

文章编号: 2096-1618(2021)04-0472-07

成都平原经济区空气污染扩散气象条件变化特征分析

周 聪^{1,2}, 王维佳^{1,2}, 苗红妍³, 孙 或⁴

(1. 成都市气象局, 四川 成都 611133; 2. 中国气象局云雾物理环境重点研究室, 北京 100081; 3. 中国气象局气象干部培训学院辽宁分院, 辽宁 沈阳 110166; 4. 四川省气象灾害防御技术中心, 四川 成都 610072)

摘要:为更好地分析成都平原经济区空气污染扩散气象条件的变化趋势,利用1981–2018年53个国家级地面气象台站观测资料,并主要采用非参数检验方法着重对降水量、风场等气象条件的时空分布特征进行讨论和分析。结果表明:1981–2018年,经济区内降水量与相对湿度具有相似的空间分布特征,且随时间的演变均表现出减少的变化趋势,其中夏季降水的显著下降是引起年累积降水量减少的重要原因;近地面风场方面,除雅安西南部,其余地区的小风频次均表现出上升趋势,其中西北边缘地区的变化幅度较大。总体而言,1981–2018年区域内空气污染扩散气象条件是逐步转差的,尤其以中部地区的表现最为显著。

关键词:大气环境;气象条件;时空分布特征;趋势检验

中图分类号:P421

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2021.04.018

0 引言

近年来,汽车尾气、燃油、燃煤、废弃物燃烧直接排放的气溶胶粒子与气态污染物通过光化学反应产生的二次气溶胶污染日趋严重,霾成为一种常态化的天气现象,严重影响人类的身体健康^[1]。2010年,中国气象局发布霾的判识标准,规定以相对湿度80%作为辅助阈值,当相对湿度介于80%~95%时,需按照地面气象观测规范或大气成分做进一步判别^[2]。然而鉴于地面观测人员的主观性因素,不同地区之间有关霾的统计往往存在较大差异^[3–5]。研究表明:西南地区是中国霾高发的区域之一^[6],且冬季是霾日多发的时段^[7–8]。因此,针对四川盆地特殊的地形与气候条件,需要更新阈值才能够得到较好的霾日判别结果^[9]。如何有效地治理大气污染、控制霾天气的发生已然成为中国各大城市亟待解决的问题。因此探究导致大气污染的气象因子很有必要。

由同一污染源造成的污染物浓度在不同气象条件下相差可达几十乃至几百倍,这是由于大气对污染物的稀释扩散能力随着气象条件的不同而发生变化的缘故^[10]。地面气压场、中低层风场等大尺度天气系统往往会造成区域性污染天气的发生^[11]。研究表明地面低压场或弱气压场为重污染天气发生时的主要地面形势^[11–12],而来自西北向的冷空气易将上游城市群落的污染物带下,造成下游地区的输入型大气污染事件^[13–14]。四川盆地独特的地形与气候条件致使地面高压为该地区连续性污染天气形成阶段的主要天气系

统,而冷空气的影响往往能够明显改善其空气质量^[15]。与大尺度天气系统不同,降水会对局地污染物产生更为直接的冲刷以及清洗作用^[16],但当相对湿度较大却未发生明显降水天气时,往往是不利于污染物扩散的。研究表明相对湿度与PM_{2.5}浓度的相关系数高达0.6,呈较为显著的正相关^[17],这主要是因为吸湿后的气溶胶粒径会增大20%~60%,使得观测的PM_{2.5}质量浓度出现“虚高”^[18]。

2018年,由成都、绵阳、德阳、遂宁、资阳、眉山、乐山以及雅安构成的成都平原经济区正式确立。该经济区既是四川省经济最发达、人口密度最大、城市化水平发展最高的区域,也是四川盆地霾天气发生频率最高的地区。不断增长的经济与人口总量要求成都平原经济区必须加速形成大气污染共商、共治与共享的一体化格局,如何探索更加高效的区域联防途径也已成为当前面临的挑战。以往的研究多集中于天气尺度的环流背景,很少探究某区域内空气污染扩散气象条件的时空变化特征,尤其缺乏将成都平原经济区作为整体考虑的相关研究,进而制约了成都平原经济区的大气污染治理举措。基于上述原因,本研究将针对大气污染物显著增长的1981–2018年,分析并讨论成都平原经济区内影响大气污染扩散条件的重要气象要素的变化情况,以为大气污染防治决策提供科学的数据支撑。

1 资料与方法

研究选取成都平原经济区53个国家级地面气象台站的降水量、相对湿度以及风速数据进行分析,起止时间为1981–2018年,各台站资料长度统一,时间序列完整。此外,本研究采用非参数检验方法(Mann

收稿日期:2020-08-28

基金项目:四川省科技计划资助项目(2019YJ0621);中国气象局云雾物理环境重点开放实验室开放课题资助项目(2019Z01602);四川省气象局青年基金课题资助项目(SCQXKJQN2019020)

Kendall)对降水与风速的月际变化趋势进行显著性检验,M-K方法详见文献[19].

