

# 演化博弈模型下我国光伏发电市场规模分析

王林忻雨

(安徽财经大学 统计与应用数学学院, 安徽 蚌埠 233041)

**摘要:** 针对中国光伏发电市场规模情况, 文章通过定义光伏原材料供应商、光伏原材料分销商、政府和光伏发电企业四方参与者的策略选择, 利用复制动态方程构建四方演化博弈模型, 分析在不同战略选择下每个参与者之间的收益和成本, 并对微分方程稳定性原理和光伏市场中参与者策略之间的动态关系进行数据仿真。研究发现: (1) 分销商需要筛选优质产品并提高鉴别能力, 从而减少与不守规矩的生产商合作的可能性; (2) 企业的维权行为对分销商和政府采取的政策具有积极影响; (3) 政府在处理产品质量问题时需要采取多种措施进行综合治理。本研究有助于光伏产业参与者和政策制定者更好地了解市场动态, 制定有效的政策和战略。

**关键词:** 光伏发电市场; 演化博弈; 策略选择; 可持续发展

**中图分类号:** TM615 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-9659(2025)01-0063-09

随着能源需求的持续增长和环境污染的日益严重<sup>[1]</sup>, 传统能源体系面临着前所未有的挑战<sup>[2]</sup>。太阳能作为一种清洁、可再生能源方式<sup>[3]</sup>, 受到广泛的关注, 在近几年迅速发展, 并在全球能源市场中占据越来越重要的地位<sup>[4]</sup>。特别是光伏发电技术, 因其具备清洁环保、资源丰富等优点, 成为推动能源结构转型和实现绿色低碳发展的重要途径<sup>[5]</sup>。

中国作为全球最大的光伏生产国和市场之一<sup>[6]</sup>, 其光伏产业的发展速度和规模引人注目, 已成为推动全球能源转型的重要力量。研究表明, 在过去十年中, 由于政策的推动和市场需求, 中国的光伏产业快速发展<sup>[7]</sup>, 产能大幅提升, 成本显著下降, 光伏发电已经成为中国乃至全球能源转型的重要力量<sup>[8]</sup>。然而, 光伏发电市场的快速增长也带来了一系列挑战和问题<sup>[9]</sup>, 例如市场供需不平衡、电网接入和消纳能力有限、市场价格波动等<sup>[10]</sup>。这些问题对光伏产业的健康发展提出了挑战, 也影响了投资者的收益和市场的稳定性<sup>[11]</sup>。因此, 如何有效解决这些问题, 促进光伏市场可持续发展, 已成为业界和政策制定者关注的焦点。

对光伏发电市场规模发展进行分析<sup>[12]</sup>, 早期研究主要关注光伏技术的研发和成本降低策略。Lacchini 等人于2013年对光伏发电企业进行了成本分析<sup>[13]</sup>。随着技术的成熟和政策的扶持, 光伏发电市场快速扩张。当前, 研究逐渐转向市场规模的持续增长动力与机制探讨, 特别是在政策激励<sup>[14]</sup>、技术进步和市场需求三者相互作用下的市场扩张模式。如 Hasset 早在大约40年前指出, 如果光伏系统有机会成为一种有吸引力的能源替代品, 就需要长期稳定的政府干预<sup>[15]</sup>, 并利用气候预测分析中国光伏能源的未来<sup>[16]</sup>。Roldán-Fernández 等人<sup>[17]</sup>指出光伏市场快速发展的同时, 也面临供需平衡<sup>[18]</sup>、电网接入<sup>[19]</sup>和消纳能力限制<sup>[20]</sup>等挑战。Mastrocinque 等人的研究<sup>[21]</sup>指出, 一些障碍仍然存在, 阻碍光伏在市场站稳脚跟, 例如成本和不明晰的制度框架。光伏市场的供应链<sup>[22]</sup>涉及材料和能源, 从原材料到供应商、分销商和最终用户或消费者(如光伏企业)的转化流以及相关的所有活动。政府的监管也影响着光伏市场的发展<sup>[23]</sup>。已有研究中, 只有基于AHP层次分析法对光伏供应链提供了决策框架, 但尚未对四方关系进行深入分析<sup>[21, 24, 26]</sup>。在此基础上, 文章通过构建演化博弈模型, 深入分析中国光伏发电市场规模问题, 通过演化博弈模型的应用<sup>[27]</sup>揭示了光伏原料供应商、分销商、政府及企业之间策略的选择和相互作用, 为光伏发电市场的未来发展趋势提供了新的视角。

[收稿日期] 2024-04-12

[修回日期] 2024-05-09

[基金项目] 国家自然科学基金项目(72374001)。

[作者简介] 王林忻雨(2003-), 女, 主要从事经济统计方面研究, E-mail: ac\_zycy@163.com.

## 1 分销商选品策略的稳定性分析

### 1.1 研究思路

演化博弈论是一种多学科整合的新理论,它在生态学、社会经济学、能源政策等诸多领域得到了深入发展和广泛应用<sup>[28]</sup>。现有研究中,尚无基于演化博弈论对政府、光伏原料供应商、光伏原料分销商和光伏发电企业影响因素的相关研究分析<sup>[29]</sup>。为了填补这一研究空白,文章运用四方演化博弈论,以中国光伏发电市场现状为研究对象,建立四方合作的演化博弈模型,分析参与者的演化过程,并从有限理性的角度预测了中国光伏发电企业的未来市场规模。光伏发电市场的未来规模要利用演化博弈模型来分析和预测,演化博弈理论提供了一种分析不同策略如何在一定环境下随时间演化并影响市场结构的方法。

