

张蕾,郭安红,何亮,等,2021.2020 年我国南方双季晚稻寒露风危害的变化特征[J].气象,47(12):1537-1545. Zhang L,Guo A H,He L,et al,2021. Variation characteristics of chilling dew wind for double-season late rice across Southern China in 2020[J]. Meteor Mon,47(12):1537-1545(in Chinese).

2020 年我国南方双季晚稻寒露风危害的变化特征^{*}

张蕾¹ 郭安红¹ 何亮¹ 侯英雨¹ 赵秀兰¹ 钱永兰¹ 蔡哲²

¹ 国家气象中心,北京 100081

² 江西省农业气象中心,南昌 330046

提 要: 基于高分辨率的土地利用/土地覆被遥感监测数据,融合下垫面信息、格点化寒露风等级和不同尺度寒露风指数,分析了 2020 年我国南方双季晚稻区的寒露风特点。结果表明:2020 年晚稻寒露风发生时间早,持续时间长,普遍出现轻度至重度寒露风。寒露风发生面积占稻田总面积的 24.7%,为 2000 年以来第三高,发生轻度、中度、重度寒露风的面积比例分别为 9.7%、12.8%和 4.9%;湖南、江西、浙江发生面积比例超过 90.0%,其余省(自治区)不足 30.0%;2020 年湖南、湖北、安徽、江苏发生面积比例为 2000 年以来最高,江西发生重度寒露风面积比例为 2000 年以来最高,浙江、福建、广西发生寒露风以轻度为主,广东寒露风发生面积较小;晚稻区寒露风指数达 4.21,为 2000 年以来第二高;2020 年湖南、江西、湖北寒露风指数较高,分别达 7.16、7.16、12.59,相应分别为 2000 年以来第二高、最高、最高。

关键词: 双季晚稻,寒露风,灾害指数,灾害等级,土地利用/土地覆被变化

中图分类号: S16,P49

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.12.009

Variation Characteristics of Chilling Dew Wind for Double-Season Late Rice Across Southern China in 2020

ZHANG Lei¹ GUO Anhong¹ HE Liang¹ HOU Yingyu¹

ZHAO Xiulan¹ QIAN Yonglan¹ CAI Zhe²

¹ National Meteorological Centre, Beijing 100081

² Jiangxi Agrometeorological Centre, Nanchang 330046

Abstract: Based on land use/cover change dataset at a resolution of 30 m×30 m, the characteristics of chilling dew wind in 2020 are analyzed for double-season late rice by using the information of underlying surface, gridded monitoring degree and chilling dew wind index. It is shown that the chilling dew wind in 2020 is characterized by earlier start date, longer duration and general low-to-heavy degree occurrence across double-season rice area. There is 24.7% of late rice area exposed to chilling dew wind, which is the third largest since 2000. The area percentages of low, medium and heavy chilling dew winds are 9.7%, 12.8% and 4.9%, respectively. In terms of the statistic in provinces, it is obvious that the area percentage of late rice area affected by chilling dew wind is more than 90% in Hunan, Jiangxi and Zhejiang, but is less than 30% in other provinces. The area percentage subjected to chilling dew wind in Hunan, Hubei, Anhui and Jiangsu is the largest since 2020, and Jiangxi has the largest area percentage of heavy chilling dew wind since 2000. The light degree of chilling dew wind occurs in Zhejiang, Fujian and Guangxi, and the occurrence

^{*} 国家重点研发计划(2017YFC1502402 和 2018YFC1507802)共同资助

2021 年 1 月 3 日收稿; 2021 年 9 月 13 日收修定稿

第一作者:张蕾,主要从事农业与生物气象灾害监测预警与风险评估研究. E-mail:leizhang@cma.gov.cn

通讯作者:郭安红,主要从事农业气象防灾减灾研究. E-mail:guoah@cma.gov.cn

area of chilling dew wind in Guangdong is small. The integrated index for chilling dew wind in double-season late rice area is 4.21 in 2020, which is the second largest since 2000. Moreover, the indexes in Hunan, Jiangxi and Hubei reach 7.16, 7.16 and 12.59, which is the second largest, the largest and the largest since 2000, respectively.

Key words: double-season late rice, chilling dew wind, disaster index, disaster degree, land use/cover change

引 言

农业生产与气象、气候条件息息相关,气候变化,尤其是气候变暖背景下极端气候事件的变化会对农业生产产生较大影响。随着全球气候不断变暖,极端温度和极端温度事件的发生特点有所改变(李金洁等,2019);总体而言近年来极端高温发生频率明显增加,持续时间延长(聂羽等,2018),而极端低温的发生总体呈降低趋势,随之造成的农业气象灾害发生频率有减有增。作为我国主要粮食作物之一,水稻生产有其适宜的气候条件范围(易灵伟等,2016;徐敏等,2018),而伴随气候变化所引起的极端温度条件改变会引起灾害胁迫变化(徐敏等,2015;许莹等,2020;杨建莹等,2020;Zhang et al,2018)。双季晚稻是我国南方稻区主栽作物,生产中遭受的主要温度灾害之一是寒露风(吕晓敏和周广胜,2018)。寒露风是指晚稻抽穗扬花期因低温造成扬花受阻、空壳率增加的危害性天气。受寒露风影响,晚稻生理特征(如叶生理活性下降)、品质构成(如出糙率、精米率、整精米率、垩白度、直链淀粉含量下降,垩白粒率、胶稠度上升)和产量构成(如结实率降低,千粒重减轻,产量下降)等方面会受到不同程度的影响(林洪鑫等,2016;余焰文等,2014)。

