

日光温室地源热泵供暖碳足迹的生命周期分析

柴立龙^{1,2}, 马承伟³, 刘明池^{1,2}, 王宝驹^{1,2}, 武占会^{1,2}, 许 勇^{1,4}

(1. 北京市农林科学院国家蔬菜工程技术研究中心 北京 100097;

2. 农业部都市农业(北方)重点实验室, 北京 100097;

3. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083;

4. 农业部华北地区园艺作物生物学与种质创制重点实验室, 北京 100097)

摘 要: 为分析日光温室地源热泵供暖的碳足迹, 该文以日光温室地源热泵供暖系统中浅层地热能的存储、提取、制冷压缩提升和温室末端供暖整个过程为研究对象, 对系统的温室气体排放和单位温室供暖面积的排放水平进行分析, 构建基于生命周期分析 LCA (life cycle assessment) 的日光温室地源热泵供暖碳足迹分析方法。同时以北京地区日光温室地源热泵系统冬季供暖采集的试验数据为依据, 分析和计算出北京地区日光温室在采用燃煤和燃气 2 种不同发电方式下地源热泵系统的供暖碳足迹和基于 20 a 和 100 a 温室地源热泵供暖碳足迹的全球变化潜能 (global warming potential, GWP, 单位为二氧化碳当量排放- $\text{CO}_2\text{-eq.}$) 的变化。研究表明, 在北京地区采用燃煤和燃气驱动地源热泵系统的碳足迹 GWP 分别为 257 和 72 $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。基于 100 a 的 GWP 总量比 20 a 的计算值分别减少了 1.6% 和 5.4%。对比荷兰 Venlo 型温室天然气供暖, 该研究中采用燃煤发电驱动日光温室地源热泵供暖的碳足迹是其 1.39 倍, 而燃气发电驱动日光温室地源热泵供暖的碳足迹仅为 Venlo 型温室供暖的 41%。采用燃气发电驱动的地源热泵供暖系统具有更低的碳足迹。

关键词: 温室; 供暖; 二氧化碳; 地源热泵; 碳足迹; 生命周期分析

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.08.018

中图分类号: S625.5⁺¹

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2014)-08-0149-07

柴立龙, 马承伟, 刘明池, 等. 日光温室地源热泵供暖碳足迹的生命周期分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(8): 149—155.

Chai Lilong, Ma Chengwei, Liu Mingchi, et al. Carbon footprint of ground source heat pump system in heating solar greenhouse based on life cycle assessment[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(8): 149—155. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

能源危机和全球变暖等问题的加剧促使各类清洁能源利用机制在不同领域得到不同程度的发展, 作为当前清洁能源技术主要应用之一的浅层地热能地源热泵技术近年来在农业生产供暖中得到迅速发展^[1]。Ozgener 等^[2]在土耳其 Ege 大学 (北纬 $38^{\circ}24'$) 利用一个供暖输出功率为 4 kW 的小型太阳能辅助地源热泵系统 (ground source heat pump system, GSHPs) 给一栋 50 m^2 温室进行供暖, 系统供暖性能系数 (coefficient of performance, COP) 约为 2.27, 同时作者分析了 GSHPs 在土耳其温室中的应用经济性, 分析得出与传统能源供暖相比 GSHPs 供暖在土耳其具有更好的经济性。江耀等^[3]在商业化温室餐厅内供暖的研究表明, 利用地下水

式 GSHPs 比普通中央空调供暖节能 30% 以上。方慧等^[4]在北京地区 Venlo 型连栋温室中进行了单井地下水式 GSHPs 供暖的研究, 系统 COP 达到 3.14。而方慧等^[5]在日光温室中采用地埋管式 GSHPs 得到的系统 COP 是 2.62, 比传统燃煤系统节能 29.6%。柴立龙等^[6]在北京地区一栋 480 m^2 的日光温室中采用了多井回灌地下水式 GSHPs 供暖试验研究, 系统的 COP 达到 3.83, 研究还得出北京地区在 2007—2008 年采暖期内日光温室采用 GSHPs 的供暖费用约为 0.12 元/ $(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。关于温室 GSHPs 供暖技术性能 (COP)、经济性能以及初步环境性能 (碳减排) 等国内外已进行了相关研究。然而关于温室 GSHPs 深入的环境性能分析如碳足迹 (carbon footprint, CFt) 水平等还有待于深入研究。

碳足迹是一个产品或活动各生命周期阶段二氧化碳及其当量直接或间接的排放量^[7-8]。碳足迹的概念起源于美国哥伦比亚大学 Rees 和 Wackernagel 两位学者提出的“生态足迹”范畴^[8]。产品碳足迹是指产品或服务从摇篮到坟墓的整个生命周期中所产生的二氧化碳排放量^[9-11]。生命周期评估法

