

市域尺度下中国农业低碳发展水平

空间异质性及影响因素

——来自种植业的检验

邓悦 崔瑜 卢玮楠 赵敏娟¹

(西北农林科技大学 经济管理学院, 陕西 杨陵 712100)

【摘要】: 识别农业低碳发展空间异质性,对提高农业生产效率和保护农业生态环境具有重要意义。以狭义农业——种植业为研究对象,借助低碳农业发展理论,构建农业低碳发展水平评价指标体系,并应用熵值法和地理加权回归模型,探讨了 357 个市域尺度下的中国农业低碳发展水平的空间异质性及影响因素。研究发现:(1)中国农业低碳发展水平存在空间异质性和相关性。空间异质性表现为,市域尺度下中国农业低碳发展综合水平由西南—东北一线向东南、西北两侧递减,而碳生产水平指标对综合水平的影响最大;空间相关性表现为,西南地区、大兴安岭区农业低碳发展水平呈“高一高”聚集,辽宁、新疆和华中地区基本呈“低—低”聚集,其他地区则呈高低聚集的状态;此外,地形引起的社会经济等间接效应,大于其直接效应。(2)在空间上,劳动生产率和农业规模化对农业低碳发展水平的影响力呈“U”型与倒“U”型特征,劳动生产率对农业低碳化水平的影响由西到东呈“正向-负向-正向”的“U”型变化趋势;农业规模化呈南北低、中部高的倒“U”特征。城镇化水平对农业低碳发展水平的影响则由西向东逐步递减。

【关键词】: 农业低碳发展水平 空间异质性 市域尺度 种植业

【中图分类号】: F323.2 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)01-0147-13

温室气体排放严重威胁全球生态环境及经济社会的可持续发展,已经成为关系世界各国利益的全球性问题。籍此背景,低碳发展理念被提出并被认为是低能耗、低污染、高能效的可持续发展新模式,是应对全球气候挑战的最佳选择^[1]。中国政府承诺从 2015 年至 2020 年将单位 GDP 二氧化碳排放量减少 18%^[2]。农业作为人类生产生活的重要组成部分,其碳排放占总排放的 17%^[1],肩负着重要的减排责任。然而,随着农药、化肥等农业生产资料需求和使用的增加,引发了一系列环境问题,也加剧了人类与自然和谐发展相冲突的矛盾^[3]。为实现农业碳减排,中国政府积极推广各类低碳农业生产技术,并制定环境规制措施以促进农业低碳发展,但各地区在自然环境、资源丰富度、生态环境承载力和经济发展水平等方面,仍存在明显的差异^[4]。因此,寻找正确的方案评估和判别农业低碳发展水平空间异质性及影响因素,对农业低碳发展具有前瞻性和现实意义。

合理的评价指标体系和方法,是有效评价区域农业低碳发展战略实施效果的前提。有学者认为,以碳排放量作为评价标准忽略了农业低碳发展过程中经济、社会和生态环境以及一系列资源禀赋、生产方式等差异^[5]。因此,国内外现有文献中关于农业低

¹作者简介: 邓悦(1991~),女,博士研究生,主要研究方向为绿色农业技术、低碳经济。E-mail:dengyuedy@foxmail.com

赵敏娟 E-mail:minjuan.zhao@nwsuaf.edu.cn

基金项目: 国家社会科学基金重大项目(15ZDA052)

碳发展水平评价,多涵盖了生态环境、产出效率、农业减排等指标,并综合运用多种方法进行区域整体评价。如 Jiang Cuihong^[6]等以生态保护、循环利用、节能和技术支持指标,对 2005~2009 年间大兴区都市农业进行评估,指出低碳经济逐渐渗透到农业生产中是一个漫长的过程;陈瑾瑜等^[7]应用 AHP 法从社会发展、经济发展、农业减排及环境安全 4 个方面,设计了低碳农业发展的综合评价指标体系,并对 1995~2009 年四川省低碳农业发展水平进行评估;谢淑娟等^[5]应用加乘混合合成法从农业生产要素产出效率、能源利用低碳化水平、农业生产方式低碳化水平、农业碳汇效应 4 个维度测度 2006~2011 年广东省低碳农业发展水平,并对发展趋势进行预测。以上研究都是学者基于对低碳农业内涵的理解并结合各地实际而设计的农业低碳发展指标体系,但鲜有基于全国而设计的统一测度标准与衡量方法,更有对全国层面农业低碳发展水平空间异质性的研究。

在低碳农业影响因素方面,学者们主要依据农业内涵选取指标,尧波等^[8]研究认为,生产效率、结构、劳动力、农业经济发展抑制农业碳排放,社会、政策也在一定程度影响碳排放;庞丽^[9]研究证明,农业能源利用效率的提高、内部结构的优化和农业劳动力的转移都有助于农业碳减排,但这些研究都忽视了影响因素的空间异质性。同时,戴小文等^[10]、田云等^[11]利用 Kaya 恒等式分解得出,经济规模、经济结构、农业结构、低碳农业技术进步、农业生产效率、劳动力规模为农业碳排放主要影响因素;而杨欣等^[12]、王兴等^[13]则利用 LMDI 方法得出能源结构、能源效率、农业劳动力规模因素是抑制碳排放的主要因素,经济水平是碳排放增长的主要原因。但 Kaya 恒等式、LMDI 方法等全局模型关于影响因素的研究,往往会掩盖不同区域的空间异质性,忽视了空间位置对碳排放各影响因素的重要性。与此同时,以大尺度区域为研究对象难以衡量农业低碳发展水平影响因素的空间特征与不平衡性^[14]。

综上所述,国内外学者关于农业低碳发展水平和影响因素的研究取得了一定成果,但仍有一定改进空间。首先,现有关于低碳农业的研究大多局限于某一省(经济区),以大尺度区域为研究对象难以衡量农业低碳发展水平影响因素的空间特征与不平衡性,且缺乏全国层面对农业低碳发展水平的深度探讨。其次,影响因素的研究以全局模型为主,忽视了空间位置重要性和非平稳性。鉴于此,本文将以狭义农业——种植业为研究对象,借助低碳农业发展理论,构建农业低碳发展水平评价指标体系,并应用熵值法和地理加权回归模型探讨 357 个市域尺度下的中国农业低碳发展水平及影响因素的空间异质性。以期刻画出中国低碳农业的空间格局,增强对中国低碳农业空间异质性的认识,从而为中国农业低碳发展政策的完善提供理论参考和实证依据。

