

翁之梅,李丽平,杨万裕,等. 2016. 浙江省冬季不同霾过程的后向气流轨迹及环流特征. 气象, 42(2):183-191.

# 浙江省冬季不同霾过程的后向 气流轨迹及环流特征<sup>\*</sup>

翁之梅<sup>1,2</sup> 李丽平<sup>1</sup> 杨万裕<sup>2</sup> 刘力源<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 南京信息工程大学大气科学系, 南京 210044

<sup>2</sup> 台州市气象局, 台州 318000

**提 要:** 根据 1981—2013 年浙江省地面气象观测资料对浙江省冬季霾的时空分布特征进行分析发现, 20 世纪 80 年代中期起冬季霾呈显著上升趋势; 空间分布总体特征表现为北多南少、西多东少, 盆地平原多、丘陵岛屿少。利用  $K$ -均值聚类法将近 33 年冬季的主要霾过程分为盆地-平原型和全省型两类, 其中超过 62% 的个例表现为盆地平原型, 该型以 12 月发生比例最高; 全省型霾过程在 12 和 1 月均多发。从气流输送及冷空气强度、垂直运动和干区分布等大气环流背景条件方面对比两类霾过程的形成机理差异发现: 盆地-平原型冬季霾多在北方冷空气南下, 浙江省受较强冷高压和下沉气流控制时形成, 气流来自高纬度; 全省型冬季霾则在变性减弱的冷高控制下, 下沉气流较弱、不利本地污染源扩散的情况下发生。

**关键词:** 冬季霾, 气候特征,  $K$ -均值聚类, 后向气流轨迹

**中图分类号:** P427

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.02.006

## Backward Trajectory and Circulation Features in Different Haze Processes in Winter of Zhejiang

WENG Zhimei<sup>1,2</sup> LI Liping<sup>1</sup> YANG Wanyu<sup>2</sup> LIU Liyuan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> College of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

<sup>2</sup> Taizhou Meteorological Office of Zhejiang Province, Taizhou 318000

**Abstract:** Based on available observation data of Zhejiang Province for the period from 1981 to 2013, temporal and spatial distribution characteristics of winter haze in Zhejiang Province were analyzed. The results show that haze days have increased significantly since the mid-1980s. Haze days in the northern and western part of the province are much more than the south and the east, also more in the basin and plain than on the hills and islands. The division of the haze distribution pattern is obtained according to the  $K$ -means clustering analysis, which shows the pattern can be divided into two categories. The first category accounts for 62% of the total haze, most of which happens in December, while most of the second category usually appears in January and December. In the end, according to the NCEP/NCAR reanalysis data, the different atmospheric circulation features, including the strength of cold high, vertical velocity and the distribution of water vapor, are discussed for the two kinds of haze patterns respectively. It is found that Zhejiang Province is controlled by cold high from northern China and the sinking airflow in the first haze pattern. In the second haze pattern, however, the cold high has transformed, and the sinking flow is also weakened, which makes air move slowly, so it is hard for pollutants to dissipate.

**Key words:** winter haze, climate characteristic,  $K$ -means cluster, backward trajectory

\* 台州市社会发展科技项目(14SF01)和国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2015CB453200)共同资助

2015 年 4 月 24 日收稿; 2015 年 6 月 15 日收修定稿

第一作者: 翁之梅, 主要从事短期天气预测与气候统计研究. Email: amander1116@163.com

## 引 言

近年随着我国工业化、城镇化的推进,能源消耗持续增加,各地空气质量下降,霾天气增多。对污染事件的提前预(警)报成为社会生产生活的普遍需求。目前,大气污染物主要分为有害气体及颗粒物。《霾的观测和预报等级》(中国气象局,2010)中定义大量极细微的干尘粒等均匀地浮游在空中,使水平能见度小于 10.0 km 的空气普遍混浊现象即为霾。气象学者在霾的变化规律、空间分布和形成条件等方面做了许多有意义的研究。

国内华南地区对霾的分析起步较早。刘爱君等(2004)通过多年观测资料对广州霾天气气候特征及成因进行了分析。吴兑(2005;2008)、吴兑等(2006;2014a)先后讨论了霾与雾的区分判据、能见度下降与细颗粒物的关系、资料分析处理方法、预报预警的发布等工作。伍红雨等(2011)采用统计诊断方法分析了华南霾日、雾日的时空特征和变化。夏冬等(2013)利用大气成分要素和气象资料分析了珠三角地区热带气旋外围连续灰霾天气成因和变化。陈林等(2013)讨论了广州亚运会期间华南区域大气质量状况及气象条件对区域本底浓度值的影响。2007 年以后华东地区也加强对霾天气的关注。靳利梅等(2008)研究分析了上海近 50 年雾和霾日数时空分布气候特征及变化规律。牛彧文等(2010)对 20 世纪 50 年代以来浙江省 11 个城市的霾历史数据进行分析。史军等(2010)基于 MODIS 气溶胶光学厚度数据分析了华东雾、霾日数的气候变化特征及成因。齐冰等(2012)对主要天气形势、典型气象要素及环境污染下杭州霾天气特征及形成机制进行了研究。过宇飞等(2013)对无锡市霾天气演变特征、气象要素特征及其影响因素进行了分析。刘梅等(2014)和于庚康等(2015)对 2013 年 1 月江苏雾霾天气持续和增强机制展开了讨论。另外,华北地区的霾天气也是气象学者讨论研究的热点之一。魏文秀(2010)在分析河北省霾时空特征基础上归纳了霾日 500 hPa 环流形势 5 种类型。侯灵等(2012)讨论了环北京地区空气污染指数、降水等气象要素的变化特征,并论证气溶胶对降水的影响。姚青等(2012)从气象条件、污染演化过程和气流后向轨迹等方面分析了一次天津灰霾事件的起因。吴兑等(2014b)使用矢量和算法分析环首都圈典型霾个例气流停滞区的形

