文章编号:1003 - 2053(2026)05 - 0960 - 12

技术风险评估方法与实证研究
——基于“依赖 - 管制 - 差距”视角

何 潇[1,2],代 涛[1,2],程燕林[1],陈 捷[1]
(1. 中国科学院科技战略咨询研究院,北京 100190; 2. 中国科学院大学公共政策与管理学院,北京 100049)

摘 要:技术风险是影响国家安全的关键因素,建立健全技术风险评估体系对防范化解重大风险具有重要意义。从风险管理理论出发,构建了“风险源 - 风险发生概率 - 风险对冲承受力”的技术风险评估框架,提出基于“技术依赖 - 技术管制 - 技术差距”三因素视角的技术风险评估模型(T - DCG 模型),探讨了三因素对技术风险的作用机制。在此基础上,构建技术风险评估定量测算方法体系:首先利用 Armington 替代弹性模型测算技术依赖度指标,以美国商业管制清单为基础明确技术管制度,引入技术优势指数(RTCA)测算技术差距度指标,最后计算综合技术风险值(TRV),据此将技术风险等级分为极高风险、高风险、中风险、低风险 4 个等级。以半导体设备、材料和产品为例,进行了实证研究,验证方法的可行性。本研究为技术风险的量化评价和监测提供了一个新的思路。

关键词:技术风险;评估方法;技术依赖;技术管制;技术差距
中图分类号:F062.4 **文献标识码**:A

当今世界百年未有之大变局加速演进、国际格局深刻调整,科技安全对于防范国家安全风险的意义越来越重要。十八大以来,习近平总书记高度重视科技安全风险,指出:“只有把核心技术掌握在自己手中,才能真正掌握竞争和发展的主动权,才能从根本上防范化解重大风险,保障国家经济安全、国防安全和其他安全”[1]。党的二十届三中全会提出要“构建科技安全风险监测预警和应对体系,加强科技基础条件自主保障”以及“健全提升产业链供应链韧性和安全水平制度、建立产业链供应链安全风险评估和应对机制”[2]。可见,化解技术风险对于保障国家安全具有极其重要的作用,不仅有助于维护国家技术主权,也能促进技术创新的合理布局,因此迫切需要在加强自主创新的同时建立技术风险评估预警体系。

从已有研究看,多聚焦于项目研发视角下的技术风险评估研究。如张丽玮、郑彦宁[3,4]针对高新技术项目中的技术风险进行评估,构建包含技术环境、技术特征和项目组织 3 个维度的高新技术项目技术风险评价体系。迟宝山等[5]根据技术风险的特点建立了研发项目方案论证阶段评价技术风险的指标体系,包括技术成熟性、复杂性、先进性、充裕性、标准化等指标。曲麒富等[6]探讨了工程研制过程适用于我国的技术风险评估方法,以技术成熟度、研发困难度、技术需求值 3 个因素构建风险矩阵。随着大国博弈背景下新一轮科技革命中新兴技术的涌现,技术风险研究逐渐向国家竞争安全视角下转变,但更多集中在技术风险识别,如李牧南等[7]利用基于深度学习和多源数据的分析框架对自动驾驶技术风险进行识别;Roslyng 等[8]基于内容分析,并结合对 3 个不同丹麦媒体平台新闻数据的定性研究,尝试识别新兴技术的潜在风险。Aureliano da 等[9]为研究一国在特定技术方面潜在风险程度,提出了技术主权指数。少数对于技术风险的评估研究也均停留在较为宏观的层面,偏向于对政策、技术、人才等多方面风险因素的整体科技安全评估体系研究,较为缺乏具体技术层面的微观评估预警体系。如徐宗煌等[10]建立了涵盖科技成果、科技人才、科技活动和科技环境 4 个方面的国家科技安全风险评估指标体系。刘晓峰等[11]基于当前我国科技安全

收稿日期:2025 - 03 - 28;**修回日期**:2025 - 07 - 14
基金项目:中国科学院战略研究与决策支持系统建设专项(GHJ - ZLZX - 2025 - 01)
作者简介:何潇(1998 -),女,博士研究生。代涛(1982 -),男,研究员,通讯作者,E - mail:daitao@ casisd. cn。程燕林(1982 -),女,副研究员。陈捷(1989 -),女,助理研究员。

领域风险的现实,结合系统理论视角,从政策制度、关键技术自主可控、技术应用失当、人才安全 4 个核心关键构建指标体系。Frolov[12] 论述本国科技、创新和产业政策之间的互动问题,尤其强调技术安全对于国家安全的重要性。

综合来看,当前技术风险评估研究较为缺乏适用于国家竞争和国家安全背景下聚焦微观技术层面的定量评估方法模型,本文尝试构建微观技术风险评估量化模型,为构建技术风险防控体系、防范化解重大风险、提升科技安全治理能力提供借鉴。

1　技术风险评估 T – DCG 模型构建

1.1　技术风险的概念界定

风险(risk)一词最初起源于探险领域,由于风险内涵及类型的丰富性,当前国内外学者仍未统一风险的概念内涵。美国学者 Haynes 于 1895 年提出“风险意味着损害的可能性”[13];1901 年美国学者 Weillet 进一步提出“风险是关于不愿发生的事件发生的不确定性之客观体现”,指出风险的客观状态和不确定性[14];日本学者武井勋基于前人研究基础在其著作《风险理论》中将风险的概念表述为“风险是特定环境中和特定期间内自然存在的导致经济损失的变化”,概括了风险的基本特性:客观性、不确定性、可测定性。可见风险是可测度的不确定性损害的客观可能性[15]。

当前学界对于技术风险也尚无统一概念界定,总结以往学者们对技术风险的探索,当前我国技术风险主要包括:(1)技术自身发展带来的风险。近年来各种新兴技术不断涌现,技术迭代速度日益加快,由此可能带来社会、文化等层面的风险。如高建明等[16]认为任何一种技术的出现均可以理解成一种新的技术文化的产生和形成,而当这种作为文化现象的技术在一定的时间里给人类的全面发展带来种种不利时,技术风险便由此而生。郭瑜桥等[17]认为技术风险是指在限定的时间范围内由于技术的研究、开发和利用导致人类及其社会可能发生的利益损失。(2)技术被“卡脖子”的风险。结合当前新一轮科技革命的时代背景,从国际竞争和国家安全视角看,技术风险可归因于由于技术自身能力不足而且受制于人所引起的技术安全问题,归根结底是技术可能被“卡脖子”的风险[18],意味着技术安全遭受损害的可能性。张治河等[19]认为“卡脖子”困境是指在技术创新领域的研发生产过程中关键核心技术创新严重依赖进口且可能被先进国家或地区实施技术封锁管制的现象。汤志伟等[20]指出技术“卡脖子”风险具备较大依赖性、较强垄断性以及难以替代性,认为“卡脖子”风险的诱因是部分关键核心技术在国际上技术来源少,形成技术垄断的局面,一旦被技术供给方制裁,技术需求方将难以在短期内缩小技术差距、实现技术突破。陈劲[21]首先从技术安全视角出发,认为是由于被其他竞争对手掌握关键技术要素从而在一定程度上威胁我国产业技术安全;其次是从技术差距视角出发,认为是由于先进国家的技术垄断程度高,我国想要依赖国际贸易合作很难实现技术转移,且这些技术差距在短期内难以缩小,从而导致“卡脖子”风险。(3)技术研发和产业化成败的风险。技术风险除了带来技术安全问题,还可能面临技术研发和产业化成败而带来的经济安全遭受损害的可能性,即技术经济安全风险。刘志鹏等[22]提出技术经济安全指一国经济利益不受内部和外部技术因素威胁的状态及维持这种状态的能力。代涛[23]等认为技术经济安全与技术风险息息相关,同时提出导致技术经济安全问题的因素包括核心技术对外依赖、因技术不成熟或者不当应用带来的安全问题等方面。陈捷等[24]在分析未来技术风险时,指出其中的经济风险主要包括未来技术产业化后可能带来的产业冲击和经济利益损失等问题。