1 农业低碳发展内涵及指标构建

1.1 农业低碳发展理论及内涵

低碳农业是针对减少碳排放而建立的一种全新农业发展模式,衍生于低碳经济,主要指在农业生态系统中农业生产过程中,农作物通过光合作用等固定大气中的碳从而发挥碳汇功能,通过使用大量化肥、机械等农业生产资料,排放出大量温室气体的生态性农业^[15]。在此基础上,罗吉文等^[16]学者又提出低碳农业是通过温室气体减排、固定技术,提高农业生产的碳汇能力,实现农业生产节能、减排的农业发展模式,具有低排放、低耗能、高效益和高效率特征。骆旭添^[17]也认为低碳农业是在农业生态系统中,通过高效率技术利用等方式节能减排以实现农业生产低碳化,最终达到改善环境目的的可持续发展农业。由上述低碳农业理念可知,低碳农业的关键内容包括农业生态环境系统、高效率、减排、固碳、碳排放、碳汇。基于此,本文构建了低碳农业发展理论的逻辑关系图。详见图 1。

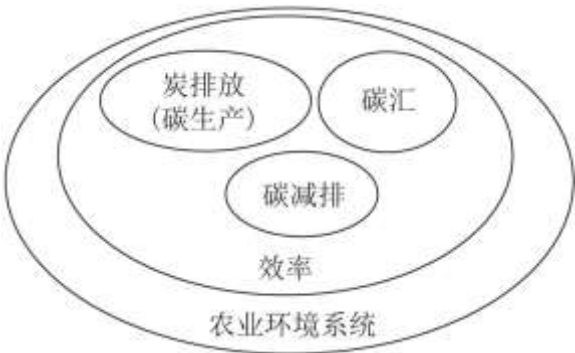


图 1 低碳农业发展理论逻辑关系图

农业耕作中消耗大量的农药、化肥等生产资料形成了碳排放,而作物又通过光合作用相应的碳汇,这构成低碳农业衡量指标基础。因此,碳排放(生产)、碳汇构成低碳农业发展理论逻辑关系图最内核的一层。而随着低碳农业的发展,碳减排也成为农业生产的重要方向,碳减排实质是减少碳排放,也构成了低碳农业发展理论逻辑关系图最内核的一层。而效率提升作为低碳农业发展的关键环节,农民通过效率提高方式等进行农业减排、增汇等,其效果不仅作用于碳减排,还通过品种改良等方式促进增汇作用,因此,效率构成了低碳农业发展理论的逻辑关系图的第二层。与此同时,低碳农业的发展与降雨、水资源、土地资源等农业生态环境系统紧密相连,且低碳农业的目标是保护生态环境,改善环境质量,农业环境系统就构成低碳农业发展理论的逻辑关系图的第三层。三层系统相辅相成,缺一不可,共同构成了低碳农业发展的逻辑关系图。农业低碳发展是低碳农业可持续发展的延续和深化,其发展方式是对低碳农业模式的肯定,需要契合低碳发展的内容。因此,以农业生态环境系统、高效率、减排、固碳、碳排放、碳汇是农业低碳发展的基础内容和重要方向。

1.2 农业低碳发展水平综合指标体系的构建

基于低碳农业理论的逻辑关系框架和农业低碳发展的内涵,结合已有研究中的中国农业低碳发展指标体系^[4~9],同时考虑到指标数据的可得性,本文以狭义农业——种植业为研究对象,最终确立了中国农业低碳发展水平综合评价指标体系,包括碳效率指标、碳生产指标、碳汇指标、碳减排指标以及碳环境指标 5 个方面,具体的指标如表 1 所示。

表 1 中国农业低碳发展水平指标体系及其权重分配

准则层	指标层	计算方法	单位	属性	权重
碳效率指标	农业碳排放强度	农业碳排放量/耕地面积	kg/hm ²	负	0.0111
	农业碳生产力	农业环比增加值/农业碳排放量	万元/t	正	0.0303
	农业碳生产率	农业生产总值/农业碳排放量	元/kgCO ₂	正	0.0341
碳生产指标	化肥施用强度	化肥施用折纯量/耕地面积	t/hm ²	负	0.0002
	农药施用强度	农药施用折纯量/耕地面积	t/hm ²	负	0.0100
	农膜使用强度	农膜施用量/耕地面积	t/hm ²	负	0.0136
	农业机械化水平	农业机械总动力/耕地面积	kW/hm ²	负	0.0128
	有效灌溉面积比例	有效灌溉面积/耕地面积	%	正	0.3060
碳汇指标	作物单位面积碳汇量	主要粮食作物及经济作物面积碳汇量	t/hm ²	正	0.0539
碳减排指标	化肥投入品减少比例	化肥环比减少量/年化肥总量	%	正	0.0157
	农药投入品减少比例	农药环比减少量/年农药总量	%	正	0.0619
	农膜投入品减少比例	农膜环比减少量/年农膜总量	%	正	0.0379
	机械投入品减少比例	机械环比减少量/年机械总量	%	正	0.0321
碳环境指标	年可利用水资源	水资源总量/总人口数	m ³ /人	正	0.0562

	年降雨量	多年平均降雨量	mm	正	0.0966
	森林覆盖率	森林覆盖率	%	正	0.1974
	耕地面积	耕地面积	hm ²	正	0.0303

注:表中农业数据均为狭义农业——一种植业数据。

2 研究方法与数据来源

2.1 研究方法

2.1.1 碳足迹计算模型

碳排放和碳汇是农业低碳发展水平综合指标计算的基础,本文借鉴田云等^[18]、陈儒等^[19]相关学者研究成果,确定种植业碳排放主要来源有化肥、农药、农膜、农业机械消耗、灌溉等,作物碳汇主要是主粮作物和经济作物光合作用所吸收的碳量,测算见公式如(1)~(2)所示:

$$Cf_o=\sum T_o*d \tag{1}$$

$$Ci_o=\sum C_o*Y_o*(1-R_o)/H_o \tag{2}$$

式中:Cf_o为农作物 o 的碳排放量;T_o为碳排放源的使用量;d 为碳排放因子,碳排放因子系数值具体参考陈儒等^[19]研究成果。Ci_o为主粮作物和经济作物 o 的碳汇量;C_o为农作物 o 的碳吸收因子;Y_o为农作物 o 产量;R_o为农作物 o 经济产品部分的含水量;H_o为农作物经济系数,碳汇因子系数具体系数值参考陈儒等^[19]研究成果。

