

doi: 10.3969/j.issn.1671-7775.2013.06.006

三种设施蔬菜生产方式的生命周期评价

沈 军^{1,2}, 高丽红¹, 张真和³, 王 仲⁴, 陈青云¹

(1. 中国农业大学 农学与生物技术学院, 设施蔬菜生长发育调控北京市重点实验室, 北京 100193; 2. 河南科技学院 园艺园林学院, 河南 新乡 453003; 3. 全国农业技术推广服务中心, 北京 100125; 4. 北京市优质农产品产销服务站, 北京 100101)

摘要: 为了确定设施蔬菜生产对环境的影响程度及影响因素, 应用生命周期评价(LCA)方法对3种蔬菜生产方式的生产过程进行了分析评价. 结果表明: 3种蔬菜生产方式对环境影响较大的是能源消耗、水资源消耗、全球变暖、环境酸化和水体富营养化; 农作环节对环境的影响要大于农资生产环节, 但无公害生产方式的农作环节对环境的影响只占农资生产环节的47.2%; 运输环节对环境的影响较小. 芬洛温室蔬菜生产在能源消耗、全球变暖、环境酸化和水体富营养化方面影响较大, 其中, 全球变暖、环境酸化和水体富营养化分别是中国人均基准值的58.3, 32.5和15.1倍; 而日光温室蔬菜生产在水资源消耗、人体毒性、水体毒性和陆生毒性方面影响较大; 从整体上来说, 芬洛温室蔬菜生产对环境的影响是最大的, 是日光温室和无公害生产方式的101倍和740倍.

关键词: 生命周期; 蔬菜; 温室; 环境影响; 评价; 资源消耗

中图分类号: X820.3 文献标志码: A 文章编号: 1671-7775(2013)06-0650-08

Life cycle assessment (LCA) on three facility modes of vegetable production

Shen Jun^{1,2}, Gao Lihong¹, Zhang Zhenhe³, Wang Zhong⁴, Chen Qingyun¹

(1. College of Agriculture and Biotechnology, Beijing Key Laboratory of Growth and Development Regulation for Protected Vegetable Crops, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. College of Horticulture and Landscape, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang, Henan 453003, China; 3. National Agricultural Technology Extension Service Center, Beijing 100125, China; 4. Beijing Agricultural Products Quality Service Station, Beijing 100101, China)

Abstract: In order to determine the extent and the impact factors of the facilities vegetable production on environment, the environment impacts of three modes of vegetable production were assessed by the LCA. The results show that the main impacts of facility vegetable production on environment are energy depletion, fresh water depletion, global warming, acidification and eutrophication. The environment impact of farming system is greater than that of agriculture material system, while the environment impact of farming system by pollution-free way is 47.2% of the agriculture material system. The impact of transportation is slight. The Venlo-type green house impacts of energy depletion, global warming and acidification are 58.3, 32.5 and 15.1 times than those of person values in China, respectively. The solar-greenhouse impacts of fresh water depletion, human toxicity, fresh water toxicity and terrestrial toxicity are severe. The environment impacts of Venlo-greenhouse are 101 and 740 times than those of solar-greenhouse and pollution-free way, respectively.

Key words: life cycle; vegetable; greenhouse; environment impact; assessment; resource depletion

收稿日期: 2012-12-16

基金项目: 农业部现代农业产业技术体系建设专项资金资助项目(Nycytx-35-gw22); 科技部都市型设施园艺和无土栽培关键技术研究
与示范项目(2011BAD12B01); 河南省现代农业产业技术体系建设专项资金资助项目(S2010-03-G06)

作者简介: 沈 军(1976—) 男, 山西长治人, 博士研究生(shenjun1976@yahoo.com.cn), 主要从事设施园艺方面的研究.

陈青云(1958—) 男, 北京人, 教授, 博士生导师(通信作者, caucqy@163.com), 主要从事设施园艺工程方面的研究.

生命周期评价^[1] (life cycle assessment, LCA) 是对一个产品系统的生命周期中输入、输出及其潜在环境影响的汇编和评价。初期主要针对工业产品进行生命周期评价^[2], 现在建筑^[3]、能源^[4]、废弃物管理^[5]、农业^[6]、电子信息等领域得到了广泛的应用。文献[7]对生命周期评价的方法进行了研究, 开发了生命周期评价的软件, 使得生命周期评价更加科学、简便、准确。

在对农业生产进行的研究中主要是围绕大田作物、能源作物、畜牧业、土地利用等进行生命周期的评价。中国的设施蔬菜生产对农民增收、促进蔬菜周年均衡供应起到了重要作用, 但由于缺乏科学的技术指导, 盲目地施肥、施药, 再加上设施内特殊的小气候, 造成了设施内养分利用率低、土壤盐渍化、地下水污染等情况^[8]。另外, 在设施蔬菜生产中需要投入大量的化肥、有机肥和农药^[9-10], 中国已经是世界上最大的化肥和农药生产国与消费国, 肥料^[11]和农药^[12]在生产过程中需要消耗大量的能源和产生大量的废弃物, 对环境产生了严重的影响。E. Andrews等^[13]研究了魁北克温室番茄供应链的社会效果, 提出了生命周期属性评价(LCAA)。M. Cellura等^[14]对意大利南部设施蔬菜的生产进行了生命周期评价, 认为蔬菜包装和温室建造对环境的影响较大, 大棚生产比温室生产可节约能源。沈军等^[15]对3种类型温室建造过程进行了生命周期评价, 总体上说砖墙钢架日光温室对环境的影响是3种温室类型中最大的, 但利用生命周期评价方法分析中国的设施蔬菜生产方式对环境造成的影响还未见报道。本研究选用常见的日光温室蔬菜生产(以下简称为日光温室)和芬洛玻璃温室蔬菜生产(以下简称为芬洛温室)以及按照无公害蔬菜生产要求进行的日光温室生产(以下简称为无公害)为研究对象, 运用生命周期评价方法研究3种设施蔬菜生产方式各个生产环节对环境造成的影响, 以无公害生产方式为对照, 揭示目前设施蔬菜生产中对环境影响较大的因素, 以便更好地改进生产技术, 减少对环境影响, 为设施蔬菜的可持续发展提供参考。

