

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2013.02.018

基于汇流单元的水污染物排污权交易比率研究

何 盼,魏 琦,张 炳

(南京大学环境学院污染控制与资源化研究国家重点实验室,江苏 南京 210023)

摘要:以控制流域断面水质为目标,在排污权交易市场中引入交易比率,以解决排污权交易带来局部水质恶化的热点问题。以江苏省无锡市社渚港流域为研究区域,模拟该流域主要点源化学需氧量(COD)的排污权交易,探讨交易比率对排污权交易政策效果的影响。模拟结果显示,交易比率会促使排污布局向上游迁移,但交易前后控制断面的水质不变,可避免热点问题的出现。

关键词:排污权交易;交易比率;热点问题;社渚港

中图分类号:X196 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2013)02-0086-05

Research on subwatershed-based trading ratio of water pollution rights trading

HE Pan, WEI Qi, ZHANG Bing

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: To ensure the water quality of the control section of a watershed, the trading ratio is introduced in order to prevent regional water quality deterioration after water pollution rights trading, which is a hot spot problem. The COD trading in the Shedugang River Basin in Wuxi, in Jiangsu Province, was modeled to explore the influence of the trading ratio on the effect of the water pollution rights trading policy. The results show that the trading ratio can promote the distribution of discharge moving upwards, and the water quality of the control section remained unchanged after trading, which helps to avoid the hot spot problem.

Key words: pollution rights trading; trading ratio; hot spot; Shedugang River

排污权交易是指在控制污染总量的前提下,允许污染源之间为了降低污染成本而开展污染物排放配额的交易^[1]。从 20 世纪 60 年代开始,排污权交易政策在不同国家得到了广泛应用,如美国的酸雨计划、长岛氮信用交易计划、弗吉尼亚营养物质信用交易计划、俄勒冈清洁水服务、威斯康辛 Fox 河流域的化学需氧量(COD)许可证等^[2-3]。我国自 20 世纪 90 年代开始实施污染总量控制。2001 年起,我国一些试点省市陆续开展排污权交易实践,至今已有江苏、浙江、重庆、陕西、山西、山东、黑龙江、昆明、内蒙古、湖南、天津、湖北等省(市、自治区)已实施或准备实施总量控制下的排污权交易政策^[2]。

然而,对非均匀混合污染物(因排放地点不同

对区域环境质量可能造成不同影响的污染物)而言,进行排污权交易在降低污染控制成本的同时,也可能引起热点问题(即交易后某一地区因污染物排放量增多而在短时间内污染物质量浓度超出环境容量,造成局部环境质量下降)。为了通过适当的政策设计避免热点问题,Hahn 等^[4-5]提出了 3 种方法:①在交易前进行环境质量模拟;②设置区域交易限制;③引入交易比率。根据这 3 种方法,学者们对若干种排污权交易制度进行了探讨。排污权交易制度包括污染物补偿机制(pollution offset system, POS,即在排污权交易前进行环境质量模拟,以决定是否采用交易比率进行排污权交易,其中交易比率根据交易双方所排放污染物到达特定区域的浓度之比确

基金项目:国家自然科学基金青年基金(70903030)
作者简介:何盼(1990—),女,硕士研究生,研究方向为资源环境经济学。E-mail:hepannju@163.com
通信作者:张炳,副教授。E-mail:zhangb@nju.edu.cn

定^[6]), 区域性许可证机制 (zonal permit system, ZPS, 即划定管理区域并限制区域间的排污权流通^[4,6]), 周边许可证机制 (ambient permit system, APS, 即排污者向受影响区域购买排污权, 但受影响区域售出的排污权通过交易比率转换后不得超过其环境容量, 交易比率按照各排污者初始排放浓度与到达特定区域的浓度之比确定^[7]), 交换比率机制 (exchange-rate system, ERS, 即引入按照排污权交易决策模型最优解情形下交易双方边际削减成本之比确定的交易比率进行自由交易^[8]), 等。POS、APS、ERS 在政策设计中引入了交易比率, 但因存在着不能完全解决热点问题 (如 POS^[4]、ERS^[8])、交易成本高 (如 POS^[9]、APS^[10-11])、可能引起搭便车、成本难以保证 (如 POS^[12]) 等问题, 未能实现环境质量约束与削减成本节约之间的平衡。Hung 等^[10] 提出交易比率机制 (trading-ratio system, TRS), 即应用 POS 中交易比率的定义, 根据环境容量确定各区域初始排污权的分配量, 要求排污者按交易比率进行自由交易, 在双边交易、多方交易模式下达到区域环境质量约束下的成本控制。

