

全球气候变化与区域气象及空气质量的关系研究

——以成都市为例

武文琪 张凯山¹

(四川大学 建筑与环境学院, 四川 成都 610065)

【摘要】: 区域气象条件及空气质量或与全球气候变化关系密切。研究通过分析不同气候条件下成都地区 1951~2017 年主要气象要素及其 2013~2017 年大气污染物浓度变化趋势,并结合大数据挖掘技术探究厄尔尼诺/拉尼娜事件与成都地区气象及空气质量的关系。结果表明,全球气候变化对区域气象及空气质量影响明显。异常气候造成成都地区气温、降水、风速、日照时长等气象条件发生明显变化。这些变化通常利于大气扩散条件的改善而使污染物浓度下降,但相应时期的臭氧浓度却有所升高。研究同时利用 KNN 大数据挖掘算法评估不同气候条件下气象和减排对空气质量改善的贡献。结果显示,在全球厄尔尼诺发生频繁的 2015 年,成都地区重污染天数明显减少,气象和减排的贡献率分别为 27%和 73%;而在全球拉尼娜现象频发的 2016 年,成都地区空气质量也有明显改善,重污染天数的减少有 42%归功于气象条件的变化,几乎与大气污染物的减排贡献相当。因此,为实现空气质量的有效改善,空气质量改善管理政策的制定,既要从源头上控制污染物的排放,同时也应考虑全球气候变化的影响。

【关键词】: 厄尔尼诺 拉尼娜 空气质量 气候变化 K 近邻算法(KNN)

【中图分类号】: X51 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2020)04-0985-12

区域气象条件及空气质量或与全球气候变化关系密切^[1,2]。成都市位于群山环伺的四川盆地西部,其大气扩散条件差,受气象条件的影响颇为显著,气象条件的变化也直接关系到当地空气污染的程度。

全球气候变化导致极端气候事件发生频率和强度明显增加^[3,4]。厄尔尼诺-南方涛动(ElNiño-Southern Oscillation, ENSO)现象是年际气候变率中的最强信号,它以 2~7 年的周期不断循环,并在暖位相和冷位相分别表现为 ElNiño 和 LaNiña 事件^[5]。ENSO 不仅是造成全球气候异常的重要原因之一,也是导致亚洲季风异常和我国旱涝发生的关键因素^[6]。ENSO 事件通过太平洋-东亚“遥相关”^[7,8]的形式影响东亚地区的气温、环流和降水。冬季厄尔尼诺事件成熟阶段,热带西太平洋海洋性大陆上空的对流冷却使得热带大气在对流层底层产生 Rossby 波响应^[9],从而在海洋性大陆以北的热带西太平洋和我国南海地区强迫出异常的反气旋环流。春季和夏季厄尔尼诺事件衰退时,副热带高压向北移动至中国内陆,西太副高偏强、偏西,影响我国的西南水汽输送也偏强,而东亚夏季风偏弱,从而导致全国降水和气温分布异常^[10,11]。四川全省均在东亚季风活动的影响范围之内。因此,全球气候变化也势必影响成都市的区域气象条件和污染物的大气扩散。然而这种影响一直以来却很少有人关注。在过去的 30 年间,国内外在全球气候变化方面的研究主要集中于动力学理论、预测方法、年代际变化特征、ENSO 分类和指标等方面^[12],而对气候变化影响区域空气质量方面的研究较少。

¹**作者简介:** 武文琪(1993-),女,硕士研究生,主要研究方向为大气污染控制. E-mail:venkywu@foxmail.com;张凯山, E-mail:zhangkaishan@scu.edu.cn。

基金项目: 环境保护部公益性行业科研专项项目(201409012)。

本研究的主要目的是通过分析不同气候背景下(厄尔尼诺、拉尼娜、正常年份)成都地区 1951~2017 年气象要素及 2013~2017 年大气污染物浓度变化趋势,结合大数据挖掘技术实现气象和减排对大气贡献率的量化研究,分析全球气候变化与成都地区气候及空气质量的关系,以进一步探究全球极端气候事件对区域空气质量的影响,为区域空气质量预测预防提供科学依据。

1 材料与方法

本研究通过收集历史气象和环境监测数据,利用统计分析方法和数据挖掘算法分析评价全球气候变化与区域气候及空气质量的关系。主要包括:(1)历年厄尔尼诺/拉尼娜事件变化特征统计;(2)1951~2017 年成都地区气象要素变化特征及其与厄尔尼诺/拉尼娜事件的关系分析;(3)2013~2017 年成都地区空气质量变化与厄尔尼诺/拉尼娜事件的关系分析,包括气象条件和减排对空气质量改善的贡献评估。

研究有关海表温度(SST)资料来源于美国国家环境预测中心(NCEP)和中国国家气候中心(<https://cmdp.ncc-cma.net/>);所用气象数据来自于中国气象数据共享网(<http://data.cma.cn/>)下载的成都地区 5 个气象站点的逐日观测数据;环境监测数据来自于中国环境监测总站(<http://www.cnemc.cn/>)下载的成都市五个监测站(研究时段 2013~2017 年内逐时监测数据缺失率在 5% 以内的站点,即梁家巷、灵岩寺、十里店、沙河铺以及金泉两河)的污染物逐时监测数据。研究选取 1951~2017 年成都市降水量、气温、风速和日照时数的月均值以及 2013~2017 年成都市颗粒物、SO₂、NO₂、O₃等空气污染物的月均质量浓度作为研究对象。成都地区 2014~2017 年空气重污染天数依据中国空气质量在线监测分析平台(<https://www.aqistudy.cn/>)的历史 AQI 数据进行判别。

