

吴文丽, 谢英添, 董晓鸣, 等. 塑料中棚番茄有机肥与化肥配施能耗与温室气体排放评估[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(6): 1516-1525.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2021.06.021

塑料中棚番茄有机肥与化肥配施能耗与温室气体排放评估

吴文丽¹, 谢英添¹, 董晓鸣¹, 尤 春²

(1. 江苏联合职业技术学院盐城生物工程分院, 江苏 盐城 224051; 2. 盐城市蔬菜研究所, 江苏 盐城 224002;)

摘要: 以江苏省盐城市塑料中棚番茄生产系统为研究对象, 使用生命周期评价法分析比较常规施肥和5种使用生物有机肥或菌菇渣部分、全部替代尿素有机肥与化肥配施条件下番茄单位产量能耗和温室气体排放值。结果表明, 6种施肥方案下, 每生产1 000 kg番茄的能耗为2 264~3 094 MJ, 温室气体排放值为150~204 kg, CO₂-eq。设施建设对整个系统的环境影响要高于栽培管理。通过提高建材的使用寿命, 合理减少建材使用量或提高番茄产量可达到节能减排的目标。常规施肥条件下, 尿素的生产与施用所造成的能源消耗和温室气体排放值均占栽培管理的40%以上, 本研究中利用有机肥替代尿素的5种有机肥与化肥配施方案, 与常规施肥相比, 节能减排效果最佳的是生物有机肥氮全部替代尿素氮的施肥方案, 其次是菌菇渣与生物有机肥氮分别替代25%尿素氮的施肥方案。

关键词: 能耗; 温室气体排放; 番茄; 中棚

中图分类号: S641.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2021)06-1516-10

Evaluation of energy consumption and greenhouse gas emissions under combined application of organic fertilizer and chemical fertilizer in plastic greenhouse tomato production

WU Wen-li¹, XIE Ying-tian¹, DONG Xiao-ming¹, YOU Chun²

(1. Yancheng Bioengineering Branch of Jiangsu Union Technical Institute, Yancheng 224051, China; 2. Yancheng institute of vegetables, Yancheng 224002, China)

Abstract: Taking the plastic shed tomato production system as the research object in Yancheng, Jiangsu province, the bio-organic fertilizer or mushroom residue was used to partially or completely replace urea for formula fertilization. Energy consumption and greenhouse gas emissions of the tomato production system in greenhouse under six kinds of fertilization schemes were assessed by using life cycle assessment (LCA). The results showed that environmental impacts of producing 1 000 kg tomatoes were 2 264~3 094 MJ for energy consumption, 150~204 kg, CO₂-eq for greenhouse gas emissions. The environmental impact of horticultural facilities construction on tomato production system was higher than that of tomato cultivation and management. By increasing the service life of various building materials, reducing building materials consumption or increasing the yield of tomato per unit area, the goal of energy saving and emission reduction could be achieved. The value of energy consumption and greenhouse gas emissions caused by urea production and application accounted for more than 40% of tomato cultivation and management under conventional fertilization. In this study, the best energy-saving and emission-reduction effect was the formula fertiliza-

tion for completely replacing urea with bio-organic fertilizer of five formula fertilization schemes, followed by the formula fertilization for respectively replacing 25% urea with mushroom residue and bio-organic fertilizer.

Key words: energy consumption; greenhouse gas emissions; tomato; greenhouse

收稿日期: 2021-08-30

基金项目: 江苏现代农业(蔬菜)产业技术体系项目[JATS(2020)204]

作者简介: 吴文丽(1989-), 女, 江苏扬州人, 硕士, 讲师, 主要研究方向为园艺作物栽培技术与推广。(E-mail) 874107050

@qq.com

通讯作者: 尤 春, (E-mail) 38724322@qq.com

《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》中提出,强化绿色导向,建立高标准农田工程^[1],即满足农作物高产栽培、节能节水等要求,达到持续高产稳产、优质高效和安全环保的目标^[2]。设施农业是实现农业现代化的重要举措^[3],近20年,中国设施农业生产规模逐年扩大,产量和效益获得巨大提升。江苏作为中国设施蔬菜主产区之一,设施农业面积达 $7.58 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ^[4],占耕地面积的16%以上,占比居全国第一^[5]。设施农业主要集中在徐州、盐城、宿迁、淮安,设施类型以中高棚为主,占71%^[6-7]。设施蔬菜种类主要有辣椒、番茄、黄瓜、茄子。2019年,全世界番茄种植面积已经超过蔬菜种植面积的15%^[8]。2021年中国设施番茄栽培面积 $7.78 \times 10^5 \text{ hm}^2$,位居中国设施蔬菜栽培面积第一位^[9]。

设施蔬菜生产与传统露地生产相比,除需建立园艺设施外,普遍依赖化肥来提高作物产量,尤其是化学氮肥。中国是化学氮肥生产和使用最多的国家之一^[10],据调查,2005年,氮肥生产造成的温室气体排放占全国温室气体排放总量4.3%^[11]。尿素作为常用的化学氮肥之一,其生产、施用引起的能源消耗和温室气体排放量最高。目前设施栽培普遍存在肥料利用率低下问题,造成土地板结、盐渍化等土壤退化现象,制约土壤的可持续利用^[12-15]和设施蔬菜的产量与品质^[16]。

有机物料替代技术作为一种国家助推的化学肥料减量的方法,是一种能提高土壤有机质与速效养分含量,调节土壤酶活性^[17-21],防治土传病害^[22-23],增强土壤可持续生产力,实现农业绿色发展的关键技术^[24]。曹健^[25]、鲁伟丹等^[26]、魏文良等^[27]、任科宇等^[28]、Serme等^[29]等开展了有机物料替代技术在大田作物小麦、玉米、水稻、高粱上的应用研究,结果表明,针对不同作物,采用适宜比例的有机物料替代化肥,可以改良土壤,提高作物生产力,促进作物生产系统的可持续性,但该技术设施蔬菜方面的应用研究较少。

生物有机肥是指特定功能微生物与主要以动植物残体(如畜禽粪便、农作物秸秆等)为来源并经无害化处理、腐熟的有机物料复合而成的一类兼具微生物肥料和有机肥料效应的肥料^[30],是有机物料替代技术中常用的一种生物菌肥,能有效改善土壤酶活性和微生物菌落代谢活动,实现作物稳产甚至高产^[31-34]。

