

# 动态随机一般均衡模型全局非线性分析方法研究进展

聂光宇 赵云霄\*

**摘要:** 动态随机一般均衡 (DSGE) 模型是宏观经济学的主流模型。近年来, 传统求解该模型的局部线性近似法的局限性愈发明显, 而全局非线性方法逐渐兴起, 在一系列前沿领域取得突破性进步, 推动了宏观经济学发展。本文介绍全局非线性方法的一般性框架及其优势, 随后梳理该方法在货币政策、金融危机、结构转型中的经济周期等课题上的最新成果。全局非线性方法可以提高宏观理论和量化分析的准确性和可靠性, 有力推动国内宏观研究的进展。

**关键词:** 动态随机一般均衡模型、全局非线性解法、不完备金融市场、金融危机、结构转型

**JEL:** C68, E00, F00

## Recent Development of Global Nonlinear Analysis in Dynamic Stochastic General Equilibrium Models

**Abstract:** Dynamic Stochastic General Equilibrium Model is the mainstream framework in macroeconomics. Recently, the deficiencies of the traditional linearization method for solving the model become increasingly evident, while the global nonlinear method makes breakthroughs in a series of frontier fields, promoting the development of macroeconomics. This article introduces the general framework and advantages of the global nonlinear method. Subsequently, it reviews the latest achievements of this method in topics such as monetary policy, financial crises, and economic cycles during structural transformation. Global nonlinear methods can enhance the accuracy and reliability of macroeconomic theoretical and quantitative analysis, effectively promoting the progress of macroeconomic research in China.

**Keywords:** DSGE Model; Global Nonlinear Analysis; Incomplete Financial Market; Financial Crisis; Structural Transformation

---

\* 聂光宇、赵云霄, 上海财经大学商学院。通讯作者及地址: 赵云霄, 上海财经大学商学院, 200433; 电话: 021-65906898; Email: [zyxavazs@163.com](mailto:zyxavazs@163.com)。本文得到国家自然科学基金项目 (71803124, 72273080, 72271253)、上海市教育发展基金会和上海市教委“曙光计划”、上海财经大学富国 ESG 研究院年度课题 (SUFESG-20240304)、以及中央财经大学青年科研创新团队支持计划资助。作者感谢主编及两位匿名审稿人的宝贵意见。文责自负。

## 一、引言

动态随机一般均衡 (DSGE) 模型是宏观经济学的主流模型, 其分析框架具有高度灵活性与广泛适用性, 被应用于各类宏观经济问题的研究, 包括经济增长和经济周期的分析及预测, 以及财政、货币等宏观政策效果的评估等。2008 年全球金融危机前, 学者们在使用 DSGE 模型进行建模、分析和预测时, 通常采用线性近似法, 求解 DSGE 模型在确定性稳态附近的局部近似解。Blanchard and Kahn (1980)、Uhlig (1999) 和 Sims (2002) 等学者建立了线性近似方法的一般性框架, 同时软件 Dynare (Adjemian et al., 2011) 只需要用户提供基本信息就可以自动得出线性近似解, 极大地促进了该方法的普及和使用。

然而, 金融危机的爆发凸显了线性近似法的局限性, 主要体现在如下四个方面: 1. 当经济存在大幅外生冲击或表现出高度非线性时, 线性近似得到的结果与经济现实之间存在巨大差别<sup>1</sup>。2. 存在零利率下限、借贷约束等偶然紧约束 (occasionally binding constraint) 时, 该约束是否收紧会将经济状态划分为不同区间。线性近似法得到的结果只能刻画稳态所处区间的经济波动, 当经济运行到其他区间时, 经济周期的性质发生了变化, 不能再用基于稳态的线性近似法来刻画。3. 不适用于特定的研究课题, 例如资产定价研究关注的核心变量之一是风险溢价, 而线性化之后效用函数变为风险中性, 风险溢价也就不存在了。4. 无法刻画个体的预防性动机: 企业和家庭预期到未来有可能发生经济萧条或危机时, 会预防性地调整现在的行为, 例如降低投资和消费、增加储蓄。线性近似法只能刻画经济受到真实冲击时的经济波动, 无法刻画这种提前的预防行为。

由于线性近似法自身存在的缺陷, 并随着计算方法与运算能力的不断提升, 全局非线性方法近年来得到蓬勃发展。该方法突破了线性近似法存在的上述问题, 可以准确刻画宏观经济中的非对称、非线性、不可导、非连续、时变性等特征, 深化了学者们对于不同经济机制与经济政策效果的理解, 拓宽了 DSGE 模型的研究主题和内涵, 并在多个领域均取得了突破性成果, 包括: 1. 金融市场与实体经济的互动关系, 以及系统性金融风险的防范, 例如 Brunnermeier and Sannikov (2014)、He and Krishnamurthy (2012、2013)、Cao and Nie (2017)。2. 巨灾风险冲击, 例如 Barro (2006)、Guerrieri et al. (2022)。3. 货币政策零利率下限, 例如 Gust et al. (2017)、Cao et al. (2023a)。4. 资产定价的相关研究, 例如 Heaton and Lucas (1996)、Guisen (2009)。5. 开放经济体金融危机的产生、影响及应对, 例如 Mendoza (2010)、Bianchi (2011)、Devereux and Yu (2020)。

近年来, DSGE 模型在中国宏观经济问题的研究上得到了广泛应用, 在多个领域取得了重要进展 (文献综述参见李戎等, 2022), 然而目前采用全局非线性解法探讨中国宏观经济波动与增长的研究还不多 (例如 Storesletten, Zhao and Zilibotti, 2019、熊琛和金昊, 2018)。事实上, 全局非线性解法对于分析中国经济问题格外重要。一方面, 作为一个高速增长且不断转型的经济体, 我国的经济现实与理论模型中的确定性稳态相差很远, 很多现象无法通过基于稳态的局部近似法来刻画; 另一方面, 当前我国经济已经进入高质量发展阶段, 需要创新和完善宏观调控理论与工具。这对宏观经济政策提出了新的要求和挑战, 需要运用科学方法量化分析经济运行状况, 增强宏观调控的前瞻性、针对性、协同性。全局非线性解法可以提高宏观分析的可靠性和准确性, 并有助于宏观调控科学精准施策。

本文第二部分介绍全局非线性方法的一般性框架及其与局部近似法的区别, 第三部分综述全局解法在多个领域取得的进展, 第四部分基于货币政策、金融危机、结构转型中的经济周期三个数值实例详细介绍全局非线性解法的使用方法, 第五部分总结全文, 并展望全局解法在研究中国宏观问题时的优势和应用场景。

---

<sup>1</sup> 诺贝尔经济学奖得主斯蒂格利茨 (Stiglitz, 2018) 对此明确批评道: “能够刻画现实经济周期的 DSGE 模型通常依赖于线性近似法, 在大幅冲击条件下求解。在巨幅冲击发生的区间, 这种线性近似得到的结果将完全丧失有效性。”

## 二、全局分析方法与局部近似法的比较

动态随机一般均衡模型刻画了不同经济主体（例如家庭、企业、政府）在不确定环境中的动态最优决策，以及各个经济变量如何通过一般均衡条件达到市场出清。从数学上看，DSGE 模型的求解可以用如下的方程组来描述：

$$\mathbf{F}(z_t, s_t, x_t, y_t) = 0, \quad (1)$$

其中

$$y_t = \mathbb{E}_t h(s_t, x_t, z_{t+1}, s_{t+1}, x_{t+1})$$

表示基于第  $t$  期的信息对于函数  $h(\cdot)$  在下一期取值的预期<sup>2</sup>。公式 (1) 中， $z_t \in \mathcal{Z} \subset \mathbb{R}^{d_z}$  表示模型中第  $t$  期的外生冲击（exogenous shock，如生产效率、国际利率），其取值独立于模型系统， $s_t \in \mathcal{S} \subset \mathbb{R}^{d_s}$  表示第  $t$  期的状态变量（state variable，如资本积累、财富）， $x_t \in \mathcal{X} \subset \mathbb{R}^{d_x}$  表示第  $t$  期的控制变量（control variable，如消费、储蓄、投资、资产组合）。准确区分状态变量  $s_t$  与控制变量  $x_t$  对于模型的求解至关重要： $s_t$  由上一期的模型均衡决定，其取值在第  $t$  期是给定的，而  $x_t$  由方程组  $\mathbf{F}$  代表的第  $t$  期模型均衡条件（如欧拉方程、市场出清条件、状态变量的运动规律等）求得，为该方程组的解。

我们以一个简单的实际经济周期模型为例进行说明。在该模型中，产出  $Y_t$  取决于生产率冲击  $A_t$  与资本存量  $K_t$ ： $Y_t = A_t K_t^\alpha$ 。代表性家庭将  $Y_t$  在消费  $C_t$  与投资  $I_t$  之间做分配，来最大化期望效用： $E_0 \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t C_t^{1-\sigma} / (1-\sigma)$ 。下一期的资本积累等于当期未折旧资本与投资之和： $K_{t+1} = (1-\delta)K_t + I_t$ 。生产效率冲击服从外生的 AR(1) 过程： $\ln A_t - \ln \bar{A} = \rho(\ln A_{t-1} - \ln \bar{A}) + \varepsilon_t$ ，其中  $\bar{A}$  表示均值， $\varepsilon_t \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2)$ 。对照公式 (1) 中的一般框架，外生冲击  $z_t = A_t$ ，状态变量  $s_t = K_t$ ，控制变量为  $x_t = \{C_t, K_{t+1}\}$ ，其取值由欧拉方程和预算约束构成的方程组决定<sup>3</sup>：

$$\begin{aligned} C_t^{-\sigma} &= \beta \mathbb{E}_t [(\alpha A_{t+1} K_{t+1}^{\alpha-1} + 1 - \delta) C_{t+1}^{-\sigma}], \\ C_t + K_{t+1} &= A_t K_t^\alpha + (1 - \delta) K_t, \end{aligned} \quad (2)$$

其中欧拉方程 (2) 刻画了代表性家庭在权衡消费和投资之后的最优决策。

我们发现，将 DSGE 模型的均衡条件表示为公式 (1) 中的方程组后，外生冲击  $z_t$  与状态变量  $s_t$  可以完整描述经济所处的当前状态。换句话说，给定  $(z, s)$ ，控制变量  $x$  的取值以及经济的演进路径与时间  $t$  无关。因此，我们通常求解模型的递归均衡（recursive equilibrium）形式，将不同  $(z, s)$  取值下，公式 (1) 得到的  $x$  表示为  $(z, s)$  的函数，并称之为政策函数： $x = \mathcal{P}(z, s), \forall (z, s) \in \mathcal{Z} \times \mathcal{S}$ 。在上面实际经济周期的例子中，政策函数包括消费和下一期资本积累： $C(A, K)$  和  $K'(A, K)$ ，同时  $K'$  也是下一期的状态变量<sup>4</sup>。通常情况下，下一期的状态变量  $s'$  可以表示为控制变量  $x$  的显性表达式<sup>5</sup>，因此在得到  $x$  后，我们可以立即得到  $s'$ ，并根据实现的外生冲击  $z'$  与政策函数迭代得到下一期的  $x' = \mathcal{P}(z', s')$ 。依照此方式通过不断向未来迭代，可以获得此经济的随机演进路径。

全局非线性解法的目的是得到公式 (1) 对应的政策函数。虽然直观上这项工作并不复杂，只需要不断改变  $(z, s)$  在定义空间  $\mathcal{Z} \times \mathcal{S}$  上的取值并求解方程组即可，然而在操作层面却面临进一步的困难：注意到公式 (1) 的期望运算中出现了下一期的控制变量  $x_{t+1}$ ，其在均衡中是  $(z_{t+1}, s_{t+1})$  的函数，然而此时政策函数  $x = \mathcal{P}(z, s)$  还未求解出来，研究者无法事先得知  $x_{t+1}$  如何对  $(z_{t+1}, s_{t+1})$  取值的变化做反应。例如在式 (2) 欧拉方程中，等式右边出现的  $C_{t+1}$  是  $(A_{t+1}, K_{t+1})$  的函数。研究者事先不知道  $C_{t+1}$  如何随着  $(A_{t+1}, K_{t+1})$  变化，因此无法直接求解该方程。

<sup>2</sup> 在少数情况下， $t+1$  期变量也可能以期望运算之外的形式出现，例如在 Geanakoplos (2010)、Cao and Nie (2017)、Cao (2018) 中，企业的借款上限为下一期资产价值最小可能值的固定比例，此时  $t+1$  期的资产价格以  $\min\{q_{t+1}\}$  形式出现在方程组  $\mathbf{F}$  中。此类问题的进一步介绍和求解方法参见 Cao et al. (2023a)。

