第 9 卷 第 7 期
2004 年 7 月

中国图象图形学报
Journal of Image and Graphics

Vol. 9, No. 7
July 2004

# 一种栅格图层的模糊叠置分析模型

虞强源　刘大有　王生生

（吉林大学计算机科学与技术学院，吉林大学符号计算与知识工程教育部重点实验室，长春　130012）

**摘　要**　为了更好地进行 GIS 空间分析，根据 GIS 应用领域中属性数据的区间值特征，首先利用区间值模糊集来描述模糊属性数据的模糊图层，然后基于区间值模糊集给出了一种栅格图层的模糊叠置分析模型，并改进了基于经典模糊集的模糊叠置分析方法。该模型利用区间值模糊集的基本运算，可以实现普通模糊叠置和加权模糊叠置，而采用区间值，则可以减少属性值模糊性的丢失，且叠置结果符合人们的认知和推理规律，实例结果表明，该模型能够较好地解决区间值属性图层间的模糊叠置分析问题。

**关键词**　地理信息系统　栅格图层　模糊叠置分析　区间值　区间值模糊集

**中图法分类号**：TP391.4　P208　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1006-8961(2004)07-0832-05

# A Fuzzy Overlay Analysis Model for Raster Map Layers

YU Qiang-yuan, LIU Da-you, WANG Sheng-sheng

(*College of Computer Science and Technology*, *Key Laboratory of Symbolic Computation and Knowledge Engineering of Ministry of Education*, *Jilin University*, *Changchun* 130012)

**Abstract**　Spatial overlay analysis is an important problem of spatial data analysis. Sometimes spatial data are fuzzy in Geography Information Systems and spatial database, so fuzzy overlay analysis has gained more and more attention from researchers during the recent years. Based on the interval value character of the attributes in GIS applications, the fuzzy map layers of fuzzy attribute data were described as interval valued fuzzy sets. Then an overlay analysis model of fuzzy raster map layers is proposed based on interval valued fuzzy sets. It improves the original fuzzy overlay analysis model, which based on classical fuzzy sets. With the basic operations of interval valued fuzzy sets the model can complete general fuzzy overlay and weighted fuzzy overlay. The weighted fuzzy overlay model will degenerate to general fuzzy overlay when the weights of fuzzy map layers are equal. The fuzzy overlay model can reduce the losing of attribute fuzziness through using interval value to represent the fuzziness, and the fuzzy overlay result accord with the cognitive and reasoning principle of people. The result of the instance shows that this model can well solve fuzzy overlay analysis between the map layers of interval value attributes.

**Keywords**　geography information systems, raster map layers, fuzzy overlay analysis, interval value, interval valued fuzzy sets

## 1　引　言

空间叠置分析是 GIS 空间分析的一个重要研究内容，其目标是分析空间位置相互耦合的地物特征专题属性之间的相互关系。一般两个专题数据图层根据空间位置相互重叠的关系发生联系，往往可揭示一种新的专题特征的空间分布特点，而叠置分析就是将同一区域的多幅不同要素或不同时期的地图进行叠置，以便发现其间的相互联系、差异以及动态变化等特征。如今空间叠置分析已是地理、地质和环境等领域综合分析和评价的一种重要手段，例如将植被、土壤和坡度 3 个图层进行叠置来分析土壤侵蚀情况。GIS 中的图层叠置分析通常分为矢量图层叠置和栅格图层叠置两种形式。

由于目前大多数 GIS 平台所提供的栅格图层叠置功能只能对精确的属性数据进行操作，但实际应用中的空间数据往往具有模糊性（即不能表示为一个精确的数值），因此近年来模糊叠置越来越受到相关领域研究者的重视，现有的模糊叠置模型大都

基金项目：国家自然科学基金项目(60373098)；国家高技术研究发展计划项目(2003AA118020)；吉林省科技发展计划项目(20030523)；吉林大学创新基金项目(2002CX028)