对南方双季晚稻寒露风的发生的气候特点,目前已有不少学者从寒露风气象指标、气候特征、风险评估和影响评估等方面开展研究,包括:基于大多数农业气象业务和研究工作者认可的寒露风指标,分析了南方双季晚稻区和省(自治区)等不同尺度下晚稻不同等级寒露风指标发生频率、危害日数、发生等级等时空分布特征(戴剑波等,2012;黄晚华等,2011;刘文英等,2009;刘丹等,2019;罗伯良和李易芝,2015;彭莉莉等,2014;苏荣瑞等,2012);基于寒露风发生特点,构建寒露风风险评价指标,开展了不同区域寒露风风险和影响评估(黄晚华等,2011;田俊和崔海建,2016;王华等,2018;吴立等,2014)。上述针对寒露风的研究较好地总结了寒露风的发生特

点和风险水平,对开展寒露风防御工作具有重要指导作用。以往研究多用气象站点的表征指数来代表整个县或者区域的寒露风情况,较少从下垫面角度分析,也很少能反映出寒露风发生面积。近年来,随着多源数据的应用,从面尺度开展寒露风的评估工作逐步开展,Chen et al(2019)利用中国气象局地面数据同化系统(CLDAS)的格点数据开展了寒露风的监测,统计分析了不同等级寒露风的受影响面积;这项工作拓展了寒露风影响范围的评估,但没有考虑下垫面信息从而难以获取精确的影响范围。2020年9月中下旬,南方双季晚稻区出现了明显的寒露风天气,针对此次典型的寒露风天气过程结合历史寒露风发生特点,本文融合高分辨率土地利用/土地覆被遥感监测数据和气象数据,从寒露风的发生时间、面积、等级、强度等角度精细化分析晚稻寒露风发生特点。

1 资料与方法

1.1 数据来源

研究所用土地利用数据为中国多时期土地利用/土地覆被遥感监测数据集(CNLUCC),来源于中国科学院资源环境科学数据中心,空间分辨率为 $30\text{ m}\times 30\text{ m}$ (徐新良等,2018)。该数据集采用中国科学院土地资源分类系统:1级分类划分为6类(耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地);2级分类主要根据土地资源的自然属性分为25类(如耕地划分为水田和旱地)。该数据集经过遥感解译,具备较好的应用精度(刘纪远等,2018)。在处理过程中,考虑到目前国家级农业气象灾害监测评估业务服务中产品的空间分辨率为 $5\text{ km}\times 5\text{ km}$,因此以 $5\text{ km}\times 5\text{ km}$ 格点为对象,判断该格点内划分的 $30\text{ m}\times 30\text{ m}$ 格点对应CNLUCC数据集中的土地利用类型,如果是水田则计为1,最后水田比例即为格点内水田数与格点包含的 $30\text{ m}\times 30\text{ m}$ 总数的比值(图1)。



图 1 双季晚稻区水田分布

Fig. 1 Location of double-season late rice

研究所用的气象资料包含南方双季晚稻区(湖北南部、江苏南部、安徽南部、上海、浙江、江西、湖

南、福建、广东、广西)的 789 个气象站点 2000 年以来逐日平均温度、最低温度等。晚稻发育期数据包括晚稻区 82 个农业气象观测站 2000 年以来逐年观测的发育期(播种、出苗、三叶、移栽、返青、分蘖、拔节、孕穗、抽穗、乳熟、成熟期)日期。

1.2 寒露风指数构建

寒露风等级计算:首先,将计算时段内晚稻区气象站点的逐日观测数据插值到 5 km×5 km 格点,然后判断格点所处的发育期(发育期用其最邻近的农业气象观测站观测的晚稻发育期代替)是否进入抽穗扬花阶段;若进入,则参考《寒露风等级》(QX/T 94—2008,中国气象局,2008)和《大宗作物气象服务手册》(毛留喜和魏丽,2015)确定的业务服务中的晚稻寒露风等级划分指标(表 1),即可判定该格点的寒露风等级。

表 1 寒露风等级划分

Table 1 Classification of degree of chilling dew wind

寒露风等级		气象要素指标(满足其一即可)
轻度	1	(1)日平均温度≤22℃持续 3~5 d;
		(2)日平均温度≤22℃且日最低温度≤17℃持续 2 d
中度	2	(1)日平均温度≤22℃持续 6~9 d;
		(2)日平均温度≤20℃且日最低温度≤17℃持续 2 d
重度	3	日平均温度≤20℃持续 6 d 以上

寒露风面积提取:在格点化寒露风等级的基础上,与水田面积比例图层相叠加,即格点内寒露风等级发生面积=水田面积比例×寒露风等级×格点面积;省级/区域寒露风面积为省/区域内格点判定的寒露风面积的和。

不同空间尺度寒露风指数构建:在分析时段内,通过寒露风等级划分计算轻度、中度、重度寒露风的天数,考虑不同等级寒露风的影响程度,进一步构建站点寒露风指数(H):

$$H_i = 0.2L_1D_1 + 0.3L_mD_m + 0.5L_hD_h \quad (1)$$

式中: H_i 为 i 站的寒露风指数; L_1 、 L_m 、 L_h 分别为轻度、中度、重度寒露风等级,即对应 1、2、3; D_1 、 D_m 、 D_h 分别为轻度、中度、重度寒露风等级出现的天数。