2 结果

2.1 空气污染扩散气象条件年变化分析

成都平原面积较大且位于四川盆地西南边缘,受

到龙门山、龙泉山、雾中山等山脉的制约,地形、地貌存在明显差异^[20]。1981–2018年,经济区的降水空间分布具有显著的区域性特征(图1a),呈现自西南向东北递减的变化趋势,高值区位于区域西南部,主要包括雅安东部、眉山西部以及乐山西北部,年累积降水量均值大于1400 mm;低值区位于西南以及东北边缘一带。同时发现区域中东部地区的年累积降水量明显偏小,均值在800 mm左右。

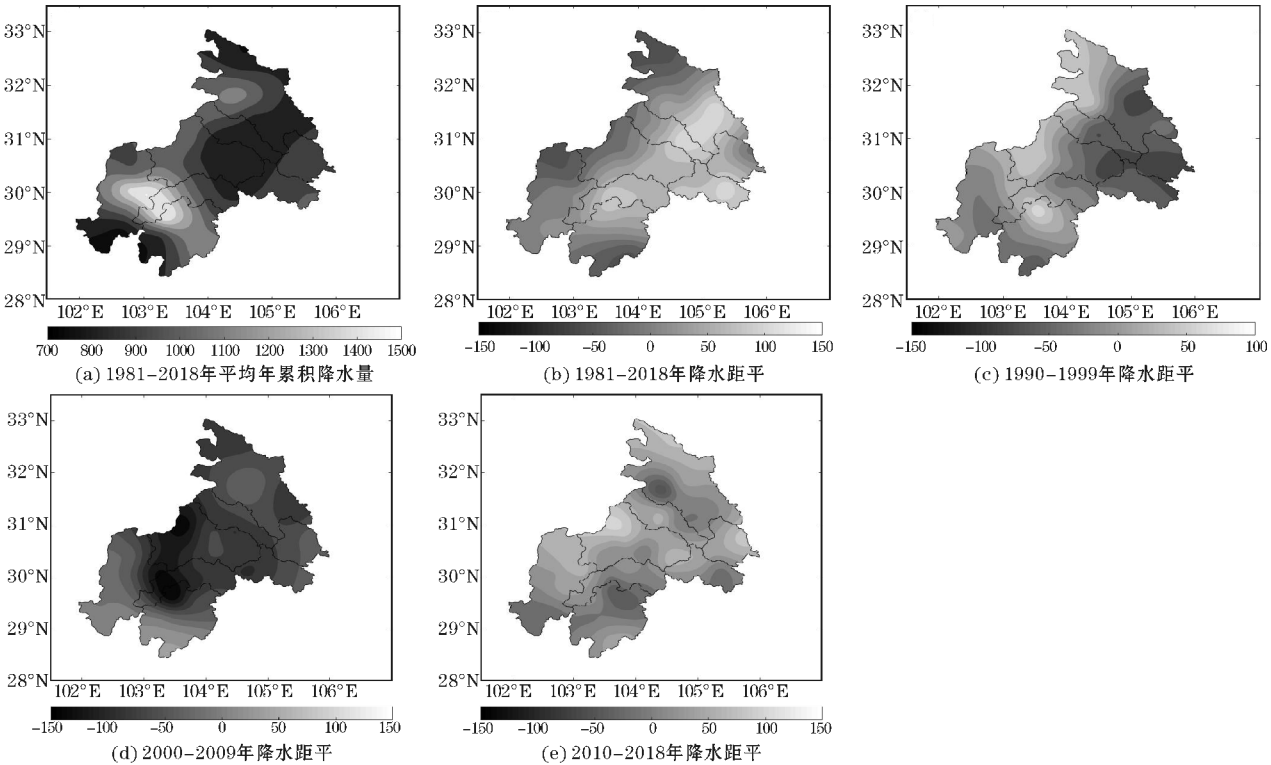


图1 平均年累积降水量与降水距平分布图

可以看出,1981–1989年与2010–2018年区域主要表现为正的降水距平(图1b、e),但两者高值区的位置存在显著差异:1981–1989年,区域中东部的降水量明显偏大;而在2010–2018年,正距平区主要位于西北边缘一带。另外,2000–2009年为降水量异常偏少的年代,尤其以中部地区表现最为显著。结合图1(e)能够发现1990–2009年中东部降水量出现大幅减少,较大范围的降水量距平值小于–100 mm,然而在2010–2018年该区域则以正距平为主,最大值约为50 mm。不难看出,1981–2018年成都平原经济区中东部地区的降水量是逐步减少的。

