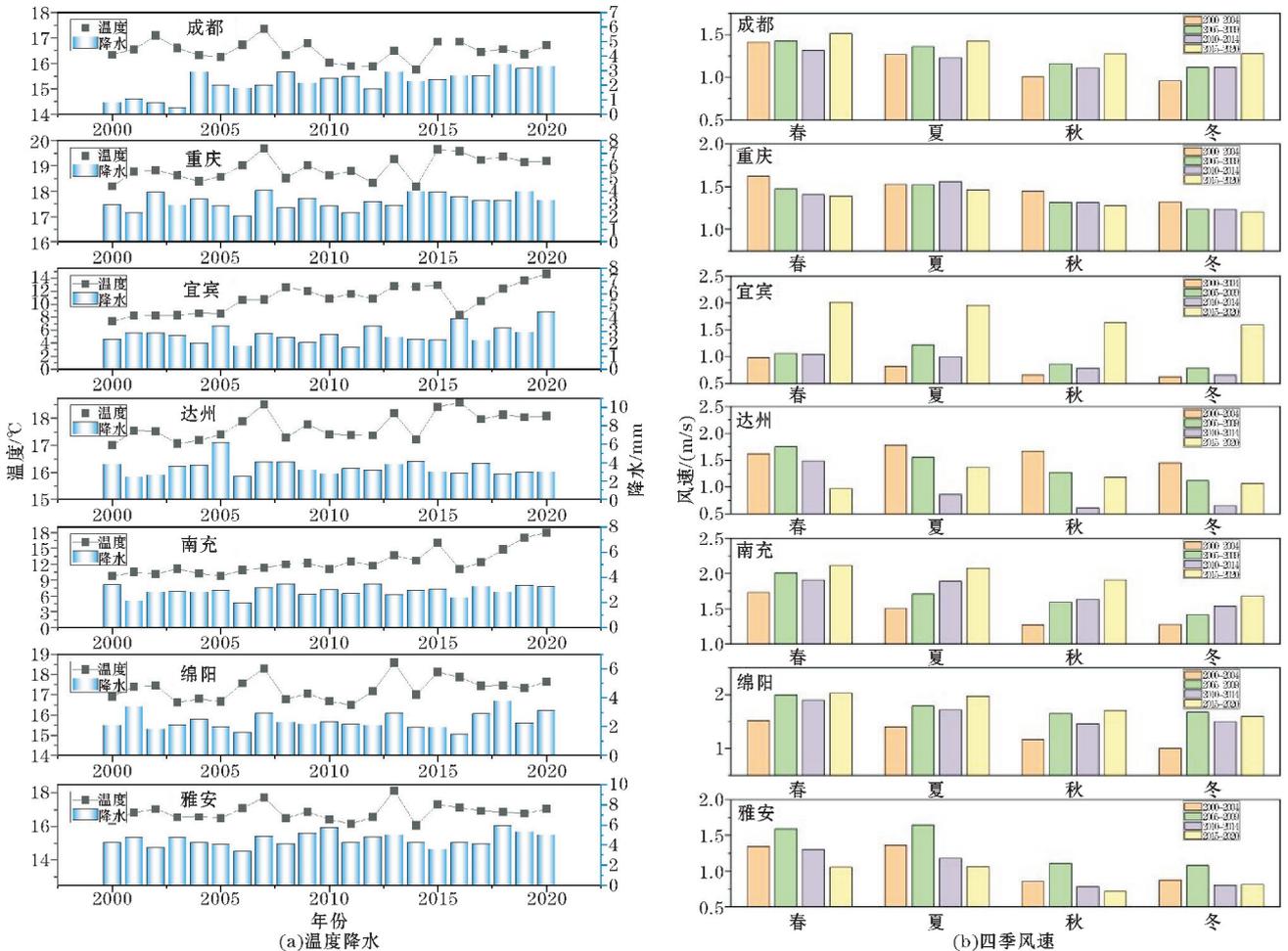


图7 代表城市的温度、降水和四季风速

### 2.4.2 气象扩散条件特征对比

大气通风系数反映了大气边界层内通风情况,能较好地说明大气的扩散能力<sup>[19]</sup>,大气通风系数较小时,风速较小,边界层较低容易使污染物和水汽积聚,从而导致污染加重。混合层高度也是衡量大气垂直扩散能力的因素之一,混合层高度表征了大气污染物在垂直方向被热力湍流、对流与动力湍流输送所能达到的高度,混合层高度低,大气污染物被积压在近地面层,不利于扩散;反之有利于污染物扩散<sup>[20]</sup>。由图 8 可知,2000–2020 年成都、重庆、宜宾、达州、南充、绵阳、雅安的平均大气通风系数分别是 $521.70 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $495.50 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $433.60 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $413.70 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $527.50 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $684.30 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $306.60 