

周伟东, 马雷鸣, 梁萍, 等. 上海地区冬季不同等级冷空气变化特征及其对风雨的影响[J]. 干旱气象, 2017, 35(5): 791-796, [ZHOU Weidong, MA Leiming, LIANG Ping, et al. Climate Characteristics of Winter Cold Air and Its Impacts on Wind and Precipitation in Shanghai in Recent 56 Years[J]. Journal of Arid Meteorology, 2017, 35(5): 791-796], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-05-0791

上海地区冬季不同等级冷空气变化特征及其对风雨的影响

周伟东¹, 马雷鸣², 梁萍³, 张丽亚¹

(1. 上海市浦东新区气象局, 上海 200135; 2. 上海中心气象台, 上海 200030;
3. 上海市气候中心, 上海 200030)

摘要:基于1960年12月至2016年2月上海地区地面气象站气温、气压、降水、风速等观测资料, 采用趋势分析、相关分析、小波分析、功率谱分析等方法, 对冬季影响上海地区不同等级冷空气的活动特征及其对风雨影响进行分析。结果表明: 尽管近56 a冬季影响上海地区的冷空气频次未发生明显变化, 但所致降温幅度呈现先由大变小、再由小变大的变化特征; 冬季中等强度冷空气、弱冷空气次数有14 a和4 a的显著周期; 冷空气过程平均最大风速呈明显下降趋势, 其中强冷空气平均最大风速下降幅度最大; 冷空气降水总量呈增多趋势, 弱冷空气降水总量占冷空气所致总降水量的57%。

关键词:冷空气; 小波分析; 冬季; 上海

文章编号:1006-7639(2017)05-0791-06 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-05-0791

中图分类号:P458

文献标志码:A

引言

上海是东亚季风区^[1]中最大的沿海城市, 冬季经常受到中路、西路和东路冷空气的侵袭^[2], 冷空气、特别是强冷空气和寒潮造成的大范围雨、雪和大风天气, 给工农业生产、交通运输和人体健康等带来重大影响。2016年1月24日, 上海地区受强冷空气影响, 最低气温达 $-7.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 突破1981年以来1月下旬历史同期最低值。受强冷空气影响, 1月23日上海长途客运班次大量取消、长江和洋山港客轮全部停航、机场航班部分延误, 冷空气影响后医院急诊人数也出现明显增加, 此次冷空气的强度和影响程度为历史罕见。冷空气除对交通、人体健康等产生影响外, 对污染物的扩散也起到重要作用^[3]。因此, 研究影响上海地区的冷空气活动特征, 不仅有助于提高对冬季降温、大风、降水等现象的认识, 也对冬季气象灾害防御、大城市空气污染预报及防控有科学和实际意义。

在气候变暖背景下, 我国东部气温明显上升, 影响该地区的寒潮频次也呈下降趋势^[4]。研究表明,

中高纬度寒潮事件的减少与北极涛动(Arctic oscillation, AO)指数升高密切相关^[5], AO异常偏强时, 我国西南地区降水异常偏多^[6]。东亚冬季风(east Asian winter monsoon, EAWM)是全球大气环流的一个重要组成部分, 对我国及周边地区天气产生重要影响^[1]。厄尔尼诺和南方涛动(EL Nino and southern oscillation, ENSO)不仅对我国冬季气温产生影响^[7], 其暖位相与冬季降水也有很好的相关性^[8]。AO、EAWM和ENSO存在一定的关联, 并共同影响我国冬季的天气气候^[9-10]。其他研究表明, 全国性冷空气活动频次显著减少^[11], 冷空气入侵我国的3条主要路径中, 西路冷空气年发生次数减少趋势比中、东路更加明显^[12], 寒潮的强度越强, 其持续的时间反而越短^[13], 在其他地区(山西^[14]、云南^[15]、宁夏^[16]、河北^[17])也有相关研究。

已有对冷空气的相关研究主要集中在冷空气路径^[2,12]、冷空气的活动特征及成因^[4-7,11-17]、冷空气的影响^[3,18]等方面, 针对不同等级冷空气的变化特征及其对风雨影响的研究较少。本文利用上海近

