

# 碳排放约束下的农业生产效率及其空间格局 ——基于河南省65个村庄的调查

王帅<sup>1</sup>, 赵荣钦<sup>1</sup>, 杨青林<sup>1</sup>, 肖连刚<sup>1</sup>, 杨文娟<sup>1</sup>, 余娇<sup>1</sup>,  
朱瑞明<sup>1</sup>, 揣小伟<sup>2</sup>, 焦士兴<sup>3</sup>

(1. 华北水利水电大学测绘与地理信息学院, 郑州450046; 2. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京210023; 3. 安阳师范学院资源环境与旅游学院, 安阳455002)

**摘要:** 基于村庄尺度探索碳排放约束下的农业生产效率, 对于差别化的低碳农业生产模式的选择具有一定的理论和实践意义。基于河南省65个村庄的调查数据, 对不同样点的农业碳排放进行了核算, 并采用Super-SBM模型分析了碳排放约束下的农业生产效率的差异。结果表明: 河南省农业碳排放强度呈现“南北高, 中间低”的空间分布格局, 这主要受种植结构、农业生产条件、人类各项投入等因素的影响; 碳排放约束下的河南省农业生产效率具有较大的空间差异, 根据农业生产效率和碳排放强度的关系, 可将样点村庄分为低碳高效村、高碳低效村、高碳高效村和低碳低效村四种类型。其中高碳低效村和低碳低效村的比例较大。建议未来应加强农业规模化经营、减少能源和物资投入、完善农业基础设施、推广节水节能新技术, 在提高农业生产效率的同时推动农业低碳发展。

**关键词:** 碳排放; 农业生产效率; Super-SBM模型; 空间格局; 河南省

农业生产效率是指一定时间内农业经济总产出与各种投入要素的比值, 反映农业资源配置状况、技术水平、劳动力条件等对农业生产的影响程度<sup>[1]</sup>。开展农业生产效率研究对于农业水土资源优化配置、提高粮食生产的保障能力、推动农业可持续发展具有重要意义。近年来, 农业生产效率及其影响因素研究得到了国内外学者的关注。比如: 一些学者采用SBM模型、随机前沿生产函数<sup>[2]</sup>、DEA模型<sup>[3,4]</sup>、Malmquist指数法和ESDA<sup>[5]</sup>等方法开展了全国<sup>[6,7]</sup>和区域<sup>[8-11]</sup>等不同尺度的农业生产效率研究, 认为生产技术水平、农业种植结构、区域配置和农户受教育程度等是影响农业生产效率的主要因素; 也有学者进一步分析了农地规模<sup>[12]</sup>、土地流转<sup>[13,14]</sup>、土地生产力<sup>[15]</sup>、土地利用变化<sup>[16]</sup>、土地细碎化<sup>[17]</sup>和农业投入要素<sup>[18-20]</sup>等因素对农业生产效率的影响。总体来看, 传统的农业生产效率研究主要是基于粮食产量的最大化和水、能及物资投入最小化的目标, 没有考虑农业生产的环境影响。实际上, 由于农业生产方式不合理、过度的水能资源消耗和物资投入不仅造成了资源和能源的浪费<sup>[21,22]</sup>, 而且农业活动带来的直接或间接的碳排放也呈明显的增长态势<sup>[23]</sup>。研究表明, 农业源温室气体占全国总量的17%<sup>[24]</sup>。因此, 将碳排放作为影响农业

收稿日期: 2019-12-24; 修订日期: 2020-03-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971241); 河南省自然科学基金项目(182300410103); 教育部人文社科项目(17YJCZH257); 河南省高等学校青年骨干教师培养计划(2017GGJS078)

作者简介: 王帅(1994-), 男, 河南滑县人, 硕士, 主要从事资源环境与碳排放方面的研究。

E-mail: wangshuai19940517@163.com

通讯作者: 赵荣钦(1978-), 男, 河南孟津人, 博士, 教授, 主要从事土地利用与碳排放方面的研究。

E-mail: zhaorq234@163.com

生产环境的指标纳入到农业生产效率研究中,对促进农业低碳转型、实现国家碳减排承诺具有重要的实践意义。近年来,一些学者对国家<sup>[25,26]</sup>、市域<sup>[27,28]</sup>、县域<sup>[29-31]</sup>等不同空间尺度的农业碳排放进行了测算,进而开展基于碳排放约束下的农业生产效率研究,为面向农业碳减排和效率提升双重目标的低碳农业发展策略的选择提供了重要的实践指导。

总体而言,前期研究大部分是基于统计数据开展的宏观尺度研究,而基于碳排放约束下的微观尺度(村庄)的农业生产效率研究还相对较少。由于区域内部自然条件、种植结构、农业生产条件和灌溉模式等的差异,不同区域内部村庄层面的农业生产状况明显不同,这造成了区域内部农业生产效率的差异。而传统的研究则在大尺度上掩盖了区域内部农业生产条件及生产效率的差异。因此,基于村庄尺度探索碳排放约束下的农业生产效率不仅有助于揭示微观单元层面碳排放与农业生产效率的关系,而且对于差别化的低碳农业生产模式的选择具有一定的实践意义。河南省是农业大省,各地区自然条件和生产模式的差异为开展村庄尺度农业生产效率的差异研究提供了便利。因此,基于河南省65个村庄的调查数据,本文采用非期望产出的Super-SBM模型探讨了碳排放约束下农业生产效率的空间差异,并提出了不同地区农业低碳发展的政策建议,为河南省农业生产效率的提升和农业低碳发展提供决策参考。

## 1 研究方法 with 数据来源

### 1.1 机理分析

农业生产效率可以反映一个地区的综合农业生产能力,是衡量一个地区农业资源禀赋、投入产出效率的重要指标。实际上,农业生产活动需要劳动力、物资、资本、能源等生产要素的投入,而区域经济发展水平和农用地自然环境条件的不同导致了农业机械化水平、灌溉模式、耕作方式等的差异,进而影响农业投入强度和产出效率。传统的农业生产效率测算主要考虑生产投入和期望产出,忽视了农业生产所带来的环境问题。实际上农业生产活动会消耗能源和物资,从而产生一定的非期望产出,即农业碳排放。而农业生产效率的影响因素复杂多样,不能只简单地考虑产出效益,还要考虑由于农业生产所导致的碳排放(图1)。因此,本文将劳动力、物资、资本等投入要素和粮食产量、农业碳排放等产出要素纳入农业生产效率的测算,并探讨农业碳排放强度与农业生产效

