

绵阳市大气能见度的变化特征及其影响因子分析

王於琪^{1*}, 李镇洪¹, 陈文龙²

¹绵阳市气象局, 四川 绵阳

²凉山州气象局, 四川 凉山

Email: 565356379@qq.com

收稿日期: 2021年6月4日; 录用日期: 2021年7月5日; 发布日期: 2021年7月13日

摘要

大气能见度是衡量大气透明度的重要指标, 常被用于表征大气环境质量, 与人们的生活和健康息息相关。近年来, 受空气污染和环境恶化的影响, 绵阳地区大气能见度显著降低, 冬季低能见度天气频繁出现, 给居民环境和道路交通等造成了严重危害。因此, 本文基于绵阳地区2008~2019年的气象资料和2014~2016年的空气污染物资料, 运用科学的统计方法, 分析绵阳地区大气能见度的变化规律; 基于大气能见度与气象因子和污染物因子之间的相关性, 建立合理的数学模型, 识别大气能见度影响因子。

关键词

大气能见度, 气象因子, 污染物因子, 相关性分析

Analysis of Atmospheric Visibility Variation Characteristics and Its Influencing Factors in Mianyang City

Yuqi Wang^{1*}, Zhenhong Li¹, Wenlong Chen²

¹Mianyang Meteorological Bureau, Mianyang Sichuan

²Liangshan Meteorological Bureau, Liangshan Sichuan

Email: 565356379@qq.com

Received: Jun. 4th, 2021; accepted: Jul. 5th, 2021; published: Jul. 13th, 2021

*第一作者。

Abstract

Atmospheric visibility is an important indicator to measure atmospheric transparency. It is often used to characterize the quality of atmospheric environment, which is closely related to people's life and health. In recent years, the atmospheric visibility in Mianyang city has decreased significantly due to the air pollution and environmental deterioration. The frequent occurrences of low-visibility weather in winter have caused serious impacts on the environment and road traffic. Therefore, in this study, the variation characteristics of atmospheric visibility in Mianyang city were analyzed by using scientific statistical methods with the meteorological data from 2008 to 2019 and the air pollutant data from 2014 to 2016. Based on the correlations among atmospheric visibility, meteorological and pollutant factors, a reasonable mathematical model was established to identify the influencing factors of atmospheric visibility.

Keywords

Atmospheric Visibility, Meteorological Factor, Contamination Factor, Correlation Analysis

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

大气能见度是衡量大气透明程度的重要指标，它可以反映出某地的空气清洁度以及空气污染状况。国外许多研究学者对于大气能见度下降事件的分析看出：低能见度事件频繁发生的重要原因是由于人类活动造成的颗粒污染物浓度的增加。从 1960 s 开始，颗粒污染物影响大气能见度的现象受到国内外学者的广泛关注，直到现在也是科学家们赋有兴趣的课题[1]。Sloane 等分析了气象要素和空气污染物对大气能见度的影响，解释了相对湿度增大使得大气能见度下降的原因。Lee 等、Doyel 和 Dorling 等使用很长一段时间的大气能见度资料发现能见度的变化特征和气象条件存在一定的相关性。影响大气能见度的主要因子是气象因子和颗粒污染物因子[2]。在气象因子中，对大气能见度影响最大的两个因子是风速和相对湿度，学者们一致认为，相对湿度的高低直接使颗粒物粒子的尺度谱大小发生变化，从而改变颗粒物粒子的消光系数，使大气能见度发生变化[3]。

大气能见度在我国的研究研究开始的开始时间晚于欧洲发达国家，王淑英等[4]分析了北京市近 10 年来大气能见度的变化趋势和影响因素，研究证明了大气能见度有显著的日变化、季节变化和年变化。PM10, SO₂, 风速和相对湿度是在冬季起主要作用的影响因素；而 RH、风速大小和 PM10 则是其余三个季节起主要作用的因素，且大气能见度与颗粒物粒子的浓度和 RH 的高低呈显著的负相关性。相关方面的研究证明，颗粒污染物主要通过散射和吸收可见光对大气能见度产生影响[5]。综上所述，以目前我国的研究发展水平来看，低能见度事件的研究主要集中于气象要素和污染物因子的变化特征和活动规律上，在实际预报工作中，虽然预报低能见度事件的水平有所提高，但是还是困难重重，存在着很多不足之处。

近些年来，特别是许多发展中国家以牺牲环境为代价换取临时的经济和工业的快速增长，导致全球变暖，环境问题愈加严重，空气污染加剧，人口众多的大城市低能见度事件出现的越来越多，特别是在 1、2、12 月份，雾霾天气长期笼罩着城市，导致大气能见度显著降低。对大气能见度的观测，受到很多

因素的影响, 主要有人为误差, 气象因素以及空气污染等, 降水也可造成近地层的能见度降低, 但是最主要的原因是由于污染物粒子对可见光的散射。本文从天气学形势的角度, 揭示影响该地区大气能见度的成因及来源, 以期为绵阳地区大气能见度的改善提供参考依据。

2. 资料说明

1) MICAPS (Meteorological Information Comprehensive Analysis and Process System)地面常规气象观测数据。2) 四川省环保局提供的绵阳地区的 2014~2016 年的空气质量数据日资料。3) NECP/NCAR6 小时一次的逐日再分析资料水平分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$ 。4) 中国国家基础地理信息中心提供的覆盖中国的 90 cm \times 90 cm 精度的 DEM 高程数据。

