



河南省大豆生产体系化肥投入的碳足迹分析

李江涛, 于会勇, 郭海悦, 杨彩云

(濮阳市农林科学研究院, 河南 濮阳 457000)

摘要: 为给河南省大豆产业的碳排放降低和农业绿色低碳发展提供依据, 通过生命周期评估方法(LCA), 基于2004—2022年河南省大豆生产中化肥使用、产出和种植面积的数据, 定量评估化肥使用对环境的影响。结果表明, 河南省大豆生产中化肥投入类型发生明显变化。氮肥的施用量减少了98.6%, 平均施用量是 $9.95\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 占总施肥量的23.8%。与此相反, 复混肥施用量显著增加了254.8%, 平均施用量 $31.18\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 所占比例为74.73%, 磷肥和钾肥的施用量较为有限, 分别仅占化肥总施用量的1.2%和0.2%。施用化肥的总量增加了104.1%。大豆的氮肥偏生产力维持在 $33.7\sim 778.7\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。每年的活性氮排放中, NH_3 挥发量最高, 占比达到总量的69.2%, 其次为硝态氮淋洗 NO_3^- , N_2O 的排放则最少。 NH_3 年平均挥发量为 $4.87\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, NO_3^- 淋洗 $1.23\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, N_2O 排放 $0.94\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。化肥投入导致的年均总碳排放量达到7.52万t, 单质氮肥的施用量对碳排放量贡献最为显著, 化肥生产和施用的平均碳足迹分别为111.63和 $63.76\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 化肥生产的碳排放大于化肥施用。研究结果可为河南省大豆产业面向绿色低碳发展提供科学支持和指导。

关键词: 大豆; 化肥投入; 活性氮排放; 碳足迹

Carbon Footprint Analysis of Chemical Fertilizer Input in Soybean Production System in Henan Province

LI Jiangtao, YU Huiyong, GUO Haiyue, YANG Caiyun

(Puyang Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Puyang 457000, China)

Abstract: Based on the data of fertilizer use, output and planting area in soybean production in Henan province from 2004 to 2022, this study quantitatively assessed the impact of fertilizer use on the environment through the life cycle assessment method (LCA). The purpose is to provide a basis for the reduction of carbon emissions in the soybean industry in Henan province and the green and low-carbon development of agriculture. The results showed that the basic situation of soybean fertilizer input in Henan province changed significantly. The application amount of nitrogen fertilizer decreased by 98.6%, and the average application amount was $9.95\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, accounting for 23.8% of the total application amount. The use of compound fertilizer increased by 254.8%, with an average application rate of $31.18\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, accounting for 74.73%. The application amount of single phosphorus fertilizer and potassium fertilizer was less, accounting for 1.2% and 0.2% of the total application amount of chemical fertilizer, respectively, and the total application amount of chemical fertilizer increased by 104.1%. The nitrogen partial factor productivity of soybean was maintained at $33.7\sim 778.7\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Among the annual active nitrogen emissions, NH_3 volatilization was the highest, accounting for 69.2% of the total, followed by nitrate leaching NO_3^- , and N_2O emission was the least. The annual average volatilization of NH_3 was $4.87\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, NO_3^- leaching was $1.23\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, and N_2O emission was $0.94\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. The annual total carbon emissions caused by chemical fertilizer input reached an average of 75 200 t. The application amount of elemental nitrogen fertilizer contributed the most to carbon emissions. The average carbon footprints of chemical fertilizer production and chemical fertilizer application were 111.63 and $63.76\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, respectively. The carbon emissions of chemical fertilizer production were greater than those of chemical fertilizer application.

Keywords: soybean; fertilizer input; active nitrogen emission; carbon footprint

全球氮排放的主要来源是农业生产, 大约占总排放量的70%。在农业生产中, 甲烷(CH_4)和氧化亚氮(N_2O)排放量分别占全球人为 CH_4 和 N_2O 排放量的52%和85%^[1,2], 化肥的使用是导致氮排放的主要来源之一, 根据数据, 2022年我国农用化肥的施用量达到了5 079.2万t。大豆是河南省的主要粮食作物, 河南省又是我国黄淮海地区的大豆主要产区之一, 2004—2022年河南省大豆产量由

$1\,980.6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 增加到 $2\,333.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 增幅达17.8%。大豆单产的增加离不开化肥的投入。合理利用化肥可以有效改善土壤质地, 有助于增加大豆的产量。然而, 化肥滥用造成大量的氮素流失, 超出作物吸收利用范围, 超量化肥以活性氮的形式释放到环境中^[3], 这种情况不仅减少了氮肥的效率和增加了生产费用, 还可能引发耕地环境污染和农作物质量下降的问题。随着全球气候变暖的趋势, 农

业越来越倾向于实现绿色低碳的发展。因此,分析河南省大豆生产过程中化肥使用所带来的温室气体排放对环境的影响,可以推动合理利用化肥,提高其利用效率,降低碳排放,为环境保护和农业可持续发展作出贡献。