收稿日期: 2017-03-03; 改回日期: 2017-06-08

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项子课题(XDA05090204)资助

作者简介: 周伟东(1971—), 上海金山人, 高级工程师, 主要从事气候变化及影响研究. E-mail: wd_zhou@sohu.com。

56 a 的观测资料,对上海冬季不同等级冷空气次数、过程降水总量等进行较详细的分析,对冷空气的多年变化特征和风雨影响进行揭示,以期上海及周边区域冬季气象灾害防御、空气污染预报和防控等提供气候背景和参考。

1 资料和方法

1.1 资料

采用上海浦东南汇地区 1960 年 12 月至 2016 年 2 月日最低气温、日降水量、日平均气压等资料。由于最大风速的观测从 1974 年开始,所以该资料长度为 1974 年 12 月至 2016 年 2 月。

1.2 方法

冷空气国家标准(GB/T 20484 2006)把冷空气划分为 5 个等级,分别为弱冷空气、中等强度冷空气、较强冷空气、强冷空气和寒潮。由于上海地处中纬度地区,又滨江临海,有些等级的冷空气很少出现,所以文中将较强冷空气并入中等强度冷空气,把寒潮并入强冷空气。同时,在冷空气国家标准基础上,对弱冷空气的判别进一步细化:定义 48 h 降温大于等于 2 °C 且小于 6 °C,并且 48 h 内有升压过程、最大风速的风向为偏北风时,定义为一次弱冷空

气过程(表 1)。在强冷空气标准中涉及到 24 h、48 h、72 h 3 种降温指标,在统计降温幅度时挑取 3 种降温指标中降温幅度最大者作为该次过程的降温幅度,本文中其他降温幅度均指 48 h 降温幅度。

最大风速取 10 min 滑动平均最大风速,冷空气过程平均最大风速是指每次冷空气过程最大风速平均。由于历史资料中,风速观测仪安装在不同高度上,本文参照《建筑结构设计规范》(GB50009 - 2001),利用幂指数公式把不同高度上的风速统一订正到 10 m 高度,以避免风速序列的非均一性。具体公式如下:

$$V_2 = V_1 \left[\frac{Z_2}{Z_1} \right]^\alpha \quad (1)$$

式中: V_2 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 为高度 Z_2 处的风速; V_1 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 为高度 Z_1 处的风速; α 为风切变指数;文中 Z_1 取 10 m 高度, α 取 0.16。

由于冷空气活动频次有较大不确定性,本文采用 Morlet 小波分析对冷空气活动周期进行分析,以期合理揭示出时间序列中瞬时频率随时间的变化。另外,采用线性趋势方法研究各等级冷空气的长期变化趋势。冬季取当年 12 月至次年 2 月。

表 1 冷空气等级标准

Tab. 1 Grades of cold air

冷空气等级	标准
弱冷空气	日最低气温 48 h 降温大于等于 2 °C 且小于 6 °C,且 48 h 内有升压过程、最大风速的风向为偏北风
中等强度冷空气	日最低气温 48 h 降温大于等于 6 °C 且小于 8 °C 或日最低气温 48 h 降温大于等于 8 °C 且日最低气温大于 8 °C
强冷空气	日最低气温 48 h 降温大于等于 8 °C 且日最低气温小于等于 8 °C 或日最低气温 24 h 降温大于等于 8 °C,或 48 h 降温大于等于 10 °C、或 72 h 降温大于等于 12 °C,且日最低气温小于等于 4 °C

2 结果与分析

2.1 上海地区近 56 a 冬季冷空气气候特征

1960—2015 年上海地区冬季冷空气次数平均每年为 13 次,最多为 17 次,出现在 2014 年,最少为 9 次,出现在 1966 年。从变化趋势(图 1)上看,上海地区冬季冷空气次数趋势不显著,气候倾向率为 $-0.08 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,线性趋势未通过显著性检验;冷空气次数的年代际差异不明显,其中 1970 年代和 2010 年代前 6 a 冷空气次数最多,为 13.6 次,2000 年代最少,为 12.1 次。

