顶尖研究者的国际科研合作：性别差距依然存在

Marek Kwiek波兰波兹南亚当·密茨凯维奇大学公共政策研究中心
kwiekm@amu.edu.pl，ORCID：orcid.org/0000-0001-7953-1063

Wojciech Roszka(1) 波兹南经济与商业大学，波兰波兹南 (2) 波兰波兹南亚当·密茨凯维奇大学公共政策研究中心wojciech.roszka@ue.poznan.pl，
ORCID：orcid.org/0000-0003-4383-3259

摘要

我们研究了波兰顶尖研究者（按科研生产力排名位居前10%的科学家）在15个STEMM学科中的国际科研合作性别差异及其随时间的变化。我们考察了1992年至2021年间的五个六年期。我们使用Scopus中的国际出版物合著来操作化国际科研合作，并采用了一个包含152,043名独立波兰作者及其在1992—2021年发表的587,558篇文章的样本。数据显示，顶尖研究者（以及科学家总体人群）的国际合作性别差距持续扩大：20世纪90年代初差距最小，随后30年间不断增大。在顶尖研究者中，四个学科（农业、生物学、环境科学和医学）的国际化程度男性高于女性。为体现国际科研合作的多维性质，我们估计了带固定效应的分数逻辑回归模型，结果证实，顶尖研究者中持续存在适度但具有统计显著性的国际合作性别差距。我们发现，与女性顶尖研究者相比，男性顶尖研究者参与国际合作的概率高约11%。文末还讨论了文献计量学驱动研究的相关思考。

关键词： 顶端 科研绩效者；纵向研究设计；性别差异；发表生产力；分数逻辑回归模型；固定效应

1. 引言

我们考察波兰学者中的一个亚群体——顶尖表现者（按发表生产力界定为波兰科学家中排名前10%者）——在合作模式方面是否存在内部性别差异。我们比较特定STEMM（科学、技术、工程、数学和医学）学科中男女顶尖表现者在1992年至2021年间五个六年期内的情况。我们关注六年期而非整个30年时间跨度，因为波兰在经历了数轮高等教育改革后，其科学体系迅速发展（Antonowicz等人，2022；Antonowicz等人，2023；Bojko等人，2021；Donina等人，2022）。因此，与其他后共产主义转型国家一样，波兰科学体系在不同时期呈现出不同特征（Dakowska与Harmsen，2011；Dobbins，2011；Dobbins与Kwiek，2017）。

我们比较顶尖表现者中 男性和女性在不同学科与时期内部及之间的国际合作率。国际科研合作通常与更高的

科研生产力相关（Abramo 等人，2011年；Bozeman 和 Corley，2004年；Kato 和 Ando，2013；Lariviere 等人，2013）；因此，研究顶尖表现者的合作维度颇有意义。

传统上，女性的合作网络不如男性广泛（Bozeman & Corley，2004年），她们参与国际合作的倾向也较低（Abramo 等，2013；Frehill 等，2010；Fox 等，2017）。多项调查的结果表明，女性身份是国际合作的负向预测因素（Rostan 等，2014；Vabo 等，2014）。Vabo 等（2014）发现，女性科学家报告的国际合作水平低于男性。（但女性科学家在本土国际化方面的参与度也高于男性科学家——例如，使用外语开展教学。）Kwiek（2018）表明，在11个欧洲国家，男性身份会显著提高参与国际合作的可能性（提高69%）。Fox 等（2017）得出结论：与科研经费或寻找国际合作伙伴相比，个人或家庭顾虑是国际化过程中不那么重要的障碍。在挪威等一些国家，性别差异对国际合作并不重要，国际合作最重要的决定因素是科学学科（Aksnes 等，2019）。

顶尖研究者群体在性别方面并非内部同质。相反，来自不同国家的研究表明，这一群体具有鲜明的性别结构。在生产力分布中所处的位置越高，性别结构就越明显。女性科学家虽然也跻身高产职业群体（即前10%），但她们在前1%和前5%中的占比低于男性。在波兰，前10%群体中存在显著的性别差异。1992—2021年间，男性顶尖表现者所发表的出版物通常占男性发表的全部出版物的50%以上，而女性顶尖表现者所发表的出版物仅占女性发表的全部出版物的约30%（Kwiek & Roszka, 2024）。

总体而言，在15个STEMM学科中，男性在表现排名前1%、前5%和前10%的群体中占比过高，而且随着绩效等级提高，这种过度代表现象会加剧。换言之，女性顶尖表现者在表现排名前1%的群体中代表性最低，在前10%的群体中代表性最高。平均而言，与女性相比，男性进入生产力分布前10%的可能性高出39.2%，进入前5%的可能性高出59.7%，进入前1%的可能性高出125.2%（Kwiek & Roszka, 2024）。进入顶尖表现者群体的女性往往位于较低层级，而男性则位于较高层级，不过不同学科之间存在一定差异。我们关注的是顶尖表现者国际合作模式中的性别差异。

2. 概念框架

从性别差异的角度来看，欧洲（以及全球）的科学体系并非一成不变：在过去三十年中，女性持续大量进入STEMM学科。当前，在32个欧洲国家的部分学科（例如生物学和药学）中，女性科学家的数量已超过男性科学家；在一些学科中，发表经验不超过10年的年轻女性科学家数量也超过了具有相同特征的男性科学家（即生物学、免疫学、医学、神经科学和药学；全部15个学科的列表和描述见表2；参见Kwiek和Szymula，2025）。

因此，关于女性在科学领域的某些发现仍然成立，而另一些则不成立，或只适用于某些学科。过去通常与人文学科和社会科学相对照的 STEMM，原本被视为一个整体，如今却已明显分化；只有数学化程度很高的数学、计算机、物理学和工程这四个学科（目前欧洲女性科学家的占比约为

20%或更低）仍让人想起二三十年前讨论的原有 STEMM 学科，当时女性进入学术职业的机会通常十分有限。欧洲仅有两个 STEMM 学科（免疫学和药学）的发表论文科学家中实现了性别平等（50/50）；而在2023年，32个欧洲国家的14个 STEMM 学科中有7个实现了性别均衡（40/60）：免疫学、药学、医学、生物学、神经科学、农业和环境科学（Kwiek & Szymula，2025）。

即使在十年前，欧洲的学术职业群体也面临着强烈的国际科研流动要求；但学术生活日益数字化，似乎不再像过去那样需要频繁的实体流动（Jonasson 等，2025）。传统上，国际科研合作需要研究人员在国外停留相当长的时间——也就是国际实体流动，而这通常被证明会阻碍女性参与合作，并被视为对女性科学家的“间接歧视”（Ackers，2008）。如今，数字化合作可以补充实体流动（Manchin，2025）。

科学领域的欧洲一体化建立在科研卓越、国际流动和国际科研合作等相互关联的理念之上（Fox 等，2017）。欧盟委员会优先推动并慷慨资助学术研究人员在欧洲各地流动，认为这对欧洲政治一体化和欧洲研究区的发展至关重要（Mattson 等，2010）。国际流动被视为有助于研究人员在学术晋升阶梯上更进一步，并获得欧洲民族国家学术晋升机会的途径（Fochler 等，2016；Herschberg 等，2018；Hoening，2017）。然而，国际科研合作中的性别差异鲜少得到研究。

过去十年间，尽管并未消失，但在不同国家和STEMM学科中，性别生产力差距、引用差距和晋升差距均在不同程度上逐渐缩小。渐渐地，STEMM领域女性科学家获得正教授职位的机会比以往任何时候都更加广泛（Diezman与Grieshaber，2019；爱思唯尔，2020；Halevi，2019；Huang等人，2020；Madison与Fahlman，2020；Mayer与Rathmann，2018；Zippel，2017）。

在波兰，过去三十年的变化十分显著（Antonowicz等人，2020；Antonowicz等人，2023；Dobbins与Kwiek，2017）：如今，STEMM领域女性科学家已构成学术职业中重要、高度国际化且生产力极高的组成部分。如表2和表3所示，在2016–2021年期间，在Scopus上发表论文的所有STEMM领域科学家中，女性占比超过一半（50.65%）；在至少发表了10篇Scopus论文的所有STEMM领域科学家中，女性占43.06%（两者总数分别为93,092人和31,309人）。从欧洲视角来看，波兰女性正教授和新任正教授的比例也相对较高（2023年分别为30%和43%）。

欧洲和波兰正在经历的变化规模巨大：随着女性迅速涌入STEMM学科，其中许多学科的性别差异整体背景都在发生变化。与此同时，新的文献计量工具应运而生，使研究者不仅能够研究科学家整体（如数十年前那样），还能够分别研究男性和女性科学家（并确定其性别；参见 Karimi 等人，2016； Lariviere 等人，2013）。易于获取的性别识别工具能够以极低的成本、相对较高的准确率，大规模识别性别（Hu 等人，2021； Wais，2016）。将微观层面文献计量数据视为发表论文的科学家留下的数字痕迹，可以开展严格意义上的纵向研究（Menard，2002；Ployhart 和 Vandenberg，2010；Singer 和 Willett，2003），追踪女性（和男性）科学家随时间的变化，或从其首次发表论文起进行追踪，从而获得新的国家层面和跨国洞见与比较。跨学科研究可以采用队列设计（Glenn，2005），将科学家按开始发表论文的年份划分为不同队列；

还可以采用纵向研究方法，追踪男性和女性科学家数十年的学术职业生涯。

人工性别识别无法大规模应用，且仅用于单个国家的研究（Karimi 等人，2016；Santamaria & Mihaljević，2018）。如今，genderize.io 和 NamSor 等性别识别工具提供了大规模解决方案，在跨国研究中具有较高的准确性和适用性（Hu 等人，2021年；NamSor，2024；Sebo，2021； Wais，2016）。

女性参与STEMM领域的人数不断增加，改变了分析国际科研合作和科研生产力的背景。至少在女性大量涌入并持续了20至30年的学科中，性别差异已经缩小，或正在逐渐消失。最明显的两个例子是医学和生物学，它们是规模最大的两个学科，目前女性占比均接近50%（波兰的数据见表2）。在人文学科和社会科学中（本研究未涉及），女性占比超过50%：在波兰学术出版领域的职业群体中，女性显然占多数。

全球科学日益成为团队科学；独著研究的占比持续下降，而所有 STEMM 学科的平均合著者人数都在上升（Abt，2007；Lariviere 等人，2015； Wuchty 等人，2007）。科学家越来越多地以团队形式开展工作，而在欧洲，这些团队也日益国际化。在波兰，目前有 40% 的 Scopus 出版物（论文和会议论文集中的论文）通过国际合作发表，这一占比一直在稳步上升，过去二十年间翻了一番。随着国际团队的增加，生产力（尤其是采用全计数法衡量时）和引文数量也随之增加（Ductor，2015）。

合作倾向既取决于宏观层面因素，也取决于性别、年龄、学术职位、学术世代和学科等个人因素（Jung 等人，2014；Kyvik 和 Aksnes，2015； Rostan 等人，2014；Stephan 和 Levin，1992 ）。正如其他研究所表明的（ Kwiek，2019 ），在欧洲跨世代比较中，与国际科研合作伙伴合作的科学家占比最高的是最年长的世代。在 11 个欧洲国家中，最年轻的学术世代从未成为国际合作科学家占比最高的世代。这并不令人意外，因为国际合作需要时间来发展，也需要获得经费（Jeong 等人，2014）。

Lariviere 等人（2013）考察了2008年至2012年间发表的550万篇论文，并报告称，随着生产力门槛的提高，女性代表性不足的现象也越发明显。Chan 和 Torgler（2020）对超过94,000名高被引科学家进行了研究，发现女性参与了这一科学精英群体，但她们在其中较低低了28.52%。 在挪威（Aksnes 等人，2019），高产科学家的结构同样具有明显的性别差异，女性在顶端生产力层级中代表性不足。然而，在挪威，高产男性和女性表现出相似的国际合作模式。

关于科学领域明星人才的有趣见解，也来自管理学研究。Herman Aguinis 等人（2018）指出，在科学领域的“明星人才”中，存在显著的性别不平等，而且越接近生产力分布的顶端，这种不平等越明显。在对 STEM领域和社会科学领域超过59,000名科学家进行分析后，他们得出结论：女性在生产率百分位数的顶端明显代表不足。他们对这一现象的解释是增量分化机制：网络、支持情况和资源获取方面的微小差异会随着时间累积，最终导致科研生产力出现显著差异。

Villamor 和 Aguinis（2024）还表明，人们对明星人才的常见成功原型带有男性化倾向（“想到明星，就想到男性”），这意味着女性往往被视为“非常优秀”，而不是“卓越非凡”。Bear 等人（2025）认为，尽管女性具备与男性相当的胜任力和动机，但她们更常遭遇限制其进入明星类别的情境性障碍（“隔离器”）。Aguinis 和 O’Boyle（2014）指出，明星人才中的性别差距尤其值得关注，因为顶尖表现者创造了科学领域中不成比例的大量可见度，因此，这一群体中的不平等会对整个科学体系产生重大的结构性影响。总体而言，Aguinis 的研究表明，明星人才中的性别差距并不反映胜任力之间的差异，而是源于累积性的结构性障碍、科学领域中内化的成功原型，以及系统性选择机制——这些因素都往往有利于男性。

研究者曾采用多种生产力计算方式来识别顶尖表现者（期刊文章数量，Fox & Nikivincze 2021；具有期刊层级声望的期刊文章，Abramo et al., 2009；期刊文章及文章等价物，Kwiek 2018；以及领域标准化引文，Parker et al., 2010）。研究者也曾从性别视角考察明星科学家（Abramo et al., 2009）。Abramo及其同事将研究中的明星科学家定义为科学绩效位居前10%的意大利科学家（与Kwiek, 2018的做法相同）。一项引人关注的发现是，在生产力分布的其余90%中，意大利男性和女性的生产力差异不大；只有在顶端的精英阶层，即顶尖表现者中的前10%，两者才存在差异。关于顶尖表现者的研究几乎都是横断面研究；纵向研究——即对科学家进行长期追踪的研究——极为罕见（例外包括Kwiek & Roszka, 2024对顶尖表现者所做的一项涵盖30年的研究）。

