

瓯江流域（温州段）水污染物排污权交易比率研究^{*1}

翁智雄¹ 程翠云² 章翼³ 葛察忠² 田昆铭⁴

(1. 中国人民大学 环境学院, 北京 100872;

2. 环境保护部环境规划院, 北京 100012;

3. 温州市环境监测中心, 浙江 温州 325000;

4. 浙江省丽水市莲都区现代农业园区管理委员会, 浙江 丽水 323000)

【摘要】：水污染物具有迁移转化和空间异质的特点，上下游排污主体的排污权交易可能产生环境污染“热点”问题，国内外学者对交易比率问题的研究有限，多维度的探讨仍然不足。论文以瓯江流域（温州段）为研究对象，采用流域分区、水环境功能区、经济发展水平三种方法，分别研究瓯江流域（温州段）的排污权交易比率以及排污权指标的区域调节问题。研究认为，流域分区方法以地形等为划分依据，根据分区上下游关系确定交易比率，计算结果精准，但所需的信息量较大、计算过程较复杂，且行政区划与流域分区不一致的问题无法解决，更适用于流域地形单一或排污权管理制度完善的地区。水环境功能区方法按污染因子浓度要求设计交易比率，方法简单易行，但精确度不高，适用于水环境功能区分布均匀的区域。由于许多情况下无法以交易比率实现精细化管理排污权指标，论文提出综合考虑区域经济发展水平、产业结构等因素，利用专项资金，推进排污权指标的区域流转。

【关键词】：排污权交易；热点问题；交易比率；瓯江流域

【中图分类号】：X321 **【文献标识码】**：A **【文章编号】**：1671-4407(2017)06-184-07

排污权交易制度最早由美国经济学家提出，现已发展成为许多国家一项重要的环境经济政策^[1]。国内外学者从交易模式^[2-4]、企业行为^[5-8]、社会成本^[9-13]、公平问题^[14-16]、跨区交易^[17]、补偿机制^[18-19]、市场均衡^[7]、法律问题^[20]、波特效应^[21]、微观博弈^[22]、实施进展^[23]、红利核算^[24]等角度对排污权交易开展了大量研究。随着实践深入和研究细化，排污权交易机制设计中的微观问题引起了越来越多的关注，其中非均匀混合物在开展交易时引起的“热点”问题^[25]尤为明显。水污染物具有明显的非均匀分布特点^[3]，会因为河流地势、流速等而迁移转化，而污染源位置由于产业布局不同而不同，这就直接影响到排污指标交易双方的出让和受让负荷量。因此，排污权交易中需要考虑污染物在水体中的迁移转化因素^[26]，考虑污染物的空间异质性^[27]，避免在局部区

¹ **基金项目**：国家社会科学基金重大项目“我国自然资源资本化及对应市场建设研究”（15ZDB163）

第一作者简介：翁智雄（1989—），男，浙江杭州人，博士，主要从事气候变化、绿色投融资和环境经济政策研究。E-mail: wengzx564@163.com

通讯作者简介：程翠云（1981—），女，安徽宁国人，博士，副研究员，主要从事环境经济政策、环境规划相关研究。E-mail: chengcy@caep.org.cn

域水污染的集中排放,解决水污染排污交易在空间纬度上的“热点”问题^[28],也应考虑污染源所处位置、水体的功能特征、水环境质量达标要求、地区经济发展状况等因素。通过设置交易比率、调整初始排污权分配、限制跨区交易等方式有助于调节交易市场对流域水环境的影响。

本文着重从交易比率的角度开展研究。从文献研究来看,国外学者对交易比率的研究较早。Malik 等^[28]、Farrow 等^[27]从污染源空间位置的角度研究交易比率,认为传输比率是空间位置影响的主要表现形式,即水污染物在传输和转移的过程中,交易双方买入和卖出排污权的比值。Hung & Shaw^[3]认为,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的成本控制,并提出建立不同水功能区间的交易比率体系。Farrow 等^[27]提出建立流域各点源、非点源间相互之间的交易比率矩阵。国内学者对交易比率的研究相对较少,萧代基等^[29]设计了一套简单易行的水权交易比率制度,根据交易双方用水的回流系数规定各用水者之间的交易比率。何盼等^[25]研究江苏省无锡市社渚港流域的化学需氧量排污权交易问题,探讨交易比率对排污权交易政策效果的影响,认为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。骆辉煌等^[30]建立了流域水污染物排放权交易比率的完整技术框架。张永亮^[26]研究了交易比率约束下太湖流域水污染物排污交易系统的水环境影响,即在交易比率约束下构建了武进港水污染物排污交易的仿真市场。学者们在分析流域排污权交易比率时,主要侧重于研究污染物空间位置和污染物类别对水环境的影响,而未从水环境功能分区、经济社会发展因素出发开展比较性研究。

基于此,本文以瓯江流域(温州段)为研究对象,计算并分析该流域水污染物排污权的交易比率。分别从流域分区、水环境功能分区计算排污权交易比率,并从经济发展的角度分析了排污权指标的区域调节。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域选择

瓯江流域位于浙江南部,是浙江省第二大河,东临东海,南与飞云江流域交界,西与闽江流域接壤,西北部、北部与钱塘江、椒江两流域相邻,流域总面积 18 142.7 km²,约占全省总面积的 17.82%。瓯江发源于龙泉与庆元交界的百山祖西北麓锅冒尖,境跨丽水、金华、温州、台州四市,流经 19 个市(县、区),是典型的山溪性河流,自西向东贯穿整个浙南山区,丽水段属典型的山溪性河流,温州市区段为感潮河段,该流域属亚热带季风气候,多年平均降雨量为 1 818 mm,70% 的降水集中在 4 ~ 9 月的丰水期。

