

武汉地区夏季和秋冬季大气污染的天气概念模型

唐羽 覃军 袁正旋¹

(中国地质大学 环境学院大气科学系, 湖北 武汉 430074)

【摘要】: 利用 2013~2019 年武汉市生态环境局监测数据、L 波段雷达探空资料、NCEP/NCAR 逐日再分析资料, 对夏季和秋冬季武汉地区污染日的大气污染特征、边界层结构、环流形势、物理量场进行研究, 建立了武汉地区大气污染的天气概念模型。主要结论如下: (1) 武汉市空气质量具有季节性变化特征, 大气污染程度四季分布表现为冬>秋>春>夏。夏季首要污染物是臭氧, 冬季首要污染物是 PM_{2.5}。(2) 比较挑选出的夏季清洁日和污染日的气象要素特征, 污染日逆温的平均强度约为清洁日的一倍, 逆温底高一般在 600m 以下, 空气质量一般为轻度-中度污染; 静风频率 (37.1%) 明显高于清洁日的静风频率 (2.9%); 污染日平均风速小 (0.8m/s), 边界层内相对湿度较低。同样比较秋冬季两类天气的气象要素特征, 污染日逆温底高低、厚度小, 不及清洁日的一半, 不利于污染物的扩散, 易出现重度污染天气。静风频率 (20%) 高于清洁日的静风频率 (7.5%), 风速小 (1.6m/s), 污染日边界层内呈明显上干下湿的格局。(3) 建立了夏季大气污染的天气概念模型, 污染日副高偏弱位置偏东, 长江流域易少雨干旱; 地面我国东部大范围地区处于均压场中, 武汉地区为偏东北异常小风, 不利于大气污染物的扩散。(4) 建立了秋冬季大气污染的天气概念模型, 长江流域环流平直少波动, 配合地面弱低压的天气形势和较强的逆温使得大气污染物聚集在近地面。蒙古冷高压强度偏弱, 使得入侵我国的冷空气强度偏弱; 武汉地区为偏北小风, 对雾霾的移除和稀释扩散作用差。该研究结论可供大气污染预测预警研究和环境管理部门大气污染的联防联控参考。

【关键词】: 武汉市 大气污染 环流形势 天气概念模型

【中图分类号】: X513 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227 (2021)09-2186-19

武汉市人口约 1120 万人, 是中国特大城市之一。武汉位于中国中部的鄂东北大别山和鄂东南幕阜山之间, 三面环山的特殊地形, 容易造成武汉市局地流场的特点^[1]。当大中尺度天气系统较弱时, 局地流场起主导作用, 污染物难以消散, 常造成严重的区域性空气污染。

许多学者对污染天气的气候特征、形成条件、维持机制进行了大量的研究。唐贵谦等^[2]发现北京地区臭氧光化学污染呈现出区域一致性, 并与天气型有较好相关。北京处于低压前部 (主要是蒙古气旋) 和高压前部的比例分别为 42% 和 20%, 分别是造成臭氧浓度高值和低值的主要背景场。严晓瑜等^[3]选择了 6 个具有不同气候背景的代表城市, 发现影响臭氧变化最主要的气象因素均是气温和日照时数, 其次是相对湿度, 再次是风速。城市臭氧与气象要素相关性普遍较郊区好。孙燕等^[4]对 2013 年 8 月南京亚运会期间的轻度污染事件进行研究, 污染期间气温异常偏高、降水量偏少、日照偏多。分析地面要素发现能见度与相对湿度成反比, 并与风速正相关, 且逆温层会使污染物被阻滞。利用 Hysplit-4 模式反演污染物的扩散轨迹, 发现外源输送是此次过程污染物累积的重要原因。

严重雾霾天主要出现在人口密集的城市, 且雾霾日数的季节分布特征基本是冬季多、夏季少^[5~7]。严重雾霾天气给工农业生

作者简介: 唐羽 (1997~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境. E-mail: 3331039681@qq.com

覃军, E-mail: qinjun@cug.edu.cn

基金项目: 武汉城市圈大气复合污染成因与输送规律 (2017YFC0212603)

产、交通运输、居民生活等带来严重影响^[8,9]。灰霾不仅会导致能见度降低, 研究表明其中的颗粒物会影响人们的心理健康, 还可能导致人体心肺的功能障碍等疾病^[10,11]。雾霾天气是由气象要素和 PM_{2.5} 浓度等环境要素共同作用形成的。高浓度颗粒物对大气消光有显著影响, 导致能见度下降和霾天气持续^[12~14]。谭成好等^[15]基于 1962~2011 年近 50 年的霾日观测数据, 得出了人为污染物排放增加和东亚季风减弱二者共同导致了华中地区霾日增加的结论。李艳春等^[16]利用银川气象站的气象资料和探空资料, 分析了不同季节的风速、逆温层厚度强度和混合层高度的差异, 建立了银川市雾霾天气的概念模型。王静等^[17]发现静稳天气使得上海市出现区域性污染, 重雾霾期间早晚污染物的浓度较高, 主要是由于低层逆温所致; 西北方向污染物的输送影响了上海市的空气质量状况, 下沉运动使得大气层结稳定, 局地地区受弱高压控制, 地面风速小, 不利于污染物扩散。张人禾等^[18]分析了 2013 年 1 月中国东部的气候异常特征和天气演变过程, 结果表明东亚冬季风偏弱, 对流层中低层出现异常南风, 地表风速减弱且有逆温层的存在。根据多元线性回归分析结果发现动力因子和热力因子对此次雾霾天气过程具有大致相同的作用。很多研究分析发现武汉地区天气与边界层气象要素和天气形势有关。污染期间边界层内干暖, 风速小。气团主要来自中国东海、蒙古和我国西部地区, 气团来源对武汉市的空气质量起着重要作用^[19~23]。Han 等^[24]分析发现高层污染物的传输、污染物的后期积累和气溶胶的二次形成均是重要的雾霾天气形成机理。

基于上述研究背景, 本文通过对环境空气质量检测资料、L 波段雷达探空资料、再分析资料的分析, 分析 2013~2019 年武汉市的气象因子、天气环流特征、物理量场, 得到武汉市大气污染的大尺度天气概念模型, 这是对近年来武汉市污染日天气形势配置的总结, 为未来武汉地区空气污染天气的预报预警、治理防控提供了依据。

1 资料与方法

1.1 资料

本文主要关注武汉地区夏季和秋冬季污染日的天气形势。使用的资料有: (1) 武汉市生态环境局 (<http://hbj.wuhan.gov.cn/>) 公布的自 2013~2019 年武汉市城区逐日 AQI 指数, 包括 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、CO、NO₂、O₃、空气质量指数这 7 项空气质量监测数据, 我国的空气质量标准为: 优—0~50、良—50~100、轻度污染—100~150、中度污染—150~200、重度污染—200~300、严重污染—大于 300 及以上; (2) 2013~2019 年 NCEP/NCAR 逐日再分析资料, 所选变量包括各层位势高度、风场、温度等, 其中 2m 气温、10m 风速的水平分辨率为 1.9° × 1.9°, 其余变量分辨率均为 2.5° × 2.5°; (3) 武汉市气象局提供的 L 波段雷达探空资料, 观测时段为 2013~2018 年, 每日 02、07、19h (均为北京时间)。研究表明无论是清洁日还是污染日, 一般而言一天中 07 与 19h 边界层结构无明显差异, 因此本文主要选取 07h 的探空资料以研究当天的边界层结构。

1.2 方法

(1) 利用武汉市城区逐日 AQI 指数, 挑选出夏季 (6 月至 8 月) 和秋冬季 (11 月至次年 2 月, 一般而言武汉地区 11 月就会出现严重污染天气, 故本文中的秋冬季定义为晚秋 11 月和冬季 12~2 月, 为方便起见, 简称秋冬季) 的清洁日和污染日, 根据本地实际天气情况进行筛选: 夏季清洁日 AQI ≤ 100, 夏季污染日 AQI > 100, 秋冬季清洁日 AQI ≤ 100, 秋冬季污染日 AQI > 200。(2) 利用 L 波段雷达探空资料绘制气象要素的探空曲线以分析污染日的边界层结构, 利用逐日再分析资料的环流场分别针对不同季节武汉市污染日和清洁日做合成分析 (计算距平时气候平均态为 2013~2019 年的夏季、秋冬季气象要素平均场), 目的是试图揭示有利于污染天气形成和持续维持的大尺度环流形势, 最终建立武汉市的大气污染的天气概念模型。

