

DOI: 10.13476/j.cnki.nsqdqk.2022.0116

褚钰, 付景保, 朱九龙. 基于图模型的南水北调中线水源地生态环境多主体治理冲突分析[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(6): 1179-1187. CHU Y, FU J B, ZHU J L. Conflict analysis of multi-agent ecological environment governance of water resources based on graph model in the middle route of the South-to-North Water Transfer Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(6): 1179-1187. (in Chinese)

基于图模型的南水北调中线水源地生态环境 多主体治理冲突分析

褚钰¹, 付景保¹, 朱九龙²

(1. 河南工程学院管理工程学院, 郑州 451191; 2. 南阳理工学院范蠡商学院, 河南 南阳 473004)

摘要: 采用通过字典序偏好规避现实冲突中主体偏好难以量化的图模型理论, 对中线水源地生态环境多主体治理冲突进行动态描述, 分析冲突主体博弈的均衡解, 探究冲突的动态演化。分析表明, 中线水源地管理机构对地方政府的激励有力地推动了中线水源地生态环境多主体治理冲突向均衡状态演化。中线水源地管理机构应结合地方政府的发展需求, 积极探索多种激励模式, 引导地方政府积极参与水源地生态环境保护, 最终形成水源地生态环境治理的多主体合作局面。中线水源地生态环境多主体治理冲突是不断演化的, 在一定时间及环境下的均衡是暂时的, 这种均衡会在水源地生态环境多主体的多轮博弈中向下一个均衡演进。

关键词: 图模型; 南水北调中线水源地; 生态环境治理; 多主体; 冲突

中图分类号: TV67;X24 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



自 2014 年底南水北调中线工程通水以来, 南水北调水已逐渐成为沿线大中城市的主力水源^[1]。水源地生态环境保护是保证水质良好的基础与关键措施, 然而, 水源地涉及的甘肃、陕西、河南、四川、重庆和湖北 6 省(市)^[2] 经济社会发展总体水平不高, 受限于经济条件, 具有有限理性经济人特征的地方政府, 在生态环境治理过程中, 相互之间展开利益博弈。厘清水源地各地方政府之间的博弈关系, 有助于认识水源地地方主体行为博弈的内在规律, 从而为水源地生态环境治理决策提供有效的依据。

学者们^[3-8] 围绕水源地生态环境治理, 主要从两方面展开研究: 一方面, 从水源地生态阻控及修复、土地利用变化、生物多样性、水质变化和生态补偿等微观角度展开, 为水源地生态治理提供关键技术支撑; 另一方面, 从协同治理的宏观角度, 对水源地

生态治理的多主体博弈问题展开研究, 为开展生态环境协同治理提供决策依据。后者的研究主要采用演化博弈^[9]、混合均衡博弈^[10] 对水源区和受水区两类主体的行为博弈进行分析, 对水源区域内不同主体间的行为博弈关注较少。通过对南水北调中线水源地调研发现, 区域内不同地方主体间利益交叉冲突现象普遍存在, 显著影响和制约了中线水源地生态环境治理效果。为此, 聚焦中线水源地多主体利益冲突问题, 研究多主体之间的博弈和演化问题, 对于扭转现阶段中线水源地生态环境治理多主体冲突局面、提升治理效果具有重要现实意义。

当前, 对于冲突主体间行为博弈的研究, 主要采用经典博弈论方法^[11], 这类方法能够对利益主体间的相互作用进行有效分析, 但其分析建立在对主体收益量化的基础上, 难以满足现实中冲突主体收

收稿日期: 2022-05-16 修回日期: 2022-08-30 网络出版时间: 2022-11-23

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20221122.1312.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(71804042; 42077449); 国家社会科学基金项目(21BGL248); 河南省哲学社会科学规划项目(2022BJJ036); 河南省高等学校青年骨干教师培养计划(2021GGJS160)

作者简介: 褚钰(1984—), 女, 河南郑州人, 副教授, 博士, 主要从事资源配置与环境治理研究。E-mail: cychuyu@163.com

益难以被量化的需求^[12]。为此, Fraser 等^[13]、Fang 等^[14-15] 和于晶等^[16] 将序数偏好理论引入经典博弈论, 依据主体的偏好进行比较对象的相对排序, 形成字典序偏好排序, 在此基础上对多主体之间的策略互动过程进行研究, 定义多种均衡解, 形成了图模型冲突分析理论^[17-20], 开发了基于图模型冲突分析理论的决策支持系统 GMCR。图模型冲突分析理论仅需要基于定性的相对偏好信息进行建模, 有效解决了经典博弈论中主体收益难以量化的问题, 得到国内外学者^[21-26] 的广泛关注, 并逐渐在水资源配置、生态环境治理、跨区域水质改善和跨界水污染冲突等多个领域得到应用。南水北调中线水源地生态环境治理涉及多个利益主体, 主体的利益构成复杂, 偏好信息难以量化, 图模型冲突分析理论为其主体冲突分析提供了新的途径。以中线水源地为研究对象, 构建中线水源地生态环境多主体治理冲突图模型, 进行地方主体间的行为冲突演化分析, 寻求水源地生态环境多主体治理冲突的均衡解, 为中线水源地管理机构优化生态环境治理提供理论参考和决策依据。

