科技创新

长江中游城市群绿色技术创新空间关联网络结构特征与影响因素

王锐雅，彭 鹏，晏玉清，高 涛

（湖南师范大学地理科学学院，长沙 410081）

摘要： 基于绿色专利数据，运用修正引力模型、社会网络分析和QAP回归分析方法，深入探讨2006—2022年长江中游城市群绿色技术创新空间网络的结构演变及影响因素。结果发现：长江中游城市群绿色技术创新空间关联网络呈现多路径协同传导的复杂结构形态，并且网络稳定性较强；净受益地区主要集中在经济发展水平较高的区域，显示显著的虹吸效应；该关联网络逐渐显现以武汉、长沙、南昌市为核心的核心-边缘结构特征，核心区与边缘区的范围随时间逐渐扩大，而半边缘区的范围则趋于缩小；经济发展水平、产业结构、科研经费投入、数字基础设施以及金融发展水平的差异等因素，对关联网络的发展起到积极的推动作用，而地理空间距离、教育资源配置则对关联网络的发展产生一定的抑制效应。

关键词： 绿色技术创新；绿色专利；长江中游城市群；空间关联网络；社会网络分析

中图分类号： F124.3 **文献标志码：** A **文章编号：** 1671－1807(2026)08－0027－10

Braun和Wield[1]认为，绿色技术创新是以减少对环境的破坏为核心目标，通过整合多种技术、改进生产工艺，让企业在环保清洁生产的同时实现经济收益的一种模式。绿色技术创新作为国家创新驱动与绿色发展战略的协同载体，在当下具有无可替代性。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》提出“完善科技创新体制机制”“推动绿色发展”“构建市场导向的绿色技术创新体系”，凸显了绿色技术创新的重要性。绿色技术创新贯穿于国家从宏观战略规划到具体产业行动方案以及园区标准制定等各个层面。它通过推动各行业的技术升级、能源结构优化、资源循环利用以及生态环境保护等，有效破解国家绿色发展过程中面临的资源、环境、产业升级等诸多难题，从而成为实现高质量发展的关键力量[2]。

长江中游城市群凭借其区位优势、经济实力、生态功能和创新潜力，成为中国区域协调发展战略的“脊梁”，也是构建新发展格局中“以内需驱动为主、内外需协同”的关键节点。然而，该区域在发展过程中面临发展质量有待提高、亟须开展绿色转型等诸多问题。随着高质量发展理念的深入贯彻以及区域生态保护被提升至国家战略高度，绿色技术创新逐渐显现其关键价值，成为长江中游城市群落实国家战略部署、实现生态保护与高质量发展协同共进的核心驱动力。因此，研究长江中游城市群绿色技术创新空间关联网络的结构特征及其影响因素，对推动区域生态与经济协调发展具有重大意义。

早期关于绿色技术创新的研究主要集中在以下几个维度：首先是概念内涵研究，如Mirata和Emtairah[3]、孙燕铭和谌思邈[4]、汪明月等学者[5]从绿色发展、绿色转型发展视角对绿色技术创新进行了概念界定；其次是效率量化分析，为了对绿色技术创新进行量化测度，Zhu等[6]、董会忠等[7]构建了评价指标体系，Miao等[8]运用随机前沿分析方法进行创新评价，而Amore和Bennedsen[9]、Zhang等[10]以绿色专利申请量或授权量作为衡量国家或企业绿色技术创新产出的关键指标；再者是空间差异研究，相关成果主要围绕绿色创新的空间分异特征、演化规律及空间溢出效应展开分析[11-13]，如鲍

收稿日期： 2025-10-24

作者简介： 王锐雅(1999—)，女，山东聊城人，硕士研究生，研究方向为城市地理学；通信作者彭鹏(1968—)，男，湖南长沙人，博士，副教授，研究方向为GIS与区域规划；晏玉清(1999—)，女，江西九江人，硕士研究生，研究方向为城市地理学；高涛(1998—)，男，江苏南京人，硕士研究生，研究方向为人口地理学。

涵等[14]研究了长三角地区的绿色技术创新效率的空间分异特征，翟梦新等[15]分析了长江经济带绿色技术创新效率的时空分布特征；最后是影响因素研究，学者多采用定量方法，如QAP回归分析方法识别影响绿色技术创新的因素，研究表明经济发展水平、地区产业结构、科学技术投入等对绿色技术创新具有显著影响[16-17]。

随着开放式创新环境的发展，创新要素的流动愈发活跃，网络化的创新模式成为新的创新导向[18-19]。绿色技术创新在不同城市之间的知识交流与技术合作也愈发依赖于创新网络来实现。在此背景下，Fan等[20]、Liu等[21]、孙中瑞等[22]以省域为研究尺度剖析绿色技术创新效率的空间关联网络结构；滕堂伟等[23]以市域为研究尺度对长三角地区绿色技术创新效率的空间关联网络结构进行剖析；周灿等[24]、黄永春等[25]、孙茜和黄丽[26]、赵林等[27]基于绿色专利数据，对长三角地区及黄河流域的绿色技术创新的空间关联网络演变特征及其影响因素进行了实证分析。现阶段，绿色技术创新空间关联网络相关研究尚未进入成熟的系统性研究阶段，研究案例的数量与类型仍有较大拓展空间，尤其是市域尺度的研究案例较少，未来需进一步丰富研究实例，以更全面地揭示其内在规律与作用机制。

综上所述，探究绿色技术创新的空间关联网络结构特征和驱动因素已成为绿色技术创新领域的研究热点。然而，以城市群为研究对象的相关研究，仍存在较大的深化空间，亟待进一步拓展和完善。

