

绿色增长下的导向性技术创新选择研究^①

周晶淼^{1,2}, 赵宇哲^{1,2}, 武春友¹, 肖贵蓉¹

(1. 大连理工大学管理与经济学部, 大连 116023;
2. 大连海事大学综合交通运输协同创新中心, 大连 116026)

摘要: 针对如何正确引导 GHG 排放的气候反馈经济损失下导向性技术创新, 以实现长期的绿色增长这一问题, 基于 DICE 模型, 重构导向性技术创新不同的动力要素及其与气候变化之间的内生关系, 建立了可体现绿色增长“均衡性”、“包容性”和“可持续性”的非线性最优控制模型. 数值仿真结果显示: 气候反馈经济损失不容小觑; 偏于生产的绿色技术创新导向下社会生产力强劲但存在气候环境恶化风险, 偏于减排的绿色技术创新导向下气候反馈经济损失小但存在增长动力匮乏风险, 二者虽均可实现长期的绿色增长, 但中性的绿色技术创新导向会更稳妥; 偏于生产的绿色技术创新导向下人均消费变化率在短期内会显著提升.

关键词: 绿色增长; DICE 模型; 导向性技术创新; 非线性最优控制

中图分类号: F224.1; O232; X506 文献标识码: A 文章编号: 1007-9807(2018)10-0061-13

0 引言

当前, 各国政府在推动经济社会发展的同时, 正面临着气候变化带来的风险^[1]. 我国作为一个发展中国家, 推行绿色增长改革是积极应对这一挑战的责任担当, 更是建设美丽中国、实现绿色发展的内在要求. 一直以来, 我国在推动绿色增长改革的进程中, 面临的一个重要瓶颈在于如何在减缓气候环境恶化的同时创造新的增长动力. 目前, 被政府、专家和利益相关者广泛认同的观点是绿色技术创新是实现长期的绿色增长的根本动力^[2-3]. 然而, 中央计划者在设计和实施可行的绿色增长政策时, 并不能如愿地促进绿色技术创新的展开, 主要是因为不同的绿色增长政策可能对社会创新者进行绿色技术创新的成本和收益产生不同影响^[4-5], 进而衍生了旨在提高社会生产的

生产技术创新和试图减少 GHG (greenhouse gas) 排放的减排技术创新, 即导向性技术创新. 事实上, 任一绝对性导向的绿色技术创新均会引发不同的增长风险. 因此, 中央计划者如何正确引导导向性技术创新对实现长期的绿色增长是个重要的管理问题.

气候变化是个复杂的、多领域交叉的问题, 气候变化综合评估模型 (IAM) 是研究气候变化问题不可或缺的重要工具^[6]. 在气候变化影响评估方面, IAM 通常通过气候变化的减排成本函数和经济损失函数来计算最优的减排成本路径^[7]. 当前, 最具代表性的 IAM 是 Nordhaus^[8] 开发的 DICE 模型, 它集成了 Ramsey 最优经济增长模型和简单的气候模块, 其区域版本是 RICE 模型^[9]. 模型结构可以分为三部分, 分别是用于计算经济增长路径及经济活动导致碳排放的经济模块、用

① 收稿日期: 2016-04-18; 修订日期: 2018-03-21.

基金项目: 国家自然科学基金重大国际合作资助项目(71320107006); 国家自然科学基金资助项目(71403035; 71273037); 国家社会科学基金重点资助项目(14AZD090); 教育部“创新团队发展计划”资助项目(IRT13048); 中国博士后科学基金面上资助项目(2016M590227); 辽宁省经济社会发展课题重点资助项目(2017lslktzd-004); 辽宁省自然科学基金资助项目(2015020080); 辽宁省高等教育内涵发展专项资金资助项目(20110116103)

作者简介: 周晶淼(1983—), 女, 黑龙江大庆人, 博士生. Email: zhoujingmiao123@126.com

于计算 GHG 对气候变化影响的气候模块以及通过气候变化的经济损失计算和减排措施的成本效益计算来连接二者的耦合模块。一些学者根据研究问题的需要在 DICE 模型框架下进行探究。关于经济增长与气候变化之间互动关系的研究有, Greaves^[10]考虑了气候变化可能带来生产力、资本和市场损失,基于 DICE 模型对利用可再生能源实现的经济增长和社会消费演变过程进行分析。Zaddach^[11]考虑了经济增长中消费者主权因子的跨期递减效应,基于 DICE 模型对气候变化探析经济反馈作用的评估和适应气候变化的政策制定。事实上,无论从何种角度来研究,均证实了损失函数引入的必要性,因为气候变化造成的经济损失是其根本属性。Löschele 和 Schymura^[12]在经济增长与气候变化之间互动关系的总结中,提出已有研究对损失函数的考察明显不足。可见,气候模块与经济模块二者间的耦合模块是研究气候变化问题的关键所在。但以上研究的损失函数仅能反映静态的损失,难以刻画气候变化对经济增长持续的动态影响。

不同于原有“GDP 或社会福利”主导的经济增长理论,绿色增长是由 ESCAP^[13]、OECD^[14]等提出的可应对气候变化的经济增长路径,更强调经济、环境、社会的“均衡性”、“包容性”和“可持续性”。当前,主流的绿色增长研究均是在 Ramsey 模型框架下进行拓展的。由此可见,绿色增长研究与 DICE 模型有共同的理论源流,加之二者具有全球性、长期性的共同属性和自顶向下的相同视角,为基于 DICE 模型来探究气候变化下绿色增长的最优路径问题提供了坚实的理论基础。但是,探究这一问题仍需克服两个难点:其一,绿色增长下导向性技术创新不同动力要素与气候变化之间的关系应如何内生于 DICE 模型。关于导向性技术创新的研究主要关注于引导因素及其会对长期的经济增长带来何种影响,提出导向性技术创新分类^[15]基础上,通过环境政策引导其发展方向可提高经济增长水平^[16],但这种引导需考虑国家发展阶段^[17-18]和环境政策实施、执行的力度^[19]等因素。关于未进行区分的技术创新与气候变化之间的关系研究集中于技术创新对气候反馈经济损失的影响,主要将减排成本^[20]、损失函数^[21]和技术创新^[22]作为内生变量引入最优增长模型中,发

现技术创新在减缓气候变化的同时能维持经济增长。其二,绿色增长“均衡性”、“包容性”和“可持续性”对 DICE 模型构建与求解提出了更高要求。已有文献主要是尝试性地对绿色增长的不同要素建立程式化的目标和可能性约束。于渤等^[23]、许士春等^[24]、闫晓霞等^[25]、石莹等^[26]、Quaas 和 Smulders^[27]在效用函数和 Cobb-Douglas 生产函数中引入了自然资本。似于以上研究, Rauscher^[28]将最优增长模型中的资本用于棕色技术创新投资和绿色技术创新投资并进行量化。Moser 等^[29]采用复合效用函数对绿色增长目标进行量化。周晶森等^[30]在 Rauscher^[28]和 Moser 等^[29]的研究基础上,建立了导向性技术创新与环境政策的内生增长模型来探析绿色增长目标的实现。

综上,绿色增长下基于 DICE 模型的导向性技术创新选择问题,需融合绿色增长目标、约束重构 DICE 模型,希冀通过新建模型的思想实验得到有价值的政策洞见。新建模型以“中央计划者”自顶向下的研究视角,通过常弹性的 Cobb-Douglas 生产函数确保长期的稳态存在,在不考虑劳动力跨期更替的前提下,作出如下三个创新点:一是,建立区间形式的导向参数来重新量化导向性技术创新的不同动力要素。参考 Smulders 和 Werf^[15]但不同于其棕色技术创新和绿色技术创新的绝对区分,本文模型采用 $\varepsilon \in (0, 1.000)$ 表示导向参数, $\varepsilon \in (0, 0.500)$ 表示偏于生产的绿色技术创新导向; $\varepsilon \in (0.500, 1.000)$ 表示偏于减排的绿色技术创新导向; $\varepsilon = 0.500$ 表示中性的绿色技术创新导向,即对于生产技术创新和减排技术创新的比重相同。二是,建立导向性技术创新的不同动力要素与气候变化之间的关系内生化形式。在减排技术创新与 GHG 排放及其效应——气温变化之间建立内生关系函数,再将基于气温变化的损失函数内生于有生产技术创新的生产函数中。不同于 DICE 模型中生产技术创新是 Hicks 中性技术进步,本文模型采用与规模经济效应递减这一实际情况符合更好的 Solow 中性技术进步^[31]。三是,建立符合绿色增长“均衡性”、“包容性”和“可持续性”的目标函数和可能性约束。充分考虑社会生产、资本分配、导向性技术创新和气候变化等模块不同要素之间的联系,设计符合绿色增长均衡性、包容性和可持续性的初始条件和

均衡条件. 不同于 DICE 模型中对数化人均消费表征的效用函数是相对风险回避系数等于 1 的特殊情况, 本文模型绿色增长目标函数中相对风险回避系数大于 0 的效用函数更具一般性.

