算法化行为沉沦：对转向不可逆人口崩塌的建模

余峰

所属机构：劳伦斯伯克利国家实验室（LBNL）

本研究是独立的 研究，不代表 *LBNL* 或美国能源部（*DOE*）的观点。

摘要

2025年，全球主要经济体中的绝大多数报告称，其总和生育率（TFR）低于2.1的更替水平。尽管实施了广泛的鼓励生育的财政干预，这种同步性崩溃仍持续存在，揭示了传统线性人口模型的结构性局限。本文提出，移动互联网与人工智能（AI）的普及充当了合成交配干扰因素，促使人类配对动态发生非线性相变。我们将婚姻市场视为受热力学约束支配的复杂系统，提出一种费米–狄拉克选择模型——以国民收入分布作为输入谱，并结合日本纵向数据（2012–2024年）进行拟合——以说明数字“超真实”如何生成日益难以逾越的“婚姻能垒”。我们的模型量化了一个“技术因子”，该因子在最初求偶阶段使女性择偶期望脱离当地经济现实；我们预测，随着人工智能演变为情感替代物，这种扭曲将被严重加剧。预测表明，这种替代效应正在加速；如果不加以干预，2040年以后，世界可能进入不可逆的人口收缩阶段，因为恢复所需的总和生育率突然大幅上升在生物学上是不可能的。归根结底，这一框架解释了传统财政补贴为何无法扭转出生率下降，并表明数字便利性可能构成一种行为“大过滤器”，侵蚀物种延续的内在驱动力。

关键词：人工智能、人口崩塌、费米-狄拉克统计、超真实、生育率、社会物理学

1. 引言

1.1 全球生育率悖论

近期人口数据凸显出东亚和西方生育产出的显著崩塌。中国2025年的统计数据显示，出生率同比下降17%（中国国家统计局 2026年），总和生育率估计低于1.0（徐 2026年）。韩国也呈现出同样的趋势，其总和生育率在2023年降至全球最低纪录0.72（韩国统计厅 2024年）；日本则难以将该数值维持在1.2（厚生劳动省 2024年）。矛盾的是，尽管过去十年实施了广泛的鼓励生育干预措施，并且结构性条件表面上持续向有利方向转变——包括计划生育政策放宽、政府财政补贴、房价下降，以及性别平等规范逐渐成为主流——这种崩塌仍在持续。与此同时，从传统上鼓励生育的中东到新兴的印度，所有主要经济体的生育率均同步降至2.1这一代际更替线以下（联合国 2024年）。

这一同步现象表明，传统人口学模型无法充分捕捉21世纪复杂的社会文化动力学。具体而言，这种突然收缩不能仅仅归因于宏观经济停滞，因为在过去十年间，东亚各地的总体增长轨迹并未出现相应的结构性断裂。标准预测的偏离表明，对人口变化进行直接线性外推在结构上是不充分的。相反，必须通过能够捕捉男女婚姻微观互动的非线性动力学来建立生育率模型，从而揭示现代数字社会中推动出生率发生相变的机制。所谓相变，是指一个系统在没有经历重大外部冲击的情况下，却因微小变化的累积而发生突然改变——例如近期中国出生率的崩溃。

1.2 人类约会与交配机制

从机制角度来看，个体生育结果主要取决于直接作用于个体的因素。我们认为，婚姻的主要驱动力是浪漫关系的建立，而这是一种配对过程。根据心理学，对建立联系的渴望往往与长期经济障碍相互独立，

例如养育子女的终生成本，因为个体在初次发现自己喜欢某人时，并不会考虑是否要孩子。相反，在这一阶段，主要决定因素是女性在初次相遇时的预期与接受程度——无论相遇是通过家庭安排、偶然邂逅还是约会应用实现的（Oppenheimer，1988年；Raymo等，2015年）。传统经济模型跳过了这一初次接触过程，因此忽视了推动关系从约会走向婚姻的动态变化，将模型简化为出生率与宏观经济因素之间的线性相关。当这一中间传导机制——对浪漫关系的心理驱动力——受到技术和社会干预的扰动，并成为限速步骤时，这些传统预测框架便会失效。

1.3 技术对力比多经济的颠覆

在过去十年中，技术的广泛普及从根本上改变了婚配机制。首先，智能手机对多巴胺能系统的影响，与人们对延迟满足和长期投资的耐受度降低有关（Lembke 2021）。其次，数字环境通过将用户暴露于一种经过精心筛选的“超真实”之中，加剧了焦虑——这种“超真实”呈现的是全球范围内代表着财富和社会地位最高的0.1%的生活方式（Baudrillard 1994）。这会诱发相对剥夺感（Festinger 1954；Macunovich 1998），使人们对未来生活的预期相对于当地现实出现不成比例的上升；与此同时，向上比较所造成的自觉匮乏感（Vogel等人 2014）则压低了男性交配兴趣。同样的不对称也出现在约会平台上。如今，约会平台已成为人们结识伴侣最常见的场所（Rosenfeld等人 2019）：女性迅速积累匹配对象，而男性积累匹配对象的速度则较慢（Tyson等人 2016）。随着人工智能逐渐演变为“情感助理”，提供越来越多可替代人际求偶的合成亲密关系，这一趋势很可能进一步恶化。这种现象并非人类独有。例如，人类长期以来一直通过释放合成交配信号，在昆虫防治中应用交配干扰技术（Cardé和Minks 1995）。同样，人工智能和现代技术如今也正在充当“合成交配干扰剂”，类似于生态种群控制中的信息素干扰。

1.4 社会科学中现有的非线性建模方法

为解释这些复杂因素，研究人员一直将物理学及其他定量领域中的非线性建模方法引入社会科学，并不断加以调整。非线性建模在社会科学中的应用已经相当成熟（Castellano等人 2009年；Galam 2012年），为利用物理学框架理解复杂的人类行为奠定了方法论基础。既有研究运用统计力学和多粒子假设对收入分布进行建模——其中最著名的是Dragulescu和Yakovenko（2000）的研究，Yakovenko和Rosser（2009年）以及Chakrabarti等人（2013）对其进行了综述——同时也用于研究财富不平等和房地产泡沫。这些研究表明，将社会主体视为受热力学约束的相互作用粒子，在不同社会经济分布中既可行，又具有经验上的简约性。其中有一条研究脉络与本文直接相关：Dil和Dil（2023年）表明，在高不平等系统中，变形费米–狄拉克分布比玻尔兹曼–吉布斯形式更贴合国民收入数据。该研究将这些统计形式应用于收入本身的分布；而我们则将这一分布用作选择过程的输入谱。

鉴于经济地位与婚姻前景之间存在很强的相关性，这些社会物理学方法可以自然地从单纯的财富分布扩展到婚姻市场的动态研究。这一扩展至关重要，因为现有的人口学模型往往无法捕捉社会系统达到技术颠覆的临界饱和时所发生的非线性“相变”（Scheffer 等，2009年）。通过将配偶选择视为受这些潜在经济分布约束的过程，本研究旨在提供理解生育率突然崩溃所必需的理论框架。

1.5 理论方法与贡献

本研究弥合了人口学观察、婚配机制与社会物理学建模之间的鸿沟。人口学模型既包括线性方法，也包括非线性方法；要捕捉技术颠覆如何改变初始求偶过程，以及数百万个体的配对决策如何汇聚成宏观层面崩溃，就必须将婚姻市场视为一个受热力学约束的多粒子系统。我们通过费米-狄拉克统计对人类婚配动力学建模，并将国民收入分布作为输入谱、女性期望作为阈值屏障，从而量化全球生育率中正在发生的“相变”。本文对相关研究的贡献包括：(1) 提出一种新颖的“婚姻能垒”模型，捕捉线性经济相关性所忽略的非线性阈值动力学；(2) 量化扭曲这一能垒的“技术因子”；以及 (3) 预测

人工智能对未来出生率日益加剧的影响。这一框架为经济激励为何未能扭转人口崩塌提供了另一种解释。

2. 应用费米-狄拉克模型进行出生率预测

为对生育转型进行建模，我们采用一种非线性总体模型，分离出平均收入与生育率之间的核心相关性。尽管文化规范和政策变化会导致各地区存在差异，但我们认为，交配背后的阈值动力学在现代化经济体之间具有广泛的普适性（联合国2024年）。为在不受短期地方因素干扰的情况下对这一方法进行实证验证，我们选择日本作为主要案例研究对象。日本相对较高的文化同质性与长期经济停滞构成了稳定的“社会物理平衡”，使其成为分离婚配市场基本非线性机制的合适环境。

为区分真实的系统性模式与单纯的曲线拟合，我们采用以下验证方案。我们利用单个年份的横截面数据校准模型参数，以2012年为基准确定水平，然后预测随后十年的生育率。通过将后续年份用作验证集，我们表明，这一参数最少的模型能够紧密追踪婚配市场的长期结构性轨迹。

2.1 婚姻作为结构性守门机制

传统人口学认为，降低子女抚养的经济负担能够促进生育。我们认为，这一观点错误地识别了首要瓶颈。生育率的直接决定因素是择偶动机。在现代东亚社会中，经济地位是婚姻的间接筛选因素，但并不是婚姻内部生育的直接筛选因素。例如，尽管日本的结婚率突然下降，已婚女性平均生育子女数仍接近2.0（日本国立人口与社会保障研究所，2023年）。这表明，年度出生人数与年度结婚人数呈线性耦合关系（$B = k \cdot M + c$），使婚姻成为人口更替的首要守门机制（图1）。

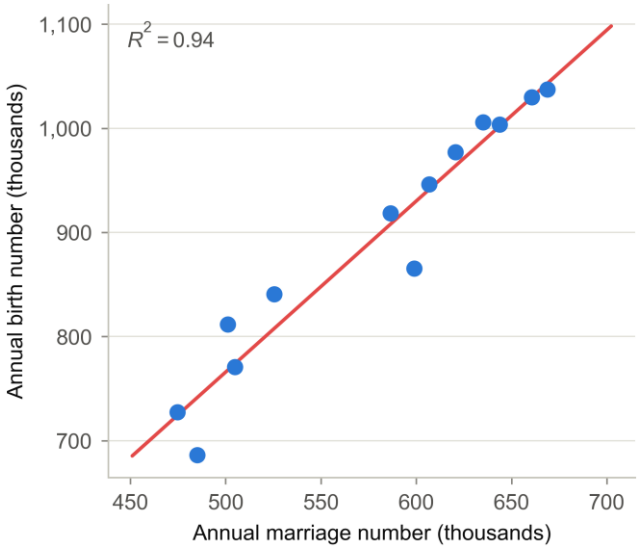


图1 日本年度结婚人数与出生人数之间的线性相关性（$R^2 = 0.94$）

2.2 婚姻能垒模型

在确认年度出生人数与结婚人数之间存在很强的线性依赖关系后，我们可以有效地将生育率预测问题简化为婚姻进入预测问题。为量化现代社会技术因素的影响，我们提出，可以将一个庞大的人类群体视为由相互作用粒子组成的热力学系综。在这一系统中，男性与女性之间的配对结合被建模为一种化学相互作用，必须克服特定的经济门槛，即“能量壁垒”。化学领域将其称为活化能：反应启动所需的推动力，而这一推动力可能远大于反应完成后所节省的任何成本。

