

基于可吸入颗粒物评估的广西能见度观测资料订正*

李 雄 廖国莲 莫雨淳

(广西气象服务中心, 广西 南宁 530022)

摘要 对能见度观测值进行湿度修订,以凸显能见度与可吸入颗粒物(PM_{10})的关系。以广西3个典型台站(南宁站、桂林站、北海站)为研究对象,利用2001年7月至2011年12月样本数据建立3个台站能见度订正模型,分别采用建模期样本数据与非建模期(2012年1月至2012年12月)样本数据对订正模型进行评估,发现订正后能见度与 PM_{10} 相关系数绝对值有所提高,即订正后能见度可以更好地表征 PM_{10} 污染。最后,分析了湿度影响导致的能见度观测偏差以及订正前后能见度分布频率、趋势变化的差异。

关键词 能见度 订正 湿度 可吸入颗粒物

Visibility correction for studying inhalable particles concentrations in Guangxi province LI Xiong, LIAO Guolian, MO Yuchun. (Guangxi Meteorological Service Center, Nanning Guangxi 530022)

Abstract: Observed visibility was revised to highlight the relationship between visibility and PM_{10} concentration. A model of visibility correction was built using the data from Jul. 2001 to Dec. 2011 at three typical stations (Nanning, Guilin and Beihai) in Guangxi province. The availability of the model was verified not only by the data which had been used to build models, but also by the data from Jan. 2012 to Dec. 2012 which had nothing to do with the building models. Finally, the variation of visibility caused by correction was also analyzed, which included the distance between the corrected visibility and the observed visibility, as well as the differences of frequency and trends before and after correction.

Keywords: visibility; correction; humidity; inhalable particles

空气污染是指空气中污染物的数量、性质及停留时间足以对人类或其他物质产生影响的现象。可吸入颗粒物(PM_{10})是一类重要的空气污染物,动力学直径在 $10\mu m$ 以下的颗粒物可进入人的鼻腔, $7\mu m$ 以下颗粒物能进入咽喉, $2.5\mu m$ 以下的颗粒物则可深入肺部并进入血液循环^[1]。由于 PM_{10} 可以对人体健康产生直接影响,因此,针对 PM_{10} 的研究受到各国政府和学术界的极大关注^[2-4]。

工业革命以来,世界环境经历了从基本未开发状态到严重污染状态的阶段。了解这一时间段 PM_{10} 等悬浮颗粒物的变化特征,对于评估空气污染有着极其重要的作用。遗憾的是,这一时间段的 PM_{10} 观测基本空白。在这一背景下,人们试图寻找和研究在 PM_{10} 观测空白期内可信的、具有长期观测数据并且可以作为 PM_{10} 表征的其他气象要素,大气能见度即是其中之一。

大气能见度是指视力正常的人在当时的天气条件下能看到目标物的最大水平距离。它与颗粒物浓度关系密切,当大气颗粒物质量浓度超过 0.10

$\mu g/m^3$ 时能见度开始下降,达到 $0.15\mu g/m^3$ 时,太阳光中的紫外线下降 7.5% ,当颗粒物质量浓度为 $0.25\mu g/m^3$ 时,能见度下降 52.7% ,太阳辐射损失 12% 以上,颗粒物质量浓度超过 $0.5\mu g/m^3$ 时,能见度下降 80.8% ^[5];因此能见度高低可以反映颗粒物浓度的大小。用大气能见度表征空气污染已成为一种常用处理方法^[6-8]。然而,由于气溶胶吸湿性的影响,湿度的改变会导致能见度观测值与颗粒物浓度关系发生变化^[9],如果对能见度进行适当订正以减少湿度的影响,则订正后能见度将更准确地反映颗粒物浓度特征。目前,国内外仅有极少数文献涉及研究这一订正问题^[10-11]。

广西自20世纪50年代以来经济高速发展,与空气污染相关的各种要素发生剧烈变化。与其他地区类似,该地区在过去数十年空气污染观测资料十分缺乏,本研究采用广西数个典型台站的基础资料,通过模型订正减少湿度对能见度观测资料的影响,从而提高能见度表征 PM_{10} 的能力,以更准确地揭示该地区过去数十年 PM_{10} 的浓度变化。

