

基于人工与自动观测对比分析的霾日重建

樊高峰*,任 律,毛裕定 (浙江省气候中心,浙江 杭州 310017)

摘要: 以杭州、宁波、衢州、温州气象观测站为代表站,基于浙江省 2012~2014 年人工与自动能见度、相对湿度观测资料,对比分析并建立拟合方程,对历史能见度及相对湿度进行修正,再利用《霾的观测与预报等级》标准对浙江历史霾日进行重建.研究表明,自动观测能见度与人工能见度线性相关性较好,但自动较人工明显偏低,人工能见度较好的沿海地区偏低更明显,全省自动能见度较人工平均偏低 28.6%;自 2004 年开展相对湿度自动观测以来,相对湿度明显下降,根据人工与自动相对湿度对比观测数据,两种观测数据线性相关性较好,自动观测平均值小于人工平均值 3%~6%;在对能见度与相对湿度采取线性回归方法进行均一性修正后,重建了霾日序列,结果表明重建后的霾日序列消除人工与自动观测资料的误差,比原观测霾日气候序列质量有明显提高,重建的霾日变化趋势稳定,各站判定标准统一,更加合理.通过与各站 2013 年 PM_{2.5} 达到轻微污染日数与重建霾日数比较,二者的重合率大部分地区达到 50% 以上.利用修正重建的霾日对浙江 1971 年以来的霾日进行评估,20 世纪 70 年代霾日较少,80 年代逐步增加,本世纪以来增加明显,中心区域逐步由浙江中北部向浙北区域及沿海发展,尤其是一些中心城市霾日数最多.

关键词: 大气能见度;相对湿度;线性拟合;霾日

中图分类号: X51,P468.02

文献标识码: A

文章编号: 1000-6923(2017)04-1254-08

Reconstruction of haze day database based on the comparison between manual and automatic observations. FAN Gao-feng*, REN Lv, MAO Yu-ding (Zhejiang Climate Center, Hangzhou 310017, China). *China Environmental Science*, 2017,37(4): 1254~1261

Abstract: Based on the comparison between manual and automatic observations from 2012 to 2014 in Zhejiang province, the historical visibility and relative humidity data is amended and the haze day database is reconstructed according to "observational and forecasting measurement of haze". The linear trend of automatic visibility data is highly consistent with manual observations, while on average the automatic data is 28.6% less than manual observations. Their difference is greater in coastal areas. The relative humidity shows a significant downward trend since the beginning of automatic observation in 2004. The comparison between the daily manual and automatic relative humidity data at 20:00 shows that the average automatic data is 3% to 6% less than manual observation data. Linear regression is used for revising visibility and relative humidity data and the haze day database is reconstructed. After reconstruction, the bias between manual and automatic data is reduced and the new haze day database shows much higher quality with a uniform observational standard. The slightly polluted days show high consistency with the new haze days in 2013. The assessment of new haze day series in Zhejiang province shows that the number of haze days is relatively smaller in the 1970s and steadily increases in the 1980s, and reaches the highest in the 21st century with the faster increasing rate. The center of haze day expands gradually from the middle-north to the north and the coastal areas in Zhejiang province, especially in major cities.

Key words: visibility; relative humidity; linear regression; haze day

近年来,我国中东部霾频繁发生.研究表明,霾增加的范围主要分布在东部和南部,是中国工业和经济发达的地区^[1-2],相关研究主要针对京津冀、长江三角洲、珠江三角洲地区展开.京津冀地区霾日数自 20 世纪 80 年代以来显著增加,非城区站点平均霾日数明显呈增加趋势,且与市区站点霾日数的差距越来越小,持续性霾日数的

增加是总的霾天气增加的主要原因,2000 年之后扩展趋势显著加速^[3-4];近 30a 来长江三角洲的霾

收稿日期: 2016-08-02

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(LQ14D050001);中国气象局预报预测核心业务发展专项(CMAHX20160703);浙江省科技重点项目(2014C23004)

* 责任作者, 副研究员, fangaofengcn@163.com

日数整体呈增长趋势,大城市、中等城市和城镇乡村站间霾日数变化具有明显差异,城市化造成的气象条件改变有利于霾日的增加^[5-6];珠江三角洲霾天气主要出现在 10 月~次年 4 月,并导致能见度恶化^[7].区域大气污染物排放量的增加,尤其是细颗粒物的增加是霾出现频率增加的主要原因,此外,风速减小,雨日减少,相对湿度下降及城市化进程加快对霾的形成有促进作用^[8-10],以及由此形成的近地层输送扩散条件的改变也与霾天气的发生频次密切相关^[11-12].

