

DOI: 10.5846/stxb202106081522

杨欢, 乔远, 王兴邦, 陈新平, 张务帅. 黄淮海玉米生产能源利用效率和净生态系统碳平衡时空特征. 生态学报, 2022, 42(15): 6184-6195.

Yang H, Qiao Y, Wang X B, Chen X P, Zhang W S. Spatio-temporal characteristics of energy use efficiency and net ecosystem carbon budget of maize production in Huang-Huai-Hai region. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(15): 6184-6195.

黄淮海玉米生产能源利用效率和净生态系统碳平衡时空特征

杨欢¹, 乔远^{1,2}, 王兴邦^{1,2}, 陈新平^{1,2}, 张务帅^{1,2,*}

1 西南大学资源环境学院, 重庆 400715

2 西南大学长江经济带农业绿色发展研究中心, 重庆 400715

摘要:黄淮海地区是我国重要的玉米产区之一, 量化该区域玉米生产的能源利用效率和净生态系统碳平衡对提高资源利用效率和实现碳中和具有重要意义。基于国家统计数据, 利用生命周期评价(LCA)、能值分析和碳平衡等方法, 量化了 2004—2018 年黄淮海地区(包括河北、河南、山东、安徽和江苏 5 个省)玉米生产的能源利用效率和净生态系统碳平衡, 并阐明其时空变化特征。结果表明:黄淮海地区玉米生产的平均能源利用效率、温室气体排放量、净生态系统碳平衡和可持续性指数分别为 3.9、3.8 t CO₂-eq/hm²、12.6 t C/hm² 和 6.8。不同年份间黄淮海地区玉米生产的能源利用效率和净生态系统碳平衡存在显著差异, 能源利用效率在 2012 年最高, 为 4.3, 在 2005 和 2007 年最低, 为 3.7; 净生态系统碳平衡在 2015 年最高, 为 14.2 t C/hm², 在 2005 年最低, 为 10.1 t C/hm²。各省份中以河北省玉米生产的能源利用效率、净生态系统碳平衡和可持续性指数最高, 分别高于区域平均 15.3%、9.6% 和 26.4%, 较最低的江苏省高 45.5%、22.0% 和 88.8%。河北省、河南省和山东省的综合得分均为正值, 具有较高的资源利用效率和生态环境效益。黄淮海地区玉米生产资源投入、能源利用效率、生态环境效益和净生态系统碳平衡在时空尺度上存在较大的差异, 应制定区域特异性优化管理策略, 减少化肥和农药的施用, 施用增效肥料和高效生物农药等, 采用秸秆还田等保护性耕作措施, 积极推进规模化和机械化的发展, 实现黄淮海地区玉米生产的绿色可持续发展。

关键词:黄淮海; 能源利用效率; 温室气体排放; 净生态系统碳平衡; 可持续性指数

Spatio-temporal characteristics of energy use efficiency and net ecosystem carbon budget of maize production in Huang-Huai-Hai region

YANG Huan¹, QIAO Yuan^{1,2}, WANG Xingbang^{1,2}, CHEN Xinping^{1,2}, ZHANG Wushuai^{1,2,*}

1 College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China

2 Interdisciplinary Research Center for Agriculture Green Development in Yangtze River Basin, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: The Huang-Huai-Hai region is one of the most important main producing areas for maize production in China. Quantifying the energy use efficiency and net ecosystem carbon budget of maize production in this area is of great significance for improving resource use efficiency and achieving carbon neutrality. Based on the national statistical panel data, the energy use efficiency and net ecosystem carbon budget of maize production in Huang-Huai-Hai region (including Hebei Province, Henan Province, Shandong Province, Anhui Province, and Jiangsu province) were quantified, and their spatial and temporal variation characteristics were clarified by integrated using the methods of life cycle assessment, energy analysis, and carbon balance analysis. The results showed that the mean energy use efficiency, greenhouse gas emissions, net ecosystem carbon budget, and carbon based sustainability index of maize production in Huang-Huai-Hai area were 3.9,

基金项目:中央高校基本科研业务费(XDJK2020C069); 国家玉米产业技术体系(CARS-02-15)

收稿日期:2021-06-08; 网络出版日期:2022-04-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wszhang@swu.edu.cn

3.8 t CO₂-eq/hm², 12.6 t C/hm², and 6.8, respectively. There were significant differences in the energy use efficiency and net ecosystem carbon budget of maize production in the Huang-Huai-Hai region among years. The energy use efficiency was highest in 2012 which was 4.3 and that in 2005 and 2007 was lowest, which were both at 3.7. The net ecosystem carbon budget was highest in 2015 which was 14.2 t C/hm², while that in 2005 was lowest which at 10.1 t C/hm². The energy use efficiency, net ecosystem carbon budget, and carbon based sustainability index of maize production in Hebei Province were the highest, which were higher than the regional average of 15.3%, 9.6%, and 26.4%, respectively, and 45.5%, 22.0% and 88.8% higher than that in Jiangsu Province, respectively. The comprehensive scores considering above mentioned indicators for maize production of Hebei Province, Henan Province and Shandong Province were all positive. The three provinces (Hebei Province, Henan Province and Shandong Province) had high resource use efficiency, ecological and environmental benefits. Resource inputs, energy use efficiency, ecological and environmental benefits, and net ecosystem carbon budget of maize production in Huang-Huai-Hai region were different on the spatial and temporal scales. Regionally specific optimization management strategies should be formulated to reduce the application of chemical fertilizers and pesticides, for instance, using enhanced efficiency fertilizers (e.g., controlled release fertilizers) and applying high use efficiency biological pesticides, etc. Conservation tillage measures such as straw returning should be adopted actively to promote the development of scalable and mechanized maize production, and realize the sustainable development of maize production in the main producing area of maize in China.

Key Words: Huang-Huai-Hai region; energy use efficiency; greenhouse gas emissions; net ecosystem carbon budget; sustainability index

玉米作为我国第一大粮食作物,在国家的粮食安全、经济发展和社会稳定中占据重要的地位。玉米总产和种植面积在 2018 年分别达到 2.57 亿 t 和 42.1×10⁶hm²,占国内谷物总产的 37%和农作物总种植面积的 25.4%,其总产和总种植面积较 2004 年分别增长 97.4%和 65.6%^[1]。黄淮海地区是我国主要的玉米产区之一,玉米种植面积为 600 多万 hm²,总产量超过 2300 万 t,约占全国玉米总产量的 39%^[2]。当前黄淮海地区玉米生产存在资源利用率不高,土壤退化等问题^[3]。因此,量化评价黄淮海地区玉米生产的能源利用效率和净生态系统碳平衡对保障我国粮食安全和玉米可持续生产尤为重要。

