DOI:10.11705/j. issn. 1672-643X. 2025. 05. 23

水-能-碳视角下的中国主粮作物热量生产力评估

张洪航[1,2,3], 梁传彬[1,2,3], 张文歆[1,2,3], 陈世超[1,2,3], 杜太生[1,2,3]

(1. 农业水资源高效利用全国重点实验室, 北京 100091; 2. 甘肃武威绿洲农业高效用水国家野外科学观测研究站, 甘肃 武威 733000; 3. 中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100091)

摘 要: 在人口增长与生态系统和资源约束压力叠加的背景下,如何在保障粮食安全的同时实现环境的可持续性已成为全球发展命题。在省域尺度上计算了全国3种主粮作物生产过程中水、能消耗和碳排放情况,探究了各投入要素在不同区域的相对贡献,评估了各区域的作物热量生产力,结果表明:小麦、水稻、玉米单位热量的水足迹分别为134、209、83 kg/Mcal,能量投入分别为1 375、848、868 kJ/Mcal,碳足迹分别为191、408、121 g CO_2 eq/Mcal;氮肥生产和灌溉水是区域生产效率差异的主要驱动因素,二者在能量投入差异中的总贡献率为39.4% ~68.1%;东北地区热量生产力最高,其次为华中和华北地区,华南地区最低。从降低投入、产出更多热量的角度出发,可适当向东北地区转移种植规模,缓解中国的资源短缺和环境问题,并保障粮食安全。

关键词: 水-能-碳系统; 热量生产力; 主粮作物; 生产效率; 能量投入; 粮食安全

中图分类号: S274 **文献标识码**: A **文章编号**: 1672-643X(2025)05-0195-10

Caloric productivity assessment of major grain crops in China from water - energy - carbon perspective

ZHANG Honghang[1,2,3], **LIANG Chuanbin**[1,2,3], **ZHANG Wenxin**[1,2,3], **CHEN Shichao**[1,2,3], **DU Taisheng**[1,2,3]

(1. *State Key Laboratory of Efficient Utilization of Agricultural Water Resources*, *Beijing* 100091, *China*; 2. *National Field Scientific Observation and Research Station on Efficient Water Use of Oasis Agriculture in Wuwei of Gansu Province*, *Wuwei* 733000, *China*; 3. *College of Water Resources and Civil Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100091, *China*)

Abstract: Under the combined pressures of population growth, ecosystem stress and resource limitations, how to ensure food security while advancing environmental sustainability has become a global development imperative. This study calculates water, energy consumption and carbon emission for three major grain crops across China's provinces, investigates the relative contributions of input factors to regional disparities, and evaluates regional crop caloric productivity. Key findings show that water footprints per unit calories are 134 kg/Mcal for wheat, 209 kg/Mcal for rice, and 83 kg/Mcal for maize, corresponding to 1 375, 848, and 868 kJ/Mcal of energy inputs, as well as 191, 408, and 121 g CO_2 eq/Mcal of carbon footprints, respectively. Nitrogen fertilizer production and irrigation water are the primary drivers of regional disparities in production efficiency, contributing 39.4% - 68.1% in total to the gap of energy input. The Northeast China exhibits the highest caloric productivity, followed by the Central and North China, while the South China demonstrates the lowest productivity. From the perspective of minimizing inputs and maximizing caloric output, it is advisable to shift a portion of crop cultivation to Northeast China. This would help ease China's resource shortages and environmental pressures while safeguarding food security.

Key words: water - energy - carbon system; caloric productivity; major grain crop; production efficiency; energy input; food security

---

收稿日期:2025-06-17; **修回日期**:2025-08-25

基金项目:国家自然科学基金项目(52239002、52209072)

作者简介:张洪航(2002—),男,山东阳谷人,硕士研究生,研究方向为作物高效用水。

通讯作者:杜太生(1975—),男,山东东阿人,博士,教授,研究方向为农业节水与水资源高效利用。

1 研究背景

小麦、水稻和玉米是我国的主粮作物,种植面积占全国粮食作物总面积的 78.6%[1]。农业生产的命脉在水利[2],2023 年全国农业用水量为 3 672.4 亿 m^3,占总用水量的 62.2%[3]。此外,农业生产中还伴随着能量投入和碳排放的产生[4],化肥、农药的生产运输过程需要消耗能量[5],同时会产生大量的温室气体[6]。近年来人口增长与生态系统和资源约束压力叠加,如何在保障粮食安全的同时实现环境可持续,已成为全球发展命题。到 2050 年,粮食产量需增加约 25% ~70% 才能满足人类需要,而相应地将产生全球 58% 的温室气体排放量[7]。综上,需要在水-能-碳耦合的视角下研究中国不同地区主粮作物的热量生产力,在减少环境压力的同时保障粮食安全。

淀粉是消费者饮食中主要的热量来源,但同时造成了巨大的碳排放[8]。有学者在全球尺度下进行了计算,3 种主粮作物提供的热量占所有作物的 56%,生产过程中造成的碳排放占所有作物的 64%[9]。在农业生产的过程中往往伴随着多种要素的投入,这会带来水、能消耗以及碳排放[10]。为应对资源短缺与气候变化,考虑水、能、碳关联下的综合优化,较单一要素优化更能实现节水、节能、节碳综合调控和量化其协同效益[11]。

营养品质的产量是用于衡量作物生长情况的重要指标[12]。在 Cassidy 等[13]的研究中,没有采用产量的标准定义,而是使用了每公顷农田实际养活的人数来衡量农业生产力。这是因为从能量的视角,农田的产量中只有一部分是直接供给人类营养的,另一部分则通过饲料间接供给,还有一部分作为生物燃料并没有供给人类食用,这导致了产量并不能准确地反映农田生产力[14]。对于直接供给人类营养的作物来说,作物产量的增加并不一定会导致营养质量的提高。所以作物的营养品质产量是一个更适合评估作物生产力的指标[15]。主粮作物提供的热量是其营养品质的主要部分,故本文将热量作为计算依据进行生产力评估。

既往研究多局限于单一作物且聚焦于产量,鲜有关注营养产量,即使关注后者,也常局限于水、能、碳的单一视角。本研究从水-能-碳耦合的视角评估各地区主粮作物热量生产力,计算生产过程中产出的热量以及水、能消耗和碳排放情况,对比生产力水平区域差异,筛选产生区域差异的驱动因子,以指导各地区合理生产,助力我国实现水资源高效利用、能耗双控和碳达峰目标,对高水效农业绿色发展具有重要意义。

