

DOI:10.13203/j.whugis.20180196



文章编号:1671-8860(2018)12-1909-07

基于多源高分辨率遥感影像的 2 m 不透水面一张图提取

邵振峰¹ 张源¹ 黄昕² 朱秀丽³ 吴亮⁴ 万波⁴

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 武汉大学遥感信息工程学院,湖北 武汉,430079

3 国家基础地理信息中心,北京,100830

4 中国地质大学(武汉)信息工程学院,湖北 武汉,430074

摘要:不透水率是衡量城市生态环境状况的一个重要指标。当前全球范围内仅有 1 km 和 30 m 分辨率尺度的不透水面专题信息,无法满足城市尺度水文模型建模、海绵城市规划和建设需求。提出了图谱信息融合的不透水面提取模型,实现了基于深度学习的的海面提取新方法,研制了不透水面遥感全流程提取和监测软件。基于多源高分辨率遥感影像首次完成了中国 31 个省(直辖市、自治区)的 2 m 不透水面专题信息提取,形成全国不透水面一张图,为海绵城市和生态城市的建设提供了基础数据支撑和技术监测手段。

关键词:地表覆盖产品;不透水面提取模型;深度学习;高分辨率遥感影像

中图分类号:P237

文献标志码:A

随着全球经济快速发展,各国都在经历快速城镇化的过程,国家与国家、城市与城市之间的联系越来越密切。一方面,城市作为人类生产和生活的主要场所,给人们带来了经济发展贸易往来的便利^[1]。另一方面,城市扩张导致不透水面(impermeable surface area, ISA)占比迅速上升。不透水面作为城市的重要组成部分,被定义为地表水不能渗透的人工材料硬质表面。城市及其周边的自然环境和地表覆盖类型发生从自然地表转化为低密度建筑物、从低密度建筑区转化为高密度建筑区等一系列转变,使得环境承受能力减弱,耕地、植被、湿地、水域等的自然地表陆续减少^[2]。不透水面的增多、大量自然地表消失对生态环境造成难以恢复的破坏。地表覆盖是指地球表面各种物质类型及其自然属性与特征的综合体,其空间分布不仅能够反映社会经济活动进程,决定地表水热和物质平衡,影响生物地球化学循环,也改变着陆地-大气的水分、能量和碳循环,以至引起气候变化^[3]。20 世纪 90 年代后,全球变化研究人员越来越认识到土地利用/覆被变化的重要性^[4],它逐渐成为全球环境变化研究的核心部分,

是全球变化模型(如净生产力模型、生态系统新陈代谢模型以及碳循环模型等)的重要输入变量,也是大多数气候变化区域响应模型的基础数据^[5]。

随着全球变化研究的深入,国家以及国际相关组织一直致力于利用遥感技术研究全球或区域的地表覆盖及其变化信息,以便更精确地预测未来城市扩张的趋势和影响^[6]。经过十多年努力,美国、欧洲国家和中国对全球地表覆盖产品的研制已经取得显著的成果,目前已有 6 套全球地表覆盖产品面向公众提供数据支持与服务^[7]。这 6 套数据分别为 IGBP DISCover 1992—1993 年 1 km 空间分辨率全球土地覆盖数据集、UMD 1992—1993 年 1 km 空间分辨率全球土地覆盖数据集、GLC2000 1 km 空间分辨率全球土地覆盖数据集、MOD12Q1-2001 1 km 分辨率全球土地覆盖数据集、GlobCover2009 300 m 分辨率全球土地覆盖数据集、GlobeLand30 30 m 分辨率全球地表覆盖产品^[8]。

但是由于中国城市化进程加快及变化研究的不断发展,1 km、300 m 甚至是 30 m 的地表覆盖遥感数据产品已经不能满足现在研究变化的需

收稿日期:2018-05-18

项目资助:国家重点研发计划战略性国际科技创新合作重点专项(2016YFE0202300);武汉市晨光计划(2016070204010114);广州市科技项目(201604020070);湖北省重点研发计划(2016AAA018);国家自然科学基金(61671332, 41771452, 41771454)。