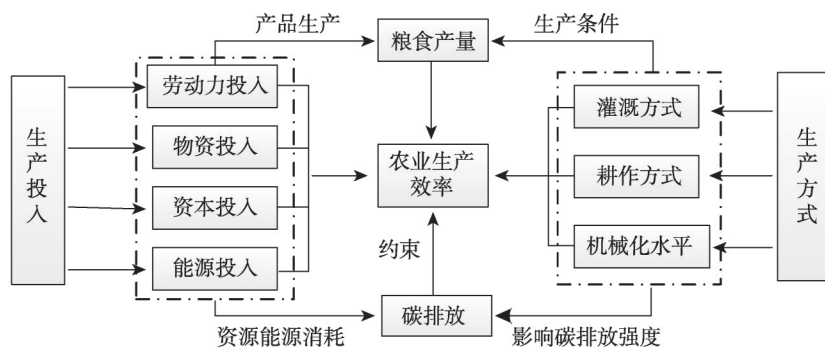


图1 农业生产效率影响因素的理论框架

Fig. 1 Theoretical framework of factors affecting agricultural production efficiency

率的空间差异。

## 1.2 数据来源

为更好地了解农业生产过程中物资和能源的投入状况,本文采用实地调研的方法收集农业生产数据。分别于2017年1-2月、2018年1-3月、2018年5-9月在河南省共实地调研了65个村庄(图2),收集调查问卷978份,剔除77份不合格问卷,有效率为92.13%。调研内容主要包括:耕地面积、户均人数、种植作物的主要种类、产量;各类作物的亩均化肥、除草剂、除虫剂等施用量、亩均灌溉次数、耗电量、耗水量;翻耕和收获过程中的柴油使用量等。

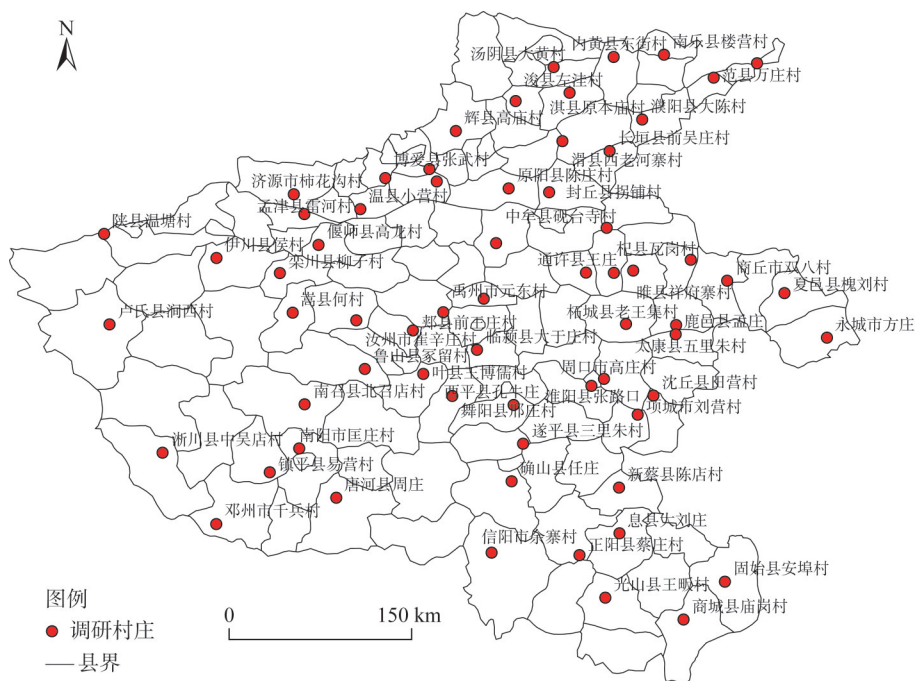


图2 调研村庄分布

Fig. 2 Distribution of surveyed villages

需要说明的是:(1)由于调研的主要作物小麦、玉米、花生,种植过程中不使用农膜,所以未考虑农膜使用所产生的隐含碳排放;(2)调研村庄所在县域是河南省的粮食主产区,主要以农业为主,且涵盖了不同地形、气候、作物、灌溉和轮种条件。同时,为便于了解区域农业生产的空间差异,调研样点尽可能涵盖河南省所有地市,且选取的调研样点村庄均以第一产业为主,因此,样点村庄具有较好的代表性。

## 1.3 研究方法

### 1.3.1 农业碳排放的计算方法

基于作物生长周期过程中各种能源和物资的投入计算农业碳排放,主要包括土地翻耕、施肥、播种、除草、灌溉、收获等过程中直接或间接消耗能源所带来的碳排放。其中,翻耕、播种、灌溉和收获等是直接碳排放过程,而施肥和除草等是间接碳排放过程(化肥和农药等生产过程能源消耗导致的隐含碳排放)。这里参考其他文献的方法<sup>[32,33]</sup>,计算公式如下:

$$E_i = E_m + E_e \tag{1}$$

式中： $E_i$ 为农业碳排放总量 (kg)； $E_m$ 为物资投入的碳排放 (kg)； $E_e$ 为能源消耗的碳排放 (kg)。

$$E_m = W_i \times Q_i \tag{2}$$

式中： $W_i$ 为第*i*种物资的投入量 (kg)； $Q_i$ 为第*i*种物资的碳排放系数 (kg)。这里主要考虑化肥和农药两种物资，碳排放系数分别为857.54 kg C/Mg<sup>[34]</sup>和4817.155 kg C/Mg<sup>[34]</sup>；

$$E_e = N_i \times C_i \tag{3}$$

式中： $N_i$ 为第*i*种能源的消耗量； $C_i$ 为第*i*种能源的碳排放系数，本文计算的主要是柴油和电力两种能源，其中，电力碳排放系数为0.801 kg CO<sub>2</sub>/kwh<sup>[35]</sup>，柴油碳排放系数的计算公式如下<sup>[36]</sup>：

$$C_c = L_{calorific} \times C_{content} \times O_{rate} \tag{4}$$

式中： $C_c$ 为柴油的碳排放系数 (C/kg)； $L_{calorific}$ 为柴油的低位发热量 (kJ/kg)； $C_{content}$ 为含碳量 (TC/TJ)； $O_{rate}$ 为氧化率。其中，低位发热量取42652 kJ/kg，含碳量和氧化率选自《省级温室气体清单编制指南》，分别为20.2 TC/TJ和0.98。