3. 绵阳市大气能见度的变化特征分析

3.1. 近十年大气能见度的年变化分析

根据绵阳地区八个国家站 2008~2019 年的大气能见度的观测数据可知, 平均大气能见度为 08 时 11.92 km, 14 时 19.23 km, 20 时 16.21 km, 三个时次的平均值为 15.79 km。八个县市区中, 大气能见度最低的为江油市 10.5 km; 最高的为梓潼县 25.31 km。具体各个县市区大气能见度情况见表 1。

Table 1. Atmospheric visibility distribution (Unit: km)

表 1. 绵阳地区大气能见度分布情况(单位: 千米)

县市区(站号)	时次			
	08 时	14 时	20 时	三时次平均值
安州区(56190)	8.41	15.64	12.06	12.04
平武县(56193)	13.67	18.25	16.10	16.00
北川县(56194)	11.94	14.42	12.22	12.86
江油市(56195)	8.35	12.36	10.77	10.50
绵阳市(56196)	9.59	16.17	16.10	13.96
梓潼县(57304)	19.78	29.15	26.99	25.31
三台县(57307)	12.74	28.59	20.66	20.66
盐亭县(57308)	10.88	19.27	14.80	15.00
县市区平均	11.92	19.23	16.21	15.79

另外由表 1 可知, 能见度较差的时次是出现在早晨 11.92 km, 最好出现在午后, 19.23 km 傍晚次之 16.21 km。由绵阳地区年平均能见度空间分布图 1 所示。从图中可以清楚地看出, 其空间分布呈现东高西低的分布特征。东部几县(梓潼县, 三台县, 盐亭县)能见度年平均较高, 约在 15~25 km 之间, 西部地区能见度年平均较低, 约在 10~15 km 之间。其中江油市大气能见度年平均最低为 10.50 km, 这是由于江油市拥有钢厂, 水泥厂以及火电厂等大型企业的原因, 其生产过程中产生的大量污染物和粉尘是该市能见度偏低的主要原因。

根据绵阳城区近年来的大气能见度地面观测数据可知, 2008 年~2019 年的平均能见度为 13.11 km, 11.96 km, 11.71 km, 12.31 km, 12.52 km, 14.68 km, 16.48 km, 18.89 km, 19.89 km, 18.11 km, 18.31 km, 13.68 km。从 2013 年开始, 能见度呈逐渐上升的趋势, 2010 年是平均能见度最低的一年, 2016 年是能见度最高的, 与能见度最低的 2010 年相比较, 2016 年上升了近 70%。

