

常俊彦, 宋明阳, 于晓曼, 等. 沈阳地区水稻生产的生态环境影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(8): 1793–1801.

CHANG Jun-yan, SONG Ming-yang, YU Xiao-man, et al. Ecological and environmental impact of rice production in Shenyang, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(8): 1793–1801.

沈阳地区水稻生产的生态环境影响研究

常俊彦¹, 宋明阳², 于晓曼¹, 白金衡¹, 贾晶旭³, 刘鸣达^{1*}

(1. 沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110866; 2. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 3. 东北育才学校高中部, 沈阳 110179)

摘要:为明确沈阳地区水稻生产对环境的影响,促进水稻清洁生产水平提升,采用生命周期评价法,以1 t稻谷为功能单位,对沈阳地区水稻生产系统的原料开采、农资生产和水稻种植阶段的10种潜在环境影响进行评价。结果表明,水稻生产对环境影响潜力较大的是水体毒性、富营养化、土壤毒性和人体毒性,环境影响指数分别为16.278、1.558、1.457和0.960。加权处理后,环境影响综合指数为2.267。水稻种植阶段化肥和农药的大量使用,增加了该阶段对环境酸化、富营养化、水体毒性和土壤毒性的潜值;其中化肥的大量投入,尤其是氮肥的大量投入,加重了其上游生产环节的能源消耗,从而提高了农资生产阶段对全球变暖的贡献率;而生产阶段能源的大量消耗又扩大了原料需求量,从而增加了原料开采阶段重金属排放量,使得潜在人体毒性成为原料开采阶段的主要环境影响。因此,减少化学肥料和农药的使用,是控制水稻生产潜在环境影响的关键。

关键词:生命周期评价;生态环境影响;水稻;沈阳

中图分类号:X820.3 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2018)08-1793-09 doi:10.11654/jaes.2018-0225

Ecological and environmental impact of rice production in Shenyang, China

CHANG Jun-yan¹, SONG Ming-yang², YU Xiao-man¹, BAI Jin-heng¹, JIA Jing-xu³, LIU Ming-da^{1*}

(1. College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 3. Senior High School of Northeast Yucai Middle School, Shenyang 110179, China)

Abstract: Identifying environmental impacts of rice production in Shenyang will provide significant references for local clean production standards. In this study, life cycle assessment (LCA) was applied to evaluate 10 potential environmental impacts (i.e., land use, water depletion, mineral depletion, energy depletion, global warming, acidification, eutrophication, aquatic toxicity, soil toxicity, and human toxicity) in the rice production system, and the functional unit was 1 ton of rice. The results showed that the parameters with significant environmental impacts during rice production were aquatic toxicity, eutrophication, soil toxicity, and human toxicity, with impact indices of 16.278, 1.558, 1.457, and 0.960, respectively. The general LCA index was 2.267 after weighted treatment. We found that the large-scale use of chemical fertilizers and pesticides in the arable farming stage increased the potential impacts of acidification, eutrophication, aquatic toxicity, and soil toxicity. The large input of chemical fertilizers, especially nitrogen fertilizers, had aggravated fossil energy depletion in its upstream production and increased the contribution rate of global warming in the agrochemical production stage. Furthermore, the large amount of fossil energy depletion in the agrochemical production stage increased the demand for raw materials, which increased emissions of heavy metals during the raw material extraction stage, resulting in human toxicity as the main environmental impact in this stage. Therefore, reducing the use of chemical fertilizers and pesticides is the key to controlling potential environmental impacts of the rice production system in Shenyang.

Keywords: life cycle assessment; ecological and environmental impact; rice; Shenyang

收稿日期:2018-02-13 录用日期:2018-04-11

作者简介:常俊彦(1992—),男,辽宁大连人,硕士研究生,从事农业面源污染防治研究。E-mail:JunyanChang0112@163.com

*通信作者:刘鸣达 E-mail:mdausoil@163.com

基金项目:国家重点研发计划项目“化肥农药减施增效的环境效应评价”(2016YFD0201200)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China (2016YFD0201200)

沈阳是东北重要的优质稻区,水稻是沈阳地区的主栽作物。到2015年,沈阳地区水稻播种面积高达10.89万hm²,产量为100.4万t^[1]。随着水稻生产技术的提高,机械化面积不断增大,加之水稻对农药化肥和灌溉水等消耗量很大,导致这一生产活动的环境影响不断加大。从生命周期的视角来看,水稻生产不是一个简单的种植活动,而是包括原料开采、农资生产和水稻种植在内的一个生产过程。单纯评价种植阶段的环境影响,通常会忽视全过程的环境影响。因此,从整个生产过程的角度分析其资源消耗、生态破坏与环境污染情况才能准确评价水稻生产的环境影响。

生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)方法产生于20世纪60年代,主要用于工业产品或工艺全过程的定量分析和评价,90年代开始应用于农业生产的环境影响评价^[2]。它的优势在于对农产品生产的生命周期所涉及的物质消耗和污染物排放进行辨识、量化和评价,最终评价资源和环境效益,挖掘降低环境影响的潜力^[3]。近年来国内外也有一些关于水稻生产生命周期评价方面的研究^[4-7]。但这些研究考虑因素和评价指标不同,研究结果差异很大。本研究以沈阳地区水稻生产为例,全面考虑影响因子和指标,应用LCA法对水稻生产系统的“原料开采-农资生产-水稻种植”过程的环境影响进行分析和评价,以期为降低沈阳地区水稻生产的环境影响,实现稻作清洁生产提供参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