### 1.3.2 碳排放约束下的农业生产效率的测算方法

#### (1) Super-SBM模型

采用数据包络分析 (DEA) 测算碳排放约束下的农业生产效率。传统DEA模型是从减少投入、扩大产出的角度来衡量生产效率，测算效率时无法同时兼顾投入与产出的松弛变量。而Super-SBM模型在避免松弛变量问题的同时还可以避免部分决策单元同效率的情况。鉴于此，本文采用Super-SBM模型<sup>[37]</sup>测算河南省65个调研村庄的农业生产效率，同时将碳排放作为农业生产的非期望产出纳入进来，模型如下：

$$\rho = \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \bar{x}_i / x_{io}}{\frac{1}{s_1 + s_2} \left( \sum_{r=1}^{s_1} \bar{y}_r^g / y_{ro}^g + \sum_{a=1}^{s_2} \bar{y}_a^b / y_{ao}^g \right)} \tag{5}$$

$$\text{s.t.} \left\{ \begin{array}{l} \bar{x} \geq \sum_{j=1, j \neq o}^n \lambda_j x_j, \bar{y}_r^g \leq \sum_{j=1, j \neq o}^n \lambda_j y_{rj}^g, \bar{y}_a^b \leq \sum_{j=1, j \neq o}^n \lambda_j y_{aj}^b \\ \bar{x} \geq x_{io}, \bar{y}_r^g \leq y_{ro}^g, \bar{y}_a^b \geq y_{ao}^b \\ \sum_{j=1, j \neq o}^n \lambda_j = 1, y^g \geq 0, y^b \geq 0, \lambda \geq 0 \\ i = 1, 2, \dots, m; r, a = 1, 2, \dots, q; j = 1, 2, \dots, n (j \neq o) \end{array} \right. \tag{6}$$

式中： $m$ 为各调研村庄投入要素类别； $n$ 为调研村庄个数 (个)； $\rho$ 为非期望产出的Super-SBM模型效率值； $x$ 、 $y^g$ 和 $y^b$ 分别表示投入要素、粮食产量 (kg/hm<sup>2</sup>) 和农业碳排放 (kg/hm<sup>2</sup>)， $x \in R^m$ ， $y^g = R^{s_1}$ ， $y^b = R^{s_2}$ ； $\lambda$ 为各调研村庄的权重向量； $s_1$ 和 $s_2$ 分别表示粮食产量和农业碳排放的松弛向量。

#### (2) 控制变量的选取

根据调研实际数据确定农业生产过程中的投入产出指标，同时将单位面积碳排放作为非期望产出指标纳入农业生产效率测算，具体指标名称和解释见表1，各变量的描述性统计见表2。

表1 指标选取的类别及解释

Table 1 Categories and explanations of indicator selection

类别	指标名称	单位	指标解释
投入要素	单位面积劳动力投入	人/hm <sup>2</sup>	由于无法具体调研农业就业人数,以调研村庄所在县域的农林牧渔就业人数作为劳动力投入
投入要素	单位面积资本投入	元/hm <sup>2</sup>	采用调研所得农业生产过程各种资源消费的总金额作为资本投入
投入要素	单位面积化肥投入	kg/hm <sup>2</sup>	调研所得单位面积的化肥施用量
投入要素	单位面积农药投入	kg/hm <sup>2</sup>	调研所得单位面积的农药施用量
投入要素	单位面积电力投入	kW·h/hm <sup>2</sup>	调研所得单位面积的耗电量
投入要素	单位面积柴油投入	kg/hm <sup>2</sup>	调研所得单位面积的柴油消耗量
产出	单位面积粮食产量	kg/hm <sup>2</sup>	调研所得单位面积的粮食总产量
非期望产出	单位面积碳排放	kg/hm <sup>2</sup>	单位面积的农业碳排放量

表2 各变量的描述性统计

Table 2 Descriptive statistics of each variable

变量	劳动力投入 /(人/hm <sup>2</sup> )	资本投入 /(元/hm <sup>2</sup> )	化肥投入 /(kg/hm <sup>2</sup> )	农药投入 /(kg/hm <sup>2</sup> )	柴油投入 /(kg/hm <sup>2</sup> )	电力投入/ (kW·h/hm <sup>2</sup> )	粮食产量 /(kg/hm <sup>2</sup> )	农业碳排放 /(kg/hm <sup>2</sup> )
极小值	0.66	3418.13	525.00	0.70	77.70	0	4005.36	565.05
极大值	14.49	6218.67	1650.00	8.79	373.52	4006.50	9375.00	1855.13
均值	4.22	4411.16	876.27	3.44	167.13	505.43	6075.92	965.63
标准差	2.20	549.53	197.47	1.62	66.28	628.77	1067.61	232.52

## 2 结果分析

### 2.1 农业碳排放强度的空间差异分析

结合农业碳排放的计算方法,对调研村庄农业生产的碳排放强度进行了核算。结果发现:调研村庄的农业碳排放强度存在较大的空间差异,总体上呈现“南北高、中间低”的空间分布特征,即豫南、豫北的碳排放强度高于豫中,且同一纬度村庄的农业碳排放强度相当(图3)。为了更好地反映调研村庄农业碳排放强度的空间分布,把调研村庄的农业碳排放强度按照大小分为四类,即低强度区(碳排放强度 $\leq 800$  kg/hm<sup>2</sup>)、中等强度区(800 kg/hm<sup>2</sup> < 碳排放强度 $\leq 1000$  kg/hm<sup>2</sup>)、较高强度区(1000 kg/hm<sup>2</sup> < 碳排放强度 $\leq 1200$  kg/hm<sup>2</sup>)和高强度区(碳排放强度 > 1200 kg/hm<sup>2</sup>)。其中,低强度区的调研村庄有16个、中等强度区24个、较高强度区17个、高强度区8个。调研村庄农业碳排放强度主要分布在中等强度区和较高强度区,占调研村庄总量的63.08%,且高值分布相对离散,但是也存在相对的高值区域,即豫北地区。其中,高强度区有5个调研村庄隶属于豫北地区,分别为浚县左洼村、武陟县程封村、温县小营村、内黄县东街村和长垣县前吴庄村。

样点村庄的农业碳排放强度主要受以下因素影响:(1)土地的规模化经营程度。整理调研数据可知,农户承包集中连片的土地时,单位面积的物资投入相对较少。农户种植分散破碎的小块土地时,单位面积的物资投入较大。如舞阳县邢庄村,该村种植大户单位面积物资投入量是其他农户的2/3,且该村只有种植大户灌溉时有配套的电力设施,其他农户使用柴油发电机抽水灌溉,能源和资金的投入相对较大。土地的集约利用和规