在研究中，Fox 和 Nikivincze（2021年）采用社会组织视角，将位于发表数量分布右尾的科学家定义为“高产”科学家。他们将阈值设定为：在此前三年内，至少有20篇文章发表于同行评审期刊或已获其录用（对于计算机科学家，则为发表于同行评审会议论文集或已获其录用）。分析显示，在样本学术群体中，三年内发表20篇或以上出版物这一界限涵盖了15.6%的群体。随后，他们将这一阈值作为分析个体属性和组织特征时“顶尖表现者”（“高产研究人员”）的操作性定义。

在方法上，因变量是“是否高产”，其依据为自我报告的文章数量。研究采用逻辑回归模型，考察哪些个体属性（性别、学术职级）和组织特征（合作跨度、院系工作条件）能够预测研究人员是否属于高产群体。研究结果揭示了一系列明显的层级优势：较高的学术职级、更广的合作跨度（合作者总人数）以及良好的院系氛围，均会显著提高研究人员高产的可能性。值得注意的是，在担任高级学术职级的女性中，其高产几率与男性相比并无显著差异。

多年来，科研表现和国际科研合作一直被分别研究。然而，顶尖表现者（未区分性别）的国际科研合作却鲜少受到研究。而将顶尖男性和女性表现者与国际科研合作结合起来考察的研究几乎从未出现（我们只找到一个例子：Giovanni Abramo 及其同事于2019年发表的一篇基于意大利数据集的论文）。Abramo 及其同事分析了顶尖科学家与非顶尖科学家中男性和女性合作行为的差异。他们考察了意大利学术体系，以及11,145位教授出版物的共同署名情况。这项研究采用横断面设计，涵盖2006–2010年。总体结论是，顶尖男性和女性表现者在总体国际合作倾向方面没有显著差异，只有少数例外（数学和化学领域的国际合作）。而在总体人群中，女性的国际合作倾向较低，

相比之下，在顶尖科学家中，这种差异则会消失。当女性处于生产力最高的十分位时，她们与男性在国际合作强度方面的差异也会消失。Abramo 等（2019）发表了首项从性别视角考察顶尖表现者国际合作行为的研究。

Abramo 等（2019）使用分数科学实力来识别生产力分布中位于前10%的群体。他们对顶尖表现的定义是以意大利学科（科学学科领域）为基准进行标准化的。女性的合作行为取决于生产力层级；在科研表现较高时，性别差异会减弱或消失。这可能意味着，在特定结构条件（高生产力）下，由于体系的竞争力，或由于处于顶端的女性已经历了强有力的筛选过程，性别差异不再影响合作行为。顶尖女性的合作行为与顶尖男性不再有差异。Abramo 等（2019）明确表明，顶尖表现者并非整个科学体系的缩影。他们在合作模式上有别于总体人口，而不仅仅是在发表行为方面有所不同。在意大利科学精英中，女性和男性的国际合作水平并无差异。

我们的研究与意大利研究在几个重要方面有所不同：研究涵盖整个波兰科学体系——所有知识生产部门，包括高等教育、科学院、研究机构和企业部门（而非仅限于高等教育部门）；研究特意采用纵向设计，覆盖1992—2021年间的五个六年期（而非单一时期和横截面研究设计）；研究采用多种个体层面的文献计量指标，包括范围为0至99的期刊百分位数排名中位数和团队平均规模，并分别考察特定六年研究期和终身情况；在计算生产力时，我们采用全计数模型方法（而意大利研究采用分数模型）。研究还比较了15个STEMM学科的结果（而非9个学科）。最后，研究采用分数逻辑回归模型，确定会改变国际科研合作强度的预测因素。

本研究关注的是我们拥有完整出版物数据的整个30年时期。我们的纵向研究方法显然不同于调查研究中所采用的传统横断面方法；在后者中，用于分析科研生产力的时期通常为2–4年，数据则来自小规模的国家登记研究。在本研究中，我们能够追踪个体科学家从首次发表到最后一次发表，或追踪到其最近一次发表（如果他们在2021年仍在发表论文）。

研究问题和假设（表1）依据上述关于高科研表现和国际科研合作的全国性及跨国比较研究的发现（以及数据可用性）提出。我们的假设涉及：顶尖表现者的国际科研合作强度随时间上升（假设1）、这种强度的学科差异（假设2）、顶尖表现者国际科研合作强度的性别差异（假设3）、全体科学家国际科研合作强度的性别差异（假设4）、顶尖表现者与总体人群之间的国际化差异（假设5），以及基于分数逻辑回归模型、随之变化的国际化程度的特征（假设6）。

表1。研究问题、假设和支持情况总结

研究问题	**假设**	**支持情况**
RQ1。国际合作强度（顶端）	**国际化程度随时间提升**	支持

表现者，无论是男性还是女性，都会随时间变化（1992—2021年）？	**假设1：**顶尖表现者的国际合作强度表现者，无论是男性还是女性，都会增加（每个连续的6年时期）。	
研究问题2。是否存在学科差异体现在国际合作顶尖表现者的合作强度中?	**国际化中的学科差异** **国际化** **假设2：**顶尖表现者的国际合作强度在不同学科之间存在显著差异。	支持
研究问题3。男性与女性之间是否存在差异顶尖表现者在国际合作强度方面的表现者?	**国际化中的性别差异——顶端表现者** **假设3：**不存在具有统计显著性的差异男女顶尖表现者之间在国际合作强度：男性和女性同样地具有国际化特征。	不支持
研究问题4。是否存在差异男性和女性之间科学家（总体人群）在国际合作强度?	**国际化中的性别差异 – 总体人群** **假设4：**存在具有统计显著性的差异男性和女性科学家在国际合作强度：男性的国际化程度更高，高于女性。	支持
研究问题6. 哪些因素会显著改变.....的强度国际研究合作?	**分数逻辑回归模型** **假设6：**团队平均规模和期刊声望中位数是国际合作强度的最强预测因素。	支持
研究问题5. 国际合作强度是否高于表现者（包括男性和女性），其合作强度是否高于所考察的总体人群?	**国际化差异** **假设6：**顶尖表现者，无论男性还是女性，其国际合作强度都高于所考察的总体人群。	支持

这是我们基于波兰科学观测站数据集撰写的系列论文中的第二篇，该数据集包含过去30年的完整Scopus原始数据；第一篇探讨了波兰顶尖研究者（按生产力计排名前1%和前10%）对1992—2021年国家科研产出的贡献为何出奇地稳定，研究覆盖15个STEMM学科及不同时期：尽管外部社会和经济环境不断变化，且这一时期学术劳动力规模大幅增长（增至四倍），顶尖研究者平均分别贡献了约10%和约50%的国家科研总产出（Kwiek & Roszka, 2024a）。

3. 数据集、样本与方法论方法

3.1. 数据集

我们使用了 Scopus 数据集，其中的作者和论文提取时间为 2022年11月至2023年1月，并收到了由爱思唯尔运营的国际研究研究中心（ICSR）提供的补充 Scopus 数据。我们的完整数据集涵盖1992—2021年。我们采用的方法是选取所有波兰研究密集型机构（共343家，不设年度出版物最低阈值）。所选机构涵盖所有部门，因此，我们的科学家

样本中的科学家不一定属于高等教育部门，但绝大多数确实来自该部门。五个六年期中每个时期的机构隶属关系，指的是在该时期的出版物署名中最常出现的机构（众数）。

本研究采用的最重要机构分类——尤其是在回归模型中——是将10所研究密集型大学（于2019年入选IDUB国家卓越计划）与其他机构区分开来。我们不区分高等教育机构、波兰科学院、研究机构和企业部门机构，而是将研究论文视为来自任何知识生产部门的成果。机构间流动通过五个六年期加以衡量，并据此确定主导隶属机构；不过，数据清楚地显示，学术近亲繁殖程度很高，而机构间流动性极低。我们使用了由作者创建并维护的波兰科学观察站数据集。

我们最初使用了两个互补的数据集：文章数据集和作者数据集。为确保数据一致且适用于分析，required extensive preprocessing to ensure consistency and analytical usefulness. At the author level, gender could not be assigned in 6,885 cases (primarily due to incomplete first names or initials only), which is typical for large-scale bibliometric datasets; these records were therefore excluded from further analysis (Kwiek & Roszka, 2024). For 14,431 scientists, the year of the first publication (prior to 1992) could not be determined, and for 49,939 scientists, the dominant discipline could not be established because cited-reference metadata were incomplete. These observations were removed to maintain comparability of disciplinary classifications across periods. At the publication level, we 旨 excluded papers with more than 100 authors (mostly in PHYS Physics and Astronomy), as authorship contributions cannot be reliably inferred in such cases. We focused exclusively on journal articles and conference proceedings, omitting other Scopus-indexed document types.

为满足本研究的需要，我们进一步将数据集限定为15个STEMM学科，剔除了人文学科、社会 humanities, social sciences, and the MULTI multidisciplinary category. After completing all 据集与 preprocessing steps, the article dataset was deterministically linked to the authors' dataset using Scopus ID as the key. The final dataset comprised 152,043 unique Polish authors and their 587,558 articles published between 1992 and 2021.

3.2. 样本

1992年至2021年间Scopus数据库中可见的科学家群体，被划分为对应五个为期6年的发表时间窗口的亚群体，从最早的时期（1992–1997）到最近的时期（2016–2021年）。根据发表生涯的长短，个体科学家可能出现在一个、多个或所有时期。在随后的每个时期，发表论文的科学家人数均大幅增加——从第一个窗口的23,166人增至最后一个窗口的93,092人——使得30年间人数扩大了四倍。这一增长部分反映了学术劳动力规模的扩大，但更重要的是，波兰科学家（在本研究分析的STEMM领域中）逐步融入全球出版网络，并在Scopus中的可见度不断提高。

在总体人口中，将每个时期发表生产力位居前10%的科学家界定为顶尖表现者子群体，并针对15个学科分别计算。表2呈现了各时期前10%与其余90%科学家的分布情况。随着总体人口不断扩大，顶尖表现者的数量也相应增长，从第一个时期的约2,400人增至最后一个时期的9,337人。此外，表2还详细

概述了各时期的整个研究群体，包括其性别、机构、学术年龄和学科结构。

表2。按六年期、性别、机构类型、2021年学术年龄（发表经验）组别和STEMM学科划分的顶尖表现者所选自的总体分布（频数）

变量 行		1992–1997	1998–2003	2004–2009年	2010–2015年	2016–2021年
总计		23,166	36,366	54,346	76,310	93,092
性别	女性	8,480	15,081	25,104	36,743	47,155
	Male	14,686	21,285	29,242	39,567	45,937
顶端与rest	Rest	20,766	32,664	48,883	68,628	83,755
	Top	2,400	3,702	5,463	7,682	9,337
学术年龄组	0–9岁	14,529	24,170	35,278	47,396	54,040
	10–19岁	5,297	6,382	10,684	17,728	22,489
	20–29岁	2,853	4,350	5,132	6,098	10,256
	30岁及以上	487	1,464	3,252	5,088	6,307
学科	AGRI	1,715	2,916	4,789	7,649	9,336
	BIO	2,524	3,766	5,199	7,280	8,922
	CHEM	3,318	4,818	6,159	7,731	8,221
	化学工程	220	375	491	535	570
	COMP	188	338	762	1,620	1,831
	地球科学	951	1,594	1,971	2,712	3,367
	ENER	50	109	223	559	1,036
	ENG	1,065	1,788	3,370	5,681	7,952
	ENVI	421	767	1,456	2,636	3,928
	材料科学	891	1,331	2,207	3,730	5,019
	MATH	898	1,248	1,705	2,204	2,244
	MED	6,900	12,224	20,143	26,929	33,167
	神经科学	230	366	455	652	892
	药学	375	410	420	509	535
	PHYS	3,420	4,316	4,996	5,883	6,072

我们的研究聚焦于15个STEMM学科：农业（AGRI），农业与生物科学；生物学（BIO），生物化学、遗传学和分子生物学；化学工程（CHEMENG），化学工程；化学（CHEM），化学；计算机（COMP），计算机科学；地球科学（EARTH），地球与行星科学；能源（ENER），能源；工程（ENG），工程学；环境科学（ENVI），环境科学；材料科学（MATER），材料科学；数学（MATH），数学；医学（MED），医学；神经科学（NEURO），神经科学；药学（PHARM），药理学、毒理学和药剂学；以及物理学（PHYS），物理学与天文学。

表3。 亚群体：拥有10个或更多共同署名的科学家

组别	Row	1992–1997	1998–2003年	2004–2009年	2010–2015年	2016–2021年
总计		11,229	17,973	25,942	31,992	31,309
性别	女性	3,767	6,825	10,718	13,693	13,481
	Male	7,462	11,148	15,224	18,299	17,828
顶端与rest	Rest	9,025	14,383	20,576	24,389	22,074
	Top	2,204	3,590	5,366	7,603	9,235
学术年龄组	0–9岁	6,114	9,926	12,408	11,436	5,057
	10–19岁	3,142	4,203	7,457	11,709	12,841
	20–29岁	1,708	2,895	3,608	4,778	8,082
	30岁及以上	265	949	2,469	4,069	5,329
学科	AGRI	758	1,425	2,495	3,411	3,468
	BIO	1,190	1,864	2,551	3,181	3,092

	CHEM	1,698	2,460	3,108	3,649	3,440
	化学工程	73	121	137	155	132
	COMP	75	127	248	330	327
	地球科学	398	624	804	974	973
	ENER	17	44	83	148	166
	ENG	366	625	1,186	1,679	1,736
	ENVI	163	346	646	959	1,035
	材料科学	475	718	1,249	1,813	1,884
	MATH	328	482	626	698	679
	MED	3,683	6,549	9,553	11,359	10,965
	神经科学	117	177	226	265	247
	药学	99	135	157	164	159
	PHYS	1,789	2,276	2,873	3,207	3,006

