

郁珍艳,李正泉,高大伟,等,2017.浙江省空气质量与大气自净能力的特征分析[J].气象,43(3):323-332.

# 浙江省空气质量与大气自净能力的特征分析<sup>\*1</sup>

郁珍艳 李正泉 高大伟 王 阔

浙江省气候中心,杭州 310017

**提 要:** 利用最新的高时空分辨率 ERA-Interim 探空和地面资料,计算分析了 1979—2015 年浙江省大气输送和自净能力的时空分布变化特征,结合环保局空气质量监测数据探讨了浙江省空气质量与大气自净能力的关系,结果表明:大气自净能力在春、夏季表现出沿海地区小,内陆地区大的分布;到了秋、冬季,沿海地区大气自净能力增大,内陆地区则减小;研究时段内全省平均大气自净能力有增大趋势。表征低层输送能力的 10 m 风速在秋、冬季最大,夏季最小,随时间略有减小,这是浙江省空气污染加剧的可能原因之一;10 m 风速的分布基本呈从东部沿海地区往西部山区逐渐减小的变化趋势,秋、冬季风速略大,以偏北风为主。浙江省大部分地区冬季大气自净能力最差,盛行的偏北风又容易将北方污染物带下来,因此冬季是浙江省最易发生空气污染的时段。当风速较小,风向转为偏西北风时,污染物从北方输入并且积累,最易出现较严重的污染天气。中度及以上的空气污染主要发生在杭嘉湖、宁波、绍兴、金华这些经济发达的地区,沿海地区的舟山、温州、台州由于大气输送条件好发生站次很少。丽水和衢州山区海拔高,加之本地工业经济发展较弱,空气污染发生的频次较少。

**关键词:** 空气质量,大气自净能力,大气输送能力,最大混合层厚度,通风量

**中图分类号:** X16

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.03.008

## Feature Analysis of Air Quality and Atmospheric Self-Purification Capability in Zhejiang

YU Zhenyan LI Zhengquan GAO Dawei WANG Kuo

Zhejiang Climate Centre, Hangzhou 310017

**Abstract:** The latest ERA-Interim radiosonde and surface data with high spatio-temporal resolution are used to analyze the change characteristics of spatio-temporal distribution of the atmospheric transport and self-purification capability in Zhejiang Province. Combining with air quality data from Environmental Protection Agency, the relationship between air quality and atmospheric self-purification capability in Zhejiang is explored. The results show that atmospheric self-purification capability is smaller in coastal areas and larger in inland during spring and summer, but increases in coastal areas and decreases in inland when it comes to autumn and winter. The average atmospheric self-purification capability is in the increasing trend during the study period. The 10 m wind speed which represents the underlying transmission is the biggest in autumn and winter, but is the smallest in summer, slightly decreasing with time. This is one of the possible causes of the aggravated air pollution in Zhejiang. The distribution of 10 m wind speed gradually reduces from east coastal areas to western mountains in general, being slightly larger in autumn and winter, northerly winds mainly. The atmospheric self-purification capability is the poorest in winter over most parts of Zhejiang, and the prevailing northerly winds tend to bring the north pollutants down, so winter is the time period when air pollution is prone to occur in Zhejiang. When the wind speed is small, and the

\* 浙江省公益技术研究社会发展项目(2016C33G1610876)和国家自然科学基金项目(41605049)、浙江省科技计划项目(2015C33055)及浙江省气象局重点项目(2014ZD05 和 2015ZD09)共同资助

2016 年 4 月 6 日收稿; 2016 年 1 月 6 日收修定稿

第一作者:郁珍艳,主要从事气候变化与生态环境. Email:yuzhenyan@126.com

direction turns into northwest, the pollutants are brought in Zhejiang from the north, getting accumulated, then more serious pollution weather is most likely to appear. The air pollution above medium grade occurs mainly in the developed areas like Hangzhou, Ningbo, Shaoxing, and Jinhua. Comparatively, air pollution rarely happens in coastal areas, such as Zhoushan, Wenzhou, Taizhou, due to the good atmospheric transport conditions. The air pollution occurs less frequently in Lishui and Quzhou as the result of high terrain and slow development in industry and economy.

**Key words:** air quality, atmospheric self-purification capability, atmospheric transport capability, maximum mixing depth, ventilation ability

## 引 言

近年来,国民经济飞速发展,城市化、工业化进程不断加快,人类活动、汽车尾气、燃油燃煤和废弃物燃烧排放的污染物日益增加,大气混浊度高,能见度差,空气污染现象日趋严重。虽然已采取了使用清洁能源、消烟除尘、控制汽车尾气排放等诸多措施,但污染情况仍然不容乐观。国内大气  $\text{PM}_{2.5}$  浓度远远超出欧美国家平均水平,中国 2013 年  $\text{PM}_{2.5}$  年均质量浓度为  $72.71 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  (Song et al, 2015), 美国仅为  $13 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  左右 (Sampson et al, 2013), 欧洲地中海盆地区域 5 个城市 2012 年  $\text{PM}_{2.5}$  的年均浓度值在  $14 \sim 37 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  (Salameh et al, 2015)。全国平均年霾日数呈现明显的增加趋势 (高歌, 2008)。霾日变化呈增加趋势的站点主要分布在中国的东部和南部,是经济和工业比较发达的地区 (吴兑等, 2010)。

环境空气质量受大气污染物排放的影响,也受气象要素变化的影响。在一段时期内,自然排放和人类活动排放的污染物总量是大致稳定的,但有时出现严重的污染天气,有时却又是蓝天白云,决定性的控制因素就是气象条件 (吴兑, 2005)。在不同气象条件下,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,这是由于大气对污染物的稀释扩散能力随着气象条件的不同而发生巨大变化 (蒋维楣等, 1993)。国内外已有很多学者对空气污染与气象条件的关系进行了大量研究, Arthur et al (2004) 对纽约高浓度  $\text{PM}_{2.5}$  天气进行了研究, 结果表明纽约高浓度  $\text{PM}_{2.5}$  经常出现在高温、高湿且风速较小的西南风气象环境下。袁美英等 (2005) 认为稳定的气象条件是哈尔滨市大气污染持续或加重的原因之一。赵敬国等 (2013) 发现西北风较东北风更有利于兰州市污染物扩散, 降水、相对湿度、风