### 1.2 博弈参与人及策略

在光伏能源领域有四个关键角色——光伏材料的供应商、企业、政府机构以及材料的分销商,他们的战略决策共同决定了行业的发展方向。每种角色在制定策略时不仅要考虑自己的利益,还需要考虑其他参与者的策略对自己的影响。

对于光伏材料的供应商来说,他们重点考虑是否严格按照质量标准进行生产。选择遵循标准意味着生产高质量的产品,而选择忽视这些标准可能会引起产品质量的问题。这一选择会受到市场监管的严格程度、材料分销商的筛选政策以及企业采取的维权措施的影响。

#### 1.2.1 博弈参与人1:光伏材料分销商

假设分销商面临两个选项:精挑细选与随意选择<sup>[30]</sup>。分销商决定采取精挑细选策略的可能性为 $x$ ,满足条件 $0 \leq x \leq 1$ ,选择随意选择的概率则是 $1 - x$ 。精挑细选意味着分销商在考虑与供应商合作前,会严格审查其产品质量,确保只有那些符合高标准的产品能被选中。相反,随意选择表明无论供应商的生产纪律如何,分销商均愿意与其建立合作关系。采取精挑细选策略时,分销商的基本收益定为 $R_\alpha$ ,但这将产生成本 $C_\alpha$ ;若采取随意选择策略,其收益则为 $R_\beta$ 。如果供应商执行自律生产,他们需向分销商支付的分成 $\theta M_h$ ;若未自律生产,则支付的分成减少为 $\theta M_l$ 。面临产品质量问题时,积极的政府监管可能致使分销商被罚款 $F_\alpha$ ,同时,企业的不满和对立可能会造成分销商客户流失 $S$ 。在供应商选择不自律生产的情况下,那些实施精挑细选的分销商仍选择与之合作的概率是 $q$ 。

#### 1.2.2 博弈参与人2:光伏原料供应商

假设原料供应商面临两种选择路径:遵循质量标准生产和忽略质量标准生产<sup>[31]</sup>。供应商决定执行遵循质量标准生产策略的概率是 $y$ ,满足条件 $0 \leq y \leq 1$ ;而选择忽略质量标准生产的概率则为 $1 - y$ 。当供应商选择遵循质量标准生产时,其基本利益为 $R_h$ ,同时他们会承担额外的质量控制成本 $C_e$ ,并且必须给分销商和政府支付一定的分成 $M_h$ 。反之,如果供应商选择忽略质量标准生产,他们能够获得的基本收益是 $R_l$ ,并需要给分销商及政府支付较低的分成 $M_l$ 。在政府进行积极监督的情况下,那些选择不遵循质量标准生产的供应商将面临政府的处罚 $F_e$ ,并且如果企业采取维权措施,供应商还需对企业进行经济补偿 $B$ 。

#### 1.2.3 博弈参与人3:政府

假设政府面临两种可能的行动方案:主动执行监管与被动放任监管<sup>[32]</sup>。政府选择主动执行监管的可能性为 $z$ ,满足条件 $0 \leq z \leq 1$ ;相对地,选择被动放任监管的概率则为 $1 - z$ 。在采取主动执行监管策略时,政府会认真查验企业反映的产品质量问题,并承担相应的监管费用 $C_p$ 。一旦发现质量问题,政府将对涉事的分销商和生产供应商分别施加罚款 $F_\alpha$ 和 $F_e$ ( $F = F_\alpha + F_e$ )。反之,若政府采用被动放任监管策略,对企业提出的产品质量问题则可能未予以妥善处理,导致部分企业因政府的消极态度而感到不满,这种情况下,政府可能会承受由此产生的连带损失系数。

#### 1.2.4 博弈参与人4:企业

假设企业在面临权益保护问题时有两个策略选择:主动权益维护和被动权益放弃。企业倾向于选择主动权益维护的概率是 $\omega$ 。这一选择与条件 $0 \leq \omega \leq 1$ 相关;相对地,倾向于选择被动权益放弃的概率为 $1 - \omega$ 。当企业在维权过程中取得胜利时,其将获得基础收益 $R_s$ ,但维权过程中也可能遭受损失 $L_0$ 。此外,当企业选择主动维护自身权益时,其不仅可能获得情感上的满足 $E$ ,同时也必须承担相应的维权成本 $C_s$ 。在政府实施积极监管策略的背景下,企业可能会获得经济补偿 $B$ 。

### 1.3 分销商选品策略的稳定性分析

分销商选择精挑细选策略时的期望收益为  $U_{11}$ , 选择随意选择策略时的期望收益为  $U_{12}$ , 其中

$$U_{11} = y(R_a - C_a + \theta M_h) + (1 - y)(R_a - C_a + q\theta M_l) - (1 - y)zqF_a - (1 - y)wqS \quad (1)$$

$$U_{12} = y(R_b + \theta M_h) + (1 - y)(R_b + \theta M_l) - (1 - y)zF_a - (1 - y)wS \quad (2)$$

分销商的复制动态方程为

$$F(x) = x(1 - x)[R_a - C_a - R_b - (1 - y)(1 - q)\theta M_l + (1 - y)z(1 - q)F_a + (1 - y)w(1 - q)S] \quad (3)$$

根据式(3)及其衍生的导数分析可知, 分销商采取精挑细选产品的决策与其他三方的策略选择概率以及分销商自身在精挑细选和随意挑选策略下的成本和收益情况紧密相关。根据微分方程稳定性原理, 分销商选品策略处于稳定状态时必须满足  $F(x) = 0$  且  $F'(x) < 0$ 。

