

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.02.023

滦河承德段水环境容量计算及初始分配

门宝辉¹,牛晓赞¹,刘灿均¹,陈静²,刘晶晶²

(1. 华北电力大学水利与水电工程学院,北京 102206; 2. 承德市生态环境局,河北 承德 067000)

摘要:以滦河承德段为研究对象,先对该河段的9个断面采用单因子指数法和灰色关联分析法进行了水质评价,再根据水功能区特征划分控制单元,采用一维模型核算该河段的水环境容量,最后基于经济、环境、公平原则,采用等比例分配法对各行政单元进行水环境容量初始分配,选取GDP、区域面积、人口作为基尼系数的分配指标,并利用各指标下的基尼系数对分配方案进行了评价及优选。结果表明:滦河承德段水质较优,COD、NH₃-N、TP 3种污染物的水环境容量分别为5203.61t/a、505.71t/a、72.92t/a;在环境容量分配中,4种分配方案均满足相对公平要求,且环境效益权重较大的方案更为合理。

关键词:单因子指数法;灰色关联分析法;水环境容量;水功能区;基尼系数法;滦河承德段

中图分类号:TV570.55 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)02-0168-08

Calculation and initial allocation of water environmental capacity in Chengde section of Luanhe River // MEN Baohui¹, NIU Xiaoyun¹, LIU Canjun¹, CHEN Jing², LIU Jingjing² (1. College of Water Resources and Hydropower Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Chengde Ecology and Environment Bureau, Chengde 067000, China)

Abstract: Taking Chengde section of Luanhe River as the research object, the water quality of 9 sections was evaluated by single factor index method and grey correlation method. Then the control unit was divided according to the characteristics of water function area, and the water environment capacity of the research section was calculated by one-dimensional model. Finally, based on the principles of economy, environment and equity, the equal proportion allocation method was adopted to initially allocate the water environment capacity of each administrative unit. GDP, regional area and population were selected as the distribution indicators of Gini coefficient, and the distribution schemes were evaluated and optimized by using the Gini coefficient under each indicator. The results show that the water quality of Chengde section of Luanhe River is better, and the water environmental capacities of COD, ammonia nitrogen and total phosphorus are 5 203.61 t/a, 505.71 t/a and 72.92 t/a, respectively. In the allocation of environmental capacity, the four allocation schemes meet the requirements of relative fairness, and the scheme with large weight of environmental benefits is more reasonable than other schemes.

Key words: single factor index method; grey correlation method; water environmental capacity; water function area; Gini coefficient method; Chengde section of Luan River

近些年我国经济社会快速发展,居民消费需求日渐加大,各类污水排放量不断增长,水环境问题日渐突出^[1-2]。我国实施水污染防治的主要办法是对水污染物进行总量控制,该方法由美国联邦环境保护局在20世纪70年代提出,即根据确定的目标总量对污染物进行削减,再对其进行合理分配^[3-8]。我国在20世纪70年代开始研究污染物浓度控制问

题,80年代提出排污许可证制度,着重对污染物浓度进行严格控制^[9-11]。随着研究不断深化,我国学者发现浓度控制不能从根本上改善污染问题,所以将研究方向逐步转向总量控制^[12-13]。要控制污染物总量,首先要核算出准确的水环境容量值,从而依据水环境容量和允许排放量进行分配^[14]。我国学者对水环境容量总量分配主要是基于公平和效率原

基金项目:全球环境基金(CD-C-1-6)

作者简介:门宝辉(1973—),男,教授,博士,主要从事水文与水资源研究。E-mail: menbh@ncepu.edu.cn

则,根据对二者侧重点不同,提出了等比例分配法、层次分析法、最小费用法、基尼系数法等分配方法,并引入数学模拟和数理统计等方法对分配方法进行优化。如杨志平等^[15]将治理费用最小作为主要目标,建立模型对水环境容量进行了合理分配;徐鸿德^[16]利用最小费用法进行了河流污染物的协调分配;林高松等^[17]将公平性作为首要原则,提出了等比例分配法;颜润润等^[18]将等比例分配法应用于新孟河流域;谢梦达等^[19]综合上海、浙江、福建的环境、经济、技术等方面的差异,应用层次分析法,进行了总量分配;陈丁江等^[20]利用基尼系数法对水环境容量进行多目标分配;秦岚迪等^[21]基于基尼系数法对洞庭湖区的水环境容量进行了科学分配。

针对现有水环境容量分配方法的研究大多未完全结合实际水环境容量,也没有考虑水质评价等问题。本文从“浓度”和“总量”两个角度出发,通过水质评价对滦河水质优劣进行分析,核算滦河水环境容量作为容量总量,采用等比例分配法进行分配,并采用基尼系数法对分配结果进行评价,以期承德市水环境容量总量控制提供重要参考,为承德市开展排污权交易工作和探索建立流域内跨行政区生态补偿机制提供支撑。

