

黄山顶夏季气溶胶数浓度特征及其输送潜在源区

王爱平^{1,2},朱彬^{1,2*},银燕²,金莲姬²,张磊²(1.南京信息工程大学,气象灾害预报预警与评估协同创新中心,江苏南京 210044; 2.南京信息工程大学,中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室,江苏南京 210044)

摘要: 利用轨迹聚类方法对 2011 年 6~8 月黄山光明顶的气团轨迹进行聚类分组,得到 2011 年夏季到达黄山顶的主要气团输送轨迹,结合黄山顶的气溶胶数浓度观测资料,分析不同类型输送轨迹与黄山顶积聚模态颗粒物数浓度的关系.利用潜在源贡献因子分析法 PSCF(potential source contribution function analysis)定性分析了不同气团背景下黄山顶积聚模态颗粒物数浓度的潜在源区,最后结合浓度权重轨迹分析法 CWT(concentration weighted field)定量分析不同潜在源区对黄山顶积聚模态颗粒物数浓度的贡献.结果表明,积聚模态颗粒物(0.5~1 μm)数浓度约占 0.5~20 μm 颗粒物数浓度的 94.9%;黄山顶 6~8 月大陆气团的发生频率最高,约 43.4%;影响黄山光明顶积聚模态颗粒物数浓度的潜在源区主要来自一些工业发达人口密集的城市群:湖北东部、安徽中部、河南、江西境内、两广交界处、湖南南部以及浙江北部地区.而垂直方向上,来自西北和西南方向高度约 2~5km 的自由对流层气团对黄山顶积聚模态粒子数浓度贡献较大.

关键词: 黄山; 积聚模态; 潜在源贡献因子分析法(PSCF); 重轨迹分析法(CWT); 潜在源区

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2014)04-0852-10

Aerosol number concentration properties and potential sources areas transporting to the top of mountain Huangshan in summer. WANG Ai-ping, ZHU Bin*, YIN Yan, JIN Lian-ji, ZHANG Lei (1.Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, 210044, China; 2.Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China). *China Environmental Science*, 2014,34(4): 852~861

Abstract: The trajectories of air masses reaching the summit of Mt. Huang, during June to August 2011, and their relationship with the number concentration of accumulation mode particles were analyzed based on a clustering technique combined with in situ measurements of the number concentration of aerosol particles. The possible sources of the accumulation mode aerosol particles over the summit of Mt. Huang under different air mass conditions were analyzed qualitatively with the method of potential source contribution function (PSCF). Finally, the contributions of different sources to the accumulation model particles over the summit of Mt. Huang were analyzed quantitatively with the method of concentration weighted field (CWT). The number concentration of accumulation mode particles (0.5~1 μm) accounted for 94.9% of the particles in 0.5~20 μm , and that the Summit of Mt. Huang was mainly influenced by continental air masses during the summer (43.4%). The potential sources of the accumulation mode particles over the summit of Mt. Huang were mainly from the most industrialized and heavily populated cluster of cities such as the eastern Hubei, central Anhui, Henan and Jiangxi province, the junction of Guangdong and Guangxi, southern Hunan and northern Zhejiang. The vertical cross sections showed that the accumulation mode particles over Mt. Huang were mainly transported from the free troposphere with the heights between approximately 2000m and 5000m and originated from the northwest and southwest pathways.

Key words: Mt. Huang; accumulation number concentration; potential source contribution function (PSCF); concentration weighted field (CWT); potential sources

收稿日期: 2013-07-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41030962,41275143);公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206011);江苏省高校自然科学研究重大项目(12KJA170003);江苏省“333”高层次人才培养工程项目;江苏省“六大人才高峰”计划

* 责任作者, 教授, binzhu@nuist.edu.cn

大气气溶胶可以降低大气能见度,影响人类健康^[1-2],气溶胶的物理特性,如数浓度、表面积浓度和质量浓度等对气候效应、环境质量以及水循环方面有重要影响^[3-4].其中气溶胶颗粒物的尺寸(又称粒径)是颗粒物最重要的性质之一. Hussein^[5]等将不同的粒径段分别定义为 4 个模态:核模态(3~25nm)、爱根核模态(25~100nm)、积聚模态(100~1000nm)和粗粒子模态(>1 μm).在 4 个模态的粒子中积聚模态粒子对颗粒物的表面积贡献最大,在可见光波长范围(0.4~0.7 μm)内气溶胶粒子的消光作用最强,因此在影响大气能见度的粒子中,积聚模态粒子占有重要的地位;此外因为碰并和凝结增长过程,核模态在大气中仅能滞留几个小时就会消失,而爱根核模态粒子容易因碰并而“老化”为积聚模态,粗粒子一般只能运输十几公里就会沉降^[5].积聚模态颗粒物的生命史比爱根核模态和核模态长,其受气团传输的影响较大,讨论该模态的粒子输送分布特征具有重要意义.随着我国工业发展,人为排放的气溶胶含量有逐年增加的趋势^[6].确定污染物的来源及其输送扩散过程,可以为控制大气质量采取合理措施提供一定的科学依据.

轨迹的聚类分析方法能确定气团的路径、来向和传输速度,但是不能定位污染气团的源区^[7],而轨迹气团的统计方法能很好地解决这个问题.目前广泛使用的轨迹统计方法有很多,如 RTA (residence time analysis)^[8-9]、QTBA (quantitative transport bias analysis)^[10]、PSCF (potential source contribution function analysis)^[11-13]、CWT(concentration weighted field)^[14]和 (RTWC)residence time weighted concentration^[15].其中 Hopke 等^[13]研究证实了 PSCF 方法和 CWT 方法能较好的确定污染物的潜在源区及污染程度.Hus 等^[16]用了 3 种不同的轨迹统计分析方法研究芝加哥 PCB(多氯联苯)的潜在源区,发现单独使用某一种轨迹统计方法不能完整的分析潜在源区对观测点的影响,每种分析方法都有自身的优势,因此综合应用不同的分析方法能更好的确定污染物的来源.