成过程。曹伟华等(2013)利用高分辨率观测资料分析了一次持续性雾霾过程中气象因素和气溶胶的演变特征。熊亚军等(2015)、花丛等(2015)和张英娟等(2015)分别对北京地区霾等级预报和京津冀持续性霾的气候特征进行了研究。同时,周宁芳等(2008)、高歌(2008)、胡亚旦等(2009)和吴兑等(2010)相继对全国霾的气候特征开展了深入的分析。

浙江省地处长三角地区南部,2000 年以后,各地区霾天数都在迅速增加,同时受到地形地貌与城市化进程差异的影响,霾天气空间分布差异大。然而,目前对浙江省霾过程空间分布型及环流形势的研究仍较少,有必要对其进行分析探讨。通过统计得到冬季为浙江省霾发生频率最高的季节,因而选取冬季作为分析研究对象。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料

采用浙江省气象台站 1981—2013 年的地面气象观测资料,包括能见度、相对湿度及天气现象等。其中嘉善、上虞、三门因 20 世纪 90 年代能见度资料存在长时间缺测,未列入统计范围。剔除缺测站点后筛选得到全省 65 个要素和时次完整稳定的台站(图 1a)。因台站级别不同造成浙江省 65 个站点中 50%以上站点的 02 时观测资料缺测,统一使用 08、14 和 20 时资料进行计算处理。

环流特征分析采用 1981—2013 年 NCEP/NCAR 全球再分析高度场、风场、相对湿度、气压场和垂直速度资料,空间分辨率为  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ,垂直方向共 13 层。

### 1.2 方法

为了解霾日的长期变化趋势,常用的霾日统计方法包括单次值法、日均值法、14 时值法 3 种。吴兑等(2014a)通过比较发现日均值法更多地显示长时间大范围的霾天气过程,因此文中采取日均值方法,定义当日均能见度小于 10 km,日均相对湿度小于 90%,并排除降水、吹雪、雪暴、扬沙、沙尘暴、浮尘和烟幕等其他能导致低能见度事件的情况为一个霾日。

分析霾时间变化特点时使用 Mann-Kendall 方

法统计检验了霾日变化趋势。讨论霾空间分布时,将浙江省 65 个站点按地貌类型分为杭嘉湖平原(11 站)、宁绍平原(7 站)、金衢盆地(11 站)、浙西丘陵(6

站)、浙东丘陵(7 站)、浙南丘陵(10 站)、东南沿海平原(9 站)和舟山群岛(4 站)共计 8 个区域(王镇铭等,2013),分区域进行霾日统计(图 1b)。

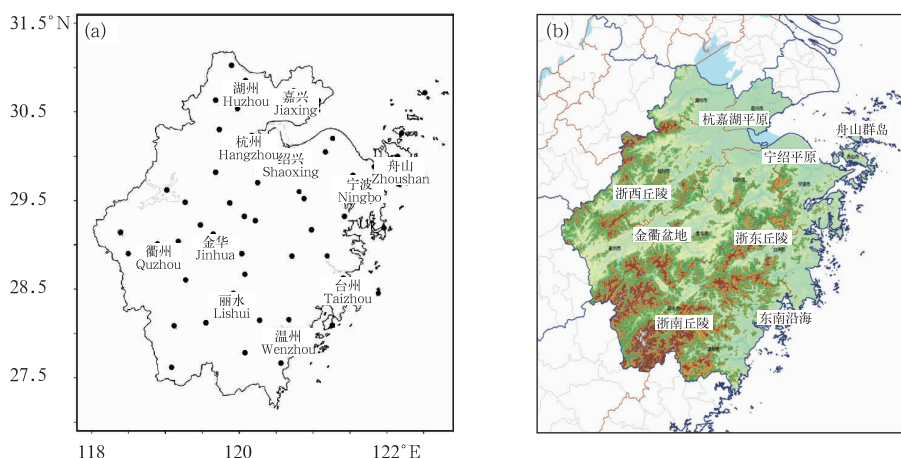


图 1 浙江省地级市名称与 65 站分布(a)及地形分布(b)

Fig. 1 The distribution of 65 weather stations and prefecture-level cities (a) as well as the variety of landforms (b)

## 2 冬季霾气候特征

### 2.1 时间变化特征

高歌等(2008)、俞科爱等(2015)和吴兑等(2010)研究指出我国经济较为发达的长江中下游、江南地区以及宁波地区霾日增长幅度大,且趋势显著。从浙江省 65 个站点的平均霾日年际变化曲线(图 2a)发现:33 年间浙江冬季霾日呈  $2.67 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$  的速度增

