

中国省际农业碳排放测算及低碳化水平评价 ——基于衍生指标与TOPSIS法的运用

田成诗, 陈 雨

(东北财经大学统计学院, 大连 116025)

摘要: 农业碳排放量测算及低碳化水平评价, 是实现农业绿色发展和制定碳减排计划的重要依据。通过测算2006—2016年中国30个省份的农业碳排放量, 并以测算结果为基础, 从农业用地、禽畜养殖和农业能源三个方面构造农业碳排放衍生指标, 采用基于动态自然权重的TOPSIS法对各省农业低碳化水平进行评价。结果表明: 中国农业碳排放总量呈先降后升的“V型”变化, 由2006年的91096万t下降至2008年的83521万t, 此后稳步增加至2016年的92192万t。农业非能源碳排放量占农业碳排放总量的84%以上, 土壤管理是农业非能源碳排放的第一来源。省际农业碳排放衍生指标异质性较强, 农业低碳化水平整体不高。研究结果可为农业和环境部门开展低碳农业评价工作提供借鉴。

关键词: 农业碳排放; 低碳化水平; 衍生指标; TOPSIS法

近年来, 建立在“高碳”基础上的中国农业发展迅速, 但农业生产活动产生的碳排放(本文将农业温室气体排放统称为农业碳排放)也日益增多。污水灌溉、养殖业污染物排放和化肥、农药、农膜等农业生产资料的过度使用是造成农业立体污染(指农业生产过程中不合理农药化肥施用、畜禽粪便排放、农田废弃物处置以及耕种措施等造成的面源污染和碳排放所构成的从水体、土壤、生物到大气的污染)加剧的重要原因。联合国粮食与农业组织统计数据表明, 农业生产和土地利用变化产生碳排放已占到人类活动产生碳排放总量的1/4^[1], 2017年中国农业碳排放总量约占亚洲农业碳排放总量的29.01%, 占世界总量的12.54%左右^[2]。因此, 控制农业及其相关部门产生的碳排放已成为中国实现《巴黎协定》减排承诺的重要一环。此外, 加快农业绿色发展是《国家质量兴农战略规划(2018—2022)》确定的重点任务之一, 而构建农业低碳化评价体系对各省农业碳排放水平进行科学评价, 则是确保任务落实到位的关键^[3]。在此背景下, 准确测算中国省际农业碳排放量及选择合理的低碳评价方法就变得尤为重要。

学者们在农业碳排放测算和农业低碳化水平评价领域的研究已取得一系列的进展。关于农业碳排放测算研究, 国外学者除参考《IPCC国家温室气体清单指南》(IPCC指南)和联合国粮食与农业组织数据库等官方数据外^[4], 还开发了Agri-LCI、SPAC和农业生态系统(DNDC)等模型对地区、行业和农场的碳排放量进行测算^[5-7]。有研究表明IPCC测算方法未考虑农作物管理效应和气候条件差异, 无法衡量特定地区农业碳排放量的真实水平^[8,9]。对此, Goglio等^[10]基于田间试验的测算数据比较了IPCC方法和DNDC模

收稿日期: 2019-10-06; 修订日期: 2019-12-16

基金项目: 国家社会科学基金重大项目(14ZDB130); 辽宁省教育厅项目(LN2019Z12)

作者简介: 田成诗(1971-), 男, 辽宁大连人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事资源经济学研究。

E-mail: sctian71@163.com

型在估算作物种植产生碳排放量时的有效性。国内学者对农业碳排放量进行测算的思路主要有农田利用论、农用物资使用和农业生产活动论：董红敏等^[11]参考 IPCC 指南测算农田碳排放量；王若梅等^[12]、李国志等^[13]测算农用能源消费产生的碳排放量，谭秋成^[14]和黄坚雄等^[15]认为除了农田和农用能源碳排放，农膜和农药使用产生的碳排放也应包括在测算范围内；陈罗焯等^[16]使用全碳分析法测算农业机械活动碳排放，田云等^[17,18]将柴油、翻耕和灌溉三类农业碳源纳入农业碳排放测算体系。

对于农业低碳化水平评价研究，国外学者主要从构建与特定农业活动相关的评价指标着手。Bockstaller 等^[19]将环境相关指标划分为通过调查、数据库和非直接测量数据得到的单一指标、考虑多种因素计算得到的综合指标和基于一项或多项测量得到的指数类指标三种。De Olde 等^[20]、Sabiha 等^[21]和 Marchand 等^[22]从评价目标、时空和利益相关方等角度开发以农业相关衍生指标（计算数据或多指标数据）为基础的评价工具，对农业低碳化水平进行评价。国内学者侧重运用投入产出理论，将农业碳排放量作为投入或产出要素，使用随机前沿（SFA）和数据包络（DEA）方法对农业碳排放水平进行效率评价。揭懋汕等^[23]将农业碳排放量作为投入要素，使用 SFA 方法测算县级农业生态全要素生产率；展进涛等^[24]将扣除碳排放成本的农业绿色 GDP 作为产出要素，使用 SFA 方法测算省际农业绿色全要素生产率；还有部分学者将农业碳排放量作为非期望产出，使用 SBM-DEA 方法测算农业生态效率或农业碳排放绩效^[25-27]。

以上文献为本文研究工作提供了参考，但也存在部分不足：一是对中国省际农业碳排放的测算，已有文章在确定碳排放因子时未考虑农业规模和地理位置差异等因素的影响，二是基于投入产出理论的效率评价方法无法反映不同类型农业碳源的碳排放水平，三是农业碳排放测算体系与评价体系的建立缺乏联系性。因此本文的贡献在于：首次使用“差异化碳排放系数—农业碳排放衍生指标—动态自然权重的逼近理想解排序法（TOPSIS）”对中国省际农业碳排放量和农业低碳化水平进行测算与评价。这一路径充分利用各省农业碳排放总量、强度和结构信息，保证了测算体系与评价体系的内部一致性，增强评价结果可靠性。创新性主要体现在两个方面：第一，参考《省级温室气体清单编制指南（试行）》（2011 年），基于牲畜统计口径改变、饲养规模和地理区位差异确定碳排放系数，提高测算的精确性。第二，以各类农业碳源的碳排放量为基础，从农业用地、禽畜养殖和农用能源角度构建农业碳排放衍生指标作为初始评价指标，使用基于动态自然权重的 TOPSIS 法对农业低碳化水平进行评价。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 农业碳排放测算方法

《省级温室气体清单编制指南（试行）》（2011 年）中指出，农业非能源碳排放来源包括水稻种植、土壤管理、肠道发酵和禽畜粪便，农业能源碳排放包括化石能源燃烧和生物质燃烧。故中国省际农业碳排放总量^①测算公式：

$$E = E_1 + E_2 \quad (1)$$

① 联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）提议采取二氧化碳当量（CO₂e）为统一单位，度量不同碳排放产生的温室效应。某气体的二氧化碳当量为该气体数量乘以其温室效应指数，该气体的温室效应指数也称作全球变暖潜力值（GWP）。为表述方便，本文将农业碳排放量测算结果统一换算成二氧化碳当量。

式中： E 表示农业碳排放总量（万 t CO₂e）； E_1 和 E_2 分别为农业非能源碳排放量和农业能源碳排放量（万 t CO₂e）^②。农业非能源碳排放量计算公式如下：

$$E_1 = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^3 e_{ij} = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^3 (\partial_{ij} T_{ij} \times GWP_j) \quad (2)$$