综上,本文的技术风险(Technology Risk,TR)是指在当前新一轮科技革命技术加速迭代的时代背景下,国家作为技术需求方因自身能力不足而存在较强的技术对外依赖,但被技术供给方实施管制制裁无法进行国外技术引进,并且由于技术不成熟的差距而导致国家技术产业化进程受阻,从而可能引发的国家社会安全、技术安全、经济安全的三重风险。

1.2　技术风险评估 T – DGC 理论模型

本文的技术风险评估模型构建基于以下风险管理理论。Kaplan 和 Garrick[25] 认为对于某项风险的分析管理要依据以下 3 个问题:(1)即将发生哪些事情?(2)其发生的可能性有多大?(3)若发生,将导致什么样的后果?并提出风险定量分析“三元组”:$R = \{ < s_i, p_i, x_i >, i = 1, 2, \cdots, n \}$,其中,$s_i$ 是风险源的识别或描述;p_i 是该风险发生的概率;x_i 是该风险的后果或评估度量,即损害的度量。Andrew[26] 进一步从社会学、经济学等交叉视角提出完

全风险管理理论,认为风险管理不仅要关注概率问题,对冲风险的成本和承受能力等因素同样会对风险所导致的后果及风险决策过程起到至关重要的作用。结合以上两个风险管理理论,风险定量"三元组"理论提出了风险管理的基本框架:风险源—风险发生概率—风险导致后果,但结合本研究内容来看,风险后果的含义较广泛,其客观损害度较难测量,因此结合完全风险管理理论中提及的对冲风险承受能力是风险后果的重要影响因素,用风险对冲承受能力来代表风险后果。

基于以上分析,从本研究国家竞争和国家安全的视角切入,梳理出本文的技术风险评估框架:风险源—风险发生概率—风险对冲承受力。

(1)风险源识别。技术风险来源的识别定位于技术依赖,由于自给能力不足而依赖别国技术引进所可能产生的风险。如果对外依赖程度越高,说明国产替代性越低,自主可控能力越弱,受他国限制的可能性越高,越易引发技术风险。因此可将技术依赖看作产生技术风险的源头,通过分析各项技术是否需要依赖进口及其依赖程度,明确潜在技术风险源。

(2)风险发生概率。在技术依赖的条件下,技术封锁管制会限制本国的技术引进从而加大技术风险发生的可能性,因此技术风险发生概率的大小取决于国外技术管制及其管制强度。如果相关技术遭受管制或管制程度越高,技术引进难度越大,关键技术环节越易出现断链问题,越易引发技术风险。因此可通过技术管制分析某项技术是否存在管制受限及其受限程度,明确技术风险发生可能性的概率大小。

(3)风险对冲承受力。若某项技术存在较强对外依赖且遭受管制,其技术差距大小决定了自身技术水平能够支撑应对以上风险的能力,从而影响技术风险可能产生的后果。如果某技术与国外领先水平的差距较小,可以通过加快自主创新实现技术追赶,具备一定的风险对冲承受能力;但如果技术差距较大,则可能意味着相关技术的人才、产业、市场等多环节存在不足,短时间内难以实现技术赶超,不具备足够的风险对冲承受能力,从而越易引发技术风险。因此可通过技术差距分析判断当前技术水平是否能够对冲承受技术风险。

综上,本文认为技术风险是技术依赖(Technology Dependence,TD)、技术管制(Technology Control,TC)、技术差距(Technology Gap,TG)的"三因素"集合:$TR = \{ < TD_i, TC_i, TG_i >, i = 1,2,\cdots,n \}$,由此构建出本文技术风险评估"三因素"理论模型:技术依赖(TD)—技术管制(TC)—技术差距(TG),简称 T – DCG 模型,如图 1 所示。

