

川渝地区雾霾时空分布特征及影响因子分析^①

白莹莹¹, 张德军², 杨世琦³, 王永前^{2,3}, 刘 川¹

1. 重庆市气候中心, 重庆 401147; 2. 成都信息工程大学 资源环境学院, 成都 610225;

3. 重庆市气象科学研究所, 重庆 401147

摘要: 利用 1981—2014 年川渝地面气象观测资料, 分析了川渝地区雾霾的时空分布特征及影响因子, 结果表明: 川渝地区雾日变化总体呈下降趋势, 两种雾日观测资料的倾向率分别为 $-6 \text{ d}/10 \text{ a}$ 和 $-8.2 \text{ d}/10 \text{ a}$, 研究时段内未出现突变点, 80 年代到 90 年代初, 雾日变化周期以 $2\sim 4 \text{ a}$ 为主, 21 世纪后以 $8\sim 10 \text{ a}$ 为主. 霾日总体趋势与雾日变化相反, 呈上升趋势, 倾向率为 $8.2 \text{ d}/10 \text{ a}$, 1997 年开始发生突变, 90 年代变化周期以 $2\sim 4 \text{ a}$ 为主, 2000 年后 $4\sim 10 \text{ a}$ 周期变化较显著. 在对雾霾与风速和空气相对湿度的关系讨论中发现, 整个川渝地区雾与风速的变化趋势一致, 与相对湿度呈正相关; 霾与风速的变化趋势相反, 与相对湿度呈负相关.

关键词: 雾; 霾; 时空分布; 影响因子

中图分类号: X513

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2018)11-0112-08

雾和霾经常同时出现, 但本质上是两种完全不同的天气现象. 将水平能见度低于 1 km 的天气现象判识为雾^[1]; 水平能见度低于 10 km , 排除降水、沙尘暴、扬沙等天气现象造成的视程障碍, 水平相对湿度低于 80% 时判识为霾, 相对湿度 $80\%\sim 95\%$ 时, 按照大气成分指标进一步判识^[2].

川渝地区由于境内地形复杂, 西临青藏高原, 东临四川盆地, 特别是四川盆地因群山屏蔽, 地形闭塞, 静风频率高, 加之水道多, 空气湿润, 近地面气层的相对湿度大, 不利于污染物的扩散, 有利于雾和霾的发生. 对于雾霾方面的研究工作, 大多集中在了京津冀^[3]、长三角^[4]和珠三角^[5]等地区, 或单独针对重庆^[6-7]和四川^[8-9]的雾霾研究, 而以川渝地区作为一个整体研究雾和霾特征的工作相对较少. 由于自身的地理条件和工业发展产生的污染, 使得川渝地区成为除京津冀、长江三角洲和珠江三角洲外我国第四大雾霾高发区. 因此本文拟利用川渝地区气象观测数据, 分析川渝地区雾和霾的整体时空分布和长期变化特征, 将对认识川渝地区雾和霾的气候特征有重要意义.

1 数据处理及研究方法

研究所采用的观测数据为四川省和重庆市区域内 75 个气象站点的 1981—2014 年的观测数据, 气象站点分布如图 1 所示, 观测数据包括: 能见度、相对湿度和天气现象等, 数据由四川省气象局和重庆市气象局提供.

文中雾和霾的数据来源有两个, 一个来自于天气现象中雾和霾的观测记录, 一个来自于利用能见度和

① 收稿日期: 2018-03-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471305); 重庆市科委社会与民生创新专项项目(cstc2017shmsA20012); 中国气象局预报预测核心业务发展专项项目(CMAHX20160406); 重庆市气象局开放基金资助项目(kfj-201402); 四川省教育厅创新团队资助项目(16TD0024).

作者简介: 白莹莹(1981-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事气候分析评估研究.

通信作者: 王永前, 博士, 教授.

相对湿度反算. 反算的依据是国家标准 GB/T27964 - 2011《雾的预报等级》^[1]、气象行业标准 QX/T113 - 2010《霾的观测和预报等级》^[2]以及重庆市地方标准 DB50/T270 - 2008《气象灾害标准》^[10](图 2). 根据判识标准分离统计出 1981—2014 年川渝地区雾和霾的日数, 采用气候倾向率、气候趋势系数、Mann-Kendall 检验(以下简称 M-K 检验)^[11]和 Morlet 小波等统计方法^[12], 对 1981—2014 年川渝地区雾、霾的时空分布特点进行研究分析.

