陕西关中地区冬小麦-夏玉米轮作系统生命周期评价

彭小瑜,吴喜慧,吴发启*,王效琴,佟小刚

(西北农林科技大学资源环境学院,陕西 杨凌 712100)

摘 要:应用生命周期评价方法分别对陕西关中地区耕作方式存在差异的富平和杨凌两地的冬小麦-夏玉米轮作系统进行评价,分析了轮作系统生命周期对能源消耗、土地资源利用、水资源消耗、全球变暖、环境酸化、富营养化、水体毒性、土壤毒性和人体毒性的影响,得到两地的生态环境综合影响指数分别为0.166 9和0.378 8。富平县小麦、玉米秸秆皆还田,而杨凌区仅小麦秸秆还田,两地的主要环境影响潜在因素不同,分别是富营养化和水体毒性,在冬小麦-夏玉米轮作系统下,富营养化、水体毒性和环境酸化对整个生命周期的生态环境影响较大,富平、杨凌两地的生态环境影响指数分别是0.078 3、0.020 2、0.016 4和0.110 5、0.214 1、0.023 2。农作系统产生了大量引起环境酸化和富营养化的污染物,主要是由于施肥方式不科学和农药施用过量,化肥、农药利用率低,造成了严重的环境负担,因而实施配方施肥、推广低毒农药是降低关中地区冬小麦-夏玉米轮作系统生命周期的生态环境影响的关键。

关键词:生命周期评价;冬小麦-夏玉米轮作;关中地区

中图分类号:X820.3 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)04-0809-08 doi:10.11654/jaes.2015.04.029

Life Cycle Assessment of Winter Wheat-Summer Maize Rotation System in Guanzhong Region of Shaanxi Province

PENG Xiao-yu, WU Xi-hui, WU Fa-qi*, WANG Xiao-qin, TONG Xiao-gang

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Winter wheat-summer maize rotation system is the most common rotation planting system in Guanzhong Region of Shaanxi Province. In this study, the environmental impacts (including energy consumption, land utilization, water utilization, global warming, acidification, eutrophication, water toxicity, soil toxicity, and human toxicity) of this system were evaluated by using life cycle assessment (LCA), on the basis of 1 ton of grain production. The primary data were collected from Fuping County and Yangling District of Guanzhong Region with different tillage practices. Results indicated that the ecological-environmental impact index was 0.166 9 and 0.378 8 for Fuping and Yangling, respectively. The dominating potential impact factors on the environment in two locations were different. In Fuping, eutrophication was the primary factor, whereas water toxicity was the main potential factor in Yangling. In the winter wheat-summer maize rotation system, eutrophication, water toxicity and acidification were the major risks to the ecological environment, and their impact indexes were respectively 0.078 3, 0.020 2 and 0.016 4 in Fuping, and 0.110 5, 0.214 1 and 0.023 2 in Yangling. Irrational fertilization and excessive insecticide spray led to the environmental loads in the winter wheat-summer maize rotation system in the Guanzhong Region.

Keywords: life cycle assessment; winter wheat-summer maize rotation; Guanzhong Region

冬小麦-夏玉米轮作是我国北方旱地比较常见的一种用地养地相结合的生物学措施,研究证明轮作能有效防治病、虫、草害,均衡利用土壤养分,调节土壤肥力[1-3]。农药、化肥的使用对环境的影响已经被广泛的研究[4-5],但由于这些研究主要集中于单一要素对环境某个方面的影响,不能系统地分析整个农业生产系统对环境各方面因素的影响。生命周期评价(Life cycle assessment,LCA)是一种分析系统整个生命周期对环境影响的研究方法[6]。

LCA起源于20世纪60年代美国开展的一系列针对包装品的分析和评价[7],用于对产品从最初的原

收稿日期:2014-11-24

基金项目:"十二五"国家科技支撑项目(2012BAD14B11)

作者简介:彭小瑜(1991—),女,山东莒县人,硕士研究生,主要从事土地资源利用与管理研究。E-mail:pengxiaoyu06@126.com

*通信作者:吴发启 E-mail:wufaqi@263.net

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

材料采掘到原材料生产、产品制造、产品使用以及产品用后处理的全过程进行跟踪和定量分析定性评价[8]。近几年，在农业领域，部分学者应用 LCA 方法对循环农业系统、作物生产过程的环境影响进行评价[9-16]，研究主要集中在施肥过程对环境的影响。本研究拟用 LCA 方法对陕西关中地区秸秆还田方式、资源投入结构不同的富平、杨凌两地的冬小麦-夏玉米轮作系统的资源消耗、环境影响等进行评价。

1 材料与方法

1.1 研究区域和数据来源

关中地区位于陕西省中部，西起宝鸡，东至潼关，海拔 325~800 m，面积约 5.4 万 km^2，该区域地势平坦、土壤肥沃、气候温和，是陕西省最发达的地区，集中了全省 52%的耕地，75%的灌溉面积。富平县总面积 1241 km^2，总人口 81 万，是关中平原和陕北高原的过渡地带，属大陆性季风暖温带半干旱型气候，光热资源充足，无霜期较长，全县多年平均降水量 533.3 mm；杨凌区是我国唯一的农业高新技术产业示范区，位于关中平原中部，总面积 135 km^2，常住人口 20.22 万，北靠黄土台塬，南临渭河，属大陆性季风暖温带半湿润气候，年均气温 12.9 ℃，无霜期较长，平均年降水量约 635.1 mm。富平县和杨凌区的主要粮食作物为冬小麦和夏玉米。

