

引用格式:黄定轩,谭斌强.“以邻为壑”如何迈向“同舟共济”——基于量子博弈的区域大气污染府际间协同治理研究[J].技术经济,2024,43(7):1-17.

HUANG Dingxuan, TAN Binqiang. From neighbors to partners: Research on inter-governmental collaborative governance of regional air pollution based on quantum game[J]. Journal of Technology Economics, 2024, 43(7): 1-17.

“以邻为壑”如何迈向“同舟共济”

——基于量子博弈的区域大气污染府际间协同治理研究

黄定轩,谭斌强

(重庆理工大学管理学院,重庆 400054)

摘要:区域大气污染协同治理往往存在搭便车现象,针对如何有效解决这一问题,本文借助量子博弈理论构建了双异质政府的量子博弈模型,对是否考虑态的纠缠分别讨论,并通过策略拓展将博弈结果锁定于量子版的双方合作策略,最后基于量子策略和量子纠缠的解读,对府际协同的“纠缠协议”做了明确规定。研究表明:纠缠态和量子策略可以有效解决政府“搭便车”行为,因为量子纠缠和量子策略通过利益关联和指标量化,避免了“道德风险”问题,强化了政府双方履行自身职责的约束力。根据研究结论,本文提出推动地方政府数字化转型,建立空气质量信息共享平台;完善大气污染协同治理绩效评估及问责机制和培养区域认同感、建立府际信任三点管理启示,为我国推进区域大气污染协同治理提供了决策参考。

关键词:区域大气污染;协同治理;“搭便车”;量子博弈;量子纠缠

中图分类号: C931 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-980X(2024)07-0001-17

DOI: 10.12404/j.issn.1002-980X.J23111405

一、引言

传统的行政区划、各自为政的属地治理模式难以应对大气污染的复合性、跨界性等特征。因此,推进整个区域的府际协同治理是纾解区域大气治理困境的关键^[1]。“十四五”规划也明确提出,要切实提高环境治理效能,强化区域协同治理。区域协同治理也称府际协同治理,是指区域政府之间通力合作,整合资源,共享利益和共担风险,实现整体治理效果的最大化^[2]。

学者们对区域大气污染协同治理的研究主要从府际关系^[1,3-4]、协同政策^[5-7]和协同效果检验^[8-10]三个层面展开。例如,在府际关系层面,景熠等^[3]通过建立府际间信任的三方演化博弈,指出地方政府之间的信任程度是影响大气污染协同治理关系稳定性的关键因素;与之方法类似的还有,王江和王鹏^[1]分别构建生态属地治理模式与府际生态协同治理模式的博弈模型,验证了府际生态协同治理效果优于属地治理。此外,关于大气污染协同政策方面的研究,学者们主要基于大气污染协同治理政策文本数据的量化分析,研判当前区域大气污染治理政策的协同程度。研究结论显示:当前治理政策的协同度不足,政策目标、政策措施的协同度有待提高^[5-6]。而对于协同治理效果检验的研究则主要基于面板数据,并利用双重差分模型进行协同治理前后的效果检验。例如,崔和瑞和辛媛等^[11]基于284个地级市2005—2020年的数据,构建双重差分模型评估区域协同治理政策的减排效果,结果显示经济发达地区的政策效果高于欠发达地区,指出政策执行中的区域异质性(如经济发展水平和环境污染程度等)不容忽视。Zhang等^[2]也得出了相似的结论。

虽然以上学者在大气污染协同治理方面贡献了丰富的研究成果,提供了一系列的环境规制政策以促进府际间协同治理,但依然无法对协同双方形成较强约束力。一方面,以“晋升锦标赛”为代表的人事任免制

收稿日期:2023-11-14

基金项目:国家社会科学基金“基于量子博弈的传感器公共服务平台价值共创协同机制研究”(21XGL002)

作者简介:黄定轩,博士,重庆理工大学管理学院研究员,研究方向:项目管理和量子博弈理论应用;(通信作者)谭斌强,重庆理工大学硕士研究生,研究方向:协同治理。

度促使地方政府最大限度地追求经济增长而忽略环境治理问题^[12],无序的府际博弈还有可能促使地方政府将污染源迁至边界地区或放宽对边界区域的环境监管,引发环境污染的“以邻为壑”现象^[13];另一方面,在污染物来源难以界定的情况下,大气污染治理过程中极易发生“搭便车”行为,且随着大气污染协同治理集体规模的扩大,极易产生较高的交易成本,进一步加剧“搭便车”问题,最终导致“集体行动困境”^[14]。因此,大气污染协同治理的核心问题就在于如何化解区域内各地方政府的集体行动困境,解决“搭便车”问题^[15]。

许多学者采用博弈论的方法解决“搭便车”问题,研究主要关注奖励、惩罚、信息披露和生态补偿机制等方面。例如,Xue等^[16]在研究城市群政府合作博弈中指出采取惩罚措施能较有效的遏制背叛行为。同样地,王江等^[1]基于演化博弈指出对“严格执行治理要求”者进行奖励、补偿,对“被动执行治理要求”者进行处罚可以减少机会主义行为。贺一堂等^[17]在研究产学研协同创新中指出信息披露可以在一定程度上解决协同过程中的搭便车行为。此外,景熠等^[3]基于信任博弈提出,给予那些为了维护区域整体大气环境利益而牺牲自身经济发展利益的地方政府适当的生态补偿可以提高他们的治理积极性。通过总结以上文献得出,奖惩机制可以减少机会主义行为,补偿机制可以提高协同合作的积极性,信息披露机制可以在一定程度上缓解搭便车的问题。然而,这些机制都存在一定的局限性,如奖惩机制的作用有限、信息披露存在主观性^[18]、生态补偿机制会导致例如寻租的低效率现象^[19]。此外,传统博弈理论的策略选择是“合作-不合作”的二元策略集,而实际上,政府的合作意愿是一个连续策略集,存在介于“合作”与“不合作”中间的状态,类似于量子力学中的叠加和纠缠^[14]。随着人们对量子力学和量子信息论的研究,一种新的博弈论形式——量子博弈论开辟了一个广阔的应用领域。

量子博弈论是以量子信息论为工具研究博弈论的跨学科理论^[20]。跨学科的性质使得量子博弈相较于经典博弈具备一定的优势,并解决一些经典博弈论无法解决的问题^[21]。Meyer等^[22]的研究表明,在硬币翻转博弈中采用量子策略的参与者总是可以战胜采用经典策略的对手;Eisert等^[23]发现,在囚徒困境博弈中通过量子纠缠的引入,经典博弈中存在的个体理性与集体理性的矛盾消失了。自1999年出现量子硬币翻转游戏^[22]和Eiser等^[23]解决囚徒困境的量子博弈模型以来,量子博弈已被应用于经济学^[24]、信息科学^[25]等领域。基于这两个基本模型,又相继产生了如性别之战博弈量子模型^[26]、量子演化模型^[27]、量子博弈猎鹿模型^[28]等。近些年来,国内学者也做了一系列相关研究。例如,刘霞等^[29]运用考虑量子纠缠的量子博弈方法,克服了金融市场的监管困境。贺一堂等^[17]用量子博弈研究产学研协同创新激励机制,解决了努力程度不可观测造成的“道德风险”问题。黄定轩等^[30]基于量子演化模型实现了协调博弈的帕累托最优。总之,量子博弈采用态叠加和量子纠缠原理,能够解决经典博弈中存在的难题,例如拓宽策略范围、消除困境、改善结果等,它为解决异质政府在大气污染协同治理中的行动困境提供了新的思路。

基于上述分析,本文拟解决以下关键问题:

- (1) 利用量子博弈的分析范式研究大气污染府际协同治理问题是否合理?
- (2) 量子机制能否消除异质政府在区域大气污染协同治理中的搭便车行为?
- (3) 如果可以,如何利用量子机制约束地方政府的行为,激励双方积极参与区域协同治理?

相较于现有研究,本文的创新之处在于:①将博弈论与量子力学相结合,描述博弈双方策略和状态的不断变化,突破了经典博弈策略集非此即彼的局限;②利用量子机制解决协同治理过程中的搭便车问题,克服了经典博弈中难以或无法解决的困境;③在大气污染协同治理情景下,对量子纠缠和量子策略进行了实际含义的解读,并明确制定了约束政府行为的“纠缠协议”。

二、问题描述和研究假设

(一) 问题描述

当前我国区域发展存在不平衡、不充分问题,表现为各区域发展进程不一致,致使地方政府在实现经济增长和改善环境质量之间的权衡理念产生冲突^[10]。例如,长江下游浙江、江苏、上海的经济实力较强,它们率先实现了经济发展,对环境也造成破坏。在经历了大气污染造成的危害后,它们逐渐意识到保护生态环

境的重要性。但上游地区的部分省份经济发展相对滞后,仍处于追求经济增长的发展阶段,环境污染是不可避免的。此时,上游地区追求经济快速增长的观点与下游地区追求生态保护的观点之间的冲突将导致地方政府之间的治理理念失衡,促使上游省份可能选择搭便车,对区域协同合作治理造成困难。

此外,各区域经济规模和污染程度不同,治污技术水平也存在差异,致使各个地区环境治理的投入成本差异悬殊。图1为生态环境部公布的2021年31个省环境污染治理投资数据。以长江三角洲地区大气污染联防联控为例,长江三角洲环境污染治理总投资约1690亿元,其中江苏、浙江、安徽和上海的环境污染治理投资分别为590亿元、500亿元、450亿元和150亿元,分别占长江三角洲地区污染治理投资的34.9%、29.6%、26.6%和8.9%。三个地区经济规模不同,环境问题类似,在环境污染治理投资方面存在显著差异。上述案例表明了地方政府在治理理念和治理能力上的差异,这些差异很大程度上受区域经济实力的影响。因此,可将地方政府的经济实力视为政府异质性,由于异质性,地方政府的合作效益、治理成本各不相同,故设置收益-成本系数来表征政府异质性。为简化模型,只考虑经济实力一强一弱的两相邻政府,协同收益系数和成本分摊系数较高的一方政府视为发达地区,记为政府A;对应的,另一方政府视为欠发达地区,记为政府B。

