

最低工资、工业自动化与技能溢价

谢杰¹ 过重阳 陈科杰 郭佳

【摘要】在制造业自动化时代，旨在促进公平收入的最低工资制度是否依然有效，学术界在理论和实践层面对此的研究尚待发掘。提高最低工资可能会激起涟漪效应，即机器替代工人或高技能工人替代低技能工人，政策制定者可能更为关注涟漪效应对技能溢价会有怎样的影响。本文将最低工资和自动化纳入以任务为基础的理论模型，为研究制造业自动化情景下最低工资对技能溢价的影响问题提供了一个比较清晰的分析框架。本文利用中国微观和中观数据，检验了工业自动化中最低工资对技能溢价的影响。研究发现：①当最低工资提高显著缩减技能溢价时，最低工资提高在不同自动化程度行业中激起的涟漪效应会显著强化最低工资对技能溢价的缩减；②证实了涟漪效应的存在，从而补充了最低工资对技能溢价直接影响之外的部分。异质性分析表明，涟漪效应对不同制造行业、不同企业技术类型、不同要素密集度、不同注册类型、不同贸易类型、不同地区等的技能溢价有着强弱不同的缩减作用。本文的研究为完善自动化时代的最低工资制度提供了经验证据和理论基础，进一步丰富了在产业链现代化进程中实现“共同富裕”的政策工具箱。

【关键词】最低工资 工业自动化 涟漪效应 技能溢价

【中图分类号】F424 **【文献标识码】**A **【文章编号】**1006-480X (2022) 09-0102-19

DOI:10.19581/j.cnki.ciejournal.2022.09.006

一、引言

随着全球人工智能、机器人及其他形式的自动化新技术迅速发展，中国工业自动化也在高速发展，2021年中国工业自动化市场规模达到 2530 亿元。中国工业机器人主要安装在制造业部门，其中汽车制造、电子电气、金属制造和化工业的机器人安装量占制造业部门机器人安装量的 90% 以上^①。与此同时，劳动力市场也在发生根本性变化，自动化增加对高技能工人的需求，劳动力供需变动传导影响工资水平，产生技能溢价 (Acemoglu, 1998)。劳动力市场上的技能溢价是造成收入分配不平等的重要原因 (郭凯明等, 2020)。为减少收入分配不平等，最低工资制度已被越来越多国家所采用。中国在 2004 年颁布《最低工资规定》、2008 年施行《中华人民共和国劳动合同法》，强化了最低工资制度。党的十九大报告指出，必须始终把人民利益摆在至高无上的地位，让改革发展成果更多更公平惠及全体人民，朝着实现全体人民共同富裕不断迈进。以自动化为主要特征之一的产业链现代化会把社会财富“蛋糕”做得更大，而最低工资等分配政策是为了把社会财富“蛋糕”分得更为公平，从而在产业链现代化进程中实现“共同富裕”愿景。

¹收稿日期：2022-05-29

基金项目：研究阐释党的十九届五中全会精神国家社会科学基金重大项目“驱动产业链供应链现代化水平提升的关键因素研究”（批准号 21ZDA023）。

作者简介：谢杰，浙江工商大学经济学院教授，博士生导师，管理学博士；过重阳，浙江工商大学经济学院硕士研究生；陈科杰，浙江工业大学经济学院博士研究生；郭佳，浙江工商大学经济学院博士研究生。

通讯作者：谢杰，电子邮箱：x_j3027@sina.com。感谢匿名评审专家和编辑部的宝贵意见，文责自负。

²①具体份额数据参见《中国工业经济》网站 (<http://ciejournal.ajcass.org>) 附件。

目前关于最低工资、自动化与技能溢价相关的文献大致分为四类：第一类文献是最低工资对劳动力市场的影响。有研究认为，提高最低工资会在企业内部形成中高技能工人对低技能工人的挤压（孙楚仁等，2020）。最低工资的提升还可能促使企业加快自动化进程，通过使用工业机器人以替代部分劳动力（Fan et al., 2021）。也有研究认为，最低工资政策不会减少就业，反而存在倒逼机制，提升生产率并缓解分配不公，有利于整体福利提升和社会稳定（蒋灵多和陆毅，2017）。第二类文献是技能溢价测度与影响因素研究。技能溢价测算方法主要有两种：一是基于平均工资测算企业技能溢价（陈波和贺超群，2013）；二是根据各行业科技人才占比测度技能溢价（陆雪琴和文雁兵，2013）。早期研究较多从技能偏向性技术进步角度对技能溢价展开分析，而后研究视野逐步拓宽，开始探讨全球价值链、人工智能等对技能溢价的影响（余东华和韦丹琳，2021）。第三类文献是基于劳动力市场视角分析自动化影响。工业机器人应用会冲击传统生产要素供需。一方面，从劳动力总量角度，Frey and Osborne（2017）探讨与自动化相关的工作易感性；中国工业机器人渗透度提高1%，企业对劳动力需求下降0.18%（王永钦和董雯，2020）。另一方面，细化至劳动力内部结构，基于“资本—技能”互补理念，自动化促进高技能工人需求的提升和低技能工人的日渐淘汰（孔高文等，2020），导致劳动力两极分化（Acemoglu and Restrepo, 2020）。第四类文献是工业自动化中最低工资的影响研究。这类文献较少，也是与本文主题最为贴近的一类。为减少自动化带来的经济不平等，学者讨论了各种政策工具（Costinot and Werning, 2018; Guerreiro et al., 2022）。Aaronson and Phelan（2019）发现，最低工资导致日常认知任务密集型职业的就业相对下降。在工业自动化情景下，Eckardt（2021）从理论层面探讨最低工资对总产出、就业、要素价格和各种收入分配措施的影响，但未用经验数据去检验其命题、假说等。本文研究发现，Eckardt（2021）的最低工资对技能溢价影响的推论与其最低工资对总产出和低技能就业影响的命题是矛盾的，在缺少涟漪效应的前提假设下，其推论结果不明确。再者，自动化程度异质性行业的最低工资会产生涟漪效应，即机器替代工人或高技能工人替代低技能工人，现有实证文献忽视了涟漪效应对技能溢价的影响。因此，本文结合Acemoglu and Restrepo（2018）基于任务的框架，修正Eckardt（2021）的理论模型，从而为在中国工业自动化情景下，利用高度细化的微观、中观和宏观匹配数据，实证研究最低工资及其涟漪效应对技能溢价的影响问题，提供了清晰的理论分析框架。

本文可能的边际贡献体现在：①理论方面，在Eckardt（2021）的理论模型基础上进行修正和简化，为在工业自动化背景下研究最低工资及其涟漪效应对技能溢价的影响提供分析框架。②经验方面，将制造企业微观数据与城市等层面中观、宏观数据匹配，针对自动化程度异质性行业中最低工资激发的机器替代工人或高技能工人替代低技能工人的涟漪效应，就其对技能溢价的影响进行实证分析，补充最低工资对技能溢价直接影响之外的部分。③拓展最低工资和自动化这两支文献的研究范围。既有文献大多单独研究最低工资和自动化各自对劳动力市场的影响，忽略工业自动化情景中最低工资对收入差距的影响。本文在现有文献基础上力图构建科学的技能溢价测度方法，拓展理论分析框架、构建经验研究方法等丰富了既有文献内容。

二、理论框架与假说提出

1. 基于生产任务的框架

首先引入基于任务的总体生产函数简化版本（Acemoglu and Restrepo, 2018）：

$$\ln Y = \int_{N-1}^N \ln y(x) dx \quad (1)$$

其中，Y 表示总产出，y(x) 是任务 x 的产出。任务在 N-1 和 N 之间实施的事实使本文能够考

考虑任务范围的变化，通过增加 N 来改变任务间隔以模拟新的、更复杂的任务创建。接着以 K 、 L 、 H 分别表示机器人、低技能工人和高技能工人的供应。存在阈值 I 和 S ($N - 1 < I < S < N$)， I 表示自动化的技术前沿，其描述利用工业机器人等技术实现自动化的任务范围； S 表示低技能工人与高技能工人间的技能差异。参考 Eckardt (2021) 的设计，任务生产函数可表示为：

$$y(x) = \begin{cases} \gamma_H(x)h(x) + \gamma_L(x)l(x) + \gamma_K(x)k(x), & \text{if } x \in [N - 1, I] \\ \gamma_H(x)h(x) + \gamma_L(x)l(x), & \text{if } x \in [I, S] \\ \gamma_H(x)h(x), & \text{if } x \in [S, N] \end{cases} \quad (2)$$

其中， $\gamma_H(x)$ 、 $\gamma_L(x)$ 、 $\gamma_K(x)$ 分别表示对高技能工人需求 $h(x)$ 、低技能工人需求 $l(x)$ 和机器人需求 $k(x)$ 的生产率函数。那么可由式 (2) 推得：低技能工人对机器的比较优势 $\gamma_{LK} = \gamma_L / \gamma_K$ ，高技能工人对低技能工人的比较优势 $\gamma_{mH} = \gamma_H / \gamma_L$ 。在此，用 R 表示均衡租金率（或机器成本），用 W_L 和 W_H 表示均衡低技能和高技能工资，引入具有约束力的最低工资 $W_m \in (W_L, W_0)$ 。令 $N \geq 1$ ，存在阈值 I^* 、 S^* ，其满足 $(I^*, S^*) \in (N - 1, N)$ ， $I^* < S^*$ ，且加总产出如下：

$$Y = \left(\frac{K}{I^* - N + 1} \right)^{I^* - N + 1} \left(\frac{L}{S^* - I^*} \right)^{S^* - I^*} \left(\frac{H}{N - S^*} \right)^{N - S^*} \exp \left(\int_{N-1}^{I^*} \ln \gamma_K(x) dx + \int_{I^*}^{S^*} \ln \gamma_L(x) dx + \int_{S^*}^N \ln \gamma_H(x) dx \right) \quad (3)$$