研究的数据主要来自 2013 年 8—9 月的实地调研，分别随机调查富平、杨凌两地各 30 户种植户的冬小麦-夏玉米种植情况，系统投入、产出数据见表 1，部分机械、籽粒、秸秆等数据参考其他研究成果[17-22]。

表 1 冬小麦-夏玉米轮作系统投入产出表

Table 1 Inputs-outputs of winter wheat-summer maize rotation system

投出/产出	富平县		杨凌区	
	小麦	玉米	小麦	玉米
氮肥/kg·hm^{-2}	252.89	381.07	229.18	290.91
磷肥/kg·hm^{-2}	135.15	54.08	95.31	25.50
钾肥/kg·hm^{-2}	47.98	31.16	24.58	19.10
农药/kg·hm^{-2}	0.61	0.73	1.04	1.05
柴油/kg·hm^{-2}	152.48	137.88	141.06	45.79
电/kWh·hm^{-2}	1 129.54	1 156.64	429.87	407.00
灌溉水/m^3·hm^{-2}	24 407.08	23 353.93	1 630.19	1 540.71
种子/kg·hm^{-2}	184.62	30.58	202.69	39.17
产量/kg·hm^{-2}	6 363.46	7 628.85	5 488.85	6 122.50

1.2 LCA 概述

LCA 是对产品或者服务系统整个生命周期中与产品或服务功能直接相关的环境影响、物质和能源的投入与产出进行汇集和测定的一套系统方法[7,23]，分为四步，即：①目标和范围定义；②清单分析；③影响评价；④结果解释[23]。

1.2.1 目标与范围定义

目标与范围定义确定了研究的原因和结果的预期用途[24]。研究冬小麦-夏玉米轮作体系从原材料开采加工、运输到农资生产，再到作物种植过程的资源利用与环境排放是为冬小麦-夏玉米轮作体系全程的生产和环境管理提供决策依据。农产品生命周期评价从矿石和能源开采开始，终止于农作物种植输出，包括农产品和污染物的输出两部分，土地资源是一切生产活动的基础，直接进入农作系统。本研究以分别生产农作物 1 t 为评价的功能单元。冬小麦-夏玉米轮作体系生命周期评价系统界定[11]如图 1。

1.2.2 清单分析

清单分析是收集实现特定目标所需的数据，是一份关于研究系统的投入和产出数据的清单[25]。冬小麦-夏玉米轮作系统生命周期主要包括原材料开采与运输、农资的生产与运输以及农作物种植三个阶段，包括煤、石油、天然气、电力等原材料的开采和生产，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排放，包括 CO_2、NH_3、SO_2、CH_4、N_2O 和 CO 等[11]。与该系统相关的厂房设备、建筑设施、运输工具的生产和原材料的运输等环节对环境的影响则不予考虑。

富平县农户施肥方式主要有覆土施肥和撒施两种，杨凌区农户以撒施为主。本研究中小麦、玉米撒施

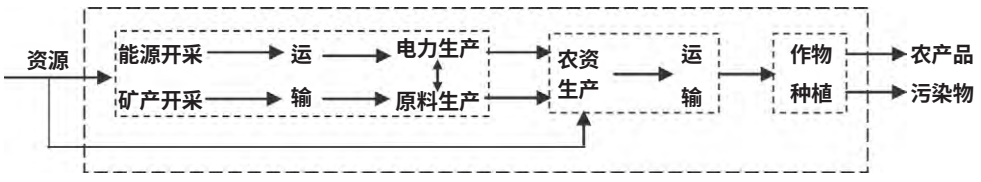

图 1 冬小麦-夏玉米轮作体系生命周期评价系统界定

Figure 1 LCA system boundaries of winter wheat-summer maize rotation system

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

时，NH_3 挥发率分别为氮素投入量的 24%[26]，覆土施肥的氨挥发率为氮素投入量的 10%[26]；冬小麦-夏玉米轮作系统 N_2O 排放量约为氮素投入量的 1.05%[27]；氧化氮（NO_x-N）的挥发系数为氧化亚氮的 10%[10]。根据杨宪龙等[28]的研究，关中地区硝态氮淋失率为 0.7%~3.3%，淋失率与施氮量有关，本文中两地区施氮量均处于较高水平，因此采用施氮量的 3.3%作为硝态氮的淋失量；根据杨学云等[29]的研究结果，估算关中地区的磷流失量约为 0.6 $kg \cdot hm^{-2}\ a^{-1}$。农药残留参考 Van Calker 等[30]的结果，研究中进入大气、水体和土壤的农药残留污染物分别为农药有效成分投入量的 10%、1%和 43%。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。由于富平玉米、小麦秸秆全部还田，仅考虑籽粒离开农作系统所带走的重金属；杨凌小麦秸秆全部还田，而玉米秸秆不还田，因此除籽粒外还要考虑到玉米秸秆携带的重金属，作物各部分的重金属含量参考肖昕等[17-18]的研究成果。研究采用玉米草谷比为 1.428 6[19]。化肥基本以生产厂家为中心就近供应，我国运货平均运输距离约为 341 km[20]，货运百公里耗油 9.84 L[21]，平均载货量约为 19 010.3 kg[22]。

