

西部地区农业碳排放效率及收敛性分析

——基于 SBM—Undesirable 模型¹

郭四代 钱昱冰 赵锐

【摘要】农业已成为温室气体排放的主要来源，研究西部地区农业碳减排问题具有重要的现实意义。基于中国西部地区 12 个省份 2006 年~2015 年的农业面板数据，采用包含非期望产出的 SBM—Undesirable 模型评价西部地区各省份的碳排放总量和碳排放效率，并利用 σ 收敛、 β 绝对收敛和 β 条件收敛方法检验西部地区农业碳排放效率的变动趋势。结果发现：①西部地区各省份的农业碳排放量呈现缓慢增长趋势，且区域差异明显。②西部地区的碳排放效率总体呈上升的趋势，广西、四川、新疆等省份的农业碳排放效率长期位于生产前沿面，其投入产出效率处于较优状态。③西部地区的农业碳排放效率具有 ρ 绝对收敛性和 ρ 条件收敛性，存在着低效率省份向高效率省份追赶的趋势，区域内各省的碳排放效率趋于各自稳态水平，且经济发展水平与劳动力投入是提高西部碳排放绩效的关键因素。故为进一步提高西部地区农业碳排放效率水平，提出了应大力发展低碳农业、提高劳动者低碳意识、不断提升农业碳减排技术水平、调整农业产业结构、完善农业生态补偿机制等建议。

【关键词】西部地区 农业碳排放效率 σ 收敛 β 条件收敛 β 绝对收敛

【中图分类号】F323.22 **【文献标识码】**A **【文章编号】**1003—7470（2018）—11—0080（08）

一、引言

IPCC 第五次评估报告指出，过去二十年间全球气温上升了 0.85°C ，地表温度每十年上升幅度均高于历史同期水平。^[1]全球变暖引发了酸雨、冰川融化、海平面上升、可利用淡水资源状况恶化等诸多棘手的问题，严重影响到人类的生存与发展，因此，解决全球变暖问题时不可待。工业革命以来，人类对化石能源的大量开采和利用使得工业碳排放量迅速增加，^[2]然而，由于农业生产活动的广泛性、普遍性，因农业活动所导致的碳排放已成为全球碳排放的重要贡献源，^{[3][4]}主要涉及农地利用、农用物资投放、农作物种植、牲畜养殖等若干活动产生的直接或隐含碳排放。中国作为全球最大的农业发展国之一，农业在国民经济中占据了主导地位，这是推动经济发展和社会进步的重要因素。如何在保障农业生产效益的同时降低碳排放，是目前农业生态效率提升的一个重要挑战。在 2015 年巴黎气候峰会上，中国政府承诺到 2030 年实现碳排放强度较 2005 年下降 60%至 65%的减排目标，并将其作为国民经济和社会发展的约束性指标。而中国西部省份大多是农业大省，其碳排放强度远高于以工业为主导的中东部省份，面临的农业减排压力较大。

国内学者基于不同视角对不同国家、不同地区的农业碳排放效率及收敛性问题进行了探索性研究，特别是大量文献采用数据包络分析法测评碳排放效率。田云和张俊飏利用 DEA—Malmquist 指数法测算我国的农业碳排放绩效，结果表明省域间的碳排放绩效差异明显，并存在着显著的绝对 β 收敛与条件 β 收敛。^[5]刘德娟和周琼运用 DEA—Global Malmquist 模型测算中国种植业

¹本文系国家自然科学基金项目“基于区域重点建设项目环境影响的社会风险演化机制与评估体系研究”（编号：41571520）、四川省科技厅软科学研究计划项目“基于碳减排标签的绿色供应链利益主体行为与策略研究”（编号：18RX0986）、四川县域经济发展研究中心项目“中国西部地区县域农业碳排放效率及收敛性研究”（编号：xy2018022）的阶段性研究成果。

作者郭四代 副教授 西南科技大学经济管理学院四川绵阳 621010
钱昱冰 硕士研究生 西南科技大学经济管理学院四川绵阳 621010
赵锐教授 博士生导师 西南交通大学四川成都 610000

