

可变模糊集理论研究进展及其在水科学中的应用

王文川¹,徐冬梅^{1,2},陈守煜²,邱林¹

(1. 华北水利水电学院水利学院,河南 郑州 450011; 2. 大连理工大学建设工程学部,辽宁 大连 116085)

摘要:介绍了可变模糊集理论的哲学基础及工程背景,简要描述了其相关概念及其理论方面的突破与进展,重点阐述了唯物辩证法三大基本规律——对立统一、质量互变与否定之否定定理的数学表达的研究情况。以此理论为基础建立的可变模糊聚类、模式识别、优选、评价的理论与模型,是可变模糊集通向实际应用的桥梁,详细评述了其在水资源评价、水质评价、水库调度与防洪、灾情评价、径流预报、农业水利工程等领域的应用。

关键词:可变模糊集;水资源;灾情评价;对立统一;质量互变;否定之否定

中图分类号: O159 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2012)05-0089-06

Research advances and applications in water science of variable fuzzy set theory//WANG Wenchuan¹, XU Dongmei^{1,2}, CHEN Shouyu², QIU Lin¹ (1. Faculty of Water Conservancy Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China; 2. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116085, China)

Abstract: This paper includes an introduction of the philosophical foundation and engineering background of the variable fuzzy set theory, and a general review of the theory's relevant concepts, breakthroughs, and progress. Besides that, it is mainly focused on the interpretation of research on the mathematical functions related to the three basic laws of the materialist dialectics: unity of opposites, mutual change of quality and quantity, and negation of negation. Based on variable fuzzy set theory, theories and models of variable fuzzy clustering, variable fuzzy pattern recognition, variable fuzzy optimal selection, and variable fuzzy evaluation were established, with the result of a variable fuzzy set that can be applied in practice. This paper also elaborates on these applications in water resources, water quality evaluation, reservoir operation and flood control, disaster evaluation, runoff forecasting, and agricultural engineering.

Key words: variable fuzzy set; water resources; disaster evaluation; unity of opposites; mutual change of quality and quantity; negation of negation

在自然界和现实物质世界的演变进化过程中,有一种普遍存在的中介过渡现象,就像一个人从出生到死亡,一般都要经历幼、少、青、中、老等中介过渡阶段,这些中介过渡概念即为模糊概念^[1]。1965年 Zadeh 在其开创性的研究中提出的模糊集合概念^[2],正是对中介过渡现象所反映出的模糊事物、现象、概念的科学描述,是对康托(Cantor)普通集合论的突破,并由此发展为一门新的数学学科——模糊集合论,是科学研究思维与方法论的进步与完善,也是科学向更高层次发展的一个标志^[2-3]。

模糊概念在时间、空间、条件上又常具有动态可变性,静态的模糊集合理论难以描述这种模糊概念与现象的动态可变性。应用静态的模糊集合论去研究

动态的模糊现象与概念,存在研究理论与研究对象之间相悖的矛盾,这是模糊集合论的一大缺陷^[4]。

在实际工程中,一些水文现象与概念,如汛期、干旱、洪涝等不仅具有动态可变性,而且具有模糊性^[5],水资源利用的可持续性与不可持续性、水资源承载能力的强弱概念,也都是可变的模糊概念^[3],为此需要新的数学理论作为基础,这就是可变模糊集理论提出的工程实际背景^[6]。

可变模糊集理论研究与其应用是相互联系、相互促进的,实际的工程应用需求促进了其理论的提出与发展,其理论发展又为扩展其应用领域提供了新的契机。为此,本文对可变模糊集理论从提出至今的理论研究成果及其在水资源评价、水质评价、水

库调度与防洪、灾情评价、径流预报、农业水利工程等领域的应用进展进行综述, 以期拓展其进一步的研究与应用提供有益的参考。

1 可变模糊集理论研究

1.1 重要定义

在集合论中, 可用特征函数表示一个元素是不是属于一个集合。

设 U 是全体讨论的对象或论域, A 是 U 的一个普通子集, A 的特征函数 χ_A 定义^[6]为

$$\chi_A: U \rightarrow \{0, 1\} \quad x \mapsto \chi_A(x) \in \{0, 1\} \quad (1)$$

$$\chi_A(x) = \begin{cases} 1 & x \in A \\ 0 & x \notin A \end{cases} \quad (2)$$