本文选取瓯江流域(温州段)作为研究对象。瓯江流域(温州段)位于整个瓯江的下游,流经温州市的鹿城区、永嘉县、龙湾区、乐清市、瓯海区至岐头汇入东海,主要的平原为温瑞平原和乐清平原,感潮河段长 78 km,主要的支流包括楠溪江和戍浦江。瓯江源头海拔超过 1 900 m,进入海滨平原后仅 6 m,上游河床比降大,具有山溪性河流特点,河流下游进入平原,河床宽阔,边滩和沙洲发育,水流分叉。从社会经济发展来看,瓯江流域(温州段)是温州市经济发展的重要地区,2015 年该流域五区(县)的生产总值为 2 920.60 亿元,占温州市全市生产总值的 63.22%,其中第一产业产值为 41.78 亿元(占 33.90%)、第二产业产值为 1 416.32 亿元(占 67.39%)、第三产业产值为 1 462.51 亿元(占 61.06%)。瓯江流域(温州段)的人口集中,2015 年年末户籍总人口为 375.15 万人,占全市户籍总人口的 46.25%。

1.2 研究方法

本文基于流域分区、水环境功能分区和经济发展水平三种方法计算交易比率,由于基于水环境功能分区和经济发展水平的方法不涉及数学公式的推演,本文在相应章节有相关说明,此处着重阐述基于流域分区的交易比率计算方法。

根据交易比率的定义,区域 q 第 i_q 个排污者 ($q=1, 2, \dots, m$; $i_q=1, 2, \dots, m_q$) 向区域 h 第 i_h 个排污者 ($h=1, 2, \dots,$

n ; $i_h=1, 2, \dots, n_h$) 购买排污权, 以断面 j 为控制断面, 两者交易比率应为:

$$t_{i_h, i_q} = \frac{t_{i_h, j}}{t_{i_q, j}} \quad (1)$$

式中: $t_{i_q, j}$ 、 $t_{i_h, j}$ 分别为排污者 i_q 、 i_h 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, 本研究采用 S-P 模型计算位置比率 $t_{i_h, j}$, 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:

$$\frac{d\rho}{dt} = -k\rho, \text{ 其中, } t=x/\mu \quad (2)$$

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; μ 为水流速度。

该微分方程的解为:

$$\rho = \rho_0 \exp\left(-\frac{kx}{\mu}\right) \quad (3)$$

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。 ρ_{0, i_q} 表示区域 q 第 i_q 个排污者 ($q=1, 2, \dots, m$) 处 COD 的初始质量浓度, 则断面 j ($j=1, 2, \dots, m$) 处的 COD 质量浓度为:

$$\rho_j = \rho_{0, i_q} \exp\left(-\frac{kx}{\mu}\right) \quad (4)$$

根据位置比率的定义, 可知:

$$t_{i_q, j} = \frac{\rho_j}{\rho_{0, i_q}} = \exp\left(-\frac{kx}{\mu}\right) \quad (5)$$

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

2 瓯江流域（温州段）排污权交易比率分析

2.1 基于流域分区的交易比率计算

2.1.1 瓯江流域（温州段）子流域划分

本研究采用 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ 空间分辨率的 DEM 作为基本地形数据（图 1），应用 ArcGIS 水文分析模块对温州市瓯江流域进行水系提取与子流域提取划分工作，以各汇流单元作为各交易区域，计算区域间的交易比率。本文参考水环境质量功能区的划分和流域行政区边界，对分区进行了调整，交易区域划分情况见图 2，简化图见图 3。温州市瓯江流域划分为 10 个分区，流域面积为 $3\,342.88\text{ km}^2$ ，分区结果见表 1。由于部分排污主体的排污口与排污主体所在的汇流单元可能不同，本文主要根据排污口所在区域来确定各排污主体的交易比率。