相关统计分析和数据挖掘算法具体分述如下:

1.1 ENSO 事件判别

研究按厄尔尼诺年、拉尼娜年、以及正常年(非厄尔尼诺/拉尼娜年)3 种不同的气候背景分析全球气候与成都地区气象条件及空气质量的关系。厄尔尼诺年、拉尼娜年、以及正常年的定义以当年是否发生厄尔尼诺或拉尼娜事件为依据。

厄尔尼诺/拉尼娜事件的评判标准通常以赤道太平洋海温监测值的距平变化作为依据。赤道太平洋海温监测区如图 1 所示(GB/T33666-2017),包括 NINO1+2 区(90° W~80° W, 10° S~0°)、NINO3 区(150° W~90° W, 5° S~5° N)、NINO4 区(160° E~150° W, 5° S~5° N)和 NINO3.4 区(170° W~120° W, 5° S~5° N),以 NINO3.4 区海表温度距平变化最为常用,NINO3.4 区海表温度与多年气候平均值的差即为 NINO3.4 区指数^[13,14]。

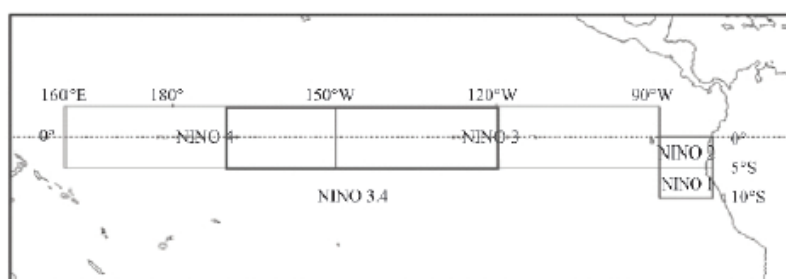


图 1 赤道太平洋海温监测区分布图

本研究将海温距平值高于或低于正常值超过 2 个季度的年份定义为 ElNiño 年或 LaNiña 年^[15,16]。具体辨别如下:

(1)NINO3.4 区指数 3 个月滑动平均的绝对值达到或超过 0.5℃; (2)持续至少 5 个月。满足这两个条件即判定为一次厄尔尼诺/拉尼娜事件(NINO3.4 指数 $\geq 0.5^{\circ}\text{C}$ 为厄尔尼诺事件;NINO3.4 指数 $\leq -0.5^{\circ}\text{C}$ 为拉尼娜事件)^[17]。

NINO3.4 指数满足事件判别的最早月份和最晚月份分别认定为事件的开始/结束时间。事件起始直至结束的总月数为持续时间。

事件过程中, NINO3.4 指数 3 个月滑动平均的绝对值达到最大的时间和数值分别定义为事件的峰值时间和峰值强度(出现数值相同的多个峰值时, 以首次出现的峰值为准)^[18]。事件强度的判别依据为事件峰值强度的绝对值(用 x 表示), 具体标准如表 1 所示。

表 1 厄尔尼诺/拉尼娜事件强度判别标准

事件峰值强度绝对值(℃)	事件强度	量化强度值
$0.5 \leq x < 1.3$	弱事件	1
$1.3 \leq x < 2.0$	中等事件	2
$2.0 \leq x < 2.5$	强事件	3
$x \geq 2.5$	超强事件	3

注:1.3℃、2.0℃和 2.5℃分别接近于 1.5 倍、2.5 倍和 3 倍 NINO3.4 指数的标准差。

本文依据上述定义, 确定 1951 年以来全球厄尔尼诺/拉尼娜事件的发生时间和强度用后续的分析。

1.2KNN 评估模型

成都市空气质量变化与厄尔尼诺/拉尼娜事件的关系分析主要对比分析不同气候背景下的空气质量变化, 包括浓度变化和频率分布。比较的主要污染物包括颗粒物、SO₂、NO₂、O₃等。气候背景年份依据上述 1.1 的方法辨别。其中, 浓度变化主要针对不同气候背景下成都市各污染物的月均浓度变化趋势, 频率分布分析主要包括 2013~2017 年成都市主要大气污染物的月均浓度累积分布和对应年份的气象要素累积分布。同时, 利用 KNN(K-nearest neighbor)^[19]模型评估不同气候背景下气象和减排对空气质量改善的贡献。

KNN 大数据挖掘技术采用经典的分类与回归分析的监督式算法。该算法通过对不同特征值之间的欧式距离进行分类。该算法对异常值不敏感, 因此无数据输入假定^[20]。该算法可以借助污染物排放和气象条件变化相关指标对空气污染状况进行分类, 可克服当前城市污染物排放数据量少且发布滞后、排放清单更新速度慢等缺点, 对空气污染日分类的预报准确率高达 91.8%^[21]。

根据《环境空气质量指数(AQI)技术规定》(HJ633-2012), 重污染日(重度污染和严重污染日)以 AQI 进行规范, 当日平均 AQI>200 时则被判定为是一个重污染日。重污染日的发生必然包含气象条件和排放强度信息。在已知气象条件和空气污染天数的情景下, 基于 KNN 算法对其他年份的空气污染天数进行模拟, 进而与实际污染天数进行对比, 就可以量化气象条件和排放变化对空气质量改善的影响。

具体步骤如下:假设有一组历史天气个例样本集合并定义为 S 。其中, S 由天气样本 $A_n(n=1, 2, \dots, i)$ 组成, 而每个天气样本由 m 个属性变量(X)及 1 个标志量(L)构成。其数学表示式为:

$$S = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ A_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [X_{11}, X_{12}, X_{13}, \dots, X_{1m}, L_1] \\ [X_{21}, X_{22}, X_{23}, \dots, X_{2m}, L_2] \\ \dots \\ [X_{i1}, X_{i2}, X_{i3}, \dots, X_{im}, L_i] \end{bmatrix} \quad (1)$$