近地面的观测并不能代表对流层高层或自

由对流层的气溶胶理化性质^[17].比起近地面的气溶胶,高层的气溶胶在风速较高的情况下能传输到更远的距离.研究污染地区边界层顶的气溶胶的理化性质是了解哪些气溶胶会传输到自由对流层的先决条件^[18].目前国内对高山站点大气污染物的研究比较少,主要集中在东部地区的泰山^[19]、黄山以及中部的华山^[20].张晓培^[21]用粒子扩散模式 FLEXPART 结合 WRF 模式高精度风场资料,分析了晴天和雾天两种天气背景下黄山光明顶气溶胶粒子的来源和输送特征;张磊^[22]利用平流输送强度评估参数和 PSCF 方法分析了黄山 CO 和 O₃ 的源区,发现平流输送对光明顶污染物浓度的变化具有重要作用.

黄山光明顶海拔 1840m,与周围平原、丘陵形成强烈对比,黄山顶大气气溶胶浓度水平具有较好的区域代表性,可以用于研究大气污染物的输送,以及污染物在大气边界层和自由大气的交换过程.本文利用轨迹聚类方法对观测期间的气团轨迹进行聚类分组,得到了 2011 年夏季到达黄山顶的主要气团输送轨迹,结合黄山顶的气溶胶数浓度观测资料,分析不同类型输送轨迹与黄山顶积聚模态粒子数浓度的关系.利用 PSCF 方法定性分析了不同气团背景下黄山顶积聚模态粒子数浓度的潜在源区,最后结合 CWT 方法定量地分析不同潜在源区对黄山顶积聚模态粒子数浓度的贡献程度.

1 仪器与资料

本次观测利用美国 TSI 公司生产的 APS-3321 型空气动力学粒径谱仪连续在线测量大气颗粒物数浓度谱分布.APS-3321 型粒径谱仪通过测量在加速气流中不同大小粒子通过检测区域的飞行时间(TOF)实时地测量粒子的空气动力学直径,测量范围为 0.5~20 μm ,采样流量 5L/min,可同时测量 52 个粒径通道的颗粒物数浓度.采样时间为 2011 年 6 月 1 日~8 月 31 日,观测中设定采样分辨率为 5min.此外光明顶的气象观测站同步观测相关的气象要素,包括气温、相对湿度、平均风速等.

黄山南北长约 40km,东西宽约 30km.黄山位

于我国经济发达和污染严重的长江三角洲地区,西北与池州毗邻,西南与江西景德镇为邻,东南与浙江交界.观测点设在安徽省黄山风景区的第 2 高峰光明顶(30.08°N,118.09°E).高度 1840m,采样点设置在光明顶气象观测站内.

2 研究方法

2.1 轨迹聚类分析

本文使用 TrajStat 软件^[23],该软件对气团轨迹的计算利用了 NOAA 的 HYSPLIT 模式的计算模块^[24],并结合了美国环境预报中心和国家大气研究中心联合执行的全球再分析资料.对有效的小时平均样本数据,计算观测期间到达黄山的 1833 条 72h 后向轨迹,轨迹计算的起始点高度为距地高度 1500mAGL(Above Ground Level),对应了光明顶海拔 1840mASL(Above Sea Level),将计算得到的后向轨迹进行聚类分析,该方法是根据气团的移动速度和方向对大量轨迹进行分组,得到不同的轨迹输送组来估计污染物的潜在源区^[25].分类的原则是组内各轨迹之间差异极小,而组间的差异极大^[26],在聚类分析过程中组间差异临界值设置为 30%,即前后两个轨迹的差异在 30%以内就归为同一类型气流,把聚类后的各条轨迹对应的气溶胶数浓度进行平均,得到造成黄山光明顶夏季气团主要的输送路径.

2.2 潜在源贡献因子分析法(PSCF)

PSCF 是基于条件概率函数发展而来的一种判断污染源可能方位的方法^[11-13],PSCF 通过结合气团轨迹和某要素值(本文指气溶胶数浓度)来给出可能的排放源位置.PSCF 函数定义为经过某一区域(i, j 分别代表经度和纬度)的气团到达观测点时对应的某要素值超过设定阈值的条件概率.

将某一研究区域划分为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 的网格,对研究的要素设定一个阈值,当轨迹所对应的要素值高于这个阈值时,认为该轨迹是污染轨迹,其经过网格(i, j) 污染轨迹端点数为 m_{ij} ,而落在某网格(i, j) 内的所有轨迹端点数为 n_{ij} ,则 PSCF 可以定义为公式(1).PSCF 是一种条件概率,PSCF 的误差会随着网格与采样点的距离增加而增加.当 n_{ij} 较小时,会有很大的不确定性.为了减小这

种不确定性,很多研究者^[27-29]引入了权重函数 $W(n_{ij})$ (公式 2).当某一网格内的 n_{ij} 小于研究区内每个网格的平均轨迹端点数 n_{ave} 的 3 倍时,就要使用 $W(n_{ij})$ 来减小 PSCF 的不确定性.

$$PSCF_{ij} = \frac{m_{ij}}{n_{ij}} \cdot W(n_{ij}) \quad (1)$$

$$W(n_{ij}) = \begin{cases} 1.00, 3n_{ave} < n_{ij} \\ 0.70, 1.5n_{ave} < n_{ij} \leq 3n_{ave} \\ 0.4, n_{ave} < n_{ij} \leq 1.5n_{ave} \\ 0.17, n_{ij} \leq n_{ave} \end{cases} \quad (2)$$

PSCF 的值越大,表明该网格点对观测点的粒子浓度贡献越大.高 PSCF 值所对应网格组成的区域就是光明顶气溶胶数浓度的潜在源区,经过该区域的轨迹就是对粒子数浓度有影响的输送路径.