的碳排放效率，表明技术进步是减小碳排放的主要助推力，全国各省份仅存在条件 β 收敛。^[6]高鸣和宋鸿远通过探索农业碳排放的空间收敛与分异，发现各区域差异明显且呈现收敛性与趋同性。^[7]而吴昊玥、何艳秋等应用 DEA-SBM 模型和面板单位根的检验方法证实中国农业的碳排放绩效并不存在随机收敛。^[8]

尽管学者们对农业碳排放效率及其收敛性进行了有益的研究，但农业碳排放绩效的收敛性并未得到一致性的结论。鉴于农业碳排放的特殊性，其碳减排政策的制定应结合不同地区的实际情况，构建适合自身的差异化减排政策，避免全国一盘棋。而针对西部地区的农业碳减排研究还没有系统展开，因此，研究西部地区的农业碳排放效率及收敛性，具有较强的现实意义。本文将中国西部地区 12 个省市作为重点研究对象，从人力、财力、物力三个方面选取投入指标，以农业总产值为期望产出，以农业碳排放总量为非期望产出，利用包含非期望产出的 SBM—Undesirable 模型对西部各省份的农业碳排放效率水平进行测度，并运用 c 收敛、P 绝对收敛和 P 条件收敛方法检验其变动趋势，以期为科学合理地制定西部地区差异化农业碳减排政策提供理论依据。

二、研究方法

1. SBM—Undesirable 模型

以 CCR、BCC 模型为代表的传统 DEA 方法一般是基于径向和角度的层面来测度同质单元的效率，由于没有考虑投入与产出的松弛性问题，而且也无法评价包含“坏产出”的效率水平，导致结果产生较大的偏差。^[9]为了有效解决这些问题，Tone 于 2001 年基于非径向和非角度提出了 SBM-DEA 模型，该模型将松弛变量纳入目标函数中。^[10]本文采用 Cooper 等提出的 SBM—Undesirable 模型来评价西部地区的农业碳排放效率，该模型是由 SBM—DEA 模型衍生发展而来的，能有效避免径向和角度选择的差异而导致的效率偏误，更能体现农业碳排放效率的本质。^[11]其中，技术效率值是基于固定规模 (CRS) 模式得出，纯技术效率是基于可变规模 (VRS) 模式得出。由于 CRS 模式得到的结果相较于 VRS 模式更能反映出各地区农业碳排放效率的差异变化情况，因此，采用固定规模 (CRS) 模式下的 SBM—Undesirable 模型进行评价，模型如下：

$$\rho_0 = \min \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m s_i / x_{i0}}{1 + \frac{1}{S_1 + S_2} \left(\sum_{r=1}^{s_1} s_r^g / y_{r0}^g + \sum_{l=1}^{s_2} s_l^b / y_{l0}^b \right)} \quad (1)$$

$$s. \quad t \quad x_0 = X\lambda + S^-$$

$$y_0^g = Y^g\lambda - S^g$$

$$y_0^b = Y^b\lambda + S^b$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1, \lambda_j \geq 0; S^- \geq 0, S^g \geq 0, S^b \geq 0$$

假设该模型有决策单元 n 个，每一个决策单元都包括投入、期望产出和非期望产出三方面的要素，形式为 $X \in R^m$ 、 $y^g \in R^{s_1}$ 、 $y^b \in R^{s_2}$ 。定义矩阵 $X = [X_1, \dots, X_n] \in R^{m \times n} > 0$ ， $Y^g = [y_1^g, \dots, y_n^g] \in R^{s_1 \times n} > 0$ ， $Y^b = [y_1^b, \dots, y_n^b] \in R^{s_2 \times n} > 0$ 。 ρ 表示效率， S^- 、 S^g 、 S^b 分别表示投入、期望产出、非期

望产出的松弛变量，当松弛变量为 0、效率值 ρ 为 1 时，农业碳排放效率最优，否则需要通过松弛变量判断是否应该减少投入或增加产出，从而提高效率值。

2. 收敛性研究方法

(1) α 收敛

本文采用 α 收敛模型中的变异系数方法评价我国西部地区农业碳排放效率的绝对差距发展趋势，该方法表示如下。

$$CV = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}}}{\bar{X}} \quad (2)$$