速和城市热岛效应对空气质量有显著影响。在经济发达的京津冀、长三角、珠三角地区, 空气污染加剧, 针对这些地区的相关研究也得到了很多有意义的结果: 王晓云等 (2001) 指出在静稳气象条件下, 北京城区冬季污染物浓度常达高值, 特别是强度大、厚度厚的贴地逆温层的形成犹如一个厚重的锅盖, 极不利于污染物扩散。温度、风速和相对湿度是影响北京空气质量的主要气象因子 (冀翠华等, 2014)。气压、气温、降水量和相对湿度与京津冀城市空气质量的关系较为密切 (周兆媛等, 2014)。江苏省混合层高度与 AQI 呈反相关, 混合层高度越低, AQI 就越高, 污染就越严重, 能见度就越差 (于庚康等, 2015); 秋、冬季重度霾发生时主要气象条件为贴地逆温, 风速在  $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以下 (戴竹君等, 2016)。气象要素的变化也与上海空气污染存在密切联系, 气压与空气污染物的关系为正相关, 而气温、相对湿度和风速与空气污染物浓度呈负相关 (张国珺等, 2010)。珠江三角洲区域霾天气过程与区域内静小风过程, 即出现气流停滞区有密切联系, 清洁对照过程与强平流输送有关 (吴兑等, 2008)。不利气象要素影响和污染物区域传输作用是形成珠江三角洲区域大气本底 (鼎湖山地区) 细粒子污染偏高的主要原因 (陈林等, 2013)。广州地区霾天气过程在干季发生较频繁, 主导风向为东南及东南偏南风, 风速一般在  $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以下, 静风频率大于多年静风频率; 霾天气过程风矢量和较小, 扩散条件较差 (吴蒙等, 2012)。

在浙江省开展的空气污染与气象条件的关系研究还较少, 浙江省经济增速快、能源消耗多, 大气环境问题日益显现。浙江省地形起伏较大, 西南以山地为主, 经济发展较缓慢, 浙北和浙东则多为平原, 城市化发展迅速 (图 1), 各地大气质量状况和变化差异较大。2011—2013 年间杭州  $\text{PM}_{2.5}$  月均质量浓度呈上升趋势, 增幅为  $10 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  左右;  $\text{NO}_2$  浓度总体呈上升趋势, 大约上升了  $10 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  左右 (毛

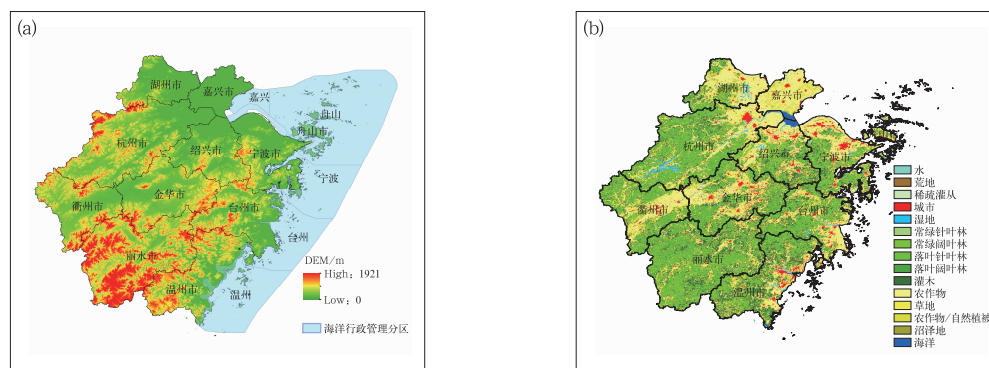


图 1 浙江省数字高程模型 (DEM) (a) 和土地利用 (b) 分布图

Fig. 1 Distribution of Digital Elevation Model (DEM) (a) and landuse (b) over Zhejiang Province

敏娟等, 2015)。2000 年之后, 浙江省各地区霾天数都在迅速增加, 尤为突出的是湖州、绍兴、杭州和嘉兴等浙北城市, 上述地区在 2000—2007 年的霾天数比 2000 年之前几十年总的霾天数还要多, 说明近几年浙江省尤其是浙北地区大气环境污染非常令人担忧, 控制大气污染, 改善空气质量, 提高空气质量已是迫在眉睫(牛彧文等, 2010)。因此本文采用高分辨率的 ERA-Interim 资料, 综合考虑混合层、通风量、雨水清洗以及近地面风对空气质量的影响, 分析浙江省各地区大气输送和自净能力的变化及现状, 探讨空气质量与气象条件的关系, 为空气污染防治提供科学依据。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料

浙江省仅 3 个气象站有探空观测资料, 运用常规观测资料难以得到全省精细准确的大气自净能力空间分布特征, 也难以进行区域间比较分析。欧洲中期数值预报 (ECMWF) 中心的 ERA-Interim 资料采用了四维变分同化技术, 结合改进的卫星数据误差校正等技术, 相对于 ERA-40 来说, 实现了再分析资料质量的提升, 且有  $0.125^{\circ} \sim 2.5^{\circ}$  多种网格资料。研究表明 ERA-Interim 资料在中国地区的适用性较好, 与观测资料的相关性也较好(秦育婧和卢楚翰, 2013; 赵佳莹和徐海明, 2014; 郭艳君等, 2016)。因此本文采用的探空及地面气象格点资料为最新的高分辨率 ERA-Interim 资料, 时段为 1979—2015 年, 水平分辨率为  $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$ , 在浙江省内共取

得 620 个格点。高空资料包含高度、温度和风速, 垂直方向为 37 层; 地面资料包括 2 m 温度、位势高度、10 m 风; 除位势高度为不变量外其余均为一日 4 次 (02、08、14 和 20 时) 观测资料。降水资料为逐日 08 和 20 时的 12 h 预报场。采用的环境空气质量指数来源于浙江省环境保护局的环境监测站数据, 时段为 2014—2015 年。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 大气自净能力

基于大气环境容量的 A 值计算方法, 赵珊珊和朱蓉 (2006) 在大气通风扩散能力的基础上, 考虑干、湿清除过程对大气中污染物的清洁作用, 在降水清洗比取  $6 \times 10^5$  (McMahon and Denison, 1979) 和单位面积 (S) 取  $100 \text{ km}^2$  的情况下, 利用平流扩散方程简化得到的大气自净能力公式:

$$A = 3.1536 \times 10^{-3} \frac{\sqrt{\pi}}{2} V_E + 2.19 \times 10^{-2} R \sqrt{S} \quad (1)$$

