

# 控制与决策

Control and Decision

## 结合多特征和模糊偏好关系的高分辨率遥感影像分割

陈烜, 刘晓燕, 赵泉华, 李玉

引用本文:

陈, 刘晓燕, 赵泉华, 等. 结合多特征和模糊偏好关系的高分辨率遥感影像分割[J]. 控制与决策, 2020, 35(4): 781–790.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0676>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 基于新排序函数的直觉模糊双边匹配决策方法

Decision method for intuitionistic fuzzy two-sided matching based on the new ranking function

控制与决策. 2020, 35(4): 985–992 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0688>

### 基于概率犹豫模糊熵的多属性决策方法

Multi-attribute decision method based on probabilistic hesitant fuzzy entropy

控制与决策. 2019, 34(4): 861–870 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.1374>

### 参数自适应的可变类FLICM灰度图像分割算法

Self-adaptive FLICM algorithm for gray image segmentation with unknown number of clusters

控制与决策. 2017, 32(2): 262–268 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.0050>

### 双论域上的犹豫模糊语言多粒度粗糙集及其应用

Hesitant fuzzy linguistic multigranulation rough set over two universes and its application

控制与决策. 2017, 32(1): 105–110 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.1365>

### 基于模糊子空间聚类的0阶岭回归TSK模糊系统

Fuzzy subspace clustering based 0-order ridge regression TSK fuzzy system

控制与决策. 2016, 31(5): 882–888 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.0182>

### 基于空间约束Student's-t混合模型的模糊聚类图像分割

Fuzzy clustering algorithm based on spatially constrained Student's-t mixture model for image segmentation

控制与决策. 2016, 31(11): 2065–2070 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.1577>

### 基于图变换的图像压缩采样与分类

Graph-transform based image compressive sampling and classification

控制与决策. 2015(4): 617–622 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2013.1681>

### 浮选泡沫图像等效尺寸分布特征提取

Equivalent size distribution feature extraction of flotation froth image

控制与决策. 2015(1): 131–136 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2013.1339>

# 结合多特征和模糊偏好关系的高分辨率遥感影像分割

陈 焯, 刘晓燕<sup>†</sup>, 赵泉华, 李 玉

(辽宁工程技术大学 测绘与地理科学学院, 辽宁 阜新 123000)

**摘 要:** 高空间分辨率(简称高分辨率)遥感影像除光谱特征外,还包含丰富的纹理特征,为了实现高分辨率遥感影像的高精度分割,提出结合多特征和模糊偏好关系的分割方法.首先,通过像素光谱测度定义多种统计特征,根据定义各个特征提取特征影像并分别实现影像分割,利用其结果构建模糊决策矩阵;然后,基于像素定义特征间的模糊偏好关系矩阵,计算不同特征对最终分割决策的权重,并对模糊决策矩阵加权以突出优势特征,抑制劣势特征;最后,通过反模糊化决策矩阵得到最优影像分割结果.对合成影像和真实高分辨率遥感影像的分割结果进行定性和定量评价,结果表明,合成影像的分割总精度为 99.8%, Kappa 值为 0.998,说明所提出的算法通过结合各特征的优势部分能够获得高精度的分割结果.

**关键词:** 高分辨率遥感影像; 光谱特征; 纹理特征; 模糊偏好关系; 模糊决策矩阵

中图分类号: TP273

文献标志码: A

## Combining multi-feature and fuzzy preference relation for high resolution remote sensing image segmentation

CHEN Xuan, LIU Xiao-yan<sup>†</sup>, ZHAO Quan-hua, LI Yu

(School of Geomatics, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

**Abstract:** In addition to spectral features, the high spatial resolution (abbreviated as high resolution) remote sensing images contain rich texture features. In order to achieve high precision segmentation for high resolution remote sensing images, this paper proposes a segmentation method which combines multi-feature and fuzzy preference relation. Firstly, statistical features are defined by using pixel spectral measure. The feature image segmentation is realized according to the defined features and the segmentation results are used to construct the fuzzy decision matrix. Then, the fuzzy preference relation matrix is defined based on the pixel to calculate different features weight, and the fuzzy decision matrix is weighted to highlight the superior features and suppress the inferior features. Finally, the optimal image segmentation results are obtained by the defuzzification decision matrix. The qualitative and quantitative evaluation of the synthetic and real high resolution remote sensing image segmentation results show that the total accuracy of synthetic image is 99.8%, Kappa value is 0.998. The proposed algorithm combines the advantages of each feature, which obtains highly accurate segmentation results.

**Keywords:** high resolution remote sensing images; spectral features; texture features; fuzzy preference relation; fuzzy decision matrix

## 0 引 言

影像分割是影像处理中的重要步骤,其实质就是根据影像的光谱、颜色、纹理和边缘等特征把影像分割成具有同质特征各个连通区域的过程<sup>[1-2]</sup>. 高分辨率遥感影像包含的信息多而复杂,且除光谱特征外,还包含丰富的几何特征和纹理特征<sup>[3]</sup>.

为此,很多学者提出了基于多特征的影像分割. 鲜焱等<sup>[4]</sup>提出了将融合均值特征、方差特征和方位特征构成新的特征矢量,并利用加权模糊  $C$  均

值(weighted fuzzy  $C$ -means, WFCM)<sup>[5-7]</sup>算法对其进行聚类,从而得到分割结果;李华等<sup>[8]</sup>采用均值漂移(mean shift)算法对纹理特征(极性、各向异性 and 对比度)进行分割和平滑处理,再利用区域合并得到分割结果;侯艳丽<sup>[9]</sup>提出了融合纹理的空间特征和频域特征,并对融合后的纹理特征利用  $K$  均值算法进行聚类,从而实现分割;贾士军等<sup>[10]</sup>在统计理论框架下利用多元高斯分布融合影像的颜色和纹理信息实现了影像分割;金永涛等<sup>[11]</sup>首先提取了几何特征、纹理特

收稿日期: 2018-05-19; 修回日期: 2018-10-13.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41301479, 41271435).

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: ltalex@163.com.

征和光谱特征,并采用改进的均值漂移方法对多特征影像进行滤波处理,然后利用分水岭分割方法对处理后的影像进行分割;陈强等<sup>[12]</sup>将影像多个纹理特征作为支持向量机(support vector machine, SVM)的训练特征,构建支持向量机分类器,从而实现影像分割;尹艳鹏等<sup>[13]</sup>结合颜色和纹理特征构建多特征融合的条件随机场模型,从而实现对影像的分割;潘琛等<sup>[14]</sup>通过提取地物的光谱特征、纹理特征和形状特征,结合试验区主要地物类型提纯后的训练样本集,采用决策树进行了影像分类。

上述基于多特征的分割算法得到的分割结果均优于利用单一特征的分割结果,但在分割决策中很少考虑特征权重对分割结果的影响.不同特征对于分割起到的作用不同,所占的权重必然不同.权重的准确性直接影响到后续的分割结果,因此,这些方法均存在一定的缺陷.为此,本文提出结合多特征和模糊偏好关系的影像分割方法,通过模糊偏好关系<sup>[15-17]</sup>基于像素对各个特征的权重进行求解,并对模糊决策矩阵进行加权,通过反模糊化决策矩阵得到分割结果.通过对合成和真实高分辨率遥感影像的分割实验验证本文算法的可行性和有效性。

