第53卷第1期
2013年1月
大连理工大学学报
Journal of Dalian University of Technology
Vol.53, No.1
Jan. 2013

文章编号：1000-8608(2013)01-0108-06

基于可变集的水资源系统可持续发展态势预测原理与方法

陈守煜*

（大连理工大学 建设工程学部，辽宁 大连 116024）

摘要：论述了将可变模糊集理论发展到可变模糊清晰混合集(简称可变集)的必要性与重要性.给出了基于可变集基础数学定理的对立事物转化相对差异度单位矩阵.给出的可变集水资源系统可持续发展态势的预测原理、方法与应用实例，不仅对数学、哲学学科，而且对工程等学科均有重要的科学意义.

关键词：可变集；可变模糊集；水资源；可持续发展；预测

中图分类号：TV213 **文献标志码**：A

0 引言

19世纪康托创立的非此即彼的集合论，被公认是现代数学的基础[1].1965年札德突破康托集合论，创建亦此亦彼的模糊集合论[2]，模糊数学由此诞生，在数学思维发展上有重要意义.因此关于发展概率论来取代模糊集理论的观点显然无益于科学的发展.但无论是康托集合论还是札德模糊集，都是静态集合，即不考虑事物、现象在演变过程中"质"的变化，难以描述清晰与模糊事物、现象、概念在变化过程中客观存在着的辩证的对立统一，使辩证思维难以进入数学科学，而影响其向更高层次(形式逻辑与辩证逻辑相结合的数学科学体系[3])发展.因为即使是非此即彼的清晰事物与现象，在由一清晰事物向其对立的清晰事物转化过程中，同样呈现出亦此亦彼的模糊性，这是一个十分重要的概念.例如一列火车(u)从中国($\underset{\wedge}{A}$)北京出发至俄罗斯($\underset{\wedge}{A}^c$)莫斯科，是非此即彼对立的清晰事物，当列车行驶在北京—满洲里区段，即在中国($\underset{\wedge}{A}$)境内，是清晰事物，但当离开满洲里站，自驶入中俄边境线的瞬间开始，列车部分在中国，部分在俄罗斯，就是亦此亦彼的模糊事物.令列车的全长(特征量)为l，驶入俄罗斯的长度为x，则列车的相对隶属函数为$\mu_{\underset{\wedge}{A}}(u)=(l-x)/l, 0\leqslant x\leqslant l$；当$x=0$，$\mu_{\underset{\wedge}{A}}(u)=1$，在俄罗斯($\underset{\wedge}{A}^c$)的相对隶属度$\mu_{\underset{\wedge}{A}^c}(u)=0$；当$x=l$，$\mu_{\underset{\wedge}{A}}(u)=0$，$\mu_{\underset{\wedge}{A}^c}(u)=1$；当$x=l/2$，$\mu_{\underset{\wedge}{A}}(u)=\mu_{\underset{\wedge}{A}^c}(u)=0.5$(渐变式质变点)，可见对立的清晰事物在转化过程中同样要经过质变点.又如人的生死是非此即彼对立的清晰现象，但就人的生死全过程而言，在正常情况下，要经历婴儿、幼年、少年、青年、中年、老年等不同的阶段，特别在最后阶段，人从具有生命指标特征(如大脑功能、心脏跳动、呼吸等)转化为指标特征消失的死亡的过程，则是亦此亦彼的可变模糊现象.因此，对于非此即彼对立的清晰事物、现象，在引入动态质变概念后，客观上存在亦此亦彼的模糊性.但作为现代数学基础的康托集合论未考虑清晰事物、现象与概念在量变向质变转化过程中的亦此亦彼性，成为现代数学很难突破形式逻辑思维框架的束缚，难以建立形式逻辑与辩证逻辑思维相结合的数学科学理论体系，难以适应社会、人文科学领域的重要原因.20世纪中期，札德模糊集虽然突破了康托集合论非此即彼的数学描述，但仍沿用康托集合论不考虑事物"质变"概念，用不考虑事物质变的模糊集理论去研究具有质变的模糊事物、现象与概念，存在着研究理论与研究目标两者不相符的矛盾，这是札德模糊集合论的一大理论缺陷.为此作者在2005年建立可变模糊集[4-8]，继而在2007年把可

收稿日期：2012-02-05； **修回日期**：2012-12-11.
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51209032;50779005).
作者简介：陈守煜*(1930-)，男，教授，博士生导师，E-mail:chensyccl@yahoo.com.cn.

