



中国农业碳排放效率空间关联网结构及驱动因素研究

尚杰, 吉雪强, 石锐, 朱美荣

Structure and driving factors of spatial correlation network of agricultural carbon emission efficiency in China

SHANG Jie, JI Xueqiang, SHI Rui, and ZHU Meirong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12357/cjea.20210607>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

中国农业碳排放效率测度、空间溢出与影响因素

Measurement, spatial spillover and influencing factors of agricultural carbon emissions efficiency in China

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(10): 1762–1773

中国农业碳排放空间格局及影响因素动态研究

Spatial dynamics of agricultural carbon emissions in China and the related driving factors

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(9): 1269–1282

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

Assessment of agricultural carbon emission performance and stochastic convergence in China using SBM–Undesirable model and panel unit root test

中国生态农业学报(中英文). 2017, 25(9): 1381–1391

BP神经网络算法在河西绿洲玉米生产碳排放评估中的应用及算法有效性研究

Application and validity of BP neural networks on prediction of carbon emissions from corn production in Hexi Oasis

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(8): 1100–1106

现代烟草农业的碳效应核算与分析——以陕西省烟草合作社为例

Carbon effect of modern tobacco agriculture: Based on tobacco cooperatives in Shaanxi Province

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(12): 1903–1915

河南省农业生产碳汇的演变趋势及其集聚特征分析

Spatio-temporal evolution and agglomeration characteristics of agricultural production carbon sink in Henan Province

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(9): 1283–1290



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.12357/cjea.20210607

尚杰, 吉雪强, 石锐, 朱美荣. 中国农业碳排放效率空间关联网络结构及驱动因素研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(4): 543-557

SHANG J, JI X Q, SHI R, ZHU M R. Structure and driving factors of spatial correlation network of agricultural carbon emission efficiency in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30(4): 543-557

中国农业碳排放效率空间关联网络结构及驱动因素研究*

尚杰¹, 吉雪强¹, 石锐², 朱美荣^{1**}

(1. 东北林业大学经济管理学院 哈尔滨 150040; 2. 扬州大学商学院 扬州 225009)

摘要: 农业碳排放效率研究对于农业碳达峰、碳中和目标的实现具有重要意义, 现有研究缺乏基于关系数据和网络视角进行的农业碳排放效率研究, 制约了区域农业协同减排活动的开展。本研究基于关系数据和网络视角, 以2010—2019年中国大陆31个省(市、自治区)农业碳排放效率为研究对象, 以非期望产出的SBM模型测度其农业碳排放效率, 利用修改的引力模型构建农业碳排放效率空间关联网络引力矩阵, 应用社会网络分析法就空间关联网络的结构特征进行分析, 最后通过QAP模型就其驱动因素进行探索。研究表明: 1) 在研究期间, 中国31个省(市、自治区)农业碳排放效率提升较快, 由0.400增长至0.756, 增长88.8%, 但仍有一定改进空间, 且各省(市、自治区)间存在较大差距; 此外, 其空间效应在全国范围呈现空间关联网络特征。2) 在研究期间内, 中国31个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络的网络关联性增强, 网络内部森严的等级关系逐渐松散, 网络结构的稳定性得到较大提升; 且该空间关联网络形成了多个网络中心, 对空间关联网络的形成发挥了重要作用, 并对各省(市、自治区)农业碳排放效率产生影响和控制; 东部沿海地区是该空间关联网络空间溢出的主要目的地。3) 交通运输水平差异和第一产业产值差异有利于推动空间关联网络的形成; 相似的居民人均收入和信息化水平以及相近的空间距离能够促进空间关联网络形成。为此, 中国农业碳排放效率具有空间关联网络特征, 相关政策措施应当考虑其空间关联网络结构及动因。

关键词: 农业碳排放效率; 空间关联网络; 碳达峰; 碳中和; 低碳农业

中图分类号: F323.7

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



Structure and driving factors of spatial correlation network of agricultural carbon emission efficiency in China*

SHANG Jie¹, JI Xueqiang¹, SHI Rui², ZHU Meirong^{1**}

(1. College of Economics and Management, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. College of Business, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: The study of agricultural carbon emission efficiency is important for the realization of agricultural carbon peak and carbon neutrality goals. There is a lack of studies on agricultural carbon emission efficiency based on relational data and network perspectives. These limitations restrict the development of regional agricultural collaborative emissions reduction activities. Therefore, based

* 国家社会科学基金后期资助项目(20FGLB059)资助

** 通信作者: 朱美荣, 研究方向为生态农业、农业循环经济。E-mail: heuzhumeirong@163.com

尚杰, 研究方向为生态农业经济研究。E-mail: shangjie2005@126.com

收稿日期: 2021-09-06 接受日期: 2021-10-29

* The study was supported by the National Social Science Foundation of China (20FGLB059).

** Corresponding author, E-mail: heuzhumeirong@163.com

Received Sep. 6, 2021; accepted Oct. 29, 2021

on relational data and network perspective, taking the development of the agricultural carbon emission efficiency of 31 provinces (cities and autonomous regions) from 2010 to 2019 as the research subject, the study used the SBM-Undesirable model to measure the efficiency of agricultural carbon emissions, constructed a modified gravity matrix of spatial correlation network of agricultural carbon emission efficiency, analyzed the structural characteristics of the spatial correlation network by applying the social network analysis method, and finally explored the driving factors through a quadratic assignment procedure (QAP) model. There are several main findings. First, despite the wide disparity across the 31 provinces (cities, autonomous regions) in China, agricultural carbon emission efficiency increased rapidly, from 0.400 to 0.756, increasing 88.8% with a creation room for improvement. Second, the network relevance of agricultural carbon emission efficiency in the provinces (cities, autonomous regions) was enhanced. For the spatial correlation networks of agricultural carbon emission efficiency in the 31 provinces (cities, autonomous regions) of China, the number of network relations increased from 121 to 211, and the network density increased from 0.130 to 0.227, while network ranking declined from 0.458 to 0.293, followed by network efficiency, which declined from 0.837 to 0.692. In addition, the spatial correlation network of agricultural carbon emission efficiency among the 31 provinces (cities, autonomous regions) had formed multiple network centers that played an important role in controlling agricultural carbon emission efficiency. Overall, the eastern coastal areas were the main destinations for cyberspace space-related spillover of agricultural carbon emission efficiency in 31 provinces (cities and autonomous regions) in China. Third, the transport-level difference, resident income difference, difference in the output value of the first industry and information-level difference had an important impact on the formation of a spatial correlation network of agricultural carbon emission efficiency in China. Finally, the study findings demonstrated that the differences in transportation level and the output value of the primary industry significantly promoted spatial correlation network development. Similarly, it was found that per capita income, information level, and spatial distance also emphasized spatial correlation network formation. Based on the research conclusions, we proposed some suggestions for enhancing the spatial correlation of agricultural carbon emission efficiency, such as emphasizing the development of inter-regional coordinated emission reduction activities and differences of various provinces (cities and autonomous regions) in spatially related networks, making full use of driving factors strengthening the connection between the agricultural product market and organizations, and enhancing the information and transportation network support.

Keywords: Agricultural carbon emission efficiency; Spatial correlation network; Carbon peak; Carbon neutral; Low carbon agriculture

温室气体排放所造成的全球变暖问题已经严重威胁人类的生存和发展,碳排放已经成为世界主要国家的重要议题。我国在 2021 年《政府工作报告》中明确提出制定 2030 年前碳排放达峰行动方案,反映了我国对于碳排放问题的高度关切,也体现出该问题对于中国可持续发展的重要影响。碳达峰、碳中和目标实现的重要前提在于对碳排放情况的深入了解。农业是碳排放的重要来源,现有研究指出农业生产造成的碳排放是全球温室气体增加的重要来源^[1-2],农业活动排放的二氧化碳(CO₂)更是占到人为温室气体的 21%~25%^[3]。20 世纪 90 年代以来,中国农业碳排放量总体呈现增长态势^[4],农业活动温室气体排放占中国温室气体排放总量的 17%,同时农业活动更是甲烷(CH₄)和一氧化二氮(N₂O)排放的主要来源^[5-6]。可见,农业碳排放是中国碳排放的核心议题之一,中国碳达峰、碳中和目标的实现必须高度重视农业碳排放,并采取有效措施,推动农业碳减排。研究指出农业碳排放效率的提升是农业碳减排实现的重要渠道,更是实现农业低碳转型的重要依据^[7]。为此,就农业碳排放效率进行研究,为农业碳减排提供有效对策,是我国碳达峰、碳中和目标实现的重要途径。