第一作者:邵振峰,教授,博士生导师,现从事城市遥感相关的科研与教学工作。shaozhenfeng@whu.edu.cn

要,模型研究相关单位需要有更高的空间分辨率、更精确的地表覆盖数据产品^[9-10]。同样,不透水面在海绵城市建设中发挥着重要作用,研究如何将不透水面信息用于量化建模,应用于不透水面 INFOWORKS 模型(现代排水模型软件)、暴雨洪水管理模型(storm water management model, SWMM)和考虑不透水面丰度影响的碳水通量估算非常重要。因此,如何获得高精度的不透水面信息是亟待解决的问题^[11-12]。

1 高分辨率遥感影像不透水面自动提取面临的挑战

1.1 多源多时相影像色调差异对不透水面提取参数的影响

由于传感器镜头畸变、气候条件及地形等因素的影响,遥感影像一般会存在光谱偏差和云雾覆盖,导致地物的光谱信息发生改变,且由于现有硬件技术的限制,获取低空间分辨率的多光谱影像和高分辨率的全色影像的信息量有限;同时,大面积影像处理时涉及多时相拼接分类问题,以江西省为例,采用高分一号、高分二号、资源三号等多种数据源才能完全覆盖。多时相往往造成错分类:冬季植被与夏季植被会被分为不同类别,雨季河床和枯水季河床也会分为不同类别,冬季大雪覆盖区域分类结果不可靠。诸如此类的问题都是由不同时相影像引起的,因此如何通过影像融合、特征提取等方式提高影像信息量是开展大面积高分辨率不透水面提取需要研究的第一个问题。

由于高分辨率不透水面提取依赖于影像的光谱、纹理、形状、语义等低层与高层特征,上述问题的存在都给高效的不透水面提取带来困难,因此,如何提高影像的亮度和对比度,有效地恢复影像的光谱偏差,去除云雾影响,提高多光谱影像的空间分辨率,降低光谱损失,为影像分类提供更丰富的可供查询的空间特征与光谱特征^[13],是遥感影像处理需要解决的重要问题。

1.2 云及阴影遮挡

云层遮挡使得光线难以到达地面,在影像上形成了“盲区”。被云层遮挡的地物的光谱信息不能被卫星传感器接受,导致获取的遥感影像不清晰,甚至无法读取,极大地阻碍了遥感影像的应用^[14]。同时,城市建筑群高大且密集分布使得高分辨遥感影像上存在大量的阴影,导致阴影覆盖区域的光谱信息缺失,引起影像解译困难、解译精度低等问题(见图1)。因此,高分辨率遥感影

像的阴影检测和提取是高分辨率遥感影像数据解译的重要步骤。

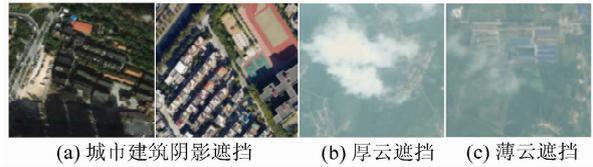


图1 云及阴影遮挡

Fig. 1 Clouds and Shadow

1.3 分割尺度影响不透水面提取精度

不透水面之间存在着规模大小的差异,单一尺度的不透水面提取必然会出现过分割或者分割不完全的情况。如图2所示,由于不同的地物类型各自具有其最适宜的分割尺度,为保证不透水面信息提取的精细化程度,正确反映城市复杂地表不透水面地理空间分布格局,需要了解不透水面随分割尺度变化的效应^[15]。因此,不透水面尺度确定与各层次不透水面最优尺度选择成为同质区对象提取要解决的基本问题。针对城市复杂地表不透水面地物多层次结构特点,分层次设定尺度阈值,根据各层次同质区对象的光谱和空间特征,确定多特征异质度准则,基于同质区对象内部异质性最小和对象间异质性最大原则,使各尺度的同质分割达到最优化的程度,从而实现不透水面特征的多尺度表达,是需要研究的问题。

