DOI:10.13878/j.cnki.jnuist.2018.01.003

杜培军[1,2,3] 白旭宇[1,2,3] 罗洁琼[1,2,3] 李二珠[1,2,3] 林聪[1,2,3]

城市遥感研究进展

摘要

城市遥感是当前遥感技术应用的一个重要领域.随着我国新型城镇化过程的推进,遥感技术将在城市生态建设、国土空间开发、资源环境承载能力监测等方面发挥重要作用,成为城市规划管理重要的信息源.本文在总结国内外城市遥感研究内容的基础上,重点对城市遥感若干重要方向的发展进行了分析,在此基础上构建出一个地理学视角的城市遥感研究框架,结合典型实例从结构与格局、要素与作用、变化与过程、功能与响应4个方面进一步探讨了城市遥感研究的发展.最后,结合国家需求和技术发展,对城市遥感今后的发展从数据源、研究对象、应用主题、研究目标、技术方法等方面进行了展望.

关键词

城市遥感;不透水面;城市扩展;土地利用/覆盖分类

中图分类号 TU984;TP79

文献标志码 A

0 引言

城市是人类文明发展的重要标志.据联合国世界城市化展望报告(UN World Urbanization Prospects Report)统计,1900年全球城市人口的比例为13%(2.2亿),1950年达到29%(7.32亿),2005年则达到32亿(40%),2007年,全球城市人口的比例在历史上首次突破50%,预计到2030年城市人口的比例将达到60%(49亿)(http://www.un.org/esa/population/publications/WUP2005/2005wup.htm).

城市化过程是指乡村人口转变为城市人口、乡村地域转变为城市地域的过程,因此通常用城市人口(或非农业人口)占区域总人口的百分比来衡量城市化水平[1-2].城市化也是城市数量迅速增加、城市规模迅速膨胀、农村人口转入城市、人们生活方式改变的过程,可以进一步分解为4个主要过程:反映城市人口集散的人口城市化过程、反映城市经济增长的经济城市化过程、反映城市城镇空间扩展的空间城市化过程以及反映城市文明扩散的社会城市化过程[1].城市化在推动社会发展、提高人类物质和精神生活水平的同时,也不可避免地带来了一系列负面影响,引发了严重的水危机、资源短缺、生态破坏、环境污染等问题,进而出现了所谓的"城市病",主要包括城市水资源水环境问题、绿地生态系统破坏、大气污染、热岛效应、固体废弃物问题、噪声污染、地面沉降、光污染和电磁污染以及城市社会环境问题[3-5].城市化与生态环境之间存在着极其复杂的交互耦合关系,协调城市化与生态环境的关系已上升为学术界和决策部门普遍关注的热点问题[1,6].

城市化对自然地理环境、人文地理环境和生态环境系统的影响,都直接或间接地在多源、多尺度、主被动遥感影像上得到了表达.空间城市化过程及其引发的各种自然和人文变化是城市遥感最直接的应用方向,通过对空间城市化过程与人口、经济和社会因素的分析,遥感能够间接用于人口城市化过程、经济城市化过程和社会城市化过程的分析和建模.因此,遥感是监测、管理、分析城市化过程及其生态环境响应的最为有效的信息源."城市遥感"作为遥感的一个重要应用分支,一直是国际上遥感应用和城市科学2个领域的重要研究内容[7-11].

本文在分析国内外城市遥感主要方向研究进展的基础上,构建了一个系统化的城市遥感研究框架,并以作者课题组相关研究工作

收稿日期 2017-12-19

资助项目 国家自然科学基金重点项目(41631176)

作者简介

杜培军,男,教授、博士生导师,主要研究方向为城市遥感、遥感图像处理与地学分析.peijun@nju.edu.cn

1 南京大学 地理与海洋科学学院,南京,210023

2 卫星测绘技术与应用国家测绘地理信息局重点实验室,南京,210023

3 江苏省地理信息技术重点实验室,南京,210023

为例予以分析,最后对城市遥感未来进展进行了展望和探讨.

1 城市遥感的研究内容和主要进展

城市遥感作为一个多学科交叉的领域,研究内容丰富.由国际摄影测量与遥感学会(International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS)和IEEE地学与遥感学会(IEEE Geoscience and Remote Sensing Society,IEEE GRSS)共同召开的城市遥感联合大会(Joint Urban Remote Sensing Event,JURSE)是国际上城市遥感领域最高水平的学术盛会,该会议的主要议题也反映了当前国内外城市遥感研究的主要内容:

1)城市遥感的数据源和传感器,包括城市遥感新的卫星/机载观测系统、描述城市特征的多源数据(多光谱、高光谱以及高分辨率数据等)、考虑城市地区特点的处理技术(如配准、阴影影响改正、三维、地籍调查等)、城市遥感新型地面观测技术(如LiDAR等).

2)城市地区结构探测和特征化描述,包括开发区状态和变化调查、城市土地覆盖/利用制图、目标(街道、建筑物等)探测、LiDAR和InSAR城市目标/现象和地表沉降三维监测、通过数据融合的二维/三维特征合并和分解.

3)城市地区遥感数据解译算法和技术,包括高分辨率影像目视分析和解译的数学方法和工具、GIS与影像的融合、多源遥感数据融合、新型分类算法等.

4)城市遥感应用的算法和技术,包括基于遥感的城市风险评估算法、水文/地质环境评价算法、灾害管理算法、公共安全相关的应用算法、国家/区域/地区层次的遥感变化检测、城市环境和地球物理参数的定量反演.

5)遥感用于城市气象学、地质学和地质灾害,包括城市热岛效应、空气质量评价、沉降、水文学、地震/火山/滑坡和泥石流等地质灾害、沿海灾害、环境监测(土壤和地表水污染)等.

6)遥感在社会科学中的应用,包括人口统计、健康、社会科学、考古中的遥感和GIS应用、公共安全和应急管理、大型社会活动(如奥运会、世博会等)中的遥感应用等.

7)遥感在城市规划和保护中的应用,包括城市规划、数字城市、城市保护中的遥感应用,以及基于遥感和其他模型的城市模拟.

8)城市发展和扩展的格局、过程与模拟,包括城市发展建模、遥感与城市轨迹理论、城市精细结构变化等.

9)城市/城市周边地区生态学,包括景观生态遥感、生态安全遥感评价、生态过程建模等.

结合以上内容,可以构建如图1所示的城市遥感内容和信息处理方法总体结构.

可以看出,遥感既可以对城市环境从格局、要素、功能、演变方面进行全面描述和监测,又能够为城市环境评价、规划、模拟、预测等提供最重要的信息源.通过城市遥感分析的结果,还可以进一步与城市其他自然、人文、经济和社会过程结合,实现遥感技术的全方位、深层次应用.

随着遥感数据获取技术的快速发展,城市遥感可用的遥感数据源越来越多,为开展各项研究工作创造了坚实的基础.从全球城市化研究中应用的中低分辨率遥感数据如MODIS、NOAA/AVHRR、MERIS,到区域城市研究中常用的中分辨率遥感数据如Landsat TM/ETM+/OLI、ASTER、SPOT、Sentinel,再到城市问题精细研究的各种高分辨率遥感影像如WorldView、IKONOS等,都在描述城市结构和状态、变化与过程等方面发挥了重要作用.在常规全色和多光谱遥感数据的基础上,雷达、高光谱、热红外和夜光遥感影像等也在城市遥感中得到越来越多的应用.近年来,以CBERS、HJ-1 A/B为代表的国产中分辨率遥感影像和GF-1、GF-2和ZY-3等为代表的国产高分辨率遥感影像在城市研究中也得到了有效的应用.

