

2005—2014年川南城市群大气污染的时间演变特征

陈珂 王增武 刘志红 黄观 向秋实

(成都信息工程大学 资源环境学院 成都 610225)

摘要: 基于2005—2014年PM₁₀、SO₂及NO₂的环境空气质量监测数据,研究了川南城市群5个地级市(乐山、泸州、内江、宜宾、自贡)三类主要大气污染物的时间特征及变化规律。结果表明:5个城市的PM₁₀年均质量浓度和API年均值均呈波动性下降趋势,PM₁₀是影响各城市环境空气质量的主要污染物。各城市NO₂年均质量浓度以上升趋势为主,SO₂年均质量浓度除乐山有明显上升趋势外,其余城市以下降趋势为主。

关键词: 川南城市群; 大气污染; 环境空气质量; 演变特征

DOI: 10.13205/j.hjgc.201703016

THE TEMPORAL EVOLVEMENT CHARACTERISTICS OF AIR POLLUTION OF THE URBAN AGGLOMERATION IN SOUTHERN SICHUAN FROM 2005 TO 2014

CHEN Ke, WANG Zeng-wu, LIU Zhi-hong, HUANG Guan, XIANG Qiu-shi

(College of Resource and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: Based on monitoring datum of ambient air quality including SO₂, NO₂ and PM₁₀ from 2005 to 2014 in five core cities of the Urban Agglomeration in Southern Sichuan, the time characteristics and change law of the three main air pollutants were analyzed, and the changing trends of them were described and discussed. The results showed that the annual average values of PM₁₀ mass concentrations and API index exhibited a downward trend in the five cities; PM₁₀ was the main air pollutant of the area related to their ambient air quality. In addition, the annual average values of NO₂ mass concentrations showed a rising trend in the five regional cities. With the exception of Leshan city, the decreased trends of annual average values of SO₂ mass concentrations were observed in the other four cities.

Keywords: the urban agglomeration in Southern Sichuan; air pollution; ambient air quality; the temporal evolvement characteristics

0 引言

大气污染是当今中国面临的重大环境问题之一,城市作为经济发展和人口聚集的中心,由于特殊的下垫面条件和边界层结构,其大气污染状况日趋严重,空气质量持续恶化,给环境造成了严重破坏,这不仅严重危害着城市居民的日常生活和身心健康,还制约着我国经济社会的可持续发展^[1-2]。近年来,很多学者相继对我国的城市大气污染展开了各方面的研究,但这些研究主要集中在较发达的省会城市、直辖市及污染较重的地区,如北京^[3]、天津^[4]、石家庄^[5]、广州^[6]、珠海^[7]和乌鲁木齐等^[8]城市。关于四川盆地大气污染的分析研究也主要集中在重庆和成都等较

发达的经济区,如重庆^[9]、成都^[10]、绵阳和德阳等^[11]城市,而对污染状况同样严重的次发达经济区域的研究则甚少涉及。

位于四川盆地南部的川南城市群,地处长江上游,与云贵高原相毗邻,是由乐山、泸州、内江、宜宾和自贡5个地级市组成的多核心经济区。作为川、滇、黔、渝三省一市的接壤地带,川南城市群东连重庆,西接凉山,北邻乐山、资阳,南接长江干流渝宜段,是沟通四省市的重要物资贸易中心。区域内城镇密集,人口众多,是四川省除成都经济区之外的第二大城市群和重要的经济发展区^[12]。但作为一个发展还很不成熟的城市群,其产业结构不尽合理,仍以高能耗的传统工业为主的发展,致使其区内污染状况严峻,极不

收稿日期:2016-04-21

利于其自身的可持续发展^[13]。

在此背景下,利用 2005—2014 年间川南城市群内的乐山、泸州、内江、宜宾和自贡 5 个城市的环境空气质量监测数据,分析 PM₁₀、SO₂ 和 NO₂ 三类主要污染物及(API)空气污染指数的年内和年际变化等,探究区域内主要大气污染物浓度的时间演变特征,从中找出规律并分析原因,进而对川南城市群 5 个核心城市近年来的大气污染状况有一个较为全面的了解,以期为研究区今后的污染防治、环境管理和政治经济决策分析提供科学依据和基础参考。

