



整合与重塑：新时代交叉科学研究演进与展望

张瑜¹, 李拓宇^{2*}, 叶民²

1. 浙江大学 公共管理学院, 杭州 310058;

2. 浙江大学 中国科教战略研究院, 杭州 310058

摘要:新一轮科技革命催生大量复合型复杂科学难题, 学科交叉成为破解重大现实问题的核心路径, 但国内外学界长期混用相近术语, 概念体系混乱, 加之数字技术重塑科研范式, 现有研究缺少整体性梳理框架。本文以 CNKI、WOS 文献为数据源, 运用文献计量与系统综述相结合的方法, 借助 VOSviewer 开展关键词共现分析, 筛选 127 篇核心文献展开深度剖析。研究将领域繁杂术语收敛为学科交叉、交叉学科、交叉科学、跨学科学四大核心概念, 构建层级化整合概念模型; 并从学科交叉、交叉学科、跨学科学三大板块系统梳理现有研究全貌, 识别出机制剖析碎片化、研究场景单一、测度数据源有限等现存短板。立足 AI、大数据驱动的数字科研新场景, 从范式变革、作用机理、人才学科建设、量化测度四个维度提出未来研究方向, 可为完善本土化交叉科学理论、推动跨学科可持续创新提供理论参考。

关键词: 交叉科学; 学科交叉; 交叉学科; 跨学科学; 数字科研; 学科融合; 文献计量

中图分类号: G647; G301

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2026)04-0559-16

引言

随着新一轮科技革命和产业变革的持续深入, 人类在生命健康、气候变化、经济发展等领域面临诸多挑战, 高度复杂综合的重大科学问题不断涌现, 单一学科逐渐难以解决日益多样化和复杂化的现实问题。

正如量子力学创始人马克斯·普朗克 (Max Planck) 曾指出的“科学是内在的整体”, 从 20 世纪开始, 科学研究就呈现出从高度分化向高度交叉综合转变的趋势^[1]。立足当下, 以大数据、人工智能、云计算等为代表的新一代信息技术的快速发展和广泛应用, 正在引发科学研究领域的范式变革^[2], 随之而来的许多复

收稿日期: 2026-05-28; **修回日期:** 2026-07-04

基金项目: 国家自然科学基金项目: 中国原创研究分类评价及长周期资助模式探究 (L25240108); 中国工程院科技战略咨询项目学部重大项目: 国家战略急需人才培养机制与路径研究 (2025-XBZD-07)

作者简介: 张瑜 (1999—), 女, 博士研究生, 研究方向为科教管理研究。E-mail: iizhangyu@163.com

*李拓宇 (1987—), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为科教战略研究。E-mail: Lty@zju.edu.cn (通讯作者)

叶民 (1964—), 男, 博士, 研究员, 研究方向为科教战略研究。E-mail: yem@zju.edu.cn

引用格式: 张瑜, 李拓宇, 叶民. 整合与重塑: 新时代交叉科学研究演进与展望[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2026, 18(4): 559-574. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20260075. CSTR: 32282.14.JES.20260075

ZHANG Y, LI T Y, YE M. Integration and Reconstruction: A Review and Prospect of Interdisciplinary Science Research in New Generation[J]. Journal of Engineering Studies, 2026, 18(4): 559-574. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20260075. CSTR: 32282.14. JES.20260075

杂的共性原理和科学问题都涉及多学科交叉融合^[3], 交叉科学正面临新一轮的需求与挑战。

自1926年伍德沃斯(R. S. Woodworth)提出学科交叉的概念以来^[4], 学界就交叉科学领域的相关问题展开经久不衰的探讨, 过程中逐渐产生许多高度相关又极易混淆的概念。长期以来, 厘清这些概念的内涵与关联始终是横亘在学者开展相关研究面前的一道门槛。近年来, 我国高度重视学科交叉融合, 采取成立交叉科学部、增设交叉学科门类等举措, 引导并规范交叉科学的发展。这使得交叉科学研究领域相关概念的内涵逐渐清晰、成熟, 但概念之间的关系仍有待进一步梳理与凝练。此外, 受国内外学科体制差异的影响, 交叉科学领域内相关概念的内涵也略有不同。

交叉科学研究已经历较长时间的发展和积淀, 不少学者从不同维度对交叉科学研究进展进行总结和梳理, 如整体描绘国内外交叉科学研究历史演变^[5,6], 总结图书情报^[7]、教育^[8]等具体领域内交叉科学研究进展, 或聚焦学科交叉测度^[9,10]、学科交叉动力^[11]、跨学科科研合作^[12]等特定主题进行系统综述。然而, 较少有研究站在更加综合全面的视角对交叉科学研究整体发展情况进行宏观描述, 并对各相关概念之间的关系及其研究内容进行总结梳理。此外, 在数字洪流的时代浪潮之下, 交叉科学研究面临着新的发展情境和契机, 亟须在已有研究基础上, 立足新的时代需求, 探讨交叉科学研究未来的方向与可能性。综上, 本文在总结国内外学者观点的基础上, 采用文献分析法, 将有关概念收拢归纳为学科交叉、交叉学科、交叉科学和跨学科学四个核心概念, 并尝试构建一个整合性的交叉科学相关概念框架, 以厘清这些概念之间的关系。本文希望解决以下三个问题: 第一, 系统归纳交叉科学相关概念, 讨论不同概念的区别与联系; 第二, 梳理国内外交叉科学研究成果, 整理交叉科学研究框架; 第三, 总结现有研究的不足, 并立足当下数字情境, 对交叉科学研究的未来发展作出展望。

1 研究方法

为全面解答研究问题, 本研究分步骤开展了层层递进的文献研究。(1) 初步检索领域相关文献。以Web of Science数据库和CNKI中国知网为检索平台,

检索日期范围为1900—2023年, 检索时间为2024年7月。在WOS数据库选择高级检索方式构造检索式: (TI= (interdisciplinary* OR multidisciplinary* OR crossdisciplinary* OR transdisciplinary*) AND SU= (“Education” OR “Management” OR “Information Science Library Science”) AND DT= (Article OR Review)), 并设定来源为SSCI和SCI-E, 共返回结果2168条。在CNKI平台选择高级检索方式构造检索式: 篇名= (跨学科 OR 学科交叉 OR 交叉学科 OR 多学科 OR 超学科 OR 交叉科学), 并设定来源为CSSCI, 共返回结果3046条, 进一步限制学科为“高等教育” OR “教育理论与教育管理” OR “科学研究管理” OR “图书情报与数字图书馆” OR “计算机软件与计算机应用”, 共得到结果1505条。(2) 文献计量分析。分别将结果导入VOSviewer软件进行关键词共现分析, 得到国内外交叉科学研究领域的重要关键词图谱。(3) 根据二八定律, 结合被引频次、关键学者、重要期刊进一步筛选国内外重点文献, 同时对参考文献中出现的有价值文献进行回溯检索, 最终筛选得到127篇重点文献。(4) 对上述重点文献进行系统梳理与总结, 构建交叉科学研究框架, 并提出未来研究展望。

2 交叉科学研究概念框架

交叉科学研究是一个复杂且宏大的研究领域, 起源于1926年美国哥伦比亚大学心理学家R. S. Woodworth提出的“学科交叉(interdisciplinary)”概念。相较于国外, 我国交叉科学研究起步较晚, 直到1985年首届交叉科学学术讨论会召开后, 才引起国内学者对于交叉科学相关问题的重视与讨论。随后, 来自教育、管理、科学学、图书情报等越来越多领域的学者对于交叉科学问题展开热烈探讨, 交叉科学研究领域逐渐产生许多相似又高度相关的概念表达。澄清和理解概念间的内涵与关联, 是开展交叉科学研究的前提和基础。

2.1 交叉科学概念发展现状

首先, 为了全景式地扫描现有研究对于跨学科及

认的概念表达体系。概念表达的混乱,在一定程度上给不同领域学者开展交叉科学研究造成了沟通障碍。因此,有必要对这些概念进行整合与归纳,明确不同概念的内涵与边界,以便学者后续能更深入地开展交叉科学研究。

