能源转型影响中国经济增长潜力的模拟研究
——基于“弱可持续性”视角

魏　巍[1*]，王赞信[2]，李　冰[2]

（1.河南大学黄河文明与可持续发展研究中心，河南开封 475001；2.云南大学发展研究院，云南昆明 650091）

【摘　要】能源需求的高增长和化石能源的高占比导致了日益严峻的环境退化问题。均衡状态下，用于环境治理的资本投入实质上是对储蓄的一种扣除，这会降低生产性资本总量的积累速度，导致经济增长潜力下滑。本文构建了一个包含能源转型与真实储蓄量的DSGE模型，结合最新相关文献和中国经济数据校准模型，模拟研究了能源转型对中国经济增长潜力的影响以及相关政策效应。结论表明：能源转型发挥出一种“刹车”效应，将逐渐减缓经济增长潜力的下滑趋势；能源转型的持续推进，有望在2030年左右逆转其趋势；能源转型相关政策会改变“刹车”期的时长和弱化经济潜力的下滑程度。政策启示方面，能源转型是扭转经济增长潜力下滑趋势的有效手段，政府可通过政策“组合拳”的方式来干预能源转型过程，将有助于缩短“刹车”期和相对增强经济增长潜力。

【关键词】能源转型；经济增长潜力；真实储蓄量；“刹车”效应

【中图分类号】F120.3；F124.5　　【文章编号】1674-6252（2020）02-0076-08

【文献标识码】A　　【DOI】10.16868/j.cnki.1674-6252.2020.02.076

引言

当前，化石能源在为经济增长提供动力的同时，也带来了日益严重的环境退化问题。“弱可持续性”视角下，当不存在环境退化时，当期储蓄量可全部转化为投资，生产性资本总量的积累速度恒定，经济增长潜力得以保持；而当环境退化存在时，当期储蓄量需扣除掉本期环境退化所造成的损失①，被扣除后的储蓄量称作真实储蓄量。随着环境退化问题日益严峻，该扣除不断增加且快于储蓄量的增长值；保持其他条件不变，真实储蓄量会呈现一种时序递减趋势。时序递减的真实储蓄量意味着生产性资本总量的积累速度会下降，经济增长率也随之下降，并最终导致经济增长潜力的弱化。

依据世界银行公布的中国历年真实储蓄量数据，近年来该数值呈现负增长态势，结合中国频繁爆发的“雾霾”、日渐走高的碳排放量等现实，表明中国经济增长的潜力的确下降了。这种源自环境退化所引致的经济潜力下降，能否通过能源转型进行抑制？即能源转型像“刹车片”一样，先减缓这种下降趋势并最终逆转它（本文称之为“刹车效应”）。为回答这一关键问题，本文从三个子问题展开研究。首先，以真实储蓄量来反映经济增长潜力，研究能源转型与经济增长潜力的关系如何变化；其次，若能源转型停滞，经济增长潜力又会发生何种变化；最后，政府正制定和实施一系列与能源转型相关的政策，这些政策的变动怎样影响两者关系。通过本研究，将为中国以能源转型促经济增长潜力提升，以及相关政策的制定和实施提供必要启示。

1 文献评述与研究创新

能源转型与经济增长关系的相关研究很多[1-3]，但鲜有探讨能源转型对经济增长潜力的研究。经济增长潜力的变化受多种因素影响，但最重要的影响因素是生产性资本总量的变化，其积累受控于真实储蓄量

【编者按】本文选自 2019 年召开的第十届中国能源经济与管理学术年会暨第十三届中国能源资源开发利用战略学术研讨会会议论文。中国能源经济与管理学术年会是国家自然科学基金委管理科学部和中国“双法”研究会能源经济与管理研究分会联合主办的年度大型学术交流活动，《中国环境管理》期刊为大会协办单位。

资助项目：国家自然科学基金项目“基于光电入网的电力市场机制研究：博弈行为、稳态突变及经济可持续性效应”（71763033）；云南省 2017 年度博士研究生学术新人奖资助项目（YUN201701）。

作者简介：魏巍（1988—），博士，讲师，研究方向为能源转型与经济发展，E-mail: WSRdragon@yeah.net。

① 环境治理的治理费用理应小于或等于环境退化所造成的产出损失（潜在产出与实际产出的差距），在一个经济系统中这笔治理费用来自当期储蓄量。本文取上限值，即治理费用等于产出损失。同时，假定环境退化问题仅来源于化石能源的使用，这一损失称作化石能源的环境效应净值（简称“环境效应净值”）。

的变动。

真实储蓄量是一个可用于反映经济增长潜力的变量，在“弱可持续性”概念下 Pearce[4] 和 Hamilton[5] 等多位学者不断丰富了其内涵。具体而言，“弱可持续性”是衡量可持续发展的重要经济学概念，它认为人造资本与自然资本是彼此可替代的，人类经济活动虽然会消耗自然资本，但同时也会积累人造资本，只要保证整个生产性资本总量不变，那么经济增长潜力将至少不被弱化。基于“弱可持续性”概念，学者们基于新古典经济增长理论，遵循严谨的经济学逻辑，考虑经济增长与自然环境的关系，包括经济结构的转变、自然资源的利用、经济活动的外部性影响等方面，设计出一个可反映经济增长潜力的变量——真实储蓄量 [6-10]。世界银行于 1999 年提议将真实储蓄量作为衡量经济可持续性（或经济增长潜力）的通用指标 [8]；核算上，真实储蓄量等于净储蓄量与人力资本净值之和，再减去自然资本折旧与环境效应净值 [9]。其中，净储蓄量也称作人造资本净值，人力资本净值主要指教育支出，自然资本折旧为自然资源被消耗部分的货币价值，以及环境效应净值即等于环境退化所导致的产出损失 [11]。

