

董旭光,刘焕彬,汤子东,等.气候变化背景下山东大气自净能力特征分析[J].海洋气象学报,2018,38(4):93-102.
Dong Xuguang, Liu Huanbin, Tang Zidong, et al. Spatial-temporal characteristics of the atmospheric self-purification capacity index in the context of climate change in Shandong from 1961 to 2017[J].Journal of Marine Meteorology, 2018, 38(4):93-102.
DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.04.010. (in Chinese)

气候变化背景下山东大气自净能力特征分析

董旭光,刘焕彬,汤子东,曹洁,邱黎
(山东省气候中心,山东 济南 250031)

摘要: 利用山东 22 个基本(准)气象站小时气象观测资料,采用 A 值法计算了山东 1961—2017 年逐日大气自净能力指数(the atmospheric self-purification capacity index,ASPC),分析了其气候空间分布特征和时间演变规律,利用 MK 检验(Mann-Kendall 检验)和 MT 检验(Moving- t ,滑动 t 检验)方法对历年 ASPC 进行了突变检验。结果表明:平均 ASPC 气候倾向率减小趋势极显著($P < 0.01$),除章丘和威海外,其他各地 ASPC 减小趋势均极显著($P < 0.01$);春季各月 ASPC 较大,历年各月 ASPC 随时间明显减小;年和四季 ASPC 空间分布基本一致,半岛地区较大,鲁南等内陆地区相对较小;年和春、夏、秋、冬季 ASPC 突变年份分别出现在 2003 年和 2006 年、2003 年、2003 年、2005 年。济南、青岛地区 ASPC 分别从 1999 年、1993 年开始显著减小,低 ASPC 日数历年变化大致与 ASPC 变化相反;济南和青岛历年各月 ASPC 变化差异明显。

关键词: 大气自净能力(ASPC);气候倾向率;突变检验;低 ASPC 日数

中图分类号: P49 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2018)04-0093-10

DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.04.010

Spatial-temporal characteristics of the atmospheric self-purification capacity index in the context of climate change in Shandong from 1961 to 2017

DONG Xuguang, LIU Huanbin, TANG Zidong, CAO Jie, QIU Can
(Shandong Climate Center, Jinan 250031, China)

Abstract Based on the fixed time observation data from 22 basic meteorological stations in Shandong, the daily atmospheric self-purification capacity index (ASPC) from 1961 to 2017 is calculated using A value method, climatic spatial-temporal characteristics are analyzed, and the ASPC mutation test is conducted using Mann-Kendall (MK) mutation test and Moving- t (MT) technique. The results show that the average ASPC presents significant downtrend($P < 0.01$) and its climate tendency rate is $-2.61 \times 10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$. The ASPC downtrend in Shandong is remarkable ($P < 0.01$) except in Zhangqiu and Weihai. The monthly ASPC is higher in each month of spring, but with time passing by, it obviously decreases over the years. The annual and seasonal spatial distribution of ASPC is relatively consistent, and it is higher in Shandong Peninsula and lower in inland areas such as the south of Shandong. The annual abrupt change of ASPC appears in 2003, and years of abrupt change of ASPC in spring, summer, autumn, and winter are respectively 2006, 2003, 2003, and 2005. The average ASPC in Jinan and Qingdao has shown significant downtrend($P < 0.01$) respectively since 1999 and 1993. Annual change of days of low ASPC is roughly opposite to the change of ASPC. Monthly ASPC involves obvious change in Jinan and Qingdao

收稿日期:2018-04-23; 修订日期:2018-07-03

基金项目:环渤海区域科技协同创新基金项目(QYXM201611)

作者简介:董旭光,男,硕士,高级工程师,主要从事气候变化和气候应用研究工作,dongxugg@sina.com。

over the years.

Key words the atmospheric self-purification capacity (ASPC); climate tendency rate; mutation test; days of low ASPC

引言

随着社会经济的发展和城市化进程加快,人类活动导致的污染物排放量日益增加,使得大气浑浊度高,能见度低,大气污染范围和程度越来越严重。空气质量受自然和人为因素共同作用,当外界污染物排放量比较稳定时,空气污染的度和变化特征主要取决于气象因素^[1-2]。在不同气象条件下,同一污染物排放所造成的大气污染物浓度可相差几十倍至上百倍,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^[3]。逆温、低压、高湿、弱风、稳定大气层结、低混合层厚度和弱降水等气象条件容易造成污染物的堆积^[4-5],是产生重污染天气的主要气象要素条件。王晓云等^[6]研究表明,在静稳气象条件下,污染物浓度常出现高值,贴地逆温层极不利于污染物扩散。较低的边界层高度限制污染物的垂直扩散,大气环境容量(大气自净能力,简称 ASPC)的减小使污染加剧。杨欣等^[7]研究了北京市 2013 年 1 月 10—16 日强污染过程,连续静稳的天气形势和区域污染是其主要原因,而高湿天气则加剧了污染状况。于庚康等^[8]发现雾霾期间低层都存在不同程度的逆温现象,混合层高度与空气污染指数(API)呈反相关关系,混合层高度越低,API 就越高,污染就越严重,能见度就越差。吴兑等^[9]发现珠江三角洲霾天气过程和区域内静小风过程密切相关,清洁对照过程和强平流输送有关。戴竹君等^[10]对江苏秋冬季重度霾的环流背景、边界层特征、热力条件、动力条件及气流轨迹进行了分析,探讨重度霾的形成机制,发现重度霾发生时主要是贴地逆温,风速在 $4.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下。

大气环境容量(ASPC)是在给定的空间和时间范围内,大气污染物平均浓度不超过大气质量标准的条件下,可以向该空间内排放污染物的总量^[11]。大气环境容量(ASPC)估算方法包括 A-P 值法、大气扩散模型法、线性规划法等,大气扩散模型法包括美国的 AERMOD^[12]、CALPUFF^[13] 和英国的 ADMS^[14] 等,其输入参数多、计算量大,模拟需要详细的污染源数据和气象数据,国家标准《大气自净能力 GB/T 34299-2017》^[15] 给出了