1 数据与方法

1.1 数据来源

本文所用数据源自四川省环境空气质量自动监测站点的观测数据,包括 2005—2014 年乐山、泸州、内江、宜宾和自贡 5 个地级市 PM₁₀、SO₂ 和 NO₂ 的逐年日均质量浓度数据。其中所用到的监测数据所对应的站点都分布在对应城市的城区及城郊,利用这些数据得到的分析结果能很好地反映出这些城市的大气污染状况。图 1 为研究所用的 5 个地级城市的监测站点分布图,具有很好的代表性。

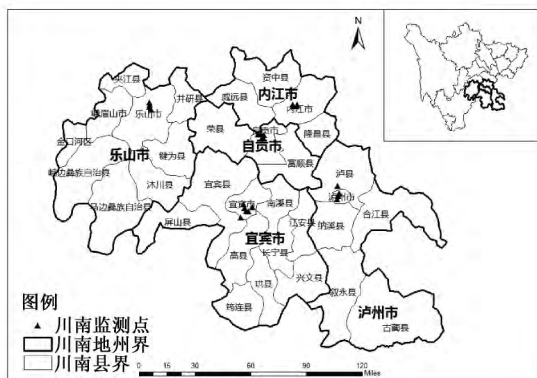


图 1 川南城市群 5 个核心城市的监测站点分布

Fig. 1 Map of observation stations in five core cities of the urban agglomeration in Southern Sichuan

1.2 研究方法

为分析 2005—2014 年川南城市群内 5 个核心城市环境空气质量的变化趋势,考虑其时间周期的连续性,本文采用 Spearman 秩相关系数法定量地对其变化趋势进行分析与评价。具体方法如下^[14]:

对给出的时间周期 $Y_1 \cdots Y_n$, 确定其对应的数值 C (本文采用年均值 $C_1 \cdots C_n$), 将 C 值从大到小地排列好。并用下列公式计算出秩相关系数 r_s :

$$r_s = 1 - 6 \sum_{i=1}^N d_i^2 / (N^3 - N) \quad (1)$$

$$d_i = X_i - Y_i \quad (2)$$

式中: d_i 为变量 X_i 和 Y_i 的差值; X_i 为周期 1 到周期 n 按浓度值从小到大排列的序号; Y_i 为按时间顺序排列的序号。

将秩相关系数 r_s 的绝对值同 Spearman 秩相关系数统计表中的临界值 W_p 进行比较。若 $|r_s| > W_p$, 则表明变化趋势有显著意义, 若 r_s 是负值, 则表明在评价时段内有关统计量的指标变化呈下降趋势或好转趋势; 若 r_s 是正值, 则表明在评价时段内有关统计量的指标变化呈上升趋势或加重趋势。若 $|r_s| \leq W_p$, 则表明变化趋势没有显著意义, 说明在评价时段内有关统计量的指标变化稳定或平稳。本文研究分析 10 年的监测数据, $N = 10$, 单侧检验显著水平为 0.05 时, $W_p = 0.564$ 。

2 结果与分析

2.1 主要大气污染物的时间变化特征

通过对监测点位上的污染日数据处理与统计分析, 得到乐山、泸州、内江、宜宾和自贡 5 个城市近 10 年(2005—2014 年) PM₁₀、SO₂ 和 NO₂ 三类主要大气污染物的年际变化值, 结果如图 2 所示。

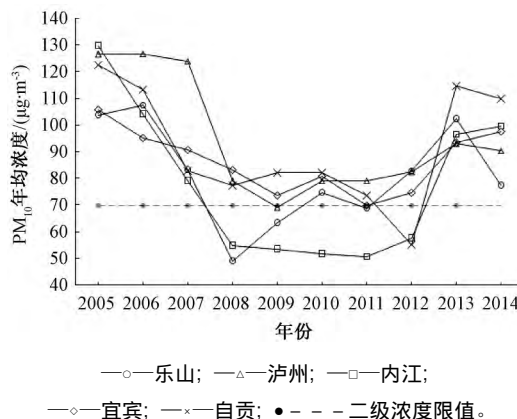


图 2 川南城市群核心城市 2005—2014 年 PM₁₀ 年均质量浓度变化

Fig. 2 The annual variation of PM₁₀ mass concentration from 2005 to 2014 in the core cities of the urban agglomeration in Southern Sichuan