式中： e_{ij} 的下标 i 对应水稻种植、土壤管理、肠道发酵和禽畜粪便四种来源； j 对应各碳源所产生的温室气体的种类（种）； ∂_{ij} 和 T_{ij} 分别表示各碳源所产生温室气体的排放系数和使用量； GWP_j 表示不同温室气体对应的全球变暖潜力值^③。

关于碳排放系数的确定：（1）水稻种植产生的甲烷的排放系数，采用闵继胜等^[28]的计算结果，其包含的假设是，研究期间各省份土地禀赋和种植技术保持不变。（2）土壤管理中化肥、农药和农膜的碳排放系数分别为 0.8956（kg C/kg）、4.9341（kg C/kg）和 5.18（kg C/kg）。（3）由于《中国畜牧业年鉴》在 2007 年以后改变了牛的统计口径，仅公布牛、肉牛和奶牛的年末存栏量，故将牛的类别划分为奶牛和非奶牛。参考《省级温室气体清单编制指南（试行）》（2011 年），确定牲畜肠道发酵和禽畜粪便管理产生碳排放的排放系数，具体如表 1、表 2 所示。

表 1 肠道发酵碳源与排放系数

Table 1 Intestinal fermentation carbon sources and emission coefficient

碳源	排放系数	排放气体、单位	碳源	排放系数	排放气体、单位
奶牛	88.1/89.3/99.3	CH ₄ 、kg/头/年	骆驼	46	CH ₄ 、kg/峰/年
非奶牛	52.9/67.9/85.3	CH ₄ 、kg/头/年	猪	1	CH ₄ 、kg/头/年
马	18	CH ₄ 、kg/匹/年	山羊	8.9/9.4/6.7	CH ₄ 、kg/头/年
驴/骡	10	CH ₄ 、kg/匹/年	绵羊	8.2/8.7/7.5	CH ₄ 、kg/头/年

注：奶牛、非奶牛、山羊和绵羊的排放系数“88.1/89.3/99.3”，分别对应规模化饲养、农户散养和放牧饲养模式下动物肠道发酵产生甲烷的排放系数。

考虑数据可得性和我国农业生产实际情况，本文选取原煤、柴油、焦炭、燃油和汽油 5 类农业能源。农业能源碳排放量计算公式如下：

$$E_2 = \sum_{p=1}^5 (e_p \times \partial_{energy,p}) \times GWP_{CO_2} \quad (3)$$

式中： e_p 表示化石能源种类； $GWP_{CO_2} = 1$ ； $\partial_{energy,p}$ 表示各类能源的二氧化碳排放系数，由式（4）计算得到。

$$\partial_{energy,p} = [COF_p \times NCV_p \times (44/12) \times 1000] \times 4186.8 \times 10^{-9} \times 10^{-3} \times CEF_p \quad (4)$$

式中： COF 、 NCV 、 CEF 分别表示不同类型能源的碳排放系数、碳氧化因子和中国能源净发热值，具体数值参考《省级温室气体清单编制指南（试行）》（2011 年）计算得到。

1.2 农业低碳化水平评价方法

1.2.1 基于衍生指标的评价指标构建

常见的农业衍生指标有农业人均碳排放和单位农业总产值碳排放，但前者易受农业

② 由于 2007 年后《中国能源统计年鉴》不再公布各省市沼气、秸秆和薪柴三种生物质燃料的数据，故本文未计算生物质燃烧活动产生的碳排放。

③ 根据《京都议定书》，以二氧化碳的 100 年全球变暖潜力值（GWP）为基准，1 t 甲烷产生的温室效应相当于排放 21 t 二氧化碳，1 t 氧化亚氮产生的温室效应相当于排放 310 t 二氧化碳，因此二氧化碳、甲烷和氧化亚氮的全球变暖潜力值为 1、21 和 310。

表2 粪便管理碳源与排放系数

Table 2 Manure management carbon source and emission coefficient (kg/头/年)

排放气体	地区	禽 兽								
		奶牛	非奶牛	绵羊	山羊	猪	家禽	马	驴/骡	骆驼
CH ₄	华北	7.46	2.82	0.15	0.17	3.12	0.01	1.09	0.60	1.28
	东北	2.23	1.02	0.15	0.16	1.12	0.01	1.09	0.60	1.28
	华东	8.33	3.31	0.26	0.28	5.08	0.02	1.64	0.90	1.92
	中南	8.45	4.72	0.34	0.31	5.85	0.02	1.64	0.90	1.92
	西南	6.51	3.21	0.48	0.53	4.18	0.02	1.64	0.90	1.92
	西北	5.93	1.86	0.28	0.32	1.38	0.01	1.09	0.60	1.28
排放气体	地区	禽 兽								
		奶牛	非奶牛	绵羊	山羊	猪	家禽	马	驴/骡	骆驼
N ₂ O	华北	1.846	0.794	0.093	0.093	0.227	0.007	0.330	0.188	0.330
	东北	1.096	0.913	0.057	0.057	0.266				
	华东	2.065	0.846	0.113	0.113	0.175				
	中南	1.710	0.805	0.106	0.106	0.157				
	西南	1.884	0.691	0.064	0.064	0.159				
	西北	1.447	0.545	0.074	0.074	0.195				

人口数量的影响，无法反映农业碳排放的真实水平，后者因农业总产值核算中未统计农户自给自足和私自交易部分的影响，会导致对农业碳排放强度的高估。因此，这两个指标在一定程度上与特定农业活动的相关性不高。为此，本文以省际农业碳排放测算体系为基础，从农业种植、禽畜养殖和农用能源层面构建4个农业碳排放衍生指标，并将其作为农业低碳化水平评价的初始评价指标。与Dace等^[29]不同的是，本文不仅考察了家禽粪便管理产生的碳排放水平，还增设单位农业能源碳排放强度指标。

4个衍生指标分别为：（1）单位面积农业用地碳排放（t CO₂/hm²），该指标衡量与土地耕作和水稻种植有关活动的碳排放强度，由水稻种植和土壤管理产生碳排放量之和与农业用地面积的比值得出，农业用地当年面积指标使用主要农作物播种面积上年年末和本年末之和的平均值代替^④；（2）单位牲畜肠道发酵碳排放（t CO₂/头），由各省牲畜肠道发酵碳排放总量与总牲畜量之比表示^⑤；（3）单位牲畜粪便管理碳排放（t CO₂/头），该指标衡量牲畜和家禽（简称“禽畜”）粪便管理过程中碳排放强度，由禽畜粪便管理碳排放总量与禽畜总量之比表示^⑥；（4）单位农业能源碳排放强度（万t CO₂/亿元）由农业能源消耗产生的二氧化碳排放总量与农业生产总值之比表示。

④ 根据《中国国土资源统计年鉴》中对耕地和主要农作物播种面积的解释，主要农作物播种面积是指种植农作物的土地，包括熟地、新开发、复垦、整理地，休闲地（含轮歇地、轮作地）；以种植农作物（含蔬菜）为主，间有零星果树、桑树或其他树木的土地；耕地又分为灌溉水田、水浇地和旱地3个二级地类，因此在单位面积农业用地碳排放指标计算中，主要农作物播种面积比耕地面积更适合作为农业用地面积的替代指标。