2.2 交叉科学相关概念内涵

基于文献计量结果,本文立足中国政策话语与学术研究情境,通过对比分析国内外文献,将交叉科学研究的相关概念归纳为学科交叉、交叉学科、交叉科学及跨学科学这四个核心概念。

(1) 学科交叉(表1)。与之相近的概念表述还有跨学科、跨学科研究、交叉科研等,其对应的英文翻译为“interdisciplinary”或“interdisciplinary research (IDR)”。国内外已有不少学者尝试对这一概念进行定义,通过对比分析可以得出,学科交叉的本质是一种综合性的科学研究活动,通过将不同学科理论或方法有机地融为一体,以解决那些不能用单一

学科或研究实践领域解决的问题。

(2) 交叉学科(表2)。其对应的英文翻译也是“interdisciplinary”,此外也有学者将其译为“interdiscipline”。由于国内外学科体制的不同,交叉学科是一个相对本土的学术概念。2021年,国务院学位委员会印发《交叉学科设置与管理办法(试行)》,正式赋予交叉学科地位合法性,并明确阐释了交叉学科的内涵,其本质是多个学科相互渗透、融合形成的新学科。

(3) 交叉科学(表3)。其对应的英文翻译是“interdisciplinary science”,是我国的自创概念^[4],源于1985年首届交叉科学学术讨论会时钱学森、钱三强、钱伟长等著名学者发表的有关交叉科学的重要论述。学者们多通过借鉴“学科”与“科学”之间的关系,来阐释交叉科学的概念内涵,即科学是由众多学科组成的真理性知识体系,一系列学科交叉研究成果和交叉学科所构成的知识体系组成交叉科学。

(4) 跨学科学(表4)。其对应的英文翻译是

表1 学科交叉概念界定

Table 1 Definitions of interdisciplinary (research) concepts

代表文献	概念界定
R. S. Woodworth (1926)	跨学科是超越一个已知学科的边界而进行的涉及两个或两个以上学科的研究领域 ^[13] ①
刘仲林 (1993)	打破学科壁垒,把不同学科理论或方法有机地融为一体的研究或教育活动 ^[4]
美国国家科学院 (2005)	跨学科研究是团队或个人的一种研究模式,他们把来自两个以上的学科或专业知识团体的知识、数据、方法、工具、观点、概念和理论综合起来,加深基本的认识,或解决那些不能用单一学科或研究实践领域解决的问题 ^[14]
路甬祥 (2005)	学科交叉是“学科际”或“跨学科”研究活动 ^[15]
Repko (2008)	跨学科研究是一项回答、解决或提出某个问题的过程,该问题涉及面和复杂度都超过了某个单一学科所能处理的范围,旨在形成更加综合的理解,拓展我们的认知 ^[16]

①R. S. Woodworth于1926年11月30日在美国社会科学研究理事会(SSRC)内部会议上首次公开使用并界定interdisciplinary一词,无正式期刊论文,原始记录为会议速记稿。文献[13]是国内最早完整转述该定义的核心期刊文献。

表2 交叉学科概念界定

Table 2 Definitions of interdiscipline concepts

代表文献	概念界定
杨永福等 (1997)	交叉学科是对那些(种)通过各种交叉途径(活动)而形成的学科指称 ^[17]
李喜先 (2001)	交叉学科是由远缘的(非本学科内部的)理论簇之间发生非线性相互作用所构成的独立系统 ^[18]
路甬祥 (2005)	学科交叉形成的理论体系构成交叉学科 ^[15]
张雪等 (2020)	交叉学科指两门或两门以上学科渗透融合的活动及所形成的新学科群 ^[19]
国务院学位委员会 (2021)	交叉学科是多个学科相互渗透、融合形成的新学科,具有不同于传统一级学科范畴的概念、理论和方法体系,已成为学科、知识发展的新领域 ^[20]

表 3 交叉科学概念界定

Table 3 Definitions of interdisciplinary science concepts

代表文献	概念界定
钱学森（1985）	交叉科学是自然科学和社会科学相互交叉地带生长出的一系列新生学科 ^[21]
王续琨（2000）	交叉科学是现已形成的各门交叉学科的集合，是所有交叉学科的统称 ^[22]
李喜先（2001）	交叉科学是在众多的不同学科之间、不同交叉学科之间发生非线性相互作用所构成的系统 ^[18]
路甬祥（2005）	交叉科学是自然科学、社会科学、人文科学、数学科学和哲学等大门类科学之间发生的外部交叉以及本门类科学内部众多学科之间发生的内部交叉所形成的综合性、系统性的知识体系 ^[15]
戴亚飞等（2021）	交叉科学是指众多学科的集合，是学科广泛交叉、深度交叉的综合性产物 ^[23]

“interdisciplinarity”，本质是以研究学科交叉规律与方法为基本内容的“科学学”。另外，“interdisciplinarity”也被译为跨学科性，用来描述跨学科研究中的跨学科特征，如各学科知识交叉的广度与强度、知识跨学科分布与扩散的特征等^[24]。

在文献调研过程中，笔者发现当前交叉科学研究领域内概念混乱，主要有两个原因。其一，“学科交叉”是舶来概念，一方面，国内外学科体制存在差异，难以精准用国外话语解释中国现象；另一方面，国外关于交叉科学研究的相关概念表述也未完全达成共识。其二，交叉科学研究本身是多学科参与的交叉领域，受学科范式差异影响，不同领域学者表达习惯不同，从而产生大量高度相关又极易混淆的学术概念。但本质上，这些概念可归纳为学科交叉、交叉学科、交叉科学和跨学科学这四个核心概念，只是因翻译习惯和学科差异产生了不同表达形式。

2.3 交叉科学相关概念框架

进一步地，通过横向比较分析学科交叉、交叉学科、交叉科学以及跨学科学这四个核心概念的内涵，可以发现这些概念本质上分别对应科研、学科、科学

和科学学。因此，借鉴这四者的关系，就能较为清晰地勾勒出交叉科学研究领域相关概念之间的关系：如果把知识单元视为构成科学体系的最基本单元，那么知识单元的系统化便构成了知识体系，即学科；而各门学科知识的总和则构成了科学总体。科学研究活动正是从探索知识单元入手，进入学科领域，纳入科学门类，最终形成对科学总体的观念和方法上的把握^[28]。科学学则以反映科学活动的主体和客体为研究对象，描述科学发展过程，揭示科学发展的内在机理，预测科学发展趋势，为科学管理工作提供依据^[29]。

综上，学科交叉、交叉学科、交叉科学、跨学科学之间的关系如图3所示：学科交叉是在社会和学科

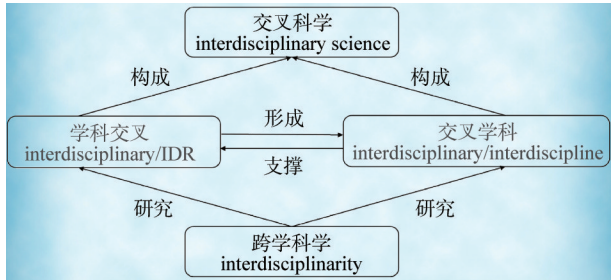


图 3 交叉科学相关概念框架
Figure 3 Conceptual framework of interdisciplinary science

表 4 跨学科学概念界定

Table 4 Definitions of interdisciplinarity concepts

代表文献	概念界定
姜振寰（1990）	从总体上研究学科交叉的规律和方法的科学。其研究对象是各类交叉学科形成和发展一般规律和方法的探索 ^[25]
刘仲林（1993）	跨学科学指一门以研究跨学科规律与方法为基本内容的高层次学科 ^[4]
胡志刚等（2008）	作为解释跨学科现象、指导跨学科实践发展的理论，即以跨学科研究为研究对象，以跨学科研究的一般性质特点、关系结构、普遍运动规律和社会功能为主要研究内容，旨在揭示促进跨学科研究实践发展的一般原理、原则和方法 ^[26]
刘小宝等（2012）	以跨学科研究的整体规律和特征为研究对象，以显示问题解决为目标，强调整合不同学科知识的一个专门的研究领域 ^[27]