模型分析框架, 见图 1, 主要有 4 个模块: 1) 社会生产: 以生产技术创新和资本积累存量为投入要素. 生产技术创新在促进社会生产增长率完成社会生产的同时会引起 GHG 排放, 进而导致气温升高, 由此造成的经济损失以损失函数的形式体现于社会生产中. 2) 资本分配: 社会生产资本用于人均消费、资本再积累、GHG 治理和技术创新投资上, 其中社会福利以社会消费表现, GHG 治理成本与中央计划者的 GHG 治理

力度有关, 技术创新投资成本与中央计划者的技术创新投资力度有关. 3) 导向性技术创新: 技术创新投资力度决定着技术创新水平, 社会创新者进行生产技术创新还是减排技术创新受中央计划者关于导向性技术创新的导向参数的直接影响. 由于减排技术创新不参与社会生产, 会间接占用社会生产资本空间. 4) 气候变化: 气候变化可看作是 GHG 排放引起 GHG 浓度增加导致气温无法再自修复能力下维持, 进而不断升高的过程, 其中 GHG 浓度除了自吸收能力作用以外, 还受不同 GHG 治理力度下社会生产资本形成和减排技术创新作用下 GHG 排放强度变化的影响.

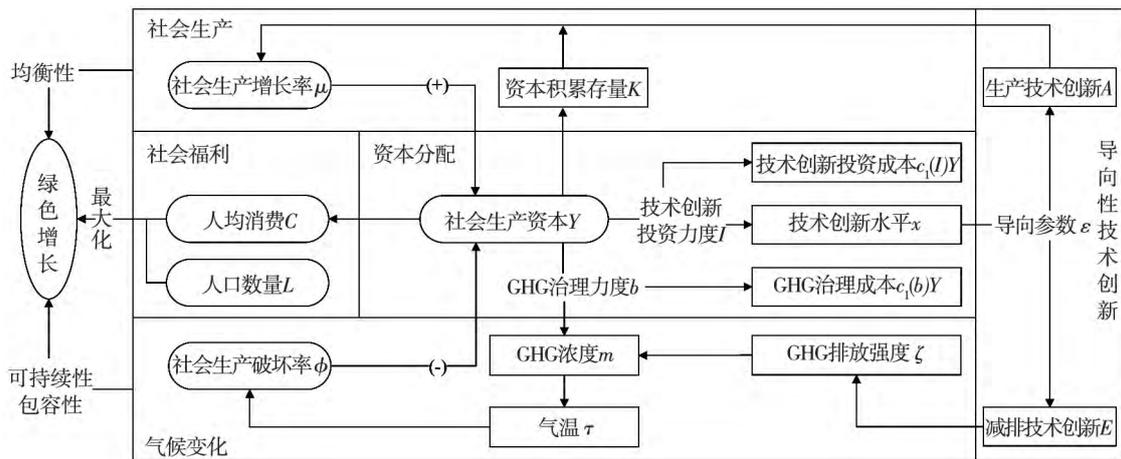


图 1 绿色增长下基于 DICE 模型的导向性技术创新选择的分析框架

Fig 1. Analytical framework for selection of directed technological innovation based on DICE model from the perspective of green growth

1 模型建立

1.1 目标函数

社会福利 关于社会消费的效用函数 $U(C(t), L(t))$ 最大化, 其中人均消费 $C(t)$ 和人口数量 $L(t)$ 为自变量, 人口数量 $L(t)$ 具有跨期替代弹性不变的特性. 对任意变量 $y(t)$ 和 $\dot{y}(t) = \frac{dy}{dt}$ 则有(为便于表达省去时间 t)

$$U = \frac{C^{1-r}}{1-r} L$$

社会福利最大化的目标是关于人均消费 C 和人口数量 L 的瞬时效用贴现值总量最大化, 有

$$\max \int_0^{\infty} e^{-(\rho-n)t} L_0 \frac{C^{1-r}}{1-r} dt$$

其中 n 为人口增长率, $n \in (0, 1, 000)$; ρ 为人均消费主观时间的贴现率; r 为相对风险回避系数, $r > 0$; L_0 为人口数量初始值.

1.2 约束

1) 社会生产 参考 Repetto 和 Easton^[32] 研究成果, 引入气温 τ 变化表征的损失函数 $\phi(\tau)$; 同时, 在资本积累存量 K 的规模经济效应递减的假设下, 采用 Solow 中性技术进步的生产技术创新 A 与资本积累存量 K 之间具有有限的替代性. 于是, 内生化生产技术创新 A 的社会生产增长率 $\mu(A)$ 、损失函数 $\phi(\tau)$ 共同作用于资本积累存量 K 的 Cobb-Douglas 生产函数, 有

$$Y = \mu(A) \phi(\tau) K^\alpha$$

$$\phi(\tau) = (\chi_1 (\tau - \tau_0)^2 + 1)^{-\psi}$$

其中 Y 为社会生产资本; $\phi(\tau)$ 为损失函数; χ_1 为

气温影响社会生产的线性系数, $\chi_1 > 0$; ψ 为气温影响社会生产的双曲衰退率, $\psi > 0$; $\mu(A)$ 为社会生产增长率, $\mu(A) = A^{\chi_2}$ 这里 χ_2 为生产技术创新影响社会生产的衰退率, $\chi_2 > 0$, 参考 Moon 和 Sonn^[33] 的参数取值 $\chi_2 = 1$; K 为资本积累存量; α 为资本积累生产弹性.

2) 资本分配 社会生产资本 Y 用于人均消费 C 、资本积累存量 K 、GHG 治理成本 $c_1(b)Y$ 和技术创新投资成本 $c_1(I)Y$, 关于资本积累存量 K 的动态方程有

$$\dot{K} = Y - C - (\delta + n)K - c_1(b)Y - c_1(I)Y$$

其中 δ 为资本折旧率, $\delta \in (0, 1.000)$; b 为中央计划者的 GHG 治理力度, b_0 为 GHG 治理力度初始值 $b_0 = b(0)$; I 为中央计划者的技术创新投资力度, I_0 为技术创新投资力度初始值 $I_0 = I(0)$. 资本积累存量 K 会因资本折旧率 δ 和人口增长率 n 下降. GHG 治理成本 $c_1(b)Y$ 和技术创新投资成本 $c_1(I)Y$ 采用相同的成本函数 $c_1(\cdot)$.

3) 导向性技术创新 技术创新水平 x 的微分方程为

$$\dot{x} = \beta I - \delta_2 x$$

其中 β 为技术创新投资利用率; δ_2 为技术衰退率.

将导向性技术创新区分为生产技术创新 A 和减排技术创新 E , 其中生产技术创新 A 致力于社会生产增长率 $\mu(A)$ 的提高, 减排技术创新 E 关注于 GHG 排放强度 ζ 的下降. 引入中央计划者关于导向性技术创新的导向参数 $\varepsilon \in (0, 1.000)$, 生产技术创新 A 和减排技术创新 E 关于技术创新水平 x 的方程组为

$$\begin{cases} A = 1 + \varepsilon \omega x \\ E = 1 + (1 - \varepsilon) \omega x \end{cases}$$

其中 ω 为技术转化率.

