

文章编号:0559-9350(2011)02-0127-09

基于Vague集的水污染负荷分配方法

李如忠, 舒 琨

(合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 从水污染负荷分配涉及的社会、经济、环境、技术与管理等因素出发, 筛选出16个评价指标, 构建了具有多层次结构的水污染负荷分配评价指标体系。结合Vague集理论, 同时考虑隶属与非隶属信息的特点, 建立了基于Vague集的区域水污染负荷分配多目标决策模式, 并将其应用于巢湖流域9个市、县间水污染负荷削减量的分摊, 得到各市县的的分摊量。实例研究表明本文模型在水污染负荷分配方面具有可行性和灵活性。

关键词: Vague集; 水污染负荷分配; 评价指标; 组合权重

中图分类号: X32

文献标识码: A

水污染负荷分配是水污染控制和水环境管理的基础工作。近年来, 国内外有关水污染负荷分配的研究一般都是将公平原则或经济原则作为决策的准则, 而对区域间客观存在的差异性不够重视。依据经济原则构建的分配模型^[1-6], 一般都是以经济最优作为目标, 在分配过程中常出现为了突出整体经济效益而忽视个体合理要求的问题, 从而导致排污者因分配不公而产生抵触情绪, 致使总量控制难以顺利实施^[7]。目前, 基于公平原则的排污总量分配研究比较活跃, 取得了丰富的研究成果^[8-12]。但是, 单纯考虑效益或片面强调公平的分配模式, 既不符合社会经济发展规律, 在实际应用中也是阻力重重。因此, 建立一个兼顾公平性与效益性原则, 同时能被排污方和水质管理方普遍接受且易于操作的分配模式, 是水污染负荷分配方法研究的方向和追求。本文从社会、经济和环境等的整体效益出发, 设计了一种基于Vague集、综合考虑主客观因素影响的水污染负荷分配多目标群体决策模式, 并将其应用于巢湖流域水污染负荷削减量分摊, 为水污染负荷分配提供新思路、新方法。

1 Vague集基本原理

Vague集理论^[13]用一个真隶属度函数 t_F 和一个假隶属度函数 f_F 来描述隶属度 μ_F 的界, 从而将模糊集单值隶属度扩展到 $[0, 1]$ 上的一个子区间 $[t_F(x), 1-f_F(x)]$ 。由于Vague集同时考虑了隶属与非隶属两方面的信息, 因此较传统模糊集, 有着更强的表示能力和灵活性。

1.1 Vague集概念 定义1^[13-14]。设论域 $X=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 其中元素 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 是所要讨论的对象。 X 上的某一Vague集 A , 是由一个真隶属度函数 t_A 和一个假隶属度函数 f_A 所描述: $t_A: X \rightarrow [0, 1], f_A: X \rightarrow [0, 1]$ 。其中 $t_A(x)$ 是由支持 x 的证据所导出的肯定隶属度的下界, $f_A(x)$ 是由反对 x 的证据所导出的否定隶属度的下界, 且 $t_A+f_A \leq 1$ 。元素 x_i 在Vague集 A 中的隶属度 $\mu_A(x_i)$ 被区间 $[0, 1]$ 上的子区间 $[t_A(x_i), 1-f_A(x_i)]$ 所界定, 称该区间为 x_i 在 A 中的Vague值, 记为 $v_A(x_i)$ 。

对 $\forall x \in X$, 称 $\pi_A(x)=1-t_A(x)-f_A(x)$ 为 x 相对于 A 的Vague度, 它刻画了 x 相对于Vague集 A 的踌躇程度, 是 x 相对于 A 的未知信息的一种量度。 $\pi_A(x)$ 越大, 说明 x 相对于 A 的未知信息越多, 显

收稿日期: 2009-06-03

基金项目: 安徽省科技攻关计划重点项目(07010302165); 浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室开放基金项目(2008KJ002)

作者简介: 李如忠(1970-), 男, 安徽怀远人, 博士, 教授, 主要从事水环境保护研究。E-mail: Lrz1970@163.com

然 $0 \leq \pi_A(x) \leq 1$ 。如果 $t_A(x) = 1 - f_A(x)$ ，那么 Vague 集 A 就等同于传统模糊集；如果 $t_A(x) = 1 - f_A(x) = 0$ 或 1 ，那么 Vague 集 A 就等同于普通集合。

1.2 基于 Vague 集的多目标决策 水污染负荷分配是一个多目标决策过程，涉及社会、经济和环境等各个方面。对于各分配方案，可能有人支持，也有人反对，而 Vague 集具有同时考虑支持与反对两方面信息的特性。

这里，设决策矩阵 $F = [f_{ij}]_{m \times n}$ ， f_{ij} 表示第 j 个方案的第 i 个目标值， $i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$ 。将决策矩阵变换为目标优属度矩阵 $\mu = [\mu_{ij}]_{m \times n}$ ，可根据矩阵 μ 来定义方案的支持目标集、反对目标集和中立目标集。

