

基于生命周期评价的广西火龙果环境影响分析

赵鹏飞^{1,2}, 程 玉¹, 任太军², 黄志坚², 李广泽², 汤 华¹, 阮云泽^{1*}

1. 海南大学热带农林学院, 海南海口 570228; 2. 深圳诺普信农化股份有限公司, 广东深圳 518100

摘 要 为了评价火龙果种植体系对环境的影响, 并找出其主要的的影响因子, 通过农户调研与生命周期评价的方法对广西火龙果集约化种植体系开展了生命周期评价。结果表明: 富营养化和温室气体排放是火龙果生产体系生命周期环境影响中占比最大的影响类型, 对生命周期综合环境影响的贡献率分别为 59.6%和 21.7%。其中肥料生产和施用分别占到农资阶段和农作阶段富营养化潜值的 98.0%和 99.8%。而在温室气体排放中, 农资生产阶段的肥料与农药生产分别占农资生产阶段温室气体排放量的 20.0%和 77.9%, 肥料施用占农作阶段温室气体排放量的 86.6%。因此, 在火龙果生产体系中, 减少肥料及农药用量是减轻该体系对环境的影响的主要环节。

关键词 火龙果; 生命周期评价; 富营养化; 全球变暖潜在值; 环境酸化

中图分类号 S667.9 文献标识码 A

Environment Impact Assessment of Pitaya Production System with LCA Method in Guangxi

ZHAO Pengfei^{1,2}, CHENG Yu¹, REN Taijun², HUANG Zhijian², LI Guangze², TANG Hua¹, RUAN Yunze^{1*}

1. Institute of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China; 2. Shenzhen Noposion Agrochemicals Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518100, China

Abstract To evaluate the environmental impact of pitaya production and find out the main impact factors, a baseline household survey in Guangxi was conducted meanwhile the method of Life Cycle Assessment (LCA) was used for data analysis. Among all potential impacts indexes, the significant environmental impact were eutrophication and global warming potential, with the contribution rate of 59.6% and 21.7%, respectively. Fertilizer production and application accounted for 98.0% and 99.8% of the eutrophication in agricultural production stage and agricultural operation stage, correspondingly. In the global warming aspect, fertilizer and pesticide production accounted for 20.0% and 77.9% in agricultural production stage, which made the largest contribution among all the links. Similarly, fertilizer application, which accounted for 86.6% of the global warming potential, made the largest contribution in agricultural operation stage. To sum up, reducing fertilizer and pesticide application rate are the important ways to mitigate the impact on the environment in pitaya production.

Keywords pitaya; life cycle assessment; eutrophication; global warming potential; acidification

DOI 10.3969/j.issn.1000-2561.2019.11.004

集约化农业的可持续性是当前科学界和公众关注的重要问题之一^[1]。我国现代集约化农业以高投入换取高产出, 尤其是以果树和蔬菜为代表的经济作物^[2]。集约化农业虽然极大的提高了作

物产量, 提升了土地利用效率, 但也引发了许多资源环境问题, 比如能源消耗、温室效应、水体富营养化以及土壤酸化等^[3-5]。前人针对肥料生产或农田施用过程某个或若干环境排放途径如农田

收稿日期 2019-03-13; 修回日期 2019-06-20

基金项目 香蕉、菠萝、火龙果、槟榔优化施肥技术研究与示范 (No. zzzz002017038)。

作者简介 赵鹏飞 (1987—), 男, 博士, 农艺师, 研究方向: 养分资源综合管理。*通信作者 (Corresponding author): 阮云泽 (RUAN Yunze), E-mail: yunzeruan@163.com。

氨挥发、硝化和反硝化损失以及硝态氮的淋失等已经进行大量研究并取得了显著成果^[6-7]。然而,传统的环境影响评价方法在对农产品生产进行评价时往往具有片面性,因此,需要从生命周期角度全面识别和综合评价农产品生产体系的资源消耗与环境排放。

生命周期评价 (life cycle assessment, LCA) 方法旨在对某项产品、工艺或者服务“从摇篮到坟墓”整个生命周期中的资源消耗和环境排放潜力进行量化,寻求改善环境影响的机会,是一种全面系统的环境评价方法^[8]。目前 LCA 方法已经广泛应用于欧美国家和日本工农业领域的相关研究中,近年来,我国借鉴国外成果已经在工业领域建立了相应的评价指标体系,也有不少学者开始把 LCA 方法引入农业领域,开展农产品或农田管理措施的环境影响研究^[9]。

