

# 长江经济带农业碳排放 EKC 检验及其驱动因素分析

1

田 云，蔡艳蓉\*

(中南财经政法大学工商管理学院，湖北 武汉 430073)

**【摘要】**：以长江经济带为研究对象，在明确各省市 2005~2020 年农业碳排放量现状特征的基础上探讨了其与农村居民人均纯收入的关系，同时分析了农业碳排放的驱动因素并对各省市 2023~2030 年农业碳排放情况进行了合理预测。研究发现：(1) 长江经济带各省市农业碳排放量均具有明显增减变化。样本考察期内，5 省处于增长态势且以云南增幅最大，6 省市处于下降态势且以上海降幅最大；农业碳排放量总体呈“中部高，东西低”特征。(2) EKC 检验结果表明，长江经济带各省市均存在 EKC 关系但整体趋势并非完全一致，基于 EKC 曲线差异可将 11 个省市划分为倒“N”型、倒“U”型和正“U”型等 3 种类型。(3) STIRPAT 测算结果表明，第一产业从业人员数和农林牧渔总产值对农业碳排放量起促进作用且为主导因素，而农业技术水平则表现为抑制作用但作用力度较小。(4) GM(1,1) 预测结果表明，2023~2030 年长江经济带各省市农业碳排放量均呈现出明显的起伏变化且减排成效不一，基于预测结果可将 11 个省市划分为“持续下降型”“持续增长型”和“先升后降型”等 3 种类型。

**【关键词】**：长江经济带；环境库兹涅茨曲线；农业碳排放；驱动因素

**【中图分类号】**：F323; X322 **【文献标识码】**：A **【文章编号】**：1004- 8227(2023) 11- 2403- 15

DOI: 10. 11870/cjlyzyyhj202311015

面对越来越严峻的全球气候变化问题，世界各国相继签署《京都议定书》《巴黎协定》等协议，并纷纷做出减排承诺。其中，有 126 个国家和经济体先后以立法、法律提案、政策文件等不同形式明确碳中和目标，并制定出与本国国情相契合的碳中和自主贡献方案。即便如此，根据联合国环境规划署发布的《2022 年碳排放差距报告：正在关闭的机会之窗》可知，如果维持目前各个国家提交的自主减排目标不变，至 21 世纪末全球气温将上升 2.8℃，由此将对人类生存环境产生巨大威胁。作为全球最大的发展中国家，中国一直高度重视气候变化问题，积极参与全球气候变化治理活动，通过一系列实际行动向世界表明中国政府减排的决心。从 2020 年第七十五届联合国大会上承诺“2030 碳达峰，2060 碳中和”目标，到二十大报告提出“要积极稳妥推进碳达峰碳中和”，坚持先立后破，有计划分步骤实施碳达峰行动，中国始终致力于“双碳”目标的早日实现。

虽然二、三产业引发了绝大多数的温室气体排放，但基于联合国粮农组织统计数据可知，农业亦是碳排放的重要来源之一，产生了全球将近四分之一的碳排放量[1]。作为全球最大的碳排放国，中国每年农业农村生产生活所引发的碳排放量也不容小觑，占到了全国温室气体排放总量的 15%左右[2]。为此，加快推进农业农村领域减排固碳，是实现我国“双碳”目标的重要举措和

<sup>1</sup> 收稿日期：2023- 03- 10；修回日期：2023- 05- 23

**基金项目**：国家自然科学基金(71903197)；国家社会科学基金(23BGL189)；中南财经政法大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2722022BY012)；中南财经政法大学科研创新平台能力建设项目(2722023EJ012)

**作者简介**：田 云(1986~)，男，副教授，主要研究方向为低碳经济与低碳农业。E-mail: tianyun1986@163.com

\* **通讯作者** E-mail: cyr11150416@163.com

---

潜力所在。近些年来，不仅中央一号文件多次提出“推进农业绿色发展、减少农业碳排放”目标，而且政府也发布《农药管理条例》《到2020年化肥使用量零增长行动方案》以及《2022年全面推进乡村振兴重点工作的意见》等文件，要求在水、肥、农药等领域采取措施，减少农业碳排放。可见，促进农业碳减排是当前政府的重要工作之一。

长江经济带作为引领中国经济高质量发展的排头兵，始终坚持生态优先、绿色发展。目前，中国九大商品粮基地中的6个分布于长江经济带[3]，农业在其发展过程中占有重要地位，其产生的农业碳排放量更是占到了全国的35%[4]。基于此背景，围绕长江经济带农业碳排放变化趋势及驱动因素展开研究，对于推动长江经济带农业绿色发展、促进长江生态环境修复与保护具有重要的现实意义。

## 1 文献综述

从现有文献来看，农业碳排放相关研究较为丰富。学者们在不断完善农业碳排放测算指标体系的基础上[5,6,7]，分别从动态分布规律探讨[8,9,10]、减排潜力评估[11]以及模拟峰值预测[12]等多个视角展开了研究。

其中，农业碳排放驱动因素一直是研究热点。早期学者们主要基于 KAYA 恒等式[13]、LMID 分解式[14]、IPAT 模型[15]及 STIRPAT 模型[16]等方法对农业碳排放驱动因素进行分析。而近些年，学者们更多采用面板模型[17]、指数分解法[18]、GWR[19]和灰色关联度[20]等方法围绕此问题展开探讨。相关内容也逐渐深入且全面，由原先的种植业生产总值(PGDP)、农林牧渔业生产总值(AGDP)、农业人口规模(RP)、地区总人口规模(P)等基本因素，到目前逐渐趋于多样化的系列因素。综合研究结果表明，农村人力资本积累[21]、市场规模扩大[22]、农业机械化水平提高[23]、农业生产效率提高[3]和支农财政加大[24]均有利于促进农业碳排放量的减少，而农业能源消费结构恶化[25]、农村生活水平提高[26]、农业生产结构不合理[27]和农地流转规模扩大[28]等都会增加农业碳排放量。值得注意的是，由于指标选取、测算方法的不同，研究地点、时间选择的不同以及研究方法运用的不同，各因素对农业碳排放的作用机理也不尽相同。比如，农业水土资源因素[29]对湖南、四川、贵州和云南等地的农业碳排放量起促进作用，而对上海、江苏、浙江、安徽、江西和湖北等地的农业碳排放量则起抑制作用。

针对农业碳排放与经济增长的关系，学者们通常是基于环境库兹涅茨曲线模型展开研究[30]。Panayotou[31]基于 Kuznets[32]提出环境库兹涅茨曲线(EKC)假设，认为环境质量与人均收入之间存在一定关系，早期相关研究主要集中在工业领域[33]，最近这些年才逐步深入到农业领域。具体而言，学者们主要基于畜禽养殖业[36]、渔业[37]、农业碳排放[38]和种植业碳排放[10]等方面展开研究。其中，在农业环境污染指标选取上，从氮磷污染[39]、化肥污染[40]再到农业碳排放量[30]，逐渐全面；在农业经济增长指标选取上，农村居民人均纯收入[41]、第一产业增加值[42]和农林牧渔总产值[43]均有涉及，根据研究的侧重点不同，学者们选取相应的指标来反映农业经济增长。从现有研究结果来看，农业碳排放与经济发展水平之间存在 EKC 关系但曲线形状不一，如倒“U”型[44]、倒“N”型[45]和正“U”型[46]。值得注意的是，丁宝根等[3]曾对长江经济带进行农业碳排放 EKC 检验，但仅从整体上探讨了长江经济带农业碳排放和农民人均收入的关系，没有对长江经济带各省市进行详细分析。

纵览相关文献可知，目前关于农业碳排放的研究已比较丰富，涉及多个视角，为日后进一步研究奠定了坚实的基础。然而，关于农业碳排放与经济增长关系的研究较少且一直存在争议，是否存在环境库兹涅茨曲线，是倒“U”型还是倒“N”型，不同学者持不同观点。长江经济带作为农业生产重要领域，其农业碳排放量一直居高不下，故而对其各省市农业碳排放进行 EKC 检验，观测其曲线形状以及是否到达拐点，对于能否及时调整相关碳减排措施是十分必要的。有鉴于此，本文尝试以长江经济带为研究对象，在厘清各省市农业碳排放量与农村居民人均纯收入 EKC 关系的基础上，采用 STIRPAT 模型分析农业碳排放主导驱动因素，同时利用 GM(1,1)模型预测 2023~2030 年长江经济带各省市农业碳排放量并分析其发展趋势，以此来判断长江经济带各省市农业碳减排成效，为未来长江经济带农业绿色低碳发展政策制定提供参考。

## 2 研究方法 with 数据来源

### 2.1 研究方法

本文着重分析长江经济带农业碳排放与农业经济增长的关系及其驱动因素,并对 2023~2030 年农业碳排放量进行合理预测。研究所涉及的方法主要包括农业碳排放测算、EKC 模型、STIRPAT 模型和 GM(1,1)模型,接下来将进行具体介绍。

### 2.1.1 农业碳排放测算

本文农业碳排放量测算方法将参照田云等[47]的研究,从农业能源利用、农用物资投入、水稻种植和畜禽养殖等 4 个方面对长江经济带 11 省市农业碳排放量进行测度。具体而言,农业能源利用主要考察农林牧渔业所耗费的原煤、洗精煤、汽油、柴油等 12 种能源所引发的碳排放,对应的排放系数参照蒋金荷[48]、田云等[49]的研究;农用物资投入主要考察化肥、农药、农膜等产品使用所产生的碳排放,对应的排放系数参照李波等[44]的研究;水稻种植则考察水稻生产所引发的稻田甲烷排放,对应的排放系数参照闵继胜等[50]的研究;畜禽养殖主要考察牛(包括肉牛、奶牛、水牛)、马、羊(包括山羊和绵羊)、生猪、家禽等 11 种主要畜禽品种因为肠道发酵和粪便管理所导致的甲烷与氧化亚氮排放,对应的排放系数源自 IPCC。基于此,构建农业碳排放测算公式如式(1)所示。

$$AC = \sum AC_u = \sum T_u \times \delta_u \quad (1)$$

式中:AC 为农业碳排放总量(万 t);AC<sub>u</sub> 为各类具体碳源所导致的碳排放量(万 t);T<sub>u</sub>、δ<sub>u</sub> 则分别代表各类碳源的实际数量及其对应的碳排放系数。需要说明的是,为确保结果的一致性,实际分析中将各类温室气体统一换算成标准二氧化碳,结合 IPCC 第四次评估报告可知,碳、甲烷、氧化亚氮的转换系数分别为 44/12、25 和 298。