1.2.3 影响评价

在 LCA 中，影响评价是对清单分析中所辨识出来的负荷的影响进行定量或定性的分析和评价[7]。影响评价由影响分类、特征化、标准化、加权评估 4 个步骤组成。

1.2.3.1 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结果进行归类，循环农业的影响类型可以分为资源利用和生态环境影响两大类。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；生态环境影响主要包括全球变暖、环境酸化、富营养化、人体毒性、水体毒性和土壤毒性六个方面。

1.2.3.2 特征化

特征化是在每种环境影响类型内部对数据进行处理和分析，进而反映该影响类型特征的过程。一般采用当量系数法进行核算，即以某影响因素中某一种生态影响因子为基准，得出各影响因子的相对影响潜力，进而计算出各种影响因素的环境影响潜值[9]。

能源消耗的计算是将整个生命周期消耗的能源依据能源系数[20]折算成热值进行核算。

对于土地资源利用的评价，只考虑农作物种植涉及到的草地、林地、水域的使用，用净初级生产力乘以土地利用系数得出的现实生产力作为各种土地资源的当量系数，则耕地、林地、草地、海水水域、内陆水域当量系数分别为 1、0.04、0.16、0.1 和 0.24[9]。

对于水资源消耗的计算，可以根据公式（1）评价功能单位水资源的利用情况[25]。仅考虑灌溉用水的消耗，农业灌溉用水的回收率较低，本研究假设重复利用率为 0。

$$F_w = \Sigma[Q_{w(p)}(1-RC_{w(p)})] \quad (1)$$

式中：F_w 指每功能单位消耗的水资源总量；$Q_{w(p)}$为第 p 阶段水资源的消耗量；$RC_{w(p)}$为第 p 阶段水资源回收或重复使用率。

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，其中 CO_2、CO、CH_4、N_2O 四种温室气体当量系数分别为 1、2、25、298[14,20]；引起酸化的物质 SO_2、NH_3、NO_x 的当量系数分别为 1、1.88、0.7[20]；引起富营养化的 PO_4^{3-}、P_{tot}、NH_3、NO_3^-、NO_x 的当量系数分别为 1、3.06、0.33、0.42、0.13[9,14,25]。Huijbregts 等[31]将1,4-DCB 作为当量因子，计算了 181 种物质（包括 86 种农药）在人体、水体、陆地等方面的潜在毒性。各种生态环境影响类型可以根据公式（2）计算。

$$E_{p(x)} = \Sigma E_{p(x)i} = \Sigma[Q_{(x)i} E_{F(x)}] \quad (2)$$

式中：$E_{p(x)}$为系统对第 x 种生态环境影响潜值；$E_{p(x)i}$ 为第 i 种影响因子对第 x 种生态环境影响的潜值；$Q_{(x)i}$ 为第 i 种影响因子排放量；$E_{F(x)}$为第 i 种影响因子对第 x 种生态环境影响的当量系数。

1.2.3.3 标准化

标准化的目的是建立标准化基准，使各影响类型在统一的标准下比较其相对大小，研究采用的环境影响基准是 2000 年世界人均环境影响潜力[32]，可用公式（3）计算。

$$R_x = E_{p(x)} / S_{(2000)} \quad (3)$$

式中：R_x 为第 x 种环境影响类型的标准化结果；$E_{p(x)}$为第 x 种潜在环境影响特征化结果；$S_{(2000)}$为第 x 种潜在环境影响特征化结果，即 2000 年的基准值。

根据《国家粮食安全中长期规划纲要（2008—2020 年）》[33]，我国人均粮食消费量约为 390 $kg \cdot a^{-1}$，1 t 小麦和 1 t 玉米大约能满足 5.13 人的需求。

1.2.3.4 加权评估

加权评估是根据一定的加权方法，确定不同影响类型的相对严重程度，权衡各种影响类型的重要性，对标准化后的影响潜值进行修正。本研究增加了土地资源这一生态环境影响因素，在王明新等[11,20]研究成果的基础上对各个生态环境影响因素的权重进行了

