

徐敏, 徐经纬, 高苹, 等. 2015. 江苏水稻障碍型冷害时空变化特征及敏感性分析. 气象, 41(11):1367-1373.

# 江苏水稻障碍型冷害时空变化特征 及敏感性分析<sup>\*1</sup>

徐 敏<sup>1</sup> 徐经纬<sup>2</sup> 高 苹<sup>1</sup> 于庚康<sup>1</sup> 单 婵<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 江苏省气象局, 南京 210008

<sup>2</sup> 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

**提 要:** 利用江苏 35 站 1961—2014 年的气象观测数据和水稻产量数据, 基于 ArcGis 软件统计分析了水稻关键生育期内低温冷害的时空变化特征和敏感性。结果表明: (1) 低温冷害总次数呈现“北多南少”的总体特征, 20 世纪 70 年代发生的冷害次数最多, 21 世纪 00 年代为第二高值期; (2) 全省低温冷害持续天数主要是 3~6 d, 其中持续 3 d 的比重最大, 平均占 50% 左右, 淮北存在 6 d 以上的低温冷害过程, 但比重基本不足 10%, 淮北遭遇低温冷害的时间要早于淮南, 淮南基本上都是在 9 月上旬才会发生; (3) 低温冷害总体发生几率存在“北大南小”的特征, 年代际波动明显, 20 世纪 70 年代的发生几率最大, 21 世纪 00 年代次之, 20 世纪 80—90 年代最小; (4) 江苏西北部低温冷害强度最强, 21 世纪 00 年代低温冷害强度最强, 20 世纪 70 年代次之, 20 世纪 80—90 年代最弱; (5) 江苏中部是水稻对低温冷害的高敏感地区。

**关键词:** 江苏水稻, 障碍型冷害, 敏感性

**中图分类号:** P458, P49

**文献标志码:** A

**doi:** 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2015. 11. 006

## Analysis of Spatiotemporal Variation Characteristics and Sensitivity of Rice Sterile-Type Chilling Injury in Jiangsu

XU Min<sup>1</sup> XU Jingwei<sup>2</sup> GAO Ping<sup>1</sup> YU Gengkang<sup>1</sup> SHAN Chan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Jiangsu Meteorological Bureau, Nanjing 210008

<sup>2</sup> College of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

**Abstract:** Using 35 meteorological stations observation data and rice yield data during 1961—2014, and the ArcGis software technology, we analyzed the spatiotemporal variation characteristics and sensitivity during the key growth period of rice when chilling injury events occur. The results show that (1) the total chilling injuries number presents a “north more south less” distribution, and the largest number of chilling injuries appears in the 1970s, then the second largest in the 2000s. (2) Most chilling injury events last three to six days, mostly three days, standing for about 50% of the total events. Some chilling injuries lasting longer than six days occur in Huaibei (the area to the north of Huaihe River), with proportion below 10%. Usually Huaibei suffers chilling injuries earlier than Huainan (the area to the south of Huaihe River), most in early September. (3) Basically, the probability of the chilling injuries also presents a “north more south less” feature and significant decadal fluctuations. The largest occurrence probability appears in the 1970s, followed by the 2000s, and the lowest during 1980s to 1990s. (4) The intensity of chilling injuries is the highest in the northwest of Jiangsu, where the most intensive chilling injuries happen in the 2000s, followed by the 1970s, and the weakest in the 1980s and the 1990s. (5) The highest sensitivity area of rice to

\* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306035)和江苏省气象局青年科研基金项目(Q201517)共同资助

2015 年 3 月 3 日收稿; 2015 年 6 月 9 日收修定稿

第一作者: 徐敏, 主要从事气候变化研究. Email: amin0506@163. com

通信作者: 高苹, 主要从事农业气象研究. Email: gaoping5268@126. com

chilling injuries is the central part of Jiangsu.