霾作为天气现象,是地面气象观测中的重要内容.长期以来,我国气象部门已在全国建立了霾天气网络化监测体系^[13-14],主要包括能见度、相对湿度、霾天气现象等观测,随着现代气象业务发展,气象观测自动化水平提高,霾观测逐步从人工向自动观测转变,但两类资料之间存在较大差异^[15-19],因为观测方式变化引起霾观测数据的异常变化,就霾评估方面,主要面临两个问题:一是与霾观测相关的能见度、相对湿度人工与自动不均一造成的资料重建问题;二是对历史人工观测的霾记录,因为对霾的观测认知的差异造成历史资料记录不一致^[20-22].

当前,在进行长期大气质量评价时,常常需要用霾日的长期变化趋势来表达,因为观测的不统一,对于霾日的统计方法也不尽相同,虽然基本变化趋势基本一致,但具体霾日数差别较大,长期以来争议较多.本文充分考虑地面气象观测实现完全自动化的发展趋势,以及结合历史人工观测实际,在对能见度与相对湿度进行修正基础上进行霾日序列重建,实现霾的变化趋势评估.

1 资料与方法

自有观测资料以来,能见度观测经历了人工等级观测、人工观测和自动观测 3 个阶段.人工观测能见度一般指有效水平能见度.自动能见度仪观测是通过测量大气散射系数从而估算出大气消光系数和气象光学视程^[13],所使用的能见度观测仪器为 HY-35P 前向散式能见度仪.自 2011~2014 年,浙江省能见度观测采用能见度人工与自动观测并行,以自动观测为主.本文对能见

度的对比分析与修订采用的是 2012~2014 年人工与自动并行观测数据.

2004 年,相对湿度的观测由人工观测过渡到自动,气象观测站保持每天 20:00 开展一次人工对比观测.相对湿度人工观测是采用通过观测干湿球温度,再通过干湿球方程换算得到相对湿度,而自动观测是通过湿敏元件感应环境湿度变化来测量相对湿度^[13],自动相对湿度观测仪器为 HMP155 温湿传感器.

修正的霾日与 PM_{2.5} 污染日进行比较,PM_{2.5} 观测值为各气象站提供,观测仪器主要有 TEOM1405D 分析仪、SHAPE5030 颗粒物混合同步监测仪、GRIMM180 在线颗粒物/气溶胶粒径谱仪.

本文以杭州、宁波、衢州、温州为代表站,选取浙江省 1971~2014 年常规气象观测站按地面气象观测规范^[27]开展的能见度、相对湿度、霾天气现象等逐日观测资料,其中包括 1971~2014 年人工能见度,1971~2003 年人工相对湿度,2004~2014 年自动相对湿度,2012 年至 2014 年自动能见度、PM_{2.5} 以及每天 20:00 人工及自动相对湿度值等.

本文首先通过对能见度、相对湿度人工与自动观测值进行对比分析,建立能见度与相对湿度修正方程,利用《霾的观测与预报等级》^[14]标准对浙江霾日进行重建.

2 能见度人工与自动对比分析

首先统计全省各台站 2012~2014 年人工与自动能见度平均值,得出人工与自动平均值空间分布趋势基本一致,但能见度高值区与低值区的区域范围仍然有较大差异,此外也得出自动观测值较人工观测值明显偏低,全省能见度人工平均值为 14.1km,自动平均值为 10.0km,自动较人工减少了 28.6%,衢州、湖州等内陆地区差异较小,其他均较大,尤其是嘉兴、宁波、温州等沿海地区能见度较好的地区自动较人工偏小更加明显,与吴华斌等^[15]、李浩等^[16]结论一致.

人工与自动观测能见度由于 2 种观测方式的定义和原理不同,观测数据存在一定的差异,两

者的理论差异自动观测值约为人工观测值的76%^[16].人工观测能见度容易受到观测员的视力状况、对比视感、主观意识等因素的影响;自动观测能见度存在以点盖面的不利情况,以及前向散射能见度仪在雨、雾、不同状态的气溶胶的散射系数不同造成观测误差较大的情况^[16,19].

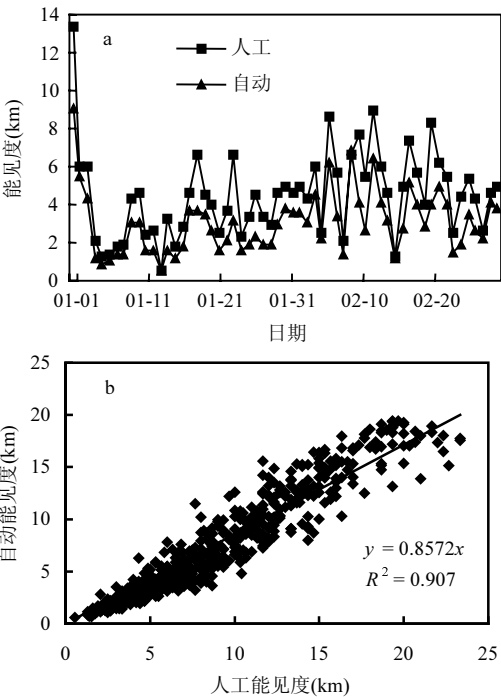


图1 杭州人工与自动能见度对比分析
Fig.1 Comparison between manual and automatic visibility data in Hangzhou