(1) 式中属性变量 X 的选取对 KNN 算法的准确率具有重要影响。由于研究选取 $PM_{2.5}$ 作为衡量是否发生重度污染的标准, 而 $PM_{2.5}$ 浓度的增加受多种其他条件的影响, 例如降水、风速、日照等。因此, 本研究模型变量的选择主要依据的是气象要素与污染物 ($PM_{2.5}$) 的显著相关性^[21]。通过气象要素与 $PM_{2.5}$ 的相关性分析, 本研究选取日均海平面气压、日均温度、日均风速、日均降水、日均变温、日均变压及日均 $PM_{2.5}$ 浓度这 7 个要素为属性变量 X_{ij} 。要素 L_i 称为标志量, 本文中的标志量即为重污染天气时的污染等级。

对于标志量 L_i 的确定, 假设预报日的温度、气压、风速、降水、日均变温、日均变压以及 $PM_{2.5}$ 浓度这 7 个要素的集合 $Y_i = \{y_1, y_2, \dots, y_7\}$ 为预测样本; 预测时, 首先在 S 中找到与样本 Y_i 最相似的 K 个近邻 (借助 R 工具对模型进行训练, 本研究中 $K=12$) 及对应的标志量 (即污染天气时的污染等级) 集合 $L = \{L_1, L_2, \dots, L_k\}$, 然后按照投票多数的原则^[21], 选取最多的标志量 L_i 作为 Y_i 的预测结果。

本研究中以 2014 年作为基准年份。按照上述方法, 以 2014 年各属性变量值作为训练测试数据, 并采用留一交叉验证法^[19]验证模型的准确性。假设未来年份未减排的情况下, 利用模型预测该未来年份可能产生的重污染天气天数。预测污染天数与基准年份污染天数的差值即为气象条件变化的贡献。因此, 气象条件与减排的贡献分别用下式表示:

$$Q = \frac{S_0 - S_m}{S_0 - S_R} \times 100\% \quad (2)$$

$$P = 1 - Q \quad (3)$$

式中: S_0 =基准年份 (2014) 实际重污染天数, 与模型模拟的天数相同; S_m =未来任一年份模型模拟的重污染天数; S_R =未来任一年份实际的重污染天数; Q 、 P 分别为气象条件与减排对空气质量改善的贡献率。

2 结果与讨论

本部分主要介绍全球历年厄尔尼诺/拉尼娜事件变化特征, 厄尔尼诺/拉尼娜事件与成都地区历年气象要素及空气质量的关系等。

2.1 1951 年以来厄尔尼诺/拉尼娜事件变化特征统计

本研究分析全球自 1951 年以来发生厄尔尼诺/拉尼娜事件的变化特征, 依据上述 1.1 的方法及我国气象行业标准《厄尔尼诺/拉尼娜事件判别方法》(QX/T370-2017) 确定厄尔尼诺/拉尼娜事件发生年份及强度, 结果如表 2 所示。这里需要指出的是, 因定义和判定指标的不同, ENSO 事件的起止年月和持续时间略有差别, 但在总体趋势上, 表 2 的结果与其他结果基本一致^[5, 12, 18]。

在过去的 67 年中, 气候变化异常频繁, 正常气候和非正常气候约各占一半 (正常与非正常气候年份分别为 34 与 33 年)。对于非正常年份, 其中有 17 个年份为厄尔尼诺年, 有 16 个年份为拉尼娜年, 且有近 80% 的年份其事件强度为中等及以上。

ENSO 事件有连续性和非连续性之分^[22]。如表 2 所示, 共有 6 次连续性的厄尔尼诺事件;9 次冷暖相位交替的 ENSO 循环;拉尼娜事件均不连续。即厄尔尼诺事件与拉尼娜事件交替发生的情况频率更高。

表 2 1951 年以来厄尔尼诺/拉尼娜事件发生年表

年份	事件类型	事件强度	年份	事件类型	事件强度
1951~1953	正常	—	1986	正常	—
1954~1955	拉尼娜	2	1987	厄尔尼诺	2
1956	正常	—	1988	拉尼娜	3
1957~1958	厄尔尼诺	2	1989~1990	正常	—
1959~1962	正常	—	1991~1992	厄尔尼诺	2
1963	厄尔尼诺	1	1993~1996	正常	—
1964	拉尼娜	1	1997	厄尔尼诺	3
1965	厄尔尼诺	2	1998~2000	拉尼娜	2
1966~1968	正常	—	2001	正常	—
1969	厄尔尼诺	1	2002	厄尔尼诺	2
1970~1971	拉尼娜	2	2003	正常	—
1972	厄尔尼诺	3	2004	厄尔尼诺	1
1973~1975	拉尼娜	2	2005~2008	正常	—
1976	正常	—	2009	厄尔尼诺	2
1977	厄尔尼诺	1	2010~2011	拉尼娜	2
1978~1981	正常	—	2012~2014	正常	—
1982~1983	厄尔尼诺	3	2015	厄尔尼诺	3
1984	正常	—	2016	拉尼娜	1
1985	拉尼娜	1	2017	正常	—

注: 事件的强度按文中表 1 判别量化, 即 1-弱事件, 2-中等事件, 3-强/超强事件. 正常年份的事件强度用 “—” 表示.