变模糊集发展为可变模糊清晰混合集(简称可变集)[9],并在 2012 年给出可变集的辩证法三大基本规律的基础数学定理[10],为在数学学科中建立形式逻辑与辩证逻辑思维相结合的理论体系迈出了坚实的一步.本文根据可变集的基础数学定理,导出对立事物转化相对差异度单位矩阵,进而提出基于可变集的水资源系统可持续发展态势预测原理与方法,为研究预测变化环境下水资源系统可持续发展态势提供新的思路.

1　可变集的对立事物转化相对差异度单位矩阵

为了导出可变集的对立事物转化相对差异度单位矩阵,以及水资源系统可持续发展态势的预测原理与方法,需要对文献[10]中可变集的基础数学定理作一简述.

设 U 为论域,u 为 U 中的任一元素,$u \in U$. u 的对立属性变化前后的测度值分别记以 $\mu_{\underset{\wedge}{A}}(u)$、$\mu_{\underset{\wedge}{A}^c}(u)$ 与 $\mu_{\underset{\wedge}{A}}(C(u))$、$\mu_{\underset{\wedge}{A}^c}(C(u))$.

有且仅有

$$\mu_{\underset{\wedge}{A}}(u) + \mu_{\underset{\wedge}{A}^c}(u) = \mu_{\underset{\wedge}{A}}(C(u)) + \mu_{\underset{\wedge}{A}^c}(C(u)) = 1;$$
$$0 \leqslant \mu_{\underset{\wedge}{A}}(u) \leqslant 1,\ 0 \leqslant \mu_{\underset{\wedge}{A}^c}(u) \leqslant 1,$$
$$0 \leqslant \mu_{\underset{\wedge}{A}}(C(u)) \leqslant 1,\ 0 \leqslant \mu_{\underset{\wedge}{A}^c}(C(u)) \leqslant 1 \qquad (1)$$

$\mu_{\underset{\wedge}{A}}(u)$、$\mu_{\underset{\wedge}{A}^c}(u)$、$\mu_{\underset{\wedge}{A}}(C(u))$、$\mu_{\underset{\wedge}{A}^c}(C(u))$ 分别为变化前后元素 u 关于对立 $\underset{\wedge}{A}$、$\underset{\wedge}{A}^c$ 的相对隶属度.

根据式(1)可知,无论变化前后必存在渐变式质变点,即

$$\begin{cases} \mu_{\underset{\wedge}{A}}(u) = \mu_{\underset{\wedge}{A}^c}(u) = 0.5 \\ \mu_{\underset{\wedge}{A}}(C(u)) = \mu_{\underset{\wedge}{A}^c}(C(u)) = 0.5 \end{cases} \qquad (2)$$

式(1)、(2)为可变集的对立统一定理,它有两方面的含义:(1)在一定时间 C_1、空间 C_2 与条件 C_3 的组合下,即 $C = \{C_1, C_2, C_3\}$,u 无论呈现何种变化,u 的对立相对测度值之和等于 1 不变是可变集中一个"变化中不变"的重要概念.(2)在 C_1、C_2、C_3 组合下,若连续统上存在对立测度值为 0.5 的渐变式质变点,则质变点两侧必存在 u 的两极相对对立.