自身发展需求的驱动下出现的一种综合性科学研究活动,也是形成交叉学科的途径。部分学科交叉活动会逐渐发展壮大,进而形成新的交叉学科。众多交叉学科共同构成了交叉科学。跨学科科学则以学科交叉研究活动与交叉学科为研究对象,揭示其背后的本质特征、一般规律及过程机理等,以更好地推动交叉科学的进步与发展。需要强调的是,从学科交叉到跨学科科学并非垂直的线性关系,学科交叉虽是形成交叉学科的途径,但交叉学科并非学科交叉的唯一终点。正如学科是科学研究发展成熟的产物,但并非所有研究领域最终都能发展成为新的学科^[30]。

3 交叉科学研究进展

基于对交叉科学研究领域重要文献的深入研读与理解,本文提出了一个交叉科学研究进展框架(图4)。此框架以交叉科学相关概念框架为核心,把现有的交叉科学研究归纳为学科交叉研究、交叉学科研究以及跨学科科学研究三大部分,便于研究者清晰把握现有研究进展,并对未来交叉科学研究作出展望。

3.1 学科交叉研究进展

尽管学科交叉的意义已获广泛认可,但在实际推进中,它仍面临诸多问题与障碍。在学科交叉研究领域,学者们以“如何促进学科交叉活动”这一核心议题为中心,从个体、团队、组织三个层面展开了讨论。

(1) 跨学科研究个体特征。教师、学生和研究者是推动跨学科合作的主要力量,他们在学科交叉互动过程中,可能会面临学科壁垒带来的思想传统、语言风格、技术和方法等方面的障碍^[31]。那么,在个体层面如何激发跨学科活动的活力与创造力呢?从研究者角度出发,研究发现女性学者在开展学科交叉相关活动方面更具优势,更倾向于从事学科交叉研究^[32]。此外,科技管理评价体制^[33]、研究者的研究经验和工作经历等,也会影响其从事跨学科研究的可能性^[34]。另外,由于跨学科组织一般实行自下而上的主任(所长)负责制,有学者关注到内部领导者对跨学科合作过程和结果的影响。研究发现,变革型领导风格^[35]和家長式领导风格^[36]对学科交叉具有正向作用。领导者的个人特质也会影响跨学科团队的绩效,例如,具有适度多学科工作经验和身份的领导者,能够提升跨学科团队的创新绩效^[37]。

(2) 跨学科团队的知识创新。学科交叉的关键在于知识整合过程^[38],其本质是不同学科研究者所携带的异质性知识的整合与创新^[39]。因此,许多学者从知识维度研究学科交叉现象,以跨学科团队为分析单元,识别影响其知识创新的因素,分析其知识创新的过程,揭示其产生创新成果背后的知识作用机理。在影响跨学科团队知识创新的因素方面,已有研究发现,跨学科团队的知识整合受到个人情感需求、人际关系需求、知识整合环境、知识整合方式、知识本身的离散性及差异性特质这六类因素的交互作用^[40]。也有学者发现,跨学科团队的知识关联整合受到知识

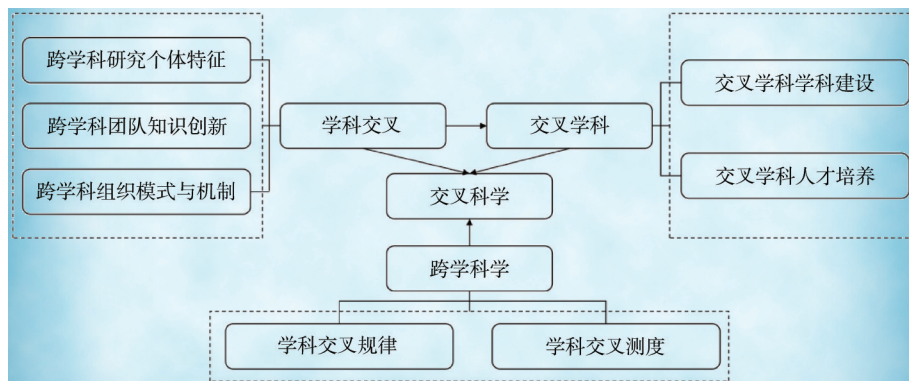


图4 交叉科学研究进展框架

Figure 4 Framework of interdisciplinary science research progress

因素、主体因素及合作因素的影响^[41]。在跨学科团队知识创新机制方面, 有学者提出, 跨越边界的知识整合需经过转移、翻译和转换3个过程^[42]; 也有学者提出, 跨学科团队通过知识表述、知识解释、知识涌现和知识建构4个过程, 实现新知识的协同创造^[43]。但总体而言, 关于跨学科团队知识创新的研究相对较少, 其内部黑箱机制尚未被完全揭示。

(3) 跨学科组织模式与机制。学科交叉的开展需依托组织载体, 但大学的组织架构长期受学科主导, 形成了森严的组织壁垒。如何突破这层壁垒, 创新构建跨学科组织形态, 是国内外研究关注的重要话题之一。一方面, 学者们聚焦跨学科组织设计, 对现有跨学科组织进行了总结分类: 根据学科交叉的组织形态, 可分为学科群、交叉学科研究组(课题组)、交叉学科实验中心、科学园及交叉学科研究会^[44]; 根据与现有院系的关系, 可分为独立建制型、利益分享型和独立预算型等^[45]; 还有学者将国外大学的跨学科组织归纳为托管式、独立建制式、矩阵式、学院内嵌式和无学科边界式五种形态^[46]。此外, 也有学者创新性地提出了跨学科组织方案设计构想, 如超学科大学组织结构^[47]、跨学科大学混合系统结构^[48]等。另一方面, 大量研究也关注到了跨学科组织的发展困境^[49, 50], 总结了跨学科组织建设典型案例的先进经验^[51], 或更深入地探究了跨学科组织的运行机制, 分析了与产业界联系^[52]、政府支持^[53]等因素对跨学科组织绩效的影响。

3.2 交叉科学研究进展

交叉学科人才是开展学科交叉研究的基础, 而学科是开展人才培养活动的主要载体。在交叉学科研究领域, 学者们围绕“如何培养交叉学科人才”这一核心议题, 主要从交叉学科人才培养及学科建设这两个方面展开探讨。

(1) 交叉学科人才培养。交叉学科人才培养或跨学科教育是交叉科学研究的重要议题之一。目前可追溯到的、交叉科学研究领域最早的文献, 是 Brozek 等^[54]于 1944 年发表在《Science》上的一篇关于人类生物学领域学科交叉研究的文献, 其中探讨了人类生物学项目对交叉学科人才的需求及人才培养问题。现

有关于交叉学科人才培养的研究, 多以经验总结和模式探索为主, 常采用案例研究方法, 从培养层次^[55]、课程体系^[56]、培养平台^[57]等不同维度总结国内外交叉学科人才培养项目的成功经验。

(2) 交叉学科建设。2020 年, 国务院学位委员会与教育部联合印发《关于设置“交叉学科”门类、“集成电路科学与工程”和“国家安全学”一级学科的通知》, 正式增设“交叉学科”门类。次年, 国务院学位委员会又印发《交叉学科设置与管理办法(试行)》, 进一步明确了交叉学科的内涵, 并规范推进了一级交叉学科的设置工作, 此举也引发了国内学者对交叉学科建设问题的热烈讨论。一方面, 学者们从顶层设计的视角出发, 对交叉学科的生成逻辑进行了理论阐释^[58], 并指出我国当前交叉学科建设受多重学科规训影响^[59], 面临着高校重视不够、认知偏差、制度困境以及外部政策环境制约等诸多发展难题^[60], 同时提出了我国交叉学科建设的建议^[61]。另一方面, 也有学者聚焦于具体的交叉学科, 如国家安全学^[62]等, 有针对性地提出了交叉学科建设方案。

3.3 跨学科学研究进展

学科交叉的方法和途径多种多样, 交叉学科数量众多且形态各异。探索学科交叉的整体规律, 把握交叉的原理与方法, 有助于我们更好地认识和适应交叉科学时代。跨学科学研究不仅是图书情报、管理、教育等领域学者共同探讨的重要议题, 同时也备受科技管理部门重视。在跨学科学研究领域, 学者们围绕“学科交叉的规律是什么”这一核心问题, 主要从学科交叉规律和学科交叉测度两个层面展开研究。

