

尚子澍, 宁贵财, 王捷馨, 等. 十个代表城市空气污染指数与能见度和相对湿度的关系[J]. 干旱气象, 2017, 35(4): 590-597, [SHANG Ziwei, NING Guicai, WANG Jiexin, et al. Relationship Between Air Pollution Index and Visibility, Relative Humidity in Ten Representative Cities of China [J]. Journal of Arid Meteorology, 2017, 35(4): 590-597], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-04-0590

## 十个代表城市空气污染指数与能见度和相对湿度的关系

尚子澍<sup>1</sup>, 宁贵财<sup>1</sup>, 王捷馨<sup>1</sup>, 程一帆<sup>1</sup>, 王式功<sup>1,2</sup>

(1. 兰州大学大气科学学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都 610225)

**摘要:**影响能见度的不仅仅是大气污染物, 雾也是一个重要因素。因此, 用能见度反映空气质量, 需要考虑水汽的作用。在已有的研究结果基础上, 构造空气污染指数(API)与能见度和空气相对湿度的数学关系。依据全国10个代表城市2001—2012年逐日API资料和同期08:00(北京时)地面气象资料, 运用线性回归方法, 确定公式中的待定系数, 从而建立利用能见度和相对湿度估算API的统计方程。结果表明: (1) 当空气相对湿度小于78%时, 能见度主要受空气污染物浓度影响; 当空气相对湿度大于96%时, 能见度主要受空气湿度影响; 当空气相对湿度介于78%~96%时, 能见度受空气污染物浓度和空气湿度共同影响; (2) 除拉萨和兰州外, 其余城市API与能见度和相对湿度相关程度都通过了 $\alpha=0.000\ 01$ 的显著性水平, 并且相关程度冬半年好于夏半年; (3) API与能见度和相对湿度拟合关系中的参数 $b_0$ 和 $b$ , 除拉萨、乌鲁木齐和兰州以外, 其余城市的变化幅度都比较小; (4) 回代检验表明, 除个别月份外, 绝对误差和相对误差都相对较小, 说明API与能见度和空气湿度的数学关系式可以拟合API。

**关键词:**10个代表城市; API; 能见度; 相对湿度

**文章编号:**1006-7639(2017)-04-0590-08 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-04-0590

**中图分类号:**P427.2<sup>+</sup>1, X16, X511

**文献标识码:**A

### 引言

能见度属于气象因子, 同时也是表征大气环境的特征因子<sup>[1]</sup>。能见度的下降是由于大气中悬浮粒子和水汽凝结成雾对光的散射和吸收所造成的<sup>[2-8]</sup>, 其已经成为城市区域空气质量下降的一个重要标志<sup>[9]</sup>。早在1960年代, 国外学者就已经开展了能见度变化趋势的研究, 提出了累积百分率、Ridit分析法等研究方法<sup>[10-11]</sup>。国内大量学者也相继对能见度及其影响因子展开研究<sup>[12-19]</sup>: 如付桂琴等<sup>[20]</sup>分析河北低能见度的区域分布和变化趋势特征, 认为相对湿度与能见度呈显著负相关; 吴兑等<sup>[21]</sup>分析指出造成广州低能见度年代际变化的主要原因是人类活动产生的细粒子。在水汽含量较低

时, 大气基本是“干”的, 能见度的好坏主要反映空气中污染物的多寡; 在水汽含量接近饱和时, 形成云雾, 能见度很差<sup>[22-25]</sup>; 当水汽含量达到中等程度, 且有一定的空气污染物存在时, 水汽容易吸附在污染物上, 或与气体污染物反应, 形成新的污染物, 导致能见度下降。近30多年来, 全球平均能见度变化呈现下降趋势, 这与空气质量恶化直接相关。能见度所反映的污染程度更接近老百姓的感官认知, 美国环保局(EPA)也已经将能见度降低视为对所有空气污染所引起的环境影响最有效的解释。

我国从2000年开始发布空气质量日报, 监测城市逐年增加, 目前达到120多个。即便如此, 全国大多数中小城市依然没有进行空气质量监测。2012年以前, 大多用空气污染指数(API)衡量空气质量

**收稿日期:**2017-02-09; **改回日期:**2017-04-20

**基金项目:**国家自然科学基金项目(91644226, 41575138)、国家基础科技条件平台建设项目(NCMI-SBS17-201607、2016NCMIZX09、NCMI-SJS15-201607)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(lzujbky-2017-it20)共同资助

**作者简介:**尚子澍(1990—), 女, 甘肃景泰人, 硕士研究生, 研究方向为现代天气预报技术和空气污染预报. E-mail: shang\_ziw@163.com

**通讯作者:**王式功(1955—), 山东安丘人, 教授, 博导, 主要从事医学气象学、干旱气候和现代天气预报技术方面的研究. E-mail: wangsg@lzu.edu.cn

状况<sup>[26]</sup>。由于空气质量监测需要一些采集和分析设备,致使我国没有长时间的空气质量指数历史数据积累。研究能见度和水汽与空气污染程度之间的关系,找到一个恰当的数学表达式是很有必要的<sup>[27]</sup>。已有的研究主要涉及空气污染和水汽(雾)分别对能见度的影响<sup>[28-32]</sup>,但三者之间的综合关系研究,少见报道。本文拟利用全国10个代表城市近10a的数据,探讨能见度和空气湿度与API的综合关系。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料