设

$$D_{\underset{\wedge}{A}}(u) = \mu_{\underset{\wedge}{A}}(u) - \mu_{\underset{\wedge}{A}^c}(u) \qquad (3)$$

当 $\mu_{\underset{\wedge}{A}}(u) > \mu_{\underset{\wedge}{A}^c}(u)$,有 $1 \geqslant D_{\underset{\wedge}{A}}(u) > 0$;当 $\mu_{\underset{\wedge}{A}}(u) = \mu_{\underset{\wedge}{A}^c}(u)$,有 $D_{\underset{\wedge}{A}}(u) = 0$;当 $\mu_{\underset{\wedge}{A}}(u) < \mu_{\underset{\wedge}{A}^c}(u)$,有 $0 > D_{\underset{\wedge}{A}}(u) \geqslant -1$;$D_{\underset{\wedge}{A}}(u)$ 称为 $\underset{\wedge}{A}$ 与 $\underset{\wedge}{A}^c$ 的对立相对差异度.映射

$$D_{\underset{\wedge}{A}}: U \to [1, -1]$$
$$u \mapsto D_{\underset{\wedge}{A}}(u) \in [1, -1] \qquad (4)$$

称为 $\underset{\wedge}{A}$ 与 $\underset{\wedge}{A}^c$ 的对立相对差异函数,如图 1 所示.

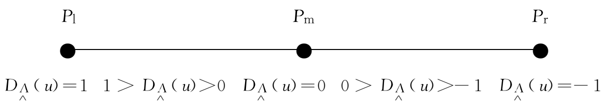

图 1　相对差异函数示意图

Fig.1　Sketch map of relative difference function

对 u 作变换 C,变换后的对立隶属函数与对立差异函数分别为 $\mu_{\underset{\wedge}{A}}(C(u))$、$\mu_{\underset{\wedge}{A}^c}(C(u))$ 与 $D_{\underset{\wedge}{A}}(C(u))$,$D_{\underset{\wedge}{A}}(C(u)) = \mu_{\underset{\wedge}{A}}(C(u)) - \mu_{\underset{\wedge}{A}^c}(C(u))$.

设 $D_{\underset{\wedge}{A}}(u) \neq 0$

(1)如不等式

$$D_{\underset{\wedge}{A}}(u) \cdot D_{\underset{\wedge}{A}}(C(u)) < 0;\ D_{\underset{\wedge}{A}}(C(u)) \neq 1, 0, -1 \qquad (5)$$

成立,则为渐变式质变.

(2)如不等式

$$D_{\underset{\wedge}{A}}(u) \cdot D_{\underset{\wedge}{A}}(C(u)) > 0;\ D_{\underset{\wedge}{A}}(C(u)) \neq 1, 0, -1 \qquad (6)$$

成立,则为量变.式(5)、(6)分别称为质变、量变定理,统称为质量互变定理.

图 1 中 $D_{\underset{\wedge}{A}}(u)$ 由 1 变化到 -1 为一个周期,根据质量互变定理,如 $D_{\underset{\wedge}{A}}(u) = 1$,即当初始状态点为 P_l,变化到 P_r 后(一次否定),有 $D_{\underset{\wedge}{A}}(C(u)) = -1$,则

$$D_{\underset{\wedge}{A}}(u) \cdot D_{\underset{\wedge}{A}}(C(u)) = -1 = (-1)^1 \qquad (7)$$

若再从 P_r 变化到 P_l(二次否定,即否定之否定),则有

$$D_{\underset{\wedge}{A}}(u) \cdot D_{\underset{\wedge}{A}}(C(u)) = 1^2 = (-1)^2 \qquad (8)$$

若变化为 N 个周期(N 为正整数,$N \in [1, \infty)$),设变化前初始状态在 P_l 点($\underset{\wedge}{A}$),即 $D_{\underset{\wedge}{A}}(u) = 1$,变化后终了状态在 P_r 点($\underset{\wedge}{A}^c$),则有

$$D_{\underset{\wedge}{A}}(u) \cdot D_{\underset{\wedge}{A}}(C(u)) = (-1)^N \qquad (9)$$

式(9)为可变集的 N 次否定定理.

根据 N 次否定定理式(9)给出对立事物转化相对差异度单位矩阵.

