文章编号:1003 - 2053(2025)09 - 1924 - 14

中国内地科技人才跨境流动网络多样性与互惠性

柳美君[1,2],杨 杰[3],石 静[3],步 一[4]

(1. 复旦大学全球公共政策研究院,上海 200433; 2. 复旦大学国家发展与智能治理综合实验室,上海 200433;
3. 南京大学信息管理学院,江苏南京 210023; 4. 北京大学信息管理系,北京 100871)

摘 要:多样性和互惠性是维持网络稳定和动态发展的重要因素。具有多样性和互惠性特征的科技人才跨境流动网络有利于培育多元互补的科技人力资源,也有利于国家/地区在全球科技人才流动网络中持续交换和共享知识、信息和其他学术资源。本研究基于Scopus数据库1950 - 2020年收录的科学文献大数据,使用复杂网络分析法和收敛交叉映射法度量中国内地科技人才跨境流动的多样性和互惠性及其演化趋势。基于多样性概念的差异维度,本研究分析国家/地区间科学差距如何影响双方科技人才流动的互惠性。研究发现,中国内地科技人才跨境流动网络的多样性和互惠性不断增强。国家/地区间科研合作距离的增大有利于促进双方科技人才流动的互惠性,知识距离的增大则削弱双方科技人才流动的互惠性。本文为优化中国内地海外引才工作提出政策启示。

关键词:人才跨境流动;网络多样性;网络互惠性;海外引才;收敛交叉映射法;双向因果

中图分类号:C965 **文献标识码**:A

DOI:10.16192/j.cnki.1003-2053.20240725.002

随着知识经济时代的到来,全球人才竞争日益激烈,科技人才跨地区/跨国流动日益频繁[1,2]。随着全球化进程加深、社会转型发展和各国引才政策的出台,全球科技人才跨境流动已从单向或永久性的人才流失、人才流入,演化为人才环流。中国科技人才跨境流动逐渐呈现多元化、复杂化、动态化和网络化特征[3,4]。有效掌握中国内地科技人才跨境流动网络的结构特征和发展趋势有利于我国及时调整海外引才政策,加速实现国家的创新战略。

中国内地与各国/地区保持多元、互惠的人才流动具有多重益处。在国际层面,有利于实现知识在全球范围内的扩散和共享,促进各国创新发展。对中国内地来说,有利于学习和吸收先进知识和技术;有利于中国内地与各国/地区保持在科技、经济、教育和人才等方面的联系和协作,形成通达全球主要人才聚集地的人才网络。

网络节点的多样性和互惠性是保持科技人才跨境流动网络持续发展的关键因素[5]。根据Stirling构建的分析框架[6],多样性包括三个基本要素,即丰富性(variety)、均衡性(balance)和差异性(disparity)。这三个要素分别对应科技人才跨境流动网络中节点,即人才所在国家/地区和机构等,所属丰富性的多寡、节点间人才流动频次的均衡程度以及节点间的差异程度。网络节点的多样性(后文简称为“网络多样性”)程度较高,说明中国内地科技人才跨境流动涉及的目标或来源国家/地区/城市/机构的分布较广、均衡性较高和异质性较强。根据信息加工理论[7],多样性能带来知识、技能、观点、科研资源和社会联系等互补[8],有利于提升组织的创新性和灵活性。提高网络节点的多样性能避免科技人力资本在知识结构、行为模式和社会关系方面的趋同,有利于形成更多元化和差异化的科技人力资源,有利于孕育创新。

网络节点的互惠性(后文简称为“网络互惠性”)反映了网络中节点间的互动,其程度可用有向网络中两个节点形成相互连接的概率来衡量。在科技人才跨境流动网络中,互惠性指各国/地区建立双向连接关系的程度。研究科技人才跨境网络的节点互惠性有利于揭示网络拓扑结构的形成机制并解释其组织原理。当科技人才从A国流向B国的频次

收稿日期:2024 - 03 - 05;**修回日期**:2024 - 07 - 06

基金项目:上海市哲学社会科学规划课题(2021ETQ001)

作者简介:柳美君(1992 -),女,副研究员,博士。杨杰(2000 -),男,博士研究生。石静(1995 -),女,博士后。步一(1994 -),男,蒙古族,助理教授,博士,通讯作者,E - mail: buyi@pku.edu.cn。

中国知网 https://www.cnki.net

与从 B 国流向 A 国的频次存在双向因果关系时,A 国与 B 国在科技人才跨境流动网络中存在互惠性。两国/地区在跨境流动网络中存在互惠性意味着科技人才双向流动,有助于知识、想法和信息的交换和共享,实现双方共赢。

1　研究问题

目前,仅有少量研究从复杂网络视角利用大规模数据研究科技人才跨境流动[9-11],也缺乏对网络结构特征和动态变化的深入分析。本文基于 Scopus 数据库 1950 – 2020 年收录的科学文献大数据,构建中国内地科技人才跨境流动数据集,使用复杂网络分析法和收敛交叉映射法等方法,测量和分析中国内地科技人才跨境流动网络的多样性和互惠性。本文基于多样性概念的差异性维度,探索国家/地区间的科学差距如何影响国家/地区间科技人才流动的互惠性。本文提出以下研究问题:

(1)如何测量中国内地科技人才跨境流动网络的多样性和互惠性?

(2)中国内地科技人才跨境流动网络的多样性和互惠性发展趋势如何?

(3)国家/地区间科学差距如何影响国家/地区间科技人才流动的互惠性关系?

2　数据与方法

2.1　数据来源和预处理

(1)中国内地科技人才跨境流动数据

本文基于 Scopus 数据库构建中国内地科技人才跨境流动数据集。Scopus 收录了全球最广泛的科技及医学文献,是全球最大的摘要和引文数据库。与其他文献数据库相比,例如 Web of Science, Scopus 的收录范围更广,作者姓名消歧效果更好,更适合作为基础数据库测量科技人才流动。本文从 Scopus 数据库获取作者唯一标识、作者机构、机构所在城市及国家/地区、论文发表年份和论文所属学科等相关元数据。

为识别中国内地科技人才,本文获取中国内地机构在 Scopus 中的标准名称及机构 ID,提取这些机构作为署名单位的论文,进而确定以中国内地机构作为署名单位发文的所有作者。本文获取这些作者在 Scopus 数据库中 2021 年 4 月前发表的所有论文,并按论文发表年份排序,记为 p_1 , p_2 , …, p_s 。本文提取作者在每篇论文中的第一署名单位,记为 f_1 , f_2 ,…, f_s ,进而形成每个作者所在机构的时间序列。若作者在 p_s 论文中的第一署名单位 f_s 与其在 p_{s-1} 论文中的第一署名单位 f_{s-1} 不同,即 $f_s \neq f_{s-1}$,则认为该作者在发表 p_s 的当年产生了机构变迁,即流动。基于每次流动前后作者所在的机构名称,本文进一步识别流动事件的相关特征,例如来源和目标机构/城市/国家/地区等。如果流动前后作者机构所属国家/地区发生改变,则认为是跨境流动。

本文获取了 1950 – 2020 年间中国内地科技人才产生的 965,915 条跨境流动事件,包括人才从境外流入中国内地机构,以及从中国内地机构流向境外的流动行为。这些跨境流动事件涉及 182 个国家/地区,5,282 个城市,以及 46,037 个发文机构。本文将从中国内地机构流向境外机构的流动事件定义为跨境流出,反之为跨境流入。下文将“跨国/地区流动”简写为“跨境流动”。

(2)国家/地区层面数据

从 World Bank Open Data 官网①,本文下载了各国/地区每年的 GDP、人口数量及研发(R&D)支出占 GDP 的比例。由于 R&D 支出占 GDP 的比例数据仅涵盖 1996 年及以后年份,本文在回归分析中仅包含 1996 – 2020 年的数据。基于微软学术图谱(Microsoft Academic Graph,简称 MAG)数据集[12],本文获得各国/地区每年的论文发表数量,以及各国/地区间的论文合著频次。MAG 是目前使用较广泛的文献数据集,包含了超过 2 亿篇学术论文的元数据。基于每篇论文中作者的所属机构,以及机构对应的国家,本文使用全计数法,计算各国/地区在 MAG 中每年的论文发表数量,以及论文合著频次。