使用的资料包括:(1)全国10个代表城市2001—2012年逐日空气污染指数(API)资料,来源于国家环境监测总站。10个代表城市分别为:哈尔滨、乌鲁木齐、兰州、太原、北京、拉萨、昆明、重庆、杭州和广州,它们是从中国10个气象站区号(50,51,52,⋯,59)中挑选出来的,依次代表不同的气候类型:东北寒冷区、西北干旱区、西北东部半干旱区、黄河河套区、华北平原区、青藏高原区、四川盆地及西南地区、华中平原区、华东地区和华南地区;(2)同期地面气象资料,包括能见度、温度和露点温度,为MICAPS格式地面资料。

州和广州,它们是从中国10个气象站区号(50,51,52,⋯,59)中挑选出来的,依次代表不同的气候类型:东北寒冷区、西北干旱区、西北东部半干旱区、黄河河套区、华北平原区、青藏高原区、四川盆地及西南地区、华中平原区、华东地区和华南地区;(2)同期地面气象资料,包括能见度、温度和露点温度,为MICAPS格式地面资料。

### 1.2 研究方法

#### (1) 研究思路

潘洪密等<sup>[33]</sup>研究表明,污染物浓度与能见度呈负相关,符合幂函数关系。因此,假定API与能见度和空气湿度的数学关系如下:

$$Y = A \cdot Q \cdot vv^{-b} \quad (1)$$

式中:Y为API;vv为能见度;A,b为系数;Q是受相对湿度影响的参数,假定其表达式为:

$$Q = \begin{cases} Q_1 & RH \leq RH_1 \\ Q_2 & RH \leq RH_2 \\ Q_1 + \frac{Q_2 - Q_1}{RH_2 - RH_1}(RH - RH_1) & RH_1 < RH < RH_2 \end{cases} \quad (2)$$

式(1)两边同时取对数:

$$\ln Y = \ln A + \ln Q - b \times \ln vv \quad (3)$$

令  $y = \ln Y - \ln Q$ ,  $b_0 = \ln A$ ,  $x = -\ln vv$ , 则式(3)简化为:

$$y = b_0 + bx \quad (4)$$

#### (2) 参数的确定

首先利用温度和露点温度计算出相对湿度;然后通过试验方法确定公式(2)中的 $Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $RH_1$ 和 $RH_2$ ;最后通过一元线性回归确定公式(4)中的 $b_0$ 、 $b$ 。具体为: $Q_1$ 的取值范围为0.7~1.0, $Q_2$ 的取值范围为0.1~0.4,间隔均为0.01, $RH_1$ 的取值范围为50%~80%, $RH_2$ 的取值范围为80%~100%,间隔均为1%,代入公式(2)和(3)中,计算出公式(4)中的 $y$ 和 $x$ ,然后计算相关系数。

#### (3) 相关系数的换算处理

对于一元线性回归,有统计量:

$$F = \frac{r^2(n-2)}{1-r^2} \quad (5)$$

F值的大小,说明了 $x$ 与 $y$ 之间相关显著的程度。变换式(5)有:

$$r = \sqrt{\frac{F}{F+n-2}} \quad (6)$$

显然同样的F值,实际样本 $n$ 不同,对应的 $r$ 也不同。为了便于比较,本文换算成样本数为300对应的相关系数( $r_{300}$ ):

$$r_{300} = r_n \sqrt{\frac{n}{300}} \quad (7)$$

式中 $r_n$ 为实际样本的相关系数。样本数为300时,显著水平 $\alpha$ 分别为0.01、0.001、0.0001和0.00001,所对应的 $r_c$ (临界相关系数)为0.19、0.22、0.15和0.28。

## 2 结果分析

### 2.1 参数 $Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $RH_1$ 和 $RH_2$ 的确定

利用全国10个代表城市2001—2012年逐日API资料和08:00气象资料,计算10个站的 $Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $RH_1$ 和 $RH_2$ 的每一种组合所对应的平均相关系数,从中找到平均相关系数最大时对应的上述4个参数,分别为: $RH_1 = 78\%$ , $RH_2 = 96\%$ , $Q_1 = 1.0$ , $Q_2 = 0.2$ 。间接说明,当空气相对湿度小于78%时,能见度主要受空气污染物浓度影响;当空气相对湿度大于96%时,能见度主要受空气湿度影响;当空气相对湿度介于78%~96%时,能见度受空气污染物浓度和空气湿度的共同影响。

### 2.2 预报因子时次的确定

选定了 $Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $RH_1$ 和 $RH_2$ 之后,分别用02:00、08:00、14:00和20:00的地面资料,计算10个代表城市各月 $y$ 和 $x$ 的相关系数,选出相关系数较大的时次,结果如表1所示。可以看出,4—11月10个代表城市相关系数较大的时次以08:00为主,其中

9 月所有代表城市都是 08:00;12 月至次年 3 月 10 个代表城市 02:00 和 08:00 各占约 50%;14:00 和 20:00 因相关性不是最大而没有选入。分析其原因,可能 02:00、08:00 大气逆温强,更能反映当天的污染情况,而 14:00、20:00 处于污染物消散时段,故不能较好地反映当日的污染程度。