2016年4月—2017年9月对沈阳稻区进行实地调查。共调查农户62户,调查内容包括化肥种类及

用量、农药种类及用量、机械耗油、生产耗电、灌溉水量等相关信息,具体投入产出数据平均值见表1。

表1 沈阳地区水稻种植投入产出表

Table 1 Inputs–outputs of rice cultivation in Shenyang area

物质	单位	投入/产出
氮	kg·hm ⁻²	211.34
磷	kg·hm ⁻²	110.17
钾	kg·hm ⁻²	107.06
柴油	kg·hm ⁻²	107.06
电力	kW·h·hm ⁻²	1 712.05
灌溉水	m ³ ·hm ⁻²	15 462.77
农药	kg·hm ⁻²	15.71
产量	t·hm ⁻²	10.30

1.2 评价方法

根据国际环境毒理学和化学学会的要求,将生命周期评价分为四个步骤:目标定义与范围界定、清单分析、影响评价、结果解释。

1.2.1 目标定义与范围界定

以生产1 t稻谷为功能单位,规定起始边界为生产化肥农药的矿石和化石能源开采,终止边界为水稻种植阶段的污染物排放(图1)。

1.2.2 清单分析

将水稻生产生命周期分为三个阶段:原料开采、农资生产和水稻种植阶段。分别考虑矿石、化石能源的开采与运输的资源消耗和污染排放,化肥、农药的生产与运输的资源消耗和污染排放,化肥、农药以及农机的使用的资源消耗和污染排放。

其中原料开采和农资生产阶段的能耗、物耗和水耗等指标参考《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》及文献[8-12],TP、COD、CO₂、CO、CH₄、SO₂、NO_x、N₂O、

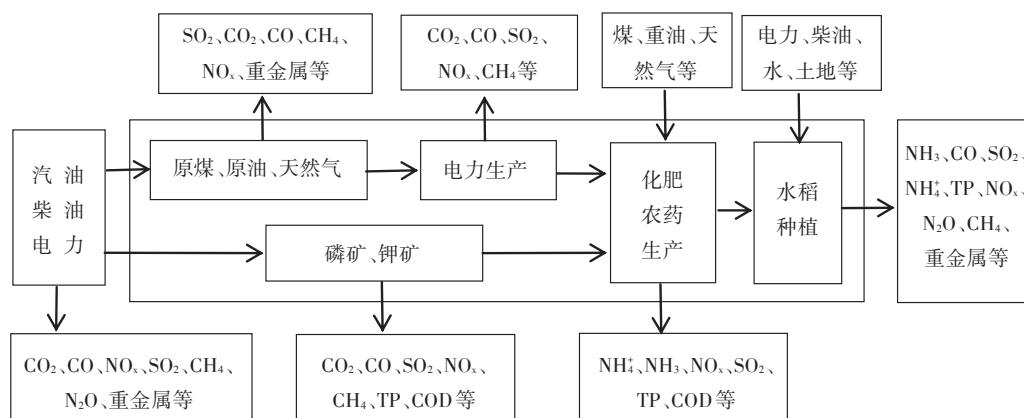


图1 水稻生产生命周期系统边界

Figure 1 LCA system boundary of rice production

NH_3 、 NH_4^+ 、重金属等污染物排放系数参考相关文献[13-19]。氮素、磷素流失和重金属排放系数参考相关文献[20-26];农药使用的残留系数引用 van Calk 的研究结果^[27];稻田甲烷排放系数根据 IPCC2006 的公式计算得到^[28];稻田固碳能力参考相关文献[29-32]。由于缺少农药毒性当量系数转换的相关报道,本研究只考虑了毒死蜱、丙草胺、三唑磷和乐果的毒性影响。

1.2.3 影响评价

1.2.3.1 影响分类和特征化

采用当量系数法将同类污染物转化为参照物的环境影响潜力^[22],评价水稻生产的环境影响。部分环境影响类型及当量系数见表2。

各类环境影响潜值根据公式(1)计算。

$$E_{P(x)} = \sum E_{P(x)i} = \sum [Q_{(x)i} E_{F(x)i}] \quad (1)$$

式中: $E_{P(x)}$ 为系统对第 x 种环境影响的影响潜值; $E_{P(x)i}$ 为第*i*种排放物质对第 x 种环境影响的影响潜值; $Q_{(x)i}$ 为第*i*种排放物质的排放量; $E_{F(x)i}$ 为第*i*种排放物

表2 环境影响类型及排放物的当量系数

Table 2 Environmental impact categories and their equivalent factors

环境影响类型	排放物质	当量系数	环境影响类型	排放物质	当量系数
全球变暖	CO_2	1	土壤毒性	1,4-DCB	1
	CO	2		Cr	6300
	N_2O	310		Zn	25
	CH_4	21		Cd	170
水体毒性	1,4-DCB	1		Pb	33
	Zn	92		As	3300
	As	210		Ni	240
	毒死蜱	640 000		Hg	56 000
	丙草胺	38 000		V	1400
	三唑	170 000		Cu	14
人体毒性	乐果	170		毒死蜱	0.54
	1,4-DCB	1		丙草胺	250
	Cr	650		三唑磷	0.8
	Zn	100		乐果	6300
	Cd	81		SO_2	1
	Pb	470		NH_3	1.88
富营养化	As	350 000		NO_x	0.7
	Hg	6000		PO_4^{3-}	1
	Ni	35 000		NO_x	0.13
	毒死蜱	21		TP	3.06
	丙草胺	2.6		NO_3^-	0.42
	三唑	210		NH_3	0.35
	乐果	44		NH_4^+	0.33
				COD	0.1