综合国内外相关研究,目前一些主要的城市遥感方向包括:

1) 城市土地利用/土地覆盖分类.城市土地利用/土地覆盖遥感分类主要是利用中、高分辨率遥感数据和各种遥感分类器,对城市土地覆盖进行分类,结合各种先验知识、语义信息等构建转换和识别规则,实现城市土地覆盖到土地利用的转换[12-14].新型分类器如支持向量机、旋转森林、多分类器等在城市土地覆盖分类中得到有效应用,空间-光谱特征综合则是提高分类精度的有效途径.在基于像素分类的基础上,针对城市要素分布特点,面向对象分类方法也得到了较好的应用.基于土地利用/土地覆盖分类结果,可以对城市构成、结构进行系统、全面的分析,进一步可以和景观格局分析软件结合,对城市景观

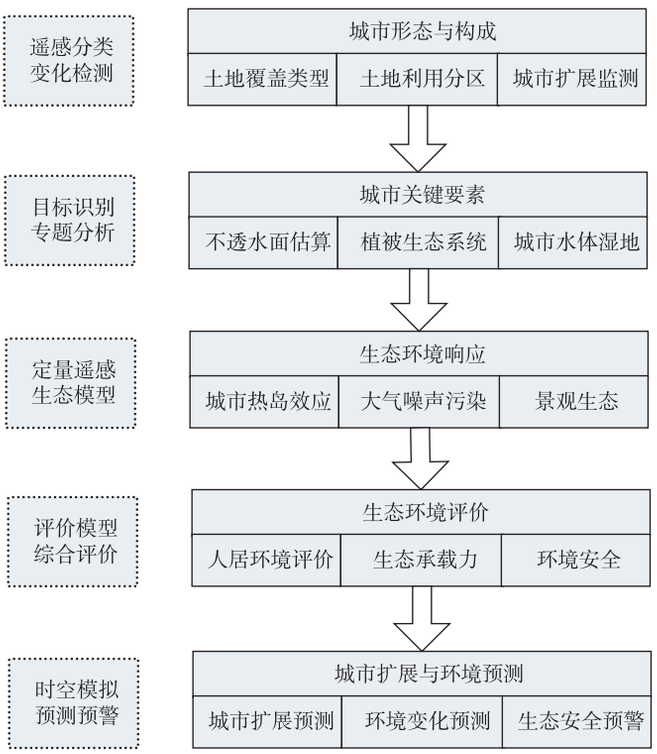


图 1　城市遥感的体系结构

Fig. 1　Framework of urban remote sensing

结构进行综合分析[15-16].

2) 城市环境遥感监测.遥感信息能够识别叶绿素 a、悬浮物浓度、TN 和 TP 等水体环境质量指标,进而实现水体环境评价和水质遥感分级[17-19].遥感技术在空气污染和大气环境监测中具有非常重要的应用价值,可用于近地面空气质量(颗粒污染物、NO_2、O_3、CO 等)监测、地表排放估算(如氮氧化物、挥发性有机化合物、CO、气溶胶污染源等)等方面[20-23].

3) 城市植被遥感.植被在城市生态系统中发挥着生态功能、景观功能和生产功能,城市植被遥感主要包括植被过程中的地表辐射能量收支、地表湿度和温度变化、植被覆盖和土地退化、植被生物量和净初级生产量(NPP)、植被结构和生态参数、地表生态过程、土地利用和农用植被提取、陆面植被生态过程研究等[24-32].

4) 城市不透水面遥感.不透水面是指城市中各种不透水建筑材料所覆盖的表面,包括公路、车道、人行道、停车场、屋顶等.城市不透水面的空间格局和动态变化引发城市热岛效应、城市点源污染等一系列环境问题.目前用于估算不透水层比较采用最广泛的 2 种方法是基于混合像元分解的亚像元级估算方法和基于硬分类的直接识别方法,V-I-S 模型(Vegetation-Impervious surface-Soil,植被-不透水面-土壤模型)和混合像元分解结合是应用最为广泛的不透水面信息提取方法[33-42].

5) 城市热环境遥感.热环境时空分析是城市环境定量遥感最为活跃的研究方向,大体可分为 3 个阶段:利用卫星遥感数据结合气象观测分析城市热岛的平面结构和垂直结构,解释城市下垫面热信息的分布和结构特征;对热岛强度的变化规律和过程的研究,以发现城市热岛的周期性变化和非周期性变化规律;通过分析变化背后的各种驱动力以揭示城市空间热环境变化机制,建立热岛强度与各种可能的影响因素如 NDVI、植被覆盖度、土地利用类型、人口密度、容积率等的定量关系[43-49].

6) 城市环境遥感变化检测与动态分析.为了实现对城市环境动态变化及其驱动影响因素的综合分析,基于多时相遥感信息的城市环境变化检测和动态分析得到了研究人员的高度重视.一方面,可以通过多时相遥感影像变化检测或分类后比较等操作,实现对特定城市要素动态变化的分析;另一方面,利用多时相遥感信息支持下的综合评价结果,可以实现对城市演变的综合动态分析[50-59].

7) 城市生态安全与人居环境遥感综合评价.将遥感数据及派生信息、调查统计数据、实地观测数据和各种生态环境专题模型结合,实现遥感支持下的城市生态环境综合评价,是推进城市遥感应用水平的重要方面.遥感技术已在城市生态安全、人居环境、生态风险评价、生态承载力评价等方面得到了较多的应用,并成为当前和今后城市遥感最为重要的研究方向之一[60-69].

2 地理学视角的城市遥感框架与研究案例

综合以上国际城市遥感大会主要内容、国内外城市遥感相关研究进展可以看出,目前城市遥感作为一个多学科交叉的研究领域,其研究涉及到城市水环境、土地系统、大气、生态、植被、人类活动各个方面,结合地理学对人地关系、地域系统研究的方法,可以构建一个地理学视角的城市遥感研究框架,如图 2 所示.

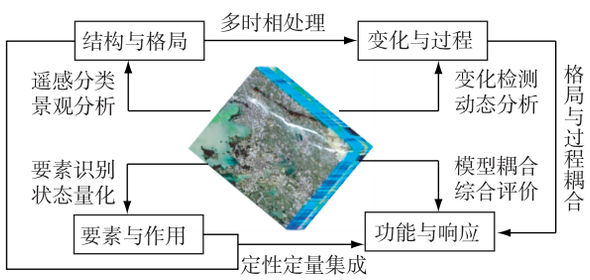


图 2 地理学视角的城市遥感研究框架

Fig. 2 Framework of urban remote sensing research from geographic view

该框架可以将目前从不同要素、不同方法、不同数据、不同目标出发的城市遥感相关研究予以总结归纳,更好地体现城市作为一个开放空间、城市化作为一个动态过程、城市内部各种要素相互作用、城市化与资源环境响应、人类活动与城市系统作用多方面的特性.其中,结构与格局重点对城市构成、土地利用/覆盖进行描述,进而结合各种格局分析方法如景观生态指标等对城市的空间构成进行综合描述.要素与作用重点对城市各种关键要素如植被、不透水面、水资源、建设用地等进行定性、定量的专题描述与分析,对多种要素的相互作用(如地表温度与不透水面、植被与生态环境)、人类活动与城市自然系统的相互影响进行研究.变化与过程重点以动态视角对城市扩展、城市要素变化进行分析,充分利用多时相遥感影像对城市结构、要素演变进行综合研究,实现对城市扩展时空过程的综合描述.功能与响应则将城市自然系统所具备的服务功能、人类活动影响下城市系统的响应以及不同地理空间范围内城市与区域相互作用与响应作为一个整体,耦合城市多源遥感信息和各种专题分析模型,实现对城市问题的综合研究.

2.1 结构与格局研究实例

城市结构与格局遥感的重点是对遥感影像进行土地利用/覆盖分类,应用景观生态、空间格局分析等工具进行统计,实现对城市构成、空间分布、结构格局的描述.结构与格局遥感的关键问题是土地利用/覆盖遥感分类、空间格局统计分析.目前常用的格局分析是利用景观格局指标分析城市景观组成的构成和复杂性,而将遥感分类结果与城市功能格局、交通格局等结合则是进一步需要研究的问题.

为了得到客观的格局分析结论,高精度、可靠的分类结果是必要前提.目前城市土地利用/覆盖分类一些前沿研究方向包括:1)引入各种新型分类器,如支持向量机等;2)采用多分类器集成策略,特别是具有较好性能的随机森林(Random Forest)、旋转森林(Rotation Forest)等;3)综合采用空间、光谱、极化、时序等多维特征;4)应用面向对象分类策略;5)将场景识别与城市格局分析结合,实现城市场景和结构类型区、功能区识别.

针对以上发展趋势,我们以多源遥感影像为数据源,从中提取反映地物光谱、空间和变化的多维特征,引入先进的机器学习算法,通过分类器优化和多分类器集成,能够得到优于常规方法的分类结果,从而为格局分析提供支持.相关分类研究的主要策略如图 3 所示.

