

# 吉林省半干旱区玉米生命周期碳足迹研究

孙 博<sup>1</sup>, 秦裕波<sup>1</sup>, 林 园<sup>2</sup>, 李 前<sup>1</sup>, 刘志全<sup>1</sup>, 王 蒙<sup>1</sup>, 冯艳春<sup>1</sup>

(1. 吉林省农业科学院农业资源与环境研究所, 长春 130033; 2. 吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118)

**摘 要:** 基于调研数据, 以吉林省半干旱区玉米种植体系为研究对象, 以生产 1 kg 玉米为评价单元, 运用农业碳足迹理论及生命周期评价法研究吉林省半干旱区玉米种植系统碳足迹大小及组成, 分析玉米生产过程中各种碳排放源的相对贡献。结果显示, 玉米生命周期单位面积碳足迹和单位产量碳足迹分别为 12.3 kg/hm<sup>2</sup> 和 1.10 kg/kg, 其中农资生产系统引起的温室气体排放对碳足迹贡献最大, 占总量的 52%, 碳排放量为 21 431 kg·eq, 农资生产系统中由氮肥造成的碳排放比例最高, 占 41%。作物生产系统对玉米生命周期碳足迹的贡献为 48%, 该环节的碳排放量为 17 257 kg·eq, 其中施用氮肥产生的温室气体排放量为 14 209 kg·eq, 占该环节碳排放总量的 82.3%。各项农资投入与碳足迹的相关分析表明, 玉米生命周期碳足迹主要受化肥影响, 其次是耗电和柴油。建议优化煤基氮肥生产路线, 研发清洁煤基氮肥技术, 降低肥料生产加工过程中的碳排放量同时采取施用缓释肥料、脲酶抑制剂等方法, 延缓养分释放, 提高肥料利用率。

**关键词:** 玉米; 碳足迹; 生命周期评价; 氮肥

**中图分类号:** S513.01

**文献标识码:** A

## Life Cycle Carbon Footprint Study of Maize in the Semi-Arid Area of Jilin Province

SUN Bo<sup>1</sup>, QIN Yu-bo<sup>1</sup>, LIN Yuan<sup>2</sup>, LI Qian<sup>1</sup>, LIU Zhi-quan<sup>1</sup>, WANG Meng<sup>1</sup>, FANG Yan-chun<sup>1</sup>

(1. Institute of Agricultural Resource and Environment, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033;

2. College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

**Abstract:** Based on survey data, this study focused on the maize planting system in the semi-arid region of Jilin province, using the production of 1 kg of maize as the evaluation unit, agricultural carbon footprint theory and life cycle assessment analyses were used to examine the size and composition of the carbon footprint in the maize planting system, as well as to analyze the relative contributions of various carbon emission sources in the maize production process. As a result, the carbon footprints per unit area and per unit yield of maize were 12.3 kg/ha and 1.10 kg/kg, respectively. Throughout life cycle of maize, greenhouse gas emissions caused by the agricultural resource production system contributed the most (52%, 21 431 kg·eq) to the carbon footprint, of which nitrogen fertilizer had the largest share with 41%. Planting accounted for 48% (17 257 kg·eq), and nitrogen fertilizer had a portion of 82.3% (14 209 kg·eq). Correlation analysis of agricultural elements and carbon footprint indicated that fertilizer is the main contributor to the carbon footprint, followed by electricity consumption and diesel. Suggestions on optimizing coal-based nitrogen fertilizer production routes and developing clean coal-based nitrogen fertilizer technologies. To reduce the carbon emissions in the process of fertilizer production, slow-release fertilizers and urease inhibitors can be applied to delay the release of nutrients and improve the utilization rate of fertilizers.

**Key words:** Maize; Carbon footprint; Life cycle assessment; Nitrogenous fertilizer

录用日期: 2022-01-14

基金项目: 吉林省农业科学院基本科研经费项目(KYJF2021JQ106)、

吉林省自然科学基金(20210101028JC)

作者简介: 孙 博(1993-), 硕士, 从事植物营养学研究。

王 蒙、冯艳春为本文通信作者。

随着人们对气候变化和粮食安全的认知日益增加, 低碳农业越发受到国际社会的高度关注。联合国粮农组织(FAO)指出, 耕地释放出大量的温室气体, 超过全球温室气体排放总量的 30%, 相当于 150 亿 t 的二氧化碳<sup>[1]</sup>。我国农业碳排放量占全国碳排放总量的 17%<sup>[2~4]</sup>, 农业已经成为全球气候变化公认