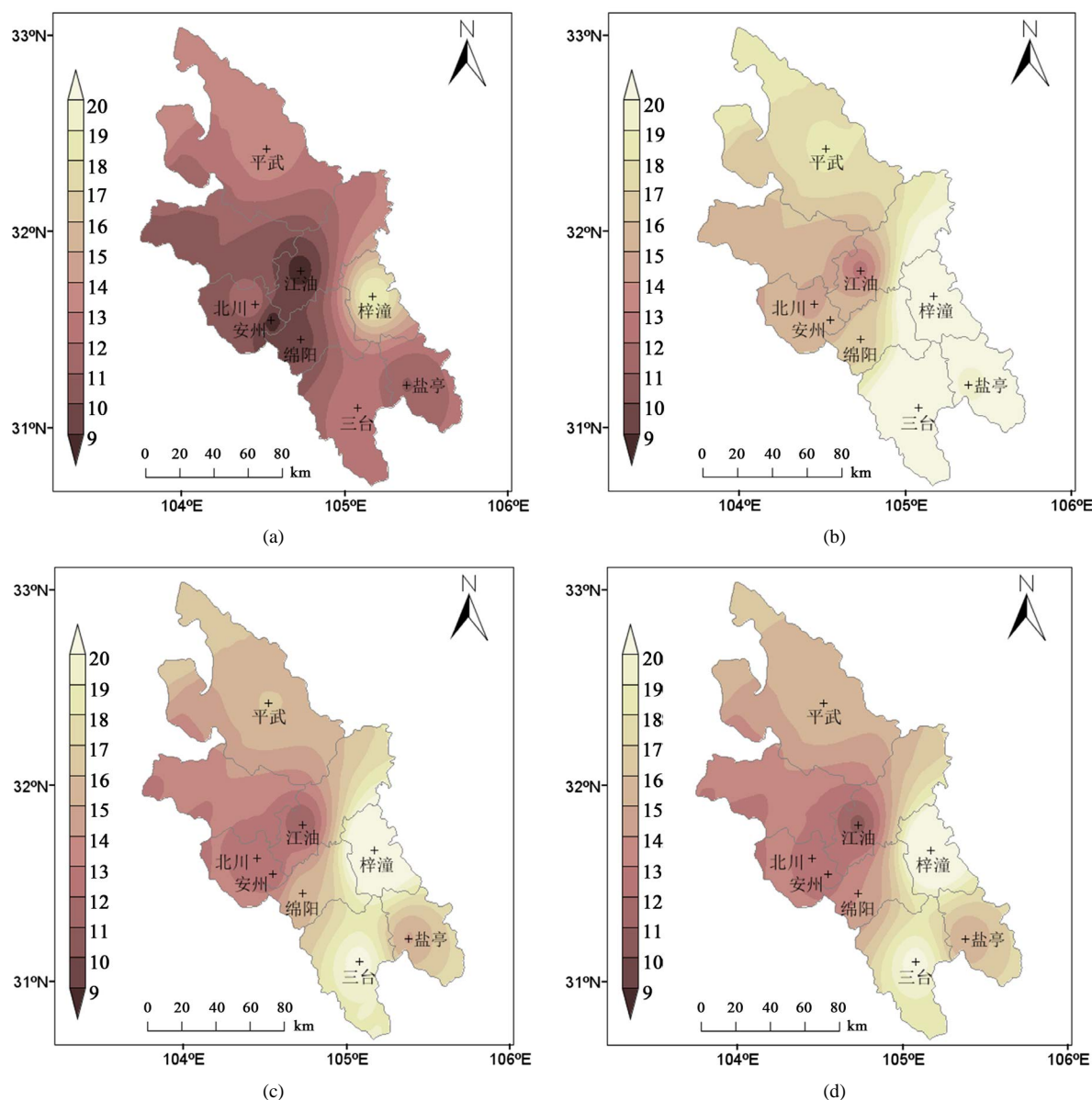


Figure 1. Spatial distribution of visibility in Mianyang ((a) 08; (b) 14; (c) 20; (d) All day average)
图 1. 绵阳地区全天平均值的能见度空间分布图((a) 08 时; (b) 14 时; (c) 20 时; (d) 全天平均)

3.2. 近十年大气能见度的季节变化分析

绵阳地区不同县市区的大气能见度都有明显的季节变化,但是不同县市区之间的季节变化不尽相同,为了进一步揭示大气能见度在季节尺度上的变化规律,图 2 给出了 2008~2019 年绵阳地区大气能见度的四季平均的空间分布。从图 2(a)可以看出,春季绵阳地区能见度呈现“北高南高中间低”的分布。图 2(b)夏季的能见度变化趋势与春季相似。图 2(c)和图 2(d)秋季和冬季的能见度可以明显看出,特别是冬季,大气能见度值明显低于春季和夏季,江油市和绵阳市(涪城区、游仙区)重工业较发达的区县,由于冬季降水较少,大气层结相对稳定,大气扩散条件差,大气污染物累积,导致能见度明显降低,容易出现雾霾天气。除天气条件外,秋季农作物收割后生物质的燃烧以及煤气燃气的排放也大量增加了污染物的出现,导致低能见度天气的频繁出现。

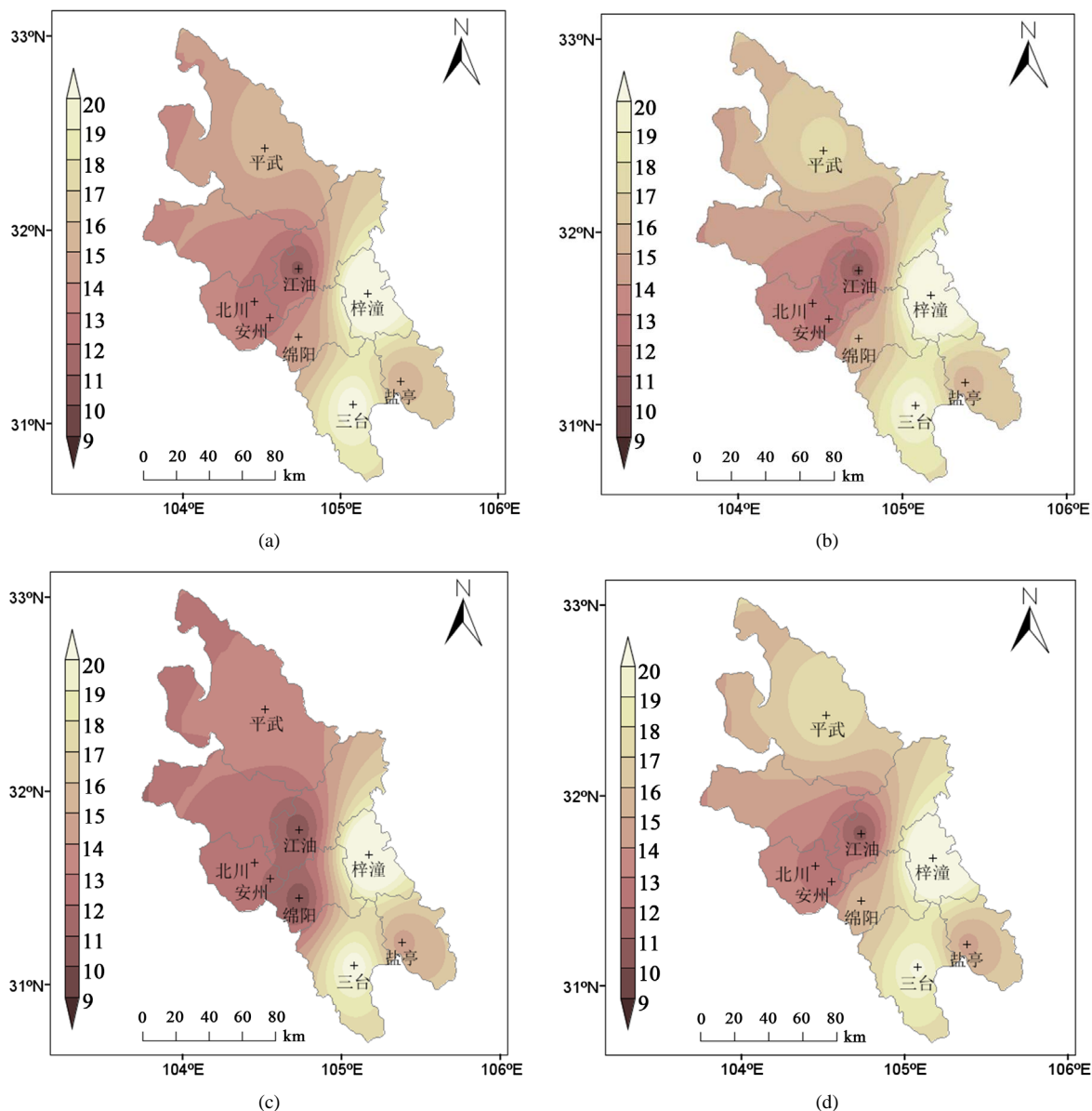


Figure 2. Seasonal average of visibility in Mianyang ((a) Spring; (b) Summer; (c) Autumn ; (d) Winter)
图 2. 绵阳地区大气能见度季节平均的空间分布图((a) 春季; (b) 夏季; (c) 秋季; (d) 冬季)

