上海崇明岛水稻生产能耗与碳足迹生命周期评价

董珑丽,李小平*,姜 雪,刘晓臣

(华东师范大学河口海岸学国家重点实验室,上海 200062)

摘 要:采用生命周期评价(LCA)方法,对上海崇明岛水稻生产能源消耗和温室效应两类环境影响进行了分析研究。该 LCA 模型由水稻生产原料部分、农资部分和种植部分三个子系统组成,分段进行了清单分析和计算。结果表明,每生产 1 t 崇明岛水稻的能耗为 4 039.32 MJ,能量耗竭环境影响指数为 0.001 6;二氧化碳排放当量为 973.11 kg,温室效应环境影响指数为 0.141 7。造成水稻生产能量消耗的主要原因是施用过量的尿素,而造成水稻生产碳足迹的主要原因是水稻生长过程中 CH_4 和 N_2O 的排放,以及尿素的施用。情景分析建议采用测土施肥的方法提高 N 的利用效率,改进耕作方式以减少温室气体的排放。LCA 方法不仅可以认识水稻生产的环境影响,还能够确认水稻生产过程中降低能耗和碳足迹的关键所在。

关键词:生命周期评价;清单分析;崇明岛;水稻;碳足迹;能耗

中图分类号:X820.4 **文献标志码**:A **文章编号**:1672-2043(2014)06-1254-07 doi:10.11654/jaes.2014.06.029

Assessment of Energy Consumption and Carbon Footprint of Rice Production Using Life Cycle Assessment Method: Case study in Chongming Island, Shanghai, China

DONG Long-li, LI Xiao-ping*, JIANG Xue, LIU Xiao-chen

(State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: Rice production consumes large amount of energy and releases greenhouse gases. Here we used Life Cycle Assessment (LCA) to evaluate energy consumption and greenhouse effect in rice production in Chongming Island, Shanghai. The LCA model included three subsystems of raw materials acquisition and transportation, agricultural materials production and transportation, and cultivation. Inventory analysis and calculation were performed. Producing one ton of rice consumed 4 039.32 MJ of primary energy with environmental impact indices of 0.001 6, and emitted 973.11 kg of CO_2 equivalent with environmental impact indices of 0.141 7. The energy consumption was mainly caused by excessive urea fertilization, and carbon footprint was mainly from CH_4 and N_2O emissions and urea fertilization as well during rice cultivation. Improvement of N utilization efficiency by applying fertilizers from soil testing and reduction of greenhouse gas emission via developing new rice cropping systems are two keys to alleviating environmental impacts during rice production. LCA has proved to be an effective tool for understanding the environmental impacts of Chongming rice and addressing key issues in mitigating energy consumption and carbon footprint of rice production.

Keywords: Life Cycle Assessment (LCA); inventory analysis; Chongming Island; rice; carbon footprint; energy consumption

水稻是全球最重要的农作物之一,全球约一半以上的人以大米为主食。近年来,人们为了追求水稻高产,大量施用化肥农药,在获得高收益的同时也造成很多环境问题,如能源的大量消耗、污染物排放量的增加。同时水稻生产过程中稻田的 CH_4 和 N_2O 排放在全球温室效应中起着很大作用,稻田产生的 CH_4 达到全球 CH_4 排放的 20%[1]。因此,识别水稻生产过程中的能源消耗和碳足迹对于优化种植方案、节能减排、改善环境具有重要意义。

生命周期评价(Life Cycle Assessment,以下简称 LCA)是国际上通行的评价一个产品系统生命周期所有部分对环境影响的工具,能够分析和评价某产品或服务“从摇篮到坟墓”全过程所产生的环境问题。碳足

收稿日期:2013-10-13

基金项目:国家科技支撑计划(2010BAK69B15);上海科委科技崇明专项(10dz1200602)

作者简介:董珑丽(1976—),女,博士研究生,主要研究方向为生态修复工程。E-mail:lilongdong04@gmail.com

* **通信作者**:李小平 E-mail:lixp_2008@hotmail.com

迹可视为 LCA 中关于全球变暖潜力(GWP)的评价结果[2]。LCA 法在水稻的研究中已有应用,Breiling 等[3]应用 LCA 研究日本免耕水稻的温室气体排放潜力,Roy 等[4]采用 LCA 比较了孟加拉国不同流程蒸谷米生产的温室气体排放及资源保护潜力。也有学者采用 LCA 对意大利、泰国、美国、日本有机水稻、常规管理水稻以及绿色水稻生产的生命周期进行评价[5-8],我国学者应用 LCA 对太湖流域、湖南、江苏、吉林等地的水稻温室气体排放及其能耗进行了研究[9-13],但以发展低碳为主题的上海崇明岛的水稻能耗及其碳足迹研究尚未见报道。