2.3  $y$  与  $x$  之间的相关分析

与表 1 对应的 10 个代表站各月相关分析如表 2 所示。可以看出,哈尔滨、乌鲁木齐、太原、北京、昆明、重庆、杭州和广州 8 个城市中,所有月份都通过了  $\alpha=0.000\ 01$  或者  $\alpha=0.000\ 001$  的显著性水平;拉萨除了 2、6、8 月以外,其他月 API 与能见度之间基本不相关;兰州除了 5 和 7 月通过  $\alpha=0.000\ 01$  的显著性水平,8—12 月和 1—4 月都通过了  $\alpha=0.000\ 001$

的显著性水平。整体来看,各个城市的相关系数冬半年大于夏半年。

2.4 参数  $b_0$  和  $b$

表 3 给出 10 个代表城市各月的  $b_0$  值。可以看出,各气候区的  $b_0$  值存在差异。哈尔滨、乌鲁木齐、兰州、太原和北京 5 个北方城市  $b_0$  的年平均值均在 6.0 以上,其中哈尔滨、太原和北京 3 个城市各月的  $b_0$  变化不大,乌鲁木齐和兰州各月则差异较大,乌鲁木齐夏半年大、冬半年小,而兰州夏半年小、冬半年大。昆明、重庆、杭州和广州 4 个南方城市  $b_0$  值都在 6.0 以下,且全年各月相差不大。东北区、华北区和河套区具有一致性,西南区、华中区、华东区和华南区具有一致性,而西北干旱区和西北东部半干旱区各具特色。

表 1 10 个代表城市各月  $y$  和  $x$  最大相关系数对应的时次

Tab.1 The time corresponding to the maximum correlation coefficients between  $y$  and  $x$  in each month in 10 representative cities

城市	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
哈尔滨	02:00	08:00	02:00	08:00	08:00	08:00	08:00	08:00	08:00	08:00	08:00	02:00
乌鲁木齐	02:00	08:00	02:00	08:00	02:00	08:00	02:00	02:00	08:00	08:00	02:00	02:00
兰州	08:00	02:00	02:00	02:00	08:00	08:00	02:00	08:00	08:00	08:00	02:00	02:00
太原	08:00	08:00	08:00	08:00	08:00	08:00	08:00	08:00	08:00	08:00	08:00	08:00
北京	02:00	02:00	02:00	02:00	02:00	02:00	08:00	08:00	08:00	08:00	02:00	02:00
拉萨	08:00	02:00	02:00	08:00	08:00	08:00	08:00	08:00	08:00	08:00	08:00	08:00
昆明	02:00	02:00	08:00	08:00	08:00	08:00	08:00	08:00	08:00	08:00	08:00	08:00
重庆	02:00	02:00	02:00	08:00	02:00	02:00	08:00	08:00	08:00	02:00	02:00	02:00
杭州	02:00	08:00	02:00	08:00	02:00	02:00	02:00	08:00	08:00	08:00	08:00	02:00
广州	08:00	08:00	08:00	08:00	08:00	08:00	02:00	08:00	08:00	08:00	08:00	08:00

表 2 10 个代表城市各月  $y$  与  $x$  之间的相关系数

Tab.2 Correlation coefficients between  $y$  and  $x$  in 10 representative cities in each month

城市	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	年均值
哈尔滨	0.46 <sup>a</sup>	0.45 <sup>a</sup>	0.47 <sup>a</sup>	0.39 <sup>a</sup>	0.43 <sup>a</sup>	0.35 <sup>a</sup>	0.53 <sup>a</sup>	0.59 <sup>a</sup>	0.50 <sup>a</sup>	0.62 <sup>a</sup>	0.67 <sup>a</sup>	0.48 <sup>a</sup>	0.50
乌鲁木齐	0.47 <sup>a</sup>	0.51 <sup>a</sup>	0.62 <sup>a</sup>	0.60 <sup>a</sup>	0.30 <sup>a</sup>	0.33 <sup>a</sup>	0.42 <sup>a</sup>	0.26 <sup>b</sup>	0.31 <sup>a</sup>	0.56 <sup>a</sup>	0.65 <sup>a</sup>	0.54 <sup>a</sup>	0.46
兰州	0.55 <sup>a</sup>	0.53 <sup>a</sup>	0.62 <sup>a</sup>	0.55 <sup>a</sup>	0.26 <sup>b</sup>	0.22	0.27 <sup>b</sup>	0.30 <sup>a</sup>	0.34 <sup>a</sup>	0.47 <sup>a</sup>	0.66 <sup>a</sup>	0.74 <sup>a</sup>	0.46
太原	0.55 <sup>a</sup>	0.53 <sup>a</sup>	0.59 <sup>a</sup>	0.49 <sup>a</sup>	0.57 <sup>a</sup>	0.54 <sup>a</sup>	0.50 <sup>a</sup>	0.64 <sup>a</sup>	0.61 <sup>a</sup>	0.68 <sup>a</sup>	0.61 <sup>a</sup>	0.61 <sup>a</sup>	0.58
北京	0.87 <sup>a</sup>	0.80 <sup>a</sup>	0.73 <sup>a</sup>	0.66 <sup>a</sup>	0.67 <sup>a</sup>	0.71 <sup>a</sup>	0.83 <sup>a</sup>	0.87 <sup>a</sup>	0.83 <sup>a</sup>	0.93 <sup>a</sup>	0.76 <sup>a</sup>	0.89 <sup>a</sup>	0.80
拉萨	0.00	0.27 <sup>b</sup>	0.20	0.00	0.00	0.30 <sup>a</sup>	0.00	0.26 <sup>b</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09
昆明	0.44 <sup>a</sup>	0.51 <sup>a</sup>	0.64 <sup>a</sup>	0.59 <sup>a</sup>	0.54 <sup>a</sup>	0.62 <sup>a</sup>	0.61 <sup>a</sup>	0.51 <sup>a</sup>	0.53 <sup>a</sup>	0.44 <sup>a</sup>	0.27 <sup>b</sup>	0.28 <sup>a</sup>	0.50
重庆	0.44 <sup>a</sup>	0.70 <sup>a</sup>	0.56 <sup>a</sup>	0.48 <sup>a</sup>	0.71 <sup>a</sup>	0.59 <sup>a</sup>	0.78 <sup>a</sup>	0.78 <sup>a</sup>	0.79 <sup>a</sup>	0.63 <sup>a</sup>	0.64 <sup>a</sup>	0.45 <sup>a</sup>	0.63
杭州	0.83 <sup>a</sup>	0.83 <sup>a</sup>	0.71 <sup>a</sup>	0.74 <sup>a</sup>	0.74 <sup>a</sup>	0.78 <sup>a</sup>	0.83 <sup>a</sup>	0.85 <sup>a</sup>	0.75 <sup>a</sup>	0.82 <sup>a</sup>	0.86 <sup>a</sup>	0.85 <sup>a</sup>	0.80
广州	0.73 <sup>a</sup>	0.72 <sup>a</sup>	0.74 <sup>a</sup>	0.63 <sup>a</sup>	0.70 <sup>a</sup>	0.67 <sup>a</sup>	0.71 <sup>a</sup>	0.58 <sup>a</sup>	0.56 <sup>a</sup>	0.74 <sup>a</sup>	0.78 <sup>a</sup>	0.78 <sup>a</sup>	0.70

