

文章编号 :1000-2472(2007)11-0070-06

## 基于集对分析的污水处理工艺设计优化\*

蒋 茹<sup>†</sup>,曾光明,李晓东,杜春艳,李建兵,宋琳玲

(湖南大学 环境科学与工程学院,湖南 长沙 410082)

**摘 要:**针对污水处理工艺设计多目标、多指标,以及确定性与多种不确定性共存的特点,将集对分析理论用于污水处理工艺设计的优化决策,拓展了结构函数——同异反联系度的概念;在确定权重时引入熵权修正广泛应用的层次分析法的主观权重,一定程度上解决了信息丢失问题;其独特的稳定性分析通过基序分析其稳定区域,判定扩展序的存在,保证了决策的准确性和可靠性.方法的有效性通过实例研究得到了验证.实例考察了某污水处理厂的 4 种候选方案,即 A<sup>2</sup>/O 法、三沟式氧化沟、厌氧-单沟式氧化沟和 SBR 法.结果表明,对该污水处理厂而言,厌氧-单沟式氧化沟为最佳方案,综合效益最高.所得排序稳定,不存在扩展序.

**关键词:**污水处理;工艺设计;优化;集对分析;熵权

**中图分类号:**X32.021

**文献标识码:**A

## Wastewater Treatment Process Design Optimization Based on Set Pair Analysis

JIANG Ru<sup>†</sup>, ZENG Guang-ming, LI Xiao-dong, DU Chun-yan, LI Jian-bing, SONG Lin-ling

(College of Environmental Science and Engineering, Hunan Univ, Changsha, Hunan 410082, China)

**Abstract:** Considering the characteristics of multi-objective, multi-index and coexistence of certainty and uncertainties, set pair analysis theory was introduced into wastewater treatment process design optimization. The concept of structural function, that is, identity-discrepancy-contrary connection degree was developed. Furthermore, a subjective and objective integrated approach to determine weights was applied to avoid information loss. The unique stability analysis for basic ranking to determine other extra ranking could ensure the veracity and stability of decision results. The effectiveness of the approach was verified through case study. For some municipal wastewater treatment plants, four alternatives (A<sup>2</sup>/O, triple oxidation ditch, anaerobic single oxidation ditch and SBR) were evaluated and compared. The results showed that anaerobic single oxidation ditch was the optimal scheme and could obtain the maximum general benefits. The resultant ranking was stable and there was no extra ranking.

**Key words:** wastewater treatment; process design; optimization; set pair analysis; entropy weight

污水处理工艺设计直接影响着项目建设能否达到预期的目标以及投入运营后的效果,如污水处理的经济性、可靠性和稳定性.目前采用的方法有层次

分析法(AHP)<sup>[1-2]</sup>、灰色关联法<sup>[3]</sup>、灰色局势决策法<sup>[4]</sup>和模糊综合评价法<sup>[5]</sup>等,但还存在以下不足:AHP常因对标度把握不准而无法构造良好的判断

\* 收稿日期:2007-02-02

基金项目:国家自然科学基金(70171055、50179011)、国家杰出青年科学基金(50225926)、高等学校博士学科点专项科研基金(20020532017)资助项目;2000年教育部高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划资助项目

作者简介:蒋茹(1979-),女,浙江金华人,湖南大学博士研究生  
†通讯联系人, E-mail: hunan\_jiangru@163.com

矩阵;灰色方法考虑到灰色性的特点,但指标值分布过于离散时,由于白化函数的范围窄,可能导致最终优化排序的错误;模糊综合评判法由于基本运算规则强调取小取大,过分突出极值的作用,忽略了各项指标的综合效应,且模糊隶属度的确定存在较大的随机性,这些都可能导致优化结果的不确定性。

集对分析是我国学者赵克勤于 1989 年提出的一种新的处理不确定性信息的系统分析方法<sup>[6-7]</sup>。近十年来,随着理论不断完善和人们对环境不确定性问题研究的日益重视,已成功地用于城市规划、质量评价、污染预报、资源开发利用等方面。集对分析的核心思想是把确定性和不确定性作为一个互相联系、互相制约、互相渗透,在一定条件下可互相转化的确定-不确定系统来处理。它用联系度来统一处理模糊、随机、信息不完全所导致的系统不确定性。针对污水处理工艺优化决策的多目标、多指标特点<sup>[8]</sup>,以及确定性和多种不确定性并存的现象,笔者应用集对分析法对污水处理工艺设计优化的问题进行了研究。

