

黑龙江省大豆生产的碳足迹时空分布特征及生态优化研究

陈晗奕^{1,2}, 陈一灵^{1,2}, 洪志坤^{1,2}, 游璐萍^{1,2}, 郑先鑫^{1,2}, 王琳^{1,2}, 许章华^{1,2*}

(1. 福州大学环境与安全工程学院, 福建 福州 350108;

2. 福州大学地理与生态环境研究院, 福建 福州 350108)

摘要:选取我国大豆主产区黑龙江省为研究区,采用生命周期评价(LCA)法核算该地区2011—2020年大豆生产的碳足迹,分析其时空分布特征,利用灰色关联分析法分析全省各地级市(地区)大豆生产碳足迹的影响因素,确定其碳排放的主要来源,提出大豆生产的生态优化方案。结果表明:2011—2020年黑龙江省大豆生产碳足迹平均值为0.337 kg/kg(以CO₂当量计),整体呈现反复波动、“北多南少”的格局;在所选的9个黑龙江省大豆生产碳足迹影响因素中,农药、种子、柴油3个因素的贡献度最大。

关键词:碳足迹;时空分布;生态优化;大豆生产;生命周期评价;黑龙江省

中图分类号:F062.2

文献标志码:B

文章编号:1006-2009(2024)03-0021-06

Spatiotemporal Distribution Characteristics and Ecological Optimization of Carbon Footprint in Soybean Production in Heilongjiang

CHEN Hanyi^{1,2}, CHEN Yiling^{1,2}, HONG Zhikun^{1,2}, YOU Luping^{1,2}, ZHENG Xianxin^{1,2},

WANG Lin^{1,2}, XU Zhanghua^{1,2*}

(1. College of Environment and Safety Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China;

2. Academy of Geography and Ecological Environment, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China)

Abstract: Taking Heilongjiang, the main soybean producing area in China, as the research area, the carbon footprint of soybean production in this area from 2011 to 2020 was calculated by using Life Cycle Assessment (LCA), and its spatiotemporal distribution characteristics were analyzed. Grey correlation analysis was used to analyze the influencing factors on carbon footprint of soybean production in various cities(regions) throughout the province, so as to determine the main sources of carbon emission and put forward the ecological optimization plan for soybean production. The results showed that the average carbon footprint of soybean production in Heilongjiang from 2011 to 2020 was 0.337 kg/kg(calculated by CO₂ equivalent), showing a pattern of repeated fluctuations and “more in the north and less in the south”. Among the nine selected factors affecting the carbon footprint of soybean production in Heilongjiang, pesticides, seeds and diesel had the greatest impact.

Key words: Carbon footprint; Spatiotemporal distribution; Ecological optimization; Soybean production; Life cycle assessment; Heilongjiang Province

碳足迹是指对某种活动引起的(或某种产品生命周期内积累的)直接或间接的CO₂排放量的度量^[1]。2022年6月,《农业农村减排固碳实施方案》提出到2025年农业农村减排固碳与粮食安全、乡村振兴统筹融合的格局基本形成,以推动农业农村绿色低碳发展。2020年我国大豆进口量10 033万t,进口依存度高达84.80%,国内市场供

需严重不平衡。2021年12月,国家明确提出要多

收稿日期:2023-04-16;修订日期:2024-03-20

基金项目:国家自然科学基金面上基金资助项目(42071300);福建省自然科学基金面上基金资助项目(2020J0113);国家大学生创新训练基金资助项目(03626552)