基于此，本文选取长江中游城市群作为案例，运用引力模型和社会网络分析方法，以地级市绿色专利数据为研究基础，深入探讨长江中游城市群绿色技术创新的空间关联网络结构特征并通过QAP回归分析对长江中游城市群绿色技术创新空间关联网络的驱动因素进行定量分析。本文旨在丰富绿色技术创新空间关联网络的案例储备的同时，深入探讨绿色技术创新空间关联网络在不同发展阶段的特征及变化机制，以深化对其演化理论的认知，从而为相关领域的研究与实践提供更坚实的理论支撑和丰富的实证依据。此外，研究成果将为优化长江中游城市群绿色技术创新体系、强化长江中游城市群绿色技术创新网络合作提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

以长江中游城市群作为研究区，该城市群位于中国中部地区，承东启西、连南接北，具有临江达海的区位优势。它以武汉城市圈、环长株潭城市群和环鄱阳湖城市群为三大核心主体，共同构成一个特大型城市群。其覆盖范围包括28个地级以上城市，具体分布如图1所示。

长江中游城市群作为长江沿岸的人口集聚区之一，截至2024年底，区域内常住人口达到1.3亿人，占全国总人口的9%，为区域发展提供了坚实的劳动力资源支撑。同时，该地区作为长江经济带发展活力最强的地区之一，近年GDP增长势头迅猛，2023年其GDP总量占全国的9.3%。尤其是武汉都市圈、环鄱阳湖城市群和环长株潭城市群这三大主体的GDP增长尤为显著，对省内其他城市及周边区域产生了强大的辐射与带动效应。

1.2 研究方法

1.2.1 引力模型

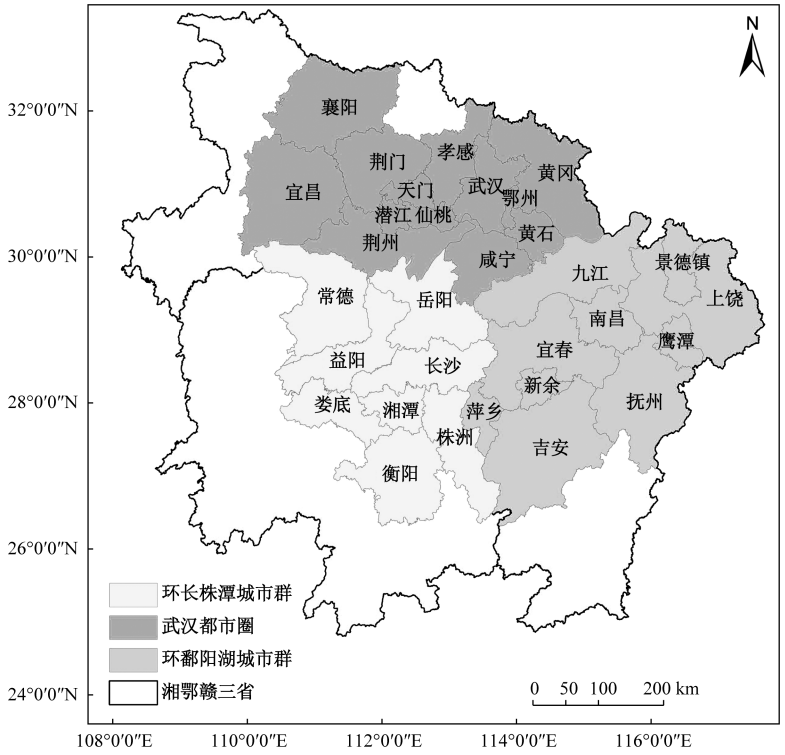
借鉴赵林等[27]的做法，构建修正的引力模型来测算长江中游城市群绿色技术创新的空间关联关系矩阵。修正后的引力模型公式为

$$F_{ij}=\frac{\sqrt[4]{K_{ij}G_i\mathrm{Ste}_iG_j\mathrm{Ste}_j}}{\mathrm{Deco}_{ij}^2} \tag{1}$$

式中：$K_{ij}=\frac{G_i}{G_i+G_j}$；$F_{ij}$为城市$i$与$j$之间的空间关联强度；$G_i$、$G_j$为城市$i$与$j$的绿色专利申请量；$\mathrm{Deco}_{ij}$为城市$i$与$j$之间的经济距离；$S_i$、$S_j$分别为城市$i$与$j$的科学技术支出；$K_{ij}$为引力系数，表示城市$i$在城市$i$和城市$j$之间绿色技术创新联系中贡献率的权重。根据式(1)计算得出地市间的空间关联关系矩阵。随后，将矩阵各行中大于平均值的记为1，表示城市i与j之间存在关联关系，小于平均值的记为0，表示两城市间在绿色技术创新上不存在空间关联关系，得到空间关联关系的二值化矩阵。

1.2.2 社会网络分析方法

为了深入探究长江中游城市群各地级市之间绿色技术创新空间网络结构特征的关联关系，对绿色技术创新网络的整体架构、个体节点结构以及核心-边缘结构特征进行全面剖析，指标主要包括网络密度、关联度、等级度、中心性。网络密度是指当前关系总数与理论最大关系数的比值，整体网密度越大；对个体的影响越大，网络关联度在网络分析中指的是节点的度，即和该节点关联的边的条数或连接的个数，网络等级度接近1说明网络中存在占据主导地位的城市，点度中心性指如果一个点与许多



审图号:GS(2020)4619 号

图 1 研究区域概况

节点之间有联系,那么该节点在网络中就处于比较中心的位置,具有比较大“权利”,具体分析公式参考刘军[28]。

1.2.3 QAP 回归分析

QAP(quadratic assignment procedure)回归分析通过将观测到的关系数据(如网络数据、空间数据等)与随机化的数据进行比较,来评估变量之间的关系是否具有统计学意义[29]。它基于二次指派程序,通过多次随机置换数据中的行和列,重新计算变量之间的统计量,构建一个零假设分布,然后将实际观测到的统计量与零假设分布进行比较,从而判断变量之间的关系是否显著以揭示复杂关联网络与影响因素之间的内在联系。