ASPC-A 值的计算方法,A 值法是基于箱模式计算出一段时间内大气运动能清除的大气污染物总量,其计算简单,实用性强。郁珍艳等^[16]、许启慧等^[17]、吴蓉等^[1]采用 A 值法分别对浙江省、河北省、安徽省的 ASPC 时空变化特征进行了分析,得到一些有意义的结论。

山东开展大气污染和气象条件关系的研究不多见,山东各地区下垫面特征差异明显,沿海和内陆气候背景不同,各地大气环境质量和变化差异较大,同时由于城市化和经济的快速发展,大气环境问题日益突出。山东霾日数呈增加趋势,21 世纪以来增加明显,霾的分布受城市工业和污染排放影响较大,典型的雾霾过程发生时,山东上空以平直的纬向环流为主,多短波槽活动,冷空气较弱,山东受偏西或者西南气流影响,大范围霾出现前空气湿度相对较低^[18]。郭丽娜等^[19]应用青岛站 2006—2012 年探空资料,研究发现青岛 08 时接地逆温强度与污染日 API 指数相关系数达 0.99。马艳等^[20]应用青岛 2006—2012 年雾日数与污染物浓度监测资料,发现雾天气常伴随着不同程度的空气污染。在仅考虑大气通风和湿沉降等因素时,ASPC 仅涉及气象参数和地域面积,与排放源的配置参数无关,完全是自然属性量^[1]。本研究采用《大气自净能力 GB/T 34299-2017》^[15] 国家标准中的 A 值法,利用山东 22 个基本(准)站地面小时气象观测数据,对山东 ASPC 的时空变化特征进行研究,探讨 ASPC 的气候变化特征,对深入理解气候变化背景下大气环境有效改善具有积极的意义,亦可为山东空气质量影响评价业务提供技术支持。

1 资料与方法

1.1 使用的资料

选取山东省气象信息中心经过气象数据质量控制后的逐日小时观测资料计算 ASPC,对于没有 02 时(北京时,下同)观测的总低云量数据,以 08 时和前一日 20 时总低云量数据内插得到,2014 年以来,仅基本(准)站保留总低云量的记录,因此最终确定利用山东 22 个(除泰山站)基本(准)站 1961—2017 年的平均风速、总云量、低云量等小时观测资料及逐日降水量资料计算各站的 ASPC。选取的气

象台站空间分布见图1,山东省基本(准)站空间分布均匀,各站 ASPC 计算结果能够较好地反映大气自净能力空间分布情况。

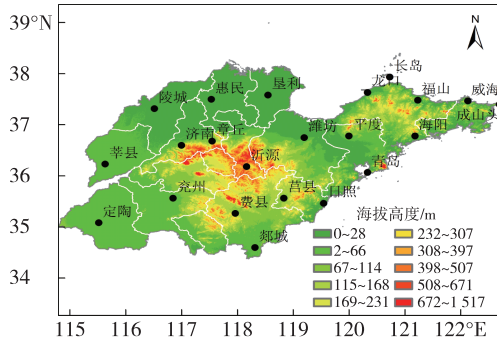


图1 山东地形及使用的气象站点地理位置分布图
Fig.1 Topographic map and locations of meteorological stations of Shandong

1.2 研究方法

1.2.1 ASPC 估算方法

参考国家标准《大气自净能力等级 GB/T 34299-2017》^[15]中有关大气自净能力的估算方法,根据徐大海和朱蓉^[21]、赵珊珊和朱蓉^[22]的研究方法,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,假定大气本底浓度相对于污染物浓度很小,对气块体积内的大气污染物平衡方程简化,得到 ASPC 计算公式:

$$A = 3.1536 \times 10^{-3} \times \frac{\sqrt{\pi}}{2} \times V_E + 1.7 \times 10^{-3} \times R \times \sqrt{S} \quad (1)$$

式中等式右侧两项分别为大气输送扩散清除项和清洗能力项。其中, A 为 ASPC (单位: $10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$), V_E 为通风量 (单位: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), 其计算方法参见《大气自净能力等级 GB/T 34299-2017》; R 为降水强度 (单位: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); S 为单位面积,取 100 km^2 。

在计算 ASPC 过程中需得到大气稳定性和大气混合层厚度等中间变量,两者均是影响大气污染物扩散的重要参数。大气越稳定越不利于污染物的扩散,大气混合层厚度越大,越有利于污染物垂直方向的扩散和稀释。大气稳定性有理查森数、莫宁-奥布霍夫长度、温差法、风速比法等计算方法^[23],本文采用 Pasquill 法^[15]中的稳定性分类法,该方法将大气稳定性分为强不稳定、不稳定、弱不稳定、中性、较稳定和稳定 6 类。大气混合层厚度确定方法包括环境影响评价导则法、罗氏法、干绝热

法等,本文采用仅使用地面常规气象观测资料的《大气自净能力 GB/T 32499-2017》国家标准中推荐的方法计算大气混合层厚度,其使用的气象资料包括总低云量、平均风速及计算的太阳高度角等。ASPC 低于 $12.0 \times 10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ 时 (大气自净能力等级为三级以下,对大气污染物的清除作用不明显)^[15],表明大气混合层高度低、混合层内整体水平风速小且无降水,大气扩散条件很差,容易引起空气质量重度污染,称为低 ASPC 日。

1.2.2 气候倾向率

采用气候趋势分析^[24] ASPC 的空间分布特征,气候趋势为正值表示要素序列为上升趋势,负值表示下降趋势,并进行显著性检验。

假设数据系列 x_i 可用一元线性回归的数学模拟拟合 ($x = a + bt$), 其气候趋势系数为 r_{xt} , 其定义为 n 个时刻 (年) 的要素序列与自然数列 $1, 2, 3, \dots, n$ 的相关系数:

$$r_{xt} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(i - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (i - \bar{t})^2}} \quad (2)$$

其中 n 为年数, x_i 是第 i 年要素值, \bar{x} 为其样本均值。 $\bar{t} = (n+1)/2$ 。显然,气候倾向率 (为气候趋势 10 a 的变化量) 为正 (负) 时表示该要素在所计算的 n 年内有线性增加 (减少) 的趋势。 $r_{xt} \sqrt{n-2} / \sqrt{1-r_{xt}^2}$ 符合自由度 $n-2$ 的 t 分布,从而检验这种气候趋势是否有意义,是否是一种随机振动。