火龙果 (*Hylocereus undatus* cv. Vietnam) 属仙人掌科 (Cactaceae) 量天尺属 (*Hylocereus Britton et Rose*) 和蛇鞭柱属 (*Selenierys Meja-lantous Britton et Rose*) 植物,是热带亚热带果树^[10]。我国台湾从 20 世纪 90 年代开始引进试种,并选育出一些优良品种^[11]。自 2010 年以来,我国火龙果种植面积以每年平均 40% 的速度增长,短短的几年内,目前全国种植面积已超过 4 万 hm^2 , 主要分布在广西、广东、海南、云南、贵州等地,其中广西发展尤为迅速,约占全国种植面积的三分之一,而且随着香蕉行情及黄叶病的发展,由香蕉改种火龙果的大型基地越来越多^[12]。火龙果是典型的高投入高产出的作物,以纯氮用量为例,火龙果全年纯氮投入高达 $1000 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 大约是香蕉的 2 倍,柑橘的 10 倍,同时其产量在丰产期可达 $75 \text{ t}/\text{hm}^2$ ^[13]。为此,在当前火龙果种植面积迅速扩张的背景下,本研究以广西火龙果集约化生产体系为例,针对其主要环境影响问题,建立火龙果生命周期资源消耗与污染物排放清单,进行生命周期的环境影响评价,旨在为研究区域火龙果种植全程环境管理提供决策依据,也为种植者的管理技术环节提供优化方向。

1 材料与方法

1.1 研究区域与数据来源

本研究区域为广西壮族自治区隆安县 ($107^{\circ}21' \sim 108^{\circ}6'E$, $22^{\circ}51' \sim 23^{\circ}21'N$), 属南亚热带季风气候,

日照充足,雨量集中,夏季长冬季短。全县平均温度为 21.9°C , 极端最高温度为 38.9°C , 极端最低温度为 1.9°C , 年降雨量 1230 mm ^[14]。隆安县全县火龙果种植面积 0.33 万 hm^2 , 是广西火龙果种植的集中区域^[15]。

本研究数据来源于 2018 年对广西自治区隆安县 3 个乡镇进行的农户调研,据统计,隆安县种植面积大于 33 hm^2 的火龙果基地约有 32 个,本研究调研基地数量 16 个,每个基地平均种植面积约 87.5 hm^2 , 覆盖火龙果种植面积 1400 hm^2 , 约占隆安火龙果总面积的 42%。调查采用问卷方式,通过访谈式交流,详细记录相关信息。

调研的主要内容为: (1) 种植面积、品种、种植密度和产量; (2) 灌溉水用量和灌溉次数、肥料施用情况和农药用量; (3) 基建构造材料,主要包括钢材用量、防草布用量等; (4) 基地运输肥料、打药施肥等消耗的柴油、汽油及耗电量等。

隆安地区火龙果种植基地几乎全部采用滴灌的方式进行灌溉和施肥,因此本研究结果只针对该地区滴灌条件下的火龙果种植体系。

1.2 生命周期评价

根据国际环境毒理学和化学学会 (SETAC) 以及 ISO14040 和 ISO14044 环境管理标准的 LCA 技术框架,生命周期评价包括以下 4 个步骤: 目标定义与范围界定、清单分析、影响评价和结果解释。

1.3 目标定义与范围界定

本研究以与作物生命周期有关的矿石和能源开采作为系统的起始边界,终止于农作物种植输出阶段,其中输出包括农产品和污染物输出 2 个部分。由于火龙果属多年生作物,本研究以火龙果种植第 2 年作物全年生产过程为评价单元。土地资源是一切生产活动的基础,直接进入农作系统。本研究以生产农作物 1 t 为评价的功能单元。火龙果体系生命周期评价系统界定如图 1 所示。

1.3.1 清单分析 本研究将火龙果生产的生命周期划分为农资生产阶段和农田种植阶段。包括煤、石油、天然气、电力等原材料的开采与生产,土地资源的利用,化肥、农药等农资生产相关的能耗和污染物的排放,如 CO_2 、 NH_3 、 SO_2 、 CH_4 等。与该系统相关的厂房设备、建筑设施、运输工具的生产等环节对环境的影响则不予考虑。

