

1958—2015年长江中下游寒潮时空演变特征

王珂依¹, 刘园¹, 刘布春¹, 邱美娟¹, 杨晓娟¹, 张玥滢¹,
吴昕悦^{1,2}, 肖楠舒^{1,2}, 庞静漪^{1,3}

(1. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所/作物高用水与抗灾减损国家工程实验室/农业部农业环境重点实验室, 北京 100081; 2. 沈阳农业大学农学院, 沈阳 110161; 3. 营口市气象局, 营口 115001)

摘要: 基于长江中下游地区 54 个气象站点 1958—2015 年日最低气温数据, 从时间和空间的角度, 定量分析该地区寒潮发生发展的演变特征和空间变化。结果表明: 过去 58 年, 寒潮发生次数呈不显著减少趋势, 平均减少幅度为 1.2 次/站; 寒潮过程中, 最低气温的平均降温幅度呈南高北低分布, 最低气温的极端降温幅度呈自区域中心向四周逐渐降低分布。寒潮发生的首次最早为 8 月 1 日(九江站), 末次最晚为 5 月 4 日(寿县站和六安站), 出现时间的空间分布差异显著。冬季寒潮频发, 春季和秋季次之。

关键词: 长江中下游地区; 寒潮; 日最低温度; 时空特征

长江中下游地区是我国气候变化重要响应区域之一^[1,2], 也是寒潮发生频次较高的区域之一。严重的寒潮可导致农作物受灾, 甚至绝收^[3]。随着气候变暖, 西伯利亚高压及东亚冬季风强度的变化对长江中下游地区寒潮的影响更为直接^[4-8], 寒潮发生的频次和强度也出现了新的变化特征。气候变暖背景下明确该地区寒潮变化的新特征和新规律, 对制定行之有效的农业气象灾害防御措施、保障冬季作物安全生产以及提高品质有重要的现实意义。

过去几十年, 专家学者通过对寒潮发源地、路径、类型、发生发展过程、分布特征、影响、成因及监测预警等各个相关领域进行大量研究, 形成了比较系统的寒潮理论^[9-14]。李宪之^[15]、陶诗言^[16,17]、Zhao 等^[18]、丁一汇等^[19]分别指出北冰洋(约 30°~90°E)和西伯利亚东部(约 100°~150°E)是冬季东亚寒潮的两大发源地, 寒潮的爆发涉及到中低纬相互作用过程。按中短期天气形势可分为小槽发展型、低槽东移型及横槽型三种类型; 按中期发展过程可分为倒Ω流型、极涡偏心型及大型槽脊东移型三种类型^[20]。随着气候变化, 我国中高纬度寒潮事件减少且一定程度上形成了持续性暖冬^[21], 尤其是江淮地区寒潮频次减少明显^[22]。王遵娅等^[23]、Chen 等^[24]认为我国寒潮频次减少与西伯利亚高压、ENSO 循环等大尺度天气现象具有很好的相关性。黄大文^[25]分析认为西北冷高压、西南低压、副热带高压、500 hpa 环流特征等天气系统的演变可以提前预测判别寒潮的发生。当寒潮发生时, 降温幅度、降雪/水强度等可以作为寒潮天气诊断的重要指标^[26]。综上所述, 寒潮的发生发展的研究已较为深入, 但是为农服务的深入分析相对较少, 因此本文为进一步探究长江中下游地区寒潮的变化特征对农业生产的影响, 剖析气候变暖下, 长江中下游地区寒潮发生的空间和时间变化特征, 对该地区服务三农、防灾减灾等措施的制定具有现实意义。

收稿日期: 2019-05-17; 修订日期: 2019-12-20

基金项目: 国家重点基础研发计划项目(2017YFC1502803); 中国农业科学院基本科研业务费(BSRF201902); 中国农业科学院科技创新工程(CAAS-ASTIP-2014-IEDA)

作者简介: 王珂依(1996-), 女, 河北邯郸人, 硕士, 主要从事农业气象灾害研究。E-mail: 961563711@qq.com

通讯作者: 刘园(1983-), 女, 天津人, 博士, 副研究员, 主要从事农业气象减灾研究。E-mail: liuyuan@caas.cn

1 研究方法与数据来源

1.1 数据资料

本文分析长江中下游地区寒潮时空变化特征和规律。为保证资料的完整性和连续性,建立均一、稳定的气温序列,选取长江中下游54个气象站(不含高山站)1958—2015年的逐日最低气温数据。数据来自中国气象科学数据共享服务网,均经过严格的质量检查和控制,包括极值检验和时间一致性检验等,消除了非气候因素造成的影响。具体研究区及气象站点如图1所示。

1.2 寒潮发生标准

依据国家标准《寒潮等级》(GB/T21987-2017)^[27]中定义,同时考虑我国地域辽阔,南北方气候差异等因素,本文规定长江中下游地区寒潮为24小时降温 $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上或48小时降温 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,同时最低气温低于 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。24小时内降温幅度定义为24小时内最高气温与该日最低气温之差。

1.3 研究方法

依据观测气象数据对长江中下游地区寒潮发生进行筛选,利用相关分析、线性回归和Mann-Kendall(M-K)等数理统计方法,采用地理信息系统软件对该地区寒潮时空演变特征进行表达。M-K法是目前常用的突变监测方法^[28],对寒潮进行突变检测,将 UF 和 UB 两个统计量序列曲线和给定显著性水平对应的两条临界值直线绘制在同一张图上(本文给定显著性水平 $\alpha=0.05$,临界值 $u_{0.01}=\pm 1.96$),如果 UF 与 UB 两条曲线出现了交点,且交点在临界线之间,那么对应的时刻便是突变开始的时间。