1 研究区概况

滦河位于华北平原东北部,发源于河北省承德市丰宁县巴彦古尔图山北麓,是海河流域四大水系之一。滦河全长 888 km,流域面积 44 880 km²。河北省承德市滦河流域集水面积为 28 616 km²,占全市总面积的 72%,占整个滦河流域总面积的 64%,滦河流域水系分布如图 1 所示,滦河承德段是滦河流域的核心部分。滦河流域多年平均年径流量为 44.23 亿 m³,承德市多年平均水资源总量大约为 37.01 亿 m³,并呈东南-西北向递减分布。自引滦入津工程投入运行以来,年输水量已达 10 亿 m³,极大程度上缓解了天津市供水困难问题,滦河已成为天津市的重要水源,为河北省部分地区及天津市带来了社会效益、生态效益和环境效益。

2 滦河承德段水质评价

2.1 断面布设及指标选取

选取滦河承德段上部的东缸房、郭家屯断面,中部的宫后、承钢大桥、偏桥子大桥和上板城大桥断面,下部的乌龙矶大桥、大杖子(一)和门子哨断面(图 2)作为评价对象,选取 KMnO₄、BOD₅、NH₃-N、COD、TP 5 个代表性的参评指标,对滦河承德段 2020 年 2 月(枯水期)和 5 月(丰水期)各断面的水

质情况进行评价。

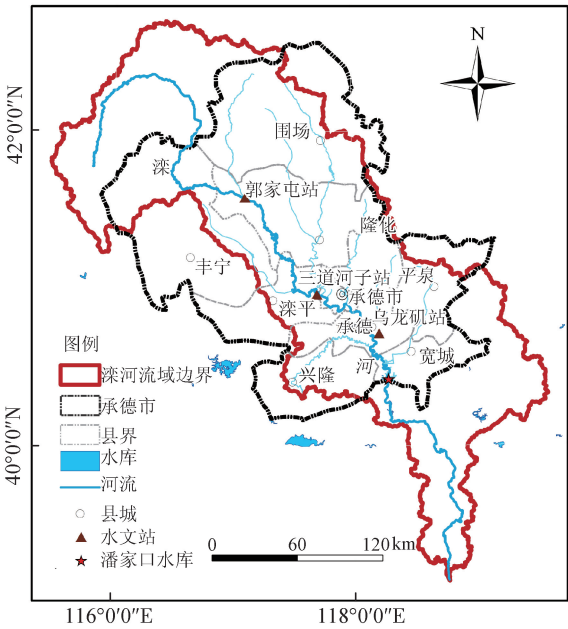


图 1 滦河水系分布

Fig. 1 Water system distribution of Luanhe River



图 2 滦河承德段监测断面分布

Fig. 2 Distribution of monitoring sections of Chengde section of Luanhe River

2.2 评价方法

2.2.1 单因子指数法

单因子指数法将参评指标多次监测的平均值或多次监测的最值,与该指标对应的水质标准进行对比,计算单因子指数,确定水样在该指标下的水质等级,由此对各参评指标进行水样水质等级的判定,遵循“从劣不从优”的原则^[22-23],选择各参评指标对应的最低水质等级作为水样水质评价的结果。单因子指数法计算公式为

$$p_{i,j} = \frac{C_i}{C_{i,j}} \quad (1)$$

式中: $p_{i,j}$ 为第 i 项指标在第 j 水质等级下的单因子指数; C_i 为第 i 项指标的实测浓度值; $C_{i,j}$ 为第 i 项指标对应的第 j 等级的水质标准浓度值。

2.2.2 灰色关联分析法

灰色关联分析法通过将水质监测值作为参考序列,水质标准作为比较序列,在对参考序列和比较序列进行归一化处理后^[24],确定第 i 个指标 ($i = 1, 2, \dots, n$) 监测值到第 j 等级 ($j = 1, 2, \dots, m$) 标准值区间的距离 $\Delta_{i,j}$,进而计算该指标与等级 j 的关联系数 $\zeta_{i,j}$,第 i 个指标与等级 j 的关联系数计算公式^[25-26]为

$$\zeta_{i,j} = \frac{\Delta_{\min} + \lambda \Delta_{\max}}{\Delta_{i,j} + \lambda \Delta_{\max}} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

其中 $\Delta_{\min} = \min_j \min_i |x_i - C_{i,j}|$
 $\Delta_{\max} = \max_j \max_i |x_i - C_{i,j}|$ $\Delta_{i,j} = |x_i - C_{i,j}|$
式中: x_i 为第 i 个指标的监测值; $C_{i,j}$ 为第 i 个指标对应等级 j 的水质标准浓度值; λ 为分辨系数,一般取 0.5。

根据式(3)计算水样与等级 j 的关联度,并选取最大关联度对应的等级作为水样的评价等级。

$$r_j = \sum_{i=1}^n w_i \zeta_{i,j} \quad (3)$$

式中 w_i 为第 i 个指标的权重值。各指标权重值可通过 CRITIC 法进行计算^[27]。

2.3 评价结果

用单因子指数法和灰色关联分析法分别评价滦河干流承德段 2020 年 2 月和 5 月各断面水质。单因子指数法将最为严重的污染物作为评价对象来确定水样的水质等级,适用于确定水样的主要污染物。各监测断面 2 月和 5 月的评价结果及主要污染物见表 1。2 月(枯水期)滦河承德段的主要污染物为 COD、TP 和 $\text{NH}_3\text{-N}$,5 月(丰水期)主要污染物为 COD、TP。滦河承德段的上游主要受到 COD 的污染;中游主要受到 TP 的污染,其中,宫后和承钢大