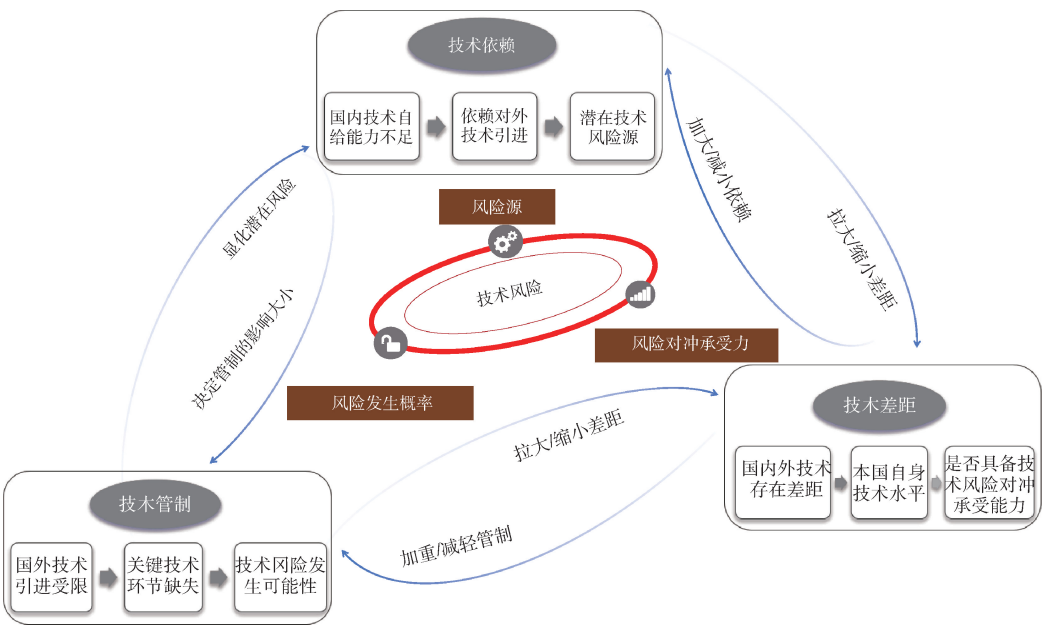

图 1 "依赖 – 管制 – 差距"视角的技术风险评估 T – DGC 理论模型

Figure 1 T – DGC theoretical model for technology risk assessment

技术依赖、技术管制、技术差距三者在对技术风险的作用过程中也存在相互影响的关系。首先,技

术是否存在依赖决定了国外技术管制是否可能对本国技术产生影响及影响程度大小;同时如果技术依赖度增加则表明国内技术具备较低自给能力,技术差距会随之拉大,反之随之减小。其次,国外技术管制会导致技术依赖产生的潜在技术风险加速显化;同时会导致国内技术引进难度加大,引起技术差距的拉大,反之如果未被管制,可以通过技术引进解决技术短板缩小技术差距。最后,技术差距会反作用于技术依赖与技术管制,技术差距大即不具备风险对冲承受能力,同时会进一步加大技术依赖程度及受技术管制影响的程度,而对于差距较小技术,本国可以实现技术赶超,对于其他两方面的影响会相应减小。

1.3　技术风险评估 T – DGC 模型计算方法

T – DGC 模型主要计算方法流程如图 2 所示,构建基于"技术依赖指标 X_1 – 技术管制指标 X_2 – 技术差距指标 X_3"的指标体系,分别对三指标进行定量测算,并根据三指标数据综合计算各项技术的技术风险值(Technological Risk Value,TRV),设立技术风险等级表,依据技术风险值对各技术进行技术风险等级划分,三指标具体测算方法如下。

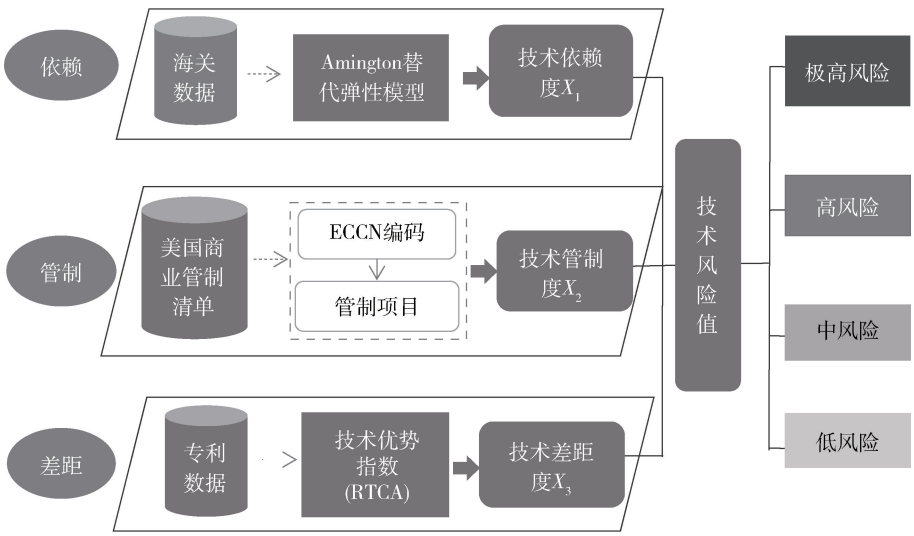

图 2　技术风险评估 T – DGC 模型计算流程

Figure 2　Technology risk assessment calculation methodology model

(1) 技术风险源—技术依赖(TD)

技术依赖层面,主要从进出口海关数据入手,通过对事实数据的客观分析我国国内的实际进口需求依赖情况,引入 Armington 替代弹性模型量化我国相关进口产品的依赖程度。计算各主要进口产品的替代弹性,替代弹性大于 1 则说明替代弹性较大,进口依存度低,反之若替代弹性小于 1 则说明替代弹性较小,进口依存度高,即自给能力相对不足。

Armington 替代弹性在某种程度上表明了我国对某进口产品的进口依存度,即某进口产品的替代弹性小(大)表明:国产产品与进口产品之间的相对价格的微小变动对进口产品与国内产品之间的相对需求量将产生较小(大)的影响,该种进口产品与国内同类产品的差异越大(小),进而认为该种产品的进口依存度越大(小)[27]。

一般 Armington 替代弹性理论[28]中,消费者对某一种产品的国产品和进口产品的效用函数一般用 CES(Constant Elasticity of Substitution)即常替代弹性效用函数进行表示。根据 Armington 模型假设,给定总需求水平 Y_i 时,i 国某种产品消费的 CES 函数可以描述为:

$$Max\ U_i = \left[\delta_i D_i^{\frac{\sigma_i - 1}{\sigma_i}} + \sum_{j \neq 1} \delta_i M_i^{\frac{\sigma_i - 1}{\sigma_i}}\right]^{\frac{\sigma_i - 1}{\sigma_i}}$$

$$Y_i = p_i^D D_i + \sum_{j \neq 1} p_i^M M_i$$

其中,$\sigma_i \in \{(0,1) \cup (1, +\infty)\}$,$\delta_i$,$\delta_{ij}$,$D_i$ 和 M_i 均取正值,U_i 表示我国对国内和国外同类产品的消费组合效用;D_i 表示中国消费国产的数量;M_i 表示中国进口第 i 个地区或第 i 种进口产品的数量;δ_i 表示偏好系数,且 $0 < \delta_i < 1$;σ_i 表示进口量与国内消费量的不变替代弹性 σ_i,即 Armington 弹性;p_i^D 表示国内价格;p_i^M 表示中国进口第 i 个地区或第 i 种进口产品的价格。根据效用最大化要求及

假设,国内外消费的边际替代率经推导如下式:

$$\frac{M_i}{D_i} = \left(\frac{p_i^D}{p_i^M}\right)^{\sigma_i}\left(\frac{\delta_i}{1-\delta_i}\right)^{\sigma_i}$$

对两边分别数变换,可得:

$$\ln\frac{M_i}{D_i} = \sigma_i \ln\left(\frac{p_i^D}{p_i^M}\right) + \sigma_i \ln\left(\frac{\delta_i}{1-\delta_i}\right)$$

令 $y = \ln\frac{M_i}{D_i}, x = \ln\left(\frac{p_i^D}{p_i^M}\right), \alpha = \ln\left(\frac{\delta_i}{1-\delta_i}\right)$;$\beta$ 表示进口 i 地区数量或第 j 种进口产品数量与国产数量的不变替换弹性 σ_i,简化表示为:

$$y = \alpha + \beta x$$

作加权最小二乘数回归分析(OLS)就可以求出进口产品的 Armington 替代弹性。

技术依赖度(Technology Dependency Level,TD)指某物项的对外进口依赖程度,替代弹性≥1 则表明该物项的替代弹性相对较大,存在很低甚至不存在技术依赖风险,可以将其技术依赖度视为 0,因此技术依赖度的计算公式设置如下,其中统一将替代弹性≥1 的物项的弹性值都记为 1,故其技术依赖度均为 0,替代弹性值 <1 的物项的技术依赖度用 1 减去替代弹性值表示,$TD \in [0,1]$。

$$\text{技术依赖度(TD)} = \begin{cases} 1 - \text{替代弹性值}, 0 \leqslant \beta < 1 \\ 0, \beta \geqslant 1 \end{cases}$$

