

遥感技术在不透水层提取中的应用与展望

李德仁^{1, 2} 罗 晖¹ 邵振峰^{1, 2}

1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

2 地球空间信息技术协同创新中心,湖北 武汉,430079

摘 要:地理国情监测是我国测绘工作在新时代的主要任务和发展方向。不透水层分布是城市和区域环境的生态考核指标之一,对城市 and 区域的发展规划和生态评估具有重要意义。但是,目前我国地理国情普查和监测工作中依然缺少对不透水层分布的调查和统计。基于遥感技术的不透水层提取具有实时、快速、精确的特点,本文首先针对不同遥感影像的数据特点和优势介绍了不透水层提取的经典理论,然后对现有的不透水层应用方向进行了总结,主要包括水文、城市热岛效应、土地利用及变化、城市生态环境监测以及城市规划,最后展望其在相关行业中的潜在应用,并建议将不透水层分布列为我国地理国情调查和监测的内容。

关键词:不透水层提取;地理国情监测;遥感技术;城市研究;生态评估

中图法分类号:P237.9

文献标志码:A

地理国情监测就是综合利用包括遥感技术在内的现代测绘技术,对我国地理国情要素进行动态和定量化、空间化的监测,并统计分析其变化数量、变化频率、分布特征、地域差异、变化趋势等,为国家政府管理和决策提供权威、标准的地理国情监测产品和分析报告,从地理空间的角度展示国情^[1]。地理国情监测是国家和社会对测绘工作提出的新要求和新发展方向。地理国情监测的主要内容包括了耕地、房屋建筑、道路、水域等共 12 个一级类、58 个二级类和 133 个三级类^[1]。但是,目前我国的地理国情监测工作还没有重视不透水层的调查、统计和分析研究。

不透水层是阻止水渗入土壤的土地覆盖表面,主要包括道路、停车场、人行道、屋顶和城市地物中其他不具有渗透性的表面^[2]。近年来,不透水层已经成为城市环境研究中一项主要指标^[2]。从城市水文学的角度来讲,不断增加的不透水层覆盖率会提高城市径流的速度和体积,从而给市政排水和防洪带来了很大的压力^[3]。此外,城市化所带来的径流增加也会令更多的非点源污染被排放到水道中^[4]。高密度的不透水层会减弱降水

渗透的作用从而影响到地下水的补给^[5]。同时,不透水层会吸收更多的热量,其覆盖率、分布和变化因此也与地表温度有着一定的正相关性^[6-7]。综上所述,不透水层分布对诸多环境因素都有着直接或间接的影响,其变化也能够直接反映出城市的发展和扩张,因此城市不透水层的分布估计和发展变化监测已经受到发达国家政府部门的重视^[8]。美国最权威的地理国情监测机构美国地质调查局(U. S. Geological Survey, USGS)发布的第二版 2001 年全美土地覆盖数据库(national land cover database, NLCD)中就已经开始包含不透水层信息,并在其后陆续发布的 2006 年和 2011 年 NLCD 数据库中均包含不透水层分布调查和研究^[9]。由 USGS 所提供的官方权威全美不透水层分布监测信息已经为研究城市或区域的发展和扩张提供了可靠数据支持^[10-13]。

随着对地观测技术的发展,遥感传感器已经能够对城镇区域地表进行长期连续观测。遥感影像一方面能够提供从局部尺度到城镇甚至地区尺度的不同分辨率观测数据,另一方面还能突破人类视觉限制,通过记录不同波长的光谱响应来实

收稿日期:2016-01-27

项目资助:国家重大设备专项项目(2012YQ16018505);国家科技支撑计划(2013BAH42F03);国家教育部新世纪优秀人才资助计划(NCET-12-0426);武汉大学创新人才项目(2042014kf0212);地理国情监测专项基金。

第一作者:李德仁,教授、博士生导师,中国科学院院士,中国工程院院士,国际欧亚科学院院士,现从事以遥感、全球卫星定位系统和地理信息系统为代表的空间信息科学与技术的科研与教学工作,推进地理国情监测、数字城市与数字中国、智慧城市与智慧中国的研究及相关建设。drli@whu.edu.cn

通讯作者:罗晖,博士生。luohui_lh@whu.edu.cn

现不透水层的精确区分。相比较传统的人工调查方式,根据遥感技术进行不透水层提取具有省时省力、节约成本的优势,因此它已经成为实时、精确监控和绘制城市地区不透水层分布的主要手段,其相关理论方法也已经得到国内外的广泛研究^[14]。本文对扩展版科学引文索引(science citation index expanded, SCIE)分别以“impervious surface”(不透水层)和“impervious surface+remote sensing”(不透水层+遥感)为关键主题词进行年度(1989~2015年)收录论文分析。包含不透水层作为关键词的论文从1989年的1篇持续增长到了2015年的157篇。同时,包含不透水层和遥感的论文从2000年开始出现并呈现快速增长的状态,于2015年发表了43篇文章。因此,不论是单纯的不透水层研究还是基于遥感的不透水层估计研究,在近年来都已经得到越来越多的关注,整体文章篇数呈现不断增加的趋势。综上所述,城市不透水层分布的分析理论和方法在科学研究和实际应用上都已经较为成熟,可以成为地理国情监测的重要组成部分,为相关的生态环境、自然科学及社会科学提供准确的不透水层分布数据源,从而促进相应应用研究的发展,最终为政府层面的管理决策提供重要参考信息。