本研究采用 LCA 方法,建立崇明岛水稻生命周期资源消耗排放清单,进行生命周期的环境影响评价,综合分析崇明岛水稻生产的能耗及其碳足迹,为水稻生产体系全程管理提供决策依据;通过与国内外研究结果比较,优化减排方案,促进农产品生命周期评价的理论研究。

1 材料与方法

1.1 研究区域与数据来源

研究区崇明岛位于西太平洋沿岸中国海岸线的中点地区(东经 121°09′30″~121°54′00″,北纬 31°27′00″~31°51′15″),地处长江入海口,是世界最大的河口冲积岛,全岛面积 1267 km^2。岛屿地处北亚热带,气候温和湿润,年平均气温 15.2 ℃,日照充足,雨水充沛,四季分明,年日照时数 2104 h。年平均降雨量 1030 mm,年平均降雨 118 d,主要集中在 4—9 月,全年无霜期可达 229 d[14]。土壤类型主要为滨海盐碱土,总耕地面积 5.014 万 hm^2,粮食作物播种面积 5 万 hm^2,耕作方式主要为稻麦两熟轮作,优质水稻种植面积 2.30 万 hm^2。水稻生长期 5 月至 10 月下旬,主要采用水直播方式种植。水稻品种为具有节水、抗旱优势的“旱优 8 号”。

本研究对崇明岛水稻农资生产系统及其全程生产过程进行了分析。水稻生产的物质投入产出来自对上实公司农科所水稻种植过程的统计调查,内容包括化肥品种及用量、灌溉用电量、农机投入消耗的柴油量和农药用量,其中化肥品种主要有复合肥、尿素、磷酸二铵。基本物料投入见表 1。农药、化肥生产的物耗与能耗来自国内外相关文献[9,13,15-19]。原煤、石化柴油和电的热值来自《综合能耗计算通则》(GB/T 2589—2008)[20],其碳排放系数取自 IPCC2006 燃料碳排放系数,电力碳排放系数采用 2012 年华东电网的碳排放系数。

表 1 水稻生命周期物料投入表

Table 1 Material inputs during rice production

物料投入	N/kg	P_2O_5/kg	K_2O/kg	水/m^3	柴油/kg	农药/kg
投入量	38.47	7.74	2.73	2 425.21	17.25	2.18

注:养分投入量数据已经过化肥折纯换算。

1.2 研究方法

本研究运用 LCA 方法进行水稻生产的能耗与碳足迹计算。LCA 方法是一种全面系统的环境评价方法,旨在对某项产品、工艺或者服务的整个生命周期中的资源消耗和环境排放,包括对土壤、空气、水体以及人体等方面的影响潜力进行量化,寻求改善环境的机会,具有时间上的延续性和空间上的完整性等特点[21-22]。目前 LCA 已被纳入 ISO14000 环境管理体系,成为重要的环境影响分析、评价与管理的工具之一[23]。根据国际环境毒理学与化学学会(SETAC)的权威专著,标准的 LCA 包括目标定义与范围界定、清单分析、影响评价和改进评价四个步骤。

1.2.1 目标定义与范围界定

本研究目标定义为识别崇明岛水稻生产的碳足迹及能源消耗,为该区域以节能降耗为目标的水稻生产体系全程管理提供决策依据。首先需要确定功能单位和界定系统边界。从生产效率和便于对比的角度考虑,本研究选取的功能单位为 1 t 水稻,即分析崇明岛内生产 1 t 水稻的生命周期内各环节所有能量或物质的投入、产出所产生的能耗及其碳排放。农产品生产的完整系统包括获取原料、农资、种植、产品加工输出和污染物排放五个子系统[24],为了便于与其他国内研究比较,本研究仅考虑水稻生产的原料、农资、种植三个子系统。生命周期范围的界定从矿产开采开始,到作物收获入库终止,包括原料、农资部分的能耗及温室气体间接排放以及种植部分的能耗及其温室气体直接排放。对相关的厂房设备、建筑设施、运输工具等生产中产生的能耗及碳足迹不予考虑。系统框架如图 1 所示。