本文利用真实储蓄量来反映经济增长潜力，通过分析能源转型与真实储蓄量的关系来研究能源转型对经济增长潜力的影响。为实现该目标，研究方法上需仔细考究和创新。一般而言，量化分析法主要包括计量分析法和模拟分析法两个大类。

在量化研究领域，计量分析法是首选方法，但不适合本研究。计量分析法在解释方面极具优势，但预测方面却不尽如人意，特别是运用基于过去信息估计出的计量模型来预测因变量的未来值往往是不可信的 [12]；由于本文需预测未来的能源转型过程对真实储蓄量的影响，因此计量分析法是不合适的。相比较而言，模拟分析法能够在一个系统模型下研究自变量对因变量的影响，该方法可有效地预测所关注变量的数值变化 [13]。对模拟分析法而言，最关键部分是系统模型，主要包括可计算一般均衡模型（CGE 模型）和动态随机一般均衡模型（DSGE 模型）两种。CGE 模型是基于一般均衡理论构建的，以社会核算矩阵为分析基础，较完备地反映出整体经济对政策和冲击的反馈 [14,15]；而 DSGE 模型是建立在真实经济周期理论上，通过运用数学方程对经济系统中的主要经济部门的行为进行刻画，并在一个动态环境下研究各经济部门的相互作用和经济变量均衡的变动 [16]。两种模型各有优势，但结合本研究目标，DSGE 模型更为适合。原因在于：第一，CGE 模型所依据的社会核算矩阵是固定的，将能源转型与真实储蓄量纳入该矩阵是困难的。相反，DSGE 模型更为灵活，可结合实际研究问题对模型的结构进行自主设计 [17]。第二，能源转型对经济的影响是不确定的，相比 CGE 模型而言，DSGE 模型在不确定性问题的研究上更具优势 [18]。

综上，本文的创新之处体现在：第一，研究能源转型对中国经济增长潜力的影响是一个学术前沿；第二，“弱可持续性”视角下真实储蓄量可代表经济增长潜力，以此为基础构建一个包含能源转型和真实储蓄量的 DSGE 模型，这种研究方法是新颖的；第三，本研究为能源转型如何影响经济增长潜力提供一种新的解释。

2 模型构建及参数校准

在构建包含能源转型与真实储蓄量的经济模型中，主要内容包括：对能源转型的量化、建立能源转型与真实储蓄量的关联，以及将这种关联融入整个 DSGE 系统中。然后，基于所构建的模型，结合相关经济数据和文献研究对模型中的参数进行校准。

2.1 包含能源转型与真实储蓄量的经济模型

当前的能源转型是一个向清洁低碳、安全高效能源体系转型的过程，一般而言，化石能源被认为是一种对环境不友好的能源，而可再生能源则恰好相反。不失一般性，本文将可再生能源占总能源消耗（简称总能耗）的比重定义为能源转型进度，该比重越高，意味着能源体系更趋于清洁、低碳。借助这一定义，可实现对能源转型的量化。

依据真实储蓄量的核算规则 [9]，能源转型进度会从两个方面与环境效应净值发生关联：第一，随着能源转型进度的增加，化石能源比重下降，降低总的环境效应净值；第二，能源转型进度的增加会影响污染物存量，污染物存量的多寡会影响生产部门的效率，这将影响单位环境效应净值。遵循这一逻辑，本文可明晰能源转型与真实储蓄量的关联性，基于此，结合 DSGE 系统的框架可构建一个包含能源转型与真实储蓄量的经济模型。

本模型主要包括四个部分：居民部门、中间产品部门、最终产品部门与真实储蓄量核算。其中，中间产品部门是本模型的核心，它包含着能源转型与真实储蓄量的关联性。

2.1.1 居民部门

借鉴 Torres [19] 在 DSGE 系统中引入人力资本的研究，同时考虑环境退化对效用的影响，本模型中居民部门的效用函数受消费、闲暇和环境退化三个因素的影响，写作：

$$U=\chi\ln\left(C_t\right)+\left(1-\chi\right)\ln\left(1-L_t^H-L_t\right)-f\left(E_t\right) \tag{1}$$

式中，C_t 表示居民消费；L_t^H 和 L_t 分别表示单位时间内居民用于学习和劳动的比例；$\left(1-L_t^H-L_t\right)$ 表示闲暇的比例；χ 表示消费在效用函数中的权重。$f\left(E_t\right)$ 表示环境退化对居民效用的影响，它是一个能源使用量（E）的隐函数，理论上能源使用量中化石能源比重越高，$f\left(E_t\right)$ 将越大。