由图 2 可知: 2005—2014 年, 5 个城市的 PM₁₀ 年均质量浓度都有明显的波动, 呈先下降后上升的趋势。2005—2008 年各城市的 PM₁₀ 年均质量浓度均有明显的下降趋势, 2008—2012 年变化较为平缓, 而 2012—2014 年则有较大的波动, 年均质量浓度急剧上升后再下降。其中, 宜宾各年度的 PM₁₀ 年均浓度均超过了环境空气质量的二级标准限值, 泸州除 2009 年、自贡除 2012 年、乐山除 2008 年和 2011 年、内江除 2008—2012 年之外各年度的 PM₁₀ 浓度也均

超过了标准限值。

由图3可以看出:2005—2014年川南城市群的5个地级城市除乐山外,其余4城市的SO₂年均质量浓度总体都有波动性下降的趋势,总体态势较为良好,均在15~73 μg/m³。乐山和自贡的情况最优,各年度的SO₂年均质量浓度值均在环境空气质量的二级标准限值之下。而泸州除2008年、内江除2006—2008年、宜宾除2005,2007,2008年外,其余各年份的SO₂年均质量浓度值也均达标,其最大超标率(此处指监测值超过环境空气质量二级质量浓度限值的比率)也仅为21.7%。

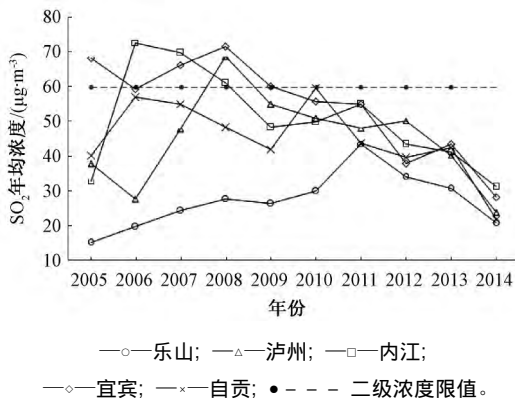


图3 川南城市群核心城市2005—2014年SO₂年均质量浓度变化
Fig.3 The annual variation of SO₂ mass concentration from 2005 to 2014 in the core cities of the urban agglomeration in Southern Sichuan

从图4可知,2005—2014年5个城市的NO₂年均质量浓度值在12~44 μg/m³变化。结合表3和图4可以看出:总体情况都较为良好,乐山和内江各年度的NO₂浓度值均在环境空气质量二级质量浓度限值之下,而泸州除2010年和2013年、宜宾除2011年、自贡除2007年和2008年之外,其余年份的NO₂浓度值也均达标。其中,除乐山和泸州的NO₂年均质量浓度值有明显上升趋势外,其余城市变化均为较为平缓。

2.2 API指数的时间变化特征

2.2.1 API指数年均值的变化特征

图5为川南城市群核心城市的API年均值变化图。可知:在2005—2014年乐山、泸州、内江、宜宾和自贡的API年均值变化情况均为先下降后上升,且在2013年都有较大的上升幅度,但相较2005年的API值,总体上又均呈波动性下降的趋势。

2.2.2 API季均值的变化特征

统计分析5个城市的API季均值,其结果如表1

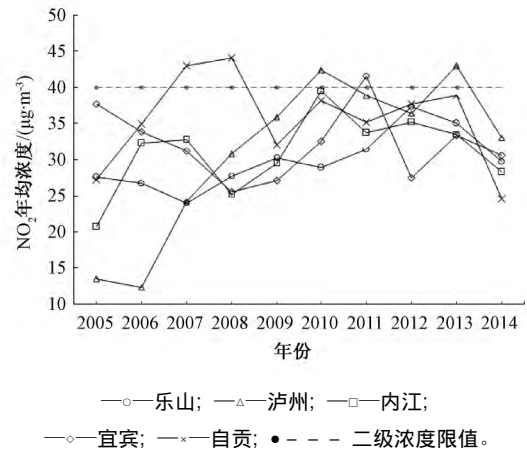


图4 川南城市群核心城市2005—2014年NO₂年均质量浓度变化
Fig.4 The annual variation of NO₂ mass concentration from 2005 to 2014 in the core cities of the urban agglomeration in Southern Sichuan