## 1 算法描述

### 1.1 特征表达

已知多光谱遥感影像  $\mathbf{X} = \{\mathbf{x}_k(a_k, b_k), k = 1, 2, \dots, N\}$ . 其中:  $k$  为像素索引;  $\mathbf{x}_k = (x_{k1}, \dots, x_{kq}, \dots, x_{kd})$  为像素  $k$  的光谱测度矢量,  $q$  为波段索引,  $d$  为波段数;  $(a_k, b_k)$  为像素  $k$  的格点坐标;  $N$  为像素总数。

对于多光谱遥感影像  $\mathbf{X}$ , 设  $\mathbf{W}_{kq}$  为第  $q$  波段中以像素  $k$  为中心像素且大小为  $s \times s$  窗口内的光谱测度集合. 设影像  $\mathbf{X}$  第  $q$  个波段的灰度级集合为  $H_q$ , 在水平方向上间隔一个像素组建像素对形成灰度共生矩阵,  $C_{xyq}$  为  $\mathbf{W}_{kq}$  窗口内灰度  $x, y \in H_q$  的共生像素对数, 共生概率定义为

$$P_{xyq} = \frac{C_{xyq}}{\sum_{x', y' \in H_q} C_{x' y' q}}. \quad (1)$$

据此, 本文选择均值特征、能量特征、熵特征、反差距特征和对比度特征实现单一特征影像提取, 主要是由于这些特征在分割中能得到较高的精度<sup>[18-19]</sup>. 各特征的具体定义如下:

#### 1) 均值特征.

设均值特征  $\mathbf{z}_k^{(1)} = (z_{k1}^{(1)}, \dots, z_{kq}^{(1)}, \dots, z_{kd}^{(1)})$ , 其中  $z_{kq}^{(1)}$  定义为

$$z_{kq}^{(1)} = \frac{1}{s^2} \sum_{x_{k'q} \in \mathbf{W}_{kq}} x_{k'q}. \quad (2)$$

#### 2) 能量特征.

设能量特征为  $\mathbf{z}_k^{(2)} = (z_{k1}^{(2)}, \dots, z_{kq}^{(2)}, \dots, z_{kd}^{(2)})$ , 其中  $z_{kq}^{(2)}$  定义为

$$z_{kq}^{(2)} = \sum_{x \in H_q} \sum_{y \in H_q} P_{xyq}^2. \quad (3)$$

能量特征反映影像灰度分布的均匀度以及纹理的粗细, 纹理越粗, 能量特征值越大。

#### 3) 熵特征.

设熵特征为  $\mathbf{z}_k^{(3)} = (z_{k1}^{(3)}, \dots, z_{kq}^{(3)}, \dots, z_{kd}^{(3)})$ , 其中  $z_{kq}^{(3)}$  定义为

$$z_{kq}^{(3)} = - \sum_{x \in H_q} \sum_{y \in H_q} P_{xyq} \log P_{xyq}. \quad (4)$$

熵特征是基于信息理论的特征量, 反映影像包含的信息量. 影像的灰度分布越分散, 即纹理越复杂, 熵值越大; 影像灰度分布越均匀, 即纹理越简单, 熵值越小。

#### 4) 反差距特征.

设反差距特征为  $\mathbf{z}_k^{(4)} = (z_{k1}^{(4)}, \dots, z_{kq}^{(4)}, \dots, z_{kd}^{(4)})$ , 其中  $z_{kq}^{(4)}$  定义为

$$z_{kq}^{(4)} = \sum_{x \in H_q} \sum_{y \in H_q} \frac{P_{xyq}}{1 + (x - y)^2}. \quad (5)$$

反差距特征反映影像纹理的同质性, 度量影像纹理局部变化的多少, 其值大则说明影像纹理的不同区域间变化很小, 局部非常均匀。

#### 5) 对比度特征.

设对比度特征为  $\mathbf{z}_k^{(5)} = (z_{k1}^{(5)}, \dots, z_{kq}^{(5)}, \dots, z_{kd}^{(5)})$ , 其中  $z_{kq}^{(5)}$  定义为

$$z_{kq}^{(5)} = \sum_{x \in H_q} \sum_{y \in H_q} P_{xyq} |x - y|. \quad (6)$$

对比度特征是可视的纹理特征, 体现影像的清晰程度. 对比度特征值越大, 表明影像中的纹理沟纹越深, 视觉效果越清晰。

## 1.2 模糊决策矩阵构建

由于模糊  $C$  均值(fuzzy  $C$ -means, FCM)算法原理简单、收敛速度快, 本文采用 FCM 算法对特征影像进行分割, FCM 算法的目标函数为

$$J(\mathbf{U}, \mathbf{V}) = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^C \mu_{ki}^m \|\mathbf{x}_k - \mathbf{v}_i\|. \quad (7)$$

其中:  $i$  为类别索引;  $C$  为聚类数;  $\mathbf{U} = [\mu_{ki}]_{N \times C}$  为隶属度矩阵, 表达影像  $\mathbf{X}$  的模糊分割,  $\mu_{ki} \in [0, 1]$  代表第  $k$  个像素属于第  $i$  类的隶属度, 并满足如下约束条

件:

$$\sum_{i'=1}^C \mu_{ki} = 1, 2, k = 1, 2, \dots, N; \quad (8)$$

$V = \{v_i, i = 1, 2, \dots, C\}$ ,  $v_i = (v_{i1}, \dots, v_{iq}, \dots, v_{id})$  为第  $i$  个聚类的中心;  $m$  为模糊因子, 表征算法的模糊程度. 通过最小化该目标函数可以得到隶属度和聚类中心如下:

$$\mu_{ki} = \frac{1}{\sum_{i'=1}^C \left( \frac{\|x_k - v_i\|^2}{\|x_k - v_{i'}\|^2} \right)^{\frac{2}{m-1}}}, \quad (9)$$

$$v_i = \frac{\sum_{k=1}^N x_k \mu_{ki}^m}{\sum_{k=1}^N \mu_{ki}^m}. \quad (10)$$

采用FCM算法对单一特征影像进行分割, 分割结果以每一类的像素均值表示, 并将该值作为每一类的标准聚类中心. 利用式(9)计算单一特征影像分割结果与标准聚类中心的隶属度, 构成模糊决策矩阵.  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_c\}$  为各单一特征模糊决策矩阵集合, 其中  $c$  为特征数. 本文利用5个统计特征实现分割, 即  $c = 5$ .

### 1.3 多特征分割模型构建

#### 1.3.1 模糊偏好关系矩阵

设模糊偏好关系矩阵为  $R^{(k)} = [r_{jj'}^{(k)}]_{c \times c}$ , 其中:  $r_{jj'}^{(k)} \in [0, 1]$  表示就像素  $k$  而言, 第  $j$  个特征偏好于第  $j'$  个特征的程度. 当  $0.5 - \varepsilon \leq r_{jj'}^{(k)} \leq 0.5 + \varepsilon$  时, 表示两个特征同样重要; 当  $0 < r_{jj'}^{(k)} < 0.5 - \varepsilon$  时, 表示特征  $z_k^{(j')}$  比特征  $z_k^{(j)}$  重要, 且  $r_{jj'}^{(k)}$  越小  $z_k^{(j')}$  越显重要; 当  $0.5 + \varepsilon < r_{jj'}^{(k)} < 1$  时, 表示特征  $z_k^{(j)}$  比特征  $z_k^{(j')}$  重要, 且  $r_{jj'}^{(k)}$  越大  $z_k^{(j)}$  越显重要. 当模糊偏好关系矩阵满足如下等式时, 称该模糊偏好关系矩阵满足乘性一致性:

$$r_{jj''}^{(k)} r_{j''j'}^{(k)} r_{j'j}^{(k)} = r_{j''j'}^{(k)} r_{j'j''}^{(k)} r_{jj}^{(k)}, \quad \forall j, j', j'' \in \{1, 2, \dots, c\}. \quad (11)$$