居民部门面临两个约束条件，第一个约束条件为预算约束条件，假定居民是各种要素的所有者，其总收入等于各要素使用量与各要素价格的乘积的加总；总收入将被用于居民消费、储蓄和缴纳环境税（用于环境污染治理）。

$$C_t+K_{t+1}-\left(1-\delta_K\right)K_t+T_t=R_tK_t+W_tH_tL_t+B_tE_t \tag{2}$$

式中，K_t 和 T_t 分别表示资本和环境税；δ_K 表示资本折旧率；R_t、W_t 和 B_t 分别表示资本的租金、工资和能源的价格；H 表示人力资本附加。

第二个约束方程为人力资本附加（H）形成的方程。本文采纳 Heckman[20] 的研究，认为时间投入是唯一的教育投入品；进而，新生人力资本附加是一个关于 L^H 的函数。人力资本附加形成的方程写作：

$$H_{t+1}=\left(1-\delta_H\right)H_t+\xi\left(L_t^H\right)^{\theta} \tag{3}$$

式中，δ_H 表示人力资本附加的折旧率；ξ 和 θ 共同决定新的人力资本附加的生产效率 [19]。

基于式（1）、式（2）和式（3），考虑社会贴现率 ρ，构建拉格朗日函数求解一阶条件，然后消除资本和人力资本附加的影子价格，可得到实现居民部门效用最大化的条件：

$$\frac{1-\chi}{1-L_t^H-L_t}=\frac{\chi W_tH_t}{C_t} \tag{4}$$

$$\frac{C_t}{C_{t-1}}=\rho\left(R_t+1-\delta_K\right) \tag{5}$$

$$\frac{\left(\overline{L^H}\right)^{\theta-1}(\chi-1)}{\theta\rho D_{t-1}\left(1-\overline{L^H}-L_{t-1}\right)}+\frac{\chi W_tL_t}{C_t}=\frac{\left(\overline{L^H}\right)^{\theta-1}(\chi-1)\left(\delta_H-1\right)}{\theta D_t\left(\overline{L^H}+L_{t-1}-1\right)} \tag{6}$$

$$B_t=\frac{\left(1-\gamma_t\right)\varepsilon_EC_t}{\chi} \tag{7}$$

化简，首先，假定居民部门的学习时间是固定的，令 $L_t^H=L_{t-1}^H=\overline{L^H}$。因为居民部门可视作一个整体，中短期来看学习时间应是一个定值或者变化很小。再者，假定唯有化石能源会导致环境退化，令 $f\left(E_t\right)=\left(1-\gamma_t\right)E_t\varepsilon_E$；其中，$\gamma$ 表示能源转型进度；ε_E 表示环境退化对居民效用的影响程度，其目的是关联了能源转型进度与居民效用。

2.1.2 中间产品部门

在本模型中，中间产品部门会使用资本、劳动和能源来生产中间产品，最终产品部门则使用中间产品来“组装”最终产品；基于这一假定，环境污染仅发生在中间产品生产环节。同时，中间产品部门是买方市场的垄断者，要素价格由其决定。

中间产品部门中存在两种类型企业：化石能源偏向型企业和可再生能源偏向型企业。前者只使用化石能源，生产过程会带来环境污染；后者则只使用可再生能源，生产过程是环境友好的。进一步，资本和劳动两种要素也被分割成两个部分，前者使用（1−γ）比例的资本、劳动和能源，后者使用 γ 比例的资本、劳动和能源。此外，两种类型企业的生产函数均遵循柯布－道格拉斯函数形式。

对化石能源偏向型企业而言，其生产函数写作：

$$Q_t^F=\left[1-\Gamma\left(M_t\right)\right]A_t\left(K_t^F\right)^{\alpha}\left(H_tL_t^F\right)^{\beta}\left(E_t^F\right)^{1-\alpha-\beta} \tag{8}$$

式中，( ) 表示产出偏离系数；A_t 表示技术进步；K_t^F、L_t^F 和 E_t^F 分别表示化石能源偏向型企业所使用的资本、劳动和能源量；α 表示资本产出弹性系数；β 表示劳动产出弹性系数。相应地，$K_t^F=\left(1-\gamma_t\right)K_t$，$L_t^F=\left(1-\gamma_t\right)L_t$ 和 $E_t^F=\left(1-\gamma_t\right)E_t$。对产出偏离系数而言，它衡量着潜在产出与实际产出的差距，其大小与污染物的存量（M）密切相关。产出偏离系数与污染物存量的关系式 [21] 如下：

$$\Gamma\left(M_t\right)=\varepsilon_0+\varepsilon_1M_t+\varepsilon_2M_t^2 \tag{9}$$

其中，ε_0、ε_1 和 ε_2 三个参数共同决定污染物存量对产出偏离系数的影响。污染物存量取决于三个因素：第一，自然环境的自净功能，它会降解或沉淀污染物 [22]；第二，化石能源的使用会带来新的污染物；第三，政府的污染治理会降低污染物。污染物存量的关系式写作：

$$M_t=\left(1-\delta_M\right)M_{t-1}+mE_t^F-\varepsilon_T\ln\left(1+T_t\right)M_{t-1} \tag{10}$$

式中，δ_M 表示自然环境的自净速度；m 表示每单位化石能源消耗所产生的环境污染量；ε_T 表示每单位税收减少污染物的比例。考虑到政府的环境治理效果会存在一个递减规律，即随着环境治理费用不断增加，其边际治理效果会下降，故本文对 T 取对数形式①。

假定化石能源偏向型企业所生产的中间产品以 P_t^F 的价格销售，其成本约束方程是各要素使用成本的加总，写作：

$$C_t^F = R_t^F K_t^F + W_t^F H_t L_t^F + B_t^F E_t^F \tag{11}$$

式中，C_t^F、R_t^F、W_t^F 和 B_t^F 分别表示化石能源偏向型企业的总成本、资本租金、工资和化石能源价格。结合式（8）和式（11），该企业的利润（π_t^F）方程写作 $P_t^F Q_t^F - C_t^F$。假定中间产品部门的两类企业均是规模报酬递增的，随着能源转型推进，化石能源偏向型企业的规模会逐渐缩小，商品价格增加（因为平均生产成本相应提升了）；为刻画这一特征，外生的 P_t^F 被设定为 e^{γ_t}。以 π_t^F 分别对 K_t^F、L_t^F 和 E_t^F 求偏导，得到实现该企业利润最大化的一阶条件。

$$R_t^F = \frac{\alpha P_t^F Q_t^F}{K_t^F} \tag{12}$$

$$W_t^F = \frac{\beta P_t^F Q_t^F}{H_t L_t^F} \tag{13}$$

$$B_t^F = (\mathrm{d}M) A_t \left(K_t^F\right)^{\alpha} \left(H_t L_t^F\right)^{\beta} \left(E_t^F\right)^{1-\alpha-\beta} + \frac{(1-\alpha-\beta) P_t^F Q_t^F}{E_t^F} \tag{14}$$

