

文章编号:1000-582X(2012)09-114-07

# 基于均衡理念的流域污染物排放许可交易

付意成<sup>1</sup>, 阮本清<sup>1</sup>, 臧文斌<sup>2</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;  
2. 北京江河湖泊信息技术有限公司, 北京 100055)

**摘要:** 污染物排放许可交易是一种实现流域污染物治理与水质改善均衡发展的有效经济手段。在概述国内外流域污染物排放交易研究特点的基础上, 给出以治污成本最小化、低水位水质风险最小化为目标函数的污染物排放交易研究框架。在综合遗传算法改进序列(NSGA-II)、Young 交易理论(YBT)、污染物初始排放许可分配(IDPA)模型求解适用范围的基础上, 构建涵盖流域治污层面相关要素的污染物排放许可交易框架。利用非零和博弈模型, 以前述理论框架为基础, 构建以流域均衡发展、治污成本最小化为目的的污染物排放交易模型。以典型流域为例, 给出各方能够接受的最优均衡化结果, 验证了模型的适用性。结合应用中出现的问题, 给出模型完善建议和使用前景预测。

**关键词:** 均衡; 流域污染物排放许可交易; 多目标优化模型; 非零和博弈

**中图分类号:** X196

**文献标志码:** A

## Pollutant discharge permit trading based on equilibrium theory

FU Yicheng<sup>1</sup>, RUAN Benqing<sup>1</sup>, ZANG Wenbin<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of River Basin Water Cycle, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;  
2. Beijing Water Science IT Co., Ltd., Beijing 100055, China)

**Abstract:** Pollutant discharge permit trading is an effective economic means to realize equilibrium development between pollutant treatment and water quality improvement. On the basis of summarizing the study characteristics of pollutant discharge permit trading at home and abroad, we present the study framework making treatment cost minimizing and the risk of low water quality minimizing as objective functions. Combining the application scope of the Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II), Young Bargaining Theory (YBT) and Initial Discharge Permit Allocation model (IDPA), we construct Discharge Permit Trading model (DPT) considering the related factors of watershed pollutant treatment. By virtue of nonzero-sum game and theoretical framework of trading model, we describe the calculation process of optimization model. We choose typical watershed as a realistic example to test the efficiency and applicability of methodology for developing pollutant discharge permit trading. Finally, we give the perfection suggestion and application prospect forecastin.

**Key words:** equilibrium; pollutant discharge permit trading; multiple objectives optimization model; nonzero-sum game

收稿日期: 2012-04-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50979114); 中国水利水电科学研究院博士学位论文创新研究资助课题

作者简介: 付意成(1983-), 男, 中国水利水电科学研究院博士研究生, 主要从事流域水资源管理研究,

(E-mail)swfyc@126.com。

作为一种新的解决公共物品分配问题的制度手段,许可证交易已经在世界各国以不同的形式被广泛的应用。排污权交易制度能够有效地降低环境负荷,达到保全环境的目的<sup>[1]</sup>。随着水资源紧缺局面的加剧,污染物排放权交易可能成为解决流域生态环境问题的有效途径。水污染排污权交易不仅是企业解决排污指标短缺的手段,也是进行区域污染物总量控制,解决污染治理投入不足的重要手段<sup>[2]</sup>。

污染物排放许可交易制度首先由 Crocker<sup>[3]</sup> 和 Dales<sup>[4]</sup> 提出。国内学者<sup>[5-6]</sup> 多从交易产生的理论背景、经济学原理层面阐述,并借鉴相关的实例进行交易模型的框架论述。当前,对污染物排放许可交易一般采用确定性模型进行研究,易忽略环境的随机性影响。如 O'Neil<sup>[7]</sup> 和 Eheart 等<sup>[8]</sup> 指出变化的环境特性影响到排污许可交易制度(TDP)实施的有效性。最近, Hung 等<sup>[9]</sup> 在考虑跨界断面最小水流基础上,提出基于交易率方法(TRS)的河流污染物排放交易制度。TRS 能够满足预先设置的水质标准,利用最少的交易次数减少成本。Ganji 等<sup>[10]</sup> 运用对称的纳什理论构建离散的随机动态博弈模型,模拟用水户间的竞争。Kerachian 等<sup>[11]</sup> 提出 2 种随机模型用于水库和河流水库体系的水质管理。Shirangi 等<sup>[12]</sup> 给出一种简易的冲突改进解决方法,在考虑水质的基础上用于水库操控。

