

胡习邦, 许振成, 王后能, 等. 基于模糊信息熵的流域水污染系统建模与控制[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(4): 184-188. Hu Xi-bang, Xu Zhen-cheng, Wang Hou-neng, et al. Watershed water pollution control system based on fuzzy information entropy[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 35(4): 184-188.

基于模糊信息熵的流域水污染系统建模与控制

胡习邦^{1,2,4}, 许振成^{1,2*}, 王后能³, 王俊能², 张修玉^{1,2}

(1.中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640; 2.环境保护部华南环境科学研究所, 广东 广州 510655; 3.武汉工程大学, 湖北 武汉 430205; 4.中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 我国水污染局部得到了改善,但呈现流域污染蔓延的趋势。运用系统控制论构建流域水污染控制系统,突破了传统的“就水论水、见污治污”的还原论水污染控制方法,综合考虑总体控制战略决策(S)反馈系统以及社会发展布局(L)、经济发展模式(E)、居民生活方式(C)和治理工程措施(T)控制系统等多种控制措施及因素,通过输出量与参考给定输入的比较,采用模糊信息熵方法进行了定量分析方法的探讨。

关键词 流域; 模糊信息熵; 系统控制; 水污染

中图分类号: X506 文献标志码: A doi: 10.3969/j.issn.1003-6504.2012.04.040 文章编号: 1003-6504(2012)04-0184-05

Watershed Water Pollution Control System Based on Fuzzy Information Entropy

HU Xi-bang^{1,2,4}, XU Zhen-cheng^{1,2*}, WANG Hou-neng³,
WANG Jun-neng², ZHANG Xiu-yu^{1,2}

(1. Geochemistry Institute of Guangzhou, CAS, Guangzhou 510640, China;

2. South China Institute of Environmental Science, MEP, Guangzhou 510655, China;

3. Wuhan University of Technology, Wuhan 430205, China;

4. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Water pollution has been partially improved in China, but the trend of watershed water pollution is increasing presently. System control theory was used to build a watershed water pollution control system model, to solve the problem of just controlling the wastewater and the environment separately, which is different from the traditional water pollution control methods. The watershed water pollution controllers consist of the overall control of strategy and decision-making(S), as well as the feedback system of social development strategy (L), the economic development model (E), the way of life(C) and governance engineering measures(T) control system. The water pollution control system model is assessed by fuzzy information entropy, and is showed that it's an available quantitative technical approach for building a water pollution control system.

Key words: watershed; fuzzy information entropy; system control; water pollution

据 2008 年的全国环境公报^[1], 全国地表水污染依然严重, 影响流域水环境的污染事故频繁。我国当前面临着水质性缺水、水量性缺水与工程性缺水的复合性水资源紧缺严重态势在不断加剧。尤其是在我国水质黑臭问题(氧失衡)尚未解决, 富营养化问题(氮磷等失衡)已经到来, POPs 问题同时已经显露, 这些在发达国家分属不同发展阶段的水质问题在我国几乎同时出现, 明显加剧了我国水环境问题的复合态势,

加剧了解决问题的难度^[2]。因此, 改善水环境, 特别是对流域水污染进行控制显得十分迫切。本文将控制论等成熟方法引入到流域水污染系统的控制中来, 初步进行了定量分析的探讨。

1 流域水污染控制系统模型

控制论、系统论、信息论自 20 世纪 50 年代产生以来, 在工程控制、生物控制、经济控制、人口控制等

《环境科学与技术》编辑部 (网址) <http://fjks.chinajournal.net.cn/> (电话) 027-87643502 (电子信箱) hjkyxj@126.com

收稿日期 2011-06-17, 修回 2011-08-01

基金项目 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07011)

作者简介 胡习邦(1981-) 男, 博士研究生 (电子信箱) hooyan@126.com; * 通讯作者, 研究员, 主要从事环境科学与环境工程方面研究 (电子信箱) xzc@scies.com.cn。