长,相关系数 0.57,通过了 0.001 显著性水平检验。20 世纪 80 年代,年霾日较常年偏少;20 世纪 90 年代霾日数基本在平均值附近波动;进入 21 世纪以后,霾日数波动幅度加大,增长较为明显。

为分析冬季霾日数的波动幅度变化,使用 Mann-Kendall 方法计算讨论时间序列的突变(图 2b),由  $UF$  曲线可见 20 世纪 80 年代中期以来,年霾日有明显的增加趋势。20 世纪 90 年代后期起该增加趋势超过显著性水平  $\alpha=0.05$  临界线,表明增加趋势十分显著;同时  $UF$  线与  $UB$  线相交

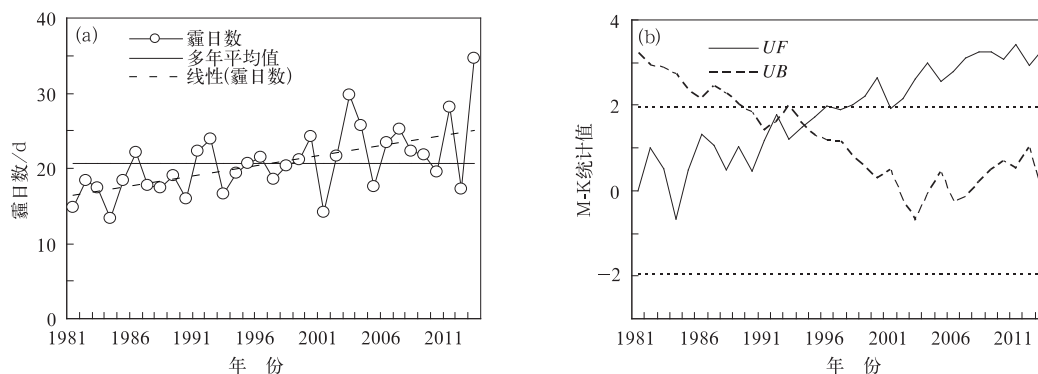


图 2 1981—2013 年冬季浙江省多站平均霾日年际变化(a)及 Mann-Kendall 统计量曲线(b,虚直线为  $\alpha=0.05$  显著性水平临界值)

Fig. 2 Annual variation of autumn haze days in 1981—2013 (a) and the Mann Kendall rank statistics curves (b, Dotted line is the shreshold of significance level  $\alpha=0.05$ )

于 1995 年,表明 1995 年是霾增多的突变点。研究认为(史军等,2010;过宇飞等,2013)大气污染物排放量增加与风速、相对湿度、雨日和气温等气象要素的变化可能是造成霾日增多的主要原因。

## 2.2 空间分布特征

浙江省山地和丘陵占总面积七成。山体对近地层颗粒物输送的阻挡作用以及地区间城市化水平的差异造成冬季霾日数分布存在明显地域差异。

从 33 年平均冬季霾日的空间分布(图 3a)可见,霾分布具有北部多南部少、西部多东部少的总体特点。金衢盆地、杭嘉湖平原西部和宁绍平原西部

霾日频数明显高于其他地形区。冬季霾日数大于 40 d 的站点分别为位于杭嘉湖平原的西北部和金衢盆地,其中,金华兰溪站冬季平均霾日数最多,达 52.6 d。霾日数在 10 d 以下的站点分别为位于浙南丘陵和舟山群岛,其中庆元站霾日最少,仅 0.7 d。

分类统计各地貌类型的霾日分布(图 3b),可见冬季的霾日数按盆地、平原、丘陵、沿海岛屿的地形分布依次减少;霾日频数最高的区域为金衢盆地,盆地内 11 站点平均霾日超过 38 d;其次为杭嘉湖平原、宁绍平原。霾日最少区域为舟山群岛,平均霾日数不足 10 d。省内各丘陵地区中浙南丘陵霾日最少,浙西丘陵霾日最多。

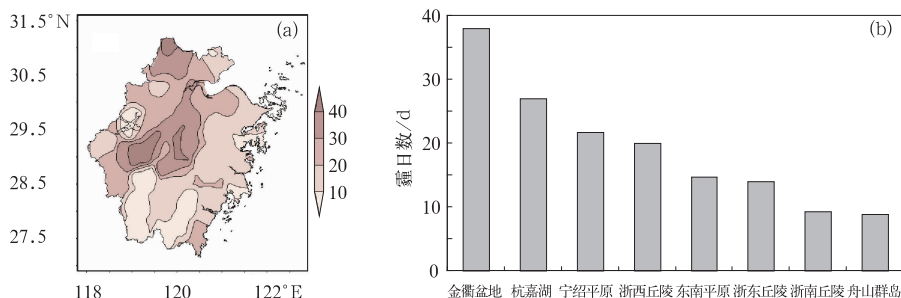


图 3 浙江省多年平均冬季霾日分布(a)及各区域冬季霾日数(b)

Fig. 3 Annual mean winter haze days in Zhejiang (a) and winter haze days of different landforms (b)

## 3 冬季霾过程典型分布型

2.2 节分析发现浙江省冬季霾分布具有显著的地域性,但由于该特征是 33 年冬季的平均状态,难以表现每次霾天气过程的空间分布,同时从预报业务角度来看,对霾过程进行空间分型是具有实际指导意义的。因此,利用 K-均值法对 1981—2013 年冬季浙江省 65 个站点中 30% 以上出现霾的 848 个个例进行空间分类。

