

引用格式:李泽琪,张玥,王晓燕,等. 基于不同层级排污单元的水污染负荷分配方法[J]. 资源科学, 2018, 40(7): 1429-1437. [Li Z Q, Zhang Y, Wang X Y, et al. A method for water pollution load allocation for different levels of pollution discharges[J]. Resources Science, 2018, 40(7): 1429-1437.] DOI :10.18402/resci.2018.07.11

基于不同层级排污单元的水污染负荷分配方法

李泽琪¹, 张 玥¹, 王晓燕¹, 李英杰², 陈 洁², 郭 巍²

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 2. 陕西省环境科学研究院, 西安 710061)

摘 要:如何体现不同层级排污单元主导分配原则的差异性,一直是污染负荷分配方法的研究热点。本文在行政单元—排污企业间建立了一种水污染负荷分配模型:采用熵值加权基尼系数法体现行政单元层面的公平性分配原则;采用排污绩效法体现排污企业层面的效率性分配原则。这种负荷分配方法,既体现了排污企业对环境资源公平使用和高效利用的特点,又兼顾了行政单元在环境保护与社会经济发展上的协调性。结合陕西省区域统计年鉴及西安市污染普查数据,针对渭河流域西安市人口众多、工业污染源集中、水资源严重短缺、水污染严重超标的现状,应用该模型进行负荷分配,取得现实可行的结果。该方法可为不同层级排污单元的水污染负荷分配问题提供参考。

关键词:污染负荷分配;信息熵;基尼系数;排污绩效;渭河流域;西安市

DOI :10.18402/resci.2018.07.11

1 引言

总量控制已成为许多国家开展水环境管理的基本思路,其中具有代表性的包括美国最大日负荷总量控制,欧盟水框架指令等等^[1]。考虑中国水污染实际,目前已将单一水质浓度超标控制调整成目标总量控制为主、行业及容量总量控制为辅的水污染总量控制思路^[2,3]。

污染负荷分配是总量控制实施的关键环节^[4,5]。早期研究多以污染治理费用最小化、水质改善效率最优化等单目标构建优化模型,解决污染负荷分配问题^[6-8];但污染负荷分配与水资源短缺、治理费用有限等存在复杂的相互制约关系,而过于简化的单目标优化模型应用受限^[9]。因此,有关学者提出模糊变换方法^[10]、多目标遗传算法^[11]、粒子群优化模拟退火算法等^[12],以解决水资源与污染负荷多目标优化问题;但这些方法存在数据需求量大、计算方法复杂、模型可移植性差等问题^[13]。

考虑中国水污染现状,国内相关学者提出数据需求较少且体现分配单元公平性的方法,然而这些方法都存在各自的优缺点。如等比例分配法虽简单易行^[6],但忽略分配单元间的差异性而存在隐含的不公平性^[8];层次分析法虽能兼顾多种因素^[14],但存在指标选择主观性太强、模型设计复杂的问题^[15];博弈论法在分析不同决策制定者的动态博弈中具有天然优势^[16],但方法结构复杂、模型可移植性差^[15]。基尼系数法的引入,为污染负荷公平分配提供了新的思路^[17];李如忠等从社会、经济和环境及资源等方面选择代表性指标,采用综合基尼系数最小化表征分配方案的公平性^[8,9];秦迪兰等构建了基于基尼系数的污染负荷分配模型^[18],并依据指标贡献系数分析导致分配不公平的指标及区域^[19]。

上述方法大多只针对单一排污单元或单一分配原则,导致不同层级排污单元间缺少有效衔接,限制分配方案的有效实施。为探索涉及多层级、多

收稿日期:2017-08-18 修订日期:2018-04-10

基金项目 北京市自然科学基金委员会-北京市教育委员会联合资助项目(KZ201810028047);科技创新服务能力建设基本科研业务费(科研类)(025185305000/149);国家重大水专项(2009ZX07212-002-01)。

作者简介 李泽琪,男,河南上蔡人,博士生,研究方向为流域非点源污染模拟与控制。E-mail: lzq2314@yeah.net

通讯作者 王晓燕, E-mail: wangxy@cnu.edu.cn

分配原则相互衔接的分配方法,王媛等提出了水污染负荷层级分配体系,但没有结合实例进行分析^[20];李睿指出行政单元应以公平性原则为主导,排污行业层面应以效率性原则为主导^[21],但方法存在指标确权方式过于主观、对层级间衔接考虑不足的问题;Liang等综合考虑点源及面源污染构建水污染负荷垂直分配体系^[13],然而方法缺少对分配单元社会、经济、环境等多因素差异性的考虑,可能导致分配结果合理性欠佳。

本文拟在水资源严重短缺、水污染严重超标的渭河流域西安市,建立不同层级排污单元相互关联的水污染负荷分配模型:在行政单元层面,依据加权基尼系数最小化为目标确定分配方案;在行政单元-排污企业层面,依据行政单元排污绩效最大化为目标确定分配方案;最终得到层级关联的污染负荷分配方案。

