

陈龙, 智协飞, 覃军, 等. 2016. 影响武汉市空气污染的地面环流形势及其与污染物浓度的关系. 气象, 42(7): 819-826.

# 影响武汉市空气污染的地面环流形势 及其与污染物浓度的关系<sup>\* 1</sup>

陈 龙<sup>1,2</sup> 智协飞<sup>1,3,4</sup> 覃 军<sup>5,6</sup> 胡航菲<sup>1</sup>

1 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

2 湖南省气象台, 长沙 410118

3 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

4 南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京 210044

5 中国地质大学环境学院, 武汉 430074

6 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002

**提 要:** 利用 Lamb-Jenkinson 客观环流分型法, 分析 2004—2013 年影响武汉地区的主要地面环流型及其特点, 并探讨环流型与污染物浓度之间的关系。结果表明, 影响武汉地区的主要地面环流型有反气旋型(A)、气旋型(C)、偏东风型(E)、高压系统控制的偏东风型(AE)、偏东北风型(NE)及东南风型(SE)。秋、冬季以 A、AE、E 型为主, 春季 A、C、E 型出现频率最高, 夏季则 C、E 型出现次数最多。空气污染日出现的主要地面环流型有 A、AE、E、SE、C 及 NE 型, 影响各季节出现污染的主要环流型不同, 其中 C 型主要出现在春、夏季, 表现为被弱低压控制; 而中度及以上污染日的地面环流型主要为 A、SE、E 及 AE 型, 受高压系统或偏东风影响时, 高浓度污染较易出现。环流型对各种污染物浓度的影响程度存在差异。

**关键词:** 空气污染, 环流, Lamb-Jenkinson 环流分型法

**中图分类号:** P434, X513

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.07.005

## Surface Atmospheric Circulation Types of Air Pollution and Its Relationship with Concentration of Air Pollutants in Wuhan

CHEN Long<sup>1,2</sup> ZHI Xiefei<sup>1,3,4</sup> QIN Jun<sup>5,6</sup> HU Hangfei<sup>1</sup>

1 School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Hunan Meteorological Observatory, Changsha 410118

3 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

4 Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

5 School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074

6 Institute of Desert Meteorology, CMA, Urumqi 830002

**Abstract:** Lamb-Jenkinson atmospheric circulation classification scheme is used to classify daily circulation types. The major types, their catalogues and the relationship between the surface atmospheric circulation and the concentration of pollutants in Wuhan from 2004 to 2013, are explored. The results show that six major types (A, C, E, AE, NE and SE) occur most frequently, and the major types are A, AE and E in

\* 武汉市重大科技攻关专项“武汉市大气灰霾成因与来源研究”项目、江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)和江苏省“青蓝工程”(东亚季风与区域气候变化)共同资助

2015 年 4 月 1 日收稿; 2016 年 1 月 3 日收修定稿

第一作者: 陈龙, 主要从事环境气象和数值天气预报研究. Email: chlnuist@163.com

通信作者: 智协飞, 主要从事天气学和数值天气预报研究. Email: zhi@nuist.edu.cn

winter and autumn, A, C and E occur frequently in spring, C and E are the major types in summer. For air pollution days, major types are A, AE, E, SE, C and NE, and the major types that impact air pollution in different seasons are different. The Type C is mainly in spring and summer, being controlled by weak low pressure. The four major types (A, SE, E, AE) are relevant to severe air pollution in Wuhan. Severe air pollution occurs easily under the control of high pressure system or easterly. The impact of the circulation types on the concentration of air pollutants is different.

**Key words:** air pollution, atmospheric circulation, Lamb-Jenkinson circulation classification scheme

## 引 言

随着中国经济的高速发展,环境问题变得越来越突出。其中,由于空气质量恶化造成的大气环境污染问题对人民群众的生产生活造成了极大的影响(丁一汇等,2009)。因此,空气污染问题受到了人们广泛的关注。灰霾天气的出现,则是空气污染的一种直观表现。高歌(2008)、胡亚旦等(2009)、吴兑等(2010)、孙彧等(2013)和刘晓慧等(2013)指出我国近 50 年霾日呈东多西少分布,且冬多夏少。近几年来,我国长江中下游、珠江流域等地区,霾日增加明显,持续性霾天气发生频率增加。有研究发现空气质量存在显著的季节、月及日变化,地域上则存在由南到北、从沿海到内陆逐渐变差的趋势,一些研究还探讨了空气污染与大气环流背景、局地气象条件的关系及其边界层特点(魏玉香等,2009;张艳等,2010;伍红雨等,2011;李小飞等,2012;李文杰等,2012;刘梅等,2014)。金祺等(2012)和庞杨等(2012)通过数值模式研究了污染物的分布和演变特征。