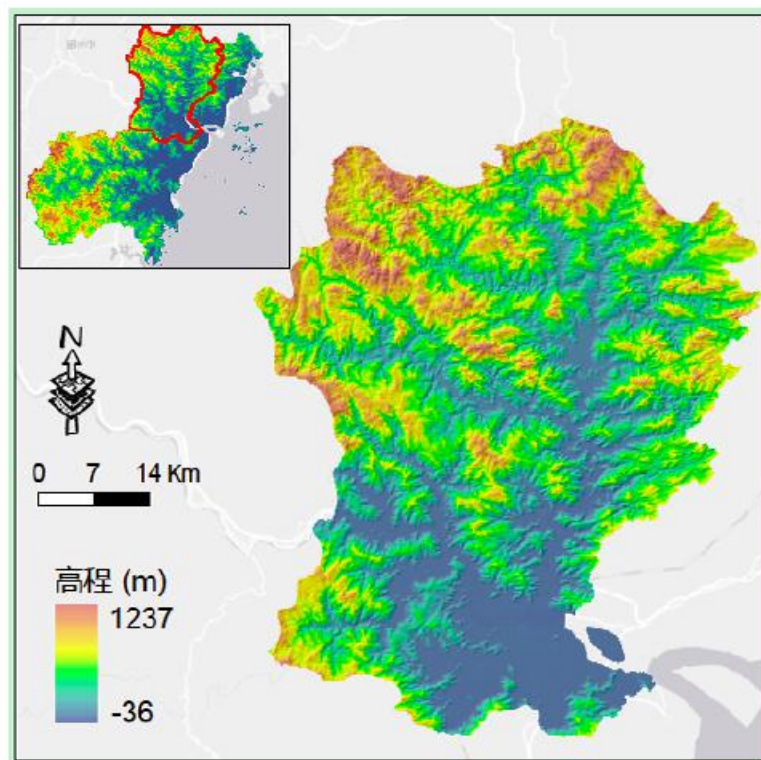


图1 温州市瓯江流域DEM渲染图



图2 温州市瓯江流域子流域划分

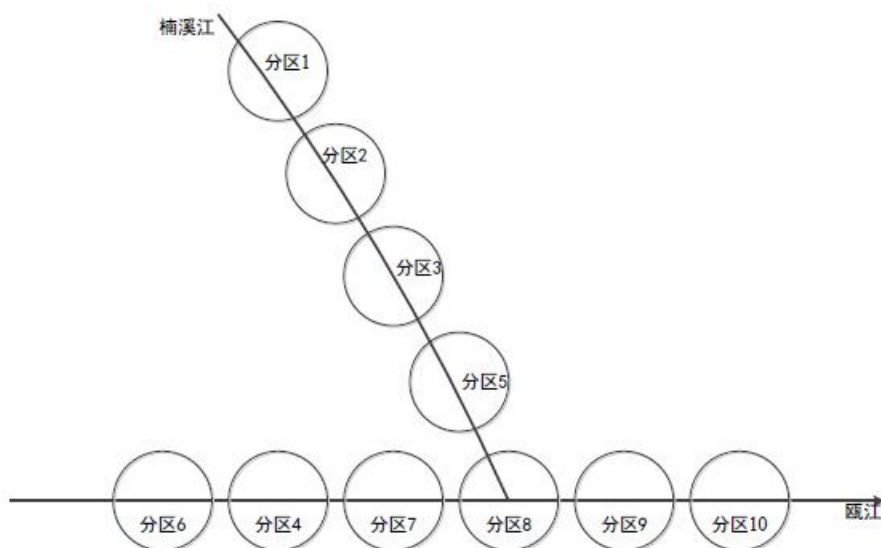


图3 温州市瓯江流域子流域简化图

表1 温州市瓯江流域分区结果

分区	面积 /km ²	河道长度 /km
1	710.79	37.83
2	589.53	22.01
3	544.40	5.12
5	316.16	28.38
6	90.04	9.49
4	218.42	11.62
7	281.48	18.28
8	229.38	4.67 (瓯江)、18.73 (楠溪江)
9	291.63	3.48
10	71.05	10.19

2.1.2 交易比率计算结果

一个流域的水环境容量有限，且水体具有从上游向下游迁移的特性，即上游分区内的污染物排放会对下游功能区造成影响，而下游的排放则不会对上游产生影响。同时，为便于研究，对处于同分区的排污主体，交易比率可视为 1，即将一个分区视为一个整体，假定同一区内的排污主体对控制断面水质的影响相当。

为简化计算，假设温州市瓯江流域各交易区域只有一个排污口，且位于该区域长度中心处，并假设所有河段无回流现象。由于运用流域分区方法计算时，COD 和氨氮的计算过程相似，本文因篇幅有限，只选择了 COD 计算结果作为分析内容，排污权指标 COD 衰减系数 k 根据相关文献确定为 $0.15d^{-1}$ ^[31]。瓯江及其支流楠溪江在不同分区内不同河段的流速分别设定 ($0.08 \sim 1.5$ m/s)。

根据每两个排污主体对各断面计算出的位置比率得到其交易时的 $i \times j$ 阶传输比率矩阵，如矩阵 (6) 所示。

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 0.97 & 0.78 & 0.42 & 0.70 & 0.70 & 0.64 & 0.33 & 0.30 & 0.29 \\ 1.03 & 1 & 0.98 & 0.67 & 0.90 & 0.72 & 0.65 & 0.50 & 0.48 & 0.43 \\ 1.29 & 1.02 & 1 & 0.75 & 0.92 & 0.75 & 0.66 & 0.55 & 0.53 & 0.48 \\ 2.37 & 1.50 & 1.34 & 1 & 1.32 & 1.10 & 1.06 & 1.95 & 0.73 & 0.57 \\ 1.43 & 1.11 & 1.09 & 0.76 & 1 & 0.97 & 0.91 & 0.59 & 0.47 & 0.32 \\ 1.46 & 1.38 & 1.34 & 0.91 & 1.03 & 1 & 0.98 & 0.75 & 0.60 & 0.44 \\ 1.56 & 1.54 & 1.52 & 0.94 & 1.10 & 1.02 & 1 & 0.83 & 0.66 & 0.50 \\ 3.07 & 2.01 & 1.81 & 1.05 & 1.70 & 1.33 & 1.21 & 1 & 0.96 & 0.80 \\ 3.30 & 2.08 & 1.87 & 1.64 & 2.13 & 1.67 & 1.52 & 1.04 & 1 & 0.88 \\ 3.48 & 2.32 & 2.08 & 1.76 & 3.08 & 2.27 & 2.01 & 1.25 & 1.14 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