收稿日期：2003-09-22；改回日期：2004-03-29

先将模糊图层建模为一个经典模糊集，然后基于模糊集的与、或和加权综合等运算来实现模糊叠置分析[1,2]。文献[3]给出了一种使用语言程度术语的模糊叠置模型，即先根据模糊术语将模糊图层表示为模糊集，然后分别采用 MIN-MAX 运算、区间法和模糊加权平均来计算结果图层中各栅格的隶属程度；文献[4]则通过模糊集的凸结合给出了多图层的模糊加权凸结合方法，又针对各因素的非补偿情形，给出了非折衷形式的凸结合方法；文献[5]又给出了利用能量函数的模糊叠置综合方法，即通过计算多个模糊集合的能量度量来得到结果模糊集。

在 GIS 的实际应用问题中，由于获取的空间数据往往不是精确的数值，很可能是一个区间范围，如降水量、温度、土壤养分、化学成分含量等等，因此这种类型的空间数据对于某个模糊概念的隶属程度将是一个区间值，比如根据某种化学成分的含量来确定其高含量地区，每个采样点的区间值数据对于"高含量"这个模糊概念的隶属度即为一个区间值，而整个专题图层将形成一个区间值模糊集。由于在实际应用中需要对这种模糊图层进行叠置分析，进而完成查询、推理和决策，因此需要基于区间值模糊集来讨论模糊叠置分析。早在 20 世纪 70 年代就有一些学者讨论了区间值模糊集[6]，近几年区间值模糊集的研究和应用更逐渐受到重视，其原因是由于在实际应用中，难以获得精确的数据，且对象对于概念的隶属程度往往不易确定，而区间值隶属度相对而言较易确定，因此判断、推理所产生的结果用区间值来表示更能反映人类推理的模糊性。

## 2　区间值和区间值模糊集

本节介绍区间值和区间值模糊集的有关概念和运算性质[7]。

**定义 1**　用 $I$ 表示单位闭区间 $[0,1]$，称包含于闭区间 $[0,1]$ 的闭区间 $\hat{a}=[a^-,a^+]$ 为区间值，$I$ 上的区间值全体记为 $[I]$，即 $[I]=\{[a^-,a^+]\,|\,a^-\leqslant a^+,a^-,a^+\in I\}$。同样可以定义实数集 R 上的区间值集合为 $[\mathbf{R}]=\{[a^-,a^+]\,|\,a^-\leqslant a^+,a^-,a^+\in \mathbf{R}\}$。

显然对于 $a\in I(a\in\mathbf{R})$，若令 $a\equiv[a,a]$，则有 $a\in[I](a\in[\mathbf{R}])$，即单点数值是区间值的特例，$I\subset[I](R\subset[\mathbf{R}])$。

**定义 2**　设 $X$ 是一非空普通集合，称映射 $A:X\to[I],x\to[A^-(x),A^+(x)]$ 为 $X$ 上的区间值模糊集，$X$ 上所有的区间值模糊集记为 $IF(X)$（$IF$ 是 Interal Valued Fuzzy Sets 的缩写）。

对 $\forall A\in IF(X)$，令 $A(x)=[A^-(x),A^+(x)]$，$A^-(x)\leqslant A^+(x),\forall x\in X$，则普通模糊集 $A^-:X\to I$ 和 $A^+:X\to I$ 分别称为 $A$ 的下模糊集和上模糊集。特别地，若 $A^-(x)\equiv A^+(x)$ 时，则 $A$ 退化为普通模糊集；若 $A^-(x)\equiv A^+(x)\equiv 0$ 或 1 时，则 $A$ 退化为普通集合。

设 $A,B\in IF(X)$，$A(x)=[A^-(x),A^+(x)]$，$B(x)=[B^-(x),B^+(x)]$，规定

$A=B\Leftrightarrow A(x)=B(x)\Leftrightarrow A^-(x)=B^-(x)$，$A^+(x)=B^+(x),\forall x\in X$。