2 结果分析

2.1 寒潮空间分布特征

2.1.1 寒潮频次及平均最低气温差的空间分布特征

1958—2015年间,长江中下游地区寒潮发生频次空间特征如图2a所示。由图可知,过去58年间,该地区寒潮发生频次在39~201次/站之间,累计发生5020站次,呈东高西低分布特征;寒潮发生频次的最高值与最低值间相差近4倍。高值区分布在安徽—浙江交界处,高达201次(宁国站),低值区分布在湖南、湖北等地,有四站寒潮多年总频次低于50次/站,分别是长沙,芜湖,九江和温州站。以此频次为依据,长江中下游地区寒潮可分为四个等级(表1)。

1958—2015年间,长江中下游地区发生寒潮时的最低温差空间分布如图2b所示。由图可知,过去58年间,寒潮平均最低温差范围在 $-11.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $-10.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,以湖北、湖南、安徽、江西四省交接处为分割线,呈南北对称分布,南部地区寒潮平均最低温差小于 $-11.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,高值为南昌站、波阳站,寒潮平均最低气温为 $-11.9\text{ }^{\circ}\text{C}$;北部地区寒潮平均最低温差大于 $-11.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,低值为大陈岛站,寒潮平均最低气温为 $-10.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

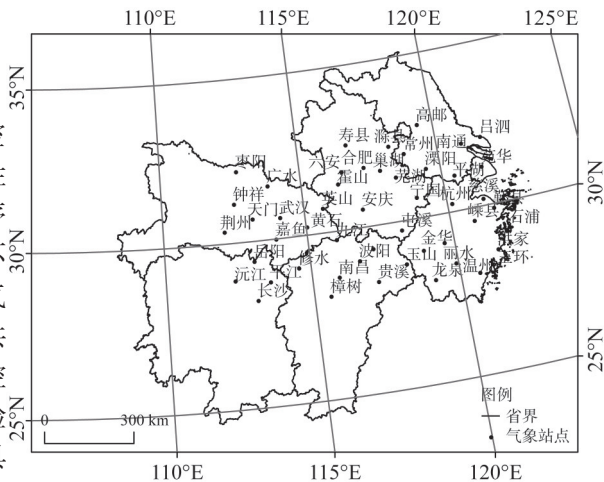


图1 长江中下游气象站点分布

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in the middle and lower reaches of the Yangtze River

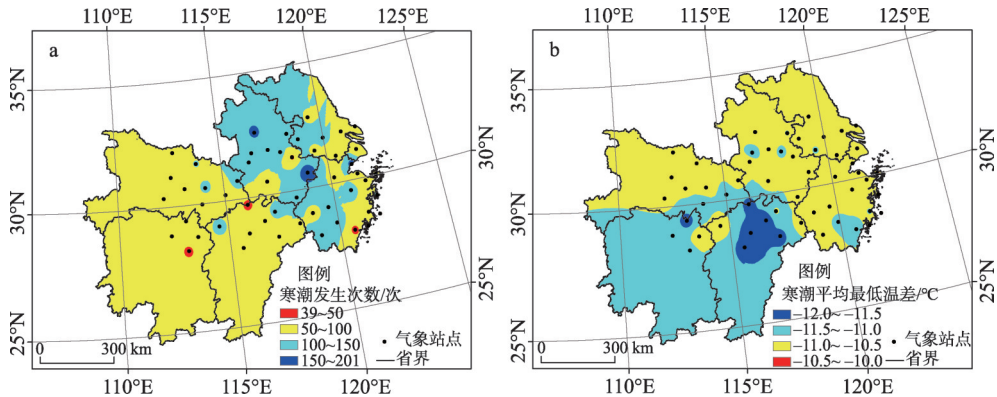


图2 1958—2015年长江中下游寒潮发生频次及平均最低气温温差的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of cold wave occurrence frequency and difference of average minimum temperature in the middle and lower reaches of Yangtze River from 1958 to 2015

2.1.2 寒潮频次季节空间分布特征

由图3可知, 冬季是长江中下游地区寒潮发生最频繁的季节, 主要分布在浙江、安徽。春季和秋季寒潮发生频次次之, 主要分布在安徽。

2.1.3 寒潮年代频次及平均最低温差空间分布特征

由图4a~图4e可知, 20世纪60年代寒潮发生频次范围在13~51次/站,

频次范围在20~30次/站和30~40次/站的区域所占比例分别为51.9%和25.9%。由北向南逐渐递减, 寒潮频次较高区域分布在江苏北部和安徽大部分地区, 寿县和宁国站寒潮频次最高(51次); 寒潮频次较低区域分布在江苏南部、浙江、江西、上海及湖南、湖北地区, 在13~30次/站之间变化, 温州站寒潮频次最低(13次)。20世纪70—90年代, 长江中下游寒潮发生频次均低于35次/站, 江苏、浙江地区发生频次较高, 湖南、湖北等地区发生频次较低。而进入21世纪后, 长江中下游寒潮发生频次略有增加的趋势, 频次范围在1~20次/站占比约为83.0%。在此时间内, 温州站已无寒潮发生。

不同年代际寒潮发生频次呈由北向南逐渐递减空间分布特征且平均最低气温温差范围逐渐扩大, 平均最低气温温差与寒潮发生频次呈相反的空间分布特征, 长江中下游寒潮平均最低气温温差极大值发生在21世纪初期, 江西省九江站差值最大(-15.5℃)。