在阈值范围出现均衡：若 $x \in [N - 1, I^*]$ ，则 $l(x) = h(x) = 0$ ；若 $x \in [I^*, S^*]$ ，则 $k(x) = h(x) = 0$ ；若 $x \in [S^*, N]$ ，则 $k(x) = l(x) = 0$ ；在阈值范围的均衡点附近，才可能出现要素替代。2. 具有约束力的最低工资假设企业在《最低工资规定》施行前的低技能工人工资低于最低工资标准，该政策施行将导致该类企业不得不提高低技能工人平均工资。根据前文引入的以 W_0 为上限约束的最低工资 $W_m \in (W_L, W_0)$ ，则最低工资 W_m 满足如下不等式：

$$W_L < W_m < W_0 < W_H \quad (5)$$

将机器人、领取最低工资的低技能工人、高技能工人的需求进行加总，即对 $k(x)$ 、 $l(x)$ 、 $h(x)$ 求定积分，使其与各自对应的总供给 K 、 L_m 、 H 相等，得出供给与需求相等时市场出清条件：

$$K = \int_{N-1}^{I^*} k(x) dx, L_m = \int_{I^*}^{S^*} l(x) dx, H = \int_{S^*}^N h(x) dx \quad (6)$$

其中，机器人生产 $[N - 1, I^*]$ 内的任务，低技能工人在 $[I^*, S^*]$ 内生产，高技能工人在 $[S^*, N]$ 内生产。在新均衡中，对低技能工人的需求 L_m 相对应的阈值（边界门槛值）为 $[I^*, S^*]$ 。在式 (3) — (6) 基础上，根据 Acemoglu and Restrepo (2018) 的框架和 Eckardt (2021) 的逻辑链条，假设最终商品为标量，对任意 $K > 0$ 、 $L_m > 0$ 、 $H > 0$ ， $N \geq 1$ ， $N - 1 < I < S < N$ ，存在唯一均衡，其由阈值 (I^*, S^*) 表征，且 $N - 1 < I^* < S^* < N$ ，则对低技能工人的需求、总产出分别为：

$$L_m = B \left(\frac{1}{W_m} \right)^{\frac{1}{1-S^*+I^*}} (S^* - I^*), Y = B \left(\frac{1}{W_m} \right)^{\frac{S^*-I^*}{1-S^*+I^*}} \quad (7)$$

其中

$$B = \left\{ \left(\frac{K}{I^* - N + 1} \right)^{I^* - N + 1} \left(\frac{H}{N - S^*} \right)^{N - S^*} \exp \left(\int_{N-1}^{I^*} \ln \gamma_k(x) dx + \int_{I^*}^{S^*} \ln \gamma_l(x) dx + \int_{S^*}^N \ln \gamma_H(x) dx \right) \right\}^{\frac{1}{1 - S^* + I^*}}$$

那么，在机器人租金、最低工资、高技能工资之间，存在如下均衡关系式：

$$R = Y \left(\frac{I^* - N + 1}{K} \right), W_m = Y \left(\frac{S^* - I^*}{L_m} \right), W_H = Y \left(\frac{N - S^*}{H} \right) \quad (8)$$

最低工资及其涟漪效应对总产出和劳动力市场的影响。考虑最低工资对内生阈值（ I^* ， S^* ）的影响，即涟漪效应。当（ I^* ， S^* ） \neq （ I^* ， S^* ）时，考虑涟漪效应是必要的，因为它们依赖于自动化技术前沿阈值 I^* 、低技能工人与高技能工人的技能差异阈值 S^* 及其变化，这样可关注产出和就业的发展，即通过探索要素价格比率（租金率、最低工资和高技能工资）和收入分布的影响检验分配效应、收入分布（国民收入份额）情况。不失一般性，考虑 $N = 1$ ， $K > 0$ 、 $L_m > 0$ 、 $H > 0$ ， $0 < I < S < 1$ ，并且 $W_m \in (W_l, W_0)$ ，对式（7）、（8）求偏导并相互代入等式，整理得到如下两个不等式：

$$\frac{dL_m}{dW_m} = -\frac{1}{1 - S^* + I^*} \frac{Y}{W_m} \left(\frac{S^* - I^*}{W_m} + \frac{dI^*}{dW_m} - \frac{dS^*}{dW_m} \right) < 0 \quad (9)$$

$$\frac{dY}{dW_m} = -\frac{Y}{1 - S^* + I^*} \left(\frac{S^* - I^*}{W_m} + \frac{dI^*}{dW_m} - \frac{dS^*}{dW_m} \right) < 0 \quad (10)$$

其中，基于任务的框架求得最低工资增长可能会产生机器替代低技能工人的涟漪效应（ $dI^*/dW_m > 0$ ），即最低工资边际增加（ dW_m ）会引起自动化技术前沿阈值边际增加（ dI^* ），机器人生产可能性边界扩大，这有利于机器人对低技能和高技能工人的替代；基于任务的框架可求得最低工资增长可能会产生高技能工人替代低技能工人的涟漪效应（ $dS^*/dW_m < 0$ ），^③即最低工资边际（ dW_m ）增加会引起技能差异阈值边际减少（ dS^* ），这有利于高技能工人对低技能工人的替代；涟漪效应在式（9）、（10）中进一步强化最低工资增加对低技能工人就业和产出的消极影响。根据式（5）—（10）可知，当低技能工资从 W_l 提升到 W_m 后，最低工资 W_m 增加使低技能工人成本升高，如果阈值不在广延边界，机器人和高技能工人会替代低技能工人，这会降低对低技能工人的需求且减少产出。提升到 W_m 降低了低技能工人生产率函数 γ_l 的比较优势，刺激企业雇佣更多高技能工人并使用更多机器人。式（9）、（10）的涵义在于：提高最低工资会减少对低技能工人的需求，作为生产要素之一的低技能工人就业会因此而减少，总产出也会随之下降。

修正 Eckardt（2021）的推论，得出技能溢价对最低工资的边际反应小于 0：^④

$$\frac{d \left(\frac{W_H}{W_m} \right)}{dW_m} = -\frac{W_H}{W_m} \left(\frac{1}{W_m} + \frac{1}{S^* - I^*} \frac{dI^*}{dW_m} - \frac{1}{S^* - I^*} \frac{dS^*}{dW_m} \right) < 0 \quad (11)$$

^③①具体推导参见《中国工业经济》网站（<http://ciejournal.ajcass.org>）附件

^④②具体推导参见《中国工业经济》网站（<http://ciejournal.ajcass.org>）附件。

其中，涟漪效应在式（11）中同样存在， $dI^*/dW_m > 0$ 、 $dS^*/dW_m < 0$ ，涟漪效应也进一步强化了最低工资边际增加对技能溢价（ W_H/W_m ）的负面影响，此时技能溢价边际减少。式（11）意味着最低工资提升会缩减低技能工资和高技能工资之间的差距，即减少技能溢价。 $dI^*/dW_m > 0$ 表明，最低工资提升会引起自动化技术前沿阈值增加，机器人生产可能性边界扩大，有利于机器人对低技能和高技能工人的替代，替代会引起高技能工资下降；此时，低技能工资（ W_L ）会提升至最低工资（ W_m ），并且最低工资也在提升，这意味着涟漪效应会强化最低工资对技能溢价的负面影响。 $dS^*/dW_m < 0$ 表明，最低工资提升会引起高技能工人与低技能工人的技能差异阈值减少，又因式（7）、（8），有 $dL_m/dS^* > 0$ ，所以有利于高技能工人对低技能工人的替代。由于最低工资提升会导致总产出减少，即使高技能工人取代了低技能工人，高技能工资也会下降，那么此时涟漪效应也会强化最低工资边际增加对技能溢价的消极影响。因为只有对低技能工人的替代才会导致高技能工资的增加，但为替代低技能工人，前者的工资增长又不能超过最低工资增长。根据式（8）可知，高技能工资取决于总产出，又如式（9）、（10）所述，最低工资提升会使总产出下降，这会引起高技能工资下降。因此，如果总产出下降，即使高技能工人替代低技能工人，高技能工资也可能下降。式（11）中的逻辑是明确的，最低工资（ W_m ）上升，技能溢价（ W_H/W_m ）缩小，其中自动化技术前沿增加（ $dI^*/dW_m > 0$ ），技能差异减少（ $dS^*/dW_m < 0$ ），二者分别引起机器人、高技能工人替代低技能工人的涟漪效应；涟漪效应又进一步缩小技能溢价（ W_H/W_m ）。

3. 最低工资对技能溢价在广延边际上的作用

考虑到可自动化任务的扩展，其表现为阈值 I 增加，只关注 $I^* = I$ 情况，此时在任务 I 中机器人比低技能工人便宜。一方面，这产生成本节约效应，提高总产出，从而增加劳动力需求；另一方面，替代效应减少劳动力需求和低技能就业，因为低技能工资没有弹性，所以替代效应也减少了总产出。两种效应可以相互抵消，因此，最低工资对技能溢价在广延边际上的作用方向是模糊的。