2 水污染负荷分配模型

2.1 建模原则

2.1.1 公平性原则

现有研究多基于水环境容量约束,通过调整分配单元间的允许排放量,尽可能的降低基尼系数,来实现区域(流域、水功能单元、行政单元等)污染负荷的公平分配^[17]。然而目前我国多数水体污染物排放量已远超出其水环境容量,若一味根据水体当前环境容量进行分配,削减率较大、方案难以执行^[4],因此本研究认为应以目标总量控制为基础,阶段性、有步骤地降低污染物排放量,提高分配方案可操作性。

2.1.2 效率性原则

针对排污单位层面的负荷分配,现有研究多将对企业生产、发展与环境关系有重大影响的指标与优化排污绩效法相结合展开分配^[22],本研究中主要从环境经济效益及企业资源利用效率两方面来衡量。

2.2 模型构建

2.2.1 技术路线

本研究参考王媛等提出的水污染负荷分配体系^[20],建立层级关联的污染负荷分配框架,技术路线如图1所示。

2.2.2 行政单元层面

在已有研究基础上^[8,9],首先筛选行政单元水污

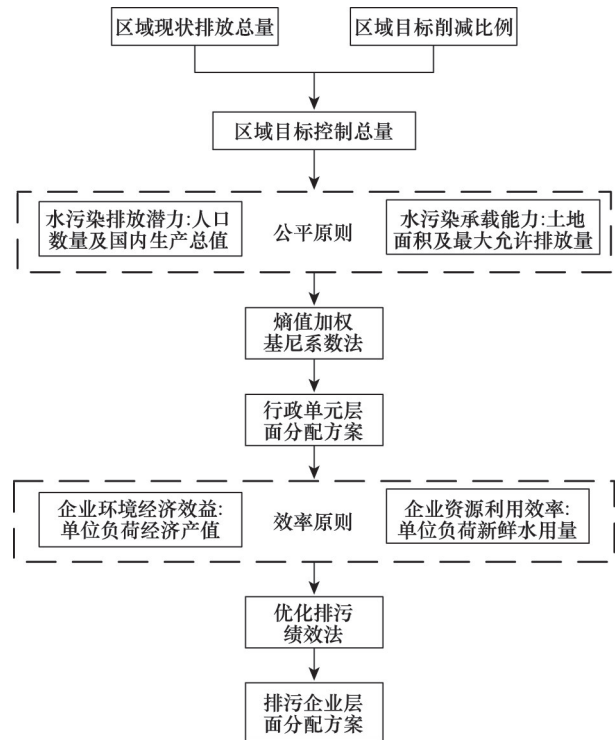


图1 污染负荷分配框架

Figure 1 Waste load allocation framework

染排放潜力及承载能力的代表性指标,其次采用熵值法量化不同指标的影响权重,紧接着采用环境基尼系数衡量行政单元现状负荷分配的公平性,最后以行政单元负荷削减率作为决策变量,熵值加权基尼系数之和最小为目标函数,得到满足公平性的负荷分配方案。具体步骤如下所示:

(1)指标体系筛选。代表性指标的选择是基尼系数法应用的核心环节。本研究借鉴环保部环境规划院及刘年磊等在行政单元层面负荷分配中已有研究成果^[23,24],选择“人口数量、国内生产总值(GDP)”表征水污染排放潜力,选择“土地面积、最大允许排放量”表征水污染承载能力,构建起行政单元层面的负荷分配指标体系。

(2)信息熵法确权^[25]。

$$K_{ij} = W_{0(i)} / M_{ij} \quad (1)$$

式中 $W_{0(i)}$ 表示行政单元 i 的现状污染排放量 ($i=1, 2, 3, \dots, m$); M_{ij} 为行政单元 i 指标 j 的值 ($j=1, 2, 3, \dots, h$); K_{ij} 为行政单元 i 指标 j 的单位污染负荷。

$$p_{ij} = K_{ij} / \sum_{i=1}^m K_{ij} \quad (2)$$

若以 p_{ij} 为行政单元 i 指标 j 在指标总值中所占

2018年7月

比例,于是行政单元 i 指标 j 的信息熵值 e_j 可表示为:

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m p_{ij} \times \ln p_{ij} \quad (3)$$