通过对不同站点寒露风指数进行集成,构建省级寒露风指数(HP):

$$HP = \sum_{i=1}^m \omega_i H_i \quad (2)$$

式中: H_i 为 i 站的寒露风指数; ω_i 为 i 站的权重,即为该 i 站点所在县的水田面积占全省水田总面积的比例, m 为省内站点数。

对不同省寒露风指数进行集成,构建晚稻区寒

露风指数(HS):

$$HS = \sum_{j=1}^n \omega_j HP \quad (3)$$

式中:权重 ω_j 为该 j 省水田面积占晚稻区水田总面积的比例, n 为省份个数。

2 结果与分析

2.1 寒露风发生特点

2020 年 9 月 13 日至月底,南方晚稻区出现寒露风天气,与 2000—2019 年寒露风的平均发生日期对比来看(图 2),湖南北部、湖北南部普遍偏早 5 d 以上,湖南中部—东南部偏早 3~5 d,湖南南部、江西中北部、安徽南部、江苏南部、浙江、广西西北部等地偏早 1~2 d。从南方双季晚稻区寒露风发生天数来看,湖北南部、安徽南部、江苏南部、浙江、江西、湖南、福建西北部和广西北部等地出现 3 d 以上寒露风天气,湖北南部、安徽南部、江西北部、湖南中北部和浙江中部等地达 9 d 以上。依据寒露风等级判断标准,上述地区出现轻度及以上寒露风,其中湖南中

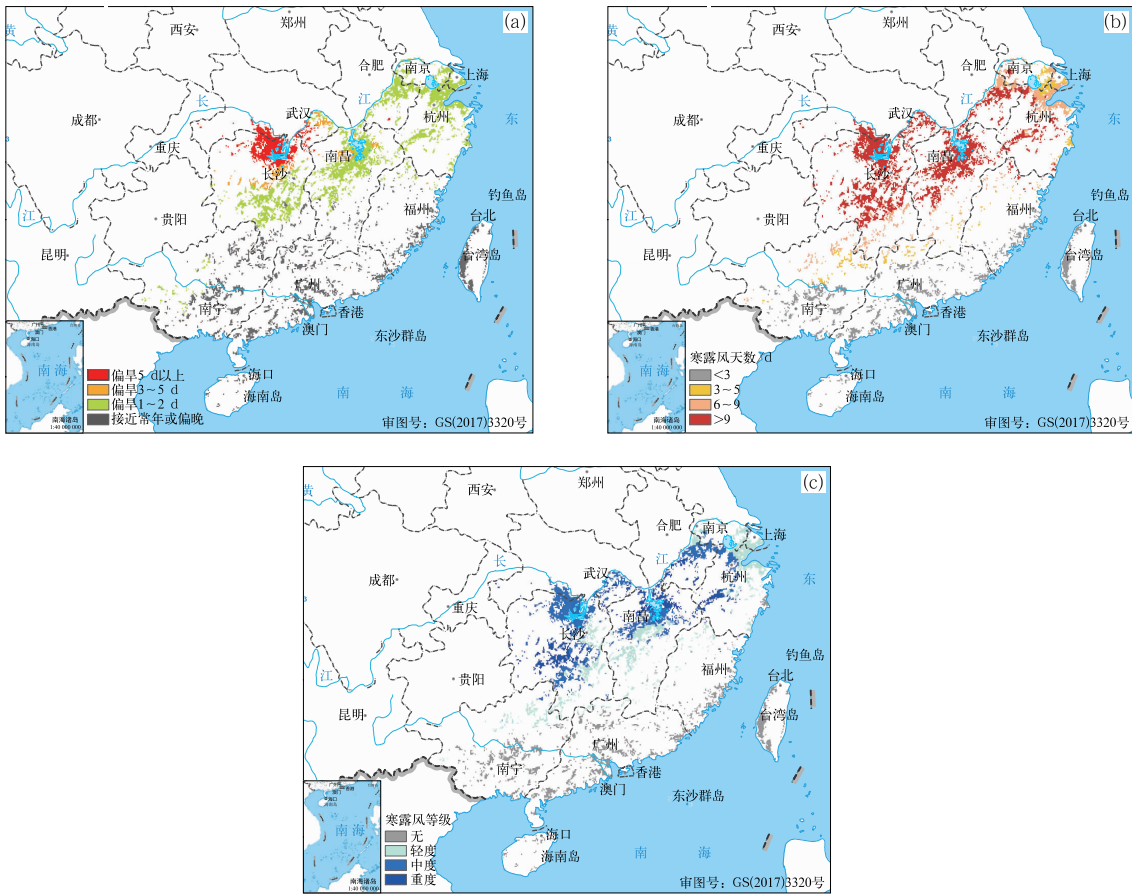


图 2 2020 年双季晚稻区寒露风(a)发生日期与 2000—2019 年平均发生日期对比,(b)持续天数,(c)等级
 Fig. 2 (a) Comparison of occurrence date between chilling dew wind in 2020 and the multi-year average during 2000—2019, (b) lasting days and (c) degree of chilling dew wind in 2020 across double-season late rice region

部、江西北部、湖北东南部、安徽南部等地出现重度寒露风。

2.2 寒露风发生面积

从不同等级双季晚稻区寒露风发生面积来看

(图 3),2020 年双季晚稻区寒露风发生面积占水田总面积的 24.7%,低于 2011 年的 28.3%和 2002 年的 27.5%;其中,轻度、中度、重度寒露风面积比例分别为 9.7%、12.8% 和 4.9%,分别为 2000 年以来第七、第三、第三高。