不同等级的冷空气次数变化有明显差异。从图 2 可以看出,弱冷空气、中等强度冷空气次数的趋

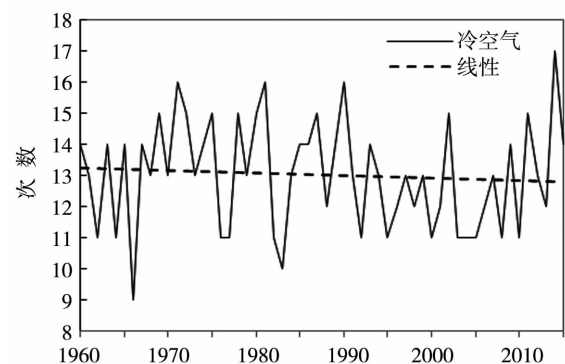


图 1 1960—2015 年上海地区冬季冷空气次数及线性趋势

Fig. 1 Frequency of winter cold air and its linear trend in Shanghai from 1960 to 2015

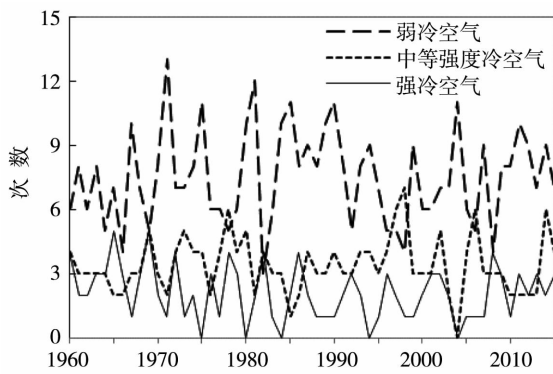


图2 1960—2015年上海地区冬季弱冷空气、中等强度冷空气和强冷空气次数变化
Fig. 2 Frequency of the weak cold air, moderate intensity cold air and strong cold air in Shanghai from 1960 to 2015

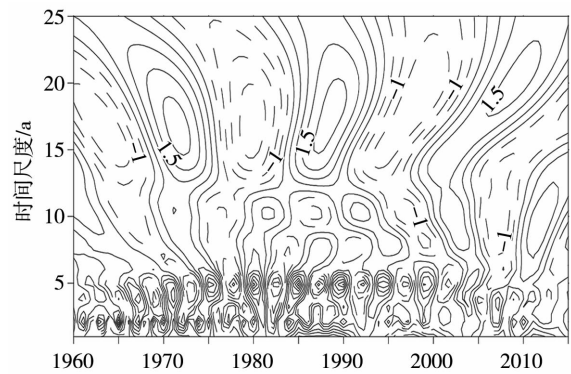


图3 1960—2015年上海地区冬季弱冷空气次数的Morlet小波变换
(实线为正,虚线为负)
Fig. 3 The Morlet wavelet transform of weak cold air frequency in Shanghai from 1960 to 2015 (solid lines for positive values, and dash lines for negative values)

势系数为正值,强冷空气次数的趋势系数为负值,但三者均未通过显著性检验。从气候倾向率来看,弱冷空气、中等强度冷空气分别为 $0.05、0.02 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,强冷空气为 $-0.15 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。1970年代前期、1980年代前期、2000年代中期弱冷空气次数出现大值区,而中等强度冷空气和强冷空气的次数在相同时段都为小值区;弱冷空气次数与中等强度冷空气、强冷空气的次数变化存在很好的反相关性(相关系数分别为 $-0.389、-0.516$)。

对上海地区冬季弱冷空气次数进行周期分析,通过Morlet小波变换(图3)可以看出,近56a来,影响上海地区弱冷空气次数的序列在14a和4a左右时间尺度上有明显的正负闭合中心,表明弱冷空气次数在对应年尺度下交替振荡显著,存在14a和4a左右的周期变化特征。为证实该周期的显著性,进一步使用功率谱进行分析(图略),结果显示,弱冷空气次数存在14a和4a的周期变化,并通过0.05的显著性检验。使用相同方法对中等强度冷空气次数进行周期分析(图略),也发现其存在显著的14a和4a变化周期。而强冷空气次数则没有显著周期变化。

从图4看出,上海地区冬季冷空气过程平均降温幅度先由大变小、再由小变大。1990年以前平均降温幅度由大变小,1969年出现最大值 $7.1 \text{ }^\circ\text{C}$,1971年出现次小值 $3.8 \text{ }^\circ\text{C}$;1990年以后,降温幅度逐渐变大,2008年出现次大值 $6.9 \text{ }^\circ\text{C}$,2004年出现最小值 $3.5 \text{ }^\circ\text{C}$,表明近年来冷空气产生的降温幅度在逐渐加大。上海地区冬季冷空气过程平均降温幅度为 $5.4 \text{ }^\circ\text{C}$,不同等级冷空气的降温幅度差异明显,强冷空气、中等强度冷空气和弱冷空气的平均降温

