

安庆大气颗粒物污染外来输送轨迹及源区研究^{*1}

余光明¹ 李法松¹ 韩铖^{1, 2}

(1. 安庆师范大学资源环境学院, 安徽安庆 246133;

2. 安庆市环境监测中心站, 安徽安庆 246003)

【摘要】:在对安庆 2015~2016 年大气颗粒物变化特征分析的基础上, 利用 HYSPLIT-4 后向轨迹模式, 采用气团轨迹聚类分析、潜在源贡献因子法(PSFC)和浓度权重轨迹法(CWT), 研究了不同季节安庆地区外源污染物传输的路径及潜在源区。结果表明: (1) 安庆市大气颗粒物质量浓度存在显著的季节变化, 表现为冬季>春季>秋季>夏季, 12 月份污染最重, 7 月份污染最轻。(2) 影响安庆地区气流轨迹具有显著性季节性变化特征, 夏季主要受来自南方和东南方向海洋气流影响, PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的平均值较低; 冬、春和秋季安庆地区受到海洋性气团和大陆性气团共同影响, 且以偏西和西北路径的大陆性气团影响最为明显, 受沙尘或人为排放因素的影响, 对应 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的平均值相对较高, 颗粒物高污染时段与该 2 类大陆性气流轨迹输送关系密切。(3) 安庆颗粒物冬季 PSFC 值和 CWT 值最大, 夏季最小。PSFC 和 CWT 值 2 处高值区主要分布在湖北东部、江西北部 and 湖南南部等带状地区, 以及山西、河南中部、山东南部及安徽北部等带状区域。

【摘要】:颗粒物污染; 后向轨迹分析; 聚类分析; 潜在源区贡献; 浓度权重轨迹法

【中图分类号】:X21 **【文献标识码】:**A **【文章编号】:**1004-8227(2017)12-2111-09

DOI:10.11870/cjlyzyyhj201712020

近年来, 我国中东部地区多次发生大范围持续性的灰霾污染, 以可吸入颗粒物(PM_{10})和细颗粒物($PM_{2.5}$)为特征污染物的区域性大气环境问题日益突出^[1~5], 对人们的身体健康和生产生活造成不利影响^[6, 7]。在大气污染过程中, 区域性大气传输扮演着十分重要的作用^[8~10]。比如对 2014 年 10 月北京市典型空气重污染过程模拟结果表明, 来自河南、河北和山东等地区污染物输送对 $PM_{2.5}$ 贡献率为 42.36%~69.12%^[11]。朱书慧等^[11]研究表明, 受冬季风影响, 西北内陆方向长距离输送可对长三角区域 12 月份空气质量产生较大影响。此外, 长三角污染物通过冬季风也会输送向华南和西太平洋地区^[12]。王文丁等^[13]研究发现珠三角地区重污染期间广州、佛山等城市在不仅本地 $PM_{2.5}$ 浓度较高, 而且对其他多个城市的 $PM_{2.5}$ 浓度也存在显著贡献。对特定区域大气污染特征和来源的研究, 需要对目标地区污染物输入地区进行识别, 后向轨迹模型是一种常用的识别污染过程中颗粒物可能位置的工具, 得到广泛应用^[14, 15]。

作为我国主要经济区之一, 长江三角洲地区城市群一体化建设深入推进, 但高强度污染排量、人口密度大加上不利气象扩

¹ 收稿日期:2017-04-07; 修回日期:2017-04-26

基金项目:国家自然科学基金项目(41601075) [National Natural Science Foundation of China(41601075)]; 安徽省自然科学基金项目(1608085QD76) [Anhui Provincial Natural Science Foundation(1608085QD76)]

作者简介:余光明(1986~), 男, 副教授, 博士, 主要从事大气环境变化研究. E-mail:ygm19870803@163.com

散条件使这一地区灰霾污染加重,区域和城市间大气污染防治形势严峻^[16, 17]。安庆北倚长江,西北靠大别山主峰,是长三角地区生态安全的重要屏障。但区域灰霾事件的大范围持续性发生^[18],以及快速的工业进程,对地区大气污染防治提出严峻挑战。鉴于此,本文在对安庆 2015~2016 年 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 颗粒物变化特征分析基础上,利用 HYSPLIT 后向轨迹模式,采用气团轨迹聚类分析、潜在源贡献因子法和浓度权重轨迹法等方法,分析了同时期不同季节安庆地区污染物传输的路径及潜在源区,从而为区域和城市大气颗粒物防治提供参考。

1 材料和方法

1.1 气流后向轨迹聚类分析

HYSPLIT 模式由美国国家海洋大气研究中心空气资源实验室(NOAA)和澳大利亚气象局开发,最新 HYSPLIT4.9 版本耦合了全球欧拉模式,该模型具有较为成熟的输送、扩散和沉降模式,能够处理多种气象要素输入场、物理过程和不同类型污染物排放源,除了可以用来计算气团轨迹还可以模拟复杂的扩散和沉积。该模式已广泛应用于多种污染物的来源及传输路径辨别(如对流层臭氧、二氧化硫、火山喷发、森林火灾、沙尘模拟等)^[14, 15]。为了更好的反映外部污染源对安庆地区颗粒物污染的影响,本研究中利用 HYSPLIT 模式计算每日气团移动的 72h 后向轨迹,模拟高度选取为距地面 500m。计算过程中选用的气象数据为美国国家环境预报中心(NECP)发布的全球资料同化数据 GDAS2015 年 1 月~2016 年 12 月数据。同时段安庆市 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的质量浓度数据来自于安庆市区 4 处国控监测站点。

利用 HYSPLIT4 软件对 2015~2016 年安庆市各季节(春季:3~5 月,夏季:6~8 月;秋季:9~11 月,冬季:12~2 月)500m 高度 72h 气流后向轨迹进行计算,得到不同季节气流后向轨迹分布图,利用 Traj Stat 提供的 angle distance 算法对各季节气流轨迹进行聚类分析^[19],并根据安庆市区颗粒物监测数据统计了不同气流轨迹对应的日均 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 质量浓度,以 2012 年发布的《环境空气质量标准》中的 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 二级标准限值作为临界值(分别为 150 和 75 μg·m⁻³),计算了超该临界值的气流轨迹的平均浓度。