式中, 等式右侧两项分别代表了大气的输送能力和清洗能力。其中  $V_E$  为通风量 (单位:  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $R$  为降水率 (单位:  $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ )。由于 A 值的标准单位为:  $10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ , 浙江省主要城区面积一般在几十至几百千米, 本文参考赵珊珊和朱蓉 (2006) 并结合浙江省实际情况, 取  $\sqrt{S} = 10 \text{ km}$ 。要计算 A 值, 首先要求得混合层厚度, 再求得通风量。

#### 1.2.1.1 最大混合层厚度

大气混合层厚度是反映污染物在铅直方向扩散的重要参数, 也是影响大气污染物扩散的主要气象因子之一。大气混合层厚度越大, 就越有利于污染

物垂直方向的扩散和稀释。混合层厚度的计算方法主要有干绝热法、罗氏(Nozaki)法和环境影响评价技术导则法等,罗氏法和导则法只需常规气象资料,在没有探空资料的情况下比较实用,但干绝热法的计算结果相对更加准确(程水源等,1997;史宝忠等,1997)。

干绝热曲线法主要是应用  $T-\ln p$  图解法(图 2),清晨温度廓线( $\gamma_{08\text{时}}$ , 线段  $AB$ )和午后地面最高温度的干绝热线( $\gamma_d$ , 线段  $SF$ )相交,地面( $p_0$ )到交点  $D(p_h)$  的高度即为当日的最大混合层厚度。为了在计算机上实现逐日资料的计算,利用王式功等(2000)提出的求解二元一次方程组法[式(2)和式(3)],将 08 时探空曲线上  $A$ 、 $B$  两点的高度和温度值代入式(2),用位势高度和地面 14 时温度分别代换式(3)中的  $Z_s$  和  $T_s$ ,然后将式(2)和式(3)联立求解出  $Z$  和  $T$ ,其中  $Z$  就是交点  $D$  的海拔高度, $Z$  与  $Z_s$  之差即为最大混合层厚度。在计算机上确定  $A$ 、 $B$  两点的具体做法是:先将温度层结曲线上由地面到高空每个节点的海拔高度代入式(3),得到相应高度的温度值,若其中用第  $i$  个节点上的高度值所求得温度值低于该点实际大气温度值时,则取第  $i$  个节点为  $B$  点,第  $(i-1)$  个节点为  $A$  点。计算得到浙江省 620 个格点 1979—2015 年逐日最大混合层厚度,参与计算的资料包含高空 08 时温度资料和高度资料、地面 14 时温度资料和位势高度。

$$Z - Z_A = \frac{Z_A - Z_B}{T_A - T_B}(T - T_A) \quad (2)$$

$$Z - Z_s = -\frac{100}{0.976(T - T_s)} \quad (3)$$

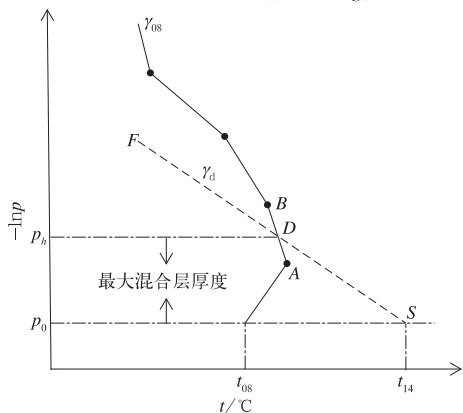


图 2 利用干绝热曲线法求最大混合层厚度(王式功等,2000)

Fig. 2 Estimating maximum mixing depths by the method of dry adiabatic (Wang et al, 2000)

由于午后强对流等特殊天气造成午后温度骤降,午后地面最高温度低于清晨地面温度,导致 14 时地面温度的干绝热线与 08 时温度廓线无交点,此时将当日最大混合层高度视为缺测处理。最后浙江省内每个格点计算得到的日最大混合层厚度数据系列完整率均在 90% 以上,且绝大多数在 95% 以上。

### 1.2.1.2 通风量

通风量为混合层内垂直于风向上的每单位时间大气水平输送量,代表混合层内大气的输送能力(刘文,1999)。计算公式如下所示:

$$V_E = \bar{U}D = \sum_{i=1}^n U_i D_i \quad (4)$$

式中, $\bar{U}$  为混合层内的平均风速(单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), $D$  为混合层高度(单位:  $\text{m}$ ), $U_i$  为每层的平均风速(单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), $D_i$  为每层厚度(单位:  $\text{m}$ ), $n$  表示混合层高度所在层。

### 1.2.2 近地层大气输送能力

空气自净能力主要体现了一个区域的污染物在本地积聚或空气污染发展的可能程度,以及遭受污染后恢复的速率。但无法体现出风向变化的作用,也就是无法体现出污染物输入的可能性以及程度。浙江省较严重的空气污染以北方污染物输入为主(洪盛茂等,2010;翁之梅等,2016),因此风向也是一个比较重要的气象条件。另外考虑到近地层输送条件与大气污染物稀释扩散密切相关(吴兑等,2008),并且近年来城市化建设、人类活动和汽车尾气等低架源污染物的排放增加又是造成浙江省空气质量日益变差的主要原因(牛彧文等,2010,毛敏娟等,2015)。因此本文在分析了整个混合层大气对污染物的输送清洗综合能力的基础上,还分析了近地层大气的输送能力,用近地面 10 m 风向风速表示。

## 2 时间变化特征

由浙江省最大混合层厚度和通风量平均值时间变化图可见(图 3a 和 3b),季节差异较大,夏季太阳辐射强烈,地表白天吸收太阳能多,大气边界层热力湍流旺盛,7—10 月最大混合层厚度最大,月均值在 1000 m 以上;冬季则太阳辐射较弱,致使午后边界层湍流相对较弱,12 月及 1—2 月最大混合层厚度最小,基本在 950 m 以下。随着时间推移,各月最大混合层厚度和通风量有所增大,尤其是 21 世纪后。20 世纪,冬季通风量基本在  $5000 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  以下,