食用菌作为现代农业的重要组成部分,已经成为

仅次于粮、菜、果、油的第五大类作物^[35],目前中国食用菌生产总量位居世界第一^[36]。调查结果显示,每生产1 kg的食用菌约产生3.25 kg菌菇渣^[37]。因此伴随着食用菌产业的迅速发展,菌菇渣数量也在逐年增加,传统的处理方法是燃烧或者丢弃,对环境造成很大的污染。菌菇渣是一类含有丰富有机物以及多种矿质元素的农业废弃物,国内外学者将其作为一种有机物料进行了还田研究,发现施用菌菇渣可以增强土壤通气性和保水性,改变土壤团粒结构和容质量等物理性质,同时能显著增加土壤肥力^[38-42],并对设施栽培土壤中有害菌的繁殖有较好的抑制作用,提高大田作物、设施蔬菜的产量并提升其品质^[43-44]。

生命周期评价法(LCA, Life cycle assessment)是一种对某项产品、工艺或者服务整个生命周期中输入、输出及潜在环境的汇编与评价,是一种全面立体的评价方法^[45],现已被国内外学者广泛应用于农业系统的研究工作中。Maurizio等^[46]利用生命周期评价法估算了意大利辣椒、瓜类、西红柿、樱桃番茄和西葫芦设施栽培所需能耗和对环境的影响,并指出蔬菜包装和建造温室对环境造成的负荷较大;Benyamin等^[47]分析比较了伊朗伊斯法罕省温室黄瓜和番茄对环境造成的影响,结果显示,生产温室番茄对环境的影响小于温室黄瓜;Maurizio等^[48]评估了地中海地区几种设施栽培作物生产过程中的能源消耗和环境负担,并筛选出最佳的生产方案。国内王效琴等^[49]、郭金花^[50]、徐强等^[51]评价了中国部分地区设施蔬菜生产造成的环境影响,但评估有机物料替代技术下塑料中棚番茄生产造成的环境影响的研究相对较少。

本研究以江苏省盐城市塑料中棚番茄生产系统为研究对象,选取生物有机肥和菌菇渣2种有机肥料,部分或全部替代高能耗高排放的尿素,利用生命周期评价法评估常规施肥和5种有机肥料与化学肥料配合施用方案生产单位质量番茄的能源消耗和温室气体的排放情况,以期缓解设施栽培对环境造成的影响提出合理建议。

1 材料与方法

1.1 研究区域

试验点为江苏省盐城市亭湖区江苏联合职业技术学院盐城生物工程分院设施蔬菜种植基地,该区域常年太阳辐射总量为 $1.162 \times 10^5 \sim 1.210 \times 10^5 \text{ cal/cm}^2$,无霜期为209~218 d,平均气温为13.7~

14.4 ℃,年平均降水量为910~1 060 mm。按照盐城地区1年种植2茬番茄的耕作方式进行中棚栽培。塑料中棚为南北走向,长33 m,宽8 m。各处理小区畦宽1.2 m、长11.0 m,区组排列,重复3次。番茄采取双行种植方式,每小区定植44株。第1茬于2020年3月10日定植,6月2日开始采收,7月15日拉秧。第二茬于2020年8月26日定植,11月3日开始采收,12月30日拉秧。

1.2 试验方案和数据来源

根据对盐城地区设施番茄施肥情况的调查,按照常规施肥量,在保证氮、磷、钾养分水平($N\ 273\ \text{kg}/\text{hm}^2$, $P_2O_5\ 315\ \text{kg}/\text{hm}^2$, $K_2O\ 435\ \text{kg}/\text{hm}^2$)一致的情况下,试验设置6种施肥方案,分别为常规施肥、菌菇渣氮替代50%尿素氮($MR_{50\%}$)、菌菇渣氮替代100%尿素氮($MR_{100\%}$)、生物有机肥氮替代50%尿素氮($BF_{50\%}$)、生物有机肥氮替代100%尿素氮($BF_{100\%}$)、菌菇渣氮与生物有机肥氮分别替代25%尿素氮($MR_{25\%}+BF_{25\%}$)。全部有机肥和部分化肥于番茄定植前作基肥一次性施入,地膜覆盖,滴灌,番茄初果期追施相同质量复合肥。试验于2020年3月至12月在江苏联合职业技术学院盐城生物工程分院蔬菜种植基地塑料中棚中进行。供试番茄品种春季为京粉201,秋季为粉都312。供试生物有机肥

氮含量为4.00%, P_2O_5 含量为0.75%, K_2O 含量为1.25%,供试菌菇渣为杏鲍菇菌菇渣,氮含量为1.28%, P_2O_5 含量为0.13%, K_2O 含量为0.81%,化学肥料分别为尿素(氮含量为46%)、过磷酸钙(P_2O_5 含量为12%)、农用硫酸钾(K_2O 含量为50%)和三元复合肥(氮、磷、钾含量均为15%)。试验过程中详尽记录建设设施构筑物的各种建材(钢材、薄膜、遮阳网以及附属配件)的种类、数量和人工数,不同施肥方案番茄产量,番茄栽培管理过程中各种肥料、农药、人工等投入量。

1.3 能耗和温室气体排放评估

采用生命周期法对设施番茄生产系统不同施肥方案下的能耗和温室气体排放值进行评估,根据国际化标准组织(ISO14040)规定,评价过程一般由目标与范围的界定、清单分析、影响评价和结果解释4个部分组成。本研究针对的是能耗和温室气体排放2种环境影响类型。

1.3.1 目标和范围的界定 本研究的目标是评估和比较不同施肥方案下中棚生产1 000 kg番茄所需的能耗和温室气体排放情况。图1显示了塑料中棚番茄生产系统边界,包括中棚建材的生产、组建、运行与栽培所需农资的生产、使用、管理等,假设各种物质采购点离试验点的距离为10 km,采用卡车运输。

