

# 气候变化对安徽省大气污染扩散能力的影响

黄勇<sup>1,2,3</sup>, 张红<sup>4</sup>, 汪腊宝<sup>1,2,3</sup>, 王儒威<sup>5</sup>, 梅建鸣<sup>6</sup>

(1.安徽省气象科学研究所 大气科学与卫星遥感重点实验室, 合肥 230031; 2.寿县国家气候观象台, 安徽 寿县 232200; 3.中国气象局 淮河流域典型农田生态气象观测野外科学试验基地, 安徽 寿县 232200; 4.安徽省环境科学研究院, 合肥 230071; 5.中国科学技术大学 地球与空间科学学院, 合肥 230026; 6.铜陵市环境监测中心站, 安徽 铜陵 244000)

**摘要:** 利用气象部门整编的30年(1981—2010年)气候资料中, 安徽省内35个未搬迁的地面气象站观测资料, 分析安徽省大气污染扩散能力的变化特征。时间变化方面, 安徽省的不稳定日数比重以每年0.31%的速度增加, 大气扩散能力经历了“增强-减弱-增强”的起伏式变化, 1997—2004年是扩散能力降低的时期。在空间分布上, 除沿江中、西部和皖南山区东部的局部地区出现不稳定日比重下降(安庆站的下降速率最快, 为每年-0.32%)的变化趋势外, 其他地区均呈逐年升高趋势。高斯扩散模型的模拟结果表明, 安徽省的大气污染扩散能力总体上有所增强, 在35个台站中, 有1/2的台站扩散能力出现了降低的变化趋势。此外, 在安徽省淮东北部、大别山西北部和皖南山区东北部, 大气的垂直扩散能力得到了增强, 水平输送能力有所减弱。沿(长)江西, 大气的垂直扩散能力有所减弱, 但水平输送能力却得到增强。

**关键词:** 大气污染; 扩散能力; 高斯扩散模型

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2019.06.010

**中图分类号:** X513      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2019)06-0055-08

## Atmospheric Pollution Diffusion in Anhui Province under Global Climate Change

HUANG Yong<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Hong<sup>4</sup>, WANG La-bao<sup>1,2,3</sup>, WANG Ru-wei<sup>5</sup>, MEI Jian-ming<sup>6</sup>

(1. Anhui Key Lab of Atmospheric Science and Remote Sensing, Anhui Meteorology Institute, Hefei 230031, China; 2. Shouxian National Climatology Observatory, Shouxian 232200, China; 3. Typical Eco-meteorological Farmland base of Huaihe River Basin CMA, Shouxian 232200, China; 4. Anhui Institute of Environment Science, Hefei 230071, China; 5. USTC School of Earth and Space Science, Hefei 230026, China; 6. Tongling Environment Observatory, Tongling 244000, China)

**ABSTRACT:** In this paper, the change characteristics of atmospheric pollution diffusion in Anhui Province were studied with the 30 years (from 1981—2010) data of 35 meteorological observatories, which had not been relocated from 1981 to 2010. For time variation, the percent of unstable day was increased annually at 0.31%. The atmospheric pollution diffusion was evolved with the character of "enhancement-decrease-enhancement". The ability of diffusion was decreased from 1997 to 2004. For the spatial distribution, the change trend of unstable day proportion was increased year by year, except the regions of West and East area along the Yangtze River, and some area in eastern of mountain area in Southern Anhui (that of Anqing decreased the fastest, with an annual rate of -0.32%). The simulation results with Gauss modes showed that, most of the region's atmospheric pollutant dispersion capacity was enhanced with the same pollution source. In addition, the diffusion ability of half of the 35 observa-

收稿日期: 2019-03-15; 修订日期: 2019-06-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0201900); 中央引导地方资金科技惠民项目(2016080802D116); 安徽省公益性技术应用研究联动项目(1604f0804001, 1604f0804002)

作者简介: 黄勇(1980—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为大气探测遥感与环境气象。

ories was decreased. The vertical diffusion was enhanced and the horizontal transmission was weakened in some regions, such as eastern part of Huaibei Plain, west-northern of Dabie Mountain and east-northern of mountain area in Southern Anhui. Oppositely, in the west part of Yangtze River, the vertical diffusion was weakened and horizontal transmission was enhanced.

**KEY WORDS:** atmospheric pollutants; diffusion ability; Gauss modes

近年来,受到全球气候变化的影响,我国的气候条件也发生了显著的变化。对于年平均气温来说,近百年来大气温度升高了 0.5~0.8 °C<sup>[1]</sup>。对于其他一些物理量而言,虽然无明显变化趋势,但年际变化的波动较大<sup>[1-3]</sup>。

气候条件的显著变化,不仅对植被生态和地表水循环产生了影响<sup>[4-7]</sup>,并且对区域大气环境质量和污染物分布造成了一定的影响<sup>[8-11]</sup>。已有研究表明,气温升高、降水频率降低、天气形势改变等变化,均可能对区域的大气污染气象条件造成负面影响<sup>[12-14]</sup>。Meleux 等<sup>[15]</sup>的研究结果显示,气候变化对 O<sub>3</sub> 浓度的影响与气温升高、干旱频发之间有着明显的关系,并且这种关系还随着地域的变化而变。符传博等对华南地区 1960—2013 年霾的研究结果也表明,年平均风速、大风日数、小风日数、降水日数等因子的变化,致使华南地区气溶胶粒子的扩散能力下降,湿沉降能力减弱<sup>[16]</sup>。毛敏娟等<sup>[17]</sup>研究表明,1996—2015 年在气候变化影响下,浙江省的大气污染扩散能力呈现出下降的变化趋势。另外,已有研究表明,城市化、地形地貌差异等都会对大气污染扩散能力造成一定的影响<sup>[18]</sup>。