注:相关系数中上标“a”和“b”分别表示通过  $\alpha=0.000\ 001$  和  $0.000\ 01$  的显著性水平

表3 10个代表城市各月的系数  $b_0$

Tab.3 The coefficient  $b_0$  of 10 representative cities in each month

城市	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年均值
哈尔滨	6.29	5.54	6.24	5.72	6.04	5.46	6.37	6.63	5.83	5.72	5.98	6.44	6.02
乌鲁木齐	6.19	5.91	5.95	8.27	7.27	7.48	8.52	7.33	6.97	6.53	6.02	6.08	6.88
兰州	6.83	7.50	8.42	7.58	5.48	5.08	5.46	5.29	5.63	6.83	7.38	7.43	6.58
太原	5.99	5.91	6.43	5.85	5.65	5.82	5.84	6.26	6.80	6.40	6.47	6.27	6.14
北京	6.24	6.18	6.53	6.58	6.29	6.10	5.77	5.82	5.98	6.15	6.10	6.38	6.18
拉萨	4.00	7.50	12.85	4.07	3.90	11.63	3.65	12.04	3.65	3.86	3.95	4.02	6.26
昆明	6.06	5.84	5.90	5.82	5.61	5.99	6.14	6.12	6.17	5.99	5.43	5.62	5.89
重庆	5.57	5.92	5.69	5.44	5.94	5.89	5.44	5.48	5.58	5.90	5.98	5.70	5.71
杭州	5.65	5.54	5.58	5.42	5.65	5.60	5.75	5.35	5.36	5.55	5.68	5.67	5.57
广州	6.05	5.89	5.65	5.43	5.38	5.46	6.65	5.49	5.46	5.66	5.99	6.20	5.78

表4给出10个代表城市各月的  $b$  值。可以看出,各气候区的  $b$  值也存在差异。乌鲁木齐和兰州2个北方城市  $b$  的年均值均在0.7以上,API对能见度的变化敏感;乌鲁木齐夏半年大、冬半年小,而兰州夏半年小、冬半年大;北京  $b$  的年均值为0.64,其他城市都在0.5~0.6,且各月相差不大。

2.5 API估算式的检验

将10个代表城市2001—2012年API估算值与实际值进行对比并统计出绝对误差和相对误差,分别见表5和表6。由表5可以看出,乌鲁木齐的绝对误差年均值最大(35.2),特别是1月达到97.6,这可能与当地冬季采暖燃煤、逆温层强有关,导致实际空气污染严重,但乌鲁木齐冬季的相对湿度较大,根据公式(2)计算出的  $Q$  值小,因此公式(1)拟合出的污染指数偏小,所以绝对误差大;重庆和兰州次之,绝对误差的年均值分别为32.5和31.9;太原和北京绝对误差的年均值分别为28.4

和27.2;哈尔滨、昆明、杭州和广州绝对误差的年均值在20.0~21.9;拉萨绝对误差的年均值最小(13.5)。从10个城市平均情况来看,5—9月绝对误差小于20.0,2—4月和10月绝对误差在20.0~30.0;11月至次年1月为31.5~36.8。整体来看,冬半年的绝对误差比夏半年大,除乌鲁木齐和兰州的个别月份外,绝对误差的变化范围为10.0~45.0。