### 3.1 聚类分析与分类数的确定

K-均值算法是聚类分析中最常用的算法之一。为避免人为确定聚类数 K 对结果产生的影响,使用 Dudoit 等(2002)提出的 Silhouette(Sil)指标评价 K 取值的有效性。

设  $a(t)$  为聚类  $C_j$  中的样本  $t$  与类内所有其他样本的平均不相似度或距离,  $d(t, C_i)$  为样本  $t$  到另一个类  $C_i$  的所有样本的平均不相似度或距离,则  $b(t) = \min\{d(t, C_i)\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, k, i \neq j$ 。Sil 指

标计算每个样本与同一聚类中样本的不相似度以及与其他聚类中样本的不相似度,其每个样本  $t$  的计算公式如下:

$$Sil = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{a(i), b(i)\}}$$

Sil 指标反映了聚类结构的类内紧密型和类间分离性。指标值在  $[-1, 1]$  变动, Sil 指标值越大表示聚类质量越好,其最大值对应的类数为最佳聚类数,同时 Sil 值在负数的个数越少聚类效果越好。利用以上指标对 848 个霾日计算分析得到在 2~7,  $K=2$  是最佳聚类数。

### 3.2 空间分布聚类结果

K-均值法将 33 年来冬季霾过程进行客观分型,划分出图 4 所示两种分布型:第一型是平原-盆地型,共有个例 530 例,超过总数的 60%。该型全省平均有 44.6% 的站点出现霾,基本分布在浙江西北部地区的浙北平原和金衢盆地,该类型多发于 12 月,12 月个例约占该类总数 45%。第二型是全省型,含 317 个霾过程。该型全省平均有 60.3% 的站

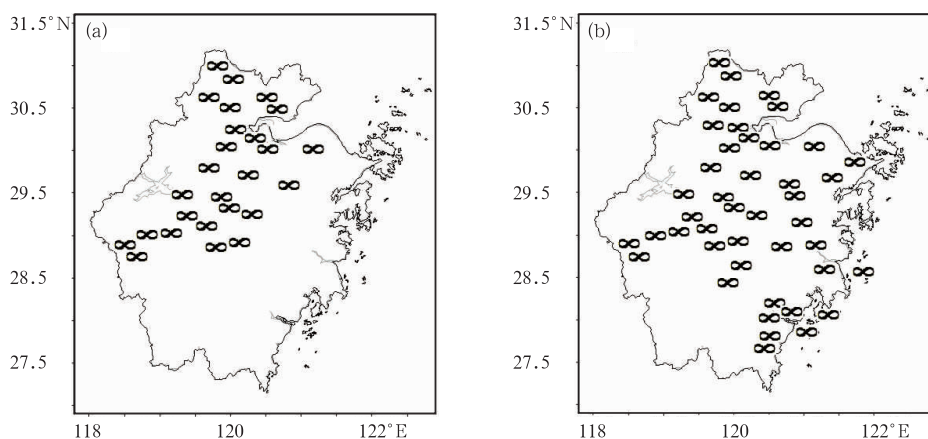


图 4 聚类分析对应的两种霾分布型

(a)平原盆地型, (b)全省型

Fig. 4 The haze patterns based on the cluster analyses

(a) plain-basin pattern, (b) all over pattern

点出现霾天气,除舟山群岛和浙南丘陵外,其他地区基本都出现了霾,该类型多发于 1 和 12 月。

#### 4 典型过程后向气流轨迹分析

霾由大量浮游在空中的细微干尘粒造成。蒋维楣等(2012)指出空气污染物排放进入大气层,首先

受大气边界层湍流活动支配。大气边界层与人类活动的关系最密切、最直接,空气污染问题亦主要发生在这一层中。为研究平原盆地型与全省型霾过程的形成机理差异,对两类过程边界层气流的来源进行比较。选取 847 个霾日中与各自聚类中心距离最小的过程各 4 例,分别为第一类的 2000 年 1 月 29 日、2000 年 12 月 18 日、1986 年 12 月 9 日和 2011 年 12