年降水量表征整年的降水累积,易受到大型降水天气过程的影响,且考虑到降水对颗粒物的清除作用,分别统计了1981–2018年日累积降水量≥2 mm、5 mm以及10 mm的频次时间序列(如图2所示),可以看到,≥2 mm的频次无明显变化趋势,而图2(b)、(c)中拟合直线则表现出小幅的增长,表明日累积降水量≥5 mm的天气过程是逐渐增多的。同时发现,1994–2003年是≥2 mm频次偏少的时段,但随着阈值的升

高,散点偏离拟合直线的程度越来越小,结合图1(c)、(d)可知,日累积降水量为2~5 mm的频次偏少对该时段内年累积降水量距平为负值的贡献较大。2009–2018年,各阈值下的频次均表现出较为显著的上升趋势,拟合的直线斜率分别为:1.12(2 mm)、1.06(5 mm)与0.78(10 mm)。

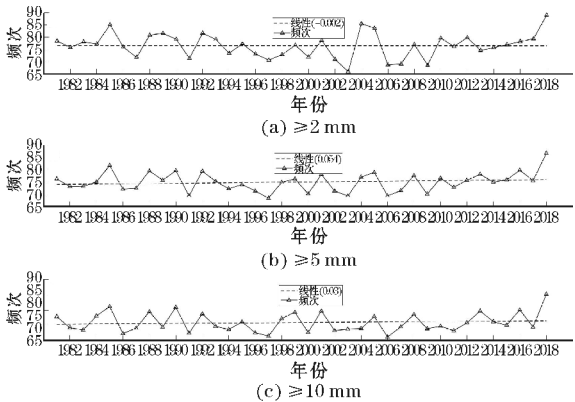


图2 满足各日累积降水量阈值的频次时间序列图

相对湿度与污染物浓度往往呈正相关,较大的相对湿度会使可溶性气溶胶粒子更易吸收水汽而增长,加强气溶胶粒子的消光作用(主要是散射作用),降低能见度,进而促使霾天气的发生^[21]。图3(a)可见,与

