

# 基于 LCA+DEA 方法的玉米 种植效率与温室气体减排潜力研究

宋文丽, 王文芳, 杨 振\*

(华中师范大学城市与环境科学学院, 武汉 430079)

**摘要:** 在推进实施碳达峰、碳中和战略背景下,该文根据调查统计资料,利用生命周期评价(Life cycle assessment, LCA)与数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)相结合的方法对中国玉米的种植效率及温室气体减排潜力进行实证研究,结果表明:1) 2019 年,20 个主产省份的玉米种植效率均值为 0.933 2,其中 11 个 DEA 低效省份效率介于 0.621 7~0.975 4 之间,平均值为 0.772 6. 种植效率对农药投入用量的敏感性最高,种子次之,柴油和化肥较低. 2) 低效省份当前每公顷排放的温室气体数量平均值为 3 310.56 kg CO<sub>2</sub>-eq,其中来自化肥的排放贡献率(75.10%)最高,柴油(19.98%)次之,农药(3.59%)和种子(1.32%)较低. 在化肥排放结构中,氮肥排放占比(54.84%)最高,复合肥(43.45%)次之,磷肥(1.70%)和钾肥(0.02%)较低. 3) 为达到 DEA 有效,低效省份每公顷可以削减的温室气体介于 30.69~2 345.02 kg CO<sub>2</sub>-eq 之间,平均值为 844.64 kg CO<sub>2</sub>-eq,其中,山东、河南两省的减排潜力分居全国前两位,总体上看减排潜力与种植效率呈反向变化关系. 该项研究可望为玉米种植的低碳化导控路径设计提供参考依据.

**关键词:** 种植效率;减排潜力;LCA+DEA;玉米作物

**中图分类号:** S162.5+3

**文献标志码:** A

**开放科学(资源服务)标志码(OSID):**



为了减少气候变暖给人类带来的直接或间接危害,2015 年达成的《巴黎协定》提出应把全球平均气温较工业化前水平升高幅度控制在 2 °C 之内,并为把升温幅度控制在 1.5 °C 之内而努力<sup>[1]</sup>. 当前,农业生产贡献了全球大约 1/5 的温室气体,被大部分《巴黎协定》缔约方列为应对气候变化的重要领域<sup>[2]</sup>. 玉米原产于美洲,是世界上主要的粮食作物和饲料作物之一. 虽然不同国家和地区种植过程中投入的生产要素不尽相同,但通常包括种子、化肥、农药、地膜、柴油、电力等几种类型<sup>[3]</sup>. 这些要素在各自的生产、使用过程中排放了可观的温室气体,对农业领域应对气候变化的努力构成挑战.

近年来,有关农作物种植的减排理论、方法与技术探索引起学界广泛关注,普遍认识到科学测算减排潜力是指导减排行动的基础工作之一<sup>[4]</sup>. 作为一种识别、量化和评估产品环境影响的有效方法<sup>[5-6]</sup>,生命周期评价(life cycle assessment, LCA)能够在一定程度上明确作物种植的温室气体排放源、排放量等问题,但无法提供用于减排潜力测算

的进一步信息<sup>[7]</sup>. 根据可持续发展理论和有关指导方针,任何旨在减轻环境影响的策略都应该以提高投入要素的环境效率行动为基础,以较低的环境影响创造更多的价值<sup>[8]</sup>. 从这一理念出发,以“相对效率”概念为基础的数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)被越来越多的学者纳入作物减排潜力测算的“工具箱”. DEA 方法起源于 Charnes 等人 1978 年所做的开创性工作<sup>[9]</sup>,针对多个同质性决策单元(decision making unit, DMU),该方法能够识别出技术有效、无效单元,并能够确定无效单元投入/产出的改进目标值(即为了将无效单元转化为有效单元需要达到的投入/产出水平),为投入/产出结构的优化提供参照基准. 作为一种非参数方法,DEA 在评价多投入、多产出系统效率方面有独到之处<sup>[10]</sup>,它无需明确指定一个先验生产函数来解释投入、产出之间的关系,无需定义不同投入之间、产出之间的相对权重,也不必考虑各指标间的单位和量级差异. 在众多 DEA 方法中径向模型较为常用,但这一类模型对低效率程度的测量只

收稿日期:2022-01-12.

基金项目:教育部人文社会科学基金项目(19YJCZH220).

\* 通信联系人. E-mail: yangzhenpp@126.com.

包含所有投入(产出)等比例缩减(增加)的比例,未考虑当前状态与改进目标值之间差距的松弛改进部分<sup>[11]</sup>.为克服这一不足,Tone K 等提出基于松弛测度的 SBM 模型(slack based measure, SBM)<sup>[12]</sup>.同时,为进一步区分效率值均为 1 的有效单元,SBM 模型与 Andersen 等提出的超效率模型(super-efficiency model)结合起来,形成了所谓的超效率 SBM 模型<sup>[13]</sup>.当前,已经有不少文献应用 SBM 模型或超效率 SBM 模型对部分农作物进行了研究,但大多止步于对种植效率的测算及其对比分析上<sup>[14-15]</sup>,鲜有论及温室气体减排潜力方面的成果.考虑到 LCA、DEA 方法的各自优势及内在关联,Lozano 等提出将两种方法联合起来,建立技术效率与环境影响之间的直接联系<sup>[16]</sup>,以更有效地探测效率低下的原因以及不必要的环境影响.这一思路十分新颖,被认为是解析可持续发展目标的一个有力工具,当前已逐步应用于小麦、马铃薯、棉花、槟榔等种植环境问题分析中<sup>[17-20]</sup>,为生产者、政策制定者权衡农业生产与环境影响之间的关系提供了良好视角.

在国内,LCA+DEA 方法尚未引起重视,有关农业领域的应用成果未见系统报道.玉米在我国粮食安全体系中占据重要地位,近年种植面积基本稳定在 4 300 万  $\text{hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ ,产量在 2.5 亿  $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$  上下,长期居世界第二位.随着玉米种植过程现代化水平的不断提高,直接和间接排放的温室气体越来越多,减排压力巨大.基于上述分析,本研究在碳达峰、碳中和战略目标指引下,引入 LCA+DEA 方法测算我国玉米种植效率及温室气体减排潜力,为农业生产的低碳化导控路径设计提供参考依据.

