

日光温室土墙厚度的优化 ——以杨凌地区为例

马江伟 王宏丽* 许红军 宋丹

(西北农林科技大学 园艺学院,陕西 杨凌 712100)

摘要 为减少日光温室土质墙体成本并满足作物生长,对后墙厚度进行优化。以单位造价的节能量为日光温室节能改造的技术经济评价指标,分析日光温室土墙系统在节能工程中的成本构成;通过分析日光温室的状态系数、墙体传热系数和不变成本,着重研究节能量和土墙厚度的关系。研究结果表明:在杨凌地区,当不变成本为 43.08 元/m²,单位造价节能量取极大值时,增加厚度为 1.18 m,实际建造厚度为 2.30 m。引入性价比将墙体技术参数和经济参数有效连系起来,以杨凌地区为例,得到了日光温室土墙增加厚度优化式。

关键词 日光温室; 土墙; 节能改造; 技术经济优化

中图分类号 S 625.1

文章编号 1007-4333(2012)04-0144-04

文献标志码 A

Optimization of earth wall thickness of solar greenhouse: A case study in Yangling Area

MA Jiang-wei, WANG Hong-li*, XU Hong-jun, SONG Dan

(College of Horticulture, Northwest Agriculture and Forest University, Yangling 712100, China)

Abstract In order to reduce the cost of solar greenhouse and guarantee the normal crop growth, the thickness of greenhouse wall must be optimized. The paper analyzes the composition of costs for an earth wall system of solar greenhouse in energy saving project, and a technical and economical evaluation index, namely, a ratio of energy saving and unit cost, is proposed for solar greenhouse energy saving renovation. The relationship of the ratio with earth wall thickness was deduced by analyzing the state coefficient, the thermal conductivity of wall and the constant costs. When the constant cost is 43.08 yuan per square meters, the maximization of the energy saving and unit cost is 1.18 m, so the construction thickness is 2.30 m. Technical and economic parameters of the wall are effectively connected. Taking Yangling area as an example, the optimization formula of earth wall of solar greenhouse was obtained.

Key words solar greenhouse; earth wall; energy saving renovation; optimization of technology and economy

目前,关于日光温室墙体的研究主要是对复合墙体的材料和厚度的筛选,对于推广面积最大的日光温室土质墙体厚度优化研究均以试验为主。如果能够根据温室热量需求计算出土墙的标准厚度,在建造日光温室时按照标准厚度进行建造,不但可以有效满足温室内作物的生长,节约成本和能源,减少劳动力,而且能够有效节约土地,提高土地利用效率。

日光温室节能改造需要经过技术经济论证^[1-3]。

王晓冬等^[4]通过收集温室资料和测试实验数据,并结合不同地区、地质等因素,对结构不同的墙体进行对比和优化,得到塔城地区日光温室的主要结构参数。李军等^[5]参照民用建筑设计规范及日光温室的建造规则,以热性能为基础,分别计算出几种常见日光温室的墙体厚度。杨建军等^[6]对西北地区 4 个省份推广应用面积最广的土质日光温室内部环境指标进行测试和分析,并且综合建造成本以及土地利用

收稿日期: 2012-03-05

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201203002)

第一作者: 马江伟,硕士研究生, E-mail: majiangwei2010@126.com

通讯作者: 王宏丽,副教授,主要从事温室节能技术研究, E-mail: daisy. h. wang@gmail.com

率得出了4个省份日光温室土质墙体的最佳厚度。以上研究从试验角度分析了不同地区、不同类型的日光温室墙体厚度,但是并没有从理论上给出具体某地日光温室的设计标准和计算方法。本研究拟通过建立日光温室技术指标和经济指标之间的关系,通过技术论证得到日光温室土质墙体优化公式;以杨凌地区为例计算日光温室土墙设计和建设的标准厚度。