2.2　研究方法

(1)复杂网络分析法

构建中国内地科技人才跨境流动网络:本文根据中国内地科技人才跨境流动数据分别构建以国家/地区、城市和机构为节点的有向二分网络,并分别研究跨境流出网络(即人才从中国内地流向境外)和跨境流入网络(即人才从境外流向中国内地)。根据两点间的流动频次,节点间的连线具有

① https://data.worldbank.org/。

中国知网　https://www.cnki.net

权重。根据流动年份,本文构建不同年份的二分网络。

网络多样性:根据 Stirling 构建的分析框架计算丰富性、均衡性和差异性。

①丰富性衡量在人才跨境流动二分网络中与中国内地发生科技人才互动的机构、城市和国家/地区数量。节点越多,人才跨境流动涉及的机构、城市和国家/地区越多,代表人才跨境流动的覆盖范围越大。

②均衡性指在人才跨境流动二分网络中,境外机构/城市/国家涉及的人才流动数量分布的平衡程度。如果中国内地与较少国家/地区间人才互动极为紧密,但与大部分国家/地区的人才互动较少,则中国内地科技人才跨境流动网络均衡性程度较低。Simpson 指数是衡量均衡性的常用指标[13-17]。原始的 Simpson 指数与均衡性是负向关系,学者多使用 1 - Simpson 衡量均衡性。本文使用 1 - Simpson 测量人才跨境流动网络的均衡性。

本文以机构为节点的人才跨境流出二分网络为例。在该网络中,与中国内地发生人才流动的境外机构记为 i,境外机构总数为 n,x_i 代表当年人才从中国内地机构流向该机构的频次,t 表示年份。本文使用公式 1 计算该网络的 1 - Simpson。指标值越大,均衡性越强。

$$1 - Simpso\,n_t = 1 - \sum p_i^2 \tag{1}$$

其中 $p_i = x_i / X$,$X = \sum x_i$。

③差异性描述节点间的差异程度。在以国家/地区为节点的跨境流入/流出二分网络中,本文测量中国内地与其他国家/地区在地理、经济、文化和科学活动等方面的差异程度[18]。本文将年份记为 t,国家/地区记为 m,计算中国内地与 m 之间的各个距离变量,包括:

地理距离,$Dis(geo_m)$:基于国家首都的经纬度,本文使用 Python geodesic 包计算中国内地和 m 首都间的最短距离②,测量地理距离。

经济距离,$Dis(GDP_{t,m})$:基于各国/地区在 t 年的 GDP,本文使用中国内地和 m 间 GDP 之差的绝对值测量经济距离。

人口距离,$Dis(population_{t,m})$:基于各国/地区在 t 年的人口总数,本文使用中国内地与 m 间人口总量之差的绝对值测量人口规模距离。

文化距离,$Dis(culture_m)$:基于 Hofstede 提出的文化维度理论[19],本文使用国家/地区间在 6 个维度上③分数之差的绝对值测量国家/地区间在各个维度上的距离,并使用国家/地区间在 6 个文化维度上距离分数的均值,测量国家/地区间整体的文化距离。

科研投入距离,$Dis(R\&D_{t,m})$:基于各国/地区在 t 年的 R&D 支出占 GDP 的比值,本文使用中国内地和 m 在 R&D 支出比例方面的差的绝对值测量科研投入距离。

科研合作距离,$Dis(collaboration_{t,m})$:根据各国/地区间在 t 年在 MAG 数据集中的合著频次,建立各国/地区间每年的合著矩阵。矩阵中的取值为对应国家/地区间在 t 年的合著频次④。本文使用公式 2,计算在 t 年中国内地(记为 c)与 m 在这一矩阵中的余弦距离。

$$科研合作距离_{c,m,t} = 1 - \frac{c \cdot m}{\|c\|\|m\|} \tag{2}$$

科研产出距离,$Dis(publication)_{t,m}$:根据 MAG 数据集中在 t 年各国/地区以第一或最后一位作者身份发表论文的数量计算各国/地区在该年的科研产量。使用中国内地与 m 在 t 年论文数量之差的绝对值测量科研产出差异。

知识距离,$Dis(knowledge)_{t,m}$:知识距离源自经济学领域的技术临近性概念[20,21]。本文根据 MAG 数据集中的 292 个 L1 级领域构建多维科学知识向量 $f_m = [f_m^1, f_m^2, \cdots, f_m^N]$ 以表征 m 的科学知识分布,其中 f_m^N 表示 m 在领域 $N(N = 1, \cdots, 292)$ 的论文占比,本文将中国内地与 m 的知识距离定义为:

$$Dis(knowledge)_{t,m} = 1 - \frac{f_c f_m^T}{\sqrt{(f_c f_m^T)(f_c f_m^T)}} \tag{3}$$

② 当 m 为中国香港、中国澳门和中国台湾时,分别计算北京与中国香港、中国澳门和台北的地理距离。

③ 6 个文化维度包括:权力距离、个人主义、男性气质、不确定性、长期取向和放纵。权力距离指社会中地位较低的个体接受或期望权力不平等分配的程度;个人主义反映对松散结合的社会框架的偏好,即社会总体关注个人利益的程度;男性气质表示对使用武力的社会认同程度;不确定性反映对不确定性和模糊性的态度。长期取向指对延迟其物质、情感和社会需求的满足所能接受的程度;放纵指对人基本需求与享乐欲望的允许程度。

④ 本文使用全计数法计算国家间的合著频次。例如,一篇论文有 4 位作者,其中 2 位来自美国,其他 2 位来自英国和中国内地,则美国 - 英国、美国 - 中国内地和英国 - 中国内地在该论文中各合著 1 次。

中国知网 https://www.cnki.net

网络互惠性:本文使用同配性(Assortativity)指标测量中国内地科技人才跨境流动二分网络的互惠性。网络互惠性指以不同分析单元(例如城市、机构和国家/地区)为节点的网络中从中国内地节点流向境外节点的频次与从境外节点流向中国内地节点的频次是否均衡或对称。节点的度的相关系数被用于衡量网络同配性,衡量网络是否存在度数大的节点更多地与其他度数大的节点相连的倾向。参考 Foster 等人提出的适用于有向网络的同配性指标[22],本文将同配性定义为节点出度(即跨境流出频次)和节点入度(即跨境流入频次)的皮尔逊相关性系数。同配性越接近 1,网络中节点跨境流入和跨境流出的对称性越强,网络互惠性越强;反之,对称性越弱,网络互惠性越弱。

(2)收敛交叉映射法

本文识别中国内地科技人才跨境流入和流出的双向因果关系以更全面地测量网络互惠性。格兰杰(Granger)因果检验是推断时间序列变量之间因果关系的常用方法。但这一方法仅适用于纯随机线性系统,并要求数据具有强耦合性和可分离特点。为克服这一方法的局限,Sugihara 等[23]提出了基于数据驱动的收敛交叉映射法(Convergent Cross Mapping,CCM),为揭示弱耦合变量间的非线性因果关系提供了解决办法。

CCM 是一种用于估计两组动态序列之间因果关系的方法,其基本假设是:若基于序列 x 滞后坐标和序列 y 滞后坐标重构的两组影子流形在拓扑学性质上的动态分布能够实现相互预测,则 x 和 y 之间存在因果关系[23]。这一方法已应用于生态学、生物学和地理学等领域。不同于格兰杰因果检验侧重于分析单向因果关系,CCM 方法侧重于研究变量间的双向因果关系。单向因果关系指一个变量的变化直接导致另一个变量发生单向的、非对称的变化,且这种因果关系是线性或近似线性的。双向因果关系更为复杂,指两个变量间存在相互依赖、相互影响的关系。在这种关系中,一个变量不仅受到另一变量的影响,同时也影响另一变量,形成一个闭环或反馈系统[24]。在 CCM 中,如果两个变量的历史都能预测对方的未来,且这种预测是相互的,则两变量间存在双向因果关系。在国际关系领域,有学者基于国家/地区间的冲突合作数据使用 CCM 识别国际协作中的互惠性[25]。