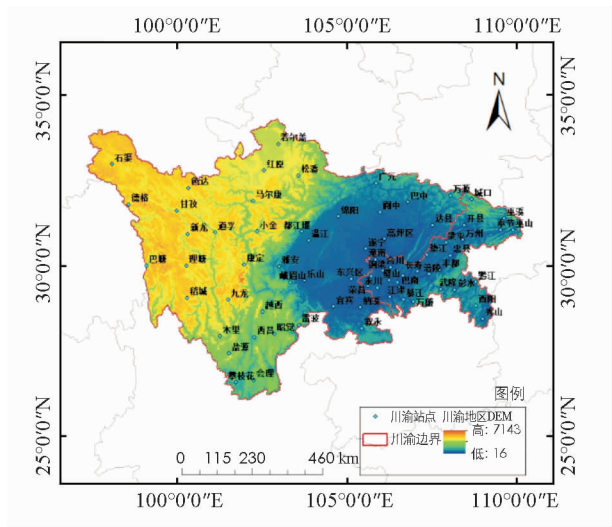


图 1 研究区域

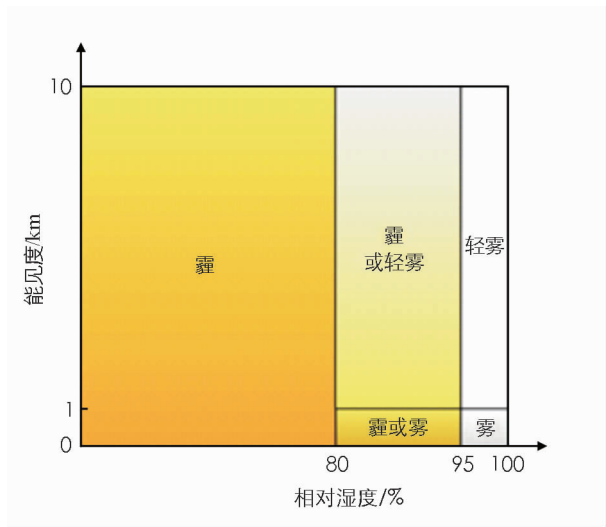


图 2 雾和霾的分类示意图

2 结果分析

2.1 川渝地区雾日气候特征

研究表明, 持续的浓雾天气不仅对交通产生较大的影响, 还会对人体的健康造成极大的危害, 可引发哮喘、呼吸道疾病、支气管炎等病症^[13]. 近年来, 随着观测资料的积累, 人们对雾有了新的认识, 并利用雾的观测数据进行了诸多的研究, 产生了大量的研究方法. 气候统计方法作为雾的传统研究方法, 已获得了最为广泛的认可和应用. 雾的观测数据主要来源有两个: 第一个是天气现象数据, 第二个是用能见度数据历史反算得到. 两个数据的资料都比较完整, 本文利用两类资料对长时间序列下的川渝地区雾日时空变化进行分析研究.

2.1.1 雾日时间变化分析

利用两种观测数据对川渝地区雾日历年变化进行统计分析. 按雾的分类标准, 统计川渝地区 75 个气象站点从 1981—2014 年间各年的平均值, 并将各站点的雾日数求均值得到整个川渝地区的雾日历年变化图(图 3).

川渝地区雾日历年变化可以看出, 利用两种资料计算的雾日年际变化基本一致, 1981—1994 年间, 天气现象数据中雾日较能见度反算结果偏多 5~10 d, 1995 年后两种数据差异不大, 特别是 1995—2005 年, 两种资料的分析结果基本重合. 以往针对雾的研究, 大多数学者采用的是天气现象数据, 而用能见度反算的结果研究相对较少, 由于天气现象数据只能判断有无, 并无量级, 随着目前能见度自动观测的普及和推广, 资料的时空分辨率都会进一步提高, 因此为了更好地评估雾的强度和分类, 能见度反算的结果在以后的研究中将更具优势(图 3).

对川渝地区雾日历年变化进行趋势性分析, 雾日总体呈减少趋势, 两种资料的气候倾向率分别为 -6 d/10 a 和 -8.2 d/10 a, 气候趋势系数分别为 0.798 和 0.864, 均可通过显著性检验, 但在 2012 年后, 两种数据统计出的雾日呈快速反弹增长的趋势, 2014 年雾日已为 1997 年以来雾日最多的一年.

在研究时段内, 由能见度反算的雾日平均值最大值为 38.6 d/a, 出现在 1992 年, 最小值为 11.7 d/a, 出现在 2012 年, 年平均雾日天数为 28 d; 天气现象数据得到的平均值最大值为 47.7 d/a, 最大值同样出

现在 1992 年, 最小值出现在 2011 年为 15.4 d/a, 平均值为 32.5 d/a. 整体平均值上, 由能见度反算得到的雾日天数较由天气现象数据得到的雾日天数少 5 d/a.