(2)技术风险发生概率—技术管制(TC)

技术管制层面,考虑到美国商业管制清单(CCL)是当前内容较为全面且较权威的管制文件,且通过 CCL 可以快速定位中国与美国的差距,因此提取美国商业管制清单中的技术管制信息分析技术的管制情况。若某项技术遭受管制,则该技术的技术管制度赋值为 1,若某项技术未遭受管制,则将该技术的技术管制度赋值为 0,用 0 - 1 变量表示技术管制程度(Technical Control Level,TCL)。

技术管制度计算公式如下:

$$\text{技术管制度}(TC) = \begin{cases} 1, \text{技术遭受管制} \\ 0, \text{技术未遭受管制} \end{cases}$$

(3)技术风险对冲承受力—技术差距(TG)

技术差距层面,首先计算各受管制技术的技术优势指数(RTCA)。利用某国家或地区在某时期内不同技术领域的发明专利授权量进行技术比较优势指数分析,从而揭示该国家或地区的技术比较优势[29]。RTCA 计算公式如下:

$$RTCA = (X_{ij}/\sum_i X_{ij})/(\sum_j X_{ij}/\sum_{ij} X_{ij})$$

其中,X_{ij} 表示 i 国 j 技术领域的发明专利授权数量,$\sum_i X_{ij}$ 表示 i 国所有发明专利授权数量,$\sum_j X_{ij}$ 表示所有国家在 j 技术领域的发明专利授权数量,$\sum_{ij} X_{ij}$ 表示所有国家在全部技术领域的发明专利授权数量。

基于以上理论基础,技术差距度(Technology Gap Level,TG)的测算方法如下:计算相关管制项目的技术优势指数 RTCA,根据日本贸易振兴会的显性比较优势指数 4 等级分法[30],RTCA <1 的技术均为劣势技术,其中 RTCA <0.8 为较强劣势技术,0.8 <RTCA <1 为较弱劣势技术,RTCA≥1 的技术为持平或优势技术。技术差距度指某技术与国际领先技术的差距程度,技术优势指数 RTCA >1 则表明我国该技术相对处于技术优势,存在很低甚至不存在技术差距风险,可以将其技术差距度视为 0,因此技术依赖度的计算公式设置如下,统一将 RTCA≥1 的技术差距度都记为 0,将 <1 的技术差距度用 1 减去 RTCA 的值表示,$TG \in [0,1]$。

$$\text{技术差距度(TG)} = \begin{cases} 1 - RTCA, 0 \leqslant RTCA < 1 \\ 0, RTCA \geqslant 1 \end{cases}$$

(4)技术风险综合指数(TRV)

经过前文分析,三指标均为影响技术风险的重要因素,为兼顾计算方法的简便性及科学性,在数据标准化之后进行等权分配计算技术风险综合指数(TRV),计算公式如下:

$$TRV_i = \sum_{j=1}^{n} \omega_j x_{ij} \quad (j = 1,2,3)$$

其中,TRV_i 为第 i 项技术的技术风险值,$TRV_i \in [0,1]$,$\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = \frac{1}{3}$,$x_{ij}$ 为第 i 项技术的第 j 项指标得分。

根据最终得出的各项技术风险值,将技术风险等级划分为 4 个风险等级,分别为低风险、一般风险、较大风险、重大风险。具体如表 1 所示。

表 1 技术风险等级划分

Table 1 Technology risk classification

TRV	技术风险等级
[0,0.25]	低风险
(0.25,0.5]	中风险
(0.5,0.75]	高风险
(0.75,1]	极高风险

2　实证研究

半导体材料和设备作为芯片产业的重要基础,其对应的技术风险是影响芯片产业安全的关键因素,因此本以芯片产业为例进行实证。本文借鉴国家知识产权局发布的《关键数字技术专利分类体系(2023)》中的高端芯片技术专利分类体系表,得到半导体材料、设备和产品的较为完整的技术体系,以半导体材料、设备和产品为例进行实证研究,半导体设备包括光刻机、离子注入机、刻蚀设备、原子层沉积(ALD)设备、CMP 抛光机、量检测设备,半导体材料包括硅片、第四代半导体材料、光刻材料、掩膜版、溅射靶材、CMP 抛光材料、湿电子化学品、电子特气、封装基板、引线框架,半导体产品包括高端存储器、射频芯片、逻辑芯片。

2.1　技术依赖分析

技术依赖度主要是通过进口物项的替代弹性进行测度,数据来源为 2018 – 2023 年中国海关总署进出口数据库、联合国商品贸易统计数据库以及国家统计局发布的《中国统计年鉴》及工业产品产量;通过对标 HS8 位编码获取各物项的进口金额和数量,其中湿电子化学品、电子特气未找到对应数据,考虑到会影响后续技术风险值的评估,因此将这两项技术剔除。

利用 Armington 模型进行技术依赖度的计算。在进行模型计算前,先使用 Eviews10.0 对数量时间序列 y 和价格时间序列 x 进行 ADF 检验验证时间序列的平稳性,初次检验结果显示两组时间序列均不平稳,进行一阶差分处理,差分后平稳性检验结果如表 2 所示,经过一阶差分后两组时间序列都趋于平稳。

回归及检验结果如表 3 所示,β 即替代弹性值。R^2值较大且 P 值均 <0.05,拟合效果较好,通过检验,各项技术依赖度结果如图 3 所示。

半导体设备中的光刻机的技术依赖度最高为 0.8979,其次离子注入机(0.4387)、原子层沉积设备(0.3895)、刻蚀设备(0.1609)、量检测设备(0.1512)同样具有一定进口依赖度;而 CMP 抛光机的替代弹性大于 1,技术依赖度相对较低。半导体材料中光刻材料的技术依赖度最高为 0.7909,其次第四代半导体材料(0.3561)、掩膜版(0.3188)、硅片(0.1948)、CMP 抛光材料(0.0196)同样存在进口依赖;而靶材、封装基板和引线框架的替代弹性均大于 1,存在较小的技术依赖问题。半导体产品中的逻辑芯片(为 0.7190)、高端存储器(0.6996)、射频芯片(0.5680)均存在较高的技术依赖度。