(1) 学科交叉规律。学科交叉是一个复杂动态的过程, 按照学科交叉形成演化的时间维度可将现有关于学科交叉规律的研究分为以下四个方面: 首先, 学科交叉动力。学科交叉动力因素促进学科交叉、交叉学科的形成。已有研究多认为学科交叉动力可分为内部动力和外部动力, 内部动力包括认识主体的好奇心^[63]、科学系统自身发展的动力^[64]以及知识生产模式转变^[65], 外部动力包括服务国家战略^[59]和社会需求驱动^[64]等。其次, 学科交叉类型。学者们根据不同的分类视角和分类逻辑, 将学科交叉分为不同类

型。如根据学科交叉相互作用的数量和程度不同, 划分为单学科、多学科、群学科、横断学科、跨学科、超学科^[47]; 根据学科系统的演化, 有学者提出我国学科发展经历了学科交叉、学科群和学科会聚^[66]等阶段。再次, 学科交叉形成机制。在学科交叉动力因素的驱动下, 学者们更为深入地揭示了学科交叉背后的不同学科相互融合的形成机制, 如有学者基于库恩范式理论构建学科交叉结构模型^[67]。也有学者尝试将学科交叉的形成机制归纳为观同察异、话语移植、互补共融、连锁辐射、辐射聚焦、横断综析、形上升华^[68]。最后, 学科交叉形成。通过分析那些正在形成或已经形成的较为成熟的学科交叉领域和交叉学科演化过程来总结学科交叉的规律, 具体包括全领域学科交叉现象研究^[69, 70], 即围绕自然科学、社会科学或所有学科展开研究, 通过绘制科学图谱等方式, 揭示科学整体结构, 从而使得研究者可以据此寻找本领域与其他领域交叉融合的可能点; 以及特定领域学科交叉现象研究^[71, 72], 即围绕特定学科领域利用多种研究方法揭示特定领域学科交叉现象、特征及演化趋势, 从而用于监测与预测学科前沿, 及时把握学科发展趋势, 探测处于萌芽期或潜伏期的学科交叉主题。

(2) 学科交叉测度。学科交叉测度方法和指标是科学合理地探索学科交叉规律的重要工具和手段, 国内外已有很多学者就学科交叉评价和测度展开系统而详细的综述^[73-75], 本文不再做重复性梳理, 仅作简要概述。总的来说, 现有关于学科交叉测度的方法主要包括引文分析、合著分析以及文本分析, 分别对应学科交叉知识扩散的三种途径, 即参考文献中来自不同学科的引文、不同学科的学者合作发表论文以及在其他学科期刊中发表作品^[76]。其中, 引文分析是目前使用频率最高的方法, 其通过分析参考文献和施引文献构建学科交叉引文网络, 合著分析和文本分析则分别以作者合作网络和文章本身的文本内容为分析单元。从测度指标看, 现有的学科交叉测度指标主要分为三类: 第一, 多样性指标, 用来描述交叉领域所涉及学科的数量统计特征, 包括学科数量多少(丰富性)、分布特征(均衡性)和个体差异(差异性)^[77]; 第二, 聚合性指标, 用以衡量领域交叉融合的紧密程度^[78]; 第三, 综合性指标^[79], 结合不同

测度标准, 更加综合全面地测度学科交叉性。

4 结论与展望

新一轮科技革命与产业变革催生大量跨领域复杂科学难题, 单一学科范式难以实现问题完整求解, 交叉科学成为驱动前沿创新、培育新质生产力的核心路径。但当前国内外学界长期混用学科交叉、交叉学科、交叉科学、跨学科学等相近概念, 中外话语体系、学科体制差异进一步加剧概念混淆, 造成学术沟通壁垒。同时, 大数据、生成式人工智能等数字技术重塑科研范式, 交叉研究的开展逻辑、实现路径均出现全新变化, 既有研究尚未立足数字情境系统研判交叉科学未来发展方向。基于此, 本文采用文献计量与系统综述相结合的研究方法, 厘清交叉科学核心概念边界与内在逻辑, 搭建统一的领域研究分析框架, 主要得到两个研究结论:

(1) 通过对比剖析国内外已有研究对于交叉科学领域相关概念的界定, 将交叉科学研究领域众多极易混淆的概念归纳为学科交叉、交叉学科、交叉科学以及跨学科学四个核心概念, 并借鉴科研、学科、科学以及科学学的关系, 构建了一个整合性的交叉科学相关概念框架, 澄清和理顺了交叉科学研究领域内不同概念的边界及概念之间的关系。

(2) 通过对国内外重点文献的深入阅读, 对当前交叉科学研究进展进行系统梳理, 搭建了交叉科学研究进展框架, 将现有交叉科学研究分为三大部分, 分别是学科交叉研究、交叉学科研究以及跨学科学进展, 从综合全面的视角总结现有交叉科学研究进展。

最后, 基于研究发现, 结合当前数据爆炸以及科研范式变革的时代情境, 本文提出以下研究展望, 希望能为未来交叉科学研究提供启发。

(1) 在科研范式变革背景下多维度审视交叉科学的发展方向。交叉科学研究以交叉科学的进步与发展为对象与基石。当下, 在海量的数据、提升的算力、优化的算法等要素的加持下, 科学研究的范式变革正在进行, 集中体现在解决系统性复杂问题成为科研主要驱动力、采用仿真模拟和数据科学等新的研究方法和手段、科技创新链条丰富、科研组织模式创新变革

等方面^[80]。一方面, 作为科学整体的一部分, 交叉科学在变革时代面临着同样的机遇与挑战。

另一方面, 学科交叉融合也是此轮科研范式变革的核心特征, 交叉科学正在变革时代焕发新的生机。以AI for Science (人工智能驱动的科学) 领域为例, 自2020年DeepMind推出Alpha Fold 2以来, 人工智能与生命科学、材料计算、新能源等众多学科领域交叉融合, 产生了一系列颠覆性的创新成果, 不断刷新科学界的认知。在此背景下, 交叉科学迎来新的发展契机, 如可否通过搭建领域大语言模型凝练重大前沿交叉问题? 如何借助海量的数据和优化的算力、模型等加速交叉科学问题求解? 人工智能如何起到降低学科壁垒、推进跨学科科研合作的作用? 这些潜在的可能性值得后续研究持续关注。

(2) 在数字情境下更加全面综合地分析学科交叉的影响因素及其内在机制。已有研究从不同维度挖掘了影响学科交叉研究的诸多因素, 零散地分析了单个或某几个因素与学科交叉的相关关系及其对学科交叉的影响。然而, 学科交叉是一个复杂的过程, 是众多因素共同作用的结果。仅仅分析几个因素对学科交叉的影响, 不足以揭示学科交叉难的全貌, 未来研究可以考虑从组态的视角分析不同因素对学科交叉产生的组态效应, 从而得到关于学科交叉更为综合全面的认知。另外, 在跨学科团队知识创新方面, 尽管已经有学者尝试从知识的视角揭示跨学科团队知识创新的影响因素和内在机理, 但相关研究数量较少, 学科交叉知识创新机制的黑箱尚未被完全揭开, 未来有待就这一问题继续展开深入探索。

此外, 大数据、人工智能、移动通信、云计算等新一代信息技术为科学研究带来了新工具、新方法, 对于科学家提炼交叉科学问题、寻求学科交叉合作的路径、解决交叉科学问题的方式等诸多方面带来诸多影响。在新的数字情境下, 已有的学科交叉影响因素是否还会产生作用? 影响的条件和效果是否发生变化? 是否产生了新的学科交叉影响因素? 甚至是否出现了新的学科交叉研究范式? 其背后的知识创新机制又是什么? 这些问题有待进一步探讨。