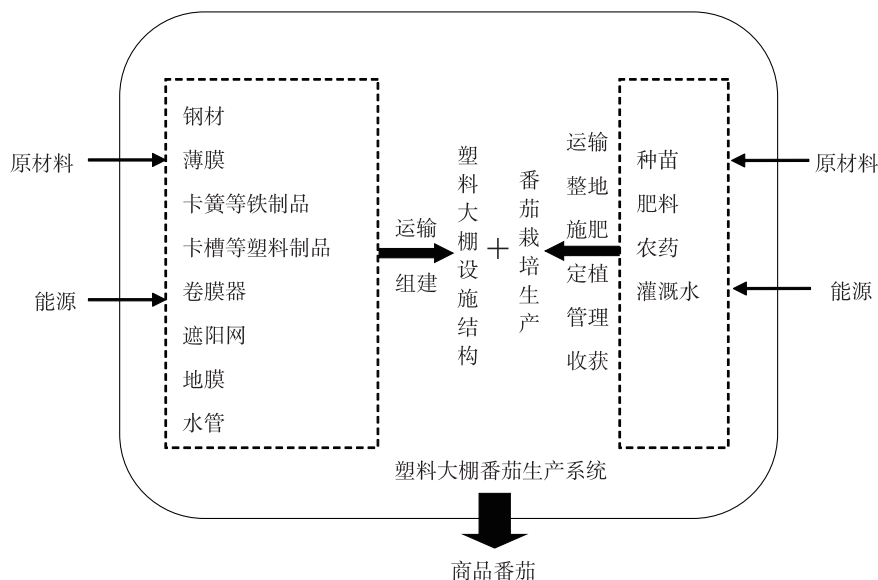


图1 塑料中棚番茄生产系统边界

Fig.1 System boundary of tomato production in plastic greenhouse

1.3.2 清单分析 塑料中棚建材投入清单的分析方法参照王效琴等^[49]的方法,每种建材的投入量根据

实际情况和建材的使用寿命折算成一年的用量进行分析。单个棚(8 m×33 m)建造物资清单见表1,不同

施肥方案下番茄栽培管理物质投入清单见表 2。

1.3.3 影响评价指标计算 影响评价根据选定的影响类型和对应参数,量化整个生命周期各个阶段中能源、物质消耗以及温室气体排放值。从生态环境的角度,分析各个环节对整个系统环境影响的大小。本研究选定的环境影响类型是能源消耗和温室气体排放。

基于生命周期评价方法^[52],能耗值(单位为 MJ)的计算方法参照 Heidari^[53]和 Canakci^[54]的研究方法,具体计算公式如下:

$$EU_{\text{总}} = EU_{\text{设施组建}} + EU_{\text{作物栽培}}$$

$$EU_{\text{设施组建}} = \sum (Q_i \text{设施物资} \times EF_{i \text{建材/运输/人工}})$$

$$EU_{\text{作物栽培}} = \sum (Q_i \text{栽培农资} \times EF_{i \text{栽培农资}})$$

表 2 不同施肥方案下番茄栽培管理的物资投入清单

Table 2 Inventory of material inputs for tomato cultivation and management under different fertilization schemes

施肥方案	复合肥 (kg/hm ²)	尿素 (kg/hm ²)	过磷酸钙 (kg/hm ²)	硫酸钾 (kg/hm ²)	菌菇渣 (kg/hm ²)	生物有机肥 (kg/hm ²)	农药 (kg/hm ²)	人工 (h/hm ²)
常规施肥	900	300	1 500	600	0	0	4.2	9 000
MR _{50%}	900	150	1 445	513	5 390	0	4.2	9 600
MR _{100%}	900	0	1 385	426	10 780	0	4.2	9 750
BF _{50%}	900	150	1 395	557	0	1 725	4.2	9 150
BF _{100%}	900	0	1 285	514	0	3 450	4.2	9 300
MR _{25%} + BF _{25%}	900	150	1 420	537	2 695	862	4.2	9 375

MR_{50%}: 菌菇渣氮替代 50% 尿素氮; MR_{100%}: 菌菇渣氮替代 100% 尿素氮; BF_{50%}: 生物有机肥氮替代 50% 尿素氮; BF_{100%}: 生物有机肥氮替代 100% 尿素氮; MR_{25%} + BF_{25%}: 菌菇渣氮与生物有机肥氮分别替代 25% 尿素氮; 菌菇渣含水量为 60%。

式中, $EU_{\text{总}}$ 为作物生产系统总能耗, $EU_{\text{设施组建}}$ 为设施组建能耗投入, 包括建材的生产、运输和搭建; $EU_{\text{作物栽培}}$ 为作物栽培管理能耗投入, 主要包括农资的生产、使用和人工。 $Q_i \text{设施物资}$ 、 $EF_{i \text{建材/运输/人工}}$ 分别为第 i 种设施物资年均消耗量及其对应的能耗当量值; $Q_i \text{栽培农资}$ 、 $EF_{i \text{栽培农资}}$ 分别为第 i 种栽培农资消耗量及其对应的能耗当量值。本研究中的菌菇渣为食用菌厂栽培杏鲍菇后产生的废弃物, 能耗当量为 0。基于生命周期评价方法^[22], 温室气体排放值(单位为 kg, CO₂-eq) 计算依据 IPCC^[55]、Hauschild 等^[56]、赵明炯等^[57]的方法, 并进行一定调整, 具体计算公式如下:

$$GHG_{\text{总}} = GHG_{\text{设施组建}} + GHG_{\text{栽培农资生产}} + GHG_{\text{栽培农资施用}}$$

$$GHG_{\text{设施组建}} = \sum (Q_j \text{设施物资} \times EF_{j \text{设施物资}})$$

$$GHG_{\text{栽培农资生产}} = \sum (Q_j \text{栽培农资} \times EF_{j \text{栽培农资生产}})$$

$$GHG_{\text{栽培农资施用}} = \sum (Q_j \text{栽培农资} \times EF_{j \text{栽培农资施用}})$$

式中, $GHG_{\text{总}}$ 为作物生产系统温室气体排放值总和, $GHG_{\text{设施组建}}$ 指建材的生产、运输和设施组建过

表 1 塑料中棚建造物资投入清单

Table 1 Inventory of material inputs for plastic greenhouse

物资及人工	用量	使用年限	组成
镀锌钢材 (kg)	967.51	10	大棚框架
聚乙烯膜膜 (kg)	76.73	3	棚膜
ABS 塑料 (kg)	3.24	3	压膜卡
高密度聚乙烯网 (kg)	33.91	3	遮阳网、防虫网
聚氯乙烯膜 (kg)	2.52	1	地膜
聚氯乙烯管 (kg)	5.67	3	滴灌管
聚丙烯 (kg)	2.41	2	地铺钉
涤纶织物 (kg)	2.52	3	压膜线
柴油 (L)	4.00	1	运输
人工 (h)	220.00	1	组建