1.2 大气颗粒物源区分析

PM₁₀ 和 PM_{2.5} 源区研究主要基于潜在源贡献分析法(PSCF, Potential Source Contribution Function)和浓度权重轨迹分析法(CTW, Concentration weighted Trajectory Method)^[20, 21]。其中 PSCF 值是利用后向气流轨迹来描述污染物可能源区地理位置空间分布的条件概率函数,研究区被分为 i×j 个网格,研究时段内所有轨迹的总节点数为 N_{ij},如果有 n_{ij} 个节点落在第(i, j)个网格中,PSCF 值表示为:

$$PSCF_{ij} = n_{ij}/N_{ij}$$

由于 PSCF 是一种条件概率,PSCF 高的网格被解释为潜在源区。当各网格内气流滞留时间较短时,加上瞬时风速的影响,使得 PSCF 的数值存在一定的误差。相关学者引入了权重函数 W_{ij} 来减小误差,使不确定性降到最低^[22]。当某一网格中的 n_{ij} 小于研究区内每个网格内平均轨迹端点数的 3 倍时,使用权重因子 W_{ij} 降低 PSCF 的误差。即 WPSCF=W_{ij}×PSCF。本文参考相关学者研究中对 W_{ij} 的定义^[22~24]:

$$W_{ij} = \begin{cases} 1.00 & N_{ij} > 80 \\ 0.70 & 20 < N_{ij} \leq 80 \\ 0.42 & 10 < N_{ij} \leq 20 \\ 0.05 & N_{ij} \leq 10 \end{cases}$$

PSCF 不能准确反映潜在源区的污染程度以及污染物浓度的数值大小。本文进一步利用 CWT 分析法对潜在源区的污染程度进行分析。CWT 分析通过气流轨迹与其对应的污染物浓度进行对比，以此确定对研究区污染物影响较大的源区。每个网格 (i, j)

的浓度平均值 $\overline{C_{ij}}$ 表示为：

$$\overline{C_{ij}} = W_{ij} \cdot \frac{1}{\sum_{l=1}^M \tau_{ijl}} \cdot C_l \cdot \tau_{ijl}$$

式中： W_{ij} 为网格 i, j 上的平均权重浓度，定义同 PSCF 算法； l 是气流轨迹； C_l 是研究区气流轨迹 l 经过网格 i, j 时对应的颗粒物质量浓度， τ_{ijl} 是轨迹 l 在网格 (i, j) 经过的时间。若某网格 $\overline{C_{ij}}$ 具有较高数值，表明平均后过该网格的气流会导致接收站点的高浓度。

2 结果与分析

2.1 安庆市区颗粒物污染特征

2015~2016 年安庆市区空气质量超标天数共计 149d，平均超标天数比例为 20.4%(图 1)，2a 中首要大气污染物均为细颗粒物 $PM_{2.5}$ 。对比同期安庆市区 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 质量浓度以及超标天数的月变化曲线，可以看出，3 者变化趋势非常吻合，其中 ρ ($PM_{2.5}/PM_{10}$) 比值平均为 0.74，表明安庆市区细颗粒物污染比较严重。安庆市区颗粒物污染存在显著的季节变化， PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 质量浓度在冬季的 12~2 月维持在较高水平，持续性的重污染事件多发生这一时期，春秋次之，夏季污染最轻。全年中，12 月空气质量超标天数比例为 63.2%，7 月则是 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 质量浓度最低的月份，仅为 12 月份相应污染物浓度的 30%。

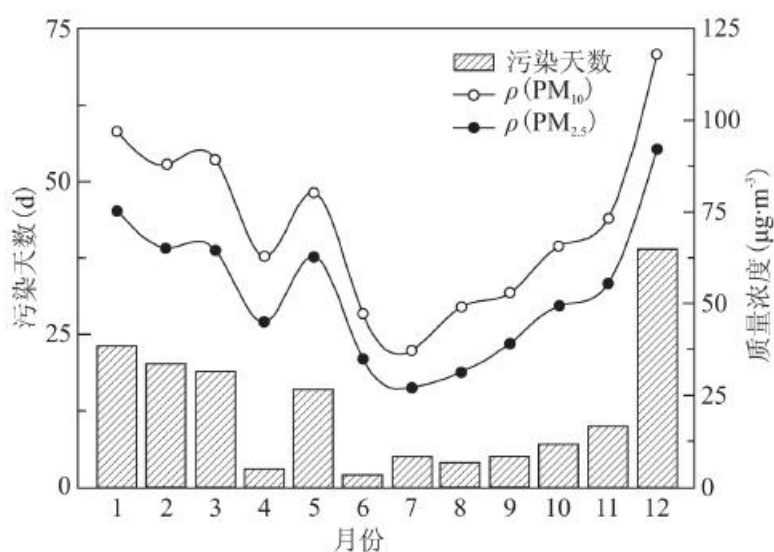


图1 2015~2016年安庆市区PM₁₀和PM_{2.5}质量浓度以及超标天数的月变化

Fig. 1 Monthly Variation of PM₁₀ and PM_{2.5} Mass Concentrations and Pollution Days in Anqing Between 2015 and 2016