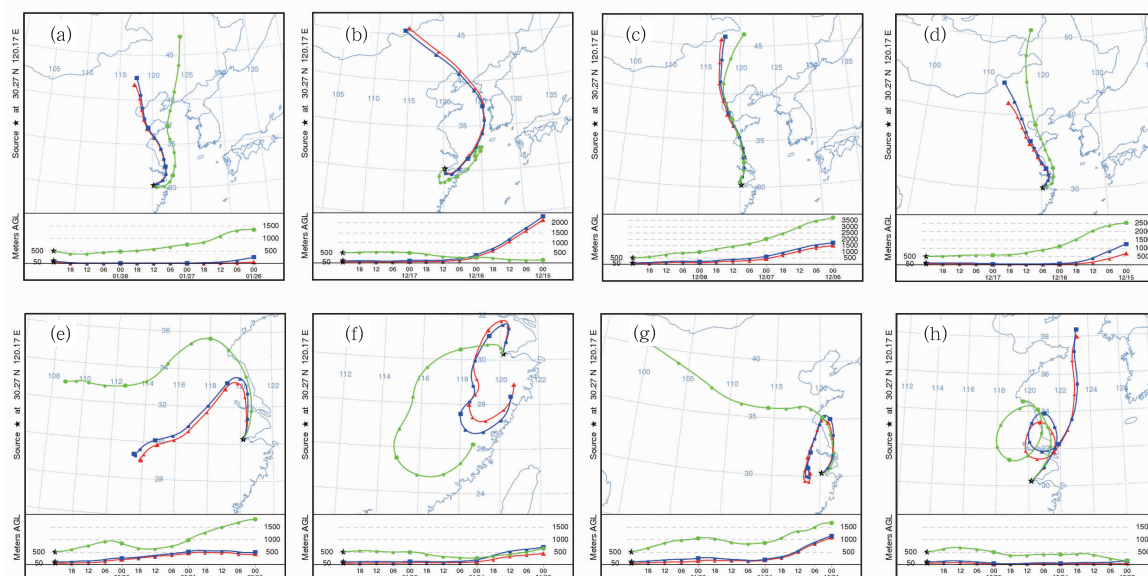


图 5 典型霾过程后向气流轨迹模拟

(a)2000 年 1 月 29 日, (b)2000 年 12 月 18 日, (c)1986 年 12 月 9 日, (d)2011 年 12 月 18 日,  
(e)2008 年 2 月 23 日, (f)1996 年 1 月 6 日, (g)2010 年 1 月 3 日, (h)2005 年 12 月 26 日

Fig. 5 The simulation of back-trajectories of typical haze process

(a) 29 January 2000, (b) 18 December 2000, (c) 9 December 1986, (d) 18 December 2011,  
(e) 23 February 2008, (f) 6 January 1996, (g) 3 January 2010, (h) 26 December 2005

月 18 日及第二类的 2008 年 2 月 23 日、1996 年 1 月 6 日、2010 年 1 月 3 日和 2005 年 12 月 26 日。后向气流轨迹计算应用了美国国家海洋和大气管理局研制的 HYSPLIT4.8 即拉格朗日混合单粒子轨道模型 (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model)。轨迹起点设置在离地面 50、100 和 500 m 高度 (分别对应图 5 红色、蓝色、绿色线条)。对比两类过程的 72 h 后向气流轨迹, 可以发现气流来源和气团性质具有明显差别。

从第一类 (平原盆地型) 霾过程的后向轨迹图 (图 5a~5d) 中可以看出, 4 次过程发生前 72 h 气团都位于  $40^{\circ}\text{N}$  以北的东北地区, 此后路径呈明显的经向型自北向南运动, 先后经过华北、华东北部。气团南下过程中都出现下沉运动。可见来自北方的冷空气南下伴随着下沉运动使得近地层大气层结稳定, 有利于北方污染物的输入、抑制本地污染物的扩散, 在特殊地形共同作用下, 污染物在西北部的平原与盆地积聚。

第二类 (全省型) 霾过程 (图 5e~5h) 中, 4 次过程发生前 72 h 内气团移动路径均呈顺时针旋转, 表

明霾发生前气团处于高压反气旋流场的控制之中; 相对第一型, 气团的经向运动不明显。从垂直运动来看, 气团下沉运动相对第一型弱, 整个过程甚至出现阶段性上升运动, 可见控制华东地区的冷高强度不强或已发生变性; 前 48 h 气团均位于浙江省附近, 且 4 次过程霾发生前 24 h 内气团均移动经过江苏省, 表明气流来源于本地或周边省份, 气团在弱高压控制下移动速度小, 不利本地污染物的扩散。

## 5 不同类型霾相应环流特征分析

大气扩散的理论研究和试验研究表明, 不同的气象条件下, 同一污染源排放所造成的地面污染物浓度可相差几十倍乃至几百倍 (蒋维楣等, 2012)。天气现象与气象状况都是在相应的天气形势背景下产生的, 第四节后向气流轨迹分析也表明两类过程的形成机理存在天气尺度的差异, 所以对两种冬季霾过程分别进行大气环流合成, 以期总结得到两种霾过程的天气环流形势模型。图 6 为冬季 (12 月至次年 2 月) 平均环流场。