2.3 浓度权重轨迹分析(CWT)

由于 PSCF 反映的是某网格中污染轨迹所占的比例,该方法存在一定的缺陷:不能区分相同 PSCF 值的网格对观测点污染程度贡献的大小,即无法确定经过该网格内的轨迹对应的某要素值是略高于还是很高于设定的阈值.为了弥补这个不足,用 CWT^[14,16]方法计算了轨迹的权重浓度,以反映不同轨迹的污染程度.在 CWT 分析法中,每个网格点都有一个权重浓度,它可以通过计算经过该网格的轨迹对应的观测点粒子浓度的平均值来实现,计算方法如公式(4).设置 CWT 的网格精度与 PSCF 相同,为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$.其中: C_{ij} 是网格(i, j) 上的平均权重浓度; l 是轨迹; C_l 是轨迹 l 经过网格(i, j) 时对应的光明顶的粒子数浓度; τ_{ijl} 是轨迹 l 在网格(i, j) 停留的时间,计算过程中,用落在网格内的轨迹的端点数来代替停留时间.采用与 PSCF 分析法相同的权重函数 $W(n_{ij})$.

$$C_{ij} = \frac{\sum_{l=1}^M C_l \cdot \tau_{ijl}}{\sum_{l=1}^M \tau_{ijl}} \cdot W(n_{ij}) \quad (4)$$

3 结果与讨论

3.1 光明顶气溶胶数浓度特征

计算光明顶夏季 $0.5 \sim 20 \mu\text{m}$ 的气溶胶粒子数

浓度的小时均值,以方便下文结合 TrajStat 计算的后向轨迹数据分析污染物潜在源区.剔除由于仪器故障造成缺失数据达半小时以上的相应小时数据,剔除后得到的可用小时平均数据样本 1833 个.为了研究不同粒径颗粒物浓度的特征,将 0.5~20 μm 的气溶胶分为 0.5~1.0 μm 、1.0~2.5 μm 、2.5~20 μm 这 3 个粒径段.其中本文受 APS 仪器观测粒径范围(0.5~20 μm)限制,定义积聚模态粒径范围是 0.5~1.0 μm .从表 1 中可以看出,观测期间 0.5~20 μm 颗粒物数浓度变化范围为 0.03~155 个/ cm^3 ,平均值为(20.7 \pm 21.8)个/ cm^3 ;粒径为 0.5~1.0 μm 、1.0~2.5 μm 、2.5~10 μm 颗粒物的平均数浓度分别是(19.6 \pm 20.8),(1 \pm 1.2),(0.06 \pm 0.08)个/ cm^3 ,各粒径段粒子数浓度平均值占 0.5~20 μm 数浓度的 94.9%、4.8%、0.3%,可见积聚模态粒子占黄山光明顶粒径为 0.5~20 μm 气溶胶的绝大部分.由图 1 可见,粒子的平均数浓度为 19.6 个/ cm^3 ,在可用的 1833h 平均样本中超过平均值的有 689 个.其中 6、7、8 月的平均数浓度值分别是 17.8、26.7、14.7 个/ cm^3 .观测期间的数据

波动较大,这主要跟天气系统和气象要素有关.6 月初有秸秆焚烧,使得黄山顶积聚模态粒子浓度高,6 月 10 号进入梅雨季节后,长时间的降水有效清除了气溶胶,而 6 月底 7 月初和 7 月下旬的高数浓度主要受黄山周围发达工业区气团输送的影响,这与张磊^[22]研究不同输送类型下的污染气体(CO 和 O₃)的结果相吻合.8 月份黄山受南太平洋台风和副热带高压的交替影响,光明顶位于副高后部,偏东风将海洋上的清洁气团输送到黄山,使得 8 月的数浓度偏低.

表 1 黄山顶夏季不同粒径范围颗粒物数浓度统计值
Table 1 Number concentration of particles in different size ranges at Mt. Huang in the summer

粒径范围 (μm)	平均值 (个/ cm^3)	最大值 (个/ cm^3)	最小值 (个/ cm^3)	标准偏差	平均值所占百分比(%)
0.5~1.0	19.6	148.7	0.02	20.8	94.9
1.0~2.5	1.0	11.3	0.01	1.2	4.8
2.5~20	0.06	1	0	0.08	0.3
0.5~20	20.7	155.4	0.03	21.8	0

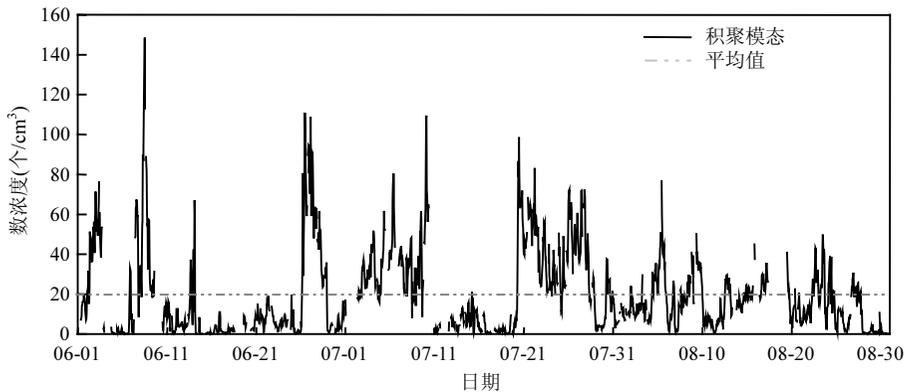


图 1 2011 年 6~8 月黄山顶积聚模态气溶胶数浓度小时均值分布

Fig.1 Hourly mean number concentration of particles in the accumulation mode on Mt Huang during summer 2011

由表 2 可见观测期间积聚模态(0.5~1 μm)数浓度明显低于夏秋季节兰州地区 [(98 \pm 86) 个/ cm^3]、春季广州地区 [(123 \pm 87) 个/ cm^3].而对南京、上海、济南地区的研究所用粒子浓度测量仪器为 WPS,与本文的 APS 测量原理有所不同.王飞^[30]用 3 种不同的粒子数浓度测量仪器 APS-SMPS-WPS 对南京夏季气溶胶数浓度的