基于 1950 – 2020 年间以国家/地区为节点的中国内地科技人才跨境流动网络,本文使用 CCM 测量人才每年从中国内地流向其他国家/地区的频次与人才从其他国家/地区流向中国内地的频次间的双向因果关系,从而识别中国内地科技人才跨境流出和跨境流入之间的互惠性。本文构建中国内地与 m 间科技人才流动频次的时间序列,并进行 CCM 因果识别。流动事件共涉及 71 年及 319 个学科。在第 t 年,从中国内地到 m 的人才流动时间序列(记为 $x(t)$),以及从 m 到中国内地的人才流动时间序列(记为 $y(t)$)的规模为:$(t+1-1950)\times 319$。以在 2020 年,中国内地与美国之间人才流动时间序列为例(图 1),从中国内地流向美国的人才流动序列,和从美国流向中国内地的人才流动序列存在非线性特征。中国内地与其他国家/地区产生的人才流动序列的平均斯皮尔曼相关性系数约为 0.5,表明人才跨境流入与流出存在弱耦合特征。综上,中国内地科技人才跨境流动网络是非线性及弱耦合系统,不满足格兰杰因果检验的要求,需使用 CCM 法进行因果识别。

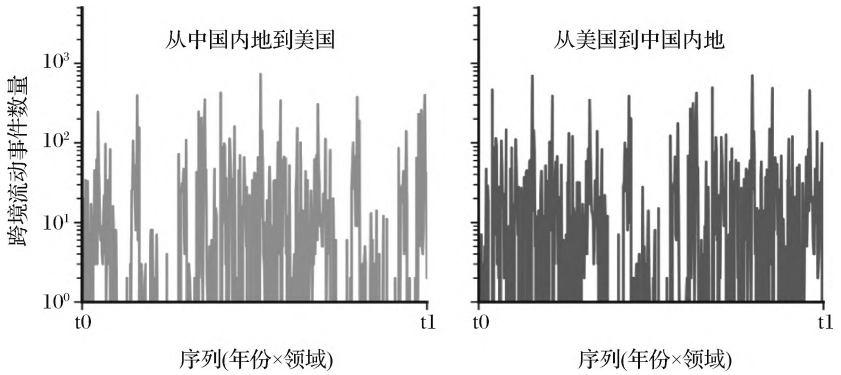


图 1　中国内地与美国之间科技人才流动频次时间序列的非线性与弱耦合特征

Figure 1　The on – linear and weak – coupling characteristics of time series for China – US scientific and technological (S&T) talents mobility frequencies

中国知网　https://www.cnki.net

收敛交叉映射的计算理论基于嵌入理论和状态空间重建技术(State Space Reconstruction),利用非线性动力学系统中的响应过程判定序列双向因果关系。本研究开展收敛交叉映射分析的具体步骤如下:

①重建相空间:通过延迟嵌入技术将原始人才流动序列转换为相空间中的嵌入轨迹,即使用人才流动序列的多阶滞后值,构建高维相空间,从而捕捉原始人才流动序列的动态特征。对于自变量人才流动序列 $x(t)$ 和 $y(t)$,分别构建高维相空间:

$$X(t) = (x(t), x(t-\tau), x(t-2\tau), \cdots, x(t-(m-1)\tau)) \quad (4)$$

$$Y(t) = (y(t), y(t-\tau), y(t-2\tau), \cdots, y(t-(m-1)\tau)) \quad (5)$$

其中,t 表示时间参数;τ 为延迟参数,本文设定 $\tau = N(Fields)$;m 为嵌入维度(embedding dimension),本文将其设定为全部取值范围内取得最优预测的值;$X(t)$ 和 $Y(t)$ 即为人才流动序列的高维相空间重建向量。

②交叉映射:利用 k 最近邻算法(KNN),基于重建相空间中的序列来预测目标序列的未来状态,即找到与目标人才流动序列最相似的邻近点,并利用它们的状态来预测目标人才流动序列的未来状态。

③收敛性检验:通过比较预测值与实际观测值之间的误差评估预测的准确性。对于自变量人才流动序列 $x(t)$ 和因变量人才流动序列 $y(t)$,交叉映射进行使用 $y(t)$ 的高维相空间重建向量 Y 预测 $x(t+\triangle)$,并反过来使用 $x(t)$ 的高维相空间重建向量 X_i 预测 $y(t+\Delta)$,即:

$$\hat{x}(t+\Delta) = f_y(Y(t)) \quad (6)$$

$$\hat{y}(t+\Delta) = f_x(X(t)) \quad (7)$$

其中,f_x 和 f_y 表示预测模型(最近邻算法),$\hat{x}(t+\Delta)$ 和 $\hat{y}(t+\Delta)$ 分别表示 $x(t+\Delta)$ 和 $y(t+\Delta)$ 的预测值,基于此可以计算预测误差,如果预测误差随着重建相空间的维度增加而减小,并且在某个维度后趋于稳定,那么可以认为两个序列存在显著的因果关系。本文使用可决系数 R^2 作为统计指标,以量化预测模型对观测数据的因果解释能力。值得注意的是,在进行收敛交叉映射分析时,人才跨境流入(即从 m 到中国内地)和人才跨境流出(即从中国内地到 m)这两组序列数据会交替分别作为自变量和因变量,最终计算出双向因果关系。

(3)多元回归分析

本文从科研投入、科研合作、科研产出距离以及知识距离 4 个角度反映中国内地与各国/地区的科学差距,并探究这 4 个变量如何影响中国内地与各国/地区间科技人才跨境流动互惠性关系。本文探究中国内地与各国/地区,记为 m,的科学差距是否影响中国内地与 m 在 t 年的科技人才流动存在互惠性关系的概率。

本文的因变量为 $reciprocit\ y_{t,m}$,即中国内地与 m 在 t 年的科技人才流动是否存在互惠性关系。R^2 表示重构影子流形的预测可决系数,$in \rightarrow out$ 表示跨境流入数据预测跨境流出数据;$out \rightarrow in$ 表示跨境流出数据预测跨境流入数据。借鉴 Frank 等人的做法[25],当 $R^2_{CCM(in\rightarrow out),t,m} > 0.25$ 且 $R^2_{CCM(out\rightarrow in),t,m} > 0.25$ 时,即在收敛交叉映射法的范式下,两国/地区科技人才流动序列具有双向因果关系,本文将其定义为人才流动的互惠关系。本文识别在每一年中国内地与其他各国/地区间科技人才流动是否存在互惠关系(即双向因果关系),并产生 $reciprocit\ y_{t,m}$ 变量。如果在 t 年,中国内地与 m 的科技人才流动序列存在双向因果关系,则两国/地区科技人才流动具有互惠关系,$reciprocit\ y_{t,m}$ 取值为 1,否则为 0。

本文的核心自变量包括 $Dis(R\&\ D_{t,m})$,$Dis(collaboration_{t,m})$,$Dis(publication_{t,m})$ 以及 $Dis(knowledge_{t,m})$。控制变量包括:$Dis(geo_m)$,$Dis(GDP_{t,m})$ 和 $Dis(population_{t,m})$ ⑤。本文使用以下公式估计中国内地与各国/地区科技人才流动存在互惠性关系的概率:

$$Reciprocity_{m,t} = \alpha + \beta_1 Dis(R\&\ D_{t,m}) + \beta_4 Dis(collaboration_{t,m}) + \beta_3 Dis(publication_{t,m}) + \beta_4 Dis(knowledge_{t,m}) + Controls + Y_t + \varepsilon \quad (8)$$

其中,$Controls$ 表示三个控制变量,Y_t 表示国家/地区固定效应,这一固定效应的加入可控制随时间变化并对各国/地区科技人才跨境流动产生影响的因素,例如全球性金融危机等。α 和 ε 分别表示常数项和误差项。变量定义、变量描述性统计及变量间斯皮尔曼相关性系数矩阵分别见表 1、表 2 和表 3。本文分别使用最小二乘法(OLS)和 Logistic 回归

⑤ Hofstede 只提供 100 个国家的文化维度分数。如果将各国间文化距离作为控制变量加入,由于变量缺失,样本大量减少。为了确保回归分析中国家/地区样本相对完整,本研究不将国家文化距离作为控制变量。