(3) 在更大的尺度和范围内探讨交叉学科人才培养及交叉学科建设问题。跨学科组织是交叉学科人才

培养的重要载体。已有关于跨学科组织模式的研究大多局限在大学内部, 或以大学为中心, 设计与构建跨学科组织。然而, 大学内部森严的学科壁垒短时间内仍难以消弭。与此同时, 近年来不断涌现的各类型国家实验室、新型研发机构以及开源社区等或从功能定位上瞄准需求导向的前沿交叉问题解决, 或从组织结构和平台设计上营造学科交叉的天然土壤, 越来越多地发挥着学科交叉创新成果产出和交叉学科人才培养的功能。未来研究可以考虑跳出大学的边界, 在更大的范围和尺度上探讨跨学科组织设计与运行、交叉学科人才培养等问题。另外, 近年来生成式人工智能等数字技术的突破进展正在对人类的教和学方式造成巨大冲击, 对传统的交叉学科人才培养手段和目标都造成一定影响, 未来有必要重新思考数字时代交叉学科人才培养体系。

交叉学科地位合法性的确立引发了我国交叉学科建设和研究的热潮, 很多学者开始从顶层设计的角度探讨交叉学科的建设问题, 或论述某个特定交叉学科的具体实施方案, 这有利于促进交叉学科的形成, 推动交叉学科人才培养。但交叉学科目录的确立在某种程度上也标志着新的学科壁垒的形成, 未来研究仍需要就交叉学科建设问题展开探讨。一方面, 有效结合跨学科科学研究在学科交叉规律、前沿交叉领域趋势预测等方面的重要研究成果, 建立规范严格的交叉学科成立审批流程, 谨慎设置新的交叉学科; 另一方面, 也有必要探讨如何构建开放动态的交叉学科考核评价方案或动态退出机制, 避免学科边界的再次僵化。

(4) 在新的技术手段加持下丰富探索学科交叉规律的手段和方法。已有关于学科交叉测度的研究多以文献为分析单元, 采用引文分析、合著分析等, 但受到学科分类不清晰、作者隶属关系复杂等因素干扰, 对学科交叉测量程度较浅, 未来研究可以考虑挖掘多元数据来源, 如基金、专利、报告等。另外, 数字情境下, 学者们发布其研究成果及寻求跨学科科研合作的方式和渠道变得更加多元, 如在一些开源社区更新并交流最新研究进展、通过社交网络平台发布交叉科学问题寻求科研合作等。如何收集这些信息并转化为有用的数据, 进一步用于探测学科交叉的规律与程度, 也是未来研究值得思考的议题。

除此之外, 学科交叉测度研究的重要功能是揭示学科交叉的规律、预测学科交叉的趋势, 并指导相关部门作出科学合理的战略布局与规划。现有研究多分析单个或某几个交叉领域的演化特征, 对全领域的科学网络整体结构与演化的宏观分析成果较少, 且相关研究多停留在学科交叉现状剖析层面, 对学科交叉未来演进趋势分析不足。未来可考虑引入数据挖掘、生成式人工智能等技术手段, 借助更加先进的数据处理能力和算法模型, 增强学科交叉测度的精度与准度,

更好地辅助科技预测。

总之, 无论是从现有研究热度还是从现实的需求来看, 交叉科学研究依然保持着高涨的学术生命力和重要的学术意义。与此同时, 在当前数字洪流的时代浪潮下, 交叉科学研究的各个层面都面临着新的机遇和挑战, 需要学者们对交叉科学研究领域的相关问题持续关注、深入研究, 逐步构建并完善交叉科学研究理论体系, 促进交叉科学创新成果的持续产出。

参考文献

- [1] Porter A L, Rafols I. Is science becoming more interdisciplinary? Measuring and mapping six research fields over time[J]. *Scientometrics*, 2009, 81(3): 719-745.
- [2] Wang H C, Fu T F, Du Y Q, et al. Scientific discovery in the age of artificial intelligence[J]. *Nature*, 2023, 620(7972): 47-60.
- [3] 陈劲, 张月遥, 李振东. 科学问题凝练与科研成果落地的贯通机制研究: 以国家自然科学基金项目为例[J]. *科学学研究*, 2023, 41(9): 1627-1637.
Chen J, Zhang Y Y, Li Z D. Research on the linking mechanism of scientific problem formation and scientific achievement transformation: Taking the Projects of National Natural Science Foundation of China as an example[J]. *Studies in Science of Science*, 2023, 41(9): 1627-1637.
- [4] 刘仲林. 交叉科学时代的交叉研究[J]. *科学学研究*, 1993, 11(2): 9-16.
Liu Z L. Interdisciplinary research in the New Era of interdisciplinary science[J]. *Studies in Science of Science*, 1993, 11(2): 9-16.
- [5] 章成志, 吴小兰. 跨学科研究综述[J]. *情报学报*, 2017, 36(5): 523-535.
Zhang C Z, Wu X L. Review on interdisciplinary research[J]. *Journal of the China Society for Scientific and Technical Information*, 2017, 36(5): 523-535.
- [6] 黄颖, 顾秀丽, 孙蓓蓓, 等. 我国交叉科学研究的演进与展望: 基于学术著作视角[J]. *图书情报知识*, 2022, 39(1): 61-72.
Huang Y, Gu X L, Sun B B, et al. The evolution and prospect of interdisciplinary research in China: From the perspective of academic books[J]. *Documentation, Information & Knowledge*, 2022, 39(1): 61-72.
- [7] 顾秀丽, 黄颖, 孙蓓蓓, 等. 图书情报领域中的交叉科学研究: 进展与展望[J]. *情报学报*, 2020, 39(5): 478-491.
Gu X L, Huang Y, Sun B B, et al. Interdisciplinary research in information science and library science: Progress and prospects[J]. *Journal of the China Society for Scientific and Technical Information*, 2020, 39(5): 478-491.
- [8] Van den Beemt A, MacLeod M, Van der Veen J, et al. Interdisciplinary engineering education: A review of vision, teaching, and support[J]. *Journal of Engineering Education*, 2020, 109(3): 508-555.
- [9] 张琳, 孙蓓蓓, 黄颖. 交叉科学研究: 内涵、测度与影响[J]. *科研管理*, 2020, 41(7): 279-288.
Zhang L, Sun B B, Huang Y. Interdisciplinary research: Connotation, measurement and impact[J]. *Science Research Management*, 2020, 41(7): 279-288.
- [10] 陈必坤, 刘钰馨, 白宽, 等. 基于科学建模的学科交叉测度研究综述[J]. *图书情报工作*, 2022, 66(18): 126-139.
Chen B K, Liu Y X, Bai K, et al. Literature review of interdisciplinary measurement based on modeling of science[J]. *Library and Information Service*, 2022, 66(18): 126-139.
- [11] 陈仕吉, 崔腾腾, 邱均平. 学科交叉动力学分析研究综述[J]. *数据分析与知识发现*, 2022, 6(5): 1-9.
Chen S J, Cui T T, Qiu J P. Review of studies analyzing interdisciplinary dynamics[J]. *Data Analysis and Knowledge Discovery*, 2022, 6(5): 1-9.
- [12] 陈艾华, 吴伟. 大学跨学科科研合作与科研生产力的关系研究综述与展望[J]. *重庆高教研究*, 2023, 11(5): 105-116.