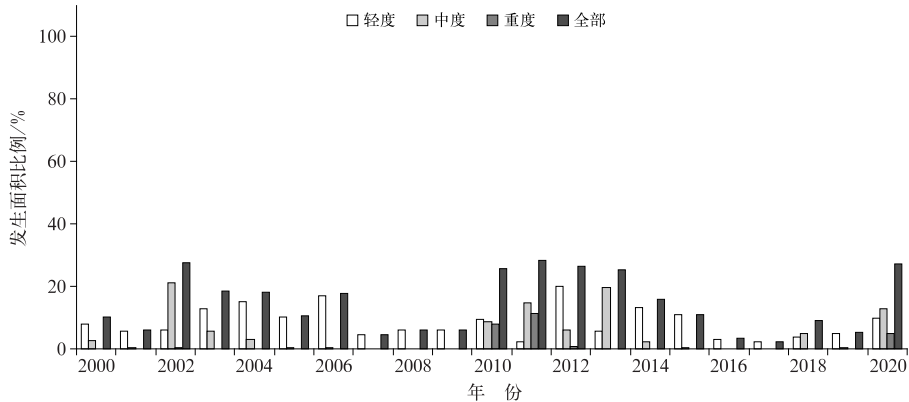


图 3 2000—2020 年双季晚稻区寒露风发生面积比例

Fig. 3 The percent of area exposed to chilling dew wind across double-season rice region during 2000—2020

从分省寒露风发生面积来看(图 4),2020 年江苏、安徽、湖北、湖南、江西、浙江、福建、广东、广西该面积占比分别为 11.1%、18.9%、17.7%、99.9%、99.4%、91.8%、23.1%、2.8%、22.2%。2020 年湖南寒露风发生面积比例为 2000 年以来最高,轻度、中度、重度寒露风面积比例分别为 16.9%、63.6% 和 19.4%;江西寒露风发生面积比例为 2000 年以

来第二高,轻度、中度、重度寒露风面积比例分别为 36.3%、37.2%和 25.9%,重度寒露风面积比例为 2000 年以来最高;湖北寒露风发生面积比例为 2000 年以来最高,轻度、中度、重度寒露风面积比例分别为 0.0%、14.6%和 3.0%;安徽寒露风发生面积比例为 2000 年以来最高,轻度、中度、重度寒露风面积比例分别为 2.4%、12.0%和 4.4%;江苏寒露风发

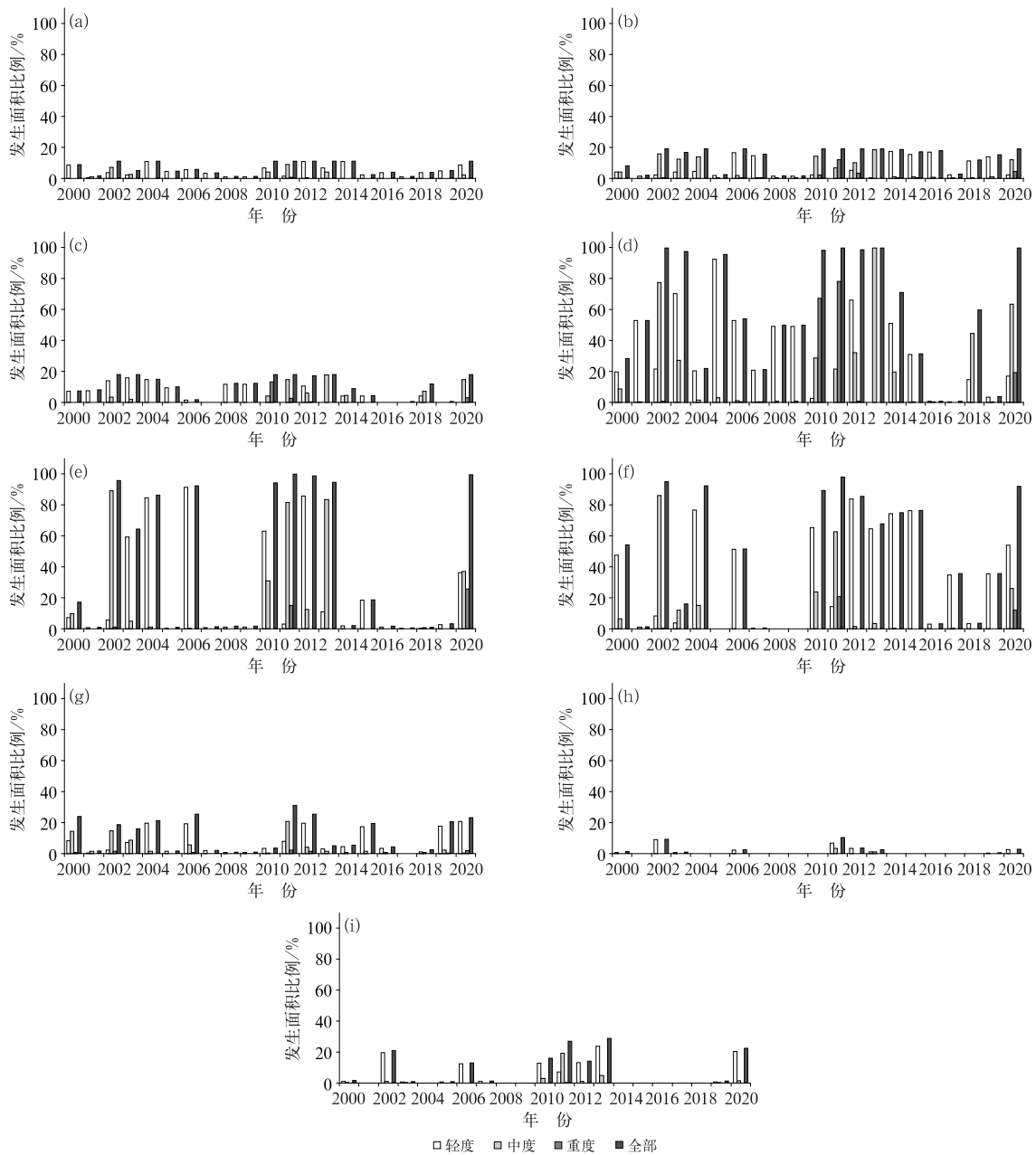


图 4 2000—2020 年(a)江苏,(b)安徽,(c)湖北,(d)湖南,(e)江西,(f)浙江,(g)福建,(h)广东,(i)广西不同等级寒露风发生面积比例