2.1.2 熵值法

客观赋权熵值法是确定农业低碳发展水平各指标权重及综合得分的基础。借鉴李磊等^[20],袁久和等^[21]学者相关研究,通过构建指标矩阵、指标归一化处理等步骤得出农业低碳发展水平的各项指标权重和综合得分。其中,各项指标权重和综合得分的公式如(3)~(4)所示:

$$W_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^m g_j}, j = 1, 2 \cdots m \tag{3}$$

$$F = \sum w_{ij}y_{ij} \tag{4}$$

2.1.3 探索性空间分析法

探索性空间数据法(ESDA)是广泛用于研究空间相关性的分析方法,其主要包括 Moran’ s I 全局自相关和 Anselin Local Moran’ s I 局部自相关分析^[22, 23]两种方法,具体公式如(5)~(6)所示:

$$I = \frac{n \sum_i \sum_j W_{ij} (X_i - \bar{X}) (X_j - \bar{X})}{\sum_i \sum_j W_{ij} \sum_k (X_k - \bar{X})} \quad (5)$$

$$I_i = \frac{n (X_i - \bar{X})}{S_X^2} W_{ij} (X_j - \bar{X}) \quad (6)$$

式中:公式(5)为全局空间自相关Moran's I, n为市域总数;W_{ij}为空间权重(queen标准的一阶空间权重矩阵);X_i和X_j分别是市域i和j的属性,X̄为属性均值。公式(6)为局部空间自相关Moran's I, S_X²为观测值方差,表达式为 $S_X^2 = \sum_j W_{ij} (X_i - \bar{X})^2 / n$ 。

2.1.4 地理加权回归模型

为准确衡量各影响因素的对农业低碳水平的空间分异程度,本文借地理加权回归模型(GWR)将地理位置嵌入到回归参数之中,研究具有空间关系的变量间的数量关系^[24],使变量间的关系可以随空间位置的变化而变化,可以反映参数在不同位置的空间非平稳性^[25],其模型结构如下:

$$Y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_k \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} + \varepsilon_i \quad (7)$$

式中:Y_i指市域i农业低碳发展水平变化的拟合值;Y是市域数;K是影响因素等自变量;x_{ik}为第K个自变量在市域i的值;(u_i, v_i)是i的地理中心坐标;β_k(u_i, v_i)是连续函数,β(u, v)是市域i的值;ε_i是随机误差项。

2.2 数据来源

本文以中国357个地级行政区(不含香港、澳门和台湾省)为研究单元,所用数据均来自于2014~2015年份。研究数据主要包括4个部分,详细来源如下:(1)、碳排放数据。碳排放核算所需农业生产资料数据(化肥、农药、农膜、农业机械消耗、灌溉)主要来源于各省(直辖市、自治区)《统计年鉴》、《农村统计年鉴》、《农业年鉴》、《发展年鉴》的主要能源和物资消耗部分。其中,农业机械消耗和有效灌溉面积部分来源于各地级行政区国民经济和社会发展统计公报,农药按照统计学中单值填补法的原则及方法对部分省份缺失值进行填补。(2)、碳汇数据。碳汇数据主要包括包括玉米、小麦、稻谷、豆类和蔬菜等主要粮食和经济作物,数据来源于各省(直辖市、自治区)《统计年鉴》、《农村统计年鉴》、《农业年鉴》、《发展年鉴》的主要农产品播种面积和产量部分。(3)、评价指标数据。评价指标体系中年可利用水资源总量、年降雨量、耕地面积主要来源于《统计年鉴》、《农村统计年鉴》、《农业年鉴》、《发展年鉴》和水资源公报,各地市的森林覆盖率主要来源于各地方政府文件。(4)、影响因素数据。影响因素所需数据均来源于各省(直辖市、自治区)《统计年鉴》、《农村统计年鉴》、《农业年鉴》、《发展年鉴》。

3 结果与分析

3.1 农业低碳发展水平空间异质性分析

3.1.1 农业低碳发展水平空间分异特征

基于构建的农业低碳发展水平评价指标体系,各项指标的熵值权重得分计算结果详见表 1。整体来看,碳环境指标权重(0.3805)最大,碳生产指标权重(0.3426)次之,碳汇指标权重(0.0539)最小,碳减排指标权重(0.1476)和碳效率指标权重(0.0755)居中。其中,碳环境指标权重最大,说明自然环境对农业低碳发展具有重要影响。碳生产指标权重仅次于碳环境指标且两者差距较小,是测度农业发展水平的重要组成部分。碳汇指标权重最低,可能的解释是碳汇核算所依据的各类作物单产量的区域差异较小,因此其对农业低碳发展水平影响甚微,但是碳生产指标和碳汇指标合计占综合指标的 40.88%,这也间接突出了“碳”在水平识别中的作用。借助熵值权重得分得出农业低碳发展水平综合指标得分和各指标得分,并采用gis可视化技术和 Jenks 自然断点分级法将综合指标得分和各指标得分由高到低划分为低碳水平区、相对低碳水平区、中等水平区、相对高碳水平区和高碳水平区五种,得到综合水平空间分异图(图 2a)和各指标得分空间分异图(图 3),以便对农业低碳发展水平空间异质性进行深入探讨。此外,考虑到碳排放对农业低碳发展起到抑制作用,绘制了亩均碳排放量空间分异图(图 2b)以便探讨农业低碳发展水平综合水平与碳排放量的关系。

