

华北平原冬小麦-夏玉米种植系统生命周期环境影响评价

梁 龙¹, 陈源泉¹, 高旺盛¹, 隋 鹏¹, 陈冬冬^{1,2}, 张 伟¹

(1. 中国农业大学循环农业研究中心, 北京 100193; 2. 中国农业科学院农业信息研究所, 北京 100081)

摘 要:以华北平原集约高产粮区河北省栾城县为例,应用生命周期评价方法进行小麦-玉米轮作体系生命周期资源消耗与污染物排放清单分析,在此基础上进行生命周期环境影响评价。结果表明,在传统生产方式下,小麦生命周期环境影响较大的潜在因素是富营养化、水体毒素、环境酸化和土壤毒素;玉米生命周期环境影响较大的潜在因素是富营养化、环境酸化和水体毒素。小麦-玉米轮作体系下,氮肥、农药、电力的生产和使用过程是可能引起能源耗竭和气候变暖的主要因素,分别占整个体系的 86.5% 和 66%;农民超量使用氮肥造成 NH_3 挥发和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 淋失,是导致潜在环境酸化和富营养化的关键;而农药的使用是造成潜在水体毒素、土壤毒素的主要原因。因此,工业领域要实施清洁生产机制,降低农资生产能耗;农业领域要减少氮肥、农药的使用量,推广节水灌溉技术。

关键词:生命周期评价;环境影响;冬小麦;夏玉米

中图分类号:X820.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)08-1773-04

Life Cycle Environmental Impact Assessment in Winter Wheat-Summer Maize System in North China Plain

LIANG Long¹, CHEN Yuan-quan¹, GAO Wang-sheng¹, SUI Peng¹, CHEN Dong-dong^{1,2}, ZHANG Wei¹

(1. Circular Agriculture Research Center, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Agricultural Information Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Life cycle assessment (LCA) methodology was used to establish inventory of resource usage and emission and to assess life cycle environmental impacts of winter wheat-summer maize system in Luancheng County of Hebei Province, a high-yielding grain production region in North China Plain. The result showed that the significant potential environmental impacts of wheat production were aquatic eutrophication, fresh water ecotoxicity, acidification and terrestrial ecotoxicity in the conventional production, and those of maize production were aquatic eutrophication, acidification and fresh water ecotoxicity. In the wheat-maize system, the energy depletion and global warming potentials were mainly from the energy-intensive production of fertilizers, pesticide and electricity, occupying 86.5% and 66% of the whole system, respectively. The acidification and aquatic eutrophication potential mainly resulted from NH_3 volatilization and $\text{NO}_3\text{-N}$ losses, and the use of pesticide was the key factor associated with water and terrestrial ecotoxicity. Therefore, developing energy-saving & clean production in industry, reducing consumption of nitrogenous fertilizer and pesticide, promoting water-saving irrigation technology in agriculture were the key points to control the life cycle environmental impacts of wheat-maize production in North China Plain.

Keywords: life cycle assessment; environmental impacts; winter wheat; summer maize

产品生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)已被纳入 ISO14000 环境管理体系,将成为 21 世纪最有效的环境管理工具之一。农产品的生命周期评价在国际上得到较多的研究,初步建立了一套农业

生命周期评价体系^[1]。然而,国内这方面的研究进展缓慢,仅有若干专家提出相关理念,对个别作物进行了初步探讨^[2]。与此同时,当前频繁爆发的各种食品安全事故,使人们再次审视农产品种植、养殖、加工过程中存在的各种潜在风险,力求从源头加以防范。因此,从源头出发,运用生命周期评价方法,按照清洁生产的要求建立符合我国国情的农业生命周期评价体系尤显必要。冬小麦-夏玉米轮作是我国华北平原最主要的粮食生产方式之一,本文以华北平原典型集约

收稿日期:2008-12-22

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划(2006BAD02A15, 2007BAD89B01)

作者简介:梁 龙(1973—),男,湖南郴州人,博士生,主要从事农田生态健康与循环农业研究。E-mail:txws0109@126.com

通讯作者:高旺盛 E-mail:wshgao@cau.edu.cn

高产粮区——河北栾城为例,探讨冬小麦-夏玉米轮作体系生命周期中资源消耗和潜在的环境影响。

1 分析参数的确定

国际标准化组织(ISO)认为生命周期评价包括“目标定义和范围界定”、“清单分析”、“影响评价”和“结果解释”四个部分。本文将冬小麦-夏玉米生产体系生命周期分为包括化肥、农药、电力生产的农资生产系统和作物栽培全过程的农作生产系统来分析。