#### 1.3.2 求解各特征权重

设  $w^{(k)} = (w_1^{(k)}, w_2^{(k)}, \dots, w_c^{(k)})^T$  为模糊偏好关系矩阵  $R^{(k)}$  的权重向量, 满足: 1)  $w_j^{(k)} > 0, 1 \leq j \leq c$ ; 2)  $\sum_{j=1}^c w_j^{(k)} = 1$ . 由于矩阵  $R^{(k)}$  满足乘性一致性, 元素  $r_{jj'}^{(k)}$  用权重可以表达为

$$r_{jj'}^{(k)} = \frac{w_j^{(k)}}{w_j^{(k)} + w_{j'}^{(k)}}, \quad (12)$$

模糊偏好关系矩阵  $R^{(k)}$  变为

$$R^{(k)} = \begin{bmatrix} \frac{w_1^{(k)}}{w_1^{(k)} + w_1^{(k)}} & \frac{w_1^{(k)}}{w_1^{(k)} + w_2^{(k)}} & \dots & \frac{w_1^{(k)}}{w_1^{(k)} + w_c^{(k)}} \\ \frac{w_2^{(k)}}{w_2^{(k)} + w_1^{(k)}} & \frac{w_2^{(k)}}{w_2^{(k)} + w_2^{(k)}} & \dots & \frac{w_2^{(k)}}{w_2^{(k)} + w_c^{(k)}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{w_c^{(k)}}{w_c^{(k)} + w_1^{(k)}} & \frac{w_c^{(k)}}{w_c^{(k)} + w_2^{(k)}} & \dots & \frac{w_c^{(k)}}{w_c^{(k)} + w_c^{(k)}} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

根据式(13)可以写出等式

$$\begin{aligned} & \frac{w_j^{(k)}}{w_j^{(k)} + w_1^{(k)}} (w_j^{(k)} + w_1^{(k)}) + \\ & \frac{w_j^{(k)}}{w_j^{(k)} + w_2^{(k)}} (w_j^{(k)} + w_2^{(k)}) + \\ & \dots + \frac{w_j^{(k)}}{w_j^{(k)} + w_c^{(k)}} (w_j^{(k)} + w_c^{(k)}) = c w_j^{(k)}, \\ & j = 1, 2, \dots, c. \end{aligned} \quad (14)$$

将模糊关系矩阵  $R^{(k)}$  中的元素代入式(14), 可得

$$\begin{aligned} & r_{j1}^{(k)} (w_j^{(k)} + w_1^{(k)}) + r_{j2}^{(k)} (w_j^{(k)} + w_2^{(k)}) + \dots + \\ & r_{jc}^{(k)} (w_j^{(k)} + w_c^{(k)}) = c w_j^{(k)}, j = 1, 2, \dots, c. \end{aligned} \quad (15)$$

式(15)可以改写为

$$\begin{aligned} & r_{j1}^{(k)} w_1^{(k)} + r_{j2}^{(k)} w_2^{(k)} + \dots + \left( r_{jj}^{(k)} + \sum_{j'=1}^c r_{jj'}^{(k)} \right) w_j^{(k)} + \\ & \dots + r_{jc}^{(k)} w_c^{(k)} = c w_j^{(k)}, j = 1, 2, \dots, c. \end{aligned} \quad (16)$$

通过式(16)可以得到特征方程<sup>[20-21]</sup>如下:

$$P^{(k)} w^{(k)} = c w^{(k)}. \quad (17)$$

式(17)中特征方程的特征矩阵  $P^{(k)}$  表达为

$$P^{(k)} = \begin{bmatrix} r_{11}^{(k)} + \sum_{j'=1}^c r_{1j'}^{(k)} & r_{12}^{(k)} & \dots & r_{1c}^{(k)} \\ r_{21}^{(k)} & r_{22}^{(k)} + \sum_{j'=1}^c r_{2j'}^{(k)} & \dots & r_{2c}^{(k)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{c1}^{(k)} & r_{c2}^{(k)} & \dots & r_{cc}^{(k)} + \sum_{j'=1}^c r_{cj'}^{(k)} \end{bmatrix}. \quad (18)$$

通过式(17)和(18)可以求得各特征的权重向量  $w^{(k)}$ .

### 1.3.3 模糊偏好关系矩阵的乘性一致性修复

初始模糊偏好关系矩阵  $\mathbf{R}^{(k)}$  中元素可由划分熵 (partition entropy, PE)<sup>[22-23]</sup> 表示为

$$r_{jj'}^{(k)} = \begin{cases} 1, & \text{PE}_j^{(k)} \geq \text{PE}_{j'}^{(k)}; \\ \frac{\text{PE}_j^{(k)}}{\text{PE}_{j'}^{(k)}}, & \text{PE}_j^{(k)} < \text{PE}_{j'}^{(k)}. \end{cases}$$

$$r_{jj}^{(k)} = r_{j'j'}^{(k)} = 0.5.$$

$$r_{j'j}^{(k)} = 1 - r_{jj'}^{(k)}. \quad (19)$$

其中:  $\text{PE}^{(k)}$  定义为

$$\text{PE}^{(k)} = - \sum_{k \in \mathbf{W}_k} \mu_{ki} \log \mu_{ki}, \quad (20)$$

这里  $\mathbf{W}_k$  表示以像素  $k$  为中心的  $3 \times 3$  窗口. 但该矩阵往往不满足乘性一致性, 利用模糊一致性比率 (fuzzy

consistency ratio, FCR) 可对模糊偏好关系矩阵  $\mathbf{R}^{(k)}$  是否具有乘性一致性进行判断, 针对像素  $k$  的模糊一致性比率  $\text{FCR}^{(k)}$  定义为

$$\text{FCR}^{(k)} = \frac{\text{FCI}^{(k)}}{\text{RI}}.$$

$$\text{FCI}^{(k)} = \frac{1}{c(c-1)} \sum_{1 \leq j < j' \leq c} \sigma_{jj'}^{(k)} \left( \frac{r_{jj'}^{(k)} w_{j'}^{(k)}}{r_{j'j}^{(k)} w_j^{(k)}} + \frac{r_{j'j}^{(k)} w_j^{(k)}}{r_{jj'}^{(k)} w_{j'}^{(k)}} - 2 \right).$$

$$\sigma_{jj'}^{(k)} = \begin{cases} 0, & r_{jj'}^{(k)} = 0, 1; \\ 1, & \text{others.} \end{cases} \quad (21)$$

其中:  $\text{FCI}$  (fuzzy consistency index) 为模糊一致性指数;  $\text{RI}$  (random index) 为随机性指标, 具体见表 1.