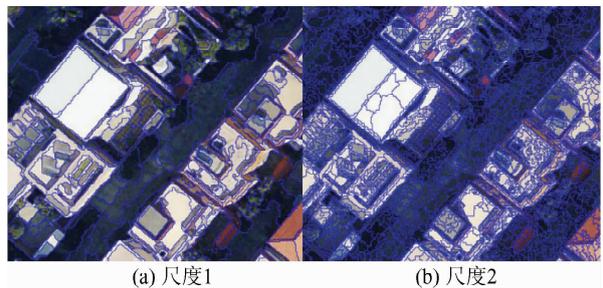


图2 两个不同分割尺度的效果

Fig. 2 Effect of Two Different Segmentation Scales

1.4 同物异谱

同物异谱与同谱异物在判读中难以直接定性,主要是由于地物综合光谱信息(混合像片)、区域环境背景差异及图像处理等因素造成的。地物相互之间的混淆是对提取结果影响较大的一个问题。在地表覆盖类型之间存在光谱混淆,特别是在城市低亮度不透水面和农业用地或者湿地之间,高亮度不透水面和裸土之间,如图3所示。同样,之前的研究表明^[16-17],这种光谱混淆问题被认为是遥感影像地表覆盖信息提取的一大挑战。

在水体分类问题中,采用归一化差分水指数(normalized difference water index, NDWI)等指

数能获得较好的分类效果,但是水体的纹理特征、光谱特征与阴影光谱相似度较高,造成水体与阴影的混淆。归一化差植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)是植被分类常用指数,但是单凭 NDVI 指数依旧会使植被与低反照率建筑混淆。道路作为不透水面的典型类别之一,其精度极大地影响最终不透水提取的质量和精度。道路在分类过程中容易与裸土、细长田埂混淆。为了提高道路分类精度,加入纹理特征,减少部分道路与裸土的混淆。但从影像来看,细长田埂和较暗的道路仍很难区分,因此,如何提高道路提取效果仍需继续研究。

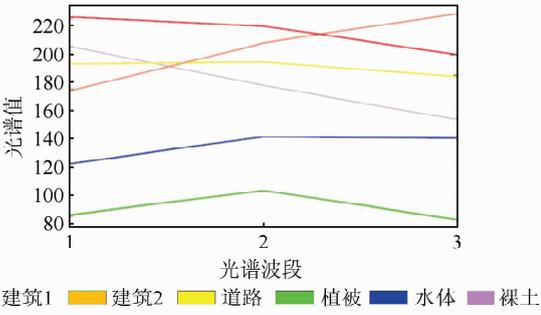


图 3 光谱曲线图

Fig. 3 Spectral Curve

2 不透水面提取模型

城市不透水面的提取并不是一个纯粹的遥感影像分类问题或单一的土地利用/覆盖问题,城市不透水面与城市规划和形态、城市建设所使用的材质等相关,仅使用高分辨率影像的图特征或谱特征来提取城市不透水面具有很大的不确定性,需要融合城市“地物-材质”的空间特征和光谱特征才能解决不透水面提取问题。因此,本文提出了首先对影像进行“地物-材质”结构的同质区分割,进而实现图谱合一的不透水面提取方法,在对多源高分辨率遥感影像图谱信息进行深入挖掘的基础上,构建一种图谱特征逐层融合的多分类器集成迭代分类提取模型。该模型改变了以往仅依赖单分类器和固定特征输入的不透水面提取模式,通过自适应地逐层次递进式特征融合迭代分类和多分类器集成增强分类结果的稳健性,实现城市不透水面的准确高效提取。

城市不透水面通常是人工建造的,与自然地物相比,不透水面对象通常边缘明确,形状多为几何图形及其组合,而自然对象的边缘常呈现渐变的特性,且渐变范围较大,形状也多不规则。相比其他人工地物,道路具有狭长的线性特征,道路同

质区的描述可主要利用形状特征。在纹理特征表现上,城市不透水面与透水面也存在较大差异,建筑物的材质一般为水泥、瓦片、金属、大理石等。在高空间分辨率遥感影像中,建筑物同质区的描述可以利用形状、纹理等特征。然而,由于不透水面受植被、阴影等遮挡,以及不透水面自身存在遮挡,单一的几何特征不能有效描述不透水面与其他地物的差异性。因此,本文首先研究同质区对象图特征的描述和提取过程,如图 4 所示。

