

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

徐海燕, 武梓馨, 吴正稿

(南京航空航天大学经济与管理学院, 江苏 南京 211106)

摘要:针对上下游水污染冲突, 基于冲突分析图模型反问题理论构建了第三方调解模型, 在充分考虑冲突双方偏好底线的前提下, 获取双方做出最小让步后的冲突化解策略。基于反问题理论构建了一个 0-1 多目标规划第三方调解模型, 并进行模型求解设计。最后, 将模型应用于跨流域上下游水污染冲突事件, 进一步验证了该模型求解调解方案及调整偏好的有效性。研究表明, 所提方法能找到使上下游地区做出最小偏好的最优状态, 有效辅助第三方制定调解策略, 从而化解水污染冲突, 为相关水资源冲突调解提供借鉴。

关键词:冲突分析图模型; 反问题; 水污染冲突; 第三方调解; 0-1 规划

中图分类号: C934 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-9511(2021)01-0040-07

我国地域辽阔, 河流众多, 普遍存在着河流上下游分属不同行政区的情况。随着我国人口的持续增长及经济的高速发展, 水资源短缺和水污染问题日趋严重, 由此引发的跨流域水资源冲突日益凸显。一方面, 在水源较为稀缺的流域, 上游地区由于用水过度, 很可能导致下流地区水量匮乏、缺水严重, 上下游之间由于水量短缺产生冲突; 另一方面, 上游地区为了发展经济, 满足自身发展需求, 不顾环境压力, 破坏了水域平衡, 造成了严重的水污染, 并影响下游地区的生态环境, 使上下游关系紧张, 导致了众多群体性冲突事件。为及时化解冲突, 更好保护水资源, 不仅需要健全的水资源管理制度^[1], 也需要公正的第三方管理机构进行有效的干预指导, 调解水资源冲突, 减少不必要的损失, 促使社会和谐有序地发展。

经典博弈论常常被应用于水资源冲突的研究中, 如陈军飞等^[2]利用博弈论对流域水量冲突问题进行了研究, 建立了三阶段跨流域水量协调分配博弈模型。然而比起经典博弈论要求精确的偏好值, 冲突分析图模型理论(Graph Model for Conflict Resolution, GMCR)^[3]只需要各个冲突方的少量偏好信息, 就能够对冲突进行有效的分析求出均衡解, 为冲

突决策者、调解机构提供有效的解决方案。现有的大部分 GMCR 研究是在冲突各方偏好已知情况下, 研究状态的稳定性, 这称为图模型正问题。徐海燕教授等在其英文专著^[4]中对图模型正问题的各种类型进行了详细的描述, 并总结了 GMCR 的矩阵形式。由状态稳定或不稳定信息, 反推冲突对手所有可能的偏好, 这称为图模型反问题。在包含两个决策者的冲突中, 如何根据冲突双方的底牌(偏好信息), 找出富有创造性的策略来辅助第三方调解冲突双方之间的矛盾, 这称为基于图模型反问题的第三方调解问题, 图 1 展示了图模型正反问题的区别。第三方通常为政府部门或者一些公益组织等具有一定影响力的调解机构, 在冲突加剧时, 主动或被动地介入冲突进行调解, 及时降低冲突破坏性并成功化解冲突^[5]。Ali 等^[6]研究了第三方介入俄罗斯和土

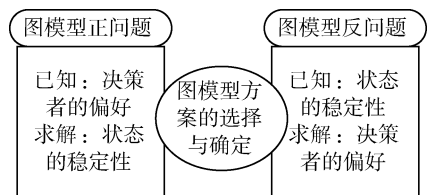


图 1 冲突分析图模型理论正反问题框架

基金项目: 国家自然科学基金(71971115)

作者简介: 徐海燕(1963—), 女, 教授, 博士, 主要从事冲突分析和决策理论研究。Email: xuhaiyan@nuaa.edu.cn

耳其冲突后,对双方态度和冲突结局的影响。胡玉盼等^[7]建立了政府作为调解者的黄河流域跨边界水污染冲突分析模型。于晶等^[8]研究了流域上下游水质污染冲突第三方调解问题,针对不同的稳定性通过决策路径分析预测冲突事件的演化路径。上述研究均将第三方作为冲突中的一个决策者进行分析与研究,认为第三方有自己的偏好,无法决定冲突的走向。然而在现实冲突中,第三方常常是中立方,并不参与冲突,而是在冲突发生后作为调解机构为冲突方提供调解方案。

