

# 面向对象的高分辨率遥感影像 桥梁提取研究

陈生<sup>1)</sup> 王宏<sup>2)</sup> 沈占锋<sup>1)</sup> 骆剑承<sup>1)</sup> 胡晓东<sup>3)</sup> 刘雯<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>(中国科学院遥感应用研究所,北京 100101) <sup>2)</sup>(中国矿业大学资源与安全工程学院,北京 100083)

<sup>3)</sup>(浙江工业大学软件学院,杭州 310023) <sup>4)</sup>(北京理工大学信息科学技术学院,北京 100081)

**摘要** 根据桥梁和水体相交的空间关系,提出一种面向对象的高分辨率遥感影像桥梁提取方法,首先利用面向对象的影像分析方法对 IKONOS 全色影像进行河流、陆地分类;然后将陆地提取为一个矢量图层,同时对分类后的影像进行二值化处理,分成河流和陆地两部分,再经数学形态学处理,获得连通的河流对象,并提取河流为一个矢量图层;最后通过河流与陆地求交的空间运算获得桥梁。实验结果表明,这种方法简单、运算量小、效率高,在从高分辨率遥感影像提取桥梁的实践中具有广泛的适用性。

**关键词** 面向对象 高分辨率 空间分析 桥梁提取

中图分类号:TP79 文献标识码:A 文章编号:1006-8961(2009)04-0585-06

## Study on Object-oriented Extracting Bridges from High Resolution Remote Sensing Image

CHEN Sheng<sup>1)</sup>, WANG Hong<sup>2)</sup>, SHEN Zhan-feng<sup>1)</sup>, LUO Jian-cheng<sup>1)</sup>,  
HU Xiao-dong<sup>3)</sup>, LIU Wen<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> (Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

<sup>2)</sup> (School of Resource and Safety Engineering, China University of Mining and Technology of Beijing, Beijing 100083)

<sup>3)</sup> (Software College, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)

<sup>4)</sup> (School of Information Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

**Abstract** According to the relation of bridge with water, an object-oriented method to extract bridges from high resolution remote sensing image is put forward as follows. First, use the object-oriented image analysis method to classify the IKONOS image into two classes, water and the land. Second, export all the image objects of land class to a vector shape file. Then binarize the classified image as two parts, the land with white color and the water with black color. Fourth, process the binarized image based on mathematic morphology to get the connected water object. Fifth, extract the water object to a vector file. Finally, the destired bridge is extracted through the intersection of the land and water vector files. An experiment indicates that the method is of universal application with the features of simplicity, small amount of computation and high efficiency.

**Keywords** object-oriented, high resolution, spatial analyses, bridge extraction

**基金项目:**国家自然科学基金项目(40601057);国家高技术研究发展计划(863)基金项目(2007AA12Z141,2007AA12Z224);中国科学院资源与环境信息系统国家重点实验室开放研究基金项目(A0615)

**收稿日期:**2007-07-30;**改回日期:**2008-03-27

**第一作者简介:**陈生(1979~),男。现为中国科学院遥感应用研究所地理信息系统专业博士研究生。主要研究方向为高分辨率遥感影像目标识别与信息提取。E-mail:chenshengbj@163.com

## 1 引言

从高分辨率遥感影像中提取桥梁等人工地物目标在军用及民用上具有重大意义。目前,国内外已有不少学者对桥梁目标识别方法做了研究,如 Baker、Hawang 和 Aggarwal 等人应用有关混凝土桥梁的区域知识指导底层检测和分割,采用由上至下的知识驱动策略来检测提取桥梁<sup>[1-2]</sup>;聂垣提出了基于河流骨架提取桥梁的检测方法<sup>[3]</sup>;杨斌提出了一种基于自组织特征映射 SOFM 网络模型的纹理分类算法<sup>[4]</sup>;骆剑承提出了一种基于知识的高分辨率遥感影像水上桥梁提取的实用方法<sup>[5]</sup>,其中主要用到基于高斯马尔可夫随机场(GMRF)纹理特征的支撑向量机(SVM)分类方法。以上均使用传统的基于像素的影像分析方法,而没有有效利用空间拓扑关系,实现步骤多、计算量大,且需要较多的人为干预。