对比观测,研究发现 APS 测得的数浓度要低于 WPS,在 0.5~10 μm 测量范围内 WPS 约是 APS 的 1.35 倍.排除仪器测量原理不同造成的影响,南京、上海和济南等地区的积聚模态粒子数浓度仍然高于黄山,可见高海拔地区黄山的气溶胶可以作为清洁背景.而积聚模态粒子在大气中的寿命相对其他模态的粒子长,可长距离输送,因此有

必要讨论其随气团轨迹的传输特征,以及在不同气团背景下的粒子潜在输送源区。

表2 本研究结果与其他城市地区研究结果的比较
(个/cm³)

Table 2 Comparison of the results obtained on Mt Huang with those from other urban areas (cm⁻³)

地区(季节)仪器	粒径范围		参考文献
	0.5~1.0 μm	1.0~2.5 μm	
广州(春季)APS	127 \pm 87	10 \pm 10	张涛等 ^[31] ,2010
兰州(夏秋)APS	98 \pm 86	8 \pm 10	赵素平等 ^[32] ,2012
南京(夏秋冬)WPS	666 \pm 746	7 \pm 9	钱凌等 ^[33] ,2008
上海(春夏)WPS	69 \pm 46	7 \pm 6	高健等 ^[34] ,2006
济南(夏季)WPS	96 \pm 93		高健等 ^[35] ,2007
黄山(夏季)APS	19.6 \pm 20.8	1 \pm 1.2	本研究

3.2 气溶胶数浓度聚类分析

利用 TrajStat 计算 2011 年 6 月 1 日~8 月 31 日的有效样本时间对应的 1833 条后向轨迹,每条轨迹后向模拟 72h,时间分辨率为 0.1h,每条轨迹

上有 720 个点.用聚类分析方法对轨迹进行分组,得到 3 条主要传输路径.如图 3(a)所示,A 轨迹主要来自内陆各个方向的气团,定义为大陆气团;B 轨迹源自南海经过广东江西省境内到达黄山,定义为西南远距离海洋气团;C 轨迹为偏东海洋气团.轨迹的路线和方向表示气团在到达观测点以前所经过的地区,根据其长短可以判断气团移动的速度,长的轨迹对应快速移动的气团,短的轨迹对应移动缓慢的气团.西南方向的轨迹比其他方向的轨迹长,表明来自西南方向的气团移动都较快.从图 3 中可以发现,大陆性气团(聚类 A)多来自西北高海拔地区,而聚类 B 和 C 的气团多源自海平面上.3 种聚类气团在到达黄山时都有一个沿山体爬升的趋势,气溶胶粒子可能会受到地形的强迫抬升的影响.银燕等^[36]研究 2008 年黄山山顶夏季 0.1~10 μm 气溶胶数浓度的日变化特征,发现黄山顶受边界层发展和山谷风的影响,气溶胶数浓度下午大于上午.

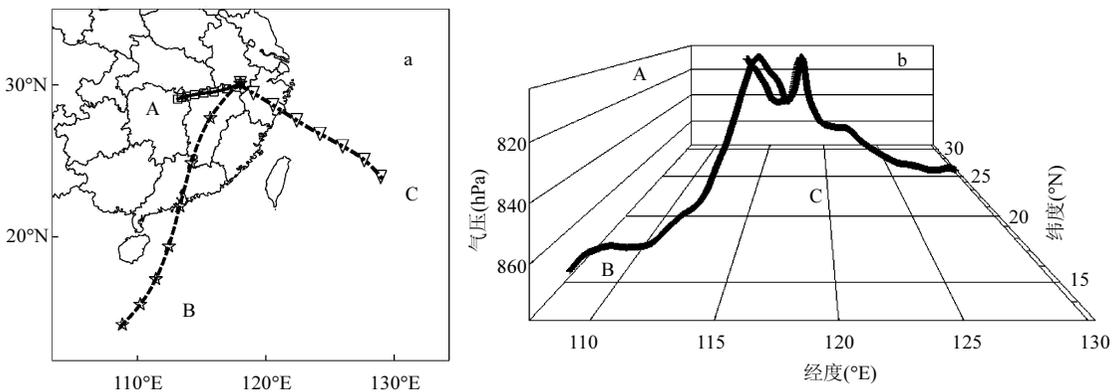


图2 黄山顶夏季后向轨迹聚类结果(a)及轨迹空间三维分布结构(b)

Fig.2 Cluster mean back-trajectories (A-C) arriving at Mt. Huang during the summer 2011 (a), and a 3D view of the three back-trajectories (b)

根据黄山顶夏季积聚模态粒子数浓度小时平均值,结合由 Trajstat 计算的后向轨迹,按照每条轨迹对应的观测点的数浓度,将后向轨迹划分为清洁轨迹和污染轨迹.当某条轨迹所对应的黄山光明顶数浓度小于平均值(19.6 个/cm³)时,就将其定义为清洁轨迹;当轨迹对应的观测点的数浓度高于平均数浓度时,认为该条轨迹为污染轨

迹.由表 3 可见,从总轨迹特征的发生频率可以看出,聚类 A 大陆型气团的占总轨迹的比例最大(43.4%),聚类 C 偏东方向的海洋气团轨迹数最少(发生频率 24.2%).其中来自大陆的气团(聚类 A)的积聚模态粒子数浓度均值(27.4 个/cm³)超过了观测期间的平均值(19.6 个/cm³),并且远高于来自海洋气团背景下的粒子数浓度.对欧洲中部的

一个站点的粒子数浓度谱分布特征的研究发现,来源于大陆和海洋气团对观测点 Melpitz 颗粒物数谱分布影响不同,来自大陆气团对应积聚模态粒子较多^[37].而同样是源自海洋的气团,来自西南方向的聚类 B 轨迹对应的观测点粒子数浓度均值要远高于类型 C 的数浓度均值.研究表明气象条件对颗粒物数谱分布有重要影响^[20],聚类 B 和聚类 C 都是从海洋飘过的气团,相对湿度相差不大,但是在西南远距离输送气团背景下的风速较大,其平均风速达到了 6.3m/s,比起近地面的气溶胶,高层的气溶胶在风速较大的情况下能传输到更远的距离,可见较大的风速将沿途的积聚模态的气溶胶粒子带到观测点.综上所述,聚类 A 大陆气团对应的黄山顶粒子污染最重,积聚模态粒子数浓度最高,而来自海洋的气团(聚类 B 和聚类 C)相对大陆气团较清洁.