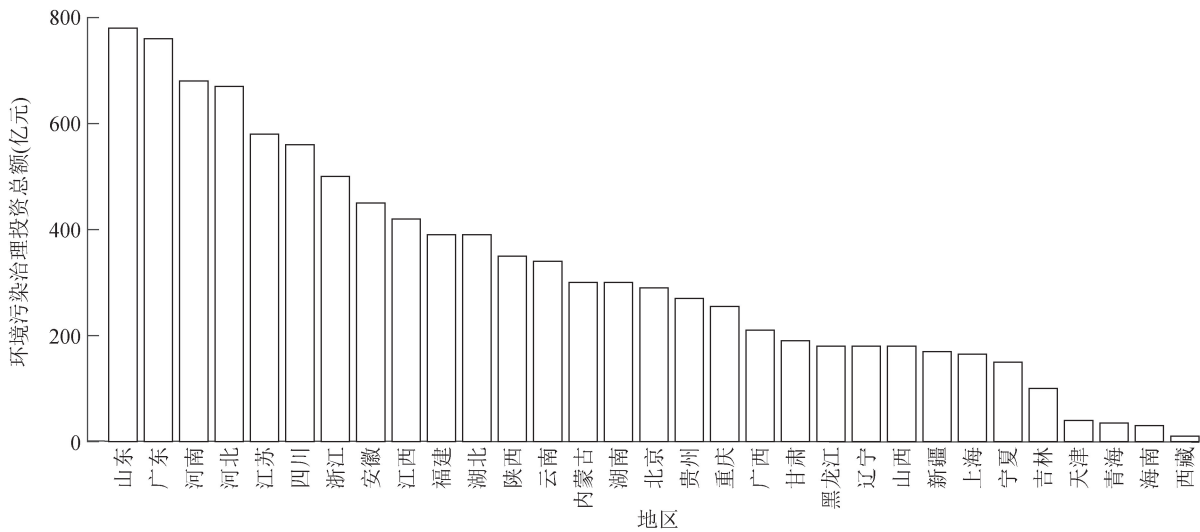


图1 2021年全国各地区环境污染治理投资情况

资料来源:《2021年中国生态环境统计年报》

(二) 研究假设

根据以上问题描述,作出如下假设:

(1)基于经典博弈理论,政府A、政府B的两个极端策略选择分别为合作(C)和背叛(D)。

(2)该区域创造的环境协同治理效益和总治理成本保持不变。此外,两地方政府以特定的分配比例获得固定的净治理收益和分担成本。

(3)若两方都积极协同治理能获得正的净效益,两方消极参与获得净效益为0。若一方合作,另一方背叛,则背叛方获得部分治理效益却不需要承担任何成本,合作方能获得部分治理效益但需要承担协同治理的全部成本。

(4)不考虑此区域以外的大气污染扩散造成的影响。

(5) α_1 和 α_2 分别为政府A和政府B的协同治理效益分配系数, β_1 和 β_2 分别为政府A和政府B的治理成本分摊系数。并且, $0 < \alpha_2 < \alpha_1$, $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ 和 $0 < \beta_2 < \beta_1$, $\beta_1 + \beta_2 = 1$ 。

根据假设,构建双方的收益矩阵如表1所示。

在表1中, b 为政府间协同治理大气污染的总收益, c 为两政府的共同成本。对于地方政府来说,大气污染

表1 双方收益矩阵

政府A	政府B	
	合作(C)	背叛(D)
合作(C)	$\alpha_1 b - \beta_1 c, \alpha_2 b - \beta_2 c$	$\alpha_1 b - c, \alpha_2 b$
背叛(D)	$\alpha_1 b, \alpha_2 b - c$	0, 0

造成的成本是外部的,可以由其他地方政府共同承担,环境治理的好处也具有外部性,这可能导致经济实力较小的地区搭便车。考虑到政府 B 的经济实力较弱,污染治理水平较低,在区域协同治理过程中可能面临较高的治理成本和较低的效益,因此,设定 $0 < \beta_2 c < \alpha_2 b < c < \alpha_1 b$ 。利用占优策略下划线法,可知表 1 博弈的均衡结果是:(合作,背叛),即政府 A 积极治理大气污染,而政府 B 则消极应对。由于政府 B 是一个经济落后的地区,污染较为严重,治理效果较差,治理成本高,这导致政府 B 选择搭便车行为。为此,本文尝试引入量子机制来解决这个问题。由于量子博弈独特的叠加性和纠缠性,它扩大了策略空间,描述了博弈双方策略和状态的不断变化,因此有可能产生优于经典博弈的结果。

三、量子博弈的基本模型

(一) 量子博弈模型要素

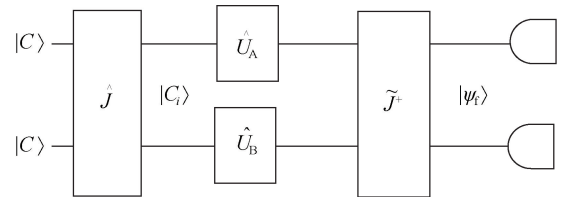
量子博弈将量子力学中的物理行为信息与博弈论相结合,描述了博弈双方之间的信息交换和实现^[31],其可以表示为: $G\{n, \Theta_H, \rho, S, u\}$ 。其中 n 是博弈中的参与者数量; H 是二维希尔伯特 (Hilbert) 空间,它包括两个量子比特和每个博弈者的一个比特; Θ_H 是博弈的状态空间,系统每一时刻的游戏结果完全由二维状态空间中的状态向量描述; ρ 是初始量子状态,量子博弈的决策过程主要通过初始状态应用局部变换来实现博弈决策,具体表现为对应酉矩阵算子的左单位乘法; S 是参与者集合的策略空间; u 是参与者的效用函数。此外,量子博弈需要一个物理测量设备,该设备可以根据两个比特的状态来确定博弈方的收益。

(二) 量子博弈一般计算过程

在量子博弈的框架下,量子表达式依赖于经典策略的支付。首先把 Hilbert 空间的基矢指定为两个基本向量: $|C\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$, $|D\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ 。其次,在每种情况下,博弈的状态都由张量积空间中的向量描述,任意状态可以由这 4 个基础策略的任意组合来表示 $|CC\rangle$ 、 $|CD\rangle$ 、 $|DC\rangle$ 、 $|DD\rangle$ (第一个 qubit 代表政府 A 的策略,第二个 qubit 代表政府 B 的策略)。其中 $|CD\rangle = |C\rangle \otimes |D\rangle$ 。量子博弈的一般计算过程如图 2 所示。

1. 计算初始量子策略状态

最初,每个主体都处于状态 $|C\rangle$,然后经历双量子纠缠门



ψ 为量子策略状态, $\tilde{J} = \hat{J}$ 为可逆门

图 2 量子博弈一般过程示意图

$$\hat{J} = \exp\left(i\omega D \otimes \frac{\hat{D}}{2}\right) = \cos \frac{\omega}{2} \cdot \hat{I} \otimes \hat{I} + i \sin \frac{\omega}{2} \cdot \hat{\sigma}_x \otimes \hat{\sigma}_x = \begin{pmatrix} \cos \frac{\omega}{2} & 0 & 0 & i \sin \frac{\omega}{2} \\ 0 & \cos \frac{\omega}{2} & -i \sin \frac{\omega}{2} & 0 \\ 0 & -i \sin \frac{\omega}{2} & \cos \frac{\omega}{2} & 0 \\ i \sin \frac{\omega}{2} & 0 & 0 & \cos \frac{\omega}{2} \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中: \hat{J} 为量子纠缠门; i 为虚数单位; I 为 4×4 的单位矩阵; $\hat{\sigma}_x$ 为 Pauli-x 矩阵的变型矩阵 $\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$; ω 为纠缠程度,且 $\omega \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right]$,当 $\omega = 0$ 时代表不纠缠, $\omega = \frac{\pi}{2}$ 时代表最大纠缠,接着,初始量子策略状态如式(2)所示。

$$|\psi_i\rangle = \hat{J}|CC\rangle = \begin{pmatrix} \cos \frac{\pi}{2} \\ 0 \\ 0 \\ i \sin \frac{\omega}{2} \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中： ψ_i 为初始量子策略状态。

2. 计算最终量子策略状态

\hat{U}_A, \hat{U}_B 分别是政府 A 和政府 B 的局部酉算子（也称为局部操作算子）。纯量子策略是一种特殊的酉算子，可以用式 (3) 表示。

$$\hat{U}(\theta, \varphi) = \begin{pmatrix} e^{i\varphi} \cos \frac{\theta}{2} & \sin \frac{\theta}{2} \\ -\sin \frac{\theta}{2} & e^{-i\varphi} \cos \frac{\theta}{2} \end{pmatrix} \quad (3)$$

此处 e 是自然常数, $0 \leq \theta \leq \pi, 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$, 特别的, 定义经典合作策略 $\hat{C} \equiv (0, 0) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$, 经典背叛策略 $\hat{D} \equiv (\pi, 0) = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$, 量子合作策略 $\hat{Q} \equiv \left(0, \frac{\pi}{2}\right) = \begin{pmatrix} i & 0 \\ 0 & -i \end{pmatrix}$ 。一旦参与者执行他们的策略, 初始状态将变成一个状态 $(\hat{U}_A \otimes \hat{U}_B) \hat{J} |CC\rangle$, 其中

$$\hat{U}_A \otimes \hat{U}_B = \begin{pmatrix} e^{i\varphi_A} \cos \frac{\theta_A}{2} & \sin \frac{\theta_A}{2} \\ -\sin \frac{\theta_A}{2} & e^{-i\varphi_A} \cos \frac{\theta_A}{2} \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} e^{i\varphi_B} \cos \frac{\theta_B}{2} & \sin \frac{\theta_B}{2} \\ -\sin \frac{\theta_B}{2} & e^{-i\varphi_B} \cos \frac{\theta_B}{2} \end{pmatrix} \quad (4)$$

因此, 两类参与者提交他们的状态来进行最终测量, 最终测量是通过可逆门来实现的 $\tilde{J} = \hat{J}^+$, 最终状态以式 (5) 的形式表示态叠加特征。

$$|\psi_f\rangle = \tilde{J}(\hat{U}_A \otimes \hat{U}_B) \hat{J} |CC\rangle \quad (5)$$

最后的量子态可以通过量子测量导致最终态坍缩成一个纯态的结果, 即

$$\begin{aligned} |\psi_f\rangle = \tilde{J}(\hat{U}_A \otimes \hat{U}_B) \hat{J} |CC\rangle = & [\cos(\varphi_A + \varphi_B) - i\cos\omega \sin(\varphi_A + \varphi_B)] \cos \frac{\theta_A}{2} \cos \frac{\theta_B}{2} |CC\rangle + \\ & [\cos\varphi_A - i\cos\omega \sin\varphi_A] \cos \frac{\theta_A}{2} \sin \frac{\theta_B}{2} |CD\rangle + [\sin\omega \sin\varphi_B] \sin \frac{\theta_A}{2} \cos \frac{\theta_B}{2} |CD\rangle + \\ & [\cos\varphi_B - i\cos\omega \sin\varphi_B] \sin \frac{\theta_A}{2} \cos \frac{\theta_B}{2} |DC\rangle + [\sin\omega \sin\varphi_A] \cos \frac{\theta_A}{2} \sin \frac{\theta_B}{2} |DC\rangle + \\ & [\sin\omega \sin(\varphi_A + \varphi_B) \cos \frac{\theta_A}{2} \cos \frac{\theta_B}{2} + \sin \frac{\theta_A}{2} \sin \frac{\theta_B}{2}] |DD\rangle \end{aligned} \quad (6)$$

