

文章编号:2095-6134(2016)03-0289-09

综 述

高分辨率遥感影像在城市 LUCC 中的应用^{*}

杨朝斌^{1,2}, 张树文^{1†}, 卜 坤¹, 于灵雪^{1,2}, 颜凤芹^{1,2}, 常丽萍¹, 杨久春¹

(1 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102; 2 中国科学院大学, 北京 100049)
(2015 年 2 月 27 日收稿; 2015 年 12 月 3 日收修改稿)

Yang C B, Zhang S W, Bu K, et al. Application of high spatial resolution remote sensing images in urban LUCC[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2016, 33(3):289-297.

摘 要 高分辨率遥感影像具有高空间分辨率、高清晰度、信息量丰富等优点, 它的出现极大提高了遥感在城市土地利用/覆被变化研究中的应用能力. 城市土地利用类型的准确分类是城市土地利用/覆被变化研究的重要前提, 高分辨遥感影像凭借其自身优势成为最重要的数据源. 本研究从高分辨率遥感影像的发展与特点、分类方法及其在城市专题信息提取中的应用 3 个方面进行综述, 重点回顾高分辨率遥感影像用于城市土地利用分类的代表性方法及其在城市系统中提取建筑物、道路和绿地等专题信息的方法和应用进展, 最后指出高分辨遥感影像在城市土地利用/覆被变化研究中的不足以及未来需要解决的问题.

关键词 高分辨率遥感; 城市 LUCC; 分类方法; 信息提取

中图分类号: TP79 **文献标志码**: A **doi**: 10. 7523/j. issn. 2095-6134. 2016. 03. 001

Application of high spatial resolution remote sensing images in urban LUCC

YANG Chaobin^{1,2}, ZHANG Shuwen¹, BU Kun¹, YU Lingxue^{1,2}, YAN Fengqin^{1,2},
CHANG Liping¹, YANG Jiuchun¹

(1 Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China;
2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Urbanization causes land cover changes which lead to deeper regional social, economic, and environmental changes and have important influences on environment and climate on the global scale. The coarse or moderate resolution remote sensing images may have much mixed pixels which limit their applications in the study of urban remote sensing. High spatial resolution remote sensing images with the advantages of high spatial resolution, high definition, and rich information, greatly improve the application of remote sensing in the research area of land use and land change. Accurate urban land use classification is the basis of the study of urban LUCC, and the high spatial resolution

^{*} 国家自然科学基金面上项目(41271416)和国家自然科学基金(41301466)资助
[†] 通信作者, E-mail: zhangshuwen@iga.ac.cn

remote sensing images become one of the most important data sources because of their inherent advantages. We report the development and features of high resolution remote sensing images, the methods of remote sensing images classification, and their applications in extracting urban information. Much attention is paid to the representative classification methods in urban land use and to the ways of extracting information of buildings, roads, and vegetation in urban environment. The paper indicates that, compared to the traditional classification methods based on the level of pixels, the object-oriented image classification method which makes full use of high spatial resolution remote sensing images is the most widely used method. The discussion focuses on the current status and perspectives of the object-oriented method. With the help of high spatial resolution remote sensing images, accurate urban thematic information can be extracted effectively and it plays a significant role in the study of urban LUCC.

Key words high spatial resolution remote sensing; urban LUCC; classification methods; information extraction

2005 年,国际全球环境变化人文因素计划 (IHDP) 第 15 号报告发布城市化与全球环境变化计划 (UGEC),旨在对陆地生态系统中的城市化和全球环境变化之间的交互关系进行研究^[1]. 在过去的几十年中,全球正经历着空前的城市化进程,2008 年城镇人口首次超过农村人口,预计到 2030 年将有 60% 的人口生活在城市^[2]. 城市作为社会经济、地缘政治和环境过程交互作用产生的复杂系统,其城市化进程能够引起土地利用/覆被的剧烈变化,从而影响区域生态系统和气候,进而对全球环境变化和气候变化产生重要影响^[3-6].

目前,遥感技术凭借其宏观性、时效性、快捷性等特点迅速成为获取土地利用/覆被数据最主要、最高效的手段之一^[7-8]. 在中国,区域尺度上的 LUCC 时空分析的主要数据源为 Landsat 影像^[9]. 然而,当尺度进一步缩小时,利用中等或粗分辨率的遥感影像对城市土地利用/覆被类型进行较为精确的分类仍然具有一定的挑战性,这是由于城市空间异质性和光谱异质性相对较高,存在大量的混合像元和光谱混淆现象^[10-11]. 在城市遥感中,高分辨率遥感影像丰富细致的空间信息在清晰描述城市结构和地物属性方面,发挥着越来越重要的作用,对于城市土地利用/覆被研究势必起到巨大推动作用^[12-14]. 本文中高分辨率遥感影像指高空间几何分辨率的卫星遥感影像.

