

不透水表面遥感监测及其应用研究进展

刘珍环^{1,2}, 王仰麟², 彭 建²

(1. 北京大学深圳研究生院城市规划与设计学院, 城市人居环境科学与技术重点实验室, 深圳 518055;

2. 北京大学城市与环境学院, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

摘 要:不透水表面是城市中一种人工地表特征, 隔离地表水下渗到土壤, 割断了城市地表与地下水文联系, 主要由城市中的道路、停车场、广场及屋顶等建筑物组成。不透水表面影响城市的地表径流、水文循环、水体质量、局部气候、生物多样性等生态环境要素, 是监测城市生态系统及环境变化的重要指标, 也是许多生态环境模型的主要输入参数。本文归纳了不透水表面提取技术及其对城市自然生态环境影响的研究进展。从遥感提取技术方面看, 亚像元分解等新的运算方法提取中尺度分辨率遥感影像的不透水表面, 将是未来遥感技术应用到城市自然资源环境研究的趋势。在数据源方面, 中分辨率(10~100m)与高分辨率(0.3~5m)遥感数据为不透水表面指数在大范围、多时段的获取提供了可靠基础。在不透水表面指数应用方面, 城市地表覆被监测与模拟可以为城市未来发展及规划管理提供基础。鉴于不透水表面决定了城市地区的地表水文循环、非点源污染、能量分布、植被变化及生物多样性等生态环境要素, 因此搭起深入理解城市景观格局与生态过程相互关系的桥梁, 是研究城市化的生态环境效应的最佳切入点。

关 键 词:不透水表面指数; 遥感提取技术; 环境指标; 流域规划与管理; 城市化

1 引言

城市化是 20 世纪以来最为显著的人类活动过程, 目前全球约 50%左右的人口居住在城市^[1]。改革开放以来, 中国城市迅速发展, 成为全球地表覆被变化最为快速的发展地区之一^[2]。城市地域是人类活动最为集中的区域, 快速城市化是 20 世纪以来地表覆被变化的重要原因, 随着全球化及信息化的发展, 这一过程必然会继续深入。中国城市化进程的快速推进, 产生了一系列城市生态环境问题, 引起公众、政府及科学家的关注, 并成为环境科学、生态学、地理学等学科领域关注的热点问题^[3]。随着城市化过程的推进, 城市中心区周边的土地不断转为建设用地, 并且伴随着建设用地面积的不断扩张, 不透水表面迅速增加, 而具有较高生态价值的植被、水源地等生态用地日益缩小破碎, 导致区域内的水土资源需求与供给之间产生矛盾。

城市化的显著特征之一是不透水地面不断增加, 各种不透水面是城市的基质景观, 主导城市景

观格局与过程, 是城市地表覆被的典型特征, 能用来监测城市地表覆被变化过程^[4]。不透水表面(Impervious Surface, 简称 IS)是城市中一种人工地表特征, 隔离地表水下渗到土壤, 割断了城市地表与地下水文联系, 主要由城市中的道路、停车场、广场及屋顶等建筑物组成。不透水表面是城市环境变化的主要因素之一^[5-6], 不透水表面指数(Impervious Surface Area Index, 简称 ISA)是指单位面积内不透水表面地表所占的面积比例, 不仅作为表示城市化程度的指标, 还可作为衡量环境质量的指标之一^[7-8]。

20 世纪 70 年代以来, 不透水表面被认为是城市地表的一项主要特征, 自然资源保护及规划等领域开始应用于解决一些城市环境问题, 但不透水表面的提取技术一直是制约该指标发展的主要因素。在 20 世纪 90 年代以前, 在流域管理中的不透水表面基本以建设用地比例代替, 但建设用地属于土地利用分类数据, 因而不透水表面在应用过程中往往只能获得一个固定区域的比例值, 而无法获得任意一个区域内部的不透水程度^[9], 更不能监测城市高

收稿日期: 2010-01; 修订日期: 2010-05.

基金项目: 国家自然科学基金项目(40635028, 40801066); 中国博士后科学基金项目(20070420001, 200801017)。

作者简介: 刘珍环(1982-), 男, 江西泰和人, 博士。主要从事景观生态与土地利用研究。

E-mail: zhenhuanliu@gmail.com.

通讯作者: 王仰麟. E-mail: ylwang@urban.pku.edu.cn.

强度土地利用导致的不透水表面扩展变化^[10]。1995年以后,随着遥感技术的迅速发展,不透水表面表面的研究也有了长足的进步,遥感技术迅速发展,多种遥感技术应用于不透水表面提取中,神经网络模拟、回归树分类、线性光谱分离等技术出现,提高了不透水表面解译精度^[11],并将不透水表面指数作为一项重要的环境指标广泛应用于研究城市环境、城市生态系统、城市规划及流域管理等方面^[9]。不透水表面影响城市的地表径流、水文循环、水体质量、局部气候、生物栖息地等,是监测城市生态系统及环境变化的重要指标,也是众多生态环境模型的主要输入参数^[6]。

将不透表面指数应用于城市生态环境监测、效应及机制分析中是当前研究的热点,其应用于地表覆被动态监测、城市水文模拟、非点源污染负荷估算、热环境效应、区域气候变化、城市扩展监测及城市生态系统评价等多个方面^[12]。因此,研究城市不透水表面对评价城市生态系统状况、改善城市生态环境质量方面具有重要意义。