1 图模型冲突分析理论

1.1 图模型概述

图模型冲突分析理论采用动态有向图描述多主体动态博弈的过程, 并基于多种均衡解定义, 对多主体动态博弈的演化进行均衡分析。图模型可以表示为 $G=\{N, A, S, P\}$, 其中:

N 代表局中人的集合。局中人指的是冲突中涉及的所有主体, 每个局中人相互独立, 拥有独立的决策权。

A 代表局中人的策略集合。在冲突中, 各局中人从自身利益出发, 选择执行不同的策略决策, 这些策略决策形成了策略集合。在冲突博弈过程中, 每个局中人至少选择一个策略, 每个策略或被局中人选中或不被选中。

S 代表局中人博弈的可行状态集合。局中人不同的策略决策形成了冲突治理过程的各种状态, 但并非所有状态在实际中逻辑可行, 逻辑可行的状态形成了可行状态集合。

P 代表局中人对可行状态的相对偏好集合。相对偏好集合表示局中人对所有可行状态 S 中任意两个状态的偏好比较。如, 当某个局中人分别对可行状态 S_1 和 S_2 、 S_2 和 S_3 进行偏好比较: 对于 S_1 和 S_2 ,

认为 S_1 较好, 记为 $S_1 > S_2$; 对于 S_2 和 S_3 , 认为 S_2 较好, 记为 $S_2 > S_3$ 。那么, 对于 S_1 、 S_2 和 S_3 , 该局中人的字典序偏好排序为 $S_1 > S_2 > S_3$ 。

1.2 图模型冲突分析

图模型冲突分析的基本流程: 确定冲突中的局中人; 确定局中人的策略集合; 分析所有状态的逻辑可行性, 确定可行状态集合; 结合实际情况, 分析局中人对可行状态的字典序偏好排序; 根据不同的均衡解定义, 分析冲突的均衡解; 绘制冲突的状态转移图, 进行冲突的演化分析。图模型冲突分析的基本流程见图 1。

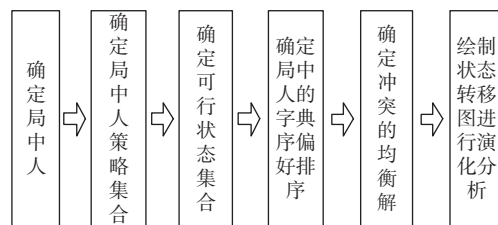


图 1 图模型冲突分析的基本流程

Fig. 1 The basic flow of graph model conflict analysis

2 多主体治理冲突的图模型建模

2.1 局中人及策略集

南水北调中线水源地生态环境治理涉及水源地管理机构、水源地地方政府、环境保护部门、林业管理部门、企业和农户等多个主体。自丹江口水库库区及上游水污染防治和水土保持部际联席会议机制建立以来, 国务院先后印发实施了丹江口水库库区及上游水污染防治和水土保持“十一五”“十二五”“十三五”“十四五”规划, 河南、湖北和陕西 3 省是规划实施的责任主体, 对辖区内水源地水污染防治进行治理。因此, 地方政府是中线水源地生态环境治理的责任主体和实施主体, 企业和用户的参与度相对有限。主要对政府主体间的行为博弈进行分析, 并根据决策管理层级, 将政府主体分为水源地管理机构和地方政府两类: 前者主要为部际联席会议机制及生态环境部长江流域生态环境监督管理局等, 是水源地生态环境治理的决策层; 后者为水源地各地方政府, 是生态环境治理决策的执行主体, 主要为河南、湖北和陕西 3 省。从生态环境治理的行为角度对地方政府主体细分为污染的引起者和污染的被影响者两类。基于上述分析, 中线水源地生态环境多主体治理冲突的局中人主要包括水源地管理机构和两类地方政府。为便于建模, 文中分别用变量 GC 、 GL_1 和 GL_2 表示水源地管

理机构、引起污染和受污染影响的地方政府。

2.1.1 水源地管理机构策略分析

水源地管理机构在一定程度上是中央政府的代表者,追求的是水源地整体生态环境治理质量的提升。水源地管理机构依据《水污染防治行动计划》(2015)、丹江口库区及上游水污染防治和水土保持“十三五”规划(2017)、“十四五”规划(2021),对水源地生态环境治理工作进行管理,对地方政府的生态环境治理行为进行监督。根据“十三五”规划和“十四五”规划,河南、湖北和陕西是规划实施的责任主体,水源地管理机构对3省进行统筹协调和监督,将规划实施评估结果纳入地方政府生态文明目标考核评价体系,对责任主体进行激励或惩罚:一方面,通过激励补偿鼓励地方政府重视环境保护,积极推动环境污染治理;另一方面,通过惩罚措施对地方政府消极的环境治理行为进行约束。因此,水源地管理机构GC的策略集合为{激励补偿;惩罚}。