2 结果与分析

2.1 天气过程概述

2.1.1 武汉市空气质量季节性变化特征

根据武汉市空气质量指数数据,可计算六种污染物($PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、二氧化硫、一氧化碳、二氧化氮和臭氧)的IAQI(空气质量分指数,计算方法遵循《HJ633-2012 环境空气质量指数(AQI)技术规定》),得到污染日的首要污染物类型(图1)。通过比较武汉市四季空气质量等级和首要污染物类型可知,武汉市大气污染具有明显的季节分布特征^[25]。本文利用2013~2019年武汉市逐日空气质量指数数据统计分析表明,春季以良(60.7%)和轻度污染(25.3%)天气为主,首要污染物是 $PM_{2.5}$ (47.0%)和 PM_{10} (22.2%),有时会出现臭氧(20.0%)污染;夏季以优(20.8%)、良(55.6%)、轻度污染(21.4%)天气为主,首要污染物是臭氧(79.8%)且占比很高;秋季以良(49.1%)、轻度污染(28.6%)天气为主,首要污染物是 $PM_{2.5}$ (46.5%)和臭氧(26.9%);冬季以良(28.9%)、轻度污染(32.9%)天气为主,其中中度污染(16.1%)和重度污染(15.1%)天气占比明显比其他季节高,首要污染物是 $PM_{2.5}$ (89.3%)且占比很高。总体来看,武汉市大气污染程度季节分布表现为冬>秋>春>夏。春季、秋季、冬季的首要污染物均是 $PM_{2.5}$,夏季的首要污染物是臭氧,其中夏季、冬季分别是臭氧、 $PM_{2.5}$ 污染最为严重,本文接下来将对武汉市夏季和秋冬季污染天气进行研究。

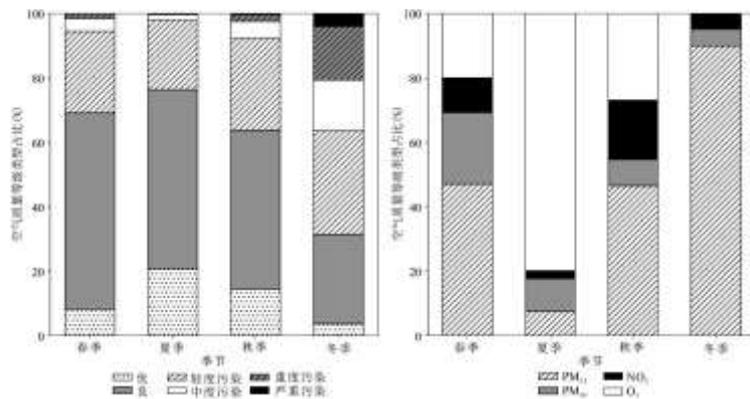


图1 武汉市2013~2019年四季空气质量等级和首要污染物类型占比

2.1.2 武汉市夏季和秋冬季污染日数年变化

图2给出了2013~2019年武汉市夏季污染和秋冬季重度以上污染日数的年变化,武汉市秋冬季重度以上污染总日数为115d,年平均为17d,2013年日数最多,为53d,2019年日数最少,为2d。从连续7年的日数年际变化来看,重度以上污染日数呈明显逐年下降的趋势。2013~2019年武汉市夏季污染总日数为155d,年平均为23d,2019年日数最多,为35d,2017年日数最少,为8d。从夏季污染日数年际变化图来看,2014~2017年呈下降趋势,之后明显上升,年变化呈波动性变化。夏季污染日中AQI>150的日数为16d,占总夏季污染日数的10.3%,污染日主要以轻度污染为主。近年来,武汉市 $PM_{2.5}$ 污染有所减轻,而臭氧污染有所加重,故开展夏季空气污染的气象条件研究是极为重要的。

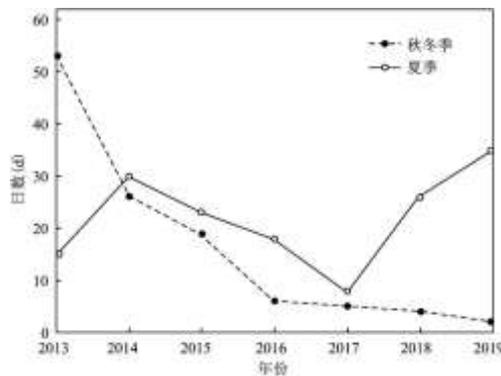


图2 2013~2019年武汉市夏季(实线)污染和秋冬季(虚线)重度以上污染日数的年变化

2.2 边界层结构分析

2.2.1 夏季研究时段及空气质量

利用武汉市生态环境局提供的2013年6月~2018年8月逐日AQI资料,挑选出夏季空气质量为优的清洁日(平均AQI为37.1)共35d。污染日(平均AQI为151.1,首要污染物为O₃)共35d,以轻度和中度污染为主,其中有2天达重度污染,未出现严重污染天气,详情见表1。

表1 35个夏季清洁日和35个夏季污染日的日期和AQI指数

清洁日日期	AQI 指数	污染日日期	AQI 指数
2013-06-08	43	2013-06-03	146
2013-06-25	44	2013-06-22	136
2013-07-08	41	2013-08-13	156
2013-07-09	39	2013-08-30	119
2013-08-23	38	2014-06-06	171
2014-06-01	47	2014-06-07	159
2014-06-26	48	2014-06-08	175
2014-07-05	32	2014-06-09	200
2014-07-16	34	2014-06-12	268
2014-08-08	44	2014-06-13	208
2014-08-13	46	2014-07-27	187
2015-06-17	42	2014-08-04	135
2015-06-30	33	2015-06-19	130
2015-07-16	40	2015-07-21	141
2015-07-26	42	2015-07-25	130
2015-08-11	40	2015-08-26	140
2015-08-19	37	2015-08-27	159
2016-06-01	33	2015-08-29	146
2016-06-02	33	2015-08-30	135
2016-07-01	29	2016-06-10	114
2016-07-06	35	2016-07-12	128

2016-08-04	37	2016-08-01	136
2016-08-26	27	2016-08-17	138
2017-06-10	38	2016-08-18	138
2017-06-30	33	2017-06-03	120
2017-07-01	32	2017-06-07	120
2017-07-09	34	2017-07-25	125
2017-08-12	30	2018-06-15	148
2017-08-30	30	2018-06-16	196
2018-06-20	40	2018-06-17	178
2018-06-22	42	2018-06-18	155
2018-07-06	33	2018-07-24	111
2018-07-07	24	2018-08-09	135
2018-08-13	42	2018-08-11	160
2018-08-17	38	2018-08-12	144

2.2.2 夏季地面气象要素

表 2 统计了武汉市夏季清洁日与污染日的地面基本气象要素及逆温特征。观察可知，清洁日和污染日的平均气温、气压差别不大，主要的差异表现为：1) 污染日相对湿度(83.1%) 小于清洁日相对湿度(91.5%) ;2) 污染日的静风频率(37.1%) 明显高于清洁日；污染日的主导风向频率(北风，28.6%) 大于清洁日的主导风向频率(北北东风，17.1%) ;污染日的次主导风向是东北风和北风，频率均为 11.4%，清洁日的次主导风向是西北偏北风，频率为 14.3%;3) 污染日的平均风速(0.8m/s) 明显小于清洁日平均风速(2.5m/s) ;4) 污染日近地面出现悬浮逆温和接地逆温，逆温出现频率为 42.9%;清洁日近地面只有悬浮逆温，频率为 22.5%。污染日逆温出现频率高于清洁日；5) 污染日逆温的平均强度约为清洁日的 2 倍；污染日的逆温平均厚度约为清洁日的 1/2。

2.2.3 夏季探空资料分析

图 3 分别是武汉市 2013~2018 年夏季 35 个清洁日、污染日的平均廓线图。可以看出，夏季清洁日地面主导风速为北风，300~2100m 为稳定的东北风，2100m 至边界层顶为稳定的西南风；地面平均风速为 2.6m/s，地面至 500m 左右高度风速迅速增大，有利于污染物的移除和扩散，600m 高度以上风速变化不大；地面平均相对湿度为 92%，整层湿度变化不大。夏季逆温较浅薄，以悬浮逆温为主，底高一般在 600m 以下，逆温强度不大，空气质量一般为轻度-中度污染。污染期间多为晴朗天气，地面和 2000m 以上的边界层高层为东北风控制，而在 2000m 以下主要为偏东风控制，说明偏东小风在污染形成过程中的作用不可忽视，这一点与武汉市秋冬季污染日情形相似；地面平均风速小于清洁日，地面至 300m 高度风速由 0.8m/s 增大至 3.1m/s，300m 以上平均风速变化不大；污染日地面平均相对湿度最大，为 83%，地面至 300m 高度平均湿度减小至 74%，300m 至 1200m 高度湿度稳定在 72% 左右，之后湿度随高度逐渐减小，总体来看边界层内湿度较清洁日偏低。