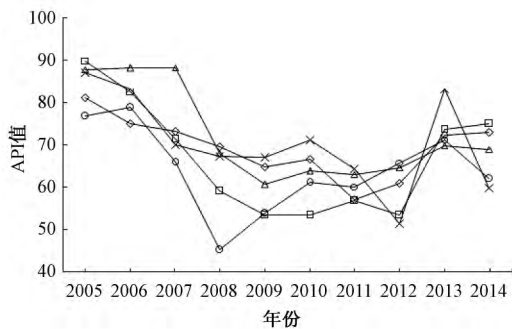


图5 川南城市群核心城市2005—2014年API年均值变化
Fig.5 The annual variation of API index from 2005 to 2014 in the core cities of the urban agglomeration in Southern Sichuan

所示。可以看出:2005—2014年其API季均值总体呈现冬春季高、夏秋季低的特点。10年内,乐山、泸州、内江、宜宾和自贡的季均值分别介于40~85、46~117、45~105、52~106和38~98。

为进一步分析近4年内川南城市群5个城市的API月均值变化,绘制2011—2014年5个地级城市的API月均值变化图(图6)。可以看出:2011年和2012年各城市的API月均值变化都较平缓,且冬春季的API月均值略高于夏秋季节。2013—2014年其API月均值变化则更能凸显“冬春高、夏秋低”规律,并且在2014年的5月和10月,有明显突增的趋势。

2.3 城区环境空气质量现状评价

表2为2005—2014年PM₁₀、SO₂和NO₂三种主要大气污染物的超标率统计结果,超标率是指在统计年份内某一污染物的日均质量浓度超过GB 3095—

表1 川南城市群核心城市2005—2014年API季均值

Table 1 The seasonal average values of API index from 2005 to 2014 in the core cities of the urban agglomeration in Southern Sichuan

| 城市 | 季节 | 年份 | | | | | | | | | |
|----|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 |
| 乐山 | 春 | 79 | 82 | 69 | 46 | 48 | 54 | 62 | 72 | 83 | 55 |
| | 夏 | 73 | 85 | 63 | 40 | 53 | 57 | 55 | 59 | 54 | 52 |
| | 秋 | 72 | 72 | 62 | 42 | 60 | 63 | 60 | 68 | 70 | 60 |
| | 冬 | 80 | 72 | 53 | 50 | 69 | 70 | 59 | 85 | 80 | — |
| 泸州 | 春 | 94 | 94 | 93 | 77 | 63 | 59 | 62 | 67 | 70 | 70 |
| | 夏 | 61 | 68 | 68 | 58 | 46 | 51 | 54 | 53 | 48 | 51 |
| | 秋 | 86 | 86 | 82 | 55 | 62 | 64 | 58 | 60 | 64 | 56 |
| | 冬 | 111 | 117 | 86 | 74 | 84 | 79 | 74 | 88 | 106 | — |
| 内江 | 春 | 104 | 84 | 74 | 59 | 55 | 49 | 63 | 51 | 81 | 80 |
| | 夏 | 73 | 73 | 66 | 51 | 46 | 50 | 59 | 56 | 60 | 63 |
| | 秋 | 83 | 66 | 65 | 56 | 49 | 48 | 45 | 51 | 63 | 66 |
| | 冬 | 105 | 93 | 69 | 66 | 66 | 62 | 52 | 83 | 92 | — |
| 宜宾 | 春 | 90 | 84 | 79 | 79 | 58 | 69 | 62 | 70 | 71 | 79 |
| | 夏 | 75 | 77 | 68 | 67 | 54 | 61 | 63 | 54 | 61 | 52 |
| | 秋 | 78 | 71 | 71 | 70 | 81 | 63 | 54 | 61 | 70 | 59 |
| | 冬 | 78 | 74 | 64 | 65 | 75 | 61 | 53 | 79 | 106 | — |
| 自贡 | 春 | 84 | 81 | 67 | 74 | 66 | 65 | 66 | 58 | 95 | 60 |
| | 夏 | 75 | 79 | 61 | 64 | 56 | 69 | 63 | 45 | 61 | 38 |
| | 秋 | 87 | 81 | 78 | 59 | 70 | 68 | 59 | 44 | 82 | 68 |
| | 冬 | 93 | 77 | 78 | 73 | 83 | 75 | 62 | 83 | 98 | — |