⑤ 总牲畜量用猪羊换算后的牲畜量与大牲畜头数之和表示，牲畜量计算根据2003年1月1日实施的《畜禽养殖业污染物排放标准》（GB 18596-2001），对不同种类牲畜的饲养量按照一定折算系数进行换算，其中10头猪折算成1头奶牛，30只羊折算成1头奶牛（奶牛属于大牲畜）。

⑥ 禽畜总量由大牲畜头数与猪、羊和家禽换算后的牲畜量之和表示，家禽折算系数取蛋鸡和肉鸡的平均值，即450只家禽折算成1头奶牛。

1.2.2 动态自然权重的TOPSIS法

TOPSIS法是一种多指标评价法,其思想是将评价对象的各指标数据在坐标系中画出,找到最优(坏)解,计算各评价方案与最优(坏)解之间的欧式距离,得到评价方案与最优(坏)理想解的接近程度。但由于欧式距离衡量的是数据曲线间的距离关系,无法体现评价数据的动态变化信息。故本文尝试构建基于动态自然权重的TOPSIS法,利用数据序列本身的变化信息对评价指标进行赋权。

(1) 决策矩阵构造

设 m 个省份 n 年的农业碳排放衍生指标值构成的原始评价信息矩阵为决策矩阵 X :

$$X=(x_{ij})_{m \times n} \quad i=1, \cdots, m; j=1, \cdots, n \quad (5)$$

为消除量纲对结果可能造成的影响,对决策矩阵进行标准化处理,由于文中构建的评价指标均为越小越优型,故决策矩阵 $V=(v_{ij})_{m \times n}$ 的标准化过程如下:

$$v_{ij} = \frac{\max x_j - x_{ij}}{\max x_j - \min x_j} \quad (6)$$

(2) 加权决策矩阵构造

将衍生指标对应碳源的碳排放量占各省当年农业碳排放总量的比例作为评价指标的权重 w_{ij} , 得到加权决策矩阵 P :

$$P=(p_{ij})_{m \times n} = (w_{ij} \times v_{ij})_{m \times n} \quad i=1, 2, \cdots, m, j=1, 2, \cdots, n \quad (7)$$

(3) 正负理想解表达式

① 最优(坏)解。最优解为各评价指标值最小, S_j^+ 和 S_j^- 分别表示最优解和最坏解。

$$\begin{aligned} S_j^+ &= \left\{ \min_{1 \leq i \leq m} \{p_{ij}\} \right\} \quad j=1, 2, \cdots, n \\ S_j^- &= \left\{ \max_{1 \leq i \leq m} \{p_{ij}\} \right\} \quad j=1, 2, \cdots, n \end{aligned} \quad (8)$$

② 用欧氏距离计算各评价对象与最优(坏)解的距离。

$$\begin{aligned} Sd_i^+ &= \sqrt{\sum_{j=1}^n (S_j^+ - p_{ij})^2} \quad i=1, 2, \cdots, m \\ Sd_i^- &= \sqrt{\sum_{j=1}^n (S_j^- - p_{ij})^2} \quad i=1, 2, \cdots, m \end{aligned} \quad (9)$$

③ 评价方案与最优解相对贴近度。TOPSIS法将贴近度值大小作为排序依据,贴近度值越大,评价方案越接近最优解,在文中表示农业低碳化水平越高,反之亦然。相对贴近度 λ_i 为:

$$\lambda_i = \frac{Sd_i^-}{Sd_i^+ + Sd_i^-} \quad (10)$$

1.3 数据来源与处理

1.3.1 数据来源

2006年全面废止《中华人民共和国农业税条例》是中国农业发展史中的一个里程碑,故样本以2006年为起始,样本期为2006—2016年。研究对象为除西藏自治区、台湾省、澳门和香港特别行政区以外的30个省市自治区。基础数据来源于历年的《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国农村统计年鉴》《中国农业年鉴》《中国国土资源统计

年鉴》《中国畜牧兽医年鉴》和《中国粮食统计年鉴》^⑦。

1.3.2 数据处理

(1) 禽畜数量

由于官方数据给出的禽畜数量为期末头数,但不同种类禽畜的饲养周期差异、繁殖与宰杀均会对当年养殖量产生影响,故参考胡向东等^[30],据禽畜出栏率、平均生命周期和饲养周期对禽畜饲养量进行调整,计算牛、马、驴、骡、骆驼、山羊和绵羊,以及猪和家禽的年平均饲养量。其中,牛、马、驴、骡、骆驼、山羊和绵羊的出栏率^⑧均小于1,采用上年年末与本年年末出栏量之和的均值为当年牲畜平均饲养量:

$$M=(m_{t-1}+m_t)/2 \quad (11)$$

式中: M 表示年均饲养量(头/匹/峰); m 为年出栏量(头/匹/峰)。

对于出栏率大于1的猪和家禽,年均饲养量为:

$$M=(d \times m)/365 \quad (12)$$

式中: d 表示禽畜平均生命周期(天); m 为禽畜年出栏量(头/只)。文中猪和家禽的平均生命周期分别为200天和55天。

(2) 饲养规模划分

本文对规模化饲养、农户散养和放牧饲养的划分参考《中国畜牧兽医年鉴》,并结合《2016年畜禽养殖标准化示范创建活动工作方案》,对不同饲养模式下的畜禽动物肠道发酵甲烷量排放进行加权核算,具体加权比例据各省相关年份数据计算得到^[31]。

(3) 缺失数据处理

数据收集过程中出现的缺失数据采用插值法和平均值法予以补充,农业部门某些种类能源在特定年份消耗极少,数据为零,对这部分数据采取剔除处理。

2 结果分析

2.1 农业碳排放总量测算结果及分析

通过上文构建的农业碳排放测算体系,对30个省份2006—2016年农业排放量进行测算,限于篇幅,表3仅展示部分年份的测算结果。全国农业碳排放总量和农业非能源碳排放总量的变化趋势如图1所示,全国农业能源碳排放总量的变化趋势如图2所示。

2.1.1 全国农业碳排放总量变化趋势

研究期间,全国农业碳排放总量呈先降后升的“V型”变化。2006—2008年为下降阶段,农业碳排放总量下降了7575.77万t,农业自然灾害频发是造成这一阶段农业碳排放量下降的主要原因^⑨。2008—2016年为上升阶段,2016年中国农业碳排放总量较2008年增加10%,年均增加1.24%。2008年后农业生产逐渐恢复,生产投入增加是这一阶段农业碳排放总量连年递增的主要原因。省际农业碳排放总量差异较大,河南、湖南、江苏、山东、四川和湖北农业碳排放总量排名居全国前列,这些省份的农业碳排放量之和占全国总量比例接近40%,除2008年的江苏和2012年的山东外,其余年份各省(市、自

⑦ 《中国畜牧业年鉴》自2014卷起更名为《中国畜牧兽医年鉴》。

⑧ 出栏率=出栏量/存栏量。

⑨ 2007—2008年初全国范围内不同地区接连出现春旱、夏伏旱和秋旱,淮河流域汛期发生仅次于1954年的特大暴雨洪涝,河南、山东及东北地区出现1951年以来的最强暴风雪天气和低温冷冻灾害。

表3 中国省际农业碳排放量

Table 3 China's inter-provincial agricultural carbon emissions (万t CO₂e)