前期研究表明我国粮食生产存在肥料、农药和柴油等资源投入过量的问题^[4]。农业发展对生态环境的胁迫效应总体十分剧烈,短期内中国仍然面临农业快速发展与生态环境保护之间的矛盾^[5]。实施既能养活人类又能保护环境的可持续农业对于实现若干可持续发展目标至关重要。因此,对农业生产活动的能源分析可以帮助确定支持可持续农业的措施。于伟咏等^[6]研究中测算中国 31 个省份的农业能源利用效率,指出碳排放强度低的地区农业能源利用效率较高。王梦媛等^[7]研究发现尽管作物生产主要投入和产出要素相同,但同一作物不同地点产出能值和能源利用效率均存在显著差异。综上所述,我国农业能源利用效率主要从全国尺度出发开展研究,但尚未针对黄淮海地区玉米生产的时空变化进行量化评价。

农业生产资料特别是氮肥的投入可以增加地上植物生物量,进而通过增强根系分泌物增加地下碳输入。Ni^[8]等人进行的整合分析表明,化肥显著增加了 20%的土壤碳输入,主要是由于净初级生产力的增加。农田土壤过多的化肥施用会导致土壤的酸化和盐碱化,这可能会影响作物生长,从而降低有机碳固存潜力^[9]。然而,氮肥投入同时也会增加土壤呼吸相关微生物的活性,甚至可以抵消对净初级生产力的促进作用。Chen 等^[10]通过大量的田间试验发现过量的氮肥和传统的农业管理会造成大量的活性氮损失和温室气体排放。在中国东北地区,与不施氮的玉米农田土壤相比施氮增加土壤碳输入 0.08 Mg C/hm²,但同时刺激土壤 CO₂排放增加 0.09 Mg C/hm²,从而导致土壤有机碳储量减少^[11]。由于直接测量土壤有机碳储量变化存在一定局限,净生态系统碳平衡被开发为估算土壤碳平衡的工具,但与之相关的黄淮海地区玉米生产净生态系统碳平衡的研究尚缺乏。

基于全生命周期的定量化黄淮海地区玉米生产资源投入的能源利用效率和环境效益的时空变化研究较为缺乏,制约着我国对黄淮海地区玉米生产生态环境效益的评价和减排措施的提出。本文以 2004—2018 年黄淮海玉米生产为研究对象,基于国家统计局数据,采用生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)、能值分析、碳平衡分析等方法,定量化该地区玉米生产能源利用效率和净生态系统碳平衡及其时空变化,探究关键影响因素,提出优化措施,为实现玉米绿色生产提供依据。

1 材料和方法

1.1 研究区域与供试作物

研究区域主要围绕黄淮海地区的河北、河南、山东、安徽和江苏五个省。该地区人口产业密集,农资投入量大,不同省份的资源投入和产量水平等存在较大差异。研究对象为黄淮海地区主要种植的夏玉米。

1.2 数据来源与收集

根据中国国家统计局(<http://www.stats.gov.cn/>)^[1]、《中国农村统计年鉴》^[12]以及《全国农产品成本收益资料汇编》^[13]收集整理黄淮海地区 2004—2018 年来玉米生产的产量、种植面积、化肥用量、农药、柴油、地膜、种子和人工等相关数据。

1.3 生命周期评价(LCA)

生命周期评价(LCA)是用于评估给定产品的潜在环境影响以支持生产和消费决策的最广泛使用的工具之一^[14]。研究中使用 LCA 定量化评估黄淮海地区玉米从农资的生产加工运输到玉米收获的整个生命周期的环境效应^[15]。

1.4 能源利用效率、温室气体排放、净生态系统碳平衡和可持续性指数计算

1.4.1 能源利用效率

为了阐明黄淮海地区玉米生产的能量平衡,本研究根据能源输入(化肥、农药、柴油地膜)和输出(玉米籽粒所含能量)来计算玉米生产的净能量、能源生产力和能源利用效率。计算公式如下:

$$NE = E_o - E_D \quad (1)$$

$$EP = Y_p / E_D \quad (2)$$

$$EUE(\%) = E_o / E_D \times 100\% \quad (3)$$

式中,NE、EP 和 EUE 分别为净能量(能源产生和消耗量之间的差值)、能源生产力(单位能源消耗所生产的玉米籽粒产量)和能源利用率(单位能源消耗的能量产生量)。E_o是玉米籽粒的能源产生,E_D是能源消耗包含玉米生产期间消耗的可再生能源(即人工和种子)和不可再生能源(即柴油,机械,农药和化肥),单位为 GJ/hm²。Y_p为玉米籽粒的产量,单位为 kg。本研究将能量输入和输出乘以它们各自的能量当量参数,以计算能源消耗量和能源产生量(表 1)^[16-28]。

1.4.2 温室气体排放

基于生命周期评价方法,本研究计算了整个生命环节的温室气体排放量,单位为 kg CO₂-eq/hm²。农业温室气体主要包括 CO₂, CH₄和 N₂O^[29]。计算公式如下:

$$GHG = GHG_m + \text{Total } N_2O \times 44/28 \times 298 \quad (4)$$

$$\text{Total } N_2O = N_2O \text{ emission} + 2.5\% \times NO_3 \text{ leaching} + 1\% \times NH_3 \text{ volatilization} \quad (5)$$

$$N_2O \text{ emission} = 1.13 \exp(0.0071 \times N_{\text{surplus}}) \quad (6)$$

$$NH_3 \text{ volatilization} = 1.45 + 0.24 \times N_{\text{rate}} \quad (7)$$

$$NO_3 \text{ leaching} = 25.31 \exp(0.0095 \times N_{\text{surplus}}) \quad (8)$$

$$N_{\text{surplus}} = N_{\text{rate}} - N_{\text{uptake}} \quad (9)$$

$$N_{\text{uptake}} = \text{产量} \times 0.86 / 0.845 \times \text{籽粒吸氮量} \quad (10)$$

式中,GHG 为玉米生产整个生命过程中温室气体排放量,GHG_m为农业投入品(包括肥料、农药、柴油等)生产

运输过程中产生的温室气体,单位为 $\text{kg CO}_2 \text{ eq/hm}^2$ [16-28]。Total N_2O 是指氮肥田间施用所产生的 N_2O 排放,44/28 为 N 与 N_2O 间的换算系数,298 为 N_2O 相比于 CO_2 的温室效应的当量系数,2.5% 和 1% 分别为硝态氮淋洗和氨挥发进入环境后通过一系列生物化学反应间接转化为 N_2O 的转换因子 [30]。 N_2O emission 为 N_2O 直接排放, NH_3 volatilization 为氨挥发, NO_3 leaching 为硝酸盐淋洗, N_{surplus} 为氮盈余,单位为 kg N/hm^2 ; N_{rate} 为施氮量,单位为 kg/hm^2 ; 0.86/0.845 为国际标准产量换算数值;籽粒吸氮量在产量大于 7.5 t/hm^2 时为 18.1 kg N/t ,在产量小于 7.5 t/hm^2 时为 19.8 kg N/t [10]。