1.2.3 突变检验方法

在实际序列趋势分析中, Mann-Kendall (MK) 检验法^[25]是世界气象组织推荐并已广泛使用的非参数检验方法。MK 非参数突变检验正序列曲线超过临界值信度线的前提下,若正序列和反序列两个统计量序列仅有一个明显的交叉点,且位于信度线之间,则表明该交叉点为突变点,且统计上显著;若交叉点位于信度线之外,或者是存在多个明显的交叉点,则不确定是否为突变点,可结合滑动 t 检验 (MT) 方法综合判断该点是否为突变点。MT 方法主要用来检验两随机样本平均值的显著性差异,如果两段子序列的均值差异超过了一定的显著性水平,可以认为均值发生了质变,有突变发生,文中对 5~10 a 的不同子序列对 ASPC 的时间序列进行 MT 突变检验。采用两种方法综合判断突变是否真实发生。

2 结果与分析

2.1 ASPC 的时间变化

2.1.1 年变化

1961—2017年山东平均ASPC呈显著减小变化趋势(图2),气候倾向率为 $-2.61 \times 10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,通过了0.01显著性水平检验($P < 0.01$)。从各年代均值看,山东ASPC具有明显的年代际减小趋势,20世纪60、70年代各年ASPC均大于平均值,20世纪80、90年代则接近平均值,2000年以来小于平均值且减小趋势相对最明显。全省各站平均ASPC仅1962年和1969年大于 $40.0 \times 10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$,其中以1962年最大,为 $40.7 \times 10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$,2004年以来逐年ASPC均小于 $30.0 \times 10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$,其中2014年最小,为 $21.0 \times 10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ 。

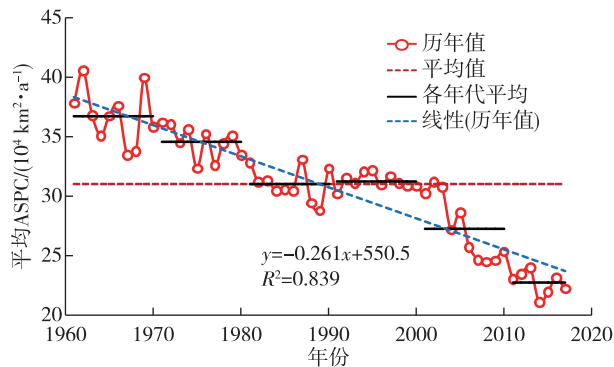


图2 1961—2017年山东平均ASPC历年变化(单位: $10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$)

Fig. 2 Annual variation of average ASPC (units: $10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$) in Shandong from 1961 to 2017

2.1.2 月变化

1961—2017年山东平均ASPC的年内逐月变化明显(图3),春季各月ASPC相对较大,均大于 $35.0 \times 10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$,其中4月最大,为 $39.8 \times 10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$,8—10月相对较小,其中9月最小,为 $25.4 \times 10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$,山东春季大风天气较多,夏季对流性天气较多,湍流较强,是ASPC年内相对较高的时段,秋、冬季太阳辐射较弱,湍流活动较弱,大气稳定度高,是ASPC年内相对较低的时段。

1961—2017年山东历年各月平均ASPC表现出明显的年际和年内变化(图4),也是春季各月大,8—10月小,历年各月ASPC总体上呈现随时间明显减小的变化趋势。20世纪60、70年代春季各月ASPC一般大于 $40.0 \times 10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$,8—10月则小于 $35.0 \times 10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$,之后逐渐减小,自2000年以

来,春季各月多小于 $35.0 \times 10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$,8—10月则小于 $25.0 \times 10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ 。

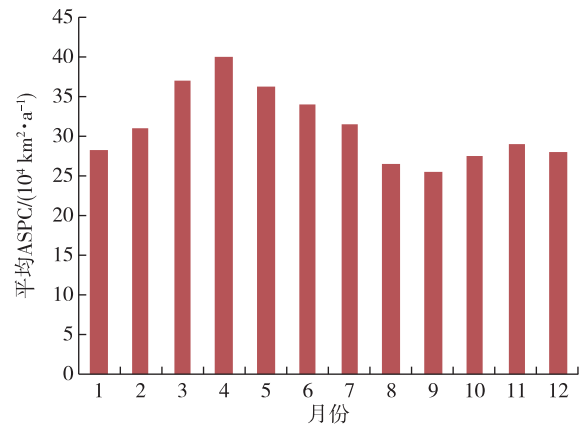


图3 1961—2017年山东平均ASPC逐月变化(单位: $10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$)

Fig. 3 Monthly variation of average ASPC (units: $10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$) in Shandong from 1961 to 2017

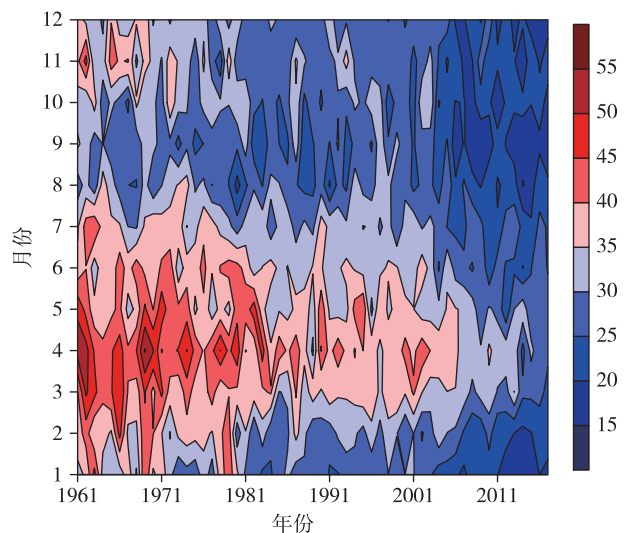


图4 1961—2017年山东历年各月平均ASPC变化(单位: $10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$)

Fig. 4 Annual variation of monthly average ASPC (units: $10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$) in Shandong from 1961 to 2017

