

# 长江中游城市群大气环境容量演变特征分析

孙杰<sup>1</sup> 任永建<sup>2</sup> 高媛<sup>31</sup>

(1. 湖北省信息与技术保障中心, 湖北 武汉 430074;

2. 湖北省气象服务中心, 湖北 武汉 430205;

3. 武汉区域气候中心, 湖北 武汉 430074)

**【摘要】:** 为厘清长江中游各城市群大气环境容量的演变特征, 为科学制定适应减缓的政策提供技术支撑。本研究基于 1961~2016 年气象台站定时观测资料, 采用国标法计算了中游城市群近 56a 大气稳定度、混合层厚度和大气环境容量系数。结果表明: 近 56a 来, 中游城市群大气稳定度基本以中性类居多, 稳定类次之, 不稳定类最少。武汉城市圈中性类频率有显著的下降趋势, 达到-3.4%/10a, 不稳定和稳定类则表现显著的上升趋势, 分别为 1.9 和 1.5%/10a; 环长株潭和环鄱阳湖城市圈的不稳定类频率变化均不明显; 但中性类频率上升趋势显著, 分别为 0.3 和 1.2%/10a, 稳定类频率呈显著下降趋势, 分别为 0.3 和 1.1%/10a。武汉城市圈春、夏季混合层厚度要高于秋、冬季; 夏、秋、冬三季均呈现下降趋势, 分别为 0.1、6.0 和 43.9m/10a, 春季呈上升趋势, 达到 9.3m/10a。环长株潭城市圈和环鄱阳湖城市圈四季混合层厚度均为下降趋势。年内大气环境容量系数呈倒“U”型分布, 峰值出现在夏季, 秋、冬季为低值时段; 56a 来各城市圈大气环境容量系数逐渐下降, 下降速率分别为  $1.6 \times 10^4$ 、 $0.9 \times 10^4$  和  $1.8 \times 10^4$  ( $\text{km}^2/\text{a}$ )/10a。近 56a 大气稳定度增加, 混合层厚度下降以及风速减小是中游城市群大气环境容量系数减小、大气自净能力减弱的主要原因。

**【关键词】:** 中游城市群 大气环境容量系数 大气稳定度 混合层厚度

**【中图分类号】:** X26 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2022)01-0202-10

气候容量是针对全球气候和环境变化背景下提出的概念, 是适应气候变化的测度指标<sup>[1]</sup>。当前, 全球社会既面临人类活动造成的气候空间客体活动的强度和规模激增, 又面临气候变暖等因素造成的气候容量空间的明显萎缩。在这两方面因素的共同作用下, 目前许多地区气候容量空间正在趋于饱和, 甚至有些地区还出现了超载<sup>[2]</sup>, 气候风险总体正在不断升高, 未来社会经济活动和生态环境建设的气候容量空间已经十分有限, 气候安全形势日益严峻。

气候容量包含了众多关键影响因子, 其中大气环境容量评估作为气候容量的重要组成。大气环境容量是在给定空气体积中和给定时段内, 当某种污染物在给定平均浓度水平上, 其产生量(源)和大气清除量(汇)达到平衡状态时, 该平衡量为在此平均浓度阈值下的大气环境容量<sup>[3,4]</sup>。研究大气环境容量将为制定区域大气环境质量标准、控制和治理大气污染提供重要的依据。

**作者简介:** 孙杰(1981~), 男, 高级工程师, 主要研究方向为气候变化和气候应用。E-mail:sunjie19811217@126.com;任永建 E-mail:renyj@cma.gov.cn

**基金项目:** 湖北省气象局科技基金重点项目(2019Z09);中国气象局气候变化专项(CCSF202033, CCSF202008)

目前,国内外已具备较成熟的评估模型以及较丰富的成果应用。大气环境容量估算的基本方法<sup>[5]</sup>主要有基于总量控制系数 A 值法和点源控制系数 P 的 A-P 值法、利用线性规划优化各点源排放量的线性优化法和基于空气质量模式模拟污染物浓度的模式模拟法<sup>[6,7,8,9,10]</sup>。与模式法和规划法相比而言,A 值法使用简便,可操作性强。徐大海等<sup>[11]</sup>根据中国大陆 378 个气象站 1975~2014 年共 40a 的逐日有效地小时观测数据,计算出了逐日、逐年平均的大气环境容量系数 A 值系列,探讨了各重现期的大气环境容量系数在不同控制区面积、时段所对应的容量及其相应空气质量的关联<sup>[12]</sup>。许启慧等<sup>[13]</sup>采用 A 值法计算了河北省大气环境容量,分析了其气候分布特征和长期变化趋势。刘新等<sup>[14]</sup>分析了内蒙古呼包鄂地区大气环境容量与气象要素之间的相关性。鲁洋等<sup>[15]</sup>基于修正 A 值法评估率水流域的大气环境容量,系统分析了主要大气污染物的环境容量对各参数变化的敏感性。

