

绿色 PPP 项目组合的最优契约： 经济与环境效应的福利视角

魏晓云 韩立岩

(首都经济贸易大学统计学院,北京 100070;北京航空航天大学经济管理学院,北京 100191)

摘要:绿色 PPP 搭配高收益项目的激励方式是吸引社会资本参与环境治理的举措之一。本文基于经济与环境的双重福利效应,从理论上研究了该激励方式的契约设计问题,阐释了博弈均衡的存在性以及最优特许期的形成逻辑和关键决定因素。研究表明:第一,绿色 PPP 搭配高收益项目能够提高企业利润,激发社会资本参与环境治理来应对环境风险。第二,政企双方博弈决策模式决定了契约能否订立。如果独立决策,使企业利润最大的特许期也能够带来最高的环境效益,但此时博弈结果展现为“刀刃上的均衡”,契约难以建立;如果合作博弈,双方最优特许期选择达成一致,契约得以订立,政府向企业让渡经济利润而收获环境效益,最终实现经济与环境福利的双赢。第三,绿色 PPP 搭配高收益项目优于传统政府补贴的激励方式,在收获同等环境效益的基础上,能够带动社会总福利的提升。研究结论为绿色 PPP 搭配高收益项目激励方式的推广实施、从而助力实现碳达峰和碳中和战略目标提供了契约设计理论依据和相关框架。

关键词:绿色 PPP 项目;公私合作制;最优特许期;绿色金融;环境风险

JEL 分类号:G28,Q58,D61 文献标识码:A 文章编号:1002-7246(2022)03-0060-19

一、引言

近年来我国绿色金融体系建设取得了重要进展,发展绿色金融已经成为金融供给侧结构性改革的实质性举措。国家“十四五”规划纲要中提出未来将推动经济社会发展全面绿色转型,绿色金融也被提到了历史新高高度,“十四五”规划和 2035 年远景目标纲要提出将大力发展绿色金融,助推经济高质量发展。

收稿日期:2019-01-07

作者简介:魏晓云,管理学博士,副教授,首都经济贸易大学统计学院,E-mail:weixiaoyun@cueb.edu.cn.

韩立岩(通讯作者),理学博士,教授,北京航空航天大学经济管理学院,E-mail:hanly@buaa.edu.cn.

* 本文感谢国家自然科学基金(71673020、71690244、71850007)的资助。感谢匿名审稿人的宝贵意见,文责自负。

实践中,发展绿色金融、推动生态环境保护的资金需求量巨大,单纯依靠政府的资金支持难以为继,因此公私兼顾的公私合作制(Public-Private Partnership,简称PPP)¹成为解决该问题的重要模式。然而,污染防治与绿色低碳类PPP项目一般存在投资门槛高、竞争趋于同质化以及市场风险大等问题,致使企业参与积极性不高。为了激发社会资本的主观能动性,2016年8月,经国务院同意,人民银行等七部委共同发布了《关于构建绿色金融体系的指导意见》(以下简称《意见》),提出了“支持在绿色产业中引入PPP模式,鼓励将节能减排降碳、环保和其他绿色项目与各种相关高收益项目打捆”的激励新举措。随后各省针对自身特点和需要相继出台意见推行这种绿色PPP搭配高收益项目的激励方式,例如广东省2016年鼓励将水环境综合整治、农村环境综合整治等公益性项目与各种相关高收益项目打捆;北京市2017年提出将节能减排降碳、环保和其他绿色项目与相关高收益项目打捆;江苏省2018年提出将黑臭水治理、污染场地修复等项目和休闲度假、旅游观光、健康养老等有稳定收益的项目打捆实施;吉林省2019年提出鼓励将城市绿地建设等生态类项目与符合要求的高收益项目打捆包装,通过产业项目收入补贴生态环保项目。²这种绿色PPP搭配高收益项目的新型激励方式不仅能够节约财政成本,也能够有效引导社会投资参与环境保护。

尽管激励方式思路和方向非常明确,但仅仅依靠传统的PPP契约框架却不足以应对项目组合实践中的复杂问题。例如,纳入高收益商业项目会直接影响绿色PPP项目是否能够实施;又如普通商业PPP项目主要考虑经济产出的收益分配和风险分担,而绿色PPP项目的核心产出是环境效益,但企业又不参与环境产出的分配,这就使契约设计更加复杂。这意味着无法直接采用传统单一商业PPP项目的契约模型,需要将经济产出、环境产出、消费者剩余乃至社会福利等目标同时纳入来构建新的契约设计框架。

鉴于此,本文参考Zhang et al. (2016)和Wang et al. (2018)的思路,采用净现值方法针对绿色PPP搭配高收益项目的创新激励方式,提出了最优特许期决策模型,主要创新体现在:第一,引入环境效益,将单一PPP项目最优特许期模型扩展到绿色和高收益项目情形,实现项目组合框架下社会福利、环境效益、消费者剩余、企业以及政府经济利润的共赢目标。第二,比较政府方与企业方不同博弈模式,论证了均衡存在性,揭示最优特许期形成的内在逻辑及关键决定因素,从而为相关项目组合提供契约设计的基础框架。第三,通过新模型的全方位情景分析,论证了绿色PPP搭配高收益项目激励方式相对于传统政府直接补贴激励方式的优势,为该种激励方式促进生态环境保护提供理论支撑。

本文后续内容安排如下:第二部分为回顾文献;第三部分在描述全文研究框架的基础上提出关键假设;第四部分对合作与非合作情形下政府与企业博弈的最优特许期进行讨

1 PPP模式也被称为“政企合作制”“政府和社会资本合作”等,企业可为国有企业,也可为私营企业。

2 广东省2016年发布《关于加强环保与金融融合促进绿色发展的实施意见》;北京市2018年发布《关于构建首都绿色金融体系的实施办法》;江苏省2018年发布《关于深入推进绿色金融服务生态环境高质量发展的实施意见》;吉林省2019年发布《吉林省人民政府办公厅关于推进绿色金融发展的若干意见》。

论与求解;第五部分对本文所研究的绿色 PPP 搭配高收益项目的激励方式与传统政府直接补贴激励方式进行比较分析;第六部分采用模拟分析对文中的模型结论进行直观展示;第七部分对全文结论进行总结并提出相关政策启示。

二、文献综述

绿色 PPP 搭配高收益项目所形成的组合(以下简称绿色 PPP 项目组合)的契约设计中包含两个核心问题:收益分配和政府激励。收益分配也是风险分担问题。绿色 PPP 项目具有投资额度大、周期长、合同结构复杂等特点,面临许多的不确定性,导致政府和企业都承担巨大的风险(Wu et al., 2018)。因此,基于政府和企业之间的契约精神,探索合理的利益分配机制以保证有效的收益分配与风险分担,是绿色 PPP 项目组合能否成功融资和实施的关键环节。政府激励一方面是为了吸引企业方参与竞标,另一方面可以与项目建设质量相关联,为生态保护带来更多的正外部性。

(一) 收益分配

PPP 项目的收益分配可以采用“建设-经营-移交”(Build-Operate-Transfer, BOT)、“移交-经营-移交”(Transfer-Operate-Transfer, TOT)以及政府购买等多种模式,目前我国绿色 PPP 项目以 BOT 方式为主。BOT 模式是指政府赋予企业一个特许期,允许项目建成后由企业运营和管理,特许期结束后将项目移交给政府。

最优特许期的选择是 BOT 模式的关键技术,因为特许期决定了政府和企业的权利和义务(Ye and Tiong, 2003; Khanzadi et al., 2012)。研究确立最优特许期的方法中,最常用的有期权定价方法(Xu et al., 2012)、模糊-德尔菲法相关技术(Khanzadi et al., 2012)、净现值方法(NPV)(Bao et al., 2015)、讨价还价博弈法(Shen et al., 2007)、基于网络的分析方法(Zhang, 2011)等。当然,比较基础的是 NPV 方法,是由 Ngee et al. (1997)和 Shen et al. (2002)构建的模型。国内也有一些学者对 PPP 项目的最优特许期问题进行了研究。宋金波等(2014)研究了高速公路 BOT 项目的特许期决策问题。吕萍等(2015)将运营成本作为 BOT 合同决策的重要因素,确立了公路 BOT 合同决策的特许期、定价和容量,结论是最优特许期为整个公路寿命长度。燕雪等(2017)研究了政府与企业合作、不合作两种状态下交通 PPP 项目特许期决策问题,研究发现,充分与非充分合作状态下,最优特许期存在显著差异。