要素收入间的再分配问题。参考 Eckardt（2021），概括出如下前提条件：生产率函数 γ 、低技能工人对机器人的比较优势 γ_{Lk} ，高技能工人对低技能工人的比较优势 γ_{mL} 都是连续可微且严格递增；在高 N 任务中，高技能工人相对于机器人和低技能工人具有比较优势，低技能工人相对于机器人具有比较优势， γ_{mL} 大于 1 的特性保证高技能工资始终大于低技能工资。

在递增的生产率函数以及高技能工人具有比较优势的前提条件下，可进一步设想这样的情景：低技能工人收入占国民收入的比重 Se_L 在 W_m 的变化过程中是非增的，即 $dSe_L/dW_m \leq 0$ ；高技能工人收入占国民收入的比重 Se_H 在 W_m 的变化过程中是非减的，即 $dSe_H/dW_m \geq 0$ 。随着低技能工人收入占国民收入的比重下降，一些低技能工人可能会失业。当最低工资 W_m 接近 W_0 ，低技能就业接近 0， Se_L 也会接近 0。那么可考虑预期低技能工资、高技能工资分别为：

$$(1-u)W_m = \frac{L_m}{L} W_m = \frac{Se_L Y}{L}; W_H = \frac{Se_H Y}{H} \quad (12)$$

其中， u 为低技能工人的失业率。那么在满足此前的假设条件下，得到如下不等式

$$\frac{d\left(\frac{W_H}{(1-u)W_m}\right)}{dW_m} = \frac{L}{H} \frac{1}{Se_L^2} \left(Se_L \frac{dSe_H}{dW_m} - Se_H \frac{dSe_L}{dW_m} \right) \geq 0 \quad (13)$$

式(13)说明在最低工资引起的国民收入份额变化影响下,最低工资增长不会缩减技能溢价。增加最低工资会减少要素价格的不平等,也会提高国民收入的不平等,这意味着,二者存在此消彼长。与式(11)相比,式(13)等号左侧的失业率 u 以及低技能工资和高技能工资占国民收入份额 Se_L 、 Se_H 都是宏观因素,更能体现最低工资对技能溢价在广延边际上的影响。

本文在简约模型中用最低工资与基期行业自动化程度交互项代表最低工资在自动化程度各异行业且存在技能差异的样本中激起的涟漪效应。根据前文所述,涟漪效应被理解为最低工资在存在技能差异的自动化程度各异行业引发的连锁反应。因此,基于上述分析,本文提出:

假说 1: 在工业自动化情景中,最低工资对技能溢价的影响是不确定的;最低工资在自动化程度异质性行业产生涟漪效应,即机器替代工人或高技能工人替代低技能工人;最低工资在有技能差异的自动化程度异质性行业中引发的涟漪效应会强化最低工资对技能溢价的影响。

不同行业自动化存在结构差异,有些行业企业会使用更多的机器人,例如,在汽车企业内部的固有生产任务上,其更可能实施自动化以提高生产效率,这是发生在集约边际的自动化。出于就业保护的考虑,在劳动密集型行业,实施自动化完成新任务的企业不会很多,即发生在广延边际的自动化不会太多。如前文所述,在工业自动化情景中,最低工资对技能溢价的影响是不确定的,因此,将分析范围限定在集约边际,本文提出:

假说 2: 在自动化程度异质性行业,最低工资会缩小集约边际发生自动化的企业技能溢价。

4. 在深度自动化、技能深化、技能广化情景下,最低工资对技能溢价的作用

集约边际自动化意味着生产率提高,也被称为深度自动化。深度自动化产生节约成本效应,总产出增加。但机器也会替代低技能工人,降低对低技能工人需求,抵消产出效应,这样对低技能就业的影响是模糊的。集约边际自动化提高总产出、机器租金率和高技能工资。如果低技能工资被最低工资所限定,低技能工资与其他要素价格间不平等会增加,也包括技能溢价增长。技能深化情景下的技能溢价。劳动力扩张技术 (A_H 、 A_L) 增长会降低要素相对价格,这产生成本节约效应,提高总产出。一方面, A_H 增加逆转对任务阈值的影响,进而逆转在国民收入中所占份额。另一方面,当 A_L 增加时,如果 $I^* \neq I$,低技能工人替代机器;如果 $S^* \neq S$,低技能工人替代高技能工人,这导致低技能工人在国民收入中所占份额不降低。再由于劳动力扩张技术对高技能工资的影响是模糊的,所以在技能深化情景下,最低工资对技能溢价的影响也是模糊的。

技能广化情景下的技能溢价。假设低技能工人不能从事高于能力差异 S 的任务, S 增加对应于低技能工人技能范围的扩展。低技能工人的成本更低,其对高技能工人的替代意味着低技能工人在国民收入中所占份额增加。这也说明, S 的增加减少收入分配的不平等,降低了技能溢价。

在深度自动化以及与深度自动化类似的技能深化情景下,如果低技能工资被最低工资所限定,即最低工资将其约束在一个比较低的水平,这样自动化所带来的产出增加和收入扩大不足以弥补工资差距的扩大,技能工资之间的不平等会增加。在技能广化情景下,低技能工人能力的增长有助于降低技能溢价。深度自动化、技能深化更可能出现在技术密集型行业,而技能广化更可能发生在密集培训的劳动密集型行业。基于上述分析,本文提出:

假说 3: 在深度自动化和技能深化的技术密集型行业,最低工资可能会提升技能溢价;在进行密集技

能培训的劳动密集型行业或低技术行业，最低工资可能会降低技能溢价。

三、研究设计

1. 变量测度

(1) 技能溢价。本文的技能溢价是指企业内部高技能工人与低技能工人的工资差距。现有数据库中并未直接提供相关指标，需要测度，具体测度方法如下：

步骤一：计算企业内部的高技能工人占比 θ_{kit} 。本文采用国际通用的“是否取得高等教育文凭”为划分依据，将高中及以下学历认定为低技能劳动者，将大专及以上学历认定为高技能劳动者。在中国工业企业数据库中，仅有 2004 年数据统计了企业员工学历情况。为计算其他年份企业的高技能工人占比，借鉴盛斌和郝碧榕（2021），且考虑到无法获取细分行业劳动力的学历数据，不能以行业劳动力波动情况进行赋权，所以假设企业 i 内高技能劳动占比与该企业所在省份高技能劳动占比是同步变动的。《中国劳动统计年鉴》提供了全国各地区的就业人员受教育程度数据，以各年受教育程度结构变化作为权重，以 2004 年高技能工人数据为基准，从而得出持续经营企业在其余年份的高技能工人占比。为保证样本不出现大量缺失，对于后续年份非持续经营企业，参考方齐云和刘东（2020），本文补齐了企业所在省份当年的高技能工人占比数据。所以得到企业高技能工人占比 θ_{kit} 的具体表达式为：

$$\theta_{it}^k = \begin{cases} \theta_{i=2004} \frac{\theta_{ipt}}{(\theta)_{ipt=2004}}, & K = 1 \\ \theta_{ipt}, & K = 0 \end{cases} \quad (14)$$

其中， i 、 p 、 t 分别表示企业、省份和年份， $\theta_{it=2004}$ 表示中国工业企业数据库中 2004 年企业 i 的高技能工人占比， θ_{ipt} 表示《中国劳动统计年鉴》中企业 i 所在 p 省在 t 年的高技能工人占比情况，而

$\frac{\theta_{ipt}}{(\theta)_{ipt=2004}}$ 表示企业 i 所在 p 省在第 t 年相较于 2004 年的高技能工人变动情况。 K 表示企业在样本期内是否持续经营，其中， $K = 1$ 表示持续经营企业， $K = 0$ 表示非持续经营企业

步骤二：计算技能溢价 spl_{it} 。企业平均工资 $\bar{W}_{it} = \frac{HW_{it}^H + LW_{it}^L}{H + L}$ 所以 $\bar{W}_{it} = \theta_{it}^k W_{it}^H + (1 - \theta_{it}^k) W_{it}^L$ 。

结合考虑技能溢价定义，可知 $spl_{it} = W_{it}^H - W_{it}^L$ ，得到技能溢价公式如下：

$$spl_{it} = \frac{\bar{W}_{it} - (1 - \theta_{it}^k) W_{it}^L}{\theta_{it}^k} - W_{it}^L = \frac{\bar{W}_{it} - (1 - \theta_{it}^k) W_{it}^L - \theta_{it}^k W_{it}^L}{\theta_{it}^k} = \frac{\bar{W}_{it} - W_{it}^L}{\theta_{it}^k} \quad (15)$$

其中， \bar{W}_{it} 、 W_{it}^H 、 W_{it}^L 分别表示 i 企业 t 年的平均工资、高技能工人工资和低技能工人工资， $H+L$ 、 H 、 L 分别表示工人总数、高技能工人数和低技能工人数；参考盛斌和郝碧榕（2021），根据企业所在年份—地区—行业，以平均工资水平最低的企业的平均工资作为该行业中企业的低技能工人工资 W_{it}^L ； spl_{it} 表示 i 企业 t 年的技能溢价水平， θ_{kit} 表示 i 企业 t 年的高技能工人占比，在实证分析时使用 spl_{it} 的对数 sp_{it} 。参考方齐云和刘东（2020），本文采用农民人均工资性和经营性收入度量 W_{it} ，得出另一技能溢价 spl_{it} ，用于稳健性分析。