多个学科领域开展了深入的研究,对各个领域的控制问题得到了很好的解决^[3-10]。马勇、彭永臻、姚重华等^[11-15]研究了城镇污水处理厂控制系统的控制问题,于海霞等^[16]以昆山市水污染控制为例提出了系统集成的“三级控制,三级标准”区域水污染控制模式,提出了从源头控制、污水处理厂建设到尾水导流的全过程水污染控制对策,但仍缺乏在流域尺度上的水污染控制系统定量研究。笔者自 1997 年“淮河式的达标”迫使我们国家环境战略进行思索,提出了以“主动引导发展的国家环境战略”取代了“被动的污染防治战略”的新观点。2003 年,形成了主动引导发展国家环境战略的总体框架^[2]。2003-2005 年,将上述战略思路成功应用于“珠江三角洲环境保护规划”,2006 年形成了“主动有序的使用生态环境、引导经济社会和谐发展”的完整体系,并应用于流域规划等领域。本文将主动引导发展国家环境战略总体框架,引入到流域水环境污染控制系统模型,实现从理论到量化的研究。

东江是珠江三大水系之一,发源于江西省赣州市寻邬县,干流全长 562 km,其中广东境内 435 km。东江水环境呈现出典型的“高经济密度、高发展速度、高功能水质要求及高强度控污”特征,展开了东江流域水污染控制与水生态系统恢复技术与综合示范项目(下称“东江项目”)研究。东江项目实施从社会发展规划优化、经济产业结构升级、工程控源减排、居民生活方式调整等 4 大措施的流域水污染系统控制战略,确保高功能河流在科学发展过程中持续改善生态环境质量。为此,本文在结合控制论、系统论及水污染理论基础运用东江项目流域水环境污染控制系统框架,通过给定输入参考值,综合考虑总体控制战略决策(S)反馈系统以及社会发展规划(L)、经济发展模式(E)、居民生活方式(C)和治理工程措施(T)等方面的影响因素,共同构建成 SLECT 流域水污染控制系统模型,见图 1。

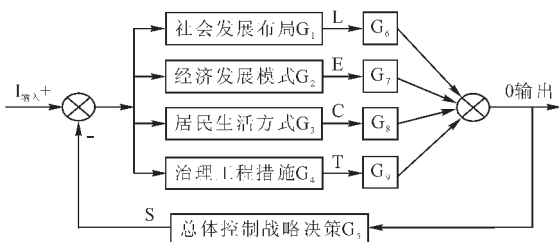


图1 流域水污染控制系统模型

Fig.1 Control system model of watershed water pollution

假定 t 为时间流,图 1 中流域水环境污染控制系统中总体控制战略决策(S)反馈系统以及社会发展规划(L)、经济发展模式(E)、居民生活方式(C)和治理

工程措施(T)表达式的维数不一致,所以需将维数统一后进行运算,为了解决这个问题引入了传递函数 G_1, G_2, G_3 和 G_4 与传递函数转换矩阵 G_6, G_7, G_8 和 G_9 , 最终将输出 $O(t)$ 为三维行向量组,各传递函数与传递函数转换矩阵及各个控制环节的表达式详细介绍如下。

社会发展布局过程传递函数 G_1 、转换矩阵 G_6 ,在图中总目标 $I(t)$,建立社会发展布局表达式 $L(t)$ 即:

$$L(t)=G_6 \cdot \{G_1 \cdot [I(t)-G_5 \cdot O(t)]\} \quad (1)$$

其中 $L(t)$ 为三维列向量组 $L(t)=[L_{11}(t) \ L_{12}(t) \ L_{13}(t)]^T$, G_1, G_6 分别为 $3 \times 6, 3 \times 3$ 的矩阵;

经济发展过程传递函数 G_2 、转换矩阵 G_7 ,建立经济发展模式表达式 $E(t)$ 即:

$$E(t)=G_7 \cdot \{G_2 \cdot [I(t)-G_5 \cdot O(t)]\} \quad (2)$$

其中 $E(t)$ 为四维列向量组 $E(t)=[E_{21}(t) \ E_{22}(t) \ E_{23}(t) \ E_{24}(t)]^T$, G_2, G_7 分别为 $4 \times 6, 3 \times 3$ 的矩阵;