## 1 研究思路与方法

### 1.1 研究思路

我国玉米主产区涵盖河北、山西、内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江、江苏、安徽、山东、河南、湖北、广西、重庆、四川、贵州、云南、陕西、甘肃、宁夏、新疆等 20 个省级行政区.这些地区集中了全国 90% 以上的播种面积和产量,本研究将其定义为应用于数据包络分析的决策单元.借鉴 LCA+DEA 分析中常用的“五步法”思路<sup>[21]</sup>,设定玉米种植效率与温室气体减排潜力测算分析框架(图 1),主要步骤如下:1) 明晰问题背景与目标,明确各个决策单元有关玉米种植的投入/产出指标,收集基础数据.2) 利用 DEA 方法测算每个决策单元的种植效率,确定低效单元及其在生产前沿上的投入目标值.3)

利用 LCA 方法测算每个低效单元当前投入对应的温室气体排放量.4) 计算每个低效单元投入目标值对应的排放量.5) 测算每个低效单元的当前排放量与目标排放量的差距,确定减排潜力,解析低碳化导控策略.

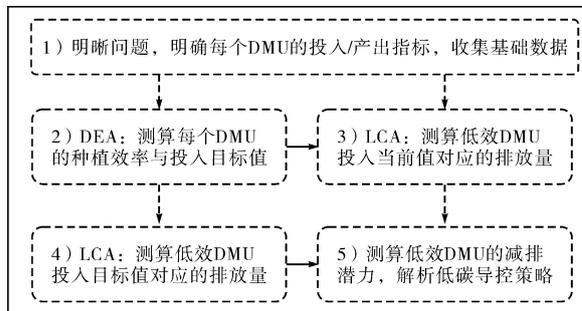


图 1 玉米种植效率与减排潜力测算分析框架

Fig. 1 Calculation and analysis framework of planting efficiency and potential GHG reduction

### 1.2 指标与方法

1.2.1 指标与数据 根据 LCA 应用需求和 DEA 建模需要(如满足“拇指法则”等)并考虑数据的可得性,确定玉米种植投入、产出指标.1) 投入指标,主要考虑当年投入的、与碳排放有关的核心生产要素.当前,我国玉米种植已实现商品化供种,播种后通常需要喷洒适量农药防治病虫害,施用足量化肥补充土壤肥力,并根据水分盈亏状况及时排灌.参考《全国农产品成本收益资料汇编 2020》<sup>[22]</sup>中提供的数据,玉米种植中对地膜和电力的消耗普遍很少,故选择种子、农药、化肥和柴油作为投入要素,将各要素的每公顷用量作为投入指标.其中,种子和各类化肥(氮肥、磷肥、钾肥、复混肥等)的用量数据直接取自上述汇编资料.对农药和柴油用量,根据市场价格和上述汇编资料中提供的相应支出项进行折算.其中,农药市场综合价设定为 30.0 元  $\cdot \text{kg}^{-1}$ ;柴油成本占机械作业费的 1/3,市场价设定为 6.7 元  $\cdot \text{kg}^{-1}$ .2) 产出指标.农户从事玉米种植的目的在于收获玉米实物,以及出售部分实物获取收入两个方面.两类收益密切相关,且后者取决于前者,故本研究将实际收获的按原粮(标准水分)计算的玉米粒重量作为产出指标,不考虑秸秆、玉米芯等副产品的收获量,数据直接取自上述汇编资料.

1.2.2 生命周期评价方法 根据国际标准化组织(ISO)制订的 LCA 相关流程量化各项投入的温室气体,排放系数以每单位投入品排放的生命周期二氧化碳(当量)表示,功能单位为 1 kg.由于我国本

土化的 LCA 数据库研发工作尚处于起步阶段<sup>[23]</sup>, 这里使用联合国粮食及农业组织 (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) 开发推广的 Agri-footprint 5.0 作为背景数据库, 采用联合国政府间气候变化专门委员会 (Intergovernment Panel on Climate Change, IPCC) 提出的 IPCC-2013 方法测算各投入要素的温室气体排放系数。对二氧化碳以外的温室气体, 根据其全球增温潜势 (global warming potential, GWP) 折算为二氧化碳 (当量), 时间尺度统一为 100 年。其中, 按照从“摇篮”到“大门”的历程对种子和农药进行排放系数测算, 所得结果考虑了相关原材料的收集、加工、产品制造过程; 对化肥和柴油则同时考虑了原材料收集、加工、产品制造与农田使用过程。利用目前广泛使用的生命周期评估专业软件 SimaPro 9 Developer 进行计算, 显示种子、农药、柴油的排放系数分别为  $1.137\ 1\ \text{kg CO}_2\text{-eq} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $9.865\ 0\ \text{kg CO}_2\text{-eq} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $8.798\ 9\ \text{kg CO}_2\text{-eq} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 氮肥 (尿素)、磷肥 (过磷酸钙)、钾肥 (氯化钾)、复合肥 (NPK: 15-15-15) 的排放系数分别为  $3.338\ 6\ \text{kg CO}_2\text{-eq} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $1.828\ 8\ \text{kg CO}_2\text{-eq} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.153\ 7\ \text{kg CO}_2\text{-eq} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.890\ 5\ \text{kg CO}_2\text{-eq} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2.3 数据包络分析方法 由于温室气体主要来源于投入要素的生命周期排放, 减少投入是实现减排的可行举措, 也是生产者容易理解和操作的视角; 同时, 由于各省份所处的规模报酬阶段 (递增、不变、递减) 不尽相同, 并非全部处于最优规模, 因此选择基于投入导向 (input-oriented, IO) 和规模报酬可变 (variable returns to scale, VRS) 的 SBM 模型测算玉米种植效率。根据 Tone 等提出的“至强有效前沿最远距离”方法<sup>[12]</sup>, 上述 SBM 模型的生产可能集  $P$  以及效率  $\rho$  的测算方法, 分别为:

$$P = \left\{ (x, y) \mid x \geq \sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j, y \leq \sum_{j=1}^n y_{rj} \lambda_j \right\}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \rho &= \min \left[ 1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m s_i^- / x_{ik} \right], \\ \text{s. t. } &\sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j + s_i^- = x_{ik}, \\ &\sum_{j=1}^n y_{rj} \lambda_j \geq y_{rk}, \\ &\lambda, s^- \geq 0, \end{aligned} \quad (2)$$