在模糊集合论中, 特征函数拓展为隶属函数^[7]:

$$\chi_A: U \rightarrow [0, 1] \quad x \mapsto \chi_A(x) \in [0, 1] \quad (3)$$

Zadeh 的模糊概念在数学思维上有重要意义, 其理论缺憾是不能描述模糊现象、事件、概念的基本特点——中介过渡的动态性^[3]。为了表述中介过渡的动态性, 文献^[1, 6]通过运用自然辩证法中的关于运动的矛盾性原理, 提出表述现象动态变化的概念为: 现象 u 具有吸引性质 $\tilde{A}$ 的相对隶属度为 $\mu_{\tilde{A}}(u)$, 具有 $\tilde{A}$ 的对立排斥性质 $\tilde{A}_c$ 的相对隶属度为 $\mu_{\tilde{A}_c}(u)$, $\mu_{\tilde{A}}(u), \mu_{\tilde{A}_c}(u) \in [0, 1]$, 且 $\mu_{\tilde{A}}(u) + \mu_{\tilde{A}_c}(u) = 1$ 。当 $\mu_{\tilde{A}}(u) > \mu_{\tilde{A}_c}(u)$ 时, 现象 u 以表示吸引性质 $\tilde{A}$ 为主要特性, 排斥性质 $\tilde{A}_c$ 为次要特性; 当 $\mu_{\tilde{A}}(u) < \mu_{\tilde{A}_c}(u)$ 时则相反, 当现象 u 从 $\mu_{\tilde{A}}(u) > \mu_{\tilde{A}_c}(u)$ 转化为 $\mu_{\tilde{A}}(u) < \mu_{\tilde{A}_c}(u)$ 或相反转化时, 必通过动态平衡界或者渐变式质变界, 即 $\mu_{\tilde{A}}(u) = \mu_{\tilde{A}_c}(u)$ 。此概念应用对立模糊集定义可描述如下^[8]:

设论域 U 中的任意元素 u 的对立模糊概念(现象、事物)或对立模糊属性, 以 $\tilde{A}$ 与 $\tilde{A}_c$ 表示。在参考连续统^[9]区间 $[1, 0]$ (对 $\tilde{A}$) 与 $[0, 1]$ (对 $\tilde{A}_c$) 的任一点上, 对立模糊属性的相对隶属度分别为 $\mu_{\tilde{A}}(u)$ 和 $\mu_{\tilde{A}_c}(u)$, 且

$$\mu_{\tilde{A}}(u) + \mu_{\tilde{A}_c}(u) = 1 \quad (0 \leq \mu_{\tilde{A}}(u) \leq 1, 0 \leq \mu_{\tilde{A}_c}(u) \leq 1) \quad (4)$$

$$\tilde{A} = \{u, \mu_{\tilde{A}}(u), \mu_{\tilde{A}_c}(u) \mid u \in U\} \quad (5)$$

$\tilde{A}$ 称为 u 的对立模糊集。左极点 $p_1: \mu_{\tilde{A}}(u) = 1, \mu_{\tilde{A}_c}(u) = 0$; 右极点 $p_r: \mu_{\tilde{A}}(u) = 0, \mu_{\tilde{A}_c}(u) = 1$, 如图 1 所示, p_m 为连续统区间 $[1, 0]$ (对 $\mu_{\tilde{A}}(u)$) 的渐变式质变点, 即 $\mu_{\tilde{A}}(u) = \mu_{\tilde{A}_c}(u) = 0.5$ 。

文献^[1, 3, 6, 8]给出了相对隶属函数、相对差异函数、相对比例函数的定义。

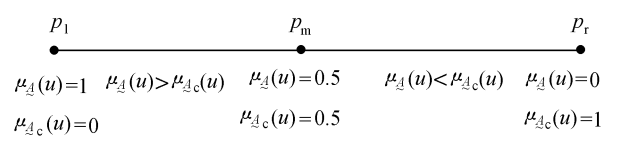


图 1 对立模糊集 $\tilde{A}$ 的示意图

可变模糊集合定义^[3, 10]:

$$\tilde{V} = \{ (u, D) \mid u \in U, D_A(u) = \mu_{\tilde{A}}(u) - \mu_{\tilde{A}_c}(u), D \in [-1, 1] \} \quad (6)$$

$$A_+ = \{ u \mid u \in U, 0 < D_A(u) \leq 1 \} \quad (7)$$

$$A_- = \{ u \mid u \in U, -1 \leq D_A(u) < 0 \} \quad (8)$$

$$A_0 = \{ u \mid u \in U, D_A(u) = 0 \} \quad (9)$$

$$A_* = \{ u \mid u \in U, D_A(u) = 1, -1 \} \quad (10)$$

式中: $\tilde{V}$ 为可变模糊集合; A_+, A_-, A_0, A_* 分别称为可变模糊集合 $\tilde{V}$ 的 $\tilde{A}$ 为主域、 $\tilde{A}_c$ 为主域、渐变式质变界和突变式质变界。