<sup>3</sup> 控制变量的个数须与方程组中方程的个数相同。如果我们将投资  $I_t$  添加为控制变量： $x_t = \{C_t, K_{t+1}, I_t\}$ ，则须同时将资本积累  $K_{t+1} = (1-\delta)K_t + I_t$  添加到方程组中。在实际操作中，研究者可以根据需要自行设定控制变量。

<sup>4</sup> 如无特殊说明，本文采用  $(\cdot)$  表示该变量下一期的取值。

<sup>5</sup> 某些情况下， $s'$  不能表示为  $x$  的显性表达式，此时需要额外求解状态转移方程。相关的讨论参见 Cao et al. (2023a)。

有鉴于此，文献中一般采用政策函数迭代法求解，具体算法如下：第一步，猜测下一期的政策函数形式  $x' = \mathcal{P}^{(0)}(z', s')$ ,  $\forall (z', s') \in \mathcal{Z} \times \mathcal{S}^6$ ，并带入到公式 (1)，得到如下方程组：

$$\mathbf{F} \left[ z, s, x, \mathbb{E} \left( h \left( s, x, z', s', \mathcal{P}^{(0)}(z', s') \right) \right) \right] = 0.$$

此时  $\mathbf{F}$  中的方程均有了明确的表达式，可以直接求解。第二步，通过数值求解方法，遍历  $(z, s) \in \mathcal{Z} \times \mathcal{S}$ ，求解上面的方程组得到新的政策函数  $x = \mathcal{P}^{(1)}(z, s)$ 。第三步，将  $\mathcal{P}^{(1)}(z', s')$  作为新的猜测放入方程组  $\mathbf{F}$  求解，并得到下一轮结果  $\mathcal{P}^{(2)}(z, s)$ ，重复第一、二步进行循环迭代。当迭代次数足够多时，这一方法得到的政策函数结果将向真实函数收敛，即  $\lim_{n \rightarrow \infty} \mathcal{P}^{(n)}(z, s) = \mathcal{P}(z, s)$ ,  $\forall (z, s) \in \mathcal{Z} \times \mathcal{S}$ 。在实际操作中，当两次迭代得到的函数之间的差距  $\|\mathcal{P}^{(\bar{n})}(z, s) - \mathcal{P}^{(\bar{n}-1)}(z, s)\|$  小于预先设定的精度要求后就停止迭代， $\mathcal{P}^{(\bar{n})}(z, s)$  即为该模型的全局非线性解。具体的算法设计参见 Duffie et al. (1994) 及 Magill and Quinzii (1994)。Cao et al. (2023b) 基于上述算法开发了 GDSGE 软件工具包 ([www.gdsge.com](http://www.gdsge.com))，可以简便准确地求解 DSGE 模型的全局非线性解。

与全局非线性解法不同，传统的局部近似解法并不直接求解政策函数  $\mathcal{P}(z, s)$ ，而是计算基于确定性稳态的近似解，具体做法如下：第一步，求解公式 (1) 中模型的确定性稳态  $(z^*, s^*, x^*)$ ，稳态代表了各个变量的长期平均值。例如在实际经济周期的例子中令生产效率恒取其均值  $A^* \equiv \bar{A}$ ，可以得到资本与消费的稳态值  $K^* = \left( \frac{1/\beta - 1 + \delta}{\alpha \bar{A}} \right)^{1/(\alpha-1)}$ ， $C^* = A^*(K^*)^\alpha - \delta K^*$ 。第二步，将公式 (1) 在稳态附近进行泰勒展开 (Taylor expansion)，其中最为常用的方法是一阶线性展开，因此该方法也常被称为线性近似法<sup>7</sup>。这一步将原始的非线性系统转化为如下的线性系统，极大的简化了模型求解：

$$\begin{bmatrix} s_{t+1} - s^* \\ \mathbb{E}_t x_{t+1} - x^* \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} s_t - s^* \\ x_t - x^* \end{bmatrix} + \Gamma(z_t - z^*), \quad (3)$$

其中  $\mathbb{E}_t x_{t+1}$  表示对于下一期控制变量的预期，矩阵  $B$  的维度为  $(d_s + d_x) \times (d_s + d_x)$ ，矩阵  $\Gamma$  的维度为  $(d_s + d_x) \times d_z$ 。第三步，求解上面的线性系统，通过待定系数法，得到线性近似的政策函数：

$$x = \hat{\mathcal{P}}(z, s) = x^* + \gamma^s (s - s^*) + \gamma^z (z - z^*),$$

其中的参数  $\gamma^s$  维度为  $d_x \times d_s$ ， $\gamma^z$  维度为  $d_x \times d_z$ 。具体的线性近似求解方法参见 Blanchard and Kahn (1980) 以及软件 Dynare 使用教程。此外，研究中常用的另一种近似方法为对数线性化方法，即将各个变量表示为与其稳态值比例的对数形式， $\hat{x}_t = \ln(x_t/x^*)$ ， $\hat{s}_t = \ln(s_t/s^*)$ ，并在此基础上对公式 (1) 进行一阶泰勒展开。无论是线性化还是对数线性化，其得到的结果只适用于刻画稳态附近的小幅经济波动。近年来也有文献使用更高阶的泰勒展开，然而其局部近似的本质是不变的，而且高阶近似方法可能造成严重误差 (Petrosky-Nadeau and Zhang, 2017)。

图 1 刻画了实际经济周期模型中，投资  $I$  的全局非线性解与线性近似解的区别。为了对两种方法做进一步的区分，我们在模型中对投资加入一个额外的约束：投资须高于稳态值的一个固定比例： $I \geq \phi I^*$ ，显然该约束收紧时会影响经济周期的性质。可以看出，当状态变量  $K$  位于稳态值附近时，线性近似解与全局非线性解的结果较为接近，但是随着  $K$  与其稳态值偏离的增大，线性近似解的误差也逐渐增大。特别是当  $K$  取值很低，投资约束收紧时，线性近似解无法刻画此时经济周期的性质。

<sup>6</sup> 理论上，此处应包含状态空间  $\mathcal{Z} \times \mathcal{S}$  上的所有  $(z, s)$  组合。现实中由于电脑计算能力的限制，研究者们通常选取若干格点来代表状态空间，并采用插值法得到近似的函数值。

<sup>7</sup> Christiano et al. (2018) 解释了线性近似解法在早期流行的三个主要原因：首先，二战后发达国家的宏观经济变量波动保持在稳态值的附近，此时线性近似解法的误差较小；其次，相比于非线性问题，早期的统计和计量分析方法更适合解决线性问题；最后，受限于电脑计算速度的制约，求解和估计非线性模型实施起来较为困难。

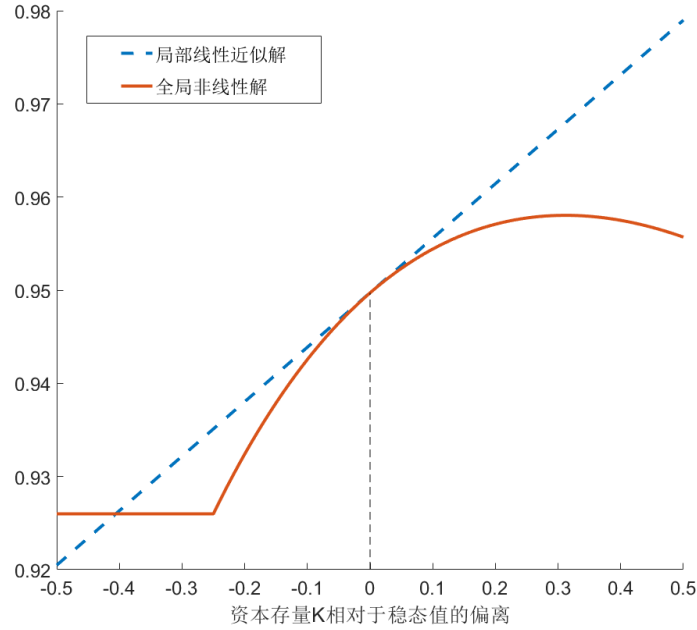


图 1：存在投资约束的 RBC 模型中两种计算方法的结果比较

附注：参数取值为 $\beta = 0.99$ ,  $\sigma = 2$ ,  $\alpha = 0.35$ ,  $\delta = 0.025$ ,  $\phi = 0.975$ , 外生冲击 $A = 1$ 。

### 三、采用全局非线性解法的文献综述

近年来，全局非线性方法被广泛应用于宏观研究，取得突破性进展。本节基于代表性成果，介绍该方法在货币政策、金融危机、结构转型中的经济周期、罕见灾难、异质性个体模型、资产定价、劳动力市场等主要领域中发挥的关键作用。

#### （一）全局解法在货币政策零利率下限领域的应用

2008 年金融危机爆发后，美联储、欧洲央行等中央银行纷纷采取宽松货币政策作为应对手段，将政策利率下调到 0 附近，此时零利率下限（zero lower bound）限制了进一步降息以刺激经济的操作空间，引发了学术界和政策界的热议讨论。理论上，零利率下限约束的一般形式为<sup>8</sup>：

$$r_t = \max\{r_t^D, 0\}, \quad (4)$$

其中 $r_t^D$ 为货币当局在第  $t$  期所希望设定的利率水平， $r_t$ 为实际执行的利率水平。在新凯恩斯模型中加入零利率下限约束后，取决于该约束是否收紧，模型均衡被划分为两个区间，不同区间内的经济性质存在本质差别。当经济处于未收紧区间时， $r_t = r_t^D$ ，货币政策可以通过影响利率水平起到熨平波动的作用；然而当经济面临大幅冲击，经济运行切换至收紧区间时， $r_t = 0$ ，此时中央银行无法再对利率水平施加干预，传统货币政策失效。线性近似解法假定零利率下限约束始终不收紧，因此无法刻画经济周期在约束收紧区间的性质，以及均衡在两个区间之间的内生转换。

近年来，一系列量化分析表明含有零利率下限的模型存在高度的非线性（Fernández-Villaverde et al., 2015）。此时全局非线性解法的优势体现在三方面。第一，全局解法得到的结果从定性和定量上更加准确。Gust et al. (2017) 发现零利率下限约束增大了美国在 2008 年金融危机期间经济下行的程度，同时显著地阻碍了后续的经济复苏，并发现线性近似解会带来明显的偏差。近年来也有一些文献在模型求解时保留了零利率下限约束导致的非线性，同时对其他均衡条件进行线性化处理（例如 Bodenstein et al., 2013; Guerrieri and Iacoviello, 2015），Gust et al. (2017) 指出这种方法在量化求解模型时仍会产生明显偏误。Boneva et al. (2016) 指出，采用线性近似法甚至可能得出错误结论，当

<sup>8</sup> 理论上只要求存在利率的某一个下限，该下限并不一定是零，也可高于或低于零。

经济处于零利率下限时，工资税减免政策在线性近似解看来会导致就业和产出的下降，然而全局非线性解表明这种政策其实是扩张性的。进一步地，Cao et al. (2023a) 构建了含有不完备金融市场且同时包含零利率下限和内生借贷约束的新凯恩斯模型。文章发现零利率下限约束与借贷约束会产生强烈的交互作用。根据这两个约束收紧与否，经济的运行被分为了四个可能的区间，更加凸显了使用全局非线性解法的必要性。第二，在对模型参数进行估计时，由于线性近似法只能使用零利率下限约束不收紧时的样本，因此得到的参数会存在偏差；更加准确的参数估计应该使用同时包含零利率下限约束收紧时期和不收紧时期的样本 (Gust et al., 2017)。第三，全局非线性解法可以刻画经济个体基于理性预期的预防性动机，即使当前经济的运行处在未收紧的区间，个体对于零利率下限约束在未来可能会收紧的担忧也会对当前的经济变量产生影响。例如 Gust et al. (2017) 发现，2002 年末，美国的私人部门预期零利率下限约束在 2003 年会有 12% 的概率收紧，该预期对于总产出产生了收缩效应。Cao et al. (2023a) 发现个体对于零利率下限在未来收紧的预期会导致当期资产价格的下降，造成与资产价格绑定的内生借贷约束更有可能收紧。线性近似解无法刻画这一机制。其他使用全局非线性解法求解含有零利率下限模型的文章还包括 Adam and Billi (2007)、Mertens and Ravn (2014)、Aruoba et al. (2018)、Lindé and Trabandt (2018) 等。