1.3 数据来源

以长江中游城市群的 28 个地级以上城市为研究对象,研究时段为 2006—2022 年。相关指标数据主要来源于 2007—2023 年的《中国城市统计年鉴》、各地级市历年统计年鉴以及国民经济和社会发展统计公报。由于专利申请量比授权量更能直观迅速地反映城市在该领域的创新活跃度与探索积极性,且专利授权量存在时间滞后及受人为因素影响的问题,将绿色专利申请量作为衡量绿色技术创新水平的关键指标。

2 结果与分析

2.1 网络特征分析

2.1.1 绿色技术创新空间关联网络的结构特征

根据式(1)计算得到 2006—2022 年长江中游城市群绿色技术创新空间关联关系的二值化矩阵进行对比分析,并对长江中游城市群的空间关联网络进行可视化,如图 2 所示。研究发现,该空间关联网络结构呈现多流向、多线程的复杂形态特征,2006—2022 年地级市之间关联强度显著增强,且同年内不同地级市之间的关联强度差异明显。

2006 年,武汉、长沙和南昌的空间关联网络最为稠密,其中武汉、长沙、南昌和新余的关联关系数最多。武汉与其他城的关联性最强,武汉、长沙、南昌、宜昌和株洲与其他城之间的关联强度较高。如图 2 所示,各个城市群内部的绿色技术创新网络也具有较好的通达性。

2010 年,武汉、长沙和新余与其他地市的空间关联关系最多,相比 2006 年,南昌与其他地市的关联关系数降低,各地级市之间的空间关联强度增强,武汉与其他城市之间的关联强度最高。

2014 年,武汉、长沙、南昌和新余的空间关联关系最多,相比 2010 年,南昌与其他地市的关联关系数增加,各地级市之间的空间关联强度增强,武汉

与其他城市之间的关联强度最高。

2018 年，武汉、长沙、南昌和新余的空间关联关系最多，相比 2014 年，由于地区发展差异逐步扩大，各地级市的关联关系数有所减少，各地级市之间的空间关联强度增强。

2022 年，各城市的空间关联关系进一步强化。其中，武汉、长沙和南昌与其他地市的关联关系数最多，新余与其他地市的关联关系数下降，长江中游城市群的创新网络逐渐形成了以武汉、长沙和南昌为核心的三核心结构特征。武汉、长沙和南昌在长江中游城市群绿色技术创新空间关联网络的枢纽地位日益凸显。

2.1.2　绿色技术创新空间关联整体网络结构的时序演变特征

利用 Ucinet6.0 软件，计算得出 2006—2022 年整体网络结构特征指标值，结果如图 3 所示。对结果进行分析，得出以下结论。

(1)网络的关联关系数从 328 个波动下降到 300 个；网络密度值从 0.433 9 波动下降至 0.396 8。这表明空间关联网络的稠密程度随时间减弱，地市间的联系有待加强。

(2)网络关联度从 2006—2011 年波动上升至 1 后保持平稳，各地市间的关联程度逐渐增强；2011 年以后地市间均建立起关联关系，网络整体的连通性有所增强。

(3)网络等级度从 0.258 1 波动上升至 0.457 1，在最初阶段关联网络内部无明显等级结构，没有出现极不均衡的发展状况，随着地级市之间的差异增大，逐渐产生不明显的等级结构。

(4)网络效率从 0.444 4 波动上升至 0.492 9，说明城市群内部各地市之间依托多维空间纽带形成复杂的交互网络，其空间溢出渠道呈现多元化特征，绿色技术创新空间关联网络结构从早期的松散型向紧密型演进，整体稳定性呈现增强趋势。

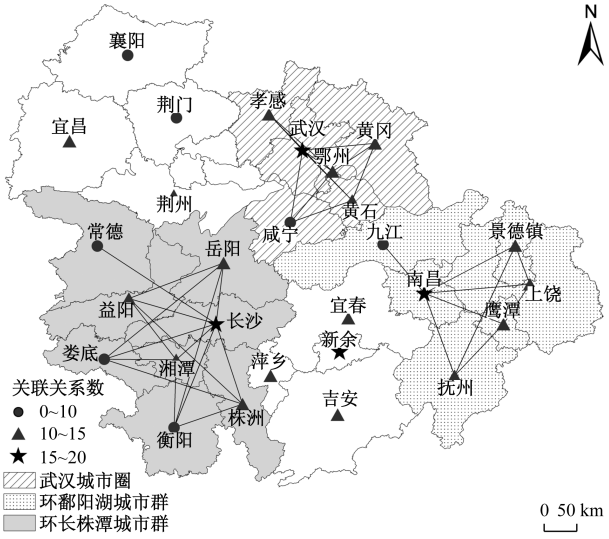
2.1.3　绿色技术创新空间关联个体网络的结构特征

1)溢出-受益关系特征

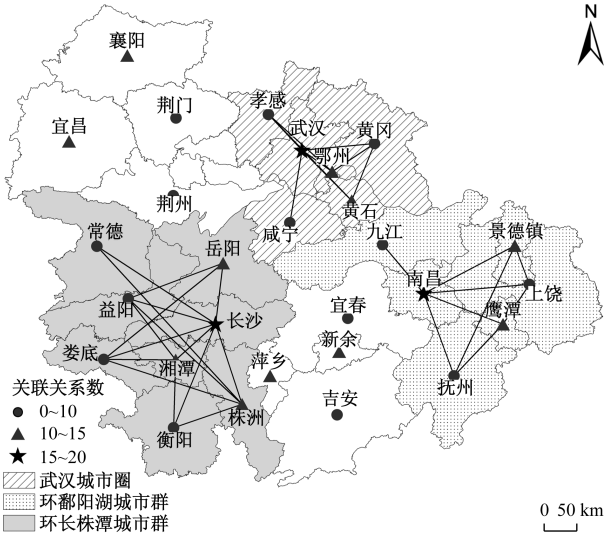
结合各地市的点入度和点出度分析长江中游城市群内部各地市在关联网络中的溢出与受益关系，如图 4 所示。