学者们就农业碳排放效率进行了深入研究,这些研究主要包括农业碳排放效率概念探讨、农业碳排放效率测算、农业碳排放效率影响因素分析、农业碳排放效率空间关系分析等。就农业碳排放效率的概念来看,农业碳排放效率是在既定投入要素和经济产出条件下,理论上可达到的最少碳排放与实际排放之比^[8-9],也有学者认为农业碳排放效率就是指碳排放约束下的农业生产率水平^[4]。而无论哪种概念,其都是将农业碳排放作为农业生产活动的非期望产出进行考量,以反映在碳排放这一非期望产出作用下农业生产经营过程中的投入产出关系。农业碳排放效率越高,其在相同农业投入下所产出的经济价值越高或产生的碳排放越少,越有利于地区农业低碳化发展。就农业碳排放效率的测算研究来看,学者们主要通过 DEA-Malmquist 指数^[10-11]、SBM-Undesirable 模型^[7,12]等模型和方法对我国农业碳排放效率进行分析,也有少部分研究将农业碳排放量与地区农业 GDP 进行比较以测度地区农业碳排放效率^[13-14],这些研究指出我国农业碳排放效率整体呈增长趋势,但不同地区间存在差异。就农业碳排放效率的影响因素研究来看,学者们就农业产业结构、财政支农力度、有效灌溉率、农业技术进步、城

镇化水平、人力资本、农业机械化率、市场规模等多种因素对农业碳排放效率的影响进行了探讨^[6-7,15]。就农业碳排放效率空间分析来看,学者们不仅就农业碳排放效率在地区间的分布情况进行了讨论,更是进一步就农业碳排放效率的空间溢出效应、空间关联关系进行了分析^[16-19],其研究结果指出我国农业碳排放效率存在明显的空间效应,对于农业碳排放效率的分析不仅应当考虑本地区情况,还应当进一步考虑空间关系。

上述农业碳排放效率研究为我国农业碳排放问题的解决提供了有力的学术支撑,具有较高的学术价值和实际意义,并为本文农业碳排放效率的测度方法、指标体系等提供了参考。此外,随着区域协调发展战略的深入,农业碳排放效率空间关系分析^[16-19]的价值逐渐突显,这些研究成果为协调发展下的区域农业碳减排活动提供了重要支持。

但是,随着区域协调发展战略的进一步深入以及交通网络、信息网络的迅速发展,地区间劳动力、资金、技术以及产品等要素流动加快,地区产业^[20]、金融^[21]、消费^[22]的空间关联关系已经突破了地理邻近限制,形成空间关联网络。碳排放作为社会经济活动的产物,其空间效应也同样超越了地理邻近距离,在全国范围形成空间关联网络^[23-24]。农业碳排放作为碳排放的重要构成,也逐渐呈现出空间网络特征^[25]。在此背景之下,农业碳排放效率的空间关系研究也应当进一步深入,以探明区域协调发展下农业碳排放效率的新情况、新特征,从而为区域协调发展下农业碳减排活动提供更多有益指导。虽然现有研究^[16-19]已经就农业碳排放效率空间关系进行了探讨,对其空间收敛情况、空间溢出效应、空间关联关系进行了分析,但是这些研究仍存在一些局限:一方面现有研究仅考虑地理上的“邻近”或“相邻”空间效应,缺乏整体性,未考虑“非邻近”地区可能对农业碳排放效率产生的影响;另一方面,现有农业碳排放效率研究多基于反映省份自身性质的属性数据展开,少有研究基于反映两个或多个省份之间相互关系的关系数据进行探索,这使得现有研究难以就农业碳排放效率空间关联网络的整体网络结构特征进行刻画,而结构对于属性数据具有决定性的影响,对于空间关联研究具有更大价值^[26]。这些局限的存在影响了区域农业碳排放效率协调提升,更制约了区域农业协同减排活动的开展,不利于我国碳达峰、碳中和目标的实现。

为此,借鉴现有研究成果,本文基于关系数据和

网络视角,以2010—2019年中国31个省(市、自治区)农业碳排放效率发展情况为研究对象(香港、澳门、台湾等地区的农业发展情况存在较大差异,故未列为研究对象),以非期望产出的SBM模型(SBM-Undesirable模型)测度农业碳排放效率,利用修改的引力模型构建农业碳排放效率空间关联网络引力矩阵,应用社会网络分析法就空间关联网络的结构特征进行分析,最后通过QAP模型(Quadratic Assignment Procedure模型)就驱动因素进行探索,以期为区域农业协同减排活动提供参考和支持,助力中国碳达峰、碳中和目标的实现。相对现有农业碳排放效率研究,本研究实现了以下创新:1)基于关系数据和网络视角就中国农业碳排放效率空间关联网络特征进行分析,为中国农业碳排放效率研究开拓新的研究视角;2)综合利用非期望产出SBM模型、引力模型、社会网络分析法、QAP模型,实现了中国农业碳排放效率研究方法的拓展。

1 研究方法、数据来源

1.1 农业碳排放效率测度方法

1.1.1 非期望产出SBM模型

本文利用非期望产出SBM模型对农业碳排放效率进行测度,该模型由Tone在2001年提出^[27],在农业碳排放效率测度中得到了较广泛应用^[7,12],由于该模型已经被学界熟知,为此对其公式不进行详细介绍。

1.1.2 农业碳排放效率投入产出指标体系

本文借鉴前人研究^[7],构建中国31个省(市、自治区)农业碳排放效率投入产出指标体系(表1)。该指标体系将农业生产活动所涉及的劳动力、土地、化肥、农药、农膜、农业机械动力、农业灌溉等因素作为投入指标,将农业总产值作为期望产出指标,将农业活动所造成的碳排放作为非期望产出指标。

其中农业从业人员的计算借鉴研究成果^[28],利用公式第一产业从业人员 \times 农业GDP/农林牧渔业GDP进行计算。农业碳排放量的计算主要参考文献^[29-30],包含了稻田的CH₄排放,化肥和土壤引起的N₂O排放,农田土壤、化肥、农药、农业机械和农业灌溉所产生的CO₂排放,化肥引起的N₂O排放利用各省(市、自治区)的施用氮肥和复合肥总数计算。参考文献^[29-31]的做法,在与相关专家商议后,本文决定仅考虑农业生产本身所产生的温室气体,未将秸秆等农业废弃物燃烧等活动所产生的CO₂纳入碳排放量中。在计算后,参考文献^[30]的方法,将CH₄、

表 1 农业碳排放效率投入-产出指标体系
Table 1 Input-output indexes system of agricultural carbon emission efficiency

一级指标 First indicator	二级指标 Secondary indicator	变量及说明 Variable and instruction
投入指标 Input index	农业劳动力 Labour force	农业从业人员 Number of employees in agriculture ($\times 10^4$ person)
	土地 Land	农作物总播种面积 Planting area of crops (hm^2)
	化肥 Chemical fertilizer	化肥施用量 Fertilizers consumption ($\times 10^4$ t)
	农药 Pesticide	农药使用量 Pesticides usage (t)
	农膜 Agricultural film	农膜使用量 Agricultural film consumption (t)
	农业机械动力 Agricultural machinery power	农业机械总动力 Total power of agricultural machinery ($\times 10^4$ kW)
期望产出指标 Desirable output index	灌溉 Irrigation	有效灌溉面积 Effective irrigation area (hm^2)
	农业总产值 Total output value of agriculture	农业总产值(以2010年为基期) Total agricultural output value (based at 2010)
非期望产出指标 Undesirable output index	农业碳排放量 Agricultural carbon emissions	农业碳排放 Agricultural carbon emissions (t)

N_2O 折合为 CO_2 当量。碳排放量具体计算系数及过程见文献 [29-30]。

1.2 空间关联网结构分析方法

1.2.1 修改的引力模型

为了解中国 31 省(市、自治区)农业碳排放效率是否具有空间网络特征,需要先构建引力矩阵。参考文献 [32] 引入修正的引力模型对中国 31 省(市、自治区)农业碳排放效率的空间关联引力强度进行测度。其计算公式为:

$$Q_{ij} = \frac{AG_i}{AG_i + AG_j} \times \frac{ACE_i \times ACE_j}{\frac{D_{ij}^2}{(ag_i - ag_j)^2}} \quad (1)$$

式中: Q_{ij} 表示中国第 i 、 j 省(市、自治区)之间农业碳排放效率的引力, ACE_i 、 ACE_j 、 AG_i 、 AG_j 、 ag_i 、 ag_j 分别表示中国第 i 、 j 省(市、自治区)之间的农业碳排放效率、农业生产总值、农业劳动力人均生产总值, D_{ij}^2 表示各省(市、自治区)之间的地理距离(以省会距离代替)。在计算得到各省(市、自治区)农业碳排放效率间引力之后,基于引力值构建 31 个省(市、自治区)碳排放效率空间关联网矩阵,参考文献 [32] 将其中每行取引力均值作为比较值,将大于平均水平的记为 1, 否则记为 0。

1.2.2 社会网络分析法

社会网络分析法是基于“关系数据”就关系网络进行分析的科学方法,在多个领域得到了广泛的应用 [26]。参考现有空间关联网结构研究 [20-26,32], 本文利用社会网络分析法对 31 个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网结构特征进行分析。