## (二) 全局解法在金融危机领域的应用

金融系统的良好运行对于宏观经济起到关键作用；反之，金融运行受阻会显著降低资源配置效率，并影响微观主体的信心，增大系统性风险，从而影响宏观经济的稳定，甚至爆发危机。近年来，将金融系统纳入到宏观经济分析框架，探讨两者之间的互动关系以及金融危机防范，成为了学术界的研究热点。这一领域的开创性研究包括 Bernanke and Gertler (1989) 和 Kiyotaki and Moore (1997)，此后 Mendoza (2010)、Bianchi (2011)、Korinek (2018) 等又将这一方面的研究拓展到资本账户开放条件下的金融危机问题。这一支文献中的核心机制是偶发收紧的内生借贷约束：在不完备金融市场中，宏观经济中的大幅负向冲击会导致借款人面临的内生借贷约束收紧，从而放大负面冲击的效果，产生金融危机。值得注意的是，危机的爆发是小概率事件，宏观经济周期在大多数时候位于借贷约束不收紧的正常区间。经济周期由此表现出非对称、非线性、时变性等特征。

在设定上，内生借贷约束主要分为存量型约束和流量型约束。在存量型约束中，借款的上限取决于抵押资产的价值，通常具有如下形式：

$$b_{t+1} \leq \theta q_t k_t, \quad (5)$$

其中  $b_t$  为第  $t$  期借入、 $t+1$  期需要偿还的金额， $k_t$  为抵押资产数量， $q_t$  为抵押资产的价格， $\theta$  为参数。使用存量型约束的代表性研究是 Mendoza (2010)。该文基于一个小国开放模型刻画了新兴市场国家存在的资本流入突然中断 (sudden stop) 现象，并全局非线性量化分析强调了内生借贷约束在准确刻画开放经济体的经济周期中所起到的关键作用。Mendoza (2010) 的模型中  $q_t$  的波动导致融资上限随之改变，在危机期间会产生强烈的金融放大效应：当经济中的负债水平  $b_t$  较高时，负向冲击将导致借贷约束收紧，代表性家庭会削减消费和投资，造成资本价格下降和借贷约束进一步收紧。此时消费、投资、资本价格、产出等变量都会呈现“螺旋下降”的趋势。此时，当前债务水平  $b_t$  的增加反而会导致未来债务水平  $b_{t+1}$  的下降，这与正常时期二者同向变动的趋势截然相反，因此借贷约束的存在使得模型具有高度的非线性特征。与此同时，模型也表现出了高度的非对称性与时变性：负向冲击产生的效果远大于正向冲击；相比于正常时期，同样的冲击在危机期间能够产生更强效果。

在流量型约束中，借款的最高额度取决于当期的收入，通常具有如下形式：

$$b_{t+1} \leq \kappa (P_t^N y_t^N + y_t^T), \quad (6)$$

其中  $y_t^T$  和  $y_t^N$  分别为可贸易品和不可贸易品的收入， $P_t^N$  为不可贸易品的相对价格，是借贷约束内生性的主要来源， $\kappa$  为参数。我们将在第四章中以 Bianchi (2011) 为例说明，流量型约束同样会产生强烈且非对称的金融放大效应。



总之，经济周期在正常时期与危机时期的运行存在本质的区别。从研究方法上，采用线性近似解法求解模型时，通常假定内生借贷约束（5）或（6）总是收紧的，因此无法刻画经济周期的非对称、非线性、时变性等特征，同时会显著高估危机爆发的可能性和危害。为了对经济周期进行准确的描述，应当使用全局非线性解法。在理论和求解方法方面，Cao and Nie（2017）发现，与内生借贷约束的设定相比，不完备金融市场的设定在解释外生冲击的放大效应和非对称效应时起到了更重要的作用，而使用线性近似解会严重高估金融摩擦的放大效应。Di Tella（2017）强调了不确定性冲击与生产效率冲击在产生金融放大效应方面存在的差别，发现不确定性冲击即便在完全金融市场中仍会起到放大效应。Faria-e-Castro（2022）研究了美国在2008年金融危机时期财政政策的效果。由于预防性储蓄动机，并且家庭和银行均存在偶发收紧约束，线性近似解并不能准确地描述经济出现危机时的动态，应当使用全局非线性解。

2008年金融危机后，运用全局非线性方法研究金融与实体经济互动关系，以及金融监管的文献大量涌现。He and Krishnamurthy（2012）构造了含有家庭和金融部门（专家）两类决策者的连续时间模型，家庭只能通过专家间接地投资于风险资产。为了缓解其中的道德风险，模型引入了专家的股权资本约束。当专家持有的财富较低时股权资本约束会随之收紧，影响金融中介效率，导致风险溢价上升。Brunnermeier and Sannikov（2014）同样构造了含有专家和家庭两类决策者的连续时间模型。在正常时期，专家有足够净资产以缓冲负向冲击带来的不利影响；而在危机时期模型系统远离其稳态，即使是小幅的冲击也具有放大效应。因此，经济对于外生冲击的反应表现出高度非线性。Ai et al.（2020）认为金融中介通过影响资本在异质性企业中的配置效率从而影响经济周期，金融部门财富值下降会增大实体经济中的资源错配，由此产生的产出和资产价格下跌导致金融部门的财富值进一步下降，在极端情况下可能导致整个金融系统可用资源不足，造成危机。Elenov et al.（2021）构建了一个包含家庭、企业、银行的三部门模型，其中企业部门面临的借贷约束以及银行部门面临的资本充足率约束会产生双重放大效应，在金融危机时产生巨大和持续的衰退。文章还进一步评估了宏观审慎政策的有效性。采用全局解法量化分析金融监管政策的文章还包括Begenau and Landvoigt（2022）、Corbae and D'Erasmus（2021）、Greenwald et al.（2021）等。

关于开放经济体金融危机的理论研究还有很多，这些研究通常强调融资约束所产生的金融放大效应，以及金融危机中表现出高度非线性，但是在研究侧重点上有所不同。Boz and Mendoza（2014）考察了金融创新与借贷约束的交互作用。Ma（2020）分析了最优的资本管制政策在防范金融危机与促进经济增长之间的权衡。Schmitt-Grohé and Uribe（2021）研究了基于悲观预期自我实现的金融危机，认为此时经济体会表现出“借贷不足”的现象。Bianchi and Mendoza（2018）考虑了资产价格的前瞻性，指出最优且时间一致的宏观审慎政策可以有效减轻金融系统的脆弱性。Jeanne and Korinek（2020）探讨了事先的危机防范与事后危机处理政策的最优选择。学者们还探讨了产业政策（Benigno et al., 2013）、汇率政策（Benigno et al., 2016、Fornaro, 2018）、财政政策（Liu, 2022）等在应对危机时起到的作用。相关研究可以参考Bianchi and Mendoza（2020）的综述文章。

### （三）全局解法在结构转型中经济周期问题的应用

DSGE模型的分析框架大多基于发达国家的设定。在此类标准的分析框架中，影响长期经济增长的动因（例如企业研发新技术、制度质量提升）与影响经济周期的因素存在本质不同，因而学者们在讨论经济周期问题时，通常不考虑经济增长，或者将增长视为外生给定，隐含地假定宏观经济已达到稳定状态，经济周期围绕确定性稳态波动<sup>9</sup>。在这一关键假定之下，线性近似解能够较为准确地刻画经济中的小幅波动。

---

<sup>9</sup> 事实上，早期的宏观研究者在构建经济周期一般框架时，综合考虑了增长趋势变化和短期波动的影响（Kydland and Prescott, 1982; King, et al., 1988）。然而，之后的宏观研究者更多将增长和波动作为独立的研究对象，这可能与发达国家的经济特性有关，例如Aghion et al.（2009）发现汇率波动与经济增长负相关，但是在金融市场发达的国家样本中，二者的相关性变得不显著。

然而采用这一分析框架研究仍处于结构转型中的发展中国家，可能会造成偏误。与发达国家不同，发展中国家通常经历了，并且正在经历着广泛而持续的结构转型和制度调整，这些因素很可能同时影响经济增长路径以及围绕该路径的经济周期的性质（Aguilar and Gopinath, 2007），此外经济增长与经济周期之间还存在交互影响。因此有必要将结构转型过程中的增长问题与周期问题纳入到统一的框架进行分析。换句话说，对于尚未达到稳态的经济体，线性近似法适用的前提假定并不成立。例如，改革开放以来的宏观经济数据表明，中国经济并不是在某个确定的稳态附近波动，而是一个不断增长且不断演变和成长的大型经济体（李戎等，2022；Chen and Zha, 2023）。因此，在使用 DSGE 模型分析包括中国在内的发展中国家的经济波动问题时，应当转向更加符合现实的全局非线性解法。

Storesletten, Zhao and Zilibotti (2019) 是目前国际文献中唯一一篇采用全局非线性方法同时研究中国在经济转型过程中的经济增长与经济周期问题的文章。除了他们的文章之外，其他学者也发现转型过程中，短期的经济波动与长期的经济增长紧密相关，并且强调了结构转型中的关键因素对于增长与波动的共同影响。Chen and Zha (2020) 发现我国经济发展阶段发生变化后，经济的短期波动特征和长期趋势也随之变化。例如在国有企业主导阶段（1978-1997），消费与总投资呈现同向波动的特征，同时重工业与轻工业部门产出的比值比较稳定。而在投资驱动阶段（1998-2015），消费与总投资没有显著的相关性，重工业与轻工业部门产出的比值呈现持续上升的趋势。他们认为在国有企业主导阶段，信贷政策旨在为所有部门的国有企业提供优惠信贷，而在投资驱动阶段，信贷政策更加偏向于支持对重工业部门的投资。信贷政策既影响了经济的短期波动，也改变了其长期趋势。Brandt and Zhu (2020, 2001) 解释了我国在 20 世纪末出现的产出增长率和通货膨胀率在经济周期中呈现显著正相关的现象，认为财政和金融分权促进了经济增长，但同时也使得中央政府更多地依赖于货币创造以支持向国有部门的转移支付，通货膨胀率也随之上升。

此外，宏观经济学中研究结构转型的另外一种方法是求解确定性转移路径，即假设经济中不存在不确定性，计算宏观变量从其初始位置向长期稳态的转移路径。很多学者也运用该方法探讨中国经济增长与转型的相关课题。Song et al. (2011) 刻画了民营企业相比国有企业生产效率更高，但难以从外部获得充足的金融支持。随着民营企业自身的资本积累，资本和劳动将逐渐从国有企业向民营企业转移。这一机制导致了宏观层面的高储蓄率、高资本回报率、经济的高速增长与结构变迁、以及持续的贸易盈余。Chen and Wen (2017) 研究了近年来中国住房市场的繁荣，认为由于金融市场不健全，理性预期使得从事生产性活动的个体在当下对住房市场进行投机，使住房市场出现泡沫并挤出生产性投资。Chang et al. (2016) 借助模型的确定性转移路径解释了中国经济的一些特征事实，如 21 世纪初期消费占比的持续下降与投资占比的持续上升。Li et al. (2020) 构建了包含国际贸易、投资、借贷的多国动态模型以探讨贸易与投资自由化对于全球失衡现象的影响。文章发现中国 2001 年加入世界贸易组织不显著影响全球失衡现象，而美国的投资自由化是全球失衡的主要驱动因素。Ju et al. (2019) 在两部门开放经济体模型基础上，分析了基于预期自我实现机制的金融危机防范问题，指出最优的资本流动税制应当是非线性的（累进的），并讨论了该税制在我国的具体实现形式。此外，学者们还研究了不同宏观政策与结构变迁，例如基础设施投资（Dinlersoz and Fu, 2022）、人口结构变化（Nie, 2020）、住房市场限购措施（Dong et al., 2021）、资本管制与资本账户开放（Liu, et al., 2021a, 2023）等。相应的英文文献综述参见 Chen and Zha (2023)。近年来，采用该方法的中文论文也不断涌现，例如：彭俞超和何山（2020）发现，资管新规的出台限制了影子银行的活动，使得资源配置效率提高，产出在短期增加但在长期会经历持续的下滑。赵扶扬等（2021）构建了包含地方政府与土地市场的一般均衡模型，认为 2008 年外部冲击下，地方政府出于基建投资的“土地金融”模式带来了房价升高和地方政府债务上升，并产生资源错配。林毅夫和陈斌开（2013）发现，相比于比较优势发展战略，如果低收入国家的政府过度推行重工业发展优先的战略，国民收入分配将会持续恶化。张军等（2020）研究了官员考核机制对于经济增长的影响，发现 2013 年对地方官员考核体系做出的结构性调整，即弱化 GDP 增长、加强环保方面的考核导致地方政府通过投资拉动经济的动力明显下降。



#### （四）全局解法在罕见灾难领域的应用

罕见灾难是指经济遭遇罕见而大幅的负面冲击，导致产出、消费等宏观变量大幅下跌。罕见灾难的例子包括 1929 年大萧条、经济危机、两次世界大战、以及地震、海啸等极端天气冲击等。对于罕见灾难风险的研究由 Rietz (1988)、Barro (2006) 创立，是宏观经济学中的重要领域。当遭遇到罕见灾难冲击时，宏观经济与正常状态或其稳态相距甚远，此时不适合采用线性近似解法，需要使用全局非线性解法。

