

廖碧婷, 吴兑, 陈静, 等. 灰霾天气变化特征及垂直交换系数的预报应用[J]. 热带气象学报, 2012, 28(3): 417-424.

文章编号: 1004-4965(2012)03-0417-08

灰霾天气变化特征及垂直交换系数的预报应用

廖碧婷^{1,2}, 吴兑^{1,2}, 陈静³, 李菲²,
陈欢欢², 刘运策⁴, 黄晓莹⁴

(1. 中国气象科学研究院, 北京 100081; 2. 中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广东 广州 510080;
3. 北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京 100871; 4. 广东省气象局, 广东 广州 510080)

摘 要: 利用 1998—2008 年广东省广州、东莞和增城的常规气象资料及 2004 年 6 月 10 日—2008 年 12 月 30 日 Micaps 3.0 的 K 指数、沙氏指数和 L 指数资料, 重点分析了这三个地方 10—12 月的灰霾天气变化特征。研究表明, 增城的能见度比例主要集中在大于 10 km 的范围内, 空气质量最好, 东莞的空气质量最差。广州和东莞 10—12 月的能见度等级百分比分布形态类似, 轻微灰霾天气所占频率较大, 其中 10 月占的比例最高。并提出垂直交换系数试图对污染物的垂直输送能力进行评估, 进而尝试对灰霾天气进行预报。结果表明当垂直交换系数小于 15 000 时, 城市容易出现灰霾天气, 反之则说明该地的空气质量较为良好。

关 键 词: 大气环境学; 空气质量; 灰霾天气; 矢量和; 垂直交换系数; 广州; 东莞; 增城

中图分类号: X16

文献标识码: A

Doi: 10.3969/j.issn.1004-4965.2012.03.014

1 引 言

灰霾天气定义为日均能见度小于 10 km, 日均相对湿度小于 90%, 大气浑浊视野模糊导致的能见度恶化的天气现象事件^[1]。自 1980 年开始, 广州地区的能见度急剧恶化, 灰霾天气显著增加^[2]。广东省大气成分公报显示, 2004—2008 年广州灰霾天数超过 100 天, 2009 年达 97 天。灰霾天气被新闻界称作“地毯式的污染”、“是气溶胶污染问题的显著证据”^[3-4], 易诱发如呼吸道疾病、心血管病和肺癌等^[5], 对城市的经济活动和居民生活影响巨大。因此研究灰霾天气变化特征, 预测和控制灰霾天气是十分重要和紧迫的研究课题。国内对广州及周边地区的灰霾天气变化特征已有不少研究, 如沈家芬等^[6]利用广州市 2001—2003 年大气能见度及同期地面气象要素观测资料和空气污染监测数据, 对广州市能见度特征及

其影响因子进行了分析。陈欢欢等^[7]利用天气学分析方法、矢量和分析方法分析了珠三角 2001—2008 年灰霾天气过程特征。刘新罡等^[8]通过污染性气体 NO₂ 等观测资料初步研究了广州能见度的影响因子。吴兑等^[9]从气溶胶的光学厚度以及天气形势等方面对 2003 年 11 月一次大气能见度极低的现象进行了报道。过去的研究主要讨论典型重污染过程的灰霾变化特征, 而本文则主要研究 1998—2008 年亚运会同期灰霾天气的平均变化特征。

吴兑等^[10]利用矢量和研究方法得出区域霾天气过程与区域内静小风过程有关, 而清洁对照过程则与强平流输送有关。矢量和的提出可应用于空气污染物水平输送能力的评估, 但仍无法评估其垂直输送能力。本文利用 Micaps3.0 系统的 K 指数、沙氏指数和 L 指数资料得出垂直交换系数, 对空气污染物的垂直输送能力进行评估, 从而尝

收稿日期: 2010-12-12; 修订日期: 2011-04-11

基金项目: 国家自然科学基金 (U0733004) ; “973” 课题 (2011CB403403) ; “863” 课题 (2006AA06A306、2006AA06A308) 共同资助

通讯作者: 吴兑, 男 (满族), 北京市人, 二级研究员, 博士生导师, 研究方向: 大气物理化学与大气环境。E-mail: wudui@grmc.gov.cn

试对灰霾天气和无视程障碍天气进行预报,为政府部门空气质量整治及气象业务部门灰霾天气预报提供科学依据。

2 资 料

(1) 1998—2008 年广州五山气象站、东莞、增城一天 24 个时次的常规气象资料。(2) Micaps 3.0 2004 年 6 月 10 日—2008 年 12 月 30 日的 K 指数、沙氏指数、L 指数资料。

3 亚运同期灰霾天气变化特征分析

利用广州、东莞、增城三地的 1998—2008 年 10—12 月能见度 24 时次资料计算出日平均能见度,根据气象行业标准 QX/T 113-2010 “霾的观测和预报等级”中关于预报分级的标准^[11],将能见度划分为>10、5~10(轻微灰霾天气)、3~5(轻度灰霾天气)、2~3(中度灰霾天气)、<2(重度灰霾天气)五个等级,分别统计出三地 11 年来与亚运会同期对应等级的能见度日数百分比。但由于三地能见度<3 km 的百分比比较小,故将 2~3 和<2 两个等级合并为<3。