1 研究方法和内容

1.1 研究目标和范围

研究的目标主要是采用生命周期评价(LCA)方法, 评价3种不同类型设施蔬菜生产方式对环境造成的潜在影响, 为中国设施蔬菜的健康发展提供一

定的参考。

文中的研究范围包括农资生产环节、运输环节和农作环节^[6], GB/T24040—2008规定, 对总体研究结论影响不大的输入和输出可以不必考虑。蔬菜生产中使用的种子量很小, 生产中产生的废弃物主要是一些蔬菜的枝叶, 对环境的影响不是很大, 文中的研究范围没有包括种子和废弃物处理。农资生产环节主要包括化肥、有机肥、农药等的生产, 但温室透明覆盖材料如玻璃、薄膜等在温室建造过程予以研究^[15]; 运输环节指化肥等生产资料从产地运输到使用地; 农作环节主要包括土地的准备、蔬菜栽培管理、收获、包装、运输等。中国设施蔬菜生产如整地、施肥、施药、植株调整、收获等农事操作主要以人工操作为主, 此阶段对环境的影响主要来自于施用肥料和农药以及温室设备运行消耗的电能。假设对收获的产品进行简易包装, 90%在本地销售^[16], 故包装、产后运输环节对环境产生的影响可忽略。农药的用量较少, 其运输环节对环境的影响可忽略。假设化肥的来源为化肥产量居全国第2位的山东省的中化化肥有限公司山东分公司(烟台)北京至山东(烟台)的平均距离为741 km, 采用柴油汽车运输, 每100 t·km的油耗为5.59 kg^[15]。

农业生命周期评价可以以生产单位质量的产品^[6,14]或生产单位质量的营养物质^[13]作为功能单位, 文中以较常用的单位面积 m^2 生产1 t的蔬菜作为功能单位。

1.2 设施蔬菜生产清单

文中数据来源于实地调研和相关文献。其中, 芬洛温室位于小汤山特菜基地, 栽培种类为番茄和甜椒(8月定植, 次年7月拉秧), 平均每667 m^2 种植3 636株, 灌溉方式为滴灌, 肥料以腐熟鸡粪和三元复合肥为主, 平均每667 m^2 施用727.3 kg化肥, 病虫害以生物防治为主, 通过设置防虫网、悬挂黄板、利用风机湿帘进行降温、燃烧天然气进行增温和补充 CO_2 的方式来减少病虫害的发生, 化学药剂主要为溴氰菊酯和百菌清。日光温室生产方式为对顺义区杨镇和大孙各庄镇20名农户调查问卷的结果, 选择越冬茬黄瓜(11月初定植, 次年7月初拉秧)作为研究对象, 平均每667 m^2 种植3 195株, 采用水泵抽取地下水进行大水漫灌, 以腐熟的牛粪或鸡粪和复合肥作为基肥, 尿素等作为追肥, 平均每667 m^2 施用321.25 kg化肥, 采用人工塑料膜扒缝放风降温和电动卷草帘机卷放草帘进行冬季保温, 化学药剂主要是多菌灵和敌敌畏。无公害蔬菜生产方式是根据《NY/T5007—2001 无公害食品 番茄保护地生产技术规程》及相关文献^[17-19]计算得到的理论数据, 具体数据见表1。

表1 3种蔬菜生产方式的物质投入

项目	芬洛温室		日光温室		无公害	
	每栋用量	产量	每栋用量	产量	每栋用量	产量
面积/m ²	2 567.95	—	653.66	—	667	—
溴氰菊酯/kg	0.29	0.009 14	—	—	—	—
百菌清/kg	0.07	0.002 29	—	—	—	—
敌敌畏/kg	—	—	0.30	0.029 7	0.01	0.001 2
多菌灵/kg	—	—	0.07	0.007 43	0.002 25	0.000 30
水体积/m ³	1 823.24	57.74	2 520.23	252.02	82.88	11.05
有机肥/kg	13 000.00	412.65	10 272.46	1 027.22	1 707.81	227.74
N质量/kg	560.00	17.78	19.74	1.88	8.85	1.18
P ₂ O ₅ 质量/kg	560.00	17.78	20.56	1.96	4.87	0.65
K ₂ O质量/kg	560.00	17.78	50.21	4.77	4.38	0.58
耗电量/(kW·h)	3 1761.00	1 008.29	223.45	21.25	167.56	21.25
天然气/(m ³ ·年 ⁻¹)	6 8821.06	2 184.80	—	—	—	—
柴油/kg	115.98	3.68	13.46	1.35	2.25	0.3
产量/kg	31 500.00	1 000.00	10 000.26	1 000.00	7 499.10	1 000.00

不同的投入物在其生产、使用过程中会消耗或产生某些物质,这些物质对环境会产生不同的影响。由不同投入物 m 产生的物质 i 的总量可由式(1)计算得出:

$$I_{\text{tot}(i)} = \sum (P_{i(m)} \times A_m), \quad (1)$$

式中: $I_{\text{tot}(i)}$ 为产生的 i 物质的总量; $P_{i(m)}$ 为单位物质 m 产生 i 的量; A_m 为物质 m 的用量。

根据式(1)及相关资料^[6,20]可计算出3种设施蔬菜生产方式每平方米生产1t蔬菜所消耗或产生物质的量,如表2所示。

表2 3种蔬菜生产方式系统清单

物质名称	芬洛温室				日光温室				无公害			
	农资	运输	农作	合计	农资	运输	农作	合计	农资	运输	农作	合计
能耗/MJ	3.50	3.59 × 10 ²	1.59 × 10 ⁴	1.63 × 10 ⁴	3.36	1.32 × 10 ²	7.94 × 10 ¹	2.14 × 10 ²	8.23 × 10 ⁻¹	2.92 × 10 ¹	7.94 × 10 ¹	1.10 × 10 ²
V _水 /m ³	4.54	—	5.77 × 10 ¹	6.23 × 10 ¹	5.15 × 10 ⁻¹	—	2.52 × 10 ²	2.53 × 10 ²	2.29 × 10 ⁻¹	—	1.11 × 10 ¹	1.13 × 10 ¹
m _{HC} /kg	1.62 × 10 ⁻²	1.80 × 10 ⁻⁵	1.31 × 10 ¹	1.31 × 10 ¹	1.51 × 10 ⁻³	6.62 × 10 ⁻⁶	—	1.52 × 10 ⁻³	8.93 × 10 ⁻⁴	1.47 × 10 ⁻⁶	—	8.95 × 10 ⁻⁴
m _{CO} /kg	1.16 × 10 ⁻¹	2.40 × 10 ⁻³	1.32 × 10 ²	1.32 × 10 ²	3.64 × 10 ⁻²	8.82 × 10 ⁻⁴	6.00 × 10 ⁻²	9.73 × 10 ⁻²	1.18 × 10 ⁻²	1.96 × 10 ⁻⁴	6.00 × 10 ⁻²	7.20 × 10 ⁻²
m _{NO_x} /kg	1.36	1.20 × 10 ⁻³	7.13 × 10 ²	7.14 × 10 ²	1.42	4.39 × 10 ⁻⁴	1.20 × 10 ⁻¹	1.54	3.44 × 10 ⁻¹	9.75 × 10 ⁻⁵	1.20 × 10 ⁻¹	4.64 × 10 ⁻¹
m _{SO_x} /kg	7.35 × 10 ⁻¹	9.38 × 10 ⁻³	6.61 × 10 ²	6.62 × 10 ²	8.81 × 10 ⁻²	3.44 × 10 ⁻³	2.00 × 10 ⁻²	1.12 × 10 ⁻¹	4.54 × 10 ⁻²	7.65 × 10 ⁻⁴	2.00 × 10 ⁻²	6.62 × 10 ⁻²
m _{CO₂} /kg	2.47 × 10 ²	2.70 × 10 ⁻¹	2.84 × 10 ⁵	2.84 × 10 ⁵	8.07 × 10 ¹	9.91 × 10 ⁻²	2.55 × 10 ¹	1.06 × 10 ²	2.61 × 10 ¹	2.20 × 10 ⁻²	2.55 × 10 ¹	5.16 × 10 ¹
m _{CH₄} /kg	5.67 × 10 ⁻¹	—	1.09 × 10 ¹	1.15 × 10 ¹	1.40	—	—	1.40	3.10 × 10 ⁻¹	—	—	3.10 × 10 ⁻¹
m _{N₂O} /kg	3.88 × 10 ⁻³	—	4.37	4.37	3.94 × 10 ⁻⁴	—	—	3.94 × 10 ⁻⁴	2.32 × 10 ⁻⁴	—	—	2.32 × 10 ⁻⁴
m _{NH₃} /kg	1.35	—	—	1.35	2.39	—	—	2.39	5.48 × 10 ⁻¹	—	—	5.48 × 10 ⁻¹
m _{P_{tot}} /kg	1.32 × 10 ⁻²	—	—	1.32 × 10 ⁻²	2.83 × 10 ⁻²	—	—	2.83 × 10 ⁻²	6.39 × 10 ⁻³	—	—	6.39 × 10 ⁻³
m _{BOD} /kg	2.10 × 10 ⁻¹	—	—	2.10 × 10 ⁻¹	5.18 × 10 ⁻¹	—	—	5.18 × 10 ⁻¹	1.15 × 10 ⁻¹	—	—	1.15 × 10 ⁻¹
m _{CO_D} /kg	2.33	—	3.00 × 10 ⁻²	2.36	1.58	—	6.95 × 10 ⁻⁴	1.58	4.14 × 10 ⁻¹	—	6.95 × 10 ⁻⁴	4.15 × 10 ⁻¹
m _{As} /kg	9.13 × 10 ⁻⁷	—	—	9.13 × 10 ⁻⁷	1.06 × 10 ⁻⁷	—	—	1.06 × 10 ⁻⁷	3.33 × 10 ⁻⁸	—	—	3.33 × 10 ⁻⁸
m _{Pb} /kg	3.31 × 10 ⁻⁶	—	1.01 × 10 ⁻⁵	1.34 × 10 ⁻⁵	3.83 × 10 ⁻⁷	—	—	2.51 × 10 ⁻⁵	2.54 × 10 ⁻⁵	1.21 × 10 ⁻⁷	—	5.59 × 10 ⁻⁶
m _{Cd} /kg	2.28 × 10 ⁻⁷	—	1.98 × 10 ⁻⁶	2.21 × 10 ⁻⁶	2.64 × 10 ⁻⁸	—	—	4.92 × 10 ⁻⁶	4.95 × 10 ⁻⁶	8.32 × 10 ⁻⁹	—	1.09 × 10 ⁻⁶
m _{Zn} /kg	8.67 × 10 ⁻⁶	—	1.32 × 10 ⁻⁴	1.40 × 10 ⁻⁴	1.00 × 10 ⁻⁶	—	—	3.25 × 10 ⁻⁴	3.26 × 10 ⁻⁴	3.17 × 10 ⁻⁷	—	7.21 × 10 ⁻⁵
m _{Cu} /kg	1.07 × 10 ⁻⁶	—	3.46 × 10 ⁻⁵	3.56 × 10 ⁻⁵	1.24 × 10 ⁻⁷	—	—	8.46 × 10 ⁻⁵	8.47 × 10 ⁻⁵	3.91 × 10 ⁻⁸	—	1.88 × 10 ⁻⁵

农资生产环节中的重金属主要来自于磷肥生产过程^[6],农作环节中的重金属^[21]则来自于有机肥和化肥。进入大气、水体和土壤中的农药分别以投入量的10%、1%和43%计算^[6]。

1.3 评价方法

1.3.1 分类

不同的研究方法分类是不一样的^[6,15]。文中将环境影响类型分为能源消耗、淡水资源消耗、全球变暖、环境酸化、水体富营养化、人体毒性、水体毒性、陆生毒性。

1.3.2 特征化

特征化主要是将不同的负荷或排放因子在各环境影响类型中的潜在影响量化成相同的形态或相同的单位进行分析。文中采用国际通用的当量模型。

通常,如果物质 i 的排放量为 Q_i (kg),该物质对环境影响类型 j 的特征化因子为 $EF_{(j)i}$,则物质 i 对影响类型 j 的潜在环境影响贡献 $EP_{(j)i}$ 可由下式

计算:

$$EP_{(j)i} = Q_i \times EF_{(j)i}, \quad (2)$$

那么,整个系统对影响类型 j 的潜在环境影响总量 $EP_{(j)}$ 可由下式计算:

$$EP_{(j)} = \sum EP_{(j)i} = \sum [Q_i \times EF_{(j)i}]. \quad (3)$$

1.3.3 标准化

标准化的目的是消除各单项结果在量纲和数量上的差异,更好地认识所研究的产品系统中每个参数结果的相对大小^[6]。其计算公式为

$$R_j = EP_{(j)} / S_{(1990/2000)}, \quad (4)$$

式中: R_j 为第 j 种潜在环境影响标准化结果; $EP_{(j)}$ 为第 j 种潜在环境影响特征化结果; $S_{(1990/2000)}$ 为某年的基准值。

标准化的基准尺度应该与其对应的环境影响范围相对应,不同的学者做了不同的研究,文中采用杨建新^[22]、梁龙^[6]、沈军^[15]等的研究成果。

1.3.4 加权

加权是使用基于价值选择所得到的数值因子

对不同类型的参数结果进行转化的过程. 根据不同环境影响类型对某一国家或地区的重要性不同, 赋予不同的权重, 来评价本产品系统对环境的影响.

$$EI = \sum W_j R_j, \quad (5)$$

式中: EI 为系统环境影响潜值; W_j 为第 j 种潜在环境影响的权重; R_j 为第 j 种潜在环境影响标准化结果. 文中采用杨建新^[22]设置的权重系数.

2 结果与分析

2.1 不同环节对环境的影响

文中所指的环境主要包括自然资源、空气、水体和土壤. 通过表 2 可以得出每个环节在整个生产中所占的比重. 如图 1 所示, 日光温室和无公害蔬菜生产方式中, 农资生产环节对环境造成的影响占整个影响的 56% ~ 60%. 这主要是因为农药、化肥的生产对环境的影响要比其使用对环境的影响大^[6]. 芬洛温室蔬菜生产方式农作环节占总影响比农资生产环节高, 达到了 71.5%, 而日光温室和无公害蔬菜生产农作环节占总影响的比例分别为 34.6% 和 42.6%. 这是因为芬洛温室在生产阶段主要依靠降温、加温等设备来调节环境和进行生产(如灌溉), 需要投入的物质较多, 而日光温室生产基本以人力为主, 投入的物质较少. 运输环节对环境造成的影响基本可以忽略.

