

杨肖, 钟方雷, 郭爱君, 等. 干旱区绿洲制种玉米生命周期环境影响评价: 以张掖市为例[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(8): 1664–1671.

YANG Xiao, ZHONG Fang-lei, GUO Ai-jun, et al. Assessment of the environmental impact of seed maize production in oasis agriculture of arid regions based on the life cycle assessment method: A case study of Zhangye City[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(8): 1664–1671.

干旱区绿洲制种玉米生命周期环境影响评价 ——以张掖市为例

杨肖¹, 钟方雷^{1,2*}, 郭爱君¹, 王琮³

(1. 兰州大学经济学院, 兰州 730000; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院内陆河流域生态水文重点实验室, 兰州 730000; 3. 中国人民银行兰州中心支行, 兰州 730000)

摘要:为定量分析干旱区绿洲农业的生态环境影响, 在张掖市统计局投入产出调查基础上增补专项调查, 以黑河流域中游张掖市主要三县区的制种玉米为例, 采用生命周期评价(LCA)方法, 将灌溉用水量纳入 LCA 清单, 定量评估作物生命周期内投入产出的环境影响。结果显示, 张掖市甘州区、高台县和临泽县制种玉米环境综合影响指数分别为 0.608 0、0.538 1 和 1.259 5, 其中: 化肥的生产和施用对环境的影响十分显著; 淡水消耗量高于华北地区, 低于陕西关中地区; 与实行轮作的地区比较, 环境污染指数较高。建议加大技术指导, 测土配方施肥, 并在气候及生产条件允许的区域改变耕作制度, 调整种植结构。

关键词: 生命周期评价; 干旱区绿洲农业; 环境影响; 制种玉米

中图分类号: X820.3 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2017)08-1664-08 doi:10.11654/jaes.2017-0425

Assessment of the environmental impact of seed maize production in oasis agriculture of arid regions based on the life cycle assessment method: A case study of Zhangye City

YANG Xiao¹, ZHONG Fang-lei^{1,2*}, GUO Ai-jun¹, WANG Qiong³

(1. School of Economics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Key Laboratory of Ecohydrology of Inland River Basin, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. Lanzhou Central Branch, The People's Bank of China, Lanzhou 730000)

Abstract: Based on the input-output survey of the Zhangye Municipal Bureau of Statistics, a survey was conducted to determine the environmental impact of seed maize production using the life cycle assessment method. The first step was to identify the evaluation objectives and scope, consider the two stages of agricultural production, and determine the production boundaries. The second step was an inventory analysis of irrigation water in the life cycle assessment list and a consideration of resource consumption and environmental emissions. The third step assessed the impact of evaluation and analysis, listed all material characteristics, performed standardization, and calculated the environmental impact index. The fourth step explained the results of the life cycle assessment. The comprehensive impact indices of the seed maize environment in the three counties of Zhangye were 0.608 0, 0.538 1, and 1.259 5. Significant effects of the production and application of chemical fertilizers were observed on the environment. Fresh water consumption was higher than in North China and the Guanzhong Region of Shaanxi Province, and a higher environmental pollution index was obtained when crop rotation was implemented. In view of these findings, it is proposed that agricultural technical guidance be increased, soil testing and fertilization be promoted, the farming system be altered, and the planting structure be adjusted in areas where climate and production conditions permit.

Keywords: life cycle assessment; arid oasis agriculture; environmental impact; seed maize

收稿日期: 2017-03-23

作者简介: 杨肖(1993—), 女, 甘肃甘南人, 硕士研究生, 研究方向为区域经济学。E-mail: 814981371@qq.com

* 通信作者: 钟方雷 E-mail: flzhong@lzb.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571516); 中国博士后科学基金项目(2016M590980)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41571516); The China Postdoctoral Science Foundation(2016M590980)

为更好地满足“十三五”规划的要求,转变农业发展方向,推进农业现代化,我国农业发展必须充分考虑自然资源的承载能力以及对农业环境的保护。我国西北干旱区农业面临水资源稀缺和生态环境脆弱的双重限制^[1],我国人均水资源量几乎不足世界人均水平的1/4,且其中73.4%为农业用水,而灌溉用水有效利用率不足40%。西北干旱区水资源人均拥有量更稀缺,尚不足全国人均拥有量的50%^[2];另外,西北干旱区生态环境脆弱,极易受到气候变化及人类活动的干扰,导致灾害和环境问题频发。在这样的背景下,采用生命周期评价(Life cycle assessment, LCA)方法评估西北干旱区农业的精华部分——绿洲农业的环境影响,同时重点评估农业生产中水资源的消耗情况,无疑具有较强的现实针对性。张掖市作为绿洲农业典型区域,是全国最大的杂交玉米种子生产基地。2015年,张掖市杂交玉米制种播种面积达到99.06万亩(6.6万hm²),产量达52 853.31万kg,产值突破23.86亿元,制种面积占全国全部制种面积的近30%。用LCA方法既能对制种玉米生产过程中各个阶段的环境影响做系统汇总评估,又可以直观反映生产过程环节和要素的影响,可反推改进措施,操作性强,对于我国农业可持续发展具有较强的实践指导意义。