本文所讨论的栅格图层的属性数据对于模糊概念的隶属程度是 $I$ 上的区间值，下面主要就 $[I]$ 上的性质和运算进行讨论。

对 $\hat{a},\hat{b}\in[I]$，$\hat{a}=[a^-,a^+]$，$\hat{b}=[b^-,b^+]$，规定 $[I]$ 中元素的序如下：

①$\hat{a}\leqslant\hat{b}\Leftrightarrow a^-\leqslant b^-,a^+\leqslant b^+$；

②$\hat{a}=\hat{b}\Leftrightarrow a^-=b^-,a^+=b^+$；

③$\hat{a}<\hat{b}\Leftrightarrow\hat{a}\leqslant\hat{b},\hat{a}\neq\hat{b}$。

$*$ 代表区间值间的任意一种运算，根据扩展原理，有

$[a^-,a^+]*[b^-,b^+]=\{z\,|\,(x,y)\in[a^-,a^+]\times[b^-,b^+],z=x*y\}$。

对 $\hat{a},\hat{b}\in[I]$，$\hat{a}=[a^-,a^+]$，$\hat{b}=[b^-,b^+]$，区间值的基本运算为：

(1) $\hat{a}$ 的否定（补）：$\neg\hat{a}=\neg[a^-,a^+]=[1-a^+,1-a^-]$；

(2) $\hat{a},\hat{b}$ 的逻辑和（取大）：$\hat{a}\vee\hat{b}=[a^-\vee b^-,a^+\vee b^+]$；

(3) $\hat{a},\hat{b}$ 的逻辑积（取小）：$\hat{a}\wedge\hat{b}=[a^-\wedge b^-,a^+\wedge b^+]$；

(4) $\hat{a},\hat{b}$ 的乘积：$\hat{a}\hat{b}=[a^-b^-,a^+b^+]$。

容易看出，$I$ 上的区间值在上述运算下是封闭的。

对 $\hat{a},\hat{b}\in[\mathbf{R}]$，$\hat{a}=[a^-,a^+]$，$\hat{b}=[b^-,b^+]$，规定 $\hat{a}+\hat{b}=[a^-+b^-,a^++b^+]$。

设 $A$ 和 $B$ 是论域 $X$ 上的两个区间值模糊集，$x\in X$，其隶属函数分别为 $A(x)=[A^-(x),A^+(x)]$ 和 $B(x)=[B^-(x),B^+(x)]$，则区间值模糊集的交、并和补运算分别如下：

$S=A\cup B$ 为 $A$ 和 $B$ 的并集，其满足 $S(x)=(A\cup B)(x)=A(x)\vee B(x),\forall x\in X$；

$S=A\cap B$ 为 $A$ 和 $B$ 的交集，其满足

$\boldsymbol{S}(x)=(\boldsymbol{A}\cap\boldsymbol{B})(x)=\boldsymbol{A}(x)\wedge\boldsymbol{B}(x),\forall\ x\in\boldsymbol{X}$；

$\boldsymbol{S}=\boldsymbol{A}^c$ 为 $A$ 的补集，其满足 $\boldsymbol{S}(x)=\boldsymbol{A}^c(x)=\neg\boldsymbol{A}(x),\forall\ x\in\boldsymbol{X}$。

# 3　模糊叠置分析模型

## 3.1　模糊栅格图层的表示

对于 GIS 应用中，若属性值为区间值的栅格数据，则首先需要根据模糊概念（即语言修饰词，如土壤肥力高、降水充足等）将其模糊化，其属性数据对于某个模糊概念的隶属程度为 $I$ 上的区间值，这样模糊化过程就将整个栅格图层表示为一个区间值模糊集，如中等森林覆盖率的隶属函数和模糊化过程如图1所示。

$$\mu_{\text{medium}}(x)=\begin{cases}x/30 & 0\leqslant x<30\\(60-x)/30 & 30\leqslant x<60\end{cases}$$

| | | |
|---|---|---|
| [0,0] | [1,1.8] | [12,12.6] |
| [2,2.4] | [15,15.9] | [27.3,27.9] |
| [11.1,11.7] | [36,36.9] | [29.1,30.3] |