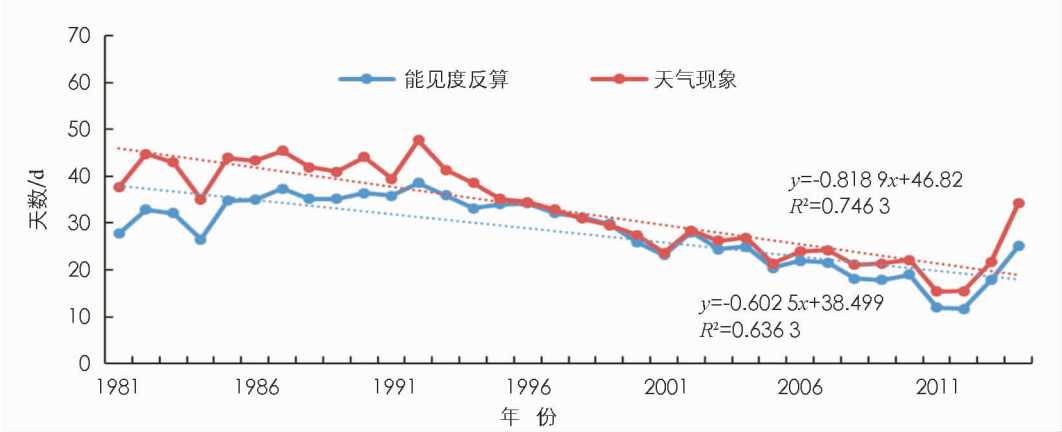


图 3 1981—2014 年川渝地区雾日历年变化

图 4—5 分别给出了川渝地区由能见度资料反算雾日和由天气现象提取的雾日的突变检验. 从能见度资料反算的雾日突变检验结果中可以看出, 除 1983 年和 1984 年外, 从 1981 年到 1994 年 UF 值都大于 0, 表示在该时间段内川渝地区的雾日年平均值在呈增长的趋势, 且在 1985 年到 1994 年间 UF 值大于临界值 (± 1.96), 表明此时段内雾日平均值增长趋势有统计学意义; 由天气现象计算得到的雾日平均值在 1981—1994 年间总体呈上升趋势, 但上升的趋势无统计学意义. UF 统计量和 UB 统计量在临界值范围内的交点对应的时间是突变开始的时间, 而在图 4—5 中, 两资料数据的 UF 统计量和 UB 统计量的交点均出现在临界值范围外, 因此不存在突变点.

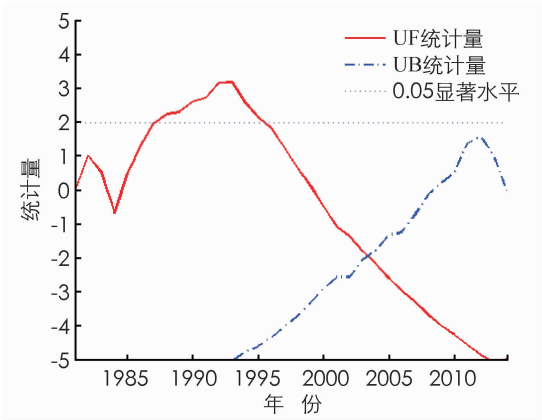


图 4 川渝地区雾日反算突变检验结果

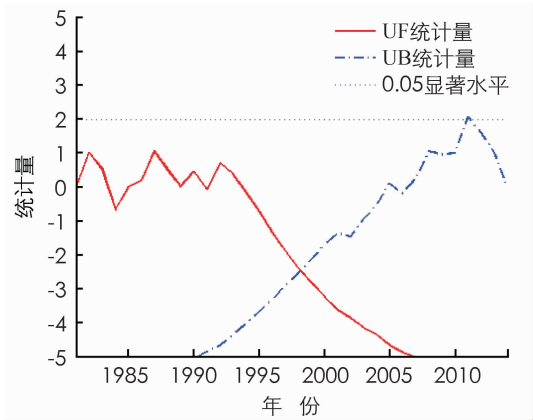
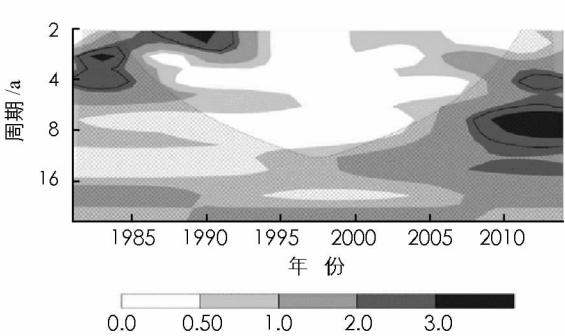


图 5 川渝地区天气现象雾日突变检验

Morlet 小波分析的结果显示, 两种资料的周期分析结果基本一致, 图 6 为天气现象观测雾日的小波分析结果, 可以看出整个研究时段(1981—2014 年)上没有出现较明显的周期振荡, 但出现了两个振荡较明显的短时间序列的振荡中心, 20 世纪 80 年代到 90 年代初, 雾日的变化以 2~4 a 为周期的年际变化为主, 21 世纪后 8~10 a 周期振荡较为显著.