LCA方法是一种用于评估产品或服务生命周期过程中产生的环境影响的工具^[3]。国外相关研究已在农业领域建立比较完善的分析框架,例如:Brentup等^[4]以甜菜为研究对象,运用LCA方法对比了所施不同种类氮肥对环境影响的差异;Charles等^[5]通过比较不同种植密度的小麦生命周期系统内所造成环境影响的差异,得出了生态角度相对最优的种植密度;Mora等^[6]对墨西哥农业生命周期内的碳排放做出了评估。近年来,国内学者也逐步将LCA方法运用于农业生产,例如:Wang等^[7]以华北高产粮区夏玉米不同施肥水平为例,应用LCA方法对夏玉米生命周期资源消耗与污染排放进行清单分析和全面的影响评价;梁龙等^[8]同样应用LCA方法分析了该地区小麦生产过程,结果表明我国小麦生产能耗较高,水土资源的压力较大,富营养化、水体毒性、环境酸化和土壤毒素是主要的潜在环境影响;彭小瑜等^[9]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,得出施肥方式不科学,农药施用过量 and 化肥、农药利用率低是农作系统产生大量引起环境酸化和富营养化污染物的原因。

本文以我国西北干旱区绿洲农业典型区域——张掖市制种玉米为例,应用LCA方法评估环境影响,进而提出缓解环境影响的对策建议。

1 材料与方法

1.1 张掖市区域概况

甘肃省张掖市位于东经97°20′~102°12′,北纬37°28′~39°57′之间。地处全国地形的第二阶梯中心,在青藏高原与内蒙古高原的过渡地带,位于河西走廊中段,处于我国第二大内陆河——黑河流域中游,海拔1200~5565 m,属大陆性荒漠草原气候,干燥少雨,蒸发量大,多风。四季云量少,日照长、太阳辐射强,年平均日照时数为3 052.9 h,气温日较差大,年平均日较差为14℃,年平均气温为7.7℃。年均降水量118.4 mm,大多集中在7—9月,年蒸发量2 337.6 mm,无霜期152 d。

由于天然隔离而少病虫害的自然环境和种植业传统优势,张掖市自古以来就是绿洲农业生产较发达的区域,种植作物以制种玉米为主,分布于黑河流域干流沿岸,下辖的甘州区、临泽县、高台县三县区2012年被农业部命名为国家级杂交玉米种子生产基地,种子产业已成为当地农业增效、农民增收最为显著的支柱产业。但另一方面,张掖市总体种植方式较为粗放,截至2015年,一家一户的分散生产经营方式仍占全市制种面积的80%,生产过程中播种、去雄、追肥、喷药、收获等田间操作90%以上皆由人工完成^[10]。由于当地长期过度追求经济效益,造成土地退化、沙化和土壤盐渍化等环境问题,不利于农业的长期可持续发展和绿色农业推进。

1.2 样本选取与数据收集

本文数据来源于张掖市统计抽样调查2012年投入产出表时,增加专项调查所获得的数据。由于投入产出表每五年编制一次,目前最新的投入产出表为《2012年中国投入产出表》,故本文在分析时采用2012年的数据。样本总量和构成遵循以下原则:第一,总量以国家调查点为基础,确定张掖市三县区调查样本量需补充入户调查80户。样本的构成保持与当地农业增加值比例相同的原则,按照农业增加值比例7:5:8确定相应调查户数,即三县区分别抽取28、20、32户。第二,采用分层随机抽样和典型样本选择法结合,问卷调查和典型样本结构化访谈的方式收集数据。在三县区制种玉米产值前五的各乡镇中,抽取制种玉米户为调查对象。最终甘州区选择碱滩镇、党寨村和小满村三个村镇,临泽县选择沙河镇和平川

镇,高台县选择宣化镇、巷道村和骆驼城乡三个村镇,剔除其中不完整的数据,共得到72户农户的有效数据:制种玉米最大规模为23亩,最小为1.5亩,户均制种玉米种植面积为10.04亩,与当年全市户均种植面积9.45亩较接近。总体抽样数据对当地种植状况的代表性较强。