在分析国际合作强度时，我们选取了这样一个科学家亚群体：在整个观察期（1992—2021年）内，他们以任何形式发表的合著出版物至少达到10篇。之所以将阈值设为10，是因为较低的标准会使处于职业生涯早期或仅有少量活跃研究的研究人员所占比例过高，而这些人的合著模式波动很大；较高的标准则会大幅缩小样本，降低学科覆盖面。该群体在整体学术群体中规模相对较小，但对分析至关重要。活跃科学家的数量从第一时期（1992–1997）的23,200人增加到最近时期（2016–2021年；见表1）的93,100人；同期，达到≥10 篇合著出版物阈值的作者人数从11,200人增至31,300人（见表2）。这意味着，在最近时期，约三分之一的科学家（33.6%）达到了较高水平的合作发表活动。我们区分机构合作、国内合作和国际合作，但分析重点是国际合作。

最近时期的性别差异仍属中等，但十分明显。在总体人口中，女性研究人员有47,200人（50.6%），男性研究人员有45,900人（49.4%）。在拥有≥10 篇合著出版物的科学家中，这两个数字分别为13,500人（43.0%）和17,800人（57.0%）。这表明，尽管女性在各时期的整体学术群体中所占比例持续上升，男性仍略微更有可能达到较高的合作活跃度。

顶尖组与其余组结构中的对比最为显著。在最后一个时期，总体人口中的顶尖表现者共有 9,300 名研究人员（10%）。然而，在拥有 ≥10 合著出版物的作者中，他们有 9,200 名，占该亚群体的 29.5%。因此，几乎三分之一的高度协作型科学家属于产出最高的前10%研究人员。其余组在总体人口中有 83,800 人，而在高度协作型科学家中则只有 22,100 人。

按学术年龄划分也呈现出显著差异。在最后一个时期（2016–2021年）的总体人口中，职业生涯早期研究人员（学术年龄为0–9岁）占主导地位，共有54,000人（58%）。而在高合作子群体中，这一人数骤降至5,100人（16%）。相比之下，拥有10–19年经验的研究人员在总体人口中有22,500人（24%），而在拥有≥10 出版物的群体中有12,800人（41%）。拥有≥20 年经验的研究人员代表性更高：他们在总体人口中有16,600人（18%），而在高合作群体中有13,400人（43%）。这表明，较高的合作强度与较长的职业生涯和更丰富的累积经验密切相关。

领域层面的差异尤为显著。2016–2021年，医学是总体人口中规模最大的群体（33,200名科学家；36%），也是高合作子群体中占比最大的部分（11,000人；35%）。化学（总体8,200人；合作群体3,400人；41%）和生物学（总体8,900人；合作群体3,100人；35%）也同样占有较大比例。这表明，生物医学和实验室研究领域的研究人员在高合作研究人员中所占比例明显偏高。

相比之下，大规模合作在物理科学和工程学领域明显较为少见。在数学领域（总体2,200人；合作680人；30%）和计算机科学领域（总体1,800人；合作330人；18%），高强度合作相对罕见。化学工程（总体570人；合作130人；23%）和能源领域（总体1,000人；合作170人；16%）也呈现出类似模式。

总而言之，至少拥有10篇合著出版物的科学家约占总体的三分之一；从性别来看，他们以男性为主，学术年龄较高，并且高度集中于生物医学和实验领域。他们构成了科研体系的核心，具有最高的科研强度，并且贡献了波兰国内合作产出和出版产出的相当大一部分。

3.3. 方法论方法

我们的分析单位是个人科学家，而非单篇出版物。研究中的个人科学家均依据其个体特征进行归类，包括传记特征（如性别和学术年龄）以及与出版相关的特征（如分别针对每个时期计算的科研生产力、针对每个时期计算的国际合作率、针对每个时期计算的团队平均规模，以及终身期刊声望中位数，即合并所有时期计算的数值）。

此外，还有一项机构特征：每个时期的科学家被划分为10所IDUB研究密集型大学之一，或归入其他机构类型（二元划分：IDUB/其余）。遗憾的是，借助我们的数据集，我们无法获取其他能够界定研究如何开展（或未开展）的机构变量，例如大学院系和院系中各种各样的“机构氛围”和“办事方式”。这些因素对科研生产力极为重要，但只能通过调查方法获取。

对于数据集中的每位科学家，我们都有一个个人识别号码（Scopus ID），并以此为基础构建了他们的出版物组合。每个组合包含1至5个子组合，具体数量取决于科学家在研究时期内发表论文的时长。这些子组合涵盖了所有从Scopus获取的出版物元数据，包括出版物元数据和期刊元数据。出版物元数据包括出版年份、合著者人数及其国家隶属机构、引文数量，以及所有出版物的全部被引参考文献；期刊元数据则包括Scopus CiteScore百分位排名等信息。

出版物及其元数据与个人出版物组合中的年份相关联。在本研究中，它们与所研究的五个时期相对应。我们使用首次发表的年份来确定各时期末科学家的学术年龄（发表经验）。学术年龄等同于发表经验；在波兰的 STEMM 学科中，它与生理年龄高度相关。对整个国家体系中学术年龄与实际生理年龄差异的系统分析表明，这两种年龄之间的相关性非常高，相关系数介于 80%–90% 之间（例如，CHEM 化学为 0.89，PHYS 物理学与天文学为 0.88，MATH 数学为 0.85，IMMU 免疫学与微生物学为 0.90；Kwiek & Roszka, 2022）。在我们的数据集中，每位科学家的性别、学术年龄和学科均有明确界定。

我们采用全计数法衡量生产力，即所有合著者均获得全部计分（Kwiek & Roszka, 2024 采用了另一种方法——分数计数法，即按合著者人数分摊计分；参见 Waltman & van Eck, 2019）。此外，我们还根据期刊声望进行标准化：期刊声望标准化凸显了主要在高影响力期刊发表与主要在低影响力期刊发表这两种情况之间，在学术投入和对全球科学界影响方面的平均差异。

我们采用的期刊声望标准化生产力分析方法，将论文与期刊在高度分层的全球期刊体系中的位置联系起来。我们使用了 Scopus CiteScore体系，其中期刊按百分位排名，从第0百分位（最低）到第99百分位（最高；范围：第0至第99百分位）。虽然在生产力计算中，我们将CiteScore百分位排名应用于单篇论文，而非仅应用于单个期刊（其原本的用途），但我们遵循了过去三十年波兰科研评估工作的一项基本原则：“学术期刊并非一视同仁。”

波兰科学家对学术期刊的国家分层体系早已习以为常；在这一体系中，期刊的价值按出版积分计为0至200分。我们用于按生产力水平划分科学家的声望标准化体系，反映了波兰科学体系的现实：该体系在个人资助申请和个人晋升中，以及在机构评估和基准比较中，都会常规使用出版积分。因此，我们认为，有些期刊声望极高，对潜在作者的要求也很高（通常位于第90至第99百分位）；另一些期刊的声望则低得多，发表所需的工作量也少得多。Scopus期刊约有47,000种，构成了一个高度分层的体系，顶端是声望最高的期刊，底端则是声望最低的期刊。

我们掌握了样本中每位科学家的个人出版物组合，其中包括出版物数据和期刊数据。我们使用包含 46,702 种 Scopus期刊的 Scopus CiteScore列表（2024）来确定每位科学家的每篇 Scopus 出版物所属的位置，并计算各时期的生产力。由于没有历史 CiteScore数据，我们使用当前的 CiteScore 列表计算过去的生产力，并假设核心期刊多年来保持其所属位置不变，因此可以忽略CiteScore排名随时间可能发生的变化。

我们的期刊声望标准化基于引文，且爱思唯尔每年都会更新 CiteScore 列表。因此，在计算生产力时，位于 Scopus CiteScore百分位排名较高位置的出版物权重高于排名较低的出版物。例如，一篇发表于处于第 80 百分位位置期刊的单作者论文，其数值为 0.8（而在大多数调查采用的非标准化方法中，该数值为 1）。由于我们采用的是全文计数法，而非分数计数法，因此，发表于处于第 80 百分位位置期刊的单作者论文和多作者论文，其数值均为 0.8。

将个人出版物与学术期刊及其在 CiteScore 中的位置（范围为 0–0.99）关联起来是可行的。然而，利用我们的数据集，无法将个人出版物与其随时间累积的引文关联起来，也无法将其与四年领域加权引文影响力（或任何其他有用的引文影响力指标）关联起来。尽管论文层面引文指标显然比期刊层面指标更适合用于计算个人生产力，但我们的数据集无法支持此类计算。在波兰科研评估工作中，我们认为，基于期刊声望标准化的方法比非标准化方法更合适；后者会忽略期刊在高度分层体系中的位置。

我们对顶尖表现者（科研生产力排名前 10%）的筛选很简单。我们分别考察了每个学科在每个六年期内的所有科学家。要纳入某一时期的统计，科学家在该时期内至少需要发表一篇论文。有些科学家被纳入多个时期的生产力计算：根据他们在同一时期、同一学科中相对于其他人的生产力水平，他们在某些时期可能是顶尖表现者，在另一些时期则可能不是。

本文选取六年期，同时也考察了较短的时期（四年期和五年期）。选择时期长度时，关键在于确保女性顶尖表现者人数足够，尤其是在女性占比较低（通常低于20%）的学科中，例如数学、计算机、物理学和工程。我们的独立科学家样本（152,043人）中，有些人可能只属于最早的时期或最近的时期，也有些人属于全部五个时期。

我们的科学家并非1992年队列（即首次发表论文的年份为1992年的科学家）；随着时间推移，他们可能属于波兰研究人员不断变化的人群中的多个不同队列，既有较年轻的，也有较年长的。因此，本研究并非基于队列，而是在纵向意义上追踪所有科学家随时间的变化，依据的是他们从数据库中的第一篇到最后一篇或最近一篇论文。我们追踪科学家的时间跨度不超过三十年（1992—2021年）。

在每个时期，我们通过对所有科学家进行排名并选取前10%，将其归入顶尖表现者类别（前10%）。与按声望标准化的出版物数量不同，基于排名的生产力类别能够识别不断扩大的波兰科学家群体中的顶尖表现者。

每个时期、每个学科都有其顶尖表现者：生产力分布中排名前10%者（采用全计数法，并按期刊声望进行标准化）。在每个时期和每个学科中，男性和女性顶尖表现者均有分布。我们依据每位科学家整个终身出版物组合（从其第一篇到最近一篇被 Scopus 收录的论文）确定其主导学科，从而确保对学科归属进行稳定且全面的分类。

我们根据科学家（及顶尖表现者）整个终身出版物组合（从其第一篇到最近一篇被 Scopus 收录的论文），为每人指定一个主导学科。因此，主导学科反映的是长期发表模式，而非特定时期的波动。尽管科学家的研究重点可能随时间而变化，基于终身出版物的做法仍能为后续所有分析提供稳定且全面的学科归属分类。

我们认为，相较于仅参考科学家发表论文所涉及的全部期刊，参考所有被引参考文献及其期刊，能使我们的学科判定方法更加细致。举例来说：某位作者在一个时期内发表了20篇论文，那么可供其选择主导学科的 ASJC 学科仅有20个；而同样这20篇论文平均可提供800–1,000个 ASJC 学科，供我们根据所有被引参考文献计算主导学科。

这正是详细的个人出版物组合的力量所在：对于每位科学家，我们都拥有其终身出版物集合，以及完整的被引参考文献列表。此外，每条被引参考文献都与一份期刊相关联，而该期刊被归入一个或多个学科。同时，为每个时期分配主导学科，比为整个学术生涯分配单一主导学科，更能准确地呈现一位科学家的情况。参照 ASJC，我们使用了 27 个主题层级领域，而不是 333 个独特的研究领域。我们采用两位数分类，而非四位数分类，因为使用四位数分类来筛选顶尖表现者会产生毫无意义的结果。然而，这

在最大的领域中，可以在这一层级开展工作，尤其是在 MED 医学领域；在最近的时期，该领域拥有超过 3,000 名科学家（2016–2021年为 33,167 名）。