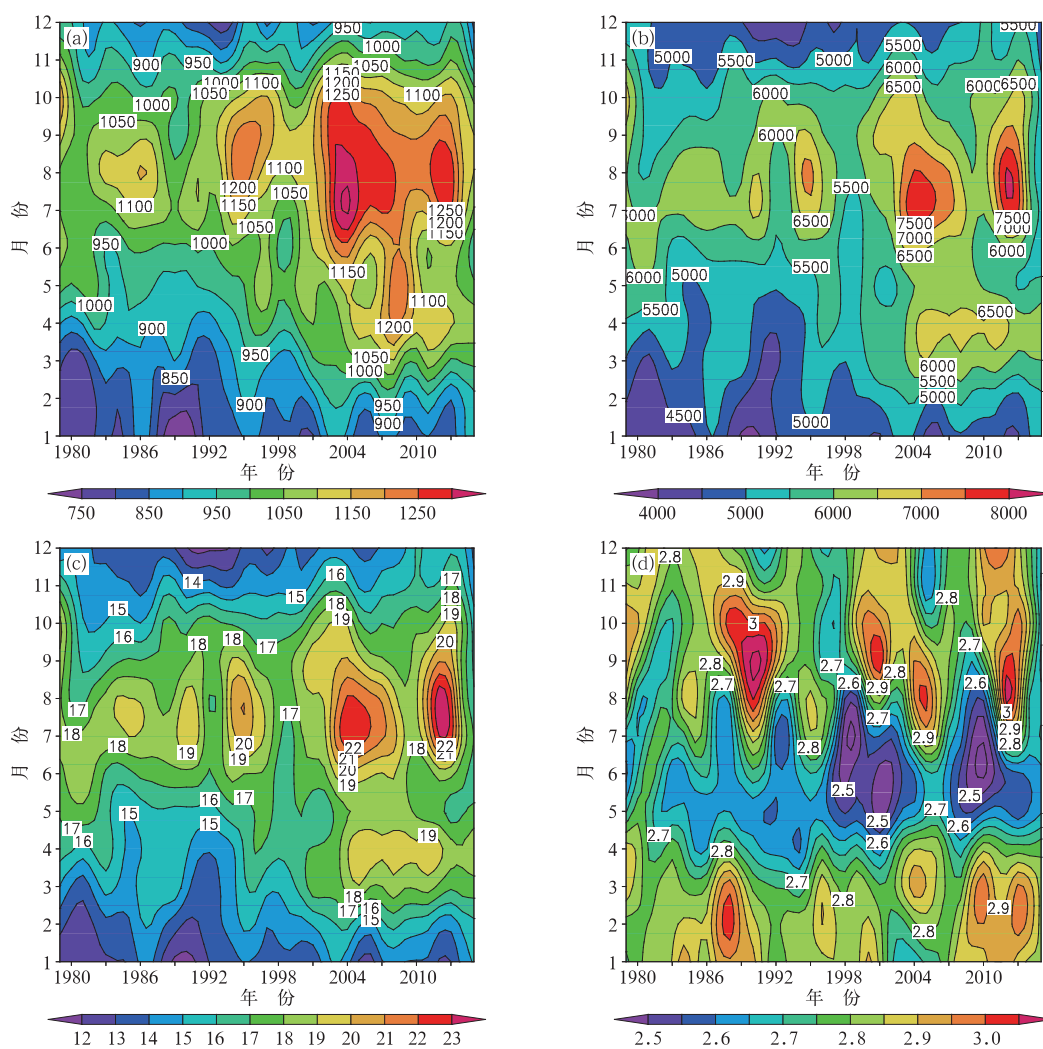


图 3 1979—2015 年浙江省全省平均最大混合层厚度(a, 单位: m)、通风量(b, 单位:  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )、大气自净能力(c, 单位:  $10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ )和 10 m 风速(d, 单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )时间变化图

Fig. 3 Average maximum mixing depth (a, unit: m), ventilation ability (b, unit:  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ), atmospheric self-purification capability (c, unit:  $10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ ) and 10 m wind speed (d, unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) in Zhejiang Province from 1979 to 2015

夏季通风量基本在  $5500 \sim 6000 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ;到了 21 世纪,冬季通风量增大了  $500 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  左右,夏季通风量增大到  $6000 \sim 7500 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

大气自净能力(图 3c)的时间变化也表现出夏季大、冬季小,随时间明显增大的变化趋势。20 世纪的冬季大气自净能力基本在  $14 \times 10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$  以下,夏季在  $16 \times 10^4 \sim 20 \times 10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ ;到了 21 世纪,冬季大气自净能力增大了  $1 \times 10^4 \sim 2 \times 10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ ,夏季增大了  $2 \times 10^4 \sim 3 \times 10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ 。

城市化发展导致下垫面粗糙度增加,加上高大建筑物的遮挡作用,10 m 风速略有减小(图 3d),在秋、冬季最大,夏季最小。近地面风速的减小也是浙

江省空气污染加剧的可能原因之一。

### 3 空间分布特征

沿海地区空气比较潮湿,气温日变化较小,早晨地面气温与最高温度相差较小,14 时地面温度干绝热线在较低高度便与 08 时探空温度垂直分布廓线相交,使最大混合层厚度在一年四季均较内陆地区小。沿海地区的最大混合层厚度在春、夏季最小,在秋季最大;其他地区在冬季最小,夏季最大(图略)。与吴祖常和董保群(1998)得到的结果较为一致:内陆台站大气混合层高度通常秋、冬季时为最低,在夏

季为最高;而沿海台站则相反,大气混合层高度通常夏季最低,在秋、冬季最高。李金堡等(2014)针对青岛地区的研究也得到一致的结果:春、夏季海温等于或小于气温,形成相对稳定的下垫面,所以在春、夏季时,混合层高度较低;秋、冬季则相反,海温要高于气温,形成不稳定的下垫面,在这种情况下,有利于热力湍流的强度发展,从而秋、冬季的混合层高度在全年中处于最高的时期。

但是通风量的季节变化空间分布与最大混合层厚度有所区别,春、夏季还是表现出沿海地区小,内陆地区大的分布;到了秋、冬季,沿海地区风速大,沿海地区通风量增大,也比大部分内陆地区大。总体来看,一年四季浙北地区的通风量都比浙南地区大一点(图略)。