在 GMCR 中,第三方作为冲突局外人进行调解的研究还比较少。目前,Kinsara 等^[9]构建了图模型反问题的具体模型求解冲突方的偏好,辅助第三方获取调解方案,并将研究成果应用到叙利亚和伊拉克水坝冲突的第三方调解中,充分展示了反问题在第三方调解中的重要性。但 Kinsara 运用穷举法来获取冲突方的偏好,不能真正用于冲突建模分析。吴正稿^[10]构建了基于图模型反问题的第三方调解数学模型,并将模型应用到医患冲突中,给出能使冲突双方做出最小让步的偏好。但该模型假设第三方是在已知最优调解方案的前提下,获取能使冲突双方改变最小的偏好,第三方如何得到最优调解方案的问题并没有解决。根据上述分析,基于 GMCR 矩阵形式^[11]构建的第三方调解数学模型,不仅能实现最优调解方案的自动求解,而且能获取在该最优调解方案下冲突双方做出最小让步的偏好,进一步增强了图模型反问题的实用性,并拓展了它的使用范围。

1 基础理论

1.1 冲突分析图模型理论

冲突分析图模型(GMCR)主要包含决策者、可行状态、决策者的偏好和状态转移弧四部分,可以表示为 $V = \{N, S, P, A\}$ 。其中:

a. $N = \{1, 2, \dots, n\}$ ($n \geq 2$) 表示冲突中至少有两个决策者的集合。本文研究了两个决策者参与冲突的调解问题,此时 $N = \{i, j\}$ 表示冲突中有两个决策者,分别是决策者 i 与决策者 j 。

b. $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$ 表示冲突中可行状态的集合, m 表示冲突中可行状态的个数。

c. $A = \{A_i, A_j\}$ 表示冲突中决策者 i 与决策者 j 可行状态转移的有向弧集合, A_i 表示决策者 i 的可行状态转移弧。假设 s 和 q 为冲突中的两个可行状态($s, q \in S$),如果 $(s, q) \in A_i$ 成立,表示决策者 i 能够从状态 s 一步转移到达状态 q 。

d. $P = \{P_i, P_j\}$ 表示决策者的偏好信息集合, P_i 表示决策者 i 的偏好信息。决策者 i 对可行状态的

简单偏好,可以用 $P_i = \{>_i, \sim_i\}$ 来表示。假设 s 和 q 为冲突中的两个可行状态($s, q \in S$), $s >_i q$ 表示决策者 i 认为状态 s 优于状态 q , $s \sim_i q$ 表示决策者 i 对状态 s 与状态 q 的偏好程度是一样的,并且 $P_i = \{>_i, \sim_i\}$ 满足以下 3 种性质:

性质 1: $>_i$ 满足不对称性: $s >_i q$ 与 $q >_i s$ 不能同时成立;

性质 2: \sim_i 满足自反性和对称性: $s \sim_i s$ 成立, $s \sim_i q$ 等价于 $q \sim_i s$;

性质 3: $P_i = \{>_i, \sim_i\}$ 满足完备性:冲突中任意两个可行状态 s 和 q 只能满足 $s >_i q, s \sim_i q$ 或 $q >_i s$ 中的一个关系。

1.2 基于图模型理论的偏好生成方式

决策者偏好的获取是 GMCR 中最关键也是最复杂的步骤。在 GMCR 中,有 3 种确定决策者偏好的方法:直接状态排序法、策略加权平均法和策略优先权排序法^[12-13]。冲突中的状态数量 m 是由策略数量 k 所决定的: $m = 2^k$,当冲突中的策略数量过多时,直接状态排序法非常烦琐复杂。因此,从策略角度出发对决策者的偏好进行排序更具灵活性和简便性。而比起策略加权平均法需要直接给出策略权重,策略优先权排序法更能清晰地体现决策者的喜好和态度,从而被广泛运用于决策者偏好的获取。在简单偏好下,策略优先权排序法是通过决策者对当前冲突策略的声明次序得到对各个状态点的分值,根据分值大小得到关于状态的偏好排序。声明是由策略编号和一些特定的逻辑关系符号构成,以条件形式、非条件形式或双条件形式出现。在声明次序中,声明出现的越早被认为拥有越高的优先权。

对于每个状态 $s \in S$,在每条声明 Ω 处都要取一个真值 T 或 F 。如果 $\Omega(s) = T$,说明状态 s 满足声明 Ω ;如果 $\Omega(s) = F$,说明状态 s 不满足声明 Ω 。

假设决策者 i 有 l 个策略声明,则 $\{\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_l\}$ (按照由优到劣的顺序进行排序) 为决策者 i 给出的策略声明次序集合,根据该集合可赋予每个状态 $s \in S$ 一个分值 $\Psi_i(s)$,满足 $\Psi_i(s) = \sum_{r=1}^l \Psi_r^i(s)$,其中 $\Psi_r^i(s)$ 为状态 s 基于决策者 i 的第 r 个声明 Ω_r 的分值, $0 < r \leq l$,满足:

$$\Psi_r^i(s) = \begin{cases} 2^{l-r} & \Omega_r(s) = T \\ 0 & \Omega_r(s) = F \end{cases} \quad (1)$$

对于决策者 i , $(\Psi_i(s_1), \Psi_i(s_2), \dots, \Psi_i(s_m))$ 表示状态 s_1, s_2, \dots, s_m 的分值向量,对于任意两种不同状态 $s, q \in S$ 满足: $s >_i q \Leftrightarrow \Psi_i(s) > \Psi_i(q)$; $s \sim_i q \Leftrightarrow \Psi_i(s) = \Psi_i(q)$ 。