以旋转森林(Rotation Forest)为例,作为一种最新的集成学习策略,旋转森林通过样本多样性、特征子空间和特征旋转等策略,利用决策树基分类器生成不同的分类输出,最后通过投票法得到最终分类结果.针对遥感影像分类的特点,从特征旋转、基分类器选择和空间-特征综合应用等方面对旋转森林进行了改进[70-72].在特征旋转策略方面,传统的旋转森林算法采用主成分分析进行特征旋转,在实际遥感影像分类中则可以采用非线性特征旋转、半监督特征旋转等策略,从而提高特征空间对不同地物类别的可分性.在基分类器选择方面,传统旋转森林使用决策树作为基分类器,对于小样本问题适应性较差,因此用支持向量机、极限学习机等代替决策树作为基分类器,可以进一步优化分类结果[72].针对光谱

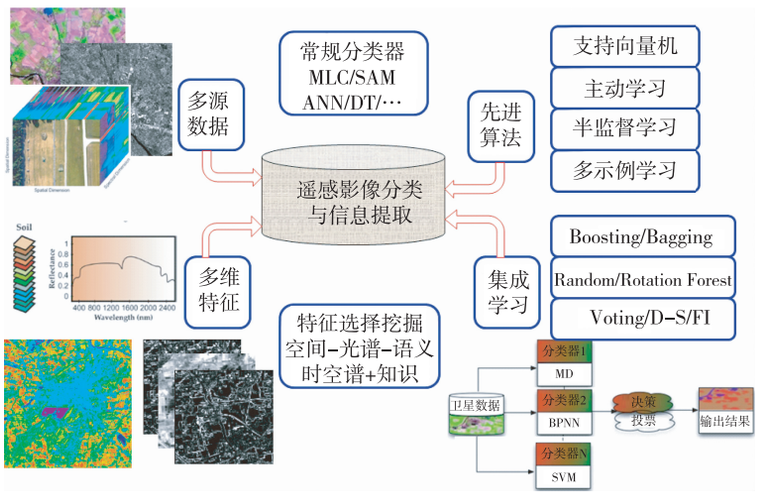


图 3　城市土地利用/覆盖遥感分类的研究策略

Fig. 3　Systematic strategies of urban land use/cover classification

分类的局限性,可以综合应用光谱、极化、空间特征作为分类输入,或者进行图像分割后在每一分割单元内提取空间特征,实现多特征支持下的旋转森林分类[71].图 4 是研究中对旋转森林分类器进行改进策略的实现,其中左半边分类器为传统旋转森林的分类策略,右部则为对旋转森林进行不同方案的改进后的成员分类器,最后通过多分类器投票集成实现最终分类.

图 5 是对某一区域高光谱遥感影像进行改进旋转森林分类器地表覆盖遥感分类的结果,图 5a 为原始影像,5b 为旋转森林分类结果,5c 为改进旋转森林分类器的分类结果[73].

通过多特征综合、多分类器集成后得到的土地利用/覆盖分类结果,克服了只使用光谱特征分类导致的斑块数量多、椒盐噪声影响严重等限制,可以获得更稳定的分类结果,保证了格局分析的可靠性.

2.2　要素与作用研究实例

城市是一个多要素构成的复合系统,既涉及到各种自然要素之间的相互影响,又涉及到人类活动和其他要素的相互作用.通过多源遥感影像能够提取城市多种要素的信息,从而实现对单一要素专题分析、多要素相互作用的综合描述.

不透水面是城市构成中最重要的要素之一,遥感是提取不透水面最有效的信息源.城市热环境(利

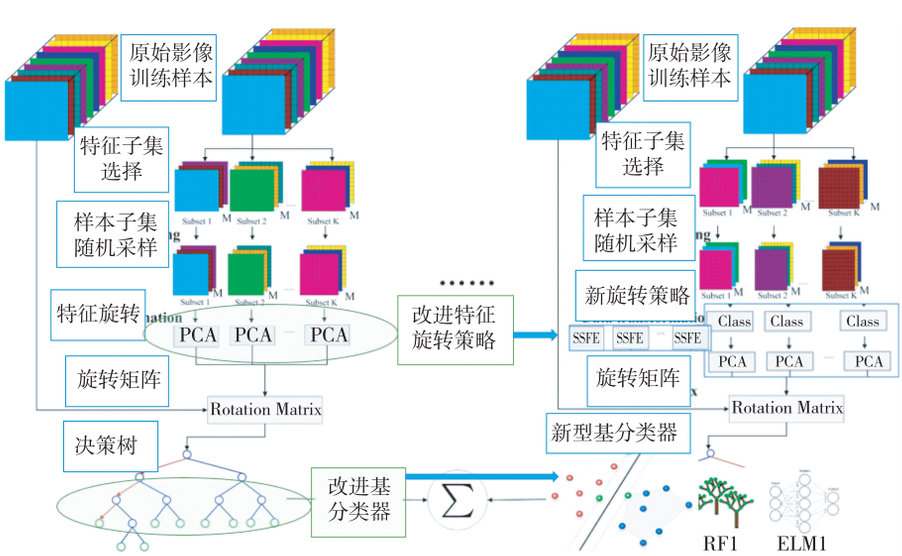
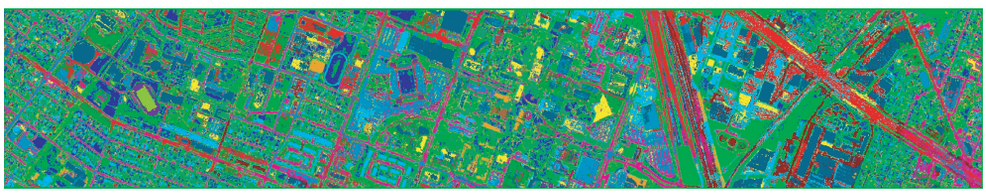


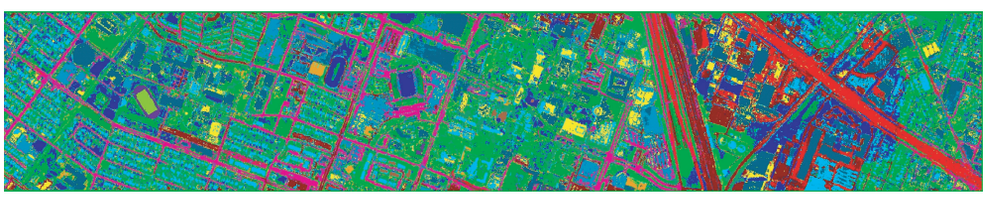
图 4　旋转森林分类器改进策略

Fig. 4　Improvements to rotation forest classifier

a.原始高光谱影像



b.旋转森林分类结果(总体精度72%, kappa: 0.695)



c.改进旋转森林分类器分类结果(总体精度88%, kappa: 0.869)

图 5 遥感影像改进旋转森林分类器分类结果

Fig. 5 Classification maps of hyperspectral image

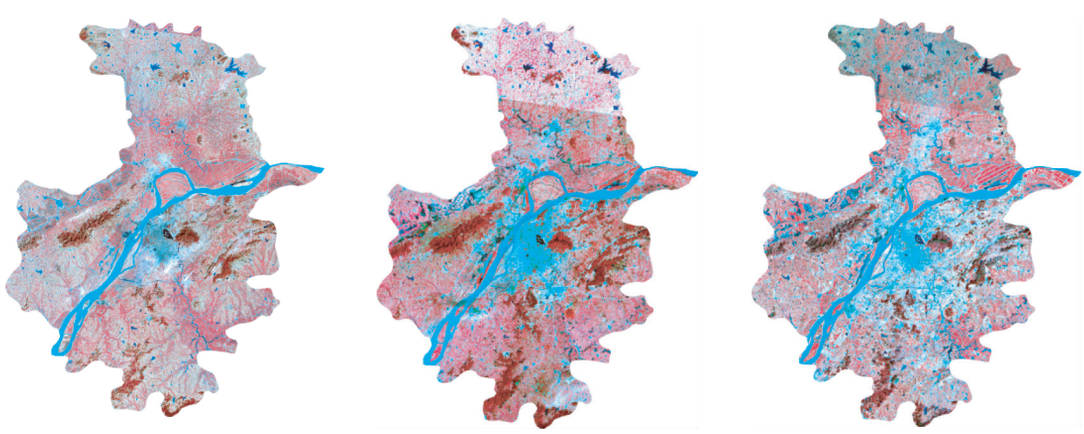
用地表温度表征)是城市环境另外一个重要要素,热红外遥感反演地表温度是研究城市热环境的基础.以南京市为例,对不透水面、地表温度 2 个重要的要素信息进行计算,进而分析二者之间的相互作用关系.