式(1)、(2)中,  $x_{ij}$ 、 $y_{rj}$ 、 $\lambda_j$  分别表示决策单元  $j$  的第  $i$  项投入、第  $r$  项产出与组合系数;  $x_{ik}$ 、 $y_{rk}$  表示被评

价单元  $k$  的第  $i$  项投入与第  $r$  项产出;  $m$  为投入总项数,  $n$  为决策单元总数;  $s_i^-$  为第  $i$  项投入的松弛量;  $\rho$  表示被评价单元  $k$  的玉米种植效率,  $0 \leq \rho \leq 1$ , 等于 1 说明该单元处于生产前沿 (production frontier) 上, 称为 DEA 有效;  $0 \leq \rho < 1$  说明该单元偏离生产前沿, 称为 DEA 无效, 数值越低越低效。式(2)通常被称为标准 SBM 模型, 无法区分效率均为 1 的有效单元。超效率 SBM 模型将被评价的有效单元从参考集中剔除, 参考其它单元构成的前沿得到新的相对效率值, 从而实现有效单元的区分<sup>[13]</sup>。投入导向的超效率 SBM 模型为:

$$\begin{aligned} \rho_{SE} &= \min \left[ 1 + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m s_i^- / x_{ik} \right], \\ \text{s. t. } &\sum_{j=1, j \neq k}^n x_{ij} \lambda_j - s_i^- \leq x_{ik}, \\ &\sum_{j=1, j \neq k}^n y_{rj} \lambda_j \geq y_{rk}, \\ &\lambda, s^- \geq 0. \end{aligned} \quad (3)$$

因运算量较大, 利用数据包络分析专业软件 MaxDEA8.2 对式(2)、(3)进行计算。

1.2.4 温室气体减排潜力测算 生产前沿是投入产出组合可能集的边界, 代表了当前最优的投入模式。部分决策单元落在边界“下方”, 它们在生产前沿上的投影点对应的投入用量是其投入的最优目标值。在保持产出不变的情况下, 目标值与当前值之间的差距 (即投入松弛) 刻画了当前投入用量的潜在削减水平。温室气体减排潜力测算公式为:

$$P_k = \sum_{i=1}^m (x_{ik} - g_{ik}) \times ef_i, \quad (4)$$

式中,  $P_k$  表示低效单元  $k$  的温室气体减排潜力;  $x_{ik}$ 、 $g_{ik}$  表示第  $i$  项投入的当前用量与目标值;  $ef_i$  表示第  $i$  项投入的排放系数。

## 2 研究结果与分析

### 2.1 投入导向的玉米种植效率特征

近年来, 我国玉米种植的现代化程度有了很大提高, 基本实现了商品化供种, 利用农药防治病虫害成为常态, 各类化学肥料替代了以前常用的有机肥, 农业机械则解放了大部分人力、畜力。根据《全国农产品成本收益资料汇编 2020》提供的调查数据, 20 个主产省份平均每公顷的种子、农药、化肥、柴油用量分别为  $29.55\ \text{kg}$ 、 $9.15\ \text{kg}$ 、 $365.4\ \text{kg}$ 、 $57.9\ \text{kg}$ , 玉米产量为  $7\ 558.5\ \text{kg}$ 。不同省份有关玉米种植的自然、人文条件不尽相同, 基于投入—产出组合状况的种植效率差别较大。根据式(2)、(3)

测算样本省份之间的相对效率(图 2),发现效率得分总体上介于 0.621 7~1.259 6 之间,平均为 0.933 2。其中,甘肃、重庆、内蒙古、辽宁、山西、吉林、新疆、贵州、广西等 9 个省份超过 1,占样本总数的 45%,这些省份处于生产前沿,各项投入与产出组合良好,代表了当前技术、管理条件下玉米种植的最优水平。效率得分低于 1 的省份有 11 个,占样本总数的 55%,得分均值为 0.772 6,说明这些省份的种植技术和管理条件如果达到最优水平,可以用 77.26%的投入获得同等数量的产出,意味着当前投入用量中有 22.74%是不必要的。在低效省

份中,黑龙江的效率得分(0.975 4)最高,最接近生产前沿,山东的效率得分(0.621 7)最低,偏离生产前沿最远。为了达到 DEA 有效,两个省份在投入用量方面的综合改进比例分别为 2.46%、37.83%。总体上看,我国玉米种植效率处于较高水平,低效省份通过改良与投入有关的技术和管理条件(如减少种子浪费、测土配方施肥、绿色防控病虫害、减少农机使用等)可以实现向 DEA 有效的转化。将效率得分超过 1.20 的省份视为高效单元<sup>[24]</sup>,发现甘肃、重庆属于此类,这两个省份是低效省份提升效率最具标杆价值的参考对象。