假设当供应商采取遵循质量标准生产的可能性降低, 政府加强监管的可能性提高以及企业更加积极维权时, 分销商选择精挑细选产品的概率相应增加。基于这一假定, 描述分销商策略选择变化的相位图如图1所示。

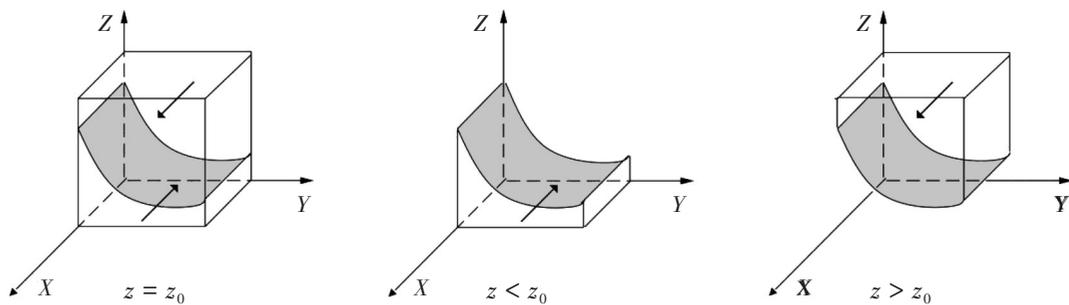


图1 x相位图

### 1.4 供应商策略的稳定性分析

设供应商选择遵循质量标准生产策略时的期望收益为  $U_{21}$ , 选择忽略质量标准生产策略时的期望收益为  $U_{22}$ , 其中

$$U_{21} = R_h - M_h - C_e \quad (4)$$

$$U_{22} = R_l - M_l + x(q - 1)(R_l - M_l) - zF - zwB + xz(1 - q)F_e + xzw(1 - q)B \quad (5)$$

供应商的复制动态方程为

$$F(y) = y(1 - y)\{[R_h - M_h - C_e - (R_l - M_l)] + x(1 - q)(R_l - M_l) + z(F_e + wB) - xz(1 - q)F_e - xzw(1 - q)B\} \quad (6)$$

由式(6)可知, 商家是否选择遵循质量标准生产取决于另外三方决策的概率和商家遵循及忽略质量标准生产时各自的成本及收益。根据微分方程稳定性原理, 商家生产策略处于稳定状态时必须满足条件  $F(y) = 0$  且  $F'(y) < 0$ 。

假定生产商按照质量标准进行生产的可能性会随着分销商进行精挑细选的可能性提升, 政府主动执行监督的可能性增加以及企业更主动维护权益的可能性上升而提高。基于这种预设, 展示供应商策略调整的相位图如图2所示。

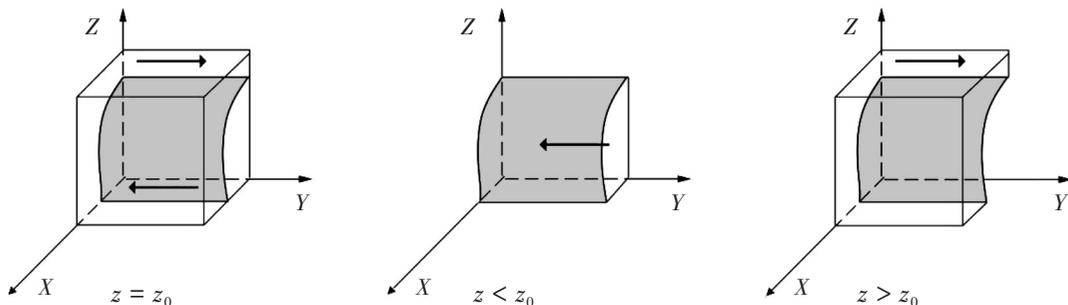


图2 y相位图

### 1.5 政府监管策略的稳定性分析

同理,假设政府主动执行监管时的期望收益为  $U_{31}$ ,被动放任监管时的期望收益为  $U_{32}$ ,其中

$$U_{31} = xy[R_p - C_p + (1 - \theta)M_h] + x(1 - y)\{R_p - C_p + q[(1 - \theta)M_l + F]\} + (1 - x)y[R_p - C_p + (1 - \theta)M_h] + (1 - x)(1 - y)[R_p - C_p + (1 - \theta)M_l + F] \quad (7)$$

$$U_{32} = xy[R_p + (1 - \theta)M_h] + x(1 - y)\{R_p + q[(1 - \theta)M_l] - wq\beta S\} + (1 - x)y[R_p + (1 - \theta)M_h] + (1 - x)(1 - y)[R_p + (1 - \theta)M_l - w\beta S] \quad (8)$$

政府的复制动态方程为

$$F(z) = z(1 - z)[-C_p + F + w\beta S - y(F + w\beta S) - x(1 - y)(1 - q)(F + w\beta S)] \quad (9)$$

由式(9)可知,政府是否选择主动监管取决于另外三方决策的概率、政府主动监管及被动监管时各自的成本及收益。根据微分方程稳定性原理,政府监管策略处于稳定状态时必须满足条件  $F(z) = 0$  且  $F'(z) < 0$ 。

设想政府采取主动监管策略的可能性会因分销商精挑细选产品而降低,因为可能性会随着生产商遵守质量标准概率的提高而减少,但随着企业更加积极地维护自己的权益而上升。在这种情况下,政府策略调整的相位图如图3所示。