2 研究方法与数据来源

2.1 系统边界

系统边界决定了有哪些因素要被考虑到水、能、碳的消耗之中。在生产资料投入方面,本研究将其界定为从播种到收获的全生命周期过程,包含小麦、水稻、玉米生产全生命周期中氮肥、磷肥、钾肥、电力、燃料、机械、灌溉、劳动力、农药、种子和农膜等生产资料的投入。在产出方面,边界只延伸到作物收获。

2.2 水足迹的计算

水足迹指的是在一定的物质生活标准下,一定人群消费的产品和服务所需要的全部水资源,不仅包括消费者或者生产者的直接用水,也包括产品供应链上提供的间接用水[16]。本研究只考虑各类生产要素的投入对水足迹的贡献,故排除了非人为因素的耗水(如地下水、雨水等),只考虑灌溉水和灰水两个部分。在作物生长过程中会施加肥料和喷洒农药,并因此造成水质污染,为使水质达到安全标准,将用于稀释各种营养元素(N、P、K)及药剂所需水资源量称为灰水。生产过程中总水足迹及灰水水足迹的计算如公式(1)、(2)所示。

$$WF_{\mathrm{proc}} = WF_{\mathrm{irr}} + WF_{\mathrm{gray}} \tag{1}$$

$$WF_{\mathrm{gray}} = \frac{\alpha \cdot AR}{c_{\max} - c_{\mathrm{nat}}} \tag{2}$$

式中:WF_{proc} 为生产过程中总的水足迹,m^3;WF_{irr} 为灌溉水的水足迹,m^3;WF_{gray} 为灰水的水足迹,m^3;α 为浸出径流分数,%;AR 为农田的化肥施用量,kg;$c_{\max}$ 为最高可接受的污染物浓度,kg/m^3;c_{nat} 为污染物的自然浓度,kg/m^3。

2.3 能量投入的计算

作物生产过程中各要素投入的同时伴随着能量的消耗,不同投入要素所造成的能量消耗不同,计算各地区作物各要素的能量投入,可以衡量不同要素对能量投入的相对贡献值,以进一步计算区域间的差异。本研究中包含各种形式的能量投入,采用能量当量将不同的要素统一单位,利用公式(3)进行计算[5]。

$$EI_{i,j} = A_{i,j} \cdot Ee_i \tag{3}$$

式中:$EI_{i,j}$ 为第 i 个要素在第 j 个省份的能量投入,MJ;$A_{i,j}$ 为第 i 个要素在第 j 个省份的投入值,kg;Ee_i 为第 i 个要素的能量当量,MJ/kg。

在具体计算各因素能量投入时，$A_{i,j}$ 的计算应根据各因素特点具体分析，Ee_i 则是将不同单位的投入值统一转化为 MJ。以机械的能量投入为例，$A_{ma,j}$ 用公式(4) 进行计算。

$$A_{ma,j} = W_{m,j} \cdot C \cdot \frac{a_j}{a_{m,j}} \tag{4}$$

式中：$A_{ma,j}$ 为第 j 个省份的机械能量投入，kg；$W_{m,j}$ 为第 j 个省份的农业机械总动力，kw；C 为机械的能量转化系数，kg/kw；a_j 为某种作物在第 j 个省份的机耕面积，hm^2；$a_{m,j}$ 为第 j 个省份的总机耕面积，hm^2。

主粮作物种植系统中各要素投入的能量当量和碳排放当量及数据来源见表 1。

表 1　主粮作物种植系统各要素投入的能量当量和碳排放当量

项目	能量单位	能量当量	参考文献	碳排放单位	碳排放当量	参考文献
电力	MJ/(kM·h)	3.60	[17]	kg CO_2 eq/(kW·h)	1.12	[23]
柴油	MJ/kg	42.70	[17]	kg CO_2 eq/kg	0.89	[6]
汽油	MJ/kg	43.10	[17]			
煤	MJ/kg	20.90	[17]			
机械	MJ/kg	62.50	[18]			
氮肥(N)	MJ/kg	66.14	[18]	kg CO_2 eq/kg N	7.76	[6]
磷肥(P_2O_5)	MJ/kg	12.44	[18]	kg CO_2 eq/kg P_2O_5	2.33	[6]
钾肥(K_2O)	MJ/kg	11.15	[18]	kg CO_2 eq/kg K_2O	0.66	[6]
农药	MJ/kg	120.00	[19]	kg CO_2 eq/kg	18.00	[6]
塑料薄膜	MJ/kg	51.93	[20]	kg CO_2 eq/kg	0.60	[6]
灌溉用水	MJ/m^3	1.02	[20]	kg CO_2 eq/m^3	0.24	[24]
种子运输						
小麦种子	MJ/kg	20.10	[21]	kg CO_2 eq/kg	0.58	[24]
玉米种子	MJ/kg	16.60	[21]	kg CO_2 eq/kg	1.93	[24]
水稻种子	MJ/kg	14.70	[21]	kg CO_2 eq/kg	1.66	[24]
劳动力	MJ/h	1.96	[22]	kg CO_2 eq/(人·d)	0.86	[25]

2.4　碳足迹的计算

碳足迹是某一产品或服务系统在其全生命周期内的碳排放总量，或活动主体在某一活动过程中直接和间接的碳排放总量[26]。在作物生产的过程中会造成直接或间接的碳排放，直接的碳排放包括耕地排放(施氮过程以及氮肥淋溶造成的碳排放)、水稻淹水等；间接的碳排放包括种子的运输、化肥和农药的生产、劳动力的投入等。作物的碳足迹便是这些活动过程产生碳排放的总量。本研究以 CO_2、CH_4、N_2O 这 3 种气体来衡量碳排放量，最终统一转化为 CO_2 当量进行比较。

本研究中的碳排放量用公式(5)进行计算。

$$E_{i,j} = A_{ij} \cdot EF_{i,j} \tag{5}$$

式中：$E_{i,j}$ 为第 i 个要素在第 j 个省份的碳排放量，kg CO_2 eq；$A_{i,j}$ 为第 i 个要素在第 j 个省份的投入值，kg；$EF_{i,j}$ 为第 i 个要素在第 j 个省份的碳排放因子，kg CO_2 eq/kg。