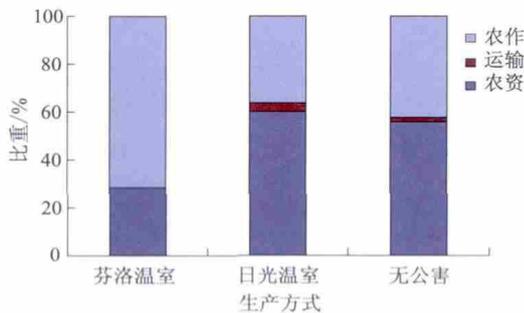


图 1 3 种蔬菜生产方式对环境影响的比重

2.2 资源消耗

从表 2 可以看出, 芬洛温室每平方米生产 1 t 蔬菜能源消耗是最多的, 是无公害生产方式的 148.6 倍, 日光温室生产方式的 75.9 倍, 其农作环节的能源消耗达到了 15 912.46 MJ, 占整个能源消耗的 97.8%. 这主要是由于芬洛温室为了调节温室内的环境, 在运行过程中需要运行风机、湿帘、开窗电机、遮阳电机等, 消耗了大量的电力. 日光温室和无公害生产方式中, 农作环节所消耗的能源相同, 但各自占总能源消耗的 37.1% 和 72.5%, 主要是由于无公害生产方式所需的农资较少, 导致农作环节所占比例较高.

日光温室每平方米生产 1 t 蔬菜水资源消耗为最多, 达到了 252.53 m³, 分别是芬洛温室和无公害的 4.1 倍和 22.4 倍. 3 种蔬菜生产方式水资源的消耗都集中在农作环节, 芬洛温室为 92.7%、日光温室为 99.8%、无公害为 98.0%. 蔬菜在生长过程中需要消耗大量的水分, 而灌水方式决定了水资源的消耗量, 日光温室采用大水漫灌, 芬洛温室采用的则是滴灌, 导致芬洛温室的用水量较少, 但与无公害生产方式相比仍有较大的提升空间, 应在日常的管理上根据作物的需水规律合理灌溉.

2.3 环境负荷

2.3.1 全球变暖

全球变暖是全球性影响, 在设施蔬菜生产过程中影响全球变暖的主要因素是 CO₂, CO, CH₄ 和 NO_x 等, 以 CO₂ 为参照物^[23-24].

从表 3 可以看出, 从排放总量上来看, 芬洛温室每平方米生产 1 t 蔬菜造成的全球变暖是最大的, 达到了 507 627.8 kg CO₂, 分别是日光温室和无公害的 754.8 倍和 2 523.8 倍. 从各个环节所占比例来看, 芬洛温室的农作环节占到了几乎 100%, 原因同能源消耗; 而日光温室和无公害的农资生产环节占 81.6% 和 69.3%. 这主要是由于农资中氮肥在生产过程中产生的温室气体较多所致. 运输环节造成的全球变暖除日光温室(9.2%)外, 基本可以忽略.

表 3 3 种蔬菜生产方式对全球变暖潜在影响

kg · t⁻¹ · m⁻²

全球变暖系数	当量	芬洛温室				日光温室			无公害				
		农资	运输	农作	合计	农资	运输	农作	合计	农资	运输	农作	合计
CO ₂	1	2.47 × 10 ²	2.70 × 10 ⁻¹	2.84 × 10 ⁵	2.84 × 10 ⁵	8.07 × 10 ¹	2.55 × 10 ¹	2.55 × 10 ¹	1.32 × 10 ²	2.61 × 10 ¹	2.20 × 10 ⁻²	2.55 × 10 ¹	5.16 × 10 ¹
CO	2	2.32 × 10 ⁻¹	4.81 × 10 ⁻³	2.63 × 10 ²	2.64 × 10 ²	7.28 × 10 ⁻²	1.24 × 10 ⁻¹	1.20 × 10 ⁻¹	3.17 × 10 ⁻¹	2.35 × 10 ⁻²	3.92 × 10 ⁻⁴	1.20 × 10 ⁻¹	1.44 × 10 ⁻¹
CH ₄	21	1.19 × 10 ¹	—	2.29 × 10 ²	2.41 × 10 ²	2.94 × 10 ¹	—	—	2.94 × 10 ¹	6.51	—	—	6.51
N ₂ O	310	1.20	—	1.35 × 10 ³	1.36 × 10 ³	1.22 × 10 ⁻¹	—	—	1.22 × 10 ⁻¹	7.18 × 10 ⁻²	—	—	7.18 × 10 ⁻²
NO _x	310	4.21 × 10 ²	3.71 × 10 ⁻¹	2.21 × 10 ⁵	2.21 × 10 ⁵	4.39 × 10 ²	3.62 × 10 ¹	3.62 × 10 ¹	5.11 × 10 ²	1.07 × 10 ²	3.02 × 10 ⁻²	3.62 × 10 ¹	1.43 × 10 ²
潜在影响		6.81 × 10 ²	6.46 × 10 ⁻¹	5.07 × 10 ⁵	5.08 × 10 ⁵	5.49 × 10 ²	6.18 × 10 ¹	6.18 × 10 ¹	6.73 × 10 ²	1.39 × 10 ²	5.26 × 10 ⁻²	6.18 × 10 ¹	2.01 × 10 ²

2.3.2 酸化

环境酸化是区域性影响,在蔬菜生产过程中影响环境酸化的主要因素是 SO_2 和 NO_x 等,以 SO_2 为参照物.

从表4可以看出,从排放总量上来看,芬洛温室每平方米生产1 t 蔬菜造成的环境酸化是最大

的,达到了1 169.0 kg SO_2 ,是日光温室和无公害的205.6倍和824.8倍.从各个环节所占比例来看,芬洛温室的农作环节占到了几乎100%,而日光温室和无公害的运输环节和农作环节对环境酸化产生的影响基本可以忽略,主要是由农资生产环节造成的.