3.3 潜在源区分布及其相对贡献值

利用 PSCF 分析 3 类气团的潜在污染源分布及其相对贡献,设定整个观测期间积聚模态粒子数浓度的阈值为 19.6 个/cm³.图 3 中 a 的颜色越深,表示该网格区域对受点黄山光明顶的数浓度影响越大.从图 3 可以发现,聚类 A 大陆性气团的 PSCF 值大于 0.6 的区域最大,其次是聚类 B 西南海洋气团,而偏东的海洋气团高 PSCF 值所占区域最小.造成这种污染源区分布的原因,一方面是由于 3 种不同方向的气团轨迹在黄山顶出现的频率不同造成的(表 3),而更主要的原因是大陆性气团带来的积聚模态的粒子数浓度明显高于海洋气团的影响.

对于大陆性气团(聚类 A),高 PSCF 值(PSCF>0.6)区域主要集中在湖北东部、河南东南部、安徽中部、江西东北地区以及浙江西北部.对聚类 B 西南远距离的海洋性气团,其高 PSCF 值集中在黄山光明顶的西南偏西方向,主要分布在两广交界处、湖南东南部和江西西北部.而来自西南偏南方向的海洋气团的污染潜在源区的 PSCF 值要小,甚至一些区域的 PSCF 的值为 0,意味着来自这个方向的轨迹所对应观测点的污染贡献值低于 19.6 个/cm³.说明了来自大陆的气团的积聚模态的粒子对黄山的潜在贡献要高于海

洋性气团.从聚类 C 偏东海洋性气团的 PSCF 值分布情况可以发现,高的 PSCF 值分布在浙江沿海的宁波、温州一带工业较发达的地区,相对较清洁的海洋气团在经过这些污染严重地区之后,在较高的相对湿度的环境下,核膜态粒子经过碰并向积聚模态转化,造成了较高数浓度的积聚模态粒子^[36].综合 3 种聚类气团的 PSCF 结果(图 4a),影响黄山光明顶夏季积聚模态粒子数浓度的潜在源区主要分布在湖北东部、安徽中部、河南、江西境内、两广交界处、湖南南部以及浙江北部.这些地区人口密集,工业和交通污染严重,对黄山积聚模态粒子贡献较大.

表 3 黄山顶夏季每组聚类的轨迹数、发生频率、对应的积聚模态粒子数浓度均值以及相应气象要素特征

Table 3 Number of trajectories and occurrence frequency of cluster A to C, the corresponding averaged number concentration of accumulation-mode particles and meteorological parameters

聚类	项目说明	A	B	C	总计
总轨迹特征	轨迹数	795	595	443	1833
	发生频率(%)	43.4	32.4	24.2	100
	数浓度均值(个/cm ³)	27.4	17.6	8.4	19.6
污染轨迹特征	污染轨迹数	412	233	48	693
	占本组聚类百分数(%)	51.8	39.1	10.8	
	数浓度均值(个/cm ³)	45.4	34.9	32	41
气象要素	平均气温(°C)	17.2	17.8	17.2	
	平均风速(m/s)	3.9	6.3	4.4	
	相对湿度(%)	88.9	92.5	92	

分别用 PSCF 和 CWT 潜在源区的方法分析粒子的来源,对比发现 2 种分析方法得到的污染源区分布结果大致相同,细节方面略有不同(图 4).例如在聚类 C 偏南海洋气团中,用 PSCF 方法分析得到的潜在源区分布结果,其中在海洋上有一些潜在源区的 PSCF<0.2 并呈轨迹流线型的分布趋势. CWT 方法得到的污染潜在源区的分布更加平滑.出现该现象的原因是,某条来自海洋的远距离轨迹气团,只要该轨迹所对应的观测点的数浓度高于设定的污染数浓度阈值 19.6 个/cm³,PSCF 方法就会认定该条轨迹上所有的点都是污染的点,因此造成了海洋上的轨迹流线型的 PSCF 值分布

结果.而浓度权重轨迹 CWT 方法能很好地避免这一现象,在 CWT 方法中没有设定某一特定污染临界值,每条轨迹对观测点的影响都是相等的.而且可以量化的得到不同贡献程度源区的分布情况.

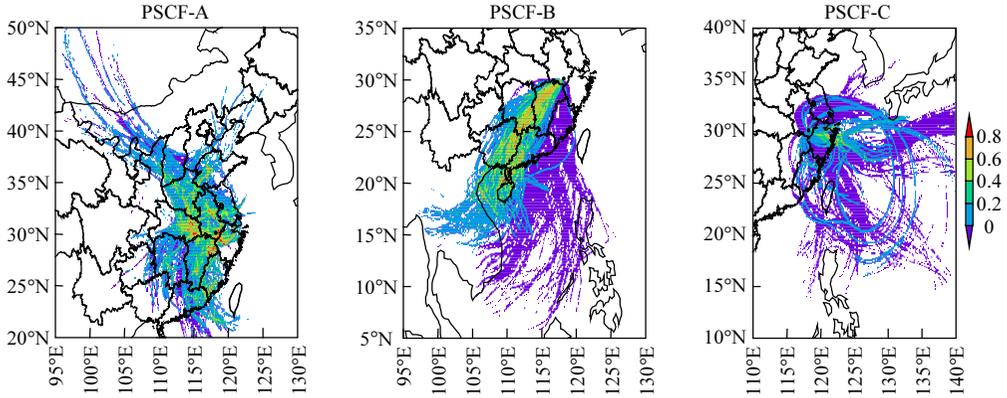


图3 黄山顶夏季聚类 A~C 的潜在源贡献因子(PSCF)分布

Fig.3 The distribution of the potential source contribution function (PSCF) of back trajectory clusters A to C on Mt. Huang during summer 2011