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

修正，各生态环境影响指数的基准值和权重见表 2，根据公式 (4) 进行加权评估计算，最后得到生态环境综合影响指数，该指数在一定程度上可反映评价区域的生态环境质量。

$$EI=\sum (W_x R) \quad (4)$$

式中：EI 为生态环境综合影响指数；W_x 为第 x 种潜在环境影响的权重；R_x 为第 x 种潜在环境影响标准化结果。

表 2 生态环境影响指数的基准值与权重

Table 2 Normalization values and weights for different impact categories

生态环境影响类型	单位	标准化基准值/人$^{-1}$·a^{-1}	权重
能源消耗	MJ	2 590 457	0.11
土地资源利用	m^2·a^{-1}	5423	0.14
水资源消耗	m^3·a^{-1}	8800	0.11
全球变暖	kg CO_2-eq	6869	0.12
环境酸化	kg SO_2-eq	52.26	0.12
富营养化	kg PO_4^{3-}-eq	1.90	0.11
水体毒性	kg 1,4-DCB-eq	4.83	0.12
土壤毒性	kg 1,4-DCB-eq	6.11	0.09
人体毒性	kg 1,4-DCB-eq	197.21	0.08

2 结果与讨论

2.1 清单分析

2.1.1 资源利用

冬小麦-夏玉米轮作系统生命周期清单分析主要涉及化石能源等不可再生资源的消耗、土地资源的利用以及水资源的消耗，如表 3 所示。煤炭、天然气开采，重油、柴油、电力、农资生产，农资运输、农业机械耕作等过程中都消耗大量能源。每生产 1 t 小麦和 1 t 玉米，杨凌区单位产量低，土地资源、种子消耗量高，富平县农化投入较多水资源、能源用于灌溉和机械。

表 3 冬小麦-夏玉米轮作系统生命周期资源利用清单

Table 3 Inventory of life cycle resource utilization of winter wheat-summer maize rotation system

资源类型	富平县		杨凌区	
	小麦	玉米	小麦	玉米
土地资源/m^2·t^{-1}	1 608.72	1 347.54	2 008.62	1 670.60
水资源/m^3·t^{-1}	4 362.95	3 554.60	922.81	769.85
能源/MJ·t^{-1}	10 599.03	11 345.52	9 926.82	9 131.70
种子/kg·t^{-1}	29.62	4.15	39.40	6.55

2.1.2 污染物排放

将原材料开采、农资生产、农作物种植各环节的污染物排放量进行汇总，即冬小麦-夏玉米轮作系统生命周期污染物排放清单 (表 4)。富平县 CO、NO_x、SO_x、CO_2 和 CH_4 的排放量高于杨凌区，其排放量平均是杨凌区排放量的 118%，而 N_2O、NH_3、P_{tot}、PO_4^{3-}、NO_3^- 和农药的排放量低于杨凌区，大约是杨凌区的 75%。粮食籽粒、秸秆富集一定量重金属，杨凌区玉米秸秆不做还田处理，因此杨凌区重金属排放量低于秸秆全部还田的富平县。

表 4 冬小麦-夏玉米轮作系统生命周期污染物排放清单

Table 4 Inventory of life cycle pollutant discharges of winter wheat-summer maize rotation system

排放类型	富平县			杨凌区		
	小麦	玉米	小计	小麦	玉米	小计
CO/g·t^{-1}	541.09	547.03	1 115.12	469.29	444.98	914.27
NO_x/g·t^{-1}	3 571.23	3 896.58	7 467.81	3 184.80	3 139.49	6 324.29
SO_x/g·t^{-1}	2 686.20	2 913.61	5 599.81	2 502.89	2 401.40	4 904.29
CO_2/kg·t^{-1}	1 146.43	1 226.66	2 373.09	1 021.03	960.71	1 981.74
CH_4/g·t^{-1}	33.51	31.53	65.04	35.10	21.12	56.22
N_2O/g·t^{-1}	446.68	558.42	1 005.10	480.18	528.36	1 008.54
NH_3/kg·t^{-1}	5.75	8.02	13.77	10.72	11.89	22.61
P_{tot}/g·t^{-1}	10.03	9.33	19.36	18.74	16.41	35.15
PO_4^{3-}/g·t^{-1}	48.26	40.43	88.69	60.26	50.12	110.38
NO_3^-/g·t^{-1}	1 349.87	1 698.38	3 048.25	1 457.58	1 616.62	3 074.20
农药/g·t^{-1}	52.47	52.72	105.19	103.72	95.50	199.22
重金属/g·t^{-1}	−4.70	−15.25	−19.95	−1.48	−36.10	−37.58

2.2 影响评价

依据公式 (2) 对富平、杨凌两地冬小麦-夏玉米轮作系统生命周期生态环境影响潜值进行计算，其结果如表 5、表 6 所示。

2.2.1 能源消耗

冬小麦-夏玉米轮作系统的能源消耗主要发生在原料系统和农资系统，农作系统的消耗量较少，分别占富平、杨凌两地冬小麦-夏玉米轮作系统整个生命周期的 13.8%和 10.6%。我国能源开采和农资生产方式较为粗放，开采和生产过程需要消耗大量的能源，单纯的作物种植属于低耗能的生产方式。

2.2.2 土地资源与水资源的利用

每生产 1 t 小麦和 1 t 玉米：富平土地利用面积仅为杨凌的 80.4%，其土地利用效率较高；富平县农作物灌溉水源充足、灌溉设施齐全，水资源消耗量约为 7 917.6 m^3，杨凌区的主要耕地类型为水浇地，但灌溉成本普遍较高，只有少量农户进行灌溉，水资源消耗量仅为 1 692.7 m^3。