定义 2^[15]。设 $f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x))^T$ 表示 m 个目标的向量函数，若决策空间由有限多个决策变量组成，即 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ，那么 (1) 如果 $\mu_{ij} \geq \lambda^u$ (决策者能够接受的满意度的下界)，则第 i 个目标函数对第 j 个方案是满意的，或称第 j 个方案是支持第 i 个目标函数的 ($i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$)；(2) 如果 $\mu_{ij} \leq \lambda^l$ (决策者能够接受的不满意度的上界)，则第 i 个目标函数对第 j 个方案是不满意的，或称第 j 个方案是反对第 i 个目标函数的 ($i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$)；(3) 如果 $\lambda^l \leq \mu_{ij} \leq \lambda^u$ ，则第 i 个目标函数对第 j 个方案是中立的，或称第 j 个方案对第 i 个目标函数既不支持也不反对 ($i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$)；称满足 ① $F_j = \{f_i \in f \mid \mu_{ij} \geq \lambda^u\}$ 为第 j 个方案的支持目标集 ($i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$)；② $A_j = \{f_i \in f \mid \mu_{ij} \leq \lambda^l\}$ 为第 j 个方案的反对目标集 ($i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$)；③ $N_j = \{f_i \in f \mid \lambda^l \leq \mu_{ij} \leq \lambda^u\}$ 为第 j 个方案的中立目标集 ($i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$)。

一般地说，支持目标集中包含目标越多，方案越好。因此，可以利用 Vague 集理论对每个方案进行 Vague 估计，从而选出最优方案。

定义 3^[15]。设目标的权重向量为 $\omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m\}$ ，那么对于任意一个方案 $x_j \in X$ ，它在 m 个目标上满足决策者要求的程度可用一个 Vague 值来表示，即，其中 $v_j = [t(x_j), 1 - f(x_j)]$ ，其中 $t(x_j)$ 等于方案 x_j 的支持目标集中目标函数对应权重之和，即 $t(x_j) = \sum_{i \in J_1} \omega_i$ ，其中 $J_1 = \{i \mid f_i \in F_j\}$ ； $f(x_j)$ 等于方案 x_j 的反对目标集中目标函数对应权重之和，即 $f(x_j) = \sum_{i \in J_2} \omega_i$ ，其中 $J_2 = \{i \mid f_i \in A_j\}$ ，且 ($i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$)。

于是，每个方案都对应了一个 Vague 值。利用 Chen 等^[16] 提出的评分函数 $score(x) = t(x) - f(x)$ ，可以度量方案对决策者需求的适合程度。显然， $score(x) \in [-1, 1]$ 。评分函数值越大，方案对于决策者的适合程度也就越大，因此可以根据评分函数值的大小进行方案排序，函数值最大者对应的方案就是最优方案 x^* ，即 $score(x^*) = \max(score(x)), x \in X$ 。

2 基于 Vague 集的水污染负荷分配模式

2.1 水污染负荷分配评价指标体系 影响水污染负荷分配的因素很多，关系很复杂，主要涉及社会、经济、资源、环境、技术与管理等方面^[17-18]。由于目前我国仍处在点源污染治理阶段，水污染总量控制中有关污染负荷的削减实际上就是针对点源污染物进行的，因此本研究也暂不考虑非点源污染负荷的影响。现以巢湖流域为例，遵循完整性原则、简明性原则、主要性原则、层次性原则和可比性原则，结合现有统计资料，从上述诸因素角度筛选出若干具有代表性的评价指标，建立一个具有多层次结构的水污染负荷分配评价指标体系，见图 1。

下面就指标筛选及分析过程简要阐述如下：(1) 目标层 A：选择区域污染物削减总量作为最高目标层；(2) 准则层 B：反映影响水污染负荷分配的主要因素，通常由社会、资源与环境、经济、技术与管理等 4 个方面构成，每个因素都包含了若干不同的评价指标；(3) 指标层 C：由 4 个因素包含的 16 项指标组成，具体如下：在社会因素 B_1 中，指标 C_1 反映了区域城市化水平和社会经济结构状况。

考虑到巢湖流域大部分市、县仍是以粗放型生产模式为主， C_1 值越大，表明当地非农业经济发展水平相对越高，消耗的资源 and 产生的污染量也就越大，因此承担的削减义务也应越多；反之亦然。指标 C_2 反映了区域经济发展水平和社会稳定程度，为实现社会稳定，在分配削减量时需要考虑该因素的影响，即 C_2 越大，分配的削减量则应越少。指标 C_3 反映了城镇居民的富裕程度。我国社会财富的分配多倾向于城市，城镇居民收入高，当地城市经济相对也就越发达。针对巢湖流域粗放型的经济模式，可以理解为 C_3 越大，消耗的资源 and 排放的污染物也越多，应承担的削减量也就越大。

