

日光温室结构优化现状与新思路探索

田兴运^{1,2}, 何 斌^{1,2*}, 朱雄伟²

(1. 农业部农业设施结构工程重点实验室, 北京 100125; 2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:以近年来日光温室结构优化研究进展为基础, 结合温室结构研究现状, 对其结构优化进一步的研究方向进行了分析, 认为在各种新材料、新设备荷载的取值及其组合原理性; 寻找跨度、脊高和温室栋与栋之间合理间距, 合理确定土后墙厚度; 采光面形状对日光温室光照均匀性的影响; 积极应用拓扑优化、形状优化、截面优化等理论开展基于日光温室的采光条件和室内作物生长模型的日光温室桁架结构优化; 大型日光温室的几何尺寸; 后墙保温与强度要求的相关性几个方面需更深研究, 并对其研究方法进行了初步探索。

关键词:日光温室; 结构优化; 荷载; 墙体厚度

中图分类号: S625.1

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2020)04-0058-05

Current Situation and Further Discussion on the Optimization of Solar Greenhouse Structure

TIAN Xingyun^{1,2}, HE Bin^{1,2*}, ZHU Xiongwei²

(1. Key Laboratory of Structural Engineering of Agricultural Facilities, Ministry of Agriculture, Beijing, 100125; 2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Based on the research progress of solar greenhouse structure optimization (SGSO) in recent years, combined with the current situation of greenhouse structure research, the further research direction of greenhouse structure optimization is analyzed. It is considered that further study is needed in several aspects: The value of load of new materials and new equipment and its combinational principle. Look for the span, ridge height and reasonable space between greenhouses to determine the thickness of earth back wall. The influence of the shape of day lighting surface on the illumination uniformity in solar greenhouse, topology optimization, shape optimization, section optimization and other theories are applied to optimize the truss structure of solar greenhouse based on the lighting conditions and indoor crop growth model. Determine the geometry of a large solar greenhouse and the correlation between thermal insulation and strength requirements for rear walls.

Key words: Solar greenhouse; Structure optimization; Load; The wall thickness

温室建筑结构的优化以满足可靠性标准为准则^[1-3]。同时, 温室结构的优化应充分考虑其经济性要求。温室建筑结构优化的前提条件是采光满足作物的基本要求、保温良好和经济适用。目标是在上述前提下确定适宜的温室前屋面倾角、跨度、屋脊高度、骨架型式、后屋面构造与墙体类型

等建筑结构参数。“十三五”期间, 国家继续把日光温室结构优化与数字化设计列为高技术研究发展计划。本文在近年来日光温室结构优化中取得成就的基础上, 总结出结构优化还应该从荷载、几何尺寸、屋面骨架、墙体结构等四个方面展开进一步的研究。

1 日光温室的荷载

温室设计荷载, 最初主要参考《建筑结构荷载规范》的相关条文进行设计, 其中主要集中在风载及雪载的选取上。随着《农业温室结构荷载规范》^[2]等的陆续出台, 使温室设计有了参考依据。确定了以 30 年一遇的积雪为基本雪压及相关分

收稿日期: 2018-11-21

基金项目: 农业部农业设施结构工程重点实验室开放课题 (201701); 陕西省科技统筹创新工程计划项目 (2016KTCL02-02)

作者简介: 田兴运 (1964-), 男, 副教授, 硕士, 从事钢结构及结构稳定理论研究。

通讯作者: 何 斌, 男, 博士, 副教授, E-mail: ylhebin@163.com

布系数的取值方法,同时也规定了风压计算中体形系数、高度修正系数等基本参数。周长吉^[4]在建筑荷载规范的基础上,参照一般建筑结构中的相关规定和方法,提出了坡度角的基本概念和建议雪荷载分布系数的取值方法及范围,具有一定的现实意义;关于风荷载体型系数方面也结合建筑结构荷载规范的基本方法和日光温室的特点,提出了具有可操作性的计算方法。研究中给出了其它恒载与活载,如植物和设备吊重、前屋面骨架及保温材料的自重、施工和操作荷载等的取值方法及其组合原理,对温室荷载的设计具有重要意义。但随着日光温室材料的变化、操作设备的发展,如新型保温被和卷帘机的使用,上述取值及其组合方式有待进一步研究。

