

长江经济带种植业碳排放效率 空间关联网络结构及动因

吉雪强, 张跃松

(中国人民大学公共管理学院, 北京 100872)

摘要: 基于长江经济带 11 省市数据, 利用非期望产出 SBM 模型测度种植业碳排放效率, 通过修改的引力模型构建空间关联网络, 应用社会网络分析法剖析空间关联网络结构, 利用 QAP 模型分析空间关联网络驱动因素。研究表明: (1) 长江经济带种植业碳排放效率提升较快, 效率较高, 但仍有提升空间, 且存在地区差距, 整体呈现出复杂空间网络特征; (2) 长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络关联性增强, 网络结构稳定性提升, 空间关联网络由上海单极主导演变为江苏、浙江、贵州、上海多中心协同发展格局; (3) 农民人均收入、交通运输水平、空间邻接关系、科技水平、政府农业重视水平对长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络具有重要影响。提升种植业碳排放效率时应考虑空间关联网络结构及其动因影响, 采取有效措施增强种植业碳排放效率空间关联。

关键词: 长江经济带; 种植业碳排放效率; 空间关联网络; 碳达峰; 碳中和

近年来, 温室气体排放引起的全球变暖问题受到了全世界的高度关注, 碳达峰、碳中和已经成为世界主要国家的重要议题^[1]。中国 2022 年《政府工作报告》专门就有序推进碳达峰碳中和工作进行了安排。碳排放问题已经成为中国可持续发展过程中不可忽视的重要问题。长江经济带是中国重大国家战略发展区域^[2], 人口和生产总值均超过全国的 40%, 碳排放及增长率、人均碳排放及增长率也高于全国平均水平。因此, 长江经济带减排目标的实现对于中国生态文明建设具有重要意义^[3]。长江经济带碳排放问题的研究, 既能为长江经济带绿色发展战略落实提供指导^[4], 也能为中国碳达峰、碳中和目标的实现提供参考。

农业是碳排放重要来源, 现有研究指出世界范围内农业碳排放占碳排放总量的 20% 以上^[5]。就中国而言, 农业活动造成的碳排放占碳排放总量的 17%^[6-8]。虽然相对于工业碳排放, 农业碳排放占比较低, 但由于中国碳排放总量巨大, 使得中国农业碳排放的绝对数值依然可观。在此背景下, 农业碳排放研究对于中国碳排放问题的重要作用不容忽视^[9,10]。种植业是农业最基础产业, 虽然相对于畜牧业而言, 种植业碳排放对农业碳排放影响较小, 但是种植业作为中国农业的重要组成部分, 种植业活动带来的碳排放同样是农业碳排放的主要来源^[11,12]。另外, 就种植业碳排放研究的现实意义而言, 种植业碳排放研究可为区域差异化的种植业低碳发展措施提供决策参考^[13], 这对于种植业绿色发展有着重要影响。因此, 无论从种植业碳排放对农业碳排放的重要影响还是从种植业碳排

收稿日期: 2022-01-24; 修订日期: 2022-04-09

基金项目: 国家社会科学基金项目 (17BRK023)

作者简介: 吉雪强 (1996-), 男, 江西吉安人, 博士研究生, 研究方向为农业生态经济、土地经济与政策。

E-mail: 252358980@qq.com

通讯作者: 张跃松 (1970-), 女, 内蒙古赤峰人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为住房保障与政策评价。

E-mail: yuesong51@sina.com

放研究的现实意义来看,种植业碳排放研究的开展都是必要的。

长江经济带是中国种植业发展重点区域^[14]。无论是从种植业产值还是粮食产量亦或耕地面积来看,这一地区对于中国种植业的重要性都不言而喻。另外,长江经济带农业碳排放量更是占到全国的35%^[15],可见这一地区不仅是重要的种植业产区,更是中国农业碳排放的重要来源地。虽然现有研究未直接测算长江经济带种植业碳排放占全国种植业碳排放比例,但综合长江经济带种植业对全国种植业的重要性及长江经济带农业碳排放占全国农业碳排放的比例,可知长江经济带种植业碳排放必然对中国种植业碳排放有着重要影响。为此,长江经济带种植业碳排放研究的开展对于中国种植业碳排放问题的解决具有重要价值。在碳排放研究中,碳排放效率研究具有重要意义,碳排放效率的提升对于解决碳排放问题有着重要作用。农业碳排放效率提升是实现农业碳减排的重要渠道,更是实现农业低碳转型的重要依据^[13]。种植业碳排放效率作为农业碳排放效率的具体表现,其研究的开展将为种植业碳减排活动提供重要支持。长江经济带这一种植业重点地区的种植业碳排放效率研究,将为长江经济带种植业碳减排活动提供科学参考,并为中国碳达峰、碳中和目标的实现提供支持。

就现有研究来看,种植业农业碳排放效率相关研究较为丰富。学者们就农业碳排放效率测度、农业碳排放效率影响因素、农业碳排放效率空间分布等问题进行了深入讨论。在碳排放效率测度方面,学者们主要利用DEA方法^[16-18]对碳排放效率进行测算;也有部分学者将农业碳排放量与经济发展成果的比例作为农业碳排放效率的反映^[19,20]。就研究尺度而言,农业碳排放效率测度尺度包含了国际^[21]、省际^[16]、区域^[22-24]、省份^[17]等多个层面,这些成果较好地反映了各地区农业碳排放效率情况,为相关政策的制定提供了科学支持。在农业碳排放效率影响因素分析方面,学者们深入探讨了农业产业结构、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的影响^[16,17,21]。这些成果为农业碳排放效率的提升及相关减排工作开展提供了参考与支持。随着空间计量技术的发展及区域农业协同减排活动的进行,学者们进一步讨论了农业碳排放效率的空间分布、空间收敛、空间溢出等问题^[16,17,25,26]。这些研究指出农业碳排放效率在邻近地理范围具有空间效应,且就邻近区域内农业碳减排活动相关对策进行了分析。

上述成果显示出种植业碳排放效率相关研究取得的积极进展,这些成果也为农业碳减排活动提供了参考和指导。然而,随着中国区域协调发展战略的深入,区域内人口、技术、资源流动加速,各省市经济社会发展空间关联性不断增强。这一过程中,碳排放空间效应已经突破了传统的地理邻近限制,逐步显现出空间网络特征^[27-30]。受此影响,碳排放效率的空间关联关系也应当不再局限于地理邻近范围,而是随着信息网络和交通网络的完善,逐步在全区域内形成更为复杂的空间关联网络。上述部分研究虽然已经认识到种植业等农业活动碳排放效率所具有的空间效应,并对此进行了一系列分析^[16,17,25,26]。但是这些研究仍存在诸多局限:一是现有农业碳排放效率空间研究仅考虑了两个地区在地理上的“邻近”或“相邻”效应,难以从整体区域层面把握各省市农业碳排放效率的空间关联特征;二是基于“属性数据”而非“关系数据”,使得研究结果未能反映农业碳排放效率空间关联的网络结构特征,而网络结构特征对于空间关联研究具有更大价值^[31];三是未能分析区域农业碳排放效率空间网络关联“关系”的驱动因素。这些局限将影响相关政策设计,并制约区域农业协同减排活动的开展。此外,就现有种植业等农业碳排放效率研究而言,虽然部分学者探索了区域农业碳排放效率问题,如郭四代等^[24]研究了一带一路沿线省份农业

碳排放效率。但是, 现有研究未专门分析长江经济带这一重要区域的农业碳排放效率, 更未有研究专门就长江经济带种植业碳排放效率进行测度并对其空间关联网络问题进行探讨。空间关联网络的形成与发展, 对于区域协调发展以及区域协同减排节能具有重要作用。部分学者指出空间关联网络研究对于区域协同节能机制构建、区域均衡发展具有积极作用^[31,32]; 更有研究直接点明农业碳排放空间关联网络研究对于区域协同减排机制的形成具有重要意义^[30]。因此, 长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络也将对长江经济带种植业协同减排活动产生重要影响。然而, 现有研究未对长江经济带种植业碳排放效率进行测度, 更未能深入分析长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络结构特征及其空间关联网络驱动因素。这无疑不利于长江经济带种植业协同减排机制的实现。