1 技术经济参数的引入

1.1 热性能参数

根据热力学第一定律,日光温室遵循能量守恒定律,节能改造前后日光温室散热量差 ΔQ_H 表征了日光温室改造后的节能量,直接反映出改造的效果, ΔQ_H 的计算公式为^[7]

$$\Delta Q_H = Q_H^0 - Q_H \quad (1)$$

式中: Q_H^0 和 Q_H 分别为改造前后日光温室散热量指标。

温室围护墙体在满足结构强度的前提下,其热阻值应大于所要求的低限热阻(表1),墙体的低限热阻是指作为围护结构的墙体实际计算出的热阻值应该达到的最低值,如果选择墙体材料和厚度所确定的热阻值低于低限热阻,则墙体的保温性能达不到预期效果。要满足温室保温要求,墙体基本厚度应该满足公式

$$d_0 = R_x \lambda \quad (2)$$

式中: d_0 为墙体基本厚度,m; R_x 为墙体低限热阻, $m^2 \cdot ^\circ C/W$; λ 为导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$,指在稳定传热条件下,1 m厚的材料两侧表面温差为 $1^\circ C$ 时,在1 s内通过 $1 m^2$ 面积传递的热量。表2示出日光温室常用墙体材料的导热系数。

表1 日光温室围护结构低限热阻

Table 1 The threshold of heat resistance of building envelope

室外设计 温度/ $^\circ C$	低限热阻/ $(m^2 \cdot ^\circ C/W)$	
	后墙、山墙	后屋面
-4	1.1	1.4
-12	1.4	2.5
-21	1.8	3.0
-26	2.1	4.0
-32	2.8	6.0

表2 常用墙体材料的导热系数

Table 2 Thermal conductivity coefficient of common wall materials

参数	容重 $\rho/(kg/m^3)$	导热系数 $\lambda/(W/(m \cdot ^\circ C))$
砖	1 800	0.87
多孔砖	1 400	0.58
土坯	1 800	0.93
夯实土	2 000	1.00
泥砂浆	1 800	0.93

注:不同地区、不同土壤、不同夯实程度时 λ 取值不同,杨凌地区取0.8。

根据公式 $d_0 = R_x \lambda$ 可得到杨凌地区温室墙体基本厚度为1.12 m。温室后墙实际建造厚度为 $(d_0 + d)$,其中 d 为温室墙体增加厚度。

1.2 成本参数

日光温室的土墙总成本分为不变成本和变动成本;不变成本,即基本厚度对应的土墙成本,不随增加厚度的变化而变化。变动成本是由增加厚度引起的,增加厚度不同,变动成本随之变化。总成本为

$$P = P_0 + P' \quad (3)$$

式中: P_0 和 P' 分别为土墙不变成本和变动成本,元/ m^2 。对日光温室墙体厚度进行改造时,土的热性能与造价是2个重要因素,引入 T 函数对增加厚度进行热性能、经济评价,即土墙的传热系数乘以该材料的单位体积价格,其乘积越小,技术经济效果越好。

$$T = S \lambda \quad (4)$$

式中: S 为土墙的单位体积价格,元/ m^3 ; T 为墙体的技术经济特征量,元 $\cdot W/(m^3 \cdot ^\circ C)$,反映了单位热阻的价格,因此 T 较好的代表墙体技术经济的优劣。

1.3 技术经济参数

ΔQ_H 为核心技术参数, P 为核心经济参数,反映了获得 ΔQ_H 的花费。这里引入 f 表征单位造价的节能量,即性价比,将技术参数和经济参数有效的联系起来,并令:

$$f = \Delta Q_H / P \quad (5)$$

2 墙体增加厚度的优化

2.1 热量差与传热系数的关系

温室失热和得热的热量差表示为

$$Q_H = q_1 + q_2 - q_3 \quad (6)$$

式中: q_1 为单位建筑面积通过围护结构的传热耗热量, W/m^2 ; q_2 为单位建筑面积的空气渗透耗热量, W/m^2 ; q_3 为单位建筑面积的建筑物内部得热, W/m^2 。

$$q_1 = (t_i - t_e) \left(\sum_{i=1}^m \varepsilon_i K_i F_i \right) / A_0 \quad (7)$$

$$q_2 = (t_i - t_e) (C_p \rho N V) / A_0 \quad (8)$$

式中: t_i 为平均室内计算温度值, 杨凌地区取 $15\text{ }^\circ\text{C}$; t_e 为平均室外计算温度值^[8], 杨凌地区取 $-15\text{ }^\circ\text{C}$; C_p 为空气比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$; ρ 为空气密度, kg/m^3 ; N 为换气次数, 次/h; V 为换气体积, m^3 ; A_0 为建筑面积, m^2 。对于杨凌地区

$$q_1 = \frac{30}{A_0} \left(\sum_{i=1}^m \varepsilon_i K_i F_i \right) \quad (9)$$

$$q_2 = \frac{Y}{A_0} V_0 \quad (10)$$

式(6)表示为

$$Q_H = q_1 + q_2 - q_3 = \frac{30}{A_0} \left(\sum_{i=1}^m \varepsilon_i K_i F_i \right) + \frac{Y}{A_0} V_0 - Z \quad (11)$$