在此基础上,指标 j 在行政单元层面负荷分配中的影响权重 w_j 可表示为:

$$w_j = (1 - e_j) / \sum_{j=1}^h (1 - e_j) \quad (4)$$

(3) 梯形面积法计算初始基尼系数^[26]。

$$G_j = 1 - \sum_{i=1}^m (X_{ij} - X_{i-1,j}) \times (Y_{ij} + Y_{i-1,j}) \quad (5)$$

$$X_{ij} = X_{i-1,j} + M_{ij} / \sum_{i=1}^m M_{ij} \quad (6)$$

$$Y_{ij} = Y_{i-1,j} + W_{0(i)} / \sum_{i=1}^m W_{0(i)} \quad (7)$$

式中 G_j 为指标 j 的初始基尼系数; X_{ij} 为指标 j 的累计百分比; Y_{ij} 为对应污染负荷的累积百分比; $W_{0(i)}$ 的意义同上。当 $i=1$ 时,可将 $(X_{i-1,j}, Y_{i-1,j})$ 视为 $(0,0)$ 。

(4) 目标函数构造及约束条件设置。以熵值加权基尼系数和最小为目标,则有目标函数为:

$$\min G = \sum_{j=1}^h w_j \times G_j \quad (8)$$

以行政单元负荷削减率为决策变量,综合考虑区域目标控制总量、基尼系数不变差、削减率上下限以及洛伦兹曲线中相对位置不变等约束,得到满足公平性的负荷分配方案。

总量控制约束:

$$\sum_{i=1}^m W_i = (1 - q\%) \sum_{i=1}^m W_{0(i)} \quad (9)$$

基尼系数约束:

$$G_j \leq G_{0(j)} \quad (10)$$

削减阈值范围约束:

$$W_i = (1 - p_i) \times W_{0(i)}, \quad p_{i0} \leq p_i \leq p_{i1} \quad (11)$$

洛伦兹曲线位置约束:

$$K_{ij} = \frac{W_{0(i)}}{M_{ij}}, K_{ij'} = \frac{W_i}{M_{ij'}} \quad (12)$$

$$K_{(i-1,j')} \leq K_{ij'} \leq K_{(i+1,j')}$$

式中 W_i 为行政单元 i 的允许排放量; $G_{0(j)}$ 为 j 指标的现状基尼系数; G_j 为指标 j 优化后的基尼系数; q 为行政单元层面总量目标削减率; p_i 、 p_{i0} 、 p_{i1} 为行政单元 i 的削减率及上下限; $K_{ij'}$ 及 $K_{ij''}$ 分别为优化分配前、后行政单元 i 在洛伦兹曲线上的位置; $K_{(i-1,j')}$ 及 $K_{(i+1,j')}$ 分别为洛伦兹曲线上 $K_{ij'}$ 的上一位置及下一位

置; M_{ij} 、 $W_{0(i)}$ 、 w_j 与前面的描述一致。

2.2.3 排污企业层面

采用排污绩效法来衡量分配效率,以“单位负荷经济产值”反映企业环境经济效益,“单位负荷新鲜水用量”反映企业资源利用效率(假设排污企业在模拟期内的技术发展水平不变),保证同等排污量情况下,将负荷优先分配给经济效益好而且水资源利用率高的企业。

以行政单元内排污企业产值之和最大化为目标,则有目标函数为:

$$\max S = \sum_{k=1}^n A_k \times C_k \quad (13)$$

以排污企业负荷削减率为决策变量,综合考虑行政单元负荷总量控制目标、水资源利用目标以及排污企业削减率上下限等约束条件,得到满足效率性原则的负荷分配方案。

总量控制约束:

$$\sum_{k=1}^n C_k \leq C_{Total} \leq \sum_{k=1}^n C_{0k} \quad (14)$$

水资源利用约束:

$$\sum_{k=1}^n B_k \times C_k \leq \sum_{k=1}^n D_{0k} \quad (15)$$

削减阈值范围约束:

$$C_{k0} \leq \frac{C_{0k} - C_k}{C_{0k}} \leq C_{k1} \quad (16)$$

式中 S 为行政单元内排污企业产值之和; n 为行政单元内参与分配的排污企业个数; A_k 、 C_k 分别为企业 k 排放单位污染负荷的经济产值及优化分配的污染负荷; C_{Total} 为行政单元内待分配污染负荷总量; B_k 为企业 k 排放单位污染负荷的新鲜用水量; C_{0k} 、 D_{0k} 为企业 k 现状排污量及现状水资源用量; C_{k0} 、 C_{k1} 为排污企业层面削减率的下限及上限。

3 方法应用

3.1 研究区概况

2015年西安市规模以上企业共495家,工业废水排放量为33.18万t,工业化学需氧量(COD)排放量为1.37万t(由陕西省环境科学研究院提供的2015年陕西省西安市污染源普查数据汇总得到)。2015年渭河干流虽整体污染水平有所下降,但作为西安、咸阳两地的主要纳污河流,仍有78.6%的断面水质超出水功能区要求(地表水Ⅲ类水质)^[27]。基于

渭河流域西安市水污染现状,以其工业COD排放量为研究对象,在区县行政单元及排污企业两个层面展开负荷分配研究,以期对不同层级排污单元的水污染负荷分配问题提供解决方案。