a:2013 年 1~2 月逐日变化;b:2012~2014 年人工与自动散点图

选取杭州、宁波、衢州、温州 4 个代表站 2012~2014 年逐日自动与人工能见度观测数据进行分析,以杭州为例(宁波、衢州、温州基本类同),由图 1a 可见,人工观测能见度与自动观测能见度基本同步,自动能见度较人工能见度明显偏低.图 1b 显示,人工与自动能见度符合线性相关特征,相关系数达 0.95,通过了 0.001 的显著性检验,建立人工与自动能见度线性拟合方程:

$$V = a \times v \tag{1}$$

式中: v 为人工能见度,km; V 为自动能见度,km; a 为系数.杭州 a 的值为 0.86,通过线性拟合方程,把人工能见度修订到自动值,也可把自动能见度

修订到人工值.由表 1 可见,不同区域数据的相关性及线性系数具有区域差异.

表 1 杭州、宁波、衢州、温州人工与自动能见度相关系数及线性系数(a)值

Table 1 The correlation coefficient and linear coefficient (a) between manual and automatic visibility data in Hangzhou, Ningbo, Quzhou and Wenzhou

参数	杭州	宁波	衢州	温州
相关系数	0.95	0.90	0.86	0.78
线性系数 a 值	0.86	0.71	0.83	0.68

3 相对湿度人工与自动对比分析

2004 年开始全省相对湿度从人工观测转变为自动观测,选取杭州、宁波、衢州、温州 4 站自 1971 年以来的历年相对湿度变化曲线(图 2),以 2004 年为界,2004 年之后 4 站相对湿度明显下降.对 4 站 1994~2003 年及 2004~2013 年 2 个 10a 的相对湿度对比分析表明(表 2),2 个平均值的差可以达到 5%以上,而如果再向前推 10a(1984~1993 年)的相对湿度平均值与 1994~2003 年的差各地最大也不会超过 2%.进一步分析表明(表 2),1994~2003 年间,各站每年日相对湿度小于 80%的日数平均为 200~220d.而 2004 年以后,增加到 250~280d.表明因观测仪器变更,自动观测的相对湿度比人工观测值明显下降.

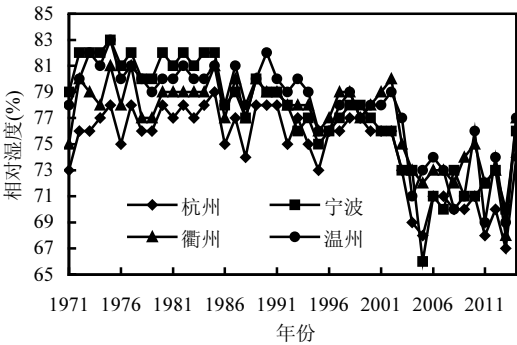


图2 杭州、宁波、衢州、温州 1971~2014 年平均相对湿度变化曲线

Fig.2 Annual relative humidity in Hangzhou, Ningbo, Quzhou and Wenzhou from 1971 to 2014

相对湿度是绝对湿度与饱和湿度之间的比.

人工观测与自动观测 2 种观测方式不同,误差产生原理不同等造成 2 种观测数据之间差异.其次因自动观测相对湿度采用湿敏电容测湿,而湿敏电容在相对湿度为 80%以下时,线性度好,湿敏电容在相对湿度为 80%以上时,出现非线性,在接近 100%时,出现明显的失真,这种情况在高温、高湿状态下更为明显^[17-18],而浙江温暖湿润的气候特征,自动观测相对湿度更容易出现较大误差.

表 2 杭州、宁波、衢州、温州相对湿度 1994~2003 年及 2004~2013 年统计值对比

Table 2 Statistics of relative humidity in Hangzhou, Ningbo, Quzhou and Wenzhou from 1994 to 2003 and from 2004 to 2013

参数	杭州	宁波	衢州	温州
1994~2003 年平均值(%)	76	77	78	78
2004~2014 年平均值(%)	70	71	73	73
1994~2003 年<80%年平均日数(d)	220	227	208	202
2004~2014 年<80%年平均日数(d)	267	278	255	265