1.1 农资生产系统

能源、化肥生产的相关能耗和污染物排放系数参见杨建新相关研究^[3];农药生产则将农药折纯后采用荷兰 Leide 大学环境科学中心开发的 SimaPro7.1 模型结合企业提供数据计算。由于资料缺乏,相关的厂房设备、建筑设施、运输工具生产的环境影响不予考虑。

1.2 农作生产系统

农田 N 损失参数选择:综合陈新平、张福锁等的研究成果^[4],冬小麦的氨(NH₃-N)挥发取施入氮素总量的 23%,夏玉米取 26%;冬小麦淋洗取氮素投入总量的 14%,夏玉米取 16%。氧化亚氮(N₂O-N)和氧化氮(NO_x-N)的参数则根据 Brentup F 等研究成果^[5],直接从土壤中挥发的氧化亚氮(N₂O-N)占包括无机肥、有机肥和生态固氮在内的总氮投入的 1.25%,同时每向空气挥发 1 kg 氨(NH₃-N)和水体流失 1 kg 硝态氮(NO₃-N),间接挥发的氧化亚氮(N₂O-N)分别为 0.01 和 0.025 kg;氧化氮(NO_x-N)的挥发系数为氧化亚氮的 10%。

农田磷流失参数采用 Gaynor J D 等的研究成果^[6],磷(PO₄-P)流失为无机肥和有机肥投入总量的 1%。农田重金属污染仅考虑肥料和灌溉水带入农田的 Cu、Zn、Cd、Pb 等重金属对环境的影响。由于栾城作物秸秆大部分粉碎还田,仅考虑子粒离开农田系统所携带的重金属,参数来自肖昕等的研究成果^[7]。农药残留率参见 Van Calk 等的研究^[8],进入大气、水体和土壤的污染物分别以农药有效成分投入量的 10%、1%和 43%计算。

2 进行影响评价的步骤

影响评价就是确定研究系统的资源消耗和污染物排放及其对外部环境的影响,一般分为分类和特征化、标准化与加权评估 3 个步骤。

2.1 分类和特征化

特征化是对资源消耗和环境排放清单进行分类

计算并计算环境影响潜力的过程。本研究仅考虑农产品生命周期的资源消耗、气候变化、环境酸化、富营养化、人类毒性、水体毒性和土壤毒性 7 种环境影响类型,同类污染物通过当量系数转换为参照物的环境影响潜力^[9],各种环境影响潜值可以根据公式(1)计算。

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

式中: $E_{P(x)}$ 为产品系统对第 x 种环境影响潜值; $E_{P(x)i}$ 为第 i 种排放物质对第 x 种环境影响潜值; $Q_{(x)i}$ 为第 i 种物质排放量; $E_{F(x)i}$ 为第 i 种物质对第 x 种潜在环境影响的当量因子。

2.2 标准化与加权评估

本研究采用 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^[10],采用王明新等研究中通过专家组评议设置的权重系数^[2],标准化基准值和权重见表 1,标准化和权重后产品系统的环境影响值可以根据公式(2)计算。

$$EI = \sum W_x [E_{P(x)} / E_{F(2000)}] \quad (2)$$

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; $E_{P(x)}$ 为产品系统对第 x 种潜在环境影响潜值; $E_{F(2000)}$ 为 2000 年世界人均环境影响基准值。

表 1 环境影响指数的基准值与权重^[2,10]

Table 1 Normalization 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
能源耗竭/MJ·a ⁻¹	2 590 457	0.15
全球气候变暖/kg CO ₂ -eq	6 869	0.12
环境酸化/kg SO ₂ -eq	52.26	0.14
富营养化/kg PO ₄ -eq	1.88	0.12
人类毒性/kg 1,4-DCB-eq	197.21	0.14
水体毒性/kg 1,4-DCB-eq	4.83	0.11
土壤毒性/kg 1,4-DCB-eq	6.11	0.09

3 结果分析

本研究以河北栾城 2006 年生产 1 t 小麦和 1 t 玉米为功能单位,研究冬小麦-夏玉米轮作生产体系从原料生产到作物种植过程的资源消耗与环境排放。数据来自本中心 2006 年在栾城进行的农户抽样调查和田间实验结果,物质投入产出情况见表 2。

3.1 清单汇总

作物生命周期消耗的主要资源有土地、水和生物等可再生资源以及化石能源、磷、钾等不可再生资源,

表 2 河北栾城冬小麦-夏玉米投入产出表

Table 2 Inputs-Outputs of plant production system in Luancheng County Hebei Province

物质投入		冬小麦	夏玉米
N/kg·hm ⁻²	化肥	241.09	180.88
	有机肥	75.81	39.01
P ₂ O ₅ /kg·hm ⁻²	化肥	150.71	13.32
	有机肥	40.68	16.31
K ₂ O/kg·hm ⁻²	化肥	39.23	13.75
	有机肥	58.47	45.89
灌溉水/m ³ ·hm ⁻²		2 617.5	1 627.5
电力/kWh·hm ⁻²		1 177.88	732.38
柴油/kg·hm ⁻²		39.53	39.53
农药/kg·hm ⁻²		4.53	2.71
产量/t·hm ⁻²		7.211	8.746