作者简介:陈晗奕(2003—),女,福建莆田人,在读本科生,研究方向为信息地理与环境监测。

*通信作者:许章华 E-mail: fafuxzh@163.com

措并举扩大大豆油料作物种植面积,提高产量。计算大豆生产碳足迹、控制大豆生产中温室气体排放有利于中国“双碳”目标的实现。

近年来,碳足迹已被广泛应用于农业生产碳排放或温室气体排放的评价中。总体来看,碳足迹的计算方法主要包括生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)、投入产出分析(IOA)、混合生命周期(hybrid LCA)等^[2],LCA在计算碳足迹时考虑了较多方面,其分析结果具有很强针对性,被广泛应用^[3-4]。此外,国内外研究也涉及碳足迹时空格局分析^[5-6]、影响因素分析^[3,7]等方面。然而,目前国内外文献对农业生产中碳足迹的研究多见于玉米、小麦、水稻3大粮食作物^[8-10],针对大豆生产碳足迹研究较少,故分析大豆生产碳足迹有助于丰富我国农业生产活动碳足迹的基础数据。黑龙江省是我国最大的优质大豆生产和供给基地,今选取黑龙江省为研究区,分析大豆生产碳足迹的时空分布特征及影响因素,确定其碳排放的主要来源,为该省大豆生产的减排固碳及生态优化提供参考。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

黑龙江省地处 E121°11′ ~ E135°05′, N43°26′ ~ N53°33′,位于我国东北部。今以黑龙江省下辖的12个地级市、1个地区行署为研究区(见图1)。黑龙江省属于寒温带与温带大陆性季风气候,主要特征是春旱秋涝,夏季暖热多雨,冬季寒冷漫长,年均气温为3℃,降水量超500mm,常年有效积温1600℃~2800℃,无霜期100d~150d,是典型的高纬度低热量旱作农业区^[11]。黑龙江省是我国最主要的大豆生产基地,大豆种植面积约占中国的60%。2011年黑龙江省大豆种植面积292.91×10⁴hm²,占全省粮食作物播种面积的22.83%。截至2020年,黑龙江省大豆种植面积483.06×10⁴hm²,占全省粮食作物播种面积的33.46%。

1.2 数据来源

研究数据主要包括2011—2020年黑龙江省大豆种植面积、产量、农用物资投入量、各农资投入品价格及系列碳排放因子。其中,农资投入品涉及化肥、农药、种子、柴油共4种。化肥投入细分为氮肥、钾肥、复合肥投入;柴油投入指作物生产全过程的农业机械作业燃料动力投入。具体数据来源为:①从《黑龙江年鉴》中获取大豆种植面积和产量数

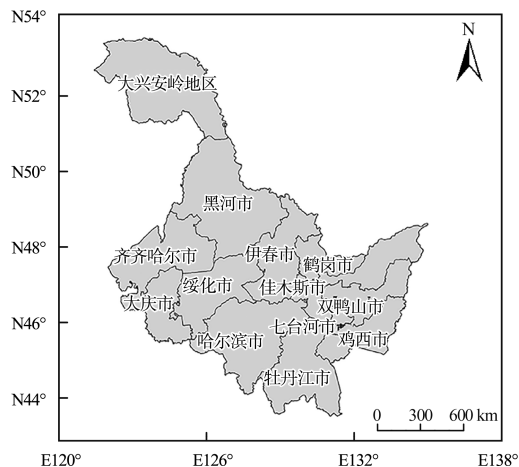


图1 研究区示意

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

据;②从《全国农产品成本收益资料汇编》中获取大豆生产的农资投入数据;③从《物价年鉴》中获取每种农资投入品价格,通过投入品价格计算投入量;④从中国生命周期基础数据库(CLCD)中获取各农资投入的碳排放因子,从联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)获取N₂O排放系数^[12-13]。

1.3 研究方法

采用LCA法计算碳足迹。定义大豆生产的系统边界为从播种到收获这一生命周期阶段,碳足迹的核算边界包括直接和间接温室气体排放^[14]。大豆生产中的直接温室气体排放主要为土壤N₂O排放,间接排放主要是农资投入引起的温室气体排放^[15-16]。

(1)农资投入碳排放。大豆生产过程中农资(化肥、农药、种子、柴油)产生的碳足迹为:

$$CE_{input} = \sum_i Q_i \times \varepsilon_i \quad (1)$$

式中:CE_{input}为农资投入产生的碳排放量,kg/hm²(以CO₂当量计);Q_i为第i种农资产品投入量,kg/hm²,ε_i为第i种农资投入的排放因子。