本文将介绍国内外利用遥感技术提取不透水层分布的经典算法和主流应用方向。首先,根据遥感数据源不同,本文将分别总结基于中低空间分辨率遥感影像和高空间分辨率遥感影像的不透水层提取方法。然后,对不透水层分布在水文、城市热岛效应、土地利用及变化、城市生态环境监测和城市规划中的应用进行分析。最后,本文还将不透水层作为未来地理国情监测的内容进行了展望。

1 遥感数据不透水层分布估算方法

在1999年前,由于高分辨率遥感卫星影像的缺乏,及中低分辨率的遥感卫星具有不易获取和价格高昂的特点,所以基于遥感影像的不透水层提取并不常见^[3]。2000年后,大量的学者和机构采用遥感影像对不透水层提取进行了深入的研究,为城市发展、规划,及城市生态环境监测、治理提供重要的基础数据。

1.1 中低分辨率遥感数据的不透水层提取

由于数据结构精炼、覆盖范围广阔、分辨率适中,中低空间分辨率遥感影像目前是全球、地区,及覆盖整个城市范围的不透水层提取最常采用的

数据。使用最广泛的光学遥感数据主要包括 AVHRR^[15]、MODIS^[16]、Landsat TM/ETM+^[17-18]、ASTER^[19]、DMSP-OLS 夜光影像^[16]等。除此之外,雷达数据包括 ERS-1/2^[20]和 ENVISAT ASAR WSM^[21]等也可以用来进行不透水层分布研究。例如,文献^[16]利用2009年MODIS和DMSP-OLS夜光影像对覆盖我国上海、南京、无锡等15个城市行政区域的长江三角洲地区进行不透水层提取,原始DMSP-OLS数据及对应不透水面提取结果如图1所示。图1(a)所示的灯光数据空间分辨率为1 km,图中亮度越高代表灯光强度及聚集程度越高,从而可以间接反映出该地区越发达,其不透水层比率也可能更高。图1(b)表示根据夜光灯光数据提取的不透水层分布结果,图中颜色表示像素中的不透水层丰度比率,其中,红色及绿色分别代表该像素含有百分之百和百分之零不透水层。从图1结果可以看出,基于中低分辨率遥感影像的不透水层提取结果能够全面展示城镇密度和分布情况,为研究地区经济发展、城市分布情况等提供数据支持。同时,中低分辨率遥感数据的获取成本较为低廉,Landsat TM/ETM+和MODIS等常用卫星数据甚至可以免费获取,因此,基于中低分辨率的不透水层提取在实际应用中获得了广泛的关注。

基于中低空间分辨率遥感影像的不透水层分布提取方法主要有以下几类。

1) 光谱混合分析法。由于中低空间分辨率的遥感影像中存在大量的混合像元现象^[22],光谱混合分析法作为基于遥感影像的不透水层提取经典方法得到了广泛应用。光谱混合分析法假设在中低分辨率遥感影像中,每一个像素都是由几种地物根据不同比例混合而成的。光谱混合分析就是提取每种地物的纯净光谱,即端元光谱,并计算出每一种地物的丰度分布。线性混合模型是最常用的混合模型:

$$y = \sum_{i=1}^m \alpha_i u_i + \varepsilon \quad (1)$$

式中, y 表示混合像元的观测光谱向量; m 为端元总数; u_i 为第 i 个端元的光谱向量; α_i 为端元 i 在单个像元中所包含的丰度比例; ε 为残差。 α_i 要满足 $\sum_{i=1}^m \alpha_i = 1$ 且 $0 \leq \alpha_i \leq 1$ 。在基于光谱混合分析的不透水层提取中,最主要的理论模型就是文献^[23]首次提出的植被-不透水层-土壤(vegetation-impervious surface-soil, V-I-S)分布模型(见图2)。V-I-S模型假设城镇地区遥感影像中地

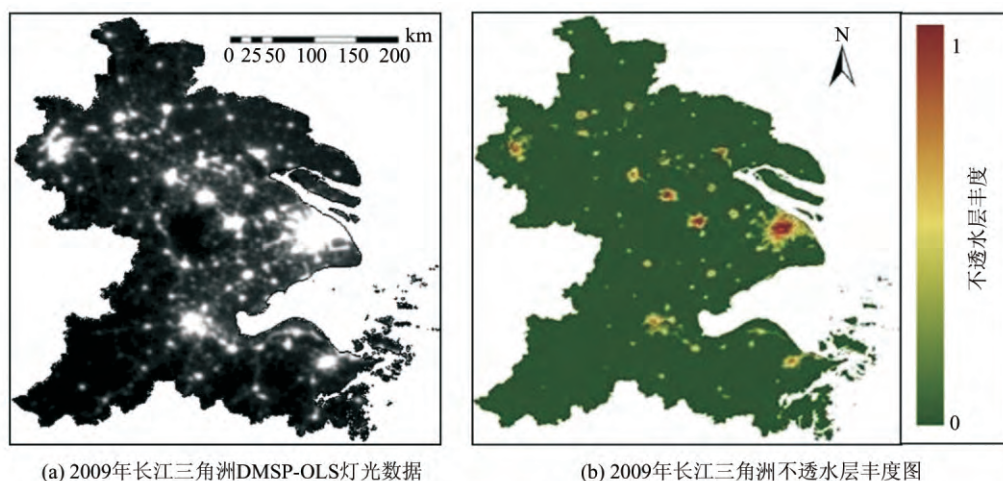


图 1 2009 年长江三角洲 DMSP-OLS 灯光数据及对应的不透水层丰度图

Fig. 1 DMSP-OLS Data in the Yangtze River Delta and Its Corresponding Impervious Surface Fraction Map in 2009