4) 气候变化 关于 GHG 浓度 m , 由 GHG 治理力度 b 未作用下社会生产资本 Y 产生的 GHG 排放与内生化减排技术创新 E 的 GHG 排放强度 ζ 共同作用, 有

$$\begin{cases} \dot{\zeta} = \frac{\zeta_0}{E} \\ \dot{m} = -vm + (1 - b)Y\zeta \end{cases}$$

其中 ζ_0 为 GHG 排放强度初始值, $\zeta_0 = \zeta(0)$; v 为 GHG 浓度自吸收率; m 为 GHG 浓度, m_0 为其初始

值, $m_0 = m(0)$.

气温 τ 由于 GHG 浓度 m 增加而升高, 减少而降低, 气温 τ 与损失函数 $\phi(\tau)$ 相联系, 有

$$\dot{\tau} = -\lambda\tau + \eta \ln \frac{m}{m_0}$$

其中 λ 为气温自修复率; η 为气温关于 GHG 浓度的敏感系数; τ 为气温, τ_0 为其初始值, $\tau_0 = \tau(0)$.

1.3 非线性最优控制模型

采用的效用函数 $U(C, L)$ 是严格上的凸函数, 满足建立最优控制模型的条件. 为表述简洁, 所有已量化的要素以符号替代. 经简化, 建立非线性最优控制模型有

$$\max_{C, b, I} W = \max_{C, b, I} \int_0^{\infty} e^{-(\rho-n)t} L_0 \frac{C^{1-r}}{1-r} dt \quad (1)$$

s. t.

$$\dot{K} = Y - C - (\delta + n)K - c_1(b)Y - c_1(I)Y \quad (2)$$

$$\dot{\tau} = -\lambda\tau + \eta \ln \frac{m}{m_0} \quad (3)$$

$$\dot{m} = -vm + (1 - b)Y\zeta \quad (4)$$

$$\dot{x} = \beta I - \delta_2 x \quad (5)$$

$$Y = (1 + \varepsilon \omega x) \phi(\tau) K^\alpha \quad (6)$$

$$\mu = 1 + \varepsilon \omega x \quad (7)$$

$$\zeta = \frac{\zeta_0}{1 + (1 - \varepsilon) \omega x} \quad (8)$$

$$\phi(\tau) = (\chi_1 (\tau - \tau_0)^2 + 1)^{-\psi} \quad (9)$$

其中 C, b 和 I 为控制变量; K, τ, m 和 x 为状态变量. 为符合绿色增长对 L 的关注, 引入 n 保证 L 服从马尔萨斯模型特性. 将目标函数(1)采用人均形式的 C 与约束(2)~约束(9)的 Y, K 建立联系, Y, K 亦建立在人均形式之上; 而 τ, m, x, μ, ϕ 和 ζ 不存在人均形式, 因为它们表示的是某一种状态.

对于 b 和 I , 成本函数 $c_1(\cdot)$ 有

$$c_1(b) = 0.01 \frac{b}{1 - b} \quad (10)$$

$$c_1(I) = 0.01 \frac{I}{1 - I} \quad (11)$$

令 $\lambda_K, \lambda_\tau, \lambda_m$ 和 λ_x 为 K, τ, m 和 x 的共态变量(影子价格), 建立 Hamilton 函数

$$\begin{aligned} H = & \frac{C^{1-r}}{1-r} + \lambda_K [Y - C - (\delta + n)K - c_1(I)Y - c_1(b)Y] + \\ & \lambda_\tau \left(-\lambda\tau + \eta \ln \frac{m}{m_0} \right) + \lambda_m [-vm + (1 - b)Y\zeta] + \\ & \lambda_x (\beta I - \delta_2 x) \end{aligned} \quad (12)$$

由极大值原理 最大化条件满足

$$\frac{\partial H}{\partial C} = 0 \Rightarrow C^{-r} - \lambda_K = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial H}{\partial b} = 0 \Rightarrow -\frac{0.01}{\zeta(1-b)^2} \lambda_K - \lambda_m = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial H}{\partial I} = 0 \Rightarrow -\frac{0.01}{\beta(1-I)^2} Y \lambda_K + \lambda_x = 0 \quad (15)$$

欧拉方程为

$$\dot{\lambda}_K = -\frac{\partial H}{\partial K} + (\rho - n) \lambda_K \quad (16)$$

$$\dot{\lambda}_\tau = -\frac{\partial H}{\partial \tau} + (\rho - n) \lambda_\tau \quad (17)$$

$$\dot{\lambda}_m = -\frac{\partial H}{\partial m} + (\rho - n) \lambda_m \quad (18)$$

$$\dot{\lambda}_x = -\frac{\partial H}{\partial x} + (\rho - n) \lambda_x \quad (19)$$

横截条件为

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e^{-(\rho-n)t} \lambda_K K = 0 \quad (20)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e^{-(\rho-n)t} \lambda_\tau \tau = 0 \quad (21)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e^{-(\rho-n)t} \lambda_m m = 0 \quad (22)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e^{-(\rho-n)t} \lambda_x x = 0 \quad (23)$$

2 模型求解

对任意变量 y 和 \dot{y} , $g_y = \frac{\dot{y}}{y}$ 为无限时域上稳

态下 y 的变化率. 由式(13) ~ 式(19) 可得关于 K, τ, m 的共态变量 $\lambda_K, \lambda_\tau, \lambda_m$ 和 Y 的变化率为

$$g_{\lambda_K} = -rg_C \quad (24)$$

$$g_{\lambda_\tau} = g_Y - rg_C + 2g_I \frac{I}{1-I} \quad (25)$$

$$g_{\lambda_m} = -g_e + rg_C + 2g_a \frac{a}{1-a} \quad (26)$$

$$g_Y = g_\mu + \alpha g_K - 2\psi g_\tau \quad (27)$$

长期稳态下 Y, K, C 三者变化率相同的均衡条件体现了绿色增长的“均衡性”. m 变化率为 0

的均衡条件体现了绿色增长的“包容性”, 即允许“适度”的 GHG 排放, 但 GHG 浓度的增加不可超过自吸收能力的控制. 因为 Bréchet 等^[34] 和 Bondarev 等^[35] 的研究已表明应慎重考虑气候变化对经济的反馈作用. m 变化率为 0 的设置更趋近于气候变化的“弱包容性”. τ 变化率为 0 的均衡条件体现了绿色增长的“可持续性”, 即长期多代下气温是不允许升高的, 因为气温的持续升高极有可能跨越人类生存的危机临界点而引发不可逆的负面效应. 于是 均衡条件为

$$g_Y = g_K = g_C \quad (28)$$

$$g_\tau = g_m = 0 \quad (29)$$

2.1 GHG 治理力度 b 和技术创新投资力度 I

由式(7) 和式(27) ~ 式(29) 推导可得

$$g_\mu = -g_\zeta \quad (30)$$

$$g_b = -\frac{1}{2} g_I \quad (31)$$

$$g_Y = \frac{1}{1-\alpha} g_\mu \quad (32)$$

于是, 可得关于 b 和 I 的动态方程组为

$$\dot{b} = \frac{1}{2}(1-b)(r-\alpha+1)g_Y \quad (33)$$

$$\dot{I} = -\frac{1}{2}(1-I)g_Y \quad (34)$$

求解 b 和 I 的解析解有

$$b^* = (b_0 - 1) e^{-\frac{g_Y(r+\alpha-1)}{2} t} + 1 \quad (35)$$

$$I^* = (I_0 - 1) e^{-\frac{g_Y t}{2}} + 1 \quad (36)$$

2.2 技术创新水平 x 、社会生产增长率 μ 和 GHG 排放强度 ζ

由式(5) 和式(7) 推导可得 x 的解析解为

$$x^* = \frac{2\beta(I_0 - 1)}{g_Y + 2\delta_2} e^{\frac{g_Y t}{2}} - \frac{\beta}{\delta_2} \left[\frac{g_Y + 2\delta_2 I_0}{g_Y + 2\delta_2} e^{-\delta_2 t} - 1 \right] \quad (37)$$