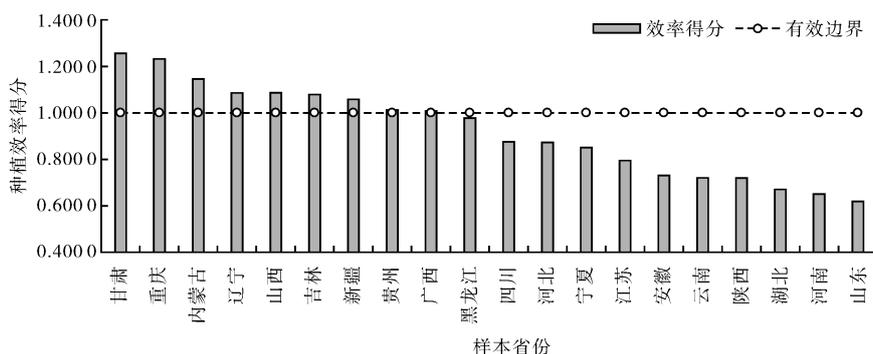


图 2 样本省份的玉米种植效率

Fig. 2 Corn planting efficiency of the sample provinces

由于 DEA 是通过非随机线性规划的方式估计生产前沿的,对有效单元有一定敏感性。若有效单元中存在异常值,会大幅度改变生产前沿面进而影响所有单元的效率得分,最终对有关分析产生误导。这里引入 Jackknifing 方法检验各单元效率得分的稳定性<sup>[25]</sup>。针对 9 个有效单元,每剔除 1 个后计算其他 19 个单元的效率得分,合计得到 9 组效率分值。然后,将每组分值与剔除前的对应单元分值进行秩相关分析。表 1 显示,剔除前后效率的 Spearman 相关系数都超过了 0.9 且都在 5%的置信水平上显著,同时这 9 组效率的平均值很接近,标准差较小且比较接近,这说明本研究选取的样本省份具有一定代表性,效率测算结果具有较高稳健性。

利用式(2)的对偶形式计算各项投入的对偶量,以评价低效省份种植效率对投入用量变化的敏感性。表 2 显示,所有投入的对偶量均低于 0,说明玉米种植效率与各投入用量呈反向变化关系。其中,农药、种子、柴油、化肥用量的对偶量(绝对值)分别介于 0.244 6~0.891 2 之间、0.105 0~1.469 1 之间、0.050 1~0.171 6 之间、0.001 6~0.025 7 之间。农药的对偶量均值(绝对值)最高,

表 1 玉米种植效率的稳健性检验

Tab. 1 Robustness test of corn planting efficiency

剔除的 有效单元	剔除前后效率 相关系数	剔除后的 效率均值	剔除后的 效率标准差
甘肃	0.963 2**	0.922 7	0.190 0
重庆	0.926 3**	0.951 4	0.190 9
内蒙古	0.977 2**	0.933 9	0.226 7
辽宁	0.968 4**	0.939 7	0.200 5
山西	0.998 2**	0.917 2	0.200 8
吉林	0.989 5**	0.932 6	0.217 9
新疆	0.998 2**	0.914 5	0.197 4
贵州	0.998 2**	0.925 0	0.214 2
广西	1.000 0**	0.919 2	0.202 7

注: \*、\*\*、\*\*\* 分别表示在 10%、5%、1%的置信水平上显著。

说明在保持其他条件不变的情况下,低效省份平均每增加 1 kg 农药用量将推动玉米种植效率降低 0.417 1。种子、柴油、化肥投入的对偶量均值(绝对值)大小依次为 0.243 3、0.085 8、0.005 0,说明种植效率对三类投入用量的敏感性依次降低。结合各省份投入资料进一步分析,发现种植效率对投入的敏感性与其当前用量有一定联系,每公顷种子和农药用量较少,用量的轻微减少将推动效率得分的

明显增加,用量较多的化肥和柴油的“调减增效”作用则相对较弱。

表 2 投入对偶量的描述性统计

Tab. 2 Descriptive statistics of input's dual values

项目	最小值	最大值	范围	平均数	标准偏差
农药	-0.891 2	-0.244 6	0.646 6	-0.417 1	0.176 7
种子	-1.469 1	-0.105 0	1.364 1	-0.243 3	0.406 7
柴油	-0.171 6	-0.050 1	0.121 5	-0.085 8	0.039 7
化肥	-0.025 7	-0.001 6	0.024 1	-0.005 0	0.007 4

### 2.2 玉米种植温室气体排放特征

根据每公顷投入的种子、化肥、农药、柴油用量以及各自的排放系数,计算每项投入排放的温室气体分量,汇总得到排放总量。总体上看,低效省份每公顷排放总量介于 1 160.15~5 540.08 kg CO<sub>2</sub>-eq 之间,平均为 3 310.56 kg CO<sub>2</sub>-eq。这一结果与旷爱萍等人的研究接近<sup>[14]</sup>。图 3 显示,云南、宁夏、江苏、陕西、湖北等 5 个省级区域的排放总量依次降低,均高于平均排放水平;山东、安徽、河南、四川、河北、黑龙江等 6 个省级区域依次降低,均低于平

均水平。这两类地区在地理分布上并无明显规律可循,说明影响玉米排放水平的因素不仅局限于自然地理条件,还取决于包括技术和管理方式在内的人文社会因素。为明确排放结构,对低效省份每项投入的排放量占比进行计算,发现化肥排放量所占比重较高,各省平均达到 75.10%,其中占比最高的云南超过 90%,占比最低的河北也接近 40%。与其他三类投入相比,化肥(氮肥、磷肥、钾肥、复合肥)的排放系数并不高,但由于用量偏大,因而成为玉米种植中最大的排放贡献者。柴油的温室气体排放量平均占比接近 20%,是玉米种植的第二大排放源。除个别省份外,农药和种子的排放量占比大多低于 5%,属于第三、第四排放源。其中,农药的排放系数很高,但每公顷用量极少,故温室气体排放不多;种子的排放系数和用量都比较低,温室气体排放很少。因此,从总体上看,化肥和柴油在玉米种植排放结构中占据核心地位,二者在大多数省份的比重之和都超过 95%。这两类投入应成为减排行动的关注重点,尤其是占比最高的化肥(图 3)。