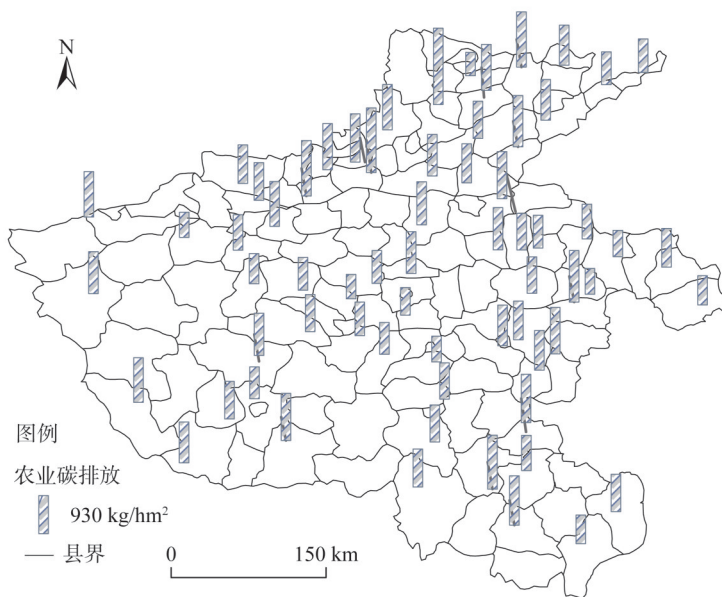


图3 调研村庄的农业碳排放强度

Fig. 3 Agricultural carbon emission intensity of surveyed villages

模化经营会减少单位面积的物资投入量，增大农户的经济效益，同时又减少农业碳排放。(2) 农业水利设施完善与便利度。农业生产资料的投入往往会伴随着水资源的消耗，水利设施完善且布设便利的村庄管理作物时灌溉次数要多于无机井或灌溉困难的村庄。如同属于平顶山市的叶县王博儒村和鲁山县豕留村，王博儒村有机井35眼且沟渠建设已基本完成，豕留村无机井。两个调研村庄的其他生产条件相近，但王博儒村灌溉次数多，伴随着灌溉所投入的物资和能源也高于豕留村，因此王博儒村农业碳排放强度大于豕留村。(3) 种植结构。区域种植结构的不同使得农业生产过程中物资投入存在着差异，如豫北地区主要种植小麦、玉米、花生，豫中地区主要种植小麦、玉米、大豆，豫南地区主要种植小麦、玉米、水稻。其中，小麦的碳排放强度大于玉米和花生<sup>[31]</sup>。大豆种植方式简单、易管理，不需要施用农药和灌溉，农业生产过程中投入的物资极少，碳排放强度要小于其他三种作物。因此豫中的碳排放强度要低于豫南和豫北。(4) 地形条件。自然环境、土壤性质和地形会影响农业生产的物资投入，如豫西地区以山区为主，人均耕地少、土地破碎且主要为坡地，不利于使用大型机械进行农业生产，恶劣的生产条件促使农户更倾向于人工管理，一定程度上减少了物资的投入量，如伊川县侯村、嵩县何村、栾川县柳子村等。

## 2.2 碳排放约束下农业生产效率的差异分析

对不同村庄而言，碳排放约束下的农业生产效率差异悬殊（表3）。其中，农业生产效率最大的为双八村（1.45），农业生产效率最小的为东街村（0.49）。调研村庄的农业生产效率平均值为0.76。结合农业碳排放强度的分类方法，把调研村庄的农业生产效率分为四类，农业生产效率大于1.0的调研村庄有8个，为I类，分别为栾川县柳子村、西平县孔牛庄、淮阳县张路口、商丘市双八村、原阳县陈庄村、汤阴县大黄村、禹州市元东

表3 碳排放约束下调研村庄的农业生产效率测算结果

Table 3 Results of agricultural production efficiency of surveyed villages under the constraint of carbon emissions

村名	农业生产效率	村名	农业生产效率	村名	农业生产效率
兰考县白云山村	0.75	确山县任庄	0.77	辉县高庙村	0.65
通许县王庄	0.68	遂平县三里朱村	0.71	淇县原本庙村	0.72
修武县郟封村	0.67	西平县孔牛庄	1.03	浚县左洼村	0.62
温县小营村	0.56	舞阳县邢庄村	0.83	汤阴县大黄村	1.26
武陟县程封村	0.70	临颍县大于庄村	0.63	内黄县东街村	0.49
博爱县张武村	0.69	叶县王博儒村	0.83	南乐县楼营村	0.73
济源市柿花沟村	0.63	鲁山县冢留村	0.60	范县万庄村	0.62
偃师县高龙村	0.66	郑县前王庄村	0.71	濮阳县大陈村	0.69
伊川县侯村	0.83	汝州市崔辛庄村	0.71	宁陵县徐黑村	0.65
嵩县何村	0.86	长葛市榆园村	0.63	中牟县砚台寺村	0.64
栾川县柳子村	1.16	太康县五里朱村	0.72	滑县西老河寨村	0.75
卢氏县涧西村	0.58	淮阳县张路口	1.17	长垣县前吴庄村	0.66
南召县北召店村	0.71	周口市高庄村	0.69	禹州市元东村	1.16
浙川县中吴店村	0.82	项城市刘营村	0.79	台前县后三里村	0.75
邓州市千兵村	0.79	沈丘县田营村	0.76	杞县瓦岗村	0.70
唐河县周庄	0.75	永城市方庄	0.78	鹿邑县孟庄	0.64
镇平县易营村	0.65	夏邑县槐刘村	0.80	孟津县雷河村	0.61
信阳市余寨村	0.70	睢县祥府寨村	0.60	南阳市匡庄村	0.84
光山县王畈村	0.67	商丘市双八村	1.45	陕县温塘村	0.62
信阳市庙岗村	0.90	柘城县老王集村	0.80	息县大刘庄	1.19
固始县安埠村	0.79	封丘县拐铺村	0.64	正阳县蔡庄村	0.63
新蔡县陈店村	0.66	原阳县陈庄村	1.13		

村、息县大刘庄；农业生产效率介于0.8~1.0之间的村庄有9个，为Ⅱ类；0.6~0.8之间的有45个，为Ⅲ类；小于0.6的有3个，为Ⅳ类。大部分调研村庄农业生产效率位于0.6~0.8之间，平均值也位于该区间。调研村庄农业生产效率小于1.0有57个，占调研村庄总数的87.69%。可知，调研村庄农业生产普遍存在着效率低下的问题。