2.1.4 寒潮极端温差空间分布特征

1958—2015年间, 长江中下游寒潮极端温差呈自区域中心向四周逐渐降低的空间分布特征(图5), 极端温差变幅在-20.0~-14.0℃; 高值区分布在江西中部, 岳阳九江站高达-20.0℃, 低值区分布在江苏东部、浙江及湖北北部, 东山站低至-14.0℃。从长江中下游寒潮极端温差出现日序来看, 11-12月出现极端温差占一半, 次年1-3月出现极端温差所占比例为48.2%。

2.1.5 寒潮首日和末日空间分布特征

图6为1958—2015年长江中下游地区寒潮首日和末日出现日序的空间分布。由图可知, 寒潮首次出现日期呈自区域中心向四周逐渐递增的空间分布特征, 寒潮首次出现最

表1 长江中下游地区寒潮等级划分

Table 1 Classification of cold wave in the middle and lower reaches of the Yangtze River

等级	多年发生频次/(次/站)	主要分布区
① 寒潮重发区	≥150	安徽—浙江交界处站点
② 寒潮频发区	[100, 150)	浙江西部、安徽大部分站点
③ 寒潮多发区	[50, 100)	浙江东部、江苏东部站点
④ 寒潮低发区	≤50	湖南、湖北等站点

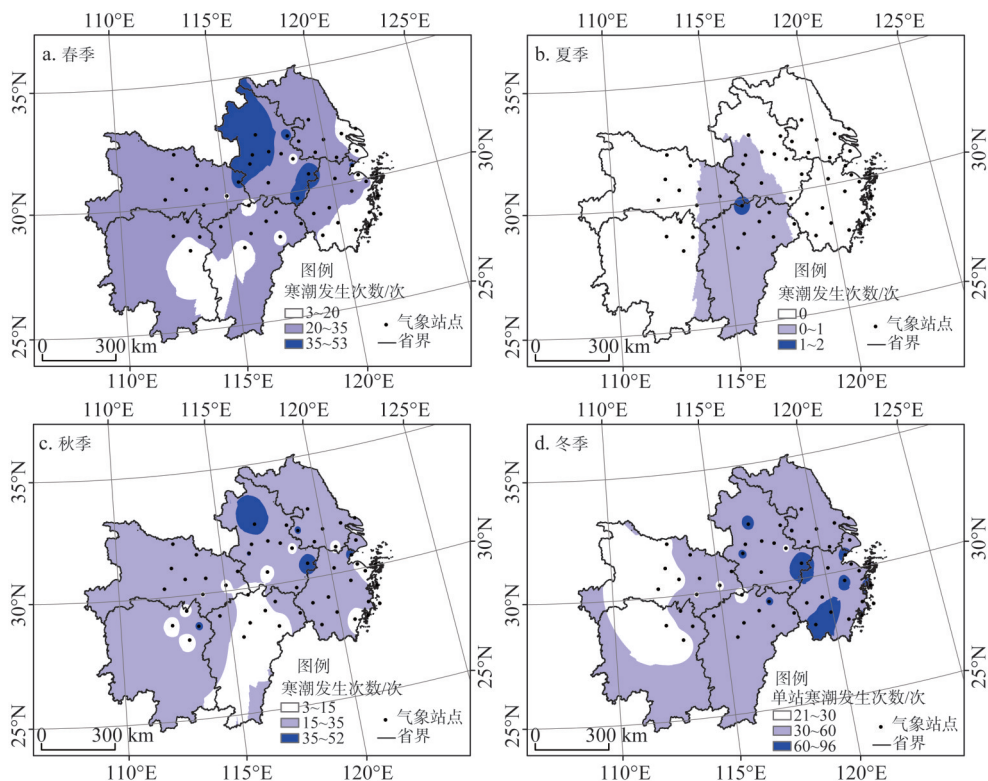
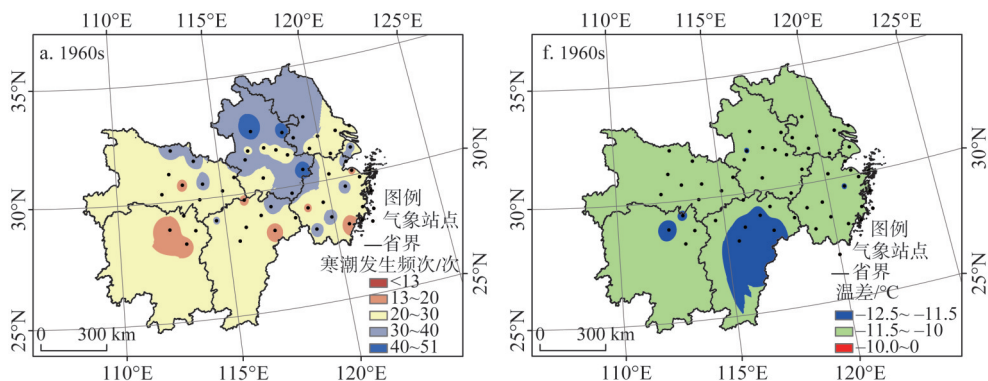


图3 1958—2015年长江中下游寒潮季节发生频次的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of cold wave occurrence frequency by season in middle and lower reaches of Yangtze River from 1958 to 2015

早为九江站8月1日；江苏、上海、浙江北部、安徽、江西北部及湖北寒潮首次出现日期在10月，占比为76.0%；浙江南部、江西中部以及湖南寒潮首次出现日期在11月，占比为22.0%。长江中下游地区寒潮末次出现日期呈自南向北逐渐递增的空间分布特征，集中分布在4月，占比为89.0%，少量寒潮末次出现在5月，占比为11.0%，末次出现寒潮最晚的为寿县和六安，日期为5月4日。

