



科学学研究
Studies in Science of Science
ISSN 1003-2053, CN 11-1805/G3

《科学学研究》网络首发论文

题目：世界科学活动中心研究——基于高质量科学家流动
作者：韩芳，张汝昊，陈光，袁军鹏
DOI：10.16192/j.cnki.1003-2053.20221021.001
收稿日期：2022-06-01
网络首发日期：2022-10-25
引用格式：韩芳，张汝昊，陈光，袁军鹏. 世界科学活动中心研究——基于高质量科学家流动[J/OL]. 科学学研究.
<https://doi.org/10.16192/j.cnki.1003-2053.20221021.001>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

世界科学活动中心研究——基于高质量科学家流动

韩芳¹ 张汝昊¹ 陈光^{2*} 袁军鹏¹

(1 中国科学院文献情报中心, 北京 100190; 2 中国科学院学部工作局, 北京, 100190)

摘要: 高质量科学家的流动代表了科学知识的传播, 基于高质量科学家的流动刻画近代世界科学活动中心的转移规律, 对于国家制定科技战略, 推动科技进步具有重要意义。该研究基于 Scopus 数据库 1921—2020 年发表的论文数据, 提取高质量科学家的跨国流动序列, 从而对近百年来世界科学活动中心的转移进行分析, 并从学科层次研究科学活动中心的转移规律。研究结果显示: (1) 科学活动中心与学科活动中心具有不唯一性, 且随时间呈现多中心化, 美国、英国一直占据科学活动中心位置, 其次为德、意等发达国家, 是多个阶段的世界科学活动中心与学科活动中心; (2) 科学活动中心与学科活动中心具有转移性, 且转移方向不是单向的, 但二者的演化具有一致性, 即科学活动中心可视为不同学科活动中心的堆叠效应; (3) 不同时期不同学科对于科学活动中心形成的贡献度不同, 随着科学多元化与学科交叉融合, 这种贡献差异性降低; (4) 中国自 2004 年成为世界科学活动中心之一, 但与发达国家相比仍有较大差距, 需进一步加大科研投入力度, 促进学科平衡发展。

关键词: 世界科学活动中心; 学科活动中心; 学术论文; 高质量科学家; 跨国流动

中图分类号: G350 **文献标识码:** A

“世界科学活动中心”的概念由科学学奠基人贝尔纳(J. D. Bernal)在《历史上的科学》(1957年)首次提出, 代表了全球、国家与城市的科学与技术活动中心^[1]。之后, 很多学者应用“科学活动中心”反映一个国家或地区的科学实力, 并基于不同方法对科学活动中心及其转移规律进行研究^[2-14]。把握世界科学活动中心与学科活动中心的形成与转移特征, 对于提升国家科学水平, 平衡学

收稿日期: 2022-06-01; **修回日期:** 2022-07-20

基金项目: 科技部科技创新战略研究专项(ZLY202140)。

作者简介: 韩芳(1987—), 女, 山西临汾人, 助理研究员, 研究方向为文献计量学;
张汝昊(1995—), 男, 福建福鼎人, 博士研究生, 研究方向为科学计量方法与应用;
陈光(1977—), 男, 辽宁抚顺人, 副研究员, 研究方向为科技政策。通讯作者, Email: chenguang@cashq.ac.cn;
袁军鹏(1973—), 男, 山东临沂人, 研究员, 研究方向为科学计量学。

科发展，有效进行科技体制改革与政策调整具有重要意义。

然而，已有相关研究多基于研究成果或科技事件对科学活动中心展开分析，忽略了背后科研人员的因素^[2]。而在日益深化的全球化背景下，科研人员间的合作日益频繁，科研成果已无法用于判定世界科学活动中心^[3-5]。在新的发展背景下，需要寻求新的指标重新对世界科学活动中心进行定义。高质量科学家的流动被认为代表了重要科学知识的流动^[15,16]。因此，一些研究基于高质量科学家的流动对世界科学活动中心进行了刻画并取得了一定成果^[2,6]。然而，这些研究多局限于数据量较小的科学家群体，无法对世界科学活动中心的转移规律进行系统分析。

基于此，本研究基于 Scopus 数据库 1921—2020 年发表的论文数据，提取各学科 top1% h 指数科学家的跨国流动序列，对近百年来高质量科学家的流动进行分析，从而掌握近百年来世界科学活动中心的转移规律。此外，本研究将在某学科发展中占据领先地位的国家或地区定义为“世界学科活动中心”，从学科层次研究世界科学活动中心的转移规律。

1. 研究回顾与评述

“世界科学活动中心”的概念自提出以来一直广受研究人员关注。已有研究主要采用科学研究成果或科技大事件等指标研究世界科学活动中心。如 1962 年，日本科学史家汤浅光朝将一个国家科学成果占同时期世界科学成果 25% 以上定义为“世界科学活动中心”，揭示了 1501—1950 年世界科学活动中心转移过程^[7]。我国著名的科学计量学家赵红州用《复旦大学学报》所载的“自然科学大事记”对世界科学活动中心转移现象进行了研究^[8]。此外，一些学者从学科层次对科学活动中心的转移规律进行分析^[9,10]，证实学科结构与科学活动中心的形成密切相关。如冯焯与梁立明^[10]基于 1501 年至 1970 年的重大科学与文化事件数据，对物理学、生物学、化学、天文学、医学、数学和地学七个学科的学科活动中心转移进行分析，证明了学科活动中心与科学活动中心的一致性。

然而，在全球化背景下，科学成果数量已无法用来判定世界科学活动中心^[3-5]。一些研究证实科研人员的迁移可用于表征世界科学活动中心的形成与转移^[6]。尤其是高质量科学家，对流入国产生的影响更大。相比整个群体，高质量科

学家的流动被认为可以更精确反映科学知识的真正流动^[15,16]。一些研究基于诺贝尔奖获得者的流动历程，对世界科学活动中心的形成进行分析，证实了二者的紧密关系^[2,6]。尽管诺奖得主代表了高质量科学家的“顶级科学精英”^[17]，然而，由于诺奖得主数量较少，且仅涉及六个学科，无法全面反映高质量科学家群体的流动，从而不能完全反映世界科学活动中心的形成及转移规律。