(2)土壤N₂O排放。主要包括氮肥施用导致的N₂O直接排放,以及大气沉降与淋溶径流引起的N₂O间接排放,计算公式分别为:

$$CE_{D,N_2O} = N_{input} \times CE_1 \times 44/28 \quad (2)$$

式中:CE_{D,N₂O}为施用氮肥所产生的N₂O排放量,kg/hm²;N_{input}为农田氮肥施用量,kg/hm²;CE₁为施用氮肥所产生的N₂O直接排放因子;44/28为N₂O-N与N₂O的分子相对质量之比。

$$CE_{G,N_2O} = N_{input} \times CE_G \times CE_2 \times 44/28 \quad (3)$$

$$CE_{L,N_2O} = N_{input} \times CE_L \times CE_3 \times 44/28 \quad (4)$$

式中: CE_{G,N_2O} 为大气氮沉降引起的 N_2O 间接排放量, kg/hm^2 ; CE_G 为农用地氨和 NO_x 挥发率; CE_2 为氮沉降引起的 N_2O 间接排放因子; CE_{L,N_2O} 为淋溶径流引起的 N_2O 间接排放量, kg/hm^2 ; CE_L 为农用地氮素淋溶和径流率; CE_3 为淋溶径流引起的 N_2O 间接排放因子。根据《省级温室气体清单编制指南》的推荐值, CE_G 取值为 10%, CE_L 取值为 20%。

$$CE_{C,N_2O} = (CE_{D,N_2O} + CE_{G,N_2O} + CE_{L,N_2O}) \times 298 \quad (5)$$

式中: CE_{C,N_2O} 为 N_2O 直接排放和间接排放引起的 CO_2 排放当量, kg/hm^2 (以 CO_2 当量计); 298 为 100 a 时间尺度的全球变暖潜势值^[17]。

(3) 碳足迹总和。

$$CE = CE_{input} + CE_{C,N_2O} \quad (6)$$

式中: CE 为大豆生产的温室气体排放量, kg/hm^2 (以 CO_2 当量计)。

大豆生命周期产生的碳足迹为:

$$CF = CE/Y \quad (7)$$

式中: CF 为大豆生产碳足迹, kg/kg (以 CO_2 当量计); Y 为大豆单位面积产量, kg/hm^2 。

在大豆碳足迹计算的基础上进行大豆生产碳足迹的时空变化及影响因素分析。在大豆生产碳足迹时间序列变化方面, 从平均值、极值、增幅等角度对比年际变化, 并对不同农资投入所产生的碳排放占总碳排放的比例差异进行年际变化研究; 在大豆生产碳足迹空间分布特征变化方面, 对比探究极值、占比、增幅等角度的空间分布变化情况, 并根据各地实际大豆生产情况初步分析碳足迹空间分布特征的产生原因; 在大豆生产碳足迹的影响因素方面, 用灰色关联分析法分析系统的动态发展曲线与内部影响因素变化曲线, 确定数据列之间的几何形状相似程度, 进而比较曲线间的关联程度^[18-19]。

2 结果与讨论

2.1 大豆生产碳足迹时间序列变化分析

图 2 为 2011—2020 年黑龙江省大豆生产碳足迹年际变化。其中, 碳足迹单位为 kg/kg (以 CO_2 当量计)。由图 2 可见, 2011—2020 年黑龙江省大豆生产碳足迹平均值为 0.337 kg/kg , 各年碳足迹值