2006 年，净溢出地区主要分布在荆门、咸宁、黄石和景德镇等地区，而净受益地区主要分布在武汉、宜昌、九江、南昌、鹰潭、长沙、株洲、湘潭、衡阳等地区。除了省会及经济发展水平较高的地级市，净溢出地区主要分布在江西省内，净受益地区主要分布在湖南省内。

2010 年，净溢出地区主要分布在鹰潭、荆门、景



(a) 2006年



(b) 2022年

审图号：GS(2020)4619 号

图 2　长江中游城市群绿色技术创新空间关联网络的结构特征

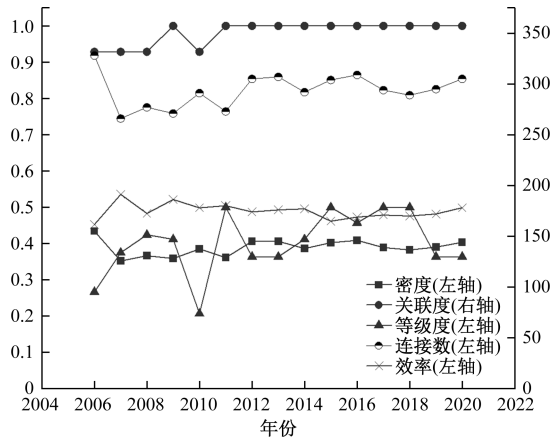


图 3　整体网络结构随时间变化特征

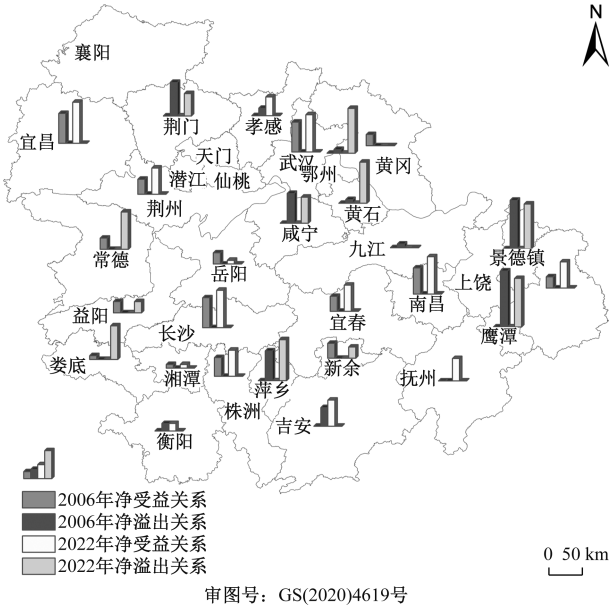


图 4　长江中游城市群绿色技术溢出-受益关系

德镇、黄冈、吉安、抚州、萍乡等地区，净受益地区主要分布在武汉、长沙、南昌、宜昌、湘潭、株洲等地区。

2014 年，净溢出地区主要分布在鹰潭、景德镇、荆门、娄底、益阳、岳阳、吉安、抚州、萍乡等地区，净受益地区主要分布在武汉、长沙、南昌、宜昌、湘潭、株洲等地区。

2018 年，净溢出地区主要分布在新余、荆门、咸宁、益阳、常德、娄底、衡阳、益阳、景德镇、萍乡、鹰潭，净受益地区主要分布在武汉、长沙、南昌、宜昌、湘潭、鄂州、吉安、宜春、抚州、上饶。湖南省内部净受益地区减少，江西省内部净受益地区增加。

2022 年，净溢出地区主要分布在荆门、咸宁、黄石、景德镇、鹰潭、萍乡、常德、益阳、娄底等地区。与此同时，净受益地区的空间分布呈现趋于集中的态势，主要集中在武汉、宜昌、黄冈、南昌、上饶、赣州、吉安、长沙、湘潭、株洲等地区，且虹吸效应表现得尤为明显。与 2006 年相比，湖南省部分地级市溢出效应增强，虹吸作用减弱，江西省部分地级市虹吸效应增强，溢出效应减弱。

总体来看，在研究时段内，长江中游城市群中的省会城市及经济发展水平较高的城市，在绿色技术创新空间关联网络中主要发挥虹吸效应。而其他经济发展水平较低、创新能力较弱的城市，以及城市群外围的地市，其资源则倾向于向经济发展水平较高的地区流动。