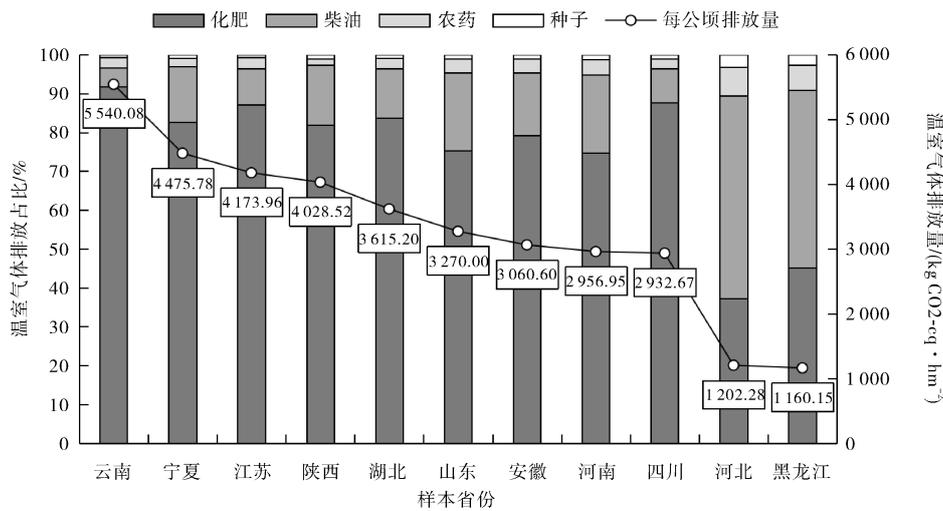


图 3 玉米种植温室气体排放量与排放结构

Fig. 3 GHG emissions and its structure of corn planting

图 4 呈现了低效省份化肥排放的温室气体数量与排放结构,显示每公顷化肥排放量介于 447.09~5 085.18 kg CO<sub>2</sub>-eq 之间,平均值为 2 670.26 kg CO<sub>2</sub>-eq,四类肥料的平均贡献率大小依次为氮肥(54.84%)>复合肥(43.45%)>磷肥(1.70%)>钾肥(0.02%)。在所有低效省份中,云南的化肥排放量最高,四类肥料排放占比依次为氮肥(84.39%)>复合肥(12.60%)>磷肥(2.98%)>钾肥(0.03%)。河北的化肥排放量最低,其中氮

肥排放占比为 51.30%,复合肥排放占比为 48.70%,磷肥和钾肥排放极少。因此,无论从总体上还是典型省份看,氮肥和复合肥都是化肥温室气体的主要来源,各省份玉米种植排放量差异主要取决于这两类肥料用量的不同。实际上,经过长期的实践探索,当前已经形成一些有效策略来降低氮肥和复合肥引起的过多排放,主要包括绿肥或有机肥替代、轮作豆科植物、使用硝化抑制剂、增加施肥深度、避免过量施用等<sup>[27]</sup>,其中减少不必要的过量施

用最为重要. 过量施用不仅在肥料的自身生产过程产生了额外的温室气体, 而且会大大增加土壤中  $N_2O$  排放. 由于缺乏精准施肥的基本知识, 大部分生产者囿于传统经验认为增加肥料用量能够提高玉米的相对产量和经济收益. 然而, 无论微观的田间实验, 还是宏观的统计检验已经证明, 当化肥用量超过一定阈值后, 产出的新增收益将超过投入的

边际成本, 导致无利可图. 这说明农民对肥料最优投入的认识还不充分, 或者没有在适当的时间以最优的数量进行应用<sup>[28]</sup>. 所以, 采取积极措施培养生产者更好的施肥习惯和行为, 帮助他们提高种植素养、树立环保观念和效率意识, 对节肥减排有重要意义.

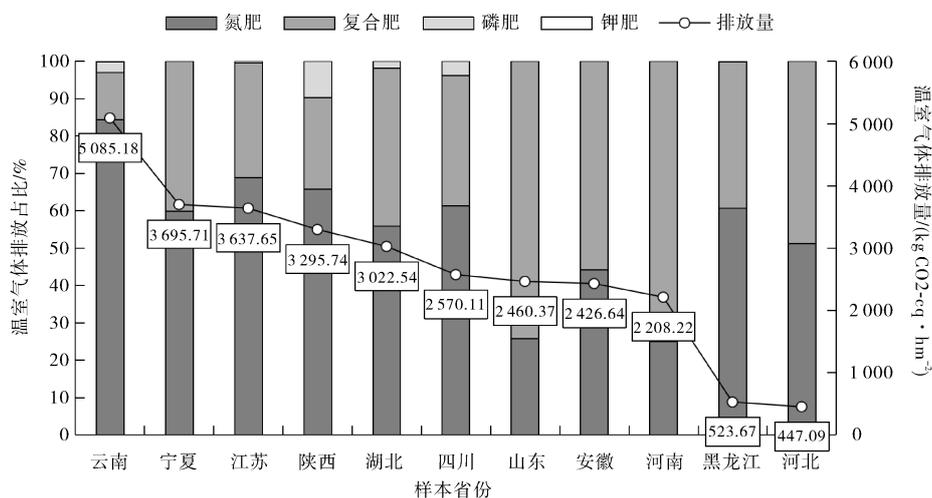


图 4 化肥温室气体排放量与排放结构

Fig. 4 GHG emission and its structure of chemical fertilizer

### 2.3 玉米种植温室气体减排潜力

根据低效省份达到 DEA 有效时的目标投入水平, 计算相应的温室气体排放量. 目标投入排放量与当前投入排放量之间的差距, 为低效省份通过技术和管理水平提高而可能避免的排放量, 即减排潜力. 根据式(4)测算结果, 发现低效省份每公顷减排潜力介于 30.69~2 345.02 kg CO<sub>2</sub>-eq 之间, 平均值为 844.64 kg CO<sub>2</sub>-eq. 每公顷减排潜力最高的省份(山东)比最低省份(黑龙江)高出 2 314.33 kg CO<sub>2</sub>-eq, 相差 76.41 倍. 其中, 黑龙江、四川、河北、云南 4 省的排放潜力较小, 每公顷减排量均不超过 150 kg CO<sub>2</sub>-eq; 山东、河南、安徽、陕西的减排潜力较大, 每公顷均超过 1 500 kg CO<sub>2</sub>-eq. 通过测算各省份减排潜力在当前排放总量中的比重(即减排率), 发现云南、四川、黑龙江 3 省的减排率较低, 均不足 5%; 山东、河南、安徽 3 省的减排率较高, 均超过 50%(表 3). 根据玉米播种总面积与每公顷减排潜力计算全省减排总量, 汇总发现 11 个低效省份的减排总潜力为 2 200.85 万 t, 占这些省份当前排放总量的 34.12%, 超过三分之一. 其中, 山东、河南两省的减排潜力分居全国第一位、第二位, 播种面积远高于其他省份是基本原因. 上述结果表明, 如果低效省份在玉米种植中采取更加合理的技

术与管理措施, 那么在保持各自产量不变的情况下可以实现较大幅度的减排. 由于减排潜力是基于当前有效省份的生产实践测算的, 通过改进当前技术和管理方式是可以实现的, 可以在一定程度上作为减排行动的目标参考. 进一步的分析还发现, 减排潜力与种植效率之间的 Pearson 相关系数为 -0.501 8 且在 5% 的水平上显著, 说明二者在总体上存在反向变化关系, 即种植效率较高省份的减排潜力相对较低, 提高效率是缩小减排空间从而实现最优排放的基本途径.