3. 计算量子策略收益

根据式 (6) 最终状态坍缩到张量积空间基向量的概率计算公式如式 (7) 所示。

$$\begin{cases} P_{CC} = |\langle CC | \psi_f \rangle|^2 = [\cos^2(\varphi_A + \varphi_B) + \sin^2(\varphi_A + \varphi_B) \cos^2\omega] \cos^2 \frac{\theta_A}{2} \cos^2 \frac{\theta_B}{2} \\ P_{CD} = |\langle CD | \psi_f \rangle|^2 = \sin^2\varphi_B \sin^2\omega \sin^2 \frac{\theta_A}{2} \cos^2 \frac{\theta_B}{2} + [\cos^2\varphi_A + \sin^2\varphi_A \cos^2\omega] \cos^2 \frac{\theta_A}{2} \sin^2 \frac{\theta_B}{2} \\ P_{DC} = |\langle DC | \psi_f \rangle|^2 = \sin^2\varphi_A \sin^2\omega \sin^2 \frac{\theta_B}{2} \cos^2 \frac{\theta_A}{2} + [\cos^2\varphi_B + \sin^2\varphi_B \cos^2\omega] \sin^2 \frac{\theta_A}{2} \cos^2 \frac{\theta_B}{2} \\ P_{DD} = |\langle DD | \psi_f \rangle|^2 = \sin^2(\varphi_A + \varphi_B) \sin^2\omega \cos^2 \frac{\theta_A}{2} \cos^2 \frac{\theta_B}{2} + \sin^2 \frac{\theta_A}{2} \sin^2 \frac{\theta_B}{2} \end{cases} \quad (7)$$

其中： $P_{CC}, P_{CD}, P_{DC}, P_{DD}$ 分别是最终量子策略状态坍缩为纯策略 $|CC\rangle, |CD\rangle, |DC\rangle, |DD\rangle$ 的概率, 经验证 $P_{CC} + P_{CD} + P_{DC} + P_{DD} = 1$ 。最后, 基于量子博弈收益算例, 通过收益矩阵和式 (7), 计算纠缠量子博弈的量子收益。政府 A 量子收益 ($\$A$) 和政府 B 的量子收益 ($\B) 可以定义为式 (8)。

$$\begin{cases} \$A = (\alpha_1 b - \beta_1 c) P_{CC} + (\alpha_1 b - c) P_{CD} + (\alpha_1 b) P_{DC} \\ \$B = (\alpha_2 b - \beta_2 c) P_{CC} + (\alpha_2 b) P_{CD} + (\alpha_2 b - c) P_{DC} \end{cases} \quad (8)$$

(三) 量子机制解释

1. 量子状态

在量子博弈中,博弈的状态使用叠加态的概念,把概率空间从实数域扩展到了复数域。希尔伯特空间基向量 $|C\rangle$ 和 $|D\rangle$ 分别对应于传统博弈中“合作”状态和“背叛”状态。每个参与者的状态是基向量 $|C\rangle$ 和 $|D\rangle$ 的二维线性组合,即 $j|C\rangle+k|D\rangle$ 。 $(j,k$ 是概率大小),这个线性矢量是一个叠加态。在本文中,“合作意愿”用叠加状态来表示,使双方合作意愿的连续变量更符合现实。因为博弈中有两个参与者,博弈状态表示为四维希尔伯特空间向量基: $|CC\rangle$ 、 $|CD\rangle$ 、 $|DC\rangle$ 、 $|DD\rangle$,直积运算的功能是将两个向量合成一个新的向量来表示系统的叠加状态,故博弈状态为 $j|CC\rangle+k|CD\rangle+g|DC\rangle+h|DD\rangle$ (j,k,g,h 为波函数振幅的平方,用来表示量子态对应的概率,且 $|j|^2+|k|^2+|g|^2+|h|^2=1$ 。

2. 量子策略

由式(3)可知,参与者的量子策略空间被限制为两参数 θ 和 φ 的 2×2 酉矩阵集,其中纯量子态 $\hat{U}(0,0)$ 、 $\hat{U}(\pi,0)$ 分别对应于经典策略中的“合作”和“背叛”。因此,结合现实,有理由认为 θ 值的大小代表政府之间的合作意愿或者努力程度, θ 值越大,表明政府协同治理大气污染意愿越低, θ 为0时,表明政府合作意愿最强或努力程度最高。

不难发现,量子策略 $\hat{U}(\theta,\varphi)$ 指的是 $0<\varphi\leq\pi/2$ 时相应的策略,因此 φ 值代表策略的量子化程度, φ 越接近0,策略的量子化程度越小,反之则越大。 $\varphi=\pi/2$ 代表完全量子策略, $\varphi=0$ 时代表非量子策略,此时系统坍塌成经典策略,且收益与纠缠度无关。在协同治理情境下, φ 可将其看作是大气污染协同治理过程中可被检测的、可量化的各项指标,如地方政府的经济发展水平、治污技术与能力,当 $\varphi=0$ 时,表示地方政府不存在协同治理能力。

区域大气污染协同治理主要体现在两个方面:主观治理意愿和客观执行能力,其包含了可量化和不可量化的内容。为了表征协同治理的这两个方面,量子策略中描绘的合作治理意愿和治理技术水平,在一定程度上综合了主观意愿和客观能力,符合大气污染协同治理实际。

3. 量子纠缠

量子纠缠是一种可观测的物理现象,指两个量子系统之间的非局域性、非经典性、先天的强关联^[32]。由于这种非局部相关性,对一个子系统的操作会影响另一个子系统。若两体系统A和B,不能写成 $|\psi\rangle_{AB} = |\psi\rangle_A \otimes |\psi\rangle_B$,则认为两体纠缠,纠缠度的确定通常通过对量子信息进行测量^[33],因此,纠缠态可以作为信息共享的工具。此外,纠缠从字面意思可理解为将博弈双方的利益“捆绑”在一起,使得双方的利益相关性提升,参与者把彼此的利益视为自己的利益^[17]。

综上,有理由将纠缠视为衡量地方政府之间信息共享程度和利益关联程度的指标,纠缠程度越高,从另一个政府获得的信息就越多,地方政府之间的利益关联性就越高(量子纠缠度的取值为 $0<\omega\leq\pi/2$)。当两个地方政府参与区域大气污染协同治理,双方都无法观测对方政府在治理过程中的努力程度,因此,根据纠缠的特点,本文将构建一个约束地方政府行为的“纠缠协议”。

四、量子博弈模型分析

$\theta_A, \theta_B, \varphi_A, \varphi_B$ 是政府策略选择的参数, ω 为系统纠缠度的大小。由于纠缠度对整个博弈过程的影响显著,因此,本文进一步将是否考虑态的纠缠分两种情形讨论。

(一) 不考虑态的纠缠

由于不考虑态的纠缠,因此对式(7)取 $\omega=0$,每个量子态的概率分布为

$$\begin{cases} P_{CC} = |\langle CC | \varphi_f \rangle|^2 = \cos^2 \frac{\theta_A}{2} \cos^2 \frac{\theta_B}{2} \\ P_{CD} = |\langle CD | \varphi_f \rangle|^2 = \cos^2 \frac{\theta_A}{2} \sin^2 \frac{\theta_B}{2} \\ P_{DC} = |\langle DC | \varphi_f \rangle|^2 = \sin^2 \frac{\theta_A}{2} \cos^2 \frac{\theta_B}{2} \\ P_{DD} = |\langle DD | \varphi_f \rangle|^2 = \sin^2 \frac{\theta_A}{2} \sin^2 \frac{\theta_B}{2} \end{cases} \quad (9)$$

政府 A 的收益为

$$\begin{aligned} \$ _A &= (\alpha_1 b - \beta_1 c) \cos^2 \frac{\theta_A}{2} \cos^2 \frac{\theta_B}{2} + (\alpha_1 b - c) \cos^2 \frac{\theta_A}{2} \sin^2 \frac{\theta_B}{2} + (\alpha_1 b) \sin^2 \frac{\theta_A}{2} \cos^2 \frac{\theta_B}{2} \\ &= [(\beta_2 c - \alpha_1 b) \cos^2 \frac{\theta_B}{2} + (\alpha_1 b - c)] \cos^2 \frac{\theta_A}{2} + \alpha_1 b \cos^2 \frac{\theta_B}{2} \end{aligned} \quad (10)$$

政府 B 的收益为

$$\begin{aligned} \$ _B &= (\alpha_2 b - \beta_2 c) \cos^2 \frac{\theta_A}{2} \cos^2 \frac{\theta_B}{2} + (\alpha_1 b) \cos^2 \frac{\theta_A}{2} \sin^2 \frac{\theta_B}{2} + (\alpha_1 b - c) \sin^2 \frac{\theta_A}{2} \cos^2 \frac{\theta_B}{2} \\ &= [(\beta_1 c - \alpha_2 b) \cos^2 \frac{\theta_A}{2} + (\alpha_2 b - c)] \cos^2 \frac{\theta_B}{2} + \alpha_2 b \cos^2 \frac{\theta_A}{2} \end{aligned} \quad (11)$$

由式(10)和式(11)可知,在不考虑态的纠缠时,政府 A 和政府 B 的收益只与 θ 有关,此时,政府之间的合作意愿或努力程度将影响各自的收益。

命题一: 不考虑态的纠缠时,政府 A 的收益随合作意愿的增大而增大的充分条件为 $0 \leq \theta_B < 2\arccos \sqrt{\frac{\alpha_1 b - c}{\alpha_1 b - \beta_2 c}}$, 此时政府 A 的最优策略是完全合作,即 $\theta_A = 0$; 政府 B 的收益随合作意愿的减少而增加,此时政府 B 的最优策略是完全背叛,即 $\theta_B = \pi$ 。

证明: 对政府 A 而言, $\$ _A = \left[(\beta_2 c - \alpha_1 b) \cos^2 \frac{\theta_B}{2} + (\alpha_1 b - c) \right] \cos^2 \frac{\theta_A}{2} + \alpha_1 b \cos^2 \frac{\theta_B}{2}$, 由于 $(\beta_2 c - \alpha_1 b) \cos^2 \frac{\theta_B}{2} + (\alpha_1 b - c)$ 的正负难以确定, 只有满足 $\theta_B < 2\arccos \sqrt{(\alpha_1 b - c) / (\alpha_1 b - \beta_2 c)}$ 时, $(\beta_2 c - \alpha_1 b) \cos^2 \frac{\theta_B}{2} + (\alpha_1 b - c) > 0$, $\$ _A$ 随 θ_A 的增加而减小, 也即政府 A 的收益随政府 A 的合作意愿的增大而增加; 对政府 B 而言, $\$ _B = \left[(\beta_1 c - \alpha_2 b) \cos^2 \frac{\theta_A}{2} + (\alpha_2 b - c) \right] \cos^2 \frac{\theta_B}{2} + \alpha_2 b \cos^2 \frac{\theta_A}{2}$, 由于 $(\beta_1 c - \alpha_2 b) \cos^2 \frac{\theta_A}{2} + (\alpha_2 b - c)$ 对任意 $\theta_A \in [0, \pi]$ 时始终小于 0, 因此 $\$ _B$ 随 θ_A 的增大而增大, 也即政府 B 的收益随政府 B 的合作意愿的减小而增大, 命题一证毕。