1.2 唯物辩证法三大基本规律的数学定理

根据上述相关可变模糊集的概念及定义, 文献^[4, 10-13]率先用严密的数学语言表达及证明了唯物辩证法三大基本规律——对立统一、质量互变、否定之否定定理, 搭建起一座沟通数学与哲学两大学科之间联系的桥梁, 在唯物辩证法哲学原理的数学化研究领域具有重要意义。

1.2.1 对立统一定理

在参考连续统区间 $[1, 0]$ (对 $\mu_{\tilde{A}}(u)$) 和 $[0, 1]$ (对 $\mu_{\tilde{A}_c}(u)$) 的左、右端点 p_1 与 p_r 之间, 必存在确定的中介点 p_m , 该点的对立模糊概念或对立模糊属性的相对隶属度相等, p_m 称为渐变式质变点, 即 $\mu_{\tilde{A}}(u) = \mu_{\tilde{A}_c}(u) = 0.5$ 。 p_1, p_r 点为对立双方达到突变的突变式质变点(证明见文献^[4])。

1.2.2 质量互变定理

设 $D(u)$ 为论域 U 中任一元素 u 对 $\tilde{A}$ 的相对差异函数, 对 u 作变换 C , 变换前 $D(u) \neq 0$, 变换后的对立相对隶属函数与相对差异函数分别为 $\mu_{\tilde{A}}(C(u))$, $\mu_{\tilde{A}_c}(C(u))$ 与 $D(C(u))$, 其中 $D(C(u)) = \mu_{\tilde{A}}(C(u)) - \mu_{\tilde{A}_c}(C(u))$ 。

a. 如有不等式

$$D(u)D(C(u)) < 0 \quad (D(C(u)) \neq 1, 0, -1) \quad (11)$$

则为渐变式质变。

b. 如有等式

$$D(u)D(C(u)) = \pm D(u) \quad (12)$$

则为突变式质变。

c. 如有等式

$$D(u)D(C(u)) = 0 \quad (13)$$

则变化至动态平衡点, 或渐变式质变的临界点, 系统

处于动态平衡状态。
d. 如有不等式
 $D(u)D(C(u)) > 0 \quad (D(C(u)) \neq 1, 0, -1) \quad (14)$
 则为量变。

式(11)、式(12)与式(13)分别为渐变式质变不等式、突变式质变等式与渐变式质变点等式,称之为质变定理,式(14)为量变不等式,称之为量变定理,两者统称为质量互变定理^[14]。文献[11-12]给出了用相对差异函数和相对比例函数的证明与分析。

1.2.3 否定之否定定理

$D(u)$ 从1变化到-1为一个周期,设有 e 个变化周期。若变化为一个周期($e=1$),变化后终了状态在 p_r 点($\tilde{A}^e$)即否定,有 $D(C(u)) = -1$,则 $D(u) \cdot D(C(u)) = 1 \times (-1) = (-1)^1$;若变化为两个周期($e=2$),变化后终了状态在 p_1 点($\tilde{A}^{e^e}$)即否定的否定,有 $D(C(u)) = 1$,则 $D(u)D(C(u)) = 1 \times 1 = (-1)^2$;若变化为 e 个周期,变化后终了状态在 p_r 或 p_1 点,即 e 次否定($\tilde{A}^{e \cdots e}$),则有

$$D(u)D(C(u)) = (-1)^e \quad (15)$$

当 $e=2$ 时,对应于唯物辩证法哲学中否定之否定规律。故否定之否定定理可表示为

$$D(u)D(C(u)) = 1 \quad (16)$$

1.3 可变模型集

定义^[15]:设 C 为可变因子集, $C = \{C_A, C_B, C_C\}$, C_A 为可变模型集, C_B 是可变模型参数集, C_C 为除模型及其参数外的可变其他因子集。令

$$\begin{aligned} \tilde{V} = \{ (u, \mu) \mid u \in U, \mu_{\tilde{A}}(u) + \\ \mu_{\tilde{A}_c}(u) = 1, \mu \in [0, 1] \} \end{aligned} \quad (17)$$