物主要是由三种端元构成,分别是植被、土壤和不透水层,城镇中的主要土地覆盖类型都是由这三类端元根据不同比例混合而成的。图 2 中,中央商务区含有很高的不透水层比率,且具有很低的植被及土壤比率;中密度居民区中植被和不透水层比率几乎各占 50%,即该类型区域几乎不含有土壤。综上所述,可通过提取这三种端元的组分分布对城镇土地利用情况进行分析和评价。现有的城市不透水层提取研究中广泛采用基于 V-I-S 模型的光谱混合分析法进行混合像元分解^[24-25]。在后续研究中,文献^[26]提出了改进的 V-I-S 模型,即将不透水层细分为高反射率和低反射率地物,这一研究也得到了广泛的应用^[27-28]。

2) 回归方法。尽管光谱混合分析是一种有效的监测不透水层的方法,但是该方法可能不适用于大范围且地物复杂的区域,因为在这种情况下不易获取代表纯净像元的端元光谱特征,从而使得不透水层的提取精度受到影响^[29]。因此,回归及回归树模型也常应用在地物复杂的大范围的不透水层提取中^[17,30-31]。回归方法通过地物光谱特征和不透水层比例的关系来建立回归函数,从而估计区域的不透水层分布。比较常用的地物特征包括影像原始光谱特征^[14,17,30]、归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)^[17]、人口统计数据^[31]等。

3) 分类方法。不透水层提取方法的另外一类分支为图像分类技术。所采用的方法包括人工神经网络^[32]、随机森林^[21]等分类技术。该类方法中不透水层是一种地物类别,其分布情况通过最终地物分类结果获取,即区分目标是不透水层还是透水层。基于分类的不透水层提取方法可以应用较为

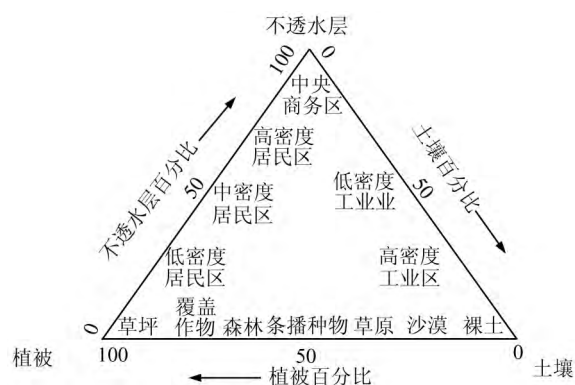


图 2 典型地物的 V-I-S 模型表达^[23]

Fig. 2 Typical Landscapes Placed in the V-I-S Model^[23]

成熟的遥感分类技术,所以提取步骤较为规范化。此类分类方法可以根据分类目的细分为基于像素的硬分类方法^[21]和亚像元级的软分类方法^[32]。

4) 指数方法。由于上述方法计算都较为复杂,所以学者们也提出了高效、计算相对简单的基于指数的方式获取不透水层分布^[33]。指数方法就是根据不透水层的光谱响应特征,提出能够真实反映不透水层分布并且与其他地物具有较高分离度的特征指数。例如,文献^[34]根据缨帽变换提出了生物物理组成指数(biophysical composition index, BCI),用来提取不透水层分布。文献^[35]提出了改进的归一化不透水层指数(modified normalized difference impervious surface index, MNDISI)对美国洛杉矶市区进行不透水层估计,如图 3 所示。图 3(a)为该研究区的 Landsat-TM 假彩色合成图,该区域包含洛杉矶的城区和郊区。图 3(b)为该实验区 MNDISI 指数结果,该指数高则说明该区域是不透水层的可能性高,

反之则是透水层的可能性高。如图3(a)中的植被区域的MNDISI指数值偏低,而城区对应的该指数值较高。若要根据指数方法进行不透水层的提取,则需要通过自定义的阈值对指数结果进行

分割。如何针对这类方法自动获取合理的分割阈值是未来需要研究的方向之一。这一类方法的另一问题是,不透水层指数不能同真实的不透水层含量相关联,难以进行绝对量化分析。

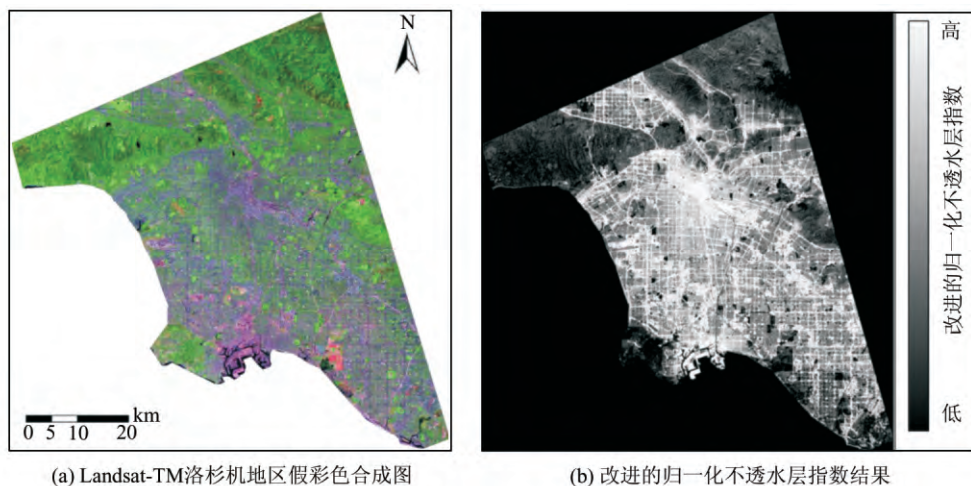


图3 洛杉矶地区的 Landsat-TM 影像和对应的改进的归一化不透水层指数结果

Fig. 3 Landsat-TM False Colour Composite and Its Corresponding MNDISI Result in Los Angeles