长江中游城市群是以武汉城市圈、环长株潭城市圈、环鄱阳湖城市圈为主体形成的特大型城市群,国土面积约 31.7 万 km<sup>2</sup>,承东启西、连南接北,是长江经济带三大跨区域城市群支撑之一,也是实施促进中部地区崛起战略、全方位深化改革开放和推进新型城镇化的重点区域,在我国区域发展格局中占有重要地位。2015 年 4 月国务院批复《长江中游城市群发展规划》发展目标 and 任务中明确指出着眼推动生态文明建设和提升可持续发展能力,促进城市群绿色发展,形成人与自然和谐发展格局。

气象条件是影响大气环境容量最重要的因素之一,它影响着区域大气扩散、稀释能力,从而影响大气环境容量<sup>[2]</sup>。大气环境容量主要受风速、大气稳定度、混合层高度等因素的影响<sup>[16]</sup>,亚洲季风的年际变化<sup>[17]</sup>、北极海冰的变化<sup>[18]</sup>对大气环境容量也有重要的调制作用。大气环境容量的自然属性决定了其必然受到气候变化的影响,但针对中游城市群大气环境容量的系统研究还很少。本研究利用中游城市群 31 个地面站的定时观测资料,对中游城市群大气稳定度、混合层厚度和大气环境容量系数的变化趋势进行探讨。开展该地区大气环境容量研究和评估,科学制定的适应减缓的政策是生态文明建设的重要组成部分,有助于地方政府制定相应的中长期发展规划和适应政策提供服务,为促进社会经济的可持续发展发挥作用,同时也可为全国其他城市或城市圈开展气候容量相关研究,特别是不同区域的气候容量指标体系和阈值研究提供技术方法指引。

## 1 数据和分析方法

### 1.1 数据

考虑台站迁徙及资料稳定性,选取收集武汉城市圈、环长株潭城市圈和环鄱阳湖城市圈共 3 省市 31 个县市(其中武汉城市圈 9 个站、环长株潭城市群 9 个站和环鄱阳湖城市群 13 个站)的气象台站 1961~2016 年定时观测资料,选取的气象要素为风速、总云量、低云量和降水量。其中,为方便日常气象业务应用,考虑到云量观测资料的限制,云量为逐日 14 时观测风速。因观测业务调整,2013 年以后部分站点取消了云量的观测,利用临近站点的数据进行线性回归插补至 2016 年。研究中气候基线期选取 1981~2010 年。

### 1.2 分析方法

大气稳定度是表征气温垂直分布的重要参数,当大气层结处于稳定状态时,大气扩散能力差,污染物不易扩散。大气稳定度有多种定义和分类方法,如理查逊数、莫林-奥布霍夫长度、温差法、风速比法等,本研究采用 Pasquill-Turner 法中的稳定度等级分类法,按照风速、总云量、低云量、太阳辐射等级将大气稳定度分为强不稳定、不稳定、弱不稳定、中性、较稳定和稳定六级。

采用 Pasquill 稳定度对大气稳定度等级进行分类<sup>[19]</sup>,大气稳定度分为 3 大类,即不稳定类(强不稳定、不稳定、弱不稳定)、中性类和稳定类(较稳定和稳定),具体如表 1 所示。

表 1 大气稳定度的等级

地面风速 (m/s)	太阳辐射等级					
	3	2	1	0	-1	-2
≤1.9	A	A-B	B	D	E	F
2.0~2.9	A-B	B	C	D	E	F
3.0~4.9	B	B-C	C	D	D	E
5.0~5.9	C	C-D	D	D	D	D
≥6	D	D	D	D	D	D

其中，A~F 分别表示强不稳定，不稳定，弱不稳定，中性，较稳定和稳定六级。

混合层是湍流特征不连续界面以下湍流较充分发展的大气层，其厚度就是混合层厚度，厚度越大，越有利于污染物的扩散和稀释。大气混合层厚度的确定有国标法、罗氏法、干绝热法等，罗氏法需要局地修正，而干绝热法需要探空资料。为了解长江城市群大气容量的分布情况，本研究采用国标规定，利用地面常规气象观测资料，包括太阳高度角、云量(总云量、低云量)和风速，由公式计算出混合层厚度<sup>[20]</sup>，当大气稳定度为 A、B、C、D 时：

$$h = \frac{\alpha_s U_{10}}{f} \quad (1)$$

当大气稳定度为 E 和 F 时：

$$h = \frac{b_s \sqrt{U_{10}}}{f} \quad (2)$$

$$f = 2\omega \sin\phi \quad (3)$$

式中：h 为混合层厚度(E、F 时指近地层厚度，单位：m)； $U_{10}$  为 10m 高度处平均风速(单位： $m \cdot s^{-1}$ )， $>6m \cdot s^{-1}$  时取  $6m \cdot s^{-1}$ ； $\alpha_s$ 、 $b_s$  为混合层系数；f 为地转参数； $\omega$  为地转角速度，取  $7.29 \times 10^{-5} rad \cdot s^{-1}$ 。 $\phi$  为地理纬度，单位： $(^\circ)$ 。