质对第 x 种环境影响的当量系数。

能源消耗主要考虑煤、石油、重油、柴油和天然气等化石能源消耗,可用式(2)计算。

$$EU = \sum_i \sum_j EN_{Fij} \quad (2)$$

式中: EU 为系统每功能单位化石能源消耗总量; EN_{Fij} 为清单分析中每功能单位*i*阶段*j*类能源的消耗量。

水资源消耗主要考虑灌溉用水和生产耗水,可根据式(3)计算。

$$F = \sum_i [Q_i (1 - RC_i)] \quad (3)$$

式中: F 为系统中每功能单位消耗的水资源总量; Q_i 为第*i*阶段水资源消耗量; RC_i 为第*i*阶段水资源回收或重复使用率。

稻田固碳能力可根据式(4)计算。

$$Q = Y \times R \times 1.63 - E \quad (4)$$

式中: Q 为稻田 CO_2 净吸收量,kg; Y 为水稻产量,kg; R 为干物质量转化系数,参考文献[33]取值为1.6,即生产1 kg稻谷的干物质量为1.6 kg;1.63为 CO_2 吸收常数,即每生产1 kg干物质,需要吸收1.63 kg CO_2 ^[34]; E 为稻田 CO_2 排放通量,参考文献[35]计算沈阳地区每生产1 t稻谷排放 CO_2 2 229.55 kg。

1.2.3.2 标准化和加权评估

选用2000年世界人均环境影响潜力为基准进行标准化处理,权重系数参考Sleeswijk的研究结果^[36]。基准值和权重系数如表3所示。

标准化过程可用公式(5)表示。

$$R_x = E_{p(x)} / S_{x(2000)} \quad (5)$$

式中: R_x 为第*x*种潜在环境影响的标准化结果; $E_{p(x)}$ 为第*x*种潜在环境影响的特征化结果; $S_{x(2000)}$ 为第*x*种潜在环境影响基准值。

加权评估可以用公式(6)进行计算。

$$EI = \sum W_x R_x \quad (6)$$

式中: EI 为系统环境影响值; W_x 为第*x*种潜在环境影

表3 环境影响指数的基准值与权重

Table 3 Normalization values and weights for different impact categories

环境影响类型	单位	基准值	权重
能源消耗	$\text{MJ} \cdot \text{a}^{-1}$	2 590 457	0.15
全球变暖	$\text{kg CO}_2\text{-equ}\cdot\text{a}^{-1}$	9 439.53	0.12
环境酸化	$\text{kg SO}_2\text{-equ}\cdot\text{a}^{-1}$	43.39	0.14
富营养化	$\text{kg PO}_4^{3-}\text{-equ}\cdot\text{a}^{-1}$	1.88	0.12
土壤毒性	$\text{kg 1,4-DCB-equ}\cdot\text{a}^{-1}$	6.11	0.09
人体毒性	$\text{kg 1,4-DCB-equ}\cdot\text{a}^{-1}$	196.66	0.14
水体毒性	$\text{kg 1,4-DCB-equ}\cdot\text{a}^{-1}$	4.82	0.11

响的权重; R_x 为第 x 种潜在环境影响的标准化结果。

2 结果与分析

2.1 清单汇总

水稻生产生命周期清单见表4。

2.2 特征化

各类环境影响的特征化结果见表5。

2.3 标准化和加权评估

各类环境影响的标准和加权后结果列于表6。可以看出,各类环境影响指数大小依次为:水体毒性、富营养化、土壤毒性、人体毒性、环境酸化、全球变暖和能源消耗,环境影响指数分别为16.278、1.558、1.457、0.960、0.135、0.041和0.003,分别相当于2000年世界人均环境影响潜力的1627.8%、155.8%、145.6%、96%、13.5%、4.1%和0.3%。各阶段环境影响大小依次为:水稻种植、原料开采和农资生产阶段,其中水稻种植阶段的水体毒性、富营养化和土壤毒性影响最严重;原料开采阶段的人体毒性和土壤毒性影响最严重;农资生产阶段的富营养化影响最严重。加权处理后,环境影响综合指数为2.267。

2.4 结果解释

2.4.1 资源消耗

由表4可知,生产1t稻谷会占用土地资源1000.24 m²,消耗磷矿37.98 kg、钾矿15.64 kg,总耗水量为1576.28 m³,其中水稻种植阶段占比高达98.13%,这是因为水稻是一种耗水量较大的作物。由表5可知,生产1t稻谷生命周期能源消耗总量为6893.41 MJ,农资生产、水稻种植和原料开采阶段能耗占比分别为51.38%、33.57%和15.05%。农资生产阶段的能耗主要源于化肥生产,化肥生产是能源密集型产业,需要消耗大量化石能源;种植阶段的能耗主要是灌溉抽水用电;原料开采阶段的能耗主要由化石能源浪费和开采耗能产生。化肥生产和灌溉用电的能耗占比分别为49.43%和30.84%。

2.4.2 全球变暖

水稻种植阶段对全球变暖的影响是单位水稻生产全周期中最大的,主要是因为该阶段CH₄的排放量较高,而其增温潜势远高于CO₂^[6],该阶段CH₄排放量为16.08 kg,对单位水稻全周期生产中全球变暖的贡献率为87.12%。但总体上水稻种植仍表现出碳汇现象,生产1t稻谷生命周期温室气体排放量为387.6 kg CO₂-equ(图2)。水稻种植、农资生产和原料开采阶段对系统全球变暖潜值的贡献率分别为44.8%、