从农业低碳发展水平综合水平(图 2a)分布上看,农业低碳发展水平空间差异明显,主要表现为由西南—东北一线向东南、西北两侧递减。在西南以及大兴安岭地区的农业低碳化水平最高,而在西北地区 and 辽宁、吉林与内蒙古东部地区农业低碳化水平最低。究其原因,西南以及大兴安岭地区资源环境丰富,地形较为平坦,农业生产投入产出效果“事半功倍”。而西北地区无论资源环境还是传统的农业生产方式与其他地区相比显得“相形见绌”,农业低碳模式发展有待进一步提升。辽宁、吉林与内蒙古东部地区的农业规模化等资源禀赋带来成本优势,但成本优越性容易造成生产要素的过度投入,出现农业向高碳化发展的问题。与此同时,将农业低碳发展水平识别结果(图 2a)与亩均碳排放量(图 2b)进行对比,发现两者具有相似性但是也存在一定的差异。亩均碳排放量整体处于西南—东北一线低碳,集中于西南地区、青藏高原北部、新疆西部、内蒙古东部地区,但与综合水平相比集聚状态更明显,那么差距产生是什么原因呢?低碳农业是以较低的碳成本获取最大化为目标的农业发展方式^[3],其发展必然与经济、环境等息息相关,但如果仅以“碳”作为评判标准,容易忽略经济社会、生态环境等多重因素对农业低碳发展水平的作用。因此,依据低碳农业理论,选取碳效率、碳排放、碳汇、碳减排以及碳环境指标作为农业低碳发展水平综合评价指标,对农业低碳发展水平进行系统剖析和客观评价具有现实必要性。

从农业低碳发展各评价指标空间分异图(图 3)来看,碳效率水平(图 3a)较高地区主要集中于西南地区、青藏高原北部、黑龙江区以及内蒙古高原,即这些区域农业具有低排放、高效益的特征。碳生产水平(图 3b)空间分布与综合水平空间分布整体一致性较强,西南—东北一线均呈低碳化状态,对此可能的解释是碳生产对农业低碳发展起到抑制性作用且是农业低碳发展水平核心指标,而碳生产水平又大于碳环境水平的区域差异,是五类指标中对整体水平影响力最大的,所以空间分布具有一致性。碳汇水平(图 3c)与作物产量、种植面积息息相关,但东部地区碳汇指标集中度更高,可能的解释是与东部产出量大有关。碳减排水平(图 3d)整体分布较零散,未呈现空间集聚状态,说明碳减排较高地区在农业碳减排上做了一定的努力。碳环境水平(图 3e)较高区域主要集中于藏南、华南、东北以及北疆地区,主要是当地原有生态环境较好,农业资源丰富,更容易形成低碳农业的发展模式。

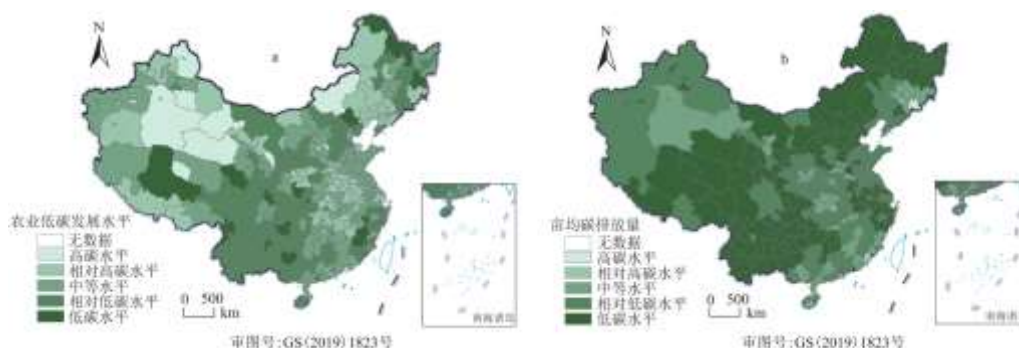


图 2 农业低碳发展水平空间与亩均碳排放量空间分异

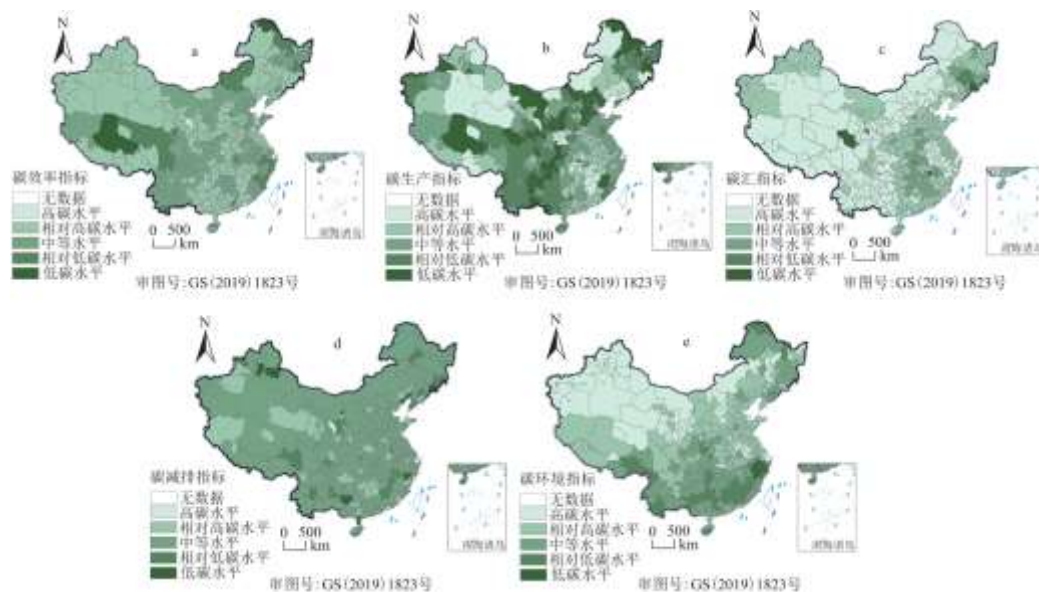


图 3 农业低碳发展水平各评价指标空间分异

3.1.2 地形异质性地农业低碳发展水平分析

地形异质性地各地区所承担的低碳农业内容有所不同,且有证据表明,盆地、平原、丘陵和山地化肥施用比分别为 31.58%、37.33%、16.97%和 26.25%^[26]。因此,为探讨地形异质性地农业低碳发展的内在规律,以各地市主要地形为衡量标准,将中国 357 个地市分为平原、高原、山地、丘陵、高原和盆地五种地形区,进行各地形区下各评价水平和综合水平得分均值(图 4)的低碳农业分布规律分析。