2.2.3 全球变暖、环境酸化与富营养化

研究采用当量系数法计算全球变暖潜力，富平和

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 5 富平县冬小麦-夏玉米轮作系统生命周期生态环境影响潜值

Table 5 Life cycle environmental impact potential of winter wheat-summer maize rotation system of Fuping

生态环境影响类型	原料系统	农资系统	农作系统	合计
能源消耗/MJ	9 552.55	9 353.13	3 038.87	21 944.55
土地资源利用/m^2	—	—	2 956.26	2 956.26
水资源消耗/m^3	—	—	7 917.55	7 917.55
全球变暖/kg CO_2-eq	1 246.61	1 003.34	426.52	2 676.47
环境酸化/kg SO_2-eq	4.81	6.12	25.79	36.72
富营养化/kg PO_4^{3-}-eq	0.48	0.60	5.87	6.95
水体毒性/kg 1,4-DCB-eq	—	—	4.17	4.17
土壤毒性/kg 1,4-DCB-eq	—	—	2.93	2.93
人体毒性/kg 1,4-DCB-eq	—	—	0.54	0.54

表 6 杨凌区冬小麦-夏玉米轮作系统生命周期生态环境影响潜值

Table 6 Life cycle environmental impact potential of winter wheat-summer maize rotation system of Yangling

生态环境影响类型	原料系统	农资系统	农作系统	合计
能源消耗/MJ	7 693.12	9 344.65	2 020.76	19 058.53
土地资源利用/m^2	—	—	3 679.21	3 679.21
水资源消耗/m^3	—	—	1 692.66	1 692.66
全球变暖/kg CO_2-eq	873.73	1 005.50	406.27	2 285.50
环境酸化/kg SO_2-eq	3.38	6.10	42.37	51.85
富营养化/kg PO_4^{3-}-eq	0.34	0.64	8.81	9.79
水体毒性/kg 1,4-DCB-eq	—	—	44.21	44.21
土壤毒性/kg 1,4-DCB-eq	—	—	0.11	0.11
人体毒性/kg 1,4-DCB-eq	—	—	1.01	1.01

杨凌两地温室气体排放量分别为 2 676.5、2 285.5 kg CO_2-eq。温室气体主要产生在原料系统和农资系统中，两地农作系统产生的温室气体分别占整个生命周期的 15.9%和 17.8%。富平县农户单位面积上投入的农资、机械和电力较多，原材料、农资的开采和生产过程产生大量 CO_2、CH_4、N_2O 等温室气体，造成富平轮作系统的全球变暖指数高于杨凌。

引起环境酸化的物质主要有原料开采、农资生产和农作物种植过程中产生的 SO_2、NH_3、NO_x，富平和杨凌两地生产 1 t 小麦和 1 t 玉米产生的环境酸化潜值分别 36.7、51.8 kg SO_2-eq。杨凌区农户施肥主要以撒施为主，富平则是覆土施肥和撒施兼有，由于撒施的 NH_3 挥发率比覆土施肥约高 14%[26]，杨凌在农作物种植过程中约有 22.4 kg 的 NH_3 挥发进入大气，增加了轮作系统的环境酸化潜值。

研究中引起富营养化物质主要考虑到 PO_4^{3-}、P_{tot}、NH_3、NO_3^-和 NO_x，富平和杨凌两地生产 1 t 小麦和 1 t 玉米产生的环境富营养化潜值分别为 6.9、9.8 kg PO_4^{3-}-eq，富平的富营养化潜值较低，杨凌约为富平的 1.4 倍。两地施肥方式的不同造成该差异，富平农户多采用覆土施肥，其化肥利用率较高，造成的环境影响也较小。杨凌磷肥的使用量低于富平，造成杨凌富营养化的主要是 N 素，约占总富营养化潜值的 97.8%。

2.2.4 毒性

本文仅考虑农作系统灌溉和化肥、农药的使用引起的水体毒性、土壤毒性和人体毒性，原料系统和农资系统的毒性影响由于缺乏资料未予以考虑，将 1,4-DCB 作为当量因子。富平的水体毒性、土壤毒性和人体毒性影响潜值分别为 4.17、2.93、0.54 kg 1,4-DCB-eq，杨凌的分别为 44.21、0.11、1.01 kg 1,4-DCB-eq，杨凌的水体毒性潜值远高于富平，是因为杨凌农户普遍使用杀菌剂多菌灵，它的水体毒性当量系数高达 38 000 kg 1,4-DCB-eq。富平冬小麦-夏玉米轮作系统的秸秆都做还田处理，而杨凌区玉米秸秆不还田，籽粒和秸秆从系统中带走一定量的重金属，造成杨凌土壤毒性低，杨凌的重金属当量比富平低 0.96 kg 1,4-DCB-eq，并且杨凌轮作系统中重金属元素呈现负增长。杨凌轮作系统的人体毒性影响潜值较高，