在我国现行的目标总量控制的政策框架下, 排污权交易的初始分配受到众多因素的影响, 因而不能够完全和环境容量相结合, 导致排污权交易无法有效避免热点问题。本研究以特定断面水质为控制目标, 探讨引入交易比率对流域水污染排污权交易市场和水环境质量的影响, 并以江苏省无锡市社渚港流域为案例进行仿真模拟研究。根据《美国水质交易技术指南》, 交易比率分为传输比率和位置比率, 其中传输比率表示上下游排污者之间水体自净作用产生的环境影响, 位置比率表示排污者排放单位质量污染物对相关水体造成的环境影响^[13]。本文将交易比率定义为不同排污者对特定断面的位置比率。

1 模型构建

1.1 排污权交易决策模型

假设参与排污权交易的流域内共有 m 个监测断面, 第 j 个监测断面 ($j=1, 2, \dots, m$) 的环境质量标准为 C_j , 流量为 Q_j , 第 $j-1$ 到第 j 个监测断面之间的流域为区域 j 。流域内从上游到下游各区域内依次有 $n_1, n_2, \dots, n_m$ 个排污者, 且 $\sum_{j=1}^m n_j = n$ 。设区域 s 第 i_s 个排污者 ($s=1, 2, \dots, m, i_s=1, 2, \dots, n_s$) 污染物产生量为 $e_{i_s}^0$, 污染物许可排放量为 e_{i_s} , 削减成本函数为 c_{i_s} 。在 $e_{i_s}^0 \geq e_{i_s}$ 时, 排污者倾向于在许可排放量限制下达到最大排放量, e_{i_s} 即可视作污染物最终排

放量, 则 c_{i_s} 为 e_{i_s} 的函数, 且 $\frac{\partial c_{i_s}}{\partial e_{i_s}} \leq 0, \frac{\partial^2 c_{i_s}}{\partial^2 e_{i_s}} > 0$ 。在排污权交易中, 买卖双方决策导致的交易结果并不因模型的构建方式而有所不同, 因而以任一方决策建构目标函数, 以另一方决策作为约束条件建立的模型为最优解一致。本研究以卖方决策构建目标函数, 即削减成本最小化, 交易收入最大化, 以买方决策作为约束条件, 同意进行交易的条件为交易后削减成本与交易支出之和不大于交易前削减成本。未引入交易比率时, 卖方减少的污染物排放量等于买方增加的污染物排放量。以排污者 i_l ($l=1, 2, \dots, m, i_l=1, 2, \dots, n_l$) 为卖方, 排污者 i_s 为买方, 根据交易比率机制 TRS 可得到^[10]:

$$\begin{aligned} & \min_{e_{i_s}, e_{i_l}, X} c_{i_l} - X \\ & \text{s. t. } c_{i_s} + X \leq c'_{i_s} \\ & e'_{i_l} - e_{i_l} = e_{i_s} - e'_{i_s} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: e'_{i_s}, e'_{i_l} 分别买卖双方交易前的污染物许可排放量; e_{i_s}, e_{i_l} 分别为买卖双方交易后污染物许可排放量; c'_{i_s} 为交易前排污者 i_s (买方) 削减成本, c_{i_s} 为交易后排污者 i_s (买方) 削减成本, c_{i_l} 为交易后排污者 i_l (卖方) 削减成本, X 为交易额。

交易过程中, 约束 $c_{i_s} + X \leq c'_{i_s}$ 为限制性约束, 即

$$\begin{aligned} & \min_{e_{i_s}, e_{i_l}, X} c_{i_l} - c'_{i_s} + c_{i_s} \\ & e'_{i_l} - e_{i_l} = e_{i_s} - e'_{i_s} \end{aligned} \quad (2)$$