### 2.1.2 EKC 曲线模型

环境库兹涅茨曲线目前已被广泛应用于研究农业碳排放与经济增长的关系中。鉴于农村居民人均纯收入能反映农民个人收入水平、农业综合生产力和辅助产业等发展现状,本文将借鉴陈宗胜等[41]的研究,采用农村居民人均纯收入来反映农业经济增长。国内外学者常采用二次函数来反映环境污染与经济增长的关系,后经 Grossman 等[51]拓展,引入三次多项式,故本文将在传统的 EKC 模型中加入三次项,先检验三次函数,若三次函数曲线拟合度不高,形状不显著,则剔除三次项,进行二次函数检验。为了解决可能存在的异方差问题,本文将对各变量取对数。简化之后的 EKC 模型如式(2)、式(3)所示。

$$\ln AC_t = \beta_0 + \beta_1 \ln G_t + \beta_2 \ln^2 G_t + \varepsilon_t \quad (2)$$

$$\ln AC_t = \beta_0 + \beta_1 \ln G_t + \beta_2 \ln^2 G_t + \beta_3 \ln^3 G_t + \varepsilon_t \quad (3)$$

式中:AC 为农业碳排放量(万 t);G 为农村居民人均纯收入(元),简化模型中分别对其进行取对数处理;t 为年份;ε 为随机误差干扰项;β<sub>i</sub>(i=1,2,3)为待估系数,决定了 EKC 的曲线形态(表 1)。

表 1 EKC 曲线形态

待估参数 $\beta_1$	待估参数 $\beta_2$	待估参数 $\beta_3$	EKC 曲线形态
$\beta_1 > 0$	$\beta_2 = 0$	$\beta_3 = 0$	单调递增型曲线
$\beta_1 < 0$	$\beta_2 = 0$	$\beta_3 = 0$	单调递减型曲线
$\beta_1 < 0$	$\beta_2 > 0$	$\beta_3 = 0$	正“U”型曲线
$\beta_1 > 0$	$\beta_2 < 0$	$\beta_3 = 0$	倒“U”型曲线
$\beta_1 > 0$	$\beta_2 < 0$	$\beta_3 > 0$	正“N”型曲线
$\beta_1 < 0$	$\beta_2 > 0$	$\beta_3 < 0$	倒“N”型曲线
$\beta_1 = 0$	$\beta_2 = 0$	$\beta_3 = 0$	不存在

### 2.1.3 STIRPAT 模型

本文将采用 STIRPAT 模型对长江经济带农业碳排放的驱动因素进行分析。具体而言，基于黎孔清等[52]的研究，并结合长江经济带的现实状况，重点分析第一产业从业人员数、农林牧渔总产值、农业技术水平、农村居民人均纯收入以及城镇化率等对其农业碳排放量产生的影响，在此构建模型如式(4)所示。

$$AC = a \times P^b \times A^c \times T^d \times G^e \times U^f \quad (4)$$

式中：AC 是农业碳排放量(万 t);P 为第一产业从业人员数(万人);A 为富裕度，用农林牧渔总产值表示(亿元);T 为农业技术水平，用农业人均机械动力表示；G 为农村居民人均纯收入(元);U 为城镇化率。

该模型是一个多自变量的非线性模型，模型两边分别取对数后可以得到式(5)。式(5)是以  $\ln AC$  为因变量， $\ln P$ 、 $\ln A$ 、 $\ln T$ 、 $\ln G$  和  $\ln U$  为自变量的多元线性模型。

$$\ln AC = a + b \ln P_{it} + c \ln A_{it} + d \ln T_{it} + e \ln G_{it} + f \ln U_{it} \quad (5)$$

式中： $a$  为常数项； $i$  代表省份； $t$  代表时间； $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $e$  和  $f$  为弹性系数。

#### 2.1.4 灰色预测模型

灰色预测模型(Grey Model, 简称 GM)通过对原始数据进行生成处理来寻找系统变动的规律，并生成有较强规律性的数据序列，然后建立相应的微分方程模型，从而预测事物未来发展趋势的状况[53]。鉴于 GM(1,1)模型拥有样本需求量少、计算工作量小、预测准确度高且可用于中长期预测等优点，本文将选用该模型对长江经济带各省市 2023~2030 年农业碳排放量进行预测，其基本形式如式(6)所示。

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b \quad (6)$$

式中： $-a$  为发展系数； $b$  为灰作用量，经过演变计算可变为白化方程式(7)。

$$\frac{dx^{(1)}(t)}{dt} = -\hat{a}^{(1)}(t) + \hat{b} \quad (7)$$

取初始值  $\hat{x}^{(1)}(t) |_{t=1} = x^{(0)}(1)$ ，可求出其对应的解，同时代入本文所研究的农业碳排放量，得式(8)。

$$\widehat{AC}^{(1)}(t+1) = \left( \widehat{AC}^{(0)}(1) - \frac{u}{g} \right) e^{-gt} + \frac{u}{g} \quad (8)$$

式中： $\widehat{AC}^{(0)}(t)$  代表农业碳排放量原始数列； $u$  表示灰作用量； $-g$  表示发展系数； $\widehat{AC}^{(1)}(t+1)$  是原始数列一次累加生成后的紧邻均值生成数列。

#### 2.2 数据来源

本文测算农业碳排放所涉及的各项能源消费数据均出自 2006~2021 年历年《中国能源统计年鉴》，其他原始数据则源自 2006~2021 年历年《中国农村统计年鉴》。其中，能源耗费数量、各类农用物资投入量以及水稻播种面积均以当年实际情况为准；畜禽养殖量则参照闵继胜等[50]的研究，结合各自年末存栏量与饲养周期的不同计算其年均饲养量。至于其他数据，第一产业从业人员数、农林牧渔总产值、农村居民人均纯收入和城镇化率均出自 2006~2021 年历年《中国统计年鉴》；其中，农林牧渔总产值以 2005 年为基期进行不变价处理，农村居民人均纯收入以 2005 年为基期采用 CPI 指数进行平减。农业技术水平则通过人均农业机械动力表示，即农业机械总动力除以第一产业从业人员总数，农业机械总动力数据出自 2006~2021 年历年《中国农

村统计年鉴》。

### 3 研究结果及分析

#### 3.1 长江经济带各省市农业碳排放量分析

根据式(1)计算出 2005~2020 年长江经济带各省市农业碳排放量(表 2)。限于篇幅,表 2 仅列举各省市 2005 和 2020 年的农业碳排放量。

表 2 长江经济带各省市农业碳排放情况(单位:万 t)

省份		2005 年			2020 年			增幅(%)
		总量	排名	占比(%)	总量	排名	占比(%)	
上游	重庆	2 017.00	10	31.33	1 494.27	10	29.47	-25.92
	四川	6 153.39	2		5 533.48	3		-10.07
	贵州	3 036.24	8		2 368.80	8		-21.98
	云南	3 420.64	7		3 922.76	7		14.68
中游	江西	4 836.25	6	37.83	5 147.99	6	41.20	6.45
	湖北	5 628.15	4		6 025.81	2		7.07

	湖南	7 196.89	1		7 444.97	1		3.45
下游	上海	499.59	11	30.83	313.14	11	29.33	-37.32
	江苏	5 839.29	3		5 456.77	4		-6.55
	浙江	2 798.59	9		2 102.23	9		-24.88
	安徽	5 257.02	5		5 382.30	5		2.38

注：占比为长江经济带上(中、下)游农业碳排放量占长江经济带农业碳排放总量比重。

由表 2 可知，2020 年农业碳排放量居于前 3 位的省份依次是湖南、湖北和四川，其农业碳排放量分别为 7 444.97、6 025.81 和 5 533.48 万 t；上海则排在最后一位，其农业碳排放量仅为 313.14 万 t。相比 2005 年，各省市农业碳排放量均有较为明显的增减变化。其中，云南等 5 省份表现出了不同程度上升趋势且以云南增幅最大，高达 14.68%；重庆等 6 省市则表现出了下降态势且以上海降幅最大，达到了 37.32%。从空间分布态势来看，相较于 2005 年，2020 年中游 3 省农业碳排放量均为上升趋势且其在农业碳排放总量中的比重也显著提高，是长江经济带农业碳排放量始终居高不下的主要原因；而上下游虽有部分省份仍持上升趋势，但总体上看各自在农业碳排放总量中的比重均略有下降，初见农业碳减排成效。

### 3.2 长江经济带各省市农业碳排放量 EKC 检验

#### 3.2.1 EKC 系数估计

根据式(2)、式(3)对长江经济带各省市农业碳排放量与农村居民人均纯收入关系进行检验(表 3),由此可以得出各省市农业碳排放的 EKC 曲线形状。

由表 3 可知，长江经济带各省市农业碳排放量与其农村居民人均纯收入均存在 EKC 关系。进一步，按照 EKC 曲线形状差异可将 11 省市划分为 3 种类型：(1)倒“U”型，即农业碳排放量随农村居民人均纯收入的增加表现出先增后降特点，以重庆、浙江等二地为代表；(2)正“U”型，即农业碳排放量随农村居民人均纯收入的增加而表现出先降后增特点，仅含贵州一地；(3)倒“N”型，即农业碳排放量随农村居民人均纯收入的增加表现出“先降、后增、再降”的三阶段特征，湖北、四川、安徽、湖南、江西、江苏、云南和上海等 8 省市均如此。

表 3 长江经济带各省市 EKC 回归系数

省份	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	结论
湖北	6 541.94**	-2 388.33**	290.95**	-11.81**	倒“N”型
重庆	-302.70**	77.33**	-4.82**		倒“U”型
贵州	278.46***	-69.53***	4.46***		正“U”型
四川	6 797.79**	-2 522.91**	312.48**	-12.90**	倒“N”型
安徽	9 544.77***	-3 542.67***	438.61***	-18.10***	倒“N”型
湖南	6 806.31***	-2 476.05***	300.58***	-12.16***	倒“N”型
江西	6 004.29**	-2 175.45**	263.03**	-10.60**	倒“N”型
江苏	9 018.34***	-3 096.69***	354.75***	-13.55***	倒“N”型
浙江	-278.81***	64.63***	-3.64***		倒“U”型
云南	5 833.73***	-2 232.51***	285.09***	-12.13***	倒“N”型
上海	21 759.94***	-7 103.20***	773.16***	-28.05***	倒“N”型

---

注：\*\*、\*\*\*分别表示 5%、1%的水平上显著。

### 3.2.2 平稳性检验和协整分析

为了避免伪回归的出现，需对 EKC 模型中所涉及的时间序列变量进行平稳性检验，在此基础上对各变量之间是否存在协整关系进行检测。

#### (1)变量的平稳性检验。

采用 ADF 及 Phillips-Perron(P-P)两种检验方法对各变量及其一阶差分、二阶差分形式进行平稳性检验，以确保检验的稳健性。结果显示，长江经济带 11 省市的所有变量在零阶时均存在单位根，其中湖北、重庆、江西、江苏、浙江和上海等 6 地变量在一阶时拒绝了原假设，原始序列均为非平稳的 I(1)过程；贵州、四川、安徽、湖南和云南等 5 省份在二阶时拒绝了原假设，原始序列均为非平稳的 I(2)过程。鉴于所有变量在差分之后均保持平稳状态，可进一步进行协整关系检验。

