

# 基于后向轨迹追踪模式分析 SACOL 气溶胶来源及其光学特性\*

李霞 张镭†

(半干旱气候变化教育部重点实验室/兰州大学大气科学学院, 兰州 730000)

(2011 年 8 月 7 日收到; 2011 年 9 月 18 日收到修改稿)

利用 2007 年 11 月至 2010 年 10 月 NCEP/NCAR 再分析资料和 HYSPLIT 模式模拟了后向气流轨迹, 分析了兰州大学半干旱气候环境观测站 (SACOL) 所在地区的大气输送特征. 采用聚类分析方法将 1096 条轨迹分类, 得到 15 簇反映主要特征的典型气流, 研究了不同气流特征、出现频数及季节分布特点, 与主要天气形势和天气系统的关系. 统计主要气流路径所占比例, 其中源于四川和重庆的气流占总路径的 16%, 为影响 SACOL 的主要路径, 其次为源于局地 and 陕西的气流, 路径最少的是东欧和孟加拉国. 结合同期 MFRSR 地基辐射计反演的 870nm 气溶胶光学厚度和波长指数, 分析了不同气团源控制下的气溶胶光学特性和粒子性质特征. 揭示了最大平均气溶胶光学厚度达  $0.29 \pm 0.12$  (平均值  $\pm$  标准差), 气团源于塔克拉玛干沙漠; 最小平均光学厚度的气团源于孟加拉国, 为  $0.14 \pm 0.02$ . 根据研究站点周围环境条件和气团源区地理条件以及移动轨迹, 分析其可能影响, 并定量给出不同源区气团对 SACOL 三年平均气溶胶光学厚度的贡献率. 结果表明, 源于局地和区域性气团贡献平均光学厚度的 41.1%, 沙尘区贡献 28.4%, 中亚为 17.9%, 远距离东欧和中东为 12.6%.

**关键词:** 后向轨迹, 聚类分析, 气溶胶光学厚度, 波长指数

**PACS:** 34.10.+x, 92.60.Mt, 42.68.Jg

## 1 引言

气溶胶是大气的重要组成成分, 可以通过散射和吸收太阳短波辐射直接影响地气辐射收支<sup>[1,2]</sup>, 可以作为云凝结核改变云微物理特性和生命周期以及云量, 间接影响地气辐射平衡<sup>[3,4]</sup>, 吸收性气溶胶通过直接吸收辐射加热所在高度层的大气, 减少低云覆盖<sup>[5]</sup>, 因此气溶胶在全球和区域气候中扮演着重要角色. 近几十年来, 对气溶胶的气候效应研究取得了很大进展, 但是由于其时空变率和理化性质差异的复杂性, 迄今仍然是影响气候变化的最大不确定性因素之一<sup>[6]</sup>. 气溶胶既可来自土壤、岩石风化、火山喷发的尘埃、海沫产生的海盐等天然源, 也可来自交通、工业生产的烟尘以及其他人类活动排放的污染物等人为源. 不同来源的气溶胶成分、形状、尺度不同, 其气候环境效应也不同, 某一地区大气气溶胶源通常是多种共同汇集而成. 因

此, 对大气气溶胶光学特性的研究必须综合考虑各种影响因素.

中国西北地区戈壁和蒙古南部沙漠是东亚的主要沙尘源区, 强烈的气团活动可以将充足的沙尘卷入对流层并随气流远距离输送. 工业、农业生产活动的增加导致能量消耗的加剧, 引起人为气溶胶的快速增加<sup>[7]</sup>. SACOL 地处西北黄土高原半干旱区, 下垫面属于典型的黄土高原地貌, 塬面梁峁基本为原生植被. 距西北方向的中国第一大沙漠塔克拉玛干约 1500 km, 西南约 600 km 有青藏高原, 东南约 450 km 是邻近省市城市化环境, 东北与内蒙古的几大沙漠邻近. 远距离不同源区随气流传输的气溶胶都会改变影响途经地区的空气质量, 显然局地气溶胶含量变化与气团的来源和运行历史有关. 因此, 局地气溶胶组成是多种源共同作用的结果, 局地贡献和远距平流作用对气溶胶含量影响巨大.

研究一个地区受何时何地气溶胶输送的影响,

\* 国家自然科学基金 (批准号: 41075104) 和国家重点基础研究发展计划项目 (批准号: 2010CB428604) 资助的课题.

† E-mail: zhanglei@lzu.edu.cn

输送路径分析非常必要. 目前主要通过大气环流、地面气象场分析<sup>[8,9]</sup>和卫星遥感资料分析<sup>[10,11]</sup>, 但这两类分析方法并不能给出完整的气流运行轨迹, 后向轨迹追踪模式可以弥补这一缺陷, 实施三维轨迹模拟<sup>[12-15]</sup>. 此模式还用于 $\text{PM}_{10}$ <sup>[16-18]</sup>,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$ 等气体浓度研究<sup>[18,19]</sup>以及水汽通量输送的研究<sup>[20,21]</sup>.

为了研究气溶胶受何地沙尘气溶胶和污染物的影响, 本文利用美国大气和海洋局 (NOAA) 的 HYSPLIT v4.9 模式, 模拟了后向气流轨迹, 结合 3 年的气溶胶光学特性资料, 定量分析不同类型气团的特征和主要气团源对气溶胶总消光的贡献.

## 2 资料和方法

### 2.1 资料来源

兰州大学半干旱气候环境观测站 (The Semi-Arid Climate and Environment Observatory of Lanzhou University, SACOL) 位于中国西北半干旱地区 (35.57°N, 104.08°E), 海拔高度 1966 m, 距离西北方向的兰州市约 48 km<sup>[22]</sup>. SACOL 是按国际标准建设的气候观测平台, 拥有先进的气候与环境观测设备和仪器, 可以进行多种大气成分和气象要素观测实验.