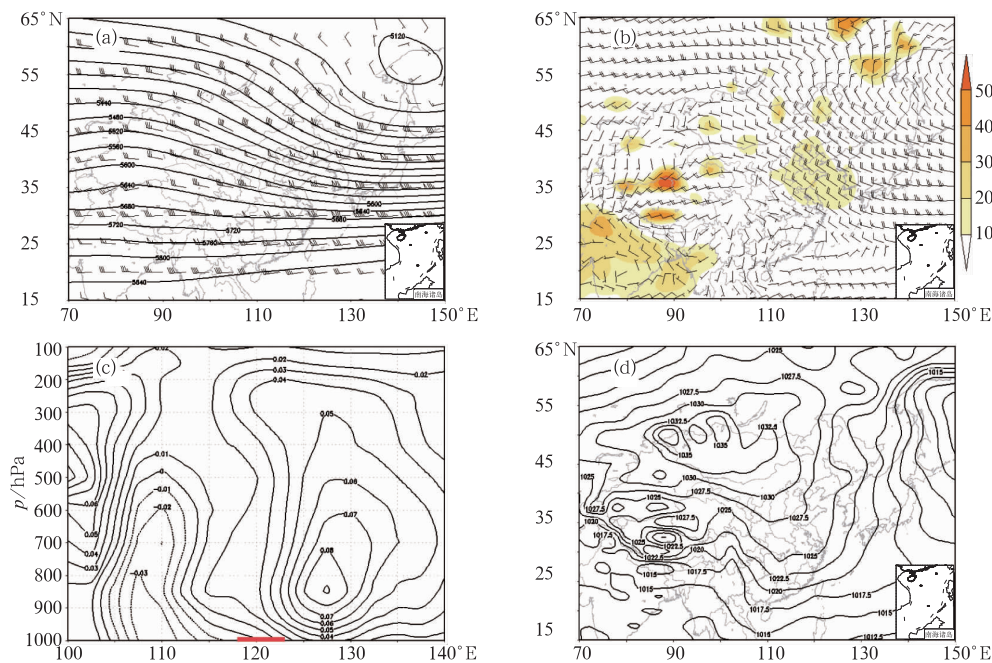


图 6 冬季平均环流特征

(a) 500 hPa 高度场 (单位: gpm) 及风场, (b) 850 hPa 风场及相对湿度场 (单位: %, 阴影部分相对湿度小于 50%), (c) 垂直速度场 (单位:  $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ), (d) 地面气压场 (单位: hPa)

Fig. 6 The climatological circulation characteristics of winter

(a) 500 hPa geopotential height (unit: gpm) and wind field, (b) 850 hPa wind and relative humidity field (unit: %), (c) vertical velocity (unit:  $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ), (d) sea level pressure (unit: hPa)

对第一型(平原盆地型)的 530 个过程和第二型(全省型)的 317 个过程分别进行环流合成对比分析,可以发现:

第一型(图 7):500 hPa 在  $30^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$  为宽广的高度场正距平区,说明东亚大槽偏弱,青藏高原北部脊偏强;从风场上看,华东地区北部距平风场为东北风,表明北风分量偏强,浙江省上空距平风场为偏东风,表明西风分量偏弱。从 850 hPa 风场和湿度场来看,华中、华东地区及黄渤海海区上空的距平风场

为西南风,表明上述区域北风分量偏弱;黄海和东海海面、华东、华南东部相对湿度偏低。在地面图上(图 7d),贝加尔湖及以北地区、我国的东北、华北及华中北部为气压负距平,表明控制北方地区的冷高势力偏弱,而西南、华南、东南沿海地区、西北太平洋沿海为气压正距平,表明冷高偏强,浙江省也处于弱正距平区。同时从垂直速度距平图(图 7c)可见  $110^{\circ}\sim 115^{\circ}\text{E}$  上升运动偏强,  $115^{\circ}\sim 135^{\circ}\text{E}$  下沉速度偏强。因此控制浙江省的冷高偏强、下沉速度偏大。

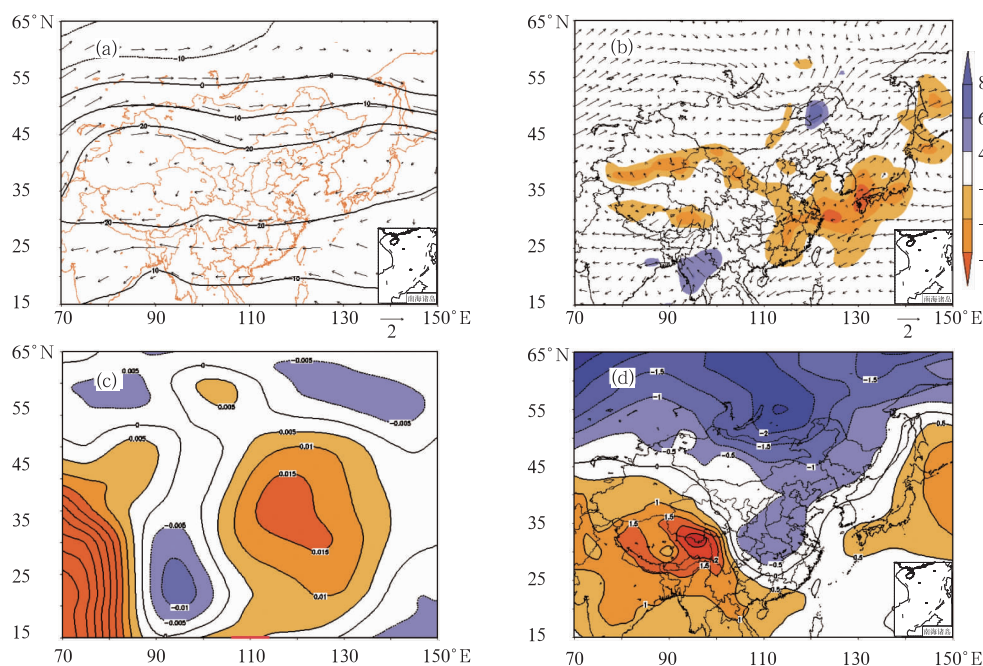


图 7 第一型(平原盆地型)霾过程合成环流特征距平场

(a)500 hPa 高度场距平(等值线,单位:gpm)及距平风场(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), (b)850 hPa 距平风场(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )及相对湿度距平场(阴影:相对湿度小于 50%,单位:%), (c)垂直速度距平沿  $30^{\circ}\text{N}$  剖面(阴影:垂直运动速度距平绝对值大于 0.005,单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ), (d)地面气压场距平(阴影:气压距平绝对值大于 0.5,单位:hPa)