2.2.4 秋冬季研究时段及空气质量

利用武汉市生态环境局提供的 2013 年 1 月~2018 年 12 月逐日 AQI 资料, 挑选出秋冬季空气质量优良的清洁日(平均 AQI 为 52.1)共 40d。重度及以上污染日(平均 AQI 为 299.9, 首要污染物为 PM_{2.5})共 40d, 其中严重污染日共 22d, 详情见表 3。

表 2 武汉市夏季清洁日与污染日 07h 地面基本气象要素统计

项目	平均气温 (°C)	气压 (hPa)	相对湿度 (%)	主导风向	平均风速 (m/s)	逆温特征			能见度 (km)
						强度 (°C/100m)	底高(m)	厚度(m)	
清洁日	22.6	1001.5	85	NE	3	/	/	/	12
	25.3	995.5	98	WNN	2	/	/	/	8
	29.5	1001.4	66	SSW	5	/	/	/	15
	30.1	1001	66	S	5	/	/	/	18
	27.6	994.4	95	NNE	5	/	/	/	12
	24.4	999.4	98	N	3	/	/	/	10
	22.2	1001	98	NNE	3	/	/	/	8
	22.4	1000	97	C	0	/	/	/	11
	25.7	1003.1	94	SSE	2	/	/	/	12
	22.7	1003	95	N	1	0.4	637	572	10
	20.2	1003	99	SSE	3	/	/	/	7
	21.5	998.8	99	N	3	/	/	/	6
	25	998	89	N	1	0.4	443	256	15
	21.6	998	98	WNN	2	0.7	526	200	10
	26.9	1001.3	95	SE	1	/	/	/	8
	24.6	1004.8	90	N	3	/	/	/	15
	22	1004.7	97	NNE	2	0.7	380	263	8
	22.5	1000	98	NNE	3	0.4	602	515	8
	20.8	1003.6	96	N	2	0.2	1318	432	12
	25	998.2	98	S	3	/	/	/	6
23.3	1006.6	99	NE	3	/	/	/	5	

	24.8	1005.2	98	NE	1	/	/	/	6
	23.5	1007.3	82	N	3	0.8	774	173	11
	26.6	1000.5	85	SSW	5	/	/	/	10
	23.2	1001.5	96	ESE	3	/	/	/	8
	23.5	999.8	98	SSW	2	/	/	/	6
	27.8	999.6	81	SSE	2	/	/	/	12
	26	1001.3	96	SSE	1	/	/	/	12
	21	1011.4	86	N	2	0.7	433	475	12
	24.2	1001.5	87	N	4	/	/	/	11
	23.7	1000.8	98	ENE	1	/	/	/	6
	26	998.3	89	WNN	4	/	/	/	10
	25.9	999.6	86	N	2	0.5	710	214	12
	27.9	996.8	86	WNN	1	/	/	/	10
	26.2	1000.5	85	WNN	3	/	/	/	10
平均	24.46	1001.18	91.51	C, 频率 2.86%, 频率 28.57%	2.54	悬浮逆温 0.53	悬浮逆温 647.00	悬浮逆温 344.44	10.06
污染 日	22.8	1005.2	92	C	0	0.9	142	129	8
	27.5	1002.8	84	E	1	/	/	/	12
	30.2	1003.3	89	C	0	/	/	/	15
	24.7	1003.3	81	NNE	1	1.9	127	197	12
	24.5	1001.5	91	NNE	1	2	0	121	10
	26.6	1001.7	72	C	0	1.3	211	98	8
	25.4	1001.3	73	NNE	2	0.7	1838	171	11
	24.6	1000.3	91	NE	1	0.9	37	172	8
	25.6	1004.2	78	NNE	2	0.5	396	359	10
	23.5	1004.7	85	NNE	1	0.7	0	185	11
	26.5	1007.8	87	C	0	/	/	/	8
	30.2	1000.6	80	C	0	/	/	/	12

	23.1	1004.1	99	SE	1	/	/	/	8
--	------	--------	----	----	---	---	---	---	---

续表 2

项目	平均气温(°C)	气压(hPa)	相对湿度(%)	主导风向	平均风速(m/s)	逆温特征			能见度(km)
						强度(°C/100m)	底高(m)	厚度(m)	
污 染 日	25.8	1002.4	92	NNE	1	/	/	/	8
	26.2	1000.1	98	C	0	2.5	945	110	13
	23.5	1008.2	88	NE	1	1.1	0	106	10
	23.6	1007.2	96	NE	1	1.4	0	171	8
	24.3	1005.7	91	C	0	/	/	/	10
	24.4	1006.4	98	C	0	/	/	/	10
	24.6	1004	80	SE	1	/	/	/	15
	29.2	997.8	80	C	0	/	/	/	12
	30.5	1002.5	72	ENE	2	/	/	/	15
	29	998.7	86	NE	1	1.3	294	97	10
	30.3	997.6	78	ENE	1	/	/	/	8
	28	1000.6	78	E	1	/	/	/	12
	21.7	1009.7	85	S	1	0.7	758	222	12
	31.6	1001.8	72	C	0	1.1	0	121	12
	24.3	1001.7	66	E	1	1	0	325	12
	27.8	1003.1	63	ESE	2	/	/	/	10
	27.2	1001.4	74	SE	2	/	/	/	8
	27.6	998	71	C	0	/	/	/	10
	29.9	1001	87	W	2	/	/	/	10
	29.7	1002.6	88	C	0	/	/	/	11
29.5	999.9	80	E	1	/	/	/	11	
30	998	82	C	0	/	/	/	12	

平均	26.68	1002.55	83.06	C, 频率 37.14%NNE, 频率 17.14%	0.80	接地逆温 1.22 悬 浮逆温 1.19	悬浮逆温 527.56	接地逆温 171.50 悬浮逆温 172.78	10.63
----	-------	---------	-------	-------------------------------	------	-------------------------	----------------	----------------------------	-------

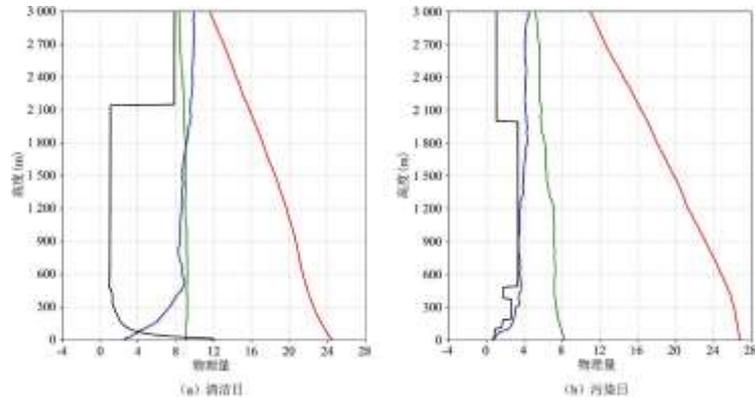


图3 武汉市2013~2018年夏季35个清洁日(a)、污染日(b)各气象要素随高度变化的平均廓线

注：温度(红色线，单位：℃)、相对湿度(绿色线，单位：%)、风速(蓝色线，单位：m/s)、风向(黑实线，为各高度的主导风向对应的风向角)。纵坐标为高度(单位：m)，横坐标是各物理量大小，其中相对湿度除以10、风向角除以30，其它为原值。

表3 40个秋冬季清洁日和40个秋冬季污染日的日期和AQI指数

清洁日日期	AQI 指数	污染日日期	AQI 指数
2013-01-03	52	2013-01-10	359
2013-01-12	58	2013-01-11	326
2013-02-05	50	2013-01-12	360
2013-02-19	45	2013-01-15	301
2013-11-10	80	2013-01-27	414
2013-11-28	73	2013-01-28	297
2014-01-12	56	2013-02-26	327
2014-01-18	67	2013-11-22	348
2014-02-18	36	2013-11-23	347
2014-02-28	46	2013-12-04	343
2014-11-12	67	2013-12-05	298
2014-11-24	50	2013-12-07	362

2014-12-16	76	2013-12-08	345
2015-01-29	87	2013-12-19	301
2015-02-20	58	2013-12-20	307
2015-02-26	72	2014-01-07	309
2015-11-07	35	2014-01-13	322
2015-11-23	34	2014-01-17	296
2015-11-24	30	2014-01-25	301
2015-12-15	59	2014-01-26	338
2015-12-16	55	2014-01-28	351
2016-01-22	80	2014-01-29	339
2016-02-13	57	2014-02-02	287
2016-02-15	43	2014-11-23	290
2016-11-22	29	2015-01-06	289
2016-11-23	28	2015-01-25	284
2016-12-26	62	2015-01-26	304
2017-01-05	52	2015-12-11	286
2017-01-07	47	2015-12-12	307
2017-02-04	62	2015-12-25	330
2017-02-21	42	2016-01-04	244
2017-11-18	70	2016-01-11	238
2018-01-04	54	2016-01-18	249
2018-01-25	52	2016-02-24	227
2018-02-20	29	2017-01-03	211
2018-02-28	53	2017-01-04	239
2018-11-06	32	2017-02-17	215
2018-11-18	45	2018-01-20	226
2018-12-06	30	2018-11-30	262
2018-12-08	32	2018-12-01	215