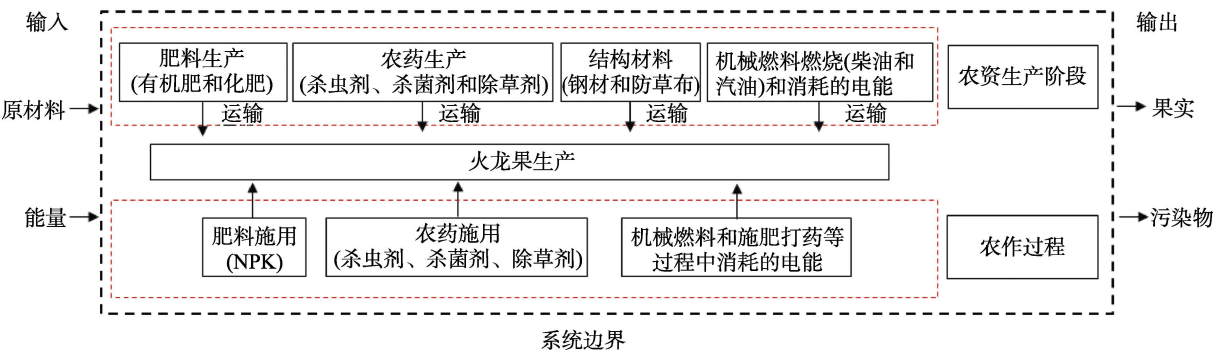


图 1 研究系统的系统边界及相关的输入和输出项
Fig. 1 Flow diagram stages for pitaya production system

农田种植阶段中，截至目前，国内尚未有基于广西火龙果园氧化亚氮排放量的研究，但在同一地区已有研究团队针对香蕉园氧化亚氮排放物进行了系统分析^[16]，因此，本研究根据前人研究结论计算火龙果园氧化亚氮（N₂O）的公式为：

$$\text{N}_2\text{O}(\text{Emission}) = \text{有机肥氮} \times 0.73\% + \text{硝态氮} \times 0.25\% + \text{脲基氮肥} \times 1.15\% \quad (1)$$

截至目前，关于广西火龙果园氨挥发的报道虽然少见，但针对大尺度上的南方农田氨挥发量（NH₃-N）已有较多报道。本研究根据目前权威刊物数据整理得该地区农田氨挥发的平均值^[17-20]，即 35.2 kg/hm²，以该值作为常数直接用于火龙果园氨挥发量的估算。

氮淋洗（NO₃-N）的计算依据曾曙才等^[21]在赤红壤条件下获得的氮淋洗特征研究结果估算，该研究指出，在土著模拟条件下，总氮淋洗量（y）与施氮量（x）之间存在显著线性相关，其回归方程可作为氮淋洗的计算依据：

$$\text{总氮淋洗}(y) = 0.4419 \times \text{施氮量}(x) + 97.605 \quad (R^2 = 0.941) \quad (2)$$

氧化氮（NO_x-N）的计算参照 Perrin 等^[22]的研究结果：

$$\text{氧化氮}(\text{NO}_x\text{-N}) = 10\% \text{氮淋洗}(\text{NO}_3\text{-N}) \quad (3)$$

1.3.2 影响评价 在 LCA 中，影响评价是对清单分析中所辨识出来的符合的影响进行定量或定性的分析和评价。影响评价由影响分类、特征化、标准化和加权评估 4 个步骤组成。

1.3.3 影响分类 影响分类是指根据不同的环境影响类型，对清单分析阶段的数据进行归类。本研究中资源利用主要考虑能源消耗、土地资源的利用和水资源消耗；生态环境影响主要考虑全球变暖、环境酸化以及富营养化 3 个指标。

1.3.4 特征化 特征化是对资源消耗和环境排放

清单进行环境影响潜力计算的过程。对能源消耗，国际常用的方法是将其折算成能量进行比较；水资源的消耗具有区域范畴，本研究对火龙果生产体系每生产 1 t 果实消耗的水资源总量进行分析，涉及农田环节的淡水资源消耗和农资生产中的水资源消耗。全球变暖、环境酸化、富营养化等环境影响比较完善的当量模型已经建立，气候变化以 CO₂ 为参照物转换为全球变暖潜力，CH₄、N₂O 和 CO₂ 的当量系数分别为 21、310 和 2；环境酸化以 SO₂ 为参照物，NO_x 和 NH₃ 的当量系数分别为 0.7 和 1.88；富营养化则是以 PO₄ 为参照物，具体的当量系数见表 1。

表 1 各类环境影响因子及当量系数
Tab. 1 Impact factors and equivalent coefficient of all environmental impact types

影响因子 Impact factor	全球变暖 当量系数 Equivalency factor of global arming /(CO ₂ eq·t ⁻¹)	环境酸化 当量系数 Equivalency factor of acidification /(SO ₂ eq·t ⁻¹)	富营养化 当量系数 Equivalency factor of eutrophication /(PO ₄ eq·t ⁻¹)
CO ₂	1		
CO	2		
CH ₄	21		
N ₂ O	310		0.13
NO _x	310	0.70	0.13
NH ₃		1.88	0.13
SO _x		1.00	
NO ₃ ⁻			0.10
NH ₄ ⁺			0.33
P _{tot}			3.06
COD			0.022

注：上述参数来自 Huijbregts 等^[23]和邓南圣等^[24]的研究成果；其中 P_{tot} 为磷排放总量。

Note: The parameters above are from the results of Huijbregts et al.^[23] and Deng et al.^[24]. P_{tot} is total phosphorus emission.