在污染物排放交易许可中,排放权被看作是具有可转让产权性质的有形资产。因此,具有污染物排放余量的排放者将其多余排放容量借助市场交易,转让给相对低效的污染物排放者。许多学者已开展过污染物排放许可交易模型的相关研究,如 Montgomery<sup>[13]</sup> 和 Eheart 等<sup>[14]</sup> 利用确定性模型进行河流污染物排放许可交易研究,但却不能就违背河流水质标准造成的风险给出定量分析。当前, Niksokhan 等<sup>[15]</sup> 给出一种在考虑利益相关者利益冲突的河流污染物排放许可交易方法。随后, Niksokhan 等<sup>[16]</sup> 提出一种考虑不同利益相关者和决策者利益冲突、发展河流污染物排放许可交易的有效方法。

为有效解决流域水体污染物排放过程中的风险性与治污成本变动性造成的生态补偿标准的不确定性问题,笔者借鉴多目标优化求解理论,从基于治污层面的流域均衡发展、博弈层面的污染物排放交易角度出发,结合当前已有的研究,给出流域污染物排放和治理相关的最优均衡决策。污染物排放许可交易利于流域污染物排放的总量控制和浓度排放的限定控制,为进行水生态破坏流域水质的达标控制及

治污标准的核算提供依据。

## 1 研究框架

笔者采用遗传算法改进序列(NSGA-II)、Young 交易理论(YBT)以及污染物初始排放许可分配(IDPA)模型进行相关分析。在多目标优化模型中,NSGA-II 用于提供总处理费用和超标浓度、总量排放标准造成的模糊风险间的均衡曲线。在冲突解决模型中,YBT 用以解决决策者和利益相关者间的利益冲突,给出总处理费用的最佳值以及违背标准的风险。IDPA 模型给出最大污染物排放许情况下水质标准的实现条件。排放许可交易模型(DPT),用于最小化治污成本,并提供用于上下游污染物排放交易的均衡政策。框架见图 1。

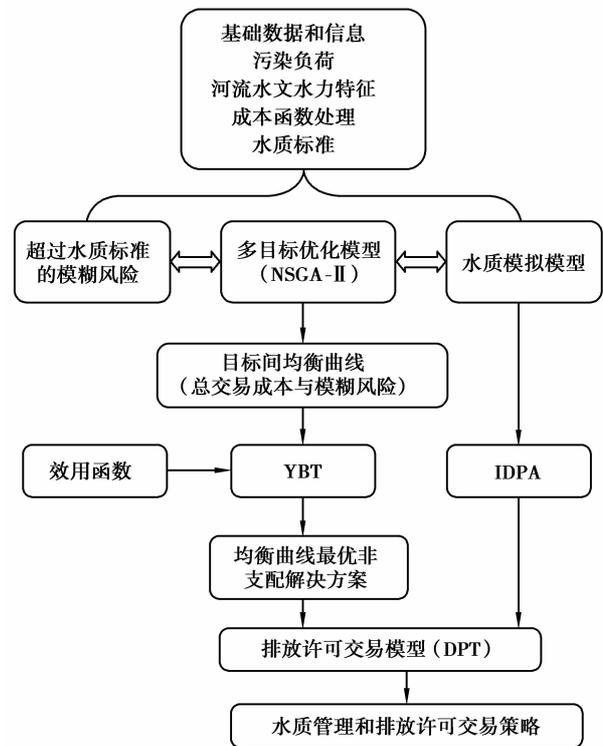


图 1 研究思路

河流体系中的水质管理通常被看作是多元目标的优化问题:充分利用河流水体的自净能力,降低污染物排放对环境的影响,实现水体水质稳定。从均衡发展角度考虑,流域上下游水质控制的目标在于:确信污染物在可接受的界限范围内,实现水质和污染物总量排放标准;同时充分利用水体自净稀释能力,减少污染治理费用。为此,笔者以治理成本最小化、低水位水质风险最小化为目标进行最优化模型的构建。