1 高分辨率遥感影像的发展与特点

1972 年第一颗 Landsat 卫星成功发射之后,卫星遥感数据较好的性价比及较高的更新速率,

使其成为遥感研究主要的数据源^[15],此时的卫星遥感数据具有相对较高的空间分辨率(例如 Landsat 卫星的 MSS 传感器达到 80 m),主要用于区域尺度的研究. 第二代遥感卫星传感器,例如 Landsat 的 TM 以及 SPOT-HRV,进一步将空间分辨率分别提高到 30 m 和 10 m. 李德仁^[16]指出未来的卫星遥感呈现出“三高”(高空间分辨率、高光谱分辨率和高时间分辨率)和“三多”(多平台、多传感器和多角度)的发展趋势. 卫星遥感影像的空间分辨率几乎每 10 年提高一个数量级,1 ~ 5 m 的空间分辨率成为 21 世纪以来新一代民用卫星的基本指标^[17]. 利用遥感提取城市土地利用/覆被信息时,空间分辨率通常要比光谱分辨率更为重要^[18-19].

针对高分辨率遥感影像的定义,目前尚未有统一的定论,通常认为当遥感影像的地面分辨率高于 5 m 时可称为高空间分辨率遥感影像^[17,20]. 在过去的十几年中,新一代商业高分辨率卫星的出现使得遥感影像的空间分辨率可以达到米级甚至亚米级,真正意义上的高分辨率遥感影像正式进入城市遥感应用. 目前,世界各国在轨运行的民用高分辨率遥感卫星达到几十颗(表 1),中国近 10 年也相继发射数颗高分辨率遥感卫星(表 2).

相比传统中低分辨率的遥感影像,高分辨率遥感影像拥有以下优势:

1) 空间分辨率高. 高分辨率遥感影像的空间分辨率能够达到米级甚至是亚米级别,通过影像人们可以识别传统影像中难以辨清的个体目标

表 1 国际主要高分辨率卫星参数一览表
Table 1 Parameters of major international high-resolution satellites

卫星 (国家/地区)	发射年份	波段/ μm	高度/ km	空间分辨率/ m	访问周期/ d	宽幅/ km
IKONOS(美)	1999	0.45~0.90	674	1	1.5~2.9	11
SPOT5(法)	2001	0.49~0.69	832	2.5	26	60
QuikBird(美)	2001	0.45~0.90	450	0.61	1~3.5	16.5
FORMOSAT(台)	2004	0.45~0.90	891	2	1	24
IRS-P5(印)	2005	0.5~0.85	618	2.5	5	30
EROS-B(以)	2006	0.50~0.90	600	0.7	5	7
KOMPSAT-2(韩)	2006	0.50~0.90	685	1	3	15
WorldView-1,2(美)	2008/2009	0.45~0.80	770	0.5	1.1~3.7	30/60
GEOEye-1(美)	2008	0.45~0.90	681	0.41	2~3	15
RapidEye(德)	2008	无全色	630	5.8	1	77
Pleiades-1(法)	2011	0.48~0.83	695	0.5	1	20
SPOT6(法)	2012	0.455~0.745	694	1.5	2~3	60
Resurs-PNO.1(俄)	2013	0.5~0.8	475	0.7	<3	38

表 2 中国高分辨卫星参数一览表
Table 2 Parameters of Chinese high-resolution satellites

卫星	发射年份	全色波段/ μm	高度/ km	空间分辨率/ m	宽幅/ km	重访时间/ d
北京一号小卫星	2005	Pan:0.5~0.8	686	4	24.2	3~5
CBERS-02B	2007	HR:0.5~0.8	—	2.36	27	104
资源一号 02C	2011	HR:0.5~0.8 Pan:0.51~0.85	780	2.36 5	54 60	3~5
资源三号	2012	前/后/正视相机:0.5~0.8	506	3.5/3.5/2.1	52/52/51	3~5
高分一号	2013	Pan:0.45~0.90	645	2	60	4
高分二号	2014	Pan:0.45~0.90	631	1	45	5

物,例如城市中的建筑、道路、汽车、绿地、水源甚至单株树木等等。

2)地物空间信息更加丰富明确.除去光谱特征信息外,影像的空间特征在城市遥感中得到越来越多的重视,例如纹理、形状、大小、位置、阴影与周围地物的空间关系等,而高分辨率遥感影像恰恰以一种非常精细的方式观测地面,可以清楚表达空间结构和表层纹理特征,地物边缘信息也更加清晰,从而为提取城市精确信息提供条件和基础^[21-22]。

3)有效提供三维信息.高分辨率遥感影像能够反映三维空间上的不同组分组合.例如中国资源三号卫星搭载的前、后、正视相机可以获取同一地区 3 个不同观测角度的立体像对,从而提供丰富的三维几何信息.城市发展不仅在二维平面扩张,第三维的高度也是城市空间格局的重要组成,利用高分辨遥感影像得到的城市建筑物、植被的高度信息将丰富城市土地利用/覆被研究^[23]。

4)时间分辨率高.相比中低分辨率遥感影像

十几天的重访周期,高分辨率遥感影像的时间分辨率一般能够控制在几天之内.城市化进程正以前所未有的速度进行着,高分辨率遥感影像1~3天的时间分辨率能够满足城市土地利用遥感监测对数据源时间分辨率的需求。

综上所述,针对城市环境的复杂性,高分辨率遥感影像特别适用于开展城市遥感研究,因此通常被认为是城市土地利用/覆被变化研究最为重要的数据源.然而,高分辨率遥感影像自身也具备一定的局限性,数据量庞大、光谱分辨率低、“同物异谱”现象突出、数据获取时间长、价格过高等因素不同程度增加了高分辨率遥感影像应用的挑战性^[24-25].高分辨率遥感影像固有的特点及其局限性使其影像分类和信息提取具有特殊之处^[26]。

2 高分辨率遥感影像分类方法

2.1 从遥感分类对象进行划分

1)基于像元的分类方法
像是遥感分类中最为常用的分类对象,至

今仍有广泛的应用,技术也相对较为成熟.传统监督分类与非监督分类是广为人知的两种分类方法,其主要的分类依据为地物的光谱特征^[27].此类方法常常应用于中低分辨率的遥感影像,是目前大尺度土地覆被遥感分类的主要方法,然而城市空间异质性特点明显,大量混合像元导致某些土地类型难以区分,分类精度有待提高^[28].