2）网络中心性特征

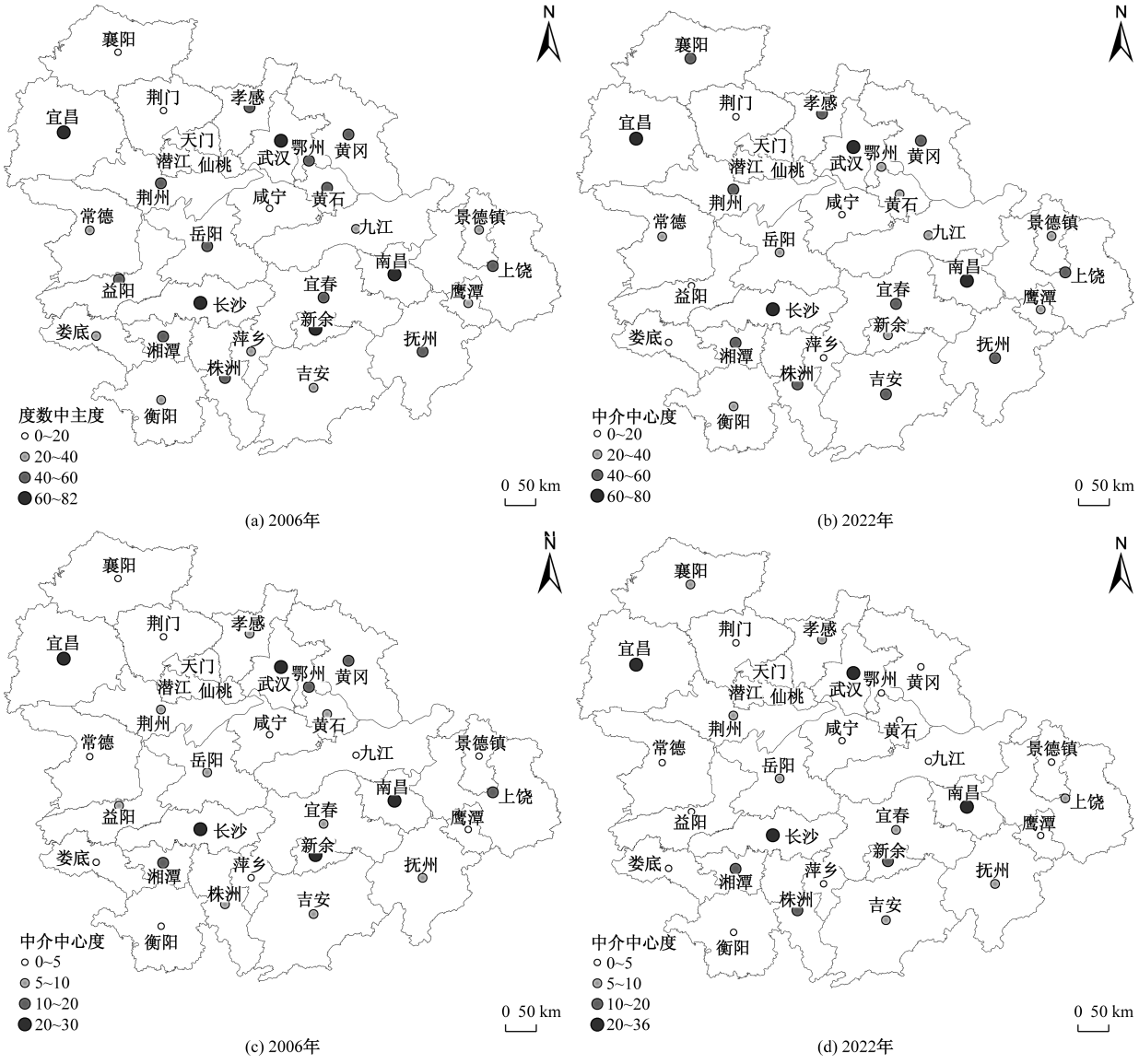
计算 2006 年和 2022 年各地市的度数中心度和中介中心度深入分析长江中游城市群各地市的网络中心性特征，对 2006 年和 2022 年的结果进行可视化表达，如图 5 所示。

2006—2022 年，长江中游城市群各地市的度数中心度均值从 43.386 下降至 39.683，且空间分布不均衡。高值区从武汉、宜昌、南昌、长沙和新余，转变为武汉、长沙和南昌；低值区则从靠近研究区域外围分布，演变为不均衡分布。2022 年，度数中心度较高城市包括武汉、长沙、南昌、宜昌和新余等，在绿色技术创新空间关联网络中，省会城市及区域中心城市占据核心位置，其核心地位由经济与创新要素上的优势及绿色转型压力等多重因素共同促成。而黄石、常德、萍乡、咸宁、娄底等由于地理位置、经济与创新要素上的劣势，多处于网络边缘位置。

2006—2022 年，长江中游城市群各地市的中介中心度均值从 9.893 下降至 8.643，这表明网络节点的中介功能呈明显的减弱趋势。2022 年，在长江中游城市群绿色技术创新空间关联网络中，武汉、长沙、南昌、宜昌的中介中心度显著高于平均水平。其中，武汉、长沙、南昌作为城市群核心枢纽城市，凭借完善的创新生态和强大的资源配置能力，在网络中扮演着“战略支点”角色，高效衔接不同区域的创新要素流动；宜昌虽非省会城市，但依托特色产业优势（如宜昌的绿色化工产业），成为区域性创新协作的关键节点。这类城市通过技术转移、资源整合与跨区域协同等方式，有效打通网络中的“结构洞”，显著提升了城市群绿色技术创新合作的连通性与效率，是推动区域创新网络协同发展的核心“中介桥梁”。另外，中介中心度较低的地区则连片分布于长江中游城市群的西部城市，以及黄石、鄂州、鹰潭、萍乡、常德、咸宁、景德镇、娄底等，这些地区地处关联网络中的边缘位置，在关联网络中的协调控制能力有所欠缺。均值之上城市数量的逐渐降低表明网络的中介功能向少数地市集聚。总体来看，中介中心度的空间分布表现不均衡特性，经济发达的中心城市在推动绿色创新要素流动过程中发挥显著的中介作用。

2.1.4　*核心边缘结构特征*

为探究各地市在网络中的地位，通过 Ucinet6.0 计算各网络节点的核心度，核心度高于 0.25 为核心区，核心度介于 0.15～0.25 为半边缘区，核心度低于 0.15 为边缘区。对结果进行可视化，如图 6 所示。



审图号:GS(2020)4619 号

图 5　长江中游城市群绿色技术创新网络中心度结构特征

2006—2022 年期间,关联网络的核心区数量从 2 个增加至 3 个,从武汉和长沙扩展至武汉、长沙和南昌;边缘区范围不断扩大,数量由 5 个增加至 10 个,而半边缘区范围则相对缩小,数量由 21 个减少至 15 个。整体来看,长江中游城市群已形成以武汉、长沙、南昌为核心的网络结构。