由图 1a 可看出,广州 10—12 月能见度等级百分比分布形态具有相似性,能见度最高频率都出现在>10 km 范围内,出现频率分别为 70.27%、69.44%、74.47%,5~10 km 的频率也较高,分别为 27.33%、24.38%和 18.32%,3~5 km 的出现频率分别为 1.80%、5.56%和 5.71%,而<3 km 的趋于零。说明广州 10—12 月能见度<10 km 的概率约为 30%,可能因为每年 10 月以后,珠三角地区开始受副热带高压控制,来自大陆的干冷空气和来自海洋的暖湿空气实力相当,空气流动受限使污染物不易扩散,导致灰霾天气较多。

由图 1b 可看出,东莞市 10—12 月能见度等级百分比分布与广州相似,能见度最高频也是出现在>10 km 范围内,分别高达 62.39%、67.59%、61.45%,5~10 km 的比例也相对较高,分别有 28.36%、24.07%和 25.30%,3~5 km 的频率分别为 9.25%、7.41%和 12.35%,大大高于广州该等级的比例,而<3 km 范围也趋于零。

从图 1c 中可以看出,增城 10—12 月空气质量较好,能见度最高频也出现在>10 km 范围内,频率分别达 89.52%、73.60%、75.00%,5~10 km 的出现频率分别为 10.48%、23.91%、24.09%。由此可以得出增城 10—12 月能见度<10 km 的日数百分比<25%,这可能与增城主要走非均衡发展之路——全区域公园化战略,坚持“保护也是发展,让生态价值凸显”的发展理念有关。

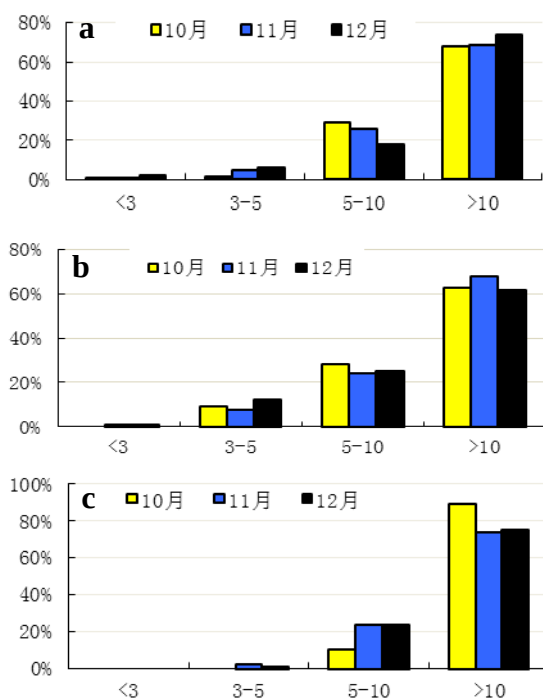


图 1 广州(a)、东莞(b)、增城(c)1998—2008 年 10—12 月能见度等级百分比 横坐标单位为 km。

由图 1 表明 1998—2008 年亚运会同期增城能见度比例主要集中在>10 km,空气质量最好,广州次之,东莞空气质量最差。而广州和东莞 10—12 月能见度等级百分比分布形态类似,轻微灰霾天气所占频率较大,且 10 月最高。东莞 10、12 月能见度在 3~5 km 的百分比均高于广州。

目前研究表明珠三角地区近几十年的能见度恶化主要是细粒子污染^[12],当细粒子浓度达到一定程度时,其产生的消光作用可导致能见度的恶化^[13],引发灰霾天气。而边界层中污染物的输送,在水平方向上受平均风速支配,在垂直方向上受湍流支配。文献[14-16]从天气系统及局地环流对污染物输送与能见度的影响方面进行研究,吴兑

等^[10]提出的矢量和方法也已应用于污染物水平输送能力的评估,但垂直输送能力尚无法评估。因此下节主要利用 Micaps3.0 系统的 K 指数、沙氏指数和 L 指数得出垂直交换系数,试图对污染物垂直输送能力进行评估,进而尝试对亚运会同期典型灰霾天气过程和清洁过程进行预报。

4 垂直交换系数的定义

4.1 三种稳定度参数

4.1.1 K 指数 (气团指标)

$$K=(T_{850}-T_{500})+T_{d850}-(T_{700}-T_{d700}) \quad (1)$$

其中第一项 $(T_{850}-T_{500})$ 为 850 hPa 与 500 hPa 的温度差,代表气温直减率;第二项 T_{d850} 为 850 hPa 的露点,表示低层水汽条件;第三项 $(T_{700}-T_{d700})$ 为 700 hPa 的温度露点差,反映中层饱和程度和湿层厚度(单位:°C)。K 指数是反映稳定度和湿度条件的综合指标,一般 K 值愈大表示大气层结愈不稳定。