1.3.5 标准化 标准化的目的是建立标准化基

准,使不同影响类型能够比较大小。标准化过程选择的基准值一般是全球、全国或某一地区的资源消耗或环境排放的均量或总量值,其中均量值有人均占有排放量、地均占有量及单位产值等。标准化一般是用基准量除以特征化结果。本研究的标准化基准值是 2000 年世界人均环境影响潜力,具体标准化基准值见表 2。

表 2 2000 年世界人均环境影响基准值及权重值
Tab. 2 Normalization values of the world environmental impact per capita in 2000 and weight of different environmental impact indexes

环境影响类型 Environmental impact type	单位 Unit	标准化基准值 Normalization value/ (kg·person ⁻¹ ·year ⁻¹)	权重值 Weighted value
能源消耗 Energy consumption	MJ·t ⁻¹	2 590 457	0.15
土地资源消耗 Land resource consumption	M ² ·t ⁻¹	988.17	0.14
水资源消耗 Water resource consumption	M ³ ·t ⁻¹	2 193.9	0.13
全球变暖 Global warming	kg·CO ₂ -eq ⁻¹	6 869	0.12
环境酸化 Acidification	kg·SO ₂ -eq ⁻¹	52.26	0.14
富营养化 Eutrophication	kg·PO ₄ -eq ⁻¹	1.88	0.12

1.3.6 加权评估 不同环境影响类型对同一个国家或地区的影响是不同的,因此需要对不同环境影响类型赋予一定的权重,然后再进行加权。加权评估是对各类型环境影响指数进行综合评价,得到环境影响综合指数,从而提供一个可以比较的评价结果。

常见的有 3 种权重的确定方法:目标距离法、专家组评议及层次分析法。本研究采用王明新等^[25]以及彭小瑜等^[26]的研究通过专家组评议法评议设置权重,详见表 2。

1.3.7 结果解释 生命周期评价结果解释是根据生命周期评价清单分析或者标准化、特征化以及加权评估的结果,以透明的方式来分析结果,形成结论,解释研究的局限性,提出建议并报告生命周期解释的结果。

2 结果与分析

2.1 广西火龙果生产体系物质投入与产出

表 3 表明了通过农户调研获取的 2017 年隆安县火龙果生产体系物质投入产出情况。该体系全年 N、P₂O₅ 和 K₂O 的投入量分别为 806、387、

789 kg/hm²,其中化肥 N、P₂O₅ 和 K₂O 的投入量分别为 580、242、660 kg/hm²,有机肥 N、P₂O₅ 和 K₂O 的投入量分别为 226、145、129 kg/hm²。化肥 N、P₂O₅ 和 K₂O 分别占全年总 N、P₂O₅ 和 K₂O 投入的 72.0%、62.5%和 83.7%。火龙果生产体系中有机肥投入量较大,达到了 32 250 kg/hm²,是当地另一种典型经济作物香蕉的 3 倍多^[27],杀虫剂、杀菌剂以及除草剂等农药投入量为 67.5 kg/hm²,另外,由于田间管理等消耗的电力、汽油、柴油、栽培用钢铁以及防草用的地布等分别为 933 kWh/hm²、79.0 kg/hm²、155 kg/hm²、80.9 kg/hm² 和 58.3 kg/hm²。相应地,火龙果全年果实产量也达到了 27.6 t/hm²。

表 3 2017 年广西隆安火龙果生产体系物质投入产出
Tab. 3 Input-output inventory of pitaya production system in Longan Guangxi in 2017

物质投入-产出 Material input-output		平均值 Mean value	范围 Rang	标准偏差 Standard deviation
总养分 (kg·hm ⁻²)	N	806	322~1 233	284
	P ₂ O ₅	387	132~834	224
	K ₂ O	789	282~1 612	263
化肥养分 (kg·hm ⁻²)	N	580	164~834	141
	P ₂ O ₅	242	31.3~577	154
	K ₂ O	660	192~1 324	338
有机肥用量/(kg·hm ⁻²)		32 250	22 500~57 000	11 832
有机肥养分 (kg·hm ⁻²)	N	226	158~399	84.2
	P ₂ O ₅	145	101~257	47.6
	K ₂ O	129	90~228	38.6
农药/(kg·hm ⁻²)		67.5	23.6~95.3	21.2
电/(kWh·hm ⁻²)		933	463~1 513	282
汽油/(kg·hm ⁻²)		79.0	43.5~106	19.3
柴油/(kg·hm ⁻²)		155	102~195	27.8
钢铁/(kg·hm ⁻²)		80.9	68.5~93.2	6.44
防草布/(kg·hm ⁻²)		58.3	44.6~72.1	7.75
产量/(t·hm ⁻²)		27.6	18.8~33.8	4.16