式中，CV 表示某一年的变异系数， X_i 为该年的农业碳排放效率值， $\bar{X}$ 为该年的效率平均值。如果标准差按时间序列呈递减趋势，那么在这一时期内，农业碳排放效率呈 σ 收敛态势。

(2) β 绝对收敛

β 绝对收敛目的在于判断低效率省份在研究期内是否存在向高效率省份靠拢的趋势，即判断是否存在“追赶效应”，若存在“追赶效应”则意味着西部地区未来的农业碳排放形势在向好的趋势发展。 β 绝对收敛模型如下所示。

$$\ln (x_{i,t+T} / \bar{X}) / T = c + \beta \ln x_{i,t} + \mu_{i,t} \quad (3)$$

式中， $X_{i,t}$ 表示在某时段期初第 i 个决策单元的效率值， $X_{i,t+T}$ 表示在某时段期末第 i 个决策单元的效率值， c 为常数项， $\mu_{i,t}$ 为误差项，若回归结果显示 $\beta < 0$ 且通过显著性检验，则证明西部地区的碳排放效率存在“追赶效应”。

(3) β 条件收敛

β 条件收敛目的在于判断西部地区各省份的农业碳排放效率是否趋近于各自的稳态水平，即各影响因素对农业碳排放效率是否会有正向的促进或负向的抑制作用。 β 条件收敛模型如下。

$$\ln (x_{i,t+T} / \bar{X}) / T = c + \beta \ln x_{i,t} + \sum_{j=1}^k \lambda_j m_j + \mu_{i,t} \quad (4)$$

相对于 β 绝对收敛模型而言， β 条件收敛增加了控制变量 m ，即考虑了影响因素的作用，其他变量的含义和条件收敛模型中的含义相同。

三、指标选取

1. 农业碳排放效率评价指标的选取

从人力、财力、物力三方面考虑投入指标，产出变量包括期望产出与非期望产出。具体指标选取如表 1 所示。

表 1 指标选取

种类	变量
投入指标	农村第一产业从业人数
	农业固定资产投资
	化肥使用量
	农药使用量
	农膜使用量
	柴油使用量
	农作物播种面积
期望产出指标	农业总产值
非期望产出指标	农业碳排放量

上述指标数据均来自于《中国统计年鉴》、《中国农村统计年鉴》、各省份统计年鉴。为了计算方便，需对部分指标选取的数据做如下处理。

第一，为涵盖所有碳源，我们以广义农业作为研究对象，主要包括种植业、畜牧业、林业、渔业。相应的农业碳排放来源主要涵盖三个方面：①农业用地碳排放，包括化肥、农药、农膜、柴油使用产生的碳排放以及灌溉、翻耕工作过程中的碳排放；②水稻养殖过程中产生的 CH_4 ，这一部分主要由种植业产生；③牲畜饲养过程中动物肠道发酵和粪便处理的碳排放，这一部分主要由畜牧业产生。

第二，由于农业固定资产投资是流量指标，需将流量指标换算成存量指标，换算方法采取国际通用的 PIM 方法。而对于农业总产值这一指标，由于年鉴上已按基年价格计算，故无需考虑时间价值，可直接使用。

第三，选取化肥、农药、农膜、柴油的使用量，农业灌溉、翻耕、水稻种植面积以及反刍动物牛、猪、羊、马、驴、骡等作为农业碳排放量的计算基础。但由于不同种类牛的碳排放系数差异巨大，故将牛细分为奶牛与其他牛。化肥、农药、灌溉的碳排放系数采用美国学者 West 的研究成果；农膜的碳排放系数参考南京农业大学农业资源与生态环境研究所的研究成果；^[12]翻耕的碳排放系数参考中国农业大学生物与技术学院的研究成果；^[13]反刍动物的肠道发酵系数、粪便管理系数和柴油碳排放系数参考 IPCC 的研究成果；^[14]根据王效科^[15]关于水稻生长过程中甲烷排放系数的研究成果，先测算出水稻排放的甲烷总量，再根据 IPCC 报告中的折算比例（1 吨甲烷所引发的温室效应等同于 6.8182 吨碳引发的温室效应），从而折算出水稻的碳排放量。

