

张浩, 石春娥, 邱明燕, 等. 2010 合肥市霾天气变化特征及其影响因子 [J]. 环境科学学报, 30(4): 714–721

Zhang H, Shi C E, Qiu M Y, et al. 2010. Long-term variation of haze phenomena in Hefei and its impact factors [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 30(4): 714–721

合肥市霾天气变化特征及其影响因子

张浩^{1,2}, 石春娥^{2*}, 邱明燕², 谢伟³

1 南京大学大气科学学院, 南京 210093

2 安徽省气象科学研究所, 安徽省大气科学与卫星遥感重点实验室, 合肥 230031

3 安徽省大气探测技术保障中心, 合肥 230031

收稿日期: 2009-07-06 修回日期: 2009-11-03 录用日期: 2010-01-22

摘要: 分别应用费希尔最优分割法和后向轨迹-聚类分析的方法分析了 1965~2005 年间合肥霾天气的气候变化特征, 以及合肥霾天气发生频率与不同高度输送条件的关系。同时应用 2001~2005 年的资料分析了合肥霾的月、季分布特征及其与地面气象要素的关系。合肥各月平均霾日数呈 W 型分布, 1 月最多, 8 月最少, 秋冬两季占全年霾日数的 70% 以上。41 年来霾日数总体呈上升趋势, 期间发生了 3 次跃变, 分别在 1978、1992 和 2005 年, 与我国社会经济发展的各个阶段相一致。霾的发生频率与边界层中上部气团来向关系不大, 但与其移动速度关系密切。近地面不同来向的气团对应霾的发生频率明显不同, 霾易于出现的气团在春、夏、冬季主要来自偏东方向, 秋季主要为本地气团以及来自偏北方向的气团。小风、高湿和偏东风是产生霾的有利条件。随着空气污染加重, 霾的出现频率升高, 当空气质量为中度污染时, 霾的出现频率达到 75%; 高质量浓度的 PM₁₀ 并不意味着有霾出现, 反之亦然。

关键词: 霾; 费希尔最优分割法; 后向轨迹; 聚类分析; 气候跃变; 影响因子

文章编号: 0253-2468(2010)04-714-08 中图分类号: X513 文献标识码: A

Long-term variation of haze phenomena in Hefei and its impact factors

ZHANG Hao^{1,2}, SHI Chun'e^{2*}, QIU Mingyan², XIE Wei³

1 School of Atmospheric Science, Nanjing University, Nanjing 210093

2 Anhui Institute of Meteorological Sciences, Key Laboratory of Atmospheric Science and Satellite Remote Sensing, Hefei 230031

3 Anhui Atmospheric Detection Center, Hefei 230031

Received 6 July 2009; received in revised form 3 November 2009; accepted 22 January 2010

Abstract The Fisher optimum separation method was used to analyze the hazy days and associated climate jumps in Hefei during the period from 1965 to 2005 and back-trajectory-cluster analysis was used to determine the effects of transport patterns at different heights on haze frequency. The monthly variation of hazy days and their relationships with surface meteorological parameters are analyzed with data from 2001 to 2005. The monthly variation of the hazy days shows a “W” pattern with maxima in January, June and November and minima in April and August. The number of hazy days in autumn and winter accounts for more than 70% of the annual hazy days. During those forty-one years, annual hazy days kept increasing with 3 climate jumps which occurred in 1978, 1992, 2005, corresponding to different stages of Chinese economic development. The haze occurrence has little relationship with the direction of the back trajectory in the upper atmospheric boundary layer (ABL) (1000 m); however, it has close relationship with the direction of air mass in the lower ABL and with the length of the trajectory in the upper ABL. The air masses in the lower ABL with the highest haze occurrence are mainly from east in spring, summer and winter, and local and north in autumn. The light wind, high humidity and easterly wind at the ground level are conducive to occurrence of haze. With the increase of PM₁₀ concentration, the frequency of haze increases. The frequency of haze occurrence reaches 75% when the air quality is medium polluted. However, high PM₁₀ concentration does not always mean haze nor vice versa.

Keywords haze; Fisher optimum separation method; back-trajectory; cluster analysis; climate jump; influencing factors

1 引言 (Introduction)

霾是指大量极细微的干尘粒均匀地浮游在空

中, 使远处光亮物微带黄、红色, 黑暗物微带蓝色, 水平能见度小于 10km 的空气普遍有混浊的天气现象 (中国气象局, 2003)。霾天气不仅危害人体健康

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 40675002, 40775010)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 40675002, 40775010)

作者简介: 张浩 (1982-), 男; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: chuneshi@gmail.com

Biography: ZHANG Hao (1982-), male; * Corresponding author. E-mail: chuneshi@gmail.com