大棚框架包括主管、套管、纵梁、压顶簧、防风压膜槽、卡槽固定卡、摇膜机、摇膜杆、浸塑卡簧。

程中排放的温室气体; $GHG_{\text{栽培农资生产}}$ 与 $GHG_{\text{栽培农资施用}}$ 分别为作物栽培管理过程中投入的各种农资生产过程和施用过程中排放的温室气体值。 $Q_j \text{设施物资}$ 与 $EF_{j \text{设施物资}}$ 分别为第 j 种设施物资的年均消耗量及其对应的温室气体排放参数; $Q_j \text{栽培农资}$ 与 $EF_{j \text{栽培农资生产}}$ 分别为第 j 种栽培农资的消耗量和生产其栽培农资对应的温室气体排放参数; $EF_{j \text{栽培农资施用}}$ 为施用第 j 种栽培农资过程中温室气体排放参数。

其中本研究施用的菌菇渣需堆置发酵约 60 d, 王义祥等^[58]的研究结果显示, 菌菇渣发酵过程中 CO₂ 排放量为 67.32 g/kg, N₂O 排放量为 30.4 mg/kg, CH₄ 排放量为 0.72 mg/kg。按照 IPCC 测算的 N₂O、CH₄ 的 100 a 全球增温潜势(分别为 298, 25^[55]) 计算, 生产单位质量腐熟菌菇渣的温室气体增温潜势 $EF_{\text{菌菇渣生产}}$ (单位: g/kg, CO₂-eq) 估算公式如下:

$$EF_{\text{菌菇渣生产}} = 67.3200 \times M_{\text{菌菇渣}} + 0.03040 \times M_{\text{菌菇渣}} \times$$

$$298+0.000\ 72\times M_{\text{菌菇渣}}\times 25$$

其中 $M_{\text{菌菇渣}}$ 为菌菇渣的质量,设定值为 1 kg。

菌菇渣作为一种有机肥料, $EF_{\text{菌菇渣施用}}$ 按照 $EF_{\text{生物有机肥}}$ 进行计算。

由于缺乏有关建材使用过程中的能耗损失和温

室气体排放研究,本系统只考虑塑料中棚组建过程中的能耗损失和温室气体排放。

通过查阅文献资料,塑料中棚建设各种物资能耗当量和温室气体排放参数见表 3,番茄栽培过程中各种物资能耗当量和温室气体排放参数见表 4。

表 3 塑料中棚建设所需各种物资的能耗当量和温室气体排放参数

Table 3 Energy consumption equivalents and greenhouse gas emission parameters for greenhouse

物资及人工	能耗当量值		温室气体排放参数		参考文献
	数值	单位	数值	单位	
镀锌钢材	39.00	MJ/kg	2.82	kg/kg, CO ₂ -eq	[59]
ABS 塑料	80.50	MJ/kg	2.53	kg/kg, CO ₂ -eq	[59]
涤纶织物	103.83	MJ/kg	25.70	kg/kg, CO ₂ -eq	[60]
聚乙烯膜	83.10	MJ/kg	1.94	kg/kg, CO ₂ -eq	[59]
高密度聚乙烯网	76.70	MJ/kg	1.60	kg/kg, CO ₂ -eq	[59]
聚氯乙烯膜	77.20	MJ/kg	3.00	kg/kg, CO ₂ -eq	[59]
聚氯乙烯管	67.50	MJ/kg	2.50	kg/kg, CO ₂ -eq	[59]
聚丙烯	115.10	MJ/kg	3.90	kg/kg, CO ₂ -eq	[59]
柴油	56.31	MJ/L	3.75	kg/L, CO ₂ -eq	[53]、[57]
人工	1.80	MJ/h	0.86	kg/d, CO ₂ -eq	[61]、[62]

表 4 番茄栽培管理所需各种物资的能耗当量和温室气体排放参数

Table 4 Energy consumption equivalent and greenhouse gas emission parameters of materials in tomato cultivation and management

物资及人工	温室气体排放参数						参考文献
	能耗当量		生产阶段		施用阶段		
	数值	单位	数值	单位	数值	单位	
复合肥	9.72	MJ/kg	1.18	kg/kg, CO ₂ -eq	1.46	kg/kg, CO ₂ -eq	[63]、[64]、[65]
尿素	64.48	MJ/kg	4.02	kg/kg, CO ₂ -eq	5.24	kg/kg, CO ₂ -eq	[63]、[64]、[65]
过磷酸钙	1.15	MJ/kg	0.20	kg/kg, CO ₂ -eq	—		[63]、[66]
硫酸钾	2.40	MJ/kg	0.41	kg/kg, CO ₂ -eq	—		[63]、[66]
生物有机肥	0.57	MJ/t	0.14	kg/kg, CO ₂ -eq	0.35	kg/kg, CO ₂ -eq	[64]
农药	208.00	MJ/kg	19.10	kg/kg, CO ₂ -eq	6.58	kg/kg, CO ₂ -eq	[67]、[57]、[62]
人工	1.80	MJ/h	—		0.86	kg/d, CO ₂ -eq	[61]、[62]
菌菇渣	0				0.35	kg/kg, CO ₂ -eq	[64]

2 结果与分析

2.1 塑料中棚番茄生产系统能耗分析

由表 5 可知,不同施肥方案下塑料中棚生产 1 000 kg 番茄,能耗为 2 264~3 094 MJ。与常规施肥处理相比, $MR_{30\%}$ 、 $MR_{100\%}$ 、 $BF_{30\%}$ 、 $BF_{100\%}$ 、 $MR_{25\%}+BF_{25\%}$ 处理单位产量能耗分别降低 11.09%、23.30%、10.09%、26.84% 和 23.69%,以 $BF_{100\%}$ 处理单位产量能耗为最低,其次是 $MR_{25\%}+BF_{25\%}$ 处理。对于 6 种施肥方案,设施建设消耗

的能源为 287 914 MJ/hm²,是能源消耗的主要环节,占系统总能耗的 85.63%~90.83%,其次是栽培管理,占系统总能耗的 9.17%~14.37%。在系统总能耗中,设施建设能耗是栽培管理的 6~10 倍。