为此, 本文基于关系数据和网络视角, 以长江经济带 11 个省市为研究对象, 利用非期望产出 SBM 模型测度长江经济带种植业碳排放效率, 而后利用社会网络分析法分析长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络结构及其演化过程, 并利用 QAP 模型就该网络的驱动因素进行动态分析, 以期探明长江经济带种植业碳排放效率空间网络结构及其动因, 为长江经济带种植业协同减排活动提供科学参考。这一研究步骤是多数空间关联网络研究的惯例, 即先就各基础要素(如效率)进行分析, 而后构建空间关联网络, 并就空间关联网络结构进行剖析, 最后就空间关联网络结构动因进行探讨^[27-34]。

相对现有农业碳排放效率研究, 本文的边际贡献为: (1) 在研究区域方面, 现有研究未测度长江经济带农业碳排放效率, 更未分析该区域种植业碳排放效率, 而本文就该区域种植业碳排放效率进行研究; (2) 在研究视角方面, 现有研究较少分析农业碳排放效率空间关联网络特征及其动因, 本文则从关系数据和网络视角研究种植业碳排放效率空间关联网络特征及其动因; (3) 在研究方法方面, 现有空间关联网络分析多是对某一年空间关联网络特征及其动因进行分析或某一时期(如整个 10 年)的整体空间关联网络特征及其动因进行探讨, 而本文则对长江经济带 2010—2019 年种植业碳排放效率空间关联网络结构特征进行逐年分析, 深入探讨其动态演化过程。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概况

本文以长江经济带为研究区域, 研究时间为 2010—2019 年。长江经济带覆盖上海、江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南、重庆、四川、云南、贵州等 11 个省市, 面积约 205.23 万 km², 占全国的 21.4%, 人口和生产总值均超过全国的 40%。长江经济带是中国重要的农业区域。根据《长江经济带农业发展报告(2020—2021)》可知: 2017 年长江经济带农业用地总面积约为 168721 千 hm², 约占全国农用地总面积的 26.2%; 2017 年长江经济带耕地面积约为 44909 千 hm², 约占全国耕地总面积的 33.3%; 2020 年长江经济带农业总产值为 58291 亿元, 占全国农业总产值的 42.3%; 2020 年长江经济带粮食总产量约为 23914 万 t, 占全国粮食总产量的 35.7%; 2020 年长江经济带种植业产值为 28889 亿元, 占长江经济带农业总产值的 49.6%, 占全国种植业产值的 40.3%。

1.2 研究方法

1.2.1 种植业碳排放效率分析方法

(1) 非期望产出 SBM 模型

本文利用非期望产出 SBM 模型^[35]测度种植业碳排放效率, 该模型在对非期望产出的

效率测度中得到了广泛应用^[16,36]。模型具体计算公式如下：

$$ACE = \min \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{S_i^-}{X_i}}{1 + \frac{1}{s_1 + s_2} \left(\sum_{r=1}^{s_1} \frac{S_r^g}{Y_r^g} + \sum_{k=1}^{s_2} \frac{S_k^b}{Y_k^b} \right)}, \quad i = 1, 2, \dots, m; r = 1, 2, \dots, s_1; k = 1, 2, \dots, s_2$$
$$\text{subject to } X_0 = X\lambda + S^-$$
$$Y_0^g = Y^g\lambda - S^g$$
$$Y_0^b = Y^b\lambda + S^b$$
$$S^- \geq 0, S^g \geq 0, S^b \geq 0$$

(1)

式中： ACE 为长江经济带各省市种植业碳排放效率值； m 表示所设定的投入指标个数（个）； s_1 和 s_2 分别表示长江经济带种植业碳排放效率的期望产出个数（个）和非期望产出个数（个）； S_i^- 和 X_i 分别表示长江经济带各省市与种植业碳排放效率相关的投入冗余及投入变量； S_r^g 和 Y_r^g 分别表示长江经济带各省市与种植业碳排放效率相关的期望产出不足以及期望产出变量； S_k^b 和 Y_k^b 分别表示长江经济带各省市的非期望产出过剩以及非期望产出变量； λ 表示权重向量； X_0 、 Y_0^g 、 Y_0^b 分别为模型决策单元所对应的实际投入变量、期望产出变量和非期望产出变量值； X 、 Y^g 、 Y^b 分别为决策单元估计需要的投入变量、期望产出变量和非期望产出变量值， S^- 、 S^g 、 S^b 分别表示决策单元对应的投入冗余、期望产出不足与非期望产出过剩。

(2) 种植业碳排放效率投入产出指标体系

参考现有研究对碳排放效率的定义：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^[37,38]。借鉴研究^[16]中对农业碳排放效率指标的设计，构建长江经济带种植业碳排放效率投入产出指标体系，见表1。

其中种植业碳排放量的计算主要参考研究^[39-41]。在计算化肥引起的 N_2O 排放时，本文基于长江经济带各省市施用氮肥和复合肥总数进行计算。在计算过程中，参考已有研究^[41]中的方法，将 CH_4 、 N_2O 折合为二氧化碳当量。由于现有研究已经详细说明种植业碳排放量计算过程，为此，本文不进行赘述。

1.2.2 空间关联网分析方法

空间关联网的理论基础是空间相互作用理论及社会网络理论。Unman^[42]认为空间相

表1 种植业碳排放效率投入—产出指标体系

Table 1 The input-output index system for planting industry carbon output efficiency

一级指标	二级指标	变量及说明
投入指标	种植业劳动力投入	第一产业从业人员×农业总产值/农林牧渔业总产值
	土地投入	农作物总播种面积
	化肥投入	化肥施用量
	农药投入	农药使用量
	农膜投入	农膜使用量
	农业机械动力投入	农业机械总动力
	灌溉投入	有效灌溉面积
期望产出指标	种植业总产值	农业总产值（以2010年为基期，狭义农业）
非期望产出指标	种植业碳排放量	种植业碳排放

互作用是在特定的前提条件下（即存在互补性、可达性和中介机会），在特定空间范围内发生“要素流”形式的动态流动。种植业碳排放效率相关的农业劳动力、涉农资金、农业设备、种植业技术等要素在各省市区存在一定的互补性。各类要素依托长江经济带较为完善的交通网络和信息网络可实现便捷的交流，具有可达性。此外，凭借长江经济带协调发展战略这一中介机会，长江经济带各省市区空间关联关系进一步强化。由于长江经济带各省市区种植业碳排放效率存在空间相互作用力，因此一个省市的种植业碳排放效率相关要素变动会引起另一个乃至多个省市种植业碳排放效率的变化，进而形成以省市为节点的空间网络联结关系。此外，长江经济带种植业碳排放效率相关要素的流动依托于区域内发达的交通网络及信息网络，这使得长江经济带种植业碳排放效率空间关联关系进一步呈现出网络特征。社会网络理论是围绕社会网络这一研究核心发展起来的涉及诸多领域的科学理论。根据社会网络理论，“社会网络”是由作为节点的社会行动者及其间的关系构成的集合^[43]。长江经济带各省市区作为网络节点，在空间相互作用力的影响下，在种植业碳排放效率各类要素的联结下，所形成的种植业碳排放效率空间关联网络，也是社会网络的一种。根据引文中的分析可知，空间关联网络的形成与发展，对区域协调发展以及区域协同减排节能具有重要作用，种植业等农业碳排放空间关联网络研究对于区域协同减排机制的建立具有重要意义。因此，探讨长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络的结构特征也将为长江经济带种植业协同减排活动的开展提供重要支持。社会网络理论形成了关于空间关联网络结构的系统分析方法，以下是具体的方法介绍：

