探讨　技术进步评估方法，基于文献交叉引用

Shengxuan Tang、Liming Zhang、Shuo Jiang、Ming Cai、Yao Xiao*智能系统工程学院，中山大学，中国广东深圳

摘要——评估技术进步对于制定科技政策和在技术市场中进行明智投资至关重要。然而，现有方法主要关注技术本身的特征，难以对不同领域和不同代际的技术进行准确评估。为应对这一挑战，我们提出了一种新方法，利用文献计量学，特别是文献引文网络，衡量技术演进过程中知识流动的变化。该方法能够识别技术发展的多样化趋势，是评估技术进步的有效工具。我们将其应用于移动通信技术，并将定量结果与其他评估方法进行比较，以验证其准确率和适用性。我们的研究为评估不同技术路线和制定技术政策提供了重要支持。

关键词：技术评估、引文分析、技术知识流、文献计量学、科学计量学

1. 引言

科学技术被广泛认为是推动社会和经济进步的关键力量。准确评估不同技术的发展水平及其相对优势，有助于确定最佳技术路径、制定合理的资源配置策略，并识别关键研究重点。因此，评估和预测各类技术、了解技术进步及其趋势，并识别技术发展的动态领域至关重要。

技术评估长期以来一直是各领域关注的重要议题，也是技术管理的核心研究方向之一。目前，技术评估主要采用的方法包括德尔菲法 [1-4], 情景分析 [5-8], 和决策分析 [9-12]。德尔菲法是一种基于问卷的方法，通过反馈来组织和分享意见。它具有四个鲜明特征：匿名性、迭代性、反馈性以及统计意义上的“群体响应”。Kareem A [2] 开发了一种模糊德尔菲法，包含三个步骤：可用性标准分析、模糊德尔菲分析和可用性评价模型开发。Majed G [3] 提出了一种采用三角模糊数的德尔菲法变体，该方法与专家的沟通方式相似，但评估流程不同。Tomas Eloy Salais-Fierro [4] 建立了一种混合方法，将专家判断与基于历史数据生成的需求预测相结合，用于汽车工业。

情景分析是许多管理领域广泛采用的技术评估方法，对于评估技术尤其有价值。该方法通常会考察多个情景对技术的影响。Guo [5] 等人设计了四种纳入不同政策考量的情景——基准情景、补贴情景、低碳价情景和高碳价情景——以评估并遴选供应链各环节的节能技术路线。Hussain [6] 采用终端用户方法和计量经济学方法构建了五种情景。Gómez- Sanabria [7] 等人在分析不同情景时纳入了关键治理变量，以评估潜在影响

* 通讯作者。电子邮箱：xiaoyao9@mail.sysu.edu.cn（Y. Xiao）。

这些情景对印度尼西亚鱼类加工业七种废水处理方案所产生的温室气体排放的潜在影响。为使情景更加贴近现实，Gelder [8] 等人基于Wasserstein距离提出了情景代表性（SR）指标，用于量化生成的参数值在多大程度上能够代表真实情景，同时涵盖真实情景中出现的实际变化。

决策分析方法也已应用于技术评估。技术评估的决策分析方法通常包括两个步骤：构建决策分析框架，以及使用所构建的框架对研究领域内各项技术的表现进行排序。Liang [9] 等人构建了一个模糊群体决策支持框架，用于确定替代燃料汽车可持续性的优先级。Dahooie 等人 [10]使用模糊多属性决策（F-MADM）方法对交互式电视技术进行排序。为提高决策分析结果的可信度，可以将其他工具纳入决策分析框架。Zeng 等人 [11] 提出了一个模糊群体决策支持框架，并引入毕达哥拉斯模糊聚合算子，以弥补现有不足并提高可信度。他们通过评估无人地面运输技术并开展比较分析和敏感性分析，展示了其多准则决策（MCDM）模型的完整过程。Dahooie 等人 [12] 提出了一个基于情感分析（SA）和采用直觉模糊集（IFS）的 MCDM 技术的集成框架。他们利用 Amazon.com 上的在线客户评论（OCR）对五种手机产品进行了评估和排序，以说明 OCR 的可用性和实用性。

通过回顾三种技术评估方法（即德尔菲法、情景分析和决策分析），可以看出，这些方法已应用于多个领域。然而，它们仍存在一些固有局限。德尔菲法缺乏思想交流，可能受到主观偏差的影响，也容易忽视少数意见。这可能导致评估结果偏离现实，并受到组织者主观性的影响。情景分析耗时且成本高，并依赖于仍在变化的假设，这会影响结果的可靠性。尽管这种方法有客观依据，但它高度依赖分析人员对数据的假设，因此会受到其价值取向和主观性的影响。决策分析方法的适用范围有限，无法用于某些无法量化表达的决策。对各种选项发生概率的判断有时更具主观性，可能导致糟糕的决策。

德尔菲法、情景分析和决策分析这三种方法都属于技术挖掘方法。技术挖掘方法从技术本身的角度评估技术，而数据挖掘方法则利用与技术相关的数据进行评估。这两种方法的关键区别在于，技术挖掘以问题为导向，过去的研究重点关注技术本身，而不是直接从数据中寻找模式。在本研究中，我们引入技术相关数据，用于技术评估分析。

为克服上述局限，可采用技术知识流（TKF）这一概念，因为科学论文或专利中的引文信息已被视为技术知识流的可靠替代指标 [13-15]。Park 等人 [13] 提出了一种面向未来的方法，利用专利信息和有向网络中的链接预测方法，发现融合领域的技术机会。Chen 等人 [14] 通过测量施引—被引专利对之间的文本相似度，检验了专利引文是否表明存在知识关联这一假设，并发现审查员引文比申请人引文更能体现知识关联。Żogała-Siudem 等人 [15]提出了离散广义贝塔分布和幂律模型的重新参数化版本，该版本保留了引文向量中各元素的总和，从而具有更强的预测能力，也更易于进行数值拟合。

基础科学研究是科学活动的一种重要形式，也是技术进步的基础。大多数突破性的技术成果都受益于基础科学研究，而基础科学研究体现了知识流动。新技术通常建立在现有技术的基础之上，并不断创新和积累，直至在某个节点实现颠覆性创新。这是技术知识流动与传递的另一种表现形式。基础科学研究的主要产出是理论化的概念和本质，通常是...