2.2 ASPC 的空间分布

1961—2017年山东年和四季平均ASPC的空间分布类似(图5),但数值略有不同。山东中西部地区ASPC普遍小于 $35.0 \times 10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$,山东半岛地区相对较大,其中青岛、蓬莱、威海等地区ASPC大于 $45.0 \times 10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ (图5a)。春季(图5b)各地ASPC普遍大于其他季节,山东半岛地区最大,大于 $35.0 \times 10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$,鲁中山区以南地区最小,小于 $30.0 \times 10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ 。夏季(图5c)次之,秋季(图5d)和冬季(图5e)各地ASPC相对较小。

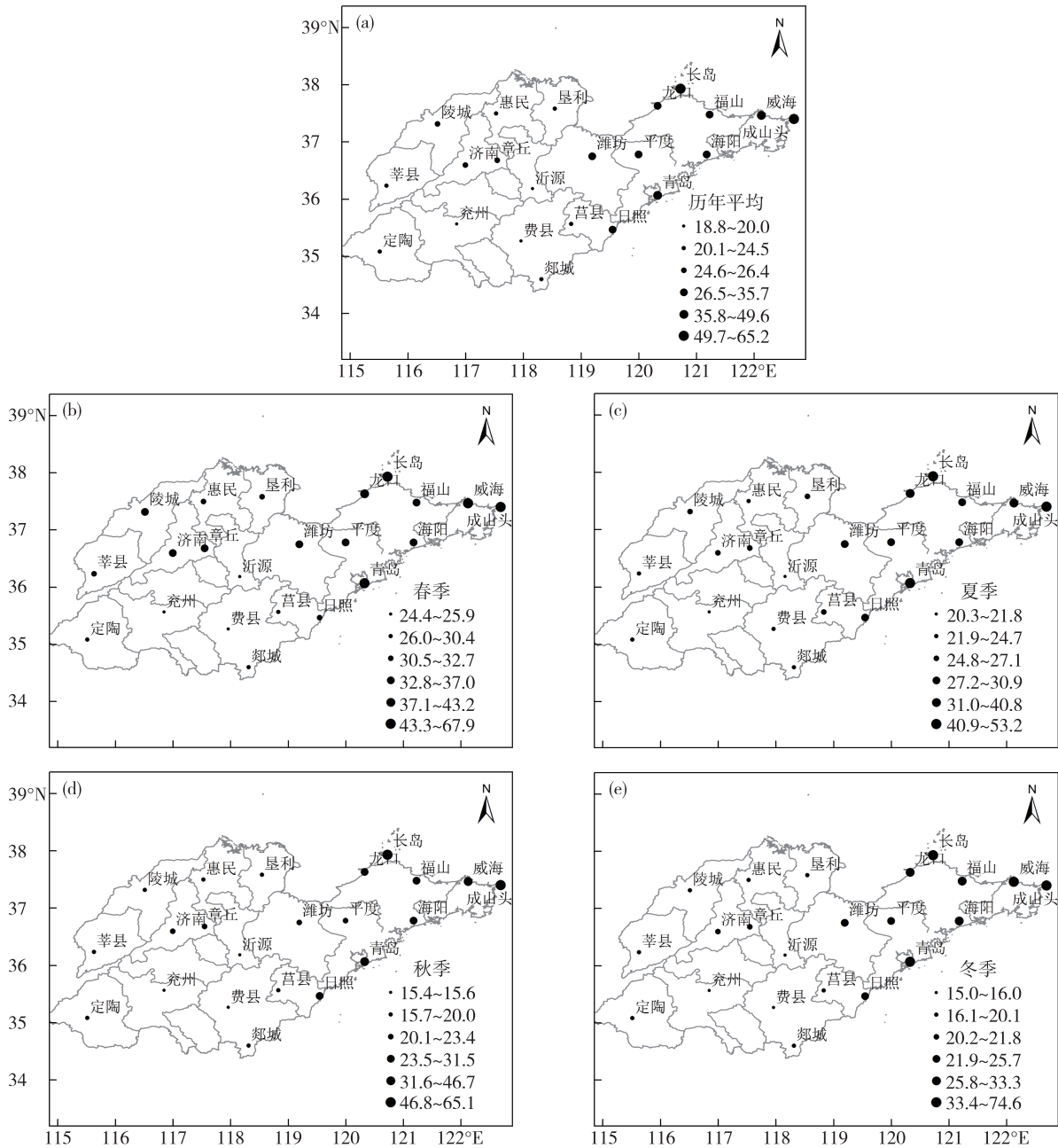


图 5 1961—2017 年山东年(a)、春季(b)、夏季(c)、秋季(d)、冬季(e)平均 ASPC 空间分布(单位: $10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$)
 Fig.5 Spatial distribution of annual average ASPC (a) and average ASPC in spring (b), summer (c), autumn (d), and winter (e) (units: $10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$) in Shandong from 1961 to 2017

2.3 ASPC 的气候倾向率

山东各地 ASPC 呈一致的减小趋势(图 6), 各地气候倾向率在 $-5.511 \times 10^4 \sim -0.319 \times 10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 之间, 除章丘和威海减小趋势没有通过 0.05 显著性水平检验外, 其他各地减小趋势均极显著, 均通过 0.01 显著性水平检验。鲁中和半岛东南部减小趋势相对较小, 小于 $-1.581 \times 10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 青岛、长岛、龙口等地减小趋势最显著, 均大于 $-4.0 \times 10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。

2.4 ASPC 的突变检验

采用 MK 法对山东各站年平均 ASPC 序列进行突变检验(图 7a-e 左), 图中红色实线是最大风速的顺序统计曲线(UF), 蓝色实线是逆序统计曲线(UB), 并给定显著性水平 0.05, 临界线为 ± 1.96 (图中虚直线)。从图中可知, 年和四季 ASPC 呈逐年波动减小变化趋势, UF 和 UB 线相交于两条临近线以外, 不能确定交点是否为突变年, 因此结合 MT 检验结果分析年和四季 ASPC 的突变年份。