幅度分别为 $9.5、6.8$ 和 $3.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 。值得注意的是,近年来强冷空气降温幅度有所增大(线性趋势系数为正值),说明在全球气温上升的背景下,上海强冷空气事件的频数和强度仍有增多、增强的可能性^[5],应注意防范其对上海地区天气、气候产生的影响。从冷空气平均降温幅度年代际变化(表略)来看,1960年代最大,为 $5.88 \text{ }^\circ\text{C}$,1970年代比1960年代减小 $0.62 \text{ }^\circ\text{C}$,为 $5.26 \text{ }^\circ\text{C}$,1980年代达到最小值 $5.15 \text{ }^\circ\text{C}$ 。之后各年代冷空气平均降温幅度逐渐增大,1990年代为 $5.31 \text{ }^\circ\text{C}$,2000年代为 $5.48 \text{ }^\circ\text{C}$,2010年代的前6a冷空气平均降温幅度达到 $5.43 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

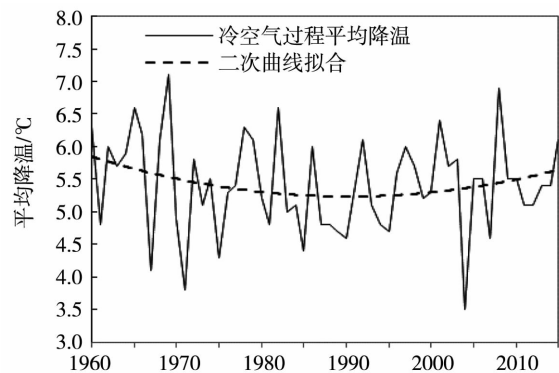


图4 1960—2015年上海地区冬季冷空气过程降温幅度及二次拟合曲线
Fig. 4 Temperature descending range during cold air processes in winter and its nonlinear trend in Shanghai from 1960 to 2015

2.2 上海地区冬季冷空气背景下的风雨特征
冬季冷空气过程总是伴随着大风、降水等天气

现象,下面对冷空气过程平均最大风速、过程降水总量、过程平均降水量进行统计分析,以揭示不同等级冷空气过程的风雨特征。

2.2.1 冷空气过程平均最大风速变化特征

上海地区冬季冷空气过程平均最大风速为 $7.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 并呈明显下降趋势(图 5), 气候倾向率为 $-0.46 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 趋势系数为 -0.551 , 通过了 0.001 的显著性检验。1981 年冷空气过程平均最大风速最大, 为 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 1995 年最小, 为 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。年代际变化显示, 1970 和 1980 年代冷空气过程平均最大风速处于相对高值, 分别为 8.8 和 $8.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 1990 年代风速最小, 平均为 $6.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 2000 年代上升到 $7.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 2010 年代前 6 a 平均为 $7.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。上海冬季风速与我国平均风速都具有减小的变化趋势, 这种趋势主要是由于大气环流调整引起的, 特别是与影响我国冬季气候的 EAWM 减弱存在关联^[19], 城市化的影响也不容忽视^[20]。

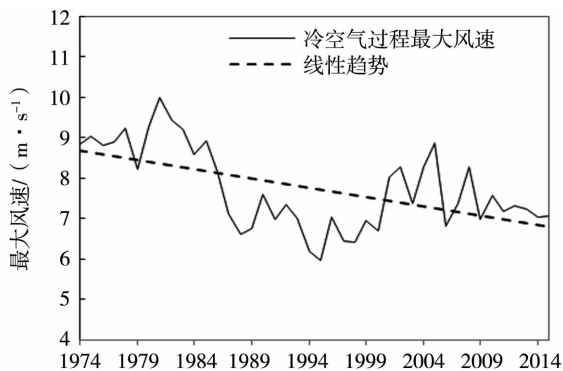


图 5 1974—2015 年上海地区冬季冷空气过程平均最大风速及线性趋势

Fig. 5 Average maximum wind speed during winter cold air processes and its linear trend in Shanghai from 1974 to 2015