2.2 气团后向轨迹及聚类分析

对2015~2016年安庆各季节气团轨迹进行聚类分析,结果如表1和图2所示。春季影响安庆地区气流轨迹主要有西北、西支及东支3条路径。3条轨迹中东支气流主要来自相对清洁的黄海地区,对应的PM₁₀和PM_{2.5}质量浓度最低,但该类型气流移动速度缓慢,加之途经经济发达的江浙地区,会造成部分时段PM_{2.5}浓度升高;西北气流来自于西北干旱半干旱地区,与春季冷空气频繁南下有关,气流轨迹相对较长,移动速度很快,近地面平均风速大。该条气流途经污染较重的北方地区,春季也是我国北方沙尘暴和扬沙等灾害天气的多发时段,而位于长江下游的安庆地区自身距离沙源地较远,直接产生沙尘、扬尘的可能性小,大气中的浮尘可随气流运动南下从而影响到安庆地区,从而使空气中颗粒物浓度增高,西北气流对应的PM₁₀和PM_{2.5}质量浓度最高,分别为 $83.31\pm 39.30\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $60.96\pm 31.12\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,超标概率分别为15.2%和9.7%,对PM₁₀贡献较大。西支路径则主要途经四川、湖南、江西等地区,气流运行速度缓慢,对应的地面风速较低,对安庆地区PM₁₀和PM_{2.5}质量浓度有一定的贡献。

表1 安庆不同季节气流轨迹聚类特征

季节	出现概率 (%)	沿途主要区域	质量浓度平均值 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)		超标天数(d)及污染气团质量浓度($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)			
			PM ₁₀	PM _{2.5}	超标天数	PM ₁₀	超标天数	PM _{2.5}
NW	56.0	内蒙古中部, 华北, 安徽北部	83.31	60.96	10	172.3	26	105.40
春季	WSW	湖南北部, 江西北部	70.81	52.56	3	165.0	9	102.10

	ENE	9.2	黄海, 东海, 江苏中部	68.94	55.9	—	—	3	88.67
	SSW	58.6	南海, 广东, 江西	41.93	30.15	—	—	—	—
夏季	ESE	21.0	东海	45.94	30.18	—	—	—	—
	N	20.4	河北, 山东, 安徽北部	49.65	33.62	—	—	1	76.00
	NW	34.1	内蒙古中部, 华北, 安徽北部	60.53	45.03	—	—	5	88.60
秋季	WSW	46.7	湖南, 江西北部	69.95	52.53	2	153.0	14	90.86
	ENE	19.2	黄海, 东海	55.86	42.51	—	—	13	86.33
	NW	32.2	内蒙古中部, 华北, 安徽北部	105.96	80.52	10	197.0	29	111.86
	SSW	11.1	广东, 江西	99.04	74.80	1	154.0	11	91.82
冬季	WNW	48.9	四川, 重庆, 湖北中部	102.93	80.75	15	183.0	45	111.69
	NE	7.8	渤海, 黄海	74.43	56.5	—	—	2	91.00

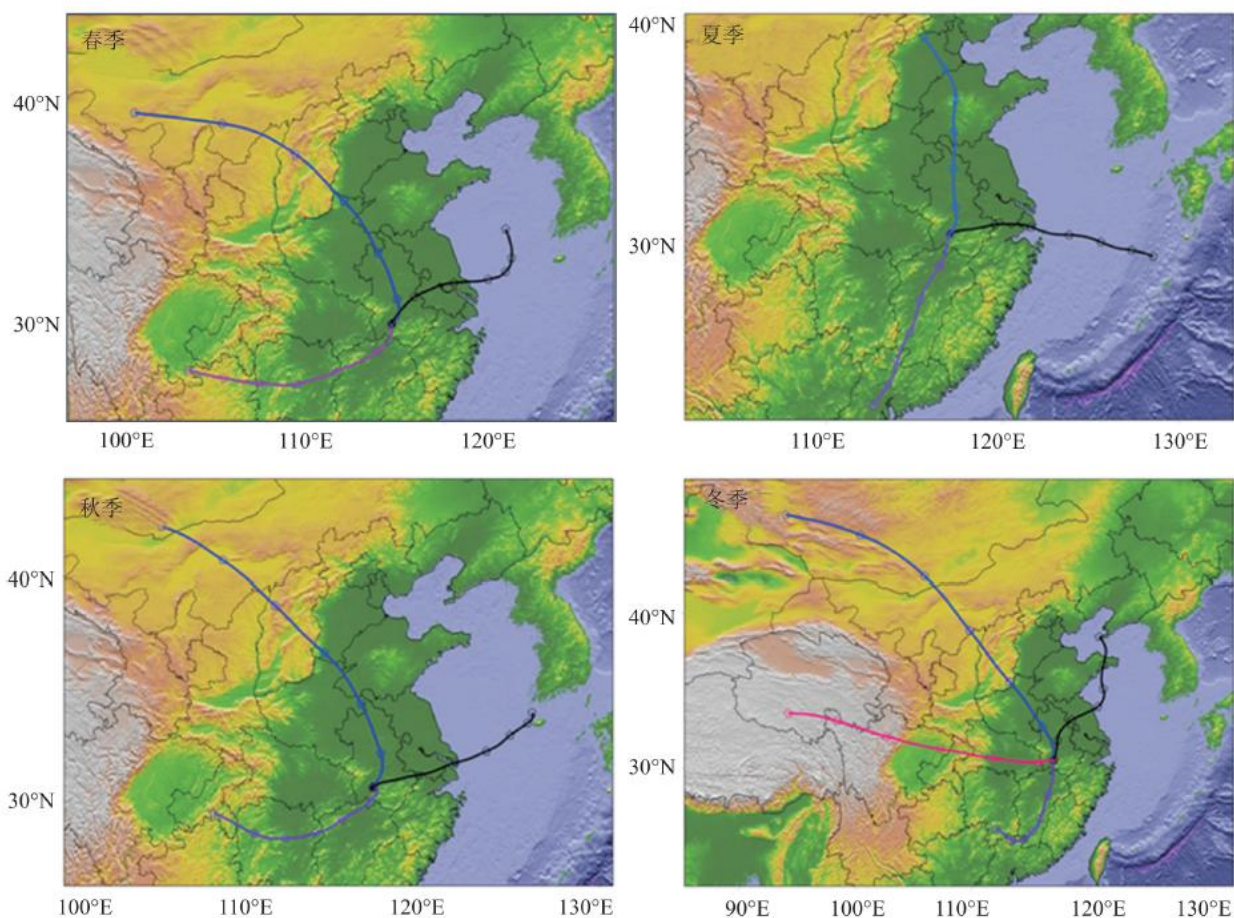


图 2 安庆不同季节轨迹聚类路径图示(间隔 12 h)