传统的遥感影像分析方法建立在基于像素的光谱信息分析基础之上,使用图像的强度量即灰度值的统计信息进行分析、识别、解译,很少利用地物的形状、结构、纹理等信息,在处理高分辨率遥感影像时显得能力不足。面向对象的遥感影像分析方法把遥感影像分成不同的同质性对象,每个对象都有描述光谱、形状、结构、纹理等信息的属性,对象之间还有相邻、包含等各种空间关系以及类似面向对象软件开发中继承等关系。其分析实体,不再是单个的像素,而是由多个像素组成的有意义的影像对象,包含了影像对象的光谱、语义与纹理等信息。因此,面向对象的影像分析方法为空间分析能力强大的 GIS 应用到高分辨率遥感影像的处理过程提供了思路。

地理信息系统(GIS)是采集、存储、管理、分析、显示和应用地理信息的计算机系统,是分析和处理海量地理数据的通用技术<sup>[6]</sup>。空间分析是地理信息系统的核心功能之一,是地理信息系统区别于一般信息系统的主要功能特征。利用空间信息分析技术,通过对遥感影像目标的空间分析,可以提高影像目标识别和提取的速度和效率以及准确度,用户可以获得新的经验和知识,并以此作为影像目标识别提取的决策依据。

本文利用面向对象的影像分析方法、图形的数学形态学处理方法和 GIS 的空间分析方法的有机结

合,来实现 IKONOS 高分辨率遥感影像桥梁的识别和提取。

## 2 桥梁提取方法体系

### 2.1 面向对象的影像分析方法

面向对象的影像分析技术最早在 20 世纪 70 年代应用于遥感影像的解译中<sup>[7]</sup>。所谓面向对象,就是通过对影像的分割,使同质像元组成大小不同的对象,每个对象都有光谱、形状、纹理、空间拓扑关系、层次等属性,利用对象的各种属性类进行分类、分析和目标识别决策。

目前商业化的面向对象的影像分析软件有德国的 eCognition,现在最新版本是 Definiens 2007。该软件采用了面向对象的多尺度影像分割方法<sup>[8-9]</sup>。该分割方法分割的影像对象的大小由尺度、颜色、形状、紧凑度以及平滑度等参数决定。在进行多尺度影像分割时采用异质性最小的区域合并算法,影像分割中像元的合并开始于任意一个像元,先将单个像元合并为较小的影像对象,再将较小的影像对象合并成较大的多边形对象,使得较大的异质性不断变大,当大于由尺度值决定的阈值时,合并过程将停止,如此实现整幅影像在给定的分割尺度决定的阈值的条件下所有影像对象的平均异质性最小。这种方法综合利用遥感影像的光谱特征和形状特征,即首先加权计算影像中每个波段的光谱异质性与形状异质性的综合特征值,然后根据各个波段所占的权重,计算影像所有波段的加权值,当分割出的对象或基元的光谱和形状异质性综合加权值小于某个指定的阈值时,进行重复迭代计算,直到所有分割对象的异质性综合加权值大于指定的阈值即完成图像的多尺度分割操作<sup>[10]</sup>。当合并相邻的两个小影像对象以生成更大的影像对象时,合并后的影像对象的异质性由下式计算<sup>[9,11]</sup>:

$$F = \sum_{i=1}^n f_i \quad (1)$$

式中, $F$  为影像对象的异质性, $n$  为影像总波段数, $f_i$  为影像对象的第  $i$  波段异质性,计算公式如下:

$$f_i = w_i \cdot h_{\text{color}} + (1 - w_i) h_{\text{shape}} \quad (2)$$

式中, $w_i$  为第  $i$  波段权重,由用户设定; $h_{\text{color}}$  为光谱异质性, $h_{\text{shape}}$  为形状异质性。 $h_{\text{color}}$ 、 $h_{\text{shape}}$  由下式计算得到:

$$h_{\text{color}} = \sum_c w_c (n_m \cdot \sigma_{c,m} - (n_{o1} \cdot \sigma_{c,o1} +$$