(Radojevic *et al.*, 1999; Aditama 2000), 还会对地球系统有冷却或加热作用 (Kerr *et al.*, 1995), 已成为一种新的气象与环境灾害性现象, 受到世界各国科学家的广泛关注. 国外学者较早地对霾的组成及气候特征进行了研究 (Malm, 1992; Schichtel *et al.*, 2001; Doyle *et al.*, 2002; Quinn *et al.*, 2003), 其中 Malm (1992) 对美国大陆性灰霾天气的时空演变进行了定量分析, 发现造成霾天气能见度下降的主要成分是硫酸盐气溶胶, 部分地区硝酸盐和有机气溶胶的贡献也比较大; Schichtel (2001) 利用美国 298 个气象站的观测资料分析了美国 1980~1995 年霾的变化趋势, 发现美国自实施干净空气行动 (Clean Air Act) 之后, 灰霾日数 15 年间下降了约 10%, 与二氧化硫排放量的下降同步. 近年来, 我国一些大城市霾天气剧增也引起国内学者的广泛关注. 广州灰霾期积聚态颗粒物质量浓度在 TSP 中所占的比例比粗颗粒物高 (段菁春等, 2006), 西安在灰霾天气下大气颗粒物中的硫酸盐、硝酸盐含量高于正常天气, 而且比在正常天气下偏酸性 (李丽珍等, 2007); 不同作者对广州 (刘爱君等, 2004)、天津 (徐梅等, 2006)、南京 (童尧青等, 2007) 等地的霾天气进行了统计分析, 发现各地霾日数基本都是在 1970 年代末到 1980 年代初迅速上升, 霾日数上升与大气污染物浓度上升有关, 霾的发生与地面气象条件密切相关; 南京地区的灰霾数值模拟表明, 风速、相对湿度、 $PM_{2.5}$ 浓度是灰霾形成的主要影响因素 (胡荣章等, 2009). 吴兑等 (2008) 分析发现, 纬向环流显著与否与珠江三角洲霾天气的发生频率关系密切, 纬向环流不显著的年份, 有利于该地污染物扩散, 不易形成霾天气.

综上所述, 我国学者已经对很多大城市霾天气的气候特征、化学特征及其影响因素进行了深入的研究. 这些研究提高了我们对霾的物理化学特征、变化趋势及其产生的天气条件的认识, 但很少有人使用客观分析的方法研究霾日数的气候跃变及大尺度输送条件与霾的关系. 本文采用最优分割法对 1965~2005 年合肥霾日数的变化趋势进行客观划分, 用轨迹分析和聚类分析相结合的方法对合肥不同高度的输送条件进行客观分类, 以研究不同输送条件对霾发生频率的影响, 并结合地面常规气象观测资料和污染物浓度资料分析合肥霾的影响因子. 这对开展霾天气预警预报及其影响评估业务奠定了基础, 也为政府决策部门保护环境、制定相关政

策提供科学依据.

2 资料与方法 (Data and methods)

2.1 资料来源

本文所用常规气象观测资料来源于合肥市气象观测站, 包括霾天气日期、相对湿度、地面风和降水; 地面污染物浓度资料来自合肥市环境监测站; 合肥市建成区面积来自安徽省统计年鉴, 用于轨迹计算的气象场资料为 NOAA 的 FNL 资料 (NOAA, 1997).

地面气象观测规范 (中国气象局, 2003) 从以下 4 个方面规定了霾的判别标准: 一是特征或成因上, 霾是大量极细微尘粒, 均匀浮游空中, 使水平能见度小于 10km, 并使空气普遍浑浊; 二是颜色, 霾使远处光亮物体微带黄色、红色, 使黑暗物体微带蓝色; 三是天气条件, 与雾相比, 霾形成于较干燥的空气中; 四是出现时间上, 霾在一天中任何时候均可出现. 另外, 安徽省气象局业务处还规定霾天气时相对湿度低于 70%, 以区别于轻雾 (吴兑, 2005), 具体操作时, 可能与观测员的经验有关. 由于本文讨论的是合肥市多年的趋势, 而同一测站的观测人员是相对稳定的, 因此不考虑观测人员的观测误差, 霾天气现象以观测员的记录为准, 在此基础上进行月、季、年值的统计.

2.2 研究方法

费希尔最优分割法是把 N 个样本序列 X_i 分成 k 类, 寻找一种最优方法, 使得样本离差最小. 在对样本序列进行分割时, 总希望分割出的各段内数据比较接近, 而每段内各数据的变幅用变差来表示, 变差愈小, 表明各段数据愈接近, 因此最优分割时根据总变差进行分割. 该方法在研究跃变特征时, 既可以客观真实的求出跃变参考点, 又能避免人为滑动引起的不稳定性 (杨文峰等, 1997; 黄嘉佑, 2004). 统计发现 41 年来合肥霾日数总体呈上升趋势, 并存在明显的跃变 (图 1). 为使本文的研究结果客观可靠, 使用该方法分析合肥霾日数的气候跃变特征.

大量研究表明, 霾天气的出现与空气污染密切相关, 而一个地区或城市大气污染物的浓度一方面决定于局地污染源的强度, 另一方面决定于当地的输送和扩散条件 (Quinn *et al.*, 2003; 吴兑等, 2008). 轨迹分析是研究区域性空气污染问题最常用的方法 (Miller, 1987; Brankov *et al.*, 1998; 王艳

等, 2006 石春娥等, 2008a 2008b; 刘国卿等, 2008). 本文应用美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 研制的 HYSPLIT4 (Draxler, 2003) 轨迹模式, 计算了 2001 年 1 月 1 日到 2005 年 12 月 31 日无降水日的地面和边界层中上部所有 72h 后向轨迹. 计算后向轨迹的开始时间为一天记录的中间时段 (北京时间 8:00), 轨迹起始点分别设在离地面 10m 和 1000m, 1000m 对应于该地区边界层中上部.