2.2 火龙果生产体系生命周期评价

2.2.1 火龙果生产体系生命周期清单评价 由表 4 可知,火龙果生产体系农资系统的能源消耗为 77 558.679 0 MJ/t,农作系统的能源消耗为 362.1 931 MJ/t,农资系统是农作系统能源消耗的 200 余倍,除水资源消耗等个别指标,农资子系统的能源消耗以及污染物排放指标均高于农作子系统,如温室气体的主要成分 CO₂ 和 CH₄,农资子系统较农作子系统高上百和上千倍,而农资生

产中, 肥料、农药以及防草布是其中消耗量较大的部分, 生产过程中的能量消耗及污染物排放也较多。

表 4 火龙果生产体系生命周期清单
Tab. 4 The LCA inventory of pitaya production system

影响因子 Impact factor	农资系统 Agricultural material system	农作系统 Agricultural production system	合计 Total
能源消耗 Energy consumption/(MJ·t ⁻¹)	77 558.679 0	362.193 1	77 920.872 1
水资源消耗 Water resource consumption/(m ³ ·t ⁻¹)	4.364 8	94.490 0	98.854 8
HC/(g·t ⁻¹)	0.041 2	0.000 3	0.041 4
CO/(g·t ⁻¹)	0.496 7	0.005 8	0.502 5
CO ₂ /(g·t ⁻¹)	4696.724 6	26.955 5	4 723.680 1
NH ₃ /(g·t ⁻¹)	2.416 1	1.275 4	3.691 5
N ₂ O/(g·t ⁻¹)	0.006 1	0.776 5	0.782 6
NO _x /(g·t ⁻¹)	2.608 0	0.122 8	2.730 8
NO ₃ /(g·t ⁻¹)	—	17.674 0	17.674 0
SO _x /(g·t ⁻¹)	0.991 5	0.063 5	1.055 0
CH ₄ /(g·t ⁻¹)	1.671 5	0.000 4	1.671 9
Ptot/(g·t ⁻¹)	0.224 5	0.022 3	0.246 8
NH ₄ /(g·t ⁻¹)	0.329 0	—	0.329 0
COD/(g·t ⁻¹)	4.457 2	—	4.457 2

2.2.2 分类环境影响评价 (1) 能源消耗。火龙果体系生产过程中的能源耗竭, 包括可再生资源与不可再生资源两部分。可再生资源包括土地资源与水资源两部分。本研究参照梁龙^[9]的研究成果, 因农资子系统中土地利用的数据较难获取, 暂不考虑。故生命周期评价中可再生能源消耗仅考虑水资源消耗及农作子系统土地资源消耗。不可再生资源主要包括农资生产过程和农作系统中农机使用所消耗的化石燃料。由表 5 可见, 火龙果生产体系中土地资源利用值为 362.50 m²/t, 全部来自农作子系统。水资源消耗为 98.95 m³/t, 其中农资系统 4.36 m³/t, 占其整个生命周期水资源消耗的 0.4%, 而主要的水资源消耗发生在农作生产阶段, 为 94.49 m³/t, 占其整个生命周期水资源消耗的 95.6%。

火龙果生产体系不可再生资源耗竭主要发生在农资生产阶段, 占到整个生命周期能源消耗的 99.5%, 这主要是由于生产化肥、农药及发电过程消耗了大量的能源, 而农作子系统中能源消耗为 362.19 MJ/t, 仅占到其生命周期的 0.5%。

表 5 火龙果生产体系生命周期资源消耗特征化结果
Tab. 5 Characterization of energy resources depletion for pitaya production system

环境影响类型 Environmental impact type	农资系统 Agricultural material system	农作系统 Agricultural production system	合计 Total
能源消耗 Energy consumption/(MJ·t ⁻¹)	77 558.68	362.19	77 920.87
土地资源利用 Land resource consumption/(m ² ·t ⁻¹)	—	362.50	362.50
水资源消耗 Water resource consumption/(m ³ ·t ⁻¹)	4.36	94.49	98.85