$$n_{o2} \cdot \sigma_{c,o2}) \quad (3)$$

$$h_{\text{shape}} = w_{cm} \cdot h_{cm} + (1 - w_{cm}) h_{sm} \quad (4)$$

式中,  $n_m$ 、 $n_{o1}$ 、 $n_{o2}$  分别为合并后和合并前的影像对象的像元数,  $\sigma_c$  表示在  $c$  波段的标准差,  $w_c$  为  $c$  波段的光谱权重, 下标  $m$  表示合并后的对象,  $o1$ 、 $o2$  表示合并前的两个对象。

$w_{cm}$  为形状紧凑度权重, 由用户设定;  $h_{cm}$  为形状紧凑度,  $h_{sm}$  为形状光滑度。

$$h_{cm} = n_m \cdot \frac{l_m}{\sqrt{n_m}} - \left( n_{o1} \cdot \frac{l_{o1}}{\sqrt{n_{o1}}} + n_{o2} \cdot \frac{l_{o2}}{\sqrt{n_{o2}}} \right) \quad (5)$$

$$h_{sm} = n_m \cdot \frac{l_m}{b_m} - \left( n_{o1} \cdot \frac{l_{o1}}{b_{o1}} + n_{o2} \cdot \frac{l_{o2}}{b_{o2}} \right) \quad (6)$$

式中,  $l_m$ 、 $l_{o1}$ 、 $l_{o2}$  为合并后和合并前的影像对象的周长,  $b_m$ 、 $b_{o1}$ 、 $b_{o2}$  为合并后和合并前的影像对象外接矩形的周长。

影像被分割成一个个影像对象之后, 根据影像对象的形状、结构、纹理和它们之间的空间、层次关系来进行分析是重要的工作。面向对象的影像分析技术的优势体现在分类和空间分析。面向对象的影像分类采用监督分类和模糊分类的方法, 提供了两种不同类型的分类器——最近邻法和成员函数。最近邻分类类似于普通影像分析软件中的监督分类, 同样需要选择至少一个影像对象作为训练区, 即样本。当无法描述特征空间时, 最近邻分类器是最好的选择。样本是一个类的典型代表。成员函数法是基于可利用的目标特征的模糊逻辑来分类的, 是对不确定性进行量化的一种数学方法。对比基于像素的统计分类器, 模糊分类不像严格分类只用“是”或“不是”来表示, 而是用 0~1 之间的连续数字描述分类成员的一个连续状态<sup>[10,12]</sup>。模糊逻辑分类法是一种基于知识和概念的方法, 且容易使用。因此, 如果仅用一个特征或很少的特征就可以将一个类同其他类区别开时, 建议使用成员函数分类器; 否则, 应该选择最近邻分类器。最近邻分类器比成员函数能更好地处理多维特征空间的联系<sup>[13]</sup>。

## 2.2 数学形态学

数学形态学是一种基于集合论的非线性理论, 它的基本思想是基于像素间的逻辑关系对数字图像进行分析处理。它能定量地描述和分析影像的几何特征。与传统的线性理论相比, 数学形态学的特点是将大量复杂的影像处理算法用基本的集合逻辑运算来描述和实现, 使得运算更加灵活快捷。伴随着学科之间的不断交叉融合, 数学形态学已被很多学

者应用到遥感影像处理的诸多方面<sup>[14]</sup>。

### 2.2.1 腐蚀与膨胀运算

定义一个结构元素  $B$ , 结构  $B$  对图像  $A$  的腐蚀的数学表达式为  $A \ominus B = \{x: B + x \subset A\} = \bigcap \{A - b: b \in B\}$ 。从几何上看,  $A \ominus B$  由将  $B$  平移  $x$  后仍包含在内的所有点组成, 也可以通过将输入图形  $A$  平移到  $-b$  ( $b$  属于结构元素), 并计算所有的平移的交集而得到<sup>[15]</sup>。