**Key words:** Jiangsu rice, sterile-type chilling injury, sensitivity

## 引 言

低温冷害是水稻的主要农业气象灾害之一,我国南北方均会发生,北至黑龙江,南至广西,水稻在其生育期内都会遭遇低温冷害(何燕等,2010;姜丽霞等,2010)。水稻是中国的主要粮食作物之一,低温冷害的发生会造成水稻大面积减产。不少学者对水稻低温冷害进行了多角度研究,主要体现在低温冷害时空分布特征(张养才等,1983;李文亮等,2008;杨爱萍等,2009a;陈斐等,2013)、生理影响和耐冷性(何英彬等,2008;叶昌荣等,2000)、冷害监测(王连喜等,2003)、冷害指标(梁荣欣等,1982;孙玉亭等,1983),以及产量损失评估和预测(马树庆等,2003;2015)等几个方面。低温冷害大致可分为障碍型和延迟型两大类,障碍型冷害主要由水稻生长敏感期间发生的短时降温所致,在南方稻区比较常见;延迟型冷害主要由抽穗以前生育期间发生的较为持久的低温所致,在北方稻区比较常见(郭建平等,2009)。近年来,受全球气候变暖的影响,由于极端气候事件趋于频繁,各地区温度波动幅度加大,因此短期严重低温造成的区域性障碍型低温冷害具有频繁且严重的趋势,同时,生产者为了追求高产,不断扩种喜温作物及其偏晚熟品种,一旦发生低温冷害,农业经济损失将比以往更加严重(程勇翔等,2012)。

水稻是江苏省第一大粮食作物,常年种植面积为 220 万  $\text{hm}^2$ ,种植面积和稻谷产量分别占全省粮食面积的 40% 和总产量的 60%,单产稳居全国第一。根据江苏水稻灾情记录,20 世纪 70 年代,江苏发生过三次非常明显的障碍型低温冷害事件(1971、1973 和 1976 年),对水稻的抽穗扬花、干物质积累及灌浆速度造成了极不利的影 响,最终导致水稻减产;进入 21 世纪,低温冷害事件发生的频次明显增加,其中 2003 和 2014 年最为显著,2003 年 8 月中旬淮北地区气温异常低,严重影响水稻开花授粉,降低了结实率,2014 年,在水稻的穗花期(8 月上旬至 9 月上旬),江苏再次出现了大范围、持续低温天气,全省平均气温为 1981 年以来最低,持续的低温使得水稻生育进程延缓,影响籽粒充实,病虫害发生重,最终导致产量下降。由此可见,低温冷害是影响水

稻产量的主要因子之一,特别是在水稻拔节长穗至抽穗开花的关键生育期,低温冷害影响最为严重,它易造成颖花不育、空壳率增加。从已有研究结果来看,针对江苏地区水稻低温冷害的相关研究很少。本文将从低温冷害的持续时间、发生几率及冷害强度等方面对江苏地区近 50 多年的水稻低温事件展开分析,另外,对江苏不同地区水稻相对气象产量受低温冷害影响程度(即敏感度),也做了初步探讨。研究结果将对江苏水稻安全生产起到一定的指导作用,进行农业气象服务时,可以在把握江苏各个地区低温冷害气候特征的基础上,依据当年的天气形势,在特定时间和区域预警低温冷害的发生;也可为水稻生产的优化布局提供科学依据。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料

气象资料采用江苏省 35 个气象台站 1961—2014 年的逐日平均气温,用于确定低温过程;35 个气象台站 1961—2010 年 5—10 月的气温、降水量、日照时数,用于选取低温对照年。由于一季稻产量高、稻米品质好,并且比双季稻更节约成本和劳力,因而农民种植一季稻的积极性在持续增高,近 20 年来,长江中下游地区一季稻面积平均每年增加近 2.25 万  $\text{hm}^2$ ,目前江苏主栽水稻为一季稻。低温冷害对一季稻的主要影响时段是拔节长穗—抽穗开花的关键生育期,即 7 月下旬至 9 月上旬,因此,文本计算低温冷害频次、几率、强度和敏感度时,均是基于 7 月下旬至 9 月上旬的关键生育期而进行。江苏属于南方稻区,所以冷害类型为障碍型低温冷害(以下简称低温冷害)。农业统计资料:1961—2010 年江苏省分县逐年水稻产量。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 低温冷害强度的计算方法

##### (1) 低温冷害指标的选取

已有研究表明,江苏属于南方稻区,以障碍型冷害为主,主要是通过日平均气温和日冷积温两种方式进行判定,由于在实际使用中,日平均气温指标使

用较广泛,因此,本文也采用日平均气温指标作为判定低温冷害发生与否的标准,即日平均气温连续 3 d 或以上  $\leq 22^\circ\text{C}$  定义为一次低温冷害过程(郭建平等, 2009)。