本研究采用 A-P 值法，是最简单的大气环境容量估算方法，其特点是不需要知道污染源的布局、排放量和排放方式，就可以估算该区域的大气环境容量，对决策和提出区域总量控制指标有一定的参考价值。在计算大气环境容量系数时涉及大气稳定度和混合层厚度，两者均是影响大气污染扩散的重要因子。

采用长时间平衡条件下的简单箱模式<sup>[19]</sup>，仅考虑通风稀释和雨洗作用，并假定大气本底浓度相对于污染物浓度很小，将气块体积内的大气污染物平衡方程简化<sup>[21]</sup>，得到大气环境容量系数计算公式：

$$A = 3.1536 \times 10^{-3} \times \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot V_E + W_r \times R \times$$

$$\sqrt{S} \quad (4)$$

$$V_E = \int_0^H u(z) dz \quad (5)$$

式中：A 为大气环境容量系数 ( $10^4 \text{ km}^2/\text{a}$ )； $V_E$  代表通风量 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )，H 代表混合层厚度 (m)；Z 表示混合层内某层距离地面的高度 (m)； $u(z)$  表示混合层内 z 高度上的风速 ( $\text{m}/\text{s}$ )； $W_r$  代表清洗比，通常取  $6 \times 10^5$ ；R 代表降水率 ( $\text{mm}/\text{d}$ )；S 代表单位面积，参照其他研究取  $100 \text{ km}^2$ 。

## 2 大气环境容量系数变化特征

从图 1 可以看出，各城市圈平均大气环境容量系数的逐月变化基本一致，呈倒 U 型分布特征，峰值出现在夏季，其中 7 月大气环境容量系数值均在  $11 \times 10^4 \text{ km}^2/\text{a}$  以上，长株潭城市圈 7 月峰值达到  $12.9 \times 10^4 \text{ km}^2/\text{a}$ ，其次 4、8 和 9 月达到  $9 \times 10^4 \text{ km}^2/\text{a}$ ，春、夏季对流性天气较多，湍流旺盛，大气环境容量系数为年内较高的时段。11、12 和 1 月为全年最低时段，其中 12 月最低，武汉城市圈 12 月大气环境容量系数仅为  $6.4 \times 10^4 \text{ km}^2/\text{a}$ ，其他两个城市圈为  $7.0 \times 10^4 \text{ km}^2/\text{a}$ ，主要是秋、冬两季太阳辐射较弱，湍流活动较弱，大气稳定，相应大气环境容量系数较小。

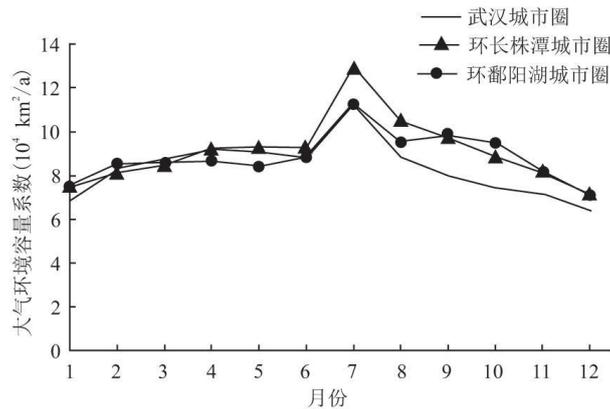


图 1 1961~2016 年城市圈平均大气环境容量系数逐月变化

图 2 给出了 1961~2016 年武汉城市圈、环长株潭城市圈、环鄱阳湖城市圈大气环境容量系数逐年变化。可以看出，近 56a 来武汉城市圈大气环境容量系数逐渐下降，大气自净能力不断减弱。大气环境容量减小速率为  $1.6 \times 10^4 (\text{km}^2/\text{a})/10\text{a}$ ，通过了  $\alpha = 0.001$  的信度检验。从年代际变化来看，20 世纪 60~70 年代大气环境容量系数较大，80 年代开始呈下降趋势，尤其是 2011 年以来下降速率不断加快。长株潭和鄱阳湖两个城市圈均呈显著减少趋势，减少速率分别为  $0.9 \times 10^4$  和  $1.8 \times 10^4 (\text{km}^2/\text{a})/10\text{a}$ ，均通过  $\alpha = 0.001$  的信度检验。年代际变化上，长株潭 20 世纪 60~80 年代均呈增加趋势，80 年代开始减少速率加快；鄱阳湖城市圈大气环境容量系数的变化趋势与武汉城市圈的变化趋势基本一致，近 6 年减小速率明显加快。

