

基于气象因素的日光温室蓄放热研究

张传坤^{1,2}, 李风晶³, 李广², 王晓¹, 刘波¹, 杨宁¹

(1. 山东省农业科学院蔬菜研究所, 山东济南 250100; 2. 新疆维吾尔自治区喀什地区农业农村局, 新疆喀什 844000; 3. 新疆维吾尔自治区喀什地区气象局, 新疆喀什 844000)

摘要 为探索寿光各代日光温室引进喀什地区后蓄热保温性能降低的原因, 以气象学土壤热量收支平衡理论为依据, 对 2000—2020 年越冬季潍坊市和喀什市的气象因素进行对比。结果表明, 喀什市平均日照时数、地面接收到的太阳辐射强度分别为潍坊市的 92.94%、91.55%~94.77%。喀什市白天最高气温比潍坊市最高气温低 3.79℃; 喀什市夜间最低气温比潍坊市最低气温低 3.50℃, 日光温室夜间放热量多。喀什市日光温室蓄放热更容易失去平衡, 温室温度降低; 外地引进寿光各代日光温室后, 要对采光面倾斜程度、温室跨度、温室保温被厚度等进行调整, 以适应引进地区的气象条件。

关键词 气象因素; 日光温室; 蓄放热; 平衡

中图分类号 S625.1 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2023)07-0196-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2023.07.045



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Study on the Heat Absorption and Release in Solar Greenhouse Based on the Meteorological Factors

ZHANG Chuan-kun^{1,2}, LI Feng-jing³, LI Guang² et al (1. Institute of Vegetables, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan, Shandong 250100; 2. Bureau of Agriculture and Rural Affairs in Kashgar of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Kashgar, Xinjiang 844000; 3. Meteorological Bureau in Kashgar of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Kashgar, Xinjiang 844000)

Abstract In order to explore the reasons for the reduction of heat storage and insulation performance of each generation of Shouguang solar greenhouses after being introduced in Kashgar region, based on the theory of soil heat absorption and release balance in meteorology, the meteorological factors of Weifang City and Kashgar City in the wintering season during 2000–2020 were compared. The results showed the average sunshine hours and the solar radiation intensity received in ground in Kashgar City were 92.94% and 91.55%–94.77% of those indices in Weifang City respectively. The maximum air temperature in Kashgar City was 3.79℃ lower than that in Weifang City. The minimum temperature at night in Kashgar City was 3.50℃ lower than that in Weifang City, heat volume released from solar greenhouse at night was more in Kashgar City than that in Weifang City. The solar greenhouse in Kashgar City was easier to lose balance between heat absorption and heat release, and the greenhouse temperature decreased. After each generation of Shouguang solar greenhouses was introduced into other places, the slope of lighting surface, the thickness of greenhouse insulation quilt should be adjusted to adapt the meteorological conditions of the introduced region.

Key words Meteorologic factors; Solar greenhouse; Heat absorption and release; Balance

日光温室是在生产实践中不断发展完善起来的一种栽培模式, 依靠其特有的棚型结构和保温性能, 实现了喜温果菜的越冬生产, 在我国北方地区得到大面积推广^[1-3], 为北方地区越冬季蔬菜供应发挥了重要作用。在众多棚型结构中, 以山东寿光各代日光温室^[4-6]为代表的棚型结构被许多地区引进, 在北方地区得到大面积应用。自 1990 年以来, 喀什地区引进寿光各代日光温室, 但引进的寿光各代日光温室在喀什地区表现一般, 越冬季蓄热保温性能低下, 夜间气温普遍较低, 喜温果菜很难进行越冬季生产。为此, 探索寿光各代日光温室引进喀什地区后温度水平降低的原因, 不仅能够有针对性地加以改进, 而且会对喀什地区的设施蔬菜产业发展产生深远影响。研究表明, 后墙和土壤作为日光温室的热源^[7], 其温度高低直接影响温室夜间空气温度的高低^[8]。热源蓄热是被动蓄热^[9-12], 其蓄热量与太阳辐射密切相关。考虑到一天之内太阳辐射强度的规律性变化, 日照时间越长, 热源蓄热量越多; 热源放热同样也是被动放热^[13], 其放热量受到外界低温的影响, 外界温度越低, 热源放热量越多。由此可见, 日光温室热源的蓄热、放热受到所在地区白天日照和夜间低温的影响。热源蓄热量与放热量之间的关系也就