设施建设能耗主要由镀锌钢材、棚膜、遮阳网与防虫网的生产产生,分别占设施建设能耗的 39.66%、33.51%、13.67%。镀锌钢材作为塑料中棚的骨架材料,用量大;棚膜、遮阳网与防虫网均为高能耗的聚乙烯膜与高密度聚乙烯网。

表 5 不同施肥方案能耗

Table 5 Energy consumption under different fertilization schemes

施肥方案	产量		能耗		
	春茬 (t/hm ²)	秋茬 (t/hm ²)	番茄栽培管理 (MJ/hm ²)	总能耗 (MJ/hm ²)	单位产量能耗 (MJ/kg)
常规施肥	88.99	19.68	48 331	336 245	3.094
MR _{50%}	97.71	21.29	39 467	327 381	2.751
MR _{100%}	114.05	19.83	29 798	317 712	2.373
BF _{50%}	93.88	23.53	38 706	326 620	2.782
BF _{100%}	119.08	20.95	29 075	316 989	2.264
MR _{25%} +BF _{25%}	118.55	19.95	39 091	327 005	23.611

MR_{50%}、MR_{100%}、BF_{50%}、BF_{100%}、MR_{25%}+BF_{25%}见表 2 注。

番茄栽培管理能耗主要集中在尿素生产、人工等方面。但是常规施肥方案的栽培管理能耗中尿素生产的能耗投入占栽培管理总能耗的 40.02%，其次是人工，占 33.52%。而有机肥与化肥配施方案以人工能耗为主，占41.50%~58.93%，其次是复合肥或者尿素生产能耗(图 2)。

2.2 塑料中棚番茄生产系统温室气体排放值分析

由表 6 可知,不同施肥方案生产1 000 kg 番茄的温室气体排放值(以 CO₂ 当量计) 150~ 204 kg,CO₂-eq。与常规施肥处理相比,MR_{50%}、MR_{100%}、BF_{50%}、BF_{100%}、MR_{25%}+BF_{25%}处理的温室气体排放值均降低,BF_{100%}处理单位产量温室气体排放最低,其次是 MR_{25%}+BF_{25%}。

对于 6 种不同施肥方案,设施建设排放温室气体为15 415 kg/hm²,CO₂-eq,对系统总排放的贡献率为64.28%~73.26%;其次是栽培管理过程中的农资施用环节,贡献率为16.86%~25.67%;农资生产环节的贡献率最低,为9.88%~13.02%。

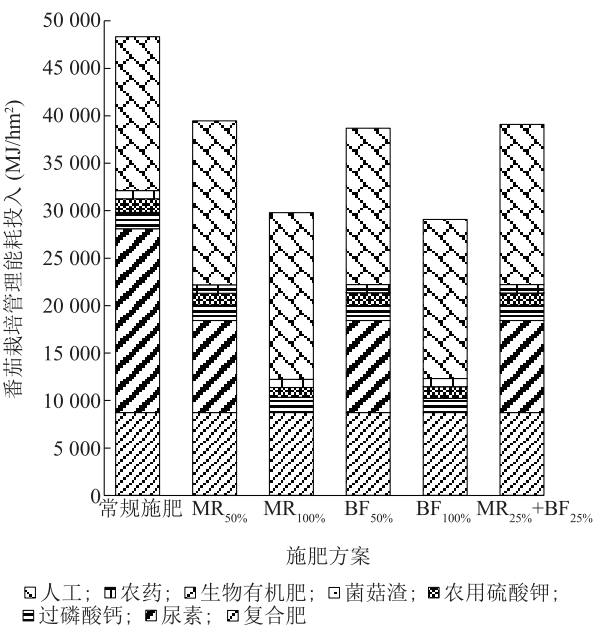


图 2 不同施肥方案番茄栽培管理能耗

Fig.2 Energy consumption of tomato cultivation and management under different fertilization schemes

表 6 不同施肥方案番茄生产系统温室气体排放值

Table 6 Greenhouse gas emissions of tomato production system under different fertilization schemes

施肥方案	番茄栽培管理(kg/hm ² , CO ₂ -eq)		总排放 (kg/hm ² , CO ₂ -eq)	单位产量温室气体排放值 (kg/kg, CO ₂ -eq)
	农资生产	农资施用		
常规施肥	2 890	3 885	22 190	0.204
MR _{50%}	2 650	5 044	23 109	0.194
MR _{100%}	2 410	6 155	23 980	0.179
BF _{50%}	2 485	3 716	21 617	0.184
BF _{100%}	2 080	3 548	21 043	0.150
MR _{25%} +BF _{25%}	2 568	4 380	22 363	0.161

MR_{50%}、MR_{100%}、BF_{50%}、BF_{100%}、MR_{25%}+BF_{25%}见表 2 注。

设施建设过程中温室气体排放主要是由镀锌钢材生产产生,其次是聚乙烯膜生产,贡献率分别为 67.04% 和 12.19%,故可以考虑合理降低塑料中棚骨架结构用钢量或提高钢材质量,延长使用寿命,改进现有塑料中棚设施,以达到减排目标。

农资施用环节对系统温室气体排放的影响程度

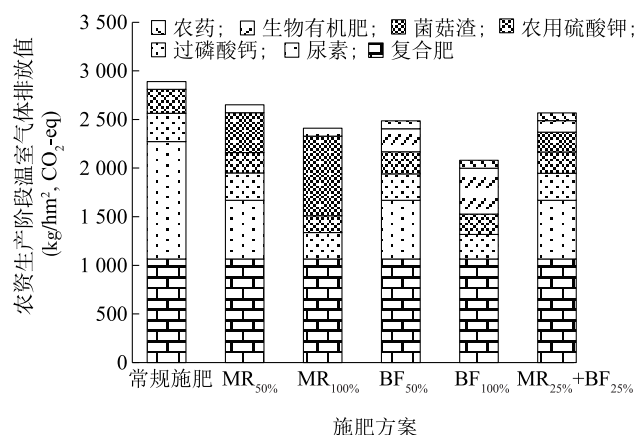
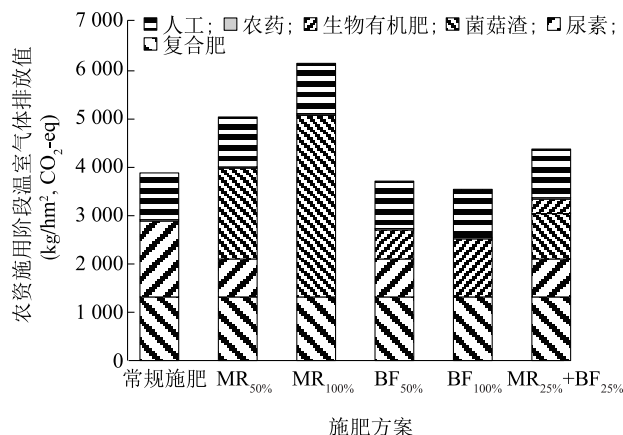