表 1 RI 值

$c$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49	1.52	1.54	1.56	1.58	1.59

当  $\text{FCR}^{(k)} < 0.1$  时, 模糊偏好关系矩阵  $\mathbf{R}^{(k)}$  为可接受的乘性一致性矩阵; 当  $\text{FCR}^{(k)} \geq 0.1$  时, 模糊偏好关系矩阵  $\mathbf{R}^{(k)}$  不具有乘性一致性; 当模糊偏好关系矩阵  $\mathbf{R}^{(k)}$  不具有乘性一致性时可对其进行修复. 首先, 计算其误差矩阵  $\mathbf{D}^{(k)} = [d_{jj'}^{(k)}]_{c \times c}$ , 其中

$$d_{jj'}^{(k)} = \left| r_{jj'}^{(k)} - \frac{w_j^{(k)}}{w_j^{(k)} + w_{j'}^{(k)}} \right|; \quad (22)$$

然后, 计算误差矩阵  $\mathbf{D}^{(k)}$  中的最大误差值  $\text{MD}^{(k)}$ , 即

$$\text{MD}^{(k)} = \max\{d_{jj'}^{(k)}, j, j' = 1, 2, \dots, c\}, \quad (23)$$

找到最大误差值  $\text{MD}^{(k)}$  对应的模糊偏好关系矩阵  $\mathbf{R}^{(k)}$  中的元素  $r_{jj'}^{(k)}$ , 将其更新为  $r'_{jj'}^{(k)}$ , 即

$$r'_{jj'}^{(k)} = \frac{w_j^{(k)}}{w_j^{(k)} + w_{j'}^{(k)}}, \quad (24)$$

对带有新元素  $r'_{jj'}^{(k)}$  的模糊关系矩阵  $\mathbf{R}^{(k)}$  重新求权重向量  $\mathbf{w}^{(k)}$  和模糊一致性比率  $\text{FCR}^{(k)}$ , 直到  $\text{FCR}^{(k)} < 0.1$  停止, 此时, 模糊偏好关系矩阵  $\mathbf{R}^{(k)}$  具有可接受的乘性一致性, 权重向量  $\mathbf{w}^{(k)}$  为最终的多特征权重. 利用最终的权重向量  $\mathbf{w}^{(k)}$  对模糊决策矩阵进行加权计算, 通过反模糊化决策矩阵可以得到最优的影像分割结果.

### 1.4 算法流程

综上所述, 该算法具体的实验流程为:

Step 1: 利用式(1)~(6)计算各个特征.

Step 2: 采用 FCM 算法对单一特征影像进行分割, 并利用单一特征分割结果构建模糊决策矩阵.

Step 3: 通过式(20)对各特征影像分割结果计算  $\text{PE}^{(k)}$  值, 并利用式(19)构建初始模糊偏好关系矩阵  $\mathbf{R}^{(k)}$ .

Step 4: 利用式(17)和(18)计算权重向量  $\mathbf{w}^{(k)}$ .

Step 5: 通过式(21)计算  $\text{FCR}^{(k)}$ , 如果  $\text{FCR}^{(k)} < 0.1$ , 则进入 Step 8; 如果  $\text{FCR}^{(k)} \geq 0.1$ , 则进入 Step 6.

Step 6: 通过式(22)计算  $\mathbf{D}^{(k)}$ , 通过式(23)计算  $\text{MD}^{(k)}$ , 找到  $\mathbf{R}^{(k)}$  中对应的元素, 通过式(24)更新  $r_{jj'}^{(k)}$  为  $r'_{jj'}^{(k)}$ , 进入 Step 4.

Step 7: 重复 Step 4~Step 7, 直到  $\text{FCR}^{(k)} < 0.1$ , 得到各个特征的权重向量  $\mathbf{w}^{(k)}$ .

Step 8: 利用权重向量  $\mathbf{w}^{(k)}$  对模糊决策矩阵进行加权计算, 反模糊化得到分割结果.

## 2 实验结果与讨论

为了验证本文算法的可行性和有效性, 分别对合成和真实高分辨率遥感影像进行分割实验.

### 2.1 合成影像分割

首先, 制作模板影像, 如图 1(a) 所示, 大小为  $128 \times 128$  像素, 类别数为 5, 编号 1~5 代表不同的同质区域. 以图 1(a) 为标准模板拼接草地、林地、水体 1、水体 2 和田地制作合成影像, 如图 1(b) 所示.

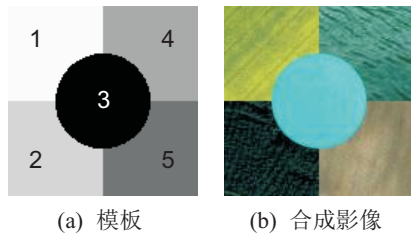


图1 模板及合成影像

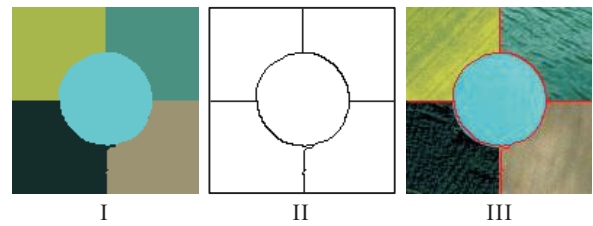
采用本文算法对图1(b)进行分割实验,分割结果如图2(a)中的I所示,合成影像的单一特征如图3所示.图3(a)~图3(e)为图1(b)的单一特征影像(特征提取的窗口大小分别为3、7、11、19、15),图3(f)~图3(j)为单一特征影像的分割结果.可以看出,均值特征在区域1和区域4分割不甚理想,区域1将部分草地分为了田地,区域4将小部分海水分为了林地,而其他特征在均值特征分割不好的像素位置处则比较均质,因此求得的特征权重较大.以合成影像第1个像素为例显示其修复后可接受的模糊偏好关系矩阵如表2所示.

表2 合成影像第1个像素的模糊偏好关系矩阵  $R^{(1)}$

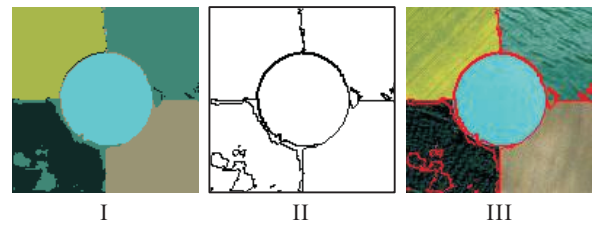
$R^{(1)}$	$z^{(1)}$	$z^{(2)}$	$z^{(3)}$	$z^{(4)}$	$z^{(5)}$
$z^{(5)}$	0.50	0.78	0.67	0.71	0.73
$z^{(2)}$	0.22	0.50	0.33	0.35	0.40
$z^{(3)}$	0.33	0.67	0.50	0.54	0.57
$z^{(4)}$	0.29	0.65	0.46	0.50	0.52
$z^{(5)}$	0.27	0.60	0.43	0.48	0.50

由表2求解的特征权重为[0.39, 0.10, 0.20, 0.17, 0.15].通过权重可以看出:第1个特征(均值特征)所占的权重最大,第2个特征(能量特征)所占的权重最小.图2(a)中II为所提出算法分割结果的轮廓线,图2(a)中的III为轮廓线与原图叠加结果.可以看出,所提出的算法能够有效区分各区域特征,同时能有效拟合区域边缘,故其分割结果明显优于图3(f)~图3(j)中基于不同特征的分割结果,主要由于所提出算法通过模糊偏好关系求解不同特征、不同像素位置的权

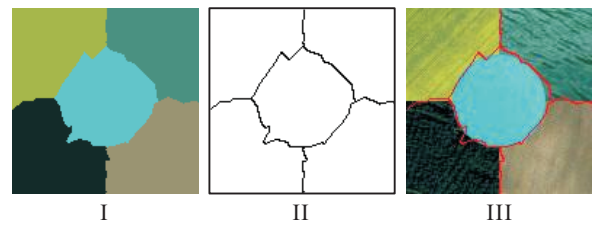
重,增强了分割结果较好的特征,抑制了分割结果不甚理想的特征,从而获得了较为理想的分割结果.