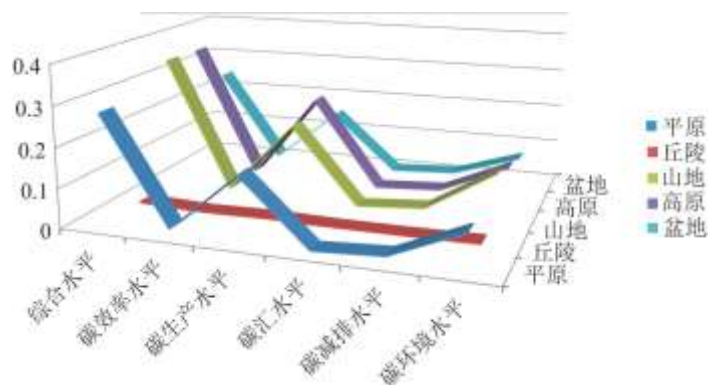


图 4 地形异质性地农业低碳发展水平分析

从各评价水平均值来看,山地的碳环境水平最高,主要是山地的水土资源、植被覆盖等资源环境禀赋高。而山地的碳减排水平最优,可能的原因是山地不适宜大规模农业化,进而推动了城镇化发展,增加农民外出务工机会而减少农民靠化肥、农药投入获取高产出的行为,因此减排水平高于其他地形区域。与此同时,山地不适宜大规模作业化,所以碳生产水平和碳效率水平略低。高原地形平整度较高,但效率水平高于平原作业,除作物差异这一原因外,平原地区良好的机械作业条件增加了农业生产成本优势,出现生产资料浪费。丘陵区的各评价指标与其他区域相比显著降低且基本较低,可能的解释是丘陵地块破碎化相关不适合规模化耕作,所以碳效率和碳生产水平都较低。但丘陵区的其他指标均处于较低水平,该问题较难解释但从各个指标的解释来看,地形异

质性下各地区低碳农业指标的差异主要是地形所带来的社会经济间接性影响,其直接性影响较小,地形异质性下各地区所承担的低碳农业内容规律主要与地形带来的社会经济问题相关。且农业低碳化综合水平表现为山地>高原>平原>盆地>丘陵,平原作为最优地形区,其综合水平却低于山地和高原地区。针对这些问题,可以得出的结论是地形引起的社会经济等间接效应大于其直接效应,即地形主要通过影响农业经济水平、农业规模化、城镇化水平、劳动生产效率等影响低碳农业的发展,而非直接性质的影响。特别是,地形因素不可控,而其所带来的社会经济问题具有可控性,研究社会经济等影响因素所带来的农业低碳发展水平改变具有一定的必要性。

3.2 空间自相关分析

依照地理学定律,空间中的每一个事务都是有联系的,距离近的事物间的联系紧密度要高于距离远的事物间紧密度^[27]。因此,采用全局 Moran' sI 指数和局部 Moran' sI 指数分析农业低碳发展水平在空间上的相关紧密性,得出我国市域农业低碳发展水平的全局 Moran' sI 指数为 0.2601,且通过显著性检验,这表明我国农业低碳发展水平存在空间正相关关系,具有空间聚集性特征。然而,由于全部 Moran' sI 容易出现正负相关区域的相互抵消问题,导致存在空间不相关性的结果^[19],因此需要对局部空间自相关进一步验证。

为更准确地研究农业低碳发展水平的空间自相关,采用 Anselin Moran' s I 法对农业低碳发展水平进行局部空间分析并获取 LISA 集聚图(图 5),将农业低碳发展水平集聚程度分为高一高、高一低、低一高和低一低 4 个类型。从图 4 可以看出,农业低碳发展水平的高一高和低一低集聚特征明显,存在马太效应。其中,西南地区和大兴安岭区表现为高一高集聚,说明这些地区农业低碳发展水平高且与周边地区农业低碳化发展联系紧密,辐射带动能力强。甘肃北部、新疆西部、辽宁、吉林、河南—安徽—湖北交叉地带等地区主要表现为低一低集聚,即该区域内农业低碳发展水平整体较低。其中,甘肃北部、新疆西部地区粗放式的农业生产方式导致区域农业高碳集聚,而辽宁、吉林地区和河南、安徽、湖北、湖南交叉地带则具备优越资源环境,但因追求农业高产出而采用高机械、高化肥、高农药的生产方式,形成了农业高碳集聚区。此外,陕北、阿拉善、那曲、海南文昌市等地主要表现为高一低集聚,即该区域出现低碳农业高低错落发展状态,与周边农业发展联系紧密度较低。



图 5 农业低碳发展水平 LISA 集聚图

3.3 农业低碳发展水平影响因素空间异质性分析

3.3.1 指标选取及其机理分析

由农业低碳发展水平空间特征可知,不同市域农业低碳发展水平的影响因素差异性明显,特别是地形等因素所带来的社会经济影响力大于其直接性的影响力,因此深入探讨各地区社会经济影响因素带来的农业低碳发展水平的空间异质性十分必要。根据低碳农业理论,同时借助以往研究^[9~13]以及充分考虑数据的可获取性,主要从以下五类影响因素进行考察。

(1) 城镇化水平。

城镇化进程中,劳动力、耕地等持续性外流,农业需要用更少劳动力、耕地去满足城市更多的粮食需求,迫使农业生产向以化学化、机械化等为代表的现代农业转型^[28],不利于农业低碳发展,但也有学者^[29]认为城镇化利于农业专业化和集聚经济的发展,有利于农业低碳化发展。因此,城镇化对农业低碳发展具有“驱动”与“抑制”双重作用,但空间异质性下影响的预判效应未知。而基于市域尺度的影响因素空间异质性研究,相比以往大尺度区域和微观调研为主的研究具有一定特殊性,故认为有必要再次检验城镇化水平对农业低碳发展水平产生的影响。参照戴小文等^[28]、程琳琳等^[29]的研究,选取城镇人口与总人口的比值作为城镇化水平指标变量。