Fig. 2 Seasonal Distribution of 500m Backward Trajectory Clusters in Anqing, 2015–2016

夏季影响安庆地区气流轨迹则主要有南支、北支及东支 3 条路径。其中南支(58.6%)和东支(21.0%)气流轨迹分别来自于南海和东海海域, 主要与夏季风期间南海、东海等海域水汽输送有关, 对应的 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度较低, 其中南支气流对应的 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 质量浓度最低。研究表明, 夏季海面气团输送有利于长三角地区空气质量改善^[25]。北支气流来自于河北、山东等华北及安徽北部地区, 对应的日均 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度虽然在 3 类轨迹中最高, 但由于夏季华北地区燃煤消耗减少, 降水逐渐增多, 植被覆盖增加, 本地大气扩散条件比较于有利污染物扩散, 导致夏季安庆总体 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 处于较低的水平。

随着夏季风减退和冷空气势力增强, 秋季影响安庆地区空气轨迹转变为东支、西北和偏西方向气流, 这与春季类似。西北气流同样来自于西北干旱半干旱地区, 气流移动速度快, 对应的地面风速相对较大, 对安庆地区 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度具有一定的贡献, 东支气流主要是来自于东海和黄海海洋性气团, 空气较为清洁, PM_{10} 均未超标, 但气流途经污染较重的江浙地区, 也会造成 $PM_{2.5}$ 浓度升高。秋季 3 类轨迹中, 以偏西的大陆性气流所占比例最高, 与春季西支气流轨迹相比明显较短, 对应的气团移动速度相对缓慢, 地表风速低, 大气扩散能力弱, 有利于大气中颗粒物堆积, 该类气流轨迹也是相应污染物浓度最高的一条。

冬季安庆地区静稳天气多, 逆温持续时间长, 大气扩散条件极为不利, 该季节是安庆霾高污染频发的季节。这一时期影响安庆地区的气流轨迹共有 4 类, 表现为 2 条分别主要来自于西北和偏西的大陆性气团, 以及 2 条分别来自黄海和南海的海洋性气团, 其中大陆性气团移动速度非常快, 特别是西北气流轨迹流经山西、陕西和河南等地区, 加上该时期为北方地区的采暖季节, 降水少, 植被覆盖度差, 带来大量的外源性空气污染物, PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 超标概率分别为 17.2% 和 50%, 该类气团轨迹也是影

响长江三角洲冬季灰霾发生的主导气流^[26]。相比之下，来自北方和南方的海洋性气团源区则相对洁净，甚至带来部分降水。

总体来看，受沙尘或人为排放因素的影响大，冬春时节空气质量会受到严重影响，颗粒物浓度异常升高。春、秋和冬季时期安庆地区冷空气势力强，主要受到以偏西和西北路径的大陆性气团影响，加之安庆所处的特殊地形，对应 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的平均值相对较高；海洋性气团对应的污染物载荷较低，但由于气团移动速度相对缓慢，加之途经污染较重地区， $PM_{2.5}$ 也会出现超标的情况。夏季则主要受来自海洋地区较为清洁的气流影响， PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的平均值相对较低。

2.3 颗粒物源区分析

图3与图4为2015~2016年安庆市颗粒物潜在源贡献计算结果，可以看出， PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 潜在源贡献因子变化基本一致，就全年而言，对 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 贡献比较大的地区主要为安庆周边地区，如湖北省东部、江西省北部和湖南省南部等，污染物可经由短距离输送至安庆。来自西北、华北地区和安徽省北部等北方地区污染物通过远距离输送也可以到达安庆地区；此外，安徽省南部、江浙一带对安庆 $PM_{2.5}$ 颗粒物也有一定的贡献，而对 PM_{10} 贡献并不显著。