中国知网 https://www.cnki.net

模型对公式 8 进行估计。由于部分国家/地区相关变量缺失,本文的回归分析中仅包含 157 个与中国内地发生科技人才互动的国家/地区。本文对地理距离、经济距离、人口距离和科研产出距离取自然对数。

表 1　变量定义

Table 1　The definition of variables

变量名	符号	定义
因变量		
人才流动互惠性	Reciprocity	在 t 年,中国内地与 m 间科技人才跨境流动是否存在互惠关系
自变量		
科研投入距离	Dis(R&D)	在 t 年,中国内地与 m 的 R&D 投入占 GDP 的比例之差的绝对值(%)
科研产出距离	Dis(publication)	在 t 年,中国内地与 m 的论文发表数量之差的绝对值
科研合作距离	Dis(collaboration)	在 t 年,中国内地与 m 在科研合作矩阵中的 cosine 距离
知识距离	Dis(knowledge)	在 t 年,中国内地与 m 在知识空间中的距离
控制变量		
地理距离	Dis(geo)	北京与 m 的首都间的最短距离(km)
人口距离	Dis(population)	在 t 年,中国内地与 m 的人口数量之差的绝对值
经济距离	Dis(GDP)	在 t 年,中国内地与 m 的 GDP 之差的绝对值

表 2　变量的基本统计

Table 2　The summary statistics of variables

变量名称	数量	均值	标准差	最小值	最大值
Reciprocity	3,925	0.117	0.322	0	1
Dis(R&D)	2,061	1.035	0.603	0.001	3.124
Dis(collaboration)	3,782	0.675	0.225	0.005	1
Dis(publication)	3,814	11.379	2.19	0.693	13.389
Dis(knowledge)	3,783	0.547	0.255	0.096	1
Dis(GDP)	3,820	28.627	1.326	20.139	30.29
Dis(geo)	3,875	8.947	0.575	6.699	9.866
Dis(population)	3,900	20.966	0.221	16.504	21.068

注:本文对地理距离、经济距离、人口距离和科研产出距离取自然对数。

表 3　变量间斯皮尔曼相关性系数矩阵

Table 3　The matrix of Spearman's correlation coefficients between variables

		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
(1)	Reciprocity	1						
(2)	Dis(collaboration)	−0.052**	1					
(3)	Dis(publication)	0.02	−0.112**	1				
(4)	Dis(knowledge)	−0.352**	0.145**	−0.011	1			
(5)	Dis(GDP)	0.045*	−0.140**	0.930**	−0.021	1		
(6)	Dis(geo)	−0.097**	0.095**	0.017	0.329**	−0.004	1	
(7)	Dis(population)	0.055**	−0.116**	0.699**	0.067**	0.746**	0.097**	1
(8)	Dis(R&D)	−0.037	−0.088**	0.477**	0.246**	0.470**	−0.086**	0.340**

注:*** $P<0.01$, ** $P<0.05$, * $P<0.1$。

中国知网　https://www.cnki.net

3 结果与分析

3.1 网络多样性:丰富性、均衡性和差异性

中国内地科技人才跨境流动网络中的节点数量不断增加,这说明在丰富性维度,网络多样性不断增强。在以机构、城市和国家/地区为节点的跨境流入和流出网络中,节点数量均逐年增多,呈现指数型增长趋势。图 2a – 2f 显示了以机构、城市、国家/地区为节点的跨境流入和流出二分网络中,境内/境外机构、境内/境外城市的数量以及国家/地区数量不断增多。这说明,中国内地科技人才的跨境流动范围越来越广,覆盖了更多的机构、城市和国家/地区。

以国家/地区为节点的科技人才跨境流动网络的节点均衡性不断提高。图 2g – 2l 展示了 1 – Simpson 的变化趋势。从 20 世纪 90 年代开始,这一指标稳定增长。通过对这一指标进行以年份为自变量的简单线性模型拟合,本文发现回归系数均为正数,并在 0.001 的显著水平上具有统计学意义。这说明,中国内地科技人才跨境流动网络均衡性不断增长。

在以国家/地区为节点的中国内地科技人才跨境流动网络中,依据距离变量的性质,节点差异程度的发展趋势具有复杂性特征。经济、人口和科研产出距离方面的节点差异程度逐渐提升;地理和文化距离的节点差异程度先增加后减少;科研投入和科研合作距离的节点差异程度整体下降;知识距离平稳发展,具有一定波动性。

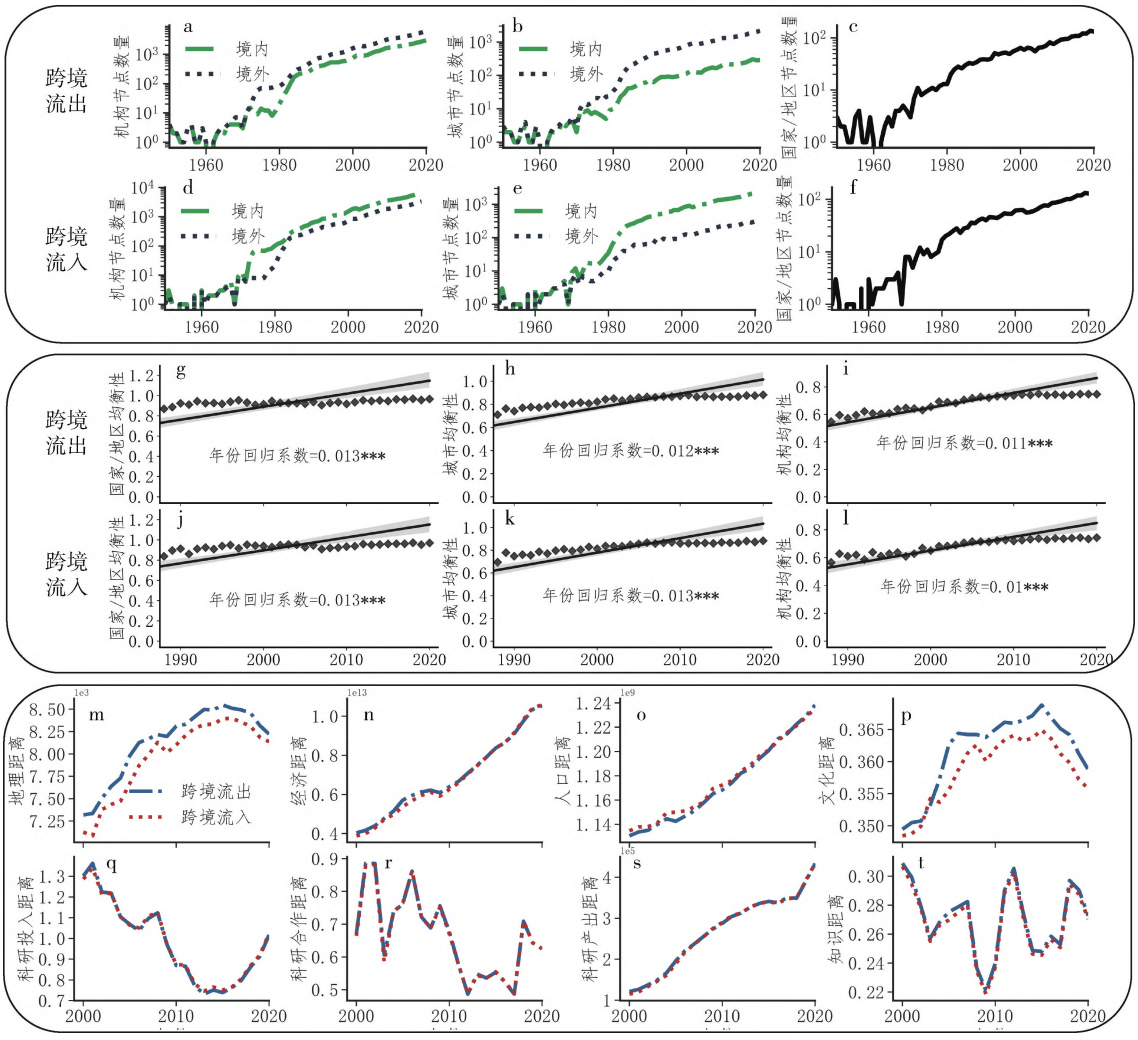


图 2 中国内地科技人才跨境流动网络国家/地区均衡性和差异性演变

Figure 2 The evolution of balance and disparity in the cross – border mobility network of S&T talents