设

$$D_{\underset{\wedge}{A}^c}(u) = \mu_{\underset{\wedge}{A}^c}(u) - \mu_{\underset{\wedge}{A}}(u) \qquad (10)$$

当$\mu_{\underset{\wedge}{A}}(u) > \mu_{\underset{\wedge}{A}^c}(u)$，有$-1 \leqslant D_{\underset{\wedge}{A}^c}(u) < 0$；当$\mu_{\underset{\wedge}{A}}(u) = \mu_{\underset{\wedge}{A}^c}(u)$，有$D_{\underset{\wedge}{A}^c}(u) = 0$；当$\mu_{\underset{\wedge}{A}}(u) < \mu_{\underset{\wedge}{A}^c}(u)$，有$1 \geqslant D_{\underset{\wedge}{A}^c}(u) > 0$；$D_{\underset{\wedge}{A}^c}(u)$称为$\underset{\wedge}{A}^c$与$\underset{\wedge}{A}$的对立相对差异度.映射

$$\begin{aligned} &D_{\underset{\wedge}{A}^c}: U \to [-1,1] \\ &u \mapsto D_{\underset{\wedge}{A}^c}(u) \in [-1,1] \end{aligned} \tag{11}$$

称为u对$\underset{\wedge}{A}^c$与$\underset{\wedge}{A}$的对立相对差异函数.

由式(3)与式(10)得

$$D_{\underset{\wedge}{A}}(u) + D_{\underset{\wedge}{A}^c}(u) = 0 \tag{12}$$

或

$$D_{\underset{\wedge}{A}}(u) = -D_{\underset{\wedge}{A}^c}(u)；\ D_{\underset{\wedge}{A}}(C(u)) = -D_{\underset{\wedge}{A}^c}(C(u)) \tag{13}$$

根据$N=1$一次否定定理式(7)与式(13)，则对立事物一方$\underset{\wedge}{A}$在一个周期内变化至对立面$\underset{\wedge}{A}^c$的表达式为

$$D_{\underset{\wedge}{A}}(u) \cdot D_{\underset{\wedge}{A}^c}(C(u)) = 1 \tag{14}$$

则在$N=1$的一个变化周期中，由$D_{\underset{\wedge}{A}}(u)=1$的$P_l$点变化至$D_{\underset{\wedge}{A}^c}(C(u))=1$的$P_r$点，可用行向量表示为

$$\mathbf{D}_{\underset{\wedge}{A}-\underset{\wedge}{A}^c}(u) = (1 \quad 1) \tag{15}$$

类似地，N个变化周期的行向量为

$$\mathbf{D}_{(\underset{\wedge}{A}-\underset{\wedge}{A}^c)^N}(u) = (1 \quad 1 \quad \cdots \quad 1) \tag{16}$$

式(16)描述了对立事物$\underset{\wedge}{A}$与$\underset{\wedge}{A}^c$在N个周期的每一个变化周期中向其对立面转化的过程，由于其元素值均为1，称为对立事物转化相对差异度单位矩阵.

2 基于可变集的水资源系统可持续发展态势预测原理与方法

下面根据可变集的对立事物转化相对差异度单位矩阵，导出水资源系统可持续发展的预测原理与方法.

本文预测的思路是：引入级别变量h，它既是清晰值，如$h=1,2,\cdots,c$（c为级别总数）；但又可以表示模糊概念，即可规定1代表优级，2代表良级，…，c代表劣级.因此h实质上是一个可变模糊清晰变量.首先将指标i（$i=1,2,\cdots,m$；m为指标总数）按拟定的标准区间值$[a_{ih}, b_{ih}]$分级，a_{ih}、b_{ih}分别为指标i级别h标准值的上、下界，对于越小越优成本型指标，$a_{ih} < b_{ih}$；对于越大越优效益型指标，$a_{ih} > b_{ih}$，相邻两级指标i标准区间值的交点b_{ih}，相当于对立统一与质量互变定理中h级向$(h+1)$级转化的渐变式质变点，即交点的相对隶属度$\mu(b_{ih}) = \mu(a_{i(h+1)}) = 0.5$.