影响空气污染发生的原因有多种。一是本地污染物的排放或者局地污染物的输送达到一定量;二是需要有较合适的大气环流背景场,且气象条件对污染物的堆积有利(饶晓琴等,2008;朱彬等,2010;曹伟华等,2013;张人禾等,2014)。作为空气污染形成的条件之一,环流形势对于空气污染的产生有着重要作用。只有在合适的环流背景下,满足一定的气象条件,污染物的排放达到一定量,空气污染才会发生。因此,准确的环流分型对于研究空气污染具有重要的理论意义和应用价值(田宏伟等,2008;唐贵谦等,2010;李霞等,2012)。

环流分型主要有主观分型、客观分型及主客观结合分型。不同的分型方法各有利弊。本文利用基于 Lamb 大气环流分型法(Lamb,1950)的 Jenkin-

son 法(Jenkinson et al,1977),它是将主观的 Lamb 法通过一定的客观划分方法将环流分型客观化,是一种主客观结合的方法,在一定程度上能够克服主观分型或客观分型的缺点。由于这种方法具有明确的天气学意义并且简便易操作,在天气和气候变化研究中得到了广泛应用(贾丽伟等,2006;朱艳峰等,2007;郝立生等,2009;Jones et al,1993;Pope et al,2014)。目前,Lamb-Jenkinson 法已在软件中得以实现(Philipp et al,2014)。

武汉作为中部地区的经济、文化中心之一,其高度的城市化、快速发展的工业给城市大气环境带来了一系列问题,并且在最近几年愈演愈烈。空气污染的形成与大尺度环流特征、中小尺度局地气象条件及污染物排放密切相关,本文仅从大尺度环流特征出发,利用 Lamb-Jenkinson 法对武汉市近 10 年的地面环流形势进行分型,探讨武汉市近 10 年的主要环流型及其与污染物浓度的关系,为我国中部地区的空气污染成因研究及预测提供参考依据。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料

大气环流分型选用资料为 NCEP/NCAR 再分析资料,包括 2004—2013 年逐日 08 时(北京时,下同)的海平面气压,水平分辨率为  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。

污染物浓度资料来源于武汉市环保局,包括 2004—2013 年逐日平均的  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{10}$  浓度。根据环境空气质量标准(HJ633—2012;环境保护部,2012)规定,当  $\text{SO}_2$  的 24 h 平均浓度  $>150 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $\text{NO}_2$  的 24 h 平均浓度  $>80 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $\text{PM}_{10}$  的 24 h 平均浓度  $>150 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,即空气质量分指数  $\text{IAQI} > 100$  时,污染物浓度超标,发生污染事件,记为各污染物造成的污染事件。

1.2 方法

武汉(29°58'~31°22'N、113°41'~115°05'E)位于江汉平原东部。本文以(30°N、115°E)为中心,在 20°~40°N、100°~130°E 范围内,每隔 10 个经度和 5 个纬度取 16 个点,武汉恰好位于中心位置(图 1),利用逐日 08 时海平面气压场资料进行环流分型。

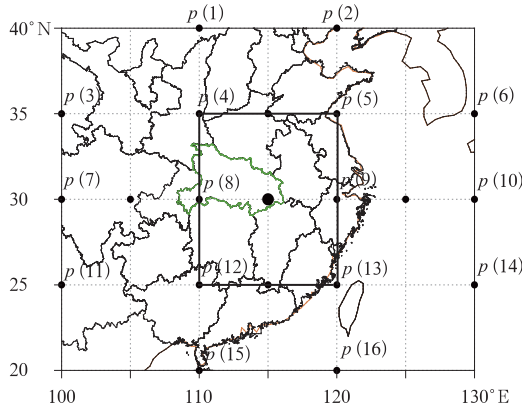


图 1 所选区域 16 个差分格点的选取  
Fig. 1 The 16 grid points used to central difference in the selected area

利用所选区域内 16 个格点的海平面气压(08 时),采用中央差分的计算方案,得到以下 6 个环流指数:

$$u = \frac{1}{2}[p(12) + p(13) - p(4) - p(5)]$$

$$v = \frac{1}{4} \frac{1}{\cos\alpha} [p(5) + 2p(9) + p(13) - p(4) - 2p(8) - p(12)]$$

$$V = \sqrt{u^2 + v^2}$$

$$\xi_u = -\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{2} \frac{\sin\alpha}{\sin\alpha_1} [p(15) + p(16) - p(8) - p(9)] - \frac{1}{2} \frac{\sin\alpha}{\sin\alpha_2} [p(8) + p(9) - p(1) - p(2)]$$

$$\xi_v = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{1}{4} \frac{1}{2\cos^2\alpha} [p(6) + 2p(10) + p(14) - p(5) - 2p(9) - p(13) + p(3) + 2p(7) + p(11) - p(4) - 2p(8) - p(12)]$$

$$\xi = \xi_u + \xi_v$$

式中,  $p(n)$  ( $n=1, 2, \dots, 16$ ) 是第  $n$  个格点上的海平面气压值。 $\alpha$ 、 $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  分别为 30°、25°和 35°(Jones et al, 1993)。  $V$  是地转风,  $u$ 、 $v$  分别为地转风的纬