以期刊文献为其知识的载体。由于研究领域并非单纯由期刊文献构成，其整体知识架构网络是通过期刊文献之间的交叉引用构建的。这些交叉引用关系在一定程度上能够反映技术发展。本文通过分析文献数据及其交叉引用关系，从知识流动的角度探讨技术进步评估。

第 2 节介绍数据来源及其处理方法，并构建技术评估模型。第 3 节以移动通信技术（即 2G – 6G）为例，分析该评估模型的适用性。第 4 节介绍其他技术评估方法，并将其表现与本文提出的基于交叉引文的评估模型进行比较。基于评估结果，第 5 节总结该评估模型，并分析其潜在局限与改进方向。

2. 数据与模型

本研究采用的研究方法包括两个主要部分：（1）数据收集与预处理；（2）交叉引文计算与模型构建。第一部分是使用与目标技术领域相关的关键搜索词，从 Web of Science 核心数据库中检索可能相关的文献，并利用二元分类器根据词频区分相关与不相关文献，对收集到的文献进行筛选。第二部分是针对该领域中的每项技术，计算相应文献之间的交叉引文，以生成交叉引文矩阵；随后提出一种纳入交叉引文矩阵的技术评估模型，从而获得每项技术更深入的评估结果。

.

2.1. 数据收集与预处理

Web of Science 是由科学信息研究所（ISI）维护的引文数据库，收录了来自世界各地 8,000 多种极具影响力的同行评审期刊。鉴于其全面性和可靠性，本文的所有研究数据均来源于 Web of Science 数据库。本文通过关键词检索获取文献数据。从数据库中检索到的所有文献均导出为 txt 文件，以便进一步处理数据。然而，仅通过关键词检索获得的文献中会包含大量干扰数据，这是因为许多文章只是提到了该关键词，或者某些关键词具有多层含义，因此通过关键词检索会检出涉及该关键词所有含义的文献。数据的真实性对数据处理结果以及最终结论都有重大影响。因此，从通过关键词检索获得的文献中筛选出目标文献是一项关键任务。在此，我们改进了一种支持向量机（SVM）方法 [16] ，用于对通过关键词检索得到的文献进行相关/不相关二分类：

步骤 1：文本预处理。在此阶段，仅提取文献的摘要部分，并进行一系列预处理步骤，例如分词、停用词处理和归一化。此过程旨在提升文本的质量和可读性。

步骤 2：特征提取。使用词袋模型、词频-逆文档频率（TF-IDF）及其他技术，将文本信息转换为数值向量。这些数值向量作为支持向量机模型的输入特征。

步骤 3：模型训练。研究人员手动标注一部分文献，以便训练模型。在第二轮测试中，随机选取已标注文献，以确保标注文献数据集的准确率。相关文献与不相关文献的比例为 1:1，并随机选取 80% 的文献用于训练，

其余 20% 用于分类效果评估。使用标注文献数据集训练支持向量机模型，以确定特征空间上间隔最大的超平面，从而区分相关文献和不相关文献。选择线性核函数作为核函数，惩罚因子为 C=1.0。

步骤 4：模型评估。使用交叉验证、混淆矩阵、准确率、召回率及其他相关指标，评估 SVM 模型对未知数据进行分类的性能及其泛化能力。

步骤 5：文档分类。将训练好的支持向量机文本分类模型应用于所有文献，并将判定为相关的文档标记为“1”，将判定为不相关的文档标记为“0”。仅保留标记为“1”的文档，用于后续的交叉引文计算。

步骤 3 中的训练样本量也会对模型训练产生重大影响，因此，在确定参数之前，先确定支持向量机分类器学习所需的样本量。本文分别针对每种技术，使用不同数量的样本训练支持向量机分类器。随后，分别使用得到的分类器对与每种技术对应的全部文献进行分类。样本量的选择取决于分类结果的稳定性；分类效果稳定性的量化公式见公式 1。

$$\sigma_n = |\omega_i(n) - \omega_i(n-100)|/P_i\,, \quad n > 100 \tag{1}$$

其中，σ_n 表示支持向量机分类器的 degree of classification stability of iterative sum。$\omega_i(n)$表示训练样本量为 n 时，使用支持向量机分类器进行分类后获得的目标文献数量。P_i表示与技术 t_i对应的文献初始数量。

本文假设，当 σ_n 小于 0.01 时，分类效果足够稳定并满足我们的要求。

2.2. 交叉引文计算与模型构建

在上一步中，我们对目标文献进行了交叉引文分析预处理。为了获取对应两项技术的文献之间的交叉引用数据，我们开发了一个 Python 程序，用于计算技术 a 与技术 b 之间的交叉引用。首先，我们提取每篇文献中对应技术 a 的 DOI，并将其全部放入集合 M 中。然后，我们提取每篇文献中所有参考文献对应技术 b 的 DOI，并将其全部放入集合 N 中。技术 a 与技术 b 之间的引用关系如公式 2 所示。d_{ij} 表示两项技术之间的引用关系。$d_{ij} = 1$ 表示技术 b 的文献引用了技术 a 的文献。相反，$d_{ij} = 0$ 表示不存在引用关系，这是因为文献与 DOI 一一对应。

设置 M，并设置 N

$$d_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if } M[i] = N[j] \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \tag{2}$$

根据技术之间的引用关系 a 与技术之间 b 如式 2所示。引用次数 c_i^j 技术 b 技术的 a 计算如下。

$$C_i^j = \Sigma_{m=1}^{|M|}\Sigma_{n=1}^{|N|} d_{ij} \tag{3}$$

也可以通过引用技术 b 的技术 a 数量得出。然后，我们可以根据公式 3 中给出的两种技术之间交叉引用的公式，计算某一技术领域内若干种技术之间的交叉引用数量。计算所有技术的交叉引文后，我们得到一个技术交叉引用矩阵，如表 1 所示。在该矩阵中，t_i 表示技术 i，而 C_i^j 表示 the