式（14）中，dM 表示 $\left[1-\Gamma\left(M_t\right)\right]$ 对 的导数。考虑篇幅，dM 的具体表达式不再给出，该步骤利用数学软件 Mathematica 完成（后续复杂推导类似处理）。

对可再生能源偏向型企业而言，它仅使用可再生能源且不会产生污染物，但生产效率会也受到污染物存量的影响。类似地，其生产函数写作：

$$Q_t^N = \left[1-\Gamma\left(M_t\right)\right] A_t \left(K_t^N\right)^{\alpha} \left(H_t L_t^N\right)^{\beta} \left(E_t^N\right)^{1-\alpha-\beta} \tag{15}$$

其中，$K_t^N = \gamma_t K_t$，$L_t^F = \gamma_t L_t$ 和 $E_t^F = \gamma_t E_t$；K_t^N、L_t^N 和 E_t^N 分别表示此类企业所使用的资本、劳动和能源量。令 C_t^N、R_t^N、W_t^N 和 B_t^N 分别表示其总成本、资本租金、工资和可再生能源价格，成本约束方程写作：

$$C_t^N = R_t^N K_t^N + W_t^N H_t L_t^N + B_t^N E_t^N \tag{16}$$

此企业所生产的中间产品以 P_t^N 的价格销售。类似的，能源转型推进会降低其商品价格，令 $P_t^N = e^{1-\gamma_t}$。该企业的利润（π_t^N）方程写作 $P_t^N Q_t^N - C_t^N$。以 π_t^N 分别对 K_t^N、L_t^N 和 E_t^N 求偏导：

$$R_t^N = \frac{\alpha P_t^N Q_t^N}{K_t^N} \tag{17}$$

$$W_t^N = \frac{\beta P_t^N Q_t^N}{H_t L_t^N} \tag{18}$$

$$B_t^N = (1-\alpha-\beta) \frac{P_t^N Q_t^N}{E_t^N} \tag{19}$$

式（12）、式（13）、式（14）和式（17）、式（18）、式（19）构成了保证中间产品部门利润最大化的条件。考虑到生产要素的使用仅发生在中间产品生产环节，居民部门是各要素的所有者且不具备议价能力，为统一要素供给方和需求方价格，存在 $R_t K_t = R_t^F K_t^F + R_t^N K_t^N$、$W_t H_t L_t = W_t^F H_t L_t^F + W_t^N H_t L_t^N$ 和 $B_t E_t = B_t^F E_t^F + B_t^N E_t^N$。

2.1.3 最终产品部门与真实储蓄量核算

最终产品部门被设定成一个组装部门，仅使用两类中间产品来组装最终产品。该部门的市场环境是完全竞争的，其利润为零，故最终产出（Y_t）写作：

$$Y_t = P_t^F Q_t^F + P_t^N Q_t^N \tag{20}$$

依据真实储蓄量的核算规则，不考虑自然资本折旧。教育投入量取决于学习时间；环境效应净值依赖于产出偏离系数与潜在总产出，潜在总产出等于实际总产出除以 $\left[1-\Gamma\left(M_t\right)\right]$。

2.2 参数校准

量化分析前，需结合最新文献和中国经济数据以校准模型的相关参数。各相关参数的校准值如表 1 所示（这些校准值为基准值）。

自然环境的自净速度是基于孙涵、Silva[22,23] 等学者的研究，利用中国森林资源清查数据计算得到。学习时间等于 2018 年中国加权受教育年限与平均人均寿命的比值。碳排放是引起环境退化一个重要因素，本文利用“单位化石能耗的碳排放”参数代表环境退化，故此值是一个下限值。其他参数在相关文献中已详细说明，不再赘述。

① 由于对数函数在定义域（0,1] 中为负，而环境治理效果是正面的，为符合现实，故设定成 ln（$1+T_t$）。

表1　相关参数校准

参数	定义	数值	文献
α	资本产出弹性	0.366	蒲志仲等 [24]
β	劳动产出弹性	0.121	
ρ	社会贴现率	0.03	刘昌义 [25]
δ_K	资本折旧率	0.096	张军 [26]
δ_H	人力资本折旧	0.05	姚洋和崔静远 [27]
δ_M	自然环境的自净速度	0.006	孙涵、Silva 等 [22,23]
L^H	学习时间	0.15	依国家统计数据计算
χ	消费在效用函数所占权重	0.4	Torres[19]
θ	教育的生产率	0.8	
m	单位化石能耗的碳排放量	3.48	IEA
ε_0	产出偏离系数方程的参数	1.395×10^{-3}	Annicchiarico 和 Di Dio[21]
ε_1		-6.67×10^{-6}	
ε_2		1.46×10^{-8}	
ε_T	环境税的污染治理效果	0.001 3	秦昌波等 [28]
ε_E	环境退化对居民效用的影响程度	0.03	黄永明和何凌云 [29]