向分量和经向分量,  $\xi$  是地转涡度,  $\xi_u$  是  $u$  的经向梯度,  $\xi_v$  是  $v$  的纬向梯度, 单位均为  $\text{hPa} \cdot (10^\circ)^{-1}$ 。

表 1 是根据地转风速、风向及涡度值将环流型划分为气流型、旋转型和混合型 3 大类, 总共 27 种不同的环流类型。根据这种方法得到的分型结果具有明确的物理意义, 如某一区域的环流型为 A 型, 说明该区域被反气旋控制(即高压型); 如为 C 型则被气旋控制(即低压型); N 型则表示该区域被偏北的地转风气流控制; AN 型则表示该区域被高压系统控制下的偏北地转风(即高压前部)影响; 依此类推。由于 U 型是一类模糊分型(Jones et al, 1993), 分型结果没有明确的物理意义, 因此在实际操作中, 将此类分型依据条件归类到其余类型中。

表 1 Lamb-Jenkinson 环流分型表  
Table 1 The Lamb-Jenkinson circulation types

$ \xi  \leq V$ (平直气流型)	$ \xi  \geq 2V$ (旋转型)	$V \leq  \xi  \leq 2V$ (混合型)	$V < 6$ 且 $ \xi  < 6$
北(N); 东北(NE);		CN; CNE; CE; CSE;	
东(E); 东南(SE);	反气旋(A)	CS; CSW; CW; CNW;	U 无
南(S); 西南(SW);		AN; ANE; AE; ASE;	定义型
西(W); 西北(NW)	气旋(C)	AS; ASW; AW; ANW	

2 结果分析

2.1 武汉市主要环流型特点

为了更好地研究环流型与污染物浓度的关系, 首先要了解影响武汉地区环流型的特点。本文中各环流型的出现频率是各环流型出现日数与总日数的比值, 如近 10 年冬季各环流型出现频率为各环流型在冬季出现日数与近 10 年冬季的总日数之比。图 2 是 2004—2013 年 27 种地面环流型出现的频率, 偏东风型、高压系统影响型及低压系统型是主要型。出现频率低于 5% 的占绝大多数, 大于 5% 的主要环流型有 A(29.3%)、C(14.6%)、E(10.6%)、AE(8.8%)、NE(6.0%) 和 SE(5.8%) 型, 6 种环流型出现总频率为 75.1%。可以认为它们是近 10 年影响武汉地区的主要环流型。图 3 是分析 2004—2013 年逐日 08 时海平面气压得到的出现频率从大到小的前 6 种环流型。全年影响武汉地区的主要环流型是反气旋型(高压型)、气旋型(低压型)、偏东风

型等(表 2)。A 与 C 型有明显的季节变化,A 型冬季出现频率最高,而 C 型夏季出现频率最高。秋、冬季以 A、AE、E 型最为常见,春季 A、C、E 型出现频率最高,夏季则 C、E、CSW 型出现次数最多。SW 型在春、夏季出现,秋、冬两季没有。冬半年武汉地区位于冷高压底部,主要风向为东风、东北风,夏季则受副热带高压或弱低压系统影响,以气旋型和东南风为主。Lamb-Jenkinson 法所得的环流分型结果与实际情况较为一致。

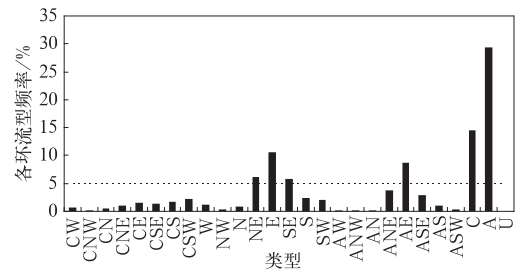


图 2 2004—2013 年武汉地区 27 种地面环流型的出现频率分布

Fig. 2 The percentage of 27 kinds of surface circulation types in Wuhan Region over 2004—2013