表 4 进一步报告了低效省份各项投入的松弛量和减排量, 以反映减排潜力的组成结构. 其中, 部分省份的投入松弛为 0, 包括黑龙江的种子投入, 四川、河北、云南、湖北 4 省的化肥投入, 陕西的农药投入, 黑龙江、宁夏、江苏、安徽 4 省的柴油投入, 说明这些省级区域的相应投入已经达到最优水平, 无需调减. 其他省级区域各项投入的松弛量均为负, 表示为了达到 DEA 有效而需要减少投入用量, 这部分地区的相应投入尚存在一定的调减空间. 对种子投入来说, 合计有 10 个省级区域存在高低不等的减排潜力, 其中四川、云南、陕西、湖北 4 个地区的潜力较大, 每公顷超过 7.50 kg CO<sub>2</sub>-eq; 四川的种子减排潜力在全省总潜力中所占比重

(31.84%)最高,云南(10.58%)居第二位,其他省级区域均低于10%。对化肥投入来说,有7个省级区域存在减排空间,其中安徽、河南、山东三省的潜力较高,每公顷超过1500 kg CO<sub>2</sub>-eq;这些地区的化肥减排潜力在各自总潜力中的比重超过80%。对农药投入来说,有10个省级区域存在减排空间,其中江苏、云南、山东3省的潜力较高,每公顷超过45 kg CO<sub>2</sub>-eq;黑龙江、四川、宁夏、云南、湖北5个

省级区域的潜力占比超过10%。对柴油投入来说,有7个省级区域存在减排空间,其中陕西、湖北和山东3省的潜力较高,每公顷超过了150 kg CO<sub>2</sub>-eq;河北、湖北两省的潜力占比均超过80%。因此,表4进一步明确了玉米种植减排行动中值得优先关注的省份及其投入类型,有利于根据因地制宜原则提高低碳化路径设计的合理性。

表 3 目标投入温室气体排放量与减排潜力

Tab. 3 GHG emissions and its potential reduction of the optimal input

决策单元	目标排放量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	减排潜力/(kg·hm <sup>-2</sup> )	减排率/%	全省减排总量/万 t
山东	924.985 5	2 345.019 0	71.71	902.004 5
河南	993.015 0	1 963.932 0	66.42	746.555 4
安徽	1 319.386 5	1 741.216 5	56.89	208.327 8
陕西	2 516.979 0	1 511.542 5	37.52	177.916 1
江苏	3 397.996 5	775.962 0	18.59	39.127 1
湖北	3 297.933 0	317.266 5	8.78	23.082 1
宁夏	4 175.781 0	299.997 0	6.70	8.993 3
云南	5 403.006 0	137.073 0	2.47	24.431 9
河北	1 066.432 5	135.844 5	11.30	46.298 5
四川	2 900.146 5	32.520 0	1.11	5.996 7
黑龙江	1 129.314 0	30.688 5	2.66	18.113 0

表 4 投入松弛量与减排潜力结构

Tab. 4 Input slack and potential reduction structure

种类	名称	黑龙江	四川	河北	宁夏	江苏	安徽	云南	陕西	湖北	河南	山东
种子	松弛量	0	-0.607 0	-0.369 1	-0.263 0	-0.297 9	-0.020 2	-0.850 3	-0.790 5	-0.650 9	-0.151 7	-0.007 0
	减排量/kg	0	10.353 0	6.294 0	4.486 5	5.082 0	0.345 0	14.503 5	13.483 5	11.100 0	2.589 0	0.118 5
	占比/%	0	31.84	4.63	1.50	0.65	0.02	10.58	0.89	3.50	0.13	0.01
化肥	松弛量	-1.144 6	0	0	-11.076 0	-26.648 7	-86.049 4	0	-50.788 5	0	-113.411 0	-129.004 0
	减排量/kg	27.220 5	0	0	255.451 5	716.154 0	1701.802 5	0	1238.794 5	0	1852.201 5	2126.182 5
	占比/%	88.70	0	0	85.15	92.29	97.74	0	81.96	0	94.31	90.67
农药	松弛量	-0.023 4	-0.064 0	-0.088 4	-0.270 7	-0.369 8	-0.264 0	-0.619 4	0	-0.253 7	-0.295 6	-0.305 6
	减排量/kg	3.468 0	9.472 5	13.075 5	40.059 0	54.726 0	39.069 0	91.660 5	0	37.543 5	43.737 0	45.226 5
	占比/%	11.30	29.13	9.63	13.35	7.05	2.24	66.87	0	11.83	2.23	1.93
柴油	松弛量	0	-0.096 2	-0.882 5	0	0	0	-0.234 2	-1.964 4	-2.035 3	-0.495 6	-1.314 5
	减排量/kg	0	12.694 5	116.473 5	0	0	0	30.910 5	259.264 5	268.623 0	65.404 5	173.491 5
	占比/%	0	39.04	85.74	0	0	0	22.55	17.15	84.67	3.33	7.40

### 3 结论与讨论

2020年9月,习近平总书记在联合国大会上提出中国CO<sub>2</sub>排放力争于2030年前达到峰值,争取在2060年前实现碳中和,进一步提高中国自主减排贡献力度。在推进实施碳达峰、碳中和国家战略背景下,本研究对我国玉米的种植效率及温室气体减排潜力进行了研究,得到以下结论。

1) 我国20个主产省级区域的玉米种植效率均值为0.933 2,其中11个DEA低效地区得分介于0.621 7~0.975 4之间,平均值为0.772 6,将这些地区的种植效率提高到高效水平可在总体上节约22.74%的投入用量。各省级区域效率分值比较稳健,对农药用量变化的敏感性最高,种子次之,柴油和化肥较低。

2) 低效省级区域当前每公顷排放的温室气体

介于 1 160.15~5 540.08 kg CO<sub>2</sub>-eq 之间,平均值为 3 310.56 kg CO<sub>2</sub>-eq,其中化肥的排放贡献率(75.10%)最高,柴油(19.98%)次之,农药(3.59%)和种子(1.32%)较低.在化肥排放结构中,来自氮肥的排放占比(54.84%)最高,复合肥(43.45%)次之,磷肥(1.70%)和钾肥(0.02%)较低,说明氮肥和复合肥是玉米减排的重点抓手.