由于单根轨迹的精度总会受到气象场的时空分辨率、观测误差、分析误差以及模式所用的一些假定的影响, 因此常采用大量轨迹和聚类分析的方法来研究空气质量、气溶胶的理化特性与不同输送态势之间的关系 (Brankov *et al.*, 1998; Kim *et al.*, 2005; 石春娥等, 2008b). 聚类分析是一种多元统计技术, 近年来, 在大气污染研究方面得到广泛应用. 该方法对大量资料进行分组, 分组的原则是达到组间差异极大, 组内差异极小. 该方法可根据气团水平移动速度和方向对所有轨迹进行分类得到不同的输送态势, 从而估计大气污染物的潜在源区. 后向轨迹资料的时间间隔为 6h, 每一根轨迹可以得到 12 组经度 (x)-纬度 (y) 坐标, 这些坐标值作为聚类分析算法的输入参数, 具体计算步骤和方法参见文献 (Dorling *et al.*, 1992). 为研究大尺度输送条件对合肥霾天气的影响, 采用聚类分析方法对 5 年来无降水日的所有 72h 后向轨迹按季节进行分类, 并统计各类输送条件下霾的发生频率.

3 霾天气的气候变化特征 (The variations of haze phenomena)

3.1 霾日数的气候跃变特征及其与我国社会经济发展的关系

表 1 给出合肥市不同年代霾出现日数. 可以看出, 20 世纪 80 年代以后霾出现日数显著上升, 2000~2005 年甚至达到了 72.7d. 值得指出的是 1980s 以后年霾日数的发展趋势与年雾日数的发展趋势几乎相反 (石春娥等, 2008c).

表 1 合肥市不同年代霾出现日数

Table 1 Number of hazy days in different decades in Hefei

	霾日数 / d			
	1965~1969 70年代	80年代	90年代	2000~2005
总日数	29	139	407	590
年均日数	5.8	13.9	40.7	59.0

图 1 为合肥市逐年霾日数的分布情况. 为消除年际间的随机变化, 采用 5 年滑动平均对原霾日数

序列进行了处理 (刘爱君等, 2004), 用最优化分割法分析合肥 41 年来年霾日数的气候跃变得到了 3 个跃变点, 标注于图 1. 该结果通过了杨文峰等 (1997) 给出的 F 检验, 同时计算了段内方差 W 和段间方差 B 及分层系数 $R = (B - W) / W = 0.993$, 说明分层效果较好.

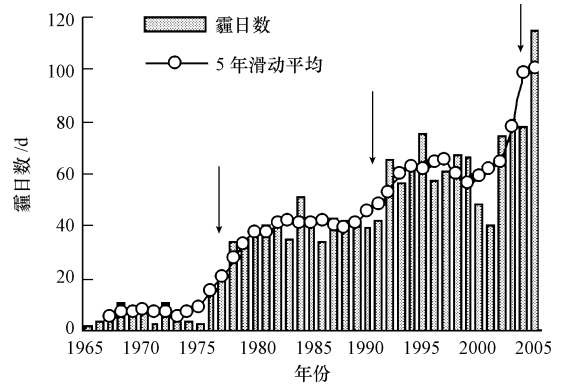


图 1 合肥市 1965~2005 年逐年霾日数变化 (↓ 表示跃变点)
Fig. 1 Variation of annual hazy days in Hefei from 1965 to 2005 (↓ jump time)

从图 1 可以看出, 合肥市 40 多年来霾日数总体呈上升趋势, 1965~2005 年间发生了 3 次跃变, 分别发生于 1977~1978、1991~1992、2004~2005 年, 每一次跃变都使合肥市霾日数上一个台阶. 第一阶段 (1965~1977 年), 合肥市霾日数普遍较低, 年均 7.6d, 这一时期对应着 10 年文化大革命, 我国工业、交通运输业尚未得到全面发展, 人类活动对城市环境的影响较小, 霾很少. 第二阶段 (1978~1991 年), 霾日数大幅度上升, 年均 39.8d, 这一时期对应着改革开放的头 14 年, 经济复苏, 城市化进程加快, 工业、能源、交通迅猛发展, 能源消耗迅速增长, 排放到大气中的气态和固态污染物迅速上升, 霾日数也迅速增长. 第三阶段 (1992~2004 年), 霾日数明显上升, 年均 63.8d, 这一阶段经历了我国市场经济的开始 (1992 年) 和亚洲金融风暴, 前期霾日数迅速上升, 1990s 后期霾日数呈下降趋势, 2000~2001 年为一低谷, 这与南京的趋势一致 (童尧青等, 2007). 据范引琪等 (2005) 的统计, 1997 年后全国燃煤量呈下降趋势, 这也说明, 受亚洲金融风暴的影响, 我国工业在 1997 后有一个发展降缓的时期. 第四阶段 (2005 年), 霾日数跳跃性增长, 这可能与合肥的市政建设、房地产开发热有关, 合肥市建成区面积在 2000 年之后迅速扩大, 2000 年为 125 km², 2005 年达 225 km².