3.2 数据收集

西安市各区县2015年的人口数量、土地面积、国内生产总值(GDP)来源于2016年陕西区域统计年鉴^[28]。由于现有数据中没有关于西安市所辖各区县的环境容量数据,因此本文依据西安市水资源利用技术服务中心对西安市主要河流纳污能力计算结果^[29]及2010年各区县COD的排放比例估算得到。西安市各区县工业COD排放量来源于2015年陕西省污染源普查结果(由陕西省环境科学研究院根据西安市各区县登记工业企业的排放量汇总得到)。具体数据如表1所示。

3.3 行政单元层面负荷分配

根据国务院“十三五”节能减排综合工作方案,陕西省2020年COD排放量要在2015年的基础上降低10%^[30]。因此在行政单元层面负荷分配时,将西安市2020年COD初始削减率定为10%。考虑西安市COD污染现状及分配方案的可实施性,确定行政单元的削减阈值范围为[1%, 20%]。根据2.2.2节行政单元负荷分配优化模型,计算出不同行政单元COD的削减率及削减配额,结果见表2。

综合表1及表2可以看出:

(1)户县(37.49%)、未央区(18.88%)位居西安市COD排放量的第1和第2位,其削减配额分别为70.64%和8.91%,位居西安市的第1和第2位;碑林区、高陵县、周至县及蓝田县不仅现状排放量低,其相应的削减配额接近削减率的下限;一定程度上体现出削减量与排放量的一致性。

(2)户县的COD削减配额大于其排放量占比,表明该区县社会经济发展现状与环境保护不协调。

(3)新城区(11.86%)、莲湖区(10.37%)的削减率相对较高,究其原因单位土地面积承载的污染物排放量较大;因此在公平原则下,导致这些行政单元排放量虽不是最高,但仍需大量削减污染物。

(4)临潼区(14.13%)和长安区(9.71%)位居西安市排放量的第三位和第四位,但其削减率仅为5.97%和1%,表现出排放量与削减量不成比例的现象;这是由于这些区县单位指标承载的污染物排放量较为均衡,故不需削减大量污染物。

由表3可看出:

(1)四项指标优化后的基尼系数均变小,即向更加公平的方向改善。

(2)优化后综合基尼系数表现出较大程度的减少,说明西安市行政单元层面污染负荷分配的公平性得到提升。

3.4 排污企业层面负荷分配

西安市所辖企业众多,但各区县排污企业在生

表1 西安市各区县指标值所占比例

Table 1 Percentage of index attribute values to the total amount

(%)

区县	人口占比	土地面积占比	GDP占比	最大允许排放量占比	2015年实际排放量占比
新城区	6.93	0.30	8.97	1.21	2.07
碑林区	7.22	0.23	12.30	0.31	0.02
莲湖区	8.18	0.38	10.41	3.86	5.09
灞桥区	7.05	3.21	5.68	4.42	4.68
未央区	9.54	2.60	13.08	18.75	18.88
雁塔区	13.89	1.50	21.15	2.44	2.05
阎良区	3.31	2.42	3.43	2.32	3.20
临潼区	7.77	9.07	3.51	19.44	14.13
长安区	12.85	15.78	9.33	27.81	9.71
蓝田县	6.03	19.85	2.04	0.38	0.57
周至县	6.67	29.14	1.89	0.77	0.79
户县	6.55	12.67	2.82	17.78	37.49
高陵县	3.99	2.85	5.40	0.51	1.32

2018年7月

表2 西安市COD削减任务分配方案

Table 2 Plan of COD reductions in the Xi'an City

区(县)	2015年实际排放量/t	2020年允许排放量/t	削减量/t	削减率/%	削减配额*/%
新城区	284.42	250.69	33.73	11.86	2.46
碑林区	3.38	3.35	0.03	1.00	0.00
莲湖区	700.06	627.43	72.63	10.37	5.30
灞桥区	644.07	637.63	6.44	1.00	0.47
未央区	2 596.04	2 474.08	121.96	4.70	8.91
雁塔区	281.85	279.03	2.82	1.00	0.21
阎良区	440.45	411.55	28.90	6.56	2.11
临潼区	1 943.45	1 827.40	116.05	5.97	8.47
长安区	1 335.96	1 322.60	13.36	1.00	0.98
蓝田县	78.36	73.37	4.99	6.37	0.36
周至县	108.50	107.41	1.08	1.00	0.08
户县	5 155.73	4 188.39	967.34	18.76	70.64
高陵县	181.38	175.34	6.04	3.33	0.44
西安市总计	13 753.64	12 378.27	1 369.33	10.00**	100.00

注:*表示削减配额=行政单元负荷削减量/西安市负荷总削减量 $\times 100\%$,显然西安市的削减配额为 100% ;**表示西安市COD污染负荷的整体削减率=负荷削减量/实际排放量 $\times 100\%$ 。