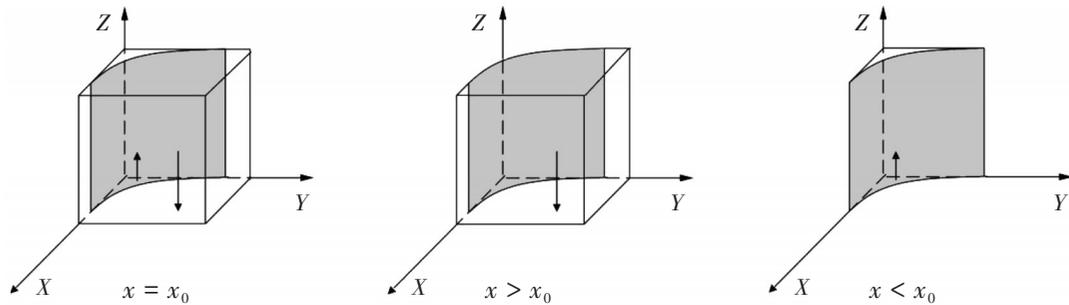


图3 z相位图

### 1.6 企业维权策略的稳定性分析

同理,假设企业主动权益维护时的期望收益为  $U_{41}$ ,被动权益放弃时的期望收益为  $U_{42}$ ,其中

$$U_{41} = xy(R_s - C_s) + x(1 - y)[q(E - L) - C_s] + x(1 - y)zqB + (1 - x)y(R_s - C_s) + (1 - x)(1 - y)(-L - C_s + E) + (1 - x)(1 - y)zB \quad (10)$$

$$U_{42} = xyR_s + x(1 - y)q(-L) + (1 - x)yR_s + (1 - x)(1 - y)(-L) \quad (11)$$

企业的复制动态方程为

$$F(w) = w(1 - w)[-C_s + (1 - y)(E + zB) - x(1 - y)(1 - q)(E + zB)] \quad (12)$$

由式(12)可知,企业是否选择积极维权取决于另外三方决策的概率、企业积极维权及消极维权时各自的成本及收益。根据微分方程稳定性原理,企业维权策略处于稳定状态时必须满足条件  $F(w) = 0$  且  $F'(w) < 0$ 。

假设企业积极维权的概率随着分销商严格选品概率的增大而减小,随着商家遵循质量标准生产概率的增大而减小,随着政府主动监管概率的增大而增大。根据假设,企业策略选择的相位图如图4所示。

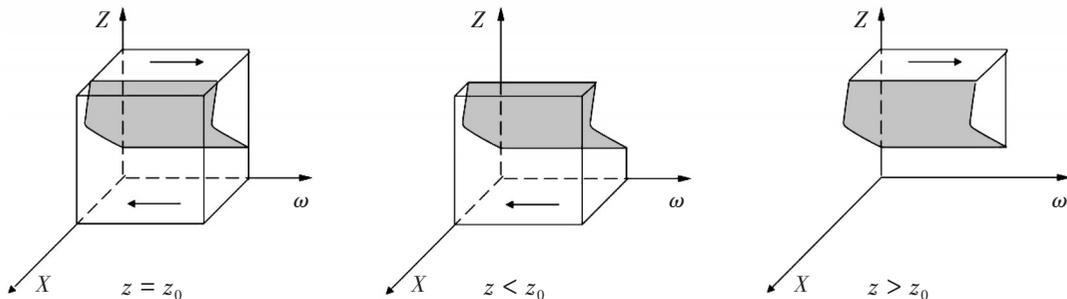


图4 w相位图

基于微分方程的稳定性分析,四方博弈模型中仅纯策略均衡状态被认为是稳定的。因此,需要对16个纯策略均衡点进行研究,并计算相应的雅可比矩阵的特征值。使用李雅普诺夫稳定性判据,即如果一个均衡点的所有特征值都是负数,则该点处于一个渐进稳定的状态。通过这种方法,可以确认光伏能源市场中16个潜在的演化稳定策略,并对这些均衡点进行雅可比矩阵特征值分析,以此来判断其稳定性。相关结果汇总如表1所示。

表1 各个均衡点的渐进稳定性分析

平衡点	特征值	稳定性
$E_1(0,0,0,0)$	$R_a - C_a + q\theta M_l - (R_b + \theta M_l); R_h - M_h - C_e - (R_l - M_l); F - C_p; E - C_s$	有条件的ESS
$E_2(1,0,0,0)$	$R_b + \theta M_l - (R_a - C_a + q\theta M_l); R_h - M_h - C_e - q(R_l - M_l); qF - C_p; qE - C_s$	有条件的ESS
$E_3(0,1,0,0)$	$R_a - C_a - R_b; (R_l - M_l) - (R_h - M_h - C_e); -C_p; -C_s$	有条件的ESS
$E_4(0,0,1,0)$	$R_a - C_a - R_b + (q - 1)(\theta M_l - F_a); (R_b - M_b - C_e) - (R_l - M_l - F_e); C_p - F; -C_s + B + E$	有条件的ESS
$E_5(1,1,0,0)$	$R_b - (R_a - C_a); q(R_l - M_l) - (R_b - M_b - C_e); -C_p; -C_s$	有条件的ESS
$E_6(1,0,1,0)$	$R_b - (R_a - C_a) - (q - 1)(\theta M_l - F_a); R_h - M_h - C_e - q(R_l - M_l - F_e); C_p - qF; q(E + B) - C_s$	有条件的ESS
$E_7(0,1,1,0)$	$R_a - C_a - R_b; (R_l - M_l - F_e) - (R_h - M_h - C_e); C_p; -C_s$	不稳定点
$E_8(1,1,1,0)$	$R_b - (R_a - C_a); q(R_l - M_l - F_e) - (R_h - M_h - C_e); C_p; -C_s$	不稳定点
$E_9(0,0,0,1)$	$R_a - C_a + q(\theta M_l - S) - (R_b + \theta M_l - S); R_h - M_h - C_e - (R_l - M_l); F - C_p - (-\beta S); C_s - E$	有条件的ESS
$E_{10}(1,0,0,1)$	$(R_b + \theta M_l - S) - [R_a - C_a + q(\theta M_l - S)]; R_h - M_h - C_e - q(R_l - M_l); qF - C_p + q\beta S; C_s - qE$	有条件的ESS
$E_{11}(0,1,0,1)$	$R_a - C_a - R_b; (R_l - M_l) - (R_h - M_h - C_e); -C_p; C_s$	不稳定点
$E_{12}(0,0,1,1)$	$R_a - C_a - R_b + (q - 1)(\theta M_l - S - F_a); (R_b - M_b - C_e) - (R_l - M_l - F_e - B); C_p - (F + \beta S); C_s - (B + E)$	有条件的ESS
$E_{13}(1,1,0,1)$	$R_b - (R_a - C_a); q(R_l - M_l) - (R_b - M_b - C_e); -C_p; C_s$	不稳定点
$E_{14}(1,0,1,1)$	$(R_b + \theta M_l - S - F_a) - [R_a - C_a + q(\theta M_l - S - F_a)]; R_h - M_h - C_e - q(R_l - M_l - F_e - B); -q\beta S - (qF - C_p); C_s - q(E + B)$	有条件的ESS
$E_{15}(0,1,1,1)$	$R_a - C_a - R_b; (R_l - M_l - F_e - B) - (R_b - M_b - C_e); C_p; C_s$	不稳定点
$E_{16}(1,1,1,1)$	$R_b - (R_a - C_a); q(R_l - M_l - F_e - B) - (R_h - M_h - C_e); C_p; C_s$	不稳定点