由于缺乏有效计量设施,当地农户农业用水量并没有直接数据,主要通过水电费缴纳情况推算得到。水费支出主要包括井水灌溉费用和河水灌溉费用。井水灌溉时需要考虑将水从机井中抽出所消耗的电,因而在折算时需考虑电费的支出,河水灌溉没有此项支出。所以,农户灌溉用水量是按井水灌溉 $0.55 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$ 、河水灌溉 $0.1 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$ 折算(河水灌溉只缴纳水费 $0.1 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$,农业用水价格来源于张掖市水务局;井水灌溉既要缴纳水费 $0.1 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$,还需缴纳电费 $0.45 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$,张掖市农业用电价格参考甘肃省电网官网价格公示,以上价格均为2012年同期价格)。调查内容围绕所有投入的生产要素和经济成本以及资源性消耗等,产出主要关注产品产量和当期的经济价值,以及产生的废弃物量和处理方式等。

1.3 生命周期评价

1990年,国际环境毒理学与化学学会(SETAC)提出了“LCA”的概念,提出LCA是用来评价与产品、技术或服务相关的整个生命周期相关环境负荷的过程,它通过识别并量化资源与原料的使用以及环境影响的排放,评价这些投入与排放的影响,并评价和解释环境改善的机会^[11]。具体可分为四步:①确定评价目标与范围;②清单分析(Life cycle inventory, LCI);③影响评价与分析;④生命周期结果解释^[12]。

1.3.1 确定评价目标与范围

用LCA方法评估制种玉米农业系统,是把产品从投入到最终产出的处理的整个过程作为研究对象,进行量化分析和比较,以评价制种玉米环境影响^[13]。本文使用制种玉米质量1t作为功能单元,系统边界从化肥和电力的生产开始,终止边界为作物种植过程输出农产品和污染物,即存在两个生产系统,分别是农资生产系统和作物生产系统,如图1所示。

1.3.2 清单分析

生命周期清单分析是LCA中环境影响评价的基础,主要对产品、工艺或活动等被评估对象在整个生命周期阶段资源、能源的使用与向环境排放废物量的定量评估过程,必须收集系统边界内每一个单元过程中需要纳入清单的数据。张掖市制种玉米的生产按

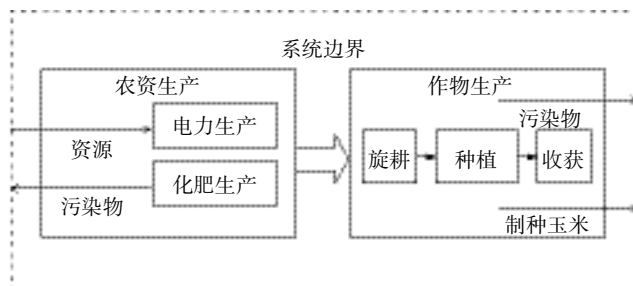


图1 制种玉米的系统边界

Figure 1 System boundary of seed maize production

照《农作物种子生产技术规程:杂交玉米》(DB 62/T 1052—2003)^[14]进行,其中对制种玉米生产的产地环境、产量标准、栽培管理措施、质量管理措施等均作了明确规定,与华北地区夏玉米的种植要求具有较高的相似度。华北平原由于海拔较低、气候湿润,可以实行冬小麦-夏玉米轮作制度,考虑作物全年对环境的影响则必须综合分析两种作物;相比较而言,张掖市海拔较高,制种玉米一年仅一季,因此生产1t制种玉米可以核算全年农作物对农业环境的影响。

本文把制种玉米的生产分为两个阶段,即农资生产阶段和作物生产阶段。农资阶段的影响有化肥生产所导致的大量能源消耗和废水、废气及污染物排放,相关能耗和污染物排放系数,以及电力生产排放系数,参考胡志远^[15]的相关研究。

种植阶段的影响包括整地、灌溉、施肥、病虫害防治等管理措施引起的燃料、电力、淡水消耗及径流、淋溶、挥发等过程带来的污染物排放^[7]。本文主要考虑制种玉米生命周期各阶段中与化肥相关的资源与环境影响,氮磷钾肥有效成分施用量根据生产过程所用复合肥与尿素有效成分进行换算,其中复合肥有效成分N、P₂O₅、K₂O分别为17%、15%、17%,尿素有效成分N为45.5%^[16]。在玉米种植阶段,一般研究中只考虑N和P的损失。N损失综合考虑陈新平等^[17]的研究成果,制种玉米氨(NH₃)挥发为氮素投入总量的26%,制种玉米淋洗取氮素投入总量的16%;N₂O和NO_x的参数参考Brentrup等^[18]的成果,N₂O挥发系数占总氮素投入的1.25%,NO_x的挥发系数则为0.125%。P损失参数参考Gaynor等^[19]的研究,PO₄³⁻流失量为化肥和有机肥总量的1%。农田重金属的污染仅参考化肥和灌溉用水带入土壤的Cu、Zn、Cd、Pb等重金属对环境的影响。张掖市制种玉米几乎全部秸秆还田,所以仅考虑除籽粒之外的重金属,制种玉米各部分的重金属含量参考李静等^[20]的研究。农药残留率参考Van Calker等^[21]的研究成果,污染物进入大气、水体和土