表 1 温室气体排放和能量当量参数

Table 1 Sources of greenhouse gas emissions and energy equivalent parameters

项目 Item	单位 Unit	温室气体排放 GHG emissions/ ($\text{kg CO}_2\text{-eq}$)	能量当量 Energy equivalent/MJ	参考文献 Reference
氮肥生产和运输 Production and transportation of nitrogen fertilizer	kg N	8.3	92.03	[16, 21]
磷肥生产和运输 Production and transportation of phosphorus fertilizer	$\text{kg P}_2\text{O}_5$	0.79	20.96	[17, 21]
钾肥生产和运输 Production and transportation of potash fertilizer	$\text{kg K}_2\text{O}$	0.55	13.13	[17, 21]
农药生产和运输 Production and transportation of pesticide	kg	19.1	240	[18, 21]
地膜生产和运输 Production and transportation of mulch	kg	2.8	32.3	[19, 22]
柴油 Diesel	L	3.75	35.83	[20, 21]
种子 Seed	kg	3.85	15.32	[23-24]
人工 Labour	h	0.036	1.96	[25-26]
机械 Machine	h		62.7	[27]
电力 Electricity	$\text{kW} \cdot \text{h}$	1.14		[28]

1.4.3 净生态系统碳平衡

为了评估玉米中植物部分的碳分配,假设玉米中所有植物部分的碳浓度为 0.45 g/g [31]。净生态系统碳平衡 (Net Ecosystem Carbon Budget, NECB) 被用来表示土壤有机碳含量的变化,基于 Xia 等 [32] 计算公式如下:

$$\text{NECB} = \text{NPP}/0.58 (\text{GPP}) - \text{HR} - \text{GHG} \times 12/44 + \text{FRW} \quad (11)$$

式中, GPP 为总初级生产力, NPP 为净初级生产力, NPP/GPP 的比率系数为 0.58 [33]。HR 为收获后从土壤中移除的玉米籽粒碳含量,计算方式为玉米产量与碳浓度相乘,单位为 kg C/hm^2 。GHG 为玉米生产整个生命周期的温室气体排放量,由公式 4 计算获得,12/44 指 CO_2 和 C 之间的换算系数。FRW 为收获后残留在田间的谷物和秸秆碳含量,单位为 kg C/hm^2 ,计算方式为作物碳含量乘以田间残留物系数,山东、江苏、河南、河北、安徽五个省的田间残留物系数分别为 0.82、0.86、0.93、0.91 和 0.86 [34]。

净初级生产力通过下式计算,单位为 kg C/hm^2 :

$$\text{NPP} = \text{NPP}_C + \text{NPP}_S + \text{NPP}_R + \text{NPP}_{ER} + \text{NPP}_L \quad (12)$$

NPP_C 、 NPP_S 、 NPP_R 和 NPP_{ER} 分别为作物籽粒、秸秆、根部和根际的碳含量,为植物籽粒、秸秆、根部和根际的生物量与碳浓度相乘,单位为 kg C/hm^2 。 NPP_L 为玉米生育期残留物的碳含量,单位为 kg C/hm^2 ,我们残留物生物量占地上生物量和根系干生物量的 5% [35]。

1.4.4 可持续性指数

可持续性指数是为了量化玉米生产系统的生产力及碳分配情况,计算公式如下 [36]。

$$\text{SI} = (C_P - C_E) / C_E \quad (13)$$

式中, C_p 指玉米生产的碳总量, C_e 是基于生命周期评价方法计算的温室气体排放量, C_p 和 C_e 的单位都为 $\text{kg C}/\text{hm}^2$ 。

研究中的 C_p 包含玉米籽粒 (C_G)、秸秆 (C_S)、根系 (C_R) 和根际 (CE_{ER}) 的碳含量, 根据 Bolinder 等人的研究结果, 按照下式计算^[37]:

$$C_G = Y_p \times 0.45 \quad (14)$$

$$C_S = (Y_p + Y_S) (1 - HI) \times 0.45 \quad (15)$$

$$C_R = Y_p / (S/R \times HI) \times 0.45 \quad (16)$$

$$CE_{ER} = C_R \times Y_{ER} \quad (17)$$

式中, Y_p 是玉米地上部干物质产量, Y_S 为玉米秸秆量, 单位为 kg/hm^2 , HI 是收获指数 (籽粒的干物质产量/总地上干物质产量), 根据 Zhao 等^[38] 对中国玉米生长数据的研究, 将河北、河南、山东、安徽和江苏玉米生产的 HI 分别设置为 0.49、0.50、0.51、0.51 和 0.51。 S/R 为冠/根比, Y_{ER} 为相对可恢复根系因子的额外根系碳 (即根际沉积碳)。假设给定玉米的 S/R 和 Y_{ER} 分别为 5.60 和 0.65^[37]。

2 结果

2.1 黄淮海地区不同年份生产投入与环境效益评价

2.1.1 资源投入、总种植面积和总产量年际变化及各省份种植面积和产量占比

2004—2018 年的 15 年间, 黄淮海地区玉米生产的肥料投入总体呈增加趋势, 氮肥、磷肥和钾肥的平均投入量分别为 202、72.4 和 53.8 kg/hm^2 (表 2)。氮肥用量在不同年份间存在较大差异, 2004 年投入量最高为 219 kg/hm^2 , 自 2015 年后我国总体养分投入量有所下降, 2018 年投入量最低为 178 kg/hm^2 。磷肥和钾肥投入量在 15 年间保持逐年递增, 2018 年分别较 2004 年增加了 61.7 和 62.8 kg/hm^2 。种子投入在 15 年间呈下降的趋势, 2004 年达到最高值 43.3 kg/hm^2 , 2017 年最低为 30.4 kg/hm^2 。农药和柴油投入量在 15 年间的差异较大, 单位面积最高投入量相比于最低投入量增长 133% 和 221%。地膜投入量 15 年间相对稳定, 总体变化范围为 0.2—0.8 kg/hm^2 。

表 2 黄淮海地区不同年份玉米生产投入产出情况

Table 2 Input-output situation of maize production in Huang-Huai-Hai region in different years

年份 Year	投入 Input								产出 Output
	N/ (kg/hm^2)	P_2O_5 / (kg/hm^2)	K_2O / (kg/hm^2)	农药 Pesticide/ (kg/hm^2)	柴油 Diesel/ (L/hm^2)	地膜用量 Mulch/ (kg/hm^2)	种子 Seed/ (kg/hm^2)	人工 Labour/ (h/hm^2)	产量 Yield/ (t/hm^2)
2004	219	38.1	15.8	6.6	35.5	0.3	43.3	6.0	6.2
2005	198	48.9	25.3	6.9	34.6	0.2	41.2	14.4	5.5
2006	202	53.5	32.1	7.6	41.6	0.2	40.0	6.9	6.1
2007	207	60.9	41.7	8.5	52.5	0.2	41.6	4.8	6.1
2008	199	57.3	42.5	10.0	44.3	0.5	39.4	3.3	6.6
2009	211	57.4	42.1	10.1	54.6	0.3	39.1	3.9	6.7
2010	213	64.7	49.1	10.8	47.6	0.6	37.8	8.1	6.6
2011	199	73.5	53.6	9.5	43.0	0.8	36.3	1.2	6.7
2012	201	81.3	63.8	11.7	56.2	0.6	34.4	7.6	7.2
2013	205	82.6	64.7	12.8	64.1	0.5	34.2	8.0	6.8
2014	216	86.8	70.7	13.5	83.0	0.5	32.3	5.4	7.4
2015	202	90.2	72.6	15.4	120	0.6	31.0	4.8	7.6
2016	198	92.4	75.9	15.2	132	0.5	30.5	5.2	7.3
2017	186	98.6	77.7	14.8	117	0.5	30.4	4.3	7.3
2018	178	99.8	78.6	15.0	111	0.6	30.5	3.6	6.9
平均 Average	202	72.4	53.8	11.2	69.1	0.4	36.1	5.8	6.7