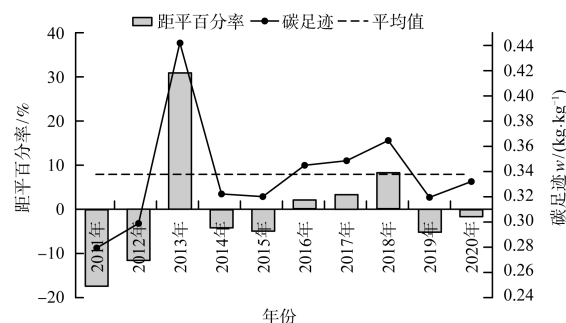


图 2 2011—2020 年黑龙江省大豆生产碳足迹年际变化

Fig. 2 Interannual change in carbon footprint of soybean production in Heilongjiang from 2011 to 2020

围绕平均值上下波动。最大值出现在 2013 年, 为 0.442 kg/kg ; 最小值出现在 2011 年, 为 0.278 kg/kg 。偏离平均值幅度较大的碳足迹值出现在 2011 年、2012 年、2013 年, 距平百分率绝对值均超过 10%。碳足迹受农资投入量和单位面积产量两因素的共同作用, 单产越高、农资投入量越少, 碳足迹越低。

图 3 为 2011—2020 年黑龙江省大豆生产碳足迹构成的年际变化。由图 3 可见, 在黑龙江省大豆生产过程中, 由于碳足迹受农资投入影响, 不同农资投入量所产生的碳排放占总碳排放的比例存在较大差异。其中, 施用复合肥所产生的碳足迹占比最大, 平均占比为 37.11%; 土壤 N_2O 排放所产生的碳足迹在总碳足迹构成中的占比位居第二, 平均占比为 22.71%。各年份的大豆生产碳足迹构成有一定差异, 各构成部分围绕其十年间平均值呈小幅度上下波动。2011—2020 年, 复合肥、土壤 N_2O 排放占比总体呈先下降后上升的趋势; 种子、农药、氮肥、钾肥、柴油的碳排放占比总体呈先上升后下降的趋势, 变化幅度较小。其中, 2016 年的农药、钾肥、柴油的碳排放占比均达到十年间的最高值; 2019 年的种子、复合肥的碳排放占比达到十年间的最高值; 2012 年的氮肥、土壤 N_2O 的碳排放占比达到十年间的最高值。

2.2 大豆生产碳足迹空间分布特征分析

图 4(a) — (j) 分别为 2011—2020 年黑龙江省大豆生产碳足迹的空间分布。其中, 碳足迹单位为 kg/kg (以 CO_2 当量计)。由图 4 可见, 2011—2020 年, 黑龙江省市域尺度碳足迹呈现较为显著的区域分布差异, 整体呈现“北多南少”的格局, 各地级市 (地区) 大豆生产碳足迹在空间分布上存在较大差异。大豆生产碳足迹高值区域主要分布在

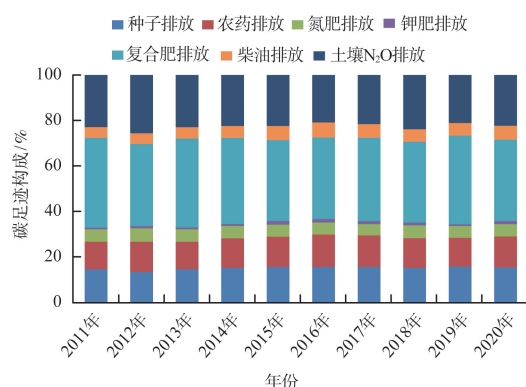


图3 2011—2020年黑龙江省大豆生产碳足迹构成的年际变化

Fig. 3 Interannual change in carbon footprint composition of soybean production in Heilongjiang from 2011 to 2020

黑龙江省北部,西南部的碳足迹较低。其中,2011—2020年鹤岗大豆生产碳足迹总量最大,达4.475 kg/kg,占全省碳足迹总量的10.21%;其次为大兴安岭地区,碳足迹总量为3.962 kg/kg,占全省碳足迹总量的9.04%。2011年研究区大豆生产碳足迹平均值为0.278 kg/kg,其中鹤岗市最高,为0.384 kg/kg,哈尔滨市最低,为0.221 kg/kg。2020年研究区大豆生产碳足迹平均值为0.332 kg/kg,其中大兴安岭地区最高,为0.403 kg/kg,双鸭山市最低,为0.291 kg/kg。鹤岗市和双鸭山市2011年大豆生产碳足迹分别为0.384 kg/kg和0.302 kg/kg,2020年分别为0.327 kg/kg和0.291 kg/kg,同比降低14.84%和