壤的量为农药折纯投入量的 10%、1%和 43%。在制种玉米的生长阶段, N_2O 、 NO_x 、 NO_3 的排放量分别占氮肥施放量的 4.9%、5.3%、6.5%^[22], 每生产 1 kg 玉米排放 3 g NH_3 ^[23]。厂房设备、建筑设施、运输工具生产的环境影响由于资料缺乏, 不予考虑^[14]。

1.3.3 影响评价

影响评价是生命周期评价的核心内容, 是对清单分析中所识别出的环境影响定性或定量的评价过程, 一般有特征化、标准化和加权评估三个步骤。本文将制种玉米的影响因素划分为资源利用情况和生态环境影响两大类, 其中资源利用情况包括能源消耗、土地利用和淡水消耗, 生态环境影响则划分为全球变暖、环境酸化、富营养化、人体毒性、水体毒性和土壤毒性等六种类别。

具体来说, 特征化采用当量系数进行折算, 能源消耗以生产 1 t 制种玉米的能源消耗量表示; 土地利用考虑农作物种植涉及到的草地、林地、水域的使用, 耕地、林地、草地、海水水域、内陆水域的当量系数分别为 1、0.04、0.16、0.1、0.24, 制种玉米的土地类型为耕地, 即为 1; 淡水消耗以生产 1 t 制种玉米的新鲜用水量表示, 由于农业灌溉用水的重复利用率极低, 本文假设为 0。生态环境影响已建立比较完善的当量系数模型, 全球变暖潜力以 CO_2 为当量, CH_4 、 N_2O 和 CO 的当量系数分别为 21、310 和 2^[15]; 酸化潜值以 SO_2 为当量, NH_3 和 NO_x 的当量系数分别为 1.89 和 0.7^[24]; 富营养化潜值以 PO_4^{3-} 为当量, NH_3 、 NO_3^- 、 NO_x 当量系数分别为 0.33、0.42、0.13^[15]。

标准化可以将不同范围的环境影响在统一的标准下研究, 本文采用 2000 年世界人均环境影响潜力^[25]。其中, 土地使用参考梁龙^[8]的研究, 基准值为 $924.92 \text{ m}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ 。能源消耗、淡水消耗、全球变暖潜值、酸化潜值和富营养化潜值的基准值分别为 $56\,877.88 \text{ MJ} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $654.32 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $7\,192.98 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $56.14 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $10.70 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

加权评估是根据特定的加权方法, 赋予不同的影响类型一定的权重。本文所采用的权重参考 Wang 等^[7]、梁龙等^[8]的研究成果, 并考虑到干旱区绿洲农业对水资源的极度依赖, 同时土地资源较为丰富, 将淡水消耗权重由平均水平的 0.09 调整到 0.11, 将土地利用权重由平均水平的 0.16 调整到 0.14。具体的标准化基准值及其权重见表 1。

2 结果与讨论

本文以张掖市三县区 2012 年生产 1 t 制种玉米

表 1 生态环境影响指数基准值及权重

Table 1 Normalization values and weights for different impact categories

生态环境影响类型	单位	标准化基准值/ $\text{人}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$	权重
能源消耗	MJ	2 590 457	0.11
土地利用	m^2	5 423	0.14
淡水消耗	m^3	8 800	0.11
全球变暖	$\text{kg CO}_2\text{-eq}$	6 869	0.12
环境酸化	$\text{kg SO}_2\text{-eq}$	52.26	0.12
富营养化	$\text{kg PO}_4^{3-}\text{-eq}$	1.9	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

为功能单位, 分析该生产体系从农资生产到农作生产中的资源消耗和环境排放情况。表 2 展示了生产 1 t 制种玉米的前期投入要素的数量, 其中氮磷钾肥的数量是折纯后的结果。