1.2.2 清单分析

LCA 方法中生命周期清单本质是数据的收集。清单分析包括对产品、工艺或活动在其整个生命周期内的所有输入和输出进行量化的过程。本研究中,原料部分和农资部分主要考虑矿产及化肥生产所用的原料开采、运输的碳足迹以及能耗;作物种植部分则考虑田间水肥投入、耕作能耗、作物收获以及温室气体排放等多方面因素。种植部分物料投入来自调查数据,原料开采、农资生产的物耗、能耗数据采用国内外

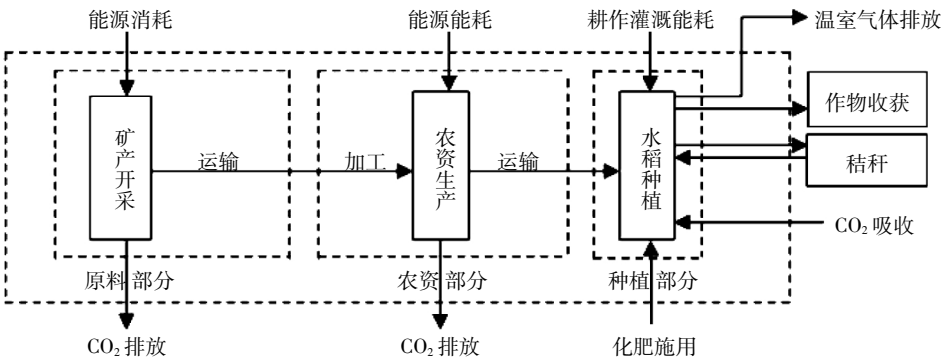

图 1 水稻生命周期评价界定

Figure1 LCA system boundary of a rice production system

其他研究成果[9,13,15-19]。

1.2.3 影响评价

生命周期环境影响评价就是把清单分析结果(投入/产出)与对环境的影响联系起来,说明不同投入/产出的相对重要性以及每个生产部分对环境影响的大小。目前国际上尚无统一的生命周期影响评价方法，一般采用定性研究和定量评价相结合的方法,分为特征化、标准化和加权评估三个步骤。

(1)特征化。特征化就是将清单结果汇总为不同环境影响类型的过程。国际上通常采用当量因子法进行计算。本研究仅考虑水稻生命周期的温室效应和能源消耗,温室效应以 CO_2 为参照物转换为全球变暖潜力(Global Warming Potential)GWP 表征,以 CO_2 当量表示，主要温室气体 GWP 值为 CH_4 25、CO_2 1、N_2O 298(IPCC,2007)。能源消耗以单位评价单元的能量消耗量表征。

(2)标准化。标准化的目的是在某一基准值的基础上对比分析不同环境效应,消除环境效应之间的差别,为加权评估提供依据。本研究采用标准人当量标准化方法[25],选取 2000 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[26],标准化后环境影响潜值单位为标准人当量,反映了每个人对环境影响的贡献。

(3)加权评估。即将不同环境效应最终综合为一个环境指数，通过赋予不同影响类型不同的权重来进行加权评估,并最终得到一个综合的环境影响值。权重确定方法主要有目标距离法、专家组评议法、环境成本评估法和层次分析法[27]。加权评估采用王明新研究中通过专家组评议设置的权重系数(表 2)[28]。标准化和加权后产品系统的环境影响值可以根据下式进行计算:

$$EI=\sum W_{(x)}[\frac{Ep_{(x)}}{S_{2000}}]$$

表 2 环境影响指数的基准值与权重[26,28]

Table 2 Normalized values and weights for different impact categories

环境影响类型	单位	标准化基准值/kg·人$^{-1}$·a^{-1}	权重
能源消耗	MJ·a^{-1}	2 590 457	0.15
全球气候变暖	kg·CO_2e	6869	0.12

式中:EI 为产品系统环境影响值;$W_{(x)}$ 为第 x 种潜在环境影响的权重;$Ep_{(x)}$为产品系统对第 x 种潜在环境影响潜值;S_{2000} 在本研究中为 2000 年基准值。

1.2.4 改进评价

根据前几个阶段的研究或清单分析的发现,以透明的方式来分析结果，形成研究结论并解释其局限性,提出相应的建议并报告生命周期评价的结果。

本研究中改进评价即在能耗与碳足迹研究的基础上,辨识生命周期各部分主要的控制因素及关键环节,以减少获得单位质量水稻的能源消耗、降低碳足迹为目标,识别、评价和选择节能减排方案,确定崇明岛水稻生产过程中减少资源消耗与碳排放的途径。