2.2.5 秋冬季地面气象要素

由表 4 可知，秋冬季清洁日和污染日的平均气温、气压和相对湿度相近，且主导风向、次主导风向均为北风或偏北风。两类天气主要的差别表现为：1) 污染日的静风频率(20%)明显大于清洁日(7.5%);2) 污染日的平均风速(1.6m/s)小于清洁日(2.4m/s);3) 污染日近地面以接地逆温为主，而清洁日以悬浮逆温为主。污染日接地逆温出现频率(52.5%)大于清洁日接地逆温出现频率(22.5%)。污染日的逆温强度大于清洁日，同时污染日悬浮逆温底高更低、厚度更小，不及清洁日的一半，不利于大气污染物的扩散。

2.2.6 秋冬季探空资料分析

图 4 分别是武汉市 2013~2018 年秋冬季 40 个清洁日、污染日的平均廓线图。可以看出，秋冬季清洁日低层有弱的接地逆温存在，低层至 800m 气温随高度下降较快，之后至 1200m 气温下降缓慢；地面主导风向为北风，之后与夏季清洁日类似，随高度增加风向逆时针旋转，至 300m 高度左右转为稳定的东北风；地面至 600m 高度平均风速由 2.4m/s 迅速增大到 8.1m/s, 600~1800m 平均风速变化较小，之后风速大约呈 45° 的斜率随高度增大；地面至 600m 高度相对湿度由 89%减小为 76%，之后随高度变化不大。秋冬季污染日逆温明显，平均厚度一般在 400m 以下，大气层结稳定。污染期间强的接地逆温会阻碍大气污染物在垂直方向上的扩散，易出现重度污染天气。污染日低层主导风向是 NNE；近地面风速小于清洁日，地面平均风速为 1.6m/s, 地面至 200m 高度风速迅速增大为 4.5m/s。200~1800m 高度风速变化稳定，平均风速为 4.9m/s, 之后与清洁日变化相似，风速约呈 45° 的斜率随高度增大；地面至 600m 平均相对湿度由 90%快速减小至 59%，边界层内呈明显上干下湿格局。

表 4 武汉市秋冬季清洁日与污染日 07h 地面基本气象要素统计

项目	平均气温 (°C)	气压 (hPa)	相对湿度 (%)	主导 风向	平均风速 (m/s)	逆温特征			能见度 (km)
						强度 (°C/100m)	底高 (m)	厚度 (m)	
清洁 日	-1.1	1038.5	43	NNE	4	/	/	/	10
	-3.6	1023.7	94	C	0	1.2	0	630	0.2
	4.5	1016.6	97	WNN	2	0.6	408	1111	10
	0.7	1024.1	98	NNE	2	/	/	/	11
	12.6	1023.8	91	N	4	0.7	650	335	10
	2.4	1029	57	NE	1	3.6	0	67	18
	-0.6	1028.8	97	C	0	1.7	0	300	10
	-4.1	1033.4	89	NNE	1	1.5	0	486	12
	0.7	1026.5	98	N	3	/	/	/	4
	8.5	1015.8	97	NE	2	0.4	1660	428	8
	6.9	1022.9	99	NNE	3	2.8	0	258	6
10.1	1017.3	97	WNN	4	0.3	786	418	7	

-2.3	1037.1	65	N	2	3.9	0	147	10
-0.9	1026.2	97	WNN	2	0.3	728	2264	4
4.9	1013.6	97	N	1	0.5	351	773	8
8.4	1015.5	98	NNE	2	/	/	/	3
6	1018.1	98	WN	1	1.3	581	740	9
5.8	1023	98	NE	2	1.2	346	548	4
5	1023.6	96	N	4	1.1	786	719	6
5.3	1025.7	72	NE	2	1.3	0	89	12
1.1	1032	66	N	3	3.8	0	64	10
0.2	1027	98	N	2	/	/	/	4
8.9	1013	95	N	3	0.4	986	687	10
0.7	1032	75	C	0	/	/	/	12
4.6	1025	86	NNE	6	1.7	799	468	8
-1.2	1032	93	N	3	0.5	726	2009	8
4.7	1024.4	86	N	3	0.3	1195	1192	10
8.5	1016	98	NNE	1	0.2	223	1285	11
5.4	1017.8	97	N	3	0.8	1491	234	7
4.3	1018.1	97	S	1	0.7	970	686	8
6	1017.5	72	NE	3	1.5	842	623	12
8.6	1024.4	65	NE	3	1	867	345	10
0.1	1023.2	97	NE	4	0.4	493	338	8
-0.5	1021.7	90	NNE	4	0.5	1179	1525	5
4.9	1019	98	N	2	0.3	1432	496	7
7.4	1013	97	WN	2	1.1	0	139	13
11.1	1021.2	95	N	3	1	726	411	6
7.1	1022	98	WNN	3	/	/	/	8
4	1024.2	91	NNE	4	0.1	1141	1316	6
1	1033.5	70	NNE	2	0.4	1781	1082	10

3.90	1023.51	88.55	C, 频率 7.5%N, 频率 32.5%	2.43	悬浮逆温 0.68	悬浮逆温 881.13	悬浮逆温 834.71	8.38
-3.2	1025.6	95	SE	1	1.8	0	302	10
1.9	1023.3	87	C	0	1	93	163	11
-3.6	1023.7	94	C	0	1.2	0	630	0.2
0.4	1020.2	96	NE	1	1.1	32	320	12
-2.3	1024.5	96	ENE	2	1.7	0	622	8
3.6	1020.3	86	SE	2	0.9	0	656	6
9.2	1014.7	96	N	2	0.6	426	236	10
9	1019.3	84	ENE	3	1.1	0	377	8
11.1	1018	92	C	0	0.2	218	514	8
3.1	1022	98	N	1	2.1	0	286	8
3.1	1018.4	98	C	0	2.6	0	329	0.02
1.1	1018.2	98	E	1	2.8	0	301	0.1
7.5	1013.6	97	SE	2	1.6	0	373	6
-1.7	1027.8	98	NNE	1	2.1	0	63	6
0.4	1029.1	89	ENE	2	2.4	0	66	5
5.1	1015.6	98	N	2	/	/	/	9
0.6	1029.8	84	NNE	2	2.5	0	102	12
-0.8	1025.7	92	NNE	1	2.3	0	277	6
5.6	1018.2	35	N	2	0.2	0	1116	12
4	1023.8	73	NE	2	0.8	0	442	10
7.3	1019.5	79	N	3	1.6	0	227	7
7	1019	98	C	0	0.6	901	217	3
7.2	1008.7	97	NE	1	1.3	0	729	0.3
12	1016.9	91	NNE	2	0.8	346	344	0.8
7.1	1020.3	80	NNE	4	1.1	697	168	8
5.1	1019.2	97	WNN	2	0.8	472	489	6

5.6	1019.1	72	N	1	0.3	622	792	8
8.4	1020.8	81	NNE	2	/	/	/	6
6.7	1019.4	91	NNE	2	1.5	359	67	4
0.3	1026.8	98	C	0	2.6	0	247	0.1
8.6	1017	99	NNE	2	0.7	104	377	5
3.8	1022.7	99	N	3	/	/	/	2
0.4	1020.6	90	ENE	2	1	109	420	7
3.4	1033.8	90	NE	2	0.6	0	430	5
6.2	1022.7	96	C	0	1	0	355	8
10.5	1018	94	ESE	1	/	/	/	11
11.1	1020.1	64	NNE	4	2.9	458	195	10
5.2	1019.5	97	C	0	0.5	722	426	2
8.8	1020	98	N	2	0.7	0	853	0.6
10.4	1019.6	91	NE	2	1.1	408	401	6
4.73	1020.89	89.70	C, 频率 20%NNE, 频率 22.5%	1.55	接地逆温 1.61 悬浮逆温 0.95	悬浮逆温 397.80	接地逆温 418.24 悬浮逆温 341.93	6.18