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

约为富平的 1.9 倍。

2.3 标准化

标准化后冬小麦-夏玉米轮作系统的生命周期生态环境影响指数如图 2 所示。富平的主要环境影响因素是富营养化、水资源消耗和水体毒性，生产 1 t 冬小麦和 1 t 夏玉米产生的富营养化、水资源消耗和水体毒性潜力，分别相当于 2000 年世界人均环境影响潜力的 71.2%、17.5%和 16.8%；杨凌冬小麦-夏玉米生命周期环境影响较大的是水体毒性、富营养化和环境酸化，分别相当于 2000 年世界人均环境影响潜力的 178.4%、100.5%和 19.3%。

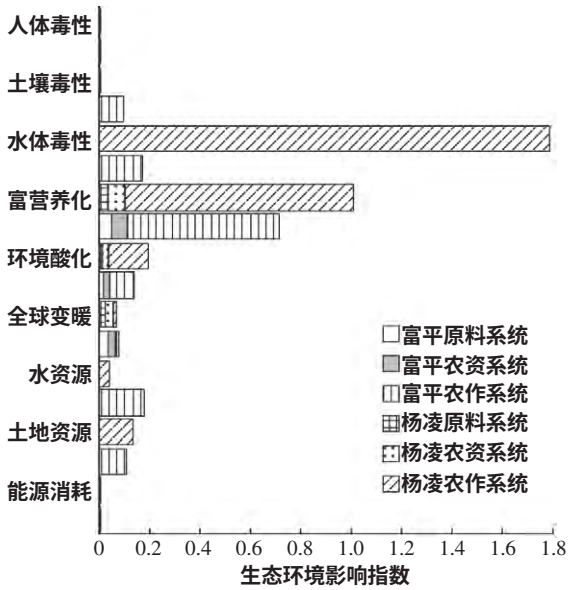

图 2 冬小麦-夏玉米轮作系统生命周期生态环境影响指数

Figure 2 Indexes of life cycle environmental impacts of winter wheat-summer maize rotation system

富平、杨凌两地生态环境影响的主导因素也不相同。富平以富营养化为主，影响指数为 0.712，占该地区轮作系统影响潜值的 48.4%；杨凌是以水体毒性为主为 1.784，占该地区整个轮作系统的 55.4%，其次是富营养化为 1.004，约占系统的 31.2%。两地能源消耗和人体毒性的影响都很小，低于 0.12%。

轮作系统各阶段对整体主要环境影响的贡献率如图 3 所示。作物种植是造成环境酸化、富营养化的主要阶段，富平地区农作系统的富营养化、环境酸化影响的贡献率分别为 84.5%和 70.3%，杨凌的分别为 90.0%和 81.7%；原料、农资开采和生产过程中排放大量温室气体，是造成全球变暖的主要阶段，富平的原料系统对全球变暖的影响最大，贡献率约为 46.6%，杨凌影响最大的是农资系统，约占 44.0%；两地资源投入的结构不同，富平的农户投入较多电力和柴油，杨凌的农户投入的化肥、农药比例较大。

2.4 加权评估

加权后的生命周期生态环境影响指数见表 7。富平、杨凌两地加权后冬小麦-夏玉米轮作系统生命周期生态环境综合影响指数分别为 0.166 9 和 0.378 8，杨凌的综合指数明显高于富平，水体毒性和富营养化是其主要影响因子。农药施用量和施肥方式是造成杨凌水体毒性和富营养化指数高的主要原因；富平农药

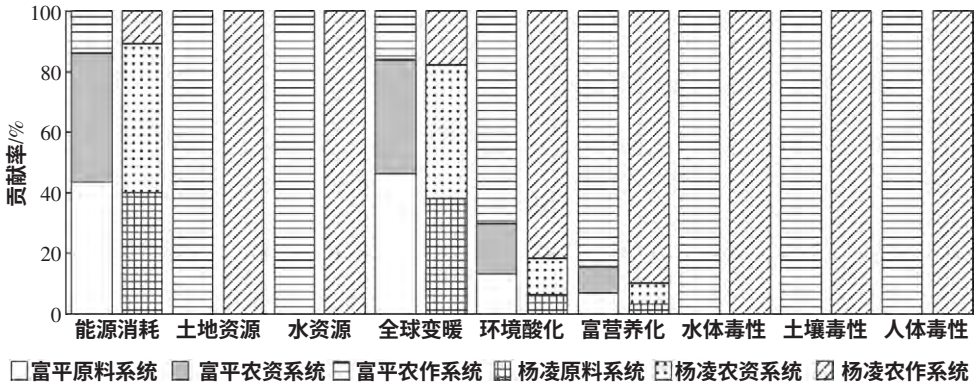

图 3 冬小麦-夏玉米轮作系统生命周期生态环境影响贡献率

Figure 3 Percent contribution to environmental impacts of winter wheat-summer maize rotation system

表 7 冬小麦-夏玉米轮作系统生命周期生态环境加权后影响指数

Table 7 Weighted indexes of life cycle environmental impacts of winter wheat-summer maize rotation system