安徽省地处南温带-亚热带的气候过渡区,淮河以北为南温带季风气候区,以南为亚热带季风气候区。安徽省内地形地貌复杂,长江、淮河两大水系自西向东横穿安徽,北部为(淮北)平原,东部有(江淮)丘陵,南部和西部均为山区(皖南山区和大别山区)。特殊的气候条件、地理位置以及多样化的地形地貌,使得这一地区的气候变化也呈现出其独有的变化特征<sup>[19-20]</sup>。文中利用安徽省气候中心整编的 30 年(1981—2010 年)地面气候观测资料,分析全球气候变化影响下,安徽省的大气污染扩散能力变化特征,为有效应对气候变化影响下的安徽省大气污染防治提供科学依据。

## 1 资料和方法

所用资料为安徽省气象部门整编的 30 年(1981—2010 年)气候数据集。该数据集包括了安徽全省 81 个气象台站,逐日的地面常规气象观测数据。文中主要用到数据集中的总云量、低云量、气温、气压、湿度、降水、风向和风速等气象要素。从中选取出

35 个在 1981—2010 年间未进行迁移的站点的观测资料,对安徽全省逐年的大气污染扩散能力进行分析。分析的参数主要包括:稳定日所占比重,以及在假定相同的污染源影响下,大气污染的最大落地浓度和最大落地距离。在这 35 个台站中,城市站 8 个,郊区站 12 个,乡村站 15 个,如图 1 所示。

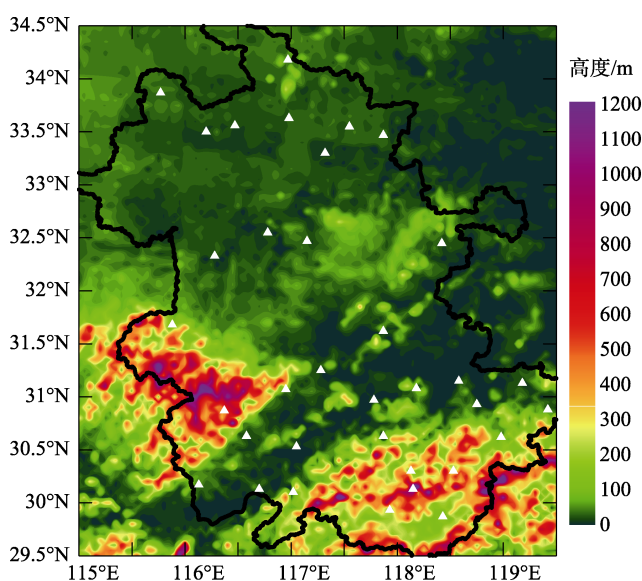


图 1 安徽省地形高度与 35 个台站分布

大气稳定度是评价大气污染扩散能力的主要指标之一。在目前通用的众多计算方法中, Pasquill 稳定度分级法<sup>[21]</sup>是较为常用的一种方法,且较适用于我国国情。在 Pasquill 稳定度分级法中,考虑到近地层大气的热能主要来源于地球表面的长波辐射加热,而地球表面温度的升高主要依赖于太阳短波辐射的加热作用。因此可以用太阳高度角、云量和风速来判断地球表面辐射加热的状况,进而评价大气的稳定度。根据 Pasquill 稳定度分级法,大气稳定度可分为 6 个等级,分别为:强不稳定、不稳定、弱不稳定、中性、较稳定和稳定,分别以 A、B、C、D、E、F 进行表示。分类时,先通过太阳高度角与云量来计算出太阳辐射的等级,再通过太阳辐射等级与地面的风速,来确定大气稳定度的等级。

在 Pasquill 稳定度分级法<sup>[21]</sup>中,通常只在夜间,或者是风速小于 3 m/s 的清晨和傍晚,才会出现稳定的大气层结。强不稳定的大气层结通常出现在太阳高度角大于 35° 的中午前后,且风速要小于 3 m/s。另

外,云量越多,地面风速越大,大气层结就越趋向于中性。因此,在没有太阳辐射加热的夜间,大气层结一般为中性、较稳定或稳定等级;而在太阳辐射较强且风速较小(<2 m/s)的晴天白昼,大气的层结多数为不稳定等级。

根据以上分析,文中以晴天且风速较小为标准,来判断不稳定的大气层结,并且认为当日白昼出现了不稳定等级的大气层结,则认为该日为大气层结不稳定,称为不稳定日。不稳定日比重则定义为当年不稳定日数占全年总日数的百分比。

此外,为了解气候变化影响下,安徽省大气污染扩散能力的变化特征及其地域差异,利用 1981—2010 年 35 个气象站的地面观测数据,在设定相同大气污染排放源的基础上,模拟 35 个站点所代表区域的大气污染扩散能力。大气污染排放源的相关信息如下:排放量为 1000 kg/h,排烟率为 500 m<sup>3</sup>/s,烟囱高度为 120 m,烟气温度为 100 °C,烟囱直径为 10 m。采用点源高斯污染扩散模型,模拟该排放源所排放污染物在大气中的扩散情况,统计最大落地浓度( $c_{\max}$ )及其对应的最大落地距离( $L_{\max}$ )这两个物理量,以此来表征大气污染扩散能力。具体计算公式为:

$$c = \frac{Q}{2\pi U \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{Y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot F$$

式中: $Q$  为单位时间的污染物排放量, mg/s;  $Y$  为该点与通过排气筒的风向轴线在水平面上的垂直距离, m;  $\sigma_y$  为垂直于风向的水平横向扩散系数, m;

$\sigma_z$  为铅直扩散系数, m;  $U$  为排气筒出口处的平均风速。

$$F = \sum_{n=-k}^k \left\{ \exp\left[-\frac{(2nh-H_e)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(2nh+H_e)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\}$$