## (2) 低温冷害强度的定义

低温冷害强度计算公式如下(杨爱萍等, 2009b):

$$I_i = \sum_{l=1}^m \left[ \sum_{j=1}^n (T - T_{lj}) \right] \quad (n \geq 3, n \in N) \quad (1)$$

式中,  $I_i$  表示某站点某年的低温冷害强度;  $T$  表示对水稻生长不利的临界温度,即  $22^\circ\text{C}$ ;  $T_{lj}$  表示某次低温冷害过程中的日平均气温;  $n$  为低温冷害过程的持续天数,  $m$  为某站点某年低温冷害的发生次数。

### 1.2.2 相对气象产量的计算方法

产量不仅受社会因素的影响,而且还取决于历年气象条件的优劣。对大范围农业区而言,农业生产水平逐年变化不大,相对稳定;但农作物的生长发育则各有特点,对气象条件的要求也各不相同,且气象条件逐年变化较大,故最终的产量历年波动也不相同。因此,一般将实际产量  $y$  可分离为依社会生产水平的变化而变化的趋势产量  $y_t$ 、随历史气象环境条件而变化的气象产量  $y_w$  和随机误差  $\varepsilon$ , 通常情况下随机误差  $\varepsilon$  可以忽略不计。其模型为:

$$y = y_t + y_w \quad (2)$$

相对气象产量( $Y$ )计算公式为:

$$Y = \frac{y - y_t}{y_t} \times 100\% \quad (3)$$

### 1.2.3 低温冷害敏感度的计算方法

敏感性是指系统受到与气候有关的刺激因素的影响程度,所谓刺激因素是指气候变化因素,包含气候状况和气候变率等。根据已有研究(杨爱萍等, 2009b),水稻对低温冷害的敏感度是指水稻相对气象产量受低温冷害影响的程度。计算公式如下:

$$S = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{\Delta Y_i}{I_i} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, k) \quad (4)$$

式中,  $S$  表示某站点的水稻低温冷害敏感度;  $\Delta Y_i$  为低温冷害年与对照年的差值,表示水稻相对气象产量的变化;  $I_i$  表示低温冷害强度;  $i$  表示年份,共有  $k$  年。式(4)表明,若低温冷害强度小,但引发的相对气象产量变动幅度大,则敏感度强;反之亦然。

在计算  $\Delta Y_i$  时涉及对照年的选取,所谓对照年是指与低温冷害年气象条件相似(关键生育期气温

条件除外)的无灾年。对照年利用类平均聚类法,对水稻生长期内的日平均气温和日均变异系数(除 7 月下旬至 9 月上旬以外)、5—10 月的降水总量、降水集中期和降水集中度及日照总时数等 6 项指标进行聚类分析而挑选出。考虑江苏省的气候条件和水稻生产力在 20 世纪 80 年代前后存在明显差异,所以在分析敏感度时主要是侧重于 20 世纪 80 年代以后的年份。 $\Delta Y$  的计算公式如下:

$$\Delta Y_i = (Y_{di} - Y_i)(0.3 - D_i) \quad (5)$$

式中,  $\Delta Y_i$  表示某站点某年的水稻相对气象产量的变化量;  $Y_{di}$  表示对照年的相对气象产量;  $Y_i$  表示低温冷害年的相对气象产量;  $D_i$  是标准均方根距离,表示两类样本的相似程度,经验阈值取 0.3,大于 0.3 表示相似程度低而剔除,  $(0.3 - D_i)$  表示权重,相似程度高的则权重大。

## 2 结果与分析

### 2.1 低温冷害的时空变化特征

#### (1) 低温冷害发生频次与地域特征

从 1961—2014 年低温冷害总次数的地域特征(图 1)来看,江苏各地存在“北多南少”的总体特征,随着纬度自北向南递减,淮北大部分地区低温冷害的总次数是在 20~30 次,江淮之间主要是处于 10~20 次,苏南地区发生的非常少,均在 10 次以下。从单站来看,丰县最多,发生了 32 次;新沂次之,发生了 30 次;赣榆位列第三,发生了 29 次;宜兴、苏州发生最少,54 年间分别仅发生了 2 次。从低温冷害发生次数的年代际变化来看(图 1),20 世纪 70 年代发生的冷害次数最多,盐城郊区、建湖、大丰等地 20 世纪 70 年代发生低温冷害的次数占总次数的比例均超过了 40%,对于淮北地区而言,21 世纪 00 年代为第二高值期,20 世纪 80 和 90 年代所占比例最少。