2 不透水表面遥感监测

2.1 ISA 的早期遥感方法

从 1970–1990 年,不透水表面提取技术较为简单,主要从地面测量及遥感反演两方面获取。应用 GPS 定位的野外调查,可以获得较为精准的数据;高分辨率(0.3~5 m)的航片影像也常用于不透水的制图;这两种方法虽然原理简单直观,但费时费力,数据获取难,幅度小而且应用范围受限^[13]。Brabec 等^[9]总结了这一时段内用航片提取不透水表面的 4 类计算方法:①应用求面积方法,计算航片里的不透水面面积,获得的是某区域内不透水表面的简单比例关系值;②应用格子法,将航片应用等积法破分为若干个格子,通过计数不透水面的格子数,计算面积及比例;③运用影像分类技术,将航片应用影像分类技术如非监督分类,简单分为两类,不透水及透水,计算面积及比例;④替代法,应用某一区域内的城市化程度近似等于不透水表面所占比例。这些方法都是手工解译航片,很难有效地推广到更宽的幅度上应用。

不透水表面提取技术随遥感数据源的多元化及遥感技术的进步而发展,不同尺度上的遥感数据源为不透水表面在多种尺度上应用提供了基础。伴

随多源遥感数据的出现,遥感技术迅速发展,影像分类 (Image Classification)、亚像元分类 (Sub Pixel Classification)、多元回归技术 (Multiple Regression)、人工神经网络 (ANN) 分类及回归树运算 (CART) 等方法应用于实践^[8]。Slonecker 等^[13]将上述遥感估算不透水表面的方法归纳为 3 种类型,即:解译分类方法、光谱分析方法与模型模拟方法。

20 世纪 80 年代后期至 90 年代初期,中分辨影像(10~100 m)分类技术,包括监督分类和非监督分类应用于土地利用/覆被分类中,不透水表面作为土地利用/覆被的一种类型受到关注^[14–15],但该方法过于依赖土地利用/覆被分类及影像空间分辨率,精度受限,而且城市地区的混合像元运用分类方法很难辨别,因此分类结果很少应用于实际估算中^[9]。随着遥感技术的快速发展,相关学者开始探索自动计算机解译航片及高分辨率影像,能够大范围的获得空间数据,例如 Quick Bird 及 IKONOS,应用解译高分辨率影像提高不透水面的分类精度。高分辨率的影像分类能够有效地避免中分辨率遥感影像面临的混合像元问题,但同物异谱及阴影是限制其分类准确性的关键问题,尽管如此,这类影像的分类技术必将成为不透水表面的主要提取技术之一^[16]。

2.2 ISA 的最新遥感技术

1995 年至今,亚像元分解分类技术是计算不透水表面指数的主要方法。Ridd^[16]通过分析城市地区的地表覆被组成,提出城市生态系统的地表属性框架模型,并构建了城市地表覆被的 V–I–S 模型,认为城市地表覆被除水体外,由植被、不透水表面、土壤 3 种基本组分组成。但限于遥感技术 Ridd 只是提出了概念框架,并没有直接应用中分辨率影像估算不透表面,而是应用高分辨率航片与 Landsat TM 影像土地利用/覆被分类结果比较的方法估算不透水表面分布^[17]。Ward 等^[18]成功地将 V–I–S 模型应用于澳大利亚的城市环境研究中,而 Phinn 等^[19]在此基础上运用约束光谱分离方法成功地估算了不透水表面的分布状况。随着光谱分离技术(SMA)的成熟,V–I–S 模型开始广泛应用于城市环境的研究中^[18,20–22]。Wu^[17]在综合上述方法的基础上,运用线性光谱分离模型(LSMA)以美国的大都市区 Columbus, OH 地区为研究区,探索基于 V–I–S 模型的城市不透水表面覆盖制图与评价,将城市地表覆被的混合像元假设为植被、不透水面(高反射率地表、低反射率地表)、土壤的 4 种地物光谱特征的组合物,成功地将线形

光谱分离技术与 V-I-S 模型结合,并估算了 Columbus 地区的亚像元级别的不透水表面比例的空间分布,获得了可信的估算精度,成为目前大多数线性光谱分离估算城市不透水表面的典范方法。与这类方法对应的是中分率影像(10~100 m)开始应用于不透水表面提取中,线性光谱分离技术(LSMA)致力于解决混合像元的问题,常用于自然环境的混合像元分离^[23-25],许多学者深入探讨了端元选择、精度检验^[26-28]等方面内容,完善了中分辨率的影像的线性光谱分离技术,其不透水表面提取技术流程包括以下几步:图像裁切、几何及辐射校正、最小噪声分离变换(MNF)、纯像元处理(PPI)、终端单元的收集、线性光谱分离、结果的检验与校正等^[29]。亚像元分解技术中另一种较为常用的方法是多元回归法及回归树方法。这类方法需要高分辨率的航片或卫片选择典型样区,运用监督分类或者非监督分类获取二元样区值,计算中分辨率数据像元大小网格内不透水面的比例;再运用回归方法建立不透水面指数与中分辨率影像的波段间回归关系^[30-33],通过运算回归关系模型,计算中分辨率影像的不透水表面指数。

越来越多的新遥感技术应用于提取不透水指数。徐涵秋^[34]应用多光谱内不透水表面的最强热辐射波段及最弱发射波段的关系,构建归一化差值不透水表面指数(NDISI),提取了福州市的不透水表面指数。Hu 等^[35]应用 SOM 及 MLP 神经网络方法估算中尺度影像的不透水表面。而 Bauer 等^[36]及 Gillies 等^[37]发现城市中不透水表面与植被盖度高度负相关,应用缨帽变换的绿色光波段(Tasseled Cap Greenness)或是归一化植被指数(NDVI)计算的植被盖度,进而提取不透水表面指数。