(2) 农业规模化水平。

农业规模化水平反映了农业经营的集约程度,一方面农业规模经营既有利于精细管理,提升农业绩效,另一方面规模化的成本优势容易造物质要素的过度投入^[30],且规模化后农户转变种植结构,易增加单位面积农药、化肥使用量,不利于农业低碳发展。因此,农业规模化对农业低碳发展具有“驱动”与“抑制”双重作用,但空间异质性角度下影响的预判效应未知。而基于市域尺度的影响因素空间异质性研究,相比以往大尺度区域和区域微观调研为主的研究具有一定特殊性,故认为有必要再次检验农业规模化对农业低碳发展水平产生的影响。参照唐轲等^[30]研究,选取耕地面积与农村居民人数的比值作为农业规模化水平指标变量。

(3) 农业经济发展水平。

农业经济发展水平越高、投入更多,成为农业碳排放增长的主要因素^[9],也有学者认为农业经济水平越高,生产率越高更有利于农业低碳发展模式形成^[31],但1993年Panayotou^[32]首次提出的环境库兹涅茨曲线(EKC),认为经济增长与环境之间呈“倒U型”关系。因此,市域空间异质性角度下的农业经济发展水平对低碳农业的发展水平的影响效应未知,故认为有必要再次检验。参照孔昕等^[31]的研究,选取农业生产总值与农业从业人员的比值作为指标变量。

(4) 农民可支配收入水平。

农民可支配收入指农户经过初次分配与再分配后获得的收入,包括农业收入与非农收入,即农户可支配收入既是农业经济发展水平的反映,也是整体经济的反映。农户可支配收入可能会增加农民农药、化肥用品投资以获取高收益的行为,但也可能因务工收入更高而减少农业生产投资行为。因此,空间异质性下农民可支配收入对低碳农业的发展水平的影响效应未知,故认为有必要检验。参照一般学者的做法,本文选取农民可支配收入作为指标变量

(5) 劳动生产率水平。

劳动生产率水平反映了劳动者在一定时期内创造的劳动成果与其相适应的劳动消耗量的比值。粗放式、低效率的劳动消耗所产生的碳排放压力较大^[33],因此劳动生产率提升成为降低二氧化碳排放水平的主要手段,而影响的预判效应为正。而基于空间异质性的研究具有一定特殊性,故认为劳动生产率对农业低碳发展的影响有必要进行检验。参照一般学者的做法,选取农业增加值与农业从业人员的比值作为指标变量。

3.3.2 实证结果分析

地理加权回归模型 (GWR) 是判定影响因素空间异质性的重要方法, 但其在诊断因素方面较弱, 需先进行普通最小二乘法模型 (OLS) 线性回归, 以提高 GWR 模型的准确性^[23]。通过对五类影响因素变量进行 OLS 回归, 剔除未通过显著性检验的农业经济发展水平和可支配收入变量后, 进行 GWR 模型检验后得出: 在模型解释度 (R^2_{adj}) 上, GWR 模型的 0.3899 明显高于 OLS 模型的 0.0599; 在赤池信息 (AICc) 上, GWR 模型 (-751.4302) 比 OLS 模型 (-620.2983) 有显著的提高; 在拟合优度 (R^2) 上, GWR 模型的 R^2 (0.4880) 高于 OLS 模型 (0.0732), GWR 模型比 OLS 模型更能精确的模拟空间非平稳问题^[34]。而基于 GWR 模型的农业低碳发展水平回归系数空间分异结果具体见图 6。

(1) 城镇化水平对农业低碳发展水平的影响及空间分异 (图 6a)。

城镇化水平对农业低碳发展水平的影响回归系数在空间上呈由东向西递减的分布特征。在中部地区和东部地区, 城镇化水平对农业低碳发展水平的影响呈负效应, 城镇化水平对农业低碳发展水平的影响呈现正效应。究其原因, 农业低碳发展是以最少的碳排放获取最大的产出为核心理念, 当城镇化水平较低时, 农民为减少农业生产资料消耗而采用传统的劳动密集型作业方式, 农业低碳化水平较高, 但也影响了农业高质量发展。而当城镇化水平上升, 劳动密集型向资源密集型转型, 农业生产资料消耗逐步递增, 农业低碳化水平相应降低。只有当城镇化水平进一步提高, 科技水平达到一定的结点, 农业生产消耗逐步递减, 城镇化对农业低碳发展的影响力表现才会为正相关且趋于稳定。

(2) 农业规模化水平对农业低碳发展水平的影响及空间分异 (图 6b)。

农业规模化水平对农业低碳发展水平的影响力分为两个部分, 在西部地区的影响力由西到东递减, 在中、东部地区的影响力由北向南呈“倒 U 型”发展。在西部地区, 新疆和西藏地区地形开阔、地势平坦, 地广人稀, 以传统农业为主, 进行农业规模化, 可以促进农业向高质量发展, 实现农业低碳化, 而到陕西、甘肃等非传统农业为主的地区效果逐步降低, 但依然呈正相关。在中、东部地区, 农业规模化对农业低碳发展水平在空间上整体呈南北低、中部高的特征且为负相关关系, 可能的解释是北部干旱区不利于农业种植, 南部地区地处人多地少, 农业规模化后需要通过增加单位面积农药、化肥等投资获取收益, 农资投入与收益匹配不难以实现农业低碳化。中部地区的耕作条件略高, 所以回归系数略高于北部和南部, 但依然存在南北部的同类问题。

(3) 劳动生产率对农业低碳发展水平的影响及空间分异 (图 6c)。

劳动生产率对农业低碳发展水平的影响在空间上呈由内蒙古等地向两侧递增的状态, 整体影响呈正相关, 部分地区呈现负相关。华中等地的劳动生产率对低碳农业的影响系数达到 0.0254, 而内蒙古等地区劳动生产率对农业低碳发展水平的影响呈负相关且影响系数达到 0.0281。新疆西部地区农业传统的人工耕作方式, 当劳动生产率提升村促进农业低碳化。华中地区的劳动生产率高, 劳动生产率的进一步提高难以大幅度减少农药、化肥等农业投入量, 但依然可以实现农业低碳发展。与此同时, 内蒙古等地区的劳动生产率对低碳农业的影响存在部分负相关, 可能的解释是, 内蒙古等地区的高科技技术采纳不足, 劳动生产率提升的方向仍属粗放型, 出现劳动力率水平与农业低碳发展目标水平的暂时错位, 不利于农业碳减排。