#### (2) 低温冷害的持续时间与出现日期特征

据统计,1961—2014 年,在 7 月下旬至 9 月上旬的水稻关键生育期,全省低温冷害持续天数主要是 3~6 d(图 2),其中持续 3 d 的比重最大,平均占 50% 左右,持续 4 d 的比重次之,淮河以南地区均是在 6 d 以内(含 6 d),淮北由于地理位置偏北,易受

冷空气侵袭,所以存在 6 d 以上的低温冷害过程,但所占比例均都比较小,7~10 d 的低温冷害所占比例基本不足 10%,10 d 以上的极端低温过程,仅出现了 2 次,均发生在丰县,具体时间是 1972 年 8 月 28 日至 9 月 10 日和 1979 年 8 月 28 日至 9 月 8 日。从发生低温冷害的时间来看,分布在 8 月中旬至 9 月上旬期间,7 月下旬至 8 月上旬历史上均无低温冷害发生,淮北地区各旬出现低温冷害的比例排序为,9 月上旬(75%左右)>8 月下旬(20%左右)>8 月中旬(5%左右),淮河以南地区基本上均是在 9 月上旬才会发生。从发生低温冷害的具体日期来看,淮北遭遇低温冷害的时间要早于淮河以南,8 月中旬就有发生,淮河以南地区基本上是在 9 月上旬才出现,历史上最早发生低温冷害的日期是 8 月 13 日(丰县、睢宁和淮安均有出现),最晚发生低温冷害的日期是 9 月 8 日。

(3) 低温冷害发生几率的年代际变化和空间分布特征

所谓低温冷害发生几率是指某站点发生低温冷害年数与统计时段总年数的比值。从 1961—2014 年的低温冷害总体发生几率(图 3f)来看,存在“北大南小”的特征,即淮北发生低温冷害的几率明显大于淮南,江苏省西北部发生几率最大可达 40%左右,东南部最小,发生几率低于 10%。从各年代的低温冷害发生几率(图 3a~3e)来看,20 世纪 70 年代的发生几率最大,其中西北部的发生几率高达 50%~70%;21 世纪 00 年代次之;20 世纪 80—90 年代最小。由此可见,江苏各地低温冷害发生几率存在明显的年代际波动特征。

(4) 低温冷害强度的年代际变化和空间分布特征

根据低温冷害强度的定义,可计算出每个站点低温冷害强度,应用 ArcGis 中空间反距离权重插值法,可将各站点的数值插值到各个格点,最后得到低温冷害强度的空间分布图(图 4)。1961—2014 年(图 4f),江苏全省的低温累积强度呈现自北向南递减的分布特征,西北部低温冷害强度最强,在 120~270℃,苏南地区基本上都是在 30℃以下,其他地区是 30~120℃。从年代际变化来看(图 4a~4e),21 世纪 00 年代低温冷害强度最强,淮河以北地区的冷害强度处于 40~90℃,其中徐州冷害强度最强,20

世纪 70 年代的低温冷害强度次之,20 世纪 60 年代低温冷害强度位列第三,20 世纪 80—90 年代低温冷害强度最弱,基本上都在 10℃以下,由此可见,江苏低温冷害强度也存在明显的年代际波动特征。结合上述低温冷害发生几率来看,容易发生低温冷害的地区,其冷害强度也往往比较大。值得注意的是:从江苏大的气候背景来看,在 20 世纪 90 年代平均气温发生突变,20 世纪 90 年代至 21 世纪 00 年代呈现出明显的上升趋势,即大的背景是处于变暖的趋势(杨强等,2014),但这并不意味着低温冷害的发生强度和几率会下降,从以上分析可知,进入 21 世纪,无论是低温冷害的发生几率还是强度都明显增强,因此在江苏气候变暖的大背景,未来依旧要关注气温的大幅度波动所导致的低温冷害。

