

李文科,杨霏云,王娜,等.山东省设施农业生产季连阴天时空演变特征及其影响[J].海洋气象学报,2020,40(3):136-142.
LI Wenke, YANG Feiyun, WANG Na, et al. Spatio-temporal characteristics and influence of continuous overcast skies in the production season of facility agriculture in Shandong Province[J].Journal of Marine Meteorology, 2020, 40(3):136-142. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.03.015. (in Chinese)

山东省设施农业生产季连阴天时空演变特征及其影响

李文科¹,杨霏云²,王娜³,陈辰⁴

(1.山东省气象服务中心,山东 济南 250031;2.中国气象局气象干部培训学院,北京 100081;3.山东省农业科学院作物研究所,山东 济南 250100;4.山东省气候中心,山东 济南 250031)

摘要: 利用山东省59个国家级气象观测站1961—2018年逐日日照时数及32个设施农业小气候观测站2008—2018年逐日气温观测资料,采用线性回归法、Mann-Kendall突变检验法及反距离权重插值法等分析了设施农业生产季连阴天时空分布和变化规律及其对设施内气温条件的影响。结果表明,时间上,过去58 a山东省连阴天年总发生次数和总连阴天数分别以 $1.7 \text{次} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $6.5 \text{d} \cdot \text{a}^{-1}$ 的趋势增加,且年总发生次数在1999年发生突变;空间上,过去58 a连阴天总发生次数和总连阴天数均呈“东北—西南”向增多分布,聊城和德州地区的增加较其他区域更为明显,单站年发生次数和连阴天数增加超过 $0.06 \text{次} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $0.2 \text{d} \cdot \text{a}^{-1}$,且变化趋势在聊城等15个和13个站点通过显著性水平为0.05的显著性检验;随着连阴天数增加,设施内气温降温幅度会增大;相同连阴天数时,平均气温和最低气温降幅春秋季节大于冬季,分析其原因可能是春秋季节基础温度高于冬季,从而更容易引起温度的剧烈变化所导致。研究结果可为有关部门研究设施农业种植布局和指导设施农业生产及防灾减灾提供理论支持。

关键词: 连阴天;设施农业;时空分布;变化规律;Mann-Kendall突变检验

中图分类号: P49 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2020)03-0136-07

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.03.015

Spatio-temporal characteristics and influence of continuous overcast skies in the production season of facility agriculture in Shandong Province

LI Wenke¹, YANG Feiyun², WANG Na³, CHEN Chen⁴

(1. Shandong Meteorological Service Center, Jinan 250031, China; 2. China Meteorological Administration Training Center, Beijing 100081, China; 3. Crop Research Institute, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China; 4. Shandong Climate Center, Jinan 250031, China)

Abstract Based on the observed daily sunshine hours of 59 national meteorological stations from 1961 to 2018 and daily temperature data of 32 microclimate meteorological stations for facility agriculture from 2008 to 2018 in Shandong Province, this study analyzes the spatial and temporal distribution and trend of continuous overcast skies and their influence on the temperature condition for facility agriculture in the production season using linear regression, Mann-Kendall test, and inverse distance weighted (IDW) interpolation methods. The results are as follows. 1) Temporally, the total times and days of continuous overcast skies increase by $1.7 \text{ times} \cdot \text{a}^{-1}$ and $6.5 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ in the past 58 years, respectively, and the

收稿日期:2020-08-05; 修订日期:2020-08-20

基金项目:山东省气象局科研项目(2019sdqxm08);“十三五”山东重大气象工程项目(鲁发改农经[2017]97号)

作者简介:李文科,男,硕士,工程师,主要从事农业气象服务,liwenke0112@163.com。

通信作者:杨霏云,女,正高级工程师,主要从事农业气象科研与教育培训,yangfy@cma.gov.cn。

mutation of the total times occurs in 1999. 2) Spatially, the total times and days of overcast skies increase from the northeast to the southwest of Shandong Province. The increase is much more obvious in Liaocheng and Dezhou with the total times and days at a single station increasing by more than 0.06 times $\cdot a^{-1}$ and 0.2 d $\cdot a^{-1}$. Moreover, the trend passes the significance test at 0.05 level in the 15 and 13 stations such as Liaocheng. 3) The temperature dropping rate in facility agriculture increases as the days of continuous overcast skies increase. 4) For the same days of continuous overcast skies, the dropping rate of the average and the minimum temperature in spring and autumn is greater than that in winter, and the reason may be that the temperature in spring and autumn is basically higher than that in winter, which is more likely to cause dramatic changes in temperature. The results can provide theoretical support for relevant departments to study the planting layout and to guide production and disaster prevention and mitigation for facility agriculture.