1) 空间关联网整体结构特征。该特征主要利

用网络关系数、密度、关联度、等级度、效率 5 个指标进行分析,详细公式及其内涵见文献 [33-34]。其中网络关系数、网络密度反映空间关联网内各节点的关联强度,即各节点在空间关联网中相互作用的强度。当网络关系数越多,网络密度越大,说明 31 个省(市、自治区)农业碳排放效率的关联性越强,各省(市、自治区)的农业碳排放效率相互间产生的影响也更强;网络关联度则是反映空间关联网的稳健性,当其为 1 时说明 31 个省(市、自治区)农业碳排放效率具有空间网络效应,且该空间关联网稳健性强;网络等级度反映 31 个省(市、自治区)农业碳排放效率的地位差异,等级度越高,说明该空间关联网中形成的等级地位差异越大;网络效率反映空间关联网的稳定情况,网络效率越低,31 个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网越稳定。

2) 空间关联网个体结构特征。该特征主要利用点度中心度、接近中心度和中介中心度 3 个指标进行分析,详细公式及其内涵见文献 [33-34]。在研究中,当一个省(市、自治区)的点度中心度越高,表明该省(市、自治区)距 31 个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网中心越近,对其余网络节点的作用越强;当一个省(市、自治区)的接近中心度越高,表明其在 31 个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网中与其他省(市、自治区)的距离越近;当一个省(市、自治区)的中介中心度越高,该省市对 31 个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网中其他省(市、自治区)的农业碳排放效率的控制和调节作用越强。

3) 空间关联网聚类结构特征分析。本文通过

块模型分析法探讨中国31省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络各个板块在网络结构中的角色与作用。参考程慧等^[32]的评价规则对中国31个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络进行

聚类分析。将中国31个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络划分为4个板块, 板块的属性根据其板块内外部接收和发出关系系数与板块内部成员数判断而来(表2)。

表2 块模型中农业碳排放效率板块属性分类
Table 2 Classification of agricultural carbon emission efficiency plate attributes in the block model

位置内部的关系比例 Proportion of relationships within the location	位置接收到的关系比例 Proportion of relationships received by this position	
	≈ 0	> 0
$\geq (g_k - 1)/(g - 1)$	双向溢出板块 Two-way overflow plate	净受益板块 Net benefit plate
$< (g_k - 1)/(g - 1)$	净溢出板块 Net overflow plate	经纪人板块 Broker plate

g_k 表示板块内的成员数量, g 表示整个网络关系中成员数量。 g_k is the numbers number within the block. g is the numbers number within the network relationship.

1.3 QAP 模型

由于研究所涉及变量均为关系数据, 变量间可能存在多重共线性, 同时也难以判定干扰项是否服从正态分布, 而 QAP 模型不需要独立性与正态分布假定, 运用 QAP 模型对关系数据进行分析所得的结果更为稳健^[35]。为进一步揭示中国31个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络演变的内在驱动力, 参考现有研究成果^[20-26,32], 本文以最接近的2019年为研究对象, 构建 QAP 模型如下:

$$GL = f(K, J, S, Z, B, X, P, C) \quad (2)$$

式中: 因变量 GL 为中国31省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络矩阵, 自变量为科技水平差异矩阵(K)、交通运输水平差异矩阵(J)、居民收入差异矩阵(S)、第一产业产值差异矩阵(Z)、第一产业比重差异矩阵(B)、信息化水平差异矩阵(X)、地区人口差异矩阵(P)、空间邻接矩阵(C)。

其中科技水平所使用指标为各省(市、自治区)的研究与试验发展经费; 交通运输水平所使用指标为各省(市、自治区)的货运量; 居民收入所使用指标为各省(市、自治区)的居民人均收入值; 第一产业产值所使用指标为各省(市、自治区)的第一产业产值; 第一产业比重所使用指标为各省(市、自治区)的第一产业产值与地区生产总值之比; 信息化水平所使用指标为各省(市、自治区)的邮电业务总量; 地区人口所使用指标为各省(市、自治区)的年末人口数量; 空间邻接关系采用0—1法则, 若两省市邻接则记为1, 否则记为0。

1.4 数据来源

基础数据来源于《中国统计年鉴》《中国农业年鉴》《中国农村统计年鉴》。其中, 各省(市、自治区)间距离利用 ArcGIS 软件 distance 功能, 结合各

省会(直辖市为本市坐标)地理坐标进行计算。

2 中国农业碳排放效率分析

本文利用 PRO DEA SOLER 5.0 软件, 基于上文提出的农业碳排放效率投入产出指标体系, 应用非期望产出 SBM 模型进行计算, 得到2010—2019年中国31省(市、自治区)农业碳排放效率(表3)。

由表3可知, 2010—2019年间, 中国31个省(市、自治区)农业碳排放效率均值由0.400增长至0.756, 增长了88.8%, 表明在这10年间, 中国大陆农业低碳化发展得到了长足进步, 在碳排放约束下, 同样的农业投入得到了更多的农业经济产出; 或者说在同样的投入和农业经济产出下, 农业碳排放量相对减少, 这反映出中国农业生产与环境保护的协调发展。究其原因, 一方面是农业科技下农业生产效率的提升, 随着农业信息技术、新型农业器械、优良农种等相关农业科技的推广和应用, 农产品单位面积产量得到了提高; 另一方面随着农业面源污染攻坚战进行, 在政策指导和市场绿色消费引导下, 在绿色农业相关技术的支持下, 农业生产对化肥、农药、农膜的依赖程度下降, 减少了农业碳排放。就不同省(市、自治区)情况来看, 2019年福建、广东、贵州、海南、湖北、陕西、青海、上海、四川、天津、新疆、浙江等省(市、自治区)农业碳排放效率为1, 达到了效率前沿面, 其中福建、广东、上海、天津、浙江等地较高的农业碳排放效率可能多依靠其先进的农业技术支持和严格的农业污染政策制约; 陕西、青海、新疆等则更多依托土地供给和农业规模化经营提升农业经济产出, 从而得以实现较高的农业碳排放效率; 至于湖北省可能依托其较为充足的农业劳动力以及优良的水热条件实现较高的农业经济产出, 此外, 其对于农业污染问题的高度重视也

表 3 2010—2019 年中国 31 个省(市、自治区)农业碳排放效率
Table 3 Agricultural carbon emission efficiency in 31 provinces (cities, autonomous regions) of China from 2010–2019

地区 Area	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
安徽 Anhui	0.250	0.264	0.284	0.289	0.307	0.324	0.340	0.366	0.380	0.402
北京 Beijing	0.591	0.639	0.630	0.712	0.722	0.885	1.000	1.000	0.777	0.822
福建 Fujian	0.522	0.548	0.573	0.579	0.604	0.643	0.721	0.822	0.903	1.000
重庆 Chongqing	0.395	0.424	0.459	0.498	0.527	0.568	0.629	0.674	0.705	0.797
甘肃 Gansu	0.285	0.290	0.306	0.312	0.321	0.337	0.390	0.465	0.536	0.655
广东 Guangdong	0.516	0.545	0.562	0.587	0.616	0.639	0.696	0.766	0.898	1.000
广西 Guangxi	0.359	0.392	0.430	0.447	0.475	0.503	0.525	0.571	0.639	0.723
贵州 Guizhou	0.200	0.163	0.215	0.318	0.353	0.388	0.462	0.523	0.648	1.000
海南 Hainan	0.586	0.589	0.602	0.628	0.647	0.677	0.745	0.787	1.000	1.000
河北 Hebei	0.416	0.439	0.453	0.470	0.486	0.507	0.552	0.614	0.703	0.776
河南 Henan	0.378	0.407	0.424	0.449	0.465	0.501	0.553	0.607	0.664	0.753
黑龙江 Heilongjiang	0.315	0.319	0.315	0.321	0.338	0.359	0.370	0.381	0.404	0.465
湖北 Hubei	0.378	0.409	0.430	0.456	0.477	0.515	0.573	0.638	0.714	1.000
湖南 Hunan	0.386	0.420	0.413	0.416	0.436	0.468	0.498	0.534	0.578	0.653
吉林 Jilin	0.329	0.338	0.342	0.371	0.379	0.386	0.419	0.460	0.489	0.556
江苏 Jiangsu	0.454	0.479	0.502	0.526	0.551	0.583	0.596	0.630	0.655	0.700
江西 Jiangxi	0.252	0.264	0.266	0.302	0.312	0.325	0.349	0.375	0.414	0.462
辽宁 Liaoning	0.400	0.454	0.471	0.519	0.522	0.597	0.569	0.608	0.636	0.717
内蒙古 Inner Mongolia	0.291	0.317	0.316	0.336	0.329	0.338	0.349	0.351	0.377	0.395
宁夏 Ningxia	0.309	0.324	0.353	0.367	0.398	0.422	0.467	0.508	0.556	0.591
青海 Qinghai	0.391	0.408	0.442	0.529	0.591	0.543	0.616	0.680	0.758	1.000
山东 Shandong	0.401	0.425	0.440	0.475	0.505	0.543	0.598	0.667	0.743	0.822
山西 Shanxi	0.277	0.302	0.319	0.331	0.346	0.352	0.396	0.461	0.486	0.517
陕西 Shaanxi	0.458	0.515	0.541	0.586	0.643	0.697	0.771	0.823	0.865	1.000
上海 Shanghai	1.000	1.000	1.000	0.878	1.000	0.747	0.642	0.743	1.000	1.000
四川 Sichuan	0.468	0.503	0.532	0.559	0.586	0.607	0.715	0.764	0.863	1.000
天津 Tianjin	0.415	0.453	0.466	0.510	0.542	0.602	0.680	0.826	0.910	1.000
西藏 Tibet	0.155	0.159	0.029	0.171	0.188	0.192	0.191	0.129	0.146	0.170
新疆 Xinjiang	0.576	0.592	0.603	0.592	0.535	0.604	0.650	0.746	0.872	1.000
云南 Yunnan	0.180	0.195	1.000	0.217	0.233	0.261	0.287	0.326	0.382	0.455
浙江 Zhejiang	0.483	0.500	0.497	0.506	0.535	0.564	0.654	0.745	0.846	1.000
均值 Mean	0.400	0.422	0.459	0.460	0.483	0.506	0.549	0.600	0.663	0.756