2.1 清单分析

张掖市制种玉米的 LCA 清单主要包括资源利用情况和生态环境影响两大类, 见表 3。资源利用情况包括能源消耗、土地使用情况和淡水的消耗, 就生产 1 t 制种玉米的资源利用情况来说, 临泽县消耗都居首位, 能源、土地和淡水的消耗量很大, 高台县的淡水使用最少, 主要受限于地势较高, 且位于黑河中游的末端。由于化肥施放量最高, 按照排放系数折算后, 临泽县各种污染物排放仍然最高。

2.2 影响评价分析

2.2.1 特征化结果

制种玉米种植系统的能源消耗主要发生在农资生产的过程中, 当地农业生产以手工为主, 属于粗放型生产, 制种玉米的种植属于低耗能的生产方式。生产 1 t 制种玉米需要的土地, 甘州区最小、临泽县最大; 农业灌溉用水高台县最少。

采用当量系数计算的全球变暖潜值, 三个县区的温室气体排放量分别是 2 423.50、2 053.19、5 246.40 $\text{kg CO}_2\text{-eq}$, 农资生产和农作生产都会造成温室气体的排放, 临泽县生产 1 t 制种玉米投入较多的农资造成该县全球变暖潜值大幅高于其他地区; 农资和农作过程中产生的 SO_2 、 NH_3 、 NO_x 等气体会造成环境酸化, 三县区分别为 71.12、60.48、154.02 $\text{kg SO}_2\text{-eq}$ 。大部分环境酸化潜值是由所施氮肥引起的, 在较高的氮素背景下, N_2O 排放量呈上升的趋势, 该现象在东北的大豆生产中也得到证实^[26], 胥刚等^[27]的研究同样表

表2 生产1 t制种玉米的前期投入
Table 2 The pre-input for 1 t of seed maize

前期投入	甘州区	高台县	临泽县
氮肥(折纯)/kg·t ⁻¹	79.7	66.69	180.79
钾肥(折纯)/kg·t ⁻¹	19.13	16.01	43.39
磷肥(折纯)/kg·t ⁻¹	21.68	18.14	49.18
化肥实物总量/kg·t ⁻¹	255.05	213.41	578.53
农业用电(用于抽水)/kWh·t ⁻¹	112	182.88	102.11
劳动力/人·t ⁻¹	0.43	0.3	0.29
种籽/kg·t ⁻¹	60.63	52.64	137.51
农膜/kg·t ⁻¹	31.28	45.33	78.26
农药/kg·t ⁻¹	13.81	36.77	20.67
耕种土地面积/hm ² ·t ⁻¹	0.06	0.08	0.11
农业用水/m ³ ·t ⁻¹	711.03	361.55	978.88
生产性服务支出/元·t ⁻¹	260.04	290.14	392.03

表3 生产1 t制种玉米的生命周期排放清单
Table 3 Life cycle inventories for 1 t of seed maize

清单物质	单位	甘州区	高台县	临泽县
能源消耗	MJ	11 622.66	12 399.91	21 940.97
土地利用	hm ²	0.06	0.08	0.11
淡水消耗	m ³	711.03	361.55	978.88
CO ₂	kg	902.68	780.61	1 795.17
CO	kg	0.38	0.33	0.84
N ₂ O	kg	4.90	4.10	11.12
HC	kg	0.05	0.04	0.11
PM ₁₀	kg	0.43	0.37	0.97
SO _x	kg	2.71	2.31	6.08
NH ₃	kg	36.48	31.01	78.93
NO ₃ ⁻	kg	5.18	4.33	11.75
NO _x	kg	3.10	2.67	6.91
PO ₄ ³⁻	kg	0.19	0.16	0.43
莠去津	kg	0.09	0.12	0.16
甲基 1605	kg	0.07	0.09	0.12
乐果	kg	0.05	0.07	0.09
Cu	g	0.20	0.20	0.20
Cd	g	0.01	0.01	0.01
Pb	g	0.05	0.05	0.05
Zn	g	0.08	0.08	0.08

明土壤硝酸盐淋失量随着施氮量的增加而增加,张卫红等^[28]证明测土配方施肥可以有效改善这种现象;临泽县环境影响潜值中富营养化潜值、毒性均为最高。制种玉米的生产具有较高的技术要求,与制种户签约的种子公司技术人员会对农户进行技术指导和规范。由于临泽县制种玉米的生产规模高于其他两县区,单位面积配备的技术人员数量较低,甘州区每亩(667

m²)土地的技术人员平均为1.2人,高台县则达到3人,而临泽县只有0.5人。在实际种植中,由于制种户盲目相信化肥施用量与产量之间有显著增加的经验关系,在缺乏技术人员有效指导的情况下,容易造成化肥多用、滥用,增加了不必要的环境影响。具体环境影响潜值标准化结果见表4。