式中: $h$  为混合层厚度;  $H_e$  为排气筒有效高度,等于排气筒高度  $H$  加上烟气抬升高度  $\Delta H$ 。

## 2 不稳定日占比

统计 1981—2010 年全省年均不稳定日频率的逐年变化,结果如图 2 所示。可以看出,不稳定日的出现频率有逐年上升的趋势。为进一步掌握不稳定日频率逐年上升的速率,采用线性回归方法,对逐年的不稳定日频率进行拟合。通过线性回归拟合,得到不稳定日频率逐年变化的表达式为:

$$y=0.0031x+0.2421$$

式中: $y$  为逐年的不稳定日频率;  $x$  为自 1981 年开始的年份序号(1981 年为 1, 1982 年为 2, ..., 2010 年为 30)。从关系式中可以看出,1981 年以后不稳定日频率以 24.21% 为基础,每年上升 0.31%。尤其是在 2001 年以后,不稳定日频率逐年上升的现象尤为明显。

从图 2 还可以看出,安徽省全省平均的不稳定日频率呈现出逐年上升的变化趋势,但对于各个观测站点来说,不一定存在着相同的变化趋势。为解决这一问题,分别统计每个站点不稳定日频率的逐年变化趋势,并制作变化速率的空间分布图。

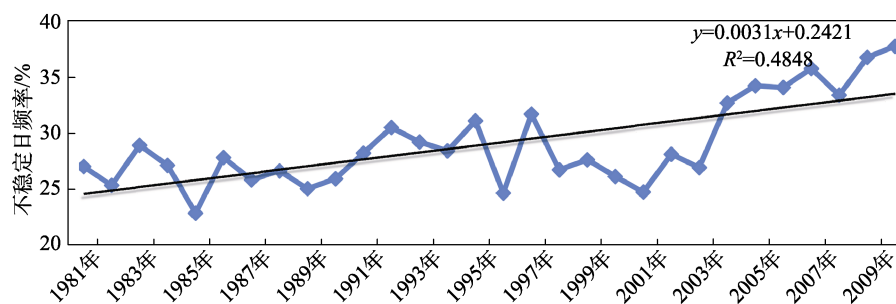


图 2 1981—2010 年安徽省大气不稳定日频率时序

首先,利用一元线性回归方法,拟合得到每个站点不稳定日频率的变化速率。然后,采用克里格插值方法将 35 个台站的变化速率,插值成分辨率为  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  网格点数据,并采用 surfer 软件制作空间分布图。35 个台站不稳定日频率逐年变化速率见表 1,可以看出,在 35 个台站中,大多数站(77%)出现上升的变化趋势,只有 8 个站出现了逐年下降的变化特征。在不稳定日频率逐年上升的台站中,霍邱站的上升速率最快,达到了 1.35%/a。逐年下降的 8 个台站中,安庆站的速率快,为 -0.32%/a。

从不稳定日频率逐年变化速率的空间分布图(图

3) 来看,大部分地区的不稳定日频率都呈现出了逐年上升的变化趋势,淮河及其两岸地区为上升趋势最为明显的区域。另外,在安徽省最北的灵璧县、沿(长)江部分市县以及皖南东部局部地区出现了不稳定日频率逐年下降的趋势。

总的来说,在安徽省的大部分地区,大气层结表现为不稳定的日数呈现出逐年升高的变化趋势。仅仅是在安徽最北部、沿(长)江局部地区和皖南山区东部的局部地区出现了不稳定日逐年降低的变化特征。

表 1 35 个台站位置 (城市站/郊区站) 不稳定日占比逐年变化趋势

%/a

位置	萧县	亳州	濉溪	涡阳	宿州	灵璧	泗县	固镇	霍邱
站名	乡村站	城市站	乡村站	郊区站	城市站	乡村站	郊区站	乡村站	城市站
比重	-0.05	0.19	-0.05	0.06	0.2	0.68	0.9	1.06	1.35
位置	寿县	长丰	来安	金寨	岳西	桐城	巢湖	庐江	繁昌
站名	郊区站	城市站	郊区站	乡村站	乡村站	乡村站	城市站	郊区站	乡村站
比重	0.09	0.74	0.77	0.05	0.56	-0.07	-0.23	0.45	0.02
位置	芜湖县	潜山	宿松	望江	东至	青阳	安庆	太平	铜陵
站名	郊区站	乡村站	乡村站	乡村站	郊区站	城市站	城市站	乡村站	郊区站
比重	0.4	-0.08	-0.08	0.1	0.56	0.24	-0.32	0.38	0.1
位置	宣城	旌德	宁国	光明顶	广德	郎溪	黟县	歙县	
站名	郊区站	城市站	郊区站	乡村站	乡村站	郊区站	乡村站	郊区站	
比重	0.09	0.16	-0.16	0.08	0.33	1.15	0.28	0.05	