采用基于影像的反演算法对遥感影像的热红外波段进行地表温度反演[74].利用归一化差值不透水面指数(Normalized Difference Impervious Surface Index,NDISI,其量值记为 I_{NDIS})提取不透水面信息[75]:

$$I_{\mathrm{NDIS}}=\frac{p_{\mathrm{TIR}}-(p_{\mathrm{VIS}_1}+p_{\mathrm{NIR}}+p_{\mathrm{MIR}})/3}{p_{\mathrm{TIR}}+(p_{\mathrm{VIS}_1}+p_{\mathrm{NIR}}+p_{\mathrm{MIR}})/3}, \tag{1}$$

式中:p_{TIR} 为热红外波段,p_{MIR} 为中红外波段,p_{NIR} 为近红外波段.在 ETM+/TM 影像中,分别为 6 波段、2 波段和 5 波段.p_{VIS_1} 为可见光红、蓝、绿中的任何一波段,本研究中选取绿色波段.

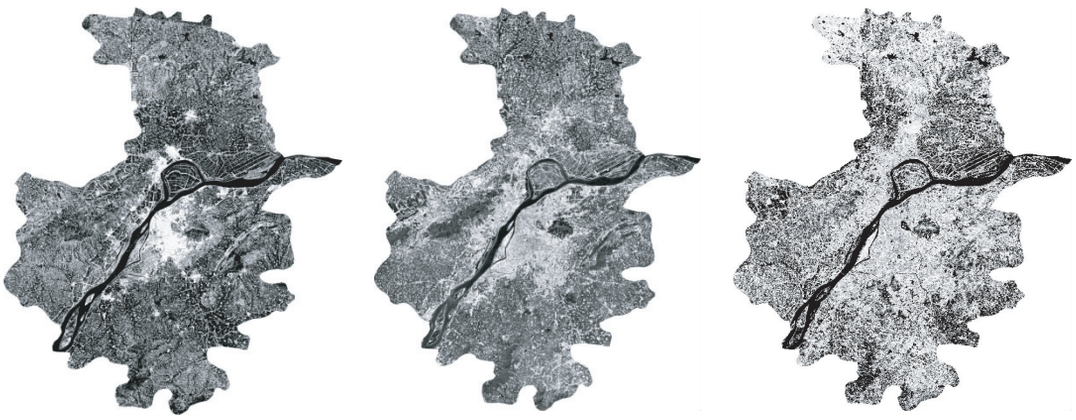
图 6 为南京市 1989、2001、2010 年 3 个时相的 Landsat TM/ETM+遥感影像,图 7 为计算的 3 个时相不透水面指数,图 8 为反演的地表温度[76].



a.1989年 b.2001年 c.2010年

图 6 3 个时相假彩色影像(R、G、B 分别为 Landsat TM/ETM+的 4、3、2 波段)

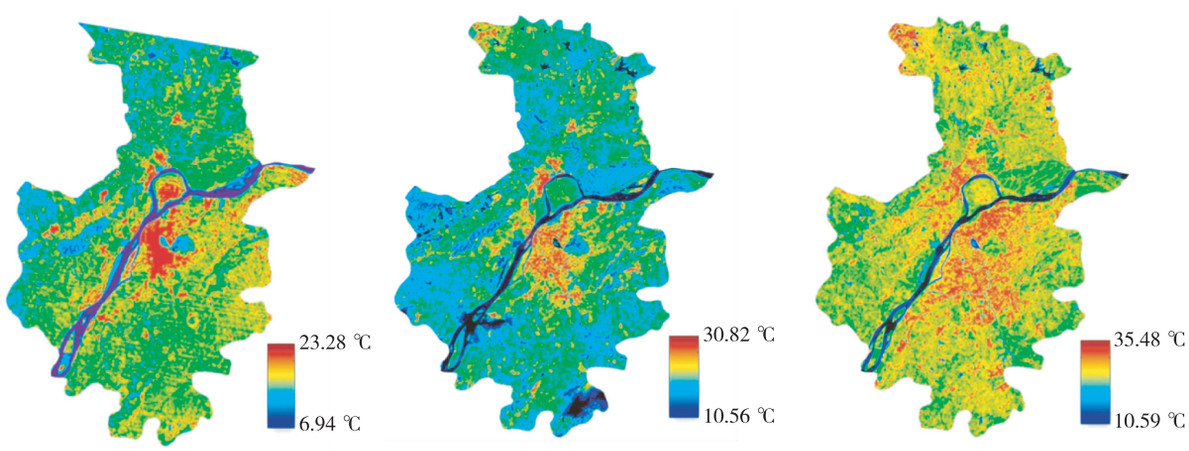
Fig. 6 False color composites of Nanjing (R,G,and B correspond to Band 4,3,and 2 of Landsat TM/ETM+,respectively)



a.1989年　　b.2001年　　c.2010年

图 7　各年份不透水面指数

Fig. 7　Normalized difference impervious surface index of three years



a.1989年　　b.2001年　　c.2010年

图 8　各年份地表温度分布

Fig. 8　Land surface temperature of three years

使用回归分析方法定量分析 LST(量值记为 T_{LS})与 NDISI 的关系,利用 ArcGIS 软件在上述提取的各指数图中随机抽取一定数量的样本,样本值在95%的置信水平下,极限误差为正负 3 个百分点,回归关系如图 9 所示.建立的线性回归模型如下:

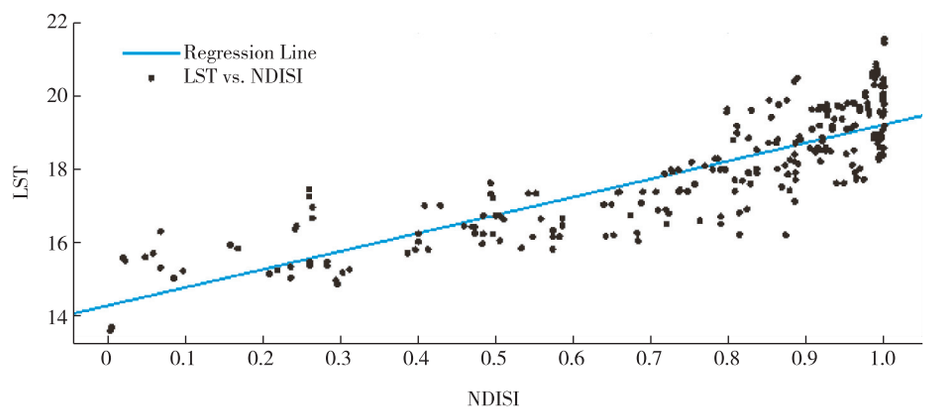


图 9　LST 与 NDISI 的回归关系

Fig. 9　Regression relationship between LST and NDISI

$T_{LS} + 4.977I_{NDISI} + 14.28$, $R^2 = 0.7047$.

可以看出,地表温度和不透水面指数呈正相关关系,不透水面和建筑覆盖比例高的区域,温度也较高,大面积的不透水面增加、建筑物增建和植被面积减小将引起局部地表温度的明显升高,从而产生城市热岛效应.

2.3 变化与过程研究实例

城市是一个动态的系统,特别是由于人类活动影响,城市土地覆盖/利用和各种要素往往处于动态变化之中,多时相遥感影像是发现城市变化、描述城市扩展过程最为有效的数据源.从城市环境变化监测的遥感技术手段来看,大致可分为:1)基于变化检测的技术;2)基于土地覆盖遥感的分析;3)基于景观格局的监测与分析;4)基于不透水面的城市扩展分析;5)其他方法,如 GIS 分析等.

图 10 是江苏省 13 个地级市不透水面变化过程.

基于 3 个时相不透水面信息,可以计算城市扩展强度,如图 11 所示.一级代表的城市扩展强度最强,二级次之,三级最弱.将江苏省 13 个城市的扩展强度进行分级,其中,1985—2000 年间,一级扩展强度城市 1 个、二级 5 个、三级 7 个;2000—2014 年间,一级扩展强度城市 5 个、二级 3 个、三级 5 个.