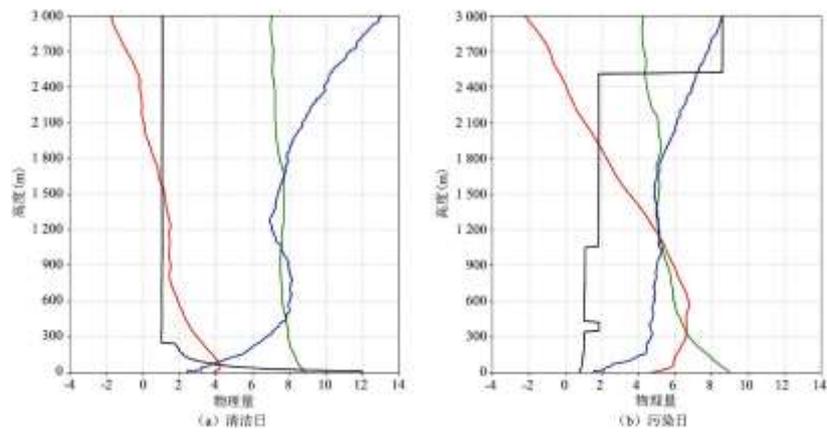


图4 武汉市 2013~2018 年秋冬季 40 个清洁日 (a)、污染日 (b) 各气象要素随高度变化的平均廓线

注：温度(红色线，单位：℃)、相对湿度(绿色线，单位：%)、风速(蓝色线，单位：m/s)、风向(黑实线，为各高度的主导

风向对应的风向角)。纵坐标为高度(单位: m),横坐标是各物理量大小,其中相对湿度除以 10、风向角除以 30,其它为原值。

2.3 天气过程环流形势

2.3.1 风场分析

图 5 为夏季清洁日/污染日的风场距平合成,最显著的风场特征是:清洁日,西太平洋副高偏强,欧亚大陆东南沿海为气旋式距平环流控制,有明显的偏南异常气流,而武汉地区为异常偏西南小风(图 5a);污染日,欧亚大陆东南沿海为显著的反气旋式距平环流控制,有明显的偏北风异常,而武汉地区则有偏东北异常小风(图 5b);污染日和清洁日的风场差值场图中(图 5c),当西北太平洋上以日本南部为中心的气旋式距平环流场加强时,武汉及其周边大范围地区没有明显的气旋或反气旋式环流控制,武汉地区主要为偏东异常小风,这种流场形势不利于污染物的移除和扩散。

图 6 为秋冬季清洁日/污染日的风场距平合成,最显著的风场特征是:清洁日,东南沿海和西太平洋上、中国西部均为弱的气旋式距平环流控制,中国东部沿海地区和武汉地区及其以西地区均为偏北异常小风(图 6a);污染日,西太平洋上的气旋式距平环流偏东偏强而中国西部为弱的反气旋式距平环流(图 6b);污染日和清洁日的风场差值场图中,西北太平洋上为明显的气旋式距平环流、中国西部为反气旋式距平环流、而欧亚大陆北部贝加尔湖西部为弱的气旋式距平环流(说明蒙古高压偏弱),同时中国南方尤其是东南沿海和武汉及其以西地区为弱的偏南风异常,这种环流形势使得武汉地区空气质量较差(图 6c)。

2.3.2 高度场和温度场分析

夏季清洁日 500hPa 平均场西太平洋副高加强西伸南压。清洁日地面距平场上黄海、淮河和长江流域之间大部气温偏低,武汉地区温度距平为负,环流形势较稳定(图略)。污染日地面武汉地区等压线稀疏,气压变化较小,处于均压场中(图 7a)。中高层和低层 30° N 以北地区气温负异常的范围和程度与清洁日相比均增大(图 7b、c)。500hPa 平均场 30~50° N、115~130° E 为槽的低值中心区,槽的强度小于 570dagpm(图略);西太平洋副高东退减弱,位势高度负异常中心加强(图 7d)。观察位势高度差值场(图 8),当贝加尔湖东北部位势高度异常增加而日本南部和 35° N, 175° E 附近的北太平洋上位势高度异常减小时,武汉地区处于弱均压场内,这种环流形势不利于武汉地区大气污染物的扩散。