2) 基于亚像元的分类方法

混合像元的存在驱使人们追求更为精确的分类方法,于是遥感影像的应用由像元级别达到亚像元级别,将混合像元分解为不同的“终端单元”^[29].在城市土地利用/覆被研究中,众多学者利用光谱混合模型提取城市不透水面作为城市环境中一种特殊的土地覆被类型,并达到良好的精度效果^[30-31].然而,高分辨率遥感影像空间分辨率较高,混合像元问题并不突出.

综上所述,针对高分辨率遥感影像,传统基于像元及亚像元的分类方法有以下局限性:首先,忽略了纹理、形状、大小等丰富有用的空间信息,仅仅利用影像光谱信息,这对于复杂多变的城市环境来说无疑是一种信息忽略和信息浪费;其次,高分辨率遥感影像光谱分辨率低、光谱复杂性大等局限性使其不适用于简单的基于光谱特征的影像分类.从城市角度看,某些城市土地利用/覆被类型有着极为类似的光谱响应(例如城市沥青道路和沥青屋顶)从而导致传统分类方法可能出现错分现象;再次,传统分类方法中并没有很好地考虑遥感信息的空间尺度效应问题^[32],同目标地物的提取往往是在同一尺度上进行的,提取信息的精度有待进一步提高;因此,如若充分发挥高分辨率遥感影像在城市土地利用/覆被研究中的优势仍需更进一步的努力.

3) 面向对象的分类方法

顾名思义,在面向对象的遥感影像分类方法中,分类对象不再是像元,而是以包含更多语义信息的多个相邻像元组成的对象(或者基元)为最小单元,这里的单元或基元具有相同特征,如光谱、纹理和空间组合关系等特征的“同质均一”的单元^[19,33-35].面向对象的思想在 20 世纪 70 年代就应用到遥感影像解译中^[36],其分类方法在 20 世纪 90 年代开始迅速发展.伴随着商用高分辨率遥感影像的迅猛崛起,面向对象的遥感影像分类方法越来越多地受到遥感研究者的青睐^[37-40].2010 年

Blaschke 等^[41]指出来自 145 种期刊、84 本专著中的相关章节中有超过 820 篇文献对面向对象的影像分析技术进行了详细的探讨.

利用面向对象的方法进行城市土地分类的研究数量庞大在此无法一一列出.影响较显著的研究包括:Carleer 等^[42]比较分析面向对象分类方法中常用的 4 类图像分割算法,结果表明分割参数的选择对于分割结果有着重要影响.Zhou 和 Troy^[43]利用 LIDAR 数据在地块尺度上对城市景观进行分类,结果精度达到 92.3%,Kappa 系数为 0.899.Myint 等^[19]利用 Quikbird 影像以美国城市菲尼克斯为研究区域对比分析基于像元和面向对象的方法在城市土地覆被分类研究中的差异性,结果表明面向对象分类方法的整体精度达到 90.40%,这比单纯基于光谱特征的传统方法高出将近 30 个百分点.Pu 等^[44]利用高分辨率的 IKONOS 影像探索面向对象的方法是否能够显著提高城市土地覆被分类的精度,结果表明以对象为最小单位的分类方法能够有效去除种类内部差异性引起的“椒盐现象”从而提高分类精度,此外并探究了选取不同数量的“对象”对分类结果的影响^[44].

国内方面,面向对象的影像分类方法起步较晚,缺乏机理性的研究,更多集中在案例研究.曹雪和柯长青^[45]利用 QuickBird 数据开展深圳市土地利用分类研究,结果表明相比传统方法面向对象的方法在精度上有明显提高.姚国红等^[46]利用航空影像选取山西省平顺县城为研究区域采用面向对象的特征提取技术开展地理要素提取实验,获得了比较满意的专题信息.仇江啸和王效科^[47]开展了基于高分辨率遥感影像的优化和广义两种面向对象分类方案的比较性研究,结果表明两种方法有各自的优缺点,优化方法精度高而可移植性差,广义的方法精度相对低一些但有较强的适用性.