将式(37) 代入式(7) 和式(8) 可得内生化的 μ 和内生化的 E 的 ζ 的解析解为

$$\mu^* = 1 + \varepsilon \omega x^* = 1 + \frac{2\varepsilon\omega\beta(I_0 - 1)}{g_Y + 2\delta_2} e^{\frac{g_Y t}{2}} - \frac{\beta\varepsilon\omega}{\delta_2} \left[\frac{g_Y + 2\delta_2 I_0}{g_Y + 2\delta_2} e^{-\delta_2 t} - 1 \right] \quad (38)$$

$$\zeta^* = \frac{\zeta_0}{1 + (1 - \varepsilon) \omega x^*} = \frac{\zeta_0}{1 + \frac{2(1 - \varepsilon)\omega\beta(I_0 - 1)}{g_Y + 2\delta_2} e^{\frac{g_Y t}{2}} - \frac{\beta(1 - \varepsilon)\omega}{\delta_2} \left[\frac{g_Y + 2\delta_2 I_0}{g_Y + 2\delta_2} e^{-\delta_2 t} - 1 \right]} \quad (39)$$

2.3 社会生产资本 Y 、资本积累存量 K 和人均消费变化率 g_c

由式(3)、式(4)和式(29)可得

$$m = \frac{1}{v} \zeta (1 - b) \mu \phi(\tau_0) K^\alpha \quad (40)$$

$$\frac{\lambda \tau_0}{\eta} = \ln \frac{m}{m_0} \quad (41)$$

结合式(39)和式(40)求 K 的解析解为

$$K^* = \left[m_0 v e^{\frac{\lambda \tau_0}{\eta}} \frac{1 + (1 - \varepsilon) \omega x^*}{(1 - b^*) \zeta_0 (1 + \varepsilon \omega x^*)} \right]^{\frac{1}{\alpha}} \quad (42)$$

由式(6) Y 的解析解为

$$Y^* = m_0 v e^{\frac{\lambda \tau_0}{\eta}} \frac{1 + (1 - \varepsilon) \omega x^*}{(1 - b^*) \zeta_0} \quad (43)$$

由式(12)和式(15)可得

$$\begin{aligned} \dot{\lambda}_K &= -r \frac{\dot{C}}{C} C^{-r} \\ &= (1 - c_1(b) - c_1(I)) \frac{\partial Y}{\partial K} C^{-r} + \\ &\quad \frac{0.01}{1 - b} \frac{\partial Y}{\partial K} C^{-r} + (\rho + \delta) C^{-r} \end{aligned} \quad (44)$$

整理式(44) g_c 的解析解为

$$g_c = \frac{\dot{C}}{C} = \frac{\alpha}{r} \left(1.01 - \frac{0.02}{1 - b^*} - \frac{0.01 I^*}{1 - I^*} \right) \times \mu^* K^{*(\alpha-1)} - \frac{\rho + \delta}{r} \quad (45)$$

2.4 社会生产资本变化率 g_Y

由式(6)中 Y 与 τ 的关系,求解可得 g_Y 关于 τ 的解析解有

$$\begin{aligned} g_Y &= \frac{\Delta Y}{Y} = \frac{Y(\tau) - Y(\tau_0)}{Y(\tau_0)} \\ &= (\chi_1 (\tau - \tau_0)^2 + 1)^{-\psi} - 1 \end{aligned} \quad (46)$$

3 数值仿真

3.1 数据来源

参考已有研究中关键参数的经验值(见表1)。时间维度上以 $t = 1$ 年为单位,对长期的绿色增长中社会福利、社会生产、资本分配、导向性技术创新和气候变化进行数值仿真,分析关键要素的一次性变化对长期的绿色增长的影响,探究中央计划者应如何引导社会创新者进行导向性技术创新。

表 1 关键参数取值

Tab 1. Volume of the key parameters

目标函数和约束	参数	取值	定义	参考来源
社会福利	n	0.030	人口增长率	[36]
	ρ	0.035	人均消费主观时间的贴现率	[37]
	r	2.500	相对风险回避系数	[37]
	L_0	1.000	人口数量初始值	[36]
社会生产	α	[0.180 0.700]	资本积累生产弹性	[38]
	χ_1	0.030	气温影响社会生产的线性系数	[36]
	ψ	0.200	气温影响社会生产的双曲衰退率	[36]
资本分配	δ	0.075	资本折旧率	[34]
	b_0	30.500	GHG 治理力度初始值	[34]
	I_0	0.500	技术创新投资力度初始值	[35]
导向性技术创新	β	0.700	技术创新投资利用率	[35]
	δ_2	0.100	技术衰退率	[35]
	ω	[0.050 0.200]	技术转化率	[36]
	ε	(0.1, 0.04, 440)	导向参数	[35]
气候变化	ζ_0	0.043 3	GHG 排放强度初始值	[34]
	ν	0.005	GHG 浓度自吸收率	[34]
	m_0	1.000	GHG 浓度初始值	[36]
	λ	0.110	气温自修复率	[35]
	η	0.591	气温关于 GHG 浓度的敏感系数	[34]
	τ_0	292.000	气温初始值	[36]

3.2 不同 $\Delta\tau$ 下的社会生产资本变化率 g_Y

不同的 $\Delta\tau \in [0, 8]^\circ\text{C}$ 下 g_Y 的变化趋势, 见图 2. g_Y 随 $\Delta\tau$ 的升高呈不断下降的态势. 对比本文与 Bréchet 等^[34]、Bondarev 等^[35] 的仿真结果, 由表 2 可知, Bréchet 等^[34] 外生化技术创新下 $\Delta\tau$ 对 g_Y 的影响是线性的, 即 $\Delta\tau$ 每升高 2°C 时 g_Y 下降 2.23%; 但 $\Delta\tau$ 对 g_Y 的影响不一定遵循着平稳、可预见的轨迹, 本文仿真结果显示了不同 $\Delta\tau$ 下 g_Y 的变化趋势是非线性的, 表明由于温度升高 g_Y 可急转直下. 对于温度升高对 g_Y 产生的负面影响, Bréchet 等^[34] 的拟合结果过于乐观. 通过校准 $\Delta\tau$ 对 g_Y 的初始影响, 仿真结果显示 $\Delta\tau$ 等于 8°C 时 g_Y 将下降 19.22%, 本文远高于 Bréchet 等^[34] 下降 8.92% 的拟合结果, 但仍低于 Bondarev 等^[35] 下降 26.73% 的拟合结果, 因为 Bondarev 等^[35] 还考虑了温度升高时气候灾难发生的大概率倾向和海平面上升的额外经济损失等. 总之, 相对悲观估量气候对经济的反馈作用能体现绿色增长应对气候变化的必要性.

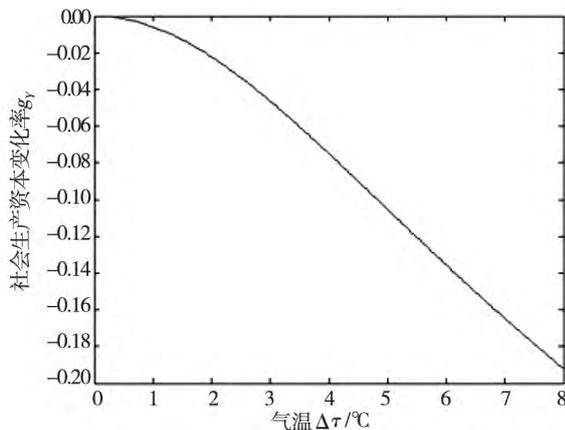


图 2 $\Delta\tau$ 对 g_Y 的影响
Fig 2. Effect of $\Delta\tau$ on g_Y

表 2 $\Delta\tau$ 对 g_Y 的影响
Table 2. Effect of $\Delta\tau$ on g_Y

$\Delta\tau/^\circ\text{C}$	g_Y (%)		
	本文	Bréchet 等 ^[34]	Bondarev 等 ^[35]
+2	-2.23	-2.23	-2.23
+4	-7.50	-4.46	-8.36
+6	-13.57	-6.69	-17.02
+8	-19.22	-8.92	-26.73

3.3 不同 ω 下的导向性技术创新与资本分配

观察长期的稳态下不同 ω 的绿色增长相关指标可进一步明晰导向性技术创新内生化的驱动

机制. 对 $g_Y = 0.005$ 、 $\varepsilon = 0.500$ 和其它参数不变时 $\omega = \{0.200, 0.100, 0.050\}$ 下导向性技术创新与资本分配的相关指标进行仿真.