现有一些关于高质量科学家的研究与关于人员跨国流动的研究，但将两者结合的研究还较为匮乏。如何对流动人员的“质量”进行评价，是研究高质量科学家流动的基础。学术论文被认为是科研人员的主要知识载体。一个学者拥有的学术论文越多，或被引用次数越多，说明该学者学术水平越高，可被认为属于“高质量科学家”群体。2005年，Hirsch提出h指数^[18]：一个学者的h指数代表其有h篇论文分别被引用至少h次。尽管存在一些不足^[19]，但其仍被普遍认为可在一定程度弥补传统文献计量指标在学者评价上的缺陷，在Web of Science, Google Scholar, Scopus以及学术机构等评估中得到广泛应用^[20]。学术论文涵盖了作者的署名国家、发表年份等信息，通过对科学家发表所有文献的署名国家变更情况进行分析，可获取科研人员的跨国流动历程。基于该方法，Laudel基于1980-2002年发表于Nature、Science上的所有学术论文，将拥有≥3篇Nature与Science文章的作者定义为“高质量科学家”，对“血管紧张素”研究领域的高质量科学家群体流动特征进行了研究^[16]。尽管这些研究仅局限于单个学科或短时期内的小群体科学人员流动，但证实了学术论文可用于刻画特定领域高质量科学家的流动。

基于以上分析，本文基于Elsevier的Scopus数据库，选取1921—2020年这100年长历史周期发表的论文数据，将各学科top1% h指数的科学家界定为“高质量科学家”。基于高质量科学家发表的论文相关信息，分析高质量科学家的跨国流动历程，并基于高质量科学家流动数量及其变化规律对世界学科活动中心进行度量。此外，本研究从学科层次探讨不同学科活动中心的转移规律，以及其与科学活动中心的关系。

2 数据来源与方法

2.1 数据来源与科技人员流动序列聚合

本研究数据来源为 Elsevier 的 Scopus 数据库，时间范围为 1921 年至 2020 年，共包含科技文献条目数量 80,963,897 篇，涵盖 28 个学科大类，涉及作者 41,671,835 位，这些作者实体与机构实体已由 Scopus 匹配算法进行了规范控制与歧义消除。Scopus 为每个作者分配了单独的 ID，可通过其论文识别主题领域等。

本研究数据分析基于 Elsevier 的 ICSR Lab。ICSR Lab 是面向数据科学、科学计量学研究人员数据分析研究平台，其运行基于 PySpark 架构，并以在线编程的方式提供服务。这使得本研究中的科学计量数据挖掘及分析工作能够灵活、高效地开展。

基于 Scopus 学科分类，本研究将 28 个学科 top1% h 指数的科研人员定义为高质量科学家，对其跨国流动进行分析。通过抽取研究时间段（1921—2020）内的每一高质量作者 ID 及其对应的单个或多个所属单位，将所属单位中的国家信息以发文时间为序存储到作者实体的数据结构中，形成科技人员流动序列。如作者 i 在 1921 年至 2020 年，分别于 1950 年、1955 年及 1960 年发表三篇论文，署名单位所属国家分别为中国、美国与中国。则其跨国序列存储如下：

[[{China,1950},{USA,1955},{China,1960}]]。需要注意的是，我们假设科技文献是科技人员的主要产出，且能够反映科技人员本人的真实流动。这些假设可能造成一定误差，但在基于大规模数据的研究中，我们认为这些误差对结论的干扰是有限的。此外，本文中的跨国流动是指发表论文署名国家的变迁，而非科学家的国籍或物理空间的流动。

2.2 高质量科学家跨国流动网络分析

高质量科学家的流入、流出反映了一个国家高层次科研人员的流动活力。研究显示，多数国家在 100 年中，高质量科学家的流入与流出总量接近（见章节 3.2），但部分国家在一定时间段内两个指标值相差较大。因此，评价世界科学活动中心时应综合考虑流入、流出量。本文以高质量科学家的跨国流动信息为基

础，构建跨国流动网络，并应用社会网络分析方法，对一个国家的高质量科学家入度与出度进行分析。

在跨国流动网络中，节点代表高质量科学家跨国流动涉及的国家，两个国家间高质量科学家的流动频次为其连边的权重。由于科学家的流动是有向的，因此，该网络为有向网络。有向网络节点的度包括出度与入度，入度是指其它节点指向该节点的边的权重和，出度为从该节点指向其它节点的边的权重和。国家 i 第 t 年的入度 $degree_{in}(i_t)$ 与出度 $degree_{out}(i_t)$ 由公式 (1) 计算：

$$\begin{aligned} degree_{in}(i_t) &= \sum_{j=1, j \neq i}^N k_{ijt} w_{ijt} \\ degree_{out}(i_t) &= \sum_{j=1, j \neq i}^N k_{ijt} w_{ijt} \end{aligned} \quad \begin{aligned} k_{ijt} &= 1, \text{ 当 } i \text{ 与 } j \text{ 有连边时;} \\ k_{ijt} &= 0, \text{ 当 } i \text{ 与 } j \text{ 无连边时;} \end{aligned} \quad (1)$$

其中， N 为 1921-2020 年发生高质量科学家跨国流动行为的国家总数。 w_{ijt} 为第 t 年节点 i 与 j 间连边的权重。在本研究中，对节点的入度、出度由公式 (2) 进行 $min-max$ 标准化处理。则国家 i 第 t 年的标准化入度、标准化出度为：

$$\begin{aligned} degree_{in-norm}(i_t) &= \frac{degree_{in}(i_t) - degree_{in}(x_t)_{\min}}{degree_{in}(x_t)_{\max} - degree_{in}(x_t)_{\min}} \\ degree_{out-norm}(i_t) &= \frac{degree_{out}(i_t) - degree_{out}(x_t)_{\min}}{degree_{out}(x_t)_{\max} - degree_{out}(x_t)_{\min}} \end{aligned} \quad x \in [1, N], \quad (2)$$

2.3 世界科学活动中心与学科活动中心测度

基于各国在跨国流动网络中的入度与出度，本研究提出世界科学活动中心测度指标 $WSAC$ (World Scientific Activity Centrality)。国家 i 第 t 年的 $WSAC$ 通过公式 (3) 计算：

$$WSAC(i_t) = \frac{degree_{in-norm}(i_t) + degree_{out-norm}(i_t)}{2} \quad (3)$$

此外，本研究基于 Scopus 学科分类体系，应用相同方法，对农业和生物科学、生物化学、遗传学和生物分子学、物理学和天文学、综合学科，神经科学，

免疫学和微生物学，材料科学，化学，医学及工程学等被证实与科学中心演化密切相关的十大重要学科的活动中心进行分析^[8]，对各学科高质量科学家入度、出度进行测度及标准化，应用其算术平均值作为“学科活动中心指数”从而研究十个学科的活动中心，并从学科层次探索科学活动中心的演化规律。