在具体计算各因素时，$A_{i,j}$ 的计算应根据各因素特点具体分析。在考虑氮肥施加时，$EF_{i,j}$ 为 N_2O 的排放因子；在考虑氮肥的生产、运输过程时，EF 包括 CO_2、CH_4、N_2O 这 3 种气体；在其他因素计算时，EF 仅为 CO_2 的排放因子。以柴油的碳排放为例，$A_{di,j}$ 用公式(6) 进行计算。

$$A_{di,j} = M_j \cdot p \cdot \frac{Con_{di}}{Con} \cdot K_{di} \tag{6}$$

式中：$A_{di,j}$ 为第 j 个省份的柴油投入，kg；M_j 为第 j 个省份的燃料动力费，元；p 为能源价格，MJ/ 元；Con_{di} 为柴油的消费量，MJ；Con 为总燃料的消费量，MJ；K_{di} 为柴油的能量转化系数，kg/MJ。

2.5　数据来源

本研究使用的数据来源于国家统计年鉴以及相关的国内外文献。具体数据包括水稻、小麦、玉米生产全生命周期的产量、种植面积、氮肥、磷肥、钾肥、电力、燃料、机械、灌溉水、人力、农药、种子和农膜。能量当量和碳排放当量来源于部分国内外文献，具体来源见表 1、2。由于相关统计年鉴中缺失北京、天津、上海、青海、西藏、香港、澳门和台湾的数据，故本研究的计算中不涉及以上省份地区。

表 2 研究采用数据的来源文献

项目	参考文献	项目	参考文献
电力、柴油、汽油、煤炭	[27]~[30]	农药	[34]
人力、种子、农膜、氮肥、磷肥、钾肥	[29]	灌溉用水	[35]
机械	[31]~[33]	作物产量、种植面积	[29]

注:年鉴中未给出直接的电力、燃料数据,故本研究中使用电费、燃料动力费与当年的价格指数年鉴数据计算用电量与燃料用量。

2.6 热量分析

相比于作物产量而言,热量的产量更能反应出作物实际可养活的人口,主粮作物富含大量的热量,是人类生命活动的主要热量来源,也是本文聚焦的营养物质。小麦、玉米、水稻的热量含量数据取自 Smith 等[36]建立的 GENuS(Global Expanded Nutrient Supply)数据集,分别为 3 400、3 650、3 700 kcal/kg。

在粮食热量产出不变的前提下,单位热量的水、能消耗和碳排放总量越低,表明资源利用效率越高,热量生产力越高;反之,资源消耗越高,则热量生产力越低。某地区作物生产单位热量的水、能消耗、碳排放的计算方法相似,以水足迹为例,其计算如公式(7)所示。

$$CWF_{i,j} = \frac{WF_{\mathrm{proc},\,i,j}}{Cal_{i,j}} \tag{7}$$

式中:$CWF_{i,j}$ 为第 i 个地区第 j 种作物生产单位热量所消耗的水足迹,kg/Mcal;$WF_{\mathrm{proc},i,j}$ 为第 i 个地区第 j 种作物在生产过程中总的水足迹(以重量计),kg;$Cal_{i,j}$ 为第 i 个地区第 j 种作物生产的热量,Mcal。

为了衡量各地区的热量生产力,本文用最小-最大归一化的方法将数据线性映射到区间[0,1],以消除不同变量的单位差异。最后使用熵权法计算水、能、碳的权重系数,综合衡量各地区的热量生产力。

2.7 基于生产要素贡献值的区域差异计算

在区域差异的计算中,将生产单位热量所需的能量投入和碳足迹最少、最多的区域分别设置为高效区和低效区。在研究能量投入时,将 3 种作物的生产投入要素分为氮肥生产、种子、电力及燃料、灌溉水和其他;在研究碳足迹时,将小麦和玉米的生产投入要素分为氮肥生产、耕地排放、电力及燃料、灌溉水和其他,将水稻的生产投入要素分为氮肥生产、耕地排放、水稻淹水、灌溉水和其他,计算区域间差距及各投入要素的贡献值,计划制定不同的措施来降低低效区的能量投入和碳足迹,以缩小两者之间的差距。

对于同一种作物,生产要素贡献值的计算方法为公式(8)~(10)。

$$co_i = \frac{b_{l,i} - b_{h,i}}{low} \times 100\% \tag{8}$$

$$b_{l,i} = \frac{In_{l,i}}{Out_l} \tag{9}$$

$$b_{h,i} = \frac{In_{h,i}}{Out_h} \tag{10}$$

式中:co_i 为第 i 个要素在两区域差异中的贡献值,%;$b_{l,i}$ 为第 i 个要素在低效区生产单位热量所贡献的碳足迹,g CO_2 eq/Mcal;$b_{h,i}$ 为第 i 个要素在高效区的碳足迹,g CO_2 eq/Mcal;low 为低效区的碳足迹,g CO_2 eq/Mcal;$In_{l,i}$、$In_{h,i}$ 分别为第 i 个要素在低效区、高效区的碳足迹,g CO_2 eq;Out_l、Out_h 分别为低效区、高效区的热量产出量,Mcal;计算能量投入与碳足迹类似。

3 结果与分析

3.1 省际单位面积水、能、碳消耗

表 3 给出了我国 3 种主粮作物的单位面积平均水足迹、能量投入、碳足迹。由表 3 可见,我国水稻、小麦、玉米的平均水足迹分别为 5 520、2 673、1 910 t/hm^2,水稻的水足迹远大于另外两种作物,是主要耗水作物。3 种作物的灰水占比分别为 17.3%、46.6%、55.9%,水稻的水足迹主要是由灌溉水驱动,而玉米和小麦则由灌溉水和灰水共同驱动。

表 3 全国 3 种主粮作物单位面积平均水足迹、能量投入、碳足迹

作物	水足迹/(t·hm^{-2})	能量投入/(GJ·hm^{-2})	碳足迹/(kg CO_2 eq·hm^{-2})
小麦	2 673	27	3 804
水稻	5 520	22	10 722
玉米	1 910	20	2 782

图 1 给出了我国 3 种主粮作物单位面积水足迹、能量投入、碳足迹的省际分布。分析图 1 可知,宁夏回族自治区(下简称宁夏)的小麦水足迹最多(17 552 t/hm^2),黑龙江省最少(1 024 t/hm^2)。在水稻生产中,宁夏水足迹最多(31 081 t/hm^2),内蒙古自治区(下简称内蒙古)最少(1 112 t/hm^2);整体

而言，华东、华南沿海地区水足迹较内陆地区大；水稻整体水足迹远高于小麦、玉米，大部分省份集中在 3 000 ~ 6 000 t/hm^2 之间。就玉米而言，新疆维吾尔自治区（下简称新疆）水足迹最多（6 620 t/hm^2），河南省最少（1 218 t/hm^2）；西北地区水足迹较大，其他地区空间变异不大。