## 1 工艺方案优化的评价指标体系

### 1.1 经济指标

主要表现为工程建设投资和运行费用。前者包括土地费用、直接建设安装工程费用、设备费用、管理费用和财务费用;后者包括电费、人工费、药剂费、维护费、污泥处理以及折旧费等。经济指标可用诸如单位水量处理费用等综合指标来表示。

### 1.2 工艺指标

主要包括单位时间处理水量、进水水质、处理效率、出水水质等与处理工艺相关的指标。

### 1.3 可靠性指标

可靠性指标包括所选用工艺技术的新颖性及先进性、技术的成熟程度、系统对水量水质变化的适应性、设备的耐久性、设备维修的难易程度等。

### 1.4 管理指标

主要有操作技术的复杂程度、操作劳动的繁简与强度、控制与调节的简便程度、设备和器材的标准化程度、药剂的通用性程度及普及性、运输量以及施工期的长短等。

### 1.5 资源占有及环境指标

包括占地面积、占地的价值级别、劳动指标、副产品及甲烷气的回收利用、污水及污泥的利用程度、电耗及其他能耗、污泥产量、药剂耗量、二次污染及

对环境的影响等。

## 2 工艺设计优化决策的特点

### 2.1 多目标性与目标的相互矛盾性

污水处理工艺优化是一个涉及经济、技术、环境、社会文化等方面的多目标、多层次决策过程。而这些目标有时具有不同重要性甚至是相互矛盾的。尤其是近年来,对出水水质和处理水量等提出了较高的要求,但能达到要求的此类工艺要求在资金和占地方面大投入。另一方面,在我国目前经济发展的情况以及城市用地日益紧张的形势下,要求污水处理厂的建设占用土地面积尽可能地小、投资尽可能地少。因此协调好这些相互矛盾的多目标是我们在实际工作中需要解决的一个主要任务。

### 2.2 多层次和多指标

从文献[3]中的递阶层次结构可看出,由于评价系统的复杂性,工艺设计优化呈现的是一个多层次结构,分别由目标层、准则层和指标层构成。

### 2.3 定性指标与定量指标相结合

在评价指标中既有定量指标,又有定性指标,前者可通过企业的统计数据得到,后者需要利用专家法得到具体的指标值。这些指标又可分为越大越好的效益型指标和越小越好的成本型指标。

### 2.4 评价指标的相互交错性

在影响选择的各因素之间并非相互独立,它们之间存在依赖性和反馈性,相互依存、相互影响。如果忽略它们的差异性以及之间的关系则会得到与实际情况不太吻合的排序结果。

### 2.5 不确定性

污水处理工艺优化涉及的因素多且复杂,相当一部分评价因素不能定量描述,具有不确定性(模糊性、灰色性、未确知性)。同时处理系统各种行为的输入、输出也不是确定的数值。如果在决策过程中无视上述不确定性,将会损失大量的信息,导致决策的不准确和不科学。此外,各指标的影响程度也不相同,其权重的确定存在较大的主观不确定性。

综上所述,污水处理工艺优化的过程是定性与定量、确定性与多种不确定性同时存在的多目标决策问题。而集对分析理论用联系度来统一处理模糊、随机、信息不完全所导致的综合不确定性,并作为一个确定-不确定系统来研究。这是将集对分析理论引入污水处理工艺优化决策过程的原因。

### 3 现有优化策略存在的主要问题

利用集对分析中的重要概念——联系度,来构建工艺设计优化的效用函数.根据不同的定义,分别形成两种不同的优化策略.

优化策略一<sup>[9]</sup>:根据给定的各个方案,确定出一个理想方案,将各待选方案与理想方案构筑一个集对,计算备选方案各指标与理想方案各对应指标的同一度、差异度和对立度,并计算集对的联系度,寻找与理想方案最贴近的那个方案;或者单一地利用联系度中的同一度分量,结合各指标的权重计算待选方案与理想方案的加权同一度,根据所得的同一度数值大小确定方案的优劣次序.

