

太湖地区高产水稻生命周期评价

王明新¹, 夏训峰², 刘建国¹, 柴育红¹, 雷春生¹

(1.江苏工业学院环境与安全工程学院, 江苏 常州 213164; 2.中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要:以太湖地区高产水稻典型管理措施为例,应用生命周期评价方法,以生产 1 t 水稻为评价的功能单元,把水稻生命周期划分为原料阶段、农资阶段和种植阶段进行清单分析与影响评价,考虑了能源消耗、水资源消耗、温室效应、环境酸化和富营养化 5 种环境影响类型。结果表明,太湖地区高产水稻生命周期环境影响潜力大小依次是水资源消耗、富营养化、温室效应、环境酸化和能源消耗,环境影响指数分别为 1.45、0.54、0.52、0.32 和 0.05,环境影响综合指数为 0.54。降低稻田水肥投入,提高水分和养分生产效率是控制太湖地区水稻生产体系生命周期环境影响的关键,它在直接减少种植环节资源消耗与污染排放的同时,也间接减轻了上游生产环节的环境影响,从而减缓生命周期的环境影响。

关键词:生命周期评价;清单分析;太湖流域;水稻

中图分类号:X826 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)02-0420-05

Life Cycle Assessment of High-yielding Rice in Taihu Region

WANG Ming-xin¹, XIA Xun-feng², LIU Jian-guo¹, CHAI Yu-hong¹, LEI Chun-sheng¹

(1.College of Environmental & Safety Engineering, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou 213164, China; 2.China Environmental Science Research Institute, Beijing 100012, China)

Abstract: In this study, a life cycle assessment (LCA) method was used to examine the environmental impact of the rice production system in Taihu region. The LCA considered the entire system, which was required to produce 1 ton each of rice. The analysis included raw material extraction and transportation, agrochemical production and transportation, and arable farming in the field. First, all emissions and resource consumption connected to the different processes were listed in a life cycle inventory (LCI) and related to a common unit (1 ton of grain). Then a life cycle impact assessment (LCIA) was conducted, in which the inventory data were aggregated into indicators for environmental effects, including energy depletion, water depletion, climate change, acidification and aquatic eutrophication. The result showed that the significance of environmental impacts followed by water depletion, aquatic eutrophication, global warming, acidification and energy depletion, with the impact indices of 1.45, 0.54, 0.52, 0.32 and 0.05, respectively. The aggregate life cycle environmental impact index was 0.54. As such, to reduce the nitrogenous fertilizer and water consumption as well as to increase their production efficiency were the key points to control the life cycle environmental impacts of rice production system in Taihu region, which decreased resource consumption and emissions not only directly in arable farming stage but also indirectly in the upstream production stage, so as to reduce life cycle environmental impacts of rice production system.

Keywords: life cycle assessment; inventory analysis; Taihu region; rice

太湖地区是我国农业高产、稳产的地区之一,集约化程度高,化肥用量也很高。农民习惯上大量施用水肥以获得作物的高产,而忽视了水肥过量使用的低效率和严重的环境排放。稻田水肥过量投入不仅引起种植阶段资源消耗与污染排放,也带动上游的农资产

产及其相应的原材料开采运输过程的资源消耗与污染排放。然而,这并不意味着传统低投入农业就一定是环境友好型农业,因为低投入农业的低产出意味着需要更多的土地来生产农作物,其实质是污染物在不同生产体系或生产过程的转移^[1],这使得传统的环境影响评价方法在农产品环境评价中的应用结果往往具有片面性,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影响。

生命周期评价(life cycle assessment,简称 LCA)作为一种新兴的环境管理工具,旨在对产品整个生命

收稿日期:2008-04-25

基金项目:江苏省基础研究计划(BK2007734);国家重点基础研究发展计划(2008CB418006)