3.2 网络互惠性

网络同配性的时间演变(图 3)以及 CCM 分析

中国知网 https://www.cnki.net

结果(图 4)均表明,在国家/地区层面,中国内地科技人才跨境流动网络互惠性越来越强。在以国家/地区为节点的二分网络中(图 3a),网络同配性整体呈现向上发展的趋势,其值越来越接近于 1。网络同配性指标的上升趋势也体现在以机构为节点的网络中(图 3c)。这说明,在国家/地区和机构层面,人才从中国内地流向境外国家/地区的频次与人才从境外流向中国内地的频次的相关性越来越强,人才流失或人才流入现象越来越不明显,中国内地与境外地区在人才流动方面的对称性和互惠程度越来越强。然而,在以城市为节点的二分网络中(图 3b),网络同配性逐渐下降。

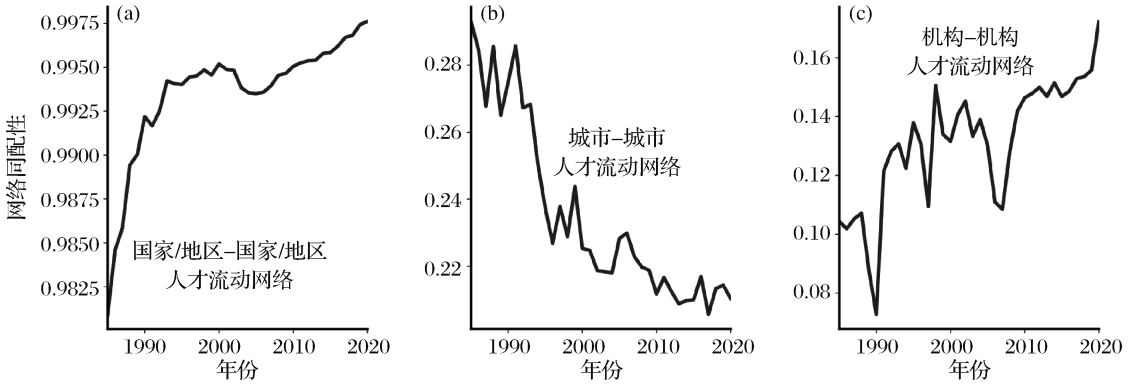


图 3　网络同配性指标发展趋势

Figure 3　The evolution of network assortativity

本文基于中国内地与 70 个国家/地区间的人才流动数据⑥,使用中国内地与该国家/地区的人才跨境流出及流入数据的滞后序列重构影子流形,图 4a 和 4b 表明跨境流出及流入数据对应影子流形的预测可决系数,R^2 ,均大于 0.25,表明在这个阶段以后,中国内地与其他国家/地区间的科技人才流动呈现较强的双向因果关系。

图 4c 和 4d 呈现了中国内地与 70 个国家/地区间人才流出及流入因果效应(基于 CCM 的影子流形的预测可决系数结果)的时间分布,结果表明科技人才流动序列的双向因果关系存在明显的时间趋势:在早期,中国内地与大部分其他国家/地区的科技人才流动不存在因果关系;随着时间推进,与中国内地存在科技人才流动双向因果关系的国家/地区越来越多,且效应越来越强(对应图中颜色越来越深)。

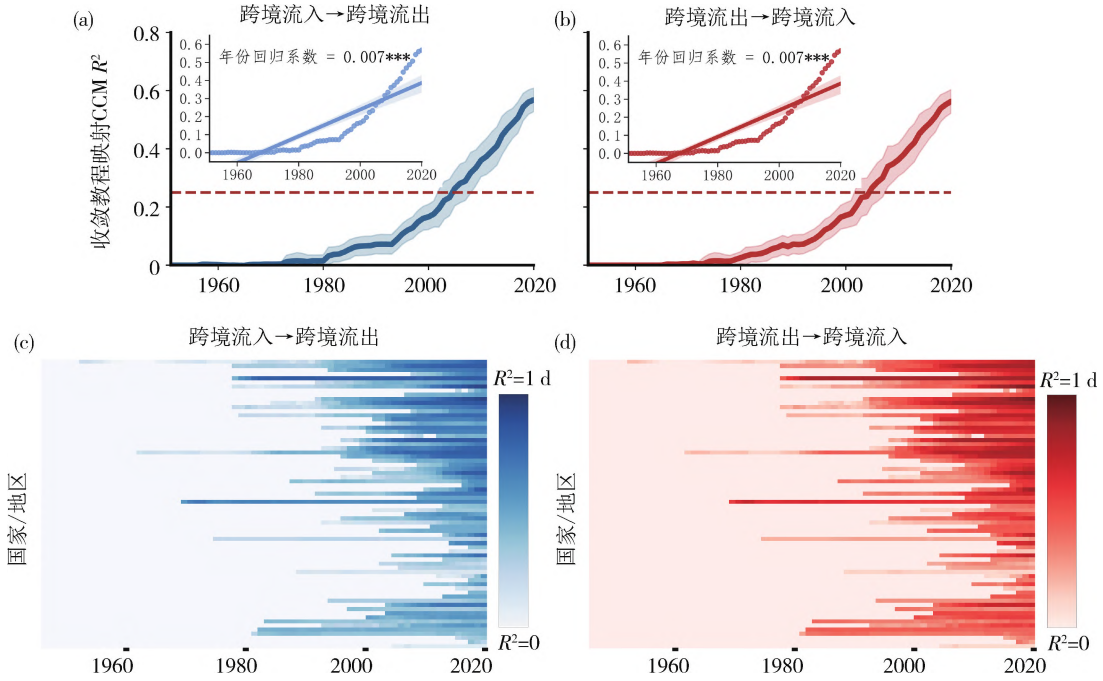
科技人才流动序列的双向因果关系存在一定程度的地区异质性,以 2020 年为例(见表 4),中国内地与发达国家/地区,包括欧洲、北美、澳洲的绝大部分国家/地区,以及区域大国,如印度、南非等国家/地区,的科技人才流动呈现出较强的双向因果关系,而与其他第三世界国家/地区人才流动的因果关系较弱。

3.3　国家/地区科学差距与国家/地区间科技人才流动互惠性的关系

中国内地与各国/地区间科研合作距离方面的增加,有助于提高双方在科技人才跨境流动中保持互惠性关系的概率;中国内地与各国/地区间知识距离方面的增加,降低双方人才流动互惠性关系的概率。本文发现中国内地与各国/地区的科研合作距离与双方间的科技人才流动互惠性关系显著正相关(系数 =0.165,P <0.01,见表 5 模型 1)。中国内地与各国/地区间的科研合作距离越大,双方科技人才流动具有互惠性关系的概率越高。中国内地与各国/地区间的知识距离与双方科技人才流动的互惠性关系显著负相关。中国内地与各国/地区的知识距离越大(系数 = −0.456,P <0.01,见表 5 模型 1),双方科技人才流动具有互惠性关系的概率越低。国家/地区间的科研投入和科研产出距离与双方科技人才流动互惠性关系之间没有显著关系。本

⑥　1950 – 2020 年期间与中国内地产生科技人才互动关系的国家/地区共有 170 个。在 CCM 分析中,由于 100 个国家/地区与中国内地每年仅有零星的科技人才互动,其对应的 CCM 结果 $R^2_{CCM(in\to out)m}=0$,或 $R^2_{CCM(out\to in)m}=0$。在网络互惠性的描述性分析中,本文仅分析 $R^2>0$ 的 70 个国家/地区。

中国知网　https://www.cnki.net



注：图 a 和图 b 中，阴影区域表示 95% 置信区间，水平线虚线代表 0.25 的可决系数。

图 4　中国内地科技人才跨境流动网络双向因果关系演变及时空分布

Figure 4　Evolution of bi – directional causality and spatial and temporal distribution of cross – border mobility networks of S&T talents

表 4　2020 年中国内地与 70 个国家/地区间人才流动的双向因果效应

Table 4　The bidirectional casual effect of talents flow between China's mainland and other countries/regions in 2020