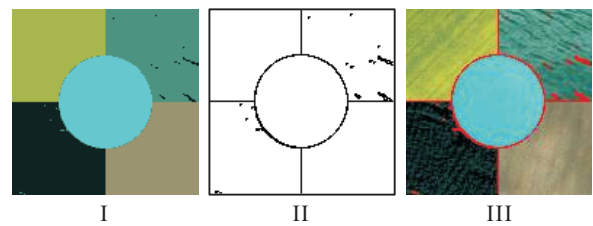
(a) 本文算法的分割结果及定性评价



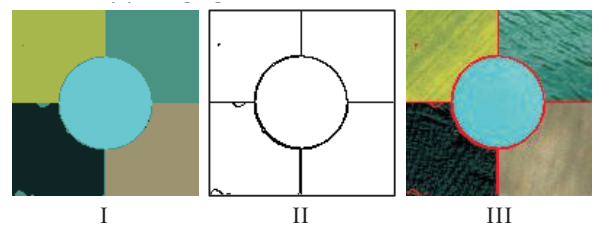
(b) WFCM算法的分割结果及定性评价



(c) 文献[24]算法的分割结果及定性评价



(d) 文献[25]算法的分割结果及定性评价



(e) 文献[26]算法的分割结果及定性评价

图2 合成影像的分割结果及其定性评价

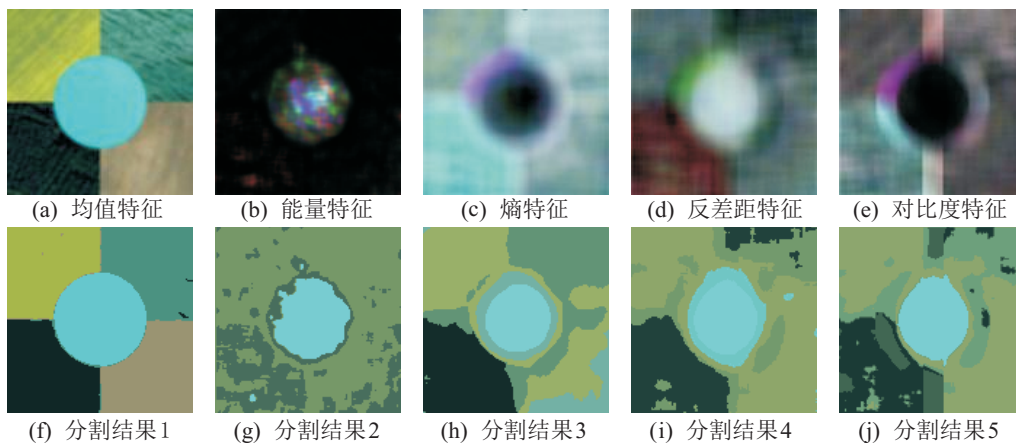


图3 合成影像的单一特征

为了验证本文算法在分割精度方面的优势,采用WFCM算法(各个特征的权重人为设置为[0.4, 0.15, 0.15, 0.15, 0.15])、文献[24-26]算法作为对比算法,对图1(b)进行分割实验. 分割结果分别如图2(b)~图2(e)中I所示,图2(b)~图2(e)中II为各对比算法分割结果的轮廓线提取结果,图2(b)~图2(e)中III为各对比算法分割结果的轮廓线与原合成影像叠加结果. 可以看出,WFCM算法分割结果较差,同时,其轮廓线提取结果较杂乱,与原图拟合效果不好,主要是由于WFCM算法采用人为给出特征权重的方式,且没有针对像素特定给出,因此限制了各个特

征的发挥,无法达到较好的效果. 文献[24]算法分割结果也不理想,轮廓线在边缘处拟合较差,主要是该算法基于多边形进行区域划分之后对边缘分割效果较差;文献[25-26]算法分割结果相对较好,其中,文献[25]算法在区域2和区域4拟合较差,文献[26]算法在区域2小部分拟合不理想. 综上可以看出,4种对比算法相比所提出的算法并没有精度方面的优势.

为了对分割结果进行定量评价,以图1(a)为标准模板计算分割结果的混淆矩阵,并进一步统计产品精度、用户精度、总精度和kappa值,得到的统计结果如表3所示.

表3 合成影像分割结果定量评价(本文算法/WFCM算法/文献[24]算法/文献[25]算法/文献[26]算法)

区域	用户精度/%	产品精度/%	总精度/%	Kappa
同质区域1	99.9/97.9/97.4/99.3/99.4	100/99.8/98.3/99.9/99.9	—	—
同质区域2	99.6/84.6/98.3/99.5/97.4	99.6/97.5/97.2/98.6/99.2	—	—
同质区域3	100/97.5/95.8/98.6/99.9	99.8/83.2/99.6/97.8/93.4	99.8/94.9/97.4/99.1/98.6	0.998/0.936/0.968/0.989/0.982
同质区域4	99.7/98.9/98.7/99.6/99.6	99.7/97.0/98.2/99.7/99.7	—	—
同质区域5	99.8/95.5/96.8/98.5/96.3	99.9/99.5/93.9/99.9/99.8	—	—

在表3中:产品精度为正确分割像素数与模板影像中该类像素数的比值;用户精度为正确分割像素数与所有分为该类的像素数的比值;总体精度为被正确分割的像素数总和除以总像素数;Kappa值为综合用户精度和产品精度两个参数提出的一个最终评定指标. 由表3可以看出:本文算法各精度指标均大于99.6%,总精度可达99.8%,Kappa值为0.998;WFCM算法总精度为94.9%,Kappa值为0.936;文献[24]算法总精度为97.4%,Kappa值为0.968;文献[25]算法总精度为99.1%,Kappa值为0.989;文献[26]算法总精度为98.6%,Kappa值为0.982. 4种对比算法的精度均不如本文算法精度高. WFCM算法没有基于像素对特征加权,且权重人为设置,导致无法对特征影像分割不好的区域降低权重,分割较好的区域也无法提高权重,使得分割结果较差. 文献[24]算法基于多边形区域进行分割,对于边缘效果分割不理想;文献[25]算法的抗噪声和异常值能力不如本文算法;

文献[26]算法总体分割效果较好,但有小部分区域同质区域划分错误.

在运行效率方面,本文算法在Intel(R) Core(M) i7 CPU 3.70 GHz/16 G内存/Matlab R2015a运行环境下,运行速度为2 min,WFCM算法、文献[24-26]算法的运行速度分别为1.5 min、10 min、5 min、8 min. WFCM算法与本文算法运行速度相差不大,但本文算法的精度要远优于WFCM算法. 文献[24-26]算法在速度和精度方面相比本文算法均没有优势.

## 2.2 真实高分率遥感影像分割

图4为6幅尺度大小均为256×256像素的真实高分率遥感影像,包含R、G、B三个波段,其中:图4(a)是分辨率为1 m的IKONOS影像,图4(b)~图4(f)是分辨率为0.5 m的Worldview-2影像. 采用本文算法对图4进行分割实验. 图5为单一特征影像(窗口大小分别为3、7、11、19、15)的分割结果,图6为本文算法的分割结果.