(二) 政府激励

传统的激励方式是政府直接向企业提供补贴,国外存在大量文献对这种激励方式进行了研究,但研究对象主要是单一商业 PPP 项目。例如 Wang and Liu (2015)研究了政府承诺固定补偿的 PPP 项目的激励问题,求解了最优激励系数。Wang et al. (2018)研究发现 BOT 项目的政府补贴与特许期之间存在着既相互替代又互相补充的关系。Jin et al. (2021)求解了最优特许期与政府承诺的最低收益保障水平,并发现二者具有反比例关系。也有少部分针对单一绿色 PPP 项目的激励问题的研究,如 An et al. (2018)研究了城

市水环境处理的 PPP 项目的政府补偿机制,求解了政府补贴的最优激励系数。Xue and Wang (2020) 以水污染治理的 PPP 项目为对象,使用绩效评估方法求解了各利益主体(政府、公众、第三方机构和其他专家)之间的行为选择演化路径。

国内对激励问题的研究也主要集中于单一商业 PPP 项目上。如高颖等(2016)对以最终用户付费的 PPP 项目为对象,研究了在需求量下降时,政府是否应当对企业进行补偿等问题。曹启龙等(2016)研究了公平偏好下 PPP 项目的多任务激励问题,考虑了投资方的成本函数相互依存和投资方行为是否可测两种情景。罗煜等(2017)提出需要制度来保证合理的风险承担以激励私营部门。近年来国内也出现了少部分文献研究了单一绿色 PPP 项目的激励或实施问题,如杨晓冬和张家玉(2019)针对老旧建筑的绿色改造问题建立了政府与投资群体的演化博弈优化模型,结论是政府给予激励的策略为演化稳定策略。此外,与绿色 PPP 项目激励相关的研究还包括绿色金融的激励或惩罚问题,例如周永圣等(2017)研究了绿色供应链问题,发现当政府对银行实施激励后,有助于实现绿色发展。苏冬蔚和连莉莉(2018)研究发现绿色信贷对重污染企业的融资具有惩罚效果,对其投资具有抑制作用。王遥等(2019)研究表明,针对绿色信贷的激励政策能够同时带来经济与环境的双重发展。陈国进等(2021)研究发现绿色金融政策对绿色企业形成融资激励,且逼迫棕色企业绿色转型。文书洋等(2021)证实绿色金融比公共部门环保投入具有更强的跨部门成本分摊与风险分担属性,带来更长期的增长效应。这些研究都为本文的后续工作提供了参考。

综上所述,已有文献主要针对单一 PPP 项目特别是单一商业 PPP 项目最优特许期以及政府补贴激励机制展开研究,鲜有对绿色 PPP 项目组合的最优契约设计的探索。在绿色 PPP 项目组合契约设计中涉及到的关键问题是:契约订立需要考量哪些要素?需要选择怎样的协调机制保障合同签署?绿色 PPP 项目是否存在最优特许期?是否优于传统的政府直接补贴激励机制?探索这些问题将为绿色 PPP 项目组合的推广实施提供一定的理论基础和技术支撑。

三、问题描述与模型假设

(一) 问题描述

本文研究绿色 PPP 与高收益商业投资项目打捆组合激励策略在不同博弈模式下均衡的存在性和最优特许期决策问题,以期为政府与企业建立契约关系提供一个可参考的理论框架。在这个框架中,政府的核心目标是完成绿色 PPP 项目,引入高收益项目的主要目的是平衡收益,因此绿色 PPP 项目采用“建设-经营-移交”(BOT)模式,高收益项目并不通过 BOT 方式实施,而是政府赋予企业经营如养老、旅游等项目的特许权,在特许权期内政府既不分享利润也不回收项目,期满后收回特许权。为了建立合理的契约关系,需要确立绿色 PPP 项目中赋予企业方的最优特许期。政府与企业之间的博弈有两种形式:非合作与合作。在非合作模式下,二者分别按照社会福利和经济利润最大化来选择对

自身最优的特许期; 在合作模式下, 二者遵从统一的效用损失函数最小化原则做出选择并确立最优特许期。

(二) 模型假设

研究中涉及到项目的属性、时间跨度、建设周期、总投资、期望收益、运行和维护成本、税收、环境效益、经济利润、消费者剩余以及社会福利等相关概念或变量, 本部分将对这些关键指标进行界定、假设和量化表示。

1. 绿色 PPP 项目描述

中国人民银行等七部委发布的《关于构建绿色金融体系的指导意见》中对绿色 PPP 项目的描述为“节能减排降碳、环保和其他绿色项目” 财政部政府和社会资本合作中心发布的“全国 PPP 综合信息平台管理库项目” 月度报告中对绿色 PPP 项目给出了更为具体的描述: 公共交通、供排水、生态建设和环境保护、水利建设、可再生能源、教育、科技、文化、养老、医疗卫生、林业、旅游等多个领域具有支持污染防治和推动经济结构绿色低碳化作用的 PPP 项目。

依据绿色 PPP 项目是否需要用户付费将其分为两类, 第一类为纯公益项目, 如公共绿地、生态保护、园区保护等, 企业方的回报主要由财政支付或者通过与其打捆的高收益项目来平衡; 第二类为用户付费项目, 典型的案例有高速公路、供水、供暖、污水处理、垃圾处理、新能源等, 建成后可以收取过路费、水费、取暖费、污水处理费以及产品销售收入等。

2. 项目的存续期和特许期

绿色 PPP 项目和高收益项目分别以 e 和 h 表示。两类项目均包含建设期和运营期, 建设期从 0 时刻开始, 分别到 T_e^0 和 T_h^0 时刻结束。 T_e 和 T_h 为项目寿命结束的时刻, 因此总的存续期分别为 $T_e - T_e^0$ 和 $T_h - T_h^0$ 。绿色 PPP 项目建成后, 政府赋予企业的特许经营截止时刻为 T , $T \in [T_e^0, T_e]$, T 也称为特许期, 包含建设期和政府特许企业的经营期 (Zhang et al., 2016)¹ 特许期结束后移交给政府。高收益项目在整个存续期 $T_h - T_h^0$ 都由企业经营管理, 政府在 T_h 时刻收回特许权。

3. 总投资

$I = I_e + I_h$ 为项目的初始总投资(不包括运营成本), 一般政府要求初始投资 I_0 需要达到总投资 I 的一个比例 α , 一般有 $\alpha \geq 30\%$ (Zhang et al., 2016), 剩余部分资金需要向银行借款, 借款利息为 $(1 - \alpha)IR$, R 为贷款利率。

4. 运营期每年的收入

消费者对绿色 PPP 项目和高收益项目每年的产品或服务的需求量分别记为 Q_{et} 和 Q_{ht} 单位。假设两类项目所生产产品或服务的价格分别为 P_e 和 P_h , 其中, $P_h > 0$, $P_e \geq 0$ 特别地, $P_e = 0$ 表明绿色 PPP 项目为纯公益项目, 用户无需付费。绿色 PPP 项目在移交前后可能具有不同的价格, 因此假定 P_e^c 和 P_e^g 分别为企业和政府运营期间产品的价格。

¹ 特许期也可以专指特许经营期而不包含建设期, 为了表述便捷, 本文参考已有文献 (Zhang et al., 2016) 定义特许期包含建设期和运营期。

$Q_{ii}(P)$ 代表消费者对项目 i 产品的需求量, $i \in \{e, h\}$, 依赖于价格 P , $Q_{ii}(P)$ 为随机的且为 P 的减函数。当然, 需求量也受到项目容纳量上限 v_i 的影响 (Zhang et al., 2018), 因此, 实际需求量为 $\min(Q_{ii}(P), v_i)$, 而建成后每年的运营收入为 $\min(Q_{ii}(P), v_i) P_i$ 。