在东亚文化中，由于文化规范和供给侧限制，女性通常对进入婚姻拥有主要决定权。因此，将婚姻进入建模为一种阈值评估，即根据女性的经济期望对潜在男性伴侣进行评估，是一种立足于东亚人口现实的合理结构性假设（Raymo等，2015年）。无论女性在经济上是否独立，这一假设都成立。当她自行做决定时，男性会根据她所持有的标准接受评判；当她的家庭参与决策时，男性则会根据家庭明确提出的要求接受评判，下面的日本和中国案例说明了这一点。两种情况下，门槛都处于同一位置，提出的也是同一个问题——男性是否能够供养一个家庭——而收入在这一判断中占据重要地位。因此，该模型不另外区分城市和农村，也不单独纳入女性自身的收入。由此还可以推知，即使没有任何人的偏好发生变化，标准也可能提高：第1.3节所述的数字环境同样容易触及施加这一评判的人，以及接受评估的男性。对男性而言，跨过这一门槛需要满足一项相当高的经济“活化能”，它不同于日常生活成本，而且往往高于后者。在日本，与进入婚姻相关的初始支出（仪式、礼金以及置办家庭）通常为300万至400万日元，这对一般男性而言接近整整一年的薪资，而且婚后还需要提供更好的住房。在中国，这一障碍更加僵化，通常还要求拥有房地产所有权并支付高额彩礼（Chae和Zhang，2026年）。这些一次性支出促成了活化能类比；模型评估的是男性必须赚取多少年度收入，才能负担得起这类支出。如今，人们所感知的进入婚姻所需经济门槛，远高于作为单身个体或已婚夫妇持续承担的生活成本。事实上，在大多数现代经济体中，由于共同住房和消费所带来的规模经济，已婚夫妇人均生活成本低于单身个体（图2）。

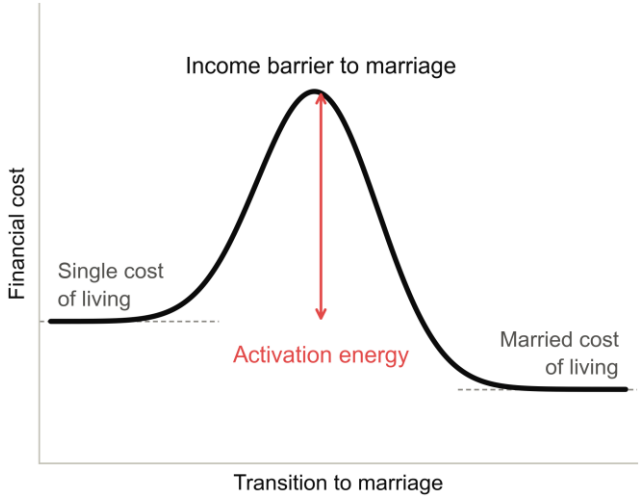


图 2 拟议的男性收入壁垒作为决定婚姻和生育率的唯一因素。该示意图展示了从单身生活成本过渡到已婚生活成本所需的“活化能”

基于这些假设，我们提出两个非线性方程，用于表示结婚概率与男性收入之间的函数关系。

阿伦尼乌斯应用：以所需门槛收入（$I_{barrier}$）与实际男性收入（I）的比值表示时，男性人口中的结婚概率 P(I) 最初可以使用阿伦尼乌斯型活化方程进行近似：

$$P(I) = \alpha \exp\left(-\frac{I_{\text{barrier}}}{I}\right) \quad (1)$$

其中，$I_{barrier}$ 表示女性对潜在伴侣所期望的男性平均年收入，α 是一个缩放前置因子。方程（1）说明了为什么当实际收入 I 无法跟上算法膨胀的期望（$I_{barrier}$）时，结婚率会呈指数级骤降：对于收入远低于 $I_{barrier}$的低收入男性而言，结婚概率微乎其微；而一旦跨越这一壁垒，结婚概率便会出现急剧的非线性增长。

费米-狄拉克改进：然而，随着α 收入的增长，阿伦尼乌斯公式趋近于，因此拟合得到的α 1.4578使其在高收入下返回P(I) > 100%，这在物理上并不现实。为考虑高收入饱和——即在高收入者中，婚姻概率渐近于上限P_{max} ——我们使用费米-狄拉克统计（Dil和Dil，2023）重新构建转移核。之所以选择费米-狄拉克统计，而不是玻色-爱因斯坦统计或麦克斯韦-玻尔兹曼统计，

是由市场本身的结构决定的：在一夫一妻制下，一个个体至多处于一种婚姻状态，其占据上限为1，这在社会层面上对应于泡利不相容原理：

$$P(I) = \frac{P_{\max}}{1+\exp\left[\frac{I_{\text{barrier}}-I}{\sigma}\right]} \quad (2)$$

在这一改进模型中，σ 代表“社会温度”，即设定择偶标准在整个人口中分布范围的参数，而上限 P_{max} 固定为0.95。方程（2）简洁地刻画了宏观相变：随着数字超真实推高 $I_{barrier}$ ，而实际男性收入 I 停滞不前，男性收入分布的大部分被移至化学势以下（$I < I_{barrier}$），进入费米-狄拉克曲线的“禁区”，从而导致总体婚姻率和出生率发生非线性崩塌。更直白地说，化学势是指男性结婚概率达到 P_{max}一半时所对应的收入。如果所有人采用的标准大致相同，σ 就较小，结婚概率会在收入跨过这一阈值时急剧变化；如果标准差异很大，σ 就较大，变化会更加渐进，并且一些收入低于障碍的男性仍然能够结婚。

2.3 使用日本数据验证模型

为验证模型的有效性，我们分析了日本政府官方统计中2012–2024年的出生率、婚姻统计数据、男性人口分布以及出生队列数据（由于男性平均结婚年龄，这些数据滞后32年）。将某一年的结婚人数除以32年前的出生人数，可得到某一出生队列在该年结婚的占比（图 S1；图 S2中对滞后年数本身进行了变化；所有编号为 S 的图均见在线资源 1），这样即使人口减少，该占比仍具有可比性。之所以将2012年作为起始年份，是因为这一年标志着2008年金融危机之后的稳定期，也是智能手机普及率超过20%的阈值年份。本案例中的理论 $I_{barrier}$ 被假定为所有男性平均收入的1.1倍，这与未婚日本女性表示在考虑结婚时所抱持的经济期望相符。在一项全国调查分析中，94%的女性认为伴侣的经济状况很重要或值得考虑，而男性的这一比例为41%；约十分之九的女性偏好收入不低于自己的伴侣（Ghaznavi等（2022））。此外，我们还从东京大学报告的一项近期综合研究中获得了一个匿名日本城市的结婚率，该研究使用了行政税务记录（Masaki 2024）。如果模型仅通过对平均收入进行基准校准，就能准确再现这一横截面市级分布，那么这将支持我们的结构性假设具有经验上的合理性（图 3；薪资趋势见图 4a）。

为确定这些精细化模型中的拟合因子，我们首先估算了相对于32年前出生队列出生人数的有效总和结婚率，发现平均结婚率约为40%。随后，我们使用2024年结婚率数据，通过将总和结婚率约束为与实际值相匹配，确定了拟合参数。由此得到，阿伦尼乌斯模型的拟合参数为α = 1.4578，费米-狄拉克拟合参数为σ = 2.40百万日元。图S3列出了σ的识别结果。

使用这些拟合参数，费米-狄拉克模型与东京大学报告的市政数据高度吻合（Masaki 2024）。数据显示，收入低于200万日元时，估计结婚率低于10%；当收入超过平均水平时，结婚率则上升至55%以上。通过这一独立于纵向测试数据进行的单参数校准，我们的费米-狄拉克公式捕捉到了日本婚配市场的非线性经验结构。这表明，日本观测到的横截面婚姻分布可以用费米-狄拉克函数形式很好地近似（表 1）。

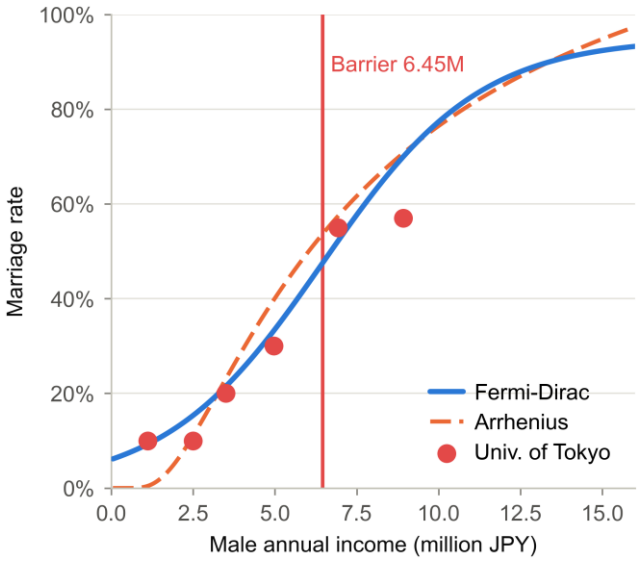


图 3 2024年按收入划分的结婚概率：模型预测与东京大学参考数据。与阿伦尼乌斯模型（橙色线）相比，费米–狄拉克模型（蓝色线）与参考数据点（红点）的拟合效果更佳，尤其是在过渡区域。障碍为 6.45 百万日元

表 1日本模型预测与实际结婚率的比较（年份：2024年；障碍：6.45 百万日元；实际汇总比率：40.12%）。与实际值的差异（费米）：−0.04 个百分点。

区间（日元）	占比（%）	平均收入（百万）	费米–狄拉克	阿伦尼乌斯	参考值
低于200万	9.1	1.12	9.27%	0.45%	10%
200万 - 300万	8.7	2.50	15.34%	11.03%	10%
3.0M - 4.0M	14.3	3.50	21.48%	23.06%	20%
4.0M - 6.0M	31.6	4.97	33.22%	39.74%	30%
6.0M - 8.0M	17.9	6.92	52.14%	57.40%	55%
8.0M - 10.0M	8.6	8.92	69.95%	70.70%	57%
超过 10.0M	9.7	14.87	92.23%	94.46%	–
总计	**99.9**	–	**40.08%**	**42.42%**	**40.12%**

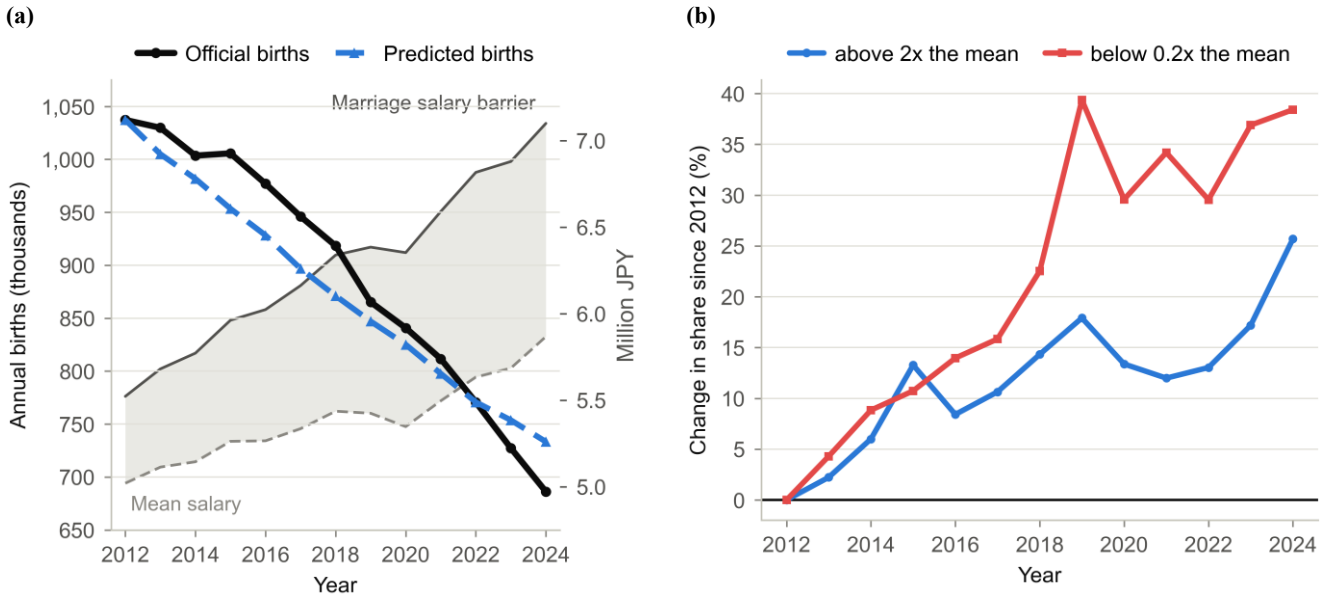


图4 出生人数预测及障碍背后的收入数据。（**a**）2012–2024年仅技术模型的历史验证（表2）。左轴为官方年度出生人数和预测值；右轴为男性平均工资和婚姻工资门槛。平均工资从5.02百万日元上升至5.87百万日元，而门槛从5.52百万日元上升至7.10百万日元，因此两者之间的阴影差距从0.50百万日元扩大至1.23百万日元。（**b**）同期的男性收入两极分化（日本国税厅，男性受薪者构成）。每年的分布均以当年男性平均工资的倍数为界进行划分，因此各区间不会随名义工资增长而漂移。收入高于平均工资两倍的男性占比上升了26%，收入低于平均工资五分之一的男性占比上升了38%：分布两端同时扩大。这种扩大本身可能由技术因子驱动，因为图中展示的是分布的顶部，因此被视为足够的收入，是由所展示出来的收入水平而非典型收入水平所决定的