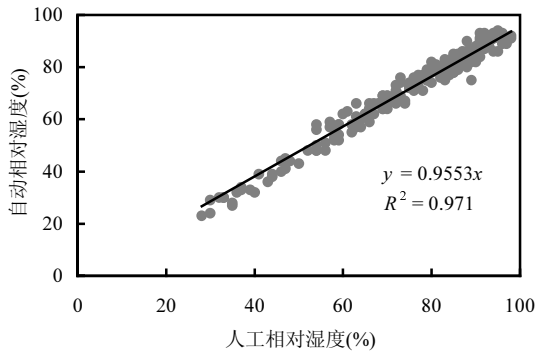


图 3 杭州 2012~2014 年人工与自动相对湿度散点图
Fig.3 Manual and automatic relative humidity in Hangzhou from 2012 to 2014

为进一步分析人工与自动观测相对湿度的相关性,利用 2012~2014 年每天 20:00 人工与自动相对湿度对比观测数据进行分析,4 站人工观测平均值大于自动平均值 3%~6%,以杭州为例(宁波、衢州、温州特征基本一致)制作人工与自动观测散点图(图 3),人工和自动观测相对湿度符合线性相关特征,具有非常好的同步性,相关系数为 0.98,通过了 0.001 的显著性检验,建立人工与自动相对湿度线性拟合方程:

$$U = b \cdot u \tag{2}$$

式中: u 为人工相对湿度,%; U 为自动向对湿度,%; b 为线性系数.杭州的系数 b 值为 0.96,通过线性拟合方程可以把人工观测值拟合到自动,也可把自动值拟合到人工.由表 3 可见,大气气溶胶吸湿增长与湿度条件密切相关,并进一步影响能见度及大气自清洁过程,精确地相对湿度观测值对霾的判定非常重要,而自动观测相对湿度偏小影响了霾判定的精准度.

表 3 杭州、宁波、衢州、温州人工与自动相对湿度距平、相关系数及线性系数(b)值

Table 3 The anomaly, correlation coefficient and linear coefficient (b) of manual and automatic relative humidity in Hangzhou, Ningbo, Quzhou and Wenzhou

参数	杭州	宁波	衢州	温州
人工与自动距平(%)	3	5	5	6
相关系数	0.98	0.96	0.97	0.94
线性系数 b 值	0.95	0.93	0.94	0.93

4 能见度与相对湿度均一性修正基础上霾日重建

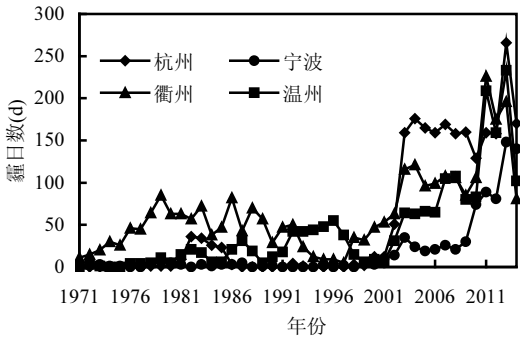


图 4 杭州、宁波、衢州、温州人工观测霾日数历年变化曲线
Fig.4 Manual annual haze days in Hangzhou, Ningbo, Quzhou and Wenzhou

根据历史霾天气现象观测对杭州、宁波、衢州与温州 4 站历史霾出现日数进行分析(图 4),4 站都表现为 20 世纪 70 年代除衢州外其他 3 站较少,80 年代到 90 年代杭州、宁波、温州逐渐增多,21 世纪以来,4 站明显增多,历年变化特征表明,

观测霾日分别在 2004 年和 2011 年有 2 次跳跃式增长,2004 年的霾日数增多可能是相对湿度由人工改为自动的原因,2011 年可能是能见度观测方式由人工改为自动观测的原因.霾天气现象观测资料基本反映了霾历史变化特征,但霾日历史变化曲线存在着 2 方面问题,一是各气象观测站在《地面气象观测规范》^[13]要求下,通过长期实践形成或制定了本站霾观测技术方案,各站之间有区别,造成不同站之间霾日历史记录之间缺乏可比性,二是在霾历史记录中存在因仪器变更、观

测方式改变等造成观测霾日跳跃性增长,导致利用霾现象历史记录来开展霾统计分析可用性较差^[20-22].
分析表明:自动观测能见度比人工能见度明显偏小,且部分地区差异较大,尤其是人工能见度较好的地区更加明显,相对湿度自转变为自动观测后,明显比人工相对湿度偏小,尤其在高湿情况下.通过对能见度、相对湿度人工与自动进行均一性修正重建基础上,开展霾日重建,采取的方法为:

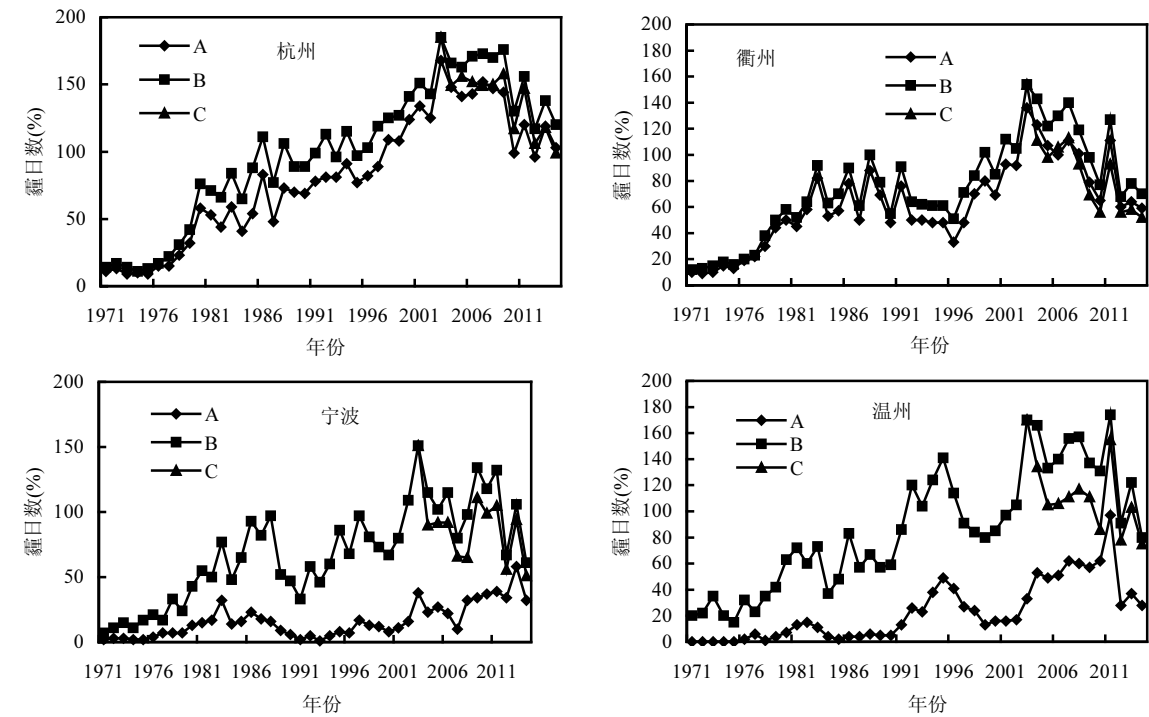


图 5 对能见度与相对湿度进行修正的霾日变化比较
Fig.5 Comparison between original and revised haze days by revising visibility and relative humidity
A:能见度与相对湿度不修正; B:修正能见度; C:修正能见度与相对湿度

对于能见度,利用建立的线性方程(1)把历史观测的人工能见度修正到自动,也可把实现自动观测后的自动能见度修正到人工,然后把观测值与修正的值按公式 $Z=\sqrt{vV}$ 求中间值,把 Z 作为能见度基础数据,以消除人工观测与自动观测之间的差异, Z 作为人工与自动中间数据,本身是人工或自动能见度线性修正的值,其与人工或自动能见度之间较好的线性相关性得到保留.

对于相对湿度,按线性方程(2),把 2004 年之后的自动观测相对湿度拟合到人工观测值,作为相对湿度基础数据,这样则修订了因自动观测相对湿度较低而把轻雾判定为霾的问题,通过线性修订,也保持了人工与自动相对湿度值之间的高相关性.在重新建立能见度与相对湿度历史序列基础上,利用《霾的观测与预报等级》^[14]标准对浙江历史霾日进行重建.

对 4 站能见度与相对湿度修正后重建霾的效果进行评估,图 5 中 A 是对能见度与相对湿度不修正重建霾日,也就是能见度是人工观测值,相对湿度 2003 年之前是人工观测,之后是自动观测,B 是对能见度进行修正,C 是在 B 基础上,对 2003 年之后的相对湿度修正.结果表明,仅对能见度修订的霾日曲线(B)明显比仅以人工资料反演的霾日数(A)多,尤其是自动能见度与人工能见度明显偏小的地区,如宁波、温州等地,这主要是因为修正的能见度值比人工观测能见度低,霾是一种低能见度事件,因此霾变化曲线 B 会高于 A.另外也发现,如仅对能见度进行修正,2003 年后各地反演的霾日数有突然增多趋势,这是因相对湿度观测方式改变,自动观测值偏低造成部分轻雾判定为霾,进一步对 2003 年后的相对湿度按线性方程(2)进行修正,再反演霾日数,得到 C,修订后霾日数就会有一定减少.说明通过对能见度与相对湿度进行均一性修正,消除人工与自动观测资料的误差,可以对历史霾日数重建起到较好的修订.通过与图 4 观测的霾日比较,重建的霾日变化趋势稳定,各站判定标准统一,更加合理.