3.2 霾的月、季变化及成因

由表 1 和图 1 可见合肥霾日数年代际变化较大, 本文重点分析 2001~2005 年霾日数的月变化(图 2). 合肥各月平均霾日数呈 W 型分布, 1 月、6 月和 10 月为 3 个极大值, 4 月和 8 月为两个极小值. 根据本文第 5 部分的分析发现合肥在小风、高湿和偏东风的条件下霾易于出现. 因此, 从无降水日地面风向、风速、相对湿度及降水日数出发讨论霾日数月变化的成因. 合肥平均风速春夏季高, 秋冬季低, 4 月平均风速最高, 超过 $3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 9~2 月平均风速都低于 $2.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. 降水日的分布为春夏季高, 秋冬季低, 春夏季以 4 7 8 月最高, 接近或超过 12d 因此 4 7 8 月霾日数较少. 而同样处于夏季的 6 月份, 降水日数低于春、夏季其他月份 ($< 10\text{d}$), 平均风速不高, 高湿天数中等, 主导风向为偏东和偏东南风, 霾天气易于形成. 另外, 5 月到 6 月初是江淮地区的夏收季节, 农民大量焚烧秸秆, 造成空气中颗粒物浓度升高. 城市周边地区秸秆焚烧配合相应的气象条件(如小风、无降水)可加重城市空气污染, 导致霾天气频发. 由于秸秆焚烧的影响还有一定的滞后效应, 致使 6 月份的霾日数异常增多.

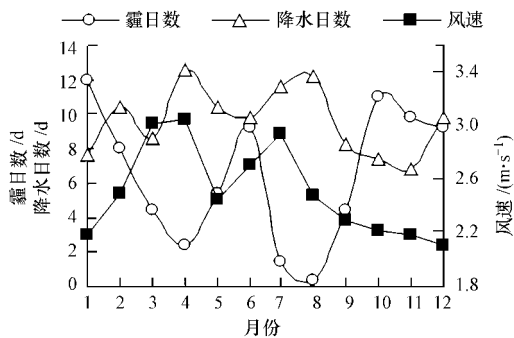


图 2 合肥市 2001~2005 年各月平均霾日数、降水日数和风速

Fig. 2 Monthly mean of hazy days, wind speed and rain days in Hefei during 2001 to 2005

统计发现, 冬季平均霾日数为 30.6d 占全年霾日数的 38.7%, 秋季占全年霾日数的 31.9%, 秋冬季占全年霾日数的 70% 以上, 而夏季仅占全年的 13.9%, 表现出秋冬季出现霾天气多, 春夏季少的分布特征. 这可能与降水的季节变化有关, 据 2001~2005 年合肥降雨量资料显示, 夏季降水占年总量的 46.9%, 春季占 24.2%, 冬季占 13.3%, 降雨量与霾的季节分布正好相反. 夏季充沛的雨水对空气中悬浮的灰尘和粉尘起冲刷作用, 不易于霾的形成; 另外, 夏季大气对流活动旺盛, 使近地层污染物扩散

稀释, 霾较少发生. 冬季混合层高度低, 大气层结稳定, 风速小, 近地面的颗粒物、汽车尾气累积在边界层下层, 容易出现霾天气.

4 不同输送态势与霾发生频率的关系 (The effects of transport patterns at different heights on haze frequency)

4.1 1000m 高度

应用聚类分析的方法对 2001~2005 年各季 1000m 高度处的后向轨迹进行客观分类, 春、夏、秋、冬四季分别得到 7.5.5.5 组不同的后向轨迹. 各组平均轨迹的水平分布见图 3(a~d), 图中数字为分组序号, 括号内的数字分别表示该组轨迹的出现频率和霾的发生频率. 轨迹水平分量经过的路线表示气团到达本地以前所经过的地区, 根据其长短可以判断气团移动的速度, 长的轨迹对应移动快的气团, 短的轨迹表示气团移动缓慢. 同一季节同一方向可能因为气团移动速度的快慢存在多组轨迹. 移动缓慢且基本上在本地打转的轨迹定义为本地轨迹.