本文在作计量研究前，首先明确以下两个概念。

科学活动中心：研究发现，同一时期不同国家的 *WSAC* 数值具有高度偏态分布特征（偏态系数均大于 1），各阶段平均 *WSAC* 大于 0.25 的国家高质量科学家流动人次占据同时期总人次的 40%~60%，且均位居同时期的前十位，是高质量科学家流动枢纽。基于此，本研究将某国 *WSAC* 大于 0.25 的时期为科学兴隆期。处于科学兴隆期连续超过 3 年的国家称为该阶段的科学活动中心，简称科学活动中心。

学科活动中心：同样，将一国某一学科活动中心指数大于 0.25 的时期为该学科兴隆期。处于某一学科兴隆期连续超过 3 年的国家称为该阶段的学科活动中心。

3 结果

3.1 高质量科学家流入与流出国家概况分析

本研究基于 Scopus 数据库 1921 年至 2020 年发表论文，共计 28 个学科 top1% h 指数的作者定义为高质量科学家，共计 78,815 位。其中 44,798 位发生过流动的高质量科学家被选取为本研究的分析对象，其主要流入国家分布如图 1 所示。其中，美国吸引了最多高质量科技人员，共计 177,799 人次，占全部流入量的 66.25%。其次为英国、德国、意大利及瑞士等国家。各国家在一百年中高质量科学家流入、流出总量基本持平（图 2）。

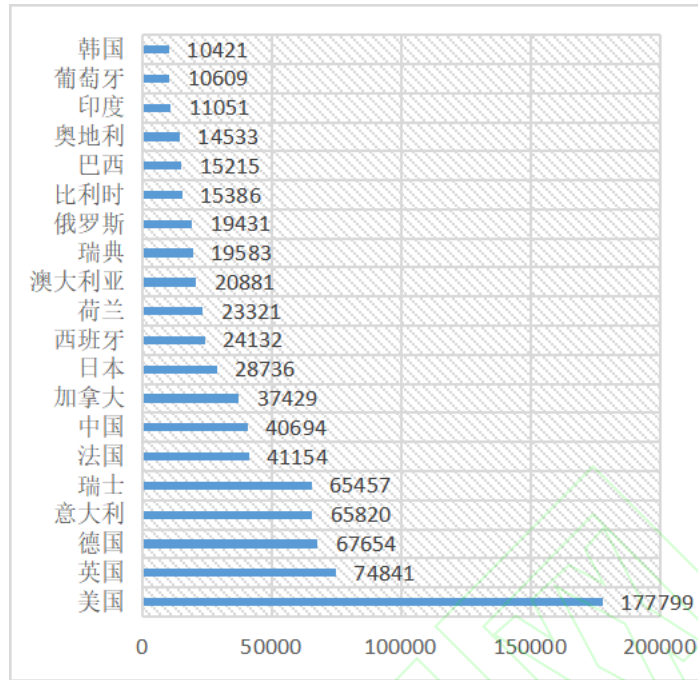


图 1 Top_20 高质量科学家流入数量最多的国家

Figure 1 Top_20 countries the most high-quality scientists flow in

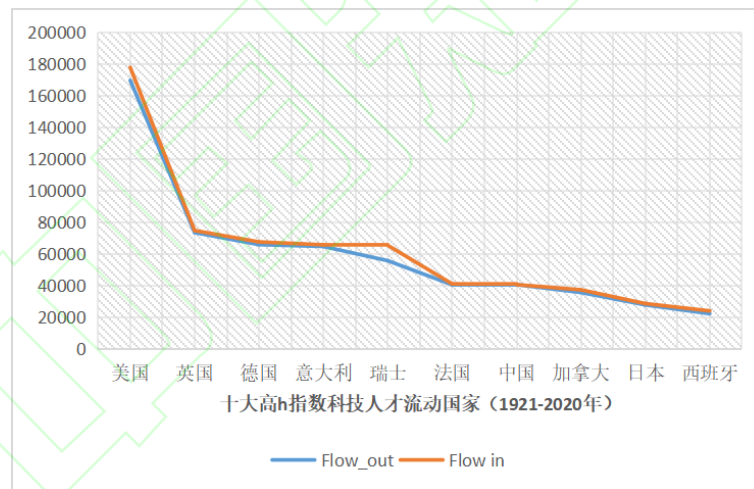


图 2 1921—2020 年十大国家高质量科学家流入与流出总数对比

Figure 2 The total number of inflow and outflow of high-quality scientists among ten major countries in the years from 1921 to 2020

图 3 显示了十个流入/流出量最多国家高质量科学家流入量的演化。整体而言，各国家的高质量科学家流入数量呈现稳步增长态势。尤其是美国，高质量科学家流入量呈指数形式增长，其次为英国与德国，高质量科学家流入数量增长快速。中国自 1980 年起吸引了大量高质量科学家流入，并逐步超过意大利、瑞士

等欧洲发达国家，成为高质量科学家主要流入国之一。

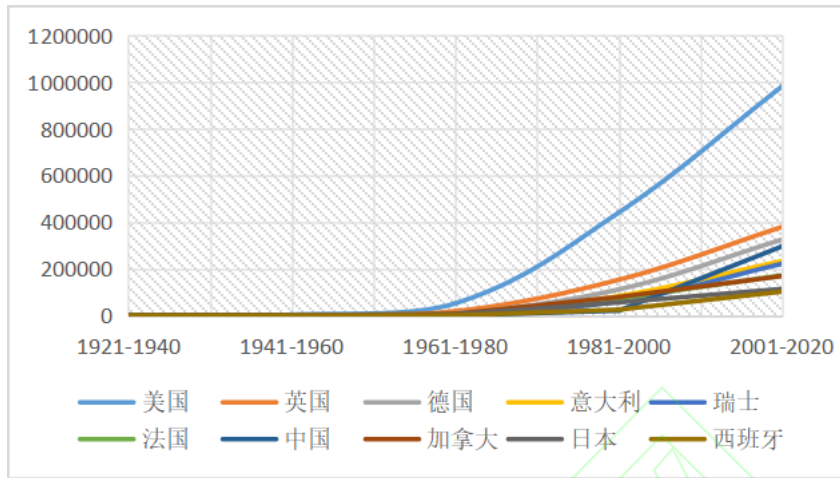


图 3 十大国家高质量科学家流入数量变化

Figure 3 The evolution of inflow of high-quality scientists over time in 10 countries