日光温室散热包括前屋面、后屋面、山墙和后墙的散热, 则

$$Q_H = \frac{30}{A_0} (\varepsilon_1 K_1 F_1) + \frac{30}{A_0} (\varepsilon_2 K_2 F_2) + \frac{30}{A_0} (\varepsilon_3 K_3 F_3) + \frac{30}{A_0} (\varepsilon_4 K_4 F_4) + \frac{Y}{A_0} V_0 - Z \quad (12)$$

式中: ε 为围护结构的传热系数修正值, 与围护结构的朝向有关; F 为围护结构的面积, m^2 ; V_0 为建筑体积, m^3 ; A_0 为建筑面积, m^2 ; $i=1, 2, 3, 4$, 代表分别前屋面、后屋面、山墙和后墙。由此可见, ε 、 F 、 V_0 、 A_0 是与围护结构建筑相关的参数, 与围护结构使用的材料无关, 对于日光温室, 改造前后这些参数不会发生变化。 K 是某一围护结构的传热系数, 与围护结构的材料及构造相关。

在只对温室后墙进行改造的情况下, 根据式(12)得

$$\Delta Q_H = \frac{30}{A_0} (\varepsilon_4 F_4) (K^0 - K) \quad (13)$$

式中: K^0 和 K 分别为改造前后后墙传热系数, 令 $m = \frac{30}{A_0} (\varepsilon_4 F_4)$, m 表征了日光温室及其后墙围护结构的形态特征, 改造前后各参数不变。

2.2 墙体增加厚度的优化

墙体增加厚度土壤的热阻和导热系数互为倒数, 节能改造前后的传热阻 R_0 与 R 为

$$R_0 = R_i + R_f + R_e \quad (14)$$

$$R = R_i + R_f + d/\lambda + R_e \quad (15)$$

式中: R_i 、 R_f 、 R_e 分别为日光温室后墙内表面换热阻、基本厚度热阻、外表面换热阻^[9-10], $\text{m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$ 。对于改造后后墙的传热阻为原墙体基本厚度的传热阻与增加厚度的传热阻之和, 则传热系数差为

$$\Delta K = K^0 - K = \frac{d/\lambda}{R_0(R_0 + d/\lambda)} \quad (16)$$

由式(4)、(5)、(15)及(16)得

$$f = \frac{md}{R_0(\lambda R_0 + d)(P_0 + Sd)} \quad (17)$$

由式(17)各项参数的物理意义知 $f > 0$, 且在 $d \geq 0$ 范围内为连续函数, 因此 f 存在最大值。所以:

$$f' = \frac{df}{dd} = \frac{m\lambda P_0 R_0^2 - md^2 R_0 S}{R_0^2 (\lambda R_0 + d)^2 (P_0 + Sd)^2} \quad (18)$$

当 $f' = 0$ 时, 得到

$$d = \sqrt{\frac{\lambda R_0 P_0}{S}} \quad (19)$$

2.3 结果与讨论

以杨凌地区日光温室土墙建造成本价格为例计算出式(19)中各参数值: 日光温室长 50 m, 跨度 9 m, 后墙的上宽 0.8 m, 下宽 1.2 m, 高 2.3 m, 墙体造价为 3 500 元, 由此计算出不变成本 $P_0 = 34.08$ 元/ m^2 , $S = 30.43$ 元/ m^3 。为统一评价条件^[12], 取外表面换热系数 $23 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$, 内表面换热系数 $8.7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$, 导热系数取 $0.8 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$ 。得到 $R_0 = 1.5584 \text{ m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$ 。

