

基于 LCA 和 Ecotect 的塑料连栋温室节能优化研究

卢艳玲 周素涓 高新南*
(南京农业大学,江苏 南京 210031)

摘要:本文以江苏省南京市某三连栋塑料温室为例,根据生命周期评价法(LCA)定量估算该温室生产单位产量作物所需能耗,并分析其影响因素,为情景分析法提供依据。利用建筑物理模拟软件 Ecotect,从温室建造、作物生产管理两方面研究该温室可能的节能优化方案,并对具有节能效果的方案进行经济可行性分析,提出具有节能效果并且经济可行的方案。

关键词:连栋温室节能;生命周期评价法;情景分析法;Ecotect

中图分类号:S625

文献标识码:A

文章编号:2096-4390(2022)21-0179-04

温室大棚设施农业是提升农产品品质、增加农民收入、实现乡村振兴的重要手段和载体。中国从 2009 年开始成为世界设施农业生产大国,其中温室大棚占地面积稳居世界第一。与传统的农业模式相比,设施农业对能源的依赖性更强^[1],其中连栋温室由于配备控温设备对温室内气候进行调控以满足周年生产的需要,导致其能源消耗率最高。

为了定量估算农业能耗,为降低温室能耗提供依据,实现农业的可持续发展,本文基于 LCA(即生命周期评价法)的能耗计算理论,以连栋温室中使用面积最广的塑料连栋温室和温室内最常见的种植作物黄瓜为例,定量估算温室生产单位产量黄瓜所需能耗,分析影响温室能耗的主要因素,并根据情景分析法设定具有节能潜力的若干情景,采用 Ecotect 软件分析节能情况并进行经济可行性分析,以期为南京市及周边地区设施农业的应用提供借鉴。

1 基于 LCA 的塑料连栋温室能耗计算

1.1 基于 LCA 的能耗计算理论概述

塑料连栋温室的能耗计算以生命周期评价法(Life Cycle Assessment,简称 LCA)为理论依据。它可以评估某个产品、过程或活动从原材料获取、生产、使用、直至最终处置整个生命周期产生的影响。国际标准化组织于 1997 年将 LCA 结构确定为研究目标和系统边界、清单分析、影响评价及结果解释四部分。

栽培黄瓜的塑料连栋温室 LCA 研究目标包括:定量估算该温室生产单位产量黄瓜所需能耗;分析影响该温室能耗的关键因素,为使用情景分析法进行节能优化研究提供依据。研究的系统边界包括温室建造与作物生产管理两部分。作物生产管理包括田间耕作播种、喷洒农药、施用化肥、灌溉等过程。塑料连栋温室生产单位产量作物的能耗需求量计算方法如式(1),式(1)中温室建造所需能耗与温室作物生产管理所需能耗分别由式(2)与式(3)计算得出。

A 温室生态系统生产单位产量温室作物所需能耗 (MJ.kg⁻¹)

$$\frac{\text{单位面积单位时间建造温室所需能耗} \times \text{作物生长周期} + \text{单位面积作物生产所需能耗}}{\text{单位面积温室作物产量}} \quad (1)$$

B 单位面积单位时间建造温室所需能耗(MJ.hm⁻².day⁻¹)

$$= \sum \left(\frac{\text{单位面积基本建造物质输入量} \times \text{对应能耗能量}}{\text{使用天数}} \right) \quad (2)$$

C 单位面积作物生产管理所需能耗(MJ.hm⁻²)

$$= \sum (\text{单位面积生产物质输入量} \times \text{对应能耗当量}) \quad (3)$$

1.2 基于 LCA 能耗计算理论的实例分析

1.2.1 塑料连栋温室概况

本文选取的研究模型是江苏省南京市某三连栋塑料温室,占地 1056m²,朝向为南偏东 30°左右,单栋跨度 8 米,南北长 44 米,檐高 3 米,总高 4.4 米;以 32 毫米的热镀锌钢管为骨架,覆盖材料为 0.1mm 厚的聚乙烯薄膜,

基金项目:江苏省大学生创新训练计划(202110307152Y)。

作者简介:卢艳玲(2001-),女,汉族,福建漳州人,本科,研究方向:建筑节能。

通讯作者:高新南(1982-),女,汉族,江苏泰州人,博士,讲师,研究方向:建筑节能。

用作黄瓜生产。该温室结构符合南京市设施农业项目规定的“8332 钢架温室”的要求,是南京市使用范围最广的温室结构之一;覆盖材料是设施农业最常见的覆盖材料之一,具有代表性,因此以该模型进行研究具有现实意义。采用 Revit 建立温室模型,将其 Gbxml 格式导入到 Ecotect 软件中,如图 1 所示。