3 模拟结果与经济学解释

模拟分析包括两个方面：第一，研究能源转型对经济增长潜力的影响，回答前两个子问题；第二，研究相关能源政策变动的影响，回答第三个子问题。

3.1 能源转型影响经济增长潜力的模拟研究

由于能源转型进度和总能耗量是影响本模型均衡的重要变量，当其他变量的初始值不变时，这两个变量的变动将改变均衡位置。为量化能源转型对经济增长潜力的影响，具体操作步骤如下：①能源转型进度的初始值为 0.13（中国 2018 年可再生能源占总能耗比重约为 13%①）和设定其他变量的初始值，得到第 1 组均衡值，该组称之为基准组（每个变量均对应一个基准值）。②结合总能耗的增长率（年均增长率为 1.15%）和总能耗基准值，采取累乘方式依次计算未来每年的总能耗值；同时结合能源转型的速度（年均变动幅度为 0.006）和能源转型进度的基准值，采取累加方式依次得到未来每年的能源转型进度值。③遵循时齐变动原则，依次替换掉基准组内的这两个关键变量的值，构成一系列新初始值组合。④将这些新组合依次代入本模型，可计算出每个组合的真实储蓄量均衡值②。

遵循上述操作方法，真实储蓄量均衡值（$\overline{GS}$）与能源转型进度（γ）之间建立了一一对应关系。鉴于这种映射关系暗含时间尺度，为更清晰地研究真实储蓄量时序上的变化，绘制图像（图 1）时横轴为时间尺度，起始为 2018 年；纵轴代表真实储蓄量的均衡值。

2018 年能源转型进度为 0.130，从当前值（0.130）逐渐增加到“分界线③”（0.208），对应着经济增长潜力下滑的时期。任取 A_1 和 A_2（A_1 处的能源转型进度较小），虽然 A_2 点处的能源转型进度更高，但 $\overline{GS}$ 却较小，对应的经济增长潜力也较弱。进一步比较发现，随着能源转型推进，$\overline{GS}$ 会趋于平缓，这说明经济增长潜力的下滑趋势因能源转型而不断“刹车”。总结而言，在“刹车”期随能源转型推进，经济增长潜力的确下滑了（$\dot{GS}<0$），但这种趋势逐渐消失（$\dot{GS}\propto 0$）。为什么能源转型会带来一种“刹车”效应？能源转型会改变单位能耗所引致的环境效应净值，能源转型进度较小时此净值会较高。能源转型前期，一方面，能源转型进度的增长会逐步降低此净值；另一方面，总能耗一直保持增长，此净值即便

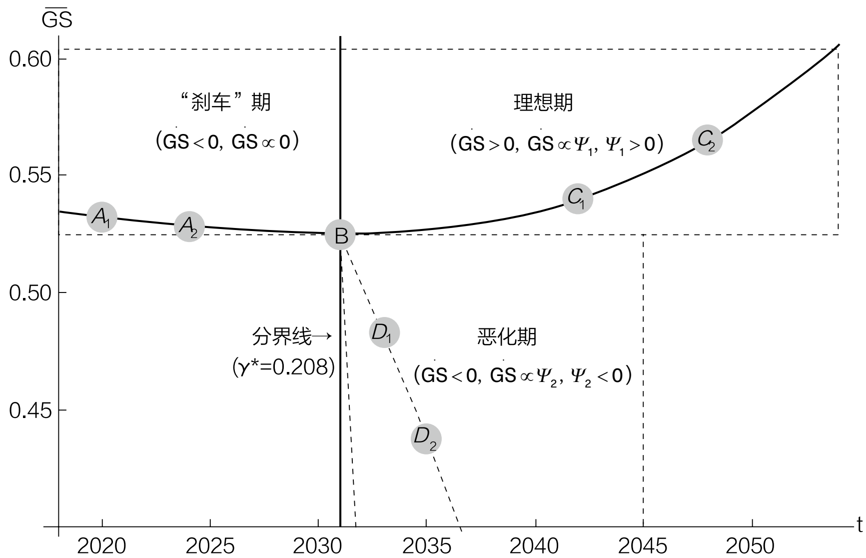

图1　能源转型进度与真实储蓄量均衡值的关系模拟

---

① 依据 *Global Energy Outlook* 2017 中表 13.1 所示，2018 年中国可再生能源占比约为 13%。依据此表，可估算：可再生能源占比按着年均 0.6% 的份额增长，总能耗年均增长率为 1.15%。

② 每一种组合均对应着一种新均衡，忽略不同种均衡之间的调整时间。本文是在均衡下研究能源转型与真实储蓄量的关系。

③ “分界线”的经济学含义是：能源转型进度移动至该处时，真实储蓄量与能源转型的关系发生质变。

下降了，但加总的环境效应净值却仍然增加。随能源转型推进，此净值下降幅度更为明显，驱使加总的环境效应净值趋于其极值点。在这一内在作用下，经济增长潜力会保持下滑趋势，但能源转型像一个“刹车片”一样，不断减弱这种趋势。

当能源转型进度突破“分界线”时，意味着能源转型已完成“刹车”使命，此后能源转型进度继续保持增加，能源转型与经济增长潜力的关系将进入“理想期”。任取并比较两点（C_1 和 C_2），发现 C_2 的能源转型进度和 $\overline{\mathrm{GS}}$ 均更大。在“理想期”，随着能源转型推进，经济增长潜力会提升（$\dot{\mathrm{GS}} > 0$）且增长势头会最终恒定（$\dot{\mathrm{GS}} \propto \psi_1$）。此时，能源转型已达到较高程度，单位能耗的环境效应净值已明显下降，总能耗的增加已无法驱使加总的环境效应净值进一步增加（达到极值点）；之后能源转型进度继续增加，此净值进一步下降，加总环境效应净值的下滑幅度更大。