由命题一可知,在不考虑态的纠缠时,只有当政府 B 的合作意愿高于某一特定值时,政府 A 才会选择完全合作。而政府 B 的收益则总是随着合作意愿的增加而降低,因而会选择背叛策略。因此,政府 B 对待区域大气污染治理更倾向于采取搭便车。以四种较为特殊的策略为例,分别为经典合作策略 $\hat{U}(0,0)$ 、经典背叛策略 $\hat{U}(\pi,0)$ 、量子合作策略 $\hat{U}(0,\pi/2)$ 和量子背叛策略 $\hat{U}(\pi,\pi/2)$ 。政府 A、政府 B 的收益矩阵如表 2 所示。

表 2 不考虑态纠缠时四种特殊策略下两政府的收益情况

政府	政府 B			
	$\hat{U}_B(0,0)$	$\hat{U}_B(\pi,0)$	$\hat{U}_B(0,\pi/2)$	$\hat{U}_B(\pi,\pi/2)$
政府 A				
$\hat{U}_A(0,0)$	$(\alpha_1 b - \beta_1 c, \alpha_2 b - \beta_2 c)$	$(\alpha_1 b - c, \alpha_2 b)$	$(\alpha_1 b - \beta_1 c, \alpha_2 b - \beta_2 c)$	$(\alpha_1 b - c, \alpha_2 b)$
$\hat{U}_A(\pi,0)$	$(\alpha_1 b, \alpha_2 b - c)$	$(0,0)$	$(\alpha_1 b, \alpha_2 b - c)$	$(0,0)$
$\hat{U}_A(0,\pi/2)$	$(\alpha_1 b - \beta_1 c, \alpha_2 b - \beta_2 c)$	$(\alpha_1 b - c, \alpha_2 b)$	$(\alpha_1 b - \beta_1 c, \alpha_2 b - \beta_2 c)$	$(\alpha_1 b - c, \alpha_2 b)$
$\hat{U}_A(\pi,\pi/2)$	$(\alpha_1 b, \alpha_2 b - c)$	$(0,0)$	$(\alpha_1 b, \alpha_2 b - c)$	$(0,0)$

由表2可知,由于不考虑态的纠缠,模型中参数 φ_A, φ_B 的取值不影响最终的收益,政府的收益只与参数 θ_A, θ_B 有关。并且(合作,合作)是不稳定点,政府双方都有动机改变当前策略追求更高的收益,最终博弈均衡点是(合作,背叛)。此外,当政府A完全合作,即 $\theta_A=0$ 时,无论是采取非量子策略还是量子策略,只要政府B选择背叛,政府A的收益就降为 $\alpha_1 b - c$,政府B的收益情况类似,也就是说选择“背叛”策略的一方政府带来的代价需要由完全努力的政府来承担。

为了直观地观察在不考虑态纠缠情况下量子策略对双方政府收益的影响,不妨设定一组初始值: $\alpha_1=0.6, \alpha_2=0.4, \beta_1=0.6, \beta_2=0.4, b=10, c=5$,此时政府双方的收益如图3所示。

由图3可知,政府双方的收益只跟彼此的合作意愿 θ 有关,由图3(a)可知, θ_B 越接近0,政府A的收益随 θ_A 的增大而增大的趋势越明显;当 θ_B 靠近 π 时,政府A的收益随 θ_A 的增减性不易判断。不妨将图3(a)沿着不同的截面切开,所得 S_A 随 θ_A 变化的图像如图4(a)所示。相应的,图4(b)为不同截面下 S_B 随 θ_B 变化的图像。

从图4易知,当 $\theta_B \leq \frac{\pi}{2}$ 时,政府A的收益随 θ_A 的增大而增大,而当 $\theta_B \geq \frac{3\pi}{4}$,政府A的收益随 θ_A 的增大而减小。理解为政府B的合作意愿超过一定程度时,政府A的最优策略是背叛,反之是合作;而对政府B而言,无论 θ_A 如何变化, S_B 总是随 θ_B 的增加而增加,即无论政府A如何决策,政府B都会选择背叛。也就是说,政府A和政府B都希望对方积极参与区域大气污染的治理工作,而自己却坐享其成,此时,他们的利益

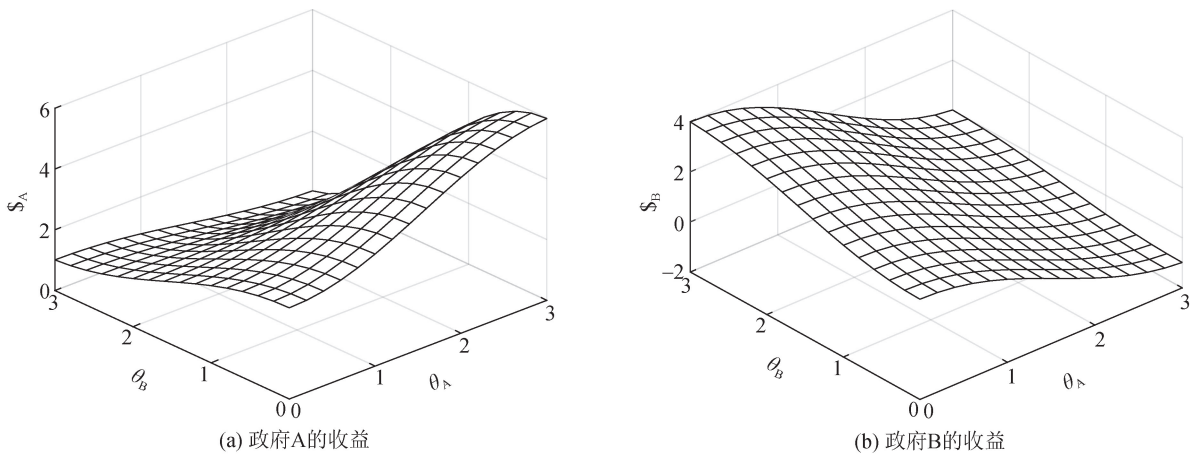


图3 不考虑纠缠态下 θ 对政府双方收益的影响

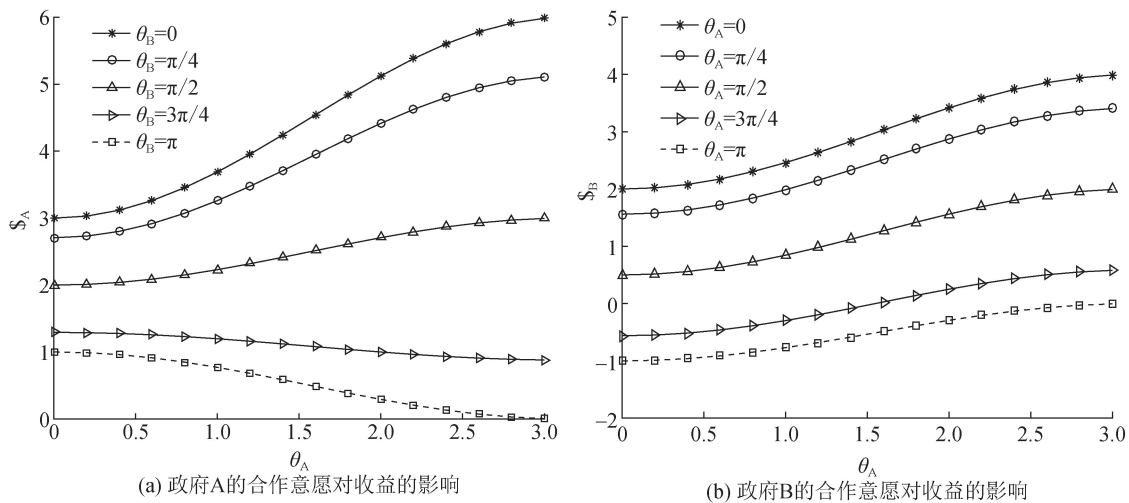


图4 沿不同的截面切开观察合作意愿对政府双方收益的影响

能达到最大。

由表 2 和图 3、图 4 的分析得知,当两政府处于非纠缠状态时,政府双方都希望对方努力治污而自己坐享其成,“搭便车”行为仍然无法得到有效解决,因此,有必要考虑引入态纠缠后讨论双方的博弈情况。

(二) 考虑态的纠缠

当 $0 < \omega \leq \frac{\pi}{2}$, 表明系统加入了态的纠缠,为方便起见,接下来只考虑最大纠缠时的情况,即 $\omega = \frac{\pi}{2}$ 。

命题二:考虑态的纠缠(即 $\omega = \frac{\pi}{2}$)后,如果政府 A 采取完全量子策略,即 $\hat{U}_A(\theta_A, \frac{\pi}{2})$ 时,政府 A 的收益随着合作意愿的增加而增加的充分条件是 $\theta_B \in (\bar{\theta}_B, \pi)$, 且政府 B 不能采用完全量子策略。类似地,如果政府 B 选择完全量子策略 $\hat{U}_B(\theta_B, \frac{\pi}{2})$, 政府 B 的收益随着合作意愿的增加而增加的充分条件是 $\theta_A \in (\bar{\theta}_A, \pi)$, 且政府 A 不能采用完全量子策略。其中, $\bar{\theta}_B = 2\arccos \sqrt{\alpha_1 b / [2\alpha_1 b - (\alpha_1 b + \beta_2 c) \sin^2 \varphi_B]}$, $\bar{\theta}_A = 2\arccos \sqrt{\alpha_2 b / [2\alpha_2 b - (\alpha_2 b + \beta_1 c) \sin^2 \varphi_A]}$ 。

证明:在最大纠缠情况下,政府 A 和政府 B 的收益分别为

$$\begin{aligned} \$_A = & \{ [(\alpha_1 b - \beta_1 c) \cos^2(\varphi_A + \varphi_B) + c(\cos^2 \varphi_A + \sin^2 \varphi_B) - 2\alpha_1 b] \cos^2 \frac{\theta_B}{2} + \alpha_1 b - c \cos^2 \varphi_A \} \cos^2 \frac{\theta_A}{2} + (\alpha_1 b - \\ & c \sin^2 \varphi_B) \cos^2 \frac{\theta_B}{2}, \quad \$_B = \{ [(\alpha_2 b - \beta_2 c) \cos^2(\varphi_A + \varphi_B) + c(\cos^2 \varphi_B + \sin^2 \varphi_A) - 2\alpha_2 b] \cos^2 \frac{\theta_A}{2} + \alpha_1 b - c \cos^2 \varphi_B \} \cos^2 \frac{\theta_B}{2} + \\ & (\alpha_2 b - c \cos^2 \varphi_A) \cos^2 \frac{\theta_A}{2}. \end{aligned}$$