第一作者:李 雄,男,1972年生,博士,高级工程师,研究方向为空气污染和气候变化。

* 广西自然科学基金资助项目(No. 2010GXNSFA013007、No. 2013GXNSFAA019346);广西教育厅科研项目(No. 2013YB148)。

1 资料与方法

1.1 观测资料

以广西 3 个典型台站(南宁站、桂林站、北海站)为研究对象,其中南宁是广西壮族自治区首府,桂林是著名的旅游城市,北海为广西重要的滨海城市。南宁、桂林具有广西区域雨量大、河流多,生物资源丰富,旅游业发达的特征,北海可代表广西沿海区域。

1980 年 1 月至 2012 年 12 月湿度、能见度、天气现象 3 类气象数据来源于各城市气象台的业务观测;其中湿度为仪器观测记录,能见度、天气现象为气象观测员人工肉眼观测记录;气象观测时间为北京时间每天 02:00、08:00、14:00、20:00 时,考虑到能见度的夜间观测(02:00、20:00 时)和白天观测所选的目标物不同,为保持资料的一致性,仅采用白天能见度观测资料(08:00、14:00 时)。此外,考虑到降雨会造成视程障碍,观测到的能见度不能准确反映空气污染状况,本研究排除有雨日的观测数据。

1.2 主要方法

1.2.1 忽略时间要素分析法

本研究在分析能见度与 PM_{10} 相关关系时采用忽略时间要素分析法,即只按照能见度和 PM_{10} 进行统计分析,不考虑时间要素。该方法可将样本数大幅提高^[12],在长序列观测数据分析中优势尤为明显,通过样本数的扩大可更准确地揭示能见度和 PM_{10} 之间的相互关系。

1.2.2 反距离权重插值法

反距离权重插值是一种常用的插值方法,其基本原理如下:将任意样本点 P 的属性值由周围局部领域内其余样本点的属性值进行加权得到,与样本点距离越近的对 P 点影响越大。参考 ROSENFELD^{[18]1396}做法,采用总样本数的 20%(-10%至 10%)进行距离权重插值,并进行样本数为 11(-5 至 5)的滑动。

2 能见度与 PM_{10} 相关关系

采用反距离权重插值法,忽略时间要素,利用 2001 年 7 月至 2012 年 12 月资料绘制不同相对湿度下 PM_{10} 随能见度观测值的变化曲线,结果见图 1。由图 1 可见,在不同相对湿度下, PM_{10} 浓度与能见度均呈负相关,这表明较低的能见度对应更高的 PM_{10} 浓度,即更严重的空气污染。从图 1 中还可看出,对于给定的 PM_{10} 浓度,相对湿度越大,能见度越小,但这一现象在个别数据组出现例外,例如在南宁

站和桂林站,相对湿度为 90%~100% 的曲线与相对湿度为 80%~90% 及 70%~80% 的曲线相比,在某些能见度下的 PM_{10} 浓度相对更高,这可能是因为相对湿度大于 90% 时往往伴随多雾现象^[14],高湿度、雾事件对应于稳定的大气层结,有利于污染物聚集,导致南宁站、桂林站在高相对湿度下的 PM_{10} 浓度偏高;北海站在相对湿度为 30%~50% 时对应的曲线与其他湿度段的曲线形状略有差异,这一差异未见于南宁站、桂林站,这可能与北海站是 3 站中唯