由图 3(a~d)可以看出, 合肥各季平均轨迹有所不同, 同一季节每组轨迹所对应的霾发生频率存在显著差异. ①除冬季外, 各组轨迹对应的霾发生频率都有较大差异; 冬季只有来自偏北方向的轨迹对应的霾发生频率略低(20%), 其他各组都超过 40%. ②合肥四季基本上都是本地轨迹对应着最高的霾发生频率; 同一方向不同组霾的发生频率与轨迹长度有关: 例如春季西北轨迹, 轨迹越长霾的出现频率越小, 这一点与 PM_{10} 的分析结果不同(石春娥等, 2008b), 合肥春季西北方向轨迹越长 PM_{10} 平均浓度越高, 这是因为造成霾的颗粒物与高质量浓度 PM_{10} 的成分不同, 造成霾天气的大气颗粒物主要是细粒子, PM_{10} 质量浓度中主要以粗粒子的贡献为主. 细粒子主要来源于光化学反应产物的累积, 而西北沙尘暴产生的粗粒子可以通过对流层中上部的气流远程输送到中国东部地区, 造成东部地区高浓度的 PM_{10} 污染. ③霾天气的发生与边界层中上部的输送方向关系不大, 但与输送速度关系密切, 一般对应慢速移动的气团.

4.2 10m 高度

10m 高度处的后向轨迹在春、夏、秋、冬四季分别得到 8.7.6.6 组不同的后向轨迹. 各组平均轨迹的水平分量分布、轨迹出现频率和霾的发生频率见图 3(e~h). 比较图 3(e~h)与图 3(a~d)发现, 近地面后向轨迹与边界层中上部的后向轨迹有所不同.

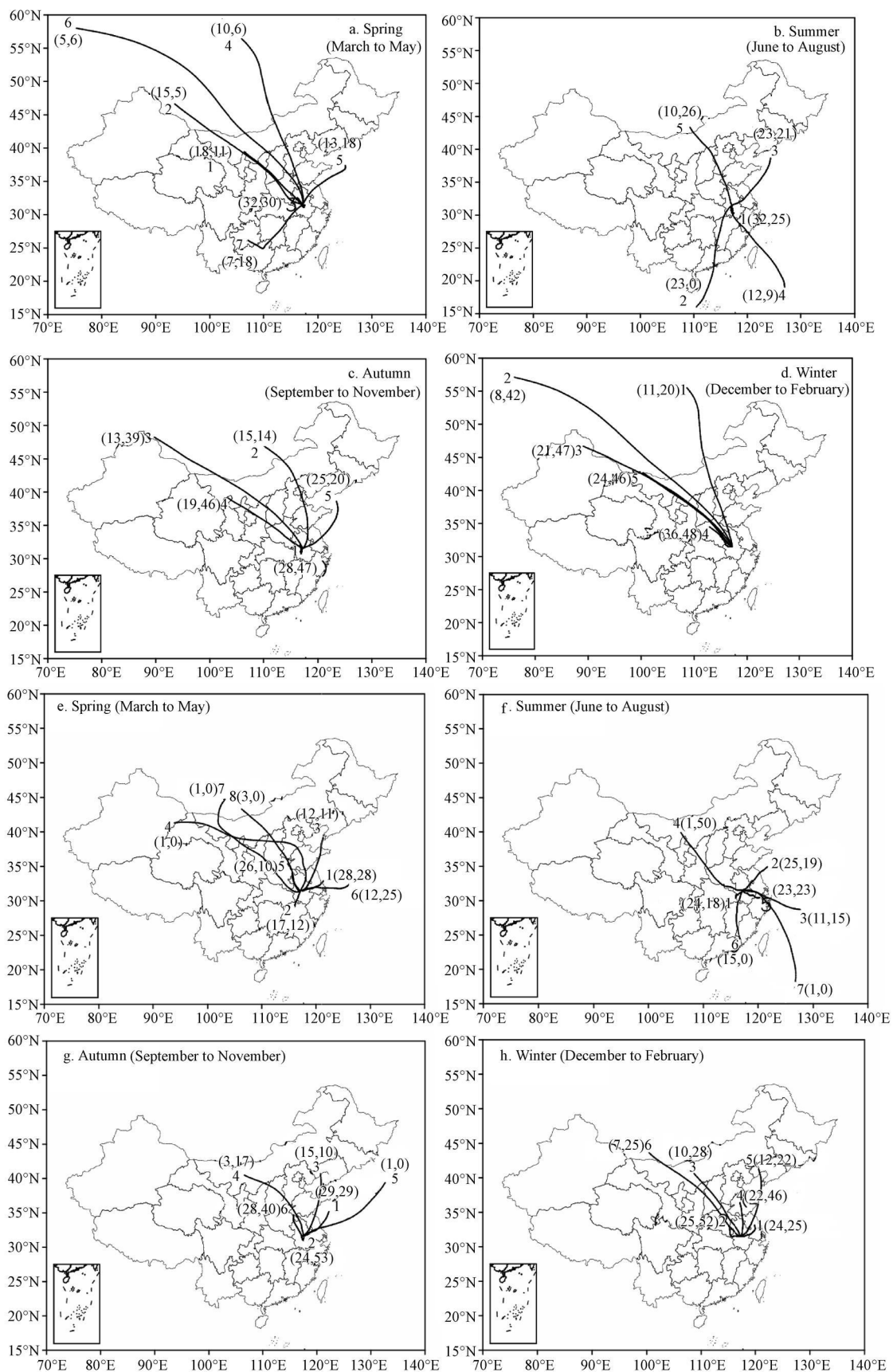


图 3 四季各组 1000m、10m 平均后向轨迹分布 (春: 3~5 月, 夏: 6~8 月, 秋: 9~11 月, 冬: 12~2 月) (图审字[2009]第 1644 号)