第四，由于西藏地区 2011 年至 2015 年的农业固定资产缺失，故通过加权移动平均法对缺失年份的农业固定资产进行估算。

2. 影响因素指标的选取

关于农业碳排放影响因素的研究现在已经非常成熟。李博、张文忠等^[16]认为影响我国农业碳排放的主要因素包括农业结构、劳动者素质、城市化水平、城乡收入比等。胡中应、胡浩^[17]将产业集聚程度、农业发展水平、环境规制水平、农业产业结构归

纳为农业碳排放的四大影响因素。王兴、马守田则认为影响我国西南地区农业碳排放的主要因素有农业结构、劳动力规模、经济发展水平。综合学者们的研究成果及数据的可获取性，从规模效应、技术效应、结构效应三方面选取经济发展水平（人均农业生产总值：农业生产总值/第一产业从业人数）、劳动力规模（第一产业从业人数）、农业产业结构（种植业产值在农林牧渔业总产值中的比重）、城镇化水平（农村总人口与全省总人口的比值）四个影响因素，研究其对收敛性的影响程度。

四、实证分析

1. 农业碳排放总量及分析

根据各种农业碳排放源的碳排放系数，可测算出西部各省份的农业碳排放量，结果如表 2 所示。

表 2 2006 年~2015 年西部各省份的农业碳排放量

年份	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	均值
内蒙古	1291.3	1285.8	1812.9	1358.4	1394.1	1380.1	1412.1	1477.7	1539.5	1586.8	1453.9
广西	848.9	814.5	841.2	869.7	886.2	893.9	912.5	939.6	935.7	932.7	887.5
重庆	364.4	362.2	381.2	400.2	406.2	411.7	417.5	425.4	438.7	441.3	404.9
四川	1618.5	1504.1	1527.7	1549.5	1556.0	1555.3	1558.9	1597.1	1614.0	1611.9	1569.3
贵州	613.3	587.2	611.7	627.4	630.3	616.2	628.4	652.8	650.1	671.2	628.9
云南	1019.0	1012.9	1042.8	1079.6	1114.6	1138.7	1172.0	1231.3	1221.0	1232.3	1126.4
西藏	359.0	358.7	369.2	367.7	357.7	356.1	348.3	365.2	343.6	345.1	357.1
陕西	578.1	542.1	550.8	589.9	595.2	603.6	637.9	650.6	639.9	641.0	602.9
甘肃	648.1	647.5	665.0	683.7	711.0	734.5	749.8	824.4	822.8	831.6	731.8
青海	304.1	297.4	301.3	303.8	309.5	307.8	303.3	325.1	317.7	320.7	309.1
宁夏	179.1	180.0	186.0	192.8	197.2	199.6	207.5	212.0	224.2	227.9	200.6
新疆	984.3	978.9	972.6	969.0	990.3	1016.8	1084.9	1206.8	1272.4	1307.7	1078.4

从表 3 西部各省份的碳排放量来看，省域差异十分明显。四川的年均碳排放量最高，达到 1569.3 万吨；最少的为宁夏，仅有 200 万吨，造成这一差异的根源在于不同省份在幅员面积、人口基数、农业发展程度、经济结构等方面的异同。四川、内蒙古、云南、新疆等多为西部农业发展领先省份，其人口基数大、疆域辽阔、农业总产值大等导致这些省份碳排放量位于前列。从环比增长速度来看，总体呈现出“缓慢上升、个别省份下降”的趋势。从年均增长率来看，除西藏的年均增长率为负值之外，其余省份均为正值，意味着大部分省份的农业碳排放量呈递增趋势。

2. 农业碳排放效率测算

基于 CRS 假设下的 SBM^{Undesirable} 模型，利用 Matlab 软件进行编程运算，西部地区农业碳排放效率测算结果如表 3 所示。

从总体层面上来看，我国西部地区的农业碳排放效率均值已达到较高效率水平，大体上呈现上升趋势。从 2007 年开始，效率值稳步上升，仅在 2013 年和 2015 年略有下降，这意味着我国西部地区农业碳减排工作取得了显著成效。这与我国西部地区农业环境治理投入的不断加大、农业用地的切实保护、退耕还林政策的扎实推进等工作是密不可分的。