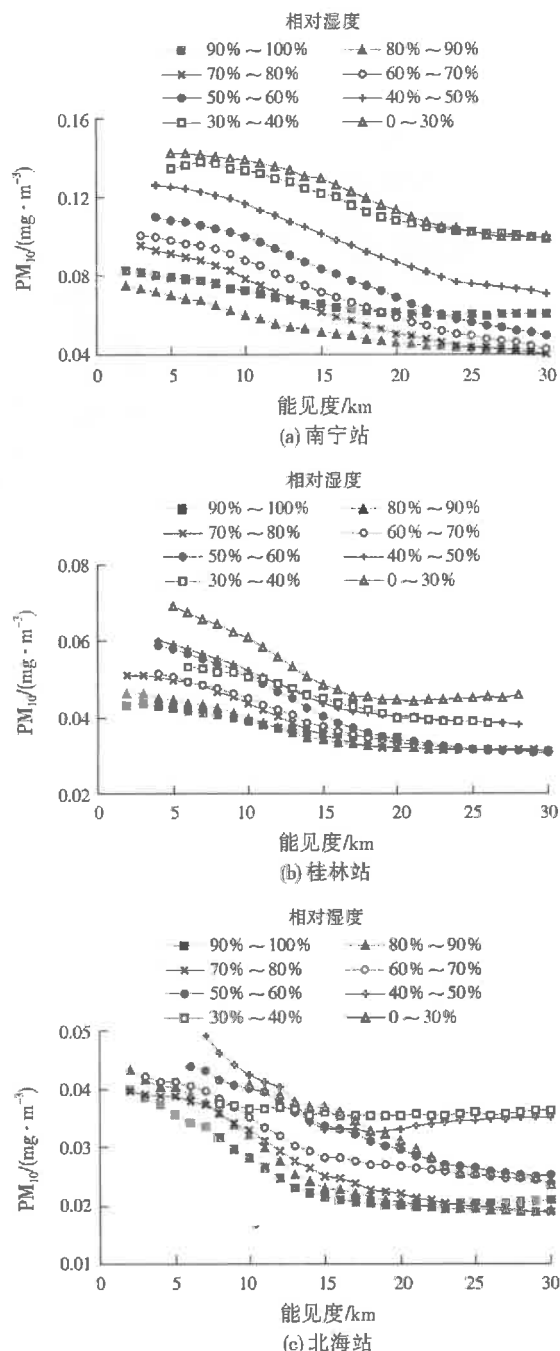


图 1 不同湿度下 PM_{10} 随能见度的变化
Fig. 1 Correlation between PM_{10} and original visibility under different humidity

一的沿海台站有关,沿海、内陆颗粒物属性不尽相同,而颗粒物间的差异是否是造成低湿度区间曲线异常的原因还有待于在后期工作中进一步研究。

总体而言,湿度和 PM_{10} 浓度的增加会引起视程障碍进而降低能见度数值。在给定的相对湿度下,能见度与 PM_{10} 存在一定的对应关系,为此,可以考虑将能见度观测值经湿度订正后用以反映 PM_{10} 浓度的高低。

3 订正公式的建立

ROSENFELD等^{[13]1397}以相对湿度订正能见度作为空气污染表征物,并给出以下公式:

$$\begin{cases} V_{cor} = V \times [0.26 + 0.4285 \times \lg(100 - R_H)]^{-1} & (40\% \leq R_H \leq 99\%) \\ V_{cor} = V & (R_H < 40\%) \end{cases} \quad (1)$$

式中: V_{cor} 为订正后能见度; V 为原始能见度; R_H 为相对湿度,%。

参考公式(1),建立南宁站、桂林站、北海站的能见度订正公式,以反映 PM_{10} 浓度数值,建立分析模型如下:

$$V_{cor} = V \times [A + B \times \lg(100 - R_H)]^{-1} \quad (2)$$

根据上述分析,湿度会导致能见度变小。订正能见度作为排除湿度影响后的能见度,应当不小于观测能见度,即 $V_{cor} \geq V$,令:

$$M = A + B \times \lg(100 - R_H) \leq 1 \quad (3)$$

式(3)中 R_H 越小, M 越大,理论上当 $R_H = 0$ 时湿度影响为0,此时 M 达到最大值1。即:

$$M = A + 2B = 1 \quad (4)$$

将式(4)代入式(2)得到:

$$V_{cor} = V \times [(1 - 2B) + B \times \lg(100 - R_H)]^{-1} \quad (5)$$

值得说明的是,当 R_H 达到99%以上时,式(5)的计算结果出现突变,但这种突变不具有物理意义,即 $R_H > 99\%$ 时使用式(5)并不合理。

取2001年7月至2011年12月 $R_H \leq 99\%$ 的全部样本数据,采用式(5)计算 V_{cor} 并进一步计算 V_{cor} 与 PM_{10} 相关关系。 B 值在 $(-\infty, +\infty)$ 变化下 V_{cor} 与 PM_{10} 相关性分析见图2(仅显示相关系数绝对值大于0.3的曲线部分)。由图2可见, V_{cor} 与 PM_{10} 相关系数绝对值随 B 值的增加呈先上升后下降的趋势,相关系数绝对值最大处对应的 B 值即为最佳 B 值。南宁站、桂林站与北海站的最佳 B 值分别为0.39、0.37、0.39,对应3站点的 A 值分别为0.22、0.26、0.22。