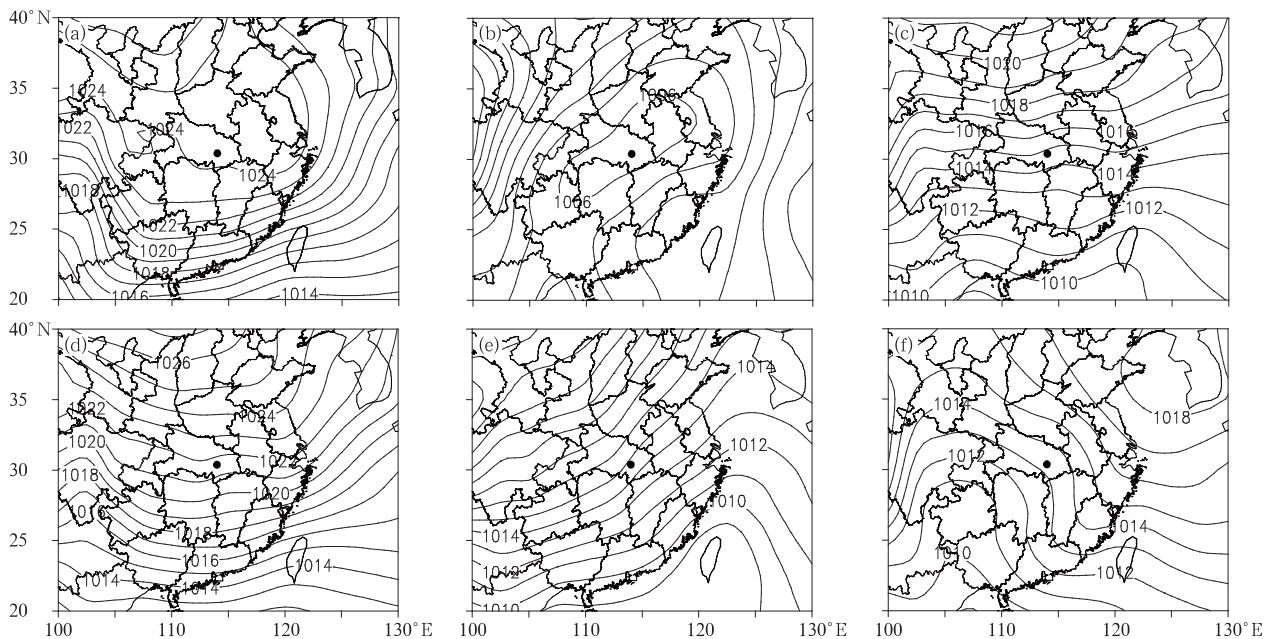


图 3 2004—2013 年武汉地区出现频率从大到小的前 6 种地面环流型对应的 08 时海平面气压场分布 (a)A 型,29.3%; (b)C 型,14.6%; (c)E 型,10.6%; (d)AE 型,8.8%; (e)NE 型,6.0%; (f)SE 型,5.8%

Fig. 3 Sea level pressure distribution of the occurrence frequency of the first 6 kinds of surface circulation types from maximum to minimum at 08:00 BT in 2004—2013

(a) Type A,29.3%; (b) Type C,14.6%; (c) Type E,10.6%; (d) Type AE,8.8%; (e) Type NE,6.0%; (f) Type SE,5.8%

表 2 2004—2013 年武汉地区年平均及各季节平均的主要地面环流型出现日数

Table 2 Days of the annual and seasonal average of major surface circulation types in Wuhan Region over 2004—2013

年平均/d	春/d	夏/d	秋/d	冬/d
A(107.0)	A(25.8)	C(35.4)	A(32.9)	A(46.3)
C(53.2)	C(12.6)	E(9.2)	AE(14.2)	AE(12.2)
E(38.6)	E(8.0)	CSW(6.2)	E(12.6)	E(8.8)
AE(32.0)	SE(7.6)	NE(5.9)	NE(9.1)	SE(4.2)
NE(22.4)	AE(4.5)	SE(5.0)	ANE(6.8)	NE(3.9)
SE(21.5)	S(3.7)	CE(3.7)	SE(4.7)	ANE(3.8)
ANE(13.0)	ASE(3.6)	SW(3.4)	C(3.1)	ASE(3.4)
ASE(10.6)	NE(3.5)	CS(3.1)	ASE(2.3)	C(2.1)
S(8.7)	SW(3.4)	S(2.8)	S(1.0)	S(1.2)

### 2.2 环流型与污染日的关系

本文使用表征空气污染状况的空气质量指数 AQI 定义空气污染日。当 AQI>100 时,当天发生空气污染,记为 1 个污染日(包括轻度、中度及以上污染);当 AQI>150 时,当天发生中度及以上空气污染,记为 1 个中度及以上污染日。由于武汉市在 2013 年才开始应用 AQI 指数进行空气污染等级发布,所以在进行污染日识别前,使用 2004—2013 年共有的污染物(PM<sub>10</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>)浓度资料进行订正,得到新的 AQI 指数再进行污染日识别。图 4 指

出,在 2009 年以前,污染日数是逐渐减少的,2012 年开始增加,2013 年显著增加。污染日的增加主要来自于中度及以上污染日的增加,2013 年尤为明显,其主要原因与武汉市近几年的城市建设和经济发展有密切关系。污染日各季节也存在明显变化,秋、冬季最多,春季次之,夏季最少。污染日的增加与秋、冬季节污染日数增多有关。冬半年的污染日数明显高于夏半年。