## 2.2 低温冷害的敏感性特征

在计算水稻对低温的敏感度时,首先需要计算相对气象产量的变化量,但由于水稻的相对气象产量是各种短周期气象波动因子对产量形成的综合影响结果,如何把由低温冷害所影响的那部分产量剥离出来显得非常关键,这就需要选取合理的对照年,即除了低温冷害这一条件不同外,其他气象条件与灾害年都要相似,具体方法见 1.2.2 节。从图 5 可见,高敏感地区是位于江苏中部,高值中心主要是集中在盱眙—高邮—东台一带,敏感度是在 0.46~0.63,说明这一带的低温冷害对水稻产量的减产幅度要大于其他地区,西南部敏感度最弱。敏感度与冷害强度的空间分布并不一致,淮北地区虽然发生低温冷害的几率高、强度也较强,但是敏感度并不是很高,这可能与水稻自身的适应能力有关,经常接受低温锻炼,其抗寒能力较强;苏南地区由于遭受低温冷害的次数很少,而且冷空气经过长途跋涉到达苏南地区时已不是很强,所以苏南冷害强度也弱,因此该地的敏感度较弱;对于江淮之间,正好处于过渡地带,冷害发生几率和强度波动较大,水稻对低温冷害的响应比较敏感。西北部的敏感度处于中等,可能与海拔高度较其他地方高有关。由此可见,水稻对低温冷害的敏感性比较复杂,它受作物自身的适应能力、地理状况和气候条件等多种因子的综合影响。

7 月下旬至 9 月上旬的低温冷害对水稻产量结构的影响主要体现在对空壳率的影响,从理论上讲,

敏感度高的地方意味着遭遇低温冷害后,空壳率将出现一定程度的增加。以处于江淮之间中部的兴化站为例,1987 和 1992 年在 9 月上旬兴化均有低温冷害发生,冷害累积强度分别达到了 4.8 和 4.3℃,其强度分别位列近 50 年第二和第三,1987 和 1992

年兴化水稻空壳率分别是 9.1%和 7.8%,空壳率分别位列有记录以来的第二和第四,由此可见,冷害强度强时基本对应较高的空壳率。由于农业气象观测站有限,敏感度的高值中心没有较多的水稻空壳率数据,所以敏感度的准确性还有待进一步验证。

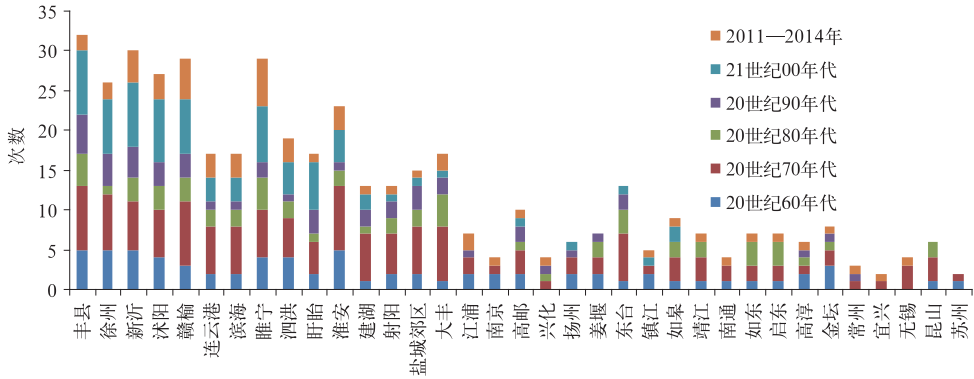


图 1 1961—2014 年江苏水稻关键生育期(7 月下旬至 9 月上旬)低温冷害各年代发生次数

(20 世纪 60 年代指 1961—1970 年,以此类推)

Fig. 1 Decadal frequency of rice chilling injury in Jiangsu from late July to early September during 1961—2014

(1960s means from 1961 to 1970, by parity of reasoning)