黄淮海地区 15 年间玉米总产量和种植面积整体呈上升趋势,总产量提高 85.7%,种植面积增加 53.5% (图 1)。单产在 15 年间总体呈先上升后下降的趋势,平均值为 $6.7 \text{ t}/\text{hm}^2$ (表 2)。山东、河南和河北为黄淮海地区玉米主产地,各省的总产量分别占区域总量的 34%、29% 和 27%。安徽和江苏的产量分别占区域总量的 6% 和 4%,种植面积分别占 8% 和 4% (图 1)。

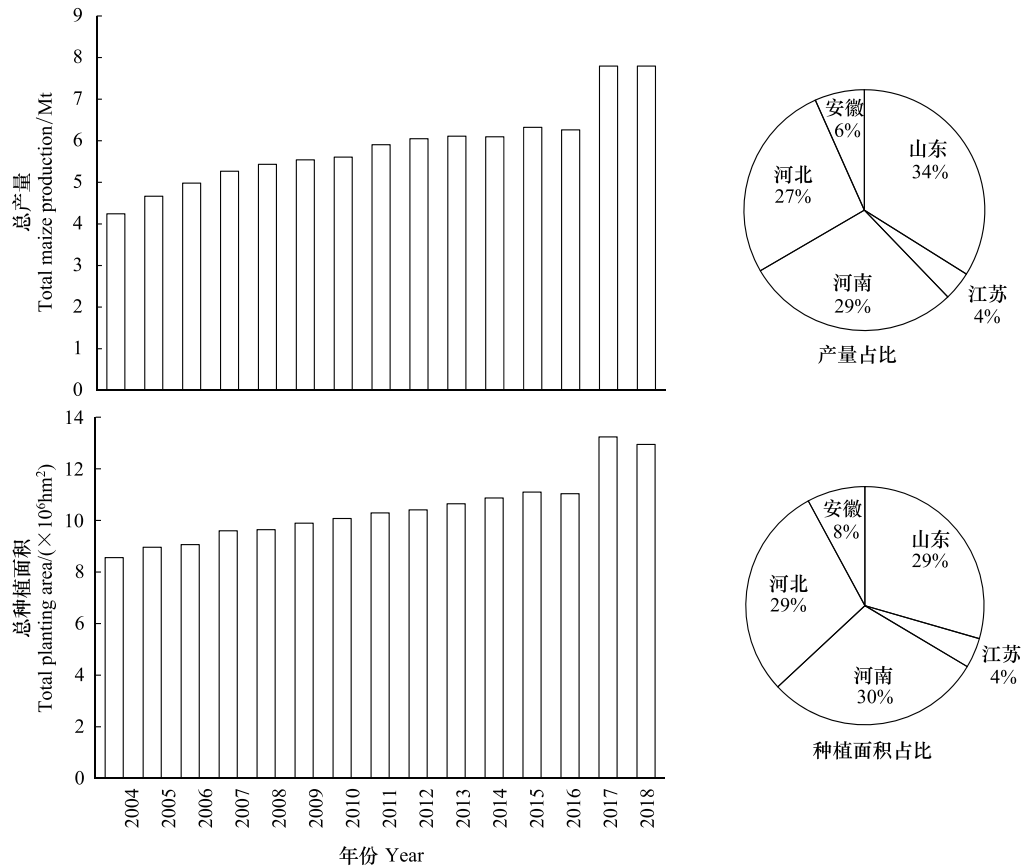


图 1 黄淮海地区不同年份及不同省份玉米生产的总产量、种植面积、产量占比和种植面积占比

Fig.1 Total maize production, total planting area, proportion of production, and proportion of planting area in different years and provinces in Huang-Huai-Hai region

2.1.2 玉米生产能源利用效率的年际变化

黄淮海地区 2004—2018 年 15 年间玉米生产能源消耗量和能源产生量的平均值分别为 $26.6 \text{ GJ}/\text{hm}^2$ 和 $103 \text{ GJ}/\text{hm}^2$ (表 3)。玉米生产的净能量随时间呈上升的趋势,变化范围为 $60.7\text{—}86.4 \text{ GJ}/\text{hm}^2$,平均值为 $76.5 \text{ GJ}/\text{hm}^2$ 。作为评价玉米生产能源利用情况的指标,2004 到 2018 年间均呈现先上升后下降的趋势。2005 和 2007 年玉米生产的能源生产力和能源利用效率相同,都分别为 $0.24 \text{ t}/\text{GJ}$ 和 3.7。

2.1.3 玉米生产温室气体排放、净生态系统碳平衡和可持续性指数的年际变化

15 年间,黄淮海地区温室气体排放呈现先增加后减少的趋势,变化范围为 $3.6\text{—}4.1 \text{ t CO}_2\text{-eq}/\text{hm}^2$,平均排放量为 $3.8 \text{ t CO}_2\text{-eq}/\text{hm}^2$ (图 2)。其中肥料生产运输过程和田间施用的温室气体排放占总排放量中占比最高,达到 81.7%。农药生产运输和农机耗油的温室气体排放占总排放量的 5.7% 和 6.9%,其它过程的贡献率之和低于 6%。各环节温室气体排放贡献率大小排序为:肥料生产运输>肥料田间施用>农机耗油>农药生产运输>种子>灌溉耗电>地膜>人工。

黄淮海 15 年玉米生产碳输入高于碳输出,净生态系统碳平衡为正值。黄淮海地区玉米生产的净生态系统碳平衡在 2005 年最低,为 $10.1 \text{ t C}/\text{hm}^2$,自 2015 年 ($14.2 \text{ t C}/\text{hm}^2$) 后呈逐渐下降的趋势。2015—2018 年平

均净生态系统碳平衡为 13.6 t C/hm², 比 2004—2014 年高 11.9%。净生态系统碳平衡中总初级生产力和作物残留物量分别占总碳输入的 84.1% 和 15.9%; 碳输出中收获移除和以温室气体排放形式的碳损失分别占总碳输出的 74.6% 和 25.4% (图 2)。碳输入和碳输出均在 2015 年达到最高, 分别为 18.8 t C/hm² 和 4.5 t C/hm², 在 2005 年最低, 分别为 13.5 t C/hm² 和 3.5 t C/hm²。可持续性指数同净生态系统碳平衡和温室气体排放的变化规律相近, 均为先增加后降低, 2005 年最低为 5.7, 2012 年最高为 7.7 (图 2), 2012 年玉米生产的可持续指数较 2004 年增加了 20.6%。

表 3 黄淮海地区不同年份玉米生产能源利用情况

Table 3 Energy use efficiency of maize production in Huang-Huai-Hai region among different years