降水量的分布特征类似,具有较高相对湿度的站点主要分布在经济区西南部,包括成都西南部、雅安东部、眉山西部以及乐山北部。

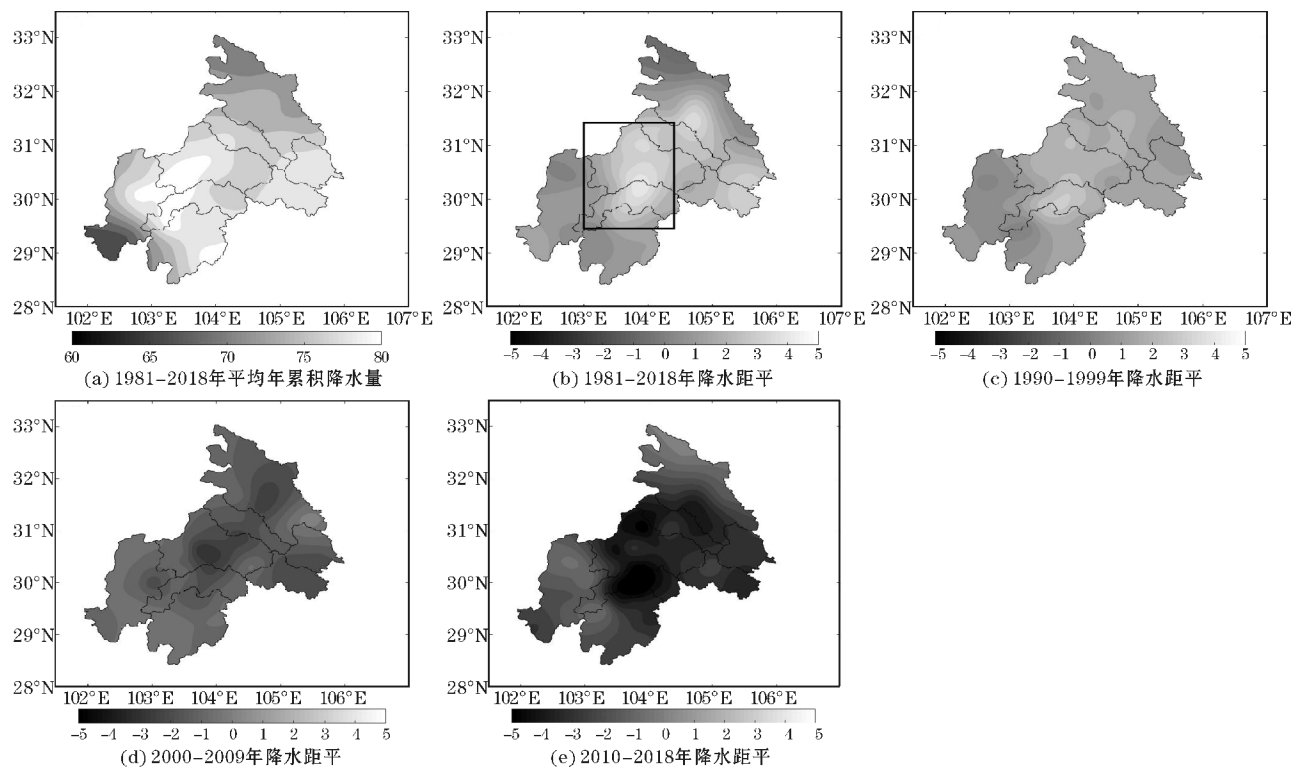


图3 平均相对湿度与相对湿度距平分布图

进一步分析成都平原经济区年代际的相对湿度分布情况,不难发现,随着时间的推移大部分地区的距平值逐渐由正值转为负值,尤其在中东部地区。因此本研究选取图3(b)中黑色矩形区域作为研究对象,分析1981-2018年相对湿度的变化趋势。由图4可知,位于矩形范围内站点的年平均相对湿度呈现出较为明显的下降趋势,拟合的直线斜率为-0.26。此外,通过与均值线(虚线)作对比,可以看到在2000年前相对湿度都高于均值线,但2001年绝大部分时段的价值位于均值线以下,尤其在2011-2015年小于75%。需要注意的是当2013年达到最小值后,相对湿度开始出现回升,逐渐上升至均值线附近。

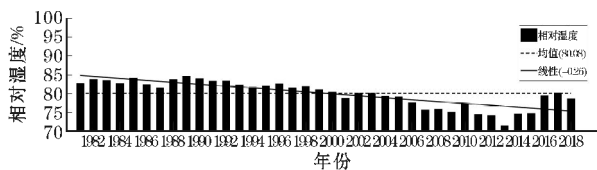


图4 1981-2018年黑色矩形区域相对湿度时间序列图

本研究针对日平均相对湿度 $\geq 75\%$ 以及 85% 的频次(图略)进行统计分析发现,不同阈值下的频次时

间序列均表现为减少变化趋势,且拟合直线的斜率分别达-2.57(75%)及-1.73(85%)。另外,与图2结果类似,2013年两阈值下的频次均达到最小值,且自此开始出现较为明显的上升趋势。总体而言,虽然1981-2018年成都平原经济区的相对湿度表现出下降趋势,但区域均值高达78.1%,一方面有助于气溶胶粒子的稀释增长,另一方面不利于霾粒子向雾滴的转化,进而促使经济区霾天气的发生^[22]。

除降水量与相对湿度外,近地面风速亦是影响空气污染扩散气象条件的重要因子,研究表明当近地面风速 $>2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,风速的增大使区域大气污染物浓度显著减小^[23]。针对近地面08时、20时风速小于 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的频次进行统计,仔细分析其空间分布情况(图5),可以看到两者的空间分布特征基本一致:除西部、西南边缘地区的频次明显偏低外,大部分地区的小风频次大于300次。其中,高值区主要位于中部以及北部、南部边缘一带。需要注意的是,两个低值中心分别为峨眉山站点以及雅安市宝兴县站点,两站点的海拔高度均高于1 km。此外,不难发现,大部分地区的20时小风频次要明显小于08时的小风频次。

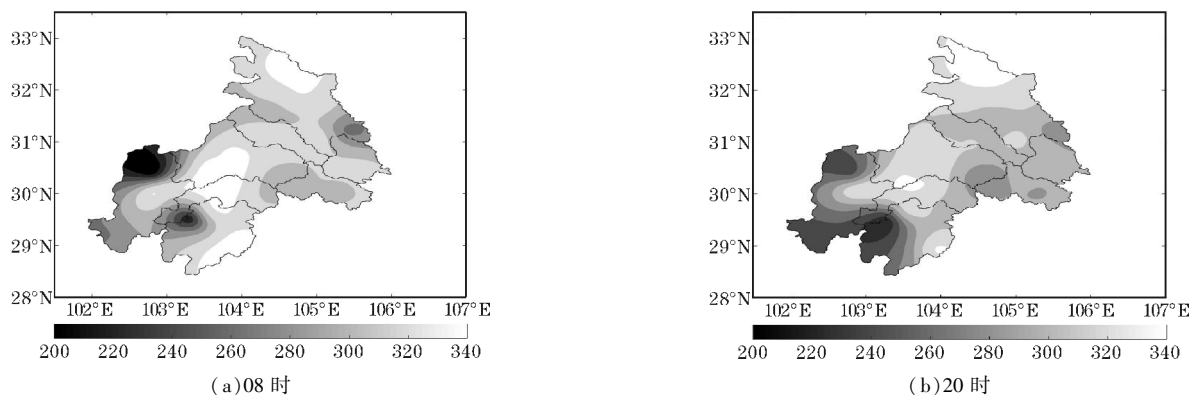


图 5 1981–2018 年两时次平均小风频次分布图

两者随时间的变化趋势(图略)较为相似,线性拟合后的直线斜率分别为 -0.26 (08 时)与 -0.59 (20 时),尤其在 2014–2016 年,小风频次的下降幅度最为显著。