3.3. 2016 年大气能见度的日变化

图 3 为绵阳地区春、夏、秋、冬四个季节大气能见度的日变化曲线，由图可见，四个季节的大气能见度存在明显的日变化，总体特征呈现“一峰一谷”的特征，低值和峰值分别出现在 08 时和 17 时。这是由于夜晚稳定大气边界层和逆温层的存在，抑制了气溶胶粒子的扩散和传输，大量的颗粒污染物积聚在边界层的底部[6]。另外，夜间温度低，相对湿度较高，风速较小，吸湿能力较强的粒子会更多的聚集在一起，吸收更多的水汽，增大其吸收和散射面积，从而成比例的降低大气能见度。

其中，冬季的能见度水平最低，日变化的趋势较为平缓，变化范围在 8000~140,000 m 之间，主要是与冬季的气候特点、逆温作用以及静稳的大气条件有关，致使近地层的污染物不容易扩散。从图中可以看出 05 时~08 时是大气能见度最低的时段，在 17 时的时候出现最大值，之后由于对流强度的减小，

光照强度的减弱，还有下班高峰期交通污染源的排放等原因，能见度开始逐渐降低，直至凌晨又出现最低值。

夏季的能见度水平最高，而能见度的日变化趋势也相对最为明显，特别在 08 时~17 时的变化趋势。随着太阳东升，太阳辐射越来越强，光照强度随之变强，大气能见度逐渐增大，在一天中的 17 时达到最大值。

春秋季节的大气能见度介于冬季和夏季之间。两个季节的变化趋势大致相同，在 11 时~17 时之间十分接近，但是总体上秋季的能见度大于春季。

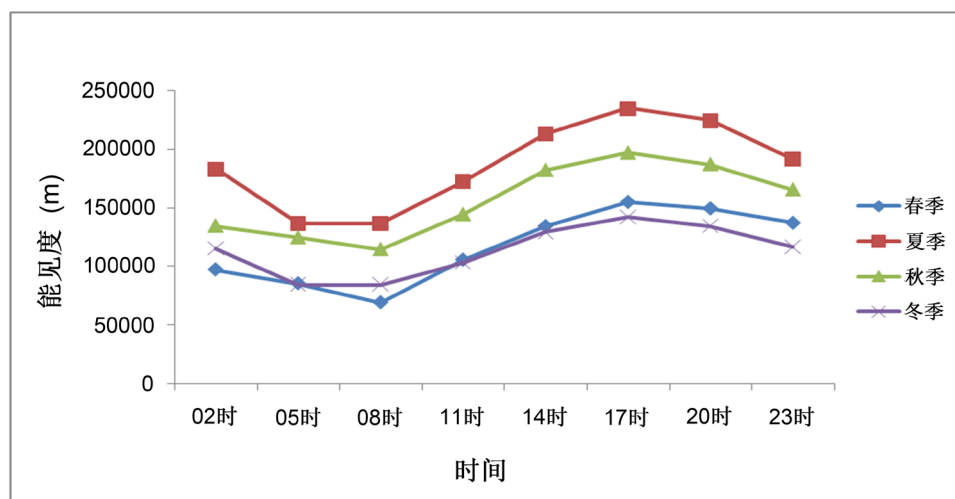


Figure 3. Diurnal variation of visibility in four seasons

图 3. 绵阳主城区春、夏、秋、冬四个季节大气能见度的日变化曲线

4. 绵阳市 2016 年环境空气颗粒物浓度的变化特征分析

4.1. 2016 年 AQI 的季节变化

一个地区的空气质量好坏主要是用 AQI 值来反映，AQI 值越大，表示该地区的空气质量越差。本文选取绵阳地区 2016 冬、春、夏、秋四个季节中的第一个月份作为代表，来详细分析高东区的空气质量的优良。

由表 2 可知，绵阳地区夏季、秋季以及春季的空气质量都较好，春季居中，而冬季最差。冬季绵阳地区空气质量以轻度污染和中度污染为主；春季空气质量以优和良为主；夏季空气质量最好，以优和良为主；秋季空气质量以优和良为主。总体看来，绵阳地区冬季的空气污染较重。

Table 2. Air quality level frequency in four seasons of Mianyang 2016 (%)

表 2. 2016 年绵阳地区四季各等级的空气质量出现频率统计表(%)

季节	优	良	轻度污染	中度污染	重度污染
冬季(1月)	9.7	29.0	41.9	19.4	0.0
春季(4月)	54.8	29.0	12.9	0.0	0.0
夏季(7月)	10	76.7	16.7	0.0	0.0
秋季(10月)	21.9	64.5	12.9	0.0	0.0

4.2. 首要污染物(PM2.5、PM10)的变化特征

4.2.1. 月变化特征

对绵阳地区的首要污染物(PM2.5、PM10)浓度按月份进行统计, 得出绵阳城区 PM2.5、PM10 的月均值。如图 4, 绵阳主城区 PM2.5 和 PM10 的月均浓度变化规律基本相同。PM2.5、PM10 的月均浓度 1 月、2 月和 12 月份相对较高, 最大值分别为 $82.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $109.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 分别维持的范围在 $60\sim 80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $90\sim 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间。3 月份到 11 月份浓度相对较低, 9 月份最低, 浓度分别为 $23.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $37.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 从 1 月开始, PM2.5 和 PM10 浓度逐渐降低, 在 7、8、9 三个月到达低谷, 从 10 月份开始, 有逐渐上升, 呈现出“两头高中间低”的分布形势。