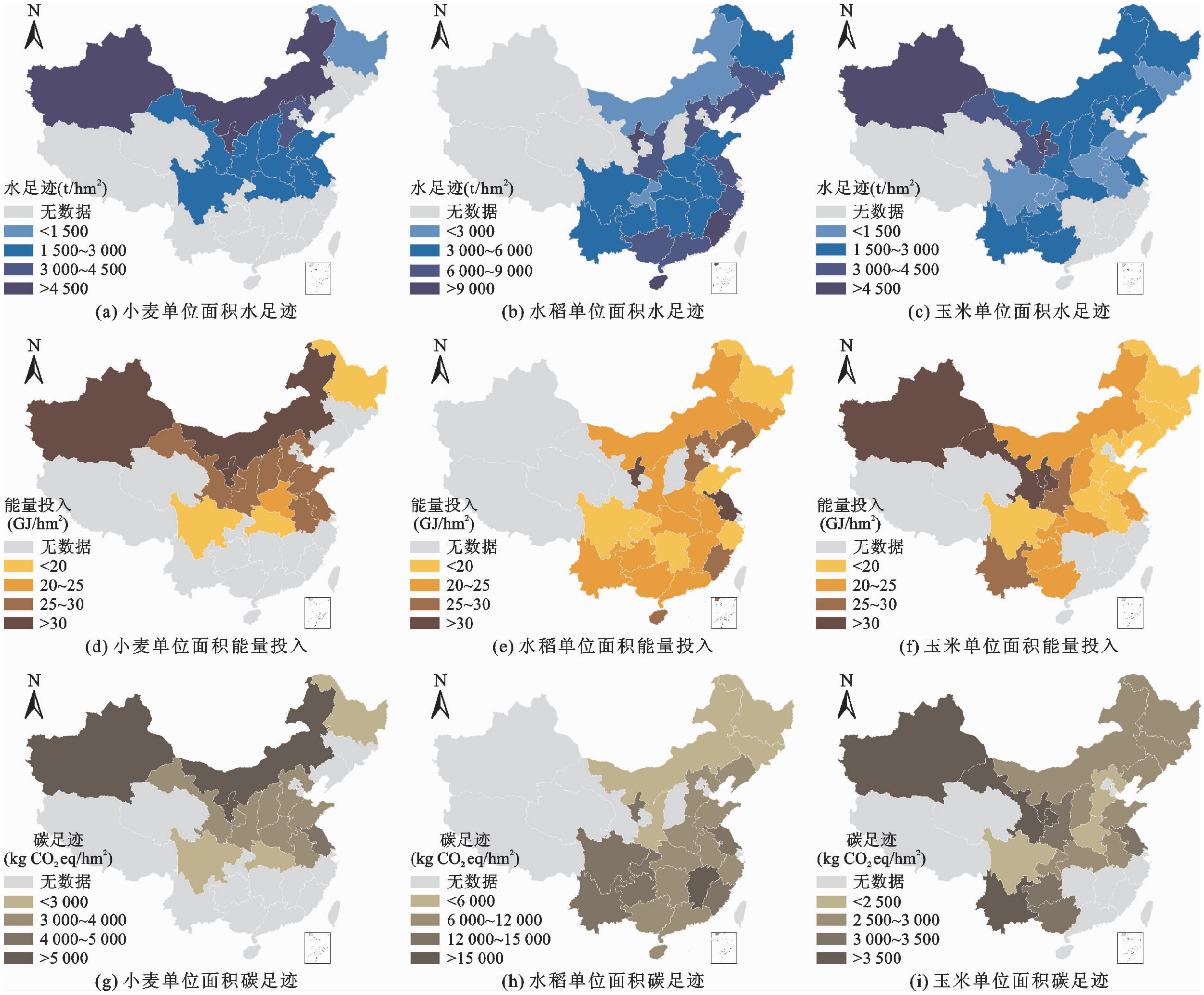


图 1　全国 3 种主粮作物单位面积水足迹、能量投入、碳足迹省际分布

（审图号：GS(2024)0650 号）

表 4 给出了我国 3 种主粮作物能量投入和碳足迹的各驱动因子占比。我国小麦、水稻、玉米单位面积的平均能量投入分别为 27、22、20 GJ/hm^2，由表 4 可以看出，氮肥生产的能量投入贡献最大，分别占 65.3%、61.3%、76.8%。灌溉水对水稻能量投入的贡献率为 20.8%，较玉米、小麦高 16% 左右，这是生产条件和供水需求不同造成的。内蒙古的小麦能量投入最多（45 GJ/hm^2），黑龙江省最少（14 GJ/hm^2）。水稻生产中，宁夏能量投入最多（61 GJ/hm^2），重庆市最少（14 GJ/hm^2）。就玉米而言，甘肃省能量投入最多（41 GJ/hm^2），河南省最少（15 GJ/hm^2）；西北地区的能量投入较大，华北、东北地区的投入较小，大部分省份集中在 15 ~ 20 GJ/hm^2 之间。

我国的小麦、水稻、玉米单位面积平均碳足迹分别为 3 804、10 722、2 782 kg CO_2 eq/hm^2。水稻远大于其他两种作物，是碳足迹的主要作物来源。氮肥生产、灌溉水、耕地排放对小麦和玉米碳足迹的总贡献高于 90%，而水稻淹水在水稻碳排放中占主导地位，占比达到 64.5%。宁夏的小麦每公顷碳足迹最多（6 778 kg CO_2 eq/hm^2），黑龙江省最少（1 762 kg CO_2 eq/hm^2）。水稻生产中，江西省碳足迹最多（15 069 kg CO_2 eq/hm^2），内蒙古最少（4 400 kg CO_2 eq/hm^2），多数省份集中在 6 000 ~ 12 000 kg CO_2 eq/hm^{2}之间，沿海各省比内陆略高。就玉米而言，新疆碳足迹最多（4 986 kg CO_2 eq/hm^2），河南省最少（2 081 kg CO^2 eq/hm^2）；西北地区的碳足迹