该交易比率为卖方对买方的交易比率，其中 T 代表区域 1 的排污者向第 q 个区域的排污者出售 1 单位 COD 排污权时，区

域 q 的排污者可以获得的排污权增量，反之亦然。对于同分区的排污者，交易比率为 1。

2.2 基于水环境功能分区的交易比率计算

2.2.1 交易比率计算的主要方法

本文提出基于水环境功能分区的交易比率计算方法，根据交易双方各自排污口所在水环境功能区类型来确定交易比率大小，此计算方法较为简单可行。

基于水环境功能分区的交易比率是依据“等标污染负荷值相同”的原则确定，即交易双方原则上应保证交易前后所排污染物的等标污染负荷相同，交易比率大小等于出让方排污口所在功能区水质标准与受让方排污口所在功能区水质标准的比值，如公式（7）所示：

$$\text{交易比率} = P_i / P_j \quad (7)$$

式中： P_i 为出让方 i 排污口所在功能区水质标准； P_j 为受让方排污口所在功能区水质标准，交易比率即由两者的比值所得。

水环境功能分区的交易比率根据出让方和受让方相应的所在区域水环境管理控制目标值计算得到。例如，出让方在 V 类功能区（氨氮浓度为 2 mg/L），受让方在 III 类功能区（氨氮浓度为 1 mg/L），出让方的氨氮交易比率为 2: 1（2mg/L : 1 mg/L），即出让方产生的 2 吨氨氮削减数量，只能有 1 吨排污权指标可出售给受让方。出让方与受让方交易 1 吨氨氮，区域内能够交易的总氨氮排污量实际上减少了 1 吨，但整个区域内的氨氮等标负荷并未变化，与一般的 1 : 1 交易比率相比，在 III 类区要获得同样多的排放权，就需要付出更大的代价。

2.2.2 交易比率计算结果

根据《温州市水功能区、水环境功能区划分方案》（2015），温州市瓯江流域水环境功能区被划分为保护区与保留区、保留区、缓冲区与农业用水区、饮用水源区与饮用水水源保护区、工业用水区、农业用水区、渔业用水区、景观娱乐用水区。其中，保护区与保留区、保留区执行 I 类水标准，缓冲区与农业用水区执行 I ~ II 类水标准，饮用水水源二级保护区执行 II ~ III 类水标准、渔业用水区执行 II ~ III 类水标准、工业用水区执行 IV 类水标准，景观娱乐用水区执行 IV 类水标准。

依据各水功能区执行的水质标准，结合国家《地表水环境质量标准》（GB 3838—2002）（表 2）规定的目标限值，计算出温州市瓯江流域不同水环境功能区之间 COD 和氨氮排污权交易比率，结果如表 3 和表 4 所示。

表2 地表水环境质量标准目标限值（单位：mg/L）

序号	项目	I 类	II 类	III 类	IV 类	V 类
1	COD ≤	15	15	20	30	40
2	氨氮 ≤	0.15	0.5	1.0	1.5	2.0

表3 瓯江流域不同水环境功能区之间排污权交易比率值（COD）

出让与受让区域	保护区、保留区	保留区	缓冲区、农业用水区	饮用水源区、饮用水水源保护区	工业用水区		农业用水区	渔业用水区		景观娱乐用水区	
水体类别	I	I	II	II	III	IV	III	II	III	II	III
保护区、保留区	/	/	1:1	1:1	1:1.33	1:2	1:1.33	1:1	1:1.33	1:1	1:1.33
保留区	/	/	1:1	1:1	1:1.33	1:2	1:1.33	1:1	1:1.33	1:1	1:1.33
缓冲区、农业用水区	/	/	1:1	1:1	1:1.33	1:2	1:1.33	1:1	1:1.33	1:1	1:1.33
饮用水源区、饮用水水源保护区	/	/	1:1	1:1	1:1.33	1:2	1:1.33	1:1	1:1.33	1:1	1:1.33
工业用水区	III	/	/	1.33:1	1.33:1	1:1	1:1.5	1:1	1.33:1	1:1	1.33:1
	IV	/	/	2:1	2:1	1.5:1	1:1	1.5:1	1:1	1.5:1	1.5:1
农业用水区	/	/	1.33:1	1.33:1	1:1	1:1.5	1:1	1.33:1	1:1	1.33:1	1:1
渔业用水区	II	/	/	1:1	1:1	1:1.33	1:2	1:1.33	1:1	1:1.33	1:1
	III	/	/	1.33:1	1.33:1	1:1	1:1.5	1:1	1.33:1	1:1	1.33:1
景观娱乐用水区	II	/	/	1:1	1:1	1:1.33	1:2	1:1.33	1:1	1:1.33	1:1
	III	/	/	1.33:1	1.33:1	1:1	1:1.5	1.33:1	1:1	1.33:1	1:1