策略优先权排序法所确定的分值可以用来设置

决策者的状态偏好底线,第三方将在可选调解方案中剔除分数低于决策者状态偏好底线的状态。

1.3 冲突分析图模型的矩阵表示

在冲突分析图模型矩阵形式的基础上进行构建与求解第三方调解模型。原有的 GMCR 理论使用一种逻辑表述,相应的稳定性求解算法很难实现。徐海燕教授开创了 GMCR 的矩阵形式^[11],这种直观的代数表达方式不仅便于理论拓展、易于求解算法的开发,而且还搭建起图模型正问题与反问题之间的桥梁。

在图模型 $V = \{N, S, P, A\}$ 中,对于决策者 $i \in N$, 状态 $s, q \in S$, 有如下定义:

定义 1 可达矩阵。0-1 矩阵 J_i 为 m 阶方阵, 其中第 s 行、第 q 列元素 $J_i(s, q)$ 满足:

$$J_i(s, q) = \begin{cases} 1 & (s, q) \in A_i \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

则称 J_i 为决策者 i 的可达矩阵。

根据定义 1, 可以得到决策者 i 的可达集 $R_i(s) = \{q \in S | J_i(s, q) = 1\}$, 表示决策者 i 从状态 s 出发可以一步到达的状态集合。

定义 2 偏好矩阵。0-1 矩阵 P_i^+ 为 m 阶方阵, 其中第 s 行、第 q 列元素 $P_i^+(s, q)$ 满足:

$$P_i^+(s, q) = \begin{cases} 1 & q >_i s \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

则称 P_i^+ 为决策者 i 的偏好矩阵。

定义 3 改良可达矩阵。0-1 矩阵 J_i^+ 为 m 阶方阵, 其中第 s 行、第 q 列元素 $J_i^+(s, q)$ 满足:

$$J_i^+(s, q) = \begin{cases} 1 & J_i(s, q) = 1 \text{ 且 } q >_i s \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

则称 J_i^+ 为决策者 i 的改良可达矩阵。

根据定义 3, 可以得到决策者 i 的改良可达集 $R_i^+(s) = \{q \in S | J_i^+(s, q) = 1\}$, 表示决策者 i 从状态 s 出发可以一步到达并且优于状态 s 的状态集合。

对于决策者 i , 可达矩阵 J_i 、偏好矩阵 P_i^+ 与改良可达矩阵 J_i^+ 之间的关系为:

$$J_i^+ = J_i \circ P_i^+$$

式中“ \circ ”表示 Hadamard 乘积。

1.4 冲突分析图模型 Nash 稳定的矩阵表示

在简单偏好下, 冲突分析图模型理论有 4 种基本稳定性, 分别是 Nash 稳定^[14]、GMR 稳定^[15-16]、SMR 稳定^[15-16]、SEQ 稳定^[17]。4 种基本稳定性之间的关系见图 2^[18]。显然, 处于 Nash 稳定的状态一定也满足 GMR 稳定、SMR 稳定和 SEQ 稳定, 但处于后 3 种稳定的状态不一定是 Nash 稳定状态。可见在 4 种基本稳定性中, Nash 稳定具有最强的稳定性。因

此选择 Nash 稳定性作为决策者的稳定性选择, 为第三方调解提供最强的稳定性保证。

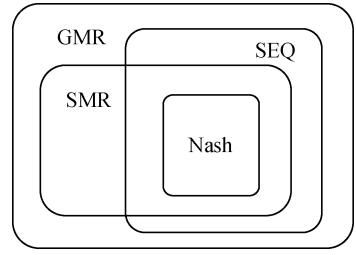


图 2 四种基本稳定性之间的包含关系

定义 4 Nash 稳定性。对于决策者 $i \in N$, 如果状态 $s \in S$ 满足 $R_i^+(s) = \emptyset$, 则状态 s 是决策者 i 的 Nash 稳定状态^[19]。

一个决策者的 Nash 稳定状态只和自身的偏好有关, 而与另一个决策者的偏好无关。当冲突中所有决策者在某一状态都满足 Nash 稳定性时, 则该状态为冲突中的 Nash 均衡状态。

令 e_s 表示 m 维单位列向量, 该列向量中第 s 个元素为 1, 其他元素为 0。 e_s^T 为 e_s 的转置。 $\mathbf{0}$ 表示 m 维行向量, 该向量中所有元素均为 0。

Nash 稳定性的矩阵形式为: 对于决策者 $i \in N$, 如果状态 $s \in S$ 满足 $e_s^T \cdot J_i^+ = \mathbf{0}$, 则状态 s 是决策者 i 的 Nash 稳定状态。