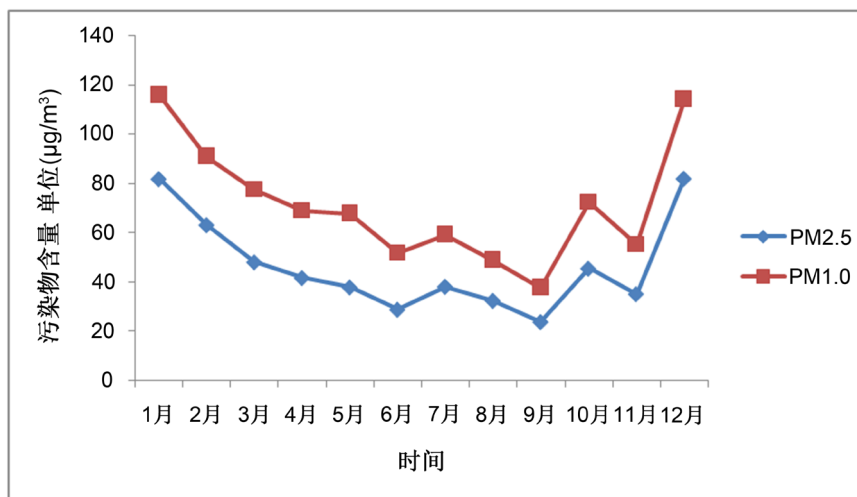


Figure 4. Monthly concentration change of pollutants (PM2.5, PM10) in Mianyang

图 4. 绵阳地区首要污染物(PM2.5、PM10)的月均浓度变化

4.2.2. 季节变化特征

将一年 12 个月分为四个季节, 得出了绵阳地区 PM2.5 以及 PM10 的季节平均浓度变化。如图 5, 绵

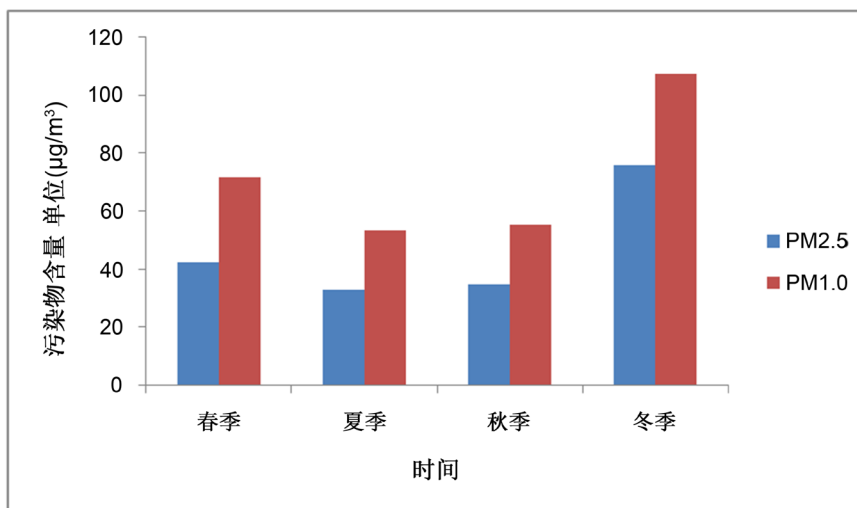


Figure 5. Seasonal concentration changes of pollutants (PM2.5, PM10) in Mianyang

图 5. 绵阳城区首要污染物(PM2.5、PM10)的季节浓度变化

阳地区的 PM_{2.5}、PM₁₀ 的平均浓度都在冬季最高，春季次之，夏季最低，秋季居中。因为在夏季，大气对流活动十分频繁，气流的水平交换和垂直快，加上雨水的冲刷作用，使污染物粒子容易扩散，因此 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度低；而在冬季，降水较少，气温较低，层结稳定，扩散条件差，再加上家家户户的供暖设备的使用，汽车尾气的排放以及燃煤排放量较其他几个季节急剧增加，因而 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度高。

5. 大气能见度与影响因子的相关性分析

大气能见度主要受到气象因子(风速、气温、气压和相对湿度)和污染物因子(PM₁₀、PM_{2.5}、NO₂ 以及 NO_x)的影响。在以下章节中，主要分析影响能见度的几个主要因子的浓度变化，来讨论大气能见度与它们之间的相关性。

5.1. 与气象因子的相关性分析

本节主要利用绵阳地区全年各气象数据的日均值资料，将大气能见度与其进行了相关性分析，分别得到了大气能见度与相对湿度、风速、气温和气压的相关系数。由表 3 可以得出，大气能见度与风速和气温呈显著正相关关系；与相对湿度呈显著的负相关关系；与气压呈不显著的负相关关系。由此可以看出，从相关性来看，对大气能见度影响最大的气象因子是相对湿度，影响最小的是气压，影响程度居中的是风速和气温；从显著性关系来看，风速、相对湿度以及温度都和大气能见度相关性显著，而气压与大气能见度相关性不显著。

Table 3. Correlation coefficient between visibility and meteorological factors

表 3. 大气能见度与各气象因子的相关系数

	能见度	风速	相对湿度	气压	气温
能见度	1				
风速	0.7633	1			
相对湿度	-0.8815	-0.9601	1		
气压	-0.6461	-0.6649	0.5772	1	
气温	0.8558	0.9692	-0.9986	-0.5647	1