### 1.1 治理成本最小化

河流沿岸通常分布一系列排污口,排放不同治理水平的污染物。检测站点的指标污染物浓度的现场测定结果,用于表明水质状况的可接受程度。在水质管理模型中,水质指标污染物浓度超标,在排放过程中应当被控制。总治理费用  $c$  的表达式为

$$c = \sum_{i=1}^n f_i(x_i), \quad (1)$$

式中:  $f_i(x_i)$  为排污口  $i$  的治理费用函数,  $x_i$  为部分清除水平,  $n$  为排污口的个数。

### 1.2 低水位水质风险最小化

低水位水质风险最小化可以用模糊事件的概率表示,通常被认为是低水位水质事件的发生概率。计算表达式为

$$r_{wl} = \int_0^{\infty} \mu_{wl}(c_{wl}) f(c_{wl}) dc_{wl}, \quad (2)$$

式中:  $\mu_{wl}(c_{wl})$  为低水位水质模糊事件的从属函数;  $f(c_{wl})$  为水质指标  $w$  在检测点  $l$  处浓度水平的概率密度函数(PDF)。

为便于研究,笔者对于在检测点处的水质变量浓度 PDFs,在输入河道上游流量与基础上,利用 Monte Carlo 模拟法获得。

## 2 模块构成

1) NSGA-II。由于多目标改进算法(MOEAs)能处理复杂问题,适合于多目标最优化问题求解,例如非连续、多峰值、空间离散化、噪声评估问题。遗传算法能够处理解决方案的整体性问题,因此从整体的角度利于帕累托最优的实现。NSGA-II 算法作为一套成熟的理论已被广泛应用到科研、生产领域,计算步骤参考文献[17]。笔者借助 NSGA-II 算法,给出决策制定者针对冲突目标构建帕累托最优的实施基础。

2) YBT 模型。YBT 模型提供了一种调查双方价格满足程度的方法。模型假定存在 2 种有限性:可能的交易数目  $l_1$  和代理商数量  $l_2$ 。在每个周期中,2 个随机给定代理商的  $j \in l_1, k \in l_2$ ,开始有 2 个参与者 1 和 2 独自进行博弈。博弈过程中,周期数并非一定相同。每个参与者具有冯诺依曼效用函数  $\pi_i$ 。假定每个群体的分布均匀、每个治污者的效用函数为凸函数,改进的博弈模型收敛于独特的分界值  $(x, 1-x)$ [18]。在  $x$  最大化时,严格的准凹函数为

$$R(x) = \min \left\{ \min_{j \in l_1} \frac{\partial \pi_j(x)}{\partial x}, \min_{k \in l_2} \frac{\partial \pi_k(1-x)}{\partial x} \right\}. \quad (3)$$

Young 理论属于零和博弈,因此  $x_1$  和  $x_2$  具有相同的单位,且  $x_1 + x_2 = 1$ 。但在水质管理中,参与者的效用函数通常具有不同单位的价值。比如,对上游环境保护机构而言,水质非常重要,并且环境保护者致力于减少污染的治理投入。为此,文中定义了 2 个新变量  $y_1$  和  $y_2$ ,用于解决零和博弈问题。借此,  $x_1$  和  $x_2$  表示为:

$$x_1 = \frac{y_2}{y_1 + y_2}, x_2 = \frac{y_1}{y_1 + y_2}. \quad (4)$$

参与者在考虑到双方目标的前提下,可给出自己的效用函数。如前所述,在用 NSGA-II 方法获得均衡曲线的基础上, YBT 模型用于选择无偏差的最优解决方案。解决方案中包括上下游可接受的总治理成本以及超标水质造成的风险,也包括污染物排放者  $i$  的污染物处理水平 ( $x'$ ) 和排放负荷 ( $p_i$ )。