结构  $B$  对图像  $A$  的膨胀数学表达式为  $A \oplus B = \bigcup \{A + B: b \in B\} = \{x: (-b + x) \cap A = \emptyset\}$ 。从几何上看, 膨胀可以通过图形  $A$  平移  $b$  ( $b$  属于结构元素), 并计算所有平移的并集而得到。

### 2.2.2 形态开运算和形态闭运算

定义一个结构元素  $B$ , 结构  $B$  对图像  $A$  的开运算数学表达式为

$$A \bullet B = (A \ominus B) \oplus B = \bigcup (B + x: B + x \subset A)$$

从几何上看, 开运算可以通过计算所有可以填入图像内部的结构元素平移的并求得。这也是对  $A$  先腐蚀后膨胀运算的结果。开运算具有平滑功能, 能消除图像的某些微小连接、边缘毛刺和孤立斑点。

结构  $B$  对图像  $A$  的闭运算数学表达式为

$$A \blacklozenge B = (A \oplus B) \ominus B$$

从几何上看, 闭运算是开运算的对偶运算, 即是对  $A$  先膨胀后腐蚀运算的结果。闭运算具有过滤功能, 可以填平图形内部的小沟、空洞和裂缝, 使断线相连。

## 2.3 空间分析

在 GIS 中, 空间分析是对分析空间数据有关技术的统称。根据作用的数据性质不同, 可以分为: (1) 基于空间图形数据的分析运算; (2) 基于非空间属性的数据运算; (3) 空间和非空间数据的联合运算。GIS 中实现空间分析的基本功能, 包括空间查询与量算、缓冲区分析、叠加分析、路径分析、空间插值、统计分类分析等。

地理信息系统的叠加分析是将有关主题层组成的数据层面进行叠加, 产生一个新数据层面的操作, 其结果综合了原来两层或多层要素所具有的属性。叠加分析不仅包含空间关系的比较, 还包含属性关系的比较。多边形叠加将两个或多个多边形图层进行叠加产生一个新多边形图层的操作, 其结果将原来多边形要素分割成新要素, 新要素综合了原来两层或多层的属性。根据叠加结果最后欲保留空间特

征的不同要求,一般的 GIS 软件都提供了 3 种类型的多边形叠加操作<sup>[16]</sup>,如图 1 所示。

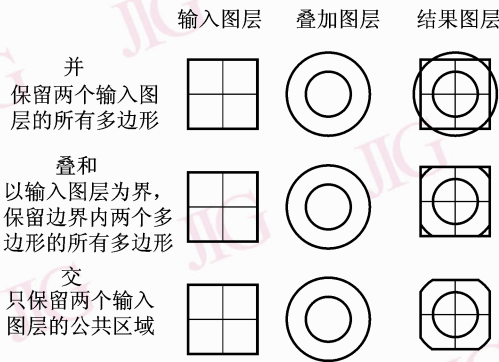


图 1 多边形的不同叠加方式

Fig. 1 Different styles of polygon overlap

### 3 桥梁提取技术路线

桥梁与水体间的空间相交关系是水上桥梁的重要特征。根据计算机视觉领域的理论,人类对地物目标的认识首先是基于大尺度的,即视觉细胞首先捕获场景中的大目标或背景,并获得相应的轮廓,在此基础上,场景中的细节或子目标再逐渐被聚焦。因此,要从影像上提取桥梁,必须提取与桥梁密切相关的背景——河流作为判断桥梁存在的依据和相关分析的背景知识。

根据以上的知识,设计如下的桥梁提取技术路线,如图 2 所示。

首先,对 IKONOS 全色影像进行辐射校正、几何校正等图像预处理,然后利用面向对象的影像分析方法进行分割,建立分类层次,为每个类建立分类器,然后进行分类,获得水体和陆地。经过分类后,把分类结果中所有陆地的影像对象矢量化为 ArcView Shape 格式 .shp 文件并在 GIS 中合并所有的实例对象;对分类后的影像进行二值化处理,分成水体和陆地两部分,再利用数学形态学算子,将被桥间断的水体处理成连通的水体对象。水体连通之后,对影像再一次面向对象的多尺度分割、分类,分成水体和陆地两类,从分类结果中提取河流并矢量化为 .shp 文件并在 GIS 中合并所有的实例对象。这样影像就被分为陆地和水体两个大的矢量对象。以水体作为背景,叠加河流和陆地,并结合 GIS 空间分析方法——叠加分析相交运算,对桥梁进行提取。