最多,其他省份差异不大,集中在 2 500 ~ 3 000 kg CO_2 eq/hm^2 之间。

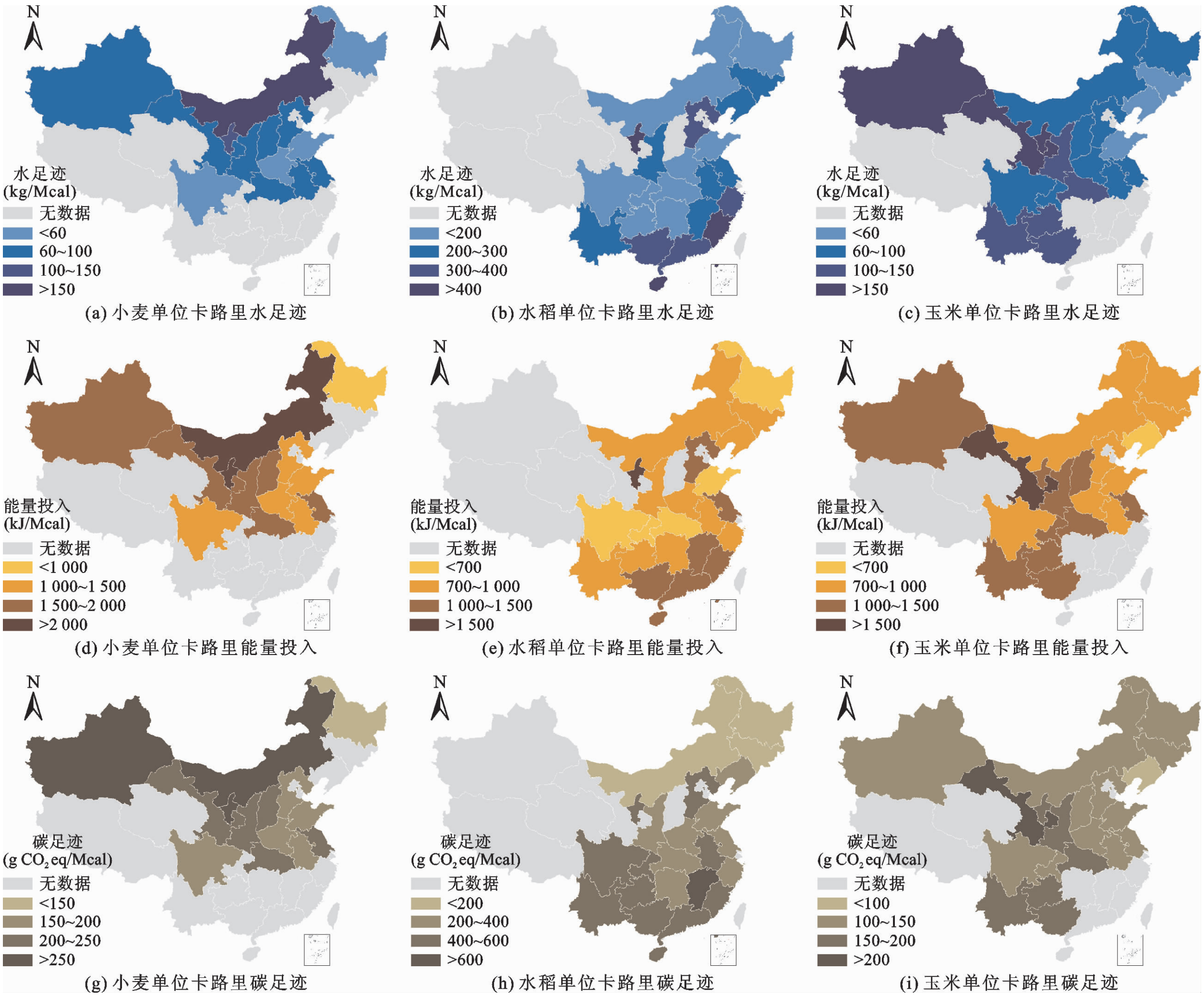
3.2 省际单位热量水、能、碳消耗

图 2 给出了我国 3 种主粮作物单位热量水足迹、能量投入、碳足迹的省际分布,根据图 2 汇总计算了全国 7 大地区的分布,结果见表 5。由表 5 可见,小麦、水稻、玉米单位热量的平均水足迹分别为 134、209、83 kg/Mcal;平均能量投入分别为 1 375、848、868 kJ/Mcal;平均碳足迹分别为 191、408、121 g CO_2 eq/Mcal。由于西北地区和华南地区的灌溉水和氮肥投入较高,导致这两个地区的水足迹和能量投入均较高。水稻的碳足迹显著高于其他两种作物,加之华南地区水稻种植面积大,致使该地区碳足迹高于其他地区。

表 4 全国 3 种主粮作物能量投入和碳足迹的各驱动因子占比

项目	作物	驱动因子占比/%				
		氮肥生产	种子运输	电力及燃料	灌溉水	其他
能量投入	小麦	65.3	18.5	0.3	5.3	10.6
	水稻	61.3	2.7	1.4	20.8	13.8
	玉米	76.8	2.4	0.2	4.3	16.3

项目	作物	驱动因子占比/%				
		氮肥生产	耕地排放	电力及燃料(水稻淹水)	灌溉水	其他
碳足迹	小麦	48.8	31.3	0.2	9.2	10.5
	水稻	13.2	8.8	64.5	10.3	3.2
	玉米	57.2	23.1	0.1	7.4	12.2