长江中下游地区寒潮首次出现时的温差范围在 $-19.0\sim-8.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，温差最低值为九江站（ $-19.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）。寒潮末次出现时的温差范围在 $-15.0\sim-7.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，温差最高值为波阳站（ $-14.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）。



接上页

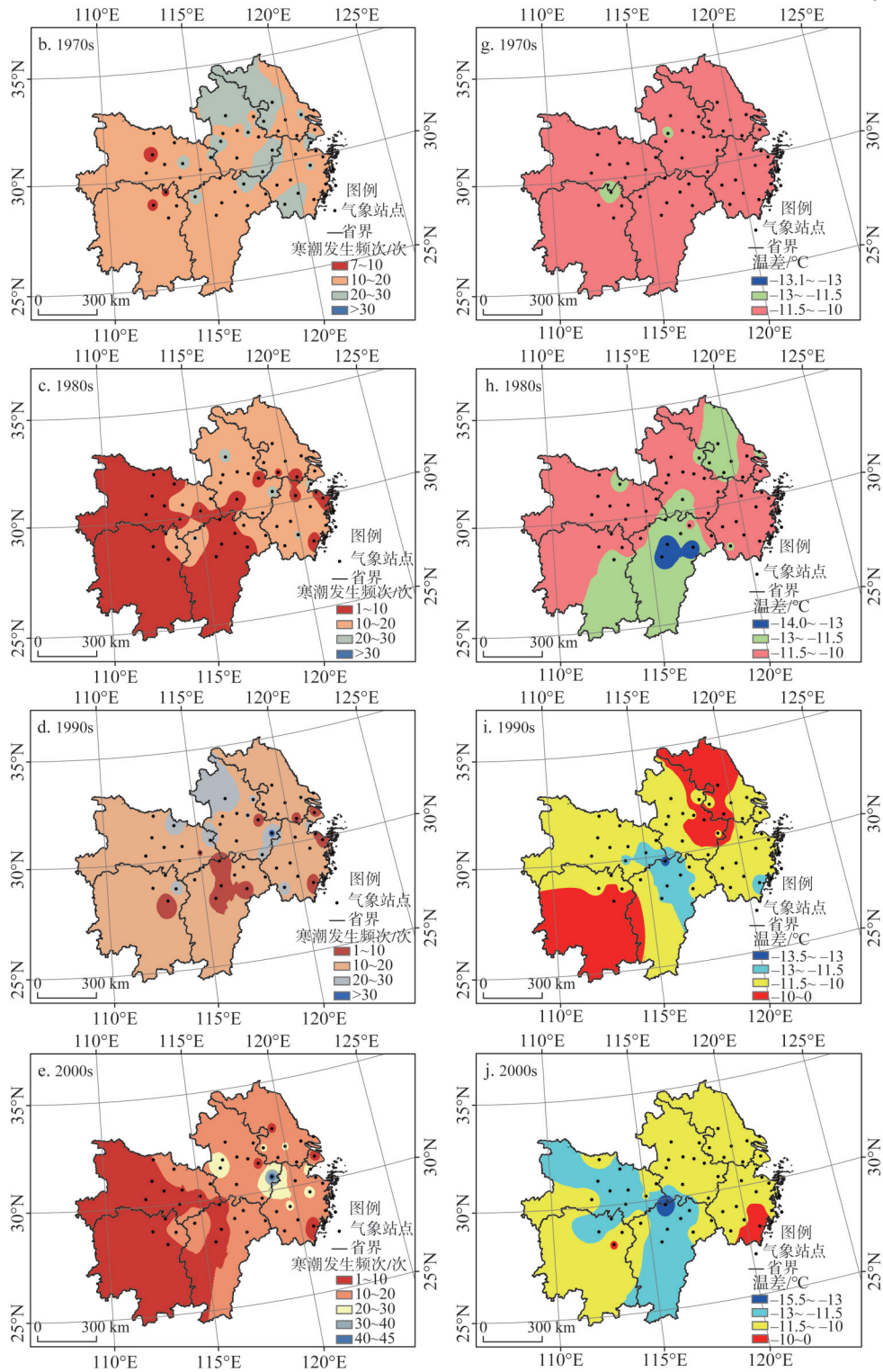


图4 1960—2010年长江中下游寒潮年代发生频次及平均最低气温温差的空间分布
 Fig. 4 Decade spatial distribution of cold wave occurrence and difference of average minimum temperature in the middle and lower reaches of the Yangtze River from 1960 to 2010

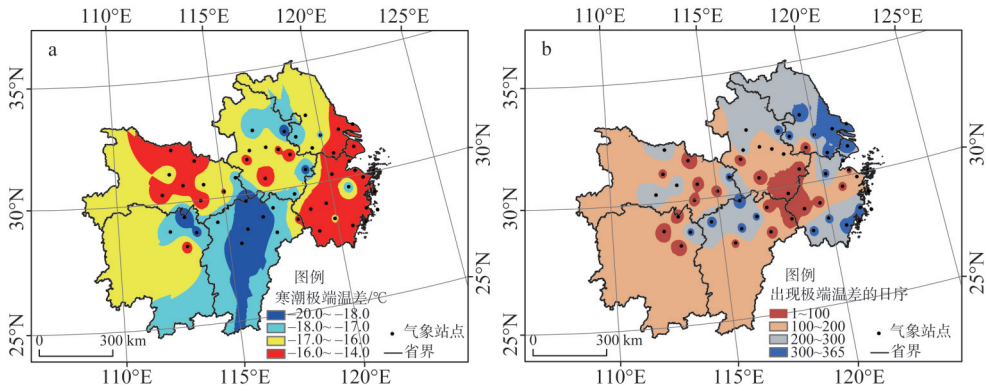


图5 1958—2015年长江中下游寒潮极端温差及发生日序空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of cold wave extreme temperature difference and Julian day in the middle and lower reaches of the Yangtze River from 1958 to 2015