桥两个断面的 TP 污染比较严重;下游 2 月(枯水期)主要受到 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的污染,5 月主要受到 COD 和 TP 的污染。

灰色关联分析法能够综合考虑各指标对于水质的影响,其对滦河承德段的水质评价结果为:2 月东缸房、郭家屯和大杖子(一)断面为 I 类水,宫后、承钢大桥、偏桥子大桥、乌龙矶大桥和门子哨断面为 II 类水,上板城大桥断面为 III 类水;5 月宫后、上板城大桥断面为 I 类水,东缸房、郭家屯、承钢大桥、乌龙矶大桥、大杖子(一)和门子哨断面为 II 类水,偏桥子大桥断面为 III 类水。由评价结果可知:市内上游及下游河段水质较优,枯水期水质优于丰水期水质;市内中游河段由于流经承德市较发达区域,污染相对严重,水质劣于上游和下游,且丰水期和枯水期水质变化趋势不明显。总的来说,滦河承德段水质较好,能够满足 III 类水要求。

3 滦河承德段水环境容量计算

环境容量具有资源性,水环境容量分配的前提是进行水环境容量计算^[28-29]。本文将承德境内水系中的滦河干流作为研究对象,调查与评价了水文资料(包括流域面积、流速、流量、水位、降水量等)、水质资料、排污口资料、取水口资料、污染源资料、社会经济指标数据、研究区域统计年鉴等,并进行数据一致性分析,形成数据库;进行了水域概化,明确河流水功能区的特征并划分控制单元,确定主控污染物,进而计算水环境容量^[30]。

3.1 确定水功能区

水功能区是指为满足河流、湖泊水资源合理开发利用和有效保护需求,并按综合规划、水资源保护规划和经济社会发展要求,划分出执行特定标准的特定区域^[31]。根据 GB 50594—2010《水功能区划分标准》以及《河北省水功能区划》(冀水资[2017]127 号),结合滦河干流流经区域的特征,对滦河干流进行水功能区划分,具体见表 2。

表 1 滦河承德段各断面单因子指数法评价结果

Table 1 Single factor index method evaluation results of sections in Chengde section of Luanhe River

断面名称	2020 年 2 月			2020 年 5 月		
	评价结果	主要污染物	超标倍数	评价结果	主要污染物	超标倍数
东缸房	II	COD	0.80	III	COD	0.72
郭家屯	II	COD	0.70	II	COD	0.87
宫后	V	TP	1.20	III	TP	0.95
承钢大桥	V	TP	0.80	III	TP	0.65
偏桥子大桥	III	$\text{NH}_3\text{-N}$	0.65	III	TP	0.80
上板城大桥	III	$\text{NH}_3\text{-N}$	0.65	II	COD	0.57
乌龙矶大桥	III	$\text{NH}_3\text{-N}$	0.56	III	TP	0.80
大杖子(一)	III	$\text{NH}_3\text{-N}$	0.52	II	COD	0.80
门子哨	II	COD	0.85	III	TP	0.95

表2 滦河干流水功能区划分

Table 2 Division of water function area of Luanhe main stream

水环境功能区		水功能区名称	水质目标
起点	终点		
外沟门子	郭家屯	闪电河承德保留区	Ⅲ
郭家屯	三道河子	滦河承德保留区	Ⅲ
三道河子	乌龙矶	滦河承德开发利用区	Ⅲ
乌龙矶	潘家口水库	滦河承德、唐山缓冲区	Ⅲ

3.2 划分控制单元

基于数字高程模型 (DEM) 数据, 采用 ArcGIS Hydrology 水文分析工具, 对承德市数字高程数据进行创建无凹陷点 DEM、流向分析、流量统计等一系列操作, 得到承德市境内水系的集水区范围, 提取出滦河干流集水区。根据已有的数据资料, 将提取的滦河干流集水区与监测断面位置、排污口位置数据进行叠加分析, 提取满足控制单元划分原则的区域作为汇水单元, 最后将汇水单元与区县边界叠加, 得到滦河干流上的 7 个控制单元。每个控制单元均包含在一个区县内部, 且在河流流经的两个区县交界处, 即控制单元的入口和出口均有监测断面分布。滦河承德段的控制单元划分结果如图 3 所示。