在荷载组合方面,周长吉^[4]提出了4种不利荷载组合,其组合原理对研究日光温室的屋面荷载组合具有指导意义。在此基础上,侯丽薇等^[5]通过数值计算方法,对抛物线型前屋面骨架进行力学性能分析,得出了日光温室设计荷载的最不利组合:雪载+结构恒载+集中活载。由此,日光温室荷载主要集中在屋面上,是日光温室受力最复杂、最多变的部位。可见,前屋面结构体系的优化是日光温室结构优化研究的重要部分。

2 日光温室的几何尺寸

日光温室的几何尺寸主要指相关建筑参数,包括:前屋面倾角、骨架曲线形状、后坡仰角及其投影宽度、屋脊高度、跨度等。因此,研究各建筑参数及其相关性是温室设计建设中最关键的问题。

2.1 温室主要建筑结构参数

温室主要建筑结构参数前屋面倾角、屋脊高度、跨度和后坡仰角四者相互影响,屋脊高度和跨度的取值决定采光角度的大小。跨度一定的情况下,受保温比制约,前屋面和后坡投影大小也能基本确定。屋脊高度一定的条件下,跨度大,则前屋面倾角低,温室可能会采光不足,跨度小,温室空间利用率则降低。

程季珍等^[6]在山西日光温室的研制中,把相关建筑参数归纳为“5度3比”。佟国红等^[7]对辽宁沈阳地区新型大跨度日光温室内不同部分表面太阳照度进行了数值分析,认为改变温室跨度与脊高对种植面与后墙太阳辐射照度影响很大,基本呈线性相关。总体来说,前屋面投影宽度与采光性、后坡投影宽度与保温性能均呈正相关关系。

因此,在总跨度不变的情况下,需协调考虑四者之间的关系。佟国红等^[8]通过对辽宁沈阳地区典型日光温室的分析,以多目标模糊决策法为基本方法,推导了后屋面、跨度、后墙高度、屋脊高度等温室参数的最优组合,该研究成果对分析多参数相互作用有一定参考意义。

日光温室逐渐由最早的6、7米的小跨度向如今的10多米甚至20米的大跨度大体量方向发展,适应了时代的需要,提高了温室空间的整体利用效率。宋明军等^[9]根据甘肃省河西地区自然与气候条件,设计建造新型大跨度西北型日光温室,应用效果明显,为日光温室节能设计、高效利用提供了经验。在改善空间利用率的同时,也牺牲了温室的部分保温性能,从土地的利用效率上说,未能达到节约用地的目的。原因在于,园区整体规划要求前栋温室不能遮挡后栋,大跨度高屋脊大后墙的温室要求前后间距较大,土地的利用率可能会有所降低。应对日光温室的各项建筑参数耦合考虑,建立数学模型,寻找各种参数的最合理组合,提高土地整体利用效率。

2.2 采光面的形状

日光温室的热量来自太阳辐射,争取更多太阳光进入温室是采光面设计的关键。前屋面曲线形状既要考虑采光要求,同时需兼顾其受力性能,设计时需平衡两者之间关系。若仅从采光量角度分析前屋面形状,则以直线型平面效果最优,能获得尽可能大的采光能量,同时,其光线分布均匀性亦最好。但该结构型式在温室前脚处距离支座1米范围内,上部空间小,既不能满足作物生长和耕作的要求,也是结构受力最差的一种方式。基于此,许多研究人员为了研究方便,首先用有明确数学表达式的曲线函数,如圆曲线、摆线、椭圆曲线、抛物型曲线等等,规定了前屋面的曲线形状。李有等^[10]通过对三种易进行数值模拟的前屋面曲面(圆型、椭圆型和抛物线型),基于基本的采光理论,得到圆弧型曲面采光性能最佳,椭圆型曲面较好,抛物线型曲面最差;王静等^[11]在此基础上对日光温室前屋面采光性能进行了深入研究,进一步说明前屋面为圆型曲线和抛物线型曲线组合时,室内整体光环境效果强于直线斜面和抛物线组合屋面;李晓豁^[12]则通过数值模拟分析,得到前屋面为拱形的日光温室采光性能最优的结论。