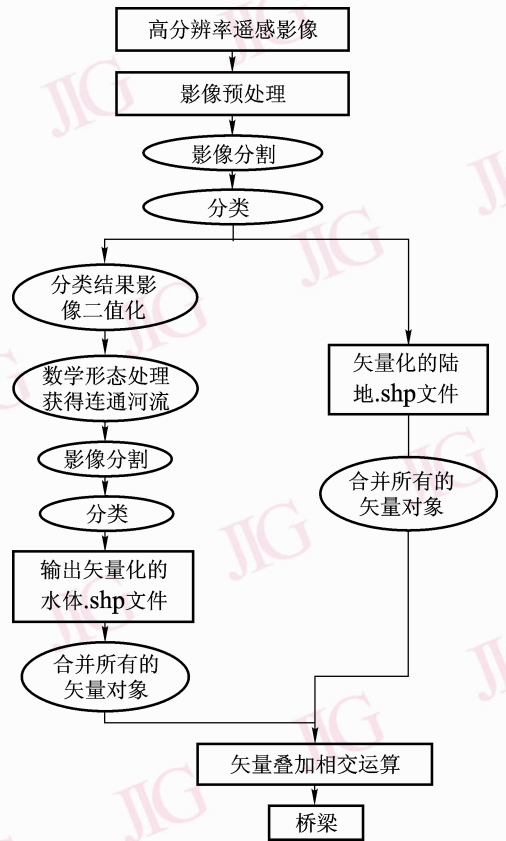


图 2 桥梁提取技术路线

Fig. 2 Flowchart of bridge extraction

### 4 实验

实验数据采用 IKONOS 全色影像,空间分辨率为 1 m,研究区大小为 1 872 × 1 288 个像素。研究区为某城市如图 3 原始影像、图 4 分割结果所示,包括道路、城市建筑等。



图 3 原始影像  
Fig. 3 Original image

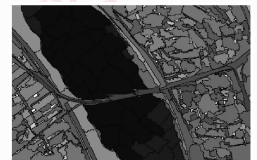


图 4 分割结果  
Fig. 4 Segmentation results

根据技术路线,对影像进行预处理后的工作就是对影像进行分割。由于在高分辨率遥感影像上,水体的总体灰度特征表现得比较暗<sup>[17-18]</sup>,在进行面向对象的分割时,将光谱信息权重设置高一些,能得到很好的分割效果。本实验确定本次分割参数尺度为 40,形状为 0.2,颜色为 0.8,紧凑度为 0.5,平滑

度为 0.5。影像分割结果如图 4 所示。

影像对象建立后,采用最近邻法进行分类。分类前首先建立分类层次,分为道路、河流、建筑物、植被,然后在影像上为设定的分类层次分别选择样本,用最近邻分类器进行分类。分类结果如图 5 所示,分类精度如表 1 所示。



图 5 分类结果

Fig. 5 Classification result

表 1 分类精度

Tab. 1 Classification accuracy

类别	水体	建筑物	植被	道路
总对象数	63	75	159	89
样本数	4	5	7	9
分类精度(%)	99.7	99.57	89.92	99.86
标准差	0.003 8	0.007 2	0.213 8	0.005 8

影像经过分割和分类后,将所有不属于水体类别的影像对象矢量化为 .shp 矢量文件,然后在 GIS 环境中合并所有的多边形对象为陆地,合并结果如图 6 所示。陆地由道路、建筑物、植被以及其他未分类的影像对象组成。