不妨令 $X_A = [(\alpha_1 b - \beta_1 c) \cos^2(\varphi_A + \varphi_B) + c(\cos^2 \varphi_A + \sin^2 \varphi_B) - 2\alpha_1 b] \cos^2 \frac{\theta_B}{2} + \alpha_1 b - c \cos^2 \varphi_A$, $X_B = [(\alpha_2 b - \beta_2 c) \cos^2(\varphi_A + \varphi_B) + c(\cos^2 \varphi_B + \sin^2 \varphi_A) - 2\alpha_2 b] \cos^2 \frac{\theta_A}{2} + \alpha_1 b - c \cos^2 \varphi_B$; $Y_A = (\alpha_1 b - c \sin^2 \varphi_B) \cos^2 \frac{\theta_B}{2}$, $Y_B = (\alpha_2 b - c \cos^2 \varphi_A) \cos^2 \frac{\theta_A}{2}$, 则 $\$ _A = X_A \cos^2 \frac{\theta_A}{2} + Y_A$, $\$ _B = X_B \cos^2 \frac{\theta_B}{2} + Y_B$ 。若政府 A 在最大纠缠下选择完全量子策略,即 $\varphi_A = \frac{\pi}{2}$, 此时 $X_A = [(\alpha_1 b + \beta_2 c) \sin^2 \varphi_B - 2\alpha_1 b] \cos^2 \frac{\theta_B}{2} + \alpha_1 b$, 若要使 $\$ _A$ 随 θ_A 的增大而减小,则需满足 $X_A > 0$,

解得 $\theta_B > 2\arccos \sqrt{\alpha_1 b / [2\alpha_1 b - (\alpha_1 b + \beta_2 c) \sin^2 \varphi_B]}$, 且此时政府 B 不能使用完全量子策略。换言之,当政府 B 不使用完全量子策略,且 $\theta_B \in (2\arccos \sqrt{\alpha_1 b / [2\alpha_1 b - (\alpha_1 b + \beta_2 c) \sin^2 \varphi_B]}, \pi)$, $\$ _A$ 随 θ_A 的增大而减小,即政府 A 的收益随着合作意愿的增加而增加,政府 B 的情况类似。命题二得证。

命题二表明,如果两个政府环境治理过程中表现出较强的治理能力和较高的技术水平,且双方都采用量子策略,那么在满足一定条件下政府 A 和政府 B 的收益将随着合作意愿的增加而增加,这对政府双方是非常好的激励,因此,双方在协同开始前就应签订“纠缠协议”,确保协同双方均没有动机去采取非量子策略。此外,由于目前我国经济欠发达城市的污染治理能力不足和技术水平落后导致环境治理失衡,因此,经济发达地区应向落后地区提供适当技术援助,以提升落后地区的治理能力,从而提高区域协同治理的效率。

命题三:考虑最大纠缠(即 $\omega = \pi/2$)后,如果政府 A 采取非量子策略,即 $\hat{U}_A(\theta_A, 0)$ 时,政府 A 的收益随着合作意愿的增加而增加的充分条件是 $\theta_B \in (\theta_B^*, \pi]$, 其中 $\theta_B^* = 2\arccos \sqrt{(c - \alpha_1 b) / \{ [\alpha_1 b - c(\beta_1 + 1)] \cos^2 \varphi_B + 2(c - \alpha_2 b) \}}$ 。类似地,如果政府 B 选择非量子策略 $\hat{U}_B(\theta_B, 0)$, 则政府 B 的收益随着政府 B 的合作意愿增加而增大的充分条件是 $\theta_A \in [0, \theta_A^*]$, 其中 $\theta_A^* = 2\arccos \sqrt{(\alpha_2 b - c) / \{ [c(\beta_2 + 1) - \alpha_2 b] \cos^2 \varphi_A + 2(\alpha_2 b - c) \}}$, 且 $\beta_1 c > \alpha_2 b$, $\varphi_A \in \left(\arccos \sqrt{(\alpha_2 b - c) / [\alpha_2 b - c(1 + \beta_2)]}, \frac{\pi}{2} \right)$ 。

证明:在考虑最大纠缠态下,如果政府 A 采取非量子策略, $\varphi_A = 0$, 此时 $X_A = \{[\alpha_1 b - c(1 + \beta_1)] \cos^2 \varphi_B + 2(c - \alpha_1 b)\} \cos^2 \frac{\theta_B}{2} + \alpha_1 b - c$, 显然, $[\alpha_1 b - c(1 + \beta_1)] \cos^2 \varphi_B + 2(c - \alpha_1 b) < 0$, 若要使 S_A 随 θ_A 的增大而减小, 则需满足 $X_A > 0$, 解得 $2 \arccos \sqrt{(c - \alpha_1 b) / \{[\alpha_1 b - c(1 + \beta_1)] \cos^2 \varphi_B + 2(c - \alpha_1 b)\}} < \theta_B \leq \pi$, 此时政府 A 的收益随其合作意愿的增大而增加。类似地, 若政府 B 采取非量子策略, 即 $\varphi_B = 0$, 此时 $X_B = \{[\alpha_2 b - c(1 + \beta_2)] \cos^2 \varphi_A + 2(c - \alpha_2 b)\} \cos^2 \frac{\theta_A}{2} + \alpha_2 b - c$, 若要使 S_B 随 θ_B 的增大而减小, 需满足 $X_B > 0$ 。由于 $\alpha_2 b - c < 0$, 则要求 $[\alpha_2 b - c(1 + \beta_2)] \cos^2 \varphi_A + 2(c - \alpha_2 b) > 0$, 且发现当 $\beta_1 c > \alpha_2 b$ 时, $[\alpha_2 b - c(1 + \beta_2)] \cos^2 \varphi_A + 2(c - \alpha_2 b) > 0$ 恒成立, 此时 θ_A 的取值应满足 $0 \leq \theta_A < 2 \arccos \sqrt{(\alpha_2 b - c) / \{[c(\beta_2 + 1) - \alpha_2 b] \cos^2 \varphi_A + 2(\alpha_2 b - c)\}}$, 为保证根号内的值大于 0, 需保证 $\arccos \sqrt{(\alpha_2 b - c) / [\alpha_2 b - c(1 + \beta_2)]} < \varphi_A \leq \frac{\pi}{2}$, 命题三得证。

由命题三可知, 对政府 B 来说, 使“政府 B 的收益随合作意愿增大而增大”成立的条件要比采用完全量子策略的复杂得多, 不仅需要政府 A 也采取量子策略, 并且要求政府 A 的合作意愿要超过一定水平, 还需要满足政府 A 的分摊成本高于政府 B 的分摊收益, 一旦以上条件达不到要求, “政府 B 的收益随合作意愿的增加而增大”就不能成立。因此, 为了激发经济落后地区的协作动力, 发达地区应在环境协同治理中发挥引领和示范作用, 积极推动欠发达地区参与环境治理。

以四种较为特殊的策略为例, 纠缠态下政府 A、政府 B 的收益矩阵如表 3 所示。

表 3 考虑态纠缠时四种特殊策略下两政府的收益情况

政府	政府 B			
政府 A	$\hat{U}_B(0,0)$	$\hat{U}_B(\pi,0)$	$\hat{U}_B(0,\pi/2)$	$\hat{U}_B(\pi,\pi/2)$
$\hat{U}_A(0,0)$	$(\alpha_1 b - \beta_1 c, \alpha_2 b - \beta_2 c)$	$(\alpha_1 b - c, \alpha_2 b)$	$(0,0)$	$(\alpha_1 b - c, \alpha_2 b)$
$\hat{U}_A(\pi,0)$	$(\alpha_1 b, \alpha_2 b - c)$	$(0,0)$	$(\alpha_1 b - c, \alpha_2 b)$	$(0,0)$
$\hat{U}_A(0,\pi/2)$	$(0,0)$	$(\alpha_1 b, \alpha_2 b - c)$	$(\alpha_1 b - \beta_1 c, \alpha_2 b - \beta_2 c)$	$(\alpha_1 b, \alpha_2 b - c)$
$\hat{U}_A(\pi,\pi/2)$	$(\alpha_1 b, \alpha_2 b - c)$	$(0,0)$	$(\alpha_1 b - c, \alpha_2 b)$	$(0,0)$

如表 3 所示, 经典策略的(合作, 合作)仍然不是均衡点, 博弈均衡点由(合作, 背叛)变成了 $[\hat{U}_A(0, \pi/2), \hat{U}_B(0, \pi/2)]$, 一旦政府 A 选择了 $\hat{U}_A(0, \pi/2)$ 策略, 政府 B 也会选择同样的策略, 背叛的一方只会带来更高的成本, 合作的一方政府不必承担背叛一方政府带来的代价。量子博弈拓展了经典博弈的策略空间, 把经典策略的均衡策略(合作, 背叛)转变成了量子策略的(合作, 合作)。由此可见, 量子纠缠在一定程度上解决了经济落后地区搭便车的问题。

五、关键参数仿真分析

为了直观地分析在态纠缠下政府双方的协同治理意愿、协同治理能力及利益关联度对于合作系统稳定性的影响, 本节主要借助 MATLAB 绘图工具通过图形展示的方式分析量子策略下的关键参数对于政府双方收益的影响。参数取值沿用前文的设定: $\alpha_1 = 0.6, \alpha_2 = 0.4, \beta_1 = 0.6, \beta_2 = 0.4, b = 10, c = 5$ 。

(一) 协同治理意愿 θ 对双方收益和系统稳定性的影响

为了分析在特定的协同治理能力下, 政府的协作意愿对双方收益及协作稳定性的影响, 现考虑 $\varphi = 0, \frac{\pi}{2}$ 时, 参数 θ 如何影响地方政府的利益及系统的稳定性。

由图 5 可知, 在态纠缠下, 政府的收益同时受到 θ 和 φ 的影响。由图 5(a) 可知, 当政府 A 选择 $(\theta, 0)$ 策略, $\theta_B \rightarrow 0$ 时, 政府 A 的收益随合作意愿的减少而增加, 但是政府 A 减少合作意愿的同时会降低政府 B 的收益, 于是政府 B 降低合作意愿, 造成政府 A 的收益降低, 政府 A 和政府 B 的收益总是此消彼长, 无法达到平