Gourio (2012) 在实际经济周期模型框架中引入发生概率具有时变性的罕见灾难风险，使得模型能够同时解释经济周期和资产价格的性质。文章指出线性近似解所忽略的高阶项实际上会显著地影响模型求解的准确性。线性近似解认为风险厌恶系数只会影响资产价格而基本不会影响宏观总量，然而全局解法发现，如果存在时变性的大幅冲击，风险厌恶系数会显著影响宏观加总变量的动态。在有关罕见灾难风险的另一篇文章中，Gourio (2013) 使用全局非线性解法探讨了信贷利差对于经济周期的影响。Barro et al. (2022) 的罕见灾难模型全局解得到的结果较好地匹配了实际数据，例如安全资产（无风险债券）占总资产的一个较稳定的比重，财富和股权分布的高度集中于少部分个体，以及由政府 and 央行发售的安全资产和金融机构发售的安全资产之间的负相关性。全局非线性解法还可应用于其他研究罕见灾难风险的模型框架，如 Barro (2006, 2009) 以及 Gabaix (2012)。

气候变化是近年来的研究热点。鉴于气候相关风险具有“概率低、损失大”的特性，易引发经济金融体系的结构变化（中国人民银行研究局课题组，2020），全局非线性解法同样适用于气候变化课题的研究。Barro (2015) 研究了旨在降低未来环境灾害发生概率或严重程度的最优社会支出规模。Gregory (2021) 认为从长期来看二氧化碳含量增加带来的环境灾害风险上升会使得家庭转向安全资产，进而无风险利率下降，风险溢价上升。

#### （五）全局解法在异质性个体模型中的应用

上世纪九十年代以来兴起的另外一脉文献——异质性个体模型——将宏观与微观变量联系起来，主要着眼于刻画微观个体的异质性及其宏观影响。随着近年来微观数据的大量涌现、以及社会对于收入分配、财富分配问题的关注度不断提高，这类模型变得越来越重要。模型假设每个家庭受到个体层面的异质性冲击，例如涨薪、失业等；同时由于金融市场不完备，个体无法购买保险来消除这种冲击对自己的影响。在这种情况下，不同家庭受到冲击的累积效果决定了他们在财富分布中所处的位置：受到持续正向冲击家庭的财富更多，受到负向冲击的家庭则反之。财富分布会在经济周期中不断演进，同时又会作为状态变量对经济周期的性质产生影响。因为财富分布是无穷维的，无法用单一数值来刻画，这极大的增加了全局解的求解难度。此外，异质性个体模型不存在代表性家庭模型中的稳态，不能用局部线性化方法求解。

Krusell and Smith (1998) 首次将宏观冲击引入到异质性个体模型中，求解模型的递归均衡，并分析了财富分布对于经济周期的影响及其福利效应。他们用财富分布的若干个矩（例如均值、方差）代表整个分布作为状态变量，从而显著降低状态变量的维度，以便近似地求解均衡。当加入校准的宏观冲击和折现因子冲击后，模型产生的财富分布与实际的财富分布十分接近。Heathcote (2005) 在异质性个体的框架下的研究发现，扭曲性税制以及不完备的金融市场会导致李嘉图等价定理不再成立。Hubmer et al. (2016) 发现高收入群体税率的大幅下降最能够解释美国过去三十年来贫富差距不断扩大的现象。期刊《Journal of Economic Dynamics and Control》2010 年第 1 期专刊中的文章均基于全局算法，比较了存在宏观不确定性的异质性个体模型的各种求解方法的优劣。Fernández-Villaverde et al. (2023) 改进了 Krusell and Smith (1998) 的算法，设定迭代时使用的宏观加总变量的演进动态为非线性形式而不是对数线性形式，并借助神经网络对宏观加总变量的演进动态进行求解。Maliar et al. (2021) 分析了运用深度学习方法求解包括 Krusell and Smith (1998) 模型在内的高维宏观问题的适用性。关于异质性个体模型的其他算法还可参见 Auclert (2021) 和 Achdou (2022)。

早期的异质性个体模型面临的一个问题是，异质性对于宏观变量的影响很小，其原因在于微观个体的消费、储蓄作为财富的政策函数非常接近于线性，不同家庭的边际消费倾向基本为常数。这

一结果导致异质性个体模型与代表性家庭模型相比，在探讨经济周期问题上的优势不明显。Kaplan et al. (2018) 在异质性个体模型的基础上引入了价格粘性，构建了异质性个体新凯恩斯 (HANK) 模型，并在该框架下分析了货币政策的传导机制及效果。文章发现降息的经济刺激效果主要是通过间接效应起作用，即通过一般均衡影响劳动需求、不同资产的配置等渠道从而最终影响总需求，而传统意义上的直接效应——影响家庭消费和储蓄的跨期选择——实际起到的作用很小。而代表性家庭模型只考虑直接效应，不考虑间接效应，因而与 HANK 模型在分析货币政策传导机制方面存在本质差别。HANK 模型近年来被用于探讨很多热点话题，包括非传统货币政策、预期引导、财政乘数、结构性转移支付等，然而其模型求解依赖于复杂的编程计算，部分结果缺乏直观的经济学解释，目前还有很大的发展空间。

#### (六) 全局解法在资产定价领域的应用

资产定价文献关注金融资产价格的决定，例如股票相对于无风险债券的超额收益，以及不同投资者对于金融资产的配置。在研究此类问题时，线性近似解法并不适用，因为在公式 (3) 的线性近似方程组中，投资者的效用函数变为风险中性，无法产生风险溢价，导致股票的回报率与无风险债券相等。同时线性化后，由于各种金融资产的期望回报率相同，在投资者看来这些资产是等价的，从而使得资产组合问题也无法求解。此时全局解法具有明显优势<sup>10</sup>。

全局非线性解法在资产定价领域中的应用十分广泛。Guvenen (2009) 基于一个不完备金融市场模型解释了美国数据中观察到的多个资产定价的异常现象，包括较高的股票风险溢价、较低和平稳的利率、以及风险溢价和夏普比率的逆周期性等。他的模型假定存在持股人和非持股人两类个体，二者具有不同的跨期替代弹性，且只有持股人能够参与股票市场。由于持股人的消费水平等变量具有较大的波动性，使用线性近似解法求解模型会带来较大的误差。He and Krishnamurthy (2013) 强调了金融中介持有的资本在决定资产价格时的重要性。文章指出线性近似解无法刻画实际数据中风险溢价的时变性，其中股权资本约束作为模型的关键假定，规定了家庭对于金融中介的最大股权投资额，也是风险溢价非线性的主要来源。Brumm et al. (2015) 认为，资产的价格不仅取决于其未来的现金流，还取决于资产本身的可抵押性，即债权人在债务违约发生时能够获得的抵押品的比例。资产的可抵押性越强，则该资产的风险溢价越低，而且资产自身收益的波动性也越小。抵押约束的存在导致模型存在高度的非线性。Li and Xu (2023) 研究了当金融中介面临杠杆约束时的资产定价问题。文章发现假定约束始终收紧的线性近似解夸大了资产价格的波动性，因此也夸大了风险溢价。不少研究也将不完备金融市场以及异质性个体的设定纳入到了资产定价的模型框架中。例如，Gomes and Michaelides (2008) 的理论框架能够同时刻画资产价格和个体资产分布的动态；Gomes et al. (2013) 探究了财政政策对于资产价格的影响；Pijoan-Mas (2007) 探讨了习惯养成 (Habit Formation) 这一设定对于股权溢价之谜的解释力度；Storesletten et al. (2007) 认为生命周期以及资本积累的设定会降低个体性风险对于夏普比率的解释力度。如前所述，这些模型均需要使用全局非线性解法求解。

#### (七) 全局解法在失业和劳动力市场分析中的应用

Petrosky-Nadeau and Zhang (2017) 强调了全局非线性解法对于精确求解经典的 Diamond-Mortensen-Pissarides (DMP) 失业模型的重要性。失业存在高度非线性：在经济大幅衰退阶段，失业会迅速增加，然而在经济扩张阶段，失业的下降是一个较为缓慢的过程。然而，线性近似解仅关注模型稳态附近的性质，无法刻画大幅衰退时失业的迅速增加，因此会低估失业率的均值与方差，低估负向冲击对失业的不利影响；也无法刻画扩张时失业的缓慢下降，因此会高估市场上劳动力的紧俏程度、失业与职位空缺之间的相关性、以及正向冲击时劳动力紧俏程度的上升。在稳态附近二阶展开的近似解仍然无法准确刻画失业的非线性特征，其准确度甚至差于一阶线性近似解。Petrosky-

<sup>10</sup> 有学者采用二阶或更高阶的局部近似法求解资产定价与资产组合问题，例如 Devereux and Sutherland (2010) 在研究海外资产的价值波动问题时，采用了二阶近似方法求解。但是这一方法只适用于他们研究的具体问题，同时本质上仍然为局部近似法，只适用于分析资产价格在稳态附近小幅波动的情况。

Nadeau et al. (2018) 发现使用全局非线性解法准确地对 DMP 模型进行求解后，该模型会产生内生的罕见灾难风险，与数据中的观察结果一致。Den Haan et al. (2018) 认为不完备金融市场和粘性名义工资的同时存在将导致失业-通缩螺旋，并指出线性近似解法在求解模型时会带来较明显的误差。Pizzinelli et al. (2020) 发现在生产率水平较低时，生产率冲击对失业率、入职率和离职率的影响会更大，即劳动市场的波动存在状态依赖性。准确刻画该特征需要使用全局非线性解法。Petrosky-Nadeau and Zhang (2021) 基于高度非线性的工作搜寻模型解释了上世纪三十年代大萧条时期美国的失业危机。

### 四、全局非线性解法的实例

本章以零利率下限、金融危机、结构转型中经济周期三个领域的代表性模型为例，详细介绍全局非线性解法在宏观量化分析中起到的关键作用。此处仅涉及模型的简要介绍和主要结果的分析，具体的模型设定、参数选择和计算方法请参考文章的线上附录。

#### (一) 全局解法在零利率下限领域的应用实例

我们构建了一个包含家庭、中间品生产商、最终品生产商、中央银行的标准新凯恩斯模型。家庭选择消费和劳动以最大化其效用，中间品生产商使用劳动作为投入以生产中间品，进而由最终品生产商将其打包为最终品。我们假定中间品生产商在调整其产品价格时需要支付价格调整成本 (Rotemberg, 1982)。中央银行的货币政策遵循泰勒规则，但其对利率的调整面临如式 (4) 所示的零利率下限约束。家庭部门的随机折现因子  $\beta$  为唯一的外生冲击，并且没有内生的状态变量。

图 2 给出了产出、通货膨胀率和利率关于折现因子  $\beta$  的政策函数。图中虚线为 Dynare 工具箱生成的局部线性近似解，实线表示全局非线性解。随着  $\beta$  的增大，消费者的消费意愿下降，储蓄意愿上升，从而导致利率下降。同时这会导致总需求收紧，从而使产出、工资以及通货膨胀率下降。根据图 2 (c) 中的全局非线性结果，当  $\beta_t > 1.0054$  时，零利率下限收紧，此时传统货币政策失效，导致消费和产出进一步减少。而局部近似解无法刻画零利率下限带来的严重后果，因此会低估经济受到的不利影响。当折现因子  $\beta_t < 1.0054$  时，经济处于正常状态，此时两种解法的结果较为接近。仔细观察可以发现，图 2 (c) 中的利率曲线在  $\beta_t = 1.0054$  附近，全局非线性解的结果低于线性近似解得到的结果，这是由家庭的预防性储蓄导致的。虽然零利率下限在当前期不收紧，但是未来有较大概率会达到零利率下限从而产生经济萧条。预期到这一点，家庭会预防性的降低消费、增加储蓄，从而使实际的利率水平比线性近似得到的结果更低。