碳足迹(Carbon Footprint, CF)指某项活动或某产品在其整个生命周期内所产生的温室气体排放总量。目前,国际上普遍采用的农业生产碳足迹核算方法是生命周期评价(Life Circle Asseddment, LCA),该方法是一种评估特定生产过程或活动在整个生命周期内对环境的负荷的工具,可用于计算不同作物种植体系的碳足迹^[4,5]。目前有一些学者运用LCA法对粮食作物与饲草进行碳足迹核算,周舒怡等^[6]利用LCA法研究表明,氮肥是小麦、马铃薯、高粱生产的最大碳排放来源,合理施肥可以减少农业生产产生的环境污染,从而降低碳足迹。韩欣怡等^[7]通过对马铃薯的碳足迹核算分析,结果表明种植阶段马铃薯碳足迹的主要来源是肥料,肥料的减排是马铃薯减排的基本点,减排与增产要协同发展。化肥碳排放是农业碳排放的重要组成部分之一,其在总碳排放量中所占比例最高。化肥投入在增产的同时,带来的环境问题不容忽视。我国2060年前计划实现碳中和目标,河南省的大豆生产面临减排增产的挑战,但是关于当前河南省大豆生产过程中的化肥投入对本省的碳排放影响研究较少。

本研究利用2004—2022年间河南省大豆生产过程中的种植和施肥数据,采用生命周期评价方法评估其对环境的影响。分析大豆生产体系施肥带来的环境影响,旨在为河南省大豆产业面向绿色低碳发展提供科学支持和指导。

1 材料与方法

1.1 河南区域特点

河南省位于我国华北平原和黄河中下游地区,地势从西向东逐渐降低。这里属于暖温带和亚热带的大陆性季风气候,四季分明。2013—2022年的平均气温为15.1~15.9℃,年无霜期为180~240 d。平均年降水量512.6~1 129.1 mm,大豆是河南省主要粮食作物之一,2022年河南省大豆种植面积根据统计年鉴数据,达到了36.35万hm²,总产量达到84.85万t。

1.2 数据来源

河南省大豆生产化肥投入量数据来自《全国农产品成本收益资料汇编》^[8],大豆的播种面积和产

量数据从《河南统计年鉴》中获取^[9]。

1.3 方法

使用生命周期评价法(LCA),参考《中国氮磷钾肥制造温室气体排放系数的估算》和《2006年IPCC国家温室气体清单指南》中的数据和参数^[10,11]。在大豆整个生命周期中,碳足迹的主要构成部分由化肥投入构成。以河南省2004—2022年大豆生产中化肥投入数据为研究对象。通过分析化肥投入所产生的活性氮排放,以及在化肥生产环节和施用过程中释放的碳排放,来评估其对环境的影响。采用范燕等^[12]的计算方法,投入化肥活性氮排放主要分为N₂O排放、NO₃⁻淋失、NH₃挥发,计算公式为^[13]:氮肥偏生产力(kg·kg⁻¹)=大豆产量/施氮量;N₂O排放量(kg·hm⁻²)=0.48^{0.0058×施氮量};NO₃⁻排放量(kg·hm⁻²)=4.46^{0.0094×施氮量};NH₃排放量(kg·hm⁻²)=0.24×施氮量+1.3;化肥生产碳足迹(kg·hm⁻²)=(施氮量×2.041+施磷量×0.195+施钾量×0.168)×44/12;化肥施用碳足迹(kg·hm⁻²)=施氮量×0.01×44/28×273;化肥投入总碳足迹(kg·hm⁻²)=化肥生产碳足迹+化肥施用碳足迹。

1.4 数据分析

使用Excel 2010软件进行数据分析与作图。

2 结果与分析

2.1 河南省大豆2004—2022年化肥投入情况分析

如表1所示,2004—2022年河南省大豆生产中化肥总量的使用量呈现波动趋势。具体来说,氮肥的用量先增加后减少,而复混肥的使用量则呈上升趋势。2008年氮肥投入量最高,为54.15 kg·hm⁻²,2010年后大幅降低。2019—2022年的氮肥用量为0,2004—2022年平均氮肥用量为9.95 kg·hm⁻²,占化肥总量的23.8%。复混肥施用量从6.3 kg·hm⁻²增加到22.35 kg·hm⁻²,增加了254.8%,平均用量为31.18 kg·hm⁻²,占化肥总量的74.73%。钾肥和磷肥用量较少,分别占总化肥量的0.2%和1.2%,特别是2019—2022年用量减少到0。2004—2022年化肥总使用量总体在波动中上升,2004年最低,为10.95 kg·hm⁻²,2008年最高,为76.65 kg·hm⁻²,总用量从2004年的10.95 kg·hm⁻²增加到2022年的22.35 kg·hm⁻²,总化肥量增加了104.1%。