2 结果与分析

本研究以崇明岛水稻为研究对象,在水稻生命周期内,评价生产 1 t 稻米所有物质和能量的投入、产出各环节碳排放，从而综合分析崇明水稻生产的能耗与碳足迹。系统模拟的起始边界为与水稻生产有关的矿石和能源开采,终止边界为农产品及温室气体的排放[9,12]。

2.1 水稻生产的资源消耗清单

本研究仅考虑一个完整的生命周期评价中全球变暖效应与能源消耗的影响,因此此处的清单汇总为资源消耗清单。根据国内外相关研究及实地调查情

况,得到水稻生命周期的资源消耗量。尿素生产的能耗与物耗情况源自籍春蕾等[15]的研究成果,磷矿开采的能耗选用 Silva 等[16]的研究结果,磷肥钾肥生产的物质资源消耗根据胡志远等[17]的文献,依据我国的能源结构推算得出。我国目前的能源消费结构,假定农资生产中 70%为原煤,15%为石化柴油,15%为电[18]。运输能耗情况参考王明新等[9]的结果,水稻种植能耗情况来自于调查数据。具体结果见表 3,表中数据均折合为以 1 t 水稻产量计。

表 3 水稻生产生命周期的资源消耗表

Table 3 Inventory for life cycle resource consumption of rice production system

生产环节		煤/kg	柴油/L	电/kWh
原料开采与运输	钾矿开采			0.14
	尿素	1.65		3.49
	磷矿开采			4.02
	原料运输		2.88	
农资生产与运输	尿素生产	129.63		86.14
	P_2O_5 生产	5.43	0.57	6.76
	K_2O 生产	1.20	0.13	1.49
	农药生产	2.18		7.76
	农资运输		1.38	
作物种植	作物种植		12.29	27.27
总计		140.09	17.25	137.07

2.2 能源消耗

本研究中原煤、石化柴油和电的热值来自《综合能耗计算通则》(GB/T 2589—2008)[20],分别为 20.91、35.82 $MJ\cdot L^{-1}$(柴油密度按 0.84 $kg\cdot L^{-1}$ 计算)和 3.60 $MJ\cdot(kWh)^{-1}$,将生命周期全过程的物质消耗折算成能源消耗,结果见表 4。生产 1 t 水稻生命周期能耗为 4 039.32 MJ,主要集中在农资部分,占总能耗的 82.58%,主要产生在化肥生产环节,其中尿素生产的能耗为 3 020.66 MJ,占该部分能耗的 90.55%,占水稻生命周期总能耗的74.78%。其次为种植部分能耗,占总能耗的 13.33%。原料部分的能耗最小,仅占 4.09%。以 2000 年世界人均环境影响潜力为基准值,对环境影响进行标准化,得到生产 1 t 水稻的能量耗竭环境影响指数为0.001 6,即生产 1 t 水稻产生的能源耗竭影响相当于2000 年世界人均环境影响潜力的 0.16%,权重后的能源消耗影响指数为 0.000 2。

表 4 生命周期能源消耗表

Table 4 Inventory for life cycle energy consumption of rice production system

生产环节		能耗/MJ
原料开采与运输	矿产开采	62.04
	矿产运输	101.16
农资生产与运输	尿素生产	3 020.66
	P_2O_5 生产	158.30
	K_2O 生产	33.81
	农药生产	73.52
	农资运输	49.43
作物种植	作物种植	538.40
总计		4 039.32

2.3 碳足迹

表 5 列出了水稻生产不同部分的温室气体排放量的详细数据。原料部分和农资部分的温室气体排放主要由原料部分矿产开采与运输、农资生产运输过程中煤、柴油、电力的消耗产生,根据 IPCC 2006,煤、柴油的碳排放系数分别为 2.70 $kg\ CO_2e\cdot kg^{-1}$ 和 2.77 $kg\ CO_2e\cdot L^{-1}$,电力碳排放系数为 0.824 4 $kg\ CO_2e\cdot(kWh)^{-1}$,该值取自《2012 中国区域电网基准线排放因子》华东电网的碳排放系数。种植部分温室气体碳足迹包括稻田中 CH_4、N_2O 的直接排放,以及农机与灌溉过程消耗柴油与电的碳排放,稻田 CH_4 排放量选用 2012 年 UNEP-IESD《崇明生态岛碳源碳汇核算研究报告》的核算结果,施用氮肥引起的 N_2O 的 CO_2 当量选用逯非等[19]的研究结果。种植部分 CO_2 净排放量根据侯玉兰对崇明岛水稻的研究结果推算[29]。综合各部分得到生产 1 t 水稻全生命周期的碳足迹为 973.11 $kg\ CO_2e$,崇明水稻表现为温室气体排放源。种植部分碳足迹最大,为 499.84 $kg\ CO_2e$,占整个生命周期的 46.71%,主要原因是水稻生长过程中的 CH_4 与 N_2O 排放,其中