多滤波旋转影带辐射计 (the multi-filter rotating shadowband radiometer, MFRSR) 是一个地基辐射观测仪器, 采用自动旋转影带技术可实现六个波段总水平辐射、散射水平辐射和直接辐射的光谱分解测定, 中心波长分别位于 413.8, 495.7, 613.4, 670.1, 869.5 和 936.4 nm, 带宽 10 nm. 仪器主要根据影带旋转遮挡天空有效视场, 分别进行四次不同角度的观测, 确定散射辐射和太阳直接辐射, 旋转影带要求仪器必须对准太阳位置. 仪器在白天以 1min 频率进行有效观测. 可利用不同波段的总辐射和散射辐射资料, 基于光谱消光法, 反演气溶胶光学特性<sup>[23,24]</sup>, 关于此反演方法已有较多的描述和应用<sup>[25-29]</sup>, 反演的气溶胶光学厚度, 95%的不确定性范围为 0.02—0.025<sup>[30,31]</sup>.

本文选取 2007 年 11 月至 2010 年 6 月, 870 nm 波段反演的大气气溶胶光学厚度 (aerosol optical depth, AOD) 和 440—870 nm 反演的波长指数.

### 2.2 后向轨迹追踪模式

Makra 等<sup>[17]</sup>指出在轨迹追踪研究中, HYSPLIT 模式较其他模式 (挪威大气研究所的 FLEX-PART 6.2 和美国环境保护署的 CALPUFF 5.8) 有更好的性能. 本文采用了 NOAA Draxler 等<sup>[32,33]</sup>质点轨迹、扩散及沉降综合模式系统 HYSPLIT\_4 (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated), 是一种欧拉-拉格朗日混合计算模式, 其平流和扩散计算采用拉格朗日方法. HYSPLIT v4.9 版本气流三维轨迹模式模拟分析气流路径的思路是假设空气中的粒子随风飘动, 粒子的移动轨迹就是其在时间和空间上位置矢量的积分. 气团的路径主要与流场形式、气压系统移动和地形特点有关. 气象场采用美国国家环境预报中心 (NCEP) 和美国国家大气研究中心 (NCAR) 的全球再分析资料, 水平分辨率为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ , 垂直共 17 层, 从地面到 10 hPa.

鉴于单条轨迹不确定性大且意义有限<sup>[34]</sup>, 反映气流特征更可靠的方法是对大量三维轨迹进行分类统计分析. 因此, 三维轨迹模拟时间从 2007 年 11 月到 2010 年 10 月, 选取每日 00:00 (UTC), 向后追踪 120 h, 轨迹起始高度选取距地 500 m 和 1500 m. 1500 m 高度被广泛的用于对流层自由大气的区域输送研究中<sup>[14,35,36]</sup>, 而气溶胶主要分布于边界层以内, 研究可选取 500 m 高度<sup>[17,37]</sup>.

### 2.3 轨迹分类方法

轨迹追踪可以分析某一地区受哪个方向气团影响, 按照轨迹路径最接近的原则把多条轨迹分组考虑. 本文采用 Draxler 等<sup>[38]</sup>提出的簇分析 (聚类) 方法, 聚类标准是每簇的空间方差 (spatial variance, SV) 为簇内每条轨迹与簇平均轨迹对应点的距离平方和, 总空间方差 (total spatial variance, TSV) 为各簇方差之和. 总方差增加最小时对应的簇分类就是最后结果. 计算 1h 间隔的距离函数, 时长为 120 h. 公式为

$$\text{SV}(k) = \sum_{i=1}^{m_k} \left( \sum_{j=1}^{120} D_{i,j}^2 \right), \quad (1)$$

其中

$$D_{i,j} = \sqrt{(x_{i,j} - \bar{x}_j)^2 + (y_{i,j} - \bar{y}_j)^2}, \quad (2)$$

$D_{i,j}$  为第  $k$  簇中第  $i$  条轨迹对应  $j$  时刻与该簇平均轨迹的距离,  $x$ ,  $y$  分别代表轨迹  $j$  时刻的经纬度,  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$  代表各簇平均轨迹的经纬度,  $m_k$  为第  $k$  簇的轨

迹总数.

$$TSV(k) = \sum_{k=1}^N SV(k), \quad (3)$$

$N$  为总簇数.

假设每条轨迹初始时刻总空间方差为零, 各自独立为一簇. 先计算所有可能组合的两簇的空间方差, 选择使合并后的总空间方差之和比合并前增加最小的两簇合并. 此过程持续进行直到所有轨迹合并为一个簇. 最终的分簇标准选取总空间方差第二次迅速增大之前的结果. 因为最初几步总空间方差迅速增加, 之后缓慢增加, 当分到一定数量后, 又迅速增大, 说明此合并簇已经非常不相似, 合并结束, 此合并之前的各簇即为分簇结果. 算出这几簇的平均轨迹, 就代表该研究点在分析时期的主要气流类型.

轨迹分类结果表明, 500 m 高度可分为 15 簇, 1500 m 高度分为 14 簇, 二者簇平均轨迹部分相似, 最大区别在东南方向, 500 m 高度分类更为细致. 考虑到气溶胶的垂直分布特征, 认为 500 m 高度对气溶胶有更大的影响, 以下选取此高度分类并结合气溶胶光学特性分析.

## 2.4 大气输送概率分布

利用轨迹途经区域的概率分布法对到达距地面 500 m 高度的大气输送路径特征和规律进行分析. 首先将水平空间网格化, 对 10—130°E 和 10—80°N 空间分为 1° × 1° 的网格, 然后针对选取的 1096 条轨迹, 统计每个网格内轨迹出现的

概率, 每条轨迹所经网格无论滞留时间长短, 均按一次计算. 考虑到长路径轨迹移动速度快的特点, 1 h 内气团可能横跨几个网格, 分析中将 1 h 的时间间隔内插到 0.1 h, 尽量减小时间上的误差. 将各网格内频数除以总网格总频数得到网格的输送概率分布场 TPF( $x, y$ ) (transportation probability field), 公式为

$$TPF(x, y) = \frac{\sum_{k=1}^{1096} P(x, y, k)}{\sum_{i=1}^{71} \sum_{j=1}^{121} \sum_{k=1}^{1096} P(i, j, k)}, \quad (4)$$

式中  $P(x, y, k)$  表示网格点 ( $x, y$ ) 对应第  $k$  条轨迹出现与否, 取值 1 或 0. 当轨迹  $k$  在此网格出现,  $P(x, y, k) = 1$ , 否则  $P(x, y, k) = 0$ .  $x$  取值范围 1 到 71,  $y$  取值范围 1 到 121.