由图 3 和图 4 可知, 不同 ω 下 μ 和 ζ 随 t 的变化趋势是相互对应的, 二者模拟至 30 年左右时出现了极值点, 之后 70 年的反向趋势相对平缓. 不难推测, Cobb-Douglas 生产函数中 $\alpha = 0.180$ 下 K 的驱动作用变小, 使得 Y 的增长主要依赖于 A 促进的 μ . 前期 30 年 μ 随 t 不断上升, ζ 随 t 不断下降. 不同 $\omega = \{0.200, 0.100, 0.050\}$ 下 μ 和 ζ 在变化幅度上显示出一定差异, ω 越高 μ 越大、 ζ 越小. 由式 (38) 和式 (39) 可知 $\mu^* \propto \omega$ 和 $\zeta^* \propto 1/\omega$. 这里采用的 $\varepsilon = 0.500$ 是中性的绿色技术创新导向, 一同考量了 A 和 E 在解决 A 这一奋力促进 Y 增长同时会引发 τ 升高可能带来的严重后果 (见 3.2 的仿真结果), 对 E 相同的重视可保证 GHG 排放的严格控制来降低 ζ .

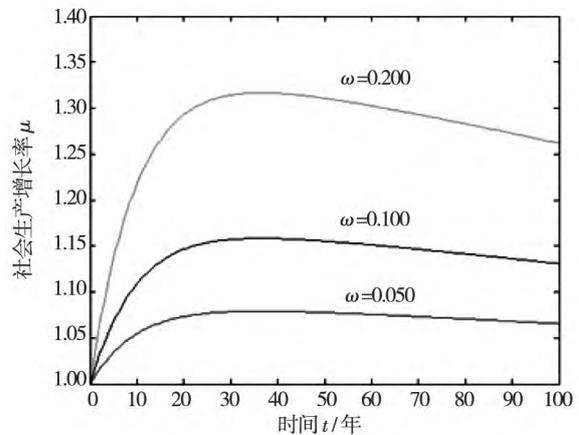


图 3 不同 ω 下 μ 随 t 的变化趋势

Fig 3. Change pattern of μ over t under different ω

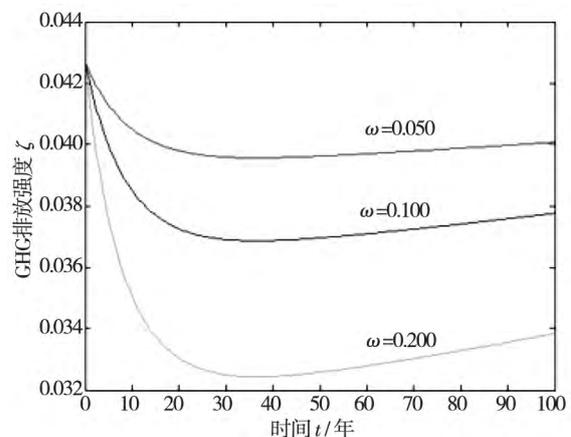


图 4 不同 ω 下 ζ 随 t 的变化趋势

Fig 4. Change pattern of ζ over t under different ω

由图5可知,不同 $\omega = \{0.200, 0.100, 0.050\}$ 下的 K 之间不存在差异,这说明 $\varepsilon = 0.500$ 时 K 不受 ω 影响,由式(42)可知 $\varepsilon = 0.500$ 时 K^* 的解析解中不含 ω .不同 ω 下相同的 K 这一结果说明了 A 和 E 之间竞争互补的关系在 $\varepsilon = 0.500$ 时达到了“平衡状态”.另一方面,高 ω 下更大 μ 促进更大规模的 Y 并未得到更高水平的 K ,应是中央计划者追求目标非 K 而是 C 这一决策的结果, Y 在资本分配中除了必要的 $c_1(b)Y$ 和 $c_1(I)Y$ 之外,留予更多的资本空间用于 C ;这亦从侧面证明了中央计划者对 K 的淡然态度应来自于 A 的驱动作用比 K 更强劲这一事实.对比图3图4中之后70年 μ 和 ζ 相逆于之前30年且相对平缓的变化趋势和图6可知,前期30年积累一定规模的 K 在 $\alpha = 0.180$ 下足以应对未来 $g_Y = 0.005$ 较低的增长需求,之后70年主要的动力要素重新定位于 K ;除非有进一步提升 g_Y 的要求,否则不会重视 I 的提升,这一点从式(36)中 $I^* \propto g_Y$ 可得到证实.

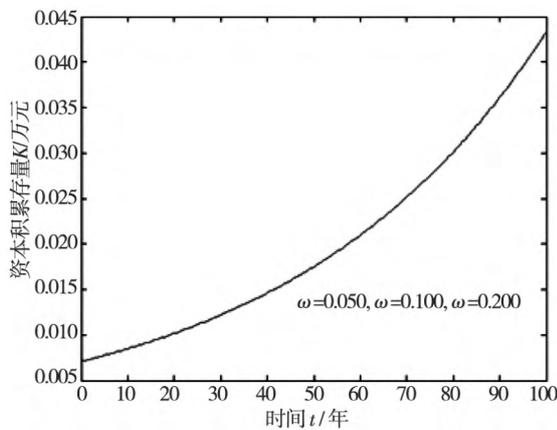


图5 不同 ω 下 K 随 t 的变化趋势

Fig 5. Change pattern of K over t under different ω

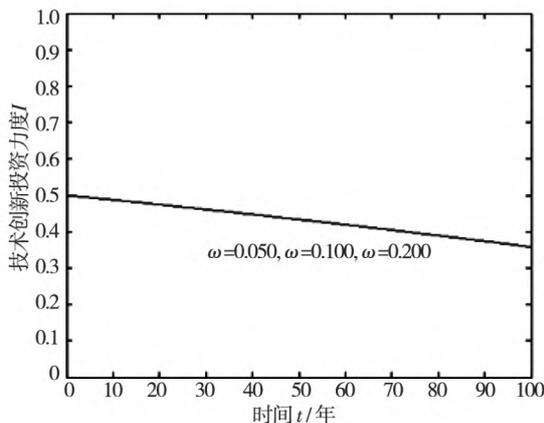


图6 不同 ω 下 I 随 t 的变化趋势

Fig 6. Change pattern of I over t under different ω

需注意的是,DICE模型对 μ 的设置是固定的外生化形式,未考虑 μ 与 I 之间的关系,对 μ 的拟合结果是不断上升的;本文将 A 内生化于 μ 通过式(2)、式(5)和式(6)将 μ, I, Y 之间建立联系,对 μ 的仿真结果是先上升后下降的变化趋势,建立的特殊形式 μ 取决于 x ,见图7.由式(37)可知 x^* 的解析解与 ω 不相关、与 I_0 关系复杂.因此,中央计划者需做的是能游刃有余的控制 x 的水平 and 方向,即迅猛进步之后平稳下降.

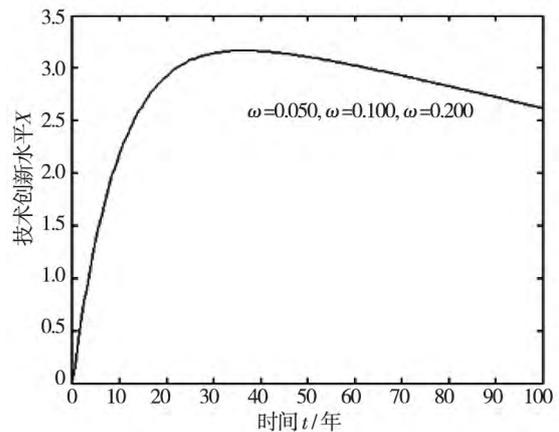


图7 不同 ω 下 x 随 t 的变化趋势

Fig 7. Change pattern of x over t under different ω

3.4 不同 ε 下的导向性技术创新、社会生产与资本分配

现实中 Cobb-Douglas 生产函数 $Y = \mu(A) \phi(\tau) K^\alpha$ 的 $\alpha < 1$ 是规模经济效应递减的,前期的绿色增长中 K 能否达到理想的规模取决于 A 可促进的 μ .因此,中央计划者对导向性技术创新的正确引导至关重要.观察长期的稳态下 $g_Y = 0.005, \omega = 0.100$ 和其它参数不变时 $\varepsilon = \{0.100, 0.500, 0.900\}$ 对导向性技术创新、社会生产与资本分配的相关指标的影响进行仿真.