5. 可变成本

C_{et} 和 C_{ht} 为两类项目每年内单位产品的可变成本, 包含运营与维护费用和原材料费用, 则年度总可变成本分别为 $C_{et}Q_{et}(P)$ 和 $C_{ht}Q_{ht}(P)$, 即单位产品的可变成本与需求量的乘积。此外, 政府所支付的成本还包括授予企业高收益项目的特许权, 例如授权企业在一定期限内的土地商业开发权, 这是一种机会成本, 政府如果不赋予企业, 则可以出售土地商业开发权而获得收入, 因此特许权成本即为出售商业开发权所获得的收入。

6. 税收

企业每年需要缴纳税收, 假设税率为 τ , 则企业每年的税后收入为税前收入的 $(1 - \tau)$ 倍。因为税率变动并不频繁而且每次变动幅度不高, 为此本文假设税率为常数。

7. 社会福利

政府构建绿色 PPP 项目组合的主要目标是获取环境效益和社会福利。社会福利的度量包括货币形式和非货币形式, 对于非货币形式, 一般使用合理的权重将其转化为货币形式 (Chen and Subprasom, 2007; Zhang et al., 2016; Zhang et al., 2018)。根据福利经济学理论, 绿色 PPP 项目的总社会福利包含四部分: 一是政府从项目中获得的直接经济产出; 二是消费者剩余; 三是绿色 PPP 项目的环境效应; 四是企业的经济利润。我们对环境福利赋予一个合适的权重折合为经济福利, 权重的选择取决于政府对环境效益的重视程度, 越重视环境保护和治理, 权重越高。从已经发生或者政府政策文件所支持的绿色 PPP 与高收益项目的组合情况来看, 政府往往是以特许权形式授予企业高收益项目的经营权, 而并不参与高收益项目的收益分成, 因此高收益项目的社会福利包括两个部分: 企业的经济利润和消费者剩余。接下来给出绿色 PPP 项目组合中政府经济利润、企业经济利润、环境效益、消费者剩余以及社会福利的具体表达形式。

绿色 PPP 项目移交给政府后, 政府每年从中可以获得经济收益, 扣除向企业提供高收益项目的特许权的价值, 政府获得的经济利润的净现值表示为

$$NPV_g(T) = E_0 \left\{ \int_T^{T_e} (P_e^g - C_{et}) Q_{et}(P_e^g) e^{-rt} dt - A\chi \right\} \quad (1)$$

其中, E_0 为期望算子, A 为高收益项目特许权的数量, 例如土地的亩数, 经营养老或医疗等服务的地域面积, χ 为单位特许权的价值, r 为贴现率, 从 T 到 T_e 表示绿色 PPP 项目特许期结束移交给政府后, 政府运营的时间跨度。

企业只关心经济收益, 其净现值包括它们在绿色 PPP 项目的特许期内获得的经营性利润和从高收益项目的整个特许权存续期中获得的收入现值, 并扣除其初始投入成本

$$NPV_p(T) = E_0 \left\{ \int_{T_0}^T (1 - \tau)(P_e - C_{et}) Q_{et}(P_e) e^{-rt} dt + A \int_{T_0}^{T_h} (1 - \tau)(P_h - C_{ht}) Q_{ht}(P_h) e^{-rt} dt \right. \\ \left. - (1 - \alpha)(I_e + I_h)R - I_e - I_h \right\} \quad (2)$$

其中,从 T_e^0 到 T 表示项目建设完成到特许期结束的时间跨度,因此 $T - T_e^0$ 即为政府特许企业运营绿色 PPP 项目的年限;从 T_h^0 到 T_h 表示高收益项目从建设完成到特许权结束的时间跨度,因此 $T_h - T_h^0$ 为企业运营高收益项目的年限。

因高收益项目的引入是为了平衡绿色 PPP 项目的收益,盈利性水平必定较高,因此可以得出结论: $A \int_{T_h^0}^{T_h} (1 - \tau) (P_h - C_{ht}) Q_{ht}(P_h) e^{-rt} dt - (1 - \alpha) I_h R - I_h - A\chi > 0$, 即高收益项目收入的现值扣除初始投资和政府的特许权价值后大于 0, 否则企业方将不参与竞标。

从绿色 PPP 项目建设完成投入运营直至项目存续期结束,政府方每年从绿色 PPP 项目中获得环境效益 V_{et} , $t \in [T_e^0, T_e]$, 总环境效益为

$$EV(T) = q(T) \int_{T_e^0}^{T_e} \rho V_{et} e^{-rt} dt \quad (3)$$

其中, ρ 为政府赋予环境效益的权重, $q(T)$ 表示绿色 PPP 项目的质量, 质量越高, 生态环境保护作用越强, 环境效益越好。最终选择的特许期为 T , 而使企业利润最大化的特许期为 T_p^* , T 与 T_p^* 越靠近, 企业满意度越高, 越有动力改进绿色 PPP 项目的质量, 因此设定 $q(T)$ 为具有指数形式的衰减函数, 设定其最低值为 1, 即项目必须满足政府的最低质量要求

$$q(T) = 1 + e^{-(T-T_p^*)^2 / (\max |T-T_p^*|)^2}$$

其中 $T - T_p^*$ 表示 T 与 T_p^* 的偏离量, 除以 $(\max |T - T_p^*|)^2$ 是为了对特许期偏离程度进行归一化处理。可以看出, 在 $T = T_p^*$ 时, $q(T)$ 最大, 随着 T 偏离 T_p^* 越大, $q(T)$ 逐渐下降。从 (3) 式可以看出, 如果最终选择的特许期 T 为使企业利润最大的特许期 T_p^* , 则绿色 PPP 项目的质量达到最高, 此时能够收获最高的环境效益。

消费者剩余为消费者愿意支付与实际支付的差额 (Chen and Subprasom, 2007)。因此, 绿色 PPP 项目和高收益项目的消费者剩余之和为

$$SPL(T) = E_0 \left\{ \int_{T_e^0}^T (P_e^{e0} - P_e^c) Q_{et}(P_e^c) e^{-rt} dt + \int_T^{T_e} (P_e^{e0} - P_e^g) Q_{et}(P_e^g) e^{-rt} dt \right. \\ \left. + A \int_{T_h^0}^{T_h} (P_h^0 - P_h) Q_{ht}(P_h) e^{-rt} dt \right\} \quad (4)$$

其中, P_e^{e0} 表示绿色 PPP 项目的产品在企业特许运营期内消费者愿意支付的价格, P_e^{g0} 表示绿色 PPP 项目移交给政府后消费者愿意为产品支付的价格, P_h^0 为消费者对高收益项目的产品愿意支付的价格。根据消费者剩余的定义, $P_e^{e0} - P_e^c$ 和 $P_e^{g0} - P_e^g$ 分别表示绿色 PPP 项目移交前后单位产品的消费者剩余, 而 $P_h^0 - P_h$ 表示高收益项目中单位产品带来的消费者剩余。沿循 Zhang et al. (2018) 等研究, 假定 P_e^{e0} 、 P_e^{g0} 和 P_h^0 分别为实际价格 P_e^c 、 P_e^g 和 P_h 的增函数, 表示为 $P_e^{e0} = u(P_e^c)$ 、 $P_e^{g0} = u(P_e^g)$ 和 $P_h^0 = u(P_h)$ 。

社会福利 $SW(T)$ 为政府经济利润、企业经济利润、环境效益和消费者剩余的总和

$$SW(T) = NPV_g(T) + NPV_p(T) + EV(T) + SPL(T) \quad (5)$$

四、最优特许期均衡解

(一) 非合作博弈的均衡解

在非合作模式下,政府与企业均站在自身最优的角度独立决策,并不考虑二者的决策是否一致,是否能够建立契约关系。政府基于(5)式的社会福利最大化目标和净现值大于0的约束条件确立最优特许期

$$\begin{aligned} & \max_T SW(T) \\ & s. t. \quad SW(T) > 0 \end{aligned} \quad (6)$$

对政府的目标函数关于特许期 T 求一阶导数并令其为0

$$\begin{aligned} \partial SW(T) / \partial T = & (C_{eT} - P_e^{e0}) E_0 Q_{eT}(P_e^e) e^{-rT} + [(1 - \tau)(P_e^c - C_{eT}) + (P_e^0 - (P_e^d))] \\ & E_0 Q_{eT}(P_e^c) e^{-rT} + \frac{-2(T - T_p^*)}{(\max|T - T_p^*|)^2} e^{-(T - T_p^*)^2 / (\max|T - T_p^*|)^2} \int_{T_p^0}^{T_e} \rho V_{et} e^{-rt} dt = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