Key words continuous overcast sky; facility agriculture; spatial-temporal distribution; trend; Mann-Kendall test

引言

在我国大力推进现代农业发展背景下,设施农业已成为主要的生产方式^[1],在提高农民收入的同时也极大地丰富了人们的菜篮子^[2]。山东省是我国设施农业生产的主要基地之一,在保障北方蔬菜供应、农民增收等方面起到了重要作用^[3]。

山东设施农业多以非加温型日光温室为主,受外界气象条件影响较大,抵御不利气象条件能力较弱^[4-5]。连阴天是设施农业生产中遇到的主要灾害性天气之一,一般会导致设施内光照和蓄热不足^[6-7],造成作物光合能力下降、生长发育受阻及产量下降和品质降低等^[8-11],在气候变化加剧、极端气候事件频发的背景下,问题显得更加突出。因此,研究连阴天变化规律及其影响对设施农业生产管理具有重要意义。

前人关于连阴天的研究更多侧重于其对设施小气候变化特征^[12]、设施内外温度的关系^[13]、设施番茄^[3]和黄瓜^[14]等作物光合特性及活性酶的影响^[15-16]等方面,而针对连阴天时空分布和变化特征的研究主要集中在河南^[6]和江苏^[17]等地,作为设施农业生产主要区域的山东尚未见报道。因此,本文选取山东设施农业生产季(当年10月至次年4月,下同)作为研究时段,拟通过分析1961—2018年连阴天发生次数和发生天数的时空分布和变化特征及不同程度连阴天对设施内气温条件的影响,以期有关部门研究设施农业种植布局和指导设施农业生产及防灾减灾提供理论依据。

1 资料来源与研究方法

1.1 资料来源

数据来源于山东省气象信息中心。为保证数据的连续性和有效性,本文将不连续年份较多或日值数据缺测较多的站点剔除,最终保留了山东全省123个国家级气象观测站(以下简称“观测站”)中59个观测站(站点分布见图1)1961—2018年逐日日照时数和32个设施农业小气候观测站2008—2018年逐日气温资料(包括逐日平均气温、最高气温和最低气温)作为最终研究资料。文中设施农业小气候观测建站所选日光温室基本架构(棚型)比较一致(东西长度60~100 m,南北跨度10~12 m,脊高2~4 m)。

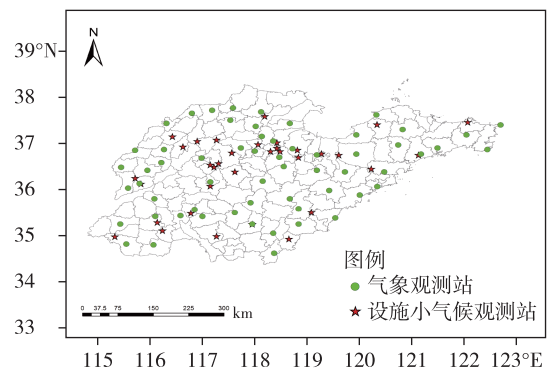


图1 站点分布图

Fig.1 Distribution of used meteorological stations and microclimate meteorological stations for facility agriculture in Shandong

1.2 研究方法

1.2.1 指标确定

在设施农业生产中,当日照时数 ≤ 3 h时,设施内温度将会不能满足作物生长发育需要;当连续出现3 d日照时数 ≤ 3 h时,作物生长速度会减慢,严重时会出现落花、落果等现象,从而受灾^[8]。因此本文选取连续3 d及以上日照时数 ≤ 3 h作为一次连阴天灾害性天气过程的发生指标,过程持续的天数为连阴天数。