2 第三方调解模型构建

2.1 双方让步的多目标第三方调解模型构建

由于冲突双方之间不存在均衡解或均衡解难以使冲突双方达成一致, 为了避免冲突加剧, 第三方介入进行调解。假设第三方在调解之前并不清楚能够化解冲突的最优方案(状态), 考虑到冲突双方对调解的接受程度, 第三方将从非均衡状态中选择最为合适的状态进行调解, 并且保证该状态是冲突双方偏好改变最小的状态。

根据 GMCR 相关理论, 构建第三方调解模型时所用到的符号有: m 为冲突中可行状态的个数, P_i^+ 为决策者 i 的偏好矩阵, X_i^* 为第三方调解后决策者 i 的偏好矩阵, J_i 为决策者 i 的可达矩阵, P_j^+ 为决策者 j 的偏好矩阵, X_j^* 为第三方调解后决策者 j 的偏好矩阵, J_j 为决策者 j 的可达矩阵, x_i, x_j 分别为决策者 i 与决策者 j 最不满意的分数, 即决策者的偏好底线, 第三方可以通过与决策者商谈确定具体数值。构建的第三方调解模型如模型 1 所示。

模型 1:

$$\min \sum_{p=1}^m \sum_{q=1}^m |P_i^+(p, q) - X_i^*(p, q)|$$

$$\min \sum_{p=1}^m \sum_{q=1}^m \left| P_j^+(p,q) - X_j^*(p,q) \right| \quad (5)$$

$$\text{s. t. } e_s^T \cdot (J_i \circ X_i^*) = \mathbf{0} \quad \exists s \in S' \quad (6)$$

$$e_s^T \cdot (J_j \circ X_j^*) = \mathbf{0} \quad \exists s \in S' \quad (7)$$

$$S' = S'_i \cap S'_j \quad (8)$$

$$S'_i = \{s \mid e_s^T \cdot (J_i \circ P_i^+) \neq \mathbf{0}, \Psi_i(s) > x_i\} \quad (9)$$

$$S'_j = \{s \mid e_s^T \cdot (J_j \circ P_j^+) \neq \mathbf{0}, \Psi_j(s) > x_j\} \quad (10)$$

$$X_i^*(p,q), X_j^*(p,q) \in \{0,1\} \quad (p = 1,2,\dots, m; q = 1,2,\dots, m) \quad (11)$$

其中,目标函数(5)表示最小化决策者*i*和决策者*j*的偏好让步;约束条件(6)、(7)表示经过调解后存在一个状态*s*为决策者*i*和决策者*j*的 Nash 稳定状态,即状态*s*为调解的最优方案;约束条件(8)、(9)和(10)表示可供第三方选择调解的状态集合,表示当冲突调解前不存在均衡解或者均衡解不能使冲突双方达成一致时,第三方需要在其他可行状态(集合*S'*)中选择最合适的可行状态进行调解,并且剔除决策者不满意的状态;约束(11)表示变量*X_i^{*}(p,q)*、*X_j^{*}(p,q)*、*p*和*q*的取值范围。

2.2 双方让步的多目标第三方调解模型求解

2.2.1 多目标转成单目标第三方调解模型

第三方调解模型属于多目标规划,两个目标分别对应冲突中决策者*i*和决策者*j*的最小偏好改变,目标之间不存在干扰,因此考虑运用线性加权和法进行求解。线性加权和法是赋予多个目标函数相应的权重值后,再进行线性求和。多目标规划可用此方法转化为单目标规划,然后进行求解。此时,约束条件不变,目标函数(5)可以转化为:

$$\min \lambda_i \sum_{p=1}^m \sum_{q=1}^m \left| P_i^+(p,q) - X_i^*(p,q) \right| + \lambda_j \sum_{p=1}^m \sum_{q=1}^m \left| P_j^+(p,q) - X_j^*(p,q) \right| \quad (12)$$

式中: λ_i 与 λ_j 分别为决策者*i*和决策者*j*的权重值。本文中两个目标的权重选择有多种情况,但考虑到第三方较为公正,并不偏向冲突中的某一方,因此令权重值为 $\lambda_i=0.5, \lambda_j=0.5$,此时多目标规划模型转化为单目标规划模型,同样约束条件不变,目标函数(12)为

$$\min 0.5 \sum_{p=1}^m \sum_{q=1}^m \left| P_i^+(p,q) - X_i^*(p,q) \right| + 0.5 \sum_{p=1}^m \sum_{q=1}^m \left| P_j^+(p,q) - X_j^*(p,q) \right| \quad (13)$$

2.2.2 获取第三方调解模型所有最优解

求解模型可以得到最优解*X_i^{*}*与*X_j^{*}*,以及最优值*Z*(式(14))。由于冲突双方改变最小的偏好是相对偏好,因此最优解很可能不止一个,可在模型中增加约束条件(式(14)、(15)),在保证最优值、排除