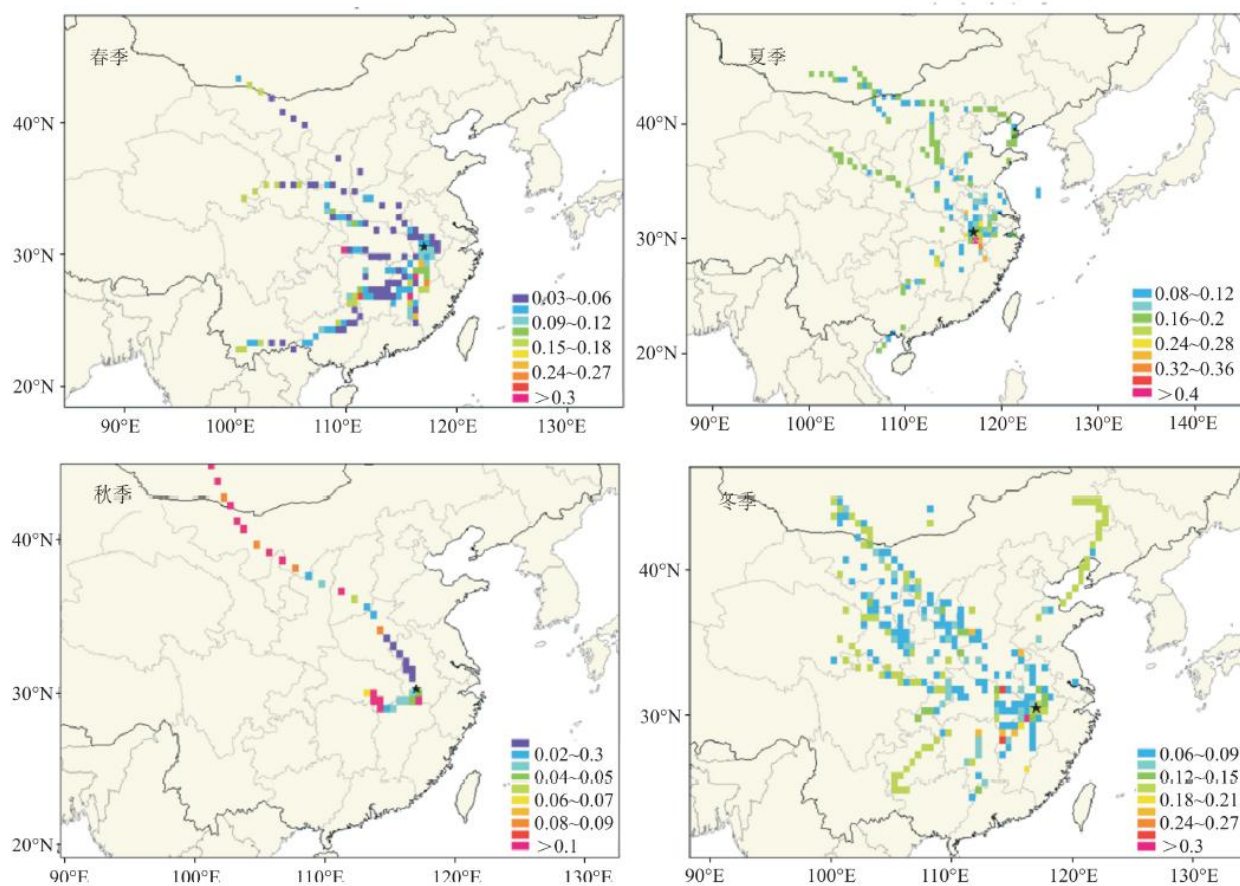


图3 安庆不同季节 PM_{10} 的PSFC分析结果

Fig. 3 Potential Source Contribution for PM_{10} in Different Seasons in Anqing

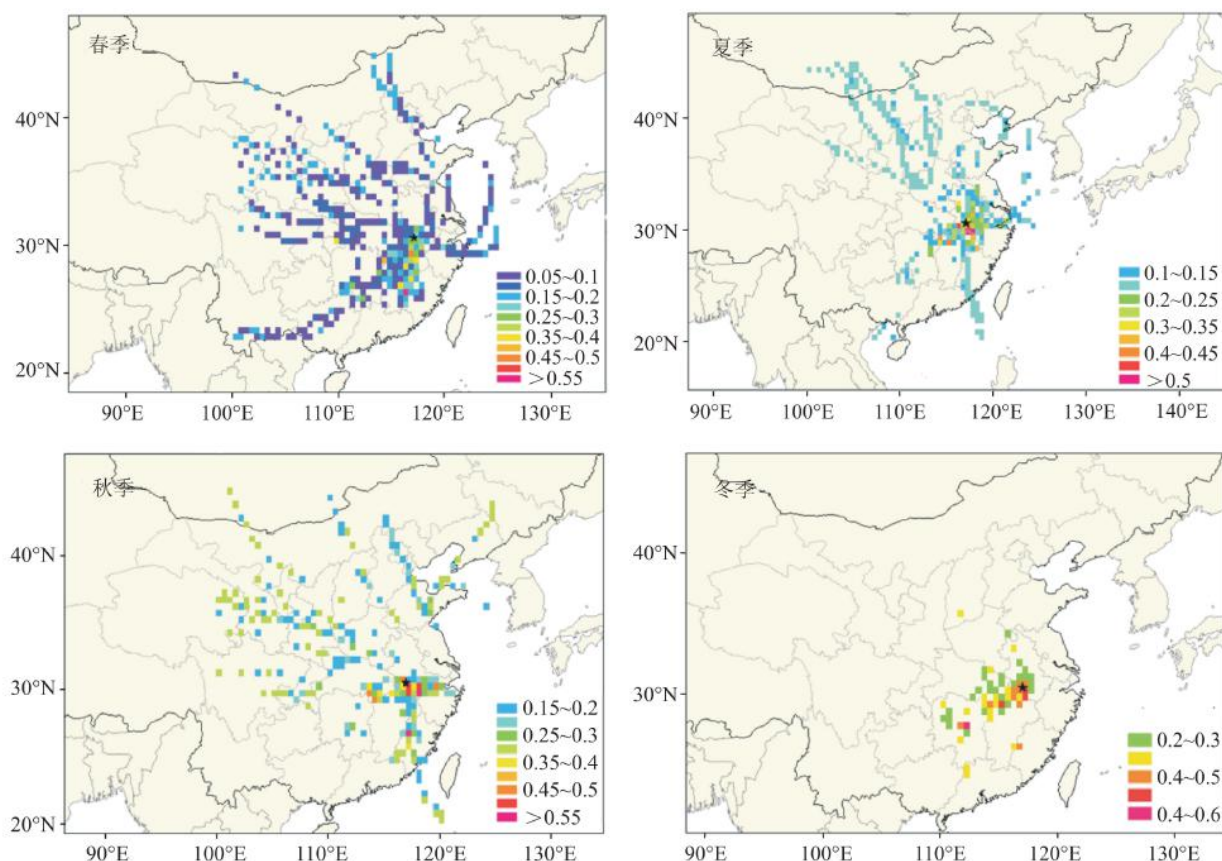


图4 安庆不同季节 $PM_{2.5}$ 的 PSFC 分析结果

Fig. 4 Potential Source Contribution for $PM_{2.5}$ in Different Seasons in Anqing