我们使用性别判定工具 genderize.io 来判定性别，并将概率阈值设为 0.85。我们采用二元分类：男性/女性。

4. 结果

4.1. 国际合作中的性别差异——总体人群

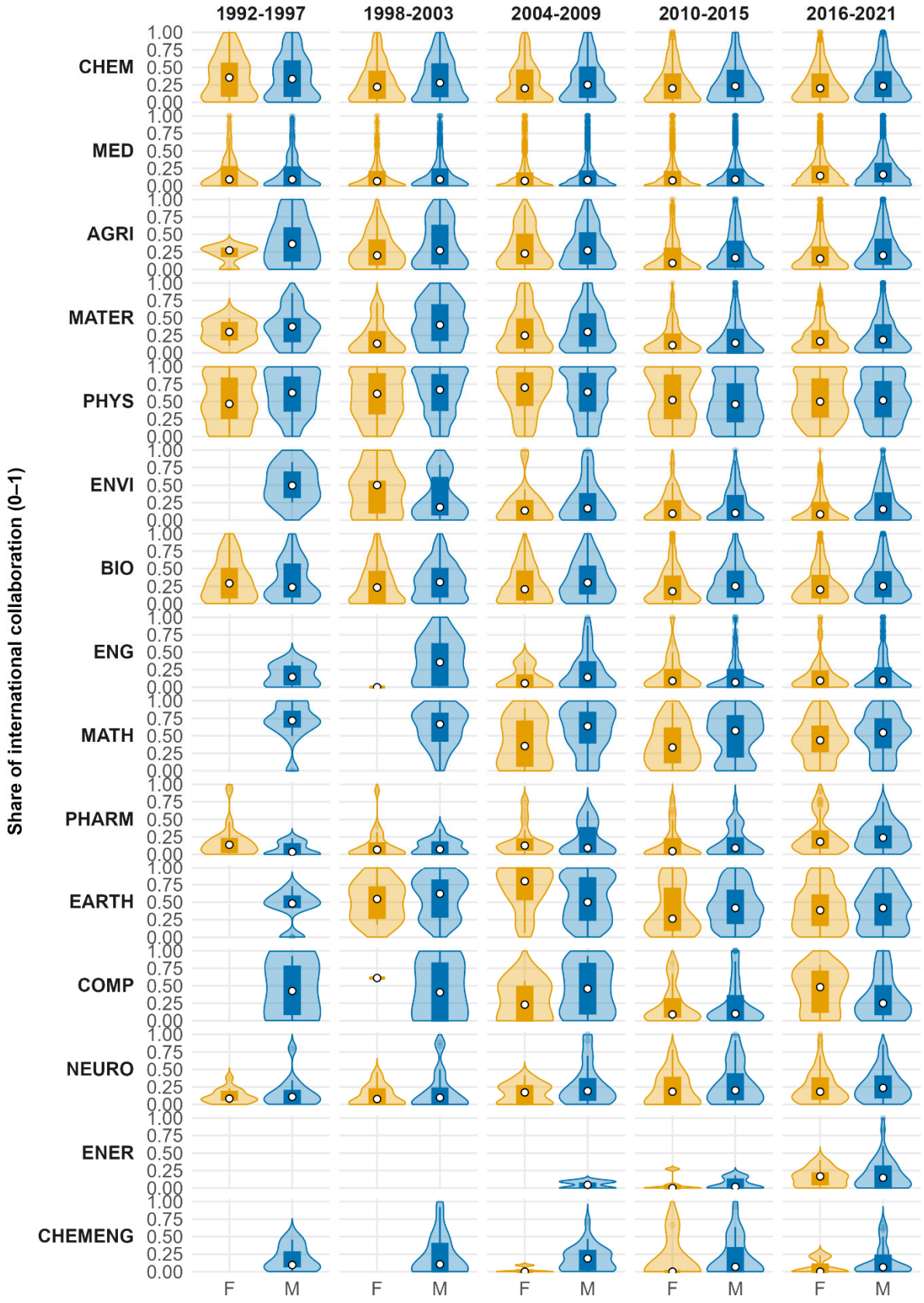
在整个1992—2021年期间，波兰科学家的国际合作比例持续上升，这一点既体现在分布形态上，也体现在表4所列的中位数上。在最早的时期（1992–1997），国际共同署名比例的中位数较低，鲜少超过0.20。在农业科学领域，女性为0.188，男性为0.357；在化学领域，男女均为0.333；而在医学领域，仅为0.091。只有在物理学和地球科学领域，我们观察到个别较高的数值（中位数分别为0.467和0.423），这表明早期国际合作高度集中于最具国际化倾向领域中的一小部分研究人员。该时期所有性别差异在统计学上均不显著（$p > 0.25$），这主要是由于样本量较小且方差较大；所有p值均经过多重比较校正。

1998年至2003年间，研究国际化开始缓慢扩展，但中位数仍然较低：化学为0.200–0.263，生物学为0.231–0.308，农业为0.200–0.243。这一时期也首次出现显著的性别差异。在材料科学领域，女性的中位数为0.133，男性为0.385（差异：−0.25，p值= 0.004）；在医学领域，女性为0.067，男性为0.091（差异：−0.024，p值= 0.005）。其他领域的差异不超过0.05–0.08，且不具有统计显著性。

2004–2009年，大多数领域的中位数均有所上升。医学（0.071 vs. 0.083，p值= 0.001）和生物学（0.206 vs. 0.300，p值= 0.009）的性别差距最大且具有统计显著性，这证实了这一时期生物医学领域的国际化性别差异最为突出。2010年至2015年间，国际合作变得更加普遍。在化学领域，女性的中位数为 0 190 0 231 −0 040, = .，男性为. 0 025 0 176 0 250 −0 074, < 0 001 0 091 0 167（差异：., p值.）；在生物学领域，分别为.和.（差异：., p值.）；在农业领域，分别为.和.（差异：−0.076，p值< 0.001）；在医学领域，分别为0.077和0.091（差异：−0.014，p值< 0.001）。物理学呈现相反趋势——女性的中位数略高（0.514 vs. 0.457）——但差异未达到0.05水平的统计显著性（p值= 0.066）。总体而言，这些结果表明，到2010年，国际化方面的性别差距已趋于稳定并呈现系统性，尽管差距仍相对较小，中位数差异约为0.04–0.08个百分点。

在最近的时期（2016–2021年），国际合作水平稳定在明显高于此前时期的数值。在物理学领域，女达到0.500；在化学领域，分别为0.200和0.231；在生物学领域，分别为0.200和0.250；在医学领域，0.159；在农业科学领域，分别为0.154和0.200。所有这些差异虽然幅度不大，但均具有统计显著性 035；生物学、农业、环境科学和医学领域 p值 < 0.001）。在技术与精确科学领域（化学工程、工程性别差异仍不具有统计显著性，中位数集中在0.25–0.50左右，这表明女性和男性获得国际合作网络的

图1。全体人群中按性别、时期和学科划分的国际合作比例分布



空白方框 = 缺失数据（成果组合中至少有10篇出版物的男性或女性人数不足）

表4. 国际合作中位数比例及曼-惠特尼检验（所有亚群体）

时期	学科	中位数比例 - 女性	中位数比例 - 男性	中位数比例 - 差异	p_adj	方向
1992年起 1997	AGRI	0.188	0.357	-0.170	0.441	ns
	BIO	0.290	0.235	0.055	0.904	ns
	CHEM	0.333	0.333	0.000	0.904	ns
	化学工程	-	0.095	-	-	-
	COMP	-	0.367	-	-	-
	地球科学	-	0.423	-	-	-
	ENG	-	0.142	-	-	-
	ENVI	-	0.495	-		-
	材料科学	0.273	0.333	-0.061	0.867	ns
	MATH	-	0.641			-
	MED	0.091	0.091	0.000	0.820	ns
	神经科学	0.077	0.108	-0.031	0.774	ns
	药学	0.136	0.034	0.102	0.261	ns
	PHYS	0.467	0.594	-0.127	0.261	ns
1998年至今 2003	AGRI	0.200	0.243	-0.043	0.475	ns
	BIO	0.231	0.308	-0.077	0.100	ns
	CHEM	0.212	0.263	-0.051	0.168	ns
	化学工程	-	0.083	-	-	-
	COMP	0.611	0.381	0.230	0.751	ns
	地球科学	0.545	0.555	-0.009	0.904	ns
	ENG	0.000	0.333	-0.333	0.441	ns
	ENVI	0.500	0.185	0.315	0.751	ns
	材料科学	0.133	0.385	-0.251	0.004	男性 > 女性
	MATH	-	0.599	-	-	-
	MED	0.067	0.091	-0.024	0.005	男性 > 女性
	神经科学	0.077	0.097	-0.020	0.904	ns
	药学	0.063	0.071	-0.009	0.820	ns
	PHYS	0.600	0.636	-0.036	0.413	ns
2004年起 2009	AGRI	0.226	0.250	-0.024	0.873	ns
	BIO	0.206	0.300	-0.094	0.009	男性 > 女性
	CHEM	0.200	0.250	-0.050	0.168	ns
	化学工程	0.000	0.176	-0.176	0.167	ns
	COMP	0.176	0.444	-0.268	0.463	ns
	地球科学	0.700	0.492	0.208	0.168	ns
	ENER	-	0.045	-	-	-
	ENG	0.053	0.111	-0.058	0.657	ns
	ENVI	0.112	0.167	-0.054	0.475	ns
	材料科学	0.200	0.300	-0.100	0.475	ns
	MATH	0.307	0.571	-0.265	0.098	ns
	MED	0.071	0.083	-0.012	0.001	男性 > 女性
	神经科学	0.172	0.190	-0.019	0.463	ns
	药学	0.125	0.092	0.033	0.820	ns
	PHYS	0.696	0.611	0.085	0.296	ns
2010年–2015	AGRI	0.091	0.167	-0.076	0.000	男性 > 女性
	BIO	0.176	0.250	-0.074	0.000	男性 > 女性
	CHEM	0.190	0.231	-0.040	0.025	男性 > 女性
	化学工程	0.000	0.068	-0.068	0.530	ns
	COMP	0.087	0.091	-0.004	0.873	ns

	地球科学	0.250	0.396	-0.146	0.475	ns
	ENER	0.000	0.017	-0.017	0.810	ns
	ENG	0.091	0.061	0.030	0.510	ns
	ENVI	0.093	0.091	0.002	0.904	ns
	材料科学	0.111	0.138	-0.027	0.510	ns
	MATH	0.333	0.500	-0.167	0.168	ns
	MED	0.077	0.091	-0.014	0.000	男性 > 女性
	神经科学	0.167	0.200	-0.033	0.510	ns
	药学	0.045	0.091	-0.046	0.530	ns
	PHYS	0.514	0.457	0.058	0.066	ns
2016年至今 2021	AGRI	0.154	0.200	-0.046	0.000	男性 > 女性
	BIO	0.200	0.250	-0.050	0.000	男性 > 女性
	CHEM	0.200	0.231	-0.031	0.035	男性 > 女性
	化学工程	0.000	0.062	-0.062	0.296	ns
	COMP	0.442	0.250	0.192	0.649	ns
	地球科学	0.369	0.412	-0.042	0.904	ns
	ENER	0.152	0.137	0.015	0.904	ns
	ENG	0.091	0.091	0.000	0.820	ns
	ENVI	0.083	0.154	-0.071	0.000	男性 > 女性
	材料科学	0.167	0.188	-0.021	0.118	ns
	MATH	0.417	0.500	-0.083	0.330	ns
	MED	0.143	0.159	-0.016	0.000	男性 > 女性
	神经科学	0.182	0.235	-0.054	0.614	ns
	药学	0.181	0.238	-0.057	0.820	ns
	PHYS	0.500	0.500	0.000	0.510	ns

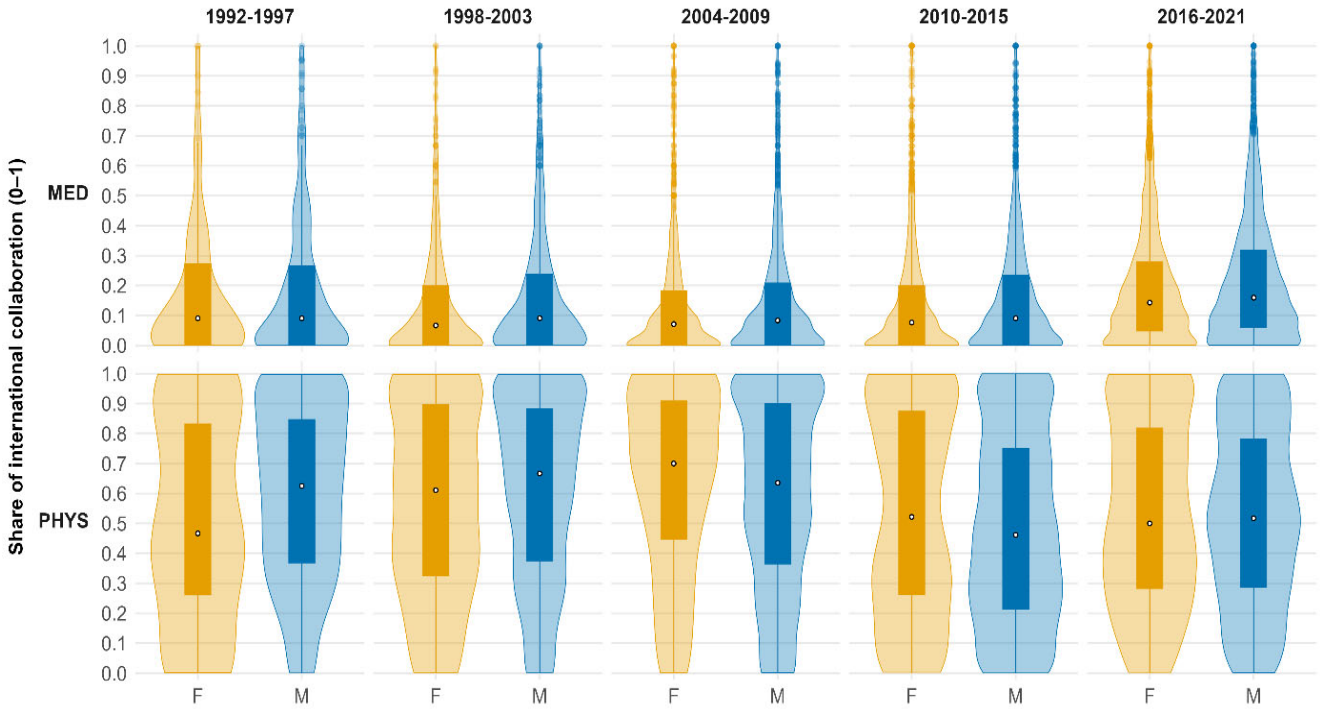
“-” = 缺失数据（成果组合中至少有10篇出版物的女性人数不足）

综合来看，结果表明，过去三十年来，波兰的研究国际化程度大幅提高——外国合著者参与的出版物占比从20世纪90年代初的约10%–20%上升至近年的30%–50%。在大多数学科中，女性融入国际合作网络的程度仍略低于男性。这些性别差异的中位数值很少超过0.05–0.08，且主要在生物学、医学、化学和农业科学领域具有统计显著性。在其他学科中，女性和男性的分布非常相似，这表明，尽管国际化总体不断扩大，国际合作中的性别差距仍然不大且稳定，但持续存在。

4.2. 示例：来自 MED 医学与 PHYS 物理学与天文学的科学家（全体人群）

对医学（MED）中国际合作系数分布的比较 d
物理学与天文学（计算机）揭示了这两个领域之间的根本差异，既体现在国际化的总体层级上，也体现在它们随时间推移的发展轨迹上。在所分析的整个时期内，物理学的国际合作占比明显高于医学。早在第一个时期，即1992–1997年，物理学中拥有外国合著者的出版物占比中位数，女性为0.467，男性为0.594；而在医学中，两个性别均仅为0.091。这意味着，平均而言，物理学家参与国际合作的频率约为医学科学家的六倍。