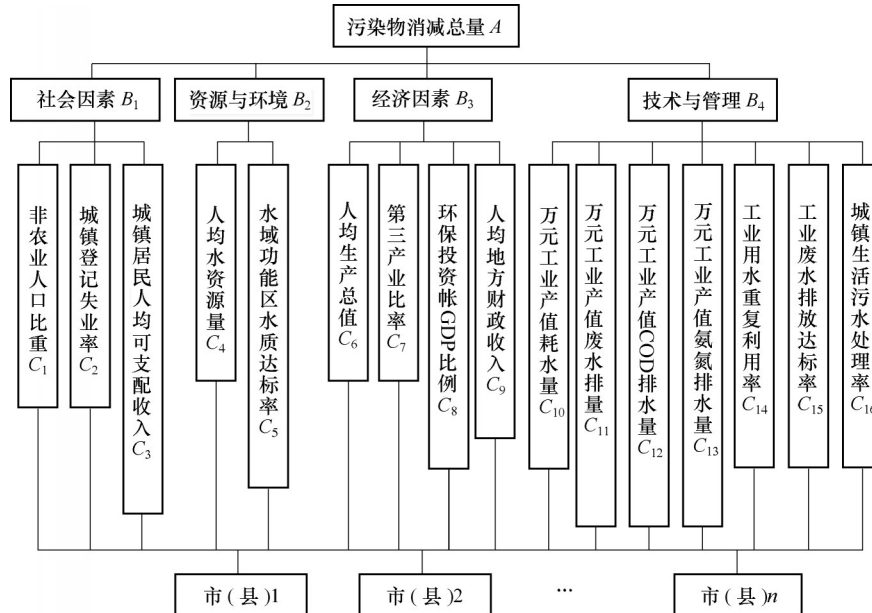


图1 水污染负荷分配评价指标体系

在资源与环境因素 B_2 中，指标 C_4 反映了区域水资源的丰富状况。可以认为人均水资源量越高，当地水环境容量也就越大，允许排放的污染物也就越多，需要削减的污染量相对也就越少。指标 C_5 反映了区域水环境质量状况。水质达标率越高，表明当地环保工作做得好，作为激励，分摊的污染物削减任务应越少；反之，环境质量不高，本身也需要多削减污染物以保护水环境。

在经济状况 B_3 中，指标 C_6 和 C_9 是反映区域经济效益的重要指标。 C_6 和 C_9 值越大，区域的经济状况越好。当然，资源的消耗量和废物的产生量也就越大，理应承担更多的削减义务。另一方面， C_6 和 C_9 值大，承担治污的能力就强，这对削减任务的完成是有利的。第三产业 C_7 产值高污染少，为鼓励第三产业的发展，可以在污染物削减方面给与倾斜。环保投资占 GDP 比重 C_8 越大，对保护环境所做的贡献也就越多。作为激励，可以适当减少污染物削减任务。通过调配污染物削减量，促进地方产业结构的调整，鼓励发展循环经济，实现绿色 GDP 的增长。

在技术与管理水平 B_4 中，指标 C_{10} 、 C_{11} 、 C_{12} 和 C_{13} ，是从经济贡献的角度反映水资源利用和污染物排放的情况，其值越大，表明单位耗水量、废水排放量和污染物排放量就越多，需要承担的污染物削减义务理应越高。虽然本文仅是将污染物 COD 作为削减对象，但对于富营养化较为严重的巢湖水体，氨氮排放是不容忽视的，因此这里也将氨氮列为重要指标。指标 C_{14} 和 C_{15} ，是从技术管理和工艺角度，反映水资源的利用效率和企业生产对环境的影响。显然，应当鼓励提高水的重复利用率和废水排放达标率。除工业点源外，生活污染源也必须给予高度重视，在我国很多地区，生活污水的 COD 排放量已经接近甚至超过工业污染源。指标 C_{16} 反映了城镇生活污水处理能力，作为激励，可以对处理率较高的市县，适当分配较少的削减份额。指标 C_{10} — C_{16} 是基于各市、县在治污工作上的投入情况和已取得的成效，建立一种奖惩机制，提高区域或企业节水治污的积极性，促使区域或企业生产由粗放型向集约型转变。

将上述指标体系与基于 Vague 集的多目标决策理论相结合, 指标 $C_1—C_{16}$ 就是 16 个目标函数 f_i , $i=1, 2, \dots, 16$; 污染物削减总量在 n 个市、县间的分配, 就对应于 n 个分配方案 x_j , $j=1, 2, \dots, n$ 。