2. 2 厄尔尼诺/拉尼娜事件与成都地区气候的关系

图 2 列出厄尔尼诺年、正常年和拉尼娜年 3 种不同气候背景下成都地区年均温、年降水量的对比情况。

就气温的平均值(图 2a)而言,厄尔尼诺年的平均气温要高于正常年,而拉尼娜年的平均气温则下降。但就平均降水量(图 2b)而言,正常年均比非正常年高,厄尔尼诺年的平均降水量下降明显。由于气象要素在不同时间尺度上具有不同的变化特征,即气象要素的年平均值具有一定局限性,准确量化年代际尺度上气象要素的变化规律十分困难。同时,本研究定义的厄尔尼诺/拉尼娜年也因判断标准的不同而具有不确定性,因此除了考虑不同气候背景下气象要素的年均值差异外,也须考虑对应变异系数的不同。

如图 2 所示,不同气候背景下的气温和降水均呈现出正常年的变异系数大于厄尔尼诺/拉尼娜年变异系数的特点,即气象要素在非正常气候年的波动更小。这表明本研究中的非正常气候年较正常年份具有更为一致的气象变化趋势,也说明厄尔尼诺/拉尼娜事件对成都地区气象条件的影响具有一定的稳定性。具体来说,即厄尔尼诺/拉尼娜年的降水量较正常年稳定偏低;厄尔尼诺年较正常年的年均气温稳定偏高,拉尼娜年则相反。

由于非正常气候的强度不同,其对区域气象要素的影响也不尽相同。例如,图 3 展示了成都市自 1951 年起至 2017 年年均气温和年降水量的变化趋势及其与不同强度事件的关系。

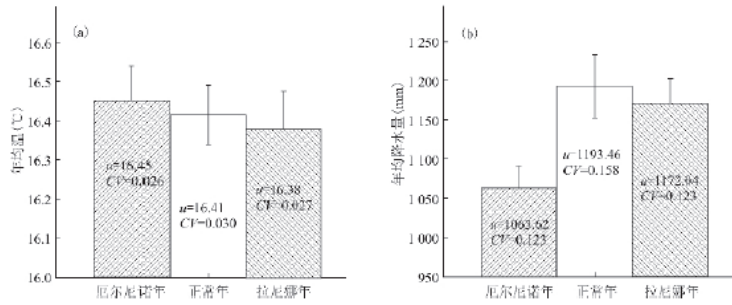


图 2 不同气候背景下成都市气象要素年平均水平对比

注: μ 表示平均值, CV 表示变异系数。

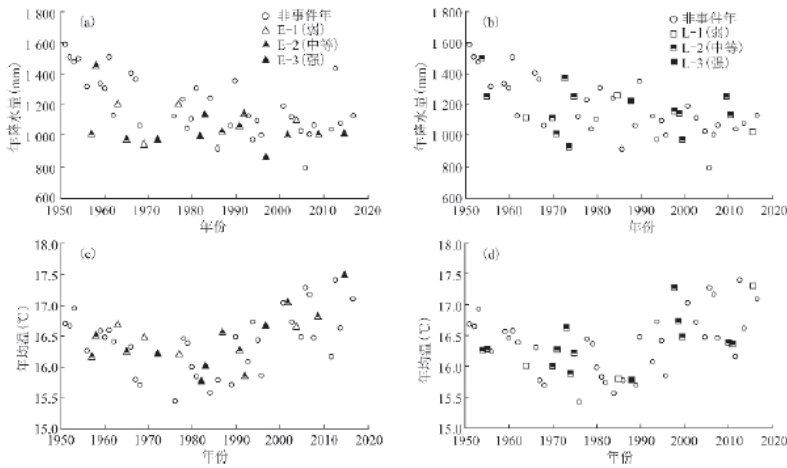


图 3 1951~2017 年成都市气象要素与厄尔尼诺/拉尼娜事件强度的变化趋势

注:图(a)、(c)为不同强度的厄尔尼诺年,图(b)、(d)为不同强度的拉尼娜年。

在研究时段内,年降水量整体呈减少趋势;气温则先降低后升高,转折点位于 20 世纪 90 年代附近,而同时期厄尔尼诺事件的发生频率较高,这主要是受到全球变暖的影响^[23,24]。当然,由于 ENSO 事件强度及持续时间的不同,并非每一次厄尔尼诺/拉尼娜事件都会对气象条件产生显著影响。即便有影响,其程度也不尽相同。但总体而言,其影响还是具有一定的规律性(图 3)。此外,选用距平值作为统计量进行分析也得到类似的变化趋势。

从厄尔尼诺/拉尼娜事件强度与降水的关系上看,厄尔尼诺事件时降水量处于较低水平且其强度直接影响降水量的增减。一般说来,强厄尔尼诺事件年的降水量显著减少(图 3a)。强厄尔尼诺年的降水量平均值为 994.70mm,中等及弱厄尔尼诺事件平均年降水量分别为 1082.35 和 1112.33mm,均低于未发生厄尔尼诺事件时的平均水平。例如,1997 年为强厄尔尼诺年,该年成都市年降水量出现明显偏低,仅为 863.7mm。2015 年也是强厄尔尼诺年,成都市该年降水量(1015.8mm)也明显低于往年平均水平(1155.8mm)。这一分析结果与翟盘茂等^[25]的研究成果一致,即 2015~2016 超强厄尔尼诺事件致使我国西南地区降水减少。对于图 3b,约有四分之一的拉尼娜年降水量偏低,且其强度在不同降水量水平上分布不均。