森林覆盖率(%)

$\xrightarrow{\text{模糊化}}$

| | | |
|---|---|---|
| [0,0] | [0.03,0.06] | [0.4,0.42] |
| [0.07,0.08] | [0.5,0.53] | [0.91,0.93] |
| [0.37,0.39] | [0.77,0.8] | [0.97,1] |

中等森林覆盖率的隶属程度

图1　模糊化过程示例

## 3.2　模糊叠置分析

栅格图层叠置是将表示不同属性要素而又具有相同尺寸的栅格单元叠加，即通过对相应栅格单元的数据进行运算来得到另外一个结果图层。栅格单元间的运算通常为与、或、差，如果在具体应用中进行叠置操作的各个图层具有不同的权数，则需要采用加权叠置。模糊叠置分析的操作对象为多个区间值模糊集，其得到的结果图层仍然表示为区间值模糊集。

### 3.2.1　普通模糊叠置

设所要讨论的栅格单元集合为 $X$，两个模糊栅格图层相应的区间值模糊集分别为 $\boldsymbol{A}(x)=[\boldsymbol{A}^-(x),\boldsymbol{A}^+(x)]$ 和 $\boldsymbol{B}(x)=[\boldsymbol{B}^-(x),\boldsymbol{B}^+(x)]$，$x\in\boldsymbol{X}$，叠置结果图层相应的区间值模糊集为 $\boldsymbol{C}(x)$，则两个栅格图层的“与叠置”、“或叠置”和“非叠置”操作如下：

（1）与叠置：$\boldsymbol{C}(x)=(\boldsymbol{A}\cap\boldsymbol{B})(x)=\boldsymbol{A}(x)\wedge\boldsymbol{B}(x),\forall\ x\in\boldsymbol{X}$；

（2）或叠置：$\boldsymbol{C}(x)=(\boldsymbol{A}\cup\boldsymbol{B})(x)=\boldsymbol{A}(x)\vee\boldsymbol{B}(x),\forall\ x\in\boldsymbol{X}$；

（3）差叠置：$\boldsymbol{C}(x)=(\boldsymbol{A}\cap\boldsymbol{B}^c)(x)=\boldsymbol{A}(x)\wedge\neg\boldsymbol{B}(x),\forall\ x\in\boldsymbol{X}$。

上述“与叠置”和“或叠置”操作很容易扩展为多个图层叠置的情形，设 $n(n\geqslant2)$ 个图层相应的区间值模糊集分别为 $\boldsymbol{A}_1,\boldsymbol{A}_2,\cdots,\boldsymbol{A}_n$，则有

（1）与叠置：$\boldsymbol{C}(x)=(\bigcap_{i=1}^{n}\boldsymbol{A}_i)(x)=\bigwedge_{i=1}^{n}\boldsymbol{A}_i(x)$，$\forall\ x\in\boldsymbol{X}$；

（2）或叠置：$\boldsymbol{C}(x)=(\bigcup_{i=1}^{n}\boldsymbol{A}_i)(x)=\bigvee_{i=1}^{n}\boldsymbol{A}_i(x)$，$\forall\ x\in\boldsymbol{X}$。

### 3.2.2　加权模糊叠置

在 GIS 实际应用问题中，各叠置图层的属性数据对于叠置结果的重要程度通常不尽相同，其完全相同仅仅是特殊情形，此时模糊叠置操作往往不能用通常的与、或、差来描述，而必须考虑各叠置图层的相应权数。加权模糊综合是指根据图层的权数对多个叠置图层进行综合来得到叠置结果，由于每个图层的真值和权数都将对结果产生作用，因此栅格单元的隶属程度越大，图层的权数越大，此栅格单元在结果图层中的隶属程度就越大[8]。