省(市、 自治区)	农业碳排放总量			农业能源碳排放总量			农业非能源碳排放总量		
	2006年	2011年	2016年	2006年	2011年	2016年	2006年	2011年	2016年
北京	303.58	283.79	191.89	127.56	118.90	63.76	176.02	164.89	128.13
天津	331.53	340.50	343.57	92.50	124.89	136.58	239.03	215.61	206.99
河北	3842.92	3443.68	3622.36	126.70	616.26	732.85	3716.22	2827.42	2889.50
山西	1491.38	1406.16	1466.55	421.70	547.66	530.07	1069.68	858.50	936.47
内蒙古	2849.89	3560.09	3924.07	391.13	921.56	1043.35	2458.76	2638.53	2880.72
辽宁	2328.42	2561.16	2565.50	506.94	527.15	510.45	1821.48	2034.01	2055.05
吉林	2426.01	2162.04	2474.17	415.97	231.41	390.59	2010.04	1930.63	2083.58
黑龙江	2939.40	3498.20	4170.41	564.33	644.12	1234.42	2375.07	2854.08	2935.99
上海	385.16	340.38	298.35	126.50	95.01	96.98	258.66	245.37	201.37
江苏	5214.81	5278.83	5233.19	555.78	768.75	774.75	4659.04	4510.08	4458.44
浙江	2454.35	2396.18	2239.20	622.95	685.28	740.61	1831.40	1710.90	1498.59
安徽	4691.98	4639.04	4859.00	251.73	375.66	406.61	4440.25	4263.39	4452.39
福建	2264.32	2086.65	1802.71	548.67	437.53	173.89	1715.65	1649.11	1628.82
江西	4318.49	4263.15	4374.57	294.74	211.23	225.15	4023.75	4051.92	4149.42
山东	6812.77	5042.44	5093.62	1373.27	655.82	800.71	5439.49	4386.62	4292.91
河南	7320.79	6493.30	6620.45	510.97	589.46	619.79	6809.82	5903.84	6000.66
湖北	5263.14	5596.47	5550.38	729.03	825.17	719.06	4534.11	4771.30	4831.32
湖南	6305.31	6415.26	6763.21	650.41	799.80	1010.80	5654.90	5615.46	5752.42
广东	3886.11	3803.24	3932.58	443.33	435.26	533.66	3442.78	3367.99	3398.91
广西	4210.26	3784.60	4025.33	100.31	127.17	345.29	4109.95	3657.43	3680.04
海南	885.86	953.34	863.83	107.57	199.32	157.07	778.29	754.02	706.75
重庆	1778.16	1902.06	1544.06	544.32	659.61	241.45	1233.84	1242.45	1302.61
四川	5486.46	5418.86	5507.82	362.04	454.26	514.47	5124.42	4964.60	4993.35
贵州	3021.17	2110.61	2454.58	577.46	221.15	456.52	2443.71	1889.46	1998.06
云南	3188.87	3348.63	3707.87	448.20	454.64	505.53	2740.67	2893.99	3202.34
陕西	1528.76	1497.88	1582.31	144.75	203.46	193.56	1384.01	1294.41	1388.75
甘肃	1592.12	1857.07	2038.73	153.82	207.12	223.83	1438.31	1649.94	1814.90
青海	956.54	1029.98	1070.98	16.77	35.61	37.88	939.77	994.36	1033.10
宁夏	386.90	435.21	468.21	23.04	36.14	31.19	363.86	399.07	437.02
新疆	2631.00	2425.80	3402.56	419.92	417.71	719.43	2211.09	2008.09	2683.13

治区) 农业碳排放量都超过了5000万t。统计资料显示, 2017年上海、天津和北京的农林牧渔业增加值仅有411.92亿元, 农业碳排放总量也仅占全国总量的1%, 但这三个城市年末常住人口多达6145.70万人。显然, 上海、天津和北京本地农产品供应无法满足各自城市人口生活所需。所以, 农业生产的大量转移是导致这三市农业碳排放量较低的直接原因。

2.1.2 全国农业能源碳排放总量变化趋势

研究期间, 全国农业能源碳排放总量变化表现为先降后升, 再降再升的波动性增长。第一次下降发生在2007年前后, 农业自然灾害频发造成山东、河南和湖北等多个省

份农作物大面积绝收,间接导致了农业能源消费量的降低;2012—2013年出现第二次降低,其中重庆市农业原煤终端消费量和福建省农业柴油终端消费量下降是造成此次变化的直接原因^⑩。尽管出现两次下降,但总体来看,中国农业能源碳排放量保持着增长态势,2016年较2006年增加了2518万t,农业机械的广泛使用是农业能源碳排放量持续增长的客观原因^⑪。从地区来看,河北、内蒙古、黑龙江、湖南、江苏、安徽、广西、四川和新疆农业能源碳排放量增加较为明显,其中河北省2006—2016年增幅高达478%,增幅最小为江苏省的39%。

2.1.3 全国农业非能源碳排放总量变化趋势

全国农业非能源碳排放总量变动规律与农业碳排放总量变化趋势相似,同是先降后升的“V型”,区别在于,2008年以后农业非能源碳排放总量一直增加,直到2016年出现些许下降。2006—2016年,农业能源和非能源碳排放量实现“双降”的省市有北京、上海、福建、山东、和贵州,“双升”省(自治区)有内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江、安徽、湖南、云南、陕西、甘肃、青海、宁夏和新疆。江西、安徽、云南、广东和广西非能源碳排放量较高(高于3000万t),能源碳排放量较低(低于500万t),表明在一定农业生产规模下,这些省(自治区)消耗更少的能源,产生更少的碳排放。

2.2 农业碳排放结构测算结果及分析

农业非能源碳排放结构是由各类碳源产生碳排放量占农业非能源碳排放总量比例计算得来,农业能源碳排放结构亦是如此。限于篇幅,表4仅展示部分年份省际农业非能源碳排放结构,图3展示2016年省际农业能源碳排放结构。

2.2.1 农业非能源碳排放结构分析

从全国层面看,土壤管理是非能源碳排放的第一来源,水稻种植和肠道发酵所占比例大致相当。其中,土壤管理产生碳排放量占农业非能源碳排放总量的35%左右,生产资料的持续投入和低回收率是造成这一现象的主要原因。样本期内,水稻种植引发碳排

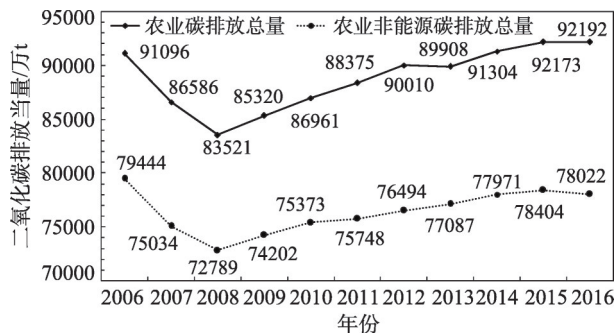


图1 2006—2016年中国农业碳排放总量与农业非能源碳排放总量

Fig. 1 China's total agricultural carbon emissions and total agricultural non-energy carbon emissions in 2006-2016