2.1.2 水源地地方政府策略分析

水源地地方政府面临经济发展瓶颈与生态环境保护机遇。一方面,水源地部分地区刚刚脱贫摘帽,如淅川县、内乡县和卢氏县等,经济发展意愿强烈;另一方面,根据“十四五”规划,水源地立足生态保护与经济社会高质量发展,以实现“保供水”向“强生态、促发展”转变为目标。作为有限理性的“经济人”,水源地地方政府从自身利益出发,根据对经济社会发展和生态环境保护重视程度的不同,其行为策略集可概化为{发展经济,忽视环境治理;以发展经济为主,适当进行环境治理;重视环境治理,兼顾经济发展},这类地方政府主要指污染的引起者,记为行为主体 GL_1 。水源地生态环境属于典型的准公共产品,呈现典型的非排他性,因此针对地方政府 GL_1 的不同行为策略,受污染影响的其他地方政府既可以选择对污染进行治理,也可以选择不治理,这类主体(记为 GL_2)的策略集为{治理;不治理}。在水源地生态环境治理过程中,水源地地方政府之间的行为相互影响,呈现显著的反复博弈特征。

综合上述分析,水源地生态环境治理冲突的局中人及其策略集合,见表1。

2.2 可行状态集及字典序偏好

2.2.1 可行状态集

从表1可以看出,中线水源地生态环境治理的3个局中人共有7种策略可选择,用Y表示某一策略被局中人选择,用N表示该策略未被局中人选择。每个策略都有被局中人选择不选择两种可能。

理论上,水源地生态环境治理共有 $2^7=128$ 种状态。然而,128种状态中相当一部分状态不符合实际逻辑,这类状态称为逻辑不可行状态。逻辑不可行状态主要包含以下两类情况。

表1 水源地生态环境治理冲突的局中人及其策略集合
Tab. 1 Participants and their strategies of ecological environmental governance conflicts in water source area

局中人	策略集合
水源地管理机构(GC)	{激励补偿;惩罚}
水源地地方政府(GL_1)	{发展经济,忽视环境治理;以发展经济为主,适当进行环境治理;重视环境治理,兼顾经济发展}
水源地地方政府(GL_2)	{治理;不治理}

互斥策略原则,指局中人不可能同时选择的策略,所有包含互斥策略的状态都是不可行状态。如对局中人 GL_1 来讲,不可能同时既选择“发展经济,忽视环境治理”,又选择“以发展经济为主,适当进行环境治理”,则(ZZ YYZ ZZ)、(ZZ ZYY ZZ)、(ZZ YZY ZZ)均将作为逻辑不可行状态被排除,其中Z的取值集合为{Y, N}。

至少1个策略原则,即每个局中人至少选择1个策略,不可能不进行任何策略选择。如对局中人 GL_1 来讲,至少选择1个策略,3个策略均未被选择的状态均为逻辑不可行状态,则(ZZ NNN ZZ)均被作为逻辑不可行状态而被排除。

通过对逻辑不可行状态进行剔除,水源地生态环境治理共有18种可行状态,见表2。

2.2.2 可行状态字典序偏好排序

图模型采用字典序偏好排序的方法,根据局中人对每种可行状态的相对偏好信息,对所有可行状态进行排序,这种方法的本质是序数排序,规避了对局中人偏好信息难以量化的困难^[14-15]。对于某个主体,对于状态 S_j 更加偏好状态 S_i ,则其字典序偏好记为 $S_i > S_j$ 。在水源地生态环境治理过程中,局中人从自身利益出发,对水源地生态环境治理的各种可行状态有各自的字典序偏好排序。

对于水源地管理机构GC:水源地管理机构追求不断提高水源地生态环境质量及高质量发展,根据水源地部际联席会议机制,其对地方政府适时进行统筹协调和评估。依据不同策略组合效用的大小,水源地管理机构GC,其自身策略的字典序偏好为:“激励补偿”与“惩罚”并用(同时选择策略1和

策略 2) > “激励”(策略 1) > “惩罚”(策略 2); GC 对地方政府 GL₁ 策略的字典序偏好为: “重视环境治理, 兼顾经济发展”(策略 5) > “以发展经济为主, 适当进行环境治理”(策略 4) > “发展经济, 忽视环境治理”(策略 3); 对地方政府 GL₂ 策略的字典序偏

好为“治理”(策略 6) > “不治理”(策略 7)。综合水源地管理机构 GC 对自身及其 GL₁、GL₂ 策略集合的字典序偏好顺序, 可得到水源地管理机构 GC 的完整字典序偏好顺序为 S₉ > S₁₈ > S₈ > S₁₇ > S₇ > S₁₆ > S₆ > S₁₅ > S₅ > S₁₄ > S₄ > S₁₃ > S₃ > S₁₂ > S₂ > S₁₁ > S₁ > S₁₀。