收稿日期: 2013-07-29 修订日期: 2014-02-22

基金项目: 北京市自然科学基金项目 (6132011); 北京市农林科学院青年基金项目 (QNJJ201212)。

作者简介: 柴立龙 (1983—), 男, 安徽宿州人, 工学博士, 助理研究员, 研究方向: 设施农业环境科学与工程。北京市海淀区彰化路 50 号农林科学院蔬菜研究中心, 100097。Email: chaililong@nrcv.org.cn

(life cycle assessment, LCA) 是目前使用较为广泛的碳足迹评价方法^[12-16]。LCA 是一种评价产品、工艺或活动从原材料采集到产品生产、运输、销售、使用、回收、维护和最终处置整个生命周期阶段有关的环境负荷的过程和方法^[17-18]。近年来国内、外学者将 LCA 方法广泛应用于各类产品和系统的环境、能源评估。瑞典的 Heikkila^[19]分析了家用空调系统的环境影响,提出应从全球变暖潜能和光化学臭氧层创造潜力方面进行分析。意大利的 Ardenne 等^[20-21]采用 LCA 方法分析了太阳能集热,风力发电等技术的环境影响,对比结果显示清洁能源比化石类能源具有明显的环境效益。清华大学的尚春静等^[22]采用 LCA 对建筑的碳排放进行了核算,并预测我国新增 10 亿 m^3 建筑将排放 14 t 温室气体。

然而关于温室 GSHPs 供暖碳足迹的研究尚未深入开展。研究温室 GSHPs 供暖过程的碳足迹,分析系统中产品浅层地热能 (shallow geothermal energy, SGE) 从存储到温室供暖整个过程的温室气体排放总量和单位温室供暖面积的排放水平,从而有助于政府部门制定相关清洁能源和环境保护政策,同时为设施农业生产企业或个人在选择清洁能源供暖系统时提供技术参照。本研究将对一套位于北京地区的一个 480 m^2 日光温室 GSHPs 和其冬季供暖过程进行供暖计算和碳足迹分析。同时,对比中国不同发电系统燃煤发电 (coal fired power producing, CFPP) 和燃气发电 (gas fired power producing, GFPP) 对 GSHPs 碳足迹的潜在影响。

1 材料与方法

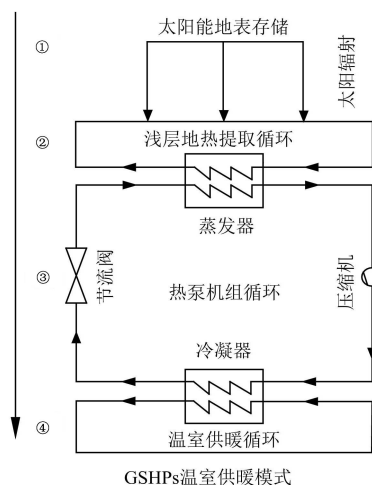
1.1 试验温室-GSHPs

本研究中使用的试验日光温室及地下水式 GSHPs 位于北京市海淀区 (北纬 39°40'), 日光温室为东西走向,长 60 m,跨度 8 m,脊高 3.5 m,北墙高 2.5 m。地下水式 GSHPs 为单井抽水多井回灌地下水式,主要在冬季为实验站内的办公楼和温室设施提供辅助供暖。系统主要由 3 个部分组成:地下水抽水和回水循环,热泵机组制冷剂工作循环和循环水路与温室风机盘管末端组成的循环。机组采用丹佛斯 (Danfoss) 涡旋式压缩机 (HE450),单台制热工况下输入电功率为 23.82 kW,共 4 台;制冷剂为 R22 (Freon22, 二氟一氯甲烷),充注总量为 58 kg;冷凝器是卧式壳管式,干式蒸发器,毛细铜管节流阀。温室以及 GSHPs 详细参数参见文献[6]和[23]。

1.2 浅层地热传递 LCA 研究方法

本研究以 2007—2008 年采暖期 GSHPs 温室供

暖研究为例,采用 LCA 方法对系统的碳排放足迹进行分析。基于 LCA 分析的系统界定可由图 1 表示。



注: ①为浅层地能存储 Shallow geothermal energy from sun; ②为浅层地热提取 Energy extraction; ③为能量提升 Energy promotion; ④为温室供暖 Heating greenhouse。

图 1 浅层地热能温室地源热泵系统 GSHPs 中的传递
Fig.1 Transportations of shallow geothermal energy in ground source heat pump greenhouse heating system

本研究以浅层地热能研究对象,研究范围包括浅层地热能的存储形成 (SGE 存储),人工提取 (SGE 提取),热泵机组提升 (SGE 提升) 和给温室供暖 (SGE 供暖) 等环境,如图 1 中①~④表示每个阶段。