## 3 结果与讨论

### 3.1 输送概率分布特征

采用 2007.11—2010.10 年后向轨迹追踪模式模拟结果, 分析 SACOL 大气输送概率场 (如图 1), 图中直观地显示了气团的主要来源地、方向和路径. 由于所有气团全部抵达研究站点, 所以其附近是高概率分布. 低层气流主要源于西北和东南方向, 概率分布最大. 气团的主要源地是东欧、中东东部、蒙古、孟加拉国和青藏高原等地区, 中亚和新疆既是源区也是气流途经地, 其他省区如内蒙古、四川、陕西、山西、河南等也是气团的主要源地, 邻近区域的影响主要是周围气团停滞打转的结果.

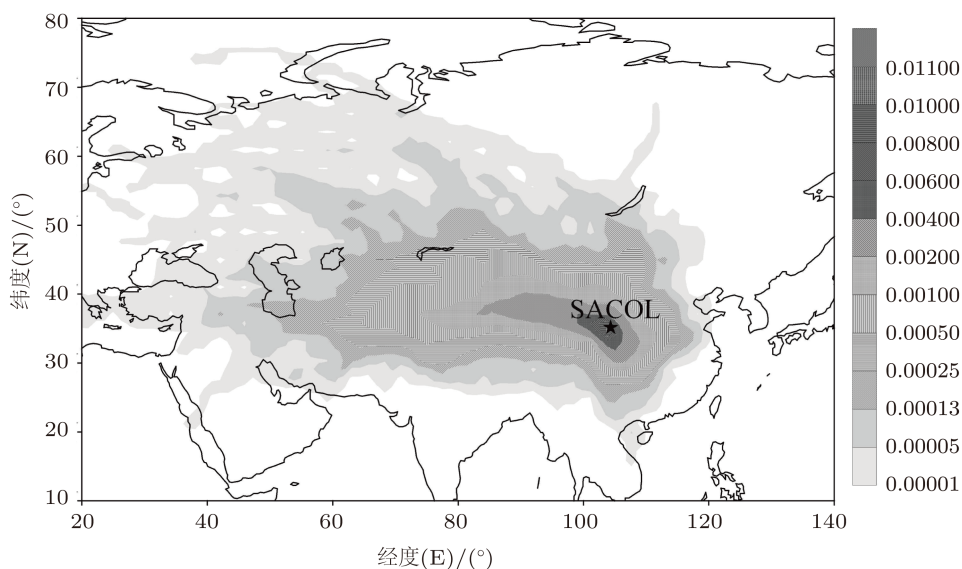


图 1 大气输送概率分布场

### 3.2 气流轨迹分类特征和气溶胶光学特性

根据聚类分析方法,将3年的1096条后向轨迹分为15簇,按照路径长短和轨迹方向将15簇平均路径概括为5类,见图2.图中灰色背景为2008—2009年的平均气溶胶光学厚度,资料源于Terra卫星携带的中分辨率成像光谱仪(MODIS)550 nm通道的反演产品,白色为无值区.较大的气溶胶光学厚度主要分布于中国东部沿海地区、塔克拉玛干

沙漠附近、印度、巴基斯坦,中亚南部和中东东部等.图2各类中包含不同源地的气团,部分包含多个源地.对应最大平均AOD的气团出现在春季和冬季,源于塔克拉玛干沙漠,为 $0.29 \pm 0.12$ (平均值 $\pm$ 标准差);最小平均AOD的气团出现在夏秋季,源于孟加拉国,为 $0.14 \pm 0.02$ ,这两簇的平均AOD与其他簇存在显著性差异,根据平均值的双尾T检验,二者的显著性水平均小于0.05.