求解式(7)得到的最优特许期为社会福利目标函数的极值点,在理论上,使得社会福利最大的特许期截止时刻可能为该极值点,也可能为端点 T_e^0 或者 T_e 。

企业则基于(2)式的经济利润最大化和净现值大于0的约束确立最优特许期

$$\begin{aligned} & \max_T NPV_p(T) \\ & s. t. \quad NPV_p(T) > 0 \end{aligned} \quad (8)$$

用企业的目标函数关于特许期 T 求一阶导数得到

$$\partial NPV_p / \partial T = (1 - \tau)(P_e^c - C_{eT}) E_0 Q_{eT}(P_e^c) e^{-rT} = 0 \quad (9)$$

易知一阶导数在 $P_e^c - C_{eT} = 0$ 时为0,极值点出现在 $P_e^c = C_{eT}$ 时,从企业角度选择的最优特许期结束时刻要么为(9)式所求解得到的 T ,要么为端点 T_e^0 或者 T_e 。

然而,BOT项目的特点是政府赋予企业经营特许期,因此最优特许期不可能为 T_e^0 或者 T_e ,否则政府与企业将有一方不参与项目的运营。由此推知只有式(7)和(9)关于 T 的解相同,并且满足 $SW(T) > 0$ 和 $NPV_p(T) > 0$ 两个条件时,政府与企业才存在合作的可能。显然,式(7)和(9)同时成立具有偶然性,取决于多个参数是否恰好满足两式,这是一种“刀刃上的均衡”,导致政企很难达成合作,需要寻求新的方法来解决这一难题。

(二) 合作博弈的均衡解

为使绿色PPP项目组合能够得以实施,需要对政府与企业的博弈进行协调,将双目标问题转化为单目标问题,即双方都站在公平的角度上做出总体最优的决策。

一般地,将多目标规划转化为单目标规划的方法有目标函数简单线性加权法、主要目标法及理想点法等。本文参考孙国峰等(2017)选择理想点法,即使得主体获得的实际值和期望最优值之间的偏差平方和最小,其中政府期望目标为使(6)式最优的社会福利,企业期望目标为使(8)式最优的经济利润,因此总体目标可以表示为损失函数

$$\min_T L = \min_T \sum_{i=g,p} \frac{1}{2} \{ \lambda_g [SW(T) - SW(T_g^*)]^2 + \lambda_p [NPV_p(T) - NPV_p(T_p^*)]^2 \} \quad (10)$$

其中, $\lambda_i \in [0, 1]$, $i \in \{g, p\}$ 表示政府与企业的谈判能力, 如果政府处于完全主导地位, 则 $\lambda_g = 1$, $\lambda_p = 0$, 反之 $\lambda_g = 0$, $\lambda_p = 1$ 则表示企业处于完全主导地位; T_g^* 表示政府基于 (6) 式独立决策后选择的最优特许期; T_p^* 表示企业基于 (8) 式独立决策后选择的最优特许期。

由于损失函数为开口向上的二次函数, 必定存在极小值点, 因此存在唯一的最优特许期。使用损失函数对特许期 T 求一阶导数并令其为 0 得到最优特许期的 FOC 条件为

$$\lambda_g \left\{ \begin{aligned} & (C_{eT} - P_e^{g0}) E_0 Q_{eT}(P_e^g) e^{-rT} + [(1 - \tau)(P_e^c - C_{eT}) + (P_e^0 - P_e^g)] \\ & E_0 Q_{eT}(P_e^c) e^{-rT} - \frac{2(T - T_p^*)}{(\max |T - T_p^*|)^2} e^{-(T - T_p^*)^2 / (\max |T - T_p^*|)^2} \int_{T_p^*}^{T_e} \rho V_{et} e^{-rt} dt \end{aligned} \right\} [SW(T) - SW(T_g^*)] \\ + \lambda_p (1 - \tau)(P_e^c - C_{eT}) E_0 Q_{eT}(P_e^c) e^{-rT} [NPV_p(T) - NPV_p(T_p^*)] = 0 \quad (11)$$

(11) 式关于特许期 T 的非线性特征使得我们无法获得最优特许期的解析解, 本文将在第六部分进行数值计算。当然, 由 (11) 式可知最优特许期主要取决于如下参数: 高收益项目的特许权数量 A 、初始投资金额 I 、绿色 PPP 项目产品价格 P_e^c 和 P_e^g 、高收益项目的产品价格 P_h 、平均成本的相关参数、贴现率 r 、政府赋予环境效益的权重 ρ 、需求函数的相关参数等。当然, 将双目标优化转化为单目标优化时最优特许期 T 必定与企业单独决策时选择的最优值 T_p^* 不同, 此时获得的环境效益低于环境效益理论最高值, 但却能使绿色 PPP 项目组合的契约签订并实施, 真正收获环境效益, 达到环境保护目的。

五、与传统政府直接补贴激励方式的比较

传统上政府主要采用直接补贴¹的方式激励企业参与 PPP 项目的竞标, 为了论证我国政府提出的绿色 PPP 搭配高收益项目方式的优越性, 本部分将其与传统的政府直接补贴激励方式进行比较分析。

首先假定两种激励方式下最优特许期相同, 分析政府经济利润、企业经济利润、环境效益、消费者剩余以及社会福利的差异。为了对比分析, 需要固定政府激励成本, 即假定政府直接补贴激励方式中的补贴金额与绿色 PPP 搭配高收益项目组合中政府提供高收益项目特许权的价值相同, 均为 $A\chi$ 。

在政府直接补贴激励方式下, 政府获得的经济利润 $NPV_g^S(T)$ 为从绿色 PPP 项目中获得的经济利润扣除给予企业的补贴

$$NPV_g^S(T) = E_0 \left\{ \int_T^{T_e} (P_e^g - C_{et}) Q_{et}(P_e^g) e^{-rt} dt - A\chi \right\} \quad (12)$$

企业利润 $NPV_p^S(T)$ 为从绿色 PPP 项目中获得的经济利润与政府直接补贴金额之和

¹ 政府直接补贴既可以为一次性补贴, 也可以为分年度补贴; 既可以按照每年固定金额补贴, 也可以变动金额补贴 (Wang et al., 2018; Jin et al., 2021)。本文考虑政府初始一次性补贴方式, 分期补贴形式可以通过贴现为现值与一次性补贴进行等价分析。

$$NPV_p^S(T) = E_0 \left\{ \int_{T_p^0}^T (1 - \tau) (P_e^c - C_{eT}) Q_{eT}(P_e^c) e^{-rt} dt \right. \\ \left. - (1 - \alpha) (I_e) R - I_e + A\chi \right\} \quad (13)$$

环境效益 $EV^S(T)$ 为

$$EV^S(T) = q(T) \int_{T_p^0}^{T_e} \rho V_{eT} e^{-rt} dt \quad (14)$$

消费者剩余 $SPL^S(T)$ 为在(4)式的基础上扣除高收益项目的部分,即只有绿色 PPP 项目产出的产品或服务能够带来消费者剩余

$$SPL^S(T) = E_0 \left\{ \int_{T_p^0}^T (P_e^{g0} - P_e^c) Q_{eT}(P_e^c) e^{-rt} dt + \int_T^{T_e} (P_e^{g0} - P_e^g) Q_{eT}(P_e^g) e^{-rt} dt \right\} \quad (15)$$

社会福利 $SW^S(T)$ 为政府经济利润、企业经济利润、环境效益和消费者剩余四部分之和

$$SW^S(T) = NPV_g^S(T) + NPV_p^S(T) + EV^S(T) + SPL^S(T) \quad (16)$$

从式(12) - (16)与(1) - (5)的对比可以发现,如果最优特许期 T^* 相同,与绿色 PPP 搭配高收益项目的激励方式相比,政府直接补贴方式下政府的经济利润不变,企业的经济利润下降,消费者剩余减少,社会总福利减少。