在此基础上,可以基于不透水面信息提取城市建成区,分析城市扩展过程与模式.利用 BCI 指数(Biophysical Composition Index)提取城市不透水面[77],进一步基于距离加权的不透水面聚集度计算,

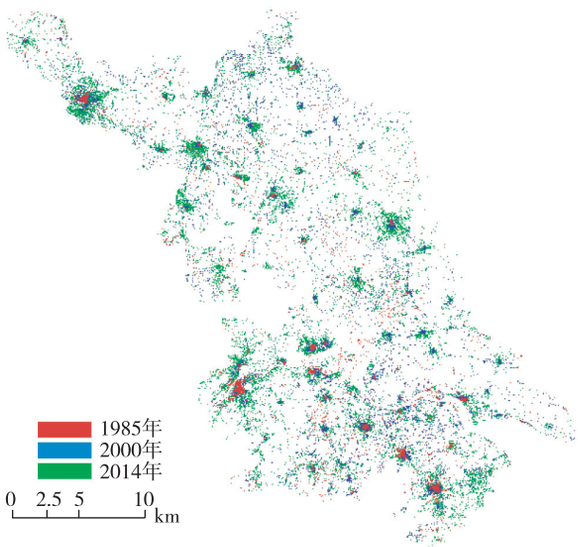
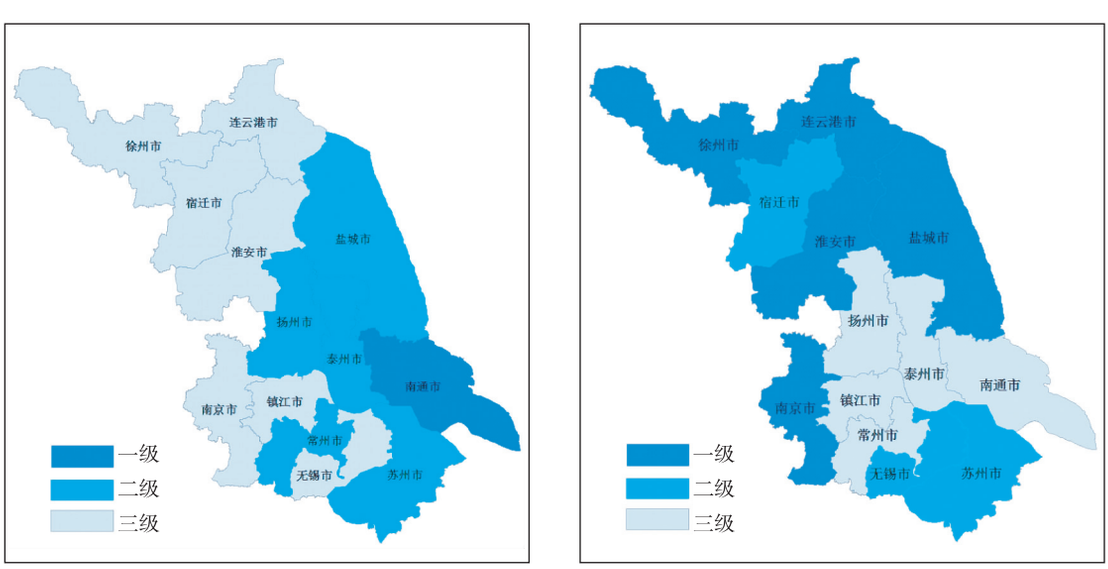


图 10 江苏省 1985—2014 年不透水面变化

Fig. 10 Changes of impervious surface information in Jiangsu from 1985 to 2014

可以清晰分辨出各个城市的核心区域分布,消除了城市周边农村、工矿等对城市建成区的影响,在此基础上人机交互获取不同时期城市建成区范围,实现对城市扩展过程的动态描述(图 12).可以看出,南京市城市空间扩展模式属于多中心网状扩展,一方面是由于南京的自然地貌丰富、长江穿城而过,城市发展需遵循自然地理条件;另一方面,则是科学的城市规划使然,南京市的城市发展格局以长江为城镇发展轴,兼顾江南江北地区,以主城区为核心,以仙林、



a.1985—2000年 b.2000—2014年

图 11 江苏省城市扩展强度级别分布

Fig. 11 Urban expansion intensity in Jiangsu from 1985 to 2014

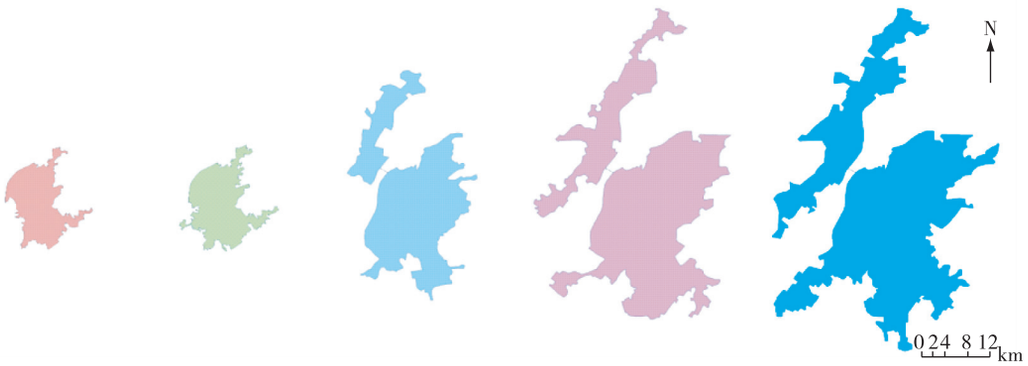


图 12　1985—2016 年南京城市建成区实体边界

Fig. 12　Extents of urban area in Nanjing city from 1985 to 2016

东山、江北新市区为区域中心,实现一核多中心间隔分布,新城、新区、“大学城”的建设推动了南京的多中心发展,形成了城市组团跳跃式的城镇空间布局结构.

2.4　功能与响应研究实例

城市各种要素相互作用,在动态变化的过程中其服务功能也会相应变化,并受到人类活动的影响而产生各种响应.综合利用遥感解译信息和多源数据,可以对城市系统的功能进行定量评价,研究城市化影响下的区域资源环境效应、环境变化下城市系统的响应综合.功能与响应是实现城市复合系统综合研究的重要方面,其核心是遥感解译信息、多源数据与专题模型的耦合.图 13 为耦合多源信息的城市生态安全评价技术路线,表 1 为评价过程中各种因子指标数据的来源,其中遥感解译指标是评价的基础[62].

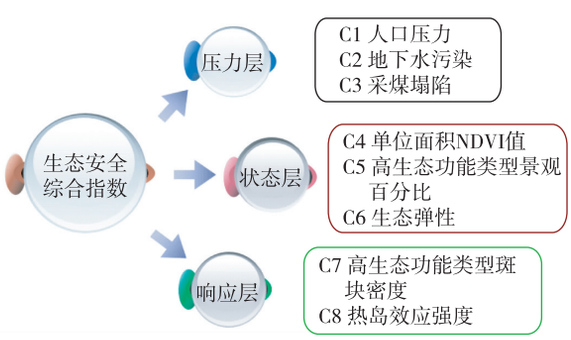


图 13　耦合多源信息的城市生态安全评价技术路线

Fig. 13　Technical flow of urban ecological security assessment by integrating multi-source information

图 14 为徐州市生态安全综合评价结果.从时间维、空间维和分类水平上分别进行深入的分析结果表明,随着城市化进程的推进,徐州生态安全状况形势严峻,不安全范围逐步扩大,主要以城市市区为中心向四周扩展,辐射速度有加快的趋势[62].