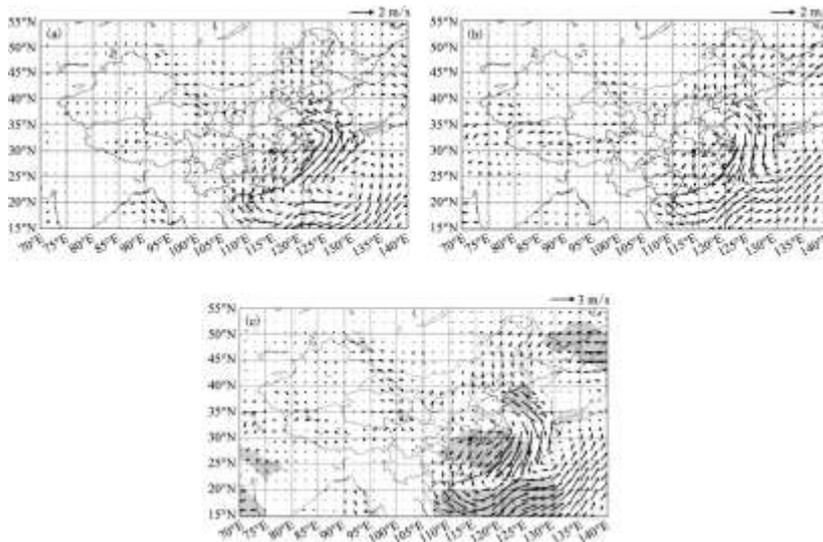


图 5 夏季 10m 风场距平。(a)清洁日, (b)污染日, (c)差值场(污染日减清洁日)阴影区通过了 99%信度检验

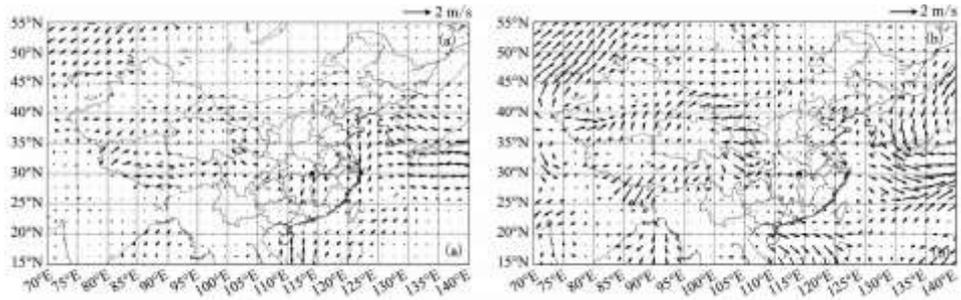


图6 秋冬季10m风场距平。(a)清洁日, (b)污染日, (c)差值场(污染日减清洁日)阴影区通过了90%信度检验

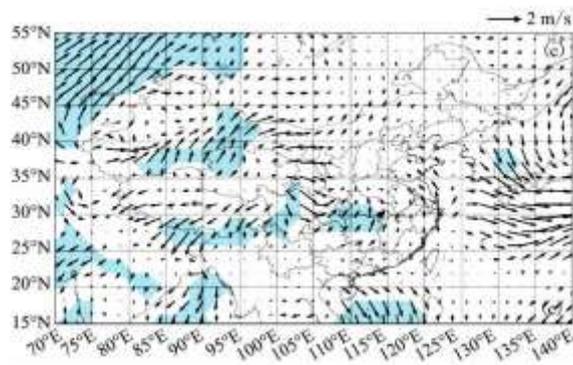


图6 秋冬季10m风场距平。(a)清洁日, (b)污染日, (c)差值场(污染日减清洁日)阴影区通过了90%信度检验

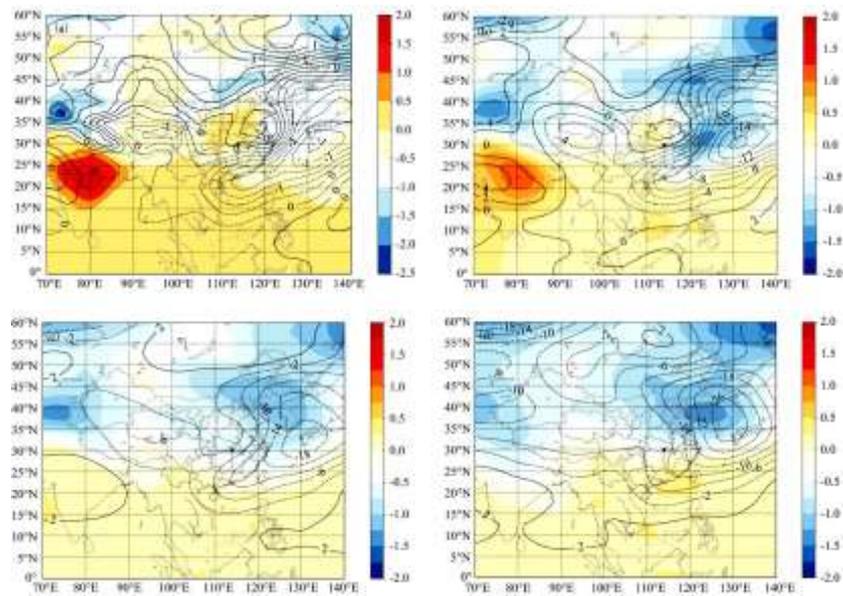


图7 夏季污染日海平面气压场(图 a, 单位百帕)、850hPa(b)、700hPa(c)、500hPa(d) 高度场与温度距平场

注: 位势高度场为等值线, 单位: 位势米; 温度场为彩色阴影, 单位: $^{\circ}\text{C}$

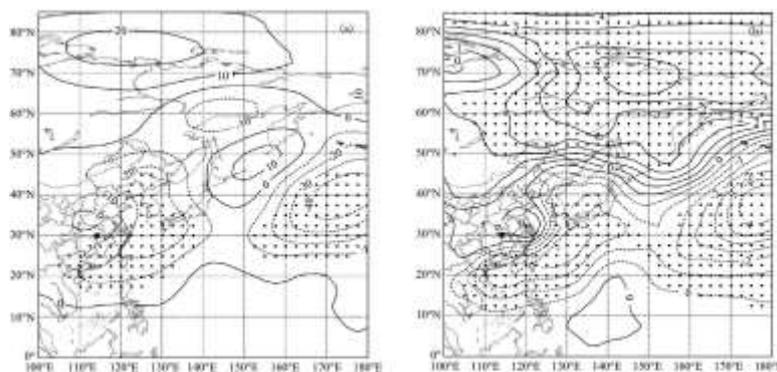


图 8 夏季 500hPa 位势高度(a)、海平面气压(b)差值场(污染日减清洁日), 打点区域通过了 99%的显著性检验

图 9 是秋冬季污染日海平面气压场与不同高度、温度的距平场。污染日蒙古冷高压中心位置在 $45^{\circ}\text{N}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 、 $90^{\circ}\text{E}\sim 95^{\circ}\text{E}$ 范围内, 中心强度大于 260gpm (图略)。地面距平场上, 蒙古地区位势高度距平异常偏低, 蒙古高压强度减弱, 蒙古东部地面温度距平为正, 阻碍东亚冬季风入侵我国。冬季风弱且武汉地面存在偏南风异常, 风速较小(图 9a)。而清洁日地面存在明显蒙古冷高压, 冷空气南下, 伴有大风和降温, 有利于污染物扩散(图略)。污染日地面武汉地区西边的弱脊加强, 武汉气温增加(图 9a)。850hPa 位势高度和温度的异常情况与地面相似, 武汉地区温度异常升高有利于边界层内逆温层的形成(图 9b)。秋冬季污染日 500hPa 平均场上横槽的低值中心区位于 $40^{\circ}\text{N}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 、 $120^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$, 强度小于 532gpm (图略)。东亚大槽区域位于位势高度负距平区, 负距平中心位于太平洋 170°E 、 38°N 附近, 东亚大槽加强但强度不大(图 9d)。500hPa 武汉地区受偏西气流控制, 850hPa~700hPa 高度为弱的西南偏西气流, 有暖平流, 且地面受均压场控制, 扩散条件不利。观察秋冬季位势高度差值场(图 10), 在北太平洋上 500hPa 高度以及地面上都存在强负异常中心, 正是这种环流异常的不对称(指东强西弱)鞍型场结构导致武汉地区形成不利于大气污染物扩散的边界层动力热力条件, 比如逆温、静风或小风天气, 边界层内“暖干”的温湿度层结等。

2.4 天气过程物理量场

分析夏季和秋冬季污染日和清洁日的垂直速度、垂直涡度和水平散度可见, 无论夏季还是秋冬季, 相对于周围地区, 武汉处在一个弱的垂直运动区域, 空气污染物在垂直方向的湍流交换比较弱(图 11~图 13)。水平方向风速也比较小, 静稳天气较多。这是武汉污染事件较频发的主要原因。

为了更清晰地比较武汉及周边地区不同季节各物理量的大小, 故对 $275^{\circ}\text{N}\sim 325^{\circ}\text{N}$ 、 $110^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 区域进行平均, 结果如表 5。夏季污染日 2m 温度高于清洁日, 秋冬季重污染时期 10m 风速明显小于清洁日, 不利于污染物的扩散。夏季污染日 850hPa 垂直涡度为负值, 秋冬季污染日垂直涡度小于平均日和清洁日, 对应区域内有下沉运动, 不利于空气在垂直方向上的湍流交换扩散。夏季污染日 850hPa 水平散度为正值, 秋冬季污染日水平散度大于平均日和清洁日, 该区域对流层低层为辐散区, 对应下沉气流, 静稳天气较多。

2.5 武汉市大气污染的天气概念模型

下图分别是武汉市夏季和秋冬季大气污染的大尺度天气概念模型(图 14~图 15), 典型污染过程的天气形势配置示意图如下:

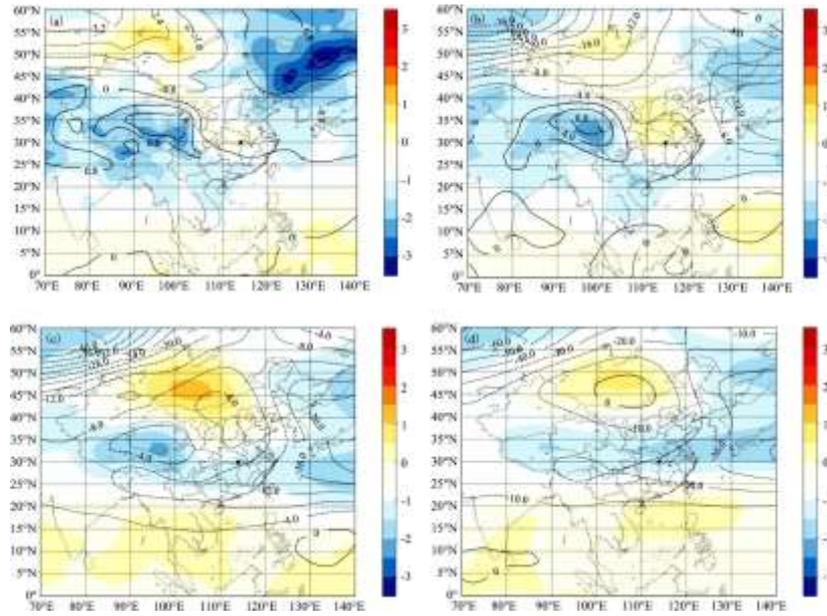


图9 秋冬季污染日海平面气压(图 a, 单位百帕)、850hPa(b)、700hPa(c)、500hPa(d) 高度场与温度距平场

注：位势高度场为等值线，单位：位势米；温度场为彩色阴影，单位： $^{\circ}\text{C}$

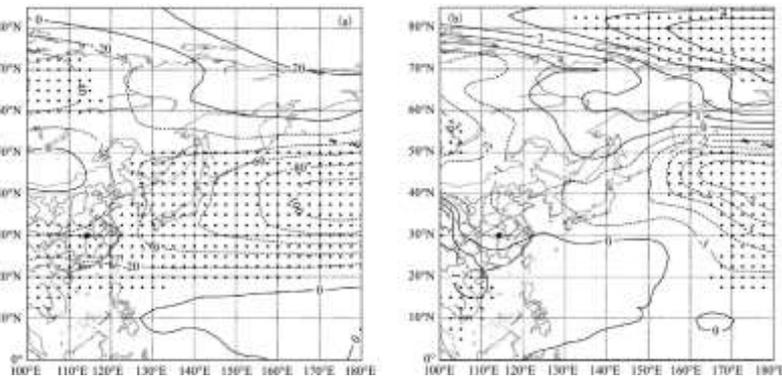


图10 秋冬季500hPa 位势高度(a)、海平面气压(b)差值场(污染日减清洁日), 打点区域通过了99%的显著性检验

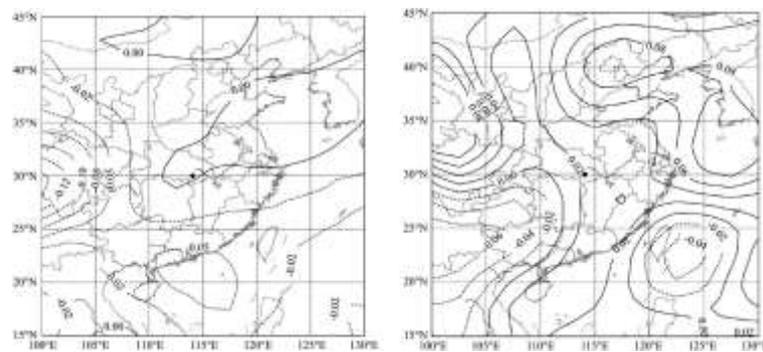


图11 夏季(左)、秋冬季(右)污染日850hPa 垂直速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