（1）修改的引力模型

社会网络分析是基于空间关联网络矩阵展开。为就种植业碳排放效率空间关联网络结构进行分析，需要先构建种植业碳排放效率空间关联网络矩阵。参考已有研究^[29,44]引入修正的引力模型测度种植业碳排放效率空间关联强度，计算公式为：

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

式中： Q_{ij} 表示第*i*、*j*省市间种植业碳排放效率的引力，以此作为长江经济带各省市区种植业碳排放效率空间关联强度的反映； ACE_i 、 ACE_j 、 AG_i 、 AG_j 、 ag_i 、 ag_j 分别表示第*i*、*j*省市之间的种植业碳排放效率、农业生产总值（狭义农业）（万元）、农业劳动力人均生产总值（狭义农业）（万元）； D_{ij}^2 表示各省市区间的地理距离（以省会距离代替）。据此模型构建长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络矩阵，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。

（2）社会网络分析法

社会网络分析以“关系”作为基本分析单位，是一种针对“关系数据”的跨学科分析方法，在多个领域广泛应用^[31]。在获得种植业碳排放效率空间关联网络矩阵后，参考已有研究^[27-34]，应用社会网络分析法，就长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络整体结构特征、个体结构特征进行分析。公式来源和相关方法的具体介绍参考文献[43, 45]。

空间关联网络整体结构特征主要通过网络关系数、密度、关联度、等级度、效率五个指标进行反映，公式见表2。网络关系数是指网络中各节点产生空间关联关系的数目，网络密度反映网络中各节点关系的紧密程度。种植业碳排放效率空间关联网络的网络关系数和网络密度提高，表明各省市区间的种植业碳排放效率的空间关联性增强，因为

各省市间在种植业碳排放效率相关要素的流动过程中产生了更多的空间关联关系,且这些空间关联关系的密度得到提高。网络关联度测算的是空间关联网络的稳健性。从表2公式可以看出,该指标强调网络内不可达点对数对于空间关联网络的影响。当空间关联网络内存有不可达点对数时,表明网络内部分节点难以联结;当网络关联度为1时,表明长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络内所有节点都可产生空间关联,此时空间关联网络稳健性较强。网络等级度测度的是空间关联网络的非对称可达程度,反映各省市种植业碳排放效率的地位差异。网络等级度处于高值时,表明有一个或少数节点在空间关联网络中居于“领导”角色,对网络内部要素的流动具有“控制”作用。但是,一旦这些“领导”节点出现变故,支撑空间关联网络形成的作用力便会减弱。因此,网络等级度越低,种植业碳排放效率空间关联网络对单个或少数节点的依赖性越低,网络的稳定性越强。网络效率反映的是种植业碳排放效率空间关联网络中网络关联线的多少。网络效率越低,网络关联线越多,空间关联网络越稳定。

空间关联网络个体特征主要通过点度中心度、接近中心度和中介中心度进行反映,公式见表2。点度中心度越高,说明该节点与其他节点有较多的直接关联,表明这一节点居于空间关联网络中心地位,能够对网络中相连的节点产生影响。因此,点度中心度较高的省市在长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络中居于中心地位,能对其他省市种植业碳排放效率产生重要影响。接近中心度测量的是网络中一节点不受其他节点“控制”的能力,接近中心度越高,表明其在网络中与其他节点的距离越近,传递信息和推动要素流动的优势更明显。因此,接近中心度较高的省市在长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络中更容易实现种植业碳排放效率相关要素交流。中介中心度反映的是节点在空间关联网络中的中介作用,当某一节点处于许多节点对的捷径上,其中介中心度就越高。一般而言,中介中心度较高省市对其他省市种植业碳排放效率的调节作用较强。

1.2.3 QAP模型

社会网络分析所涉及变量均为关系数据,变量间可能存在多重共线性,难以判定干扰项是否服从正态分布。而QAP (Quadratic Assignment Procedure) 模型对于关系数据的分析更为稳健^[46]。为进一步揭示长江经济带种植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^[27-34,44],构建QAP模型如下:

$$GL=f(J、T、X、S、G、C) \quad (3)$$

表2 网络整体结构与个体结构特征指标

Table 2 Index of overall structure and individual structure characteristics of networks

整体结构特征	公式	个体结构特征	公式
网络密度 D	$D=L[N(N-1)]$	点度中心度 C_{RD}	$C_{RD}=n/(N-1)$
网络关联度 C	$C=1-2V/[N(N-1)]$	接近中心度 C_{AP}	$C_{AP}=\left(\sum_{j=1}^n d_{ij}\right)/(N-1)$
网络等级度 H	$H=1-K/\max K$	中介中心度 C_{RB}	$C_{RB}=\left[2\sum_{j=1}^N\sum_{k=1}^N b_{jk}(i)\right]/(N^2-3N+2)$
网络效率 NE	$NE=1-M/\max M$		

注: N 表示种植业碳排放效率空间关联网络中的节点总数(个); L 表示实际关联数(个); V 表示网络内部不可达点对数(个); K 与 $\max K$ 分别表示对称可达点对数及最大对称可达点对数(个); M 与 $\max M$ 分别表示节点间多余联系数及最大可能多余联系数; n 表示网络中与某特定节点相连的其他节点的数目(个); d_{ij} 表示成员 i 与成员 j 之间的捷径距离, $j \neq i$ 且 $j < k$; $b_{jk}(i)=g_a(i)/g_a$,表示经过节点 i 并且连接节点 j 与成员 k 的捷径数 $g_a(i)$ 与这两节点之间捷径总数 g_a 之比。

式中：因变量 GL 为长江经济带种植业碳排放效率空间关联网矩阵；自变量为科技水平差异矩阵 (J)、交通运输水平差异矩阵 (T)、信息化水平差异矩阵 (X)、农民人均收入差异矩阵 (S)、政府农业重视水平差异矩阵 (G)、空间邻接矩阵 (C)。科技水平是种植业发展的重要支持，也是种植业效率的重要影响因素，低碳技术的发展能有效降低种植业碳排放，而耕种技术和农业机械的进步则能提升种植业产值。因此，科技水平的差异会为区域不同省市间的技术溢出提供可能，从而加强种植业碳排放效率的空间网络联系。所以，本文认为科技水平会对种植业碳排放效率空间关联网产生影响。地区间的相互联系及种植业相关各类要素的流动依赖于交通网络和信息网络，为此，交通运输水平差距和信息化水平差距对种植业碳排放效率空间关联网会产生重要影响。农业劳动力是种植业发展的基础要素，而收入差距是推动劳动力流动的重要因素，因此，该因素会对种植业碳排放效率空间关联网的形成产生影响。政府对农业的重视程度会影响到种植业的物资投入和资金投入，也会影响到相关低碳技术的应用，进而对种植业碳排放效率及其空间相互作用产生作用，因此，该因素会对种植业碳排放效率空间关联网的形成产生影响。种植业碳排放效率相关要素的流动会受到空间距离影响，通常认为临近省市间相互作用更强，更有可能形成空间关联。

其中，科技水平以各省市国内三种专利授权数作为替代变量；交通运输水平以各省市货运量作为替代变量；农民人均收入以各省市农村居民家庭人均纯收入作为替代变量；信息化水平以各省市邮电业务总量作为替代变量；政府农业重视水平以各省市农林水事务支出与一般预算支出比例作为替代变量；空间邻接关系采用0-1法则，两省市邻接记为1，否则为0。

1.3 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，长江经济带各省市间距离，利用ArcGIS软件distance功能，结合长江经济带各省会（上海、重庆以本市坐标）地理坐标进行计算。