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ;平均混合层高度分别为 $570.30 \text{ m}$ 、 $641.80 \text{ m}$ 、 $548.50 \text{ m}$ 、 $586.30 \text{ m}$ 、 $593.20 \text{ m}$ 、 $708.30 \text{ m}$ 、 $551.90 \text{ m}$ 。平均大气通风系数和混合层高度按照从大到小排序,均为重庆、宜宾、雅安、南充、绵阳、达州、成都。反映了按此顺序大气污染扩散能力依次减弱,即在选取的 7 个代表城市中,重庆大气污染扩散能力最强,成都最弱。

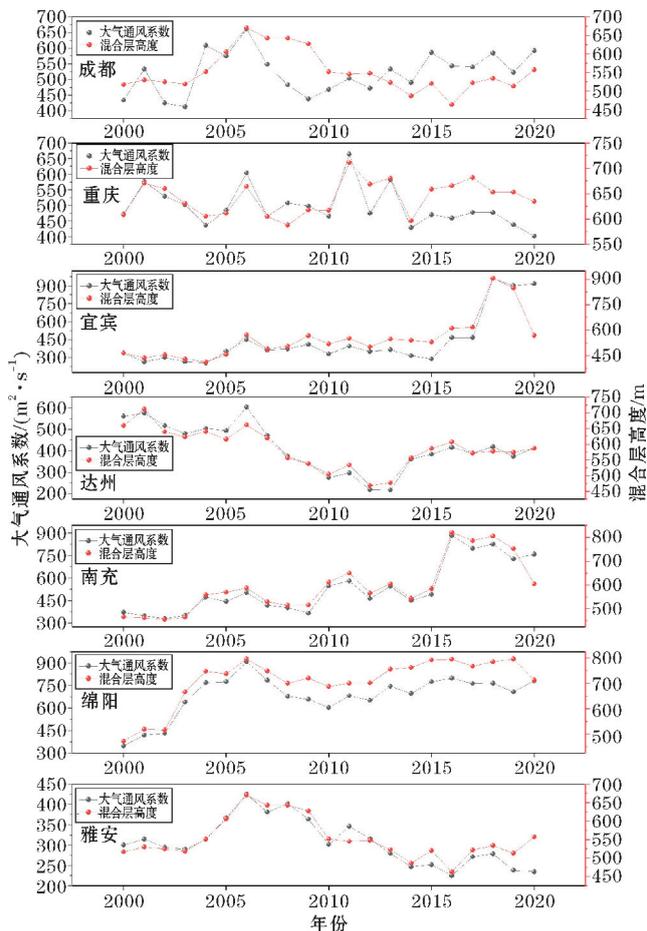


图 8 大气通风系数与混合层高度的变化

分析大气通风系数和混合层高度的特征可知,7 个代表城市的大气通风系数和混合层高度的变化特征基本保持同步,各个城市的大气通风系数和混合层高

度在 2000–2006 年基本都表现出波动中增大的趋势,这一阶段各项指标都处于较低水平,气象条件较为不利大气污染的扩散;2006 年 7 个代表城市的两项指标均出现极大值,各项指标出现较大改善之后在 2006–2010 年呈波动中减小的趋势。2010–2020 年宜宾、南充的大气通风系数和混合层高度在波动中增高,重庆、雅安则呈减小趋势,成都、达州、绵阳在近 10 年变化不大。总体来说,近 21 年宜宾、南充、绵阳的大气污染扩散条件有所改善,达州从 2000–2013 年逐渐变差,2013 年之后有所好转,但 2020 年还未恢复到 2000 年的污染扩散能力。成都、雅安和重庆的大气通风系数在近 21 年变化不大,呈现上下波动的规律。