临界值：0.7067；在 0.05 水平上显著相关。

5.1.1. 风速对大气能见度的影响

风速对大气能见度有着重要的影响，风速的大小直接影响着污染物浓度的高低以及大气稳定度的状态，导致大气能见度发生明显改变。通常在风速越大时，低能见度事件出现的概率越小，大气能见度越好。

从图 6 可以看出，大气能见度与风速的日变化呈显著的正相关关系。风速越小，颗粒污染物在大气边界层内积聚，不容易扩散，大气能见度降低；而风速越大，污染物的扩散和稀释能力就越强，污染物的浓度就会下降，大气稳定度降低，大气能见度就会升高。

5.1.2. 气温对大气能见度的影响

从图 7 可以看出，大气能见度和气温呈显著的正相关关系，可以得出气温越高，近地层的对流越强，稳定度越差，大气能见度就越好，污染物的浓度也就越低；而气温越低，对流越弱，大气静稳，污染物浓度越高，导致大气能见度变差。虽然说气温和大气能见度的日变化相关性很好，但是并不能说明气温就可以决定大气能见度的变化情况。

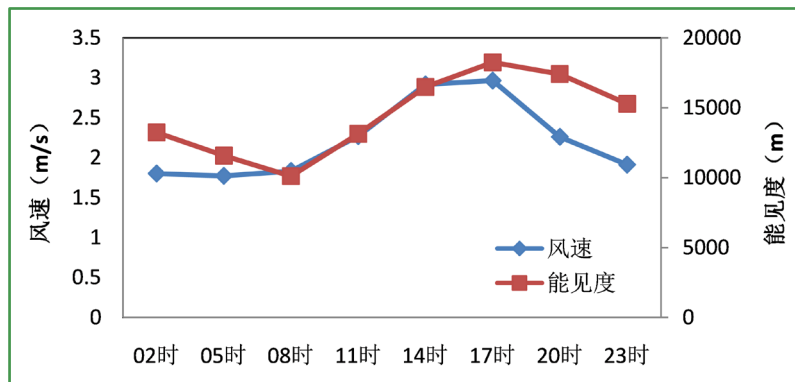


Figure 6. Daily variation curve of visibility and wind speed
图 6. 大气能见度与风速日变化的曲线

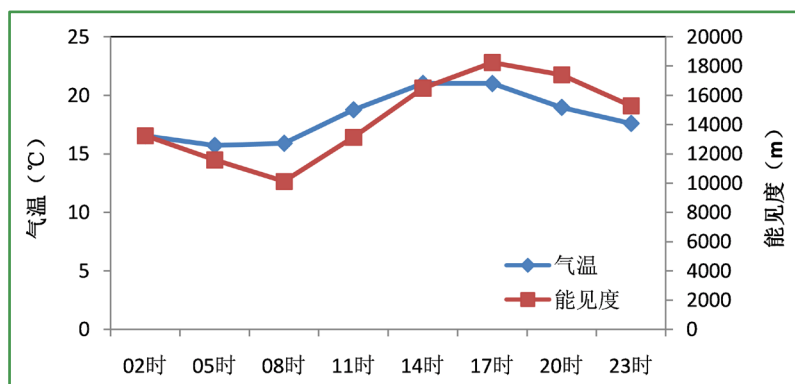


Figure 7. Daily variation curve of visibility and temperature
图 7. 大气能见度与气温日变化的曲线

5.1.3. 相对湿度对大气能见度的影响

从图 8 可以看出，大气能见度与相对湿度呈显著的负相关关系，当相对湿度上升或者下降，大气能见度的变化情况则与之相反。在气象因子中，大气能见度受相对湿度的影响尤为重要，大气中的颗粒物粒子通过吸湿作用改变粒子直径从而影响能见度，加上自身对大气还能产生消光作用，使其反射散射能力增强，致使大气能见度发生改变。再结合风速对大气能见度的直接影响，在高湿和静风的状态下，能见度维持一个较低值，但大气能见度会随着这一状态的打破而增大[7] [8] [9]。

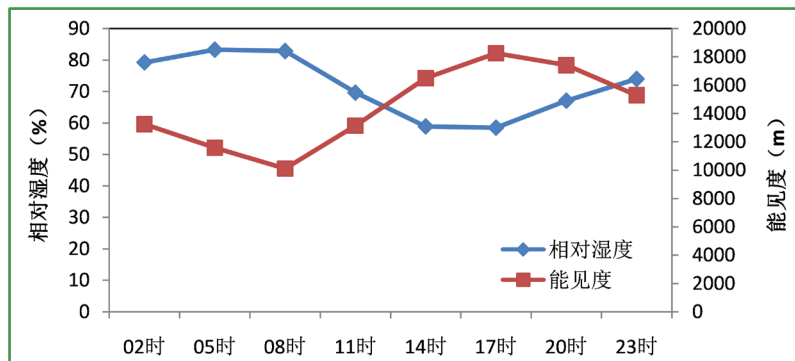


Figure 8. Daily variation curve of visibility and relative humidity
图 8. 大气能见度与相对湿度日变化的曲线

结果显示,当相对湿度高于百分之七十以后,大气中的气溶胶颗粒物通过亲水增长,其粒径、质量浓度和复折射指数等性质随之发生改变,气溶胶粒子的散射率增加更为明显。

5.1.4. 气压对大气能见度的影响

从图9中能看出,大气能见度和气压呈不显著的负相关关系,气压的变化规律和大气能见度的变化规律相关程度小,在某些时刻呈正相关关系,某些时刻呈负相关关系,因此只能看出在能见度较高的时候,对应的是高温和低压的天气[10]。气压较低时,往往受热低压控制,气温较高,天气静稳,有利于污染物的积聚,使得大气能见度降低。