2.4 建模历史出生趋势与“技术因子”（2012–2024年）

接下来，我们根据过去12年的出生率数据评估了模型的预测准确性。我们使用官方政府数据中的男性收入分布（图 S4），并利用费米-狄拉克模型估算不同收入档次下的结婚概率。随后，根据人口分布对这些概率进行加权，从而得出整个男性群体的有效婚姻率。最后，将有效婚姻率乘以人口规模和线性生育因子（根据图1推导），并使用2012年基线数据进行校准，以计算出生总人数。

在我们的预测框架中，我们假设技术通过抬高理想伴侣的“预期收入”来抑制出生率——这是由于社交媒体让用户接触到收入最高的0.1%人群高度精心策划的生活方式。为量化这一点，我们在收入门槛（$I_{barrier}$）项中引入了一个技术因子乘数。该因子作为数字超现实日益普及程度的代理变量，反映出现代经济体中观察到的每日智能手机使用时长持续增加。社交媒体向用户展示了他人生活方式的误导性样本，因此，即使当地工资没有变化，人们对伴侣预期收入的要求也会提高。改变的是标准，而不是任何人的收入，因此模型提高了障碍，同时保持测得的收入分布不变。

技术因子在2012年初始化为1.0（表示没有扭曲），并以每年0.01的幅度线性增长，最高 capped at 1.10。这代表预期水平以一种细微且累积的方式上升——大约相当于平均工资每年增加1%——对个人而言几乎难以察觉（例如，在十年间，600万日元的工资增加60万日元）。关键在于，这种理想化的线性增量旨在展示：当人口接近费米–狄拉克阈值时，预期水平每年几乎难以察觉的漂移（每年1%）如何触发生育率的宏观相变。尽管可以通过数值优化这一年增长率，以最小化2013年至2022年窗口期内的纵向误差（所得最优值接近每年0.65%），但这样做将构成将测试集信息泄漏到校准阶段。为使纵向窗口期不受事后优化影响，我们预先将技术因子 设定 为一个整齐、未经拟合的增量，即每年+0.01（最高 capped at 1.10）。

纳入这一因素后，该模型对截至2022年的每一年出生人数的复现误差均控制在5.21%以内（表2；图 4a）。这支持了模型的稳健性，表明其通过单点校准而非过拟合实现了较高精度。鉴于第 2.3 节根据2024年的横截面确定的核参数，只需进一步调整纵向出生序列中的一个数值，并将其设定为使2012年与记录完全一致。

该序列中没有任何更晚年份的数据被用于确定这一数值。

表2 模型的历史认可（2012–2024年）。仅包含技术因子；不包含人工智能因子。

Year	25—39岁男性（万人）	技术因子	障碍（百万日元）	预测出生人数	实际出生数	误差（%）
2012	985	1.00	5.52	1,037,231	1,037,231	+0.00
2013	972	1.01	5.68	1,004,957	1,029,816	-2.41
2014	958	1.02	5.77	981,669	1,003,539	-2.18
2015	945	1.03	5.96	953,416	1,005,677	-5.20
2016	930	1.04	6.02	928,278	976,978	-4.98
2017	915	1.05	6.16	896,795	946,065	-5.21
2018	900	1.06	6.34	871,130	918,400	-5.15
2019	885	1.07	6.38	847,020	865,239	-2.11
2020	870	1.08	6.35	825,092	840,835	-1.87
2021	855	1.09	6.59	797,657	811,622	-1.72
2022	840	1.10	6.82	770,751	770,759	-0.00
2023	825	1.10	6.88	753,686	727,288	+3.63
2024	810	1.10	7.10	733,316	686,173	+6.87

3. 人工智能事件视界：加速崩溃（2023年至2040年）

3.1 “人工智能因子”与超真实

尽管仅技术模型在2012年至2022年间对日本出生人数的追踪误差保持在5.21%以内，但2023年出现了系统性偏离（+3.63%），并在2024年扩大（+6.87%；图 5）。虽然低于7%的误差从绝对值来看仍属适中，但这一突然而明确的方向性断裂表明，随着生成式人工智能的大规模部署，出现了第二次结构性制度转变。我们推测，生成式人工智能通过同时抬高对生活方式和伴侣的期待，并提供合成式情感替代，进一步加剧了超真实效应（Malfacini 2025年）。

为量化这一制度转变，我们将一个乘法型人工智能因子引入有效门槛（$I_{eff} = I_{barrier} \times$ 技术 $\times$ 人工智能）。根据2023年和2024年的残差（图S5a–b）对该项进行校准后，得到+0.025/年的年增长率（上限为1.25）——是人工智能出现前技术因子增长速度的2.5倍。这一更陡峭的轨迹反映了交互式人工智能系统取代人类求偶和情感效用的能力正在加速。聊天机器人将这种影响从图片延伸到了对话中，因此，如今被抬高的标准变成了用户需要与之交谈的对象，而不再只是观看的对象。它以与技术因子相同的方式作用于门槛。

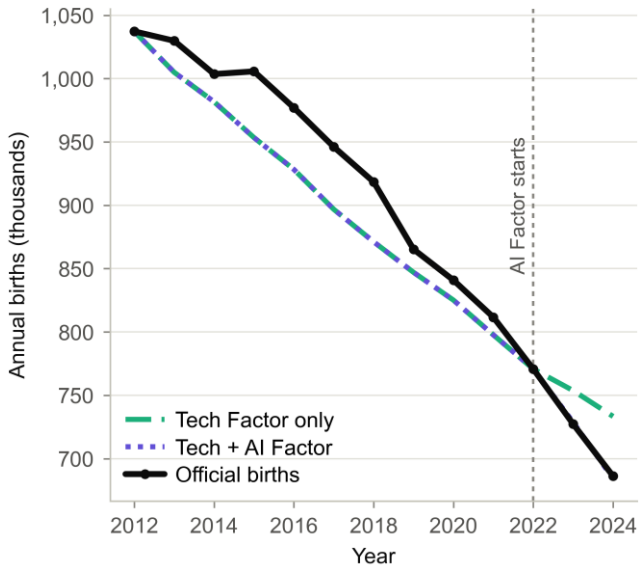


图5 日本出生人数与仅采用技术因子以及同时采用技术因子和人工智能因子的模型对比（2012–2024年）。两次运行在2022年之前完全相同；人工智能因子于2023年首次增加。仅技术因子模型预测的出生人数比2023年实际出生人数高出3.63%，比2024年高出6.87%；加入人工智能因子后，同一运行结果分别为0.20%和-0.28%

3.2 2040年预测：灭绝螺旋

将这一趋势推演至2040年，结果显示出日本现代历史上前所未有的局面。如表 3所示，如果人工智能因子继续扩大实际收入与“有效门槛”（$I_{barrier}$ × 技术 × 人工智能）之间的差距，日本的年出生人数到2040年可能骤降至约 *208,000*人（见图 6；表 3中为207,700人）。第4.4节讨论了平均收入上升而中位数收入停滞或增长较慢时，这一差距如何扩大。该预测假设增长上限呈线性变化，图S6则改变了这一预测所依赖的三个假设；不过，人工智能应用速度的加快表明，其影响可能更加严重。

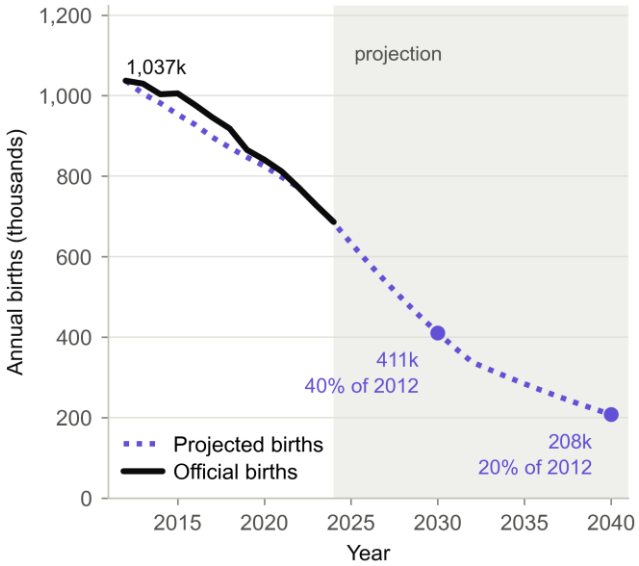


图 6 考虑人工智能加速因素后对日本出生人数的预测（表 3）。年度出生人数将于2030年降至410,702人，并于2040年降至207,700人，分别为2012年水平的40%和20%。2040年之后的人口情景见表 S1

表 3 考虑人工智能加速因素后的出生人数预测（2023年至2040年）

Year	男性人口（万人,	技术因子	人工智能因子	有效门槛（百万	预测出生人数	实际值/参考值	误差百分比
2023	825.00	1.10	1.025	7.05	728,735	727,288	0.20
2024	810.00	1.10	1.050	7.45	684,229	686,173	-0.28
2025	795.00	1.10	1.075	7.75	633,402	–	–
2026	780.00	1.10	1.100	8.05	584,537	–	–
2027	765.00	1.10	1.125	8.35	537,750	–	–
2028	750.00	1.10	1.150	8.66	493,134	–	–
2029	735.00	1.10	1.175	8.99	450,767	–	–
2030	720.00	1.10	1.200	9.31	410,702	–	–
2031	705.00	1.10	1.225	9.65	372,971	–	–
2032	690.00	1.10	1.250	10.00	337,585	–	–
2033	675.00	1.10	1.250	10.15	319,104	–	–
2034	660.00	1.10	1.250	10.30	301,275	–	–
2035	645.00	1.10	1.250	10.45	284,093	–	–
2036	630.00	1.10	1.250	10.61	267,555	–	–
2037	615.00	1.10	1.250	10.77	251,654	–	–
2038	600.00	1.10	1.250	10.93	236,383	–	–
2039	585.00	1.10	1.250	11.09	221,734	–	–
2040	570.00	1.10	1.250	11.26	207,700	–	–

3.3 低估人工智能乘数：中国案例

为检验我们的预测是否过于悲观，我们进行了一项样本外压力测试：将模型应用于中国（2012—2025年；中国国家统计局 2025年、2026年），使用完全相同的技术和人工智能因子时间表（该时间表源自日本），且未针对中国生育数据重新拟合乘数（图7；表4和表5；图S7）。尽管在中国全面二孩政策实施后，2016年出现了短暂的负残差（−15.44%），但模型对近几年出生人数的预测始终高于实际记录出生人数，预测值与实际值的差距在2025年达到+24.76%（预测出生人数为988万，观测值为792万；中国国家统计局 2026年）。