表 5 水稻生产生命周期的碳足迹

Table 5 Life cycle carbon footprint of rice production system

生产环节		$CO_2e/kg\cdot t^{-1}$
原料开采与运输	矿产开采	10.76
	矿产运输	7.98
农资生产与运输	尿素生产	421.02
	P_2O_5 生产	12.58
	K_2O 生产	4.83
	农药生产	12.28
	农资运输	3.82
作物种植	CH_4	680.54
	N_2O	61.17
	灌溉	22.48
	农机	34.04
	水稻 CO_2 净排放	−298.39
总计		973.11

种植部分 CH_4 排放占生命周期碳足迹的 69.93%，N_2O 排放占 6.29%。种植期间，CO_2 净排放为−298.39 kg，即仅就 CO_2 吸收与排放而言，植物表现为碳汇。其次为农资部分的碳足迹，为 454.53 kgCO_2e，占生命周期碳足迹的 46.71%，其中尿素生产排放占生命周期碳足迹的 43.27%。若不考虑稻田温室气体吸收与排放，则由氮肥生产引起的排放可达水稻生命周期能源碳排放的 71.24%。原料部分碳足迹最低，占整个生命周期碳足迹的 1.93%。以 2000 年世界人均环境影响潜力为基准值，对环境影响进行标准化，得到生产 1 t 水稻的温室效应环境影响指数为 0.141 7，即生产 1 t 水稻产生的温室效应影响相当于 2000 年世界人均环境影响潜力的 14.17%，加权后的温室效应环境影响指数为 0.017。

2.4 改进评价

根据表 4 所列能源消耗的影响评价可知，崇明岛水稻生产全生命周期的能耗主要集中在农资部分，主要原因是人们为了追求高产而施用大量的化肥，化肥在生产和运输中需要消耗大量的化石燃料，从而造成化肥部分的能耗较大。由于尿素的施用量最大，其能耗也最高。因此，在保证产量的前提下，减少尿素施用量可降低崇明水稻生产生命周期能耗，其主要措施如下：

首先，采用测土配方施肥的方法，在保障单产的前提下，可减少化肥尤其是化学氮肥的总用量，提高氮素使用效率，减少氮肥施用量可以降低水稻生产能耗。根据 Xia 等[30]对太湖地区水稻最适施氮量的研究，对单季稻来说，最适氮肥施用量为 187 kg N·hm^{-2}，仅为本研究中化肥施用量的 58.92%。若按最适氮肥施用量，本研究中的能耗可降 2 798.42 MJ，比原能耗下降 30.7%；潘根兴等[31]对江苏昆山稻田的研究表明，化肥使用量减低至 210 kgN·hm^{-2}，产量仍可达到 9 t·hm^{-2} 的水平。

其次，通过改善轮作制度，减少化肥施用量也可降低崇明岛水稻生产能耗。张鲜鲜等[32]对崇明岛长期绿肥水稻轮作模式下的不同施肥条件的水稻研究表明，在施肥水平降至原施肥量 70%时，产量并无明显差别。乔俊等[33]对太湖地区的研究也表明适当地将传统的小麦−水稻轮作制度改为绿肥−水稻轮作制度，可在稻季减少 120 kg·hm^{-2} 的纯氮投入，并可兼顾经济、产量和环境效益。

第三，就化肥生产而言，工业领域实施清洁生产、节能减排也是降低能耗的途径。

根据表 5 所列全球变暖的影响评价可知，崇明岛水稻生产全生命周期的碳足迹主要集中在种植部分，种植部分 CH_4 和 N_2O 的排放是产生碳足迹的关键步骤。其次为农资部分氮肥生产产生的碳足迹。因此，减少种植部分 CH_4 和 N_2O 的排放以及适量降低氮肥施用量均可以减少水稻生命周期碳足迹。