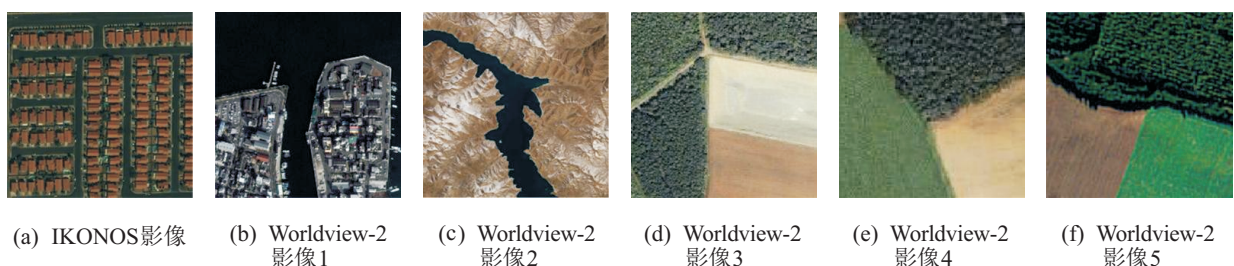


图4 真实高分率遥感影像

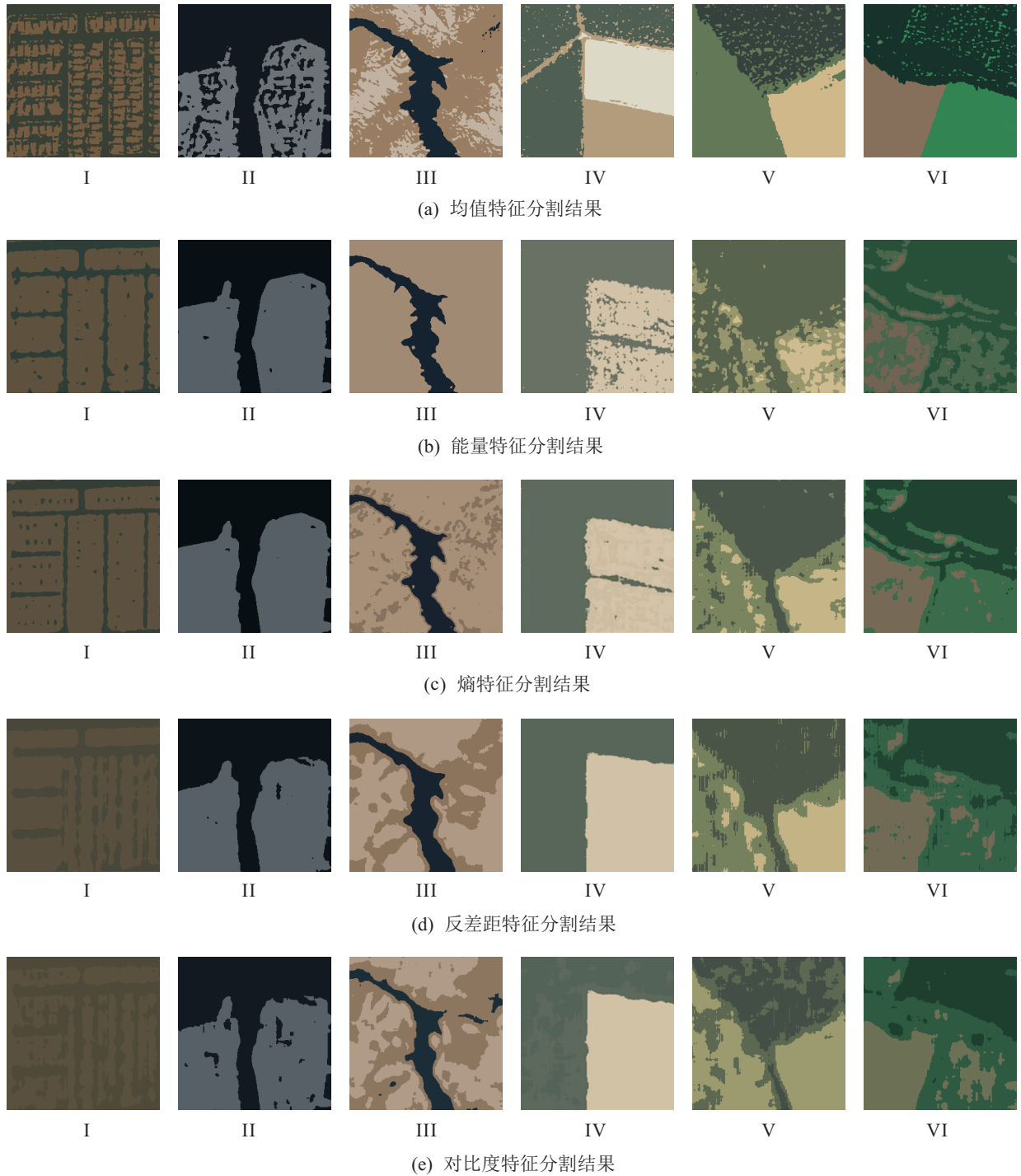


图5 真实高分辨率遥感影像的单一特征分割结果

由图4和图5可以看出,对于真实高分辨率遥感影像,均值特征的分割效果同样优于其他特征,但是其往往包含较多的噪声,尤其是图5(a)中I和II的建筑区域以及图5(a)中IV~VI的林地区域,而其他特征在这些区域的分割效果上要优于均值特征,形成了优势互补,最终得到了较好的分割结果。

为了对本文算法进行定性评价,提取其分割结果的轮廓线(见图6(b))与原始影像进行叠加(见图6(c)).可以看出,本文算法的各区域与原始影像均拟合较好.为了进一步验证本文算法对真实高分辨率

遥感影像分割性能的优势,利用WFCM算法(各特征的权重人为设置为 $[0.4, 0.15, 0.15, 0.15, 0.15]$ )、文献[24-26]算法作为对比算法对图4进行分割实验.4种对比算法分割结果见图7:图7(a)为WFCM算法的分割结果,可以看出,WFCM算法对于真实高分辨率遥感影像的分割结果同样不理想;图7(b)为文献[24]算法的分割结果,可以看出,基于区域划分的操作使得各影像在区域内部分割较好,但在边界处分割精度降低;图7(c)为文献[25]算法的分割结果,可以看出,图7(c)中I~III出现过分割,图7(c)中IV~VI包含噪