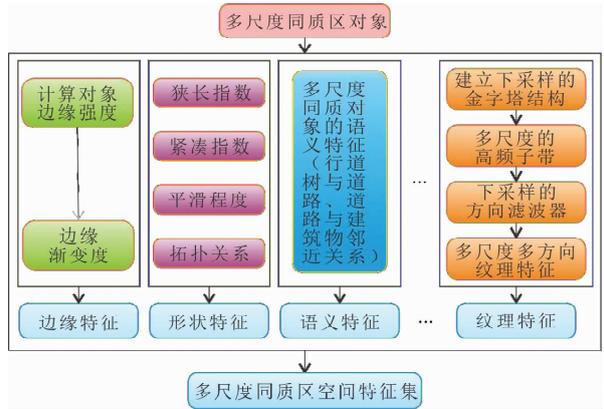


图 4 多尺度同质区空间特征的描述和提取

Fig. 4 Description and Extraction of Spatial Characteristics of Multi-scale Homogeneous Regions

由图知谱是对空间对象的光谱认知过程,可以提高城市区域复杂场景下各尺度不透水面光谱认知的准确性。利用同质区对象内光谱的异质性指数来度量“地物-材质”同质区内像元光谱的差异性。光谱异质性指数常用每个波段光谱反射率的标准差的均值来表示。图 5 表示“地物-材质”同质区对象的谱特征描述和提取流程。

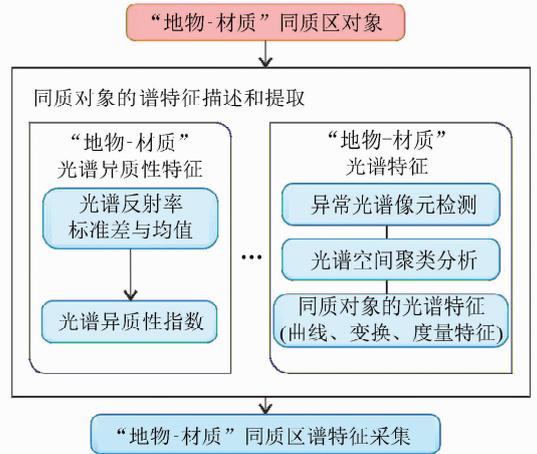


图 5 “地物-材质”同质区对象的谱特征描述和提取

Fig. 5 Description and Extraction of Spectral Feature of Homogeneous Regions

根据以上对图特征和谱特征的提取获得用于

城市不透水面提取的图谱特征集,可通过单分类器求取影像中包括不透水面在内的各地物分布。但实际上由于城市尺度上不透水面构成十分复杂,基于固定特征输入的单分类器很难对其进行有效区分。为克服该问题,本文提出了一种图谱特征逐层融合的多分类器集成不透水面提取模型(见图6)。

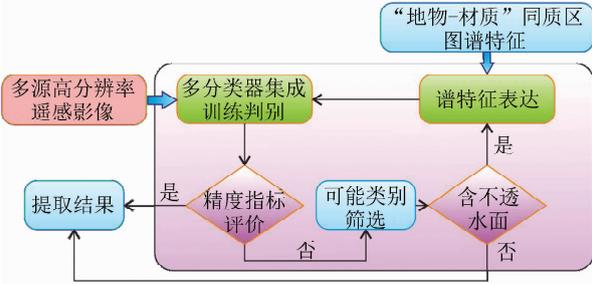


图6 图谱特征逐层融合的多分类器集成不透水面提取模型

Fig. 6 Multi-classifier Integrated Impervious Surface Extraction Model with Spectral and Spatial Feature

3 基于深度学习的的海不透水面提取方法

深度学习是计算机科学领域中一个新的学习方向。深度学习可学习一种深层非线性网络结构,实现复杂函数的逼近,具有从少数样本中学习数据集本质特征的能力。为了提高分类能力,首先基于高分辨率卫星影像构建不透水面样本库,利用深度卷积网络提取图像特征,并进行逐像素的类别概率预测,然后利用带空间上下文约束的条件随机场对预测得到的类别概率进行整体优化^[18]。

本文采用的基于深度学习的高分影像不透水面提取流程主要包括两个阶段,如图7所示。在第一阶段中,利用深度卷积网络对影像局部特征进行提取。为了实现高分遥感影像不透水面的高精度提取,保留两个池化层以得到更为密集的特征图。同时,为了保证网络仍能够对影像的多尺度特征进行提取,进一步引入空洞卷积对影像特征