有效制约了农业碳排放的增加;海南省可能主要得益于较好的光热水等自然条件。而安徽、黑龙江、江西、西藏、内蒙古、云南等省(市、自治区)的农业碳排放效率在 2019 年仍低于 0.500,其中西藏、内蒙古主要是因为其农业生产活动较少,且受到自然环境制约而造成农业经济产出较低;安徽、江西、云南则可能是受到农业技术制约;黑龙江省虽然具有较为肥沃的土壤以及广阔的土地,但其农业生产易受到寒冷天气影响。整体上而言,在研究区间内,中国 31 个省(市、自治区)农业碳排放效率提升较大,但仍有一定的提升空间,不同省(市、自治区)间存在较大差距。

3 中国农业碳排放效率空间关联网络结构分析

以中国 31 个省(市、自治区)农业碳排放效率

(表 3)作为构建空间关联矩阵的基础数据,结合公式(1)测算获得的引力构建中国 31 个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联二值矩阵(GL),而后应用社会网络分析工具 Ucinet 软件制作中国 31 个省(市、自治区)农业碳排放效率的空间网络拓扑图,并进行空间网络结构分析。研究选取 2010 年、2013 年、2016 年、2019 年 4 个年份为代表进行图像展示(图 1)。可以看出中国 31 个省(市、自治区)农业碳排放效率已经突破了传统的空间地理邻近溢出属性,网络中没有孤立点,整体呈现出复杂的空间关联网络特征。

3.1 农业碳排放效率空间关联网络整体特征分析

利用 Ucinet 6.0 软件,计算得到 2010—2019 年中国 31 个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络整体特征指标(表 4)。

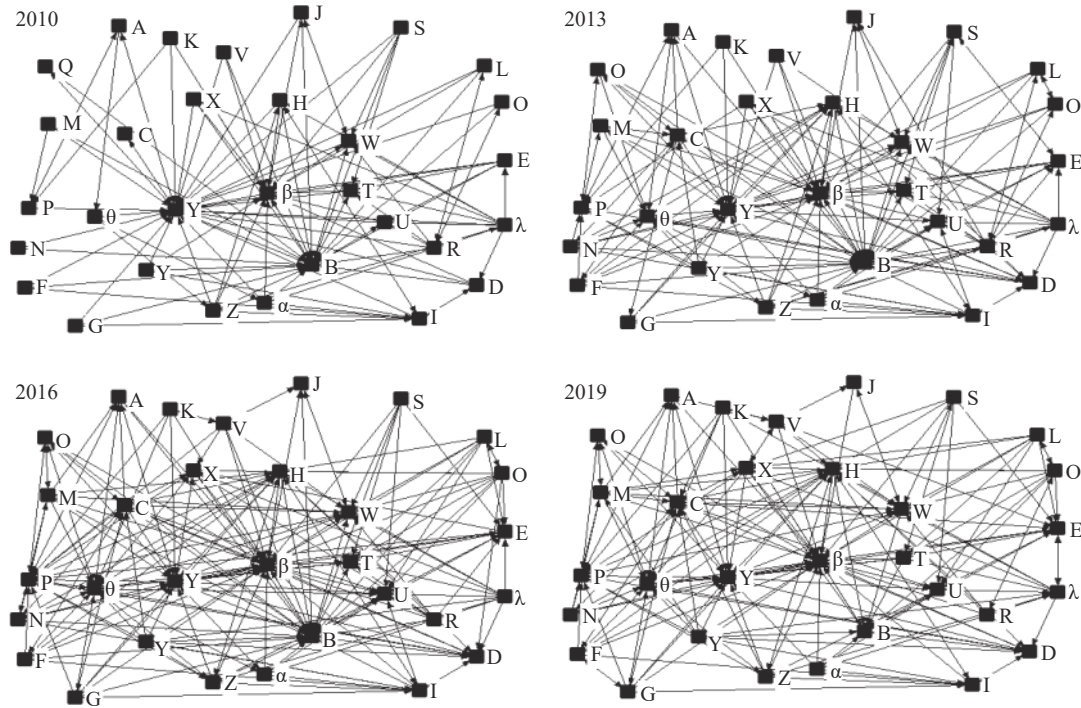


图 1 2010—2019 年中国 31 个省(市、自治区)农业碳排放效率空间网络拓扑图

Fig. 1 Topologies of agricultural carbon emission efficiency in 31 provinces (cities, autonomous regions) of China from 2010 to 2019

A: 安徽; B: 北京; C: 福建; D: 重庆; E: 甘肃; F: 广东; G: 广西; H: 贵州; I: 海南; J: 河北; K: 河南; L: 黑龙江; M: 湖北; N: 湖南; O: 吉林; P: 江苏; Q: 江西; R: 辽宁; S: 内蒙古; T: 宁夏; U: 青海; V: 山东; W: 山西; X: 陕西; Y: 上海; Z: 四川; β : 天津; α : 西藏; λ : 新疆; γ : 云南; θ : 浙江. A: Anhui; B: Beijing; C: Fujian; D: Chongqing; E: Gansu; F: Guangdong; G: Guangxi; H: Guizhou; I: Hainan; J: Hebei; K: Henan; L: Heilongjiang; M: Hubei; N: Hunan; O: Jilin; P: Jiangsu; Q: Jiangxi; R: Liaoning; S: Inner Mongolia; T: Ningxia; U: Qinghai; V: Shandong; W: Shanxi; X: Shaanxi; Y: Shanghai; Z: Sichuan; β : Tianjin; α : Tibet; λ : Xinjiang; γ : Yunnan; θ : Zhejiang.

表 4 2010—2019 年中国 31 个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络整体特征指标

Table 4 Overall characteristic indexes of spatial correlation network in 31 provinces (cities, autonomous regions) of China from 2010—2019

年份 Year	网络关系数 Number of network relationships	网络密度 Network density	网络关联度 Network correlation	网络等级度 Network rank	网络效率 Network efficiency
2010	121	0.130	1	0.458	0.837
2011	128	0.138	1	0.501	0.825
2012	161	0.173	1	0.506	0.766
2013	182	0.196	1	0.125	0.743
2014	172	0.185	1	0.425	0.745
2015	203	0.218	1	0.181	0.708
2016	229	0.246	1	0.377	0.651
2017	213	0.229	1	0.234	0.685
2018	221	0.238	1	0.181	0.690
2019	211	0.227	1	0.293	0.692

从表 4 可知, 中国 31 个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络的网络关系数呈现波动上升的趋势, 从 2010 年的 121 个上升至 2019 年的 211 个, 增加了 74.4%, 其中最高值为 2016 年的 229 个。就网络密度而言, 其同样呈现出波动上升趋势, 从 2010 年的 0.130 上升至 0.227, 提升 74.6%, 其中最高值为 2016 年的 0.246。根据网络关系数和网络密度的变

化可知, 2010—2019 年间中国 31 个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络的关联强度提升, 各省(市、自治区)农业碳排放效率间的相互作用得到强化。究其原因, 一方面得益于逐步完善的市场经济体制, 使得农业生产经营要素能够在全国范围得到便捷流通; 另一方面, 中国交通网络、信息网络的迅速发展, 也进一步为各省(市、自治区)间农业技

术扩散、农业劳动力转移、农业投资拓展等活动提供了支持,加强了各省(市、自治区)农业生产经营间的关联,为农业碳排放效率空间关联关系的形成提供了保障;此外,在这 10 年间,长江经济带、粤港澳大湾区等区域发展战略的实施,加快了区域内部协调发展的速度,也为全国范围各类涉农要素的流动提供了动力和支持。虽然,在研究区内中国 31 个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络的网络关系数得到了较大提升,但是相对于最大可能关系总数 930 个(31×30),仍有着较大差距,因此中国农业碳排放效率空间关联关系还有着巨大的提升空间。