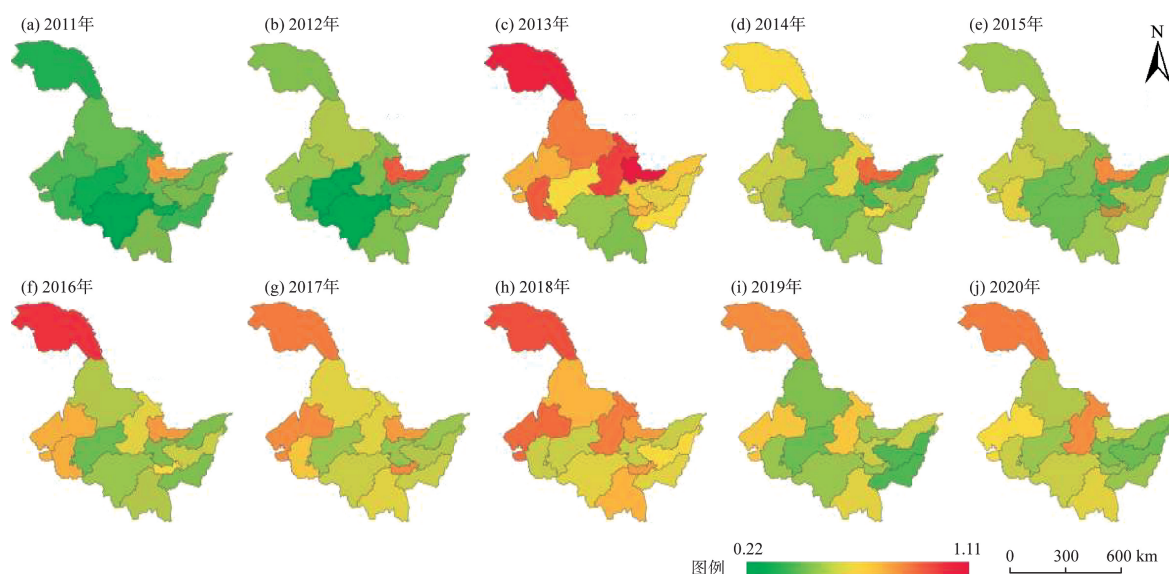


图4 2011—2020年黑龙江省大豆生产碳足迹的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of carbon footprint of soybean production in Heilongjiang from 2011 to 2020

3.64%。相比2011年,2020年大豆生产碳足迹除了鹤岗市和双鸭山市外,其他11市(地区)均呈增长趋势,其中增幅最大的为大兴安岭地区,从0.263 kg/kg增加到0.403 kg/kg,增幅为53.23%,其次为哈尔滨市,增幅为49.77%。

黑河、齐齐哈尔、绥化、佳木斯4市的大豆种植面积大、产量高,是黑龙江省的大豆主产区。其中,黑河市是该省大豆种植面积最大、产量最高的地级市,其大豆生产碳足迹处于全省的中等水平;其他3市的大豆生产碳足迹相对较低,处于全省最低水平。从农业生产总值、农作物种植面积和农业机械

化水平的角度来看,哈尔滨、鸡西、佳木斯、绥化4市的农业规模较大,农业发展水平较高,碳足迹相对较低;鹤岗、伊春、七台河3市及大兴安岭地区的农业规模较小,农业发展水平较低,存在农用物资利用效率较低的问题,碳足迹相对较高。

2.3 大豆生产碳足迹影响因素分析

为了进一步揭示各因素对碳足迹影响的重要性程度,分别以黑龙江省各地级市(地区)大豆生产碳足迹为参考数列,以农药、种子、柴油、氮肥、钾肥、复合肥、产量、播种面积、单位面积产量9个因素为比较数列,对其进行灰色关联度计算,结果见表1。由表1可