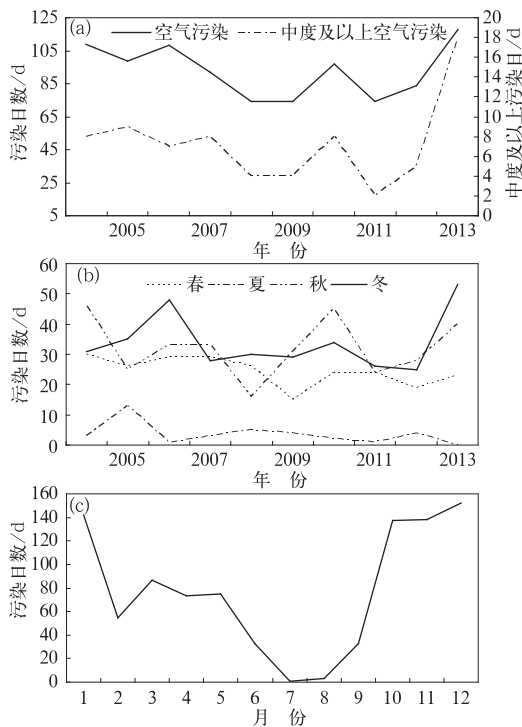


图 4 2004—2013 年污染日数与中度及以上污染日数的逐年变化(a)、季节变化(b)及其逐月变化(c)

Fig. 4 Yearly variation of the pollution days and moderate or severe pollution days (a), seasonal (b) and monthly (c) variations of pollution days during 2004—2013

由于影响各季节的主要环流型不同,且各环流型控制下出现的污染日频率分布不同(图 5a),因此,在分析各季节出现污染的主要环流型时,以各环流型出现频率与它们各自出现污染的年平均污染日数的乘积结果大小作为衡量各季节出现污染的主要环流型的标准较为合理。若以每年冬季出现一次的频率(1.2%)与武汉地区 10 年的年平均污染日数(35.4 d)的乘积(42.48)作为判断主要污染类型的下限(春、夏、秋季分别为 24.74、4.14、34.76),则秋、冬季污染的主要环流型为 A、AE 和 E 型,春季

以 A、SE 型为主,C 型在春、夏季表现为弱低压型,大气较为稳定,局地气象条件不利于污染物扩散。近 10 年,武汉地区空气污染日出现所对应的主要环流型有 A、AE、E、SE、C 及 NE 型(图 6)。而中度及以上污染日的环流型主要为 A、SE、E 及 AE 型(图略),受高压系统或偏东风影响时,高浓度污染较易出现,当受高压系统控制时,大气多处于静稳状态,合适的局地气象条件比如静风等,较为有利于污染物堆积;当受偏东风影响时,污染物从东部输入,在局地气象条件合适的情况下,受武汉地区周边地形影响,三面环山,污染物不易扩散,进而造成污染。

为了更好地研究环流型与污染日之间的关系,定义比值  $P_1/P_2$  分析不同环流型对空气污染的影响(图 6), $P_1$  和  $P_2$  分别为某环流型下污染日数所占比例和所有环流型下污染日数所占比例。如果  $P_1/P_2 > 1$ ,表示某环流型出现时,较易出现污染;而当  $P_1/P_2 < 1$  时,不易出现污染。当武汉地区环流型为 A、SE、E、AE、C 及 NE 型时,较易造成污染物的迅速堆积进而达到污染,C 型表现为弱低压。在环流型为 A、SE、E 及 AE 型时,中度及以上空气污染较易出现。因此,影响武汉地区空气污染形成的主要环流型有 A、AE、E、SE、NE 及 C 型,各季节及各月份都有差异。

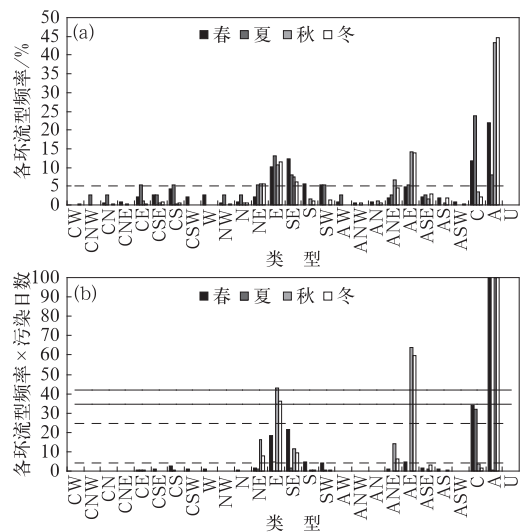


图 5 2004—2013 年各季节污染日的各环流型频率分布(a)和各环流型出现频率与污染日数乘积分布(b)

Fig. 5 The percentage of circulation types (a) and multiplier between percentage of circulation types and air pollution days (b) in different seasons during 2004—2013