接下来对两种激励方式下绿色 PPP 项目的最优特许期选择进行对比分析。在政府直接补贴激励方式下,对损失函数(10)关于绿色 PPP 项目的特许期 T 求一阶导使其最小化,得到的一阶条件((17)式)与前文绿色 PPP 搭配高收益项目激励下的一阶条件((11)式)在形式上非常相似

$$\lambda_g \left\{ (C_{eT} - P_e^{g0}) E_0 Q_{eT}(P_e^g) e^{-rT} + [(1 - \tau) (P_e^c - C_{eT}) + (P_e^{g0} - P_e^c)] \right. \\ \left. E_0 Q_{eT}(P_e^c) e^{-rT} - \frac{2(T - T_p^*)}{(\max |T - T_p^*|)^2} e^{-(T - T_p^*)^2 / (\max |T - T_p^*|)^2} \int_{T_p^0}^{T_e} \rho V_{eT} e^{-rt} dt \right\} [SW^S(T) - SW^S(T_g^*)] \\ + \lambda_p (1 - \tau) (P_e^c - C_{eT}) E_0 Q_{eT}(P_e^c) e^{-rT} [NPV_p^S(T) - NPV_p^S(T_p^*)] = 0 \quad (17)$$

通过对比可以发现,(17)式中除 $SW^S(T) - SW^S(T_g^*)$ 和 $NPV_p^S(T) - NPV_p^S(T_p^*)$ 与(11)式中的 $SW(T) - SW(T_g^*)$ 和 $NPV_p(T) - NPV_p(T_p^*)$ 不同以外,其他参数和变量均与(11)式相同,这表明两种激励方式下最优特许期的差异仅取决于这四个差式两两之间的差异。从前文分析可知,两种激励方式下, $SW(T)$ 与 $SW^S(T)$ 的差异仅仅是与高收益项目或政府补贴金额有关的部分,而这些部分与绿色 PPP 项目的特许期 T 无关,因此在计算 $SW(T) - SW(T_g^*)$ 和 $SW^S(T) - SW^S(T_g^*)$ 后差异部分被消除,因此 $SW(T) - SW(T_g^*)$ 和 $SW^S(T) - SW^S(T_g^*)$ 相同。同理可推知 $NPV_p^S(T) - NPV_p^S(T_p^*)$ 与 $NPV_p(T) - NPV_p(T_p^*)$ 也相同。

综上所述,(17)式与(11)式的各个组成部分均相同,由此推知两种激励方式下的最优特许期也相同,再结合前述讨论可以得出结论:如果政府激励成本相同,则绿色 PPP 搭配高收益项目与政府直接补贴两种激励方式下绿色 PPP 项目的最优特许期也相同,但绿色 PPP 搭配高收益项目方式下的消费者剩余和社会福利都更高,原因是高收益项目的引

入带动了企业更多的投资,生产出更多的产品或服务,使得消费者剩余增加,社会福利增加。这表明,同样的财政负担,从改进社会福利角度看,绿色 PPP 搭配高收益项目的激励方式优于传统政府直接补贴的激励方式,值得进一步推广。第六部分将使用数值模拟方式给出上述结论的直观表示。¹

六、模拟分析

本文以某绿色 PPP 搭配高收益项目为例,说明绿色 PPP 项目组合最优契约模型的运行原理。国内某地区由政府牵头建立绿色 PPP 项目,计划建成后销售某种绿色产品或服务。该绿色 PPP 项目总投资额 3.49 亿元,因建设耗资量大,为吸引企业参与竞标,政府配置了高收益项目加以平衡,该高收益项目的开发预计需要投资 0.5 亿元。绿色和高收益项目均由企业投资,初始投资比例 α 为 30%,其他资金向银行借款,贷款利率 R 为 4.9%,且企业负责组建项目建设运营公司、管理、特许经营期内的运营、维护,绿色 PPP 项目特许经营期满移交给政府。高收益项目中,政府向企业提供特许权,特许权数量为 100 单位,单位特许权价值为 60000 元,特许权授予期限 T_h 为 40 年。

绿色 PPP 项目建成后,每年产品或服务的销售量为价格的函数, $Q_{et} = 54750000 - 1.5P_e + \varepsilon_{et}$ 。在项目特许期内,产品价格为 4.2 元,政府运维期间,价格降低至 4 元。对于高收益项目,企业预计开发后单位特许权所生产产品或服务的销售量关于价格的函数为 $Q_{ht} = 70630 - 3P_h + \varepsilon_{ht}$,产品的价格 P_h 为 2 元。 ε_{et} 和 ε_{ht} 分别为绿色 PPP 和高收益项目所生产产品或服务销售量的随机部分,假定它们服从均值为 0、方差分别为 100 和 80 的正态分布, $\varepsilon_{et} \sim N(0, 100)$, $\varepsilon_{ht} \sim N(0, 80)$ 。考虑到随机性问题,使用蒙特卡洛模拟 (MCMC) 方法进行计算,每次模拟包含 1000 次随机抽样。此外,企业的投资收益需要缴纳税率 τ 为 5% 的税收,且在构建项目组合时,政府与企业具有同样的谈判能力。

绿色 PPP 项目获得的环境福利由受益的居民数量乘以政府赋予环境效应的权重以及绿色 PPP 项目的质量系数 $q(T)$ 来度量,该地区常住人口约为 125 万人,政府赋予环境效应的权重为 3。贴现率 r 取为现行的长期贷款基准利率 4.9%。预期绿色 PPP 项目的最长可服务年限为 57 年。为计算消费者剩余,参考 Zhang et al. (2018) 定义消费者对两类项目产品的价格估值与实际出售价格的关系分别为 $P_e^c = 1.5P_e^s$, $P_e^s = 1.5P_e^g$, $P_h^c = 1.5P_h^s$ 。关于两类项目后期的运维成本,参照 Zhang et al. (2016) 的研究假定为 U 形曲线,因为早期的设备较新,维护费用较低,而且随着管理者经验的积累会使成本逐年降低,但后期设备不断折旧、老化,运维成本不断增加,因此设定绿色 PPP 项目的成本曲线为 $C_{et} = a_e t^2 + b_e t + c_e$,设定高收益项目的成本曲线为 $C_{ht} = a_h t^2 + b_h t + c_h$ 。

根据项目的基本信息可以获得模型的参数值为: $P_e^c = 4.2$ 元, $P_e^s = 4$ 元, $A = 100$ 单

¹ 全文公式的推导过程和运算代码可向作者索取。

位, $\chi = 60000$ 元, $P_h = 2$ 元, $I_h = 0.5$ 亿元, $I_e = 3.49$ 亿元, $\rho = 3$, $V_{et} = 125$ 万人, $a_e = 0.005$, $b_e = -0.05$, $c_e = 3$, $a_h = 0.01$, $b_h = -0.8$, $c_h = 8$, $r = 4.9\%$, $R = 4.9\%$, $\alpha = 0.3$, $\lambda_g = \lambda_p = 0.5$, $T_h = 40$ 年, $T_e = 57$ 年, $\tau = 5\%$, $T_e^0 = 1$ 年, $T_h^0 = 1$ 年。

我们模拟了绿色 PPP 搭配高收益项目中政府与企业不合作、合作以及政府补贴激励方式下的损失函数、社会福利、政府利润、企业利润、消费者剩余和环境效益的净现值,求得各种情景下的最优特许期,并考虑绿色 PPP 项目移交后价格变动对最优特许期的影响。

经数值计算,当政府与企业不进行合作博弈时,政府基于期望社会福利净现值最大化来选择特许期,企业则基于利润净现值最大来选择特许期,从图 1 可以看出,社会福利随着特许期的延长而增加,因此政府选择的最优特许期为 57 年,图 2 则显示企业选择的最优特许期为 21 年,即企业只希望建设和运营项目 21 年(建设期 T_e^0 为 1 年,运营期为 20 年)后移交给政府。因此,如果不引入合作机制,政府和企业双方无法形成一个共同的最优特许期,无法达成合作协议,绿色 PPP 项目组合也无法实施。