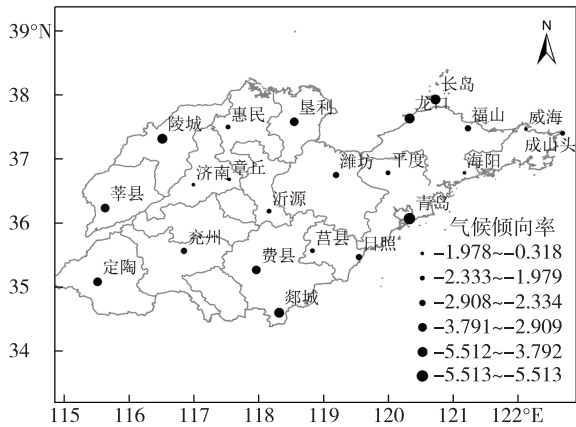


图6 1961—2017年山东平均ASPC的气候倾向率空间分布(单位: $10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$)

Fig.6 Spatial distribution of climate tendency rate (units: $10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$) of average ASPC in Shandong from 1961 to 2017

表1给出了MK检验UF和UB的交点年份和5~10 a MT检验超过显著性水平的峰值年份。MK检验的UF和UB线相交年份和MT检验超过显著性水平的峰值年份不一致,因此分别比较年和四季ASPC的MK检验的相交年份和MT检验的峰值年份前后两段多年平均值的差值,取差值大的年份定为突变年(图7a-e右)。比如对年ASPC序列,MK检验的交点年为1996年,其前后ASPC平均值的差值为 $7.1 \times 10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$,MT检验5~10 a峰值年份多为2003年,前后时段差值为 $8.6 \times 10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$,因此综合确定年ASPC突变年为2003年,同理得到春季突变年为2006年,夏季和秋季为2003年,冬季为2005年。

表1 MK检验的UF线和UB线相交年份和MT检验超过显著水平的峰值年份

Table 1 Intersection years of UF and UB in Mann-Kendall test and peak years above significance level in Moving-t test

检验时段	不同子序列长度 MT 检验超过显著水平的峰值年份						MK 检验 UF 和 UB 相交年份
	5 a	6 a	7 a	8 a	9 a	10 a	
全年	2005	2003	2003	2003	2003	2003	1996
春季	2006	2006	2006	2006	2006	2006	2002
夏季	1998	2003	2003	2003	2003	2003	1999
秋季	2003	2003	2003	2003	2003	2003	1998
冬季	2005	2005	2005	2005	2005	2005	1994

2.5 济南、青岛等重点城市的ASPC

1961—2017年济南和青岛平均ASPC均呈减小趋势(图8),气候倾向率分别为 $-1.240 \times 10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 和 $-5.510 \times 10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,均通过0.01显著性水平检验,减小趋势极显著($P < 0.01$)。济南地区ASPC年际变化波动较大(图8a),历年平均值为 $26.4 \times 10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$,1999年较1998年明显增大,之后显著减小,2017年最小,为 $17.3 \times 10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ 。造成这种现象的原因之一可能是济南站1998年迁站,迁站后测风环境发生显著变化,使得观测风速明显增大,导致ASPC明显增大。青岛地区ASPC年际变化波动相对较小(图8b),历年平均值为 $49.6 \times 10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$,1992年以前变化较小,之后则逐年明显减小,2016年达到最小,为 $29.2 \times 10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ 。济南和青岛低ASPC日数历年变化大致与ASPC变化相反,ASPC越大(小),低ASPC日数越低(高)。

1961—2017年济南和青岛平均ASPC的年内逐

月变化差异明显(图9),两地区均呈双峰型分布,济南地区各月ASPC变化明显,峰值分别出现在4月和10月,4月最大,为 $38.2 \times 10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$,春季各月较大,均大于 $33.2 \times 10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$,谷值分别出现在1月和9月,1月最小,为 $19.1 \times 10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ 。青岛地区各月ASPC差异相对较小,峰值分别出现在4月和12月,4月最大,为 $56.6 \times 10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$,3—6月、11月、12月均大于 $50.0 \times 10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$,谷值分别出现在9月和1月,9月最小,为 $43.4 \times 10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ 。

1961—2017年济南和青岛历年各月平均ASPC表现出明显的年际和年内变化(图10),济南历年春季各月ASPC明显大于其他月份(图10a),秋、冬季明显小于春、夏季,21世纪以来,各月ASPC减小趋势更显著。青岛地区20世纪60年代后期至20世纪90年代初期各月ASPC相对较大(图10b),1993年以来各月ASPC多小于 $50.0 \times 10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$,且减小趋势更显著,自2010年以来,各月达到最小值。