本文中资源消耗为煤炭或天然气,能源消耗统为电能。电能消耗主要是热泵机组中压缩机的耗能,潜水泵,循环水泵和回灌水泵的耗能以及风机盘管末端的耗能等,碳排放主要为 CO_2 和少量其他温室气体。浅层地能传递过程的碳足迹分析如图 2 所示。

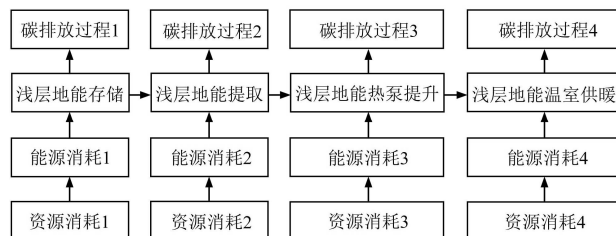


图 2 地源热泵系统供暖 GSHPs 的碳足迹分析示意图
Fig.2 Schematic diagram of carbon footprint analysis on ground source heat pump system

1.3 GSHPs 碳足迹分析方法

国际能源署 (International Energy Agency, IEA) 在《2008 世界能源展望》^[24]中发表的统计数据表明在 2006 年全世界电能中约 41%来源于燃煤发电,

20%来源于燃气发电。此外，水电占 16%，核电占 15%，燃油占 6%，其他清洁能源占 2%左右。而同期中国的电力结构为：燃煤火电 83%，水电 15%，燃气、燃油、核能以及其他能源共约 2%。其中燃气发电技术近年来在中国受到越来越多的重视，发展较快，因此本研究以燃煤和燃气 2 种火力发电为参照，分析 GSHPs 所消耗的电能发电过程中温室气体的排放总量。燃煤或燃气发电过程中的碳排放可参照公式 (1) ~ (4) 计算分析得出^[25-26]。

燃煤火力发电厂和燃气的碳排放情况：

$$1 \text{ kgC} + 2.67 \text{ kgO}_2 \xrightarrow{\text{充分燃烧}} 3.67 \text{ kgCO}_2 + 29.3 \text{ MJ热能} \quad (1)$$

燃气火力发电厂的碳排放情况：

$$1 \text{ kg CH}_4 + 4 \text{ kg O}_2 \xrightarrow{\text{充分燃烧}} 2.75 \text{ kgCO}_2 + 2.25 \text{ kgH}_2\text{O} + 52.6 \text{ MJ热能} \quad (2)$$

$$EC_k = E_k \gamma_k \quad (3)$$

$$EC_{k,d,s} = \frac{EC_k}{AD} \quad (4)$$

式中： EC_k 是系统 k (CFPP 或者 GFPP) 的 GHG (greenhouse gas) 排放量，kg； E_k 是系统 k (CFPP 或者 GFPP) 能源消耗量，kg； γ_k 是系统 k (CFPP 或者 GFPP) 的 GHG 排放量系数，即燃烧每 kg 燃料 (C 或者 CH_4) 后 CO_2 的排放量，kg/kg，本研究中对于 CFPP 和 GFPP 来说， γ_k 分别是 3.67 和 2.75 kg/kg； $EC_{k,d,s}$ 系统 k 单位时间供给单位面积建筑所排放的 GHG 质量，kg/($\text{m}^2 \cdot \text{d}$)； A 为温室面积， m^2 ； D 为供暖天数，d。根据文献[27-28]报道的热电效率，燃气供暖的效率约为燃煤供暖的 1.55 倍。

煤炭和天然气的电力生产消耗量，如公式 (5)^[26]：

$$E_{pp\chi} = \frac{3600 E_e}{CV_\chi R_\chi} \quad (5)$$

式中： $E_{pp\chi}$ 是标准状态下 (0°C ，1 个大气压) 燃煤或燃气发电厂消耗能源的质量，kg 或 t； E_e 为电能消耗，kW·h； χ 代表燃煤或者燃气； CV_χ 是燃煤或者燃气系统的热电转化率； R_χ 燃煤或者燃气系统的热电损失。本研究中假定燃煤发电厂 (CFPP) 和燃气电厂 (GFPP) 的热电效率^[28] (扣除电力输送和自身消耗) 分别为 0.27 和 0.42。

全球变暖潜能 (global warming potential, GWP) 即二氧化碳当量排放 ($\text{CO}_2 \text{ eq.}$) 是衡量温室气体排放对全球变暖的贡献水平的一个重要指标^[29-30]。根据“京都议定书”中规定的 6 种主要温室气体，GSHPs 系统的 GWP 可由公式 (6) 计算并参照 IPCC (Intergovernmental Panel for Climate Change) 公布

的温室气体当量因子 (如表 1) 来完成^[26]。

$$EM_{\text{gshp}} = \sum_{x=1}^4 \sum_{y=1}^6 E_{xy} \text{GWP}_y \quad (6)$$

式中： EM_{gshp} 是本研究中 GSHPs 在温室供暖过程中的 GWP 贡献总量，以 CO_2 计，kg； x 是 SGE 经历的 4 个阶段； y 是 IPCC 公布的 6 种温室气体当量因子； E_{xy} 是浅层地能在第 x 阶段中排放的 y 因子数量，kg； GWP_y 是因子 y 的温室气体排放当量，kg/kg。