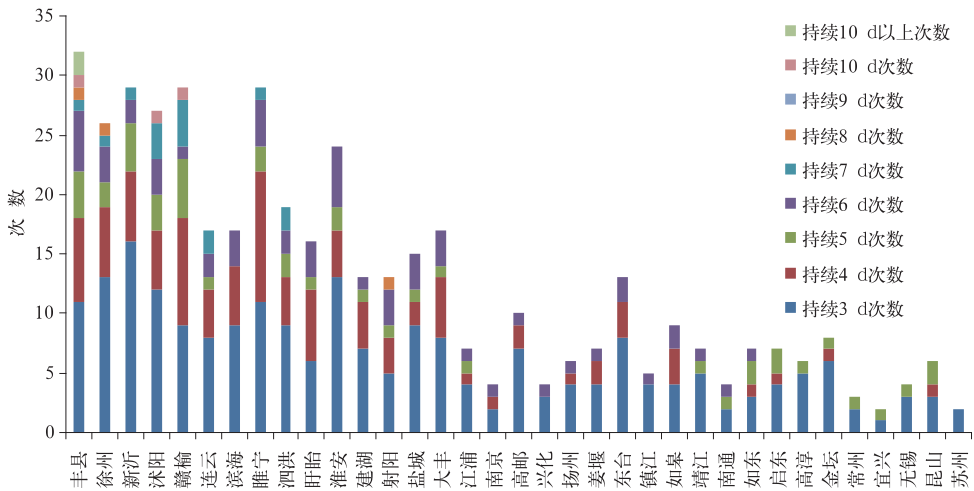


图 2 1961—2014 年江苏水稻关键生育期(7 月下旬至 9 月上旬)低温冷害不同持续时间的发生次数

Fig. 2 Frequency of different duration of rice chilling injury in Jiangsu from late July to early September during 1961—2014

### 3 结论与讨论

为了对江苏水稻关键生育期低温冷害的气候变

化特征有较全面的认识,文中从低温冷害的发生频次、持续时间、出现日期、发生几率和冷害强度等多个角度作了分析,并对水稻的低温敏感性作了探讨。具体结论如下:

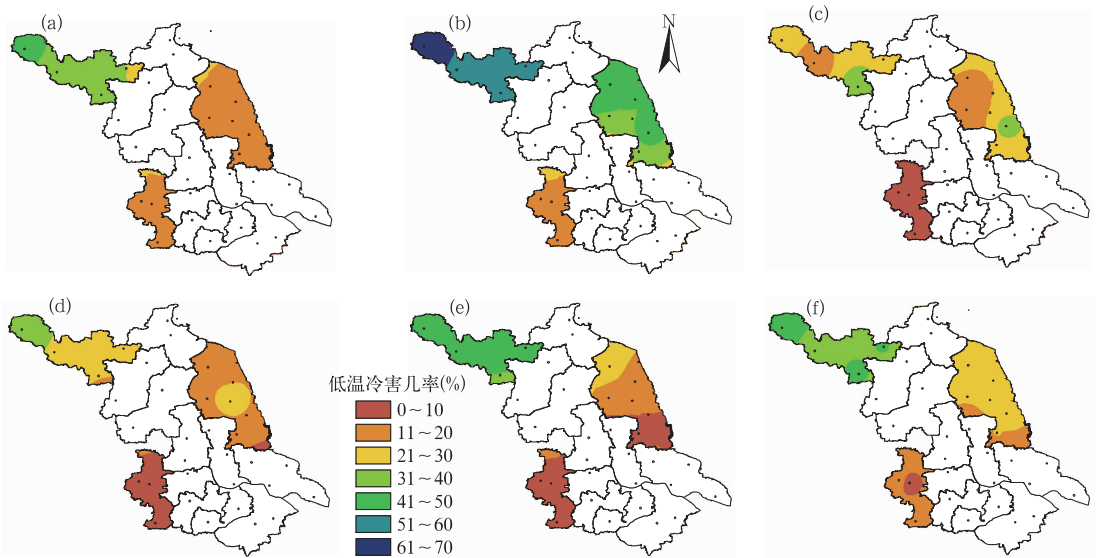


图 3 1961—2014 年江苏水稻关键生育期(7 月下旬至 9 月上旬)低温冷害发生几率年代际变化  
 (a) 20 世纪 60 年代, (b) 20 世纪 70 年代, (c) 20 世纪 80 年代, (d) 20 世纪 90 年代,  
 (e) 21 世纪 00 年代, (f) 1961—2014 年

Fig. 3 Interdecadal variation of occurrence probability of rice chilling injury in Jiangsu from late July to early September during 1961—2014