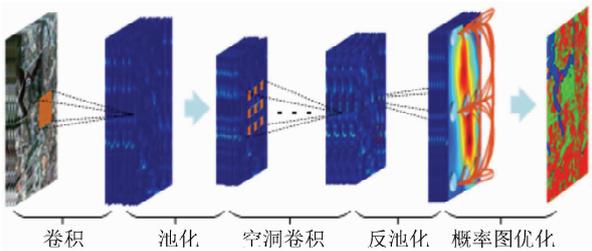


图7 面向高分影像不透水面提取的深度卷积网络

Fig. 7 Deep Convolution Network of Impervious Surface Extraction Based on High-Resolution Remote Sensing Image

进行提取。空洞卷积是对标准卷积核的大小进行扩张,以扩大卷积核的感受野。即使不通过池化,也能有较大的感受野看到更多的信息。在第二阶段中,为了避免预测结果受噪声等因素的影响,在预测时充分考虑到空间相邻像素的语义关系。将输入影像根据其邻域关系构建成网络图,在深度网络提取特征的基础上,进一步引入高阶语义信息对特征进行优化,最终实现不透水面的精确提取。

记网络输入的遥感影像为 I ,深度卷积网络可以表示为一系列线性变换和非线性激活操作。对于包含 $(2L+M)$ 层的深度卷积网络,其前 L 层为卷积+池化层,中间 M 层为空洞卷积层,而后 L 层为反池化+反卷积层,最后的输出特征如下:

$$F(I) = \text{Relu}(\text{unpooling}(\mathbf{H}_{2L+M-1}) \otimes \mathbf{W}_{2L+M} + \mathbf{b}_{2L+M}) \quad (1)$$

式中, \otimes 表示反卷积操作;第 l 层的隐含节点可以表示为:

$$\mathbf{H}_l = \begin{cases} \text{pooling}(\text{Relu}((\mathbf{H}_{l-1}) * \mathbf{W}_l + \mathbf{b}_l)), & l = 1, 2 \dots L \\ \text{Relu}((\mathbf{H}_{l-1}) \otimes_{S_l} \mathbf{W}_l + \mathbf{b}_l), & l = L + 1 \dots L + M \\ \text{Relu}(\text{unpooling}(\mathbf{H}_{l-1}) \otimes_{S_l} \mathbf{W}_l + \mathbf{b}_l), & l = L + M + 1 \dots 2L + M - 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中, $*$ 为卷积运算; \otimes_{S_l} 为 S_l 步长的空洞卷积; $\mathbf{H}_0 = \mathbf{I}$; \mathbf{W}_l 和 \mathbf{b}_l 分别表示卷积核和偏置项; $\text{pooling}(\cdot)$ 和 $\text{unpooling}(\cdot)$ 分别为池化和反池化函数; $\text{Relu}(\cdot) = \max(\cdot, 0)$ 为网络的非线性激活函数。

对于学习得到的特征 $F(I)$,进一步采用 softmax 回归对类别的概率进行预测:

$$\hat{p}_{i,k} = \text{softmax}(F_i(I)) = \frac{e^{w_k^T F_i(I)}}{\sum_{c_j \in C} e^{w_j^T F_i(I)}} \quad (3)$$

式中, $\hat{p}_{i,k}$ 表示预测得到的第 i 个像素属于类别 $c_j \in C$ 的概率; $C = \{c_1, c_2, c_3\}$ 为类别标签集合,分别对应透水面、不透水面和水体。

人工标记实验区域样本,其中 30%作为训练样本用于支持向量机(support vector machine, SVM)与随机森林(random forest, RF)测试中,其余 70%用于测试深度学习、SVM 与 RF 精度。深度学习模型、RF 和 SVM 的不透水面提取结果如图8所示。可以看出,相较 RF 和 SVM,深度学习方法在准确提取不透水面、更好地保留不透水面结构信息的同时,能够有效抑制影像噪声对不透水面提取结果的影响,具有更好的鲁棒性和

更高的提取精度。同样,表 1 数据也表明深度学习模型能获取更高精度的提取结果。

表 1 深度学习模型与 RF 和 SVM 模型精度对比

Tab. 1 Accuracy Results of Deep Learning Model, RF and SVM Models

方法	总体精度/%	Kappa 系数
深度学习模型	95.55	0.916 7
随机森林(RF)	94.11	0.890 3
支持向量机(SVM)	94.22	0.890 5