- Chen A H, Wu W. Research review and prospect on the relationship between university interdisciplinary research cooperation and research productivity[J]. *Chongqing Higher Education Research*, 2023, 11(5): 105-116.
- [13] 刘仲林. 交叉学科分类模式与管理沉思[J]. *科学学研究*, 2003, 21(6): 561-566.
- Liu Z L. The classifying mode and management meditation about interdisciplinary subjects[J]. *Studies in Science of Science*, 2003, 21(6): 561-566.
- [14] National Academies (U.S.). Facilitating interdisciplinary research[R]. Washington, D. C.: The National Academies Press, 2005.
- [15] 路甬祥. 学科交叉与交叉科学的意义[J]. *中国科学院院刊*, 2005, 20(1): 58-60.
- Lu Y X. Implications in the disciplinary cross-breeding and inter-disciplinary sciences[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2005, 20(1): 58-60.
- [16] Repko A F. *Interdisciplinary Research*[M]. Los Angeles: SAGE, 2008.
- [17] 杨永福, 朱桂龙, 海峰. "交叉科学"与"科学交叉"特征探析[J]. *科学学研究*, 1997, 15(4): 5-10.
- Yang Y F, Zhu G L, Hai F. Analysis on the characteristics of "interdisciplinary science" and "scientific intersection"[J]. *Studies in Science of Science*, 1997, 15(4): 5-10.
- [18] 李喜先. 论交叉科学[J]. *科学学研究*, 2001, 19(1): 22-27.
- Li X X. On interdisciplinary sciences[J]. *Studies in Science of Science*, 2001, 19(1): 22-27.
- [19] 张雪, 张志强. 学科交叉研究系统综述[J]. *图书情报工作*, 2020, 64(14): 112-125.
- Zhang X, Zhang Z Q. Review on interdisciplinary research[J]. *Library and Information Service*, 2020, 64(14): 112-125.
- [20] 国务院学位委员会. 国务院学位委员会关于印发《交叉学科设置与管理办法(试行)》的通知[EB/OL]. (2021-12-06)[2024-03-07]. http://www.moe.gov.cn/srcsite/A22/s7065/202112/t20211203_584501.html.
- Academic Degrees Committee of the State Council. Notice of the Academic Degrees Committee of the State Council on Issuing the Measures for the Establishment and Administration of Interdisciplinary Disciplines (Trial)[EB/OL]. (2021-12-06)[2024-03-07]. http://www.moe.gov.cn/srcsite/A22/s7065/202112/t20211203_584501.html.
- [21] 钱学森. 交叉科学: 理论和研究的展望[J]. *机械工程*, 1985(3): 48.
- Qian X S. Interdisciplinary science: Prospect of theory and research[J]. *China Mechanical Engineering*, 1985(3): 48.
- [22] 王续琨. 交叉学科、交叉科学及其在科学体系中的地位[J]. *自然辩证法研究*, 2000, 16(1): 43-47.
- Wang X K. Interdisciplinarity, interdisciplinary science and their position in the system of sciences[J]. *Studies in Dialectics of Nature*, 2000, 16(1): 43-47.
- [23] 戴亚飞, 杜全生, 潘庆, 等. 探索中前行的交叉科学发展之路[J]. *大学与学科*, 2021, 2(4): 1-13.
- Dai Y F, Du Q S, Pan Q, et al. Explorations and advances of the development of interdisciplinary sciences[J]. *Universities and Disciplines*, 2021, 2(4): 1-13.
- [24] 李江. "跨学科性"的概念框架与测度[J]. *图书情报知识*, 2014, 31(3): 87-93.
- Li J. The concept and measurement of interdisciplinarity[J]. *Documentation, Information & Knowledge*, 2014, 31(3): 87-93.
- [25] 姜振寰. *交叉科学学科辞典*[M]. 北京: 人民出版社, 1990.
- Jiang Z H. *Dictionary of Interdisciplinary Sciences*[M]. Beijing: People's Publishing House, 1990.
- [26] 胡志刚, 徐晖, 谭跃进, 等. 跨学科的辩证视野[J]. *学位与研究生教育*, 2008(1): 21-26.
- Hu Z G, Xu H, Tan Y J, et al. Interdisciplinary dialectical vision[J]. *Academic Degrees & Graduate Education*, 2008(1): 21-26.
- [27] 刘小宝, 刘仲林. 跨学科研究前沿理论动态: 学术背景和理论焦点[J]. *浙江大学学报(人文社会科学版)*, 2012, 42(6): 16-26.
- Liu X B, Liu Z L. Academic background and theoretical focus of interdisciplinary research[J]. *Journal of Zhejiang University (Humanities and Social Sciences)*, 2012, 42(6): 16-26.
- [28] 杜俊民. 试论学科与跨学科的统一[J]. *科学技术与辩证法*, 2000, 17(4): 56-59.
- Du J M. On the unity of discipline and interdiscipline[J]. *Science Technology and Dialectics*, 2000, 17(4): 56-59.
- [29] 刘则渊, 陈悦, 朱晓宇. 普赖斯对科学学理论的贡献: 纪念科学计量学之父普赖斯逝世30周年[J]. *科学学研究*, 2013, 31(12): 1761-1772.
- Liu Z Y, Chen Y, Zhu X Y. D. J. Price's contribution to theory of the science of science: Commemorating father of scientometrics D. J. Price's 30th anniversary of his death[J]. *Studies in Science of Science*, 2013, 31(12): 1761-1772.
- [30] 蔡曙光. 科学与学科的关系及我国的学科制度建设[J]. *中国社会科学*, 2002(3): 79-80.
- Cai S S. The relationship between science and discipline and the construction of discipline system in China[J]. *Social Sciences in China*,

- 2002(3): 79-80.
- [31] Jacobs J A, Frickel S. Interdisciplinarity: A critical assessment[J]. *Annual Review of Sociology*, 2009, 35: 43-65.
- [32] Rhoten D, Pfirman S. Women in interdisciplinary science: Exploring preferences and consequences[J]. *Research Policy*, 2007, 36(1): 56-75.
- [33] 于汝霜. 高校教师跨学科交往影响因素实证研究[J]. *中国高教研究*, 2015(4): 90-94.
Yu R S. The empirical research on interaction of university teachers from different disciplines[J]. *China Higher Education Research*, 2015 (4): 90-94.
- [34] van Rijnsoever F J, Hessels L K. Factors associated with disciplinary and interdisciplinary research collaboration[J]. *Research Policy*, 2011, 40(3): 463-472.
- [35] Bishop P R, Huck S W, Ownley B H, et al. Impacts of an interdisciplinary research center on participant publication and collaboration patterns: A case study of the National Institute for Mathematical and Biological Synthesis[J]. *Research Evaluation*, 2014, 23(4): 327-340.
- [36] 赵文平, 聂聚宾. 家长式领导对跨学科团队创新绩效的影响: 以交互记忆系统为中介变量[J]. *科技进步与对策*, 2018, 35(12): 125-130.
Zhao W P, Nie J B. Research on the effect of paternalistic leadership on the transactive memory system performance: Based on the mediating effect of cross-disciplinary team innovation performance[J]. *Science & Technology Progress and Policy*, 2018, 35(12): 125-130.
- [37] Salazar M, Lant T. Facilitating innovation in interdisciplinary teams: The role of leaders and integrative communication[J]. *Informing Science: the International Journal of an Emerging Transdiscipline*, 2018, 21: 157-178.
- [38] Porter A L, Cohen A S, David Roessner J, et al. Measuring researcher interdisciplinarity[J]. *Scientometrics*, 2007, 72(1): 117-147.
- [39] 柳洲. "M-C-K"群体行动者网络模型与跨学科创新团队知识生产机制[J]. *科学学与科学技术管理*, 2012, 33(3): 158-164.
Liu Z. 'M-C-K' group actor network model and knowledge production mechanism of interdisciplinary innovation team[J]. *Science of Science and Management of S & T*, 2012, 33(3): 158-164.
- [40] 邢飞, 彭国超, 贾怡晨, 等. 跨学科团队知识整合影响因素研究: 以智能制造项目为例[J]. *现代情报*, 2020, 40(5): 41-50.
Xing F, Peng G C, Jia Y C, et al. Research on affecting factors of knowledge integration in interdisciplinary teams: A case study of smart manufacturing project[J]. *Modern Information*, 2020, 40(5): 41-50.
- [41] 金子祺, 王晓红, 刘绮莉, 等. 智能制造跨学科研究团队知识关联整合的影响因素: 扎根理论的应用案例[J]. *科技管理研究*, 2018, 38 (23): 137-144.
Jin Z Q, Wang X H, Liu Q L, et al. Influencing factors of knowledge relational integration of interdisciplinary research team in intelligent manufacturing: An application case of rooted theory[J]. *Science and Technology Management Research*, 2018, 38(23): 137-144.
- [42] Carlile P R. Transferring, translating, and transforming: An integrative framework for managing knowledge across boundaries[J]. *Organization Science*, 2004, 15(5): 555-568.
- [43] 王馨. 跨学科团队协同知识创造中的知识类型和互动过程研究: 来自重大科技工程创新团队的案例分析[J]. *图书情报工作*, 2014, 58(3): 20-26.
Wang X. Knowledge taxonomy and interaction process of collaborative knowledge creation in interdisciplinary teams: A case study from major project innovation teams[J]. *Library and Information Service*, 2014, 58(3): 20-26.
- [44] 游士兵, 惠源, 崔娅雯. 高校协同创新中交叉学科发展路径探索[J]. *教育研究*, 2014, 35(4): 94-99.
You S B, Hui Y, Cui Y W. Exploring the interdisciplinary development path in collaborative innovation of higher educational institutions[J]. *Educational Research*, 2014, 35(4): 94-99.
- [45] 陈亚玲. 大学跨学科科研组织: 起源、类型及运行策略[J]. *高校教育管理*, 2012, 6(3): 45-49.
Chen Y L. The interdisciplinary research organization of a university: Its origin, types and operating strategies[J]. *Journal of Higher Education Management*, 2012, 6(3): 45-49.
- [46] 焦磊, 谢安邦. 美国研究型大学跨学科学术组织的建制基础及样态创新[J]. *中国高教研究*, 2019(1): 60-65.
Jiao L, Xie A B. Study on the institutionalization foundation and organizational form innovation of interdisciplinary research in American research universities[J]. *China Higher Education Research*, 2019(1): 60-65.
- [47] Jantsch E. Inter- and transdisciplinary university: A systems approach to education and innovation[J]. *Policy Sciences*, 1970, 1(1): 403-428.
- [48] 张炜, 邹晓东, 陈劲. 基于跨学科的新型大学学术组织模式构造[J]. *科学学研究*, 2002, 20(4): 362-366.
Zhang W, Zou X D, Chen J. Reengineering a new interdisciplinary-oriented university academic organization pattern[J]. *Studies in Science of Science*, 2002, 20(4): 362-366.
- [49] 周朝成. 大学跨学科研究组织冲突与治理对策: 新制度主义的视角[J]. *教育发展研究*, 2014, 34(9): 40-45.