优化策略二<sup>[10]</sup>:将待评价的评价指标量与评价标准构筑一个集对,对于一个具体决策来说,设有  $N$  个评价指标,其中有  $S, F_1, F_2, P$  个指标分别处于 I, , , 级标准,则该决策的联系度表达式为

$$\mu = \frac{S}{N} + \frac{F_1}{N}i_1 + \frac{F_2}{N}i_2 + \frac{P}{N}j. \quad i_1, i_2 \text{ 分别表示差异不确定度, } j \text{ 表示对立度标记. 设 } a = \frac{S}{N}, b_1 = \frac{F_1}{N}, b_2 =$$

$\frac{F_2}{N}, c = \frac{P}{N}$ , 则  $a, b_n (n = 1, 2), c$  依次表示为同一度、差异不确定度、对立度.原联系度表达式可简写为  $\mu = a + b_1 i_1 + b_2 i_2 + c j$ .根据集对分析理论,同一度、对立度是相对确定的,而差异度则相对不确定, $a, b, c$  三者是对同一问题不同侧面的全面刻画,依据  $a, b, c$  三者大小关系及定量分析,可判断实际决策目标状况. $a$  值越大, $b, c$  值越小,工艺级别越优先.另外,根据  $a, b, c$  的具体数值,可对污水处理厂工艺状况进行分级,即以评价因子的数量指标相对于决策评价标准的达标、超标及其所占比例,确定污水处理厂最佳工艺.但是在实际工作中,某项评价指标的评价标准没有确切的定义,由于地区差异性,很难实现统一.

总的来说,现有的应用主要存在以下不足:

1) 线性加权对于各评价指标相互联系的污水处理工艺方案优化不合理.对于文献中的对各方案的同一度进行线性加权,一般只适用于各评价指标相互独立的场合,若各评价指标间不独立,“和”的结果必然是信息的重复,难以反映客观实际;特别是线性加权法可使各评价指标间得到线性地补偿,任一指标值的减少,都可以用另一些指标的增量来维持综合评价水平的不变<sup>[11]</sup>.而污水处理工艺优选涉及的

指标,很多是相互影响、相互联系的,因此采用各待选方案指标值与理想方案指标值同一度的线性加权,显然不能反映实际.

2) 指标的权重是相互影响的,指标权重的赋值与指标的量化相比具有更大的不确定性和随意性.目前普遍采用的赋权方法是 AHP 法. AHP 法是一种定性定量相结合的决策分析技术,将问题分解成若干层次,由专家和决策者对所列指标通过两两比较重要程度而逐层进行判断评分,利用计算判断矩阵的特征向量确定下层指标对上层指标的贡献程度,从而得到最底层指标对总目标而言重要性的赋权结果<sup>[12]</sup>.但 AHP 确定权重存在较大的主观随意性,当采用专家咨询方式时,容易产生循环而不满足传递性公理,导致标度把握不准并丢失部分信息<sup>[13]</sup>.

3) 我们认为联系度表达式原则上是一个结构函数,直接将联系度作为一确定的数值来进行各种运算是值得商榷的.若只单一的利用联系度中的同一度分量,受理想点的限制,尚未考虑对立度,具有一定的主观性和片面性,实质为一种理想点法.

### 4 基于集对分析的污水处理工艺优化多属性决策模型

多属性决策问题一般可记为  $G = (S, E, W, D)$ . 方案集  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$ , 指标集  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ , 指标权重集  $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ , 决策矩阵  $D = (d_{kr})_{m \times n}$ ,  $d_{kr}$  为方案  $s_k$  关于指标  $e_r$  的属性值.决策矩阵经归一化处理,所得的归一化矩阵记为

$$P = (p_{kr})_{m \times n}. \text{ 对效益型指标,有 } p_{kr} = \frac{d_{kr}}{d_r^{\max}}, d_r^{\max} = \max\{d_{1r}, d_{2r}, \dots, d_{mr}\}; \text{ 对成本型指标,有 } p_{kr} = \frac{d_{kr}^{\min}}{d_{kr}}, d_r^{\min} = \min\{d_{1r}, d_{2r}, \dots, d_{mr}\}.$$

#### 4.1 熵权法确定指标权重

指标权重以数量形式反映各指标在综合评价中的重要程度.若同一指标下各方案的指标值相差越大,则反映该指标在综合评价中比较重要.若某项指标值全部相等,则该指标在综合评价中不起作用.信息论中,信息熵是信息量的度量,其基本出发点是把获得的信息看作用以消除不确定性的东西.故信息量的大小可用被消除的不确定性的多少来表示.某项指标值变异程度越大,该指标提供的信息量越大,则该指标的权重也越大,反之亦然.因此可以根据各

指标提供的信息量大小来确定指标权重.