Fig. 7 Anomalous field of the first haze pattern

(a) anomaly of 500 hPa geopotential height (unit: gpm) and wind field (unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), (b) anomaly of 850 hPa wind (unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and relative humidity field (unit: %), (c) anomaly of vertical velocity (unit:  $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ), (d) anomaly of surface pressure (unit: hPa)

第二型(图 8):500 hPa 高度场在我国上空表现为高度场正距平区,距平中心位于河套地区,与第一型相比正距平范围略偏小,表现为青藏高原北部脊偏强,环流形势呈西高东低的特点;从风场上看我国黄渤海、东海、南海及各沿海地区包括浙江省上空的北风分量偏强。850 hPa 上看,我国中东部地区距平风场为西南风,表明北风偏弱;北风正距平区分布于浙江东部海面上;干区分布于西北、华北、华东北部及黄海海面海面。与第一型相比,第二型浙江省

西北相邻省份 850 hPa 北风更加偏弱,而东部海区的低层北风偏大、干区偏强。地面图(图 8d)上则呈现大范围的负距平区,其中贝加尔湖、我国两湖平原一带各存在  $-2 \text{ hPa}$  的气压场负距平中心,与第一型相比,全省型霾过程的地面气压负距平范围更广,浙江省的地面气压也为负距平。从垂直速度的剖面图(图 8c)上看,  $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$  之间的上升速度偏差中心达  $-0.02 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $125^{\circ}\sim 135^{\circ}\text{E}$  海面上空的下沉速度偏差中心达  $0.025 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ , 均比第一型的垂

直运动更强烈,浙江省处于下沉速度负距平区,下沉气流偏弱。

通过上述分析可见,影响两类霾过程的冷空气强度不同、扩散南下的区域也不同。第一型(盆地平原型)霾过程是在东亚大槽偏弱,北方冷高压南下至

东南、华南沿海,低层湿度偏低,浙江省受干冷空气中偏强的下沉气流控制时发生。第二型(全省型)霾过程为青藏高原北部脊区明显偏强,较强干冷空气东移南压入海后,地面控制我国中东部地区的冷高减弱变性,浙江省上空下沉运动减弱的情况下出现。

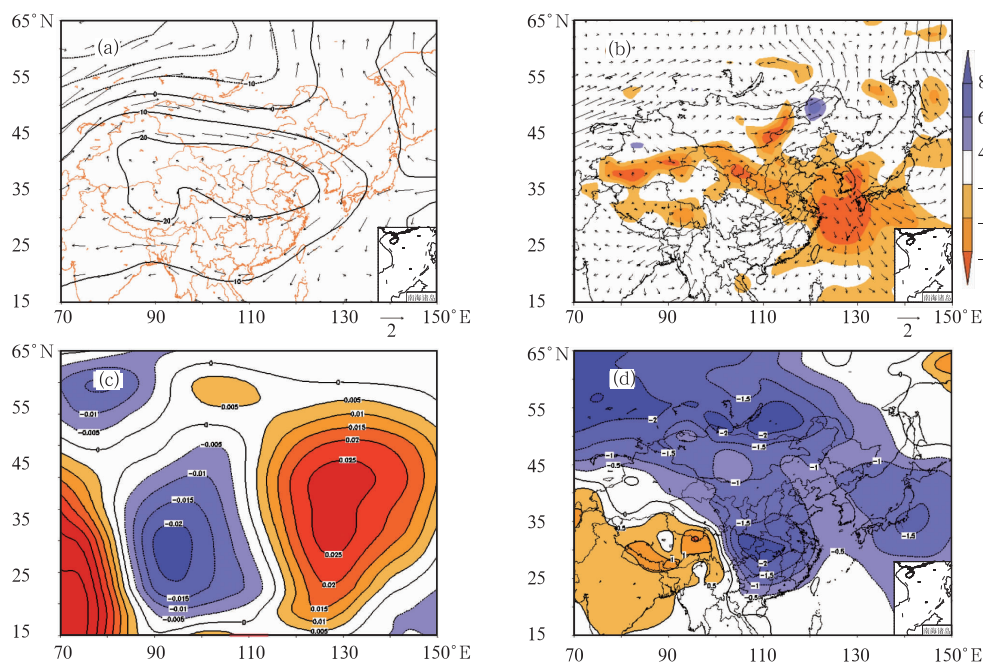


图 8 同图 7, 但为第二型

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for the second haze pattern

## 6 结 论

采用 1981—2013 年冬季浙江省相对湿度、能见度及天气现象资料重建霾的气候序列,利用 Mann-Kendall 方法检验霾的气候变化特点。分析浙江省各地域的霾分布特征,在此基础上结合 K-均值聚类方法对 848 个霾过程进行客观划分,并讨论不同空间分布型霾过程的大气环流及气流输送特征。得到以下结论:

(1) 20 世纪 80 年代中期以来浙江省平均冬季霾日呈显著增多趋势,1995 年为霾日增多的突变点,其空间分布具有北多南少、西多东少的特点。金衢盆地和浙北平原是全省霾出现频率最高的地区,浙南丘陵和沿海岛屿霾出现频次最少。