胡亚旦等^[7]的研究结果表明降水与风场条件对霾天气的增减有十分明显的影响,年霾日与年降水日之间的相关系数达 -0.629 ,与静风或微风日数的相关系数更是高达 0.788 。由图 2(a)可知,2014–2018 年经济区内发生日累积降水量 $\geq 2\text{ mm}$ 的频次呈单调递增的趋势,且自 2014 年开始近地面小风频次出现大幅的下降,2016–2018 年的小风频次也远位于均值线下方。因此,本研究认为经济区整体的空气污染扩散气象条件呈转差的趋势,但自 2014 年开始有所改善。

2.2 空气污染扩散气象条件 MK 趋势检验分析

1981–2018 年经济区的空气污染扩散气象条件逐渐转差,究竟是哪个区域、哪个月份对于转差的贡献更大,则需要做进一步分析。鉴于两时次小风频次的时空变化特征相似,采用 M-K 方法针对各月降水量以及

08 时小风频次的时间序列在 95% 的置信区间上进行趋势检验。

降水量的趋势检验结果(图 6)表明,除冬季外,降水趋势的分布呈现较为明显的区域性特征。如图 6(a)所示,春季 β 值自西北向东南递减,其中西部与北部边缘地区降水的增长趋势较为显著, β 值超过 $0.4\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$;相反,中部、东南部以及西南边缘地区则表现出小幅的下降趋势,平均 β 值约为 $-0.1\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 。夏季,绝大部分地区均为显著的下降趋势,其中 3 个低值中心分别位于眉山与乐山交界一带、绵阳的西部以及南部;形成鲜明对比的,乐山南部的夏季降水则存在中心值大于 $0.9\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 的高值区。秋季,区域的降水变化趋势空间分布较为不均,经济区中部、东部、西部边缘以及北部边缘地区均表现为小幅的上升趋势,而南部与西南边缘地区则为较小的减少变化趋势;相比之下,乐山南部及绵阳南部分别呈现出较为明显的上升与下降趋势,其中上升幅度达到 $0.5\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$,下降幅度为 $-0.3\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