表 2　进口产品一阶差分序列平稳性检验结果

Table 2　Results of the first – order difference series smoothness test

一级技术分类	二级技术分类	y(Prob)	x(Prob)
半导体设备	光刻机	0.0028	0.0057
	离子注入机	0.0011	0.0014
	刻蚀设备	0.0009	0.0008
	原子层沉积设备	0.0005	0.0110
	CMP 抛光机	0.0209	0.0076
	量检测设备	0.0007	0.0401
半导体材料	硅片	0.0038	0.0729
	第四代半导体材料	0.0021	0.0289
	光刻材料	0.0003	0.0019
	掩膜版	0.0009	0.0382
	靶材	0.0109	0.0071
	CMP 抛光材料	0.0008	0.0003
	封装基板	0.0112	0.0005
	引线框架	0.0298	0.0094
半导体产品	高端存储器	0.0482	0.0455
	逻辑芯片	0.0375	0.0007
	射频芯片	0.0002	0.0340

综上来看,技术依赖程度高的大多集中于芯片制造环节,如光刻设备、光刻材料、离子注入设备等均是芯片制造的关键工艺环节,尤其是光刻工艺,设备及材料均存在较高的技术依赖,且是替代弹性值最小的两个物项。

2.2　技术管制分析

技术管制分析从美国商业管制清单入手,对各项技术相关信息进行提取,明确各技术的受管制情况。数据来源为美国商务部于 2024 年 12 月 2 日发布的商业管制清单(CCL),通过关键词匹配及对应类目逐条比对,对清单数据进行清洗、处理,各项技术的技术管制情况如表 4 所示。

半导体设备中,除 CMP 抛光机外均被列入管制清单;半导体材料中,光刻材料、第四代半导体材料、硅片、掩膜版遭受管制,技术管制度为 1,靶材、CMP 抛光材料、封装基板和引线框架相关技术未被管制,

因此技术管制度均为 0;半导体产品中,高端存储器、逻辑芯片及射频芯片均遭受管制,技术管制度均为 1。

表 3 回归结果及检验

Table 3 Regression results and tests

一级技术分类	二级技术分类	β	R^2	Prob(F - statistic)
半导体设备	光刻机	0.1021	0.7302	0.0019
	离子注入机	0.5613	0.7291	0.0001
	刻蚀设备	0.8391	0.7729	0.0002
	原子层沉积设备	0.6105	0.9801	0.0021
	CMP 抛光机	2.1001	0.7298	0.0305
	量检测设备	0.8488	0.8067	0.0007
	硅片	0.8052	0.8111	0.0003
	第四代半导体材料	0.6439	0.7299	0.0015
半导体材料	光刻材料	0.2091	0.9010	0.0418
	掩膜版	0.6812	0.8138	0.0082
	靶材	1.4322	0.8821	0.0102
	CMP 抛光材料	0.9804	0.7019	0.0047
	封装基板	3.4933	0.9160	0.0004
	引线框架	2.1903	0.7219	0.0249
半导体产品	高端存储器	0.3004	0.8302	0.0019
	逻辑芯片	0.2810	0.9475	0.0009
	射频芯片	0.4320	0.8999	0.0384

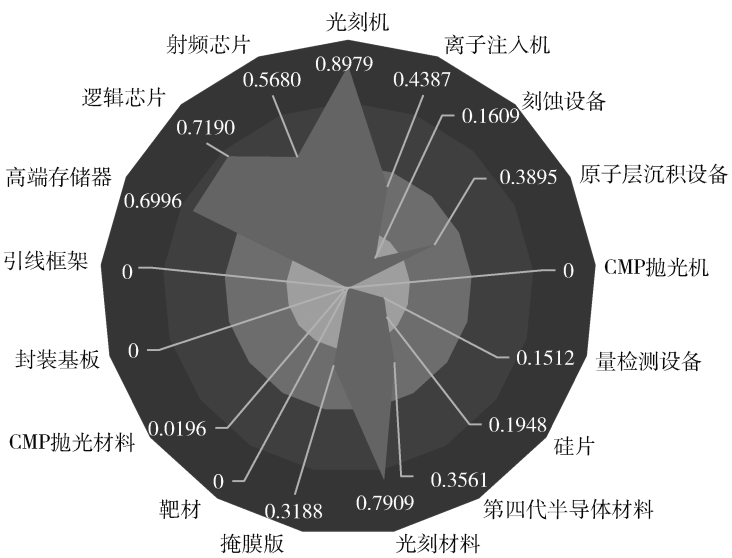

图 3 技术依赖度计算值

Figure 3 Calculated value of technology dependency

半导体设备中,除 CMP 抛光机外均被列入管制清单;半导体材料中,光刻材料、第四代半导体材料、硅片、掩膜版遭受管制,技术管制度为 1,靶材、CMP 抛光材料、封装基板和引线框架相关技术未被管制,

因此技术管制度均为 0;半导体产品中,高端存储器、逻辑芯片及射频芯片均遭受管制,技术管制度均为 1。

表 4　技术管制度值

Table 4　Value of technology control

一级技术分类	二级技术分类	技术管制度
半导体设备	光刻机	1
	离子注入机	1
	刻蚀设备	1
	原子层沉积设备	1
	CMP 抛光机	0
	量检测设备	1
半导体材料	硅片	1
	第四代半导体材料	1
	光刻材料	1
	掩膜版	1
	靶材	0
	CMP 抛光材料	0
	封装基板	0
	引线框架	0
半导体产品	高端存储器	1
	逻辑芯片	1
	射频芯片	1

2.3　技术差距分析

基于技术优势指数(RTCA)公式对各项技术进行技术差距度的测算,数据来源为 Incopat 数据库,借鉴国家知识产权局的高端芯片技术专利分类体系中提供的各项技术的国际专利分类,结合 IPC 分类号和关键词及其下位词构建专利检索式,检索获取相关专利指标数据,最终结果如图 4 所示。

半导体设备中,光刻机、离子注入机、原子层沉积设备的 RTCA 均小于 0.8,为较强劣势技术,技术差距大,其中光刻机(0.8967)的技术差距最大;刻蚀设备、CMP 抛光机、量检测设备的 RTCA 大于 0.8,技术差距相对较小。半导体材料中,光刻材料(0.7161)及第四代半导体材料(0.7090)的技术差距度位居前两名,技术差距大;靶材、CMP 抛光材料、封装基板、引线框架的 RTCA 均大于 0.8,目前与国外领先技术水平差距较小。半导体产品中,高端存储器、逻辑芯片、射频芯片的技术差距度分别为 0.7902、0.8016、0.7762,半导体产品整体存在较大技术差距。