周长吉等^[13]探索了前屋面曲线整体优化的设计思路,具体方法是,不采用任何一种固定曲线,

而是运用网格化原理,基于功能和结构要求下,以前屋面坐标(x_i, y_i)为基本变量,以进光量大小为目标,逐点绘制曲线,最终形成一条平滑曲线,即为最佳前屋面采光曲线;陈端生等^[14]也提出了相似研究思路,即整体优化设计方案,并以冬季室内获取的太阳总辐射光量最大为原则,设计前屋面倾角和曲线形状;吴毅明等^[15]首次在采光数值模拟的基础上,编制了相应的计算机程序和软件,能够逐时分析太阳直射光进入室内后在不同部分的空间分布状况,对温室采光设计提供了理论分析手段和快捷计算工具。

通过对日光温室前屋面的多重优化计算分析,得出一些共识,即前屋面曲线形状对温室整体采光效率的影响很小。高志奎等^[16]从理论上推导了日光温室前屋面采光的数值模型,并明确曲线类型与采光总量的关系,当温室跨度、屋脊高度和肩高确定,通过改变前屋面曲线形状进行优化,结果发现曲面曲线形状趋同;轩维艳^[17]同样对日光温室前屋面采光曲线进行了理论分析,采用数值模拟研究的方法发现,当温室前屋面采光曲线的形状和曲率不同时,对温室结构承载能力、蓄放热性能等均有很大的影响,但对温室采光性能影响较小,不同屋面形状采光量相差不足3%。故在日光温室优化设计中,主要应以其使用功能要求和结构承载能力为主要目标,参考温室内光照的均匀性分布,进行定性和定量分析,最终确定温室的前屋面采光曲线形状。

3 日光温室的骨架系统

日光温室的骨架系统包括前屋面和后屋面两部分。温室骨架系统设计以满足前屋面综合考虑后的曲线型式要求和后屋面保温采光要求为准则,并兼顾骨架总体设计所用材料的经济性因素。

日光温室骨架支撑系统按照其发展历程中出现的类型有:有柱式与无柱式。

有柱式日光温室的前屋面结构有竹木结构、悬索结构、单管结构等。白义奎等^[18]分析了预应力拉索拱结构,提出采用拉索能有效减小对后墙的水平推力。周长吉^[19]利用数学分析中的黄金分割法,分析了有立柱骨架结构优化方式,建立了相关数值模型,进行了骨架内力分析,得出了最优曲线模型。李晓豁^[20]对日光温室荷载进行了计算机模拟研究,通过对不同荷载的模拟分析,得出抛物线形日光温室骨架的应力值最小。

无柱式日光温室:取消中柱后,前屋面和后屋面骨架形成一体,荷载将综合考虑,受力过程也较复杂。目前主要运用计算机模拟的方法对其受力进行分析与验证。周长吉^[21]根据无柱式日光温室的受力特征,对前屋面骨架的优化提出了具体措施和适用条件,综合考虑前屋面恒载和活载的情况进行曲线选优,再用后屋面恒、活载进行复核修正,并给出了优化计算的流程图。张鹰等^[22]通过理论分析与计算,并结合电子试验技术,对日光温室屋面钢桁架在最不利荷载作用下力学性能进行了测试分析,推导了骨架所受的应力大小。为骨架优化设计提供了参考。卢旭珍等^[23]利用有限元分析方法,对相同温室建筑结构参数、不同构造形式的日光温室骨架进行了应力应变规律分析,并由此得出了最优屋架结构设计方案:方管双骨架斜拉花结构。

日光温室骨架系统现采用的最多的是以桁架结构为主的钢结构形式。由于桁架结构自重较轻、造价相对较低、便于施工等特点,在生产中得到普遍应用。目前,在普通建筑行业中关于桁架结构优化设计中用到的一些方法,像拓扑优化、截面优化等概念和方法,在日光温室的结构优化中还未见到。

4 日光温室的墙体结构

日光温室中的墙体,特别是后墙,既是承重结构的一部分,同时也是温室的主要蓄、放热体和围护结构的一部分,是保证日光温室反季节生产的最主要构件。目前,根据市场使用情况统计,日光温室墙体结构主要有这几种类型:各种堆砌土墙、砖、替代砖、复合异质墙体等。