3) 为达到 DEA 有效,低效省级区域每公顷可以削减的温室气体介于 30.69~2 345.02 kg CO<sub>2</sub>-eq 之间,平均值为 844.64 kg CO<sub>2</sub>-eq.其中,云南、陕西、湖北、四川每公顷种子的减排潜力超过 7.50 kg CO<sub>2</sub>-eq,山东、河南、安徽每公顷化肥的减排潜力超过 1 500 kg CO<sub>2</sub>-eq,云南、江苏、山东每公顷农药的减排潜力高于 45 kg CO<sub>2</sub>-eq,陕西、湖北和山东每公顷柴油的减排潜力高于 150 kg CO<sub>2</sub>-eq.减排潜力与种植效率总体上呈反向变化关系,提高效率是实现最优排放目标的重要途径.

上述结论为探索提高玉米种植效率及低碳化导控路径提供了一定参考.需要指出的是,本研究从种植效率和环境影响内在关联的角度出发,证实了 LCA+DEA 方法可以应用于我国农业减排领域,其突出优点在于能够设定优化目标并量化投入用量的潜在改进<sup>[29-30]</sup>,从而能够探测减排潜力,这有助于促进和丰富农业减排问题的深入讨论和解释.然而,由于玉米种植中“投入—产出”“投入—排放”“投入—产出—排放”等详细环节无法在 LCA+DEA 分析框架内得到体现,需要建立更详尽的流程模型解析减排问题的复杂性,以夯实减排行动的微观科学基础.这是本文下一步关注的重点方向.

#### 参考文献:

- [1] 姜克隽,冯升波.走向《巴黎协定》温升目标:已经在路上[J].气候变化研究进展,2021,17(1):1-6.  
JIANG K J, FENG S B. Going to the mitigation targets in “Paris Agreement”: the world is on the road[J]. Climate Change Research, 2021, 17(1): 1-6. (Ch).
- [2] United Nations Environment Programme. Emission gap report[R/OL]. Nairobi: UNEP, 2019(11): 22[2020-11-02]. <https://www.unenvironment.org/resources/emissions-gap-report-2019>.
- [3] 霍丽丽,赵立欣,姚宗路,等.中国玉米秸秆草谷比及其资源时空分布特征[J].农业工程学报,2020,36(21):227-234.  
HUO L L, ZHAO L X, YAO Z L, et al. Difference of the ratio of maize stovers to grain and spatiotemporal variation characteristics of maize stovers in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(21): 227-234. (Ch).
- [4] 吴贤荣,张俊彪,田云,等.基于公平与效率双重视角的中国农业碳减排潜力分析[J].自然资源学报,2015,30(7):1172-1182.  
WU X R, ZHANG J B, TIAN Y, et al. Analysis on China's agricultural carbon abatement capacity from the perspective of both equity and efficiency [J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(7): 1172-1182. (Ch).
- [5] ISO. ISO 14040-Environmental management-life cycle assessment: principles and framework [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2006.
- [6] ISO. ISO 14044-Environmental management-life cycle assessment: requirements and guidelines [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2006.
- [7] 王迪,和维,聂锐.中国2030年CO<sub>2</sub>排放情景预测与减排潜力分析[J].系统工程学报,2019,34(6):721-735.  
WANG D, HE W, NIE R. China's CO<sub>2</sub> emission scenario prediction and emission reduction potential analysis in 2030 [J]. Journal of Systems Engineering, 2019, 34(6): 721-735. (Ch).
- [8] WBCSD. Measuring eco-efficiency: a guide to reporting company performance[R]. Geneva: World Business Council for Sustainable Development, 2000.
- [9] CHARNES A, COOPER W W, RHODES E. Measuring the efficiency of decision making units[J]. European Journal of Operational Research, 1978(2): 429-444.
- [10] PICAZO A J, GOMEZ A, REIG E. Assessing farming eco-efficiency: a data envelopment analysis approach [J]. Journal of Environmental Management, 2011, 92: 1154-1164.
- [11] TORGERSEN A M, FORSUND F R, KITTELSEN S A C. Slack-adjusted efficiency measures and ranking of efficient units[J]. Journal of productivity analysis, 1996(7): 379-398.
- [12] TONE K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2001, 130(3): 498-509.
- [13] TONE K. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis [J]. European Journal of Operational Research, 2002, 143(1): 32-41.
- [14] 旷爱萍,胡超,韩丹丹.碳排放约束下中国玉米全要素生产率测度及其时空分异[J].地域研究与开发,2021,40(3):115-120.  
KUANG A P, HU C, HAN D D. China's corn total factor productivity measurement and its temporal and spatial differentiation under carbon emission constraints[J]. Areal Research and Development, 2021, 40(3): 115-120. (Ch).
- [15] 陈晋泉,信猛,马晓君,等.中国农业生态效率测度与驱动因素[J].中国环境科学,2020,40(7):3216-3227.  
CHEN J Q, XIN M, MA X J, et al. Chinese agricultural eco-efficiency measurement and driving factors[J]. China Environmental Science, 2020, 40(7): 3216-3227. (Ch).
- [16] LOZANO S, IRIBARREN D, MOREIRA M T, et al. The