综上所述,针对高分辨率遥感影像,与传统的分类方法相比,面向对象的分类方法具有以下优点:1)它是一种能够充分利用遥感影像的多特征从而更加接近于人脑的解译方式.对象具有比像元更丰富的意义,以此为基础可以应用地学的各种核心概念,如距离、方向特征等,更符合人类的思维和推理,更具智能性^[17].2)它能够依据不同地物类别的特点在不同尺度上进行信息提取.在高分辨率遥感影像中,不同地物目标的特征差异更加明显,各自对应的最佳提取尺度也不同,而面

向对象的方法可以在最适宜的尺度上提取地类信息^[35,48]。3)它的分类结果精度高。面向对象的分类方法在城市遥感研究中所能达到的分类精度一般超过90%,能够较好地满足精度要求^[49]。任意一种分类方法都有其自身的局限性,在面向对象的分类方法中,怎样快速进行尺度转换、图像分割、特征映射与分类等问题都有待进一步的研究和开拓^[50-52]。

2.2 从分类器的角度划分

从分类器角度看,遥感影像主要的分类方法如下:1)模糊数学分类方法。模糊集理论自创立以来便逐步应用到处理遥感数据的不确定性和分类问题中^[53]。在此类方法中,某个像元的归属可以不具有排他性,即在某种程度上可以从属于这个类别而在另外一种程度上又可以归属于其他类别^[54]。这种像元的归属关系一般需要用隶属度函数进行确定,然而数学模型的不成熟一定程度上限制了该方法的普适性。2)神经网络(artificial neural networks, ANN)分类器。ANN分类器,是由大量简单的处理单元(神经元)构成的复杂网络,它通过模仿人的大脑对数据进行接收、处理、存储和传输等一系列操作^[55-58]。刘正军等^[59]利用Fuzzy ARTMAP神经网络针对高分辨率影像进行土地覆被分类及其评价研究,结果表明该方法的分类精度相比监督分类、反馈式神经网络分类方法等有较大提高,能够获得较好的分类结果。3)基于专家知识和地学知识的分类。该类方法利用专家系统丰富的经验并结合相关地学知识对遥感影像进行综合的解译和决策分析,能够进一步更多地从发生学、动力学机制的角度对遥感信息进行提取分析^[60-61]。4)决策树分类器。决策树是通过训练样本进行归纳学习生成决策树或决策规则,然后使用决策树或决策规则对新数据进行分类的一种数学方法,主要包括决策树学习和决策树分类2个过程^[62-63]。陈亮等^[64]利用决策树分类方法对高分辨率影像进行分类研究,结果表明该分类精度为81.7%,能有效解决光谱数据分类中存在的地物破碎问题,有助于提高高分辨率遥感影像的分类精度。Tooke等^[65]采用混合像元分解和决策树分类算法对QuickBird影像进行城市植被类型提取。5)支持向量机分类器。支持向量机是一种基于统计学习理论的新型机器学习算法,具有小样本学习、抗噪声性能、学习效率高、推广性好等优点^[66-68]。汪闵等^[69]结合高斯马尔可夫随机场模型

与支持向量机模型在1 m分辨率的IKONOS影像上提取道路网络,结果证明该方法是有有效的。Inglada^[70]使用支持向量机方法自动识别高分辨遥感影像中的人工目标,总体精度超过80%。

3 城市高分辨率遥感影像专题信息提取

3.1 城市建筑物的信息提取

人工建筑物是城市中最常见的地物类型,提取的相关信息一般包括建筑物位置、二维结构、包含高度在内的三维信息以及建筑物覆盖率、建筑容积率等,这些信息的获取有助于促进土地利用优化配置^[71-72]。迄今为止,利用高分辨率遥感影像提取建筑物的方法主要有以下几类:1)基于建筑物几何特征的提取方法。此类方法又可细分为基于线状特征和基于角点检测和匹配的方法。在基于直线特征的方法中,首先提取影像中的边缘信息,根据空间关系对获取的边缘进行分组进而搜索符合建筑物轮廓矩形来提取建筑物的信息^[73]。在基于角点检测和匹配的方法中,首先独立提取建筑物的角点,再根据一定规则进行角点匹配,达到提取建筑物信息的目的。2)基于区域分割的提取方法。该方法首先利用面向对象的思想将影像分割为若干子区域,然后依据建筑物自身的位置、形状等特征进行信息提取。Wang和Liu^[74]基于多尺度面向对象的分类方法和概率霍夫变换的方法提出一种从高分辨率影像提取建筑物信息的新途径,实验结果证明该方法可以准确地提取出大多数规则建筑物的信息。3)基于辅助信息的提取方法。除去建筑物本身的特征外,利用阴影等辅助信息能够有效促进对建筑物信息的提取。谢军飞和李廷明^[75]利用IKONOS卫星影像阴影提取出城市建筑物的高度信息。赵鸿燕等^[76]利用太阳、卫星、建筑物及其阴影关系图计算出建筑物的高度。

综上所述,利用高分辨率遥感影像能够有效提取与城市建筑物相关的丰富信息。近年来,一些学者在自动提取^[77]、变化监测^[78]、三维信息^[79]方法等方面也开展了崭新的研究。结合多种方法,取长补短,适当利用辅助信息是未来利用高分辨率遥感影像提取建筑物信息的趋势之一。

3.2 城市道路信息的提取

道路可以比作城市的骨骼,提取道路信息对

于 GIS 数据更新、影像匹配等具有重要意义但也常被认为是一项困难的工作^[80-81]. 为了能够更好地揭示道路提取的特点, 可以把从高分辨率遥感影像中提取道路的方法分为以下几类: 1) 于边缘特征的道路提取. 在高分辨率影像中, 道路往往呈现出条带状的几何特点, 而且拥有对称的边缘线. 该方法依据道路的线性特征, 利用计算机提取道路的边缘信息进而识别出道路. 李朝奎等^[82]利用 Google 高分辨率遥感影像, 基于光谱和几何特征相结合并利用数据形态等辅助方法提取了道路信息. 2) 面向对象的道路提取. 该方法把道路本身作为影像分类的基本对象从而能够有效的解决高分辨率遥感影像的噪声问题. 唐伟等^[83]采用面向对象的技术, 实现高分辨率影像道路信息的提取, 准确度较高. 杨先武等^[84]提出基于形态重建的道路提取方法, 将影像进行分割、形态重建后提取出道路轮廓和中心线, 结果表明该方法能有效提取出城市道路网.