由表 4 可知,2010—2019 年间中国 31 个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络的网络关联度皆为 1,显示出中国各省(市、自治区)均被纳入农业碳排放效率空间关联网络之中,表明这一空间关联网络的网络结构稳健,各省(市、自治区)的农业碳排放效率实现了相互连接,农业碳排放效率的空间溢出效应范围较广,不仅仅局限于邻近范围。就网络等级度来看,中国 31 个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络的网络等级度波动较大,由 2010 年的 0.458 下降至 2019 年的 0.293,下降 36.0%,其中最高值为 2012 年的 0.506,最低值为 2015 年和 2018 年的 0.181,整体呈现震荡下降趋势,反映出中国 31 个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络内部森严的等级结构瓦解,而随着这一进程的发展,各省(市、自治区)农业碳排放效率间的相互联系和影响得到加强。究其原因可能是在市场、交通、信息、政策等因素影响下,农业碳排放效率相关的农业劳动力、资金、农业技术等要素得以在全国范围内实现协调配置,缩小了各省(市、自治区)间农业碳排放效率差距。就网络效率而言,中国 31 个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络的网络效率整体呈下降趋势,由 2010 年的 0.837 下降至 2019 年的 0.692,下降 17.3%,表明中国 31 个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络的稳定性得到增强,其原因可能是由于国家社会经济发展协调性的增强,使得各省(市、自治区)农业碳排放效率间的关联关系不断增多,各节点间关联线的增多使得整个网络越发紧密,从而实现稳定提升。

3.2 农业碳排放效率空间关联网络个体结构特征

利用 Ucinet 6.0 软件计算得到 2019 年中国 31 个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络个体结构特征指标(表 5)。

由表 5 可知,2019 年中国 31 个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络的点度中心度均值为 35.269。其中北京、福建、甘肃、贵州、湖北、江苏、山西、陕西、上海、天津、浙江等 11 个省(市、自治区)的点度中心度高于均值,表明这些省(市、自治区)在中国 31 个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络中相对其余省(市、自治区)更为接近网络中心位置,与其他节点省(市、自治区)有着较多的联系,这些省(市、自治区)对于整体网络的形成与稳定发展起着关键作用。其中北京、福建、江苏、上海、天津、浙江等省市属于我国的经济发达地区,这些地区农业技术先进,经济发展较快,且有着便捷的交通网络,这使得其能够通过农业技术转移、农业资金投入、吸收农业劳动力等方式对其他省(市、自治区)农业经济产出产生重要影响;此外,这些地区由于人口密集且人均收入较高,是农产品的重要消费地区,其逐渐形成的绿色消费习惯也会对其他省(市、自治区)的农业生产经营产生反向影响,使其减少化肥、农药施用,从而降低农业碳排放量。甘肃、贵州、山西、陕西、湖北等省份则主要得益于其地理位置,如甘肃和陕西处于我国西北诸省(市、自治区)的中间位置,贵州位于西南诸省(市、自治区)的中间位置,湖北位于中部诸省(市、自治区)的中间位置,山西省周边也围绕着内蒙古、河南、陕西、河北等省(市、自治区),使得这些省(市、自治区)能够借助交通与信息网络与周边省(市、自治区)形成较好的要素交流,从而在空间关联网络中处于较为接近网络中心的位置。此外,北京、江苏、上海、天津、浙江等省市的点入数要远远超过点出数,反映出其在网络之中获取了较多要素,处于净受益状态。

由表 5 可知,2019 年中国 31 个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络的接近中心度均值为 25.802。其中北京、福建、甘肃、贵州、江苏、青海、山西、上海、天津、浙江等 10 个省(市、自治区)的接近中心度高于均值,说明这些省(市、自治区)易与其他省(市、自治区)产生空间关联。其中,北京、福建、江苏、上海、天津、浙江处于东部地区,经济发达,信息技术先进,且交通完善,涉农资金、农业技术、农产品等要素在这些地区进行投资、扩散、流通,使得这些省(市、自治区)能够与其他省(市、自治区)较快产生空间关联。甘肃、贵州、青海、山西等则是由于其处于一定区域的较中心位置,与周边省(市、自治区)有着较好的要素交流渠道,

表5 中国31个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络结构中心性分析
Table 5 Structural central analysis of the spatial correlation network of agricultural carbon emission efficiency in 31 provinces (cities, autonomous regions) of China

地区 Area	点度中心度 Point center degree				接近中心度 Closeness center degree		中介中心度 Intermediation center degree	
	点出数 Point-out number	点入数 Point-in number	中心度 Center degree	排序 Order	中心度 Center degree	排序 Order	中心度 Center degree	排序 Order
	安徽 Anhui	4	6	23.333	25	25.210	13	0.338
北京 Beijing	1	12	40.000	9	62.500	2	0.013	28
福建 Fujian	13	11	53.333	4	26.087	10	12.534	3
重庆 Chongqing	8	5	33.333	12	25.210	13	0.841	18
甘肃 Gansu	7	9	43.333	8	26.549	9	4.641	8
广东 Guangdong	8	3	26.667	19	21.898	24	0.435	22
广西 Guangxi	8	3	26.667	19	21.898	24	0.435	22
贵州 Guizhou	11	16	63.333	3	29.126	3	14.366	1
海南 Hainan	6	7	26.667	19	24.590	16	4.161	9
河北 Hebei	2	2	10.000	31	22.727	22	0.000	31
河南 Henan	8	1	26.667	19	18.987	28	0.442	21
黑龙江 Heilongjiang	8	1	26.667	19	3.444	30	0.013	28
湖北 Hubei	9	7	36.667	11	25.424	12	2.513	15
湖南 Hunan	7	2	23.333	25	24.000	17	0.031	27
吉林 Jilin	9	2	30.000	16	3.448	29	0.886	17
江苏 Jiangsu	5	13	46.667	7	27.778	7	3.434	11
江西 Jiangxi	6	4	20.000	28	23.438	19	0.796	19
辽宁 Liaoning	4	1	13.333	30	3.444	30	0.013	28
内蒙古 Inner Mongolia	7	1	23.333	25	22.388	23	2.832	13
宁夏 Ningxia	5	5	30.000	16	23.256	20	0.399	24
青海 Qinghai	5	8	33.333	12	26.786	8	2.935	12
山东 Shandong	8	3	26.667	19	22.901	21	6.272	6
山西 Shanxi	5	12	46.667	6	28.037	6	13.336	2
陕西 Shaanxi	8	7	40.000	9	25.641	11	4.061	10
上海 Shanghai	7	18	66.667	2	29.126	3	8.631	5
四川 Sichuan	9	3	30.000	16	25.210	13	2.805	14
天津 Tianjin	1	26	86.667	1	88.235	1	0.720	20
西藏 Tibet	6	1	20.000	28	19.481	27	0.153	26
新疆 Xinjiang	10	5	33.333	12	23.622	18	8.941	4
云南 Yunnan	10	2	33.333	12	21.127	26	1.437	16
浙江 Zhejiang	6	15	53.333	4	28.302	5	4.921	7
均值 Mean	6.806	6.806	35.269		25.802		3.333	

从而能够通过输出劳动力等要素以及吸收先进农业技术而与网络中的其他省(市、自治区)尤其是其周边的省(市、自治区)产生关联。

由表5可知,2019年中国31个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络的中介中心度均值为3.333。其中福建、甘肃、贵州、海南、江苏、山东、山西、陕西、上海、新疆、浙江等11个省(市、自治区)的中介中心度高于均值。表明这些省(市、自治区)在空间网络之中能够较好地影响和控制劳动力、资金等资源与技术的流动,并进一步对其他省(市、自治区)的农业碳排放效率产生调节和制约作用,是中国31个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络之中的“桥梁”。福建、江苏、上海、浙江等省市凭借其经济、技术优势通过输出农业技术、

资金等方式推动其他省(市、自治区)农业经济产出增加,或通过扩散绿色农业技术或绿色农业经营管理经验减少其他省(市、自治区)农业生产经营活动的碳排放量;甘肃、贵州、海南、山西、新疆等省(市、自治区)则是通过输出劳动力或农产品等方式与周边等省(市、自治区)产生空间关联。

3.3 农业碳排放效率空间关联网络聚类结构特征

研究利用CONCOR算法对中国31个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络进行分析,将其划分为4个板块(表6)。

中国31个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络板块间内部关系系数共37个,占2019年网络总关系系数的17.5%,板块外关系系数共174个,占2019年网络总关系系数的82.5%,显示出各省(市、自

表 6 中国 31 个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联板块划分

Table 6 Division of spatial correlation plates of agricultural carbon emission efficiency in 31 provinces (cities, autonomous regions) of China

板块 Plate	地区 Area	接收关系数 Number of received relationships		发出关系数 Number of issued relationships		期望内部 关系比例 Expected internal relationship ratio (%)	实际内部 关系比例 Actual internal relationship ratio (%)
		板块内 Inside the plate	板块外 Outside the plate	板块内 Inside the plate	板块外 Outside the plate		
		第1板块 First plate	安徽、江西、广东、重庆、云南、广西、贵州、河南、湖南 Anhui, Jiangxi, Guangdong, Chongqing, Yunnan, Guangxi, Guizhou, Henan, Hunan	11	34		
第2板块 Second plate	陕西、西藏、甘肃、山西、青海、宁夏 Shaanxi, Tibet, Gansu, Shanxi, Qinghai, Ningxia	5	37	5	31	16.667	13.889
第3板块 Third plate	上海、福建、天津、北京、海南、湖北、江苏、浙江 Shanghai, Fujian, Tianjin, Beijing, Hainan, Hubei, Jiangsu, Zhejiang	16	93	16	32	23.333	33.333
第4板块 Fourth plate	辽宁、内蒙古、黑龙江、山东、新疆、吉林、河北 Liaoning, Inner Mongolia, Heilongjiang, Shandong, Xinjiang, Jilin, Hebei	5	10	5	43	20.000	10.417