2.2 目标优属度矩阵 由 n 个市、县的 16 项指标值可以构成决策矩阵 $F=[x_{ij}]_{16 \times n}$, 这里 x_{ij} 表示第 j 个市、县的第 i 个指标值。为克服指标量纲不相同和数值大小差异带来的影响, 需对各指标进行标准化。与此同时, 为消除 0 值影响, 考虑采用下述标准化方法^[19]:

对于数值越大, 承担削减任务越多的指标, 即“效益型”指标:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{i,\min}}{x_{i,\max} - x_{i,\min}}k + q \quad (1)$$

对于数值越大, 承担削减任务越少的指标, 即“成本型”指标:

$$y_{ij} = \frac{x_{i,\min} - x_{ij}}{x_{i,\max} - x_{i,\min}}k + q \quad (2)$$

式中: $x_{i,\max}$ 和 $x_{i,\min}$ 分别为第 i 个指标的最大值和最小值, y_{ij} 为标准化后的指标值; k 、 q 为给定的两个值, 使得经过标准化后的数值落在 $[q, k+q]$ 范围内。

于是, 可以构成目标优属度矩阵 $\mu=[y_{ij}]_{16 \times n}$, 其中 $i=1, 2, \dots, 16, j=1, 2, \dots, n$ 。

2.3 确定指标权重

(1) 主观权重。考虑采用层次分析法(AHP法)确定评价指标权重, 其基本原理和定权步骤参照文献[17]。限于篇幅, 此处不再赘述。这里假设由 AHP 得到图 1 中各项指标相对于总目标的主观权重向量为: $W_s=(w_{s1}, w_{s2}, \dots, w_{s16})^T$ 。

(2) 客观权重。根据信息熵理论, 在确定系统各指标权重时, 如果某个指标的信息熵越小, 就表明指标值的变异程度越大, 提供的信息量就越大, 则其权重也应越大。反之, 其权重就越小。假设经过式(1)或式(2)标准化后, 指标值 y_{ij} 在第 i 个指标中出现的概率为 p_{ij} , 第 i 个指标信息熵为 e_i , 则第 i 个指标的客观权重为^[19]:

$$w_{oi} = \frac{(1 - e_i)}{\sum_{i=1}^{16} (1 - e_i)} \quad (3)$$

式中: $p_{ij} = y_{ij} / \sum_{j=1}^n y_{ij}$, $e_i = -\frac{1}{\ln n} \sum_{j=1}^n p_{ij} \cdot \ln p_{ij}$, $i=1, 2, \dots, 16, j=1, 2, \dots, n$ 。

假设, 由式(3)得到图 1 中 16 项指标的客观权重向量为 $W_o=(w_{o1}, w_{o2}, \dots, w_{o16})^T$ 。

(3) 组合权重。采用文献[20]的组合方法, 综合各项指标的主客观权重, 得到

$$w_{ci} = \frac{(w_{si} \cdot w_{oi})^{0.5}}{\sum_{i=1}^{16} (w_{si} \cdot w_{oi})^{0.5}} \quad i=1, 2, \dots, 16 \quad (4)$$

这里, 令由式(4)计算得到 16 项指标的组合权重向量为: $W_c=(w_{c1}, w_{c2}, \dots, w_{c16})^T$ 。

2.4 满意度下界与不满意度上界 在基于 Vague 集的多目标决策中, 满意度下界 λ^u 和不满意度上界 λ^l 的确定, 体现了 Vague 集集成支持与反对两方面信息的特性。就水污染负荷分配而言, 所谓的满意与不满意, 可以理解为指标对污染负荷分配的影响(或作用)是敏感还是不敏感, 也可以理解为合适还是不合适。如果一个指标对污染负荷分配的意义重大, 很容易影响到分配结果, 那么就可以认为这个指标对分配方案是满意的。反之, 则是不满意的。对这一问题的判定, 一般需要在广泛咨询相关领域专家意见的基础上综合确定。对照定义 2, 这里若 $\mu_{ij} \geq \lambda^u$, 则称第 i 个目标函数对第 j 个方案是满意的, 可以理解为第 j 个市、县的第 i 个指标值对该市、县获得污染物削减量是有帮助的, 若 $\mu_{ij} \leq \lambda^l$, 即第 j 个市、县的第 i 个指标值对该分区获得更多的污染物削减量有不利影响, 则支持目标集 F_j 就是所有对第 j 个市、县获得更多污染物削减量有积极影响的指标集合, 中立目标集 N_j 就是对获得更多削减量没有多大影响的指标集合, 反对目标集 A_j 就是对获得更多削减量有消极影响的指标集合。不

同的指标对分配方案有着不同的影响,因此不同指标具有不同的 λ^u 和 λ^l ,正向影响较大的指标,很容易出现在支持目标集中,为降低该指标加入支持目标集的门槛,减少属于反对目标集的机会, λ^u 和 λ^l 可能较低,反之, λ^u 和 λ^l 可能较高。