年份 Year	能源消耗量 Energy depletion/ (GJ/hm ²)	能源产生量 Output/ (GJ/hm ²)	净能量 Net energy/ (GJ/hm ²)	能源生产力 Energy productivity/ (t/GJ)	能源利用效率 Energy use efficiency/ (×100%)
2004	24.6	95.7	71.0	0.25	3.9
2005	23.1	83.8	60.7	0.24	3.7
2006	24.1	92.9	68.9	0.26	3.9
2007	25.5	93.5	68.0	0.24	3.7
2008	24.7	101	76.0	0.27	4.1
2009	26.1	102	76.0	0.26	3.9
2010	26.5	101	74.4	0.25	3.8
2011	24.9	102	77.2	0.28	4.2
2012	26.4	111	84.2	0.28	4.3
2013	27.4	104	76.7	0.25	3.9
2014	29.3	114	84.7	0.26	3.9
2015	29.9	116	86.4	0.26	3.9
2016	30.0	111	81.1	0.24	3.8
2017	28.4	113	84.2	0.26	4.0
2018	27.5	105	77.8	0.25	3.9
平均 Average	26.6	103	76.5	0.26	3.9

2.2 黄淮海地区不同省份生产投入与环境效益评价

2.2.1 不同省份玉米生产资源投入和产量变化

黄淮海玉米生产资源投入和产量在空间上存在差异(表 4)。江苏省氮肥投入量最高, 为 257 kg/hm², 比氮肥投入量最低的河南省高出 55.8%; 山东省磷肥、钾肥和农药的投入量最高, 分别高于区域平均 34.1%、31.6% 和 9.7%, 河北省的农药投入量显著低于其他 4 个省份。河北省柴油和种子投入量占比最高, 分别占区域总投入量的 24.1% 和 21.6%。山东省机械化程度较高, 人工投入量最低。黄淮海地区各省份单产由高到低分别为: 山东>河北>河南>安徽>江苏。

表 4 黄淮海地区不同省份玉米生产投入产出情况

Table 4 Input-output situation of maize production in different provinces in Huang-Huai-Hai region

年份 Year	投入 Input								产出 Output
	N/ (kg/hm ²)	P ₂ O ₅ / (kg/hm ²)	K ₂ O/ (kg/hm ²)	农药 Pesticide/ (kg/hm ²)	柴油 Diesel/ (L/hm ²)	地膜用量 Mulch/ (kg/hm ²)	种子 Seed/ (kg/hm ²)	人工 Labour/ (h/hm ²)	产量 Yield/ (t/hm ²)
河北	168	76.8	40.6	9.6	83.3	0.6	39.0	6.6	6.9
河南	165	64.1	59.0	11.3	71.6	0.5	36.8	7.6	6.7
山东	207	97.1	70.7	12.3	78.8		37.9	3.1	7.3
安徽	215	55.8	48.0	11.3	56.6	0.5	33.6	7.8	6.4
江苏	257	68.2	50.3	11.6	55.1	0.2	33.5	3.9	6.3

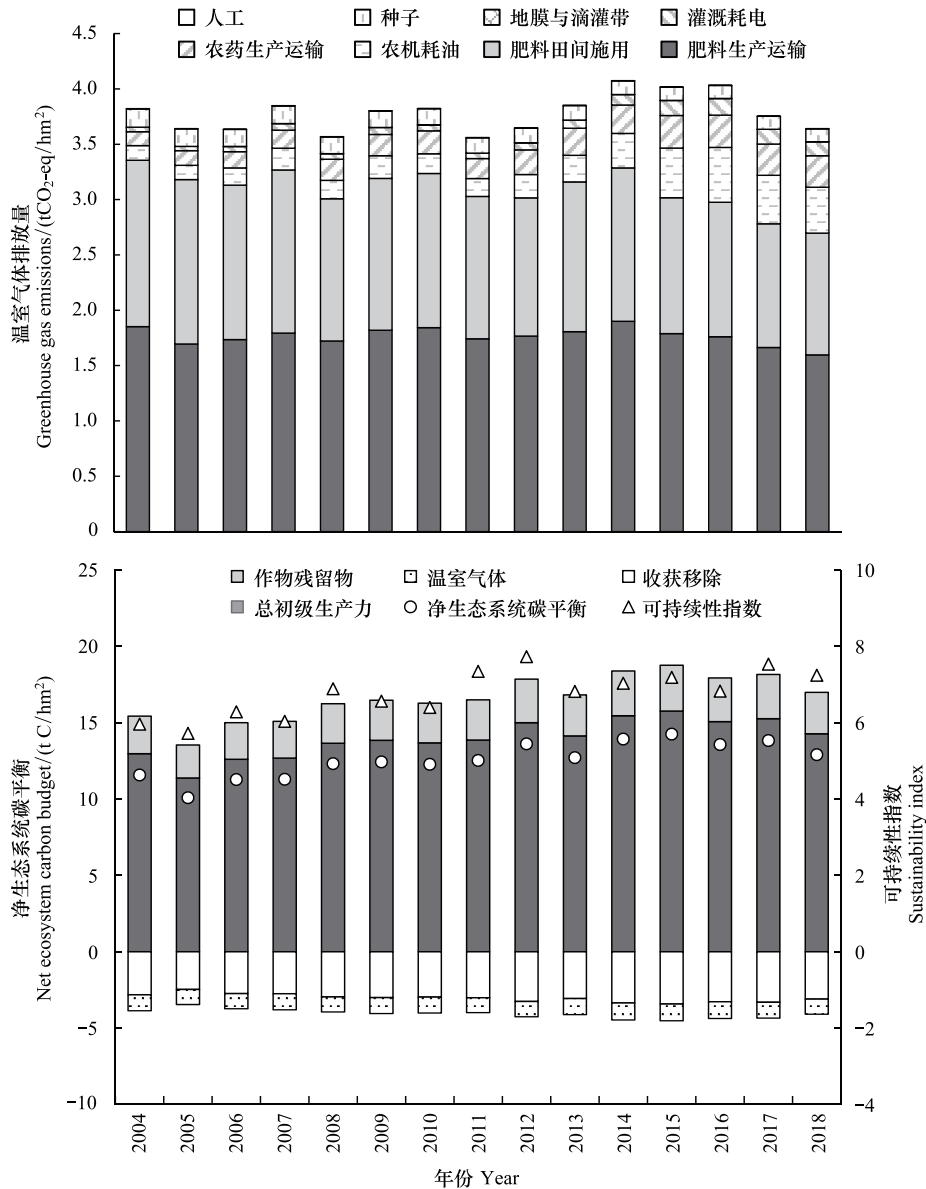


图2 黄淮海地区不同年份玉米生产温室气体排放量、净生态系统碳平衡和可持续性指数

Fig.2 Greenhouse gas emissions, net ecosystem carbon budget and sustainability index of maize production in Huang-Huai-Hai region in different years