由图 3(e~h)可以看出: ①四季各组后向轨迹对应霾的发生频率显著不同, 冬季各方向轨迹下都有霾出现. ②春、夏、冬季都是偏东方向的轨迹对应着最高的霾发生率, 超过了本地轨迹, 这一点与 1000m 高度的结果不同, 秋季仍然是本地轨迹对应着最高的霾发生率. ③虽然各季霾的高发生率所对应的近地面后向轨迹在水平方向上都较短, 但在春季和夏季, 不同来向的气团对应霾的发生频率明显不同; 偏东方向的气团在四季都对应着较高霾的发生频率, 反映出长江三角洲地区污染物排放对本地霾天气的贡献.

5 霾天气与地面气象条件和污染物浓度的关系 (Relationships between haze phenomena and ground level meteorology pollutant concentrations)

5.1 地面风

2001~2005年的资料显示, 霾出现时日均风速一般比较小, 以 $\leq 2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 为最多 (53.3%), $2\sim 3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 为次多 (30.7%), 当风速大于 $5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 有利于近地面污染物扩散, 出现霾的机率不大. 从不同风向对应的霾出现频率 (表 2) 可以看出, 各风向下均有霾出现, 静风时霾出现频率最高, 其次是 ENE 风, 这与上一节近地面后向轨迹-聚类分析的结果是一致的.

表 2 不同风向对应的霾出现频率

Table 2 Occurrence frequencies of hazy days for each wind direction

出现频率								
N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S
7.8%	28.8%	22.7%	3%	15.8%	24.8%	29.4%	22.6%	12.9%
出现频率								
SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	C(静风)	
13.9%	25%	28.6%	28.5%	27.5%	20.8%	20.7%	53.7%	

5.2 相对湿度

表 3 为不同相对湿度下霾出现频率, 可以看出, 当日平均相对湿度在 60%~70% 时霾出现频率最

高, 其次是 70%~80%, 当相对湿度 < 30% 则没有霾出现.

表 3 不同相对湿度对应的霾出现频率

Table 3 Occurrence frequencies of hazy days for each relative humidity

相对湿度	< 30%	30%~40%	40%~50%	50%~60%	60%~70%	70%~80%	80%~90%	> 90%
出现频率	0	6.9%	10.8%	12.5%	15.6%	14.3%	7.2%	0.6%

考虑到相对湿度对气溶胶消光系数的影响较大, 分别统计 41 年来各月霾日平均相对湿度 < 90% 的日数 (d_{90}) 和 < 70% 的日数 (d_{70}), 采用 $(d_{90} - d_{70})$ 相对于 d_{90} 得出的百分率来分析相对湿度对月霾日

数的影响 (徐梅等, 2006; 董尧青等, 2007).

由图 4 高湿度霾天所占比例看出, 相对湿度对霾的逐月变化影响很大, 较高相对湿度 (70%~90%) 的霾日数占总霾日数的比重通常在 40% 以上, 7~9 月超过 70%, 可见高湿有利于霾的出现.

5.3 霾天气与地面污染物浓度的关系

近年来, 合肥市年均 SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 浓度呈增加趋势 (邱明燕等, 2009), 与年霾日数的变化趋势相对应. 统计 2001~2005 年的资料发现, 霾天污染物浓度高于非霾天气, 霾天 SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 平均浓度分别为 13.7 、 28.1 、 $145.1\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 而非霾天分别下降为 9.8 、 21.4 、 $91.0\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 合肥市多年来的首要污染物都是 PM_{10} (石春娥等, 2008a), 因此分析了不同 PM_{10} 浓度范围下的霾出现频率 (表 4), 可以看出, 当 PM_{10} 浓度较高时出现霾的频率比较大, 尤其是当空

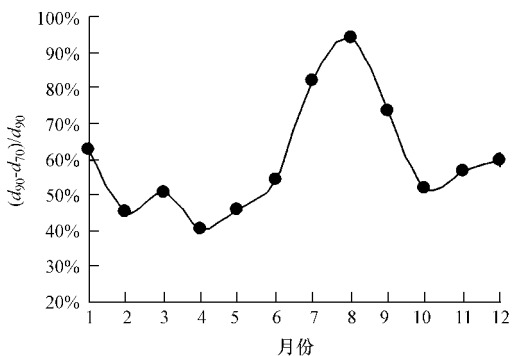


图 4 高湿度霾天所占比例

Fig. 4 Percentage of hazy days with high relative humidity

气污染指数为中度污染时,霾的出现频率达到75%;但在重度污染时(2d),却没有观测到霾,在空气质量为优良时也有霾出现,这再一次说明造成霾

天气的气溶胶粒子与造成高质量浓度PM₁₀的颗粒物不同。

表 4 不同 PM₁₀浓度范围下的霾出现频率

Table 4 Occurrence frequencies of hazy days at different ranges of PM₁₀ concentration