4.1.2 沙氏稳定度指数 (SI)

$$SI=T_{500}-T_s \quad (2)$$

其中 T_{500} 为 500 hPa 的层结曲线温度, T_s 为气块从 850 hPa 沿干绝热线抬升到凝结高度后再沿湿绝热线抬升到 500 hPa 的温度。SI 表示气层稳定情况, $SI<0$ 表示气层不稳定。SI 负值愈大,愈不稳定。

4.1.3 L 指数(抬升指数(LI))

L 指数是表示自由对流高度以上不稳定能量大小的指数。它表示一个气块从抬升凝结高度出发,沿湿绝热线上升到 500 hPa (海拔 5 500 m 左右高度)处所具有的温度被该处实际大气温度所减得到的差值。当差值为负数时,表明气块比环境温度更暖,因此将会继续上升。该差值的绝对值越大,出现对流天气的可能性也越大。差值为正数时,表示大气层结稳定。

K 指数是衡量大气中潜在能量多少的一种指标,在反映气层不稳定程度的同时考虑了中低层的水汽条件,但它不能全面刻划出大气层结不稳定程度;沙氏指数、抬升指数是计算某一高度上气块温度高出环境温度的大小,其单位是度,反

映单层的浮力,表示气层的不稳定程度,负值越大气层越不稳定。但如果水汽不能从地面伸展到 850 hPa,或如果地表高度不能很好地代表边界层,SI 则没有代表性。另外,SI 是基于探测时间的温度和露点的“状态指数”,未考虑午后可能发生的加热变化。LI 和 SI 一样,如果对流层中层存在逆温层或稳定层,则稳定度值没有代表性,而 LI 易受其影响,亦没有代表性。所以各种指数都有其长处和弱点,但没有一个指数能全面刻划大气稳定度状态。综合三种指数重新制定一个新的组合指数,即垂直交换系数,试图更全面地描述大气的对流稳定状况,从而对灰霾天气进行预报。

4.2 典型过程中各指数的变化规律

图 2~4 分别是典型过程 K 指数、沙氏指数、L 指数的变化规律。由图 2 可知 K 指数日均值 <25 °C是广州发生灰霾天气的阈值。资料分析中一共包含有 36 个典型灰霾过程和 35 个典型清洁过程。其中典型灰霾过程有 149 天,145 天有数据, $K<25$ °C有 112 天,达 77.24%;而典型清洁过程有 150 天,133 天有数据, $K>25$ °C有 74 天,达 55.64%。从图 5a、6a 中也可看出典型灰霾过程 K 指数平均值为 12.92 °C,远小于 25 °C,其中有 28 个过程的 K 指数的平均值 <25 °C,占 80%;而典型清洁过程 K 指数的平均值为 24.22 °C,其中 16 个过程的 K 指数平均值 >25 °C,占 50%。

由图 3 可知,沙氏指数日均值 >7 °C是广州发生灰霾天气的阈值。数据统计表明典型灰霾过程中 $SI>7$ °C有 96 天,达 66.21%,典型清洁过程 $SI<7$ °C有 83 天,达 62.41%。从图 5b、6b 中可以看出,典型灰霾过程中 SI 平均值为 9.19 °C,其中 35 个典型灰霾过程中有 24 个过程的 SI 平均值 >7 °C,占 68.57%;而典型清洁过程 SI 的平均值为 6.75 °C,其中 19 个过程的平均值 <7 °C,占 59.37%。

由图 4 可知,L 指数日均值 <10 °C是广州发生灰霾天气的阈值。数据统计表明典型灰霾过程 $LI<10$ °C有 106 天,达 73.10%,典型清洁过程 $LI>10$ °C有 95 天,达 71.43%。从图 5c、6c 中可以看出,典型灰霾过程中 LI 平均值为 5.55 °C,其中 35 个典型灰霾过程中有 28 个过程的 LI 平均值

$<10^{\circ}\text{C}$, 占 80%; 典型清洁过程 LI 平均值为 10.22°C , 其中 18 个过程平均值 $>10^{\circ}\text{C}$, 占 56.25%。