综合气象条件分析可知,成渝双城经济圈的大气污染扩散条件具有以下特点:(1)盆地边缘城市的污染扩散能力较强,靠近盆地中心的城市污染扩散能力较弱。7 个代表城市中,雅安的海拔最高(气象站点海拔 $629.40 \text{ m}$ ),属于标准的盆地边坡,是著名的雨城<sup>[21]</sup>,风速大降水多,对污染物的自净化能力较强。成都是典型的盆地底部城市,温度相对较高,降水相对其他城市较小,大气通风系数与混合层高度都是 7 个代表城市中最底的,气象条件相对不利于污染物的扩散。(2)土地城市化率低的的城市,大气污染扩散条件都相对较好,反之则污染扩散能力较差。截至 2019 年,土地城市化率按照从高到低排序为成都、南充、绵阳、重庆、宜宾、达州、雅安,分别为 $23.91\%$ 、 $6.05\%$ 、 $5.93\%$ 、 $3.05\%$ 、 $2.87\%$ 、 $2.81\%$ 、 $2.26\%$ 。与成渝双城经济圈其他城市相比,成都的城市用地占比最大,受到城市动力效应更强,大气通风系数和混合层高度都较小,大气污染扩散能力较差。(3)2000–2006 年各城市的大气通风系数和混合层高度基本都是增大趋势,2006–2010 年有所减小,2010 年之后,原本空气质量较差的宜宾、南充风速增大,大气通风系数和混合层高度呈增大趋势,污染扩散能力有比较明显的增强。

### 2.5 代表城市城镇化率与大气扩散条件的相关性分析

表 2 是根据 2005–2019 年的城镇化率与各个气象条件及扩散条件计算得出的斯皮尔曼相关系数。通过查阅 Spearman 秩相关系数界值表可知,样本数为 15 时,相关系数临界值为 0.65。分析表 2 可知,大气污染扩散条件与城镇化率相关性较强的城市有成都、宜宾、南充、雅安。与成都的城镇化率相关性最强的气象条件为混合层高度,相关系数达到了 $-0.84$ ,为显著负相关。雅安的风速、大气通风系数和混合层高度都与城镇化率成负相关。成都和雅安同属于成都平原经济区,成都的城市化特点为城镇化率和土地城市化率远高于成渝双城经济圈的其他城市,受城市化影响更大。

雅安的城市化特点为城市规模小,产业结构较为落后。宜宾和南充分别属于川南经济区和川东北经济区,这两个城市的混合层高度都与城镇化率呈现显著正相关。相对于其他3个城市,宜宾的大气污染扩散能力与城镇化率相关性较低,仅混合层高度与城镇化率正相关,相关系数为0.69。南充的温度、风速、大气通风系数都与城镇化率呈现显著正相关。宜宾的城市化特点为第二产业占主导,城镇化率和土地城市化率都较低。南充的产业结构变化相对较大,第二产业占比显著减小。由于环境污染的变动受产业结构即第二产业比重变化的影响较大<sup>[22]</sup>,且第二产业比重的增加会带来环境污染的恶化<sup>[23]</sup>。因此南充的大气污染扩散能力增强。综上可知,对于整个成渝双城经济圈来说,城市化发展使成都平原经济区的大气污染扩散条件变差,川东北经济区和川南经济区的大气污染扩散条件变好,这与周聪等的研究结论相符合<sup>[24]</sup>。

表2 城镇化率与各气象条件及扩散条件的斯皮尔曼相关系数

城市	温度/°C	降水/mm	风速/(m/s)	大气通风系数/(m <sup>2</sup> /s)	混合层高度/m
成都	0.03	0.65**	0.18	0.06	-0.84**
重庆	0.34	0.47	-0.34	-0.45	0.38
宜宾	0.40	0.14	0.27	0.41	0.69**
达州	0.34	-0.31	-0.15	-0.20	-0.14
南充	0.72**	0.14	0.81**	0.71**	0.66**
绵阳	0.29	0.14	0.13	0.01	0.51
雅安	0.10	0.34	-0.86**	-0.90**	-0.90**