的重要贡献者<sup>[5]</sup>。在农业生产上,碳足迹是对农产品整个生命周期各项涉农活动所造成的直接或间接的CO<sub>2</sub>排放量的度量。农业碳足迹研究可以明确农业生产过程中造成温室气体排放的主体目标,且利于采取针对性措施改善不当的农业生产行为<sup>[6]</sup>。

生命周期评价(LCA)在环境影响评价中较为成功,是一种通过收集作物生长全过程中环境排放,按照国际标准及一定权重计算获得结果的方法<sup>[7]</sup>。近年来,伴随着生命周期评价法在农业生产领域的运用,越来越多有关碳足迹的研究表明,除了粮食作物田间种植环节以外,各农业生产资料在生产加工过程中排放的温室气体同样不容忽视<sup>[8]</sup>。我国在氮肥生产方面,生产能源结构相对落后,产生温室气体排放较大,节水灌溉面积小、灌溉水利用系数低等原因造成的耗电问题严重<sup>[9]</sup>。

玉米是我国种植面积较大的作物之一,提高玉米生产碳排放效率已成为农业研究中需要加以关注的焦点。吉林省位属北方春播玉米区,玉米种植面积和单产水平始终保持在全国前列,总产量玉米占全国玉米生产的28%,是我国著名的“玉米之乡”<sup>[10]</sup>。近年来,吉林省机械化玉米生产碳排放呈波动上升趋势。农药、化肥的使用程度加重,玉米生产碳排放逐年增加,玉米安全生产问题引起了国家的高度重视<sup>[11]</sup>。因此,分析玉米生产碳足迹变化控制农业生产碳排放具有重大意义,减少二氧化碳排放,发展低碳农业刻不容缓。本文以我国北方半干旱区春播玉米区域为例,通过调研与数据收集,整理总结该地区农业生产过程中生产资料及其相关资源投入的结构与规律,应用LCA方法评估环境影响,对吉林省半干旱区的玉米生产的碳足迹进行研究,评估该地区碳足迹,分析其影响因素进而提出缓解环境影响的

对策建议。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本研究区域位于吉林省中西部,属半干旱春玉米区。该地区属温带大陆性季风气候,冬季气温低,无霜期短。该地区平均气温4.5℃左右,年均日照2900 h左右,无霜期135~140 d。年降水量在400~500 mm,年平均风速为13.3 m/s。土壤类型以风沙土为主,保水保肥性能差。

### 1.2 研究方法

本研究采用生命周期法进行碳足迹计算,生命周期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。产品的生命周期是指从原材料的获取开始、产品生产直至产品使用后处置收尾全过程。用生命周期方法评估玉米生产碳足迹,是把产品从投入到最终产出处理的整个过程作为研究对象,进行量化分析和比较,进而评价玉米环境影响。本研究计算宁江区玉米生产系统碳足迹,确定调查对象的系统边界,收集相关数据,计算玉米系统碳足迹。

#### 1.2.1 确定调查对象的系统边界

本研究以玉米质量1 kg作为功能单元,系统边界从化肥、农药、种子和电力的生产开始,终止边界为作物种植过程输出的农产品和废弃物,即存在农资生产系统和作物生产系统两个生产系统,农资生产阶段的影响有化肥生产所导致的能源消耗,种植阶段的影响包括翻耕、播种、施肥、除草、喷药、灌溉、收获等过程引起的燃料、电力、水资源消耗以及废弃排放(图1)。

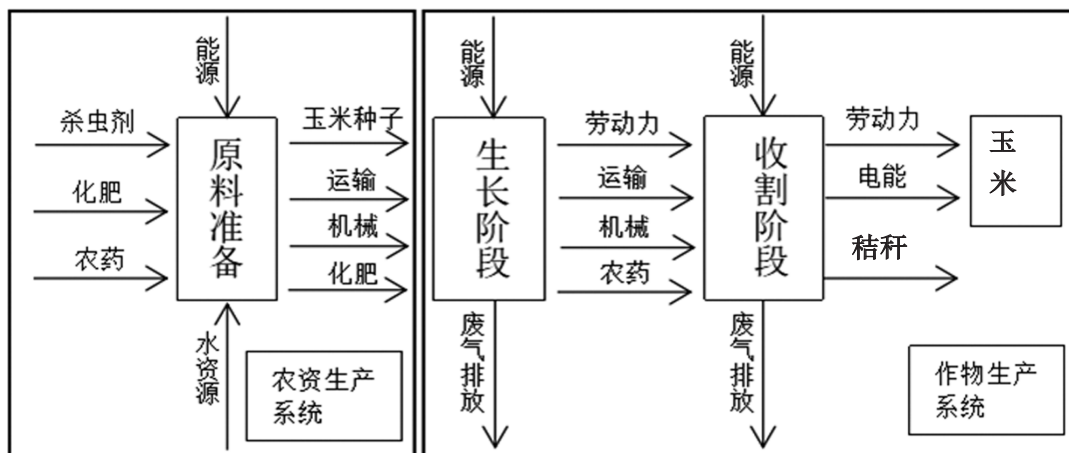


图1 玉米生产的碳足迹计算边界

Fig.1 Systematic boundaries for calculating greenhouse gases emissions of maize production