表4 瓯江流域不同水环境功能区之间排污权交易比率值（氨氮）

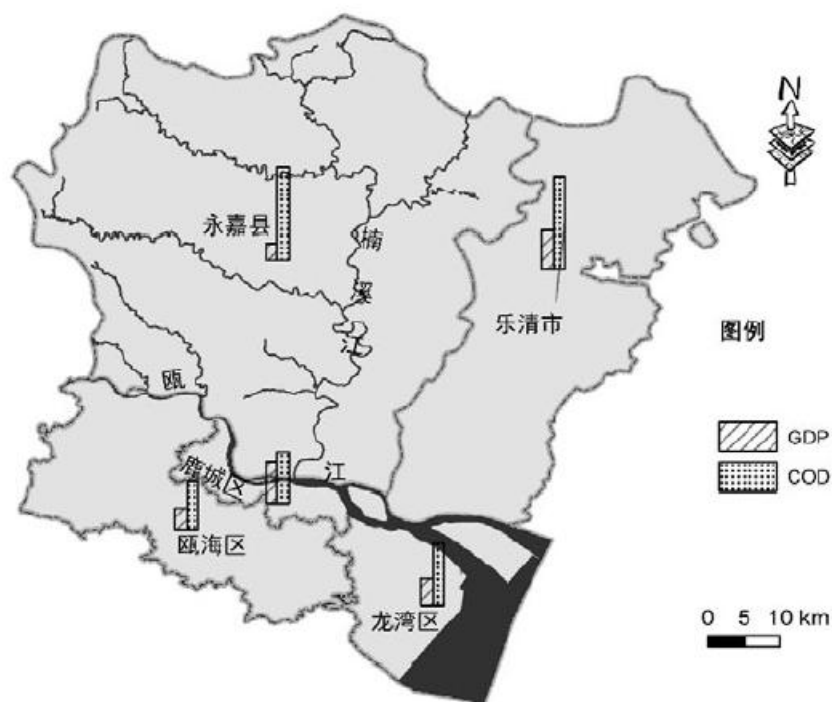
出让与受让区域	保护区、保留区	保留区	缓冲区、农业用水区	饮用水源区、饮用水水源保护区	工业用水区		农业用水区	渔业用水区		景观娱乐用水区	
水体类别	I	I	II	II	III	IV	III	II	III	II	III
保护区、保留区	/	/	1:3.33	1:3.33	1:6.67	1:10	1:6.67	1:3.33	1:6.67	1:3.33	1:6.67
保留区	/	/	1:3.33	1:3.33	1:6.67	1:10	1:6.67	1:3.33	1:6.67	1:3.33	1:6.67
缓冲区、农业用水区	/	/	1:1	1:1	1:2	1:3	1:2	1:1	1:2	1:1	1:2
饮用水源区、饮用水水源保护区	/	/	1:1	1:1	1:2	1:3	1:2	1:1	1:2	1:1	1:2
工业用水区	III	/	/	2:1	2:1	1:1	1:1.5	1:1	2:1	1:1	2:1
	IV	/	/	3:1	3:1	1.5:1	1:1	1.5:1	3:1	1.5:1	3:1
农业用水区	/	/	2:1	2:1	1:1	1:1.5	1:1	2:1	1:1	2:1	1:1
渔业用水区	II	/	/	1:1	1:1	1:2	1:3	1:2	1:1	1:2	1:1
	III	/	/	2:1	2:1	1:1	1:1.5	1:1	2:1	1:1	2:1
景观娱乐用水区	II	/	/	1:1	1:1	1:2	1:3	1:2	1:1	1:2	1:1
	III	/	/	2:1	2:1	1:1	1:1.5	1:1	2:1	1:1	2:1

2.3 基于经济发展水平的排污权指标区域调节

2.3.1 瓯江流域区县经济发展与污染物排放情况

从生产总值来看，2013 年瓯江流域（温州段）区县实现生产总值 2 828.12 亿元，占温州市 GDP 比重的 63.14%。区域内 5 个区县的经济水平差异显著，经济总量排名是鹿城区>乐清市>龙湾区>瓯海区>永嘉县。但是，从单位面积生产总值排名来看，鹿城区>龙湾区>瓯海区>乐清市>永嘉县。

从污染物排放（COD）情况看，2013 年瓯江流域（温州段）排放 COD 的总量为 6 081.75 万吨，区域 5 个区县排名情况如下：永嘉县>乐清市>龙湾区>鹿城区>瓯海区。按照单位 GDP 排污强度来看，瓯江流域（温州段）经济发展水平与污染物排放呈负相关，即经济发展水平越高，污染物排放量越小，反之，经济发展水平越低，污染物排放量越高，如图 4 所示。



注：由于 2014 年和 2015 年瓯江流域(温州段)分区县 COD 数据难以获得，为便于比较，此处 GDP 与 COD 均取 2013 年的数据。

图4 2013年瓯江流域（温州段）GDP与COD情况

2.3.2 排污权指标的区域调节

考虑到数据可获得性、管理能力等因素的限制，许多情况下无法计算获得前两种交易比率实现精细化管理排污权指标跨区交易，本文尝试按照区域经济发展水平的差异性促使排污权指标的区域流转，从而实现区域间排污权指标的平衡，整体提升区域环境质量水平。

根据污染物边际治理费用曲线，每减少单位污染所需要的费用是持续上升的，即在最初治理污染物时，单位污染物治理费用所需较小，但随着治理的不断深入，单位污染治理费用持续增加。瓯江流域（温州段）的市辖区（鹿城区、瓯海区 and 龙湾区）经济生产总值较大，但污染物排污量相对少，说明污染治理投入较大；而乐清市和永嘉县在经济生产总值较小的情况下，排放较多的污染物，说明污染治理投入相对市辖区较小。从治理成本上看，如果市辖区、乐清市和永嘉县均加大污染治理投入以满足对排污权指标的需要，那么市辖区单位污染治理成本一定大于乐清市和永嘉县。随着经济继续上升发展，排污权指标需求必然会进一步加大。考虑到瓯江流域（温州段）各行政区之间的经济发展、产业层次、污染治理等差异，可以以最小边际成本为前提，通过调节区域排污权指标，实现区域总量控制目标，满足不同区域对排污权指标的需求。