表 1 温室气体当量因子
Table 1 Greenhouse gas equivalent factor

排放物 Pollutants	全球变暖潜能 GWP Global warming potential/($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)		
	20 a	100 a	500 a
CO_2	1	1	1
CH_4	72	25	7.6
N_2O	289	298	153
HFCs (HFC-134a 四氟乙烷)	3830	1430	435
PFCs (PFC-116 六氟乙烷)	8630	22800	32600
SF6	16 300	22 800	32 600

注：引自参考文献[20]，以 CO_2 当量计。

Note: Data were cited from reference [20], expressed in $\text{CO}_2 \text{ eq.}$

由于本文研究的对象是 SGE，因此不涉及各类建筑材料，机械制造材料等的生成，故而只有 CO_2 排放是 SGE 供暖过程中涉及的温室气体。然而 GSHPs 热泵机组的制冷材料为 R22 (HFC-22，二氟一氯甲烷) 制冷剂，制冷剂在使用过程中不可避免会发生泄漏等问题，因此本研究考虑 R22 的泄露量为每年 2%^[19]。R22 虽然不是“京都议定书”规定的 6 种温室气体之一，但是它与 HFC-134a (或 R134a 四氟乙烷) 具有相似的 GWP 水平，R22 的 GWP 水平约为 R134a 的 1.28 倍^[31]，故本研究在对 R22 的 GWP 分析过程中参照 R134a 的因子水平和两者的关系水平进行计算。温室供暖的碳足迹为实际供暖耗能的直接 CO_2 排放和制冷剂泄露产生的 CO_2 当量 ($\text{CO}_2 \text{ eq.}$) 排放之和。

2 结果与分析

2.1 温室供暖 CO_2 排放总量

试验温室采暖期内 GSHPs 供给温室的热量为 149 270.4 MJ，同时消耗 10 826.1 kW·h 的电能。基于 CFPP 发电情况下，日光温室的能耗、资源消耗以及以每天每平方米温室的供暖碳排放作为 LCA 功能单位的分析结果如表 2 所示。日光温室基于 CFPP 和 GFPP 情况下的 CO_2 总排放量 ($\text{CO}_2\text{-eq.}$) 分别为 17.8 和 4.9 t。

本研究中 LCA 碳足迹分析以单位面积温室每天的碳排放为参照即功能单位进行，采用不同电力生

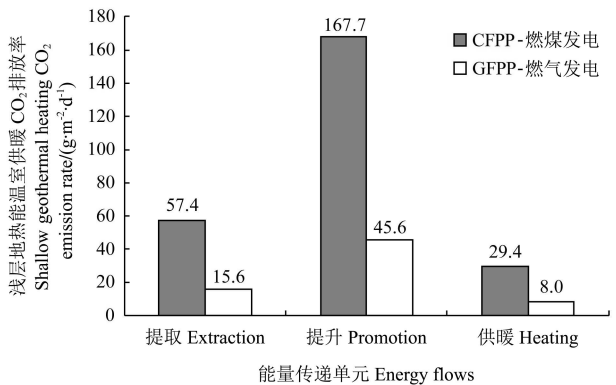
产方式和不同温室的供暖碳足迹功能单位如图 3 所示。供暖期内基于燃煤发电条件下单位面积日光温

室 GSHPs 供暖的碳足迹分别是 254.5 g/(m²·d)，为燃气发电条件下温室碳足迹 69.2 g/(m²·d)的 3.7 倍。

表 2 地源热泵供暖电能、资源消耗及 CO₂ 排放
Table 2 Consumptions of electricity, resource and CO₂ emission of heating GSHPs greenhouse

能量传递途径 Energy flows	燃煤发电 (CFPP) Coal fired power producing			燃气发电 (GFPP) Gas fired power producing		
	电能消耗/(kW·h)	煤炭消耗/kg	CO ₂ 排放/kg	电能消耗/(kW·h)	煤炭消耗/kg	CO ₂ 排放/kg
地热能提取 SGE extraction	2440.6	1095.5	4020.3	2440.6	397.7	1093.7
地热能提升 SGE promotion	7135.5	3202.7	11754	7135.5	1162.8	3197.6
温室末端 Greenhouse	1250.3	561.2	2059.5	1250.3	203.7	560.3
总量 Inventory	10826	4859	17834	10826	1764	4852

注：日光温室面积为 480 m²，供暖时间为 146 d。
Note: Area of greenhouse was 480 m² and the heating lasted 146 d.



注：CFPP-燃煤发电；GFPP-燃气发电。下同。
Note: CFPP- coal fired power plant; GFPP-gas fired power plant. The same as blow.