1.2.2 数据处理

根据连阴天灾害性天气过程发生指标,统计分析设施农业生产季59个观测站1961—2018年连阴天灾害性天气过程的发生次数和连阴天数(当年10—12月算在次年进行统计分析),分析其时空变化规律,并研究不同季节、不同持续连阴天时设施内平均气温、最低气温和最高气温的变化情况。利用线性回归法分析研究要素时间序列变化趋势^[18-19],利用Mann-Kendall(M-K)突变检验法进行研究要素突变分析^[20-21],且结合累积距平法确定真实突变点^[22-24],利用反距离权重插值方法对研究要素进行空间插值^[25]。研究要素突变分析利用Matlab实现,变化趋势显著性检验利用SPSS实现,空间分析利用ArcGIS实现。

2 结果与分析

2.1 连阴天时间分布与变化规律

统计分析59个观测站年总发生次数(年总发生次数为该年59个站年发生次数的总和)得出,1961—2018年山东省设施农业生产季连阴天平均每年总发生次数为285次,最大值发生在2001年,为444次,最小值发生在1995年,为52次。由图2可以看出,过去58 a,山东省设施农业生产季连阴天年总发生次数呈增加趋势变化,平均每年约增加1.7次。

给定显著性水平为0.05(对应的临界值线等于 ± 1.96)情况下,由M-K突变检验(图3)显示,1961—1995年山东省设施农业生产季连阴天年总发生次数以减少趋势为主,1995—2018年以增加趋势为主,UF、UB曲线在临界区间内有1998、1999、2000、2003、2004、2005年多个交点,且相交后的UF曲线在2015年超过了临界值线,故认为1961—2018年山东省设施农业生产季连阴天年总发生次数突变特征通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验。由于UF、UB两条曲线有多个交点,因此结合累积距平法综

合判断其真实突变点,由图4可以看出,累积距平在1999年前波动增加,至1999年达到峰值,然后总体呈减小趋势,故认为1961—2018年山东省设施农业生产季连阴天年总发生次数在1999年出现了递增突变。

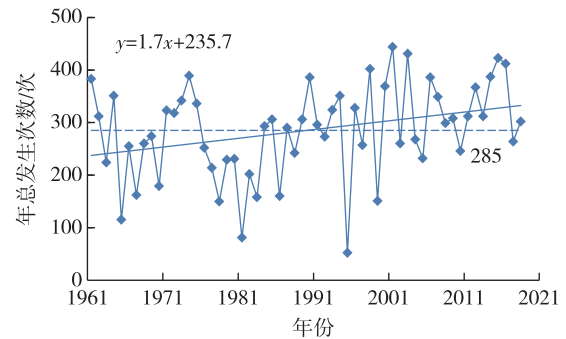


图2 1961—2018年山东省设施农业生产季连阴天年总发生次数变化趋势

Fig.2 Change trend of annual total times of continuous overcast skies in the production season of facility agriculture in Shandong Province from 1961 to 2018

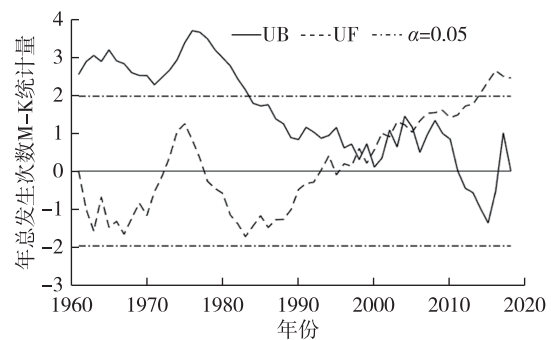


图3 1961—2018年山东省设施农业生产季连阴天年总发生次数M-K突变检验

Fig.3 Mann-Kendall mutation test of annual total times of continuous overcast skies in the production season of facility agriculture in Shandong Province from 1961 to 2018

统计分析59个观测站年总连阴天数(年总连阴天数为该年59个站年连阴天数的总和)得出,1961—2018年山东省设施农业生产季连阴天平均每年总连阴天数为1 191 d,最大值发生在2007年,为2 168 d,最小值发生在1995年,为171 d。由图5可以看出,过去58 a,山东省设施农业生产季连阴天年总连阴天数呈增加趋势变化,平均每年约增加6.5 d。