从表6可以看出相对误差的变化范围是20.4%~51.5%。乌鲁木齐、兰州、太原、昆明和重庆5个城市的相对误差变化幅度比较大,其他城市则比较小,尤其杭州的相对误差变化趋势比较稳定。相对误差年平均最大的城市是重庆(41.1%),重庆为山城,嘉陵江和长江穿城而过,相对湿度较大,能见度较低,由公式(1)拟合出的API值偏大,导致误差较大。然后依次为广州、昆明、乌鲁木齐、太原、拉萨、北京、兰州、杭州和哈尔滨。总体来看,除少数月份外,相对误差的变化范围为20.0%~40.0%。

表4 10个代表城市各月的系数  $b$

Tab.4 The coefficient  $b$  of 10 representative cities in each month

城市	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年均值
哈尔滨	0.60	0.42	0.63	0.46	0.55	0.39	0.69	0.77	0.51	0.47	0.55	0.62	0.56
乌鲁木齐	0.30	0.25	0.39	1.16	0.93	1.02	1.32	0.95	0.81	0.63	0.37	0.29	0.70
兰州	0.79	1.03	1.31	0.98	0.36	0.24	0.37	0.32	0.43	0.78	0.96	0.99	0.71
太原	0.47	0.47	0.65	0.45	0.42	0.50	0.50	0.64	0.80	0.65	0.60	0.52	0.56
北京	0.69	0.64	0.70	0.70	0.62	0.59	0.57	0.59	0.62	0.68	0.60	0.71	0.64
拉萨	0.00	1.05	2.59	0.00	0.00	2.33	0.00	2.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.70
昆明	0.61	0.61	0.57	0.57	0.50	0.65	0.70	0.67	0.71	0.56	0.22	0.29	0.56
重庆	0.39	0.69	0.46	0.24	0.66	0.55	0.52	0.52	0.54	0.61	0.58	0.36	0.51
杭州	0.59	0.61	0.49	0.49	0.54	0.52	0.60	0.57	0.54	0.64	0.60	0.55	0.56
广州	0.70	0.64	0.55	0.46	0.48	0.46	0.87	0.46	0.46	0.55	0.68	0.71	0.59

表 5 回代检验绝对误差  
Tab. 5 Absolute error for back test

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年平均
哈尔滨	32.5	27.3	22.6	22.9	21.4	14.4	16.1	16.8	15.4	18.4	27.3	27.3	21.9
乌鲁木齐	97.6	58.0	28.9	26.6	15.2	13.8	13.9	16.2	15.8	17.5	45.8	72.9	35.2
兰州	44.8	38.8	52.1	43.9	24.6	15.4	17.3	16.9	17.4	28.3	35.5	47.3	31.9
太原	33.5	24.8	33.8	30.4	17.9	18.8	19.5	21.0	27.8	31.3	40.5	41.8	28.4
北京	22.0	22.6	35.8	37.9	29.7	22.2	20.1	17.4	21.5	30.8	32.9	33.1	27.2
拉萨	18.2	18.5	15.5	15.7	12.8	12.0	11.4	10.4	10.5	11.2	12.2	13.1	13.5
昆明	20.5	12.0	15.6	14.5	14.8	15.4	17.4	20.4	20.3	23.0	32.7	32.9	20.0
重庆	44.3	32.4	31.0	37.5	27.0	33.8	21.0	21.8	27.0	32.1	38.5	43.9	32.5
杭州	25.5	19.9	25.1	23.5	19.9	18.6	15.4	15.4	17.9	20.5	28.5	26.1	21.4
广州	29.4	25.2	22.3	20.8	15.7	16.4	17.5	16.8	18.1	18.6	21.2	25.4	20.6
平均	36.8	28.0	28.3	27.4	19.9	18.1	17.0	17.3	19.2	23.2	31.5	36.4	25.2

表 6 回代检验相对误差(单位:%)  
Tab. 6 Relative error for back test (Unit:%)

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年平均
哈尔滨	33.5	31	26.9	28.2	23.6	24.8	28.9	28.7	25.3	26.7	34.0	27.8	28.3
乌鲁木齐	51.3	38.3	28.2	31.7	28.8	26.2	25.8	27.7	26.3	23.6	36.9	44.9	32.5
兰州	31.2	31	39.2	30.7	31.1	22.0	22.6	24.5	25.7	34.2	28.2	28.2	29.1
太原	28.5	25.5	32.0	30.7	21.5	27.0	26.3	30.9	42.5	44.4	37.7	34.3	31.8
北京	24.1	25.4	33.0	33.5	29.7	27.4	27.4	24.8	30.8	35.3	35.9	31.5	29.9
拉萨	36.3	34.8	26.9	29.2	29.7	34.8	43.2	33.8	34.0	27.7	24.5	24.5	31.6
昆明	32.8	20.4	22.5	22.9	27.4	31.6	34.4	36.9	36.7	41.8	51.5	49.1	34.0
重庆	47.7	35.3	38.5	47.5	36.9	45.9	31.2	32.2	38.6	47.0	44.8	47.0	41.1
杭州	29.6	27.8	30.1	29.2	26.9	28.5	25.0	24.9	27.4	27.2	32.9	31.0	28.4
广州	41.3	41.9	35.0	34.6	30.1	32.2	35.4	31.7	33.4	28.8	32.6	36.7	34.5
平均	35.6	31.1	31.2	31.8	28.6	30.0	30.0	29.6	32.1	33.7	35.9	35.5	32.1