表1显示,在光伏发电领域的四方博弈分析中,共识别出10个潜在的稳定策略配置,如 $E_1(0,0,0,0)$ 、 $E_2(1,0,0,0)$ 等。特定的策略配置,比如 $E_1$ 、 $E_4$ 、 $E_9$ 和 $E_{12}$ ,展示了分销商和生产商的行为策略主要依赖于其对利益的预期评估。在政府执行积极监管或企业进行积极维权的情况下,其也会受到政府处罚强度和由维权导致的客户损失的影响。在这些策略配置下,由于能够获得额外利益,分销商倾向于选择宽松的产品筛选,而生产商选择不遵循生产标准。由于企业损失和政府处罚不够严厉,无法有效促使其改正非法行为,导致政府的监管和企业的维权未能发挥足够的威慑作用。

另一方面,策略组合 $E_2$ 、 $E_6$ 、 $E_{10}$ 和 $E_{14}$ 表明,尽管政府监管和企业维权力度不足以促使生产商遵守规则,但分销商采取的严格产品选择可以有效减少与不遵守规则的生产商的合作,从而降低不合格产品进入市场的风险。在 $E_3$ 和 $E_5$ 的情形中,虽然缺少政府监管和企业维权的强制力,但生产商仍可能根据质量管理标准进行自律生产,有利于保障企业权益。

由此得出,影响中国光伏产业未来发展的四方参与者的策略有:(1)分销商通过精挑细选产品并提升辨别能力,降低与不遵守质量标准的生产商合作的概率,这一策略有助于激励生产商遵循质量自律,进而提升市场产品的整体质量;(2)企业维权活动导致分销商用户流失,这对分销商及政府采取的措施具有正面影响。同时,政府行动也会因与分销商相关的连带损失而受到影响,因此减少对分销商的依赖,有助于提高政府进行主动监管的积极性;(3)政府加大处罚力度确实可以驱使分销商和供应商修正其行为,但仅依靠加大处罚力度并不能从根本上改变生产商的行为模式。因此,政府在处理产品质量问题时,除了加大惩罚力度外,还需要采取多种措施来综合治理。

## 2 光伏市场中参与者策略之间动态关系的数据仿真

### 2.1 计算原理及简要说明

数据仿真使用MATLAB(R2021a)软件。设 $x, y, z, w$ 初始值为0.1,边值为1,步长为0.2。 $R_a$ 为光伏材料分销商严格选品时的基本收入,代表为选择高质量产品而获得的奖励,文章中 $R_a$ 的值设为5。 $C_a$ 为光伏材料分销商严格选品时所承担的成本,包括确保产品质量所投入的努力和资源,文章中 $C_a$ 的值设为1。 $R_b$ 为光伏材料分销商宽松选品时的基本收入,通常涉及的努力和标准比严格选品时低,文章中 $R_b$ 的值设为3。 $q$ 为光伏材料分销商与不自律光伏原料供应商合作的概率,文章中 $q$ 的值设为0.5。 $F_a$ 为产品出现质量问题时,政府积极监管对光伏材料分销商施加的罚款,文章中 $F_a$ 值设为1。 $S$ 为企业不满导致的用户流失,影响光伏材料分销商的决策,文章中 $S$ 的值设为10。 $\theta$ 为光伏原料供应商给光伏材料分销商的收入分成比例,根据光伏原料供应商是否自律而有所不同,文章中 $\theta$ 的值设为0.9。 $R_h$ 为光伏原料供应商自律生产时的基本收入,文章中 $R_h$ 的值设为30。 $M_h$ 和 $M_l$ 为光伏原料供应商给光伏材料分销商的分成,根据光伏原料供应商是否自律有所不同,文章中 $M_h$ 的值设为6, $M_l$ 的值设为5。 $C_e$ 为光伏原料供应商自律生产时所承担的成本,文章中 $C_e$ 的值设为18。 $R_l$ 为光伏原料供应商不自律生产时的基本收入,文章中 $R_l$ 的值设为25。 $F_e$ 为政府对光伏原料供应商因质量问题施加的罚款,作为政府积极监管的一部分,文章中 $F_e$ 的值设为2。 $B$ 为企业因产品问题积极维权时获得的经济补偿,文章中 $B$ 的值设为5。 $C_p$ 为政府在积极监管和监控产品质量时所承担的成本,文章中 $C_p$ 的值设为7。 $\beta$ 为政府的连带损失系数,反映用户损失如何影响政府的监管行为,文章中 $\beta$ 的值设为0.8。 $E$ 为企业积极维权时获得的情感收益,文章中 $E$ 的值设为15。 $C_s$ 为企业积极维权时所承担的成本,文章中 $C_s$ 的值设为3。