给定显著性水平为0.05(对应的临界值线等于 ± 1.96)情况下,由M-K突变检验(图6)显示,1961—2018年山东省设施农业生产季连阴天年总

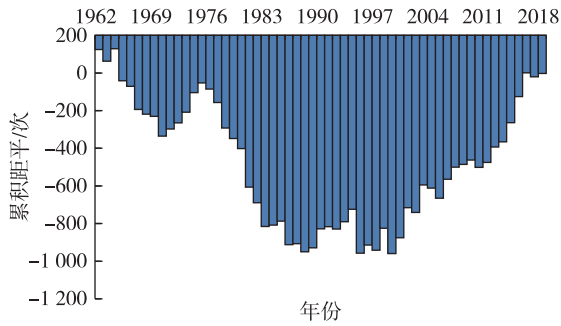


图4 1961—2018年山东省设施农业生产季连阴天年总发生次数累积距平

Fig.4 Cumulative anomaly of annual total times of continuous overcast skies in the production season of facility agriculture in Shandong Province from 1961 to 2018

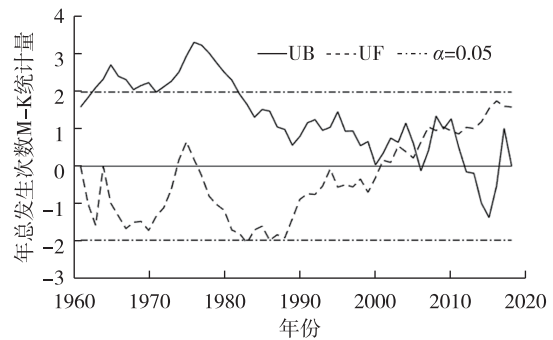


图6 1961—2018年山东省设施农业生产季连阴天年总连阴天数 M-K 突变检验

Fig.6 Mann-Kendall mutation test of annual total days of continuous overcast skies in the production season of facility agriculture in Shandong Province from 1961 to 2018

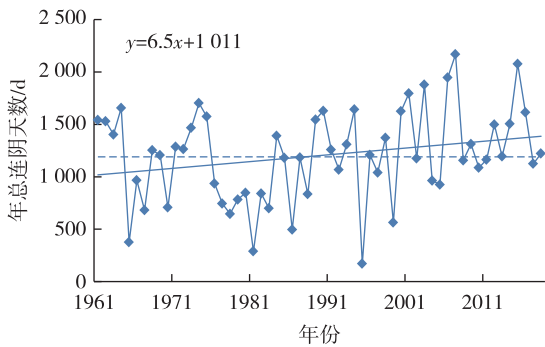


图5 1961—2018年山东省设施农业生产季连阴天年总连阴天数变化趋势

Fig.5 Change trend of annual total days of continuous overcast skies in the production season of facility agriculture in Shandong Province from 1961 to 2018

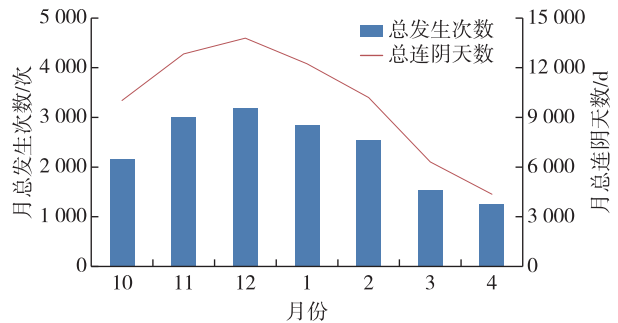


图7 1961—2018年山东省设施农业生产季内连阴天月总发生次数和总连阴天数

Fig.7 Monthly total times and days of continuous overcast skies in the production season of facility agriculture in Shandong Province from 1961 to 2018

连阴天数的 UF、UB 曲线有多个交点,但相交后的 UF、UB 曲线均未超过临界值线,故认为 1961—2018 年山东省设施农业生产季连阴天年总连阴天数未出现明显突变。

统计分析 59 个观测站月总发生次数(月总发生次数为该月 59 个站过去 58 a 发生次数的总和)和总连阴天数(月总连阴天数为该月 59 个站过去 58 a 连阴天数的总和)(图 7)得出,1961—2018 年山东省设施农业生产季内连阴天月总发生次数和总连阴天数均呈先增加后减少趋势变化,12 月连阴天总发生次数和总连阴天数均最多为 3 182 次和 13 784 d,4 月连阴天总发生次数和总连阴天数均最少为 1 248 次和 4 358 d,总发生次数和总连阴天数从多到少均依次为 12 月、11 月、1 月、2 月、10 月、3 月和 4 月。