Fig. 4 The percent of area exposed to chilling dew wind in Jiangsu (a), Anhui (b), Hubei (c), Hunan (d), Jiangxi (e), Zhejiang (f), Fujian (g), Guangdong (h) and Guangxi (i) during 2000—2020

生面积比例为 2000 年以来最高,轻度、中度、重度寒露风面积比例分别为 8.8%、2.3%和 0.0%;浙江寒露风发生面积比例为 2000 年以来第四高,轻度、中度、重度寒露风面积比例分别为 53.9%、25.9%和 12.0%;福建寒露风发生面积比例为 2000 年以来第五高,轻度、中度、重度寒露风面积比例分别为 20.8%、0.4%和 1.9%;广东寒露风发生面积较小,仅为轻度寒露风;广西寒露风发生面积比例为 2000 年以来第三高,轻度、中度、重度寒露风面积比例分别为 20.6%、1.6%和 0.0%。

2.3 寒露风指数

从寒露风指数来看(图 5),湖北南部、安徽西南部、江西北部、湖南中西部、浙江中部寒露风指数在 5 以上,江西中部、湖南东南部、福建北部寒露风指数在 1~5,其余大部晚稻区寒露风指数不足 1。

双季晚稻区寒露风指数 2020 年为 4.21,为 2000 年以来第二高,仅次于 2011 年的 5.16(图 6)。从省(自治区)尺度寒露风指数来看(图 6),2020 年湖南、江西、湖北、安徽、广西、广东、福建、浙江寒露风指数

分别为 7.16、7.16、12.59、3.83、0.16、0.00、1.06、1.72。湖南寒露风指数为 2000 年以来第二高,低于 2011 年的 10.33;江西、湖北寒露风指数为 2000 年以来最高;安徽、广西、广东、福建、浙江寒露风指数分别为 2000 年以来第六、第五、第七、第五、第五高。

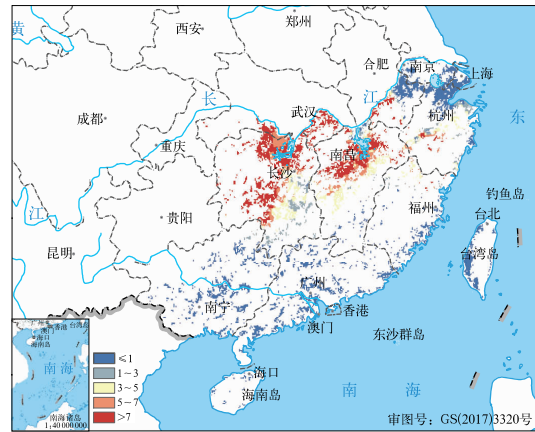


图 5 2020 年双季晚稻区寒露风指数

Fig. 5 The index of chilling dew wind across double-season late rice region in 2020

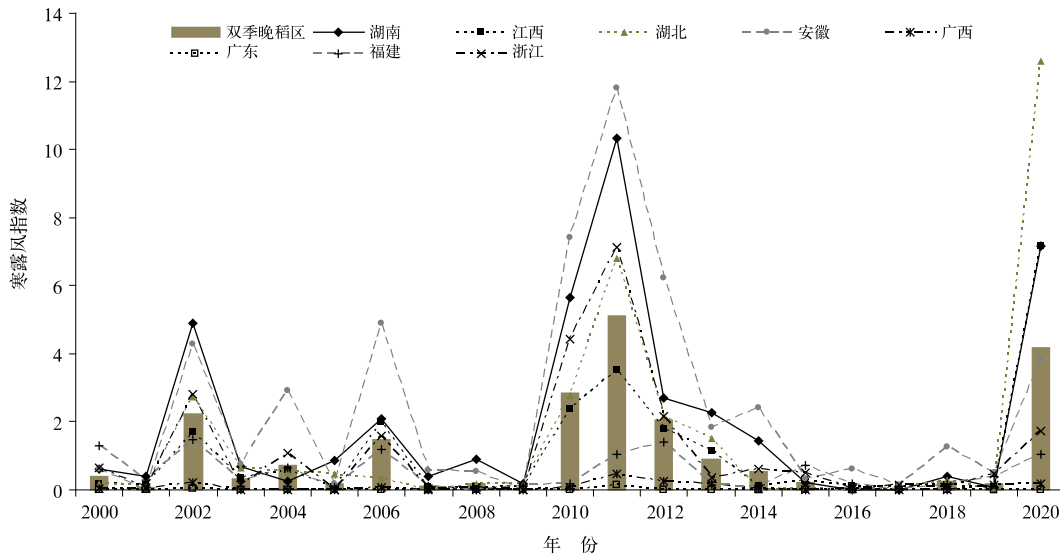


图 6 2000—2020 年各省(自治区)和双季晚稻区寒露风指数

Fig. 6 The integrated indexes of chilling dew wind across double-season late rice region and provinces during 2000—2020

3 结论与讨论

利用土地利用/土地覆被遥感监测数据提取下

垫面信息,在此基础上构建点-省-晚稻区的寒露风指数,分析了 2020 年南方双季晚稻区寒露风特点,主要结论如下:

(1)发生时间早、持续时间长:湖北南部、安徽南

部、江苏南部、江西、湖南、浙江和广西北部等地寒露风天气出现日期普遍偏早,寒露风持续天数在 3 d 以上,大部出现轻度至重度寒露风。

(2)影响范围大:双季晚稻区寒露风发生面积比例为 24.7%,是 2000 年以来第三高,轻度、中度、重度寒露风面积比例分别为 9.7%、12.8%和 4.9%;在各省(自治区)中,湖南、江西、浙江发生面积比例较大,分别为 99.9%、99.4%、91.8%,其余省(自治区)不足 30.0%。湖南、湖北、安徽、江苏寒露风发生面积比例为 2000 年以来最高;江西寒露风发生面积比例为 2000 年以来第二高,重度寒露风面积比例为 2000 年以来最高;浙江、福建、广西寒露风发生面积比例分别为 2000 年以来的第四、第五、第三高,以轻度为主;广东寒露风发生面积较小。

(3)强度高:湖北南部、安徽西南部、江西北部、湖南中西部、浙江中部寒露风指数较高,普遍在 5 以上。双季晚稻区寒露风指数为 4.21,为 2000 年以来第二高;湖南、江西、湖北寒露风指数分别为 7.16、7.16、12.59,其余省(自治区)不足 4.00;湖南寒露风指数为 2000 年以来第二高,江西、湖北为 2000 年以来最高。

本文通过构建寒露风指数,分析寒露风时空多尺度发生特点。对比历史寒露风发生特点,1981 年以来寒露风指数整体呈降低趋势,与 1981—2010 年相比(平均指数为 1.53),近十年寒露风强度减弱(平均指数为 1.39);但寒露风指数高值出现频率并没有降低,近十年中寒露风指数较高的年份出现了两年(2011 年和 2020 年为历史前五位)。可见,气候变暖背景下强寒露风的发生并没有减弱,这与已有研究结果较为一致(刘丹等,2019)。在这种背景下,寒露风指数较高的年份(2011 年和 2020 年),晚稻一旦遭受寒露风天气会受到明显影响,正如田间调查结果显示:2011 年湖南南部、江西南部、浙江南部、福建西部和北部以及两广北部局部等地晚稻遭受轻至中度寒露风危害,晚稻无法正常抽穗开花和授粉、结实率降低,部分处于抽穗扬花始期的晚稻空壳率高达 60%~70%,处于抽穗扬花普遍期的空壳率为 40%~50%,处于抽穗末期的空壳率为 20%~30%;2020 年湖南中北部、江西北部等地区晚稻遭受寒露风天气影响较重,出现抽穗开花缓慢、花粉败育、授粉不良、结实率下降、空壳率上升、灌浆不充分,后期千粒重偏低,影响晚稻产量形成。此外,胡磊等(2020)研究表明 2006 年属于中度寒露风,这也

与计算的寒露风指数属于中等水平相一致。当然,本研究建立的寒露风指数虽然能反映出寒露风年际间的差异,但是要量化寒露风的具体影响程度(如对产量的影响),还需要通过进一步获取有效的试验数据样本从而构建综合性的寒露风影响指数(如低温积寒等)。此外,本研究在数据方法上也存在不确定性。首先,受土地利用数据的限制,计算过程中采用了统一的分类数据,即粗略地认为近年来水田面积一致,忽略了年际间的差异,这与实际水田面积存在一定的差异。其次,在土地利用数据分类解译时把水田粗略地认为是晚稻田,这里也必然存在一定的误差,因为水田并不等于晚稻田,下一步将尝试利用遥感反演和地面实测结合的方式确定晚稻田的具体分布情况,从而从水田中进一步分离出晚稻田,提高精细化服务水平。

根据寒露风天气特点,尤其是区域发生特点,可以为采取区别化、针对性的生产措施调整和防御提供参考。在产前,根据区域寒露风发生和风险特点,尤其是在江西、湖南等寒露风风险较高的区域,需要选择合适的能在寒露风来临前大概率完成齐穗的品种,在充分考虑品种生育特性的基础上尽可能早播早插(王华等,2011)。在产中,根据实时天气和晚稻生长发育进程,对寒露风进行提前预测(罗伯良和李易芝,2015;吴立等,2016a;2016b),从而采取相应的管理技术(李超等,2018;苏荣瑞等,2012),如在寒露风到来时,对于尚未抽穗晚稻采取灌深水增温,对已进入始穗的晚稻采取结合叶面适量喷施磷酸二氢钾加调节剂等促进晚稻早抽穗;对正处于抽穗扬花的晚稻应灌深水保温御寒、喷施增温剂以减轻低温危害确保安全齐穗。寒露风过后,受影响水稻对病虫害的抵抗力下降,需预防白叶枯病和细菌性条斑病以及稻飞虱等危害,避免或减轻病虫害对于水稻产量的影响。

参考文献

- 戴剑波,高静,杨爱萍,等,2012. 1961—2010 年桂北晚稻寒露风特征分析[J]. 气象与减灾研究,35(3):57-62. Dai J B, Gao J, Yang A P, et al. 2012. Characteristics of the cold-dew wind impact on late rice in northern Guangxi[J]. Meteor Disaster Reduct Res, 35(3):57-62(in Chinese).
- 胡磊,田俊,卓红秀,等,2020. 1961—2017 年江西省晚稻寒露风时空演变特征[J]. 气象与环境学报,36(4):67-73. Hu L, Tian J, Zhuo H X, et al. 2020. Spatio-temporal variation characteristics of cold-dew wind on double-cropping late rice in Jiangxi Province