(2) K-均值聚类法将近 33 年冬季主要霾过程分为盆地-平原型和全省型两类。盆地-平原型霾过程气流存在自北向南远距离输送的特点,气流来自

于高纬度地区;而全省型霾过程气流来自于浙江省及周边地区。

(3) 两类霾过程的大气环流形势在冷高强度、干区分布与强度、垂直运动等方面存在较明显的差异。盆地-平原型冬季霾多在冷高压和下沉气流偏强情况下发生;全省型冬季霾则在冷高变性、下沉气流减弱,不利于本地污染源扩散的情况下发生。

## 参考文献

- 曹伟华,梁旭东,李青春,等. 2013. 北京一次持续性雾霾过程的阶段性特征及影响因子分析. 气象学报, 71(5): 940-951.
- 陈林,王莉莉,吉东生,等. 2013. 广州亚运会期间鼎湖山站大气污染特征. 应用气象学报, 24(2): 151-161.
- 高歌. 2008. 1961—2005 年中国霾日气候特征及变化分析. 地理学报, 63(7): 761-768.
- 过宇飞,刘端阳,周彬,等. 2013. 无锡市霾天气特征及影响因子研究. 气象, 39(10): 1314-1324.
- 侯灵,姚展予. 2012. 环北京地区空气污染指数与降水的周循环特征及其影响机制分析. 大气科学, 36(4): 686-696.
- 胡亚旦,周自江. 2009. 中国霾天气的气候特征分析. 气象, 35(7): 73-

- 78.
- 花丛,张碧辉,张恒德. 2015. 2013年1—2月华北雾、霾天气边界层特征对比分析. 气象, 41(9):1144-1151.
- 蒋维楣,孙鉴泞,曹瑞宾,等. 2012. 空气污染气象学教程. 北京:气象出版社, 5-6.
- 勒利梅,史军. 2008. 上海雾和霾日数的气候特征及变化规律. 高原气象, 27(增刊):138-143.
- 刘爱君,杜尧东,王惠英. 2004. 广州灰霾天气的气候特征分析. 气象, 30(12):68-71.
- 刘梅,严文莲,张备,等. 2014. 2013年1月江苏雾霾天气持续和增强机制分析. 气象, 40(7):835-843.
- 牛彧文,顾骏强,浦静姣,等. 2010. 浙江城市区域灰霾天气的长期变化. 热带气象学报, 26(6):807-812.
- 齐冰,刘寿东,杜荣光,等. 2012. 杭州地区气候环境要素对霾天气影响特征分析. 气象, 38(10):1225-1231.
- 史军,崔林丽,贺千山,等. 2010. 华东雾和霾日数的变化特征及成因分析. 地理学报, 65(5):533-542.
- 王镇铭,杜惠良,杨诗芳. 2013. 浙江省天气预报手册. 北京:气象出版社, 9-10.
- 魏文秀. 2010. 河北省霾时空分布特征分析. 气象, 36(3):77-82.
- 吴兑. 2005. 关于霾与雾的区别和灰霾天气预警的讨论. 气象, 31(4):3-7.
- 吴兑. 2008. 大城市区域霾与雾的区别和灰霾天气预警信号发布. 环境科学与技术, 31(9):1-7.
- 吴兑,毕雪岩,邓雪娇,等. 2006. 珠江三角洲大气灰霾导致能见度下降问题研究. 气象学报, 64(4):510-517.
- 吴兑,陈慧忠,吴蒙,等. 2014a. 三种霾日统计方法的比较分析-以环首都圈京津冀晋为例. 中国环境科学, 34(3):545-554.
- 吴兑,廖碧婷,吴蒙,等. 2014b. 环首都圈霾和雾的长期变化特征与典型个例的近地层输送条件. 环境科学学报, 34(1):1-11.
- 吴兑,吴晓京,李菲,等. 2010. 1951—2005年中国大陆霾的时空变化. 气象学报, 68(5):680-688.
- 伍红雨,杜尧东,何建,等. 2011. 华南霾日和雾日的气候特征及变化. 气象, 37(5):607-614.
- 夏冬,吴志权,莫伟强,等. 2013. 一次热带气旋外围下沉气流造成的珠三角地区连续灰霾天气过程分析. 气象, 39(6):759-767.
- 熊亚军,廖晓农,李梓铭,等. 2015. KNN数据挖掘算法在北京地区霾等级预报中的应用. 气象, 41(1):98-104.
- 姚青,韩素芹,蔡子颖. 2012. 天津一次持续低能见度事件的影响因素分析. 气象, 38(6):688-694.
- 于庚康,王博妮,陈鹏,等. 2015. 2013年初江苏连续性雾-霾天气的特征分析. 气象, 41(5):622-629.
- 俞科爱,胡晓,黄旋旋,等. 2015. 宁波区域霾过程的天气分型及环流场特征. 气象, 41(12):1514-1524.
- 张英娟,张培群,王翼,等. 2015. 1981—2013年京津冀持续性霾天气的气候特征. 气象, 41(3):311-318.
- 中国气象局. 2010. QX/T113-2010. 霾的观测和预报等级.
- 周宁芳,李峰,饶晓琴,等. 2008. 2006年冬半年我国霾天气特征分析. 气象, 34(6):81-88.
- Dudoit S, Fridlyand J. 2002. A prediction-based resampling method for estimating the number of clusters in a dataset. Genome Biology, 3(7):1-21.