1.2 高分辨率遥感数据的城市不透水层提取

随着遥感对地观测技术的发展,能够提供米级和亚米级地物观测信息的高分辨率遥感影像已经成为遥感技术研究和应用的主要方向。高分辨率遥感影像能够提取更加精细的局部地区不透水层分布,为城市发展研究、人口估计、局部水文建模等提供数据支持,同时其更加丰富的空间、细节、纹理信息也可以有效提高不透水层提取的精度^[36]。因此,基于高分辨率遥感影像的不透水层提取已经受到越来越多的关注。图4为高分辨率真彩色航片和根据这一航片所绘制的美国布法罗市局部不透水层分布图。从图4中可以看出,高分辨率遥感影像能够提供局部更精细的不透水层分布结果,适合于研究城镇内部结构,在城市规划和土地利用变化等问题上具有重要的实用价值。但是如图4(a)所示,高分辨遥感影像上存在大量的阴影区域。阴影遮挡^[37]是获取更高精度的高分辨遥感影像不透水层提取所亟待解决的问题之一。另外,目前高分辨遥感影像由于其成本较高,基于高分辨遥感影像的大范围不透水层提取可能受到经济方面的制约。因此,高分辨遥感影像的不透水层提取区域主要集中在局部区域。

基于高分辨率不透水层提取方法主要可以概况为以下几类。

1) 基于像素的方法。基于像素的不透水层提取方法以像素作为最小处理单元,因此,一些中低分辨率经典不透水层提取方法也在高分辨率遥

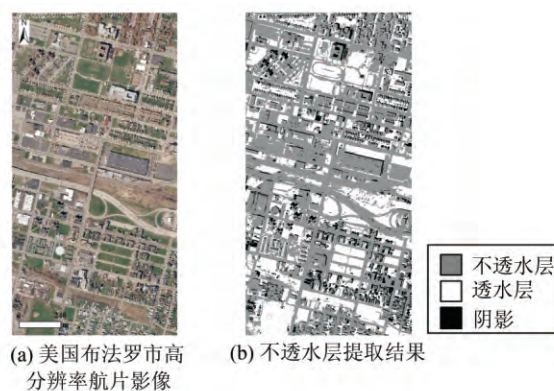


图4 美国布法罗市高分辨率航片影像和对应的不透水层提取结果

Fig. 4 High Resolution Aerial Image and Its Impervious Surface Map in Buffalo

感影像上有所应用。如文献^[38]选取了 Quick-Bird 影像进行实例分析,发现高分辨率数据中依然包含着大量的混合像元,据此选择采用了光谱混合分析的方法提取不透水层。文献^[39]根据 IKONOS 高分辨率遥感影像的不透水层分类结果,建立了不透水层比例和 NDVI 植被指数的相关模型,从而获取了美国明尼苏达州 Eagan 市的精细不透水层分布。文献^[40]采用高分辨率卫星影像的光谱信息、NDVI 植被指数以及光谱波段比例作为数据特征来自动训练决策树,最终获得不透水层分布情况。

2) 面向对象的方法。高分辨率遥感影像包含了丰富的对象形状、纹理、拓扑等空间信息,充

分利用以上信息能够提高不透水层提取的精度。面向对象的方法是最常用的一种基于高空间分辨率影像的不透水层提取方法,它通过影像分割预处理方式来获取对象,以对象作为最小处理单元,保证了地物的完整性,同时消除了基于像素提取结果中常见的椒盐噪声现象。已有研究^[36, 41]对比了基于像素的方法与面向对象的方法以及加入纹理特征的方法,结果指出,面向对象的方法和加入纹理特征的方法都能够得到比单纯采用光谱信息的基于像素的方法更精确的不透水层估计结果。面向对象的影像处理中,获取初始对象的分割是其中关键的一步,因此,分割方法的选择和分割尺度的确定对面向对象的不透水层提取结果有较大影响。文献[42]研究了多智能体分割算法来获得影像上的地物对象,再采用多元方差分析的分类方法进行分类,从而获得不透水层分布。

3) 多源数据融合的方法。多源数据融合也是高分辨率遥感影像不透水层提取的重要方向,通过利用多源数据所包含的信息能够有效提高不透水层提取精度。由于中低分辨率多光谱遥感影像包含更多的红外波段数据,对于不透水层有着较好的区分,因此可以融合高分辨率遥感影像和中低分辨率遥感影像进行不透水层提取。如文献[43]根据 IKONOS 影像所得到的缨帽变换特征、分形维数特征和中低分辨率 ETM+ 影像所反演的地表温度特征采用线性回归、神经网络和回归树 3 种方法来估计不透水层比例。除了光学影像外, LiDAR 数据可以提供地物的三维空间信息,能够高精度地提取人工地物,可以和高分辨率光学影像形成互补优势。文献[44]采用基于知识的决策树对高分辨率光学遥感影像和 LiDAR 数据进行分类,获得高精度的不透水层分布结果。但是,在光学和 LiDAR 数据融合中所采用的基于知识的决策树方法中存在大量的根据经验设定的阈值,如何根据提取目标自动获取阈值是未来需要解决的问题。另外,由于 LiDAR 数据相对普通光学影像具有价格高昂导致的不易获取性,该类方法的普适性将受到经济角度的制约。

2 基于不透水层分布的相关应用

不透水层分布是反映城市或地区生态环境、土地规划等与人类活动有密切关系议题的重要指标,对诸多环境因素都有着直接或间接的影响^[2]。本节将从水文、城市热岛效应、土地利用及变化、城市生态环境监测、城市规划等几个方面来讨论