3) IDPA 模型。为实现在总污染物负荷最大的前提上,水体水质达标,构建 IDPA 模型用于检测污染物的排放负荷。控制条件表示为

$$\max Z_1 = \sum_{i=1}^n \bar{p}_i, \quad (5)$$

$$\text{subject to } c_{al} \geq c_a \quad \forall a, l,$$

式中:  $\bar{p}_i$  为污染者  $i$  的污染负荷, kg;  $n$  为总排污者的个数;  $c_{al}$  为水质指标污染物  $a$  (如 COD) 在检测站点  $l$  处的体积浓度, mg/L;  $c_a$  为水质指标污染物  $a$  的最小允许检测体积浓度, mg/L。

4) DPT 模型。NSGA-II、YBT 对排污者  $i$  提供了污染物的最优处理水平以及污染物的最优限定排放负荷  $p_i$ , IDPA 提供了最大污染物排放负荷  $\bar{p}_i$ 。研究表明:当  $\bar{p}_i < p_i$  时,排污者  $i$  向河中排放超过河流最大允许承受极限的污染物,且排污权在同流域的排污者之间可自由交易;当  $\bar{p}_j > p_j$  时,排污者  $j$  允许出售排污权。

在确定排污权的出售者和购买者的基础上,借助优化模型,可计算出出售排污权的价值,便于区域内部生态补偿标准的确立。为实现排污者公平排放污染物,以单一排污者排污变化对整体排污成本影响程度最小为目标构建优化模型为

$$\min Z_2 = \text{var} \left( \frac{c'_i}{e_i}, \forall i \right) = \frac{1}{n-1} \left[ \sum_{i=1}^n \left( \frac{c'_i}{e_i} \right)^2 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{c'_i}{e_i} \right)^2 \right], \quad (6)$$

Subject to

$$c'_i = c_i + \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} c''_{ij},$$

$$\alpha_{ij} = \begin{cases} -1 & \text{if } \bar{p}_i > p_i \text{ and } \bar{p}_j < p_j, \\ 1 & \text{if } \bar{p}_i < p_i \text{ and } \bar{p}_j > p_j, \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases}$$

$$c''_{ij} = \begin{cases} f_i(x'_i) - f_i\left(x'_i - \frac{T_{ij}}{e_i}\right) & \text{if } \alpha_{ij} = -1, \\ f_j(x'_j) - f_j\left(x'_j - \frac{T_{ij}}{e_j}\right) & \text{if } \alpha_{ij} = 1, \\ 0 & \text{if } \alpha_{ij} = 0, \end{cases}$$

$$T_{ij} \geq 0,$$

$$\sum_{j=1}^n T_{ij} \leq e_i \quad i = 1, 2, \dots, n \text{ and } i \neq j.$$

式中:  $n$  为总排污者个数;  $c'$  为污染物排放交易后的排污者总成本, 元;  $e_i$  为排污者  $i$  的污染物清除量, kg;  $T_{ij}$  为由排污者  $i$  变为排污者  $j$  后的污染物允许排放量, kg;  $c''_{ij}$  为排污者  $i$  清除  $T_{ij}$  的成本(卖方, 元);  $\alpha_{ij}$  为排污者  $i$  和  $j$  买卖双方的交易系数;  $f_i(x)$  为排污者  $i$  在清除水平  $x$  下的治理成本函数;  $x'_i$  为排污者  $i$  的污染物最优清除水平。