本研究仅考虑化石能源耗竭影响,包括煤炭、重油、汽油、柴油和天然气等化石能源,可以用公式(3)计算,结果如表 3。

$$EU = \sum_i \sum_j EN_{ij} \quad (3)$$

式中:EU 为每功能单位生命周期化石能源消耗总量;EN_{ij} 为清单分析中每功能单位生命周期 i 阶段 j 类能源的消耗量。

将各个阶段污染物排放量汇总,全球气候变暖、环境酸化、富营养化、人类毒性、水生生态毒性和陆生生态毒性则根据公式(1)进行计算,得到作物生命周期污染物排放总的清单,见表 3。

3.2 影响评价

3.2.1 能源耗竭与气候变化

计算结果表明,栾城县冬小麦、夏玉米生产的能源耗竭主要发生在农资生产阶段,能源消耗分别高达 5 494.94 MJ·t⁻¹ 和 3 026.66 MJ·t⁻¹,分别占其生命周期总能耗的 55.78% 和 30.72%,这主要是由于生

产化肥、电力和农药消耗了大量能量。

冬小麦温室效应农资系统和农作系统分别占整个冬小麦-夏玉米生命周期的 42.5% 和 21.08%;夏玉米农资系统和农作系统为 23.51% 和 12.91%。其中农资系统主要来自化肥生产过程产生的 CO₂,农作系统主要来自施用氮肥释放的 N₂O。

3.2.2 环境酸化和富营养化

造成环境酸化的污染物主要是农作系统中 NH₃ 的排放,冬小麦和夏玉米农作系统的环境酸化潜力分别占各自生命周期环境酸化潜力的 85.37% 和 89.16%,分别占冬小麦-夏玉米生产体系的 52.7% 和 34.13%。这主要是由于氮肥的大量施用导致 NH₃ 的挥发。农资系统环境酸化主要是由于化肥生产过程中产生的 SO_x 和 NO_x,其中氮肥生产又占据了总量的 90% 以上。

富营养化污染物主要是作物种植阶段农田 NH₃ 挥发和 NO₃-N 淋失。冬小麦农作系统水体富营养化潜力占自身生命周期的 93.4%,占小麦-玉米轮作体系的 56.93%;夏玉米分别为 94.53% 和 36.9%,其中冬小麦 NH₃ 挥发产生的富营养化潜力占自身生命周期的 52.38%,其次是 NO₃-N,占 40.55%,夏玉米分别为 52.9% 和 41.39%。可见,氮肥的过量施用仍是环境酸化和富营养化的主要原因。

3.2.3 人类毒性与生态毒性

计算结果表明,冬小麦在空气、水体、土壤中毒性潜力分别为 0.28、8.02 和 1.57 kg 1,4-DCB-eq·t⁻¹,以水体毒性最为严重,其中土壤毒性中重金属因素占据 67.43%。夏玉米的 3 种毒性潜力分别为 0.72、0.92、0.20 kg 1,4-DCB-eq·t⁻¹,也以水体毒性最为突出。

3.3 标准化和加权评估

以 2000 年世界人均环境影响潜力为基准值,运用公式(2)对环境影响进行标准化以计算作物生命周

表 3 冬小麦-夏玉米生命周期环境影响清单(kg·t⁻¹)Table 3 Life cycle environmental impacts inventory of a functional unit plant production system(kg·t⁻¹)

项目	冬小麦			夏玉米			合计
	农资系统	农作系统	小计	农资系统	农作系统	小计	
能源耗竭	5 494.94 MJ	829.24 MJ	6 324.18 MJ	3 026.66 MJ	500.33 MJ	3 526.99 MJ	9 851.17 MJ
全球气候变暖	5.49E+02	2.72E+02	8.21E+02	3.04E+02	1.67E+02	4.70E+02	1.29E+03
环境酸化	3.27E+00	1.91E+01	2.24E+01	1.51E+00	1.24E+01	1.39E+01	3.63E+01
富营养化	4.21E-01	5.95E+00	6.37E+00	2.24E-01	3.86E+00	4.08E+00	1.04E+01
人类毒性	-	2.76E-01	2.76E-01	-	7.18E-01	7.18E-01	9.94E-01
水体毒性	-	8.02E+00	8.02E+00	-	9.23E-01	9.23E-01	8.94E+00
土壤毒性	-	1.57E+00	1.57E+00	-	2.03E-01	2.03E-01	1.78E+00