2.2.2 不同省份玉米生产的能源利用效率

2004—2018年江苏省玉米生产平均能源消耗量最高,为31.0 GJ/hm²,净能量、能源生产力和能源利用效率最低,分别为66.2 GJ/hm²、0.20 t/GJ和3.1(表5)。河南省平均能源消耗量为区域最低,为23.5 GJ/hm²。河北省玉米生产净能量、能源生产力和能源利用率最高,分别为83.0 GJ/hm²、0.30 t/GJ和4.5。山东省能源产生量最高,为111 GJ/hm²。河北省和河南省能源利用效率比区域平均分别高15.4%和12.8%,而山东省、安徽省和江苏省比区域平均分别低0.4%、8.3%和25.8%。

2.2.3 不同省份玉米生产温室气体排放、净生态系统碳平衡和可持续性指数

黄淮海玉米生产温室气体排放由低到高的顺序为河南<河北<山东<安徽<江苏(图3)。江苏省玉米生产温室气体排放最高,达4.8 t CO₂-eq/hm²,是河南省的1.5倍。山东省和安徽省玉米生产温室气体排放均为3.9 t CO₂-eq/hm²。河北、河南、山东、安徽和江苏肥料生产运输和施用环节温室气体排放分别占区域温室气

体总排放的 13.0%、12.9%、16.0%、16.4% 和 22.1%。

表 5 黄淮海地区不同省份玉米生产的能源利用情况

Table 5 Energy use efficiency of maize production in different provinces in Huang-Huai-Hai region

省份 Province	能源消耗量 Energy depletion/ (GJ/hm ²)	能源产生量 Output/ (GJ/hm ²)	净能量 Net energy/ (GJ/hm ²)	能源生产力 Energy productivity/ (t/GJ)	能源利用效率 Energy use efficiency/ (×100%)
河北	23.5	106	83.0	0.30	4.5
河南	23.1	103	79.4	0.29	4.4
山东	28.3	111	82.9	0.26	3.9
安徽	26.8	97.7	70.9	0.24	3.6
江苏	31.0	97.2	66.2	0.20	3.1

黄淮海地区各省份玉米生产平均碳输入和碳输出分别为 16.6、4.1 t C/hm², 净生态系统碳平衡为 12.6 t C/hm² (图 3)。河北省玉米生产的净生态系统碳平衡最高, 为 13.8 t C/hm², 江苏省玉米生产净生态系统碳平衡最低, 为 11.3 t C/hm²。碳输入中总初级生产力占比 80% 以上, 碳输出中收获移除占比 70% 以上。作物残留物范围在 2.5—2.8 t C/hm² 之间, 河北省最高, 江苏省最低。黄淮海地区各省份玉米生产能源利用效率和可持续性指数由高到低的顺序为: 河北>河南>山东>安徽>江苏 (图 3)。

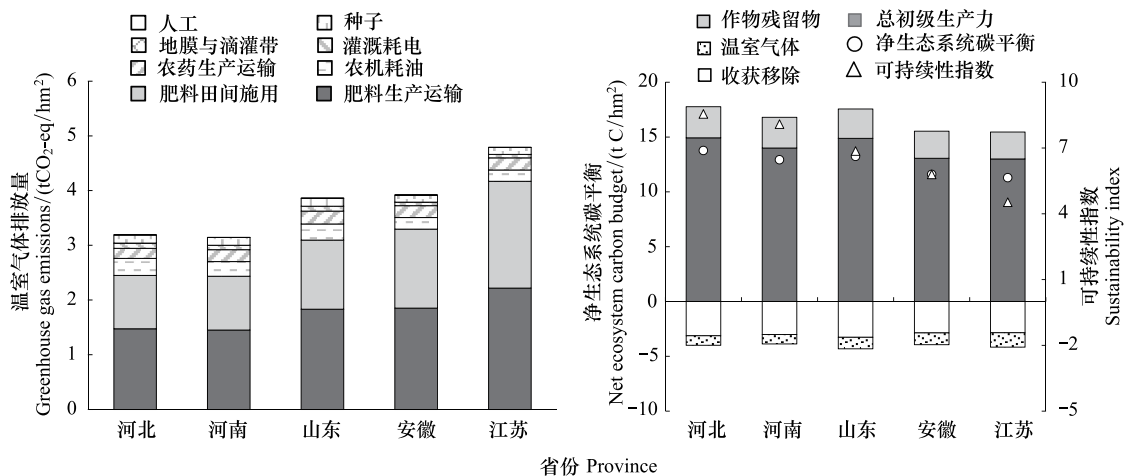


图 3 黄淮海地区不同省份玉米生产温室气体排放量、净生态系统碳平衡和可持续性指数

Fig.3 Greenhouse gas emissions, net ecosystem carbon budget and sustainability index of maize production in different provinces in Huang-Huai-Hai region

2.2.4 不同省份玉米生产的综合生态环境效益分析

黄淮海地区各省份玉米生产的资源投入和环境效益间存在较大差异。通过颜色等级得分方格图 (图 4), 可以清晰比较各省份不同指标的得分情况, 得分越高, 代表该省份玉米生产的综合生态环境效益越高。各省份间玉米生产能源利用效率、作物残留物和可持续性指数的得分分布情况相似, 河北省最高, 江苏省最低。山东省产量得分最高, 净生态系统碳平衡得分位居第二。安徽省在各个指标上的得分仅高于江苏省。河北、河南和山东三个省份综合得分均为正值, 安徽和江苏两个省份综合得分均为负值。

3 讨论

黄淮海地区 15 年间 (2004—2018 年) 玉米生产平均能源利用效率、温室气体排放、净生态系统碳平衡和可持续性指数分别为 3.9、3.8 t CO₂/hm²、12.6 t C/hm² 和 6.8 (表 3、图 2)。氮肥和柴油是影响能源利用效率、温室气体排放、净生态系统碳平衡和可持续性指数的重要因素。15 年间全国平均^[13] 氮肥和农药投入量为

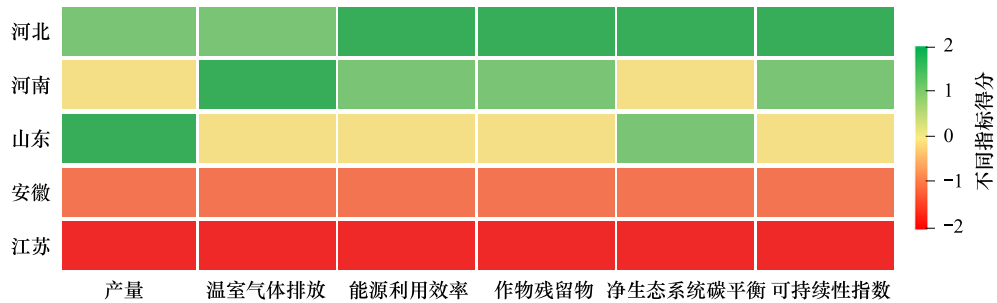


图4 黄淮海地区不同省份玉米生产的综合生态环境效益

Fig.4 Comprehensive ecological and environmental benefits of maize production in different provinces in Huang-Huai-Hai region