从技术 i 到技术 j 的引文数量。以下是我们如何利用该矩阵分析技术进步。

表 1 与技术对应的文献交叉引文矩阵。

	$\boldsymbol{t_1}$	$\boldsymbol{t_2}$	…	$\boldsymbol{t_i}$	…	$\boldsymbol{t_j}$
$\boldsymbol{t_1}$	-	C_1^2	…	C_1^i	…	C_1^j
$\boldsymbol{t_2}$	C_2^1	-	…	C_2^i	…	C_2^j
…	…	…	-	…	…	…
$\boldsymbol{t_i}$	C_i^1	C_i^2	…	-	…	C_i^j
…	…	…	…	…	-	…
$\boldsymbol{t_j}$	C_j^1	C_j^2	…	C_j^i	…	-

科学出版物是表征科技进步的关键方式，也是人类知识体系的重要组成部分。以往的出版物是后续研究的重要参考，使知识能够随着时间的推移不断积累。科学出版物中的引文表明哪些既有文献对某篇论文作出了贡献，并为知识积累提供了背景信息 [17-18]。引文已被广泛用于文献计量学研究，以评估技术发展和研究绩效，并绘制知识演化或技术轨迹。科学文献之间的交叉引用关系能够反映技术融合和扩散效应。技术融合通过后向引文（参考文献）体现，而技术扩散则通过前向引文（被引文献）体现。通过引用关系构建的知识网络中的进出程度，对应于知识的融合与扩散 [19]。

入度指标 r（i）是指文献 i 引用其他文献的次数。入度越高，表明文献 i 引用的其他文献越多，代表来自其他来源的知识向文献 i融合的动能更大

$$r(i) = \sum_{j=1, j\neq i}^{k} C_i^j \tag{4}$$

其中，k 表示技术数量。

出度指标 $c(i)$ 指文献 i 被其他文献引用的次数。出度越高，说明文献 i 被其他文献引用得越多，表明知识从文献 i 向其他来源扩散的势头越强。

$$c(i) = \sum_{j=1, j\neq i}^{k} C_j^i \tag{5}$$

假设 1 对于两种类型的技术 i 和 j，基于交叉引用数据，如果 C_i^j 大于 C_j^i，则表明技术

t_i 可能比技术更先进 t_j.

$$Z_i > Z_j, \quad \text{if } C_i^j > C_j^i, \tag{6}$$

其中，Z_i、Z_j 表示技术i 和j的先进性值。

受到引文网络出度所体现的知识融合与扩散的物理本质启发，如果技术i 引用技术j 的次数多于技术j 引用技术i的次数，那么技术i 被认为

比技术j更先进。原因被认为是，技术i 吸收了技术j 的相关成果，从而实现技术突破，并最终形成一种更新、更先进的技术。

对于两种技术，可以用它们的比值来确定技术评估结果。然而，对于三种或更多技术，无法通过交叉引文的比值量化技术评估结果。相反，它们之间的交叉引文构成了文献交叉引用矩阵，如表 1 所示。为了利用其他技术的综合信息，技术 Z_i 的技术先进性指数定义如下。

$$Z_i = \frac{1}{k-1} \cdot \sum_{i=1,i\neq j}^{k} \left(\frac{C_i^j + 1}{C_j^i + 1} \cdot log_a\left(C_i^j C_j^i + b\right) \right) / \sum_{i=1,i\neq j}^{k} log_a\left(C_i^j C_j^i + b\right), \qquad k \geq 2 \tag{7}$$

这项研究通过计算相关技术的文章数量来考虑技术的规模效应，但忽略了自引的影响。请注意，参数 a 的值不会影响技术先进性的最终结果

证明1。

$$Z_i = \frac{1}{k-1} \cdot \sum_{i=1,i\neq j}^{k} \left(\frac{C_i^j + 1}{C_j^i + 1} \cdot log_a\left(C_i^j C_j^i + b\right) \right) / \sum_{i=1,i\neq j}^{k} log_a\left(C_i^j C_j^i + b\right)$$

$$= \frac{1}{k-1} \cdot \sum_{i=1,i\neq j}^{k} \left(\frac{C_i^j + 1}{C_j^i + 1} \cdot ln\left(C_i^j C_j^i + b\right) / \ln a \right) / \sum_{i=1,i\neq j}^{k} \ln\left(C_i^j C_j^i + b\right) / \ln a$$

$$= \frac{1}{k-1} \cdot \sum_{i=1,i\neq j}^{k} \left(\frac{C_i^j + 1}{C_j^i + 1} \cdot ln\left(C_i^j C_j^i + b\right) \right) / \sum_{i=1,i\neq j}^{k} \ln\left(C_i^j C_j^i + b\right)$$

因此，无论 a取何值， Z_i 都保持不变。

参数 b 用于在技术之间的引用关系为 0 时防止出现负规模效应。为便于计算，公式中 a 和 b 均设为 2。

3. 结果分析

本文对移动通信技术领域进行技术评估分析。我们选择这一领域主要有两个原因。首先，移动通信技术是电子计算机和移动互联网发展过程中的一项重要成果。在过去半个世纪里，它深刻影响了社会的方方面面，包括生活方式、生产、工作、娱乐、政治、经济和文化。它是改变世界的主要技术之一。其次，移动通信技术包括第二代移动通信技术、第三代移动通信技术、第四代移动通信技术、第五代移动通信技术和第六代移动通信技术。这五代技术的演进相对直观、清晰，因此便于验证本文提出的技术评估方法。

本文选取了移动通信技术类别下已发表文献的数据，数据来源于 Web of Science 核心数据库。检索所用的关键词为“2G”“3G”“4G”“5G”和“6G”；选取的文献类型包括论文、会议论文集、综述论文和在线出版物；Web of Science 类别选为电气、电子与电信工程；出版商选为 IEEE、Elsevier 和 Springer Nature；时间范围为 2000 年至 2022年。数据导出日期为2022年8月30日。表2展示了采用移动通信技术检索式收集的数据量。