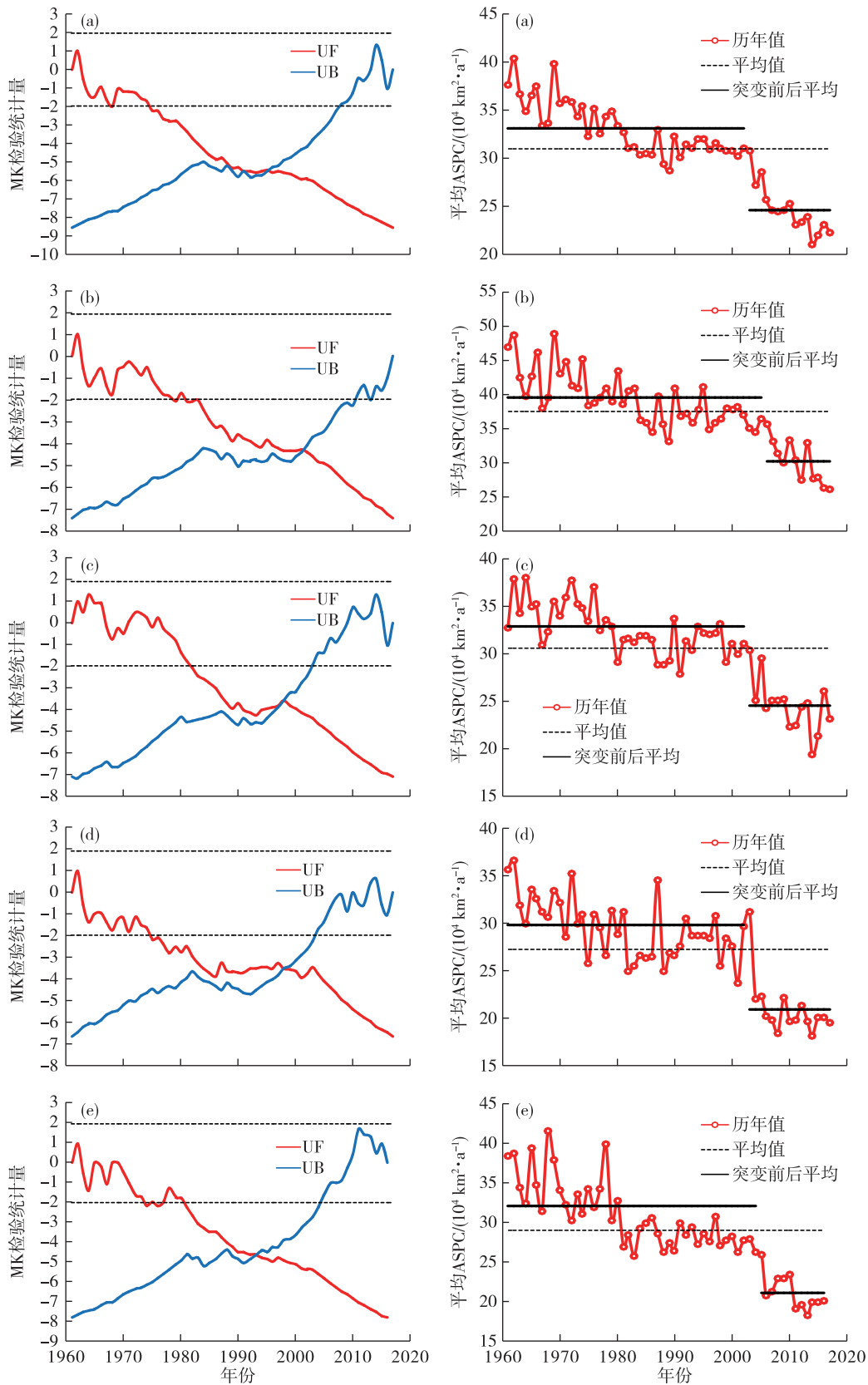


图 7 1961—2017 年山东年 (a)、春季 (b)、夏季 (c)、秋季 (d)、冬季 (e) MK 突变检验 (左) 及平均 ASPC 历年变化 (右, 单位: $10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$)

Fig.7 Mann-Kendall mutation test (left) and annual variation of average ASPC (right, units: $10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$) in Shandong from 1961 to 2017 (a. annual ASPC, b. ASPC in spring, c. ASPC in summer, d. ASPC in autumn, e. ASPC in winter)

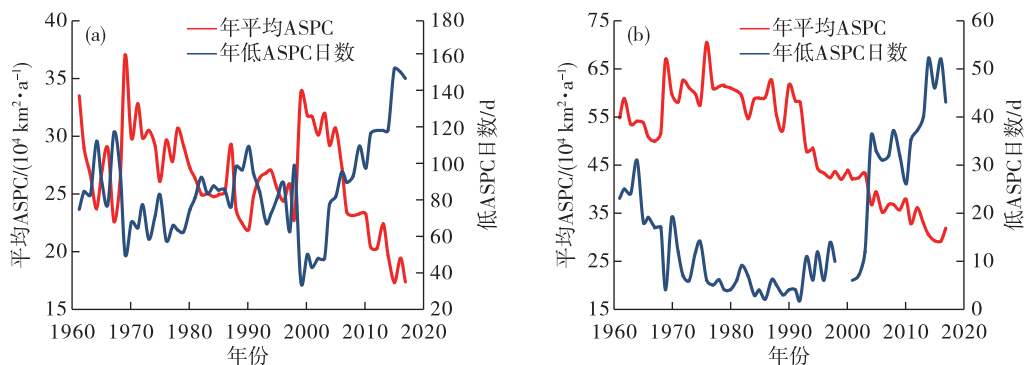


图8 1961—2017年济南(a)和青岛(b)平均 ASPC(单位: $10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$)、低 ASPC 日数(单位:d)历年变化
Fig.8 Annual variation of average ASPC (units: $10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$) and days of lower ASPC (units: d) in Jinan (a) and Qingdao (b) from 1961 to 2017

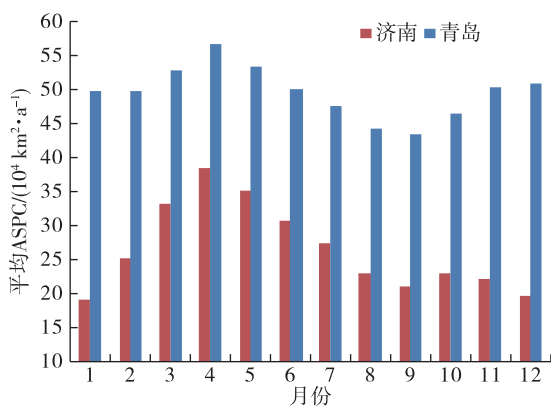


图9 1961—2017年济南和青岛平均 ASPC 逐月变化(单位: $10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$)
Fig.9 Monthly variation of average ASPC (units: $10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$) in Jinan and Qingdao from 1961 to 2017