表4 水稻生产生命周期清单汇总

Table 4 Inventory of life cycle of rice production

	项目	水稻种植阶段	农资生产阶段	原料开采阶段	总计
资源消耗	煤炭/kg·t ⁻¹	106.82	10.85	117.67	
	原油/kg·t ⁻¹		7.66	7.66	
	汽油/kg·t ⁻¹		0.41	0.41	
	重油/kg·t ⁻¹	0.67		0.67	
	柴油/kg·t ⁻¹	10.71	2.25	3.51	16.47
	天然气/m ³ ·t ⁻¹		12.38	1.63	14.01
	电力/kW·h·t ⁻¹	171.00	66.46	21.78	259.24
	磷矿/kg·t ⁻¹			37.98	37.98
	钾矿/kg·t ⁻¹			15.64	15.64
	土地/m ² ·t ⁻¹	1000.24			1000.24
	水资源/m ³ ·t ⁻¹	1546.78	29.30	0.20	1576.28
污染物排放	CO/kg·t ⁻¹	0.61	0.31	1.22	2.14
	CO ₂ /kg·t ⁻¹	-245.91	155.95	44.81	-45.15
	N ₂ O/g·t ⁻¹	260.16	3.40	5.15	268.71
	SO ₂ /kg·t ⁻¹	0.16	0.63	0.72	1.51
	NO _x /kg·t ⁻¹	0.03	0.41	0.28	0.72
	NH ₃ /kg·t ⁻¹	2.14	0.02		2.16
	CH ₄ /kg·t ⁻¹	16.08	0.31	0.05	16.44
	TP/kg·t ⁻¹	0.18	0.18		0.36
	COD/kg·t ⁻¹		2.54	0.02	2.56
	NH ₄ /kg·t ⁻¹	1.36	0.50		1.86
	NO ₃ /kg·t ⁻¹	0.87			0.87
	Cu/g·t ⁻¹	0.80			0.80
	Zn/g·t ⁻¹	25.00		0.10	25.1
	Cd/g·t ⁻¹			0.10	0.10
	Pb/g·t ⁻¹		0.10		0.10
	Hg/g·t ⁻¹	0.10			0.10
	As/g·t ⁻¹		0.10	0.30	0.40
	Ni/g·t ⁻¹			1.30	1.30
	V/g·t ⁻¹			0.50	0.50
	毒死蜱/g·t ⁻¹	11.54			11.54
	丙草胺/g·t ⁻¹	12.00			12.00
	三唑磷/g·t ⁻¹	5.12			5.12
	乐果/g·t ⁻¹	12.31			12.31

42.33%和12.97%。尽管农资生产和原料开采阶段的主要温室气体是CO₂,排放量为200.76 kg,但种植阶段稻田CO₂排放量为-245.91 kg,单位水稻种植全周期CO₂产生的温室效应对全球变暖的贡献率为-11.65%。

2.4.3 环境酸化

生产1t稻谷生命周期环境酸化潜值为6.11 kg SO₂-equ(图3)。原料开采、农资生产和种植阶段对系统环境酸化潜值的贡献率分别为15.06%、16.2%和

表5 水稻生产生命周期清单特征化结果

Table 5 The results of characterization of life cycle inventory of rice production

环境影响类型	单位	原料开采阶段	农资生产阶段	水稻种植阶段	总计
能源消耗	MJ·t ⁻¹	1 037.88	3 541.50	2 314.03	6 893.41
全球变暖	kgCO ₂ -equ·t ⁻¹	49.89	164.07	173.64	387.60
环境酸化	kgSO ₂ -equ·t ⁻¹	0.92	0.99	4.20	6.11
富营养化	kgPO ₄ ³⁻ -equ·t ⁻¹	0.04	1.07	2.12	3.23
土壤毒性	kgI _{1,4} -DCB-equ·t ⁻¹	2.02		6.88	8.90
人体毒性	kgI _{1,4} -DCB-equ·t ⁻¹	150.52	35.05	3.29	188.86
水体毒性	kgI _{1,4} -DCB-equ·t ⁻¹		0.02	78.44	78.46

表6 水稻生产生命周期环境影响标准化和加权分析

Table 6 Life cycle environmental impact indexes and evaluation results of rice production

环境影响类型	标准化后环境影响指数			总计	加权后环境影响指数			总计
	原料开采	农资生产	水稻种植		原料开采	农资生产	水稻种植	
能源消耗	0.000 40	0.001 37	0.000 89	0.002 66	0.000 06	0.000 21	0.000 13	0.000 40
全球变暖	0.005 29	0.017 38	0.018 39	0.041 06	0.000 63	0.002 09	0.002 21	0.004 93
环境酸化	0.018 63	0.020 04	0.096 80	0.135 47	0.002 61	0.002 81	0.013 55	0.018 97
富营养化	0.015 50	0.414 73	1.127 66	1.557 89	0.001 86	0.049 77	0.135 32	0.186 95
土壤毒性	0.330 61		1.126 02	1.456 63	0.029 75		0.101 34	0.131 09
人体毒性	0.765 38	0.178 22	0.016 73	0.960 33	0.107 15	0.024 95	0.002 34	0.134 44
水体毒性		0.004 15	16.273 86	16.278 01		0.000 46	1.790 12	1.790 58
总计	1.135 81	0.635 89	18.660 35		0.142 06	0.080 29	2.045 01	2.267 36