进一步分析了川渝地区雾日的年代变化, 可以看出, 2000 年后雾日显著减少, 2000—2014 年



实线部分通过了 90% 的信度检验, 阴影部分为头部效应影响区

图 6 川渝地区天气现象观测雾日 Morlet 小波序列

平均雾日较 1981—1999 年偏少超过 10 d(表 1), 分析其原因可能与川渝地区的气候变化有关,《西南区域气候变化评估报告》和《重庆气候变化评估报告》中指出,川渝地区的变暖较全国和全球变暖偏晚,大多开始于 90 年代中后期,这与雾日大幅减少的时间基本一致。

表 1 川渝地区雾日年代变化

	能见度反算/d	天气现象/d
1981—1990 年	33.3	42.0
1991—2000 年	33.1	35.8
2001—2010 年	22.0	23.9
2011—2014 年	16.7	21.7

2.1.2 雾日空间变化分析

川渝地区雾日的空间分布总体呈西少东多、高原少、盆地多的现象。两种资料在空间分布的表现总体一致,但在个别地区仍有较大差异。从天气现象的观测数据来看,川西高原雾日总体偏少,甘孜、道孚、马尔康、小金、松潘、稻城、九龙、西昌等地年平均雾日在 1 d 以下;除峨眉山年雾日达 300 d 以上,盆地大部地区雾日在 30~50 d 之间;盆周山地雾日略少,约在 10~20 d 之间。能见度反算的结果空间分布总体一致,只是在高原和盆地的差异相对较小,高原在 5~15 d 之间,盆地在 35~50 d 之间(图 7)。

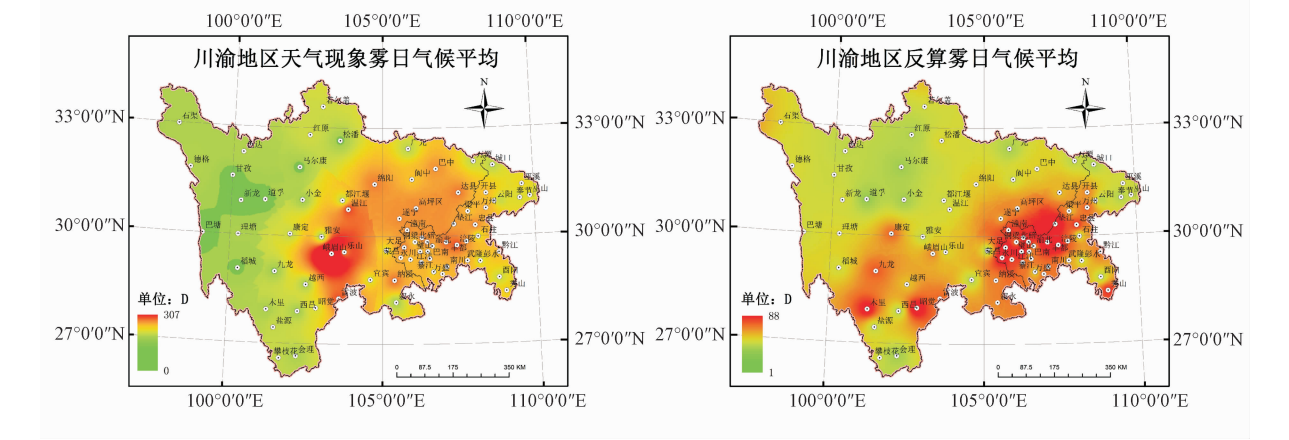


图 7 两种资料计算川渝地区雾日气候平均(1981—2010 年)分布图(单位: d)

2.2 川渝地区霾的气候特征

由于天气现象数据提取的霾日量级偏小太多,究其原因,得知霾的观测在 2013 年以前采用人工观测,2013 年以后才有仪器自动观测,历史天气现象数据人工无法准确识别霾的特征,因此提取出的霾日数据量级很小,且参考价值低。利用能见度和相对湿度反算的霾日结果总体比较稳定,因此本文对霾日的分析主要依据能见度反算结果。