2.4　技术风险综合评估分析

经过最终计算,得到各项技术的技术风险值(TRV),并对其进行技术风险等级划分如图 5 所示。

半导体设备中,存在极高风险的为光刻机,光刻机一直以来是我国集成电路产业的瓶颈,对于 EUV

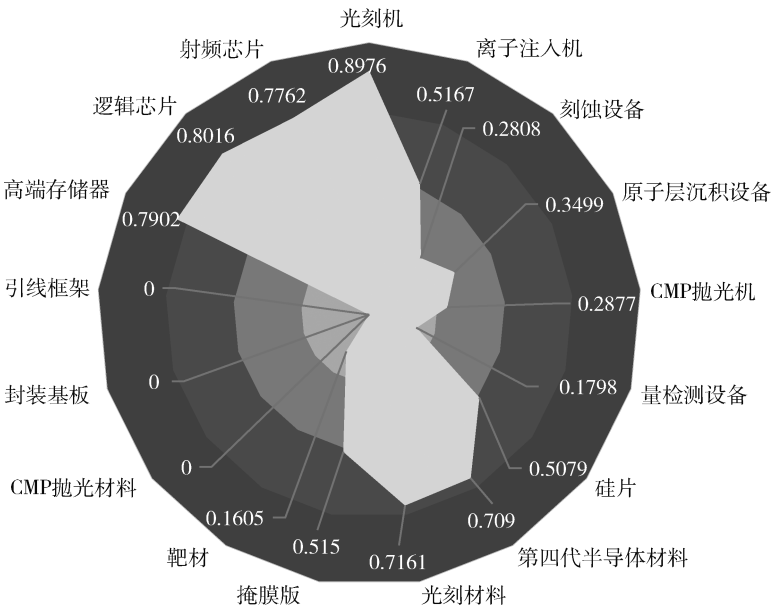

图 4　技术差距度计算值

Figure 4　Calculated value of technology gap degree

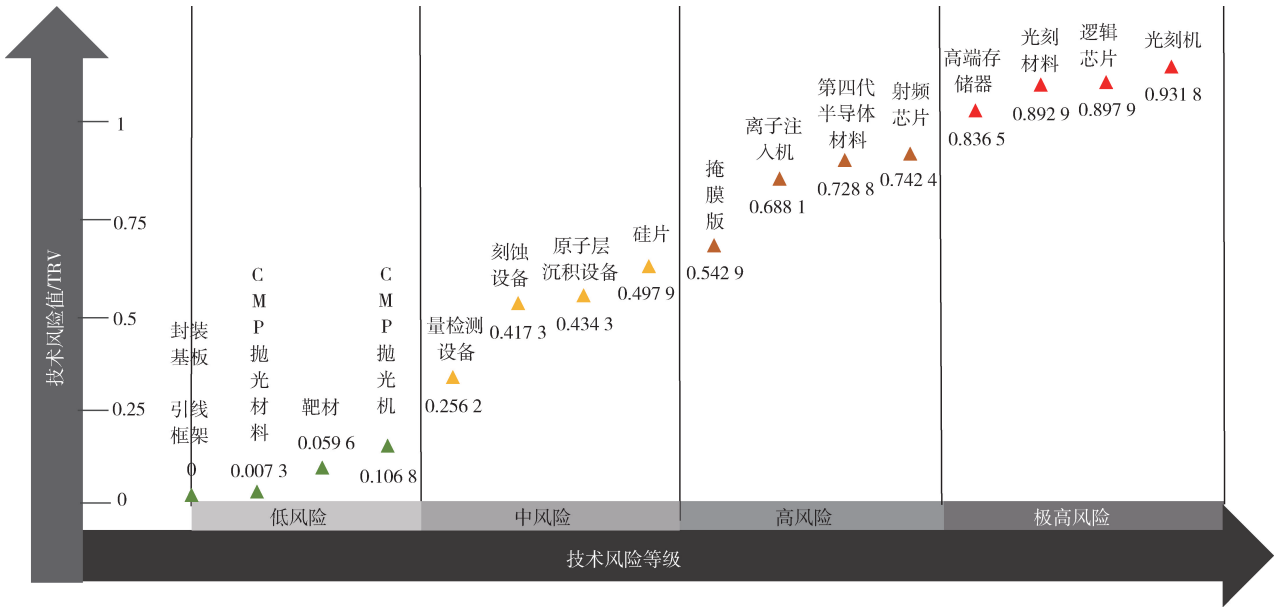

图 5　技术风险值

Figure 5　Technical value at risk

光刻机更是高度依赖进口,具有很低的技术自主可控性,对国家科技安全和经济安全造成威胁。离子注入机为高风险,存在较高的技术依赖度,我国进口先进离子注入机的难度加大,在 28nm 制程中我国虽有一定的国产替代率,但仍与国外领先水平有一定距离。刻蚀设备、原子层沉积设备、量检测设备为中风险。近年来我国刻蚀设备的国产替代率逐渐提高,对外技术依赖程度逐渐减小,但对于高精度技术仍面临管制;国内对 ALD 技术的引进相对较晚,但近年来技术实力得到了显著提升,在成膜质量、沉积速率等方面已经取得了显著进步,但技术管制程度较高,在高端设备、核心材料和工艺等方面仍存在风险;量检测设备中前道量检测设备市场规模呈现稳步增长态势,但高端技术和核心零部件仍严重依赖进口。CMP 抛光机为低风险,CMP 抛光机的国内厂商在设备精度、稳定性以及智能化控制等方面不断优化,逐渐缩小了与国际领先水平的差距。

半导体材料中,光刻材料为极高风险,与国内日益增长的光刻胶需求相比,光刻胶的国产化严重不足,同时遭受技术管制,适用于不同工艺节点的高稳定性、高分辨光刻材料与国外存在较大技术差距。第四代半导体材料、掩膜版为高风险,第四代半导体材料主要以金刚石、氧化镓、锑化物为代表,当前全球氧化镓材料研究进展缓慢,仅日本实现了量产,我国国产能力低,同时存在较大技术差距,存在较高风险;掩膜版技术依赖度高,对于高精度产品落后于国际先进水平,随着半导体功能的进步,对于掩膜版的层数及套刻精度也提出了更高的要求,存在潜在高风险。硅片为中风险,近年来我国大尺寸半导体硅片国产化进程加速,但我国 12 英寸硅片企业起步晚、整体规模偏小,仍存在中等级风险;CMP 抛光材料、靶材、封装基板、引线框架为低风险,未来应继续进行技术创新,继续保持竞争优势。

半导体产品中,高端存储器、逻辑芯片为极高风险,高端存储器由于美国 2024 年最新实施的对于高带宽内存(HBM)和高端动态随机存取存储器(DRAM)的技术管制政策的出台,相关新兴存储技术的技术风险持续走高;逻辑芯片中 CPU、GPU 由于复杂的设计和技术要求,一直是我国的技术短板,当前人工智能大模型高算力的趋势下,逻辑芯片的发展存在极高风险。射频芯片为高风险,射频芯片未来将向更高频率、更低功耗、更高集成度的方向发展,但当前我国射频芯片的技术水平较难实现高精度国产替代,同时存在技术管制,具备高风险属性。