表 3

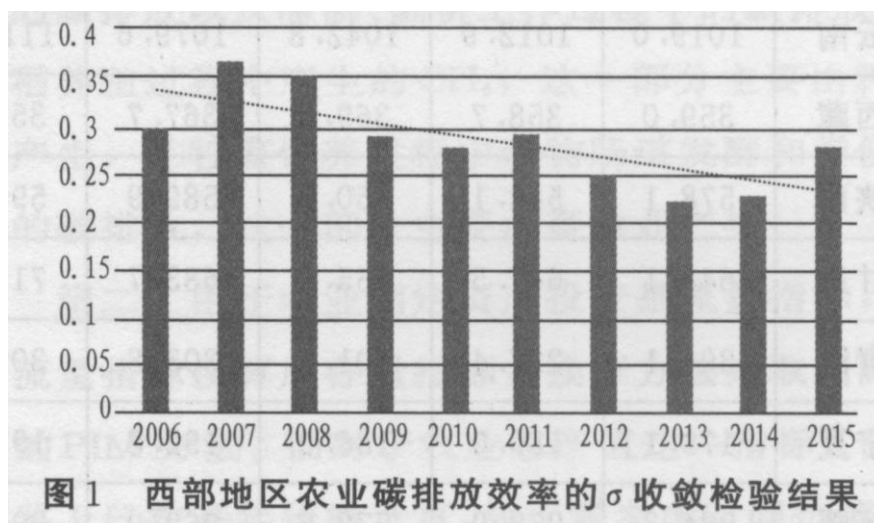
2006 年~2015 年西部各省份的农业碳排放效率

年份	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	均值
内蒙古	1.000	1.000	1.000	1.000	0.747	1.000	1.000	1.000	1.000	0.808	0.956
广西	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
重庆	0.680	0.637	0.647	0.736	0.710	0.730	0.741	0.796	0.783	0.792	0.725
四川	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
贵州	0.697	0.551	0.529	0.578	0.584	0.535	1.000	1.000	1.000	1.000	0.747
云南	0.620	0.523	0.524	0.600	0.534	0.556	0.621	0.662	0.665	0.607	0.591
西藏	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.591	0.596	0.527	0.871
陕西	0.656	0.632	0.725	0.731	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.874
甘肃	0.508	0.417	0.426	0.512	0.550	0.505	0.555	0.595	0.607	0.556	0.523
青海	0.510	0.451	0.475	0.512	0.556	0.538	0.557	1.000	1.000	0.557	0.616
宁夏	0.422	0.359	0.389	0.500	0.550	0.572	0.561	0.602	0.541	0.562	0.506
新疆	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
平均值	0.758	0.714	0.726	0.764	0.769	0.786	0.836	0.814	0.849	0.784	

从单个省份来看，农业碳排放效率长期达到 1 的省份有广西、四川、新疆，这表明此三省长期位于生产前沿面，其农业投入产出效率最优。内蒙古的效率次之，仅在 2010 年和 2015 年未达到 1，但总体保持高效率。重庆一直处于高效率的稳定水平，云南、甘肃、青海、宁夏则一直处于中等效率的稳定水平。陕西和贵州相似，2010 年前的农业碳排放效率处在中等水平，2010 年后效率则位于前沿面，说明 2010 年之后两省在减排工作中取得较大进展。而西藏则恰恰相反，2006 年~2012 年间其农业碳排放效率位于生产前沿面，但 2013 年开始陡降至中等水平。

3. 农业碳排放效率收敛性分析

(1) σ 收敛结果



通过 Excel 进行变异系数测算及趋势预测，农业碳排放效率的 σ 收敛结果如图 1 所示。图 1 可以反映出中国西部地区 2006 年~2015 年农业碳排放效率的标准差呈下降趋势，这说明了西部各省份的绝对差距在不断缩小，但这种差距缩小趋势并不一定意味着西部地区的农业碳排放量有绝对减小现象。因为差距缩小的原因有两个：一是农业碳排放高效率地区向低效率地区靠拢，二是低效率地区向高效率地区靠拢。为了探究差距缩小的真实原因，有必要进行 P 绝对收敛，旨在厘清西部地区各省份是否存在“追赶效应”，即低效率地区是否向高效率地区靠拢。