综上所述, 从高分辨率遥感影像提取道路网是一个研究热点, 一些学者从多重信息融合^[85]、模型组合^[86]、自动化提取^[87]等方面探索了道路提取的新途径. 未来可从以下几方面进一步加强研究, 如加深对道路特征的认识和理解, 利用三维信息, 深入应用数学、模糊识别等理论方法.

3.3 城市绿地信息的提取

城市未来发展的方向之一是森林城市, 建设“林中有城, 城在林中”的园林城市已成为城市建设的热潮^[88]. 城市绿地作为城市土地利用/覆被分类中的重要一员, 对于城市的生存发展有着重要作用. 高分辨率遥感影像的出现为获取城市绿地信息提供了崭新的途径. 张友水等^[89]利用 IKONOS 影像建立归一化植被指数提取城市绿地信息, 使用的方法考虑了各类目标的不同点, 避免了单一分类造成的混分现象. 随着遥感信息提取方法的发展, 面向对象的方法开始占据重要地位. 黄慧萍等^[90]利用多尺度分割面向对象的方法自动提取大庆市城市陆地覆盖信息, 结果表明其方法具有周期短、精度高、成本低等优点. 此外也有学者利用其他分类方法对城市绿地开展研究, 例如陈君颖和田庆久^[91]基于 IKONOS 遥感影像采用决策树分类算法对南京市区的植被进行分类, 使用 QuickBird 影像进行验证总体精度达到 91.94%. Pu 和 Landry^[92]对比研究 IKONOS 影像

和 WorldView-2 影像在区分城市树种能力时的差异.

综上所述, 不同绿地信息的提取方法各有优缺点, 但如何高效、准确和自动化地识别城市绿地信息仍是需要重点探讨的问题之一. 此外, 利用高分辨率遥感影像针对城市绿地还开展了其他领域的研究, 例如, 黄金龙等^[93]利用 IKONOS 遥感影像估算南京市某林区森林地上生物量, 结果表明其方法具有可行性; Song 等^[94]指出结合统计模型可直接利用 IKONOS 影像和 QuickBird 影像估算植被的冠层大小; Tigges 等^[95]利用 RapidEye 高分辨率影像使用支持向量机的方法对德国柏林城市森林进行分类研究, 结果表明其可以获得城市环境中精度较高的树属分类信息.

4 总结与展望

本研究回顾高分辨率遥感影像的发展历史, 总结高分辨率遥感影像的特点, 综合比较针对城市环境利用高分辨率遥感影像进行土地分类的方法以及高分辨率遥感影像在城市专题信息提取中的应用. 城市土地利用类型的准确分类是城市土地利用/覆被变化研究的重要前提, 城市建筑物、道路、绿地等专题信息的变化也是城市土地利用/覆被变化的重要内容. 高分辨率遥感影像自身的优势使其出现以来便受到城市遥感研究者的热烈追捧, 现已成为城市土地利用/覆被研究最为重要的数据源^[96-98], 对于高分辨率遥感影像在城市 LUCC 中应用的总结与展望如下:

1) 高分辨率遥感影像具有空间分辨率特别高、空间信息丰富、时间分辨率高等特点, 适用于开展城市复杂多变精细的土地利用/覆被变化研究. 以高分辨率遥感影像为主, 辅以其他多光谱、高光谱影像, 结合历史资料、地形图等传统数据, 综合利用多种数据源开展研究是主要的趋势. 未来工作还需放在如何解决高分辨率遥感影像光谱分辨率低、获取时间周期长、价格过高等局限性的问题上.

2) 在众多高分辨率遥感影像分类方法中, 面向对象的分类方法应用最为广泛, 具有明显的优势, 分类结果精度也最高. 在未来的工作中, 进一步加强分类方法的理论创新, 实现影像快速分割、尺度有效转换, 建立典型地表类型的图像库, 增强分类方法普适性和智能性是重要的方向.

3) 高分辨率遥感影像能够有效提取城市环境中的建筑物、道路和绿地等信息。未来城市土地利用/覆被变化研究中,在准确提取城市专题信息的基础之上,充分发挥高分辨率遥感影像的特点,对专题信息本身的属性状态(例如树木种类、高度等内容进行)进行进一步的描述从而使得城市土地利用/覆被变化研究更为丰富细致。