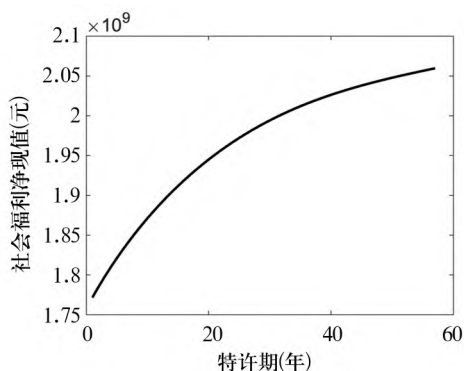


图 1 非合作博弈下的社会福利净现值

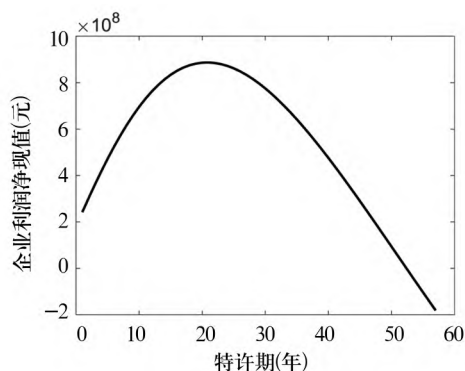


图 2 非合作博弈下的企业利润净现值

在政府与企业合作的情况下,当为二者赋予相同的谈判能力参数时,无任何一方具有更大的谈判优势,它们完全协调合作,即双方都站在总体最优的角度做出决策,此时目标为(10)式的损失函数最小,图 3 展示了损失函数随特许期的变动情况,此时合作博弈的双方能够达成统一,最优特许期为 26 年,即企业建设并运营绿色 PPP 项目 26 年,期满后移交给政府。

接下来对绿色 PPP 搭配高收益项目的激励方式与传统的政府直接补贴激励方式进行对比分析,图 4 与图 3 的对比结果验证了第五部分的结论,即两种激励方式下决定最优特许期的一阶条件相同,最优特许期也相同,均为 26 年。

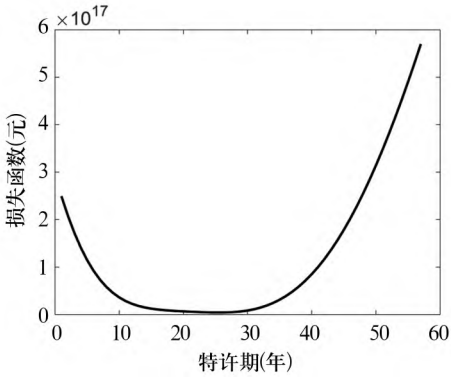


图3 绿色 PPP 搭配高收益项目激励下的最优特许期

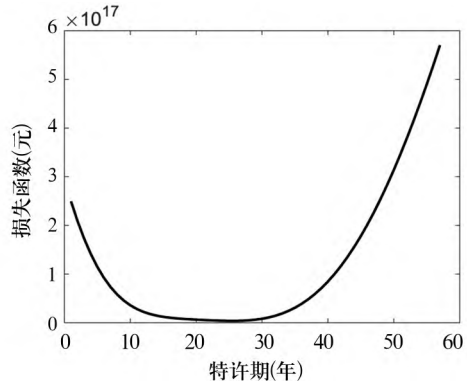
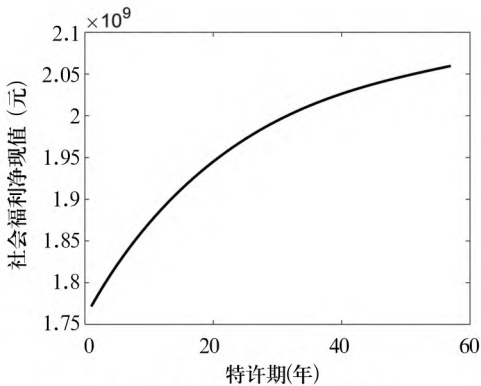
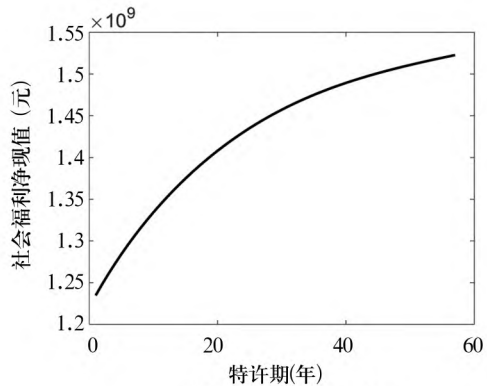


图4 政府直接补贴激励下的最优特许期

进一步对两种激励方式下的社会福利、环境效益、消费者剩余、政府经济利润和企业经济利润的净现值进行比较。结果显示,在绿色 PPP 搭配高收益项目的激励方式下,社会福利较政府补贴方式下更高(图 5),环境效益相同(图 6),消费者剩余更高(图 7),政府经济利润不变(图 8),企业利润也更高(图 9)。这些结果支撑了前文结论:绿色 PPP 搭配高收益项目的激励方式优于政府补贴的激励方式。