注:\*\*在0.01级别(双尾),相关性显著。

### 3 结论

分析了近21年来成渝双城经济圈的城市发展过程中大气污染扩散条件变化特征,结果表明:

(1)成渝双城经济圈的城镇化水平逐年增高,但空间发展不均衡,是典型的双核经济圈,而成都的土地城市化率又远高于成渝双城经济圈的其他城市,比重庆的城市化水平更高。城镇化率增幅的特点为成都平原经济区的城镇化率增幅较小,重庆、川东北经济区和川南经济区的增幅较大。2019年之后,成渝双城经济圈的大部分城市产业结构转变为“三二一”结构。只有宜宾属于“二三一”类型,第二产业在地方生产总值中的占比最大。

(2)成渝双城经济圈2000-2018年的空气质量逐年转好。2018年成都、重庆、宜宾、达州、南充、绵阳、雅安PM<sub>2.5</sub>年均浓度较2000年分别下降74.13%、57.26%、49.74%、63.47%、74.16%、76.27%和70.07%。达州、重庆、宜宾的PM<sub>2.5</sub>年均浓度下降幅度较小,即西北部比东南部的空气质量改善更大。

(3)成渝双城经济圈的大气污染扩散条件分析显示:盆地边缘城市的污染扩散能力较强,靠近盆地中心的城市污染扩散能力较弱;土地城市化率低的城市,大气污染扩散条件都相对较好,反之则污染扩散能力较差;2006年各城市的大气污染扩散能力都相对较好,2010年之后,原本空气质量较差的宜宾、南充风速增大,大气通风系数和混合层高度呈增大趋势。

(4)城镇化率与大气污染扩散条件相关性分析表明,2000-2020年城市化发展使成都平原经济区的大气污染扩散条件变差,川东北经济区和川南经济区的大气污染扩散条件变好。

### 参考文献:

- [1] 王清川,周贺玲,许敏,等. 河北省廊坊市大气污染扩散气象条件影响分析[J]. 防灾科技学院学报,2014,16(3):1-8.
- [2] 梅梅,朱蓉. 污染防治重点区域大气扩散条件变化趋势及成因[J]. 环境影响评价,2017,39(5):1-6.
- [3] United Nations Human Habitat. Urban Indicators Guideliners, United Nations Human Settlement Programme [M]. New York: United Nations Publications,2004.
- [4] United Nations Human Settlement Programme. Urban indicators guideliners [S]. New York: United Nations Publications,2004:8-9.
- [5] 方创琳,王德利. 中国城市化发展质量的综合测度与提升路径[J]. 地理研究,2011,30(11):1931-1946.
- [6] 李明秋,郎学彬. 城市化质量的内涵及其评价指标体系的构建[J]. 中国软科学,2010(12):182-186.
- [7] 陈明星,陆大道,张华. 中国城市化水平的综合测度及其动力因子分析[J]. 地理学报,2009,64(4):387-398.
- [8] 魏洪斌,吴克宁. 长江经济带成渝城市群城镇化协调发展研究[J]. 中国发展,2015(1):30-37.
- [9] Lv Ping, Zhou Tao, Zhang Zhengfeng, et al. Construction and application of land urbanization and corresponding measurement index system [J]. China Land Science,2008,22(8):24-28,42.
- [10] 王彦昌,赵鸣,张世丰,等. 城市大气污染(SO<sub>2</sub>)与气象关系的初步分析[J]. 环境科学,1981(1):35-40.
- [11] 李梦,唐贵谦,黄俊,等. 京津冀冬季大气混合层高度与大气污染的关系[J]. 环境科学,2015(6):1935-1943.
- [12] 陆大道,姚士谋,李国平,等. 基于我国国情的