河南省大豆单位面积产量呈增长趋势,从2004年的1 980.6 kg·hm⁻²增长到2022年的2 333.87

kg·hm⁻²,增长幅度达 17.8%。大豆种植面积在 2004—2022 年呈下降趋势。虽然 2018 年国家实施大豆振兴计划,对比 2017 年大豆种植面积,2018—2020 年实现 3 年连续增长。而总体来说,播种面积从 2004 年的 52.2 万 hm²减少到 2022 年的 36.3 万 hm²,减少 30.5%。与此同时,大豆总产量也减少了

18.0%。大豆总产量减少的主要原因是种植面积减少,但其减少速度低于种植面积的变化。其中 2019 年总产量达到近 10 年(2013—2022 年)最高,为 98.21 万 t,说明大豆生产过程中伴随优质高产品种大面积推广、种植管理技术提高,实现化肥使用优化,总化肥用量减少。

表 1 2004—2022 年河南省的大豆化肥施用量和大豆单产的关系

Table 1 Relationship between soybean fertilizer application rate and yield in Henan province during 2004 – 2022									
年份 Year	氮肥(N)	磷肥(P ₂ O ₅)	钾肥(K ₂ O)	复混肥(N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)			化肥总量	大豆单产	播种面积
	N fertilizer	P feratilizer	K feratilizer	Compound fertilizer(N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)/			Total	Soybean	Planting
	(N)/	(P ₂ O ₅)/	(K ₂ O)/	(kg·hm ⁻²)			fertilizer/	output/	area/
	(kg·hm ⁻²)	(kg·hm ⁻²)	(kg·hm ⁻²)	总量	二铵	其他	(kg·hm ⁻²)	(kg·hm ⁻²)	(×10 ³ hm ²)
				Total/ (kg·hm ⁻²)	Diamine/ (kg·hm ⁻²)	Others/ (kg·hm ⁻²)			
2004	3.15	0.15	1.35	6.30	0.00	0.00	10.95	1980.60	522.53
2005	9.90	1.50	0.00	23.85	0.30	0.00	35.25	1088.30	533.58
2006	14.85	1.50	0.45	15.15	0.00	0.00	31.95	1258.00	539.10
2007	42.75	0.00	0.15	32.70	15.75	0.00	75.60	1813.00	468.84
2008	54.15	1.05	0.00	21.45	0.00	0.00	76.65	1825.34	486.10
2009	29.15	0.90	0.00	40.50	0.00	10.20	70.55	1841.54	467.00
2010	3.90	1.50	0.00	36.45	2.85	32.70	41.85	1906.77	452.98
2011	5.85	0.75	0.00	30.60	4.20	20.55	37.20	1975.36	445.69
2012	9.45	0.00	0.00	34.50	0.00	20.25	43.95	1696.60	460.50
2013	3.60	0.60	0.00	33.00	0.00	31.50	37.20	1643.30	443.90
2014	6.60	0.00	0.00	34.05	0.90	24.30	40.65	1365.80	399.70
2015	1.50	0.00	0.00	28.50	1.65	7.05	30.00	1363.00	366.00
2016	3.55	0.00	0.00	34.95	0.00	18.60	37.50	1375.10	368.00
2017	0.75	1.05	0.00	46.50	0.00	19.05	48.30	1459.00	345.00
2018	0.90	0.30	0.00	62.55	0.00	22.35	63.75	2478.80	385.55
2019	0.00	0.00	0.00	33.00	0.00	17.70	33.00	2488.41	394.67
2020	0.00	0.00	0.00	30.45	0.00	13.65	30.45	2490.10	375.20
2021	0.00	0.00	0.00	25.50	0.00	11.70	25.50	2245.50	330.49
2022	0.00	0.00	0.00	22.35	0.00	9.00	22.35	2333.87	363.56
平均 Average	9.95	0.49	0.10	31.18	1.35	13.61	41.72	1822.55	428.86

2.2 河南省大豆氮肥偏生产力分析

2004—2022 年河南省大豆生产中单质氮肥的使用逐渐减少,而复合肥的使用量则呈现波动性增长的趋势。综合考虑单一氮肥和按比例计算后的复混肥投入,结果表明大豆的氮肥偏生产力为 33.7~778.7 kg·kg⁻¹,均值 122.6 kg·kg⁻¹(图 1)。氮肥

偏生产力反映作物对氮肥的利用率。根据每年的化肥用量和产量数据分析,随着氮肥施用量的增加,大豆产量也随之增加。然而,当氮肥施用量达到一定水平后,由于氮肥利用率降低,导致大豆产量增长速度放缓,进而导致活性氮排放到环境中,造成环境污染。