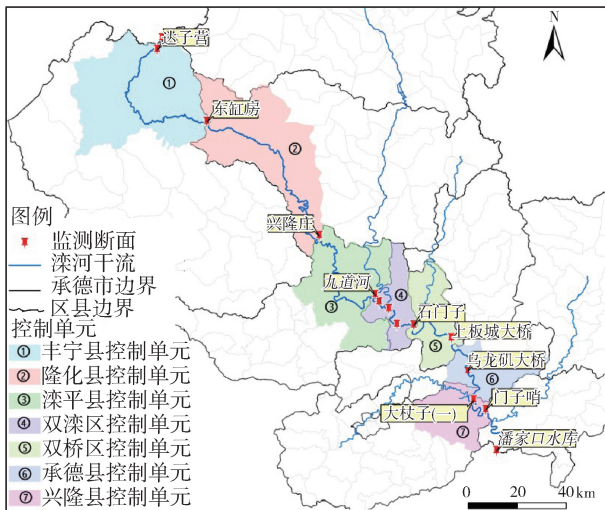


图3 滦河承德段控制单元划分

Fig.3 Division of control units in Chengde section of Luanhe Riverr

3.3 水域概化

水域概化是指将复杂的河道概化为简单的河道, 将非稳态的水流概化为稳态的水流, 将相邻近的多个排污口概化为一个排污口使得概化后的水域更易于环境容量的计算。在水域概化模型中, 参与概化的要素主要分为 3 方面: 节点、河段、上下界。滦河承德段水域概化结果如图 4 所示。

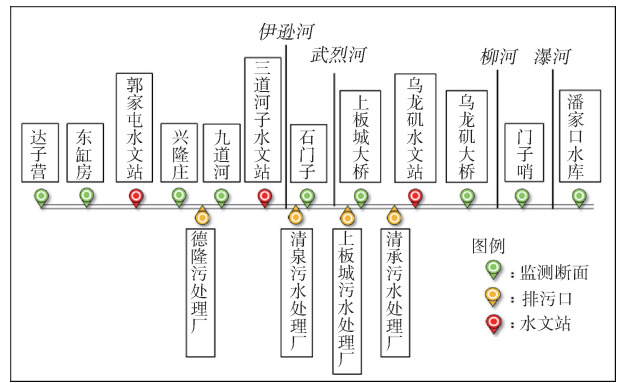


图4 滦河承德段水域概化结果

Fig.4 Generalization results of water area in Chengde section of Luanhe River

3.4 确定主控污染物

我国现行污染物总量控制方法首先是对 COD 水污染排放总量进行控制, 再将 $\text{NH}_3\text{-N}$ 指标加入其中。污染物总量的控制不仅为水环境治理取得了显著的成果, 也为我国有机污染问题的研究做出了巨大的贡献。《水污染防治行动计划》(国发〔2015〕17 号) 中指出 TN、TP 等指标对水环境有显著影响, 要将这些指标纳入流域、区域污染物排放总量控制约束性指标体系中。对 TN、TP 的排放控制在“十三五”期间也被列上日程, 在部分流域和区域内已经展开。本研究调查了承德市 2013—2019 年地表水监测断面的水质类别及主要污染物状况, 由调查水质数据可知, 承德市境内滦河水体已受到不同程度的污染, TP 已经成为承德市河流的主要污染指标之一。因此, 水环境容量计算选择 COD 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 作为主要控制因子, 增加 TP 作为区域特征污染物。

3.5 水环境容量模型和计算

3.5.1 计算模型的选择

根据 GB/T 25173—2010《水域纳污能力计算规程》和滦河实际状况, 采用河流一维水质数学模型计算。河流的水环境容量一般由自净容量、稀释容量和输移容量组成, 水环境容量计算公式为

$$W = W_s + W_d + W_l \quad (4)$$

其中 $W_s = 31.536C_s \left[\exp\left(\frac{Kx}{86.4u}\right) - 1 \right] (Q_0 + q_m)$

$$W_d = 31.536 [C_s (Q_0 + q_m) - Q_0 C_0]$$

$$W_l = 31.653qC_s$$

式中: W 为河流水环境容量; W_s 为自净容量; W_d 为稀释容量; W_l 为输移容量; K 为污染物综合衰减系数; x 为河段长度; u 为河流断面的平均流速; q_m 为污水排放量; Q_0 为河段流量; C_s 为河道控制断面水质标准; C_0 河流中污染物的本底浓度。 q_m 相对于 Q_0 是一个很小的值, 在计算中一般忽略不计, W 可整

理简化为

$$W = 31.536 \left[\exp \left(\frac{Kx}{86.5u} \right) - C_0 \right] Q_0 + 31.536qC_s$$

(5)

3.5.2 模型参数的确定

在对河段进行水环境容量计算时,用河流的设计流量表示设计水文条件。对于常年有水,并且水量相对充沛的河流,一般情况下采用多年最枯月平均流量,推求设计保证率 $P=90\%$ 的设计流量条件;对于有冰封期、季节性、枯水期的河流,一般可根据流域实际情况确定设计标准。通过对郭家屯水文站、三道河子水文站、乌龙矶水文站 2007—2016 年的流量系列数据资料分析计算,得到滦河干流郭家屯水文站 90% 保证率下的设计流量为 $3.8\text{ m}^3/\text{s}$,三道河子水文站 90% 保证率下的设计流量为 $4.56\text{ m}^3/\text{s}$,乌龙矶水文站 90% 保证率下的设计流量为 $6.42\text{ m}^3/\text{s}$ 。结合《全国水环境容量核定技术指南》^[32]以及《河北省地表水水环境容量核定技术报告》,滦河干流各段各指标衰减系数取为 $K_{\text{COD}} = 0.23\text{ d}^{-1}$, $K_{\text{氨氮}} = 0.05\text{ d}^{-1}$ 。TP 是难降解的无机物,只能稀释,因此进行水环境容量计算时只考虑稀释容量和输移容量^[33]。