遥感技术发展极大促进了不透水表面研究。从近年遥感数据与方法来看,多源数据的融合、多种技术方法的运用是当前的主流趋势^[38]。多源数据包括高分辨率、中分辨率和低分辨率影像。其中,高分辨率(0.3~5 m)的影像数据有航片(Aerial Imagery)、DOQQs、QuickBird、IKONOS、SPOT 等;中分辨率(10~100 m)的影像数据有 Landsat MSS/TM/ETM+、Terra's ASTER、SPOT 等;低分辨率(0.25~4 km)的影像有 MODIS、NOAA/HAVRR、DMSP、SPOT 等;雷达影像数据如 LiDAR、SAR 等;高光谱数据(Hyperspectral)^[39]等遥感影像为不透水表面研究提供了坚实的基础。其中,中分辨率影像与高分辨率影像结合提取不透水表面是目前数据源融合的主要方法,

而在大尺度上,结合矢量数据的遥感方法也拓展了遥感提取不透水表面的幅度,例如应用建筑密度调查数据、美国国家土地利用/覆被分类数据(NLSD)、GPS 野外调查、土地利用数据等矢量数据结合低分辨率遥感数据估算不透水面的分布特征^[40-41]。从技术方法上看,在高分辨率影像提取技术上,快速处理高分辨率航片、卫片的技术、三维城市模型提取等技术^[42-43];结合高分辨率与中分辨率影像的技术的亚像元分解、神经网络(ANN)、多元回归、自组织制图(SOM)^[35]、分形^[44]、模糊数学、波段比值法^[34]等技术,为不透水表面指数提取提供了多元方法。

3 基于 ISA 的城市地表覆被动态监测

3.1 ISA 应用于城市地表覆被动态分析

土地覆被变化以渐变性变化为主,因此监测城市地表覆被内部在组分上的变化差异,要比监测类型间转换的意义更大。不透水表面扩展是城市地表覆被变化的主要现象,是以人类主导的地表变化的结果。不透水表面动态变化过程代表了城市地表覆被变化,因而监测城市不透水表面的可以扩展为监测城市地表的动态过程^[45-46]。目前监测城市地表变化较多运用土地利用/覆被分类体系,遥感数据是主要数据源,比较不同时段内土地覆被变化的数量及动态度,但这类研究受到遥感数据精度的限制,无法解决像元的混合地表覆被组合现象,而基于亚像元分解的不透水表面为混合地表覆被提供了更好的途径,在中尺度精度像元上提供了比刚性分类更为准确的变化结果^[30]。Bauer 等^[36]应用 Landsat TM 数据研究了 Twin 大都市区 1986~2000 年间的不透水表面变化,发现整个都市区不透水表面的数量增加了 8.8%~14.1%。Jantz 等^[47]以美国 Chesapeake 湾流域为案例区,应用不透水表面指数评估了该流域的自然资源用地的流失状况,以不透水指数的 20% 为变化阈值,分析了 1990~2000 年间城市快速发展带来的影响。Lu 等^[26]鉴于不透表面应用于城市土地利用分类中的效果还未得到充分认识,尝试将线性光谱分离后的不透水表面盖度运用于城市土地利用分类中,获得了较为满意的精度。这些研究表明不透水表面指数在研究城市地区的资源环境、地表覆被变化的优势,能够更有效的辨别变化的程度及空间分布。

但变化阈值一直是不透水表面指数应用于监测城市地区动态变化的难题之一^[48],例如,在 Jantz

等^[47]的研究中不透水的变化阈值是根据经验观察判定的刚性变化值。目前有相关研究应用指数分级方法,将不透表面指数按照指数的高低分为多个等级进而分析城市内不同等级的不透水表面分布及景观格局特征。肖荣波等^[50]以北京市区为研究区,应用多元回归分析提取了不透水表面盖度,并应用分级方法将不透水指数按照比例分为高密度城市用地 ($ISA>60\%$)、中等建设密度用地 ($40\%<ISA\leq 60\%$)、低密度城市用地 ($10\%<ISA\leq 40\%$)以及低于10%的自然地表,并计算其空间分布格局。类似的分级研究还有李伟峰等^[49]、Dougherty 等^[14]、Relly 等^[50]、Xian 等^[33],只是分级的阈值标准不统一且采用经验判定的刚性值作为分类依据,但这种分类应用于监测时常常不能辨别出变化与无变化的明显界限,降低了监测结果的有效性。在认识到阈值的重要性后,开始探索基于软性分级的变化监测方法。Rashed^[48,51]应用模糊数学方法确定软性变化值区间,分析了埃及开罗地区的不透水指数的时空动态特征,取得了良好的效果。Clapham^[52]探讨了应用变化向量分析方法 (Change Vector Analysis, CVA),选择线形光谱分离的不透水指数与植被盖度指数作为变化向量,构建了城市化指数,分析了流域尺度内像元的变化结果。这些研究提高了连续性不透水表面指数、在变化监测方面的应用,但结果的有效性还需进一步检验,因此解决好变化阈值将会推动不透水表面在城市地表覆被监测方面的应用。