生态环境影响类型	能源消耗	土地资源利用	水资源消耗	全球变暖	酸化	富营养化	水体毒性	土壤毒性	人体毒性	合计
富平县	1.82×10^{-4}	0.014 9	0.019 3	9.11×10^{-3}	0.016 4	0.078 3	0.020 2	8.42×10^{-3}	4.30×10^{-5}	0.166 9
杨凌区	1.58×10^{-4}	0.018 5	0.004 1	7.78×10^{-3}	0.023 2	0.110 5	0.214 1	3.11×10^{-4}	7.99×10^{-5}	0.378 8

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

施用水平较低，但土壤毒性却高于杨凌，主要是秸秆中重金属进入土壤造成的。

3　结论

(1) 富平、杨凌两地的生态环境综合影响指数分别为 0.166 9 和 0.377 8。表明富平的作物种植方式、农资使用方式优于杨凌，覆土施肥、合理灌溉、秸秆还田对整个轮作系统的资源利用和生态环境影响有益。

(2) 原料系统和农资系统对全球变暖的贡献率大，约占 83%，农作系统对富营养化、环境酸化和毒性的贡献率较大，是造成生态环境影响的主要阶段。两地不同的秸秆还田方式对土壤毒性影响较大，但对整个生态环境影响较小。

(3) 两地区的主要环境影响因素不同，富平的主要环境潜在影响因素是富营养化。农药施用量较高的杨凌的主要环境潜在影响因素是水体毒性。因此，推广使用低毒高效农药、无公害防虫十分必要。

(4) 富平县生产 1 t 冬小麦和 1 t 夏玉米利用的土地面积分别为 1 608.7、1 347.5 m^2，明显低于杨凌区的 2 008.6、1 670.6 m^2，可见富平县的耕地利用效率较高。

参考文献：

[1] 范如芹, 梁爱珍, 杨学明, 等. 耕作与轮作方式对黑土有机碳和全氮储量的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48 (4): 788–796.
FAN Ru–qin, LIANG Ai–zhen, YANG Xue–ming, et al. Effects of tillage and rotation on soil organic carbon and total nitrogen stocks of a black soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48 (4): 788–796.

[2] 魏守辉, 强　胜, 马　波, 等. 不同作物轮作制度对土壤杂草种子库特征的影响[J]. 生态学杂志, 2005, 24 (4): 385–389.
WEI Shou–hui, QIANG Sheng, MA Bo, et al. Effects of different crop rotation system on the characteristics of soil weed seedbank[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24 (4): 385–389.

[3] 张丽琼, 郝明德, 臧逸飞, 等. 长期定位条件下不同轮作系统的土壤肥力数值化综合评价[J]. 核农学报, 2013, 27 (8): 1216–1226.
ZHANG Li–qiong, HAO Ming–de, ZANG Yi–fei, et al. Soil fertility numerical value comprehensive evaluation of different rotation system under the long–term positioning conditions[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2013, 27 (8): 1216–1226.

[4] 华小梅, 江希流. 我国农药环境污染与危害的特点及控制对策[J]. 环境科学研究, 2000, 13 (3): 40–43.
HUA Xiao–mei, JIANG Xi–liu. Characteristics and control countermeasures of pesticide pollution and its damage on environment in China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2000, 13 (3): 40–43.

[5] 李秀英, 赵秉强, 李絮花, 等. 不同施肥制度对土壤微生物的影响及其与土壤肥力的关系[J]. 中国农业科学, 2005,38(8):1591–1599.
LI Xiu–ying, ZHAO Bing–qiang, LI Xu–hua, et al. Effects of different fertilization systems on soil microbe and its relation to soil fertility[J]. *Scientia Agriculutra Sinica*, 2005, 38(8): 1591–1599.

[6] 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.

[7] 章家恩, 秦　钟, 叶延琼. 农业循环经济[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010: 132–136.
ZHANG Jia–en, QIN Zhong, YE Yan–qiong. Agricultural recycling economy[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010: 132–136.

[8] 杨建新, 王如松. 生命周期评价的回顾与展望[J]. 环境科学进展, 1998, 6 (2): 21–28.
YANG Jian–xin, WANG Ru–song. Retrospect and prospect of life cycle assessment[J]. *Advances in Environmental Science*, 1998, 6 (2): 21–28.

[9] 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.

[10] 梁　龙, 陈源泉, 高旺盛, 等. 华北平原冬小麦-夏玉米种植系统生命周期环境影响评价[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28 (8): 1773–1776.
LIANG Long, CHEN Yuan–quan, GAO Wang–sheng, et al. Life cycle environmental impact assessment in winter wheat–summer maize system in North China Plain[J]. *Journal of Agro–Environment Science*, 2009, 28 (8): 1773–1776.

[11] 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.

[12] 李贞宇, 王　旭, 魏　静, 等. 我国不同区域玉米施肥的生命周期评价[J]. 环境科学学报, 2010, 30 (9): 1912–1920.
LI Zhen–yu, WANG Xu, WEI Jing, et al. Life cycle assessment of fertilization in corn production in different regions of China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30 (9): 1912–1920.