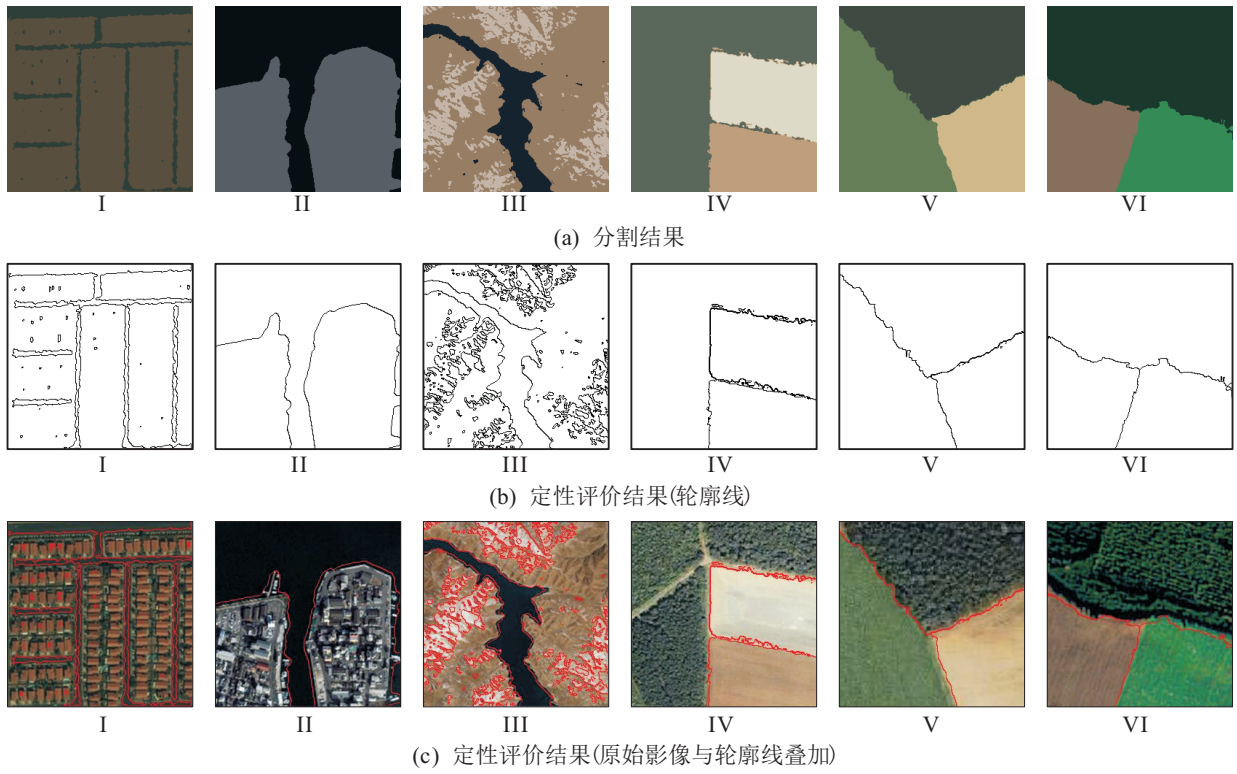


图6 真实高分辨率遥感影像分割结果及定性评价结果

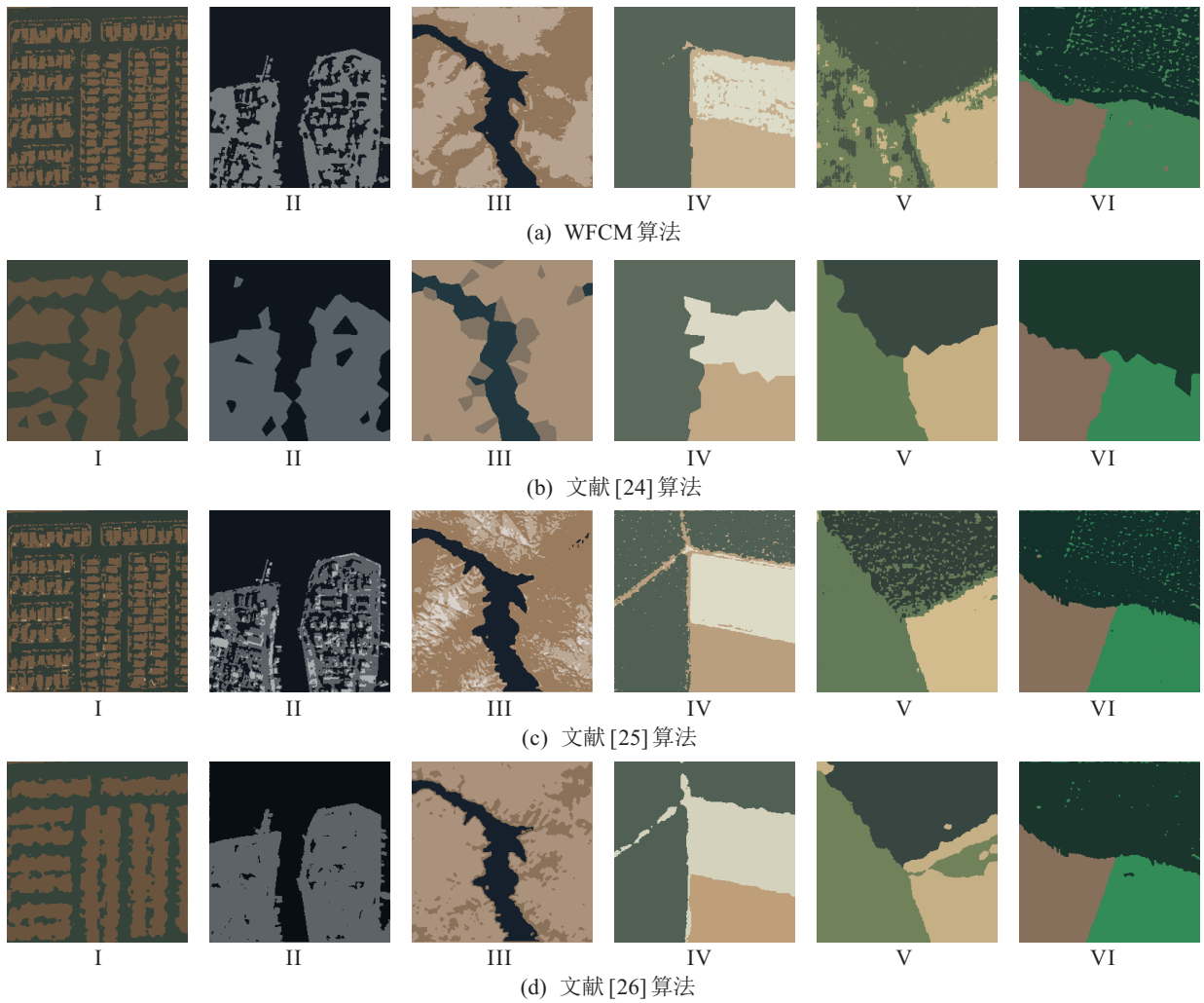


图7 对比算法分割结果

声和异常值较多;图7(d)为文献[26]算法的分割结果,可以看出,该算法抗噪声和异常值能力较强,但是依旧有小部分区域划分错误,分割效果没有本文算法好.综合而言,针对真实高分辨率遥感影像,4种对比算法在分割精度方面均比不过本文算法,本文算法的性能要优于对比算法,充分验证了本文算法的优势.

### 3 结 论

为了实现高分辨率遥感影像的高精度分割,本文提出了结合多特征与模糊偏好关系的分割算法.本文算法以像素为单位利用模糊偏好关系计算各特征权重,从而有效突出优势特征,抑制劣势特征,各特征发挥不同优势,形成优势互补,使其分割结果明显优于基于单一特征的分割结果,有效地剔除了噪声和异常值,使高分辨率遥感影像的分割精度得到提高.通过对合成和真实遥感影像的分割实验进行定性定量评价,合成影像的总精度可达99.8%,Kappa值为0.998,验证了本文算法的可行性和有效性.利用WFCM算法、文献[24-26]算法作为对比实验进一步验证了本文算法的优势.本文算法的核心思想在于通过权重结合各个特征在分割中的优势部分,因此,权重的准确性直接影响分割的精度,在今后的工作中,将进一步研究多属性模糊偏好关系的构建问题,以更加精准求得各个特征的权重,从而得到更优的影像分割结果.