图 3 日光温室地源热泵系统供暖的 CO₂ 当量排放
Fig.3 CO₂ equivalent emission from solar greenhouse heating with GSHPs

2.2 GSHPs 供暖碳足迹

本研究中日光温室 GSHPs 供暖的碳足迹为电力生产 CO₂ 的直接排放量和 R22 当量 (CO₂-eq.) 温室气体排放量的总和。本研究中 R22 的年泄露量 (排放量) 约为 1.16 kg/a (总量的 2%)，根据其 CO₂ 的当量因子计算，GSHPs 温室热环境调控运行过程中的 R22 的温室气体排放量为 5 686.8 kg/a。由于本研究供暖的时间 (GSHPs 系统运行时间) 为 146 d，所以 GSHPs 实际的 R22 当量温室气体排放量约为 2 274.7 kg，根据热量等比分配原则给日光温室 (480 m²) 和农业园区另一栋连栋玻璃温室 (756 m², 单位面积热负荷约为日光温室的 3.45 倍) 的温室气体当量排放分别为 455.8 和 1 828.9 kg^[26]。如表 3 所示，GSHPs 在基于 CFPP 和 GFPP 电力条件下，日光温室供暖碳足迹 (总排放量) 分别为 18.3 和 5.3 t。基于 CFPP 和 GFPP 情况下，温室供暖碳

足迹中 R22 的贡献率分别约为 2.4%和 8.4%。CFPP 和 GFPP 情况下，日光温室单位面积单位时间供暖碳足迹分别为 260.8 和 75.6 g/(m²·d)。

表 3 基于生命周期分析方法计算的地源热泵系统温室供暖碳足迹 (CO₂ 当量)

Table 3 Carbon footprint calculation of GSHPs greenhouse heating based on life cycle assessment method (CO₂ eq.)

研究指标 Study index	CFPP- GSHPs 供暖碳足 迹/kg	CFPP-GSHPs 单位面积单位 时间供暖碳足 迹/(g·m ⁻² ·d ⁻¹)	GFPP- GSHPs 供暖碳足 迹/kg	CFPP-GSHPs 单位面积单位 时间供暖碳足 迹/(g·m ⁻² ·d ⁻¹)
地热能提取 Shallow geothermal energy extraction	4 020.3	57.4	1 093.7	15.6
地热能提升 Shallow geothermal energy promotion	12 199.8	174.1	3 643.4	52.0
地热能供暖 Shallow geothermal energy heating	2 059.5	29.4	560.3	8.0
碳足迹总量 Total carbon footprint	18 279.8	260.8	5 297.4	75.6

注：CFPP-燃煤发电；GFPP-燃气发电。日光温室面积为 480 m²，供暖时间为 146 d。
Note: CFPP- coal fired power plant; GFPP-gas fired power plant. The area of greenhouse was 480 m² and the heating lasted 146 d.

荷兰 Venlo 型温室是目前世界范围内应用较为广泛的园艺设施，在欧洲大部分该类型温室供暖以天然气为主。Torrellas 等采用 LCA 方法分析了 Venlo 温室燃气供暖生产西红柿的碳足迹^[32]，研究得出每千克西红柿供暖的碳足迹为 1.82 kg/kg (基于 96%的天然气燃烧利用热效率)。目前中国日光温室的西红柿年产量约为 30 kg/(m²·a) (采收期 270~280 d，假定单株占地面积为 1 m²)^[33]。本研究 146 d 供暖期内产量约占全年产量一半，即 15 kg，可分析计算出基于燃煤和燃气发电情况下，生产每

千克西红柿的地源热泵供暖碳足迹分别为 2.53 (基于 80% 的天然气的燃烧利用热效率) 和 0.74 kg/kg (基于 42% 天然气的热电效率^[28])。日光温室中 CFPP 驱动 GSHPs 供暖的碳足迹是 Venlo 型温室天然气供暖碳足迹的 1.39 倍, 然而采用 GFPP, 日光温室 GSHPs 供暖的碳足迹仅为 Venlo 型温室供暖的 41%。

2.3 GSHPs 碳足迹-全球变暖潜能

碳足迹最终的影响可以由全球变暖潜能 GWP ($\text{CO}_2\text{-eq.}$) 表示, 本研究根据 CO_2 在不同电力生产中的排放情况和 R22 制冷剂的 $\text{CO}_2\text{-eq}$ 排放计算出 GSHPs 在给日光温室供暖的 GWP 值。基于 CFPP 和 GFPP 条件下, GSHPs 日光温室供暖在 20 a 和 100 a 环境影响情况下碳足迹全球变暖潜能 (GWP) 为 18.29 和 18.00 t, 5.31 和 5.02 t, 如图 4 所示。此外, 基于 100a 的计算结果比 20a 的计算值分别减少了 1.6% (CFPP) 和 5.4% (GFPP)。温室气体中 CO_2 一般不随时间的推移而发生变化, 但是 R22 在环境中处于消散状态, 随时间的积累而减少。此外, 单位面积时间内温室 GSHPs 供暖碳足迹分别由基于 20 a 的 261 $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ (CFPP) 和 76 $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ (GFPP) 降低为 100 a 的 257 $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ (CFPP) 和 72 $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ (GFPP)。