$\tilde{V}$ 称为以相对隶属函数表示的可变模糊集合,令

$$\begin{aligned} A^+ = C(A_-) = \{ u \mid u \in U, \mu_{\tilde{A}}(u) < \\ \mu_{\tilde{A}_c}(u), \mu_{\tilde{A}}(C(u)) > \mu_{\tilde{A}_c}(C(u)) \} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} A^- = C(A_+) = \{ u \mid u \in U, \mu_{\tilde{A}}(u) > \\ \mu_{\tilde{A}_c}(u), \mu_{\tilde{A}}(C(u)) < \mu_{\tilde{A}_c}(C(u)) \} \end{aligned} \quad (19)$$

式(18)和式(19)称为可变模糊集合 $\tilde{V}$ 是关于 C 的渐变式质变,式中 $\mu_{\tilde{A}}(C(u))$ 和 $\mu_{\tilde{A}_c}(C(u))$ 分别表示对 u 做 C 变换后关于 $\tilde{A}$ 和 $\tilde{A}_c$ 的相对隶属函数,令

$$\begin{aligned} A^{(+)} = C(A_{(-)}) = \{ u \mid u \in U, \mu_{\tilde{A}}(u) < \\ \mu_{\tilde{A}_c}(u), \mu_{\tilde{A}}(C(u)) > \mu_{\tilde{A}_c}(C(u)) \} \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} A^{(-)} = C(A_{(+)}) = \{ u \mid u \in U, \mu_{\tilde{A}}(u) > \\ \mu_{\tilde{A}_c}(u), \mu_{\tilde{A}}(C(u)) < \mu_{\tilde{A}_c}(C(u)) \} \end{aligned} \quad (21)$$

式(20)和式(21)称为可变模糊集合 $\tilde{V}$ 关于 C 的变量域。

可变模型集 C_A 可根据文献[9]中建立的模糊聚类循环迭代、模式识别、优选决策以及评价模型进

行拓展。可变模型参数集 C_B 包括模型的指标标准值区间、指标权重等重要参数。

可变模糊集理论的研究是对扎德静态模糊集概念的重要突破,以相对差异函数、相对比例函数为基础,首次用严密的数学理论表达了对立统一、质量互变与否定之否定定理,构建起数学与哲学两大学科之间联系的桥梁,突破了长期未能用严密的数学定理表达唯物辩证法哲学三大基本规律的难题。在数学融入辩证法思维的哲理数学研究领域,在唯物辩证法哲学数学化研究领域,均具有重要的科学意义与应用价值。

2 可变模糊集在水科学中的应用研究

根据可变模糊集理论^[1,4,6,8,10,12],文献[3,4,15-17]建立了可变模糊聚类、模式识别、优选、评价的理论与模型,是可变模糊集通向实际应用的桥梁,是对经典、静态模糊集合的突破与发展,其具体模型可参考相关文献,在此不再重述。下面就其在一些水科学领域的应用进展概况进行简要介绍。

2.1 水资源评价

水资源作为一种社会经济发展必需的基础性资源,水资源承载能力评价能揭示有限的水资源与环境、人口和经济发展之间的关系,充分地利用水资源,使经济发展与水资源保护同步进行,促进社会经济可持续发展^[18]。可变模糊评价模型为水资源承载能力评价提供了一种有效途径,它可以确定影响地下水资源承载能力的各个指标对各级别标准值区间的相对隶属度,并能综合考虑各个指标的权重,从而能较全面地分析出区域水资源承载能力的状况^[18-20]。为实现水资源可持续利用,保障社会经济实现可持续发展,文献[21-24]应用可变模糊集方法实现了对区域水资源可持续利用状况的评价。针对水资源可再生能力评价标准是区间形式而不是点值形式,文献[24-25]研究了以相对差异函数为基础的水资源可再生能力可变模糊评价模型,很好地解决了评价指标标准为区间形式的评价识别问题,克服了大多数评价方法将其评价标准按点值形式处理的不足。文献[26]应用可变模糊识别模型分析大连市水资源与社会经济的协调性,结果表明可变模糊识别模型计算简便,评价结果可信度高。文献[27]研究了模糊可变评价模型在水资源价值评价中的应用,克服了通常的水资源价值评价标准硬性分级的缺点。文献[28]研究了可变模糊模型在水资源短缺风险评价中的应用,结果表明可提高评价结果的可靠性。文献[29]研究了利用模糊可变评价模型评价地下水的脆弱性,结果表明模糊可变评价模型