以安徽、浙江、江苏及上海为分界线，其中安徽、浙江、江苏及上海温差范围为-11.0~-9.0℃；江西、湖北、湖南寒潮末次出现温差范围为-13.0~-11.0℃。

2.2 寒潮时间变化特征

2.2.1 寒潮频次月变化和年变化趋势

过去58年，长江中下游寒潮发生年平均频次为92次/站且呈弱减少趋势，减少幅度为

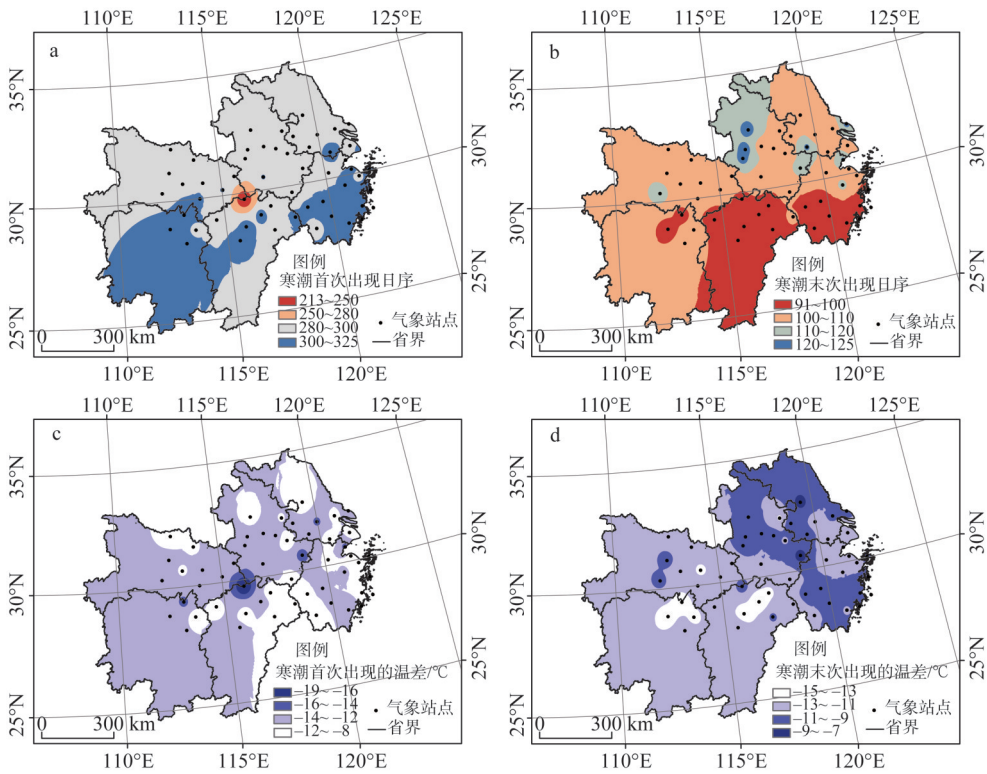


图6 1958—2015年长江中下游寒潮首日和末日日序空间分布特征

Fig. 6 Spatial distribution of cold wave first day and last day in the middle and lower reaches of the Yangtze River from 1958 to 2015

1.2次/站(图7),未通过任何显著性水平检验。年代际发生总频次依次为1480站次/10年、949站次/10年、624站次/10年、790站次/10年和775站次/10年。1966年寒潮频次达到332次;寒潮频次发生较多的年份为1966年、1969年、1970年,均高于200次/站。1984年寒潮频次低至15次,1958—2015年,寒潮发生频次12月最多,占比为21.4%。11月、1月、3月次之,占比为54.1%。

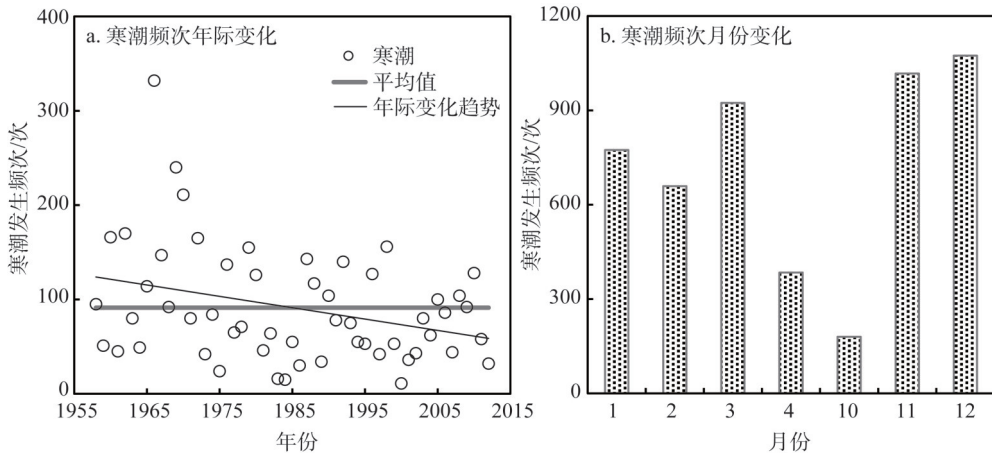


图7 1958—2015年长江中下游寒潮频次时间变化特征

Fig. 7 Temporal variation of cold wave frequency of the middle and lower Yangtze River from 1958 to 2015