瓯江流域（温州段）排污权指标基于经济发展水平进行区域调节的具体模式可以如下：（1）在产业政策和 water 环境管理等条件允许的前提下，打破行政辖区限制，在全市范围内县市开展排污权交易，实现更大范围内利用市场机制优化资源配置。（2）经济发展水平相对好的区县向经济发展水平相对差的区县拨出专项资金，用于其污染治理设施建设；（3）经济发展水平相对差的区县利用该专项资金实现的污染物减排量，按一定比例扣减后的指标量调节到经济发展水平相对好的区县，作为其新增的污染物排放量；（4）有排污权指标增加（经济发展水平相对好）或减少（经济发展水平相对差）需求的企业，在各自环保行政主管部门登记，要求增加排污权指标的企业应缴纳相应的交易费用，环保行政主管部门分配调节相应的指标。

2.4 分析与讨论

(1) 流域分区方法考虑了流域地形、水文特征等因素的影响, 计算较为复杂但结果较为精准, 水环境功能分区方法计算简便, 能保证区域总量的削减, 限制污染向水环境功能要求高的区域转移。

基于流域分区的交易比率计算较为精准, 依据区域间水污染物的传输比率来设定交易比率时, 总体上有两种情况: 第一种情况: 当下游分区内的排污主体 j 向上游分区的排污主体 k 购买排污权时, 如果 j 需要 1 个单位的排污权, 则 j 就需要向 k 购买 $1/T(j, k)$ 单位的排污权, 此时 $T(j, k) > 1$, 即 j 增加 1 个单位的减排量, k 就需要减少 $T(j, k)$ 单位的排放量。在这种情况下, 如果其他排污者的排放量不变, 该流域的污染物排放总量就会减少, 所在功能区的水质将会提高, 下游河段的水质不受影响; 第二种情况, 当上游分区的排污主体 k 向下游分区的排污主体 j 购买排污权指标时, 如果 k 需要 1 个单位的排污权, 则 k 需要向 j 购买 $1/T(j, k)$ 单位排污权, 此时 $T(j, k) < 1$, 即 k 增加 1 个单位的减排量, j 就需要减少 $T(j, k)$ 单位的排放量。在这种情况下, 如果其他排污者的排放量不变, 该流域的污染物总量会增加。同时, 相比第一种情况, 上游分区的企业增加了污染物排放量, 会对 j 和 k 河段之间的水质产生影响, 但这一变化能够被水体自净作用完全抵消, 能够达到流域断面水质目标的目的, 从而避免了“热点”问题的出现。

①瓯江流域有明显的干、支流之分, 依据上下游关系分别确定处于干、支流的分区交易比率。一是干流的各分区交易比率情况。由图 2 可知, 分区 6、分区 7、分区 8、分区 9 和分区 10 位于瓯江干流两侧, 地势依次递减。从矩阵 (6) 可看出, 这几个分区的交易比率存在上、下游购买两种情况。以分区 6 为例, 分区 6 处于这几个分区上游, 当分区 6 需要 1 个单位的排污权, 则分别需要向分区 7、分区 8、分区 9 和分区 10 购买 0.98、0.75、0.60、0.44 个单位排污权; 反之, 当分区 7、分区 8、分区 9 和分区 10 需要 1 个单位的排污权, 则分别需要向分区 6 购买 1.02、1.33、1.67、2.27 个单位排污权。二是支流的各分区交易比率情况。由图 2 可看出, 分区 1、分区 2、分区 3、分区 5 位于瓯江流域的支流部分, 地势依次递减, 由矩阵 (6) 可知, 这几个分区之间也存在上、下游购买的关系。

②在各分区间上下游关系不明显但都会流经某个河段时, 仍然需要设置交易比率以避免“热点”问题的出现。由图 2 可知, 楠溪江 (从东北口流出, 汇入瓯江) 与温州段 (从西北流出) 从地理位置上看, 虽然不存在上下游关系, 但它们都会流经瓯江的下游河段, 如果没有设置一定的交易比率, 也有可能在瓯江的下游河段出现“热点”问题。例如分区 1 位于楠溪江的上游河段, 分区 6 位于瓯江上游, 从地理位置来看, 很难明确两者的上下游关系, 但分区 1 和分区 6 都会流经图 2 中某个汇集点, 分区 1 到该汇集点的河道长度远大于分区 6 到该汇集点的河道长度, 等量污染物在分区 1 到汇集点的净化的量大于分区 6 到汇集点的净化量, 因此需要给分区 1 和分区 6 设计一定的交易比率。基于分区 1 和分区 6 到汇集点的河道长度, 计算得到两个分区的交易比率, 即当分区 6 需要 1 个单位排污权时, 需要向分区 1 购买 1.46 单位排污权, 反之, 当分区 1 需要 1 个单位排污权时, 需要向分区 6 购买 0.70 单位排污权。

基于水环境功能区的方法根据不同水污染因子在不同功能区的浓度要求确定交易比率, 从结果来看主要有以下几方面特点: 瓯江流域 (温州段) 存在不同的水环境功能区。主要有八大水环境功能区, 分别为保护区/保留区、保留区、缓冲区/农业用水区、饮用水水源区/饮用水水源保护区、工业用水区、农业用水区、渔业用水区、景观娱乐用水区。按照不同水环境功能区的污染因子浓度要求设计交易比率。以 COD 为例, 保留区与农业用水区的交易比率为 1 : 1.33, 即保留区执行 I 类水标准, 在该标准下 COD 的浓度要求为 15 mg/L, 农业用水区执行 III 类标准, 在该标准下 COD 的浓度要求为 20 mg/L, 两者浓度要求相比即得到 1 : 1.33 的交易比率, 其他交易比率的情况分析类似。