国家(地区)	数值	国家(地区)	数值	国家(地区)	数值	国家(地区)	数值	国家(地区)	数值	国家(地区)	数值	国家(地区)	数值
跨境流入对跨境流出的因果效应													
日本	0.94	瑞典	0.8	意大利	0.71	巴基斯坦	0.61	克罗地亚	0.55	捷克	0.45	爱沙尼亚	0.36
中国香港	0.93	美国	0.79	奥地利	0.71	丹麦	0.61	匈牙利	0.55	肯尼亚	0.44	摩尔多瓦	0.35
德国	0.87	法国	0.77	菲律宾	0.70	澳大利亚	0.61	沙特阿拉伯	0.53	拉脱维亚	0.43	土耳其	0.35
以色列	0.84	英国	0.76	印度	0.70	中国香港	0.60	波兰	0.52	乌兹别克斯坦	0.43	越南	0.34
荷兰	0.84	墨西哥	0.74	新加坡	0.70	斯洛伐克	0.60	埃及	0.51	南非	0.42	亚美尼亚	0.31
俄罗斯	0.84	马来西亚	0.74	芬兰	0.69	阿根廷	0.59	百慕大	0.5	塞尔维亚	0.39	伊拉克	0.29
波多黎各	0.84	加拿大	0.73	巴西	0.68	白俄罗斯	0.58	罗马尼亚	0.49	尼日利亚	0.39	哥伦比亚	0.19
瑞士	0.83	韩国	0.73	挪威	0.67	斯洛文尼亚	0.57	爱尔兰	0.48	马其顿	0.38	利比亚	0.17
中国台湾	0.82	希腊	0.72	葡萄牙	0.67	西班牙	0.57	保加利亚	0.47	埃塞俄比亚	0.38	印度尼西亚	0.16
比利时	0.81	乌克兰	0.71	新西兰	0.67	智利	0.57	泰国	0.45	黎巴嫩	0.37	委内瑞拉	0.14
跨境流出对跨境流入的因果效应													
日本	0.95	瑞士	0.79	奥地利	0.69	阿根廷	0.63	斯洛文尼亚	0.58	捷克	0.47	肯尼亚	0.36
中国香港	0.94	比利时	0.79	葡萄牙	0.68	中国香港	0.62	摩尔多瓦	0.56	罗马尼亚	0.45	塞尔维亚	0.35
德国	0.87	马来西亚	0.78	芬兰	0.68	澳大利亚	0.61	波兰	0.55	埃及	0.44	爱沙尼亚	0.35
中国台湾	0.84	韩国	0.78	印度	0.68	匈牙利	0.61	保加利亚	0.54	白俄罗斯	0.41	越南	0.33
波多黎各	0.84	英国	0.78	菲律宾	0.67	西班牙	0.61	克罗地亚	0.54	黎巴嫩	0.40	哥伦比亚	0.29
俄罗斯	0.82	法国	0.77	巴西	0.66	巴基斯坦	0.61	拉脱维亚	0.53	泰国	0.39	亚美尼亚	0.27
荷兰	0.81	新加坡	0.77	乌克兰	0.66	斯洛伐克	0.60	南非	0.52	埃塞俄比亚	0.37	伊拉克	0.27
以色列	0.81	墨西哥	0.77	新西兰	0.65	乌兹别克斯坦	0.58	百慕大	0.50	马其顿	0.37	印度尼西亚	0.18
瑞典	0.80	加拿大	0.76	挪威	0.64	丹麦	0.58	爱尔兰	0.48	尼日利亚	0.37	利比亚	0.10
美国	0.80	意大利	0.72	希腊	0.64	智利	0.58	沙特阿拉伯	0.48	土耳其	0.36	委内瑞拉	0.10

注：表中数值代表基于 CCM 的影子流形的预测可决系数结果，R^2 。为节省空间，表格中仅保留两位小数。

中国知网　https://www.cnki.net

研究使用了 Logistic 回归模型得到了相似的结果(见表 5 模型 4)。

图 5a 和 5b 分别展示了当其他解释变量设为均值时,科学合作距离与知识距离的边际效应。图 5a 表明,当国家/地区科学合作距离从 0 提升至 1 时,双方人才流动存在互惠性的概率从 26.4% 上升至 36.2%。图 5b 表明,当知识距离从 0 提升至 1 时,双方人才流动存在互惠性的概率从 48.2% 下降至 10.0%。图 5c 表明,当科研合作距离处于较高水平,知识距离处于较低水平时,中国内地与各国/地区在科技人才流动方面保持互惠性关系的概率较高。

在不同时期,科学合作距离和知识距离对中国内地与各国/地区科技人才流动互惠性关系的重要性有所变化。在 1996 – 1999 年间,科研合作距离与互惠性间存在显著正向关系,而知识距离的回归系数虽然为负但不显著(见表 5 模型 2)。这表明在这一时期,科研合作距离在两个变量中起主导作用。然而,新世纪以来,科研合作距离的回归系数不再显著,而知识距离的回归系数则显著为正(见表 5 模型 3)。这说明在这一时期,知识距离在两个变量中对互惠性关系起主导作用。本研究采用了 Logistic 回归模型,得到类似结果(见表 5 模型 5 – 模型 6)。以上研究结果表明,在早期阶段,科研合作距离对国家/地区间科技人才流动互惠性的影响较为显著。随着全球化进程的深入,科研合作距离不再显著影响互惠性关系,而知识距离主要决定国家/地区间科技人才流动是否具有互惠性。

表 5　OLS 与 Logistic 回归结果

Table 5　The regression results of OLS and Logistic models

	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4	模型 5	模型 6
		OLS 回归模型			Logistic 回归模型	
变量名称	1996 – 2020	1996 – 1999	2000 – 2020	1996 – 2020	1996 – 1999	2000 – 2020
Dis(R&D)	−0.032	0.305***	−0.070***	−0.108	3.009***	−0.355**
	(0.023)	(0.049)	(0.025)	(0.140)	(0.817)	(0.157)
Dis(collaboration)	0.165***	0.225***	0.113	1.041**	3.496**	0.675
	(0.060)	(0.082)	(0.069)	(0.416)	(1.585)	(0.475)
Dis(publication)	0.001	0.025	−0.142***	0.152	0.816**	−1.248***
	(0.017)	(0.015)	(0.041)	(0.156)	(0.366)	(0.346)
Dis(knowledge)	−0.456***	−0.163	−0.374***	−3.342***	−2.519	−2.974***
	(0.091)	(0.151)	(0.099)	(0.717)	(3.142)	(0.812)
Dis(GDP)	−0.119***	0.030	−0.176***	−0.891***	−0.025	−1.248***
	(0.019)	(0.020)	(0.032)	(0.156)	(0.357)	(0.250)
Dis(geo)	−0.186***	0.107*	−0.205***	−0.991***	1.261	−1.098***
	(0.028)	(0.060)	(0.029)	(0.173)	(1.064)	(0.191)
Dis(population)	−0.212***	−0.162*	−0.218***	−1.274***	−1.881	−1.302***
	(0.034)	(0.096)	(0.035)	(0.250)	(3.038)	(0.284)
年份固定效应	YES	YES	YES	YES	YES	YES
Observations	2,061	247	1,814	2,061	247	1,814
Adjusted R^2	0.240	0.422	0.295			
Pseudo – R^2				0.223	0.547	0.276

注:括号中为稳健性标准误。* 表示 $P<0.1$;** 表示 $P<0.05$;*** 表示 $P<0.01$。

中国知网　https://www.cnki.net

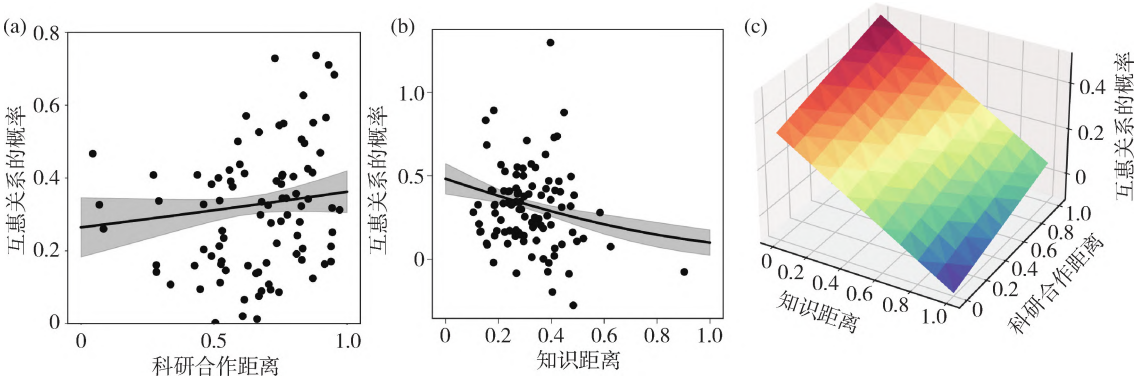


图 5 科研合作距离以及知识距离对互惠性的边际效应

Figure 5 The marginal effects of scientific collaboration distance and knowledge distance between China and other countries/regions on reciprocity