考虑一种极端情况，若能源转型停滞，经济增长潜力的下滑趋势会如何变化呢？假设能源转型进度停滞在“分界线”处，即能源转型进度推至 0.208 后其值保持不变。在这一情景下，经济增长潜力的下滑趋势如“恶化期”刻画①。任取两点（D_1 和 D_2），虽然 D_2 对应的时点更晚，但该时点处的 $\overline{\mathrm{GS}}$ 更小；随着时间的推移，这种下滑趋势变得更强（$\dot{\mathrm{GS}}$　0，$\dot{\mathrm{GS}} \propto \psi_2$）。同“理想期”相比较，能源转型的停滞会导致“本将增强的”经济增长潜力又回到“持续恶化”的路径上。为什么？能源转型的停滞意味着单位能耗的环境效应净值不再下降，但总能耗随着时间会不断增加，这将导致加总的环境效应净值又将进一步增加。停滞时间越久，其增加幅度越大。

基于本节的分析，能源需求的不断增长和化石能源所引致的环境退化问题，会导致经济增长潜力不断下滑。能源转型可发挥出一种“刹车”效应，它将逐渐减弱此下滑趋势并实现逆转。能源转型需不断推进，否则经济增长潜力的趋势又会回归原路径，甚至更糟。

3.2 敏感性分析：能源转型相关政策变动的影响

政府正制定和实施一系列相关政策，推进能源转型，这些外生性的政策变动又会产生何种影响呢？依据政策作用对象的不同，相关政策分为三种类型：第一，影响碳排放的政策，其作用对象是“单位化石能耗的碳排放量”；第二，影响能源利用效率、节能普及的政策，其作用对象是“总能耗的增长率”；第三，影响可再生能源发展的政策，其作用对象是“能源转型的速度”。这样，本文可间接研究相关政策的影响。

操作上，首先明确三个作用对象的基准值，单位化石能耗的碳排放量为 3.48、总能耗的增长率为 1.15% 和能源转型的速度为 0.006。然后对基准值做上浮和下调处理，如对单位化石能耗碳排放量的基准值做上浮 1%、2%、3% 和下调 1%、2%、3% 处理，得到 6 个新值。最后保持其他条件不变，将这些新值按着前述分析范式依次代入模型中，可计算出真实储蓄量的均衡值。

对影响碳排放的政策而言，其变动会导致单位化石能耗的碳排放量的上升或下降。这里考虑两种情景：情景 1 对应着“下调”，对应基准值 −1%、−2% 和 −3% 三种情况；情景 2 对应着“上浮”，对应基准值 +1%、+2% 和 +3% 三种情况。两种情景下真实储蓄量均衡值的时序变化如图 2 所示。首先比较情景 1 中的三种情况，随单位化石能耗碳排放量的下降，本文有三点发现：第一，“分界线”将左移（“刹车”期缩短），并且能源转型进度与真实储蓄量均衡值的反向关系会变得更不明显；第二，“理想期”中两者的正向关系更强，且从绝对量来看 $\overline{\mathrm{GS}}$ 变得更大；第三，若能源转型进度停滞，两者的反向关系将被弱化。

类似地，比较情景 2 中的三种情况，随单位化石能耗碳排放量的上升，“分界线”将不断右移（延长“刹车”期），同时变化趋势与情景 1 相反。综合比较，碳减排相关的政策会从两个方面影响能源转型对经济增长潜力的作用：首先，碳减排相关政策会移动“分界线”位置，从而影响经济增长潜力下滑的持续时间，“分界线”左移意味着持续时间的缩短，右移则相反。其次，碳减排相关政策也会从绝对量上影响真实储蓄量的均衡值，保持其他条件不变，该类政策的效力越强，同一能源转型进度所对应的真实储蓄量均衡值越大，更大的真实储蓄量对应着更快的生产性资本总量积累，经济增长潜力相对逐渐增强；相反，该类政策的效力越弱，经济增长潜力相对逐渐减弱。

采取相同的分析步骤，本文也研究另外两类政策变动的影响。当总能耗增长率的基准值上浮（下调）1%、2% 和 3% 时，分界线依次右移至 0.218、0.226 和 0.235（左移至 0.196、0.178 和 0.154）；当能源转型速度的基准值上浮（下调）1%、2% 和 3% 时，分界线依次左移至 0.198、0.191 和 0.185（右移至 0.217、0.224 和 0.229）。比较来看，通过制定和实施相关政策以刺激能源利用效率提升、节能普及和可再生能源