[13] 李贞宇, 王　旭, 高志岭, 等. 我国不同区域小麦施肥资源环境影响的生命周期评价[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29 (7): 1417–1422.
LI Zhen–yu, WANG Xu, GAO Zhi–ling, et al. Life cycle assessment of wheat fertilization in different regions of China[J]. *Journal of Agro–Environment Science*, 2010, 29 (7): 1417–1422.

[14] 王效琴, 吴庆强, 周建斌, 等. 设施番茄生产系统的环境影响生命周期评价[J]. 环境科学学报, 2014, 34 (11): 2940–2947.
WANG Xiao–qin, WU Qing–qiang, ZHOU Jian–bin, et al. Life cycle assessment of tomato production in greenhouses[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34 (11): 2940–2947.

[15] 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.

[16] 周　冉, 班红勤, 侯　勇, 等. 京郊典型作物生产体系施肥环境影响

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的生命周期评价[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(5): 1042-1051.
ZHOU Ran, BAN Hong-qin, HOU Yong, et al. Life cycle assessment of environmental impact by fertilization in major cropping systems of a Peri-urban area of Beijing, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(5): 1042-1051.

[17] 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.

[18] 李 静, 依艳丽, 李亮亮, 等. 几种重金属(Cd、Pb、Cu、Zn)在玉米植株不同器官中的分布特征[J]. 中国农学通报, 2006, 22(4): 244-247.
LI Jing, YI Yan-li, LI Liang-liang, et al. Distribution of heavy metal (Cd, Pb, Cu, Zn) in different organs of maize[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(4): 244-247.

[19] 彭卫东, 单宏业. 农作物秸秆综合利用 110 问[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2013: 6-7.
PENG Wei-dong, SHAN Hong-ye. 110 questions about comprehensive utilization of crop straw[M]. Beijing: China's Agricultural Science and Technology Press, 2013: 6-7.

[20] 梁 龙. 基于 LCA 的循环农业环境影响评价方法探讨与实证研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2009: 20-48.
LIANG Long. Environmental impact assessment of circular agriculture based on life cycle assessment: Methods and case studies[D]. Beijing: China Agricultural University, 2009: 20-48.

[21] 豪 彦. 我国已制订《乘用车燃料消耗量限值》标准[J]. 汽车与配件, 2004(2): 36-40.
HAO Yan. Vehicle fuel consumption limit standards in China[J]. Automobile and Accessories, 2004(2): 36-40.

[22] 袁长伟, 王建伟. 高速公路货流统计方法与实证分析[J]. 公路交通科技, 2009, 26(10): 149-158.
YUAN Chang-wei, WANG Jian-wei. Analysis of statistical method of expressway freight flow volume and verification[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2009, 26(10): 149-158.

[23] 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.

[24] Brentrup F, Küsters J, Kuhlmann H, et al. 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]. *European Journal of Agronomy*, 2004, 20(3): 247-264.

[25] 邓南圣, 王小兵. 生命周期评价[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 43-68.
DENG Nan-sheng, WANG Xiao-bing. Life cycle assessment[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003: 43-68.

[26] 李贵桐, 李保国, 陈德立. 大面积冬小麦夏玉米农田土壤的氨挥发[J]. 华北农学报, 2002, 17(1): 76-81.
LI Gui-tong, LI Bao-guo, CHEN De-li. Ammonia volatilization from large field planted with winter wheat and summer maize[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2002, 17(1): 76-81.

[27] 张 强, 巨晓棠, 张福锁. 应用修正的 IPCC2006 方法对中国农田 N_2O 排放量重新估算[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(1): 7-13.
ZHANG Qiang, JU Xiao-tang, ZHANG Fu-suo. Re-estimation of direct nitrous oxide emission from agricultural soils of China via revised IPCC2006 guideline method[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(1): 7-13.

[28] 杨宪龙, 路永莉, 同延安, 等. 施氮和秸秆还田对小麦-玉米轮作农田硝态氮淋溶的影响[J]. 土壤学报, 2013, 50(3): 565-572.
YANG Xian-long, LU Yong-li, TONG Yan-an, et al. Effects of application of nitrogen fertilizer and in corporation of straw on nitrate leaching in farmland under wheat-maize rotation system[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(3): 565-572.

[29] 杨学云, 古巧珍, 马路军, 等. 壤土磷素淋移的形态研究[J]. 土壤学报, 2005, 42(5): 792-798.
YANG Xue-yun, GU Qiao-zhen, MA Lu-jun, et al. Forms of phosphorus leaching in loessial soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(5): 792-798.

[30] 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.

[31] Huijbregts M A J, Thissen U, Guinée J B, et al. Priority assessment of toxic substances in life cycle assessment. Part I: Calculation of toxicity potentials for 181 substances with the nested multi-media fate, exposure and effects model USES-LCA[J]. *Chemosphere*, 2000, 41(4): 541-573.

[32] Sleeswijk A W, Guinée J B, Huijbregts M A J, et al. Normalization 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.

[33] 国家发展与改革委员会. 国家粮食安全中长期规划纲要(2008—2020 年)[EB]. www.gov.cn, 2008.11.13.
National Development and Reform Commission. National long-term plan for food security (2008—2020)[EB]. www.gov.cn, 2008.11.13.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net