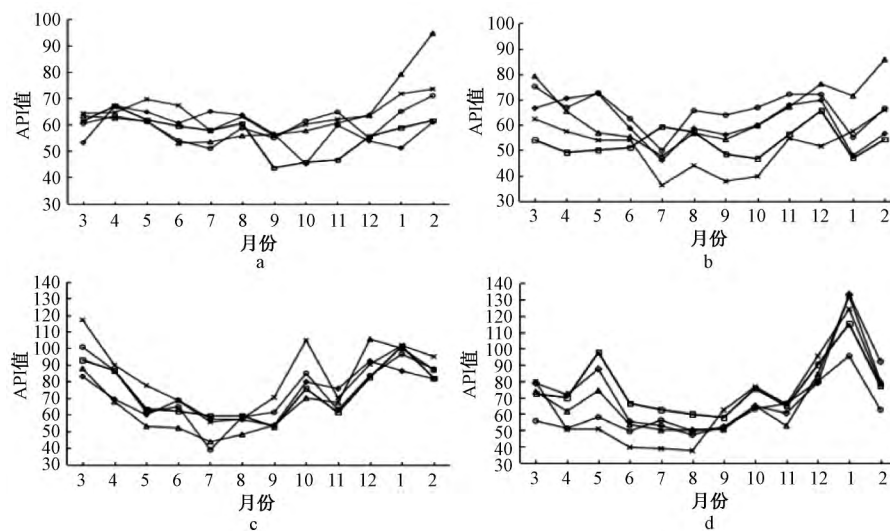
表2 2005—2014年主要大气污染物的超标率统计

Table 2 The statistics of the over standard rate of three main air pollutants from 2005 to 2014

| 城市名称 | 污染物名称 | 历年污染物超标率/% | | | | | | | | | | |
|------|------------------|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--|
| | | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | |
| 乐山 | PM ₁₀ | — | — | — | 0.5 | 0.3 | 1.1 | 1.4 | 2.5 | 15.2 | 7.0 | |
| | SO ₂ | — | — | — | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | |
| | NO ₂ | — | — | — | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1.1 | 0.0 | |
| 泸州 | PM ₁₀ | — | — | — | 7.4 | 4.7 | 6.0 | 4.4 | 6.3 | 16.2 | 14.0 | |
| | SO ₂ | — | — | — | 1.6 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | |
| | NO ₂ | — | — | — | 0.0 | 0.0 | 0.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | |
| 内江 | PM ₁₀ | — | — | — | 1.1 | 0.5 | 0.0 | 0.0 | 0.8 | 14.0 | 12.7 | |
| | SO ₂ | — | — | — | 0.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | |
| | NO ₂ | — | — | — | 0.0 | 0.0 | 0.5 | 0.0 | 0.0 | 0.5 | 0.0 | |
| 宜宾 | PM ₁₀ | — | — | 3.3 | 1.4 | 4.7 | 1.1 | 2.5 | 1.4 | 12.1 | 15.9 | |
| | SO ₂ | — | — | 0.3 | 1.1 | 0.8 | 0.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | |
| | NO ₂ | — | — | 0.0 | 0.0 | 0.3 | 0.0 | 2.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | |
| 自贡 | PM ₁₀ | 20.9 | 12.1 | 2.2 | 0.8 | 4.9 | 4.7 | 2.5 | 0.5 | 23.4 | 17.8 | |
| | SO ₂ | 0.3 | 0.3 | 0.0 | 0.0 | 0.3 | 0.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | |
| | NO ₂ | 0.0 | 0.6 | 0.3 | 8.2 | 0.8 | 1.6 | 0.0 | 0.0 | 1.6 | 0.3 | |