(a) 小麦单位卡路里水足迹 (b) 水稻单位卡路里水足迹 (c) 玉米单位卡路里水足迹

(d) 小麦单位卡路里能量投入 (e) 水稻单位卡路里能量投入 (f) 玉米单位卡路里能量投入

(g) 小麦单位卡路里碳足迹 (h) 水稻单位卡路里碳足迹 (i) 玉米单位卡路里碳足迹

图 2 全国 3 种主粮作物单位热量水足迹、能量投入、碳足迹省际分布

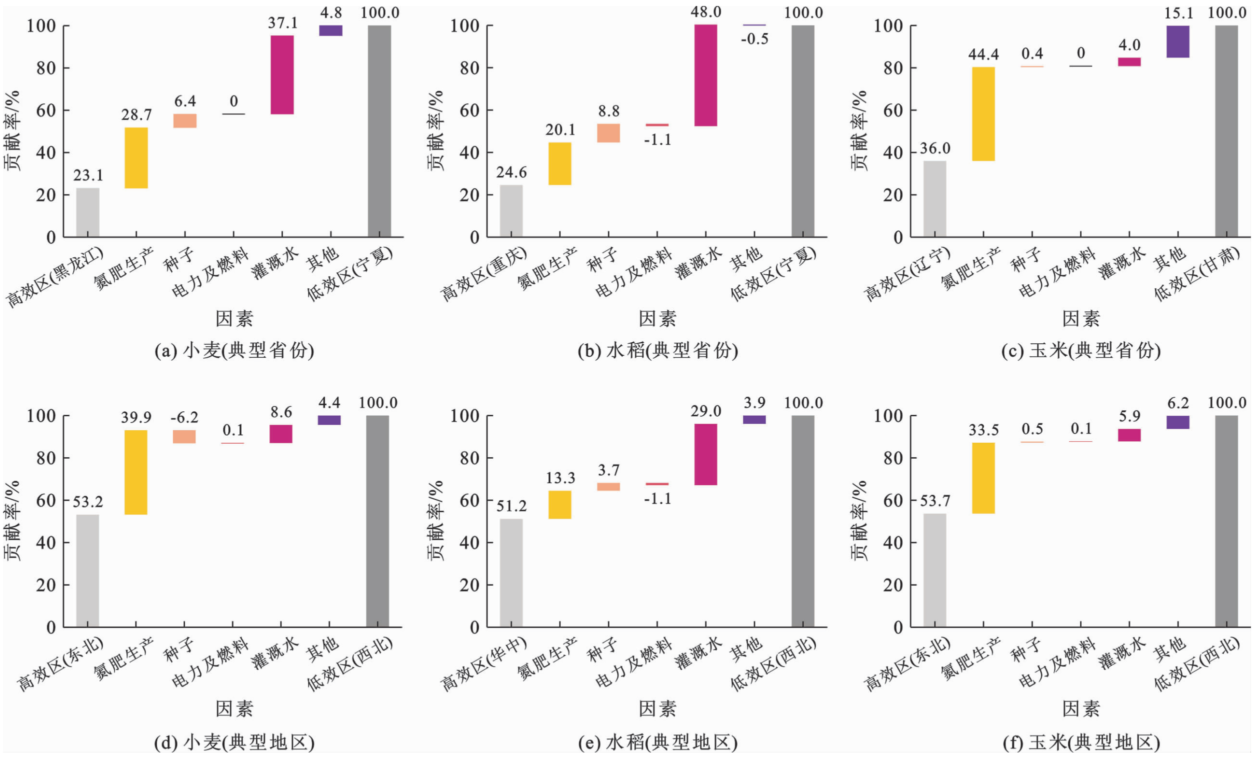
表 5　全国 7 大地区 3 种主粮作物单位热量平均水足迹、能量投入、碳足迹

地区	水足迹/($kg \cdot Mcal^{-1}$)				能量投入/($kJ \cdot Mcal^{-1}$)				碳足迹/($g\ CO_2\ eq \cdot Mcal^{-1}$)			
	小麦	水稻	玉米	作物平均	小麦	水稻	玉米	作物平均	小麦	水稻	玉米	作物平均
东北地区	77	182	64	100	1 047	738	726	731	133	202	107	136
华北地区	184	121	87	109	1 631	864	819	998	207	242	108	132
华东地区	106	258	63	162	1 352	983	800	1 066	191	491	115	304
华南地区		332	123	309		1 124	1 226	1 135		513	187	477
华中地区	98	140	69	111	1 113	695	825	866	164	371	117	247
西北地区	297	539	174	225	1 969	1 357	1 354	1 554	254	295	176	205
西南地区	114	151	90	122	1 172	719	1 119	918	168	502	152	331
地区平均	134	209	83		1 375	848	868		191	408	121	

图 3 给出了全国典型省份和地区小麦、水稻、玉米生产中单位热量能量投入差异的贡献值及驱动因素。从图 3 中投入要素角度分析，3 种作物的氮肥、灌溉水是缩小区域差距的主要驱动因素，但其中灌溉水对玉米的贡献（4.0% ~5.9%）小于小麦（8.6% ~37.1%）和水稻（29.0% ~48.0%）。

在产生碳足迹的区域差距对比中，全国典型省份和地区小麦、水稻、玉米生产各要素在生产单位热量碳足迹中所产生区域差异的贡献值如图 4 所示。分析图 4 可知，对于小麦、玉米而言，氮肥生产、灌溉水是缩小区域差距的主要驱动因素，这与区域能量投入差异的情况相似。而水稻淹水（44.8% ~65.1%）是水稻的主要驱动因素，这是因为在水稻淹水过程中，土壤进入厌氧状态，为产甲烷菌提供了理想的生存环境，土壤中的有机质被分解后生成了大量甲烷[37]。

各区域可以根据此计算结果，通过降低主要驱动因素的投入来缩小碳足迹的区域差距。



(a) 小麦(典型省份)　(b) 水稻(典型省份)　(c) 玉米(典型省份)
(d) 小麦(典型地区)　(e) 水稻(典型地区)　(f) 玉米(典型地区)

图 3　全国典型省份和地区 3 种主粮作物生产中单位热量能量投入差异的贡献值及驱动因素

注：图中横坐标左、右两侧分别为全国尺度上的高效区和低效区，上方数字以相对值表示高效区、低效区生产单位热量所需的能量投入；中间的 5 列代表缩小差异的不同策略及其贡献率；负数代表该因素在低效区的相对投入量要低于高效区。