68.74%。造成环境酸化的主要影响因子为NH₃,其中种植阶段由于氮肥施用,导致NH₃挥发量增加,该阶段NH₃挥发对系统环境酸化潜值的贡献率为65.8%。NH₃在土壤中可发生硝化反应生成HNO₃,造成土壤酸化;同时挥发到大气中的NH₃可与酸性气体反应,形成酸性气溶胶态铵盐,打破酸性气体平衡,加速酸性物质的干湿沉降^[37]。因此,尽管NH₃是一种碱性物质,但在生命周期评价过程中,其环境影响是以环境酸化的形式表达出来的。

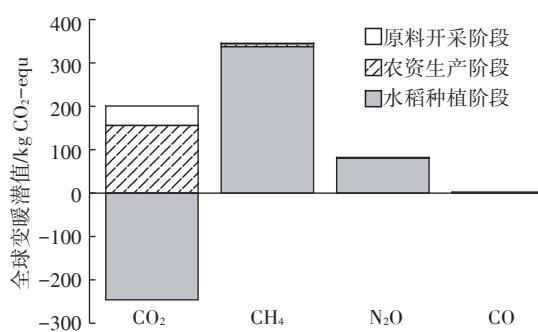


图2 水稻生产生命周期全球变暖影响潜力

Figure 2 Life cycle global warming effects potentials of rice production

2.4.4 富营养化

生产1 t稻谷生命周期富营养化潜值为3.23 kg PO₄³⁻-equ(图4)。水稻种植、农资生产和原料开采阶段对富营养化影响的贡献率分别为65.63%、32.22%和2.15%。水稻种植阶段化肥施用造成的TP、NH₃、NH₄⁺和NO₃⁻等污染物排放是导致富营养化的主要原因。其中NH₃的富营养化潜力虽较小,但其排放量较大,大量NH₃进入大气后增加了大气无机氮沉降通量,从而增加了富营养化潜力^[38]。TP、NH₃、NH₄⁺和NO₃⁻

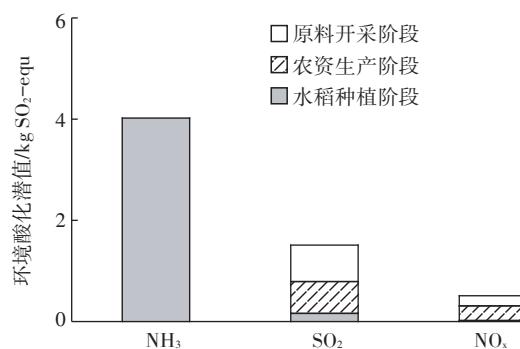


图3 水稻生产生命周期环境酸化影响潜力

Figure 3 Life cycle acidification effects potentials of rice production

对富营养化影响的贡献率分别为17.05%、23.19%、13.89%和11.5%。其次,化肥生产所排放的TP和COD对富营养化的影响也较大,贡献率分别为17.05%和15.17%。

2.4.5 毒性

生产1 t稻谷生命周期毒性潜力为276.22 kg 1,4-DCB-equ(图5),以人体毒性和水体毒性最为严重,占毒性影响的96.78%。其中人体毒性主要是由原料开采阶段排放到环境中的Cu、Zn、Hg等重金属所致,该阶段造成的人体毒性占毒性影响的54.49%;水体毒性是种植阶段化学农药残留导致的水体污染,该阶段造成的水体毒性占毒性影响的28.4%。

3 讨论

有学者应用LCA法对水稻生产生命周期的资源、能源消耗以及各环境影响进行评价。为了比较分析沈阳地区水稻生产的环境影响,表7列出了国内外几例相关研究结果。

沈阳地区水稻生产潜在环境影响较大的是能源消耗、全球变暖、环境酸化、富营养化与毒性,这与湖南、江苏太湖等地区的研究结果基本一致。但本研究

综合考虑了各阶段运输的能源消耗、能源开采的损耗、常用农药的危害及稻田固碳能力等因素,导致环境影响大小与国内外研究结果存在一定差异。

能源消耗主要发生于化肥生产环节,沈阳地区水稻生产化肥用量较多,因此能耗较高。其次,沈阳稻区农机合作社发展较快,水稻生产机械化程度较高,加之与南方地区相比,沈阳地区降雨较少,人工灌溉用水量较多。因此在种植阶段,沈阳地区的农机耗能和灌溉用电会高于其他地区。此外,本研究考虑了原料开采阶段的次级能源消耗和初级能源浪费,从而增加了开采阶段的能源消耗。因此,沈阳地区水稻生产能耗高于国内同类研究结果。与国外相比,巴西^[7]和日本^[40]的研究边界为“农资生产-水稻种植-稻米加工”,不包含原料开采阶段的能源消耗,因此两者的能源消耗较低;意大利^[41]的研究边界为“农资生产-水稻种植-稻米加工-稻米出口”,虽没涉及原料开采阶段,但稻米加工后的包装、运输和出口所消耗的能源更多,使其能源消耗高于本研究。