### 3 污染物排放许可交易模型

笔者运用非零和博弈模型, 从环境保护机构与污染物排放者目标冲突的均衡中选择最优的非偏向解决方案, 实现污染物的最优排放交易。具体操作流程, 如图 2 所示。

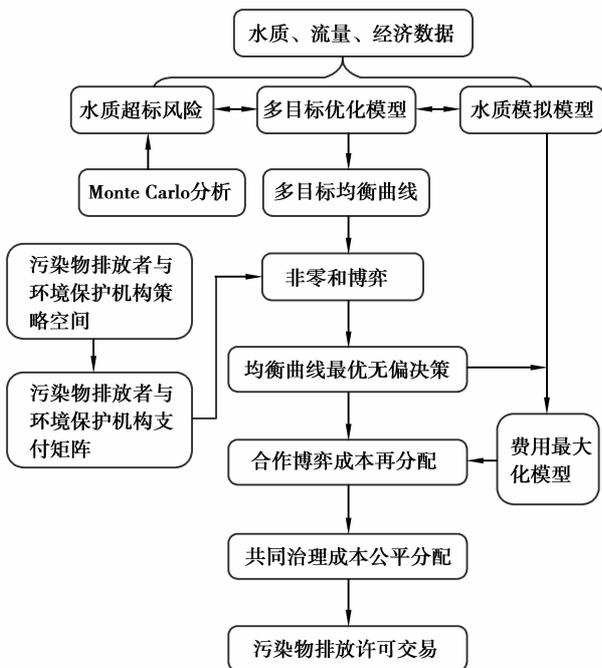


图 2 污染物排放许可交易流程图

参与者 I 和 II 具有混合的策略向量  $x$  和  $y$ 。假

定  $x$  的维度从 1 到  $n$ ,  $y$  的维度从 1 到  $m$ 。  $n$  维矩阵  $A$  和  $m$  维矩阵  $B$  分别对应参与者 I 和 II 的决策变量。参与者 I 在  $A$  的行向量、参与者 II 在  $B$  的列向量上取最大值。  $e, l$  分别是  $n$  维、  $m$  维的矢量。

参与者 I、II 的目标函数为:

$$\max_x x' Ay$$

$$\text{s. t. } e'x - 1 = 0 \quad x \geq 0, \quad (7)$$

$$\max_y x' By$$

$$\text{s. t. } l'y - 1 = 0 \quad y \geq 0. \quad (8)$$

对于上述目标函数的最初表现形式, 在引入纳什均衡系数均衡点  $(x^0, y^0)$  的基础上, 参与者 I 和 II 的目标函数能够同时成立:

$$x^0 Ay^0 = \max_x \{x' Ay^0 \mid e'x - 1 = 0, x \geq 0\},$$

$$x^0 By^0 = \max_y \{x^0 By \mid l'y - 1 = 0, y \geq 0\}. \quad (9)$$

对上述联立均衡方程组, 直接运用 Kuhn-Tucker 的必要条件, 求出均衡点: 如果  $(x^0, y^0)$  是联立方程组的均衡点, 则应该存在标量  $\alpha^0, \beta^0$ , 使得下面的函数关系成立:

$$\begin{cases} x^0 Ay^0 - \alpha^0 = 0, \\ x^0 By^0 - \beta^0 = 0, \\ Ay^0 - \alpha^0 e \leq 0, \\ B'x^0 - \beta^0 l \leq 0. \end{cases} \quad (10)$$

s. t.

$$\begin{cases} e'x^0 - 1 = 0, \\ l'y^0 - 1 = 0, \\ x \geq 0, \\ y \geq 0. \end{cases}$$

式(10)变形可得:

$$\begin{cases} x^0 (Ay^0 - \alpha^0 e) = 0, \\ y^0 (B'x^0 - \beta^0 l) = 0. \end{cases} \quad (11)$$

环境保护机构与污染物排放者间的非零和博弈模型可表示为:

$$\max_{x, y, \alpha, \beta} x'(A + B)y - \alpha - \beta = 0, \quad (12)$$

$$\text{s. t. } Ay - \alpha e \leq 0, B'x - \beta l \leq 0,$$

$$e'x - 1 = 0,$$

$$l'y - 1 = 0,$$

$$x \geq 0, y \geq 0.$$

式中:  $\alpha, \beta$  是标量,  $\alpha, \beta$  在取最大值的情况下, 即为  $\alpha^0, \beta^0$ , 分别为参与者 I 和 II 获得的期望价值。

### 4 均衡交易模型应用

为进一步验证提出的污染物排放许可交易模型的有效性和可行性, 选择中国北方的某河流(天然径

流量较小,水量主要用于农田灌溉)作为试点,探讨上下游交易框架下的污染物治理新理念,为流域生态补偿的实施提供方法参考。污染物排放口和检测点的具体信息见图 3 所示。受入河污染物类型、水体水质保护目标的限制(入河 90%的污水来源于家庭生活),选取 DO、BOD 作为水质污染物控制典型因子<sup>[19]</sup>。