3.2 高质量科学家跨国流动网络

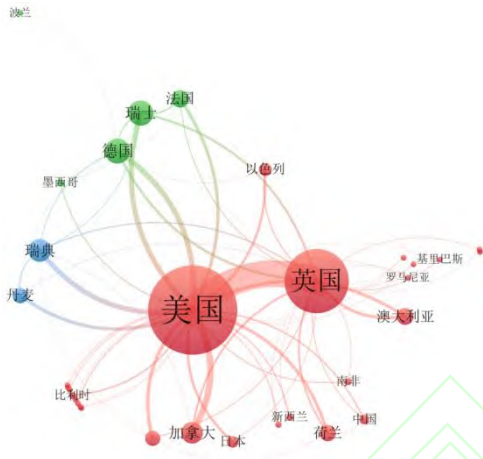
为进一步对高质量科学家跨国流动特征进行分析，本研究将每个国家或地区作为节点，国家或地区间高质量科学家的流动次数作为边，构建跨国流动网络。图 4a-4e 为 1921—1940、1941—1960、1961—1980、1981—2000 以及 2001—2020 五个阶段跨国流动网络图谱。其中，节点大小与该国家或地区高质量科学家的流动总量成正比，节点的位置代表了其在网络中的地位。即节点越靠近网络中心，代表节点在网络中占据核心地位，则节点代表的国家或地区可视为该时期的流动枢纽，具有较强的高质量科学家流动活力。节点间连线的粗细代表了两个国家或地区间流动关系的紧密程度，不同的颜色代表不同的聚类。为了更清晰展现主要国家间的高质量科学家流动情况，本研究仅展示该阶段的主要流动线路。

整体而言，美国与英国一直以来是高质量科学家跨国流动最为活跃的国家。随着跨国流动的高质量科学家数量不断增多，跨国流动网络结构不断演化。尤其自 1980 年后，网络结构变化较大，逐渐由以美、英为核心，演化为具有多个流动中心的网络。同时，不同国家或地区间的流动关系不断增多，网络结构呈现复杂化。

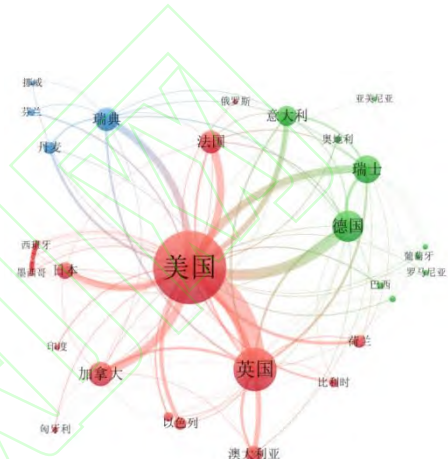
a. 1921—1940



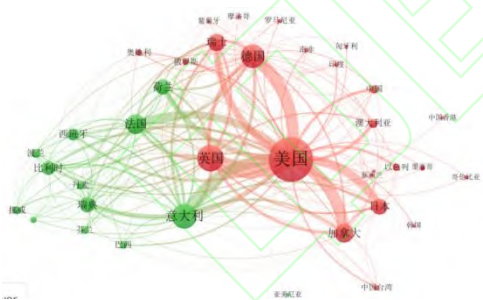
b. 1941—1960



c. 1961—1980



d. 1981—2000



e. 2001—2020

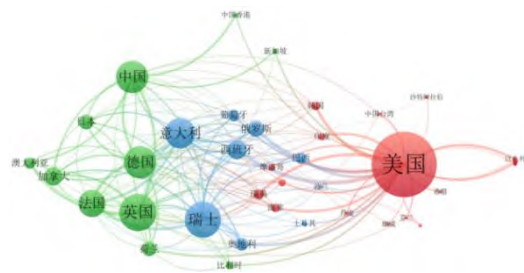


图 4 高质量科学家跨国流动网络图（基于 VosViewer 软件绘图）

Figure 4 The networks of high-quality scientists' transnational flow (based on VosViewer)

表 1 显示了不同阶段各主要国家的标准化入度、出度均值以及跨国流动网络的中心度。结果显示，十大主要国家可分为四个梯队：

第一梯队为美国。各阶段高质量科学家流入、流出指数均位居全球第一；

第二梯队包括英国、德国与意大利。三个国家在跨国流动网络中入度、出度较大，近 40 年各指标值大于 0.3，处于高质量科学家流动活力的第二梯队。从变化态势而言，英国的出入度呈下降趋势，德国、意大利保持增长；

第三梯队为瑞士、法国与中国。三个国家的入度与出度呈增长态势。其中，中国在近 20 年增长迅猛，成为近年来高质量科学家流动的中心之一；

第四梯队包括加拿大、日本与西班牙。三个国家的指标基本呈增长趋势。此外，整个跨国流动网络的中心度（基于 Ucinet 计算，使用标准化度中心性进行度量）先增长后降低，进一步说明跨国流动网络中心从聚集到逐渐呈现多元化特征。

表 1 主要国家世界高质量科学家流动指标

Table 1 The flowing indicators of high-quality scientists in ten major countries

国家	1921-1940		1941-1960		1961-1980		1981-2000		2001-2020	
	入度	出度	入度	出度	入度	出度	入度	出度	入度	出度
美国	0.92	0.85	0.93	0.99	1	1	1	1	0.98	0.99
英国	0.6	0.69	0.69	0.57	0.44	0.45	0.42	0.44	0.41	0.43
德国	0.36	0.44	0.15	0.23	0.22	0.24	0.33	0.33	0.38	0.4
意大利	0.03	0.22	0.04	0.11	0.11	0.15	0.31	0.33	0.35	0.36
瑞士	0.18	0.16	0.16	0.2	0.21	0.17	0.22	0.21	0.32	0.33
法国	0.01	0.05	0.08	0.13	0.14	0.15	0.23	0.23	0.22	0.23
中国	0.02	0.12	0	0.1	0.01	0.09	0.06	0.1	0.26	0.27
加拿大	0.1	0.13	0.12	0.14	0.14	0.15	0.22	0.23	0.22	0.21
日本	0.04	0.04	0.02	0.06	0.08	0.09	0.17	0.17	0.17	0.16
西班牙	0	0.01	0	0.03	0	0.02	0.1	0.08	0.1	0.13
网络中心度	14.74%		15.33%		12.43%		6.44%		3.31%	