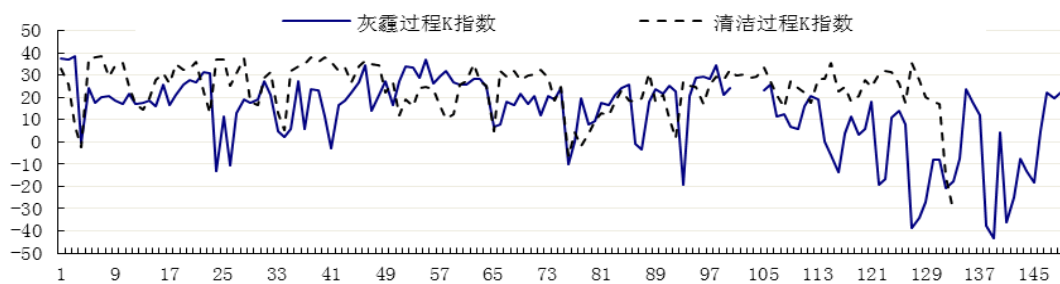


图2 典型过程 K 指数的变化规律

横坐标为次数。

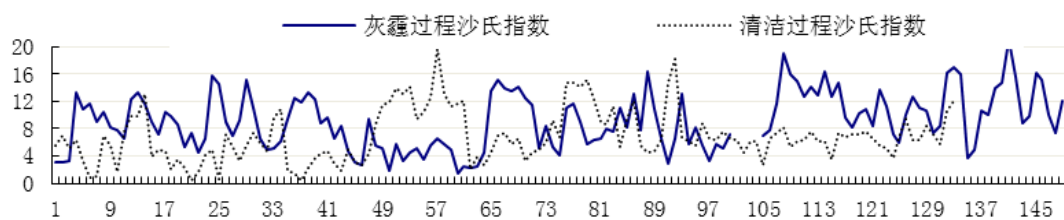


图3 典型过程沙氏指数变化规律

横坐标为次数。

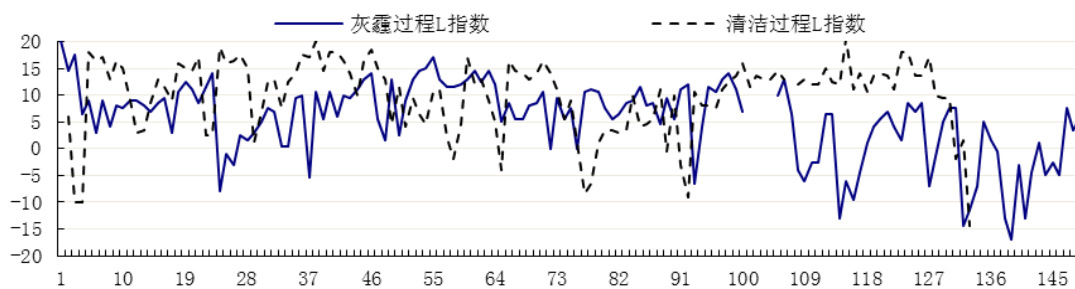
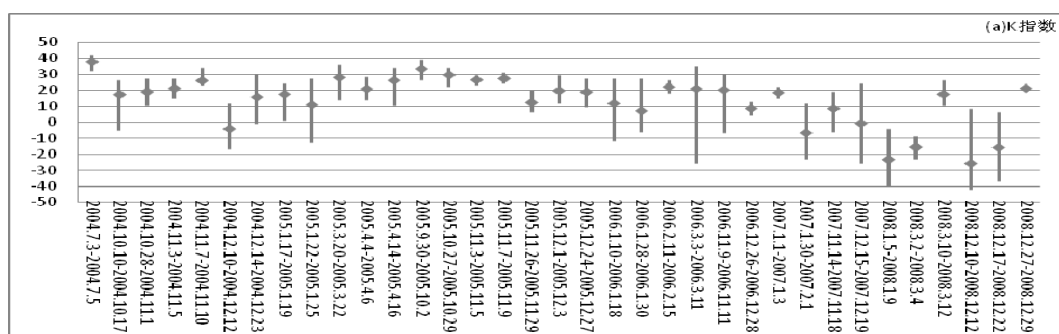
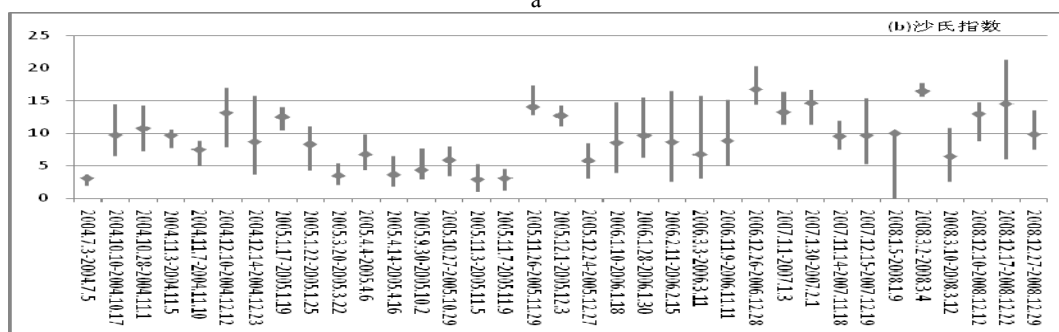