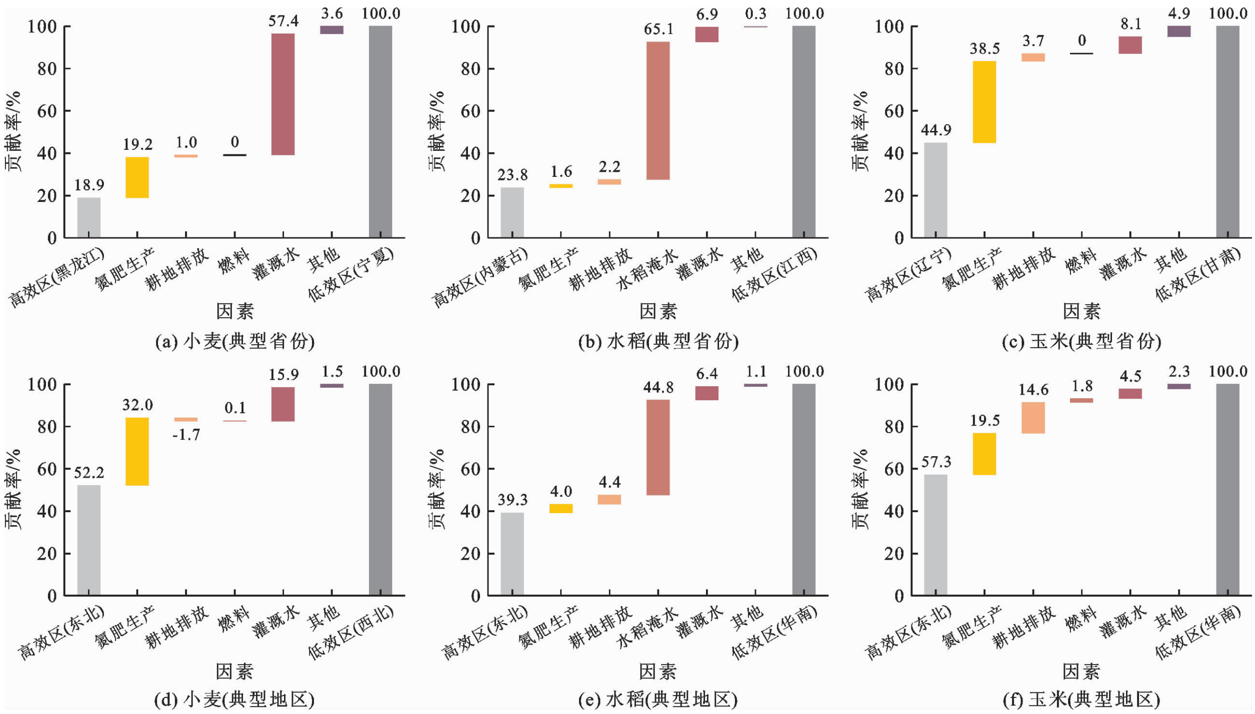


图4 全国典型省份和地区3种主粮作物生产中单位热量碳足迹差异的贡献值及驱动因素

3.3 不同分区作物综合热量生产力评价

前文已分析了各地区生产单位热量的水、能、碳的代价,但仅从单一层面探讨热量生产力是不全面的,需通过一种方法进行整合。本研究采用熵权法,依据上文7大地区生产单位热量所需的平均水、能、碳数据,计算得出其权重系数分别为0.277、0.450、0.273。其中,能量投入权重最高,水足迹与碳足迹权重相近。将0~1标准化后的数据代入权重系数进行计算,结果表明:东北地区是热量生产力最高的地区,其自然条件优渥、土壤肥力较高、水能碳综合投入最低,因而建议向东北地区转移种植规模,以更低的代价生产热量;华南地区是热量生产力最低的地区,这归因于其水稻种植面积较大,生产单位热量所需的水、碳足迹较高。同理,计算各省份生产单位热量所需的平均水、能、碳,其权重系数分别为0.340、0.333、0.327,得出东北地区的3个省份的热量生产力最高,华南地区的广东省、福建省、海南省是热量生产力最低的3个省份,这与全国7大地区的热量生产力情况具有高度的一致性,具体计算结果如表6所示。

表6 所研究的各省份综合热量生产力计算结果

省份（区、市）	平均水足迹	平均能量投入	平均碳足迹	综合投入	生产力排名
吉林	0.070	0.030	0.000	0.034	1
辽宁	0.092	0.007	0.042	0.047	2
黑龙江	0.133	0.014	0.034	0.061	3
河南	0.072	0.175	0.062	0.103	4
内蒙古	0.131	0.177	0.002	0.104	5
山东	0.070	0.216	0.042	0.110	6
河北	0.122	0.254	0.025	0.134	7
重庆	0.000	0.000	0.420	0.137	8
四川	0.149	0.051	0.337	0.178	9
山西	0.135	0.377	0.045	0.186	10
湖北	0.199	0.182	0.331	0.237	11
湖南	0.215	0.053	0.517	0.260	12
安徽	0.211	0.363	0.306	0.293	13
陕西	0.183	0.652	0.128	0.321	14
云南	0.220	0.439	0.365	0.340	15
江苏	0.346	0.396	0.321	0.354	16
贵州	0.241	0.341	0.572	0.383	17
新疆	0.507	0.602	0.135	0.417	18
浙江	0.626	0.295	0.570	0.498	19
甘肃	0.325	1.000	0.189	0.505	20
广西	0.519	0.446	0.584	0.516	21
江西	0.423	0.270	1.000	0.561	22
宁夏	0.784	0.694	0.207	0.565	23
广东	0.638	0.339	0.720	0.565	24
福建	0.910	0.372	0.703	0.663	25
海南	1.000	0.474	0.782	0.754	26

4 讨 论

本研究通过在省际尺度上计算小麦、水稻、玉米3种主粮作物的水、能消耗和碳排放情况,探究了各投入要素在区域差异中的相对贡献,评估了各区域

的热量生产力。其中,玉米综合投入最少,小麦能耗最高;水稻耗水与碳排放均居首位,投入代价最大,这与 Qian 等[38]的研究结论一致。从水-能-碳耦合视角出发,适度压缩水稻种植比例并扩大玉米种植比例,可望实现不同区域尺度农业节水、节能与减排的协同调控。王楚凡等[39]通过优化西北地区种植结构,将水稻面积调减、玉米与小麦扩种,实现了节水与减碳的双重效益。韩路[40]基于历史年份的数据发现鄂北岗地的玉米播种面积呈上升趋势,而水稻呈下降趋势,对作物水分利用率的提升显著。就生产效率而言,东北地区最适合主粮作物的种植,可以适当向该地区转移种植规模,以较低的投入产出更多的粮食,Huang 等[41]的研究同样得出了这种趋势。本研究受县级统计数据缺失所限,仅能在省域尺度展开,未能捕捉省内差异。下一步应补齐县域数据,进一步开展县域尺度的研究,以提升空间精度与政策靶向性。

5 结 论

本文在水-能-碳的视角下对中国主粮作物的热量生产力进行了评估,得出以下主要结论。

(1)小麦、水稻、玉米单位面积的水足迹分别为 2 673、5 520、1 910 t/hm^2;能量投入分别为 27、22、20 GJ/ hm^2;碳足迹分别为 3 804、10 722、2 782 kg CO_2 eq/hm^2。单位热量的水足迹分别为 134、209、83 kg/Mcal;能量投入分别为 1 375、848、868 kJ/Mcal;碳足迹分别为 191、408、121 g CO_2 eq/Mcal。

(2)小麦和玉米的水足迹由灌溉水和灰水共同驱动,而水稻主要是由灌溉水驱动;氮肥生产在 3 种作物的能量投入中起主要驱动作用;小麦和玉米碳足迹的主要驱动因素是氮肥生产,其次是耕地排放,而水稻的是水稻淹水。氮肥生产、灌溉水和水稻淹水是减少区域间生产效率差距的主要因素。

(3)东北地区热量生产力最高,华南地区最低。适当向东北地区转移种植规模,可以缓解中国的资源短缺和环境问题,并保障粮食安全。

参考文献:

[1] 中华人民共和国统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2024.

[2] CHEN Xiaohui, MA Changcheng, ZHOU Huimei, et al. Identifying the main crops and key factors determining the carbon footprint of crop production in China, 2001 – 2018 [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 172: 105661.