1.2.2 数据来源

本研究立足于吉林省半干旱区春玉米生产,在2019年对吉林西部半干旱区的3个城市(松原、乾安、白城)共计6个技术示范合作社的代表性地块(17个地块,面积总计4.9 hm<sup>2</sup>,产量总计54 685 kg)进行数据调研。在调研过程中采用访谈式交流,详细记录主要的种植信息。无法直接获取的数据,通过间接换算得到,化肥用量在碳足迹的计算中通常以有效成分计,尿素有效成分是46%、磷肥38%、钾肥60%。玉米生产中各项投入与产出的数据主要来源于《2017年中国投入产出表》,计算公式的排放因子来源于2014年IPCC国家温室气体清单指南。

1.2.3 碳足迹计算<sup>[12]</sup>

作物的碳足迹是指从播种到收获整个农业生产

过程中由于投入种子、农药、化肥、机械和灌溉造成的间接单位面积碳排放总量。具体包括化肥和农药生产以及使用过程中所导致的碳排放;农田种子引起的碳排放;农业机械使用消耗化石燃料(柴油、电力等)所产生的碳排放;农业灌溉过程中电能利用所形成的碳排放。作物农田利用生产过程中碳足迹公式如下:

$$CE_i = \sum_{i=1}^n (\vartheta \times m)_i \tag{1}$$

式中:CE<sub>i</sub>为农田利用的碳排放总和;n表示该玉米生产系统从播种到收获整个过程消耗的农业生产资料种类和农事操作(化肥、农药、柴油、用电、人工等), $\vartheta$ 表示各种农资的消耗量,m表示某种农资的温室气体排放参数。各农业资料排放系数见表1。

表1 农业资料碳排放系数

Table 1 Index of carbon emission of different material for agricultural production

项 目	碳排放参数	参考文献
Item	Index of carbon emission	Reference
氮肥(作物生产系统)	13.50 kg/kg	[13]
磷肥	1.50 kg/kg	[13]
钾肥	0.98 kg/kg	[13]
除草剂	6.30 kg/L	[13]
杀虫剂	5.10 kg/L	[13]
灭菌剂	3.90 kg/L	[13]
柴油	0.94 kg/L	[13]
电能	0.25 kg/(kWh·kg)	[13]
人工	0.86 kg/(人·d·hm <sup>2</sup> )	[13]
CH <sub>4</sub>	34.00 kg/kg	[14]
N <sub>2</sub> O	298.00 kg/kg	[14]
玉米种子	1.05 kg/kg	[13]
氮肥(农资生产系统)	8.30 kg/kg	[13, 15]
磷肥	1.50 kg/kg	[13, 15]
钾肥	0.98 kg/kg	[13, 15]
农药	18.00 kg/L	[13, 16]
柴油	19.00 kg/L	[13, 17]
耗电	1.00 kg/(kWh·hm <sup>2</sup> )	[13, 18]

作物生命周期的碳足迹(CE)即各项投入与排放源的总和,计算公式如下:

$$CE = CE_i + CE_{CH_4} + CE_{N_2O} \tag{2}$$

$$CE_{CH_4} = E_{CH_4} \times 34 \tag{3}$$

$$CE_{N_2O} = DCE_{N_2O} + GCE_{N_2O} + LCE_{N_2O} \tag{4}$$

$$DCE_{N_2O} = N \times F_D \times 44/28 \times 298 \tag{5}$$

$$GCE_{N_2O} = N \times F_G \times 0.1 \times 44/28 \times 298 \tag{6}$$

$$LCE_{N_2O} = N \times F_L \times 0.3 \times 44/28 \times 298 \tag{7}$$

其中,(2)式中的CE是农作物的碳足迹;(2)、(3)