是温室所在地区白天日照与夜间低温之间的关系, 已有研究也给出了明确答案: 根据非稳态导热^[14-16] 温度与热量转化的基础模型^[17], 热源白天蓄热量大于夜间放热量时, 热源温度水平提高, 反之, 热源温度水平降低。因此, 日光温室温度水平取决于白天蓄热量与夜间放热量之间的关系, 与引进地区白天日照和夜间低温密切相关。笔者对越冬季潍坊市和喀什市日照时数、地面接收到的太阳辐射强度、最高气温、最低气温进行对比研究, 分析两地日光温室蓄热量与放热量之间的差异, 探索寿光各代日光温室引进喀什地区后蓄热保温性能降低的原因, 以期对不同地区日光温室引进后的结构调整提供理论依据。

1 材料与方法

2000—2020 年喀什市与潍坊市越冬季的日照时数、最高气温、最低气温数据来源于国家气象科学数据中心。

越冬季指的是每年 12 月到次年 1 月; 最高气温指的是一天 24 h 内的最高气温; 最低气温指的是一天 24 h 内的最低气温。

1.1 喀什市与潍坊市日光温室白天蓄热的对比 对日照时数、地面接收到的太阳辐射强度、最高气温 3 个指标进行对比。①计算 2000—2020 年每个越冬季喀什市和潍坊市日照时数的均值、整个越冬季的均值, 并进行对比。②根据喀什市、潍坊市的纬度, 计算出冬至日两地太阳高度角, 以此高度角进行计算, 对冬至日两地地面接收到的太阳辐射强度进行

基金项目 山东省援疆资金资助项目。

作者简介 张传坤(1972—), 男, 山东临朐人, 研究员, 博士, 从事设施工程与环境调控研究。

收稿日期 2022-05-09; **修回日期** 2022-06-10

对比,然后对越冬季两地地面接收到的太阳辐射强度进行对比。③计算 2000—2020 年每个越冬季喀什市和潍坊市最高气温的均值、整个越冬季的均值,然后对比日光温室白天热量的变化。

1.2 喀什市与潍坊市日光温室夜间放热的对比 计算 2000—2020 年每个越冬季喀什市、潍坊市最低气温的均值、整个越冬季的均值,并进行对比。

2 结果与分析

2.1 越冬季喀什市与潍坊市气象因素的对比分析

2.1.1 喀什市与潍坊市日照时数对比。2000—2020 年越冬季喀什市和潍坊市平均日照时数如图 1 所示。从图 1 可以看出,不同越冬季喀什市的平均日照时数不同,潍坊市的平均日照时数也不同。同一越冬季喀什市的平均日照时数与潍坊市的平均日照时数也不同,有些越冬季喀什市的平均日照时数比潍坊市的平均日照时数要长,比如 2000 年越冬季、2006 年越冬季等;有些越冬季喀什市的平均日照时数比潍坊市的平均日照时数要短,比如 2005 年越冬季、2008 年越冬季等。造成不同年份喀什市、潍坊市日照时数不同,同一年份喀什市与潍坊市日照时数也存在差别的原因可能是由于不同年份、不同地区的云层、尘埃随太阳辐射的反射不同,导致大气透明程度不同造成的^[18]。

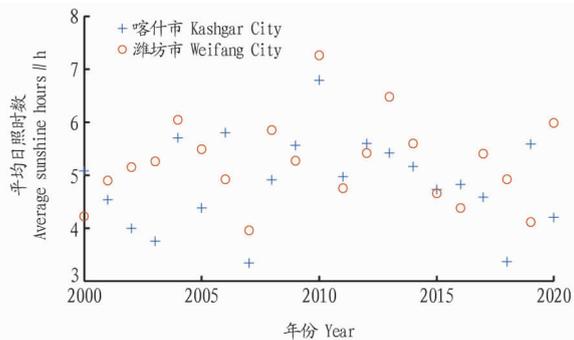


图 1 2000—2020 年越冬季喀什市与潍坊市平均日照时数

Fig. 1 Average sunshine hours in the wintering season from 2000 to 2020 in Kashgar City and Weifang City

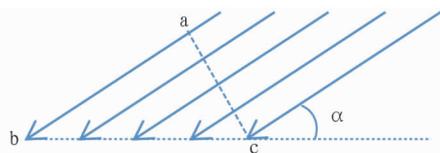
2000—2020 年越冬季喀什市平均日照时数的均值为 4.87 h,2000—2020 年越冬季潍坊市平均日照时数的均值为 5.24 h,喀什市平均日照时数是潍坊市平均日照时数的 92.94%。以上结果表明 2000—2020 年越冬季喀什市的平均日照时数比潍坊市的平均日照时数短,这可能是由于越冬季喀什地区的浮尘天气较多所致。