表 2 水源地生态环境治理冲突的可行状态

Tab. 2 The feasible status of ecological environmental governance conflicts in water source area

局中人	策略	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉	S ₁₀	S ₁₁	S ₁₂	S ₁₃	S ₁₄	S ₁₅	S ₁₆	S ₁₇	S ₁₈
GC	1 激励补偿	Y	N	Y	Y	N	Y	Y	N	Y	Y	N	Y	Y	N	Y	Y	N	Y
	2 惩罚	N	Y	Y	N	Y	Y	N	Y	Y	N	Y	Y	N	Y	Y	N	Y	Y
GL ₁	3 发展经济, 忽视环境治理	Y	Y	Y	N	N	N	N	N	N	Y	Y	Y	N	N	N	N	N	N
	4 以发展经济为主, 适当进行环境治理	N	N	N	Y	Y	Y	N	N	N	N	N	N	Y	Y	Y	N	N	N
	5 重视环境治理, 兼顾经济发展	N	N	N	N	N	N	Y	Y	Y	N	N	N	N	N	N	Y	Y	Y
GL ₂	6 治理	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	N	N	N	N	N	N	N	N
	7 不治理	N	N	N	N	N	N	N	N	N	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y

对于水源地地方政府 GL₁: 随着中线水源地逐渐成为重要水源地, 地方政府对生态环境保护越来越重视, 但由于水源地整体公共服务、基础设施等历史遗留问题较多, 城乡居民收入低于全国平均水平, 因此地方政府对经济发展和生态环境的重视程度将受绩效考评导向、地区发展实情等因素的影响发生变化。但无论地方政府 GL₁ 选择何种目标, 对地方政府 GL₁ 来讲, 水源地管理机构 GC 和地方政府 GL₂ 策略选择的字典序偏好是确定的, 分别是: “激励补偿”(策略 1) 和 “惩罚”(策略 2) > “激励补偿”(策略 1) > “惩罚”(策略 2)、 “治理”(策略 6) > “不治理”(策略 7)。基于此, 地方政府 GL₁ 在进行决策选择时, 部分状态的字典序偏好顺序可以确定: S₁ > S₃ > S₁₀ > S₁₂ > S₂ > S₁₁, S₄ > S₆ > S₁₃ > S₁₅ > S₅ > S₁₄, S₇ > S₉ > S₁₆ > S₁₈ > S₈ > S₁₇。当地方政府 GL₁ 追求的目标以经济发展为主时, 其完整的字典序偏好排序为: S₄ > S₁ > S₇ > S₆ > S₃ > S₉ > S₁₃ > S₁₀ > S₁₆ > S₁₅ > S₁₂ > S₁₈ > S₅ > S₂ > S₈ > S₁₄ > S₁₁ > S₁₇。当地方政府 GL₁ 追求的目标以生

态环境治理为主时, 其完整的字典序偏好排序为: S₇ > S₄ > S₁ > S₉ > S₆ > S₃ > S₁₆ > S₁₃ > S₁₀ > S₁₈ > S₁₅ > S₁₂ > S₈ > S₅ > S₂ > S₁₇ > S₁₄ > S₁₁。

对于水源地地方政府 GL₂: 作为地方政府 GL₁ 策略选择的影响者和“十四五”规划实施的主体之一, 根据“十四五”规划要求, 地方政府 GL₂ 更偏好在水源地管理机构 GC 管理下, 与地方政府 GL₁ 共同开展水源地生态环境治理。根据上述分析, GL₂ 和 GC 的策略选择优先顺序是确定的; 同时, 对 GL₂ 来讲, 其对 GL₁ 策略选择的字典序偏好顺序为“重视环境治理, 兼顾经济发展”(策略 5) > “以发展经济为主, 适当进行环境治理”(策略 4) > “发展经济, 忽视环境治理”(策略 3)。因此, 地方政府 GL₂ 的完整字典序偏好顺序为: S₉ > S₈ > S₇ > S₆ > S₅ > S₄ > S₁₈ > S₁₇ > S₁₆ > S₁₅ > S₁₄ > S₁₃ > S₃ > S₂ > S₁ > S₁₂ > S₁₁ > S₁₀。