表3 指标权重及基尼系数优化结果

Table 3 Index weights and optimization values of the Gini coefficients

指标	信息熵		基尼系数	
	指标熵值	所占权重	优化前	优化后
人口*	0.97	0.04	0.61	0.59
土地利用*	0.77	0.38	0.69	0.68
GDP排放量*	0.91	0.15	0.70	0.68
最大允许排放量*	0.74	0.43	0.33	0.30
加权基尼系数	-	-	0.56	0.42

注:*表示单位指标COD排放量。

产规模、技术水平及污染排放量差异显著。因此为提高分配结果的计算效率,选取累计污染量占区县行政单元前80%的排污企业参与分配;又因排污企业数据的特殊性,将各排污企业名称以“污染源+数字”代替;另外根据西安市各区县负荷削减率的差异,将其划分为重点削减区县(削减率 $\geq 10\%$)和有保留削减区县(削减率 $< 10\%$)两类分别展开研究。

3.4.1 重点削减区县

西安市共有3个区县的COD目标削减率大于 10% (见表2),以削减率为 10.37% 的莲湖区为例展开研究。参与分配的排污企业共有9家,将排污企业削减率区间设置为 $[10\%, 20\%]$,结合2.2.3章节排污企业层面负荷分配方法得到具体分配方案(见表4)。

莲湖区COD实际排放量为567.15t,该区域目标排放量与通过优化分配模型得到COD排放总量相同均为489.45t,因此模型优化分配方案即为该区县实际负荷分配方案。

3.4.2 有保留区县

西安市共10个区县COD负荷削减率小于 10% (见表2),以削减率 4.7% 的未央区为例展开研究。参与分配的排污企业共有6家,为保证污染负荷削减率不为负,将排污企业削减率的区间设定为 $[0\%, 10\%]$,结合2.2.3章节排污企业层面负荷分配方法得到具体分配方案(见表5)。

未央区COD的现状排放量为2525.23t,该区域目标削减率为 4.37% ,通过优化分配模型得到COD目标排放量为2406.54t。由于未央区的目标削减率低于 10% ,如直接按照计算结果分配,会存在个别排污企业削减率为负值的情况;而负荷分配是以污染量削减为最终目标的,因此将排污企业负荷负值削减率调整为零(即保持现状排放量),最终长安区实际分配到COD排放总量为2379.29t,余出27.25t排放量,可满足企业扩大规模所产生的增排需求。

4 讨论

4.1 行政单元层面负荷分配

以2010年为基准年,计算西安市各区县2015年

表4 莲湖区COD削减方案

Table 4 Plans of COD in Lianhu District

名称	企业总产值/亿元	新鲜水用量/万 t	2015 年实际排放量/t	2020 年允许排放量/t	2020 年目标削减率/%
污染源 1	17.72	15.36	23.60	21.24	10.00
污染源 2	1.52	16.52	13.21	10.57	20.00
污染源 3	32.80	60.61	102.00	91.80	10.00
污染源 4	3.23	51.26	27.17	21.74	20.00
污染源 5	11.77	24.28	13.11	11.80	10.00
污染源 6	9.41	58.66	13.14	11.83	10.00
污染源 7	7.33	61.68	57.24	45.79	20.00
污染源 8	44.57	68.40	279.80	244.39	12.66
污染源 9	0.28	7.5	37.88	30.30	20.00
莲湖区总计	128.62	364.27	567.15	489.45	10.37*

注: *表示莲湖区COD污染负荷的整体削减率=(实际排放量-允许排放量)/实际排放量×100%。

表5 未央区COD削减方案

Table 5 Plans of COD in Weiyang District

名称	企业总产值/亿元	新鲜水用量/万 t	2015 年实际排放量/t	2020 年允许排放量/t	削减比例/%	2020 年实际分配量/t
污染源 1	78.76	130.00	520.00	546.00	0.00	520.00
污染源 2	10.79	155.20	1 450.59	1 346.29	0.05	1 346.29
污染源 3	0.18	121.69	416.39	374.75	0.10	374.75
污染源 4	8.40	6.20	25.00	26.25	0.00	25.00
污染源 5	5.00	13.91	55.65	55.65	0.00	55.65
污染源 6	5.56	24.00	57.60	57.60	0.00	57.60
未央区总计	108.69	451.01	2 525.23	2 406.54	4.37*	2 379.29

注: *表示未央区COD污染负荷的整体削减率=(实际排放量-允许排放量)/实际排放量×100%。

工业 COD 实际削减率;以 2015 年为基准年,计算 2020 年工业 COD 目标削减率(其中 2010 年及 2015 年西安市各区县 COD 排放量,由陕西省环境科学研究院根据各区县规模以上企业的排放量汇总得到);将两者作对比,具体差异如图 2 所示。