3　结论与启示

本研究提出基于“风险源 – 风险发生概率 – 风险对冲承受能力”的风险评估框架,构建出“技术依赖 – 技术管制 – 技术差距”三因素视角下的技术风

险评估模型(T – DCG 模型),并对技术依赖、技术管制、技术差距指标进行量化,综合计算技术风险值(TRV),以此进行技术风险等级评估,将技术风险划分为低风险、中风险、高风险、极高风险 4 个等级。以半导体设备、材料、产品为例进行了实证研究,经过技术风险评估模型计算,光刻机、光刻材料、逻辑芯片、高端存储器为极高风险,射频芯片、第四代半导体材料、离子注入机、掩膜版为高风险,硅片、原子层沉积设备、刻蚀设备、量检测设备为中风险,CMP 抛光机、CMP 抛光材料、靶材、封装基板、引线框架为低风险。

对比以往研究体系,本文有如下理论贡献。第一,为技术风险评估提供新的理论视角。基于以往风险理论研究,提出“风险源—风险发生概率—风险对冲承受力”的技术风险评估框架,并构建基于“技术依赖 – 技术管制 – 技术差距”视角的技术风险评估理论模型,为技术风险评估研究作出新的理论贡献。第二,构建技术风险定量评估方法体系。本文尝试提出技术风险评估量化方法体系,测度技术依赖度、技术管制度、技术差距度三指标数据,客观计算技术风险值并判定技术风险等级,为技术风险评估方法体系建设提供借鉴。第三,丰富技术层面安全风险评估的微观研究。当前科技安全评估预警研究多集中于包含政策、人才、技术等较为宏观层面的描述性分析,本研究深入当前较为缺乏的具体技术层面的安全风险评估,具有较强的可扩展性。

本研究根据量化评估结果对技术风险进行了分级,可据此采取针对性的措施,建立防范化解技术风险的应对机制。一是对于极高风险技术,应整合资源,加大政策、资金等扶持力度,满足相关技术周期长、投入高、难度大的需求,尤其要强化企业创新主体的地位,构建产学研紧密结合的联合体,加速技术攻关和快速应用。二是对于高风险技术,应定期监测主要国家技术管制动向,及时调整技术封锁严重的技术的对外合作方向与策略,对于管制程度较低的技术要加强国际合作,针对具体差距点前瞻布局存在较大差距技术的攻关对策。三是对于中风险技术,及时评估技术短板,寻求技术依赖、技术管制、技术差距等方面的潜在突破点,努力追赶国际先进水平,缩小技术差距,加强自主知识产权的积累与应用,降低对外技术依赖。四是对于低风险技术,应继续保持当前发展态势,进一步扩大市场占有率,持续进行技术创新,提升技术精度,争取迈向全球价值链高端。

由于数据可得性及文章篇幅限制,本文存在一定的局限性,未来需进一步深化研究。一是本文使用的数据主要包括开源的进出口海关数据、出口管制数据及专利数据,这些数据在学术研究的使用中具有一定滞后性,一定程度上可能也会造成风险评估结果的滞后性。二是本文仅对半导体材料、设备及主要产品进行了实证研究,未来可进一步应用于其他技术领域,在实践中进一步优化评估方法。

参考文献:

[1] 中共中央文献研究室. 习近平关于科技创新论述摘编[M]. 北京:中央文献出版社,2016:46. Literature Research Office of the Central Committee of the Communist Party of China. Excerpts from Xi Jinping's Discourse on Science and Technology Innovation [M]. Beijing: Central Literature Press,2016:46.

[2] 新华社. 中共中央关于进一步全面深化改革推进中国式现代化的决定[EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/202407/content_6963770.htm. 2025 – 01 – 16. Xinhua News Agency. Decision of the Central Committee of the Communist Party of China on Further Comprehensively Deepening Reform and Promoting Chinese – style Modernization [EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/202407/content_6963770.htm. 2025 – 01 – 16.

[3] 张丽玮,郑彦宁. 高新技术项目技术风险评估体系构建研究[J]. 科学管理研究,2014,32(2):36 – 39. Zhang L W, Zheng Y N. Research on the construction of technology risk assessment system for high – tech projects [J]. Scientific Management Research, 2014, 32(2):36 – 39.

[4] 郑彦宁,张丽玮. 高新技术项目技术风险评估研究(Ⅰ)——技术风险模型构建和风险因素分析[J]. 科技管理研究,2014,34(3):240 – 246. Zheng Y N, Zhang L W. Research on technology risk assessment of high – tech projects(Ⅰ) – technology risk model construction and risk factor analysis[J]. Science and Technology Management Research,2014,34(3):240 – 246.

[5] 迟宝山,李永泰,李军. 基于熵权—双基点研制技术风险评估方法研究[J]. 科技进步与对策,2006(10):131 – 133. Chi B S, Li Y T, Li J. Research on technology risk assessment method based on entropy right – dual base point development[J]. Science and Technology Progress and Countermeasures, 2006(10): 131 – 133.

[6] 曲麒富,王崑声,马宽,等. 技术成熟与技术风险评估方法在我国的适用性研究[J]. 科学决策,2015(7):69 – 78. Qu Q F, Wang K S, Ma K, et al. Research on the applicability of technology maturity and technology risk assessment methods in China[J]. Science Decision Making,2015(7):69 – 78.

[7] 李牧南,王良,赖华鹏. 基于深度学习和多源数据的自动驾驶技术风险识别[J]. 科研管理,2024,45(11):160 – 175. Li M N, Wang L, Lai H P. Automatic driving technology risk identification based on deep learning and multi – source data[J]. Research Management,2024,45(11):160 – 175.

[8] Roslyng M, Eskjaer M F. Mediatised risk culture: News coverage of risk technologies[J]. Health Risk & Society,2017,19(3 – 4):112 – 129.

[9] Da Ponte A, Leon G, Alvarez I. Technological sovereignty of the EU in advanced 5G mobile communications: An empirical approach[J]. Telecommunications Policy, 2023,47(1):102459.

[10] 徐宗煌,蔡鸿宇,张伟,等. 我国科技安全风险评估指标体系与模型构建研究[J]. 情报科学,2023,41(12):165 – 173,182. Xu Z H, Cai H Y, Zhang W, et al. Research on the construction of index system and model of China's scientific and technological security risk assessment[J]. Intelligence Science, 2023, 41(12): 165 – 173,182.

[11] 刘晓峰,胡高强,范兆媛,等. 科技安全风险监测预警体系构建研究[J]. 中国工程科学,2024,26(3):186 – 195. Liu X F, Hu G Q, Fan Z Y, et al. Research on the construction of scientific and technological security risk monitoring and early warning system[J]. China Engineering Science,2024,26(3):186 – 195.

[12] Frolov A. Problems of coordination of science and technology, innovation and industrial policy in Russia[J]. Journal of the New Economic Association,2013,20:133 – 147.

[13] Haynes J. Risk as an economic factor[J]. The Quarterly Journal of Economics,1895,9(4):409 – 449.

[14] Willett A H. The economic theory of risk and insurance [J]. Revue Économique, 1955,6(3).

[15] 王波. 我国财产保险公司的风险管理模型研究[D]. 河海大学,2007. Wang B. Research on risk management modeling of property insurance companies in China [D]. Hehai University,2007.