鉴于中国的高度数字化的移动生态系统以及僵化的婚姻进入壁垒（城市房地产所有权和高额彩礼将基线激活能提高至1.2× 平均工资），这一正向偏离表明，我们的基线乘数相对保守。基线费米-狄拉克参数化并非夸大人口威胁，而是低估了在经历快速数字饱和和高基线婚姻壁垒的社会中生育率崩溃的速度。

表4 根据中国出生数据进行的模型认可（2012—2025年）

Year	预测_出生人数（百万）	实际值_出生人数（百万）	误差百分比	平均_薪资（人民币）	障碍（10万 RMB）	Tech	AI
2012	16.35	16.35	0.00	46,769	0.56	1.00	1.000
2013	16.01	16.40	-2.37	51,474	0.62	1.01	1.000
2014	15.75	16.87	-6.63	56,339	0.69	1.02	1.000
2015	15.42	16.55	-6.80	62,029	0.77	1.03	1.000
2016	15.10	17.86	-15.44	67,569	0.84	1.04	1.000
2017	14.61	17.23	-15.18	74,318	0.94	1.05	1.000
2018	14.06	15.23	-7.68	82,461	1.05	1.06	1.000
2019	13.55	14.65	-7.53	90,501	1.16	1.07	1.000
2020	13.12	12.00	9.35	97,379	1.26	1.08	1.000
2021	12.61	10.62	18.72	106,837	1.40	1.09	1.000
2022	12.01	9.56	25.63	114,029	1.51	1.10	1.000
2023	11.21	9.02	24.24	120,698	1.63	1.10	1.025
2024	10.56	9.54	10.68	124,110	1.72	1.10	1.050
2025	9.88	7.92	24.76	127,600	1.81	1.10	1.075

表5 预测　　人工智能加速下的中国出生人数预测（2023年至2040年），使用与表　　3

Year	男性人口（百万，	技术因子	人工智能因子	障碍（10万人 RMB)	预测值（百万）	实际值（百万）	误差百分比
2023	163.00	1.10	1.025	1.63	11.21	9.02	24.24
2024	161.00	1.10	1.050	1.72	10.56	9.54	10.68
2025	158.00	1.10	1.075	1.81	9.88	7.92	24.76
2026	155.00	1.10	1.100	1.91	9.23	–	–
2027	152.00	1.10	1.125	2.01	8.62	–	–
2028	149.00	1.10	1.150	2.12	8.05	–	–
2029	146.00	1.10	1.175	2.23	7.51	–	–
2030	143.00	1.10	1.200	2.34	7.00	–	–
2031	140.00	1.10	1.225	2.46	6.53	–	–
2032	137.00	1.10	1.250	2.59	6.08	–	–
2033	134.00	1.10	1.250	2.67	5.88	–	–
2034	131.00	1.10	1.250	2.75	5.69	–	–
2035	128.00	1.10	1.250	2.83	5.50	–	–
2036	125.00	1.10	1.250	2.91	5.31	–	–
2037	122.00	1.10	1.250	3.00	5.12	–	–
2038	119.00	1.10	1.250	3.09	4.94	–	–
2039	116.00	1.10	1.250	3.18	4.77	–	–
2040	113.00	1.10	1.250	3.28	4.59	–	–

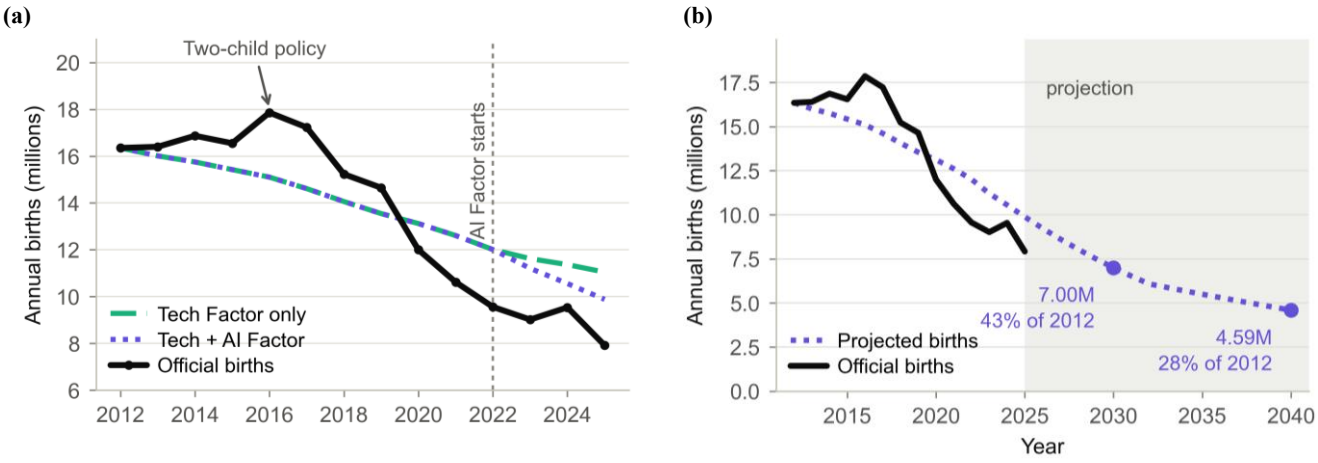


图7 中国出生率估计：屏障模型 + 技术/人工智能因素。（**a**） 模型与官方出生人数数据的对比，2012—2025年（表4）；箭头标示二孩政策出台后出现的2016年峰值。（**b**） 同一模型延伸至2040年（表5）：到2030年出生人数为700万，到2040年为459万，分别为2012年水平的43%和28%。2040年之后的人口情景见表 S2

4. 讨论：灭绝机制

4.1 人工智能悖论：缺乏智能的情感替代

对我们“人工智能因子”的一种批评可能是，当前人工智能（生成式预训练变换器）缺乏真正的主体性或智能。然而，我们的分析表明，情感吸引力并不需要类人的智能。正如Character.AI和Replika等平台上的用户行为所显示的那样（Bakir和McStay，2025年），当前的人工智能模型已经足以成为人类亲密关系的“超常刺激”，其含义正如Tinbergen（1951年）赋予该术语的意义，以及Barrett（2010年）将其延伸至合成媒体的意义。它们无需脆弱性即可提供认可，无需妥协即可提供陪伴（Skjuve等，2021年；Pentina等，2023年）。

危险在于，这种替代发生在通用人工智能（AGI）到来之前。我们目睹的这一螺旋式趋势，仅仅是由先进的聊天机器人驱动的。如果通用人工智能（AGI）成为现实——不仅能够模拟情感，还能主动预判并满足复杂的心理需求——人类从婚配市场中被替代的速度可能会以非线性的方式加快。届时，我们模型中的“人工智能因子”可能会从线性增长（0.025/年）转向复合增长轨迹。

这种人口下降会在滞后20至30年后，永久性地减少育龄女性群体。由于人类世代更替缓慢，2040年之后的人口恢复将需要总和生育率大幅跃升至无法实现的水平（图8b），从而使政策干预的难度呈指数级增加，并由非线性相变造成一个由此无法逆转的临界点。

4.2 全球性同步下降

传统上，人口转变理论认为，生育率下降明显滞后于经济发展，只有在社会达到一定程度的工业化、教育和医疗水平之后才会发生。然而，当前的全球人口格局呈现出一种“数字同步”特征，似乎完全绕过了这些经济发展阶段。我们观察到，一些尚未达到西亚或东亚财富水平的发展中国家以及传统的鼓励生育国家，出现了非线性的生育率崩溃，这表明信息环境可能比人均国内生产总值更具影响力（Vollset 等人，2020年）。

在越南和墨西哥等新兴经济体中，生育率轨迹已脱离经典的工业化时间线。尽管越南的人均收入低于西方国家，其总和生育率（TFR）已降至更替水平以下，约为1.9；胡志明市等城市中心的超低生育率也与东亚相似（联合国 2024 年）。同样，墨西哥也经历了急剧收缩，近期估计显示其总和生育率接近 1.6；欧洲国家在达到显著更高的生活水平后，历经数十年才达到这一水平（联合国 2024年）。

这一现象在印度或许最为重要。印度被广泛预期将成为21世纪的全球人口增长引擎。然而，与长期“人口红利”的预测相反，印度的全国总和生育率已经降至2.1的更替水平门槛以下（国际人口科学研究所和ICF 2021年）。价格低廉的移动数据无处不在（“Jio效应”），加速了全球生活方式标准的传播；与此同时，印度城市地区的婚配市场迅速分层，实际上绕过了西方所经历的渐进式世俗化阶段。

此外，数字信息环境的影响似乎超越了文化和宗教壁垒。伊朗尽管其宗教治理框架积极倡导传统家庭规范，却创下了有记录以来最快的生育率崩溃之一。在国家计划生育政策下，总和生育率于20世纪80年代从超过6.0下降后，尽管伊朗在2010年代全面转向鼓励生育政策，其总和生育率仍继续降至约1.6（联合国2024年），这表明国家意识形态和宗教保守主义不足以抵御全球数字空间的超真实。

4.3 关系能力的不可逆丧失

我们研究结果最令人担忧的影响或许是这一趋势可能具有不可逆性。交配和照护并非仅仅是生物本能，而是由文化强化的习得的社会算法。当一代人逐渐成熟并依赖人工智能来获得亲密关系（“无摩擦关系”）时，他们可能会永久丧失应对人际摩擦所需的韧性——即交配和子女抚养中固有的妥协与冲突（Turkle 2011；Zimmerman等人，2023年）。

这种能力的丧失与日益严重的心理健康危机同时出现。依赖人工智能伴侣与孤立程度上升有关；而且，在涉及拟人化聊天机器人的案例报告中，这种依赖还与青年自杀这一看似矛盾的现象相关（Bakir和McStay，2025年）。此外，人口崩塌还造成了次生死亡危机，即“照护真空”。随着年轻人口不断减少，老年人将面临这样一种未来：照护虽然实现了自动化，却远远不足。与技术乐观主义者认为技术能够延长寿命的观点相反，人类照护结构承受的巨大压力可能会对老年健康结局造成下行压力，从而形成加速人口减少进程的反馈回路。我们面对的不仅是出生人数下降，更是人类维系生命的能力遭到根本性削弱。

4.4 不平等陷阱：为什么人工智能驱动的增长无法挽救生育率

对人口悲观主义的一种常见反驳，是一种经济学假设：人工智能推动生产率提高，将提升生活水平，并因此提高生育率。我们的模型通过强调人工智能主导的经济体中平均收入与中位数收入之间的分化，对这一假设提出了挑战。

在我们的费米–狄拉克框架中，婚姻所需的“活化能”（$I_{barrier}$）在心理上与男性人口的平均收入挂钩。这一“障碍”代表着“合格供养者”的社会标准，而数字媒体所营造的“超真实”又推高了这一标准。在人工智能驱动的财富集中时代，生产率提升所带来的收益不成比例地流向顶层百分位的资本所有者，使平均收入大幅上升；与此同时，由于劳动力替代，中位数收入（代表典型男性劳动者）停滞不前，或以更慢的速度增长。这正是收入谱中的热主体与超热尾部彼此拉开的表现（Yakovenko 和 Rosser，2009年；日本收入分布见图 4b）。

从数学上看，这造成了“移动门槛”动态。将中位数男性劳动者（I_{median}）的婚姻概率 P_{median} 定义为：

$$P_{\text{median}} = \frac{P_{\max}}{1+\exp\left[\frac{I_{\text{barrier}}-I_{\text{median}}}{\sigma}\right]} \tag{3}$$