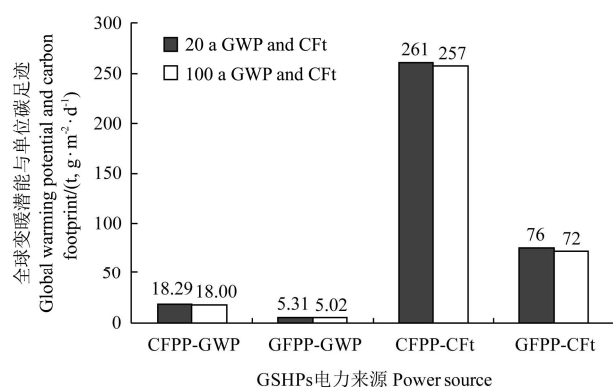


图 4 地源热泵系统温室供暖全球变暖潜能值 (GWP) 与温室单位面积时间供暖碳足迹 (CFt)

Fig.4 Global warming potential (GWP) values and carbon footprint (CFt) based on per square meters greenhouse floor and per day of ground source heat pump system (GSHPs) heating

3 结论与建议

1) 2007—2008 年供暖期内地源热泵系统 (ground source heat pump system, GSHPs) 在基于燃煤发电 (coal fired power producing, CFPP) 和燃气发电 (gas fired power producing, GFPP) 下, 在北京地区 1 个 480 m^2 的日光温室供暖碳足迹分别为 18.3 和 5.3 t, 温室单位面积单位时间供暖碳足迹分别为 260.8 和 75.6 $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$;

2) 基于 CFPP 和 GFPP 电力条件下, 不同电力

GSHPs 供暖过程中制冷压缩机组的 R22 制冷剂泄露的贡献率分别约为 2.4% 和 8.4%。减少制冷剂泄露以及开发使用新型环保型制冷剂将有助于减少系统供暖的碳足迹;

3) 基于 100 a 环境影响的燃煤和燃气发电技术条件下, GSHPs 在温室供暖过程中的全球变暖潜能 (global warming potential, GWP) CO_2 当量分别为 18.0 和 5.0 t, 燃煤发电 GSHPs 驱动供暖的碳足迹是燃气发电的 3.6 倍。单位时间每平方米温室的 GWP (以 CO_2 计) 分别为 257 和 72 $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。此外, 基于 100 a 的 GWP 计算结果比 20a 的计算值分别减少了 1.6% (CFPP) 和 5.4% (GFPP);

4) 日光温室中 CFPP 驱动 GSHPs 供暖的碳足迹是 Venlo 型温室天然气供暖碳足迹的 1.39 倍, 然而采用 GFPP, 日光温室 GSHPs 供暖的碳足迹仅为 Venlo 型温室供暖的 41%。

本研究中是以浅层地能 (shallow geothermal energy, SGE) 为研究对象, 没有将温室建筑、供暖设备的构造材料等参数的生命周期分析 (life cycle assessment, LCA) 分析考虑进来。在今后的研究中将通过分析温室建筑构造材料以及供暖系统设备中的构造材料包括玻璃、金属、塑料、黏土砖等不同材料各自的使用量和 LCA 方法来分析不同温室供暖过程中总体的碳足迹。

[参 考 文 献]

- [1] Chai Lilong, Ma Chengwei, Ni Jiqin. Performance evaluation of ground source heat pump system for greenhouse heating in northern China[J]. Biosystems Engineering, 2012, 111(1): 107—117.
- [2] Ozgener O, Hepbasli A. Experimental investigation of the performance of a solar-assisted ground-source heat pump system for greenhouse heating[J]. International Journal of Energy Research, 2005, 29(3): 217—231.
- [3] 江耀, 卜云龙, 周增产, 等. 浅层地能热泵技术在农业设施中的应用研究[J]. 内蒙古农业大学学报, 2007, 28(3): 28—36.
Jiang Yao, Bu Yunlong, Zhou Zengchan, et al. Application research of geothermal energy in agricultural installations[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2007, 28(3): 28—36. (in Chinese with English abstract)
- [4] 方慧, 杨其长, 孙骥. 地源热泵——地板散热系统在温室冬季供暖中的应用[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 145—149.
Fang Hui, Yang Qichang, Sun Ji. Application of ground-source heat pump and floor heating system to greenhouse heating in winter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24 (12): 145—149. (in Chinese with English abstract)
- [5] 方慧, 杨其长, 孙骥. 地源热泵在日光温室中的应用[J].