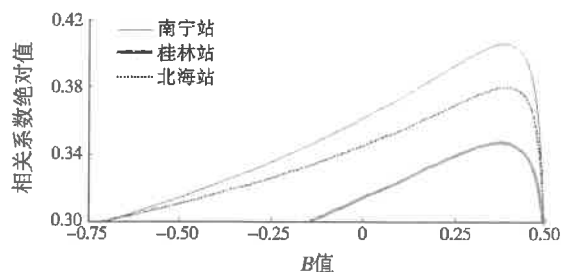


图2 不同 B 值下订正后能见度与 PM_{10} 相关系数
Fig. 2 Correlation coefficient between PM_{10} and V_{cor} under different B value

对于 $R_H > 99\%$ 的样本数据,由于样本数量较少,单独对其分析可能受数据随机波动影响较大,考虑到 $R_H > 99\%$ 时大气伴随高湿度特征,其对能见度的影响效果与 $R_H = 99\%$ 时相近,故采用 $R_H = 99\%$ 的订正公式统一作为 $R_H > 99\%$ 样本数据的订正公式。

南宁站、桂林站、北海站的能见度订正公式分别见式(6)至式(8):

$$\begin{cases} V_{南宁cor} = V \times [0.22 + 0.39 \times \lg(100 - R_H)]^{-1} & (R_H \leq 99\%) \\ V_{南宁cor} = V / 0.22 & (R_H > 99\%) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} V_{桂林cor} = V \times [0.26 + 0.37 \times \lg(100 - R_H)]^{-1} & (R_H \leq 99\%) \\ V_{桂林cor} = V / 0.26 & (R_H > 99\%) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} V_{北海cor} = V \times [0.22 + 0.39 \times \lg(100 - R_H)]^{-1} & (R_H \leq 99\%) \\ V_{北海cor} = V / 0.22 & (R_H > 99\%) \end{cases} \quad (8)$$

4 订正公式效果评估

4.1 订正前后能见度与 PM_{10} 相关性

订正模型建立时使用的是2001年7月至2011年12月的样本数据,为验证订正模型的适用性,分别采用建模期与非建模期样本数据(2012年1月至2012年12月)分析订正前后能见度与 PM_{10} 相关性,计算结果见表1。由表1可见,经湿度订正后,3个台站在两个时间段内能见度与 PM_{10} 相关系数绝对值均有一定提高,表明订正后能见度可以更好地表征 PM_{10} ,建立的订正模型具有一定适用性。

采用式(6)至式(8)分别计算3个台站订正能见度,用反距离权重插值法,忽略时间要素绘制不同相对湿度下订正后能见度与 PM_{10} 相关曲线,结果见图3。

表 1 订正前后能见度与 PM_{10} 相关系数
Table 1 Correlation coefficient between PM_{10} and visibility before and after correction

项目	建模期数据			非建模期数据		
	样本数	订正后	订正前	样本数	订正后	订正前
南宁站	4 559	-0.392 9	-0.365 0	475	-0.422 0	-0.353 0
桂林站	4 438	-0.326 8	-0.318 2	492	-0.382 9	-0.288 0
北海站	4 481	-0.378 1	-0.346 4	513	-0.466 1	-0.413 6