① 图 1 中，为区分极端情景，对此情景的曲线做虚线处理。

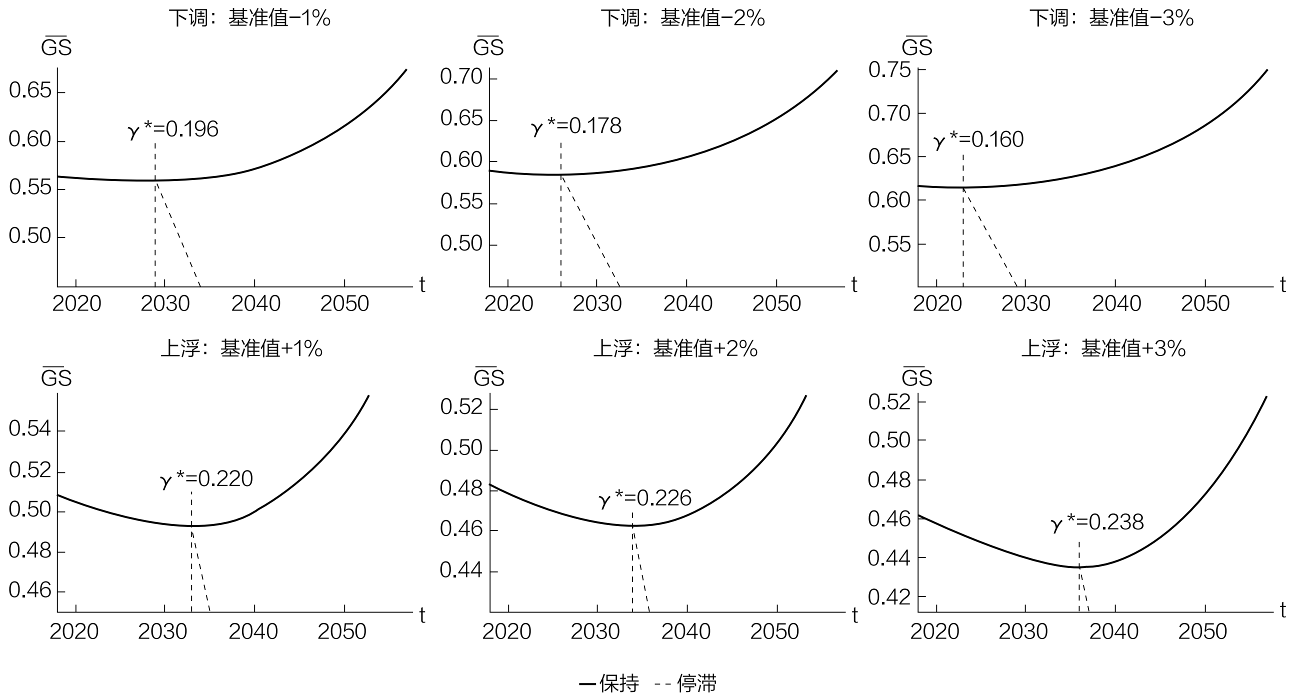

图2 单位化石能耗的碳排放的变动分析

发展，将缩短经济增长潜力下滑的持续时间（缩短“刹车”期），同时也从绝对量上提高真实储蓄量储蓄（经济增长潜力相对增强）；反之，若缺乏相关政策或政策效力不足，将会产生相反的影响。

4 结论性评述

能源转型与经济增长潜力的关系是一个热点问题，在“弱可持续性”视角下真实储蓄量可反映经济增长潜力。为量化研究能源转型如何影响经济增长潜力，本文构建了一个包含能源转型与真实储蓄量的经济模型，结合最新文献和中国经济数据对参数校准。研究内容包括两个方面：首先，保持政策环境不变，分析能源转型对经济增长潜力的影响。其次，依据政策作用对象对相关政策进行归类并参数化，逐一改变这些参数值，采用敏感性分析法研究政策变化如何影响能源转型与经济增长潜力的关系。

本文的主要结论：一是能源需求的高增长和化石能源高占比使得环境退化日益严峻，经济增长潜力不断下滑，推进能源转型，其将发挥出一种“刹车”效应。二是随能源转型进度不断增加，经济增长潜力的变化呈现出一种“U”形趋势，“U”形的分界线所对应的能源转型进度为 0.208（可再生能源占总能耗比重为 20.8%）。三是能源转型停滞会导致经济增长潜力的趋势重新回归下滑路径，停滞时间越长，这种负面影响越强。四是源自相关政策改变所引致的单位化石能耗碳排量的下降、能源利用效率与节能普及的提升和可再生能源的发展，将缩短经济增长潜力下滑的持续时间（缩短“刹车”期），同时弱化能源转型停滞所带来的负面影响。

上述研究结论具有重要的政策含义：第一，中国能源需求的快速增长和化石能源的高比例导致环境退化问题日益严重，在均衡状态下，环境退化问题的治理需要资本投入，而这项资本投入实则是对储蓄量的扣除，这将导致生产性资本总量积累速度不断下降，经济增长潜力持续下滑。第二，能源转型发挥着举足轻重的作用，就像“刹车片”一样，它将逐渐减缓这种下滑趋势。更重要的，只要能源转型持续推进，经济增长潜力有望进入持续增强状态。第三，保持现有政策条件不变，通过能源转型以逆转经济增长潜力的下滑趋势，预计需要花费 13 年左右的时间①。不过，能源转型的“刹车”效应受到相关政策的影响，诸如影响碳减排、能源利用效率、节能普及和可再生能源发展的政策都会移动“分界线”的位置，同时也会减弱经济增长潜力的下滑程度。第四，中国政府应立足于全局，借助“政策组合拳”的方式来更有效地干预这一过程，这将缩短“刹车”期和弱化经济增长潜力下滑的影响。

① 本文模拟中，假定能源转型的年均速度为 0.006，2018 年能源转型进度约为 0.130，分界线位置处为 0.208，若保持能源转型的速度不变，预计需要 13 年左右的时间。

参考文献

[1] KANDER A, STERN D I. Economic growth and the transition from traditional to modern energy in Sweden[J]. Energy economics, 2014, 46: 56-65.

[2] 石刚，陈忱．经济增长与不可再生能源消费的实证分析 [J]. 中央财经大学学报，2008(9): 56-60.

[3] 齐绍洲，李杨．能源转型下可再生能源消费对经济增长的门槛效应 [J]. 中国人口·资源与环境，2018, 28(2): 19-27.