(2) 温室气体排放。火龙果生产体系生命周期温室气体排放总量为 5848.87 kg CO₂-eq/t (表 6), 其中农资生产阶段的温室气体排放达到 5543.10 kg CO₂-eq/t, 占整个生命周期温室气体排放的 94.7%, 而在农资生产阶段的温室气体排放中, 肥料与农药生产排放量最大, 肥料生产阶段排放量为 1108.71 kg CO₂-eq/t, 占农资生产阶段生命周期温室气体排放量的 20.00%, 农药生产阶段的排放量高达 4320.00 kg CO₂-eq/t, 占农资生产阶段生命周期温室气体排放量的 77.93%, 这主要是在化肥和农药特别是农药生产过程中会产生大量的 CO₂ 所导致的。农作生产过程中温室气体排放量为 305.77 kg CO₂-eq/t, 其中肥料施用造成的温室气体排放量为 264.76 kg CO₂-eq/t, 占农作阶段温室气体排放量的 86.59%, 这是由于在肥料尤其是氮肥的施用过程中产生的 N₂O 造成的。

(3) 环境酸化。引起环境酸化的物质主要有农资生产和农作物种植过程中产生的 SO₂、NH₃ 和 NO_x 等。广西火龙果生产体系生命周期环境酸化潜值为 9.91 kg SO₂-eq/t (表 6), 其中农资生产阶段的环境酸化潜值为 7.36 kg SO₂-eq/t, 占整个生命周期环境酸化潜值的 74.3%, 而在农资生产环节中, 又以肥料生产过程中的环境酸化潜值最高, 为 7.03 kg SO₂-eq/t, 占农资生产阶段环境酸化潜值的 95.5%。农作环节的环境酸化潜值为 2.65 kg SO₂-eq/t, 同样, 在该环境中, 肥料的施用依然是造成环境酸化最高的环节, 环境酸化潜值达到 2.55 kg SO₂-eq/t, 占该阶段环境酸化潜值的 96.2%。

(4) 富营养化。研究中引起富营养化的物质主要考虑 Ptot、N₂O、NO_x、NO₃、NH₄、NH₃ 以及 COD 等。广西火龙果生产体系中富营养化潜值为 4.40 kg PO₄-eq/t。其中农资生产阶段富营养潜

值为 2.03 kg PO₄-eq/t, 农作种植阶段的富营养化潜值为 2.37 kg PO₄-eq/t, 分别占整个生命周期富营养化潜值的 46.1%和 53.9%, 而在农资生产和农作种植阶段中, 肥料生产和施用仍然是造成 2 个阶段富营养化的主要原因, 分别占到 2 个阶段富营养化潜值的 98.0%和 99.8%。

2.2.3 标准化及加权评价 标准化及加权后火龙果生产体系的生命周期影响指数如表 7 所示, 标准化的结果显示, 生产 1 t 火龙果产生的能源消

耗、土地资源、水资源消耗、温室气体、环境酸化以及富营养化等, 分别相当于 2000 年世界人均环境影响潜力的 3.01%、36.7%、4.51%、85.2%、19.0%和 234%。权重后影响指数及贡献率结果显示, 广西火龙果生产体系生命周期环境影响最大的是富营养化、温室气体排放及土地资源消耗, 三者在水果生产体系生命周期环境影响的占比分别为 59.6%、21.7%和 10.9%。而能源消耗、水资源消耗和环境酸化占比较小。

表 6 农资与农作阶段单位产量(吨)温室气体排放、环境酸化潜值和富营养化效应潜值
Tab. 6 Global warming potential, acidification potential and eutrophication potential of agricultural materials and agricultural production stage

项目 Items	温室气体排放 Greenhouse gas emission		环境酸化潜值 Acidification potential		富营养化效应值 Eutrophication potential	
	农资 Agricultural material	农作 Agricultural production	农资 Agricultural material	农作 Agricultural production	农资 Agricultural material	农作 Agricultural production
肥料 Fertilizer	1108.7106	264.7564	7.0310	2.5500	1.9861	2.3676
农药 Pesticide	4320.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0227	0.0000
燃油电力 Fuel and electricity	73.1878	41.0121	0.1445	0.0951	0.0145	0.0059
钢材和防草布 Steel and weed Barrier Fabric	41.2054	—	0.1838	—	0.0064	—

表 7 火龙果生命周期标准化及环境影响综合指数
Tab. 7 Normalization and weighting assessment of LCA for pitaya production system

环境影响类型 Environmental impact type	标准化结果 Normalization result	权重系数 Weight coefficient	权重后影响指数 Influence index after weight	贡献率 Contribution rate/%
能源消耗 Energy consumption	0.0301	0.15	0.0045	0.96
土地资源消耗 Land resource consumption	0.3668	0.14	0.0514	10.9
水资源消耗 Water resource consumption	0.0451	0.13	0.0059	1.24
全球变暖 Global warming	0.8515	0.12	0.1022	21.7
环境酸化 Acidification	0.1896	0.14	0.0265	5.63
富营养化 Eutrophication	2.3426	0.12	0.2811	59.6