图2 2006—2016年中国农业能源碳排放总量

Fig. 2 China's total agricultural energy carbon emissions in 2006-2016

⑩ 自2012年始,国家统计局实行能源统一核算制度,实现能源生产与消费及全国与地区能源消费总量基本衔接。

⑪ 国务院《关于加快推进农业机械化和农机装备产业转型升级的指导意见》指出:“到2025年全国农机总动力维持在11亿kW左右,农作物耕种收综合机械化率达到75%”。

表4 中国省际农业非能源碳排放结构

Table 4 China's inter-provincial agricultural non-energy carbon emission structure (%)

省(市、 自治区)	水稻种植			土壤管理			禽畜粪便			肠道发酵		
	2006年	2011年	2016年	2006年	2011年	2016年	2006年	2011年	2016年	2006年	2011年	2016年
北京	0.11	0.04	0.04	44.19	47.08	43.77	25.15	25.36	26.68	30.55	27.52	29.51
天津	1.45	1.62	2.10	46.27	51.42	47.53	19.83	21.16	23.03	32.45	25.80	27.34
河北	0.79	0.97	0.93	36.59	51.52	51.92	18.91	18.18	18.43	43.72	29.32	28.72
山西	0.02	0.02	0.01	40.22	59.00	56.89	15.20	13.76	14.85	44.57	27.21	28.25
内蒙古	0.57	0.66	0.67	21.50	28.06	35.08	16.28	15.48	14.39	61.65	55.79	49.86
辽宁	6.91	6.53	5.51	36.84	41.76	41.31	16.09	15.90	16.17	40.16	35.81	37.01
吉林	4.20	4.60	4.82	31.38	43.09	47.33	14.28	13.05	12.42	50.14	39.26	35.43
黑龙江	15.26	18.78	19.85	31.64	36.25	38.70	11.95	10.56	10.38	41.15	34.41	31.07
上海	48.70	49.23	53.78	40.41	36.56	34.61	9.97	12.96	10.63	0.92	1.25	0.98
江苏	53.80	56.44	58.26	31.00	32.50	30.96	7.47	7.23	7.08	7.73	3.83	3.69
浙江	55.33	53.95	55.75	28.32	30.91	33.02	10.68	11.31	8.04	5.66	3.82	3.19
安徽	46.04	49.17	49.94	28.91	34.22	32.55	8.61	8.09	8.38	16.44	8.52	9.13
福建	39.95	40.07	39.17	34.46	37.13	38.39	12.53	12.77	12.51	13.06	10.03	9.93
江西	60.52	61.68	60.73	16.17	18.09	17.67	8.48	9.10	9.67	14.83	11.12	11.93
山东	1.05	1.27	1.11	47.26	56.03	54.37	17.11	16.98	18.76	34.58	25.71	25.77
河南	3.21	4.13	4.17	32.33	46.30	48.12	17.88	16.83	17.19	46.58	32.74	30.51
湖北	43.52	42.81	43.50	28.78	32.31	29.34	10.10	10.75	11.66	17.60	14.14	15.50
湖南	50.07	52.37	51.10	18.16	20.55	20.59	12.99	12.73	13.25	18.78	14.34	15.05
广东	40.58	41.73	40.48	26.93	32.14	33.81	14.42	14.02	13.43	18.07	12.11	12.27
广西	36.71	39.08	36.70	20.40	27.01	30.10	13.66	13.72	13.72	29.23	20.19	19.48
海南	27.22	30.08	28.19	25.52	36.90	39.40	11.71	11.74	12.23	35.56	21.28	20.19
重庆	29.85	30.27	29.10	28.64	34.24	33.30	15.75	16.29	16.34	25.77	19.20	21.26
四川	22.23	22.14	21.83	20.25	23.55	23.51	18.19	18.05	17.95	39.33	36.26	36.70
贵州	13.08	16.97	15.88	13.95	21.85	23.13	15.41	15.52	15.40	57.56	45.66	45.59
云南	5.86	5.79	5.48	24.96	31.75	34.35	17.97	17.02	16.75	51.22	45.44	43.42
陕西	2.36	2.52	2.39	40.26	59.89	62.82	12.11	9.47	9.08	45.27	28.12	25.72
甘肃	0.06	0.05	0.04	30.65	41.43	44.29	13.58	11.92	11.37	55.72	46.60	44.30
青海	0	0	0	3.10	4.14	4.60	16.09	15.84	15.30	80.81	80.02	80.10
宁夏	3.92	3.40	2.78	33.14	39.91	38.23	14.08	12.36	13.40	48.85	44.33	45.59
新疆	0.70	0.80	0.59	30.09	49.09	51.33	15.72	12.52	11.93	53.49	37.59	36.16
全国	24.77	26.43	25.71	28.26	34.73	35.53	14.01	13.43	13.50	32.96	25.41	25.26

放量占农业非能源碳排放总量的比例在25%上下波动，肠道发酵产生碳排放量占总量比例下降超过7个百分点，这是因为畜牧业易受公共安全事故和动物疫情影响。2007—2008年相继出现“瘦肉精”事件、低温雨雪冰冻灾害和“三聚氰胺”事件，均对各地生猪养殖和奶牛养殖产生较大影响。禽畜粪便管理产生碳排放占农业非能源碳排放总量比例最小，但总量波动不大，由2006年的11127.55万t下降到2016年的10532.69万t。

从地区来看，在农业非能源碳排放来源中，以水稻种植为主导的省市有上海、江

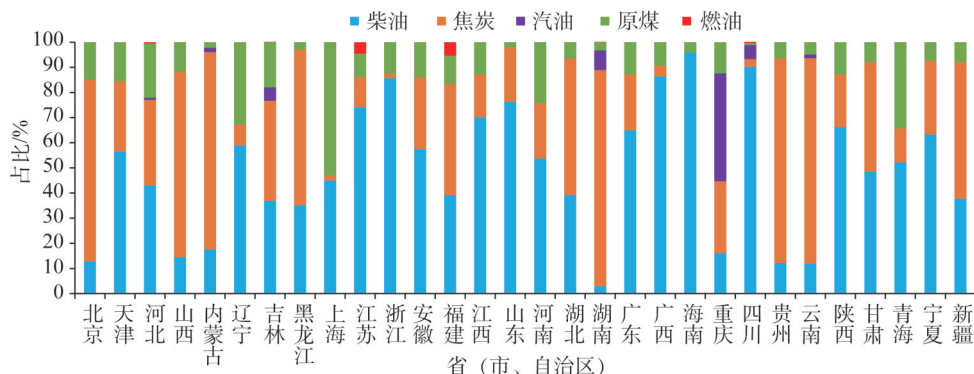


图3 2016年中国省际农业能源碳排放结构

Fig. 3 China's inter-provincial agricultural energy carbon emission structure in 2016

苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南和广东，其中江西省水稻种植产生碳排放占农业非能源碳排放总量60%以上^⑫。以土壤管理为主导的省市有北京、天津、山西、山东和陕西。此外，河北、河南、甘肃和新疆土壤管理产生碳排放占农业非能源排放总量比例不断上升，2011年后均超过40%。以肠道发酵为主导的省（自治区）除四大牧区中的内蒙古和青海，还有贵州、云南、甘肃和宁夏。