随着均值（推动有效门槛的因素）与中位数（实际值收入）之间的差距扩大，指数变得越来越趋于正值，从而推动概率 P_{median} 趋近于零。因此，即使总体经济增长（“富人变得更富”），有效门槛的上升速度仍会超过大多数人满足该门槛的能力。 consequently，由人工智能驱动的头重型经济增长，成为抑制中位数人口配对结合的结构性因素：社会顶层越富裕，中位数男性收入者就越远低于预期门槛——因而在算法交配市场中越是受到结构性排斥，无法进入婚姻。

4.5 西方停滞作为人类繁衍的“下界”

我们的分析有意优先采用东亚数据，而非西方人口统计。批评者可能会指出，排除欧洲数据是一项局限；然而，我们认为，西方国家代表了一种“人口统计学上休眠”的状态，记录的是这一转变正在趋近的底线，而不是我们旨在建模的活跃阶段。

几十年来，西欧和北美实际上一直处于更替水平以下，只有依靠大量移民流入，才得以维持人口稳定。用热力学术语来说，这些地区代表着一个“冷储库”，仅靠出生人数已无法维持人口。若不考虑迁移，其背后的下降趋势十分陡峭，预测持续的低于更替水平的生育率将带来经济、社会和地缘政治后果（Vollset 等人，2020年）。对本文而言，难点在于测量而非实质：人口总数同时涵盖出生人数和迁移，因此无法分离出用于拟合“技术因子”的出生信号。

此外，这些国家代表着灭绝曲线的“下界”。尽管其性别平等程度和社会安全网或许高于东亚，西方的生育率仍顽固地处于低位。北欧国家是最明显的例子。长期以来，北欧国家因生育率高且稳定，同时提供慷慨的育儿假、补贴托育并实现较高程度的性别平等，而被视为先行者；但自2010年前后以来，其生育率明显下降，这并非单纯的生育推迟，而且降幅最大的是首次生育——也就是本文所建模的生育起始环节（Hellstrand 等人，2021年）。这表明，文化和政策干预不足以抵消数字交配环境的影响。如果东亚——目前全球工业引擎的“热储库”——经历预测中的相变，并趋近西方的“下界”，全球人口实际上将失去其生育引擎。人类群体的未来并非取决于那些已依赖外部输入维持生存的地区，而取决于那些曾经是人口增长主要驱动力的地区是否会迅速崩溃。

5. 结论

5.1 数字行为沉沦

长期以来，社会学家一直批评John B. Calhoun的“宇宙25号”实验（卡尔霍恩，1973年）具有生物决定论倾向（拉姆斯登和亚当斯，2009年），理由是人类复杂性和文化适应能力使得我们的物种不可能出现这样的“行为沉沦”。然而，这些实验表明，即使资源仍然充足且人口密度下降，出生率也不会恢复到正常水平，

这表明人口减少可能会变成一种自我强化反馈回路。因此，我们不能假设更高的生产率和更少的人口会自动解决生育危机。

此外，本文提出，人工智能构成了卡尔霍恩方程中最后一个缺失变量。通过提供无限量的无摩擦多巴胺和合成式认可，人工智能削弱了社会合作的行为必要性，实际上完成了数字化第二十五宇宙的构建。

由此产生的动态是一种双重失效模式：合成替代导致男性交配动机崩溃，而算法超现实则推动女性的生殖焦虑激增。这使人口停止增长的原因不再是资源匮乏，而是心理退缩——这种情况的后果并不亚于环境气候变化，却明显更不易被察觉。气候变化会使栖息地退化，而“算法气候危机”则侵蚀栖息者坚持生存的生物意志。这种平行关系还延伸至滞后效应。已经发生的变暖无法通过日后的减排逆转，而一旦间隔过去，未出生的队列也无法恢复：按照本文通篇采用的32年队列间隔，2025年放弃的出生人数，意味着2057年将缺少原本可能成为父母的人。即使2040年后总和生育率突然恢复到1.0，日本或中国的人口下降也不会停止（图 8；表 S1 和 S2）。

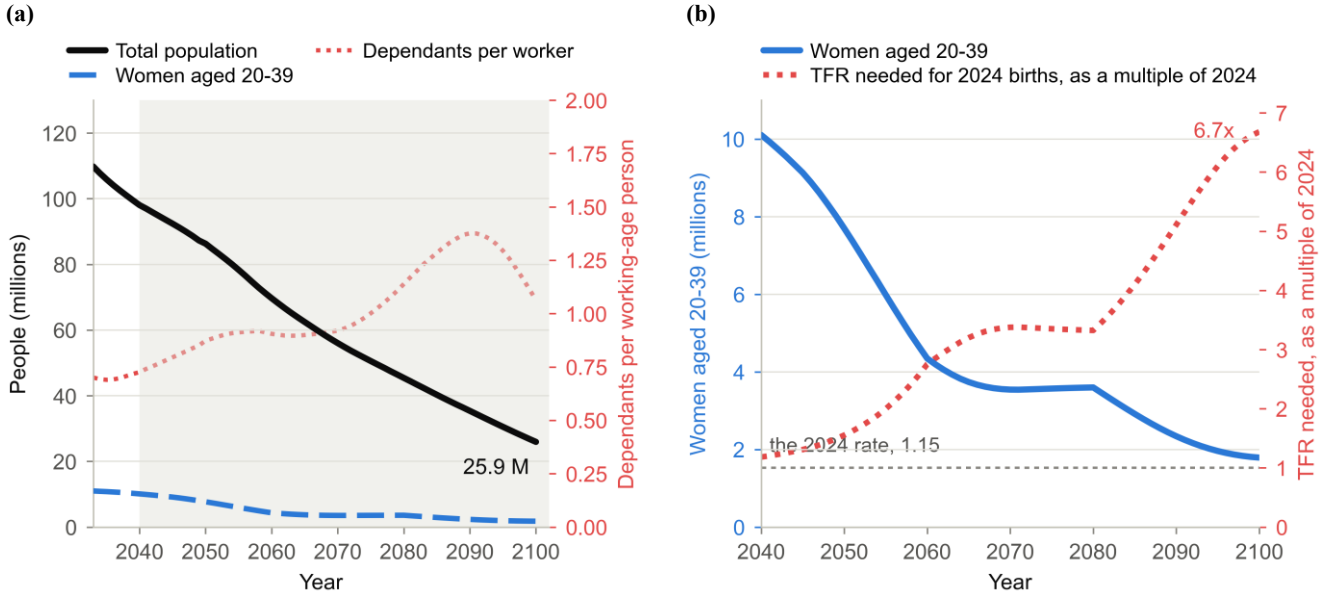


图 8 2040年后总和生育率维持在1.0（即当前数量级）的日本。2040年以前的出生人数采用表 3中的数据；图中所示每一项数据对应的各出生队列均已出生。**(a)**左轴表示总人口和20–39岁女性，右轴表示每名劳动年龄人口对应的受抚养人数。人口从2040年的9810万降至2100年的2590万，且从2070年代中期开始，受抚养人数超过劳动者。**(b)**20–39岁女性人数，以及为使每年出生人数达到2024年出生人数而需要的总和生育率；后者以2024年1.15的生育率为基准，以其倍数表示。所需生育率从2040年相当于2024年生育率的1.18倍，上升至2100年的6.67倍，因为未来生育这些子女的女性已经出生

5.2 大过滤器与禁令的理由

从费米悖论的视角来看，人工智能驱动的生殖崩溃可能代表着一道“大过滤器”——一种发展陷阱：高级文明在实现多行星化之前，便通过合成替代造就自身的过时。因此，我们认为，常规监管框架不足以应对这一威胁。

如果我们的预测成立，人类将在本世纪内面临一条可量化的走向灭绝的轨迹：按照表 3 所示的轨迹，日本的年度出生人数到 2040年将降至约 20.8 万，仅略高于 2023年数据的四分之一。人工智能因子在 2032年达到上限后将不再上升，但它所抬高的障碍仍会随着名义工资持续攀升。每延误一年，就意味着所需的干预规模扩大一年。为避免这一结果，我们主张大幅降低注意力经济的烈度。如果缺乏严格的监管护栏，限制为情感和浪漫关系替代而设计的拟人化人工智能进行大众市场部署，那么我们的预测表明，人类生育率的向下相变可能会形成自我强化，并在 2040年之前变得结构性不可逆。抬高这一

障碍的因素源于部署决策，而非人口学；与老龄化人口不同，这些因素可以通过政策加以改变。我们正站在悬崖边缘：当下的便利，正以未来的存在为代价被购买。

声明

大语言模型的使用 使用大语言模型对作者最初的分析代码进行了修订和重构。该模型未更改本文报告的任何输入、参数、结果或结论，作者对最终版本负责。

经费 作者声明，在准备本稿件期间未获得任何资金、拨款或其他支持。

利益冲突 作者没有需要披露的相关财务或非财务利益。

伦理批准 本研究使用了来自日本政府和中国政府的公开可用数据集。本研究未涉及人类参与者或动物。

数据和材料的可用性 本研究期间生成和/或分析的数据集可从日本政府统计局和中国国家统计局获取。

代码可用性用于费米–狄拉克建模的代码，包括用于模型拟合的处理后数据，可应要求向通讯作者获取。

免责声明：本研究为独立研究，不代表劳伦斯伯克利国家实验室（LBNL）或美国能源部（DOE）的观点。

参考值

Bakir V，McStay A（2025年）快速行动并伤害他人？Character.AI 的伦理、伴侣应用及其案例。*AI & SOCIETY* 40(8):6365–6377。https://doi.org/10.1007/s00146-025-02408-5

Barrett D（2010年）超常刺激：原始冲动如何超越其进化目的。W. W. Norton，纽约

Baudril lard J（1994年）《拟像与仿真》（译者：Glaser SF）。密歇根大学出版社，安娜堡 or

Calhoun JB（1973年）死亡平方：小鼠种群的爆发式增长与消亡。《英国皇家医学会会刊》66(1 Pt 2):80–88。https://doi.org/10.1177/00359157730661p202

Cardé RT、Minks AK（1995年）通过交配干扰控制蛾类害虫：成效与局限。《昆虫学年评》40(1):559–585。https://doi.org/10.1146/annurev.en.40.010195.003015

Castellano C、Fortunato S、Loreto V（2009年）社会动力学的统计物理学。《现代物理评论》81(2):591–646。https://doi.org/10.1103/RevModPhys.81.591

Chae M、Zhang D（2026年）中国年轻男性流动人口的彩礼、婚姻期望与婚姻意向：来自制造业零工的证据。《经济建模》155:107443。https://doi.org/10.1016/j.econmod.2025.107443

Chakrabarti BK、Chakraborti A、Chakravarty SR、Chatterjee A（2013年）《收入与财富分布的经济物理学》。剑桥大学出版社，剑桥。https://doi.org/10.1017/CBO9781139004169

Dil E、Dil E（2023年）基于变形费米–狄拉克分布建模的收入分布社会物理学。《数学社会学杂志》47（2）：97–122。https://doi.org/10.1080/0022250X.2021.1973456

Dragulescu A、Yakovenko VM（2000年）货币的统计力学。《欧洲物理学杂志*B*辑》17（4）：723–729。https://doi.org/10.1007/s100510070114

Festinger L（1954年）社会比较过程理论。《人际关系》7(2):117–140。https://doi.org/10.1177/001872675400700202