原有最优解的基础上求出新的最优解*X_i^{**}*和*X_j^{**}*。

$$0.5 \sum_{p=1}^m \sum_{q=1}^m \left| P_i^+(p,q) - X_i^*(p,q) \right| + 0.5 \sum_{p=1}^m \sum_{q=1}^m \left| P_j^+(p,q) - X_j^*(p,q) \right| = Z \quad (14)$$

$$[X_i^*, X_j^*] \neq [X_i^{**}, X_j^{**}] \quad (15)$$

2.3 单方妥协的第三方调解模型

当模型得到的最优方案为冲突双方均不稳定的状态时,第三方将分别对冲突双方进行调解,即第三方需要劝解冲突双方做出妥协让步。当运用调解模型得到的最优方案为单方稳定状态时,第三方只需要考虑对不稳定的一方进行调解,使其单方妥协。此时,调解模型实质为单方妥协调解模型,在保证调解成功的基础上使被调解者改变的偏好最小,单方妥协调解模型如模型2所示。

模型2:

$$\min \sum_{p=1}^m \sum_{q=1}^m \left| P_i^+(p,q) - X_i^*(p,q) \right| \quad (16)$$

$$e_s^T \cdot (J_i \circ X_i^*) = \mathbf{0} \quad \exists s \in S' \quad (17)$$

$$S' = \{s \mid e_s^T \cdot (J_j \circ P_j^+) = \mathbf{0}\} \quad (18)$$

$$\text{s. t. } \left\{ e_s^T \cdot (J_i \circ P_i^+) \neq \mathbf{0}, \Psi_i(s) > x_i \right\} \quad (18)$$

$$X_i^*(p,q) \in \{0,1\} \quad (19)$$

$$(p = 1,2,\dots, m; q = 1,2,\dots, m)$$

模型2为模型1的特例,模型1为第三方提供了所有合适的非均衡状态作为冲突最终均衡解,这其中含有只满足一方 Nash 稳定的状态。当模型1得出的最优方案为单方 Nash 稳定状态时,冲突中稳定一方的偏好不需要变化,第三方仅需对该状态下不稳定的一方进行调解,此时模型1退化为模型2。

3 案例分析

3.1 案例背景

从2018年8月25日开始,大量污水流入位于江苏省泗洪县的洪泽湖,造成当地大量鱼蟹死亡,养殖户们面临绝收困境。对于污水的来源,江苏省环保厅认为上游安徽地区因强降雨开闸放水,导致下游泗洪县洪泽湖水质严重恶化。上游安徽省和下游江苏省经过深入调查,分析本次江苏省泗洪县洪泽湖水质异常、临淮镇胜利村等地养殖的鱼蟹大批死亡情况,初步判断这些鱼蟹死亡事件是由上游地区泄洪导致污水量超标造成的。

此次跨界水污染事件,给下游地区造成了严重的经济财产损失。但上下游地区对污水具体来源、对方水质监测数据是否准确、赔偿责任如何界定等问题,迟迟未达成一致意见。若放任事态发展,冲突

有可能会进一步增大,造成难以估量的损失,因此需要外界进行调解。

3.2 冲突建模

3.2.1 决策者与策略

在上下游水质污染冲突中,主要涉及两个决策者:上游有关地区(DM1)和下游有关地区(DM2),当冲突双方争持不下时需要第三方协调者——流域管理机构。DM1 有 3 种可选策略:①补偿下游损失。鉴于上游的污水排放对下游地区造成了一定的影响,考虑给下游地区适当的补偿。②与下游协商治理污染。出于对环境保护的考虑,减少污水排放量,并与下游地区有关部门协同治理水污染。③保持现状。按照现有经济速度和污染排放标准继续保持经济持续发展,对污水排放不进行控制,并且不处理已经受污染的水源。DM2 有两种可选策略:①积极与上游协商治理污染。为保护环境,避免再次发生水污染事件,根据“谁受益谁补偿”,携手上游地区一同治理水污染;②上诉。强烈要求上游补偿自己的损失,并要求上游单独治理污染,坚持“谁污染谁治理”,必要时采取法律手段。

3.2.2 可行状态集与可达矩阵

本次水污染冲突事件共有 5 个策略,对于每个策略,决策者都可以选择是否采取该策略,则共有 $2^5 = 32$ 种状态。但是并不是所有的状态都是冲突的可行状态,例如 DM1 不可能在选择保持现状之后再选择其他策略,DM2 不可能同时选择协商治理水污染和上诉。因此,剔除不符合逻辑的状态之后,冲突共有 12 种可行状态,如表 1 所示,其中“Y”表示决策者采取该策略,“N”表示决策者不采取该策略。

DM1 与 DM2 的可达矩阵 J_1 和 J_2 为:

$$J_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

表 1 水污染冲突中决策者的可行状态

决策者	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}
DM1	①补偿下游损失	N	N	N	N	N	N	Y	Y	Y	Y	Y	Y
	②与下游协商治理污染	N	N	N	Y	Y	Y	N	N	N	Y	Y	Y
	③保持现状	Y	Y	Y	N	N	N	N	N	N	N	N	N
DM2	①与上游协商治理污染	N	N	Y	N	N	Y	N	N	Y	N	N	Y
	②上诉	N	Y	N	N	Y	N	N	Y	N	N	Y	N

$$J_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

3.2.3 策略声明与偏好信息

在图模型中需要已知决策者、状态和偏好进行建模,其中偏好信息可以由策略优先权排序法^[12]获得。在本次上下游水污染冲突中,DM1 和 DM2 分别从自身角度提出策略声明,例如 DM1 最不希望 DM2 提出上诉;其次希望能够保持现状等等。DM2 最希望 DM1 能够赔偿自己的损失;其次是不希望 DM1 保持现状,对污染不做任何处理等等。具体策略声明及其含义如表 2 所示。