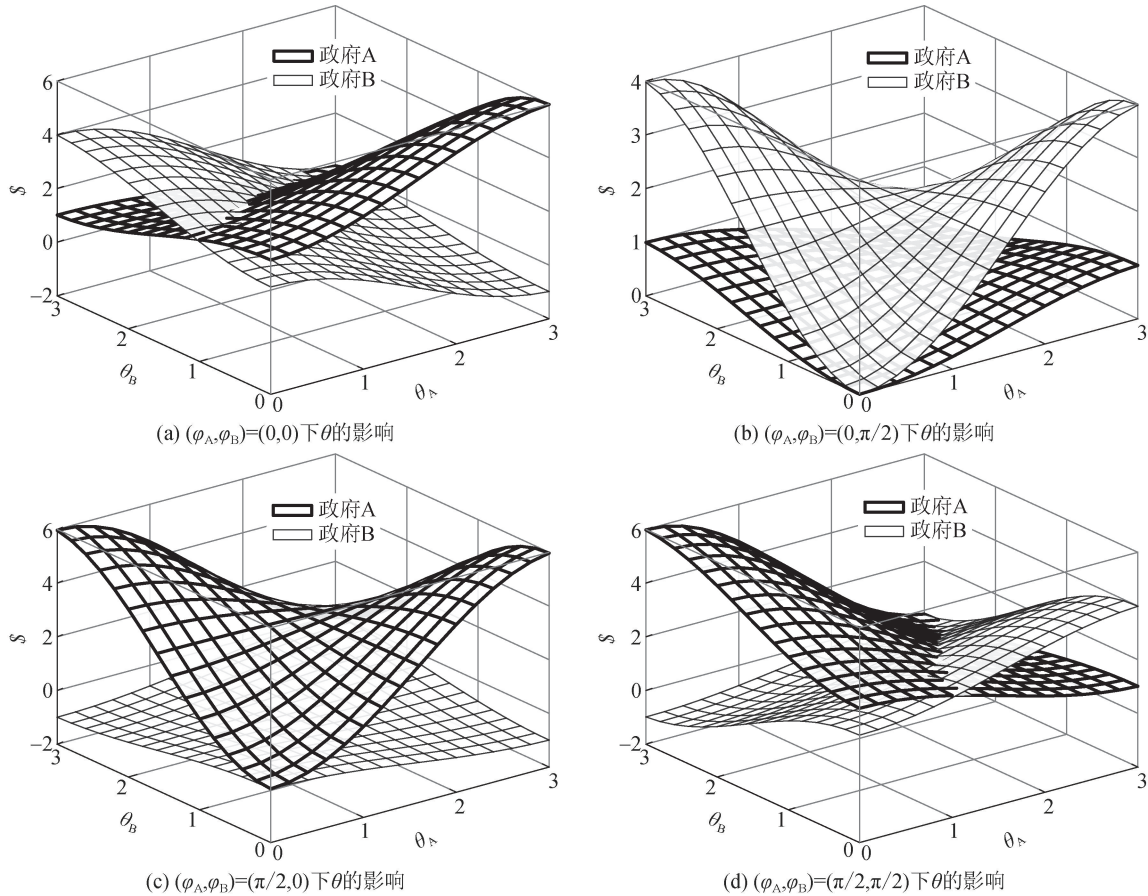


图5 给定 φ 值情况下考察 对政府收益的影响

衡。由图 5(b) 可知,其中看似存在两个使双方收益都达到最大的点,即 $(\pi, 0)$ 和 $(0, \pi)$,但这两点代表一方合作,另一方背叛,并且政府 A 可以通过改变策略 $(\varphi_A = 0 \rightarrow \varphi_B = \pi/2)$ 来提升自身整体收益;由图 5(c) 可知,政府 A 和政府 B 的收益总是此消彼长,且随对方合作意愿的增加而减少,不存在均衡点;由图 5(d) 可知,当政府 A 选择 $(\theta, \pi/2)$ 策略, $\theta_B \rightarrow 0$ 时,政府 A 的收益随合作意愿的增加而增加,当政府 B 选择 $(\theta, \pi/2)$ 策略, $\theta_A \rightarrow 0$ 时,政府 B 的收益随合作意愿的增加而增加,此时,政府双方都选择完全合作 $(\theta_A = 0, \theta_B = 0)$,系统达到均衡,任何一方政府背叛都将承担损失,因此政府 A 和政府 B 的最优策略都为 $\hat{U}(0, \pi/2)$ 。

(二) 协同治理水平 φ 对双方收益和系统稳定性的影响

为了分析在特定的协同合作意愿下,政府的协作意愿对双方收益及协作稳定性的影响,现考虑 $\theta = 0, \pi$ 时,参数 φ 如何影响地方政府的利益及系统的稳定性 $(\pi_A = \pi_B = 0$ 时, $S_A = S_B = 0$,此情形不考虑)。

由图 6(a) 和图 6(b) 可知,当政府 A 选择 $\hat{U}(0, \varphi_A)$,政府 B 选择 $\hat{U}(\pi, \varphi_B)$ 时,政府 A 的收益与自身的协同治理能力成正比,与另一方的治理能力无关,因此,政府 A 的最佳策略是 $\hat{U}(0, \pi/2)$;当政府 A 选择策略 $\hat{U}(\pi, \varphi_A)$ 时,政府 B 选择 $\hat{U}(0, \varphi_B)$ 时,政府 A 的收益与政府 B 的治理能力成反向相关,而此时对政府 B 而言,其收益与自身治理能力成正相关,因此,在此种策略组合下,政府 A 和政府 B 的利益冲突,难以达成一致;由图 6(c) 可知,当政府双方都选择策略 $\hat{U}(0, \varphi)$ 时,若一方政府选择 $\hat{U}(0, 0)$,则另一方的收益随 φ 的增加而减少。若一方政府选择 $\hat{U}(0, \pi/2)$ 时,则另一方的收益随 φ 的增加而增加,因此,双方的最佳策略都是 $\hat{U}(0, \pi/2)$ 。

由图 5、图 6 的分析可知,政府 A 和政府 B 选择经典策略的(合作,合作)是帕累托最优解,但是不稳定,政府 B 存在搭便车动机。而在纠缠状态下,政府双方选择量子策略组合(合作,合作)不仅是纳什均衡解,同时也是帕累托最优解。总之,在考虑纠缠的量子状态下,系统的均衡解为 $[\hat{U}_A(0, \pi/2), \hat{U}_B(0, \pi/2)]$ 。

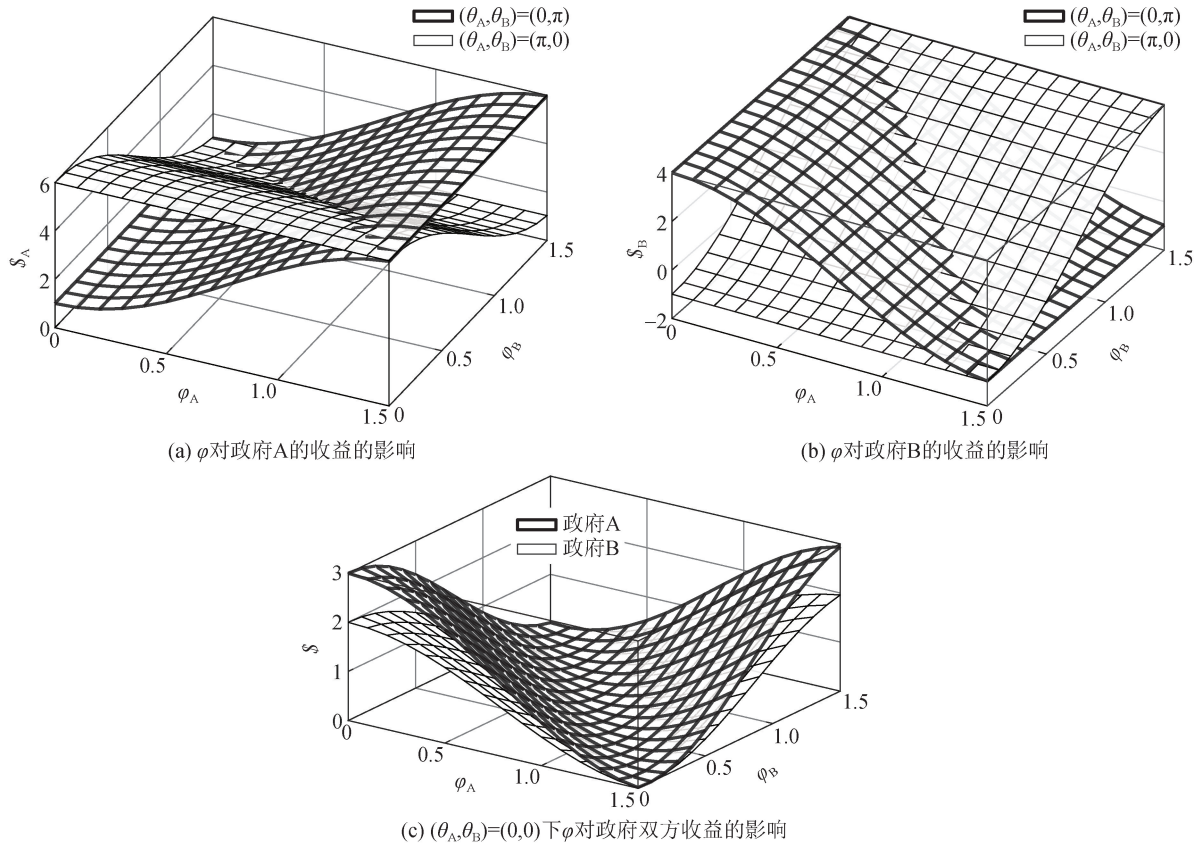


图 6 给定 θ 值情况下考察 ϕ 对政府收益的影响

(三) 纠缠度 ω 对双方收益的影响

以上分析都是在最大纠缠下的设定下,分析 θ 和 ϕ 对于双方收益及系统均衡的影响,接下来将探讨在给定的策略下态的纠缠度对于双方收益的影响。

由表 4 可知,当 $\theta_A = \theta_B = \pi$ 或 $\phi_A = \phi_B = 0$ 时,纠缠度并不影响政府的收益,这表明当政府双方都采取背叛策略或者都采取非量子策略时,双方收益不受到系统纠缠度的影响。这是显然的,因为当政府双方都采取背叛时,两者的收益都降为 0,而当双方都采取非量子策略时,双方的收益坍塌为 θ 之间的博弈,与纠缠系数无关。表 4 显示,一旦一方政府选择了 $\hat{U}(0, \pi/2)$ 策略,如果另一方政府不采取相同的策略,那么不采取相同策略政府的利益将随着纠缠度的增加而减少。以政府 A 采取 $\hat{U}_A(0, \pi/2)$,政府 B 采取 $\hat{U}_B(\pi, 0)$ 策略为例,双方收益随纠缠度变化而变化的关系如图 7 所示。