图3 不同施肥方案番茄栽培管理温室气体排放值

Fig.3 Greenhouse gas emissions of tomato cultivation and management under different fertilization schemes

高于农资生产环节。常规施肥处理中农资施用产生的温室气体主要是尿素施用引起的,其次是复合肥施用,分别占栽培管理总排放的 23.22%、19.43% (图 3),且尿素与复合肥生产所产生的温室气体排放占比之和为 33.53%。因此,减少温室气体排放可以使用生产与施用环节温室气体排放参数均低的有机肥替代尿素或复合肥。



3 结论

(1) 6 种施肥方案下,塑料中棚生产 1 000 kg 番茄消耗能源为 2 264~3 094 MJ, MR_{100%}、BF_{100%}、MR_{25%}+BF_{25%} 处理比常规施肥处理单位产量节能超 20%, MR_{50%}、BF_{50%} 处理超过 10%, 其中 BF_{100%} 处理能耗最低,其次是 MR_{25%}+BF_{25%} 处理。

(2) 塑料中棚设施建设所需的能消对总能耗的贡献率均超过 80%。美国每生产 1 000 kg 大棚番茄消耗能源 4 000 MJ, 其单位面积钢材用量是本研究中的 2 倍多^[68]。法国^[69]、地中海地区^[70] 番茄单位产量消耗能源高达 4 700 MJ、6 369 MJ, 主要是法国大棚钢结构 4 年更换 1 次, 地中海地区番茄水培设备和附属动力设备的耗材投入大。因此,降低番茄单位产量能耗关键在于减少设施构筑物的生产和建设能耗,同时提高番茄产量。提高建材的使用寿命,优化设施结构,合理减少建材用量、改进番茄栽培技术、提高番茄产量也可以达到节能的目标。

(3) 6 种施肥方案下,塑料中棚生产 1 000 kg 番茄排放温室气体为 150~204 kg, CO₂-eq, MR_{50%}、MR_{100%}、BF_{50%}、BF_{100%}、MR_{25%}+BF_{25%} 处理的温室气体

排放值均比常规施肥处理降低, BF_{100%} 处理单位产量温室气体排放最低。

(4) 塑料中棚设施建设产生的温室气体排放约是番茄栽培管理的 2 倍。在园艺设施不变的情况下,尿素和复合肥的生产与施用对番茄的单位产量温室气体排放起着决定性作用。2019 年中央一号文件^[71] 中明确指出,要大力推进农业绿色发展,化肥、农药施用量继续负增长,扩大有机肥替代化肥试点。合理施用有机肥,减少化肥施用量,是减排关键。

4 讨论

(1) 在设施建设能耗一样的条件下,6 种施肥方案消耗的总能源是由番茄栽培管理所需能耗决定的。每生产 1 kg 尿素的能源消耗为 64.48 MJ, 折合成每生产 1 kg 氮能源消耗值为 140 MJ; 而生产相同养分含量的生物有机肥能耗为 0.014 MJ, 是尿素的万分之一; 菌菇渣作为农业废弃物, 不需要消耗能源。故使用有机肥替代尿素可以大大降低能源消耗。有机肥养分含量低, 用量大, 用工多, 有机肥与化肥配施的人工要高于常规施肥。菌菇渣为含水的

块状结构,难以均匀撒于地表,且养分含量最低,因此肥料搬运与整地需要消耗更多的人工。 $MR_{100\%}$ 、 $BF_{100\%}$ 、 $MR_{25\%}+BF_{25\%}$ 处理的番茄生长周期中整枝劳作投入的人工也要高于其他处理。因此系统总能耗是 $BF_{100\%}<MR_{100\%}<BF_{50\%}<MR_{25\%}+BF_{25\%}<MR_{50\%}<$ 常规施肥。5种有机肥与化肥配施处理的番茄总产量均高于常规施肥处理,其中 $BF_{100\%}$ 、 $MR_{25\%}+BF_{25\%}$ 处理产量较高。因此单位产量能源消耗最低产量最高的是 $BF_{100\%}$ 处理。

(2)减少温室气体排放可以使用生产与施用环节温室气体排放参数均低的有机肥来替代尿素。以菌菇渣部分或全部替代尿素的3种有机肥与化肥配施处理($MR_{50\%}$ 、 $MR_{100\%}$ 、 $MR_{25\%}+BF_{25\%}$)温室气体总排放值均高于常规施肥处理。原因是菌菇渣养分含量低,氮含量仅为尿素的2.7%,在满足氮水平一致条件下,需要投入的质量是尿素的36倍,而菌菇渣施用产生的温室气体是尿素的15倍。6种施肥方案下,番茄生命周期内温室气体排放值的排序为 $BF_{100\%}<BF_{50\%}<$ 常规施肥 $<MR_{25\%}+BF_{25\%}<MR_{50\%}<MR_{100\%}$,但 $MR_{100\%}$ 、 $MR_{50\%}$ 、 $MR_{25\%}+BF_{25\%}$ 、 $BF_{50\%}$ 、 $BF_{100\%}$ 处理的产量均比常规施肥处理高,因此5种有机肥与化肥配施处理,塑料中棚每生产单位产量番茄温室气体排放值均低于常规施肥处理,产量最高的 $BF_{100\%}$ 处理温室气体排放值最低,温室气体排放较少产量较高的是 $MR_{25\%}+BF_{25\%}$ 处理。

(3)从环境影响角度出发,建议选用以生物有机肥氮全部代替尿素氮或者菌菇渣与生物有机肥氮分别替代25%尿素氮2种施肥方案,既能显著降低单位产量能耗,又可以有效减少温室气体排放。