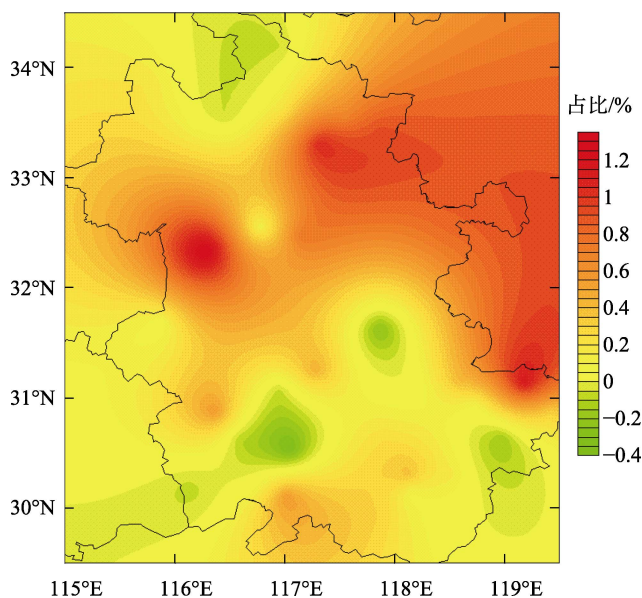


图 3 1981—2010 年安徽省不稳定日占比逐年变化趋势空间分布

### 3 大气污染扩散能力

#### 3.1 时间变化

首先,对 35 个站点计算得到的逐日  $c_{\max}$  和  $L_{\max}$  进行空间算术平均,得到全省平均的逐日最大落地浓度 ( $c_{\max \text{ save}}$ ) 以及相应的距离 ( $L_{\max \text{ save}}$ )。然后,对每年的  $c_{\max \text{ save}}$  和  $L_{\max \text{ save}}$  进行算术平均值,得到年久的  $c_{\max \text{ save}}$  和  $L_{\max \text{ save}}$ 。逐年年均  $c_{\max \text{ save}}$  和  $L_{\max \text{ save}}$  的时序变化如图 4 和 5 所示。1981—2010 年,全省的  $c_{\max \text{ save}}$  经历了“降低-升高-降低”的起伏式变化。其中,1981—1997 年为  $c_{\max \text{ save}}$  降低的时期,1997—2004 年为  $c_{\max \text{ save}}$  上升的时期,2004 年以后,  $c_{\max \text{ save}}$  再次出现逐年降低的变化特征。  $L_{\max \text{ save}}$  逐年变化与  $c_{\max \text{ save}}$  的变化正好相反,总体上呈现出“升高-降低-升高”的变化规律。其中,1981—1997 年为  $L_{\max \text{ save}}$  逐年升高

的时期,1997—2004 年为逐年降低的时期,2004 年以后,  $L_{\max \text{ save}}$  再次出现逐年升高的变化特征。

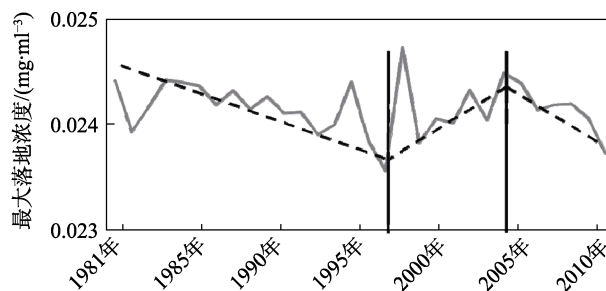


图 4 1981—2010 年安徽省  $c_{\max \text{ save}}$  的逐年变化

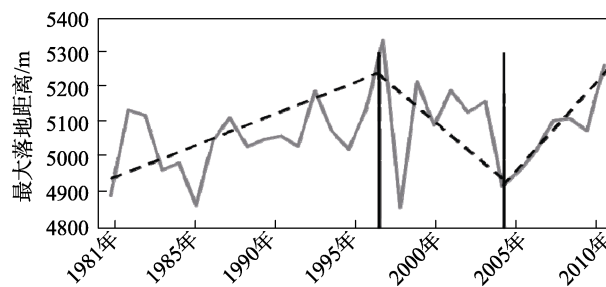


图 5 1981—2010 年安徽省  $L_{\max \text{ save}}$  的逐年变化

从上述分析可以看出,以  $L_{\max \text{ save}}$  和  $c_{\max \text{ save}}$  为代表的大气扩散能力的逐年变化趋势与不稳定日频率的时间变化规律总体上一致。所不同的是,在 1997—2004 年这一段时期内,大气污染扩散能力呈现出显著减弱的变化趋势,而不稳定日频率虽然有降低的特征,但变化幅度不大。

#### 3.2 空间分布

在 35 个站点逐日  $c_{\max}$  和  $L_{\max}$  计算结果的基础上,分别对每个站点的  $c_{\max}$  和  $L_{\max}$  进行多年平均,从而得到每个站点最大落地浓度 ( $c_{\max \text{ tave}}$ ) 及其对应距离 ( $L_{\max \text{ tave}}$ ) 的多年平均情况 (气候态)。最后,采用 Surfer 软件中的克里格插值方法,将 35 个站点的



$c_{\max \text{tave}}$  和  $L_{\max \text{tave}}$  插值到分辨率为  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  的等经纬距网格上, 绘制  $c_{\max \text{tave}}$  和  $L_{\max \text{tave}}$  的空间分布图, 如图 6 所示。

1981—2010 年, 安徽省  $c_{\max \text{tave}}$  的空间分布总体上自东向西呈现一个“高-低-高-低”的起伏式分布。其中, 在皖东、淮河及其以北的中部、大别山区东部和

北部、沿(长)江西西部以及皖南山区东部存在着  $C_{\max \text{tave}}$  的极大值中心, 即这些区域的大气污染扩散能力相对较差。而在淮河以北东北部、沿(长)江中部、江淮之间中部以及皖南山区南部, 出现了  $c_{\max \text{tave}}$  的极小值中心, 即这些区域的大气污染扩散能力较好。