### 2.2 数值模拟过程

使用ode45函数进行常微分方程(ODE)的求解,这是MATLAB中一个常用的数值求解器,适用于求解刚性或非刚性的常微分方程。这里的函数 $F(x), F(y), F(z), F(w)$ 定义了系统的动态,即模型的演化规则。分析忽略企业策略概率、忽略政府策略概率、忽略供应商策略概率和忽略分销商策略概率的演化动态图如图5所示。

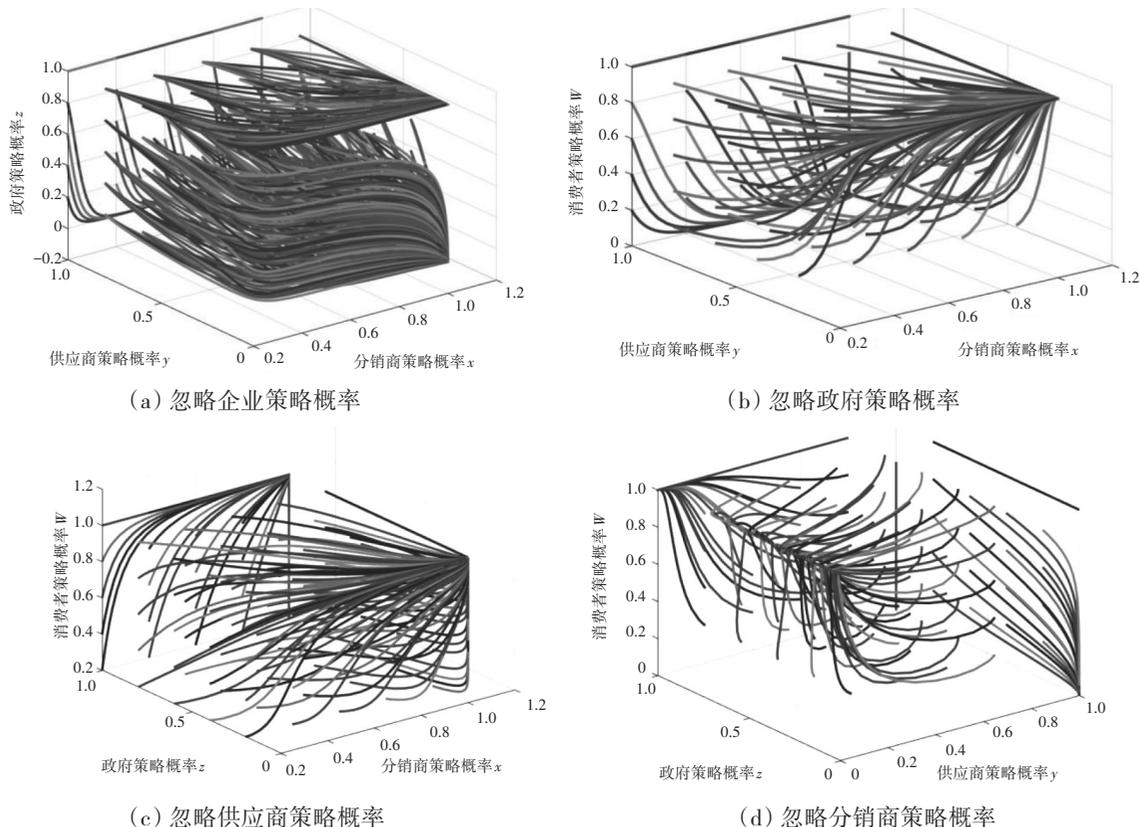


图5 数据仿真演化动态图

图5展示了光伏市场中参与者策略之间的动态关系,其中包括分销商、供应商、政府与企业的策略概率。

在图5(a)中,分销商和供应商的策略概率与政府监管策略之间的关联性得到了增强,某些区域的轨迹出现的聚集,表示市场可能趋于一个或多个稳定状态。政府策略的变动对市场的演化具有核心作用,其概率的细微调整能够显著影响分销商和供应商的策略反应,表明在特定的政府行动下市场趋于稳定。在忽略政府策略影响的情形下,图5(b)探讨了分销商和供应商策略与企业行为之间的相互作用,揭示企业策略在两极情况下对市场变化产生较大影响。这表明企业偏好的轻微变动可能引发供应链中其他角色的策略调整。在图5(c)中,固定供应商策略,分析了分销商策略与政府及企业策略的关系,表明政府与企业之间的策略互动在供应商策略不变的条件下对市场影响较大。这突出了政府策略在调节企业需求变化中的重要性,以此保持市场稳定。最后,在图5(d)中,当分销商策略被固定时,模拟了供应商、政府与企业策略的交互动态,强调了政府策略对于供应商和企业决策的重要影响。特别是当政府行为出现显著变化时,市场演化的轨迹快速改变,表示政府在塑造市场结构和参与者行为中承担关键角色。