表2 通过移动通信技术的检索式检索到的文献初始数量。

技术	2G	3G	4G	5G	6G
体积为文献	5152	7967	7866	33050	5281

由于从第二代移动通信技术到第六代移动通信技术这五种技术对应的文献数量差异显著，本文首先确定用于支持向量机分类器学习的样本量。我们使用不同的样本量对这五种技术分别训练支持向量机分类器。随后，使用训练所得的分类器对每种技术对应的全部文献进行分类。我们使用公式1计算每种技术对应文献的分类效果随样本量的变化情况。图1展示了分类文献数量随训练样本量增加而趋于稳定的示意图。

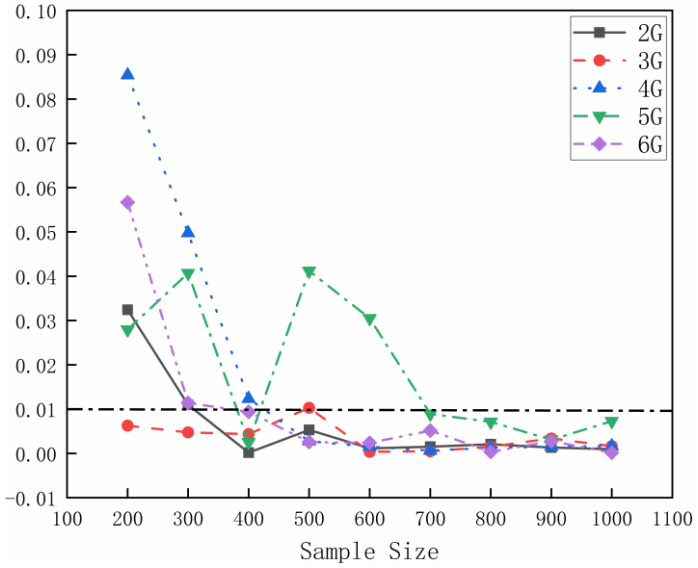

图1 移动通信技术分类的稳定性与样本量之间的关系。从图1可以看出，当样本量超过700（350篇相关论文和350篇无关论文）时，五种技术的分类效果均趋于稳定（即$\sigma_n < 0.01$）。本文统一选择1000作为五种技术的分类样本量。我们对每种技术分别进行了10次随机实验，并计算了这些分类结果的平均准确率。表3展示了每种技术10次分类的平均准确率。

表 3. 5 种技术在支持向量机分类器上的 10 次测试准确率平均值。

技术	2G	3G	4G	5G	6G
准确率	0.9867	0.9367	0.9960	0.9767	0.9965

表 3 显示，使用支持向量机对五项技术的相关文献和不相关文献进行分类非常有效。分类后的文献可用于后续的交叉引文分析。

我们使用公式3计算了移动通信技术领域中各项技术之间的双重引文交织。得到所有技术之间的双重引文交织后，我们生成了移动通信技术的文献互引矩阵，如表4所示。

表4 移动通信技术对应的文献交叉引用矩阵。

	2G	3G	4G	5G	6G
2G	-	417	231	259	6
3G	451	-	742	730	24
4G	403	1427	-	4132	110
5G	739	2271	13729	-	2159
6G	17	54	525	5819	-

我们将表4中的交织数量矩阵输入本文公式7对应的技术评估模型，由此获得了各项移动通信技术进步程度的量化结果，如图2所示。根据所有年份的文献进行量化后，移动通信技术进步程度的结果在大小关系上符合我们的预期。此外，我们发现，第四代移动通信技术、第五代移动通信技术与第六代移动通信技术之间的技术评估差距，明显大于第二代移动通信技术、第三代移动通信技术与第四代移动通信技术之间的差距。这是因为本文量化的是相对技术成熟度，而最新的移动通信技术（第五代移动通信技术和第六代移动通信技术）比早期几代（第二代移动通信技术、第三代移动通信技术和第四代移动通信技术）成熟得多。

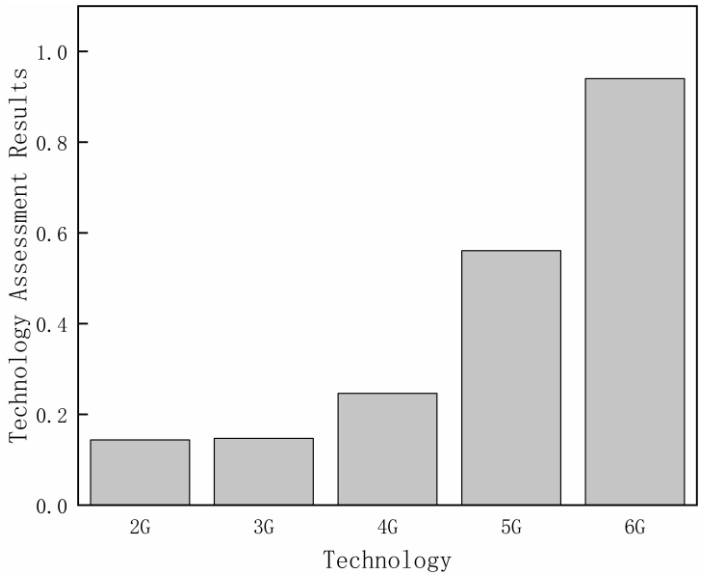

图2 移动通信技术评估结果。

为获得各项技术随时间的发展进步程度，我们在一定区间内量化分析
趋势，我们

移动通信技术。我们首先统计了移动通信技术相关文献的数量，如图3(a)所示。为避免文献数据过少导致技术评估结果不稳定，技术评估的起始年份设定为2010年（即，2010年的技术评估所用文献为2000—2010年的文献），且起始年份还必须满足该年份的文献数量达到该技术文献总量的0.01。在满足上述两个条件的情况下，最终确定2G、3G和4G的技术评估起始年份为2010年，5G为2014年，6G为2019年。移动通信技术随时间变化的技术评估结果如图3(b)所示。