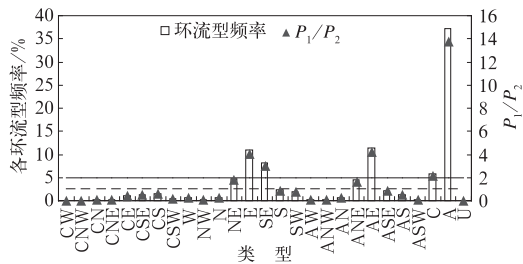


图 6 2004—2013 年空气污染日的各环流型出现频率分布及其比值  $P_1/P_2$  分布

Fig. 6 The percentage of circulation types and  $P_1/P_2$  of air pollution days in 2004—2013

### 2.3 环流型与污染物浓度的关系

环流型对各种污染物浓度的影响程度也有差异。定义各污染物造成的污染事件:当  $\text{SO}_2$  的 24 h 平均浓度  $>150 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $\text{NO}_2$  的 24 h 平均浓度  $>80 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $\text{PM}_{10}$  的 24 h 平均浓度  $>150 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 即空气质量分指数  $IAQI > 100$  时, 记为各污染物发生污染事件(环境保护部, 2012)。

环流型对污染物浓度的影响在各个季节和逐个月份有所不同, 由于冬季发生污染事件的频率较高, 这里以冬季为例探讨环流型对各污染物浓度的影

响。用比值  $R_1/R_2$  分析不同环流型对不同污染物的影响,  $R_1$  和  $R_2$  分别为某环流型下各污染物造成的污染事件所占比例和所有环流型下各污染物造成的污染事件所占比例。如果  $R_1/R_2 > 1$  表示某环流型出现时, 该污染物较易造成污染事件; 而当  $R_1/R_2 < 1$  时, 不易造成污染。表 3 是 2004—2013 年冬季 902 d 中出现日数超过 10 d 的环流型、各污染物造成污染事件的频率和  $R_1/R_2$  分布。只有 A、AE、ANE、ASE、AS、E、NE、SE、S 及 C 型出现超过 10 d, 而发生频率超过 5% 的只有 A、AE 和 E 型。冬季出现  $\text{NO}_2$  和  $\text{PM}_{10}$  污染较多, 影响  $\text{NO}_2$  和  $\text{PM}_{10}$  浓度超标的环流型较为一致, 主要有 A、AE、E、SE、ANE 及 NE 型。而  $\text{SO}_2$  污染较少, 仅有 A 型下的污染事件超过 10 d 且  $R_1/R_2 > 1$ , 虽然 AE、E、ANE、SW、W 型的比值  $R_1/R_2 > 1$ , 但发生污染事件次数均在 5 d 以下。各污染物造成的污染事件基本能与主要环流型有很好的对应关系, 但是环流型对各污染物的影响程度不同。其他季节及各月份也有类似结论。污染事件发生频率并不能与  $R_1/R_2$  值一一对应, 可能是该环流型出现几率较小, 一旦出现, 则更容易造成污染事件的发生, 也可能与样本大小有关, 需要进一步研究。

表 3 2004—2013 年冬季的主要环流型及各环流型下各污染物造成污染事件的频率和  $R_1/R_2$  分布

Table 3 The  $R_1/R_2$  and the percentage of main circulation types and pollution days by different pollutants in winter in 2004—2013

环流型	环流型出现日数/d	环流型出现频率/%	$\text{SO}_2$ 发生污染事件日数/d	$\text{SO}_2$ 发生污染事件频率/%	$\text{SO}_2$ 污染的比值 $R_1/R_2$	$\text{NO}_2$ 发生污染事件日数/d	$\text{NO}_2$ 发生污染事件频率/%	$\text{NO}_2$ 污染的比值 $R_1/R_2$	$\text{PM}_{10}$ 发生污染事件日数/d	$\text{PM}_{10}$ 发生污染事件频率/%	$\text{PM}_{10}$ 污染的比值 $R_1/R_2$
NE	39	4.3	0	0.0	0.0	9	23.1	<b>1.2</b>	17	43.6	<b>1.4</b>
E	88	9.8	3	3.4	<b>3.9</b>	16	18.2	<b>2.1</b>	33	37.5	<b>2.7</b>
SE	42	4.7	0	0.0	0.0	10	23.8	<b>1.3</b>	20	47.6	<b>1.6</b>
S	12	1.3	0	0.0	0.0	4	33.3	0.5	5	41.7	0.4
ANE	38	4.2	1	2.6	<b>1.3</b>	9	23.7	<b>1.2</b>	17	44.7	<b>1.4</b>
AE	122	13.5	4	3.3	<b>5.1</b>	23	18.9	<b>3.0</b>	38	31.1	<b>3.1</b>
ASE	34	3.8	0	0.0	0.0	5	14.7	0.6	8	23.5	0.6
AS	10	1.1	0	0.0	0.0	3	30.0	0.4	6	60.0	0.5
C	21	2.3	0	0.0	0.0	6	28.6	0.8	7	33.3	0.6
A	463	51.3	11	2.4	<b>14.1</b>	109	23.5	<b>14.1</b>	166	35.9	<b>13.5</b>