治区)农业碳排放效率间存在着空间集聚效应和空间溢出现象。其中第 1 板块包括安徽、江西等 9 个省(市、自治区),其板块内关系数为 11 个,板块外接收关系数 34 个,板块外发出关系数 68 个,期望内部关系比例大于实际内部关系比例,属于净溢出板块,其中安徽、江西、云南、广西、贵州、河南、湖南等省(市、自治区)可能向其他板块输出劳动力、农产品等要素,而广东、重庆则更多是技术或资金的输出;第 2 板块包括山西、西藏等 6 个省(市、自治区),其板块内关系数为 5 个,板块外接收关系数 37 个,板块外发出关系数 31 个,期望内部关系比例大于实际内部关系比例,属于经纪人板块,其与板块内外成员都有着密切的空间关联,在整个农业碳排放效率空间关联网络之中充当着要素沟通的纽带;第 3 板块包含上海、福建等 8 个省(市、自治区),其板块内关系数为 16 个,板块外接收关系数 93 个,板块外发出关系数 32 个,期望内部关系比例小于实际内部关系比例,属于净受益板块,主要享受着其他板块的要素输入;第 4 板块包含辽宁、内蒙古等 7 个省(市、自治区),板块年内关系数为 5 个,板块外接收关系数 10 个,板块外发出关系数 43 个,期望内部关系比例大于实际内部关系比例,也属于净溢出板块,这些地区大多是我国重要的农产品输出省(市、自治区)。

在此基础上,进一步运用凝聚子群分析路径,计算得中国 31 个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络的密度矩阵,而后将密度矩阵中大于 2019 年中国 31 个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络密度(上文测得 0.227)的元素记为 1,

反之为 0,得到像矩阵(表 7)。由表 7 可知,第 1、2 板块农业碳排放效率向第 3 板块产生空间溢出,第 3 板块农业碳排放效率向第 1 板块产生一定的空间溢出,第 4 板块农业碳排放效率的空间溢出效应主要影响第 2 板块。整体上来看,东部沿海地区是农业碳排放效率空间溢出的主要目的地。

4 中国农业碳排放效率空间关联网络驱动因素分析

4.1 QAP 相关性分析

在进行 QAP 回归分析之前,研究首先利用 Ucinet 6.0 软件进行 QAP 相关性分析,以了解各解释变量与中国 31 个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络矩阵之间的相关情况(表 8)。其中,交通运输水平差异矩阵(J)、第一产业产值差异矩阵(Z)、第一产业比重差异矩阵(B)、地区人口差异矩阵(P)、空间邻接矩阵(C)与中国 31 个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络矩阵(GL)显著相关(至少在 $P < 0.1$ 的统计水平),相关系数为正,说明各省(市、自治区)间的交通运输水平差异、第一产业产值差异、第一产业比重差异、地区人口差异有利于推进 31 个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络形成,此外,各省(市、自治区)间的空间距离在该年对中国 31 个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络的形成发挥了重要作用。居民收入差异矩阵(S)在 $P < 0.05$ 的统计水平与中国 31 个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络显著相关,其系数为负,表明在这一年,相似的居民人均

表 7 中国 31 个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联板块的密度矩阵和像矩阵

Table 7 Density matrix and image matrix of the spatial correlation plate of agricultural carbon emission efficiency in 31 provinces (cities, autonomous regions) of China

板块 Plate	密度矩阵 Density matrix				像矩阵 Like matrix			
	第1板块 First plate	第2板块 Second plate	第3板块 Third plate	第4板块 Fourth plate	第1板块 First plate	第2板块 Second plate	第3板块 Third plate	第4板块 Fourth plate
第1板块 First plate	0.122	0.033	0.788	0.043	0.000	0.000	1.000	0.000
第2板块 Second plate	0.000	0.167	0.200	0.167	0.000	0.000	1.000	0.000
第3板块 Third plate	0.287	0.188	0.286	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000
第4板块 Fourth plate	0.157	0.619	0.107	0.119	0.000	1.000	0.000	0.000

表 8 中国 31 个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络矩阵相关性分析

Table 8 Correlation analysis of the spatial correlation network of agricultural carbon emission efficiency in 31 provinces (cities, autonomous regions) of China

	GL	K	J	S	Z	B	X	P	C
GL	1.000***								
K	-0.060	1.000***							
J	0.120*	0.416**	1.000***						
S	-0.220**	0.448**	0.081	1.000***					
Z	0.130*	0.514***	0.413**	-0.004	1.000***				
B	0.146**	-0.438***	-0.197	-0.510***	0.107	1.000***			
X	0.064	0.462***	0.540***	0.050	0.709***	0.103	1.000***		
P	0.129***	0.540	0.670***	0.026**	0.700*	-0.067	0.796**	1.000***	
C	0.222*	-0.019***	-0.117***	0.073	-0.047***	-0.010	-0.068***	-0.073**	1.000***

GL: 中国31省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络矩阵; K: 科技水平差异矩阵; J: 交通运输水平差异矩阵; S: 居民收入差异矩阵; Z: 第一产业产值差异矩阵; B: 第一产业比重差异矩阵; X: 信息化水平差异矩阵; P: 地区人口差异矩阵; C: 空间邻接矩阵。GL: spatial correlation network matrix of agricultural carbon emission efficiency in 31 provinces (cities and autonomous regions) of China; K: science and technology level difference matrix; J: transport-level difference matrix; S: resident income difference matrix; Z: difference matrix of the output value of the first industry; B: the proportion difference matrix of the first industry; X: information-level difference matrix; P: regional population difference matrix; C: spatial neighbor matrix. ***: $P < 0.01$; **: $P < 0.05$; *: $P < 0.1$.

收入能够促进中国 31 个省(市、自治区)农业碳排放效率产生空间关联。此外,由表 8 可知,大部分解释变量之间存在着显著的相关关系,为此,有必要利用 QAP 回归方法进行分析,以减少多重共线性的影响。

4.2 QAP 回归分析

基于公式 (3), 利用 Ucinet 6.0 软件进行 QAP 回归分析(表 9)。

其中,交通运输水平差异矩阵(J)在 $P < 0.05$ 的统计水平显著,其系数为正。表明各省(市、自治区)交通运输水平的差距能够促进中国 31 个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络的形成。当交通运输水平存在差异时,交通运输水平较好的省(市、自治区)能够更好地从其他省(市、自治区)获取农产品、劳动力等农业生产经营要素,从而促进省(市、自治区)间的要素流通,强化空间关联。

居民收入差异矩阵(S)在 $P < 0.05$ 的统计水平显著,其系数为负。表明各省(市、自治区)居民收入情况越相似,越有利于推动中国 31 个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络形成。居民人均

收入水平反映出各省(市、自治区)的经济发展水平差异。当居民收入水平差异较小时,各省(市、自治区)间的经济发展阶段相似性较高,其农业发展基础、农产品需求情况、环境保护要求等有着较为相似的需要,从而使得劳动力、资金、技术能够较为便捷地在这些阶段相似的省(市、自治区)间流动,从而加强农业碳排放效率的空间关联。

第一产业产值差异矩阵(Z)在 $P < 0.1$ 的统计水平显著,其系数为正。表明各省(市、自治区)第一产业产值的差距能够促进中国 31 个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络的形成。第一产业产值差距越大,各省(市、自治区)间农产品流动可能性越大,这在现实中表现为农业大省的农产品向全国其他省(市、自治区)的供应,而随着农产品贸易的扩散,各省(市、自治区)间空间关联不断强化。

信息化差异矩阵(X)在 $P < 0.1$ 统计水平显著,其系数为负。表明各省(市、自治区)信息化水平越相似,越有利于推动中国 31 个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络形成。其原因可能在于相似

表 9 中国 31 个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络矩阵回归分析

Table 9 Regression analysis of spatial correlation network matrix of agricultural carbon emission efficiency in 31 provinces (cities, autonomous regions) of China

	非标准化系数 Non-standardized coefficient	标准化系数 Standardization coefficient	显著性 Significance	大比例 Proportion as large	小比例 Proportion as small
Intercept	0.200	0.000			
<i>K</i>	-0.065	-0.073	0.247	0.754	0.247
<i>J</i>	0.130	0.156	0.043	0.043	0.958
<i>S</i>	-0.163	-0.179	0.026	0.974	0.026
<i>Z</i>	0.113	0.133	0.098	0.098	0.903
<i>B</i>	0.058	0.068	0.228	0.228	0.773
<i>X</i>	-0.141	-0.165	0.075	0.926	0.075
<i>P</i>	0.110	0.130	0.159	0.159	0.842
<i>C</i>	0.303	0.257	0.000	0.000	1.000

GL: 中国31个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络矩阵; *K*: 科技水平差异矩阵; *J*: 交通运输水平差异矩阵; *S*: 居民收入差异矩阵; *Z*: 第一产业产值差异矩阵; *B*: 第一产业比重差异矩阵; *X*: 信息化水平差异矩阵; *P*: 地区人口差异矩阵; *C*: 空间邻接矩阵。GL: spatial correlation network matrix of agricultural carbon emission efficiency in 31 provinces (cities and autonomous regions) of China; *K*: science and technology level difference matrix; *J*: transport-level difference matrix; *S*: resident income difference matrix; *Z*: difference matrix of the output value of the first industry; *B*: the proportion difference matrix of the first industry; *X*: information-level difference matrix; *P*: regional population difference matrix; *C*: spatial neighbor matrix.