2.2.1 时间变化

图 8 为利用能见度和相对湿度资料反算的霾日结果,结果显示川渝地区霾日总体呈增加趋势,气候倾向率为 8.2 d/10 a,气候趋势系数为 0.754,可通过 99% 的显著性检验,变化趋势刚好与雾日的变化相反,且霾日显著增加的时段与雾日显著减少的时段基本一致。2000 年后,霾日有一个激增的时段,2006 年后有所缓和,年际波动也有增加的趋势。

为更清楚分析川渝地区霾日反算平均值在时间序列上的变化情况,对霾日平均值做 Mann-Kendall 突变检验,检验结果如图 9 显示,在 1981—1990 年间,霾日的 UF 统计量在大于 0 和小于 0 间振荡,表明该时间段内反算的霾日年平均值一会呈上升趋势,一会呈下降趋势,且变化的趋势都无统计学意义,1990 年后,UF 均大于 0,表明在 1990 后川渝地区霾日平均值整体上呈上升的趋势,且在 2000 年后,UF 值大于

临界值, 年平均值变化趋势达到有统计学意义的程度, 超过临界线的时间范围为突变时间范围. 在 1997 年, UF 统计量和 UB 统计量相交, 且相交点介于临界值内, 说明在 1997 年后, 川渝地区霾日平均值开始发生突变.

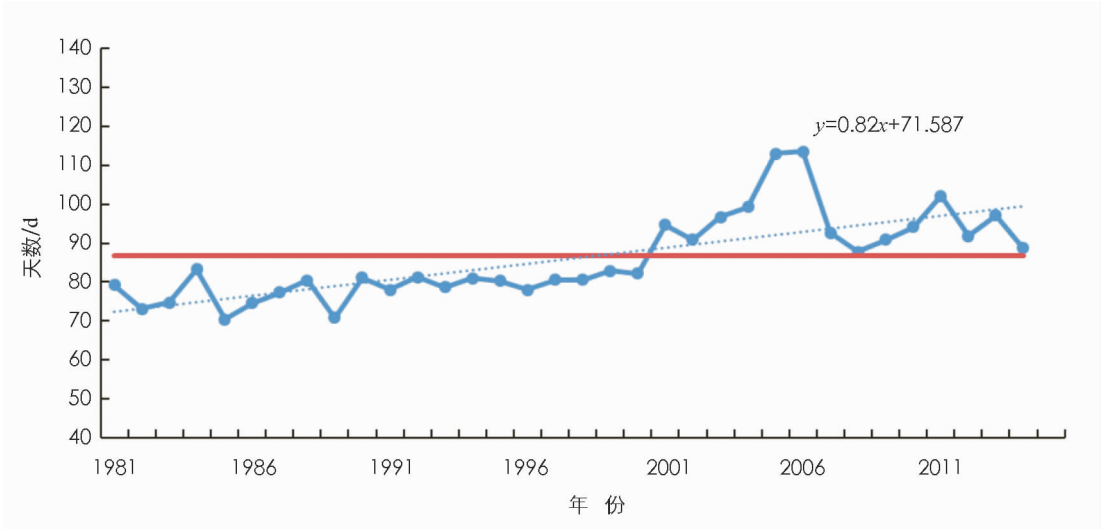


图 8 1981—2014 年川渝地区霾日历年变化和常年值

利用 Morlet 小波分析了川渝地区霾日的周期变化, 霾日的周期变化与雾日的变化相似, 在整个时间周期内未出现明显的振荡中心. 20 世纪 90 年代以前以年际振荡为主, 主要周期为 2~4 a 周期, 在 2000 年后 4~10 a 周期开始显著, 也可以看出 2000 年前后霾日经历了明显的突变(图 10), 这与突变分析结果保持一致.

对川渝地区霾日的年际变化进行二项式 9 点平滑, 也可见霾日在 2000 年前后发生突变, 并且可以通过 99% 的置信度检验(图 11), 这也与突变检验和小波分析的结果基本一致. 进一步探讨霾日在 2000 年后激增的可能原因, 一是由于气候变化引起的; 二是观测手段的变更, 2000 年后能见度的观测逐渐由仪器自动观测替代了人工观测; 三是由于工业和经济快速发展、大规模城市化建设等带来的空气污染的加重.

2.2.2 空间变化

图 12 给出了川渝地区霾日气候均值空间分布图, 可以看出川渝地区霾的分布主要呈现“盆东多, 高原少, 局地性明显”的特点. 霾日最多出现在纳溪(201.9 d)超过 200 d, 最少为马尔康(8.6 d)不足 10 d. 高原在 15~80 d 之间, 盆地多在 60~110 d 之间.