199 和 9.3 kg/hm², 柴油使用量为 34.2 L/hm²。黄淮海地区氮肥投入量与全国平均投入量相差不多, 但农药和柴油投入量比全国高 21.3% 和 102%, 与此同时单产比全国低 3.2%, 从而导致了黄淮海地区较高的温室气体排放。本研究的基础数据来自《全国农产品成本收益资料汇编》, 有机肥等在这个数据库中没有体现或数据不完整, 这可能对系统评价结果的准确度存在影响, 因此在本研究中我们限定了系统边界以确保结果的真实性与可比性。

本研究发现, 黄淮海玉米生产的能源利用效率和净生态系统碳平衡呈先增加后降低的趋势。基于此, 为满足不断增长的人口需求, 农业生产需不断增加资源投入来保证粮食产量, 这会造成各种环境问题。2004—2015 年, 能源利用效率不断下降的原因是资源投入相关的能源消耗量的增长速率高于能源产生量的增长速率。2015 年国家农业部实施“化肥农药零增长行动”后总体资源投入有所下降, 能源利用效率也有所回升。在 2004—2015 年间, 黄淮海玉米单产提高 22.6%, 净生态系统碳平衡增加 21.6%。净生态系统碳平衡是土壤中原有有机碳库分解与新添加的碳源、系统碳输入与同化等共同作用的结果^[39]。净初级生产力在生态系统碳平衡中扮演着重要角色^[40], 农资投入促进玉米固定大气中 CO₂ 能力的提高, 增加土壤中可获得的有机物料^[41]。同时, 地上部生物量增加促进根际分泌物对土壤原有碳库的分解。由此可知, 增加作物产量, 应用秸秆还田、有机替代等技术, 增加地上和地下的碳同化和碳储量对提高净生态系统碳平衡具有重要意义^[42]。

黄淮海地区玉米生产的能源利用效率和净生态系统碳平衡在空间上存在较大差异。黄淮海地区 15 年间玉米生产能源利用效率和净生态系统碳平衡最高的省份均为河北省(表 5、图 3)。能源利用效率、温室气体排放和可持续性指数随资源投入特别是肥料投入的变化而变化, 具有显著的正相关关系。净生态系统碳平衡中的碳输入计算均与单产相关, 河北省玉米单产位居区域第二, 总初级生产力及作物残留物最高, 所以其净生态系统碳平衡最高。江苏省农资投入最高, 尤其是氮肥投入, 因此江苏省温室气体排放、能源利用效率、净生态系统碳平衡和可持续性指数最低, 这与前人的研究结果相似^[6]。在颜色等级得分方格图中河北省、河南省和山东省的得分均为正值, 生态环境效益相对较好, 黄淮海地区玉米生产布局应适当向这三个省份倾斜。

综上所述, 黄淮海地区玉米生产的能源利用效率和净生态系统碳平衡等总体生态环境效益有待提升, 为实现该地区玉米生产的可持续发展, 可采取以下措施: (1) 平衡施肥: 减少氮肥的投入, 优化磷肥和钾肥, 大力推广测土配方施肥技术。氮肥是温室气体排放的主要贡献因子, 通过优化氮肥施用, 可以提高作物产量、能源利用效率和增加土壤碳固持。到 2013 年, 我国实施测土配方施肥技术因氮肥田间施用减少导致的农田减排达 1171.8 万 t CO₂-eq^[43]。(2) 配施增效肥料: 缓控释肥等已被广泛应用于农业生产, 可有效减少温室气体排放并提高氮肥利用效率和产量^[44]。(3) 应用秸秆还田技术: Lu^[45]的整合分析结果表明, 秸秆还田能够显著提高我国表层土壤(0—20 cm)有机碳储量 12%。(4) 开展土壤—作物系统综合管理: 综合技术的优化经过多种研究与大量实验证实对我国温室气体减排和提高产量有积极影响^[10]。

4 结论

黄淮海地区 2004—2018 年玉米生产平均能源利用效率、温室气体排放、净生态系统碳平衡和可持续性指

数分别为 3.9、3.8 t CO₂/hm²、12.6 t C/hm² 和 6.8。肥料的生产和田间施用以及农机耗油是各种生态环境效应的主要影响因素。2004 年到 2018 年,黄淮海地区玉米生产的能源利用效率、温室气体排放、净生态系统碳平衡和可持续性指数总体呈现先增加后减少的趋势。空间尺度上,玉米单位面积的生态环境效益得分排序由高到低为河北省>河南省>山东省>安徽省>江苏省,其中河北省、河南省和山东省得分均为正值,具有较好的玉米生产综合效益。玉米生产应根据不同地区的气候特征、土壤养分特性和种植规模等因素进行规范化、合理化布局。同时,合理减少农业化学品投入量,施用增效肥料,应用秸秆还田技术等保护性耕作措施,进行田间系统化的综合管理,提高玉米生产的资源利用率和生态环境效益。

参考文献(References):

- [1] 国家统计局. 北京: 中国统计出版社, 2019. <http://www.stats.gov.cn>.
- [2] 张亚菲, 刘松涛, 曹雯梅, 郑贝贝. 黄淮海夏玉米品种主要性状遗传多样性研究. 种子, 2021, 40(4): 96-100.
- [3] 许海涛, 王友华, 许波, 王成业, 张海申. 黄淮海玉米生产发展现状、存在问题及对策. 玉米科学, 2007, 15(S1): 160-162.
- [4] Kazemi H, Kamkar B, Lakzaei S, Badsar M, Shahbyki M. Energy flow analysis for rice production in different geographical regions of Iran. *Energy*, 2015, 84: 390-396.
- [5] 李海鹏, 罗丽, 张雄, 张俊飏. 中国农业能源效率动态演变及其影响因素. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(12): 105-115.
- [6] 于伟咏, 漆雁斌, 李阳明. 碳排放约束下中国农业能源效率及其全要素生产率研究. 农村经济, 2015, (8): 28-34.
- [7] 王梦媛, 高小叶, 侯扶江. 黄土高原-青藏高原过渡带农户生产系统的能值分析——以通渭-渭源-夏河样带为例. 生态学报, 2019, 39(5): 1758-1771.
- [8] Ni X Y, Yang W Q, Qi Z M, Liao S, Xu Z F, Tan B, Wang B, Wu Q G, Fu C K, You C M, Wu F Z. Simple additive simulation overestimates real influence: altered nitrogen and rainfall modulate the effect of warming on soil carbon fluxes. *Global Change Biology*, 2017, 23(8): 3371-3381.
- [9] Zhang F S, Cui Z L, Chen X P, Ju X T, Shen J B, Chen Q, Liu X J, Zhang W F, Mi G H, Fan M S, Jiang R F. Integrated nutrient management for food security and environmental quality in China. *Advances in Agronomy*, 2012, 116: 1-40.
- [10] Chen X P, Cui Z L, Fan M S, Vitousek P, Zhao M, Ma W Q, Wang Z L, Zhang W J, Yan X Y, Yang J C, Deng X P, Gao Q, Zhang Q, Guo S W, Ren J, Li S Q, Ye Y L, Wang Z H, Huang J L, Tang Q Y, Sun Y X, Peng X L, Zhang J W, He M R, Zhu Y J, Xue J Q, Wang G L, Wu L, An N, Wu L Q, Ma L, Zhang W F, Zhang F S. Producing more grain with lower environmental costs. *Nature*, 2014, 514(7523): 486-489.
- [11] Chen Z M, Xu Y H, Fan J L, Yu H Y, Ding W X. Soil autotrophic and heterotrophic respiration in response to different N fertilization and environmental conditions from a cropland in Northeast China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 110: 103-115.
- [12] 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴. 北京: 中国农业出版社, 2019.
- [13] 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 2019. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [14] ISO14040 Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and Framework. Geneva Switzerland: International Organization for Standardization, 2006.
- [15] Hellweg S, Canals L M I. Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment. *Science*, 2014, 344(6188): 1109-1113.
- [16] Zhang W F, Dou Z X, He P, Ju X T, Powlson D, Chadwick D, Norse D, Lu Y L, Zhang Y, Wu L, Chen X P, Cassman K G, Zhang F S. New technologies reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous fertilizer in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(21): 8375-8380.
- [17] Cui Z L, Yue S C, Wang G L, Zhang F S, Chen X P. In-season root-zone N management for mitigating greenhouse gas emission and reactive N losses in intensive wheat production. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(11): 6015-6022.
- [18] Clark S, Khoshnevisan B, Sefeedpari P. Energy efficiency and greenhouse gas emissions during transition to organic and reduced-input practices: student farm case study. *Ecological Engineering*, 2016, 88: 186-194.
- [19] 中华人民共和国国家发展和改革委员会(NDRCC). 解振华副主任出席十一届全国人大三次会议记者招待会, 就节能减排和应对气候变化问题答记者问. (2010-03-10)-[2020-11-26]. https://www.ndrc.gov.cn/fggz/hjzy/stwmjs/201003/t20100316_1160823.html?code=&state=123.
- [20] Pishgar-Komleh S H, Omid M, Heidari M D. On the study of energy use and GHG (greenhouse gas) emissions in greenhouse cucumber production in Yazd province. *Energy*, 2013, 59: 63-71.
- [21] 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.
- [22] 李蔓, 王震, 孙德智. 聚乙烯生产生命周期评价的研究. 环境科学与技术, 2009, 32(5): 191-195.