图 1 分别给出北京市 2012 年 1—2 月 API 的拟合情况及能见度和相对湿度的变化。可以看出,北京市 API 除个别值拟合较差外,其余拟合值与实际值基本吻合;相对湿度与 API 变化趋势大体一致,能见度与 API 变化趋势相反。北京市 2012 年 1 月 1 日—2 月 28 日 API 实际值与拟合值的相关系数为 0.86,API 与能见度、相对湿度的相关系数分别为 -0.74 和 0.63。说明给出的拟合结果与 API 的相关程度好于能见度、相对湿度与 API 的相关程度。

图 2 给出重庆市 2011 年 11—12 月 API 的拟合情况及其能见度、相对湿度变化情况。可以看出,

重庆市的拟合值与实际值变化趋势总体一致,但拟合效果不如北京,拟合值普遍较实际值偏大;相对湿度、能见度均与 API 变化趋势相反。重庆 2011 年 11 月 1 日—12 月 30 日 API 实际值与拟合值的相关系数为 0.75,API 与能见度、相对湿度的相关系数分别为 -0.50 和 -0.40。说明给出的拟合结果与 API 的相关程度好于能见度、相对湿度与 API 的相关程度。

以上分析表明,2 个城市 API 的整体变化趋势与实际基本一致,且拟合值与 API 的相关程度均好于单一物理量(相对湿度和能见度)与 API 的相关程度,说明构造的 API 估算式基本合理和可信。

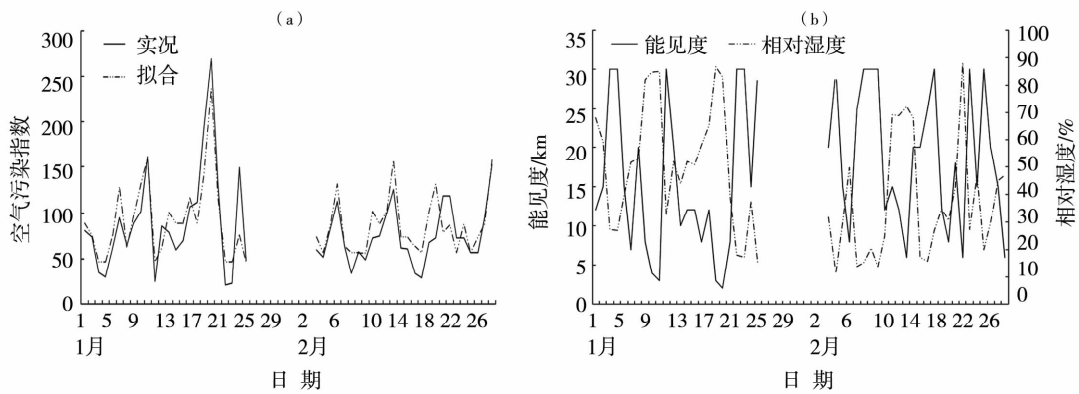


图1 北京2012年1月1日—2月28日API拟合情况(a)及能见度和相对湿度变化(b)

Fig.1 The fitting values of air pollution index (a) and variation of visibility and relative humidity (b) from 1 Jan 2012 to 28 Feb 2012 in Beijing

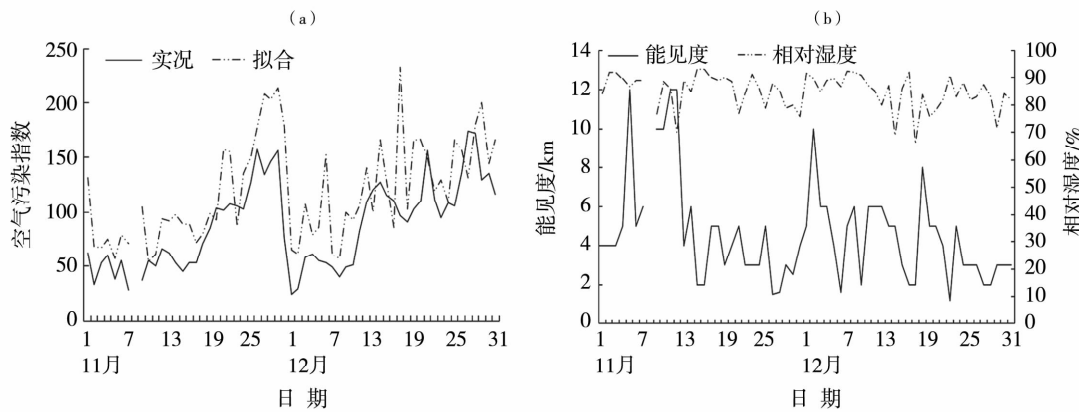


图2 重庆2011年11月1日—12月30日API拟合值(a)及能见度和相对湿度变化(b)

Fig.2 The fitting results of air pollution index (a) and variation of visibility and relative humidity (b) from 1 Nov 2011 to 30 Dec 2011 in Chongqing

### 3 结论与讨论

(1)通过试验方法确定出的4个参数分别为: $RH_1 = 78\%$ ,  $RH_2 = 96\%$ ,  $Q_1 = 1.0$ ,  $Q_2 = 0.2$ ,间接说明,当空气相对湿度小于78%时,能见度主要受空气污染物浓度影响;当空气相对湿度大于96%时,能见度主要受空气湿度影响;当空气相对湿度介于78%~96%时,能见度受空气污染物浓度和空气湿度共同影响。