3.5.3 水环境容量的计算结果

根据滦河承德段的基本情况和水质控制目标,计算出滦河承德段 COD、NH₃-N、TP 的环境容量分别为 5 203.61 t/a、505.71 t/a、72.92 t/a,计算结果见表 3。

4 水环境容量分配

要对水污染物总量进行控制,最重要的一步是要对允许的污染物排放量进行合理分配^[34]。国内对水污染总量控制可以大致分为 3 个阶段:污染物浓度控制、目标总量控制和容量总量控制。对水环境进行综合规划、管控时,由于同一流域包含了不同的行政区或是同一行政区下各部分发展极不平衡,

所以需要流域水环境容量进行合理的分配。鉴于我国实行的水污染防治体系建立在行政区监管的基础上,故一般情况下在行政单元间实行水环境容量的分配。在进行分配时,一般要把握公平原则和效益原则,并确保分配方案有良好的实用价值。

4.1 总体思路

在借鉴相关研究成果的基础上,采用容量分配法对水环境容量进行分配,再通过基尼系数法对分配结果进行评价,并最终确定最佳分配方案。基本思路为:通过全面了解研究区各行政单元间的经济、社会、环境等方面的差异,综合考虑流域总量分配应该遵循的经济效率、环境效率、区域公平 3 个原则,根据指标的代表性和数据的可行性,构建包含经济效率、环境效率和区域公平 3 方面指标的指标体系。通过计算不同行政单元各指标的效益系数作为分配的客观权重,并对各指标进行主观赋权,进而得到各分配对象的综合权重大小,确定出分配方案。引入环境基尼系数,对每个分配单位所得到的分配量进行评价,确定出最优的分配方案。

4.2 具体分配

4.2.1 指标体系构建

在环境容量分配中,一定要把握经济效率、环境效率、区域公平 3 个原则,并保证分配方案的可行性。经济效率原则选取了第二产业比例作为指标,第二产业比例反映了一个地区经济发展对第二产业的依赖程度,在分配时,对那些依赖性较大的地区应该考虑多分配排放量;环境效率原则选取了纳污能力作为指标,纳污能力反映了一个地区所能容纳污染物的多少,对纳污能力较大的区域,分配时可稍微有所侧重;区域公平原则选取了治污投资比例作为指标,治污投资比例侧面反映了一个地区污染治理水平,达标率越高,治污能力越强,分配到的可排放量应该也更多。由此构建了水环境容量的指标体系。

4.2.2 分配模型及分配结果

环境容量分配的实质是分配对象即行政单元权

表 3 滦河承德段水环境容量计算结果

Table 3 Calculation results of water environmental capacity of Chengde section of Luanhe River

控制单元编号	监测断面		行政区域	节点名称	节点性质	水环境容量/(t·a ⁻¹)		
	入口断面	出口断面				COD	NH ₃ -N	TP
1	达子营	东缸房	丰宁县			350.34	39.23	4.65
2	东缸房	兴隆庄	隆化县			367.51	48.83	6.71
3	兴隆庄	九道河	滦平县	滦平德龙污水处理厂	排污口	500.40	77.89	6.50
4	九道河	石门子	双滦区	伊逊河	支流	628.05	99.03	9.10
				清泉污水处理厂	排污口			
				武烈河	支流			
5	石门子	上板城大桥	双桥区	上板城污水处理厂	排污口	1 072.91	109.68	17.53
6	上板城大桥	乌龙矶大桥	承德县	清承污水处理厂	排污口	1 002.63	47.35	13.11
7	乌龙矶大桥	门子哨	兴隆县	柳河	支流	1 281.77	83.70	15.32

重值的确定。权重值的确定方法大致分为主观赋权法、客观赋权法和组合赋权法 3 种。组合赋权法不仅可以兼顾决策者对于各指标的偏好程度,还能深层次了解到各指标数据的客观信息,让赋权过程具有良好的客观性,使主客观相统一^[35]。因此,在本次研究中为了减小误差,采用组合赋权的分配方法确定各对象的分配权重值,构建具体模型如下:

a. 通过各行政单元的经济效率指标、环境效率指标、区域公平指标的统计数据,计算各原则下参与分配的行政单元的效益系数作为分配的客观权重值,计算公式为

$$S_i = S'_i / \sum_{i=1}^n S'_i \quad (6)$$

$$E_i = E'_i / \sum_{i=1}^n E'_i \quad (7)$$

$$D_i = D'_i / \sum_{i=1}^n D'_i \quad (8)$$

式中: S_i 为第 i 个行政单元的经济效益系数; S'_i 为第 i 个行政单元的第二产业比例; E_i 为第 i 个行政单元的环境效益系数; E'_i 为第 i 个行政单元的纳污能力; D_i 为第 i 个行政单元的区域公平效益系数; D'_i 为第 i 个行政单元的治污投资比例, n 为行政单元数。