表 1 黑龙江省各地市大豆生产碳足迹与影响因素关联度

Table 1 Correlation degree between carbon footprint of soybean production and influencing factors in cities in Heilongjiang

地区	播种面积	产量	单位面积产量	种子	农药	氮肥	钾肥	复合肥	柴油
哈尔滨	0.722	0.705	0.793	0.887	0.892	0.853	0.830	0.849	0.933
齐齐哈尔	0.841	0.827	0.898	0.955	0.962	0.935	0.881	0.928	0.964
鸡西	0.831	0.832	0.940	0.978	0.982	0.962	0.877	0.954	0.965
鹤岗	0.842	0.825	0.968	0.974	0.972	0.978	0.926	0.978	0.963
双鸭山	0.860	0.857	0.985	0.992	0.988	0.991	0.933	0.990	0.978
大庆	0.796	0.807	0.910	0.963	0.968	0.943	0.883	0.937	0.974
伊春	0.866	0.842	0.901	0.953	0.958	0.936	0.890	0.930	0.959
佳木斯	0.812	0.809	0.950	0.969	0.951	0.964	0.820	0.968	0.927
七台河	0.732	0.720	0.789	0.882	0.896	0.867	0.870	0.850	0.918
牡丹江	0.879	0.875	0.960	0.984	0.972	0.971	0.855	0.969	0.949
黑河	0.879	0.876	0.967	0.985	0.984	0.979	0.909	0.974	0.970
绥化	0.886	0.895	0.951	0.981	0.982	0.969	0.934	0.968	0.980
大兴安岭	0.888	0.856	0.869	0.922	0.929	0.911	0.915	0.904	0.942

知,就黑龙江省整体而言,农药、种子、柴油与碳足迹的关联度位居前三,说明这 3 个因素对碳足迹的贡献度较大,是导致碳足迹变化的最直接因素;氮肥、复合肥、单位面积产量与碳足迹的关联度次之,说明这 3 个因素对碳足迹的贡献度相对较小;钾肥、播种面积、产量与碳足迹的关联度最低,说明这 3 个因素基本不会影响碳足迹变化^[20-21]。

根据各影响因素关联度排名,可将研究区分为 4 类区域。其中,区域一包括哈尔滨、齐齐哈尔、大庆、伊春、七台河 5 个地市和大兴安岭地区,该类区域对碳足迹贡献度最大的因素为柴油,其关联度分别为 0.933、0.964、0.974、0.959、0.918 和 0.942;区域二包括双鸭山、佳木斯、牡丹江和黑河 4 个地市,该类区域对碳足迹贡献度最大的因素为种子,其关联度分别为 0.992、0.969、0.984 和 0.985;区域三包括鸡西和绥化两地市,该类区域对碳足迹贡献度最大的因素为农药,其关联度均为 0.982;区域四为鹤岗市,该区域对碳足迹贡献度最大的因素为氮肥,其关联度为 0.978。

2.4 碳足迹视角下黑龙江省大豆生产的生态优化策略

(1) 实施大豆保护性耕作技术。保护性耕作技术是对农田实行免耕、少耕,并用作物秸秆覆盖地表,以减少土壤侵蚀作用,提高土壤肥力^[22-24]和抗旱能力的先进农业耕作技术,对减少大豆生产碳足迹有一定积极作用^[8]。近年来,黑龙江省积极打造“龙江模式”,大豆保护性耕作已初步形成秸秆覆盖还田与深松免耕播种相结合的技术模式。然而,各地市的大豆生产碳足迹及其贡献度较大