2.2.2 寒潮频次突变分析

基于Mann-Kendall法突变分析,从 UF 曲线(图8)可以看出,1958—1964年 UF 数值在0值上下波动,表明寒潮频次虽然变化趋势不明显,但较多,1965—1974年 UF 数值都大于0,且 $|UF| < U_{(0.05)}$,表明寒潮呈现不显著的增加趋势,1975—1984年、1990—1999年、2008—2015年 UF 数值都小于0,且 $|UF| < U_{(0.05)}$,表明寒潮呈现不显著的减少趋势,1985—1989年、2000—2008年 UF 数值都小于0,且 $|UF| > U_{(0.05)}$,表明寒潮呈现显著的减少趋势。 UF 和 UB 曲线交点位置在临界线之间,1976年附近,表明1976年为突变时间点,突变时间点前平均寒潮发生频次比多年平均寒潮发生频次多31次,突变时间点后平均寒潮发生频次比多年平均寒潮发生频次少16次。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文利用长江中下游地区54个气象台站近58年逐日最低气温数据,对寒潮的变化趋势进行研究,得到以下结论:近58年来,该地区寒潮发生频次可分为4个等级,依次是寒潮重发区、寒潮频发区、寒潮多发区、寒潮低发区,高值与低值发生频次相差近4倍;当长江中下游地区寒潮发生时,平均最低气温

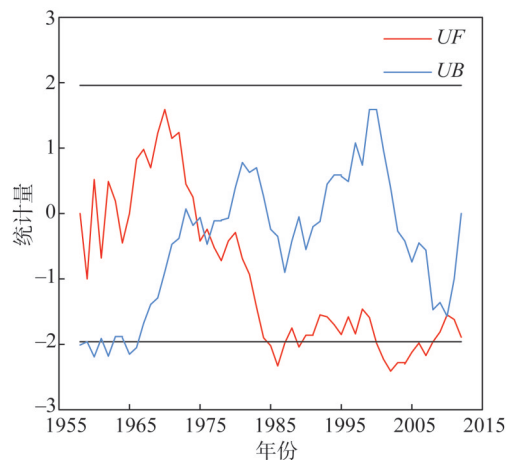


图8 1958—2015年长江中下游寒潮频次Mann-Kendall曲线

Fig. 8 Mann-Kendall curves of cold wave frequency of the middle and lower Yangtze River from 1958 to 2015

的温差空间分布呈明显南北分界且温差范围逐渐扩大。极端温差呈自区域中心向四周逐渐降低的分布特征。寒潮首次出现时间呈自区域中心向四周逐渐递增的分布特征,末次出现时间呈自北向南逐渐递减的分布特征。首次出现最早为九江站8月1日;末次最晚为寿县和六安站5月4日;冬季是长江中下游地区寒潮发生最频繁的季节,主要分布在浙江、安徽,春季和秋季次之,主要分布在安徽。寒潮发生频次呈不显著减少趋势,平均减少幅度为1.2次/站,1958—1964年寒潮频次较多,1965—1974年寒潮呈现不显著的增加趋势,1975—1984年、1990—1999年、2008—2015年寒潮呈现不显著的减少趋势,1985—1989年、2000—2008年寒潮呈现显著的减少趋势。1976年为突变时间点,突变时间点前平均寒潮发生频次比多年平均寒潮发生频次多31次,突变时间点后平均寒潮发生频次比多年平均寒潮发生频次少16次。

3.2 讨论

当前,前人对全国和区域寒潮研究较多^[23]。从指导农业生产的角度而言,寒潮全国性、区域性的分析结论不利于了解某一地区某一站点的实际情况。王遵娅等^[23]分析中国寒潮气候特征及变化指出中国东部的长江流域到华南一带,寒潮发生频次在3次左右,这与本文研究长江中下游地区寒潮发生频次基本一致,但秋季是寒潮频发的季节,春季次之,冬季最少,这个结论与文中研究结果不同,可能是依据寒潮标准不同、统计方法不同以及时间范围不一样所导致。此外,春季是作物播种关键期,尤其要注意防范寒潮引起的温度骤降、大风等农业气象灾害给长江中下游地区春播作物带来的不利影响。朱晨玉等^[29]、李艳^[30]认为全球变暖与我国南方冷空气频次显著减少关系密切,且1951—1980年间寒潮发生频次较高,20世纪80年代之后寒潮发生频次逐年降低,这与本文研究长江中下游地区寒潮发生频次呈递减趋势,结论基本一致。从农事活动角度考虑,本文从长江中下游地区寒潮的平均最低温度温差、极端温差、首日末日空间分布特征等方面进行定量分析,认为气候变暖背景下,特别是北半球高纬度地区冬季异常变暖,寒潮变化趋势主要体现为对北半球高纬度地区冬季增温的响应^[31-33],寒潮频次和强度发生显著变化,发生频次呈递减趋势,发生强度也减弱了。西伯利亚高压和东亚冬季风强度的变化,也是影响寒潮时空演变特征的因素,今后还将进行进一步的研究。寒潮天气事件发生范围、发生强度、发生频次、发生时间以及空间分布对该地区农业生产、农业布局、作物选育品种,播种时间等都有影响,未来研究工作应更加细致,并与具体作物相结合,采用趋利弊害和积极防御策略,积极应对极端天气事件和灾害对农业带来的不利影响。

参考文献(References):