图 2。 按性别和时期划分的国际合作比例分布（医学 vs. 物理学）



这一差异在之后的所有时期中都持续存在，并且仍是整个数据集各领域之间最显著的差异之一。在1998–2003年，物理学女性的中位数达到0.600，男性达到0.636；相比之下，医学中女性和男性分别为0.067和0.091。在2004–2009年，物理学家仍表现出非常高的国际化水平（女性为0.696，男性为0.611）；在随后的几十年中，这些数值保持稳定，在0.514至0.500之间波动。在医学领域，增长虽有所体现，但明显较为缓慢：女性的中位数从2004–2009年的0.071上升至2016–2021年的0.143，男性则从0.083上升至0.159。尽管相较于21世纪初的数值增长了70%以上，医学仍以约0.35–0.40的中位数差距落后于物理学，这意味着典型物理学家参与国际合作的频率仍是典型医学研究者的两倍以上。

这些差异在分布中清晰可见。在物理学领域，分布范围较广，且集中在较高数值附近，这反映出大型国际科研联盟（如 CERN 和重要的天体物理学实验）中的研究工作十分普遍。在医学领域，分布明显右偏，大多数观测值集中在零附近，这表明尽管国际化取得了进展，仍有相当一部分出版物由国内团队完成。只有在最近一个时期（2016–2021年），我们才观察到适度的上移，男性中尤为明显，这表明医学研究群体正逐步融入国际项目。

性别差异在这两个领域也呈现出不同的模式。在物理学领域，女性和男性的中位数几乎相同，差异不具有统计显著性——这可归因于大型物理学项目的协作结构：整个研究小组都参与其中，而性别对获得国际合著机会的影响微乎其微。相反，在医学领域，性别差异始终存在且显著：在每个时期，女性的中位数都低约 0 01 0 02, 2010 2021 < 。——而这
0 001
些差异在——（p值 。）中达到统计显著性。

综合来看，这些模式表明，自20世纪90年代初以来，物理学一直是波兰国际化程度最高的领域之一，外国合著比例高且稳定；而医学直到最近十年才开始迎头赶上，目前中位数约为0.15。这种差异反映了这两个研究环境在组织和文化结构上的不同：物理学以大型跨国基础设施项目为基础，而医学研究仍深深扎根于本地临床机构和国家医疗卫生体系。

4.3. 国际合作中的性别差异——顶尖表现者

在各自领域生产力排名前10%的研究人员中，与总体人群相比，国际合作占比的分布明显向较高值偏移，分布的偏斜程度较低，变异性也较小。这一模式表明，国际化是高科学生产力不可或缺的一部分：顶尖表现者参与全球研究网络的频率远高于更广泛的学术群体。这一现象在所有时期和几乎所有学科中均可观察到，但程度因领域以及女性和男性之间的差异而有所不同。

在最早的时期（1992–1997），顶尖表现者中的性别差异较小，且在统计学上不显著（p值 > 0.2）。国际合作的中位数在化学（CHEM）中为0.30至0.35，材料科学（MATER）中约为0.32，物理学与天文学（PHYS）中为0.46至0.60；而在医学（MED）和农业科学（AGRI）中则不超过0.10–0.20。即使在这一早期阶段，高度国际化的领域（PHYS、EARTH、MATH和CHEM）与国际合作刚刚兴起的领域（MED、AGRI和PHARM）之间的差异已十分明显。顶尖表现群体中的女性达到的中位数水平与男性相近，这可能反映出，在科学精英群体中，能否参与国际合作主要取决于研究产出，而非性别。

1998–2003年，顶尖表现者之间的国际合作显著加强。化学领域的中位数上升至女性0.299、男性0.322；生物学领域为0.250和0.312；物理学领域则保持在较高水平，约为0.60–0.70。与此同时，首次出现具有统计显著性的性别差异：在材料科学领域（0.150 对 0.380，$p = 0.021$）和医学领域（0.069 对 0.097，$p = 0.024$），男性的国际化水平显著更高。在所有其他领域，性别差异都较小（约为0.02–0.06），且在统计学上不显著。

2004年至2009年间，顶尖表现者的国际化水平达到成熟科研体系的典型水平。物理学领域的中位数超过0.70；地球科学领域女性达到0.70，男性达到0.50；化学和生物学领域则集中在0.30左右。这一时期，只有医学领域发现了具有统计显著性的性别差异（0.077 对 0.105，$p < 0.001$）；在其他所有领域，女性和男性的国际化水平相近。到那时，精英研究人员中的国际化已十分普遍，且性别差异有所减弱。

男性与女性顶尖表现者之间最显著的差异出现在2010年之后。这一时期恰逢波兰一系列高等教育改革，以及国内和国际科研经费逐步增加。2010–2015年，在农业（0.105与0.200）、生物学（0.214与0.269）和医学（0.091与0.118）领域观察到具有统计显著性的性别差异（$p < 0.05$），男性的中位数比女性高出0.03–0.10个点。在其余领域（化学、物理学、数学和环境科学），性别差异并不显著，尤其是物理学，几乎达到完全平等（0.514与0.500）。2016–2021年，这一模式持续存在并趋于稳定。在生物医学和环境领域，男性的国际合作比例仍显著较高

: 医学（ 0 154 0 188, −0 034, < 0 001 0 214 0 283 −0 069, = . 与 ., 差异 ., 0 010 0 176 0 263 −0 087, < 0 001 0 100 0 190 −0 090, p .）；生物学（. 与 ., ., p .）；农业（. 与 ., ., p .）；以及环境科学（. 与 ., ., p < .）。在所有这些情况下，差 0 001
异的方向都表明男性的国际化程度更高。在物理学、数学、化学和化学工程领域，中位数非常接近（例如，物理学为0.569与0.578），这表明在成熟的实验领域中，性别差异几乎已经消失。

总而言之，在表现优异的科学家中，国际合作的占比显著高于总体人群，在大多数学科中超过0.25–0.30，在PHYS和EARTH中则达到0.60–0.70。尽管性别差距小于全体人群中的差距，但在生物医学、农业和环境科学领域仍具有系统性，其中位数差异介于0.03至0.09之间，并具有统计显著性。在实验性和精确学科（PHYS、CHEM、MATH和ENG）中，这些差异则微乎其微。这表明，在科学精英群体内部，女性获得国际合作机会的程度与男性相对平等；然而，在具有较强制度性或临床因素的领域——合作取决于能否获得基础设施或资助网络——性别差距仍持续存在。

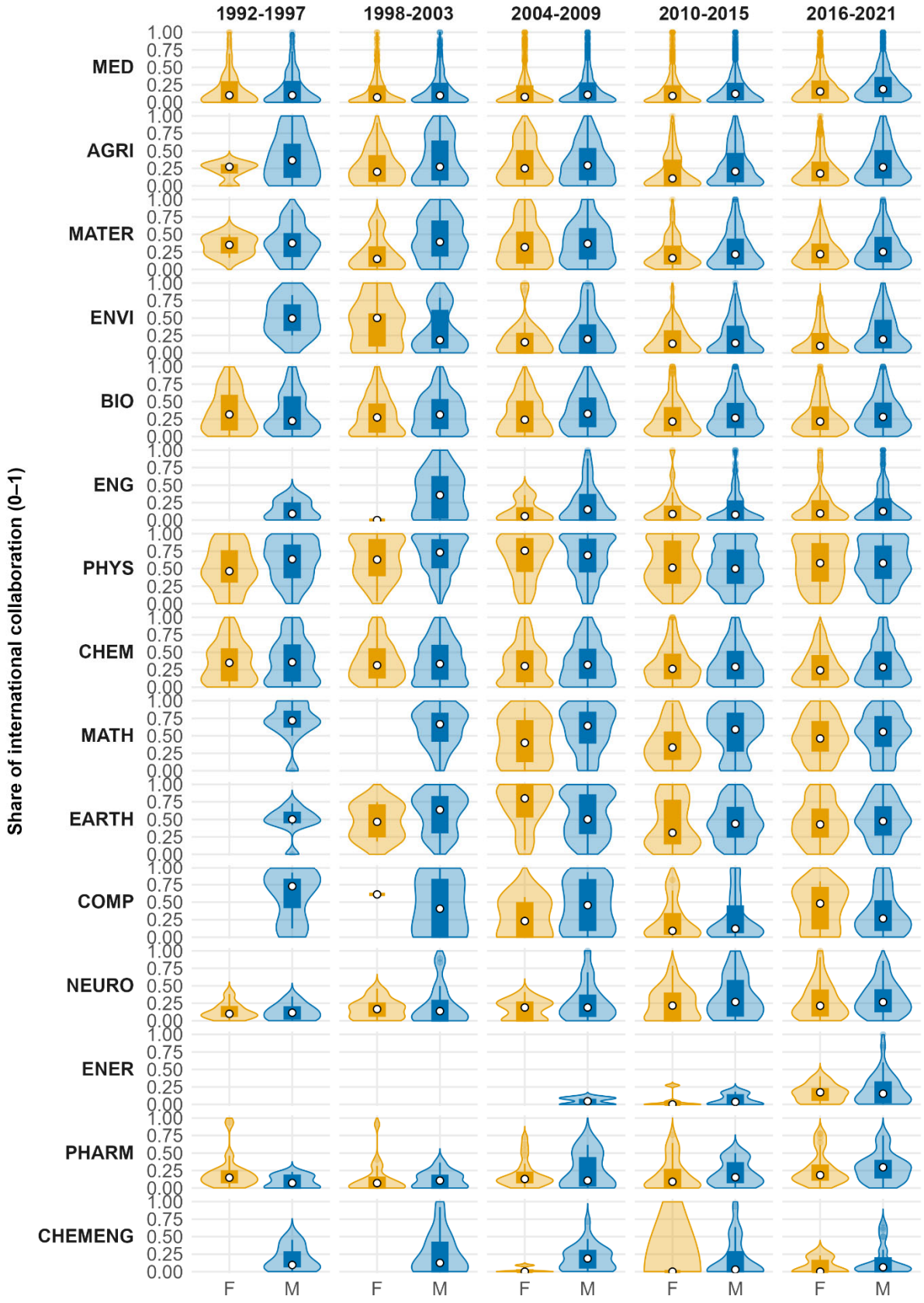
4.4. 示例：MED 医学与 PHYS 物理学与天文学中的顶尖表现者

对表现优异的科学家中医学（MED）与物理学和天文学（PHYS）的国际合作分布进行比较后发现，两者之间的差异甚至比总体人群中更加明显。在整个时期内，PHYS始终是国际化程度无可争议的领先者，而MED尽管逐步增长，仍继续处于显著较低的层级，其中位数很少超过0.20点。

早在第一个时期（1992–1997），产出最多的物理学家就几乎总是进行国际合作：国际共同署名比例的中位数，女性为0.464，男性为0.600。同一时期，医学领域的对应数值分别为0.091和0.100，几乎低了六倍。这表明，即使在最活跃的研究人员——也就是频繁发表论文的人——中，物理学也已完全遵循全球研究团队的运作逻辑，而医学仍深深植根于国内结构之中。

在随后的时期，这种差异不仅持续存在，而且日益根深蒂固。1998–2003年，物理学家的中位数达到女性0.611、男性0.696；相比之下，医学领域分别为0.069和0.097（差异 −0.028，p_调整后 = 0.024）。2004–2009年，物理学的数值稳定在约0.70，而医学仅略有上升（0.077 对 0.105，差异 −0.028，p_调整后 < 0.001）。因此，即使在表现最出色的研究人员中，医学领域的国际共同署名比例仍比物理学低数倍。2010年之后，两个领域之间的差距依然很大，不过医学领域的分布明显（尽管缓慢）向较高数值移动。2010–2015年，医学领域的国际合作率中位数，女性为0.091，男性为0.118；物理学则分别为0.514和0.500。在最近时期（2016–2021年），医学领域的数值升至0.154和0.188，而物理学仍处于高位，几乎没有变化，分别为0.569和0.578。这意味着，尽管生物医学领域的国际化取得了进展，医学领域的顶尖表现者与外国伙伴合作的频率仍远低于物理学领域的同行：两个领域之间的中位数差异超过0.35，且没有趋同迹象。