4 讨论

基于 Scopus 提供的科学文献大数据,本文使用复杂网络分析法及收敛交叉映射法测量中国内地科技人才跨境流动网络的多样性和互惠性,并探究两种网络特征的发展趋势,以及国家/地区间科学差距如何影响双方科技人才流动的互惠性关系。研究发现,中国内地科技人才跨境流动网络在丰富性和均衡性维度上呈现不断增加的多样性;在差异性维度,中国内地科技人才跨境流动网络的发展趋势呈现复杂化特征。经济和科研产出距离方面的节点差异程度不断增加,地理和文化距离方面的节点差异程度先增加后降低,科研投入和科研合作距离方面的节点差异程度整体下降。在地理和文化距离方面,中国内地科技人才跨境流动与全球化发展趋势一致,即先快速发展,后呈逆全球化趋势。2000 – 2015 年间,随着全球化进程深入发展,中国内地更倾向于与地理和文化距离较远的国家/地区进行人才互动。从 2016 年开始,英国脱欧、美国大选等不确定因素导致国际形势更加复杂,逆全球化思潮不断涌现。在这一背景下,中国内地科技人才跨境流动倾向于与地理和文化距离较近的国家/地区开展人才互动,呈现一定程度的内向化发展趋势。此外,中国内地整体上越来越倾向于与在科研方面合作较密切、科研投入差距较小的国家/地区进行人才互动,同时也倾向于与经济和科研产出差距较大的国家/地区进行人才互动。

研究发现,国家/地区间的知识和科研合作距离对科技人才流动的互惠性有显著影响。知识距离越大,双方科技人才流动存在互惠性关系的概率越低。知识距离的增加意味着两国/地区在知识产出结构和全球知识分工方面的差异增大,可能导致科技人才缺乏共同的知识基础。科技人才的流动可根据流动目的分为短期流动,如留学或学术访问,以及长期流动,如移民或长期工作。根据吸收能力理论,共同的知识基础是相互学习的必要条件之一[26]。如果国家/地区间的知识距离较大,科技人才进行相互交流和学习的可能性较低。来自科技实力较弱国家/地区的科技人才可能会单向流入科技实力较强的国家/地区进行学习或交流访问。

中国内地与其他国家/地区间的科学合作距离越大,双方科技人才流动越可能具有互惠性关系。科研合作距离越大,表示两国的科研合作较少;反之,科研合作较为紧密。在科研合作网络中,各国/地区科技人才频繁交流和共享信息、技能、经验和其他学术资源[27]。随着合作关系的深化,两国/地的科技人才逐渐形成相似的信息、观点、知识结构、习惯和技能[28]。这种趋同性使两国/地科技人才在技能、知识、观点和学术资源等方面的互补性较弱。相反,如果两国/地的科研合作距离较大,双方科技人才所具备的知识和技能可能存在较强互补性。根据资源基础理论,互补性资源促使协作互动[29]。互补性驱使科技人才前往对方国家/地区留学或学术访问,此外,互补性还使两国/地科技人才具备对方劳动力市场中所需技能,从而促进了以移民或长期工作为目的的双向的人才流动。因此,中国内地与其他国家/地区间科研合作距离越大,双方科技人才流动互惠性越强。虽然本文发现中国内地科技人才跨境流动网络的整体互惠程度越来越强,但这并不意

中国知网 https://www.cnki.net

味着不同国家/地区在人才跨境流动网络中获益程度相等。例如,有研究发现美国依然是跨境流动网络中的主要获益者,能够吸引年轻且高产的科学家[30]。

本文对优化中国内地海外引才工作提出几点政策启示。首先,要充分利用多元化和差异化的科技人力资源储备,推动颠覆性创新的发展。其次,中国内地与其他国家/地区间科技人才流动互惠性逐渐增强,这说明单向的人才流入和流出现象减弱,而人才循环日益明显。在引进海外人才方面,应该从简单追求人才数量转向提高人才质量和优化人才结构。由于缺乏共同的知识基础或在信息、观点和学术资源方面的互补性较弱,中国内地与知识距离较大的国家/地区以及科研合作紧密的国家/地区之间的人才流动的互惠程度相对较低。可采取有针对性的人才交流项目或专门的人才引进政策,加强中国内地与这些国家/地区间的人才流动,促进人才流动互惠性。

参考文献:

[1] Franzoni C, Scellato G, Stephan P. Foreign - born scientists: Mobility patterns for 16 countries[J]. Nature Biotechnology, 2012, 30(12): 1250 - 1253.

[2] Li F, Tang L. When international mobility meets local connections: Evidence from China[J]. Science and Public Policy, 2019, 46(4): 518 - 529.

[3] 李子璇,杨波. 中国科研人员的国际流动趋势研究[J]. 图书情报工作, 2021, 65(16): 25 - 34. Li Z X, Yang B. A study on the trend of international mobility of chinese researchers[J]. Library and Information Service, 2021, 65(16): 25 - 34.

[4] 柳美君,杨杰,杨斯杰,等. 中国与"一带一路"沿线国家的科技人才流动研究[J]. 科学学研究, 2025, 43(3):488 - 506. Liu M J, Yang A J, Yang S J, et al. Research on the mobility of scientific and technical talents between China and countries along the Belt and Road[J]. Studies in Science of Science, 2025,43(3): 488 - 506.

[5] Dakin R, Ryder T B. Reciprocity and behavioral heterogeneity govern the stability of social networks[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2020, 117(6): 2993 - 2999.

[6] Stirling A. A general framework for analysing diversity in science, technology and society[J]. Journal of The Royal Society Interface, 2007, 4(15): 707 - 719.

[7] Harrison D A, Klein K J. What's the difference? Diversity constructs as separation, variety, or disparity in organizations[J]. Academy of Management Review, 2007, 32(4): 1199 - 1228.

[8] Liu M, Bu Y, Chen C, et al. Pandemics are catalysts of scientific novelty: Evidence from COVID - 19[J]. Journal of the Association for Information Science and Technology, 2022, 73(8): 1065 - 1078.

[9] 侯纯光,杜德斌,刘承良,等. 全球留学生留学网络时空演化及其影响因素[J]. 地理学报, 2020, 75(4): 681 - 694. Hou C G, Du D B, Liu C L, et al. Spatio - temporal evolution and factors influencing international student mobility networks in the world[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(4): 681 - 694.

[10] 侯纯光,杜德斌,段德忠,等. "一带一路"沿线国家或地区人才流动网络结构演化[J]. 地理科学, 2019, 39(11): 1711 - 1718. Hou C G, Du D B, Duan D Z, et al. The evolution of the network structure of talent mobility in countries or regions along the "Belt and Road"[J]. Scientia Geographica Sinica, 2019, 39(11): 1711 - 1718.

[11] Verginer L, Riccaboni M. Talent goes to global cities: The world network of scientists' mobility[J]. Research Policy, 2021, 50(1): 104127.

[12] Wang K, Shen Z, Huang C, et al. Microsoft academic graph: When experts are not enough[J]. Quantitative Science Studies, 2020, 1(1): 396 - 413.

[13] Wang J, Thijs B, Glänzel W. Interdisciplinarity and impact: Distinct effects of variety, balance, and disparity[J]. PloS One, 2015, 10(5): e0127298.

[14] Simpson E H. Measurement of diversity[J]. Nature, 1949, 163(4148): 688 - 688.