Galam S（2012年）社会物理学：物理学家对心理政治现象的建模。施普林格，纽约。
https://doi.org/10.1007/978-1-4614-2032-3 Ghaznavi C、Sakamoto H、Nomura S、Kubota A、Yoneoka D、Shibuya K、Ueda P（2022年）大海捞针：未婚日本成年人数量、特征及伴侣偏好——全国调查分析。*PLOS ONE*17(2):e0262528。https://doi.org/10.1371/journal.pone.0262528 Hellstrand J、Nisén J、Miranda V、Fallesen P、Dommermuth L、Myrskylä M（2021年）不只是更晚，而且更少：新趋势

s

北欧国家的队列生育率。《人口学杂志》58(4)：1373–1399。
https://doi.org/10.1215/00703370-9373618 国际人口科学研究所（IIPS）、ICF（2021年）全国家庭健康调查（*NFHS-5*），*2019*年–*21*：印度。IIPS，孟买。https://dhsprogram.com/pubs/pdf/FR375/FR375.pdf。访问日期：2026年11月1日 Lembke A（2021年）《多巴胺国度：在放纵时代寻找平衡》。达顿出版社，纽约

Macunovich DJ（1998年）生育率与伊斯特林假说：对相关文献的评估。《人口经济学杂志》11(1)：53–111。https://doi.org/10.1007/s001480050058

Malfacini K（2025年）陪伴型人工智能对人际关系的影响：风险、益处与设计考量。《AI & SOCIETY》40(7)：5527–5540。https://doi.org/10.1007/s00146-025-02318-6

Masaki Y（2024年）收入与生育率：利用日本某城市的行政税务记录分析二者关系。《GraSPP讨论论文》E-24-001。东京大学公共政策研究生院。https://www.pp.u-tokyo.ac.jp/wp-content/uploads/2024/12/GraSPP-DP-E-24-001.pdf。访问日期：2026年11月1日

厚生劳动省（MHLW）（2024年）《日本生命统计》。日本政府，东京。
https://www.e-stat.go.jp/en/statistics/00450011。访问日期：2026年11月1日

中国国家统计局（2025年）《中国统计年鉴*2025*》。中国统计出版社，北京。
https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2025/indexeh.htm。访问日期：2026年11月1日

中国国家统计局（2026年）中华人民共和国*202*国民经济和社会发展统计公报。中国国家统计局，北京。 *5*
https://www.stats.gov.cn/english/PressRelease/202602/t20260228_1962661.html。访问日期：2026年11月1日

日本国立人口与社会保障研究所（IPSS）（2023年）第*16*次日本全国生育调查。IPSS，东京。
https://www.ipss.go.jp/ps-doukou/e/doukou16/Nfs16_gaiyoEng.html。访问日期：2026年11月1日

Oppenheimer VK（1988年）婚姻时机理论。《美国社会学杂志》94(3)：563–591。
https://doi.org/10.1086/229030

Pentina I、Hancock T、Xie T（2023年）探索与社交聊天机器人的关系发展：一项关于 Replika 的混合方法研究。《人类行为中的计算机》140：107600。https://doi.org/10.1016/j.chb.2022.107600

Ramsden E、Adams J（2009年）逃离实验室：John B. Calhoun 的啮齿动物实验及其文化影响。《社会史杂志》42(3)：761–792。https://doi.org/10.1353/jsh.0.0156

Raymo JM、Park H、Xie Y、Yeung WJJ（2015年）东亚的婚姻与家庭：延续与变迁。《社会学年度评论》41：471–492。https://doi.org/10.1146/annurev-soc-073014-112428

Rosenfeld MJ、Thomas RJ、Hausen S（2019年）让朋友不再充当中间人：美国的网络约会如何 s
取代其他相识方式。《美国国家科学院院刊》 116(36)：17753–17758。
https://doi.org/10.1073/pnas.1908630116

Scheffer M、Bascompte J、Brock WA、Brovkin V、Carpenter SR、Dakos V、Held H、van Nes EH、Rietkerk M、Sugihara G（2009年）临界转变的早期预警信号。《自然》 461(7260)：53–59。https://doi.org/10.1038/nature08227

Skjuve M、Følstad A、Fostervold KI、Brandtzaeg PB（2021年）我的聊天机器人伴侣——一项关于人机关系的研究。《国际人机研究杂志》149：102601。https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2021.102601

韩国统计厅（KOSTAT）（2024年）*2023*年出生和死亡统计初步结果。韩国统计厅，大田。
https://mods.go.kr/board.es?act=view&bid=11773&list_no=430941&mid=a20108100000。访问日期：2026年11月1日

Tinbergen N（1951年）《本能研究》。克拉伦登出版社，牛津 Turkle S（2011年）《群体性孤独：我们为何对技术期待更多、对彼此期待更少》。基础图书出版社，纽约

Tyson G、Perta VC、Haddadi H、Seto MC（2016）Tinder上的用户活动初探。载于：*2016*年*IEEE/ACM*社会网络分析与挖掘国际会议论文集。IEEE，第461–466页。https://doi.org/10.1109/ASONAM.2016.7752275

联合国经济和社会事务部人口司（2024年）《*2024*年世界人口展望》。联合国，纽约。https://population.un.org/wpp/。访问日期：2026年11月1日

Vogel EA、Rose JP、Roberts LR、Eckles K（2014）社会比较、社交媒体与自尊。《流行媒体文化心理学》3(4)：206–222。https://doi.org/10.1037/ppm0000047

Vollset SE、Goren E、Yuan CW、Cao J、Smith AE、Hsiao T等（2020）2017年至2100年195个国家和地区的生育率、死亡率、迁移和人口情景：全球疾病负担研究的预测分析。《柳叶刀》396(10258)：1285–1306。https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30677-2

徐 W（2026年）《中国人口下降加剧，2025年出生人数创现代时期新低》。《财新全球》。https://www.caixinglobal.com/2026-01-19/chinas-population-decline-accelerates-as-births-hit-modern-era-low-in-2025-102405521.html。访问日期：2026年11月1日

Yakovenko VM、Rosser JB（2009年）专题讨论：货币、财富与收入的统计力学。《现代物理评论》81(4):1703–1725。https://doi.org/10.1103/RevModPhys.81.1703

Zimmerman A、Janhonen J、Beer E（2023年）人类—人工智能关系：挑战、弊端及其对人类/人类的影响 an relationships。《人工智能与伦理》4(4)：1555–1567。https://doi.org/10.1007/s43681-023-00348-8

在线资源 1

《算法行为陷阱：不可逆人口崩溃转变的建模》的补充信息

图 S1–S7 按照正文中各项比较的顺序排列：队列婚姻率与队列滞后、社会温度、男性收入分布、人工智能因子、预测情景以及中国的收入重构。表 S1 和 S2 给出了日本和中国从 2040年到 2100年的年度人口情景。RMSE 表示均方根误差，pp 表示百分点。

计算说明。由于舍入，厚生劳动省收入份额表在某些年份的合计为 99.9，而不是 100.0；横截面检验除以实际总额，而出生数运行不进行此除法，这两种处理均遵循各自所用的原始代码。第 2.3 节、表 1 和图 3 使用男性平均工资 1.1 倍的基线门槛。技术因子在第 2.4 节中引入，人工智能因子在第 3.1 节中引入。表 2 和图 4a 仅使用技术因子；表 3 和图 6 使用两个因子，而图 5 对比两种运行结果。计算中使用的厚生劳动省分布见图 S4；单独的 NTA 分布见图 4b。

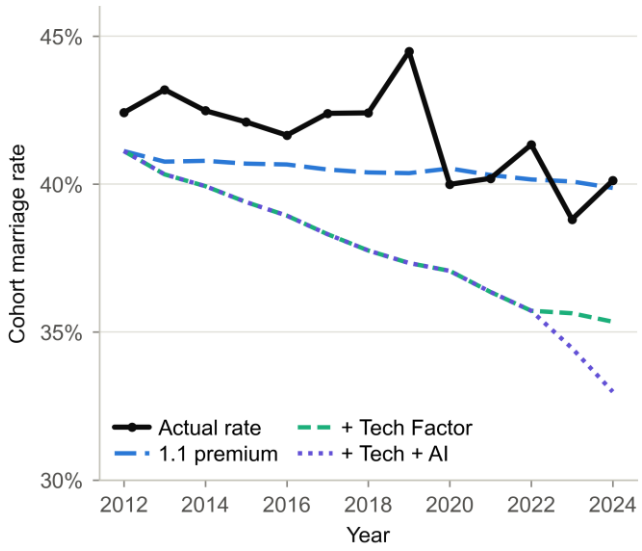


图 S1 队列婚姻率估计（2012–2024年）：实际值与费米–狄拉克模型的运行结果对比；模型分别采用男性平均工资 1.1 倍的基线门槛、加入技术因子，以及加入技术因子和人工智能因子。该比率支持对这些参数的选择

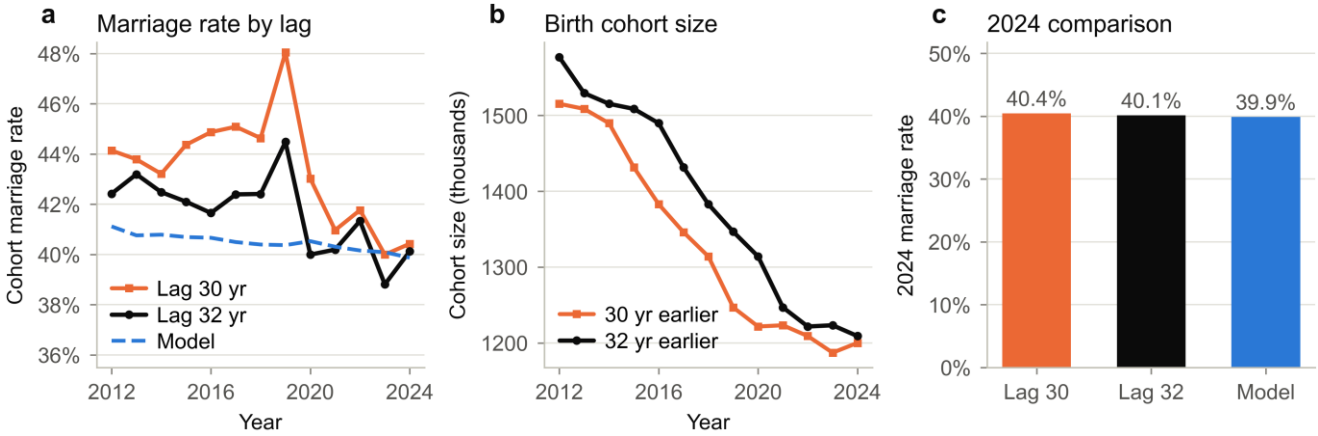


图 S2 出生队列滞后对观测婚姻率的影响。（a）使用早 30 年和 32 年的出生人数计算的结婚率，与模型进行比较。（b）出生队列规模作为两个分母。（c）2024年在两种滞后条件下的结婚率与模型预测 ed

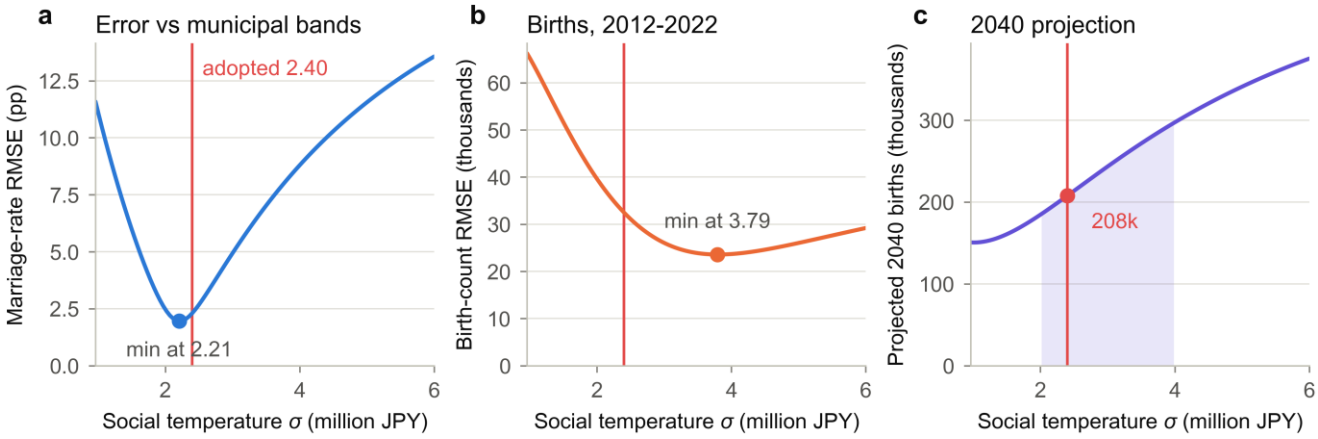


图 S3 社会温度 σ 的敏感性分析，其取值范围为采用值的 0.4 至 2.5 倍。(a) 相对于东京大学市町村收入等级的婚姻率均方根误差。(b) 2012–2022年预测出生人数的均方根误差，在较大的 σ 处出现宽阔的最小值。两项比较的最小误差值不同；红线标示采用的 σ = 240。(c) 随着 σ 变化而预测的 2040年出生人数