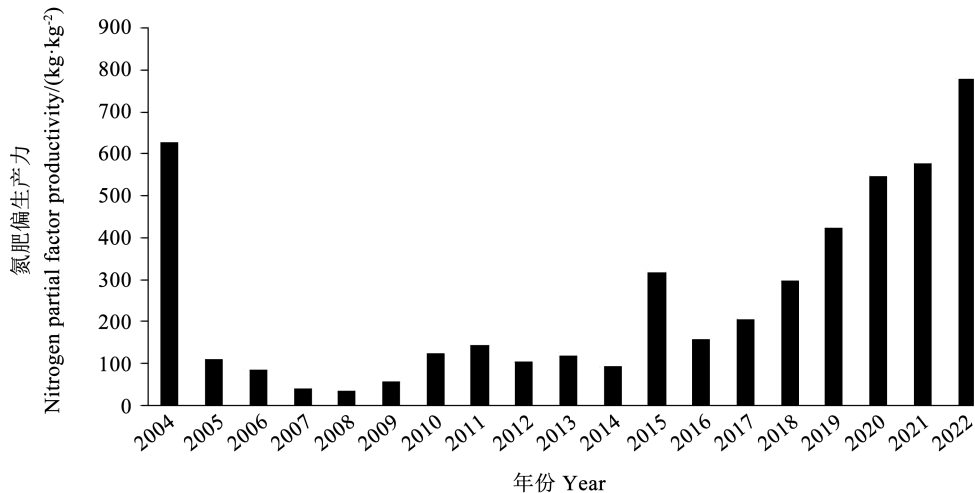


图1 河南省 2004—2022 年大豆氮肥偏生产力

Fig. 1 Partial factor productivity of soybean nitrogen fertilizer in Henan province during 2004 – 2022

2.3 河南省大豆生产中化肥施用引起的活性氮排放分析

河南省 2004—2022 年大豆生产中化肥投入造成的活性氮排放分析结果如图 2 所示： N_2O 年均活性氮排放量最少，为 $0.94\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，所占比例最小，为 13.3%；其次是 NO_3^- 液化产生的年均氮排放量为 $1.24\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，占总量的 17.4%； NH_3 挥发造成的年均活性氮排放量为 $4.87\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，占比最大，为总量的 69.2%。2004—2008 年活性氮排放逐年增加，2008—2022 年活性氮排放量呈减少趋势，2008 年活性氮排放量达到最多，总年排放量为 $17.23\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

2004—2022 年，化肥投入环境中的活性氮排放量呈现先增加后减少的趋势，这与化肥投入的趋势基本一致。2008 年的化肥投入量最大，氮肥施用量为 $54.15\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，其施用的单质氮肥的活性氮排放量也最大，为 $17.23\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，而 2018 年化肥投入量仅次于 2007 和 2008 年，但是由于其 98% 为复混肥，单质氮肥用量很少，故活性氮排放相比 2008 年少。数据表明，氮肥施用量与活性氮排放量有关。当氮肥施用量超过作物的吸收能力时，多余的氮会以活性氮的形式释放到环境中。因此，必须科学施用氮肥，以有效减少活性氮的排放。

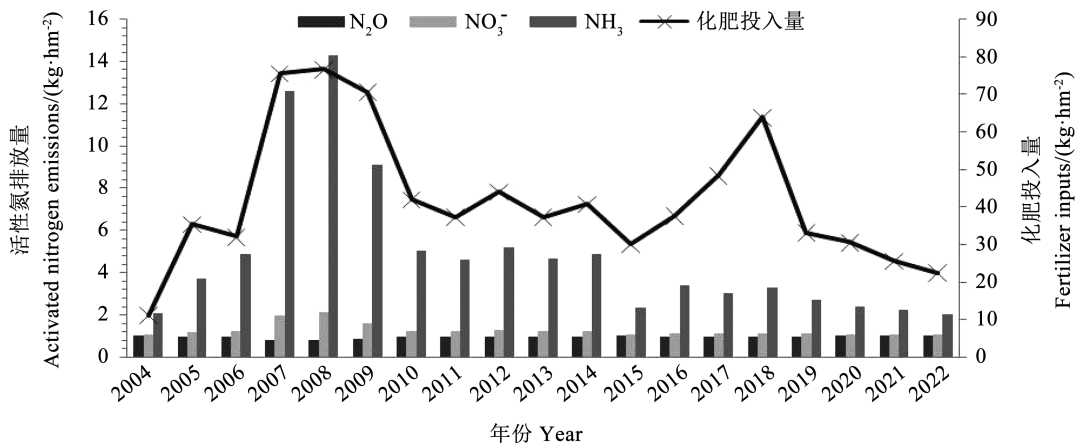


图2 河南省 2004—2022 年化肥投入和活性氮排放

Fig. 2 Fertilizer input and active nitrogen emission in Henan province from 2004 to 2022

2.4 河南省大豆化肥投入的碳足迹分析

河南省 2004—2022 年大豆化肥投入对环境产生的总碳排放量平均为 7.52 万 t，呈现了先增加后

降低的趋势(图 3)。这种趋势的主要原因可以归结为两个因素：首先，肥料的施用类型发生了改变，单质氮肥的施用量先增加后减少，复混肥的使用量则

呈增加趋势,而化肥的总用量呈现缓慢下降趋势;其次,河南大豆的种植面积由 2004 年的 52.2 万 hm^2 降至 2022 年的 36.3 万 hm^2 ,这也对总碳排放量的波动产生了影响。以 2008 年碳排放为例,总碳排放量达到 31.03 万 t,为 2004—2022 年最大;与此同时,单质氮肥用量也达到最高值 $54.15 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;这个因素致使该年化肥投入所产生的总碳排放量最高。因此,若要降低对环境的 CO_2 排放积累,降低单质氮肥的施用是关键因素。