利用浓度权重轨迹分析法对影响安庆地区 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 污染物浓度的潜在源区进行模拟，各季节污染物浓度权重轨迹分布情况见图5和图6。可以看出，污染物浓度权重轨迹值存在明显的季节差异，夏季最低，其他季节较高。春季颗粒物浓度权重轨迹值较高的地区主要集中在安庆周边的湖北省东部、江西省北部和安徽省南部等区域，为安庆 PM_{10} ，特别是 $PM_{2.5}$ 的最主要潜在源区，这些地区分布相对集中；华北地区和安徽省北部对安庆 PM_{10} 也有一定贡献，主要与春季北方沙尘暴传输过程携带沙尘有关。由于夏季扩散条件好，污染物浓度相对较低，夏季浓度权重轨迹值较高的地区主要集中在江西北部、浙江西北部以及安徽省北部的部分区域，这些地区对安庆日均 $PM_{2.5}$ 质量浓度贡献均 $20 \mu g \cdot m^{-3}$ 以下；秋季和冬季颗粒物浓度权重轨迹值较高的地区主要集中在2个地区，其一为位于湖北省东部、江西省北部和湖南省南部等地区，这些地区主要位于安庆偏西方向，对安庆日均 $PM_{2.5}$ 颗粒物质量浓度贡献在 $30 \sim 60 \mu g \cdot m^{-3}$ 之间，污染物浓度相对较高，其次为山西、河南、山东及安徽北部等地区，这些地区对安庆日均 $PM_{2.5}$ 颗粒物质量浓度贡献在 $15 \sim 50 \mu g \cdot m^{-3}$ 之间，这2处区域也是对 PM_{10} 质量浓度贡献较大的地区，需要指出的，这一时期临近的江浙一带对安庆 $PM_{2.5}$ 具有一定贡献，而 PM_{10} 表现的并不明显。

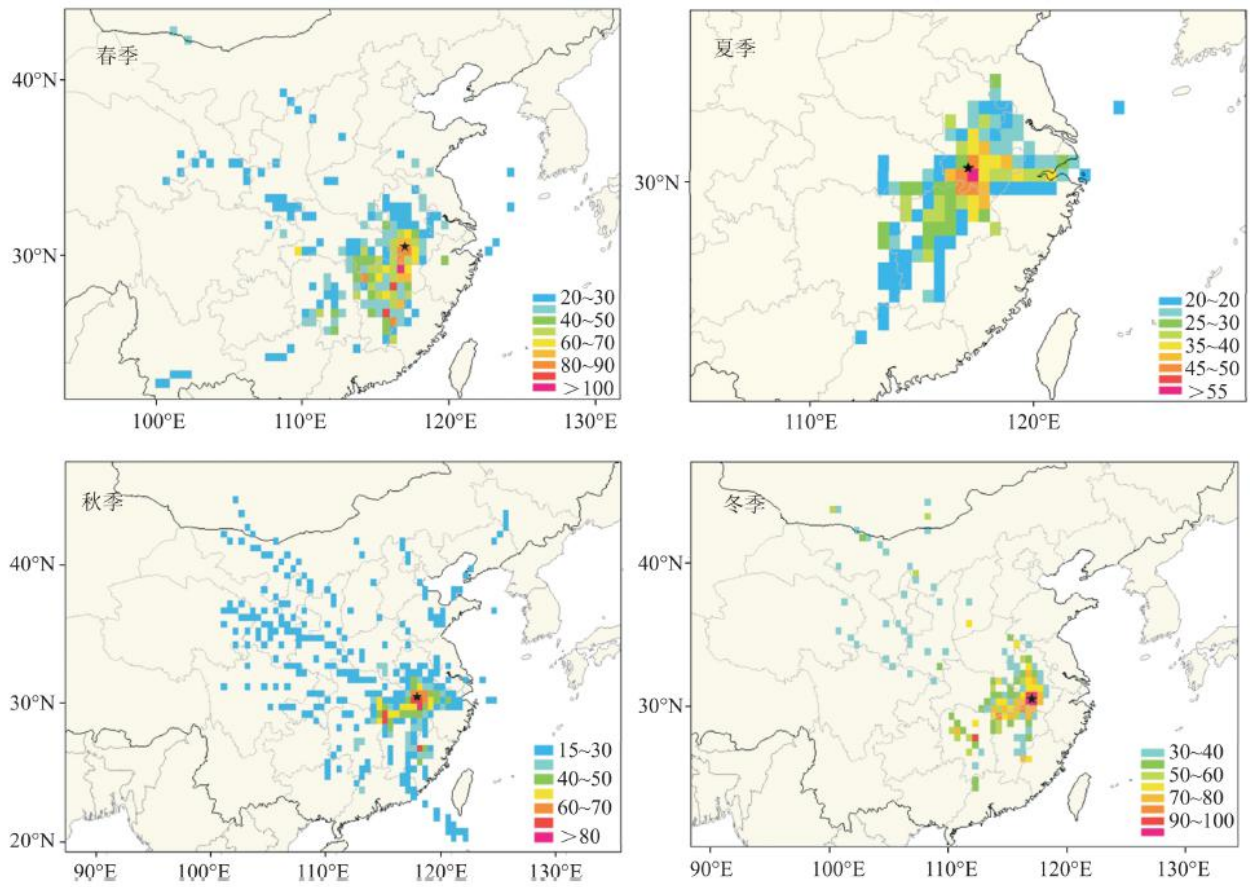


图 5 安庆不同季节 PM₁₀ 的 CWT 分析结果

Fig. 5 Weighted Potential Source Contribution for PM₁₀ in Different Seasons in Anqing