PM ₁₀ 浓度范围 / ($\mu\text{g m}^{-3}$)	0~50 (优)	50~150 (良)	150~350 (轻度)	350~420 (中度)	>420 (重度)
霾出现频率	2.3%	19.2%	48.5%	75.0%	0

6 结论 (Conclusions)

1)合肥月平均霾日数呈W型分布,1、6、10月为3个极大值,4月和8月为两个极小值,秋冬两季占全年霾日数的70%以上,夏季仅占全年的13.9%,这种分布与降水和地面风速的月变化密切相关。

2)合肥年霾日数总体呈上升趋势,41年来发生了3次跃变:1977~1978年、1991~1992年和2004~2005年,分别对应我国经济发展的各个阶段,每一次跃变都对应着霾日数的较大增长。

3)合肥霾的出现频率与边界层中上部气团来向关系不大,但与气团移动速度关系密切,水平方向上较短的轨迹(即移动缓慢的气团)对应着较高的霾发生频率。但在春季和夏季,不同来向的近地面气团所对应霾的发生频率会有明显的不同,偏东方向的气团在四季都对应着较高霾的发生频率。

4)霾天气受气象因素和大气污染水平的影响,小风、高湿和偏东风条件下有利于霾的出现;霾的出现反映空气污染程度,随着空气污染加重,霾的出现频率升高,当空气质量为中度污染时,霾的出现频率达到75%。另外,高质量浓度的PM₁₀并不意味着有霾出现,反之亦然。

责任作者简介:石春娥(1970—),女,博士,高级工程师,主要从事大气物理与大气化学研究。

参考文献 (References):

Aditama T Y. 2000 Impact of haze from forest fire to respiratory health: Indonesian experience [J]. *Respirology*, (5): 169—174

Brankov E, Rao ST, Porter P S. 1998. A trajectory-clustering-correlation methodology for examining the long-range transport of air pollutants [J]. *Atmospheric Environment* 32(9): 1525—1534

Dorling S R, Davies T D, Pierce C E. 1992. Cluster Analysis: A Technique for estimating the synoptic meteorological controls on air and precipitation chemistry: method and applications [J].

Atmospheric Environment 26A (14): 2575—2581

Doyle M, Dorling S. 2002. Visibility trends in the UK 1950—1997 [J]. *Atmospheric Environment* 36(19): 3161—3172

Draxler R R. 2003. Evaluation of an ensemble dispersion calculation [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 42(2): 308—317

段菁春, 毕新慧, 谭吉华, 等. 2006. 广州灰霾期大气颗粒物中多环芳烃粒径的分布 [J]. *中国环境科学*, 26(1): 6—10

Duan J C, Bi X H, Tan J H, *et al*. 2006. The particle diameter distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in atmospheric particle during haze period in Guangzhou [J]. *China Environmental Science*, 26(1): 6—10 (in Chinese)

范引琪, 李二杰, 范增禄. 2005. 河北省 1960~2002年城市大气能见度的变化趋势 [J]. *大气科学*, 29(4): 526—535

Fan Y Q, Li E J, Fan Z L. 2005. Visibility trends in 11 cities of Hebei province during 1960—2002 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* 29(4): 526—535 (in Chinese)

胡荣章, 刘红年, 张美根, 等. 2009. 南京地区大气灰霾的数值模拟 [J]. *环境科学学报*, 29(4): 808—814

Hu R Z, Liu H N, Zhang M G, *et al*. 2009. Simulation of brownish haze in urban areas of Nanjing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae* 29(4): 808—814 (in Chinese)

黄嘉佑. 2004. 气象统计分析与预报方法 [M]. 北京: 气象出版社. 88

Huang J Y. 2004. Meteorological Statistical Methods in Analysis and Prediction [J]. Beijing: China Meteorological Press. 88 (in Chinese)

Kerr R A. 1995. Study unveils climate cooling caused by pollutant haze [J]. *Science* 268(5215): 802

Kim J Yoon S, Jefferson A, *et al*. 2005. Air mass characterization and source region analysis for the Gosan super-site Korea during the ACE-Asian 2001 field campaign [J]. *Atmospheric Environment* 39(35): 6513—6523

李丽珍, 沈振兴, 杜娜, 等. 2007. 霾和正常天气下西安大气颗粒物中水溶性粒子特征 [J]. *中国科学院研究生院学报*, 24(5): 674—679

Li L Z, Shen Z X, Du N, *et al*. 2007. Chemical composition of water-soluble species between haze and normal days over Xi'an [J]. *Journal of the Graduate school of the Chinese Academy of Sciences* 24(5): 674—679 (in Chinese)