河南省 2004—2022 年单位面积化肥生产和施

用产生的碳足迹趋势是先增加后逐步降低(图 4)。结合表 1 数据,碳足迹最高的年份对应的单质氮肥施用量和化肥施用量也是最大的。2018 年复混肥用量最大,相对应本年度单质氮肥施用量最小,其碳足迹远低于平均值,说明氮肥对碳排放量的影响大。从图 4 可知化肥生产和化肥施用的平均碳足迹分别是 111.63 和 $63.76 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,化肥生产碳足迹大于其施用碳足迹。因此,在减少常规化肥施用量的同时,重点减少化肥生产过程的碳排放,可以有效降低总体碳排放。

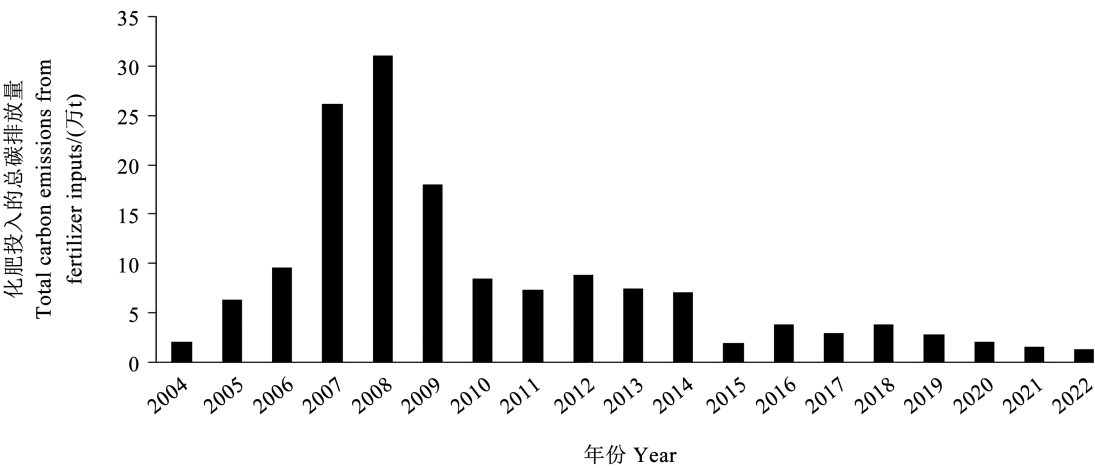


图 3 河南省 2004—2022 年化肥施用引起的总碳排放量

Fig. 3 Total carbon emissions from fertilizer use in Henan province during 2004 – 2022

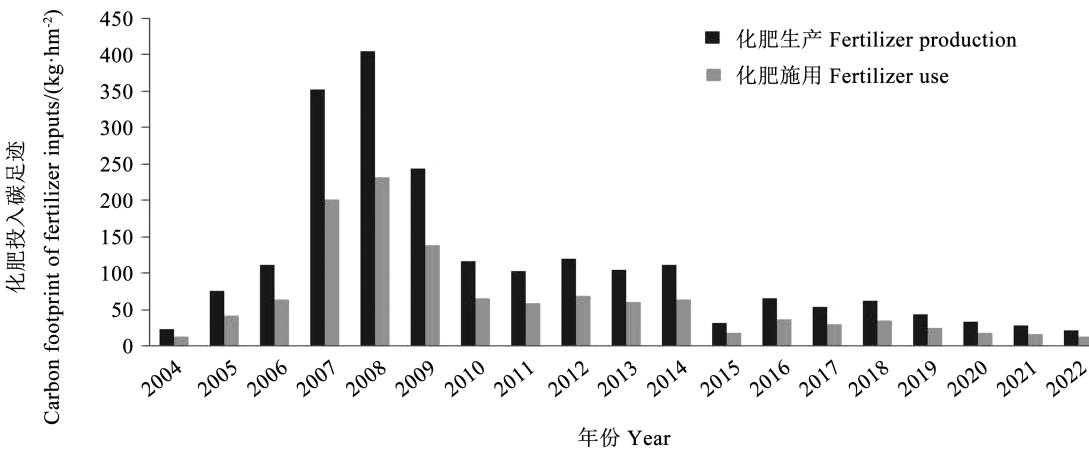


图 4 河南省大豆单位面积化肥生产和施用的碳足迹情况

Fig. 4 Carbon footprint of fertilizer production and use per unit area of soybean in Henan province