对于气温而言,厄尔尼诺年的气温(图 3c)在附近 1~2 年的时间段内明显偏低,但整体分布不均;而拉尼娜事件的强度则会影响气温变化。如图 3d,一般说来,中强拉尼娜事件年的气温普遍降低,但比起气温整体的增温幅度,拉尼娜事件对降温的影响较弱。中、强拉尼娜事件年的平均气温为 16.11℃,拉尼娜事件强度较弱时气温有所升高,为 16.40℃,但均低于未发生拉尼娜事件时的平均水平。此外,厄尔尼诺/拉尼娜事件也会影响区域次年的降水量和气温变化。例如,该时期内的 17 次厄尔尼诺事件年的下一年共有 13 次降水量增加;而 16 次拉尼娜事件年的下一年共有 11 次气温降低,有 12 次降水量减少。

2.3 厄尔尼诺/拉尼娜事件与成都地区空气质量的关系

不同气候背景下成都市各污染物($PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 O_3 、CO)的月均质量浓度变化趋势如图 4 所示。

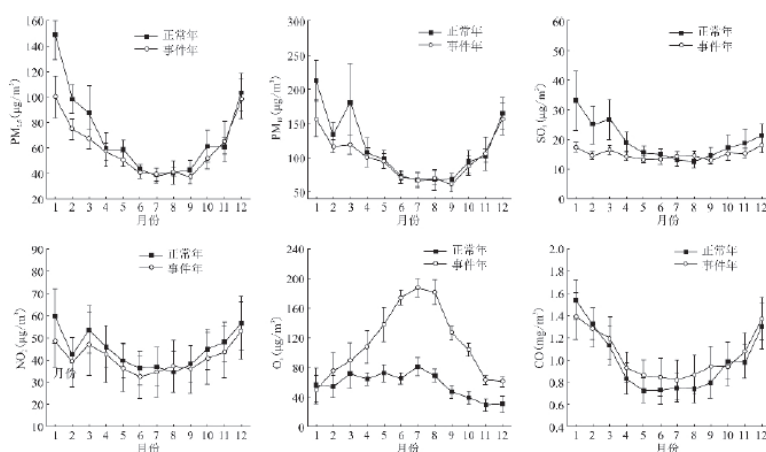


图 4 2013~2017 年不同气候背景下成都市各污染物浓度变化

大气污染物浓度往往呈现出一定的季节性差异。例如, $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 CO 的年内浓度变化规律较为相似,均呈现先降低后增加的趋势,夏季由于强对流气团增多和降雨过程的频发,较高的边界层和对流旺盛利于污染物的扩散^[26],冬季气温低、静风频率高,易形成逆温天气,故夏季浓度较低,春、冬较高; SO_2 和 NO_2 的浓度变化相对较小,但夏季浓度也相对较小,主要受人为源排放主导;相比之下,臭氧浓度春、冬两季较低,而夏季最高,这与夏季日照时长与强度增加,易于光化学反应发生有关,还可能是由于平流层输送^[27]所导致。

一般看来, $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 等污染物在事件年时的浓度较正常年时低。同时, 正常年份与事件年份之间的浓度差值随着季节的变化而有所不同。其中, 对于细颗粒物而言, 冬季的差值较大, 夏季差值较小; 对于 PM_{10} , 冬季的差值较大, 值得注意的是, 3 月的 PM_{10} 浓度较 2、4 月明显偏高, 陈源等^[28] 研究发现这可能是由于外来污染物输送及扬尘的影响; 对于 SO_2 和 NO_2 而言, 1~4 月以及冬季差值较大, 而夏季差值较小, 且 8 月附近均出现事件年污染物浓度高于非事件年的情况; 对于 CO 而言, 夏秋两季的差值较大。

与上述污染物不同, 臭氧的浓度分布在事件年相对偏高。同时, 不同气候背景下的臭氧浓度均具有明显的季节性差异, 即夏季浓度最高, 冬季浓度最低, 且春季>秋季。在夏季时, 事件年份的臭氧浓度远高于正常年份的浓度。

图 5 展示 2013~2017 年成都市主要大气污染物的月均质量浓度累积分布曲线。对于 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 和 NO_2 而言, 事件年的浓度分布均比正常年的浓度低; 而对于臭氧而言, 则出现事件年的浓度分布比正常年的浓度分布高。如图 5a 所示, 当 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度超过 $43.8 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, 事件年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布稳定偏低。又如如图 5b 所示, 事件年 SO_2 浓度超过 $14.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 时分布稳定偏低。从概率累积分布的角度上看, 这与气象条件的变化密切相关。

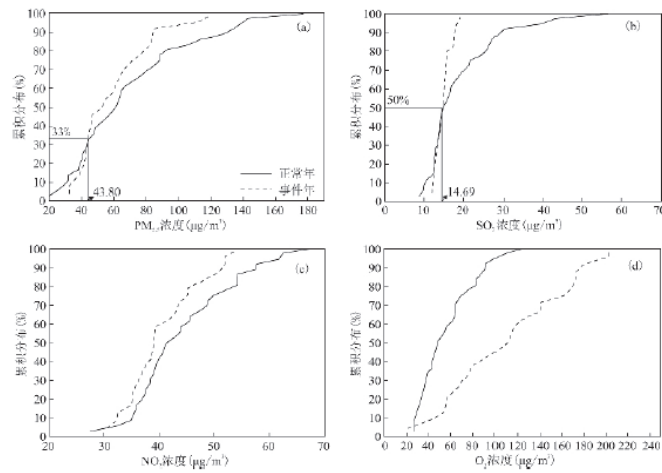


图 5 2013~2017 年不同气候背景下污染物的月均质量浓度累积分布

气象要素在不同变化范围的分布是否均匀对于大气污染物的扩散具有重要影响。研究时段内, 成都地区气象要素的累积分布情况如图 6 所示。就降水量而言, 厄尔尼诺/拉尼娜事件造成在低降水量的月份降水偏高, 而在高降水量(200mm 以上)的月份降水偏低。即夏季降水量下降, 而冬春两季的降水量增加, 这样的分布特点恰恰有助于污染物的冲洗, 从而降低污染物的浓度。就气温而言, 厄尔尼诺/拉尼娜事件导致低温的月份气温偏高, 使得事件年总体气温相对偏高。