2.1.2 喀什市和潍坊市地面接收到的太阳辐射强度对比。太阳高度角与地面太阳辐射强度的关系如图 2 所示。从图 2 可以看出,太阳辐射强度(ac)到达地面后,受太阳高度角 α 的影响,地面接收到的太阳辐射强度(bc)发生变化,二者之间的关系可用下式表达:

$$bc \times \sin \alpha = ac \quad (1)$$

受地球围绕太阳公转的影响,同一地区不同日期的太阳高度角会发生变化。由于喀什市纬度比潍坊市纬度高 2.76°,所以越冬季潍坊市太阳高度角始终大于喀什市太阳

高度角 2.76°,越冬季喀什市地面接收到的太阳辐射强度始终小于潍坊市地面接收到的太阳辐射强度。



注:图中带箭头线段代表太阳辐射光线; α 为太阳高度角;ac为太阳辐射截面,代表太阳辐射强度;bc为太阳光线在地面上的长度,代表地面接收到的太阳辐射强度。

Note:The line segment with arrows in the figure represented the solar radiation; α was the solar altitude angle;ac was the solar radiation cross-section, representing the solar radiation intensity;bc was the length of the solar rays on the ground, representing the intensity of solar radiation received by the ground.

图 2 地面接收到的太阳辐射强度与太阳高度角

Fig. 2 Solar radiation intensity to the ground and solar elevation angle

从太阳赤纬的周年变化曲线^[18]可以看出,越冬季太阳直射纬度为 $-23.26^\circ \sim -10.00^\circ$,喀什市太阳高度角的最小值、最大值分别为 27.27° 和 40.53° ,潍坊市太阳高度角的最小值、最大值分别为 30.03° 和 43.29° 。

越冬季喀什市地面接收到的太阳辐射强度与潍坊市地面接收到的太阳辐射强度比值分别用下式计算:

$$\sin 27.27^\circ / \sin 30.03^\circ \times 100\% = 91.55\% \quad (2)$$

$$\sin 40.53^\circ / \sin 43.29^\circ \times 100\% = 94.77\% \quad (3)$$

2.1.3 喀什市和潍坊市最高气温、最低气温对比。2000—2020 年越冬季喀什市和潍坊市最高气温、最低气温如图 3 所示。从图 3 可以看出,2000—2020 年越冬季喀什市、潍坊市最高气温不断变化,除了 2009 年越冬季、2012 年越冬季喀什市与潍坊市最高气温比较接近外,其余越冬季喀什市最高气温均低于潍坊市越冬季最高气温。这可能是由于越冬季潍坊市的平均日照时数比喀什市的平均日照时数长(图 1),且潍坊市地面接收到的太阳辐射强度大于喀什市地面接收到的太阳辐射强度。

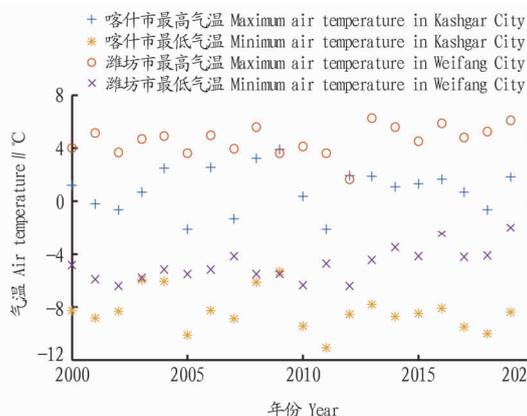


图 3 2000—2020 年越冬季喀什市和潍坊市最高气温与最低气温
Fig. 3 Maximum air temperature and minimum air temperature in Kashgar City and Weifang City in the wintering season from 2000 to 2020

从图3可以看出,除了2003年越冬季、2009年越冬季喀什市与潍坊市最低气温比较接近外,其余越冬季喀什市越冬季最低气温均低于潍坊市越冬季的最低气温。这可能是由于一方面越冬季喀什市白天地面接收到的太阳辐射较少,气温本来就低于潍坊市气温;另一方面,喀什市海拔在1 298 m左右,而潍坊市的海拔在30 m左右,由于地面大气层气温随着海拔高度的增加而逐渐降低,夜间喀什市气温比潍坊市的气温更低。