注: 表2中“—”表示当年监测数据不符合统计标准 视为无效数据。

2012《环境空气质量标准》二级限值的天数占总监测天数的比值。由表2可知: 统计年份内乐山、泸州、宜宾和自贡的PM₁₀均超标, 超标率分别在0.3%~15.2%、4.4%~16.2%、1.1%~15.9%和0.5%~23.4%,



a—2011年; b—2012年; c—2013年; d—2014年。

—○—乐山; —△—泸州; —□—内江; —◇—宜宾; —×—自贡。

图6 川南城市群核心城市2011—2014年API月均值变化

Fig. 6 The monthly variations of API index from 2005 to 2014 in the core cities of the urban agglomeration in southern Sichuan

其中各城市2013年的超标情况都最为严重。而内江除2010年和2011年外, 其余各年份的PM₁₀也均超标, 超标率在0.5%~14%。统计年份内, 乐山的SO₂均未超标; NO₂也仅在2013年略微超标。泸州和内江除2008年SO₂分别有1.6%和0.3%的超标率外,

其余统计年份内都未超标; NO₂也仅在2010年有0.5%的低超标率。宜宾2007—2010年SO₂超标率为0.3%~1.1%; 2009年和2011年NO₂超标率分别为0.3%和2.5%。而自贡在2005—2006年和2009—2010年的SO₂都略超标, 超标率均为0.3%; 2006—

2010年和2013—2014年NO₂超标率为0.3%~8.2%。

综上所述,在有效的统计年份内乐山、泸州、内江和宜宾4个城市均以可吸入颗粒物(PM₁₀)污染为主。自贡除2008年以NO₂污染为主外,其余各年份也均以PM₁₀污染为主。并且相较于其余年份,5个城市的PM₁₀污染在2013年和2014年都有明显偏高的超标率。

2.4 变化趋势分析

基于川南城市群5个城市的PM₁₀、SO₂和NO₂年均值,运用Spearman秩相关系数法,对其2005—2014年的环境空气质量变化趋势进行定量分析,结果如表3所示。

表3 川南城市群2005—2014年大气主要污染物秩相关系数统计

| 城市名称 | 指标 | r_s | $W_p(N=10)$ |
|------|------------------|--------|-------------|
| 乐山 | PM ₁₀ | -0.285 | 0.564 |
| | SO ₂ | 0.600 | |
| | NO ₂ | 0.794 | |
| 泸州 | PM ₁₀ | -0.333 | 0.564 |
| | SO ₂ | -0.042 | |
| | NO ₂ | 0.758 | |
| 内江 | PM ₁₀ | -0.285 | 0.564 |
| | SO ₂ | -0.515 | |
| | NO ₂ | 0.430 | |
| 宜宾 | PM ₁₀ | -0.248 | 0.564 |
| | SO ₂ | -0.867 | |
| | NO ₂ | -0.188 | |
| 自贡 | PM ₁₀ | -0.285 | 0.564 |
| | SO ₂ | -0.442 | |
| | NO ₂ | -0.042 | |

由表3可知:乐山PM₁₀年均值的Spearman秩相关系数为-0.285,比较对应的 W_p 可知,2005—2014年乐山的PM₁₀年均值呈不显著的下降趋势;而其SO₂和NO₂年均值的秩相关系数分别为0.6和0.794,表明其SO₂和NO₂年均质量浓度呈显著的上升趋势。分析其他城市大气主要污染物的秩相关系数可知:泸州和内江PM₁₀和SO₂年均质量浓度呈不显著的下降趋势;泸州NO₂年均质量浓度呈显著的上升趋势,而内江NO₂年均质量浓度则呈不明显的上升趋势。宜宾PM₁₀和NO₂年均质量浓度均呈下降趋势,但变化都不明显;而SO₂年均质量浓度则有明显的下降趋势。自贡PM₁₀、SO₂和NO₂年均值的秩相关系数均小于对应的 W_p 值,且都为负数,这表明2005—2014年自贡的PM₁₀、SO₂和NO₂年均质量浓度均呈不显