由图 2 可以看出,2015 年除户县及高陵县外,其余区县工业 COD 负荷削减率(相比 2010 年)均超过 20%,推测是由于这些区域长期坚持产业结构调整、技术改造等实现单位 GDP 污染排放量的减少^[28];而户县削减率仅为 1.89%,推测主要原因是污染负荷基数较大(5254.86t),而高陵县削减率为负值,推测主要原因在于污染排放量基数较小(151.39t)以及区域社会经济的快速发展(工业产值增加 102%^[28])。比较而言,为实现 2020 年 COD 减排目标,需要将重点放在户县、新城区及莲湖区三个区县(消减率均超过 10%),可采用如提高生产技术水平,促进产业

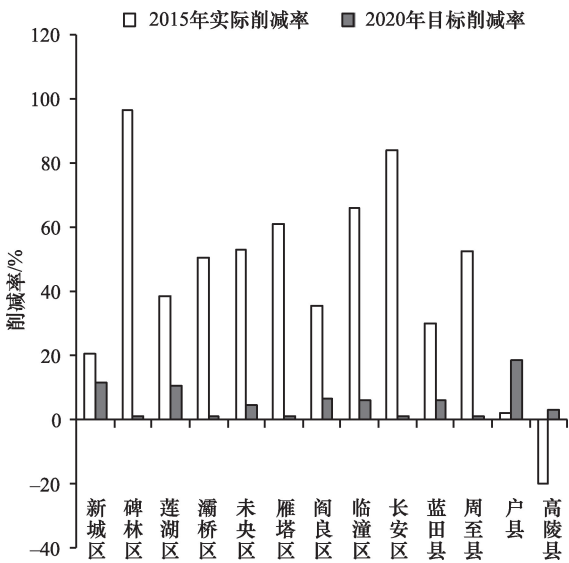


图2 污染负荷削减率对比

Figure 2 Comparison between waste load reduction rates

注: 削减率 = (现状年排放量 - 基准年排放量) / 基准年排放量 × 100%。

2018年7月

结构调整等措施,从而实现经济和环境的协调发展。

4.2 排污单位层面负荷分配

对重要削减区县而言,模型计算结果即为最终分配方案;但对于有保留区县而言,模型计算结果中部分排污企业会出现削减率为负值的现象,但本着尽可能减少污染物的排放量、满足总量控制目标的目的,将这类企业削减率优化为0;模型计算得到的排污增量可用于满足企业扩大生产规模时产生的增排需求。

5 结论

(1)本研究提出基于不同分配单元的水污染负荷分配模型,其中采用熵值加权的基尼系数法体现行政单元层面分配的公平性,排污绩效法体现排污企业层面分配的效率性,并应用在西安市得到现实可行的分配结果。

(2)虽然行政单元层面污染分配不公平性是客观存在的,但经熵值法优化后分配结果仍然达到相对公平的分配(基尼系数为0.42);分重点削减及有保留区县,采用排污绩效法实施排污企业层面的负荷分配,得到更为合理的分配结果(排污企业削减率为负的情况,采用保持现有排放量的方式进行修正)。

(3)由于目前污染物种类复杂多样,同一区域可能存在多种污染负荷同时超标的现象。然而现有方法大多按照污染物类型分别予以分配,对不同污染物的耦合作用考虑较少,在今后的研究中应进一步展开探讨。

参考文献(References):