表4 3种蔬菜生产方式对环境酸化的潜在影响

$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$

酸化	当量系数	芬洛温室				日光温室				无公害			
		农资	运输	农作	合计	农资	运输	农作	合计	农资	运输	农作	合计
SO_x	1	7.35×10^{-1}	9.38×10^{-3}	6.61×10^2	6.62×10^2	8.81×10^{-2}	3.44×10^{-3}	2.00×10^{-2}	1.12×10^{-1}	4.54×10^{-2}	7.65×10^{-4}	2.00×10^{-2}	6.62×10^{-2}
N_2O	1.07	4.15×10^{-3}	—	4.68	4.68	4.21×10^{-4}	—	—	4.21×10^{-4}	2.48×10^{-4}	—	—	2.48×10^{-4}
NO_x	0.7	9.51×10^1	8.37×10^{-4}	4.99×10^2	5.00×10^2	9.91×10^{-1}	4.39×10^{-4}	8.00×10^{-2}	1.07	2.41×10^{-1}	4.39×10^{-4}	8.00×10^{-2}	3.21×10^{-1}
NH_3	1.88	2.53	—	—	2.53	4.50	—	—	4.50	1.03	—	—	1.03
潜在影响		4.22	1.02×10^{-2}	1.16×10^3	1.17×10^3	5.58	3.88×10^{-3}	1.00×10^{-1}	5.68	1.32	1.20×10^{-3}	1.00×10^{-1}	1.42

2.3.3 水体富营养化

水体富营养化是区域性影响,在蔬菜生产过程中影响水体富营养化的主要因素是 NO_x 、总磷(P_{tot})、生化需氧量(BOD)和化学需氧量(COD)等,以 PO_4^{3-} 为参照物.

从表5可以看出,从排放总量上来看,芬洛温室

每 m^2 生产1 t 蔬菜造成的水体富营养化是最大的,达到了94.0 kg PO_4^{3-} ,是日光温室的80.2倍,无公害的327.8倍.从各个环节所占比例来看,芬洛温室的农作环节占到了几乎100%;日光温室和无公害的运输环节和农作环节对水体富营养化产生的影响基本可以忽略,主要是由农资生产环节造成的.

表5 3种蔬菜生产方式对水体富营养化的潜在影响

$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$

富营养化	当量系数	芬洛温室				日光温室				无公害			
		农作	合计	农资	运输	农作	合计	农资	运输	农作	合计	农资	运输
NO_x	0.13	1.77×10^{-1}	1.55×10^{-4}	9.27×10^1	9.29×10^1	1.84×10^{-1}	5.70×10^{-5}	2.00×10^{-2}	2.04×10^{-1}	4.47×10^{-2}	1.27×10^{-5}	2.00×10^{-2}	6.47×10^{-2}
N_2O	0.13	5.04×10^{-4}	—	5.70×10^{-1}	5.71×10^{-1}	5.12×10^{-5}	—	—	5.12×10^{-5}	3.01×10^{-5}	—	—	3.01×10^{-5}
NH_3	0.33	4.45×10^{-1}	—	—	4.45×10^{-1}	7.90×10^{-1}	—	—	7.90×10^{-1}	1.81×10^{-1}	—	—	1.81×10^{-1}
COD	0.022	5.13×10^{-2}	—	6.90×10^{-4}	5.20×10^{-2}	3.47×10^{-2}	—	1.53×10^{-5}	3.48×10^{-2}	9.11×10^{-3}	—	1.53×10^{-5}	9.12×10^{-3}
P_{tot}	3.06	4.05×10^{-2}	—	—	4.05×10^{-2}	8.66×10^{-2}	—	—	8.66×10^{-2}	1.95×10^{-2}	—	—	1.95×10^{-2}
BOD	0.11	2.31×10^{-2}	—	—	2.31×10^{-2}	5.70×10^{-2}	—	—	5.70×10^{-2}	1.26×10^{-2}	—	—	1.26×10^{-2}
潜在影响		7.37×10^{-1}	1.55×10^{-4}	9.33×10^1	9.40×10^1	1.15	5.70×10^{-5}	2.00×10^{-2}	1.17	2.67×10^{-1}	1.27×10^{-5}	2.00×10^{-2}	2.87×10^{-1}

2.3.4 人体毒性

人体毒性是区域性影响,在蔬菜生产过程中影响人体毒性的主要因素是空气中的重金属物质,由于农资生产环节中磷肥生产中产生的重金属随废水排放,不在大气中,故不对人体造成毒害.文中主要考虑农作环节中农药挥发对人体产生的毒性.以二氯苯(1,4-DCB)为参照物^[6,23],见表6.

表6 3种蔬菜生产方式对人体毒性的潜在影响

$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$

人体毒性	当量系数	芬洛温室	日光温室	无公害
溴氰菊酯	1.6	1.46×10^{-6}	—	—
百菌清	8.4	1.92×10^{-6}	—	—
敌敌畏	100	—	2.97×10^{-4}	1.20×10^{-5}
多菌灵	19	—	1.41×10^{-5}	5.70×10^{-7}
潜在影响		3.38×10^{-6}	3.11×10^{-4}	1.26×10^{-5}

从表6可以看出,从排放总量上来看,日光温室每平方米生产1 t 蔬菜造成的人体毒性是最大的,为0.000 13 kg 1,4-DCB,分别是芬洛温室和无公

害的38.8倍和24.8倍.芬洛温室比无公害造成的人体毒性还要小,主要是芬洛温室采用现代化的环境控制设备,蔬菜生长的环境较好,植株健壮,病虫害较轻,所用农药等就少,对人体造成的毒害就小,而无公害是基于日光温室生产蔬菜的,日光温室环境控制相对较差,导致病虫害发生较重,使用的农药量相对较大,而农药对人体造成的毒害相对较大.

2.3.5 水体毒性

水体毒性是局地影响,在蔬菜生产过程中影响水体毒性的主要因素是进入水中的重金属和农药残留,以二氯苯(1,4-DCB)为参照物.从表2可知,运输环节没有产生重金属和农药残留,因此表7只列出了农资生产环节和农作环节对水体毒性的影响.

从表7可以看出,从排放总量上来看,日光温室每平方米生产1 t 蔬菜造成的水体毒性是最大的,达到了0.16 kg 1,4-DCB,分别是芬洛温室和无公

害的 1.3 倍和 5.0 倍. 从各个环节所占比例来看, 对水体造成毒性的主要是农作环节, 农资生产环节所占比例可以忽略不计. 引起水体毒性的主要是肥料

中的 Zn^{2+} 和 Cu^{2+} , 以及农药残留, 而 Zn^{2+} 和 Cu^{2+} 主要存在于有机肥中, 所以在日常管理中应适当施用有机肥, 以免造成对水体的污染.