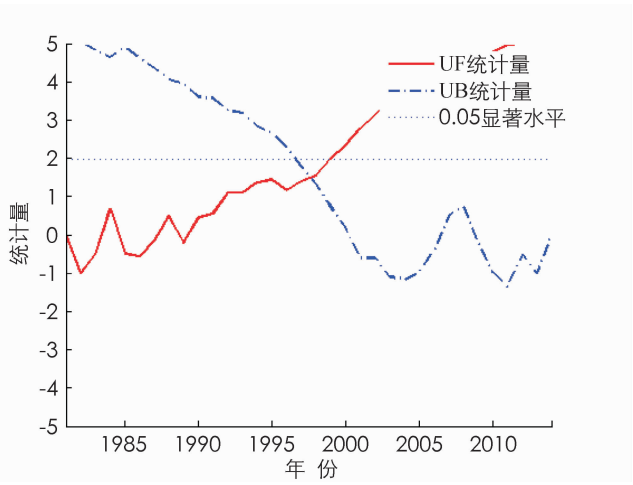
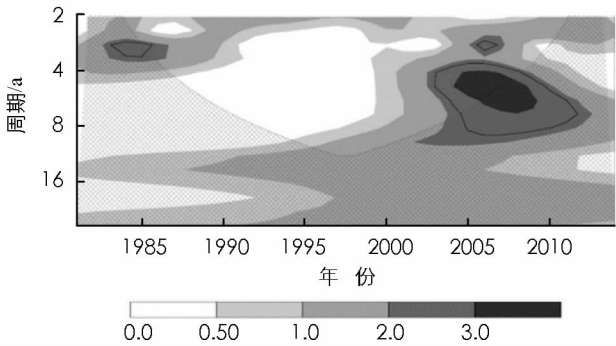


图 9 川渝地区霾日突变检验图



实线部分通过了 90% 的信度检验, 阴影部分为头部效应影响区

图 10 川渝地区能见度反算霾日 Morlet 小波序列

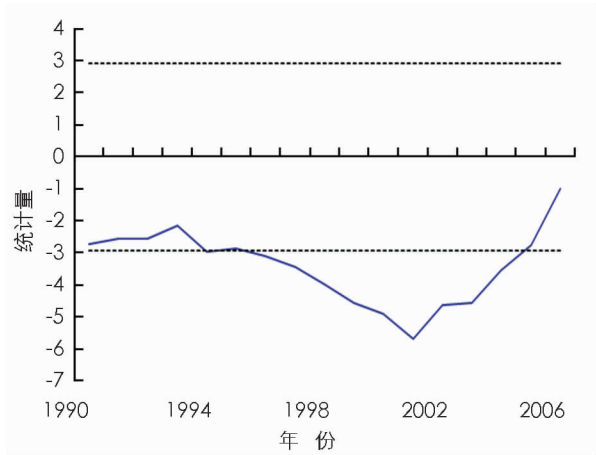


图 11 川渝地区霾日二项式
9 点平滑曲线及 t 检验

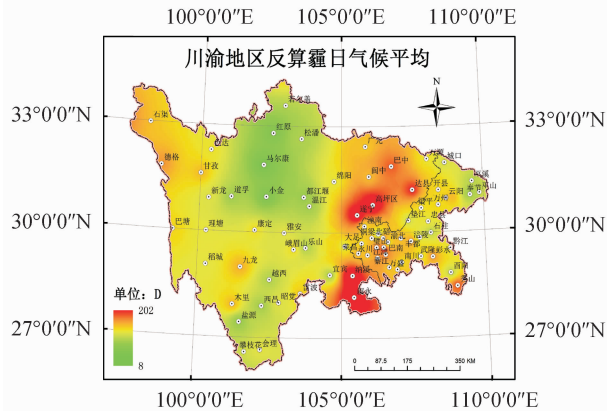


图 12 川渝地区霾日气候平均
(1981—2010 年) 空间分布图(单位: d)

2.3 影响因子分析

王珊、张玉成等^[14-15]在对雾霾影响因子的研究中指出,地面温度、风速和空气相对湿度对雾霾天气的产生具有一定的影响,温度越低,雾霾天出现的频率越高,风速和霾日数间呈负相关关系,而空气相对湿度与雾日间存在正相关关系,和霾日间存在负相关关系.利用风速资料和空气相对湿度资料讨论两气象要素与雾霾天气之间的关系.图 13 为 5 种数据的历年时间变化图,从历年变化结果中可以看出,风速与雾日反算结果的变化趋势保持一致,和霾反算结果呈相反的趋势,而空气相对湿度历年变化与雾和霾的反算结果趋势不明显,因此利用空气相对湿度数据与由天气现象和能见度反算的雾日、霾反算结果进行相关性分析,分析结果显示:空气相对湿度与基于能见度反算的雾日结果间相关系数为 0.415*,与天气现象数据得到的雾日结果的相关性为 0.377*,与霾日反算结果之间呈负相关关系,相关系数为-0.537**(*表示在 0.05 水平(双侧)上有统计学意义,**表示在 0.01 水平(双侧)极有统计学意义),说明川渝地区整体上空气相对湿度与雾日呈正相关关系,与霾日呈负相关关系.