- [1] 张亮,丁明军,张华敏,等. 1982—2015年长江流域植被覆盖度时空变化分析. 自然资源学报, 2018, 33(12): 2084-2097. [ZHANG L, DING M J, ZHANG H M, et al. Spatiotemporal variation of the vegetation coverage in Yangtze River Basin during 1982-2015. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(12): 2084-2097.]
- [2] 陈万旭,李江风,朱丽君. 长江中游地区生态系统服务价值空间分异及敏感性分析. 自然资源学报, 2019, 34(2): 325-337. [CHEN W X, LI J F, ZHU L J. Spatial heterogeneity and sensitivity analysis of ecosystem services value in the Middle Yangtze River region. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(2): 325-337.]
- [3] YEH S W, KUG J S, AN S I. Recent progress on two types of El Nio: Observations, dynamics, and future changes. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 2014, 50(1): 69-81.
- [4] 金祖辉,孙淑清. 东亚大陆冬季风的低频振荡特征. 大气科学, 1996, 20(1): 101-111. [JIN Z H, SUN S Q. The characteristics of low frequency oscillations in winter monsoon over the Eastern Asia. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1996, 20(1): 101-111.]
- [5] 谢安,卢莹,陈受钧. 冬季风爆发前西伯利亚高压的演变. 大气科学, 1992, 16(6): 677-685. [XIE A, LU Y, CHEN S J. The evolution of Siberian high prior to the outbreak of cold air. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1992, 16(6): 677-685.]

- [6] 张培忠, 陈光明. 影响中国寒潮冷高压的统计研究. 气象学报, 1999, 57(4): 493-501. [ZHANG P Z, CHEN G M. A statistical analysis of the cold wave high which influences on China. Acta Meteorologica Sinica, 1999, 57(4): 493-501.]
- [7] 龚道溢, 王绍武. 西伯利亚高压的长期变化及全球变暖可能影响的研究. 地理学报, 1999, 54(2): 31-39. [GONG D Y, WANG S W. Long-term variability of the Siberian high and the possible connection to global warming. Acta Geographica Sinica, 1999, 54(2): 31-39.]
- [8] 丁一汇, 温市耕, 李运锦. 冬季西伯利亚高压动力结构的研究. 气象学报, 1991, 49(4): 430-439. [DING Y H, WEN S G, LI Y J. A study of dynamic structures of the Siberian high in winter. Acta Meteorologica Sinica, 1991, 49(4): 430-439.]
- [9] 丁一汇. 高等天气学. 北京: 气象出版社, 1991. [DING Y H. Advanced Climatology. Beijing: China Meteorological Press, 1991.]
- [10] 陈豫英, 陈楠, 马金仁, 等. 近48 a宁夏寒潮的变化特征及可能影响的成因初步分析. 自然资源学报, 2010, 25(6): 939-951. [CHEN Y Y, CHEN N, MA J R, et al. Primary analysis on the variation characteristics and possible causes of the cold wave in ningxia in recent 48 a. Journal of Natural Resources, 2010, 25(6): 939-951.]
- [11] 仇永炎, 刘景秀. 寒潮中期预报研究成果简介. 气象学报, 1985, 43(2): 253. [QIU Y Y, LIU J X. Brief introduction of the research results on the middle term forecast of cold wave. Acta Meteorologica Sinica, 1985, 43(2): 253.]
- [12] 马杰. 全国大部降水偏少两次寒潮影响明显: 2008年12月. 气象, 2009, 35(3): 120-123. [MA J. Most of the country's precipitation is less than the impact of the two cold wave December 2008. Meteorological Monthly, 2009, 35(3): 120-123.]
- [13] 吴晓. 2008年初全国雨雪冰冻寒潮天气的OLR资料分析. 气象, 2009, 35(4): 87-93. [WU X. Analysis of satellite OLR data for the extremely icy rain and snow weather events in China during 2008. Meteorological Monthly, 2009, 35(4): 87-93.]
- [14] 王遵娅. 两次大范围寒潮侵袭我国: 大范围寒年12月. 气象, 2009, 35(3): 124-125. [WANG Z Y. Two widespread cold snaps hit China: In December 2008. Meteorological Monthly, 2009, 35(3): 124-125.]
- [15] 李宪之. 东亚寒潮侵袭的研究. 北京: 科学出版社, 1955. [LI X Z. A Study of the Cold Wave Invasion in East Asia. Beijing: Science Press, 1955.]
- [16] 陶诗言. 十年来我国对东亚寒潮的研究. 气象学报, 1959, 30(3): 226-230. [TAO S Y. Research on East Asian cold wave in China in the past decade. Acta Meteorologica Sinica, 1959, 30(3): 226-230.]
- [17] 陶诗言. 阻塞形势破坏时期的东亚一次寒潮过程. 气象学报, 1957, 28(1): 63-74. [TAO S Y. A synoptic and aerological study on a cold wave in the far east during the period of the break down of the blocking situation over euroasia and atlantic. Acta Meteorologica Sinica, 1957, 28(1): 63-74.]
- [18] ZHAO Q, DING Y H. Study of physical processes affecting the transformation of cold air overland after outbreak of cold waves in East Asia. Acta Meteorologica Sinica, 1992, 6(2): 198-212.
- [19] 丁一汇, 蒙晓. 一次东亚寒潮爆发后冷涌发展的研究. 气象学报, 1994, 52(4): 442-451. [DING Y H, MENG X. A case study of development of a cold surge after outbreak of cold wave in East Asia. Acta Meteorologica Sinica, 1994, 52(4): 442-451.]
- [20] 康志明, 金荣花, 鲍媛媛. 1951—2006年期间我国寒潮活动特征分析. 高原气象, 2010, 29(2): 420-428. [KANG Z M, JIN R H, BAO Y Y. Characteristic analysis of cold wave in China during the period of 1951-2006. Plateau Meteorology, 2010, 29(2): 420-428.]
- [21] 钱维宏, 张玮玮. 我国近46年来的寒潮时空变化与冬季增暖. 大气科学, 2007, 31(6): 1266-1278. [QIAN W H, ZHANG W W. Spatial and temporal changes of cold wave and winter warming in China in the past 46 years. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2007, 31(6): 1266-1278.]
- [22] 魏凤英. 气候变暖背景下我国寒潮灾害的变化特征. 自然科学进展, 2008, 18(3): 289-295. [WEI F Y. The changing characteristics of China's cold wave disaster under the background of climate warming. Progress in Natural Science, 2008, 18(3): 289-295.]
- [23] 王遵娅, 丁一汇. 近53年中国寒潮的变化特征及其可能原因. 大气科学, 2006, 30(6): 1068-1076. [WANG Z Y, DING Y H. Climate change of the cold wave frequency of China in the last 53 years and the possible reasons. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2006, 30(6): 1068-1076.]
- [24] CHEN T C, HUANG W R, YOON J H. Interannual variation of the East Asian cold surge activity. Journal of Climate, 2004, 17(2): 401-413.
- [25] 黄大文. 广东寒潮的分析和预报. 广东气象, 1995, (4): 2-6. [HUANG D W. Analysis and forecast of the eastern cold wave. Guangdong Meteorology, 1995, (4): 2-6.]
- [26] 吕新生, 万瑜, 尹冰霞, 等. 新疆北部一次强寒潮天气特征及成因. 干旱气象, 2017, 35(1): 82-90. [LYU X S, WAN Y, YIN B X, et al. Diagnosis of a strong cold weather process in Northern Xinjiang on 23 april 2014. Journal of Arid Meteorology, 2017, 35(1): 82-90.]
- [27] 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. 寒潮等级GB/T21987-2017. 北京: 中国标准出版社, 2017. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Grades of Cold Wave (GB/T21987-