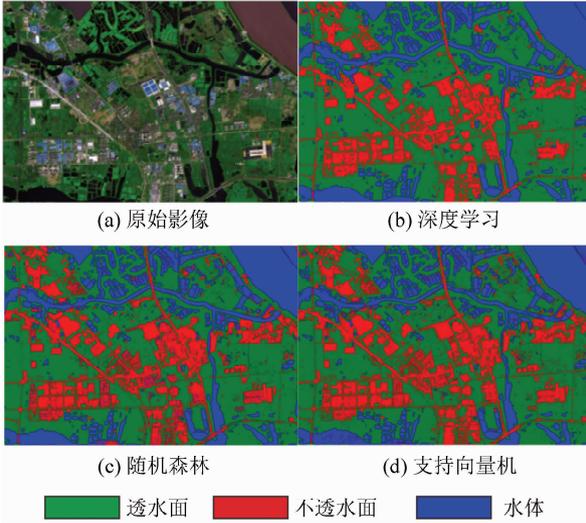


图 8 深度学习模型、RF 和 SVM 模型对比效果

Fig. 8 Classification Results of Deep Learning Model, RF and SVM Models

4 全国 2 m 级不透水面遥感提取

针对高分辨率遥感影像图谱特征单一的问题,本文提出图谱特征逐层融合的多分类器集成不透水面提取模型,实现了基于深度学习的不透水面提取方法,构建了多尺度不透水面提取和监测技术体系,针对不透水面信息提取中的自适应机制问题提出了多尺度提取概念模型^[19]。多尺度不透水面提取和监测技术体系的建立综合了图谱特征逐层融合的多分类器集成思想及深度学习提取方法。如图 9 所示,原始影像进行分割后划分为不同复杂程度的场景,不同的场景用于不同的特征参与到学习模型中进行更高精度的分类。最后将道路、建筑等不透水地物合并,获取最优提取结果。

以中国 31 个省(直辖市、自治区)为研究区域(其中不包含香港、澳门、台湾等区域)。基于资源三号、高分一号和高分二号等高分遥感影像数据,对影像采用分幅处理,人工标记每幅影像的训练样本,通过构建融合多特征的不透水面提取模型,完成了全国 31 个省(直辖市、自治区)2 m 不透水面信息提取,如图 10 所示(地图来源于原国家测