- Zhou C C. An analysis of the conflicts of the interdisciplinary research organization in universities and the countermeasures: A perspective of new institutionalism[J]. *Research in Educational Development*, 2014, 34(9): 40-45.
- [50] 张洋磊, 张应强. 大学跨学科学术组织发展的冲突及其治理[J]. *教育研究*, 2017, 38(9): 55-60, 131.
- Zhang Y L, Zhang Y Q. The conflict and its governance in the development of interdisciplinary academic organizations in universities[J]. *Educational Research*, 2017, 38(9): 55-60, 131.
- [51] 茹宁, 李薪茹. 突破院系单位制: 大学"外延型"跨学科组织发展策略探究[J]. *中国高教研究*, 2018(11): 71-77.
- Ru N, Li X R. Breaking through the institutes and departments units system: The development strategy of universities' "extensional growth" interdisciplinary organization[J]. *China Higher Education Research*, 2018(11): 71-77.
- [52] 陈艾华, 吴伟, 王卫彬. 跨学科研究的协同创新机理: 基于高校跨学科组织的实证分析[J]. *教育研究*, 2018, 39(6): 70-79.
- Chen A H, Wu W, Wang W B. The collaborative innovation mechanism of interdisciplinary research: Empirical analysis of interdisciplinary organizations in universities[J]. *Educational Research*, 2018, 39(6): 70-79.
- [53] Chen A H, Wang X T. The effect of facilitating interdisciplinary cooperation on the research productivity of university research teams: The moderating role of government assistance[J]. *Research Evaluation*, 2021, 30(1): 13-25.
- [54] Brozek J, Keys A. General aspects of interdisciplinary research in experimental human biology[J]. *Science*, 1944, 100(2606): 507-512.
- [55] 李海生. 国外高校交叉学科研究生培养面临的问题、对策及启示[J]. *中国高教研究*, 2022(3): 30-36.
- Li H S. Problems, countermeasures and enlightenment facing interdisciplinary postgraduate cultivation in foreign universities[J]. *China Higher Education Research*, 2022(3): 30-36.
- [56] Holley K. The challenge of an interdisciplinary curriculum: A cultural analysis of a doctoral-degree program in neuroscience[J]. *Higher Education*, 2009, 58(2): 241-255.
- [57] 刘继安, 李岳璟, 丁黎. 未来技术人才培养: 挑战与体系重构: 基于中国科学院大学未来技术学院的案例研究[J]. *高等工程教育研究*, 2021(2): 22-31.
- Liu J A, Li Y J, Ding L. Cultivating talents for future technology: Challenges and system reconstruction: A case study of school of future technology of the university of Chinese academy of sciences[J]. *Research in Higher Education of Engineering*, 2021(2): 22-31.
- [58] 王涛. 我国交叉学科门类设置的政策过程研究: 基于嵌入制度的多源流理论[J]. *中国高教研究*, 2022(4): 23-28.
- Wang T. Research on the policy process of interdisciplinary category setting in China: Multi-source flow theory based on embedded institution[J]. *China Higher Education Research*, 2022(4): 23-28.
- [59] 王战军, 常琅. 规训与超越: 交叉学科建设的制度困境及其突破[J]. *高等教育研究*, 2022, 43(5): 26-34.
- Wang Z J, Chang L. Beyond the discipline: The institutional dilemma and the improvement of interdisciplinary construction[J]. *Journal of Higher Education*, 2022, 43(5): 26-34.
- [60] 崔育宝, 李金龙, 张淑林. 交叉学科建设: 内涵论析、实施困境与推进策略[J]. *中国高教研究*, 2022(4): 16-22.
- Cui Y B, Li J L, Zhang S L. Interdisciplinary construction: Connotation, implementation dilemma and promotion strategies[J]. *China Higher Education Research*, 2022(4): 16-22.
- [61] 郭柏林, 杨连生. 资源依赖理论视角下高校交叉学科发展的路径[J]. *中国科学基金*, 2023, 37(1): 140-149.
- Guo I, Yang L S. The path of interdisciplinary development in universities from the perspective of resource dependence theory[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2023, 37(1): 140-149.
- [62] 梁怀新. 交叉学科门类下国家安全学一级学科建设路径分析[J]. *情报杂志*, 2021, 40(5): 50-56, 41.
- Liang H X. Analysis on the construction path of the first level discipline of national security under the interdisciplinary category[J]. *Journal of Intelligence*, 2021, 40(5): 50-56, 41.
- [63] 马跃, 蔡兵, 于小娟. 交叉学科研究的成长环境与动力机制分析[J]. *研究与发展管理*, 2007, 19(5): 105-110, 119.
- Ma Y, Cai B, Yu X J. Analysis on the growth environment and the motive-force mechanism of the cross-disciplinary research[J]. *R & D Management*, 2007, 19(5): 105-110, 119.
- [64] 王晶华, 施红玉. 从系统科学角度看学科交叉现象[J]. *科学学与科学技术管理*, 2002, 23(12): 5-8.
- Wang J H, Shi H Y. Observation of intersecting phenomena of subjects from the angle of system science[J]. *Science of Science and Management of S & T*, 2002, 23(12): 5-8.
- [65] Carayannis E G, Campbell D F J. "Mode 3" and "Quadruple Helix": Toward a 21st century fractal innovation ecosystem[J]. *International Journal of Technology Management*, 2009, 46(3/4): 201-234.