3.3 世界科学活动中心

根据本研究对世界科学活动中心的定义（连续三年 WSAC 超过 0.25），我们发现，共有 7 个国家在 1921—2020 年成为过世界科学活动中心，分别为美国、英国、德国、意大利、中国、瑞士与法国。各个国家成为世界科学活动中心的阶段与时长如表 2 所示。

表 2 不同阶段世界科学活动中心

Table 2 The World Scientific Activity Centers in different periods

世界科学活动中心	阶段	科学兴隆期时长 (年)	科学兴隆期 WSAC 年均值
美国	1921-2020	100	0.966
英国	1921-2020	100	0.513
德国	1927-1937, 1975-1978, 1982-2020	54	0.439
意大利	1989-2003, 2007-2020	29	0.381
中国	2014-2020	7	0.417
瑞士	1991-1993, 2011-2015	5	0.289
法国	1991-1994	4	0.382

其中，美国自 1921 年以来一直占据长期优势地位。在一百年中，仅有 1926 年、2012 年 WSAC 值略低于英国，其余 98 年均占据绝对领导地位。尤其是 19 世纪 50 年代起，美国的高质量科学家流入、流出数量在多数阶段均为世界第一。其科学兴隆期年均 WSAC 值为 0.966，是排名第 2 位英国的 1.88 倍，显示了美国在高质量科学家流动中占据压倒性优势地位，并且从近期发展态势看，其核心地位难以撼动。英国在 1921 至 2020 年 WSAC 平均值为 0.513。自 1961 年以来，随着德国的复兴，以及法国、加拿大、瑞典等多个科学活动中心的出现，其 WSAC 值呈下降趋势。尤其是从 1993 年起，英国 WSAC 值均小于 0.5，且在近年来被中国、意大利超越。

德国自 1927 年至 1937 年成为位居美国与英国之后的世界科学活动中心之一，期间年均 WSAC 达 0.577，与英国（0.645）接近。受第二次世界大战影响，19 世纪 50 年代德国平均 WSAC 仅为 0.181，被瑞士、波兰等欧洲国家超越，失去其世界科学活动中心地位。此后德国在 1975 年后实现科学复兴，自此长期占据世界科学活动中心地位。与德国类似，意大利也同为近代多个阶段的世界科学活动中心。根据汤浅等人的研究，意大利是近代第一个世界科学活动中心（1540-1610），根据我们的研究，意大利于 1989 年再次成为世界科学活动中心，且中心地位基本稳定维持至 2020 年，且在近年来呈现快速增长态势。

从 WSAC 指数表现而言，法国自 1990 年起实现科学复兴，并于 1991-1994 年成为世界科学活动中心之一。并且自 2007 年以来，其 WSAC 均高于 0.2，是高质量科学家流动较为频繁的国家之一。瑞士在 1991—1993，2011—2015 年成

为世界科学活动中心之一。其 WSAC 指数在 2011 年大幅度增长，五年 WSAC 平均值达 0.628，在该阶段其流动活力仅次于美国。然而，这种趋势并未得到长久维持，2016 年后瑞士高质量科学家流入、流出量所占比重均下降较多。

中国自 2000 年起高质量科学家流动日益频繁，WSAC 指数不断增长。2014 年，中国共吸引了 2179 名高质量科学家流入，分别占据同期高质量科学家流入、流出总量的 5.3% 与 5.2%，WSAC 指数超过 0.25，成为世界科学活动中心之一。最近五年（2016-2020）的平均 WSAC 为 0.449，仅次于美国与意大利。

通过对世界科学活动中心的形成与转移状况进行分析，可得到以下规律：

第一，世界科学活动中心是转移的，且这种转移具有复杂性。大致为美英德→美英→美英德→美英德意法→美英德意瑞→美英德意中。美国、英国一直以来都是世界科学活动中心，德国与意大利为多个阶段的世界科学活动中心。中国在近年来 WSAC 指数增长较快，在 2014 年成为科学活动中心之一。

第二，世界科学活动中心具有不唯一性，且呈现多中心化。如美国与英国一直为近 100 年以来的科学活动中心。而在 2014-2020 年，德国、意大利、中国也同时成为科学活动中心。这在图 5 及相关结果中也可看出。

第三，一国科学兴隆期可能存在波动性。如德国与意大利，均存在多个阶段的科学兴隆期。

3.4 学科活动中心

基于相同方法，本研究对医学、生物化学、遗传学和生物分子学等十个与世界科学活动中心形成关联度较高的重要学科^[10]的中心转移规律，以及其与科学活动中心的关系进行探讨。十个学科共包含 28,730 位高质量流动科学家，总流动量为 180,078 次，平均每位高质量科学家跨国流动 6.27 次。根据本文对学科活动中心定义（连续三年学科活动中心指数超过 0.25），分析十大学科不同阶段的活动中心及其转移过程。结果如表 3 所示。

整体而言，美国、英国与德国三个国家成为过所有学科的活动中心。美国与英国在各学科兴隆起始时间均早于其它国家。尤其在农业与生物科学，生物化学、

遗传学与生物分子学,综合学科,化学以及工程学 5 个学科发展中具有早期优势,比随后出现的新学科中心(德国)至少领先 40 年。而美国几乎保持了各阶段、各学科的活动中心地位。在十大学科的平均学科兴隆期为 88.2 年,且自 1950 年起,美国一直是各个学科的科学中心。其次,英国一直是农业与生物科学,生物化学、遗传学与生物分子学,化学等学科的活动中心。其中,农业与生物科学,生物化学、遗传学与生物分子学,化学三个学科的科学兴隆期早于美国。然而,物理学和天文学,综合学科与工程学等逐步被中国、德国、意大利等国家超越。这与英国在近年来的 WSAC 指数下降一致。近五年,英国的优势学科(即处于兴隆期的学科)为生物化学、遗传学与生物分子学,免疫学和微生物学与化学。

除材料科学外,德国在各个学科的科学兴隆期时长仅次于美国与英国。该结果也与世界科学中心一致。德国在医学,免疫学和微生物学,物理学和天文学 3 个学科的科学兴隆起始较早(分别为 1928 年,1930 年与 1932 年),与美、英接近。三大学科的科学兴隆催生了德国在近 100 年来的首个科学兴隆期(1927—1937)。20 世纪 70 年代,材料科学,工程学与综合学科等学科也飞速发展,使得德国在 1975 年重新占据科学活动中心地位,并基本一直维持至今。从近 5 年看,德国的优势学科为综合学科与工程学。