(2) 自动化水平。测度自动化水平主要有两种方法：一是利用国际机器人联合会 (International Federation of Robotics, IFR) 发布的行业层面机器人安装量和存量数据；二是以海关进口工业机器人数据为代理变量。考虑进口数据不能表示企业实际安装和使用工业机器人，无法很好反映真实的自动化水平，所以借鉴 Acemoglu and Restrepo (2020)、吕越等 (2020)，利用 IFR 公布的年份—国家—行业层面机器人数据，度量行业 j 在 t 年机器人应用情况，计算公式如下：

$$autod_{jt} = \frac{Robot_{jt}}{emp_{jt}} \quad (16)$$

其中， $Robot_{jt}$ 表示 j 行业在 t 年的机器人安装量； emp_{jt} 表示 j 行业在 t 年的总劳动人数； $autod_{jt}$ 表示企业所在行业的自动化水平，在实证分析时使用 $autod_{jt}$ 的对数 $auto_{jt}$ 。考虑到行业内企业工业机器人密度与行业机器人密度高度相关，所以本文以行业层面工业机器人密度表示自动化水平。采用同样方法构建美国行业的自动化指标，以其作为工具变量，用于稳健性分析。

(3) 最低工资标准。最低月工资标准不是每个月都变化的，最低工资标准每 1—3 年作一次调整。各省份在制定最低工资标准时存在不同档位的区分，如湖南 2022 年的最低工资标准分为第一档次、第二档次和第三档次。考虑到大多数省份按照城市进行最低工资标准档次划分，本文使用城市层面最低工资标准。各省份最低工资标准的调整时间并不统一，存在较大随机性，所以参考许和连和王海成 (2016)，使用月份加权方法。例如，浙江自 2021 年 8 月 1 日起将第一档月最低工资标准从 2010 元调整为 2280 元，加权可得 2021 年浙江第一档的月最低工资标准 2122.50 元，具体计算方法为 $2010 \times (7/12) + 2280 \times (5/12) = 2122.50$ 。由于中国目前尚未有最低工资的统计数据库，因此，本文关于最低工资的相关数据主要来自地方政府网站、政府公告、地方人力资源和社会保障事业统计公报等。本文共收集 315 个地级市 2006—2015 年的月最低工资标准数据和小时最低工资标准数据。考虑到每个地级市往往倾向于制定较统一的最低工资标准，本文采用企业所在城市最低月工资标准并取对数得 $mwct$ ，以此表示 c 城市 t 年的企业最低工资标准。

(4) 控制变量。参考樊海潮和郭光远 (2015)，本文选取企业层面控制变量如下：企业规模 ($size_{it}$)，采用企业职工数对数度量；企业年龄 (age_{it})，企业年龄=该年年份-开业年份+1；企业融资约束 ($finance_{it}$)，采用利息支出和固定资产的比值度量；资本劳动比 ($klratio_{it}$)，采用固定资产投资年均余额平减后的资本与职工数比值度量；企业存货规模 ($inventory_{it}$)，采用企业存货额对数度量；外商资本占比 ($frcapital_{it}$)，采用外商资本在实收资本的占比度量；国有资本占比 ($stcapital_{it}$)，采用国有资本在实收资本的占比度量；企业员工人均工资 ($salary_{it}$)，采用企业工资总额除以职工数后取对数度量；企业生产率 (tfp_{it})，采用 DLW 非参数方法估计测度 (De Loecker and Warzynski, 2012)。^⑤

(5) 技能差异变量。企业技能差异具有结构性特征，在技能结构高的企业，高技能工人比例较高，高低技能差异一般较大；在技能结构低的企业，低技能工人比例较高，如在大量劳动密集型企业中，众多低技能工人之间的技能差异较小，因为其技能上限不高且占比较高。由此，借鉴陆雪琴和文雁兵 (2013)、江永红等 (2016)，根据是否取得高等教育文凭对企业内的工人进行划分，大专及以上学历被认定为高技能工人，高中及以下学历被认定为低技能工人，以高、低技能工人人数比例构建技能结构指标 $labor_struct_{it}$ ，以此作为企业技能差异代理变量。结合 $K0_{it}$ (i 企业 t 年的高技能工人占比) 的公式，推导得到技能结构 $labor_struct_{it}$ 如下：

^⑤①具体变量说明参见《中国工业经济》网站 (<http://ciejournal.ajcass.org>) 附件

$$labor_struct_{it} = \frac{H_{it}}{L_{it}} = \frac{H_{it}/(H_{it} + L_{it})}{L_{it}/(H_{it} + L_{it})} = \frac{\theta_{it}^k}{1 - \theta_{it}^k} \quad (17)$$

(6) 自动化技术前沿变量。构建行业层面的自动化随机前沿模型，以行业机器人年度安装密度对数 $auto_{jt}$ 、行业年度实际投资额对数 $invs_{jt}$ 为投入变量，以行业年度增加值对数 ay_{jt} 为产出变量，假设残差项服从截尾正态分布，利用 Stata 软件计算行业技术效率值 $techefr_{jt}$ ，并以其作为行业自动化技术前沿的代理变量。行业年度实际投资额、行业年度增加值均通过对中国工业企业数据库中的实际投资额、增加值进行“年度—行业”加总计算获得。

2. 数据来源与处理

本文所用数据包括：中国工业企业数据库、中国海关进出口数据库、国际机器人联合会 IFR 的工业机器人数据，历年《中国城市统计年鉴》和《中国劳动统计年鉴》，以及手工收集的最低工资数据。IFR 公布的数据始于 2006 年，所以本文的样本区间设定为 2006—2015 年。

本文相关数据处理步骤如下：①整理来自中国工业企业数据库和中国海关进出口数据库中的数据（余淼杰，2011）；②补充缺失数据（聂辉华等，2012）；③合并整理后的数据；④合并 IFR 数据（闫雪凌等，2020；吕越等，2020）；⑤合并最低工资数据。⁶

3. 模型设计

根据上述理论模型的分析，为论证本文的研究假说，设定回归模型如下：

$$sp_{ijt} = \beta_0 + \beta_1 mw_{ct} auto_{j0} + \beta_w \sum_{w=2}^{10} Cn_{ijt} + \mu_i + \mu_j + \mu_c + \varepsilon_{ijt} \quad (18)$$

其中， i 、 j 、 c 、 t 分别表示企业、行业、城市和年份。 sp_{ijt} 表示 t 年城市 c 行业 j 企业 i 的技能溢价对数； mw_{ct} 为城市 c 在 t 年最低工资对数，是相对外生政策； $auto_{j0}$ 表示行业 j 在初始年份的自动化程度，即行业 j 在第 1 年的机器人安装密度对数； $mw_{ct} auto_{j0}$ 是最低工资标准与初始年份自动化程度的对数交互项。此设定排除 mw_{ct} 变化引起自动化程度变化，再影响技能溢价的可能性；此时需识别的是最低工资变化对自动化不同行业技能溢价的影响。如果用 $auto_{jt}$ 与 mw_{ct} 构成交互项，那么最低工资提高，行业中会有更多企业采用机器人，这就是广延边际问题；最低工资变化和自动化程度变化会互为因果，再以此去识别对技能溢价的影响会很困难。最低工资上升，高技能工资对低技能工资的比值减少，即技能溢价缩小，这是最低工资对技能溢价的直接影响。提高最低工资后，低技能工人成本上升，这会在自动化程度各异行业引发机器人替代工人或高技能工人替代低技能工人的涟漪效应，因此，根据本文研究假说提出的逻辑，用交互项 $mw_{ct} auto_{j0}$ 来捕捉最低工资在有技能差异的自动化程度异质性行业引发的涟漪效应。 Cn_{ijt} 为企业层面控制变量：企业规模 ($size_{it}$)、企业年龄 (age_{it})、企业融资约束 ($finance_{it}$)、资本劳动比 ($klratio_{it}$)、企业存货规模 ($inventory_{it}$)、外商资本占比 ($frcapital_{it}$)、国有资本占比 ($stcapital_{it}$)、企业员工人均工资 ($salary_{it}$)、企业生产率 (tfp_{it})。 μ_i 、 μ_j 、 μ_c 分别表示企业、行业—年份、城市—年份固定效应， μ_i 控制不随时间变化的企业特征， μ_c 控制城市随时间变化的趋势， μ_j 控制行业随时间变化趋势。 ε_{ijt} 为随机误差项。

四、实证分析

⁶①具体数据处理过程参见《中国工业经济》网站 (<http://ciejournal.ajcass.org>) 附件

1. 基准回归

表 1 汇报了基准回归模型的结果。^⑦第 (1)、(3)、(5) 列是对最低工资的回归结果, mw_{ct} 系数为负。第 (3) — (6) 列加入控制变量, 以尽量避免遗漏变量问题。第 (5)、(6) 列使用合成工具变量 (IV) 进行 2SLS 估计。在排除内生性问题后, 与第 (3) 列相比, 第 (5) 列中 mw_{ct} 系数显著为负, 即最低工资显著缩减工资差距。相较于第 (1)、(3)、(5) 列 mw_{ct} 的系数, 第 (2)、(4)、(6) 列中交互项系数的绝对值更大, 说明最低工资在有技能差异的自动化程度各异行业引发的涟漪效应显著强化了最低工资对技能溢价的负面影响, 验证了假说 1。