#### (2)变量的协整检验。

单位根检验已证明各单位变量是同阶单整序列，故而可通过 Johansen 协整检验(表 4),验证变量之间是否存在长期稳定关系。

从表 4 中不难发现，各省市在 5%的显著性水平上均可拒绝“最大秩为 0”的原假设，表明非平稳序列之间具有协整关系；虽然无法拒绝“最大秩为 2”的原假设，但考虑到农业碳排放量与农村居民人均纯收入如果存在稳定的长期关系，那么这种均衡关系必定是唯一的，即各变量之间协整关系成立[54]。各变量均通过平稳性及协整检验，因此各省市 EKC 系数估计及曲线走向判断可信。

### 3.2.3 EKC 检验及其结果分析

基于表 3 所得到的 EKC 系数绘制各省市农业碳排放量与农村居民人均纯收入的拟合曲线图(图 1~图 11)。

由表 3 可知，湖北等 8 地为倒“N”型 EKC 曲线，通过观察图 1~图 8,可进一步细化其 EKC 类型：(1)“传统倒 N 型”地区，即农业碳排放量随农村居民人均纯收入的增加表现出传统“先降、后增、再降”的 3 阶段特征，以湖北、云南、安徽、湖南和江西 5 地为代表；(2)“缓增急降型”地区，即以第 2 个拐点为分界点，第 2 个拐点前农业碳排放量随农村居民人均纯收入的增加表现出缓慢减增特点，第 2 个拐点后呈大幅度下降趋势，以四川和江苏 2 地为代表；(3)“持续下降型”地区，即第 1 个拐点和第 2 个拐点区间内，农业碳排放量随农村居民人均纯收入的增加近乎平缓变化，略微下降，而第 1 个拐点前和第 2 个拐点后表现出明显下降特征，整体呈下降态势，以上海市为代表。

表 4 Johansen 检验结果

省份	最大秩	迹统计量	5%临界值	省份	最大秩	迹统计量	5%临界值
湖北	0	34.230 3	29.68	江西	0	31.617 1	29.68
	1	5.945 4	15.41		1	7.846 4	15.41
	2	0.047 7	3.76		2	1.535 6	3.76
重庆	0	38.281 2	29.68	江苏	0	40.293 1	29.68
	1	12.826 3	15.41		1	10.235 9	15.41
	2	0.610 4	3.76		2	0.458	3.76
贵州	0	50.592 1	29.68	浙江	0	41.490 9	29.68
	1	20.350 3	15.41		1	11.172 4	15.41
	2	0.655 6	3.76		2	1.693 9	3.76

四川	0	46.492 4	29.68	云南	0	50.517	29.68
	1	11.634 2	15.41		1	12.524 4	15.41
	2	2.351 6	3.76		2	0.027 7	3.76
安徽	0	36.493 3	29.68	上海	0	38.281 2	29.68
	1	7.585 7	15.41		1	12.826 3	15.41
	2	0.068 4	3.76		2	0.610 4	3.76
湖南	0	46.152 3	29.68				
	1	12.204 1	15.41				
	2	0.077 6	3.76				

如图 1~图 5 所示,湖北、云南、安徽、湖南和江西等 5 省为“传统倒 N 型”,两个拐点分别为 2007 和 2017 年。其中,2005~2007 年为第 1 阶段,5 省农业碳排放量随农村居民人均纯收入的增加表现出小幅度增减特点;2007~2017 年为第 2 阶段,呈波动上升态势;2017~2020 年为第 3 阶段,表现出下降趋势。究其原因,中央一号文件多次强调农民增收问题,农民为了提高自身农业收入水平,不断加大农业生产要素投入力度,从而大大提高农业碳排放量。其中,2007 年中国自然灾害频发,据国家统计局数据显示,湖北等 5 省受灾面积位居全国前列,严重影响农业生产活动,农业碳排放量也相应较少。而 2017 年《“十三五”节能减排综合方案》的发布,各省开始重视生态文明建设,尤其是农业领域,针对《方案》提出的减排目标,各省采取恰当措施控制农田和畜禽温室气体排放,农业碳排放量开始下降。

如图 6~图 7 所示,四川和江苏 2 省为“缓增急降型”,2 省第 1 个拐点分别为 2007 和 2009 年,第 2 个拐点都是 2017 年。其中,四川省第 1 个阶段为 2005~2007 年,江苏省第 1 个阶段为 2005~2009 年,农业碳排放量随农村居民人均纯收入增加表现出小幅度增减特征;四川省第 2 个阶段为 2007~2017 年,江苏省第 2 个阶段为 2009~2017 年,均表现出小幅度波动上升特点;2 省第 3 个阶段为 2017~2020 年,呈骤降趋势。究其原因,四川省重视城镇化发展进程,自 2007 年四川省委推进新型工业化与新型城镇化互动发展的决策部署,四川省小城镇建设加快,农业人口大量转向非农就业,农业从业人数减少,农业碳排放量也相继降低;江苏省重视气候变化问题,2009 年江苏省省政府发布应对气候变化方案,针对农业方面,提出要改造中低产田,完善灌溉体系,优化产业结构,在推广高新栽培技术提高农业应对气候变化能力的同时,有效减少了农业碳排放量。

如图 8 所示,上海市为“持续下降型”,两个拐点分别为 2007 和 2015 年。2005~2007 年为第 1 阶段,农业碳排放量随农村居民人均纯收入的增加表现出大幅度下降特点;2007~2015 年为第 2 阶段,呈平缓下降趋势;2015~2020 年为第 3 阶段,呈明显下降态势。总体而言,2005~2020 年表现出持续下降特征。究其原因,上海市以金融、高新技术等产业发展为主,农业并非发展重点,农业用地面积小,机械化水平高,且上海市一直注重农业产业绿色发展,努力实现生态循环目标。因此在长江经济带各省市中,上海市农业碳排放量不仅最低,而且考察期内一直逐年降低。尤其是 2015 年,上海市提出制定国家现代农业示范区建设行动计划,积极发展绿色低碳农业,强化农业科技支撑能力,极大地推进了农业碳减排。