## 3 大气稳定度变化特征

### 3.1 年变化

图3给出了1961~2016年武汉城市圈、环长株潭城市圈、环鄱阳湖城市圈3类大气稳定度频率逐年变化。可以看出,3个城市群多年的大气稳定度基本以中性类居多,稳定类次之,不稳定类最少;武汉城市圈的不稳定平均频率为25.7%,中性类为43.3%,稳定类为30.9%;环长株潭城市圈的不稳定平均频率为17.8%,中性类为59.6%,稳定类为22.5%;环鄱阳湖城市圈的不稳定平均频率为17.7%,中性类为63.2%,稳定类为19.1%。3个城市圈相比较可以看出,环鄱阳湖城市圈的中性类比例最高,环长株潭其次,武汉城市圈的不稳定和稳定类比例均是最高的。

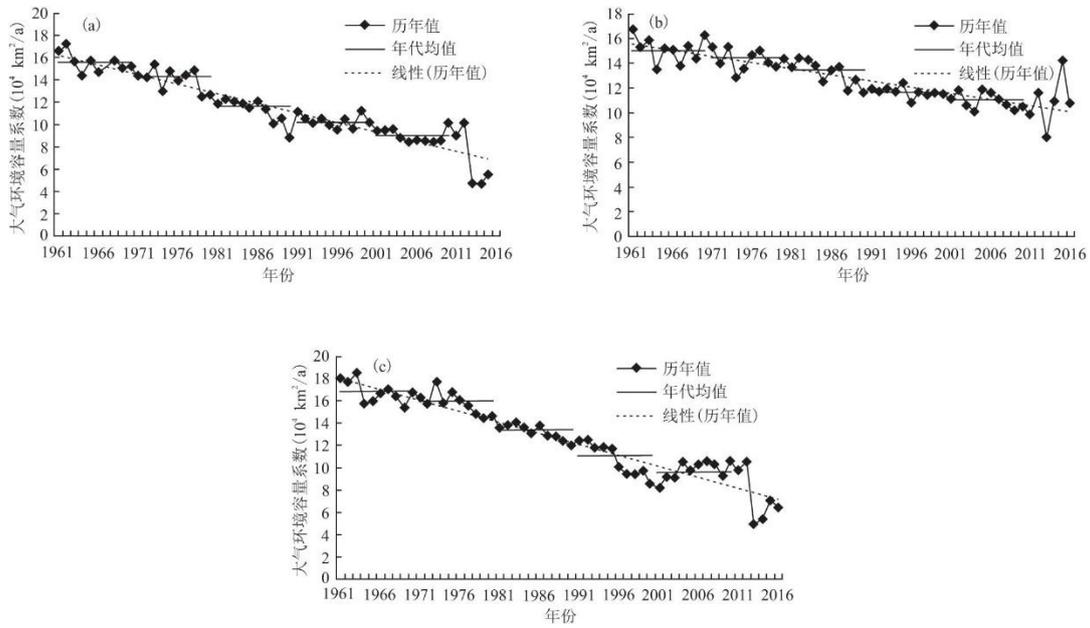


图2 1961~2016年武汉城市圈(a)、环长株潭城市圈(b)、环鄱阳湖城市圈(c)大气环境容量系数逐年变化

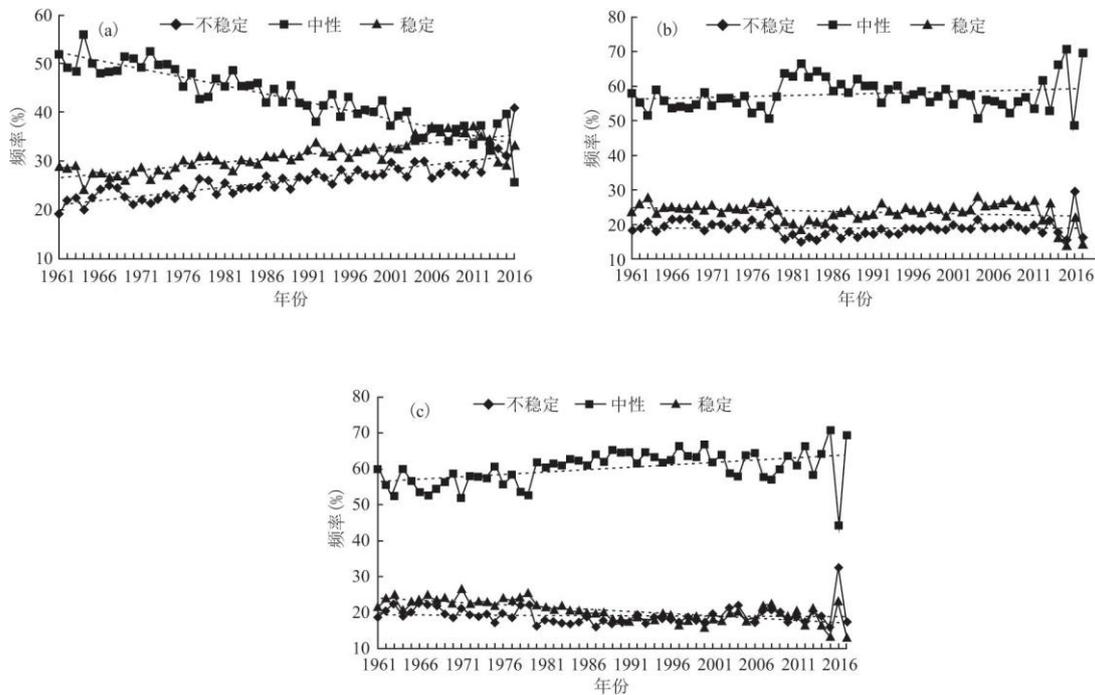


图3 1961~2016年武汉城市圈(a)、环长株潭城市圈(b)、环鄱阳湖城市圈(c)三类大气稳定度频率逐年变化

56a 以来, 武汉城市圈平均稳定度频率有明显的变化趋势, 其中, 中性类频率有显著的下降趋势, 变化趋势为-3.4%/10a, 通过  $\alpha=0.001$  的信度检验; 而不稳定和稳定类则表现显著的上升趋势, 变化趋势分别为 1.9 和 1.5%/10a, 且均通过  $\alpha=0.001$  的信度检验。环长株潭和环鄱阳湖城市圈的不稳定类频率变化均不明显; 但中性类频率上升趋势显著, 变化趋势分别为 0.3 和 1.2%/10a, 而稳定类频率呈显著下降趋势, 变化速率分别为-0.3 和 1.1%/10a。

### 3.2 月变化

武汉城市圈中性类稳定度占比最高, 其次是稳定类, 不稳定类占比最小, 其发生频率分别为 43.3%、31.0%和 25.7%。中性类稳定度的频率各月都在 36%以上, 10 月出现最小值(36.8%), 1 月出现最大值(50.0%)。季节变化也表现为中性类稳定度占比最高, 其次是稳定类, 不稳定类占比最小。中性类较其他两类偏高明显, 特别在冬季达到极值, 不稳定类和稳定类有明显的季节差异。不稳定类在冬季出现频率较低, 春、夏两季相对较高, 均在 28%以上; 而稳定类则相反, 在冬季的频率较高, 春、夏季出现的频率相对较低。