影响沈阳地区水稻生产潜在全球变暖的主要因子是CH₄。CH₄主要产生于种植阶段,沈阳、上海^[4]和江苏^[39]地区水稻种植阶段CH₄的全球变暖潜值分别

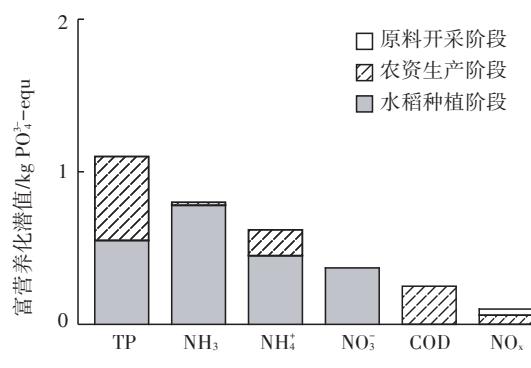


图4 水稻生产生命周期富营养化影响潜力

Figure 4 Life cycle eutrophication effects potentials of rice production

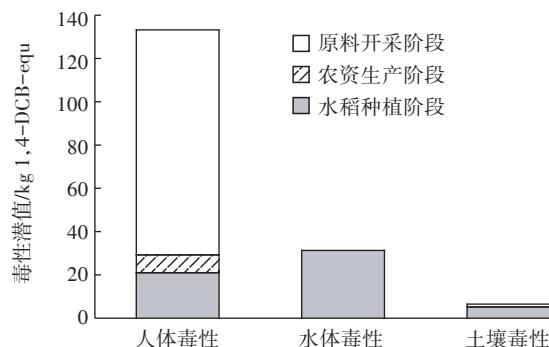


图5 水稻生产生命周期毒性影响潜力

Figure 5 Life cycle toxicity effects potentials of rice production

表7 不同区域水稻生产生命周期潜在环境影响对比

Table 7 Comparisons of potential environmental impact of one ton rice production in different areas

研究区域	能源消耗/MJ·t ⁻¹	全球变暖/kg CO ₂ -equ·t ⁻¹	环境酸化/kg SO ₂ -equ·t ⁻¹	富营养化/kg PO ₄ ³⁻ -equ·t ⁻¹	毒性/kg 1,4-DCB-equ·t ⁻¹
沈阳	6 893.41	387.60	6.11	3.23	276.22
上海 ^[4]	4 039.00	973.00	—	—	—
湖南 ^[5]	3 679.30	481.27	13.70	3.02	8.95
江苏 ^[39]	2 461.00	3 768.10	17.80	—	—
巴西 ^[7]	629.00	1 170.00	—	—	—
日本 ^[40]	5 200.00	1 460.00	11.00	—	—
意大利 ^[41]	14 590.00	2 760.00	8.00	—	—

为337.68、680.54、2 641.44 kg CO₂-equ·t⁻¹。南方地区排放率较高,加之单季稻产量低于北方稻区,所以生产1 t水稻产生和排放的CH₄高于北方^[42-43]。CO₂主要产生于农资生产和原料开采阶段,若不考虑稻田固碳作用,其排放量为333.21 kg,但本研究在考虑稻田固碳的基础上其排放量为-45.15 kg·t⁻¹。综合考虑,沈阳地区水稻生产的全球变暖潜值在国内研究中属低等水平。与国外研究相比,本研究的全球变暖潜值同样属低等水平,这是因为国外研究中的机械化程度更高,在稻田种植和管理方面消耗了更多能源,且意大利的研究考虑了包装、运输和出口环节排放的温室气体^[41],致使其结果较高。

从本研究结果来看,种植阶段氮肥施用造成的氨挥发是导致潜在环境酸化的主要原因。氨挥发系数因地理环境和种植管理模式不同而有所差异,但总体排放规律是随氮肥用量的增加而增大。沈阳、江苏^[39]、湖南^[5]和日本^[40]水稻生产的氮肥用量分别为27.5、31.27、23.29 kg·t⁻¹和18.73 kg·t⁻¹,氨挥发系数分别为氮素投入量的9.89%、28%、28%和9.98%,比较而言,沈阳地区水稻生产的环境酸化潜值较低。氮肥的施用也是导致潜在富营养化的主要原因。本研究中,因施用氮肥而产生的NH₃、NH₄⁺和NO₃⁻的富营养化总潜值为1.57 kg PO₄³⁻-equ·t⁻¹,高于湖南地区^[5];这是由于后者研究仅以早稻为对象的结果。若按整个稻季计算,其富营养化潜力应高于本研究。

沈阳地区水稻生产的毒性影响潜值约是湖南^[5]的30倍,其中人体毒性、水体毒性和土壤毒性分别是湖南的65、18倍和5倍。究其原因,除了稻季长短的差别,主要是由于本研究增加了对农资生产和原料开采阶段重金属毒害作用的环境影响,以及种植阶段化学农药使用对人体和生态危害的影响计算,故而毒性影响潜值增加。

4 结论

(1)沈阳地区水稻生产潜在环境影响大小依次为:水体毒性、富营养化、土壤毒性、人体毒性、环境酸化、全球变暖和能源消耗。

(2)化学农药的使用是造成水体和土壤毒性的主要原因;水稻种植过程中氮肥过量施用是造成潜在富营养化和环境酸化的主要原因;水稻种植阶段CH₄的大量排放对系统潜在全球变暖的贡献率最大;农资生产阶段中化肥的高生产、高能耗加剧了能源消耗;原料开采阶段中化石能源的开采加大了人体毒性潜力。

(3)减少化学肥料和农药使用是减轻沈阳地区水稻生产潜在环境影响的关键。

参考文献:

- [1] 辽宁省统计局.辽宁统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2016.
Bureau of Statistics of Liaoning Province. Liaoning statistics yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2016.
- [2] Society of Environmental Toxicology and Chemistry. Guidelines for life-cycle assessment: A code of practice[R]. Europe: Society of Environmental Toxicology and Chemistry, 1993:35-41.
- [3] 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.
- [4] 董瑰丽,李小平,姜雪,等.上海崇明岛水稻生产能耗与碳足迹生命周期评价[J].农业环境科学学报,2014,33(6):1254-1260.
DONG Gui-ling, LI Xiao-ping, JIANG Xue, et al. Assessment of energy consumption and carbon footprint of rice production using life cycle assessment method: Case study in Chongming Island, Shanghai, China[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2014, 33(6):1254-1260.
- [5] 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):222-226.
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-Environmental Science*, 2009, 28(9):222-226.
- [6] 曹黎明,李茂柏,王新其,等.基于生命周期评价的上海市水稻生产的碳足迹[J].生态学报,2014,34(2):491-499.
CAO Li-ming, LI Mao-bai, WANG Xin-qi, et al. Life cycle assessment of carbon footprint for rice production in Shanghai[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(2):491-499.
- [7] Nunes F A, Seferin M, Maciel V G, et al. Life cycle greenhouse gas emission from rice production systems in Brazil: A comparison between minimal tillage and organic farming[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 139:799-809.
- [8] 中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2016.
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2016.
- [9] 中华人民共和国国家统计局.中国能源统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2016.
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China energy statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2016.
- [10] 丁宁,杨建新.中国化石能源生命周期清单分析[J].中国环境科学,2015,35(5):1592-1600.
DING Ning, YANG Jian-xin. Life cycle inventory analysis of fossil energy in China[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(5):1592-1600.
- [11] 曹晓凡.火电厂氮氧化物产排放量的核算方法研究[J].环境科学