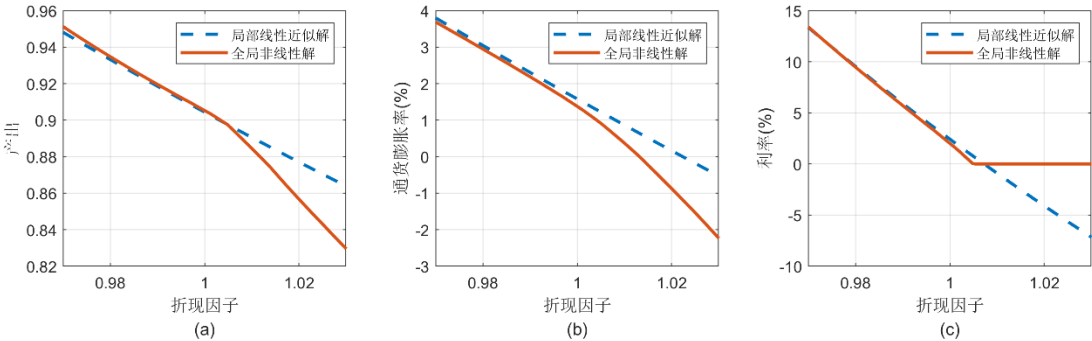


图 2: 产出、通货膨胀率和利率作为折现因子的政策函数

附注：图 (b) (c) 的纵坐标分别指年度通货膨胀率和年利率。



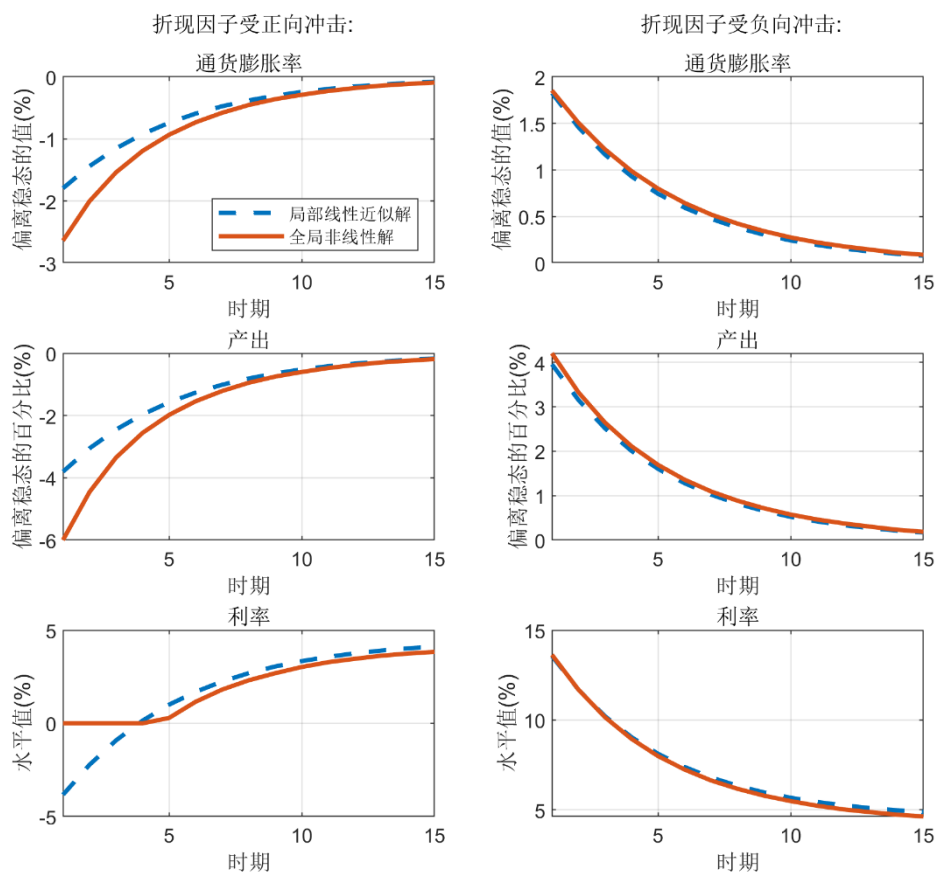


图 3：正向和负向冲击下的经济反应

附注：横坐标为时间，跨度为 1 到 15 期；纵坐标表示变量偏离其稳态值的百分比。图中外生冲击的幅度为 5 个标准差。

图 3 显示了产出、通货膨胀率和利率在折现因子受到大幅正向和负向冲击时的脉冲反应，并比较了两种解法得到的结果。如图 3 左栏所示，当折现因子受到大幅正向冲击时，全局非线性解表明在前 4 期零利率下限收紧，并导致产出与通货膨胀率的大幅下降。具体而言，在第一期产出与通货膨胀率相对于稳态值分别下降 6 与 2.6 个百分点。而局部线性近似解不考虑零利率下限的影响，严重低估了产出与通货膨胀率的下降程度，两个变量在第一期相对于各自稳态值的降幅分别为 3.8 和 1.8 个百分点，只是真实下降值的 60%。作为对比，图 3 的右栏表明当折现因子受到大幅负向冲击时，因为不存在零利率下限收紧的情况，此时两种解法的结果十分接近。上述分析还表明，局部近似解对于正向和负向冲击的反应是完全对称的，而全局非线性解能够准确刻画大幅冲击产生的非对称效应。

### (二) 全局解法在金融危机领域的应用实例

我们以 Bianchi (2011) 为例，进一步说明偶发收紧的借贷约束导致危机爆发的内在机制，以及全局非线性解法在其中发挥的作用。Bianchi (2011) 研究资本账户开放的新兴市场国家出现的资本流入突然中断现象：跨境资本流入急速下滑，导致经常账户反转，本国信贷供给和有效需求骤降，产出和汇率水平大幅下跌，从而爆发金融危机。

Bianchi (2011) 构建了一个不完备金融市场条件下的小国开放经济模型。本国消费者每一期获得外生的可贸易商品收入  $y_t^T$  和不可贸易商品收入  $y_t^N$ ，并通过国际借贷以最大化自身效用。模型的关键假设是式 (6) 所示的借贷约束：本国消费者在国际市场上能够借入的资金存在最大限额，且该限额与汇率水平  $P_t^N$  正相关。当本国经济遭遇负向冲击使汇率贬值、融资约束收紧时，本国家庭被迫降

低消费支出,从而导致汇率进一步下跌,融资约束进一步收紧,从而造成恶性循环。值得注意的是,汇率水平与可贸易商品的消费 $c_t^T$ 正相关。

图 4 给出了两种外生收入冲击的组合下,债券数量 $b_{t+1}$ 和实际汇率 $P_t^N$ 作为当期持有债券数量 $b_t$ 的政策函数。当可贸易商品收入 $y_t^T$ 取最大值时(图中虚线),借贷约束并不收紧,此时 $b_{t+1}$ 与 $P_t^N$ 均为 $b_t$ 的增函数,形状平滑,并未表现出明显的非线性特征。反之,当可贸易商品收入 $y_t^T$ 取最小值时(图中实线),作为政策函数的 $b_{t+1}$ 与 $P_t^N$ 均表现出高度非线性特征:如果当前负债过高( $b_t < -0.89$ ),则借贷约束收紧,从而导致可贸易商品消费下降,实际汇率水平被大幅压低,从而使得借贷约束进一步收紧,产生了经典的金融放大效应。在这一区间, $b_{t+1}$ 为 $b_t$ 的减函数,因为 $b_t$ 的下降会导致借贷约束收得更紧,代表性家庭能够获得的新融资数量也随之下降,在宏观层面表现为经常账户反转。

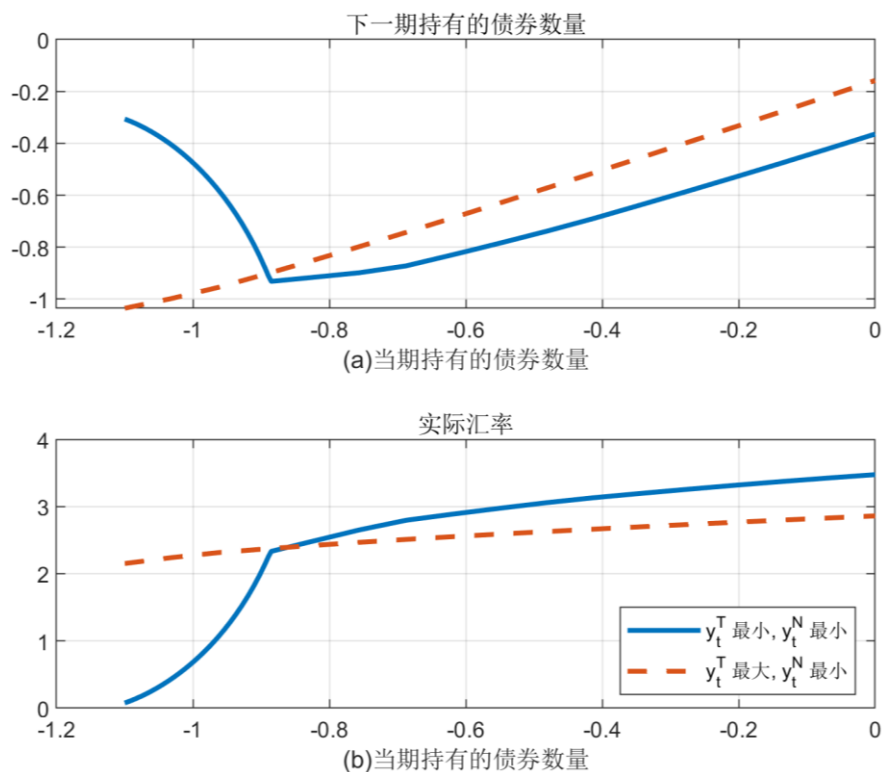


图 4: 债券持有与实际汇率的政策函数

由于借贷约束的存在,当经济遭受负向冲击时,主要经济指标的反应程度会被放大。为了展示这种放大效应,我们计算了可贸易商品 $y^T$ 受到一个标准差的负向冲击时,主要变量的反应程度,并将之与另外一个版本的经济——不存在借贷约束的经济中该变量的反应程度做比较,将差值记录在表 1 中。我们进一步将当前经济所处状态区分为借贷约束收紧状态和未收紧状态。从中可以看出,当借贷约束未收紧时,主要变量对于外生冲击的反应与不存在借贷约束经济中的反应相似;而一旦借贷约束收紧,此时变量的反应程度大幅上升,例如债务的下降比例为未收紧状态下的 10 倍 ( $-19.71\%/-1.90\%$ ),而汇率的下降程度是未收紧状态下的 5 倍 ( $-26.86\%/-5.10\%$ )。上述结果表明,借贷约束收紧会对经济周期的性质造成显著影响,产生明显的放大效应。这种差异在局部近似解中不能得到体现,更加突出了使用全局非线性解法求解模型的必要性。

表 1: 负向冲击下借贷约束产生的放大效应

主要变量的平均相对变化程度	借贷约束收紧	借贷约束未收紧
债务 ( $-b'$ )	-19.71%	-1.90%
实际汇率 $P^N$	-26.86%	-5.10%
消费 $c$	-8.40%	-1.38%
总收入 $Y$	-18.54%	-4.11%

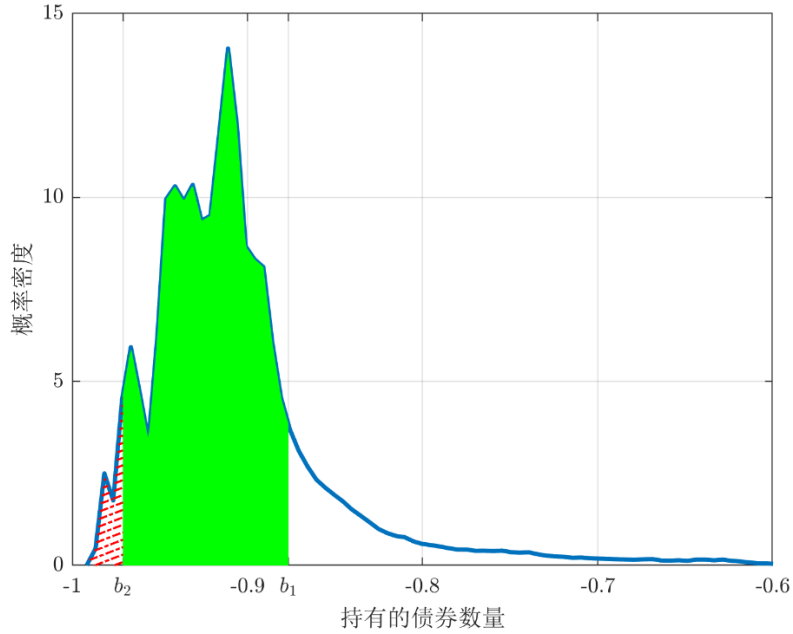


图 5：债券持有量的稳态分布

附注：实线为代表性家庭持有债券的稳态概率密度分布，通过 100 次 10 万期的蒙特卡洛模拟得出。我们舍弃掉前 4000 期观测值以避免稳态分布受到初始值的影响。图中  $b_1$  代表  $y^T$  取其最小值、 $y^N$  取其最大值时借贷约束收紧的门槛值， $b_2$  代表  $y^T$  取其次小值、 $y^N$  取其最大值时借贷约束收紧的门槛值。