设对预测对象u依据多个级别h多个指标i的标准值区间矩阵

$$\boldsymbol{I} = ([a_{ih}, b_{ih}])；\ i=1,2,\cdots,m；\ h=1,2,\cdots,c \tag{17}$$

进行预测.指标i的h与$h+1$级，由于存在渐变式质变点$\mu(b_{ih})=0.5$，根据对立统一定理，质变点两侧必存在两级（两极）相对对立，即h与$h+1$级构成相对对立级别，故$\underset{\wedge}{A}$、$\underset{\wedge}{A}^c$可分别以ih、$i(h+1)$替代，根据对立统一定理式(1)，预测对象u指标i对h与$(h+1)$级的相对隶属度之和为1，有

$$\mu_{ih}(u) + \mu_{i(h+1)}(u) = 1 \tag{18}$$

因此只需计算式(18)中的$\mu_{ih}(u)$即可.

下面应用对立事物转化相对差异度单位矩阵(16)导出$\mu_{ih}(u)$的计算公式.

单位矩阵(16)的物理意义是对立事物由$\underset{\wedge}{A}(ih)$转化为$\underset{\wedge}{A}^c(i(h+1))$，在两极的相对差异度$D_{ih}(u)$与$D_{i(h+1)}(u)$均等于1.据此，可根据级别$h$、指标$i$的标准区间矩阵$\boldsymbol{I}$确定相对差异度$D_{ih}(u)$与$D_{i(h+1)}(u)$等于1所对应的点值矩阵$\mathbf{K}$，确定方法如下：

设1级（$h=1$）为优级，由物理概念可知，指标i的1级标准值区间$[a_{i1}, b_{i1}]$的上界a_{i1}对1级的相对隶属度为1，对对立级2级的相对隶属度为0，对应的相对差异度$D_{i1}(u)=1$.设k_{i1}为预测对象u在区间$[a_{i1}, b_{i1}]$内对1级相对差异度$D_{i1}(u)=1$的点值，故$k_{i1}=a_{i1}$.

设c级（$h=c$）为劣级，根据物理概念，区间$[a_{ic}, b_{ic}]$的下界b_{ic}对c级的相对隶属度为1，对对立级$(c-1)$的相对隶属度为0，对应的相对差异度$D_{ic}(u)=1$.设k_{ic}为预测对象u在区间$[a_{ic}, b_{ic}]$内对c级相对差异度$D_{ic}(u)=1$的点值，故$k_{ic}=b_{ic}$.

设l为不等于1与c的其他级别，根据文献[11]可取指标i级别l标准区间$[a_{il}, b_{il}]$的中点为l级相对差异度$D_{il}(u)=1$的点值，即$k_{il}=\dfrac{a_{il}+b_{il}}{2}$.则有

$$\begin{cases} k_{i1} = a_{i1} \\ k_{ih} = \dfrac{a_{ih} + b_{ih}}{2};\ h = 2,3,\cdots,c-1 \\ k_{ic} = b_{ic} \end{cases} \quad (19)$$

根据标准值区间矩阵 $\mathbf{I}$ 与式(19)，可得与事物转化相对差异度单位矩阵(16)相对应的点值映射矩阵

$$\mathbf{K} = (k_{ih}) \quad (20)$$

设已知预测对象 u 的指标特征值矩阵为

$$\mathbf{X} = (x_1 \quad x_2 \quad \cdots \quad x_m) = (x_i);\ i = 1,2,\cdots,m \quad (21)$$

设 u 的指标 i 特征值 x_i 落入矩阵 $\mathbf{K}$ 中 h 与 $h+1$ 级指标 i 特征值相对差异度 $D_{ih}(u)$、$D_{i(h+1)}(u)$ 等于1对应的点值区间 $[k_{ih}, k_{i(h+1)}]$ 内，且区间内同时存在 $D_{ih}(u) = 0$ 渐变式质变点 b_{ih}，则 x_i 对 h 级的相对差异度 $D_{ih}(u)$ 可按式(22)计算：

$$D_{ih}(u) = \begin{cases} \dfrac{b_{ih} - x_i}{b_{ih} - k_{ih}};\ x_i \in [k_{ih}, b_{ih}] \\ -\dfrac{b_{ih} - x_i}{b_{ih} - k_{i(h+1)}};\ x_i \in [b_{ih}, k_{i(h+1)}] \end{cases} \quad (22)$$