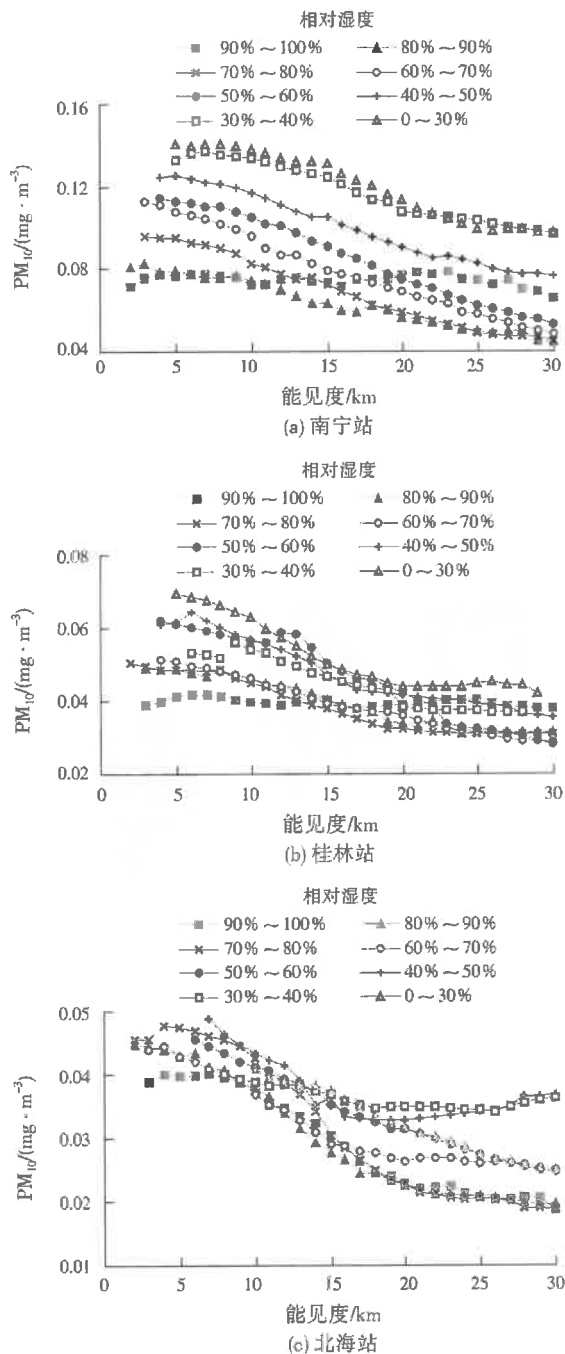


图 3 订正后能见度与 PM_{10} 的相关关系
Fig. 3 Correlation between PM_{10} and corrected visibility under different humidity

将图 3 与图 1 进行对比,发现桂林站、北海站订正前各曲线从上到下随着相对湿度的逐步增大,分层基本清楚;订正后各曲线互相交错,没有分层现

象。南宁站由于订正前分层现象过于明显,订正后仅部分弱化了分层现象,主要表现在当能见度 < 10 km 时,订正前相对湿度为 80%~90% 及 90%~100% 曲线有明显差异,而订正后两曲线则基本重叠。

总体而言,订正前湿度的增加会导致能见度变小,订正模型弱化了湿度的影响,而突出了能见度与 PM_{10} 的相互关系。

5 订正后能见度的数值变化

5.1 湿度影响导致的能见度观测偏差

由上述分析可知,订正后能见度在表征 PM_{10} 的能力上比原始能见度强。假设订正后能见度可近似反映空气能见度的真实状态,则将原始能见度看作是由湿度影响导致系统性偏差的能见度,以 $V_{cor} - V$ 表示能见度绝对偏差, $(V_{cor} - V)/V_{cor} \times 100\%$ 表示能见度相对偏差。表 2 给出了原始能见度在不同区间段内的绝对偏差与相对偏差。由表 2 可见,随着原始能见度逐渐增大,绝对偏差也逐渐变大,但相对偏差总体变小,这是因为原始能见度偏大时一般对应晴好天气,湿度较小,因而对相对偏差的影响也较小。

5.2 订正对能见度分布频率的影响

一般的,能见度低于 8 km 被称为低能见度,高于 19 km 可视为高能见度^[15]。在此以 8、19 km 为阈值,分析订正前后能见度在 0~8、8~19、>19 km 3 个区段内的出现频率,结果见表 3。

表 3 显示,订正后能见度在 0~8 km 区段内的出现频率减少,而在 8~19 km 区段以及 >19 km 区段出现的频率增加。3 个区段相比,0~8 km 区段变化幅度最大,订正后北海站能见度在 0~8 km 区段出现的频率与订正前相比减少了 79.1%,高于南宁站(68.9%)和桂林站(64.1%)。北海站减少幅度大于南宁站、桂林站的原因,可能与北海站是唯一的沿海台站,其原始能见度在低值区出现的原因多是由湿度偏大造成的。