3 讨论

河南是黄淮海大豆产区的重要省份,是传统大豆种植区之一,是我国食用大豆蛋白的重要产区。由于大豆种植效益低于其他夏播作物,播种面积整体逐年减少,由于2018年国家实施大豆振兴计划,2018—2020年实现3年连续增长,除此之外总体上由2004年的52.2万 hm^2 降至2022年的36.3万 hm^2 ,降幅达30.5%。大豆总产量呈现波动中下降,由于种植面积减少、优质高产大豆品种的推广及化肥的广泛施用,大豆总产量下降幅度小于播种面积的降幅。研究表明,在河南省大豆生产中,化肥投入情况呈现以下趋势:氮肥的使用逐步减少,2019—2022年已经完全停止使用,减幅达到100%,平均用量为 $9.95\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,占总化肥量的23.8%;与此相反,复合肥的使用量波动增加,增幅达254.8%,平均化肥用量为 $31.18\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,在总化肥量中比例为74.73%;单质磷肥和钾肥的使用较为有限,总施肥量的比例分别为1.2%和0.2%;总体而言,化肥的总使用量增长了1.04倍。化肥的使用在高产稳产方面具有重要作用,但是过量施用化肥会导致多个问题:首先,会增加种植成本;其次,过量施用会导致大豆植株过度生长,容易倒伏,从而降低了根瘤菌的固氮能力;第三,过量化肥还可能引起土壤盐碱化,增加对环境的碳排放^[14,15]。在确保大豆高产稳产从而满足人民对植物蛋白需求,以及农业绿色低碳发展的背景下,化肥减施是我国实现“碳中和”目标的主要措施。

河南省大豆生产中化肥投入量总体呈下降趋势,但其占主要比例的氮肥和复混肥发生相反的变化,结果显示为氮肥施用比例下降,而复混肥施用比例升高,与河北省花生生产中化肥使用的研究结果相吻合^[13]。氮肥偏生产力是反映植物对肥料利用率的一个指标,它也是评价当前使用化肥产出的增产效益评判的适宜指标^[16]。本研究发现,河南省2004—2022年,氮肥使用量 $<60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,河南省大豆氮肥偏生产力为 $33.7\sim778.7\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均值 $122.6\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。这与于飞等^[17]研究发现的玉米、小麦及水稻表现一致。氮肥的施用量超出标准,导致其生产效率下降,过量的氮肥以活性氮形式释放到环境中,增加了温室气体的排放^[12]。本项研究显示,河南省2004—2022年期间,大豆化肥投入产生的活性氮排放中, NH_3 年均活性氮排放量为 $4.87\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,占总

排放量的69.2%,且 NH_3 挥发大于 NO_3^- 淋洗和 N_2O 排放。这与范燕等^[12]、连炳瑞等^[18]和梁龙等^[19]的研究发现趋势一致。本项研究还揭示了氮肥的使用是导致活性氮排放的主要驱动因素,且两者之间呈现正相关关系。这与周杏和邹晓霞等^[20-22]的研究结果一致,农田温室气体中活性氮的排放主要源于氮肥的使用。

农业碳足迹能够系统评价作物在生产过程中产生的碳排放情况,它能够定量计算农业生产活动对温室效应产生的影响^[23],它是分析作物在农业生产过程中碳排放的重要方法。研究显示,化肥投入占河北省棉花碳足迹的46.30%,江苏省油菜和大豆的碳足迹分别为74.57%和71.21%^[24]。在湖北省,油菜-花生轮作、小麦-花生轮作和花生单作的肥料投入碳排放分别占总排放的59.2%、58.2%和52.9%,其余碳排放来自农机耗油、种子、除草剂等农资投入^[25]。在棉花、花生以及棉花/花生间作中,肥料投入的碳排放占比分别为44%、37%和38%,其余碳排放来自其他农资^[26]。众多研究表明,不同作物的碳排放量不一样,但相同的是化肥投入在其碳足迹中占比都相对较大。本研究以碳排放相关的化肥投入为出发点,分析2004—2022年河南省大豆生产中化肥投入产生的碳足迹,表明该时期化肥投入所产生的碳排放总量逐年呈先增加后逐步下降的趋势,年平均碳排放总量达到7.52万t,造成这种情况的原因主要有两个方面:首先是单质氮肥的施用量减少,其次是大豆种植的面积也在下降。本项研究显示,单质氮肥施用量对碳足迹影响最大,这与连炳瑞等^[18]的研究一致。2004—2022年间,河南省大豆的平均种植面积为42.8万 hm^2 ,化肥投入的碳足迹为 $175.39\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,化肥生产产生的碳足迹贡献高于化肥施用,因此通过减少化肥相关化工产业的排放,可以更快地降低碳排放量,这与范燕等^[12]研究一致。

绿色兴农是国家实现农业强国的必然要求,需要持续推动农业生产向着更环保、低碳的方向发展。2022年国家已经确立目标:到2030年,农业和农村地区在减排固碳方面与粮食安全、乡村振兴以及农业现代化相互促进,共同推动农业和农村地区向绿色低碳发展取得显著成就。当前,各行业都在积极研究和制定减少碳排放的策略^[27],农业减排作为碳减排战略的重要组成部分,化肥的合理利