2.2　影响因素

2.2.1　变量选择与模型

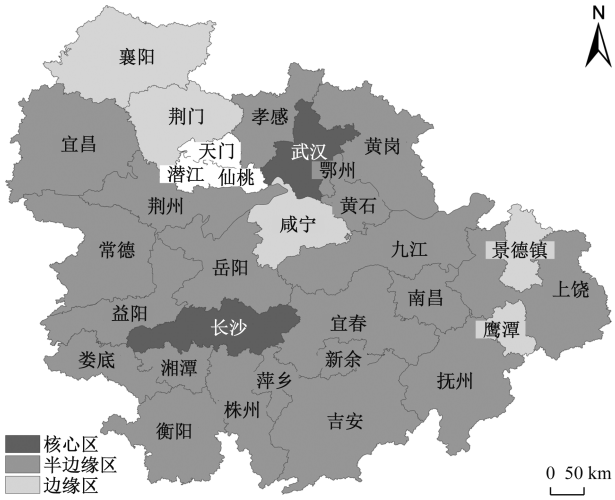
参考赵林等[27]、葛世帅等[30]、吕承超等[31]的做法选取球面距离(MDIS)、经济差异(MGDP)、产业结构差异(MIS)、科技差异(MTES)、教育差异(MEDU)、数字基础设施差异(MDIINF)、金融发展水平差异(MFDL)作为影响因素,探究其对该关联网络的影响。为探究不同影响因素之间的作用差异,采用 QAP 回归分析方法,并构建模型。

$$MTI=f(MDIS,MGDP,MIS,MTES,MEDU,MDIINF,MFDL) \quad (2)$$

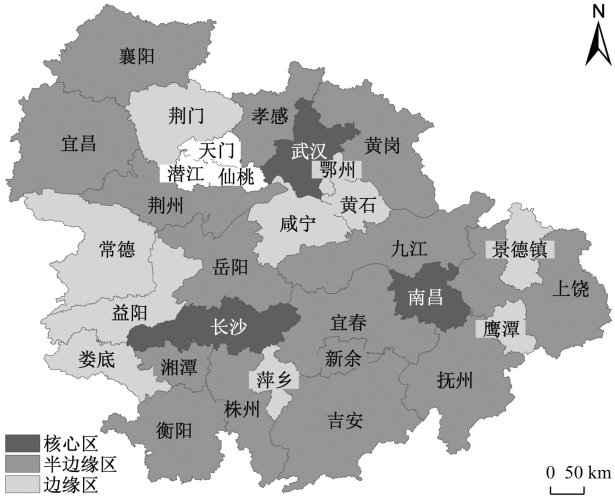
式中:因变量 MTI 为 2022 年长江中游城市群绿色技术创新空间关联关系矩阵的平方根矩阵;MDIS、MGDP、MIS、MTES、MEDU、MDIINF、MFDL 分别为球面距离(km)、人均地区生产总值(元)、产业结构高级化指数(%)、R&D 经费内部支出(万元)、教育支出占财政支出比例(%)、互联网普及率(千户/万人)、金融机构存贷比地市间绝对差异构建的差值关系矩阵。

2.2.2　分析结果

采用 QAP 回归分析方法,对长江中游城市群绿色技术创新空间关联网络的影响因素进行回归



(a) 2006年



(b) 2022年

审图号:GS(2020)4619 号

图 6　长江中游城市群核心-边缘结构特征

分析,结果如表 1 所示。调整后判定系数 R^2 为 0.612,且该结果在 1%的显著性水平上通过检验,能够解释绿色技术创新空间关联关系的 61.2%,模型拟合效果良好。

(1)经济差异、产业结构差异、科研经费投入差异、数字基础设施差异和金融发展水平差异与空间关联网络呈正相关,其中科研经费投入差异与空间关联网络呈显著正相关。

经济发展水平差异、产业结构差异、科研经费投入差异、数字基础设施差异和金融发展水平差异越大,越有利于地区之间通过空间关联网络进行资源互补、产业梯度转移、技术成果扩散等,从而推动地市间绿色技术创新空间关联网络的发展。其中,科研经费投入差异对空间关联网络的发展具有尤为显著的正向促进作用。

科研经费投入差异的标准化回归系数为 0.467,且在 1%的水平上显著为正。这表明,科研经费投入差异越大,地市间绿色技术创新资源配置的差距也越大,从而使得资金、技术、人才等资源要素流动的可能性显著增加。这种资源的流动不仅促进了绿色技术创新的传导和溢出,还增加了其渠道,进而增强了空间关联性。

经济发展水平差异的标准化回归系数为 0.133,在 1%的水平上显著为正。高经济水平地市聚焦核心研发,滞后地市承接转化应用,形成分工闭环,推动技术、人才等资源跨区域流动,降低协作成本,以差异化需求促进关联网络的发展,同时促成核心-边缘协同结构,强化网络关联。

产业结构差异的标准化回归系数为 0.177,在 1%的水平上显著为正,地区之间产业结构差异大,有利于地区之间增强合作,减少竞争,且能够促进资金、资源等在地区之间的流动。

数字基础设施差异的标准化回归系数为 0.239,在 1%的水平上显著为正,数字基础设施领先的地市通过绿色创新成果传递,建立与基础设施薄弱地区的联系,使边缘地市快速承接成熟绿色技术,强化网络关联。

(2)地理空间距离、教育支出占财政支出比例对空间关联网络呈显著负相关。地理空间距离、教育支出占财政支出比例差异越大,越不利于地区之间绿色技术创新空间关联网络的发展。

地理空间距离差异的标准化回归系数为 −0.015,在 10%的水平上显著为负,地理空间距离对于空间关联网络之间的资金、资源、人才等要素的流动起着抑制作用,但随着科技的发展,地理空间距离对于空间关联网络的抑制作用在逐渐削弱。

表 1　影响因素回归分析结果

变量	非标准化回归系数	标准化回归系数	显著性概率	概率 A	概率 B
截距项	406.676	0.000			
DIS	−0.052	−0.015	0.381	0.619	0.381
PGDP	0.002	0.133	0.012	0.012	0.988
	368.819	0.177	0.012	0.012	0.989
RES	0.000	0.467	0.000	0.000	1.000
EDU	−1 142.059	−0.038	0.254	0.747	0.254
DIGIT	112.486	0.239	0.006	0.006	0.994
LDF	5.518	0.002	0.479	0.479	0.521
R^2	0.612				
调整后 R^2	0.609				
观测值	756				
P	0.000				