式中的CE<sub>CH<sub>4</sub></sub>是农业投入的间接温室气体排放总量,34为CH<sub>4</sub>的增温潜势;旱地直接和间接的N<sub>2</sub>O排放主要由施氮肥引起的,(4)~(7)式中CE<sub>N<sub>2</sub>O</sub>为N<sub>2</sub>O引起的碳排放总量,DCE<sub>N<sub>2</sub>O</sub>为氮肥引起的田间N<sub>2</sub>O直接排放,GCE<sub>N<sub>2</sub>O</sub>是由NH<sub>3</sub>和NH<sub>x</sub>形式挥发到大气后氮沉降造成的间接N<sub>2</sub>O排放,LCE<sub>N<sub>2</sub>O</sub>为通过淋失和径流损失的氮素造成的间接N<sub>2</sub>O排放,F<sub>D</sub>、F<sub>G</sub>、F<sub>L</sub>分别为氮肥投入引起的N<sub>2</sub>O直接排放的排放因子、氮沉降造成的间接N<sub>2</sub>O排放因子以及淋失和径流损失的氮素造成的间接N<sub>2</sub>O排放因子,系数分别为0.01、0.01

和0.0075,44/28为N<sub>2</sub>O与N<sub>2</sub>O-N分子量之比,298为N<sub>2</sub>O的增温潜势。

单位产量碳足迹( $CE_y$ )计算公式:

$$CE_y = CE/Y \tag{8}$$

式中: $Y$ 表示当年玉米总产量。

单位面积碳足迹( $CE_A$ )计算公式:

$$CE_A = CE/A \tag{9}$$

式中: $A$ 表示当年玉米总的播种面积。

1.3 数据处理与分析

利用OrigiPro8.5和SPSS22.0软件对数据进行处理和统计分析,并制作图表。

2 结果与分析

2.1 玉米生命周期中农资生产系统温室气体排放量

从表2中可以看出,化肥、柴油及灌溉所耗用电

表2 玉米生命周期中农资生产系统的温室气体排放量

Table 2 Greenhouse gas emissions from production system of maize planting life cycle

项 目 Item	总投入量 Input	碳排放参数 Index of carbon emission	温室气体碳排放量(kg·eq) Carbon emissions equivalent of greenhouse gases	温室气体碳排放量比例(%) Proportion of carbon emissions equivalent of greenhouse gases
种子	103.0 kg	1.05 kg/kg	108	1
氮肥	1 052.0 kg	8.30 kg/kg	8 736	41
磷肥	397.0 kg	1.50 kg/kg	596	3
钾肥	434.0 kg	0.98 kg/kg	426	2
农药	43.0 L	18.00 kg/L	782	4
柴油	335.0 L	19.00 kg/L	6 357	30
耗电	4 426.0 kWh	1.00 kg/(kWh·hm <sup>2</sup> )	4 426	21

能是吉林省半干旱区玉米生命周期中农资生产系统主要的温室气体排放源。其中,化肥的碳排放当量比例占整体的46%,由于氮肥的总投入量高达1 052 kg,导致农资生产系统中氮肥的温室气体排放量最高,为8 736 kg·eq,占整个农资生产系统的41%,分别是磷肥和钾肥的14.7倍和20.5倍;柴油和灌溉用电的碳排放量分别占农资生产系统的30%和21%,其碳排放量分别为6 357 kg·eq、4 426 kg·eq。

2.2 玉米生命周期中作物生产系统温室气体排放量

化肥、农药、柴油、耗电、人工是玉米生产系统主要的温室气体排放源,分别占该环节碳排放量总量的88.3%、1.4%、1.8%、6.4%和2.1%。化肥投入所产生的碳排放量以氮肥为主,总投入量达1 052 kg,所产生的温室气体排放量占作物生产系统的82.3%;其次是灌溉所用耗电产生的温室气体排放量,占该系统的6.4%。作物生产系统中使用的农药以除草剂为主,造成的温室气体排放量占比为0.9%。

表3 玉米种植环节的温室气体碳排放量

Table 3 Carbon footprint of greenhouse gases in the process of farmland utilization in maize planting life cycle

项 目 Item	总投入量 Input	碳排放参数 Index of carbon emission	温室气体碳排放量(kg·eq) Carbon emissions equivalent of greenhouse gases	温室气体碳排放量比例(%) Proportion of carbon emissions equivalent of greenhouse gases
除草剂	23.20 L	6.30 kg/ L	146.0	0.9
灭菌剂	9.91 L	3.90 kg/L	38.7	0.2
杀虫剂	10.30 L	5.10 kg/ L	52.6	0.3
氮肥	1 052.00 kg	5.20 kg/kg	14 209.0	82.3
磷肥	397.00 kg	1.50 kg/kg	596.0	3.5
钾肥	434.00 kg	0.98 kg/kg	426.0	2.5
柴油	335.00 L	0.94 kg/L	315.0	1.8
耗电	4 426.00 kWh	0.25 kg/(kWh·hm <sup>2</sup> )	1 107.0	6.4
人工	428.00 人/d	0.86 kg/(人·d)	368.0	2.1