调研村庄的农业生产效率在空间上呈现一定的聚集分布规律（图4）。其中，Ⅰ类村庄主要位于河南省中东部，地形条件优越，以平原为主，主要作物类型为小麦和玉米；Ⅱ类村庄主要分布在河南省西部山地丘陵区，主要作物类型为小麦、玉米或花生；Ⅲ类村庄的分布较为分散，主要作物类型为小麦、玉米、花生、大豆和水稻，且大部分调研村庄的农业生产效率都属于Ⅲ类，由此可知，调研村庄的农业生产整体上处于低效状态；Ⅳ类村庄主要分布在河南省西北部，主要种植小麦、玉米或花生。由于调研村庄不同作物类型组合的农业生产方式不同，小麦、玉米、花生、大豆、水稻的物资投入与效益产出存在差异，因此不同作物的类型组合在一定程度上会影响农业生产效率的空间分布。根据调研村庄农业生产效率的平均值可以将调研村庄分为两类，即小于平均值和大于平均值。农业生产效率小于平均值的村庄所占比例较大，且豫北地区大于平均值的调研村庄较少，整体效率偏低。农业生产效率大于平均值的调研村庄呈现一定的线性聚集分布，主要聚集在伊川县侯村与固始县安埠村、邓州市千兵村与夏邑县槐刘村之间。

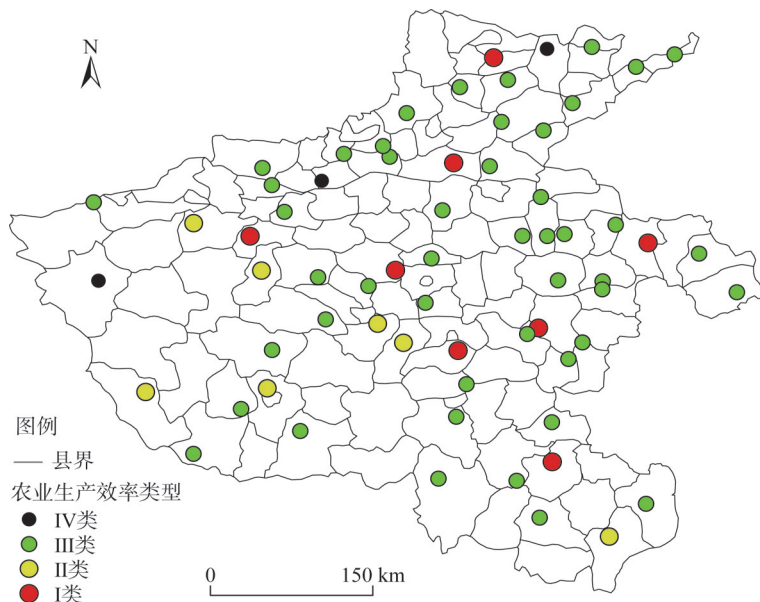


图4 碳排放约束下农业生产效率的分类

Fig. 4 Classification of agricultural production efficiency under the constraint of carbon emissions

### 2.3 基于农业生产效率和碳排放强度的类型区划分及低碳发展策略

以农业碳排放强度和农业生产效率均值为坐标原点，将调研村庄分为四类（图5、表4）：即低碳高效村、高碳低效村、高碳高效村、低碳低效村。各类村庄特点如下：

（1）低碳高效村：该类村庄的总体特征是高效率、低碳排放。农户在农业生产活动中投入了少量的资金和劳动力，基础水利设施完善、机械化水平和农业生产效率高，粮食产量要明显高于其他村庄。部分该类村庄集中在豫西山区和市区周边。山区作物种植困难且经济效益低，主要为小块、分散、人工种植。能源和物资投入相对较少，同时由于人工管理较多，提高了物资和能源的利用效率。市区周边农户种植作物的意愿不高，由于较高的通达性和经济效益促使大部分青壮劳动力选择外出务工，导致作物缺乏管理且生产投入较少，但由于邻近市区，村庄的水利设施完善、机械化水平高，能源可以得到充分利用。

（2）高碳低效村：该类村庄的特点是低效率、高碳排放。农户投入较多的技术资金和农业资源，但劳动力投入较少，作物的管理水平和农业生产效率偏低，从而导致粮食产量下降和碳排放量上升。如淇县原本庙村，该村

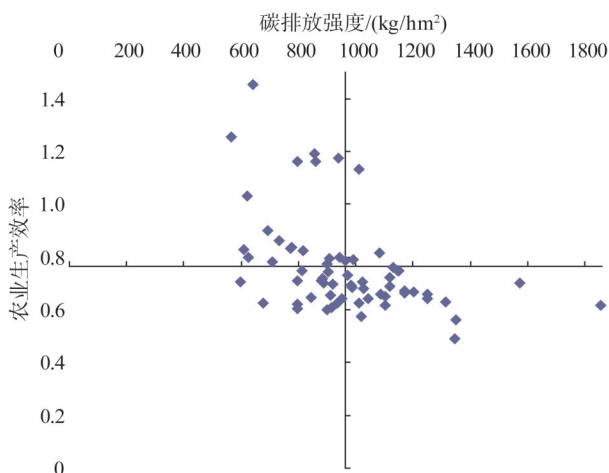


图5 基于农业碳排放强度和农业生产效率的调研村庄类型划分

Fig. 5 Classification of surveyed villages based on agricultural carbon emission intensity and agricultural production efficiency



表4 基于农业碳排放强度和农业生产效率的调研村庄分类及低碳发展对策

Table 4 Classification of surveyed villages based on agricultural carbon emission intensity and agricultural production efficiency and the strategies of low-carbon development