3.2 基于 ISA 的城市地表覆被模拟与预测

此外,不透水表面指数在模拟与预测城市扩展方面亦有良好的应用前景。Relly 等^[50]应用一个全新的统计关系模型,预测了美国新泽西州大都市区的不透水表面增长趋势,为流域管理及水质模型提供了远景基础。Davis 等^[53]以不透水表面指数作为主要的变化指数研究北美太平洋海岸地区的城市增长过程。Yuan 等^[54]对比了不透水表面指数与基于遥感分类的土地利用/覆被类型之间在变化监测及城市扩展预警上的优劣,认为不透水表面指数比类型数据更有价值,特别是在大面积区域内能够非常快速客观地评价城市增长。Xian^[32]应用 SLEUTH 模型估算了美国 Tampa 湾流域的不透水表面增长过程,认为不透水表面指数在模拟城市化过程及预测未来城市发展方面具有良好的效果。Conway^[55]以美国 Barnegat 湾及 Mullica 河流域为研究区,预测了不透水表面增长对流域水质的影响。

4 不透水表面的生态环境效应

城市化的生态环境效应是当前土地利用/覆被

变化的研究热点,城市地区地表覆被变化会影响生态环境的质量。不透水表面是决定城市地表水文循环、非点源污染、能量分布、植被变化及生物多样性的重要因素,不透水表面在理解城市景观格局与生态过程方面起着桥梁作用,是研究城市化的生态环境效应的最佳切入点。不透水表面的增加会导致城市地表径流的流量及强度加大,减少径流历时;不透水盖度高的流域地下水循环缓慢,基流减少,而暴雨径流增加,洪灾频率增加^[56],且和流域及与之相关的湖泊、水库及坑塘的水质密切相关,不透水盖度增加导致径流携带的非点源污染 (包括病菌、营养物质、有毒物质及沉积物等)增加,改变河流及河岸带的栖息地,降低水生生态系统多样性^[57]。不透水表面增加也会影响城市局地气候,通过改变地表能量收支,产生热岛效应,影响大气质量等城市气候问题^[13,57]。城市地区的植被盖度与不透水盖度密切负相关,不透水面增加必然降低植被盖度^[52,58]。在水文水质模拟中,不同的土地利用类型的不透水表面比例不同,对模拟结果有重大影响^[59]。

4.1 大气环境效应

城市不透水面状况能持续影响周边的大气,局地及区域气候变化,间接影响到气象,大气质量及辐射平衡^[60]。Xian^[61]以美国 Las Vegas 地区为研究区,运用相关分析研究了不透水表面比例与大气质量的关系,认为城市地表覆被影响了大气的质量分布,不透水表面与臭氧浓度 (O_3) 成负相关,而 1 km 栅格的 ISA 影响了可入肺颗粒物 ($PM_{2.5}$)、年均一氧化氮 (NO)、夜间一氧化氮 (NO) 含量的分布,2 km 栅格的 ISA 影响了 O_3 、日间 NO 及 NO_2 含量的聚集。城市不透水表面同样会影响城市的热环境,能量的吸收与释放取决于地表覆被状况,热环境是局部气候的重要表现之一。Yuan^[62]认为城市不透水表面的格局显著影响了热环境的分布。Weng 等^[63]以美国 Indianapolis 地区为例,研究不透表面格局与动态与城市热环境格局与动态之间的关系,认为不透水表面的空间分布及时间动态是影响热环境格局与变化的显著因素。Yang 等^[64]比较了不透水表面指数与 NDVI 指数在研究城市热环境效应方面的有效性方面,认为不透水指数比 NDVI 能更好的解释城市热环境的分布特征。Zhang 等^[65]的研究结果也有类似的结论。不透水表面与热环境指数的关系不受季节因素影响,在研究城市的大气环境质量、热岛效应

方面,不透水表面是最佳的指示指标^[66-67]。

4.2 水文水质效应

不透水表面覆被影响水文方面的变化包括缩短径流到达洪峰时间,增加地表径流量。不透水表面的增加会改变流域地表径流,在许多降雨径流模型中,不透水表面指数是重要的输入参数之一,是控制土壤持水量,径流量及洪峰流量的主要因素。当流域不透水面积为 10%~20%时,城市河流生态受到退化威胁^[7],不透水表面通过影响地表水文循环,降雨径流携带冲刷不透水面的污染物质进入水体,导致水质下降。Conway^[55]以新泽西州海岸带流域为研究区,选择 pH 及电导率为水质指标,分析了其与 ISA 之间的相互关系,认为这两者关系有强相关性,且 pH 及电导率对不透水面变化很敏感。Xian 等^[67]以 Tampa Bay 流域为研究区,选择了 BOD₅、TSS、TKN、NO₃+NO₂、TN、TDP、Pb、Zn 为非点源水质参数,评估了其污染载荷及其与 ISA 之间的关系,认为水质与城市土地覆被间存在非线性响应关系。

近几十年来,城市土地利用的水环境效应是水文学、生态学、地理学、土壤学及环境科学等学科的研究热点,出现了许多的水质模型。城市化导致的水环境化学变化主要表现为非点源污染^[68],美国已将城市化导致的非点源污染列为该国的第三大污染源^[69]。在环境影响研究中,ISA 能用于水质的非点源污染监测及污染防治规划应用中的时空动态模型^[70]。不透水表面是流域内水文水质模型的重要参数^[50],许多模型都开始关注 ISA 在地表径流及水质中的应用,增加城市子流域的模拟模块,如 L-LHI-A、SWAT、HSPF、PLOAD、SWMM 模型等^[71-72]。Shaw 等^[73]鉴于当前水质模型中多应用不透水指数与水质的经验关系估算非点源负荷,构建了基于流域尺度的不透水表面的物理侵蚀及转移过程水质模型;Pappas 等^[74]应用不透水表面模拟了不透水表面增加对径流及沉积物的影响;Bonta 等^[75]应用模型模拟讨论了不透水表面及其他因素对暴雨及水质的影响;上述研究标明,水文水质模型对不透水表面的比例及区位非常敏感^[76]。水质模拟模型需要设置许多参数,且很多参数本身具有很大的不确定性,对模拟的结果的不确定也有很大的影响^[77],但在城市地区,不透水表面指数(ISA)不失为一个最佳的地表覆被参数^[78]。