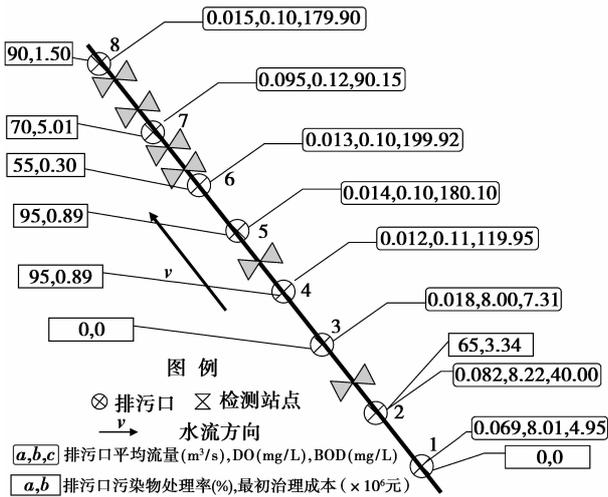


图 3 研究区基本参数

在 2 个参与者参与的非零和博弈模型中,排放者的支付矩阵用矩阵 **A** 表示,环境保护机构的决策用矩阵 **B** 表示:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0.85 \\ & & & 0.62 & 0 \\ & & 0.50 & & 0 \\ & 0.39 & & & 0 \\ 0.31 & & & & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0.15 \\ & & & 0.38 & 0 \\ & & 0.50 & & 0 \\ & 0.61 & & & 0 \\ 0.69 & & & & 0 \end{bmatrix}.$$

污染物排放者和流域环境保护机构的策略空间分别为向量 [15, 30, 50, 70, 85] 和 [45, 48, 50, 52, 55]。经计算,博弈的最优函数模型的目标值是 0.54。均衡点与  $x=(0,0,0,0,1)$  和  $y=(1,0,0,0,0)$  相一致,期望支付为  $\alpha=0.31, \beta=0.15$ 。

依据非零和博弈无偏决策的特点(表 1),污染物排放口 2、6、7 依据污染物处理率最高、模糊风险率相对较低的原则,依靠协作进行联合,减少污染物治理成本。排污口 1 和 3 可以充分利用水体自净作用消减污染物,而不需要进行人为的外部投入。排

污口 4 和 5 应该完全的处理其污染物负荷,因为在其利用较低的治理成本和提高其治理水平的情况下,并没有明显的改善河流水质。

表 1 排污口无偏决策的特点

排污口编号	污染物处理率/%	最初治理成本/万元	模糊风险率/%
1	0	0	40
2	65	334	0
3	0	0	30
4	95	89	0
5	95	89	0
6	55	30	0
7	70	501	0
8	90	150	0

研究流域均衡排污口 6 的治理成本要大于最初的治理成本,而排污口 2、7 则小于最初的均衡成本。因此,排污口 2、7 从排污口 6 购买污染物排放许可,但 2、6、7 联合的整体污染物治理成本比独自的最优值降低 20%。经非零和博弈后,排污口 2、6、7 不同层次联合的治理成本,如表 2 所示。

表 2 排污口 2、6、7 不同层次联合的治理成本比较

联合层次	排污口治理成本/万元			合计	成本下降率/%
	2	6	7		
2、6、7	222	98	372	693	20
2、6	266	55	0	321	12
2、7	334	0	501	835	0
6、7	0	71	408	479	10

利用合作的博弈理论进行总成本的降低和再分配,使每个排污者的治理成本付出在总成本中所占比例有所降低,利于激励环境保护机构采取进一步的正向激励措施,引导单个排污者实现投入与水质达标受益均衡化。2、6、7 排污口经过反复博弈后,最终的均衡成本付出计算结果见表 3。排污口 6 均衡调节的数值表明排污口通过市场交易出售排污许可获得的收益应该与排污口 2、7 购买排污许可的付出相等,但总排污成本降低 173 万元。验证了基于污染物排放许可的均衡交易模型的可行性。