b. 在等比例分配的基础上,调整经济效率指标、环境效率指标、区域公平指标的主观权重,确定了 4 种方案,见表 4。

c. 结合基于各分配单位指标统计数据的客观权重及各原则下指标的主观权重,通过式(9)进行组合赋权,确定各参与分配的行政单元的综合权重值,并结合滦河承德段的水环境容量计算结果,得到各行政单元的 COD、NH₃-N、TP 水环境容量初始分配,如表 5 所示。

$$W_i = W(\alpha_1 S_i + \alpha_2 E_i + \alpha_3 D_i) \quad (9)$$

式中: W_i 为第 i 个行政单元分配到的水环境容量; α_1 、 α_2 、 α_3 分别为经济效益系数、环境效益系数、区域公平效益系数权重。

表 5 各方案滦河干流各计算单元的 COD、NH₃-N、TP 水环境容量初始分配

Table 5 Initial allocation table of COD, ammonia nitrogen, and total phosphorus capacity of each calculation unit in Luanhe main stream of each scheme

控制单元编号	COD 水环境容量/(t·a ⁻¹)				NH ₃ -N 水环境容量/(t·a ⁻¹)				TP 水环境容量/(t·a ⁻¹)			
	方案 a	方案 b	方案 c	方案 d	方案 a	方案 b	方案 c	方案 d	方案 a	方案 b	方案 c	方案 d
1	563.57	579.55	637.99	627.48	54.80	56.35	62.03	61.01	7.89	8.12	8.94	8.79
2	924.84	913.15	907.12	878.08	89.92	88.79	88.20	85.38	12.95	12.79	12.70	12.30
3	821.84	819.45	812.32	812.29	79.91	79.68	78.98	78.98	11.51	11.48	11.38	11.38
4	581.97	608.22	645.60	686.98	56.59	59.14	62.77	66.80	8.15	8.52	9.04	9.62
5	973.16	957.55	936.29	910.74	94.62	93.1	91.04	88.55	13.63	13.41	13.11	12.76
6	665.47	660.18	637.08	644.31	64.70	64.19	61.94	62.65	9.32	9.25	8.92	9.02
7	674.32	667.06	628.76	645.28	65.56	64.86	61.13	62.74	9.44	9.34	8.81	9.04

表 4 主观赋权的指标权重确定方案

Table 4 scheme of index weight confirmation based on subjective weight

方案	α_1	α_2	α_3
a	0.10	0.35	0.55
b	0.15	0.35	0.50
c	0.25	0.40	0.35
d	0.30	0.35	0.35

4.3 基于环境基尼系数的方案评价

4.3.1 基尼系数的含义

基尼系数最初主要用来衡量一个地区的居民收入和财富分配的不平等程度,后来逐渐用于污染物总量分配、能源分布和资源消耗的公平性评价^[36]。在本研究中,基尼系数反映各个参与分配的行政单元分配的排污量相对于其他资源拥有量的公平程度。基尼系数越小,则表示分配越趋于公平。

4.3.2 指标选取及基尼系数计算

为对污染物排放量进行公平性评价,本研究选择 GDP、区域面积、人口作为基尼系数的分配指标,各区域根据污染物分配量按递增序列进行排序。基尼系数的计算公式为

$$I = 1 - \sum_{i=1}^n (X_i - X_{i-1})(Y_i + Y_{i-1}) \quad (10)$$

式中: I 为基尼系数; X_i 为评估指标的累计比例; Y_i 为污染物的累计比例; n 为分配对象数量。当 $i = 1$ 时, (X_{i-1}, Y_{i-1}) 视为 $(0, 0)$ 。

计算得到各方案各指标基尼系数见表 6。洛伦兹曲线可以明显表示分配的均衡程度^[37],各指标下污染物容量分配的洛伦兹曲线见图 5。

4.3.3 方案评价及优选

基尼系数的大小反映总量分配公平程度,按照相关规定^[35]:系数小于 0.2 表示分配绝对公平;0.2~0.3 表示比较公平;0.3~0.4 表示相对公平;0.4~0.5 表示略不公平;大于 0.5 表示不公平。由表 6 可知,4 种方案关于人口和 GDP 的基尼系数均

表6 各指标基尼系数

Table 6 Gini coefficient of each index

方案	人口	GDP	区域面积
a	0.061	0.045	0.275
b	0.052	0.036	0.267
c	0.068	0.003	0.202
d	0.076	0.007	0.304