整体而言,无论是直接参与还是作为固定背景的情况,政府策略概率的变化对光伏发电市场的演化均有显著影响。各策略之间存在强烈的相互依赖关系,策略的任何变化都会导致光伏发电市场演化路径发生显著变化。各方策略的细微调整可能会在光伏发电市场中引起复杂的连锁反应,进而影响整个光伏发电市场的平衡状态。

### 3 讨论

文章通过分析演化博弈模型揭示了光伏电站建设和运营中各利益相关者之间的利益冲突和博弈关系。光伏电站的分销商、供应商、政府和企业之间存在复杂的利益博弈。通过模型的优化和调整,可以实现各利益相关者之间的合作与协调,从而促进光伏电站的可持续发展。文章将演化博弈论应用于光伏发电市场规模分析,建立了四方参与者,考察了市场参与者在不同政策和市场机制下的策略选择及其相互作用。这一分析不仅丰富了光伏市场研究的理论基础,也为市场规模的动态预测提供了新的方法论。

#### 3.1 理论影响

本研究首次将演化博弈论应用于光伏发电市场规模分析中,提供了一个新的理论框架来解释市场参与者之间的策略选择与互动。通过构建演化博弈模型,揭示供应商、分销商、政府及企业四方在市场演化过程中的策略选择、互动关系及其对市场规模的影响,为理解光伏市场演化提供了新的视角。

#### 3.2 实际影响

研究结果为光伏发电市场的参与者提供了决策支持,帮助其优化资源配置、降低成本、提高效率,从而促进光伏发电市场的健康发展。为政策制定者提供了重要的决策依据,帮助其更好地理解市场动态,制定有效的政策和战略,推动中国乃至全球的光伏市场发展。

#### 3.3 局限性及未来研究方向

本研究尽管做出了一定贡献,但仍存在一些局限性。首先,为了分析方便,模型在构建过程中对现实情况进行了一定简化,可能无法完全捕捉市场演化的所有复杂性。因此本研究存在模型假设简化的局限性。其次,研究的结论依赖现有的数据和文献,对新的市场动态和政策变化的适应性可能存在局限。因此,本研究在数据方面存在局限性。未来的研究应当进一步细化模型,考虑更多的市场因素和参与者行为,通过实际数据验证模型的预测能力,考虑不同国家和地区光伏市场的特点,进行跨区域的比较研究,探索光伏发电市场规模演化的普遍规律和地区特性。深入研究政策变化对光伏发电市场演化的影响,提出更具针对性的政策建议,以促进光伏产业的健康可持续发展。

### 4 结语

文章通过分析演化博弈模型,揭示了光伏电站建设和运营过程中不同利益相关方的冲突和互动,讨论了光伏电站的分销商、供应商、政府和企业之间的复杂博弈,并提出了四个策略来促进中国光伏市场的未来发展。包括:(1)分销商筛选优质产品并提高鉴别能力,从而减少与不守规矩的生产商合作的可能性,此举能激励生产商坚持质量自律,提升市场产品整体质量;(2)企业的维权行为导致分销商可能面临客户流失情况,这对分销商和政府采取的政策产生积极影响;政府的行动也会受到分销商相关连带损失的影响,减少依

赖分销商可以增强政府进行主动监管的意愿;(3)虽然政府增强惩罚力度可以促使分销商和供应商改正行为,但单独使用这种方法并不足以从根本上改变生产商的行为模式,政府在处理产品质量问题时需要采取多种措施进行综合治理;(4)无论政府是直接参与还是作为固定背景,政府策略的变化显著影响光伏发电市场的演化。策略之间的强依赖性表明,任何策略的变动都能显著影响光伏市场的发展路径,且细微的策略调整可能在市场中引发复杂的连锁反应,从而影响整个市场的平衡状态。