作者简介:王明新(1979—),男,福建莆田人,博士,讲师,主要研究方向为农业面源污染防治。E-mail:wmxcu@163.com

周期潜在环境影响进行定量分析,被广泛应用于很多工业产品环境影响评价中,得到了国际范围内的普遍认同,形成了一套较为完整的方法体系^[2]。国外不少学者把 LCA 方法引进农业领域,开展农产品或农田管理措施的 LCA 研究^[1,3-5],但国内还很少报道^[6]。本研究针对我国太湖地区高产水稻生产体系生命周期的资源消耗与环境排放,应用 LCA 方法进行全面评价,为太湖地区水稻可持续生产与全程环境管理提供科学依据,也为我国其他农产品或农艺措施开展生命周期评价提供方法和数据支持。

1 评价方法

根据国际环境毒理学和化学学会(SETAC)的权威专著^[7],LCA 由 4 个相互关联的阶段组成,即目标定义和范围界定(Goal and Scope Definition);清单分析(Inventory);影响评价(Impact Assessment)和改进评价(Improvement Assessment)。

1.1 目标定义与范围界定

本文以地处太湖地区的江苏省昆山市高产水稻田常规管理措施(NP 总用量 $343.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,产量 $8730 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)^[8]为研究对象进行评价。研究的起始边界从与水稻生命周期有关的矿石和能源开采开始,终止边界为作物种植环节输出农产品和污染物。以生产水稻 1 t 为评价的功能单元,分析太湖地区高产稻田生产 1 t 水稻生命周期的所有能量和物质的投入、产出及对环境造成的影响,以寻求减少水稻生命周期各阶段产生的能源、资源消耗以及对环境影响的途径与措施,为水稻生产体系全程环境管理提供决策依据。

1.2 清单分析

本文把研究对象分为 3 个阶段,即原料阶段、农资阶段和种植阶段。作物种植阶段仅考虑田间水肥投入的环境影响,不考虑其他耕作措施的资源与环境影响;农资阶段考虑化肥在生产和运输过程的资源消耗与环境排放;原料阶段主要考虑化肥生产所用原料的开采与运输的资源消耗与环境排放,因能源是农资阶段最重要的原料,因此本阶段仅评价能源开采与运输的资源消耗与环境排放。原料阶段与农资阶段的能耗、水耗等技术经济指标来自《中国统计年鉴》、《中国环境年鉴》、《中国能源统计年鉴》、《中国化学工业年鉴》、《中国经济年鉴》、《中国电力年鉴》和《中国铁道年鉴》等, SO_2 、 CH_4 、 CO_2 、 CO 、 N_2O 、 COD 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 NO_x 等污染物排放系数来自国内相关研究报道^[9-10],种植阶段氮素各种途径排污系数来自有关学者在太湖流

域开展的研究观测报道^[11-14]。相关厂房设备、建筑设施、运输工具生产的环境影响不予考虑。

1.3 影响评价

影响评价主要是对识别出的环境影响进行定性或定量的表征评价,即确定研究对象的资源消耗与污染物排放及其对外部环境的影响。影响评价一般分为特征化、标准化和加权评估 3 个步骤。

1.3.1 特征化

特征化是对资源消耗和环境排放清单进行分类并计算其环境影响潜力的过程。本研究仅考虑能源耗竭、水资源耗竭、温室效应、环境酸化和富营养化等 5 种类型。水资源消耗以单位评价单元的灌溉用水量表征,能源消耗以单位评价单元的能量消耗量表征。同类污染物通过当量系数转换为参照物的环境影响潜力。温室效应以 CO_2 为参照物转换为全球变暖潜力(以 CO_2 当量表示), CH_4 、 N_2O 和 CO 的当量系数分别为 21、310 和 2^[15]。 NO_x 和 NH_3 同时具有环境酸化和富营养化潜力,环境酸化以 SO_2 为参照物, NO_x 和 NH_3 的当量系数分别为 0.7 和 1.89^[16];富营养化以 PO_4 为参照物, NO_x 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 NH_3 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 TN 和 TP 的当量系数分别为 0.1、0.42、0.35、0.33、0.42 和 3.06^[5]。