多年的实践和研究表明,多层复合墙体因其具有较好的蓄热与保温能力,得到了广泛应用。20多年前,周长吉^[24]就提出关于理想墙体的构造特征,建议将温室后墙分成三层,里侧部分主要用于蓄热,由蓄热能力较强的材料组成;外端部分主要用于保温,由热阻较大材料组成;中间部分无特别要求,可根据受力要求或作为里外两部分的补充需要设置不同材料。佟国红等^[25]对温室后墙热力学特征开展了分析,研究表明聚苯材料性能对温室热场反应明显。白义奎等^[26]对聚苯夹层铝箔材料空心后墙保温性能开展了相关研究,与等厚同质空心墙比较,聚苯夹层铝箔空心后墙传热系数减小13%左右,保温隔热特征明显。李小芳等^[27]针对不同墙体材料组合对温室后墙保温

性能的影响开展了研究,研究表明普通红砖墙至少应要求厚度 0.36 m 以上,并建议采用厚度 0.10 m 以上的聚苯材料作为温室后墙的保温体。张立芸等^[28]则结合现实中对实心黏土砖逐渐禁用的现状,通过理论分析和试验验证,提出采用加气混凝土可替代黏土红机砖建造日光温室,试验表明这种材料与聚苯板构筑的异质复合墙体具有相对优越的热特性。

日光温室长度较小进行热环境分析时,需考虑山墙的遮阴和蓄热问题。彭致功等^[29]提出由于作物冠层对山墙和光照 2 次分配的影响,冠层上下部在温室不同区域光照差异明显。李小芳等^[30]研究开发了日光温室热环境数值计算模型,并将云遮系数的方法用于计算温室内不同部分的直射光辐射热,计算中考虑了山墙对热环境的影响以及山墙在不同部位产生阴影的影响。李振海等^[31]将非稳态传热学相关理论的基本概念引入日光温室热环境分析,并建立了对应的数值模型,分析了日光温室几何特征及相关建筑参数和优化方法。陈青云等^[32]亦运用传热学基本理论,建立了日光温室室内热场数值计算模型,用于定量分析温室内热量分布的初步变化规律,对温室建筑参数的优化设计有一定的借鉴意义。

总之,对日光温室后墙的研究主要在热效率和其承载能力的研究上,如各种土质类型后墙。一些地区仍然采用经验设置后墙,如寿光推广的 7 m 厚墙体日光温室,是土地和工程建设成本的极大浪费。关于不同地区后墙的理想厚度,特别是从理论上给出一些量化的数据是今后研究的重要方向之一。

5 日光温室结构优化当前急需研究的问题

5.1 科学合理设计荷载

《农业温室结构设计荷载规范》规定了荷载的取值方法和相关系数的确定,但在实际使用中需灵活掌握和应用往往不易做到,如风荷载体型系数、坡屋面积雪分布系数以及动载的变化等。荷载的不利组合很多,需要进行充分研究,才能真正解决结构优化的初始和基本问题。

5.2 日光温室桁架结构的优化

日光温室前屋面骨架系统目前多采用钢桁架系统,少有基于温室内种植植物生长模型桁架系统优化研究。需基于采光要求、操作方便、结构受力和经济合理为多目标体系,进行多重因素耦

合研究。

5.3 大型日光温室的合理几何尺寸

随着农业生产机械化智能化的要求,大型日光温室在某些区域成为一种趋势。目前,关于大型日光温室的性能情况还有许多不确定性,需要在理论和实践方面进一步开展实质性的研究。

5.4 土堆后墙的合理尺寸

黏土自承重后墙是相对节约建筑材料且经济适用的墙体类型,应用较为广泛。目前,关于土质后墙的设计和建造,存在一些明显问题:尺寸设计随意、承载力和强度无定量计算标准等。因此,综合各种因素(包括基本的蓄热、保温及承载要求),从定性和定量两方面给出一个较合理的数学模型和方法,用于确定后墙的理想尺寸,对降低工程成本、节约土地具有非常现实的意义。

总之,日光温室建筑结构优化是一个综合性目标,要考虑光、热环境与结构承载能力等因素的相关性,同时需兼顾工程应用的经济性。在满足使用要求的条件下,应将节能、节地、节材真正做到实处,达到提高设施农业整体效益的目的。

参考文献:

- [1] GB/T 18622-2002 温室结构设计荷载[S]. 北京:中国计划出版社,2002.
- [2] GB/T 51183-2016 农业温室结构设计荷载规范[S]. 北京:中国计划出版社,2016.
- [3] 程勤阳. 温室结构设计的基本方法(一)温室结构设计基本要求及构件计算[J]. 农业工程技术(温室园艺),2006(9):11-12.
- [4] 周长吉. 日光温室设计荷载探讨[J]. 农业工程学报,1994(1):161-165.
- [5] 侯丽薇,吴 巍,卢 铿. 日光温室最危险荷载的计算机辅助分析计算[J]. 光学精密工程,1999(12):71-74.
- [6] 程季珍,程伯瑛,郭素英. 山西省日光温室结构及材料研究[J]. 农业工程技术(温室园艺),2006(7):13-14.
- [7] 佟国红,李保明. 日光温室内各表面太阳辐射照度的模拟计算[J]. 中国农业大学学报,2006,11(1):61-65.
- [8] 佟国红,李宝筏. 日光温室建筑参数的多目标模糊优选[J]. 农业机械学报,2005(7):108-110.
- [9] 宋明军,赵 鹏. 西北 XB-GV 型大跨度日光温室设计建造及实践[J]. 农业工程技术(温室园艺),2006(7):16-18.
- [10] 李 有,张述景,王 谦,等. 日光温室采光面三效率计算模式及其优化选择研究[J]. 生物数学学报,2001,16(2):198-203.
- [11] 王 静,崔庆法,林茂兹. 不同结构日光温室光环境及补光研究[J]. 农业工程学报,2002(4):86-89.
- [12] 李晓豁. 日光温室采光性能的模拟分析[J]. 黑龙江科技学院学报,2005(2):90-92.
- [13] 周长吉,孙 山,吴德让. 日光温室前屋面采光性能的优化

- [J]. 农业工程学报, 1993(4): 58-61.
- [14] 陈端生, 郑海山, 张建国, 等. 日光温室气象环境综合研究(三)几种弧型采光屋面温室内直射光量的比较研究[J]. 农业工程学报, 1992(4): 78-82.
- [15] 吴毅明, 曹永华, 孙忠富, 等. 温室采光设计的理论分析方法—设施农业光环境模拟分析研究之一[J]. 农业工程学报, 1992(3): 73-80.
- [16] 高志奎, 魏兰阁, 王 梅, 等. 日光温室采光性能的实用型优化研究[J]. 河北农业大学学报, 2006(1): 1-5.
- [17] 轩维艳. 日光温室采光屋面曲线数学模型的建立与分析[J]. 天津农业科学, 2006(4), 12(4): 44-46.
- [18] 白义奎, 佟国红, 姜传军, 等. 预应力拉索拱结构在日光温室骨架设计中的应用[J]. 钢结构, 2002(3): 14-15.
- [19] 周长吉. 有立柱钢管骨架日光温室的结构优化[J]. 农业工程学报, 1994(1): 157-160.
- [20] 李晓豁. 日光温室载荷的模拟研究[J]. 农业机械学报, 2005(9): 86-88.
- [21] 周长吉. 日光温室优化设计及综合配套技术(三)无柱式日光温室骨架结构优化设计[J]. 农业实用工程技术, 1993(3): 3-5.
- [22] 张 鹰, 梁建坤, 李树青, 等. 日光温室骨架的应力测试分析[J]. 沈阳农业大学学报, 2002(3): 205-207.
- [23] 卢旭珍, 邱 凌. 单面坡日光温室钢骨架有限元优化[J]. 农业机械学报, 2005(3): 150-151, 154.
- [24] 周长吉. 日光温室结构优化设计及综合配套技术(四)日光温室围护结构——墙体的保温性能[J]. 农业工程技术(温室园艺), 1993(3), 36(9): 6-6.
- [25] 佟国红, 王铁良, 白义奎, 等. 日光温室墙体传热特性的研究[J]. 农业工程学报, 2003(3): 186-189.
- [26] 白义奎, 王铁良, 李天来, 等. 缀铝箔聚苯板空心墙体保温性能理论研究[J]. 农业工程学报, 2003(3): 190-195.
- [27] 李小芳, 陈青云. 墙体材料及其组合对日光温室墙体保温性能的影响[J]. 中国生态农业学报, 2006(4): 185-189.
- [28] 张立芸, 徐刚毅, 郭忠利. 加气混凝土砌块在日光温室建造中的应用研究[J]. 农业工程技术(温室园艺), 2006(5): 12-14.
- [29] 彭致功, 段爱旺, 郝庆炉. 节能日光温室光照强度的分布及其变化[J]. 干旱地区农业研究, 2003(2): 37-40.
- [30] 李小芳, 陈青云. 用云遮系数法计算日光温室内太阳辐射[J]. 农业工程学报, 2004(3): 212-216.
- [31] 李振海, 郭慧卿, 张振武, 等. 日光温室几何参数与室内温度环境的关系[J]. 沈阳农业大学学报, 1995(1): 58-63.
- [32] 陈青云, 汪政富. 节能型日光温室热环境的动态模拟[J]. 中国农业大学学报, 1996(1): 67-72.