居民生活方式过程传递函数 G_3 、转换矩阵 G_8 ,建立居民生活方式表达式 $C(t)$ 即:

$$C(t)=G_8 \cdot \{G_3 \cdot [I(t)-G_5 \cdot O(t)]\} \quad (3)$$

其中 $C(t)$ 为三维列向量组 $C(t)=[C_{31}(t) \ C_{32}(t) \ C_{33}(t)]^T$, G_3, G_8 分别为 $3 \times 6, 3 \times 3$ 的矩阵;

治理工程措施过程传递函数 G_4 、转换矩阵 G_9 ,建立治理工程措施表达式 $T(t)$ 即:

$$T(t)=G_9 \cdot \{G_4 \cdot [I(t)-G_5 \cdot O(t)]\} \quad (4)$$

其中 $T(t)$ 为五维列向量组 $T(t)=[T_{41}(t) \ T_{42}(t) \ T_{43}(t) \ T_{44}(t) \ T_{45}(t)]^T$, G_4, G_9 分别为 $5 \times 6, 3 \times 3$ 的矩阵;

总体控制战略决策传递函数 G_5 ,在图中对输出函数 $O(t)$ 产生反馈作用,产生总体控制战略决策 $S(t)$ 即:

$$S(t)=G_5 \cdot O(t) \quad (5)$$

其中 $S(t)$ 为六维列向量组 $S(t)=[S_{51}(t) \ S_{52}(t) \ S_{53}(t) \ S_{54}(t) \ S_{55}(t) \ S_{56}(t)]^T$ 。

对于整个闭环系统传递函数 G 而言,流域水环境污染控制系统的输出 $O(t)$ 与输入 $I(t)$ 的关系为:

$$O(t)=G \cdot I(t)=\left[\frac{G_6 \cdot G_1+G_7 \cdot G_2+G_8 \cdot G_3+G_9 \cdot G_4}{1+(G_6 \cdot G_1+G_7 \cdot G_2+G_8 \cdot G_3+G_9 \cdot G_4)G_5}\right] \cdot I(t) \quad (6)$$

2 模糊信息熵

流域水污染控制系统中, SLECT 模型是一个由社会发展规划(L)、经济发展模式(E)、居民生活方式(C)和治理工程措施(T)控制系统复合而构成的多维度的复杂系统。每个污染控制子系统,都对流域的水环境改善和污染控制起到重要的作用,共同作用构成一个密闭的控制系统,一方面各个水污染控制子系统对整个流域水环境污染防治起到促进作用;另一方面

总体控制战略决策对整个流域水环境的控制和改善状况起到反馈作用,通过这种反馈作用不断地调整优化与改进各个水污染控制子系统,从而使流域水环境的污染控制能力达到参考输入的总体目标要求。然而,对于这样一个复杂的控制系统来说,流域水环境的污染控制过程是一个不确定性、时滞性的系统。该过程控制由一系列不确定的人工或信息系统执行,每次执行受到人员、信息、资源和环境等内外部不确定性因素的影响,执行特定的环境管理任务,控制方式类似于模糊控制系统^[17]。

2.1 模糊控制系统的建立

本节运用模糊集理论^[18]研究污染控制系统的作用情况,首先定义了 5 个基本论域。

论域一 水环境保护战略集合 $U_1 = \{ \text{保障流域饮用水安全,分区控制、分类指导,保水先保地、用水保干流,节水优先、源头控制,综合治理控制工程体系,建立流域系统控制框架} \}$,该 U_1 集合元素个数 n_1 为 6 个;

论域二 社会发展布局集合 $U_2 = \{ \text{规范使用土地,引导发展布局,制定供取水排纳水河系规划} \}$,该 U_2 集合元素个数 n_2 为 3 个;