表 7 3 种蔬菜生产方式对水体毒性的潜在影响

$kg \cdot t^{-1} \cdot m^{-2}$

水体毒性	当量系数	芬洛温室			日光温室			无公害		
		农资	农作	合计	农资	农作	合计	农资	农作	合计
As	210	1.92×10^{-4}	—	1.92×10^{-4}	2.22×10^{-5}	—	2.22×10^{-5}	7.00×10^{-6}	—	7.00×10^{-6}
Pb	9.6	3.18×10^{-5}	9.69×10^{-5}	1.29×10^{-4}	3.68×10^{-6}	2.40×10^{-4}	2.44×10^{-4}	1.16×10^{-6}	5.36×10^{-5}	5.48×10^{-5}
Cd	1 500	3.42×10^{-4}	2.97×10^{-3}	3.32×10^{-3}	3.96×10^{-5}	7.38×10^{-3}	7.42×10^{-3}	1.25×10^{-5}	1.64×10^{-3}	1.65×10^{-3}
Zn	92	7.98×10^{-4}	1.21×10^{-2}	1.29×10^{-2}	9.23×10^{-5}	2.99×10^{-2}	3.00×10^{-2}	2.91×10^{-5}	6.63×10^{-3}	6.66×10^{-3}
Cu	1 200	1.29×10^{-3}	4.15×10^{-2}	4.27×10^{-2}	1.49×10^{-4}	1.02×10^{-1}	1.02×10^{-1}	4.70×10^{-5}	2.25×10^{-2}	2.26×10^{-2}
溴氟菊酯	650 000	—	5.94×10^{-2}	5.94×10^{-2}	—	—	—	—	—	—
百菌清	370	—	8.46×10^{-6}	8.46×10^{-6}	—	—	—	—	—	—
敌敌畏	120 000	—	—	—	—	3.56×10^{-2}	3.56×10^{-2}	—	4.56×10^{-4}	4.56×10^{-4}
多菌灵	38 000	—	—	—	—	2.82×10^{-3}	2.82×10^{-3}	—	3.60×10^{-4}	3.60×10^{-4}
潜在影响		2.65×10^{-3}	1.16×10^{-1}	1.19×10^{-1}	3.07×10^{-4}	1.78×10^{-1}	1.78×10^{-1}	9.67×10^{-5}	3.16×10^{-2}	3.16×10^{-2}

2.3.6 陆生毒性

陆生毒性是局地影响, 在文中主要指土壤毒性, 在蔬菜生产过程中影响陆生生态毒性的主要因素是进入到土壤中的重金属和农药残留, 以二氯苯(1,4-DCB)为参照物. 与水体毒性相同, 只列出了农资生产环节和农作环节.

从表 8 可以看出, 从排放总量上来看, 日光温室每平方米生产 1 t 蔬菜造成的陆生毒性是最大的, 达到了 $0.013 kg 1,4-DCB$, 分别是芬洛温室和无公害的 1.6 倍和 4.8 倍. 从农作环节所占比例来看, 芬洛温室为 56.9%, 日光温室为 97.0%, 无公害为 95.3%. 有机肥中的重金属是引起陆生毒性的最主要原因.

表 8 3 种蔬菜生产方式对陆生毒性的潜在影响

$kg \cdot t^{-1} \cdot m^{-2}$

土壤毒性	当量系数	芬洛温室			日光温室			无公害		
		农资	农作	合计	农资	农作	合计	农资	农作	合计
As	3 300	3.01×10^{-3}	—	3.01×10^{-3}	3.49×10^{-4}	—	3.49×10^{-4}	1.10×10^{-4}	—	1.10×10^{-4}
Pb	33	1.09×10^{-4}	3.33×10^{-4}	4.42×10^{-4}	1.26×10^{-5}	8.27×10^{-4}	8.39×10^{-4}	3.99×10^{-6}	1.84×10^{-4}	1.88×10^{-4}
Cd	170	3.87×10^{-5}	3.37×10^{-4}	3.76×10^{-4}	4.48×10^{-6}	8.36×10^{-4}	8.41×10^{-4}	1.41×10^{-6}	1.85×10^{-4}	1.87×10^{-4}
Zn	25	2.17×10^{-4}	3.30×10^{-3}	3.51×10^{-3}	2.51×10^{-5}	8.11×10^{-3}	8.14×10^{-3}	7.91×10^{-6}	1.80×10^{-3}	1.81×10^{-3}
Cu	14	1.50×10^{-5}	4.84×10^{-4}	4.99×10^{-4}	1.74×10^{-6}	1.18×10^{-3}	1.19×10^{-3}	5.48×10^{-7}	2.63×10^{-4}	2.63×10^{-4}
溴氟菊酯	8.5	—	3.34×10^{-5}	3.34×10^{-5}	—	—	—	—	—	—
百菌清	0.68	—	6.68×10^{-7}	6.68×10^{-7}	—	—	—	—	—	—
敌敌畏	200	—	—	—	—	2.56×10^{-3}	2.56×10^{-3}	—	1.03×10^{-4}	1.03×10^{-4}
多菌灵	49	—	—	—	—	1.57×10^{-4}	1.57×10^{-4}	—	6.32×10^{-6}	6.32×10^{-6}
潜在影响		3.39×10^{-3}	4.48×10^{-3}	7.88×10^{-3}	3.93×10^{-4}	1.37×10^{-2}	1.41×10^{-2}	1.24×10^{-4}	2.54×10^{-3}	2.67×10^{-3}

2.4 标准化和加权评估

3 种蔬菜生产方式生命周期评价标准化结果见表 9, 由表 9 数据可见, 芬洛温室蔬菜生产方式每平方米生产 1 t 蔬菜, 能源消耗、水资源消耗、全球变暖、环境酸化和水体富营养化比较重要, 其中, 能源消耗、水资源消耗、人体毒性、水体毒性和陆生毒性等影响环境因素均小于中国的人均基准值, 但全球变暖、环境酸化和水体富营养化却远远超出中国的人均基准值, 分别是其 58.3、32.5 和 15.1 倍. 另外, 其能源消耗占中国的人均基准值的 25.8%, 水资源消耗为 14.0%.

日光温室生产方式对环境影响较大的是水资源消耗、全球变暖、环境酸化和水体富营养化. 所有的环境影响因素都低于中国的人均基准值, 但日光温室

的水资源消耗占中国人均基准值的 56.6%, 环境酸化为 15.8%, 水体富营养化为 18.9%. 无公害生产方式对环境的影响均远远低于中国的人均基准值.

3 种蔬菜生产方式生命周期评价加权评估结果见表 10, 从表 10 可以看出, 每平方米生产 1 t 的蔬菜, 芬洛温室影响指数为 13.4, 日光温室为 0.132, 无公害为 0.018, 分别是无公害生产方式的 74 倍和 7.3 倍. 3 种设施蔬菜生产方式主要对能源消耗、水资源消耗、全球变暖、环境酸化和水体富营养化造成影响. 芬洛温室与日光温室的农作环节比农资生产环节对环境的影响要大, 其中, 芬洛温室的农作环节几乎占了对环境的影响的全部; 但无公害的农作环节是农资生产环节的 47.2%, 说明通过改善生产技术, 进行科学管理来降低对环境的影响完全是可能的.