表 1　各种因子指标数据来源与处理方法

Table 1　Data sources and processing methods for the adopted indices

序号	指标因子名称	数据来源	标准化方法	标准化值域
1	人口压力	模拟人口密度分布	专家级分法	(1,10)
2	地下水污染程度	水质监测数据,空间插值	专家级分法	(1,10)
3	采煤塌陷	遥感塌陷面积提取,作缓冲区	专家级分法	(1,10)
4	单位面积 NDVI	遥感方法提取	极差标准化	(1,10)
5	高生态功能类型景观百分比	景观格局指数计算	极差标准化	(1,10)
6	生态弹性度量	遥感地物分类,弹性赋值	专家级分法	(1,10)
7	高生态功能类型斑块密度	景观格局指数计算	极差标准化	(1,10)
8	热岛效应强度	遥感温度数据反演	极差标准化	(1,10)

3　城市遥感的发展趋势

国家新型城镇化发展对城市遥感提出了新的挑战,遥感数据获取技术的快速发展为城市遥感提供了越来越多的数据源,人工智能、地理时空大数据分

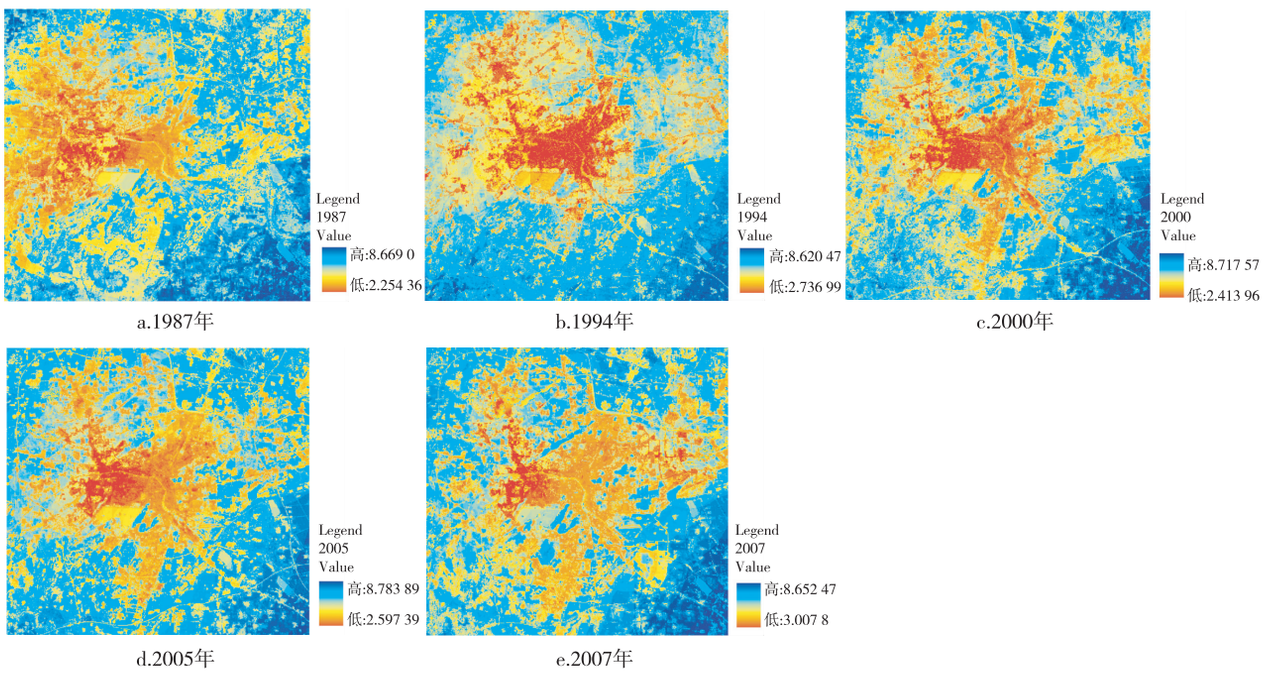


图 14　徐州市生态安全综合评价结果

Fig. 14　Assessment results of urban ecological security in Xuzhou from 1987 to 2007

析与挖掘技术为城市遥感提供了更为智能、快速的处理和分析工具.综合当前国家需求和技术发展,城市遥感主要体现出以下发展趋势:

1)在城市遥感研究目标上面,应逐步从早期针对土地利用/覆盖、城市典型要素分布的描述性研究中不断深化,在推进对城市现象、格局和功能解释性研究的同时,面向城市病、城市功能和城市演变开展诊断性研究,为城市环境健康、风险防控等提供支持,进一步综合利用长时间序列遥感数据,推进城市遥感的目标向预测性和决策性发展.

2)在城市遥感数据源方面,从光学遥感数据向光学与 SAR 并重发展,高空间分辨率光学影像和 SAR 影像、高光谱遥感数据和 LiDAR 数据得到越来越多的应用.遥感影像、地面观测和统计调查数据的集成是拓展城市环境遥感数据源的重要方面.地学传感器网络(GSN)、环境传感器网络(ESN)、志愿者地理信息(VGI)等新型信息采集技术将和遥感影像结合,形成星空地一体化的城市遥感信息获取系统.

3)在研究尺度上,形成了全球、国家尺度上的城市化、城市群、城市、城市重点区域的多尺度研究格局,不同尺度上都应根据研究对象、研究目标选择适宜分辨率的遥感数据和图像处理分析方法.特别是针对城市群、城镇一体化、村镇的遥感研究将受到越来越多的关注.另外,除了空间尺度,对于城市遥感研究的时间尺度也应该予以重视,实现对城市化与资源环境响应定位、定性和定时的综合研究.

4)城市遥感信息提取的定性定量集成和分析主题的多元化.城市环境遥感早期主要集中于定性的识别分类,但随着定量遥感的快速发展,基于遥感信息的城市生态环境参数定量描述将成为新的研究热点.结合国家新型城镇化规划,遥感信息分析主题需要从空间上的城市扩展与土地利用变化,拓展到生态环境、人居环境、热环境、景观生态、生态承载力、环境容量、生态安全等方面,从城市环境的自然分析转变到人口估算、能源消耗、经济分析、环境健康、公共安全与应急管理等社会科学方面的遥感应用.

5)从二维到三维空间的拓展.随着数字化时代的到来,人们对三维空间信息的需求越来越迫切,尤其是数字城市、智慧城市建设,都要求建立城市三维模型.各种三维城市建模技术和软件已得到了较多的应用,尤其是 LiDAR、无人机遥感、倾斜摄影等为三维城市建模提供了全新的技术手段.地面沉降作为城市三维分析和地质灾害监测的另一方面,也是城市遥感的研究热点.更进一步,研究三维城市空间中各种自然过程和人为活动的演变趋势及其资源环境响应,是实现城市遥感精细化的必然要求.

6)城市遥感信息处理新方法研究.近年来遥感信息处理发展迅速,如地表温度反演、不透水面分

析、基于新型分类器的土地利用/覆盖分类、结合景观生态学指标和生态环境模型的城市生态系统功能研究等.这些遥感信息处理新方法将为城市遥感的分析提供坚实的基础,为城市可持续发展提供有力支持.

参考文献

References

[1] 方创琳,鲍超,乔标,等.城市化过程与生态环境效应[M].北京:科学出版社,2008
FANG Chuanglin, BAO Chao, QIAO Biao, et al. The process of urbanization and ecological environmental effects[M].Beijing:Science Press,2008

[2] 许学强,周一星,宁越敏.城市地理学[M].北京:高等教育出版社,1997
XU Xueqiang,ZHOU Yixing,NING Yuemin.Urban geography[M].Beijing:Higher Education Press,1997

[3] 严正.中国城市发展问题报告:问题、现状、挑战、对策[M].北京:中国发展出版社,2004
YAN Zheng.China city development issue report:Problems,current situation,challenges and counter measures[M].Beijing:China Development Press,2004

[4] 杨士弘,廖重斌.城市生态环境学[M].北京:科学出版社,2003
YANG Shihong,LIAO Chongbin.Science of urban ecological environment[M].Beijing:Science Press,2003

[5] 李新,年福华.城市化过程中的生态风险与环境管理[M].北京:化学工业出版社,2007
LI Xin, NIAN Fuhua. Ecological risk and environmental management in the process of urbanization[M].Beijing:Chemical Industry Press,2007

[6] Carlson T N, Arthur S T. The Impact of land use-land cover changes due to urbanization on surface microclimate and hydrology: A satellite perspective[J]. Global and Planetary Change,2000,25(1):49-65

[7] 孙天纵,周坚华.城市遥感[M].上海:上海科学技术文献出版社,1995
SUN Tianzong, ZHOU Jianhua. Remote sensing in cities[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Literature Press,1995

[8] Weng Q H.Urban remote sensing[M].Boca Raton,FL:CRC Press,2006

[9] Yang X J. Urban Remote sensing: Monitoring, synthesis and modelling in the urban environment[M].Chichester, UK:Wiley-Blackwell,2011

[10] 杜培军,谭琨,夏俊士,等.城市环境遥感方法与实践[M].北京:科学出版社,2012
DU Peijun,TAN Kun,XIA Junshi,et al.Urban environmental remote sensing methods and practices[M]. Beijing:Science Press,2012