图 4 显示了各台站订正前后能见度频次分布变化。可见,南宁站、北海站订正前后能见度频次分布差异很大,订正前两站能见度在 0~8 km 区段内出

表 2 不同原始能见度区间段内的绝对偏差与相对偏差¹⁾
 Table 2 Observed deviation of data grouped by original visibility

原始能见度/km	南宁站		桂林站		北海站	
	绝对偏差/km	相对偏差/%	绝对偏差/km	相对偏差/%	绝对偏差/km	相对偏差/%
0~3	2.1	49.8	2.2	50.0	3.0	57.8
3~6	3.6	42.0	2.3	31.6	4.1	45.7
6~9	4.7	36.0	2.8	25.3	5.8	40.5
9~12	5.1	31.1	3.7	24.7	4.6	29.7
12~15	5.4	28.2	4.2	22.6	4.7	26.0
15~18	6.3	26.7	4.5	21.0	5.8	25.9
18~21	7.2	24.9	5.0	19.7	7.5	25.9
21~24	6.2	20.8	5.4	17.9	8.3	26.7
24~27	8.4	23.6	6.2	18.9	9.2	25.3
27~30	8.9	22.1	7.8	19.4		
>30	8.3	20.3	6.6	17.3	9.3	22.9

注:¹⁾以 1980 年 1 月至 2012 年 12 月无雨条件下的样本数据进行统计,表 4、图 4 同。

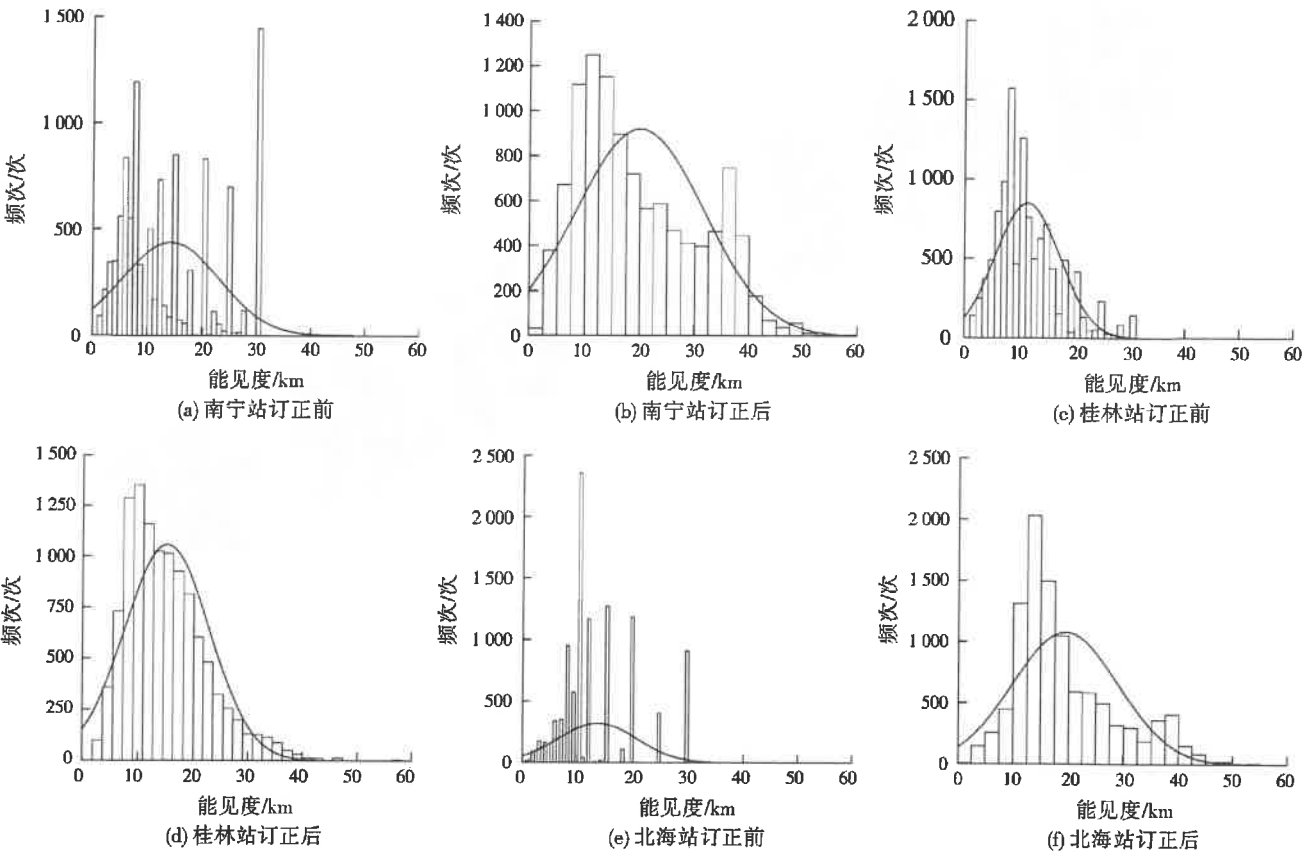


图 4 订正前后能见度频次分布

Fig. 4 Frequency distribution of uncorrected and corrected visibility

表 3 能见度观测值在各区段出现频率
 Table 3 Frequency of visibility observed in different segments %

项目		0~8 km	8~19 km	>19 km
南宁站	订正前	38.6	30.4	31.0
	订正后	12.0	43.6	44.4
桂林站	订正前	41.0	48.5	10.5
	订正后	14.7	59.2	26.1