的信息化水平更有利于信息、技术、资金的转移,尤其是农业信息化技术的转移需要一定的信息产业基础,而相似的信息化水平意味着相近的产业基础和人员素质。随着农业信息和技术的转移,农业相关各要素的交流也得到增强,从而强化了农业碳排放效率的空间关联。

空间邻接矩阵(*C*)在 $P < 0.01$ 统计水平显著,其系数为正。表明中国31个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络存在着“俱乐部趋同”现象,省(市、自治区)之间的空间距离越近,农业碳排放效率越容易发生空间关联。其原因在于,距离越近,越能实现各类农业要素的交流与配置。

5 讨论

上文分析结果指出中国31个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络特征明显,这表明随着中国信息网络、交通网络的不断完善,农业碳排放效率相关要素实现了有效的沟通和交流;此外,在研究期间内,该空间关联网络的网络关联性增强,反映出信息和交通网络完善基础上农业碳排放效率相关要素互动的强化。而空间关联网络的驱动因素分析指出,交通运输水平、居民人均收入、第一产业产值、信息化水平、空间距离对农业碳排放效率空间关联网络形成产生了重要影响,这一结果为相关政策制定者提供了改善农业碳排放效率空间关联网络的可行渠道。就本研究分析结果的实际意义而言,能够为相关碳排放问题的解决提供一些有益的思路:在提升农业碳排放效率时,既要考虑其地区内部影响以及周边地区作用,也要重视跨区域的网络效应。

就方法应用而言,本研究在参考现有成果的基

础上,综合利用非期望产出SBM模型、社会网络分析法、QAP模型等模型和方法,实现了关系数据视角下农业碳排放效率空间关联网络结构分析及其驱动因素的探讨,弥补了现有农业碳排放效率研究存在的部分局限。但是,现有方法仍存在可改进空间,如本文仅利用社会网络分析法对2019年的农业碳排放效率空间关联网络的个体结构特征和聚类机构特征进行了分析,在驱动因素的探讨上,也仅利用QAP模型对2019年农业碳排放效率空间关联网络的驱动因素进行了研究,这虽然也是现有研究成果的一般做法,但未能反映出空间关联网络结构在不同时间节点的个体结构特征和聚类结构特征变化。为此,如何实现不同时间节点空间关联网络结构分析,这仍有待进一步的深入探讨。

6 结论与启示

6.1 结论

在对2010—2019年间中国31个省(市、自治区)农业碳排放效率进行测度的基础上,利用社会网络分析法对中国31个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络结构进行分析,并利用QAP模型对该网络的驱动因素进行探讨,得到主要结论如下:

1) 在研究期间内,中国31个省(市、自治区)农业碳排放效率得到较快提升,但是仍有一定改进空间,且各省(市、自治区)间存在较大差距;此外,中国31省(市、自治区)农业碳排放效率的空间效应突破了传统的空间地理邻近限制,在全国范围呈现空间关联网络特征。

2) 在研究期间内,中国31个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络的网络关联性增强,其

网络关系数、网络密度增加,同时网络内部森严的等级关系逐渐松散,网络结构的稳定性也得到较大提升。此外,中国31个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络形成了多个网络中心,这些网络中心对空间关联网络的形成发挥了重要作用,并对其余省(市、自治区)农业碳排放效率产生影响和控制。整体上,东部沿海地区是中国31个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络空间溢出的主要目的地。

3) 交通运输水平、居民人均收入、第一产业产值、信息化水平、空间距离对于中国31个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络的形成产生重要的影响。其中交通运输水平差异和第一产业产值差异有利于推动空间关联网络的形成;相似的居民人均收入和信息化水平以及相近的空间距离能够更好地促进空间关联网络形成。

6.2 启示

农业碳排放效率问题对于我国碳达峰、碳中和目标的实现有着重要意义,结合研究结论,下面就本研究对碳排放问题的启示进行探讨。

1) 中国农业碳排放效率内部存在差距,有着一定的改进空间,且呈现出复杂的空间关联网络特征。为此,在制定农业碳排放效率提升政策时,一方面,要重视区域间协同减排活动的开展,以农业碳排放效率先进地区为中心,设计跨区域低碳农业技术、经验交流协作机制,以缩小各省(市、自治区)间农业碳排放效率的差距;另一方面,应当充分利用农业碳排放效率所具有的空间关联网络特征,通过强化交通网络、完善投资网络、提升信息交流等方式强化各省(市、自治区)的空间关联,并通过发挥网络中心省(市、自治区)对各省(市、自治区)农业碳排放效率的影响,实施重点突破,以点带面,提升农业碳排放效率,以推进农业碳减排活动的开展。

2) 中国农业碳排放效率空间关联网络关联性增强,形成多个网络中心,其中东部地区是网络中各省(市、自治区)农业碳排放效率空间溢出目的地。为此,要结合各省(市、自治区)在空间关联网络中的地位差异,制定针对性的农业碳排放效率提升策略。一方面,位于网络中心的经济发达、技术先进且作为空间溢出主要目的地的东部省(市),既要充分发挥其科技人才优势,推进现代低碳农业发展,并不断优化农业技术装备,积累低碳农业先进经验,以进一步提升本地区农业碳排放效率,同时要借助其对其他省(市、自治区)的影响渠道,通过倡导绿色消费、

进行低碳农业宣传等方式倒逼农产品生产改善及扩散低碳农业观念,以带动其他省(市、自治区)提升农业碳排放效率。另一方面,就位于网络中心的其他省(市、自治区)而言,应当通过吸收东部地区先进技术与经验等方式以积极发展本地低碳农业,并通过提供生态农产品等符合低碳农业要求的绿色产品,满足绿色消费需求并带动地区农业发展;此外,就网络边缘省(市、自治区)而言,既要通过执行严格的环境规制措施或者增加生态补偿等方式推动低碳农业发展,以降低农业碳排放量,同时,也要积极吸纳先进技术、经验以提升农业生产效率和降低农业污染。

3) 中国31个省(市、自治区)农业碳排放效率空间关联网络的形成受到多种因素影响。为此,要充分利用这些驱动因素,增强农业碳排放效率空间关联。一方面,增强信息、交通网络对农业要素流通的支持,要重视交通网络的优化和提升信息化水平,进一步增强优势地区交通运输能力,并加快推进各省(市、自治区)农业信息化发展,以保障劳动力、资金、技术、农产品等要素在全国范围实现高效流通,强化空间关联;另一方面,要加强农产品市场与产地联系,既要多渠道推进地区经济发展,提升居民收入水平,以增强其农产品消费能力、提升其消费层次,使其培养绿色产品消费习惯,又要发挥农业产值较高省(市、自治区)农业生产优势,通过选用优种、测土施肥、施用有机肥等方式提升其农产品产量和质量,增强绿色产品供应,以满足市场不断增加的农产品消费需求和质量要求。

本文相对现有农业碳排放效率研究,在研究视角和研究方法方面实现了拓展,并为我国农业碳排放效率问题的解决提供了一些启示,具有一定的学术价值和实践价值。但是,本文仍存在一些局限,如本文在参考现有研究方法的基础上对最近年份的农业碳排放效率空间关联网络的结构及其驱动因素进行了分析,并得到一些有益结果,但是这些结构特征和驱动因素是否在各年份皆是如此?这点有待进一步考究。此外,各驱动因素对空间关联网络影响的具体作用机理也有待进一步深入探讨。由于研究进展影响,这些局限在本文都没有得到较好的解决,但是这些问题在后期工作中都将得到重视。