图4 典型过程的 L 指数变化规律

横坐标为次数。



a



b

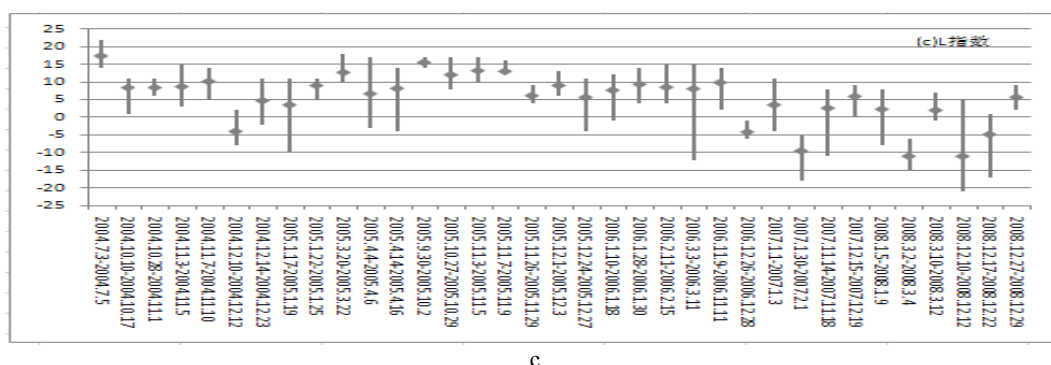


图5 典型灰霾过程中 K 指数(a)、沙氏指数(b)、L 指数(c)的变化情况

横坐标为日期。

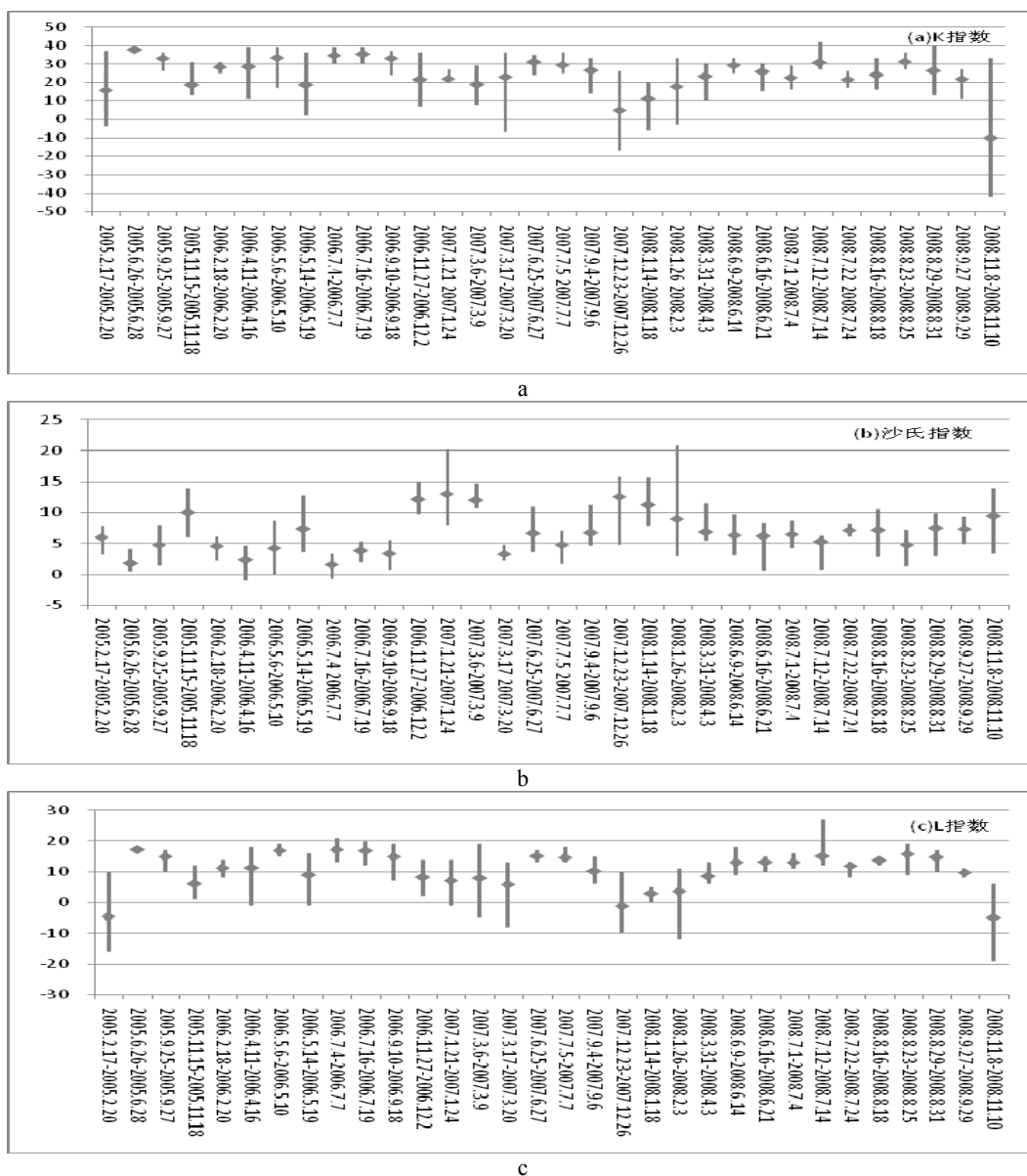


图6 同图5, 但为典型清洁过程

4.3 垂直交换系数计算

垂直交换系数是采用上述的 K 指数、沙氏指

数和 L 指数三种指数来确定的, 但各指数对垂直交换系数的贡献不同, 如何确定这三种指数的组

合方式呢?通常各指标间的价值组合规则主要有以下三种形式^[17]。

(1) 加法规则。适用于各目标值变化相互独立,对总价值的作用只有程度上而无本质上的区别,从而可以相互线性补偿的情形。当某一指标 X_j 由一系列子指标 $X_{j1}, X_{j2}, \dots, X_{jn}$ 组成时,其计算公式为,

$$F(X_j) = \sum_{i=1}^n \omega_{ji} X_{ji} \quad (3)$$

ω_{ji} 是指标 X_{ji} 的权系数, $0 \leq \omega_{ji} \leq 1$ 且 $\sum_{i=1}^n \omega_{ji} = 1$ 。