表 2 水污染冲突中决策者的策略声明及其含义

决策者	声明	解释说明
DM1	-5	不希望 DM2 提出上诉
	3	希望能够保持现状
	-2	不希望与 DM2 协商治理水污染
	-1	不希望赔偿 DM2
	11FF5	补偿 DM2 损失当且仅当 DM2 上诉
DM2	4	希望 DM2 能与自己协商治理水污染
	1	希望 DM1 能够赔偿自己的损失
	-3	不希望 DM1 对现有状况不做任何行动
	51FF3	上诉当且仅当 DM1 保持现状
	2	希望 DM1 能够与自己协商治理水污染
4	希望能与 DM1 一同治理水污染	

根据上表利用策略优先权排序法得到 DM1 与 DM2 各个状态的分值与偏好排序,见表 3 和表 4。

表 3 DM1 与 DM2 各个状态的分值

分值	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6	s_7	s_8	s_9	s_{10}	s_{11}	s_{12}
$\Psi_1(s)$	62	28	63	38	4	39	40	10	41	32	2	33
$\Psi_2(s)$	0	4	1	14	10	15	28	24	29	30	26	31

表 4 DM1 与 DM2 的偏好排序

DM1	$s_3 > s_1 > s_9 > s_7 > s_6 > s_4 > s_{12} > s_{10} > s_2 > s_8 > s_5 > s_{11}$
DM2	$s_{12} > s_{10} > s_9 > s_7 > s_{11} > s_8 > s_6 > s_4 > s_5 > s_2 > s_3 > s_1$

根据 DM1 与 DM2 的偏好排序可以确定 DM1 与 DM2 的偏好矩阵 P_1^+ 和 P_2^+ 为:

$$P_1^+ = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ [1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0] \\ [0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1] \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ [0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0] \end{bmatrix}$$

3.2.4 稳定性分析

根据可达矩阵与偏好矩阵可以得到 DM1 和 DM2 的 Nash 稳定状态,如表 5 所示。其中,“P”表示该状态满足 Nash 稳定性;“E”为 Equilibrium 的缩写,表示冲突中的 Nash 均衡解。可以看出状态 s_2 为冲突的 Nash 均衡解,即冲突最终停留在状态 s_2 。但是在该状态下 DM1 的策略为保持现状、不做任何改变,DM2 的策略为上诉、强烈要求 DM1 补偿损失以及治理水污染。冲突不但没有结束,反而将更加恶化。双方矛盾很有可能进一步升级,严重影响到双方的生产生活,因此亟须第三方介入调解冲突。

表 5 DM1 与 DM2 的冲突稳定性结果

决策者	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6	s_7	s_8	s_9	s_{10}	s_{11}	s_{12}
DM1	P	P	P									
DM2		P				P			P			P
E		P										

3.3 第三方调解模型应用

流域管理机构作为第三方通过走访调查,充分了解冲突双方的偏好与底线,慎重思考后决定将冲突双方的底线分值定为 2 分和 1 分,即只有满足

$\Psi_1(s) > 2$ 与 $\Psi_2(s) > 1$ 的非均衡状态才能被第三方选择作为调解状态。因此根据表 3 和表 5 第三方可以考虑的状态有: s_4 、 s_6 、 s_7 、 s_8 、 s_9 、 s_{10} 和 s_{12} 7 个状态。

将 DM1 和 DM2 的可达矩阵 J_1 和 J_2 以及原始偏好矩阵 P_1^+ 和 P_2^+ 代入第二部分构建的模型 1,运用 MATLAB 软件进行求解,得到最优解 X_1^* 、 $X_2^* = P_2^+$ 如下,调解后的最优状态为 s_9 。状态 s_9 满足 DM2 的 Nash 稳定性,即 DM2 不需要改变偏好矩阵,因此第三方仅需要劝解 DM1 调整偏好,此时,模型退化为单方妥协的第三方模型即模型 2。在寻找模型所有最优解时发现该模型有且仅有一个最优解 X_1^* ,矩阵 X_1^* 中方框表示与 DM1 原有偏好 P_1^+ 对比需要改变的地方。

$$X_1^* = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & \boxed{0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ [1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0] \\ [0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1] \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ [0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0] \end{bmatrix}$$