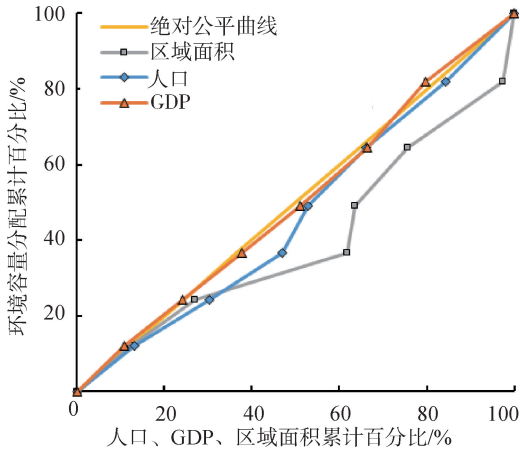


图5 承德市各指标下污染物容量分配的洛伦兹曲线

Fig.5 Lorenz curve of pollutant capacity allocation of Chengde City

小于0.1,满足分配绝对公平要求,关于区域面积的基尼系数均小于0.4,满足分配相对公平要求;总体上看,4种分配方案公平性较好。在4种方案中,方案c关于GDP和区域面积的基尼系数最小,关于人口的基尼系数与其他方案相近,是4种方案中的最优方案,也是最具有实际分配参考价值的方案。同时,也可以看出人口和GDP权重在环境容量分配过程中占主导地位。

5 结论

a. 滦河承德段的主要污染物从上游到下游包括COD、TP和 $\text{NH}_3\text{-N}$,滦河水质整体较优,能够满足地表水Ⅲ类要求。

b. 基于水质控制目标,得到滦河承德段COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP的环境容量分别为5203.61 t/a、505.71 t/a、72.92 t/a。

c. 通过综合赋权法改变指标权重得到的4种分配方案均满足分配相对公平要求,其中方案c更为合理;该分配方式的指标选取综合考虑了各区域在社会、经济方面的差异,又兼顾了环境效益和区域公平。

参考文献:

[1] 王媛,张宏伟,杨会民,等. 信息熵在水污染物总量区域公平分配中的应用[J]. 水利学报,2009,40(9):1103-1107. (WANG Yuan,ZHANG Hongwei,YANG Huimin,et

al. Application of information entropy to regional allocation of waste water load[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009,40(9):1103-1107. (in Chinese))

[2] 季永兴,刘水芹. 苏州河水环境治理20年回顾与展望[J]. 水资源保护,2020,36(1):25-30. (JI Yongxing, LIU Shuiqin. Review and prospect of Suzhou Creek water environment treatment in 20 years[J]. Water Resources Protection,2020,36(1):25-30. (in Chinese))

[3] 余明勇,刘婧婧. 长河黄冈城区河段水环境容量与污染物总量控制研究[J]. 水电能源科学,2013,31(12):33-37. (YU Mingyong, LIU Jingjing. Study on water environmental capacity and total quantity control of pollution of Changhe River in urban area of Huanggang [J]. Water Resources and Power,2013,31(12):33-37. (in Chinese))

[4] 牛晋兰,丁佳佳,苏丽萍. 流域水环境容量计算及分配方法探讨:以濑溪河为例[J]. 人民长江,2020,51(3):37-41. (NIU Jinlan, DING Jiajia, SU Liping. Study on calculation and allocation method of water environmental capacity:case of Laixi River[J]. Yangtze River,2020,51(3):37-41. (in Chinese))

[5] 张天柱. 区域水污染物排放总量控制系统的理论模式[J]. 环境科学动态,1990(1):1-23. (Z5ANG Tianzhu. System theory model of total amount control of regional water pollutant discharge [J]. Environment and Sustainable Development,1990,1:1-23. (in Chinese))

[6] SARAH Birkeland. EPA's TMDL program [J]. Ecology Law Quarterly, 2001,28(2):297-325.

[7] BORSUK M E, STOW C A, RECKHOW K H. Predicting the frequency of water quality standard violations: a probabilistic approach for TMDL development [J]. Environmental Science & Technology, 2002, 36(10): 2109-2115.

[8] 张影,杨晓东,贾子璇,等. 基于改进重叠投影法的空间耦合水污染评估模型[J]. 水资源保护,2021,37(2):128-134. (ZHANG Ying, YANG Xiaodong, JIA Zixuan, et al. Space coupling water pollution evaluation model based on improved overlapping projection method [J]. Water Resources Protection,2021,37(2):128-134. (in Chinese))

[9] 刘杰,达列雄. 汉江水源地区汉中地区水污染物总量分配研究[J]. 人民长江,2014,45(7):90-93. (LIU Jie, DA Liexiong. Research on total emission allocation of water pollutant in Hanzhong water sources area of Hanjiang River [J]. Yangtze River, 2014, 45(7): 90-93. (in Chinese))

[10] 夏青. 城镇污水处理厂污染物排放标准修改完善的思考[J]. 水资源保护,2020,36(5):22-23. (XIA Qing. Thoughts on revision and perfection of pollutant discharge standards for urban sewage treatment plants [J]. Water Resources Protection,2020,36(5):22-23. (in Chinese))