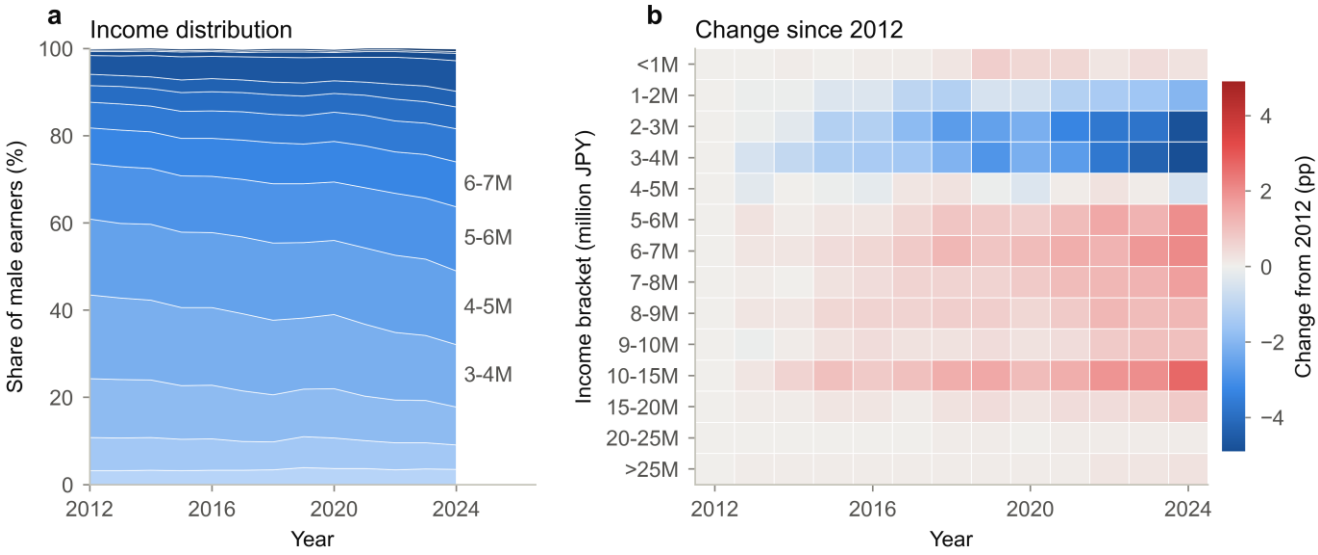


图 S4 2012–2024年男性收入分布。(a) 厚生劳动省公布的14个收入档中各档收入者的占比。(b) 各档占比相较于2012年的变化，以百分点表示：200万至400万日元档的收入者占比下降，600万日元以上档的占比上升。M 表示百万日元

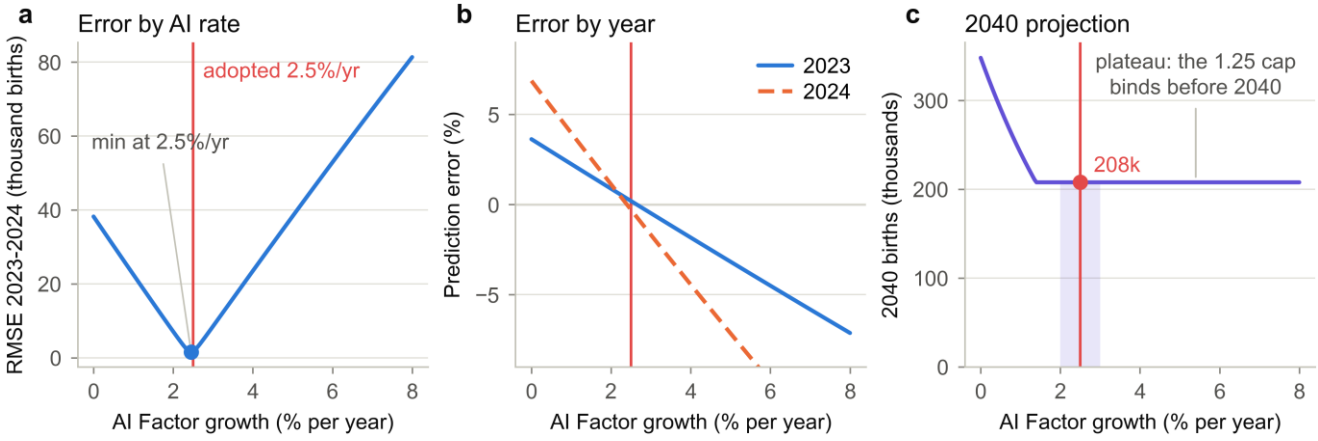


图 S5 人工智能因子增长率的校准，其取值范围从零到采用值的 3.2 倍。(a) 2023–2024年预测出生人数的均方根误差。(b) 分别显示这两年的预测误差。红线标示每年采用的 0.025 增量。(c) 每年超过约 1.4% 后，预测的 2040年出生人数保持不变，因为人工智能因子到 2040年达到其上限 1.25

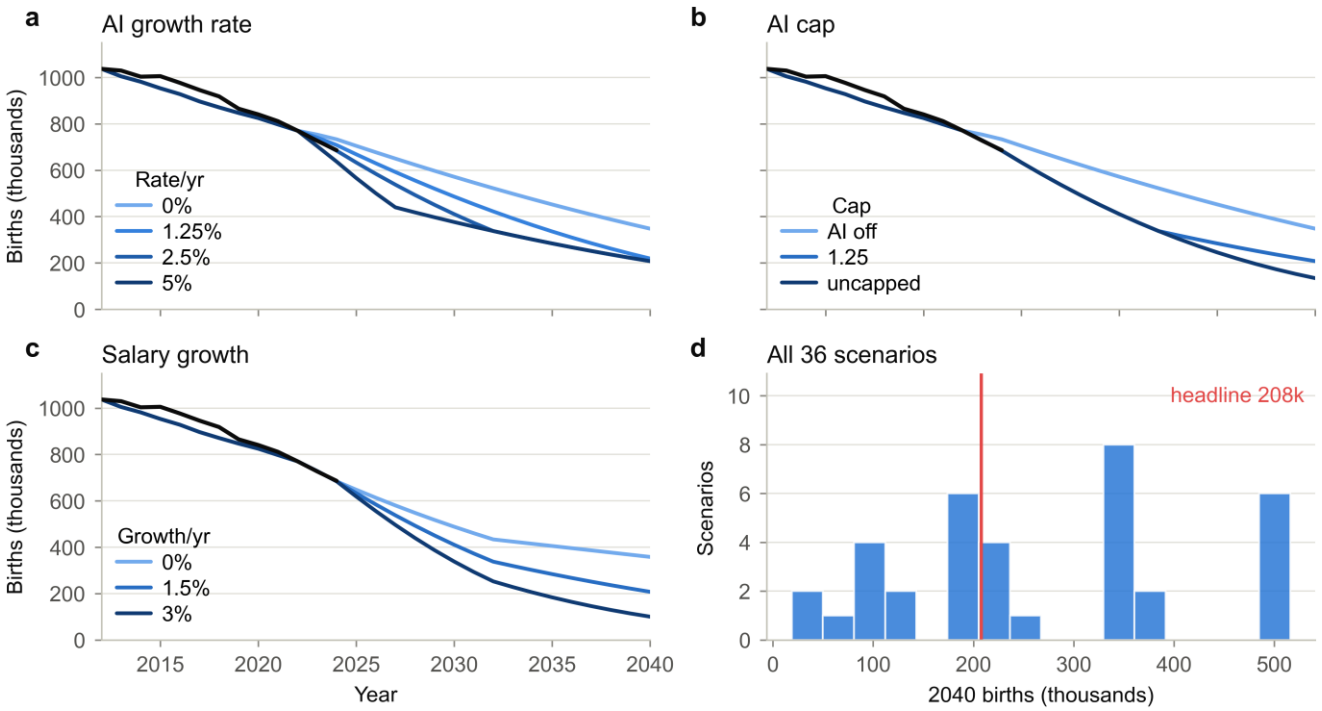


图 S6 不同模型设定下的出生人数预测。(a) 人工智能因子增长率分别为零、采用值的一半、采用值和采用值的两倍。(b) 人工智能因子的上限分别为 1.00（不增加人工智能）、1.25（采用值）和无上限。(c) 平均工资增长率分别为零、采用值和采用值的两倍。(a–c) 中的黑线表示观测到的出生人数。(d) 所有 36 种组合下的 2040年出生人数；红线表示主要预测值，约为 208,000

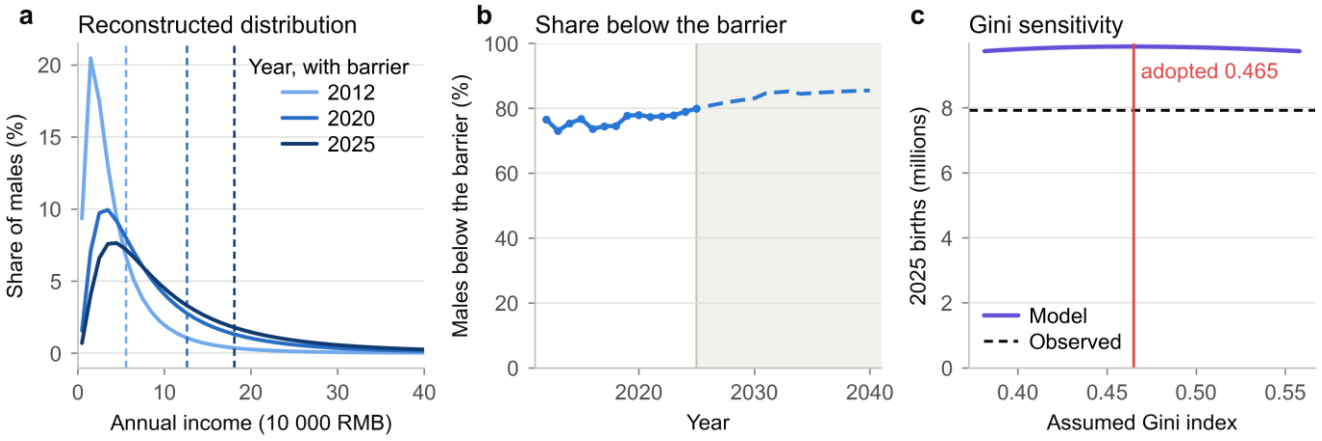


图 S7 中国的收入重构。(a) 2012年、2020年和2025年的对数正态收入分布；虚线竖线标出相应的婚姻壁垒。(b) 低于门槛的男性占比，虚线表示预测值。(c) 假设收入不平等基尼指数在采用值 0.465 的 0.82 至 1.20 倍之间变化时的 2025年预测出生人数