与图3和图4中 μ 和 ζ 随 t 的变化趋势相似,不同 ε 下 μ 之间和 ζ 之间的差异主要体现于变化幅度上(见图8和图9).偏于生产的绿色技术创新导向下 μ 和 ζ 显示出“双高”,中性的绿色技术创新 $\varepsilon = 0.500$ 导向下二者居中,偏于减排的绿色技术创新导向下二者则是“双低”,可谓是条条路径均可通往长期的绿色增长,普遍的特征是模拟至30年后不同 ε 下 μ 和 ζ 均呈平稳变化的态势.不难得到,偏于生产的绿色技术创新导向形成的

μ 和 ζ “双高”局面存在气候环境恶化的风险, 偏于减排的绿色技术创新导向形成的 μ 和 ζ “双低”局面存在增长动力匮乏的风险.

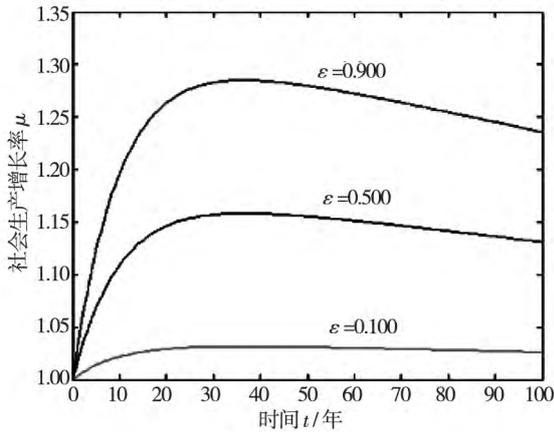


图 8 不同 ε 下 μ 随 t 的变化趋势

Fig 8. Change pattern of μ over t under different ε

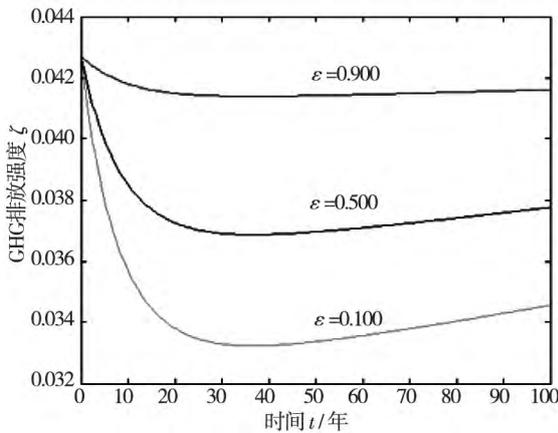


图 9 不同 ε 下 ζ 随 t 的变化趋势

Fig 9. Change pattern of ζ over t under different ε

由图 10 可知, 偏于减排的绿色技术创新导向下的 K 远远大于中性的绿色技术创新和偏于生产的绿色技术创新导向下的 K , 而其间的差距随 t 呈加速扩大的态势. 这证实了, 长期的稳态下 $g_Y = 0.005$ 的增长需求使得偏于减排的绿色技术创新导向下主要的动力要素已完全寄托于 K , 需几倍于其它导向下的 K 才能达到理想的规模, 短时性增长动力匮乏导致 Y 出现了先下降后上升的变化趋势见图 11. 反观图 10 和图 11 中偏于生产的绿色技术创新导向下致力于 A 的提升, 强劲的驱动作用下更大 μ 仅需少量的 K 即可实现 $g_Y = 0.005$ 的增长需求, 其平稳增长的态势显示这一

进程中应始终满足“弱包容性”和“可持续性”, 否则严重的气候反馈经济损失会导致 Y 下降.

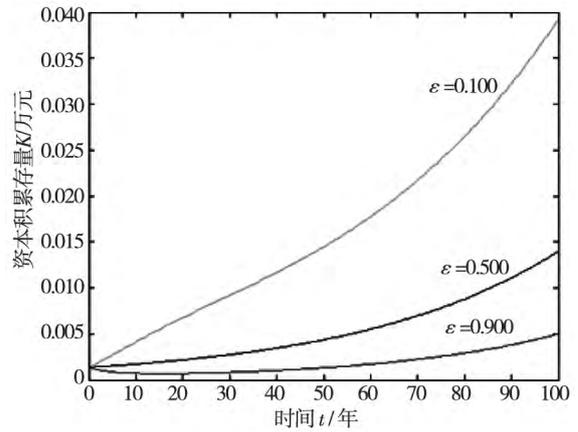


图 10 不同 ε 下 K 随 t 的变化趋势

Fig 10. Change pattern of K over t under different ε

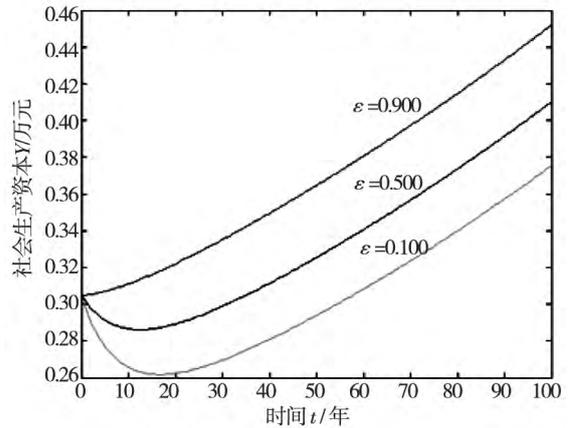


图 11 不同 ε 下 Y 随 t 的变化趋势

Fig 11. Change pattern of Y over t under different ε

因此, 偏于生产的绿色技术创新导向下中央计划者应关注的是如何在高 ζ 下保证 Y 的高增长不出现气候反馈经济损失; 偏于减排的绿色技术创新导向下中央计划者应关注的是如何保证 K 快速积累至理想的规模或者是快速提升 μ . 需注意的还有, 对于 $\varepsilon = \{0.100, 0.500, 0.900\}$ 的不同导向, 长期的绿色增长中不必对 b 和 I 实施针对性的调控, 这一点从式 (35) 和式 (36) 可知 b^* 和 I^* 的解析解中不含 ε , 中央计划者只需采用 b 逐步提升和 I 逐步下降的方式来调节其水平即可 (见图 12 和图 13). 但是, 在已确定的导向性技术创新下中央计划者可将注意力放于初始值 b_0 和 I_0 .

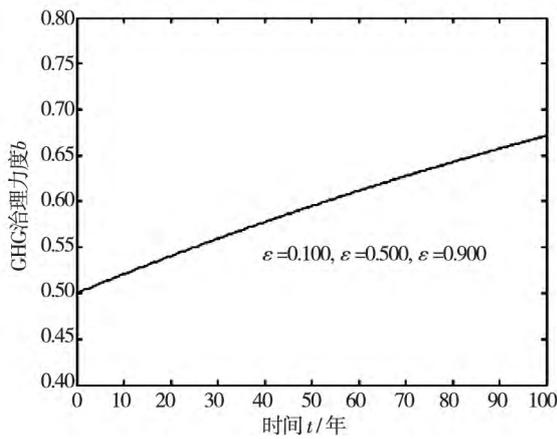


图 12 不同 ε 下 b 随 t 的变化趋势

Fig 12. Change pattern of b over t under different ε

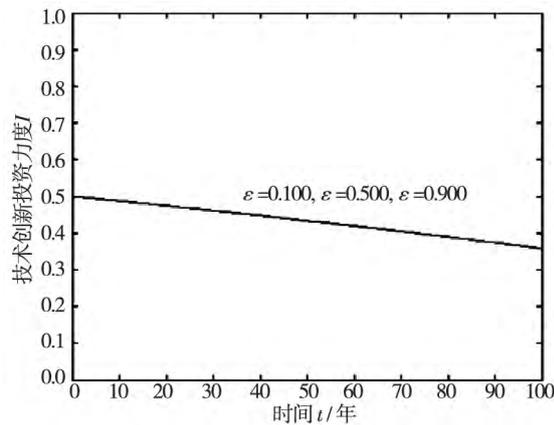


图 13 不同 ε 下 I 随 t 的变化趋势

Fig 13. Change pattern of I over t under different ε

3.5 不同 ω 和 ε 下的人均消费变化率 g_c 与导向性技术创新

绿色增长目标是实现社会福利关于 C 和 L 的效用函数最大化,由于 L 外生化,实际上绿色增长目标考量的还是 C ,长期的稳态关注于 g_c . 观察长期的稳态下 $g_Y = 0.005$ 、 $\varepsilon = 0.500$ 和其它参数不变时 $\omega = \{0.200, 0.100, 0.050\}$ 对 g_c 的影响. 由图 14 可知,不同 ω 下 g_c 在“均衡性”约束下均趋向于 $g_Y = 0.005$ 的水平,差异主要体现于高 ω 下 g_c 更大,说明了提高 ω 有助于社会福利的提升,特别是 $\omega = 0.200$ 下 g_c 在前期的绿色增长中出现了短时的增长再下降,而 $\omega = 0.100$ 和 $\omega = 0.050$ 下 g_c 则直接下降.