2.2 连阴天空间分布与变化规律

空间上,由过去 58 a 单站总发生次数统计结果(图 8)来看,1961—2018 年山东省设施农业生产季连阴天总发生次数由“东北”向“西南”逐渐增加,最大值位于菏泽大部地区及聊城和济宁部分地区,总发生次数超过 400 次,最小值位于烟台和威海局部地区,总发生次数不足 150 次。

由过去 58 a 单站年发生次数变化趋势统计结果(图 9)来看,1961—2018 年山东省设施农业生产季连阴天年发生次数全省几乎均呈增加趋势变化,增加最多地区位于聊城部分地区及德州、济南和济宁局部地区,年发生次数增加超过 $0.06 \text{ 次} \cdot \text{a}^{-1}$,其中聊城部分地区超过 $0.09 \text{ 次} \cdot \text{a}^{-1}$ 。变化趋势显著性检验结果表明,59 个观测站中有 15 个站点通过 0.05 显著性检验,分别是聊城、冠县、阳谷、茌平、济南、高唐、滨州、郯城、莒县、宁津、莘县、济宁、博兴、

淄博和曹县等站点,其中,聊城、冠县、阳谷、茌平、济南、高唐、滨州等7个站点通过0.01极显著检验。

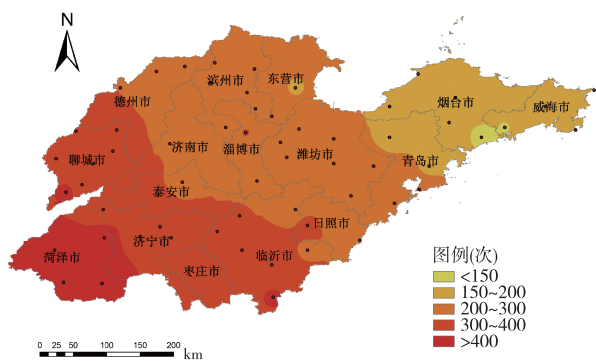


图8 1961—2018年山东省设施农业生产季连阴天总发生次数空间分布

Fig.8 Spatial distribution of total times of continuous overcast skies in the production season of facility agriculture in Shandong Province from 1961 to 2018

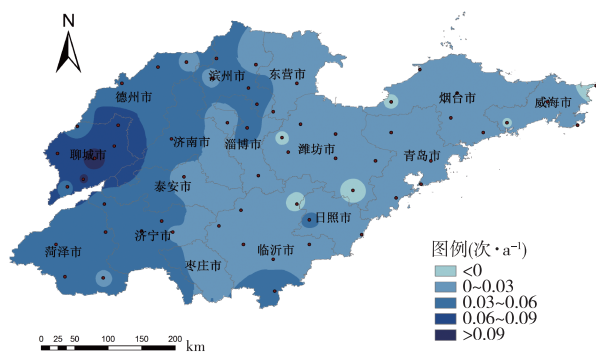


图9 1961—2018年山东省设施农业生产季连阴天年总发生次数空间变化趋势

Fig.9 Spatial distribution of trend of annual total times of continuous overcast skies in the production season of facility agriculture in Shandong Province from 1961 to 2018

空间上,由过去58 a总连阴天数统计结果(图10)来看,1961—2018年山东省设施农业生产季连阴天总连阴天数由“东北”向“西南”逐渐增加,最大值位于菏泽地区及聊城、济宁、济南和临沂部分地区,总连阴天数超过1700 d,最小值位于烟台和威海地区及青岛部分和东营局部地区,总连阴天数不足800 d。

由过去58 a单站年连阴天数变化趋势统计结果(图11)来看,1961—2018年山东省设施农业生产季连阴天年连阴天数全省几乎均呈增加趋势变化,增加最多地区位于聊城和德州大部地区及济南、菏泽、临沂、滨州、淄博和济宁局部地区,年连阴天数增加超过0.2 d·a⁻¹。变化趋势显著性检验结果表明,59个观测站中有13个站点通过0.05显著