年平均大气自净能力在沿海地区较小,其他地区基本呈现由南往北逐渐增大的分布,浙东北的内陆地区大气自净能力最强(图 4)。大气自净能力的季节变化与通风量差不多(图5),春、夏季还是表现

出沿海地区小,内陆地区大的分布;到了秋、冬季,沿海地区大气自净能力增大,比大部分内陆地区大。总体来看,除夏季整个内陆地区差不多外,其他季节浙北地区的大气自净能力比浙南地区好一点。

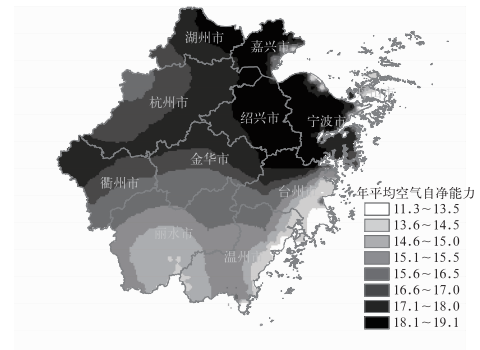


图 4 1979—2015 年浙江省大气自净能力分布图(单位:  $10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ )

Fig. 4 Spatial distribution of atmospheric self-purification capability in Zhejiang Province from 1979 to 2015 (unit:  $10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ )

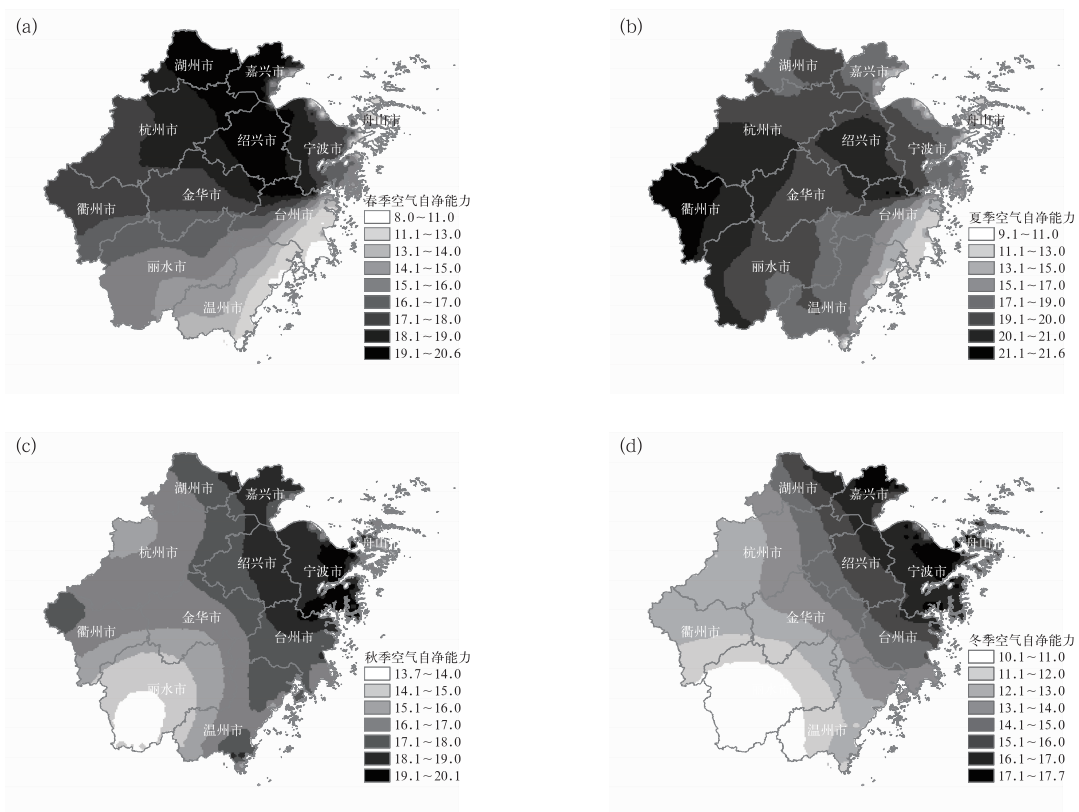


图 5 1979—2015 年浙江省四季大气自净能力分布(单位:  $10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ )

(a)春季, (b)夏季, (c)秋季, (d)冬季

Fig. 5 Seasonal spatial distribution of atmospheric self-purification capability in Zhejiang Province from 1979 to 2015 (unit:  $10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ )

(a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter

年平均 10 m 风速的分布基本呈从东往西逐渐减小的变化趋势,舟山地区以及宁波、台州、温州的沿海地区是平均风速最大的区域,山区多的丽水是平均风速最小的地区(图 6)。各个季节平均风速的分布与年度分布基本一致(图略),秋、冬季风速略大。春季以偏东风为主,夏季东南风为主导风向,秋季和冬季则以偏北风为主(图 7)。可见,秋、冬季偏北风容易携带北方污染物造成浙江地区的空气污染。沿海地区在春、夏季大气自净能力虽然不如内陆地区,但是宽阔空旷的地形条件,加上较大的近地面风速,对污染物整体的稀释扩散能力还是较强的。秋、冬季更是表现出比内陆地区更好的大气自净能力和更好的近地面输送能力。

和 2015 年分别有 86 和 70 个站的数据完整率在 90% 以上,分别取得 29701 和 24180 站次的数据,等级为优和良的站次比重较高,中度污染及以上的比例分别为 5% 和 4%(表 1)。

从月际分布来看(图 8),2014 年中度污染主要

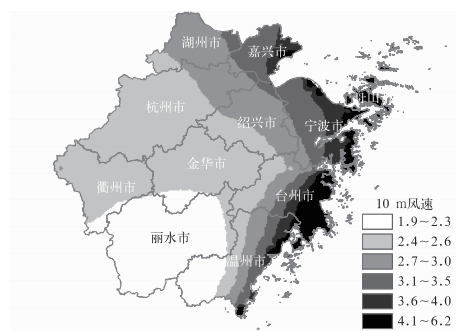


图 6 同图 4, 但为 10 m 风速分布(单位:  $m \cdot s^{-1}$ )

Fig. 6 Same as Fig. 4, but for 10 m wind (unit:  $m \cdot s^{-1}$ )