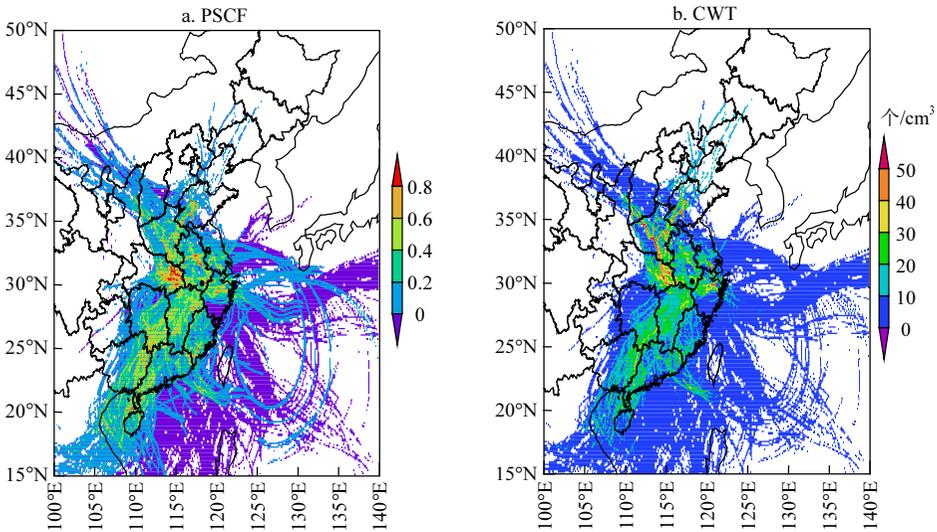


图4 黄山顶夏季潜在源贡献分布 PSCF 结果(a)与浓度权重轨迹 CWT 分析结果对比(b)

Fig.4 A comparison of the distribution of potential source contribution function (PSCF) (a) with concentration-weighted trajectories (CWT) (b)

• 为黄山光明顶

图4(b)的CWT分析结果显示,对黄山光明顶的积聚模态粒子数浓度贡献在 40 个/cm³ 的强潜在源区,主要分布在河南、湖北东部以及浙江杭州湾地区.数浓度贡献在 20~40 个/cm³ 的中等强

度潜在源区,主要集中在观测点西南方向的江西境内、湖南南部以及两广交界处,这些地区的气团沿着聚类 B 所在的轨迹远距离输送到黄山光明顶,此外中等强度地污染源区还有黄山以北苏

皖境内的江淮平原城市带。

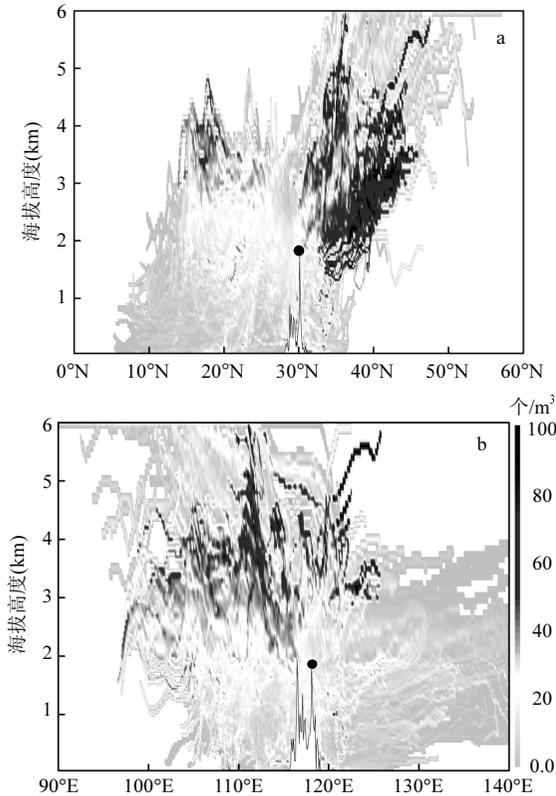


图5 黄山顶夏季积聚模态粒子数浓度权重轨迹(CWT)垂直截面分布

Fig.5 Vertical cross sections of the concentration-weighted trajectories

(a)纬向垂直分布,(b)经向垂直分布,实心圆点为黄山光明顶

Kaiser 等^[38]曾用 2 种轨迹分析方法分析了 5 个全球气候高山站 NO_x 、 CO 、和 O_3 的水平和垂直输送状况.Kaiser 将垂直方向的分辨率在 2km 以下设为 200m,2km 以上定为 500m,水平网格精度为 0.5° .本文借鉴 Kaiser 的设置方法,但是将水平方向的分辨率设为 0.1° 的网格,垂直方向分辨率在 2000m 以下为 40m,2~6km 范围内设为 100m,因此垂直方向分为 90 层.将每条轨迹在各个垂直层内的滞留时间与在黄山顶观测得到的数浓度值相结合,得到了污染轨迹气团在垂直方向的浓度权重贡献值的分布情况(图 5).综合图 5(a)和图 5(b)可以发现,对黄山顶积聚模态粒子数浓度贡献值在 $50 \text{ 个}/\text{cm}^3$ 以上的强潜在源区主要是高于

光明顶海拔高度约 2~5km 之间的西北气团.此外图 5a 显示在 20°N 附近黄山光明顶西南方向 3~5km 高度的气团对光明顶的数浓度贡献值也较大.总的来说,对于高海拔的黄山观测点,来自西北和西南方向,高度约 2~5km 的自由对流层气团对黄山顶积聚模态气溶胶数浓度贡献较大.