论域三 经济发展模式集合 $U_3 = \{ \text{制定指标体系,引导经济转型,规定污染物量允许排放量,促进产业生态化} \}$,该 U_3 集合元素个数 n_3 为 4 个;

论域四 居民生活方式集合 $U_4 = \{ \text{提高居民素质,增进社会公平,合理负担环境支付} \}$,该 U_4 集合元素个数 n_4 为 3 个;

论域五 工程治理措施集合 $U_5 = \{ \text{城镇污水处理系统,产业点源控制系统,面源控制系统,河道生态修复系统,生态调水与水回用系统} \}$,该 U_5 集合元素个数 n_5 为 5 个。

由于不同的流域系统或者发展区域在不同的发展时期对各个控制系统的需求层次要求不一致,即水环境保护战略、社会发展布局、经济发展模式、居民生活方式和工程治理措施在流域水污染治理中的作用程度是不一样的。因此,定义下面 5 个模糊集合。

模糊集 S 表示不同水环境战略发挥作用的程度,其隶属度为 $\mu_f(x)$ ($x \in U_1$);

模糊集 L 表示不同社会发展模式发挥作用的程度,其隶属度为 $\mu_s(x)$ ($x \in U_2$);

模糊集 E 表示不同经济发展模式发挥作用的程度,其隶属度为 $\mu_e(x)$ ($x \in U_3$);

模糊集 C 表示不同居民生活方式发挥作用的程度,其隶属度为 $\mu_c(x)$ ($x \in U_4$);

模糊集 T 表示不同治理工程措施发挥作用的程

度,其隶属度为 $\mu_t(x)$ ($x \in U_5$)。

假定流域水环境污染控制系统中的水环境保护战略、社会发展布局、经济发展模式、居民生活方式和工程治理措施等 5 个子控制系统的分布状态已经确定,其中某种水环境保护战略 i ,某种社会发展布局 j ,某种经济发展模式 k ,某种居民生活方式 l ,某种工程治理措施 m 在整个流域水环境污染控制系统中污染物控制总量的比重为 P_{ijklm} ($i=1, 2, 3, \dots, n_1, j=1, 2, 3, \dots, n_2, k=1, 2, 3, \dots, n_3, l=1, 2, 3, \dots, n_4, m=1, 2, 3, \dots, n_5$),其中 P_{ijklm} 满足 $\sum_i P_i = 1$ 。根据以上模糊集的建立,便可以将流域水环境污染控制系统表达为一个模糊系统,相应的模糊输出 $\overline{O}(t)$ 可表达模糊输入 $\overline{I}(t)$ 的函数:

$$\overline{O}(t) = \overline{G} \cdot \overline{I}(t) = \left[\frac{G_6 \cdot G_1 + G_7 \cdot G_2 + G_8 \cdot G_3 + G_9 \cdot G_4}{1 + (G_6 \cdot G_1 + G_7 \cdot G_2 + G_8 \cdot G_3 + G_9 \cdot G_4) G_5} \right] \cdot \overline{I}(t) \quad (7)$$

2.2 模糊信息熵

信息熵由香农和维纳创立,而模糊信息熵的表达方式目前主要有 2 种形式,一种是基于香农信息熵^[10,19],其表达式为:

$$H(x) = -\frac{1}{n \ln(2)} \cdot \sum_{i=1}^n \{ u(x_i) \cdot [\ln u(x_i)] - [1 - u(x_i)] \cdot \ln [1 - u(x_i)] \} \quad (8)$$

其中 $u(x_i)$ 表示隶属度函数;

另一种是基于扎德(L.A. Zadeh)模糊理论^[18]建立的,其表达式为:

$$H(x) = -\frac{1}{\ln(n)} \cdot \sum_{i=1}^n u(x_i) P_i \cdot \ln(P_i) \quad (9)$$