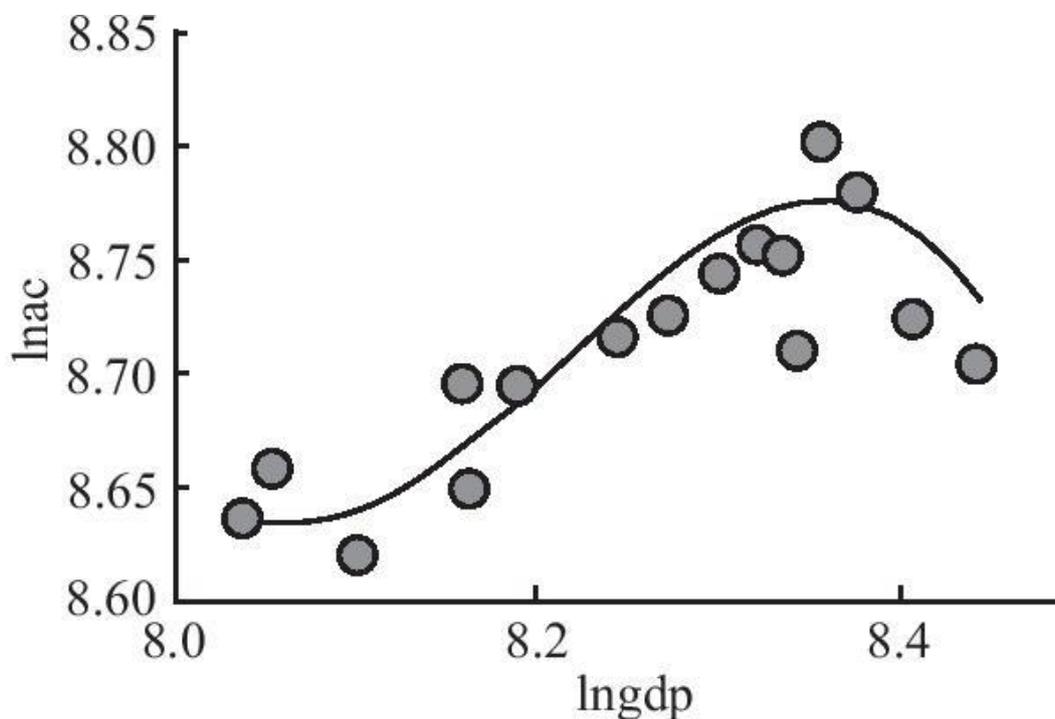


图 1 湖北省农业碳排放与农民人均纯收入拟合曲线

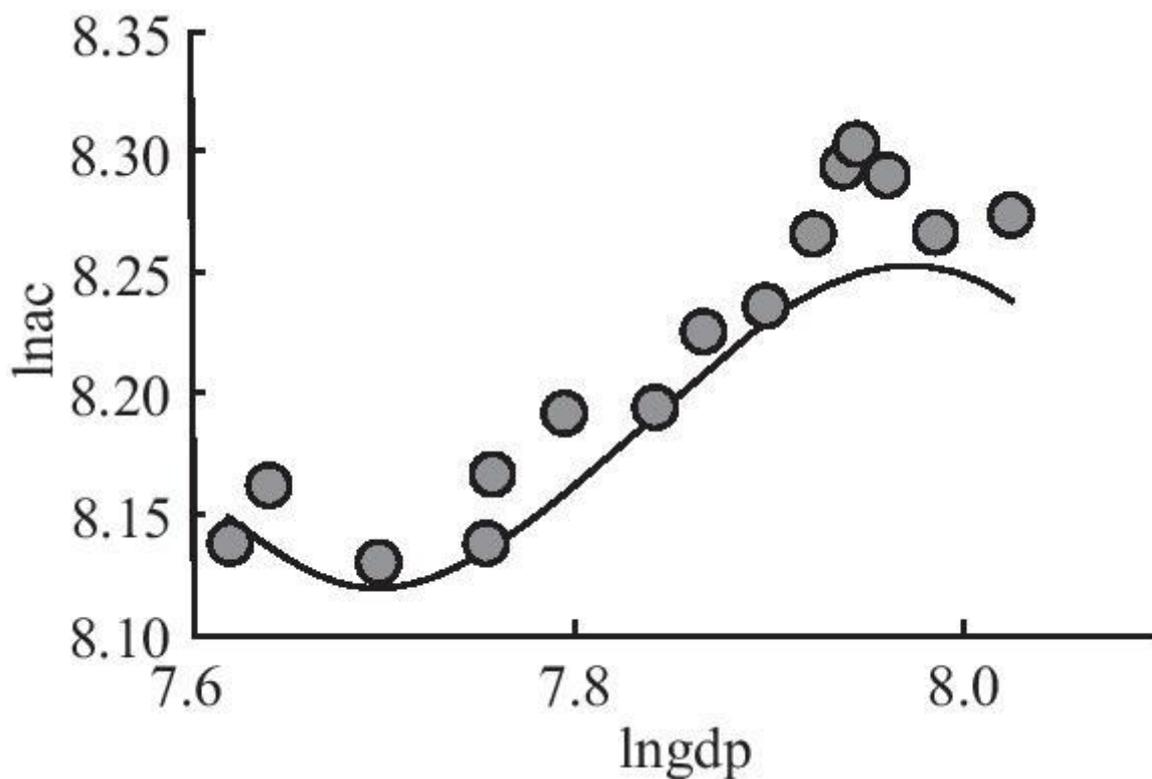


图2 云南省农业碳排放与农民人均纯收入拟合曲线

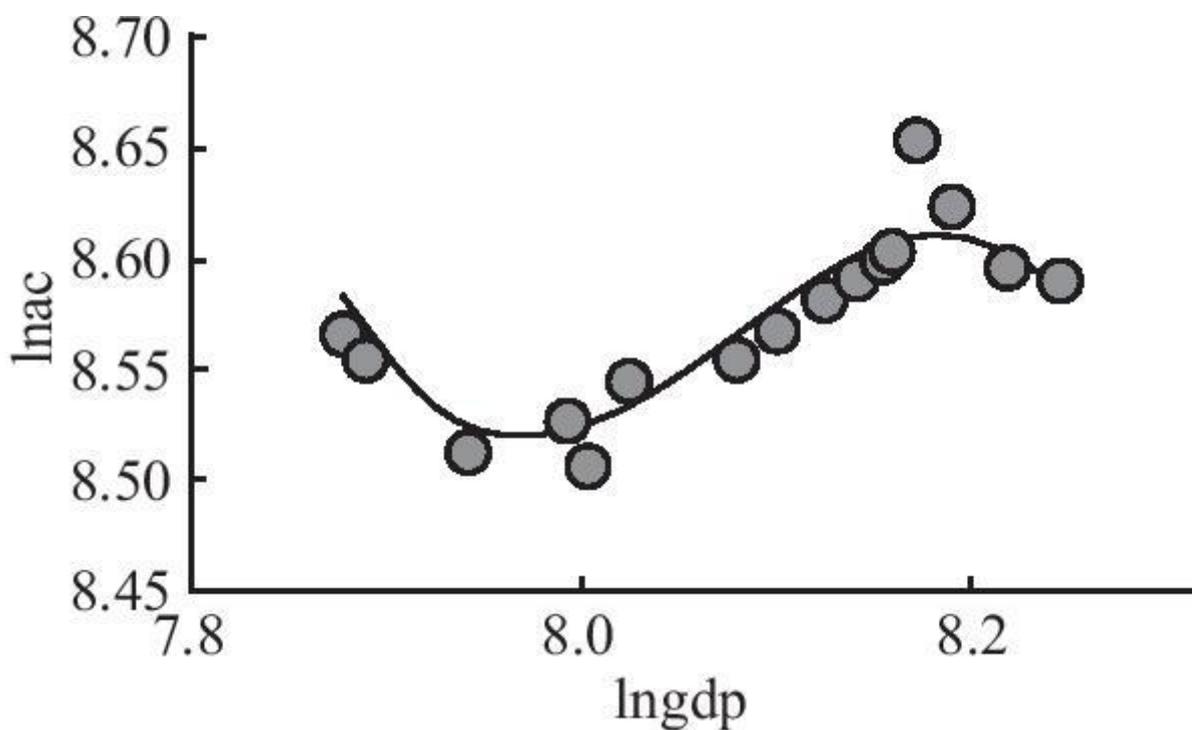


图3 安徽省农业碳排放与农民人均纯收入拟合曲线

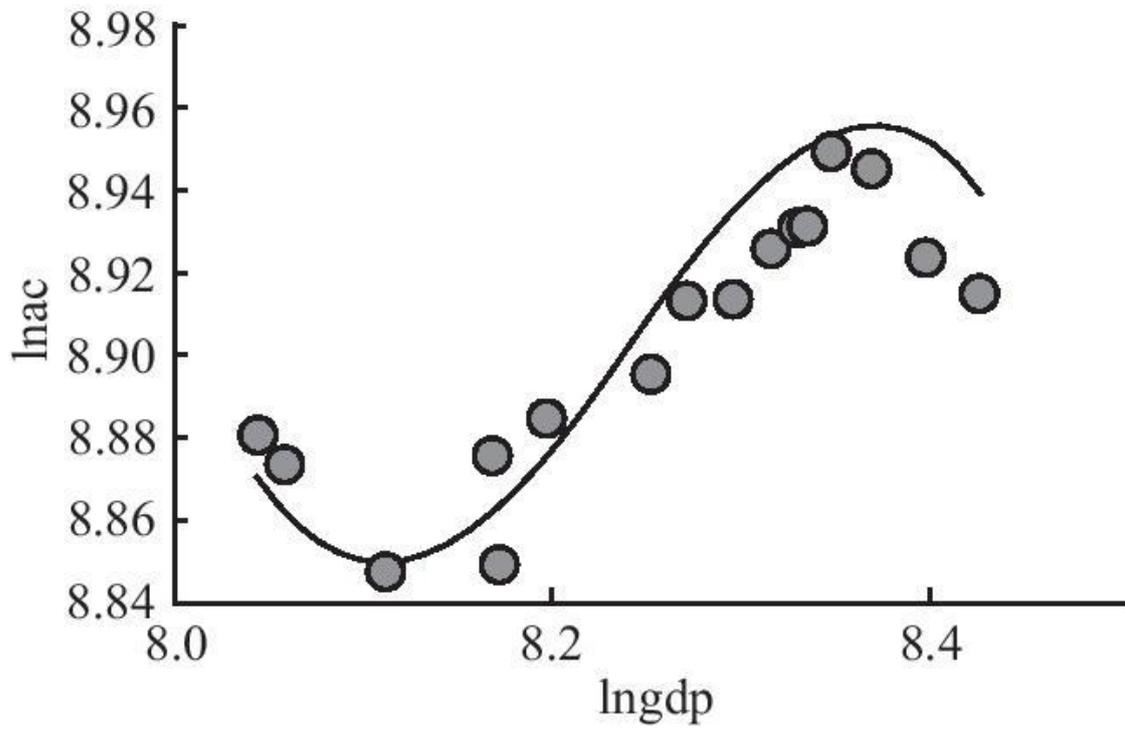


图4 湖南省农业碳排放与农民人均纯收入拟合曲线

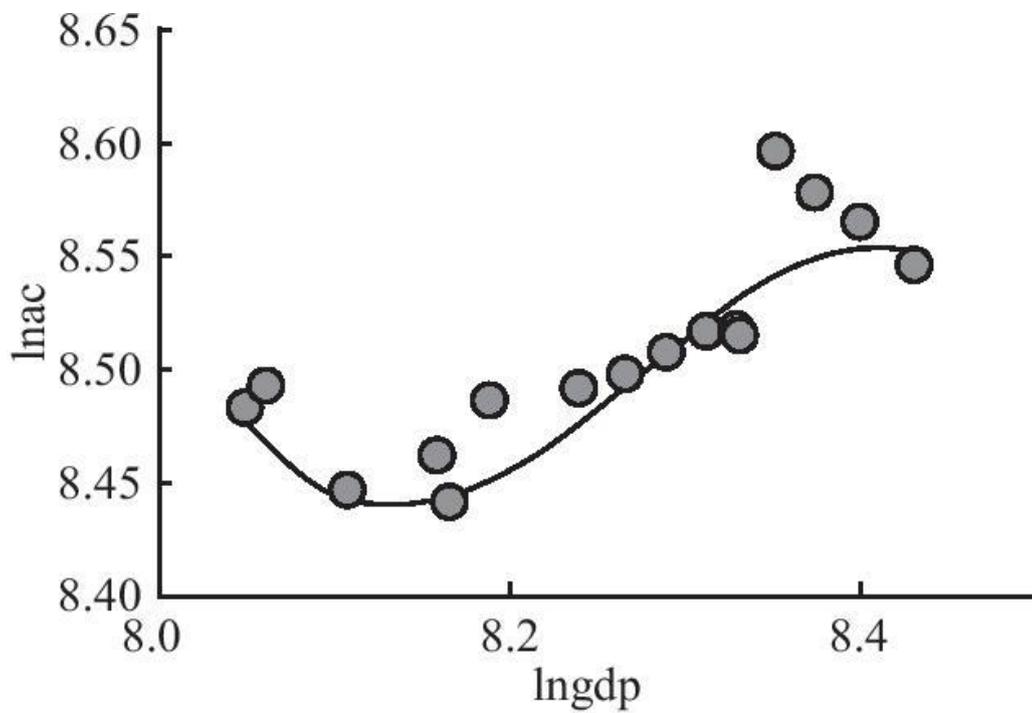


图5 江西省农业碳排放与农民人均纯收入拟合曲线

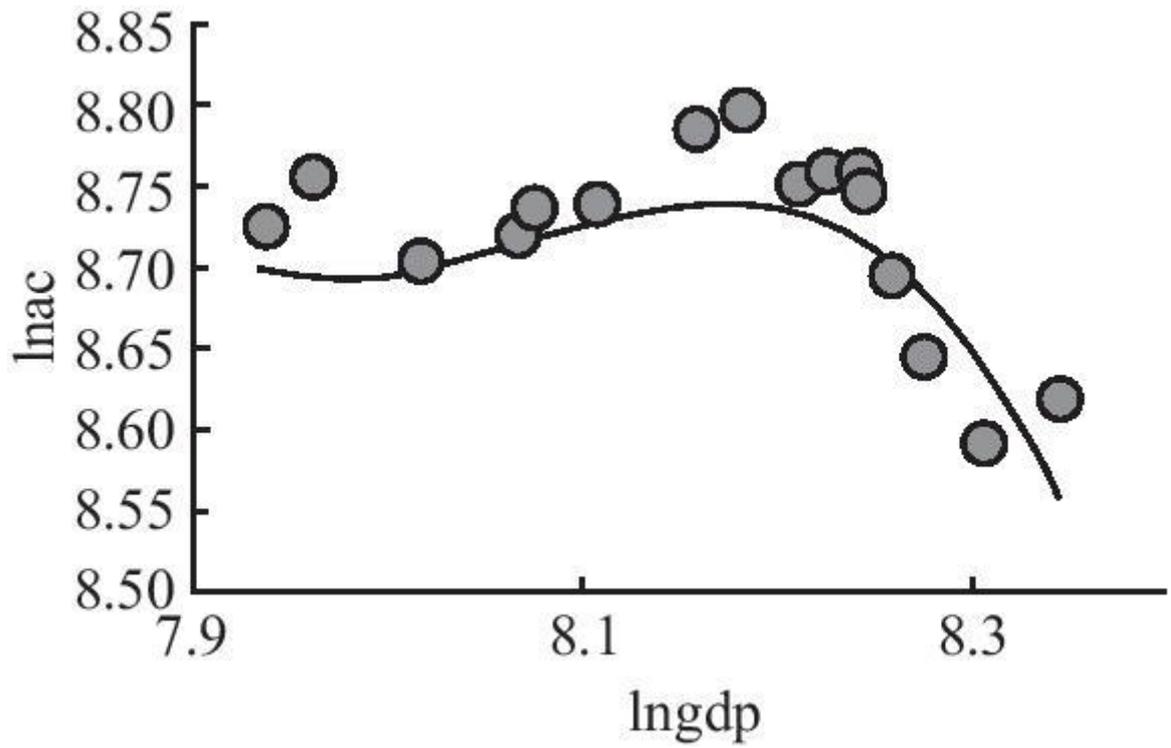


图6 四川省农业碳排放与农民人均纯收入拟合曲线

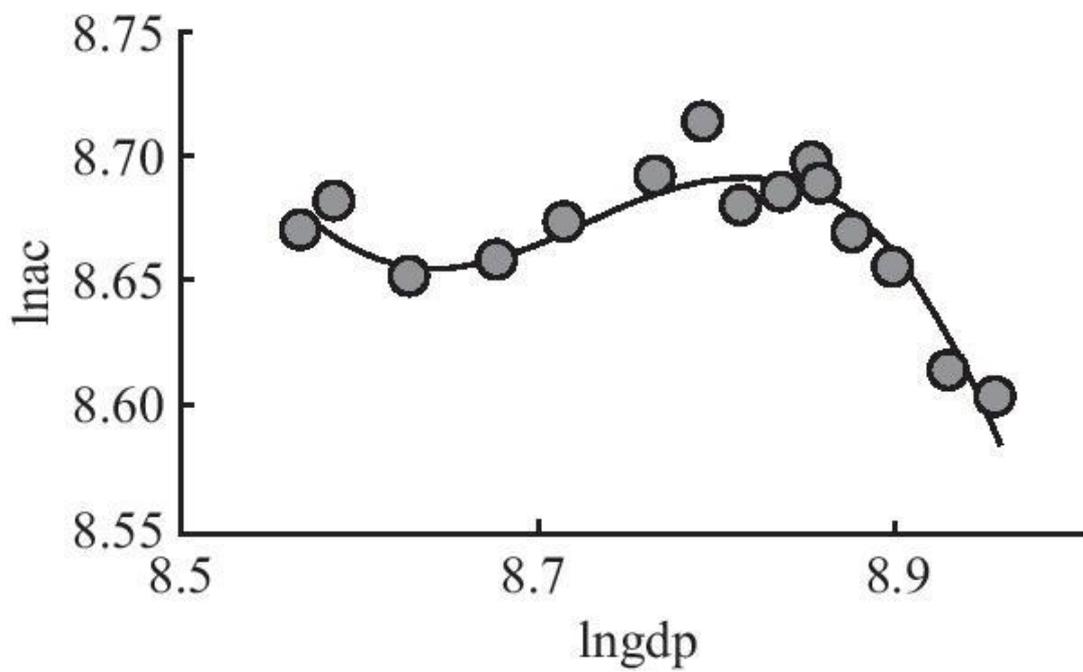


图7 江苏省农业碳排放与农民人均纯收入拟合曲线

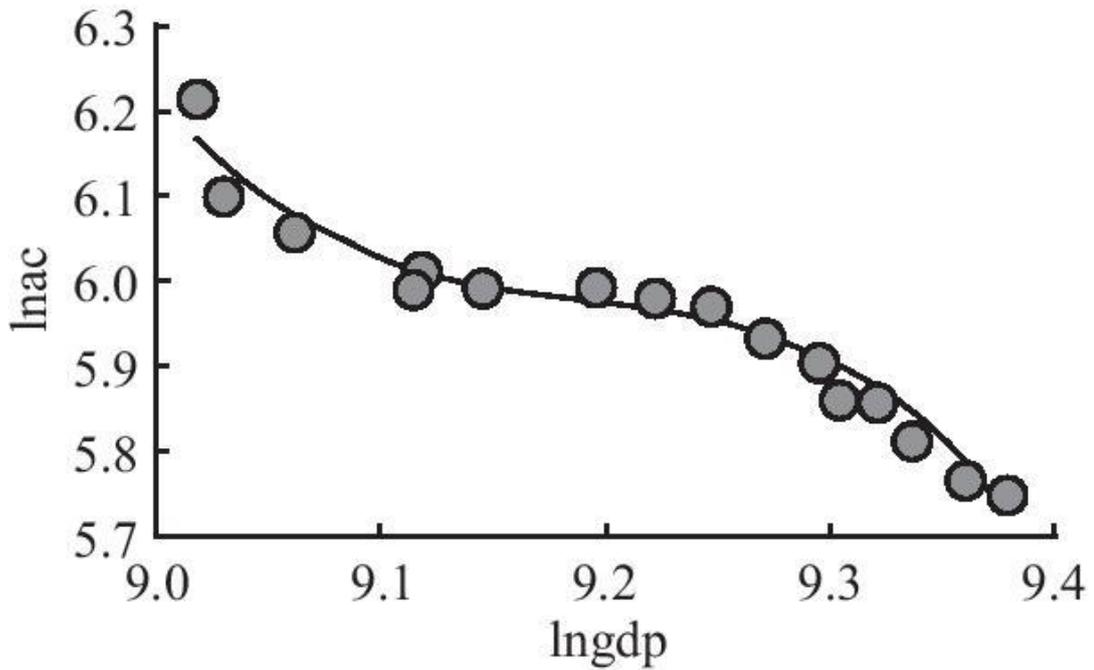


图 8 上海市农业碳排放与农民人均纯收入拟合曲线

如图 9~图 10 所示, 浙江和重庆两地为倒“U”型, 其拐点分别为 2013 和 2012 年。浙江省第 1 阶段为 2005~2013 年, 农业碳排放量随农村居民人均纯收入的增加表现出波动起伏特点, 其中, 2007~2013 年近乎平缓上升, 无明显变化; 第 2 阶段为 2013~2020 年, 呈明显下降趋势。重庆市第 1 阶段为 2005~2012 年, 农业碳排放量随农村居民人均纯收入的增加表现出波动上升特点; 第 2 阶段为 2012~2020 年, 表现出大幅度下降特征, 尤其是 2012 年和 2013 年差距明显。究其原因, 浙江省注重发展绿色低碳农业, 农业碳排放量一直保持平稳且缓慢增长趋势。同时, 浙江省不断加大财政支农力度, 成功建立低碳农业典型村庄, 初步形成可行的技术规范和推广模式, 有利于农业碳减排工作进一步展开。而重庆市 2011 年后高度重视控制温室气体排放和低碳试点工作, 尤其是大力发展低碳农业, 提出推广生态循环农业技术, 提高农业资源利用率, 从施肥、耕作两方面增强农田土壤有机质和固碳能力, 因地制宜发展农业及农村可再生能源, 农业碳减排工作成效明显。