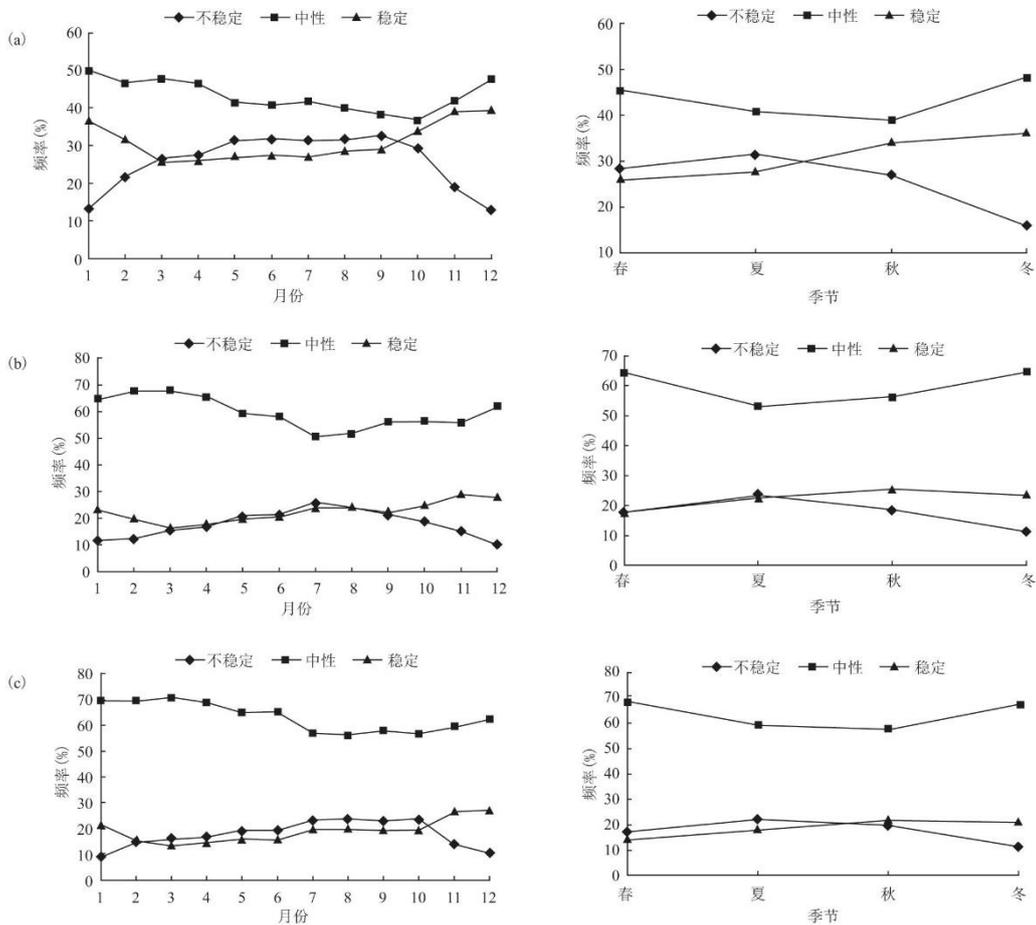


图 4 1961~2016 年武汉城市圈 (a)、环长株潭城市圈 (b)、环鄱阳湖城市圈 (c) 三类大气稳定度频率逐月及季节变化

环长株潭城市圈中性类稳定度占比最高, 其次是稳定类, 不稳定类占比最小, 其发生频率分别为 59.7%、22.5%和 17.8%。中性类稳定度的频率各月都在 50%以上, 7 月出现最小值(50.6%), 3 月出现最大值(68.0%)。季节变化也表现为中性类稳定度占比最高, 其次是稳定类, 不稳定类占比最小。中性类较其他两类偏高明显, 尤其在春、冬季达到最大, 不稳定类和稳定类有季节差异。不稳定类在冬季出现频率较低, 夏季相对较高, 为 22.1%; 而稳定类则相反, 在秋、冬季的频率较高, 春季出现的频率相对较低。

环鄱阳湖城市圈中性类稳定度占比最高，其次是稳定类，不稳定类占比最小，其发生频率分别为 63.2%、19.0%和 17.7%。中性类稳定度的频率各月都在 56%以上，8 月出现最小值(56.3%)，3 月出现最大值(70.8%)。季节变化也表现为中性类稳定度占比最高，其次是稳定类，不稳定类占比最小。中性类较其他两类偏高明显，尤其在春、冬季达到最大，不稳定类和稳定类有季节差异。不稳定类在冬季出现频率较低，夏季相对较高，为 23.7%；而稳定类则相反，在秋、冬季的频率较高，春季出现的频率相对较低。

综上所述，环鄱阳湖城市圈中性频率最高，环长株潭其次，不稳定频率武汉城市圈最高，另外两个城市圈相当，而稳定频率与不稳定特征基本一致。

#### 4 混合层高度变化特征

14 时基本是一天混合层厚度最厚的时刻，因此用这个时刻值表示当天最大的大气容量值，图 5 分别给出了 1961~2016 年各城市圈大气混合层厚度年均及四季变化。武汉城市圈春夏季混合层厚度要高于秋冬季，其中以冬季混合层厚度为最低(471.4m)，秋季次之(624.0m)，春季(686.0m)、夏季(733.1m)最高；除春季外，夏、秋、冬三季均呈现下降趋势，减小速率分别为 0.1、6.0 和 43.9m/10a，夏季变化不明显，秋、冬两季分别通过  $\alpha = 0.02$  和  $\alpha = 0.001$  的信度检验，冬季下降趋势显著。