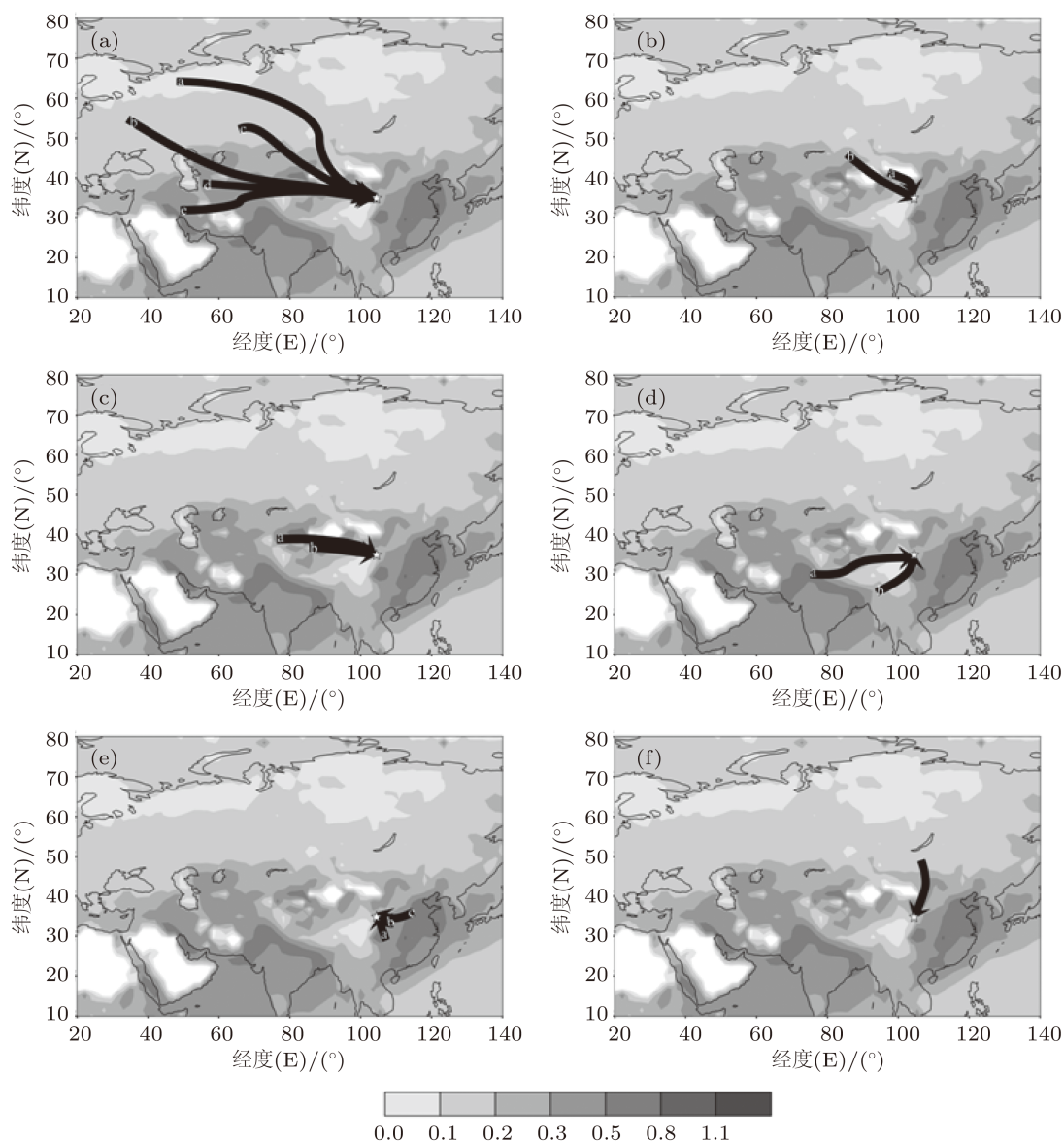


图2 后向轨迹簇方向分类图 (a)第1类A; (b)第1类B; (c)第2类; (d)第3类; (e)第4类; (f)第5类

第1类(图2(a)和(b))为西北方向,占总路径的35%,包括经过中东和中亚的路径,在到达SACOL之前,区分长短轨迹(长短轨迹的阈值为 $3000 \text{ km}^{[10]}$ ),试图量化不同区域路径输送的气

溶胶对研究站点的贡献率,如清洁区域、城市聚集区和戈壁沙漠等.第1类A(图2(a))为长路径,平均AOD范围在0.15—0.26之间,平均波长指数在0.62—1.01,说明气溶胶的不同源和混合类型.其

中 a 和 b 簇主要源于乌拉尔山以西和东欧, 仅占总路径数的 3%, 此路径气团具有移动快, 路径长, 起源于较高高度的特点, 在研究站点附近随气流下降, 完全来源于非背景区域, 带来相对清洁的空气, 平均 AOD 为  $0.20 \pm 0.07$ , 平均波长指数为  $0.78 \pm 0.26$ , 多出现在冬春季. c 簇占总路径的 3%, 源于中亚北部. a 簇和 c 簇路径位于乌拉尔山高压脊的前部, 沿高压脊伴随西北路冷空气南下, b 簇路径位于欧亚纬向气流中, 低槽东移伴随西路冷空气南下, 三条路径气团移动速度快, 可造成局地寒潮大风天气 [39].

第 1 类 A 中 d 簇初始为偏西路径, 起源于土库曼斯坦境内的大沙漠, 途经乌兹别克沙地以及塔克拉玛干沙漠, 这些均是沙尘气溶胶的主要源区, 出现频数为 8%, 平均 AOD 为  $0.26 \pm 0.14$ , 明显高于此类的其他簇, 平均波长指数为  $0.73 \pm 0.46$ , 多发生在冬季和秋季. 此路径沙尘气溶胶的输送应属偶然事件, 没有持续性的影响, 因为相比于其他簇, 有较大的平均 AOD 标准差 (详见表 1). e 簇始于黑海以南的伊朗, 虽然起始于年平均 AOD 较大的区域, 但是路径较长, 对应 SACOL 的平均 AOD 为  $0.15 \pm 0.05$ . 此路径途经阿富汗的部分地区, 之后类似 d 簇, 与 d 簇均是典型的偏西路径, 由于冬季高空急流南压, 中纬度西风带强盛, 引导冷空气沿偏西路径移动, 到达青藏高原受地形阻挡, 气流沿北麓绕流, 形成西北气流. 平均 AOD 是 SACOL 采暖期本底 AOD (平均为 0.1, 分别选取采暖期和非采暖期各 4 个降水事件之后的空气特征计算平均值作为本底值) 的 2 倍.

第 1 类 B (图 2(b)) 源自内蒙古西北部 (a 簇) 和新疆北部 (b 簇) 的较短路径. b 簇占总路径的 8%, 气流沿天山北麓南下, 途经西北戈壁沙漠和兰州市, 平均 AOD 为  $0.22 \pm 0.09$ , 波长指数为  $1.08 \pm 0.21$ , 主要发生在春夏季. 兰州市人口超过 300 万, 人为气溶胶是气溶胶主要来源之一, 对区域性气溶胶有效荷载起重要作用 [40]; 另一西北戈壁沙地的沙尘气溶胶, 对 AOD 也有贡献. 表明混合了沙尘粒子和污染型粒子的输送. a 簇平均 AOD 为  $0.20 \pm 0.08$ , 其他特征类似于 b 簇.

第 2 类 (图 2(c)) 气团源于偏西方向, 路径较短, 占总路径的 15%. a 簇起始于塔克拉玛干沙漠西部, 途经青海省西宁市, 平均 AOD 为  $0.25 \pm 0.15$ , 波长指数为  $0.93 \pm 0.48$ , 主要分布于秋季. 沙尘和人为气溶胶是主要贡献者. b 簇源自塔克拉玛干沙漠, 占

总路径的 8%, 多出现于春季和秋季, 路径类似 a 簇, 平均 AOD 较 a 簇大 0.04, 为所有路径最大值, 此类的最大特点是沙尘粒子的输送作用显著. 此外, 春季时值采暖期, 附近生物质燃烧对气溶胶的贡献不容忽视, 因此细粒子占有一定比重.