北海站	订正前	22.0	53.7	24.3
	订正后	4.6	57.0	38.4

现频次相对较高,且在该区段内随着能见度增加其出

现频次也呈逐步上升趋势,在能见度>19 km 的区段内,能见度主要集中在少数几个数值;订正后能见度频次分布基本呈中间(8~19 km)高、两边逐步减少的分布态势。这是因为能见度业务观测在研究时间段内(1980 年 1 月至 2012 年 12 月)为人工观测,观测员难以对远距离目标精确定位,因而对于高能见度观测值往往取某个较固定的值(以远方某个醒目物体位置确定);经订正后,大量具有相同观测值的能见度通过湿度订正加以区分(湿度为仪器客观测量)。

桂林站订正前能见度频次分布大体呈中间高、两边低的态势,这与南宁站、北海站不同,造成这种差异的原因,可能是由桂林站能见度数值偏低(订正前桂林站多年平均能见度为 10.9 km;低于南宁站的 12.5 km 和北海站的 12.2 km),因而更容易对观测目标进行精确定位。订正后桂林站能见度频次分布也呈中间高、两边逐步减少的态势,但相比订正前频次分布更加匀称。

5.3 订正对能见度多年趋势变化的影响

南宁站订正前后能见度逐年变化趋势见图 5。由图 5 可见,订正前后能见度逐年变化形状极为相似,两者相关系数达 0.979 8。订正前后能见度均呈下降趋势,订正前原始能见度下降速度为 $-0.190\ 2\text{ km/a}$,订正后变为 $-0.318\ 0\text{ km/a}$,即原始能见度下降速度小于订正后。因此,如果以能见度表征 PM_{10} 污染状态,则原始能见度低估了南宁 PM_{10} 浓度的增加速度;这是因为早期能见度的降低多由湿度影响,订正模型排除了湿度影响后能见度显著提高;而近期能见度的降低多由 PM_{10} 等空气污染物导致,湿度影响较小,因此订正对能见度的改变较小,导致订正前后能见度下降速度的差异。桂林站、北海站订正前后能见度逐年变化曲线进行分析,得到与南宁站类似的结果。

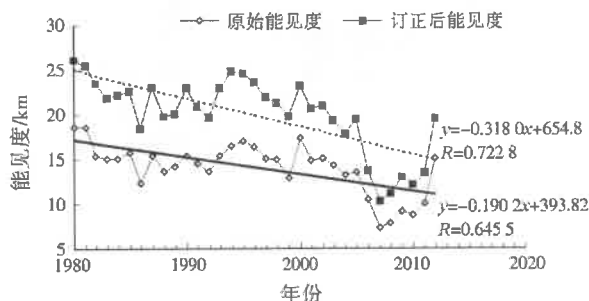


图 5 订正前后南宁站能见度逐年趋势变化
Fig. 5 Time variation of annual average visibility at Nanning