刘爱君, 杜尧东, 王惠英. 2004. 广州灰霾天气的气候特征分析 [J]. *气象*, 30(12): 68—71

Liu A J, Du Y D, Wang H Y. 2004. Climatic characteristics of haze in

- Guangzhou [J]. *Meteorological Monthly*, 30 (12): 68—71 (in Chinese)
- 刘国卿, 张干, 李军, 等. 2008 珠江口及南海北部近海海域大气有机氯农药分布特征与来源 [J]. *环境科学*, 29 (12): 3320—3325
- Liu G Q, Zhang G, Li J *et al*. 2008 Source and distribution characteristic of atmospheric organochlorine pesticides in the Pearl River Estuary and adjacent South China Sea [J]. *Environmental Science* 29 (12): 3320—3325 (in Chinese)
- Mah W C. 1992 Characteristics and origins of haze in the continental United States [J]. *Earth-Science Reviews* 33 (1): 1—36
- Miller M J. 1987 The use of back air trajectories in interpreting atmospheric chemistry data: a review and bibliography [M]. NOAA Technical Memorandum ERL ARL-155 Air Resources Laboratory, Silver Spring Maryland
- Noaa. 1997. FNL archive data [OL]. <ftp://arlftp.arl.noaa.gov/pub/archives/fnl/>
- 邱明燕, 石春娥, 张浩, 等. 2009 合肥市酸雨变化特征及其影响因子 [J]. *环境科学学报*, 29 (6): 1329—1338
- Qi M Y, Shi C E, Zhang H, *et al*. 2009 Marked changes of acid rain in Hefei and their causes [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae* 29 (6): 1329—1338 (in Chinese)
- Quinn P K, Bates T S. 2003. North American Asian and Indian haze similar regional impacts on climate? [J]. *Geophysical Research Letters* 30 (11): 1555—1599
- Radojević M, Hassan H. 1999 Air quality in Brunei Darussalam during the 1998 haze episode [J]. *Atmospheric Environment* 33 (22): 3651—3658
- Schichtel B A, Husara R B, Falke S R, *et al*. 2001 Haze trends over the United States, 1980—1995 [J]. *Atmospheric Environment* 35 (11): 5205—5210
- 石春娥, 翟武全, 杨军, 等. 2008a 长江三角洲地区四省会城市 PM_{10} 污染特征 [J]. *高原气象*, 27 (2): 406—414
- Shi C E, Zhai W Q, Yang J *et al*. 2008a Characteristic of PM_{10} pollution at four provincial cities in Yangtze Delta district [J]. *Plateau Meteorology*, 27 (2): 406—414 (in Chinese)
- 石春娥, 姚叶青, 张平, 等. 2008b 合肥市 PM_{10} 输送轨迹分类研究 [J]. *高原气象*, 27 (6): 1383—1391
- Shi C E, Yao Y Q, Zhang P, *et al*. 2008b Transport trajectory classifying of PM_{10} in Hefei [J]. *Plateau Meteorology*, 27 (6): 1383—1391 (in Chinese)
- 石春娥, 杨军, 邱明燕, 等. 2008c 从雾的气候变化看城市发展对雾的影响 [J]. *气候与环境研究*, 13 (3): 327—336
- Shi C E, Yang J Q, Qi M Y, *et al*. 2008 Impacts of urban development on long-term variation of fog [J]. *Climatic and Environmental Research* 13 (3): 327—336 (in Chinese)
- 童尧青, 银燕, 钱凌, 等. 2007. 南京地区霾天气特征分析 [J]. *中国环境科学*, 27 (5): 584—588
- Tong Y Q, Yin Y, Qian L, *et al*. 2007. Analysis of the characteristics of haze phenomena in Nanjing area [J]. *China Environmental Science* 27 (5): 584—588 (in Chinese)
- 王艳, 柴发合, 王永红, 等. 2008. 长江三角洲地区大气污染物输送规律研究 [J]. *环境科学*, 29 (5): 1430—1435
- Wang Y, Chai F H, Wang Y H, *et al*. 2008. Transport characteristics of air pollutants over the Yangtze Delta [J]. *Environmental Science* 29 (5): 1430—1435 (in Chinese)
- 吴兑. 2005 关于霾与雾的区别和灰霾天气预警的讨论 [J]. *气象*, 31 (4): 3—7
- Wu D. 2005 A discussion on difference between haze and fog and warning of ash haze weather [J]. *Meteorological Monthly* 31 (4): 3—7 (in Chinese)
- 吴兑, 廖国莲, 邓雪娇, 等. 2008. 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*, 19 (1): 1—9
- Wu D, Liao G L, Deng X J *et al*. 2008 Transport condition of surface layer under haze weather over the Pearl River Delta [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* 19 (1): 1—9 (in Chinese)
- 徐梅, 朱玉强, 余文韬. 2006 天津地区灰霾特征初步分析 [J]. *过程工程学报*, 6 (2): 9—13
- Xu M, Zhu Y Q, Yu W T. 2006 Preliminary study on haze in Tianjin [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering* 6 (2): 9—13 (in Chinese)
- 杨文峰, 李兆元, 李星敏. 1997. 一种新的气候跃变分析方法及其应用 [J]. *应用气象学报*, 8 (1): 119—123
- Yang W F, Li Z Y, Li X M. 1997 A new method of analyzing climate jump and its application [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 8 (1): 119—123 (in Chinese)
- 中国气象局. 2003 地面气象观测规范 [M]. 北京: 气象出版社. 25
- China Meteorological Administration. 2003. The Criterion of Surface Meteorological Observation [M]. Beijing: China Meteorological Press. 25 (in Chinese)