### 2.3 玉米生命周期温室气体碳足迹及贡献

由于玉米对氮肥的需求量高,吉林省半干旱区玉米种植体系中氮肥平均投入达  $215 \text{ kg/hm}^2$ ,由氮肥引起的种植环节和生产加工环节的单位面积碳足迹最高,分别为  $3.17 \text{ kg/hm}^2$  和  $2.05 \text{ kg/hm}^2$ 。整个玉米生命周期中,单位面积的碳足迹总量为  $12.3 \text{ kg/hm}^2$ ,其中化肥、农药、柴油、耗电所造成的单位面积碳足迹是分别是  $6.73$ 、 $1.30$ 、 $1.91$ 、 $1.67 \text{ kg/hm}^2$ (图2)。

吉林省半干旱区玉米生产各项投入单位产量碳足迹,碳足迹总量为  $1.10 \text{ kg/kg}$ ,单位产量碳足迹与单位面积碳足迹构成组分相同。其中,种植环节施用氮肥导致的单位产量碳足迹最高,为  $0.284 \text{ kg/kg}$ ;其次是农资生产系统中氮肥、柴油和灌溉所耗电能的单位产量碳足迹较高,分别为  $0.284$ 、 $0.141$ 、 $0.105 \text{ kg/kg}$ (图3)。

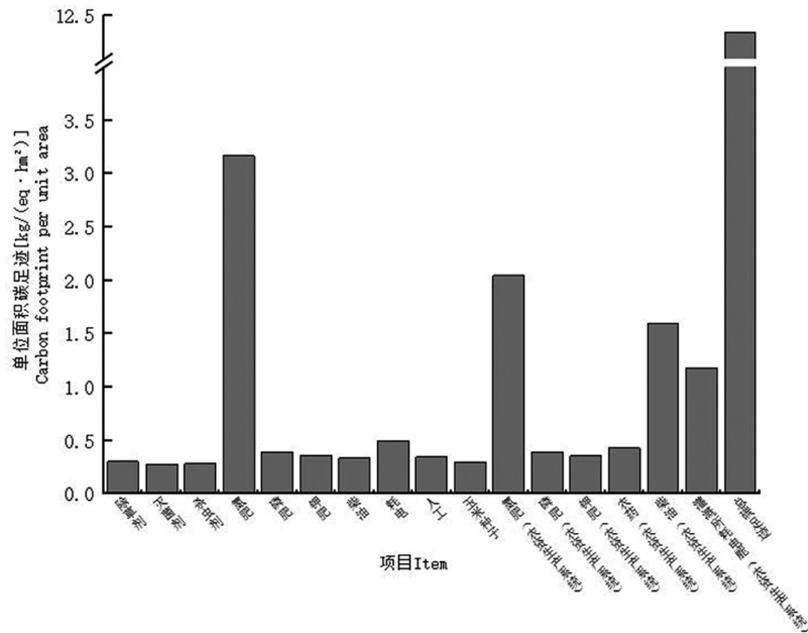


图2 玉米生命周期单位面积碳足迹

Fig.2 Carbon footprint of greenhouse gases in the process of farmland utilization in maize planting life cycle