综上分析, 水源地生态环境治理局中人的字典序偏好顺序见表 3。

表 3 局中人的字典序偏好顺序

Tab. 3 The players' lexicographical preference orders

局中人	字典序偏好顺序
GC	S ₉ > S ₁₈ > S ₈ > S ₁₇ > S ₇ > S ₁₆ > S ₆ > S ₁₅ > S ₅ > S ₁₄ > S ₄ > S ₁₃ > S ₃ > S ₁₂ > S ₂ > S ₁₁ > S ₁ > S ₁₀
GL ₁	追求经济发展 S ₄ > S ₁ > S ₇ > S ₆ > S ₃ > S ₉ > S ₁₃ > S ₁₀ > S ₁₆ > S ₁₅ > S ₁₂ > S ₁₈ > S ₅ > S ₂ > S ₈ > S ₁₄ > S ₁₁ > S ₁₇
	追求环境治理 S ₇ > S ₄ > S ₁ > S ₉ > S ₆ > S ₃ > S ₁₆ > S ₁₃ > S ₁₀ > S ₁₈ > S ₁₅ > S ₁₂ > S ₈ > S ₅ > S ₂ > S ₁₇ > S ₁₄ > S ₁₁
GL ₂	S ₉ > S ₈ > S ₇ > S ₆ > S ₅ > S ₄ > S ₁₈ > S ₁₇ > S ₁₆ > S ₁₅ > S ₁₄ > S ₁₃ > S ₃ > S ₂ > S ₁ > S ₁₂ > S ₁₁ > S ₁₀

3 多主体治理冲突图模型求解及演化分析

3.1 模型求解

图模型从不同的角度对局中人的行为进行描述,定义5种均衡解:Nash均衡(NR),一般超理性均衡(GMR),对称超理性均衡(SMR),序贯稳定均衡

(SEQ)和同步稳定均衡(SIM)^[13-14]。冲突中某状态能够满足不同均衡定义的情况越多,则该状态均衡性越强。基于这五种均衡解定义,对水源地生态环境多主体治理冲突图模型进行分析,得出表4的计算结果。

表4 不同情景下水源地生态环境治理图模型的均衡解

不同情景	稳定性定义	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9	S_{10}	S_{11}	S_{12}	S_{13}	S_{14}	S_{15}	S_{16}	S_{17}	S_{18}
GL ₁ 追求经济发展	NR						√												
	GMR			√	√	√	√	√	√	√				√	√	√	√		√
	SMR			√	√	√	√	√	√	√				√	√	√	√		√
	SEQ						√	√											√
	SIM						√	√											√
GL ₁ 追求环境治理	NR																		
	GMR		√	√	√	√	√	√	√	√				√		√	√	√	√
	SMR		√	√	√	√	√	√	√	√				√		√	√	√	√
	SEQ													√					√
	SIM													√					√

当地方政府GL₁追求经济发展时,可行状态3、4、5、6、7、8、9、13、14、15、16、18都是均衡状态,只有状态6同时满足5种稳定性定义,是强均衡状态,即水源地管理机构同时选择激励补偿及惩罚策略,地方政府GL₁选择策略“以发展经济为主,适当进行环境治理”,地方政府GL₂选择“治理”策略。

当地方政府GL₁追求生态环境治理时,可行状态2、3、4、5、6、7、8、9、13、15、16、17、18都是均衡状态,只有状态9同时满足5种稳定性定义,是强均衡状态,即水源地管理机构同时选择激励补偿及惩罚策略,地方政府GL₁选择策略“重视环境治理,兼顾经济发展”,地方政府GL₂选择“治理”策略。

3.2 基于状态转移图的演化分析

冲突分析中,局中人改变自己的行为策略,引起冲突状态的变化。在图模型分析中,可以通过构建状态转移图对各状态演化过程进行分析。对于中线水源地生态环境治理,将各局中人的策略选择引起的所有状态改变表示为有向弧线,从而绘制出状态转移图,见图2。图2中18个节点表示水源地生态环境治理的18个可行状态,箭线表示局中人改变策略选择引起的可行状态改变。

根据中线水源地生态环境治理现状,状态 S_{11} 为水源地生态环境治理的初始状态。在丹江口库区及上游水污染防治和水土保持“十一五”期间,水源地经济社会发展总体水平不高,受限于经济条件,多属于因国家大局需要而“被动”实施规划的状态,

地方政府GL₁(河南、湖北和陕西3省水源地区域地方政府)对生态环境治理的投入十分有限,更倾向大力发展地方经济,忽视生态环境治理,对水源地存在的较多污染企业采取宽松管理,这在很大程度上对水源地生态环境造成破坏。水源地管理机构GC(国务院南水北调办公室及部际联席办公室等)对地方政府GL₁忽视生态环境治理的行为依规进行惩罚,地方政府GL₂受限于经济条件,不愿意对地方政府GL₁大力发展经济造成的生态环境污染进行治理。

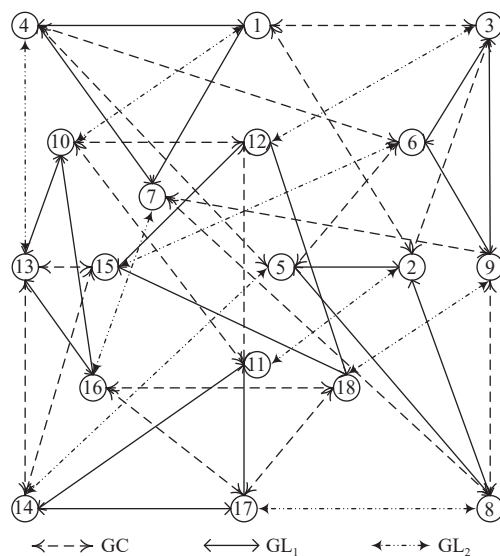


图2 水源地生态环境治理冲突图模型的状态转移图
Fig. 2 The state transition diagram of ecological environment governance conflict graph model in water source area