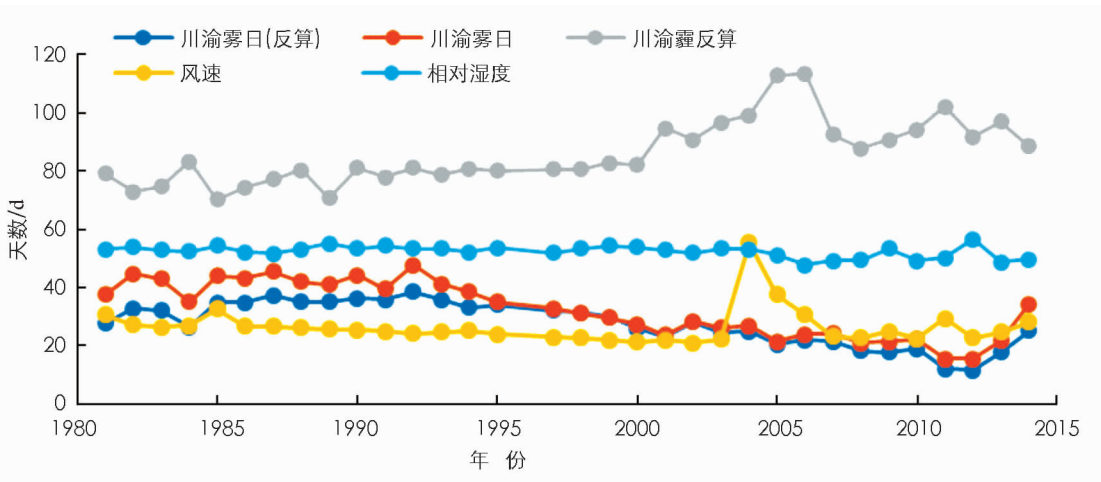


图 13 各气象要素历年变化图

不同的区域雾和霾的分布情况、空气中的相对湿度和风速等条件都不一致,因此要讨论雾和霾与风速和空气中相对湿度的关系,不仅要寻找整体上的相关关系,还要针对不同的地区进行分析比较.本文选取川渝地区 5 个较典型的站点,提取站点的雾和霾的反算数据用于与气象因子间的相关性分析.从表 2 相关性分析结果中可以看出,不同的地区雾、霾与风速和相对湿度的相关关系不一致,石渠地区,雾、霾与风速呈负相关关系,与相对湿度呈正相关关系,且相关性通过置信度检验;稻城站,霾反算与风速间呈正相关,与相对湿度间呈负相关关系,马尔康地区雾与气象因子间相关性较差;遂宁地区霾日反算与风速和相对湿

度间的呈较好的正相关关系；纳溪地区雾、霾与风速间的相关性较差，与相对湿度呈正相关关系，从各单站来看，雾、霾反算与风速间的相关性较差，与相对湿度的相关性较好，除马尔康站外，其他 3 个站点与相对湿度间都呈正相关关系，且通过置信度检验。

表 2 各站点雾日、霾日与气象因子相关性

	雾霾分类	风速	相对湿度
石渠	雾日	−0.312*	0.347*
	霾日	−0.426*	0.447**
稻城	雾日	0.360*	0.271
	霾日	0.793**	−0.677**
马尔康	雾日	0.088	−0.215
	霾日	0.401**	−0.518**
遂宁	雾日	0.118	0.584**
	霾日	0.463**	0.404*
纳溪	雾日	0.300	0.672**
	霾日	0.049	0.362*

注：* 表示在置信度(双侧)检验 0.05 水平时，相关性有统计学意义；** 表示在置信度(双侧)检验 0.01 水平时，相关性极有统计学意义。

3 结 论

1) 川渝地区雾日总体呈显著减少趋势，能见度反算和天气现象两种数据分析结果基本一致，2010 年后，雾日有反弹的趋势，特别是 2014 年，为 1997 年以来雾日最多的一年。雾日的空间分布总体呈西少东多、高原少、盆地多的现象。两种资料在空间分布的表现总体基本一致，但在个别地区仍有较大差异。

2) 川渝地区霾日总体呈显著增加趋势，其趋势刚好与雾日变化相反，且霾日发生显著增加的时段与雾日显著减少的时段基本一致。2000 年后，霾日有一个激增的时段，2006 年后有所缓和，年际波动也有增加的趋势。空间分布主要呈现“盆东多、高原少、局地性明显”的特点。

3) 影响因子分析显示：风速与雾日的变化趋势保持一致，和霾日结果呈相反的趋势；空气相对湿度与雾日呈显著正相关关系，与霾日呈显著负相关关系；讨论各单站时，雾、霾与风速和相对湿度的相关结果不一致。

参考文献：

[1] 中国气象局. 雾的预报等级: GB/T27964-2011 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.