利用熵权和普遍应用的 AHP 法确定权重,其出发点 and 理论基础均不同,前者从各指标提供的信息量多少出发,依据的是信息论;后者是由决策者分析评价,人为主观色彩较重,理论基础是决策论.本文采用主观与客观相结合的方法,在 AHP 法基础上,运用熵值理论对各专家评估水平赋予权重,确定各指标的组合权重.科学的确定权重方法应采用两者的算术平均值<sup>[14]</sup>.

为确定各指标的权重,先计算各指标的熵值

$$E_r = - (\ln m)^{-1} \sum_{k=1}^m P_{kr} \ln P_{kr} \quad (1)$$

式中  $P_{kr} = p_{kr} / \sum_{k=1}^m p_{kr}$ , 若  $P_{kr} = 0$ , 则  $P_{kr} \ln P_{kr} = 0$ .

其次,计算各指标的偏差度  $D_r = 1 - E_r$  和客观加权因子  $w_r = D_r / \sum_{k=1}^m D_j$ . 设用 AHP 法得到的各指标的权重为  $a_r (r = 1, 2, \dots, n)$ , 可用  $w_r$  进一步进行修正,即组合权重为

$$w_r = (a_r + w_r) / 2 \quad (2)$$

### 4.2 基于集对分析的多属性决策模型<sup>[15]</sup>

设最优方案和最劣方案分别记为  $U, V$ , 它们可根据系统目标和客观条件,从方案集的内部或外部选定.  $U, V$  的选定涉及到指标类型,记诸方案关于  $p_r$  的比较区间为  $[v_r, u_r]$ . 最优方案和最劣方案关于  $p_r$  的属性值分别为  $\bar{u}_r, \bar{v}_r$ . 当  $e_r$  属于效益型指标时,有  $\bar{u}_r = u_r, \bar{v}_r = v_r$ ; 当  $p_r$  属于成本型指标时,有  $\bar{u}_r = v_r, \bar{v}_r = u_r$ . 最优方案和最劣方案构成了诸方案的比较区间  $[V, U]$ .

1) 在  $p_r$  的比较区间中确定集对  $\{p_{kr}, \bar{u}_r\}$  的联系度.

对效益型指标,  $\frac{p_{kr}}{u_r + v_r}, \frac{p_{kr}^{-1}}{u_r^{-1} + v_r^{-1}}$  分别表示在数值上  $p_{kr}$  与  $u_r, p_{kr}$  与  $v_r$  的接近程度. 其值越大,接近程度越大,在确定区间  $[v_r, u_r]$  内,  $p_{kr}$  与  $v_r$  的接近恰说明了  $p_{kr}$  与  $u_r$  的远离. 故定义集对  $\{p_{kr}, u_r\}$  的同一度和对立度分别为

$$\begin{aligned} a_{kr} &= \frac{p_{kr}}{u_r + v_r}, \\ c_{kr} &= \frac{p_{kr}^{-1}}{u_r^{-1} + v_r^{-1}} = \frac{u_r v_r}{(u_r + v_r) p_{kr}} \end{aligned} \quad (3)$$

由归一化条件  $a + b + c = 1$ , 定义差异度为

$$b_{kr} = 1 - a_{kr} - c_{kr} = \frac{(u_r - p_{kr})(p_{kr} - v_r)}{(u_r + v_r) p_{kr}} \quad (4)$$

因此,对于效益型指标,集对  $\{p_{kr}, u_r\}$  的联系度为

$$\mu_{\{p_{kr}, u_r\}} = \frac{p_{kr}}{u_r + v_r} + \frac{(u_r - p_{kr})(p_{kr} - v_r)}{(u_r + v_r) p_{kr}} i + \frac{u_r v_r}{(u_r + v_r) p_{kr}} j \quad (5)$$