[3] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报(2023)[EB/OL]. (2024-04-14)[2025-04-03]. http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/202406/t20240614_1713318.html.

[4] 王钰乔,濮 超,赵 鑫,等. 中国小麦、玉米碳足迹历史动态及未来趋势[J]. 资源科学,2018,40(9):1800-1811.

[5] YAN Jie, KONG Zhaoyang, LIU Yize, et al. A high-resolution energy use efficiency assessment of China's staple food crop production and associated improvement potential [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 188: 113789.

[6] 王红瑞,李晓军,张 力,等. 水-能源-碳排放复杂关系研究进展及展望[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2023,21(1):13-21.

[7] KIKSTRA J S, NICHOLLS Z R J, SMITH C J, et al. The IPCC Sixth Assessment Report WGIII climate assessment of mitigation pathways: from emissions to global temperatures [J]. Geoscientific Model Development, 2022, 15(24): 9075-9109.

[8] LIU Yize, GU Weiyi, LIU Beibei, et al. Closing greenhouse gas emission gaps of staple crops in China[J]. Environmental Science & Technology, 2022, 56(13): 9302-9311.

[9] CARLSON K M, GERBER J S, MUELLER N D, et al. Greenhouse gas emissions intensity of global croplands[J]. Nature Climate Change, 2017, 7(1): 63-68.

[10] 周露明,谢兴华,朱珍德,等. 基于水-能源-粮食纽带关系的农业资源投入产出效率研究[J]. 农业资源与环境学报,2020,37(6):875-881.

[11] 杨 屹,张园园. 呼包鄂榆资源型城市群"水-能-碳"耦合变化及影响因素[J]. 中国环境科学,2023,43(11): 6212-6224.

[12] 马斯霜,白海波,惠 建,等. 小麦主要品质性状研究进展[J]. 中国农学通报,2021,37(24):1-5.

[13] CASSIDY E S, WEST P C, GERBER J S, et al. Redefining agricultural yields: from tonnes to people nourished per hectare[J]. Environmental Research Letters, 2013, 8(3): 34015.

[14] 王腾飞,马 霞,刘金龙,等. 引黄灌区复种饲用燕麦种植模式产量、品质及经济效益分析[J]. 草业学报,2025,34(4): 27-37.

[15] 蒋丛泽,受 娜,高 玮,等. 陇东旱塬区不同青贮玉米品种生产性能和营养品质综合评价[J]. 草业学报,2023,32(7):216-228.

[16] WANG Jiahui, SUN Shikun, YIN Yali, et al. Water – food – carbon nexus related to the producer – consumer link: a review[J]. Advances in Nutrition, 2022, 13(3): 938-952.

[17] KONG Zhaoyang, DONG Xiucheng, LIU Guixian. Coal-based synthetic natural gas vs. imported natural gas in China: a net energy perspective[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 131: 690-701.

[18] ESKANDARI H, ATTAR S. Energy comparison of two rice cultivation systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 42: 666-671.

[19] LAL B, GAUTAM P, NAYAK A K, et al. Energy and carbon budgeting of tillage for environmentally clean and resilient soil health of rice – maize cropping system[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 226: 815-830.

[20] WEI Xuemeng, CHEN Bin, QU Yinghua, et al. Emergy analysis for 'Four in One' peach production system in Beijing[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2009, 14(3): 946-958.

[21] TABATABAEEFAR A, EMAMZADEH H, VARNAMKHASTI M G, et al. Comparison of energy of tillage systems in wheat production[J]. Energy, 2009, 34(1): 41-45.

[22] YUAN Shen, PENG Shaobing. Input – output energy analysis of rice production in different crop management practices in central China[J]. Energy, 2017, 141: 1124-1132.

[23] XU Xiaoming, LAN Ying. Spatial and temporal patterns of carbon footprints of grain crops in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 146: 218-227.

[24] 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.

[25] CUI Jixiao, SUI Peng, WRIGHT D L, et al. Carbon emission of maize-based cropping systems in the North China Plain[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 213: 300-308.

[26] LIANG Dijuan, LU Xi, ZHUANG Minghao, et al. China's greenhouse gas emissions for cropping systems from 1978 – 2016[J]. Scientific Data, 2021, 8(1): 171.

[27] 中华人民共和国统计局.中国能源统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2023.

[28] 中华人民共和国统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2023.

[29] 国家发展和改革委员会价格司,国家发展和改革委员会价格成本和认证中心.全国农产品成本收益资料汇编[M].北京:中国统计出版社,2023.

[30] XU Bo, FENG Lianyong, WEI W X, et al. A preliminary forecast of the production status of China's daqing oil field from the perspective of EROI[J]. Sustainability, 2014, 6(11): 8262-8282.

[31] 国家统计局农村社会经济调查司.中国农村统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2023.

[32] 中国机械工业年鉴编辑委员会,中国农业机械工业协会.中国农业机械工业年鉴[M].北京:机械工业出版社,2023.

[33] 赵荣钦,秦明周.中国沿海地区农田生态系统部分碳源/汇时空差异[J].生态与农村环境学报,2007(2):1-6+11.

[34] ZHANG Guo, WANG Xiaoke, ZHANG Lu, et al. Carbon and water footprints of major cereal crops production in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 194: 613-623.

[35] ZHOU Feng, BO Yan, CIAIS P, et al. Deceleration of China's human water use and its key drivers[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2020, 117(14): 7702-7711.

[36] SMITH M R, MICHA R, GOLDEN C D, et al. Global Expanded Nutrient Supply (GENuS) model: a new method for estimating the global dietary supply of nutrients[J]. PLOS One, 2016, 11(1): e0146976.

[37] SHEN Wanyu, YANG Ji, QIONG Huang, et al. Differences in methanogenic pathways and communities in paddy soils under three typical cropping modes[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2023, 128(11): e2023JG007443.

[38] QIAN Haoyu, ZHU Xiangchen, HUANG Shan, et al. Greenhouse gas emissions and mitigation in rice agriculture[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2023, 4(10): 716-732.

[39] 王楚凡,牛 俊.西北地区主要粮食作物种植的水、碳足迹及布局优化[J].中国农业科学,2024,57(6):1137-1152.

[40] 韩 路.气候变化对鄂北岗地粮食作物种植结构的影响[J].现代农业科技,2025(12):109-113.

[41] HUANG Hua, HOU Mengyang, YAO Shunbo. Urbanization and grain production pattern of China: dynamic effect and mediating mechanism[J]. Agriculture, 2022, 12(4): 539.