图 6 陆地

Fig. 6 Land

由上述步骤,影像经分割分类后,形成河流与陆地两部分,桥梁作为陆地的一部分,鉴于桥梁与河流的空间关系,河流被架于其上的桥梁分成两个互不相连的部分。由于河流的宽度远远大于桥梁的宽度,因此通过图像的数学形态处理方法——腐蚀膨胀开闭运算,将被桥梁切断的河流连接起来。为保证桥梁提取的精度,对图像进行腐蚀后,需进行膨胀运算,如对图像腐蚀  $n$  次则要在腐蚀后进行  $n$  次的膨胀运算。具体的河流提取步骤如下:(1)把分类结果二值化;(2)对二值化影像进行腐蚀膨胀开闭运算,获得连通的河流。结果如图 7 所示;(3)对腐

蚀膨胀的结果影像进行第 2 次分割分类,分为河流和陆地,输出属于河流的所有影像对象为 .shp 矢量文件,在 GIS 环境下合并所有的影像对象,结果如图 8 所示。

经过上面的步骤,连通的水体和陆地都已被提取出来,在 GIS 环境下,通过河流和陆地的相交运算,获得桥梁,如图 9 所示。桥梁和原始影像叠加显示如图 10 所示。



图 7 腐蚀膨胀结果

Fig. 7 Erosion and dilation operation result



图 8 水体矢量化结果

Fig. 8 Result of water vectorization



图 9 桥梁

Fig. 9 Bridge



图 10 叠加显示图

Fig. 10 Overlapping show

## 5 结论

面向对象的高分辨率遥感影像桥梁提取的方法借鉴面向对象影像分析中的多尺度分割方法,利用了地物目标对象的空间关系,操作方便、快速,实现了遥感与 GIS 的有效紧密的结合。由于多尺度分割方法综合考虑了地物的光谱、纹理、几何信息,为影像分类提供更多的参考依据,从而提高影像的分类精度,为后面用 GIS 空间分析功能来提取桥梁目标奠定了基础。精确的分类是精确提取桥梁目标的关键。在提取长宽比较大的狭长的桥梁时,该方法比较快速而且准确,但其不太适用于那些河流细小而桥梁长宽比小的情况。因为对二值化影像进行腐蚀膨胀运算时会把太细小的河流消除掉,从而无法把细小河流上的桥梁提取出来。由于卫星成像时的太阳高度角度的影响,提取出来的桥梁存在锯齿。另外河岸两端陆地部分桥梁信息没有提取出来,这将在后续的工作中研究解决。另外,该方法涉及到 GIS 和影像分析软件的切换,需要把 GIS 的常用分

析功能集成到影像分析软件中去;该方法对跨越水体的桥梁进行提取,对于类似城市陆地上的立交桥则很难提取。因此,展开具有 GIS 分析功能的影像分析软件的开发和针对城市陆地上的桥梁提取将是今后的一个研究方向。