第 3 类 (图 2(d)) 为路径较短的西南气流, 主要受强的西风带急流和南支槽活动的影响, 占总路径的 8%. 其中 a 簇平均 AOD 为  $0.28 \pm 0.17$ , 波长指数为  $0.85 \pm 0.39$ , 多分布于春季和冬季, 来自印度北部沙漠、经青藏高原下来的气团, 经过青海高原, 虽然气流起始高度较高, 但已有研究表明青藏高原特别是藏北高原和青海高原都是重要的沙尘源区 [41], 大片的流动沙丘和大片荒漠化土地为高原沙尘暴的发生提供了充足的沙源, 可以抬升到西风带中, 成为远程传输最高效的沙尘源地之一 [42,43]. 所以此路径可能输送较多的沙尘, 导致研究站点气溶胶以粗粒子为主, 同样此路径沙尘气溶胶的输送应属偶然事件, 没有持续性的影响, 相比于其他簇, 有最大的平均 AOD 标准差. b 簇平均 AOD 为  $0.14 \pm 0.02$ , 波长指数为  $1.04 \pm 0.28$ , 为所有路径的最小值, 主要出现于夏秋季. 其主要受东亚夏季风的影响, 孟加拉湾水汽是西北地区降水的主要来源之一 [44], 而低空急流为形成降水提供条件 [45], 因而, 多云和降水天气较多, 有效的湿清除过程频繁发生, 再者原本夏季对流比较旺盛, 扩散条件有利, 气溶胶输送到 SACOL 附近, 稀释作用明显, 故在此气流路径的影响下, 局地气溶胶以细粒子为主.

第 4 类 (图 2(e)) 包括了局地 (当风速小, 气团在周围打转) 和区域性 (其他省市) 输送, 平均分三条路径. 其中 a 簇气团起源于四川省和重庆市, 为三条路径中平均 AOD 最大者, 占总路径的 16%, 主要出现于春夏季. b 簇起源于陕西省, 占总路径比例次之, 多分布于夏秋季. c 簇源于山西和河南省的交界处, 分布于冬季和夏季. 三类气团移动速度慢, 路径短, 共占总路径的 38%, 是影响 SACOL 气溶胶的主要路径. 平均 AOD 为  $0.22 \pm 0.10$ , 波长指数为  $1.29 \pm 0.34$ . 此类路径气团起源和途经部分城市人口密集区, 人为气溶胶输送明显; 夏秋季偏南和东南方向植被茂密, 分布面积大, 细粒子可能部分源于植被区.

第 5 类 (图 2(f)) 源于东北方向的蒙古戈壁, 途经腾格里和库布其沙漠, 是中国的重要沙尘暴源区之一 [46,47], 同时是 SACOL 的重要沙尘源, 虽然出现频数较少, 只占总路径的 4%, 但在此气流路



径影响下, 平均 AOD 可达  $0.26 \pm 0.09$ , 沙尘是气溶胶的主要贡献者. 因此, 如果环流形势利于此气流路径发生, 沙尘过程的发生概率

高. 此路径出现沙尘暴主要与经纬向环流调整过程和巴尔喀什湖附近出现高压脊有关 [48].

表 1 各簇轨迹特征、平均 AOD 和平均波长指数

分类	簇号	源地	路径特点	方向	百分率/%	平均 AOD	平均波长指数
	1	东欧		NNW	2	$0.21 \pm 0.08$	$0.94 \pm 0.42$
	2		远距离	WNW	1	$0.19 \pm 0.06$	$0.62 \pm 0.07$
	3	中亚北部	快速	NW	3	$0.23 \pm 0.07$	$0.87 \pm 0.37$
1	4	中亚西部沙漠		WNW	8	$0.26 \pm 0.14$	$0.73 \pm 0.46$
	5	中东东部		WNW	4	$0.15 \pm 0.05$	$1.01 \pm 0.23$
	6	内蒙古西北部		NNW	9	$0.20 \pm 0.08$	$1.25 \pm 0.40$
	7	新疆北部	近距离	NW	8	$0.22 \pm 0.09$	$1.08 \pm 0.21$
	8	塔克拉玛干西部		WNW	7	$0.25 \pm 0.15$	$0.93 \pm 0.48$
2	9	塔克拉玛干沙漠	近距离	WNW	8%	$0.29 \pm 0.12$	$0.89 \pm 0.59$
	10	印度北部沙漠, 青藏高原		W	6	$0.28 \pm 0.17$	$0.85 \pm 0.39$
3	11	孟加拉国	近距离	SW	2	$0.14 \pm 0.02$	$1.04 \pm 0.28$
	12	四川省, 重庆市	近距离	SSE	16	$0.21 \pm 0.08$	$1.39 \pm 0.38$
4	13	陕西省	近距离	SE	14	$0.21 \pm 0.08$	$1.18 \pm 0.49$
	14	山西, 河南省	近距离	ESE	8	$0.20 \pm 0.11$	$1.34 \pm 0.15$
5	15	蒙古戈壁, 腾格里沙漠	近距离	NNE	4	$0.26 \pm 0.09$	$0.76 \pm 0.31$

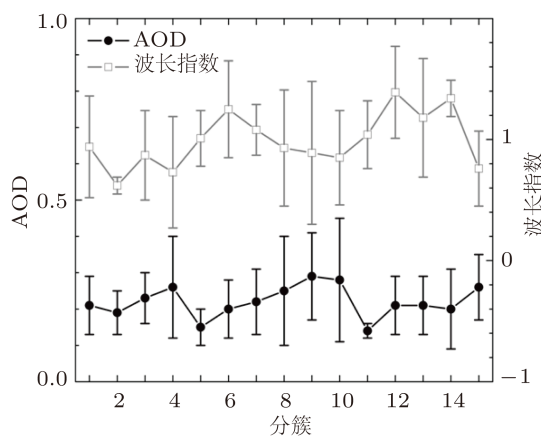


图 3 轨迹簇平均 AOD 和波长指数以及对应的标准偏差

气流轨迹分类后, 各簇对应的平均 AOD 和波长指数如图 3 所示, 对应的数值见表 1. 其中 AOD 最大值为第 9 簇, 对应波长指数值偏低, 气团源于塔克拉玛干沙漠, 是沙尘源的较近输送路径, 气溶胶以粗粒子为主. 第 10 簇来自印度北部沙漠和青藏高原的气团也有类似的特点. AOD 最小值为

第 11 簇, 波长指数大于 1, 二者值分布集中, 气团源于孟加拉国, 到达 SACOL 的气流经过部分城市上空, 气溶胶主要为细粒子. 与此相似的是第 5 簇, 但平均 AOD 偏大 0.01, 气团源于中东东部, 路径较长, 主要以细粒子为主. 第 12, 13 和 14 簇平均 AOD 值较接近, 气团均起源于近距离省市, 经过人口密集地区上空, 人为污染型气溶胶是主要成分. 其余不同源地气团的 AOD 介于第 9 和 11 簇之间. 此外, 第 4, 8, 9 和 10 簇的 AOD 和波长指数标准差较大, 表明这些路径输送的粒子性质差异大, 粗 (如沙尘) 细 (如城市污染型和生物质燃烧) 粒子比重区别显著, 极大的 AOD 事件并不常见, 没有持续性影响.