其中 P_i 表示概率,或者百分比情况, $u(x_i)$ 表示隶属度函数。本文采取的即是后一种。

Sahidu 等利用多目标信息熵研究了交通领域的应用^[20]。本文结合扎德(L.A. Zadeh)模糊信息熵提出流域水污染控制系统的水环境保护战略结构模糊信息熵、社会发展布局结构模糊信息熵、经济发展模式结构模糊信息熵、居民生活方式结构模糊信息熵和工程治理措施结构模糊信息熵,见式(10)。

考虑到水环境保护战略、社会发展布局、经济发展模式、居民生活方式和工程治理措施的重要程度存在差异,所以对其各个熵分别赋予一个权重系数 $\alpha_s, \alpha_L, \alpha_E, \alpha_C, \alpha_T \in (0, 1)$,且 $\alpha_s + \alpha_L + \alpha_E + \alpha_C + \alpha_T = 1$ 。该权重系数可以通过专家打分的方式获取,也可以根据熵的关系式获取,见式(11)。

$$\begin{cases}
 H_S(x) = -\frac{1}{\ln(n_1)} \cdot \sum_{i=1}^{n_1} u_S(x_i) \cdot \left(\sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} \sum_{l=1}^{n_4} \sum_{m=1}^{n_5} P_{ijklm} \right) \cdot \ln \left(\sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} \sum_{l=1}^{n_4} \sum_{m=1}^{n_5} P_{ijklm} \right) \\
 H_L(x) = -\frac{1}{\ln(n_2)} \cdot \sum_{j=1}^{n_2} u_L(x_j) \cdot \left(\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{k=1}^{n_3} \sum_{l=1}^{n_4} \sum_{m=1}^{n_5} P_{ijklm} \right) \cdot \ln \left(\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{k=1}^{n_3} \sum_{l=1}^{n_4} \sum_{m=1}^{n_5} P_{ijklm} \right) \\
 H_E(x) = -\frac{1}{\ln(n_3)} \cdot \sum_{k=1}^{n_3} u_E(x_k) \cdot \left(\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{l=1}^{n_4} \sum_{m=1}^{n_5} P_{ijklm} \right) \cdot \ln \left(\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{l=1}^{n_4} \sum_{m=1}^{n_5} P_{ijklm} \right) \\
 H_C(x) = -\frac{1}{\ln(n_4)} \cdot \sum_{l=1}^{n_4} u_C(x_l) \cdot \left(\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} \sum_{m=1}^{n_5} P_{ijklm} \right) \cdot \ln \left(\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} \sum_{m=1}^{n_5} P_{ijklm} \right) \\
 H_T(x) = -\frac{1}{\ln(n_5)} \cdot \sum_{m=1}^{n_5} u_T(x_m) \cdot \left(\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} \sum_{l=1}^{n_4} P_{ijklm} \right) \cdot \ln \left(\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} \sum_{l=1}^{n_4} P_{ijklm} \right)
 \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases}
 \alpha_S = \frac{1 - H_S(x)}{5 - [H_S(x) + H_L(x) + H_E(x) + H_C(x) + H_T(x)]} \\
 \alpha_L = \frac{1 - H_L(x)}{5 - [H_S(x) + H_L(x) + H_E(x) + H_C(x) + H_T(x)]} \\
 \alpha_E = \frac{1 - H_E(x)}{5 - [H_S(x) + H_L(x) + H_E(x) + H_C(x) + H_T(x)]} \\
 \alpha_C = \frac{1 - H_C(x)}{5 - [H_S(x) + H_L(x) + H_E(x) + H_C(x) + H_T(x)]} \\
 \alpha_T = \frac{1 - H_T(x)}{5 - [H_S(x) + H_L(x) + H_E(x) + H_C(x) + H_T(x)]}
 \end{cases} \quad (11)$$

根据以上公式即可得到整个流域水污染控制系统的模糊信息熵的表达式,见公式(12)。

$$E_p = \alpha_S \cdot H_S(x) + \alpha_L \cdot H_L(x) + \alpha_E \cdot H_E(x) + \alpha_C \cdot H_C(x) + \alpha_T \cdot H_T(x) \quad (12)$$