1.3.2 标准化

标准化过程主要是建立标准化基准,目的是对各种环境影响类型的相对大小提供一个可比较的标准。理论上对于全球性环境影响应采用全球尺度的基准,地区性和局地性环境影响则采用国家尺度或地区尺度的相应基准。如果评价目标是对不同生产管理措施进行评价选优,也可以采用推荐管理措施作为评价基准。为了将全球性、地区性以及局地性影响在同一水平上进行比较,本研究采用 1995 年世界人均环境影响潜力作为环境影响基准进行标准化处理^[17]。

1.3.3 加权评估

生命周期影响评价需要对各类环境影响指数进行综合,得到环境影响综合指数,从而提供一个各种环境影响类型间可比较的评价结果,这就需要确定各种影响类型对自然资源可持续利用、生态系统和人类健康影响的相对重要性,即确定各种环境影响类型的权重。常见的权重确定方法有 3 种^[18]:①专家组评议;②目标距离法,目标值多为参考环境政策、环境标准规定值;③环境成本评估法,以货币为标准确定权重。后两者方法由于缺乏基础数据难以开展,本研究采用专家组评议法进行加权评估。

1.4 改进评价

改进评价是识别、评价并选择能减少研究系统整个生命周期内资源消耗与环境污染物释放的环节和措施的过程,如改变生产要素投入结构、改进化肥生产工艺或改善农田耕作管理措施等,主要任务就是识别、评价和选择减少环境影响或负荷的方案,确定减少资源消耗和环境排放的途径。

2 结果分析

2.1 影响评价

2.1.1 资源消耗

水稻生命周期资源消耗影响评价结果见表 1。水资源消耗包括稻田灌溉耗水、氮肥工业耗水和原料开采耗水,1 t 稻谷生命周期总耗水量为 946.7 m³,其中作物种植阶段耗水量占 96%,这与农作物生产严重依赖水土资源密切相关。生产 1 t 稻谷生命周期能源总消耗量为 2 641 MJ,主要发生在农资生产阶段,占生命周期能源总消耗量的 91%,这与化肥是能源密集型产业有关,也与我国化肥工业能耗偏大有关。

表 1 水稻生命资源消耗潜力

Table 1 Life cycle resources consumption potentials of rice

影响类型	原料阶段	农资阶段	种植阶段	合计
能源消耗/MJ·t ⁻¹	126	2 406	108	2 641
水资源消耗/m ³ ·t ⁻¹	0.3	37.3	909.1	946.7

2.1.2 环境排放

2.1.2.1 环境酸化

环境酸化影响潜力见图 1。生产 1 t 稻谷生命周期环境酸化总潜力为 17.8 kgSO₂-equ,主要影响因子为 NH₃,NH₃ 其挥发贡献率占水稻生命周期环境酸化潜力的 92.8%,其中作物种植阶段 NH₃ 挥发占作物种植阶段环境酸化潜力的 87.1%,占水稻生命周期环境

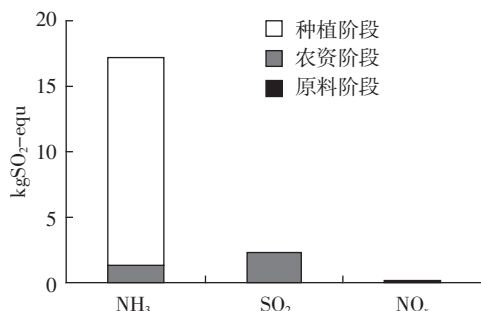


图 1 水稻生命周期环境酸化潜力

Figure 1 Life cycle acidification potentials of rice

酸化潜力的 80.8%,因此减少稻田 NH₃ 挥发是控制水稻生命周期环境酸化影响的关键。

2.1.2.2 富营养化

富营养化影响潜力见图 2,它主要来自氮、磷径流损失和 NH₃ 挥发,NH₃ 不仅是水稻生命周期环境酸化的主要因子,也是富营养化影响的主要因子。虽然 NH₃ 的富营养化当量因子较小,但由于排放量较大,导致其贡献率占水稻生命富营养化潜力的 50%。N、P 径流损失的富营养化潜力分别占水稻生命周期富营养化潜力的 22.2%和 20.6%。