引入交易比率, 卖方减少的污染物排放量不再等于买方增加的污染物排放量。根据交易比率的定义, 有

$$\begin{aligned} & \min_{e_{i_s}, e_{i_l}, X} c_{i_l} - X \\ & \text{s. t. } c_{i_s} + X \leq c'_{i_s} \\ & t_{i_l, i_s} (e'_{i_l} - e_{i_l}) = (e_{i_s} - e'_{i_s}) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: t_{i_l, i_s} 为排污者 i_l 与排污者 i_s 进行排污权交易时的交易比率。将断面 j 的污染物浓度设为控制目标时, 排污者 i_l 出售 $(e'_{i_l} - e_{i_l})$ 单位排污权后, 排污者 i_s 可增加的排放量为 $(e_{i_s} - e'_{i_s}) = t_{i_l, i_s} (e'_{i_l} - e_{i_l})$, t_{i_l, i_s} 使交易后污染布局改变的条件到达断面 j 的污染物浓度不变。

1.2 交易比率

根据交易比率的定义, 区域 s 第 i_s 个排污者向区域 l 第 i_l 个排污者 ($l=1, 2, \dots, m, i_l=1, 2, \dots, n_l$) 购买排污权, 以断面 j 为控制断面, 两者交易比率应为

$$t_{i_l, i_s} = \frac{t_{ij}}{t_{ij}} \quad (4)$$

式中: t_{i_s}, t_{i_l} 分别为排污者 i_s, i_l 对断面 j 的位置比

率,即排污者排放的污染物浓度与其所排放的污染物到达断面*j*时的浓度之比。

鉴于研究区内河流宽度较小,本文采用 S-P 模型^[14]计算位置比率 t_{ij} ,并根据其结果计算交易比率。该模型属一维水质模型,假设 COD 衰减为一级反应且速率定常。根据以上假设,有

$$\frac{d\rho}{dt} = -k\rho \tag{5}$$

其中 $t = x/u$
式中: ρ 为河水中的 COD 质量浓度,mg/L; k 为 COD 衰减系数; t 为河水流动时间; x 为河流长度, u 为水流速度。

该微分方程的解为

$$\rho = \rho_0 \exp\left(-\frac{kx}{u}\right) \tag{6}$$

式中, ρ_0 为河流源头处 COD 的初始质量浓度。

设研究区内流域 COD 的背景质量浓度为 0,区域 s 第 i_s 个排污者($s=1,2,\cdots,m,i_s=1,2,\cdots,n_s$)处 COD 的初始质量浓度为 ρ_{0i_s} ,则断面 $j(j=1,2,\cdots,m)$ 处的 COD 质量浓度为

$$\rho_j = \rho_{0i_s} \exp\left(-\frac{kx}{u}\right) \tag{7}$$

根据位置比率的定义,可知:

$$t_{ij} = \frac{\rho_j}{\rho_{0i_s}} = \exp\left(-\frac{kx}{u}\right) \tag{8}$$

排污者 i_s 在区域 j 下游时,由于 $k=0$,可知 $t_{ij}=1$ 。

2 社渚港流域排污权交易模拟案例

2.1 研究区域概述

社渚港流域位于江苏省无锡市宜兴市,为太湖流域子流域之一(图 1)。流域面积 20 998.03 km²,西起漏湖,流经宜兴市高塍、氾亭,汇入武宜运河,从与交汇处向南偏西约 3 km 后向东流经宜兴经济开发区、新庄入太湖,全长 25.7 km。平均河面宽 40 m,河底高程 0.5 m(吴淞高程),设计河底宽 10~30 m,



图 1 研究区域

河道年均径流量 0.948 亿 m³,其中,宜兴本地径流约占 30%。社渚港分为东、西社渚港,东社渚港西起武宜运河,东入太湖,全长 9.23 km,年均径流总量 0.8 亿 m³,其中宜兴本地径流量 0.24 亿 m³,占 30%。本研究以 2020 年社渚港流域规划水质目标作为排污权交易目标,对 33 家点源 COD 排污权交易进行模拟。