③从图中可以看出, 鹿城区、瓯海区和龙湾区企业分布密集且基本沿瓯江分布, 大部分以 III 类水环境功能区为主, 这三个区域大部分地区的交易比率可按照 1 : 1 开展; 乐清市和永嘉县企业分布也较多, 但存在 II 类、III 类和 IV 类水环境功能区交叉分布, 需要根据不同污染物不同水环境功能区水质标准实施差别化的交易比率。

显然，根据流域分区方法获得的交易比率与根据水环境功能分区方法获得的交易比率是有差异的。以鹿城区、瓯海区 and 龙湾区为例，根据流域分区的方法，三个地区处于不同的分区内，开展交易时需要按照非 1 : 1 交易比率；但根据水环境功能区的方法，三个地区大部分以Ⅲ类水环境功能区为主，开展交易时则可以按照 1 : 1 交易比率。

(2) 基于经济发展水平开展排污权指标区域调节的方法，着重考虑了排污权交易主管部门的现实管理需求，综合分析了不同地区的经济发展水平、产业结构、环境治理能力等因素，能有效实现排污权指标的区域平衡。

利用交易比率能促使同一区域内不同排污主体在交易不等量的同种污染物后达到对环境影响的近似同等效应，但交易不等量的排污指标也给管理部门增加较大的管理难度。研究发现瓯江流域（温州段）不同县域的经济发展水平与环境污染治理水平之间存在不平衡现象。例如，分区 1 和分区 9，从行政区划来看，分区 1 属于永嘉县县域，经济发展水平相对较弱，分区 9 属于瓯海区区域，经济发展水平相对较强。第一种情况，根据流域分区的方法，可知：当分区 9 需要 1 单位排污权时，需要向分区 1 购买 3.30 单位排污权指标，这意味着分区 9 增加 1 单位排污权，需要分区 1 削减 3.30 单位排放量，倒逼分区 1 加大污染治理设施的投入。第二种情况，根据水环境功能区的方法，分区 9 主要以Ⅲ类水环境功能区为主，交易比率可以设计为 1 : 1，但分区 1 包含多种不同水质的水体，同一个区域需要设计不同种交易比率。因此，从区域的经济发展水平来看，根据流域分区或水环境功能区的方法不能有效地解决区域间经济发展与环境保护公平性问题。如果综合考虑分区 1 和分区 9 的经济发展水平、产业结构，可以实现排污权指标在区域分配中体现一定的差异性，并利用专项资金等方式统筹区域间的排污权指标。

(3) 运用流域分区、水环境功能区、经济发展水平等多种方法对交易比率开展比较研究，研究方法上具有一定的创新性，但本文尚未解决流域分区方法下交易比率与行政区划之间的矛盾，研究仍有一定的局限性。

与其他研究相比，本文首次以瓯江流域（温州段）为例就交易比率问题做了深入分析并开展了不同方法之间的比较。综观对交易比率的已有研究，基本上按照流域分区的方法选择流域或河段开展研究，目前还没有从水环境功能分区、经济发展水平等角度出发，并采用比较的方式就交易比率开展过研究。本文为交易比率问题的研究开创了一个全新的视角，着重分析了流域分区、水环境功能区、经济发展水平等三种方法的交易比率结果，并比较了三种方法的优缺点，推动了排污权交易比率研究，为地方排污权交易主管部门深入推进排污权交易提供了一定的参考。

但随着研究的深入以及篇幅所限，也有部分问题需要在今后的研究中深化完善。特别是使用流域分区方法分析问题，子流域划分依据自然特征（地形等），由于有些地域存在多种地形，同一个区（县）可能被划分在不同的子流域分区里面，子流域分区并没有与行政区划相互吻合，造成一个区（县）出现多种交易比率的问题，进而可能给地方排污权交易的主管部门带来管理上的不便。

3 结论

(1) 国内外学者对排污权相关问题做了大量研究，其中非均匀混合物在开展交易时引起的“热点”问题尤为明显，在综合分析水污染物的迁移转化、空间异质等特征的基础上，通过研究交易比率问题有助于调节交易市场对水环境的影响。但从目前国内学者的研究来看，针对交易比率问题开展的研究仍十分有限，多维度的探讨更是不足。

(2) 本文以瓯江流域（温州段）为研究对象，分别选择了流域分区、水环境功能区、经济发展水平等三类方法开展排污权交易比率问题的研究，每种方法各有优缺点，本文认为应该在不同情景下分别适用这三种方法。①流域分区方法从流域特征（地形、水文等）角度出发，依据各分区上、下游的关系确定交易比率，计算结果较为精准，但所需信息量较大且计算过程较复杂。同时，由于该方法依据自然特征进行分区，对多种地形的区（县）域，易出现同一个区（县）域有不同子流域分区，造成出现多个交易比率的问题，给管理带来不便。该方法较适合地形单一，或排污权管理制度较为成熟的地区。②水环境功能分区方法按照不同功能区的污染因子浓度要求设计交易比率，该方法简单易行，能保证区域总量的削减，限制污染向水环境功能要求高