类别	村庄	特点	低碳发展对策
低碳高效村	伊川县侯村、嵩县何村、栾川县柳子村、信阳市庙岗村、固始县安埠村、确山县任庄、西平县孔牛庄、舞阳县邢庄村、叶县王博儒村、淮阳县张路口、项城市刘营村、永城市方庄、夏邑县槐刘村、商丘市双八村、柘城县老王集村、汤阳县大黄村、禹州市元东村、南阳市匡庄村、息县大刘庄	高效率、低碳排放	政府应以该类村庄为试点发展低碳农业，探索适合当地农业发展的生产模式，然后以试点为基础，实现从“点”到“面”的逐步推广
高碳低效村	兰考县白云山村、通许县王庄、修武县郟封村、温县小营村、武陟县程封村、博爱县张武村、偃师县高龙村、卢氏县涧西村、南召县北召店村、唐河县周庄、光山县王畈村、新蔡县陈店村、长葛市榆园村、周口市高庄村、沈丘县田营村、辉县高庙村、淇县原本庙村、浚县左洼村、内黄县东街村、南乐县楼营村、濮阳县大陈村、中牟县砚台寺村、长垣县前吴庄村、鹿邑县孟庄、陕县温塘村、正阳县蔡庄村	低效率、高碳排放	该类村庄需要调整生产轮作模式，鼓励开展土地规模化经营，减少能源和物资的投入；同时政府需投资完善农业基础水利设施，加强水利设施使用的监管力度，改进现有的灌溉方式，推广节水节能新技术；加大农机的优惠和补贴力度，提高农业机械化水平
高碳高效村	浙川县中吴店村、邓州市千兵村、原阳县陈庄村	高效率、高碳排放	政府需要发挥引导作用，利用农业技术站推广适宜当地环境的耕作模式和管理方式，优化水土资源组合模式，引导和帮助农户制定合理的投资计划，转变农户生产观念；充分利用农户种植的积极性，打造“人工—机械”的二元生产模式，提高农业生产效率，减少农业碳排放
低碳低效村	济源市柿花沟村、镇平县易营村、信阳市余寨村、遂平县三里朱村、临颍县大于庄村、鲁山县冢留村、郟县前王庄村、汝州市崔辛庄村、太康县五里朱村、睢县祥府寨村、封丘县拐铺村、范县万庄村、宁陵县徐黑村、滑县西老河寨村、台前县后三里村、杞县瓦岗村、孟津县雷河村	低效率、低碳排放	该类村庄应在完善农业水利设施的基础上充分调动农户的种植意愿，适当加大劳动力和资源投入，提高作物的管理水平，实现农业生产的低碳高效

机井深度为120 m且数量较少，同时由于相关部门监管不严，政府出资建设的机井存在乱收费现象，较深的地下水位和不健全的管理机制导致能源和资金投入偏大，农业生产效率较低。(3) 高碳高效村：该类村庄的总体特征为保持较高碳排放的同时，也有着较高的农业生产效率。该类村庄在调研村庄中所占比例最小，村民在农业生产活动中依托经验和农资店老板的指导进行物资投入，为了得到最大收益往往会过量投资。其中，农户勤劳度的大小决定着作物管理水平的高低，农户有着很强的种植意愿，农户的勤劳度和作物管理水平较高，农业生产效率和粮食产量相应也较高。(4) 低碳低效村：该类村庄的特点为低碳排放、低效率。农户在从事农业生产时物资和能源投入适中，但整体利用效率不高。部分村庄灌溉设施不健全，农户没有投资的意愿，同时由于劳动力较少，作物生长期缺乏管理，从而导致农业生产效率较低，如济源市柿花沟村。

其中，高碳低效村的数量为26个，占调研村庄的40.0%，所占比例最大，高碳高效村的数量为3个，占调研村庄的4.62%，所占比例最小。低碳高效村和低碳低效村的数量分别为19个和17个，占比分别为29.23%和26.15%。占比最大的高碳低效村在农业生产过程中产生了较高的碳排放，但没有较高的农业生产效率，因此未来河南省农业发展转

型的重心是减少碳排放, 提高农业生产效率。

### 3 结论与讨论

基于河南省 65 个村庄的调查数据, 采用 Super-SBM 模型分析了碳排放约束下的农业生产效率的差异, 根据碳排放强度和农业生产效率的关系对样点村庄进行了类型划分, 并提出了不同类型村庄低碳发展的策略, 主要结论如下: (1) 河南省农业碳排放强度呈现“南北高、中间低”的空间分布格局, 这主要受种植结构、农业生产条件、人类各项投入等因素的影响。样点村庄的农业碳排放强度高值分布相对离散, 但是也存在相对的高值区域, 即豫北地区。(2) 农用地的集约化和规模化经营会减少单位面积的能源和物资投入量, 从而降低农业碳排放强度。(3) 碳排放约束下的农业生产效率具有较大的空间差异, 样点村庄农业生产效率的平均值为 0.76, 大部分村庄位于 0.6~0.8 之间。(4) 以农业碳排放强度和农业生产效率的均值为坐标原点, 把调研村庄分为四类: 即低碳高效村、高碳低效村、高碳高效村、低碳低效村。其中高碳低效村和低碳低效村两种类型占比较大, 这表明河南省调研村庄农业生产效率普遍偏低。

为进一步提高农业生产效率, 推动农业领域碳减排, 建议未来可采取以下措施: (1) 通过农业规模化经营降低农业能源、资源投入和碳排放强度, 完善农业政策法规, 转变农户生产观念, 构架现代农业生产体系, 加快土地流转, 引导农户改变经营模式, 从高投入生产逐渐转为精准生产。(2) 加强农业基础设施建设, 推动农业科技创新, 提高农业生产效率, 水资源匮乏区要加快农田水利工程建设, 推广节水灌溉模式, 大力推进农业生产机械化、智能化和信息化水平。(3) 在保证粮食生产的前提下实施差别化的农业低碳发展管理模式, 因地制宜优化水土资源组合模式, 推进实施农业碳减排和粮食增产的双赢可持续发展道路。比如, 对农业生产条件较好的村庄(如滑县西老河寨村), 应实施精准化施肥, 从源头上减少农业碳排放; 而对于农业生产条件较差的村庄(如浚县左洼村、鲁山县冢留村等), 应重点加强农业基础设施建设、提高水能资源利用效率, 降低农业碳排放强度。

#### 参考文献(References):

- [1] 周宏, 褚保金. 构建中国农业生产效率的动态监测体系. 农业经济问题, 2003, 24(12): 45-48. [ZHOU H, CHU B J. Complete an dynamic monitor system of Chinese productivity. Problem of Agricultural Economy, 2003, 24(12): 45-48.]
- [2] NGUYEN T T, DO T L, PARVATHI P, et al. Farm production efficiency and natural forest extraction: Evidence from Cambodia. Land Use Policy, 2018, 71: 480-493.
- [3] SHORTALL O K, BAMES A P. Greenhouse gas emissions and the technical efficiency of dairy farmers. Ecological Indicators, 2013, 29: 478-488.
- [4] 刘子飞, 王昌海. 有机农业生产效率的三阶段 DEA 分析: 以陕西洋县为例. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(7): 105-112. [LIU Z F, WANG C H. Organic agricultural production efficiency based on a three-stage DEA model: A case study of Yang county, Shanxi province. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(7): 105-112.]
- [5] 贾琳, 夏英. 农户粮食生产规模效率及其影响因素分析: 基于黑、豫、川三省玉米种植户的调查数据. 资源科学, 2017, 39(5): 924-933. [JIA L, XIA Y. Scale efficiency of grain production and influencing factors based on survey data from Heilongjiang, Henan and Sichuan. Resources Science, 2017, 39(5): 924-933.]
- [6] 李博, 张文忠, 余建辉. 碳排放约束下的中国农业生产效率地区差异分解与影响因素. 经济地理, 2016, 36(9): 150-157. [LI B, ZHANG W Z, YU J H. Decomposition and influence factors of district difference of China agricultural production efficiency under the constraint of carbon emission. Economic Geography, 2016, 36(9): 150-157.]