教育支出占财政支出比例差异的标准化回归系数为－0.038，在10%的水平上显著为负，一个地区的教育支出占财政支出的比例大，科技、文化、社会保障、经济建设等方面比例小，会推动人才外流，不利于当地的创新活动发展。

3 结论和建议

3.1 结论

基于绿色专利申请数据，运用修正的引力模型与社会网络分析方法，对2006—2022年长江中游城市群绿色技术创新网络的空间关联结构演变特征进行深入剖析，并借助QAP回归分析方法识别了相关影响因素，主要结论如下。

(1)长江中游城市群的绿色技术创新空间关联形成了多路径协同传导的复杂网络结构，城市间关联强度差异显著，呈现以武汉和长沙为大核心、南昌为小核心的三核特征，这三大城市在长江中游城市群的枢纽地位尤为突出。

(2)长江中游城市群绿色技术创新在地市间呈现显著的空间关联与虹吸效应。其关联网络内部缺乏明显的等级结构，但整体网络稳定性较高。该地区经济发展水平较高的城市在绿色技术创新空间关联网络中主要发挥虹吸效应，促使资源从经济发展水平较低、创新能力较弱的城市及城市群外围地区向高水平城市流动。

(3)绿色技术创新空间关联网络逐渐呈现明显的核心-边缘结构特征。核心区的分布范围趋于集中，并且其结构特征也逐渐显现。从最初的武汉和长沙作为主要的双核心为主，逐渐向武汉、长沙、南昌市三核心结构转变。随着时间的推移，核心区和边缘区的范围不断扩大，而半边缘区的范围则相对缩小。

(4)长江中游城市群绿色技术创新空间关联网络的形成和发展，源自不同区域及创新主体间的多维度互动。显性的技术交流与隐性的知识传递共同驱动了这一网络的演化。QAP回归分析结果表明，经济发展水平差异、产业结构差异、科研经费投入差异、教育资源配置差异、数字基础设施差异和金融发展水平差异等因素，对绿色技术创新空间关联网络的发展具有促进作用；而地理空间临近对空间关联网络具有一定抑制作用。

3.2 建议

(1)为强化长江中游城市群的创新网络合作并推动区域一体化发展，建议采取以下措施：①加强核心与边缘的创新联动。尽管该城市群的创新网络规模和强度已有显著提升，但“核心-边缘”现象依然明显。因此，着力促进核心节点城市与边缘节点城市间的创新合作，缩小区域间的发展差距。如武汉东湖高新区、长株潭国家自主创新示范区等创新平台的建设为城市群的创新合作提供了重要载体。②破除壁垒，促进创新资源流通。进一步完善城市群协同创新的政策体系，加强三省之间的政策对接和协同，打破行政壁垒，为创新要素的自由流动和共享创造良好的政策环境。③培育新的创新极，实现辐射带动。利用核心城市的创新优势，培育新的创新增长极，形成点面结合的发展格局，最大化创新效益，促进区域整体发展。④深化城市群内部高校、科研院所与企业的联动协作，构建产学研深度融合的协同创新体系，加速科技成果向现实生产力转化。

(2)为促进绿色技术创新要素在长江中游城市群及城际间的自由流动，各地市着力完善交通通信等基础设施，如武汉大力推进交通网络建设，地铁线路不断向周边城市延伸，同时天河机场持续升级改造，新开通多条航线连接周边城市，极大地便利了人才往来，众多科研人才频繁穿梭于武汉与周边城市；襄阳全力推进5G网络覆盖，在工业园区、科研基地实现5G信号满格等。在此基础上，不断拓宽绿色技术创新的溢出渠道，提高绿色创新要素的流动效率，最终实现绿色技术创新资源的跨区域共享与高效转移。

(3)为吸引更多创新人才和资源，长江中游城市群加大创新投入与政策扶持力度。尽管该地区的创新网络规模和强度有所提升，但与京津冀、长三角、珠三角等发达地区相比，仍存在一定的差距。人才是创新的基础，各地政府出台政策吸引创新人才，同时完善交通设施和信息通信等基础设施，降低人才、技术等创新要素的流动成本。例如，湖北省加快建设武汉具有全国影响力的科技创新中心，建设长江中游技术创新中心，推动鄂湘赣“中三角”创新联盟合作常态化，此外，湖北省还支持沿江省市依法落实个人所得税优惠、津贴补贴、科研经费等政策，吸引高层次人才创新创业；湖南省通过推动湘江西岸科技创新走廊建设，加强与武汉、南昌等地的创新合作，促进创新人才的流动和共享；江西省积极推动南昌市赣江两岸科创大走廊建设，加强与武汉、长沙等地的创新合作，吸引创新人才。

参考文献

[1] BRAUN E, WIELD D. Regulation as a means for the social control oftechnology[I]. Technology Analysis & Strategic Management, 1994, 6(3): 259-272.

[2] 杨阳,曾刚,葛世帅,等. 国内外绿色创新研究进展与展望[J]. 经济地理,2022,42(3):10-21.

[3] MIRATA M, EMTAIRAH T. Industrial symbiosis networks and the contribution to environmental innovation: the case of thelandskrona industrial sym-biosis programme[J]. Journal of Cleaner Production, 2005, 13: 993-1002.

[4] 孙燕铭,谌思邈. 长三角区域绿色技术创新效率的时空演化格局及驱动因素[J]. 地理研究,2021,40(10):2743-2759.

[5] 汪明月,李颖明,王子彤. 工业企业不同类型绿色技术创新内在关联与绩效传导路径[J]. 资源科学,2021,43(8):1534-1548.