表3 排污口2、6、7成本重新分配计算结果

排污口	单个排污者在 总支付成本中 减少量/万元	最终治理成本 重新分配/万元	均衡调节 /万元
2	64	270	-47
6	30	0	98
7	79	422	-51
合计	173	692	0

## 5 结 语

笔者充分考虑到决策制定者和利益相关者的利益冲突,并将 NSGA-II、IDPA、TDP、非零和均衡博弈模型在多目标均衡求解方面的优势加以整合,构建了一种污染物排放许可交易决策新方法<sup>[20]</sup>: NSGA-II 与水质模拟模型耦合,给出总治理成本与超标水质模糊风险评价之间的均衡曲线;依托 YBT 理论,寻求均衡曲线上的最优无偏决策;在利用 TDP 理论制定最优排放策略的基础上,依靠非零和均衡博弈模型,给出总成本最小情况下的排污口均衡交易结果,为流域环境保护机构在治理成本最优情景下,重新分配排污口污染物的允许排放量提供依据。

运用构建模型进行典型河流的个案研究,证实了该模型在河流水质管理中的适用性:能够提供最优的污染物排放许可交易策略,给出河流污染物排放与环境保护机构利益冲突解决方法。流域水质问题的改善,不是单纯上下游之间的事情,需要不同利益协调机构的共同参与。考虑到水质变动的风险性与影响因素的不确定性,笔者借鉴 Karamouz 等<sup>[21]</sup>的相关建议,应考虑更多的水质指标作为模型控制因子。同时,均衡博弈理论也可以用于排放许可交易过程中排污者治理成本的有效性和公平性分配。

流域生态补偿对人类经济活动所利用的水资源和生态资源予以保护或修复,用于恢复和维持流域水资源服务功能的可持续性,同时对于流域水资源开发利用与保护工作中各利益主体间产生的外部性问题予以补偿或赔偿。排污权交易以污染物治理成本最小化、对水生态环境改善程度最大化为目标,并尽量减少交易过程中的外部投入。依据当前流域生态补偿实施中的共建共享理论<sup>[22]</sup>、经济最优理论<sup>[23]</sup>、支付意愿研究方法<sup>[24]</sup>的广泛应用,污染物排放交易与生态补偿的结合能够在一定程度上实现。

因此,污染物排放交易为流域生态补偿的实施提供了可供借鉴的新思路。

## 参考文献:

- [1] 罗丽. 美国排污权交易制度及其对我国的启示[J]. 北京理工大学学报:社会科学版, 2004, 6(1): 61-65.  
LUO Li. The trade system of eliminating defiles right of America and its revelation to China[J]. Journal of Beijing Institute of Technology: Social Sciences Edition, 2004, 6(1): 61-65.
- [2] 万军, 张惠远, 王金南, 等. 中国生态补偿政策评估与框架初探[J]. 环境科学研究, 2005, 18(2): 1-8.  
WAN Jun, ZHANG Huiyuan, WANG Jinnan, et al. Policy evaluation and framework discussion of ecological compensation mechanism in China [J]. Research of Environmental Sciences, 2005, 18(2): 1-8.
- [3] Crocker T D. The structuring of atmospheric pollution control systems[M]. New York: W W Norton & Co., 1966: 61-86.
- [4] Dales J H. Land water and ownership [J]. The Canadian Journal of Economics, 1968, 1(4): 791-804.
- [5] 马中, Dan Dudek, 吴健, 等. 论总量控制与排污权交易[J]. 中国环境科学, 2002, 22(1): 89-92.  
MA Zhong, DUDEK D, WU Jian, et al. Discussion on total emissions control and emission trading[J]. China Environmental Science, 2002, 22(1): 89-92.
- [6] 陈磊, 张世秋. 排污权交易中企业行为的微观博弈分析[J]. 北京大学学报:自然科学版, 2005, 41(6): 926-934.  
CHEN Lei, ZHANG Shiqiu. Gaming analysis for behaviors of the enterprises involving emission trading[J]. Acta Scientiarum: Naturalum Universitatis Pekinesis, 2005, 41(6): 926-934.
- [7] O'Neil W B. Transferable discharge permits trading under varying stream conditions: a simulation of multi-period permit market performance on the Fox River[J]. Water Resources Research, 1983, 19(3): 608-612.
- [8] Eheart J W, Brill E D, Lence B J, et al. Cost efficiency of time varying discharge permit programs for water quality management [J]. Water Resources Research, 1987, 23(2): 245-251.
- [9] Hung M, Shaw D. A trading-ratio system for trading water pollution discharge permits [J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2005, 49(1): 83-102.
- [10] Ganji A, Khalili D, Karamouz M. Development of stochastic dynamic nash game model for reservoir