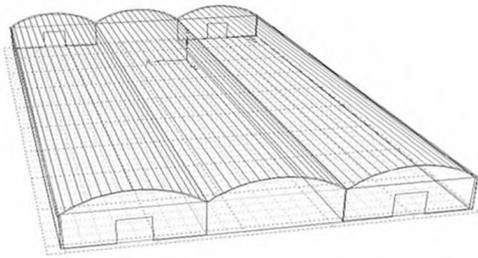


图 1 某塑料连栋温室 Ecotect 模型

1.2.2 清单分析

塑料连栋温室输入物质涉及温室建造与作物生产管理两方面。温室建造的物质输入包括基本建材、温室设备、人力和柴油四部分。其中,基本建材使用数量及使用周期通过查阅文献[2]和实地调研获得;温室设备包括控温设备、黄瓜种植过程应用于深翻、旋耕、起垄、覆膜、灭茬和行间作业的机械设备,温室设备使用数量和使用周期通过实地调研获得;人力主要在建造温室过程投入,其使用工时通过市场调研获得;柴油用于温室建造物质的运输,其耗油量根据实地调研获得。人力和柴油使用周期均按一茬黄瓜生长周期,包括播种、发芽、生长、开花、结果和成熟,约为 120 天计算。最终温室建造输入物质清单如表 1 所示。作物生产管理的物质输入包括化肥与有机肥、种子、农药、农机、柴油、灌溉水、人力七个方面。其中,有机肥、种子、农药、人力使用数量根据《全国农产品收益成本资料汇编》数据折算而来;化肥主要包括氮肥、磷肥、钾肥,其施用量通过查阅参考文献 [3] 获得;柴油使用数量根据 Ecotect 软件分析温室采暖负荷,再

利用燃油取暖器采暖计算而来;农机包括土地深翻、旋耕、起垄、覆膜、黄瓜灭茬和行间作业过程使用的机械设备,总使用小时数通过实地调研、咨询专业人士获得。作物生产输入物质的使用周期均按一茬黄瓜生长周期计算。最终每公顷塑料连栋温室作物生产管理输入物质清单如表 2 所示。

1.2.3 能耗分析

能耗分析基于 1.1 小节中的能耗计算理论,其中输入物质对应的能耗当量通过查阅文献资料[4]获得,最终能耗当量清单如表 3 所示;作物生长周期按 120 天计;单位面积温室作物产量通过实地调研获得,该塑料连栋温室在一个生长周期内黄瓜产量约为 11000kg/亩。

能耗计算结果表明:该塑料连栋温室生产单位产量黄瓜所需能耗约为 6.47MJ,其中单位面积温室建造能耗约为 2.41×10^5 MJ,单位面积作物生产管理能耗约为 8.26×10^5 MJ。对生产单位产量黄瓜所需能耗起决定性作用的因素是作物生产管理过程中控温能耗的投入,其次

表 1 塑料连栋温室建造输入物质清单

物质	数量	使用周期	物质	数量	使用周期
混凝土	63.10 m ³ /hm ²	15 年	燃油取暖器	495 kg/hm ²	5 年
LDPE 膜	475640 kg/hm ²	9 月	深翻机	1200 kg/hm ²	8 年
PC 板	1707.03 kg/hm ²	15 年	精密蔬菜灭茬机	1200 kg/hm ²	8 年
聚乙烯	2101 kg/hm ²	5 年	多功能田园管理机	2025 kg/hm ²	10 年
聚丙烯	106.20 kg/hm ²	3 年	蔬菜移植机	6750 kg/hm ²	10 年
竹竿	166640 kg/hm ²	10 年	多功能作业平台	6000 kg/hm ²	12 年
钢材	77073.70 kg/hm ²	15 年	柴油	6.50 L/hm ²	120 天
线材	1125.40 kg/hm ²	15 年	人力	2700 h/hm ²	120 天

表 2 每公顷塑料连栋温室作物生产管理输入物质清单 (以黄瓜一个生长周期为例)

物质	数量	物质	数量	物质	数量	物质	数量
种子	32.55 kg	灌溉水	16747 kg	钾肥	2810 kg	人力	7200 h
氮肥	3150 kg	柴油	9953.29 L	有机肥	75 t	农药	41.25 kg
磷肥	2900 kg	农机	960 h				

表 3 塑料连栋温室输入物质能耗当量清单

物质	当量	物质	当量	物质	当量
混凝土	2350 MJ/m ³	线材	36 MJ/kg	人力	1.8 MJ/h
LDPE 膜	89.3 MJ/kg	氮肥	31.5 MJ/kg	种子	1.0 MJ/kg
聚乙烯	89.1 MJ/kg	磷肥	11.4 MJ/kg	温室设备	33.0 MJ/kg
聚丙烯	99.2 MJ/kg	钾肥	2.9 MJ/kg	农机	13.06 MJ/h
PVC 管	67.5 MJ/kg	有机肥	303.1 MJ/t	柴油	56.31 MJ/L
钢材	24.4 MJ/kg	农药	208 MJ/kg	灌溉水	4.1 MJ/m ³