2 结果分析

2.1 长江经济带种植业碳排放效率分析

利用DEA-SOLVER Pro 5.0软件测度长江经济带种植业碳排放效率，结合式（1），计算得2010—2019年长江经济带各省市种植业碳排放效率（表3）。

整体而言，长江经济带种植业碳排放效率逐年提升，均值由2010年的0.506提升至2019年的0.869，提升了71.7%，表明长江经济带种植业活动带来的经济效益提升的同时，种植业活动产生的碳排放量相对有所降低。究其原因，一方面可能是近年来长江经济带农业面源污染治理活动下化肥、农药施用量下降从而减少了二氧化碳排放，另一方面可能是种植业技术发展提升了产量从而提高了种植业总产值。就2019年情况来看，长江经济带种植业碳排放效率均值为0.869，表明在对应技术水平与投入要素条件下长江经济带还可减少13.1%的种植业碳排放量。就各省市情况来看，2019年长江经济带多数省市种植业碳排放效率达到了效率前沿。但是，安徽、江西、云南三个省份仍未达到效率前沿，且这三省份效率值较低，反映各省市碳排放效率仍有差距，长江经济带种植业碳排放效率内部协调性仍有待提高。综合来看，长江经济带种植业碳排放效率提升较快，整体效率较高，但仍有改进空间，且存在地区差距。

表3 长江经济带种植业碳排放效率值
Table 3 Carbon emission efficiency value of planting industry in the Yangtze River Economic Belt

省市	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年
安徽	0.326	0.327	0.341	0.337	0.355	0.375	0.392	0.427	0.443	0.465
贵州	0.366	0.337	0.365	0.416	0.440	0.468	0.525	0.576	0.759	1.000
湖北	0.526	0.541	0.556	0.577	0.594	0.638	0.704	0.791	0.880	1.000
湖南	0.522	0.540	0.528	0.524	0.547	0.581	0.602	0.653	0.704	1.000
江苏	0.562	0.582	0.608	0.635	0.663	0.726	0.757	0.837	0.891	1.000
江西	0.295	0.305	0.306	0.360	0.371	0.386	0.414	0.450	0.500	0.557
上海	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.907	0.822	0.874	1.000	1.000
四川	0.564	0.583	0.604	0.629	0.653	0.669	0.776	0.816	0.893	1.000
云南	0.314	0.321	0.318	0.331	0.342	0.360	0.384	0.409	0.472	0.537
浙江	0.588	0.596	0.589	0.601	0.637	0.673	0.755	0.826	0.890	1.000
重庆	0.503	0.515	0.542	0.574	0.598	0.649	0.728	0.804	0.848	1.000
均值	0.506	0.513	0.523	0.544	0.564	0.585	0.623	0.678	0.753	0.869

2.2 长江经济带种植业碳排放效率空间关联矩阵结构分析

基于上文测度的长江经济带种植业碳排放效率，结合式（2）计算得长江经济带种植业碳排放效率引力，而后构建长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络矩阵。利用Ucinet 6.0软件的Netdraw功能结合空间关联网络矩阵数据绘制2010—2019年长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络拓扑图（图1）。由图1可知，2010—2019年长江经济带各省市都被纳入长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络之中，各省市的空间关联关系没有局限于地理邻近范围，而是在区域内形成网络状空间关联关系。这显示出长江经济带种植业碳排放效率空间关联关系的广泛性，这一网络特征也将影响相关政策效果。为此，有必要对长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络的结构特征进行深入分析。

2.2.1 空间关联网络整体结构特征

利用Ucinet 6.0软件计算得到长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络整体结构特征指标具体值（表4）。由图1和表4可知，2010—2019年间长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络内部关系数和密度都有较大程度提升。网络关系数由2010年的13个增加到2019年的37个，网络密度也由2010年的0.118提升至2019年的0.336，反映出长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络关联性的增强，表明长江经济带各省市种植业碳排放效率的空间相互作用得到强化。其中，网络关系数和网络密度在2016年提升幅度最大，可能是由于2016年《长江经济带发展规划纲要》的正式印发，促进了长江经济带各省市要素调配流通，增强了长江经济带内部关联。虽然，2010—2019年间网络关系数有所增长，但相对于长江经济带各省市间最大可能关系总数110个（11×10），仍有较大差距，因此，长江经济带种植业碳排放效率的空间关联关系还有着较大提升空间。当网络关系数增多，网络内各节点的空间关联关系不断建立，涉农劳动力、资金、信息、技术等要素将实现充分交流，就这一意义而言，网络关系数应当越多越好。若长江经济带11个省市间都形成了充分的空间关联关系（总共110个），那么依托充分的信息交流和便捷的要素流动渠道，长江经济带将实现种植业碳排放效率相关各类要素的最佳配置。此外，网络密度的提升虽然有利于增强长江经济带各省市间种植业碳排放效率的相互作用，但是网络密度的提升也可能带来冗余连线的增多。一旦冗余超过种植业碳排放效率

表4 长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络整体结构特征指标
Table 4 Overall structure characteristic index of carbon emission efficiency of planting industry
in Yangtze River Economic Belt

年份	网络关系数/个	网络密度	网络关联度	网络等级度	网络效率
2010	13	0.118	1	0.900	0.978
2011	14	0.127	1	0.905	0.956
2012	21	0.191	1	0.889	0.822
2013	26	0.236	1	0.744	0.733
2014	23	0.209	1	0.744	0.800
2015	29	0.264	1	0.571	0.689
2016	38	0.346	1	0.569	0.556
2017	39	0.355	1	0.462	0.556
2018	39	0.355	1	0.462	0.556
2019	37	0.336	1	0.333	0.578

率空间关联网络由上海单极主导逐渐过渡为上海、江苏、浙江、贵州多中心协同发展格局。随着网络内等级结构的瓦解，各省市碳排放效率间的空间相互作用也得到强化。该现象一方面是由于长江经济带协调发展过程中各省市经济发展差距缩小，上海单一经济中心的吸引力降低，使得各类要素在向上海流动的同时也向着经济实力同样较强的江苏、浙江等新中心流动；另一方面则是西部大开发政策扶持下促进了长江经济带西部省市发展，增强了长江经济带西部的贵州等地在空间关联网络中的作用。相对于长江经济带其他省市，贵州经济发展水平不高，但却是长江经济带经济增长最快的省市。2019年贵州GDP增速为8.3%，比长江经济带平均水平高1.1%。当一地区经济迅速发展时，该地区便具有较强的吸引力，得以汇集其他地区种植业碳排放效率相关的劳动力、资金、技术等要素。由图1可知，湖南、四川等地要素向着贵州进行流动，这可能是由于贵州经济发展为湖南和四川的资金与劳动力等要素提供了市场和机遇。

网络效率整体呈现下降趋势，由2010年的0.978下降至2018年的0.578，反映出空间关联网络内部关联线的增加，同样表明长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络稳定性的提升，其原因可能是区域协调发展政策的引导。此外，市场机制下长江经济带内部协作水平的提高也会提升其网络效率。

2.2.2 空间关联网络个体结构特征

利用Ucinet 6.0软件计算得到长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络个体结构特征指标，即点度中心度（表5）、接近中心度（表6）、中介中心度（表7）。

由表5可知，2010—2012年间上海是长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络的单一中心，点度中心度为100，远高于其他省市，这一阶段上海对长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络的形成与稳定起着关键作用。根据前文可知，点度中心度越高，该节点与其他节点的直接关联便越多，在网络中便拥有越多权力，越可能对空间关联网络产生重要影响。上海作为要素流入地，与长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络中所有节点产生关联，并可借助这一关联关系对其他节点产生作用。2013—2015年间上海仍然是长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络的中心，点度中心度为90。但是这一阶段，江苏在空间关联网络中的作用不断增强，逐渐成为空间关联网络又一中心；2015年时，江苏的点度中心度更是达到了80，成为空间关联网络中又一要素流入地，并逐渐分化了上海对于长

表5 长江经济带种植业碳排放效率空间关联网点度中心度

Table 5 Degree centrality of spatial correlation network of carbon emission efficiency of planting industry in Yangtze River Economic Belt