2000—2020年越冬季潍坊市最低气温和最高气温的均值分别为-4.81和4.61℃,气温变化区间为-4.81~4.61℃;喀什市最低气温和最高气温的均值分别为-8.31和0.82℃,气温变化区间为-8.31~0.82℃。根据气象学下垫面土壤热量收支平衡可知,这可能是由于潍坊市和喀什市所处的纬度不同、海拔高度不同,导致两地下垫面土壤热量收支存在差别,进而造成下垫面土壤蓄放热失衡程度不同。

2.2 喀什市和潍坊市越冬季气象因素对日光温室蓄放热的影响

2.2.1 喀什市和潍坊市越冬季气象因素对日光温室白天蓄热的影响

日照时间短使得喀什市日光温室蓄热时间短,进而导致温室热源白天蓄热量少;太阳高度角小造成太阳光线透过率低、太阳辐射强度低,进而造成温室热源白天蓄热量少;最高气温低,可能造成白天采光面塑料薄膜两侧空气温差较大,从温室内部向室外释放出的热量较多,从而导致温室热源蓄积的热量较少。由此可见,对于相同结构的日光温室,喀什市白天蓄积的热量少于潍坊市白天蓄积的热量。

2.2.2 喀什市和潍坊市越冬季气象因素对日光温室夜间放热的影响

从图3可以看出,喀什市夜间最低气温比潍坊市夜间最低气温低3.50℃。对于相同结构的日光温室,喀什市夜间释放的热量多于潍坊市夜间释放的热量。

2.2.3 喀什市和潍坊市越冬季气象因素对日光温室蓄放热平衡的影响

对于相同结构的日光温室来说,喀什市白天蓄积的热量少,夜间释放的热量多,温室蓄放热更容易失去平衡,气温降低得更多,温室温度更低。

2.3 实现喀什地区日光温室蓄放热平衡采取的措施

寿光各代日光温室引入喀什地区后,日光温室结构应做以下调整,才能适应喀什地区的气象条件,改善温室的蓄放热平衡,提高温室温度。

- ①考虑到两地气温差异,增大喀什市日光温室采光面倾斜程度,提高屋面角 2.76° 以上,以抵消纬度差异对太阳光线透过造成的影响。
- ②喀什市温室跨度调整为7~9 m。多年园艺栽培实践表明,温室跨度受当地夜间最低气温影响。喀什地区夜间最低气温低于 -18°C ,对应温室跨度为7~9 m^[19]。此外,温室跨度越大,夜间土壤释放出来的热量在温室夜间温度形成中的占比就越大,温室温度就会越低^[18]。
- ③增加日光温室保温被的厚度,减少夜间放热量。以温室内部空气温度为 10°C 进行计算示例:此时喀什市日光温室保温被两侧温差为 18.31°C ,潍坊市日光温室保温被两侧温差为 14.81°C ;在保温被性能相同的情况下,具有相同的传热系数^[20]和厚度,因而温室夜间释放的热量与温差

成正比:

$$18.31^\circ\text{C}/14.81^\circ\text{C}\times 100\% = 123.63\% \quad (4)$$

由式(4)可知,为减少喀什市日光温室夜间放热量,保温被厚度应该是潍坊市同等品质保温被厚度的123.63%。考虑到日照时数、最高气温造成的白天蓄热量差异,也需要通过减少夜间放热量进行平衡,因此喀什地区日光温室保温被的厚度还要增加。

3 讨论

日光温室是通过生产实践不断发展完善起来的一种栽培模式。多年来,由于理论研究滞后,学术界没有能为日光温室建设提供指导的实用理论。受到利益的驱动,部分温室建设企业盲目引进,造成建成后的日光温室保温性能不高,越冬季无法进行喜温果菜生产,冬春季无法正常供应喜温果菜,因此喀什地区日光温室的结构应该不断调整和修正,以适应喀什地区当地的气象条件。

极端天气必然会造成温室内部作物受到冷害、冻害,这是一个伪命题。从日光温室夜间温度的形成来看,温室内部低温是由于温室夜间放热量大于白天蓄热量,而造成温室内部温度逐渐降低造成的。当极端天气来临时,如果温室内部温度水平较高,温室内部作物是不会受到冷害、冻害的;当温室内部温度水平很低时,极端天气的来临必然会加速温室温度降低的速率,进而造成温室作物受到冷害、冻害。从极端天气造成温室内部作物受到冷害、冻害也可以反向推出,当前我国北方地区日光温室夜间放热量普遍大于白天蓄热量,造成温室蓄放热失衡,夜间温室内部温度水平普遍较低,因此我国北方地区日光温室应该加强减少温室夜间放热量的研究,提高温室夜间温度水平。