图 5 中的实线给出了代表性家庭持有债券  $b$  的稳态概率密度分布。该分布下  $b$  取值全部为负，表明该经济体总是处于对外负债的状态。我们将危机定义为借贷约束收紧，发现危机是否发生除了受外债规模的影响，还和当前收入水平高度相关。当  $y^T$  取其最小值、 $y^N$  取其最大值时，一旦  $b < b_1$ （图中深色部分）危机就会发生，而当  $y^T$  取其次小值、 $y^N$  取其最大值时， $b < b_2$  时（图中斜线部分）危机才会发生。平均而言，该经济体爆发危机的概率是 7.7%<sup>11</sup>。

本模型中的代表性家庭并未将其个体选择对于危机的爆发概率和危害考虑在内，存在过度借款的问题。具体而言，可贸易商品的消费  $c_t^T$  的减少会导致实际汇率贬值，并造成借贷约束中的融资额度下降。一旦该借贷约束收紧，宏观经济中将产生金融放大效应，爆发金融危机。然而个体在决策时将汇率和融资约束视为外生给定，并未意识到其借贷和消费选择对于宏观变量的影响，造成了个体在事先选择的国际借款 ( $-b_t$ ) 高于全社会最优水平。过高的现有债务会限制家庭的消费支出，并如图 4 所示压低实际汇率，增大危机爆发的可能性和严重程度。因此个体的过度借款行为存在负的金钱外部性 (pecuniary externality)。此时政府可以通过限制个体事先的借款数量来缓解危机期间消费和汇率的下降，从而阻止危机的爆发或者降低其严重程度，改善全社会福利。政府可以选择多种政策工具实现这一目标，资本流动税是其中最为常见的手段之一。

### （三）全局解法在结构转型中经济周期问题的应用实例

我们基于 Storesletten, Zhao and Zilibotti (2019, 以下简称为 SZZ) 模型的简化版本，介绍全局非线性解法在研究结构转型中经济周期问题上的应用。中国在经济结构转型过程中，就业的波动性很小，同时几乎不随经济周期变化。SZZ 强调农业部门就业的调整对于理解这一现象至关重要。由于中国在转型初期拥有巨大的农业人口，当非农部门的劳动生产率受到正向冲击时，劳动力会从农业

<sup>11</sup> Bianchi (2011) 对于危机的定义是借贷约束 (6) 收紧，同时资本流出超过某一数值。其文章得到的危机平均发生的概率为 5.5%。



部门流入非农部门以弥补劳动力缺口，从而使整体就业不产生明显波动。SZZ 特别强调了非农部门劳动生产率的上升对经济增长、经济结构调整、以及经济周期性质的影响<sup>12</sup>。

模型包含农业 (G) 和非农业 (M) 两个生产部门，农业部门的生产仅需使用实际劳动，而非农业部门的生产需同时使用实际劳动和资本。部门  $i(i = M, G)$  的生产率包含长期增长率  $g^i$  以及短期波动  $z_t^i$  两部分。假定非农业部门的长期增长率高于农业部门，即  $g^M > g^G$ 。代表性个体选择消费、劳动时间以及资本积累以最大化其效用。实际劳动等于劳动时间与劳动人口的乘积。代表性个体的劳动时间反映了经济中的整体就业状况。农业和非农业部门的（税后）工资率相等决定了劳动人口在两部门之间的分配。

如图 6 所示，由于非农部门的劳动生产率增长速度更快，两部门生产率的绝对差距会不断扩大，农业部门的劳动力被逐渐吸纳到非农部门，从而导致农业部门持续收缩，在经济中的占比最终趋于 0。在该经济体向长期稳态收敛的结构转型过程中，政策函数也会随着时间  $t$  的推移而发生改变，整体经济表现为围绕其转型路径的随机波动。

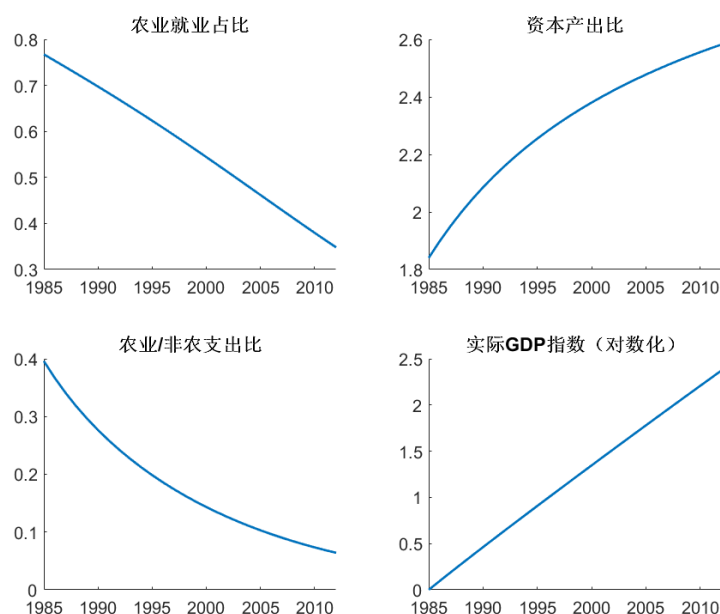


图 6: 1985-2012 年的确定性转移路径

附注：农业/非农支出比定义为  $(P_t^G Y_t^G)/(P_t^M Y_t^M)$ ，其中  $Y_t^i$  为部门  $i$  的产出， $P_t^i$  为部门  $i$  产出的价格， $i = M, G$ 。

图 7 画出了非农部门的生产率  $z_t^M$  受到 1 单位标准差正向冲击后就业和产出的脉冲响应函数，采用这些变量相对于其确定性转移路径变化的百分比来表示。我们对比 1985 年（模型  $t = 0$ ）和 2012 年（模型  $t = 27$ ）的脉冲响应函数以突出结构变迁对于经济周期性质的影响。正向冲击发生时，劳动力会从农业部门析出，向更有效率的非农部门集中，从而导致非农部门产出以及总产出增加，农业产出下降。在 1985 年，生产效率冲击对于整体就业的影响很小，非农部门增加的劳动需求主要是通过农业部门的劳动力转移得以满足；然而到了 2012 年，农业部门的规模已经很小，此时非农部门的劳动需求需要通过劳动供给的增加得到满足，此时整体就业也表现出了明显的顺周期特征。此外由于规模的缩减，农业部门的就业和产出在 2012 年时的反应程度要远大于 1985 年。

<sup>12</sup> SZZ 文章中的农业部门包含传统农业与现代农业两个子类，其中传统农业生产只依赖劳动力投入，而现代农业生产需要投入劳动力与资本。基于此设定，他们的文章还探讨了农业现代化、以及非农业-农业部门生产率差距的趋势和周期的性质。本文简化了 SZZ 的设定，假设农业部门完全由传统农业构成。

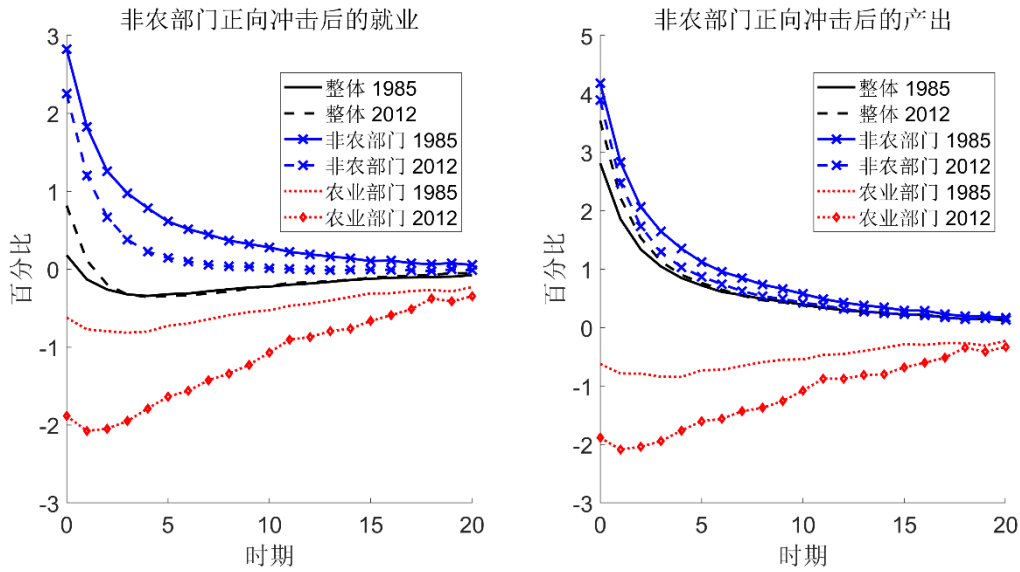


图 7：非农业部门受正向冲击后的脉冲响应函数

附注：曲线表示非农业部门的劳动生产率  $z_t^M$  受到 1 单位标准差的正向冲击后，就业和产出相对于其确定性转移路径变化的百分比。受到冲击后的演进路径通过正向冲击发生后，生成 10 万个随机模拟路径并取其平均值求得。

## 五、总结与展望

本文系统介绍了全局非线性解法的一般性框架，及其与局部线性近似解的差别，梳理了全局非线性解法适用的研究领域以及代表性文献，并通过零利率下限、金融危机、结构转型中的经济周期等领域的数值实例说明了全局非线性解法在求解 DSGE 模型时的准确性与适用性。

全局非线性解法在分析中国宏观经济问题 and 经济政策上的前景广阔：第一，中国自改革开放以来的经济周期并非是基于稳态附近的小幅波动，而是转移路径趋势变化与围绕趋势的短期波动共同作用的结果。此时采用基于稳态的局部近似法分析中国宏观问题，显然造成了研究方法和研究对象之间的割裂，而全局非线性解法由于脱离了稳态附近小幅波动的限制，可以研究涉及结构转型和政策调整的广泛课题，极大扩展了 DSGE 模型的适用范围。第二，我国当前处于新发展阶段，这对于宏观研究的量化精准提出了更高要求。鉴于全局非线性解法在定性和定量分析方面存在的天然优势，采用该方法进行参数估计、经济动态分析可以使理论结果更准确，政策建议更可靠，能够增强宏观调控的前瞻性、针对性、协同性。第三，在研究主题上，全局非线性求解方法与异质性、摩擦等宏观前沿研究特征可以更好的结合 (Kocherlakota, 2009)。

举例而言，全局非线性解法可以拓展以下课题的研究：

- **宏观审慎政策与系统性金融风险防范**：近年来，我国学者基于包含金融机构的 DSGE 模型对金融稳定及宏观审慎政策进行了深入探讨。除熊琛、金昊 (2018) 采用全局非线性解法外，大部分文献仍然采用线性近似法。此类模型一般将公式 (5)、(6) 或其他形式的融资约束收紧作为判别金融风险的主要依据。由于该融资约束在稳态处收紧，线性近似法会得出该融资约束一直收紧的错误结论，从而高估金融风险的发生概率及影响 (Cao and Nie, 2017)。采用全局解法可以对系统性风险做出准确的判断，并针对性的制定相应的宏观审慎政策以实现金融稳定。
- **具有非对称、非线性等特征的经济周期问题**：我国的经济周期经常表现出非对称、非线性、不可导、非连续、时变性等特征，例如赵胜民和张瀚文 (2018)、王胜等 (2019)、周上尧和王胜 (2021) 分别探讨了房价冲击、外国利率冲击、金融创新冲击对于我国宏观经济波动以及系统性风险产生的非对称影响，并检验了政策的稳定效果。这些文章基于 Guerrieri and Iacoviello (2015) 开发的 OccBin 插件，求解模型的分段线性近似解。然而 OccBin 的

解法仍然围绕确定性稳态展开，存在的主要问题之一是无法刻画经济主体面对不确定环境时，处于对未来可能的经济下行产生的预防性行为，与全局非线性解存在本质区别<sup>13</sup>。