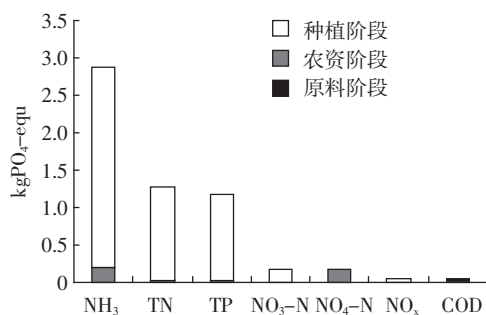


图 2 水稻生命周期富营养化潜力

Figure 2 Life cycle eutrophication potentials of rice

2.1.2.3 温室效应

生产 1 t 稻谷生命周期温室效应污染物排放量为 3 768.1 kgCO₂-equ,主要来自作物种植阶段 CH₄ 和 N₂O 的排放,其贡献率分别占 70.1%和 22.4%(图 3)。CO₂ 的排放量最大,但对水稻生命周期温室效应潜力的贡献率相对较小,只占 7.0%,这是由于单位 CH₄ 和 N₂O 的温室效应潜力远大于 CO₂,因此较少的排放量就能产生较大的温室效应潜力,目前稻田 CH₄ 排放已成为全球变暖的重要原因之一。

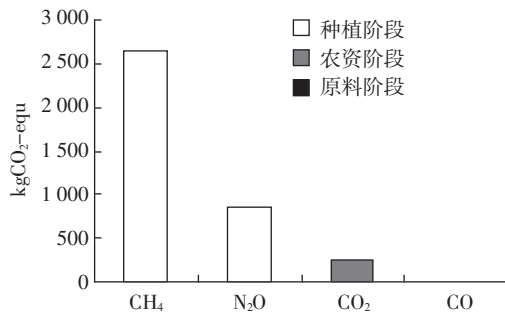


图 3 水稻生命周期温室效应潜力

Figure 3 Life cycle greenhouse effects potentials of rice

2.1.3 标准化与加权评估

根据标准化后的各种环境影响指数来看(表 2),

相对于 1995 年全球人均环境影响潜力, 水稻生命周期环境影响潜力从大到小依次是水资源消耗、富营养化、温室效应、环境酸化和能源消耗。经加权评估得到环境影响综合指数为 0.54, 表明太湖地区典型高产稻作系统生产 1 t 稻谷的环境影响潜力为 1995 年全球人均环境影响潜力的 0.54 倍。

表 2 水稻生命周期环境影响指数
Table 2 Life cycle environmental impact index of rice

环境影响类型	单位	基准值	权重	环境影响指数
能源消耗	/MJ·a ⁻¹	56 877.88	0.18	0.05
水资源消耗	/m ³ ·a ⁻¹	654.32	0.22	1.45
温室效应	kgCO ₂ -equ·a ⁻¹	7 192.98	0.09	0.52
环境酸化	kgSO ₂ -equ·a ⁻¹	56.14	0.21	0.32
富营养化	kgPO ₄ -equ·a ⁻¹	10.7	0.18	0.54