事件引起的大气环流变化对污染物扩散和转移具有重要影响。就平均风速而言, Wang 等^[29] 研究发现事件会导致中国南部($20^{\circ} \sim 40^{\circ} \text{N}$)有显著的异常上升气流, 风速异常随高度的升高而变大, 有利于天气尺度扰动的垂直扰动, 呈现出事件年的月均风速分布均比正常气候条件下高, 这对于污染物的扩散极为有利。相比于西南地区, 我国长江中下游地区由于对流层中低层大气湿度较大, 这种湿空气在上升运动过程中易于形成降水, 从而有利于加强大气污染物的湿清除。上述几个原因可以较好的解释厄尔尼诺/拉尼娜年颗粒物、 SO_2 、 NO_2 的浓度较正常气候条件下小。

但对于臭氧而言, 情况恰恰相反。由于近地层 O_3 的形成主要受其前体物浓度以及光照的影响, 臭氧的形成速度较慢。光照时间、气温和降水均和臭氧的形成有关^[30]。如图 6 所示, 事件年造成高日照时数(高于 3h)的月份日照时数延长, 而降水减少, 气温相对偏高, 进而使得臭氧的形成数量比正常气候条件下大。同时, 事件年较高的风速也可能促进如川南城市群等地区对成都市臭氧的外来输入^[31]。

由于研究可用的数据量相对有限,特别是能对应厄尔尼诺和拉尼娜事件的环境监测数据较少,本研究只根据现有的监测数据,将这两类异常气候结合在一起,研究其与空气质量的关系。未来随着可用数据的增加,将有必要具体探讨单一异常气候对空气质量的影响,以更有效的指导并旨在改善空气质量的污染物排放控制工作。

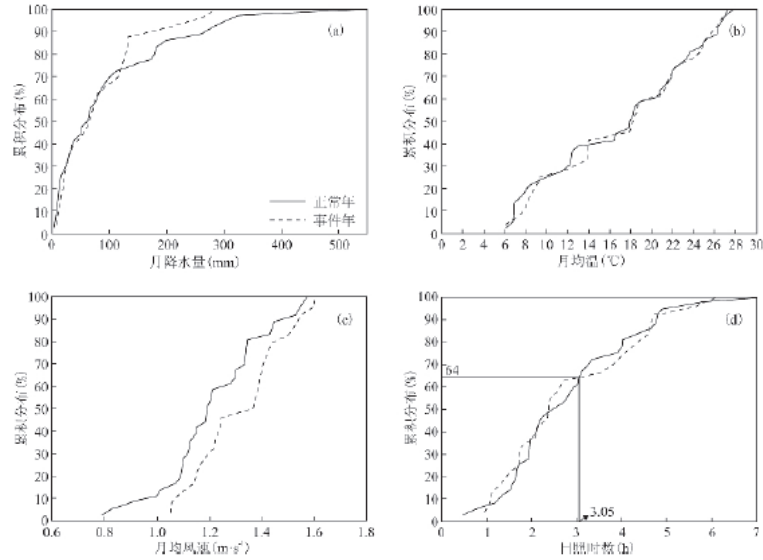


图 6 2013~2017 年不同气候条件下气象要素月均值分布对比

如前面章节所述, NINO3.4 指数可以反映太平洋海表温度的异常程度。现有研究表明, $PM_{2.5}$ 浓度对 ENSO 指数的变化更为敏感, 我国南方冬季重污染天气的发生可能受到东亚季风的影响^[32], 因此, 探究冬季重污染天气与 ENSO 指数的关系是分析全球气候变化与区域气象及空气质量关系的重点。例如, Wang 等^[29]研究发现华南地区冬季大多数监测站 $PM_{2.5}$ 浓度异常与 NINO3.4 指数存在明显的负相关关系, 而中国中部和北部地区的大多数监测站 $PM_{2.5}$ 浓度异常均与 NINO3.4 指数正相关。但总的来说, 我国多数大气监测站的 $PM_{2.5}$ 浓度与 NINO3.4 指数均存在一定相关关系。而相比之下, 其他季节的关系则稍弱。例如, 就成都地区而言, 本研究的分析发现, 春季 NINO3.4 指数与 $PM_{2.5}$ 浓度的相关系数为 0.21, 夏季为 0.31, 秋季和冬季依次为 0.84 和 0.81。如图 7 所示, 相对于 2013 年, 2014~2017 年颗粒物浓度均呈下降趋势, 2016 年颗粒物污染相对于 2015 年又有所加重。受减排措施的影响, 2013~2014 年间, $PM_{2.5}$ 的浓度较 PM_{10} 下降更为明显。

东亚季风在年代际尺度上与 ENSO 有关, 同期 NINO3.4 指数冬季月均值(归一化之后取倒数, 以百分数表示)与成都地区冬季颗粒物浓度变化具有一致趋势。例如, 2015 年太平洋海表温度距平变化最大, 且该年 12 月达到此次强厄尔尼诺事件的峰值, 与此同时 2015 年成都市颗粒物浓度水平最低, 其次是 2017 和 2014 年。NINO3.4 指数冬季月均值(取倒数)与成都市冬季 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 月均浓度之间的回归曲线 R^2 分别达到了 0.85 和 0.81。由于气溶胶、光化学反应等的影响, 研究时段内 $PM_{2.5}$ 浓度变化趋势与 NINO3.4 指数的相关性略低于 PM_{10} 。这一发现与张良瑜等^[33]学者的研究结果基本一致。