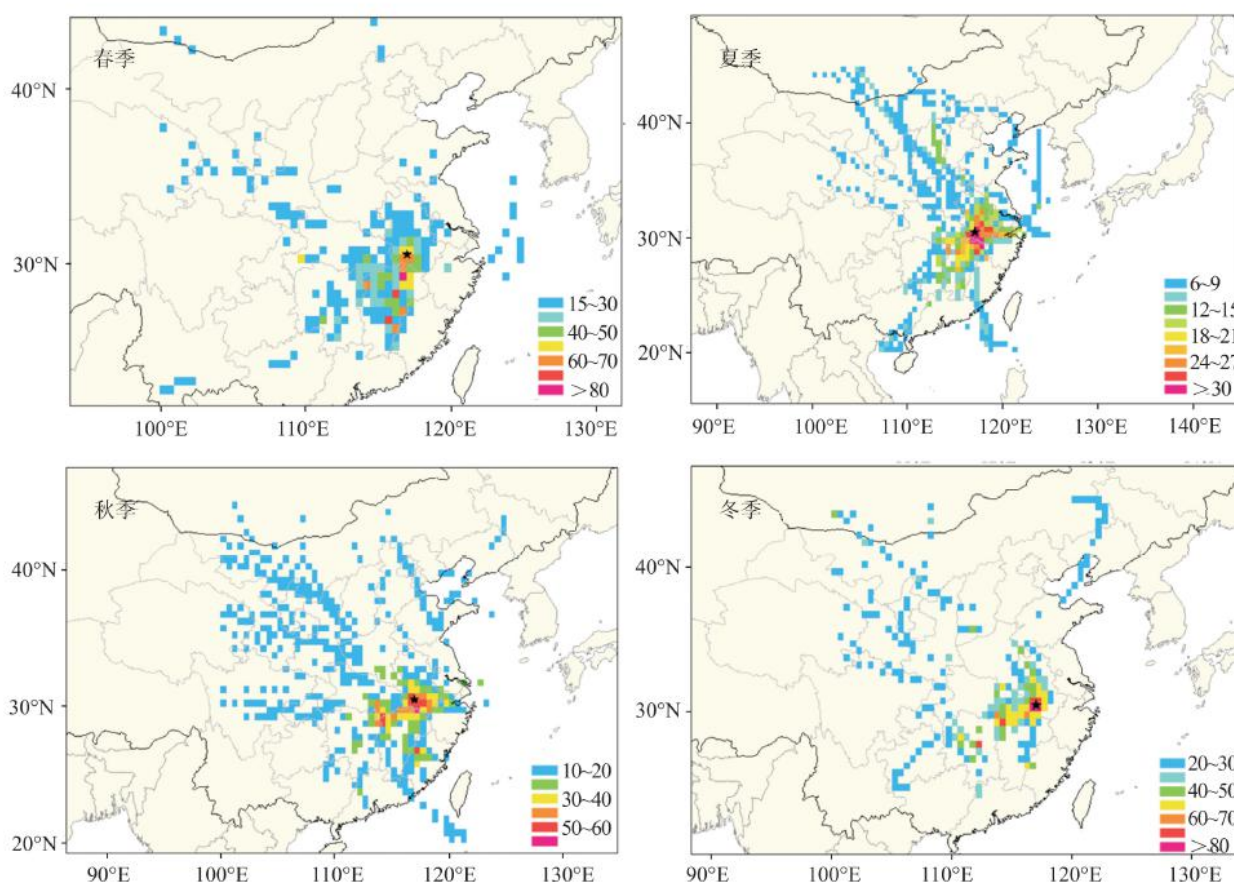


图 6 安庆不同季节 $PM_{2.5}$ 的 CWT 分析结果

Fig. 6 Weighted Potential Source Contribution for $PM_{2.5}$ in Different Seasons in Anqing

总的来看,冬季颗粒物的 PSFC 值和 CWT 值均为一年中最大的季节,冬季位于安庆偏北和偏西 2 个方向的颗粒物 PSFC 和 CWT 高值区的分布相对最为明显和集中,这可能由冬季这些区域人为排放的污染物随气流扩散,影响到安庆所致。冬季是安徽地区和我 国霾污染高发季节,但是安徽没有北方省份因为供暖燃煤排放显著上升的排放影响,但北方和偏西方向污染气团过境以及夜间辐射静稳天气诱发冬季高浓度颗粒物污染。比如北方冷空气南下时虽然通常伴随大风,边界层较高等有利条件,但也会把沿途的污染气团带到安庆地区。冷空气过境后,迅速转变为静稳天气下的本地排放累积造成污染,因此局地区域性静稳天气条件配合高空外来污染物输送造成冬季颗粒物污染浓度(尤其是 $PM_{2.5}$)维持在较高水平。

4 讨论与结论

(1) 2015~2016 年安庆市区大气污染比较严重,表现为以 $PM_{2.5}$ 为首要污染物的颗粒物污染。颗粒物质量浓度存在显著的季节变化,排序为冬季>春季>秋季>夏季,在月份分布上,以冬季 12 月份污染最终,夏季 7 月份污染最轻。

(2) 利用 HYSPLIT 模式计算 2015~2016 年每日 500m 高度气团移动的 72h 后向轨迹,对到达安庆地区不同季节气流轨迹进行聚类分析,并计算了对应轨迹的污染物浓度。发现达到安庆地区气流轨迹季节性变化明显,夏季主要受来自南方和东南方向海洋气流影响,空气质量较好;冬、春和秋季安庆地区受到海洋性气团和大陆性气团共同影响,且以偏西和西北路径的大陆性气团影响最为明显,受沙尘或人为排放因素的影响,对应 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的平均值相对较高,颗粒物高污染时段多与该 2 类气流轨迹输送有关。

(3) 基于 PSCF 和 CWT 分析法分析了安庆地区颗粒物潜在源区与贡献, 安庆 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的 PSCF 和 CWT 分布及变化类似, 冬季 PSFC 值和 CWT 值最大, 夏季最小。PSFC 和 CWT 值 2 处高值区主要分布在包括湖北东部、江西北部 and 湖南南部的带状地区, 以及包括山西、河南、山东南部及安徽北部在内的带状区域。局地静稳天气条件配合高空外来污染物输送造成冬季颗粒物污染浓度维持较高水平。

参考文献:

- [1] WANG Y S, YAO L, WANG L L, et al. Mechanism for the formation of the January 2013 heavy haze pollution episode over central and eastern China [J]. Science China Earth Sciences, 2014, 57(1) : 14–25.
- [2] TIAN S, PAN Y, LIU Z, et al. Size-resolved aerosol chemical analysis of extreme haze pollution events during early 2013 in urban Beijing, China [J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, 279: 452–460.
- [3] GAO J, WOODWARD A, VARDOLAKIS S, et al. Haze, public health and mitigation measures in China: A review of the current evidence for further policy response [J]. Science of the Total Environment, 2017, 578: 148–157.
- [4] HO K F, HO S S H, HUANG R J, et al. Chemical composition and bioreactivity of $PM_{2.5}$ during 2013 haze events in China [J]. Atmospheric Environment, 2016, 126: 162–170.
- [5] 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.
- 【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. 】
- [6] 谢元博, 陈娟, 李巍. 雾霾重污染期间北京居民对高浓度 $PM_{2.5}$ 持续暴露的健康风险及其损害价值评估 [J]. 环境科学, 2014, 35(1) : 1–8.
- 【XIE Y B, CHEN J, LI W. An assessment of $PM_{2.5}$ related health risks and impaired values of Beijing residents in a consecutive high-level exposure during heavy haze days [J]. Environmental Science, 2014, 35(1) : 1–8. 】
- [7] ZHAO W, CHENG J, LI D, et al. Urban ambient air quality investigation and health risk assessment during haze and nonhaze periods in Shanghai, China [J]. Atmospheric Pollution Research, 2013, 4(3) : 275–281.
- [8] BERGE R, LUMBRERAS J, VARDOLAKIS S, et al. Analysis of long-range transport influences on urban PM_{10} using twostage atmospheric trajectory clusters [J]. Atmospheric Environment, 2007, 41: 4434–4405.
- [9] TANG L, HAEGER E M, SJOBERG K, et al. Estimation of the long-range transport contribution from secondary inorganic components to urban background PM_{10} concentrations in south-western Sweden during 1986 – 2010 [J]. Atmospheric Environment, 2014, 89: 93–101.
- [10] YU S C, ZHANG Q Y, YAN R C, et al. Origin of air pollution during a weekly heavy haze episode in Hangzhou, China [J]. Environmental Chemistry Letters, 2014, 12(4) : 543–550.

-
- [11] 程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2014 年 10 月北京市 4 次典型空气重污染过程成因分析 [J]. 环境科学研究, 2015, 28(2) : 163—170.
- 【CHENG N L, LI Y T, ZHANG D W, et al. Analysis about the characteristics and formation mechanisms of serious pollution events in October 2014 in Beijing [J]. Research of Environmental Sciences, 2015, 28(2) : 163—170. 】
- [12] 王艳, 柴发合, 王永红, 等. 长江三角洲地区大气污染物输送规律研究 [J]. 环境科学, 2008, 29(5) : 1430—1435.
- 【WANG Y, CHAI F H, WANG Y H, et al. Transport characteristics of air pollutants over the Yangtze Delta [J]. Environmental Science, 2008, 29(5) : 1430—1435. 】
- [13] 王文丁, 陈焕盛, 吴其重, 等. 珠三角冬季 PM_{2.5} 重污染区域输送特征数值模拟研究 [J]. 环境科学学报, 2016, 36(8) : 2741—2751.
- 【WANG W D, CHEN H S, WU Q Z, et al. Numerical study of PM_{2.5} regional transport over Pearl River Delta during a winter heavy haze event [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(8) : 2741—2751. 】
- [14] STEIN A F, DRAXLER R R, ROLPH G D, et al. NOAA' s HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2015, 96(12) : 2059—2077.
- [15] DRAXLER R R, HESS G D. An overview of the HYSPLIT-4 modeling system for trajectories [J]. Australian meteorological magazine, 1998, 47(4) : 295—308.
- [16] CHE H, ZHANG X, LI Y, et al. Haze trends over the capital cities of 31 provinces in China, 1981 — 2005 [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2009, 97: 235—242.
- [17] WANG M, CAO C X, LI G S, et al. Analysis of a severe prolonged regional haze episode in the Yangtze River Delta, China [J]. Atmospheric Environment, 2015, 102: 112—121.
- [18] 刘晓蓓, 金素文. 安徽省霾时空分布特征分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(12) : 1762—1766.
- 【LIU X B, JIN S W. Spatial-temporal variation characteristics of haze days in Anhui province [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(12) : 1762—1766. 】
- [19] WANG Y Q, ZHANG X Y, DRAXLER R R. TrajStat: GISbased software that uses various trajectory statistical analysis methods to identify potential sources from long-term air pollution measurement data [J]. Environmental Modelling & Software, 2009, 24(8) : 938—939.
- [20] BEGUM B A, KIM E, JEONG C H, et al. Evaluation of the potential source contribution function using the 2002 Quebec forest fire episode [J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(20) : 3719—3724.

-
- [21] HSU Y K, HOLSEN T M, HOPKE P K. Comparison of hybrid receptor models to locate PCB sources in Chicago [J]. Atmospheric Environment, 2003, 37, 545—562.
- [22] POLISSAR A V, HOPKE P K, PAATERO P, et al. The aerosol at Barrow, Alaska: long-term trends and source locations [J]. Atmospheric Environment, 1999, 33(16) : 2441—2458.
- [23] ZHANG F, ZHOU L X, NOVELLI P C, et al. Evaluation of in situ measurements of atmospheric carbon monoxide at Mount Waliguan, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, 11(11) : 5195—5206.
- [24] ZENG Y, HOPKE P K. 1989. A study of the sources of acid precipitation in Ontario, Canada [J]. Atmospheric Environment, 23(7) : 1499—1509.
- [25] 方利江, 傅贤康, 谢立峰, 等. 舟山本岛大气污染输送过程的数值模拟分析 [J]. 环境科学研究, 2014, 27(10) : 1087—1094.
- 【FANG L J, FU X K, XIE L F, et al. Numerical simulation of air pollution transport in Zhoushan Island, China [J]. Research of Environmental Sciences, 2014, 27(10) : 1087—1094. 】
- [26] 李莉, 蔡鋆琳, 周敏. 2013 年 12 月中国中东部地区严重灰霾期间上海市颗粒物的输送途径及潜在源贡献分析 [J]. 环境科学, 2015, 36(7) : 2327—2336.
- 【LI L, CAI J L, ZHOU M. Potential source contribution analysis of the particulate matters in Shanghai during the heavy haze episode in eastern and middle China in December, 2013 [J]. Environmental Science, 2015, 36(7) : 2327—2336. 】