4 结论

4.1 2011 年 6~8 月黄山光明顶 $0.5\sim 20\mu\text{m}$ 大气颗粒物数浓度平均值为 (20.7 ± 21.8) 个/cm,粒径为 $0.5\sim 1.0, 1.0\sim 2.5, 2.5\sim 10\mu\text{m}$ 颗粒物的平均数浓度分别占总数浓度的 94.9%、4.8%、0.3%,其中积聚模态($0.5\sim 1\mu\text{m}$)粒子占总数浓度的绝大部分.

4.2 对黄山夏季观测期间的后向轨迹聚类分析得到三种结果,分别是 A:大陆气团,B:西南远距离海洋气团,C:偏东太平洋气团.其中大陆型气团的占总轨迹的比例最大(43.4%),聚类 C 偏东方向的海洋轨迹数最少(发生频率 24.2%).来自大陆的气团(聚类 A)的积聚模态粒子数浓度均值 $27.4 \text{ 个}/\text{cm}^3$ 要高于来自海洋气团背景下(聚类 B 和聚类 C)的粒子数浓度.

4.3 综合潜在源贡献因子分析法(PSCF)和浓度权重轨迹分析(CWT)的结果分析发现,影响黄山光明顶积聚模态粒子数浓度的主要潜在源区分布在湖北东部、安徽中部、河南、江西境内、两广交界处、湖南南部以及浙江北部等一些人口密集,工业和交通污染严重的地区.其中对积聚模态粒子数浓度贡献在 $40 \text{ 个}/\text{cm}^3$ 的强潜在源区,其主要分布在河南、湖北东部以及浙江杭州湾地区,还有自西北黄土高原经河南省到达光明顶的气团.而数浓度贡献在 $20\sim 40 \text{ 个}/\text{cm}^3$ 的中等强度潜在源区,主要集中在黄山西南方向的江西境内、湖南南部以及两广交界处.在垂直分布上,来自西北和西南方向高度约 2~5km 的自由对流层气团对黄山顶积聚模态粒子数浓度贡献较大.

参考文献:

- [1] Seinfeld J H, Pandis S N. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change [M]. New jersey:John Wiley & Sons, 2012.

- [2] Harrison R M, Yin J. Particulate matter in the atmosphere: which particle properties are important for its effects on health? [J]. *Science of the Total Environment*, 2000,249(1):85-101.
- [3] Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J T, et al. Aerosols, climate, and the hydrological cycle [J]. *Science*, 2001,294(5549):2119-2124.
- [4] HUSSEIN T, DAL MASO M, PETÄJÄ T, et al. Evaluation of an automatic algorithm for fitting the particle number size distributions [J]. *Boreal Environment Research*, 2005,10(5):337-355.
- [5] Mäkelä J M, Aalto P, Jokinen V, et al. Observations of ultrafine aerosol particle formation and growth in boreal forest [J]. *Geophysical Research Letters*, 1997,24(10):1219-1222.
- [6] 童尧青,银燕,钱凌,等.南京地区灰霾天气特征分析 [J]. *中国环境科学*, 2007,27(5):584-588.
- [7] Stohl A. Trajectory statistics—a new method to establish source-receptor relationships of air pollutants and its application to the transport of particulate sulfate in Europe [J]. *Atmospheric Environment*, 1996,30(4):579-587.
- [8] Ashbaugh L L, Malm W C, Sadeh W Z. A residence time probability analysis of sulfur concentrations at Grand Canyon National Park [J]. *Atmospheric Environment*, 1985,19(8):1263-1270.
- [9] Poirot R L, Wishinski P R. Visibility, sulfate and air mass history associated with the summertime aerosol in northern Vermont [J]. *Atmospheric Environment*, 1986,20(7):1457-1469.
- [10] Keeler G J. A Hybrid Approach for Source Apportionment of Atmospheric Pollutants in the Northeastern United States [D]. Michigan:University of Michigan, 1987.
- [11] Zeng Y, Hopke P K. A study of the sources of acid precipitation in Ontario, Canada [J]. *Atmospheric Environment*, 1989,23(7):1499-1509.
- [12] Gao N, Cheng M D, Hopke P K. Potential source contribution function analysis and source apportionment of sulfur species measured at Rubidoux, CA during the Southern California Air Quality Study, 1987 [J]. *Analytica Chimica Acta*, 1993,277(2):369-380.
- [13] Hopke P K, Gao N, Cheng M D. Combining chemical and meteorological data to infer source areas of airborne pollutants [J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 1993,19(2):187-199.
- [14] Seibert P, Kromp-Kolb H, Baltensperger U, et al. Trajectory analysis of aerosol measurements at high alpine sites [J]. *Transport and Transformation of Pollutants in the Troposphere*, 1994:689-693.
- [15] Stohl A. Trajectory statistics—a new method to establish source-receptor relationships of air pollutants and its application to the transport of particulate sulfate in Europe [J]. *Atmospheric Environment*, 1996,30(4):579-587.
- [16] Hsu Y K, Holsen T M, Hopke P K. Comparison of hybrid receptor models to locate PCB sources in Chicago [J]. *Atmospheric Environment*, 2003,37(4):545-562.
- [17] Pratt K A, Prather K A. Aircraft measurements of vertical profiles of aerosol mixing states [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 2010,115(D11).
- [18] Li W J, Zhang D Z, Shao L Y, et al. Individual particle analysis of aerosols collected under haze and non-haze conditions at a high-elevation mountain site in the North China plain [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011,11(22):11733-11744.
- [19] 沈小静.泰山大气气溶胶数谱分布特征及光学特性研究 [D]. 北京:中国气象科学研究院, 2012.
- [20] Wang G, Li J, Cheng C, et al. Observation of atmospheric aerosols at Mt. Hua and Mt. Tai in central and east China during spring 2009—Part 1: EC, OC and inorganic ions [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2011,11:4221-4235.
- [21] 张晓培.黄山顶大气气溶胶粒子来源和输送过程的数值模拟 [D]. 南京:南京信息工程大学, 2012.
- [22] 张磊,金莲姬,朱彬,等.2011年6~8月平流输送对黄山顶污染物浓度的影响 [J]. *中国环境科学*, 2013,33(6):969-978.
- [23] Wang Y Q, Zhang X Y, Draxler R R. TrajStat: GIS-based software that uses various trajectory statistical analysis methods to identify potential sources from long-term air pollution measurement data [J]. *Environmental Modeling and Software*, 2009,24(8):938-939.
- [24] Draxler R R, Hess G D. An overview of the HYSPLIT_4 modeling system for trajectories [J]. *Australian Meteorological Magazine*, 1998,47:295-308.
- [25] 石春娥,翟武全,杨军,等.长江三角洲地区四省会城市 PM₁₀ 污染特征 [J]. *高原气象*, 2008,27(2):408-414.
- [26] Dorling S R, Davies T D, Pierce C E. Cluster analysis: A technique for estimating the synoptic meteorological controls on air and precipitation chemistry—Method and applications [J]. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 1992,26(14):2575-2581.
- [27] Hopke P K, Barrie L A, Li S M, et al. Possible sources and preferred pathways for biogenic and non-sea-salt sulfur for the high Arctic [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995,100(D8):16595-16603.
- [28] Polissar A V, Hopke P K, Paatero P, et al. The aerosol at Barrow, Alaska: Long-term trends and source locations [J]. *Atmospheric Environment*, 1999,33(16):2441-2458.
- [29] Xu X, Akhtar U S. Identification of potential regional sources of atmospheric total gaseous mercury in Windsor, Ontario, Canada using hybrid receptor modeling [J]. *Atmospheric Chemistry and*