此外, 农业经济发展水平和农民可支配收入水平两个经济类变量无法通过显著性检验。其中, 农业经济发展水平无法通过显著性检验, 庞丽^[9]对中国各省 (直辖市、自治区) 农业碳排放进行因素分解, 验证得出农业经济发展水平是影响农业碳排放增加的最主要因素。而孔昕学者认为农业经济水平越高, 生产率越高更有利于农业低碳发展模式^[31], 因此可能的解释是本文数据是基于中观层面且时间跨度较短, 无法通过显著性检验的状况。而农民可支配收入包括农业收入与非农收入, 其无法通过显著性检验的原因可能是农业可支配收入主要来源于农村多余劳动力的非农收入, 所以对农业生产无影响。

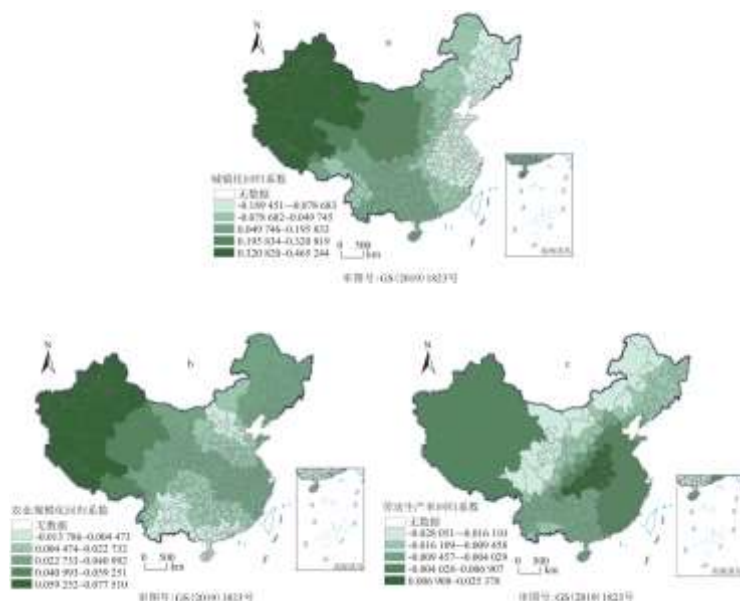


图 6 基于 GWR 模型的农业低碳发展水平影响因素回归系数空间分异

4 结论

本文以狭义农业——种植业为研究对象,就农业低碳发展水平及影响因素的空间非均衡性问题和非平稳性问题,对 2015 年中国 357 个地级市的农业低碳发展水平空间异质性及其影响因素进行研究。主要结论如下:

(1) 中国农业低碳发展水平存在空间异质性和相关性。空间异质性表现为农业低碳发展综合水平主要由西南—东北一线向东南、西北两侧递减,在西南以及大兴安岭地区的农业低碳化水平最高,在西北地区 and 辽宁、吉林与内蒙古东部地区农业低碳化水平最低,而在各类指标水平中,碳生产水平对综合水平的空间影响力最大。空间相关性表现为西南地区、大兴安岭区呈高一高聚集、辽宁、吉林地区和河南、安徽、湖北、湖南交叉地带呈低—低聚集,陕北、阿拉善、那曲、文昌等地主要表现为高一低聚集。此外,本文还探讨了地形异质性下低碳农业的规律,但地形引起的社会经济等间接效应大于其直接效应,有必要探讨社会经济因素对低碳农业的影响。

(2) 地理加权回归模型下各影响因素对农业低碳发展水平的回归系数在空间上呈现“U”型与倒“U”型发展特征。农业规模化对低碳农业的影响分为两部份,在西部地区由西向东递减,在中东部呈南北低、中部高的倒“U”特征。劳动生产率对农业低碳发展的影响力由西北地区的正相关,到中部逐步负相关,最后到东部地区又逐步上升的状态,可以预测当东部的农业规模化进一步上升则中东西部将会呈明显的“U”型变化趋势。而城镇化水平对农业低碳发展的影响力则由西向东逐步递减。

根据实证分析结果,本文对我国实现农业低碳转型提出如下的建议:

(1) 从低碳农业区域整体来看,农业低碳发展水平空间异质性和相关性较强,在西南地区、大兴安岭区等低碳集聚区,加强农业低碳发展理念、技术的交流互鉴,增强农户低碳生产意识,进一步提高区域整体低碳生态效率是区域发展重点。而在西北地区和辽宁、吉林与内蒙古东部地区等高碳集聚区,应该向低碳区域学习低碳生产理念,从低碳农业理论角度规划与调整农业工作,积极利用低碳生产技术减少农业碳排放,提高低碳生产效率是区域发展重点。

(2) 从低碳农业系统内部来看,低碳农业内容差异需要发展不同的低碳农业模式,农业生产活动应与农业资源环境协调统一。

从碳环境水平看,西南、华南、东北等农业环境禀赋较好地区,尽量减少因成本优势带来的浪费,以发展碳减排、提升碳效率的农业低碳发展模式为主。西北等资源禀赋较为一般的地区,发展以保护农业生态系统良性循环发展的碳环境保护模式,并在此基础上进行农业生产方式向节能、增效、减排、固碳高质量方向发展。

(3)从低碳农业区域发展阶段来看,在东、中、西部和南北地区的农业发展分别呈“U”型与倒U型特征。在城镇化进程中,中、西部应搭上城镇化所带来技术、市场等资源要素的“顺风车”,完善区域农业低碳发展政策,鼓励农户向低碳农业生产方式转型,推进区域农业低碳建设步伐。在农业规模化提升上,南方地区要在人多地少基础上适当进行农业规模化发展,北方地区则要因地制宜发展规模化农业,避免出现通过增加农药、化肥等单位投资获取收益的高碳发展模式。在劳动生产效率提升上,中、西部要加强科技在劳动生产率提升中的作用,特别是中部地区要避免出现劳动力效率提升目标与经济发展目标水平相错位的问题。