图 3。 按性别、时期和学科划分的国际合作比例分布（仅限顶尖表现者）



空白方框 = 缺失数据（成果组合中至少有 10 篇出版物的男性或女性人数不足）

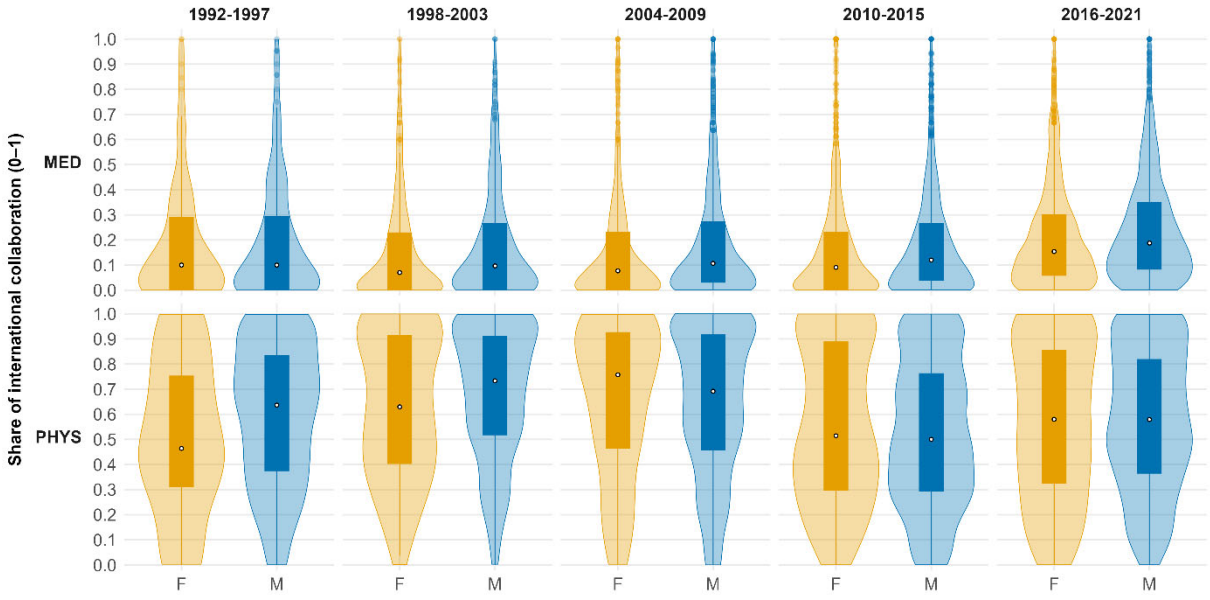
表5。顶尖表现者的国际合作中位数比例及曼-惠特尼检验

时期	学科	中位数比例 - 女性	中位数比例 - 男性	中位数比例 - 差异	p_adj	方向
1992年起 1997	AGRI	0.188	0.357	-0.170	0.507	ns
	BIO	0.316	0.223	0.093	0.808	ns
	CHEM	0.333	0.348	-0.015	0.808	ns
	化学工程	-	0.095	-	-	-
	COMP	-	0.615	-	-	
	地球科学	-	0.429	-		-
	ENG	-	0.083	-	-	-
	ENVI	-	0.495	-	-	-
	材料科学	0.324	0.333	-0.009	0.951	ns
	MATH	-	0.641	-	-	-
	MED	0.091	0.100	-0.009	0.808	ns
	神经科学	0.091	0.115	-0.024	0.902	ns
	药学	0.148	0.071	0.077	0.233	ns
	PHYS	0.464	0.600	-0.136	0.371	ns
1998年至今 2003	AGRI	0.200	0.250	-0.050	0.514	ns
	BIO	0.250	0.312	-0.062	0.164	ns
	CHEM	0.299	0.322	-0.023	0.970	ns
	化学工程	-	0.120	-	-	-
	COMP	0.611	0.381	0.230	0.781	ns
	地球科学	0.465	0.586	-0.121	0.652	ns
	ENG	0.000	0.333	-0.333	0.507	ns
	ENVI	0.500	0.185	0.315	0.781	ns
	材料科学	0.150	0.380	-0.230	0.021	男性 > 女性
	MATH	-	0.599	-	-	-
	MED	0.069	0.097	-0.028	0.024	男性 > 女性
	神经科学	0.167	0.138	0.029	0.808	ns
	药学	0.070	0.102	-0.032	0.808	ns
	PHYS	0.611	0.696	-0.085	0.517	ns
2004年起 2009	AGRI	0.250	0.270	-0.020	0.902	ns
	BIO	0.240	0.324	-0.084	0.098	ns
	CHEM	0.294	0.312	-0.018	0.514	ns
	化学工程	0.000	0.176	-0.176	0.164	ns
	COMP	0.176	0.444	-0.268	0.514	ns
	地球科学	0.700	0.500	0.200	0.260	ns
	ENER	-	0.045	-	-	-
	ENG	0.053	0.122	-0.070	0.710	ns
	ENVI	0.125	0.190	-0.065	0.519	ns
	材料科学	0.303	0.340	-0.037	0.710	ns
	MATH	0.364	0.571	-0.208	0.164	ns
	MED	0.077	0.105	-0.028	0.000	男性 > 女性
	神经科学	0.190	0.190	0.000	0.571	ns
	药学	0.129	0.107	0.022	0.902	ns
	PHYS	0.717	0.667	0.050	0.808	ns
2010年– 2015	AGRI	0.105	0.200	-0.095	0.000	男性 > 女性
	BIO	0.214	0.269	-0.054	0.020	男性 > 女性
	CHEM	0.261	0.286	-0.025	0.514	ns
	化学工程	0.000	0.029	-0.029	0.244	ns

	COMP	0.091	0.125	-0.034	0.808	ns
	地球科学	0.286	0.417	-0.131	0.808	ns
	ENER	0.000	0.034	-0.034	0.781	ns
	ENG	0.084	0.077	0.007	0.906	ns
	ENVI	0.133	0.141	-0.008	0.853	ns
	材料科学	0.159	0.214	-0.055	0.296	ns
	MATH	0.333	0.526	-0.193	0.078	ns
	MED	0.091	0.118	-0.027	0.001	男性 > 女性
	神经科学	0.217	0.270	-0.052	0.514	ns
	药学	0.090	0.154	-0.064	0.640	ns
	PHYS	0.514	0.500	0.014	0.465	ns
2016年至今 2021	AGRI	0.176	0.263	-0.087	0.000	男性 > 女性
	BIO	0.214	0.283	-0.069	0.010	男性 > 女性
	CHEM	0.240	0.286	-0.045	0.164	ns
	化学工程	0.000	0.062	-0.062	0.507	ns
	COMP	0.442	0.258	0.184	0.781	ns
	地球科学	0.429	0.469	-0.040	0.609	ns
	ENER	0.159	0.150	0.009	0.853	ns
	ENG	0.091	0.114	-0.023	0.808	ns
	ENVI	0.100	0.190	-0.090	0.000	男性 > 女性
	材料科学	0.218	0.250	-0.032	0.098	ns
	MATH	0.438	0.517	-0.080	0.779	ns
	MED	0.154	0.188	-0.034	0.000	男性 > 女性
	神经科学	0.214	0.267	-0.052	0.600	ns
	药学	0.185	0.296	-0.111	0.700	ns
	PHYS	0.569	0.578	-0.009	0.981	ns

“-” = 缺失数据（成果组合中出版物至少有10篇的女性人数不足）

图4。 按性别和时期划分的国际合作比例分布（医学与物理学对比）（仅顶尖表现者）



图中展示的分布体现了这些差异。在物理学领域，女性和男性的小提琴图都较宽，并集中在上分位数（50%–100%），这反映出国际合作在顶尖物理学家中几乎普遍存在。相比之下，医学领域的分布明显偏斜，大量观测值集中在接近零的位置，且

高度国际化的研究人员仅占很小比例。即便在高生产力精英中，国内发表成果也占主导地位，这表明，医学领域实现高科学产出的机制，主要并不依赖跨国合作，而是依赖参与大型国家级临床团队，或研究范围主要限于本地的研究领域。

这两个领域的性别差异都相对较小，但具体表现不同。在物理学领域，性别差距基本消失。各时期的中位数几乎相同（例如，2010年–2015年的0.514与0.500，2016–2021年的0.569与0.578），这证实了大型规模研究项目中合作的平等特征。相比之下，在医学领域，性别差异持续存在且具有统计显著性（2004年之后各时期的p_adj < 0.001），女性的中位数始终低0.02–0.03。这表明，即使在生产力最高的女性医学研究人员中，参与国际合作网络的机会仍受到一定限制。

总之，对顶尖表现者中的医学与物理学及天文学进行比较，证实了这些领域之间存在结构性差异。物理学与天文学构成了一个高度国际化、相互联结的研究生态系统，在其中，国际合著几乎已成为常态，性别差异也微乎其微。尽管医学领域的国际合作逐步增加，但其研究取向仍主要局限于本地，国际化程度中等，且性别差距持续存在——不过相对较小。

4.5. 多维分数逻辑回归方法

为捕捉国际化的多维特征，我们估计了一个分数逻辑回归模型。我们使用了两类固定效应：时期固定效应和学科固定效应。模型中包含的变量见表6。

结果表明，在表现优异的科学家这一成熟且高度活跃的群体中，科研合作国际化已是普遍现象，不过在个人和机构层面仍存在差异。学术年龄定义为研究人员首次被 Scopus 收录的出版物与2021年之间的年数（即发表经验；学术年龄

β = 0 0022 = 0 033 = 时期），

1 0022

其影响为正且具有统计显著性（ . ； p值 . ； Exp(B) . ）。这意味着，随着学术生涯每向前迈进一个阶段，国际合著在整体合作组合中的占比就会增加。换言之，发表经验较丰富的研究人员不仅合作更频繁，也更常跨越国界开展合作，这反映了国际网络的逐步积累。

表6。模型中变量的描述

变量	**描述**
学术年龄_时期	特定时期最后一年的学术年龄。根据首次 Scopus 中的发表日期
合作比例	某一时期合作撰写的文章比例（任何类型）
ATS	某一时期的团队平均规模。根据出版物署名
男性	性别：男性。二元分类方法：男性/女性
TopTop	在特定时期成为顶尖表现者。顶尖表现者位于上方的每个时期生产力分布的10%，分别对应15个STEMM学科。二元方法：顶尖表现者（10%）/其余（90%）
IDUB其余类别	非科研密集型大学（非IDUB类型）。IDUB = 国家科研卓越计划，该计划于其中选出了10所大学2019

数值	某一时期内的科研生产力（全计数法，期刊声望标准化） 时期
出版产出	中位数期刊声望（终身，所有 Scopus 出版物）
男性顶尖表现者	某一时期的男性顶尖表现者

表7。分数逻辑回归模型，因变量——国际合作系数（国际合著文章占所有合著文章的比例）

变量	估计值	标准误	z值	Pr(>|z|)	Exp(B)	LB	UB
ac年龄_时期	0.002	0.001	2.137	0.033	1.002	1.000	1.004
合作比例	-0.241	0.198	-1.217	0.224	0.786	0.533	1.159
ATS	0.110	0.005	22.822	0.000	1.116	1.105	1.126
男性	0.108	0.028	3.808	0.000	1.114	1.054	1.178
TopTop	0.097	0.029	3.363	0.001	1.102	1.041	1.166
IDUB其余类别	-0.099	0.024	-4.192	0.000	0.905	0.864	0.949
值	0.011	0.002	6.108	0.000	1.012	1.008	1.015
出版产出	0.014	0.001	22.998	0.000	1.014	1.013	1.015
男性顶尖表现者	0.062	0.034	1.810	0.070	1.064	0.995	1.138

衡量整体合作强度的变量（合作比例）系数为负，但不具有统计显著性（β = −0.241；p值 = 0.224）。这表明，在出版产出丰硕的研究人员中，国内合作与国际合作不再呈简单的此消彼长关系：总体作者署名水平高，并不一定意味着国际合作占比相应更高。在这一职业生涯的高级阶段，国内合作与国际合作并存，且更多是互补而非竞争关系；国际研究网络也与稳固的国家层面联系并行发展。

对于变量 *ATS*（团队平均规模），观察到的效应最强且最稳定。该变量反映了合著团队的平均规模（β = 0.1097；p < 0.001；Exp(B) = 1.116）。这意味着，团队规模指标每增加一个单位，某项合作为国际合作的概率大约提高11%。这表明，在大型多机构研究项目中，国际化与高强度团队合作密切相关。

男性的国际合著水平显著更高（ β = 0 108 < 0 001 = .；p .；Exp(B) .），1 114 11
这意味着，与女性相比，男性进行国际合作的概率估计高出%。这证实，即使在高表现研究人员中，仍然存在中等程度但具有统计显著性的性别差距。交互项性别 × TopTop（β = 0.062；p = 0.07）在0.05水平上未达到统计显著性，因此，我们没有发现明确证据表明，在高生产力精英群体中，男性优势会进一步加剧。

隶属于卓越计划——研究型大学（IDUB）项目之外大学的研究人员，其国际化水平显著较低（β = −0.099；p值 < 0.001；Exp(B) = 0.905），这意味着，他们的国际合著占比比研究密集型大学的研究人员低约9%–10%。这一持续存在的差异证实，即使在考虑个体特征并控制固定效应之后，机构效应仍然至关重要。

相比之下，*value*（ β = 0 0115 < 0 001 = .；1 012 β = 0 0139 < 0 001 = 1 014
p值 .；Exp(B) .）和*prestmed*（ .；p值 .；Exp(B) .）的系数为正且高度显著，表明国际化与科研生产力及发表渠道声望密切相关。随着出版物数量增加，以及作者更频繁地在国际知名期刊上发表论文，其整体合作组合中的国际合著比例也相应提高。

总之，模型表明，高水平的国际合作主要源于科学与网络资本的长期积累，而非任何单一特征。国内合作与国际合作相互并存且保持平衡；国际化程度的差异则受经验、机构隶属关系、团队合作强度和出版物声望等因素影响，同时男性优势持续存在，但程度有限。

对连续发表门槛（*n1*

_ = 1 5 10 *min* „ , ）下估计

20

的分数模型进行比较后发现，效应方向具有较强的稳定性，但随着门槛提高，效应大小逐渐减弱（详见电子补充材料中的稳健性检验）。随着样本逐渐限于出版物组合更大的研究人员，个人层面的差异减少，导致*z*统计量降低，一些预测变量虽然保持相同的系数符号，却不再具有统计显著性。

最大且最精确的效应出现在门槛*n1_min* = 1处，此时总体的异质性充分显现，国际化与生产力（ATS、声望、产出价值）以及性别之间的关联都很强。在*n1_min* = 5处，这些效应依然存在，但有所减弱，这反映出出版产出较大的研究人员在共同署名行为方面更加同质。针对*n1_min* = 10 的模型保留了相同的关系结构：所有关键预测变量（学术年龄、ATS、性别、IDUB隶属关系、声望）仍然显著，且效应方向不变，但效应大小略有降低。这表明，推动国际化的机制在活跃研究人员的整个范围内相似，差异更多体现在效应强度而非方向上。

只有在*n1*_分钟 = 20 （规模最小、精英程度最高的群体）中，若干效应才失去统计显著性：性别和精英地位效应消失，系数估计也变得不够精确。这是样本量有限，以及合作量极高的研究人员内部同质性显著所致。总体而言，研究结果表明，随着出版物阈值提高，个人层面的差异逐渐减弱，而国际化则日益成为最高产科学家中普遍且常态化的特征。