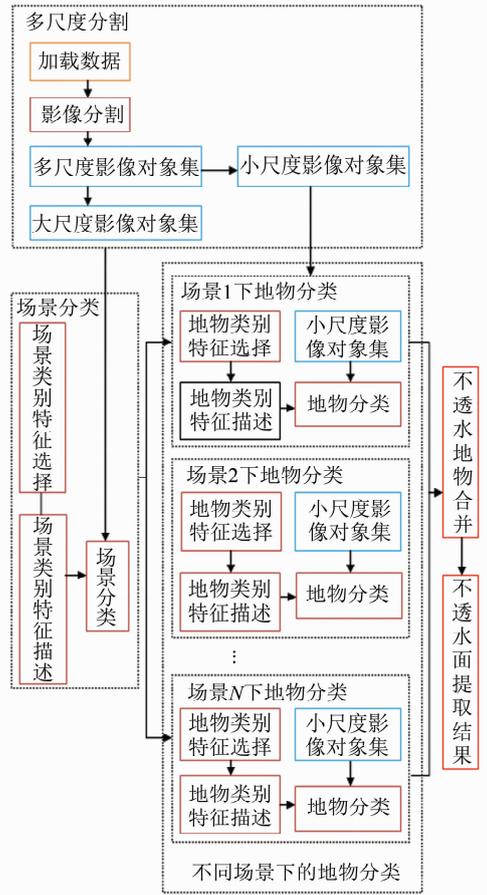


图 9 多尺度不透水面提取流程

Fig. 9 Multi-scale Impervious Surface Extraction Process

绘地理信息局标准地图服务系统, <http://bzdt.nasg.gov.cn/index.jsp>。

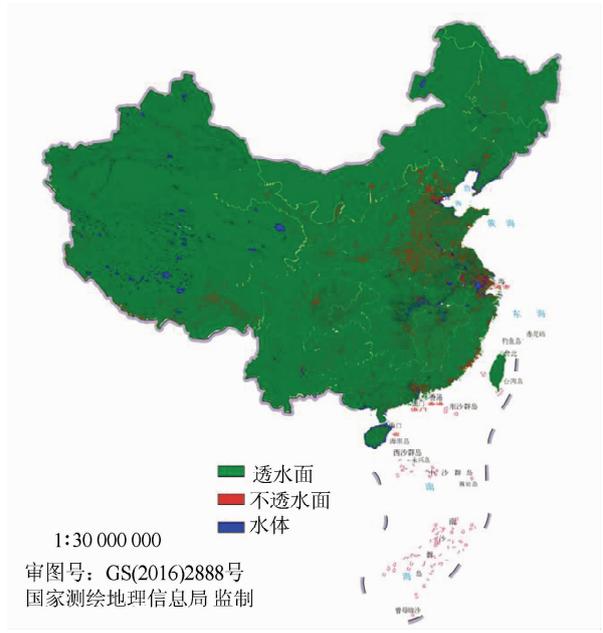


图 10 中国 2 m 不透水面信息提取结果(不包含香港、澳门、台湾等区域)

Fig. 10 Impervious Surface Map in Mainland China

5 结 语

城市不透水面信息作为城市化过程中水文环境效应研究的重要参数,也是定量评估城市土地覆盖结构组合对人居环境产生影响的核心内容。城市扩张的研究重点在城市不透水面信息的提取,而精准的不透水面信息的提取是关键^[20]。本文讨论了当前全球地表覆盖产品在模型应用、城市扩张等相关研究应用中的优势及不足;构建了图谱特征逐层融合的多分类器集成不透水面提取模型,提出了基于深度学习的的海绵城市不透水面提取方法;基于多源高分辨率遥感影像提取了全国 2 m 不透水面专题信息,为海绵城市科学规划工作提供了有力保障,为城市热环境的科学调控提供数据支撑,也可以为未来城市发展以及生态规划与整治提供科学参考,用于优化城市生产、生活、服务和生态空间布局。