[6] ZHU L, LUO J, DONG Q L, et al. Green technology innovation efficiency of energy-intensive industries in China from the perspective of shared resources: dynamic change and improvement path[J]. Technological Forecasting & Social Change, 2021, 170: 120890.

[7] 董会忠,李旋,张仁杰. 粤港澳大湾区绿色创新效率时空特征及驱动因素分析[J]. 经济地理,2021,41(5):134-144.

[8] MIAO C L, FANG D B, SUN L Y, et al. Natural resources utilization efficiency under the influence of green technological innovation[J]. Resources Conservation and Recycling, 2017, 126: 153-161.

[9] AMORE M D. BENNEDSEN M. Corporate governance and greeninnovation[J]. Journal of Environmental Economics & Managemen, 2016, 75: 54-72.

[10] ZHANG D Y, RONG Z, JI Q. Green innovation and firm performance: evidence from listed companies in China[J]. Resources Conservation &Recycling, 2019, 144: 48-55.

[11] 许玉洁,刘曙光. 黄河流域绿色创新效率空间格局演化及其影响因素[J]. 自然资源学报,2022,37(3):627-644.

[12] 段德忠,夏启繁,张杨,等. 长江经济带环境创新的时空特征及其影响因素[J]. 地理科学,2021,41(7):1158-1167.

[13] LIU Y Q, SNAO X Y, TANG M P, et al. Spatio-temporal evolution of green innovation network and its multidimensional proximity analysis: empirical evidence from China[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 283: 124649.

[14] 鲍涵,滕堂伟,胡森林,等. 长三角地区城市绿色创新效率空间分异及影响因素[J]. 长江流域资源与环境,2022,31(2):273-284.

[15] 翟梦新,陆玉麒,胡舒云,等. 长江经济带绿色技术创新效率时空特征与影响因素[J]. 地理与地理信息科学,2025,41(3):53-63.

[16] 张在旭,黄卓琳. 中国省际绿色技术创新效率测度及影响因素研究[J]. 资源与产业,2020,22(6):1-8.

[17] 黄磊,吴传清. 环境规制对长江经济带城市工业绿色发展效率的影响研究[J]. 长江流域资源与环境,2020,29(5):1075-1085.

[18] 饶悦,沈丽珍,汪侠. 基于大型科研基础设施共享的区域创新网络研究——以山东省为例[J]. 地理研究,2021,40(6):1840-1856.

[19] MELANDER L, ARVIDSSON A. Green innovation networks: a research agenda[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 357: 131926.

[20] FAN F, LIAN H, LIU X, et al. Can environmental regulation promote urban green innovation efficiency? an empirical study based on Chinese cities[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 287: 125060.

[21] LIU Y Q, SHAO X Y, TANG M P, et al. Spatio-temporal evolution of green innovation network and its multidimensional proximity analysis: empirical evidence from China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 283: 124649.

[22] 孙中瑞,樊杰,孙勇,等. 中国绿色科技创新效率空间关联网络结构特征及影响因素[J]. 经济地理,2022,42(3):33-43.

[23] 滕堂伟,潘雅君,王胜鹏,等. 长三角地区城市绿色创新效率网络空间结构演化及影响因素[J]. 长江流域资源与环境,2023,32(7):1335-1348.

[24] 周灿,曾刚,尚勇敏. 演化经济地理学视角下创新网络研究进展与展望[J]. 经济地理,2019,39(5):27-36.

[25] 黄永春,钱昕怡,严翔,等. 长三角绿色技术转移空间关联网络演化及驱动因素研究[J]. 科技进步与对策,2022,39(21):45-55.

[26] 孙茜,黄丽. 风险投资网络与绿色技术创新网络的时空耦合及其影响因素——以长三角城市群为例[J]. 热带地理,2022,42(5):716-726.

[27] 赵林,高晓彤,吴殿廷. 黄河流域绿色技术创新空间关联网络结构与影响因素[J]. 人文地理,2023,38(4):102-111.

[28] 刘军. 整体网分析——UCINET 软件实用指南(第二版)[M]. 上海:格致出版社,2014.

[29] 刘军. QAP:测量"关系"之间关系的一种方法[J]. 社会,2007(4):164-174.

[30] 葛世帅,曾刚,杨阳,等. 基于 DEA-Malmquist 和 Tobit 模型的长三角城市群绿色创新绩效研究[J]. 长江流域资源与环境,2022,31(4):738-749.

[31] 吕承超,邵长花,崔悦. 中国绿色创新效率的时空演进规律及影响因素研究[J]. 财经问题研究,2020(12):50-57.

The Structural Characteristics and Influencing Factors of the Green Technological Innovation Spatial Correlation Network in the Middle Reaches of the Yangtze River Urban Agglomeration

WANG Ruiya, PENG Peng, YAN Yuqing, GAO Tao

(School of Geographic Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081, China)

Abstract: Based on green patent data, the modified gravity model, social network analysis and QAP regression analysis were employed to explore the structural evolution and influencing factors of the green technology innovation spatial network in the Middle Yangtze River Urban Agglomeration from 2006 to 2022. The results show that the green technology innovation spatial correlation network of the agglomeration presents a complex structural form with multi-path collaborative transmission and strong network stability. Net beneficiary regions are mainly concentrated in areas with high economic development levels, showing a significant siphon effect. The correlation network has gradually exhibited a core-periphery structural characteristic with Wuhan, Changsha and Nanchang as the cores, where the scope of core and peripheral regions has gradually expanded over time while the semi-peripheral region has tended to shrink. Factors such as differences in economic development level, industrial structure, research funding investment, digital infrastructure and financial development level have played a positive role in promoting the development of the correlation network, while geographical spatial distance and the allocation of educational resources have exerted a certain inhibitory effect on it.

Keywords: green technological innovation; green patent; Yangtze River Middle-Route urban agglomeration; spatial correlation network; social network analysis