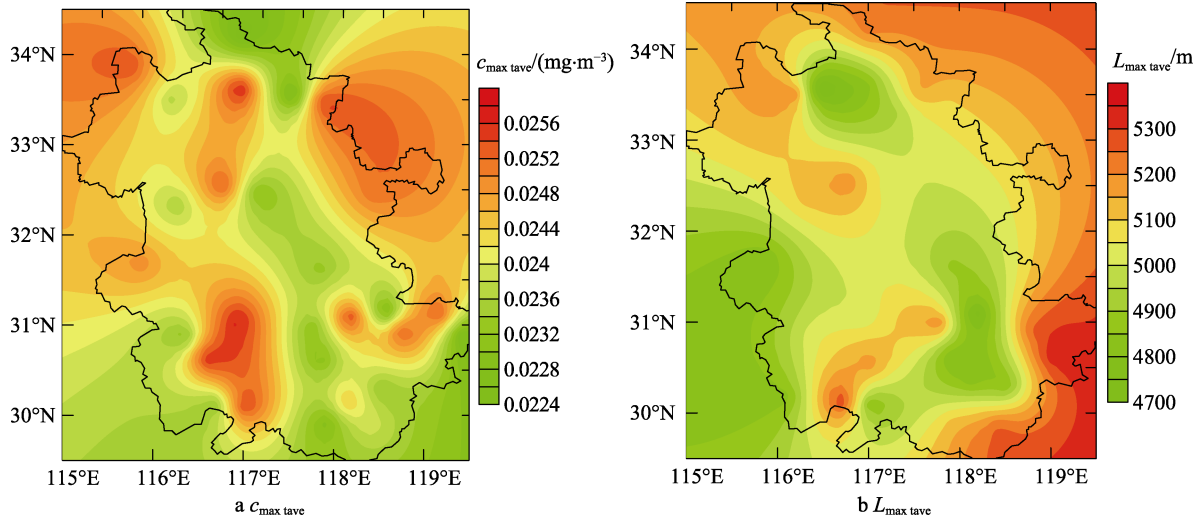


图 6 安徽省  $c_{\max \text{tave}}$  和  $L_{\max \text{tave}}$  的空间分布

对于  $L_{\max \text{tave}}$  而言, 多年平均值的空间分布中, 存在着 3 个极小值中心以及 3 个的极大值中心。3 个极小值中心分别位于皖西、淮河以北中北部以及沿(长)江东部到皖南山区东北部; 而 3 个极大值中心分别位于皖南山区东部、沿(长)江中西部、淮河及其以北地区的西部。

虽然时间变化中存在着明显的“浓度大、距离近; 浓度小、距离远”的反相相关关系, 但空间分布中  $c_{\max \text{tave}}$  和  $L_{\max \text{tave}}$  之间的反相相关关系不明显。在淮河以北西部、沿(长)江西西部以及皖南山区东北部存在着“浓度大、距离远”的特征。这说明, 在这些区域内, 因存在着较强的水平风速, 从而使得大气污染具有较强的水平输送能力, 将污染物输送到较远的距离。这些区域内垂直方向上的大气扩散能差, 大气污染虽然能输送到较远的地区, 但因垂直方向上的扩散能力差, 导致大气污染维持着较高的浓度数值。

与总体呈现逐年升高变化趋势的大气不稳定层结出现频率相比, 大气污染扩散能力的空间分布较为复杂。大气不稳定层结主要反映大尺度气象条件的影响, 而大气污染扩散除受气象条件影响外, 还受到局地的地形地貌、城市建设等因素的影响, 从而导致大气污染扩散能力的空间分布表现出更加复杂的特征。

### 3.3 变化趋势

通过以上时空分布特征的分析可以看出, 受气候变化影响, 安徽省的大气污染扩散能力总体上呈现“增强-减弱-增强”的起伏变化, 并且存在着较为明显

的空间差异。为了解大气污染扩散能力逐年变化的空间差异, 以及这种差异是否与地形、地理位置有关。对每个站点进行逐年  $c_{\max}$  和  $L_{\max}$  的平均值的计算, 并利用线性拟合方法 ( $y=ax+b$ ,  $y$  为  $c_{\max}$  或  $L_{\max}$ ,  $x$  为年份序号), 来进行拟合 1981—2010 年  $c_{\max}$  和  $L_{\max}$  的逐年变化, 并通过分析参数  $a$  的数值, 来了解变化趋势。拟合结果见表 2。

从拟合结果来看,  $c_{\max}$  呈现逐年升高和降低趋势的站点分别占 51.4% 和 48.6%。其中, 逐年升高趋势最为显著的是涡阳站, 升高速率为  $1.51 \times 10^{-4} \text{mg}/(\text{m}^3 \cdot \text{a})$ ; 而濉溪站的降低趋势最为明显, 逐年降低的速率为  $-1.48 \times 10^{-4} \text{mg}/(\text{m}^3 \cdot \text{a})$ 。35 个站点中, 有 12 个站的  $L_{\max}$  出现逐年缩短的趋势, 其中, 缩短最为明显的是东至站, 逐年缩短的速率为  $-33.22 \text{m/a}$ ; 巢湖站逐年增大的趋势最为显著, 增大速率为  $41.85 \text{m/a}$ 。

采用克里格插值方法将 35 个台站  $c_{\max}$  和  $L_{\max}$  的变化插值成分辨率为  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  网格点数据, 并采用 Surfer 软件制作空间分布图(如图 7 所示)。从空间分布来看, 大别山区东部、淮河及其以北地区的西部、江淮东部以及皖南东部等地区的  $c_{\max}$  呈现出逐年升高的趋势, 其他地区均呈现出逐年降低的变化趋势。对于  $L_{\max}$  而言, 逐年变化趋势的空间分布特征相对较为复杂。逐年缩短的区域主要在大别山区、皖南山区东部和西部、淮河西部以及淮河以北地区的西部和东部。在安徽省中东部的芜湖、合肥及马鞍山一带, 则呈现出显著增大的变化趋势。此外, 在沿(长)江西西部、皖南山区南部(休宁附近)以及淮河以北地区

表2 各站  $c_{\max}$  和  $L_{\max}$  的变化速率

站名	萧县	亳州	濉溪	涡阳	宿州	灵璧	泗县	固镇	霍邱
$c_{\max}/(10^{-4}\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{a}^{-1})$	0.19	0.42	-1.48	1.51	-0.78	-0.31	1.41	-1.02	0.94
$L_{\max}/(\text{m}\cdot\text{a}^{-1})$	10.04	2.33	26.65	-12.58	-19.88	7.56	-11.74	-5.49	-3.49
站名	寿县	长丰	来安	金寨	岳西	桐城	巢湖	庐江	繁昌
$c_{\max}/(10^{-4}\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{a}^{-1})$	-0.89	-0.85	0.94	-1.00	0.71	0.21	-1.34	0.84	-1.33
$L_{\max}/(\text{m}\cdot\text{a}^{-1})$	12.16	30.26	5.27	-21.37	8.34	-16.02	41.85	24.39	0.76
站名	芜湖	潜山	宿松	望江	东至	青阳	安庆	太平	铜陵
$c_{\max}/(10^{-4}\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{a}^{-1})$	0.22	0.69	-1.36	0.63	-0.57	-0.22	1.04	-1.32	0.64
$L_{\max}/(\text{m}\cdot\text{a}^{-1})$	7.15	-15.82	21.34	24.15	-33.22	7.74	-4.35	3.82	11.34
站名	宣城	旌德	宁国	光明顶	广德	郎溪	黟县	歙县	
$c_{\max}/(10^{-4}\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{a}^{-1})$	0.11	-0.32	1.06	-1.24	0.42	-0.08	-1.14	1.30	
$L_{\max}/(\text{m}\cdot\text{a}^{-1})$	-25.48	7.85	8.51	-13.19	16.77	7.65	25.94	4.99	