设所讨论空间范围的栅格单元集合为 $X$，两个模糊栅格图层相应的区间值模糊集分别为 $\boldsymbol{A}(x)=[\boldsymbol{A}^-(x),\boldsymbol{A}^+(x)]$ 和 $\boldsymbol{B}(x)=[\boldsymbol{B}^-(x),\boldsymbol{B}^+(x)]$，$x\in\boldsymbol{X}$。$W_1,W_2\in[0,1]$ 为两个模糊图层相应的权数 $(W_1+W_2=1)$，其叠置结果图层相应的区间值模糊集为 $\boldsymbol{C}(x)$。对 $\forall\ x\in\boldsymbol{X}$，其“加权模糊与”、“加权模糊或”和“加权模糊综合”操作如下：

（1）加权模糊与

$$\boldsymbol{C}(x)=\begin{cases}\boldsymbol{A}(x) & \boldsymbol{A}(x)\times W_2<\boldsymbol{B}(x)\times W_1\\\boldsymbol{B}(x) & \boldsymbol{A}(x)\times W_2>\boldsymbol{B}(x)\times W_1\\\boldsymbol{A}(x)\wedge\boldsymbol{B}(x) & \text{否则}\end{cases}$$

（2）加权模糊或

$$\boldsymbol{C}(x)=\begin{cases}\boldsymbol{A}(x) & \boldsymbol{A}(x)\times W_1>\boldsymbol{B}(x)\times W_2\\\boldsymbol{B}(x) & \boldsymbol{A}(x)\times W_1<\boldsymbol{B}(x)\times W_2\\\boldsymbol{A}(x)\vee\boldsymbol{B}(x) & \text{否则}\end{cases}$$

（3）加权模糊综合

$$\boldsymbol{C}(x)=\boldsymbol{A}(x)\times W_1+\boldsymbol{B}(x)\times W_2$$

上述3种操作可进一步扩展为多图层叠置，设 $n$ $(n\geqslant2)$ 个图层相应的区间值模糊集分别为 $\boldsymbol{A}_1,\boldsymbol{A}_2,\cdots,$

$A_n$，其权数分别为 $W_1, W_2, \cdots, W_n$，且满足 $\sum_{i=1}^{n} W_i = 1$，对 $x \in X$，则上述 3 种模糊叠置操作如下：

（1）令 $S = \{i \mid \neg\exists\ j \neq i, A_i(x) \times W_j > A_j(x) \times W_i, 1 \leqslant i, j \leqslant n\}$，则 $n$ 个图层"加权模糊与"的结果为 $C(x) = \bigwedge_{k \in S} A_k(x)$；

（2）令 $T = \{i \mid \neg\exists\ j \neq i, A_i(x) \times W_i < A_j(x) \times W_j, 1 \leqslant i, j \leqslant n\}$，则 $n$ 个图层"加权模糊或"的结果为 $C(x) = \bigvee_{k \in T} A_k(x)$；

（3）$n$ 个图层"加权模糊综合"的结果为 $C(x) = \sum_{i=1}^{n} A_i(x) \times W_i$。

### 3.3　实　例

在基于 GIS 的气候分类中，亚热带定义为"降水量充足"且"温暖"，由于各采样点的降水量数据（单位：mm）和温度数据（单位：℃）往往是区间值，因此可根据模糊概念"降水量充足"和"温暖"将降水量图层和温度图层进行模糊叠置分析，"降水量充足"和"温暖"的隶属函数见下式，两个图层的权数分别为 0.6 和 0.4，表 1 为加权模糊叠置结果。

$$\mu_{\text{adequate}}(v) = \begin{cases} 0, & v \leqslant 500 \\ \dfrac{v-500}{400}, & 500 < v < 900 \\ 1 & 900 \leqslant v \leqslant 1\,100 \\ \dfrac{1\,500-v}{400}, & 1\,100 < v < 1500 \\ 0, & v \geqslant 1\,500 \end{cases}$$