- from 1961 to 2017[J]. *J Meteor Environ*, 36(4): 67-73 (in Chinese).
- 黄晚华, 黄仁和, 袁晓华, 等, 2011. 湖南省寒露风发生特征及气象风险区划[J]. *湖南农业科学*, (15): 48-52. Huang W H, Huang R H, Yuan X H, et al, 2011. The occurring characteristics and meteorological risk zoning of cold dew wind in Hunan Province[J]. *Hunan Agric Sci*, (15): 48-52 (in Chinese).
- 李超, 肖小平, 汤文光, 等, 2018. 提前喷施叶面肥对增强翻秋晚稻抵御寒露风能力的分析[J]. *中国农业气象*, 39(5): 337-343. Li C, Xiao X P, Tang W G, et al, 2018. Analysis of pre-spraying foliage fertilizer on fanqiu late rice enhance the ability of resisting cold dew wind[J]. *Chin J Agrometeor*, 39(5): 337-343 (in Chinese).
- 李金洁, 王爱慧, 郭东林, 等, 2019. 高分辨率统计降尺度数据集 NEX-GDDP 对中国极端温度指数模拟能力的评估[J]. *气象学报*, 77(3): 579-593. Li J J, Wang A H, Guo D L, et al, 2019. Evaluation of extreme temperature indices over China in the NEX-GDDP simulated by high-resolution statistical downscaling models[J]. *Acta Meteor Sin*, 77(3): 579-593 (in Chinese).
- 林洪鑫, 胡启锋, 肖宇龙, 等, 2016. 寒露风对双季晚稻品种产量构成和品质的影响[J]. *江西农业学报*, 28(5): 20-23. Lin H X, Hu Q F, Xiao Y L, et al, 2016. Effect of cold dew wind on quality, yield and yield components of double cropping late rice varieties[J]. *Acta Agric Jiangxi*, 28(5): 20-23 (in Chinese).
- 刘丹, 郭瑞鸽, 杨军, 等, 2019. 江西省寒露风的时空变化特征及其对气候变化的响应[J]. *江西农业学报*, 31(10): 102-108. Liu D, Guo R G, Yang J, et al, 2019. Spatial-temporal variation characteristics of autumn low temperature and its response to climate change in Jiangxi Province[J]. *Acta Agric Jiangxi*, 31(10): 102-108 (in Chinese).
- 刘纪远, 宁佳, 匡文慧, 等, 2018. 2010—2015 年中国土地利用变化的时空格局与新特征[J]. *地理学报*, 73(5): 789-802. Liu J Y, Ning J, Kuang W H, et al, 2018. Spatio-temporal patterns and characteristics of land-use change in China during 2010—2015[J]. *Acta Geogr Sin*, 73(5): 789-802 (in Chinese).
- 刘文英, 张真真, 简海燕, 2009. 江西近 50 年寒露风演变趋势及其对双季晚稻的影响[J]. *气象与减灾研究*, 32(4): 67-71. Liu W Y, Zhang X Z, Jian H Y, 2009. Evolution trend of cold-dew wind in recent 50 years in Jiangxi Province and its influence on late double-harvest rice[J]. *Meteor Disaster Reduct Res*, 32(4): 67-71 (in Chinese).
- 罗伯良, 李易芝, 2015. 湖南双季晚稻寒露风初日的气候演变特征及其预测模型[J]. *中国农业气象*, 36(3): 338-345. Luo B L, Li Y Z, 2015. Climatic characteristics and prediction of autumn low temperature during late rice growth stage in Hunan[J]. *Chin J Agrometeor*, 36(3): 338-345 (in Chinese).
- 吕晓敏, 周广胜, 2018. 双季稻主要气象灾害研究进展[J]. *应用气象学报*, 29(4): 385-395. Lv X M, Zhou G S, 2018. A review on main meteorological disaster of double-cropping rice in China [J]. *J Appl Meteor Sci*, 29(4): 385-395 (in Chinese).
- 毛留喜, 魏丽, 2015. 大宗作物气象服务手册[M]. 北京: 气象出版社.
- Mao L X, Wei L, 2015. *Agro-Meteorological Service Manual for Major Crops* [M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 聂羽, 韩振宇, 韩荣青, 等, 2018. 中国夏季热浪持续天数的年际变化及环流异常分析[J]. *气象*, 44(2): 294-303. Nie Y, Han Z Y, Han R Q, et al, 2018. Interannual variation of heat wave frequency persistence over China and the associated atmospheric circulation anomaly [J]. *Meteor Mon*, 44(2): 294-303 (in Chinese).
- 彭莉莉, 陆魁东, 张超, 等, 2014. 基于寒露风时空特征的湖南双季晚稻抽穗扬花安全期分析[J]. *中国农业气象*, 35(2): 200-205. Peng L L, Lu K D, Zhang C, et al, 2014. Analysis on safety heading-flowering stage for double cropping late rice based on temporal and spatial features of autumn low temperature [J]. *Chin J Agrometeor*, 35(2): 200-205 (in Chinese).
- 苏荣瑞, 耿一风, 田皓, 等, 2012. 江汉平原 58 年寒露风对双季晚稻的影响[J]. *湖北农业科学*, 51(22): 5020-5023. Su R R, Geng Y F, Tian H, et al, 2012. Effect of cold dew wind on double-cropping late rice in recent 58 years in Jiangnan Plain [J]. *Hubei Agric Sci*, 51(22): 5020-5023 (in Chinese).
- 田俊, 崔海建, 2016. 江西省双季晚稻寒露风影响评估[J]. *中国农业大学学报*, 21(2): 107-114. Tian J, Cui H J, 2016. Impact assessment of cold-dew wind on double-cropping late rice in Jiangxi Province [J]. *J China Agric Univ*, 21(2): 107-114 (in Chinese).
- 王华, 陈新光, 胡飞, 等, 2011. 气候变化背景下广东晚稻播期的适应性调整[J]. *生态学报*, 31(15): 4261-4269. Wang H, Chen X G, Hu F, et al, 2011. Adaptative adjustments of the sowing date of late season rice under climate change in Guangdong Province [J]. *Acta Ecol Sin*, 31(15): 4261-4269 (in Chinese).
- 王华, 杜尧东, 张羽, 等, 2018. 广东晚稻寒露风保险风险区划[J]. *气象与环境科学*, 41(4): 98-102. Wang H, Du Y D, Zhang Y, et al, 2018. Insurance risk zoning of late rice cold dew wind in Guangdong [J]. *Meteor Environ Sci*, 41(4): 98-102 (in Chinese).
- 吴立, 霍治国, 姜燕, 等, 2014. 南方晚稻寒露风风险要素的地理分布特征[J]. *生态学杂志*, 33(10): 2817-2823. Wu L, Huo Z G, Jiang Y, et al, 2014. Geographical distribution of risk factors on cold dew wind of late rice in southern China [J]. *Chin J Ecol*, 33(10): 2817-2823 (in Chinese).
- 吴立, 霍治国, 杨建莹, 等, 2016a. 基于 Fisher 判别的南方双季稻低温灾害等级预警[J]. *应用气象学报*, 27(4): 396-406. Wu L, Huo Z G, Yang J Y, et al, 2016a. Early-warning of low-temperature disaster levels on double-cropping rice in southern China based on fisher's discriminant [J]. *J Appl Meteor Sci*, 27(4): 396-406 (in Chinese).
- 吴立, 霍治国, 杨建莹, 等, 2016b. 南方双季稻低温灾害等级预测[J]. *生态学杂志*, 35(4): 925-933. Wu L, Huo Z G, Yang J Y, et al, 2016b. Prediction of levels of low temperature disaster to double cropping rice in southern China [J]. *Chin J Ecol*, 35(4): 925-933 (in Chinese).
- 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[J]. *气象*, 41(11): 1367-1373. Xu M, Xu J W, Gao