- 2017). Beijing: Standards Press of China, 2017.]
- [28] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京: 气象出版社, 2007. [WEI F Y. Modern Climate Statistical Diagnosis and Prediction Techniques. Beijing: China Meteorological Press, 2007.]
- [29] 朱晨玉, 黄菲, 石运昊, 等. 中国近 50 年寒潮冷空气的时空特征及其与北极海冰的关系. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2014, 44(12): 12-20. [ZHU C Y, HUANG F, SHI Y H, et al. Spatial-temporal patterns of the cold surge events in China in recent 50 years and its relationship with Arctic Sea Ice. Periodical of Ocean University of China: Natural Science, 2014, 44(12): 12-20.]
- [30] 李艳. 欧亚大陆阻塞高压与我国寒潮关系. 见: 中国气象学会. 第 27 届中国气象学会年会灾害天气研究与预报分会场论文集. 北京: 中国气象学会, 2010: 11. [LI Y. Relationship between blocking high in Eurasia and cold wave in China. In: Proceedings of the 27th annual meeting of the Chinese Meteorological Society on disaster weather research and forecast. Beijing: Chinese Meteorological Society, 2010: 11.]
- [31] 周晓兰, 高庆九, 邓自旺, 等. 江苏气温长期变化趋势及年代际变化空间差异分析. 南京气象学院学报, 2006, 29(2): 196-202. [ZHAO X L, GAO Q J, DENG Z W, et al. Long term temperature trends and spatial patterns of the inter decadal variations in Jiangsu. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2006, 29(2): 196-202.]
- [32] 吴志伟, 朱筱英, 孙瑞林. 近 40 a 江苏省冬季气温异常的演变及其海气背景场特征. 南京气象学院学报, 2001, 24(4): 581-586. [WU Z W, ZHU X Y, SUN R L. Variation of 1961-1998 winter temperature anomaly in Jiangsu and its air-sea back ground features. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2001, 24(4): 581-586.]
- [33] 修军艺, 温敏, 王遵娅, 等. 全球变化背景下北半球冬季 MJO 传播的年代际变化. 大气科学, 2019, 43(1): 155-170. [XIU J Y, WEN M, WANG Z Y, et al. Interdecadal variation of the MJO propagation during the boreal winter in the context of global climate change. Chinese Journal Atmospheric Sciences, 2019, 43(1): 155-170.]

Spatio-temporal characteristics of cold wave in the middle and lower reaches of the Yangtze River between 1958 and 2015

WANG Ke-yi¹, LIU Yuan¹, LIU Bu-chun¹, QIU Mei-juan¹, YANG Xiao-juan¹,
ZHANG Yue-ying¹, WU Xin-yue^{1,2}, XIAO Nan-shu^{1,2}, PANG Jing-yi^{1,3}

(1. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, CAAS/National Engineering Laboratory of Efficient Crop Water Use and Disaster Reduction/Key Laboratory of Agricultural Environment, MOA, Beijing 100081, China; 2. College of Agronomy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China; 3. Yingkou Meteorological Bureau, Yingkou 115001, Liaoning, China)

Abstract: The daily cooling rate of station was calculated based on daily minimum temperature data of 54 meteorological stations in the middle and lower reaches of the Yangtze River from 1958 to 2015. A quantitative analysis of the evolutionary characteristics and spatial changes of cold wave occurrence and development was conducted in the region. The results showed that in the past 58 years, the frequency of cold wave presented an insignificant decrease trend with an average of 1.2 times/station ($P>0.05$). During cold wave processing, the spatial distribution of average difference of the minimum temperature was higher in the south and lower in the north; and the extreme of average difference of the minimum temperature gradually decreased from the regional center to the surroundings. The first cold wave occurred on August 1 (Jiujiang), and the last on May 4 (Shouxian and Lu'an). The spatial distribution of the time difference was significant. The frequent cold waves occurred in winter, followed by spring and autumn.

Keywords: middle and lower reaches of the Yangtze River; cold wave; daily minimum temperature; spatio-temporal characteristics