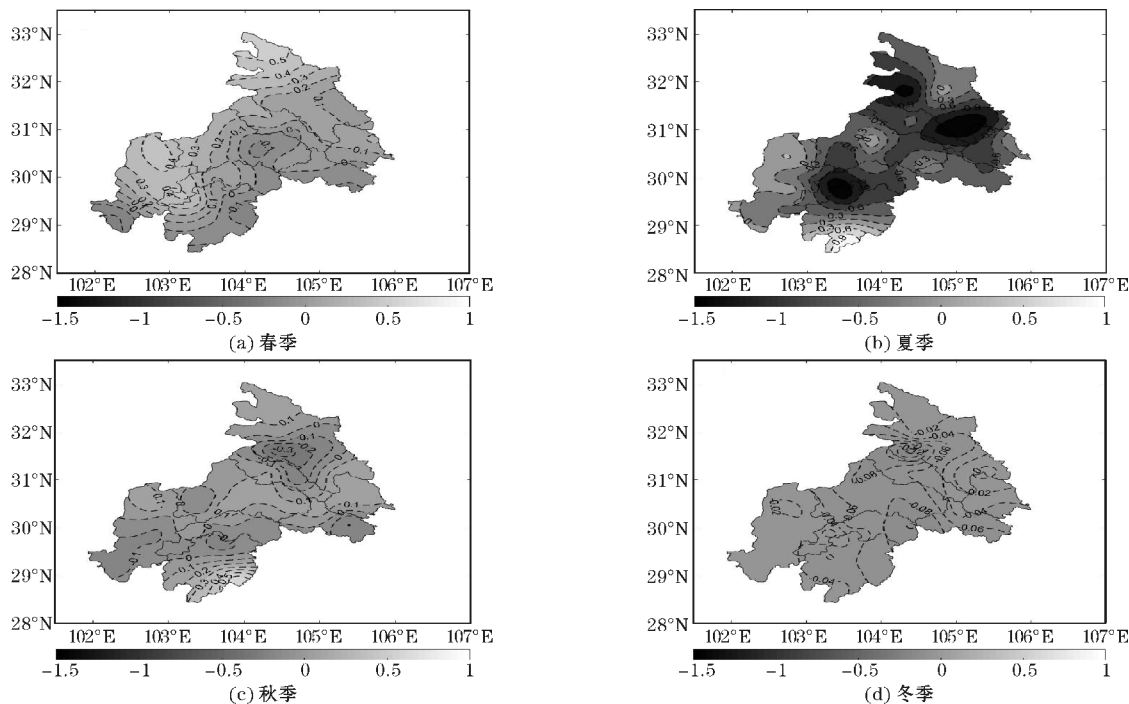


图 6 降水量 β 等值线图

观察月降水趋势的检验结果(表1)发现8月共计8个气象台站呈现出显著的下降趋势,这些站点集中于以成都、眉山以及乐山北部为主的经济区中部一带,平均下降幅度为 $-2.47\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

全年共计6个月份存在超过一半的气象台站出现

表1 降水量 M-K 趋势检验气象台站统计

参数	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	全年
上升(显著)	0	0	0	2	0	0	0	0	0	3	2	1	0
上升(不显著)	14	2	43	46	28	27	23	6	18	47	19	30	17
下降(显著)	0	3	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	1
下降(不显著)	39	48	10	6	25	26	31	40	33	3	32	22	35
无变化	1	1	1	0	1	1	0	0	3	1	1	1	1
下降站数百分比/%	72.2	94.4	18.5	11.1	46.3	48.1	57.4	88.9	61.1	5.6	59.3	40.7	66.7
上升站数百分比/%	25.9	3.7	79.6	88.9	51.9	50.0	42.6	11.1	33.3	92.6	38.9	57.4	31.5

再分析各月的平均变化幅度(表略),全年共计7个月份的 β 值小于0,其中7-9月是下降趋势较为显著的时段,尤其在8月 β 值达 $-1.46\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$;相比之下,3、4月则小幅上升,最大值为4月的 $0.32\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 。由此可见,夏季大幅减少的降水量是造成年累积降水量逐渐减少的主要原因。同时发现经济区冬季降水也表现为下降的趋势,虽然幅度偏小,但鉴于冬季降水基数较小,且冬季为四川地区空气质量偏差的时段^[8],因此小幅减少的降水量仍会对冬季空

下降的趋势,多集中在夏、冬两季。此外,年降水序列呈现下降趋势的站数百分比达66.7%,且全年的平均下降幅度达 $-1.52\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$,表明1981-2018年经济区的降水量是逐步减少的。

气质量的进一步恶化造成较为严重的影响。

与降水量不同,各季节的小风频次 β 值分布特征(图7)基本一致,高值中心均位于绵阳西部,最大值为夏季的0.76,且经济区的西北边缘一带都表现出较为显著的增长趋势。四季的低值中心均出现在雅安西南部,最小值为春季的-1.12。另外,东部地区各季节的小风频次同样表现为下降趋势,但下降幅度较小,集中在 $-0.2\sim-0.4$ 。而以成都、眉山为主的中部地区未表现出明显变化。