从不同等级冷空气平均最大风速(图略)来看, 强冷空气平均最大风速最大, 为 $8.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 中等强度冷空气、弱冷空气的平均最大风速分别为 7.7 、 $7.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 三者的趋势系数分别为 -0.446 、 -0.439 、 -0.480 , 均通过了 0.001 的显著性检验。强冷空气平均最大风速气候倾向率为 $-0.61 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 中等强度冷空气和弱冷空气平均最大风速分别为 -0.38 、 $-0.42 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。强冷空气的平均最大风速下降幅度最大, 这主要是由于强冷空气的平均最大风速明显大于其他强度冷空气, 所以更易受到大气环流调整和城市化的影响, 风速的下降更加明显。

利用近 10 a(2006—2015 年)上海冬季逐小时

风速, 计算出风速的第 95 百分位数, 以此风速为大风界限, 统计出各等级冷空气的大风持续时间。结果表明: 弱冷空气平均大风持续时间为 2.0 h , 中等强度冷空气为 2.6 h , 强冷空气为 5.9 h 。

2.2.2 冷空气过程降水变化特征

上海地区每年冬季冷空气过程降水总量差异较大, 最长达 272.7 mm (1997 年), 最少仅为 38.2 mm (1962 年), 平均为 135.9 mm 。冷空气过程降水总量占冬季总降水量的 83.6% , 并呈显著增加趋势, 其气候倾向率为 $8.8 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 趋势系数 0.262 , 通过了 0.05 的显著性检验。1970 年前后、2000 年前后冷空气过程降水总量偏多明显(图 6), 其中 1968、1971、1972、1974、1989、1997、2004、2005 和 2014 年均超过 200 mm , 是冷空气影响时降水量最多的 9 年。1988 年以前冷空气过程降水总量以负距平为主, 距平平均值为 -18.9 mm , 之后则以正距平为主, 距平平均值为 18.8 mm , 比前者增加了 37.7 mm 。上海地区冬季冷空气过程降水总量距平年代际变化(表略)显示, 1980 年代降水总量距平为 -28.3 mm , 为各年代最小值, 1960 年代降水总量距平为 -27.9 mm , 说明这 2 个年代上海地区冷空气过程干冷特征十分明显。从 1990 年代开始, 上海地区冬季冷空气过程出现了由干冷向湿冷转换的特征, 各年代冬季冷空气过程降水总量距平全部为正值, 其中 2000 年代降水总量距平达到最大值 21.4 mm , 1990 年代、2010 年代前 6 a 的冷空气过程降水总量距平分别为 11.6 mm 和 15.9 mm , 湿冷特征非常明显。

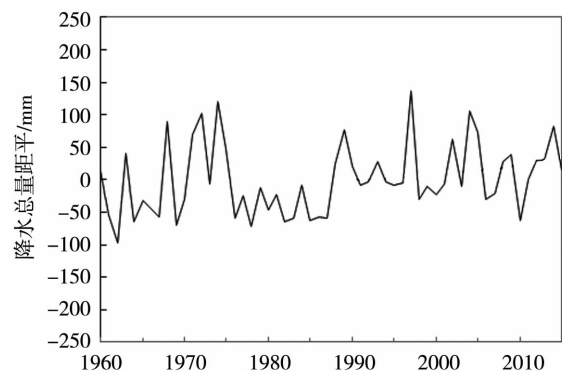


图 6 1960—2015 年上海地区冬季冷空气过程降水总量距平

Fig. 6 Precipitation anomaly during winter cold air processes in Shanghai from 1960 to 2015

不同等级冷空气过程降水总量存在差异, 其中弱冷空气过程降水总量最大, 每年平均为 77.4 mm , 中等强度冷空气、强冷空气降水总量每年分别为

35.4、23.1 mm,三者分别占冷空气过程降水总量的57%、26%和17%。弱冷空气降水总量明显大于其他等级冷空气降水总量的主要原因是弱冷空气降水持续时间长,据统计弱冷空气影响时的降水时间平均比中等强度冷空气、强冷空气长5~6 h。