- Physics, 2010,10(15):7073-7083.
- [30] 王 飞,朱 彬,康汉清,高晋徽.APS-SMPS-WPS 对南京夏季气溶胶数浓度的对比观测 [J]. 中国环境科学, 2011,31(9): 1416-1423.
- [31] 张 涛,陶 俊,王伯光,等.广州市春季大气颗粒物的粒径分布及能见度研究 [J]. 中国科学院研究生院学报, 2010,27(3): 331-337.
- [32] 赵素平,余 晔,陈晋北,等.兰州市夏秋季颗粒物谱分布特征研究 [J]. 环境科学,2012,33(3):687-693.
- [33] 钱 凌,银 燕,童尧青,等.南京北郊大气细颗粒物的粒径分布特征 [J]. 中国环境科学, 2008,28(1):18-22.
- [34] 高 健,王 韬,王文兴.中国城市大气超细颗粒物浓度及粒径分布研究 [C].//中国气象学会 2006 年年会“大气成分与气候、环境变化”分会场论文集.成都:中国气会, 2006:879-885.
- [35] 高 健,王 进,程淑会,等.济南夏季大气颗粒物粒径分布特征及来源机理分析 [J]. 中国科学院研究生院学报, 2007,24(5): 680-687.
- [36] 银 燕,陈 晨,陈 魁,等.黄山大气气溶胶微观特性的观测研究 [J]. 大气科学学报, 2010,33(2):129-136.
- [37] Birmili W, Wiedensohler A, Heintzenberg J, et al. Atmospheric particle number size distribution in central Europe: Statistical relations to air masses and meteorology [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984-2012), 2001,106 (D23):32005-32018.
- [38] Kaiser A, Scheifinger H, Spangl W, et al. Transport of nitrogen oxides, carbon monoxide and ozone to the Alpine Global Atmosphere Watch stations Jungfraujoch (Switzerland), Zugspitze and Hohenpeissenberg (Germany), Sonnblick (Austria) and Mt. Kravec (Slovenia) [J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(40):9273-9287.

作者简介: 王爱平(1988-),女,山东临沂人,南京信息工程大学大气物理学院硕士研究生,主要从事大气物理与大气环境研究。

气候变化将威胁粮食安全和经济

根据将于 2014 年 3 月底最后定稿的联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)报告草案称,全球变暖将使数百万人因沿海洪灾和海平面上升而被迫迁移,此外,还可能导致作物产量下降,造成数万亿美元的经济产出损失(1 美元约合 6.19 人民币元)。

英国《独立报》援引报告草案的数据表示,粮食安全将面临越来越严重的威胁,至本世纪末,作物平均产量将以每 10 年超过 2%的速度下降;相比之下,到 2050 年,需求却以每 10 年 14%的速度在增加。

报告草案称,如果气温相比工业化前的水平升高 2.5℃,全球每年的国内生产总值预计将下降 0.2%~2%。气候变化造成的贫困和经济冲击将对人口迁移产生显著影响,并增加抗议活动和国内或国际暴力冲突的风险。

报告草案作者之一、麦考瑞大学教授莱斯利·休斯(Lesley Hughes)表示,科学家们越来越相信,不论是从研究上还是从现实观察来说,气候变化正在发生,热浪和干旱的发生率都体现了这种变化。

科学家表示,目前全球平均气温已经上升了大约 0.9℃,随着燃烧化石燃料和土地开垦产生的二氧化碳排不断增加,气温上升至少 2℃的可能性也在加大。《独立报》称,基于 2012 年全球国内生产总值为 71.8 万亿美元这一数据,全世界每年的损失或将高达 1.4 万亿美元。

不过,包括美国环保协会在内的多家美国机构日前发布报告也指出,气候变化所产生的经济影响比自然本身的变化更难预测。例如,相比于对于干旱和洪水等极端天气事件影响的预测,气候模型在海平面上升和温度方面的预测做得更好。此外,生物多样性的丧失也很难评估。而饥荒、政治动乱和人口迁移往往是多重因素共同作用的结果,这些因素“因为难以量化、预测和评估,通常被忽略了”。