(a) 绿色 PPP 搭配高收益项目激励



(b) 政府直接补贴激励

图5 两种激励方式下社会福利净现值

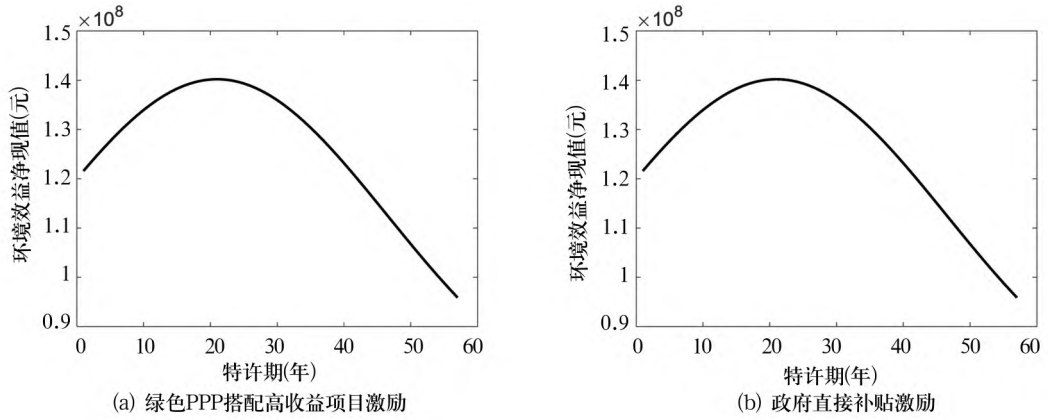


图6 两种激励方式下环境效益净现值

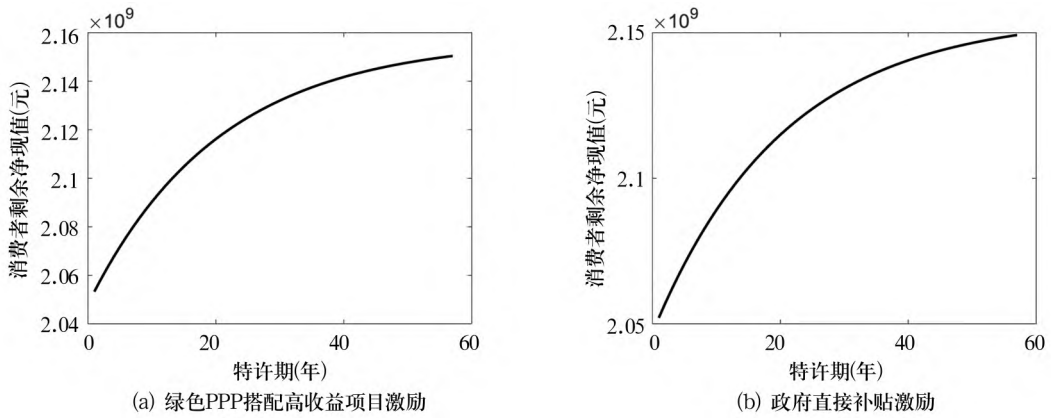


图7 两种激励方式下消费者剩余净现值

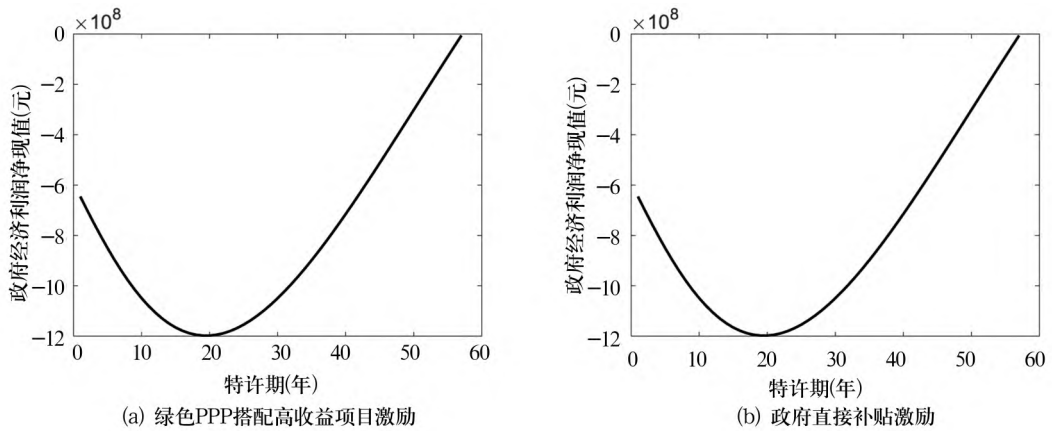


图8 两种激励方式下政府经济利润净现值

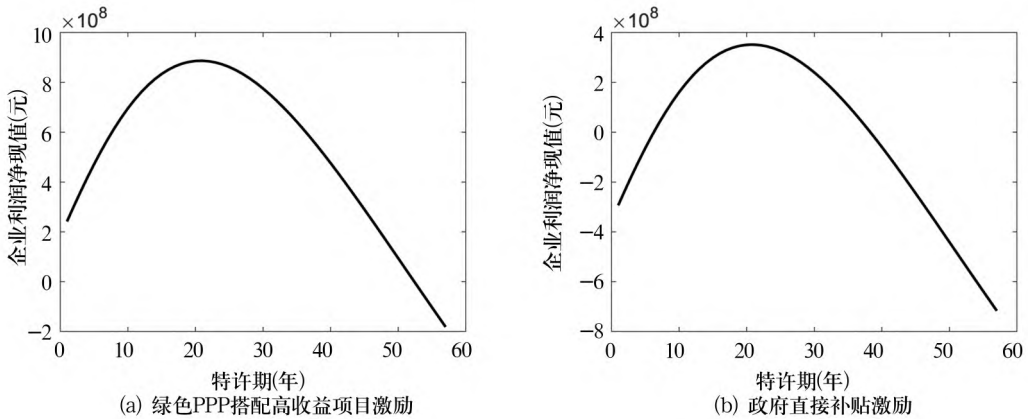


图9 两种激励方式下企业利润净现值

此外,我们还考虑了绿色 PPP 项目移交后,产品价格发生变动的情形。图 10 结果显示,随着移交后政府经营时设定价格的增长,最优特许期下降。因为在移交后,如果价格增加,政府能够从中获得更多的社会福利,因此会选择减少特许期,即减少授予企业经营的年限,使政府经营的时间加长,带来更多的政府利润和社会福利。

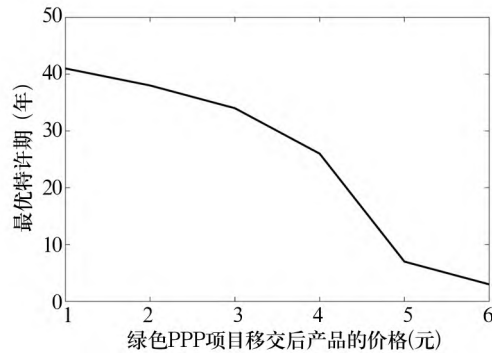


图10 绿色 PPP 项目移交后价格变动对最优特许期的影响

七、结论与政策建议

本文基于经济与环境效益双赢目标,针对我国提出的绿色 PPP 搭配高收益项目的激励方式,构建了特许期决策模型,从理论上系统阐释博弈均衡的存在性以及最优特许期的形成逻辑和关键决定因素,并论证了该激励方式在改进社会福利上具备的优越性。在当前我国构建绿色金融体系、推进碳达峰和碳中和战略目标的背景下,研究结论为政府引导和激励社会资本投资绿色领域、强化生态环境保护提供了一定的理论基础和设计框架。

理论与模拟研究表明:绿色 PPP 搭配高收益项目的激励方式能够提高企业利润净现

值,吸引社会资本参与绿色 PPP 项目建设,实现环境保护目标。但政企契约能否顺利签订则取决于双方博弈决策模式,如果两者独立决策并将对方决策作为外生结果,尽管使企业利润最大的特许期也能够实现最高的环境效益,但此时博弈结果展现为“刀刃上的均衡”,双方难以达成一致的最优特许期,也就难以吸引企业参与竞标绿色 PPP 项目,环境效益无法达成。如果政企能够协调合作进行决策,通过引入约束机制将单独决策时的多目标优化转化为单目标优化问题,则双方达成一致的最优特许期,契约得以订立,政府通过向企业方让渡经济利润收获环境效益,最终实现经济与环境福利的双赢,全社会福利得以改进。当然,企业的谈判能力、贴现率、高收益项目的预期收益率和政府的环保偏好权重等均对绿色 PPP 项目最优特许期的选择乃至社会福利具有影响。此外,与以往政府直接补贴的激励方式相比较,激励成本相同时,收获同样的环境效益,绿色 PPP 搭配高收益项目激励方式下消费者剩余和社会福利均得到提升。

本文研究结论对我国当前加强绿色金融体系建设、引导资金流向生态环境保护领域实现绿色发展具有一定的政策启示。首先,研究促成政府与企业协调合作的行为约束机制。在绿色 PPP 搭配高收益项目时,相应契约需要构建一个合理的规则约束或者推行第三方评价制度来约束政府和企业均站在全局最优视角进行谈判和决策,如本文提出的纳入了政企双方利益考量的损失函数最小化的目标约束,对不遵守规则的一方予以惩罚,促使政企协同形成合力,既相互补充,又相互制约,推动绿色 PPP 项目组合契约关系的建立。其次,加强绿色 PPP 搭配高收益项目激励方式的推广。我们的研究结论证实,与政府直接补贴相比,绿色 PPP 搭配高收益项目既能够提升消费者剩余改进社会福利,又较好地应对了财政负担加重的挑战。因此可以将此种激励方式纳入到具体措施体系,加强政策倾斜与指导,引导将关联性较强、上下游联动项目或邻近子项目合理捆绑打包,逐步替代或减少政府直接补贴,用多元化的资金持续地支持环保产业,使其成为实现碳达峰和碳中和战略目标的有力工具,更好地服务于绿色经济与高质量发展。

参 考 文 献

- [1]曹启龙、盛昭瀚、周晶和刘慧敏,2016,《公平偏好下 PPP 项目多任务激励问题研究》,《预测》第 1 期,第 75~80 页。
- [2]陈国进、丁赛杰、赵向琴和蒋晓宇,2021,《中国绿色金融政策、融资成本与企业绿色转型——基于央行担保品政策视角》,《金融研究》第 12 期,第 75~95 页。
- [3]高颖、张水波和冯卓,2014,《不完全合约下 PPP 项目的运营期延长决策机制》,《管理科学学报》第 2 期,第 48~57+94 页。
- [4]罗煜、王芳和陈熙,2017,《制度质量和国际金融机构如何影响 PPP 项目的成效——基于“一带一路”46 国经验数据的研究》,《金融研究》第 4 期,第 61~77 页。
- [5]吕萍、李晴和宋吟秋,2015,《考虑运营成本的收费公路 Pareto 有效 BOT 合同决策》,《系统工程理论与实践》第 7 期,第 1808~1815 页。
- [6]宋金波、王若宇和宋丹荣,2014,《高速公路 BOT 项目特许期决策模型》,《系统工程》第 2 期,第 91~97 页。
- [7]苏冬蔚和连莉莉,2018,《绿色信贷是否影响重污染企业的投融资行为》,《金融研究》第 12 期,第 123~137 页。
- [8]孙国峰、尹航和柴航,2017,《全局最优视角下的货币政策国际协调》,《金融研究》第 3 期,第 54~71 页。