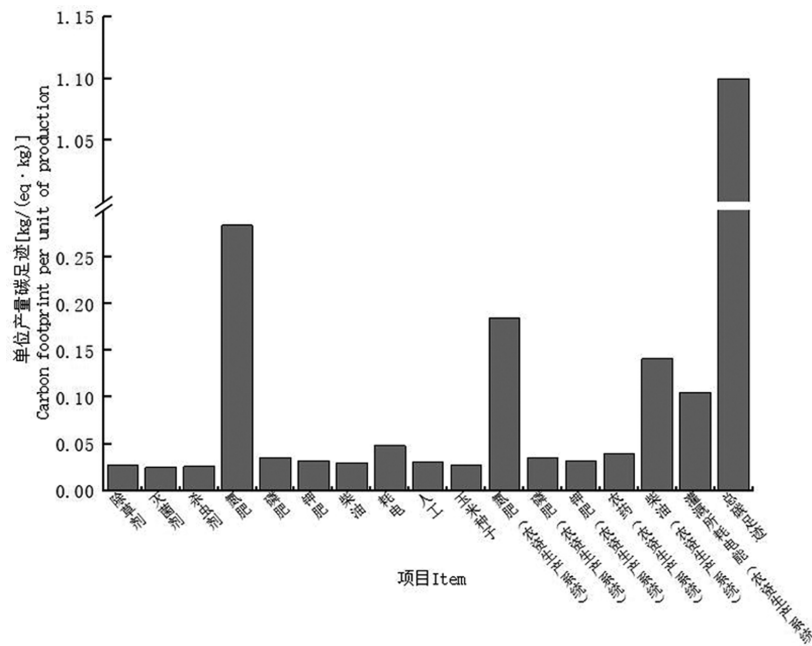


图3 玉米生命周期单位产量碳足迹

Fig.3 Carbon footprint of greenhouse gases in the process of yield utilization in maize planting life cycle

吉林省半干旱区玉米生命周期的碳足迹构成,玉米生命周期中加工运输环节的碳足迹贡献最大,该环节引起的碳足迹占总量的52%。在生产加工运输环节中,氮肥、柴油、耗电投入所产生的碳足迹较

大,对玉米生命周期碳足迹的贡献分别是17%、13%、10%。在种植环节中,氮肥的施用所产生的碳足迹贡献最大,占玉米生命周期碳足迹的26%(图4)。

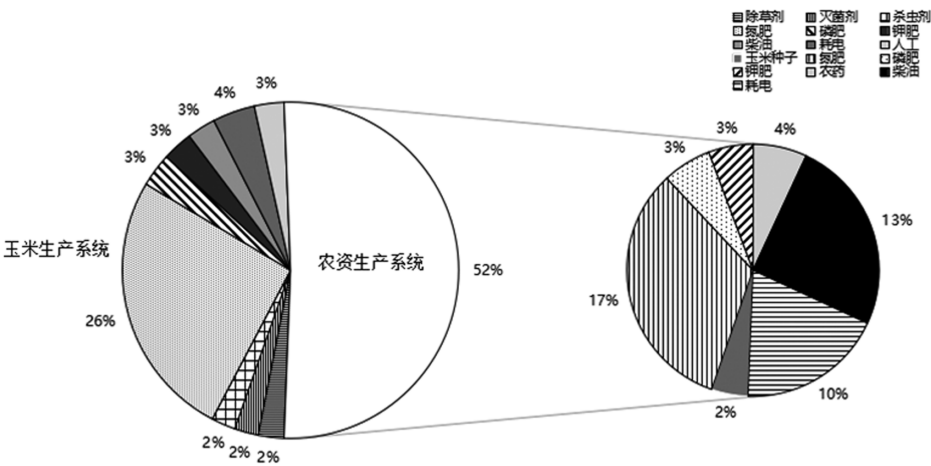


图4 玉米生命周期碳足迹贡献

Fig.4 Proportion of greenhouse gas carbon footprint in maize production system

2.4 玉米生命周期碳足迹影响因素的分析

玉米生命周期中的碳足迹受多种因素的影响。对各项农资投入量与玉米种植碳足迹进行相关性分析表明(表5),碳足迹与农药、人工、种子均无显著相

关性( $P>0.05$ ),玉米生命周期碳足迹与化肥、柴油、耗电均呈显著相关( $P<0.05$ ),其中,化肥投入与碳足迹的相关系数最大,为0.912,可见化肥施用对玉米生命周期中碳足迹的影响较大。

表5 各项农资投入与玉米生命周期碳足迹相关性分析

Table 5 Carbon footprint of greenhouse gases in the process of farmland utilization in maize planting life cycle

项 目	R 值	P 值
Item	R value	P value
化肥	0.912	0.000
柴油	0.273	0.001
耗电	0.889	0.001
农药	0.217	0.06
人工	0.249	0.667
玉米种子	0.106	0.611

3 结论与讨论

伴随着生命周期评价方法的成功运用,分析不同区域碳足迹的特点和减排潜力,可为制定区域化和有针对性的温室气体减排措施提供思路。生命周期评价应进一步发展成为能够评价不同农户管理习惯的减排潜力,最终建立优化管理措施。在目前的农户习惯中,尤其是小农户系统,农户间由于管理措施的差异存在较大的产量差和环境代价差。因此,本研究基于本地化的生命周期评价(LCA)参数和本地区6个规模化合作社农户调查分析,量化吉林