- **经济结构、制度调整的宏观效应：**中国经济在高速增长的同时，也经历了广泛而持续的结构转型和制度调整，改革措施涉及到所有制结构、产业结构、户籍政策、金融体系、对外开放等方方面面。全局非线性解法在分析结构转型中的经济周期问题时有着广阔的用武之地，一个代表性的例子是利率管制和利率市场化改革的研究。学者们普遍认同利率市场化改革大方向，然而对于改革步骤和时点存在争议：有学者认为消除利率管制有助于改善经济结构性失衡，降低经济波动；也有学者指出利率市场化的施行有其前提条件，当存在其他摩擦和市场不健全时，过于激进地推进利率市场化可能会加剧资源错配，对经济造成负面影响。由于利率管制同时对经济结构和经济波动造成影响，对其效果也需要结合两方面进行综合评估。除 Liu et al. (2021b) 计算了确定性转移路径外，大多数研究主要采用比较静态分析和局部分析法，并未在统一框架下分析利率自由化的长短期动态影响。全局解法能够弥补这一空白，对政策效果进行准确分析，也可以对不同政策组合的风险加以准确的评估，特别是当这种风险涉及到长期的经济走向，而非短期波动时更是如此（易纲，2009）。
- **异质性模型及其宏观效应：**异质性分析是宏观前沿研究的核心特征之一。李戎等（2022）详细介绍了异质性模型在研究中国经济问题时起到的作用，例如：考虑不同收入水平的家庭异质性可以准确分析需求刺激政策的效果；考虑国企、民企等不同类型的异质性可以准确评估各种改革政策的实际效果，助推供给侧改革；考虑不同规模和类型金融机构的异质性可以有效分析结构性货币政策对于实现政策目标的有效性和宏观效应；考虑不同级别、不同部门的政府异质性可以助力多目标条件下政府政策有效协调配合。正如本文第三部分指出的，异质性模型的求解需要采用全局非线性解法，异质性模型的理论设定与全局解法的结合可以实现理论与方法的统一。

在中国经济转向高质量发展背景下，宏观研究需要进一步运用科学方法，立足中国现实，深入剖析经济运行规律，服务国家经济政策。全局非线性解法更加准确可靠，有助于宏观调控科学精准施策，在未来有着广阔的发展和应用空间<sup>14</sup>。当前面临的一个问题是，全局非线性解法尚缺乏统一的研究与分析框架，且其具有一定的技术门槛，使用者主要集中于国际一流期刊和头部研究机构。在未来，需要我国的宏观经济学者将全局非线性解法与中国现实有机结合，搭建系统性的研究框架，同时进行推广和普及，让该解法更有力地服务于我国宏观经济研究，为构建新发展格局做出贡献。

## 参考文献

- [1] Achdou, Y., J. Han, J. Lasry, P. Lions, and B. Moll, “Income and Wealth Distribution in Macroeconomics: A Continuous-Time Approach”, *The Review of Economic Studies*, 2022, 89 (1), 45–86.
- [2] Adam, K., and R.M. Billi, “Discretionary Monetary Policy and the Zero Lower Bound on Nominal Interest Rates”, *Journal of Monetary Economics*, 2007, 54 (3), 728–752.
- [3] Adjemian, S., H. Bastani, M. Juillard, F. Karamé, J. Maih, F. Mihoubi, W. Mutschler, G. Perendia, J. Pfeifer, M. Ratto, and S. Villemot, “Dynare: Reference Manual, Version 4”, Dynare Working Papers NO. 1, 2011, CEPREMAP.

---

<sup>13</sup> Cao et al. (2023a) 对零利率下限的研究中发现，OccBin 会严重高估金融危机期间产出、资产价格的下降程度。

<sup>14</sup> 全局非线性解法并非完美。该方法目前面临的主要瓶颈是维数灾难（curse of dimensionality）问题：由于电脑计算能力的限制，外生冲击和状态变量的维数，即公式（1）中的  $d_2$  和  $d_s$  不能过大，否则模型求解会由于运算时间过长而变得不切实际。这一问题限制了模型的复杂程度以及对现实的刻画。学者们基于计算科学中的最新进展试图弱化该问题的影响，例如 Smolyak 格点法（Krueger and Kubler, 2004）、自适应稀疏网格法（Brumm and Scheidegger, 2017）、内生状态变量法（Cao et al., 2023b）、蒙特卡洛模拟法（Judd et al., 2011）、矩近似法（Krusell and Smith, 1998）以及机器学习（Maliar et al., 2021; Fernández-Villaverde et al., 2023）等，然而维数灾难问题目前仍是全局非线性解法面临的首要问题。如果需要处理的模型维度很高时，局部近似法会是更合适的选择。

- [4] Aghion, P., P. Bacchetta, R. Rancière, and K. Rogoff, “Exchange Rate Volatility and Productivity Growth: The Role of Financial Development”, *Journal of Monetary Economics*, 2009, 56 (4) , 494–513.
- [5] Aguiar, M., and G. Gopinath, “Emerging Market Business Cycles: The Cycle Is the Trend”, *Journal of Political Economy*, 2007, 115 (1) , 69–102.
- [6] Ai, H., K. Li, and F. Yang, “Financial Intermediation and Capital Reallocation”, *Journal of Financial Economics*, 2020, 138 (3) , 663–686.
- [7] Aruoba S. B., P. Cuba-Borda, and F. Schorfheide, “Macroeconomic Dynamics Near the ZLB: A Tale of Two Countries”, *The Review of Economic Studies*, 2018, 85 (1) , 87–118.
- [8] Auclert, A., B. Bardóczy, M. Rognlie, and L. Straub, “Using the Sequence-Space Jacobian to Solve and Estimate Heterogeneous-Agent Models”, *Econometrica*, 2021, 89 (5) , 2375–2408.
- [9] Barro, R. J., “Rare Disasters and Asset Markets in the Twentieth Century”, *The Quarterly Journal of Economics*, 2006, 121 (3) , 823–866.
- [10] Barro, R. J., “Rare Disasters, Asset Prices, and Welfare Costs”, *American Economic Review*, 2009, 99 (1) , 243–264.
- [11] Barro, R. J., “Environmental Protection, Rare Disasters and Discount Rates”, *Economica*, 2015, 82 (325) , 1–23.
- [12] Barro, R. J., J. Fernández-Villaverde, O. Levintal, and A. Mollerus, “Safe Assets”, *The Economic Journal*, 2022, 132 (646) , 2075–2100.
- [13] Begeau, J., and T. Landvoigt, “Financial Regulation in a Quantitative Model of the Modern Banking System”, *The Review of Economic Studies*, 2022, 89 (4) , 1748–1784.
- [14] Benigno, G., H. Chen, C. Otrok, A. Rebucci, and E. R. Young, “Financial Crises and Macro-Prudential Policies”, *Journal of International Economics*, 2013, 89 (2) , 453–470.
- [15] Benigno, G., H. Chen, C. Otrok, A. Rebucci, and E. R. Young, “Optimal Capital Controls and Real Exchange Rate Policies: A Pecuniary Externality Perspective”, *Journal of Monetary Economics*, 2016, 84, 147–165.
- [16] Bernanke, B., and M. Gertler, “Agency Costs, Net Worth, and Business Fluctuations”, *American Economic Review*, 1989, 79 (1) , 14–31.
- [17] Bianchi, J., “Overborrowing and Systemic Externalities in the Business Cycle”, *American Economic Review*, 2011, 101 (7) , 3400–3426.
- [18] Bianchi, J., and E. G. Mendoza, “Optimal Time-Consistent Macroprudential Policy”, *Journal of Political Economy*, 2018, 126 (2) , 588–634.
- [19] Bianchi, J., and E. G. Mendoza, “A Fisherian Approach to Financial Crises: Lessons from the Sudden Stops Literature”, *Review of Economic Dynamics*, 2020, 37, S254–S283.
- [20] Blanchard, O. J., and C. M. Kahn, “The Solution of Linear Difference Models under Rational Expectations”, *Econometrica*, 1980, 48 (5) , 1305–1311.
- [21] Bodenstein, M., L. Guerrieri, and C. Gust, “Oil Shocks and the Zero Bound on Nominal Interest Rates”, *Journal of International Money and Finance*, 2013, 32: 941–967.
- [22] Boneva, L. M., R. A. Braun, and Y. Waki, “Some Unpleasant Properties of Loglinearized Solutions when the Nominal Rate is Zero”, *Journal of Monetary Economics*, 2016, 84, 216–232.
- [23] Boz, E., and E. G. Mendoza, “Financial Innovation, the Discovery of Risk, and the US Credit Crisis”, *Journal of Monetary Economics*, 2014, 62, 1–22.
- [24] Brandt, L., and X. Zhu, “Redistribution in a Decentralized Economy: Growth and Inflation in China under Reform”, *Journal of Political Economy*, 2000, 108, 422–439.
- [25] Brandt, L., and X. Zhu, “Soft Budget Constraint and Inflation Cycles: A Positive Model of the Macro Dynamics in China During Transition”, *Journal of Development Economics*, 2001, 64, 437–457.
- [26] Brumm, J., M. Grill, F. Kubler, and K. Schmedders, “Collateral Requirements and Asset Prices”, *International Economic Review*, 2015, 56 (1) , 1–25.
- [27] Brumm, J., and S. Scheidegger, “Using Adaptive Sparse Grids to Solve High-Dimensional Dynamic Models” , *Econometrica*, 2017, 85 (5) , 1575–1612.
- [28] Brunnermeier, M. K., and Y. Sannikov, “A Macroeconomic Model with a Financial Sector”, *American Economic Review*, 2014, 104 (2) , 379–421.
- [29] Cao, D., “Speculation and Financial Wealth Distribution under Belief Heterogeneity”, *The Economic Journal*, 2018, 128 (614) , 2258–2281.

- [30] Cao, D., W. Luo, and G. Nie, “Uncovering the Effects of the Zero Lower Bound with an Endogenous Financial Wedge”, *American Economic Journal: Macroeconomics*, 2023a, 15 (1) , 135–172.
- [31] Cao, D., W. Luo, and G. Nie, “Global DSGE Models”, *Review of Economic Dynamics*, 2023b, 51, 199–225.
- [32] Cao, D., and G. Nie, “Amplification and Asymmetric Effects without Collateral Constraints”, *American Economic Journal: Macroeconomics*, 2017, 9 (3) , 222–266.
- [33] Chang, C., K. Chen, D. F. Waggoner, and T. Zha, “Trends and Cycles in China’s Macroeconomy”, In: Eichenbaum, M., and J. A. Parker (eds.) , *NBER Macroeconomics Annual 2015*, 30. Chicago: The University of Chicago Press, 2016, 1–84.
- [34] Chen, K., and Y. Wen, “The Great Housing Boom of China”, *American Economic Journal: Macroeconomics*, 2017, 9 (2) , 73–114.
- [35] Chen, K., and T. Zha, “Macroeconomic Effects of China’s Financial Policies”, In: M. Amstad, G. Sun, and W. Xiong, *The Handbook of China’s Financial System*. Princeton: Princeton University Press, 2020, 151–182.
- [36] Chen, K., and T. Zha, “China’s Macroeconomic Development: The Role of Gradualist Reforms”, National Bureau of Economic Research Working Paper, 2023, <https://www.nber.org/papers/w31395>.
- [37] Christiano, L. J., M. S. Eichenbaum, and M. Trabandt, “On DSGE Models”, *Journal of Economic Perspectives*, 2018, 32 (3) , 113–140.
- [38] Corbae, D., and P. D’Erasmo, “Capital Buffers in a Quantitative Model of Banking Industry Dynamics”, *Econometrica*, 2021, 89 (6) , 2975–3023.
- [39] Den Haan, W. J., P. Rendahl, and M. Riegler, “Unemployment (Fears) and Deflationary Spirals”, *Journal of the European Economic Association*, 2018, 16 (5) , 1281–1349.
- [40] Devereux, M. B., and A. Sutherland, “Country Portfolio Dynamics”, *Journal of Economic Dynamics and Control*, 2010, 34 (7) , 1325–1342.
- [41] Devereux, M. B., and C. Yu, “International Financial Integration and Crisis Contagion.” *The Review of Economic Studies*, 2020, 87 (3) , 1174–1212.
- [42] Di Tella, S., “Uncertainty Shocks and Balance Sheet Recessions”, *Journal of Political Economy*, 2017, 125 (6) , 2038–2081.
- [43] Dinlersoz, E. M., and Z. Fu, “Infrastructure Investment and Growth in China: A Quantitative Assessment”, *Journal of Development Economics*, 2022, 158, 102916.
- [44] Dong F., J. Liu, Z. Xu, and B. Zhao, “Flight to Housing in China”, *Journal of Economic Dynamics and Control*, 2021, 130, 104189.
- [45] Duffie, D., J. Geanakoplos, A. Mas-Colell, and A. McLennan, “Stationary Markov Equilibria”, *Econometrica*, 1994, 62 (4) , 745–781.
- [46] Elenev, V., T. Landvoigt, and S. Van Nieuwerburgh, “A Macroeconomic Model with Financially Constrained Producers and Intermediaries”, *Econometrica*, 2021, 89 (3) , 1361–1418.
- [47] Faria-e-Castro, M., “Fiscal Multipliers and Financial Crises”, *The Review of Economics and Statistics*, 2022, 1, 1–45.
- [48] Fernández-Villaverde, J., G. Gordon, P. Guerrón-Quintana and J. F. Rubio-Ramírez, “Nonlinear Adventures at the Zero Lower Bound”, *Journal of Economic Dynamics and Control*, 2015, 57, 182–204.
- [49] Fernández-Villaverde, J., S. Hurtado, and G. Nuño, “Financial Frictions and the Wealth Distribution”, *Econometrica*, 2023, 91 (3) , 869–901.
- [50] Fornaro, L., “International Debt Deleveraging”, *Journal of the European Economic Association*, 2018, 16 (5) , 1394–1432.
- [51] Gabaix, X., “Variable Rare Disasters: An Exactly Solved Framework for Ten Puzzles in Macro-Finance”, *The Quarterly Journal of Economics*, 2012, 127 (2) , 645–700.
- [52] Geanakoplos, J., “The Leverage Cycle”, In: Acemoglu, D., K. Rogoff, and M. Woodford (eds.) , *NBER Macroeconomics Annual 2009*, 24. Chicago: The University of Chicago Press, 2010, 1–65.
- [53] Gomes, F., and A. Michaelides, “Asset Pricing with Limited Risk Sharing and Heterogeneous Agents”, *The Review of Financial Studies*, 2008, 21 (1) , 415–448.
- [54] Gomes F., A. Michaelides, and V. Polkovnichenko, “Fiscal Policy and Asset Prices with Incomplete Markets”, *The Review of Financial Studies*, 2013, 26 (2) , 531–566.
- [55] Gourio, F., “Disaster Risk and Business Cycles”, *American Economic Review*, 2012, 102 (6) , 2734–2766.
- [56] Gourio, F., “Credit Risk and Disaster Risk”, *American Economic Journal: Macroeconomics*, 2013, 5 (3) , 1–34.