- 与管理, 2012, 37(12):55–58.
- CAO Xiao-fan. Research on computational methods of nitrogen oxide in thermal power plant[J]. *Environmental Science and Management*, 2012, 37(12):55–58.
- [12] 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.
- [13] 第一次全国污染源普查编纂委员会. 污染源普查数据集[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- Compilation Committee of the First National Pollution Sources Survey. Data of pollution sources survey[M] Beijing: China Environmental Science Press, 2011.
- [14] 张卫峰. 中国磷矿资源开发利用及其对磷肥产业竞争力的影响 [D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
- ZHANG Wei-feng. The status and utilization of phosphate rock of China and its effects on competitiveness of Chinese phosphorus industry [D]. Beijing: China Agricultural University, 2005.
- [15] LIU Z B, GUAN D B, WEI W, et al. Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China[J]. *Nature*, 2015, 524(7565):335–358.
- [16] CHEN P, MA J S. Petrographic characteristics of Chinese coals and their application in coal utilization processes[J]. *Fuel*, 2002, 81(11/12):1389–1395.
- [17] 许绿丝, 程俊峰, 曾汉才. 煤燃烧过程中痕量元素 As、Cd、Cr 释放特性实验研究[J]. 热能动力工程, 2004, 19(5):478–482.
- XU Lü-si, CHENG Jun-feng, ZENG Han-cai. Experimental study on the release characteristics of trace elements As, Cd and Cr during coal combustion[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2004, 19(5):478–482.
- [18] 王振刚. 湖北省磷肥生产环境影响的生命周期评价[D]. 湖北: 武汉理工大学, 2004.
- WANG Zhen-gang. The life cycle assessment of phosphatic fertilizer production in Hubei Province[D]. Hubei: Wuhan University of Technology, 2004.
- [19] 周建国, 周春静, 赵毅. 基于生命周期评价的选择性催化还原脱硝技术还原剂的选择研究[J]. 环境污染与防治, 2010, 32(3):102–104.
- ZHOU Jian-guo, ZHOU Chun-jing, ZHAO Yi. Selection of reducing agent for selective catalytic reduction and denitrification based on life cycle assessment[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2010, 32(3):102–104.
- [20] 陈振华, 陈利军, 武志杰, 等. 辽河下游平原不同水分条件下稻田挥发[J]. 应用生态学报, 2007, 18(12):2771–2776.
- CHEN Zhen-hua, CHEN Li-jun, WU Zhi-jie, et al. Ammonia volatilization from rice field under different water condition in lower Liaohe River Plain[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(12):2771–2776.
- [21] 石敏, 肖伟华, 王春梅, 等. 施肥与灌溉对黑土区稻田氮素渗漏淋溶的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(1):42–49.
- SHI Min, XIAO Wei-hua, WANG Chun-mei, et al. Influence of fertilization and irrigation on nitrogen percolation leaching in black soil region[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2016, 14(1):42–49.
- [22] BRENTROP F, KUSTERS J, LAMMEL J, et al. Environmental impact assessment of agricultural production systems using LCA II : The application to N fertilizer use in winter wheat production systems[J]. *European Journal of Agronomy*, 2004, 20(3):247–264.
- [23] 王重阳, 郑靖, 顾江新, 等. 下辽河平原单季稻田主要温室气体排放及驱动机制[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(增刊):237–242.
- WANG Chong-yang, ZHENG Jing, GU Jiang-xin, et al. Emission and affecting factors of major greenhouse gases (GHGs) from single-season paddy field in the Lower Reaches of Liaohe Plain[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2006, 25(Suppl):237–242.
- [24] 陈淑峰, 孟凡乔, 吴文良, 等. 东北典型稻区不同种植模式下稻田氮素径流损失特征研究[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(6):728–733.
- CHEN Shu-feng, MENG Fan-qiao, WU Wen-liang, et al. Nitrogen loss characteristics via runoff in typical rice planting area in Northeast China under different planting management[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(6):728–733.
- [25] 孔文杰, 倪吾钟. 有机无机肥配合施用对土壤-水稻系统重金属平衡和稻米重金属含量的影响[J]. 中国水稻科学, 2006, 20(5):517–523.
- KONG Wen-jie, NI Wu-zhong. Effects of integrated fertilization with commercial organic manure and chemical fertilizers on heavy metal balance in soil-rice cropping system[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2006, 20(5):517–523.
- [26] 王起超, 麻壮伟. 某些市售化肥的重金属含量水平及环境风险[J]. 生态与农村环境学报, 2004, 20(2):62–64.
- WANG Qi-chao, MA Zhuang-wei. Heavy metals in chemical fertilizer and environmental risks[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2004, 20(2):62–64.
- [27] VAN CALKER K J, BERENTSEN P B M, DE BOER I M J, et al. An LP-model to analyse economic and ecological sustainability on Dutch dairy farms: Model presentation and application for experimental farm "de Marke"[J]. *Agricultural Systems*, 2004, 82(2):139–160.
- [28] LASCO R D. 2006年IPCC国家温室气体清单指南第四卷: 农业, 林业及其他土地利用[M]//EGGLESTON H S, BUENDIA L, MIWA K, et al. 2006年IPCC国家温室气体清单指南. 法国: 日本全球环境战略研究所, 2006.
- LASCO R D. 2006 IPCC national greenhouse gas list guide fourth: Agriculture, forestry and other land use[M]//EGGLESTON H S, BUENDIA L, MIWA K, et al. 2006 IPCC national greenhouse gas list Guide. France: Institute for Global Environmental Strategy of Japan, 2006.
- [29] 宋涛, 王跃思, 宋长春, 等. 三江平原稻田CO₂通量及其环境响应特征[J]. 中国环境科学, 2006, 26(6):657–661.
- SONG Tao, WANG Yue-si, SONG Chang-chun, et al. CO₂ fluxes from rice fields of Sanjiang plain and its environmental response factors[J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(6):657–661.
- [30] 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-Environmental Science*, 2012, 31(9):1862-1867.
- [31] 周卫军,朱良枝,郝金菊,等.红壤丘陵区晚稻生长期CO₂的排放与固定规律[J].生态与农村环境学报,2007,23(1):7-11.
- ZHOU Wei-jun, ZHU Liang-zhi, HAO Jin-ju, et al. CO₂ emission and fixation in paddy ecosystem during late rice growing season in red soil hilly region[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2007, 23(1):7-11.
- [32] 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.
- PENG Xiao-yu, WU Xi-hui, WU Fa-qi, et al. Life cycle assessment of winter wheat-summer maize rotation system in Guanzhong region of Shanxi Province[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2015, 34 (4):809-816.
- [33] 张巍巍,柴永山,孙玉友,等.水稻不同时期群体指标与产量的关系研究[J].中国稻米,2015,21(6):32-36.
- ZHANG Wei-wei, CHAI Yong-shan, SUN Yu-you, et al. Research on relationships of yields and population indexes of different growth stage of rice[J]. *China Rice*, 2015, 21(6):32-36.
- [34] 肖玉,谢高地,鲁春霞,等.稻田气体调节功能形成机制及其累积过程[J].生态学报,2005,25(12):3282-3288.
- XIAO Yu, XIE Gao-di, LU Chun-xia, et al. Froming mechanisms and accumulating processes of gas regulation by rice paddy ecosystems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(12):3282-3288.
- [35] 隋阳辉.秸秆还田方式对稻田碳氮固持及水稻生产发育的影响[D].沈阳:沈阳农业大学,2016.
- SUI Yang-hui. Effect of different straw returning on carbon and nitrogen sequestration and rice growth and development[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016.
- [36] Sleeswijk A W, Oers L V, Guinee J B, et al. Normalisation in product life cycle assessment: An LCA of the global and European economic systems in the year 2000[J]. *Science of the Total Environmental*, 2008, 390(1):227-240.
- [37] Behera S N, Sharma M, Aneja V P, et al. Ammonia in the atmosphere: A review on emission sources, atmospheric chemistry and deposition on terrestrial bodies[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2013, 20(11):8092-8131.
- [38] 尹昊.富营养化淡水湖营养盐的大气沉降[D].上海:复旦大学,2011.
- YIN Hao. Atmospheric deposition of nutrients in eutrophic freshwater lakes[D]. Shanghai: Fudan University, 2011.
- [39] 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-Environmental Science*, 2009, 28(2):420-424.
- [40] Hokazono S, Hayashi K, Sato M. Potentialities of organic and sustainable rice production in Japan from a life cycle perspective[J]. *Agronomy Research*, 2009, 4(1):407-412.
- [41] Blengini G A, Busti 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.
- [42] 王明星,李晶,郑循华.稻田甲烷排放及产生、转化、输送机理[J].大气科学,1998,22(4):3-7.
- WANG Ming-xing, LI Jing, ZHENG Xun-hua. Methane emission and mechanisms of methane production, oxidation, transportation in the rice fields[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1998, 22(4): 3-7.
- [43] 黄耀,张稳,郑循华,等.基于模型和GIS技术的中国稻田甲烷排放估计[J].生态学报,2006,26(4):980-988.
- HUANG Yao, ZHANG Wen, ZHENG Xun-hua, et al. Estimates of methane emission from Chinese rice paddies by linking a model to GIS database[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(4):980-988.