（公式中单位为 mm）

$$\mu_{\text{warm}}(t) = \begin{cases} 0, & t \leqslant 16 \\ \dfrac{\mathrm{t}-16}{4}, & 16 < t < 20 \\ 1, & 20 \leqslant t \leqslant 22 \\ \dfrac{26-t}{4}, & 22 < t < 26 \\ 0, & t \geqslant 26 \end{cases}$$

（公式中单位为 ℃）

表 1　栅格的属性值、隶属度及其模糊叠置结果

| 栅格 | 降水量（mm） | 降水量充足程度 | 温度（℃） | 温暖程度 | 加权模糊与 | 加权模糊或 | 加权模糊综合 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $P_1$ | [958,1 052] | [1,1] | [21.6,22.1] | [0.975,1] | [1,1] | [1,1] | [0.99,1] |
| $P_2$ | [1 080,1 116] | [0.96,1] | [21.8,22.2] | [0.95,1] | [0.96,1] | [0.96,1] | [0.96,1] |
| $P_3$ | [1 280,1 378] | [0.305,0.55] | [22.1,22.5] | [0.875,0.975] | [0.305,0.55] | [0.875,0.975] | [0.53,0.72] |
| $P_4$ | [955,1 020] | [1,1] | [26.7,27.2] | [0,0] | [0,0] | [1,1] | [0.6,0.6] |
| $P_5$ | [913,998] | [1,1] | [22.8,23.4] | [0.65,0.80] | [0.65,0.80] | [1,1] | [0.86,0.92] |
| $P_6$ | [1 000,1 080] | [1,1] | [24.0,24.5] | [0.375,0.5] | [0.375,0.5] | [1,1] | [0.75,0.8] |
| $P_7$ | [1 138,1 216] | [0.71,0.905] | [21.2,21.8] | [1,1] | [0.71,0.905] | [0.71,0.905] | [0.826,0.94] |
| $P_8$ | [1 198,1 286] | [0.535,0.755] | [22.4,23.0] | [0.75,0.9] | [0.535,0.755] | [0.535,0.755] | [0.62,0.81] |
| $P_9$ | [1 244,1 368] | [0.33,0.64] | [23.5,23.9] | [0.525,0.625] | [0.33,0.64] | [0.525,0.64] | [0.41,0.63] |
| $P_{10}$ | [2 188,2 256] | [0,0] | [25.7,26.2] | [0,0.075] | [0,0] | [0,0.075] | [0,0.03] |
| $P_{11}$ | [744,868] | [0.61,0.92] | [20.7,21.2] | [1,1] | [0.61,0.92] | [1,1] | [0.77,0.95] |
| $P_{12}$ | [239,336] | [0,0] | [22.2,22.7] | [0.825,0.95] | [0,0] | [0.825,0.95] | [0.33,0.38] |
| $P_{13}$ | [3 166,3 289] | [0,0] | [10.7,11.4] | [0,0] | [0,0] | [0,0] | [0,0] |
| $P_{14}$ | [1 206,1 388] | [0.28,0.735] | [17.5,18.0] | [0.375,0.5] | [0.28,0.735] | [0.28,0.735] | [0.32,0.64] |
| $P_{15}$ | [332,424] | [0,0] | [21.3,21.9] | [1,1] | [0,0] | [1,1] | [0.4,0.4] |
| $P_{16}$ | [1 732,1 812] | [0,0] | [16.7,17.2] | [0.175,0.3] | [0,0] | [0.175,0.3] | [0.07,0.12] |
| $P_{17}$ | [1 256,1 372] | [0.32,0.61] | [23.1,23.6] | [0.6,0.725] | [0.32,0.61] | [0.6,0.725] | [0.43,0.66] |
| $P_{18}$ | [976,1 064] | [1,1] | [26.1,26.7] | [0,0] | [0,0] | [1,1] | [0.6,0.6] |