- [1] 田平,方晓波,王飞儿,等.基于环境基尼系数最小化模型的水污染物总量分配优化——以张家港平原水网区为例[J]. 中国环境科学, 2014, 34(3): 801-809. [Tian P, Fang X B, Wang F E, et al. Use of a minimum environmental Gini coefficient model on optimizing the allocation plan of total pollutant load in water bodies: a case study at Zhangjiagang river-network plain[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(3): 801-809.]
- [2] 孟伟,张楠,张远,等.流域水质目标管理技术研究(iv)——控制单元的总量控制技术[J]. 环境科学研究, 2007, 20(4): 1-8. [Meng W, Zhang N, Zhang Y, et al. The study on technique of basin water quality target management(iv): pollutant total amount control technique in control unit[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007, 20(4): 1-8.]
- [3] 雷坤,孟伟,乔飞,等.控制单元水质目标管理技术及应用案例研究[J]. 中国工程科学, 2013, 15(3): 62-69. [Lei K, Meng W, Qiao F, et al. Study and application of the technology on water quality target management for control unit[J]. *Engineering Sciences*, 2013, 15(3): 62-69.]
- [4] 张玥.渭河西安—咸阳段主要污染物负荷分配与管理[D]. 北京:首都师范大学, 2012. [Zhang Y. Pollutant load allocation and management in Xi'an—Xian yang section Weihe River[D]. Beijing: Capital Normal University, 2012.]
- [5] 吴文俊,蒋洪强,段扬,等.基于环境基尼系数的控制单元水污染负荷分配优化研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(5): 8-16. [Wu W J, Jiang H Q, Duan Y, et al. Application of total water pollutant load distribution in control-unit based on the environmental Gini coefficient[J]. *China Population Resources and Environment*, 2017, 27(5): 8-16.]
- [6] 郝信东.基于信息熵的水污染总量分配与控制策略研究[D]. 天津:天津大学, 2010. [Hao X D. The application of Information Entropy in total waste load allocation for surface-water and control policy [D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.]
- [7] 郝韶楠,李叙勇,江燕,等.水污染负荷优化分配模型研究进展[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(1): 1-6. [Hao S N, Li X Y, Jiang Y, et al. Review of water waste loads allocation model [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 39(1): 1-6.]
- [8] 李如忠,舒琨.基于基尼系数的水污染负荷分配模糊优化决策模型[J]. 环境科学学报, 2010, 30(7): 1518-1526. [Li R Z, Shu K. Fuzzy optimization model for waste load allocations based on the Gini coefficient[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(7): 1518-1526.]
- [9] 李如忠,舒琨.基于多目标决策的水污染负荷分配方法[J]. 环境科学学报, 2011, 31(12): 2814-2821. [Li R Z, Shu K. Model for wastewater load allocation based on multi-objective decision making[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(12): 2814-2821.]
- [10] Nikoo M R, Kerachian R, Karimi A, et al. Optimal water and waste-load allocations in rivers using a fuzzy transformation technique: a case study[J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2013, 185(3): 2483-2502.
- [11] Cho J H, Lee J H. Multi-objective waste load allocation model for optimizing waste load abatement and inequality among waste dischargers[J]. *Water Air & Soil Pollution*, 2014, 225(3): 1892.
- [12] Nikoo M R, Kerachian R, Karimi A, et al. Optimal water and waste load allocation in reservoir - river systems: a case study [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 71(9): 4127-4142.
- [13] Liang S D, Jia H, Yang C, et al. A pollutant load hierarchical allocation method integrated in an environmental capacity management system for Zhushan Bay, Taihu Lake[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 490: 103-112.