可信度高,信息综合处理能力强。

2.2 水质评价

水质综合评价是研究控制污染物排放、确定水环境容量、开展水污染防治工作的重要依据与基础。但水环境质量评价存在着大量不确定性因素,评价指标与评价标准之间的关系复杂,且许多现象呈非线性关系,而对于评价的优劣没有绝对分明的界限,具有中介过渡性。采用精确数学方法来研究这一模糊问题,显然存在着较大的困难^[30]。可变模糊集理论能方便地解决涉及多个指标、多个级别、以区间数表示的水环境标准值问题,能有效地解决评价标准区间值对评价结果的影响,并以样本特征值来确定评价级别,提高了评价结果的可靠性^[31-34]。文献[35-41]把可变模糊分析与模型引入灌溉水质、非常规水水质和地下水水质的评价分析中,也都取得了非常好的效果。文献[42]应用模糊可变模型研究了乌梁素海水环境评价,表明了模糊可变模型应用于水环境评价具有合理性和实用性。

2.3 水库调度与防洪

水库调度的方案优选、防洪调度决策、防洪的综合风险分析评价涉及到自然、社会、经济、技术、生态环境等多个复杂的相互联系但又彼此制约的目标。文献[43-48]将可变模糊集理论与模型应用到防洪综合风险评价、水电站联合调度方案优选、水库防洪调度决策和兴利调度方案选择中,全面地考虑了模型及其参数的变化(模型的变化、目标权重的变化),提高了优选、评价、决策的可信度。

2.4 灾情评价

灾情评价是防灾减灾领域的一项基础工作,评价结果是减灾决策的重要参考依据,对救灾和减灾决策的制定具有重要的指导意义。文献[49-50]研究了基于可变模糊集合理论的洪涝灾情评价方法和洪水灾害评价方法,能够合理、科学地确定样本指标对各级指标标准区间的相对隶属度,并且通过模型参数变化,合理地确定灾情等级;同时能够准确反映灾情度和评价指标的非线性对应关系,可信度高。文献[51]将可变模糊评价模型应用于大连市的干旱等级评价研究中,其结果表明应用可变模糊评价法评价区域干旱等级的方法是可靠的。文献[52]应用可变模糊集理论研究了洪水分类,表明用可变模糊聚类迭代模型进行洪水分类是准确、合理的,具有较强的应用价值。

2.5 径流预报

文献[53]将可变模糊集理论与相似关系近似推理法相结合,提出基于相似关系的可变模糊近似推理方法,结合大伙房水库年径流预报实例,证明了

方法的可行性。文献[54-55]提出径流中长期预报级别特征值特征展开模糊推理方法,改进了原有的模糊推理法,增强了模糊推理预报方法在径流中长期预报中的应用效果。文献[56]研究了冰凌预测的可变模糊综合分析方法,表明该方法计算简便,对开河日期的预测具有较高的精度。

2.6 农业水利工程

土地适宜性评价关联到很多指标,属多级模糊评价问题,是人们对土地分类的参考依据,文献[57]应用可变模糊集方法对农用地的土地适宜性进行了评价,丰富、发展了土地适宜性评价的模糊数学方法分支。农业生态环境质量评价是掌握区域农业生态环境的基本情况,判断未来发展趋势的依据,是制定与实际农业生态环境相符合的政策,维护农业生态平衡的参考依据,文献[58]采用可变模糊集模型对其进行评价,取得了较好的效果。文献[59]利用模糊可变评价模型对土地整理区农地可持续利用进行了综合评价,表明了模糊可变评价模型在土地整理区农地可持续利用性评价的适用性。文献[60-61]介绍了模糊可变评价模型在农村水利现代化评价中的应用,结果表明可变评价模型实用性强,计算结果可靠。文献[62-63]应用可变模糊算法研究了农业干旱风险评价,应用结果表明可变模糊评价法评价干旱等级可靠,为干旱风险评价提供了一种考虑多因素的综合方法。