6 结 论

利用广西 3 个典型台站 1980—2012 年大气资料,对能见度观测值进行湿度订正,以凸显能见度与 PM_{10} 浓度之间的关系。

(1) 通过原始能见度与 PM_{10} 相关关系分析,发现较低的能见度对应更高 PM_{10} 浓度,对于给定的 PM_{10} 数值,湿度越大,能见度越小的总体规律。

(2) 利用 2001 年 7 月至 2011 年 12 月的样本数据建立能见度订正模型,对能见度观测值进行湿度订正,以凸显能见度与 PM_{10} 浓度之间的关系。分别利用建模期数据与非建模期数据对订正模型进行

验证。研究发现,订正后能见度弱化了湿度的影响,订正后能见度与 PM_{10} 相关关系较订正前明显增加。

(3) 对订正前后能见度数值变化进行分析,发现随着原始能见度的增大,湿度影响导致的能见度观测绝对偏差变大,但相对偏差变小;与南宁站、桂林站相比,北海站原始能见度降低更多是由湿度偏大造成的;订正后与订正前相比,能见度的频次分布更具有中间高、两边低的匀称性;趋势分析发现订正后能见度下降速度快于订正前,可能与早期能见度的降低多由湿度影响,而近期能见度的降低较多由 PM_{10} 等空气污染物导致。

(4) 能见度观测长期以来都是由观测员人工完成,误差较大。未来空气污染观测,应当着眼于新观测仪器和观测方法从而实现对污染物的精确测量。本研究建立的能见度订正公式目的在于弥补过去数十年、上百年 PM_{10} 的历史记录空缺,这对于重建分析台站历史时期其他类型污染物资料(如总悬浮颗粒物)、以及其他地区历史时期相关污染物资料,具有一定启发意义。

参考文献:

- [1] 董雪玲. 大气可吸入颗粒物对环境 and 人体健康的危害[J]. 资源·产业, 2004, 6(5): 50-53.
- [2] 李金娟, 郭兴强, 杨荣师, 等. 贵州贫困农村室内 PM_{10} 污染水平及影响因素分析[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(1): 19-23.
- [3] 刘芳, 黄科瑞. 百色市右江区大气 PM_{10} 中水溶性无机离子的化学特征与来源[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(6): 57-60.
- [4] 叶文波. 宁波市大气可吸入颗粒物 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的源解析研究[J]. 环境污染与防治, 2011, 33(9): 66-69.
- [5] 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.
- [6] 姚剑, 刘卫, 王广华, 等. 上海市嘉定区大气能见度的变化特征研究[J]. 环境污染与防治, 2013, 35(6): 36-41.
- [7] 王伟, 解佳宁, 路宗敏, 等. 天津市大气能见度与空气污染物关系分析及控制措施[J]. 环境污染与防治, 2010, 32(12): 48-53.
- [8] 段玉森. 上海市霾污染判别指标体系初步研究[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(3): 49-54.
- [9] 龚识懿, 冯加良. 上海地区大气相对湿度与 PM_{10} 浓度和大气能见度的相关性分析[J]. 环境科学研究, 2012, 25(6): 628-632.
- [10] LI Xiong, QIN Wu, LIN Mang, et al. Determining coefficients in a reconstructed aerosol concentrations model from observed visibility[J]. Environmental Technology, 2012, 33(9): 1037-1040.
- [11] DOYLE M, DORLING S. Visibility trends in the UK 1950-1997[J]. Atmospheric Environment, 2002, 36(19): 3161-3172.
- [12] LIU Chenshaw, FU Congbin, SHIU Cheinjung, et al. Temperature dependence of global precipitation extremes[J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36(17): 17702.
- [13] ROSENFELD D, DAI J, YU X, et al. Inverse relations between amounts of air pollution and orographic precipitation[J]. Science, 2007, 315(5817): 118-124.
- [14] YUM S S, CHA J W. Suppression of very low intensity precipitation in Korea[J]. Atmospheric Research, 2010, 98(1): 118-124.
- [15] 林盛群, 林莽, 万军明, 等. 香港大气能见度与污染物长期变化的特征和相互关系[J]. 中国环境科学, 2009, 29(4): 351-356.

编辑: 丁 怀 (修改稿收到日期: 2014-01-10)