通过生产和实践发现,日光温室建设企业对国家或行业标准的认知度较低、执行意愿不高^[4],是由于越冬季北方不同地区的气象因素存在差异,因此温室结构也应进行调整,以适应不同地区白天日照和夜间低温的差别。对于我国广大北方地区来说,不能制定一成不变的温室标准。

不同年份同一地区的气象条件也会有差别,越冬季日光温室的温度也不同,因此不同地区日光温室结构标准的制定^[4]要综合多年来的气象条件;日光温室日常温度管理也要按照“增加白天蓄热量、减少夜间放热量”的原则来控制保温被,调节日光温室的蓄放热失衡程度,才能确保日光温室的温度。

4 结论

通过对喀什市和潍坊市2000—2020年越冬季日照时数、最低气温、最高气温等气象因素进行对比研究,探讨山东省寿光市各代日光温室引进喀什地区后蓄热保温性能降低的原因。

(1)越冬季喀什市平均日照时数是潍坊市平均日照时数的92.94%,喀什市地面接收到的太阳辐射强度是潍坊市地面接收到的太阳辐射强度的91.55%~94.77%,喀什市白天最高气温比潍坊市最高气温低 3.79°C ,喀什市日光温室白天蓄热量少于潍坊市日光温室白天的蓄热量。

(2) 越冬季喀什市夜间最低气温比潍坊市夜间最低气温低 3.50 ℃, 喀什市温室夜间放热量多于潍坊市温室夜间的放热量。

(3) 寿光各代日光温室引进喀什地区后, 要对采光面倾斜程度、温室跨度、保温被厚度进行调整, 使得温室结构适应喀什地区的气象条件。

参考文献

- [1] 魏晓明, 周长吉, 曹楠, 等. 中国日光温室结构及性能的演变[J]. 江苏农业学报, 2012, 28(4): 855-860.
- [2] 陈端生. 中国节能型日光温室的理论和实践[J]. 农业工程学报, 2001, 17(1): 22-26.
- [3] 设施园艺发展对策研究课题组. 我国设施园艺产业发展对策研究[J]. 长江蔬菜, 2010(3): 1-5.
- [4] 徐丽丽, 周长吉, 赵跃龙, 等. 对寿光日光温室建设标准化发展的调查与思考[J]. 天津农业科学, 2014, 20(12): 113-117.
- [5] 赵丽莉, 胡瑞民, 张亚红. 山东寿光日光温室在宁夏五个地区冬季的温度变化[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(32): 15973-15976.
- [6] 李光聚, 刘天英, 李秀欣, 等. 寿光日光温室的发展历程及创新点[J]. 中国蔬菜, 2019(10): 14-18.
- [7] 陈端生, 郑海山, 刘步洲. 日光温室气象环境综合研究 I. 墙体、覆盖物热效应研究初报[J]. 农业工程学报, 1990, 6(2): 77-81.
- [8] ZHANG C K, WEI M. Effects of temperature and heat release volume of north wall and soil on night air temperature in solar greenhouse with thick earth wall[J]. International agricultural engineering Journal, 2020, 29(1): 1

- 10.
- [9] 吴照学, 王强, 张勇, 等. 青海地区日光温室节能型主动蓄热式后墙的性能测试[J]. 中国农业气象, 2020, 41(2): 86-93.
- [10] 张勇, 高文波, 邹志荣. 日光温室主动蓄热后墙传热 CFD 模拟及性能试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 203-211.
- [11] 郑钦中, 李楠洋, 刘子英, 等. 水模块主动蓄热日光温室应用性能分析[J]. 中国蔬菜, 2021(10): 97-104.
- [12] 鲍恩财, 曹曼飞, 邹志荣, 等. 不同结构主动蓄热墙体日光温室传热特性[J]. 农业工程学报, 2019, 35(3): 189-197.
- [13] 张传坤, 魏珉, 刘福胜, 等. 日光温室夜间后墙不同高度放热量差异的理论分析[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(7): 112-121.
- [14] 张靖周, 常海萍, 谭晓茗. 传热学[M]. 3 版. 北京: 科学出版社, 2019: 60-62.
- [15] 马承伟, 陆海, 李睿, 等. 日光温室墙体传热的一维差分模型与数值模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 231-237.
- [16] 马承伟, 卜云龙, 籍秀红, 等. 日光温室墙体夜间放热量计算与保温蓄热性评价方法的研究[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2008, 26(5): 411-415.
- [17] 张传坤. 下挖式日光温室后墙和土壤的蓄放热特性及其对夜间气温的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020.
- [18] 崔学明. 农业气象学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2017: 8-9, 16, 18-19, 20-22, 40-42.
- [19] 邹志荣, 周长吉. 温室建筑与结构[M]. 北京: 中国农业出版社, 2012: 16.
- [20] 刘晨霞, 马承伟, 张锡玉. 山东寿光代表性保温被保温性能测试分析[J]. 绿色科技, 2019(24): 232-235.