(责任编辑:王丝语)

(上接第15页)该结果与王义芹等人的研究结果相一致^[8]。

卓武燕等对14个陕西类型小麦和7个黄淮类型小麦的光合特性和主要农艺性状进行聚类分析,将高产小麦分为2类,一类具有旗叶净光合速率高、旗叶面积小、有效穗数、千粒重较大等特点;另一类具有净光合速率一般、穗粒数多、千粒重较小、旗叶面积较大等特点^[16]。百农207则不同于上述两种类型,其旗叶宽长、上冲,净光合速率高,在较高的穗粒数基础上保持了较高的穗粒重,有效地协调了高穗粒数与高穗粒重,从而实现了高产,该品种的育成将为黄淮小麦新品种选育提供重要的理论参考。

参考文献:

- [1] 张 宁. 小麦穗分枝性状的遗传控制与QTL定位[D]. 秦皇岛: 河北科技师范学院, 2012.
- [2] 李新伟, 田 敏, 肖 新. 基于小麦养分快速诊断的施肥决策与控制系统设计[J]. 东北农业科学, 2019, 44(2): 23-27.
- [3] 茹振钢, 冯素伟, 李 淦. 黄淮麦区小麦品种的高产潜力与实现途径[J]. 中国农业科学, 2015, 48(17): 3388-3393.
- [4] 周 琳, 王 贤, 殷贵鸿, 等. 超高产小麦收获指数与灌浆期旗叶光合特性的相关性分析[J]. 河南农业科学, 2011, 40(6): 43-45.
- [5] 胡 芬, 赵聚宝, 姜雁北, 等. 土壤水分对冬小麦干物质积累和水分利用效率的影响[J]. 中国农业气象, 1994, 15(2):

- 12-14.
- [6] 石 岩, 于振文, 位东斌, 等. 土壤水分胁迫对小麦根系与旗叶衰老的影响[J]. 西北植物学报, 1998(2): 196-201.
- [7] 康华靖, 陶月良, 权 伟, 等. 北方冬小麦旗叶光饱和点探讨[J]. 麦类作物学报, 2013, 33(6): 1252-1257.
- [8] 王义芹, 杨兴洪, 李 滨, 等. 小麦叶面积及光合速率与产量关系的研究[J]. 华北农学报, 2008, 23(S2): 10-15.
- [9] 任建强, 陈仲新, 唐华俊. 基于MODIS-NDVI的区域冬小麦遥感估产—以山东省济宁市为例[J]. 应用生态学报, 2006, 17(12): 2371-2375.
- [10] 马鹏里, 蒲金涌, 赵春雨, 等. 光温因子对大田冬小麦累积生物量的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(5): 1270-1276.
- [11] 张玲丽, 王 辉, 孙道杰, 等. 两种不同穗型小麦品种光合生理特性研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2003, 31(3): 51-53.
- [12] 隋 娜, 李 萌, 田纪春, 等. 超高产小麦品种(系)生育后期光合特性的研究[J]. 作物学报, 2005, 31(6): 808-814.
- [13] 张庆琛, 许为钢, 胡 琳, 等. 小麦品种郑麦7698生育后期的光合性能及同化物运转特性[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(3): 362-370.
- [14] 侯连涛, 江晓东, 韩 宾, 等. 不同覆盖处理对冬小麦气体交换参数及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(9): 66-71.
- [15] 梁 鹏, 石 玉, 赵俊晔, 等. 不同产量潜力小麦品种冠层光截获特性及产量的差异[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(10): 57-62.
- [16] 卓武燕, 张正茂, 刘苗苗, 等. 不同类型小麦光合特性及农艺性状的差异[J]. 西北农业学报, 2016, 25(4): 66-74.

(责任编辑:刘洪霞)