- link between operational efficiency and environmental impacts: a joint application of life cycle assessment and data envelopment analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **407**: 1744-1754.
- [17] MASUDA K. Measuring eco-efficiency of wheat production in Japan: a combined application of life cycle assessment and data envelopment analysis [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, **126**: 373-381.
- [18] GEADOS D, SCHREVEENS E. Multidimensional analysis of environmental impacts from potato agricultural production in the Peruvian Central Andes[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **663**: 927-934.
- [19] ULLAH A, PERRET S R, GHEEWALA, et al. Eco-efficiency of cotton-cropping systems in Pakistan: an integrated approach of life cycle assessment and data envelopment analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, **134**: 623-632.
- [20] VENKATESH P, VADIVEL A, AMIN N, et al. Optimization of energy consumption and environmental impacts of are canut production through coupled data envelopment analysis and life cycle assessment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, **203**: 674-684.
- [21] VAZQUEZ-ROWE I, IRIBARREN D. Review of life-cycle approaches coupled with data envelopment analysis: launching the CFP+DEA method for energy policy making [J]. *Worlds Poultry Science Journal*, 2015: 1-10.
- [22] 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, 2020.  
Price Department of National Development and Reform Commission. Compilation of national agricultural product cost-benefit data [M]. Beijing: China Statistics Press, 2020. (Ch).
- [23] 翟一杰, 张天祚, 申晓旭, 等. 生命周期评价方法研究进展 [J]. *资源科学*, 2021, **43**(3): 446-455.  
ZHAI Y J, ZHANG T Z, SHEN X X, et al. Development of life cycle assessment method [J]. *Resources Science*, 2021, **43**(3): 446-455. (Ch).
- [24] MOHAMMADI A, RAFIEE S, JAFARI A, et al. Potential greenhouse gas emission reductions in soybean farming: a combined use of life cycle assessment and data envelopment analysis [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, **54**: 89-100.
- [25] 王舒鸿, 赵志博. 基于三阶段 DEA 的环保行业上市公司效率评价 [J]. *中国海洋大学学报(社会科学版)*, 2016(3): 78-84.  
WANG S H, ZHAO Z B. Efficiency evaluation of environmental listed companies based on the three stage DEA [J]. *Journal of Ocean University of China (Social Sciences)*, 2016(3): 78-84. (Ch).
- [26] 刘华军, 孙淑惠, 李超. 环境约束下中国化肥利用效率的空间差异及分布动态演进 [J]. *农业经济问题*, 2019, **40**(8): 65-75.  
LIU H J, SUN S H, LI C. Regional difference and dynamic evolution of fertilizer use efficiency in China under environmental constraints [J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2019, **40**(8): 65-75. (Ch).
- [27] 王灿, 丛建辉, 王克, 等. 中国应对气候变化技术清单研究 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2021, **31**(3): 1-12.  
WANG C, CONG J H, WANG K, et al. Research on China's technology lists for addressing climate change [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2021, **31**(3): 1-12. (Ch).
- [28] 史常亮, 郭焱, 朱俊峰. 中国粮食生产中化肥过量施用评价及影响因素研究 [J]. *农业现代化研究*, 2016, **37**(4): 671-679.  
SHI C L, GUO Y, ZHU J F. Evaluation of over fertilization in China and its influencing factors [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2016, **37**(4): 671-679. (Ch).
- [29] LEONARDO V, RICARDO R, LIDLA A, et al. The joint use of life cycle assessment and data envelopment analysis methodologies for eco-efficiency assessment: a critical review, taxonomy and future research [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **738**: 139-538.
- [30] LOZANO S, IRIBARREN L, Moreira M, et al. Environmental impact efficiency in mussel cultivation [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2010, **54**: 1269-1277.

## The efficiency and potential GHG reduction of corn planting based on LCA+DEA method

SONG Wenli, WANG Wenfang, YANG Zhen

(College of Urban and Environmental Sciences, Central China Normal University, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** Under the background of implementing the carbon peak and carbon neutralization strategy. Based on the survey and statistical data, this paper makes an

(下转第 309 页)

detected. On the other hand, given all rough feature matches based on SIFT features, least-squares match was used to carry out precise smatching. The experiment results show that our proposal was able to effectively estimate matching error with an average correct matching rate of 92.8%. Moreover, stitching accuracy was improved from 1.0 pixel to 0.1 pixel, and the stitching efficiency was also elevated. The improved SIFT perform fast and accurate matching in massive feature database, even in real time, and has stronger robustness, which would meet the demand for highly automated relative orientation of low-altitude remote sensing images with broad application prospects.

**Key words:** UAV; remote sensing images; improved SIFT; RANSAC; least squares matching; quick stitching

---

(上接第 301 页)

empirical study on the production efficiency and greenhouse gas (GHG) emission reduction potential of China's corn by using the methods of Life Cycle Architecture and Data Envelopment Analysis (LCA+DEA). The results are shown as follows: 1) In 2019, the average corn production efficiency of 20 main producing provinces (decision-making units) is 0.933 2, of which the scores of 11 low efficiency units are between 0.621 7~0.975 4, with an average value of 0.772 6. The sensitivity of production efficiency to pesticide input is the highest, followed by seeds, diesels and fertilizers are lower. 2) At present, the average amount of greenhouse gases emitted per hectare in inefficient provinces is 3 310.56 kg CO<sub>2</sub>-eq, of which the contribution rate of chemical fertilizers is the highest (75.10%), followed by diesels (19.98%), pesticides (3.59%) and seeds (1.32%) are lower. In the fertilizer emission structure, nitrogen fertilizer accounts for the highest proportion (54.84%), followed by complex fertilizer (43.45%), phosphate fertilizer (1.70%) and potassium fertilizer (0.02%) are lower. 3) In order to achieve DEA effectiveness, the greenhouse gas per hm<sup>2</sup> of low efficiency unit can be reduced by 30.69~2 345.02kg CO<sub>2</sub>-eq, with an average value of 844.64kg CO<sub>2</sub>-eq. Among them, the emission reduction potential of Shandong Province and Henan Province rank among the top two in China, and the emission reduction potential has a reverse relationship with production efficiency. This study provides some basis for improving corn production efficiency and exploring low-carbon guidance and control path.

**Key words:** planting efficiency; potential emission reduction; LCA+DEA; corn