袁伟玲等[34−36]的研究表明 CH_4 排放与作物品种、播种方式、灌溉管理以及施肥水平、耕作方式均有关系。N_2O 的排放量与氮肥施用量有直接关系[37]。崇明岛水稻采用直播方式，可以避开育苗移栽稻田水稻生长初期 CH_4 排放的一个高峰期，有效减少 CH_4 的排放[29]。灌溉管理采用淹水−烤田−湿润灌溉相结合的间歇性灌溉方式，也有效减少了种植期间CH_4 的排放。因此，崇明岛在水稻种植方式和灌溉管理方面减少 CH_4 排放的改进空间不大。但是在保证产量的前提下，不断优化作物品种，测土配方施肥的方法减少氮肥施用量、实行免耕种植等措施在降低温室气体的排放方面还有改进空间。曹凑贵等[36]的研究表明，免耕处理的水稻田 CH_4 排放量可降低 27%~29%。

因此，优化作物品种、实行免耕种植等措施降低稻田 CH_4 排放量，采用测土配方施肥，控制氮肥的施用量、提高氮素利用率是控制崇明岛水稻生命周期碳足迹的重要措施。

3 讨论

近年来，国内外许多学者应用 LCA 方法对水稻生产的能耗和碳足迹等环境影响进行了评价，并提出了相应的减排和节能措施[4−13]。表 6 列出了国内外相

表 6 不同区域生产 1 t 水稻能耗及其温室气体排放对比

Table 6 Comparisons of carbon footprint and energy consumption of rice production system in different area

研究区域	碳足迹/ kgCO_2e	能耗/ MJ	稻田 CH_4 排放量/ kgCO_2e	化肥生产能耗/ MJ
崇明岛	973	4039	681	3021
太湖地区[9]	3768	3526	2641	2406
吉林西部[13]	1330	2926	1034	1758
湖南[11]	481	3679	—	2218
江苏[12]	2517	12 526	2265	12 150
广西[12]	3346	12 500	3011	12 125
意大利[5]	2760	14 600	1104	4409
泰国[7]	2927	4182	1258	—
日本[6]	1460	5200	1095	—
美国[6]	1770	12 600	—	—
印度[38]	1221	—	—	—

注：吉林西部和日本为稻田主要温室气体排放量。

关研究的结果。

从表 6 可以看出，崇明岛水稻生命周期的能耗属于中等水平。农资部分的能耗（化肥生产能耗）比例较大，化肥投入量是决定水稻生命周期能耗的关键因素，该结果与国内其他研究结果相一致。

就水稻生命周期的碳足迹而言，本研究中碳足迹考虑了水稻种植期间 CO_2 的净排放量，为便于同其他研究进行比较，去除该部分，则碳足迹为 1272 $kgCO_2e$，该结果属于相对较低水平。分析其原因，主要为崇明岛水稻生产过程中采用直播和间歇灌溉，种植部分稻田 CH_4 排放量较小，因此碳足迹较低。

对比国内各研究，水稻生命周期能耗主要由农资部分肥料生产决定，碳足迹主要受种植部分田间温室气体尤其是 CH_4 排放量的影响。相对于国内其他区域，崇明岛氮肥施用量较高，因此能耗较高。稻田 CH_4 排放量较低，因此碳足迹较低。

4　结论

（1）崇明岛每生产 1 t 水稻全生命周期能耗为 4 039.32 MJ，其能量耗竭环境影响指数为 0.001 6。崇明水稻全生命周期碳足迹为 973.11 $kgCO_2e$，温室效应环境影响指数为 0.141 7，就温室效应贡献而言，为温室气体排放源。

（2）崇明岛水稻生命周期体系中，农资部分氮肥生产是能源耗竭的主要因素，占整个体系的 74.78%，因此，农资产品的生产过程中实施清洁生产、节能减排是降低能耗的重要措施。

（3）超量使用氮肥，造成尿素部分的能耗较大。因此，在保证产量的前提下，通过测土配方施肥、改善轮作制度等措施提高氮素使用效率、减少尿素使用量是降低崇明水稻生产生命周期能耗的关键。

（4）种植部分 CH_4 和 N_2O 的排放和农资部分尿素生产的温室气体排放是决定崇明岛水稻生命周期碳足迹的主要因素。可通过不断选育良种、适量施肥、免耕种植等措施降低碳足迹。

参考文献：

[1] Thitakamol T. Influence of distillery slop on methane emission in rice Paddies[J]. *Environment Asia*, 2008, 1(1): 46-50.

[2] 聂祚仁. 碳足迹与节能减排[J]. 中国材料进展, 2010, 29(2): 60-63.
NIE Zuo-ren. An overview carbon footprint and energy-saving and emission reduction[J]. *Materials China*, 2010, 29(2): 60-63.