春季的上升速率为 9.3m/10a，通过  $\alpha = 0.02$  信度检验，且 2000 年之前呈阶段性下降趋势，2000 年左右转变为上升趋势，平均混合层厚度从 670.8m 上升为 720.8m。2000 年以来，春季冷空气次数明显增多，南北气流交汇频繁，大风日数和不稳定频率的增加是春季混合层厚度发生变化的可能原因。

环长株潭城市圈和环鄱阳湖城市圈变化趋势比较一致。其大气混合层厚度均从高到低依次是夏、秋、春、冬季。长株潭四季混合层厚度均为下降趋势，夏、秋、冬季分别通过了  $\alpha = 0.1$ 、 $\alpha = 0.01$  和  $\alpha = 0.001$  的信度检验，其中冬季下降速率最大，为 15.2m/10a；鄱阳湖四季混合层厚度均为显著下降，且下降速率均超过 20m/10a，其中冬季为 37.8m/10a，秋季为 31.7m/10a。

表 2 1961~2016 年各城市圈大气混合层厚度四季均值及变化趋势和显著性

城市圈	指标	冬季	春季	夏季	秋季
武汉	平均值(m)	471.4	686.0	733.1	624.0
	速率(m/10a)	-43.9	9.3	-0.1	-6.0
	显著性	0.001	0.02	--	0.02
环长株潭	平均值(m)	611.5	706.1	836.2	727.5
	速率(m/10a)	-15.2	-0.9	-8.6	-9.8
	显著性	0.001	--	0.1	0.01
环鄱阳湖	平均值(m)	589.5	661.2	757.8	721.6
	速率(m/10a)	-37.8	-22.2	-27.2	-31.7
	显著性	0.001	0.001	0.001	0.001

各城市圈平均大气混合层厚度随月份变化趋势较为一致。在春、夏季混合层厚度较大，最大值均出现在 7 月，3 个区域分别为 832.9、922.9、816.5m。秋、冬两季较小，最小值均出现在 12 月份。主要原因在于春、夏季对流性天气偏多，稳定类减少，

混合层高度相对偏高；而秋、冬季大气较稳定，混合层高度相应的也偏小。各城市圈的平均风速最大值出现在均在7月(图略)，而最小值出现在冬季尤其是10~12月，与混合层的变化一致。