### 参考文献(References)

- [1] 常发亮, 刘静, 乔谊正. 基于遗传算法的彩色图像二维熵多阈值自适应分割[J]. 控制与决策, 2005, 20(6): 674-678.  
(Chang F L, Liu J, Qiao Y Z. Self-adaptive threshold segmentation for color image using two-dimensional entropy method based on genetic algorithm[J]. Control and Decision, 2005, 20(6): 674-678.)
- [2] 毕凯, 王晓丹, 邢雅琼. 基于模糊测度和证据理论的模糊聚类集成方法[J]. 控制与决策, 2015, 30(5): 823-830.  
(Bi K, Wang X D, Xing Y Q. Fuzzy clustering ensemble based on fuzzy measure and DS evidence theory[J]. Control and Decision, 2015, 30(5): 823-830.)
- [3] 温奇, 王薇, 李苓苓, 等. 高分辨率遥感影像的平原建成区提取[J]. 光学精密工程, 2016, 24(10): 2557-2564.  
(Wen Q, Wang W, Li L L, et al. Extraction of built-up area in plain from high resolution remote sensing images[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(10): 2557-2564.)
- [4] 鲜焱, 刘海华, 廖秋萍. 多特征加权的纹理图像FCM分割算法[J]. 现代科学仪器, 2011(1): 23-27.  
(Xian Y, Liu H H, Liao Q P. Weighted fuzzy C-means algorithm based on multi-feature for texture image segmentation[J]. Modern Scientific Instruments, 2011(1): 23-27.)
- [5] 李同强, 周天弋, 吴斌. 基于改进遗传算法的加权模糊C均值聚类算法[J]. 计算机应用, 2009, 29(2): 260-262.  
(Li T Q, Zhou T G, Wu B. Weighted fuzzy C-mean clustering algorithm based on improved genetic algorithm[J]. Journal of Computer Applications, 2009, 29(2): 260-262.)
- [6] 江秀勤. 半监督加权模糊C均值聚类算法[J]. 计算机工程, 2009, 35(17): 170-171.  
(Jiang X Q. Semi-supervised and weighted fuzzy C-means clustering algorithm[J]. Computer Engineering, 2009, 35(17): 170-171.)
- [7] 薛艳锋, 刘继华, 高永强, 等. 一种加权模糊C均值聚类算法及其在图像分割中的应用[J]. 计算机应用与软件, 2016, 33(7): 273-277.  
(Xue Y F, Liu J H, Gao Y Q, et al. A weighted fuzzy C-means clustering algorithm and its application in image segmentation[J]. Computer Applications and Software, 2016, 33(7): 273-277.)
- [8] 李华, 张明新, 郑金龙. 融合多特征的均值漂移彩色图像分割方法[J]. 计算机应用, 2009, 29(8): 2074-2076.  
(Li H, Zhang M X, Zheng J L. Color image segmentation based on mean shift and multi-feature fusion[J]. Journal of Computer Applications, 2009, 29(8): 2074-2076.)
- [9] 侯艳丽. 融合多特征的纹理图像分割算法[J]. 计算机技术与发展, 2012, 22(5): 120-122.  
(Hou Y L. Texture image segmentation algorithm of space feature and frequency feature fusion[J]. Computer Technology and Development, 2012, 22(5): 120-122.)
- [10] 贾士军, 王昆. 融合颜色和纹理特征的彩色图像分割[J]. 测绘科学, 2014, 39(12): 138-142.  
(Jia S J, Wang K. Color image segmentation by integrating color and texture features[J]. Science of Surveying and Mapping, 2014, 39(12): 138-142.)
- [11] 金永涛, 李旭青, 张周威, 等. 基于多特征的高分遥感图像分割算法研究[J]. 中国空间科学技术, 2016, 36(6): 38-46.  
(Jin Y T, Li X Q, Zhang Z W, et al. Segmentation of high-resolution multi-spectral remote sensing image based on multi-feature[J]. Chinese Space Science and Technology, 2016, 36(6): 38-46.)
- [12] 陈强, 田杰, 黄海宁, 等. 基于统计和纹理特征的SAS图像SVM分割研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(6): 214-221.

- (Chen Q, Tian J, Huang H N, et al. Study on SAS image segmentation using SVM based on statistical and texture features[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(6): 214-221.)
- [13] 尹艳鹏, 周颖, 曾丹, 等. 基于多特征融合条件随机场的人脸图像分割[J]. 电子测量技术, 2015, 38(6): 54-59.  
(Yin Y P, Zhou Y, Zeng D, et al. Face segmentation using CRFs based on multiple feature fusion[J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38(6): 54-59.)
- [14] 潘琛, 林怡, 陈映鹰. 基于多特征的遥感影像决策树分类[J]. 光电子激光, 2010, 21(5): 731-736.  
(Pan C, Lin Y, Chen Y Y. Decision tree classification of remote sensing images based on multi-feature[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2010, 21(5): 731-736.)
- [15] Chiclana F. Integrating multiplicative preference relations in a multipurpose decision-making model based on fuzzy preference relations[J]. Fuzzy Sets & Systems, 2001, 122(2): 277-291.
- [16] Xu Y J, Da Q L, Liu L H. Normalizing rank aggregation method for priority of a fuzzy preference relation and its effectiveness[J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2009, 50(8): 1287-1297.
- [17] Yue Z L. Approach to group decision making based on determining the weights of experts by using projection method[J]. Applied Mathematical Modelling, 2012, 36(7): 2900-2910.
- [18] 任国贞, 江涛. 基于灰度共生矩阵的纹理提取方法研究[J]. 计算机应用与软件, 2014, 31(11): 190-192.  
(Ren G Z, Jiang T. Study on GLCM-based texture extraction methods[J]. Computer Applications and Software, 2014, 31(11): 190-192.)
- [19] 李莉, 木拉提·哈密提, 艾克热木·阿西木, 等. 基于灰度共生矩阵的新疆地方性肝包虫CT图像特征提取方法[J]. 科技导报, 2010, 28(16): 31-35.  
(Li L, Hamit M, Aximu A, et al. CT image feature extraction using GLCM for Xinjiang local liver hydatid[J]. Science & Technology Review, 2010, 28(16): 31-35.)
- [20] Xu Y, Patnayakuni R, Wang H. Logarithmic least squares method to priority for group decision making with incomplete fuzzy preference relations[J]. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37(4): 2139-2152.
- [21] Xu Y J, Wang H M. A consistency improving procedure for fuzzy preference relations based on eigenvector method[C]. IEEE International Conference on Fuzzy Systems. Vancouver: IEEE, 2016: 1880-1885.
- [22] Hung W L, Chen D H. Clustering algorithm for proximity relation matrix and its applications[J]. Journal of Applied Statistics, 2013, 40(9): 1875-1892.
- [23] 尹诗白, 王一斌, 邓箴. 基于快速递推模糊2-划分熵图割的红外图像分割[J]. 光学精密工程, 2016, 24(3): 668-680.  
(Yin S B, Wang Y B, Deng Z. Infrared image segmentation based on graph cut of fast recursive fuzzy 2-partition entropy[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(3): 668-680.)
- [24] 赵泉华, 高郡, 李玉. 基于区域划分的多特征纹理图像分割[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(11): 2519-2530.  
(Zhao Q H, Gao J, Li Y. Multi-feature texture image segmentation based on tessellation technique[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(11): 2519-2530.)
- [25] Yang M S, Nataliani Y. Robust-learning fuzzy c-means clustering algorithm with unknown number of clusters[J]. Pattern Recognition, 2017, 71: 45-59.
- [26] 李玉, 徐艳, 赵雪梅, 等. 利用高斯混合模型的多光谱图像模糊聚类分割[J]. 光学精密工程, 2017, 5(2): 509-518.  
(Li Y, Xu Y, Zhao X M, et al. Multispectral image segmentation by fuzzy clustering algorithm used Gaussian mixture model[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(2): 509-518.)

## 作者简介

陈烜(1977-), 女, 副教授, 博士生, 从事管理科学理论与方法的研究, E-mail: zqhlby@163.com;

刘晓燕(1991-), 女, 硕士, 从事遥感图像处理及其应用的研究, E-mail: ltalex@163.com;

赵泉华(1978-), 女, 教授, 博士生导师, 从事随机几何、空间统计学、模糊集理论等在遥感图像建模、解译及其在海洋环境遥感中应用等研究, E-mail: zqhlby@163.com;

李玉(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 从事遥感数据处理理论与应用基础等研究, E-mail: Intuliyu@163.com.

(责任编辑: 闫妍)