第三方发现最优解只需要劝解 DM1 改变一个相对偏好就能使冲突在状态 s_9 达到稳定,即将偏好 $s_3 >_1 s_9$ 调整为 $s_3 \sim_1 s_9$,大大降低了调解难度。第三方仅需劝说 DM1 认为状态 s_9 与 s_3 一样好,就能使冲突趋于稳定,成功化解冲突。

3.4 分析与讨论

状态 s_9 表示 DM1 选择的策略是补偿 DM2 的损

失,DM2 选择的策略是与 DM1 协商治理污染。然而第三方发现在该状态下 DM1 并没有选择与 DM2 协商治理污染,可能对生态环境造成了一定的影响,因此若第三方在对比各个状态之后考虑指定状态 s_{12} 作为最终状态进行调解,即第三方想劝解 DM1 补偿 DM2 损失并与 DM2 一起治理污染,劝解 DM2 接受与 DM1 一起治理污染。为使状态 s_{12} 作为最佳调解状态,运用构建的模型发现同样只需改变 DM1 的偏好便能使冲突在 s_{12} 达到稳定,但是第三方需要劝说 DM1 改变三个相对偏好:将偏好 $s_3 >_1 s_{12}$ 调整为 $s_3 \sim_1 s_{12}$;将偏好 $s_6 >_1 s_{12}$ 调整为 $s_6 \sim_1 s_{12}$;将偏好 $s_9 >_1 s_{12}$ 调整为 $s_9 \sim_1 s_{12}$,DM1 调整后的偏好矩阵 X_1^{**} 如下,矩阵 X_1^{**} 中方框表示与 DM1 原有偏好 P_1^+ 对比需要变的地方。

$$X_1^{**} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ [1 & 0 & \boxed{0} & 1 & 0 & \boxed{0} & 1 & 0 & \boxed{0} & 0 & 0 & 0] \end{bmatrix}$$

第三方发现劝解 DM1 接受三个相对偏好较于仅改变一个相对偏好,调解难度将大大增加。因此,通过综合考虑,第三方仍决定将状态 s_9 作为调解后的均衡状态,该状态能有效解决 DM1 与 DM2 之间的冲突,避免上下游地区因冲突而造成的各种损失。此外,出于环境保护需要,第三方可在冲突结束后继续劝解 DM1 进行水污染治理,进一步保护环境。

4 结语

在跨界水污染上下游冲突中,上下游地区矛盾突出,很难得到双方满意的均衡解,这类冲突常常需要第三方介入进行调解。笔者基于图模型反问题,构建了第三方调解 0-1 整数规划模型,为第三方解决冲突事件提供有效的决策支持。第三方可利用该模型找到调解的最优方案(状态),以及在该方案下冲突双方所需做出最小让步的偏好。通过第三方的调解,冲突双方能够接受最小的偏好改变达到自己的满意状态,加快冲突化解速度,减少冲突对上下游地区的影响,促进上下游地区的协调发展。

尽管本文构建了简单偏好下图模型反问题的第三方调解模型,但对于不确定偏好下的反问题第三方调解模型尚未做进一步研究;在稳定性选择上,选取稳定性最强的 Nash 稳定性进行稳定性分析,没有分析其他稳定性在第三方调解中的适用性,今后将在这些方面作进一步研究。

参考文献:

- [1] 王亚杰,张瑞美. 水资源资产化管理制度框架及实现路径[J]. 水利经济,2019,37(4):27-31.
- [2] 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.
- [3] FANG L, HIPEL K W, KILGOUR D M. Interactive decision making: The graph model for conflict resolution[M]. New York: Wiley, 1993.
- [4] XU H Y, HIPEL K W, KILGOUR D M, et al. Conflict resolution using the graph model: Strategic interactions in competition and cooperation[M]. Cham: Springer, 2018.
- [5] KEVIN S. Conflict and third-party intervention[J]. Defence and Peace Economics, 2003,14(6):389-400.
- [6] ALI S, XU H Y, XU P, et al. Attitudinal analysis of Russia-Turkey conflict with chinese role as a third-party intervention[C]. International Conference on Group Decision and Negotiation. Cham, Springer;2018:167-178.
- [7] 胡玉盼,陈艳萍. 基于 F-H 方法的黄河流域跨界水污染冲突研究[J]. 水利经济,2016,34(2):68-71.
- [8] 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,2013,44(12):1389-1398.
- [9] KINSARA R A, KILGOUR D M, HIPEL K W. Inverse approach to the graph model for conflict resolution[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2015,45(5):734-742.
- [10] 吴正稿. 基于第三方调解策略的冲突分析反问题研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2019.
- [11] XU H Y, HIPEL K W, KILGOUR D M. Matrix representation of solution concepts in multiple decision-maker graph models[J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, 2009,39(1):96-108.
- [12] FANG L, HIPEL K W, KILGOUR D M, et al. A decision support system for interactive decision making-Part I: Model formulation[J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part_C, 2003,33(1):42-55.
- [13] FANG L, HIPEL K W, KILGOUR D M, et al. A decision support system for interactive decision making-Part II: Analysis and output interpretation[J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part_C: Applications and Reviews, 2003,33(1):56-66.