- [7] 王宝义, 张卫国. 中国农业生态效率测度及时空差异研究. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(6): 11-19. [WANG B Y, ZHANG W G. A research of agricultural eco-efficiency measure in China and space-time differences. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(6): 11-19.]
- [8] 刘俊辉, 曾福生. 碳排放约束下的粮食主产区农业生产效率及其影响因素. 江苏农业科学, 2018, 46(17): 321-326. [LIU J H, ZENG F S. Study on agricultural production efficiency and its influencing factors in major grain-producing areas under constraint of carbon emissions. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(17): 321-326.]
- [9] 张丽娜, 陈志, 杨敏丽, 等. 我国玉米生产效率时空特征分析. 农业机械学报, 2018, 49(1): 183-193. [ZHANG L N, CHEN Z, YANG M L, et al. Spatio-temporal feature of maize production efficiency in main producing provinces of China. Transactions of the CSAM, 2018, 49(1): 183-193.]
- [10] 张永强, 蒲晨曦, 王珧, 等. 化肥投入效率测度及归因: 来自20个玉米生产省份的面板证据. 资源科学, 2018, 40(7): 1333-1343. [ZHANG Y Q, PU C X, WANG Y, et al. The efficiency estimation of fertilizer input and attribution: Panel evidence from 20 corn producing provinces. Resources Science, 2018, 40(7): 1333-1343.]
- [11] 贾蕊, 陆迁. 不同灌溉技术条件下信贷约束对农户生产效率的影响: 以甘肃张掖为例. 资源科学, 2017, 39(4): 756-765. [JIA R, LU Q. The effects of credit constraints on peasant household production efficiency under different irrigation technologies in Zhangye, Gansu. Resources Science, 2017, 39(4): 756-765.]
- [12] 金福良, 王璐, 李谷成, 等. 不同规模农户冬油菜生产技术效率及影响因素分析: 基于随机前沿函数与1707个农户微观数据. 中国农业大学学报, 2013, 18(1): 210-217. [JIN F L, WANG L, LI G C, et al. Winter rapeseed's technical efficiency and its influence factors: Based on the model of stochastic frontier production function and 1707 micro-datas of farmers. Journal of China Agricultural University, 2013, 18(1): 210-217.]
- [13] 钱龙, 洪名勇. 非农就业、土地流转与农业生产效率变化: 基于CFPS的实证分析. 中国农村经济, 2016, (12): 4-18. [QIAN L, HONG M Y. Non-agricultural employment, land transfer and agricultural production efficiency change: An empirical analysis based on CFPS. Chinese Rural Economy, 2016, (12): 4-18.]
- [14] 戚焦耳, 郭贯成, 陈永生. 农地流转对农业生产效率的影响研究: 基于DEA-Tobit模型的分析. 资源科学, 2015, 37(9): 1816-1824. [QI J E, GUO G C, CHEN Y S. The impact of farmland transfer on agricultural production efficiency based on the DEA-Tobit model. Resources Science, 2015, 37(9): 1816-1824.]
- [15] DENG X, GIBSON J. Improving eco-efficiency for the sustainable agricultural production: A case study in Shandong, China. Technological Forecasting and Social Change, 2018, 144: 394-400.
- [16] 杨勇, 邓祥征, 李志慧, 等. 2000—2015年华北平原土地利用变化对粮食生产效率的影响. 地理研究, 2017, 36(11): 2171-2183. [YANG Y, DENG X Z, LI Z H, et al. Impact of land use change on grain production efficiency in North China Plain during 2000-2015. Geographical Research, 2017, 36(11): 2171-2183.]
- [17] 王嫚嫚, 刘颖, 崩昊, 等. 土地细碎化、耕地地力对粮食生产效率的影响: 基于江汉平原354个水稻种植户的研究. 资源科学, 2017, 39(8): 1488-1496. [WANG M M, LIU Y, KUAI H, et al. The effects of land fragmentation and land quality on the technical efficiency of grain production based on 354 rice planters on the Jiangnan Plain. Resources Science, 2017, 39(8): 1488-1496.]
- [18] 邢慧茹, 张晓骏, 邓义. 农业生产效率与其影响因素相关关系实证分析: 基于湖北省数据. 中国农业资源与区划, 2016, 37(12): 198-203. [XING H R, ZHANG X J, DENG Y. Empirical analysis on the relationship between agricultural production efficiency and its influencing factors: Based on the data of Hubei province. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2016, 37(12): 198-203.]
- [19] TALUKDER B, HIPEL K W. Energy efficiency of agricultural systems in the southwest coastal zone of Bangladesh. Ecological Indicators, 2019, 98: 641-648.
- [20] CLARK M, TILMAN D. Comparative analysis of environmental impacts of agricultural production systems, agricultural input efficiency, and food choice. Environmental Research Letters, 2017, 12(6): 064016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa6cd5>.
- [21] 赵荣钦, 李志萍, 韩宇平, 等. 区域“水—土—能—碳”耦合作用机制分析. 地理学报, 2016, 71(9): 1613-1628. [ZHAO R Q, LI Z P, HAN Y P, et al. The coupling interaction mechanism of regional water-land-energy-carbon system. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(9): 1613-1628.]
- [22] WANG J X, ROTHAUSEN S G S A, CONWAY D, et al. China's water-energy nexus: Greenhouse-gas emissions from