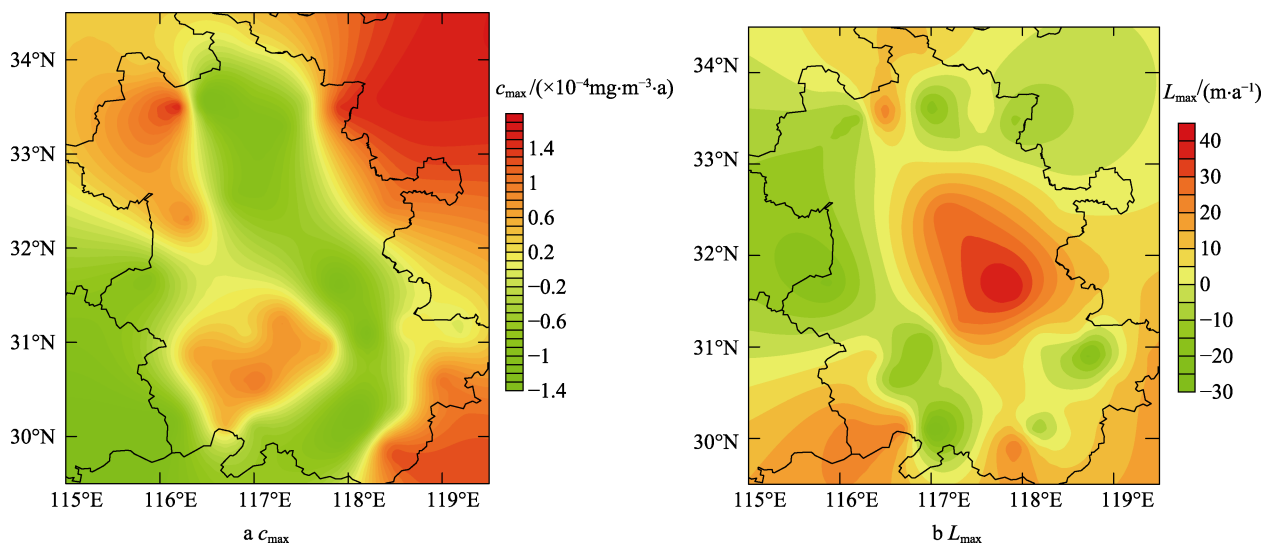


图7  $c_{\max}$  和  $L_{\max}$  平均值变化趋势的空间分布

的中北部，也表现出了逐年增大的变化趋势，但是变化速率要小于中东部地区。

$c_{\max}$  的升高，说明污染物在大气中的扩散能力减弱，而大气污染扩散能力的减弱也会在一定程度上引起  $L_{\max}$  的缩短。在  $c_{\max}$  和  $L_{\max}$  变化趋势的空间分布中，大部分地区都呈现出反位相关系的变化趋势，即  $c_{\max}$  在升高，而  $L_{\max}$  在缩短，或者  $c_{\max}$  在降低，而  $L_{\max}$  在增大。也存在部分地区  $c_{\max}$  和  $L_{\max}$  的变化趋势呈同位相关系，也就是说  $c_{\max}$  升高的同时， $L_{\max}$  也在增大，或者  $c_{\max}$  降低，且  $L_{\max}$  缩短。这些  $c_{\max}$  和  $L_{\max}$  同位相变化的区域主要位于：淮河以北东部、沿（长）江西部、大别山西北部以及皖南山区东北部。其中，淮河以北东部、大别山西北部和皖南山区东北部的  $c_{\max}$  在逐年降低、 $L_{\max}$  逐年缩短；而在沿（长）江西部的

$c_{\max}$  在升高的同时， $L_{\max}$  也在增大。

为了解极端情况下大气污染扩散能力的变化，分别统计 35 个站点逐年  $c_{\max}$  的极端值（一年中的极大值和极小值），并利用线性方程来拟合极端值的变化趋势，从而得到气候变化影响下 35 个站点  $c_{\max}$  极值（极大值和极小值）的变化情况，如图 8 所示。

从  $c_{\max}$  极值变化趋势的空间分布可以看出，皖南山区东部、沿（长）江中西部、大别山区东部和南部、淮河及其以北地区西部和东部等地区的极大值，呈现出逐年升高的变化趋势。与平均值的变化趋势相比，在淮河以北东部的局部地区，出现了一个  $c_{\max}$  升高的区域，但这一区域内  $c_{\max}$  平均值的变化趋势不明显。极小值逐年升高的区域主要位于皖南山区东部、沿（长）江中西部、大别山区东部和南部、沿淮西北部