[16] 高建明,杨建安. 技术风险评估研究[J]. 科技进步与对策,2001(2):129 – 131. Gao J M, Yang J A. Research on technology risk assessment[J]. Science and Technology Progress and Countermeasures, 2001(2): 129 – 131.

[17] 郭瑜桥,王树恩,王晓文. 技术风险与对策研究[J]. 科学管理研究,2004(2):60 – 63. Guo Y Q, Wang S E, Wang X W. Research on technology risk and countermeasures[J]. Science Management Research, 2004(2):60 – 63.

[18] 陈宝明. 高度警惕并有效防范化解科技领域重大风险[EB/OL]. http://theory. people. com. cn/n1/2019/0315/c40531 – 30977928. htm. 2019 – 03 – 15. Chen B M. High vigilance and effective prevention and resolution of major risks in the field of science and technology [EB/OL]. http://theory. people. com. cn/n1/2019/0315/c40531 – 30977928. htm. 2019 – 03 – 15.

[19] 张治河,苗欣苑. “卡脖子”关键核心技术的甄选机制研究[J]. 陕西师范大学学报(哲学社会科学版),2020,49(6):5 – 15. Zhang Z H, Miao X Y. Research on the selection mechanism of “necked” key core technologies [J]. Journal of Shaanxi Normal University (Philosophy and Social Science Edition),2020,49(6): 5 – 15.

[20] 汤志伟,李昱璇,张龙鹏. 中美贸易摩擦背景下“卡脖子”技术识别方法与突破路径:以电子信息产业为例[J]. 科技进步与对策,2021,38(1):1 – 9. Tang Z W, Li Y X, Zhang L P. Identification method and breakthrough path of “necklace” technology in the context of trade friction between China and the United States: An example of electronic information industry [J]. Science and Technology Progress and Countermeasures,2021,38(1):1 – 9.

[21] 陈劲,阳镇,朱子钦. “十四五”时期“卡脖子”技术的破解:识别框架、战略转向与突破路径[J]. 改革,2020(12):5 – 15. Chen J, Yang Z, Zhu Z Q. Cracking the “Necklace” technology in the “14th Five – Year Plan” period: Identification framework, strategic shift and breakthrough path[J]. Reform,2020(12):5 – 15.

[22] 刘志鹏,代涛,李晓轩,等. 技术经济安全的概念与内涵——从新兴学科建设的视角[J]. 科学学研究,2018,36(3):410 – 417. Liu Z P, Dai T, Li X X, et al. The concept and connotation of techno – economic security – from the perspective of emerging discipline construction[J]. Studies in Science of Science,2018,36(3):410 – 417.

[23] 代涛,刘志鹏,甘泉,等. 技术经济安全评估若干问题的思考[J]. 中国科学院院刊,2020,35(12):1448 – 1454. Dai T, Liu Z P, Gan Q, et al. Reflections on some issues of technical and economic security assess-

ment[J]. Proceedings of the Chinese Academy of Sciences,2020,35(12):1448 – 1454.

[24] 陈捷,吴仲琦,代涛. 未来技术风险识别框架研究——基于技术经济安全视角[J]. 中国科学院院刊,2023,38(4):570 – 579. Chen J, Wu Z Q, Dai T. Research on future technology risk identification framework – Based on technology economic security perspective[J]. Proceedings of the Chinese Academy of Sciences,2023,38(4):570 – 579.

[25] Kaplan S, Garrick B J. On the quantitative definition of risk[J]. Risk Analysis,1981, 1(1):11 – 27.

[26] Lo A W. The Three P's of total risk management[J]. Financial Analysts Journal, 1999(55):13 – 26.

[27] 许统生,廖秋敏,涂远芬. 中国工业品宏微观 Armington 弹性:估算、应用与决定因素[J]. 世界经济,2018,41(2):71 – 94. Xu T S, Liao Q M, Tu Y F. Macro and micro Armington elasticities of industrial goods in China: Estimation, application and determinants[J]. World Economy,2018,41(2):71 – 94.

[28] Armington P S. A theory of demand for products distinguished by place of production[J]. International Monetary Fund Staff Papers,1969,16(1):159 – 176.

[29] 王婷,宋河发,曲婉. 主要国家商业方法专利的比较优势指数监测[J]. 中国科技论坛,2011(6):144 – 150. Wang T, Song H F, Qu W. Comparative advantage index monitoring of business method patents in major countries[J]. China Science and Technology Forum, 2011(6):144 – 150.

[30] 俞文华. 职务发明专利、比较优势和封锁动态——基于国家知识产权战略实施的视角[J]. 科学学研究,2010,28(4):515 – 522. Yu W H. Patents for job inventions, comparative advantage and blocking dynamics – Based on the perspective of national intellectual property strategy implementation[J]. Studies in Science of Science,2010,28(4):515 – 522.

Methodology and empirical research on technology risk assessment under the "dependency – regulation – gap" perspective

HE Xiao[1,2], DAI Tao[1,2], CHENG Yan – lin[1], CHEN Jie[1]

(1. Institute of Science and Technology Strategy Consulting, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. School of Public Policy and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Amidst the accelerating evolution of unprecedented global transformations unfolding over a century and the profound recalibration of international power structures, the imperative of technological security as a bulwark against national security vulnerabilities has attained critical significance; technological risk, constituting a fundamental determinant impacting the integrity of national technological ecosystems, renders the establishment of a resilient and comprehensive technological risk assessment architecture fundamentally indispensable for the preemptive identification, mitigation, and ultimate resolution of major systemic threats; effectively neutralizing technological hazards performs an irreplaceable function in the overarching mission of national security preservation, serving not only to shield national technological sovereignty from external coercion and undue influence but also to strategically foster the judicious allocation of resources and the optimization of innovation trajectories across the technological landscape; this pressing context consequently generates an urgent, non – deferrable necessity for the concurrent advancement of indigenous innovation capacities and the meticulous construction of a sophisticated technological risk assessment and preemptive warning framework. Accordingly, anchored firmly in the established tenets of risk management theory, this research erects a holistic technological risk assessment framework structured upon the interconnected triad of "Risk Source – Risk Occurrence Probability – Risk Hedging Resilience," introduces a pioneering tripartite analytical paradigm—the Technology Dependence – Control – Gap (T – DCG) Model—predicated on the critical vectors of Technology Dependence (TD), Technology Control (TC), and Technology Gap (TG), and rigorously elucidates the complex causal pathways and synergistic mechanisms through which these three constitutive elements collectively modulate and amplify the aggregate technological risk exposure; proceeding from this conceptual and methodological groundwork, a systematic quantitative apparatus for technological risk measurement is meticulously engineered, commencing with the deployment of the Armington elasticity of substitution model to compute the Technology Dependence Index (TDI), subsequently defining and operationalizing the Technology Control Index (TCI) by leveraging the regulatory scope and restriction severity codified within the U. S. Commerce Control List (CCL), then introducing and

(下转第 991 页)