- [57] Greenwald, D.L., T. Landvoigt, and S. Van Nieuwerburgh, “Financial Fragility with SAM?”, *The Journal of Finance*, 2021, 76, 651–706.
- [58] Gregory, R. P., “Climate Disasters, Carbon Dioxide, and Financial Fundamentals”, *The Quarterly Review of Economics and Finance*, 2021, 79, 45–58.
- [59] Guerrieri, L., and M. Iacoviello, “OccBin: A Toolkit for Solving Dynamic Models with Occasionally Binding Constraints Easily”, *Journal of Monetary Economics*, 2015, 70, 22–38.
- [60] Guerrieri, V., G. Lorenzoni, L. Straub, and I. Werning, “Macroeconomic Implications of COVID-19: Can Negative Supply Shocks Cause Demand Shortages?”, *American Economic Review*, 2022, 112 (5), 1437–1474.
- [61] Gust, C., E. Herbst, D. López-Salido, and M. E. Smith, “The Empirical Implications of the Interest-Rate Lower Bound”, *American Economic Review*, 2017, 107 (7), 1971–2006.
- [62] Guvenen, F., “A Parsimonious Macroeconomic Model for Asset Pricing”, *Econometrica*, 2009, 77 (6), 1711–1750.
- [63] He, Z., and A. Krishnamurthy, “A Model of Capital and Crises”, *The Review of Economic Studies*, 2012, 79 (2), 735–777.
- [64] He, Z., and A. Krishnamurthy, “Intermediary Asset Pricing”, *American Economic Review*, 2013, 103 (2), 732–770.
- [65] Heathcote, J., “Fiscal Policy with Heterogeneous Agents and Incomplete Markets”, *The Review of Economic Studies*, 2005, 72 (1), 161–188.
- [66] Heaton, J., and D. Lucas, “Evaluating the Effects of Incomplete Markets on Risk Sharing and Asset Pricing”, *Journal of Political Economy*, 1996, 104 (3), 443–87.
- [67] Hubmer, J., P. Krusell, and A. Smith, “The Historical Evolution of the Wealth Distribution: A Quantitative-Theoretic Investigation”, National Bureau of Economic Research Working Paper, 2016, <https://www.nber.org/papers/w23011>.
- [68] Jeanne, O., and A. Korinek, “Macroprudential Regulation versus Mopping up after the Crash”, *The Review of Economic Studies*, 2020, 87 (3), 1470–1497.
- [69] Ju, J., L. Li, G. Nie, K. Shi, and S. Wei, “Nonlinear Capital Flow Tax: Capital Flow Management and Financial Crisis Prevention in China”, *China & World Economy*, 2019, 27 (4), 1–28.
- [70] Judd, K. L., L. Maliar, and S. Maliar, “Numerically Stable and Accurate Stochastic Simulation Methods for Solving Dynamic Models” and “Supplement”, *Quantitative Economics*, 2011, 2 (2), 173–210.
- [71] Kaplan, G., B. Moll, and G. L. Violante, “Monetary Policy According to HANK”, *American Economic Review*, 2018, 108 (3), 697–743.
- [72] King, R., C. Plosser, and S. Rebelo, “Production, growth and business cycles: II. New directions”, *Journal of Monetary Economics*, 1988, 21 (2–3), 309–341.
- [73] Kiyotaki, N., and J. Moore, “Credit Cycles”, *Journal of Political Economy*, 1997, 105 (2), 211–248.
- [74] Kocherlakota, N., “Some Thoughts on the State of Macro”, 2009, mimeo, [https://delong.typepad.com/kocherlakota\\_some\\_tho.pdf](https://delong.typepad.com/kocherlakota_some_tho.pdf).
- [75] Korinek, A., “Regulating Capital Flows to Emerging Markets: An Externality View”, *Journal of International Economics*, 2018, 111, 61–80.
- [76] Krueger, D., and F. Kubler, “Computing Equilibrium in OLG Models with Stochastic Production”, *Journal of Economic Dynamics and Control*, 2004, 28 (7), 1411–1436.
- [77] Krusell, P., and J. A. A. Smith, “Income and Wealth Heterogeneity in the Macroeconomy”, *Journal of Political Economy*, 1998, 106 (5), 867–896.
- [78] Kydland, F., and E. Prescott, “Time to Build and Aggregate Fluctuations”, *Econometrica*, 1982, 50 (6), 1345–1370.
- [79] Li, K., and C. Xu, “Asset Pricing with a Financial Sector”, *Financial Management*, 2023, 52 (1), 67–95.
- [80] 李戎、刘岩、彭俞超、许志伟、薛涧坡, “动态随机一般均衡模型在中国的研究进展与展望”, 《经济学》(季刊), 2022年第6期, 第1829–1846页。
- [81] Li, W., G. Nie, and Z. Wang, “Trade, FDI, and Global Imbalances”, *Journal of International Money and Finance*, 2020, 105, 102188.
- [82] 林毅夫、陈斌开, “发展战略、产业结构与收入分配”, 《经济学》(季刊), 2013年第4期, 第1109–1140页。
- [83] Lindé J., and M. Trabandt, “Should We Use Linearized Models to Calculate Fiscal Multipliers”, *Journal of Applied Econometrics*, 2018, 33 (7), 937–965.
- [84] Liu, S., “Government Spending During Sudden Stop Crises”, *Journal of International Economics*, 2022, 135, 103571.



- [85] Liu, Z., M. M. Spiegel, and J. Zhang, “Optimal Capital Account Liberalization in China”, *Journal of Monetary Economics*, 2021a, 117, 1041–1061.
- [86] Liu, Z., M. M. Spiegel, and J. Zhang, “Capital Flows and Income Inequality”, *Journal of International Economics*, 2023, 144, 103776.
- [87] Liu, Z., P. Wang, and Z. Xu, “Interest Rate Liberalization and Capital Misallocations”, *American Economic Journal: Macroeconomics*, 2021b, 13 (2), 373–419.
- [88] Ma, C., “Financial Stability, Growth and Macroprudential Policy”, *Journal of International Economics*, 2020, 122, 103259.
- [89] Magill, M., and M. Quinzii, “Infinite Horizon Incomplete Markets”, *Econometrica*, 1994, 62 (4), 853–880.
- [90] Maliar, L., S. Maliar, and P. Winant, “Deep Learning for Solving Dynamic Economic Models”, *Journal of Monetary Economics*, 2021, 122, 76–101.
- [91] Mendoza, E. G., “Sudden Stops, Financial Crises, and Leverage”, *American Economic Review*, 2010, 100 (5), 1941–1966.
- [92] Mertens, K. R. S. M., and M. O. Ravn, “Fiscal Policy in an Expectations-Driven Liquidity Trap”, *The Review of Economic Studies*, 2014, 81 (4), 1637–1667.
- [93] Nie, G., “Marriage Squeeze, Marriage Age and the Household Savings Rate in China”, *Journal of Development Economics*, 2020, 147, 102558.
- [94] 彭俞超、何山, “资管新规、影子银行与经济高质量发展”, 《世界经济》, 2020年第1期, 第47–69页。
- [95] Petrosky-Nadeau, N., and L. Zhang, “Solving the Diamond-Mortensen-Pissarides Model Accurately”, *Quantitative Economics*, 2017, 8 (2), 611–650.
- [96] Petrosky-Nadeau, N., and L. Zhang, “Unemployment Crises”, *Journal of Monetary Economics*, 2021, 117, 335–353.
- [97] Petrosky-Nadeau, N., L. Zhang, and L. Kuehn, “Endogenous Disasters”, *American Economic Review*, 2018, 108 (8), 2212–2245.
- [98] Pijoan-Mas, J., “Pricing Risk in Economies with Heterogeneous Agents and Incomplete Markets”, *Journal of the European Economic Association*, 2007, 5 (5), 987–1015.
- [99] Pizzinelli, C., K. Theodoridis, and F. Zanetti, “State Dependence in Labor Market Fluctuations”, *International Economic Review*, 2020, 61 (3), 1027–1072.
- [100] Rietz T. A., “The Equity Risk Premium: a Solution”, *Journal of Monetary Economics*, 1988, 22 (1), 117–131.
- [101] Rotemberg, J., “Sticky Prices in the United States”, *Journal of Political Economy*, 1982, 90 (6), 1187–1211.
- [102] Schmitt-Grohé, S., and M. Uribe, “Multiple Equilibria in Open Economies with Collateral Constraints”, *The Review of Economic Studies*, 2021, 88 (2), 969–1001.
- [103] Sims, C. A., “Solving Linear Rational Expectations Models”, *Computational Economics*, 2002, 20 (1), 1–20.
- [104] Song, Z., K. Storesletten, and F. Zilibotti, “Growing Like China”, *American Economic Review*, 2011, 101 (1), 196–233.
- [105] Stiglitz, J. E., “Where Modern Macroeconomics Went Wrong”, *Oxford Review of Economic Policy*, 2018, 34 (1–2), 70–106.
- [106] Storesletten, K., C. I. Telmer, and A. Yaron, “Asset Pricing with Idiosyncratic Risk and Overlapping Generations”, *Review of Economic Dynamics*, 2007, 10 (4), 519–548.
- [107] Storesletten, K., B. Zhao, and F. Zilibotti, “Business Cycle During Structural Change: Arthur Lewis’ Theory from a Neoclassical Perspective”, National Bureau of Economic Research Working Paper, 2019, <https://www.nber.org/papers/w26181>.
- [108] Uhlig, H., “A Toolkit for Analysing Nonlinear Dynamic Stochastic Models Easily”, In: Marimon, A., and A. Scott (eds.), *Computational Methods for the Study of Dynamic Economies*. Oxford University Press, 1999, 30–61.
- [109] 王胜、周上尧、张源, “利率冲击、资本流动与经济波动”, 《经济研究》, 2019年第6期, 第106–120页。
- [110] 熊琛、金昊, “地方政府债务风险与金融部门风险的“双螺旋”结构——基于非线性 DSGE 模型的分析”, 《中国工业经济》, 2018年第12期, 第25–43页。
- [111] 易纲, “中国改革开放三十年的利率市场化进程”, 《金融研究》, 2009年第1期, 第1–14页。
- [112] 张军、樊海潮、许志伟、周龙飞, “GDP 增速的结构性下调: 官员考核机制的视角”, 《经济研究》, 2020年第5期, 第31–48页。
- [113] 赵扶扬、陈斌开、刘守英, “宏观调控、地方政府与中国经济发展模式转型: 土地供给的视角”, 《经济研究》, 2021年第7期, 第4–23页。
- [114] 赵胜民, 张瀚文, “我国宏观审慎政策与货币政策的协调问题研究——基于房价波动的非对称性影响”, 《国际金融研究》, 2018年第7期, 第12–21页。

[115] 中国人民银行研究局课题组,“气候相关金融风险——基于央行职能的分析”,《中国人民银行工作论文》,2020年第3号,第1—24页。

[116] 周上尧、王胜,“中国影子银行的成因、结构及系统性风险”,《经济研究》,2021年第7期,第78—95页。