从不同等级冷空气过程降水总量趋势系数(表略)来看,三者均为正值,其中弱冷空气降水总量增加的幅度最大,气候倾向率为 $7.5 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,趋势系数0.253,通过0.05的显著性检验。中等强度冷空气、强冷空气过程降水总量变化趋势不显著。因此,上海冬季冷空气过程降水总量增加趋势主要由弱冷空气过程降水增加引起,贡献率约为85.8%。

上海地区冬季冷空气过程平均降水量为14.2 mm,气候倾向率为 $0.7 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ (图略),趋势系数0.248,通过了0.05显著性检验。1997年过程平均降水量最多,为22.7 mm,1978年最少,仅为6.4 mm。同样,从不同等级冷空气过程平均降水量来看,弱冷空气最多为15.3 mm,强冷空气最少为12.7 mm。

3 结 论

(1)冬季影响上海地区的冷空气平均为13次,最多的年份17次,最少的9次。冷空气总次数的变化趋势不明显。小波分析和功率谱分析表明,冬季弱冷空气、中等强度冷空气次数存在14 a和4 a的显著周期。冷空气降温幅度呈现先由大变小、再由小变大的变化特征,特别是近年来上海地区强冷空气的降温幅度有所增大,应注意防范强冷事件发生所造成的影响。

(2)冷空气过程平均最大风速为 $7.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,呈明显下降趋势。1970、1980年代冷空气过程平均最大风速处于相对高值,分别为 8.8 和 $8.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,1990年代风速最小,平均为 $6.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,2000年代上升到 $7.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,2010年代前6 a平均为 $7.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。各等级冷空气平均最大风速均有下降趋势,其中强冷空气的平均最大风速下降幅度最大。

(3)上海地区冬季冷空气过程降水总量平均为135.9 mm,年际差异比较明显,最多的年份达到272.7 mm,最少的只有38.2 mm。冬季冷空气过程降水总量距平年代际变化显示,自1990年代起上海地区冬季冷空气过程出现由干冷向湿冷转换的变化特征。冷空气降水总量呈增多趋势,其中弱冷空气的增加幅度最为明显,且对上海冬季冷空气降水总量的贡献最大(占85.8%)。冷空气过程平均降水量为14.2 mm,并有显著增加趋势。弱冷空气过程

平均降水量最多为15.3 mm,强冷空气最少为12.7 mm。弱冷空气导致降水较多的原因主要是其维持了较长的降水时间,而其他等级冷空气则维持时间相对较短。

参考文献:

- [1] 陈隽,孙淑清. 东亚冬季风异常与全球大气环流变化 I. 强弱冬季风影响的对比研究[J]. 大气科学,1999,23(1):101-111.
- [2] 陈永林,邵玲玲,漆梁波,等. 2008年初上海冰雪天气与冷空气路径的相关性研究[J]. 气象科学,2010,30(3):414-419.
- [3] 王扬锋,马雁军,陆忠艳,等. 2010年辽宁一次沙尘天气过程的气象因素及污染状况[J]. 气象与环境学报,2011,27(5):27-31.
- [4] 姚永明,姚雷,邓伟涛. 长江中下游地区类寒潮发生频次的变化特征分析[J]. 气象,2011,37(3):339-344.
- [5] 钱维宏,张玮玮. 中国近46年来的寒潮时空变化与冬季增暖[J]. 大气科学,2007,31(6):1265-1277.
- [6] 孔祥伟,于乐江,刘新伟. 西南地区冬季旱涝特征及其与北极涛动关系[J]. 干旱区地理,2012,35(6):875-882.
- [7] 李勇,陆日宇,何金海. 影响我国冬季温度的若干气候因子[J]. 大气科学,2007,31(3):505-514.
- [8] 金祖辉,陶诗言. ENSO循环与中国东部地区夏季和冬季降水关系的研究[J]. 大气科学,1999,23(6):663-672.
- [9] 张静,李跃清,蒋兴文. 东亚冬季风的时空变化及其与 ENSO、AO 相互关系的研究进展[J]. 高原山地气象研究,2012,32(3):89-96.
- [10] 陈文,兰晓青,王林,等. ENSO和北极涛动对东亚冬季气候异常的综合影响[J]. 科学通报,2013,58(8):634-641.
- [11] 周琳,孙照渤. 1961—2010年我国冷空气的活动特征[J]. 大气科学学报,2015,38(3):342-353.
- [12] 黄焕卿,韩雪. 东亚冷空气的变化趋势[J]. 海洋预报,2014,31(5):69-75.
- [13] 毛炜峰,陈颖. 1951—2015年乌鲁木齐市寒潮过程频数及强度气候特征[J]. 干旱气象,2016,34(3):403-411.
- [14] 王正旺,赵桂香,张瑞庭,等. 山西东南部地区近40年寒潮气候特征分析[J]. 自然灾害学报,2010,19(6):55-60.
- [15] 海云莎,田永丽,陈新梅. 云南寒潮时空特征及变化分析[J]. 云南大学学报(自然科学版),2011,33(s1):147-152.
- [16] 周翠芳,张广平,杨海山. 宁夏冬季寒潮天气过程对比分析[J]. 干旱气象,2009,27(2):142-147.
- [17] 赵玉广,于长文,何丽华,等. 河北省寒潮的气候特征与冬季增暖[J]. 干旱气象,2012,30(2):244-248.
- [18] 周伟东,甄新蓉,顾松强,等. 浦东地区秋末冬初冷空气风雨对PM_{2.5}质量浓度影响研究[J]. 干旱区地理,2016,39(5):1089-1095.
- [19] JIANG Y, LUO Y, ZHAO Z T, et al. Changes in wind speed over China during 1956-2004[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2010, 99(3/4):421-430.
- [20] ZHAO W D, TIE X X, ZHOU G Q, et al. Possible effects of climate change of wind on aerosol variation during winter in Shanghai, China[J]. Particology, 2015,20:80-88.