如图 11 所示, 贵州省为正“U”型, 其拐点为 2012 年。2005~2012 年为第 1 阶段, 农业碳排放量随农村居民人均纯收入的增加表现出先急后缓下降特点, 其中, 2005~2008 年大幅度下降, 2008~2012 年缓慢下降; 2012~2020 年为第 2 阶段, 呈波动上升趋势。究其原因, 2008 年前, 贵州省退耕还林还草, 耕地面积缩小, 从而农业生产要素投入减少, 碳排放量迅速下降。而 2008 年后, 贵州省退耕还林还草的同时注重保障耕地面积, 此时林地碳汇逐渐达到饱和, 农业碳排放量下降趋势减缓。此外, 2012 年贵州省将发展重点放在增加碳汇上, 积极发挥农田、草地、湿地等生态系统碳汇功能; 而由于喀斯特地貌, 其耕种面积较散, 水土流失严重, 土层薄, 肥力低, 相较其他省, 需要投入更多的农业物资, 从而不断增加农业碳排放量, 此时碳汇吸收量远远低于碳排放量, 致使贵州省 2012 年后农业碳排放量一直波动上升。

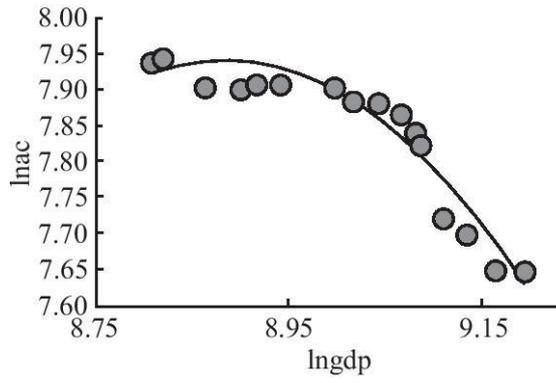


图9 浙江省农业碳排放与农民人均纯收入拟合曲线

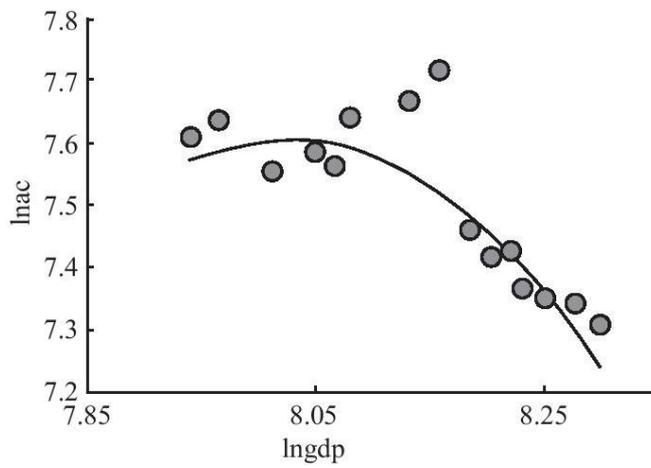


图10 重庆市农业碳排放与农民人均纯收入拟合曲线

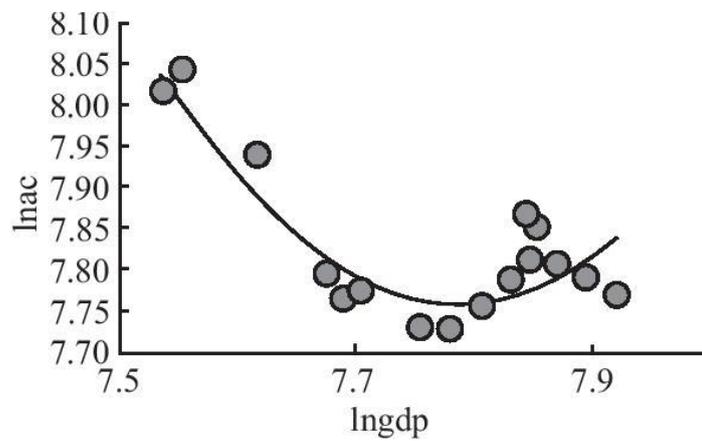


图11 贵州省农业碳排放与农民人均纯收入拟合曲线

### 3.3 长江经济带农业碳排放量驱动因素分析

利用 Hausman 检验法对混合回归、固定效应和随机效应模型的拟合程度进行检验,由于 P 值为 0.038 3(<0.05),因此选择使用固定效应模型进行回归。其中, R<sup>2</sup> 为 0.93,说明模型的整体拟合度较高, P 值为 0.00,表明式(4)通过了很好的显著性检验。随后利用 STIRPAT 模型对农业碳排放驱动因素进行分析(表 5)。