意大利在 1921—2020 年,先后成为过工程学,材料科学,医学,化学,综合学科以及生物化学、遗传学与生物分子学 6 个学科的活动中心。其中,工程学兴隆期始于 1987 年,其它学科的科学兴隆期起始均较晚,分别始于 2008 年或 2009 年。与其作为世界科学活动中心的阶段(1989—2003,2007—2020)基本一致。此外,瑞士于 1991—1993 与 2011—2015 两度成为短暂的世界科学活动中心。从表 5 可以看出,瑞士于 1990—1993 年是综合学科的科学中心,2012—2015 为综合学科与工程学的科学中心,两大优势学科奠定了瑞士两度成为科学活动中心的基础。

中国在 100 年中成为过 7 个学科的活动中心,且基本都保持至今。与美国、西欧国家不同,中国各学科的科学兴隆期起步均较晚。最早于 2006 年、2008 年分别成为物理学与天文学,工程学的学科中心。农业、生物学、化学类学科的科学兴隆起始时间大致为 2014 年左右。这些学科的科学兴隆促使中国自 2014 年起成为世界科

学活动中心之一。2018年，中国成为免疫学和微生物学的活动中心之一。

上述分析显示了世界科学活动中心与学科中心的高度一致性。但这种一致性也存在例外。如法国在1964—1966年成为材料科学学科活动中心，并于2007—2013年分别成为综合学科，生物化学、遗传学与生物分子学，以及化学的学科活动中心。这与其成为科学活动中心的时间（1991—1994）不太一致。

表3 不同阶段十大学科科学活动中心

Table 3 The evolution of scientific activity centers in 10 disciplines over time

学科	学科活动中心	阶段	总时长(年)	转移历程
农业与生物科学	美国	1927—1931, 1933—1938, 1940—2020	92	英美→英美德→英美中
	英国	1926—1928, 1930—1932, 1943—1946, 1956—1961, 1982—1986, 1989—1993, 1997—2002, 2005—2009, 2012—2016	42	
	德国	2004—2006	3	
	中国	2013—2015	3	
生物化学、遗传学与生物分子学	美国	1935—1943, 1945—2020	85	英→英美→美德→英美→英美德法意→英美中
	英国	1924—1926, 1931—1940, 1948—1950, 1953—1960, 1970—1973, 1975—1979, 1981—1984, 2004—2013, 2017—2020	48	
	德国	1998—2002, 2010—2012	8	
	中国	2014—2016, 2018—2020	6	
	法国	2009—2011	3	
	意大利	2009—2011	3	
物理学和天文学	美国	1927—1929, 1934—1937, 1946—1948, 1950—2020	81	美英→美英德→美英→美英德→美英→美英中→美英→美中
	英国	1928—1933, 1938—1940, 1955—1961, 1968—1973, 1975—1977, 1991—1993, 2007—2009, 2014—2016	34	
	德国	1932—1936, 1982—1985, 1990—1993	13	
	中国	2006—2008, 2017—2019	6	
综合学科	美国	1924—1932, 1934—1937, 1939—2020	96	美英→美英德→美德瑞法→美德意
	德国	1982—1985, 1991—1993, 2007—2018	49	
	英国	1924—1933, 1935—1940, 1942—	43	

		1947, 1953—1955, 1957—1961, 1974—1976, 1979—1983, 1985— 1990		
	瑞士	1990—1993, 2012—2015	8	
	意大利	2008—2011, 2016—2019	8	
	法国	2007—2009, 2011—2013	6	
神经科学	美国	1926—1928,1934—1937,1939— 1945,1947—2020	88	美→美英加→美英德→美英德 加→美英→美
	英国	1943—1946,1948—1951,1964— 1966,1978—1981,2005—2008,2010 —2013,2015—2017	26	
	德国	2000—2002,2006—2010	8	
	加拿大	1942—1944,2008—2010	6	
免疫学和微生物学	美国	1923—1925, 1927—2020	97	美英→美英德→美英德加→美 英荷→美中
	英国	1924—1926, 1931—1933, 1938— 1940, 1948—1950, 1953—1965, 1976—1978, 1989—1991, 2002— 2005, 2007—2010, 2016—2018	42	
	德国	1930—1934, 1971—1973, 1990— 1992, 2002—2004, 2009—2013	19	
	加拿大	1989—1991, 1996—1998	6	
	荷兰	2015—2017	3	
	中国	2018—2020	3	
材料科学	美国	1947—2020	74	美→美英→美英德法→美英加 →美英意→美中
	英国	1956—1968,1972—1974,1976— 1979,1986—1989,1996—2001,2008 —2010	33	
	中国	2009—2020	12	
	德国	1969—1971,1995—1998,2002— 2004	10	
	加拿大	1971—1976	6	
	法国	1964—1966	3	
	意大利	2007—2009	3	
化学	美国	1935—1943, 1945—2020	85	英→英美→美德→英美法意→ 英美德→英美中
	英国	1924—1926, 1931—1940, 1948— 1950, 1953—1960, 1970— 1973,1975—1979,1981—1984,2004 —2013,2017—2020	81	
	德国	1998—2002, 2010—2012	8	
	中国	2014—2016, 2018—2020	6	
	法国	2009—2011	3	
	意大利	2009—2011	3	
医学	美国	1922—1925,1927—2020	98	美英→美英德→美英加意→美

	英国	1923—1928,1930—1934,1942— 1964,1972—1976,1989—1991,1993 —1996,2000—2002,2007— 2009,2011—2013	55	英→美
	德国	1928—1937,1989—1991,1993— 1995,2000—2002	19	
	加拿大	2008—2010	3	
	意大利	2008—2010	3	
工程学	美国	1929—1931, 1934—1940, 1946— 2020	86	美→美英→美英德→美意荷→ 美意德中→美英意中瑞→美德 中
	英国	1948—1950, 1955—1963, 1973— 1975, 1977—1983, 2012—2015	26	
	意大利	1987—1989, 1991—1994, 1999— 2001, 2010—2012	13	
	德国	1974—1976, 2002—2005, 2017— 2019	10	
	中国	2008—2010, 2013—2017, 2019— 2020	10	
	瑞士	2012—2015	4	
	荷兰	1999—2001	3	

基于以上分析，我们总结出学科活动中心具有以下特点：

第一，学科活动中心是转移的，且呈现非单向转移。例如，医学学科活动中心转移规律为：美英→美英德→美英加意→美英→美。又如神经科学的转移规律为：美→美英加→美英德→美英德加→美英→美。这种转移性使得一个国家可能在某学科具有多个兴隆期。