- groundwater use for agriculture. *Environmental Research Letters*, 2012, 7(1): 14035-14044.
- [23] XIONG C H, YANG D G, HUO J W. Spatial-temporal characteristics and LMDI-based impact factor decomposition of agricultural carbon emissions in Hotan Prefecture, China. *Sustainability*, 2016, 8(3): 262.
- [24] 董红敏, 李玉娥, 陶秀萍, 等. 中国农业源温室气体排放与减排技术对策. *农业工程学报*, 2008, 24(10): 269-273. [DONG H M, LI Y E, TAO X P, et al. China greenhouse gas emissions from agricultural activities and its mitigation strategy. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(10): 269-273.]
- [25] 王兴, 马守田, 濮超, 等. 西南地区农业碳排放趋势及影响因素研究. *中国人口·资源与环境*, 2017, 27(s2): 231-234. [WANG X, MA S T, PU C, et al. Trends and influencing factors of agricultural carbon emissions in the Southwest China. *China Population, Resources and Environment*, 2017, 27(s2): 231-234.]
- [26] 黎孔清, 陈俭军, 马豆豆. 基于 STIRPAT 和 GM(1, 1) 模型的湖南省农地投入碳排放增长机理及趋势预测. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(2): 345-352. [LI K Q, CHEN J J, MA D D. Growth mechanism and trend forecast of carbon emission from farmland inputs in Hunan province based on STIRPAT and GM(1, 1) model. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(2): 345-352.]
- [27] 钱晓雍. 上海农田生态系统碳源汇时空格局及其影响因素分析. *农业环境科学学报*, 2011, 30(7): 1460-1467. [QIAN X Y. Spatial-temporal variation and impact factor of carbon source and sink of farmland ecosystem in Shanghai, China. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(7): 1460-1467.]
- [28] 卢小宏, 黄晶, 史磊刚, 等. 北京市主要农作模式的碳效益分析. *中国农业大学学报*, 2012, 17(2): 48-53. [LU X H, HUANG J, SHI L G, et al. Analysis on carbon efficiency of the main cropping systems in Beijing. *Journal of China Agricultural University*, 2012, 17(2): 48-53.]
- [29] 陈慧, 付光辉, 刘友兆. 江苏省县域农业温室气体排放: 时空差异与趋势演进. *资源科学*, 2018, 40(5): 1084-1094. [CHEN H, FU G H, LIU Y Z. Spatial and temporal variation and trend evolution of county-based agricultural greenhouse gas emissions in Jiangsu province. *Resources Science*, 2018, 40(5): 1084-1094.]
- [30] 尧波, 郑明艳, 胡丹, 等. 江西省县域农业碳排放的时空动态及影响因素分析. *长江流域资源与环境*, 2014, 23(3): 311-318. [YAO B, ZHENG M Y, HU D, et al. Spatial and temporal variations of county based agricultural carbon emissions and associated effect factors in Jiangxi province. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23(3): 311-318.]
- [31] 杨文娟, 赵荣钦, 张战平, 等. 河南省不同产业碳水足迹效率研究. *自然资源学报*, 2019, 34(1): 92-103. [YANG W J, ZHAO R Q, ZHANG Z P, et al. Industrial carbon and water footprint efficiency of Henan province based on input-output analysis. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(1): 92-103.]
- [32] 王帅, 赵荣钦, 苏辉, 等. 河南省典型区农业水土资源开发的碳排放效应研究. *华北水利水电大学学报: 自然科学版*, 2019, 40(1): 71-78. [WANG S, ZHAO R Q, SU H, et al. Carbon emission effects of agricultural land and water resources exploitation in typical villages of Henan province. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power: Natural Science Edition*, 2019, 40(1): 71-78.]
- [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. *生态与农村环境学报*, 2007, 23(2): 1-6. [ZHAO R Q, QING M Z. Temporospatial variation of partial carbon source/sink of farmland ecosystem in coastal China. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2007, 23(2): 1-6.]
- [34] WEST T O, MARLANG G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: Comparing tillage practices in the United States. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2002, 91(1-3): 217-232.
- [35] 国家发展改革委员会. 节能低碳技术推广管理暂行办法. [http://hzs.ndrc.gov.cn/newzwxx/201401/t20140110\\_575400.html](http://hzs.ndrc.gov.cn/newzwxx/201401/t20140110_575400.html). [National Development and Reform Commission of China. Interim measures for promotion and management of energy-saving and low carbon technologies. [http://hzs.ndrc.gov.cn/newzwxx/201401/t20140110\\_575400.html](http://hzs.ndrc.gov.cn/newzwxx/201401/t20140110_575400.html).]
- [36] 潘家华, 张丽峰. 我国碳生产率区域差异性研究. *中国工业经济*, 2011, (5): 47-57. [PAN J H, ZHANG L F. Research on the regional variation of carbon productivity in China. *China Industrial Economics*, 2011, (5): 47-57.]
- [37] 金巍, 刘双双, 张可, 等. 农业生产效率对农业用水量的影响. *自然资源学报*, 2018, 33(8): 1326-1339. [JIN W, LIU S S, ZHANG K, et al. Influence of agricultural production efficiency on agricultural water consumption. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(8): 1326-1339.]

## Agricultural production efficiency and spatial pattern under carbon emission constraint: Based on 65 villages of Henan province

WANG Shuai<sup>1</sup>, ZHAO Rong-qin<sup>1</sup>, YANG Qing-lin<sup>1</sup>, XIAO Lian-gang<sup>1</sup>, YANG Wen-juan<sup>1</sup>,  
YU Jiao<sup>1</sup>, ZHU Rui-ming<sup>1</sup>, CHUAI Xiao-wei<sup>2</sup>, JIAO Shi-xing<sup>3</sup>

(1. College of Surveying and Geo-informatics, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 2. School of Geographic & Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 3. Department of Resources & Environment and Tourism, Anyang Normal University, Anyang 455002, Henan, China)

**Abstract:** Exploring agricultural production efficiency under the constraint of carbon emissions based on village scale not only helps to reveal the relationship between carbon emission at the micro unit level and agricultural production efficiency, but also has certain practical significance for the choice of differentiated low-carbon agricultural production mode. Based on the survey data obtained from 65 villages in Henan province, this paper calculated the agricultural carbon emission at different sample villages, and analyzed differences in agricultural production efficiency under the constraint of carbon emission using Super-SBM model. The results show that: (1) The spatial distribution pattern of agricultural carbon emission intensity in the study area is "high in the north and south, but low in the middle", which is mainly affected by planting structure, agricultural production conditions, and human inputs. (2) Intensive use and large-scale operation of land will reduce the energy and material input per unit area, thereby reducing agricultural carbon emission intensity. (3) There are great spatial differences in agricultural production efficiency under the constraint of carbon emissions. The average agricultural production efficiency of the sample villages is 0.76, and the most areas are between 0.6 and 0.8. (4) According to the relationship between agricultural production efficiency and carbon emission intensity, the sample villages can be divided into four types: low carbon and high efficiency villages, high carbon and low efficiency villages, high carbon and high efficiency villages and low carbon and low efficiency villages. Among them, the two types of high carbon and low carbon inefficient villages account for a large proportion, which indicates that there is a widespread problem of low agricultural production efficiency in Henan. In the future, we should strengthen large-scale agricultural operations, reduce energy and material input, improve agricultural infrastructure, and advance new technologies for water saving and energy conservation, so as to promote the low-carbon development of agriculture while improving the efficiency of agricultural production.

**Keywords:** carbon emission; agricultural production efficiency; Super-SBM model; spatial pattern; Henan province