由图 7 可知,当政府 A 采取量子合作策略,而政府 B 采取背叛策略时,政府 A 的收益随纠缠度的增加而上升,政府 B 随纠缠度增加而下降。根据本文对量子纠缠的解释,纠缠度的增加意味着双方对彼此信息的了解更多,利益关系更紧密。因此,签署的“纠缠协议”需要在协同过程中进行信息公开和信息共享,将政府

表 4 考虑态纠缠时四种特殊策略下收益随纠缠度的变化情况

政府 A	政府 B			
	$\hat{U}_B(0,0)$	$\hat{U}_B(\pi,0)$	$\hat{U}_B(0,\pi/2)$	$\hat{U}_B(\pi,\pi/2)$
$\hat{U}_A(0,0)$	(3,2)	(1,4)	$(3\cos^2\omega \downarrow, 2\cos^2\omega \downarrow)$	(1,4)
$\hat{U}_A(\pi,0)$	(6,-1)	(0,0)	$(6-5\sin^2\omega \downarrow, 5\sin^2\omega-1 \uparrow)$	(0,0)
$\hat{U}_A(0,\pi/2)$	$(3\cos^2\omega \downarrow, 2\cos^2\omega \downarrow)$	$(5\sin^2\omega+1 \uparrow, 4-5\sin^2\omega \downarrow)$	(3,2)	$(5\sin^2\omega+1 \uparrow, 4-5\sin^2\omega \downarrow)$
$\hat{U}_A(\pi,\pi/2)$	(6,-1)	(0,0)	$(6-5\sin^2\omega \downarrow, 5\sin^2\omega-1 \uparrow)$	(0,0)

注: \uparrow (\downarrow) 代表地方政府的收益随纠缠度 ω 的增加而增加(减少)。

之间的经济实力、技术水平、治理业绩等信息传递给对方,以减少两者之间的信息不对称,促进双方对彼此的充分了解以增强彼此信任。这在一定程度上解释了信息公开可以避免道德风险。此外,“纠缠协议”的签订使得“背叛”成本增加,从而加强了地方政府履行自身职责的约束力,促使经济落后地区更倾向于积极参与协同治理,努力提高协同治理能力。因此,“纠缠协议”能够将污染治理的外部性内部化,有效缓解搭便车的问题。

由以上三节对于纠缠态下关键参数的分析可知,在纠缠状态下,地方政府的利益与 θ 和 φ 都有关,并且在最大纠缠下, $[\hat{U}_A(0, \pi/2), \hat{U}_B(0, \pi/2)]$ 为系统均衡解,同时也是帕累托(Pareto)最优解。此外,在给定具体的策略下,态的纠缠度也会影响政府双方的收益,一旦一方政府选择量子版合作策略,另一方选择不合作的话,其收益将随纠缠度的增加而减少。也就是说,信息的公开和共享会在一定程度上影响地方政府的协同治理收益,不进行信息共享的一方将面临一定的惩罚,这表明本文对量子纠缠解释是合理的。量子纠缠综合运用惩罚和信息披露机制,在某种意义上解决了搭便车问题。因此,政府双方联合签订协同治理的“纠缠协议”是很有必要的。

(四)“纠缠协议”规定

由于“纠缠协议”对于协同政府双方维持合作具有重大意义,因此接下来将明确规定“纠缠协议”的具体内容。

1. 明确规定空气治理信息的开放和共享

根据本文第三部分对于量子纠缠的解释,纠缠程度代表政府对彼之间的信息了解程度,地方政府对协作区域的整体环境状况了解得越详细充分,则越能制定明确有效的治理方案。因此,协议则要求规定协作地区之间进行环境空气质量动态数据和预报信息的共享、通报区域大气污染联防联控工作进展,交流和总结工作经验,在提升治污技术和强化科研分析等方面开展广泛合作,统筹协调解决区域内大气污染防治工作中的重大问题。

2. 明确规定责任划分和相应的处罚条款

由表3可知,当一方政府选择了量子版合作策略时,若另一方政府选择不积极协作则将独自承担所有治污成本。同时,由图7可知,纠缠度提高会降低不积极协作政府的收益而增加积极协作政府的收益,纠缠度强化了地方政府承担责任的约束力。以上两种情形可作为对消极协作政府的一种惩罚机制,因此,在“纠缠协议”中明确责任划分和处罚条款,可以激励地方政府尤其是经济落后地区政府积极参与环境协同治理工作,确保地方政府不必担心其他政府的搭便车行为带来的风险。

3. 明确规定协同治理的各项绩效指标和评价体系

由命题二和命题三可知,在考虑态纠缠后,量子策略中的协同治理意愿和协同治理能力都会影响政府的收益及协同合作稳定性。然而以上两者存在一定的主观性,难以量化进行评判。为此,协议需要建立一些可观察和量化的评估指标,将隐性的“合作意愿”转向对显性的、可量化的重要绩效指标的考量。此外,借助第三方组织在事前对地区的治理水平和治理能力进行评估,并规定在单位时间内要实现的目标和投入,事后对治理成果进行检验,并予以相应的奖励和处罚,激励协同双方在协同治理成果上“说实话”,抑制了隐瞒和夸大绩效指标的行为。

为了说明以上“纠缠协议”内容的适用性和科学性,本文将选取我国部分具有代表性的区域大气污染防治协同治理协议,并与本文的“纠缠协议”内容进行对比,结果如表4所示。

由表4可知,长江三角洲地区率先签订大气联合防治协议,但由于签订年份较早,其内容仅限于划分各区域的治理责任,信息共享和绩效评估尚未规定。此外,汾渭平原作为全国大气污染防治重点区域,空气质

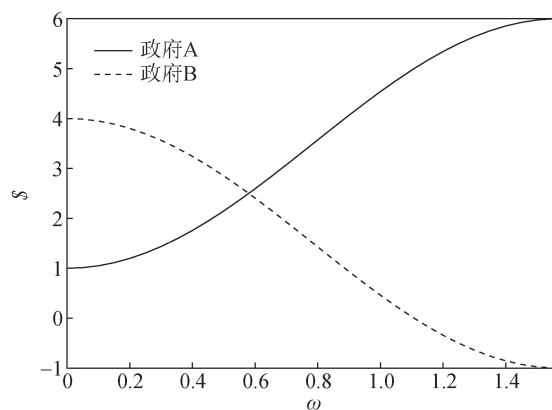


图7 纠缠度对政府双方收益的影响

表 4 我国部分典型区域大气污染协同治理协议内容对比

协同地区	协议名称	时间	信息共享	责任划分	绩效评估
上海、江苏、浙江	《长江三角洲地区环境保护工作合作协议》	2008	0	1	0
广东、香港、澳门	《粤港澳区域大气污染联防联控合作协议书》	2014	1	0	0
山西、陕西、河南	汾渭平原大气污染防治协议作小组第二次全体会议	2019	1	1	0
四川、重庆	《关于深化川渝两地大气污染联合防治的协议》	2020	1	0	1
北京、天津、河北	《“十四五”京津冀生态环境联合框架协议》	2022	1	1	1

注:资料来源于环境局官网。

量倒数城市多,而目前晋陕豫三省政府之间的合作仅限于会议磋商等非制度化地方政府治理,由于合作深度不够,导致汾渭平原雾霾府际协同治理陷入了“制度困境”。不难发现,除了沪苏浙区域因较早签订协议外,其他地区都能实现空气治理信息共享,但在治理绩效考核、处罚与责任划分方面却缺乏明确规定,只有京津冀区域综合了三方面因素做出了明确规定,截至目前,京津冀区域大气治理成效显著。

六、结论与建议

(一) 结论

鉴于区域大气污染协同治理通常存在搭便车现象,本文建立经济实力存在差异的两个相邻政府之间的量子博弈模型,分别在不考虑态的纠缠、考虑态的纠缠两种情形下,利用量子策略对区域协同治理过程中的政府行为作了细致的阐述与分析。在府际间协同治理的情境下,“纠缠态”使政府之间的利益紧密关联,并通过信息传递将隐性的参数显性化,得出以下主要结论:

(1) 利用量子博弈方法研究大气污染协同治理问题是合理的。量子博弈中的量子状态、量子策略和量子纠缠等概念能很好地契合大气污染协同治理情形。在现实生活中,府际间协同合作的策略选择并非是“合作-不合作”这种非此即彼的二元策略集,政府的合作意愿是一个连续策略集,存在介于“合作”与“不合作”中间的状态,这种假设基础类似于量子世界中的叠加和纠缠,也更加贴近现实的研究情境。因此,量子博弈模型拓展了经典博弈模型的策略空间,突破了经典博弈模型假设的局限,更加适用于研究现实中策略选择并非是非此即彼而是多样兼容的协同合作问题。

(2) 最大纠缠态和完全的量子策略可以有效解决政府“搭便车”问题,促进地方政府积极参与大气污染协同治理。由命题一可知,当两个地方政府处于非纠缠状态时,即使合作的一方采用“完全量子策略”,“背叛的代价”仍然需要积极合作的一方承担,经济实力较弱的地区就会采取搭便车的行为。由命题二可知,当双方都处于纠缠状态时,如果发达地区采用非量子策略,则发达地区选择合作策略的条件是欠发达地区的合作意愿超过一定阈值;若欠发达地区采用非量子策略,则欠发达地区选择合作策略的条件更为苛刻。由命题三可知,当两个地方政府处于最大纠缠且都选择完全量子策略时,双方都愿意积极参与区域协同治理,此时,“背叛代价”由背叛方承担,合作方不需要承担对方背叛的风险,搭便车问题得到有效解决。

(3) 量子纠缠和量子策略通过利益关联和绩效考核,强化了政府双方履行自身职责的约束力。根据第三部分对量子纠缠的解释,纠缠度的增加表示双方对彼此的信息了解越充分,利益关联越紧密,彼此之间更为信任。由第四部分分析可知,考虑态纠缠之后,更易实现“政府双方利益随合作意愿增加而增加”这一激励结果,同时通过图 7 发现,纠缠度使得背叛的成本增加,从而对政府行为起到了约束作用。此外,量子策略将协同治理意愿和协同治理能力两大隐性因素显性化,通过观测收益结果能在一定程度上反映政府双方的合作意愿和努力程度,并根据事先制定的绩效考核制度对未完成目标的一方进行处罚,避免了不可观测因素引发的“道德风险”,从而约束了政府双方的合作行为。

在现有关于大气污染协同治理的文献中,例如,王江等^[1]和 Liu 等^[34]采用经典博弈方法指出协同治理过程中容易出现合作困境,为了实现帕累托最优,他们通过设计奖惩机制、信息披露机制和签订合同来解决搭便车问题,但王江等^[1]的研究并没有提供一个能够实现稳定的均衡点。本文研究表明,量子博弈方法可