## 5 结论与讨论

本文根据 A 值法，利用中游城市圈 31 个气象站的定时观测资料，分析了中游城市圈 1961~2016 年的大气稳定度、混合层厚度以及大气环境容量系数等的变化特征，主要结论如下：

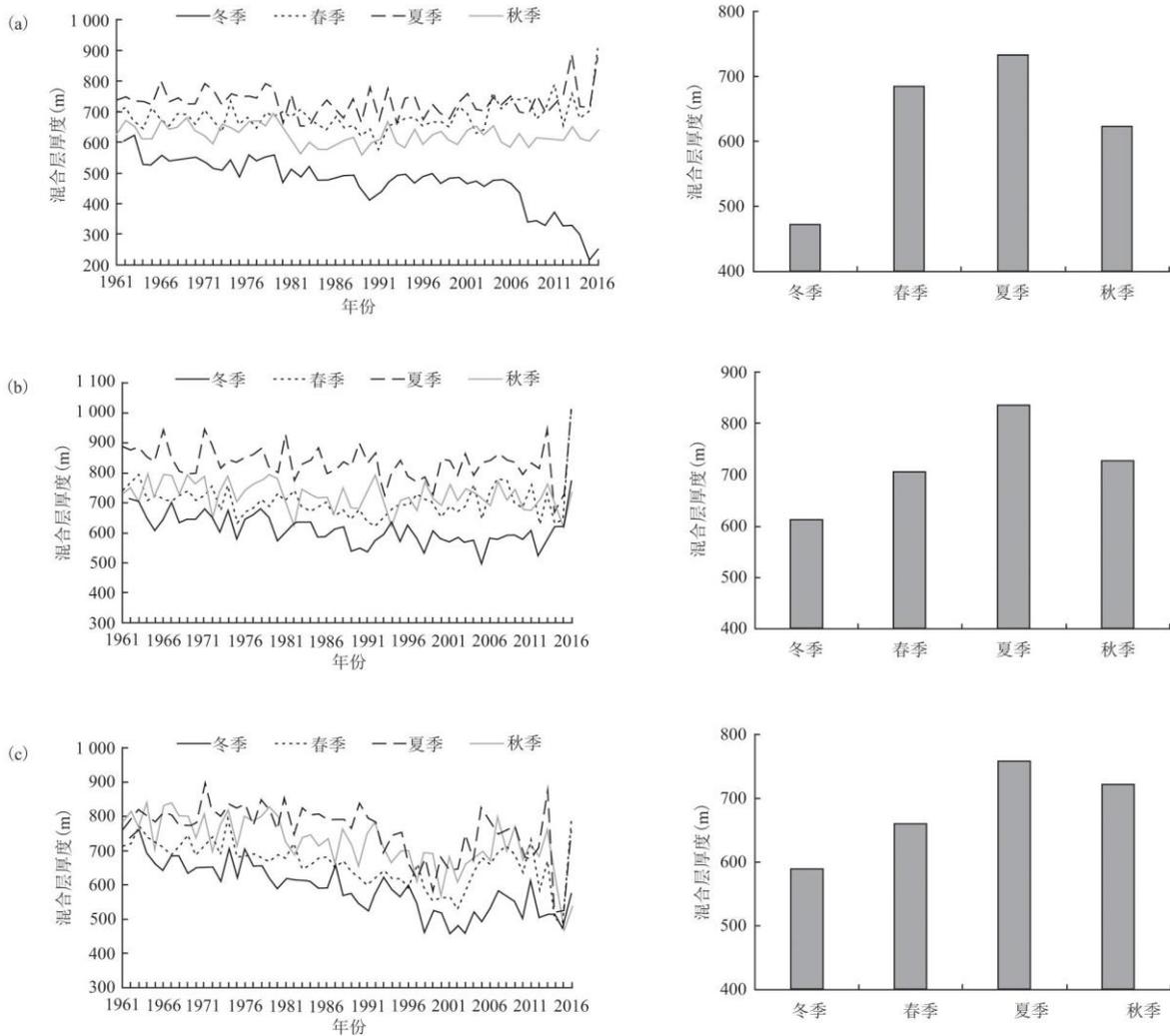


图 5 1961~2016 年武汉城市圈 (a)、环长株潭城市圈 (b)、环鄱阳湖城市圈 (c) 平均大气混合层厚度年均及四季变化

(1) 三个城市圈多年的大气稳定度基本以中性类居多，稳定类次之，不稳定类最少。武汉城市圈中性类频率有显著的下降趋势，不稳定和稳定类则表现显著的上升趋势；环长株潭和环鄱阳湖城市圈的不稳定类频率变化均不明显；但中性类频率上升趋势显著，稳定类频率呈显著下降趋势。

(2) 武汉城市圈春、夏季混合层厚度要高于秋、冬季；夏、秋、冬三季均呈现下降趋势，春季呈上升趋势。环长株潭城市圈和环鄱阳湖城市圈变化趋势比较一致，四季混合层厚度均为下降趋势。