参考文献 References

- [1] 黄祖辉,米松华. 农业碳足迹研究——以浙江省为例[J]. 农业经济问题, 2011, 32(11): 40-47, 111

- HUANG Z H, MI S H. Agricultural sector carbon footprint accounting: a case of Zhejiang, China[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2011, 32(11): 40–47, 111
- [2] 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——以湖北省为例[J]. *农业现代化研究*, 2011, 32(6): 752–755
- TIAN Y, ZHANG J B, LI B. Research on spatial-temporal characteristics and factor decomposition of agricultural carbon emission based on input angle — taking Hubei Province for example[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2011, 32(6): 752–755
- [3] 林而达. 气候变化与农业可持续发展[M]. 北京: 北京出版社, 2001
- LIN E D. *Climate Change and Sustainable Development of Agriculture*[M]. Beijing: Beijing Publishing House Group, 2001
- [4] 田云, 王梦晨. 湖北省农业碳排放效率时空差异及影响因素[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(24): 5063–5072
- TIAN Y, WANG M C. Research on spatial and temporal difference of agricultural carbon emission efficiency and its influencing factors in Hubei Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(24): 5063–5072
- [5] 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, 21(8): 80–86
- LI B, ZHANG J B, LI H P. Research on spatial-temporal characteristics and affecting factors decomposition of agricultural carbon emission in China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(8): 80–86
- [6] 田云, 张俊飏. 中国省级区域农业碳排放公平性研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2013, 23(11): 36–44
- TIAN Y, ZHANG J B. Fairness research of agricultural carbon emissions between provincial regions in China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2013, 23(11): 36–44
- [7] 吴昊玥, 黄瀚蛟, 何宇, 等. 中国农业碳排放效率测度、空间溢出与影响因素[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2021, 29(10): 1762–1773
- WU H Y, HUANG H J, HE Y, et al. Measurement, spatial spillover and influencing factors of agricultural carbon emissions efficiency in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(10): 1762–1773
- [8] ZHOU P, ANG B W, HAN J Y. Total factor carbon emission performance: a Malmquist index analysis[J]. *Energy Economics*, 2010, 32(1): 194–201
- [9] 王群伟, 周鹏, 周德群. 我国二氧化碳排放绩效的动态变化、区域差异及影响因素[J]. *中国工业经济*, 2010(1): 45–54
- WANG Q W, ZHOU P, ZHOU D Q. Research on dynamic carbon dioxide emissions performance, regional disparity and affecting factors in China[J]. *China Industrial Economics*, 2010(1): 45–54
- [10] 吴贤荣, 张俊飏, 田云, 等. 中国省域农业碳排放: 测算、效率变动及影响因素研究——基于DEA-malmquist指数分解方法与Tobit模型运用[J]. *资源科学*, 2014, 36(1): 129–138
- WU X R, ZHANG J B, TIAN Y, et al. Provincial agricultural carbon emissions in China: calculation, performance change and influencing factors[J]. *Resources Science*, 2014, 36(1): 129–138
- [11] LIN B Q, FEI R L. Regional differences of CO₂ emissions performance in China's agricultural sector: a Malmquist index approach[J]. *European Journal of Agronomy*, 2015, 70: 33–40
- [12] 吴昊玥, 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, 25(9): 1381–1391
- WU H Y, HE Y Q, CHEN R. Assessment of agricultural carbon emission performance and stochastic convergence in China using SBM-Undesirable model and panel unit root test[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(9): 1381–1391
- [13] 雷振丹, 陈子真, 李万明. 农业技术进步对农业碳排放效率的非线性实证[J]. *统计与决策*, 2020, 36(5): 67–71
- LEI Z D, CHEN Z Z, LI W M. Nonlinear demonstration of agricultural technological progress on agricultural carbon emission efficiency[J]. *Statistics & Decision*, 2020, 36(5): 67–71
- [14] 张广胜, 王珊珊. 中国农业碳排放的结构、效率及其决定机制[J]. *农业经济问题*, 2014, 35(7): 18–26, 110
- ZHANG G S, WANG S S. China's agricultural carbon emission: structure, efficiency and its determinants[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2014, 35(7): 18–26, 110
- [15] 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 and influencing factors of carbon emission efficiency in the agricultural sector: Based on data studies from 32 countries from 1995–2011[J]. *Ecological Economy*, 2018, 34(7): 25–32
- [16] 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, 35(4): 142–148, 185
- GAO M, SONG H Y. Dynamic changes and spatial agglomeration analysis of the Chinese agricultural carbon emissions performance[J]. *Economic Geography*, 2015, 35(4): 142–148, 185
- [17] 马大来. 中国农业能源碳排放效率的空间异质性及其影响因素——基于空间面板数据模型的实证研究[J]. *资源开发与市场*, 2018, 34(12): 1693–1700+1765
- MA D L. Spatial heterogeneity and influencing factors of agricultural energy carbon emission efficiency in China—An empirical research of spatial panel data model[J]. *Resource Development & Market*, 2018, 34(12): 1693–1700+1765
- [18] 李波, 王春好, 张俊飏. 中国农业净碳汇效率动态演进与空间溢出效应[J]. *中国人口·资源与环境*, 2019, 29(12): 68–76
- LI B, WANG C Y, ZHANG J B. Dynamic evolution and spatial spillover of China's agricultural net carbon sink[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2019, 29(12): 68–76
- [19] 伍国勇, 孙小钧, 于福波, 等. 中国种植业碳生产率空间关联格局及影响因素分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(5): 46–57
- WU G Y, SUN X J, YU F B, et al. Spatial correlation pattern and influencing factors of China's crop production carbon productivity[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(5): 46–57
- [20] 蔡海亚, 徐盈之, 赵永亮. 产业协同集聚的空间关联及溢出效应[J]. *统计与决策*, 2021, 37(10): 111–115

- CAI H Y, XU Y Z, ZHAO Y L. Spatial association and spillover effect of industrial collaborative agglomeration[J]. *Statistics & Decision*, 2021, 37(10): 111–115
- [21] 黄杰. 中国互联网金融发展的空间关联研究[J]. *统计与决策*, 2021, 37(12): 127–130
- HUANG J. Research on spatial correlation of China's Internet finance development[J]. *Statistics & Decision*, 2021, 37(12): 127–130
- [22] 张必忠, 傅新红, 张莎莎. 农村消费的空间关联网络特征分析[J]. *农村经济*, 2021(4): 55–62
- ZHANG B Z, FU X H, ZHANG S S. Analysis on the characteristics of the spatial correlation network of rural consumption[J]. *Rural Economy*, 2021(4): 55–62
- [23] 马歆, 高煜昕, 李俊朋. 中国碳排放结构信息熵空间网络关联及影响因素研究[J]. *软科学*, 2021, 35(7): 25–30, 37
- MA X, GAO Y X, LI J P. Research on spatial network correlation and influencing factors of information entropy of carbon emission structure of China[J]. *Soft Science*, 2021, 35(7): 25–30, 37
- [24] 李爱, 王雅楠, 李梦, 等. 碳排放的空间关联网络结构特征与影响因素研究: 以中国三大城市群为例[J]. *环境科学与技术*, 2021, 44(6): 186–193
- LI A, WANG Y N, LI M, et al. Study on the structural characteristics and influencing factors of spatial correlation network of carbon emissions: a case study of three major urban agglomerations in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 44(6): 186–193
- [25] 何艳秋, 陈柔, 朱思宇, 等. 中国农业碳排放空间网络结构及区域协同减排[J]. *江苏农业学报*, 2020, 36(5): 1218–1228
- HE Y Q, CHEN R, ZHU S Y, et al. Spatial network structure of agricultural carbon emission in China and regional collaborative emission reduction[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 36(5): 1218–1228
- [26] 刘华军, 刘传明, 孙亚男. 中国能源消费的空间关联网络结构特征及其效应研究[J]. *中国工业经济*, 2015(5): 83–95
- LIU H J, LIU C M, SUN Y N. Characteristics of spatial associated network structure and its effect of energy consumption in China[J]. *China Industrial Economics*, 2015(5): 83–95
- [27] TONE K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. *European Journal of Operational Research*, 2001, 130(3): 498–509
- [28] 王宝义, 张卫国. 中国农业生态效率的省际差异和影响因素——基于1996—2015年31个省份的面板数据分析[J]. *中国农村经济*, 2018(1): 46–62
- WANG B Y, ZHANG W G. Cross-provincial differences in determinants of agricultural eco-efficiency in China: an analysis based on panel data from 31 provinces in 1996–2015[J]. *Chinese Rural Economy*, 2018(1): 46–62
- [29] 尚杰, 杨果, 于法稳. 中国农业温室气体排放量测算及影响因素研究[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(3): 354–364
- SHANG J, YANG G, YU F W. Agricultural greenhouse gases emissions and influencing factors in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(3): 354–364
- [30] 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
- [31] 田成诗, 陈雨. 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[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(2): 395–410
- TIAN C S, CHEN Y. China's provincial agricultural carbon emissions measurement and low carbonization level evaluation: Based on the application of derivative indicators and TOPSIS[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(2): 395–410
- [32] 程慧, 徐琼, 赵梦亚. 中国旅游生态效率的空间关联网络结构及其影响因素研究[J]. *生态科学*, 2020, 39(5): 169–178
- CHENG H, XU Q, ZHAO M Y. Research on spatial correlation network structure of China's tourism eco-efficiency and its influencing factors[J]. *Ecological Science*, 2020, 39(5): 169–178
- [33] 安勇, 赵丽霞. 土地财政竞争的空间网络结构及其机理[J]. *中国土地科学*, 2020, 34(7): 97–105
- AN Y, ZHAO L X. Spatial network structure of land finance competition and its mechanism[J]. *China Land Science*, 2020, 34(7): 97–105
- [34] 刘军. 整体网分析——UCINET软件实用指南(第2版)[M]. 上海: 格致出版社, 2014
- LIU J. Practical Guide to Overall Network Analysis: UCINET Software (Version 2)[M]. Shanghai: Gezhi Press House, 2014
- [35] ALHAJJ R, ROKNE J. Encyclopedia of Social Network Analysis and Mining[M]. New York: Springer Publishing Company, 2014: 203–216