注: 各污染物发生污染事件频率为各环流型下的污染事件日数与该环流型出现次数的比值, 加粗数字为  $R_1/R_2 > 1$  的项。

### 2.4 个例分析

以 2013 年 11 月为例,  $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$  的变化规律较为一致, 造成污染事件主要污染物为  $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{NO}_2$ (图 7)。在 1—8 日, 污染物所对应的  $IAQI$  呈明显上升趋势, 此时控制武汉地区的环流型以较易

造成污染物堆积的 E、A 型为主, 即受偏东风或高压系统控制。在 8 日之后环流形势发生变化, 相继出现 S、CSE 型, 污染物扩散迅速,  $IAQI$  显著下降。10 日之后又重新受 AE、A 型控制, 污染物浓度上升。但是在 20—22 日, 在不利于污染物堆积的环流型控制下,  $\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$  的浓度呈下降趋势, 而  $\text{PM}_{10}$  浓度持

续上升并达到峰值。2013 年 11 月出现 A 型频率为 46.7%,  $PM_{10}$ 、 $NO_2$ 、 $SO_2$  造成污染事件的频率分别为 50.0%、46.7% 和 0.0%, 两者出现的频率对应较好, 但是出现 A 型的日期并不能完全对应污染事件出现的日期。整个 IAQI 变化过程与环流型变化有很好的对应关系, 但是较易造成污染物堆积的环流型与不利于污染物堆积的环流型不能完全对应 IAQI 的变化。因此, 污染物浓度的变化不仅仅与环流形势有关, 气象条件与排放量的变化也是重要因素。

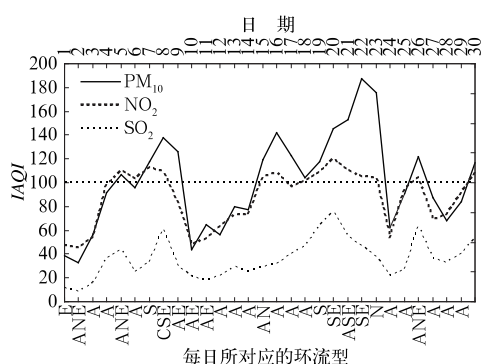


图 7 2013 年 11 月武汉市环流型及  $PM_{10}$ 、 $NO_2$ 、 $SO_2$  对应的 IAQI 变化

Fig. 7 Circulation types and IAQI variations of  $PM_{10}$ ,  $NO_2$  and  $SO_2$  in Wuhan in November 2013

### 3 结论与讨论

本文利用 Lamb-Jenkinson 环流分型法分析了 2004—2013 年武汉市的地面环流形势及其与污染物浓度之间的关系, 得到以下结论:

(1) 影响武汉地区的主要地面环流型有 6 种, 依次为反气旋型(A)、气旋型(C)、偏东风型(E)、高压系统控制的偏东风型(AE)、偏东北风型(NE)及东南风型(SE)。各环流型的出现频率具有明显的季节变化, 秋、冬季以 A、AE、E 型最常出现, 春季 A、C、E 型出现频率最高, 夏季则 C、E、CSW 型出现次数最多。SW 型在春、夏季出现, 秋冬两季则没有。

(2) 污染日出现的主要地面环流型有 A、AE、E、SE、C 及 NE 型, 秋、冬季在 A、AE 型控制下较易发生空气污染; 春季在 A、SE 型下, 较易发生空气污染; C 型污染日主要出现春夏季, 表现为弱低压型。而中度及以上污染日的环流型主要为 A、SE、E 及

AE 型, 受高压系统或偏东风影响时, 污染较易出现。

(3) 环流型对各种污染物浓度的影响程度也有差异。以冬季为例, 出现  $NO_2$  和  $PM_{10}$  污染较多, 影响  $NO_2$  和  $PM_{10}$  浓度超标的环流型较为一致, 主要有 A、AE、E、SE、ANE 及 NE 型, 而  $SO_2$  污染日数较少, 仅有 A 型下的污染事件超过 10 d。各季节及各月份的各污染物造成的污染事件与主要环流型有较好的对应关系, 但是环流型对各污染物的影响程度不同。在特定环流型控制下, 污染事件的发生频率并不能与发生污染事件的难易程度一一对应, 可能与该环流型出现几率较小有关, 也可能与样本大小有关, 需要进一步深入研究。

本文分析了污染日出现的地面环流型特点和各环流型下污染物浓度的变化特征。更进一步探讨环流型的转变特点, 有利于更好地揭示环流型对污染物浓度的影响。而污染物浓度的变化和污染事件的产生不仅与大尺度环流形势有关, 中小尺度局地气象条件与污染物排放量的变化也是重要影响因素。因此, 在今后的研究中将进一步利用中尺度数值模式探讨三者之间的关系。