[15] Fu Y H, Huang C Y, Sun C T. Using global diversity and local topology features to identify influential network spreaders[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2015, 433344 - 355.

[16] Eagle N, Macy M, Claxton R. Network diversity and economic development[J]. Science, 2010, 328(5981): 1029 - 1031.

[17] 唐惠燕,陈蓉蓉,郑新艳,等. 馆员合作研究中馆员多样性的考察与分析——基于南京农业大学图书馆的案例分析[J]. 图书情报工作, 2018, 62(11): 64 - 71. Tang H Y, Chen R R, Zheng X Y, et al. Librarians' diversity in the collaboration: A case study of Nanjing Agricultural University library[J]. Library and Information Service, 2018, 62(11): 64 - 71.

[18] 柳美君,步一,杨斯杰. 科研团队成员国别差异性的

中国知网 https://www.cnki.net

测度、演变及其与团队产出影响力的关系[J]. 情报学报, 2024. Liu M J, Bu Y, Yang S J. The measurement, evolution, and relationship between country disparity and team impact[J]. Journal of the China Society for Scientific and Technical Information, 2024, accepted.

[19] Hofstede G, Hofstede G J, Minkov M. Cultures and organizations: Software of the mind[M]. Mcgraw - hill New York, 2005.

[20] Catalán P, Navarrete C, Figueroa F. The scientific and technological cross - space: Is technological diversification driven by scientific endogenous capacity? [J]. Research Policy, 2022, 51(8): 104016.

[21] Guan J C, Yan Y. Technological proximity and recombinative innovation in the alternative energy field[J]. Research Policy, 2016, 45(7): 1460 - 1473.

[22] Foster J G, Foster D V, Grassberger P, et al. Edge direction and the structure of networks[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2010, 107(24): 10815 - 10820.

[23] Sugihara G, May R, Ye H, et al. Detecting causality in complex ecosystems[J]. Science, 2012, 338(6106): 496 - 500.

[24] Camps - Valls G, Gerhardus A, Ninad U, et al. Discovering causal relations and equations from data[J]. Physics Reports, 2023: 10441 - 11468.

[25] Frank M R, Obradovich N, Sun L, et al. Detecting reciprocity at a global scale[J]. Science Advances, 2018, 4(1): eaao5348.

[26] Boschma R. Proximity and innovation: A critical assessment[J]. Regional Studies, 2005, 39(1): 61 - 74.

[27] McFadyen M A, Cannella Jr A A. Social capital and knowledge creation: Diminishing returns of the number and strength of exchange relationships[J]. Academy of Management Journal, 2004, 47(5): 735 - 746.

[28] Coleman J S. Social capital in the creation of human capital[J]. American Journal of Sociology, 1988, 94: S95 - S120.

[29] Cantner U, Meder A. Technological proximity and the choice of cooperation partner[J]. Journal of Economic Interaction and Coordination, 2007: 245 - 65.

[30] Verginer L, Riccaboni M. Brain - circulation network: The global mobility of the life scientists[R]. 2279 - 6894, K. U. Leuven, 2018.

Diversity and reciprocity of cross - border mobility networks of scientific and technological talents located in China's mainland

LIU Mei - jun[1,2], Alex J. Yang[3], SHI Jing[3], BU Yi[4]

(1. Institute for Global Public Policy, Fudan University, Shanghai 200433, China; 2. Comprehensive Laboratory of National Development and Intelligent Governance, Fudan University, Shanghai 200433, China; 3. School of Information Management, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 4. Department of Information Management, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The cross - border mobility of scientific and technological (S&T) talents, a critical occurrence in contemporary society, holds substantial economic and political connotations. The domains of global politics, economy, and society are swiftly evolving towards heightened complexity, morphing into a broader, more intricately linked, diverse, and dynamic system. Phenomena such as technological innovation, the spread of pandemics, and the increasing intricacy of the world question a linear, unidirectional, and static perspective that has largely guided studies on scientists´ mobility. The dialogue on the cross - border mobility of S&T talents has progressed from the concepts of brain drain and brain gain to the idea of brain circulation, a term coined to illustrate the rising trend of temporary, transnational, and cyclical movements among highly skilled workers. This shift in paradigm necessitates an understanding of S&T talents´ global mobility through the lens of complex network analysis. Diversity and reciprocity play crucial roles in upholding the stability and dynamics of networks. The diversity and reciprocity of cross - border mobility networks of S&T talents contribute to the creation of diverse and complementary human resources in the field of science and technology. Diversity and reciprocity in the global mobility network of S&T talents promote sustainable exchange and sharing of knowledge, information, and other academic resources within such a network. While the cross - border mobility of S&T talents has been widely studied, research on the complex network attributes of the global mobility network of S&T talents is limited. Moreover, quantifying global mobility of S&T talents on a large scale presents challenges. This research, based on extensive bibliometric data collected from the Scopus database spanning from 1950 to 2020, measures cross - border mobility of S&T talents by examining changes in their affiliations over time. The study identifies over 0.96 million cross

中国知网 https://www.cnki.net

– border mobility events generated by S&T talents located in China's mainland, associated with 182 countries/regions, 5,282 cities, and more than 46 thousand institutions. The study employs complex network analysis methods and convergence cross mapping to measure the diversity and reciprocity of the global mobility network generated by China's mainland's S&T talents and to explore the developmental trends of these two network characteristics. Considering four key dimensions of disparities in science and technology development between countries/regions, this research analyzes how such disparities influence the reciprocity of mobility of S&T talents between countries/regions. The study uncovers that the diversity and reciprocity of cross – border mobility networks generated by China's mainland's S&T talents are continually strengthening. Research collaboration distance between nations/regions fosters reciprocal S&T talent mobility, while cognitive distance between nations/regions obstructs such reciprocity. This research provides several policy suggestions for enhancing the recruitment of overseas S&T talents to China's mainland. Firstly, it is crucial to fully leverage the diverse and varied reserves of S&T human resources to stimulate the growth of disruptive innovation. Secondly, the reciprocity of S&T talents mobility between China's mainland and other countries/regions is progressively intensifying. This indicates a diminishing trend in the one – way inflow and outflow of S&T talents, while brain circulation is increasingly noticeable. When it comes to attracting overseas S&T talents, policy emphasis should transition from merely seeking a large number of talents to enhancing the quality and optimizing the composition of talents. The reciprocity level in the cross – border mobility of S&T talents between China's mainland and countries/regions with a significant cognitive distance, as well as those with close research collaboration, tends to be lower due to the absence of a common knowledge foundation or weak complementarity in terms of information, knowledge, perspectives, and academic resources. Implementing targeted talent exchange initiatives or specific policies for attracting talents can bolster the mobility of talents between China's mainland and these countries/regions, thereby enhancing the reciprocity of talent mobility.

Key words: cross – border mobility of S&T talents; network diversity; network reciprocity; introduction of overseas talents; convergent cross mapping; bi – directional causality

(上接第 1910 页)

with stronger patent strength tend to initiate patent wars, but also reveals that entities with relatively weaker patent strength have become important initiators of patent wars. Patent wars have diversified attack forms, such as patent litigation or 337 investigations. Patent wars encountered by Chinese enterprises in emerging and mature markets are heterogeneous. The initiator types and attack forms vary markedly between these markets. Patent wars exhibit various patterns in different markets, which provide the scientific basis for preventing and addressing risks associated with global patent wars.

The growing risk of patent wars should be prevented and addressed in both mature and emerging markets based on types and heterogeneity of patent wars. Chinese enterprises should implement differentiated strategies tailored to specific features of each market and types of patent war initiators. When operating in emerging markets, Chinese enterprises should not only guard against competitors with stronger patent strength, but also be wary of competitors with relatively weaker patent strength who may initiate protracted patent wars. NPEs have become important initiators of patent wars. As a result, Chinese enterprises should screen NPEs within their respective technology sectors, monitor their patent operations and litigation activities, and conduct preemptive patent warning. Enhancing patent strength is the cornerstone of addressing patent wars. Accordingly, Chinese enterprises should proactively file patent applications in target markets based on their business development plans, to establish the patent system for preventing and addressing patent wars.

Key words: patent war; emerging market; mature market; type research

中国知网　https://www.cnki.net