然后根据模糊叠置分析结果就可以进行模糊查询，如果根据亚热带的严格定义，则返回结果仅为 $\{P_1\}$。在实际应用中可以根据具体问题设定相应的阈值，如果阈值设为[0.7, 0.8]，根据加权模糊综合的结果，则符合亚热带的查询结果为 $\{P_1, P_2, P_5, P_6, P_7, P_{11}\}$。

## 4　结　论

在现有的模糊叠置方法中，当由属性值所决定的模糊隶属程度一旦确定，则模糊集合的后继数值计算实际上已经把数据的模糊性完全抛开，并没有继续向前传送至结果[9]。本文根据 GIS 实际应用领域中属性数据的区间值特征，利用区间值模糊集来描述模糊栅格图层，进而给出了栅格图层的模糊叠置分析模型，该方法改进了基于经典模糊集的叠置分析方法中的一些不足，由于采用区间值可以减少属性数据模糊性的丢失，因此用区间值模糊集表示的模糊叠置分析结果更能反映人类的认知和推理规律。本文给出的加权模糊叠置模型在各叠置图层权数相等时，退化为普通的模糊叠置模型。实践证明，该模型能够较好地解决区间值属性图层间的模糊叠

置分析问题,在基于 GIS 的应用领域中具有一定的实际应用价值。进一步的研究工作包括基于区间值的模糊空间查询和基于区间值的模糊空间推理等等。

## 参 考 文 献


1 陈述彭,鲁学军,周成虎. 地理信息系统导论[M]. 北京:科学出版社,1999.

2 黄波,徐冠华,阎守邕. GIS 中空间模糊叠加模型的设计[J]. 测绘学报,1996,**25**(1):53~56.

3 Jiang B, Kainz W. Fuzzy overlay analysis with linguistic degree terms [A]. In: Kraak M J, Molenaar M, eds: Advances in GIS Research II: Proceedings of 7th International Symposium on Spatial Data Handling[C]. London: Taylor & Francis, 1996: 301~318.

4 Urbranski J. The use of fuzzy sets in the evaluation of the environment of coastal waters [J]. International Journal of Geographical Information Science, 1999, **13**(7):723~730.

5 Stefanakis E, Vazirgiannis M, Sellis T. Incorporating fuzzy set methodologies in a DBMS repository for the application domain of GIS [J]. International Journal of Geographical Information Science, 1999, **13**(7): 657~675.

6 罗承忠. 模糊集引论[M](上册). 北京:北京师范大学出版社,1989.

7 陈启浩. 模糊值及其在模糊推理中的应用[M]. 北京:北京师范大学出版社,2000.

8 刘大有,唐海鹰,陈建中等. 加权模糊逻辑[J]. 计算机研究与发展,1998,**35**(11):961~965.

9 史文中,王树良. GIS 中属性不确定性的处理方法及其发展[J]. 遥感学报. 2002,**6**(5):393~400.


**虞强源** 1973 年生,讲师,2003 年获吉林大学计算机科学与技术学院计算机软件与理论专业博士学位。主要研究方向为空间推理、专家系统和不确定信息处理等。E-mail:yuqiangyuan@yahoo.com.cn

**刘大有** 1942 年生,教授,博士生导师,现任吉林大学计算机科学与技术学院院长、吉林省计算机学会理事长。主要研究方向为知识工程与专家系统、分布式 AI 与多 Agent 系统、算法与数据结构、空间推理与 GIS 应用等。

**王生生** 1974 年生,讲师,2003 年 12 月获吉林大学计算机科学与技术学院计算机应用技术专业博士学位。主要研究方向为时空推理、时空数据挖掘和地理信息系统等。