3 结 语

作为对模糊集合论静态概念与理论的突破——可变模糊集合论,其研究尽管仅经历了短短几年的时间,但关于可变模糊集合理论及其应用的研究不断取得令人振奋的进展,特别是对立统一、质量互变与否定之否定定理的数学表达的研究,突破了长期未能用严密的数学定理表达唯物辩证法哲学三大基本规律的难题;以此理论为基础建立的可变模糊聚类、模式识别、优选、评价的理论与模型,是可变模糊集通向实际应用的桥梁,在水资源、农业水利工程等水利工程技术领域都取得了可喜的进展。随着理论研究的进一步深入,未来势必会引起工程技术领域的更多关注。

参考文献:

[1] 陈守煜. 可变模糊集理论的哲学基础[J]. 大连理工大学学报:社会科学版,2005,26(1):53-57.
[2] ZADEH L A. Fuzzy sets [J]. Information and Control, 1965,8(3):338-353.
[3] 陈守煜. 可变模糊集理论与模型及其应用[M]. 大连:大连理工大学出版社,2009.

- [4] 陈守煜. 基于可变模糊集的辩证法三大规律数学定理及其应用[J]. 大连理工大学学报, 2010, 50(5): 838-844.
- [5] 陈守煜. 水资源与防洪系统可变模糊集理论与方法[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2005.
- [6] 陈守煜. 工程可变模糊集理论与模型: 模糊水文水资源学数学基础[J]. 大连理工大学学报, 2005, 45(2): 308-312.
- [7] 汪陪庄. 模糊集合论及其应用[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1983.
- [8] 陈守煜. 可变模糊集合理论: 兼论可拓学的数学与逻辑错误[J]. 大连理工大学学报, 2007, 47(4): 620-624.
- [9] 陈守煜. 工程模糊集理论与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [10] 陈守煜. 可变模糊集量变与质变判据模式及其应用[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(10): 1879-1882.
- [11] 陈守煜. 基于可变模糊集的质变与量变定理: 兼论集对分析[J]. 数学的实践与认识, 2009, 39(11): 195-201.
- [12] 陈守煜. 质量互变定理的两种表示: 兼论集对分析中介不确定性[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2010, 29(5): 724-729.
- [13] 陈守煜. 基于辩证法三大规律数学定理的系统评价理论、模型与方法: 兼论集对分析及其评价方法[J]. 黑龙江大学学报, 2010, 1(1): 11-16.
- [14] 曹晓卿, 冯宁昌. 质量互变的系统探析[J]. 系统辩证学学报, 2005, 13(1): 33-36.
- [15] 陈守煜. 可变模糊集合理论与可变模型集[J]. 数学的实践与认识, 2008, 38(18): 146-153.
- [16] 陈守煜, 袁晶瑄, 李亚伟. 基于可变模糊集的模糊聚类迭代模型及其应用[J]. 大连理工大学学报, 2008, 48(6): 881-886.
- [17] 陈守煜. 可变模糊聚类及模式识别统一理论与模型[J]. 大连理工大学学报, 2009, 49(2): 307-312.
- [18] 陈守煜, 胡吉敏. 可变模糊评价法及在水资源承载能力评价中的应用[J]. 水利学报, 2006, 37(3): 264-271.
- [19] 郭瑜, 陈文龙, 陈守煜. 考虑权重灵敏度的水资源承载能力评价方法[J]. 水资源与水工程学报, 2008, 19(2): 27-30.
- [20] 周惠成, 柴智平, 何斌. 基于可变模糊识别模型的大连市水资源承载能力研究[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(2): 46-52.
- [21] 陈守煜, 柴春岭. 区域水资源可持续利用评价的模糊可变评价方法[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(5): 1-5.