4.3 生物多样性效应

不透水表面是高度城市化流域的生物多样性退化的主要因素之一,直接影响流域内陆地生态系统的生物多样性,通过影响河流水文水质间接影响

河流生态系统的水生生物多样性。Kromroy 等^[79]首次以美国 Twin Cities 大都市区的橡树森林为例,研究城市化对橡树资源的流失及转化,认为不透水表面是导致橡树面积锐减主要原因。Gillies 等^[37]研究了美国亚特兰大地区的 Line Creek 流域的水生生物受到城市化的影响,认为蚌类种群的物种丧失及栖息地的退化与流域内不透水面扩展有显著关系。水生生物多样性是流域生物多样性的的重要组成部分,大型底栖无脊椎动物群落结构,生物完整性指数(IBM)、底栖动物完整性指数(B-IBM)、鱼类群落等指标是研究水生生态群落的结构及功能变化的一些重要指标。Alberti 等^[80]以美国 Puget 流域为研究区,分析了城市格局对水生生态系统的影响,认为不透水表面的格局与数量与 B-IBM 之间具有显著关系,说明不透水表面是影响城市化流域生物多样性变化的主要因素。许多研究也有类似的研究结论,河流水生生物多样性指标的变化与流域不透水表面变化存在显著的相关性^[9,81-83]。

此外,城市规划与流域管理中一个科学问题是人类作用的地表覆被变化对生态系统的影响,科学的控制城市不透水表面可以控制城市规划带来的负效应。不透水表面指数既能表征城市地表受人类活动的动态过程,又是影响诸多生态环境变化的因素之一,是规划管理最简单、可控的地表覆被指数,受到规划管理人员的关注^[9]。从关注流域水质角度,Arnold 及 Gibbons^[7]提出了基于保护水质的城市规划战略,认为一旦不透水表面的分布及机理明晰后,就可以通过消减不透水表面及其对水资源的影响方面入手,进行社区规划、区域规划及设计、土地利用管治等有利于流域水源保护的管理措施。岳文泽等^[84]以上海市中心城区为例通过对不透水的高低反射端元遥感研究分析了上海市中心旧城改造的格局、规模以及模式,为规划管理领域应用提供了很好的范例。Brabec^[85]从流域规划角度评论了不透水表面与水质的关系,认为不透水表面指数是一个简单、实用的流域规划与管理指标,但要將不透水表面指数成功应用于规划管理,还必需解决两个问题,一是不透水表面的计算精度问题,另一个就是不透水表面影响水质的阈值标准问题。未来,基于不透水表面的流域最佳管理措施及城市规划会是城市发展规划的有效补充。

5 研究展望

不透水表面遥感监测及其应用是当前城市生

态环境监测与评价的热点内容,以一种全新的视角将城市土地利用与城市生态环境变化结合。尽管近年来,随着遥感技术的迅速发展,不透水表面引起学术界及管理者的广泛关注,但其应用还有许多问题有待进一步深入研究与解决。其中,下述问题将是技术和应用两个层面上深化不透水表面的理论与实践意义的有效途径与重点方向:

(1) 鉴于目前城市生态环境研究,不透水表面的提取将以高分辨率数据与中分辨率数据融合,亚像元分解技术为主。航片及 GPS 数据获取不透水表面的费时费力,而中分辨率数据精度不够,通过遥感技术扬长避短,综合应用二者将会获得好效果。因此,以航片、GPS 调查、高分辨率影像为基础,通过选择样区,建立样区与中分辨多波段数据之间的回归关系,通过回归关系树(CART)、神经网络(ANN)等方法反演中分辨率影像数据,提取不透水表面指数;或者是以中分辨数据为基础,运用线形光谱分离,模糊数学等方法,进行亚像元分解获取不透水表面指数,再应用 GPS 调查、航片、高分辨率影像数据进行精度检验;这两类方法将是推进不透水表面指数广泛应用的主要遥感方法。

(2) 不透水表面指数作为一种新的城市土地利用/土地覆被指数,广受关注。在实际应用中,不透水表面与地表热环境、水环境、生物多样性降低、大气环境之间都有很强的相关性,但在机理阐释方面还处于起步阶段,需要加强不透水表面到导致的环境变化及生态系统变化的监测,揭示不透水表面变化导致的环境变化的浓度及梯度。通过宏观调整土地利用的不透水表面指数,进而优化城市的生态环境。在流域管理及城市规划方面,应用不透水表面作为一个间接的土地利用管理指标,结合最佳管理措施(BMPs)可以有效的控制城市扩展导致的负效应。但目前国内,对于不透水表面指数的应用尚处于起步阶段,深化应用不透水表面指数将会在城市流域综合管理,城市规划方面卓有成效。

本文从不透水表面指数的遥感计算及应用方面,总结其研究的最新进展。从遥感提取技术方面看,多元数据融合,多种数学运算法则是主流趋势,中分辨率(10~100 m)数据与高分辨率(0.3~5 m)数据的应用为不透水表面指数的大范围、多时段提供了可靠的基础,亚像元分解、神经网络、模糊数学等新的运算方法为中尺度分辨率的提取提高了精度。不透水表面指数应用方面,城市地表覆被监测与模拟

能为城市未来发展及规划管理提供基础,不透水表面决定了城市地表水文循环、非点源污染、能量分布、植被变化及生物多样性,在理解城市景观格局与生态过程方面起着桥梁作用,是研究城市化的生态环境效应的最佳切入点。不透水表面在研究城市土地利用/覆被变化及其生态环境效应方面有显著优势。同时,不透水表面还可将地理学的地表覆被时空动态过程与生态过程、环境变化过程有机的联系起来,将环境及生态监测推广的更为深入的像元尺度,将监测结果从孤立的监测点推广到区域或是流域等更大的空间尺度。

参考文献

[1] United Nations. World Urbanization Prospects: The 2005 Revision. Database. New York: Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2006.