### 参考文献 (References)

- Baker D C, Hwang S S, Aggarwal J K. Detection and segmentation of man-made objects in outdoor scenes: concrete bridges [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1989, **6**(6): 938-950.
- Baker D C, Aggarwal J K, Hwang S S. Geometry guided segmentation of outdoor scenes [A]. In: *Proceedings of SPIE Application of Artificial Intelligence VI*, 1988 [C], Bellingham, WA, USA, 1988, **937**: 576-583.
- Nie Xuan, Zhao Rong-chun, Zhang Yan-ning. A new method for detecting bridges automatically [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2003, **21**(5): 599-602. [聂焜, 赵荣椿, 张艳宁. 一种从航空图片中自动检测桥梁的方法[J]. *西北工业大学学报*, 2003, **21**(5): 599-602.]
- Yang Bin, Zhao Hong-man, Zhao Zong-tao, *et al.* Texture classification algorithm based on SOFM and the application in remote sensing martial object [A]. In: *Proceedings of the 5th National Academic Conference on Embedding System* [C], Beijing, China, 2004: 69-72. [杨斌, 赵红漫, 赵宗涛等. 基于 SOFM 网纹理分类算法在遥感图像军事目标识别中的应用 [A]. 2004 年全国第五届嵌入式系统学术交流会 [C], 北京, 2004: 69-72.]
- Luo Jian-cheng, Ming Dong-ping, Shen Zhan-feng, *et al.* Research on bridge extraction from high resolution remote sensing image [J]. *Application of Computers*, 2006, **23**(10): 151-153. [骆剑承, 明冬萍, 沈占锋等. 高分辨率遥感影像桥梁特征提取方法研究 [J]. *计算机应用研究*, 2006, **23**(10): 151-153.]
- Chen Shu-peng, Lu Xue-jun, Zhou Cheng-hu. *Introductory Geographic Information System* [M]. 1st ed, Beijing: Science Press, 2000. [陈述彭, 鲁学军, 周成虎. *地理信息系统导论* [M]. 第 1 版. 北京: 科学出版社, 2000.]
- Huang Hui-ping. *Scale Issue in Object-oriented Image Analysis* [D]. Beijing: Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, 2003. [黄慧萍. 面向对象影像分析中的尺度问题研究 [D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2003.]
- Baatz M, Schape A. 2000, Multiresolution segmentation: an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation [A]. In: *Angewandte Geographische Information Sverarbeitung XII* [C], Salzburg, Austria, 2000: 12-23.
- Ursula C, Benz, Peter Hofmann, *et al.* Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information [J]. *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2004, **58**(3-4): 239-258.
- Sun Xiao-xia, Zhang Ji-xian, Liu Zheng-jun. Extracting the river and the road using an object oriented technique from IKONOS panchromatic imagery [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2006, **31**(1): 62-63. [孙晓霞, 张继贤, 刘正军. 利用面向对象的分类方法从 IKONOS 全色影像中提取河流和道路 [J]. *测绘科学*, 2006, **31**(1): 62-63.]
- Cao Bao, Qin Qi-ming, Ma Hai-jian, *et al.* Application of object-oriented approach to SPOT5 image classification: a case study in haidian district, beijing city [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2006, **22**(2): 46-49. [曹宝, 秦其明, 马海建等. 面向对象方法在 SPOT5 遥感图像分类中的应用——以北京市海淀区为例 [J]. *地理与地理信息科学*, 2006, **22**(2): 46-49.]
- Ads Caprioli M, Tarantino E. Urban features recognition from VHR satellite data with an object-oriented approach [A]. In: *Proceedings of Commission IV Joint Workshop, Challenges in Geospatial Analysis, Integration and Visualization II* [C], Stuttgart, Germany, 2003: 176-180.
- Definiens. *eCognition User Guide 4* [EB/OL]. <http://WWW.Definiens-imaging.com>, 2004.
- Li Li-wei, Liu Ji-ping, Yin Zuo-wei. Road Extraction from high resolution remote sensing image based on mathematic morphology [J]. *Remote Sensing Information*, 2005, (5): 9-11. [李利伟, 刘吉平, 尹作为. 基于数学形态学的高分辨率遥感影像道路提取 [J]. *遥感信息*, 2005, (5): 9-11.]
- Wu Dan, Liu Xiu-guo, Shang Jian-ga. The application and prospect of mathematical morphology in image processing and analysis [J]. *Journal of Engineering Graphics*, 2003, **24**(2): 120-125. [吴丹, 刘修国, 尚建嘎. 数学形态学在图像处理与分析中的应用及展望 [J]. *工程图学学报*, 2003, **24**(2): 120-125.]
- Wu Lun, Liu Yu, Zhang Jing, *et al.* *Geographic Information System: Principle, Methods and Application* [M]. Beijing: Science Press, 2001. [邬伦, 刘瑜, 张晶等. *地理信息系统——原理、方法和应用* [M]. 北京: 科学出版社, 2001.]
- Xu Sheng-rong, Xu Fan, Ye Xiu-qing, *et al.* Knowledge-based study on bridge target recognition method [J]. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 1992, **5**(2): 123-128. [徐胜荣, 徐凡, 叶秀清等. 基于知识的桥梁目标识别方法研究 [J]. *模式识别与人工智能*, 1992, **5**(2): 123-128.]
- Wang Xu-yong, Ren Jian-feng, Guo Lei. A method for identifying bridge across river in aerial image [J]. *Video Engineering*, 2003, (11): 78-80. [汪旭勇, 任建风, 郭雷. 高空水上桥梁的一种识别定位方法 [J]. *视频应用*, 2003, (11): 78-80.]