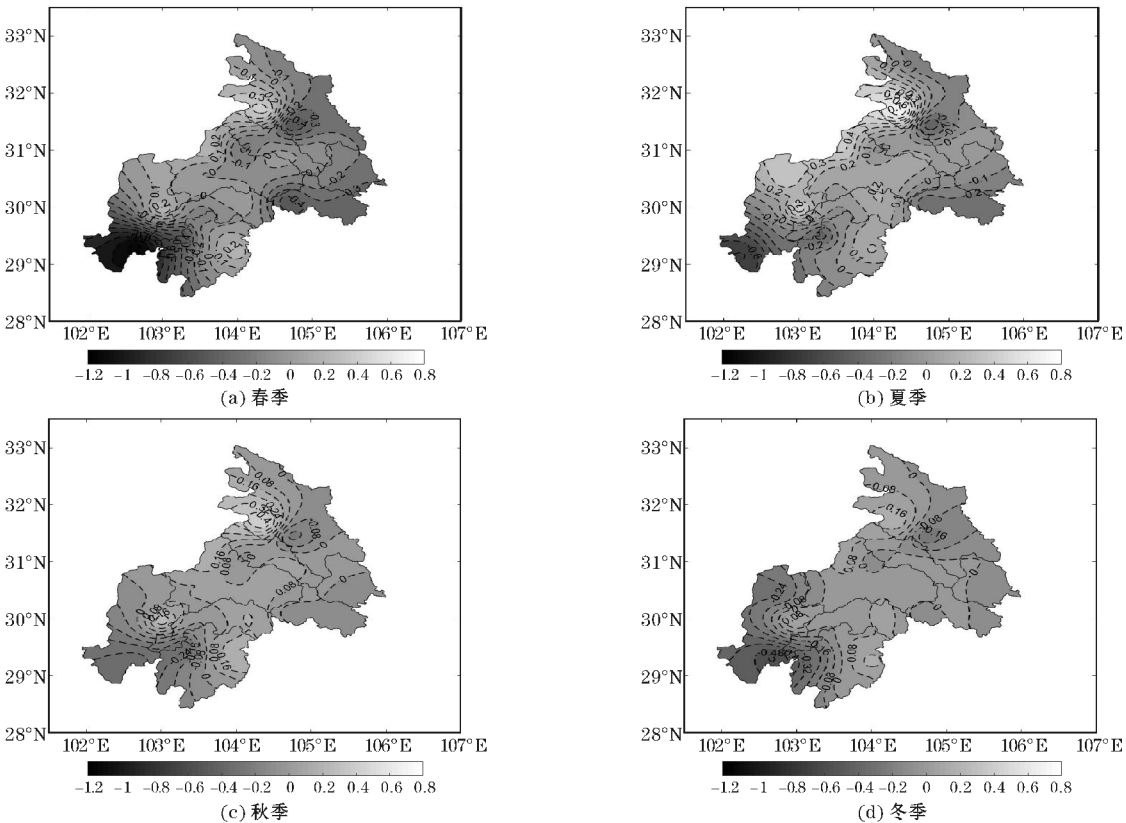


图7 小风频次 β 等值线图

进一步分析各月的趋势检验结果(表 2),可以看到,除 2-5 月外,具有显著上升趋势的气象台站数量与上升站数百分比明显偏多,尤其在 6 月、10 月、11 月以及 12 月。对比图 7 与表 2 发现除成都、眉山外,其余地区各季节的变化趋势基本维持不变;而在春季,成

都与眉山出现了较大范围的 β 负值区,这与表 2 中 3-5 月的下降站数陡增密切相关。结合前文降水量的分析结果,经济区冬季降水的减少以及小风频次的增加对空气质量的进一步转差产生了叠加效应,以成都、德阳以及眉山为主的中部地区受此影响较为严重。

表 2 小风频次 M-K 方法趋势检验气象站统计

参数	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	全年
上升(显著)	7	8	8	3	11	12	10	11	15	14	12	7	18
上升(不显著)	21	18	10	13	11	20	17	20	16	23	23	27	13
下降(显著)	5	10	15	19	13	5	9	7	8	3	4	1	10
下降(不显著)	16	16	19	17	18	16	16	15	14	12	14	18	12
无变化	4	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0
下降站数百分比/%	39.6	49.1	64.2	67.9	58.5	39.6	47.2	41.5	41.5	28.3	34.0	35.8	41.5
上升站数百分比/%	52.8	49.1	34.0	30.2	41.5	60.4	50.9	58.5	58.5	69.8	66.0	64.2	58.5

3 结论与讨论

通过分析 1981-2018 年成都平原经济区地面气象台站观测资料,得到以下主要结论:

(1)降水量与相对湿度具有相似的空间分布特征:高值区均位于雅安东部、眉山西部以及乐山西北部一带,且随时间演变两者均表现出下降的变化趋势;风场条件则未出现明显变化,绝大部分地区的年平均小风频次大于 82% ;

(2)降水的 M-K 趋势检验结果表明 7-9 月为降水量下降最为显著的时段,且呈显著下降趋势的站点多集中于经济区中部一带;

(3)小风频次的 M-K 趋势检验结果表明除 2-5 月外,具有显著上升趋势的气象台站数量与上升站数百分比明显偏多,且西北边缘地区是引起全域年小风频次呈上升趋势的主要原因;

(4)整体而言,1981-2018 年经济区的空气污染扩散气象条件是逐步转差的,而 2014 年是其空气污染扩散气象条件有所好转的时间节点。但值得注意的是,王碧茵等^[24]指出 2008-2017 年成都地区大气扩散能力有所下降。类似地,本研究发现 1981-2018 年成都地区的年累积降水量逐步减少(图 1),且 M-K 趋势检验的结果也表明以成都为主的经济区中心一带降水量出现显著的下降趋势,尤其在夏季该区域的 β 值低至 $-2.47\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 。此外,如图 4 所示,自 2013 年成都地区的相对湿度开始出现回升,进一步佐证了大气扩散能力有所下降的观点。成都作为经济区的中心,高人口密度、高汽车持有量与高污染物排放量,加以呈减弱趋势

的大气扩散能力,无疑会对成都地区的大气污染防治工作带来更大挑战。因此,除成都地区需要加强自身管控外,8 市还应当密切交流合作,建立区域联防机制,充分运用有利的天气过程,联合实施人工影响天气作业,从而更加全面、高效地改善整个区域的空气质量。

参考文献:

[1] 中国气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京:气象出版社,2003.

[2] 中国气象局. 霾的观测与预报等级[M]. 北京:气象出版社,2010.