最终求得

$$d = \sqrt{\frac{\lambda R_0 P_0}{S}} = 1.18 \text{ m}$$

表 3 示出性价比 f 与墙体增加厚度 d 的关系: 随着 d 的增加, f 渐渐变大, 说明性价比慢慢提高, 达到最大值后逐步平缓, 性价比在一定范围差别较

表 3 性价比 f 与墙体增加厚度 d 的关系

Table 3 The relationship between the C/P ratio and wall transformation thickness

d/m	f	d/m	f
1.15	0.794 2	1.20	0.836 9
1.16	0.827 9	1.21	0.809 2
1.17	0.848 8	1.22	0.770 1
1.18	0.857 0	1.23	0.719 9
1.19	0.852 9	1.24	0.658 9

小,但是随着增加厚度继续增大,性价比表现出渐渐变小的趋势,可见 f 随着增加厚度的增大有一个最大值,当增加厚度为 1.18 m 时,性价比 f 最大。

另外,由于土质的不同,导热系数也不尽相同,不同的导热系数对墙体增加厚度也会有影响。表 4 示出墙体增加厚度与导热系数的关系。

表 4 墙体增加厚度 d 与导热系数 λ 的关系

Table 4 The relationship between the thermal conductivity and transformation thickness

$\lambda/(W/(m \cdot ^\circ C))$	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00	1.05	1.10	1.15
d/m	1.18	1.22	1.25	1.29	1.32	1.35	1.39	1.42

3 结 论

本研究引入性价比 $f = \Delta Q_H / P$ 表征单位造价的节能量,该表征方法反映了技术经济的客观效果。

f 与墙体增加厚度 d 具有函数关系,并且 f 数值随着 d 的增加逐渐变大,达到极大值后,随着 d 的增加, f 值又逐渐变小。当不变成本为 43.08 元/ m^2 时, f 极大值对应墙体增加厚度为 1.18 m,实际建造厚度为 2.30 m,该结果是以杨凌地区为例计算出的土墙建造厚度,其他地区可以根据详细优化公式计算和设计温室厚度,该优化式在节能改造项目中亦有参考价值。

本研究所采用的优化方法中有些假设和影响因素对结果难免会有影响,但因这些因素涉及更复杂的领域,难以简单地解决,本研究只是采用一种近似的、简化的处理方法。

参 考 文 献

[1] 周长吉,周新群,桂金光.几种日光温室复合保温被保温性能分析[J].农业工程学报,1999,15(2):168-171
 [2] 邹志荣,李建明,王乃彪,等.日光温室温度变化与热量状态分析[J].西北农业学报,1997,6(1):58-60
 [3] 孙诗兵,李俊领,田英良,等.墙体节能改造保温层厚度的优化

研究[J].节能技术,2008,26(3):219-221
 [4] 王晓冬,马彩雯,邹平,等.日光温室保温性能的试验与优化设计[J].农机化研究,2009(9):172-175
 [5] 李军,杨世宏.日光温室保温墙体的厚度确定和成本概算[J].宁夏农林科技,2002(4):28-29
 [6] 杨建军,邹志荣,张智,等.西北地区日光温室土墙厚度及其保温性的优化[J].农业工程学报,2009,25(8):180-185
 [7] 张三慧.从功能定理到热力学第一定律到普遍的能量守恒定律[J].物理通报,2002(12):5-7
 [8] 张淑敏.铜川气温气候特点及成因分析[J].陕西气象,2009(1):27-29
 [9] 房树田,高跃春.EPS外保温复合墙体的保温层厚度设计研究[J].黑龙江工程学院学报,2004,18(1):57-59
 [10] 王宏丽,任雷,党永华,等.关中地区日光温室北面复合保温墙体的传热研究[J].北方园艺,2008(7):113-115
 [11] 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,2008,26(5):411-415
 [12] 周长吉.“西北型”日光温室优化结构的研究[J].新疆农机化,2005(6):37-38
 [13] Nijskens J, Deltour J, Coutisse S, et al. Heat transfer through covering materials of greenhouses[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1984, 33:193-214
 [14] 杨强生,浦保荣.高等传热学[M].上海:上海交通大学出版社,2001:44-45
 [15] 俞佐平.传热学[M].北京:高等教育出版社,1985:64-65

责任编辑：刘迎春