表 4 控温、温室建造、氮肥、灌溉水能耗占比

类别	控温	温室建造	氮肥	灌溉水
能耗 (MJ)	5.60×10^6	2.41×10^5	9.92×10^5	6.86×10^4
占比 (%)	52.49	22.60	9.29	6.43

是温室建造、氮肥和灌溉水。这四部分在总能耗中的占比如表4所示,总占比为90.81%,其余各部分占比较小。

2 节能优化研究与节能效果评估

根据塑料连栋温室 LCA 研究确定的影响温室能耗的关键因素,利用情景分析法进行节能优化研究,并结合 LCA 与 Ecotect 软件进行节能效果评估。情景一和情景二从温室建造的角度出发,减少控温能耗,从而降低总能耗;情景三从作物生产管理角度出发,保证氮肥和灌溉水供给充足,提高作物产量水平,从而降低单位产量作物所需能耗。

2.1 情景一:调整温室朝向

根据《温室加热系统设计规范》,黄瓜生长温度应维持在 8~35℃。利用 Ecotect 分析南京市的 CSWD 气候数据,结果表明,南京地区月平均气温最低值和最高值分别出现在 1 月,2.1℃和 7 月,28.6℃,12 月至次年 2 月的月平均温度均低于黄瓜正常生长要求,需要适当采暖。因此,本文重点研究 12 月至次年 2 月(采暖季)温室节能。为满足温室生产和节能要求,应选择合理的朝向,使其在采暖季尽可能多地接收太阳辐射,该辐射能量可用于温室升温以及作物光合作用的原料。利用 Ecotect 的 Weather Tool 工具,进行温室最佳朝向分析,结果如图 2 所示。该温室最佳朝向为南偏西 22.5°,最佳朝向下,该温室顶部和南立面接收太阳辐照度分别为 1574.192kW.h/m²、193.673kW.h/m²;原朝向下,该温室顶部和南立面接收太阳辐照度分别为 1570.517kW.h/m²、83.837 kW.h/m²。与原朝向相比,最佳朝向下该温室的节能率为 6.86%。

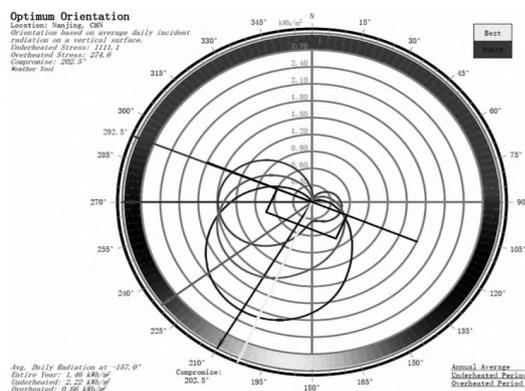


图 2 某塑料连栋温室最佳朝向分析图

2.2 情景二:调整温室围护材料

良好的围护材料可使温室在采暖季失热少、得热多,降低室内温度由于外扰动变化的程度,有利于节约温室控温能耗。该温室原围护材料为聚乙烯长寿无滴膜,

利用 Ecotect 进行热工分析,该温室在采暖季热负荷为 17418.259kW·h,结果如图 3 所示。调整围护材料为另一种常见的温室围护材料——高保温聚氯乙烯薄膜,其密度较大,导热率较小,因此保温性能更好,有利于降低控温能耗。利用 Ecotect 进行热工分析,结果如图 4 所示。调整围护材料后的温室在采暖季热负荷为 16522.687 kW·h,相比原围护材料,节能率为 5.14%。