[11] Xian G Z.Remote sensing applications for the urban environment[M].Boca Raton,FL:CRC Press,2016

[12] Sohn G,Dowman I.Data fusion of high-resolution satellite imagery and LiDAR data for automatic building extraction[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing,2007,62(1):43-63

[13] Soudani K, Francois C, Maire G L, et al. Comparative analysis of IKONOS,SPOT,and ETM+data for leaf area index estimation in temperate coniferous and deciduous forest stands[J].Remote Sensing of Environment,2006,102(1/2):161-175

[14] Goldblatt R, Stuhlmacher M F, Tellman B, et al. Using Landsat and nighttime lights for supervised pixel-based image classification of urban land cover[J]. Remote Sensing of Environment,2018,205:253-275

[15] 邬建国.景观生态学:格局、过程、尺度与等级[M].北京:高等教育出版社,2000
WU Jianguo. Landscape ecology: Pattern, process, scale and hierarchy[M].Beijing:Higher Education Press,2000

[16] Du S R,Xiong Z Q,Wang Y C,et al.Quantifying the multilevel effects of landscape composition and configuration on land surface temperature[J].Remote Sensing of Environment,2016,178:84-92

[17] 王桥,吕恒,李硕,等.基于环境一号卫星的流域水环境评价和模拟[M].北京:科学出版社,2011
WANG Qiao, LÜ Heng, LI Shuo, et al. Evaluation and simulation of water environment based on satellite HJ-1[M].Beijing:Science Press,2011

[18] 申茜,朱利,曹红业.城市黑臭水体遥感监测与筛查研究进展[J].应用生态学报,2017,28(10):3433-3439
SHEN Qian, ZHU Li, CAO Hongye. A review remote sensing monitoring and screening for urban black and odorous water body[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2017,28(10):3433-3439

[19] 温爽,王桥,李云梅,等.基于高分影像的城市黑臭水体遥感识别:以南京为例[J].环境科学,2018,39(1):57-67
WEN Shuang, WANG Qiao, LI Yunmei, et al. Remote sensing identification of urban black-odor water bodies based on high-resolution images:A case study in Nanjing[J].Environmental Science,2018,39(1):57-67

[20] 王桥,厉青,陈良富,等.大气环境卫星遥感技术及其应用[M].北京:科学出版社,2011
WANG Qiao, LI Qin, CHEN Liangfu, et al. Technology and application of atmospheric environment remote sensing[M].Beijing:Science Press,2011

[21] Zheng Y X,Zhang Q,Liu Y,et al.Estimating ground-level $PM_{2.5}$ concentrations over three megalopolises in China using satellite-derived aerosol optical depth measurements[J]. Atmospheric Environment, 2016, 124(B):232-242

[22] Van D A,Martin R V,Brauer M,et al.Global estimates of fine particulate matter using a combined geophysical-statistical method with information from satellites, models, and monitors[J].Environmental Science & Technology, 2016,50(7):3762-3772

[23] Guo Y X,Tang Q H,Gong D Y,et al.Estimating ground-level $PM_{2.5}$ concentrations in Beijing using a satellite-based geographically and temporally weighted regression model[J].Remote Sensing of Environment, 2017, 198:140-149

[24] 张佳华,张国平,王培娟,等.植被与生态遥感[M].北京:科学出版社,2010

ZHANG Jiahua,ZHANG Guoping,WANG Peijuan,et al. Vegetation and ecological remote sensing[M]. Beijing: Science Press,2010

[25] 徐涵秋,张铁军.ASTER 与 Landsat ETM+植被指数的交互比较[J].光谱学与光谱分析,2011,31(7):1902-1907
XU Hanqiu,ZHANG Tiejun.Cross comparison of ASTER and Landsat ETM+multispectral measurements for NDVI and SAVI vegetation indices[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2011,31(7):1902-1907

[26] Lu D S,Xu X F,Tian H Q.The effects of urbanization on net primary productivity in southeastern China[J].Environment Management,2010,46(3):404-410

[27] Simic A,Chen J M,Liu J,et al.Spatial scaling of net primary productivity using subpixel information[J].Remote Sensing of Environment,2004,93(1/2):246-258

[28] Xu C,Liu M,An S,et al.Assessing the impact of urbanization on regional net primary productivity in Jiangyin County,China[J].Journal of Environment Management,2007,85(3):597-606

[29] 王静,周伟奇,许开鹏,等.京津冀地区城市化对植被覆盖度及景观格局的影响[J].生态学报,2017,37(21):7019-7029
WANG Jin,ZHOU Weiqi,XU Kaipeng,et al.Spatiotemporal pattern of vegetation cover and its relationship with urbanization in Beijing-Tianjin-Hebei megaregion from 2000 to 2010[J].Acta Ecologica Sinica,2017,37(21):7019-7029

[30] 李卓,孙然好,张继超,等.京津冀城市群地区植被覆盖动态变化时空分析[J].生态学报,2017,37(22):7418-7426
LI Zhuo,SUN Ranhao,ZHANG Jichao,et al.Temporal-spatial analysis of vegetation coverage dynamics in Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan regions[J].Acta Ecologica Sinica,2017,37(22):7418-7426

[31] Du H Y,Cai W B,Xu Y Q,et al.Quantifying the cool island effects of urban green spaces using remote sensing data[J].Urban Forestry & Urban Greening,2017,27:24-31

[32] Wang J,Zhou W Q,Qian Y G,et al.Quantifying and characterizing the dynamics of urban greenspace at the patch level:A new approach using object-based image analysis[J].Remote Sensing of Environment,2017,DOI:10.1016/j.rse.2017.10.039

[33] Wu C S,Murray A T.Estimating impervious surface distribution by spectral mixture analysis[J].Remote Sensing of Environment,2003,84(4):493-505

[34] Weng Q H.Remote sensing of impervious surfaces[M]. Boca Raton,FL:CRC Press,2007

[35] Weng Q H,Hu X F.Medium spatial resolution satellite imagery for estimating and mapping urban impervious surfaces using LSMA and ANN[J].IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2008,46(8):2397-2406

[36] Lu D S,Hetrick S,Moran E.Impervious surface mapping with Quickbird imagery[J]. International Journal of Remote Sensing,2011,32(9):2519-2533

[37] 徐涵秋.城市不透水面与相关城市生态要素关系的定量分析[J].生态学报,2009,29(5):2456-2462
XU Hanqiu.Quantitative analysis on the relationship of urban impervious surface with other components of the urban ecosystem[J]. Acta Ecologica Sinica,2009,29(5):2456-2462

[38] Weng Q H.Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas:Requirements,methods,and trends[J]. Remote Sensing of Environment,2012,117(2):34-49

[39] Fan F L,Deng Y B.Enhancing endmember selection in multiple endmember spectral mixture analysis (MESMA) for urban impervious surface area mapping using spectral angle and spectral distance parameters[J].International Journal of Applied Earth Observations & Geoinformation,2014,33(12):290-301

[40] Yang J,He Y H.Automated mapping of impervious surfaces in urban and suburban areas:Linear spectral unmixing of high spatial resolution imagery[J].International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation,2017,54:53-64

[41] Sun G Y,Chen X L,Ren J C,et al.Stratified spectral mixture analysis of medium resolution imagery for impervious surface mapping[J]. International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation,2017,60:38-48

[42] Deng C B,Li C J,Zhu Z,et al.Subpixel urban impervious surface mapping:The impact of input Landsat images[J].ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2017,133:89-103

[43] Weng Q H.Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies:Methods,applications,and trends[J].ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 2009,64(4):335-344

[44] 陈云浩,李京,李晓兵.城市空间热环境遥感分析:格局、过程、模拟与影响[M].北京:科学出版社,2004
CHEN Yunhao,LI Jing,LI Xiaobing.Remote sensing analysis of urban thermal environment:Pattern,process,simulation and influence[M]. Beijing: Science Press,2004

[45] 岳文泽.基于遥感影像的城市景观格局及其热环境效应研究[M].北京:科学出版社,2008
YUE Wenze.Study on urban landscape pattern and thermal environment effect based on remote sensing imagery[M].Beijing:Science Press,2008

[46] Wang J,Zhan Q,Guo H G,et al.Characterizing the spatial dynamics of land surface temperature-impervious surface fraction relationship[J].International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation,2016,45:55-65