表 1 基准回归: 自动化程度各异行业背景下最低工资对工资差距的影响

| 变量 | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) |
|-----------------------------|------------------------|------------------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| mw_{ct} | -0.0297** (-2.0259) | | -0.0174 (-1.5804) | | -0.0555*** (-3.8262) | |
| $mw_{ct} \tau_{j0}$ | | -0.0484** (-2.4089) | | -0.0298*** (-3.2881) | | -0.1429*** (-4.5998) |
| 控制变量 | 否 | 否 | 是 | 是 | 是 | 是 |
| Kleibergen-Paap rk LM | | | | | 100.6030*** | 324.5600*** |
| Cragg-Donald Wald F | | | | | 37.1600 | 44.8230 |
| 第 1 阶段的 adj. R ² | | | | | 0.1307 | 0.5753 |
| 第 1 阶段 F 值 | | | | | 10.9369 | 17.3252 |
| 第 1 阶段 F 伴随概率 | | | | | 0.0000 | 0.0000 |
| 企业固定效应 | 是 | 是 | 是 | 是 | 是 | 是 |
| 行业一年份固定效应 | 是 | 是 | 是 | 是 | 是 | 是 |
| 城市一年份固定效应 | 是 | 是 | 是 | 是 | 是 | 是 |
| N | 597622 | 597624 | 479272 | 479272 | 479274 | 478684 |
| adj. R ² | 0.5671 | 0.5373 | 0.7124 | 0.7124 | | |
| F (或 2 阶段 F) | 4.1041 | 5.8030 | 314.3670 | 316.0323 | 6381.0136 | 6393.3145 |
| Prob>F | 0.0437 | 0.0166 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |

注: 括号内为系数 t 值; **、*、*表示在 1%、5%、10% 的水平上显著; 参考 Brandt et al. (2017) 做法, 非 2SLS 回归系数标准误均双向聚类到行业一年份和企业层面。以下各表同。

2. 内生性问题处理

借鉴 Bahar and Rapoport (2018) 思想, 引入合成工具变量以缓解内生性问题。最低工资政策相对外生性强一些, 为谨慎起见, 本文按以下步骤合成其工具变量: 选取城市编码虚拟变量、八大城市群及群外城市编码^⑧, 东部、中部、西部和东北四大区域编号等反映城市一般外生特征的变量作为第一组解释变量, 并将其与年份虚拟变量交乘, 以考虑这些虚拟变量跨时期的差异影响; 再选取各城市人口占中国总城市人口比重、各城市 GDP 占中国总城市 GDP 比重排名、城市第二产业比重、城市所在省份市场化程度^⑨等企业技能溢价的上层指标做另一组解释变量; 并设置城市一年份双向固定效应, 再对最低工资 mw_{ct} 这一被解释

^⑦控制变量回归结果参见《中国工业经济》网站 (<http://ciejournal.ajcass.org>) 附件。

^⑧①京津冀、长江中游、成渝、哈长、长三角、中原、珠三角、关中原等八大城市群及群外城市具有显著差异。

^⑨②市场化总指数 (王小鲁等, 2019) 并不具有明显的时间趋势, 一些地区在后期还有略微下降的情形。

变量进行回归后提取最低工资的预测值作为合成工具变量 1，即合成 IV1。这些城市层面的特征变量一方面会影响最低工资制定，另一方面作为企业层面技能溢价的上层指标，其具有相对外生性。出于自动化指标的内生性担忧，本文在基准回归中选取了基期自动化指标以反映行业自动化差异，在此选取行业价值链分类虚拟变量^⑩、按 IFR 分类重新划分的行业分类虚拟变量^⑪等反映行业一般外生特征的变量作为第一组解释变量，并将其与年份虚拟变量交乘以考虑这些虚拟变量的跨时期差异影响；再选取反映行业集中度和竞争程度的赫芬达尔指数、行业人均资本存量对数、行业固定资产折旧率、经价格指数平减后的行业工资总额对数、经价格指数平减后的行业福利费总额对数等企业技能溢价的上层指标做另一组解释变量；为避免共线性问题对前述虚拟变量系数的吸收，在此设置时间固定效应、行业固定效应，再对自动化指标 $auto_{jt}$ 这一被解释变量进行回归后提取预测值，并取其基期值 $auto^0$ 作为合成工具变量 2，即合成 IV2。这些行业层面的特征变量一方面会影响行业自动化程度，另一方面作为企业层面技能溢价的上层指标，也具有相对外生性。

参考 Autor et al (2013)、崔晓敏等 (2018)，本文采用企业所在省同年其他城市最低工资均值作为企业所在城市最低工资的 IV。一方面，某一城市最低工资水平很大程度上会与省其他城市存在关联，满足 IV 相关性假设；另一方面，其他城市最低工资只有通过某城市最低工资影响企业内技能溢价，满足 IV 排他性假设，所以采用该数据作为最低工资的工具变量，即 IV3。借鉴王永钦和董雯 (2020)，本文考虑中美两国人工智能化发展整体趋势一致，满足 IV 相关性假设。美国工业机器人应用情况与其他影响中国工业机器人应用的本土因素无关，美国工业机器人应用只通过中国工业机器人应用而影响中国企业的技能溢价，故满足 IV 排他性假设，因此，以 2006 年美国工业机器人安装量和该行业就业人数比值为基期指标，构建自动化程度行业差异的工具变量，即 IV4。本文还使用各省份 2006 年光缆线路长度指标作为自动化程度行业差异的工具变量，即 IV5。一方面，光缆作为新基础设施，其长度与自动化水平之间存在一定关联，满足 IV 相关性假设；另一方面，光缆线路长度只通过自动化水平影响企业技能溢价，满足 IV 排他性假设。根据表 2 可知，不存在弱 IV，且合成 IV 较合理。其中，第 (1) 列中的 mw_{ct} 系数显著为负，说明最低工资显著降低技能溢价。第 (2) 列中 $mw_{ct}auto_{j0}$ 系数显著为负，且其绝对值与第 (1) 列中的 mw_{ct} 系数绝对值相比更大，说明最低工资在有技能差异的自动化程度各异行业引发的涟漪效应，其显著强化最低工资对技能溢价的缩减。这说明假说 1 结论稳健。第 (3) 列中的 mw_{ct} 系数显著为负，第 (4) — (6) 列中交互项 $mw_{ct}auto_{j0}$ 系数也显著为负，且其绝对值与第 (3) 列中的 mw_{ct} 的系数绝对值相比也更大；第 (3) — (6) 列的 IV 有效性检验相对较差，说明基准回归中基于合成 IV 的估计是稳健的。如前所述，将实证分析范围限定在集约边际，表 2 的回归结果支持了假说 1 和假说 2。

表 2 两阶段最小二乘(2SLS)法检验与估计结果

| 变量 | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) |
|--------------------|------------|---------------|-----------|------------|-----------|------------|
| | 合成 IV1 | 合成 IV1、合成 IV2 | IV3 | IV3、合成 IV2 | IV3、IV4 | IV3、IV5 |
| mw_{ct} | -0.0555*** | -0.1429*** | -0.0253** | -0.0581*** | -0.0296** | -0.0398*** |
| $mw_{ct}auto_{j0}$ | (-3.8262) | (-4.5998) | (-2.3419) | (-2.9478) | (-1.9612) | (-2.6366) |
| 控制变量 | 是 | 是 | 是 | 是 | 是 | 是 |

^⑩③参考 McKinsey 的行业价值链分类 (Lundetal., 2019)，将中国工业企业按所属行业分为全球创新价值链、劳动密集型产品价值链、区域加工价值链、资源密集型产品价值链；再将农副食品加工、食品制造、饮料制造和医药制造归为大健康价值链，将设备制造、汽车制造、电气机械、计算机通讯和其他电子设备归为数字与自动化价值链。

^⑪④根据行业、年份合并中国工业企业数据库、中国海关进出口数据库和 IFR 数据 (闫雪凌等, 2020; 吕越等, 2020)。

| | | | | | | |
|---------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|
| Kleibergen-Paap rk LM | 100.6030*** | 324.5600*** | 224.4720*** | 979.9680*** | 18.9530*** | 14.5900*** |
| Cragg-Donald Wald F | 37.1600 | 44.8230 | 192.2480 | 14.1250 | 553.7110 | 285.5960 |
| 第1阶段的 adj. R ² | 0.1307 | 0.5753 | 0.1104 | 0.6073 | 0.1248 | 0.1295 |
| 1阶段 F | 10.9369 | 17.3252 | 12.3587 | 21.4124 | 11.7316 | 7.7147 |
| 1阶段 F 伴随概率 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| N | 479274 | 478684 | 479272 | 478684 | 478684 | 478684 |
| 2阶段 F | 6381.0136 | 6393.3145 | 6393.9064 | 6393.1482 | 6392.2209 | 6392.5068 |
| Prob>F | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |

注：控制变量为表 1 中的第二组控制变量；控制企业、行业一年份、城市一年份固定效应。以下各表同。

3. 稳健性检验

更换核心变量和样本区间。本文在式 (18) 基础上更换核心解释变量和被解释变量：用 IFR 公布的机器人行业存量除以行业劳动力人数并取对数，得到 j 行业在 t 年的机器人存量密度对数 $autos_{jt}$ ，以此代替机器人安装密度对数，重建另一个自动化水平指标；由于 2006 年的机器人存量数据与安装量数据一样，所以用 $autos_{j1}$ 表示 2007 年的 j 行业机器人存量密度对数；使用政府实行的小时最低工资标准取对数 mwh_{ct} 代替月最低工资标准。方齐云和刘东 (2020) 用企业所属省份农民人均工资性收入代表低技能工人工资，而本文认为农民经营性收入也属于从事第二、三产业的农民工资性所得，因此，以企业所属省份的农民人均工资性与经营性收入作为低技能工人工资 W_{it}^l ，重新构建技能溢价指标 $spil_{it}$ ，代替基准回归中技能溢价对数 sp_{it} 。根据回归结果可知^{①2}，在被解释变量为 sp_{it} 的回归组中，解释变量 $mwctauto_{jt}$ 的系数都显著为负，说明最低工资和自动化的交互作用显著降低技能溢价。 $auto_{jt}$ 表示 j 行业 t 年的自动化程度，一般而言，各行业中实施自动化的企业数在每年是变化的，如果最低工资标准提高，行业中会有更多企业采用机器人，这就是广延边际问题。 $mwctauto_{jt}$ 系数显著为负，说明最低工资在广延边际中缩减技能溢价，但相对于较外生的 mw_{ct} ， $auto_{jt}$ 内生性较强，后者与前者交互难以排除 mw_{ct} 变化引起自动化程度变化，再影响技能溢价的可能，因而 $mwctauto_{jt}$ 的系数估计结果是不稳健的，这也是本文在基准模型未选用此交互设置的原因。考虑汽车业机器人使用占制造业份额在 2010 年底超过 50%，化工业机器人使用占制造业份额在交出首位排名后于 2011 年又显著下降，因此，以时期中段年份 2011 年为基期构建自动化程度行业差异的代理变量 $auto_{j5}$ ，其与 mw_{ct} 交乘后进行基准回归，区间调整为 2011—2015 年，回归结果显示， $mwctauto_{j0}$ 系数显著为负，支持假说 1。考虑以 2007 年的 $autos_{j1}$ 代表机器人存量密度的自动化程度行业差异，将样本区间设置为 2007—2015 年。回归结果显示，相对于 mw_{ct} 的系数， $mwctautos_{j1}$ 的系数显著为负且绝对值更大，说明最低工资引发涟漪效应，其显著强化最低工资对技能溢价的缩减，证实假说 1。再将回归组中被解释变量更换为 $spil_{it}$ ，其中 $mwctautos_{j1}$ 的系数不显著， $mwctauto_{j0}$ 的系数也不显著，说明以农民人均工资性与经营性收入作为低技能工人工资 W_{it}^l ，重新构建的技能溢价指标 $spil_{it}$ 不是一个合适的技能溢价测度，毕竟农业与制造业的劳动力市场存在差异。在以 mwh_{ct} 作解释变量的两个回归组中，分别以 sp_{it} 、 $spil_{it}$ 作为被解释变量，发现解释变量系数只在前一对回归组合中显著，说明 $spil_{it}$ 是造成回归结果不稳健的主因。这表明基准回归中的结论稳健。

五、涟漪效应检验

本文讨论的最低工资和自动化对技能差异的影响，这一组关系与涟漪效应关系密切，有待进一步讨论。技能差异的代理变量为前文所述的技能结构变量，即以高、低技能工人人数的比例所构建的技能结构指标 $labor_struct_{it}$ 。在式 (18) 基础上将因变量更换为技能结构，回归结果见表 3。表 3 中的第 (3) — (6)

^{①2}具体回归结果参见《中国工业经济》网站 (<http://ciejournal.ajcass.org>) 附件。

列为基于合成 IV 的估计结果^⑬。第 (1)、(3)、(5) 列中 mw_{ct} 的系数显著为负, 说明提高最低工资标准显著缩小技能差异; 第 (2)、(4)、(6) 列中 $mwctauctoj_0$ 的系数显著为负, 说明提高自动化行业最低工资会显著缩小技能差异。其中, 第 (4)、(6) 列中交互项系数的绝对值显著大于第 (3)、(5) 列的系数绝对值, 说明提高自动化行业最低工资标准会更为显著缩小技能差异, 这证实了在工业自动化情景中提高最低工资标准会激发涟漪效应。涟漪效应具波动和连锁反应特征, 提高最低工资会使技能差异缩小, 有利于高技能工人替代低技能工人, 这意味着此前技能差异缩小时降低的高技能工人比例会因为相对比较优势变化而再次比例增加; 为完成替代, 高技能工资增长不能超过低技能工资增长, 这样此前被激起的涟漪效应才可能进一步缩减技能溢价, 这在基准模型和稳健性检验部分已得到证明。

表 3 自动化程度各异行业背景下最低工资对技能差异的影响

| 变量 | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) |
|---------------------|-----------|-----------|------------|------------|-----------|------------|
| mw_{ct} | -0.0092* | | -0.0160*** | | -0.0102** | |
| $mwctauctoj_0$ | (-1.6874) | -0.0089** | (-3.6433) | -0.0509*** | (-2.3775) | -0.0310*** |
| 控制变量 | 是 | 是 | 否 | 否 | 是 | 是 |
| N | 479272 | 478684 | 597622 | 597030 | 479272 | 478684 |
| adj. R ² | 0.8705 | 0.8705 | | | | |
| F | 2.9904 | 2.9836 | 13.2739 | 22.0848 | 7.9268 | 7.8087 |
| Prob>F | 0.0013 | 0.0013 | 0.0003 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |

下面接着讨论最低工资和自动化对自动化技术前沿的影响, 自动化技术前沿的代理变量为自动化行业技术效率值 $techfr_{jt}$, 由本文构建的自动化随机前沿模型计算。在式 (18) 基础上将因变量更换为自动化行业技术效率, 回归结果见表 4。表 4 第 (3) — (6) 列为基于合成 IV 的估计结果, 如前所述合成 IV 是较合理工具变量。第 (1)、(3)、(5) 列中 mw_{ct} 的系数显著为正, 说明提高最低工资显著增加自动化技术前沿; 第 (4)、(6) 列中 $mwctauctoj_0$ 的系数显著为正, 说明提高自动化行业最低工资会显著增加自动化技术前沿。其中, 第 (4)、(6) 列中交互项系数的绝对值显著大于第 (3)、(5) 列的系数绝对值, 说明提高自动化行业最低工资标准会更显著增加自动化技术前沿, 这证实了在工业自动化情景中提高最低工资会激发机器替代工人的涟漪效应。

表 4 自动化程度各异行业背景下最低工资对自动化技术前沿的影响

| 变量 | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) |
|---------------------|------------|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| mw_{ct} | 1.13e-11** | | 4.00e-11*** | | 3.14e-11*** | |
| $mw_{ct}.aut_0$ | (2.1605) | 2.02e-12 | (5.8382) | 6.29e-11*** | (3.9349) | 8.02e-11*** |
| 控制变量 | 是 | 是 | 否 | 否 | 是 | 是 |
| N | 468777 | 468188 | 585747 | 585154 | 468777 | 468188 |
| adj. R ² | 0.1571 | 0.1725 | | | | |
| F | 93.5839 | 91.4777 | 7.4531 | 210.8368 | 60.8599 | 114.1664 |
| Prob>F | 0.0000 | 0.0000 | 0.0063 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |

注: 自动化行业技术效率都是值小于 1 的变量, 其数量维度明显小于自变量和控制变量的数量维度, 因而回归估计的系数也较小。

¹³⑬具体 IV 估计结果参见《中国工业经济》网站 (<http://ciejournal.ajcass.org>) 附件。

六、异质性分析

本文从多种维度进行异质性分析：一是企业技术水平。技术水平不同会带来技能深化与技能广化的差异，最低工资产生的涟漪效应也有所不同。二是企业要素密集度。中国劳动密集型企业占比较大，最低工资标准提升对其产生的涟漪效应影响需重点关注。三是机器人安装行业。不同行业自动化存在结构差异，从而最低工资对技能溢价的影响方向及大小有所差异。四是企业注册类型。国有企业和其他注册类型企业之间在政策扶持、资金规模、发展策略等方面有所不同。五是企业贸易类型。加工贸易企业更依赖低廉劳动力成本带来的比较优势，最低工资标准上升对该类企业会产生较大冲击。六是企业的地理位置。企业所处区域的不同会存在资源、政策、环境等方面的差异，而各省份制定的最低工资标准也有较大差距，所以需要分区域回归分析。

1. 企业技术水平

制造业样本可以依技术水平区分为高技术、中技术、低技术、资源性产品和初级产品五类(La11, 2000)，基于 HS、CIC2、SITC3 码转换表剔除非制造业产品^{①4}。本文选择低技术、中技术和高技术企业样本进行回归。根据表 5 Panel A 可知，第(1)列中 mw_{ct} 的系数显著为负，表明使用机器人的低技术企业数量不会很多，即广延边际自动化不会太多。这说明最低工资在集约边际会缩小企业技能溢价，证实假说 2；在技能广化情景下，低技能工人技能增长有助于缩减技能溢价，这证实假说 3 部分内容。第(2)列中交互项的系数为负且不显著，说明在低技术企业没有发现显著涟漪效应，或因其自动化技术前沿相对较低。由第(3)列可知， mw_{ct} 的系数为负但不显著，说明在中技术企业，最低工资并未表现出显著缩小技能溢价的特征；第(4)列中交互项的系数与同类中技术企业 mw_{ct} 的系数绝对值相比更大，说明中技术企业最低工资在存在技能差异的自动化程度各异行业引发的涟漪效应显著强化最低工资对技能溢价的缩减。第(5)列中 mw_{ct} 的系数显著为负，第(6)列中交互项的系数显著为负，说明在高技术企业存在显著的缩减技能溢价的涟漪效应。