2.6 ASPC 减小的可能原因

山东各地历年平均风速和平均 ASPC 之间的相关系数达到 0.991(图 11),表明平均 ASPC 与平均风速的变化趋势较一致,由 ASPC 指数公式可看出,

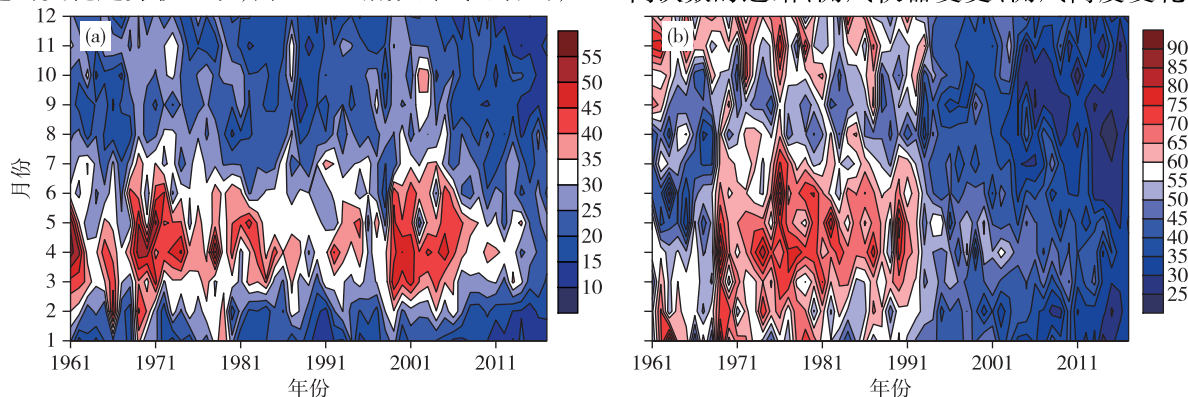


图10 1961—2017年济南(a)和青岛(b)历年各月平均 ASPC 变化(单位: $10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$)
Fig.10 Annual variation of monthly average ASPC (units: $10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$) in Jinan (a) and Qingdao (b) from 1961 to 2017

通风量是影响 ASPC 大小的关键因素,而通风量主要是由风速大小影响^[15]。章丘和威海历年平均风速呈减小变化趋势,但减小趋势没有通过 0.05 显著性水平检验(图略),平均风速变化较小可能是两地 ASPC 变化较小的主要原因之一。

造成近地面风速减小的原因主要有大气环流变化和人类活动改变地面粗糙度。在东亚,大尺度环流主要由东亚季风系统代表,包括东亚夏季季风和东亚冬季季风。Ding et al.^[26]和 Zhu et al.^[27]研究指出,过去 50 多年,东亚冬季风和东亚夏季风均有减弱变化趋势,Xu et al.^[28]指出,1969—2000 年东亚季风的减弱造成中国近地面风速减小,其中中国东南部近地面风速是受东亚季风影响最显著的地区。Jiang et al.^[29]对中国 174 个城市站和 180 个乡村站的风速对比结果看,城市的风速比乡村更低,城市的近地面风速减小趋势更明显。Li et al.^[30]也发现大城市的近地面风速减小最明显,其次是中小城市,乡村站减小趋势最弱。

山东各地基本(准)站在 1961—2017 年均有不同次数的迁站、测风仪器变更、测风高度变化。成

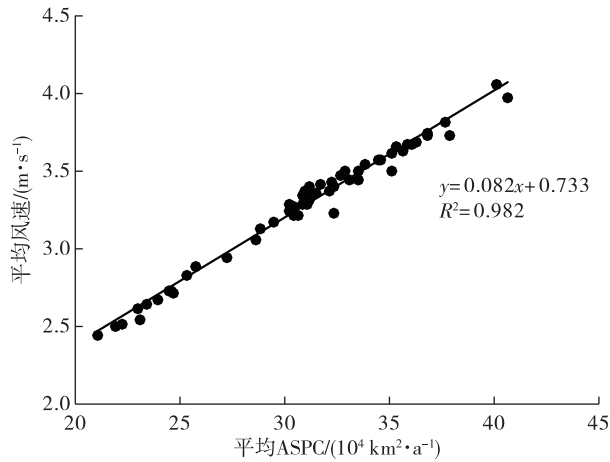


图 11 1961—2017 年山东平均风速(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和平均 ASPC(单位: $10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$)相关图

Fig.11 Correlation coefficients between average wind speed (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and average ASPC (units: $10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$) in Shandong from 1961 to 2017

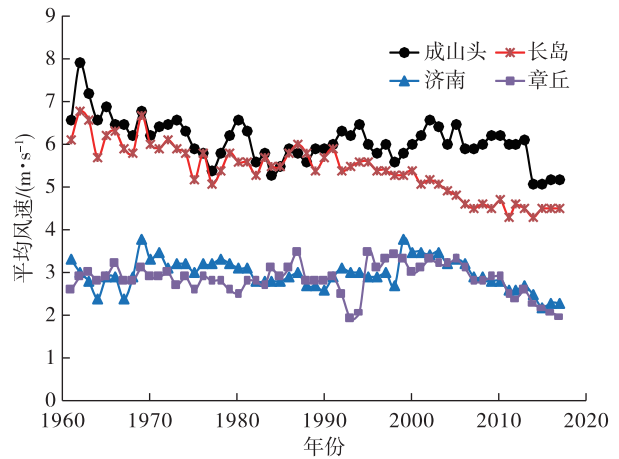


图 12 1961—2017 年成山头、长岛、济南、章丘站历年平均风速(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)变化

Fig.12 Annual change trend of average wind speed (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) in Chengshantou, Changdao, Jinan, and Zhangqiu from 1961 to 2017

山头站在 1964 年以前为定时观测,且测风高度略高,是 1961—1964 年平均风速较高的主要因素,1965 年以后为逐时观测,且未迁站,观测环境没有较大变化,历年平均风速变化趋势较小,但 2014 年以来平均风速明显偏低(图 12),可综合认为大气环流(包括东亚冬、夏季风)的减弱是造成成山头 2014 年以来平均风速明显偏小的关键因素之一。长岛站在 20 世纪 70、80 年代平均风速变化较小,之后逐年减小(图 12),主要原因是由于测站周围树木高大浓密影响了测风结果,近几年也是平均风速最低时段。济南和章丘在迁站前历年平均风速呈波动变化,但变化趋势较小,迁站后达到风速高值,之后呈逐年减小的变化趋势,近年来达到风速最低值(图 12),测站观测环境恶化和大气环流减弱是造成该区域风速持续减小的关键因素。

气象要素观测环境的改变以及大气环流减弱导致地面观测风速的减小是造成山东各地 ASPC 呈减小变化趋势的主要原因,而各气象站迁站、观测环境变化差异可能是导致不同地区 ASPC 变化趋势不一致的关键因素。

3 结论与讨论

1) 1961—2017 年山东平均 ASPC 气候倾向率为 $-2.61 \times 10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,减小趋势极显著 ($P < 0.01$),20 世纪 60、70 年代各年均值大于平均值,20 世纪 80、90 年代则接近平均值,2000 年以来各年均值小于平均值且减小趋势相对最明显。年