省市	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年
安徽	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	30.000	30.000	40.000	30.000
贵州	10.000	20.000	30.000	30.000	30.000	50.000	50.000	70.000	70.000	70.000
湖北	10.000	10.000	30.000	30.000	20.000	20.000	30.000	40.000	40.000	50.000
湖南	10.000	10.000	30.000	30.000	30.000	40.000	40.000	40.000	40.000	30.000
江苏	20.000	20.000	40.000	70.000	60.000	80.000	90.000	90.000	100.000	90.000
江西	10.000	10.000	20.000	30.000	30.000	30.000	30.000	40.000	40.000	40.000
上海	100.000	100.000	100.000	90.000	90.000	90.000	90.000	80.000	80.000	60.000
四川	10.000	20.000	20.000	30.000	30.000	30.000	50.000	40.000	40.000	30.000
云南	10.000	10.000	10.000	30.000	20.000	40.000	50.000	40.000	30.000	40.000
浙江	10.000	10.000	40.000	50.000	30.000	40.000	90.000	80.000	80.000	90.000
重庆	10.000	10.000	20.000	30.000	20.000	40.000	50.000	50.000	40.000	50.000
均值	20.000	21.818	32.727	40.000	34.545	43.636	54.545	54.545	54.545	52.727

表6 长江经济带种植业碳排放效率空间关联网接近中心度

Table 6 Closeness centrality of spatial correlation network of carbon emission efficiency of planting industry in Yangtze River Economic Belt

省市	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年
安徽	10.000	10.000	12.195	43.478	38.462	45.455	55.556	52.632	58.824	58.824
贵州	9.091	10.000	11.111	11.111	11.111	58.824	55.556	66.667	66.667	41.667
湖北	9.091	9.091	9.091	9.091	9.091	9.091	10.000	37.037	37.037	35.714
湖南	9.091	9.091	9.091	9.091	9.091	9.091	10.000	9.091	9.091	30.303
江苏	10.000	10.000	12.500	71.429	58.824	76.923	90.909	90.909	100.000	90.909
江西	9.091	9.091	9.091	50.000	50.000	50.000	52.632	55.556	55.556	52.632
上海	100.000	100.000	100.000	90.909	90.909	90.909	90.909	83.333	76.923	71.429
四川	9.091	9.091	9.091	9.091	9.091	9.091	10.000	9.091	9.091	9.091
云南	9.091	9.091	9.091	9.091	9.091	9.091	9.091	9.091	9.091	9.091
浙江	52.632	52.632	62.500	62.500	55.556	58.824	71.429	76.923	76.923	90.909
重庆	9.091	9.091	10.989	10.989	10.989	41.667	55.556	55.556	52.632	32.258
均值	21.479	21.562	23.159	34.253	32.020	41.724	46.513	49.626	50.167	47.530

江经济带种植业碳排放效率空间关联网的绝对影响力。2016—2019年间浙江、贵州逐渐成为新的中心。2019年时，长江经济带种植业碳排放效率空间关联网形成了江苏、浙江、贵州、上海四个中心，这些省市2019年点度中心度为90、90、70、60，高于均值，成为空间关联网内要素流入地，与长江经济带种植业碳排放效率空间关联网中与其他省市产生紧密关联，并对其他省市种植业碳排放效率产生重要作用。

整体而言，2010—2019年间长江经济带种植业碳排放效率空间关联网逐渐由单极主导演变为多中心格局，虽然东部地区仍是空间关联网中心，但西部也逐渐得到发展，整体上长江经济带东西部发展均衡性有所加强，这一变化可能是由于地区经济发展和区域协调发展政策的影响。2010年左右，上海是长江经济带最发达区域，劳动力、资

表7 长江经济带种植业碳排放效率空间关联网中介中心度

Table 7 Betweenness centrality of spatial correlation network of carbon emission efficiency of planting industry in Yangtze River Economic Belt

省市	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年
安徽	0.000	0.000	0.000	3.333	3.333	5.556	5.556	7.037	7.778	3.704
贵州	0.000	0.000	1.111	1.111	1.111	11.111	0.833	4.815	4.815	19.907
湖北	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.370	0.741	17.037
湖南	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.556	0.000	0.000	0.000
江苏	0.000	0.000	2.222	10.000	10.000	10.000	4.444	5.000	4.259	5.278
江西	0.000	0.000	0.000	4.444	8.889	2.222	0.278	12.037	11.481	23.981
上海	10.000	10.000	6.667	17.778	24.444	30.556	23.148	14.630	15.370	3.704
四川	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.370	0.000	0.000	0.000
云南	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
浙江	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	7.500	13.519	12.963	33.056
重庆	0.000	0.000	0.000	2.222	0.000	0.556	0.648	1.481	0.370	2.222
均值	0.909	0.909	0.909	3.535	4.343	5.455	3.939	5.354	5.252	9.899

金、技术密集，种植业碳排放效率处于前沿，其能够通过吸引涉农劳动力、吸纳各类农产品、扩散农业技术、工商资本下乡等方式对长江经济带各省市种植业活动产生重要影响。但是，由于承载能力限制，上海难以吸纳不断增加的各类要素。随着长江经济带区域协调发展政策实施，各类上海难以吸纳的要素在东部向着江苏、浙江等具有较强吸纳能力的省份进行流动，在西部则向着有政策支持且经济发展迅速的贵州流动，这些变化使得长江经济带种植业碳排放效率空间关联网逐渐由上海单极主导演变为多中心格局。

由表6可知，2010—2012年间仅仅只有上海和浙江的接近中心度高于均值。2013年开始，接近中心度高于均值的省市数量增多。2013—2014年间接近中心度高于均值的省市有5个，为上海、江苏、浙江、江西、安徽，2015年增加了贵州，2016年增加了重庆。2017—2018年间该名单没有变动，2019年则减少了贵州与重庆。当接近中心度高于均值时，表明该省市在长江经济带种植业碳排放效率空间关联网中发挥着网络中心行动者的作用，能与其他省市在空间关联网中更快产生关联，能更好地获取与输出相关要素，并进一步对其他省市种植业碳排放效率产生影响。其中，上海、江苏、浙江主要是通过接纳劳动力、农产品等要素流入，而后通过向外部进行投资和技术输出以对长江经济带其他省市的种植业碳排放效率产生影响。此外江苏、浙江、上海等经济发达省市的绿色消费习惯也将影响农产品供应省市的生产活动，引导农产品产地实施绿色生产，从而推动种植业碳排放的减少。安徽和江西则主要是通过输出劳动力等要素以及吸收先进技术而与其他省市产生关联。接近中心度低于均值时，表明这些省市难以影响其他省市的种植业碳排放效率。2019年贵州与重庆的接近中心度由之前的高于均值变为低于均值，意味着这两省市在长江经济带种植业碳排放效率空间关联网中与其他省市的“接近”程度下降。重庆可能是由于其发展相对长江经济带东部省市而言达到阶段性阈值，难以有效吸收其他省市的要素转移；贵州可能是由于其逐渐成为网络要素流入地，减少了对外要素输出，一定程度上影响了对外关联。