3 讨论

火龙果生产体系是一种高投入高产出的集约化生产体系。有机肥、化肥、农药等农资投入以及水电、燃油等的投入均维持较高水平, 这主要是由于火龙果在我国规模化种植年限较少, 种植基地对其栽培管理技术了解较少, 尤其是肥料农药等农资投入, 对于投放时间、配比、用量等都没有非常严格的理论依据, 与此同时, 火龙果目

前市场接受度高, 行情相对较好, 大多基地的亩效益可以维持在 8000 元以上, 所以, 综合以上原因, 导致基地更偏向于加大投入换取更高额的经济回报。

本研究的结果显示, 富营养化、温室气体排放与土地资源是火龙果生产体系生命周期环境影响中占比最大的影响类型。与其他地区的其他作物相比, 结果有所不同, 比如在华北平原的冬小麦生产体系中, 影响最大的能源消耗、环境酸化^[28]; 在京郊的陆地蔬菜生产体系中, 富营养化、环境酸化以及温室气体排放的影响相对较大^[29], 这与火龙果生产体系中肥料尤其是氮肥的过量施用有密切关系。据报道, 火龙果优化施氮量仅为 57.0 kg/hm²^[13], 而本研究中农户的总施氮量为 806 kg/hm², 远远高于优化施氮量, 过量施氮导致大量的 NO₃ 淋失^[30]、NO_x 排放^[31]与氨挥发^[32], 同样, 过量的氮肥生产会产生大量的 CO₂^[33], 从而导致严重的温室气体排放。所以, 优化减少肥料的施用是减少火龙果生产体系环境影响的重要措施。

农资生产阶段的能源消耗、温室气体排放以及所带来的环境酸化潜力远远大于农作物种植环节。以氮肥生产为例, 据报道, 我国 70%的氮肥

生产都是以煤为燃料,在以煤为燃料的尿素生产中,中型氮肥企业吨氮需要消耗原料煤、燃料煤、电分别是 1017 kg、940 kg 和 1423 kWh,而 1 t 尿素需要消耗氨 590 kg、燃料煤 900 kg 和电 193 kWh。消耗量远大于以天然气为原料的国际水平,肥料生产企业向来是我国的耗能大户和重点治污单位^[31]。因此,如何从肥料生产的角度减少环境影响是减少火龙果生产体系环境影响的另一个手段。

综上,在火龙果种植面积迅速增加的同时,其对环境的影响应该越来越引起大众的关注,基于本文研究结果,给予火龙果种植以下建议:

(1) 优化火龙果施肥中氮磷钾的施用量,其中氮肥用量可在现有施肥量基础上减少 30%~40%,磷肥减少 10%~20%,钾肥减少 10%~15%,以此减少肥料过量施用带来的环境影响,同时,减少化肥的过量施用也是从肥料生产角度减少其对环境的影响的重要举措;

(2) 结合生产实际,病虫害的防治掌握最佳的防治时间,最佳的防治方式,最有针对性的防治药剂,尽可能的减少农药的投入量,以此减轻其带来的环境代价。

生命周期系统边界、管理技术以及产量等对功能单位环境影响潜值都有很大的影响。本研究以树龄为 2 a 的火龙果为研究对象,并未进入火龙果的丰产时期,而且不涉及建园初期的大量物资投入,同时系统边界终止于产品输出,不涉及销售阶段,若扩展系统边界为建园初期至销售点,则会形成新的研究结果。其次,由于资料的局限性,未考虑农资子系统土地资源的消耗和相关厂房设备、建筑设施和运输工具生产的环境影响;系统边界还有待进一步扩展,系统中的相关数据还有待进一步完善。