对成本型指标,可确定集对  $\{p_{kr}, v_r\}$  的联系度为

$$\mu_{\{p_{kr}, v_r\}} = \frac{u_r v_r}{(u_r + v_r) p_{kr}} + \frac{(u_r - p_{kr})(p_{kr} - v_r)}{(u_r + v_r) p_{kr}} i + \frac{p_{kr}}{u_r + v_r} j \quad (6)$$

式(5), (6) 中的同一度和对立度分别说明了方案  $s_k$  关于指标  $e_r$  的趋优程度和趋劣程度. 两式关于同一度和对立度互为对称,且具有相同的差异度,说明了刻划的对立性和一致性. 当  $p_{kr} = u_r$  或  $v_r$  时,差异度最小为零,表示刻划的不确定性最小; 当  $p_{kr} = \sqrt{u_r v_r}$  时,差异度最大为  $2 \sqrt{u_r v_r} / (u_r + v_r)$ , 表示刻划的不确定性最大(但不超过 0.5).

将以上两式统一记为

$$\mu_{\{d_{kr}, \bar{u}_r\}} = a_{kr} i + b_{kr} j + c_{kr} k \quad (7)$$

2) 在比较区间  $[V, U]$  中计算集对  $\{s_k, U\}$  的联系度

$$\mu_{\{s_k, U\}} = a_k + b_k i + c_k j \quad (8)$$

式中  $a_k = \sum_{r=1}^n w_r a_{kr}, b_k = \sum_{r=1}^n w_r b_{kr}, c_k = \sum_{r=1}^n w_r c_{kr}$ .

3)  $s_k$  与最优方案  $U$  的贴近度

$$r_k = \frac{a_k}{a_k + c_k} \quad (9)$$

显然,  $r_k$  最大所对应的方案为最优方案,此时得到的排序为基序.

### 4.3 稳定性分析

当  $i > 0$ , 对  $a_k$  正向修正,表示对方案  $s_k$  接近理想方案  $U$  持肯定意见,且  $i$  越接近 1,修正作用越强. 反之,当  $i < 0$ ,对  $c_k$  正向修正,表示对方案  $s_k$  接近理想方案  $U$  持否定意见,且  $i$  越接近 -1,修正作用越强<sup>[15]</sup>. 因此,可通过分析  $i$  在  $[-1, 1]$  内的变化,对方案排序的稳定性进行分析. 为清楚表达,记  $i$  为  $i$ , 则  $i \in [-1, 1]$ . 假定对于整个方案集,  $i$  相同. 设  $s_k$  基序名次为 1, 记原  $r_k$  为  $r_k^0$ ; 当  $i \neq 0$  时,其值变为  $r_k^i$ . 设基序中有  $r_p^h < r_k^1$ , 则根据式(9)可得

$$c_p a_k - c_k a_p > 0 \tag{10}$$

1) 当  $0 < i < 1$  时,式(9)变为

$$\overline{r}_k^1 = \frac{a_k + b_k i}{(a_k + b_k i) + c_k} \tag{11}$$

为维持基序  $r_p^h < r_k^1$ , 需满足不等式  $c_p a_k - c_k a_p > (c_k b_p - c_p b_k) i$ . 当  $c_k b_p - c_p b_k > 0$  时, 有  $i \in [0, 1]$ ; 当  $c_k b_p - c_p b_k < 0$  时, 有  $0 < i < 1$

$$\min \left\{ \frac{c_p a_k - c_k a_p}{c_k b_p - c_p b_k}, 1 \right\}$$

2) 当  $-1 < i < 0$  时,式(9)变为

$$\overline{r}_k^1 = \frac{a_k}{a_k + (c_k - b_k i)} \tag{12}$$

同理,为维持基序  $r_p^h < r_k^1$ , 有当  $a_k b_p - a_p b_k > 0$  时, 有  $i \in [-1, 0)$ ; 当  $a_k b_p - a_p b_k < 0$  时, 有  $\max \left\{ -1, \frac{c_p a_k - c_k a_p}{a_k b_p - a_p b_k} \right\} < i < 0$ .

取以上两种情况的并集即可得到基序排序  $r_p^h < r_k^1$  的稳定区域. 以上进行的是局部分析, 为了保证全序的稳定性, 只需依次两两比较分析确定  $i$  的范围, 则所有  $i$  取值区间的交集即为排序结果的稳定区域.