(2) 乘法规则。适用于各指标地位独立作用仅有程度上而无本质上差异,但相间补偿作用甚弱的情形。其计算公式为,

$$F(X_j) = \prod_{i=1}^n (X_{ji})^{\omega_{ji}} \quad (4)$$

(3) 代换规则。适用于各指标可相互补偿,一优即优的情形。其计算公式为,

$$F(X_j) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - X_{ji}) \quad (5)$$

通常,总标评价值是各指标在各种规则相互组合下的结果。特别地,当所有组合为加法规则且总标评价值 X_j 为一个时,其综合评价值可表示为,

$$F(X) = \omega_1 X_1 + \omega_2 X_2 + \dots + \omega_n X_n \quad (6)$$

其中指标权重满足归一性原则。

综上所述,垂直交换系数由 K 指数、沙氏指数、L 指数相互结合得来,它们之间关系满足式(6),但三个未知数一个方程,方程组不闭合,因此需要对沙氏指数和 L 指数进行参数化。从图 7~10 可以知道典型过程中 K 指数与 SI 和 LI 存在高相关,在显著性水平 0.05 下, K 指数与 SI 的相关系数为 -0.58, 与 LI 的相关系数为 0.79, 清洁过程中 K 指数与沙氏指数的相关系数为 -0.67, 与 L 指数的相关系数为 0.85。所以利用 K 指数对沙氏指数和 L 指数参数化后最终得出如下结果。