用至关重要^[28]。在这样的国家战略政策下,河南省大豆生产绿色低碳发展要结合碳排放目标,在减量施肥的同时保证大豆高产稳产;要强化农业科技支撑,比如采用生物农药替代化学农药,推广有机肥料替代化肥等绿色技术,可以有效减少农业生产过程中的污染排放,降低农业生产对环境的压力。根据当地生产、肥力、品种及土壤情况,优化化肥投入比例,合理控制化肥用量^[29],加强对高效大豆根瘤菌品种的选育;加强种植户对化肥的了解与培训,加强复合肥、控释肥、有机肥的推广应用,降低生产过程中碳排放等,形成农业绿色低碳发展格局。

4 结论

2004—2022 年河南省大豆生产化肥投入发生变化,氮肥施用量急剧降低,复混肥施用量快速增加,化肥施用结构发生显著改变。氮肥施用量是影响活性氮排放的主要因素,两者呈正相关,应根据作物需肥特点,精准使用不同养分含量的化肥。河南省大豆生产中碳足迹与化肥投入密切相关,化肥生产环节碳足迹大于化肥施用环节的碳足迹。

参考文献

[1] GAN Y, LIANG C, HAMEL C, et al. Strategies for reducing the carbon footprint of field crops for semiarid areas. A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2011, 31(4): 643-656.

[2] CHATZIMPIROS P, BARLES S. Nitrogen food-print; N use related to meat and dairy consumption in France[J]. *Biogeosciences*, 2013,10: 471-481.

[3] 王士超, 闫志浩, 王瑾瑜, 等. 秸秆还田配施氮肥对稻田土壤活性碳氮动态变化的影响[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(4): 782-794.

WANG S C, YAN Z H, WANG J Y, et al. Nitrogen fertilizer and its combination with straw affect soil labile carbon and nitrogen fractions in paddy fields[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(4): 782-794.

[4] 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.

ZHANG M J, ZHANG J H, LI W T, et al. An overview of crop carbon footprint accounting research in China [J]. *China's Agricultural Resources and Regionalization*, 2023, 44 (5): 148-154.

[5] 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.

ZHANG C H, HAN L, XIE J N, et al. Carbon footprint dynamics and composition assessment of major crops production in Jiangsu province[J]. *Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 14 (1): 110-119.

[6] 周舒怡, 杨潇, 冯盼盼, 等. 陇东黄土高原旱作主要粮食和饲草生产碳足迹核算[J]. *中国草地学报*, 2022, 44(6): 11-17.

ZHOU S Y, YANG X, FENG P P et al. Carbon footprint accounting of main grain and forage production in dryland of Longdong Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2022, 44(6): 11-17.

[7] 韩欣怡, 韩雪, 李廷亮, 等. 中国马铃薯分省碳足迹核算与减排策略研究—基于生命周期评价法[J]. *中国农业资源与区划*, 2024, 45(1): 11-19.

HAN X Y, HAN X, LI T L, et al. Study on carbon footprint accounting and emission reduction strategy of potato in China province: based on life cycle assessment method [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2024, 45(1): 11-19.

[8] 国家发展和改革委员会价格司. 全国农产品成本收益资料汇编[M]. 北京: 中国统计出版社, 2004-2022.

Price Department of the National Development and Reform Commission. National compilation of cost-benefit data of agricultural products [M]. Beijing: China Statistics Press, 2004-2022.

[9] 刘永奇. 河南统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2004-2022.

LIU Y Q. Henan statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press,2004-2022.

[10] 陈舜, 逯非, 王效科. 中国氮磷钾肥制造温室气体排放系数的估算[J]. *生态学报*, 2015, 35(19): 6371-6383.

CHEN S, LU F, WANG X K. Estimation of greenhouse gases emission factors for China' s nitrogen, phosphate, and potash fertilizers [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35 (19): 6371-6383.

[11] 程豪. 碳排放怎么算:《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》[J]. *中国统计*, 2014(11): 28-30.

CHENG H. How to calculate carbon emissions: 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [J]. *China Statistics*, 2014(11): 28-30.

[12] 范燕, 赵雪飞, 么田, 等. 河北省花生生产体系化肥投入的碳足迹初探[J]. *花生学报*, 2023, 52(2): 45-51.

FAN Y, ZHAO X F, MO T, et al. Preliminary study on the carbon footprint of chemical fertilizer input in peanut production system in Hebei province[J]. *Peanut Journal*, 2023, 52(2): 45-51.

[13] 郝小雨. 基于碳足迹的黑龙江垦区农业生态系统碳源/汇时空变化[J]. *中国农业资源与区划*, 2022, 43(8): 64-73.

HE X Y. Spatio-temporal changes of carbon source/sink in agricultural ecosystem of Heilongjiang reclamation area based on carbon footprint [J]. China Agricultural Resources and Regionalization, 2022, 43 (8) : 64-73.

[14] 王春晓, 王世福, 鹿泽启, 等. 花生化肥减施途径与潜力[J]. 花生学报, 2019, 48 (3) : 71-75.

WANG C X, WANG S F, LU Z Q, et al. Route and potential of chemical fertilizer reduction for peanut [J]. Journal of Peanut Science, 2019, 48 (3) : 71-75.