#### 4 空气污染特征

根据环保站空气污染指数逐日观测资料,2014

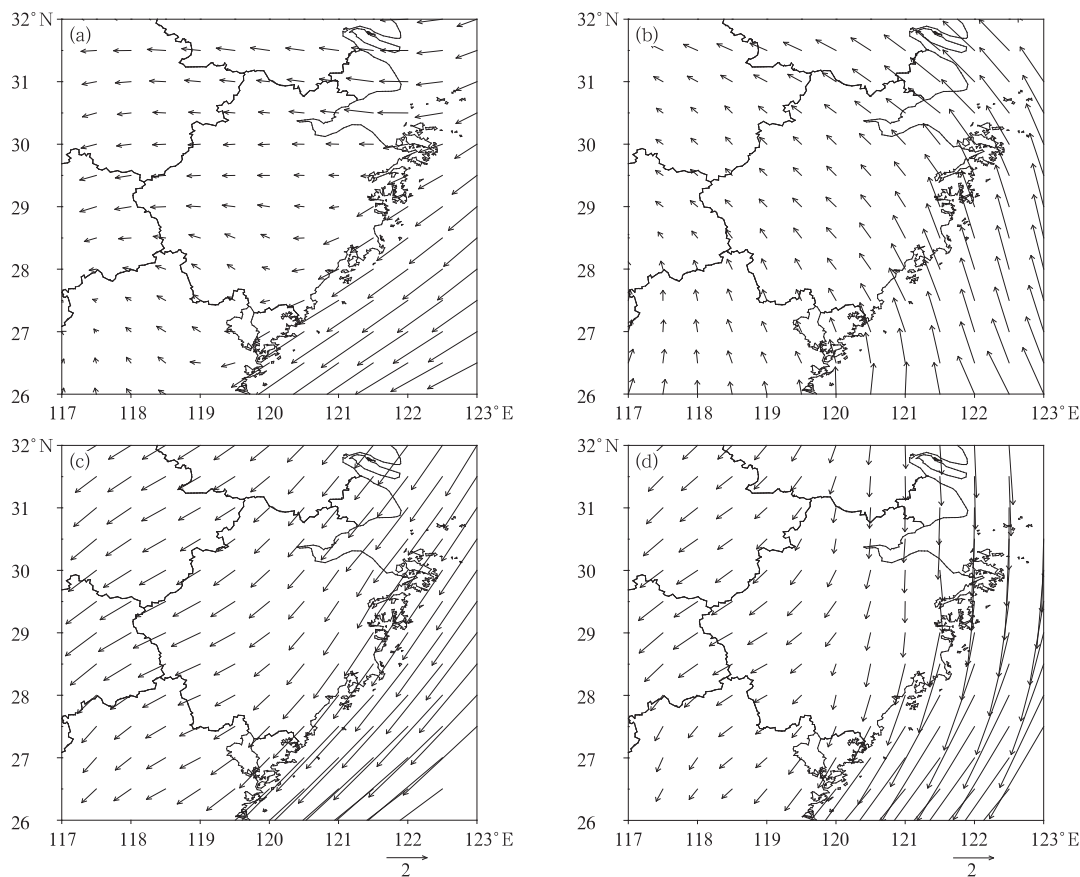


图 7 同图 5, 但为 10 m 风流场分布(单位:  $m \cdot s^{-1}$ )

Fig. 7 Same as Fig. 5, but for air flow field of 10 m wind (unit:  $m \cdot s^{-1}$ )

表 1 2014 和 2015 年各等级空气质量发生站次统计表(单位:次)

Table 1 The statistics of air quality occurrence in 2014 and 2015 (unit: number)

	总	优	良	轻度污染	中度污染	重度污染	严重污染
2014 年	29701	5297	17191	5706	1016	452	38
2015 年	24180	5362	13921	3932	709	253	2

出现在 1 月,其次为 5—6 和 11—12 月;重度污染基本发生在 1 月,其他月份相对较少;严重污染有 1 站次发生在 2 月,其余均发生在 1 月。2015 年中度和重度污染主要发生在 1 和 12 月,2 站次的严重污染分别发生在 1 和 12 月。可见,冬季特别是 1 月是浙江省最易发生空气污染的时段,图 3 和图 5 也表明冬季尤其在 1 月是浙江省大部分地区混合层最低、通风量最小及大气自净能力最差的季节。因此混合层高度、通风量、大气自洁能力均对浙江省空气污染有一定的指示作用,这三个指标值小,气象条件不利于污染物的扩散清除,易出现空气污染现象。而从图 3 和图 7 可见,虽然冬季 10 m 风速较大,近地层输送能力较好,但风向多为偏北风,容易携带北方污

染物南下,易造成输入性的空气污染。

从 10 m 风向频率和风速来看(图 9),当天空气质量等级为优良时,偏东风占主导风向,风速较大,带来东部海上的洁净空气;空气质量为轻度-中度污染时,东南风和偏西风的频率较优良时有所增大,风速也明显减小;空气质量为重度及以上时,偏西风特别是西北风的频率明显增大,风速较轻度-中度污染时更小,上风方东北、华北地区污染空气随弱偏西北风而下,在浙江地区造成严重污染。可见,浙江省冬季盛行的偏北风容易将上风方的北方污染物带下来,加上大部分地区冬季区域大气自净能力较差,在风速较小的时段,容易造成污染物的积累,导致较严重的空气污染。

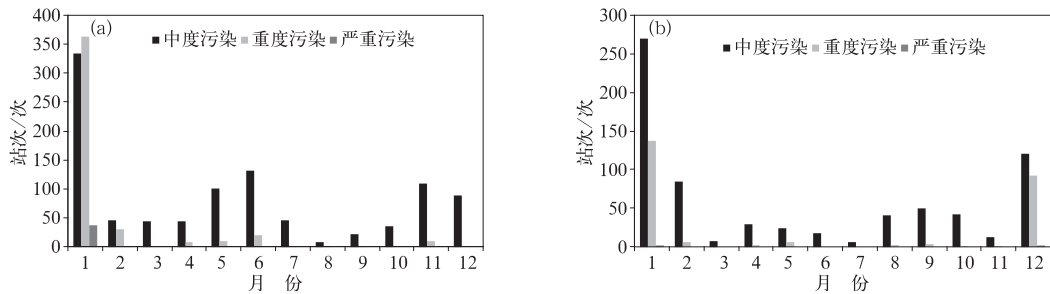


图 8 2014 年(a)和 2015 年(b)空气污染发生站次月际变化

Fig. 8 Variation of monthly occurrence times of air pollution in 2014 (a) and 2015 (b)