灰霾过程垂直交换系数的公式为,

$$VEIh = 0.91 \times K - 0.15 \times SI + 0.24 \times LI \quad (7)$$

清洁过程垂直交换系数的公式为,

$$VEIc = 0.77 \times K - 0.15 \times SI + 0.39 \times LI \quad (8)$$

调整后得垂直交换系数的公式为,

$$VEIo = 0.84 \times K - 0.12 \times SI + 0.33 \times LI \quad (9)$$

为了更清楚地显示灰霾过程和清洁过程中垂直交换系数的差别,对式(9)中的垂直交换系数作立方,最后得到垂直交换系数为,

$$VEIn = (VEIo)^3 \quad (10)$$

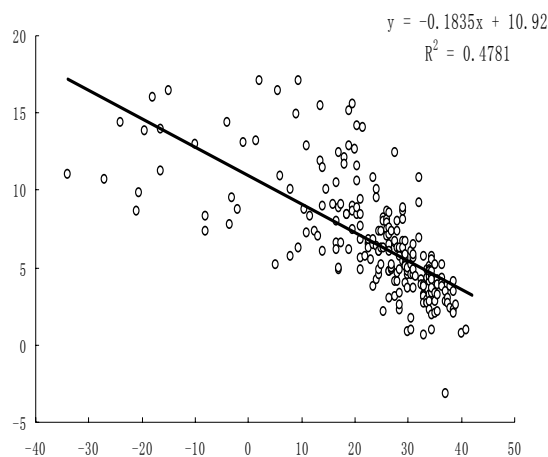


图 7 典型灰霾过程 K 指数与沙氏指数的相关

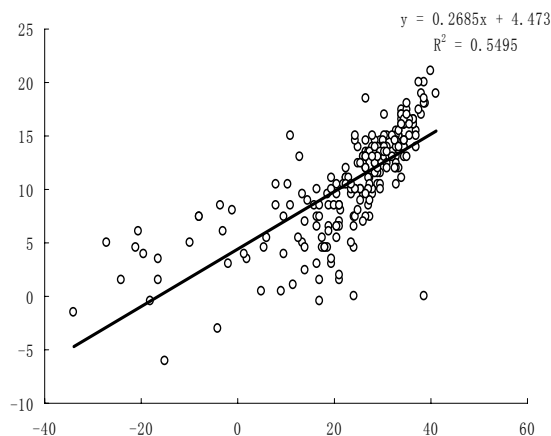


图 8 典型灰霾过程 K 指数与 L 指数的相关

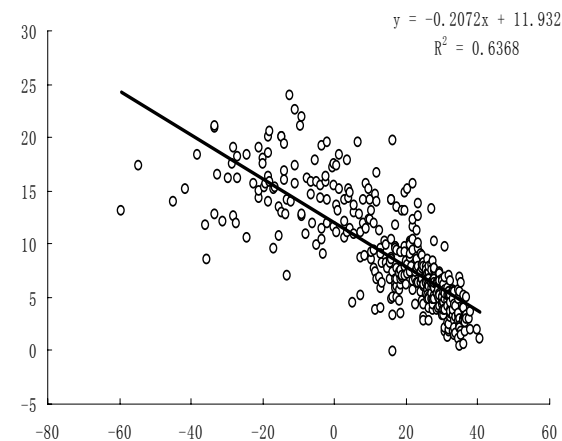


图 9 清洁过程 K 指数与沙氏指数的相关

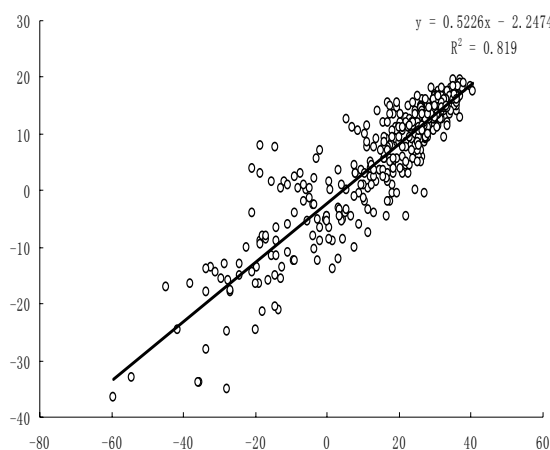


图10 清洁过程K指数与L指数的相关

5 垂直交换系数预报灰霾过程

预报指标的历史检验按照CSI(CSI=预报正确数/(预报正确数+空报数+漏报数))的定义^[18]评分,

命中率 $POD = \text{预报正确数} / (\text{预报正确数} + \text{漏报数})$, 虚假报警率 $FAR = \text{空报数} / (\text{预报正确数} + \text{空报数} + \text{漏报数})$ 。利用以上三个指标重点对垂直交换系数灰霾天气预报指标进行历史检验。

由图11可知,灰霾过程和清洁过程的垂直交换系数的阈值为15 000,即当垂直交换系数小于15 000时,容易发生灰霾天气,反之则说明空气质量较为良好。

用垂直交换系数对典型灰霾过程进行历史拟合,典型灰霾过程有145天,报对116个,漏报29个,空报0个,临界成功指数 $CSI = 80.69\%$,命中率 $POD = 80.69\%$,虚假报警率 $FAR = 0$ 。

对典型清洁过程进行历史拟合,清洁过程有133天,报对79个,漏报54个,空报0个,临界成功指数 $CSI = 59.4\%$,命中率 $POD = 59.4\%$,虚假报警率 $FAR = 0$ 。

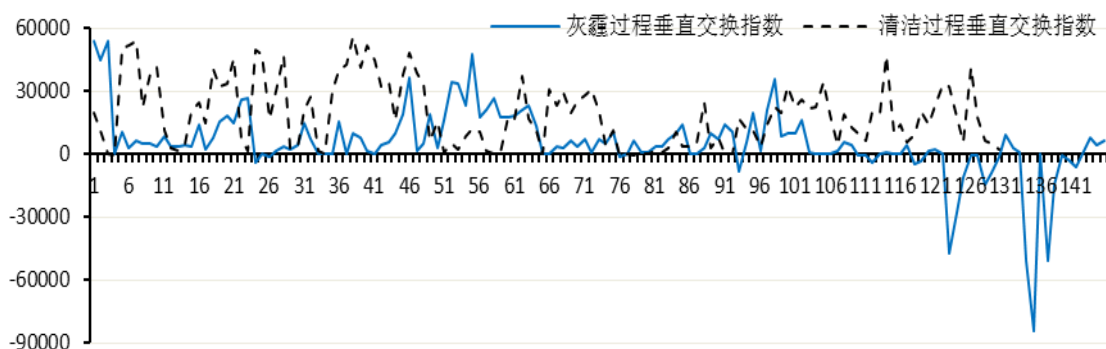


图11 调整后的灰霾过程和清洁过程垂直交换系数变化情况 横坐标为次数。

6 小结及讨论

(1) 增城能见度比例主要集中在>10 km范围内,空气质量最好,广州次之,而东莞的空气质量最差。广州和东莞两地10—12月的能见度等级百分比分布形态类似,轻微灰霾天气所占频率较大,其中10月占的比例最高。在3~5 km范围内,东莞能见度比例高于广州。

(2) K指数、沙氏指数、L指数存在高相关,垂直交换系数由三者组合得来,垂直交换系数公式为 $VEIn = (0.84 \times K - 0.12 \times SI + 0.33 \times LI)^3$ 。

(3) 灰霾过程和清洁过程的垂直交换系数阈

值为15 000,即当垂直交换系数小于15 000时,城市容易发生灰霾天气,反之则城市空气质量较为良好。

(4) 利用垂直交换系数对典型灰霾过程进行预报,临界成功指数 $CSI = 80.69\%$,命中率 $POD = 80.69\%$,虚假报警率 $FAR = 0$ 。对典型清洁过程进行历史拟合,临界成功指数 $CSI = 59.4\%$,命中率 $POD = 59.4\%$,虚假报警率 $FAR = 0$ 。