- Environment*, 2015, 533: 223-237.
- [14] 薛佳, 徐明德, 阎正坤. 流域水污染物总量分配模型研究[J]. 环境工程, 2014, 32(3): 126-130. [Xue J, Xu D M, Yan Z K. Research on total pollutant load allocation model for river basin[J]. *Environmental Engineering*, 2014, 32(3): 126-130.]
- [15] 董战峰. 国家水污染物排放总量分配方法研究[D]. 南京: 南京大学, 2010. [Dong Z F. Research on the total amount allocation methods of the water pollutant among different provinces: taking COD allocation as a case[D]. Nanjing: Nanjing University, 2010.]
- [16] 刘红刚, 陈新庚, 彭晓春. 基于合作博弈论的感潮河网区污染物排放总量削减分配模型研究[J]. 生态环境学报, 2011, 20(3): 456-462. [Liu H G, Chen X G, Peng X C. Study on the model of total pollution load allocation in tidal network river regions with Cooperative Game Theory[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(3): 456-462.]
- [17] 吴悦颖, 李云生, 刘伟江. 基于公平性的水污染物总量分配评估方法研究[J]. 环境科学研究, 2006, 19(2): 66-70. [Wu Y Y, Li Y S, Liu W J. Study on Gini coefficient method of total pollutant load allocation for water bodies[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2006, 19(2): 66-70.]
- [18] 秦迪岚, 韦安磊, 卢少勇, 等. 基于环境基尼系数的洞庭湖区水污染总量分配[J]. 环境科学研究, 2013, 26(1): 8-15. [Qin D L, Wei A L, Lu S Y, et al. Total water pollutant load allocation in Dongting lake area based on the environmental Gini coefficient method[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, 26(1): 8-15.]
- [19] 王金南, 谿元堂, 周劲松, 等. 基于GDP的中国资源环境基尼系数分析[J]. 中国环境科学, 2006, 26(1): 111-115. [Wang J N, Lu Y T, Zhou J S, et al. Analysis of China resource-environment Gini coefficient based on GDP[J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(1): 111-115.]
- [20] 王媛, 牛志广, 王伟. 基尼系数法在水污染物总量区域分配中的应用[J]. 中国人口·资源与环境, 2008, 18(3): 177-180. [Wang Y, Niu Z G, Wang W. Application of Gini coefficient in total waste load district allocation for surface-water [J]. *China Population Resources and Environment*, 2008, 18(3): 177-180.]
- [21] 李睿. 天津市水污染物总量分配方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2007. [Li R. The research of total waste load allocation for surface-water in Tianjin [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.]
- [22] 乔晓楠, 段小刚. 总量控制、区域排污指标分配与经济绩效[J]. 经济研究, 2012, (10): 121-133. [Qiao X N, Duan X G. Total quality control, interregional allocation of emission permits and economic performance [J]. *Economic Research Journal*, 2012, (10): 121-133.]
- [23] 国家环境保护总局环境规划院. 重点流域水污染防治“十一五”规划编制技术细则[M]. 北京: 国家环境保护总局环境规划院, 2005. [Environmental Planning Institute of State Environmental Protection Administration. Technical details of “Eleven-Five” Planning for Water Pollution control in Key Watershed [M]. Beijing: Environmental Planning Institute of State Environmental Protection Administration, 2005.]
- [24] 刘年磊, 蒋洪强, 卢亚灵, 等. 污染物总量控制目标分配研究——考虑主体功能区环境约束[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(5): 80-87. [Liu N L, Jiang H Q, Lu Y L. Study on allocation for total amount controlling objectives of water pollutants—considering the constraint of environmental goals of national main function regions[J]. *China Population Resources and Environment*, 2014, 24(5): 80-87.]
- [25] 刘杰. 基于最大加权信息熵模型的水污染物总量分配[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(1): 16-20. [Liu. Total amount allocation of water pollutant based on model of maximum weighted information entropy[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2015, 32(1): 16-20]
- [26] 何帮强, 洪兴建. 基尼系数计算与分解方法研究综述[J]. 统计与决策, 2016, (14): 13-17. [He B Q, Hong X J. A review of calculation and decomposition methods of Gini coefficients[J]. *Statistics & Decision*, 2016, (14): 13-17.]
- [27] 陕西省环境保护厅. 2015年陕西省环境状况公报[R]. 2016. [Environmental Protection Bureau of Shaanxi Province. Bulletin of Environmental Status of Shaanxi Province[R]. 2016.]
- [28] 陕西省统计局. 陕西区域统计年鉴—2016[M]. 西安: 陕西省统计局, 2016. [Shaanxi Provincial Bureau of Statistics. Shaanxi Regional Statistical Yearbook in 2016[M]. Xi'an: Shaanxi Provincial Bureau of Statistics, 2016.]
- [29] 史方方. 西安市主要河流纳污能力及污染物总量控制探析[J]. 水资源研究, 2018, 7(2): 207-214. [Fangfang Shi. Analysis of Pollution Absorption Capacity and Total Pollutant Control of Main Rivers in Xi'an City [J]. *Journal of Resources of Water Research*, 2018, 7(2): 207-214.]
- [30] 国务院. 国务院关于印发“十三五”节能减排综合工作方案的通知[EB/OL]. [2017-01-05]Http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-01/05/content_5156789.htm. [The State Council. Notice of the State Council on issuing the comprehensive work plan for energy saving and emission reduction in “Thirteen-Five” Planning[EB/OL]. [2017-01-05]Http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-01/05/content_5156789.htm.]

A method for water pollution load allocation for different levels of pollution discharges

LI Zeqi¹, ZHANG Yue¹, WANG Xiaoyan¹, LI Yingjie², CHEN Jie², GUO Wei²

(1. College of Resource Environmental & Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China;

2. Shaanxi Provincial Academy of Environmental Science, Xi'an 710061, China)

Abstract: We aimed to establish a method for water pollutant load allocation between administrative units and pollution discharge enterprises. Regarding the administrative unit level, equality was taken as the main allocation principle and the entropy-weighted Gini coefficient method was used to allocate pollutant load at the pollution discharge level. Population and gross domestic product were chosen to represent the potential of water pollution in administrative units; and land areas and maximum permitted discharge were chosen to represent the environmental capacity of administrative units. At the discharge enterprise level, efficiency was taken as the main allocation principle and the pollution discharge performance method was used to allocate pollutant load at discharge enterprise levels. The economic output value of the unit load was chosen to represent the environmental economic benefits of the discharge enterprise; and fresh water usage unit load was chosen to represent the resource utilization efficiency of the discharge enterprise. This method for pollutant load allocation provides equal rights for enterprises to discharge and highly efficient environmental and resource use, while paying attention to environment protection and socio-economic development. Combined with pollution census data for Shaanxi, this method is applied to Xi'an with a high population, dense industry discharge, short water resource and poor water quality, located in middle of Weihe river basin. Based on the administrative unit level in Xi'an, there are three counties with more than 10% pollution reduction rates, redefined as key reduction units. Other counties were redefined as retention reduction units. Regarding the key reduction unit, the optimized allocation result of the discharge enterprise level is the final plan. For the retention reduction unit, pollution reduction rates of some discharge enterprises need to be adjusted for a more reasonable allocation plan. This method provides a reference for pollution load allocation at multiple levels.

Key words: pollution load allocation; information entropy; Gini coefficient; emission performance; Weihe River Basin; Xi'an City