由于指标 λ^u 和 λ^l 的确定将直接影响到污染负荷分配的最终结果,与多方利益相关,所以 λ^u 和 λ^l 的确定必须兼顾各相关方利益和综合各方的意见。只有为相关利益方所接受,才能使分配方案在实际工作中得到有效的执行。为此,需要从社会、经济、环境、生态、管理和科学技术等多个领域选择专家,在群体决策的基础上,综合确定每个指标的满意度下界 λ^u 和满意度上界 λ^l 。

2.5 分配方案的确定

2.5.1 Vague评分 设第 j 个市、县相应分配方案为 $u_j(j=1, 2, \dots, n)$,依据定义2,分别将优属度矩阵 $\mu=[y_{ij}]_{16 \times n}$ 中的每个元素与16项指标的满意度下界 λ^u 和满意度上界 λ^l 进行比较,得到 u_j 的支持目标集 F_j ,反对目标集 A_j 和中立目标集 N_j 。由指标组合权重向量 $W_c=(w_{c1}, w_{c2}, \dots, w_{c16})^T$,依照定义3,分别计算支持与反对目标集中指标权重和,得到 $t(u_j)$ 和 $f(u_j)$,再由评分函数 $score(u_j)=t(u_j)-f(u_j), j=1, 2, \dots, n$,计算出各市、县的得分。这里,得分值越高,表示分摊的削减份额越多。

2.5.2 分配比例的确定 需要说明的是,由评分函数得到的分数 $score(u_j)$ 仅是相对值,反映的只是 n 个市、县对污染物削减总量的相对重要程度,但由于它是在综合了各方面因素的基础上获得的,因此应当可以作为各市、县污染负荷分摊的依据。这里, $score(u_j)$ 可能是正值也可能是负值,无法直接用于分配计算,需要对其进行一定的转化处理。由于得分值 $score(u_j)$ 越高,表示方案 j 对于目标(污染物削减总量)越重要,因此可以考虑采用式(1)对得分值进行转化。这里 k 和 q 均为正值,取值大小需根据具体情况综合确定。假设经计算和归一化处理,各市县相应得分值转化为 $w_{Dj}(j=1, 2, \dots, n)$,则比例关系 $w_{D1}:w_{D2}:\dots:w_{Dn}$ 就表示 n 个市、县应分摊的削减负荷之比。

需要指出的是,上述分析、计算是建立在各市、县人口规模基本相当的基础上的。在当前社会经济发展水平下,人口规模对资源配置往往具有特别重要的意义。环境容量是自然资源,因此对水污染负荷的分配也应考虑人口规模的影响^[21]。

设 $p_j(j=1, 2, \dots, n)$ 表示 n 个市县人口规模百分比, $\sum_{j=1}^n p_j=1; w_{Dj}(j=1, 2, \dots, n)$ 为人均承担污染物削减量,参照文献[21],可将各市县分配到的污染物削减比例关系定义为:

$$w_{D1} p_1:w_{D2} p_2:\dots:w_{Dn} p_n \quad (5)$$

根据上述比例关系,结合待分配污染负荷削减总量,即可很容易得到各市县的具体分摊量。

3 巢湖流域水污染负荷分配

巢湖是我国“九五”至“十一五”期间,重点治理的“三湖”之一。流域包括合肥市区,肥东县,肥西县,居巢区(巢湖市区),庐江县,无为县,和县,含山县及六安市的舒城县等9个市、县。根据巢湖流域水污染防治“十一五”规划,2010年流域COD总量控制目标为 5.54×10^4 t。2007年全流域COD排放总量达 7.025×10^4 t,如以2010年为目标,需削减COD量 1.485×10^4 t。

3.1 指标标准化 根据安徽省2008年统计年鉴^[22](2007年数据),收集图1中各项指标的统计值(限于篇幅,略去),并按式(1)或式(2)进行标准化处理。若取 $q=0.1, k=0.8$,得到标准化结果(见表1),由此可以构造目标优属度矩阵 $\mu=[y_{ij}]_{16 \times 9}$ 。

3.2 指标赋权及满意度下界与满意度上界的确定 由于决策结果直接受指标权重的影响,为科学、合理的确定评判指标权重,研究中邀请了10位对巢湖流域经济、社会、生态、环境和技术管理等颇为熟悉的决策领域的专家,就图1中各项指标参与巢湖流域水污染物负荷分摊的满意度以及指标相对重要程度进行评判。采用算术平均值综合处理各位专家评分,得到各项指标的满意度下界和满意度上界(见表2)。与此同时,根据各位专家意见,采用AHP法获得各项指标主观权重,再由信息熵法确定各指标客观权重后,由式(4)计算得到各项指标的组合权重值,见表2。

3.3 确定污染物削减量分配比例 将表1中各市、县标准化后的指标值分别与表2中各指标的满意度下界和满意度上界进行比较, 依据评分函数计算各市县得分, 记作 $S_i = t(u_j) - f(u_j)$, 结果见表3。