2.2 汇流单元划分

应用 GIS 进行子流域提取,以各汇流单元作为各交易区域,计算区域间的交易比率,用于模拟。由于流域范围较小,受高程数据精度的限制,子流域分割结果不够精确。本研究参考水环境质量功能区的划分,对分区进行了调整。由于一些企业排污口与企业所在的汇流单元并不相同,因此根据排污口所在区域来确定各企业的交易比率。交易区域划分情况见图 2。

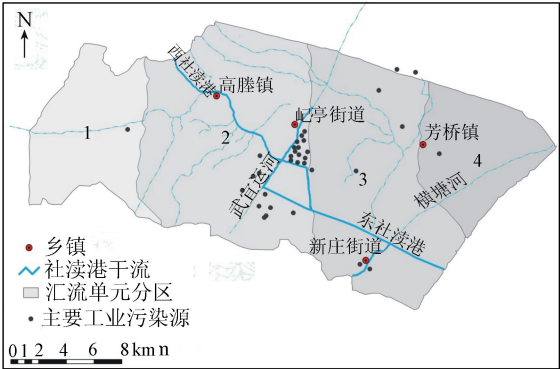


图 2 社渚港流域汇流单元划分

2.3 交易比率计算

本研究假设太湖流域内 COD 衰减系数 $k=0.1\text{ d}^{-1}$ ^[15],同时根据江苏省环境科学研究院《太湖流域十五条主要入湖河流水环境综合整治总体规划》确定太湖流域入湖河流水流速度 $u=0.13\text{ m/s}$ 。为简化计算,假设每个交易区域内只有一个排污口且位于该区域起点处,所有河段无回流现象,可计算位置比率矩阵如下:

$$[t_{sj}] = \begin{bmatrix} 0.8828 & 0.7676 & 0.7247 & 0.6870 \\ 1 & 0.8696 & 0.8209 & 0.7782 \\ 1 & 1 & 0.9441 & 0.8950 \\ 1 & 1 & 1 & 0.9480 \end{bmatrix} \tag{9}$$

式中: t_{sj} 为第 s 个区域的排污口排放单位质量浓度的 COD 到达第 $j(j=1,2,\cdots,m)$ 个区域出口断面时的质量浓度。

因此,若考虑排水量并将质量浓度转换为 COD 排污量,则区域 s 排污口排放的 l 单位 COD 到达断面 j 时,将因水体自净作用而变为 t_{sj} 单位 COD。以

进入太湖的 COD 质量浓度为控制目标,根据各区域对第 4 个断面的位置比率,可得到 $m \cdot m$ 阶传输比率矩阵:

$$[t_{ls}] = \begin{bmatrix} 1 & 0.8828 & 0.7676 & 0.7247 \\ 1.1327 & 1 & 0.8696 & 0.8209 \\ 1.3027 & 1.1500 & 1 & 0.9441 \\ 1.3798 & 1.2181 & 1.0592 & 1 \end{bmatrix}$$

(10)

该交易比率为卖方对买方的交易比率,其中 t_{ls} 代表区域 l 的排污者向第 s 个区域的排污者出售 1 单位 COD 排污权时区域 s 的排污者可以获得的排污权增量。

2.4 数据收集

本研究中心源的 COD 产生量及排放量数据主要通过 对 33 家企业的调研结果获得,削减率根据 COD 的产生量、排放量之差与 COD 产生量相比得到。主要变量统计结果见表 1。本研究在对社渚港流域数据进行经验分析的基础上确定污染物成本削减函数形式为

$$C = c_1 R^{c_2}$$

(11)

式中: C 为排污者削减成本; R 为 COD 削减率; c_1 、 c_2 为常数。

表 1 主要变量统计结果

变量	COD 产生量/t	COD 排放量/t	COD 削减率/%	COD 单位 处理成本/ (元·t ⁻¹)	c_1
平均值	1075.62	87.63	77.02	3786.79	17397456
标准差	2188.24	121.59	27.34	1773.99	41391321
最小值	0.11	0.10	0	359.27	10802.440
最大值	11460.00	450.00	98.62	8332.03	228868617