- [66] 伍蓓, 陈劲, 蒋国俊, 等. 学科会聚的起源、模式及影响因素分析[J]. 高等工程教育研究, 2008(2): 73-78.
Wu B, Chen J, Jiang G J, et al. Exploration into discipline convergence in terms of origin, mode and factors[J]. Research in Higher Education of Engineering, 2008(2): 73-78.
- [67] 李春景, 刘仲林. 现代科学发展学科交叉模式探析: 一种学科交叉模式的分析框架[J]. 科学学研究, 2004, 22(3): 244-248.
Li C J, Liu Z L. A Research on the mode of interdisciplinarity for development in modern sciences: A theoretical analysis framework of the mode of interdisciplinarity[J]. Studies in Science of Science, 2004, 22(3): 244-248.
- [68] 金薇吟. 学科交叉方法探析[J]. 科学学研究, 2006, 24(5): 667-671.
Jin W Y. Analysis of the discipline-crossing method[J]. Studies in Science of Science, 2006, 24(5): 667-671.
- [69] Boyack K W, Klavans R, Börner K. Mapping the backbone of science[J]. Scientometrics, 2005, 64(3): 351-374.
- [70] Leydesdorff L, Rafols I. A global map of science based on the ISI subject categories[J]. Journal of the American Society for Information Science and Technology, 2009, 60(2): 348-362.
- [71] Wang L L, Notten A, Surpatean A. Interdisciplinarity of nano research fields: A keyword mining approach[J]. Scientometrics, 2013, 94(3): 877-892.
- [72] 吴伟, 沈锦璐, 徐梦玲. 合法性视角下新兴交叉学科形成演化机制研究: 以合成生物学为例[J]. 大学与学科, 2022, 3(3): 64-78.
Wu W, Shen J L, Xu M L. On the formation and evolution mechanism of emerging interdisciplines from the perspective of legitimacy: Taking Synthetic Biology as an example[J]. Universities and Disciplines, 2022, 3(3): 64-78.
- [73] Wagner C S, Roessner J D, Bobb K, et al. Approaches to understanding and measuring interdisciplinary scientific research (IDR): A review of the literature[J]. Journal of Informetrics, 2011, 5(1): 14-26.
- [74] 许海云, 尹春晓, 郭婷, 等. 学科交叉研究综述[J]. 图书情报工作, 2015, 59(5): 119-127.
Xu H Y, Yin C X, Guo T, et al. Interdisciplinary research review[J]. Library and Information Service, 2015, 59(5): 119-127.
- [75] 曹玲静, 陈云伟. 学科交叉评价研究进展综述[J]. 情报杂志, 2020, 39(7): 173-180.
Cao L J, Chen Y W. Review on the progress of evaluation on interdisciplinary research[J]. Journal of Intelligence, 2020, 39(7): 173-180.
- [76] Pierce S J. Boundary crossing in research literatures as a means of interdisciplinary information transfer[J]. Journal of the American Society for Information Science, 1999, 50(3): 271-279.
- [77] 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.
- [78] Rafols I, Meyer M. Diversity and network coherence as indicators of interdisciplinarity: Case studies in bionanoscience[J]. Scientometrics, 2010, 82(2): 263-287.
- [79] Zhang L, Rousseau R, Glänzel W. Diversity of references as an indicator of the interdisciplinarity of journals: Taking similarity between subject fields into account[J]. Journal of the Association for Information Science and Technology, 2016, 67(5): 1257-1265.
- [80] 杜鹏, 赵秉钰, 孙粒, 等. 新时代科研范式变革的内涵及应对[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(7): 991-1000.
Du P, Zhao B Y, Sun L, et al. Connotation and countermeasures of scientific research paradigm transformation in the new era[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(7): 991-1000.

Integration and Reconstruction: A Review and Prospect of Interdisciplinary Science Research in New Generation

ZHANG Yu¹, LI Tuoyu^{2*}, YE Min²

1. School of Public Affairs, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. Institute of China's Science, Technology and Education Policy, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

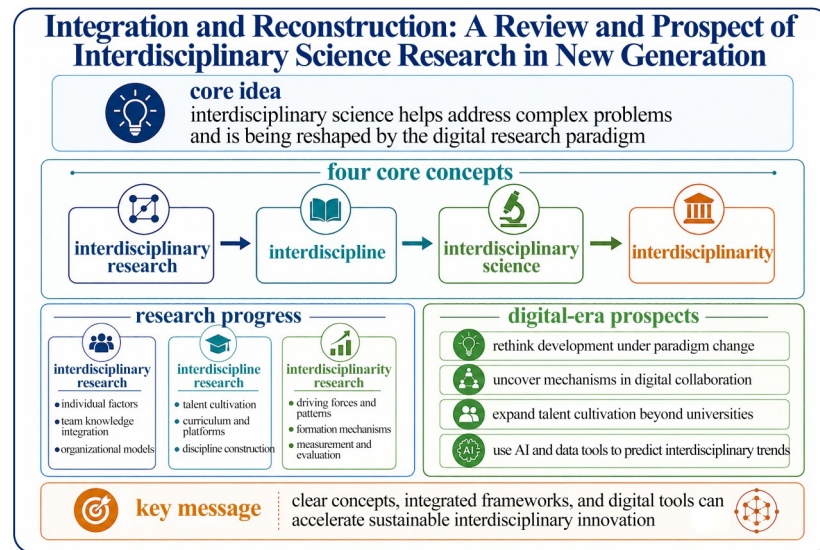
Highlights

Key concepts in interdisciplinary science are clarified and distinguished.

An integrative framework for interdisciplinary science research is constructed based on a systematic review.

Future directions for interdisciplinary science are outlined within the digital paradigm shift.

Graphical Abstract



Abstract: Interdisciplinary science research represents both a historical choice and a practical necessity in responding to the new round of technological revolution and industrial transformation, as well as in addressing increasingly complex and comprehensive scientific problems. It has long attracted widespread attention from scholars across diverse fields. However, the field is replete with highly interrelated yet easily confounded concepts, and the resulting terminological confusion poses significant barriers to scholarly communication and collaboration. There is thus an urgent need to integrate domestic and international research contexts, ground the analysis in China's policy discourse system, and further clarify the connotations of and interrelations among these concepts. Moreover, as the rapid advancement of next-generation information technologies is driving a profound transformation of scientific research paradigms, it has become imperative to synthesize the progress of interdisciplinary science research from a more comprehensive perspective and to re-examine its future directions and possibilities.

This study adopts a combined approach of bibliometric analysis and systematic literature review. Using Web of Science and CNKI as data sources, we conducted keyword co-occurrence analysis on the literature in the field of interdisciplinary science research to construct a conceptual network map. Key literature was subsequently identified based on citation frequency, influential scholars, and leading journals, followed by systematic review and synthesis.

Through a systematic analysis of the literature, this study yields two principal findings. First, by critically comparing and examining how relevant concepts in interdisciplinary science research are defined across both domestic and international scholarship, this study consolidates the numerous easily confounded and interchangeably used terms in the field into four core categories: interdisciplinary research, interdiscipline, interdisciplinary science, and interdisciplinarity. Drawing on the logical relationships among scientific research, discipline, science, and the science of science, an integrative conceptual framework is constructed. This framework not only clarifies the conceptual boundaries that have long remained ambiguous in the literature but also delineates the dynamic interrelations among these four concepts, providing a much-needed conceptual anchor for future scholarly communication. Second, through an in-depth and critical examination of key literature from both domestic and international sources, this study systematically synthesizes the current state of interdisciplinary science research and develops a

comprehensive research progress framework. This framework organizes existing scholarship into three major domains: interdisciplinary research, interdiscipline research, and interdisciplinarity research. By doing so, it offers a panoramic and structured overview of the research landscape, revealing both the achievements and the gaps that characterize the field.

Grounded in the contemporary digital context, this study outlines future directions for interdisciplinary science research in four key respects. First, the development trajectory of interdisciplinary science should be examined multidimensionally against the backdrop of the ongoing research paradigm transformation driven by emerging technologies. Second, the influencing factors and internal mechanisms that shape interdisciplinary research warrant more comprehensive and nuanced analysis within the digital context, particularly regarding how digital tools reconfigure collaborative patterns. Third, issues concerning interdisciplinary talent cultivation and interdiscipline construction deserve exploration on a broader scale and across diverse educational and institutional settings. Fourth, the tools and methods for uncovering interdisciplinary regularities should be enriched and innovated by harnessing the capabilities of emerging technologies such as large language models. Collectively, these findings hold significant theoretical and practical value. They contribute to clarifying and constructing a robust conceptual system of interdisciplinary science, promoting the further advancement of interdisciplinary science research in digital contexts, and ultimately fostering sustainable interdisciplinary innovation.

Keywords: interdisciplinary science; interdisciplinary research; interdiscipline; interdisciplinarity; digital research; interdisciplinary integration; bibliometrics