2.2.2 农业能源碳排放结构分析

总体而言，柴油和原煤消耗产生的二氧化碳是中国农业能源碳排放的主要来源，占农业能源碳排放总量的九成左右。从地区来看，柴油消耗产生二氧化碳占农业能源碳排放总量比例最高的3个省（自治区）是海南、四川和广西，比例最高为海南的96%；原煤消耗产生二氧化碳占农业能源碳排放总量比例最高的3个省是湖南、云南和贵州，比例最高为湖南的86%；汽油消耗产生的二氧化碳占农业能源碳排放总量比例最高的3个省市是上海、青海和辽宁，比例最高为上海的53%。焦炭和燃油消耗产生二氧化碳在各省（市、自治区）所占比例都较低，但重庆焦炭消耗产生二氧化碳占农业能源碳排放总量比例为43%，这是因为重庆2016年农业焦炭消费量达36.2万t，柴油和原煤消费量都不高所导致的。能源高投入发展模式会弱化相关替代产业的产业基础，导致新旧动能产业转换迟缓，短期内农业能源消费结构尚难以转变。

2.3 农业低碳化水平测算结果及分析

本文引入农业碳排放衍生指标来反映农业活动密集程度，并测算各省（市、自治区）农业低碳化水平得分，衍生指标计算结果如图4所示。

2.3.1 农业碳排放衍生指标结果分析

由图4a可知，上海、江苏、浙江、福建、江西、湖北、湖南、广东和海南的单位面积农业用地碳排放指标值明显高于其他省（市、自治区），结合各省（市、自治区）土壤管理和水稻种植产生碳排放量发现：（1）北京、天津、上海、海南、福建和浙江的土壤管理和水稻种植碳排放总量不高，但单位面积农业用地碳排放指标较高。（2）尽管河北、黑龙江、山东和河南碳排放总量高，但单位面积农业用地碳排放量低。（3）江苏、

^⑫ 以水稻种植、土壤管理和肠道发酵为主导的认定标准：各类碳源产生碳排放量占农业非能源碳排放总量的比例超过40%。



图4 中国省际农业碳排放衍生指标值

Fig. 4 China's inter-provincial agricultural carbon emission derivative indicator value

江西、湖北、湖南、广东和广西土壤管理和水稻种植碳排放总量和单位面积农业用地碳排放指标值均高居全国前列。(4) 青海、宁夏、山西、甘肃、贵州、陕西和内蒙古不仅单位面积农业用地碳排放量低, 且土壤管理和水稻种植碳排放总量也不高。

比较图 4c 和图 4b 发现, 2006 年, 近一半省(市、自治区)单位牲畜肠道发酵碳排放

值高于2011年、2016年和样本期平均值。原因在于,2006—2007年畜牧业饲养成本增加以及重大动物疫病灾害的出现,导致了非正常淘汰奶牛和生猪的现象发生;2007年以后,畜牧业发展保障体系逐渐建立和集约化饲养技术推广,使得单位牲畜肠道发酵碳排放值回落^[32]。浙江、江苏、上海和福建单位牲畜粪便管理碳排放均值最高,但这4个省市的单位牲畜肠道发酵碳排放均值的排名却列后4位,这几个地区的畜牧养殖业规模化程度以中小规模为主,粪便管理系统不完善。

由图4d可知,研究期间,单位农业能源碳排放强度值呈下降趋势的有北京、山西、辽宁、福建、江西、山东、河南、湖北、重庆、贵州和云南。单位农业能源碳排放强度增加的有天津、河北、内蒙古、黑龙江、安徽、湖南、广西和青海,值得注意的是,安徽和广西是在较低水平下发生的改变。此外,农业能源碳排放结构中原煤消费产生碳排放占比较高的省(市、自治区),单位农业能源碳排放强度值也较高,代表性省(市、自治区)有北京、山西、内蒙古、重庆、贵州和云南。

2.3.2 农业低碳化水平分析

根据各省(市、自治区)贴近度值的得分,将农业低碳化水平由低到高划分为Ⅰ级、Ⅱ级和Ⅲ级,得分区间依次为(0.14~0.28]、(0.28~0.42]和(0.42~0.56],各省(市、自治区)农业低碳化水平得分如表5所示。

样本期内,全国农业低碳化水平整体不高,省际农业低碳化水平最大值仅为0.55,2007年以后各省(市、自治区)农业低碳化水平区域稳定。表明农业低碳化水平整体不高。2006年和2007年,农业低碳化水平Ⅲ级的省(市、自治区)数量分别有17和14个,2008年以后则不超过9个。比较发现,2006—2008年农业低碳化水平等级降低的有云南、吉林、山东、山西、广西、新疆、江苏、江西、河北、河南、海南、贵州和陕西,这些省(自治区)在农业碳排放量减少的同时农业低碳化水平也相应变高,2008年以后不再出现较大范围的波动。这表明,本文以农业碳排放衍生指标为基础构建的评价体系,计算得到的结果与农业碳排放量测算结果可以相互印证。

从地区来看,研究期间共有11个省市农业低碳化水平等级未发生变化,分别是:Ⅲ级的广东、福建、上海和北京,Ⅱ级的安徽、湖北、青海和四川以及Ⅰ级的黑龙江、甘肃和辽宁。第一产业生产总值较小的几个省(市、自治区)北京、上海、宁夏和青海,农业低碳化水平等级高低不一。青海农业低碳化水平是Ⅱ级,宁夏2008年以后农业低碳化水平是Ⅰ级,北京和上海是Ⅲ级。

3 结论与讨论

本文选取差异化的碳排放系数,并以各类碳源碳排放量测算结果为基础,构建农业碳排放衍生指标和农业低碳化水平评价体系,测算省际农业低碳化水平,得到结论如下:

第一,样本期内,农业碳排放总量和农业非能源碳排放量呈先降后升的“V型”变化,全国农业能源碳排放量呈先降后升,再降再升的波动增长趋势。从农业碳排放总量角度看:湖南、湖北、山东、四川、江苏和河南为农业碳排放大省,北京、河北、山西、上海、浙江、福建、山东、河南、广西、海南、重庆、四川和贵州实现了农业碳排放总量的降低。从农业碳排放结构角度看:水稻种植以及土壤管理过程中农药、化肥和塑料薄膜等农用物资使用是中国农业非能源碳排放的主要来源。