3 水污染系统控制能力度量

3.1 流域水环境污染控制系统控制能力

在流域水环境污染控制系统中,按照实时性不同,可将控制系统划分为在线控制与离线控制 2 种类型。张玉华等将环境管理过程控制能力分为 2 种不同的度量形式^[17],本文参考其度量形式与实时性将流域水环境污染控制系统的控制能力也分为 2 种,即在线的污染系统控制能力和离线的污染系统控制能力。

在线的污染系统控制能力,其信息的采集和水污染控制是实时的,并且是时间 t 的同步变量,假定系统的控制能力为 C_p ,则有:

$$\begin{aligned}
 C_p &= G = \frac{O(t)}{I(t)} \\
 &= \left[\frac{G_6 \cdot G_1 + G_7 \cdot G_2 + G_8 \cdot G_3 + G_9 \cdot G_4}{1 + (G_6 \cdot G_1 + G_7 \cdot G_2 + G_8 \cdot G_3 + G_9 \cdot G_4)G_5} \right] \quad (13)
 \end{aligned}$$

C_p 值的大小反映了任一时刻水污染控制系统输出与总体目标输入函数的关系, C_p 值越接近 1, 则表明该污染系统控制能力越强。如果 C_p 值大于 1, 则说明流域水污染控制系统措施取得的控制效果超过设定目标值。

离线污染系统控制能力可采用拉氏变换来表达^[17],即:

$$C_p = \sum_{k=0}^{+\infty} \frac{O(t)}{I(t)} e^{-kst} \quad (14)$$

以上这两种不同类型的流域水污染系统控制能力,都表达了所控制的流域水环境总体特征目标和期望目标之间的接近程度,也就是流域水污染系统控制能力的强弱。

3.2 模糊信息熵控制能力度量

在解决流域水环境污染控制系统中的不确定因素,采用模糊信息熵将流域水污染控制系统将其实现从定性研究实现定量研究的目标。根据流域水环境污染控制系统模型,各个水污染控制子系统求得传递函数和子系统的模糊信息熵,则整个系统的模糊信息熵的表达式为:

$$\begin{aligned}
 E_o(t) = \overline{G} \cdot E_I(t) &= \left[\frac{G_6 \cdot G_1 + G_7 \cdot G_2 + G_8 \cdot G_3 + G_9 \cdot G_4}{1 + (G_6 \cdot G_1 + G_7 \cdot G_2 + G_8 \cdot G_3 + G_9 \cdot G_4)G_5} \right] \\
 &\cdot [\alpha_S \cdot H_S(x) + \alpha_L \cdot H_L(x) + \alpha_E \cdot H_E(x) + \alpha_C \cdot H_C(x) + \alpha_T \cdot H_T(x)] \quad (15)
 \end{aligned}$$

4 结论

本文突破了传统还原论方法的水污染控制观念,单纯的“就水论水,见污治污”;采用系统控制观念,采取整体保护流域水环境战略,并运用主动引导发展国家环境战略综合考虑了社会发展布局、经济发展模式、居民生活方式和工程治理措施等 4 个影响因素,构建了流域水污染控制理论框架,建立了流域水环境污染控制模型,并采用模糊信息熵对水环境污染系统控制能力进行了评估,实现了流域系统的污染控制的定量化,使得环境战略框架更具有操作性,同时还解决了流域水环境污染控制系统的不确定因素所导致的流域水污染系统难以克服的全面系统控制的矛盾。

[参考文献]

[1] 环境保护部. 2008 年中国环境状况公报[EB/OL]. <http://www.mep.gov.cn/plan/zkgb/2008zkgb/2010-2-22>.
MEP. China Environment Report(2008a)[EB/OL]. <http://www.mep.gov.cn/plan/zkgb/2008zkgb/2010-2-22>. (in Chi-