### 3.3 各簇平均 AOD 方差对总方差的贡献

方差表示样本相对平均值的总偏离程度, 图 4 为各簇方差对总方差的贡献. 第 10 簇贡献总方差的 25%, 比例最大, 气团主要源于印度北部沙漠和青藏高原; 其次为第 4 簇, 贡献总方差的 22%, 气团

主要源于中亚沙尘源区. 此两簇大气输送对局地气溶胶的影响差别较大, 除了源区和所经地区影响, 还与气流轨迹的高度、背景气溶胶以及局地气象条件有关. 在此气流作用下, 研究站点的 AOD 变化范围大, 偏离平均值最显著. 第 1 和 11 簇方差贡献最小, 气团分别源于东欧和孟加拉国. 东欧具有路径长、轨迹高度高的特点, 带来相对清洁的空气. 孟加拉国贡献较小方差的原因可能是源区大气较清洁, 途经区域大气质量稳定所致. 其余比例较大的均是气团源于或经过沙尘源区, 粒子性质差异大, 容易出现极大或极小值.

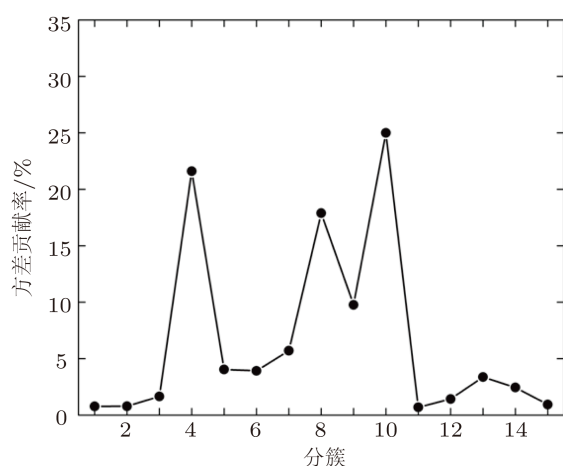


图 4 各簇方差对总方差的贡献

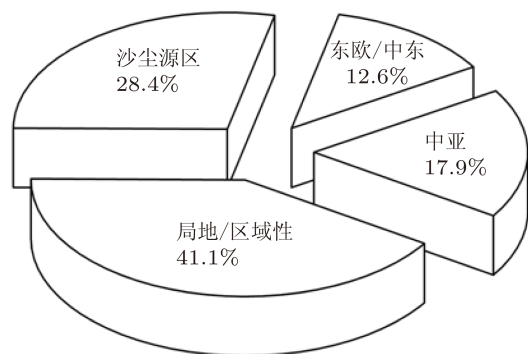


图 5 不同源区对平均 AOD 的贡献率

### 3.4 不同源区气团对平均 AOD 的贡献率

为了分析每一簇对总平均 AOD ( $AOD=0.22$ ) 的贡献率, 综合考虑每一簇气团源区的地理位置、轨迹特征、源类型和距离范围重新归类, 统计每一类中有 AOD 的天数和 AOD 值, 按照每一天贡献平均 AOD 的  $N$  分之一 ( $N$  为总天数), 计算每一类的总贡献率, 结果如图 5. 分为远距离较清洁源区东欧和中东 (包括第 1 类 A)、局地 and 区域性贡献 (局地

产生、附近生物质燃烧以及如内蒙古、新疆、四川、陕西、山西、河南和重庆部分城市的输送)、沙尘区 (塔克拉玛干沙漠、印度北部沙漠、青藏高原、蒙古戈壁、腾格里沙漠) 和中亚地区. 贡献最大的是局地和区域性气团, 可解释平均 AOD 的 41.1%, SACOL 低层 500m 高度受区域性气团影响最大, 气溶胶粒子源于这些区域的频数最高, 包括局地产生和城市污染型、生物质燃烧、植被区输送的气溶胶, 以细粒子为主; 另一个重要贡献是沙尘区, 贡献平均 AOD 的 28.4%, 仅次于上一类, 气溶胶以粗粒子为主; 中亚贡献 17.9%, 以混合型粒子输送为主, 包括沙尘和污染型气溶胶; 其余为东欧和中东的贡献.

## 4 结论

利用后向轨迹方法分析了 2007 年 11 月至 2010 年 10 月影响兰州大学半干旱气候环境观测站 (SACOL) 的气团源地、路径和气流方向, 为理解大气输送特征和局地气溶胶光学特性变化提供基础. 后向轨迹追踪 5 天可以更广泛的了解影响气流的来源地, 轨迹方向和移动速度, 分析某些轨迹所占比例, 可以归纳影响主次路径. 结合后向轨迹对应的气溶胶光学特性, 可以综合分析不同方向气流对气溶胶荷载的影响.

1. 2007 年 11 月至 2010 年 10 月三年的大气输送概率场表明, 影响 SACOL 的气团主要源于东欧、中东东部、蒙古、孟加拉国、青藏高原、内蒙古、四川、陕西和山西省等地区, 中亚和新疆既是源区也是途经地.