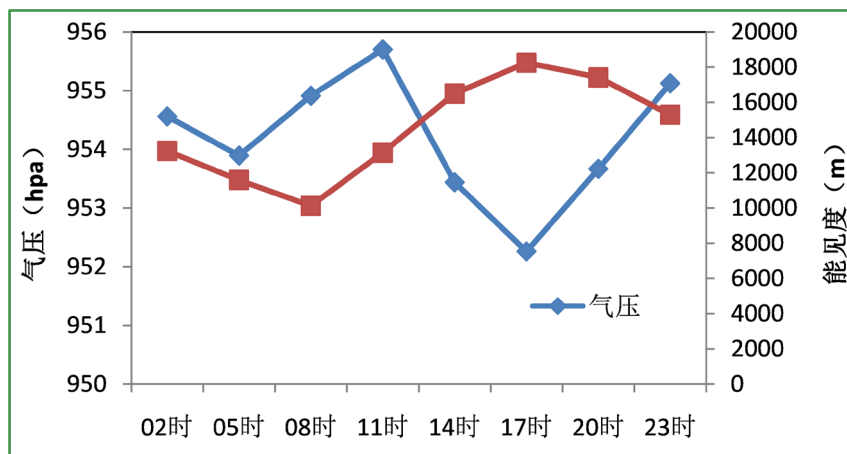


Figure 9. Daily variation curve of visibility and air pressure
图9. 大气能见度与气压日变化的曲线

5.2. 与污染物因子(PM10、PM2.5、NO₂及SO₂)的相关性分析

为了研究大气能见度与各污染物因子浓度之间的关系,特将大气能见度用统计学方法与其进行相关性分析,得出大气能见度与各污染物因子之间的相关系数。从表4中可以看出,大气能见度与PM10和PM2.5呈显著的反相关关系。说明细颗粒污染物对大气能见度的影响显著,且PM2.5与大气能见度的相关性高于PM10与大气能见度的相关性。其次从表中还能看出,大气能见度与SO₂和NO₂也呈反相关关系,但是受到这两个因子的影响很小,相关性较弱,能见度随着SO₂和NO₂浓度的变化改变较小[11][12]。因此在相关性模型中主要考虑PM10和PM2.5对大气能见度的影响。

Table 4. Correlation coefficient between visibility and pollutant factors

表4. 大气能见度与污染物因子的相关系数

	能见度	SO ₂	NO ₂	PM2.5	PM10
能见度	1				
SO ₂	-0.3086	1			
NO ₂	-0.3849	0.5926	1		
PM2.5	-0.6178	0.4933	0.6810	1	
PM10	-0.5512	0.5309	0.6850	0.9570	1

临界值: 0.2424; 在 0.05 水平上显著相关。

5.3. 大气能见度与气象因子和污染物因子的多元回归分析

5.3.1. 与气象要素的回归分析

首先, 全年共 365 个样本: 筛选 80% 作为建模样本, 20% 作为检验样本。其中从 1 月 1 日开始, 连续 4 天作为建模样本, 第 5 天作为检验样本, 然后依次类推。

其次, 采用多元线性回归方法对能见度与气象要素(相对湿度, 温度, 气压, 风速)的回归模型进行分析, 进一步使用逐步回归方法分析结果显示各因子都较显著, 因此四个因子均考虑。

得到如下模型表达式,

$$y(\text{能见度}) = -0.179 * RH + 0.423 * T + 0.249 * P + 0.448 * V - 223.794 \quad (1)$$

其中, RH 为相对湿度, T 为温度, P 为气压, V 为风速。

最后, 利用剩余的 20% 检验样本对上式进行检验。

剔除了能见度异常值得到最后结果, 能见度预测值与能见度实际值相关性显著, $R^2 = 0.518$ 。如图 10。

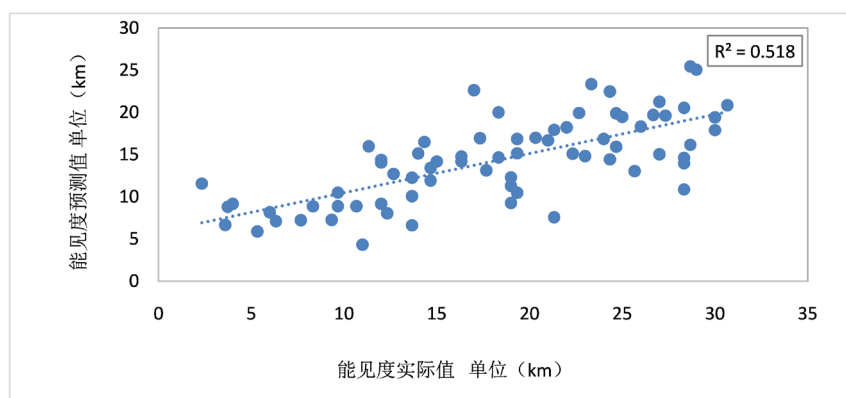


Figure 10. Forecast model test of meteorological factors and visibility
图 10. 气象因子与能见度的预测模型检验

5.3.2. 与污染物因子的回归分析

首先, 全年共 365 个样本: 筛选 80% 作为建模样本, 20% 作为检验样本。其中从 1 月 1 日开始, 连续 4 天作为建模样本, 第 5 天作为检验样本, 然后依次类推。