参 考 文 献

- [1] Cao Liqin, Li Pingxiang, Zhang Liangpei, et al. Estimating Impervious Surfaces Using the Fuzzy ART-MAP[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(10): 1 236-1 239(曹丽琴,李平湘,张良培,等. Fuzzy ARTMAP 算法在城市不透水面估算中的应用研究 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(10): 1 236-1 239)
- [2] Luo Hui, Liu Chong, Wu Chen, et al. Urban Change Detection Based on Dempster-Shafer Theory for Multitemporal Very High-Resolution Imagery [J]. *Remote Sensing*, 2018, DOI: 10. 3390/rs10070988
- [3] Tang Fei, Xu Hanqiu. A LSMA-based Comparison of the Performances in Retrieving Impervious Surface Between Landsat ETM+ and EO-1 ALI[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(9): 1 068-1 072(唐菲,徐涵秋. 不同传感器线性光谱分解反演不透水面的对比——以 Landsat ETM+ 和 EO-1 ALI 为例[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(9): 1 068-1 072)
- [4] Qiao K, Zhu W, Hu D, et al. Examining the Distribution and Dynamics of Impervious Surface in Different Function Zones in Beijing[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(5): 669-684
- [5] Dong Jinwei, Kuang Wenhui, Liu Jiyuan. Continuous Land Cover Change Monitoring in the Remote Sensing Big Data Era[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2018, 48(2): 259-260(董金玮,匡文慧,刘纪远. 遥感大数据支持下的全球土地覆盖连续动态监测[J]. 中国科学:地球科学, 2018, 48(2): 259-260)
- [6] Yang Yongke. Accuracy Assessment of Large Scale Land Cover Datasets[D]. Nanjing: Nanjing University, 2014(杨永可. 大尺度土地覆盖数据集遥感评价研究[D]. 南京:南京大学, 2014)
- [7] Wickham J, Stehman S V, Gass L, et al. Thematic Accuracy Assessment of the 2011 National Land Cover Database (NLCD) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 191: 328-341
- [8] Chen Jun, Chen Jin, Gong Peng, et al. Higher Resolution Global Land Cover Mapping [J]. *Geomatics World*, 2011(2): 12-14(陈军,陈晋,宫鹏,等. 全球地表覆盖高分辨率遥感制图[J]. 地理信息世界, 2011(2): 12-14)
- [9] Jamil A, Bayram B. Tree Species Extraction and Land Use/Cover Classification from High-Resolution Digital Orthophoto Maps[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, 11(1): 89-94
- [10] Yang Yongke, Xiao Pengfeng, Feng Xuezhi, et al. Comparison and Assessment of Large Scale Land Cover Datasets in China and Adjacent Regions[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2014, 18(2): 453-475(杨永可,肖鹏峰,冯学智,等. 大尺度土地覆盖数据集在中国及周边区域的精度评价[J]. 遥感学报, 2014, 18(2): 453-475)
- [11] Chen Hong, Tao Chao, Zou Zhengrong, et al. Automatic Urban Area Extraction Using a Gabor Filter and High-Resolution Remote Sensing Imagery[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(9): 1 063-1 067(陈洪,陶超,邹峥嵘,等. 一种新的高分辨率遥感影像城区提取方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(9): 1 063-1 067)
- [12] Luo Hui, Wang Le, Wu Chen, et al. An Improved Method for Impervious Surface Mapping Incorporating LiDAR Data and High-Resolution Imagery at Different Acquisition Times [J]. *Remote Sensing*, 2018, DOI: 10. 3390/rs10091349
- [13] Wang Chunyan, Liu Jiabin, Xu Aigong, et al. A New Method of Fuzzy Supervised Classification of High Resolution Remote Sensing Image[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(6): 922-929(王春艳,刘佳新,徐爱功,等. 一种新的高分辨率遥感影像模糊监督分类方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(6): 922-929)
- [14] 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
- [15] Liu J, Li P, Wang X. A New Segmentation Method for very High Resolution Imagery Using Spectral and Morphological Information [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 101: 145-162
- [16] Pontius J, Hanavan R P, Hallett R A, et al. High-Spatial Resolution Spectral Unmixing for Mapping Ash Species Across a Complex Urban Environment [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 199: 360-369
- [17] Xu Hanqiu. 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)
- [18] Zhao W, Du S, Wang Q, et al. Contextually Guided Very-High-Resolution Imagery Classification with Semantic Segments [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 132: 48-60
- [19] Huang X, Wen D, Li J, et al. Multi-level Monitoring of Subtle Urban Changes for the Megacities of China Using High-Resolution Multi-view Satellite Imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 196: 56-75
- [20] Li Deren, Luo Hui, Shao Zhenfeng. Application and Prospect of Remote Sensing Technology in Impervious Surface Extraction [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(5): 569-577(李德仁, 罗晖, 邵振峰. 遥感技术在不透水面提取中的应用与展望[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2016, 41(5): 569-577)

Mapping Impervious Surface with 2 m Using Multi-source High Resolution Remote Sensing Images

SHAO Zhenfeng¹ ZHANG Yuan¹ HUANG Xin² ZHU Xiuli³ WU Liang⁴ WAN Bo⁴

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

2 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China

3 The National Geomatics Center of China, Beijing 100830, China

4 Faculty of Information Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

Abstract: Impervious rate is an important indicator to evaluate the urban ecological environment. Currently, there is only 1 km and 30 m resolution of impervious surface thematic information in the global scope, which cannot meet the needs of urban scale hydrological modeling, sponge city planning and construction. In this paper, an impervious surface extraction model incorporated spectral and texture information is proposed, and a new method based on deep learning is implemented to estimate impervious surface information. In addition the software for extracting and monitoring of impervious surface is also developed. Based on multi-source high spatial resolution imagery, impervious surface map with 2 m spatial resolution in mainland China including 31 provinces (municipalities, autonomous regions) is accomplished, just supports the high resolution data to research and monitor sponge and ecological cities.

Key words: land cover datasets; impervious surface extraction model; deep learning; high spatial resolution imagery

First author: SHAO Zhenfeng, professor. He is concentrated on the research and education in spatial information science and technology represented by urban remote sensing, etc. E-mail: shaozhenfeng@whu.edu.cn

Foundation support: The National Key R & D Plan on Strategic International Scientific and Technological Innovation Cooperation Special Project, No. 2016YFE0202300; Wuhan Chenguang Project, No. 2016070204010114; Guangzhou Science and Technology Project, No. 201604020070; Special Task of Technical Innovation in Hubei Province, No. 2016AAA018; the National Natural Science Foundation of China, Nos. 61671332, 41771452, 41771454.