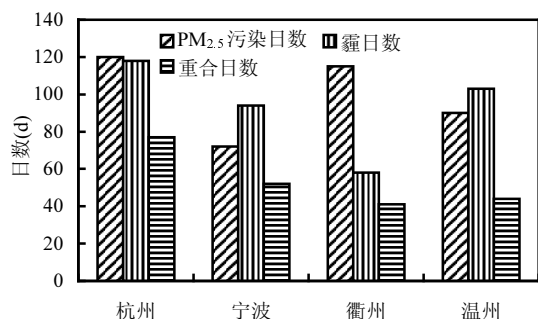


图 6 杭州、宁波、衢州、温州 PM_{2.5} 大于 75d 数、霾日数及重合日数

Fig.6 PM_{2.5} over 75 days, haze days and overlapping days in Hangzhou, Ningbo, Quzhou and Wenzhou

对杭州、宁波、衢州、温州重建后的霾日与 4 地市日平均 PM_{2.5} 浓度值进行比较,首先比较霾日与非霾日 PM_{2.5} 平均浓度值,PM_{2.5} 平均浓度霾日明显高于非霾日,4 站基本都达到 2 倍左右.统计 2013 年 4 站 PM_{2.5} 浓度达到或超过轻微污染 (PM_{2.5}>75μg/m³) 日数与重建霾日数进行比较(图

6),宁波、温州霾日数超过轻微污染日数,杭州基本相当,仅差 2d,衢州轻微污染日数明显超过霾日数,进一步统计二者的重合日数,温州重合日数占霾日数的 43%,其他 3 站重合日数均达到霾日数的 50%以上.

5 浙江省历史霾日重建

利用浙江 69 个气象观测站 1971~2014 年的能见度、相对湿度资料,根据建立的霾重建方法对各站历史霾日进行重建,分析全省霾时空变化特征.

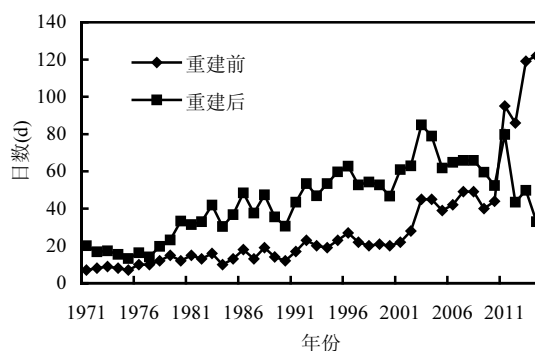


图 7 浙江省 1971~2014 年重建前与后历年霾日

Fig.7 Annual haze days before and after reconstruction in Zhejiang province from 1971 to 2014

统计重建的历年全省各站平均霾日,并增加重建前的观测霾日历年平均,作为对比(图 7),重建前与后的霾日对比结果进一步说明,2004 年因相对湿度观测方式改变,重建前的霾日数突然增加,2011 年能见度观测方式改变又进一步增长,而在历史霾观测过程中,大量存在把霾记录为轻雾的现象,导致历史观测记录霾日数偏少,因此重建后的历年霾日数普遍高于重建前.根据重建后的历年霾变化趋势,浙江省在 20 世纪 70 年代霾日数较少,并比较稳定,大多数年份霾日数保持在 20d 以下,进入 80 年代后,霾日数逐步增加,在上世纪 90 年代后期增长停滞,维持在 50d 左右,进入 21 世纪后又出现新一轮增长,于 2003、2004 年达到顶峰 80d,随后在震荡中下降.

利用重建霾日,以年代为单位,绘制全省各年代年均霾日分布图(图 8).20 世纪 70 年代,少量的

霾主要分布于浙江中部金衢盆地一带,80 年代扩展到浙北区域,90 年代这些区域及温州更加明显,本世纪以来形成了区域性的成片的霾日数明显增加.各年代平均霾日数小于等于 20d 的地区更

是急剧减少,由上世纪 70 年代的 40 县/市锐减到本世纪的 5 县/市.年平均霾日数大于 60d 的地区由上世纪 70 年代的义乌、兰溪扩展到杭州、湖州、金华、衢州、温州等地区的 37 县/市.