的因素存在一定的时空差异,仍须在深入农业实践的同时不断提升耕作技术^[25]。

(2) 减少药肥施用量,提高药肥利用率。化肥和农药施用量的增加将导致碳足迹的增加,故优化氮素管理、增施高效氮肥、减少药肥施用是降低农业生产碳排放、实现农业增收增效目标的重要手段^[9]。首先要防止过度施肥和盲目施肥,并利用测土配方等技术提高用肥的精准性和利用率;其次,鼓励农民使用绿肥和农家肥来替代化肥以培肥地力。此外,通过科技研发及政策补贴让农户使用高效、低毒、低残留的农药,降低生产费用的同时减少环境污染^[26-27]。

(3) 提高机械化水平,推广节油技术。在哈尔滨、齐齐哈尔、大庆、伊春、七台河 5 个地级市及大兴安岭地区,柴油与碳足迹的关联度均在 0.910 以上,这些地区的大豆生产所消耗的柴油偏多,在发展农业机械化的同时应该兼顾农机能源利用效率的提高和节能环保机械的推广。例如,政府在出台农机购置补贴政策的同时,引导农民购置先进的节能环保机械,并加强对农机操作人员的技术培训,提高操作人员的技能水平,进而提高农机能源利用效率^[8]。

3 结论

(1) 2011—2020 年黑龙江省大豆生产碳足迹整体呈现反复波动状态,碳足迹平均值为 0.337 kg/kg(以 CO₂ 当量计),各年碳足迹值围绕平均值上下波动。全省平均碳足迹最大值出现在 2013 年,为 0.442 kg/kg(以 CO₂ 当量计);最小值

出现在2011年,为0.278 kg/kg(以CO₂当量计)。

(2)黑龙江省大豆生产碳足迹整体呈现“北多南少”的格局,大豆生产碳足迹高值区域主要分布在北部,西南部和东部地区的碳足迹较低。

(3)从黑龙江省整体来看,农药、种子、柴油3个因素对大豆生产碳足迹的贡献度最大,是导致碳足迹变化的最直接因素;氮肥、复合肥、单位面积产量对碳足迹的贡献度次之;钾肥、播种面积、产量对碳足迹的贡献度最低,基本不会影响碳足迹变化。

(4)黑龙江省大豆生产碳足迹在很大程度上受农资投入量的影响,包括化肥、农药、柴油等。为减轻该省大豆生产的环境压力,减少碳排放,有关部门可采取针对性措施:实施大豆保护性耕作技术;减少药肥施用量,提高药肥利用率;提高机械化水平,推广节油技术。

[参考文献]