[3] 吴兑. 霾与雾的区别和灰霾天气预警建议[J]. 广东气象,2004(4):1-4.

[4] 吴兑. 关于霾与雾的区别和灰霾天气预警的讨论[J]. 气象,2005,31(4):3-7.

[5] 吴兑. 再论都市霾与雾的区别[J]. 气象,2004,32(4):9-15.

[6] Zhang X Y, Wang Y Q, Niu T, et al. Atmospheric aerosol compositions in China, spatial temporal variability, chemical signature, regional haze distribution and comparisons with global aerosols[J]. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 2011,11(9):26571-26615.

[7] 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.

[8] 刘佳,马振峰,孙彧,等. 1981-2014 年四川不同强度霾时空特征及气候成因研究[J]. 环境科学学报,2016,36(12):4328-4339.

- [9] 孙彧,马振峰,刘佳,等.不同判别方法下四川霾日的气候变化特征[J].环境科学学报,2016,36(11):3913-3921.
- [10] 吴兑.灰霾天气的形成与演化[J].环境科学与技术,2011,34(3):157-161.
- [11] 马小会,廖晓农,唐宜西,等.北京地区重空气污染天气分型及个例分析[J].气象与环境学报,2017,33(5):53-60.
- [12] 王跃思,姚利,王莉莉,等.2013年元月我国中东部地区强霾污染成因分析[J].中国科学:地球科学,2014,44:15-26.
- [13] 陈敏,马雷鸣,魏海萍,等.气象条件对上海世博会期间空气质量影响[J].应用气象学报,2013,24(2):140-150.
- [14] 陈镭,马井会,甄新蓉,等.上海地区空气污染变化特征及其气象影响因素[J].气象与环境学报,2017,33(3):59-67.
- [15] Sun Y, Niu T, He J J, et al. Classification of circulation patterns during the formation and dissipation of continuous pollution weather over the Sichuan Basin, China [J]. Atmospheric Environment, 2020, 223: 117244.
- [16] 付桂琴,张杏敏,尤凤春,等.气象条件对石家庄 PM_{2.5} 浓度的影响分析[J].干旱气象, 2016, 34(2): 349-355.
- [17] 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.
- [18] 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,2013,2013(13):18-27.
- [19] 徐宗学,张楠.黄河流域近50年降水变化趋势分析[J].地理研究,2006,25(1):27-34.
- [20] 马志刚.成都平原卵砾石层地震响应研究[D].成都:成都理工大学,2009.
- [21] 宋明,韩素芹,张敏,等.天津大气能见度与相对湿度和 PM₁₀ 及 PM_{2.5} 的关系[J].气象与环境学报,2013,29(2):34-41.
- [22] 丁一汇,柳艳菊.近50年我国雾和霾的长期变化特征及其余大气湿度的关系[J].中国科学:地球科学,2014,44(1):37-48.
- [23] 张夏琨,王春玲,王宝鉴.气象条件对石家庄空气质量的影响[J].干旱气象,2011,29(1):42-47.
- [24] 王碧菡,廖婷婷,欧阳正午,等.2013-2017年成都冬季空气质量状况改善评估[J].环境科学学报,2019,39(11):3648-3658.

Analysis on Variation Characteristics of Meteorological Conditions of Air Pollution Diffusion in the Economic Zone of Chengdu Plain

ZHOU Cong^{1,2}, WANG Weijia^{1,2}, MIAO Hongyan³, SUN Yu⁴

(1. Chengdu Meteorological Bureau, Chengdu 611133, China; 2. Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration, Beijing 100081, China; 3. Meteorological Administration Training Center Liaoning Branch, Shenyang 110166, China; 4. Sichuan Meteorological Disaster Prevention Technology Center, Chengdu 610072, China)

Abstract: In order to better analyze the variation trends of meteorological conditions of air pollution diffusion in the Economic Zone of Chengdu Plain, observational data of 53 ground weather stations from 1981 to 2018 are used and the Mann Kendall trend test is mainly used to discuss and analyze the temporal and spatial variation characteristics of meteorological conditions such as rainfall, wind and so on. The results show that, from 1981 to 2018, the spatial distribution characteristics of cumulative annual precipitation amounts and daily average relative humidity were almost the same and they both showed downward trends, and the significant downward trend of summer precipitation is the important factor which leading to the decrease of cumulative annual precipitation. Moreover, in the aspect of near-surface wind-fields, excepting southwest of Ya'an, the frequencies of small wind show upward trends, and the magnitude of the upward trend in northwest marginal areas is more obvious. Overall, the meteorological conditions of air pollution diffusion in the Economic Zone of Chengdu Plain are becoming worse from 1981 to 2018, especially the situation of central region is of the most significant.

Keywords: atmospheric environment; meteorological conditions; temporal and spatial variation characteristics; trend test