根据式(3)有

$$D_{ih}(u) = \mu_{ih}(u) - \mu_{i(h+1)}(u) \quad (23)$$

由式(18)、(23)得

$$\mu_{ih}(u) = 0.5(1 + D_{ih}(u)) \quad (24)$$

根据式(22)、(24)有

$$\mu_{ih}(u) = \begin{cases} 0.5\left[1 + \dfrac{b_{ih} - x_i}{b_{ih} - k_{ih}}\right];\ x_i \in [k_{ih}, b_{ih}] \\ 0.5\left[1 - \dfrac{b_{ih} - x_i}{b_{ih} - k_{i(h+1)}}\right];\ x_i \in [b_{ih}, k_{i(h+1)}] \end{cases} \quad (25)$$

$\mu_{i(h+1)}(u) = 1 - \mu_{ih}(u)$. 根据物理概念，对于小于 h 级、大于 $(h+1)$ 级指标 i 的相对隶属度均应等于0，即

$$\begin{cases} \mu_{i(<h)}(u) = 0 \\ \mu_{i(>(h+1))}(u) = 0 \end{cases} \quad (26)$$

由此可得 u 的指标 i 级别 h 的相对隶属度矩阵

$$\boldsymbol{\mu}(u) = (\mu(u))_{ih};$$
$$i = 1,2,\cdots,m,\ h = 1,2,\cdots,c \quad (27)$$

由于预测指标 i 的重要性不同，设指标权向量为

$$\mathbf{w} = (w_1 \quad w_2 \quad \cdots \quad w_m) = (w_i);\ \sum_{i=1}^{m} w_i = 1 \quad (28)$$

u 对级别 h 的综合相对隶属度可用向量式

$$\boldsymbol{\nu}(u) = (w_i) \cdot (\mu(u))_{ih} = (\nu_h(u)) \quad (29)$$

确定. 应用文献[12]中的级别特征值公式

$$H(u) = \sum_{h=1}^{c} \nu_h(u) \cdot h;\ h = 1,2,\cdots,c \quad (30)$$

应用式(31)将 $H(u)$ 转化为 u 对水资源系统可持续发展 $\underset{\wedge}{A}$ 的综合相对隶属度：

$$\dot{\mu}_{\underset{\wedge}{A}}(u) = 1 - \frac{H(u) - 1}{c - 1} \quad (31)$$

上式当 $H(u) = 1$，$\dot{\mu}_{\underset{\wedge}{A}}(u) = 1$；当 $H(u) = c$，$\dot{\mu}_{\underset{\wedge}{A}}(u) = 0$.

3　预测举例

预测广东省东莞市2030年水资源系统可持续发展态势. 指标标准值区间参考文献[13]资料. 确定预测指标体系为(1)人均水资源量 x_1(m^3)，(2)人均用水量 x_2(m^3)，(3)万元GDP用水量 x_3(m^3)，(4)万元工业产值增加值用水量 x_4(m^3)，(5)水资源开发利用率 x_5(%)，(6)生态环境用水率 x_6(%)，(7)水质综合达标率 x_7(%). 规划预测2030年7项指标特征值见行矩阵 $\mathbf{X}$，其为确定的清晰值或清晰概念：

$$\mathbf{X} = (2\,369 \quad 225 \quad 42 \quad 24 \quad 18.3 \quad 1.5 \quad 90) = (x_i);$$
$$i = 1,2,\cdots,7$$