从图3（a）可以看出，三种技术（第二代移动通信技术至第四代移动通信技术）的文献数量已达到峰值，目前正在下降，而第五代移动通信技术和第六代移动通信技术的文献数量则逐年增加。2022年文献数量下降的原因是，文献数据的提取时间为2022年8月30日，因此未涵盖2022年全年的文献。目前，对第五代移动通信技术的研究兴趣远远超过其他技术。

从图3（b）可以看出，我们量化了2010年—2021年五种技术的技术评估结果；但2010年只有第二代移动通信技术、第三代移动通信技术和第四代移动通信技术的技术评估结果，这是因为五种技术并非同时出现：2010年只有第二代移动通信技术、第三代移动通信技术和第四代移动通信技术可用，随着时间推移，新技术会不断出现（例如，第五代移动通信技术于2014年加入，第六代移动通信技术于2019年加入）。新兴技术纳入评估后，其技术评估结果会立即占据优势。这是因为本文的方法基于交叉引用，因此新技术初次出现时，通常会更多地引用旧技术。同时，新兴技术纳入评估后，也会在一定程度上影响（通常是负面影响）已有技术的技术评估结果。例如，第五代移动通信技术于2014年加入评估时，第四代移动通信技术的评估结果急剧下降；类似情况也发生在2019年，第六代移动通信技术加入评估时，第五代移动通信技术的技术评估结果显著下降。这种情况的原因在于，本文的方法属于基于技术交叉引用的定量方法。实际上，我们发现，新技术的加入对不同技术先进性值的影响各不相同，主要是因为最新一代技术在撰写论文时总会引用上一代技术，而这种行为会影响我们基于文献交叉引用的评估方法。它也会在一定程度上影响前一代技术的技术评估结果。尽管如此，我们的方法在识别最先进技术方面仍然具有较高的准确率；2010年至2021年每年的技术评估结果最高值，都对应着实践中表现最佳的技术。

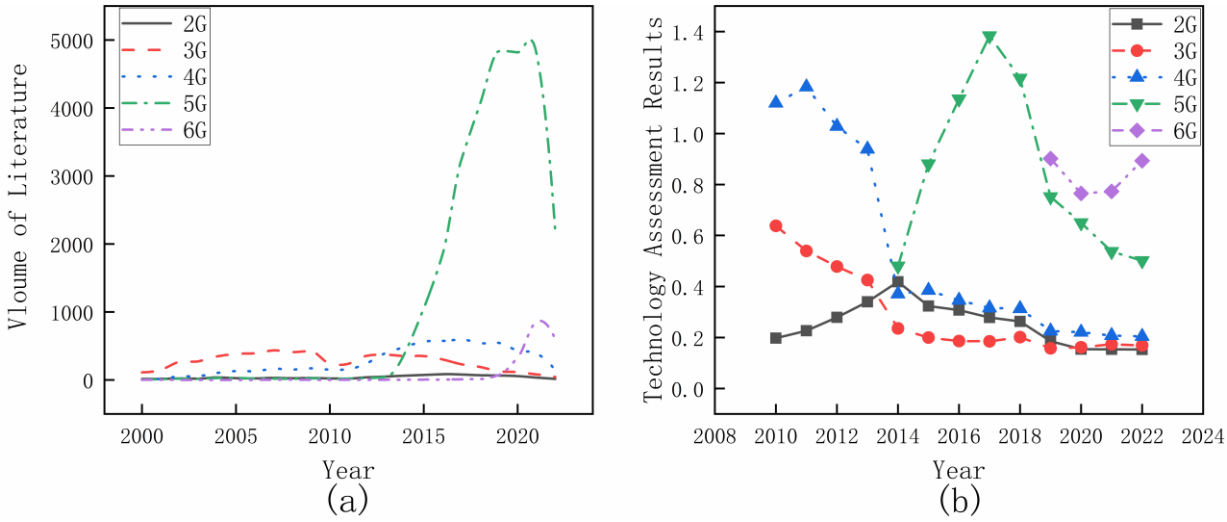

图3 多年来移动通信技术的研究结果。(a) 文献数量 (b) 技术评估。下文将采用其他相关文献计量学方法，对技术进步进行定量分析，以进一步验证本文定量方法的可靠性。

4. 比较分析

为了更好地分析我们所提出方法的特征，本文引入了几种基于引文分析的技术评估方法，对移动通信技术进行定量分析。我们对定量结果进行了比较，以说明所提出方法的优势，以及其对技术评估和预测工作的意义。

4.1. 方法介绍

引文分析已成为文献计量学研究中的常用工具，用于评估技术进步、研究绩效以及知识发展或技术轨迹。Gutiérrez-Salcedo 使用 h指数和 g指数来 delineate 研究重点和技术趋势 [20]。Acosta 通过分析西班牙各地区科学与技术之间的联系，以及专利文献中的科学引文，考察了科学增长与技术发展之间的关系 [21]。Hall 等人提出，在所有专利相关指标中，专利引文是评估市场价值更合适的指标 [22]。Stuart 和 Podolny 利用专利引文来衡量公司内部的技术进步和技术转移 [23]。

在通过引文连接构建的知识网络中，中心性越高，意味着与网络参与者的连接越多。Brass 和 Burkhardt 认为，从组织行为的角度来看，社会网络中中心性较高的个体拥有更大的权力 [24]。与特定节点直接相连的网络节点位于该节点的邻域内。邻接节点的数量称为节点度或连接度。Granovetter 指出，节点度与获取资源的可能性成正比 [25]。节点度体现了一个节点参与网络的程度，是衡量中心性的基础概念。在2010年的研究中，Pei-Chun Lee [20] 通过构建专利引文网络计算出度中心性和入度中心性，以评估技术的重要性。本文沿用 Lee 的方法，构建涵盖五代技术（第二代移动通信技术至第六代移动通信技术）的文献引文复杂网络。随后，我们计算各代技术的度中心性并进行量化，再将结果与采用本文提出的方法所得的结果进行比较。