其次, 采用多元线性回归方法对能见度与污染物因子的回归模型进行分析,

进一步使用逐步回归方法从多个污染物浓度因子中剔除 SO_2 和 NO_2 (由于二者对能见度的预测重要性较低, 检验结果不显著)。

得到如下模型表达式,

$$y(\text{能见度}) = -0.325 * PM_{2.5} + 0.104 * PM_{10} + 26.250 \quad (2)$$

最后, 利用剩余的 20% 检验样本对上式进行检验。

剔除了能见度异常值得到最后结果, 能见度预测值与能见度实际值相关性显著, $R^2 = 0.552$ 。如图 11。

6. 结论

受地形和空气污染的高排放企业等的影响, 绵阳地区年平均能见度呈“东高西低”的空间分布特征。季节上: 春季能见度在空间上呈“南北高中间低”的 U 分布; 而冬季由于降水较少、大气层结相对稳定、大气扩散条件差、大气污染物累积等特点, 造成其能见度明显低于春季和夏季。日能见度总体呈“一峰一谷”的形态特征, 即上午 08 时出现低值, 下午 17 时出现峰值。

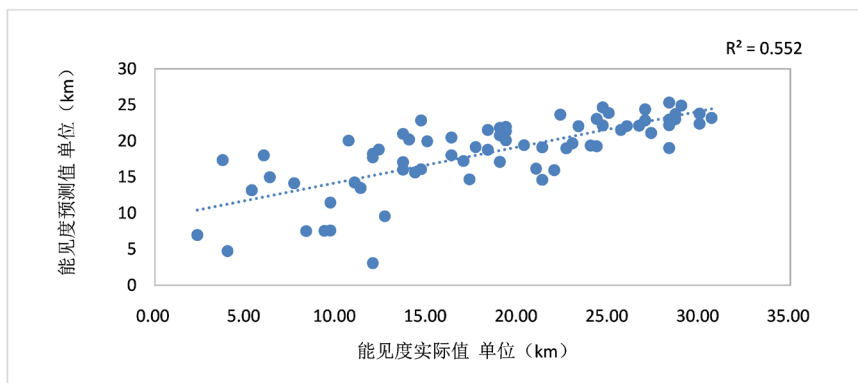


Figure 11. Forecast model test of pollutant factors and visibility

图 11. 污染物因子与能见度的预测模型检验

PM10 和 PM2.5 为绵阳地区的首要污染物，两者在月和季尺度上的浓度变化规律相似，均为冬季最高，春秋次之，夏季最低。冬季浓度最高主要与冬季降水少、气温低、层结稳定、扩散条件差等有关；而夏季大气对流活动频繁，气流水平和垂直交换快，加之雨水冲刷力强，污染物粒子易扩散等是夏季浓度最低的主要原因[13] [14] [15]。

采用多元线性回归方法分别对能见度和气象因子以及污染物因子建立模型，然后将能见度的实际值与预测值进行检验分析，最后得出如下模型的表达式：

$$y(\text{能见度}) = -0.179 * RH + 0.423 * T + 0.249 * P + 0.448 * V - 223.794$$

和

$$y(\text{能见度}) = -0.325 * PPM2.5 + 0.104 * PM10 + 26.250。$$

参考文献

- [1] 王继志, 徐祥德, 杨元琴. 北京城市能见度及雾特征分析[J]. 应用气象学报, 2002, 13(z1): 160-169.
- [2] 杨兰芳, 李宗义. 兰州市城区大气烟尘污染的变化与气象条件分析[J]. 气象, 2004, 30(8): 53-57.
- [3] 王淑英, 张小玲, 徐晓峰, 等. 北京地区大气能见度变化规律及影响因子统计分析[J]. 气象科技, 2003, 31(2): 109-114.
- [4] 范引琪, 李二杰, 范增禄. 河北省 1960~2002 年城市大气能见度的变化趋势[J]. 大气科学, 2005, 29(4): 526-535.
- [5] 林建, 杨贯名, 毛冬艳. 我国大雾的时空分布特征及其发生的环流形势[J]. 气候与环境研究, 2008, 13(2): 171-181.
- [6] 陈梁勋, 杨军. 绵阳市大气污染物天气学分型及气象条件特征分析[J]. 四川环境, 2019, 38(4): 72-78.
- [7] 朱敏, 王体健, 李淑玲, 等. 淄博市污染气象特征与大气环境容量[J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(3): 312-319.
- [8] 马学款, 蔡萝宁, 杨贵名, 等. 重庆市雾的天气特征分析及预报方法研究[J]. 气候与环境研究, 2007, 12(6): 795-803.
- [9] 袁成松, 梁敬东, 焦圣明, 等. 低能见度浓雾监测、临近预报的实例分析与认识[J]. 气象科学, 2007, 27(6): 661-665.
- [10] 苏维瀚, 张秋彭, 沈济, 等. 北京地区大气能见度与大气污染的关系初探[J]. 大气科学, 1986(2): 138.
- [11] 李子华. 重庆市气象能见度低劣的成因[J]. 南京气象学院学报, 1992, 15(4): 550-557.
- [12] 古金霞, 白志鹏, 解以扬, 等. 天津市冬季颗粒物散射消光特征[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2009, 42(2): 73-76+86.
- [13] 刘新罡, 张远航, 曾立民, 等. 广州市大气能见度影响因子的贡献研究[J]. 气候与环境研究, 2006, 11(6): 733-738.

- [14] 周书华, 倪长健, 刘陪川, 等. 成都市 1980~2010 年能见度的变化趋势分析[J]. 成都信息工程学院学报, 2014, 29(1): 91-96.
- [15] 胥全敏, 钟志京, 何小波, 等. 科学城环境空气中 PM2.5 和 PM10 的变化特征及其线性关系研究[C]//中国环境科学学会. 中国环境科学学会学术年会论文集. 北京: 中国农业大学出版社, 2012: 2004-2010.