- 西北农业学报, 2010, 19(4): 196—200.
- Fang Hui, Yang Qichang, Sun Ji. Application of ground-source heat pump in greenhouse[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2010, 19(4): 196—200. (in Chinese with English abstract)
- [6] 柴立龙, 马承伟, 张义, 等. 北京地区温室地源热泵供暖能耗及经济性分析[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(3): 249—254.
- Chai Lilong, Ma Chengwei, Zhang Yi, et al. Energy consumption and economic analysis of ground source heat pump used in greenhouse in Beijing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2010, 26(3): 249—254. (in Chinese with English abstract)
- [7] 黄进. 碳标识和环境标识[J]. *标准科学*, 2010(7): 4—8.
- [8] Boulos P F, Bros C M. Assessing the carbon footprint of water supply and distribution systems[J]. *Journal American Water Works Association*, 2010, 102(11): 47—54.
- [9] Klemes J J, Lam H L. Heat integration, energy efficiency, saving and security[J]. *Energy*, 2009, 34(10): 1669—1673.
- [10] Grunberg J, Nieberg H, Schmidt T G. Carbon footprints of food: A critical reflection[J]. *Landbauforschung*, 2010, 60(2): 53—72.
- [11] Bala A, Raugi M, Benveniste G, et al. Simplified tools for global warming potential evaluation: When 'good enough' is best[J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2010, 15(5): 489—498.
- [12] 耿涌, 董会娟, 郝凤明, 等. 应对气候变化的碳足迹研究综述[J]. *中国人口·资源与环境*, 2010, 20(10): 6—12.
- [13] Luo D X, Hu Z S, Choi D G, et al. Life cycle energy and greenhouse gas emissions for an ethanol production process based on blue-green algae[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(22): 8670—8677.
- [14] IPCC. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[M]. Washington D. C.: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006.
- [15] Barati M. Energy intensity and greenhouse gases footprint of metallurgical processes: A continuous steelmaking case study[J]. *Energy*, 2010, 35(9): 3731—3737.
- [16] Lam J C, Chan W W. Life cycle energy cost analysis of heat pump application for hotel swimming pools[J]. *Energy Conversion and Management*, 2001, 42(11): 1299—1306.
- [17] Hedegaard K, Thy K A, Wenzel H. Life cycle assessment of an advanced bioethanol technology in the perspective of constrained biomass availability[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(21): 7992—7999.
- [18] Debolt S, Campbell J E, Smith R, et al. Life cycle assessment of native plants and marginal lands for bioenergy agriculture in Kentucky as a model for south-eastern USA[J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2009, 1(4): 308—316.
- [19] Heikkila K. Environmental evaluation of an air-conditioning system supplied by cooling energy from a bore-hole based heat pump system[J]. *Building and Environment*, 2008, 43(1): 51—61.
- [20] Ardente F, Beccali G, Cellura M, et al. Life cycle assessment of a solar thermal collector: Sensitivity analysis, energy and environmental balances[J]. *Renew Energy*, 2005, 30(7): 1031—1054.
- [21] Ardente F, Beccali G, Cellura M, et al. Energy performances and life cycle assessment of an Italian wind farm[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, 12(1): 200—217.
- [22] 尚春静, 张智慧. 建筑生命周期碳排放核算[J]. *工程管理学报*, 2010, 24(1): 7—11.
- Shang Chunjing, Zhang Zhihui. Assessment of life-cycle carbon emission for buildings[J]. *Journal of Engineering Management*, 2010, 24(1): 7—11. (in Chinese with English abstract)
- [23] 柴立龙, 马承伟, 张晓慧, 等. 地源热泵温室降温系统的试验研究与性能分析[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(12): 150—154.
- Chai Lilong, Ma Chengwei, Zhang Xiaohui, et al. Experimental investigation and performance analysis on ground source heat pump system for greenhouse cooling[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2008, 24(12): 150—154. (in Chinese with English abstract)
- [24] IEA. World Energy Outlook[M/OL]. Paris, France: International Energy Agency, 2008[2013-05-29]. <http://www.worldenergyoutlook.org/media/weo/2008-1994/weo2008>.
- [25] Jones J C. Atmosphere Pollution. 2008[2013-05-23] [M/OL]. www.bookboon.com.
- [26] 柴立龙. 温室地源热泵的应用研究与性能分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2011.
- [27] 石蓓, 高兀, 石楚. 我国天然气发电的相关问题及建议[J]. *天然气技术*, 2008, 2(1): 64—67.
- [28] 张志良, 龙云. 天然气发电在中国的应用前景分析[J]. *浙江电力*, 2003(5): 8—11.
- [29] Verbeeck G, Hens H. Life cycle inventory of buildings: A contribution analysis[J]. *Building and Environment*, 2010, 45(4): 964—967.
- [30] Boguski T K. Life cycle carbon footprint of the National Geographic magazine[J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2010, 15(7): 635—643.
- [31] 张金城. 简明制冷空调工手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [32] Torrellas M, Assumpcio A, Juan I M. An environmental impact calculator for greenhouse production systems[J]. *Journal of Environmental Management*, 2013(118): 186—195.
- [33] 宋胭脂, 张建平, 宋海涛, 等. 现代温室番茄产量规律及其与环境因子的关系[J]. *甘肃农业大学学报*, 2006, 41(6): 38—42.
- Song Yanzhi, Zhang Jianping, et al. Tomato production laws and its correlation to the environmental factors in modern greenhouse[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2006, 41(6): 38—42. (in Chinese with English abstract)