[2] Sui D Z, Zeng H. Modeling the dynamics of landscape structure in Asia's emerging desakota regions: a case study in Shenzhen. *Landscape and Urban Planning*, 2001, 53(1-4): 37-52.

[3] Fu B, Lu Y, Chen L. Expanding the bridging capability of landscape ecology. *Landscape Ecology*, 2008, 23(4): 375-376.

[4] Weng Q. Remote Sensing of Impervious Surfaces. Taylor & Francis: London: CRC Press, 2008: 12-49.

[5] Espy W H, Morgan W C, Masch F D. A study of some effects of urbanization on storm runoff from a small watershed. Report 23. Austin: Texas Water Development Board, 1966: 7-9.

[6] Stankowski S J. Population density as an indirect indicator or urban and suburban land-surface modifications. U.S. Geological Survey Professional Paper 800-B. Washington, DC: U.S. Geological Survey, 1972: 25-40.

[7] Arnold C L, Gibbons C J. Impervious surface coverage: Emergence of a key environmental factor. *Journal of the American Planning Association*, 1996, 62(2): 243-258.

[8] Schueler T R. The importance of imperviousness. *Watershed Protection Techniques*, 1994, 1(3): 100-111.

[9] Brabec E, Schulte S, Richards P L. Impervious surfaces and water quality: A review of current literature and its implications for watershed planning. *Journal of planning literature*, 2002, 16(4): 499-514.

[10] Wissmar R C, Timm R K, Logsdon M G. Effects of changing forest and impervious land covers on discharge characteristics of watershed. *Environmental Management*, 2004, 34(1): 91-98.

- [11] Weng Q, Lu D. A sub-pixel analysis of urbanization effect on land surface temperature and its interplay with impervious surface and vegetation coverage in Indianapolis, United States. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2008, 10(1): 68–83.
- [12] Ridd M K. Exploring a V–I–S (Vegetation–Impervious Surface–Soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: Comparative anatomy for cities. *International Journal of Remote Sensing*, 1995, 16 (12): 2165–2185.
- [13] Slonecker E T, Jennings D, Garofalo D. Remote sensing of impervious surface: A review. *Remote Sensing Reviews*, 2001, 20(3): 227–255.
- [14] Yang L, Xian G, Klaver J M, et al. Urban land–cover change detection through sub-pixel imperviousness mapping using remotely sensed data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2003, 69(9): 1003–1010.
- [15] Dougherty M, Dymond R L, Goetz S J. et al. Evaluation of impervious surface estimates in a rapidly urbanizing watershed. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2004, 70(11): 1275–1284.
- [16] Dare P M. Shadow analysis in high-resolution satellite imagery of urban areas. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2005, 71(2): 169–177.
- [17] Wu C, Murray A T. Estimating impervious surface distribution by spectral mixture analysis. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84(4): 493–505.
- [18] Ward D, Phinn S R, Murray A T. Monitoring growth in rapidly urbanizing areas using remotely sensed data. *Professional Geographer*, 2000, 52(3): 371–386.
- [19] Phinn S, Stanford M, Scarth P, et al. Monitoring the composition and form of urban environments based on the vegetation–impervious surface–soil (VIS) model by sub-pixel analysis techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(20): 4131–4153.
- [20] Flanagan M. Subpixel impervious surface mapping, ASPRS 2001 Annual Convention, 2001.
- [21] Madhavan B B, Kubo S, Kurisaki N, et al. Appraising the anatomy and spatial growth of the Bangkok metropolitan area using a vegetation–impervious–soil model through remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22(5): 789–806.
- [22] Rashed T, Weeks J R, Gadalla M S. Revealing the anatomy of cities through spectral mixture analysis of multi-spectral satellite imagery: a case study of the greater Cairo region, Egypt. *Geocarto International*, 2001, 16(4): 5–15.
- [23] Adams J B, Sabol D E, Kapos V, et al. Classification of multiple images based on fractions of endmembers: application to land–cover change in the Brazilian Amazon. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 52(2): 137–154.
- [24] Roberts D A, Gardner M, Church R, et al. Mapping chaparral in the Santa Monica mountains using multiple end-member spectral mixture models. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 65(3): 267–279.
- [25] Setiawan H, Mathieu R, Thompson–Fawcett M. Assessing the applicability of the V–I–S model to map urban land use in the developing world: Case study of Yogyakarta, Indonesia. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2006, 30(4): 503–522.
- [26] Lu D, Weng Q. Use of impervious surface in urban land–use classification. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 102(1–2): 146–160.
- [27] 岳文泽, 徐建华, 武佳卫, 等. 基于线性光谱分析的城市旧城改造空间格局遥感研究: 以 1997–2000 年上海中心城区为例. *科学通报*, 2007, 51(8): 966–974.
- [28] 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. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(4): 1895–1908.
- [29] Weng Q, Lu D, Schubring J. Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(4): 467–483.
- [30] 肖荣波, 欧阳志云, 蔡运楠, 等. 基于亚像元估测的城市硬化地表景观格局分析. *生态学报*, 2007, 27 (8): 3189–3197.
- [31] Xiao R, Ouyang Z, Zheng H, et al. Spatial pattern of impervious surfaces and their impact on land surface temperature in Beijing, China. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19(2): 250–256.
- [32] Xian G, Crane M. Assessments of urban growth in the Tampa Bay watershed using remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 97(2): 203–215.
- [33] Xian G, Crane M. An analysis of urban thermal characteristics and associated land cover in Tampa Bay and Las Vegas using Landsat satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 104(2): 147–156.
- [34] 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. *生态学报*, 2009, 29(5): 2456–2462.
- [35] Hu X, Weng Q. Estimating impervious surfaces from medium spatial resolution imagery using the self–organizing map and multi–layer perceptron neural networks. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113: 2089–2102.
- [36] Bauer M E, Heinert N J, Doyle J K, et al. Impervious sur-