(4)本研究中采用的是生物有机肥和杏鲍菇菌菇渣作为有机肥替代尿素,对其他有机肥的替代效果还需进一步研究。本研究是按照常规施肥养分标准进行有机肥与化肥配施设计,对养分减量的有机肥与化肥配施还需要进行进一步研究。

参考文献:

- [1] 中国共产党中央委员会. 中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议[R]. 北京:中国共产党中央委员会,2020.
- [2] 中华人民共和国农业部. 高标准农田建设标准:NY/T 2148-2012[S]. 北京:中国标准出版社,2012.
- [3] LI G D, LI X Y, JIANG C H, et al. Analysis on impact of facility agriculture on ecological function of modern agriculture[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 10: 300-306.
- [4] 徐彬,徐健,祁建杭,等. 江苏省设施蔬菜连作障碍土壤理化及生物特征[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(5): 1124-1129.
- [5] 沈启扬,於锋,周学剑. 江苏省设施蔬菜关键生产环节机具的选型与配备研究[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(2): 157-161.
- [6] 夏礼如,李岩,孟力力. 江苏设施蔬菜产业发展主要风险因子分析及应对措施[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(18): 332-333.
- [7] 陈罡,管安琴,卢昱宇,等. 江苏省设施蔬菜病虫害绿色防控技术应用现状及对策[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(22): 121-124.
- [8] Food and agriculture organization of the United Nations. FAO statistical databases[DB/OL]. (2020-6-18)[2021-8-30]. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>.
- [9] 贾晓玥. 番茄连作设施土壤中微量元素的变化及其对番茄产量和品质的影响[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2020.
- [10] CHAI R, YE X, MA C, et al. Greenhouse gas emissions from synthetic nitrogen manufacture and fertilization for main upland crops in China[J]. *Carbon Balance and Management*, 2019, 14: 20.
- [11] ZHANG W F, DOU Z X, HE P, et al. New technologies reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous fertilizer in China[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2013, 110: 8375-8380.
- [12] 孙锦,高洪波,杜长霞,等. 我国设施园艺发展现状与趋势[J]. 南京农业大学学报, 2019, 42(4): 594-604.
- [13] 蒋卫杰,邓杰,余宏军. 设施园艺发展概况、存在问题与产业发展建议[J]. 中国农业科学, 2015, 48(17): 3515-3523.
- [14] FAN Y, ZHANG Y, HESS F, et al. Nutrient balance and soil changes in plastic greenhouse vegetable production[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2020, 117: 77-92.
- [15] 黄绍文,唐继伟,李春花,等. 我国蔬菜化肥减施潜力与科学施用对策[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1480-1493.
- [16] 李天来,杨丽娟. 作物连作障碍的克服——难解的问题[J]. 中国农业科学, 2016, 49(5): 916-918.
- [17] FAN J, DING W, XIANG J, et al. Carbon sequestration in an intensively cultivated sandy loam soil in the North China Plain as affected by compost and inorganic fertilizer application[J]. *Geoderma*, 2014(230/231): 22-28.
- [18] HAO X H, LIU S L, WU J S, et al. Effect of long-term application of inorganic fertilizer and organic amendments on soil organic matter and microbial biomass in three subtropical paddy soils[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2008, 81(1): 17-24.
- [19] 宋震震,李絮花,李娟,等. 有机肥和化肥长期施用对土壤活性有机氮组分及酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(3): 525-533.
- [20] 龚雪蛟,秦琳,刘飞,等. 有机类肥料对土壤养分含量的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(4): 1403-1416.
- [21] 慕君,马旭东,张丹丹,等. 有机肥与化肥配施下土壤氮组分变化与氮素利用率研究[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(5): 107-113.
- [22] ZHAO S, LIU D Y, CHEN L L, et al. Bio-organic fertilizer application significantly reduces the *Fusarium oxysporum* population and