(a) 1960s, (b) 1970s, (c) 1980s, (d) 1990s, (e) 2000s, (f) 1961—2014

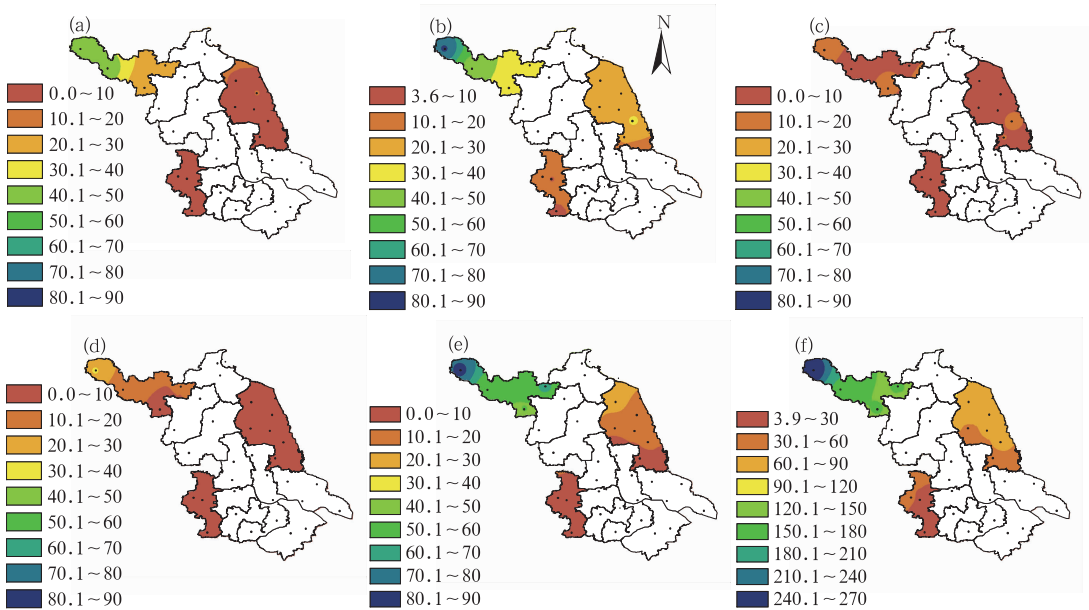


图 4 1961—2014 年江苏水稻关键生育期(7 月下旬至 9 月上旬)低温冷害强度年代际变化(单位: °C)

(a) 20 世纪 60 年代, (b) 20 世纪 70 年代, (c) 20 世纪 80 年代, (d) 20 世纪 90 年代,  
 (e) 21 世纪 00 年代, (f) 1961—2014 年

Fig. 4 Interdecadal variation of rice chilling injury in Jiangsu from late July to early September during 1961—2014 (unit: °C)

(a) 1960s, (b) 1970s, (c) 1980s, (d) 1990s, (e) 2000s, (f) 1961—2014

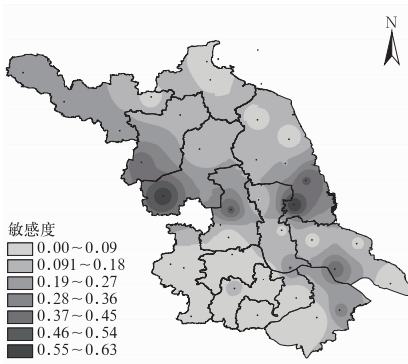


图 5 1961—2014 年江苏水稻关键生育期(7 月下旬至 9 月上旬)低温冷害敏感度空间分布

Fig. 5 Sensitivity spatial distribution of rice chilling injury in Jiangsu from late July to early September during 1961–2014

(1) 从发生频次来看,1961—2014 年,在水稻的关键生育期,江苏低温冷害总次数呈现“北多南少”,20 世纪 70 年代发生的冷害次数最多,21 世纪 00 年代次之,20 世纪 80 和 90 年代最少。从持续时间来看,全省低温冷害持续天数主要是 3~6 d,其中持续 3 d 的比重最大,平均占 50%左右,持续 4 d 的比重次之,6 d 以上的低温冷害过程均发生在淮北地区,但所占比重都比较小,7~10 d 的低温冷害比重基本不足 10%,10 d 以上的极端低温过程虽有发生,但概率很小,历史上仅出现了 2 次。从出现日期来看,淮北遭遇低温冷害的时间要早于淮南,淮北各旬出现低温冷害的比例排序为,9 月上旬>8 月下旬>8 月中旬,淮南基本上都是在 9 月上旬。