(1) h指数。将某项技术的检索论文按引文频次排序。该技术的 h 指数定义为满足以下条件的 h 值：排名前 h 的论文，其引文频次均至少为 h；而第 (h + 1) 篇论文的引文频次低于 (h + 1)。设第 h 篇论文的引文频次为 x_i，则 h 指数的数学表达式为：

$$h = max(i) : x_i \geq i \tag{8}$$

h 指数巧妙地结合了两项关键指标，即与特定技术相关的出版物数量，以及反映文献质量的引文频次。这种方法克服了仅依赖单一指标来量化技术进步的局限性。

(2) g指数。同样，g 指数根据引文频次对某项技术的检索文献进行排序。对于某项技术，g 指数定义为满足以下条件的 g 值：排名前 g 的论文所获得的引文总数不少于 g^2，而第 $(g + 1)$ 篇论文的引文总数低于 $(g + 1)^2$。g 指数的数学表达式为：

$$g = \max(i) : x_i \geq i^2 \tag{9}$$

（3）入度中心性。文献 i 中其他文献的数量与所有文献中引用其他文献的参考文献总数之比。条目的中心性越高，其他文献向文献 i 进行知识整合的动力越强。条目的中心性越高，其他文献向文献 i 进行知识整合的动力越强。

$$r'(i) = r(i) / \sum_{i=1}^{k} r(i) \tag{10}$$

(4) 出度中心性。文献 i 被其他文献引用的次数占所有文献总引文次数的比例。中心性越高，文献 i 向其他文献传播知识的势头就越强。

$$c'(i) = c(i) / \sum_{i=1}^{k} c(i) \tag{11}$$

4.2. 结果比较

采用 h指数和 g指数进行技术评估的结果如图 4(a) 和图 4(b) 所示。为了便于直观比较，将每项技术的 h指数和 g指数转换为其占全部五项技术 h指数和 g指数总和的百分比。

图4(a)和图4(b)表明，采用h指数和g指数衡量技术进步时，对于发展周期较长的技术（第二代移动通信技术至第五代移动通信技术），结果更为准确。然而，对于发展周期较短的技术（第六代移动通信技术），由于可用文献有限，得出的结果与实际情况并不吻合。图4(c)和图4(d)展示了采用入度中心性评估移动通信技术的量化结果。从图中可以明显看出，仅依靠入度中心性评估移动通信技术时，第二代、第三代和第四代移动通信技术的量化结果较好，但第五代和第六代移动通信技术的量化结果与实际情况存在明显差异。仅采用出度中心性对移动通信技术进行量化时，各项技术的量化结果随时间呈现出明显的规模关系偏差，因此总体量化效果不佳。

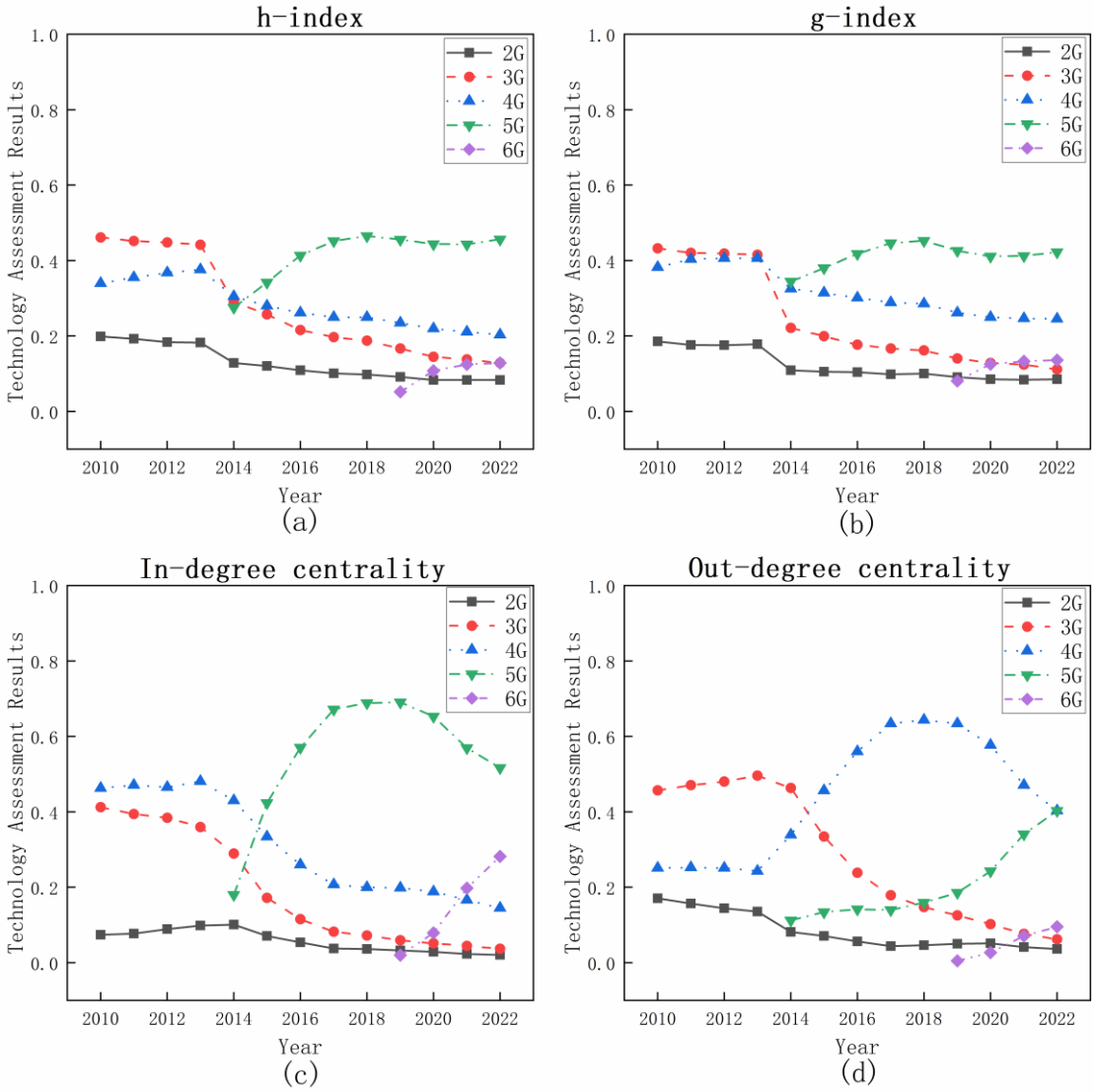

图4 使用其他方法对移动通信技术进行技术评估的结果 .