拟定四级标准(C=4)对东莞市2030年水资源可持续发展态势进行预测. 指标标准区间值矩阵

$$\mathbf{I} = \begin{pmatrix} [4\,000 \quad 3\,000] & [3\,000 \quad 2\,000] & [2\,000 \quad 1\,000] & [1\,000 \quad 500] \\ [200 \quad 300] & [300 \quad 400] & [400 \quad 500] & [500 \quad 600] \\ [60 \quad 100] & [100 \quad 200] & [200 \quad 300] & [300 \quad 500] \\ [10 \quad 30] & [30 \quad 60] & [60 \quad 100] & [100 \quad 150] \\ [10 \quad 15] & [15 \quad 25] & [25 \quad 35] & [35 \quad 40] \\ [1 \quad 2] & [2 \quad 3] & [3 \quad 5] & [5 \quad 8] \\ [90 \quad 80] & [80 \quad 70] & [70 \quad 60] & [60 \quad 50] \end{pmatrix}$$

应用式(19)与矩阵 **I** 得到与事物转化相对差异度单位矩阵(16)对应的点值映射矩阵

$$\mathbf{K}=\begin{pmatrix}4\,000 & 2\,500 & 1\,500 & 500\\ 200 & 350 & 450 & 600\\ 60 & 150 & 250 & 500\\ 10 & 45 & 80 & 150\\ 10 & 20 & 30 & 40\\ 1 & 2.5 & 4 & 8\\ 90 & 75 & 65 & 50\end{pmatrix}=(k_{ih});$$

$$i=1,2,\cdots,7,\ h=1,2,3,4$$

下面以指标(1)为例对预测计算步骤作一说明：

已知2030年(u)指标(1)人均水资源量特征值 $x_1=2\,369\ \mathrm{m}^3$.

根据矩阵 **K** 可知 $x_1(=2\,369\ \mathrm{m}^3)$ 落入指标(1)的2、3级相对差异度为1的点值之间,即落入区间$[k_{12},k_{13}]=[2\,500,1\,500]$.由矩阵 **I** 知 $b_{12}=2\,000$,$x_1\in[k_{12},b_{12}]$,应用式(25),$i=1$,$h=2$,得到$\mu_{12}(u)=0.869$,由对立统一定理式(18)得$\mu_{13}(u)=0.131$.按式(26)有$\mu_{11}(u)=\mu_{14}(u)=0$.则得2030年指标(1)的相对隶属度向量

$$\boldsymbol{\mu}_1(u)=(0\quad 0.869\quad 0.131\quad 0)$$

对指标(2)、(3)、…、(6)进行类似的计算,解得2030年指标相对隶属度矩阵

$$\boldsymbol{\mu}(u)=\begin{pmatrix}0 & 0.869 & 0.131 & 0\\ 0.875 & 0.125 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0\\ 0.650 & 0.350 & 0 & 0\\ 0.170 & 0.830 & 0 & 0\\ 0.750 & 0.250 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0\end{pmatrix}=(\mu(u))_{ih};$$

$$i=1,2,\cdots 7,\ h=1,2,3,4$$

应用文献[12]中基本单元系统理论确定的指标权向量为

$$\boldsymbol{w}=(0.185\quad 0.122\quad 0.151\quad 0.226\quad 0.097\quad 0.097\quad 0.122)=(w_i)$$

把矩阵$\boldsymbol{\mu}(u)$代入式(29)得到

$$\boldsymbol{v}(u)=(0.616\quad 0.360\quad 0.024\quad 0)$$

由式(30)得 $H(u)=1.408$,由式(31)得$\mu_{\underset{\sim}{A}}(u)=0.864$,即2030年东莞市水资源可持续发展态势预测的可持续程度为0.864,达到86%的较高的可持续发展水平.

4 结 语

可变集从可变模糊集发展而来,与其有着密切的联系,但又有质的飞跃.本文根据可变集,给出水资源系统可持续发展态势预测原理与方法,表明可变集不仅对工程学科具有重要意义,而且对于利用辩证法哲学思想指导水文水资源工程学的发展具有重要作用.

可变集是动态质变理论,根据可变集导出的水资源系统可持续发展态势预测原理与方法,具有理论严谨、思路新颖、方法简便的优点,且可推广应用于模糊与清晰多指标评价识别系统.