最后,因为指标数据的可得性,基于市域尺度测度的农业低碳发展水平及其影响因素存在空间异质性,所得结果在一定程度上能为农业低碳发展水平可持续发展提供依据,若将研究聚焦于县域,所得结果或许能更加精确科学,这也是未来深化低碳农业研究的重要方向。

参考文献:

- [1]DU H B, CHEN Z N, MAO G Z, et al. A spatio-temporal analysis of low carbon development in China' s 30 provinces: A perspective on the maximum flux principle[J]. Ecological Indicators, 2018(90):54-64.
- [2]PEI Y, ZHU Y M, LIU S X, et al. Environmental regulation and carbon emission: The mediation effect of technical efficiency[J]. Journal of Cleaner Production, 2018(236):1-12.
- [3]邓悦,陈儒,姜志德,等. 低碳农业技术梳理与体系构建[J]. 生态经济, 2017(8):98-104+123.
- [4]MIAO Y, KONG C C, WANG L L, et al. A provincial lateral carbon emissions compensation plan in China based on carbon budget perspective[J]. Science of the Total Environment, 2019(692):1086-1096.
- [5]谢淑娟,匡耀求,黄宁生,等. 低碳农业评价指标体系的构建及对广东的评价[J]. 生态环境学报, 2013, 22(6):916-923.
- [6]JIANG C H, LI H, LI G Y. The process of metropolis modern agriculture low-carbon economic evaluation and suggestions: Taking Daxing District for an Example[J]. Ecological Economy, 2011, 10(Part A):295-299.
- [7]陈瑾瑜,张文秀. 低碳农业发展的综合评价——以四川省为例[J]. 经济问题, 2015(2):101-104.
- [8]尧波,郑艳明,胡启武,等. 江西省县域农业碳排放的时空动态及影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2014(03):311-318.
- [9]庞丽. 我国农业碳排放的区域差异与影响因素分析[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(12):1-7.
- [10]戴小文. 中国隐含碳排放因素分解研究[J]. 财经科学, 2013(2):101-108.
- [11]田云,李波,张俊飏. 武汉市碳排放的测算及影响因素分解研究[J]. 地域研究与开发, 2011(5):88-92.

-
- [12]杨欣,蔡银莺,张安录. 武汉城市圈碳排放的时空格局及影响因素分解研究——基于 2001~2009 年市级面板数据的实证[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22 (11) :1389-1396.
- [13]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[J]. 中国人口·资源与环境, 2017 (S2) :231-234.
- [14]盖美,吴慧歌,曲本亮. 新一轮东北振兴背景下的辽宁省水资源利用效率及其空间关联格局研究[J]. 资源科学, 2016, 38 (07) :1336-1349.
- [15]王昀. 低碳农业经济略论[J]. 中国农业信息, 2008, (8) :12-15.
- [16]罗吉文. 低碳农业发展模式探析[J]. 生态经济, 2010, 12 (1) :142-144.
- [17]骆旭添. 低碳农业发展理论与模式研究[D]. 福建农林大学, 2011.
- [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[J]. 资源科学, 2012, 34 (11) :2097-2105.
- [19]陈儒,姚顺波,姜志德. 低碳农业联合生产的绩效评估及其影响因素分析[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2018 (3) :44-55, 154-155.
- [20]李磊,贾磊,赵晓雪,等. 层次分析—熵值定权法在城市水环境承载力评价中的应用[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23 (4) :456-460.
- [21]袁久和,祁春节. 基于熵值法的湖南省农业可持续发展能力动态评价[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22 (2) :152-157.
- [22]SANG L. Spatial association measures for an ESDA-GIS framework: developments, significance tests, and applications to spatio-temporal income dynamics of U. S. Labor Market Areas, 1969-1999[D]. The Ohio State University, 2002.
- [23]OVERMARS K P, DE KONING G H J, VELDKAMP A. Spatial autocorrelation in multi-scale land use models [J]. Ecological Modelling , 2003, 164 (2-3) :257-270.
- [24]王洋,方创琳,王振波. 中国县域城镇化水平的综合评价及类型区划分[J]. 地理研究, 2012:1305-1316.
- [25]唐建荣,吴丽娟. 中国碳减排效率的比较研究[J]. 统计与决策, 2013 (24) :121-124.
- [26]王绮雯,张小有. 农业低碳技术视域下地形特征与作物类型对化肥施用质性影响分析——以江西省规模农户为例[J]. 农村经济与科技, 2019 (3) :61-64.
- [27]毕斗斗,方远平,谢蔓,等. 我国省域服务业创新水平的时空演变及其动力机制——基于空间计量模型的实证研究[J]. 经济地理, 2015, 35 (10) :139-148.
- [28]戴小文,漆雁斌,唐宏. 1990-2010 年中国农业隐含碳排放及其驱动因素研究[J]. 资源科学, 2015 (8) :1668-1676.

[29]程琳琳,张俊飏,何可.多尺度城镇化对农业碳生产率的影响及其区域分异特征研究——基于 SFA、E 指数与 SDM 的实证[J].中南大学学报(社会科学版),2018,24(5):112-121.

[30]唐轲,王建英,陈志钢.农户耕地经营规模对粮食单产和生产成本的影响——基于跨时期和地区的实证研究[J].管理世界,2017(5):79-91.

[31]孔昕.基于 Tobit 模型的低碳经济农业生产率增长影响因素实证研究[J].中国农业资源与区划,2016,37(10):140-145.

[32]PANAYOTOU T. Empirical tests and policy analysis of environmental degradation at different stages of economic development[R]. Geneva: International Labour Office, 1993.

[33]陈嘉雯,陈华超,徐强.全要素生产率与能源消费对碳排放影响的实证分析[J].统计与决策,2018,34(13):132-136.

[34]任国平,刘黎明,付永虎,等.基于 GWR 模型的都市城郊村域农户生计资本空间差异分析——以上海市青浦区为例[J].资源科学,2016(8):1594-1608.