2. 企业要素密集度

依行业代码将企业分为劳动密集型、资本密集型和技术密集型企业(La11, 2000)，并以要素密集度差异进行分组回归。根据表 5 Panel B 可知，第(1)列中 mw_{ct} 的系数都显著为负，说明出于就业保护目的，在劳动密集型行业，实施自动化的企业数量可能不会很多，即发生在广延边际的自动化也不会太多。这说明最低工资在集约边际会缩小技能溢价，证实假说 2。另外，技能广化现象更可能发生在存在密集培训的劳动密集型行业，此时，低技能工人能力的增加有助于降低技能溢价，这证实假说 3 部分内容。第(2)列中交互项的系数为正且不显著，说明对于劳动密集型行业企业而言，最低工资没有引发显著涟漪效应，或因其自动化技术前沿较低。由第(3)列可知，最低工资显著缩减资本密集型企业的技能溢价，第(4)列中交互项系数与同类资本密集型企业 mw_{ct} 的系数绝对值相比更大，也意味着最低工资引发的涟漪效应显著强化最低工资对技能溢价的缩减。根据第(5)列， mw_{ct} 的系数为正且不显著，意味着在技术密集型行业企业，最低工资并不能显著缩小技能溢价，甚至有提升技能溢价可能。技术密集型行业更可能出现技能深化，若自动化带来的产出增加和收入扩大不足以弥补工资差距的扩大，技能工资不平等就会增加。第(6)列中交互项系数显著为负，意味着对于技术密集型企业而言，最低工资引发显著缩减技能溢价的涟漪效应，此时自动化带来的产出增加和收入扩大弥补了工资差距扩大。

¹⁴①联合国统计局网站(<http://unstats.un.org/unsd/registry/regdnld.asp>)提供海关 HS6 位码与 BEC4 位码以及 SITC3 位码分类转换表；2000—2001 年采用 HS1996，2002—2006 年采用 HS2002，2007—2009 年采用 HS2007；HS-CIC 转换表来自 Brandtetal(. 2017)。具体数据整理说明参见《中国工业经济》网站(<http://ciejournal.ajcass.org>)附件。

表 5 异质性分析

| | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|----------------|------------|
| Panel A :企业技术水平 | | | | | | |
| | 低技术 | | 中技术 | | 高技术 | |
| mw_{ct} | -0.1054* | | -0.0381 | | -0.0947* | |
| mw_{eauto}_{jo} | (-1.8439) | -0.6219 | (-1.4508) | -0.6328*** | (-1.6867) | -0.3259* |
| | | (-1.4656) | | (-3.0372) | | (-1.7238) |
| N | 104389 | 104314 | 116759 | 116486 | | 77809 |
| F | 666.6057 | 663.0734 | 1026.5696 | 1017.3936 | 77865.822.0796 | 821.6329 |
| Prob>F | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| Panel B:企业要素密集度 | | | | | | |
| | 劳动密集型 | | 资本密集型 | | 技术密 | 莓型 |
| mw_{ct} | -0.3554*** | | -0.0543*** | | 0.0310 | |
| mw_{ctaut}_{jo} | (-4.3775) | 2.8079 | (-3.3284) | -0.1908* | (1.0275) | -0.4241*** |
| | | (0.0169) | | (-1.9436) | | (-2.9303) |
| N | 146428 | 146428 | 109890 | 109315 | 215904 | 215904 |
| F | 1878.4460 | 1878.2670 | 1407.9048 | 1404.5414 | 3039.5872 | 3039.3181 |
| Prob>F | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| Panel C: 机器人安装行业 | | | | | | |
| | 机器人安装主要行业 | | | 机器人安装非主要行业 | | |
| mw_{ct} | -0.0099*** | | | -0.0334*** | | |
| Mw_{ctaut}_{jo} | (-2.6842) | -0.0480*** | -0.1023*** | (-5.4876) | -0.0387*** | -0.6043 |
| | | (-3.8901) | (-3.9607) | | (-3.8759) | (-1.1315) |
| N | 213098 | 212504 | 212504 | 255379 | 255379 | 255375 |
| F | 2809.5721 | 2807.1209 | 2813.5708 | 3097.1751 | 3093.3113 | 3112.2460 |
| Prob>F | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| Panel D :企业注册类型 | | | | | | |
| | 国有企业 | | 民营企业 | | 外资与合资企业 | |
| mw_{ct} | -0.0857 | | -0.0619* | | -0.0745*** | |
| Mw_{ctaut}_{jo} | (-1.4082) | -0.6267** | (-1.8523) | -0.1117*** | (-3.5952) | -0.2596*** |
| | | (-2.5373) | | (-3.2095) | | (-3.3004) |
| N | 52995 | 52946 | 192493 | 192302 | 226104 | 225750 |
| F | 631.0344 | 623.0725 | 2396.9632 | 2394.6946 | 3213.6887 | 3213.6879 |
| Prob>F | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| Panel E: 企业贸易类型 | | | | | | |
| | 一般贸易 | | 加工贸易 | | 混合贸易 | |
| mw_{ct} | -0.0511* | | -0.5733 | | -0.1013*** | |
| Mw_{ctaut}_{jo} | (-1.7809) | -0.4168** | (-1.3921) | -0.5951*** | (-3.909) | -0.3753*** |
| | | (-2.3778) | | (-3.3874) | | (-4.0609) |
| N | 113265 | 113012 | 79196 | 78921 | 212462 | 212434 |
| F | 1506.3008 | 1502.8087 | 648.5195 | 645.6147 | 2185.1244 | 2182.7059 |

| | | | | | | |
|-----------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|
| Prob>F | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| Panel F: 企业地理位置 | | | | | | |
| | 东部地区 | | 中部地区 | | 西部地区 | |
| mw_{ct} | -0.0200*** (-7.2357) | -0.0580*** (-8.4302) | -0.0379* (-1.9522) | -0.0925** (-2.0197) | -0.4613* (-1.8765) | -0.1018 (-0.3892) |
| $Mwcta0_{j0}$ | | | | | | |
| N | 428120 | 427564 | 32015 | 3 1994 | 15455 | 15450 |
| F | 6046.1624 | 6042.5454 | 379.061 1 | 378.3304 | 155.8456 | 27.8950 |
| Prob>F | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |

3. 机器人安装行业

根据回归结果显示^{①5}，除金属制造外， $mwcta0_{j0}$ 系数都为负，交互项系数与同行业 mw_{ct} 系数绝对值相比更大，意味着最低工资在存在技能差异的自动化程度各异行业引发的涟漪效应显著强化最低工资对技能溢价的缩减。根据 $mwcta0_{j0}$ 系数绝对值可知，就涟漪效应对技能溢价缩减的强化作用而言，电子电气行业的强化作用最大，汽车制造行业次之，而化工业最小，这与这些行业的自动化技术前沿有关。表 5 Panel C 展示了对机器人安装主要行业和非主要行业的回归结果，发现除固定效应控制较多的第（6）列外， $mwcta0_{j0}$ 的系数都显著为负，其与同类行业 mw_{ct} 系数绝对值相比更大，说明最低工资引发的涟漪效应显著强化最低工资对技能溢价的缩减。

4. 企业注册类型

根据表 5 Panel D 中第（1）列显示，最低工资对国有企业的技能溢价没有产生显著作用。第（2）列中的交互项系数显著为负，说明最低工资在存在技能差异的自动化程度各异行业引发的涟漪效应显著缩减了国有企业技能溢价。由第（3）、（5）列可知，最低工资均显著缩减民营企业、外资与合资企业技能溢价，对外资与合资企业技能溢价缩减作用最大。由第（4）、（6）列可知，交互项系数与同类企业的 mw_{ct} 系数绝对值相比更大，说明最低工资在有技能差异的自动化程度各异行业引发的涟漪效应显著强化最低工资对技能溢价的缩减。民营企业中的涟漪效应强化作用最弱，这或因民营企业自动化程度、技术前沿弱于外资与合资企业、国有企业自动化程度、自动化技术前沿。

5. 企业贸易类型

根据表 5 Panel E 中的第（1）、（5）列可知，最低工资显著缩减一般贸易企业、混合贸易企业技能溢价；第（3）列的 mw_{ct} 系数为负但不显著，或因加工贸易企业的工资成本受合同影响较大，相对而言，其对最低工资的反应敏感度不强，混合贸易企业既从事加工贸易也从事一般贸易，因此，最低工资对混合贸易企业技能溢价影响处在一般贸易企业和加工贸易企业之间。根据第（2）、（4）、（6）列可知，交互项系数与同类企业的 mw_{ct} 系数绝对值相比更大，说明最低工资在有技能差异的自动化程度各异行业引发的涟漪效应显著强化最低工资对技能溢价的缩减。加工贸易企业中的涟漪效应更为显著强化了最低工资对技能溢价的负面影响，这是因为全球自动化浪潮更多影响两头在外的加工贸易企业。

6. 企业地理位置

^{①5}具体回归结果参见《中国工业经济》网站 (<http://ciejournal.ajcass.org>) 附件。

根据表 5 Panel F 中第 (1)、(3)、(5) 列可知, 最低工资显著缩减各地区技能溢价, 最低工资对西部地区技能溢价的缩减作用最大, 中部地区其次, 东部地区缩减作用最小。与东部地区相比, 中部和西部地区高技术企业较少, 劳动密集型企业更多, 回归结果也从另一角度进一步佐证了前面的结果, 即最低工资更显著缩减劳动密集型或低技术企业的技能溢价, 对技术密集型或高技术企业的技能溢价缩小作用较小。第 (2)、(4) 列显示, 交互项系数与其对应的 mw_{it} 系数绝对值相比更大, 也意味着东部、中部地区最低工资在有技能差异的自动化程度各异行业引发的涟漪效应显著强化最低工资对技能溢价的缩减。第 (6) 列中交互项的系数为负但不显著, 或因西部地区自动化程度、自动化技术前沿较低, 因此, 最低工资引致的涟漪效应较弱, 不足以显著影响最低工资对技能溢价的作用。