- [9]王遥、潘冬阳、彭俞超和梁希,2019,《基于 DSGE 模型的绿色信贷激励政策研究》,《金融研究》第 11 期,第 1~18 页。
- [10]文书洋、张琳和刘锡良,2021,《我们为什么需要绿色金融?——从全球经验事实到基于经济增长框架的理论解释》,《金融研究》第 12 期,第 20~37 页。
- [11]燕雪、徐媛、盛昭瀚、王歌和徐峰,2017,《不同合作状态下交通特许经营项目特许期决策模型》,《中国管理科学》第 11 期,第 103~110 页。
- [12]杨晓冬和张家玉,2019,《既有建筑绿色改造的 PPP 模式研究:演化博弈视角》,《中国软科学》第 3 期,第 183~192 页。
- [13]周永圣、梁淑慧、刘淑芹和王珏,2017,《绿色信贷视角下建立绿色供应链的博弈研究》,《管理科学学报》第 12 期,第 87~98 页。
- [14]An, X., H. Li, L. Wang, Z. Wang, J. Ding, and Y. Cao. 2018. "Compensation Mechanism for Urban Water Environment Treatment PPP Project in China" *Journal of Cleaner Production*, 201: 246~253.
- [15]Bao, H., Y. Peng, J. H. Ablanado-Rosas, and H. Gao. 2015. "An Alternative Incomplete Information Bargaining Model for Identifying the Reasonable Concession Period of a BOT Project" *International Journal of Project Management*, 33(5): 1151~1159.
- [16]Chen, A., and K. Subprasom. 2007. "Analysis of Regulation and Policy of Private Toll Roads in a Build-Operate-Transfer Scheme under Demand Uncertainty" *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 41(6): 537~558.
- [17]Jin, H., S. Liu, J. Sun, and C. Liu. 2021. "Determining Concession Periods and Minimum Revenue Guarantees in Public-Private-Partnership Agreements" *European Journal of Operational Research*, 291(2): 512~524.
- [18]Khanzadi, M., F. Nasirzadeh, and M. Alipour. 2012. "Integrating System Dynamics and Fuzzy Logic Modeling to Determine Concession Period in BOT Projects" *Automation in Construction*, 22: 368~376.
- [19]Ngee, L., R. L. Tiong, and J. Alum. 1997. "Automated Approach to Negotiation of BOT Contracts" *Journal of Computing in Civil Engineering*, 11(2): 121~128.
- [20]Shen, L., H. Bao, Y. Wu, and W. Lu. 2007. "Using Bargaining-Game Theory for Negotiating Concession Period for BOT-Type Contract" *Journal of Construction Engineering and Management*, 133(5): 385~392.
- [21]Shen, L., H. Li, and Q. Li. 2002. "Alternative Concession Model for Build Operate Transfer Contract Projects" *Journal of Construction Engineering and Management*, 128(4): 326~330.
- [22]Wang, F., M. Xiong, B. Niu, and X. Zhuo. 2018. "Impact of Government Subsidy on BOT Contract Design: Price, Demand, and Concession Period" *Transportation Research Part B: Methodological*, 110: 137~159.
- [23]Wang, Y., and J. Liu. 2015. "Evaluation of the Excess Revenue Sharing Ratio in PPP Projects Using Principal-Agent Models" *International Journal of Project Management*, 33(6): 1317~1324.
- [24]Wu, Y., C. Xu, L. Li, Y. Wang, K. Chen, and R. Xu. 2018. "A Risk Assessment Framework of PPP Waste-to-Energy Incineration Projects in China under 2-Dimension Linguistic Environment" *Journal of Cleaner Production*, 183: 602~617.
- [25]Xu, Y., C. Sun, M. J. Skibniewski, A. P. Chan, J. F. Yeung, and H. Cheng. 2012. "System Dynamics (SD)-Based Concession Pricing Model for PPP Highway Projects" *International Journal of Project Management*, 30(2): 240~251.
- [26]Xue, Y., and G. Wang. 2020. "Analyzing the Evolution of Cooperation among Different Parties in River Water Environment Comprehensive Treatment Public-Private Partnership Projects of China" *Journal of Cleaner Production*, 270: 1~14.
- [27]Ye, S., and R. L. Tiong. 2003. "The Effect of Concession Period Design on Completion Risk Management of BOT Projects" *Construction Management and Economics*, 21(5): 471~482.

- [28] Zhang, X. 2011. "Web - Based Concession Period Analysis System", *Expert Systems with Applications*, 38(11): 13532 ~ 13542.
- [29] Zhang, X., H. Bao, H. Wang, and M. Skitmore. 2016. "A Model for Determining the Optimal Project Life Span and Concession Period of BOT Projects", *International Journal of Project Management*, 34(3): 523 ~ 532.
- [30] Zhang, Y., Z. Feng, and S. Zhang. 2018. "The Effects of Concession Period Structures on BOT Road Contracts", *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 107: 106 ~ 125.

The Optimal Contract for Green PPP Project Portfolios: A Welfare Perspective for Economic and Environmental Effects

WEI Xiaoyun HAN Liyan

(School of Statistics, Capital University of Economics and Business;
School of Economics and Management, Beihang University)

Summary: Green finance serves green investment, which serves the green economy. In practice, there is a huge demand for funds to develop green finance and promote environmental protection. In addition, it is unsustainable to rely solely on government financial support. Therefore, an important solution for this problem is public-private partnerships (PPP), in which the government and enterprises work together. However, enterprises are not enthusiastic participants of pollution prevention, green, and low-carbon PPP projects because they generally experience problems such as high investment thresholds, competition homogeneity, and high market risk.

Although the direction of the new incentive method is clear, relying only on the traditional PPP contract framework is insufficient to manage the complex problems that arise when managing project portfolios. Thus, the contract model for traditional single-commercial PPP projects cannot be directly adopted. The key issues involved in the green PPP project portfolio are as follows: What elements must be considered when concluding the contract? What coordination mechanism must be selected to ensure that the contract is signed? Is there an optimal concession period for green PPP projects? Is the green PPP project portfolio better than the traditional incentive mechanisms of direct government subsidies? Exploring these issues will provide a good theoretical basis and technical support for the promotion and implementation of the combination of green PPP and high-yield projects.

This paper uses the net present value method to propose a decision-making model for the optimal concession period of green PPP project portfolios based on the win-win goal of economic and environmental benefits. Our model differs from those of the literature in three dimensions. First, we introduce environmental benefits and extend the optimal concession period model for a single PPP project to the green PPP project portfolio. The goals of combining green PPP and high-yield projects include social welfare, environmental benefits, consumer surplus, and economic profits of enterprises and the government. Second, we compare the different game modes between the government and the enterprises, demonstrate the existence of an equilibrium, reveal the internal logic and key determinants of the optimal concession period, and provide a basic framework

for the contract design of the green PPP project portfolio. Third, through a scenario analysis, we show the superiority of the green PPP project portfolio over the traditional incentive mechanism of direct government subsidies. The results provide theoretical support for promoting the combination of green PPP and high-yield projects.

We obtain three important results. First, the combination of green PPP and high-yield projects can improve enterprise profits and stimulate social capital to participate in environmental governance and deal with environmental risks. Second, whether the government-enterprise contract can be signed successfully depends on the game decision-making mode. If the decision is made independently, although the concession period that maximizes enterprise profits can also achieve the highest environmental benefits, the game results are shown as “equilibrium on the edge” and it is difficult for both parties to enter into a contract. Therefore, it is necessary to study the behavioral restraint mechanism to promote coordination and cooperation between the government and enterprises. PPP stakeholders can then decide from a global optimal perspective and achieve a win-win situation of mutual economic profit and environmental protection. Third, compared with direct government subsidies, the combination of green PPP and high-yield projects not only increases consumer surplus and improves social welfare, but also copes better with the fiscal burden. Therefore, policy guidance could be strengthened to manage the reasonable bundling of projects with strong correlation, upstream and downstream links, or adjacent sub-projects. Some direct government subsidies will gradually be replaced by the combination of green PPP and high-yield projects. The diversified funds can then be used to provide continuous support for environmental protection, achieve the goals of emission peak and carbon neutrality, and better serve the green economy and sustainable development.

Keywords: Green PPP Project, Public-Private Partnership, Optimal Concession Period, Green Finance, Environmental Risk

JEL Classification: G28, Q58, D61

(责任编辑:王 鹏)(校对:WH)