表1 各市、县目标优属度矩阵

指标	合肥市	肥东县	肥西县	居巢区	庐江县	无为县	含山县	和县	舒城县
C_1	0.900	0.104	0.134	0.253	0.113	0.100	0.182	0.128	0.110
C_2	0.633	0.100	0.233	0.500	0.367	0.900	0.767	0.900	0.500
C_3	0.900	0.361	0.411	0.639	0.100	0.508	0.349	0.237	0.162
C_4	0.900	0.639	0.523	0.406	0.507	0.553	0.432	0.452	0.100
C_5	0.900	0.633	0.900	0.233	0.100	0.367	0.500	0.767	0.100
C_6	0.900	0.188	0.238	0.244	0.100	0.159	0.161	0.143	0.110
C_7	0.100	0.891	0.900	0.383	0.658	0.772	0.619	0.652	0.526
C_8	0.182	0.859	0.900	0.100	0.367	0.244	0.633	0.633	0.592
C_9	0.900	0.194	0.210	0.196	0.101	0.135	0.144	0.136	0.100
C_{10}	0.227	0.100	0.457	0.273	0.392	0.373	0.353	0.900	0.296
C_{11}	0.121	0.100	0.125	0.555	0.379	0.272	0.282	0.900	0.355
C_{12}	0.113	0.100	0.108	0.434	0.739	0.216	0.356	0.900	0.763
C_{13}	0.195	0.100	0.371	0.737	0.127	0.114	0.412	0.900	0.181
C_{14}	0.111	0.368	0.100	0.169	0.331	0.809	0.413	0.737	0.900
C_{15}	0.233	0.150	0.100	0.178	0.240	0.145	0.259	0.333	0.900
C_{16}	0.100	0.900	0.900	0.493	0.900	0.567	0.900	0.900	0.900

表2 Vague评价指标权重和满意度下界及满意度上界

评价指标	主观权重	客观权重	组合权重	满意度下界	满意度上界
C_1	0.053	0.115	0.084	0.716	0.307
C_2	0.018	0.040	0.029	0.762	0.353
C_3	0.018	0.049	0.032	0.753	0.346
C_4	0.060	0.027	0.044	0.717	0.311
C_5	0.179	0.061	0.113	0.694	0.303
C_6	0.230	0.091	0.156	0.667	0.299
C_7	0.050	0.028	0.040	0.768	0.352
C_8	0.095	0.049	0.074	0.724	0.324
C_9	0.056	0.102	0.082	0.765	0.354
C_{10}	0.016	0.042	0.028	0.744	0.343
C_{11}	0.028	0.066	0.047	0.739	0.368
C_{12}	0.051	0.079	0.069	0.533	0.224
C_{13}	0.051	0.084	0.071	0.567	0.224
C_{14}	0.016	0.067	0.035	0.728	0.306
C_{15}	0.051	0.072	0.066	0.708	0.339
C_{16}	0.028	0.028	0.030	0.708	0.339

表3 各市县的Vague评分值

	合肥市	肥东县	肥西县	居巢区	庐江县	无为县	含山县	和县	舒城县
$t(u_j)$	0.511	0.144	0.257	0.071	0.099	0.104	0.059	0.422	0.200
$f(u_j)$	0.460	0.632	0.568	0.638	0.604	0.649	0.435	0.420	0.657
S_i	0.051	-0.488	-0.311	-0.567	-0.505	-0.545	-0.376	0.002	-0.457

由表3, 按Vague评分排序有: 合肥市> 和县> 肥西县> 含山县> 舒城县> 肥东县> 庐江县> 无为县> 居巢区, 即相对于待分配的污染负荷, 合肥市人均“享有”量最大, 而居巢区最小。但这仅是各市、县针对待削减污染负荷的相对优先关系, 而非真正份额。采用式(1)再将Vague评分值转化为非

负数值,记为 S_2 ,则 $S_2 \in [q, k+q]$ 。这里,不妨对 k, q 取4组不同数值进行计算,得到各市县相应的人均削减比例 S_2 ,见表4。

表4 各市县人均削减比例 S_2 计算值

市(县)	$q=0.1, k=0.8$	$q=0.2, k=0.7$	$q=0.4, k=0.5$	$q=0.6, k=0.3$
合肥市	0.900	0.900	0.900	0.900
肥东县	0.202	0.289	0.464	0.638
肥西县	0.431	0.490	0.607	0.724
居巢区	0.100	0.200	0.400	0.600
庐江县	0.180	0.270	0.450	0.630
无为县	0.128	0.225	0.418	0.611
含山县	0.347	0.416	0.555	0.693
和县	0.837	0.844	0.860	0.876
舒城县	0.242	0.325	0.489	0.653