理论上,由各排污者 COD 削减成本数据及削减率数据进行回归,即可得到 c_1 、 c_2 的值。但由于各排污者的 COD 削减成本数据难以得到,本研究根据《太湖流域水污染物排污权有偿使用价格体系报告》数据计算出不同行业 COD 单位处理成本平均值,由此计算各排污单位自处理成本,与削减率进行回归得到 c_2 。根据计算结果,对各企业而言,均有 $c_2=9.11$ 。同时,为了进一步体现不同企业的边际削减成本的差异性,根据这一单位处理成本平均值及方差产生正态分布随机数序列,并根据这一序列针对各排污者计算出处理成本,根据削减率、 c_2 由式(11)确定 c_1 。

2.5 模拟结果

假设研究区域内污水均排在区域内,排污者无违法行为,所有排污者现行 COD 排放量等于其初始排污权拥有量,采取双边谈判进行交易。用 matlab7.0 求解最小化卖方削减成本的目标函数,运行 10000 次以得到稳定的最终解,得到各排污者最终排污量及总削减成本,运用 S-P 模型计算各区域出口断面的 COD 质量浓度。为对比引入交易比率的交易对各区域排污布局和水质所产生的影响,无交易情景的计算结果也在模拟结果中给出;为对比交易比率的引入对交易造成的政策效果产生了怎样的影响,本研究同时计算了对未引入交易比率的情景。3 种情景计算结果见表 2。

由于交易比率的存在,交易后排污权及排污总量可能不等于未交易情景下排污权及排污总量。在本研究中,引入交易比率后总削减成本相较未引入交易比率的情景下降了 0.07%,相较无排污权交易的情景下降了 8.94%,而引入交易比率后排污总量较其他两种情形有所上升。主要原因是:模拟情景中,区域 1 内的企业因地处上游,可充分利用河道的自净能力,由于向下游企业购买排污权时交易比率大于 1,引入交易比率后其最终排放量明显上升;模拟情景中,引入交易比率后,其他区域内企业排放量均不变或有微小幅度的减少,其中一些边际削减成本较低的企业售出了其拥有的全部排污权,交易后排放量为 0,总体排放量上升。

受排污布局改变的影响,引入交易比率之后,区域 1、2、3 出口断面的 COD 的质量浓度相较于未引入交易比率时上升。这主要是由于区域 1 中企业排污量上升程度大于其余企业排污量下降程度之和,而这一变化并未被水体自净作用完全抵消,造成各区域出口断面处 COD 质量浓度上升。引入交易比率后,入湖断面即区域 4 出口断面的水质情况较交易前没有发生改变。由于本研究以该断面为控制断面计算交易比率,而交易比率的设定原则为交易前后交易双方的排污量所造成的环境影响相等,这一模拟结果表明交易比率达到了保证流域断面水质目标的目的,从而避免了热点问题的出现。需要说明的是,本研究未引入交易比率的情景下排污权交易后各断面的 COD 质量浓度更小,主要原因是大多数

表 2 不同情景下削减成本及水质情况

情景	总削减 成本/元	总排放 量/t	买方交 易量/t	卖方交 易量/t	区域排放总量/t				出口断面 COD 质量浓度/(mg·L ⁻¹)			
					区域 1	区域 2	区域 3	区域 4	区域 1	区域 2	区域 3	区域 4
无交易	1.36×10 ⁸	2891.74	0	0	38.28	2808.52	44.83	0.11	0.36	26.07	25.06	23.76
未引入交易比率	1.24×10 ⁸	2891.74	1871.4	1871.4	38.25	2822.60	30.82	0.076	0.36	26.20	25.04	23.74
引入交易比率	1.24×10 ⁸	2894.81	1873	1869.9	45.61	2819.00	30.12	0.076	0.42	26.23	25.06	23.76

企业位于上游的区域 2,跨区交易主要为区域 3、4 向上游出售排污权以充分利用水体的自净能力。在引入交易比率后,这些交易会导致上游企业允许增加污染物排放量大于下游售出的污染物排放量,导致各断面 COD 质量浓度上升。对于企业集中分布于流域下游的区域而言,若不引入交易比率,则可能存在排污布局向下游迁移而造成最终入湖断面的 COD 质量浓度超标的情况。