- [23] Zhu Y C, Waqas M A, Li Y E, Zou X X, Jiang D F, Wilkes A, Qin X B, Gao Q Z, Wan Y F, Hasbagan G. Large-scale farming operations are win-win for grain production, soil carbon storage and mitigation of greenhouse gases. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 172: 2143-2152.
- [24] 杨肖, 钟方雷, 郭爱君, 王琼. 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. *农业环境科学学报*, 2017, 36(8): 1664-1671.
- [25] 刘巽浩, 徐文修, 李增嘉, 褚庆全, 杨晓琳, 陈阜. 农田生态系统碳足迹法: 误区、改进与应用——兼析中国集约农作碳效率(续). *中国农业资源与区划*, 2014, 35(1): 1-7.
- [26] Mohammadi A, Omid M. Economical analysis and relation between energy inputs and yield of greenhouse cucumber production in Iran. *Applied Energy*, 2010, 87(1): 191-196.
- [27] Ghorbani R, Mondani F, Amirmoradi S, Feizi H, Khorramdel S, Teimouri M, Sanjani S, Anvarkhah S, Aghel H. A case study of energy use and economical analysis of irrigated and dryland wheat production systems. *Applied Energy*, 2011, 88(1): 283-288.
- [28] 袁宝荣, 聂祚仁, 狄向华, 左铁镛. 中国化石能源生产的生命周期清单(II)——生命周期清单的编制结果. *现代化工*, 2006, 26(4): 59-61.
- [29] Solomon S. *Climate Change 2007: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [30] IPCC. *Climate Change 2013: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel On Climate Change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.
- [31] Khorramdel S, Koocheki A, Mahallati M N, Khorasani R, Ghorbani R. Evaluation of carbon sequestration potential in corn fields with different management systems. *Soil and Tillage Research*, 2013, 133: 25-31.
- [32] Xia L L, Lam S K, Wang S W, Zhou W, Chen D L, Yan X Y. Optimizing nitrogen fertilization rate to enhance soil carbon storage and decrease nitrogen pollution in paddy ecosystems with simultaneous straw incorporation. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 298: 106968.
- [33] Zhang Y J, Xu M, Chen H, Adams J. Global pattern of NPP to GPP ratio derived from MODIS data: effects of ecosystem type, geographical location and climate. *Global Ecology and Biogeography*, 2009, 18(3): 280-290.
- [34] 王晓玉, 薛帅, 谢光辉. 大田作物秸秆量评估中秸秆系数取值研究. *中国农业大学学报*, 2012, 17(1): 1-8.
- [35] Kimura M, Murase J, Lu Y H. Carbon cycling in rice field ecosystems in the context of input, decomposition and translocation of organic materials and the fates of their end products (CO_2 and CH_4). *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(9): 1399-1416.
- [36] Lal R. Carbon emission from farm operations. *Environment International*, 2004, 30(7): 981-990.
- [37] Bolinder M A, Janzen H H, Gregorich E G, Angers D A, VandenBygaart A J. An approach for estimating net primary productivity and annual carbon inputs to soil for common agricultural crops in Canada. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2007, 118(1/4): 29-42.
- [38] Zhao Y C, Wang M Y, Hu S J, Zhang X D, Ouyang Z, Zhang G L, Huang B, Zhao S W, Wu J S, Xie D T, Zhu B, Yu D S, Pan X Z, Xu S X, Shi X Z. Economics- and policy-driven organic carbon input enhancement dominates soil organic carbon accumulation in Chinese croplands. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4045-4050.
- [39] 夏龙龙, 颜晓元, 蔡祖聪. 我国农田土壤温室气体减排和有机碳固定的研究进展及展望. *农业环境科学学报*, 2020, 39(4): 834-841.
- [40] 王轶虹, 王美艳, 史学正, 陈龙, 赵永存, 于东升. 2010年中国农作物净初级生产力及其空间分布格局. *生态学报*, 2016, 36(19): 6318-6327.
- [41] 穆少杰, 李建龙, 周伟, 杨红飞, 章超斌, 居为民. 2001—2010年内蒙古植被净初级生产力的时空格局及其与气候的关系. *生态学报*, 2013, 33(12): 3752-3764.
- [42] 陈睿山, 郭晓娜, 熊波, 王尧, 陈琼. 气候变化、土地退化和粮食安全问题: 关联机制与解决途径. *生态学报*, 2021, 41(7): 2918-2929.
- [43] Zhang J B, Müller C, Cai Z C. Heterotrophic nitrification of organic N and its contribution to nitrous oxide emissions in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 84: 199-209.
- [44] Zhang W S, Liang Z Y, He X M, Wang X Z, Shi X J, Zou C Q, Chen X P. The effects of controlled release urea on maize productivity and reactive nitrogen losses: a meta-analysis. *Environmental Pollution*, 2019, 246: 559-565.
- [45] Lu F. How can straw incorporation management impact on soil carbon storage? A meta-analysis. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2015, 20(8): 1545-1568.