图 5 展示了我们对各项技术完整时期的文献数据进行定量分析所得的结果。除本文提出的方法外，其他所有方法对五种第二代移动通信技术至第六代移动通信技术的技术评估排名

均与实际情况不符。最明显的错误是，其他四种方法对第六代移动通信技术的评估结果并非五种第二代移动通信技术至第六代移动通信技术中最优的。使用入度中心性进行技术评估时，第四代移动通信技术排名最优，而另外三种方法均认为第五代移动通信技术最优。出现这种情况的原因是，除本文方法外的四种技术评估方法，其结果都取决于文献数量和引文数量（引用量和被引量）。本文提出的交叉引文法则从知识流动的角度评估技术。

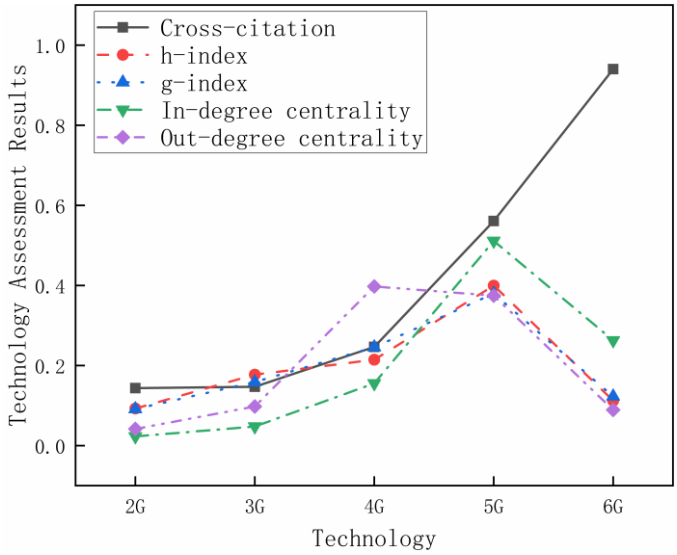

图 5 各技术评估方法在整个时期内所得结果的比较

本文提出的方法与其他四种方法评估方法结果的总体准确率和年度平均准确率

Figure 6 是不了采用其他四种技术评估方法的总体准确率和年度平均准确率。采用本文提出的方法时，两项准确率均达到最高水平；就年度平均准确率而言，采用本文方法和采用入度中心性的方法表现最佳。值得注意的是，采用本文提出的基于交叉引用的方法进行技术评估时，总体准确率达到 100%，远高于其他四种方法。

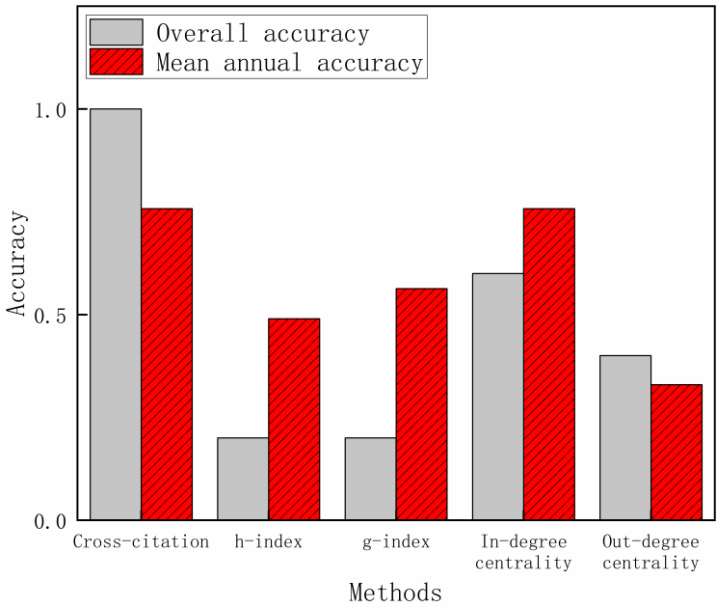

图 6 技术评估排名的总体准确率和年度平均准确率。

使用 h指数、g指数、入度中心性和出度中心性这四种方法进行技术评估时，其总体准确率和年度平均准确率的平均水平低于本文提出的基于交叉引文的方法。这是因为，使用 h指数和 g指数量化技术进步，需要经历足够长的技术发展时期，并拥有大量文献。另一方面，使用可达中心性量化技术进步过于片面；某项技术的文献获得的引文越多，表明其扩散动能越强；其他文献获得的引文越多，则表明其汇聚动能越强。然而，扩散动能和汇聚动能都不能直接等同于技术成熟度。

我们提出的基于交叉引用的方法通过整合被引用数据和引用数据，结合扩散与汇聚动能来衡量技术进步，从而克服了这些不足。我们的方法最大的贡献在于能够识别每个时期特定领域中的最优技术。我们的基于交叉引用的方法以 100% 的准确率和高稳定性胜过其他方法。

5. 结论与展望

5.1. 结论

本文从技术对应文献之间的交叉引文入手，对技术进行技术评估，以此了解某一领域一系列技术中各项技术的优势和劣势，以及该领域的未来趋势。通过比较用于技术量化的 h指数、g指数和可达中心性方法可以看出，本文的方法适用性更强，既克服了采用 h指数和 g指数进行技术评估时需要积累足够文献的缺点，也解决了单独使用可达中心性量化技术进步时过于片面且可解释性较差的问题。

本文提出的技术量化方法尽管有诸多优点，但也存在一些
局限性。

数据限制。一方面，文献的发表通常比文献记录中所记载的技术晚数月，因此文献记录与技术发展之间存在时间差；另一方面，技术发展受到科学技术、社会、经济和政策因素的影响，而通过本文的方法评估技术时，无法将这些因素全部纳入考量。