参考文献:

[1] 张景中.数学与哲学[M].大连:大连理工大学出版社,2008.
ZHANG Jing-zhong. **Mathematics and Philosophy** [M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2008. (in Chinese)

[2] Zadeh L A. Fuzzy sets [J]. **Information and Control**, 1965, **8**(3):338-353.

[3] 孟凯韬.哲理数学概论[M].修订版.北京:科学出版社,2005.
MENG Kai-tao. **Introduction to Philosophical Mathematics** [M]. Revised ed. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)

[4] 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.
CHEN Shou-yu. Theory and model of engineering variable fuzzy set —Mathematical basis for fuzzy hydrology and water resources [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2005, **45**(2):308-312. (in Chinese)

[5] 陈守煜.可变模糊集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.
CHEN Shou-yu. Quantity change and quality change criterion models of variable fuzzy sets theory and their application [J]. **Systems Engineering and Electronics**, 2008, **30**(10):1879-1882. (in Chinese)

[6] 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.
CHEN Shou-yu. Theory of variable fuzzy sets and variable model sets [J]. **Mathematics in Practice and Theory**, 2008, **38**(18)：146-153. (in Chinese)

[7] CHEN Shou-yu. Quantity change theorem and quality change theorem [M] // **Fuzzy Information and Engineering 2010. Volume 1. Advances in Intelligent and Soft Computing 78**. Berlin：Springer, 2010：109-114.

[8] 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.
CHEN Shou-yu. **Theory and Model of Variable Fuzzy Sets and Its Application** [M]. Dalian：Dalian University of Technology Press, 2009. (in Chinese)

[9] 陈守煜. 模糊可变集合的拓展：可变集合——兼论可拓零界关联函数等于零的错误[C]// 数学及其应用. 北京：原子能出版社，2007.
CHEN Shou-yu. The expand of the fuzzy variable sets：variable sets—And theory extension zero bound correlation function is equal to zero error [C] // **Mathematics and Its Application**. Beijing：Atomic Energy Press, 2007. (in Chinese)

[10] 陈守煜. 可变集—可变模糊集的发展及其在水资源系统中的应用[J]. 数学的实践与认识，2012，**42**(1)：92-101.
CHEN Shou-yu. Variable sets — The development of variable fuzzy sets and the applications in assessment of water resource [J]. **Mathematics in Practice and Theory**, 2012, **42**(1)：92-101. (in Chinese)

[11] 陈守煜. 可变集及水资源系统优选决策可变集原理与方法[J]. 水利学报，2012，**43**(9)：1066-1074.
CHEN Shou-yu. Variable sets and the theorem and method of optimal decision making for water resource system [J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2012, **43**(9)：1066-1074. (in Chinese)

[12] 陈守煜. 工程模糊集理论与应用[M]. 北京：国防工业出版社，1998.
CHEN Shou-yu. **Engineering Fuzzy Set Theory and Application** [M]. Beijing：National Defense Industry Press, 1998. (in Chinese)

[13] 钱1提清. 应用模糊综合评判法进行东莞市水资源规划宏观经济社会效益评价[J]. 珠江现代建设，2006，**134**(6)：1-3.
QIAN Yi-qing. Application of fuzzy comprehensive evaluation method for the water resource planning following macro economic and social benefit evaluation of Dongguan City [J]. **Pearl Modern Construction**, 2006 , **134**(6)：1-3. (in Chinese)

Sustainable development trend forecast theory and method of water resources system based on variable sets

CHEN Shou-yu*

(Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The necessity and importance of developing the theory of variable fuzzy sets to the variable fuzzy clear hybrid sets (simplified to variable sets) are discussed. The opposite object transformation relative diversity factor unit matrix based on the basic mathematics theorem of variable sets is introduced. The forecast principles, methods and examples of variable sets on the water resources' sustainable development trend are of great significance, not only for the mathematics and philosophy sciences, but also for the engineering and other subjects.

Key words: variable sets; variable fuzzy sets; water resources; sustainable development; forecast