随着高分辨率遥感影像数据源、分类方法、信息提取技术的不断发展,遥感作为一门应用性为主的学科必将在城市土地利用/覆被变化研究中发挥更大的作用。

参考文献

- [1] IHDP. Urbanization and global environmental change [R]. Bonn: International Human Dimensions Programme on Global Environment Change Report No. 15. 2005.
- [2] WHO. Hidden cities: unmasking and overcoming health inequities in urban settings [M]. Switzerland: World Health Organization, 2010.
- [3] Weber C, Puissant A. Urbanization pressure and modeling of urban growth: example of the Tunis Metropolitan Area [J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 86(3): 341-352.
- [4] Grimmond S. Urbanization and global environmental change: local effects of urban warming [J]. The Geographical Journal, 2007, 173(1): 83-88.
- [5] Jacobson M Z, Ten Hoeve J E. Effects of urban surfaces and white roofs on global and regional climate [J]. Journal of Climate, 2012, 25(3): 1 028-1 044.
- [6] 匡文慧. 城市土地利用时空信息数据重建、分析与模拟 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [7] 刘纪远, 邓祥征. LUCC 时空过程研究的方法进展 [J]. 科学通报, 2009, 54(21): 3 251-3 258.
- [8] Jia K, Wei X, Gu X, et al. Land cover classification using Landsat 8 operational land imager data in Beijing, China [J]. Geocarto International, 2014, 29(8): 941-951.
- [9] 刘纪远. 二十世纪九十年代中国土地利用变化的遥感时空信息研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [10] Herold M, Roberts D A, Gardner M E, et al. Spectrometry for urban area remote sensing: development and analysis of a spectral library from 350 to 2 400 nm [J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 91(3): 304-319.
- [11] Lu D, Weng Q. Use of impervious surface in urban land-use classification [J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 102(1): 146-160.
- [12] 杜培军, 郭达志. 高分辨率卫星遥感的发展及在城市规划与管理中的应用 [J]. 城市勘测, 1999, 6(4): 17-21.
- [13] 杨清华, 齐建伟, 孙永军. 高分辨率卫星遥感数据在土地利用动态监测中的应用研究 [J]. 国土资源遥感, 2001, 13(4): 20-27.
- [14] 张淑辉, 葛莹, 王伟娜, 等. 1 m 分辨率卫星影像的应用研究 [J]. 现代测绘, 2008, 31(1): 33-34.
- [15] Wulder M A, Masek J G, Cohen W B, et al. Opening the archive: How free data has enabled the science and monitoring promise of Landsat [J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 122(1): 2-10.
- [16] 李德仁. 论 21 世纪遥感与 GIS 的发展 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2004, 28(2): 127-131.
- [17] 周成虎, 骆剑承. 高分辨率卫星遥感影像地学计算 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [18] Rashed, T, Carsten J. Remote sensing of urban and suburban areas [M]. Austin: Springer Netherlands, 2010.
- [19] Myint S W, Gober P, Brazel A, et al. Per-pixel vs object-based classification of urban land cover extraction using high spatial resolution imagery [J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(5): 1 145-1 161.
- [20] 宫鹏, 黎夏, 徐冰. 高分辨率影像解译理论与应用方法中的一些研究问题 [J]. 遥感学报, 2006, 10(1): 1-5.
- [21] 孙丹峰, 杨冀红. 高分辨率遥感卫星影像在土地利用分类及其变化监测的应用研究 [J]. 农业工程学报, 2002, 18(2): 160-164.
- [22] 王碧辉, 吴运超, 黄晓春. 基于高分辨率遥感影像的城市用地分类研究 [J]. 遥感信息, 2011, 27(4): 111-115.
- [23] 蔡宏, 李俊, 刘敬. 高分辨率遥感在城市发展动态监测中的应用 [J]. 云南地理环境研究, 2006, 18(1): 105-109.
- [24] Herold M, Gardner M E, Roberts D A. Spectral resolution requirements for mapping urban areas [J]. Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(9): 1 907-1 919.
- [25] Bruzzone L, Carlin L. A multilevel context-based system for classification of very high spatial resolution images [J]. Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(9): 2 587-2 600.
- [26] 白穆, 刘慧平, 乔瑜, 等. 高分辨率遥感图像分类方法在 LUCC 中的研究进展 [J]. 国土资源遥感, 2010, 22(1): 19-23.
- [27] 陈姝, 居为民. 遥感图像分类方法及研究进展 [J]. 河北农业科学, 2009, 13(1): 143-146.
- [28] 赵英时. 遥感应用分析原理与分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [29] 李素, 李文正, 周建军, 等. 遥感影像混合像元分解中的端元选择方法综述 [J]. 地理与地理信息科学, 2007, 23(5): 35-38.
- [30] Weng Q. Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: requirements, methods, and trends [J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 117(1): 34-49.
- [31] Sexton J O, Song X P, Huang C, et al. Urban growth of the Washington, DC - Baltimore, MD metropolitan region from 1984 to 2010 by annual, Landsat-based estimates of impervious cover [J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 129(1): 42-53.
- [32] 李小文, 王伟婷. 定量遥感尺度效应刍议 [J]. 地理学报, 2013, 68(9): 1 163-1 169.