不透水层分布在城市或地区生态环境研究中的应用。

1) 水文。从 1960 年代开始,欧美学者大量开展了针对城市化影响的研究。随后 30 a 内的研究表明,城市化的发展所导致的不透水层面积激增引起了径流量的增加,并且高比率的城市不透水层造成地下水循环补给不足^[45-46]。在最近的 20 a 中,关于城市化与水文的研究中地形地貌分布等因素被纳入研究范围。文献[47]发现城市和农村的水文峰与城市化的程度和空间分布格局有关联。不透水层的比率范围对城市流域的水文影响也是研究的热点之一。文献[48]建议超过 3%~5% 的不透水层会对径流量状态产生严重的影响。但是,文献[49]研究发现研究区域含有 20% 不透水层,然而对该流域径流量影响较小。因此,不透水层分布是城市水文研究的重要基础数据之一,也可为我国“海绵城市”的建设框架和相关研究提供信息保障。

2) 城市热岛效应。热岛效应是城市化区域的人为影响和自然气象共同作用形成,其研究对环境保护和规划、能源利用、居民保健等方面具有重要的意义^[50]。不透水层比自然地物更易保存和聚集大量的热量,并且热量通过径流量转移至终端水流^[51]。因此,城市热岛效应研究是城市不透水层应用的重要方向之一。文献[19]利用夜晚的 ASTER 数据进行了印度新德里市热岛效应建模及其与城市不透水层关系的研究。文献[52]研究表明城市热岛与城市不透水层比率有很强的正相关性。文献[53]结合景观指数来分析广州市城市不透水层和城市地表温度的变化情况。

3) 土地利用及变化。不透水层变化是城镇变化的重要组成部分,因此,不透水层的变化反映了特定区域内城镇的发展和扩张,是土地变化监测的重要指标。文献[8]使用 Landsat 2001 年和 2006 年的影像及 2001 年美国土地覆盖数据库中的不透水层专题图更新绘制出 2006 年全美不透水层专题图。文献[30]利用 4 a 的 Landsat TM/ETM+ 等遥感影像建立了美国坦帕湾流域的城市不透水层的变化模型,并根据该模型对 2025 年该地区的不透水层分布进行预测。文献[54]利用 Landsat 影像进行不透水层发展监测,研究表明位于华盛顿州西部的 Snohomish 水资源库区域从 1972 年到 2006 年不透水层增长了 225%。

4) 城市生态环境监测。不透水层的比率伴随着城镇的扩展而增加,对现有的城镇生态环境产生了巨大的影响。高不透水层比率伴随着高径

流量,从而导致流向河流的水流所携带的大量营养物质、重金属、杀虫剂等有毒物质在终端河流中富集,最终使得城镇水域中藻类、无脊椎动物、鱼类的种类下降^[55]。文献[56]针对位于智利的Valdivia市区研究了不同城市地物类型下的鸟类多样性问题,其中,不透水层是其中主要的地物类型,占整个研究区域41.8%,研究结果表明高不透水层比率使鸟类种群减少。除此之外,城市中高不透水层比率会对城市植被正常生长周期产生影响。例如,文献[57]研究发现每增加10%的不透水层比率将导致荷兰椴树花期提前1.4 d。

5) 城市规划。城市不透水层的分布模式是城市规划部门所需要的重要信息,为未来城市科学发展规划提供科学依据。文献[58]以哥伦比亚的Medellin市为例,研究遥感影像提取的城市分布特征与城市犯罪率的关系,其中,城市不透水层比率是其中重要的城市分布特征之一。不透水层比率与城市景观指数计算有着紧密的联系,文献[59]计算北京不同环线内的不透水层比率及不同比率下的城市景观指数。美国Brunswick、Marine、Broward郡县及佛罗里达州、马里兰州的Chesapeake湾区部分区域都立法规定了城市规划中的不透水层比率的上限值,科学地保障城市的健康发展^[60]。

3 总结与展望

地理国情监测是我国测绘工作在新时代的主要任务和发展方向,通过全面掌握国家地理国情要素的分布和变化,能够为政府的科学发展和决策提供必要的信息支持。不透水层分布是城镇生态的主要指标之一,它能够精确反应城镇的发展变化,并能够为城镇环境评估提供重要数据。不透水层分布已经在国内外科研领域取得了越来越广泛的关注,并且在部分发达国家中已经作为一项重要的地理国情信息进行全面、持续地调查和发布。但是在我国的地理国情监测中,并没有对不透水层分布给予足够的重视。

遥感不透水层分布估计是不透水层调查的主要方式之一,所用到的数据主要包括中低分辨率和高分辨率遥感影像。中低分辨率遥感影像中,光谱混合分析方法、回归方法、分类方法和指数方法是主要的4类提取方法;对于高分辨率遥感影像,主要可以归类为基于像素的方法、面向对象的方法和多源数据融合方法三种。不透水层作为城市的主要要素,在水文、城市热岛效应、土地利用