表5 各市、县COD削减情况

市(县)	人口比例 P	人均削减量比例 W_0	分摊比例 W	污染物削减量/万吨
合肥市	0.208	0.175	0.318	0.472
肥东县	0.116	0.090	0.091	0.135
肥西县	0.096	0.118	0.098	0.145
居巢区	0.092	0.078	0.063	0.094
庐江县	0.122	0.088	0.094	0.140
无为县	0.148	0.081	0.105	0.156
含山县	0.046	0.108	0.044	0.065
和县	0.068	0.167	0.100	0.149
舒城县	0.104	0.095	0.087	0.129

由表4可以看出,若取 $q=0.2, k=0.7$,则 $S_2 \in [0.2, 0.9]$,此时合肥市人均分摊量(0.90)将是巢湖市居巢区(0.20)的4.5倍。由于合肥市人口规模较其他市县大很多,这可能导致削减任务过于集中到合肥市。当然, $q=0.1, k=0.8$ 更是如此。倘若取 $q=0.6, k=0.3$,则 $S_2 \in [0.6, 0.9]$,此时人均削减量最大的合肥市(0.90)也只是人均削减量最少的居巢区(0.60)的1.5倍,与其它各县之间虽有差距,但没能很好地反映出合肥市在巢湖流域“一枝独秀”的实际情况,在一定程度上可能弱化了合肥市所应承担的削减义务,这对经济水平和废水排放量远不如合肥市的其他市、县是不公平的。经综合分析、比较,本文考虑选取 $q=0.4, k=0.5$ 进行巢湖流域水污染负荷削减量计算。结合9个市、县的人口规模比例,再由式(5)计算得到各市、县削减比例及相应的分摊量,见表5。

由表5可以看出,合肥市分摊的COD削减量占到总量的31.8%,明显高于其它各市、县,这与合肥市自身条件相匹配。2007年,合肥市生产总值达到了1024亿元,占到整个巢湖流域的59%;人均生产总值达到51636元,而其它各市、县则基本上都在9000~14000元之间徘徊,甚至更低。可以肯定地说,合肥市无论是人口、经济规模,还是生产技术水平,都是整个巢湖流域最强、最先进的,有能力也有义务承担最多的削减责任。实际上,2007年合肥市生活污水、工业废水COD排放量(23891t)也占到了整个流域总排放量的34%。综合分析来看,合肥市分摊31.8%的COD削减量是恰当的。

巢湖市居巢区工业生产主要以水泥和矿石开采、加工等为主,大气污染物排放量大,而水污染物(COD)排放量相对较少。同其它7个县相比,居巢区水域功能区水质达标率较高,第三产业比例和环保投资比例都较7个县要高些。此外,除合肥市、居巢区和无为县外,其余6个县基本上都还没有城镇污水处理厂(2007年度)。因此,居巢区分摊较低的削减比例是合适的。在其它7个县中,和县乡镇经济较发达,但生产技术落后,万元工业产值耗水量、废水排放量、COD排放量和氨氮排放量

等都是流域内最高的。为实现流域经济、生态、环境的健康发展,很有必要对其做出惩罚性的削减量配额,以促使其调整产业结构和改进生产工艺。因此,在流域的7个县中,和县人均污染物削减量最高,仅次于合肥市,排第2位。综上分析,可以看出,上述分配结果是巢湖流域各市、县社会发展现状相吻合的,因此分配结果是科学、合理的。

4 结论

在构建水污染负荷分配评价指标体系的基础上,基于Vague集的同时考虑隶属与非隶属信息特点,建立了基于Vague集理论的区域水污染负荷分配多目标决策模式,并将其应用于巢湖流域水污染物削减量的分摊,取得了较为满意的效果,不仅计算出了汇水区域各市、县人均削减量,也得到了各市、县应承担的削减配额。

从社会、经济、资源、环境、技术和管理等因素出发,在综合考虑相关各方具体情况的基础上,兼顾公平性与经济性原则,从多目标决策角度量化水污染削减负荷量的分摊,计算结果较单纯考虑经济性或公平性,显得更为科学、合理。

虽然本文仅是针对点源污染进行的水污染负荷分配研究,但其基本思想同样可以应用于大气污染以及其他资源的分配中。

参 考 文 献:

- [1] Maeda A . The emergence of market power in emission rights markets: the role of initial permit distribution[J] . Journal of Regulatory Economics , 2003 , 24(3) : 293-314 .
- [2] Segerson K , Wu Jun Jie . Nonpoint pollution control: Inducing first-best outcomes through the use of threats [J] . Journal of Environmental Economics and Management , 2006 , 51(2) : 165-184 .
- [3] Taher I A , Culver T B . Cost Optimization for Robust Optimal TMDL Allocation[C] // Proceedings of World Environmental and Water Resources Congress 2008 . May 12-16 , 2008 , Honolulu , Hawaii , ASCE Conf . Proc . 316 .
- [4] Benedetti L , Dirckx G , Bixio D , etc . Environmental and economic performance assessment of the integrated urban wastewater system [J] . Journal of Environmental Management , 2008 , 88(4) : 1262-1272 .
- [5] 郭宏飞 , 倪晋 , 王裕东 . 基于宏观经济优化模型的区域污染负荷分配[J] . 应用基础与工程科学学报 , 2003 , 11(2) : 133-142 .
- [6] 黄显峰 , 邵东国 , 顾文权 . 河流排污权多目标优化分配模型研究[J] . 水利学报 , 2008 , 39(1) : 73-78 .
- [7] 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 .
- [8] Burn D H , Yulianti J S . Waste load allocation using genetic algorithms[J] . Journal of Water Resources Planning and Management , ASCE , 2001 , 127(2) : 121-129 .
- [9] Murty Yandamuri S R , Srinivasan K , Murty Bhamudi S . 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 .
- [10] Raquel S , Ferenc S , Emery J C , et al . Application of game theory for a groundwater conflict in Mexico[J] . Journal of Environmental Management , 2007 , 84(4) : 560-571 .
- [11] 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 .
- [12] 林高松 , 李适宇 , 江峰 . 河流允许排污量公平分配的多准则决策方法[J] . 环境科学学报 , 2007 , 27(3) : 494-500 .
- [13] Gau W L , Buehrer D J . Vague Sets[J] . IEEE Transactions on Systems , Man , and Cybernetics , 1993 , 23(2) : 610 - 614 .
- [14] 刘华文 . 多目标模糊决策的Vague集方法[J] . 系统工程理论与实践 , 2004 , 24(5) : 103-109 .
- [15] 王珏 , 刘三阳 , 张杰 . 基于Vague集的模糊多目标决策方法[J] . 系统工程理论与实践 , 2005 , 25(2) : 119-122 .

- [16] Chen S M, Tan J M . Handling multicriteria fuzzy decision-making problems based on vague set theory[J] . Fuzzy Sets and Systems, 1994, 67(2): 163-172 .
- [17] 李如忠, 钱家忠, 汪家权 . 水污染物允许排放总量分配方法研究[J] . 水利学报, 2003(5): 112-115 .
- [18] 李如忠, 汪家权, 钱家忠 . 区域水污染负荷分配的 Delphi-AHP 法[J] . 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(1): 84-88 .
- [19] 畅明琦, 刘俊萍, 黄强 . 水资源安全 Vague 集多目标评价及预警[J] . 水力发电学报, 2008, 27(3): 81-87 .
- [20] 吴开亚, 金菊良 . 区域生态安全评价的熵组合权重属性识别模型[J] . 地理科学, 2008, 28(6): 754-758 .
- [21] 李如忠, 金菊良, 钱家忠, 等 . 基于指标体系的区域水资源合理配置初探[J] . 系统工程理论与实践, 2005, 25(3): 125-132 .
- [22] 《安徽统计年鉴—2008》编辑委员会 . 安徽统计年鉴—2008[M] . 北京: 中国统计出版社, 2008 .

Allocation method of water waste loads based on Vague sets

LI Ru-zhong, SHU Kun

(Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: An evaluation index system for water waste loads allocation was established, which contained a multi-level structure comprised of sixteen indices involved in society, economic, environment, technique and management etc. Based on the characteristics that attached and non-attached information are both taken into account by Vague set theory, a multi-objective decision making model was proposed for water waste loads allocation. As a case, the model was applied to allocate the reduction amount of water waste loads among nine cities and counties in the Chaohu Lake Basin. The results show that the provided approach was feasible and flexible for the allocation of water waste loads.

Key words: Vague sets; Water waste loads allocation; Evaluation indexes; Composite weights

(责任编辑: 韩 昆)

《水利学报》征订启事

《水利学报》创刊于1956年,是中国水利学会主办的综合性学术刊物,是水利行业创刊最早、国内外最具影响的学术期刊,在水利工程类核心期刊中排第一位,被国内外多家检索系统收录。《水利学报》刊登反映水利、水电、水运领域较高水平的学术论文、专题综述和工程技术总结,开展学术论文的讨论和评论,介绍国内科技动态和消息。主要专业范围包括:水文及水资源、防洪、灌溉及排水、水力学、泥沙、河港及水运、岩土工程、水工结构及材料、水利水电施工及监理、水力机电、水利经济、水环境、水利史研究等。本刊邮局发行,邮发代号2—183。每册30元,全年订价360元。

主编:陈炳新 国内统一刊号:CN11-1882/TV 国外代号:M216

地址:北京海淀区复兴路甲1号院 邮政编码:100038

投稿网址: <http://jhe.ches.org.cn>

联系电话:010-68786919; 68786221; 68786238; 6886262

传真:010-68786262; E-mail: slxb@iwhr.com

《水利学报》编辑部