Climate Characteristics of Winter Cold Air and Its Impacts on Wind and Precipitation in Shanghai in Recent 56 Years

ZHOU Weidong¹, MA Leiming², LIANG Ping³, ZHANG Liya¹

- (1. Pudong Meteorological Bureau of Shanghai, Shanghai 200135, China;
2. Shanghai Meteorological Center, Shanghai 200030, China;
3. Shanghai Climate Center, Shanghai 200030, China)

Abstract: Based on the observation data from meteorological stations in Shanghai from December 1960 to February 2016, the active characteristics of winter cold air with different intensity grades in Shanghai were analyzed by using methods of tendency analysis, correlation analysis, Wavelet analysis and power spectrum analysis. The results indicated that temperature descending range caused by cold air processes declined firstly and then increased, though there was no obvious change of the total frequency of cold air in Shanghai during the past 56 years. The occurring frequency of moderate and weak cold air had a significant period of 14 and 4 years. The mean maximum wind speed during cold air processes was $7.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. The total amount of precipitation caused by cold air showed an increasing trend, and the precipitation caused by weak cold air accounted for 57% of the total precipitation caused by all cold air processes.

Key words: cold air; Wavelet analysis; winter; Shanghai



(上接第 790 页)

Exploration of Extended Range Forecast for Rainstorm Process from June to September in the Lower Reaches of the Yangtze River

SUN Guowu^{1,2}, LI Zhenkun², CHEN Bomin², XIN Fei², LIANG Ping²

- (1. Lanzhou Institute of Arid Meteorology, CMA, Lanzhou 730020, China;
2. Shanghai Climate Center, Shanghai 200030, China)

Abstract: The geographical position and configuration of low – frequency systems including low – frequency cyclones and anticyclones during rainstorm processes ($\geq 50 \text{ mm}$) were analyzed by using low – frequency synoptic map in Shanghai or the lower reaches of the Yangtze River (LRYR). Then two low – frequency prediction models were proposed and applied in operation based on the evolution of low – frequency systems of 75 rainstorm processes in recent years. One is that low – frequency anticyclone exists in the north – northwest of LRYR and low – frequency cyclone exists in the south – southeast (type A), the other is the opposite of type A, which means low – frequency cyclone stands in the north – northwest of LRYR and low – frequency anticyclone exists in the south – southeast. Finally, the physical meaning of low – frequency prediction models was discussed and the results demonstrated that the rainstorms occurred when low – frequency wave trains of geopotential height and water vapor flux from northwest to southeast and southeast to northwest converged over the location of 30°N , 120°E and its vicinity region. And the maintenance of low – frequency systems had relation with the intensity of perturbation kinetic energy.

Key words: low – frequency cyclone; low – frequency anticyclone; rainstorm process; water vapor flux