及变化、城市生态环境监测和城市规划等领域都能够发挥重要作用。无论是在技术方法还是应用理论,遥感不透水层提取都已经较为成熟,能够且有必要在地理国情监测中得到体现。

地理国情监测可以为政府科学发展和科学规划提供重要决策参考,基于不透水层分布这一地理国情监测专题信息,政府部门能够在以下方面得到相应的数据支持:(1)城镇发展变化情况。城镇化是我国目前及未来的重要发展方向。不透水层的变化和扩展可以作为城镇化发展的关键评估指标。遥感影像具有周期性观测的优势,基于遥感影像的不透水层提取结果能够对我国各城镇的不透水层分布进行长期的监测,为政府部门在城镇化发展方面的宏观决策提供支持和保障;(2)城镇规划和结构。城镇中人类的居住和活动区域含有大量的不透水层,不透水层分布的空间特征能够体现出城镇的规划和结构。在地理国情监测中获取不透水层分布信息,能够辅助政府部门对城镇的现有建设结构进行全面的普查,并为下一步的科学规划提供参考;(3)城镇分布和规模。不透水层分布的规模能够直接体现出城镇发展的现状。通过对我国各地区不透水层进行提取和制图,能够反映出不同省市区域内的城镇分布和建设规模,间接体现出我国不同地区之间的经济建设差异。例如,我国经济发达的东南沿海区域的不透水层分布聚集区域广且密度高,而经济欠发达的中西部区域不透水层则呈零星状态且密度较低。(4)城镇生态环境。城镇化发展过程中不应忽视生态环境的监测和保护。不透水层的分布与热岛效应、水文环境、生物多样性有着直接的联系。若在地理国情监测中提供全面详细的不透水层分布,能够为科研人员对城镇生态环境评估提供数据支持,为我国进一步科学建设城镇提供重要保障。综上所述,笔者建议有关政府部门对基于遥感数据的不透水层分布评估提高重视,加快地理国情监测指标体系的完善工作,将不透水层分布作为一项重要的地理国情要素进行调查和分析,建设更加完善、全面的地理国情监测政策和技术体系。

参 考 文 献

- [1] The First National Geographic Census Leading Group Office of the State Council. The Contents and Standards for National Geographic Census[EB/OL]. <http://hainan.sbsm.gov.cn/accessory/Oct24,2013115311AM.pdf>, 2013(国务院第一次全

- 国地理国情普查领导小组办公室. 地理国情普查内容与指标[EB/OL]. <http://hainan.sbsm.gov.cn/accessory/Oct24,2013115311AM.pdf>, 2013)
- [2] Jr Arnold C L, Gibbons C J. Impervious Surface Coverage: The Emergence of a Key Environmental Indicator [J]. *Journal of the American Planning Association*, 1996, 62(2): 243-258
 - [3] Weng Q. Remote Sensing of Impervious Surfaces in the Urban Areas: Requirements, Methods, and Trends [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 117: 34-49
 - [4] Hurd J D, Civco D L. Temporal Characterization of Impervious Surfaces for the State of Connecticut [C]. The ASPRS Annual Conference, Denver, Colorado, 2004
 - [5] Harbor J M. A Practical Method for Estimating the Impact of Land-Use Change on Surface Runoff, Groundwater Recharge and Wetland Hydrology [J]. *Journal of the American Planning Association*, 1994, 60(1): 95-108
 - [6] Yuan F, Bauer M E. Comparison of Impervious Surface Area and Normalized Difference Vegetation Index as Indicators of Surface Urban Heat Island Effects in Landsat Imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 106(3): 375-386
 - [7] Schueler T R. The Importance of Imperviousness [J]. *Watershed Protection Techniques*, 1994, 1(3): 100-111
 - [8] Xian G, Homer C. Updating the 2001 National Land Cover Database Impervious Surface Products to 2006 Using Landsat Imagery Change Detection Methods [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(8): 1 676-1 686
 - [9] Homer C H, Fry J A, Barnes C A. The National Land Cover Database [J]. *US Geological Survey Fact Sheet*, 2012, 3 020(4): 1-4
 - [10] Wickham J D, Stehman S V, Gass L, et al. Accuracy Assessment of NLCD 2006 Land Cover and Impervious Surface [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 130: 294-304
 - [11] Yang L, Huang C, Homer C G, et al. An Approach for Mapping Large-Area Impervious Surfaces: Synergistic Use of Landsat-7 ETM+ and High Spatial Resolution Imagery [J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2003, 29(2): 230-240
 - [12] Xian G, Homer C, Dewitz J, et al. Change of Impervious Surface Area Between 2001 and 2006 in the Conterminous United States [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2011, 77(8): 758-762
 - [13] Yang L, Xian G, Klaver J M, et al. Urban Land-Cover Change Detection Through Sub-pixel Imperviousness Mapping Using Remotely Sensed Data [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2003, 69(9): 1 003-1 010
 - [14] Esch T, Himmler V, Schorcht G, et al. Large-Area Assessment of Impervious Surface Based on Integrated Analysis of Single-Date Landsat-7 Images and Geospatial Vector Data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(8): 1 678-1 690
 - [15] 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(1/2): 49-65
 - [16] Shao Z, Liu C. The Integrated Use of DMSP-OLS Nighttime Light and MODIS Data for Monitoring Large-Scale Impervious Surface Dynamics: A Case Study in the Yangtze River Delta [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(10): 9 359-9 378
 - [17] Lu D, Tian H, Zhou G, et al. Regional Mapping of Human Settlements in Southeastern China with Multisensor Remotely Sensed Data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(9): 3 668-3 679
 - [18] Liao Mingsheng, Jiang Liming, Lin Hui, et al. Estimating Urban Impervious Surface Percent Using Boosting as a Refinement of CART Analysis [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(12): 1 099-1 102(廖明生, 江利明, 林晖, 等. 基于 CART 集成学习的城市不透水层百分比遥感估算 [J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2007, 32(12): 1 099-1 102)
 - [19] Mallick J, Rahman A, Singh C K. Modeling Urban Heat Islands in Heterogeneous Land Surface and its Correlation with Impervious Surface Area by Using Night-Time ASTER Satellite Data in Highly Urbanizing City, Delhi-India [J]. *Advances in Space Research*, 2013, 52(4): 639-655
 - [20] Jiang Liming, Liao Mingsheng, Lin Hui, et al. Estimating Urban Impervious Surface Percentage with ERS-1/2 InSAR Data [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12(1): 176-185(江利明, 廖明生, 林晖, 等. 利用雷达干涉数据进行城市不透水层百分比估算 [J]. *遥感学报*, 2008, 12(1): 176-185)
 - [21] Zhang Y Z, Zhang H S, Lin H. Improving the Impervious Surface Estimation with Combined Use of Optical and SAR Remote Sensing Images [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 141: 155-167
 - [22] Flanagan M, Civco D L. Subpixel Impervious Surface Mapping [C]. The ASPRS Annual Convention, St. Louis, Missouri, USA, 2001