2.2 改进评价

水稻生命周期水资源消耗影响很显著与其自身的生产特性有关, 也与灌溉水利用的低效率有关, 需要综合利用工程措施和管理措施提高稻田水分生产效率。污染物排放影响最大的影响类型是富营养化, 主要来自种植阶段 N、P 径流损失和 NH₃ 挥发, 其中 NH₃ 排放也是导致环境酸化重要污染物。因此控制肥料使用量和提高肥料生产效率是控制水稻生命周期富营养化影响的关键环节, 它也有利于降低稻田 NH₃ 挥发引起的环境酸化影响和 N₂O 排放引起的温室效应影响。

3 结论与讨论

本文采用 LCA 方法对太湖地区典型稻作系统进行了生命周期资源消耗与环境排放清单分析, 在此基础上进行了影响评价与改进评价, 探讨了其生命周期主要影响类型、成因与关键控制环节。研究结果表明, 太湖地区稻作系统生命周期环境影响从大到小依次是水资源消耗、富营养化、温室效应、环境酸化和能源消耗。

本文对水稻 LCA 研究进行了有益的尝试, 有利于对稻作系统的资源消耗与环境影响形成整体概念, 为实现水稻生产与环境和谐提供科学依据。但也存在许多不足之处, 主要表现在: 第一, 稻田 NH₃ 挥发后一部分沉降进入水域, 一部分再次沉降进入农田, 因此有些农产品 LCA 研究建议把 NH₃ 排放的富营养化影响区分为水域富营养化和陆地富营养化^[5], 但由于缺乏两者的当量系数, 本文在特征化过程中未能加以

区分; 第二, 农药过度使用引起的资源消耗与污染排放, 尤其是有毒物质的排放, 是水稻生命周期重要的环境影响类型, 本文由于资料缺乏, 未能纳入分析; 第三, 评价基准采用 1995 年的世界人均环境影响潜力, 尚需依据当前国际相关研究成果进行更新; 第四, 权重的确定采用专家组评议法, 存在一定的主观性。

我国在农产品生命周期评价领域的研究基础还很薄弱, 与国外同类研究相比, 还需加强以下几个方面的研究。第一, 清单分析是生命周期评价研究的关键, 农产品与工业品相比其资源消耗与环境排放受自然地理因素的影响较大, 清单分析比较困难。因此, 清单分析的科学与合理性还有赖于主要农作系统生态过程的长期定位观测和总结报道; 第二, 我国集约化农业中普遍存在农药过量投入现象, 其环境影响是农产品生命周期评价的重要内容, 应加强农药的排污系数及其生态毒性实验研究; 第三, 农产品生命周期生物多样性的影响评价是国内外 LCA 研究面临的共同难题, 尚需继续进行深入探索; 第四, 应深入开展中国农产品生命周期评价理论框架与评价方法研究, 重点研究符合中国农业生产与生态特征的评价因子、当量系数、评价基准、权重确定等, 以实现不同农产品以及同类农产品不同生产管理措施的评价结果之间的可比性, 为农产品结构调整优化、农田管理措施改善以及农业全程环境管理提供依据。

参考文献:

- [1] Charles R, Joliet O, Gaillard G, et al. Environmental analysis of intensity level in wheat crop production using life cycle assessment[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2006, 113: 216–225.
- [2] 杨建新. 面向产品的环境管理工具: 产品生命周期评价 [J]. *环境科学*, 1999, 20(1): 100–103.
YANG Jian-xin. Toward a product-orientated environmental management: Life cycle assessment[J]. *Environmental Science*, 1999, 20(1): 100–103.
- [3] Brentrup F, Küsters J, Kuhlmann H, et al. Application of the life cycle assessment methodology to agricultural production: an example of sugar beet production with different forms of nitrogen fertilisers[J]. *Europ J Agronomy*, 2001, 14: 221–233.
- [4] 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: 701–720.
- [5] Brentrup F, Küsters J, Lammel J, et al. Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment (LCA) methodology. I. Theoretical concept of a LCA method tailored to crop production[J]. *Europ J Agronomy*, 2004, 20: 247–264.
- [6] 王明新, 吴文良, 刘文娜, 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.
- WANG Ming-xin, WU Wen-liang, LIU Wen-na, et al. Life cycle environmental impact assessment of winter wheat in North China Plain[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(5):1127-1132.
- [7] Consoli F, Allen D, Boustead I. Guidelines for life cycle assessment: A code of practice[M]. Pensacola: Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC), 1993. 1-3.
- [8] 潘根兴, 褚清河, 张英, 等. 太湖地区高产水稻土经济极点施肥: 一种农田 N、P 养分负荷的田间控制技术 [J]. 环境科学, 2003, 24(3): 96-100.
- PAN Gen-xing, ZHU Qing-he, ZHANG Ying, et al. Minimum application rates for high-yielding rice production system in the Taihu Lake region as a field measure for controlling N and P agricultural Loading[J]. *Environmental Science*, 2003, 24(3):96-100.
- [9] 狄向华, 聂祚仁, 左铁镛. 中国火力发电燃料消耗的生命周期排放清单[J]. 中国环境科学, 2005, 25(5):632-635.
- DI Xiang-hua, NIE Zuo-ren, ZUO Tie-yong. Life cycle emission inventories for the fuels consumed by thermal power in China[J]. *China Environmental Science*, 2005, 25(5):632-635.
- [10] 胡志远, 谭丕强, 楼狄明, 等. 不同原料制备生物柴油生命周期能耗和排放评价[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11):141-146.
- HU Zhi-yuan, TAN Pi-qiang, LOU Di-ming, et al. Assessment of life cycle energy consumption and emissions for several kinds of feedstock based biodiesel[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(11):141-146.
- [11] 焦少俊, 胡夏民, 潘根兴, 等. 施肥对太湖地区青紫泥水稻土稻季农田氮磷流失的影响[J]. 生态学杂志, 2007, 26(4):495-500.
- JIAO Shao-jun, HU Xia-min, PAN Gen-xing, et al. Effects of fertilization on nitrogen and phosphorus runoff loss from Qingzini paddy soil in Taihu Lake region during rice growth season[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(4):495-500.
- [12] 吕耀. 苏南太湖地区水稻土中硝态氮淋溶的定位研究[J]. 土壤通报, 1999, 30(3):113-114.
- LV Yao. Location study of nitrate-N leaching in rice soil in Taihu region, Southern Jiangsu[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1999, 30(3):113-114.
- [13] 宋勇生, 范晓晖, 林德喜, 等. 太湖地区稻田氨挥发及影响因素的研究[J]. 土壤学报, 2004, 41(2):265-268.
- SONG Yong-sheng, FAN Xiao-hui, LIN De-xi, et al. Ammonia volatilization from paddy fields in Taihu Lake region and its influencing factors[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(2):265-268.
- [14] 熊效振, 沈壬兴, 王明星, 等. 太湖流域单季稻的甲烷排放研究[J]. 大气科学, 1999, 23(11):9-18.
- XIONG Xiao-zhen, SHEN Ren-xing, WANG Ming-xing, et al. Methane emission from rice paddy field of Taihu area[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1999, 23(11):9-18.
- [15] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Climate change 1995- the science of climate change[M]. University Press, Cambridge, UK, 1996.
- [16] Reinhardt G A. Bilanzen über die gesamten Lebenswege[M]//Kaltschmitt, M., Reinhardt, G. A. Nachwachsende energieträger-grundlagen, verfahren, ökologische bilanzierung. Verlag Vieweg, Braun-schweig, Wiesbaden, Germany, 1997: 84-95.
- [17] Huijbregts M A J, Breedveld L, Huppes G, et al. Normalization figures for environmental life-cycle assessment The Netherlands (1997/1998), Western Europe (1995) and the world (1990 and 1995)[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2003, 11:737-748.
- [18] Pennington D W, Potting J, Finnveden G, et al. Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice[J]. *Environment International*, 2004, 30:721-739.