为了保护水源地的生态环境,保证水源地水质,水源地管理机构 GC 在原有惩罚的基础上,积极采用产业扶持政策倾斜、增加政府转移支出和吸引社会资本投入等方式,对地方政府进行激励补偿,即 GC 由初始状态时仅采用惩罚(策略 2)向既采用激励补偿又采用惩罚(同时采用策略 1 和 2)转变,水源地生态环境治理状态由 S_{11} 演化为 S_{12} 。在丹江口库区及上游水污染防治和水土保持“十二五”“十三五”期间,国务院有关部门优先安排水污染防治专项资金,加大对地方政府的转移支付力度,同时落实以控制单元为核心的目标责任落实机制,在激励和考核共同作用下,河南、湖北和陕西 3 省关闭水源地造纸、化工、制药和矿产加工等 1000 多家注册的污染企业,从工业点源控制等方面对生态环境进行治理,其策略由“发展经济,忽视环境治理”向

“以发展经济为主,适当进行环境治理”转变。同时,在激励和考核共同作用下,地方政府 GL_2 根据地方政府 GL_1 的策略转变调整自身策略,由“不治理”变为“治理”,水源地生态环境治理的状态进一步由 S_{12} 演化为 S_6 。

“十四五”以来,随着南水北调中线工程的作用日益凸显,水源地生态环境治理的重要性进一步增强。同时,地方政府在多项政策扶持下形成的绿色产业逐渐产生持续效益,河南、湖北和陕西将进一步提高对生态环境治理的重视程度,选择策略“重视环境治理,兼顾经济发展”,水源地生态环境治理的状态由 S_6 演化为理想状态 S_9 。

依据图 2,结合上述分析,水源地生态环境治理冲突的演化路径见表 5。

表 5 水源地生态环境治理状态的演化

Tab. 5 The state evolution of ecological environment governance in water source area

局中人	策略	可行状态				
		S_{11}	S_{12}	S_6	S_9	
GC	1 激励补偿	N	→	Y	Y	Y
	2 惩罚	Y	Y	Y	Y	Y
GL_1	3 发展经济,忽视环境治理	Y	Y	→	N	N
	4 以发展经济为主,适当进行环境治理	N	N	→	Y	→
	5 重视环境治理,兼顾经济发展	N	N	N	→	Y
GL_2	6 治理	N	N	→	Y	Y
	7 不治理	Y	Y	→	N	N

4 结论

图模型冲突分析理论对主体偏好信息进行字典序偏好排序建模灵活,为解决南水北调中线工程水源地生态环境多主体治理冲突问题提供了新的分析思路。本文对中线水源地生态环境治理中不同主体的行为进行抽象,构建了水源地生态环境多主体治理冲突的图模型,进行了均衡求解,基于状态转移图对治理冲突进行了演化分析。

中线水源地管理机构对地方政府的激励有力地推动了中线水源地生态环境多主体治理冲突向均衡状态演化。因此,中线水源地管理机构应结合水源地地方政府的发展需求,积极探索多种激励模式,引导地方政府积极参与水源地生态环境保护,最终

形成水源地生态环境治理的多主体合作局面,如不断健全和完善水源地生态保护成效与中央转移支付资金分配挂钩的激励机制;建立水源地生态保护绩效考核机制,将水源地生态环境治理纳入地方政府绩效考核体系,根据生态环境治理评估效果进行不同层级的绩效激励。

随着地方经济的发展及水源地生态环境治理的推进,中线水源地生态环境多主体治理的冲突也在不断演化,在一定时间及环境下的均衡是暂时的,这种均衡会在水源地生态环境多主体的多轮博弈中向下一个均衡演进。

参考文献(References):