表8。 固定效应

固定效应_组	层级	FE
Period	1992–1997	-1.770
	1998–2003年	-1.935
	2004–2009年	-2.196
	2010–2015年	-2.526
	2016–2021年	-2.617
Discipline	AGRI	-0.006
	BIO	-0.103
	CHEM	0.000
	化学工程	-0.438
	COMP	0.585
	地球科学	0.697
	ENER	-0.506
	ENG	-0.172
	ENVI	-0.159
	材料科学	-0.041
	MATH	1.331
	MED	-0.784
	神经科学	-0.526
	药学	-0.687

	物理学 0.855

针对阈值*n1_分钟 = 10*（即至少拥有10篇合著出版物的研究人员）估计的固定效应分数响应模型，模型拟合度非常好。伪R^2为0.362，表明该模型能够解释所有合著出版物中国际合作比例变异的三分之一以上。与针对较低阈值估计的模型相比（*n1_分钟 = 1* 的R^2为= 0.186，*n1_分钟 = 5*的R^2为0.298），这一结果明显有所改善。这表明，当样本限定为产出更多的作者时，国际化成为一种更具系统性的现象，并且受纳入模型的协变量影响更大。

时期固定效应明确证实了研究日益全球化的趋势。其估计值在连续的时间窗口中逐步上升（从1992–1997 年的 −1.77 到 2016–2021 年的 −2.62），表明在控制其他所有特征后，国际合作的概率稳步提高。由于负值对应较高比例的国际合著，估计值日益为负反映了国际合作的长期深化。因此，包含时期效应的模型不仅捕捉了个人层面的差异，也反映了波兰科学运作方式的结构性转变；2004年后，波兰科学明显融入全球研究网络。

n1_分钟= 10 模型中的学科固定效应揭示了显著且在实质上连贯的结构性差异。最高（即最正）的数值——表示相对于参照学科（化学）更高的国际化水平——出现在数学（1.33）、物理学（0.86）、地球科学（0.70）和计算机科学（0.58）中；这些学科传统上具有国际性，并以大规模合作为特征。医学（−0.78）、药学（−0.69）、神经科学（−0.53）和能源（−0.51）则呈现负效应，这些学科与国内、临床或工业环境的联系更为紧密。

值得注意的是，*n1_min = 10* 的学科效应分布范围（MATH 与 MED 之间约相差两个逻辑斯蒂单位）虽相当大，但仍小于完整模型中的范围（*n1_min = 1*）。这表明，在生产力较高的研究人员中，跨学科差异开始缩小：即使在历史上更倾向于本地合作模式的领域，国际化也日益成为常态。

与*n1_min = 1* 和*5*的模型相比，*n1_min = 10* 模型中的时期效应负向程度较弱（在*n1_min = 1*时，2010–2015年时期的数值分别为−1.77和−2.75）。这反映出，对于生产力较高的作者而言，国际合作已相当普遍，且随时间变化较小。对于*n1_min = 20*，观察到的跨学科差异范围更小（R2 = 0.41），这进一步证实，在高度活跃科学家的顶尖群体中，结构性差异正在减弱，全球合作的普遍模式占据主导地位（参见电子补充材料中的替代模型和不同阈值的模型）。

总之，*n1_min = 10* 模型在异质性与稳定性之间实现了最佳平衡：它具有很强的解释力，保留了可解释的时间对比和学科对比，并表明波兰科学国际化同时受到演化力量（与时间相关）和结构力量（与领域相关）的影响。规模大、结构连贯且有实质依据的固定效应证实，纳入时间和学科成分对于准确捕捉科研体系的全球化动态至关重要。

在固定效应模型中（例如在 R 中使用 *feglm* 或 *fixest*），不会像在随机效应模型或虚拟变量模型中那样使用传统的参考类别编码。固定效应会被估计为各类别的个人参数

（时期、学科等），并相对于模型的全局截距进行识别。系数显示为零的类别（例如化学或医学）并非被“省略”，而是为了识别而归一化为零。所有其他效应均相对于这一归一化基准点进行解释，不过通常意义上并未明确设定“基准类别”。

为评估分数响应模型（采用学科和时期固定效应的逻辑斯蒂模型）的稳健性，我们针对同一组研究人员（艺术_合作 ≥ *10*）开展了若干项补充分析。我们考察了：（1）替代连接函数；（2）剔除极端观测值；以及（3）两阶段门槛设定。

将逻辑斯蒂连接函数替换为概率单位连接函数后，结果几乎完全相同（R2 = 0.358 vs. 0.362）。关键系数（即 *ATS*、出版产出、价值、男性和*IDUB*其余类别）的符号和显著性水平均未改变。剔除因变量和预测变量中数值最高的1%极端值后，截尾模型也证实了相同的模式（R2 = 0.339），排除了离群值影响结果的疑虑。在门槛模型中，国际合作发生的概率（*p1*）以及已有国际合作经历的作者开展国际合作的强度（*p2*），均重现了主模型中观察到的效应方向和显著性（R2

= . 和 .，分别）。

0 185　　0 283,

所有模型变体均显示出较强的稳健性和内部一致性：国际合作随团队规模（ATS）、出版物声望（出版产出）和产出价值（价值）的提高而增加，而在IDUB大学之外的研究人员中则有所下降。在大多数模型设定中，性别差异仍然有利于男性，但在限制最严格的模型（n1_min = 20）和仅考察强度的模型（hurdle p2）中，这种差异不再显著；与此同时，整体合作强度（合作比例）在统计学上仍不显著。无论链接函数、极端观测值的处理方式或因变量的分布特征如何，结果都保持稳定。

5. 讨论与结论

本节简要总结研究结果，并探讨有关顶尖表现者（或学术精英）的文献计量学驱动研究。先概述研究内容：我们考察了波兰顶尖研究者（按科研生产力排名前10%）在15个STEMM学科中的国际科研合作及其随时间的变化（1992—2021年间的五个六年期），重点分析其中的性别差异。我们使用Scopus中的国际出版物合著情况，对国际科研合作进行操作化测量；样本包括152,043位不同的波兰作者及其在1992—2021年发表的587,558篇文章。我们以总体人群（在STEMM学科中所有具有国际影响力的波兰科学家）的性别差异，作为分析顶尖表现者性别差异的背景。

整个时期内，总体人群和顶尖表现者子样本中的国际合作强度均有所提升。2010年后，这一增长尤为明显；当时波兰高等教育开始大规模改革，新的科研经费也开始投入使用（Antonowicz等人，2022；Antonowicz等人，2023）。随着时期推移，性别差异具有统计显著性（有利于男性）的学科数量不断增加。在1998–2003年和2004–2009年，性别差异分别只出现在两个学科中（材料科学和医学、生物学和医学）；到了2010–2015年，差异出现在四个学科中（农业、生物学、化学和医学）；而在最近的研究时期（2016–2021年），有五个学科的男性平均国际合作强度高于女性（农业、生物学、化学、环境科学和医学）。在研究时期内，波兰的研究国际化程度大幅提升，从20世纪90年代初的约10%–20%升至近年来的约30%–50%。与此同时，国际合作性别差距也显著扩大。

顶尖表现者中的情况并无不同。20世纪90年代初，国际合作强度方面的性别差异较小，且在统计学上不显著。然而，随着时期推移，性别差异不断扩大，并在更多学科中达到统计显著性。在最近的研究时期，国际合作方面的性别差异在四个学科中具有统计显著性（农业、生物学、环境科学和医学）。顶尖表现者的国际合作强度显著高于总体人群，在大多数学科中超过0.25–0.30，在物理学和地球科学中达到0.60–0.70。生物医学、农业和环境学科中的性别差异较大，而在物理学、化学和数学等实验科学和基础科学中则较小。

为捕捉科研国际化的多维特性，我们估计了一个带固定效应的分数逻辑回归模型。我们采用了两类固定效应：时期固定效应和学科固定效应。模型显示，顶尖表现者中的男性在国际合作方面的水平显著更高，其国际合作概率估计比女性高11%。这证实了顶尖表现者中仍存在程度适中但具有统计显著性的性别差距。研究密集型大学的科学家，其国际合作强度约高出9%–10%；在高排名期刊上发表论文更频繁的科学家，国际合作强度也更高。国际合作程度随团队规模扩大而上升：团队规模指标每增加一个单位，某项合作属于国际合作的概率就会提高约11%。对于阈值为10的分数响应模型（即发表成果组合中至少有10篇出版物的科学家），带固定效应的估计结果显示模型拟合度非常好：pseudo-R^2 为0.362，表明该模型解释了所有合著出版物中国际合著出版物占比变异的三分之一以上。时期固定效应证实了波兰科学日益国际化的趋势——在控制其他所有特征的条件下，国际合作的概率持续上升。学科固定效应揭示了明确的结构性差异：相较于参照学科（化学），数学、物理学、地球科学和计算机科学的国际化水平更高；而医学和药学的水平最低，这两个学科传统上与国内环境和临床环境联系紧密。

总体而言，回到提出的六项假设，研究发现，顶尖表现者中的男性和女性，其国际合作强度都在上升，这证实了假设1（国际化程度随时间提高）。关于顶尖表现者国际化存在学科差异的假设2也得到支持。然而，关于顶尖表现者国际化不存在性别差异的假设未获支持——女性与男性之间具有统计显著性差异的学科越来越多。与Abramo 等（2019）的发现相反，整个总体人群和顶尖表现者在几乎相同的学科中都存在国际合作方面的性别差异。Abramo及其同事发现，其总体人群与顶尖表现者子样本之间存在差异：前者存在国际合作中的性别差距，而后者则没有。与此相反，在波兰，这两类科研人员群体中都存在这种差距。不过，顶尖表现者中的差距存在于15个学科中的4个，而所有科学家中的差距存在于15个学科中的5个，因此只涉及少数学科。有趣的是，这两类人群中的差距都随时间扩大，也就是说，差异具有统计显著性的学科越来越多。

最后，我们的方法也并非没有局限。我们依托一种关于科学精英的理论模型，该模型以可衡量的发表生产力为基础——也就是说，以Scopus数据库收录的出版物为依据。这体现了对学术工作的一种狭隘看法，因此也限制了我们对科学领域性别不平等的认识。作为一种理论模型，它自然容易受到批评。我们所考察的顶尖表现者属于波兰科学体系的上层，但仅限于严格意义上以生产为导向的层面。我们没有考虑他们在波兰（以及全球）

科学体系中发挥作用的其他维度。因此，我们的视角受数据来源（Scopus）影响，具有文献计量学特征，尽管这项研究本身属于更广泛的科学学领域。

因此，我们不采用基于象征性认可（如科学奖项）、创新性贡献（如突破性发现）或治理相关职务（如在国家科学委员会、基金会或影响科学政策的机构中任职）的科学精英界定方式（参见科学社会学：Ben-David，1971；Collins，1998；Whitley，2000）。

我们的视角在认识论上是同质的：只使用文献计量数据。高生产力仅以出版物数量来界定，这意味着我们无法捕捉对科学的其他重要贡献，例如建设科研基础设施、创建数字基础设施、开发软件或领导大型科研联盟。这些贡献对科学进步至关重要，但在文献计量数据集中却不可见。

还需指出的是，我们并不识别顶尖表现者中的具体个人（也不编制“国家级高产学者精英名单”）；相反，我们将其作为一种分析类别。因此，我们并未强化科学中的社会分层（Cole & Cole，1973），而只是通过记录现有的结构模式将其揭示出来。

另一项局限是无法捕捉隐形学术劳动（Acker, 1990; O’Meara, 2015）。由于我们只关注已发表成果，因此未纳入教学、指导、实验室管理、行政负担和机构职责——这些工作由女性承担的频率高于男性（最高级别的行政职位除外）。学术时间分配的性别差异十分重要：女性花更多时间教学，而男性花更多时间从事研究（Kwiek, 2019）。

此外，我们的方法聚焦于学科内男性与女性之间的比较。跨学科工作难以用文献计量指标衡量，而在多个领域开展工作的学者通常生产力较低、发表在平均声望较低的期刊上、获得的引文较少，其贡献也更难通过文献计量方法加以捕捉（Frodeman, 2017）。从这个意义上说，我们的方法低估了跨学科研究，且更关注各个学科，而非学科之间发生的情况。

尽管我们使用总体层面数据（即过去30年间所有波兰科学家在Scopus收录期刊上发表的全部出版物），但由于Scopus收录不足，我们排除了人文学科和社会科学。在我们的框架中，“波兰科学家”实际上因此指波兰STEMM领域科学家。与此同时，被排除学科中的学者大多数是女性。

在本研究中，我们将合作强度定义为有国际合著者参与的出版物所占的比例（与 Kwiek & Roszka，2021年类似，分为低、中或高强度）。然而，我们不了解这些国际合作的性质：它们是长期还是短期、浅层还是深入；由谁发起；合著者扮演了什么角色。我们不区分高声望合作（与精英大学、领先团队的合作）和边缘合作。

另一个局限是我们的模型中缺乏机构层面数据。因此，性别效应与机构效应是分开处理的。我们的数据仅允许使用一个机构变量，即是否隶属于研究密集型大学（IDUB），而其他机构则归为一类。全球文献表明，机构背景对于性别差距十分重要；然而，与基于调查的研究不同，本研究无法获取组织文化方面的信息。组织文化塑造共同价值观和行为，界定学术单位内部受到重视的事物，并决定“开展工作”的方式。院系是特定的社会环境，各自具有不同的氛围，而我们无法观察这些环境。

但是，个人并不是在社会真空中工作的（Fox，2010）；“科学工作从根本上说具有社会性和组织性”（Fox，2010，第1000页）。科学家会讨论思想、互动并交流见解——有时频繁，有时很少，有时则完全没有。女性融入本地网络的程度可能各不相同，这取决于院系文化以及可能存在的“冷漠氛围”（Branch & Alegria，2016；Britton，2017）。文献计量数据无法捕捉组织文化，也无法获取工作时间分配、教学负担、研究与行政职责的分配、指导职责、学术取向（教学导向与研究导向），或逻辑回归模型中通常使用的个人层面数据，例如学术信念和行为。