[15] 杨利, 张建峰, 张富林, 等. 长江中下游地区氮肥减施对稻麦轮作体系作物氮吸收、利用与氮素平衡的影响[J]. 西南农业学报, 2013, 26 (1) : 195-202.

YANG L, ZHANG J F, ZHANG F L, et al. Effects of reduced nitrogen application on crop nitrogen uptake, utilization and nitrogen balance in rice-wheat rotation system in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. Southwestern Journal of Agriculture, 2013, 26 (1) : 195-202.

[16] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45 (5) : 915-924.

ZHANG F S, WANG J Q, ZHANG W F, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement [J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45 (5) : 915-924.

[17] 于飞, 施卫明. 近 10 年中国大陆主要粮食作物氮肥利用率分析[J]. 土壤学报, 2015, 52 (6) : 1311-1324.

YU F, SHI W M. Nitrogen use efficiencies of major grain crops in China in recent 10 years [J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52 (6) : 1311-1324.

[18] 连炳瑞, 李雅豪, 王激清, 等. 化肥投入对河北省玉米体系活性氮排放与碳足迹影响[J]. 山东农业科学, 2022, 54 (6) : 112-117.

LIAN B R, LI Y H, WANG J Q, et al. Effects of chemical fertilizer input on active nitrogen emission and carbon footprint of maize system in Hebeiprovince [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2022, 54 (6) : 112-117.

[19] 梁龙, 陈源泉, 高旺盛. 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 L, CHEN Y Q, GAO W S. 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.

[20] 周杏, 冯玄韬, 于书霞, 等. 湖北省油菜种植氮足迹分析[J]. 环境科学与技术, 2018, 41 (1) : 41-46.

ZHOU X, FENG X T, YU S X, et al. Aanalysis of nitrogen footprint for rape cultivation in Hubei Province[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 41 (1) : 41-46.

[21] 邹晓霞, 张晓军, 王月福, 等. 山东省小麦-夏直播花生种植体系碳足迹[J]. 应用生态学报, 2018, 29 (3) : 850-856.

ZOU X X, ZHANG X J, WANG Y F, et al. Carbon footprint of wheat-summer direct-seeding peanut planting system in Shandong province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29 (3) : 850-856.

[22] 邹晓霞, 张巧, 张晓军, 等. 玉米花生宽幅间作碳足迹初探[J]. 花生学报, 2017, 46 (2) : 11-17.

ZOU X X, ZHANG Q, ZHANG X J, et al. Carbon footprint analysis on maize-peanut wide-band intercropping [J]. Journal of Peanut Science, 2017, 46 (2) : 11-17.

[23] 王冠丽, 孙铁军, 刘廷玺, 等. 施用生物炭对干旱区玉米农田碳足迹的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38 (11) : 2650-2658.

WANG G L, SUN T J, LIU T X, et al. Effects of biochar on carbon footprint of corn fields in arid regions [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38 (11) : 2650-2658.

[24] 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.

ZHANG C H, HAN L, XIE J N, et al. Study on the carbon footprint dynamics and composition of main crops in Jiangsu province [J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 14 (1) : 110-119.

[25] 庞茹月, 王明辉, 孔洁, 等. 湖北省不同花生轮作种植体系碳氮足迹[J]. 应用生态学报, 2021, 32 (11) : 3997-4003.

PANG R Y, WANG M H, KONG J, et al. Carbon and nitrogen footprint of different peanut rotation systems in Hubei province, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32 (11) : 3997-4003.

[26] 赵亚飞, 李强, 侯献飞, 等. 新疆棉花//花生间作碳足迹研究[J]. 花生学报, 2019, 48 (2) : 61-65.

ZHAO Y F, LI Q, HOU X F, et al. Study on carbon footprint of cotton/peanut intercropping in Xinjiang [J]. Journal of Peanut Science, 2019, 48 (2) : 61-65.

[27] 马海波, 朱强. 基于生命周期评价的我国稻米碳足迹核算[J]. 干旱区资源与环境, 2023, 37 (6) : 11-19.

MA H B, ZHU Q. China's rice carbon footprint accounting based on life cycle assessment [J]. Resources and Environment in Arid Areas, 2023, 37 (6) : 11-19.

[28] 李志江, 王宇航, 向涛, 等. 近 10 年中国化肥投入格局演变及展望[J]. 农业展望, 2022, 18 (5) : 46-53.

LI Z J, WANG Y H, XIANG T, et al. The evolution and prospect of China's fertilizer input pattern in the past 10 years [J]. Agriculture Outlook, 2022, 18 (5) : 46-53.

[29] 杨吉顺, 李尚霞, 张智猛, 等. 施氮对不同花生品种光合特性及干物质积累的影响[J]. 核农学报, 2014, 28 (1) : 154-160.

YANG J S, LI S X, ZHANG Z M, et al. Effect of nitrogen application on canopy photosynthetic and dry matter accumulation of peanut [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2014, 28 (1) : 154-160.