- face mapping and change monitoring using Landsat remote sensing. ASPRS annual conference proceedings, May 23–28, 2004, Denver, Colorado. Bethesda, MD: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2004.
- [37] Gillies R R, Box J B, Symanzik J, et al. Effects of urbanization on the aquatic fauna of the Line Creek watershed, Atlanta—a satellite perspective. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86(3): 411–422.
- [38] Lu D, Weng Q. Mapping urban impervious surfaces from medium and high spatial resolution multispectral imagery//Weng Q. *Remote Sensing of Impervious Surfaces*. London: CRC Press Taylor & Francis, 2008: 59–75.
- [39] Van der Linden S, Hostert P. The influence of urban structures on impervious surface maps from airborne hyperspectral data. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(11): 2298–2305.
- [40] 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. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(8): 1678–1690.
- [41] Theobald D M, Goetz S J, Norman J B, et al. Watersheds at Risk to Increased Impervious Surface Cover in the Conterminous United States. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2009, 14(4): 362–368.
- [42] Zhou G. Urban 3D Building Model from LiDAR Data and Digital Aerial Images//Weng Q. *Remote Sensing of Impervious Surfaces*. London: CRC Press Taylor & Francis, 2008: 251–268.
- [43] Gruen A. Building Extraction from Aerial Imagery//Weng Q. *Remote Sensing of Impervious Surfaces*. London: CRC Press Taylor & Francis, 2008: 269–296.
- [44] Quackenbush L J. Separating Types of Impervious Land Cover Using Fractals//Weng Q. *Remote Sensing of Impervious Surfaces*. London: CRC Press Taylor & Francis, 2008: 119–142.
- [45] Chabaeva A, Civco D L, Hurd J D. Assessment of Impervious Surface Estimation Techniques. *Journal of Hydrological Engineering*, 2009, 14(4): 377–387.
- [46] Wu C. Normalized spectral mixture analysis for monitoring urban composition using ETM+ imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 93(4): 480–492.
- [47] Jantz P, Goetz S, Jantz C. Urbanization and the Loss of Resource Lands in the Chesapeake Bay Watershed. *Environmental Management*, 2005, 36(6): 808–825.
- [48] Rashed T, Weeks J R, Stow D, et al. Measuring temporal compositions of urban morphology through spectral mixture analysis: Toward a soft approach to change analysis in crowded cities. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(4): 699–718.
- [49] 李伟峰, 欧阳志云, 陈求稳, 等. 基于遥感信息的北京硬化地表格局特征研究. *遥感学报*, 2008, 12(4): 603–612.
- [50] Relly J, Maggio P, Karp S. A model to predict impervious surface for regional and municipal land use planning purposes. *Environmental Impact Assessment Review*, 2004, 24(3): 363–382.
- [51] Rashed T. Remote sensing of within-class change in urban neighborhood structures. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2008, 32(5): 343–354.
- [52] Clapham W B. Quantitative classification as a tool to show change in an urbanizing watershed. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(22): 4923–4939.
- [53] Davis C, Schaub T. A transboundary study of urban sprawl in the Pacific Coast region of North America: The benefits of multiple measurement methods. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2005, 7(4): 268–283.
- [54] Yuan F, Sawaya K E, Loeffelholz B C, et al. Land cover mapping and change analysis in the Twin Cities Metropolitan Area with Landsat remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 98(2–3): 317–328.
- [55] Conway T M. Impervious surface as indicator of pH and specific conductance in the urbanizing coastal zone of New Jersey, USA. *Journal of Environmental Management*, 2007, 85(2): 308–316.
- [56] Brun S E, Band L E. Simulating runoff behavior in an urbanizing watershed. *Computers, Environment and Urban System*, 2000, 24(1): 2–5.
- [57] 谢苗苗, 王仰麟, 李贵才. 基于亚像元分解的不透水表面与植被盖度空间分异测度. *资源科学*, 2009, 31(2): 257–264.
- [58] Powell R L, Roberts D A, Dennison P E, et al. Sub-pixel mapping of urban land cover using multiple endmember spectral mixture analysis: Manaus, Brazil. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 106(2): 253–267.
- [59] Soil Conservation Service. Urban hydrology for small watersheds. SCS Technical Release No. 55. Washington D C: U.S. Department of Agriculture, 1975.
- [60] Kalnay E, Cai M. Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature*, 2003, 423: 528–531.
- [61] Xian G. Analysis of impacts of urban land use and land cover on air quality in the Las Vegas region using remote sensing information and ground observations. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, 28(24): 5427–5445.
- [62] 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. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 106 (3): 375–386.
- [63] Weng Q, Liu H, Lu D. Assessing the effects of land use and land cover patterns on thermal conditions using landscape metrics in city of Indianapolis, United States. *Urban Ecosystem*, 2007, 10(2): 203–219.
- [64] Yang X, Liu Z. Use of satellite– derived landscape imperviousness index to characterize urban spatial growth. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2005, 29(5): 524–540.
- [65] Zhang Y S, Odeh I O A, Han C F. Bi–temporal characterization of land surface temperature in relation to impervious surface area, NDVI and NDBI, using a sub–pixel image analysis. *International Journal of Applied Observation and Geoinformation*, 2009, 11(4): 256–264.
- [66] 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[D]. 上海: 华东师范大学, 2005: 35–70.
- [67] Xian G, Crane M, Su J. An analysis of urban development and its environmental impact on the Tampa Bay watershed. *Journal of Environmental Management*, 2007, 85(4): 965–976.
- [68] 郭旭东, 陈利顶, 傅伯杰. 土地利用/土地覆被变化对区域生态环境的影响. *环境科学进展*, 1999, 7(6): 66–75.
- [69] USEPA. National Water Quality Inventory, Report to Congress Executive Summary. Washington DC: USEPA, 1995.
- [70] Jensen J R, Schill S R. Environmental resources evaluation of the inland coastal region of the South Carolina lower Savannah Salkehatchie watershed. Final Report to NASA, Visiting Investigator Program, University of South Carolina Extension, 1996.
- [71] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2005. Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service. Temple, Texas, 2005.
- [72] Rossman L A. Storm water management model user’s manual version 5.0. USEPA, National risk management research laboratory office of research and development. Cincinnati, O H. EPA/600/R–05/040, 2008.
- [73] Shaw S B, Walter M T, Steenhuis T S. A physical model of particulate wash–off from rough impervious surfaces. *Journal of Hydrology*, 2006, 327(3–4): 618–626.
- [74] Pappas E A, Smith D R, Huang C, et al. Impervious surface impacts to runoff and sediment discharge under laboratory rainfall simulation. *CATENA*, 2008, 72(1): 146–152.
- [75] Bonta J V, Glick R H. Impacts of impervious cover and other factors on storm–water quality in Austin, Tex. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2009, 14(4): 316–323.
- [76] Moglen G E. Hydrology and impervious areas. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2009, 14(4): 303–304.
- [77] 金卫斌, 李百炼. 流域尺度的景观–水质模型研究进展. *科技导报*, 2008, 26(7): 72–77.
- [78] Schueler T R, Fraley–Mc Neal L, Cappiella K. Is impervious cover still important? Review of recent research. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2009, 14(4): 309–315.
- [79] Kromroy K, Ward K, Castillo P, et al. Relationships between urbanization and the oak resource of the Minneapolis/St. Paul Metropolitan area from 1991 to 1998. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 80(4): 375–385.
- [80] Alberti M, Booth D, Hill K, et al. The impact of urban patterns on aquatic ecosystems: An empirical analysis in Puget lowland sub–basins. *Landscape and urban planning*, 2007, 80(4): 345–361.
- [81] Booth D B, Jackson C R. Urbanization of aquatic systems: Degradation thresholds, stormwater detection and the limits of mitigation. *Journal of the American Water Resources Association*, 1997, 33(5): 1077–1090.
- [82] Miltner R J. Urbanization influences on biotic integrity in the Cuyahoga River Basin. Paper presented at the 59th Midwest Fish and Wildlife Conference, Milwaukee, WI, 1997.
- [83] Horner R R, Booth D B, Azous A, et al. Watershed determinants of ecosystem functioning//Roesner L A. Effects of Watershed Development and Management on Aquatic Ecosystems. New York: American Society of Civil Engineers, 1997.
- [84] 岳文泽, 徐丽华, 徐建华, 等. 城市多光谱遥感像元分解技术改进研究. *浙江大学学报: 工学版*, 2006, 40(4): 719–723.
- [85] Brabec E A. Imperviousness and land–use policy: Toward an effective approach to watershed planning. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2009, 14(4): 425–433.