著的下降趋势。

3 结论

1) 2005—2014年,乐山、泸州、内江、宜宾和自贡5个城市的API年均值总体上均呈下降趋势,分析其API的季均值和月均值,有明显的“冬春高、夏秋低”特征,且某些年份5月和10月的API值有明显的上升趋势,这与当地的秸秆焚烧时间相吻合,疑有相关性存在。

2) 统计年份内5个城市的PM₁₀年均质量浓度都呈下降趋势,尽管该趋势并不明显,但也在一定程度上说明了这些城区的PM₁₀污染得到了较为良好的控制,考究实际情况,这与当地政府对能源和化工等行业的有效整治是密不可分的。

3) 2005—2014年,川南城市群内除乐山的SO₂年均质量浓度呈明显上升趋势外,其余4个城市的SO₂年均质量浓度都有不显著的下降趋势。具体考究乐山的情况可知,统计年份内其SO₂年均质量浓度是5个城市中的最低值,且浓度值仅在15~44 μg/m³,远低于60 μg/m³的二级质量浓度限值。综合乐山近年来经济和城镇化的发展,可将这种上升趋势视为在合理的范围之内。

4) 统计年份内乐山、泸州和内江的NO₂年均质量浓度有小幅上升,考究NO₂的污染来源,这与城市机动车持有量逐年增加有密切的关系。

5) 影响乐山、泸州、内江、宜宾和自贡环境空气质量的主要污染物仍为PM₁₀。对此进一步加强对PM₁₀的防控,将对川南城市群空气质量的改善有着重要意义。

参考文献

- [1] 刘鑫鑫.我国城市大气污染现状及治理措施分析[J].资源节约与环保,2013,31(11):137.
- [2] 汪林安.城市大气污染现状及其应对措施[J].资源节约与环保,2013,31(11):134.
- [3] 刘庆阳,刘艳菊,杨峥,等.北京城郊冬季一次大气重污染过程颗粒物的污染特征[J].环境科学学报,2014,34(1):12-18.
- [4] 唐邈,李鹏,肖致美,等.天津市环境空气质量现状特征分析研究[J].环境科学与管理,2015,40(2):8-11.
- [5] 梁增强,马民涛,杜改芳.2003—2012年北京津石三市大气污染特征及趋势对比[J].环境工程,2014,32(12):76-81,108.
- [6] 张凌,付朝阳,郑习健,等.广州市区大气污染特征与影响因子分析[J].生态环境,2007,16(2):305-308.
- [7] 车汶蔚,郑君瑜,邵英贤,等.珠海市大气污染时空分布特征及成因分析[J].中国环境监测,2008,24(5):82-87.

(下转第81页)

增湿塔和立磨共计16杆喷枪时,SO₂平均浓度为19.164 mg/m³,平均脱硫效率为93.506%,达到控制目标值在20 mg/m³以内的目标,达到贯彻落实《大气污染防治行动计划》的目的,也实现了“十二五”规划中提出的关于燃煤锅炉需达到燃气锅炉的排放标准的要求。

根据“十三五”中提出的工业企业绿色转型理念,较使用传统石灰石-石膏湿法脱硫工艺的企业相比,新型钠系湿法脱硫工艺,解决了石灰石湿法的结垢问题,省去了对于脱硫剂石灰石的加工工序,从而消除了加工时大气污染物的排放,节约了设备成本和脱硫设备占地面积,同时达到了节能降耗的目的。脱硫后的主要产物硫酸钠无毒、稳定,可以以各种方式回收或者再生循环利用,可为企业节约成本。