由于垂直交换系数并不能完全实时反映整层大气的对流情况,且能见度影响因子十分复杂,不但与局地气象条件关系密切,也依赖于气溶胶粒子数浓度及谱分布、气溶胶的化学组分、分子

散射、污染性气体的散射和吸收等,因此,用垂直交换系数对灰霾天气进行预报还存在一定的局限性。

参 考 文 献:

- [1] 吴兑, 吴晓京, 李菲, 等. 中国大陆1951—2005年霾的时空变化[J]. 气象学报, 2010, 68(5): 680-688.
- [2] 吴兑, 邓雪娇, 毕雪岩, 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.
- [3] The Asian Brown Cloud: Climate and other environmental impacts: Part I: The South Asian Haze: Air Pollution, Ozone and Aerosols[R]. UNEP Assessment Report, 2002.
- [4] 徐祥德, 施晓晖, 张胜军, 等. 北京及周边城市群气溶胶影响域及其相关气候效应[J]. 科学通报, 2005, 50(22): 2 522-2 530.
- [5] TIE X X, WU D, GUY Brasseur. Lung Cancer Mortality and Exposure to Atmospheric Aerosol Particles in Guangzhou, China[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(14): 2 375-2 377.
- [6] 沈家芬, 冯建军, 谢利, 等. 广州市大气能见度的特征及其影响因子分析[J]. 生态环境, 2007, 16(4): 1 199-1 204.
- [7] 陈欢欢, 吴兑, 谭浩波, 等. 珠江三角洲 2001—2008 年灰霾天气过程特征分析[J]. 热带气象学报, 2010, 26(2): 147-155.
- [8] 刘新罡, 张远航, 曾立民. 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.
- [9] WU D, TIE X X, LI C C. An extremely low visibility event over the Guangzhou Region: A case study[J]. Atmospheric Environment, 2005, 39: 6 568-6 567.
- [10] 吴兑, 廖国莲, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲霾天气的近地层输送条件研究[J]. 应用气象学报, 2008, 19(1): 1-9.
- [11] 中国气象局. 霾的观测和预报等级[S]//中华人民共和国气象行业标准, QX/T 113-2010. 2010.
- [12] 吴兑, 毕雪岩, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲大气灰霾导致能见度下降问题研究[J]. 气象学报, 2006, 64(4): 510-517.
- [13] DENG X J, TIE X X, WU D, et al. Long-term trend of visibility and its characterizations in the Pearl River Delta Region (PRD), China[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(7): 1 424-1 435.
- [14] LIU H P, CHAN J C L. An investigation of air-pollutant patterns under sea-land breezes during a severe air-pollution episode in Hong Kong[J]. Atmospheric Environment, 2002, 36: 591-601.
- [15] CHEUNG H C, WANG T, BAUMANN K, et al. Influence of regional pollution outflow on the concentrations of fine particulate matter and visibility in the coastal area of southern China[J]. Atmospheric Environment, 2005, 39: 6 463-6 474.
- [16] PETER K, LOUIE K, JOHN G, et al. Seasonal characteristics and regional transport of PM_{2.5} in Hong Kong[J]. Atmospheric Environment, 2005, 39: 1 695-1 710.
- [17] 毛保华. 评价指标体系分析及其权重系数的确定[J]. 系统工程, 1991, 9(4): 37-42.
- [18] 李一平, 薄玉华, 金恒泰. 内蒙古中西部地区降雹天气预报方法[J]. 气象, 1999, 25(7): 39.

A STUDY OF THE VARIATION TRENDS OF HAZE AND APPLICATION OF THE VERTICAL EXCHANGE COEFFICIENT

LIAO Bi-ting^{1,2}, WU Dui^{1,2}, CHEN Jing³, LI Fei², CHEN Huan-huan²,
LIU Yun-ce⁴, HUANG Xiao-ying⁴

(1. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;

2. Guangzhou Institute of Tropical Marine and Meteorology, CMA, Guangzhou 510080, China;

3. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing, 100871, China;

4. Guang dong Meteorological Administration, Guangzhou 510080, China)

Abstract: Based on the data from the conventional weather stations in Guangzhou, Dongguan and Zengcheng during 1998—2008 and the Kindex, Sindex, Lindex from Micaps 3.0 during 2004—2008, the occurrence frequencies of haze in the three regions are analyzed. In our results, the air quality of Zengcheng, having visibility higher than 10 km, is the best while that of Dongguan is the worst. Guangzhou and Dongguan show similar patterns on the percentage distributions of visibility. They are primarily in light pollution which has the greatest occurrence in October. Following Wu et al. where the Vector Sum Technique was used in the assessment of horizontal transmission capacity, this paper attempts to use the vertical exchange index to evaluate the vertical transmission capacity and tries to predict haze. Our results indicate that haze is likely to happen when the vertical exchange coefficient is smaller than 15,000. Otherwise, it is a high visibility day.

Key words: air quality; haze day; Vector Sum Technique; vertical exchange index; Guangzhou; Dongguan; Zengcheng