Carbon footprint of ground source heat pump system in heating solar greenhouse based on life cycle assessment

Chai Lilong^{1,2}, Ma Chengwei³, Liu Mingchi^{1,2}, Wang Baoju^{1,2}, Wu Zhanhui^{1,2}, Xu Yong^{1,4}

(1. *National Engineering Research Center for Vegetables, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China;*

2. *Key Laboratory of Urban Agriculture (North), Ministry of Agriculture, Beijing 100097, China;*

3. *College of Water Resource & Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;*

4. *Key Laboratory of Biology and Genetic Improvement of Horticultural Crops (North China), Ministry of Agriculture, Beijing 100097, China)*

Abstract: The Chinese solar greenhouse, characterized by east-west orientation, a transparent camber south roof, and a solid north roof and east and west walls, is utilized primarily in horticulture in northern China. This design of greenhouse can keep the sheltering plants from freezing in winter because of the “greenhouse effect”. However, the healthy growing of plants still needs assisted heating especially during winter nights. The coal-fired heating system (CFHs) and the natural gas-fired heating system (GFHs) both have been widely applied to heat greenhouses. However, the conventional fossil energy sources, such as coal and natural gas, are non-renewable and are the major greenhouse gas (GHG) contributors. The overusing of fossil fuel in agricultural production has been directly or indirectly related to the global climate change, environmental pollution, and energy crisis. Therefore, renewable and clean energy, such as solar, geothermal, and shallow geothermal has been increasingly applied for greenhouse heating or cooling across the world. Ground source heat pump (GSHP) technology has dual functions in heating and cooling. It is one of the most rapidly growing green technologies for heating and air-conditioning in recent years. The GSHP application for solar greenhouse heating has proven to have a high primary energy ratio or coefficient of performance (COP) in previously studies. However, the environmental performance of the GSHP in heating solar greenhouse, such as its carbon footprint, is still unknown. Systematic and long-term study of the specific GSHP greenhouse-heating was required to evaluate its carbon footprint based on life cycle assessment (LCA) method. The GSHP in a Chinese solar greenhouse was studied to evaluate its environmental performance in greenhouse heating. The environmental performance of the GSHP was analyzed based on the field test data and the performance analysis models that were developed in this study. According to the study, in a 480 m² Chinese solar greenhouse during the winter heating period, the GSHP demonstrated stable heating effects. The shallow geothermal energy utilized by the GSHP, in the processes of energy storage, extraction, enhancement of refrigeration compression cycles, and greenhouse heating, were studied to analyze the greenhouse gas (GHG) emission inventory and emission levels based on per square meter of the greenhouse floor. An analysis method based on LCA was developed for estimating the carbon footprint of Chinese solar greenhouse heating with GSHPs in this study, the carbon footprints of a GSHP greenhouse heating system operating on coal fired power and gas fired power were analyzed and calculated according to the data collected from a solar greenhouse heated in the Beijing area. Meanwhile, the variation of global warming potential (GWP, CO₂ emission equivalent or CO₂-eq) of GSHP in heating a Chinese solar greenhouse from 20 to 100 a were analyzed. The GWP of GSHP greenhouse heating operating on coal fired power and gas fired power were 257 g/(m²·d) and 72 g/(m²·d). Meanwhile, the total GWP of 100a is reduced by 1.6% and 5.4% from the calculation of 20 a. Comparing the carbon footprints between solar greenhouse heating with GSHP and Venlo greenhouse heating with natural gas, the carbon footprint of solar greenhouse GSHP heating was 39% more than that of Venlo greenhouse heating when GSHPs was operating on coal fired power, but the carbon footprint of solar greenhouse heating will be only 41% of Venlo greenhouse heating when GSHPs were operating on gas fired power. The GSHP heating test was focused on a Chinese solar greenhouse in this study to estimate the environmental performance; however, the carbon footprint calculation and analysis methods are applicable to different styles of multi-span greenhouse GSHP heating analysis.

Key words: greenhouses; heating; carbon dioxide; ground source heat pump; carbon footprint; life cycle assessment

(责任编辑: 王 柳)