以及皖东等, 极小值具有着与极大值相似的变化趋势空间分布特征。

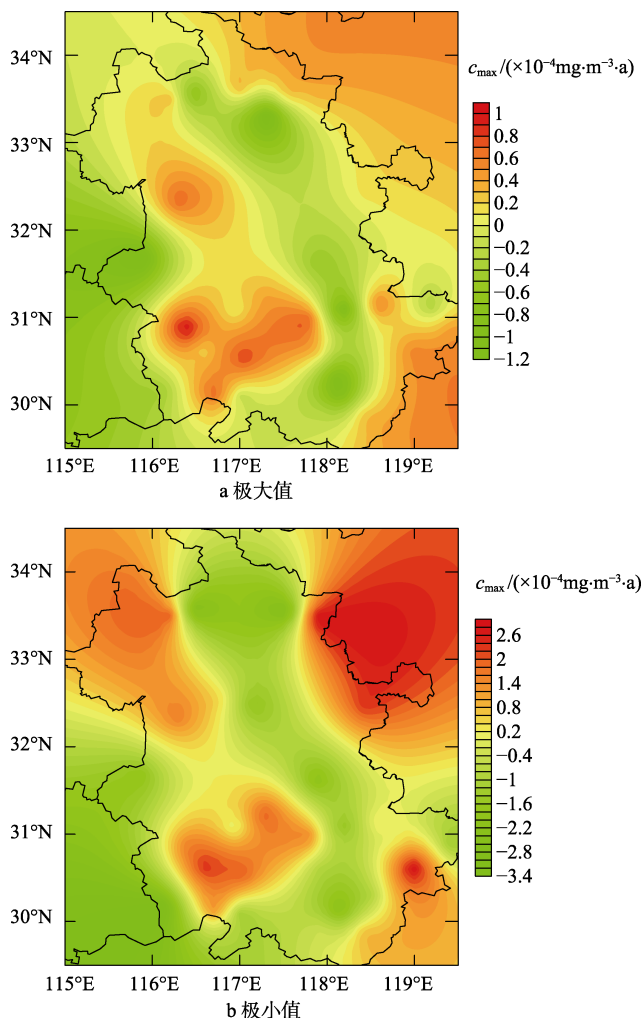


图 8  $c_{\max}$  极值变化趋势的空间分布

## 4 成因分析

以上分析表明, 在全球气候变化影响下, 1981—2010 年安徽省的大气污染扩散能力总体呈现“增强-减弱-增强”的起伏式变化特征, 虽然 1997—2004 年大气污染扩散能力出现了短暂的减弱, 但是总体上仍然呈现出增强的变化趋势。高斯扩散模型原理<sup>[19]</sup>表明, 太阳辐射、风速、气温、环境大气稳定等要素是影响大气污染扩散能力的主要因素。

年均气温总体上呈现逐年升高的变化趋势, 并且在大气污染扩散能力减弱的时期内(1997—2004 年), 未出现明显的特征变化。受城市化的影响, 高温频率有所增加<sup>[22]</sup>, 日均气温超过 32 °C 的高温频率, 在这段时期内表现出逐年增大的变化趋势。2004 年以后, 高温频率再次表现出显著的逐年降低的变化趋势<sup>[19]</sup>。此外, 对于不稳定日出现频率而言, 虽然总体上在 1981—2010 年这段时期内呈现出逐年升高的变化趋势, 但是在大气污染扩散能力减弱的时期内

(1997—2004 年), 也表现出了一个较弱的逐年降低的变化趋势。

从风速来看, 1981—2010 年, 受气象站点周边城市化<sup>[23]</sup>的影响(城市化对年平均风速减弱的贡献率为 40%), 平均风速总体上呈现出逐年减弱的变化趋势。在 1997—2004 年这段时期内, 出现了风速的先小幅增大, 随后逐渐减小的波动, 风速在 2.2~2.4 m/s 之间变化<sup>[19]</sup>。

当风速较小时, 大气的输送能力较差, 大气中的热量分布不均匀, 易出现大气垂直方向上的不稳定运动, 污染物随着不稳定的大气层结而逐渐扩散, 即以扩散运动为主。随着风速的逐渐增大, 大气中的热能分布较为均一, 大气层结垂直方向上的交换能逐渐减弱, 污染物的扩散运动逐渐被输送运动所代替。当风速超过一定数值后, 输送运动占据主导地位, 污染物随着大气的运动而被带至下风方, 从而降低本地的污染物浓度。鉴于以上分析, 1997—2004 年这时期内, 出现的大气污染扩散能力减弱的现象, 可以归结为风速恰好处于污染物扩散运动到输送运动的临界值(日均风速临界值在 2.2~2.4 m/s 之间)。增大的风速使得大气污染物的输送能力增强, 而扩散能力减弱。增强的大气污染物输送能力, 虽然降低了大气的扩散能力, 但是增强了污染物的区域输送, 从而降低了污染事件的发生。对安徽省霾天气发生频率进行统计分析的结果也表明, 霾天气总体上呈增多趋势, 但在 1997—2004 年出现了短暂的霾日减少的现象<sup>[24]</sup>。这与文中分析的结果相一致, 即水平风速的增大, 一方面减弱了大气污染物在垂直方向上的扩散能力, 使得  $c_{\max}$  升高和  $L_{\max}$  缩短; 但另一方面也增强了污染物的区域输送能力, 降低了霾天气的发生频率。

对于大气温度这个气象因子, 一方面会影响大气层结稳定度, 另一方面也会影响到排放源在源排放污染物时的热力抬升作用。排放源在排放污染物时的热力抬升作用会随着环境大气温度的升高而减弱, 进而降低了大气污染物的扩散能力。因此, 高温天数的增多, 也是 1997—2004 年这段时间内大气污染扩散能力减弱的原因之一。

在安徽省内的大部分区域, 不稳定日频率表现出显著的逐年上升的变化趋势, 仅仅是在沿(长)江中西部和皖南山区东部出现不稳定日频率逐年减低的变化趋势。沿(长)江中西部为皖南山区和大别山区之间的平坦区域, 皖南山区东部也恰好为这一区域中海拔较低的区域。因此, 这些区域表现出来的不稳定日频率逐年降低的特征与平坦的地形特征之间有着一定的联系。

安徽省的大气扩散能力存在较为显著的空间差异, 表现为  $c_{\max}$  的极大、极小值的中心交替出现, 但大气扩散能力的空间差异与地形地貌无明显的关系。另外, 淮河以北西部、沿(长)江西部和皖南山区东