2.3 情景三:保证氮肥、灌溉水供应充足,黄瓜产量提高

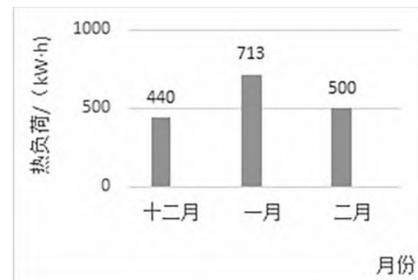


图 3 聚乙烯长寿无滴膜热工分析图

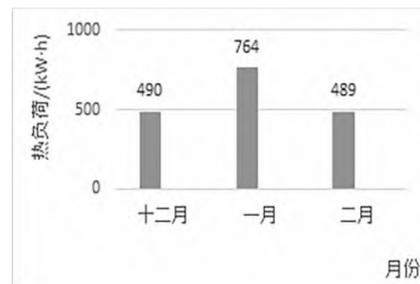


图 4 高保温聚氯乙烯薄膜热工分析图

由于该塑料连栋温室的能耗中,控温能耗占比大,约为 60%,因此提高作物生产资源(氮肥、灌溉水等)的利用率对于降低温室能耗意义不大,该情景考虑从提高作物产量水平从而提高资源利用率的角度出发,降低温室能耗。查阅文献[5],黄瓜生长过程追施氮肥 540kg/hm²,增加灌溉水 1080m³/hm²,可以使黄瓜增产 23.2%。因此调整氮肥使用量为 3690 kg/hm²,灌溉水使用量为 17820m³/hm²,黄瓜产量为 13552kg/亩,基于 1.1 小节提出的能耗计算理论,计算单位产量黄瓜的能耗需求量约为 5.36MJ。该结果表明提高作物产量水平能够较为明显降低温室生产单位产量黄瓜所需能耗,降低幅度为 17.16%。

3 经济可行性分析

3.1 情景一、二经济可行性分析

情景一调整温室朝向不会增加多余的资源投入,而又能节约能耗,因此具备经济可行性。情景二调整温室

围护材料为高保温聚氯乙烯薄膜,利用燃油取暖器(功率:100kW;耗油量:6.0kg/h)供暖,柴油价格为6.50元/L。根据图3、图4热工分析结果,聚乙烯温室采暖季热负荷比聚氯乙烯温室多896kW·h,采暖费用多415.98元。此外,聚氯乙烯薄膜使用周期为18个月,聚乙烯薄膜使用周期为9个月,围护材料面积为2000m²,按直线方式计提折旧,采暖季聚氯乙烯温室围护材料折旧费为460元,聚乙烯温室围护材料折旧费为853元。故从折旧费和采暖费用两方面综合考虑,情景二具备经济可行性。

3.2 情景三经济可行性分析

原生产管理条件下,该温室生产单位产量黄瓜所需能耗约为6.47MJ,保证氮肥、灌溉水供应充足,提高黄瓜产量水平,生产单位产量黄瓜所需能耗约为5.36MJ。从电能角度考虑,1kW·h电力能耗当量为3.6MJ。南京市平均电费约为0.6元/(kW·h),将能耗折算为电费,原生产管理条件下黄瓜生产成本约为1.08元/kg,保证氮肥、灌溉水供应,黄瓜生产成本约为0.89元/kg,比原生产管理条件下单位产量黄瓜生产成本降低,因此具备经济可行性。

4 结论

本文通过对南京市某塑料连栋温室的节能优化方案

进行LCA研究和Ecotect模拟分析,得到以下结论:(1)在温室建造方面,调整温室的朝向为最佳建筑朝向,调整温室围护材料为高保温聚氯乙烯薄膜,能够有效节约温室控温能耗。前者节能率约为6.86%,后者节能率约为5.14%。节能设计以后,折旧费与采暖费用均降低,具备经济可行性。(2)在作物生产管理方面,保证氮肥、灌溉水供应充足,提高作物产量水平,能够有效节约温室能耗,节能率约为17.16%。与原生产管理条件相比,生产单位产量黄瓜所需成本降低,具备经济可行性。

参考文献

- [1]周益波.中国农业能源效率的时空分异及影响因素研究[D].武汉:华中农业大学,2019.
- [2]朱振华.寿光冬暖大棚蔬菜生产技术大全[M].北京:中国农业出版社,2002.
- [3]吴文丽.中国不同类型温室生态系统能耗现状及节能潜力情景分析[D].南京:南京农业大学,2014.
- [4]Bojaca C R, Schrevens E. Energy assessment of peri-urban horticulture and its uncertainty: case study for Bogota, Colombia[J]. Energy, 2010, 35(5): 2109-2118.
- [5]王柳,张福垠,魏秀菊.不同氮肥水平对日光温室黄瓜品质和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(12): 225-229.

Research on Energy Saving Optimization of Plastic Connected Greenhouses Based on LCA and Ecotect

Lu Yanling Zhou Sujuan Gao Xinnan*

(Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract: Taking a three-row plastic greenhouse in Nanjing, Jiangsu Province as an example, the paper quantitatively estimates the energy consumption required for the greenhouse to produce crops per unit according to the Life Cycle Assessment Method (LCA), and analyzes its influencing factors to provide a basis for the scenario analysis method. Using the building physics simulation software Ecotect, the possible energy-saving optimization scheme of the greenhouse is studied from the aspects of greenhouse construction and crop production management, and the economic feasibility analysis of the scheme with energy-saving effect is carried out, and the economically feasible scheme with energy-saving effect is proposed.

Key words: Energy saving in connected greenhouses; Life cycle assessment method; Scenario analysis method; Ecotect