(2)除拉萨和兰州外,其余8个城市空气污染指数(API)与能见度和湿度的相关程度都通过了 $\alpha = 0.000\ 01$ 的显著性水平,并且相关程度冬半年好于夏半年;4—11月10个代表城市相关最好的时次以08:00为主;12月至次年3月02:00和08:00约各占50%。

(3)参数 $b_0$ 和 $b$ 除拉萨、乌鲁木齐和兰州以外,其余7个城市的变化幅度都比较小。

(4)回代检验表明,除乌鲁木齐和兰州个别月

份外,绝对误差的变化范围为10.0~45.0;除少数月份外,相对误差的变化范围为20.0%~40.0%。API的拟合值与实际API的相关程度均好于单一物理量(相对湿度或能见度)与实际API的相关程度,说明构造的API计算式基本合理可信。

这里构造的API与能见度和空气湿度的关系式,对相对湿度较小的情况拟合较好,但对于相对湿度较高的情况,由于对水汽的作用考虑不足或过重,导致拟合的API偏大(如重庆)或偏小(如乌鲁木齐),这需要在以后的工作中加以改进。2012年之前,国家环保部门只监测3种空气污染物( $PM_{10}$ 、 $SO_2$ 和 $NO_2$ )逐日浓度资料,研究大气污染物浓度与气象条件多以日均值为最小研究单位,缺乏小时变化关系分析,有些研究结果可能无法完全准确反映大气污染物与气象条件的变化关系。2013年后国家环境总站发布了6种空气污染物( $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$ 、 $SO_2$ 、 $CO$ 、 $O_3$ 和 $NO_2$ )逐时浓度资料,更

为详尽的资料为探讨各种污染物浓度与气象条件的关系提供了便利,以后可以通过这方面的研究为大气污染的治理提供科学依据。

#### 参考文献

- [1] 张剑,刘红年,唐丽娟. 苏州城区能见度与颗粒物浓度和气象要素的相关分析[J]. 环境科学研究,2011,24(9):982-987.
- [2] APPEL B R, TOKIWA Y, HSU J. Visibility as related to atmospheric aerosol constituents[J]. Atmospheric Environment, 1985,19(9):1525-1534.
- [3] CHAN Y C, SIMPSON R W, MC TAINSH G H. Source apportionment of visibility degradation problems in Brisbane (Australia) using the multiple linear regression techniques[J]. Atmospheric Environment, 1999,33(19):3237-3250.
- [4] ELIAS T, HAEFFELIN M, DROBINSKI P. Particulate contribution to extinction of visible radiation: pollution, haze, and fog[J]. Atmospheric Research, 2009,92(4):443-454.
- [5] 李海洋. 北京低能见度污染天气发生频率与成因特征研究[J]. 环境与可持续发展,2009,38(3):50-52.
- [6] 魏玉香,银燕,杨卫芬. 南京地区 PM<sub>2.5</sub> 污染特征及其影响因素分析[J]. 环境科学与管理,2009,34(9):29-34.
- [7] 吴兑,刘敏汉,梁延刚. 粤港细粒子(PM<sub>2.5</sub>)污染导致能见度下降与灰霾天气形成的研究[J]. 环境科学学报,2012,32(11):2660-2669.
- [8] 杨琳,杨红龙,陈嘉晔. 深圳地区灰霾分布特征及预警、预报方法探讨[J]. 环境科学学报,2012,32(12):3065-3072.
- [9] 郭军,任雨,傅宁,何群. 环渤海地区 1980-2012 年能见度变化特征[J]. 气象科技,2016,44(30):416-422.
- [10] DOYLE M, DORLING S. Visibility trends in the UK 1950-1997 [J]. Atmospheric Environment, 2002,36(19):3161-3172.
- [11] GHIM Y S, MOON K C, LEE S, et al. Visibility trends in Korea during the past two decades[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2005,55(1):73-82.
- [12] 孙景群. 能见度与相对湿度的关系[J]. 气象学报,1985,43(2):230-234.
- [13] 张智,陈玉华,周红. 宁夏雾日和霾日的变化趋势分析[J]. 干旱气象,2013,31(4):714-719.
- [14] 江文华,刘德,陈勇航,等. 1980—2012 年重庆地区霾日时空变化特征[J]. 干旱气象,2015,33(4):602-606.
- [15] 张夏琨,王春玲,王宝鉴. 气象条件对石家庄市空气质量的影响[J]. 干旱气象,2011,29(1):42-47.
- [16] 王晓敏,韩军彩,陈静,等. 石家庄地区能见度变化特征及其与相对湿度和颗粒物浓度的关系[J]. 干旱气象,2016,34(4):648-655.
- [17] 白永清,祁海霞,刘琳,等. 武汉大气能见度与 PM<sub>2.5</sub> 浓度及相对湿度关系的非线性分析及能见度预报[J]. 气象学报,2016,74(2):189-199.
- [18] 吴兑. 再论相对湿度对区别都市霾与雾(轻雾)的意义[J]. 广东气象,2006,34(1):9-13.
- [19] 刘宁微,马雁军,王扬锋. 辽宁中部城市群夏季大气能见度的观测研究[J]. 气象学报,2012,70(4):814-820.
- [20] 付桂琴,张迎新,张庆红,等. 河北省低能见度事件特征分析[J]. 气象,2013,39(8):1042-1049.
- [21] 吴兑,邓雪娇,雪岩,等. 细粒子污染形成灰霾天气导致广州地区能见度下降[J]. 热带气象学报,2007,23(1):1-6.
- [22] 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(增刊):160-169.
- [23] 王博妮,徐芬,田小毅. 我国近年雾研究方法及其研究热点综述[J]. 气象科技,2014,42(1):23-30.
- [24] 周斌斌. 雾对大气污染物迁移扩散的影响[J]. 环境科学,1993,(1):89-91.
- [25] 江玉华. 重庆城区浓雾的基本特征[J]. 气象科技,2004,(6):67-72.
- [26] SHEN C H, LI C L, SI Y L. A detrended cross-correlation analysis of meteorological and API data in Nanjing, China[J]. Physica A: statistical Mechanics and its Applications, 2015,419:417-428.
- [27] 王勇,胡晏玲. 在不同相对湿度条件下雾对空气质量的影响[J]. 新疆环境保护,2006,28(3):15-18.
- [28] 王勇,柳林涛,李江波,等. 北京气态污染物变化与空中水汽变化的比较研究[J]. 环境科学与技术,2015,38(6):50-57.
- [29] 刘严萍,王勇,李江波. 北京 APEC 会议期间 GPS 水汽与 PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> 的相关性比较[J]. 灾害学,2015,30(3):26-28.
- [30] 冯静,董君,薛莲,等. 青岛市采暖期 PM<sub>2.5</sub> 与大气能见度的关系[J]. 干旱环境监测,2014,28(1):14-17.
- [31] 陈魁,董海燕,边玮瓌. 天津市区能见度变化规律及影响因子相关分析[J]. 环境与可持续发展,2013(3):85-88.
- [32] 侯鲁健,刘玉堂,吕波,等. 济南市大气水平能见度与环境污染相关性分析[J]. 环境工程学报,2014,8(6):2523-2528.
- [33] 潘洪密,吴兑. 广州地区大气能见度与颗粒物关系的初探[J]. 环境监控与预警,2015,7(1):32-36.