- P, et al, 2015. Analysis of spatiotemporal variation characteristics and sensitivity of rice sterile-type chilling injury in Jiangsu [J]. Meteor Mon, 41(11):1367-1373(in Chinese).
- 徐敏, 吴洪颜, 张佩, 等, 2018. 基于气候适宜度的江苏水稻气候年景预测方法[J]. 气象, 44(9):1200-1207. Xu M, Wu H Y, Zhang P, et al, 2018. Long-term prediction method of rice annual agricultural climate status in Jiangsu Province based on climatic suitability[J]. Meteor Mon, 44(9):1200-1207(in Chinese).
- 徐新良, 刘纪远, 张树文, 等, 2018. 中国多时期土地利用土地覆被遥感监测数据集(CNLUCC)[EB/OL]. 中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统, [http://www.resdc.cn/DOI/doi.aspx? DOIid=54](http://www.resdc.cn/DOI/doi.aspx?DOIid=54). Xu X L, Liu J Y, Zhang S W, et al, 2018. China's multi-period land use land cover remote sensing monitoring dataset (CNLUCC)[EB/OL]. Data Registration and Publishing System of the Resource and Environmental Science Data Center of the Chinese Academy of Sciences, <http://www.resdc.cn/DOI/doi.aspx? DOIid=54>(in Chinese).
- 许莹, 王猛, 杨太明, 等, 2020. 安徽省一季稻高温热害致灾指标研究[J]. 气象, 46(6):857-862. Xu Y, Wang M, Yang T M, et al, 2020. Research on disaster-causing index of single-season-rice heat injury in Anhui Province[J]. Meteor Mon, 46(6):857-862 (in Chinese).
- 杨建莹, 霍治国, 王培娟, 等, 2020. 江西早稻高温热害发生时间分布特征[J]. 应用气象学报, 31(1):42-51. Yang J Y, Huo Z G, Wang P J, et al, 2020. Occurrence characteristics of early rice heat disaster in Jiangxi Province[J]. J Appl Meteor Sci, 31(1):42-51(in Chinese).
- 易灵伟, 杨爱萍, 余焰文, 等, 2016. 基于气候适宜指数的江西晚稻产量动态预报模型构建及应用[J]. 气象, 42(7):885-891. Yi L W, Yang A P, Yu Y W, et al, 2016. Dynamic prediction and its application for late rice yield based on climate suitability index in Jiangxi[J]. Meteor Mon, 42(7):885-891(in Chinese).
- 余焰文, 杨再强, 殷剑敏, 等, 2014. 开花期寒露风对江西晚稻功能叶生理特性及产量的影响[J]. 中国农业气象, 35(5):537-543. Yu Y W, Yang Z Q, Yin J M, et al, 2014. Effect of autumn low temperature during flowering stage on physiological property and yield of late rice in Jiangxi Province[J]. Chin J Agrometeor, 35(5):537-543(in Chinese).
- 中国气象局, 2008. 寒露风等级: QX/T 94—2008[S]. 北京: 气象出版社. China Meteorological Administration, 2008. Grade of autumn low temperature: QX/T 94—2008[S]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- Chen Y L, He Y, Mo J F, et al, 2019. Evaluation of cold dew wind monitoring precision for late rice based on CLDAS data in Guangxi[J]. Agric Biotechnol, 8(1):194-198.
- Zhang L, Yang B Y, Li S, et al, 2018. Potential rice exposure to heat stress along the Yangtze River in China under RCP8.5 scenario [J]. Agric Forest Meteor, 248:185-196.