表9 3种蔬菜生产方式生命周期评价标准化结果

影响类型	能源消耗/MJ	水资源/m ³	全球变暖/kg	环境酸化/kg	富营养化/kg	人体毒性/kg	水体毒性/kg	陆生毒性/kg	
基准值/(人·年) ⁻¹	63 066.512	446.2	8 700	36	6.21	197.21	4.83	6.11	
芬洛温室	农资	5.55 × 10 ⁻⁵	1.02 × 10 ⁻²	7.83 × 10 ⁻²	1.17 × 10 ⁻¹	1.19 × 10 ⁻¹	—	5.48 × 10 ⁻⁴	5.55 × 10 ⁻⁴
	运输	5.69 × 10 ⁻³	—	7.42 × 10 ⁻⁵	2.84 × 10 ⁻⁴	2.50 × 10 ⁻⁵	—	—	—
	农作	2.52 × 10 ⁻¹	1.29 × 10 ⁻¹	5.83 × 10 ¹	3.24 × 10 ¹	1.50 × 10 ¹	1.72 × 10 ⁻⁸	2.40 × 10 ⁻²	7.34 × 10 ⁻⁴
	合计	2.58 × 10 ⁻¹	1.40 × 10 ⁻¹	5.83 × 10 ¹	3.25 × 10 ¹	1.51 × 10 ¹	1.72 × 10 ⁻⁸	2.46 × 10 ⁻²	1.29 × 10 ⁻³
日光温室	农资	5.32 × 10 ⁻⁵	1.15 × 10 ⁻³	6.31 × 10 ⁻²	1.55 × 10 ⁻¹	1.86 × 10 ⁻¹	—	6.36 × 10 ⁻⁵	6.43 × 10 ⁻⁵
	运输	2.09 × 10 ⁻³	—	7.10 × 10 ⁻³	1.08 × 10 ⁻⁴	9.18 × 10 ⁻⁶	—	—	—
	农作	1.26 × 10 ⁻³	5.65 × 10 ⁻¹	7.10 × 10 ⁻³	2.78 × 10 ⁻³	3.22 × 10 ⁻³	1.58 × 10 ⁻⁶	3.69 × 10 ⁻²	2.24 × 10 ⁻³
	合计	3.40 × 10 ⁻³	5.66 × 10 ⁻¹	7.73 × 10 ⁻²	1.58 × 10 ⁻¹	1.89 × 10 ⁻¹	1.58 × 10 ⁻⁶	3.69 × 10 ⁻²	2.31 × 10 ⁻³
无公害	农资	1.30 × 10 ⁻⁵	5.14 × 10 ⁻⁴	1.60 × 10 ⁻²	3.66 × 10 ⁻²	4.30 × 10 ⁻²	—	2.00 × 10 ⁻⁵	2.03 × 10 ⁻⁵
	运输	4.64 × 10 ⁻⁴	—	6.05 × 10 ⁻⁶	3.34 × 10 ⁻⁵	2.04 × 10 ⁻⁶	—	—	—
	农作	1.26 × 10 ⁻³	2.48 × 10 ⁻²	7.10 × 10 ⁻³	2.78 × 10 ⁻³	3.22 × 10 ⁻³	6.39 × 10 ⁻⁸	6.54 × 10 ⁻³	4.16 × 10 ⁻⁴
	合计	1.74 × 10 ⁻³	2.53 × 10 ⁻²	2.31 × 10 ⁻²	3.94 × 10 ⁻²	4.62 × 10 ⁻²	6.39 × 10 ⁻⁸	6.54 × 10 ⁻³	4.37 × 10 ⁻⁴

表10 3种蔬菜生产方式生命周期评价加权评估结果

环境影响	能源消耗	水资源	全球变暖	环境酸化	富营养化	人体毒性	水体毒性	陆生毒性	
权重系数	0.15	0.13	0.12	0.14	0.12	0.14	0.11	0.09	
芬洛温室	农资	8.33 × 10 ⁻⁶	1.32 × 10 ⁻³	9.40 × 10 ⁻³	1.64 × 10 ⁻²	1.42 × 10 ⁻²	—	6.03 × 10 ⁻⁵	5.00 × 10 ⁻⁵
	运输	8.53 × 10 ⁻⁴	—	8.91 × 10 ⁻⁶	3.97 × 10 ⁻⁵	3.00 × 10 ⁻⁶	—	—	—
	农作	3.78 × 10 ⁻²	1.68 × 10 ⁻²	6.99	4.53	1.80	2.41 × 10 ⁻⁹	2.64 × 10 ⁻³	6.61 × 10 ⁻⁵
	合计	3.87 × 10 ⁻²	1.81 × 10 ⁻²	7.00	4.55	1.82	2.41 × 10 ⁻⁹	2.71 × 10 ⁻³	1.16 × 10 ⁻⁴
日光温室	农资	7.99 × 10 ⁻⁶	1.50 × 10 ⁻⁴	7.57 × 10 ⁻³	2.17 × 10 ⁻²	2.23 × 10 ⁻²	—	7.00 × 10 ⁻⁶	5.79 × 10 ⁻⁶
	运输	3.13 × 10 ⁻⁴	—	8.52 × 10 ⁻⁴	1.51 × 10 ⁻⁵	1.10 × 10 ⁻⁶	—	—	—
	农作	1.89 × 10 ⁻⁴	7.34 × 10 ⁻²	8.52 × 10 ⁻⁴	3.89 × 10 ⁻⁴	3.86 × 10 ⁻⁴	2.21 × 10 ⁻⁷	4.06 × 10 ⁻³	2.02 × 10 ⁻⁴
	合计	5.10 × 10 ⁻⁴	7.36 × 10 ⁻²	9.28 × 10 ⁻³	2.21 × 10 ⁻²	2.27 × 10 ⁻²	2.21 × 10 ⁻⁷	4.06 × 10 ⁻³	2.08 × 10 ⁻⁴
无公害	农资	1.96 × 10 ⁻⁶	6.68 × 10 ⁻⁵	1.92 × 10 ⁻³	5.12 × 10 ⁻³	5.15 × 10 ⁻³	—	2.20 × 10 ⁻⁶	1.83 × 10 ⁻⁶
	运输	6.96 × 10 ⁻⁵	—	7.26 × 10 ⁻⁷	4.68 × 10 ⁻⁶	2.45 × 10 ⁻⁷	—	—	—
	农作	1.89 × 10 ⁻⁴	3.22 × 10 ⁻³	8.52 × 10 ⁻⁴	3.89 × 10 ⁻⁴	3.86 × 10 ⁻⁴	8.95 × 10 ⁻⁹	7.19 × 10 ⁻⁴	3.74 × 10 ⁻⁵
	合计	2.60 × 10 ⁻⁴	3.29 × 10 ⁻³	2.77 × 10 ⁻³	5.51 × 10 ⁻³	5.54 × 10 ⁻³	8.95 × 10 ⁻⁹	7.19 × 10 ⁻⁴	3.93 × 10 ⁻⁵