由此表明, 全球气候的非正常变化对于成都市区域气象条件的变化影响明显, 有利于大气颗粒物、氮氧化物、硫化物等污染情况的改善, 但却不利于臭氧污染的消减。因此, 对大部分空气污染物的控制和治理有必要考虑全球气候变化的影响, 而对于臭氧污染的控制管理, 尚需从源头上(特别是其形成的前体物)加以控制。此外, 气象条件变化和减排措施对成都地区空气质量改善的贡献孰轻孰重, 是评判厄尔尼诺/拉尼娜事件与成都地区空气质量关系的重要考虑因素。

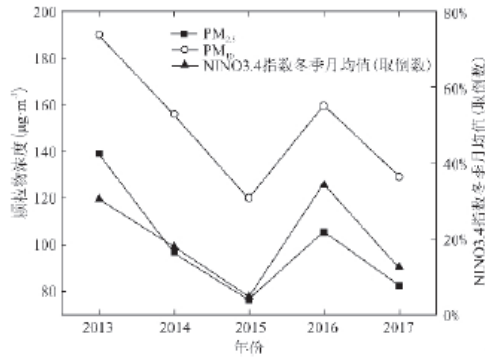


图 7 2013~2017 年冬季成都市颗粒物质量浓度与 NINO3.4 指数冬季月均值(取倒数)的关系

注:NINO3.4 指数:太平洋 NINO3.4 区海表温度与多年气候平均值的差,是厄尔尼诺/拉尼娜事件的评判标准.

2.4 大数据挖掘算法评估不同气候背景下气象与减排对大气污染的影响

利用 KNN 数据挖掘算法评估不同气候背景下气象与减排对空气质量改善的贡献,结果如表 3 所示。以 2014 年作为基准年建立的模型具有较高的精准度,其模型 R^2 为 0.85,模拟的重污染天数与实际污染天数一致。

由表 3 可知,成都地区 2014~2016 年空气重污染天数逐渐减少,2017 年较 2016 年又有所增加。在减排和气象变化的多重作用下,成都市的重污染天数均比 2014 年显著下降。就具体的贡献而言,利于大气污染物扩散的气象条件变化贡献了其中的 27%~42%不等。从仅有的几年数据来看,正常气象条件的重污染天数比事件年份的重污染天数多。其中,拉尼娜年份对污染物的扩散作用较其他气象条件的年份好,因此,该年份重污染天数最少,且气象条件对污染天数的减少贡献最大。而厄尔尼诺事件也有利于大气污染物的扩散,但其对重污染天数的贡献则相对较小。但总体而言,空气质量的改善一方面极大依赖于污染物的减排控制,但同时,气象条件变化的影响也不容忽视。

表 3 2014~2017 年实际重污染天数及 KNN 模型的模拟结果

年份	年份事件	实际污染天数(d)	KNN 模型模拟天数(d)	减排贡献(%)	气象贡献(%)
2014	正常	35	35	—	—
2015	厄尔尼诺	20	31	73.3 ± 8.2	26.7 ± 3.0
2016	拉尼娜	9	24	57.7 ± 6.5	42.3 ± 4.8
2017	正常	21	30	64.3 ± 7.2	35.7 ± 4.0

当然,由于研究区域和时段监测数据的数量有限,对于研究成果的推广应用尚需进一步分析。但随着监测站点和数据共享机制的不断完善,全球气候变化影响范围及相关研究的不断扩展,相应的数据将为本研究的进一步分析提供证据支撑,探究不同区域气象及空气质量与全球气候变化的关系也是后续的主要研究方向。

3 结论

(1)全球气候变化与区域气象条件的变化密切相关。研究发现拉尼娜事件年成都地区年均气温稳定偏低,而厄尔尼诺事件则造成降水量减少。而且,厄尔尼诺事件的下一年降水量往往增多,拉尼娜事件的下一年气温和降水量往往都会降低。

(2)由于厄尔尼诺/拉尼娜事件会造成成都地区气温、降水、风速和日照时长等气象条件的变化,2013~2017年间,颗粒物、氮氧化物和硫化物在事件年份的浓度较非事件年份时低,非正常气候有助于这些污染物的扩散和冲洗,从而促进空气质量的改善。而对于臭氧而言,由于日照时间增强、气温升高且降水减少,臭氧的形成反而加剧。

(3)基于KNN大数据挖掘算法对2014年以来成都地区空气质量改善过程中气象和减排的贡献进行评估。结果显示,厄尔尼诺/拉尼娜年气象条件改善导致成都地区重污染天数减少的占比高达1/3至1/2;此外,减排措施对重污染天数减少的贡献也不容忽视。因此,对于空气质量改善管理政策的制定,需要依据不同污染物的变化特性,既考虑气象条件的影响,也需从排放源头上加以控制,方能实现空气质量的有效改善。

参考文献:

[1]YIM S,HOU X,GUO J,et al.Contribution of local emissions and transboundary air pollution to air quality in Hong Kong during El Niño-Southern Oscillation and heatwaves[J].Atmospheric Research,2019,218:50-58.

[2]CHANG L,XU J,TIE X,et al.Impact of the 2015 El Nino event on winter air quality in China[J].Scientific Reports,2016,6(1):34275.