由表7可知，2010—2012年间上海是唯一一个中介中心度高于均值的地区，这一时期上海是长江经济带种植业碳排放效率空间关联网的绝对中心。这一阶段，空间关联

网络中各类要素都流入上海, 上海成为网络中的唯一“桥梁”, 并对长江经济带其余各省市种植业碳排放效率产生影响。2013年和2014年除上海外, 江西与江苏中介中心度也高于当年均值; 2015年在2014年基础上中介中心度高于均值的省份增加了贵州和安徽; 2016年中介中心度高于均值的省市为安徽、江苏、上海、浙江。2017年在2016年的基础上减少了江苏增加了江西; 2018年中介中心度高于均值的省市与2017年一样; 2019年中介中心度高于均值的省市为安徽、贵州、江西、浙江。当省市中介中心度高于均值时, 这一省市能够较好地对其他省市种植业碳排放效率产生中介作用。江苏、浙江、上海等省市是长江经济带空间关联网络中的要素集聚地, 各类要素在此处进行交易, 而后向着其他地区扩散。由于这些省市经济发达、技术先进且交通网络与信息网络相对其他地区更为完善, 因此, 这些地区可以为要素间交流提供信息、技术等多方面的支持, 所以能够成为空间关联网络中的交流“桥梁”。安徽、江西等省份的中介中心度得以逐渐高于均值, 主要是由于这些地区在区域协调发展的过程中逐渐成为空间关联网络内重要的涉农劳动力及农产品输出地区, 其借助向发达地区输出要素进而对部分省市的种植业生产活动及其碳排放产生影响; 而且, 这两个地区也是长江经济带东西部进行资金、技术、产品流通的中转地。贵州的中介中心度提升, 主要是因为随着其或者精辟经济的迅速发展, 其对周边要素的吸引力逐渐提升。此外, 贵州处于长江经济带西部地区中心, 也使得贵州成为周边要素交流的枢纽。

2.3 长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络动因分析

2.3.1 QAP相关性分析

在进行QAP回归分析前, 研究首先通过Ucinet 6.0软件对变量的相关性进行分析, 结果见表8。由表8可知, 自变量在一定年份内都与长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络产生了相关关系, 表明这些变量对于长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络的形成可能发挥了一定作用。因此, 本文自变量的选取具有一定的合理性。由表中数据可知, 各自变量与空间关联网络的相关性的显著情况在不同年份具有差异, 反映出不同年份长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络的主要动力存在差异。为此, 对长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络驱动因素的研究不能仅就一年情况进行分析, 应当对其进行动态分析, 剖析驱动因素的年际变化。另外, 为了解自变量之间可能的相关关系, 研究进一步对自变量间相关关系进行了QAP相关分析(出于版面考虑未进行展示), 其结果显示多数自变量之间具有相关性, 且相关系数较为显著。因此, 为避免多重共线性影响, 有必要利用QAP回归方法进行分析。

2.3.2 QAP回归分析

基于式(3), 利用Ucinet 6.0软件进行QAP回归分析, 结果见表9。由表9可知, 在2010—2019年间, 长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络QAP回归分析的调整后可决系数全部超过30%, 表明地区科技水平、交通运输水平、农民人均收入水平、信息化水平、政府农业重视水平差异矩阵以及空间邻接矩阵能够解释长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络变化的30%以上, 个别年份甚至超过40%, 整体解释性较强。

其中科技水平差异矩阵在部分年份显著。2010—2015年间, 当科技水平差异矩阵显著时(2011年、2012年、2014年), 其系数持续为正, 表明省市间科技水平差距越大越有利于长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络形成。这可能是因为在长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络发展前期, 各省市间科技水平存在较大差距。此时, 技术

表8 长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络QAP相关性分析

Table 8 QAP correlation analysis of spatial correlation network of carbon emission efficiency in Yangtze River Economic Belt

自变量	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年
<i>J</i>	-0.510**	-0.249	-0.303	-0.413**	-0.293	-0.365**	-0.451**	-0.345*	-0.414*	-0.606***
<i>T</i>	0.165	0.184	0.072	-0.041	-0.046	-0.082	-0.177	-0.065	-0.153	-0.302*
<i>X</i>	-0.408*	-0.383	-0.450**	-0.514**	-0.448**	-0.360*	-0.567***	-0.303*	-0.272	-0.601*
<i>S</i>	-0.535***	-0.501**	-0.585***	-0.668***	-0.572***	-0.606**	-0.628***	-0.570***	-0.570***	-0.307***
<i>G</i>	0.337	0.374	0.479**	0.162	0.199	0.366*	0.479**	0.474**	0.458**	0.211**
<i>C</i>	0.030	0.067	0.085	-0.044	0.003	-0.044	0.035	-0.019	0.061	0.361**

注：***、**、*分别表示 $P < 0.01$ 、 $P < 0.05$ 、 $P < 0.1$ ；本文假设 $P < 0.1$ ，便是显著。自变量为科技水平差异矩阵(*J*)、交通运输水平差异矩阵(*T*)、信息化水平差异矩阵(*X*)、农民人均收入差异矩阵(*S*)、政府农业重视水平差异矩阵(*G*)、空间邻接矩阵(*C*)，下同。

表9 长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络QAP回归分析

Table 9 QAP regression analysis of the spatial correlation network of carbon emission efficiency in planting industry in the Yangtze River Economic Belt

自变量	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年
<i>J</i>	-0.054	0.333**	0.239**	0.140	0.180*	0.044	-0.086	-0.014	-0.003	-0.440***
<i>T</i>	0.257*	0.209**	0.167**	0.098	0.126*	0.108	0.087	0.082	0.002	0.006
<i>X</i>	-0.181	-0.118	-0.137	0.005	0.024	0.122	0.213	0.226	0.055	0.117
<i>S</i>	-0.295*	-0.656***	-0.513***	-0.778***	-0.791***	-0.733***	-0.810***	-0.764***	-0.605**	-0.371**
<i>G</i>	-0.048	-0.062	0.166**	-0.051	-0.156**	0.084	0.058	0.027	0.049	0.037
<i>C</i>	0.064	0.114**	0.129**	0.021	0.081	0.007	0.059	0.036	0.097	0.198**
R^2	0.382***	0.408***	0.442***	0.445***	0.360***	0.382***	0.382***	0.325***	0.305***	0.429***

落后地区种植业部门对低碳技术等先进科技的需求促进了空间关联关系的形成。2015年后，科技水平差异矩阵系数持续为负，尤其是2019年该系数更是在1%的统计水平上显著。表明在这一阶段，科技水平差距越小，越有利于长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络形成。该现象可能是由于空间关联网络经过一段时间发展，各省市间的科技水平差距随着前期的技术溢出已经逐渐缩小。此时，长江经济带各省市间的科技交流，更多的是同层次的科技互动。由于相似科技水平的省市间产业技术基础和人员科技素质等因素较为类似，因此相似科技水平的省市之间能够更好地实现包括种植业低碳生产技术在内的各类科技的交流，从而促进空间关联网络形成。

交通运输水平差异矩阵在部分年份显著，且系数持续为正，表明交通运输水平的差距在一些年份促进了长江经济带种植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，交通运输状况较好的地区可实现较快发展，能更好地从其他地区获取种植业产品、涉农劳动力等要素，从而形成以该地区为中心的空间关联网络。信息化水平差异矩阵在任何一年都未能显著，表明信息化发展虽然与长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络具有相关关系，但是对空间关联网络的影响较为有限。

农民人均收入差异矩阵在各年份都显著，且系数持续为负，表明长江经济带各省市经济发展水平差异越小，农民收入情况越相似，越有利于推动长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络形成。一方面，收入差距越小，表明经济发展阶段越相似，对于种植

业发展和种植业环境改善越有着类似的需求,从而影响到种植业碳排放效率间的相互作用。此外,当两地经济发展阶段相似时,两地种植业发展对于涉农劳动力、种植业相关技术要素具有相似的需求。而相似的需求便于两地间劳动力的流动及技术的交流,进而有利于促进地区间关联关系的形成。例如,湖南与湖北的种植业结构较为相似,农户日常生产所面对的自然情况和农产品的品种及使用的农业技术较为类似。因此,湖南种植业相关人员可较快地适应湖北种植业活动环境。但是,湖南种植业相关人员可能由于缺少数字农业工作经验或对地区自然环境的不了解,而难以满足上海农业生产对人员的要求,从而难以实现劳动力在两地种植业活动中的流动(假设不考虑其他因素)。