- [33] Lobo A, Chic O, Casterad A. Classification of Mediterranean crops with multisensor data: per-pixel versus per-object statistics and image segmentation[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(12): 2 385-2 400.
- [34] Benz U C, Hofmann P, Willhauck G, et al. Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2004, 58(3): 239-258.
- [35] 陈杰. 高分辨率遥感影像面向对象分类方法研究[D]. 长沙:中南大学,2010.
- [36] Kettig R, Landgrebe D. Classification of multispectral image data by extraction and classification of homogeneous objects[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics GE*, 1976, 14(1): 19-26.
- [37] Pinho C M D, Fonseca L M G, Korting T S, et al. Land-cover classification of an intra-urban environment using high-resolution images and object-based image analysis[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 33(19): 5 973-5 995.
- [38] 张俊,于庆国,侯家槐. 面向对象的高分辨率影像分类与信息提取[J]. *遥感技术与应用*, 2010, 25(1): 112-117.
- [39] Blaschke T. Object based image analysis for remote sensing[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2010, 65(1): 2-16.
- [40] Rizvi I A, Mohan B K. Object-based image analysis of high-resolution satellite images using modified cloud basis function neural network and probabilistic relaxation labeling process[J]. *Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(12): 4 815-4 820.
- [41] Blaschke T, Hay G J, Kelly M, et al. Geographic object-based image analysis: towards a new paradigm[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, 87(1): 180-191.
- [42] Carleer A P, Debeir O, Wolff E. Assessment of very high spatial resolution satellite image segmentations[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2005, 71(11): 1 285-1 294.
- [43] Zhou W, Troy A. An object-oriented approach for analysing and characterizing urban landscape at the parcel level[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(11): 3 119-3 135.
- [44] Pu R, Landry S, Yu Q. Object-based urban detailed land cover classification with high spatial resolution IKONOS imagery[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(12): 3 285-3 308.
- [45] 曹雪,柯长青. 基于对象级的高分辨率遥感影像分类研究[J]. *遥感信息*, 2006,30(5): 27-30.
- [46] 姚国红,张锦,王励. 面向对象的高分辨率遥感影像地理要素提取[J]. *测绘科学*, 2012, 37(6): 53-55.
- [47] 仇江啸,王效科. 基于高分辨率遥感影像的面向对象城市土地覆被分类比较研究[J]. *遥感技术与应用*,2010,25(5):653-661.
- [48] 黄慧萍. 面向对象影像分析中的尺度问题研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2003.
- [49] Zhou W, Troy A. An object-oriented approach for analysing and characterizing urban landscape at the parcel level[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(11): 3 119-3 135.
- [50] 苏伟,李京,陈云浩,等. 基于多尺度影像分割的面向对象城市土地覆被分类研究:以马来西亚吉隆坡城市中心区为例[J]. *遥感学报*, 2007, 11(4): 521-530.
- [51] 张俊,汪云甲,李妍,等. 一种面向对象的高分辨率影像最优分割尺度选择算法[J]. *科技导报*, 2009, 27(0921): 91-94.
- [52] 沈占锋,骆剑承,胡晓东,等. 高分辨率遥感影像多尺度均值漂移分割算法研究[J]. *武汉大学学报:信息科学版*, 2010,35(3): 313-317.
- [53] 曾建航,魏萌,王靳辉,等. 基于知识的遥感影像模糊分类方法[J]. *测绘科学技术学报*, 2008, 25(3): 172-175.
- [54] 张宝光. 论遥感数字图像的模糊分类处理[J]. *天津师范大学学报:自然科学版*, 2005, 25(2): 69-72.
- [55] Civco D L. Artificial neural networks for land-cover classification and mapping[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 1993, 7(2): 173-186.
- [56] 骆剑承,杨艳. 人工神经网络遥感影像分类模型及其与知识集成方法研究[J]. *遥感学报*, 2001, 5(2): 122-129.
- [57] 修丽娜,刘湘南. 人工神经网络遥感分类方法研究现状及发展趋势探析[J]. *遥感技术与应用*, 2003, 18(5): 339-345.
- [58] 卢柳叶,张青峰,李光录. 基于 BP 神经网络的遥感影像分类研究[J]. *测绘科学*, 2012, 37(6): 140-143.
- [59] 刘正军,王长耀,延昊,等. 基于 Fuzzy ARTMAP 神经网络的高分辨率图象土地覆盖分类及其评价[J]. *中国图象图形学报: A 辑*, 2005, 8(2): 151-154.
- [60] 李石华,王金亮,毕艳,等. 遥感图像分类方法研究综述[J]. *国土资源遥感*, 2005, 2(5): 1-6.
- [61] 陈述彭. 遥感地学分析的时空维[J]. *遥感学报*, 1997, 1(3): 161-171.
- [62] 申文明,王文杰,罗海江,等. 基于决策树分类技术的遥感影像分类方法研究[J]. *遥感技术与应用*, 2007, 22(3): 333-338.
- [63] 罗来平,宫辉力. 遥感图像决策树分类器研究与实现[J]. *遥感信息*, 2006(3): 13 -16.
- [64] 陈亮,张友静,陈波. 结合多尺度纹理的高分辨率遥感影像决策树分类[J]. *地理与地理信息科学*, 2007, 23(4): 18-21.
- [65] Tooke T R, Coops N C, Goodwin N R, et al. Extracting urban vegetation characteristics using spectral mixture analysis and decision tree classifications[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(2): 398-407.
- [66] 惠文华. 基于支持向量机的遥感图像分类方法[J]. *地球*