3 结论

通过对3种设施蔬菜生产方式中农资生产环节、运输环节和农作环节进行生命周期评价(LCA),可以看出,设施蔬菜生产对环境的影响基本小于中国的人均基准值,除了芬洛温室的全球变暖、环境酸化和水体富营养化,其中对环境影响较大的是能源消耗、水资源消耗、全球变暖、环境酸化和水体富营养化。除芬洛温室是农作环节造成主要环境影响外,日光温室生产和无公害生产是农资生产环节对环境的影响比农作环节大,各种生产方式的运输环节造成的环境影响较小。农资生产环节对环境的影响主要集中在环境酸化、水体富营养化,农作环节对环境的影响主要集中在水资源消耗,而人体毒性、水体毒性和陆生毒性对环境的影响较小。

在3种设施蔬菜生产方式中,芬洛温室在能源消耗、全球变暖、环境酸化和水体富营养化方面对环境的影响是最大的,而日光温室在水资源消耗、人体毒性、水体毒性和陆生毒性对环境的影响最高。而这两种生产方式与无公害生产方式相比,其对环境的影响都大,说明在生产中应改进目前的方法,在农资

(化肥、农药等)生产过程中应采用一些先进的工艺和环境保护设备来减少对环境的影响;在农作系统中,应采取合理的施肥、灌溉、施药的方法,通过营造良好的生长环境来减少农药、肥料的投入,从而减少对人体、水体和土壤的影响。总之,芬洛温室蔬菜生产对环境的影响是最大的。

日光温室的土地利用率较低,种植蔬菜种类繁多,而不同种类的蔬菜对环境、肥料的要求及利用率也不相同,文中没有考虑不同生产方式对土地资源的影响以及蔬菜吸收二氧化碳的作用,需在下一步的研究中进行探讨。

参考文献(References)

- [1] GB/T24040—2008. 环境管理 生命周期评价 原则与框架[S].
- [2] Frischknecht R, Stucki M. Scope-dependent modelling of electricity supply in life cycle assessments[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2010, 15(8): 806—816.
- [3] 乔永锋. 基于生命周期评价法(LCA)的传统民居的能耗分析与评价[D]. 西安: 西安建筑科技大学建筑学院, 2006.
- [4] Isabela B, Julio R, Carles M G, et al. Life-cycle as-

- assessment of electricity from biomass: case studies of two biocrops in Spain [J]. *Biomass and Bioenergy* 2010 ,34 (12): 1780 - 1788.
- [5] Adriana D B , Michela G , Marco D B. A survey of life cycle approaches in waste management [J]. *International Journal of Life Cycle Assessment* ,2009 ,14(7): 597 - 610.
- [6] 梁 龙. 基于 LCA 的循环农业环境影响评价方法探讨与实证研究 [D]. 北京: 中国农业大学农学与生物技术学院 2009.
- [7] Sonnemann G , Vigon B , Broadbent C , et al. Process on “global guidance for LCA databases” [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment* ,2011 ,16(1): 95 - 97.
- [8] 郭 军 , 顾闽峰 , 祖艳侠 , 等. 设施栽培蔬菜连作障碍成因分析及其防治措施 [J]. *江西农业学报* 2009 ,21 (11): 51 - 54.
Guo Jun , Gu Minfeng , Zu Yanxia , et al. Causes and control measures of continuous cropping obstacle in facility vegetable cultivation [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi* 2009 ,21(11): 51 - 54. (in Chinese)
- [9] 葛晓颖. 我国蔬菜产业氮磷钾肥料消费现状与需求分析 [D]. 北京: 中国农业大学资源与环境学院, 2009.
- [10] 吴 蕊 , 牛明芬 , 郭 颖 , 等. 设施大棚农药污染残留调查分析 [J]. *农业环境科学学报* ,2009 ,28(1): 130 - 134.
Wu Rui , Niu Mingfen , Guo Ying , et al. Survey and analysis of pesticide contamination in greenhouse [J]. *Journal of Agro-Environment Science* , 2009 ,28(1): 130 - 134. (in Chinese)
- [11] 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.
Ji Chunlei , Ding Mei , Wang Binxin , et al. Comparative evaluation of chemical and organic fertilizer on the base of life cycle analysis methods [J]. *Chinese Journal of Soil Science* ,2012 ,43 (2): 412 - 417. (in Chinese)
- [12] 张 铮. 全国农药行业产排污系数研究 [D]. 北京: 中国农业大学农学与生物技术学院 2008.
- [13] Andrews E , Lesage P , Benoît C , et al. Life cycle attribute assessment: case study of quebec greenhouse tomatoes [J]. *Journal of Industrial Ecology* 2009 ,13(4): 565 - 578.
- [14] Cellura M , Longo S , Mistretta M. Life cycle assessment (LCA) of protected crops: an Italian case study [J]. *Journal of Cleaner Production* 2012 ,28: 56 - 62.
- [15] 沈 军 , 陈青云 , 李中明 , 等. 三种类型温室建造的生命周期评价 [J]. *农业工程学报* ,2012 ,28(4): 180 - 187.
Shen Jun , Chen Qinyun , Li Zhongming , et al. Life cycle assessment (LCA) of three types greenhouses construction [J]. *Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering* ,2012 ,28(4): 180 - 187. (in Chinese)
- [16] 张群峰. 北京市蔬菜农药残留现状 [D]. 北京: 中国农业大学农学与生物技术学院 2008
- [17] 张振贤 , 程智慧. 高级蔬菜生理学 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2008.
- [18] 沈火林. 无公害蔬菜水果生产手册 [M]. 北京: 科学技术文献出版社 2003.
- [19] 徐映明 , 朱文达. 农药问答 [M]. 北京: 化学工业出版社 2011.
- [20] 杨倩苗. 建筑产品的全生命周期环境影响定量评价 [D]. 天津: 天津大学建筑工程学院 2009.
- [21] 陈林华 , 倪吾钟 , 李雪莲 , 等. 常用肥料重金属含量的调查分析 [J]. *浙江理工大学学报* ,2009 ,26(2): 223 - 227.
Chen Linhua , Ni Wuzhong , Li Xuelian , et al. Investigation of heavy metal concentrations in commercial fertilizers commonly-used [J]. *Journal of Zhejiang Sci-Tech University* ,2009 ,26(2): 223 - 227. (in Chinese)
- [22] 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.
- [23] Huijbregts M A J , Thissen U , Guinee J B , et al. Priority assessment of toxic substances in life cycle assessment. Part I: calculation of toxicity potentials for 181 substances with the nested multi-media fate , exposure and effects model USES-LCA [J]. *Chemosphere* ,2000 ,41 (4): 541 - 573.
- [24] Huijbregts M A J , Thissen U , Jager T , et al. Priority assessment of toxic substances in life cycle assessment. Part II: assessing parameter uncertainty and human variability in the calculation of toxicity potentials [J]. *Chemosphere* 2000 ,41(4): 575 - 588.

(责任编辑 祝贞学)