表5 2006—2016年中国省际农业低碳化水平

Table 5 China's inter-provincial low carbonization level in 2006-2016

省(市、自治区)	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年
北京	0.544	0.551	0.512	0.497	0.501	0.505	0.488	0.528	0.522	0.516	0.480
天津	0.481	0.455	0.413	0.394	0.419	0.433	0.435	0.456	0.452	0.454	0.450
河北	0.479	0.454	0.373	0.360	0.351	0.334	0.321	0.328	0.316	0.309	0.314
山西	0.471	0.412	0.421	0.417	0.417	0.419	0.420	0.434	0.437	0.420	0.436
内蒙古	0.324	0.319	0.270	0.268	0.265	0.309	0.314	0.350	0.366	0.361	0.320
辽宁	0.240	0.235	0.204	0.198	0.202	0.211	0.213	0.223	0.218	0.221	0.231
吉林	0.283	0.297	0.230	0.208	0.205	0.213	0.208	0.211	0.201	0.203	0.198
黑龙江	0.249	0.240	0.200	0.197	0.191	0.202	0.219	0.268	0.278	0.291	0.295
上海	0.510	0.514	0.508	0.482	0.492	0.512	0.505	0.549	0.545	0.546	0.529
江苏	0.439	0.432	0.417	0.411	0.415	0.419	0.416	0.425	0.417	0.407	0.409
浙江	0.476	0.479	0.484	0.468	0.472	0.479	0.472	0.492	0.477	0.442	0.419
安徽	0.411	0.376	0.339	0.336	0.345	0.347	0.352	0.355	0.352	0.346	0.353
福建	0.467	0.454	0.460	0.448	0.450	0.454	0.457	0.488	0.471	0.447	0.468
江西	0.438	0.430	0.410	0.410	0.415	0.418	0.420	0.421	0.419	0.415	0.417
山东	0.444	0.419	0.408	0.389	0.393	0.406	0.430	0.414	0.398	0.384	0.401
河南	0.480	0.446	0.368	0.357	0.369	0.383	0.379	0.378	0.362	0.352	0.362
湖北	0.379	0.388	0.377	0.373	0.375	0.373	0.373	0.383	0.377	0.368	0.374
湖南	0.459	0.455	0.431	0.420	0.428	0.425	0.419	0.417	0.410	0.399	0.403
广东	0.490	0.492	0.474	0.464	0.469	0.468	0.461	0.452	0.438	0.426	0.426
广西	0.457	0.429	0.376	0.369	0.375	0.377	0.374	0.374	0.356	0.350	0.350
海南	0.477	0.430	0.369	0.367	0.363	0.371	0.371	0.390	0.386	0.379	0.371
重庆	0.455	0.430	0.366	0.343	0.369	0.381	0.385	0.340	0.322	0.307	0.318
四川	0.358	0.358	0.329	0.322	0.328	0.336	0.331	0.324	0.308	0.301	0.307
贵州	0.450	0.387	0.240	0.237	0.252	0.268	0.248	0.249	0.236	0.248	0.257
云南	0.298	0.304	0.256	0.242	0.241	0.253	0.259	0.260	0.246	0.243	0.248
陕西	0.372	0.315	0.189	0.186	0.183	0.192	0.195	0.197	0.192	0.195	0.193
甘肃	0.247	0.238	0.194	0.194	0.186	0.199	0.201	0.200	0.198	0.201	0.199
青海	0.372	0.381	0.378	0.376	0.376	0.381	0.379	0.378	0.376	0.373	0.375
宁夏	0.270	0.291	0.246	0.244	0.226	0.241	0.258	0.253	0.239	0.251	0.255
新疆	0.333	0.316	0.233	0.209	0.192	0.193	0.197	0.224	0.224	0.229	0.251

第二,全国范围来看,广东、福建、浙江、上海和北京农业低碳化水平较高,中部地区省份的农业低碳化水平多为Ⅱ级,西部地区除青海、四川、重庆和内蒙古农业低碳化水平是Ⅱ级以外,其他省(自治区)农业低碳化水平为Ⅰ级。农业整体规模大小与农业低碳化水平高低无直接关系,地理位置、农业生产转移和农业结构差异等原因造成的区域间低碳农业发展不平衡趋势短期内难以改变。各省(市、自治区)农业低碳化水平出现大范围变化的时间节点与农业碳排放量“V型”底部变化节点吻合,河北、吉林、江苏、江西、山东、河南、广西、海南、贵州、云南、陕西、宁夏和新疆在2006年和2007年农业碳排放量恢复增长后,农业低碳化水平等级均下降一个等级。

结合研究结论可预期,在保证农业高质量发展和粮食生产安全前提下,中国农业碳排放总量将保持一定增长态势。因此,低碳农业发展应从降低特定农业活动碳排放强度入手:

第一, 合理制定种植业防污计划, 对于江苏、江西和湖北等土壤管理和水稻种植碳排放总量与单位面积农业用地碳排放强度都高的省市, 应提高农业产业集聚程度, 做到化肥、农药使用量负增长; 对北京、上海和福建等农业整体规模小, 但单位面积碳排放强度高的省市, 政府应支持并建立秸秆和农膜等农业废弃物回收交易制度和大数据管理平台。

第二, 科学安排养殖业生产布局, 对浙江、江苏、上海和福建等单位牲畜粪便管理碳排放高的省市, 应充分利用禽畜规模养殖场直联直报平台; 对安装粪污处理设备且禽畜粪污综合利用率达标的养殖场给予农业用水用电价格优惠政策, 强化政策保障。

第三, 总结平原地区机井通电工程建设经验, 扩大工程实施范围。在农田机井建设存在困难的重庆、贵州和云南地区, 以及农业原煤消费较多省(自治区)如山西和内蒙古, 推广使用生物质能、风能和太阳能等清洁能源。

参考文献(References):

- [1] SMITH P, BUSTAMANTE M, AHAMMAD H, 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] Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAOSTAT. <http://www.fao.org/faostat/zh/#data/GT>, 2019-11-23.
- [3] 中华人民共和国农业农村部. 关于印发《国家质量兴农战略规划(2018—2022年)》的通知. http://www.moa.gov.cn/nybggb/2019/201902/201905/t20190517_6309469.htm, 2019-02-20. [Ministry of Agriculture and Rural Affairs, PRC. Notice on printing and distributing the national strategic plan for promoting agriculture by quality (2018-2022). http://www.moa.gov.cn/nybggb/2019/201902/201905/t20190517_6309469.htm, 2019-02-20.]
- [4] TUBIELLO F N, SALVATORE M, ROSSI S, et al. The FAOSTAT database of greenhouse gas emissions from agriculture. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(1), Doi: 10.1088/1748-9326/8/1/015009.
- [5] VALIN H, HAVLIK P, MOSNIER A, et al. Agricultural productivity and greenhouse gas emissions: Trade-offs or synergies between mitigation and food security?. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(3), Doi: 10.1088/1748-9326/8/3/035019.
- [6] VETTER S H, SAPKOTA T B, HILLIER J, et al. Greenhouse gas emissions from agricultural food production to supply Indian diets: Implications for climate change mitigation. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 237(2): 234-241.
- [7] PETER C, HELMING K, NENDEL C. Do greenhouse gas emission calculations from energy crop cultivation reflect actual agricultural management practices? A review of carbon footprint calculators. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 67(1): 461-476.
- [8] SWAINSON N, MUETZEL S, CLARK H. Updated predictions of enteric methane emissions from sheep suitable for use in the New Zealand national greenhouse gas inventory. *Animal Production Science*, 2018, 58(6): 973-979.
- [9] GOGLIO P, SMITH W N, GRANT B B, et al. Accounting for soil carbon changes in agricultural life cycle assessment (LCA): A review. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 19(104): 23-39.
- [10] GOGLIO P, SMITH W N, GRANT B B, et al. A comparison of methods to quantify greenhouse gas emissions of cropping systems in LCA. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 172(3): 4010-4017.
- [11] 董红敏, 李玉娥, 陶秀萍, 等. 中国农业源温室气体碳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's agricultural greenhouse gas emissions and emission reduction technology countermeasures. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(10): 269-273.]
- [12] 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. *资源科学*, 2019, 41(8): 1450-1461. [WANG R M, MA H L, WANG J. Spatio-temporal differentiation and influencing factors of agricultural carbon emissions from the perspective of water-soil element matching: A case study of the Yangtze River