政府农业重视水平差异矩阵仅仅在2012年和2014年显著。其中2012年该变量系数为正,表明政府对农业的重视水平差异越大,越有利于长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络形成,这可能是由于政府农业重视水平差异一定程度上反映出各地区经济发展差距。政府对农业的重视水平差异越大,表明地区产业结构及经济发展阶段的差距越大。一般情况下产业结构间的差异有利于地区间产生互补性的要素流通,从而推进空间关联关系形成。此时,上海是长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络唯一中心,上海与其他省市的产业结构差异较大,与其他省市的互补性较强,能够通过向外进行技术和资金转移以及获取外省市农产品和工业原材料而与其他省市形成空间关联。2014年,政府对农业重视水平差异矩阵的系数为负,表明政府农业重视程度差异越小,越能促进空间关联网络形成。随着经济发展和前期的省市互动,空间关联网络内各省市发展差距有所减小,网络绝对中心地位的下降也促进了其余省市间相互的要素流动。此时,政府农业重视水平越接近,产业发展差异越小,越有利于两地间空间关联关系形成。因为相似的产业发展阶段,使得两地间的涉农劳动力和涉农技术交流具有更好的基础。

空间邻接矩阵在部分年份显著,且系数持续为正,表明省市距离越近,两地区就越有可能产生空间关联。因为,距离越近,种植业碳排放效率相关的农资、劳动力、技术等要素的流动成本越低。此外,一般情况下,距离相近地区经济发展水平等也较为相似,根据上文分析可以发现,经济水平差异越小,一定程度上越有利于空间关联关系的形成。

3 结论与启示

在对2010—2019年间长江经济带种植业碳排放效率进行测度的基础上,利用社会网络分析法分析长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络结构及其演化过程,并利用QAP模型就该网络的驱动因素进行动态分析,得到主要结论如下:

(1) 长江经济带种植业碳排放效率提升较快,整体效率值达到了较高水平,但是仍有一定改进空间,且地区间存在差距。此外,长江经济带种植业碳排放效率的空间效应突破了传统空间地理邻近范围,在整体上呈现出复杂的空间网络特征。

(2) 长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络的关联性增强,网络关系数、网络密度增加,网络结构的稳定性也得到较大提升。同时,长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络由上海单极主导演变为江苏、浙江、贵州、上海多中心协同发展格局,东西发展协调性有所增强。

(3) 长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络驱动因素在不同年份存在差异。科技水平差距、交通运输水平差距、农民人均收入差距、政府农业重视水平差距、空间邻接关系对于长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络的形成具有重要影响。

相对现有研究,本文在研究区域和研究视角、方法等方面实现了拓展。研究结果表明长江经济带种植业碳排放效率具有空间关联网络特征。根据相关研究^[30-32]可知空间关联网络的形成对于区域协调发展及区域协同减排节能具有重要意义。因此,在长江经济带种植业区域协同减排政策设计的过程中,应当考虑空间关联网络结构特征可能造成的影响。此外,在研究中,长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络的网络关系数有所增加,但离最大关系数仍有差距。因此,长江经济带协调发展战略仍需要进一步深入。建议在相关战略制定过程中将长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络驱动因素纳入考虑范围,采取有效措施以增强各省市间关联关系,促进各类要素在长江经济带充分流动。另外,本文存在一些局限有待未来进行深入分析。如,长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络是否受到区域外因素的影响?其网络结构是否会在外部省市的冲击下发生变动?长江经济带东西方向跨度较大,不同的自然、经济、社会条件对空间关联网络会产生什么样的影响?如何根据长江经济带东西区域特性制定更为详细的农业碳减排策略?这些问题由于篇幅和研究进展所限,尚未进行探讨。还有,在动因分析中,虽然就部分因素对长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络的作用进行了分析,但是仅仅是对其作用效果可能的原因进行了简单讨论,内部作用机理仍有待深入研究。为此,后期将进一步对这些问题进行探讨。

参考文献(References):

- [1] 黄贤金,张秀英,卢学鹤,等.面向碳中和的中国低碳国土开发利用.自然资源学报,2021,36(12):2995-3006. [HUANG X J, ZHANG X Y, LU X H, et al. Land development and utilization for carbon neutralization. Journal of Natural Resources, 2021, 36(12): 2995-3006.]
- [2] 董又铭,郭炎,李志刚,等.长江经济带乡村性的时空分异格局及驱动机制.自然资源学报,2022,37(2):378-395. [DONG Y M, GUO Y, LI Z G, et al. Spatio-temporal differentiation and driving mechanism of rurality in the Yangtze River Economic Belt. Journal of Natural Resources, 2022, 37(2): 378-395.]
- [3] 黄国华,刘传江,赵晓梦.长江经济带碳排放现状及未来碳减排.长江流域资源与环境,2016,25(4):638-644. [HUANG G H, LIU C J, ZHAO X M. Tstatus quo of carbon emission and future carbon emission reduction for the Yangtze River Economic Zone. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(4): 638-644.]
- [4] 杜耘.保护长江生态环境,统筹流域绿色发展.长江流域资源与环境,2016,25(2):171-179. [DU Y. Protecting the eco-environment, and striving for the green development in the Yangtze River Economic Basin. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(2): 171-179.]
- [5] 林而达.气候变化与农业可持续发展.北京:北京出版社,2001. [LIN E D. Climate Change and Sustainable Development of Agriculture. Beijing: Beijing Press, 2001.]
- [6] 赵文晋,李都峰,王宪恩.低碳农业的发展思路.环境保护,2010,(12):38-39. [ZHAO W J, LI D F, WANG X E. Development ideas of low-carbon agriculture. Environmental Protection, 2010, (12): 38-39.]
- [7] 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.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. China Population, Resources and Environment, 2011, 21(8): 80-86.]
- [8] 田云,张俊飏.中国省级区域农业碳排放公平性研究.中国人口·资源与环境,2013,23(11):39-47. [TIAN Y, ZHANG J B. Fairness research of agricultural carbon emissions between provincial regions in China. China Population, Resources and Environment, 2013, 23(11): 39-47.]
- [9] 李波,张俊飏.基于投入视角的我国农业碳排放与经济发展脱钩研究.经济经纬,2012,(4):27-31. [LI B, ZHANG J B. Decoupling of China's agriculture carbon emissions and economic development based on the input perspective. Economic Survey, 2012, (4): 27-31.]
- [10] 吴贤荣,张俊飏,程文能.中国种植业低碳生产效率及碳减排成本.环境经济研究,2017,2(1):57-69. [WU X R, ZHANG J B, CHENG W N. The efficiency and reduction cost of carbon emission in China's planting industry. Journal of Environmental Economics, 2017, 2(1): 57-69.]