西部半干旱区玉米生产的养分资源投入与环境代价。

本文通过采用生命周期评价方法,分析该地区玉米生产单位播种面积及单位产量的碳足迹分布,并对玉米生命周期碳足迹构成及贡献进行分析。大量研究表明,农田温室气体的直接排放主要来源于肥料,其中,氮肥投入所产生的温室气体排放占农田总排放的44%~79%<sup>[19~21]</sup>。该区域玉米生命周期中肥料的碳足迹贡献率达55%,氮肥的碳足迹贡献率达43%,是吉林省半干旱区玉米温室气体排放最主要的影响因素。农资生产系统中氮肥的碳足迹占整

个玉米生命周期碳足迹的17%。我国农业生产资料的生产主要以消耗煤炭资源为主,煤炭的能源转换系数通常较低,这意味着每生产单位质量的农业生产资料就会排放更多的二氧化碳<sup>[22]</sup>。针对这种情况可通过淘汰高耗能的油基型氮肥生产路线,优化煤基氮肥生产路线,采用“一点加入、逐级提浓、返回系统”的碳化系统模式<sup>[23]</sup>,组织物料循环利用,提高能量利用率;研发清洁煤基氮肥技术也是降低氮肥生产加工环节碳排放量的有效模式之一,建议采用新型三废燃烧炉最大程度实现环保效益<sup>[24]</sup>。该区域玉米种植环节的氮肥碳足迹贡献占26%,对于降低氮肥田间种植环节的排放,可采取施用缓释氮肥、脲酶抑制剂等方法来延缓养分释放、延长尿素扩散时间进而提高氮肥利用率;采取分次施用技术,根据玉米生育期不同阶段玉米生长对营养成分的需求量进行针对性施肥;使用氮肥增效剂也是提高肥料利用率的主要措施之一,氮肥增效剂与氮肥混合使用,能抑制土壤硝化作用的进行,可减少氮肥由于脱氮作用所造成的损失。

除降低氮肥的温室气体排放外,玉米灌溉耗电、农业机械的使用等项目碳排放依然不能小觑<sup>[25]</sup>。本研究表明,灌溉耗电及柴油的碳排放对玉米生命周期碳足迹影响显著,碳排放量分别为5 533 kg·eq和6 672 kg·eq,占玉米生命周期碳足迹的14.3%和17.2%。半干旱区玉米种植可采用浅埋滴灌、膜下滴灌等方法多次灌溉,减少水资源投入。因此,推广集约化节水灌溉技术是降低玉米灌溉方面碳足迹的有效办法。农机作业产生的碳排放受人、机器和作业环境等多种因素的综合影响<sup>[26]</sup>,在吉林省半干旱区推行更有效的机械操作方法和选择适合的机器类型,减少柴油的消耗,提高耕作效率,降低农业机械的碳排放量,加强机械操作者的操作经验,调整玉米生产布局,降低碳源投入,提高农资投入效率是发展节约型农业与生态农业的关键途径。

#### 参考文献:

- [1] FAO. FAOSTAT database-agriculture production[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2019.
- [2] 褚力其,姜志德,任天驰. 中国农业碳排放经验分解与峰值预测——基于动态政策情景视角[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(10): 187-201.  
CHU L Q, JIANG Z D, REN T C. Empirical decomposition and peak prediction of agricultural carbon in China: From the perspective of dynamic policy scenarios[J]. Journal of China Agricultural University, 2020, 25(10): 187-201. (in Chinese)
- [3] XIONG C H, CHEN S, XU L T. Driving factors analysis of agricultural carbon emissions based on extended STIRPAT model of Jiangsu Province, China[J]. Growth & Change 2020, 51(3): 1401-1416.
- [4] Urban Research-Urban Planning; Investigators from Chinese Academy of Sciences Target Urban Planning(Driving Factors Analysis of Agricultural Carbon Emissions Based on Extended Stirpat Model of Jiangsu Province, China). 2020.
- [5] 周文魁. 气候变化对中国粮食生产的影响及应对策略[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
- [6] 高文玲,施盛高,徐丽,等. 低碳农业的概念及其价值体现[J]. 江苏农业科学, 2011, 39(2): 13-14.  
GAO W L, SHI S G, XU L, et al. The concept and value of low-carbon agriculture[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2011, 39(2): 13-14. (in Chinese)
- [7] 王长波,张力小,庞明月. 生命周期评价方法研究综述——兼论混合生命周期评价的发展与应用[J]. 自然资源学报, 2015, 30(7): 1232-1242.  
WANG C B, ZHANG L X, PANG M Y. A review on life cycle assessment: Development and application[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(7): 1232-1242. (in Chinese)
- [8] 米松华. 我国低碳现代农业发展研究——基于碳足迹核算和适用性低碳技术应用的视角[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [9] 周志花. 利用LCA法核算农作物生产碳足迹[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.
- [10] 王寅,冯国忠,焉莉,等. 吉林省玉米施肥效果与肥料利用效率现状研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(6): 1441-1448.  
WANG Y, FENG G Z, YAN L, et al. Present fertilization effect and fertilizer use efficiency of maize in Jilin province[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2016, 22(6): 1441-1448. (in Chinese)
- [11] 王海娜. 我国玉米生产碳排放效率研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [12] 陈中督,徐春春,纪龙,等. 2004-2015年长江中下游地区冬油菜生产碳足迹的时空变化[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(7): 1105-1114.  
CHENG Z R, XU C C, JI L, et al. Spatil and temporal changes in carbon footprint for oilseed rape production in the middle and lower reaches of Yangtze River during 2004-2015[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(7): 1105-1114. (in Chinese)
- [13] 夏龙龙,颜晓元. 中国粮食作物生命周期生产过程温室气体排放的研究进展及展望[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 665-672.  
XIA L L, YAN X Y. Research progress and prospect of greenhouse gas emissions from the life-cycle production of food crops in China [J]. Journal of Agro-environment Science, 2020, 39(4): 665-672. (in Chinese)
- [14] IPCC. Climate change 2014: Mitigation of climate change[M]. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [15] Ecoinvent Centre. Ecoinveny Data V3. 3. Dubendorf, Switzerland. 2016-08-15.
- [16] WEST T O, MARLAND G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: Comparing till-