- Economic Belt. *Resources Science*, 2019, 41(8): 1450-1461.]
- [13] 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. *农业技术经济*, 2010, (10): 66-72. [LI G Z, LI Z Z. Empirical analysis on factor decomposition of carbon emission in China's agricultural energy consumption: Based on LMDI model. *Agricultural Technology Economy*, 2010, (10): 66-72.]
- [14] 谭秋成. 中国农业碳排放: 现状及挑战. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(10): 69-75. [TAN Q C. China's agricultural greenhouse gas emissions: Current status and challenges. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(10): 69-75.]
- [15] 黄坚雄, 陈源泉, 隋鹏, 等. 农田温室气体净排放研究进展. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(8): 87-94. [HUANG J X, CHEN Y Q, SUI P, et al. Research progress on net greenhouse gas emissions from farmland. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(8): 87-94.]
- [16] 陈罗焯, 薛领, 雪燕. 中国农业净碳汇时空演化特征分析. *自然资源学报*, 2016, 31(4): 56-67. [CHEN L Y, XUE L, XUE Y. Analysis on spatiotemporal evolution characteristics of agricultural net carbon sinks in China. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(4): 56-67.]
- [17] 田云, 张俊飏. 中国农业生产净碳效应分异研究. *自然资源学报*, 2013, 28(8): 1298-1309. [TIAN Y, ZHANG J B. Study on the differentiation of net carbon effect in agricultural production in China. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(8): 1298-1309.]
- [18] 田云, 张俊飏, 李波. 中国农业碳排放研究: 测算、时空比较及脱钩效应. *资源科学*, 2012, 34(11): 2097-2105. [TIAN Y, ZHANG J B, LI B. Research on agricultural carbon emissions in China: Measurement, space-time comparison and decoupling effect. *Resources Science*, 2012, 34(11): 2097-2105.]
- [19] BOCKSTALLER C, GUICHARD L, MAKOWSKI D, et al. Agri-environmental indicators to assess cropping and farming systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 2008, 28(1): 139-149.
- [20] DE OLDE E M, MOLLER H, MARCHAND F, et al. When experts disagree: The need to rethink indicator selection for assessing sustainability of agriculture. *Environment, Development and Sustainability*, 2017, 19(4): 1327-1342.
- [21] SABIHA N E, SALIM R, RAHMAN S, et al. Measuring environmental sustainability in agriculture: A composite environmental impact index approach. *Journal of Environmental Management*, 2016, 166(2): 84-93.
- [22] MARCHAND F, DEBRUYNE L, TRISTE L, et al. Key characteristics for tool choice in indicator-based sustainability assessment at farm level. *Ecology and Society*, 2014, 19(3): 46.
- [23] 揭懋汕, 郭洁, 陈罗焯, 等. 碳约束下中国县域尺度农业全要素生产率比较研究. *地理研究*, 2016, 35(5): 98-108. [JIE M S, GUO J, CHEN L Y, et al. Comparative study on total factor productivity of agriculture at county scale in China under carbon constraints. *Geographical Research*, 2016, 35(5): 98-108.]
- [24] 展进涛, 徐钰娇, 葛继红. 考虑碳排放成本的中国农业绿色生产率变化. *资源科学*, 2019, 41(5): 62-74. [ZHAN J T, XU Y J, GE J H. Changes of agricultural green productivity in China considering carbon emission cost. *Resource Science*, 2019, 41(5): 62-74.]
- [25] 卢新海, 匡兵, 李菁. 碳排放约束下耕地利用效率的区域差异及其影响因素. *自然资源学报*, 2018, 33(4): 657-668. [LU X H, KUANG B, LI J. Regional differences and influencing factors of cultivated land use efficiency under carbon emission constraints. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(4): 657-668.]
- [26] 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. Study on the time and space differences of agricultural eco-efficiency measurement in China. *China Population, Resources and Environment*, 2016, 26(6): 11-19.]
- [27] 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. *经济地理*, 2015, 35(4): 142-148, 185. [GAO M, SONG H Y. Spatial convergence and differentiation of agricultural carbon emission performance in China: An empirical analysis based on Malmquist-luenberger index and spatial measurement. *Economic Geography*, 2015, 35(4): 142-148, 185.]
- [28] 闵继胜, 胡浩. 中国农业生产温室气体排放量的测算. *中国人口·资源与环境*, 2012, 22(7): 21-27. [MIN J S, HU H. Measurement of greenhouse gas emissions from agricultural production in China. *China Population, Resources and Environment*, 2012, 22(7): 21-27.]
- [29] DACE E, BLUMBERGA D. How do 28 European Union Member States perform in agricultural greenhouse gas emis-

- sions? It depends on what we look at: Application of the multi-criteria analysis. *Ecological Indicators*, 2016, 71(12): 352-358.
- [30] 胡向东, 王济民. 中国畜禽碳排放量估算. *农业工程学报*, 2010, 26(10): 247-252. [HU X D, WANG J M. Estimation of greenhouse gas emissions from livestock and poultry in China. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(10): 247-252.]
- [31] 中华人民共和国农业农村部. 农业部办公厅关于印发《2016年畜禽养殖标准化示范创建活动工作方案》的通知. http://www.moa.gov.cn/govpublic/XMYS/201602/t20160215_5013422.htm, 2016-02-15. [Ministry of Agriculture and Rural Affairs, PRC. Notice of the general office of the ministry of agriculture on printing and distributing the work plan for the 2016 model establishment of livestock and poultry standardization. http://www.moa.gov.cn/govpublic/XMYS/201602/t20160215_5013422.htm, 2016-02-15.]
- [32] 中华人民共和国国务院办公厅. 国务院关于促进畜牧业持续健康发展的意见. http://www.gov.cn/zwggk/2007-02/06/content_519464.htm, 2007-02-06. [General Office of the State Council, PRC. Opinions of the State Council on promoting sustainable and healthy development of animal husbandry. http://www.gov.cn/zwggk/2007-02/06/content_519464.htm, 2007-02-06.]

China's provincial agricultural carbon emissions measurement and low carbonization level evaluation: Based on the application of derivative indicators and TOPSIS

TIAN Cheng-shi, CHEN Yu

(College of Statistics, Dongbei University of Finance and Economics, Dalian 116025, Liaoning, China)

Abstract: The calculation of agricultural carbon emissions and the evaluation of low carbonization levels are important bases for realizing green development of agriculture and formulating carbon emission reduction plans. This article firstly calculated the agricultural carbon emissions of 30 provincial-level regions in China from 2006 to 2016. Based on the calculation results, the agricultural carbon emission derivative indicators were constructed from three aspects: agricultural land, livestock farming and agricultural energy. The low carbonization levels of agriculture in the 30 regions were evaluated by the TOPSIS method with dynamic natural weights. The results showed that China's total agricultural carbon emissions showed a V-shaped tendency, which was 910.96 million tons in 2006 and dropped to 835.21 million tons in 2008, and steadily increased to 921.92 million tons in 2016 afterwards. Agricultural non- energy carbon emissions accounted for more than 84% of the total agricultural carbon emissions, and soil management was the largest source of agricultural non-energy carbon emissions. China's inter-provincial agricultural carbon emission derivatives were heterogeneous, and the overall low carbonization level of agriculture was not high. These provided references for agricultural and environmental departments to carry out low-carbon agriculture evaluation.

Keywords: agricultural carbon emissions; low carbonization level; derivative indicator; TOPSIS method