(上接第 188 页)

取 $A_2B_1C_3$ (液料比 1:9, 凝固剂用量 2.0%, 点浆温度 80 ℃)、 $A_2B_1C_2$ (液料比 1:9, 凝固剂用量 2.0%, 点浆温度

85 ℃)、 $A_2B_2C_3$ (液料比 1:9, 凝固剂用量 2.5%, 点浆温度 80 ℃) 进行验证试验, 通过豆腐出品率及感官评分进行分析, 结果见表 5。

表 5 验证试验结果

Table 5 Verification test results

组合 Combination	凝固效果 Coagulation effect 分	质地 Quality 分	色泽 Colour and lustre 分	口味 Taste 分	总分 Total points 分	出品率 Yield/%
$A_2B_1C_3$	13	17	24	25	79	293
$A_2B_1C_2$	14	17	25	25	81	284
$A_2B_2C_3$	18	18	26	28	90	234

从验证试验结果来看, $A_2B_1C_3$ 豆腐出品率最高, 豆腐含水量高, 口感偏嫩, 但弹性稍差, 豆香味偏弱; $A_2B_2C_3$ 感官评价最高, 弹性好, 豆香味浓, 有嚼劲, 但出品率较低。

3 结论

研究结果表明, 制作黑豆卤水豆腐, 若以豆腐出品率为主要考虑因素, 且喜欢口感偏软嫩的豆腐, 最佳工艺是: 黑豆: 水 = 1:9 磨浆, 煮浆 3 min, 凝固剂用量 2.0%, 点浆温度 80 ℃, 静置 5 min; 若以豆腐感官评价为主, 且喜欢香味浓、有嚼劲的豆腐, 则凝固剂用量改为 2.5%, 其他条件不变。豆腐是人们餐桌上的常见菜肴, 黑豆豆腐营养价值高、风味好, 具有很好的发展前景。

参考文献

- [1] 熊飞. 漫话黑豆[J]. 科学种养, 2016(6): 59.

- [2] 司玉君, 曹其聪, 陈雪, 等. 黑豆品种潍黑豆 1 号的选育[J]. 中国种业, 2020(12): 93-94.
- [3] 赵巧玲, 陈晓梅, 赵晋忠, 等. 黑豆种皮花色苷含量及抗氧化活性的测定[J]. 山西农业科学, 2017, 45(8): 1240-1243, 1267.
- [4] 李传欣, 张华, 李景琳. 食用天然色素的应用及发展趋势[J]. 辽宁农业科学, 2001(1): 29-32.
- [5] 杨剑婷, 李孟良, 徐晴, 等. 大豆品种对卤水豆腐和内酯豆腐加工特性的影响[J]. 现代食品科技, 2016, 32(7): 145-150, 213.
- [6] 乔晓明. 豆腐制作技术[J]. 农产品加工, 2013(11): 35.
- [7] 王秋普, 江振桂, 赵良忠, 等. 不同大豆原料对豆清发酵液豆腐和卤水豆腐加工特性的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(6): 13-18, 25.
- [8] 刘香英, 田志刚, 康立宇. 大豆品种和凝固剂种类对豆腐保水性的影响[J]. 吉林农业科学, 2012, 37(6): 56-60.
- [9] 郑凤荣, 于美恒. 黑豆大豆复合豆腐工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(17): 83-85, 122.
- [10] 马春芳, 李顺秀, 徐冉, 等. 不同大豆原料对豆腐加工及品质的影响[J]. 食品工业, 2020, 41(12): 177-180.