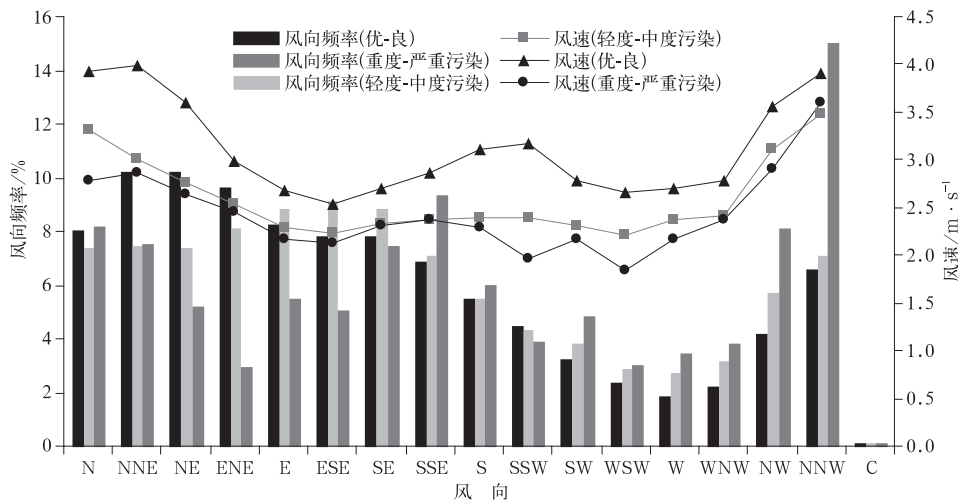


图 9 空气质量等级对应的 10 m 风向频率及风速

Fig. 9 Frequency of 10 m wind direction and wind speed corresponding to the levels of air quality



大气自净能力对区域空气质量有一定的指示意义,当自净能力优于常年值时,当日的气象条件有利于污染物清除;当自净能力较常年值差时,当日的气象条件不太利于污染物清除。但就算一个地区的大气自净能力相对其他地区强,那个地区的空气质量也不一定是最好的。浙江省中度以上的空气污染主要发生在杭嘉湖、宁波、绍兴、金华地区(图10),这些地区的大气自净能力在全省来看属于较好的,近地面输送能力也比西南山区略好,但是这些地区城市化和工业化发展水平在全省也是领先的,工业生产和人类活动排放的污染物较多,靠北又大多无高山遮挡的地理位置也使这些地区最易受到北方污染物的侵入。舟山、温州、台州发生站次很少,秋冬季较好的大气自净能力加上沿海地区大风速又广阔无遮挡的地形,即使有外来污染物输入,也能很快扩散开去。丽水和衢州地区虽然大气自净能力较差,风速也小,但是山区地形高,能将北部输送下来的污染物有效拦截,加上工业经济发展较弱,自身产生的污染物也较少,因此空气污染发生的频次较少。可见,浙江省空气污染的发生不仅与大气自净能力以及近地面输送能力有关,还与上风方空气质量、地形、城市化和工业化发展程度等都密切相关,还需在今后的工作中深入研究。

## 5 结论与讨论

本文利用最新的高时空分辨率 ERA-Interim 探空和地面资料,计算分析了浙江省最大混合层厚度、通风量、大气自净能力和近地面 10 m 风向、风速的时空分布变化特征,结合环保局空气质量监测

数据探讨了浙江省空气质量与大气自净能力的关系,得到以下主要结论:

(1) 全省平均最大混合层厚度和通风量在夏季最大、冬季最小,城市化发展、气候变暖导致大气湍流增强,各月最大混合层厚度和通风量随时间明显增大,大气自净能力也表现出基本一致的时间变化趋势。近地面 10 m 风速则表现出秋、冬季最大,夏季最小,随时间略有减小的变化趋势。近年来城市化建设、人类活动和汽车尾气等低架源污染物的排放增加是造成浙江省空气质量日益变差的主要原因,加之高楼密布的城市形成了巨大的遮挡物,导致近地面风速的减小,近地层大气输送能力减弱,也是浙江省空气污染不能有效缓解并有可能积累加剧的原因之一。

(2) 沿海地区最大混合层厚度在一年四季均较内陆地区小,春、夏季最小,秋季最大;内陆地区在冬季最小,夏季最大。但是通风量和大气自净能力的季节变化有所区别,春、夏季表现出沿海地区小,内陆地区大的分布;到了秋、冬季,沿海地区风速大,沿海地区通风量和大气自净能力增大,也比大部分内陆地区大。10 m 风速的分布基本呈从东向西逐渐减小的变化趋势,沿海地区是平均风速最大的区域,山区多的丽水是平均风速最小的地区;秋、冬季风速略大,以偏北风为主。

(3) 浙江省冬季盛行偏北风,容易将上风方的北方污染物带下来;而冬季又是北方集中采暖的时段,是燃煤排放的污染物最多的季节;加上冬季是浙江省大部分地区混合层最低、通风量最小、大气自净能力最差的季节,因此冬季是浙江省最易发生空气污染的时段。当风速较小,风向转为偏西北风时,污

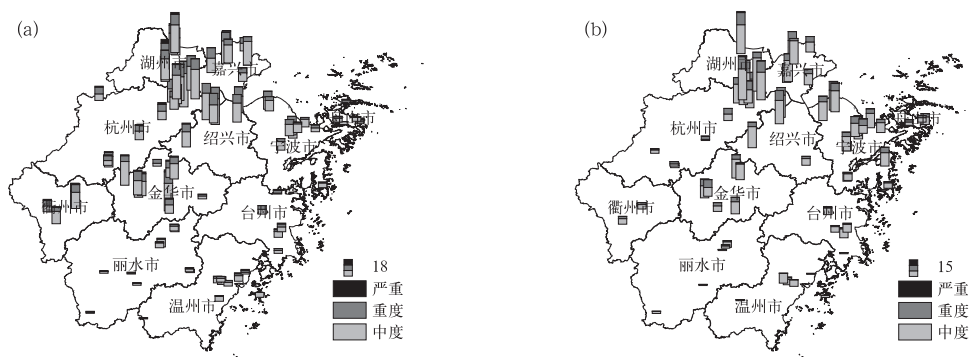


图10 2014年(a)和2015年(b)中等以上污染发生站次空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of occurrence times of pollution above medium grad in 2014 (a) and 2015 (b)