综上所述,新型钠系湿法脱硫工艺,不论在脱硫率、能耗、成本和副产物再利用等方面均优于传统的石灰石-石膏湿法脱硫工艺,值得进一步研究和工业推广。

参考文献

- [1] 李勇华. 大气中二氧化硫和氮氧化物的污染及防治方法[J]. 资源节约与环保, 2015(12): 158.
- [2] 王志华. 中国工业品出口贸易的SO₂排放问题研究[D]. 济南: 山东财经大学, 2015.
- [3] 潘佳佳, 李廉水. 中国工业二氧化碳排放的影响因素分析[J]. 环境科学与技术, 2011(4): 86-92.
- [4] 黄群亮. 湿法烟气脱硫改造工艺的优选及经济性评价[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [5] 蔡博峰, 曹东, 周颖, 等. 中国水泥企业能源消耗特征分析[J]. 环境工程, 2011, 29(2): 126-129.
- [6] 曾学敏. 中国水泥工业及其供求现状[J]. 新世纪水泥导报, 2003, 5(5): 16-18.
- [7] 王永红, 薛志钢, 柴发合, 等. 我国水泥工业大气污染物排放量估算[J]. 环境科学研究, 2008(2): 207-212.
- [8] 国家环境保护总局. 《主要污染物总量减排考核方法》[R]. 北京: 中华人民共和国国务院公报, 2007.
- [9] 国家环境保护总局. 《主要污染物总量减排考核方法》[R]. 北京: 中华人民共和国国务院公报, 2007.
- [10] 李小燕, 胡芝娟, 叶旭初, 等. 水泥生产过程自脱硫及SO₂排放控制技术[J]. 水泥, 2010(6): 16-18.
- [11] 苏达根, 叶华, 钟明峰. 关于水泥窑SO₂排放量的物料衡算[J]. 环境工程, 1999, 17(3): 33-35.
- [12] 徐东耀, 周昊, 刘伟, 等. 我国水泥行业大气污染物排放特征[J]. 环境工程, 2015, 33(6): 81-84, 143.
- [13] 薛龙, 刘延泉. 火电机组石灰石-石膏湿法烟气脱硫系统优化[J]. 仪器仪表用户, 2012(2): 71-73.
- [14] 王彬. 石灰石-石膏湿法烟气脱硫系统优化[D]. 济南: 山东大学, 2010.
- [15] 刘兆俊. 石灰石-石膏湿法烟气脱硫优化研究与实践[J]. 电力科技与环保, 2013(3): 29-31.
- [16] 刘胜臣. 有关石灰石-石膏法脱硫工艺探究[J]. 科技风, 2014(16): 103.
- [17] 汪波, 刘全祥. 石灰石-石膏法脱硫工艺中存在的问题探析[J]. 中国环保产业, 2008(11): 44-46.
- [18] 杨超, 何绪文, 竹涛, 等. 双碱法烟气脱硫技术影响因素分析[J]. 环境科学与管理, 2010(7): 96-100.
- 第一作者: 刘伟(1986-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为大气污染控制. canaanyoyo@163.com
- 通信作者: 徐东耀(1962-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为大气污染控制. xudongyao101@126.com
- [8] 赵克明, 李霞, 卢新玉, 等. 峡口城市乌鲁木齐冬季大气污染的时空分布特征[J]. 干旱区地理, 2014, 37(6): 1108-1118.
- [9] 杨显双, 伍丽梅. 重庆市大气污染特征及影响因素分析[J]. 环境与可持续发展, 2015(4): 173-175.
- [10] 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.
- [11] 胥芸博, 梅自良, 吴婷, 等. “成绵乐”城市群大气污染物浓度空间分布特征[J]. 中国环境监测, 2013, 29(4): 34-37.
- [12] 周丽, 艾大兵, 肖雨红. 川南城市群发展现状分析[J]. 宜宾科技, 2010(1): 19-20.
- [13] 周丽, 李益彬, 赵行国. 川南城市群发展现状及存在的问题探讨[J]. 中国集体经济, 2009(15): 30-31.
- [14] 庞振东, 王粟. 2006—2010年淮南市环境空气污染特征及变化趋势分析[J]. 牡丹江师范学院学报. 自然科学版, 2012(4): 33-34.
- 第一作者: 陈珂(1992-), 女, 硕士在读, 主要研究方向为3S集成与气象应用. 781682291@qq.com

(上接第76页)