#### 4.4 实例研究

拟建一座  $10 \text{万 m}^3/\text{d}$  的污水处理厂, 二级生化处理, 并要求脱氮除磷. 有 4 个方案:  $A^2/O$  法 ( $s_1$ )、三沟式氧化沟 ( $s_2$ )、厌氧-单沟式氧化沟 ( $s_3$ ) 和 SBR 法 ( $s_4$ ). 所选定的评价指标共 8 个, 分别为项目投资、经营成本、占地面积、氮磷去除效果、污泥处理效果、运行稳定性、工艺成熟性以及操作的难易程度. 各方案的具体指标值可参见文献[3].

各指标权重、各方案的联系度及相对贴近度计算结果分别见表 1 和表 2.

表 1 各指标的权重值

Tab. 1 Detailed information of attributes

	AHP 权	熵权	组合权
指标 1	0.472 9	0.007 0	0.007 0
指标 2	0.127 4	0.005 4	0.066 4
指标 3	0.034 1	0.031 7	0.032 9
指标 4	0.011 7	0.139 7	0.075 7
指标 5	0.006 9	0.362 8	0.184 85
指标 6	0.284 4	0.034 5	0.159 45
指标 7	0.020 2	0.279 3	0.149 75
指标 8	0.042 5	0.139 7	0.091 1

表 2 各工艺设计方案的联系度及相对贴近度

Tab. 2 Weights of attributes by AHP and entropy method

工艺方案	同一度系数 $a_k$	差异度系数 $b_k$	对立度系数 $c_k$	相对贴近度 $r_k$
$s_1$	0.483 1	0.003 4	0.513 5	0.484 7
$s_2$	0.559 1	0.014 6	0.426 3	0.567 4
$s_3$	0.568 2	0.018 7	0.413 2	0.579 0
$s_4$	0.380 9	0.000 1	0.619 0	0.380 9

根据表 2 中各方案的相对贴近度  $r_k$ , 得到在相对确定条件下的排序结果为  $r_3 > r_2 > r_1 > r_4$ . 因相对贴近度越大, 其所对应的方案越优, 所以方案优劣顺利分别为  $s_3, s_2, s_1, s_4$ , 即厌氧-单沟式氧化沟、三沟式氧化沟、 $A^2/O$  法、SBR 法, 此为基序. 该排序结果与文献[3]所采用的多层次灰色关联法得到的排序结果基本一致, 只是在第 2 和第 3 位序上存在偏差.

为了保证本文所得结果的稳定性, 以基序为基础进行稳定性分析, 其结果见表 3. 排序相邻方案的稳定性定量分析计算表明, 得该排序结果的稳定区域为  $i \in [-1, 1]$ , 这与  $i$  本身的定义区域是一致的. 也就是说, 不存在扩展序, 通过本方法得到的排序结果是稳定的, 其排序结果优于文献[3]的结果.

表 3 排序稳定性分析

Tab. 3 Connection degrees and relative closeness degrees of each alternative

	$r_4 < r_1$	$r_1 < r_2$	$r_2 < r_3$
$c_p a_k - c_k a_p$	0.103 4	0.081 2	0.011 2
$a_k b_p - a_p b_k$	-0.001 2	-0.005 2	-0.002 2
$c_k b_p - c_p b_k$	-0.002 1	-0.006 0	-0.001 9
$i$ 范围	$[-1, 1]$	$[-1, 1]$	$[-1, 1]$

## 5 结 论

本文引入集对分析理论解决污水处理工艺方案优化的多属性决策问题, 概念清晰, 计算简便, 结果稳定, 便于编程实现. 同时, 为了减少决策者因受专业知识的限制和偏好等主观因素的影响, 充分利用方案所反映的固有信息, 在确定权重时引入熵权修正层次分析法主观权重的思想, 综合考虑主、客观因素的影响, 使得决策结果更趋向合理和科学.