- [11] 张宇楠,赵文晋. 水环境容量总量分配存在的问题及建议[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(4): 1088-1092. (ZHANG Yunan, ZHAO Wenjin. Problems and suggestions on distribution of total water environmental capacity[J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(4): 1088-1092. (in Chinese))
- [12] 李志伟,丁凌峰,唐洪武,等. 淮河干流污染物分布及变化规律[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 29-38. (LI Zhiwei, DING Lingfeng, TANG Hongwu, et al. Distribution and variation of pollutants in main stream of Huaihe River[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(1): 29-38. (in Chinese))
- [13] 张家贤,田一平,孙瑞林,等. 河流水环境容量及其计算方法[J]. 环境科学与技术, 1991(2): 7-12. (ZHANG Jiaxian, TIAN Yiping, SUN Ruilin, et al. River water environmental capacity and its calculation method[J]. Environmental Science & Technology, 1991(2): 7-12. (in Chinese))
- [14] 陈丽娜,韩龙喜,谈俊益,等. 基于多断面水质达标的河网区点面源污染负荷优化分配模型[J]. 水资源保护, 2021, 37(6): 128-134. (CHEN Lina, HAN Longxi, TAN Junyi, et al. Optimal allocation model of point and non-point pollution loads in river network based on water quality standard of multiple control sections[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(6): 128-134. (in Chinese))
- [15] 杨志平,陆景宣. 污染物排放总量控制优化分配数学模型探讨[J]. 上海环境科学, 1989(10): 9-13. (YANG Zhiping, LU Jingxuan. A Study on optimizing mathematical model for the allocation of total emission amount control[J]. Shanghai Environmental Sciences, 1989(10): 9-13. (in Chinese))
- [16] 徐鸿德. 河流水污染物协调分配系统分析[J]. 环境科学研究, 1991, 4(2): 37-40. (XU Hongde. System analysis adjusting allocation of river water pollutant[J]. Research of Environmental Sciences, 1991, 4(2): 37-40. (in Chinese))
- [17] 林高松,李适宇,江峰. 基于公平区间的污染物允许排放量分配方法[J]. 水利学报, 2006, 37(1): 52-57. (LIN Gaosong, LI Shiyu, JIANG Feng. Allocation method of allowable waste load in river based on the principle of equitable interval[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(1): 52-57. (in Chinese))
- [18] 颜润润,晁建颖,崔云霞. 基于最大日负荷量的流域污染控制措施:以太湖新孟河流域为例[J]. 人民长江, 2012, 43(17): 70-73. (YAN Runrun, CHAO Jianying, CUI Yunxia. Water pollution control of river basin based on TMDL: a case study of Ximeng River in Taihu Lake Basin[J]. Yangtze River, 2012, 43(17): 70-73. (in Chinese))
- [19] 谢迪达,张林姣. 基于层次分析法的东海陆源污染物总量分配研究[J]. 科技与管理, 2016, 18(4): 19-24. (XIE Mengda, ZHANG Linjiao. A study of distribution of the total amount of East Sea land-based pollutants based on the AHP method[J]. Science-Technology and Management, 2016, 18(4): 19-24. (in Chinese))
- [20] 陈丁江,吕军,沈晔娜. 区域间水环境容量多目标公平分配的水环境基尼系数法[J]. 环境污染与防治, 2010, 32(1): 88-91. (CHEN Dingjiang, LYU Jun, SHEN Yena. Water environment Gini coefficient method for mult objective fair allocation of water environment capacity among regions[J]. Environmental Pollution & Control, 2010, 32(1): 88-91. (in Chinese))
- [21] 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 Dilan, WEI Anlei, LU Shaoyong, 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. (in Chinese))
- [22] 李泽利,赵兴华,梅鹏蔚,等. 于桥水库库周沟渠水质评价与污染负荷估算[J]. 南水北调与水利科技, 2020, 18(3): 142-150. (LI Zeli, ZHAO Xinghua, MEI Pengwei, et al. Water quality and pollution load estimate of ditches around the Yuqiao reservoir[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(3): 142-150. (in Chinese))
- [23] 高凡,邹兰,孙晓懿. 改进综合水质指数法的乌伦古湖水水质空间特征[J]. 南水北调与水利科技, 2020, 18(1): 127-137. (GAO Fan, ZOU Lan, SUN Xiaoyi. Analysis of the spatial characteristics of Ulungur Lake water quality based on improved comprehensive water quality index[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(1): 127-137. (in Chinese))
- [24] 刘灿均,门宝辉,蔡常鑫. 基于物元分析法的温榆河水水质评价初步研究[J]. 水资源开发与管理, 2019(10): 11-15. (LIU Canjun, MEN Baohui, CAI Changxing. Preliminary study on water quality evaluation of Wenyu River based on matter element analysis[J]. Water Resources Development and Management, 2019(10): 11-15. (in Chinese))
- [25] 许峰,秦成. 地下水环境质量评价:基于粗糙集理论和灰色关联系数矩阵的 TOPSIS 模型[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(6): 1097-1100. (XU Feng, QIN Cheng. Evaluation of groundwater environment quality based on rough set and TOPSIS model of gray correlation coefficient matrix[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(6): 1097-1100. (in Chinese))