表 5 STIRPAT 回归系数

变量	回归系数	t 统计量	P 值
常数	4.956***	3.92	0.000
lnP	0.214***	3.80	0.000
lnA	0.344***	3.60	0.000
lnT	-0.077**	-2.36	0.019
lnG	-0.007	-0.05	0.962
lnU	-0.177	-1.05	0.294

注: \*\*、\*\*\*表示 5%、1%的水平上显著。

由表 5 可知,农村居民人均纯收入和城镇化率未通过显著性检验,而第一产业从业人数、农林牧渔总产值和农业技术水平每发生 1%的变动会引起长江经济带农业碳排放量 0.214%、0.344%和-0.077%的变化。其中,第一产业从业人数和农林牧渔总产值与农业碳排放量呈正相关关系,其增加会促进农业碳排放量;而农业技术水平与农业碳排放量呈负相关关系,一定程度上会抑制农业碳排放量。同时,第一产业从业人数和农林牧渔总产值也是长江经济带农业碳排放量的主导驱动因素。值得注意的是,EKC 检验中(表 3),农村居民人均纯收入与农业碳排放之间存在非线性关系,而在此处却未通过显著性检验。可能的解释是,EKC 检验主要是观察农村居民人均纯收入变化对农业碳排放的影响,而 STIRPAT 模型则是从多个因素的复杂性和相互作用等方面对农业碳排放的影响进行全面分析,与其他因素相比,农村居民人均纯收入对农业碳排放的影响可能相对较小或不明显。

将表 5 的系数值代入式(5)中,并还原对数得式(9)。

$$AC = 142.02 \times P^{0.214} \times A^{0.344} \times T^{-0.077} \times G^{-0.007} \times U^{-0.177} \quad (9)$$

在其他条件不变的情况下，第一产业从业人员和农林牧渔总产值每增加 1% 分别会导致 0.214% 和 0.344% 的农业碳增量。农业人口的增加意味着农业生产活动的增加，在耕地面积不变甚至减少的情况下，长江经济带人地矛盾将进一步加剧。长江经济带是水稻种植的主要区域，在有限的农地资源基础上，农户为了增加产量将会加大农用物资的投入，例如化肥、农药等。然而农用物资的消耗会产生一定的农业碳排放，同时水稻生长过程中也会产生甲烷气体直接排放到大气中，两者共同导致农业碳排放量的增加。此外，第一产业从业人数的增加也会扩大畜牧业规模，牲畜饲养过程中产生的农业生物质，如粪便、秸秆等，其堆放和消化也会产生温室气体，增加农业碳排放量。而农林牧渔总产值的增加也意味着农业生产规模的扩大，农户为了提高作物产量获取经济利益不可避免地加大农地投入、农业基础设施的投资以及其他生产资料的投入，从而导致农业碳排放量的增加。

此外，农业技术水平每提升 1% 会引起 0.077% 的农业碳排放量减少。农业技术水平的提高有利于加快推进农业机械化步伐，促进农业生产各环节资源利用率提升，减少过度消耗而产生的农业碳排放。具体而言，在种植施肥方面，农业技术水平的提高可以帮助农民更为科学地施用化肥，避免过量施肥而导致的氮肥流失和挥发，进而降低温室气体排放；在灌溉用水方面，农业技术水平的提高可以帮助农民通过感测技术确定耕地土壤水分含量，从而控制灌溉的水量和频率，同时农民还可使用节水灌溉设备、渐进式灌溉技术等提高渠道管理能力，减少耕地水资源消耗，促使农业碳排放量下降；在秸秆还田方面，农业技术水平的提高能扩大农业机械化作业规模，并将秸秆和杂草滞留在田地中，使得土壤有机质含量显著提升并减少农业碳排放量。

### 3.4 长江经济带各省市农业碳排放量预测

首先，对 2005~2020 年的农业碳排放量原始数列进行准指数规律检验，其光滑比小于 0.5 的数据占比为 93.33%，表明该数据可以通过 GM(1,1) 模型进行预测。然后，使用 MATLAB 软件对长江经济带各省市 2023~2030 年农业碳排放量进行预测。需要特别说明的是，由于年鉴数据的滞后性，2021 和 2022 年的农业碳排放暂时无法测算，将其作为预测年份固然有些不妥。但是，GM(1,1) 模型预测需要数据连续，若避开 2021 和 2022 年，可能导致模型无法对后续年份的农业碳排放量进行准确估计，影响预测科学性。为此，在进行 GM(1,1) 模型预测时将从 2021 年开始，但预测结果(表 6)展示起始于 2023 年终于 2030 年。

表 6 长江经济带各省市农业碳排放 2023~2030 年预测数据(单位：万 t)

年份	湖北	重庆	贵州	四川	安徽	湖南	江西	江苏	浙江	云南	上海
2023	6 578.50	1 391.30	2 446.29	5 604.24	5 709.81	7 839.80	5 428.90	5 697.89	2 046.99	4 234.48	301.82
2024	6 628.28	1 391.30	2 448.91	5 488.10	5 753.41	7 888.02	5 477.00	5 685.70	1 983.55	4 286.17	301.82
2025	6 678.45	1 258.16	2 461.61	5 370.85	5 797.34	7 936.53	5 525.52	5 673.53	1 918.69	4 338.49	288.69

2026	6 728.99	1 213.01	2 469.03	5 245.42	5 841.61	7 985.34	5 574.47	5 661.39	1 860.00	4 391.45	282.34
2027	6 779.91	1 188.65	2 459.67	5 159.08	5 841.61	8 034.45	5 623.86	5 649.28	1 806.84	4 445.05	276.13
2028	6 831.22	1 200.28	2 441.46	5 099.07	5 931.16	8 083.86	5 673.68	5 637.19	1 754.23	4 499.31	270.05
2029	6 882.92	1 164.42	2 423.09	5 015.77	5 976.45	8 133.58	5 723.95	5 625.13	1 712.04	4 554.23	264.11
2030	6 935.01	1 122.71	2 408.92	4 954.55	6 022.09	8 183.60	5 774.65	5 613.09	1 676.43	4 609.82	258.30

从表 6 的预测结果来看,2030 年,农业碳排放量位居前 3 位的省份依次为湖南、湖北和安徽,其农业碳排放量分别为 8 183.60、6 935.01 和 6 022.09 万 t。其中,在样本考察期和预测期内,湖南农业碳排放量始终位居首位,且 2023~2030 年年均增长率为 0.62%,预估 2027 年其农业碳排放量超过 8 000 万 t;上海、重庆、浙江、贵州和云南则依次排在后 5 位,其农业碳排放量分别为 258.30、1 122.71、1 676.43、2 408.92 和 4 609.82 万 t。值得注意的是,在样本考察期和预测期内,这 5 省市农业碳排放量排名始终位于长江经济带 11 省市后 5 位,虽然农业碳排放量有不同程度的增减变化,但排名始终没有发生变化。除此之外,四川省 2030 年位居第 6,从原先位居前 3 下降至中间段,其农业碳排放量也从 2005 年的 6 153.39 万 t 下降到 2030 年的 4 954.55 万 t,农业碳减排成效显著。进一步,按照农业碳排放量时序演变差异,将 11 省市划分为 3 种类型:(1)“持续下降型”地区,即农业碳排放量在预测期内呈下降态势,以重庆、浙江、上海、四川和江苏等五地为代表,其下降幅度分别为 3.02%、2.81%、2.20%、1.74%和 0.21%;(2)“持续增长型”地区,即农业碳排放量在预测期内呈增长态势,以云南、江西、安徽、湖北和湖南等五地为代表,年均增长率分别为 1.22%、0.89%、0.76%、0.76%和 0.62%;(3)“先增后降型”地区,仅含贵州一地,从预测数据来看,贵州省 2023~2026 年农业碳排放量逐年上升,于 2026 年达到农业碳排放峰值 2 469.03 万 t,2026 年后农业碳排放量逐年下降,下降幅度为 0.22%。

总体来看,云南、江西、安徽、湖北和湖南五地未来在农业碳减排方面仍有很大潜力,需要在提高农业技术水平等方面投入更多精力以此来促进农业低碳发展;重庆、浙江、上海、四川和江苏 3 省 2 市目前农业碳减排工作进展顺利,成效显著,未来在发展低碳农业的同时可向高质量的生态农业转型,兼顾低碳和高质发展,充分发挥长江经济带农业碳减排领先作用;贵州省农业碳减排工作未来将会展现成效,在明确减排方向的基础上,需要加大力度、加快步伐。

最后,对 GM(1,1)结果进行检验(表 7)。

表 7 GM(1,1)检验结果

省市	g	u	平均相对残差	平均级比偏差
湖北	0.007 540	5 722.829 9	0.028 3	0.028 4
重庆	-0.023 470	2 205.623 5	0.052 6	0.051 8
贵州	-0.007 936	2 662.628 1	0.063 0	0.042 7
四川	-0.007 500	6 532.948 6	0.040 3	0.029 8
安徽	0.007 609	4 957.999 5	0.017 6	0.017 2
湖南	0.006 132	6 997.943 2	0.013 9	0.011 6
江西	0.008 823	4 609.539 0	0.015 9	0.018 0
江苏	-0.002 142	5 928.038 2	0.023 4	0.018 5
浙江	-0.019 192	2 965.886 6	0.037 1	0.019 8
云南	0.012 135	3 382.762 9	0.021 0	0.015 8
上海	-0.022 231	456.461 0	0.019 2	0.021 3

由表 7 可知, GM(1,1)的平均相对残差和平均级比偏差均小于 0.10,表明 GM(1,1)对原数据的拟合效果较好。同时,其发展系数-g 都大于-0.30,说明表 6 预测数据较为真实可靠,具有一定的可信度。

## 4 结论

结合前文研究,本文可得出以下主要结论:

(1)长江经济带各省市农业碳排放量均有较为明显的增减变化且中游省份碳排放量占比呈上升态势。以 2020 年为例,农业碳排放量以湖南居首,上海最末;相比于 2005 年,有 5 个省份处于增长态势且以云南增幅最大,其他 6 省市处于下降态势且以上海降幅最大。农业碳排放量总体呈现“中部高,东西低”的特征,长江经济带中游 3 省农业碳排放量较高,占比最大,且仍呈现增长态势;长江经济带上下游 6 省 2 市农业碳排放量较低,占比小,且逐渐小幅下降。

(2)长江经济带各省市农业碳排放量与农村居民人均纯收入的 EKC 关系存在但整体趋势并非完全一致。结合 EKC 曲线差异可将 11 省市划分为 3 个类型:倒“N”型、倒“U”型和正“U”型。其中,倒“N”型可以进一步划分为“传统倒 N 型”、“缓增急降型”和“持续下降型”。对比各省市 EKC 曲线出现拐点的时间,多数集中于 2007 和 2017 年,其原因可能归结于中央一号文件对农民增收问题的重视和十三五低碳农业建设的发展<sup>1</sup>。

(3)第一产业从业人数和农林牧渔总产值是长江经济带农业碳排放量的主导驱动因素。在所研究的长江经济带农业碳排放量驱动因素中,2005~2020 年,第一产业从业人数、农林牧渔总产值和农业技术水平每发生 1%的变动会分别引起农业碳排放 0.214%、0.344%和-0.077%的变化。其中,第一产业从业人数和农林牧渔总产值对农业碳排放起促进作用且为主导因素,而农业技术水平则表现为抑制作用,但作用力度较小。

(4)2023~2030 年长江经济带各省市农业碳排放量均呈现出明显的起伏变化且减排成效不一。以 2030 年预测结果为例,农业碳排放量仍以湖南居首,上海最末;相比于 2023 年,有 5 个省份处于增长态势且以云南增幅最大,3 省 2 市处于下降态势且以重庆降幅最大,1 省处于先上升后下降态势且以 2026 年为拐点。结合农业碳排放量预测结果的变化趋势可将 11 省市划分为 3 个类型,即“持续下降型”、“持续增长型”和“先升后降型”。

### 参考文献:

[1] SMITH P, BUSTAMANTE M, AHAMMADH, et al. Agriculture, forestry and other land use (AFOLU). In Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

[2] 谢华玲, 迟培娟, 杨艳萍. 双碳战略背景下主要发达经济体低碳农业行动分析[J]. 世界科技研究与发展, 2022, 44(5): 605-617.

XIE H L, CHI P J, YANG Y P. Analysis of low-carbon agricultural action in major developed economies under the background of carbon peaking and carbon neutrality strategies [J]. World Sci-Tech R & D, 2022, 44(5): 605-617.

[3] 丁宝根, 赵玉, 罗志红. 长江经济带农业碳排放的 EKC 检验及影响因素研究[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(9): 223-228.

DING B G, ZHAO Y, LUO Z H. EKC test of agricultural carbon emissions in the Yangtze River Economic Zone and analysis of the affecting factors [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(9): 223-228.

- 
- [4]吴传清, 宋子逸.长江经济带农业绿色发展报告[M].北京: 社会科学文献出版社, 2018.
- WU C Q , SONG Z Y. Report on green agricultural development in Yangtze River economic belt [ M ] . Beijing: Social Sciences Literature Publishing House, 2018.
- [5 ] WEST T O , POST W M. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation[ J ] . Soil Science Society of American Journal, 2002, 66( 6 ) : 1930- 1946.
- [ 6 ] JOHNSON J M F, FRANZLUEBBERS A J, WEYERS S L, et al. Agricultural opportunities to mitigate greenhouse gas emissions[ J ] . Environmental Pollution, 2007 , 150 ( 1 ) : 107 -124.
- [ 7 ] TIAN Y, ZHANG J B, HE Y Y. Research on spatial- temporal characteristics and driving factor of agricultural carbon emissions in China [ J ] . Journal of Integrative Agriculture, 2014 , 13 (6) : 1393- 1403.
- [8]田云, 张俊飏, 尹朝静, 等.中国农业碳排放分布动态 与趋势演进——基于 31 个省(市、区)2002—2011 年的面板数据分析[J].中国人口 -资源与环境, 2014, 24(7): 91-98.
- TIAN Y, ZHANG J B , YIN C J, et al. Distributional dynamics and trend evolution of China' s Agricultural Carbon Emissions: An analysis on panel data of 31 provinces from 2002 to 2011 [ J ] . China Population, Resources and Environment, 2014, 24( 7) : 91-98.
- [9]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[J].农村经济, 2015(8): 28-34.
- YU W Y, QI Y B , LI Y M. Study on agricultural energy efficiency and its total factor productivity of China under the constraint of carbon emission constraint[ J ] . Rural Economy, 2015 ( 8 ) : 28-34.
- [10]陈 炜, 殷田园, 李红兵.1997—2015 年中国种植业碳排放时空特征及与农业发展的关系[J].干旱区资源与环境, 2019, 33(2): 37-44.
- CHEN W, YIN T Y, LI H B. Spatiotemporal distribution characteristics of carbon emission from plant industry and the relationship with agriculture development in China from 1997 to 2015[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33( 2) : 37-44.
- [11] 高标, 房 骄, 卢晓玲, 等.区域农业碳排放与经济增长演进关系及其减排潜力研究[J].干旱区资源与环境, 2017, 31(1): 13-18.
- GAO B, FANG J, LU XL, et al. Evolution relationship between agricultural carbon emissions and economic growth and its reduction potential[ J ] . Journal of Arid Land Resources and Environment ,2017, 31(1): 13- 18.
- [12] 褚力其, 姜志德, 任天驰.中国农业碳排放经验分解与峰值预测——基于动态政策情景视角[J].中国农业大学学报, 2020, 25( 10) : 187-201.
- CHU L Q, JIANG Z D, REN T C. Empirical decomposition and peak prediction of agricultural carbon emissions in China : From the perspective of dynamic policy scenarios[ J ] . Journal of China Agricultural University, 2020, 25( 10): 187-201.

- 
- [13] 冯相昭, 王雪臣, 陈红枫.1971—2005 年中国 CO<sub>2</sub>排放影响因素分析[J].气候变化研究进展, 2008, 4( 1): 42-47.
- FENG X Z, WANG X C, CHEN H F. Analysis of factors impacting China's CO<sub>2</sub> emissions during 1971 - 2005 [ J]. Advances in Climate Change Research, 2008, 4( 1 ): 42-47 .
- [14] 黄敏, 廖为明, 王立国, 等.基于 KAYA 公式的低碳经济模型构建与运用——以江西省为例[J].生态经济, 2010, 26( 12) : 51-55, 78.
- HUANG M , LIAOWM, WANGLG, et al. Construction and use of the low-carbon economy model based on KAYA model: A case of Jiangxi Province [ J]. Ecological Economy, 2010, 26( 12) : 51-55, 78.
- [15] 聂锐, 张涛, 王迪.基于 IPAT 模型的江苏省能源消费与碳排放情景研究[J].自然资源学报, 2010, 25 (9) : 1557- 1564.
- NIE R, ZHANG T, WANG D. The scenario analysis on energy consumption and carbon emissions based on environmental loads model [ J ] . Journal of Natural Resources, 2010 , 25 ( 9 ) : 1557- 1564.
- [16] 吴敬锐, 杨兆萍, 阿达衣, 赛肯.基于 STIRPAT 模型分析新疆能源足迹的影响因素[J].干旱区地理, 2011, 34 (1) : 187- 193.
- WU J R, YANG Z P , ADAYI , Saiken. Impact factors and temporal variation of environmental pressure of Xinjiang based on STIRPAT model [ J ] . Arid Land Geography, 2011 , 34 (1) : 187- 193.
- [17] 何艳秋, 戴小文.中国农业碳排放驱动因素的时空特征研究[J].资源科学, 2016, 38(9) : 1780-1790.
- HE Y Q, DAI X W . P hase characteristics and regional differences in agriculture carbon emissions in China [ J ] . Resources Science, 2016, 38(9) : 1780- 1790.
- [18] 吴贤荣, 张俊飏.中国省域农业碳排放: 增长主导效应与减排退耦效应[J].农业技术经济, 2017(5) : 27-36.
- WU X R, ZHANG J B. Agricultural carbon emissions in China P rovince: Growth leading effect and decoupling effect of emission reduction decoupling effect[ J ] . Journal of Agrotechnical Economics, 2017( 5 ) : 27-36.
- [19] 范大莎, 杨旭, 吴相利, 等.东北三省农田生态系统碳排放时空分异特征及驱动因素研究[J].环境科学学报, 2017, 37(7) : 2797-2804.
- FAN D S, YANG X, WU X L, et al. Spatial-temporal differentiation of agro - ecosystem carbon emissions in Northeast China and its driving factors [ J ] . Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(7) : 2797-2804.
- [20] 何艳秋, 陈柔, 吴昊玥, 等.中国农业碳排放空间格局及影响因素动态研究[ J ] . 中国生态农业学报, 2018, 26 (9) : 1269-1282.
- HE Y Q, CHEN R, WU H Y, et al. Spatial dynamics of agricultural carbon emissions in China and the related driving factors [ J ] . Chinese Journal of Eco - Agriculture, 2018 , 26 ( 9 ) : 1269- 1282.

---

[21] 杨 钧.中国农业碳排放的地区差异和影响因素分析[J]. 河南农业大学学报, 2012, 46(3): 336-342.

YANG J. Analysis on regional difference and affecting factors of agriculture carbon emission in China[ J] . Journal of Henan Agricultural University, 2012, 46( 3 ) : 336-342.

[22] 王 劼,朱朝枝.农业部门碳排放效率的国际比较及影响 因素研究——基于 32 个国家 1995—2011 年的数据研究 [J]. 生态经济, 2018, 34(7): 25-32.

WANG J, ZHU C Z. International comparison of carbon emission efficiency in agricultural sector and its influencing factors based on date from 32 countries from 1995 to 2011 [ J] . Ecological Economy, 2018, 34( 7 ) : 25-32.

[23] 陈银娥, 陈 薇.农业机械化、产业升级与农业碳排放关 系研究——基于动态面板数据模型的经验分析[J].农业 技术经济, 2018(5): 122- 133.

CHEN Y E, CHEN W. A study on the relationship among agricultural mechanization, industrial upgrading and agricultural carbon emission: The empirical research based on dynamic panel data model [ J ] . Journal of Agrotechnical Economics, 2018(5) : 122- 133.

[24] 韩金雨, 曲建升, 徐 丽, 等.支农财政对农业碳排放强 度的空间效应: 基于空间杜宾模型的实证分析[J].生态 与环境学报, 2021, 37( 11): 1404-1412.