- nese)
- [2] 许振成. 中国环境管理的战略创新[J]. 生态环境学报, 2009, 18(3): 1189-1193.
Xu Zhen-cheng. Strategic innovation of environmental management in China[J]. Ecology and Environmental Science, 2009, 18(3): 1189-1193.(in Chinese)
- [3] Norbert Wiener. Cybernetics[M]. MIT Press, 1965.
- [4] 钱学森. 工程控制论[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2007.
Qian Xue-sen. Engineering Control[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2007.(in Chinese)
- [5] 汪云九, 顾凡及. 生物控制论研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
Wang Yun-jiu, Gu Fan-ji. Study on Biological Cybernetics Method[M]. Beijing: Science Press, 1986.(in Chinese)
- [6] 王晶, 陆宁云. 经济控制论: 理论、应用与 MATLAB 仿真[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
Wang Jing, Lu Ning-yun. Economic Cybernetics: Theory, Application and MATLAB Simulation[M]. Beijing: Science Press, 2008.(in Chinese)
- [7] 宋健, 于景元. 人口控制论[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
Song Jian, Yu Jing-yuan. Population Cybernetics[M]. Beijing: Science Press, 1985.(in Chinese)
- [8] 路德维希·冯·贝塔朗菲. 一般系统论基础发展和应用[M]. 北京: 中国社会科学出版社, 1987.
Ludwig Von Bertalanffy. Development and Application of General Systems Theory[M]. Beijing: Science Press, 1987.(in Chinese)
- [9] 汪应洛. 系统工程学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
Wang Ying-luo. System Engineering[M]. Beijing: High Education Press, 2007.(in Chinese)
- [10] Shannon C E. A mathematical theory of communication[J]. The Bell System Technical Journal, 1948, 27: 379-423, 623-656.
- [11] Tong R M, Beck M B Latten. A fuzzy control of the activated sludge wastewater treatment process[J]. Automatica, 1980, 16(6): 695-701.
- [12] Fu Chunsheng, Poch M. Fuzzy model and decision of COD control for an activated sludge process[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1998, 93: 281-292.
- [13] 马勇. 城市污水处理系统运行及过程控制[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 330-350.
Ma Yong. Urban Wastewater Treatment System Operation and Process Control[M]. Beijing: Science Press, 2007.(in Chinese)
- [14] 姚重华. 环境工程仿真与控制[M]. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 2008: 252-275.
Yao Chong-hua. Environmental Engineering Simulation and Control[M]. 2nd Edition. Beijing: High Education Press, 2008: 252-275.(in Chinese)
- [15] 彭永臻, 高景峰, 王淑莹. 模糊控制在污水生物处理系统中的应用[J]. 环境科学学报, 2001, 16: 143-148.
Peng Yong-zheng, Gao Jing-feng, Wang Shu-ying. Fuzzy control of wastewater treatment process[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2001, 16: 143-148.(in Chinese)
- [16] 于海霞, 沈莉莉, 左玉辉. 昆山市水污染控制研究[J]. 环境科学与技术, 2005, 28(5): 28-29.
Yu Hai-xia, Shen Li-li, Zuo Yu-hui. Water pollution control in Kunshan City[J]. Environmental Science & Technology, 2005, 28(5): 28-29.(in Chinese)
- [17] 张玉华, 蔡政英, 梅晚霞. 基于模糊信息熵的环境管理过程控制能力[J]. 管理学报, 2007, 14(6): 743-747.
Zhang Yu-hua, Cai Zheng-ying, Mei Wan-xia. Fuzzy information entropy based control capability of environment management process[J]. Chinese Journal of Management, 2007, 14(6): 743-747.(in Chinese)
- [18] 水本雅晴. 模糊数学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 76-85.
Masaharu Mizumoto. Fuzzy Mathematical and Its Application[M]. Beijing: Science Press, 1986: 76-85.(in Chinese)
- [19] 杨松林. 工程模糊论方法及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996: 54-70.
Yang Song-lin. Engineering Fuzzy Mathematical Method and Application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1996: 54-70.(in Chinese)
- [20] Islam S, Roy T K. A new fuzzy multi-objective programming entropy based geometric programming and its application of transportation problems[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 173(2): 387-404.