[3]STEPHENS S A,RAMSAY D L.Extreme cyclone wave climate in the Southwest Pacific Ocean:Influence of the El Niño Southern Oscillation and projected climate change[J].Global and Planetary Change,2014,123:13-26.

[4]邓婷,王润,姜彤,等.利用高分辨率气候模式对湖北未来气候变化的模拟与预估[J].长江流域资源与环境,2017,26(6):937-944.

[5]陈虹颖,徐峰,李晓惠,等.近65年ENSO事件强度变化及时频特征研究[J].热带气象学报,2017,33(5):683-694.

[6]袁媛,高辉,贾小龙,等.2014-2016年超强厄尔尼诺事件的气候影响[J].气象,2016,42(5):532-539.

[7]李海燕,张文君,何金海,等.SST年循环对El Niño事件局地海气过程的影响[J].海洋学报,2016,38(1):56-68.

[8]HUANG R,ZHANG R,YAN B.Dynamical effect of the zonal wind anomalies over the tropical western Pacific on ENSO cycles[J].Science in China Series D:Earth Sciences,2001,44(12),1089-1098.

[9]KIM J W,AN S I,JUN S Y,et al. ENSO and East Asian winter monsoon relationship modulation associated with the anomalous northwest Pacific anticyclone[J].Climate Dynamics,2017,49(4),1157-1179.

[10]陈文.厄尔尼诺和拉尼娜事件对东亚冬、夏季风循环的影响[J].大气科学,2002(5):595-610.

[11]FENG J,CHEN W,TAM C Y,et al.Different impacts of El Niño and El Niño Modoki on China rainfall in the decaying phases[J].International Journal Climatology,2011,31(14),2091-2101.

-
- [12]任福民,袁媛,孙丞虎,等.近30年 ENSO 研究进展回顾[J].气象科技进展,2012,02(3):17-24.
- [13]HANLEY D E,BOURASSA M A,OBRIEN J J,et al.:A quantitative evaluation of ENSO indices[J].Journal of Climate,2010,16(16):1249-1258.
- [14]ADHANI G,BUONO A,FAQIH A .Support Vector Regression modelling for rainfall prediction in dry season based on Southern Oscillation Index and NINO3.4[C]// International Conference on Advanced Computer Science & Information Systems. IEEE,2013.
- [15]魏君平,赵景波.厄尔尼诺/拉尼娜事件对陕北地区近 57a 气候的影响[J].水土保持通报,2012,32(5):210-214.
- [16]冯利华.中国登陆热带气旋与太平洋海表温度的关系[J].地理学报,2003(2):209-214.
- [17]李晓燕,翟盘茂. ENSO 事件指数与指标研究[J].气象学报,2000,58(1):102-109.
- [18]曹璐,孙丞虎,任福民,等.一种综合监测两类不同分布类型 ENSO 事件指标的研究[J].热带气象学报,2013,29(1):66-74.
- [19]尹晓梅,李梓铭,熊亚军,等.2014~2017 北京市气象条件和人为排放变化对空气质量改善的贡献评估[J].环境科学,2019,40(3):1011-1023.
- [20]刘炳春,符川川,李健.基于 KNN&SVM 的北京空气污染预测模型研究[J].产业创新研究,2017(1):32-38,72.
- [21]熊亚军,廖晓农,李梓铭,等. KNN 数据挖掘算法在北京地区霾等级预报中的应用[J].气象,2015,41(1):98-104.
- [22]马淑苗,赵景波.厄尔尼诺/拉尼娜事件对山西省南部地区气候的影响[J].水土保持通报,2012,32(4):106-111.
- [23]CHAO J,CHAO Q,LIU L.The ENSO events in the tropical pacific and dipole events in the Indian Ocean[J].Acta Meteorologica Sinica,2006,20(2):223-231.
- [24]WANG S W,ZHU J H,CAI J N,et al.Reconstruction and analysis of time series of ENSO for the last 500 years[J].Progress in Natural Science,2004,14(12):1074-1079.
- [25]翟盘茂,余荣,郭艳君,等.2015/2016 年强厄尔尼诺过程及其对全球和中国气候的主要影响[J].气象学报,2016,74(3):309-321.
- [26]黄兴,黄晓娴,王体健,等.南京城区上空大气一氧化碳的观测分析[J].中国环境科学,2013,33(9):1577-1584.
- [27]贾梦唯,赵天良,张祥志,等.南京主要大气污染物季节变化及相关气象分析[J].中国环境科学,2016,36(9):2567-2577.
- [28]陈源,谢绍东,罗彬.成都市大气细颗粒物组成和污染特征分析(2012-2013 年)[J].环境科学学报,2016,36(3):1021-1031.
- [29]WANG X H,ZHONG S Y,BIAN X D,et al. Impact of 2015-2016 El Niño and 2017-2018 La Niña on PM_{2.5} concentrations

across China[J]. Atmospheric Environment, 2019, 208:61-73.

[30] 李邹, 林伟立, 徐晓斌, 等. 香格里拉区域大气本底站地面臭氧浓度的变化特征[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(8): 1412-1417.

[31] 周子航, 邓也, 谭钦文, 等. 四川省人为源挥发性有机物组分清单及其臭氧生成潜势[J]. 环境科学, 2019(4): 1613-1626.

[32] JEONG J I, PARK R J, YEH, S W. Dissimilar effects of two El Niño types on PM_{2.5} concentrations in East Asia[J]. Environmental Pollution, 2018, 242:1395-1403.

[33] 张良瑜, 陆晓波, 杨丽莉, 等. 强厄尔尼诺事件对我国东部地区冬季空气质量影响的研究[J]. 环境监测管理与技术, 2016, 28(6): 23-27.