HAN J Y, QU J S , XU L, et al. The spatial effect of agricultural finance on agricultural greenhouse gas emission intensity: An empirical analysis based on the spatial durbin model [ J ] . Journal of Ecology and Rural Environment, 2021 , 37 ( 11 ) : 1404- 1412.

[25] 李国志, 李宗植.中国农业能源消费碳排放因素分解实证 分析——基于 LMDI 模型[J].农业技术经济, 2010(10): 66-72.

LI G Z, LI Z Z. Empirical analysis on decomposition of carbon emission factors from agricultural energy consumption in China: Based on LMDI model[ J] . Journal of Agrotechnical Economics, 2010(10): 66-72.

[26] 戴小文,何艳秋,钟秋波.中国农业能源消耗碳排放变化 驱动因素及其贡献研究——基于 Kaya 恒等扩展与 LMDI 指 数分解方法[J].中国生态农业学报, 2015, 23 ( 11 ): 1445-1454.

DAI X W, HE Y Q, ZHONG Q B. Driving factors and their contributions to agricultural CO<sub>2</sub> emission due to energy consumption in China: Based on an expended Kaya identity and LMDI decomposition method[ J ] . Chinese Journal of Eco-Agri-culture, 2015, 23( 11 ) : 1445-1454.

[27] 徐玥, 王辉, 韩秋风, 等.我国耕地碳排放时空特征 与影响因素[J].江苏农业科学, 2022, 50 ( 16 ) : 218-226.

XU Y , WANG H, HAN Q F, et al. Spatial-temporal characteristics and influencing factors of China's cultivated land carbon emissions[ J] . Jiangsu Agricultural Sciences, 2022 , 50 ( 16 ) : 218-226.

[28] 吉雪强, 李卓群, 张跃松.农地流转对农业碳排放的影响 及空间特性[J].资源科学, 2023, 45( 1): 77-90.

JI X Q, LI Z Q, ZHANG Y S. Influence of rural land transfer on agricultural carbon emissions and its spatial characteristics [J].

---

Resources Science, 2023 , 45( 1) : 77-90.

[29] 王若梅, 马海良, 王锦.基于水-土要素匹配视角的农业碳排放时空分异及影响因素——以长江经济带为例[J]. 资源科学, 2019, 41(8) : 1450- 1461 .

WANG R M, MA H L, WANG J. Spatial and temporal differences of agricultural carbon emissions and impact factors of the Yangtze River Economic Belt based on a water-land perspective [ J ] . Resources Science, 2019 , 41 ( 8 ) : 1450- 1461.

[30] 胡婉玲, 张金鑫, 王红玲.中国农业碳排放特征及影响因素研究[J].统计与决策, 2020, 36(5) : 56-62.

HU W L, ZHANG J X, WANG H L. Characteristics and Influencing factors of agricultural carbon emission in China[ J ] . Statistics & Decision , 2020 , 36(5) : 56-62.

[31] PANAYOTOU T. Empirical tests and policy analysis of environmental degradation at different stages of economic development [ R ] . International Labor Office, Technology and Employment Program Working Paper, 1993 , WP238.

[32] KUZNETS R C. Economic growth and income equality since the 1982 recession [ J ] . Journal of Policy Analysis and Management, 1955, 10: 181-203.

[33] STERN D I. Progress on the environmental kuznets curve ? [ J ] . Environment and Development Economics, 1998 , 3 (2) : 173- 196.

[ 34 ] DINDS S. Environmental kuznets curve hypothesis: A survey [ J ] . Ecological Economics, 2004, 49 ( 4 ) : 431 -455.

[ 35 ] APERGIS N, OZTURK I. Testing Environmental Kuznets Curve hypothesis in Asian countries[ J ] . Ecological Indicators, 2015, 52: 16-22.

[36] 朱哲毅, 应瑞瑶, 周力.畜禽养殖末端污染治理政策对养殖户清洁生产行为的影响研究——基于环境库兹涅茨曲线视角的选择性试验[J].华中农业大学学报(社会科学版),2016(5) : 55-62, 145.

ZHU Z Y, YING R Y, ZHOU L. The research on the effect of policy concerning controlling terminal pollution in livestock breeding on farmers clean production behavior: A choice experiment based on the EKC perspective [ J ] . Journal of Huazhong Agricultural University ( Social Sciences Edition ) , 2016 ( 5 ) : 55-62, 145.

[37] 孙康, 李丽丹.我国海域污染与渔业经济 EKC 关系研究——基于日本海洋渔业发展的启示[J].当代经济管理, 2017, 39(4) : 90-97.

SUN K , LI L D. A EKC relationship study on between the marine pollution and fishery economic in China——Based on the enlightenments from the marine economy development in Japan [ J ] . Contemporary Economic Management, 2017 , 39 ( 4 ) : 90-97.

[38] 吴金凤, 王秀红.不同农业经济发展水平下的碳排放对比分析——以盐池县和平度市为例[J].资源科学, 2017, 39(10) : 1909- 1917.

---

WU J F, WANG X H. Comparative analysis of agricultural carbon emissions at different agricultural economic development levels in Yanchi County and Pingdu City [ J ] . Resources Science, 2017, 39( 10) : 1909- 1917.

[39] 李 飞, 董锁成.西部地区畜禽养殖污染负荷与资源化路 径研究[J].资源科学, 2011, 33( 11): 2204-2211.

LI F, DONG S C. Pollution from livestock and poultry and its resource strategy in West China [ J ] . Resources Science, Resources Science, 2011, 33( 11 ) : 2204 - 2211 .

[40] 揭昌亮, 王金龙, 庞一楠.中国农业增长与化肥面源污 染:环境库兹涅茨曲线存在吗? [J].农村经济, 2018 (11) : 110-117.

JIE C L, WANG J L, PANG Y N. Agricultural growth and non-point source pollution of chemical fertilizer in China: Does the environmental kuznets curve exist? [J]. Rural Economy, 2018(11) : 110-117.

[41] 陈宗胜, 沈扬扬, 周云波.中国农村贫困状况的绝对与相 对变动——兼论相对贫困线的设定[J].管理世界, 2013 (1) : 67-75, 77, 76, 187.

CHEN Z S, SHEN Y Y, ZHOU Y B. On the absolute and relative changes in the poverty in China' s Villages and on the setting of the relative poverty line [ J ] . Management World, 2013(I) : 67-75, 77, 76, 187.

[42] 武晓明, 罗剑朝.农村金融市场开放对农业经济增长的影 响及其分解研究——基于空间 Durbin 面板模型的实证分析[J]. 经济经纬, 2016, 33(5) : 30-35.

WU X M, LUO J C. An empirical research of effects of rural financial market openness on agricultural economic growth and its decomposition: Based on spatial durbin panel model [ J ] . Economic Survey, 2016, 33( 5 ) : 30-35.

[43] 金绍荣, 任赞杰, 慕天媛.农业保险、农业全要素生产率与农业经济增长[J].宏观经济研究, 2022( 1): 102-114, 160.

JIN S R, REN Z J, MU T Y. Agricultural insurance, agricultural total factor productivity and agricultural economic growth [J]. Macroeconomics, 2022 ( 1) : 102- 114, 160.

[44] 李 波, 张俊飏, 李海鹏.中国农业碳排放与经济发 展的 实证研究[J].干旱区资源与环境, 2011, 25( 12) : 8-13.

LI B, ZHANG J B, LI H P. Empirical study on China's agriculture carbon emissions and economic development [ J ] . Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011 , 25 (12) : 8-13.

[45] 颜廷武, 田 云, 张俊飏, 等.中国农业碳排放拐点变动 及时空分异研究[J].中国人口 -资源与环境, 2014, 24 (11): 1-8.

YAN T W, TIAN Y, ZHANG J B, et al. Research on inflection point change and spatial and temporal variation of China's agricultural carbon emissions[ J ] . China Population, Resources and Environment, 2014 , 24 ( 11 ) : 1 - 8 .

[46] 廖卫东, 刘 淼.西部地区农业碳排放的时空演变及 EKC 假说检验——基于西部大开发 12 省份动态面板数据模型 的经验分析[J].世界农业, 2020(6) : 62-70.

---

LIAO W D, LIU M. Temporal and spatial evolution of agricultural carbon emissions in Western China and test of the EKC hypothesis: Empirical analysis based on the dynamic panel data model of 12 provinces in the western development Program [ J ] . World Agriculture, 2020( 6 ) : 62-70.

[47] 田云, 尹恣昊. 中国农业碳排放再测算: 基本现状、动态演进及空间溢出效应[J]. 中国农村经济, 2022 (3): 104-127.

TIAN Y , YIN M H. Re-evaluation of China's agricultural carbon emissions: Basic status, dynamic evolution and spatial spillover effects [ J ] . Chinese Rural Economy, 2022 ( 3 ) : 104- 127.

[48] 蒋金荷. 中国城镇住宅碳排放强度分析和用能政策反思 [J]. 数量经济技术经济研究, 2015, 32(6): 90-104.

JIANG J H. China's urban residential carbon intensity decomposition and energy policy rethink [J] . The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2015, 32(6): 90-104.

[49] 田云, 陈池波. 中国碳减排成效评估、后进地区识别与路径优化[J]. 经济管理, 2019, 41(6): 22-37.

TIAN Y, CHEN C B. Effectiveness evaluation of carbon emission reduction in China, identification of backward areas and path optimization [ J ]. Business Management Journal, 2019, 41(6) : 22-37.

[50] 闵继胜, 胡浩. 中国农业生产温室气体排放量的测算 [J]. 中国人口-资源与环境, 2012, 22(7) : 21-27.

MIN J S , HU H. Calculation of greenhouse gases emission from agricultural production in China [ J ] . China Population, Resources and Environment, 2012, 22(7) : 21-27.

[ 51 ] SELINGER T J. Canada's environmental review of the North American free trade agreement[ J ] . Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice, 1993 , 119 : 246253.

[52] 黎孔清, 马豆豆, 李义猛. 基于 STIRPAT 模型的南京市农业碳排放驱动因素分析及趋势预测[J]. 科技管理研究, 2018, 38( 8 ) : 238-245.

LI K Q, MA D D, LI Y M. Driving factors and trends prediction of urban agricultural carbon emissions in Nanjing based on STIRPAT [ J ] . Science and Technology Management Research , 2018, 38( 8 ) : 238-245.

[53] 刘思峰. 灰色系统理论及其应用[M]. 3 版. 北京: 科学出版社, 2004.

LIU S F. Grey system theory and its application [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2004 .

[54] 刘颖, 任燕燕. 基于 VEC 模型的中国 CO<sub>2</sub> 库兹涅茨曲线分析[J]. 安徽师范大学学报(人文社会科学版), 2012, 40( 1 ) : 25-30.

LIU Y, REN Y Y. Analysis of CO<sub>2</sub> kuznets curve in China based on VECM [ J ] . Journal of Anhui Normal University( Hum. & SocSci. ), 2012, 40(1): 25-30.