图 14 表示 $g_Y = 0.005$ 、 $\omega = 0.100$ 和其它参数不变时 $\varepsilon = \{0.100, 0.500, 0.900\}$ 对 g_c 的影响,由图 15 可知,不同 ε 下 g_c 变化趋势之间的差异

与不同 ω 下相似,但变化幅度更显著. 容易得到, ε 是决定 g_c 水平和方向的重要因素. 不同 ε 下 g_c 在未来亦均趋向于 $g_Y = 0.005$ 的水平,但偏于生产的绿色技术创新导向下可实现更长时间、更高水平的 g_c ,而偏于减排的绿色技术创新导向下为促进 K 快速积累只能靠牺牲 g_c 的方式来实现.

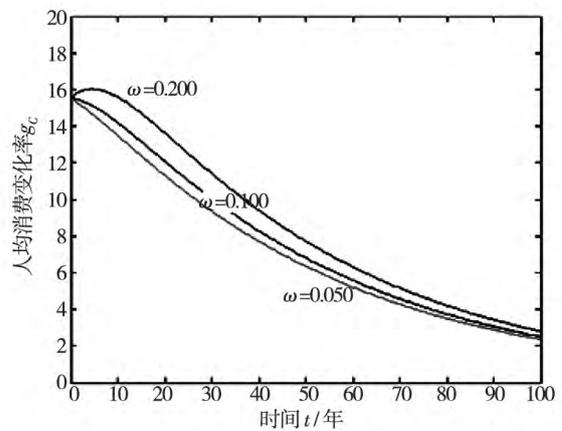


图 14 不同 ω 下 g_c 随 t 的变化趋势

Fig 14. Change pattern of g_c over t under different ω

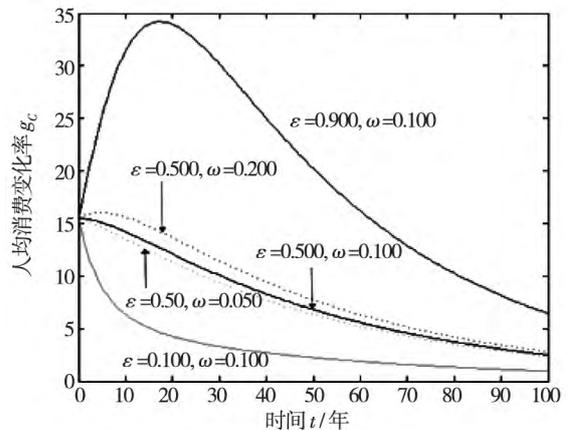


图 15 不同 ε 下 g_c 随 t 的变化趋势

Fig 15. Change pattern of g_c over t under different ε

4 结束语

DICE 模型与绿色增长为探究应对气候变化的最优路径问题提供了不同见解. 本文通过考察和量化社会福利、社会生产、资本分配、导向性技术创新和气候变化 4 个模块上参数、变量及其之间的确切关系,突破一些高度限制性的基本假设,建立可体现绿色增长“均衡性”、“包容性”和“可持续性”的非线性最优控制模型,在保持与研究

问题不直接相关的参数和变量不变的情况下进行了数值仿真,得到的结论主要有:1) 气候反馈经济损失不容小觑,气候环境恶化引起的气温升高容易导致长期的绿色增长面临极高的破坏风险。2) 生产技术创新比资本积累存量对社会生产起到更强劲的驱动作用,减排技术创新可防止社会生产资本因其与气候变化之间的冲突下降;技术转化率虽是客观因素,但须承认,高的技术转化率有利于不同导向的绿色技术创新发挥其各自作用;而技术创新水平这一可控因素先升后降的态势应予以把握。3) 再度证实了绿色技术创新是实现长期的绿色增长的根本动力,但偏于生产的绿色技术创新引导存在气候环境恶化的风险,偏于减排的绿色技术创新引导存在增长动力匮乏的风险,而中性的绿色技术创新引导会更稳妥;GHG治理力度逐步提升和技术创新投资力度逐步下降可有效控制两种增长风险。4) 人均消费变化率是绿色增长目标考量的主要指标,高的技术转化率有利于人均消费变化率的短时性增长,而偏于生产的绿色技术创新导向下人均消费变化率的提升更为显著。

目前,我国和全球许多国家面临着应对气候变化的共同挑战。在一同推行绿色增长改革的进

程中,我国需要研究设计支撑绿色增长的可行政策,绝非传统意义上的“绿色”政策。从着力追求社会福利的角度出发,基于本文结论,对短期内我国在绿色增长改革中如何引导导向性技术创新提出以下政策洞见:1) 存在不确定性的气候反馈损失不只是经济的、更是环境的;应对气候变化是全球性、长期性问题,由于环境损害性不分国界,应重视和加强与经合组织、发展中国家、新兴国家的合作来缓解气候变化。2) 绿色技术创新可促使我国打破现有资本积累的路径依赖,更重要的是其可很大程度上缓解气候变化;中性的绿色技术创新导向下可达到“平衡状态”,若执行这一导向,应制定和实施有利于提高技术转化率和加大技术创新投资力度的相关政策。3) 偏于减排的绿色技术创新引导更像是“绝对绿色增长”,偏于生产的绿色技术创新引导更像是“相对绿色增长”;若选择“相对绿色增长”这一路径,刺激更多的技术创新投资是前提性工作,更需关注的是制定和实施严格的环境政策以加大GHG治理力度。4) 偏于生产的绿色技术创新导向下短期内可实现更长时间、更高水平的人均消费变化率,证实了这一导向正是绿色增长改革中关于导向性技术创新的最优选择,因其正契合我国当前的基本国情和发展阶段。

参 考 文 献:

- [1]陈彦. 气候变化与绿色转型[M]. 北京: 金城出版社, 2015.
Chen Yan. Climate Change and Green Transformation[M]. Beijing: Gold Wall Press, 2015. (in Chinese)
- [2]Smulders S, Toman M, Withagen C. Growth theory and ‘green growth’ [J]. Oxford Review of Economic Policy, 2014, 30(3): 423–446.
- [3]于惊涛, 王珊珊. 基于低碳的绿色增长及绿色创新——中、美、英、德、日、韩实证与比较研究[J]. 科学学研究, 2016, 34(4): 528–538.
Yu Jingtiao, Wang Shanshan. Green growth and green innovation: Empirical evidence from China, US, UK, German, Japan and Korea[J]. Studies in Science of Science, 2016, 34(4): 528–538. (in Chinese)
- [4]Gerlagh R. Too much oil[J]. Cesifo Economic Studies, 2011, 57(1): 79–102.
- [5]张江雪, 朱磊. 基于绿色增长的我国各地区工业企业技术创新效率研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2012, (2): 113–125.
Zhang Jiangxue, Zhu Lei. Research on technological innovation efficiency of industrial enterprises based on green growth of regions in China[J]. Journal of Quantitative & Technical Economics, 2012, (2): 113–125. (in Chinese)
- [6]段宏波, 朱磊, 范英. 能源-环境-经济气候变化综合评估模型研究综述[J]. 系统工程学报, 2014, 29(6): 852–868.
Duan Hongbo, Zhu Lei, Fan Ying. Review on the integrated assessment model of energy-environment-economy for the global climate change[J]. Journal of Systems Engineering, 2014, 29(6): 852–868. (in Chinese)