表 4 作物生命周期环境影响潜值标准化和加权分析

Table 4 Life cycle environmental impact indexes and evaluation results of plant production system

环境影响类型/单位	影响潜值		标准化后影响指数		权重后影响指数	
	冬小麦	夏玉米	冬小麦	夏玉米	冬小麦	夏玉米
能源耗竭/MJ·a ⁻¹	6 324.18	3 526.99	0.002 4	0.001 4	0.000 37	0.000 21
全球气候变暖/kg CO ₂ -eq	821.1	470.42	0.119 5	0.068 5	0.014 34	0.008 21
环境酸化/kg SO ₂ -eq	22.42	13.9	0.429	0.266	0.060 06	0.037 23
富营养化/kg PO ₄ -eq	6.37	4.08	3.388 3	2.1702	0.406 59	0.260 42
人类毒性/kg 1,4-DCB-eq	0.28	0.72	0.001 4	0.003 7	0.000 19	0.000 51
水体毒性/kg 1,4-DCB-eq	8.02	0.92	1.660 5	0.190 5	0.182 65	0.020 95
土壤毒性/kg 1,4-DCB-eq	1.57	0.21	0.257	0.034 4	0.023 12	0.003 09

期的环境影响指数,结果见表 4。冬小麦生命周期环境影响较大的是富营养化、水体毒素、环境酸化和土壤毒素,环境影响指数分别为 3.388、1.661、0.429 和 0.257,即生产 1 t 冬小麦产生的富营养化、水体毒素、环境酸化和土壤毒素潜力分别相当于 2000 年世界人均环境影响潜力的 338.8%、166.18%、42.9% 和 25.7%。夏玉米生命周期环境影响较大的是富营养化、环境酸化和水体毒素,环境影响指数分别为 2.170、0.266 和 0.191,即生产 1 t 夏玉米产生的富营养化、环境酸化和水体毒素潜力分别相当于 2000 年世界人均环境影响潜力的 217%、26.6%和 19.1%。

经加权评估后,冬小麦和夏玉米生命周期环境影响综合指数分别为 0.687 3 和 0.330 6。

4 结论

(1)华北冬小麦-夏玉米生命周期体系中,氮肥、农药等农资生产系统是能源耗竭和全球气候变暖的主要因素,分别是整个体系的 86.5%和 66%,因此工业领域实施清洁生产、节能减排是降低能耗和减少污染的关键。

(2)超量使用氮肥,造成 NH₃ 挥发和 NO₃-N 淋失严重,是导致潜在环境酸化和富营养化的主要原因;超出作物需求灌溉不仅耗电而且浪费了有限的水资源,农业领域必须大力推广优化施肥和节水灌溉技术。

(3)农药的过量使用,是造成潜在在水体毒素、土壤毒素的主要原因,必须减少高毒高残留农药的使用,研究推广生物农药。

参考文献:

[1] Brentrup F, Küsters J. Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment methodology I. Theoretical concept of a LCA method tailored to crop production[J]. *Euro-*

pean Journal of Agronomy, 2004, 20: 247-264.

[2] 王明新,包永红,吴文良. 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. Life cycle environmental impact assessment of winter wheat in North China Plain[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(5): 1127-1132.

[3] 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 methodology and application of life cycle assessment[M]. Beijing: Weather Press, 2002: 105-115.

[4] 陈新平,张福锁. 小麦-玉米轮作体系养分资源综合管理理论与实践[M]. 北京:中国农业大学出版社, 2006: 203-205.

CHEN Xin-ping, ZHANG Fu-suo. The theory and practice of nutrient resources integrated management on wheat-maize rotation system[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2006: 203-205.

[5] Brentrup F, Küsters J, Lammel J, et al. Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment (LCA) methodology II. The application to N fertilizer use in winter wheat production systems[J]. *European Journal Agronomy*, 2004, 20: 265-279.

[6] Gaynor J D, Findlay W I. Soil and phosphorus loss from conservation and conventional tillage in corn production[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1995, 24: 734-741.

[7] 肖 昕,冯启言,刘忠伟,等. 重金属 Cu、Pb、Zn、Cd 在小麦中的富集特征[J]. *能源环境保护*, 2004, 18(3): 28-31.

XIAO Xin, FENG Qi-yan, LIU Zhong-wei, et al. Enrichment characteristics of heavy metals (Cu, Pb, Zn, Cd) in wheat[J]. *Energy Environmental Protection*, 2004, 18(3): 28-31.

[8] Van Calster 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: 139-160.

[9] 邓南圣,王小兵. 生命周期评价[M]. 北京:化学工业出版社, 2003: 134-149.

DENG Nan-sheng, WANG Xiao-bing. Life cycle assessment[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003: 134-149.

[10] 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.