- 城镇化过程综合分析[J]. 经济地理, 2007, 27(6): 883-887.
- [13] 赵酉龙, 周顺武, 郑丹, 等. 城市化对南京气候影响的数值模拟研究[J]. 气象与环境科学, 2019(2): 1-9.
- [14] 李春生. 中国两个城镇化率之差的内涵、演变、原因及对策[J]. 城市问题, 2018(1): 11-16.
- [15] 党莹, 张小玲, 饶晓琴, 等. 北京与成都空气质量和大气污染扩散条件对比分析与改善效果评估[C]. 中国环境科学学会, 2021: 393.
- [16] Yuhan Luo, Ke Dou, Guangqiang Fan, et al. Vertical distributions of tropospheric formaldehyde, nitrogen dioxide, ozone and aerosol in southern China by ground-based MAX-DOAS and LIDAR measurements during PRIDE-GBA 2018 campaign[J]. Atmospheric Environment, 2020, 226.
- [17] 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.
- [18] 宁贵财. 四川盆地西北部城市群冬季大气污染气象成因及其数值模拟研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- [19] Zhu X W, Tang G Q, Guo J P, et al. Mixing layer height on the North China Plain and meteorological evidence of serious air pollution in southern Hebei[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, 18(7): 4897-4910.
- [20] 李二杰, 刘晓慧, 李洋, 等. 一次重污染过程及其边界层气象特征量分析[J]. 干旱气象, 2015, 33(5): 856-860.
- [21] Li Yunchun, Zhang Meng, Shu Man, et al. Chemical characteristics of rainwater in Sichuan basin, a case study of Ya'an[J]. Environmental science and pollution research international, 2016, 23(13).
- [22] Xu Ning, Zhang Fan, Xuan Xin. Impacts of Industrial Restructuring and Technological Progress on PM<sub>2.5</sub> Pollution: Evidence from Prefecture-Level Cities in China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(10).
- [23] 韩楠, 于维洋. 中国产业结构对环境污染影响的计量分析[J]. 统计与决策, 2015(20): 133-136.
- [24] 周聪, 王维佳, 苗红妍, 等. 成都平原经济区空气污染扩散气象条件变化特征分析[J]. 成都信息工程大学学报, 2021(4): 472-478.

## Influence of Urbanization Characteristics of Chengdu-Chongqing Economic Circle on Air Pollution Diffusion Conditions

SUN Yuanpei<sup>1</sup>, CHENG Zhigang<sup>2</sup>

(1. Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

**Abstract:** Under the influence of complex terrain and unique basin meteorological conditions, Chengdu-Chongqing economic circle has always been one of the places with frequent smog in China. In order to explore the change of local atmospheric pollution diffusion meteorological conditions in Chengdu-Chongqing economic circle, according to the unique topographic characteristics of Chengdu-Chongqing area, this paper selects seven representative cities in Chengdu-Chongqing economic circle according to geographical distribution and city scale, and analyzes the change characteristics of atmospheric pollution diffusion conditions in the urban development process of Chengdu-Chongqing economic circle in recent 21 years. The results show that: the urbanization development level of Chengdu-Chongqing economic circle increases year by year, and the regional development is uneven. The urbanization rate of Chengdu and Chongqing is higher than that of the national average. The growth rate of Chengdu Plain Economic Zone is small, while that of Chongqing, Northeast Sichuan Economic Zone and South Sichuan Economic Zone is large, and the urbanization development slowed down significantly in 2010. From 2000 to 2018, the air quality of Chengdu Chongqing Double City Economic Circle improved year by year, and the decline situation of PM<sub>2.5</sub> in the northwest was significantly higher than that in the southeast. There are obvious temporal and spatial differences in the pollution diffusion capacity of Chengdu Chongqing Double City Economic Circle. The pollution diffusion capacity of the cities on the edge of the basin is better than that of the central cities of the basin, and the cities with low land urbanization rate are better than those with high land urbanization rate; After 2010, the pollution diffusion capacity of Yibin and Nanchong has been significantly enhanced.

**Keywords:** Chengdu-Chongqing economic circle; diffusion conditions of air pollution; urbanization; atmospheric ventilation coefficient; mixing layer height