[2] 中国气象局. 霾的观测和预报等级: QX/T113-2010 [S]. 北京: 气象出版社, 2010.

[3] 张英娟, 张培群, 王冀, 等. 1981—2013 年京津冀持续性霾天气的气候特征 [J]. 气象, 2015, 41(3): 311—318.

[4] 史 军, 崔林丽. 长江三角洲城市群霾的演变特征及影响因素研究 [J]. 中国环境科学, 2013, 33(12): 2113—2122.

[5] 吴 兑, 廖碧婷, 陈慧忠, 等. 珠江三角洲地区的灰霾天气研究进展 [J]. 气候与环境研究, 2014, 19(2): 248—264.

[6] 张天宇, 孙 佳, 王 勇, 等. 重庆雾日的气候特征及变化 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2014, 36(7): 1—9.

[7] 周国兵, 向 波, 胡春梅, 等. 基于自动能见度观测的雾和霾天气判别指标研究 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2017, 42(10): 78—83.

[8] 唐信英, 罗 磊, 王 鸽, 等. 四川省大雾时空分布特征研究 [J]. 高原山地气象研究 [J], 2009, 29(3): 60—65.

[9] 卿海涛, 徐金霞, 马振峰, 等. 四川盆地雾霾灾害风险区划初探 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2017, 39(9): 1—9.

[10] 重庆市气象局. 气象灾害标准: DB50/T 270-2008 [S]. 北京: 气象出版社, 2008.

[11] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京: 气象出版社, 1999: 69—72.

[12] 桑燕芳, 王中根, 刘昌明. 小波分析方法在水文学研究中的应用现状及展望 [J]. 地理科学进展, 2013, 32(9): 1413—1422.

- [13] 黄先成. 近 43 年安阳市雾日和霾日时空特征分析 [J], 河南科学, 2016, 34(3): 397—403.
- [14] 王 珊, 修天阳, 孙 杨, 等. 1960—2012 年西安地区雾霾日数与气象因素变化规律分析 [J]. 环境科学学报, 2014, 34(1): 19—26.
- [15] 张玉成, 李亚滨. 1961—2013 年黑龙江省雾霾时空分布特征及影响因子分析 [J]. 黑龙江气象, 2014, 31(3): 17—19, 37.

Spatial and Temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors Analysis of Smog in Sichuan-Chongqing

BAI Ying-ying¹, ZHANG De-jun²,
YANG Shi-qi³, WANG Yong-qian^{2,3}, LIU Chuan¹

1. Chongqing Climate Center, Chongqing 401147, China;

2. College of Environmental and Resource Science, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China;

3. Chongqing Institute of Meteorological Sciences, Chongqing, 401147, China

Abstract: The temporal and spatial distributions and long-term variation characteristics of haze were obtained for the Sichuan-Chongqing region from 1981 to 2014 by studying surface meteorological data and using the climatic statistic method. Simultaneously, the Mann-Kendall method and the Morlet wavelet analysis were used to discuss the changing trend, the change point and time period. The results show that fog days in Sichuan-Chongqing showed a downward trend, the propensity rates of two observations are $-6\text{days}/10\text{a}$ and $-8.2\text{days}/10\text{a}$, respectively, the trend factors are 0.798 and 0.864, no mutation occurred during the study period. From the 1980s to the early 1990s, the main change cycle of fog days is 2 to 4 years, and after the 21st century, the main change cycle of fog days is 8 to 10 years. On the contrary, the changing trend of haze days is on the rise, the propensity rates of observation is $8.2\text{d}/10\text{a}$, the trend factor is 0.754, the trend of change occurred in 1997, the main change cycle of haze days is 2 to 4 years in 90s, and after the 21st century, the main change cycle of haze days is 4 to 10 years. In discussion of the relationships between fog, haze and meteorological factors, it has been found that the trend of fog and wind speed is consistent and positively correlated with relative humidity in the whole research area, that the trend of haze and wind speed is opposite, and that it is negatively correlated with relative humidity, when considering only a single site, the results are inconsistent across site.

Key words: fog; haze; the temporal and spatial distributions; impact factor

责任编辑 包 颖