[47] Berger C,Rosentreter J,Voltersen M,et al.Spatio-temporal analysis of the relationship between 2D/3D urban site characteristics and land surface temperature[J].Remote Sensing of Environment,2017,193:225-243

[48] Zhou W Q,Wang J,Cadenasso M L.Effects of the spatial configuration of trees on urban heat mitigation:A comparative study[J].Remote Sensing of Environment,2017,195:1-12

[49] Meng Q Y,Zhang L L,Sun Z H,et al.Characterizing spatial and temporal trends of surface urban heat island

effect in an urban main built-up area: A 12-year case study in Beijing, China[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 204: 826-837

[50] Nielsen A A, Conradsen K, Simpson J J. Multivariate Alteration Detection (MAD) and MAF postprocessing in multispectral, bitemporal image data: New approaches to change detection studies[J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 64(1): 1-19

[51] Bovolo F, Bruzzone L. A theoretical framework for unsupervised change detection based on change vector analysis in the polar domain[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(1): 218-236

[52] Nemmour H, Chibani Y. Multiple support vector machines for land cover change detection: An application for mapping urban extensions[J]. ISPRS Journal of Photogrammertry and Remote Sensing, 2006, 61(2): 125-133

[53] Du P J, Liu S C, Gamba P, et al. Fusion of difference images for change detection over urban areas[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2012, 5(4): 1076-1086

[54] Tewkesbury A P, Comber A J, Tate N J, et al. A critical synthesis of remotely sensed optical image change detection techniques[J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 160: 1-14

[55] 佃袁勇,方圣辉,姚崇怀.多尺度分割的高分辨率遥感影像变化检测[J].遥感学报,2016,20(1):129-137
DIAN Yuanyong, FANG Shenghui, YAO Chonghuai. Change detection for high-resolution images using multilevel segment method[J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(1): 129-137

[56] Xiao P F, Zhang X L, Wang D G, et al. Change detection of built-up land: A framework of combining pixel-based detection and object-based recognition[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2016, 119: 402-414

[57] Lu M, Chen J, Tang H J, et al. Land cover change detection by integrating object-based data blending model of Landsat and MODIS[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 184: 374-386

[58] Zhu Z. Change detection using Landsat time series: A review of frequencies, preprocessing, algorithms, and applications[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2017, 130: 370-384

[59] Zhang X L, Xiao P F, Feng X Z, et al. Separate segmentation of multi-temporal high-resolution remote sensing images for object-based change detection in urban area[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 201: 243-255

[60] 龚建周,夏北成.城市景观生态学与生态安全:以广州为例[M].北京:科学出版社,2008
GONG Jianzhou, XIA Beicheng. Urban landscape ecology and ecological security: A case study of Guangzhou[M]. Beijing: Science Press, 2008

[61] 周文华,王如松.城市生态安全评价方法研究:以北京市为例[J].生态学杂志,2005,24(7):848-852
ZHOU Wenhua, WANG Rusong. Methodology assessment of urban ecological security: A case study of Beijing[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(7): 848-852

[62] Du P J, Xia J S, Du Q, et al. Evaluation of the spatio-temporal pattern of urban ecological security using remote sensing and GIS[J]. International Journal of Remote Sensing, 2013, 34(3): 848-863

[63] 吴晓,吴宜进.基于灰色关联模型的山地城市生态安全动态评价:以重庆市巫山县为例[J].长江流域资源与环境,2014,23(3):386-391
WU Xiao, WU Yijin. Evaluation on the eco-safety of mountainous city based on gray correlation model: A case study of the Wushan county in the city of Chongqing[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(3): 386-391

[64] Wang Y, Ding Q, Zhuang D F. An eco-city evaluation method based on spatial analysis technology: A case study of Jiangsu Province, China[J]. Ecological Indicators, 2015, 58: 37-46

[65] 陈利顶,周伟奇,韩立建,等.京津冀城市群地区生态安全格局构建与保障对策[J].生态学报,2016,36(22):7125-7129
CHEN Liding, ZHOU Weiqi, HAN Lijian, et al. Developing key technologies for establishing ecological security patterns at the Beijing-Tianjin-Hebei urban megaregion[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(22): 7125-7129

[66] 杨雪,张文忠.基于栅格的区域人居自然和人文环境质量综合评价:以京津冀地区为例[J].地理学报,2016,71(12):2141-2154
YANG Xue, ZHANG Wenzhong. Combining natural and human elements to evaluate regional human settlements quality based on raster data: A case study in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(12): 2141-2154

[67] 李航,李雪铭,田深圳,等.城市人居环境的时空分异特征及其机制研究:以辽宁省为例[J].地理研究,2017,36(7):1323-1338
LI Hang, LI Xueming, TIAN Shenzhen, et al. Temporal and spatial variation characteristics and mechanism of urban human settlements: A case study of Liaoning province[J]. Geographical Research, 2017, 36(7): 1323-1338

[68] 江源通,田野,郑拴宁.海岛型城市生态安全格局研究:以平潭岛为例[J].生态学报,2018,38(3)
JIANG Yuantong, TIAN Ye, ZHENG Shuanning. A study on urban ecosecurity pattern of island city: A case study of Pingtan Island[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(3)

[69] Langemeyer J, Camps-Calvet M, Calvet-Mir L, et al. Stewardship of urban ecosystem services: understanding the value(s) of urban gardens in Barcelona[J]. Landscape and Urban Planning, 2018, 170: 79-89

[70] Xia J S, Du P J, He X Y, et al. Hyperspectral remote sensing image classification based on rotation forest[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2014, 11(1): 239-243

[71] Du P J, Samat A, Waske B, et al. Random forest and rotation forest for fully polarized SAR image classification using polarimetric and spatial features[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2015, 105: 38-53

[72] Xia J S, Chanussot J, Du P J, et al. Rotation-based support vector machine ensemble in classification of hyperspectral data with limited training samples[J]. IEEE

Transactions on Geoscience & Remote Sensing,2016,54(3):1519-1531

[73] Bao R, Xia J S, Mura M D, et al. Combining morphological attribute profiles via an ensemble method for hyperspectral image classification [J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2016, 13(3): 359-363

[74] Artis D A,Carnahan W H.Survey of emissivity variability in thermography of urban areas[J].Remote Sensing of Environment,1982,12(4):313-329

[75] 徐涵秋.一种快速提取不透水面的新型遥感指数[J].武汉大学学报(信息科学版),2008,33(11):1150-1153
XU Hanqiu.A new remote sensing index for fastly extracting impervious surface information[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2008,33(11):1150-1153

[76] 李昕瑜,杜培军,阿里木·赛买提.南京市地表参数变化与热岛效应时空分析[J].国土资源遥感,2014,26(2):177-183
LI Xinyu,DU Peijun,ALIM Samat.Spatial-temporal analysis of urban heat island effect and surface parameters variation in Nanjing city[J].Remote Sensing for Land & Resources,2014,26(2):177-183

[77] Deng C B,Wu C S.BCI:A biophysical composition index for remote sensing of urban environments[J].Remote Sensing of Environment,2012,127(5):247-259

Advances of urban remote sensing

DU Peijun[1,2,3] BAI Xuyu[1,2,3] LUO Jieqiong[1,2,3] LI Erzhu[1,2,3] LIN Cong[1,2,3]

1 School of Geographic and Oceanographic Sciences,Nanjing University,Nanjing 210023

2 Key Laboratory for Satellite Mapping Technology and Applications of State Administration of Surveying,Mapping and Geoinformation of China,Nanjing 210023

3 Jiangsu Provincial Key Laboratory of Geographic Information Science and Technology,Nanjing 210023

Abstract Urban remote sensing is a significant field of remote sensing applications.Under the processing of new-type urbanization in China,remote sensing will not only play an irreplaceable role in many areas such as urban ecological construction,land and space development,resource and environment carrying capacity monitoring,but also provide data source for urban planning management.Based on the researches of urban remote sensing,this paper mainly analyzes the development of several important directions of urban remote sensing.Moreover,a framework of urban remote sensing based on geographical perspective is constructed.Combined with typical examples,aspects including structure and pattern,elements and interactions,change and processes,functions and responses are further explored to demonstrate the development of urban remote sensing research.Finally,combined with the national demands and technological development,the future development of urban remote sensing is prospected from aspects of data sources,research objects,application topics,research objectives and technical methods.

Key words urban remote sensing;impervious surface;urban expansion;land use/land cover classification