的区域转移,但其精确度不高,更适合于水环境功能分区均匀分布的区域。③基于经济发展水平开展排污权指标区域调节的方法,从区域排污权交易域管理的角度出发,协调不同区(县)域经济发展水平与环境污染治理不平衡的问题,特别是综合考虑各区(县)经济发展、产业结构等因素,使排污权指标的区域分配体现一定的差异性,经济发展水平高的区(县)划拨一定的专项资金给经济发展水平相对差的区(县),经济发展水平相对差的区(县)利用专项资金实现减排并将一定比例的排污权指标调节到经济发展水平相对好的区(县)。该方法在数据获得性、管理能力等有限,以及交易比率无法实现精细化管理排污权指标的情况下适用,按照经济发展水平、产业结构特征促使排污权指标的区域流转。

参考文献:

- [1]王金南,董战峰,杨金田,等. 排污交易制度的最新实践与展望[J]. 环境经济, 2008(10): 31-45.
- [2]Woodward R T, Kaiser R A, Wicks A M. The structure and practice of water quality trading markets [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2002, 38(4): 967-979.
- [3]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.
- [4]Netusil N R, Braden J B. Transaction costs and sequential bargaining in transferable discharge permit markets [J]. Journal of Environmental Management, 2001, 61(3): 253-262.
- [5]Murty T S R, Bhallamudi S M, Srinivansan K. Non-uniform flow effect on optimal waste load allocation in rivers [J]. Water Resources Management, 2006, 20(4): 509-530.
- [6]张嫚. 环境规制与企业行为间的关联机制研究[J]. 财经问题研究, 2005(4): 34-39.
- [7]顾孟迪,李寿德. 交易成本条件下排污权市场的均衡、初始排污权分配的效率和厂商行为分析[J]. 数学的实践与认识, 2006(5): 48-53.
- [8]陈德湖,李寿德,蒋馥. 排污权交易市场中的厂商行为与政府管制[J]. 系统工程, 2004(3): 44-46.
- [9]Luttner M, Kashmanian R, Podar M. Incentive analysis for clean water act reauthorization: Point source/nonpoint source trading for nutrient discharge reductions [R]. Bethesda: Apogee Research, 1992.
- [10]Brill E D, Eheat J W, Kshirsagar S R, et al. Water quality impacts of biochemical oxygen demand transferable discharge permit programs[J]. Water Resources Research, 1984, 20(4): 445-455.
- [11]O'Neil W B. Transferable discharge permit trading under varying stream conditions: A simulation of multiperiod permit market performance on the Fox River, Wisconsin [J]. Water Resources Research, 1983, 19(3): 608-612.
- [12]Thomann R V. Systems analysis and water quality management [M]. New York: McGraw-Hill, 1972.
- [13]Downey B E, Liebman J C, Revelle C S. Equity measures for exploring water quality management alternatives [J]. Water Resources Research, 1976, 12(5): 845-851.

-
- [14]Brill E D, Eheart J W, Kshirsagar S R, et al. Water quality impacts of biochemical oxygen demand under transferable discharge permit programs [J]. Water Resources Research, 1984, 20(4): 445-455.
- [15]Ng T L, Eheart J W. Effect of discharge permit trading on water quality reliability [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2005, 131(2): 81-88.
- [16]Ning S K, Chang N B. Watershed-based point sources permitting strategy and dynamic permit-trading analysis [J]. Journal of Environmental Management, 2007, 84(4): 427-446.
- [17]Cao H, Ikeda S. Inter-zonal tradable discharge permit system to control water pollution on Tianjin, China [J]. Environmental Science & Technology, 2005, 39(13): 4692-4699.
- [18]肖加元, 潘安. 基于水排污权交易的流域生态补偿研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2016 (7): 18-26.
- [19]魏楚, 沈满洪. 基于污染权角度的流域生态补偿模型及应用[J]. 中国人口·资源与环境, 2011 (6): 135-141.
- [20]蔡守秋, 张建伟. 论排污权交易的法律问题[J]. 河南大学学报(社会科学版), 2003 (5): 98-102.
- [21]涂正革, 谌仁俊. 排污权交易机制在中国能否实现波特效应? [J]. 经济研究, 2015 (7): 160-173.
- [22]陈磊, 张世秋. 排污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 (6): 926-934.
- [23]张景玲. 我国排污权交易实施和研究进展[J]. 兰州大学学报(社会科学版), 2007 (5): 120-124.
- [24]涂正革, 傅立权. SO₂ 排污权交易在中国的理论红利核算[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2016 (3): 52-62.
- [25]何盼, 魏琦, 张炳. 基于汇流单元的水污染物排污权交易比率研究[J]. 水资源保护, 2013 (2): 86-90.
- [26]张永亮. 流域水污染物排污交易政策设计及其水环境质量影响研究——以太湖流域为例[D]. 南京: 南京大学, 2012: 134-142.
- [27]Farrow R S, Schultz M T, Celikkol P, et al. Pollution trading in water quality limited areas: Use of benefits assessment and cost-effective trading ratios [J]. Land Economics, 2005, 81(2): 191-205.
- [28]Malik A S, Letson D, Crutchfield S R. Point/ nonpoint source trading of pollution abatement: Choosing the right trading ratio [J]. American Journal of Agricultural Economics, 1993, 75(4): 959-970.
- [29]萧代基, 刘莹, 洪鸣丰. 水权交易比率制度的设计与模拟[J]. 经济研究, 2004 (6): 69-77.
- [30]骆辉煌, 禹雪中, 马巍, 等. 流域水污染物排放权交易比率技术框架研究[J]. 长江科学院院报, 2010 (10): 15-18.
- [31]罗缙, 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 (2): 131-135.