#### 参考文献:

- [1] GUI J, LI C, CAO Y, et al. Hybrid Solar Evaporation System for Water and Electricity Co generation: Comprehensive Utilization of Solar and Water Energy[J]. *Nano Energy*, 2023, 107: 108155.
- [2] WANG J. Power System Resilience: The Golden Rule of the Future Grid [Guest Editorial][J]. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2020, 18(04): 17-18.
- [3] WOO T H. Climate Change Analysis in Energy-mix with Non-carbon Emission Energy Incorporated with Pandemic Society[J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2023, 25(10): 11723-11733.
- [4] 蒲稳锴. 基于EVA的L光伏企业价值评估研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2024.
- [5] 杨歌. 电力能源行业: 绿色转型 引领新时代[N]. *机电商报*, 2024-03-11(A03).
- [6] 张英英, 吴可仲. 中国光伏崛起启示: 如何突破“围剿”领跑全球[N]. *中国经营报*, 2024-03-04(C07).
- [7] 白之羽, 韩春瑶, 王伟健. 光伏行业如何拓宽发展空间[N]. *人民日报*, 2024-01-30(10).
- [8] LI H L, CHEN D P, ZHAO L, et al. PV Demand and Supply in China[J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2013, 21(06): 1286-1291.
- [9] 宋大伟, 卢文鹏, 朱家明. “双碳”目标下新能源行业上市公司价值投资策略的量化分析[J]. *哈尔滨师范大学自然科学学报*, 2022, 38(06): 5-13.
- [10] 张英英, 吴可仲. 光伏产业链“冷热不均”: 谁亏谁赚?[N]. *中国经营报*, 2024-02-05(B15).
- [11] 徐磊. 配额制下我国光伏发电产业的技术效率与市场绩效研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2024.
- [12] 曹建忠, 马志强. 基于挣值管理的分布式光伏发电项目成本管理研究[J]. *机械制造*, 2023, 61(12): 74-79.
- [13] LACCHINI C, DOS SANTOS J C V. Photovoltaic Energy Generation In Brazil—Cost Analysis Using Coal-fired Power Plants as Comparison[J]. *Renewable Energy*, 2013, 52: 183-189.
- [14] 董梓童, 杨沐岩. 能源设备更新站上政策“风口”[N]. *中国能源报*, 2024-03-25(002).
- [15] 蒙宝思, 吴逊, 姚金辛. 政府干预与市场机制的协同作用——以集成电路大基金为视角的实证研究[J]. *科学学研究*, 2024, 42(09): 1887-1885.
- [16] GUO J, CHEN Z, MENG J, et al. Picturing China's Photovoltaic Energy Future: Insights From CMIP 6 Climate Projections[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 189: 114026.
- [17] ROLDÁN-FERNÁNDEZ J M, BURGOS-PAYÁN M, RIQUELME-SANTOS J M. Impact of Domestic PV Systems in the Day-ahead Iberian Electricity Market[J]. *Solar Energy*, 2021, 217: 15-24.
- [18] 国新毅. 聚焦用户侧供需平衡破局分布式光伏就地消纳[J]. *中国电力企业管理*, 2024, (01): 31-33.
- [19] 钟文梁, 刘健, 林圣, 等. 光伏接入直流受端电网下直流换相失败影响机理初探[J]. *电网技术*, 2024, 48(07): 3034-3043.
- [20] 罗涛, 赵高帅, 闫大威, 等. 考虑配电网主动重构的分布式光伏消纳能力概率化评估方法[J/OL]. *电力系统及其自动化学报*, 1-11.
- [21] MASTROCINQUE E, RAMÍREZ F J, HONRUBIA-ESCRIBANO A, et al. An AHP-based Multi-criteria Model for Sustainable Supply Chain Development in the Renewable Energy Sector[J]. *Expert Systems with Applications*, 2020, 150: 113321.
- [22] 戴道明, 王忆都. 可再生能源消纳责任权重制下光伏供应链合作与运营决策[J/OL]. *中国管理科学*, 1-18.
- [23] ZHANG Q, LIU C, ZHENG S. Investment and Pricing in Solar Photovoltaic Waste Recycling with Government Intervention: A Supply Chain Perspective[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2023, 177: 109044.
- [24] OZDEMIR S, SAHIN G. Multi-criteria Decision-making in the Location Selection for a Solar PV Power Plant Using AHP[J]. *Measurement*, 2018, 129: 218-226.
- [25] ELBOSH Y B, ALWETAISHI M, M H ALY R, et al. A Suitability Mapping for the PV Solar Farms in Egypt Based on Gis-ahp to Optimize Multi-criteria Feasibility[J]. *Ain Shams Engineering Journal*, 2022, 13(03): 101618.
- [26] DEMIR A, DINÇER A E, YILMAZ K. A Novel Method for the Site Selection of Large-scale PV Farms by Using AHP and GIS: A Case Study in İzmir, Türkiye[J]. *Solar Energy*, 2023, 259: 235-245.

- [27] 刘宁,张驰,王栋,等. 西北地区扶贫光伏整县开发决策演化博弈[J]. 中国电力,2024,57(02):149-160.
- [28] WANG G, CHAO Y, CHEN Z. Promoting Developments of Hydrogen Powered Vehicle and Solar Pv Hydrogen Production in China: A Study Based on Evolutionary Game Theory Method[J]. Energy, 2021, 237: 121649.
- [29] SU X, LIU P, MEI Y, et al. The Role of Rural Cooperatives in the Development of Rural Household Photovoltaics: An Evolutionary Game Study[J]. Energy Economics, 2023, 126: 106962.
- [30] 梁晓莹,刘玉敏,赵哲耘,等. 直播带货产品质量的演化博弈分析[J]. 运筹与管理,2023,32(11):102-108.
- [31] ZHANG M, ZHU J, WANG H, et al. Evolutionary Game Analysis on Strategies in “Main Manufacturer–Supplier” Mode Considering Technology Docking and Price Concluding under Competition Condition[J]. Mathematics, 2019, 7(12): 1184.
- [32] SUN Z, ZHANG W. Do Government Regulations Prevent Greenwashing? An Evolutionary Game Analysis of Heterogeneous Enterprises[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 231: 1489–1502.

## Analysis of China’s Photovoltaic Power Generation Market Size based on the Evolutionary Game Model

WANG Lin-xin-yu

(School of Statistics and Applied Mathematics, Anhui University of Finance and Economics,  
Bengbu, Anhui, 233041, China)

**Abstract:** For the market size of photovoltaic power generation in China, the benefits and costs of different strategic choices among each participant are analysed by defining the strategic choices of the four players, namely, photovoltaic raw material suppliers, photovoltaic raw material distributors, the government, and photovoltaic power producers, by constructing a four party evolutionary game model using replicated dynamic equations. The data simulation is carried out about the dynamic relationship between the strategies of the players in the photovoltaic market and the principle of stability of differential equations. It is found that: (1) Distributors need to screen for quality products and improve their ability to identify them so as to reduce the likelihood of cooperating with unruly producers; (2) Firms' rights defence behaviour positively affects the policies adopted by distributors and the government; (3) The government needs to adopt a variety of measures for comprehensive governance when dealing with product quality issues. This paper helps photovoltaic industry participants and policy makers to better understand market dynamics and formulate effective policies and strategies.

**Keywords:** Photovoltaic power generation market; Evolutionary game; Strategy selection; Sustainable development