(2) β 绝对收敛结果

β 绝对收敛结果如表 4 所示。从表 4 可知， β 绝对收敛值为一 0.0343113<0(即表中估计系数)，说明西部地区的农业碳排放具有 β 绝对收敛性，且 P 值为 0.08(<0.1)，表明 β 绝对收敛结果通过了显著性检验。这意味着该 α 收敛检验结果为期望结果，即因为低效率地区有向高效率地区追赶的趋势，才导致西部地区的碳排放绩效随时间的推移而逐步缩小。因此，综合 α 收敛和 β 绝对收敛结果，可知我国西部地区的碳排放绩效存在“追赶效应”。

表 4 β 绝对收敛检验结果

变异来源	离均差平方和	自由度	均方差	修正可决系数	均方根误差
模型变异	0.002756	1	0.002756	0.1844	0.02725
误差变异	0.008166	11	0.000742		
总变异	0.010922	12	0.000910		
变量	估计系数	标准误差	t 检验值	P 检验值	[95%置信区间]
碳排放效率值	-0.034311	0.017807	-1.93	0.0802	[-0.073504, 0.004881]

(3) β 条件收敛结果与影响因素分析

① β 条件收敛结果。为了探讨我国西部地区各省份的农业碳排放绩效是否稳定于各自的稳态水平，且探究经济发展水平、劳动力规模、农业产业结构、城镇化水平四个控制变量对农业碳排放绩效是否存在正向的推动或负向的遏制作用，需进行 P 条件收敛。首先，采用固定效应模型和随机效应模型测算 3 条件收敛结果，并基于 Hausman 模型检验固定效应模型和随机效应模型的优劣。由于随机效应模型下的 Prob 检验值为 0.0019(<0.05)，因此，拒绝随机效应模型，接受固定效应模型。然后，为得到最优选择，再次对比混合效应模型和固定效应模型下的 β 条件收敛结果，以 P 值最小者为最终分析模型。此处，混合效应模型下的 P 值小于固定效应模型下 P 值，故选择混合效应模型下的 3 条件收敛结果，如表 5 所示。从表 5 可以看出， β 条件收敛值为-0.1682518(<0)，说明存在 β 条件收敛，意味着我国西部地区各省份的农业碳排放水平随时间推移稳定于各自的稳态水平。

② 影响因素分析。同时，从 p 值来看，只有经济发展水平和劳动力规模两个控制变量通过了显著性检验(P<0.1);而从 t 值上看，农业经济发展水平和劳动力规模均起到了正向的促进作用，这表明提高经济发展水平、加大劳动力投入是提高西部地区农业碳排放绩效的主要措施。首先，农业经济发展水平对农业碳排放效率具有正向作用，这是由于随着农村经济发展水平的提高，农业经济的支撑作用越来越明显，人均可支配收入逐步增加，对绿色健康产品的需求越来越强烈，以高碳排放特征为主的传统粗放式生产模式对生态环境的负作用也日益明显，这些都促进了农业先进绿色技术水平的提升，不仅降低了农业环境污染，也使得农业生产方式逐步向生态、现代化和科技化方向转型与发展，农业碳排放效率也得到了进一步的提高。其次，劳动力规模（第一产业从业人数）对农业碳排放绩效具有积极效应。这是由于随着第一产业从业人数规模的扩大，在农业生产过程中用