2.2.2 标准化结果

将张掖市制种玉米的生命周期影响潜值参考2000年世界人均环境影响潜值标准化后的结果如图2所示。可以看出,甘州区制种玉米生命周期内的淡水消耗、环境酸化和富营养化指数超过2000年世界平均水平,高台县制种玉米生命周期内的环境酸化和富营养化超过平均水平,临泽县土地利用情况、淡水消耗、环境酸化和富营养化指数均超过世界水平,尤其是淡水消耗、环境酸化和富营养化,分别是2000年世界人均环境影响的1.496 0、2.743 4、3.109 7倍。高台县的淡水消耗相比于其他两县区都较低,且低于世界平均水平,主要是由于受到政策和客观条件等多重因素影响。从政策管控来说,举世瞩目的黑河分水方案^[29]限制了中游张掖市的用水总量,而高台又处于黑河干流中游的末端,用水总量限制更加明显^[30-31]。高台县东地属黑河谷地平原和榆木山前戈壁地带,海拔较高,这一客观地理条件决定了利用河水灌溉不易,许多地方只能井水灌溉,导致用水成本较高。因此,总量和成本的限制,客观上倒逼高台制种玉米形成了淡水消耗低于其他县区的局面。另外,三县区的能源消耗、全球变暖和毒性指数均低于世界平均水平。这是由于该地区的农业生产主要依靠手工,机械化程度低,因此能源消耗低,但这有利于降低该地区制种玉米的环境影响(毒性),确保国家级制种基地和我国种业的发展以及粮食的安全。

2.2.3 加权评估结果

将制种玉米生命周期生态环境影响潜值加权后,得出张掖市甘州区、高台县和临泽县的环境综合影响指数分别为0.608 0、0.538 1、1.259 5,各县区的对比情况见图3。综合影响高于国内其他地区的相关研究,华北平原的冬小麦-夏玉米种植系统中夏玉米的生命周期环境影响综合指数为0.330 6^[32],陕西关中地区冬小麦-夏玉米轮作系统中夏玉米的生命周期环境影响综合指数为0.378 8^[8],相比于这些地区的轮作系统,制种玉米生产过程要求较为独立的环境,相关投入则相对较大,由于小麦植株中重金属的分布较高,单一种植制种玉米的张掖地区毒性较低。对于西北干旱农业中最重要的水资源来说,华北地区为186.09

表 4 制种玉米生命周期环境影响潜值特征化与加权分析结果

Table 4 Life cycle environmental impact characteristics and weighted results of seed maize production system

生态环境影响类型	单位	甘州区		高台县		临泽县	
		特征化值	加权值	特征化值	加权值	特征化值	加权值
能源消耗	MJ	11 622.66	0.022 5	12 399.91	0.024 0	21 940.97	0.042 4
土地利用	m ²	600.00	0.090 8	800.00	0.121 1	1 100.00	0.166 5
淡水消耗	m ³	711.03	0.119 5	361.55	0.060 8	978.88	0.164 6
全球变暖	kg CO ₂ -eq	2 423.50	0.040 4	2 053.19	0.034 3	5 246.40	0.087 5
环境酸化	kg SO ₂ -eq	71.12	0.152 0	60.48	0.129 3	154.02	0.329 2
富营养化	kg PO ₄ ³⁻ -eq	14.81	0.152 2	12.56	0.129 1	32.31	0.332 2
水体毒性	kg 1,4-DCB-eq	0.27	0.006 7	0.35	0.008 6	2.57	0.063 8
土壤毒性	kg 1,4-DCB-eq	0.92	0.013 5	1.19	0.017 5	3.70	0.054 4
人体毒性	kg 1,4-DCB-eq	25.54	0.010 4	33.10	0.013 4	46.44	0.018 8
环境综合影响指数			0.608 0		0.538 1		1.259 5

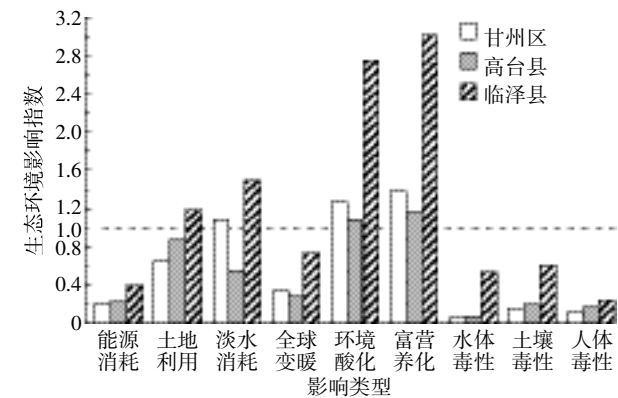


图 2 张掖市制种玉米生命周期生态环境影响指数

Figure 2 Indices of life cycle environmental impacts of seed maize in Zhangye City