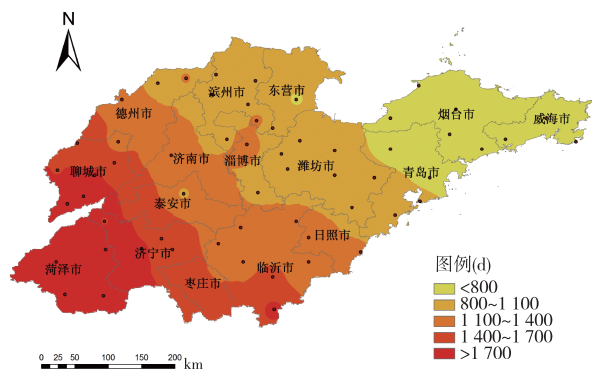


图10 1961—2018年山东省设施农业生产季连阴天总连阴天数空间分布

Fig.10 Spatial distribution of total days of continuous overcast skies in the production season of facility agriculture in Shandong Province from 1961 to 2018

性检验,分别是聊城、冠县、茌平、滨州、莒县、莘县、郯城、济南、高唐、宁津、博兴、曹县和淄博等站点,其中,聊城、冠县、茌平、滨州等4个站点通过0.01极显著检验。

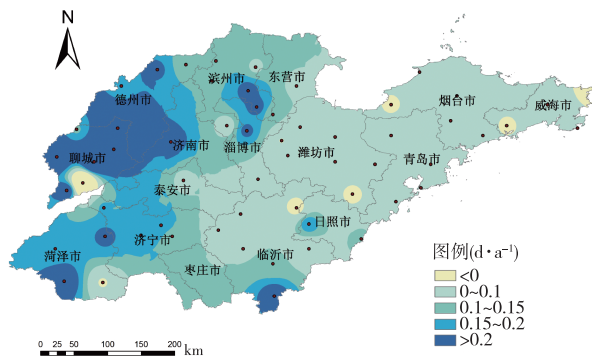


图11 1961—2018年山东省设施农业生产季连阴天年总连阴天数空间变化趋势

Fig.11 Spatial distribution of trend of annual total days of continuous overcast skies in the production season of facility agriculture in Shandong Province from 1961 to 2018

2.3 连阴天对设施内气温变化的影响

由不同程度、不同季节连阴天条件下设施内平均气温、最高及最低气温变化情况(表1)统计结果看,连续阴天3 d时,秋、冬、春季设施内平均气温降温幅度均值分别为2.8、3.8和4.6℃,变化区间分别为2.5~3.1℃、3.0~4.7℃和4.4~4.8℃;最低气温降温幅度均值分别为2.3、2.2和3.1℃,变化区间分别为2.2~2.4℃、1.5~2.6℃和2.9~3.3℃;最高气温降温幅度均值分别为8.1、11.9和10.0℃,变化区间分别为7.7~8.5℃、11.4~12.6

℃和9.6~10.4℃。连续阴天4~7 d时,秋、冬、春季设施内平均气温降温幅度均值分别为5.5、5.6和6.0℃,变化区间分别为3.6~7.1℃、2.8~6.5℃和5.0~7.1℃;最低气温降温幅度均值分别为3.7、2.9和4.1℃,变化区间分别为2.0~5.2℃、1.7~4.6℃和3.2~5.0℃;最高气温降温幅度均值分别为13.4、13.9和10.9℃,变化区间分别为11.8~15.6℃、10.7~19.3℃和5.8~15.9℃。连续阴天8 d及以上时,秋、冬季设施内平均气温降温幅度均值分别为8.4和7.2℃,变化区间分别为4.6~17.8℃和4.7~10.1℃;最低气温降温幅度均值分别为7.0和5.2℃,变化区间分别为3.3~10.8℃和

4.8~5.6℃;最高气温降温幅度均值分别为17.4和13.7℃,变化区间分别为10.0~34.7℃和9.9~16.2℃;春季则未出现8 d及以上连阴天过程。

研究连阴天对设施内气温的影响规律发现,不论秋季、冬季还是春季,随着连阴天数增加,设施内平均气温、最低气温和最高气温的平均降温幅度均会增大;而相同连阴天数、不同季节间,连阴天数3 d和4~7 d时,春季的平均气温和最低气温降幅均值较大;连阴天数8 d及以上时,秋季的平均气温、最低气温和最高气温的降幅均值均大于冬季。分析其原因可能是春秋季节基础温度高于冬季,从而更容易引起温度的剧烈变化所导致。

表1 连阴天数对设施内气温条件的影响

Table 1 Influence of days of continuous overcast skies on temperature condition in facility agriculture