- [22] 张春旺. 基于熵权的改进模糊可变模型在资源可持续评价中的应用[J]. 统计与决策, 2009(18): 72-73.
- [23] 方涛, 邓永辉. 模糊可变评价模型在湘江水资源可持续利用综合评价中的应用[J]. 长江大学学报: 自然科学版: 理工卷, 2009, 6(4): 143-145.
- [24] 陈守煜, 李敏. 基于可变模糊集理论的水资源可再生能力评价模型[J]. 水利学报, 2006, 37(4): 431-435.
- [25] 彭慧, 周惠成, 李敏. 北方沿海地区水资源可再生能力的多层次多指标可变模糊评价[J]. 水力发电学报, 2010, 29(4): 39-45.
- [26] 盖美, 李伟红. 基于可变模糊识别模型的大连市水资源与社会经济协调发展研究[J]. 资源科学, 2008, 30(8): 1141-1146.
- [27] 董胜男, 孙秀玲, 徐晓儒. 模糊可变评价模型在水资源价值评价中的应用[J]. 人民黄河, 2009, 31(11): 54-55.
- [28] 李帅, 刘冀, 董晓华, 等. 可变模糊模型在水资源短缺风险评价中的应用[J]. 水电能源科学, 2009, 27(5): 21-24.
- [29] 练建军, 许士国, 韩成伟. 基于模糊可变评价模型的地下水脆弱性研究[J]. 水电能源科学, 2010, 28(9): 26-29.
- [30] 吕素冰, 许士国, 陈守煜. 水资源效益综合评价的可变模糊决策理论及应用[J]. 大连理工大学学报, 2011, 51(2): 269-273.
- [31] 张弛, 郭瑜, 李伟, 等. 基于模糊可变集合理论的地下水质量综合评判[J]. 水电能源科学, 2007, 25(4): 15-18.
- [32] 许文杰, 曹升乐. 水质综合评价的模糊可变模型及其应用[J]. 山东大学学报: 工学版, 2008, 38(3): 40-45.
- [33] 陈守煜, 韩晓军. 松花江水质环境质量评价模糊可变集合工程方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(10): 134-138.
- [34] 陈守煜, 郭瑜. 水质综合评价的模糊可变集合方法[J]. 水资源保护, 2005, 21(6): 19-22.
- [35] 彭兆亮, 何斌, 彭勇, 等. 基于熵权的可变模糊模型在地下水质评价中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(4): 6-11.
- [36] 王文川, 马建琴, 邱林. 灌溉水水质可变模糊分析[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(3): 129-131.
- [37] 徐冬梅, 马建琴, 邱林. 基于可变模糊模型的郑州市非常规水水质评价[J]. 人民黄河, 2010, 32(10): 80-81.
- [38] 陈守煜, 徐冬梅, 邱林. 地下水水质评价可变模糊评价法[J]. 中国农村水利水电, 2011(3): 1-5.
- [39] 周振民, 穆文彬. 组合权重可变模糊模型在地表水水质评价中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2011(10): 82-86.
- [40] 任淑霞, 马涛, 李慧赟. 模糊可变评价模型在地下水水质评价中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(4): 105-108.
- [41] 马建琴, 郭晶晶, 刘晓洁. 基于 GIS 的城市景观水水质可变模糊评价[J]. 水电能源科学, 2011, 29(8): 18-20.
- [42] 姜忠峰, 李畅游, 张生. 模糊可变模型在乌梁素海水环境评价中的应用[J]. 人民黄河, 2011, 33(4): 72-74.
- [43] 陈守煜, 郭瑜. 模糊可变集合及其在防洪工程体系综合风险评价中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(6): 4-8.
- [44] 陈守煜, 王子茹. 可变模糊优选理论及在水电站联合调度方案优选中的应用[J]. 水电自动化与大坝监测, 2006, 30(6): 16-20.
- [45] 陈守煜, 袁晶瑄, 郭瑜. 可变模糊决策理论及其在水库防洪调度决策中应用[J]. 大连理工大学学报, 2008, 48