七、结论与启示

本文基于任务的框架修正 Eckardt (2021) 的理论模型, 对制造业自动化情景下最低工资对技能溢价的影响进行稳健识别和异质性分析。基于上述研究验证本文的研究假说, 得出如下主要结论: ①最低工资在存在技能差异的自动化程度各异行业引发的涟漪效应会强化最低工资对技能溢价的缩减; ②就涟漪效应对技能溢价缩减的强化作用而言, 电子电气行业的强化作用最大, 汽车制造业次之, 化工业最小; ③最低工资没有在低技术企业引发显著的涟漪效应, 未显著缩减中技术企业技能溢价, 却显著缩减高技术企业技能溢价; ④最低工资没有在劳动密集型企业引发显著涟漪效应, 在资本密集型企业激发的涟漪效应显著强化技能溢价缩减, 但并未显著缩小技术密集型企业技能溢价; ⑤最低工资引发的涟漪效应显著强化民营企业、外资与合资企业技能溢价的缩减, 其中民营企业自动化程度较低, 其涟漪效应强化作用较弱; ⑥加工贸易企业中涟漪效应的强化缩减作用最大, 这或是由于加工贸易企业受到全球自动化浪潮更多的影响; ⑦西部地区自动化程度较低, 最低工资引致的涟漪效应也因此较弱。

本文的理论框架、识别方法和相关结论, 为在以自动化、智能化和数字化为特征的产业链现代化进程中实现全体人民的“共同富裕”愿景提供了政策参考, 具体政策启示如下: 一是在推进以自动化为主要特征的产业链现代化进程中, 不断完善最低工资政策、提高最低工资标准、监督最低工资标准有效执行。最低工资作为一项公平收入的社会政策依然是有效的。在最低工资缩小技能溢价的直接影响之外, 机器取代工人不但能在集约边际提高效率, 还能激起进一步缩减技能溢价的涟漪效应, 这使得效率与公平在自动化的世界走向统一。二是各级政府在逐步提高最低工资标准的同时, 应进一步加强在职业技能培训和教育方面的引导和支出。针对低技能劳动者的职业技能培训和教育, 依然是缩小社会收入差距、建设更公平社会的有力武器。三是各地区要提高最低工资政策的社会覆盖面, 督促并扶持最低工资制度在民营企业的有效执行, 争取当地最低工资标准在每两年内调整一次。四是最低工资制度与工资增长机制、降费减税、企业社会责任等政策进行系统集成。各地政府加大最低工资制度实施的监管, 激励企业承担更多社会责任, 增加社会保障等公共事业投入, 也是通过政策系统集成在间接提高工资。五是推动可自动化企业走向深度自动化, 帮助民营企业、西部地区企业进行自动化转型。各地区政府可通过研发费加计扣除、符合产业政策的创新补贴等降费减税措施, 激励可自动化企业不断提高机器人使用密度, 从而走向深度自动化。上述措施对于民营企业、西部地区企业进行自动化转型同样适用。东部地区可向西部地区转移技术、人才和机器人设备等, 实现区域协调发展。各地应提高“专精特新”认定中的中小民营自动化企业比例, 让“小巨人”插上自动化的翅膀。本文在研究过程中发现, 采用简约模型在广延边际的工业自动化情景中研究最低工资对技能溢价的影响较为困难, 需要从宏观一般均衡的角度开发包含深度参数的结构模型加以研究。例如, 在结构模型中估计或校准技能差异、自动化前沿等参数, 然后设计反事实场景进行模拟分析。未来采用结构模型全面深入评估自动化情景中的最低工资影响是重要的拓展方向。

参考文献

- [1]陈波, 贺超群 . 出口与工资差距: 基于我国工业企业的理论与实证分析 [J]. 管理世界, 2013, (8): 6-15.
- [2]崔晓敏, 余淼杰, 袁东 . 最低工资和出口的国内附加值: 来自中国企业的证据 [J]. 世界经济, 2018, (12): 49-72.
- [3]樊海潮, 郭光远 . 出口价格、出口质量与生产率间的关系: 中国的证据 [J]. 世界经济, 2015, (2): 58-85.
- [4]方齐云, 刘东 . 融资约束、出口贸易模式与企业技能溢价 [J]. 国际经贸探索, 2020, (10): 40-56.
- [5]郭凯明, 杭静, 颜色 . 资本深化、结构转型与技能溢价 [J]. 经济研究, 2020, (9): 90-105.
- [6]蒋灵多, 陆毅 . 最低工资标准能否抑制僵尸企业的形成 [J]. 中国工业经济, 2017, (11): 118-136.
- [7]江永红, 张彬, 郝楠 . 产业结构升级是否引致劳动力“极化”现象 [J]. 经济学家, 2016, (3): 24-31.
- [8]孔高文, 刘莎莎, 孔东民 . 机器人与就业——基于行业与地区异质性的探索性分析 [J]. 中国工业经济, 2020, (8): 80-98.
- [9]吕越, 谷玮, 包群 . 人工智能与中国企业参与全球价值链分工 [J]. 中国工业经济, 2020, (5): 80-98
- [10]陆雪琴, 文雁兵 . 偏向型技术进步、技能结构与溢价逆转——基于中国省级面板数据的经验研究 [J]. 中国工业经济, 2013, (10): 18-30.
- [11]聂辉华, 江艇, 杨汝岱 . 中国工业企业数据库的使用现状和潜在问题 [J]. 世界经济, 2012, (5): 142-158.
- [12]孙楚仁, 马艳君, 陈瑾 . 最低工资对企业内部雇佣技能结构的影响 [J]. 经济科学, 2020, (4): 97-110.
- [13]盛斌, 郝碧榕 . 全球价值链嵌入与技能溢价——基于中国微观企业数据的经验分析 [J]. 国际贸易问题, 2021, (2): 80-95.
- [14]王小鲁, 樊纲, 胡李鹏 . 中国分省份市场化指数报告 (2018) [M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2019.
- [15]王永钦, 董雯 . 机器人的兴起如何影响中国劳动力市场? ——来自制造业上市公司的证据 [J]. 经济研究, 2020, (10): 159-175.

- [16]许和连,王海成. 最低工资标准对企业出口产品质量的影响研究 [J]. 世界经济, 2016, (7): 73-96.
- [17]余东华,韦丹琳. 互联网应用、技能溢价与制造业全要素生产率——兼论如何有效化解“索洛悖论” [J]. 财经问题研究, 2021, (10): 40-48.
- [18]余淼杰. 加工贸易、企业生产率和关税减免——来自中国产品面的证据 [J]. 经济学(季刊), 2011, (4): 1251-1280.
- [19]闫雪凌,朱博楷,马超. 工业机器人使用与制造业就业: 来自中国的证据 [J]. 统计研究, 2020, (1): 74-87.
- [20]Aaronson, D., and B. J. Phelan. Wage Shocks and the Technological Substitution of Low-Wage Jobs [J]. *Economic Journal*, 2019, 129 (617): 1-34.
- [21]Acemoglu, D. Why Do New Technologies Complement Skills? Directed Technical Change and Wage Inequality [J]. *Quarterly Journal of Economics*, 1998, 113 (4): 1055-1089.
- [22]Acemoglu, D., and P. Restrepo. Low-Skill and High-Skill Automation [J]. *Journal of Human Capital*, 2018, 12 (2): 204-232.
- [23]Acemoglu, D., and P. Restrepo. Robots and Jobs: Evidence from U.S. Labor Markets [J]. *Journal of Political Economy*, 2020, 128 (6): 2188-2244.
- [24]Autor, D., D. Dorn, and G. Hanson. The China Syndrome: Local Labor Market Effects of Import Competition in the United States [J]. *American Economic Review*, 2013, 103 (6): 2121-2168.
- [25]Bahar, D., and H. Rapoport. Migration, Knowledge Diffusion and the Comparative Advantage of Nations [J]. *Economic Journal*, 2018, 128 (612): 273-305.
- [26]Brandt, L., J. V. Biesebroeck, L. Wang, and Y. Zhang. WTO Accession and Performance of Chinese Manufacturing Firms [J]. *American Economic Review*, 2017, 107 (9): 2784-2820.
- [27]Costinot, A., and I. Werning. Robots, Trade, and Luddism: A Sufficient Statistic Approach to Optimal Technology Regulation [R]. National Bureau of Economic Research, 2018.
- [28]De Loecker, J., and F. Warzynski. Markups and Firm-Level Export Status [J]. *American Economic Review*, 2012, 102 (6): 2437-2471.
- [29]Eckardt, M. S. Minimum Wages in an Automating Economy [J]. *Journal of Public Economic Theory*, 2021 (24): 58-91.

[30]Fan, H. , Y. Hu, and L. Tang. Labor Costs and the Adoption of Robots in China [J] . Journal of Economic Behavior & Organization, 2021, 186: 608–631.

[31]Frey, C. B. , and M. A. Osborne. The Future of Employment: How Susceptible Are Jobs to Computerisation [J] . Technological Forecasting and Social Change, 2017, 114: 254–280.

[32]Guerreiro, J. , S. Rebelo, and P. Teles. Should Robots Be Taxed [J] . Review of Economic Studies, 2022, 89 (1) : 279–311.

[33]Lall, S. The Technological Structure and Performance of Developing Country Manufactured Exports, 1985–1998 [J] . Oxford Development Studies, 2000, 28 (3) : 337–369.

[34]Lund, S. , J. Manyika, J. Woetzel, J. Bughin, M. Krishnan, J. Seong, and M. Muir. Globalization in Transition: The Future of Trade and Value Chains [R] . McKinsey Global Institute, 2019.