## Relationship Between Air Pollution Index and Visibility, Relative Humidity in Ten Representative Cities of China

SHANG Ziwei<sup>1</sup>, NING Guicai<sup>1</sup>, WANG Jiexin<sup>1</sup>, CHENG Yifan<sup>1</sup>, WANG Shigong<sup>1,2</sup>

(1. College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. School of Atmospheric Sciences, Chengdu Information and Engineering University, Chengdu 610225, China)

**Abstract:** Not only atmospheric pollutants but also fog is an important factor affecting the visibility. Therefore, the air quality reflected by visibility needs to consider the effect of water vapor. In this paper, the mathematical models of air pollution index (API) associated with visibility and relative humidity were constructed based on the existing research results. Based on daily air pollution index and simultaneous surface meteorological data at 08:00 BST from 10 representative cities in China from 2001 to 2012, the coefficients in the formula were determined using linear regression analysis method firstly, and the statistical equation for estimating API by visibility and relative humidity was established. Results are as follows: (1) When relative humidity was less than 78%, visibility was mainly affected by the concentration of air pollutants, but when relative humidity was greater than 96%, visibility was mainly affected by relative humidity, while when relative humidity ranged from 78% to 96%, visibility was affected by the common effect of air pollutants and humidity. (2) Except for Lhasa and Lanzhou, the correlation coefficients between API and visibility, relative humidity in the rest of eight cities passed the significance test level of  $\alpha = 0.000\ 01$ , and the correlation degree in winter half year was better than that in summer half year. (3) The variation range of parameters  $b_0$  and  $b$  in the fitting relationship between air pollution index and visibility, relative humidity was small in the rest cities except for Lhasa, Urumchi and Lanzhou. (4) Back test showed that except some individual months, the absolute error and relative error were relatively small, so the API associated with visibility and relative humidity in the formula could be fitted.

**Key words:** ten major representative cities; air pollution index; visibility; relative humidity



(上接第 580 页)

## Prediction and Analysis of Factors Affecting Pan Evaporation in Changwu Tableland of Shaanxi Province

CUI Yaqiang<sup>1</sup>, ZHU Yuanjun<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling 712100, China)

**Abstract:** Based on the data of pan evaporation at Changwu Agro-ecological Station (CWA) and meteorological factors during 2007–2015, the dominant factors affecting pan evaporation were analyzed at different time scales using the methods of grey correlation and principal component analysis. Results showed that temperature, vapor pressure, air pressure and sunshine duration were main factors influencing pan evaporation at annual time scale. At seasonal scale, moreover, the sunshine duration and temperature were dominant factors in spring, for summer, they were temperature and air pressure, and for autumn and winter, they were sunshine duration and vapor pressure, respectively. Temperature, sunshine duration and air pressure were dominant factors which affected pan evaporation at monthly scale. Based on the principal component analysis and the multiple linear regression analysis, a formula was established to predict pan evaporation and the result owned a relative error ranging from 0.45% to 90%, and root mean square error of the prediction was 5.56 mm.

**Key words:** Changwu tableland; pan evaporation; correlation degree; principal component analysis; influence factors