- (2):259-261.
- [46] 刘冀,王本德. 基于组合权重的模糊可变模型及在防洪风险评价中应用[J]. 大连理工大学学报,2009,49(2):273-276.
- [47] LI Qiong,ZHOU Jianzhong,LIU Donghan,et al. Research on flood risk analysis and evaluation method based on variable fuzzy sets and information diffusion[J]. Safety Science,2012,50(5):1275-1283.
- [48] WANG X J,ZHAO R H,HAO Y W. Flood control operations based on the theory of variable fuzzy sets[J]. Water Resources Management,2011,25(3):777-792.
- [49] 张弛,宋绪美,李伟. 可变模糊评价法在洪涝灾情评价中的应用[J]. 自然灾害学报,2008,17(5):34-39.
- [50] 徐冬梅,陈守煜,邱林. 洪水灾害损失的可变模糊评价方法[J]. 自然灾害学报,2010,19(4):158-162.
- [51] 曹永强,伊吉美,罗麟,等. 可变模糊评价法在大连市干旱等级评定中的应用[J]. 水力发电,2010,36(4):14-16.
- [52] 徐冬梅,陈守煜,邱林. 基于可变模糊集理论的洪水分类研究[J]. 水电能源科学,2011,29(1):23-26.
- [53] 李敏,陈守煜. 基于可变模糊集理论的径流预报单要素近似推理法[J]. 大连理工大学学报,2008,48(4):587-590.
- [54] 李敏. 可变模糊近似推理方法在径流中长期预报中的应用[J]. 水电能源科学,2010,28(2):16-18.
- [55] 李敏,陈守煜. 径流中长期预报级别特征值特征展开模糊推理方法[J]. 大连理工大学学报,2010,50(4):576-579.
- [56] 徐晶,冀鸿兰,张宝森,等. 基于可变模糊综合分析的冰凌预测模型[J]. 水利水电科技进展,2011,31(3):6-9.
- [57] 陈守煜,柴春岭,苏艳娜. 可变模糊集方法及其在土地适宜性评价中的应用[J]. 农业工程学报,2007,23(3):95-97.
- [58] 苏艳娜,柴春岭,杨亚梅,等. 常熟市农业生态环境质量的可变模糊评价[J]. 农业工程学报,2007,23(11):245-248.
- [59] 费良军,谢志高,孙胜祥,等. 模糊可变模型在土地整理区农地可持续利用综合评价中的应用[J]. 沈阳农业大学学报,2009,40(1):70-75.
- [60] 赵然杭,刘晓丽. 模糊可变评价模型在山东省农村水利现代化水平评价中的应用[J]. 山东大学学报:工学版,2008,38(2):86-91.
- [61] 赵然杭,陈守煜. 模糊可变评价模型在评价农村水利现代化中的应用[J]. 水利学报,2008,39(2):218-222.
- [62] 曹永强,李香云,马静,等. 基于可变模糊算法的大连市农业干旱风险评价[J]. 资源科学,2011,33(5):983-988.
- [63] ZHANG Dan,WANG Guoli,ZHOU Huicheng. Assessment on agricultural drought risk based on variable fuzzy sets model[J]. Chinese Geographical Science,2011,21(2):167-175.

(收稿日期:2011-11-21 编辑:熊水斌)

(上接第88页)

- [6] 郭齐胜,钱涵欣等. 水轮机引水部件的水力损失模型[J]. 水利学报,1996(10):37-40.
- [7] 孙靖民,梁迎春. 机械优化设计[M]. 北京:机械工业出版社,1998.
- [8] 方世杰,綦耀光. 机械优化设计[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
- [9] 王飞. 高比转速混流式水轮机水力模型开发方案研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2011.
- [10] 齐学义,赵强,马惠萍,等. 全蜗壳的非圆形断面水力设计及其CFD分析验证[J]. 兰州理工大学学报,2009,35(2):41-45.
- [11] 王福军. 计算流体动力学分析:CFD软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [12] 辛喆,张兰金,常近时. 混流式水轮机蜗壳与座环三维中湍流场的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展:A辑,2004(11):713-718.

(收稿日期:2012-02-13 编辑:周红梅)

《水资源保护》征订启事

中国科技核心期刊 RCCSE 核心期刊

《水资源保护》是河海大学和中国水利学会环境水利研究会共同主办的科学技术期刊,创刊于1985年,双月刊,国内外公开发行,国内统一连续出版物号:CN32-1356/TV。

《水资源保护》主要刊登与水资源保护有关的基础研究,应用技术,工程措施,综合述评,专题讲座,国外动态,书刊评介,科技简讯,水资源管理、评价、监测、优化配置,节水技术,水环境污染控制等方面的文章。近年来,重点关注与水有关的生态环境领域中的研究方向,新增设相关的基础研究、防治技术、城市水环境治理等内容。

主要读者对象:与水资源保护工作有关的工程技术人员、科研人员、管理人员以及大专院校的师生。

《水资源保护》邮发代号:28-298,双月刊,每期定价12元,全年共72元,逢单月出版。可在全国各地邮局订阅,也可直接与编辑部联系订阅。

地址:210098 南京市西康路1号 河海大学《水资源保护》编辑部

电话/传真:(025)83786642

E-mail:bh@hhu.edu.cn

http://kkb.hhu.edu.cn/web/indexbh.asp-d_id=34