- [23] Ridd M K. Exploring a VIS (Vegetation-Impervious Surface-Soil) Model for Urban Ecosystem Analysis through Remote Sensing: Comparative Anatomy for Cities [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1995, 16(12): 2 165-2 185
- [24] Phinn S, Stanford M, Scarth P, et al. Monitoring the Composition of Urban Environments Based on the Vegetation-Impervious Surface-Soil (VIS) Model by Subpixel Analysis Techniques [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(20): 4 131-4 153
- [25] Wu C. Normalized Spectral Mixture Analysis for Monitoring Urban Composition Using ETM+ Imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 93(4): 480-492
- [26] Wu C, Murray A T. Estimating Impervious Surface Distribution by Spectral Mixture Analysis [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84(4): 493-505
- [27] Xia Junshi, Du Peijun, Fen Yunfeng, et al. Urban Impervious Surface Area Extraction and Analysis Based on Hyperspectral Remote Sensing Image [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2011, 40(4): 660-666(夏俊士, 杜培军, 逢云峰, 等. 基于高光谱数据的城市不透水层提取与分析 [J]. *中国矿业大学学报*, 2011, 40(4): 660-666)
- [28] Pu R, Gong P, Michishita R, et al. Spectral Mixture Analysis for Mapping Abundance of Urban Surface Components from the Terra/ASTER Data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(3): 939-954
- [29] Lu D S, Li G Y, Kuang W H, et al. Methods to Extract Impervious Surface Areas from Satellite Images [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2014, 7(2): 93-112
- [30] Xian G, Crane M. Assessments of Urban Growth in the Tampa Bay Watershed Using Remote Sensing Data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 97(2): 203-215
- [31] Elvidge C, Tuttle B, Sutton P, et al. Global Distribution and Density of Constructed Impervious Surfaces [J]. *Sensors*, 2007, 7(9): 1 962-1 979
- [32] Hu X, Weng Q. E Estimating Impervious Surfaces from Medium Spatial Resolution Imagery Using the Self-organizing Map and Multi-layer Perceptron Neural Networks [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(10): 2 089-2 102
- [33] Xu H. A New Remote Sensing Index for Fastly Extracting Impervious Surface Information [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(11): 1 150-1 153(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): 1 150-1 153)
- [34] Deng C, Wu C. BCI: A Biophysical Composition Index for Remote Sensing of Urban Environments [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 127: 247-259
- [35] Liu C, Shao Z, Chen M, et al. MNDISI: A Multi-source Composition Index for Impervious Surface Area Estimation at the Individual City Scale [J]. *Remote Sensing Letters*, 2013, 4(8): 803-812
- [36] Moran E F. Land Cover Classification in a Complex Urban-Rural Landscape with Quickbird Imagery [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2010, 76(10): 1 159-1 168
- [37] Luo H, Wang L, Shao Z, et al. Development of a Multi-scale Object-Based Shadow Detection Method for High Spatial Resolution Image [J]. *Remote Sensing Letters*, 2015, 6(1): 59-68
- [38] Wu C. Quantifying High-Resolution Impervious Surfaces Using Spectral Mixture Analysis [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(11): 2 915-2 932
- [39] Sawaya K E, Olmanson L G, Heinert N J, et al. Extending Satellite Remote Sensing to Local Scales: Land and Water Resource Monitoring Using High-resolution Imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 88(1/2): 144-156
- [40] Goetz S J, Wright R K, Smith A J, et al. IKONOS Imagery for Resource Management: Tree Cover, Impervious Surfaces, and Riparian Buffer Analyses in the Mid-Atlantic Region [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 88(1/2): 195-208
- [41] Yuan F, Bauer M E. Mapping Impervious Surface Area Using High Resolution Imagery: A Comparison of Object-Based and per Pixel Classification [C]. The ASPRS 2006 Annual Conference, Reno, Nevada, 2006
- [42] Zhou Y, Wang Y Q. Extraction of Impervious Surface Areas from High Spatial Resolution Imagery by Multiple Agent Segmentation and Classification [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2008, 74(7): 857-868
- [43] Mohapatra R P, Wu C. High Resolution Impervious Surface Estimation [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2010, 76(12): 1 329-1 341
- [44] Zhou W, Huang G, Troy A, et al. Object-Based Land Cover Classification of Shaded Areas in High Spatial Resolution Imagery of Urban Areas: A Comparison Study [J]. *Remote Sensing of Environment*