[4] PEARCE D W, ATKINSON G D, DUBOURG W R. The economics of sustainable development[J]. Annual review of energy and the environment, 1994, 19: 457-474.

[5] HAMILTON K. Green adjustments to GDP[J]. Resources policy, 1994, 20(3): 155-168.

[6] PEARCE D, HAMILTON K, ATKINSON G. Measuring sustainable development: progress on indicators[J]. Environment and development economics, 1996, 1(1): 85-101.

[7] HAMILTON K, CLEMENS M. Genuine savings rates in developing countries[J]. The world bank economic review, 1999, 13(2): 333-356.

[8] VINCENT J R. Are Greener National Accounts Better? No.63A[R]. Harvard University: Center for International Development, 2001.

[9] FERREIRA S, VINCENT J R. Genuine Savings: leading indicator of sustainable development?[J]. Economic development and cultural change, 2005, 53(3): 737-754.

[10] HANLEY N, DUPUY L, MCLAUGHLIN E. Genuine Savings and Sustainability[R]. St Andrews: University of St. Andrews, 2014.

[11] PILLARISETTI J R. The World Bank's ‘genuine savings’ measure and sustainability[J]. Ecological economics, 2005, 55(4): 599-609.

[12] GREENE W H. Econometric Analysis[M]. 7th ed. Boston: Prentice Hall, 2012.

[13] NKOLO J C, MOTEL P C, DJIMELI C G. Income-generating effects of biofuel policies: a meta-analysis of the CGE Literature[J]. Ecological economics, 2018, 147: 230-242.

[14] 林伯强，牟敦国．能源价格对宏观经济的影响——基于可计算一般均衡 (CGE) 的分析 [J]. 经济研究，2008(11): 88-101.

[15] MENG S, SIRIWARDANA M, MCNEILL J, et al. The impact of an ETS on the Australian energy sector: an integrated CGE and electricity modelling approach[J]. Energy economics, 2018, 69: 213-224.

[16] SADORSKY P. Renewable energy consumption and income in emerging economies[J]. Energy policy, 2009, 37(10): 4021-4028.

[17] CONSOLO A, FAVERO C A, PACCAGNINI A. On the statistical identification of DSGE models[J]. Journal of econometrics, 2009, 150(1): 99-115.

[18] 杨翱，刘纪显，吴兴弈．基于 DSGE 模型的碳减排目标和碳排放政策效应研究 [J]. 资源科学，2014, 36(7): 1452-1461.

[19] TORRES J L. Introduction to Dynamic Macroeconomic General Equilibrium Models[M]. Delaware: Vernon Press, 2014.

[20] HECKMAN J J. A life-cycle model of earnings, learning, and consumption[J]. Journal of political economy, 1976, 84(4): S11-S44.

[21] ANNICCHIARICO B, DIO F D. Environmental policy and macroeconomic dynamics in a new Keynesian model[J]. Journal of environmental economics and management, 2015, 69: 1-21.

[22] 孙涵，胡雪原，聂飞飞．空气污染物的时空演化及社会经济驱动因素研究—以长江三角洲地区为例 [J]. 中国环境管理，2019, 11(4): 71-78.

[23] SILVA R A, WEST J J, LAMARQUE J F, et al. Future global mortality from changes in air pollution attributable to climate change[J]. Nature climate change, 2017, 7(9): 647-651.

[24] 蒲志仲，刘新卫，毛程丝．能源对中国工业化时期经济增长的贡献分析 [J]. 数量经济技术经济研究，2015, 32(10): 3-19.

[25] 刘昌义，何为．不确定条件下的贴现理论与递减贴现率 [J]. 经济学家，2015(3): 65-73.

[26] 张军，吴桂英，张吉鹏．中国省际物质资本存量估算：1952-2000[J]. 经济研究，2004(10): 35-44.

[27] 姚洋，崔静远．中国人力资本的测算研究 [J]. 中国人口科学，2015(1): 70-78.

[28] 秦昌波，王金南，葛察忠，等．征收环境税对经济和污染排放的影响 [J]. 中国人口·资源与环境，2015, 25(1): 17-23.

[29] 黄永明，何凌云．城市化、环境污染与居民主观幸福感—来自中国的经验证据 [J]. 中国软科学，2013(12): 82-93.

The Effects of Energy Transition on Economic Growth Potential in China—A Perspective of Weak Sustainability

WEI Wei[1], WANG Zanxin[2], LI Bing[2]

(1. Key Research Institute of Yellow River Civilization and Sustainable Development, Henan University, Kaifeng 475001, China; 2. School of Development Studies, Yunnan University, Kunming 650091, China)

Abstract: The rapid growth of energy consumption with high proportion of fossil fuels has resulted in serious environmental problems. As capital is used to deal with the problems, the savings or the accumulated productive capitals are reduced, and consequently the potential of economic growth is undermined. This study analyzed the effects of energy transition and related policies on the economic growth potential of China using a DSGE model, in which energy transition was modeled and genuine savings are estimated. The results showed that energy transition can slow down the declining rate of economic growth potential, or has a “braking” effect; as energy transition is further advanced, it is expected that the declining trend of economic growth potential will be reversed by 2030; and policies supporting energy transition have effects on the duration of the braking effect and can reduce the declining rate of economic growth potential. Therefore, energy transition is an effective measure for dealing with the decline of economic growth potential, and the government can optimize the process of energy transition by implementing an effective policy mix to shorten the “braking effect” period and enhance the economic growth potential.

Keywords: energy transition; economic growth potential; genuine savings; braking effect