[1] 翟家齐,赵勇,赵纪芳,等.南水北调来水对京津冀地

- 区用水竞争力的影响[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(3): 440-450. (ZHAI J Q, ZHAO Y, ZHAO J F, et al. The impact of South-to-North Water Transfer on water competitiveness in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2022, 20(3): 440-450. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2022.0044.
- [2] 左其亭, 王妍, 陶洁, 等. 南水北调中线水源地水文特征分析及其水资源适应性利用的思考[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(4): 42-49. (ZUO Q T, WANG Y, TAO J, et al. Hydrological characteristics and adaptive utilization of water resources in water source area of the middle route of Source-to-North Water Transfer Project[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2018, 16(4): 42-49. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2018.0095.
- [3] 赵志楠, 王俊健, 张元娜, 等. 南水北调中线水源地浮游植物群落结构及其生物多样性[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(5): 914-924. (ZHAO Z N, WANG J J, ZHANG Y N, et al. Phytoplankton community structure and biodiversity in the water source area along the middle route of South-to-North Water Transfer Project[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2022, 20(5): 914-924. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2022.0091.
- [4] 张田田, 陈有超, 齐文华, 等. 土地利用变化对丹江流域径流和泥沙时空格局的影响[J]. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(8): 1797-1811. (ZHANG T T, CHEN Y C, QI W H, et al. Effects of land-use change on the spatio-temporal patterns of runoff and sediment in the Danjiang River basin[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, 31(8): 1797-1811. (in Chinese))
- [5] 张怡雅, 袁飞, 张利敏, 等. 南水北调中线工程调水前后汉江中下游干流水质变化特征[J]. *水利水电科技进展*, 2022, 42(3): 14-19. (ZHANG Y Y, YUAN F, ZHANG L M, et al. Variation characteristics of water quality in middle and lower reaches of the Hanjiang River before and after middle route of South-to-North Water Transfer Project[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2022, 42(3): 14-19. (in Chinese)) DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2022.03.003.
- [6] 高鑫, 宋瑞震, 曾赛星, 等. 基于随机演化博弈的重大调水工程生态补偿: 以南水北调工程为例[J]. *工程管理科技前沿*, 2022, 41(1): 26-34. (GAO X, SONG R Z, ZENG S X, et al. Ecological compensation of major water transfer project based on stochastic evolutionary game: A case study of South-to-North Water Transfer Project[J]. *Frontiers of Science and Technology of Engineering Management*, 2022, 41(1): 26-34. (in Chinese)) DOI: 10.11847/fj.41.1.26.
- [7] 王超, 贾海燕, 雷俊山, 等. 南水北调中线水源地小流域面源污染生态阻控[J]. *环境工程学报*, 2020, 14(10): 2615-2623. (WANG C, JIA H Y, LEI J S, et al. Ecological control of non-point source pollution based on small watershed in the water source of the middle route of South-to-North Water Transfer Project[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2020, 14(10): 2615-2623. (in Chinese)) DOI: 10.12030/j.cjee.202002069.
- [8] 王超, 尹炜, 雷沛, 等. 南水北调中线水源地缓坡型库岸生态屏障构建[J]. *环境工程学报*, 2020, 14(11): 2930-2937. (WANG C, YIN W, LEI P, et al. Ecological barrier constructing in the gentle slope reservoir bank in the water source of middle route of South-to-North Water Transfer Project[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2020, 14(11): 2930-2937. (in Chinese)) DOI: 10.12030/j.cjee.202002117.
- [9] 刘孟凯, 郭晶. 调水工程水源地与受水区利益演化博弈分析[J]. *水电能源科学*, 2020, 38(3): 58-61. (LIU M K, GUO J. Evolutionary game between water source area and water receiving area in water transfer project[J]. *Water Resources and Power*, 2020, 38(3): 58-61. (in Chinese))
- [10] 王爱敏, 葛颜祥, 耿翔燕. 水源地保护区生态补偿利益相关者行为选择机理分析[J]. *中国农业资源与区划*, 2015, 36(5): 16-22. (WANG A M, GE Y X, GENG X Y. Analysis of behavior selection mechanism of ecological compensation stakeholders in water source protection areas[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2015, 36(5): 16-22. (in Chinese)) DOI: 10.7621/cjarrp.1005-9121.20150503.
- [11] 陈军飞, 裴金鹏. 基于博弈视角的三阶段流域水量