- [7]魏一鸣,米志付,张皓. 气候变化综合评估模型研究新进展[J]. 系统工程理论与实践,2013,33(8):1905-1915.
Wei Yiming, Mi Zhifu, Zhang Hao. Progress of integrated assessment models for climate policy[J]. Systems Engineering - Theory & Practice, 2013, 33(8): 1905-1915. (in Chinese)
- [8]Nordhaus W D. An optimal transition path for controlling greenhouse gases[J]. Science, 1992, 258(5086): 1315-1319.
- [9]Nordhaus W D, Yang Z. A regional dynamic general-equilibrium model of alternative climate-change strategies[J]. American Economic Review, 1996, 86(4): 741-765.
- [10]Greaves G. Evaluation of the DICE climate-economy integrated assessment [OL]. MPRA Paper, <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/64588>, 2015: 1-24.
- [11]Zaddach J. Climate Policy under Intergenerational Discounting[M]. Wiesbaden: Springer, 2016.
- [12]Löschel A, Schymura M. Modeling technological change in economic models of climate change[J]. SSRN Electronic Journal, 2013, 1(7): 89-97.
- [13]Escap UN, UNEP. Green Growth, Resources and Resilience Environmental Sustainability in Asia and the Pacific[M]. Bangkok: United Nations and Asian Development Bank publication, 2013.
- [14]OECD. Interim Report of the Green Growth Strategy: Implementing our Commitment for a Sustainable Future[R]. Meeting of the OECD Council at Ministerial Level, 2010.
- [15]Smulders S, Werf E V D. Climate policy and the optimal extraction of high- and low-carbon fossil fuels[J]. Canadian Journal of Economics/Revue Canadienne d'Économie, 2005, 41(4): 1421-1444.
- [16]Bondarev A, Clemens C, Greiner A. Climate Change and Technical Progress: Impact of Informational Constraints[M]. Heidelberg: Springer, 2014.
- [17]Acemoglu D, Aghion P, Burszty L, et al. The environment and directed technical change[J]. American Economic Review, 2012, 102(1): 131-166.
- [18]Acemoglu D, Aghion P, Hémous D. The environment and directed technical change in a North-South model[J]. Oxford Review of Economic Policy, 2015, 30(3): 513-530.
- [19]Smulders S, Maria C D. The Cost of Environmental Policy under Induced Technical Change[R]. CESifo working Paper Series NO. 3886, 2012.
- [20]Buonanno P, Carraro C, Galeotti M. Endogenous induced technical change and the costs of Kyoto[J]. Resource & Energy Economics, 2003, 25(1): 11-34.
- [21]Bretschger L. Climate policies and economic growth[J]. Resource and Energy Economics, 2017, 49(8): 1-15.
- [22]Kober T, Van Der Zwaan B B C, Rösler H. Emission certificate trade and costs under regional burden-sharing regimes for a 2°C climate change control target[J]. Climate Change Economics, 2014, 5(1): 1-32.
- [23]于渤,黎永亮,迟春洁. 考虑能源耗竭、污染治理的经济持续增长内生模型[J]. 管理科学学报, 2006, 9(4): 12-17.
Yu Bo, Li Yongliang, Chi Chunjie. Endogenous model with exhaustible energy, pollution abatement spending and sustainable growth induced[J]. Journal of Management Sciences in China, 2006, 9(4): 12-17. (in Chinese)
- [24]许士春,何正霞,魏晓平. 资源消耗、污染控制下经济可持续最优增长路径[J]. 管理科学学报, 2010, 13(1): 20-30.
Xu Shichun, He Zhengxia, Wei Xiaoping. Sustainable optimal economic growth path under resource consumption and pollution control[J]. Journal of Management Sciences in China, 2010, 13(1): 20-30. (in Chinese)
- [25]闫晓霞,张金锁,邹绍辉. 污染约束下可耗竭资源最优消费模型研究[J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35(2): 291-299.
Yan Xiaoxia, Zhang Jinsuo, Zou Shaohui. Study on the optimal depletion model of exhaustible resources under pollution constraint[J]. Systems Engineering - Theory & Practice, 2015, 35(2): 291-299. (in Chinese)
- [26]石莹,朱永彬,王铮. 成本最优与减排约束下中国能源结构演化路径[J]. 管理科学学报, 2015, 18(10): 26-37.
Shi Ying, Zhu Yongbin, Wang Zheng. The cost-effective path of energy mix evolution for China under the emissions budgets[J]. Journal of Management Sciences in China, 2015, 18(10): 26-37. (in Chinese)
- [27]Quaas M F, Smulders S. Brown Growth, Green Growth, and the Efficiency of Urbanization[R]. CESifo Working Paper Series No 4044, 2013.

- [28] Rauscher M. Green R&D versus end-of-pipe emission abatement: A model of directed technical change [J]. *Thuenen-Series of Applied Economic Theory*, 2009, 106(4): 1–18.
- [29] Moser E, Prskawetz A, Tragler G. Environmental regulations, abatement and economic growth [J]. *Dynamic Modeling & Econometrics in Economics & Finance*, 2013, 14(4): 1–24.
- [30] 周晶淼, 武春友, 肖贵蓉. 绿色增长视角下环境规制强度对导向性技术创新的影响研究 [J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(10): 2601–2609.
Zhou Jingmiao, Wu Chunyou, Xiao Guirong. Study on the influence of environmental regulation intensity on the directed technological change under the perspective of green growth [J]. *Systems Engineering – Theory & Practice*, 2016, 36(10): 2601–2609. (in Chinese)
- [31] Inada K I. Production function and neutral technical progress in hicks' s sense [J]. *Metroeconomica*, 2010, 19(1): 62–74.
- [32] Repetto R, Easton R. Analyzing climate uncertainty and risk with an integrated assessment model [J]. *The SAIS Review of International Affairs*, 2015, 35(1): 47–59.
- [33] Moon Y S, Sonn Y H. Productive energy consumption and economic growth: An endogenous growth model and its empirical application [J]. *Resource & Energy Economics*, 1996, 18(2): 189–200.
- [34] Bréchet T, Camacho C, Veliov V M. Model predictive control, the economy, and the issue of global warming [J]. *Annals of Operations Research*, 2014, 220(1): 25–48.
- [35] Bondarev A, Clemens C, Greiner A. Climate Change and Technical Progress: Impact of Informational Constraints [M]// Moser E, et al (Eds), *Dynamic Optimization in Environmental Economics*, Heidelberg: Springer, 2014: 3–35.
- [36] Maurer H, Preuß J J, Semmler W. Optimal Control of Growth and Climate Change-Exploration of Scenarios [M]. Heidelberg: Springer, 2013.
- [37] Chu H, Lai C C. Abatement R&D, market imperfections, and environmental policy in an endogenous growth model [J]. *Journal of Economic Dynamics & Control*, 2014, 41(1): 20–37.
- [38] Roseta P C, Ferreira L A, Sequeira T N. Externalities in an endogenous growth model with social and natural capital [J]. *Ecological Economics*, 2010, 69(3): 603–612.

Selection of directed technological innovation from the perspective of green growth

ZHOU Jing-miao^{1,2}, ZHAO Yu-zhe^{1,2}, WU Chun-you¹, XIAO Gui-rong¹

1. Faculty of Management and Economics, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;
2. Collaborative Innovation Center for Transport Studies, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China

Abstract: Regarding the climate feedback economic losses caused by GHG emissions, how to guide the directed technological innovation exactly to achieve long-term green growth has become a major challenge. Based on DICE model, a nonlinear optimal control model, which considers the equilibrium, inclusiveness and sustainability of green growth, is established to reconstruct the endogenous relationship between the dynamic factors of directed technological innovation and climate innovation. The numerical simulation shows that: firstly, the climate feedback economic losses should not be underestimated; secondly, under the guidance of green technological innovation stressing production, social production is powerful but there is a risk of environmental degradation; under the guidance of green technological innovation stressing emission reduction, climate feedback economic losses are small but a risk of lack of growth momentum exists. Although, long-term green growth can be achieved by both directions, neutral green technological innovation will be more stable. Finally, the rate of per-capita consumption will be improved significantly in the short term under the first guidance.

Key words: green growth; DICE model; directed technological innovation; nonlinear optimal control