劳动力替代灌溉、翻耕、收割等机器生产的现象进一步增多，意味着柴油等能源消耗和碳排放逐步减少，提升了碳排放效率。但从我国西部地区现实情况来看，随着我国城市化进程的加快，第一产业从业人数规模并没有得到实质性增长，大量农村劳动力向城镇转移，为了弥补劳动力供给的短缺，应积极提高第一产业从业人员的科技素质与低碳意识。再次，城镇化水平（农村总人口与全省总人口的比值）虽然对农业碳排放绩效产生积极效应，但并未通过显著性检验。这是因为农村总人口的增加并不意味着第一产业从业人数就会增加，大量青壮年劳动力逐步向第二产业和第三产业转移，第一产业从业人数反而会出现减少的情况。这虽然意味着西部地区人均耕地面积有所增加，但受到我国土地资源稀缺和土地流转不畅等因素的制约，耕地经营规模依然没能壮大，从而不能对农业碳排放效率产生显著的影响。同时，在城镇化和工业化推进过程中，农业机械普及率、化肥和农药等生产资料的科学配置等“三农”问题并没有得到妥善解决，这都会导致研究结果和理论出现偏差。最后，农业产业结构同样对农业碳排放效率有一定的积极影响，但影响值不大，且未通过显著性检验。种植业作为农业碳排放的主要来源，其比重的提高意味着更多的农药、化肥、柴油等生产资料投入，虽然也相应增加了碳排放量，但相较于种植业更高的产出而言，农业碳排放效率反而得到了进一步提高。同时，种植业相比牧业等其他农业产业对环境的影响可能相对要小些。因此，在当前农业供给侧结构性改革背景下，应大力强化种植业综合效益和竞争力，同时优化农业生产资料投入的合理配置。

表 5 β 条件收敛检验结果

变异来源	离均差平方和	自由度	均方差	修正可决系数	均方根误差
模型变异	0. 233128	5	0. 046626	0. 0856	0. 12462
误差变异	1. 583953	102	0. 015529		
总变异	1. 817081	107	0. 016982		
变量	估计系数	标准误差	t 检验值	P 检验值	[95%置信区间]
碳排放效率值	-0. 168252	0. 049381	-3. 14	0. 001	[-0. 266199, -0. 070305]
经济发展水平	0. 068922	0. 041270	1. 67	0. 098	[-0. 012934, 0. 150781]
劳动力规模	0. 031280	0. 012460	2. 51	0. 014	[0. 006566, 0. 055995]
农业产业结构	0. 003309	0. 027860	0. 12	0. 906	[-0. 051951, 0. 058569]
城镇化水平	0. 072278	0. 115623	0. 63	0. 533	[-0. 157060, 0. 301616]
常数	-0. 107875	0. 058381	-1. 85	0. 068	[-0. 223672, 0. 007923]

五、政策建议

鉴于我国西部地区农业碳排放效率实际情况，提出以下政策建议。

1. 切实推行农业绿色生产方式，大力发展低碳农业，促进农业经济绿色发展

西部地区各省市必须摒弃传统粗放式的发展思维和发展模式，彻底改变重速度、重开发、轻效益、轻节约的思路，实现农业经济与生态环境全面协调可持续发展。积极推行农业清洁生产，深入开展有机肥全面试点工作，严格行业准入管理，确保化肥农药的零增长，促进农业节本增效。依托西部地区各省份的资源禀赋条件，大力发展生态循环农业，推行高效生态的种养结

合模式，实现禽畜粪便的资源化利用，改善农业生态环境。发展低碳农业，增加农业碳汇，通过秸秆氨化改善动物营养、推广稻田间歇灌溉、大力落实沼气工程、改进禽畜收集和贮存技术等方式降低甲烷排放。

2. 加强低碳农业的宣传和教育，提高劳动者低碳意识

健全农民培训体系，广泛开展农民低碳科技培训，创新培训方式和内容，提升农民碳减排意识，倡导低碳、节能、节约的生产生活方式。加大农业低碳科技的推广，普及测土配方技术，推行化肥减量化工程，引导农民在农业生产过程中广泛使用节能减排技术，增加农业碳减排技术的补贴力度。同时，应积极推行有序城镇化，妥善解决各种“三农”问题，挖掘农业碳减排潜力，减少城镇化过程的农业碳排放。

3. 不断提升农业碳减排技术水平

借鉴长期处于有效前沿面省份在农业碳减排中的先进技术与经验，西部地区相关省份应深化与广西、四川、新疆三省的碳减排合作力度，结合自身实际，因地制宜地制定区域农业碳减排政策，提高自身的碳排放绩效。同时，大力开展农业节能减排与节能技术创新工作，积极引导，鼓励各方面加强农业节水等关键性的低碳技术，在农业清洁化生产技术、农业资源多极转化、高效利用与废弃物再生技术等方面提供低碳农业技术标准规范。