(下转第 78 页)

- 35(5):38-43.
- [19] 张永安, 鄒海拓. 国务院创新政策量化评价: 基于 PMC 指数模型 [J]. 科技进步与对策, 2017, 34 (17): 127-136.
- [20] ESTRADA M A R, YAP S F. The origins and evolution of policy modeling [J]. Journal of Policy Modeling, 2013, 35(1):170-182.
- [21] 张永安, 周怡园. 新能源汽车补贴政策工具挖掘及量化评价 [J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27 (10): 188-197.
- [22] 施国庆. 非自愿移民: 冲突与和谐 [J]. 江苏社会科学, 2005(5):22-25.
- [23] TAKESADA N, NAKAYAMA M, FUJIKURA R. Japanese experience of involuntary resettlement: long-term consequences of resettlement for the construction of the Ikawa dam. [J]. International Journal of Water Resources Development, 2009, 25(3):419-430.
- [24] 何林. 贵州省水库移民安置机制研究 [D]. 北京: 清华大学, 2013.
- [25] DUAN Yuefang, WILMSEN B. Addressing the resettlement challenges at the Three Gorges Project [J]. International Journal of Environmental Studies, 2012, 69 (3): 1-14.
- [26] WILMSEN B. After the Deluge: a longitudinal study of resettlement at the Three Gorges Dam, China [J]. World Development, 2016, 84:41-54.
- [27] GRIGG D B G. Ravenstein and the "laws of migration" [J]. Journal of Historical Geography, 1977, 3 (1): 41-54.
- [28] 傅秀堂, 李世荣. 我国水库移民政策的回顾与思考 [J]. 人民长江, 2007(12):9-13.
- [29] 梁福庆. 中国水库移民补偿政策演变及创新 [J]. 三峡大学学报(人文社会科学版), 2009, 31(5):14-18.
- [30] 张绍山. 水库移民后期扶持政策综述 [J]. 河北水利水
- 电技术, 2003(3):1-3.
- [31] 董述春, 张建贤. 大中型水库移民后期扶持和库区建设基金政策的研究 [J]. 中国水利, 1994(5):24-26.
- [32] 施国庆, 荀厚平. 水利水电工程移民概述 [J]. 水利水电科技进展, 1995(3):37-42.
- [33] 宋良光. 国家大中型水库移民后期扶持政策的非预期后果讨论 [J]. 水利经济, 2010, 28(2):72-72.
- [34] 梁媛媛, 周晓兰, 邹晓娟. 后期扶持阶段水库移民教育培训供给状况及其效果评价: 基于江西省农村大中型水库移民调查数据 [J]. 水利经济, 2018, 36(2):78-82.
- [35] LIU Y X, ZHANG H Z, ZHOU W, et al. Effect of rural households resettlement mode on the households income in the Three Gorges Reservoir Areas [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2011, 20(3):352-356.
- [36] XU X, WANG X Y, BAI Y T, et al. The design of the monitoring and evaluation system of the reservoir resettlement later-period supportive policy's implementation effect [C]//2014 International Conference on Management Science and Management Innovation (MSMI 2014). France: Atlantis Press, 2014.
- [37] SU Lili, PU Chunling, WEI Chengbao, et al. Evaluation on the resettlement effect of the land-expropriated immigrant of Ili Reservoir based on Multi-Level Fuzzy Comprehensive Model [J]. Journal of China Agricultural Resources and Regional Planning, 2017, 38(9):144-153.
- [38] 施国庆, 王玥琳, 张虎彪. "一带一路" 视角下我国水库移民资金的自治管理 [J]. 水利经济, 2018, 36(2):73-77.
- [39] 臧维, 李甜甜, 徐磊. 北京市众创空间扶持政策工具挖掘及量化评价研究 [J]. 软科学, 2018, 32(9):56-61.
- [40] 王进富, 杨青云, 张颖颖. 基于 PMC-AE 指数模型的军民融合政策量化评价 [J]. 情报杂志, 2019, 38(4):70-77.

(收稿日期:2019-12-17 编辑:胡新宇)

(上接第 46 页)

- [14] NASH J F. Equilibrium points in n-person games [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1950, 36(1):48-49.
- [15] HOWARD N. Paradoxes of rationality: Theory of metagames and political behavior [M]. Cambridge, MA: MIT Press, 1971.
- [16] HOWARD N. The present and future of metagame analysis [J]. European Journal of Operational Research, 1987, 32(1):1-25.
- [17] FRASER N M, HIPEL K W. Conflict analysis: Models and resolutions [M]. New York: North-Holland, 1984.
- [18] FANG L, HIPEL K W, KILGOUR D M. Conflict models in graph form: Solution concepts and their interrelationships [J]. European Journal of Operational Research, 1989, 41(1):86-100.
- [19] NASH J F. Non-Cooperative Games [J]. Annals of Mathematics (Second Series), 1951, 54(2):286-295.

(收稿日期:2020-05-30 编辑:陈玉国)