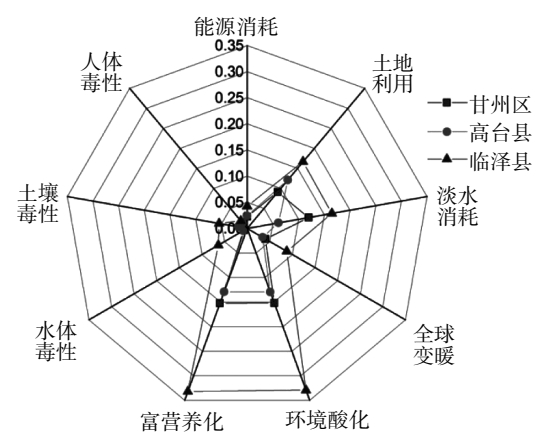


图 3 张掖市制种玉米生命周期生态环境影响潜值加权结果

Figure 3 Weighted indices of life cycle environmental impacts of seed maize in Zhangye City

$\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$, 陕西关中地区为 $2\,162.23\, \text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$, 与农业生产水平较高的华北地区相比, 张掖市平均农业淡水消耗量为 $640.95\, \text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$, 仍然较大, 但还需考虑气候对于农业灌溉用水的影响。华北地区属于温带季风气候, 夏季降水量较干旱区更多, 可能农业灌溉用水需求量会有所降低; 相比于生产水平和气候条件较为相当的陕西关中, 张掖市农业用水效率较高。

3 结论

(1) 张掖市三县区生产 1 t 制种玉米的生态环境综合影响值分别为 0.608 0、0.538 1、1.259 5, 总体差异较大。由于机械污染排放基本可以忽略, 主要原因是化肥施用量存在显著差异, 尤其是氮肥的大量施用, 对全球变暖潜值、酸化潜值、富营养化潜值等指标的贡献率都比较高。为此鼓励农业技术部门和种子公司加大技术指导, 测土配方施肥, 改变传统单纯依赖

“化肥多产量高”的经验, 不仅可以节约氮肥用量, 降低种植成本, 还可以降低环境影响。

(2) 张掖市三县区生产 1 t 制种玉米分别需要 711.03、361.55、978.88 m^3 水灌溉, 整体需水量相比于华北地区属于较高水平, 与陕西关中地区相比用水量较低, 但还需结合气候条件综合评估灌溉用水效率。三县区用水量的内部差异, 一方面由于黑河分水的严格总量控制措施, 另外也与所处地理条件有关。这同时也说明, 从政策角度和地理条件出发因地制宜地调控水资源使用, 是切实可行的。

(3) 张掖市制种玉米的生态环境影响值较实行轮作制度的地区高。建议在气候及生产条件允许的区域, 改变耕作制度, 调整种植结构, 农户可以考虑粮菜生产、种子生产与饲草生产的复合生态模式。实现优势区域生产布局, 合理轮作倒茬, 降低对环境的影响。

参考文献:

- [1] 于法稳, 尚杰. 西北半干旱区农业可持续发展的模式选择[J]. 中国农村经济, 2001(10):54-58.
YU Fa-wen, SHANG Jie. The mode selection of agricultural sustainable development in semi-arid area of Northwest China[J]. *Chinese Rural Economy*, 2001(10):54-58.
- [2] 赵玉田. 脆弱生态系统下西北干旱区农业水资源利用策略研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016:25-28.
ZHAO Yu-tian. Research on agriculture water resources exploitation countermeasures of the fragile ecosystem in northwest arid area[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016:25-28.
- [3] 王玉涛, 王丰川, 洪静兰, 等. 中国生命周期评价理论与实践研究进展及对策分析[J]. 生态学报, 2016, 36(22):7179-7184.
WANG Yu-tao, WANG Feng-chuan, HONG Jing-lan, et al. The development of life cycle assessment theory research in China and analysis of countermeasures[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(22):7179-7184.
- [4] 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]. *European Journal of Agronomy*, 2001, 14(3):221-233.
- [5] 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(1/2/3/4):216-225.
- [6] Mora M A M, Vergara C P, Leiva M A, et al. Life cycle assessment of carbon capture and utilization from ammonia process in Mexico[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 183(3):998-1008.
- [7] Wang M X, Wu W I, Bao Y H, et al. Life cycle assessment of winter and summer maize rotation system in North China Plain[J]. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 2007, 14(4):1-8.
- [8] 梁龙, 陈源泉, 高旺盛, 等. 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.
- [9] 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 Shaanxi Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(4):809-816.
- [10] 张掖市统计局. 张掖市统计年鉴(2015年)[M]. 张掖市统计局, 2016.
Statistics Bureau of Zhangye City. Statistical yearbook of Zhangye City (2015)[M]. Statistics Bureau of Zhangye City, 2016.
- [11] Rebitzer G, Ekvall T, Frischknecht R, et al. Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications[J]. *Environ Int*, 2004, 30(5):701-720.
- [12] Ekvall T. SETAC summaries[J]. *Cleaner Prod*, 2005, 13(13/14):1351-1358.
- [13] 黄和平. 生命周期管理研究述评[J]. 生态学报, 2017, 37(13):1-10.
HUANG He-ping. Critical review of life cycle management[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(13):1-10.
- [14] 甘肃省质量技术监督局. DB 62/T 1052—2003 农作物种子生产技术规程: 杂交玉米[S]. 兰州: 甘肃省质量技术监督局, 2003.
Quality and Technical Supervision Bureau of Gansu Province. DB 62/T 1052—2003, Technical specification for crop seed production hybrid maize[S]. Lanzhou: Quality and Technical Supervision Bureau of Gansu Province, 2003.
- [15] 胡志远. 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. Assessment of life cycle energy consumption and emissions of several kinds of feedstock based biodiesel[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(11):141-146.
- [16] 董志新, 李筱梅, 续珍, 等. 沼渣有机无机复混肥对土壤养分含量和酶活性的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(2):398-404.
DONG Zhi-xin, LI Xiao-mei, XU Zhen, et al. Effects of organic-inorganic mixed fertilizer made by biogas residue on soil nutrients and enzyme activities[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(2):398-404.
- [17] 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.
- [18] 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 of Agronomy*, 2004, 20:265-279.
- [19] 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(4):734-741.
- [20] 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.
- [21] 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(2):139-160.
- [22] Renouf M A. An environmental life cycle assessment comparing Australian sugarcane with US corn and UK sugars for fermentation[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2008, 32(11):1144-1155.
- [23] Pelletier N, Araenault N, Tyedmers P. Scenario modelling potential efficiency gains from a transition to organic agriculture: Life cycle perspectives on Canadian canola, corn, soy and wheat production[J]. *Environmental Management*, 2008, 42(6):989-1001.

- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 罗 燕, 乔玉辉, 吴文良. 东北有机及常规大豆对环境影响的生命周期评价[J]. *生态学报*, 2011, 31(23): 7170–7178.
- LUO Yan, QIAO Yu-hui, WU Wen-liang. Environment impact assessment of organic and conventional soybean production with LCA method in China Northeast Plain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(23): 7170–7178.
- [27] 胥 刚, 王进贤, 林慧龙, 等. 基于生命周期评价的相同食物当量玉米与紫花苜蓿生产环境影响比较研究[J]. *草业学报*, 2017, 26(3): 33–43.
- XU Gang, WANG Jin-xian, LIN Hui-long, et al. Use of life cycle assessment methodology to environment impacts of the same food equivalent for corn and alfalfa production[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(3): 33–43.
- [28] 张卫红, 李玉娥, 秦晓波, 等. 应用生命周期法评价我国测土配方施肥项目减排效果[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(7): 1422–1428.
- ZHANG Wei-hong, LI Yu-e, QIN Xiao-bo, et al. Evaluation of greenhouse gas emission reduction by balanced fertilization in China using life cycle assessment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(7): 1422–1428.
- [29] 中华人民共和国水利部. 黑河干流水量调度管理暂行办法[Z]. 北京: 水利部, 2006.
- The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China (MWR). Interim measures for management of water dispatching in Heihe[Z]. Beijing: MWR, 2006.
- [30] 钟方雷, 徐中民, 程怀文, 等. 黑河中游水资源开发利用与管理的历史演变[J]. *冰川冻土*, 2011, 33(3): 692–701.
- ZHONG Fang-lei, XU Zhong-min, CHENG Huai-wen, et al. The history of water resources utilization and management in the middle reaches of Heihe River[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(3): 692–701.
- [31] 钟方雷, 徐中民, 霍田顺平, 等. 黑河流域分水政策制度变迁分析[J]. *水利经济*, 2014, 32(5): 37–42.
- ZHONG Fang-lei, XU Zhong-min, WATIAN Shun-ping, et al. Institutional evolution of water allocation policies in Heihe River basin since 1960[J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2014, 32(5): 37–42.
- [32] 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.