- 科学与环境学报, 2006, 28(2): 93-95.
- [67] 朱海洲, 贾银山. 基于支持向量机的遥感图像分类研究[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(15): 3 659-3 663.
- [68] Zhang J, He C, Pan Y, et al. The high spatial resolution RS image classification based on SVM method with the multi-source data[J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 10(1): 49-57.
- [69] 汪润, 骆剑承, 周成虎, 等. 结合高斯马尔可夫随机场纹理模型与支撑向量机在高分辨率遥感图像上提取道路网[J]. 遥感学报, 2005, 9(3): 271-276.
- [70] Inglada J. Automatic recognition of man-made objects in high resolution optical remote sensing images by SVM classification of geometric image features[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2007, 62(3): 236-248.
- [71] 明冬萍, 骆剑承, 沈占锋, 等. 高分辨率遥感影像信息提取与目标识别技术研究[J]. 测绘科学, 2005, 30(3): 18-20.
- [72] 乔程, 骆剑承, 吴泉源, 等. 面向对象的高分辨率影像城市建筑物提取[J]. 地理与地理信息科学, 2008, 24(5): 36-39.
- [73] 陶超, 谭毅华, 蔡华杰, 等. 面向对象的高分辨率遥感影像城区建筑物分级提取方法[J]. 测绘学报, 2010, 39(1): 39-45.
- [74] Wang Z, Liu W P. Building extraction from high resolution imagery based on multi-scale object oriented classification and probabilistic Hough transform[J]. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005, 4(1): 2 250-2 253.
- [75] 谢军飞, 李延明. 利用 IKONOS 卫星图像阴影提取城市建筑物高度信息[J]. 国土资源遥感, 2004, 16(4): 4-6.
- [76] 赵鸿燕, 饶欢, 张璋. 基于高分辨率影像城市建筑物研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2009, 31(6): 27-30.
- [77] Jin X, Davis C H. Automated building extraction from high-resolution satellite imagery in urban areas using structural, contextual, and spectral information[J]. EURASIP Journal on Applied Signal Processing, 2005, 2005(14): 2 196-2 206.
- [78] Bouziani M, Goïta K, He D C. Automatic change detection of buildings in urban environment from very high spatial resolution images using existing geodatabase and prior knowledge[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2010, 65(1): 143-153.
- [79] Sportouche H, Tupin F, Denise L. Extraction and three-dimensional reconstruction of isolated buildings in urban scenes from high-resolution optical and SAR spaceborne images[J]. Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(10): 3 932-3 946.
- [80] 叶发茂, 苏林, 李树楷, 等. 高分辨率遥感影像提取道路的方法综述与思考[J]. 国土资源遥感, 2006, 18(1): 12-17.
- [81] 杨晓亮, 文贡坚. 高分辨率遥感影像中提取道路网方法综述[J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(3): 465-471.
- [82] 李朝奎, 张多才, 陶建军, 等. 基于 Google 影像的城市道路网提取及其应用[J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(1): 100-105.
- [83] 唐伟, 赵书河, 王培法. 面向对象的高空间分辨率遥感影像道路信息的提取[J]. 地球信息科学, 2008, 10(2): 257-262.
- [84] 杨先武, 韦春桃, 吕建刚, 等. 基于形态重建的高分辨率遥感影像城市道路提取[J]. 测绘通报, 2012, 16(1): 45-47.
- [85] 李晓峰, 张树清, 韩富伟, 等. 基于多重信息融合的高分辨率遥感影像道路信息提取[J]. 测绘学报, 2008, 37(2): 178-184.
- [86] 唐伟, 赵书河. 基于 GVF 和 Snake 模型的高分辨率遥感图像四元数空间道路提取[J]. 遥感学报, 2011, 15(5): 1 040-1 052.
- [87] Doucette P, Agouris P, Stefanidis A. Automated road extraction from high resolution multispectral imagery[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2004, 70(12): 1 405-1 416.
- [88] 李海梅, 何兴元, 陈玮, 等. 中国城市森林研究现状及发展趋势[J]. 生态学杂志, 2004, 23(2): 55-59.
- [89] 张友水, 冯学智, 都金康, 等. IKONOS 影像在城市绿地提取中的应用[J]. 地理研究, 2004, 23(2): 274-280.
- [90] 黄慧萍, 吴炳方, 李苗苗, 等. 高分辨率影像城市绿地快速提取技术与应用[J]. 遥感学报, 2004, 8(1): 68-74.
- [91] 陈君颖, 田庆久. 高分辨率遥感植被分类研究[J]. 遥感学报, 2007, 11(2): 221-227.
- [92] Pu R, Landry S. A comparative analysis of high spatial resolution IKONOS and WorldView-2 imagery for mapping urban tree species[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 124(1): 516-533.
- [93] 黄金龙, 居为民, 郑光, 等. 基于高分辨率遥感影像的森林地上生物量估算[J]. 生态学报, 2013, 33(20): 6 497-6 508.
- [94] Song C, Dickinson M B, Su L, et al. Estimating average tree crown size using spatial information from Ikonos and QuickBird images: across-sensor and across-site comparisons[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(5): 1 099-1 107.
- [95] Tigges J, Lakes T, Hostert P. Urban vegetation classification: benefits of multitemporal RapidEye satellite data[J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 136(1): 66-75.
- [96] 陈述彭, 谢传节. 城市遥感与城市信息系统[J]. 测绘科学, 2000, 25(1): 1-8.
- [97] 廖克, 成夕芳, 吴健生, 等. 高分辨率卫星遥感影像在土地利用变化动态监测中的应用[J]. 测绘科学, 2006, 31(6): 11-15.
- [98] Huang X, Lu Q, Zhang L. A multi-index learning approach for classification of high-resolution remotely sensed images over urban areas[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, 90(1): 36-48.