[3] Breiling M, Hashimoto S, SatoY, et al. Rice-related greenhouse gasesin Japan, variations in scale and time and significance for the Kyoto Protocol[J]. *Paddy and Water Environment*, 2005, 3(1): 39-46.

[4] Roy P, Shimizu N, Okadome H, et al. Life cycle of rice: Challenges and choices for Bangladesh[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 79(4): 1250-1255.

[5] Blengini G A, Busto M. The life cycle of rice: LCA of alternative agri-food chain management systems in Vercelli (Italy)[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(3): 1512-1522.

[6] Hokazono S, Hayashi K. Variability in environmental impacts during conversion from conventionalto organic farming: A comparison among three rice production systems in Japan[J]. 2012, 28: 101-112.

[7] Kasmaprapruet S, Paengjuntuek W, Saikhwan P, et al. Life cycle assessment of milled rice production: Case study in Thailand[J]. *European Journal of Scientific Research*, 2009, 30(2): 195-203.

[8] Hokazono S, Hayashi K, Sato M. Potentialities of organic and sustainable rice production in Japan from a life cycle perspective[J]. *Agronomy Research*, 2009, 7(Special issue I): 257-262.

[9] 王明新, 夏训峰, 刘建国, 等. 太湖地区高产水稻生命周期评价[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(2): 420-424.
WANG Ming-xin, XIA Xun-feng, LIU Jian-guo, et al. Life cycle assessment of high-yielding rice in Taihu Region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(2): 420-424.

[10] 卢　娜, 曲福田, 冯淑怡. 太湖流域上游地区不同施肥技术下水稻生产对环境的影响分析——基于生命周期评价方法[J]. 南京农业大学学报（社会科学版）, 2012, 12(2): 44-51.
LU Na, QU Fu-tian, FENG Shu-yi. Environmental impacts of rice production with different fertilization technologies in upper reaches of Taihu Lake Basin: An analysis based on life cycle assessment[J]. *Methodology Journal of Nanjing Agricultural University (Social Sciences Edition)*, 2012, 12(2): 44-51.

[11] 梁　龙, 陈源泉, 高旺盛. 两种水稻生产方式的生命周期环境影响评价[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(9): 1992-1996.
LIANG Long, CHEN Yuan-quan, GAO Wang-sheng. Assessment of the environmental impacts of two rice production patterns using life cycle assessment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(9): 1992-1996.

[12] 李贞宇. 我国不同生态区小麦玉米和水稻施肥的生命周期评价[D]. 保定：河北农业大学, 2010.
LI Zhen-yu. The Life cycle assessment of fertilization for wheat, maize and rice production in different regions of China[D]. Baoding: Agricultural University of Heibei, 2010.

[13] 徐小明. 吉林西部水田土壤碳库时空模拟及水稻生产的碳足迹研究[D]. 吉林：吉林大学, 2011.
XU Xiao-ming. Temporal and spatial simulation of paddy soil carbon pool and the carbon footprint of rice production in western Jinlin[D]. Jinlin: Jinlin University, 2011.

[14] 许世远. 长江三角洲地区风暴潮沉积研究[M]. 北京：科学出版社. 1997: 12.
XU Shi-yuan. Research on storm deposits in Yangzte River Delta[M]. Beijing: Science Press, 1997: 12.

[15] 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 Chun-lei, DING Mei, WANG Bin-xin, 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.

[16] Silva G A, Kulay L A. Application of life cycle assessment to the LCA case studies single superphosphate production[J]. *The international Journal of Life Cycle Assessment*, 2003, 8(4):209-214.

[17] 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 feed stock based biodiesel[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(11):141-146.

[18] Philip A. China′s ongoing energy efficiency drive: Origins, progress and prospects[J]. *Energy Policy*, 2009, 37:1331-1344.

[19] 逯 非, 王效科, 韩 冰, 等. 中国农田施用化学氮肥的固碳潜力及其有效性评价[J]. 应用生态学报, 2008, 19(10):2239-2250.
LU Fei, WANG Xiao-ke, HAN Bing, et al. Assessment on the availability of nitrogen fertilization in improving carbon sequestration potential of China′s cropland soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(10):2239-2250.

[20] 国家标准化管理委员会. GB/T 2589—2008 综合能耗计算通则[S]. 北京:中国标准出版社, 2008.
Standardization Administration of The People′s Republic of China. GB/T 2589—2008[S]. Beijing: China Standardization Press, 2008.