- 冲突协调分配研究[J]. *水利经济*, 2019, 37(1): 49-53,58,81. (CHEN J F, PEI J P. Three-stage coordinated allocation for basin water conflicts based on game theory[J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2019, 37(1): 49-53,58,81. (in Chinese)) DOI: 10.3880/j.issn.1003-9511.2019.01.009.
- [12] TISDELL J. The evolution of water legislation in Australia[M]. *Water Markets for the 21st Century*. Springer. 2014: 163-178. DOI: 10.1007/978-94-017-9081-9_9.
- [13] FRASER N M, HIPEL K W. Conflict analysis-models and resolutions[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 1985, 36(10). DOI: 10.2307/2582031.
- [14] FANG L P, HIPEL K W, KILGOUR D M, et al. A decision support system for interactive decision making-Part I: Model formulation[J]. *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on*, 2003, 33(1): 42-55. DOI: 10.1109/TSMCC.2003.809361.
- [15] FANG L P, HIPEL K W, KILGOUR D M, et al. A decision support system for interactive decision making-Part II: analysis and output interpretation[J]. *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on*, 2003, 33(1): 56-66. DOI: 10.1109/TSMCC.2003.809360.
- [16] 于晶, 赵敏, 孙冬营, 等. 基于图模型的流域上下游水质污染冲突研究[J]. *水利学报*, 2013(12): 1389-1398. (YU J, ZHAO M, SUN D Y, et al. Research on the water pollution conflict between the upstream area and the downstream area in a river basin based on GMCR[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013(12): 1389-1398. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.0559-9350.2013.12.001.
- [17] HIPEL K W, FANG L P. The Graph model for conflict resolution and decision support[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2020, PP(99): 1-11. DOI: 10.1109/TSMC.2020.3041462.
- [18] KE G Y, LI K W, HIPEL K W. An integrated multiple criteria preference ranking approach to the Canadian west coast port congestion conflict[J]. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39(10): 918-9190. DOI: 10.1016/j.eswa.2012.02.086.
- [19] HIPEL K W, FANG L P, KILGOUR D. M. Decision support systems in water resources and environmental management[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2008, 13(9): 761-770. DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0699.
- [20] HE S W, HIPEL K W, KILGOUR D M. Water diversion conflicts in China: A hierarchical perspective[J]. *Water Resources Management*, 2014, 28(7): 1823-1837. DOI: 10.1007/s11269-014-0550-1.
- [21] HIPEL K W, FANG L P, OUARDA T B, et al. An introduction to the special issue on tackling challenging water resources problems in Canada: A systems approach[J]. *Canadian Water Resources Journal*, 2013, 38(1): 3-11. DOI: 10.1080/07011784.2013.773643.
- [22] 姚珏, 葛察忠, 段显明, 等. 基于图模型的流域生态补偿冲突研究[J]. *环境保护科学*, 2018, 44(2): 25-31. (YAO J, GE C Z, DUAN X M, et al. Research of river basin eco-compensation conflicts based on graph model[J]. *Environmental Protection Science*, 2018, 44(2): 25-31. (in Chinese)) DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2018.02.005.
- [23] 孙冬营, 王慧敏, 牛文娟. 基于图模型的流域跨界水污染冲突研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2013, 22(4): 455-461. (SUN D Y, WANG H M, NIU W J. Research on transboundary water pollution conflicts in basin based on graph model[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2013, 22(4): 455-461. (in Chinese))
- [24] 褚钰. 基于图模型的流域水资源冲突分析[J]. *水电能源科学*, 2017, 35(11): 31-35. (CHU Y. Conflict analysis of river basin water resources based on graph model[J]. *Water Resources and Power*, 2017, 35(11): 31-35. (in Chinese)) DOI: CNKI:SUN:SD-NY.0.2017-11-008.
- [25] 曾勇, 杨志峰. 官厅水库跨区域水质改善政策的冲突分析[J]. *水科学进展*, 2004(1): 40-44. (ZENG Y, YANG Z F. Policy conflict analysis of water quality improving for the transboundary regions of Guanting reservoir[J]. *Advances in Water Science*, 2004(1): 40-44. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1001-6791.2004.01.008.
- [26] 徐海燕, 武梓馨, 吴正稿. 基于图模型反问题的上下游水污染冲突事件的第三方调解策略研究[J]. *水利经济*, 2021, 39(1): 40-46,78,81. (XU H Y, WU Z

X, WU Z G. Mediation strategy of third party for upstream and downstream water pollution conflict based on inverse problem of graph model for con-

flict resolution[J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2021, 39(1): 40-46,78,81. (in Chinese))
DOI: 10.3880/j.issn.1003-9511.2021.01.008.

Conflict analysis of multi-agent ecological environment governance of water resources based on graph model in the middle route of the South-to-North Water Transfer Project

CHU Yu¹, FU Jingbao¹, ZHU Jiulong²

(1. School of Management Engineering, Henan University of Engineering, Zhengzhou 450001, China;

2. Fanli Business School, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, China)

Abstract: Several local governing bodies are involved in the ecological environmental management of the middle route of the South-to-North Water Transfer Project. As a limited rational economic person, considering their economic benefit, local governments make different action decisions and play games with each other, which have a negative effect on ecological environmental management.

The graph model analysis method was used to dynamically describe the strategic interaction among the local governments in the ecological environment governance of water sources in the middle route. First, the main agents in the ecological environment governance in water resources and their respective strategy sets were analyzed. Then, based on the concept of lexicographic preference, the feasible statuses of the conflict were explored. The GMCR II software with five different definitions of equilibrium of NR, GMR, SMR, SEQ, and SIM was used to analyze the equilibriums of the conflict. Finally, considering the actual situation of water resources in the middle route of the South-to-North Water Transfer Project, the dynamic evolution of the ecological environment governance conflict was shown by the diagram.

In the process of ecological environment governance, incentive and compensation policies were used by the management institutions of water resources in the middle route to adjust the benefits of local governments, whose strategic choices turned to consider environmental governance. Based on the incentive and compensation policies, industrial support policies were used to adjust local governments' benefits which resulted in changing their strategic choices to emphasize environmental governance.

The result showed that the incentive policies used by management institutions of water resources in the middle route can effectively promote local governments to actively participate in the ecological environment governance, and promote the ecological environment governance conflict to evolve into a state of equilibrium. It is an effective way for the management institutions of water resources in water source of the middle route to guide local governments to cooperate by exploring a variety of incentive models in combination with the development needs.

Key words: graph model; water resource in the middle route of South-to-North Water Transfer Project; ecological environment governance; multi-agent; conflict