北部,还表现出“浓度大、距离大”的特征。也就是说这些区域具备较强的平输送能力,可以将大气污染物输送到较远的地区,但垂直方向上的扩散能力差,大气污染物维持着较高的浓度。

## 5 结论

文中利用安徽省30年(1981—2010年)气候整编资料,对气候变化下安徽省大气污染扩散能力进行研究与分析,得出以下结论。

1) 大气层结的不稳定性逐年升高(不稳定日比重以每年0.31%的速率在上升),污染扩散能力逐年增强。在1997—2004年这段时期内,随着高温日数的增多,以及风速对污染物浓度影响机制的转变,污染扩散能力出现了短期的减弱趋势。

2) 大气层结不稳定日比重存在空间差异,大部分地区呈逐年升高的趋势,只有在沿江中西部和皖南山区东部出现下降的变化趋势。

3) 大气污染扩散能力及其变化存在地域差异,总体上扩散能力有所增强,只是在大别山区东部、沿淮西北部、江淮东部和皖南东部的部分地区出现了 $c_{\max}$ 升高的变化趋势。

4) 在大部分地区, $c_{\max}$ 和 $L_{\max}$ 的变化趋势表现出反位相相关关系,但也存在变化趋势相同的区域。其中,淮河以北东部、大别山西北部和皖南山区东北部, $c_{\max}$ 和 $L_{\max}$ 都表现出逐年减小的变化趋势,即水平输送能力减弱的同时垂直扩散能力在逐年增强。在沿(长)江西西部, $c_{\max}$ 和 $L_{\max}$ 都表现出逐年增大的变化趋势,也就是说浙西区域的水平输送能力增强,但是垂直方向上的扩散能力在逐年减弱。

### 参考文献:

- [1] 丁一汇,任国玉,石广玉,等.气候变化国家评估报告(I):中国气候变化的历史和未来趋势[J].气候变化研究进展,2006,2(1):3-8.
- [2] 王颖,施能,顾骏强,等.中国雨日的气候变化[J].大气科学,2006,30(1):162-170.
- [3] 任国玉,郭军,徐铭志,等.近50年中国地面气候变化基本特征[J].气象学报,2006,63(6):943-956.
- [4] 林凯荣,何艳虎,雷旭东,等.东江流域1959—2009年气候变化及其对径流的影响[J].生态环境学报,2011,20(12):1783-1787.
- [5] 姚玉璧,杨金虎,岳平,等.近50年三江源地表湿润指数变化特征及其影响因素[J].生态环境学报,2011,20(11):1585-1593.
- [6] 时忠杰,高吉喜,徐丽宏,等.内蒙古地区近25年植被对气温和降水变化的影响[J].生态环境学报,2011,20(11):1594-1601.
- [7] 晏利斌,刘晓东.1982—2006年京津冀地区植被时空变化及其与降水和地面气温的联系[J].生态环境学报,2011,20(2):226-232.
- [8] VAUTARD R, HAUGLUSTAIN D. Impact of Global Climate Change on Regional Air Quality: Introduction to the Thematic Issue[J]. Comptes Rendus Geoscience, 2007, 339: 703-708.
- [9] BRASSEUR G P, SCHULTZ M, GRANIER C, et al. Impact of Climate Change on the Future Chemical Composition of the Global Troposphere[J]. Journal of Climate, 2006, 19: 3932-3951.
- [10] GIORGI F, MELEUX F. Modeling the Regional Effects of Climate Change on Air Quality[J]. Comptes Rendus Geoscience, 2007, 339: 721-733.
- [11] JACOB D J, WINNER D A. Effect of Climate Change on Air Quality[J]. Atmos Environ, 2009, 43: 51-56.
- [12] HOGREFE C, LYNN B, CIVEROLO K, et al. Simulating Changes in Regional Air Pollution over the Eastern United States due to Changes in Global and Regional Climate and Emissions[J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109: D22301.
- [13] LEIBENSPERGER E M, MICKLEY L J, JACOB D J. Sensitivity of US Air Quality to Mid-latitude Cyclone Frequency and Implications of 1980—2006 Climate Change[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2008, 8: 7075-7086.
- [14] LEUNG L R, GUSTAFSON J W I. Potential Regional Climate Change and Implications to U. S. Air Quality[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32: L16711.
- [15] MELEUX F, SOLMON F, GIORGI F. Increase in Summer European Ozone Amounts due to Climate Change[J]. Atmos Environ, 2007, 41: 7577-7587.
- [16] 符传博,丹利,唐家翔,等.1960—2013年华南地区霾污染的时空变化及其与关键气候因子的关系[J].中国环境科学,2016,36(5):1313-1322.
- [17] 毛敏娟,杜荣光,胡德云.气候变化对浙江省大气污染的影响[J].环境科学研究,2018,31(2):221-230.
- [18] 李洪权,尹浩,杨咏钢,等.湖州大气扩散能力变化特征及其原因探讨[J].中国农学通报,2018,34(19):121-125.
- [19] 张红,黄勇,刘慧娟.安徽省近30年气候变化的空间特征[J].生态环境学报,2012,21(12):1935-1942.
- [20] 黄勇,张红,冯妍.近38年安徽省夏季降水日数和强度的分布与变化特征[J].长江流域资源与环境,2012,21(2):157-167.
- [21] 但尚铭. Pasquill 大气稳定度查算图及其制作方法[J].环境科学,1988,9(2):76-78.
- [22] 吴蓉,孙怡,杨元建,等.城市化对安徽省极端气温事件的影响[J].气候变化研究进展,2016,12(6):527-537.
- [23] 陶寅,黄勇,杨元建,等.城市化进程对安徽省风速的影响[J].气候变化研究进展,2016,12(6):519-526.
- [24] 石春娥,王喜全,李元妮,等.1980—2013年安徽霾天气变化趋势及可能成因[J].大气科学,2016,40(2):357-370.