(2) 低温冷害总体发生几率呈现“北大南小”,江苏省西北部发生几率最大可达 40%左右,东南部最小。20 世纪 70 年代的发生几率最大,其中西北部高达 50%~70%;21 世纪 00 年代次之;20 世纪 80—90 年代最小。江苏西北部低温冷害强度最强,在 120~270℃;21 世纪 00 年代低温冷害强度最强;20 世纪 70 年代次之;20 世纪 80—90 年代最弱。低温冷害发生几率与强度均存在显著的年代际波动,高几率年代基本对应冷害强度高的年代,发生几率高的地区,冷害强度也基本都较强。在气候变暖的背景下,气候极端事件的发生概率增加,气温的大幅度波动易造成强的障碍型低温冷害,所以 21 世纪需要关注气温大幅度下降对水稻的影响。

(3) 江苏中部是水稻对低温冷害的高敏感地

区,从理论上讲,这一带的低温冷害对水稻产量的影响程度要大于其他地区。由于水稻对低温冷害的敏感性比较复杂,它是由作物自身的适应能力、地理状况和气候条件等多种因子的综合影响结果,因此敏感度与冷害强度的空间分布并不一致。由于高敏感地区缺乏水稻空壳率的进一步验证,因此敏感度分析还存在一些不确定性。

## 参考文献

- 陈斐,杨沈斌,申双和,等. 2013. 长江中下游双季稻区春季低温冷害的时空分布. 江苏农业学报, 29(3): 540-547.
- 程勇翔,王秀珍,郭建平,等. 2012. 农作物低温冷害监测评估及预报方法评述. 中国农业气象, 33(2): 297-303.
- 郭建平,马树庆. 2009. 农作物低温冷害监测预测理论与实践. 北京: 气象出版社, 38-39.
- 何燕,李政,钟仕全,等. 2010. 广西晚稻低温冷害空间分析模型构建及其区划. 地理研究, 29(6): 1037-1044.
- 何英彬,陈佑启,唐华俊. 2008. 水稻冷害研究进展. 中国农业资源与区划, 29(2): 33-38.
- 姜丽霞,季生太,李帅,等. 2010. 黑龙江省水稻空壳率与孕穗期低温的关系. 应用生态学报, 21(7): 1725-1730.
- 李文亮,张冬有,张丽娟. 2008. 黑龙江省低温冷害发生规律及预测研究. 灾害学, 23(4): 30-35.
- 梁荣欣,沈能展. 1982. 低温冷害气象型的初步研究. 气象, 8(2): 26-27.
- 马树庆,王琪,沈亨文,等. 2003. 水稻障碍型冷害损失评估及预测动态模型研究. 气象学报, 61(4): 507-512.
- 马树庆,袁祝香,马力文,等. 2015. 北方水稻低温冷害指标持续适用性检验与比较. 气象, 41(6): 778-785.
- 孙玉亭,王书裕,杨永岐. 1983. 东北地区作物冷害的研究. 气象学报, 41(3): 313-321.
- 王连喜,秦其明,张晓煜. 2003. 水稻低温冷害遥感监测技术与方法进展. 气象, 29(10): 3-7.
- 杨爱萍,冯明,刘安国. 2009a. 湖北省水稻盛夏低温冷害变化特征分析. 华中农业大学学报, 28(6): 771-775.
- 杨爱萍,冯明,刘安国. 2009b. 湖北水稻盛夏低温冷害的敏感性分析. 中国农业气象, 30(s2): 324-327.
- 杨强,王涛. 2014. 1976—2006 年江苏省气温和降水量的时空变化特征. 生物灾害科学, 37(4): 281-287.
- 叶昌荣,戴陆园,王建军,等. 2000. 低温冷害影响水稻结实率的要因分析. 西南农业大学学报, 22(4): 307-309.
- 张养才,太华杰. 1983. 双季早稻育秧期低温冷害规律的研究. 气象, 9(4): 14-17.