2. 利用轨迹聚类分析方法, 将影响 SACOL 的后向轨迹分为 15 簇. 其中源于塔克拉玛干沙漠的气团对应最大 AOD, 平均值为  $0.29 \pm 0.12$ , 沙尘粒子输送最为显著, 是 SACOL 的主要沙尘源区之一. 源于孟加拉国有最小 AOD, 平均为  $0.14 \pm 0.02$ , 此路径湿清除作用显著, 气溶胶以细粒子为主. 东欧和中东远距离传输影响下平均 AOD 为  $0.18 \pm 0.06$ . 气团源自中亚、蒙古戈壁、新疆北部、塔克拉玛干西部、印度北部沙漠和青藏高原共占总路径的 33%, 对应较大的平均 AOD, 路径输送的粒子性质差异大, 粗 (如沙尘) 细 (如城市污染型和生物质燃烧) 粒子均有一定比重, 极大的 AOD 事件 (如沙尘暴事件) 没有持续性影响, 属偶然事件. 局地和邻近省市占总路径的 47%, 比重最大, 为影响 SACOL

的主要气流路径, 路径输送以细粒子为主。

3. 源自印度北部沙漠和青藏高原的气团对应的平均 AOD 方差占总方差的比例最大, 达 25%, 对应局地气溶胶光学特性差别较大, 偏离平均值程度最大, 除了源区和所经地区, 还与轨迹的高度、季节、局地气溶胶与气象条件有关。

4. 分析不同源区对平均 AOD 的贡献率表明, 局地和区域性气团贡献最大, 约为平均 AOD

的 41%, 气溶胶包括局地产生和城市污染型、生物质燃烧、植被区的输送, 以细粒子为主; 沙尘区贡献平均 AOD 的 28%, 以粗粒子输送为主; 中亚地区贡献 18%, 气溶胶以粗细混合型粒子为主; 远距离的东欧和中东贡献 13%。

本文使用了兰州大学半干旱气候环境观测站 (SACOL) 辐射观测资料, 以及 NOAA 大气资源实验室 (Air Resources Laboratory) HYSPLIT 模式, 在此一并致谢。

- [1] McCormick R A, Ludwig J H 1967 *Science* **156** 1358
- [2] Coakley J A Jr, Cess R D, Yurevich F B 1983 *J. Atmos. Sci.* **40** 116
- [3] Twomey S A, Piepgrass M, Wolfe T L 1984 *Tellus B* **36** 356
- [4] Albrecht B A 1989 *Science* **245** 1227
- [5] Hansen J, Sato M, Ruedy R 1997 *J. Geophys. Res.* **102** 6831
- [6] IPCC 2007 *Intergovernmental Panel on Climate Change: Climate change 2007: Synthesis Report Valencia*, Spain, November 12–17, 2007 p72
- [7] Xia X A, Chen H B, Wang P C, Zong X M, Qiu J H, Philippe G 2005 *Tellus B* **57** 28
- [8] Su F Q, Ren Z H, Gao Q X, Zhang Z G 2004 *Res. Environ. Sci.* **17** 21 (in Chinese) [苏福庆, 任阵海, 高庆先, 张志刚 2004 环境科学研究 **17** 21]
- [9] Liu W D, Jiang Y H, Li J, Wang Z X, Wang Q 2010 *Clim. Envir. Res.* **15** 152 (in Chinese) [刘伟东, 江玉华, 李炬, 王正兴, 王强 2010 气候与环境研究 **15** 152]
- [10] Li C, Krotkov N A, Dickerson R R, Li Z Q, Yang K, Chin M 2010 *J. Geophys. Res.* **115** D00K03
- [11] Pierro M D, Jaeglé L, Anderson T L 2011 *Atmos. Chem. Phys.* **11** 2225
- [12] Wang Y, Chai F H, Liu H F, Wang Y H 2008 *Res. Environ. Sci.* **21** 22 (in Chinese) [王艳, 柴发合, 刘厚风, 王永红 2008 环境科学研究 **21** 22]
- [13] Zhang G X, Cui C X, Zhao Y M, Li J 2008 *J. Desert Res.* **28** 154 (in Chinese) [张广兴, 崔彩霞, 赵元茂, 李娟 2008 中国沙漠 **28** 154]
- [14] Markou M T, Kassomenos P 2010 *Atmos. Res.* **98** 438
- [15] Su L, Toon O B 2011 *Atmos. Chem. Phys.* **11** 3263
- [16] Borge R, Lumbreras J, Vardoulakis S, Kassomenos P, Rodríguez E 2007 *Atmos. Environ.* **41** 4434
- [17] Makra L, Matyasovszky I, Guba Z, Karatzas K, Anttila P 2011 *Atmos. Environ.* **45** 2630
- [18] Wang F, Chen D S, Cheng S Y, Li M J 2009 *Res. Environ. Sci.* **22** 637 (in Chinese) [王芳, 陈东升, 程水源, 李明君 2009 环境科学研究 **22** 637]
- [19] Zhao H, Wang T J, Jiang F, Xie M 2009 *J. Trop. Meteor.* **25** 181 (in Chinese) [赵恒, 王体健, 江飞, 谢旻 2009 热带气象学报 **25** 181]
- [20] Ma J J, Gao X Q 2006 *Plat. Mete.* **25** 893 (in Chinese) [马京津, 高晓清 2006 高原气象 **25** 893]
- [21] Strong M, Sharp Z D, Gutzler D S 2007 *Geophys. Res. Lett.* **34** L03404
- [22] Huang J P, Zhang W, Zuo J Q, Bi J R, Shi J S, Wang X, Chang Z L, Huang Z W, Yang S, Zhang B D, Wang G Y, Feng G H, Yuan J Y, Zhang L, Zuo H C, Wang S G, Fu C B, Chou J F 2008 *Adv. Atmos. Sci.* **25** 906
- [23] Harrison L C, Michalsky J J, Berndt J 1994 *Appl. Opt.* **33** 5118
- [24] Harrison L C, Michalsky J J, Berndt J 1994 *Appl. Opt.* **33** 5126
- [25] Michalsky J J, Liljegren J C, Harrison L C 1995 *J. Geophys. Res.* **100** 995
- [26] Alexandrov M D, Laci A A, Carlson B E, Cairns B 2002 *J. Atmos. Sci.* **59** 524
- [27] Alexandrov M D, Kiedron P, Michalsky J J, Hodges G, Flynn C J, Laci A A 2007 *Appl. Opt.* **46** 8027
- [28] Zuo H Y, Yang J G 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6132 (in Chinese) [左浩毅, 杨经国 2007 物理学报 **56** 6132]
- [29] Han Y, Wang T J, Rao R Z, Wang Y J 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7396 (in Chinese) [韩永, 王体健, 饶瑞中, 王英俭 2008 物理学报 **57** 7396]
- [30] Schmid B, Michalsky J J, Halthore R N, Beauharnois M, Harrison L C, Livingston J M, Russell P B, Holben B N, Eck T F, Smirnov A 1999 *Geophys. Res. Lett.* **26** 2725
- [31] Michalsky J J, Anderson G P, Barnard J C, Delamere J S, Gueymard C A, Kato S, Kiedron P W, McComiskey A, Ricchiazzi P 2006 *J. Geophys. Res.* **111** D14S90
- [32] Draxler R R, Hess G D 1998 *Aust. Meteor. Mag.* **47** 295
- [33] Draxler R R 1999 *NOAA Technical Memorandum ERL ARL-230* 1
- [34] Stohl A 1998 *Atmos. Environ.* **32** 947
- [35] Matthias V, Balis D, Bösenberg J, Eixmann R, Iarlori M, Komguem L, Mattis I, Papayannis A, Pappalardo G, Perrone M R, Wang X 2004 *J. Geophys. Res.* **109** D18201
- [36] Gerasopoulos E, Amiridis V, Kazadzis S, Kokkalis P, Eleftheratos K, Andreae M O, Andreae T W, El-Askary H, and Zerefos C S 2011 *Atmos. Chem. Phys.* **11** 2145
- [37] Xia X A, Chen H B, Zhang W 2007 *Atmos. Environ.* **41** 7739
- [38] Draxler R R, Stunder B, Rolph G D, Stein A F, Taylor A 2011 [http://www.arl.noaa.gov/documents/reports/hysplit\\_user\\_guide.pdf](http://www.arl.noaa.gov/documents/reports/hysplit_user_guide.pdf)
- [39] Zhu Q G, Lin J R, Shou S W, Tang D S 2008 *Principles and methods of synoptic meteorology* 4 (Beijing: China Meteorological Press) pp273—292 (in Chinese) [朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 唐东昇 2008 天气学原理和方法 4 (北京: 气象出版社) 第 273—292 页]
- [40] Li X, Zhang L, Cao X J 2010 *J. Lanzhou Univ. (Natural Sciences)* **46** 56 (in Chinese) [李霞, 张镭, 曹贤洁 2010 兰州大学学报 (自然科学版) **46** 56]
- [41] Fang X M, Han Y X, Ma J H, Song L C, Yang S L, Zhang X Y