染物从北方输入并且积累,最易出现重度以上的污染天气。

(4) 大气自净能力对区域空气质量有一定的指示意义,但大气自净能力最强的地区,空气质量也不一定是最好的。浙江省中度及以上的空气污染主要发生在杭嘉湖、宁波、绍兴和金华这些经济发达的地区,这些地区要合理使用良好的环境资源,发展经济和保护环境要协调发展。秋、冬季较好的大气自净能力加上沿海地区近地层大风速又广阔无遮挡的地形,使舟山、温州和台州等沿海地区发生污染的站次很少,这些地区可以在科学评估环境容量的基础上合理加大发展力度。丽水和衢州山区海拔高,能将北部输送下来的污染物有效拦截,工业经济发展较弱,自身产生的污染物也较少,因此空气污染发生的频次较少;但这些地区一旦发生污染天气,就很难清除或扩散出去。

## 参考文献

- 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[J]. 应用气象学报,24(2):151-161.
- 程水源,席德立,张宝宁,1997. 大气混合层高度的确定与计算方法研究[J]. 中国环境科学,17(6):513-516.
- 戴竹君,刘端阳,王宏斌,等,2016. 江苏秋冬季重度霾的分型研究[J]. 气象学报,74(1):133-148.
- 高歌,2008. 1961—2005年中国霾日气候特征及变化分析[J]. 地理学报,63(7):761-768.
- 郭艳君,张思齐,颜京辉,等,2016. 中国探空观测与多套再分析资料气温序列的对比研究[J]. 气象学报,74(2):271-284.
- 洪盛茂,焦荔,何曦,等,2010. 杭州市区空气污染物变化特征及其与气象条件的关系[J]. 气象,36(2):93-101.
- 冀翠华,王式功,王敏珍,等,2014. 2001—2012年北京市空气污染指数季节分布及其与气象要素的关系[J]. 气象与环境学报,30(6):108-114.
- 蒋维楣,曹文俊,蒋瑞宾,1993. 空气污染气象学教程[M]. 北京:气象出版社:8-17.
- 李金堡,骆永军,柴艺淳,2014. 青岛地区混合层高度的季节性变化[J]. 舰船电子工程,34(11):69-72.
- 刘文,1999. 通风量计算方法的探讨及其对比分析[J]. 山东气象,(4):3.
- 毛敏娟,孟燕军,齐冰,2015. 浙江省城市大气污染特性研究[J]. 南京大学学报:自然科学,51(3):500-507.
- 牛或文,顾骏强,浦静姣,等,2010. 浙江城市区域灰霾天气的长期变化[J]. 热带气象学报,26(6):807-812.
- 秦育婧,卢楚翰,2013. 利用高分辨率 ERA-Interim 再分析资料对 2011 年夏季江淮区域水汽汇的诊断分析[J]. 大气科学,37(6):1210-1218.
- 史宝忠,郑方成,曹国良,1997. 对大气混合层高度确定方法的比较分析[J]. 西安建筑科技大学学报,29(2):139-141.
- 王式功,姜大膀,杨德保,等,2000. 兰州市区最大混合层厚度变化特征分析[J]. 高原气象,19(3):364-370.
- 王晓云,潘莉卿,吕伟林,等,2001. 北京城区冬季空气污染物垂直分布与气象状况的观测分析[J]. 应用气象学报,12(3):279-286.
- 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[J]. 气象,42(2):183-191.
- 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.
- 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.
- 吴兑,吴晓京,李菲,等,2010. 中国大陆 1951—2005 年霾的时空变化[J]. 气象学报,68(5):680-688.
- 吴蒙,范绍佳,吴兑,等,2012. 广州地区灰霾与清洁天气变化特征及影响因素分析[J]. 中国环境科学,32(8):1409-1415.
- 吴祖常,董保群,1998. 我国陆域大气最大混合层厚度的地理分布与季节变化[J]. 科技通报,14(3):159-160.
- 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[J]. 气象,41(5):622-629.
- 袁美英,周秀杰,张桂华,2005. 天气形势对哈尔滨市空气质量影响的初步研究[J]. 气象,31(1):55-58.
- 张国琰,甄新,谈建国,等,2010. 影响上海市空气质量的地面天气类型及气象要素分析[J]. 热带气象学报,26(1):124-128.
- 赵佳莹,徐海明,2014. 中国区域探空资料与再分析资料风速场的对比分析[J]. 气候与环境研究,19(5):587-600.
- 赵敬国,王式功,王嘉媛,等,2013. 兰州市空气污染与气象条件关系分析[J]. 兰州大学学报:自然科学版,49(4):491-496.
- 赵珊珊,朱蓉,2006. 全国大气自洁能力气候评价方法[C]// 国家气候中心. 气候变化与气候变异、生态-环境演变及可持续发展. 北京:气象出版社:266-269.
- 周兆媛,张时煌,高庆先,等,2014. 京津冀地区气象要素对空气质量的影响及未来变化趋势分析[J]. 资源科学,36(1):191-199.
- Arthur T, DeGaetano A T, Doherty O M, 2004. Temporal, spatial and meteorological variations in hourly PM<sub>2.5</sub> concentration extremes in New York City[J]. Atmos Environ, 38(11):1547-1558.
- McMahon T A, Denison P J, 1979. Empirical atmospheric deposition parameters L A survey[J]. Atmos Environ, 13(5):571-585.
- Salameh D, Detoumay A, Pey J, et al, 2015. PM<sub>2.5</sub> chemical composition in five European Mediterranean cities: a 1-year study[J]. Atmos Res, 155:102-117.
- Sampson P D, Richards M, Szpiro A A, et al, 2013. A regionalized national universal kriging model using partial least squares regression for estimating annual PM<sub>2.5</sub> concentrations in epidemiology[J]. Atmos Environ, 175(4):383-392.
- Song Y, Wang X, Maher B A, et al, 2015. The spatiotemporal characteristics and health impacts of ambient fine particulate matter in China[J]. J Cleaner Prod, 112(2):1312-1318.