- alters the composition of fungi communities of watermelon Fusarium wilt rhizosphere soil[J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2014, 50(5): 765-774.
- [23] ARGAW, ANTENEN. Organic and inorganic fertilizer application enhances the effect of Bradyrhizobium on nodulation and yield of peanut (*Arachis hypogaea* L.) in nutrient depleted and sandy soils of Ethiopia[J]. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 2017, 6(3): 219-231.
- [24] 李艳梅, 孙焱鑫, 邹国元, 等. 设施蔬菜经营主体施肥现状及有机肥替代化肥情况调研——基于北京市顺义区的实证分析[J]. *中国蔬菜*, 2021(9): 84-90.
- [25] 曹健. 有机资源与化肥配施农业模式的农学和环境效应评价[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- [26] 鲁伟丹, 李俊华, 罗彤, 等. 连续三年不同有机肥替代率对小麦产量及土壤养分的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(8): 1330-1338.
- [27] 魏文良, 刘路, 仇恒浩. 有机无机肥配施对我国主要粮食作物产量和氮肥利用效率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(8): 1384-1394.
- [28] 任科宇, 陆东明, 邹洪琴, 等. 有机替代对长江流域水稻产量和籽粒含氮量的影响[J/OL]. *农业资源与环境学报*, 2021. [2021-09-16]. <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0380>.
- [29] SERME I, OUATTARA K, OUATTARA D, et al. Sorghum grain yield under different rates of mineral and organic fertilizer application in the South-Sudan Zone of Burkina Faso[M]. Berlin: Springer Press, 2018.
- [30] 中华人民共和国农业部. 生物有机肥: NY 884-2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [31] TAO R, LIANG Y C, STEVEN A, et al. Supplementing chemical fertilizer with an organic component increases soil biological function and quality[J]. *Applied Soil Ecology*, 2013, 24(6): 1627-1632.
- [32] SUN J U, FU Q X, GU J, et al. Effects of bio-organic fertilizer on soil enzyme activities and microbial community in kiwifruit orchard[J]. *The Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(3): 829-837.
- [33] QU C C, CHEN X M, ZHANG Z L, et al. Long-term effects of bio-organic fertilizer application on soil organic carbon pool and enzyme activity of cucumber continuous cropping[J]. *The Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(9): 3145-3154.
- [34] 宋以玲, 于建, 陈士更, 等. 化肥减量配施生物有机肥对油菜生长及土壤微生物和酶活性影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(1): 352-360.
- [35] 王明友, 宋卫东, 王教领, 等. 基于食用菌生产的农业废弃物基质化利用研究进展[J]. *山东农业科学*, 2017, 49(1): 155-159.
- [36] 宋卫东, 薛艳凤, 王教领, 等. 我国食用菌产业动态浅析[J]. *食用菌*, 2016, 38(2): 11-13.
- [37] 董雪梅, 王延锋, 孙靖轩, 等. 食用菌菌渣综合利用研究进展[J]. *中国食用菌*, 2013, 32(6): 4-6.
- [38] PHAN C W, SABATATNAM V. Potential uses of spent mushroom substrate and its associated lignocellulosic enzymes[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2012, 96(4): 863-873.
- [39] 石思博, 王旭东, 叶正钱, 等. 菌渣化肥配施对稻田土壤微生物量碳氮和可溶性碳氮的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38(23): 8612-8620.
- [40] 胡杨勇, 马嘉伟, 叶正钱, 等. 稻耳轮作制度下连续菌渣还田对土壤肥力性状的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(6): 172-176.
- [41] 栗方亮, 王煌平, 张青, 等. 稻田施用菌渣土壤团聚体的组成及评价[J]. *生态与农村环境学报*, 2015, 31(3): 340-345.
- [42] 张黎杰, 周玲玲, 田福发, 等. 日光温室西葫芦菌渣复合基质栽培技术[J]. *中国瓜菜*, 2018, 31(3): 56-57.
- [43] 宫志远, 韩建东, 魏建林, 等. 金针菇菌渣有机肥在油菜上施用技术研究[J]. *中国食用菌*, 2012, 31(5): 42-44.
- [44] 陆思文, 罗凡, 兰国俊, 等. 施用菇渣与有机肥对生菜生长和重金属累积的影响[J]. *土壤通报*, 2020, 51(4): 969-978.
- [45] 梁龙, 陈源泉, 高旺盛. 基于生命周期的循环农业系统评价[J]. *环境科学*, 2010, 31(11): 2795-2803.
- [46] MAURIZIO C, SONIA L, MARINA M. Life cycle assessment (LCA) of protected crops: an Italian case study[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2012, 28: 56-62.
- [47] BENYAMIN K, SHAHIN R, MAHMOUND O, et al. Environmental impact assessment of tomato and cucumber cultivation in greenhouses using life cycle assessment and adaptive neuro-fuzzy inference system[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 73: 183-192.
- [48] MAURIZIO C, FULVIO A, SONIA L. From the LCA of food products to the environmental assessment of protected crops districts: a case-study in the south of Italy[J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, 93(1): 194-208.
- [49] 王效琴, 吴庆强, 周建斌, 等. 设施番茄生产系统的环境影响生命周期评价[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(11): 2940-2947.
- [50] 郭金花. 典型设施蔬菜生产系统水肥、农药投入及环境影响的生命周期评价[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
- [51] 徐强, 胡克林, 李季, 等. 华北平原不同生产模式设施蔬菜生命周期环境影响评价[J]. *环境科学*, 2018, 39(5): 2480-2488.
- [52] 杨建新. 产品生命周期评价方法及应用[M]. 北京: 气象出版社, 2002.
- [53] HEIDARI M, OMIND M. Energy use patterns and econometric models of major greenhouse vegetable productions in Iran[J]. *Energy*, 2011, 36(1): 220-225.
- [54] CANAKCI M, AKINCI I. Energy use pattern analyses of greenhouse vegetable production[J]. *Energy*, 2006, 31(8): 1243-1256.
- [55] IPCC. Climate change 2014: synthesis report[R]. Geneva, Switzerland: IPCC Press, 2014.
- [56] HAUSCHILD M, WENZEL H. Environmental assessment of products, scientific background[M]. London: Chapman and Hall, 1998.
- [57] 赵明炯, 王孝忠, 刘彬, 等. 长三角地区蔬菜生产的活性氮损失和温室气体排放估算[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(6): 1409-1419.

- [58] 王义祥,高凌飞,叶 菁,等. 菌渣垫料堆肥过程碳素物质转化规律[J].农业工程学报,2016,32(S2):292-296.
- [59] HAMMOND G, JONES C. A BSRIA guide embodied carbon: the inventory of carbon and energy (ICE) [M]. University of Bath, Bracknell, UK; BSRIA Limited, 2008.
- [60] 吴 猛. 基于生命周期的纺织服装产品碳足迹评价[J].纺织导报,2018,895(6):30-32.
- [61] CETIN B, VARDAR A. An economic analysis of energy requirements and input costs for tomato production in Turkey[J]. Renewable Energy, 2008, 33(3):428-433.
- [62] 李柘锦,隋 鹏,龙 攀,等. 不同有机物料还田对农田系统净温室气体排放的影响[J].农业工程学报,2016,32(2):111-117.
- [63] BHAT M G, ENGLISH B C, TURHOLLO A F, et al. Energy in synthetic fertilizers and pesticides: revisited. Final project report [R]. Energy Conservation Consumption & Utilization, USA: Oak Ridge National Laboratory, 1994.
- [64] 籍春蕾,丁 美,王彬鑫,等. 基于生命周期分析方法的化肥与有机肥对比评价[J].土壤通报,2012,43(2):412-417.
- [65] 柳 杨,程 志,王廷宁,等. 基于生命周期评价的氮肥温室气体排放研究[J]. 环境与可持续发展,2015,40(3):66-68.
- [66] 陈 舜,逯 非,王效科. 中国氮磷钾肥制造温室气体排放系数的估算[J].生态学报,2015,35(19):6371-6383.
- [67] JIANG M M, CHEN B, ZHOU J B, et al. Emergy account for biomass resource exploitation by agriculture in China[J]. Energy Policy, 2007, 35(9):4704-4719.
- [68] TORRELLAS M, ANTON A, LOPEZ J C, et al. LCA of a tomato crop in a multi-tunnel greenhouse in Almeria [J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2012, 17(7):863-875.
- [69] BOULARD T, RAEPEL C, BRUN R, et al. Environmental impact of greenhouse tomato production in France[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2011, 31(4):757-777.
- [70] PLATIS D P, MAMOLOS A P, KALBURTJI K L, et al. Analysis of energy and carbon and blue water footprints in agriculture: a case study of tomato cultivation systems [J]. Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration, 2021, 6(12):1-10.
- [71] 中国共产党中央委员会. 国务院关于坚持农业农村优先发展做好“三农”工作的若干意见[M].北京:人民出版社,2019.

(责任编辑:陈海霞)