- [11] 戴小文, 杨雨欣. 2007—2016年中国省域种植业碳排放测算、驱动效应与时空特征. 四川农业大学学报, 2020, 38(2): 241-250. [DAI X W, YANG Y X. Carbon emission calculation, driving effect and space and temporal characteristics of provincial planting industry in China from 2007 to 2016. Journal of Sichuan Agricultural University, 2020, 38(2): 241-250.]
- [12] 董明涛. 我国农业碳排放与产业结构的关联研究. 干旱区资源与环境, 2016, 30(10): 7-12. [DONG M T. The association of agricultural carbon emissions and industrial structure in China. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(10): 7-12.]
- [13] 吴昊玥, 何宇, 黄瀚蛟, 等. 中国种植业碳补偿率测算及空间收敛性. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(6): 113-123. [WU H Y, HE Y, HUANG H J, et al. Estimation and spatial convergence of carbon compensating rate of planting industry in China. China Population, Resources and Environment, 2021, 31(6): 113-123.]
- [14] 丁宝根, 杨树旺, 赵玉. 长江经济带种植业碳排放时空特征及驱动因素研究. 生态与农村环境学报, 2019, 35(10): 1252-1258. [DING B G, YANG S W, ZHAO Y. Study on spatial-temporal characteristics and driving factors of carbon emission from planting industry in the Yangtze River Economic Belt. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(10): 1252-1258.]
- [15] 吴传清, 宋子逸. 长江经济带农业绿色发展报告. 北京: 社会科学文献出版社, 2018. [WU C Q, SONG Z Y. Report on Agricultural Green Development in the Yangtze Economic Belt. Beijing: Social Sciences Academic Press, 2018.]
- [16] 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. 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. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(10): 1762-1773.]
- [17] 田云, 王梦晨. 湖北省农业碳排放效率时空差异及影响因素. 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. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(24): 5063-5072.]
- [18] 王帅, 赵荣钦, 杨青林, 等. 碳排放约束下的农业生产效率及其空间格局: 基于河南省65个村庄的调查. 自然资源学报, 2020, 35(9): 2092-2104. [WANG S, ZHAO R Q, YANG Q L, et al. Agricultural production efficiency and spatial pattern under carbon emission constraint: Based on 65 villages of Henan province. Journal of Natural Resources, 2020, 35(9): 2092-2104.]
- [19] 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. 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. Statistics & Decision, 2020, 36(5): 67-71.]
- [20] 张广胜, 王珊珊. 中国农业碳排放的结构、效率及其决定机制. 农业经济问题, 2014, 35(7): 18-26, 110. [ZHANG G S, WANG S S. The structure, efficiency and determination mechanism of China's agricultural carbon emissions. Issues in Agricultural Economy, 2014, 35(7): 18-26, 110.]
- [21] 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. 生态经济, 2018, 34(7): 25-32. [WANG J, ZHU C Z. International comparison of carbon emission efficiency in agricultural sector and its influencing factors based on data from 32 countries from 1995 to 2011. Ecological Economy, 2018, 34(7): 25-32.]
- [22] 刘其涛. 中国农业碳排放效率的区域差异: 基于Malmquist-Luenberger指数的实证分析. 江苏农业科学, 2015, 43(9): 497-501. [LIU Q T. Regional differences in agricultural carbon emission efficiency in China: Based on the Malmquist-Luenberger index. Jiangsu Agricultural Sciences, 2015, 43(9): 497-501.]
- [23] WANG R, FENG Y. Research on China's agricultural carbon emission efficiency evaluation and regional differentiation based on DEA and Theil models. International Journal of Environmental Science and Technology, 2021, 18(6): 1453-1464.
- [24] 郭四代, 钱昱冰, 赵锐. 西部地区农业碳排放效率及收敛性分析: 基于SBM-Undesirable模型. 农村经济, 2018, (11): 80-87. [GUO S D, QIAN Y B, ZHAO R. Agricultural carbon emission efficiency and convergence analysis: Based on SBM-Undesirable model. Rural Economy, 2018, (11): 80-87.]
- [25] 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. Dynamic changes and spatial agglomeration analysis of the Chinese agricultural carbon emissions performance. Economic Geography, 2015, 35(4): 142-148, 185.]
- [26] 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. 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. China Population, Resources and Environment, 2019, 29(12): 68-76.]
- [27] 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. 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. Analysis of the spatial correlation pattern of carbon productivity and the

- influencing factors in Chinese planting industry. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(5): 46-57.]
- [28] 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. *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. *Soft Science*, 2021, 35(7): 25-30, 37.]
- [29] 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. *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. *Environmental Science & Technology*, 2021, 44(6): 186-193.]
- [30] 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. *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. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 36(5): 1218-1228.]
- [31] 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. *中国工业经济*, 2015, (5): 83-95. [LIU H J, LIU C M, SUN Y N. Spatial correlation network structural of energy consumption and its effect in China. *China Industrial Economics*, 2015, (5): 83-95.]
- [32] 谭灵芝. 我国土地要素产出空间关联网络特征及其效应研究. *商业研究*, 2018, (6): 41-51. [TAN L Z. The characteristics and its impacts of spatial network correlation features of land element output in China. *Commercial Research*, 2018, (6): 41-51.]
- [33] 王兆峰, 刘庆芳. 中国省域旅游效率空间网络结构演化及其影响因素. *地理科学*, 2021, 41(3): 397-406. [WANG Z F, LIU Q F. The evolution and influencing factors of spatial network structure of China's provincial tourism efficiency. *Scientia Geographica Sinica*, 2021, 41(3): 397-406.]
- [34] 王婧, 杜广杰. 中国城市绿色创新空间关联网络及其影响效应. *中国人口·资源与环境*, 2021, 31(5): 21-27. [WANG J, DU G J. Spatial association network of green innovation in Chinese cities and its impact effect. *China Population, Resources and Environment*, 2021, 31(5): 21-27.]
- [35] TONE K A. Slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, 2001, 130(3): 498-509.
- [36] 林江彪, 王亚娟, 张小红, 等. 黄河流域城市资源环境效率时空特征及影响因素. *自然资源学报*, 2021, 36(1): 208-222. [LIN J B, WANG Y J, ZHANG X H, et al. Spatial and temporal characteristics and influencing factors of urban resources and environmental efficiency in the Yellow River Basin. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(1): 208-222.]
- [37] ZHOU P, ANG B W, HAN J Y. Total factor carbon emission performance: A Malmquist index analysis. *Energy Economics*, 2010, 32(1): 194-201.
- [38] 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. *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. *China Industrial Economics*, 2010, (1): 45-54.]
- [39] 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. *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. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(3): 354-364.]
- [40] 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. Calculation of greenhouse gases emission from agricultural production in China. *China Population, Resources and Environment*, 2012, 22(7): 21-27.]
- [41] 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. *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. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(2): 395-410.]
- [42] ULMAN E L. *American Commodity Flow: A Geographical Interpretation of Rail and Water Traffic based on Principles of Spatial Interchange*. Seattle: University of Washington Press, 1957.
- [43] 刘军. *整体网分析*. 上海: 格致出版社, 2014. [LIU J. *Overall Network Analysis*. Shanghai: Gezhi Publishing House, 2014.]
- [44] 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. *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. *Ecological Science*, 2020, 39(5): 169-178.]

- [45] 刘军. 社会网络分析导论. 北京: 社会科学文献出版社, 2004. [LIU J. An Introduction to Social Network Analysis. Beijing: Social Science Literature Press, 2004.]
- [46] ALHAJJ R, ROKNE J. Encyclopedia of Social Network Analysis and Mining. New York: Springer Publishing Company, 2014.

Spatial correlation network structure and motivation of carbon emission efficiency in planting industry in the Yangtze River Economic Belt

JI Xue-qiang, ZHANG Yue-song

(School of Public Administration, Renmin University of China, Beijing 100872, China)

Abstract: Based on the data of 11 provincial-level regions in the Yangtze River Economic Belt (YREB), this paper uses the undesired output SBM model to measure the carbon emission efficiency of planting industry, constructs the spatial correlation network through the modified gravitational model, applies the social network analysis method to analyze the spatial correlation network structure, and uses the QAP model to examine the driving factors of the spatial correlation network. The research shows that: (1) The carbon emission efficiency of planting industry in the YREB is improved rapidly, the overall efficiency value reaches a high level, but there is still some room for improvement, and the gap still exists between provincial-level regions. Moreover, the spatial effect of the carbon emission efficiency of planting industry in the YREB breaks the traditional spatial geographical proximity and presents complex spatial network characteristics. (2) During the study period, the correlation and structure stability of the spatial network of carbon emission efficiency of planting industry in the YREB showed an overall growing trend. During this period, the spatial correlation network evolved from the unipolar dominance of Shanghai to the multi-center collaborative development pattern of Jiangsu, Zhejiang, Guizhou and Shanghai. (3) Farmer per capita income, transportation level, spatial proximity relationship, science and technology level, and government agriculture attention level have an important influence on the spatial correlation network of carbon emission efficiency of planting industry in the YREB. It is suggested that when improving the carbon emission efficiency of the planting industry in the YREB, we should consider the spatial association network structure and its driving factors, and take measures to enhance the spatial correlation of the carbon emission efficiency of the planting industry.

Keywords: Yangtze River Economic Belt; carbon emission efficiency of planting industry; spatial correlation network; carbon peak; carbon neutrality