表 S1 日本，2040年后总和生育率为 1.0。涵盖 2040 年至 2100 年的每一年。2040 年的出生人数取自表 3。出生人数、20–39岁女性和各年龄组的数据单位均为百万。最后一列是为了达到 2024年出生人数而需要在该年实现的总和生育率

Year	出生人数 (M)	女性 20–39岁（百万）	<18 (M)	18–64岁 (M)	65+ (M)	总计 (M)	受抚养人 每名劳动者	TFR 所需
2040	0.208	10.10	7.32	56.81	33.92	98.05	0.73	1.36
2041	0.496	9.93	7.09	55.71	34.18	96.98	0.74	1.38
2042	0.487	9.74	6.89	54.64	34.28	95.81	0.75	1.41
2043	0.477	9.55	6.74	53.56	34.37	94.67	0.77	1.44
2044	0.467	9.34	6.62	52.50	34.40	93.53	0.78	1.47
2045	0.457	9.13	6.54	51.46	34.39	92.39	0.80	1.50
2046	0.444	8.88	6.49	50.43	34.30	91.22	0.81	1.54
2047	0.431	8.61	6.47	49.36	34.16	89.99	0.82	1.59
2048	0.416	8.32	6.48	48.27	33.95	88.69	0.84	1.65
2049	0.401	8.02	6.50	47.15	33.61	87.27	0.85	1.71
2050	0.385	7.70	6.55	46.06	33.69	86.29	0.87	1.78
2051	0.368	7.37	6.60	44.99	33.13	84.72	0.88	1.86
2052	0.351	7.03	6.65	43.95	32.61	83.20	0.89	1.95
2053	0.334	6.68	6.70	42.92	32.03	81.65	0.90	2.05
2054	0.317	6.34	6.75	41.94	31.34	80.03	0.91	2.17
2055	0.299	5.98	6.80	40.97	30.56	78.33	0.91	2.29
2056	0.282	5.64	6.84	39.98	29.75	76.57	0.92	2.43
2057	0.265	5.30	6.89	38.99	28.87	74.74	0.92	2.59
2058	0.248	4.97	6.93	38.01	28.02	72.96	0.92	2.76
2059	0.233	4.65	6.66	37.27	27.36	71.29	0.91	2.95
2060	0.217	4.34	6.39	36.57	26.72	69.68	0.91	3.16
2061	0.210	4.19	6.12	35.84	26.17	68.13	0.90	3.27
2062	0.203	4.05	5.86	35.12	25.65	66.63	0.90	3.39
2063	0.197	3.93	5.60	34.37	25.21	65.18	0.90	3.49
2064	0.191	3.82	5.35	33.64	24.81	63.80	0.90	3.59
2065	0.187	3.74	5.10	32.88	24.47	62.45	0.90	3.67
2066	0.183	3.67	4.87	32.12	24.13	61.12	0.90	3.74
2067	0.181	3.62	4.65	31.37	23.77	59.79	0.91	3.79
2068	0.179	3.58	4.44	30.63	23.41	58.48	0.91	3.83
2069	0.178	3.55	4.25	29.89	23.09	57.23	0.91	3.86
2070	0.177	3.54	4.08	29.18	22.77	56.02	0.92	3.87
2071	0.177	3.54	3.92	28.42	22.51	54.85	0.93	3.88
2072	0.177	3.55	3.78	27.64	22.29	53.72	0.94	3.87
2073	0.178	3.55	3.66	26.85	22.13	52.65	0.96	3.86
2074	0.178	3.56	3.56	26.06	21.98	51.60	0.98	3.85
2075	0.178	3.57	3.47	25.26	21.83	50.56	1.00	3.85
2076	0.179	3.58	3.40	24.46	21.67	49.53	1.03	3.84
2077	0.179	3.58	3.35	23.65	21.52	48.52	1.05	3.83
2078	0.179	3.59	3.31	22.84	21.31	47.46	1.08	3.82
2079	0.180	3.59	3.28	22.04	21.13	46.45	1.11	3.82
2080	0.180	3.60	3.26	21.24	20.93	45.43	1.14	3.81
2081	0.173	3.46	3.23	20.46	20.71	44.41	1.17	3.97

Year	出生人数 (M)	女性 20–39岁（男性）	<18 (M)	18–64岁 (M)	65+ (M)	总计 (M)	受抚养人 每名劳动者	TFR 所需
2082	0.166	3.32	3.21	19.71	20.45	43.37	1.20	4.13
2083	0.159	3.18	3.18	18.98	20.20	42.35	1.23	4.31
2084	0.152	3.05	3.15	18.29	19.87	41.31	1.26	4.50
2085	0.146	2.92	3.12	17.63	19.54	40.29	1.28	4.71
2086	0.139	2.79	3.08	17.00	19.20	39.27	1.31	4.92
2087	0.133	2.67	3.03	16.41	18.85	38.28	1.33	5.15
2088	0.128	2.55	2.98	15.86	18.46	37.30	1.35	5.38
2089	0.122	2.44	2.93	15.35	18.09	36.36	1.37	5.62
2090	0.117	2.34	2.87	14.89	17.63	35.39	1.38	5.86
2091	0.112	2.25	2.80	14.49	17.12	34.41	1.38	6.11
2092	0.108	2.16	2.73	14.13	16.57	33.42	1.37	6.34
2093	0.104	2.09	2.66	13.81	15.99	32.46	1.35	6.58
2094	0.101	2.02	2.58	13.54	15.37	31.49	1.33	6.80
2095	0.098	1.96	2.50	13.31	14.73	30.54	1.29	7.00
2096	0.095	1.91	2.41	13.11	14.07	29.59	1.26	7.19
2097	0.093	1.87	2.33	12.96	13.37	28.66	1.21	7.35
2098	0.092	1.83	2.24	12.82	12.69	27.75	1.16	7.48
2099	0.090	1.81	2.16	12.69	11.98	26.83	1.11	7.59
2100	0.090	1.79	2.08	12.57	11.29	25.94	1.06	7.67

表 S2 中国，2040年后总和生育率为 1.0。涵盖 2040年至2100年的每一年。2040年的出生人数取自表5。出生人数、20–39岁女性人数和各年龄组人数的单位均为百万。最后一列是指当年要达到2024年的出生人数所需的总和生育率

Year	出生人数 (M)	女性 20–39岁（百万）	<18 (M)	18–64岁 (M)	65+ (M)	总计 (M)	受抚养人 每名劳动者	TFR 所需
2040	4.591	139.74	121.30	733.52	324.44	1179.26	0.61	1.37
2041	6.937	138.74	119.22	724.93	328.03	1172.18	0.62	1.38
2042	6.856	137.12	116.54	716.64	317.99	1151.17	0.61	1.39
2043	6.770	135.40	115.39	705.73	312.54	1133.66	0.61	1.41
2044	6.683	133.65	112.84	696.01	306.69	1115.54	0.60	1.43
2045	6.550	130.99	110.76	688.70	298.44	1097.90	0.59	1.46
2046	6.440	128.80	109.15	680.51	292.90	1082.57	0.59	1.48
2047	6.308	126.16	107.95	667.50	287.35	1062.81	0.59	1.51
2048	6.152	123.04	107.10	655.67	281.17	1043.95	0.59	1.55
2049	5.983	119.66	106.56	644.11	273.75	1024.42	0.59	1.59
2050	5.799	115.99	106.28	631.56	268.45	1006.29	0.59	1.64
2051	5.611	112.22	106.01	618.31	264.39	988.70	0.60	1.70
2052	5.367	107.35	105.69	603.33	262.18	971.20	0.61	1.78
2053	5.118	102.36	105.31	588.77	260.90	954.98	0.62	1.86
2054	4.853	97.06	104.85	574.43	260.97	940.25	0.64	1.97
2055	4.591	91.82	104.32	559.47	263.44	927.23	0.66	2.08
2056	4.294	85.87	103.67	547.39	262.63	913.70	0.67	2.22
2057	4.007	80.13	102.91	536.20	259.76	898.87	0.68	2.38
2058	3.763	75.26	102.08	525.87	255.73	883.68	0.68	2.54
2059	3.529	70.57	98.67	518.83	253.77	871.27	0.68	2.70
2060	3.353	67.06	95.17	512.13	251.10	858.40	0.68	2.85
2061	3.266	65.32	91.67	505.58	243.90	841.14	0.66	2.92
2062	3.202	64.04	88.19	499.41	237.92	825.51	0.65	2.98
2063	3.148	62.97	84.78	493.95	231.84	810.57	0.64	3.03
2064	3.081	61.61	81.43	488.90	224.70	795.02	0.63	3.10
2065	3.048	60.97	78.17	482.84	217.93	778.93	0.61	3.13
2066	2.982	59.64	75.00	476.26	210.00	761.25	0.60	3.20
2067	2.927	58.54	71.94	469.27	202.91	744.12	0.59	3.26
2068	2.882	57.65	69.02	462.42	195.91	727.35	0.57	3.31
2069	2.846	56.92	66.26	454.80	189.06	710.12	0.56	3.35
2070	2.818	56.35	63.71	446.64	185.57	695.92	0.56	3.39
2071	2.796	55.92	61.39	437.90	183.47	682.75	0.56	3.41
2072	2.779	55.58	59.31	428.56	182.74	670.61	0.56	3.43
2073	2.761	55.22	57.48	418.52	183.39	659.39	0.58	3.46
2074	2.741	54.82	55.93	408.17	184.48	648.57	0.59	3.48
2075	2.720	54.39	54.64	397.43	185.90	637.97	0.61	3.51
2076	2.696	53.91	53.57	386.70	187.54	627.82	0.62	3.54
2077	2.669	53.38	52.71	373.88	191.88	618.48	0.65	3.57
2078	2.641	52.82	52.00	360.84	196.79	609.63	0.69	3.61
2079	2.612	52.24	51.35	347.23	201.29	599.87	0.73	3.65
2080	2.582	51.65	50.73	333.88	205.11	589.72	0.77	3.69
2081	2.495	49.91	50.08	319.17	210.00	579.25	0.81	3.82

Year	出生人数 (M)	女性 20–39岁（男性）	<18 (M)	18–64岁 (M)	65+ (M)	总计 (M)	受抚养人 每位劳动者	TFR 所需
2082	2.409	48.18	49.40	305.02	214.58	569.01	0.87	3.96
2083	2.323	46.46	48.68	292.84	216.58	558.10	0.91	4.11
2084	2.238	44.75	47.93	281.17	217.70	546.81	0.94	4.26
2085	2.155	43.09	47.16	272.10	215.84	535.10	0.97	4.43
2086	2.073	41.45	46.35	264.36	212.27	522.99	0.98	4.60
2087	1.993	39.85	45.50	257.65	207.20	510.35	0.98	4.79
2088	1.915	38.30	44.60	251.45	201.57	497.61	0.98	4.98
2089	1.841	36.81	43.64	244.70	196.37	484.71	0.98	5.18
2090	1.770	35.40	42.63	239.56	189.80	471.99	0.97	5.39
2091	1.703	34.07	41.57	233.09	182.68	457.35	0.96	5.60
2092	1.642	32.84	40.48	227.21	174.91	442.59	0.95	5.81
2093	1.586	31.72	39.34	221.88	166.08	427.31	0.93	6.01
2094	1.536	30.72	38.18	217.07	157.04	412.29	0.90	6.21
2095	1.492	29.83	37.01	212.73	146.18	395.92	0.86	6.40
2096	1.454	29.08	35.82	208.85	135.48	380.15	0.82	6.56
2097	1.422	28.44	34.63	205.38	126.33	366.34	0.78	6.71
2098	1.396	27.91	33.44	202.08	117.57	353.09	0.75	6.84
2099	1.374	27.48	32.32	198.89	111.25	342.46	0.72	6.94
2100	1.356	27.11	31.27	195.80	106.13	333.19	0.70	7.04