- [1] WIEDMAN N T, MINX J. A definition of 'carbon footprint' [J]. *Ecological Economics Research Trends*, 2007, 92 (4): 193-195.
- [2] YUE Q, GUO P, WU H, et al. Towards sustainable circular agriculture: An integrated optimization framework for crop-livestock-biogas-crop recycling system management under uncertainty [J]. *Agricultural Systems*, 2022, 196: 103347.
- [3] 肖广敏, 茹淑华, 侯利敏, 等. 河北省小麦玉米生产体系碳足迹分析 [J]. *生态与农村环境学报*, 2022, 38 (11): 1388-1395.
- [4] CAMPIGLIA E, GOBBI L, MARUCCI A, et al. Hemp seed production: Environmental impacts of *Cannabis sativa* L. agronomic practices by life cycle assessment (LCA) and carbon footprint methodologies [J]. *Sustainability*, 2020, 12 (16): 6570.
- [5] CASOLANI N, PATTARA C, LIBERATORE L. Water and carbon footprint perspective in Italian durum wheat production [J]. *Land Use Policy*, 2016, 58: 394-402.
- [6] 刘宇峰, 原志华, 郭玲霞, 等. 中国农作物生产碳足迹及其空间分布特征 [J]. *应用生态学报*, 2017, 28 (8): 2577-2587.
- [7] RONGA D, GALLINGANI T, ZACCARDELLI M, et al. Carbon footprint and energetic analysis of tomato production in the organic vs the conventional cropping systems in Southern Italy [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 220: 836-845.
- [8] 贾利. 吉林省玉米生产碳足迹与水资源时空特征及影响因素研究 [D]. 长春: 东北师范大学, 2021.
- [9] 张传红, 韩露, 谢佳男, 等. 江苏省主要农作物碳足迹动态及其构成研究 [J]. *南京信息工程大学学报 (自然科学版)*, 2022, 14 (1): 110-119.
- [10] ZHAO Y X, WANG L, LEI X Y, et al. Reducing carbon footprint without compromising grain security through relaxing cropping rotation system in the North China Plain [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 318: 128465.
- [11] 吴霞, 潘雪, 公衍铎, 等. 2001—2021年黑龙江省森林植被生态质量变化分析 [J]. *环境监测管理与技术*, 2024, 36 (1): 43-48.
- [12] 张明洁, 张京红, 李文韬, 等. 中国农作物碳足迹核算研究概述 [J]. *中国农业资源与区划*, 2023, 44 (5): 148-154.
- [13] 陈慧琳. 中国大豆进口贸易对生态环境的影响——基于碳足迹的测算分析 [J]. *福州大学学报 (哲学社会科学版)*, 2019, 33 (3): 60-64.
- [14] 张帆, 宣鑫, 金贵, 等. 农业源非二氧化碳温室气体排放及情景模拟 [J]. *地理学报*, 2023, 78 (1): 35-53.
- [15] 孙小祥, 张华兵, 于英鹏. 江苏沿海地区农田生态系统碳源/汇时空变化及公平性研究 [J]. *中国农业资源与区划*, 2021, 42 (10): 56-64.
- [16] 白福臣, 高鹏, 郑沃林. 粮食主产区农田生态系统碳足迹的时空演化与脱钩效应 [J]. *生态经济*, 2023, 39 (7): 107-116.
- [17] 王莉, 刘莹莹, 张亚慧, 等. 河南省农田生态系统碳源/汇时空分布及影响因素分解 [J]. *环境科学学报*, 2022, 42 (12): 410-422.
- [18] 钱隼驰, 仇蕾. 灰色关联分析中分辨系数取值的定量研究 [J]. *统计与决策*, 2019, 35 (10): 10-14.
- [19] 郭荣中, 刘华平, 谢露静. 长沙市生态足迹与脱钩效应变化及预测分析 [J]. *环境监测管理与技术*, 2023, 35 (1): 59-63.
- [20] 郝小雨, 王晓军, 高洪生, 等. 松嫩平原不同秸秆还田方式下农田温室气体排放及碳足迹估算 [J]. *生态环境学报*, 2022, 31 (2): 318-325.
- [21] HUANG W B, WU F Q, HAN W R, et al. Carbon footprint of cotton production in China: Composition, spatiotemporal changes and driving factors [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 821: 153407.
- [22] 敖曼, 张旭东, 关义新. 东北黑土保护性耕作技术的研究与实践 [J]. *中国科学院院刊*, 2021, 36 (10): 1203-1215.
- [23] HOLKA M, KOWALSKA J, JAKUBOWSKA M. Reducing carbon footprint of agriculture—Can organic farming help to mitigate climate change? [J]. *Agriculture*, 2022, 12 (9): 1383.
- [24] SINGH S K, PATRA A, CHAND R, et al. Surface seeding of wheat: A sustainable way towards climate resilience agriculture [J]. *Sustainability*, 2022, 14 (12): 7460.
- [25] 陈仕林, 蒙炎成, 胡钧铭, 等. 秸秆覆盖对粉垄蔗田土壤有机碳及CO₂排放的影响 [J]. *南方农业学报*, 2021, 52 (2): 307-316.
- [26] XU C C, CHEN Z D, JI L, et al. Carbon and nitrogen footprints of major cereal crop production in China: A study based on farm management surveys [J]. *Rice Science*, 2022, 29 (3): 288-298.
- [27] SUN J, WANG Z, DU Y D, et al. Optimized tillage improves yield and energy efficiency while reducing carbon footprint in winter wheat-summer maize rotation systems [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 820: 153278.

本栏目编辑 谢咏梅