以实现帕累托最优的稳定结果,量子机制可以扩展博弈双方的策略空间,同时考虑双方状态的持续变化。因此,可以得出结论,量子博弈与经典博弈相比具有一定的优势,量子博弈的策略集的优势是由独特的叠加和纠缠特征决定的。此外,本文研究结果证实了刘霞等^[29]及 Zhang 和 Xing^[25]的研究中关于量子策略与经典策略比较的结论,他们都认为在两人合作博弈中,增加纠缠程度的量子博弈会比经典博弈产生更好的均衡结果。

(二) 政策建议

根据上述结论,推进区域大气污染府际协同治理的关键是综合考虑协同合作意愿、协同治理能力以及协同治理协议的制定和实施。本文的具体政策建议如下:

1. 推动地方政府数字化转型,建立空气质量信息共享平台

首先,各区域环保部门要联合建立线上空气质量信息公布平台,实时同步公布空气质量监测数据,实现空气质量动态数据和预报信息的共享,对区域空气污染变化趋势进行分析和预测,及时发布预警信息;其次,充分发挥互联网技术的功能,构建环保意见反馈机制,利用网络媒介拓展社会公众意见建议反馈渠道,充分调动公众参与大气污染治理的积极性;最后,建立企业排放数据库。环保督察组应定期或不定期进行实地暗查并上传检测数据,及时通报偷排、超排企业,并督促重污染企业安装自动监控设备和运行系统并与生态环境部监察中心联网,以便实施远程监测,从源头上减少污染排放。

2. 完善大气污染协同治理绩效评估和问责机制

首先,将区域生态环境效益和生态文明建设成果转化为清晰可量化的指标,作为政绩考核和评价的依据,促使各级政府形成内生动力。此外,除了中央对于地方治理绩效的纵向评估之外,还应进行建立在协同共识上的府际间的内部横向评估,形成成员内部的相互监督。其次,借助技术手段提高评估机制的效率与科学性,综合考虑各地政府在大气污染协同治理中发挥的作用与表现,建立更加科学全面的指标评价体系,为责任划分提供依据。最后,要健全协同治理的问责机制。问责的目的是对政府组织及官员的行为形成责任约束,一方面要加强问责过程的规范性,明确污染治理的因果关系与权责关系;另一方面要进一步细化和量化问责事由,建立规范、统一的问责标准,保证问责公平。

3. 培养区域认同感、建立府际信任

地方政府各自为政,分割化、单一化的治理模式难以形成治理合力,在推进区域一体化的背景下,要强化地方间的观念认同和价值共识,赋予地方政府区域归属感。此外,信任是合作的基础,地方政府应当基于“互信”理念签订生态协同治理协议,并在协议中做出承诺,适时公开履行情况加强自身的信用度建设。再者,地方政府在开展生态治理的过程中需避免仅追求自身利益最大化,而应通过对话交流实现信息对称,增进彼此间信任。提高府际信任将减少合作的不确定性,建立在互信基础上的合作才能维持协同稳定,实现共赢。最后,要通过生态共治、环境共享的理念指引和良好的府际信任关系实现府际协同治理的长治久安,从“以邻为壑”迈向“同舟共济”,共同打赢“蓝天保卫战”。

(二) 结语

本文构建双异质政府之间的量子博弈模型,通过策略拓展方式有效解决了大气污染府际协同治理的“搭便车”问题,并基于对量子策略和量子纠缠的解读,制定了协同治理“纠缠协议”,最后根据研究结论提出了三点管理启示,为我国跨区域生态协同治理模式提供一定的理论参考。但也存在一定局限:本文只考虑了两个政府之间的博弈过程,在现实中,大气污染治理问题往往涉及主体的多样性和利益的复杂性,在未来的研究中,将进行多主体博弈分析,并进行数据收集引入实证分析验证模型的适用性。

参考文献

- [1] 王江,王鹏.流域府际生态协同治理优于属地治理的证成与实现——基于动态演化博弈模型[J].自然资源学报,2023,38(5):1334-1348.
- [2] ZHANG M, LI H, SONG Y, et al. Study on the heterogeneous government synergistic governance game of haze in China[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 248: 109-118.
- [3] 景熠,杜鹏琦,曹柳.区域大气污染协同治理的府际间信任演化博弈研究[J].运筹与管理,2021,30(5):110-115.
- [4] 谢侃侃.数字共治视角下长三角城市群协同治理的主要实践与对策分析[J].技术经济,2023,42(2):100-108.

- [5] 孙静, 马海涛, 王红梅. 财政分权、政策协同与大气污染治理效率——基于京津冀及周边地区城市群面板数据分析[J]. 中国软科学, 2019(8): 154-165.
- [6] 刘燕, 叶晴琳. 动机与能力成都平原经济区大气污染协同治理的政策研究[J]. 公共管理与政策评论, 2022, 11(6): 49-58.
- [7] 阎波, 武龙, 陈斌. 大气污染何以治理? ——基于政策执行网络分析的跨案例比较研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(7): 82-92.
- [8] 赵志华, 吴建南. 大气污染协同治理能促进污染物减排吗? ——基于城市的三重差分研究[J]. 管理评论, 2020, 32(1): 286-297.
- [9] WANG Y, ZHAO Y. Is collaborative governance effective for air pollution prevention? A case study on the Yangtze river delta region of China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 292(3): 112-119.
- [10] GE T, CHEN X, GENG Y, et al. Does regional collaborative governance reduce air pollution? Quasi-experimental evidence from China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 419(4): 138-146.
- [11] 崔和瑞, 辛媛, 赵巧芝. 区域协同治理政策的大气污染减排效应研究——基于双重差分法的实证检验[J]. 技术经济, 2022, 41(11): 94-103.
- [12] KOU P, HAN Y, QI X. The operational mechanism and effectiveness of China's central environmental protection inspection: Evidence from air pollution[J]. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2022, 81: 101-115.
- [13] 李倩, 陈晓光, 郭士祺, 等. 大气污染协同治理的理论机制与经验证据[J]. 经济研究, 2022, 57(2): 142-157.
- [14] LI Y, ZHAO Y, FU J, et al. Reducing food loss and waste in a two-echelon food supply chain: A quantum game approach[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 80(5): 249-256.
- [15] FAN J, SHEN Z, WANG Z. The threshold effect of urban levels on environmental collaborative governance: An empirical analysis from Chinese cities[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(7): 3980-3987.
- [16] XUE J, ZHAO S, ZHAO L, et al. Cooperative governance of inter-provincial air pollution based on a black-scholes options pricing model[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 277: 124-131.
- [17] 贺一堂, 谢富纪. 基于量子博弈的产学研协同创新激励机制研究[J]. 系统工程理论与实践, 2019, 39(6): 1435-1448.
- [18] LI B, GAO F, ZENG Y. The impact of air pollution on corporate environmental information disclosure: Evidence from China[J]. *Journal of Environmental Protection and Ecology*, 2020, 21(5): 1628-1638.
- [19] 孙燕铭, 周传玉. 长三角区域大气污染协同治理的时空演化特征及其影响因素[J]. 地理研究, 2022, 41(10): 2742-2759.
- [20] ENK S V, PIKE R. Classical rules in quantum games[J]. *Physical Review A*, 2002, 66(2): 24306-24306.
- [21] LIU Y, CUI M, GAO X. A research on incentive method of investment linkage based on the perspective of quantum game[J]. *Finance Research Letters*, 2022, 52(3): 103-114.
- [22] MEYER D A, 1999. Quantum strategy[J]. *Physical Review Letters*, 82(5): 1052-1055.
- [23] EISERT J, WILKENS M, LEWENSTEIN M. Quantum games and quantum strategies[J]. *Physical Review Letters*, 1999, 83(15): 3077-3080.
- [24] ZHANG X L, YANG C, WANG Y H. The influence of entanglement on complex dynamics of a quantum Stackelberg duopoly with heterogeneous expectations[J]. *Quantum Information Processing*, 2022, 21(2): 1-14.
- [25] ZHANG C H, XING P. A research on service quality decision-making of Chinese communications industry based on quantum game[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Application*, 2015, 432: 9-15.
- [26] MARINATTO L, WEBER T. A quantum approach to static games of complete information[J]. *Physics Letters A*, 2000, 272(5/6): 291-303.
- [27] IQBAL A, TOOR A H. Evolutionarily stable strategies in quantum games[J]. *Physics Letters A*, 2001, 280(5): 249-256.
- [28] TOYOTA N. Quantization of the stag hunt game and the Nash equilibrium[J]. *Physics (College Park Md)*, 2003, 25(8): 203-214.
- [29] 刘霞, 张云玥, 李梦琪. 面向交易型股票市场操纵行为的量子监督博弈模型与仿真分析[J/OL]. 中国管理科学, 2022: 1-12[2024-05-27]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2022.0166>.
- [30] 黄定轩, 吴永娇, 卢锐, 等. 协调博弈量子演化模型分析[J]. 中国管理科学, 2023, 31(6): 253-264.
- [31] BUSEMEYER J R, WANG Z. What is quantum cognition, and how is it applied to psychology? [J]. *Current Directions in Psychological Science*, 2015, 24(3): 163-169.
- [32] BENATTI F, FLOREANINI R, FRANCHINI F, et al. Entanglement in indistinguishable particle systems[J]. *Physics Reports*, 2020, 878: 1-27.
- [33] ISLAM R, MA R, PREISS P M, et al. Measuring entanglement entropy in a quantum many-body system[J]. *Nature*, 2015, 528(7580): 77-83.
- [34] LIU X, WANG W, WU W, et al. Using cooperative game model of air pollution governance to study the cost sharing in Yangtze River Delta region [J]. *Journal of environmental management*, 2022, 301: 113-120.

From Neighbors to Partners: Research on Inter-governmental Collaborative Governance of Regional Air Pollution Based on Quantum Game

Huang Dingxuan, Tan Binqiang

(School of Management, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: The issue of free-riding often exists in regional air pollution collaborative governance. To effectively address this issue, a quantum game model involving two heterogeneous governments was constructed using quantum game theory. The consideration of entangled states was discussed separately, and the game results were locked into a quantum version of cooperation strategies through strategy expansion. Based on the interpretation of quantum strategies and quantum entanglement, explicit provisions for the “entanglement agreement” in intergovernmental collaboration were made. The results show that entangled states and quantum strategies can effectively address the free-riding issue of governments. Quantum entanglement and quantum strategies, through interest association and index quantification, can avoid the issue of “moral hazard” and strengthen the binding force on both governments to fulfill their responsibilities. Based on the conclusions, three policy implications were proposed: promoting the digital transformation of local governments and establishing an air quality information-sharing platform, improving the performance evaluation and accountability mechanism for collaborative air pollution governance, fostering regional identity and establishing intergovernmental trust. These implications provide decision-making references for advancing regional air pollution collaborative governance in China.

Keywords: regional air pollution; collaborative governance; “free-rider”; quantum games; quantum entanglement