季节	连阴天数 3 d			连阴天数 4~7 d			连阴天数 ≥8 d		
	平均气温 降幅/℃ (均值/℃)	最低气温 降幅/℃ (均值/℃)	最高气温 降幅/℃ (均值/℃)	平均气温 降幅/℃ (均值/℃)	最低气温 降幅/℃ (均值/℃)	最高气温 降幅/℃ (均值/℃)	平均气温 降幅/℃ (均值/℃)	最低气温 降幅/℃ (均值/℃)	最高气温 降幅/℃ (均值/℃)
秋季 (10—11月)	2.5~3.1 (2.8)	2.2~2.4 (2.3)	7.7~8.5 (8.1)	3.6~7.1 (5.5)	2.0~5.2 (3.7)	11.8~15.6 (13.4)	4.6~17.8 (8.4)	3.3~10.8 (7.0)	10.0~34.7 (17.4)
冬季 (12月—次年2月)	3.0~4.7 (3.8)	1.5~2.6 (2.2)	11.4~12.6 (11.9)	2.8~6.5 (5.6)	1.7~4.6 (2.9)	10.7~19.3 (13.9)	4.7~10.1 (7.2)	4.8~5.6 (5.2)	9.9~16.2 (13.7)
春季(3—4月)	4.4~4.8 (4.6)	2.9~3.3 (3.1)	9.6~10.4 (10.0)	5.0~7.1 (6.0)	3.2~5.0 (4.1)	5.8~15.9 (10.9)	/	/	/

注:“/”表示未发生。

3 结论与讨论

1) 时间上看,过去58 a山东省设施农业生产季连阴天平均年总发生次数为285次,最大值为2001年444次,最小值为1995年52次;连阴天平均年总连阴天数为1191 d,最大值为2007年2168 d,最小值为1995年171 d;过去58 a,连阴天年总发生次数和总连阴天数均呈增加趋势,年总发生次数平均每年约增加1.7次,年总连阴天数平均每年约增加6.5 d;M-K检验与累积距平综合判断显示,年总发生次数在1999年出现了递增突变,而年总连阴天数未出现突变。

2) 空间上讲,1961—2018年山东省设施农业生产季连阴天单站总发生次数和总连阴天数均呈“东北—西南”增加分布,总发生次数最大值位于菏泽大部地区及聊城和济宁部分地区,超过400次,总连阴天数最大值位于菏泽地区及聊城、济宁、济南和临沂部分地区,超过1700 d;且单站年发生次数和

连阴天数几乎均呈增加趋势变化,年发生次数增加最多地区位于聊城大部地区及德州、济南和济宁局部地区,增加超过0.06次·a⁻¹,其中聊城部分地区超过0.09次·a⁻¹;年连阴天数增加最多地区位于聊城和德州大部地区及济南、菏泽、临沂、滨州、淄博和济宁部分地区,增加超过0.2 d·a⁻¹;显著性检验结果表明,聊城、冠县、阳谷、茌平、济南、高唐、滨州、郯城、莒县、宁津、莘县、济宁、博兴、淄博和曹县等15个站点年总发生次数变化趋势通过0.05显著性检验,其中,聊城、冠县、阳谷、茌平、济南、高唐、滨州等7个站点通过0.01极显著检验;聊城、冠县、茌平、滨州、莒县、莘县、郯城、济南、高唐、宁津、博兴、曹县和淄博等13个站点年总连阴天数变化趋势通过0.05显著性检验,其中,聊城、冠县、茌平、滨州等4个站点通过0.01极显著检验。

3) 不论秋季、冬季还是春季,随着连阴天数增加,设施内平均气温、最低气温和最高气温的平均降温幅度均会增大;而季节间,连阴天数3 d和4~7

d时,春季平均气温和最低气温降幅均值最大;连阴天数8d及以上时,秋季平均气温、最低气温和最高气温降幅均值均大于冬季;分析其原因可能是春秋基础温度高于冬季,从而更容易引起温度的剧烈变化所导致。

本文只针对山东省连阴天灾害性天气过程进行了一些研究,对其可能导致的次生灾害却未涉及,比如,低温灾害等,未来可从次生灾害变化规律及其影响等方面入手进行更加深入的研究;且连阴天数对设施内气温的影响与不同时段及外界基础温度有关系,日后可分不同时段和不同外界基础温度进行更加精细的研究。

参考文献:

- [1] 李楠,陈辰,张继波.基于信息扩散理论的山东省日光温室番茄低温冷害风险评估[J].山东农业科学,2016,48(12):124-128.
- [2] 魏瑞江,乐章燕,王鑫,等.不同材质墙体日光室内气温演变[J].干旱气象,2019,37(3):483-489.
- [3] 张继波,陈辰,李楠,等.极端寡照天气对设施番茄光合特性及抗氧化酶活性的影响[J].山东农业科学,2017,49(3):64-68.
- [4] 李楠,薛晓萍,张继波,等.日光温室黄瓜低温冷害预警模型构建技术研究[J].山东农业科学,2015,47(9):106-111.
- [5] 陈思宁,黎贞发,刘淑梅.设施农业气象灾害研究综述及研究方法展望[J].中国农学通报,2014,30(20):302-307.
- [6] 杜子璇,刘忠阳,刘静,等.河南设施农业黄瓜寡照灾害时空分布及风险评价[J].干旱气象,2015,33(4):694-701.
- [7] 赵淑兰,李春,张绍祥,等.天津市北辰区设施农业温光气候资源变化分析[J].气象与环境科学,2013,36(1):32-35.
- [8] 魏瑞江.日光温室低温寡照灾害指标[J].气象科技,2003,31(1):50-53.
- [9] 关福来,杜克明,魏瑞江,等.日光温室低温寡照灾害监测预警系统设计[J].中国农业气象,2009,30(4):601-604.
- [10] 魏瑞江,康西言,姚树然,等.低温寡照天气形势及温室蔬菜致灾环境[J].气象科技,2009,37(1):64-66.
- [11] BALTZER J L, THOMAS S C. Physiological and morphological correlates of whole-plant light compensation point in temperate deciduous tree seedlings[J]. *Oecologia*,2007,153(2):209-223.
- [12] 武艳娟.日光温室冬季连阴天小气候特征分析及调控对策[J].内蒙古农业科技,2015,43(3):77-78.
- [13] 魏瑞江,王西平,常桂荣,等.连阴天塑料日光温室内外温度的关系及调控[J].中国农业气象,2001,22(3):24-27.
- [14] 熊宇,刁家敏,薛晓萍,等.持续寡照对冬季日光温室黄瓜生长及抗氧化酶活性的影响[J].中国农业气象,2017,38(9):537-547.
- [15] ALI M B, HAHN E J, PAEK K Y. Effects of light intensities on antioxidant enzymes and malondialdehyde content during short-term acclimatization on micropropagated *Phalaenopsis* plantlet [J]. *Environ Exp Bot*,2005,54(2):109-120.
- [16] ROSSA M M, OLIVEIRA M C D, OKAMOTO O K, et al. Effect of visible light on superoxide dismutase (SOD) activity in the red alga *Gracilariopsis tenuifrons* (Gracilariiales, Rhodophyta) [J]. *J Appl Phycol*,2002,14(3):151-157.
- [17] 杨再强,费玉娟,朱静,等.江苏省设施农业寡照灾害时空分布规律的研究[J].东北农业大学学报,2012,43(2):64-69.
- [18] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].2版.北京:气象出版社,2007.
- [19] 杨舒畅,申双和,陶苏林.长江中下游地区一季稻高温热害时空变化及风险评估[J].自然灾害学报,2016,25(2):78-85.
- [20] 成林,张志红,常军.近47年来河南省冬小麦干热风灾害的变化分析[J].中国农业气象,2011,32(3):456-460.
- [21] 姚凤梅,杨太明,曹倩,等.合肥地区近55年气候极值与农业气候指标动态变化趋势[J].自然灾害学报,2013,22(5):227-237.
- [22] 李森,郭安红,韩丽娟,等.基于综合强度指数的黄淮海地区干热风灾害时空特征[J].自然灾害学报,2019,28(1):76-83.
- [23] 穆兴民,李靖,王飞,等.黄河天然径流量年际变化过程分析[J].干旱区资源与环境,2003,17(2):1-5.
- [24] 宋小燕,穆兴民,高鹏,等.松花江哈尔滨站近100年来径流量变化趋势[J].自然资源学报,2009,24(10):1803-1809.
- [25] 张康聪.地理信息系统导论[M].陈健飞,胡嘉懿,陈颖彪,译.北京:科学出版社,2019.