第二，同一时期学科活动中心具有不唯一性。如英国与美国同时为多个阶段多个学科的活动中心。又如 2009—2011 年，美国、法国、意大利同为生物化学、遗传学与生物分子学学科活动中心。

第三，同一个国家可能为多个学科活动中心。除美英外，中国在 2018—2020 年，同时为生物化学、遗传学与生物分子学，物理学和天文学，免疫学和微生物学，材料科学与化学等学科活动中心。意大利在 2009—2011 年，同时为生物化学、遗传学与生物分子学，综合学科与化学学科活动中心。

第四，学科活动中心与科学活动中心具有强相关性。各个国家处于科学活动中心时大多存在一个或多个学科活动中心，如瑞士为 2011—2015 年的科学活动

中心，其同时为工程学、综合学科的中心。中国 2014—2020 年为科学活动中心，同时在该阶段中成为过生物化学、材料科学、遗传学与生物分子学、工程学等学科的中心。反过来，某国拥有学科活动中心最多的时期，一般是该国作为世界科学活动中心的时期。同时，也存在少数例外情况。如法国的学科中心与科学中心在时间上不具有一致性。

第五，不同时期学科贡献度不同，即每个时期的兴盛学科有所不同。如物理学和天文学的兴隆是美国、英国与德国能够在早期（20 世纪 20 年代—30 年代）占据科学活动中心的重要因素。20 世纪 60 年代至 80 年代，材料科学与工程学等学科的鼎盛稳固了美国、英国的中心地位，同时促使德国与意大利等国家实现复兴。而随即兴起的综合学科孕育了瑞士等新的科学中心。21 世纪初再次成为农业与生物科学，生物化学、遗传学与生物分子学，化学与医学等生物医药类学科的时代。这些学科的良好发展稳固了美国、英国与德国中心地位，同时使得意大利、瑞士等国家在该阶段占据科学活动中心。一个有趣的现象是，就近十年（2011—2020）而言，从对科学的兴隆贡献角度已难以界定“兴”“衰”学科。即单一或个别“新兴”或“复兴”学科对于国家或地区是否能成为科学活动中心的贡献度差异减小。一方面可能缘于科学呈现多元化与多样性。另一方面，学科间的知识交叉度越来越高，学科的发展从最初的“合”到“分”，又进入新一轮深层意义上的“合”。

4 结论及讨论

本文基于 Elsevier 的 Scopus 数据库 1921—2020 年发表的论文数据，将各学科 Top—1% h 指数的科学家界定为“高质量科学家”。基于这些高质量科学家的跨国流动数据对世界科学活动中心进行判定，研究世界科学活动中心的转移规律。并从学科层面对学科活动中心进行研究。得到结论如下：

第一，从国家表现而言，美国与英国一直以来是世界科学活动中心，且占据多个学科的学科活动中心位置。其次为德国、意大利等发达国家。我国在近年来整体科学水平及部分学科发展已处于国际领先地位。但从指数表现来说，与美国、英国、德国等发达国家还具有一定差距，且存在综合学科、医学、神经科学等非优势学科。

第二，从网络演化角度而言，各国间的流动关系不断增强，高质量科学家跨国流动网络中心性呈现先增长后减小的趋势，科学活动中心呈现多元化。

第三，世界科学活动中心与学科活动中心具有较多共性。首先，二者都是转移的，且转移方向非单向。其次，二者均具有不唯一性。同一时期可能有多个科学活动中心或学科活动中心，一国可多次成为科学活动中心或学科活动中心。最后，二者具有一定的同步性。即各国位居世界科学活动中心时，一般为多个学科的中心，反之亦然。因此，可以说科学活动中心是学科活动中心的叠加效应。

第四，不同时期各学科对于科学活动中心形成的贡献度不同。这种差异性在早期科学发展中较为突出。近年来，科学呈现多元化发展，学科间界限不断被打破，这种学科的贡献差异性也随之减小。

就以上结论而言，目前美国在各个学科都具有相当大的优势，其世界科学活动中心的地位在很长一段时期内不可撼动。美、英的科学发展历程显示了及早占领学科发展优势的重要性。从另一个角度而言，当前新旧知识不断演化，学科结构也在不断被重塑。新兴学科的涌现为新科学活动中心的诞生带来了机遇。德国、意大利等国家借助优势学科实现科学复兴的经验，对于我国如何在复兴之路上更进一步具有重要借鉴意义。在历史的缺憾与现状的激励下，我国应大力发展新兴科技，抢占新科技的制高点。不可忽视的是，传统学科是新兴学科的基础所在，也是当前交叉学科发展中的重要知识构成。我国应持续加强传统学科中劣势学科的建设，促进各学科的平衡发展，开创崭新的科学时代。

本研究基于 Scopus 数据库 1921—2020 年发表的论文数据，根据高质量科学家的跨国流动序列，从整体与学科两个层次对世界科学活动中心的形成与转移进行分析。对于我国制定学科发展战略，实现科技复兴具有重要启示作用。本研究尚存一些不足之处。如未来应对更多学科展开探讨，以及对学科间关系进行探讨，全面探索科学活动中心的形成与转移规律。此外，对主要国家高质量科学家的流入国、流出国展开分析，从更细颗粒度上把握科学活动中心规律，是下一步的重点工作。