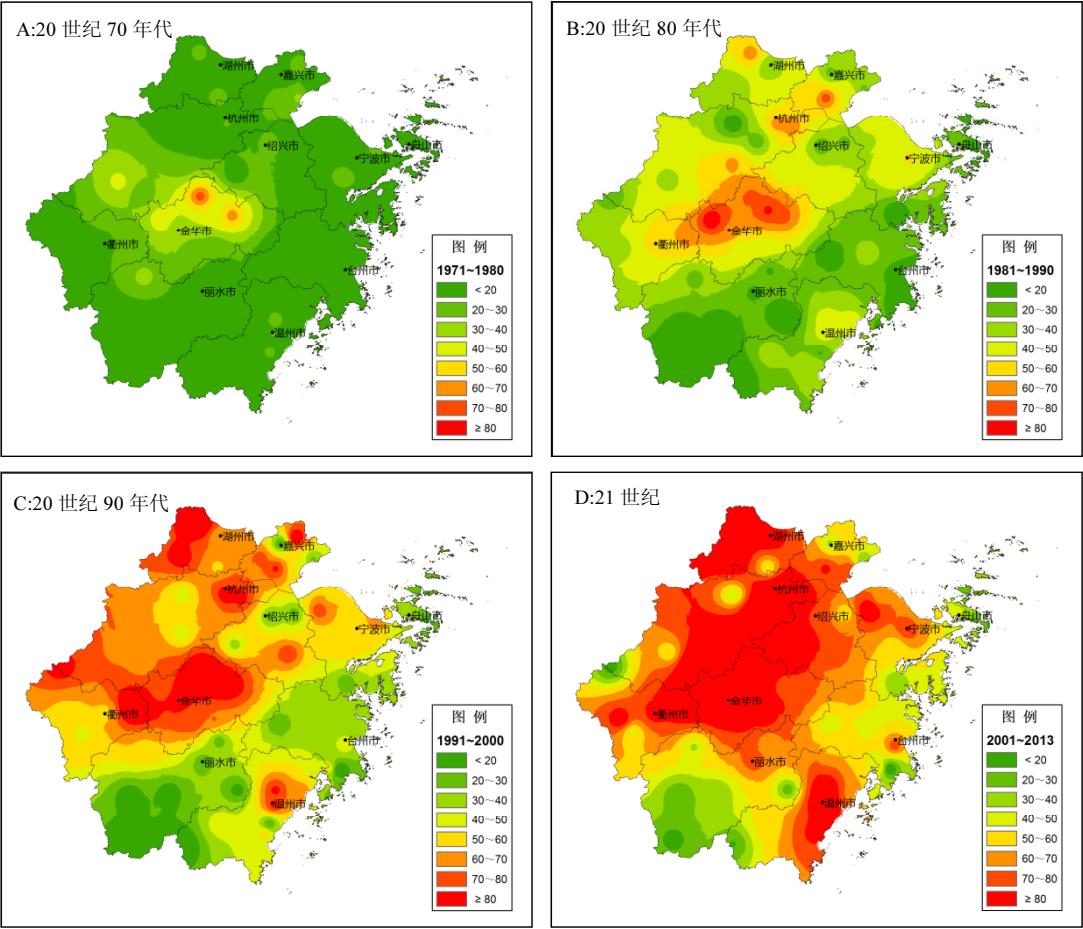


图 8 浙江省各年代平均霾日(d)分布

Fig.8 The distribution of reconstructed haze days in Zhejiang province

6 结论

6.1 自动观测能见度与人工能见度相比明显偏低,浙江省各站自动能见度较人工平均偏小 28.6%,且人工能见度较好的沿海地区这种偏差更大.但两种能见度具有较好的同步性,符合线性相关特征,杭州相关系数达到 0.95,根据各站的线性相关性建立线性拟合方程.

6.2 自 2004 年开展自动相对湿度观测以来,2004~2014 年杭州、宁波、衢州、温州平均相对

湿度较 1994~2003 年下降达 5%以上,根据 2012~2014 年同期对比观测数据分析表明,4 站人工观测平均值大于自动平均值 3%~6%,人工和自动观测相对湿度符合线性相关特征,4 站相关系数均在 0.9 以上,在此基础上建立人工与自动相对湿度线性拟合方程.

6.3 在对杭州、宁波、衢州、温州 4 站能见度与相对湿度采取线性回归方法进行修正基础上重建了霾日历史序列,表明重建后的霾日曲线比较合理地解决了针对历史观测方式,仪器变更造

成历史序列不均一问题,实现了人工与自动观测的有效统一,实现了各地霾判定标准的统一,重建后的霾日曲线变化平稳,空间分布合理,对能见度和相对湿度进行修订后再进行霾日判定技术可行,通过对 4 站 2013 年 PM_{2.5} 达到轻微污染日数与重建霾日数比较,二者的重合率基本达到 50% 以上。

6.4 利用修正的霾日对浙江省 1971~2014 年霾日进行评估,上世纪 70 年代霾日较少,平均 20d 以下,上世纪 80 年代以来逐步增多,高值区位于浙江中北部,本世纪以来增加明显,但近些年有些下降,中心区域也逐步由浙江中部向浙北区域及沿海发展,尤其是一些区域中心城市霾日数最多。

参考文献:

- [1] 吴 兑,吴晓京,李 菲,等.1951—2005 年中国大陆霾的时空变化 [J]. 气象学报, 2010,68(5):680-688.
- [2] 穆 泉,张世秋.2013 年 1 月中国大面积雾霾事件直接社会经济损失评估 [J]. 中国环境科学, 2013,33(11):2087-2094.
- [3] 赵普生,徐晓峰,孟 伟,等.京津冀区域霾天气特征 [J]. 中国环境科学, 2012,32(1):31-36.
- [4] 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.
- [5] 刘晓慧,朱 彬,王红磊,等.长江三角洲地区 1980~2009 年灰霾分布特征及影响因子 [J]. 中国环境科学, 2013,33(11):1929-1936.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 王明洁,张 蕾,张琳琳,等.基于精细观测资料的深圳不同季节霾及其污染特征分析 [J]. 中国环境科学, 2015,35(12):3562-3569.
- [9] 吴 蒙,范绍佳,吴 兑,等.广州地区灰霾与清洁天气变化特征及影响因素分析 [J]. 中国环境科学, 2012,32(8):1409-1415.
- [10] 宋连春,高 荣,李 莹,等.1961—2012 年中国冬半年霾日数的变化特征及气候成因分析 [J]. 气候变化研究进展, 2013,9(5):313-318.
- [11] 丁一汇,柳艳菊.近 50 年我国雾和霾的长期变化特征及其与大气湿度的关系 [J]. 中国科学:地球科学, 2014,44(1):37-48.
- [12] 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.
- [13] 中国气象局.地面气象观测规范 [M]. 北京:气象出版社, 2003.
- [14] QX/T 113 2010 中华人民共和国气象行业标准:霾的观测和预报等级 [S].
- [15] 吴华斌,黄小丹,莫春玲. M6000 型能见度仪与人工观测能见度差值分析 [J]. 气象科技, 2015,43(4):595-600.
- [16] 李 浩,孙学金.前向散射能见度仪测量误差的理论分析 [J]. 红外与激光工程, 2009,38(6):1094-1098.
- [17] 苑 跃,赵晓莉,王小兰,等.相对湿度自动与人工观测的差异分析 [J]. 气象, 2010,36(2):102-108.
- [18] 胡玉峰.自动与人工观测数据的差异 [J]. 应用气象学报, 2004, 15(6):719-726.
- [19] 李 浩,陈晓颖,单陈华,等.雾和气溶胶的光学特性对前向散射和总散射能见度仪性能的影响 [J]. 红外与激光工程, 2013,42(6):1568-1574.
- [20] 吴 兑,陈慧忠,吴 蒙,等.三种霾日统计方法的比较分析—以环首都圈京津冀晋为例 [J]. 中国环境科学, 2014,34(3):545-554.
- [21] 史 军,吴 蔚.上海霾气候数据序列重建及其时空特征 [J]. 长江流域资源与环境, 2010,19(9):1029-1036.
- [22] 赵普生,张小玲,徐晓峰.利用日均及 14 时气象数据进行霾日判定的比较分析 [J]. 环境科学学报, 2011,31(4):704-708.
- [23] 齐 冰,刘寿东,杜荣光,等.杭州地区气候环境要素对霾天气影响特征分析 [J]. 气象, 2012,38(10):1225-1231.
- [24] Doyle M, Dorling S. Visibility trends in the UK 1950—1997 [J]. Atmospheric Environment, 2001,36:3161-3172.
- [25] Schichtel B A, Husar R B, Falke S R, et al. Haze trends over the United States 1980—1995 [J]. Atmospheric Environment, 2001, 35:5205-5210.
- [26] Chen J, Zhao C S, Ma N, et al. A parameterization of low visibilities for hazy days in the North China Plain [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012,12(11):4935-4950.
- [27] 祁 妙,朱 彬,潘 晨,等.长江三角洲冬季一次低能见度过程的地区差异和气象条件 [J]. 中国环境科学, 2015,35(10):2899-2907.
- [28] 张蓬勃,姜爱军,孙佳丽,等.江苏秋季霾的年代际变化特征及其影响因素分析 [J]. 气候变化研究进展, 2012,8(3):205-212.
- [29] 刘 建,范绍佳,吴 兑,等.珠江三角洲典型灰霾过程的边界层特征 [J]. 中国环境科学, 2015,35(6):1664-1674.
- [30] 过宇飞,刘端阳,周 彬,等.无锡市霾天气特征及影响因子研究 [J]. 气象, 2013,39(10):1314-1324.
- [31] 曹伟华,梁旭东,李青春.北京一次持续性雾霾过程的阶段性特征及影响因子分析 [J]. 气象学报, 2013,71(5):940-951.
- [32] 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, 2013,35(8):2272-2280.

作者简介: 樊高峰(1973-),男,山西运城人,副研究员,硕士,主要从事灾害性天气、环境气象研究.发表论文 30 余篇。