4. 调整农业产业结构，优化种植业比例

在确保粮食安全的情况下，以种植业作为农业碳减排的重要突破口，推广绿色农用化肥使用，优化种植业结构，降低能源消耗和化学品投入较大的作物种植，积极采用低碳、高产、抗逆优良新品种。结合各地资源优势，大力培育特色农业，走农业现代化道路。积极推进西部地区农林牧渔业的协调发展，改变现行以种养农业为主的农业产业结构，全面实施种养结合，促进农业资源的循环利用。充分发挥林业的碳汇功能，大力保护天然林、建设防护林，落实退耕还林政策，提高农业碳排放绩效。

5. 加强政策引导，完善农业生态补偿机制

健全农业环境法律法规体系，强化政策导向，建立并完善低碳农业生态补偿技术体系，鼓励农民积极参与休耕、免耕以及植树造林等活动，增加碳汇。推动农业生产制度创新变革，完善农业能源效率标准，构建节能减排管理考核制度，建立以农产品消费为标准的碳减排责任确定机制。构建保障补偿客体利益的机制，吸引农民广泛参与农业生态环境保护项目，并对补偿项目进行科学设计和严格监督。

参考文献:

- (1) Change IPOC. Climate Change 2014 Synthesis Re-port [J]. Environmental Policy Collection, 2014, (02).
- (2) Shao, S, Yang, L, Gan, C, Cao, J, Geng, Y. Guan, D. Using an extended LMDI model to explore techno —economic drivers of energy — related industrial CO₂ emis-sion changes: a case study for Shanghai (China) [J]. Re-newable and Sustainable Energy Reviews, 2016, (03).
- (3) Fei, R, Lin, B. Technology gap and CO₂emission reduction potential by technical efficiency measures: a meta —frontier modeling for the Chinese agricultural sector [J]. Ecological Indicators, 2016, (02).
- (4) Dogan, E, Sebri, M, Turkekul, B, Exploring the relationship between agricultural electricity consumption and

output: new evidence from Turkish regional data [J]. Energy Policy, 2016, (08).

(5) 田云, 张俊飏. 中国低碳农业发展的动态演进及收敛性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2017, (03).

(6) 刘德娟, 周琼. 碳排放约束下农业全要素生产率 测算与收敛性检验[J]. 福建农业学报, 2017, (01).

(7) 高鸣, 宋洪远. 中国农业碳排放绩效的空间收敛与分异基于 Malmquist—Luenberger 指数与空间计量的实证分析[J]. 经济地理, 2015, (04).

(8) 吴昊湖, 何艳秋, 陈柔. 中国农业碳排放绩效评价及随机性收敛研究 基于 SBM — Undesirable 模型与面板单位根检验[J]. 中国生态农业学报, 2017, (09).

(9) 潘丹, 应瑞瑶. 中国农业生态效率评价方法与实证——基于非期望产出的 SBM 模型分析[J]. 生态学报, 2013, (12).

(10) Tone K. A slacks—based measure of efficiency in data envelopment analysis [J]. European Journal of Operational Research, 2001, (03).

(11) Cooper WW, Seiford LM, Tone K. Data Envelopment Analysis [M]. Second Edition Boston: Kluwer Academic Publishers, 2007.

(12) 田云, 张俊飏, 李波. 基于投入角度的农业碳排放时空特征及因素分解研究[J]. 农业现代化研究, 2011, (06).

(13) 李波, 张俊飏, 李海鹏. 中国农业碳排放时空特征及影响因素分解[J]. 中国人口 • 资源与环境, 2011, (08).

(14) IPCC. Climate Change 2007: The Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. New York: Cambridge University Press, 2007.

(15) 王效科. 温室气体排放与中国粮食生产[J]. 生态环境, 2003, (04).

(16) 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[J]. 经济地理, 2016, (09).

(17) 胡中应, 胡浩. 产业集聚对我国农业碳排放的影响[J]. 山东社会科学, 2016, (06).

(18) 王兴, 马守田, 濮超, 赵鑫, 王钰乔, 张海林. 西南地区农业碳排放趋势及影响因素研究[J]. 中国人口 • 资源与环境, 2017, (11).