3 结 语

以江苏省无锡市社渚港流域为例,以入湖断面水质为控制目标计算了基于汇流单元的区域间交易比率,并将其引入排污权交易决策模型进行模拟,以评估其对排污权交易政策效果的影响。结果表明,排污权交易能够显著降低流域污染控制总成本,而交易比率的引入对交易后总削减成本和总排放量的影响较小。同时,引入交易比率后,排污布局向上游迁移,总排放量上升,但控制断面 COD 的质量浓度不变,避免了热点问题的出现。本研究不足之处在于,假设模拟情景中区域 COD 质量浓度背景值为 0,但在现实情况并不满足这一假设。虽然 COD 质量浓度背景值并不影响交易比率起到保证排污权交易前后目标断面 COD 质量浓度不变的作用,但各断面水质数据可能有所变化。

我国现有的排污权交易试点中,各排污者初始排污权的确定和分配多基于历史数据,并未直接与流域环境容量关联,也未考虑各区域环境容量的差异性,基于 TRS 的排污权交易系统无法解决初始分配导致的污染物排放质量浓度超标的问题,需要在排污权初始分配阶段中,确定下游区域的排污权总量时排除上游区域的环境影响,并引入交易比率,以确保排污布局的改变不会导致环境影响的改变,从而完全避免热点问题。

参考文献:

[1] CROCKER T D. The structuring of atmospheric pollution control systems[C]//WOLOZIN H. The economics of air pollution. New York: W. W. Norton and Co. ,1966:61-86.
[2] 王金南,董战峰,杨金田,等. 排污权交易制度的最新实践与展望[J]. 环境经济,2008 (10): 31-45. (WANG Jinnan, DONG Zhanfeng, YANG Jintian, et al. Latest practice and outlook to system of emission trading [J]. Environmental Economy, 2008 (10): 31-45. (in Chinese))
[3] SOVACOOOL B K. The policy challenges of tradable

credits; a critical review of eightmarkets [J]. Energy Policy,2011,39:575-85.
[4] HAHN R W. Trade-offs in designing markets with multiple objectives[J]. Journal of Environmental Economics and Management,1986,13:1-12.
[5] CAO H, IKEDA S. Inter-zonal tradable discharge permit system to control water pollution in Tianjin, China[J]. Environmental Science & Technology, 2005 , 39: 4692-4699.
[6] KRUPNICK A J, OATES W E, VANDEVERG E. On marketable air-pollution permits:the case for a system of pollution offsets[J]. Journal of Environmental Economics and Management,1983,10(3):233-47.
[7] MONTGOMERY W D. Markets in licenses and efficient pollution control programs [J]. Journal of Economic Theory,1972,5(3):395-418.
[8] KLAASSEN G, FØRSUND F, AMANN M. Emission trading in Europe with an exchange rate [J]. Environmental & Resource Economics,1994,4:305-30.
[9] MCGARTLAND A. A comparison of two marketable discharge permits systems[J]. Journal of Environmental Economics and Management,1988,15(1):35-44.
[10] HUNG M F, SHAW D. A trading-ratio system for trading water pollution discharge permits [J]. Journal of Environmental Economics and Management,2005,49(1): 83-102.
[11] ERMOLIEV Y, MICHALEVICH M, NENTJES A. Markets for tradeable emission and ambient permits: a dynamic approach [J]. Environmental & Resource Economics, 2000,15(1):39-56.
[12] ATKINSON S, TIETENBERG T. Market failure in incentive-based regulation:the case of emissions trading [J]. Journal of Environmental Economics and Management,1991,21(1):17-31.
[13] 美国环境保护局. 美国水质交易技术指南[M]. 北京: 中国环境科学出版社,2009:21-23.
[14] STREETER H W, PHELPS E B. A study of the pollution and natural purification of the Ohio River. III: factors concerning the phenomena of oxidation and reaeration [J]. Public Health Bulletin,1925,146:1-75.
[15] 罗锴,逢勇,林颖,等. 太湖流域主要入湖河道污染物通量研究[J]. 河海大学学报:自然科学版,2005,33(2): 131-135. (LUO Jin, PANG Yong, LIN Ying, et al. Study on flux of pollutants discharged into Taihu Lake through main inflow river channels [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2005, 33(2): 131-135. (in Chinese))

(收稿日期:2012-03-14 编辑:彭桃英)