致谢

感谢中国科学院文献情报中心刘细文主任对本研究的悉心指导。感谢 Elsevier 出版集团的 Scopus 数据库和 ICSR Lab 提供数据和平台支持。

参考文献

- [1] Bernal J D. Science in History[M]. Watts & Co, 1954: 930-931.
- [2] 孙玉涛, 国容毓. 世界科学活动中心转移与科学家跨国迁移——以诺贝尔物理学奖获得者为例[J]. 科学学研究, 2018, 36(07): 1161-1169. Sun Yutao, Guo Rongyu. Shifting of world's scientific activity center and transnational migration of scientists—An example of the Nobel laureates in physics. Studies in Science of Science, 2018, 36(07): 1161-1169.
- [3] 王晓文, 王树恩. “三大中心”转移与“汤浅现象”的终结[J]. 科学管理研究, 2007, 25(4): 36-38. Wang Xiaowen, Wang Shuen. Shift of “three centers” and termination of Yuasa phenomenon[J]. Scientific Management Research. 2007, 25(4): 36-38.
- [4] 石国进, 龚耘. 科学是平的——“汤浅现象”新解[J]. 科学学研究, 2012, 30(12): 1770-1780+1769. Shi Guojin, Gong Yun. Science is flat: new explanation of Yuasa phenomenon[J]. Studies in Science of Science, 2012, 30(12): 1770-1780+1769.
- [5] 陈文化. 科学技术与发展计量研究[M]. 中南大学出版社, 1992, 231-266. Chen Wenhua. Quantitative study of S. & T. and their Development[M]. Central South University Press, 1992, 231-266.
- [6] 何舜辉. 世界科学中心转移过程与形成机制——基于诺贝尔奖获得者的分析[M]. 华东师范大学, 2019. He Shunhui. Movement and formation mechanism of world science center: based on the analysis of nobel laureates[M]. East China Normal University, 2019.
- [7] Yuasa M. Center of scientific activity: Its shift from the 16th to the 20th century[J]. Japanese Studies in the History of Science, 1962, 1(1): 57-75.
- [8] 赵红州. 科学能力学引论[M]. 科学出版社, 1984. Zhao Hongzhou. Social Capacity for Science[M]. China Science Publishing & Media Ltd. (CSPM), 1984.
- [9] Ben D J. The rise and decline of France as a scientific centre[J]. Minerva, 1970, 8(8): 453-454.
- [10] 冯焯, 梁立明. 世界科学中心转移的时空特征及学科层次析因(上)[J]. 科学学与科学技术管理, 2000(05): 4-8. Feng Ye, Liang Liming. Analysis the spatial-temporal characteristics of world

scientific activities center and the transfer rule based on disciplinary level (I)[J]. Science of Science and Management of S.& T. 2000(05):4-8.

[11] Zhao H, Jiang G. Shifting of world's scientific center and scientists' social ages[J].

Scientometrics, 1985, 8(1-2): 59-80.

[12] 姜春林,周磊,唐悦.科学活动中心转移现象的再测度和新解读—基于利萨 罗斯纳科学年表的数据[J].科学学研究,2010,28(4):500-507. Jiang Chunlin, Zhou Lei, Tang Yue. Re-measure and new interpretation on transfer phenomenon of scientific activities center[J]. Studies in Science of Science, 2010, 28(4): 500-507.

[13] 袁江洋.科学中心转移规律再检视[J].科学文化评论,2005(02):60-75. Yuan Jiangyang. The study of scientific activity center's transfer rule[J].Science & Culture Review, 2005(02):60-75.

[14] 陈仕伟,徐飞.世界科学技术活动中心转移规律再分析[J].科技进步与对策,2018,35(18):11-19. Chen Shiwei,Xu Fei.Reanalysis of metastasis rule of world center for science and technology activity[J].Science & Technology Progress and Policy.2018,35(18):11-19.

[15] Ackers L. Moving people and knowledge: Scientific mobility in the European Union. International Migration, 2005, 43(5): 99-131.

[16] Laudel G. Migration currents among the scientific elite[J]. Minerva, 2005, 43: 377-395.

[17] Harriet Z. Scientific Elite: Nobel Laureates in the United States[M]. New York: Free Press, 1977, 9-11.

[18] Hirsch J E. An index to quantify an individual's scientific research output[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2005, 102(46): 16569-16572.

[19] Waltman L, Van Eck N J. The inconsistency of the h-index[J]. Journal of the Association for Information Science and Technology. 2012, 63(2): 406-415.

[20] Meyers M, Quan H. The use of the h-index to evaluate and rank academic departments[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2017, 6(4): 304-311.

Analysis of world scientific activity center based on the flows of high—quality scientists

Han Fang¹, Zhang Ruhao¹, Chen Guang^{2*}, Yuan Junpeng¹

¹ National Science Library, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

² China Bureau of Academic Divisions, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China

Abstract: The concept of “world scientific activity center” was proposed by J. D. Bernal in the year of 1957, and have raised many interests from globe researchers. Study the matastasis rule of world scientific activity center is of importance to the policy makers for establishing the R&D development strategies. Most of the previous studies analyzed the matastasis rule of the world scientific activity center based on the researchers’ achievements. However, this method is not suitable at present under the background of global integration, while the collaboration among researchers increasing greatly.

The transnational flows of high—quality scientists was regarded as can be the representative of vital knowledge spreading. Previous researches have validated this based on study the matastasis of Nobel prize winners or the authors of top journals. They contributed to understand the related rule of world scientific activity center at present. However, these studies also have some limitations. Such as they only studied a small group of researchers, thus the whole phenomenon of the scientists transfer could not be reflected. Based on the above analysis, this paper collects the scientific papers published from 1921 to 2020 in the Scopus database, extracts the transnational flow sequence of each high—quality scientists, which are the top1% h-index researchers in each disciplines of the Scopus database, from these papers, and systematically analyzes the matastasis rule of world scientific activity center in the 100 years both in the whole level and the disciplinary level. Specially, the ten important disciplines including agricultural and biological sciences, biochemistry, genetics and molecular biolog, physics and astronomy, multidisciplinary, neuroscience, immunology and microbiology, materials science, chemistry, medicine, and engineering are selected into study, due to their intimate relationships with the

world scientific activity center proven by previous studies.

Results show that, first, the world scientific center or disciplinary activity center is not sole. There could be more than one world scientific center or disciplinary activity center in the same period. For example, the USA, UK, Germany and Italy have been the world scientific activity centers in multiple periods and among various disciplines. Second, both the world scientific activity center and the disciplinary activity center could transfer over time, and the transfer direction was not one-way. Besides, the transfer process of these two kind of centers are synchronous. When a region was the world scientific activity center, it was often several disciplines' activity center, and vice versa. For example, the USA was almost all the disciplines' activity centers in the entire period. Thus the world scientific activity center could be regarded as the additive effect of the different disciplines. Third, different disciplines contributed differently to the formation of scientific activity center in the certain period. The diversified development of science and the interdisciplinary integration have moderated the difference, it is hard to distinguish which disciplines have the higher contribution degrees. Last, China has been the world scientific activity center since the year of 2004. But it still has a significant gap from the developed countries. The disciplines of multidisciplinary, medicine and neuroscience still need to be developed in the future. Specially, significant attentions should be paid to the emerged scientific and technological domains, the R&D input should be raised and the balance development among disciplines should be also sidelined in the future.

Keywords: World scientific activity center; Disciplinary activity center; Scientific paper; High-quality scientists; Transnational flow