## 参考文献

[1] ELLIS K V, TANG S L. Wastewater treatment optimization

- model for developing world. I: Model development[J]. Journal of Environmental Engineering Division, ASCE, 1991, 117: 501 - 581.
- [2] ELLIS K V, TANG S L. Wastewater treatment optimization model for development world. II: Model testing[J]. Journal of Environmental Engineering Division, ASCE, 1994, 120: 610 - 624.
- [3] ZENG G M, JIANG R, HUANG G H, *et al.* Optimization of wastewater treatment alternatives selection by hierarchy grey relational analysis [J]. Journal of Environmental Management, 2007, 82: 250 - 259.
- [4] 王玲玲, 曾光明, 黄国和, 等. 小区域污水处理的多目标规划设计探讨[J]. 环境工程, 2004, 22(6): 88 - 89.  
WANG L L, ZENG G M, HUANG G H, *et al.* Study on multi-objective programming for wastewater treatment in small region [J]. Environmental Engineering, 2004, 22(6): 88 - 89. (In Chinese)
- [5] 凌 猛, 杭世珺. 城市污水处理厂工艺方案模糊决策方法的应用[J]. 给水排水, 1998, 24(3): 6 - 9.  
LIN M, HANG S J. The application of fuzzy decision - making approach in the process alternatives of municipal wastewater treatment plant[J]. Water and Wastewater Engineering, 1998, 24(3): 6 - 9. (In Chinese)
- [6] 赵克勤, 宣爱理. 集对论——一种新的不确定性理论、方法与应用[J]. 系统工程, 1996, 14(1): 18 - 23.  
ZHAO K Q, XUAN A L. Application of a novel uncertainty theory and method —— Set pair analysis[J]. Systems Engineering, 1996, 14(1): 18 - 23. (In Chinese)
- [7] JIANG Y L, XU C F, YAO Y, *et al.* A new approach for representing and processing uncertainty knowledge[C]// The 2003 IEEE International Conference on Information Reuse and Integration. USA, 2003: 466 - 470.
- [8] ANNELIES J B, HEINZ A P, RALF O, *et al.* Indicators for the sustainability assessment of wastewater treatment systems [J]. Urban Water, 2002(4): 153 - 161.
- [9] 王国平, 王洪光. 集对分析用于污水处理厂的综合评价[J]. 江苏环境科技, 2002, 15(1): 16 - 18.  
WANG G P, WANG H G. Comprehensive assessment in sewage treatment plant by integration and contrast analysis[J]. Jiangsu Environmental Science and Technology, 2002, 15(1): 16 - 18. (In Chinese)
- [10] 李凡修, 梅平, 陈武. 多元集对模型在污水处理厂改造决策中应用[J]. 环境科学与技术, 2004, 27(6): 92 - 94.  
LI F X, MEI P, CHEN W. Set pair analysis method with multi-factor connection number for planning of WTP reformation[J]. Environmental Science and Technology, 2004, 27(6): 92 - 94. (In Chinese)
- [11] 李香云, 刘理才. 一种集成的科技实力综合评价方法[J]. 科学研究, 2004, 22(6): 85 - 87.  
LI X Y, LIU L C. A literature review on the study and evaluation of scientific and technological strength[J]. Studies in Science of Science, 2004, 22(6): 85 - 87. (In Chinese)
- [12] 张佳林, 尉晓君. 基于 AHP 法的地下水综合综合评价[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2006, 33(5): 136 - 140.  
ZHANG J L, WEI X J. Comprehensive assessment of groundwater based on AHP[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2006, 33(5): 136 - 140. (In Chinese)
- [13] 方创琳, 毛汉英. 区域发展规划指标体系建立方法探讨[J]. 地理学报, 1999, 54(5): 410 - 419.  
FANG C L, MAO H Y. A system of indicators for regional development planning[J]. Acta Geographica Sinica, 1999, 54(5): 410 - 419. (In Chinese)
- [14] 张文泉, 张世英, 江立勤. 基于熵的决策评价模型及应用[J]. 系统工程学报, 1995, 10(3): 69 - 75.  
ZHANG W Q, ZHANG S Y, JIANG L Q. Application of decision - making model based on entropy [J]. Journal of Systems Engineering, 1995, 10(3): 69 - 75. (In Chinese)
- [15] 张斌. 多目标系统决策的模糊集对分析方法[J]. 系统工程理论与实践, 1997(12): 108 - 114.  
ZHANG B. Fuzzy set pair analysis for multi-objective system decision-making[J]. Systems Engineering - Theory & Practice, 1997(12): 108 - 114. (In Chinese)