- 2004 *Chin. Sci. Bull.* **49** 1084 (in Chinese) [方小敏, 韩永翔, 马金辉, 宋连春, 杨胜利, 张小曳 2004 科学通报 **49** 1084]
- [42] Han Y X, Xi X X, Song L C, Ye Y H, Li Y H 2004 *J. Desert Res.* **24** 588 (in Chinese) [韩永翔, 奚晓霞, 宋连春, 叶燕华, 李耀辉 2004 中国沙漠 **24** 588]
- [43] Yan H, Zhang J H, Zhao Y P, Zhang G P, Li C X 2006 *J. Desert Res.* **2** 932 (in Chinese) [延昊, 张佳华, 赵一平, 张国平, 李才兴 2006 中国沙漠 **2** 932]
- [44] Wang B J, Huang Y X, He J H, Wang L J 2004 *Plat. Mete.* **23** 912 (in Chinese) [王宝鉴, 黄玉霞, 何金海, 王黎娟 2004 高原气象 **23** 912]
- [45] Chen D D, Dai Y J 2009 *Sci. Atmos. Sin.* **33** 1247 (in Chinese) [陈冬冬, 戴永久 2009 大气科学 **33** 1247]
- [46] Tsaia Y I, Chen C-L 2006 *Atmos. Environ.* **40** 4734
- [47] Fu P J, Huang J P, Li C W, Zhong S R 2008 *Atmos. Environ.* **42** 5896
- [48] Zhao C G, Liu H Z 2004 *J. Appl. Meteor. Sci.* **15** 245 (in Chinese) [赵翠光, 刘还珠 2004 应用气象学报 **15** 245]

# Analysis of aerosol sources and optical properties based on backward trajectory method over SACOL\*

Li Xia Zhang Lei<sup>†</sup>

(Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

(Received 7 August 2011; revised manuscript received 18 September 2011)

## Abstract

Backward trajectories computed using the NOAA HYSPLIT model and global NOAA-NCEP/NCAR pressure level reanalysis data from November 2007 to October 2010, are used to trace air history and analyze the atmospheric transportation properties over SACOL. The cluster analysis has the advantage of providing highly disaggregated trajectory clusters, from which fifteen significant clusters arriving at the SACOL, which reflect the main feature of air mass trajectories, are obtained during this period. It is found that the air mass trajectories from Sichuan province and Chongqing account for 16% of all trajectories and have the biggest influence, those from local and Shanxi province have the second biggest influence, and those from the Eastern Europe and Bangladesh have the smallest influence. The Aerosol Optical Depth (AOD) at 870nm and Ångström exponent acquired by a Multi-Filter Rotating Shadowband Radiometer (MFRSR) at SACOL are employed to analyze aerosol optical properties and particle characteristics under the control of different air mass sources. The maximum average AOD of  $0.29 \pm 0.12$  (mean  $\pm$  standard deviation of mean) corresponds to the air mass originating from Taklimakan Desert, whereas the minimum average AOD is  $0.14 \pm 0.02$  from Bangladesh. According to ambient conditions of the studied site and the geographical conditions and moved track of air mass, the quantitative contributions of different sources to the three-year average AOD of 0.22 are investigated. The results show that the greatest contribution to the average AOD, accounting for almost 41.1%, came from local and regional sources, an additional important contribution from dust areas is about 28.4% of the average AOD, the contribution from the Central Asia source occupies 17.9%, that from Eastern Europe and Middle East is 12.6%.

**Keywords:** backward trajectories, cluster analysis, aerosol optical depth, Ångström exponent

**PACS:** 34.10.+x, 92.60.Mt, 42.68.Jg

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No.41075104), and the National Basic Research Program of China (Grant No. 2010CB428604).

<sup>†</sup> E-mail: zhanglei@lzu.edu.cn