[21] Consoli F, Allen D, Boustead I, et al. Guidelines for life cycle assessment: A code of practice[M]. Pensacola: Society of Environmental Toxicology and Chemistry(SETAC), 1993:1-3.

[22] 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.
LIANG Long, CHEN Yuan-quan, GAO Wang-sheng. Integrated evaluation of circular agriculture system: A life cycle perspective[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(11):2795-2803.

[23] 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.

[24] 梁 龙, 陈源泉, 高旺盛. 我国农业生命周期评价框架探索及其应用——以河北栾城冬小麦为例[J]. 中国人口. 资源与环境, 2009, 19(5):154-160.
LIANG Long, CHEN Yuan-quan, GAO Wang-sheng. Framework study and application of agricultural life cycle assessment in China: A Case study of winter wheat production in Luancheng of Hebei[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2009, 19 (5):154-160. (in Chinese)

[25] 杨建新. 产品生命周期评价方法及应用[M]. 北京:气象出版社, 2002:105-115.
YANG Jian-xin. The methology and application of life cycle assessment[M]. Beijing: Weather Press, 2002:105-115.

[26] Huijbregts M A J. Normalisation in product life cycle assessment: An LCA of the global and European economic systems in the year 2000[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 390:227-240.

[27] Pennington D W, Potting J, Finnveden G, et al. Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice [J]. *Environment International*, 2004, 30(5):721-739.

[28] 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.
WANG Ming-xin, BAO Yong-hong, WU Wen-liang, 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.

[29] 侯玉兰, 王 军, 陈振楼, 等. 崇明岛稻麦轮作系统稻田温室气体排放研究[J]. 农业环境科学学报, 2012 31(9):1862-1867.
HOU Yu-lan, WANG Jun, CHEN Zhen-lou, et al. Emission of greenhouse gases from paddy fields of rice-wheat rotation system in Chongming Island, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(9):1862-1867.

[30] Xia Y, Yan X. Life-cycle evaluation of nitrogen-use in rice-farming systems: Implications for economically-optimal nitrogen rates[J]. *Biogeosciences*, 2011, 8:3159-3168.

[31] 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 applicationrates 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.

[32] 张鲜鲜, 殷 杉, 朱鹏华, 等. 上海崇明岛不同施肥条件下的稻田温室气体排放格局[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2013, 31(2):34-39.
ZHANG Xian-xian, YIN Shan, ZHU Peng-hua, et al. Greenhouse gases emission pattern in paddy fields under different fertilizer conditions in Chongming Island, Shanghai[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong university(Agricultural Science)*, 2013, 31(2):34-39.

[33] 乔 俊, 颜廷梅, 薛 峰, 等. 太湖地区稻田不同轮作制度下的氮肥减量研究[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(1):24-31.
QIAO Jun, YAN Ting-mei, XUE Feng, et al. Reduction of nitrogen fertilizer application under different crop rotation systems in paddy fields of Taihu Area[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(1):24-31.

[34] 袁伟玲, 曹凑贵, 程建平, 等. 间歇灌溉模式下稻田 CH_4 和 N_2O 排放及温室效应评估[J]. 中国农业科学, 2008, 41(12):4294-4300.
YUAN Wei-ling, CAO Cou-gui, CHENG Jian-ping, et al. CH_4 and N_2O emissions and their GWPs assessment in intermittent irrigation rice paddy field[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(12):4294-4300.

[35] 彭世彰, 杨士红, 徐俊增. 控制灌溉对稻田 CH_4 和 N_2O 综合排放及温室效应的影响[J]. 水科学进展, 2010, 21(2):235-240.
PENG Shi-zhang, YANG Shi-hong, XU Jun-zeng. Influence of controlled irrigation on CH_4 and N_2O emissions from paddy fields and subsequent greenhouse effect[J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(2):235-240.

[36] 曹凑贵, 李成芳, 展 茗, 等. 稻田管理措施对土壤碳排放的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(1):93-98.
CAO Cou-gui, LI Cheng-fang, ZHAN Ming, et al. Effects of agricultural management practices on carbon emissions in paddy fields[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(1):93-98.

[37] Wang J, Xiong Z, Yan X. Fertilizer-induced emission factors and background emissions of N_2O from vegetable fields in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45:6923-6929.

[38] Pathak H, Jain N, Bhatia A, et al. Carbon footprints of Indian food items[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 139:66-73.