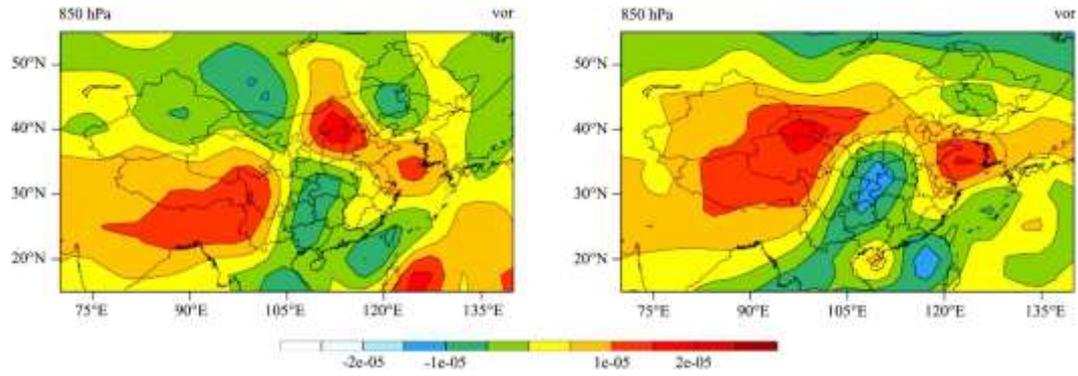


图 12 夏季(左)、秋冬季(右)污染日 850hPa 垂直涡度, 单位: (s^{-1})

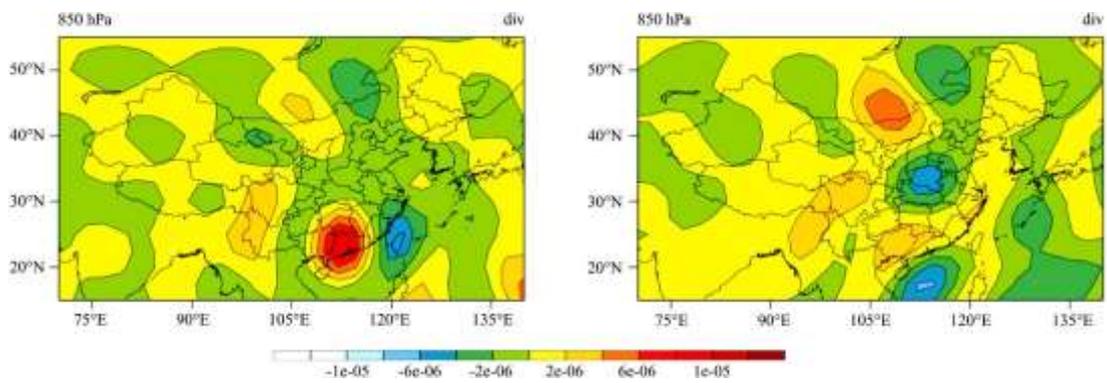


图 13 夏季(左)、秋冬季(右)污染日 850hPa 水平散度, 单位: (s^{-1})

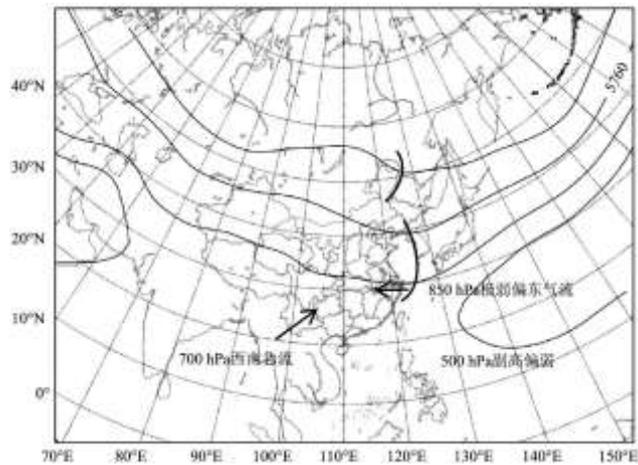


图 14 武汉市夏季大气污染的大尺度天气概念模型

表 5 275~325° N、110~120° E 区域夏季、秋冬季各物理量的区域平均

物理量	夏季	夏季清洁日	夏季污染日	秋冬季	秋冬季清洁日	秋冬季污染日
-----	----	-------	-------	-----	--------	--------

2m 温度(°C)	24.45	24.04	24.35	4.81	4.35	4.33
10m 风速(m·s ⁻¹)	0.82	0.91	0.98	1.26	1.45	1.17
海平面气压(hPa)	1005.44	1005.21	1005.55	1024.38	1024.74	1024.19
850hPa 垂直涡度*1e07(s ⁻¹)	25.04	76.90	-8.19	-27.94	-15.19	-44.50
850hPa 水平散度*1e07(s ⁻¹)	-6.47	-14.47	4.72	6.62	4.29	13.42

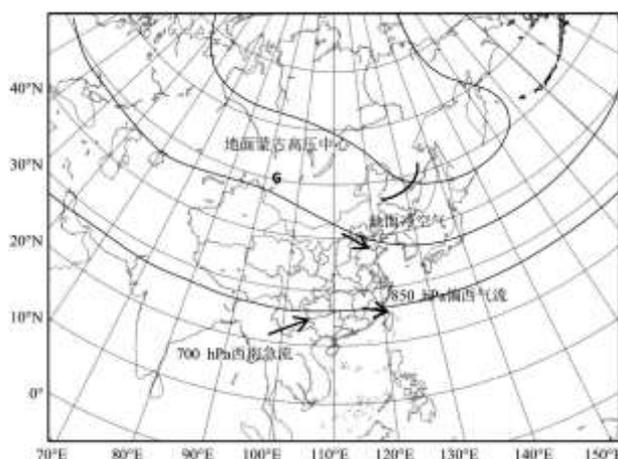


图 15 武汉市秋冬季大气污染的大尺度天气概念模型

2.5.1 夏季污染日

(1) 500hPa: 东亚中高纬大陆呈两槽一脊型, 槽脊位置东部低槽的槽线在 120~140° E 范围内, 与清洁日相比槽线的位置至少向东移动了 10 个经度; 我国 30° N 以南等压线稀疏, 为均压场; 长江流域受平直纬向西风的控制, 中高空天气形势波动小; 副高位置偏东、偏南, 强度偏弱, 长江流域易少雨干旱。

(a) 东部的槽线由多个不连续的槽线组成, 槽的低值中心区 (30~50° N、115~130° E) 强度 < 570 dagpm;

(b) 副高呈东西长, 南北短的椭圆形, 长轴大致与纬圈平行, 在 20° N 附近, 西脊点大致位于 132° E。

(2) 850hPa: 我国东南地区等压线稀疏, 武汉处于均压场中, 低空西南急流减弱, 850hPa 武汉受极弱偏东气流的影响, 700hPa 受偏西风的控制; 武汉对流层中层变暖低层变冷。在 25~40° N、110~120° E 的偏南风一般小于 2m/s, 其中纬线 30° N 长江中下游区域受弱偏东风的影响, 风速小于 1m/s。

(3) 地面: 地面 30° N 以北大范围区域气温为负异常; 我国东部大范围地区处于均压场中, 无明显的气旋或反气旋式环流; 25° N 以北存在显著偏北风异常, 对应于武汉地区为偏东北异常小风。夏季逆温较浅薄, 污染日接地逆温平均强度为 1.22, 悬浮逆温平均强度为 1.19, 逆温底高一般在 600m 以下, 污染物在低层累积, 导致出现大气污染, 空气质量主要为轻度-中度污染。污染日静风频率 (37.1%) 明显高于清洁日的静风频率 (2.9%), 地面风速小, 平均为 0.8m/s, 且相对湿度较低, 以上气象条件均不利于大气污染物的扩散。

2.5.2 秋冬季污染日

(1) 500hPa: 东亚中高纬地区呈现为两槽一脊的弱环流形势, 槽脊位置位于 35°N 以北; 横槽的低值中心区 ($40\sim 50^{\circ}\text{N}$ 、 $120\sim 140^{\circ}\text{E}$) 强度 $< 532\text{dagpm}$; 东亚大槽强度不大; 110°E 以东我国东北地区有大范围的西北气流区; 长江流域为平直西风气流区, 少波动。

(2) 850hPa: 在污染天气发生、发展、加强时, 西南急流减弱, 850~700hPa 武汉市基本受弱偏西气流的影响, 在 $25\sim 35^{\circ}\text{N}$ 、 $110\sim 120^{\circ}\text{E}$ 的偏西风一般小于 3m/s ; 武汉地区处于均压场内, 温度异常升高, 有利于逆温层的形成。