(3)各城市圈平均大气环境容量系数的逐月变化基本一致,呈倒U型分布特征,峰值出现在夏季,春、夏季对流性天气较多,湍流旺盛,大气环境容量系数为年内较高的时段。近56年来各城市圈大气环境容量系数逐渐下降,减小速率分别为 $1.6\times 10^4$ 、 $0.9\times 10^4$ 和 $1.8\times 10^4(\text{km}^2/\text{a})/10\text{a}$ 。

本文在计算区域总量控制系数(A值)所使用的干、湿成降参数较为宏观和粗糙,并未考虑化学清楚过程,这些都有待在以后的研究中进一步量化<sup>[13]</sup>。在以后的研究中,应加强重污染过程与环境容量之间的对应关系,通过分析多年气象条件变化对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和重污染强度、频率的影响,分析影响环境容量的关键因子的变化趋势,筛选出中游城市群/城市“典型重污染时段”,解析重污染季节的区域/城市大气环境容量。另外,应借鉴CMAQ、CULPUFF等模型在大气环境容量方面的应用经验,探讨在空气质量和环境影响等多种因素约束下的大气环境容量计算方法<sup>[22]</sup>。

#### 参考文献:

- [1]潘家华,郑艳,王建武,等.气候容量:适应气候变化的测度指标[J].中国人口·资源与环境,2014,24(2):1-10.
- [2]郝吉明,许嘉钰,吴剑,等.我国京津冀和西北五省(自治区)大气环境容量研究[J].中国工程科学,2017,19(4):13-19.
- [3]徐大海,朱蓉.我国大陆通风量和雨洗能力分布的研究[J].中国环境科学,1998,9(5):367-374.
- [4]徐大海,王郁,朱蓉.大气环境容量系数A值频率曲线拟合及其应用[J].中国环境科学,2016,36(10):2913-2922.
- [5]常嘉成,赵天良,谭成好,等.基于WRF-Chem模拟的玉溪市大气环境容量精细估算[J].环境科学学报,2017,37(10):3876-3884.
- [6]徐鹤,丁洁,冯晓飞.基于ADMS-Urban的城市区域大气环境容量测算与规划[J].南开大学学报:自然科学版,2010,43(4):67-72.
- [7]肖杨,毛显强,马根慧,等.基于ADMS和线性规划的区域大气环境容量测算[J].环境科学研究,2008,21(3):13-16.
- [8]王海超,焦文玲,邹平华.AERMOD大气扩散模型研究综述[J].环境科学与技术,2010,33(11):115-119.
- [9]任重,马海涛,王丽,等.CALPUFF在大气预测及环境容量核算中的应用[J].环境科学与技术,2011,34(6):201-205.
- [10]孙维,程小泉,王晖,等.合肥市冬季 $\text{PM}_{10}$ 污染特征及大气环境容量测算研究[J].气象与环境学报,2017,33(2):80-86.
- [11]徐大海,王郁,朱蓉.中国大陆地区大气环境容量及城市大气环境荷载[J].中国科学:地球科学,2018,48:924-937.
- [12]徐大海,王郁.确定大气环境承载力的烟云足迹法[J].环境科学学报,2013,33:1734-1740.
- [13]许启慧,范引琪,井元元,等.1972-2013年河北省大气环境容量的气候变化特征分析[J].高原气象,36(6):1682-1692.
- [14]刘新,刘林春,尤莉.内蒙古呼包鄂地区近56年来大气环境容量变化特征分析[J].气象与环境科学,2019,42(1):86-

---

92.

[15]鲁洋, 李小港, 熊忆茗, 等. 基于修正 A 值法评估率水流域大气环境容量及其敏感性分析[J]. 复旦大学(自然科学版), 2019, 58(5):642-651.

[16]吴蓉, 卢燕宇, 王胜, 等. 1961-2010 年安徽省大气环境容量系数变化特征分析 [J]. 气候变化研究进展, 2017, 13(6):545-556.

[17]杨清健, 赵天良, 郑小波, 等. 亚洲季风强弱年蒙自市大气环境容量差异估算[J]. 中国环境科学, 2019, 39(10):4054-4064.

[18]熊守权, 杨元建, 吴蓉, 等. 长江中游地区霾日的年际和年代际变化及其城乡差异成因研究[J]. 气象与环境科学, 2020, 43(2):33-40.

[19]GB/T3840-1991, 制定地方大气污染物排放标准的技术方法(S).

[20]杜川利, 唐晓, 李星敏, 等. 城市边界层高度变化特征与颗粒物浓度影响分析[J]. 高原气象, 2014, 33(5):1383-1392.

[21]朱蓉, 徐大海, 赵珊珊. 第 2 代大气污染物排放源强反演模式 SSIM2 及其在城市规划大气环境影响评价中的应用[J]. 气象科技, 2009, 37(6):641-645.

[22]许艳玲, 薛文博, 王金南, 等. 大气环境容量理论与核算方法演变历程与展望[J]. 环境科学研究, 2018, 31(11):1835-1840.