平均和历年春季各月 ASPC 相对较大,其中 4 月最大,8—10 月相对较小,其中 8 月最小。

2) 1961—2017 年山东年和四季平均 ASPC 的空间分布类似,半岛地区较大,鲁南等内陆地区相对较小,各季节中春季较大,夏季次之,秋、冬季较小。山东各地 ASPC 呈一致的减小趋势,除章丘和威海减小趋势不显著 ($P > 0.05$) 外,其他各地减小趋势均极显著 ($P < 0.01$)。

3) 1961—2017 年山东年和四季平均 ASPC 均存在突变,其中全年、夏季、秋季 ASPC 突变年为 2003 年,春季为 2006 年,冬季为 2005 年。

4) 济南地区 ASPC 从 1999 年开始,青岛地区从 1993 年开始显著减小,低 ASPC 日数历年变化大致与 ASPC 变化相反。济南地区春季各月 ASPC 明显大于其他各月,青岛地区各月 ASPC 变化较济南小。

近年来,人类活动、城市化进程等产生的大气污染物排放增加是造成山东环境空气质量日益恶化的原因之一,而从 ASPC 的年际和年代际分析来看,即使近年来人为排放污染物不增加,由于气象要素变化导致的山东 ASPC 持续下降等对空气污染持续加重也应该有不可忽视的贡献^[18]。由于大气环流变化和人类活动日益频繁导致的近地面风速的减小^[31-32]使得近地层大气输送扩散能力减弱,有可能导致局地大气污染物累积致使空气污染加重。由于环境空气质量受自然和人为两方面因素影响,在经济活动比较密集的地区,受复杂的局地外源排放和频繁的人类活动影响,即使大气自净能力较

好,空气质量也有可能受到影响,因此需要根据不同区域特点,合理利用环境资源做好城市规划布局^[1]。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 吴兑.关于霾与雾的区别和灰霾天气预警的讨论[J].气象,2005,31(4):3-7.
- [3] 蒋维楣,曹文俊,蒋瑞宾.空气污染气象学教程[M].北京:气象出版社,1993:8-17.
- [4] 张人禾,李强,张若楠.2013年1月中国东部持续性强雾霾天气产生的气象条件分析[J].中国科学:地球科学,2014,44(1):27-36.
- [5] 刘厚凤,杨欣,陈义珍,等.中国重霾过程污染气象研究进展[J].生态环境学报,2015,24(11):1917-1922.
- [6] 王晓云,潘莉卿,吕伟林,等.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,2001,12(3):279-286.
- [7] 杨欣,陈义珍,刘厚凤,等.北京2013年1月连续强霾过程的污染特征及成因分析[J].中国环境科学,2014,34(2):282-288.
- [8] 于庚康,王博妮,陈鹏,等.2013年初江苏连续性雾-霾天气的特征分析[J].气象,2015,41(5):622-629.
- [9] 吴兑,廖国莲,邓雪娇,等.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,2008,19(1):1-9.
- [10] 戴竹君,刘端阳,王宏斌,等.江苏秋冬季重度霾的分型研究[J].气象学报,2016,74(1):133-148.
- [11] 徐大海,朱蓉.我国大陆通风量及雨洗能力分布的研究[J].中国环境科学,1989,9(5):367-374.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.GB/T 34299-2017大气自净能力等级[S].北京:中国标准出版社,2017:2-7.
- [16] 郁珍艳,李正泉,高大伟,等.浙江省空气质量与大气自净能力的特征分析[J].气象,2017,43(3):323-332.
- [17] 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,2017,36(6):1682-1692.
- [18] 张莉,巩在武,顾伟宗,等.山东省雾霾变化特征及一次持续性雾霾过程的分析[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2015,45(11):10-14.
- [19] 郭丽娜,黄容,马艳.青岛逆温层特征及其对空气质量的影响分析[J].海岸工程,2014,33(4):14-25.
- [20] 马艳,黄容,陈尚,等.青岛市雾和城市空气质量的特征及其相关关系[J].气象科技,2015,43(5):925-931.
- [21] 徐大海,朱蓉.大气平流扩散的箱格预报模型与污染潜势指数预报[J].应用气象学报,2000,11(1):1-12.
- [22] 赵珊珊,朱蓉.全国大气自洁能力气候评价方法研究[M]//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,2006:266-269.
- [23] 陈泮勤.几种稳定度分类法的比较研究[J].环境科学学报,1983,3(4):357-364.
- [24] 董旭光,邱繁,李娟,等.1981—2016年山东陆地观测最大风速变化特征[J].海洋气象学报,2018,38(2):87-95.
- [25] 尹云鹤,吴绍洪,陈刚.1961—2006年我国气候变化趋势与突变的区域差异[J].自然资源学报,2009,24(12):2147-2157.
- [26] Ding Y, Liu Y, Liang S, et al. Interdecadal variability of the East Asian winter monsoon and its possible links to global climate change [J]. J Meteor Res, 2014, 28(5): 693-713.
- [27] Zhu J, Liao H, Li J. Increases in aerosol concentrations over eastern China due to the decadal-scale weakening of the East Asian summer monsoon [J]. Geophys Res Lett, 2012, 39(9): 1-6.
- [28] Xu M, Chang C-P, Fu C, et al. Steady decline of East Asian monsoon winds, 1969-2000: Evidence from direct ground measurements of wind speed [J]. J Geophys Res: Atmos, 2006, 111(D24): 1-8.
- [29] Jiang Y, Luo Y, Zhao Z C, et al. Projections of wind changes for 21st century in China by three regional climate models [J]. Chin Geogra Sci, 2010, 20(3): 226-235.
- [30] Li Z, Yan Z, Tu K, et al. Changes in wind speed and extremes in Beijing during 1960-2008 based on homogenized observations [J]. Adv Atmos Sci, 2011, 28(2): 408-420.
- [31] 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,2005,63(6):942-956.
- [32] Guo H, Xu M, Hu Q. Changes in near-surface wind speed in China: 1969-2005 [J]. Int J Climatol, 2015, 31(3): 349-358.