(3) 地面: 蒙古地面冷高压中心位置基本稳定在 $45\sim 50^{\circ}\text{N}$ 、 $90\sim 95^{\circ}\text{E}$, 中心强度 $> 260\text{gpm}$, 与气候平均态相比强度偏弱。武汉地区西边弱脊加强, 长江中下游地区温度异常升高。在北太平洋上存在强的位势高度负异常中心, 而武汉西部地区位势高度差值为正, 这种“东强西弱”的环流异常结构导致武汉地区形成不利于污染物的动力热力条件。冷空气路径以北偏东为主, 冷空气强度偏弱。污染日近地面以接地逆温为主, 平均逆温强度为 1.61 , 逆温厚度一般在 400m 以下, 强的逆温阻碍空气的垂直运动, 易出现重度污染天气。污染日静风频率 (20%) 高于清洁日的静风频率 (7.5%), 地面风速小, 平均为 1.6m/s , 边界层内呈明显上干下湿的格局。

3 结论

文章结合多种观测资料包括环境局监测数据、L 波段雷达探空资料、NCEP/NCAR 逐日再分析资料, 研究了武汉地区夏季、秋冬季污染日的气象特征、环流形势、物理量场等, 建立了武汉地区大气污染的天气概念模型。结果表明:

(1) 在 2013~2019 年武汉市秋冬季重度以上污染日数中, 2013 年日数最多, 为 53d, 2019 年日数最少, 为 2d。夏季污染日波动变化, 空气质量指数主要以轻度污染为主。近 7 年, 武汉市雾霾污染天气总体呈下降趋势, 这与近年来国家相关法律法规的完善, 污染物排放的控制和人们环保意识的增强有关。

(2) 武汉市空气质量具有季节性分布特征, 大气污染程度四季分布表现为冬>秋>春>夏。夏季首要污染物是臭氧, 占比很高, 为 79.8%; 冬季中度污染和重度污染天气占比明显高于其他季节, 首要污染物 $\text{PM}_{2.5}$ 占比高达 89.3%。

(3) 对比挑选出的 2013~2018 年武汉市夏季清洁日和污染日气象要素特征, 污染日逆温平均强度约为清洁日的一倍, 逆温层浅薄, 底高一般在 600m 以下, 空气质量多为轻度-中度污染。夏季污染日多为晴朗天气, 污染日地面平均风速 (0.8m/s) 小于清洁日 (2.5m/s), 且地面平均相对湿度 (83.1%) 也低于清洁日 (91.5%)。同样比较挑选出的 2013~2018 年武汉市秋冬季两类天气的气象要素特征, 污染日近地面以接地逆温为主, 而清洁日以悬浮逆温为主。逆温强度大, 污染日平均接地逆温强度可达 1.6 , 逆温底高低、厚度小, 不及清洁日的一半, 大气层结稳定。污染日风速小空气质量差, 地面平均风速为 1.6m/s ; 湿度随高度减小, 边界层内呈明显上干下湿的格局。

(4) 夏季污染日 25°N 以北沿海区域为明显的偏北风异常, 南部偏南风减弱, 武汉地区为偏东北异常小风, 风场结构使得空气质量下降。污染日 500hPa 位势高度负异常中心加强, 30°N 以北地面气温负异常范围较大, 武汉处于弱的均压场内。秋冬季污染日武汉及其以西地区为弱的偏南风异常, 这种环流形势会使得武汉地区空气质量较差。污染日蒙古高压强度减弱, 蒙古东部地区地面温度距平为正, 东亚大槽加强但强度较弱, 阻碍东亚冬季风入侵我国。地面武汉地区西部受弱高压脊控制, 温度升高。同时, 在北太平洋上 500hPa 高度以及地面都存在强位势高度负异常中心, 环流异常的不对称鞍型场结构导致武汉地区的污染物难以扩散。

(5) 分析武汉地区的物理量场, 发现武汉处在一个弱的垂直运动区域, 空气污染物在垂直方向的湍流交换比较弱, 水平方向

风速比较小对大气污染物的移除作用小,这是武汉霾污染事件较频发的主要原因之一。污染日武汉地区对流层低层为辐散区,对应下沉气流,静稳天气较多。

本文揭示了不同季节有利于污染天气形成和持续的大气污染特征、边界层结构、环流形势、物理量场等,建立了武汉地区大气污染的天气概念模型,其结论可供大气污染预测预警研究和环境管理部门污染联防联控参考。另外,文章没有定量的揭示环流型与边界层结构的关系,缺少对环流型—边界层垂直结构—空气质量变化三者之间联系规律的研究,这是之后尚需继续完成的研究工作。

参考文献:

- [1] 郑翔, 覃军, 梁胜文. 偏东小风在武汉市秋冬季重污染形成过程中的作用[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2018, 10(5): 536-546.
- [2] 唐贵谦, 李昕, 王效科, 等. 天气型对北京地区近地面臭氧的影响[J]. 环境科学, 2010, 31(3): 573-578.
- [3] 严晓瑜, 缙晓辉, 杨婧, 等. 中国典型城市臭氧变化特征及其与气象条件的关系[J]. 高原气象, 2020, 39(2): 416-430.
- [4] 孙燕, 王磊, 张蓬勃, 等. 2013年8月亚青会期间南京轻度污染气象条件分析[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(5): 182-188.
- [5] 胡亚旦, 周自江. 中国霾天气的气候特征分析[J]. 气象, 2009, 35(7): 73-78.
- [6] 刘爱君, 杜尧东, 王惠英. 广州灰霾天气的气候特征分析[J]. 气象, 2004(12): 68-71.
- [7] 童尧青, 银燕, 钱凌, 等. 南京地区霾天气特征分析[J]. 中国环境科学, 2007(5): 584-588.
- [8] 赵慧霞, 王维国, 李泽椿, 等. 雾对我国交通运输的不利影响及对策[J]. 气象与环境学报, 2010, 26(2): 58-62.
- [9] 樊文雁, 胡波, 王跃思, 等. 北京雾、霾天细粒子质量浓度垂直梯度变化的观测[J]. 气候与环境研究, 2009, 14(6): 631-638.
- [10] 白志鹏, 蔡斌彬, 董海燕, 等. 灰霾的健康效应[J]. 环境污染与防治, 2006(3): 198-201.
- [11] ANDREAE M O, SCHMID O, YANG H, et al. Optical properties and chemical composition of the atmospheric aerosol in urban Guangzhou, China[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(25): 6335-6350.
- [12] 潘本锋, 汪巍, 李亮, 等. 我国大中型城市秋冬季节雾霾天气污染特征与成因分析[J]. 环境与可持续发展, 2013, 38(1): 33-36.
- [13] 唐宜西, 张小玲, 熊亚军, 等. 北京一次持续霾天气过程气象特征分析[J]. 气象与环境学报, 2013, 29(5): 12-19.
- [14] 赵秀娟, 蒲维维, 孟伟, 等. 北京地区秋季雾霾天 PM_{2.5}污染与气溶胶光学特征分析[J]. 环境科学, 2013, 34(2): 416-423.
- [15] 谭成好, 赵天良, 崔春光, 等. 近50年华中地区霾污染的特征[J]. 中国环境科学, 2015, 35(8): 2272-2280.

-
- [16]李艳春,李艳芳,高娜,等.银川市雾霾天气的气象条件分析及概念模型建立[J].干旱区地理,2017,40(6):1127-1133.
- [17]王静,施润和,李龙,等.上海市一次重雾霾过程的天气特征及成因分析[J].环境科学学报,2015,35(5):1537-1546.
- [18]张人禾,李强,张若楠.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[J].中国科学:地球科学,2014,44(1):27-36.
- [19]MBULULO Y,QIN J,YUAN Z X.Evolution of atmospheric boundary layer structure and its relationship with air quality in Wuhan,China[J].Arabian Journal of Geosciences,2017,10(22):477.
- [20]MBULULO Y,QIN J,YUAN Z,et al.Boundary layer perspective assessment of air pollution status in Wuhan city from 2013 to 2017[J].Environmental Monitoring and Assessment,2019,191(2):69.
- [21]MBULULO Y,QIN J,HONG J,et al.Characteristics of atmospheric boundary layer structure during PM2.5 and ozone pollution events in Wuhan,China[J].Atmosphere,2018,9(9):359.
- [22]ZHENG X,QIN J,LIANG S,et al.The development of boundary layer structure index (BLSI) and its relationship with ground air quality[J].Atmosphere,2019,10(1):3.
- [23]YUAN Z,QIN J,ZHENG X,et al.The relationship between atmospheric circulation,boundary layer and near-surface turbulence in severe fog-haze pollution periods[J].Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics,2020,200:105216.
- [24]HAN S,WU J,ZHANG Y,et al.Characteristics and formation mechanism of a winter haze-fog episode in Tianjin,China[J].Atmospheric Environment,2014,98:323-330.
- [25]黄凡,周家斌,李红,等.武汉市夏冬季典型大气污染过程的成因与来源分析[J].环境科学研究,2020,33(2):280-288.