参考文献

- [1] Wang X Z, Zou C Q, Zhang Y Q, *et al.* Environmental impacts of pepper (*Capsicum annuum* L.) production affected by nutrient management: A case study in southwest China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 171: 934-943.
- [2] Chang J, Wu X, Wang Y, *et al.* Does growing vegetables in plastic greenhouses enhance regional ecosystem services beyond the food supply?[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2013, 11(1): 43-49.
- [3] He F F, Jiang R F, Chen Q, *et al.* Nitrous oxide emissions from an intensively managed greenhouse vegetable cropping system in Northern China[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157(5): 1666-1672.
- [4] Ju X T, Kou C L, Christie P, *et al.* Changes in the soil environment from excessive application of fertilizers and manures to two contrasting intensive cropping systems on the North China Plain[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 145(2): 497-506.
- [5] Song X Z, Zhao C X, Wang X L, *et al.* Study of nitrate leaching and nitrogen fate under intensive vegetable production pattern in northern China[J]. *Comptes Rendus Biologies*, 2009, 332(4): 385-392.
- [6] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. *土壤与环境*, 2000, 9(1): 1-6.
- [7] 张凤华, 刘建玲, 廖文华. 农田磷的环境风险及评价研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008(4): 797-805.
- [8] Rebitzer G, Ekvall T, Frischknecht R, *et al.* Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications[J]. *Environment International*, 2004, 30(5): 701-720.
- [9] 梁 龙, 吴文良, 郭岩彬, 等. 华北地区农田潜在生态毒性评估与农业可持续发展——以山东桓台县冬小麦-夏玉米轮作系统为例[J]. *农业环境与发展*, 2011, 28(4): 94-99.
- [10] 申世辉, 马玉华, 蔡永强. 火龙果研究进展[J]. *中国热带农业*, 2015(1): 48-52.
- [11] 陈振东. 红龙果栽培技术[J]. *柑桔与亚热带果树信息*, 2001, 17(12): 28-29.
- [12] 卢亭君, 林作晓, 周金娇, 等. 广西南宁市香蕉产业发展探讨[J]. *园艺与种苗*, 2011, 5(4): 65-68, 97.
- [13] 邓仁菊, 范建新, 蔡永强. 国内外火龙果研究进展及产业发展现状[J]. *贵州农业科学*, 2011, 39(6): 188-192.
- [14] 郑文武, 尧金燕, 彭宏祥, 等. 广西香蕉产业可持续发展之战略探讨[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(17): 434-438.
- [15] 王金乔, 马翠凤, 张学娟, 等. ‘金都 1 号’火龙果果实生长发育规律研究[J]. *热带农业科学*, 2017, 37(2): 24-27.
- [16] 李宝深. 滴灌蕉园养分综合管理技术研究与应用——以广西金穗为例[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- [17] 王桂良. 中国三大粮食作物农田活性氮损失与氮肥利用率的定量分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
- [18] 安 宁. 我国水稻高产高效的实现途径研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- [19] 朱兆良, 文启孝. 农田生态系统中化肥的去向和氮素管理[M]. 南京: 江苏科技出版社, 1992.
- [20] Zhu Z L, Cai G X, Simpson J R, *et al.* Processes of nitrogen loss from fertilizers applied to flooded rice fields on[J]. *Fertilizer Research*, 1988, 18(2): 101-115.
- [21] 曾曙才, 吴启堂, 陈水莲, 等. 肥料混施对赤红壤氮磷淋

- 失特征的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(3): 82-86.
- [22] Perrin A, Basset-Mens C, Gabrielle B. Life cycle assessment of vegetable products: a review focusing on cropping systems diversity and the estimation of field emissions[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2014, 19(6): 1247-1263.
- [23] Huijbregts M A, 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.
- [24] 邓南圣, 王小兵. 生命周期评价[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [25] 王明新, 包永红, 吴文良, 等. 华北平原冬小麦生命周期环境影响评价[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(5): 1127-1132.
- [26] 彭小瑜, 吴喜慧, 吴发启, 等. 陕西关中地区冬小麦-夏玉米轮作系统生命周期评价[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(4): 809-816.
- [27] 张江周, 张 涛, 余 赟, 等. 滴灌条件下广西香蕉氮磷钾吸收与分配特性研究[J]. 热带作物学报, 2016, 37(12): 2250-2255.
- [28] 周 冉, 班红勤, 侯 勇, 等. 京郊典型作物生产体系施肥环境影响的生命周期评价[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(5): 1042-1051.
- [29] 巨晓棠, 潘家荣, 刘学军, 等. 高肥力土壤冬小麦生长季肥料氮的去向研究 I. 冬小麦生长季肥料氮的去向[J]. 核农学报, 2002, 16(6): 397-402.
- [30] 邹国元, 张福锁, 巨晓棠, 等. 冬小麦-夏玉米轮作条件下氮素反硝化损失研究[J]. 中国农业科学, 2004, 37(10): 1492-1496.
- [31] 郑 蕾, 王学东, 郭李萍, 等. 施肥对露地菜地氨挥发和氧化亚氮排放的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(12): 4063-4070.
- [32] 张 霞, 钱锦霞, 李 娜, 等. 1970—2012 年山西省负积温变化特征及其影响[J]. 中国农学通报, 2014, 30(33): 243-247.
- [33] 李志坚. “十一五”时期循环经济与我国氮肥行业结构调整[J]. 氮肥技术, 2008, 29(1): 1-4.