- operation. I: The symmetric stochastic model with perfect information[J]. *Advances in Water Resources*, 2007, 30(3): 528-542.
- [11] Kerachian R, Karamouz M. A stochastic conflict resolution model for water quality management in reservoir-river systems [J]. *Advances in Water Resources*, 2007, 30(4): 866-882.
- [12] Shirangi E, Kerachian R, Shafai B M. A simplified model for reservoir operation considering the water quality issues: application of the Young conflict resolution theory[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007, 146(1/2/3):77-89.
- [13] Montgomery W D. Markets in licenses and efficient pollution control programs[J]. *J Econ Theory*, 1972, 5(3): 395-418.
- [14] Eheart J W, Brill E D, Lence B J, et al. Cost efficiency of time-varying discharge permit programs for water quality management [J]. *Water Resources*, 1987, 23(2): 245-251.
- [15] Niksokhan M H, Kerachian R, Amin P. A stochastic conflict resolution model for trading pollutant discharge permits in river systems[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, 154(1/2/3/4): 219-232.
- [16] Niksokhan M H, Kerachian R, Karamouz M. Game theoretic approach for trading discharge permits in rivers [J]. *Water Science and Technology*, 2009, 60(3): 793-804.
- [17] Yandamuri S R M, Srinivasan K, Bhallamudi S M. Multiobjective optimal waste load allocation models for rivers using nondominated sorting genetic algorithm-II[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management ASCE*, 2006, 132(3):133-143.
- [18] Napel S. *Bilateral bargaining: theory and applications* [M]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002: 1-196.
- [19] Mohammad R N, Reza K, Mohammad H N, et al. A game theoretic model for trading pollution discharge permits in river systems[J]. *International Journal of Environmental Science and Development*, 2011, 2(2): 162-166.
- [20] Mohammad H N, Reza K, Pedram A. A stochastic conflict resolution model for trading pollutant discharge permits in river systems[J]. *Environ Monitoring and Assessment*, 2009, 154(1/2/3/4): 219-232.
- [21] Karamouz M, Zahraie B, Kerachian R. Development of a master plan for water pollution control using MCDM techniques: a case study [J]. *Water International*, 2003, 28(4): 478-490.
- [22] 许凤冉,阮本清,汪党献,等.流域水资源共建共享理念与测算方法[J]. *水利学报*, 2010, 41(6): 665-670.  
XU Fengran, RUAN Benqing, WANG Dangxian, et al. Model for calculating benefit and cost sharing of water resources co-conservation in a river basin [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41 (6): 665-670.
- [23] 刘玉龙,胡鹏.基于帕累托最优的新安江流域生态补偿标准[J]. *水利学报*, 2009, 40(6): 703-707.  
LIU Yulong, HU Peng. Ecological compensation standard for Xinanjiang River basin based on Pareto optimization [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(6): 703 -707.
- [24] 郑海霞,张陆彪,涂勤.金华江流域生态服务补偿支付意愿及其影响因素分析[J]. *资源科学*, 2010, 32(4): 761-767.  
ZHENG Haixia, ZHANG Lubiao, TU Qin. Analysis of the people's willingness to pay for environmental services compensation and its influence factors in the Jinhua River Basin [J]. *Resources Science*, 2010, 32(4): 761-767.

(编辑 郑浩)