量化公式。基于相互引用数量对技术进步进行量化的前提是至少存在两项技术；面对单项技术时，本文的量化公式无法进行量化。未来，我们可以尝试在量化工作中纳入更多与技术相关性有关的因素，以优化技术进步的量化结果。

预测问题。由于本文的数据来源是科学文献，因此本文所做的技术量化工作只能量化过去的情况，无法运用该方法对未来某一时期现有技术的量化结果进行预测。

5.2. 潜在客户

由于上述原因，通过文献间的交叉引用来量化技术，在个别情况下并不奏效；但它仍是技术量化工作中一种具有影响力且有效的方法。为克服这些局限，可以将其他对技术进步有影响的评价指标与交叉引用结合起来，并以交叉引用作为主要指标。

时间序列分析。该方法采用时间序列方法，考察不同类型文献数量随时间的变化，充分揭示文献的时间特征，反映技术发展的过程及其达到的水平，从而掌握某一技术领域的发展现状和优势。

技术发展热点。期刊和杂志按照学科分类或主题原则收集各类技术文献，并通过比较分析各类文献数量的变化，了解不同类别的增减及其原因，从而研究技术发展的重点和可能取得突破的前沿领域。

此外，本文还分析了移动通信技术定量评估结果随年份的变化情况。下一步可根据现有年份的技术评估结果，预测现有技术在未来5年和10年后的技术进步。

致谢

纸浆　er获得国家重点研发计划资助[资助编号2020YFB1600400]。

参考文献

[1] Barrios M, Guilera G, Nuño L, 等. 德尔菲法中的共识：是什么导致决策发生变化？[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2021, 163: 120484.[2] Dawood K A, Sharif K Y, Ghani A A, 等. 基于模糊德尔菲法构建开源软件可用性评估的统一标准模型[J]. Information and Software Technology, 2021, 130: 106453.[3] Alharbi M G, Khalifa H A E W. 用于预测与决策的增强型模糊德尔菲法[J]. Advances in Fuzzy Systems, 2021, 2021.[4] Salais-Fierro T E, Saucedo-Martinez J A, Rodriguez-Aguilar R, 等. 采用软计算方法进行需求预测：汽车工业案例研究[J]. Applied Sciences, 2020, 10(3): 829.[5] Guo Y, Yu Y, Ren H, 等. 铝工业节能技术组合的基于情景的DEA评估[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 260: 121010.[6] Hussain A, Perwez U, Ullah K, 等. 长期情景路径：评估最佳可用技术的潜力，以及在现有100%可再生能源区域电力系统中减少碳排放所能实现的成本削减——以巴基斯坦吉尔吉特-巴尔蒂斯坦（GB）为例[J]. Energy, 2021, 221: 119855.[7] Gómez-Sanabria A, Zusman E, Höglund-Isaksson L, 等. 印度尼西亚鱼类加工行业的可持续废水管理：将治理纳入情景分析[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 275: 111241.[8] de Gelder E, Hof J, Cator E, 等. 用于自动驾驶车辆基于情景的评估的情景参数生成方法和情景代表性指标[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022.[9] Liang H, Ren J, Lin R, 等. 面向可持续交通的替代燃料汽车：支持可持续性优先排序的模糊群体决策框架[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2019, 140: 33-43.[10] Dahooie J H, Qorbani A R, Daim T. 在层次群体决策中考虑不确定性，构建技术获取适当方法的选择框架：案例研究：交互式电视

技术[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2021, 168: 120760.[11] Zeng S, Zhang N, Zhang C, 等. 基于社会网络的多准则决策方法：在毕达哥拉斯模糊环境下评估无人地面配送车辆[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2022, 175: 121414.[12] Dahooie J H, Raafat R, Qorbani A R, 等. 运用情感分析和多准则决策的直觉模糊数据驱动产品排名模型[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2021, 173: 121158.[13] Park I, Yoon B. 基于引文网络中的技术知识流动预测发现技术融合机遇[J]. Journal of Informetrics, 2018, 12(4): 1199-1222.[14] Chen L. 专利引文能否体现知识关联？来自专利与其引文之间文本相似度的证据[J]. Journal of Informetrics, 2017, 11(1): 63-79.[15] Żogała-Siudem B, Cena A, Siudem G and Gagolewski M. 引文模型的可解释重参数化[J]. Journal of Informetrics, 2023,17(1), p.101355.[16] Venugopalan S, Rai V. 专利的主题分类与模式识别[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2015, 94: 236-250.[17] Jaffe A B, Trajtenberg M, Henderson R. 专利引文所揭示的知识溢出的地域局限性[J]. the Quarterly journal of Economics, 1993, 108(3): 577-598.[18] Chang S B, Lai K K, Chang S M. 探索商业方法的技术扩散与分类：运用专利引文网络[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2009, 76(1): 107-117.[19] Lee P C, Su H N, Wu F S. 专利技术的定量绘图——以导电聚合物纳米复合材料为例[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2010, 77(3): 466-478.[20] Gutiérrez-Salcedo M, Martínez M Á, Moral-Munoz J A, 等. 用于分析和评估研究领域的一些文献计量程序[J]. Applied intelligence, 2018, 48: 1275-1287.[21] Acosta M, Coronado D. 西班牙各地区的科学—技术流动：专利中的科学引文分析[J]. Research policy, 2003, 32(10): 1783-1803.[22] Hall B H, Jaffe A, Trajtenberg M. 市场价值与专利引文[J]. RAND Journal of economics, 2005: 16-38.[23] Stuart T E, Podolny J M. 局部搜索与技术能力的演化[J]. Strategic management journal, 1996, 17(S1): 21-38.[24] Brass D J, Burkhardt M E. 组织中的中心性与权力[J]. Networks and organizations: Structure, form, and action, 1992, 191(215): 198-213.[25] Granovetter M S. 弱关系的力量[J]. American journal of sociology, 1973, 78(6): 1360-1380.