### 参考文献

- 曹伟华, 梁旭东, 李青春. 2013. 北京一次持续性雾霾过程的阶段性特征及影响因子分析. 气象学报, 71(5): 940-951.
- 丁一汇, 李巧萍, 柳艳菊, 等. 2009. 空气污染与气候变化. 气象, 35(3): 3-14.
- 高歌. 2008. 1961—2005 年中国霾日气候特征及变化分析. 地理学报, 63(7): 761-768.
- 郝立生, 李维京. 2009. 华北区域环流型与河北气候的关系. 大气科学学报, 32(5): 618-626.
- 胡亚旦, 周自江. 2009. 中国霾天气的气候特征分析. 气象, 35(7): 73-78.
- 贾丽伟, 李维京, 陈德亮, 等. 2006. 东北地区月平均大气环流型与哈尔滨气候关系的初步研究. 气象学报, 64(2): 236-245.
- 金祺, 银燕, 谭稳. 2012. 黄山地区复杂地形下污染气体输送过程的数值模拟. 大气科学学报, 35(6): 680-688.
- 李文杰, 张时煌, 高庆先, 等. 2012. 京津石三市空气污染指数(API)的时空分布特征及其与气象要素的关系. 资源科学, 34(8): 1392-1400.
- 李霞, 杨静, 麻军, 等. 2012. 乌鲁木齐重污染日的天气分型和边界层结构特征研究. 高原气象, 31(5): 1414-1423.
- 李鹏飞, 张明军, 王圣杰, 等. 2012. 中国空气污染指数变化特征及影响因素分析. 环境科学, 33(6): 1936-1943.
- 刘梅, 严文莲, 张备, 等. 2014. 2013 年 1 月江苏雾霾天气持续和增强机制分析. 气象, 40(7): 835-843.
- 刘晓慧, 朱彬, 王红磊, 等. 2013. 长江三角洲地区 1980—2009 年灰霾

- 分布特征及影响因子. 中国环境科学, 33(11):1929-1936.
- 庞杨, 韩志伟, 朱彬, 等. 2013. 利用 WRF-Chem 模拟研究京津冀地区夏季大气污染物的分布和演变. 大气科学学报, 36(6):674-682.
- 饶晓琴, 李峰, 周宁芳, 等. 2008. 我国中东部一次大范围霾天气的分析. 气象, 34(6):89-96.
- 孙彧, 马振峰, 牛涛, 等. 2013. 最近 40 年中国雾日数和霾日数的气候变化特征. 气候与环境研究, 18(3):397-406.
- 唐贵谦, 李昕, 王效科, 等. 2010. 天气型对北京地区近地面臭氧的影响. 环境科学, 31(3):573-578.
- 田宏伟, 谈建国, 杜子璇. 2008. 用 TSI 天气分型方法分析上海环境空气质量. 气象与环境科学, 31(1):51-55.
- 魏玉香, 童尧青, 银燕, 等. 2009. 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. 大气科学学报, 32(3):451-457.
- 吴兑, 吴晓京, 李菲, 等. 2010. 1951—2005 年中国大陆霾的时空变化. 气象学报, 68(5):680-688.
- 伍红雨, 杜尧东, 何健, 等. 2011. 华南霾日和雾日的气候特征及变化. 气象, 37(5):607-614.
- 张人禾, 李强, 张若楠. 2014. 2013 年 1 月中国东部持续性强雾霾天气产生的气象条件分析. 中国科学 地球科学, 44(1):27-36.
- 张艳, 余琦, 伏晴艳, 等. 2010. 长江三角洲区域输送对上海市空气质量影响的特征分析. 中国环境科学, 30(7):914-923.
- 环境保护部. 2012. 环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行). HJ633-2012.
- 中国气象局. 2010. 霾的观测和预报等级. QX/T113-2010. 北京:气象出版社.
- 朱彬, 苏继锋, 韩志伟, 等. 2010. 秸秆焚烧导致南京及周边地区一次严重空气污染过程的分析. 中国环境科学, 30(5):585-592.
- 朱艳峰, 陈德亮, 李维京, 等. 2007. Lamb-Jenkinson 环流客观分型方法及其在中国的应用. 南京气象学院学报, 30(3):289-297.
- Jenkinson A F, Collison F P. 1977. An initial climatology of gales over the North Sea. Synoptic Climatology Branch Memorandum, No 62. Meteorological Office, Bracknell.
- Jones P D, Hulme M, Briffa K R. 1993. A comparison of Lamb circulation types with an objective classification scheme. Inter J Clim, 13(6):655-663.
- Lamb H H. 1950. Types and spells of weather around the year in the British Isles. Quart J Roy Meteor Soc, 76:393-438.
- Philipp A, Beck C, Huth R, et al. 2014. Development and comparison of circulation type classifications using the COST 733 dataset and software. Inter J Clim. DOI: 10.1002/joc.3920.
- Pope R J, Savage N H, Chipperfield M P, et al. 2014. The influence of synoptic weather regimes on UK air quality analysis of satellite column NO<sub>2</sub>. Atmos Sci Lett, 15(3):211-217.