- age practices in the united states[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2002, 91(1-3): 217-232.
- [17] 王国刚,杨德刚,苏 芮,等.生态足迹模型及其改进模型在耕地评价中的应用[J].中国生态农业学报,2010,18(5):1081-1086.
- WANG G G, YANG D G, SUI R, et al. Application of tradition ecological footprint and its derivatives in utilization of croplands[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(5): 1081-1086. (in Chinese)
- [18] DI X, NIE Z, YUAN B, et al. Life cycle inventory for electricity generation in China[J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2007, 12(4): 217-224.
- [19] 张 国,王效科.我国保护性耕作对农田温室气体排放影响研究进展[J].农业环境科学学报,2020,39(4):872-881.
- ZHANG G, WANG X K. Impacts of conservation tillage on greenhouse gas emissions from cropland in China: A review.[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(4): 872-881. (in Chinese)
- [20] 朱晓晴,安 晶,马 玲,等.秸秆还田深度对土壤温室气体排放及玉米产量的影响[J].中国农业科学,2020,53(5):977-989.
- ZHU X Q, AN J, MA L, et al. Effects of Different Straw Returning Depths on Soil Greenhouse Gas Emission and Maize Yield[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(5): 977-989. (in Chinese)
- [21] 舒晓晓,刘智杰.浅析农田温室气体排放的影响因素[J].中国农学通报,2019,35(35):100-103.
- SHU X X, LIU Z J. Factors Affecting Greenhouse Gas Emission in Farmland[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(35): 100-103. (in Chinese)
- [22] 骆世明.基于控制论的农业低碳发展方略[J].中国生态农业学报(中英文):1-6[2022-02-18].
- LUO S M. Low carbon development strategy of agricultural based on cybernetics[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture: 1-6[2022-02-18]. (in Chinese)
- [23] 严志宇.氮肥制造业清洁生产环节的环境影响评价[J].科技资讯,2009(5):163.
- YAN Z Y. Environmental impact assessment of cleaner production in nitrogen fertilizer manufacturing industry[J]. Science & Technology Information. 2009(5): 163. (in Chinese)
- [24] 柯希玮,蒋 苓,吕俊复,等.循环流化床燃烧低污染排放技术研究展望[J].中国工程科学,2021,23(3):120-128.
- KE X W, JIANG L, LÜ J F, et al. Prospects for the low pollutant emission control of circulating fluidized bed combustion technology [J]. Strategic Study of CAE., 2021, 23(3): 120-128. (in Chinese)
- [25] 张广胜,王珊珊.中国农业碳排放的结构、效率及其决定机制[J].农业经济问题,2014,35(7):18-26,110.
- ZHANG G S, WANG S S. China's agricultural carbon emission: structure, efficiency and its determinants[J]. Issues in Agricultural Economy, 2014, 35(7): 18-26, 110. (in Chinese)
- [26] 陈中督.农作措施对双季稻田固碳减排效应与农户低碳技术采纳行为研究[D].北京:中国农业大学,2017.

(责任编辑:姜媛媛)