- ronment, 2009, 113(8): 1 769-1 777
- [45] Jacobson C R. Identification and Quantification of the Hydrological Impacts of Imperviousness in Urban Catchments: A Review [J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(6): 1 438-1 448
- [46] Leopold L B. Hydrology for Urban Land Planning: A Guidebook on the Hydrologic Effects of Urban Land Use [R]. US Government Printing Office, USA, 1968
- [47] Sheeder S A, Ross J D, Carlson T N. Dual Urban and Rural Hydrograph Signals in Three Small Watersheds [J]. *Jawra Journal of the American Water Resources Association*, 2007, 38(4): 1 027-1 040
- [48] Yang G, Bowling L C, Cherkauer K A, et al. Hydroclimatic Response of Watersheds to Urban Intensity: An Observational and Modeling-Based Analysis for the White River Basin, Indiana [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2010, 11(1): 122-138
- [49] Brun S, Band L. Simulating Runoff Behavior in an Urbanizing Watershed [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2000, 24(1): 5-22
- [50] Zhang Yan, Bao Wenjie, Yu Qi, et al. Study on Seasonal Variations of the Urban Heat Island and Its Inter-annual Differences in a Typical Megacity [J]. *Journal of Earth Science*, 2012, 55(4): 1 121-1 128(张艳, 鲍文杰, 余琦, 等. 超大城市热岛效应的季节变化特征及其年际差异 [J]. *地球物理学报*, 2012, 55(4): 1 121-1 128)
- [51] Slonecker E T, Jennings D B, Garofalo D. Remote Sensing of Impervious Surfaces: A Review [J]. *Remote Sensing Reviews*, 2001, 20(3): 227-255
- [52] van Hove L W A, Jacobs C M J, Heusinkveld B G, et al. Temporal and Spatial Variability of Urban Heat Island and Thermal Comfort Within the Rotterdam Agglomeration [J]. *Building and Environment*, 2015, 83: 91-103
- [53] Zhang Y S, Balzter H, Zou C C, et al. Characterizing Bi-temporal Patterns of Land Surface Temperature Using Landscape Metrics Based on Sub-pixel Classifications from Landsat TM/ETM [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, 42: 87-96
- [54] Powell S L, Cohen W B, Yang Z, et al. Quantification of Impervious Surface in the Snohomish Water Resources Inventory Area of Western Washington from 1972-2006 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(4): 1 895-1 908
- [55] Paul M J, Meyer J L. Streams in the Urban Landscape [J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2001, 32: 333-365
- [56] Silva C P, García C E, Estay S A, et al. Bird Richness and Abundance in Response to Urban Form in a Latin American City: Valdivia, Chile as a Case Study [J]. *PLoS ONE*, 2015, 10(9): 120-136
- [57] Massetti L, Petralli M, Orlandini S. The Effect of Urban Morphology on *Tilia X Europaea* Flowering [J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2015, 14(1): 187-193
- [58] Patino J E, Duque J C, Pardo-Pascual J E, et al. Using Remote Sensing to Assess the Relationship Between Crime and the Urban Layout [J]. *Applied Geography*, 2014, 55: 48-60
- [59] Li W, Ouyang Z, Zhou W, et al. Effects of Spatial Resolution of Remotely Sensed Data on Estimating Urban Impervious Surfaces [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, 23(8): 1 375-1 383
- [60] Brabec E, Schulte S, Richards P L. Impervious Surfaces and Water Quality: A Review of Current Literature and Its Implications for Watershed Planning [J]. *Journal of Planning Literature*, 2002, 16(4): 499-514

(下转第 703 页)

leveling data for mainland and islands of China, and in US show that height accuracy better than 10 cm over a distance of 200km is achievable for land areas and 6 cm over a distance of 10 km for islands.

Key words: height transfer from land to island; EGM2008; gravity potential; mean gravity

First author: WU Fumei, PhD, specializes in geodesy datum and kinematic geodetic data processing. E-mail: wfm8431812@163.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41374003, 41174018.

+++++
(上接第 577 页)

Review of Impervious Surface Mapping Using Remote Sensing Technology and Its Application

LI Deren^{1,2} LUO Hui¹ SHAO Zhenfeng^{1,2}

1 State Key Laboratory and Information Engineering in Surveying, Mapping and
Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Collaborative Innovation Center of Geospatial Technology, Wuhan 430079, China

Abstract: Impervious surface distribution is one of the key indicators of the regional and urban environment, and plays an important role in development planning and ecological assessment. Impervious surface extraction and analysis however has been overlooked in much of the work on monitoring national geographic conditions. Impervious surface mapping based on remote sensing technology has attracted lots of interest, as it can be used to estimate the distribution of impervious surfaces over large areas quickly and accurately. This paper starts with a review of the classical methods for impervious surface mapping using remote sensing data. The important applications of impervious surface mapping are summarized, including hydrology, heat island effect, land use/land cover development monitoring and planning, urban ecology condition assessment, and city planning. Finally, the suggestions for future applications of impervious surface mapping based on remote sensing technology in China are proposed. The contents in this paper demonstrate why impervious surface should be included in national geographic condition monitoring projects in the future.

Key words: impervious surface mapping; geographic national conditions monitoring; remote sensing technology; urban research; ecology condition assessment

First author: LI Deren, professor, PhD supervisor, Academician of Chinese Academy of Sciences, Academician of Chinese Academy of Engineering, Academician of Euro-Asia International Academy of Sciences. He is focusing on the research and education in spatial information science and technology about RS, GPS and GIS, and promoting the construction of geographic national conditions monitoring, digital city, digital China, smart city and smart China. E-mail: drli@whu.edu.cn

Corresponding author: LUO Hui, PhD candidate. E-mail: luohui_lh@whu.edu.cn

Foundation support: The National Key Scientific Instrument and Equipment Development, No. 2012YQ16018505; the Key Technologies Research and Development Program of China, No. 2013BAH42F03; New Century Excellent Talents in University, No. NCET-12-0426; Innovative Project of Wuhan University, No. 2042014kf0212; Scientific Fund of Geographic National Conditions Monitoring.