我们采用算法识别波兰科学精英，依据是截断阈值（生产力分布前10%）。因此，我们并未采用文化、社会或制度层面的方法研究科学精英，而是采用数学化、数据驱动的方法。一方面，这种方法借助大规模数据集，能够带来精确性；另一方面，它也会导致认识论还原主义，因为精英的可见度等同于其在索引出版产出中的可见度。因此，我们认为，这种方法只是诸多分析维度之一；基于调查、访谈以及其他定性方法研究精英科学和合作模式，同样重要。

Aksnes 等（2019）和 Abramo 等（2019）的研究是静态的，依赖于对国际合作和生产力的一次性测量（两项研究分别考察了3年和5年）。我们的研究涵盖30年（五个六年期），但也存在局限：我们无法准确确定期刊在全球分层的学术期刊体系中的位置如何演变。然而，除 Scopus（或 Web of Science、OpenAlex）外，并不存在其他波兰纵向数据来源。与此前的静态研究不同，我们的分析能够识别出学者在哪些时期属于顶尖表现者、在哪些时期不属于。动态方法捕捉了随时间变化的职业轨迹，并假设研究精英地位可能是阶段性的或过渡性的，而非稳定不变的——我们此前关于生产力类别间流动的研究（Kwiek & Roszka, 2024）支持了这一假设，该研究显示，生产力分布的顶端和底端都具有相当高的稳定性。

致谢

我们谨此感谢国际研究研究中心（ICSR）实验室提供的协助，并特别感谢 Kristy James 和 Alick Bird。我们谨此感谢 Łukasz Szymula 博士在获取和整合 Scopus 数据方面给予的支持。

作者贡献

Marek Kwiek：概念构思、数据整理、正式分析、调查、方法学、资源、软件、验证、撰写初稿、审阅与编辑。Wojciech Roszka：概念构思、数据整理、正式分析、调查、方法学、软件、验证、可视化、撰写初稿、审阅与编辑。

利益冲突

作者不存在利益冲突。

资助信息

我们衷心感谢科学部提供的支持（NDS资助编号：NdS- II/SP/0010/2023/01）。

数据可用性

我们使用了来自 Scopus（专有科学计量学数据库）的数据。出于法律原因，通过与 ICSR Lab（爱思唯尔）合作获得的 Scopus 数据无法公开提供。

参考文献

Abramo, G., D’Angelo, C. A., & Di Costa, F. (2019). 顶尖科学家合作行为的性别分析：来自意大

; 10(3), 338. Acker, J. (1990). 等级、工作与身体：性别化组织理论。Gender & Society, 4(2), 139–158. Ackers, L. (2008). 国际化、流动与指标：一种新形式的间接歧视？Minerva, 46, 411–435.

Journal of Applied Psychology, 105(12), 1285–1306. Aguinis, H., & O’Boyle, E. H. (2014). 二十一世纪组织中的明星人才。载于《牛津人才管理手册》（第313–347页）。牛津大学出版社。Aksnes, D. W., Piro, F. N., & Rørstad, K. (2019). 国际科研合作中的性别差距：文献计量学方法。《科学计量学》，120(2), 747–774. Antonowicz, D., Kulczycki, E., & Budzanowska, A. (2020). 打破不信任僵局？波兰高等教育结构性改革的参与式模式。Higher Education Quarterly, 74(4), 391–409. Antonowicz, D., Rónay, Z., & Jaworska, M. (2023). 政策转译者的力量：匈牙利和波兰的新型大学治理机构。European Educational Research Journal, 22(5), 741–757. Baker, D. P., & Powell, J. J. W. (2024). 全球大科学：大学、科研合作与知识生产。斯坦福大学出版社。Baker, M. (2012). 学术职业生涯与性别差距。英属哥伦比亚大学出版社。Bear, J. B., Villamor, I., Heilman, M. E., & Aguinis, H. (2025). 明星是否诞生：理解明星人才涌现中的性别差距。Journal of Organizational Behavior。在线先行发表。https://doi.org/10.1002/job.2858 Ben-David, J. (1971). 科学家在社会中的角色。Prentice-Hall。Bojko, M.M., Knapinska, A., Tomczynska, A. (2022). 波兰的学术创业与科研生产力。Industry and Innovation, 28(4), 486–506. Bozeman, B., & Corley, E. (2004). 科学家的合作策略：对科学与技术人力资本的影响。Research Policy, 33(4), 599–616. Branch, E. H., & Alegria, S. (2016). 本科计算机领域中对失败的性别化反应：证据、矛盾与新方向。载于 E. H. B [illegible]，第17–31页）。 Lorin [illegible] 职业生涯中的显著性

Chan, H. F., & Torgler, B. (2020). 不同领域和国家中高被引科学家表现的性别差异。《科学计量学》，*125*, 2421–2447. Cole, J. R., & Cole, S. (1973). 科学中的社会分层。 芝加哥大学出版社。Collins, R. (1998). 哲学社会学：思想变迁的全球理论。 哈佛大学出版社。Diezmann, C., & Grieshaber, S. (2019). 女性教授：谁能成功，又是如何成功的？ 施普林格·自然。Dobbins, M.

Kwiek, M. (2017). 中东欧高等教育的欧洲化与全球化：重访25年来的变化（1990—2015）。*European Educational Research Journal, 16*(5), 519–528. Donina, D., Pokorska, A., Antonowicz, D., & Jaworska, M. (2022). 波兰高等教育治理改革的文化视角：不同类型大学的校长对改革有不同解读。《高等教育政策与管理杂志》, *44*(6), 596–612. Ductor, L. (2015). 共同署名是否能提升学术生产力？《牛津经济与统计公报》， *77*(3), 385–407. 爱思唯尔。(2018). 全球科研格局中的性别。爱思唯尔。Elsevier. (2020). 性别视角下的研究人员历程。爱思唯尔。

博士研究人员和博士后研究人员工作与生活中的评价范式日益收窄。*Minerva, 54*(2), 175–200. Fox, M. F. (2010). 学术科学与工程领域中的男女教职人员：社会组织指标及其影响。《美国行为

《定量

ox, M. F., & Mohapatra, S. (2007). 授予博士学位院系中

M. F.,

研合作：不同地区的

Herschberg, C., Benschop, Y., & van den Brink, M. (2018). 遴选职业生涯早期研究人员：国际化与卓越话语对学术界正式及实际遴选标准的影响。*Higher Education*， *76*, 807–825. Hoenig, B. (2017). 欧洲的新科学精英：欧洲研究区中的科学社会机制。劳特利奇。Holman,

表?

《*PLO*

bio.2004956

Hu, Y., Hu, C., Tran, T., Kasturi, T., Joseph, E., & Gillingham, M. (2021). 名字里有什么？使用基于字符的机器学习模型对姓名进行性别分类。《数据挖掘与知识发现》, 35(4), 1537–1563. Huang, J., Gates, A.J., Sinatra, R., & Barabási, A.-L. (2020). 跨国家和学科对科学职业生涯中性别不平等 [illegible] yack, K. W., [illegible] 2023). 通过分析近580万名作者，考察不同科学学科中顶尖被引科学家的性别失衡及其随时间的变化。《PLOS生物学》, 21(11), 论文 e3002385. https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3002385 Jeong, S., Choi, J. Y., & Kim, J.-Y. (2014). 国际合 [illegible] Jonass [illegible] Kovesnikov, A., & Lauring, J. (2023). 各座编者按：全球流动与数字化。《全球流动杂志 [illegible] 者。载于 F. Huang, [illegible] 化：变化、现实与前景》（第 207–230 页 [illegible] (2016) [illegible] 评估。载于《第25届万维网国际会议伴随论文集》， 53–54. Kato, M., & Ando, A. (2013). 化学领域的科研表现与国际合作之间的关系。《科学计量学》, 97, 535–553. Kwiek, M. (2018). 垂直分化程度较低的高等教育体系中的高科研生产力：顶尖表现者是谁？《科学计量学》，第115卷(1)，415–463. Kwiek, M. (2019). 变化中的欧洲学者：社会分 [illegible] Kwiek, M. (2020). 国际主义者与本土主义者：资源匮乏体系中的国际科研合作。《科学计量学》, 124, 57–105. Kwiek, M., & Roszka, W. (2021a). 国际研究合作中的性别差异：对25,000名大学教授的大规模文献计量学研究。《经济调查杂 [illegible] szka, W. (2021b). 研究中的性别同质性：对男女 [illegible] . 学术职业生涯研究中的学术年龄与生理年龄：一项针对科学发展中体系的大规模研究及其启示。《科学计量学》。127, 3543–3575. Kwiek, M., Roszka, W. (2024a). 波兰三十年来的顶尖科研表现：一种多维微观数据方法。Journal of Informetrics, 18(4). 2024年11月。101595. 1–16. Kwiek, M., Roszka, W. (2024b). 科学家在学术晋升阶梯上晋升时，会改变其科研生产力类别吗？《创新高等教育》。50, 329–367. Kwiek, M., Szymula, Ł. (2023). 青年男女科学家：对全球科学劳动力人口构成变化的定量探索性研究。《定量科学研究》, 4(4), 902–937. Kwiek, M., & Szymula, L. (2024). 量化科学领域流失：对38个经合组织国家科学家开展的基于队列的纵向研究。《高等教育》。89, 1465–1493 Kyvik, S., & Aksnes, D. W. (2015). 解释学术人员发表生产力的增长：代际视角。《高等教育研究》, 40, 1438–1453.

Larivière, V., Gingras, Y., Sugimoto, C. R., & Tsou, A. (2015). 团队规模至关重要：自1900年以来的合 Larivière, V., Ni, C., Gingras, Y., Cronin, B., & Sugimoto, C. R. (2013). 文献计量学：科学领域的全球性别差异。《自然》, 504(7479), 211–213. Liu, L., Jones, B. F., Uzzi, B., Ma, Y., Izar, A. U., & Wang, D. (2023). 科学学中的数据、测量与实证方法。《自然·人类行为》, 7, 1046–1058. Madison, G., & Fahlman, P. (2020). 瑞典学者晋升教授时科学出版物数量与引文方面的性别差异。《高等教育研究》。 rch Policy, 54(8) 论文 105296. Mattsson, P., Laget, P., Nilsson, A., & Sundberg, C.-J. (2008). 欧盟内部与欧盟外部在欧盟科学合作发表模式方面的比较。《科学计量学》, 75, 555–574. Mayer, S. J., & Ra 系？分析多个发表维度上的性别差异。

NamSor API 文档。https://namsor.app/api-documentation/ Ni, C., Smith, E., Yuan, H., Larivière, V., & Sugimoto, C. R. (2021). 作者署名的性别化特征。《科学进展》, 7(36), 论文 eabe4639. https://doi.org/10.1126/sciadv.abe4639 O'Boyle Jr., E., & Aguinis, H. (2012). 最优者与其余者：重新审视个人绩效的正态性规范。《人事心理学》, 65(1), 79–119. O'Meara, K. (2015). 视野开阔的职业生涯：女性教职人员的能动性视角。《性别与教育》, 27(3), 233–254. Ployhart, R. E., & Vandenberg, R. J. (2010). 纵向研究：变化的理论、设计与分析。《管理学杂志》, 36(1), 94–120. Ross, M. B., Glennon, B. M., Murciano-Goroff, R., Berkouwer, H. R., Williams, H. L., & Thompson, N. C. (2022). 女性在科学领域获得的认可少于男性。《自然》, 608, 135–145. https://doi.org/10.1038/s41586-022-04966-w Rostan, M., Ceravolo, F. A., & Metcalfe, S. A. (2014). 研究国际化。载于 F. Huang, M. Finkelstein, & M. Rostan (编),《学术界的国际化：变化、现实与前景》（第 119–144 页）。施普林格。 Salganik, M. J. (2018). 点滴之间：数 性别推断 杂志》, 109(3), 414–421. Shaw, A. K., & Stanton, D. E. (2012). 管道中的漏洞：区分学术界的人口统计惯性与持续存在的性别差异。《英国皇家学会学报B辑：生物科学》, 279(1743), 3736–3741. Singer, J. D., & Willett, J. B. (2003). 应用纵向数据分析：变化与事件发生建模。牛津大学出版社。 Sonnert, G. (1995). 谁能在科学领域取得成功？性别维度。罗格斯大学出版社。 Spoon, K., LaBerge, N., Wapman, K. H., Zhang, S., Morgan, A. C., Galesic, M., Fosdick, B. K., Larremore, D. B., & Clauset, A. (2023). 美国教职人员的性别与留任模式。《科学进展》, 9, 论文 eadi2205. https://doi.org/10.1126/sciadv.adi2205 Stephan, P. E., & Levin, S. G. (1992). 科学领域的重大发现：年龄、地点与时间的重要性。牛津大学出版社。 Sugimoto, C. R., & Larivière, V. (2018). 衡量研究：人人都需要了解的知识。牛津大学出版社。 Sugimoto, C., & Larivière, V.

Vabø, A., Padilla-Gonzales, L. E., Waagene, E., & Naess, T.（2014）。性别与教师队伍国际化。（第183–206页）。施普林格。Van den Besselaar, P., & Sandström, U.（2016）。性别差异对科研表现及职业生涯的影响：一项纵向案例研究。《科学计量学》 *106*(1), 143–162。Villamor, I., & Aguinis, H.（2024）。想到明星绩效者，就想到男性？明星绩效者隐性理论。*Journal of Organizational Behavior, 45*, 论文 e2784。https://doi.org/10.1002/job.2784 Wais, K.（2016）。基于名字的性别预测方法与 genderizeR。《*R*期刊》, *8*(1), 17–37。Whitley, R.（2000）。科学的知识与社会组织。牛津大学出版社。Wuchty, S., Jones, B. F., & Uzzi, B.（2007）。团队在知识生产中的主导地位日益增强。科学，*316,* 1036–1039。Xu, Y. J.（2008）。[illegible]24。Zippel [illegible] 斯坦福大学出版社。