Remote Sensing of Impervious Surface and Its Applications: A Review

LIU Zhenhuan^{1,2}, WANG Yanglin², PENG Jian²

- (1. Key Laboratory for Urban Habitat Environmental Science and Technology, School of Urban Planning and Design, Shenzhen Graduate School of Peking University, Shenzhen 518055;
2. Key Laboratory for Earth Surface Processes of Ministry of Education, and College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Impervious surface can be defined as any materials that prevent the infiltration of water into the soil. Principally, roads and rooftops in the urban are the most prevalent and easily identified types of impervious surfaces. Other types include sidewalks, patios, bedrock outcrops, and compacted soils in the urban areas. Impervious surface not only indicates urbanization, but also is a major contributor to the environmental impacts of urbanization. Impervious surface area (ISA) is the index of impervious surface landscape components, which uses the percentage in a pixel for representation. It is an index to monitor the urban ecological system and environmental change, and is an important indicator of the ecological and environmental model, which can affect urban hydrological cycle, surface runoff, water quality, local climate, and biological diversity. This paper reviews the development of remote sensing technology of impervious surface, and summarizes how it impacts urban ecosystem and urban environmental system. From the aspect of remote sensing technology, sub-pixel decomposition including spectral mixture analysis and regression analysis, and other new methods for interpreting image, will be the trend of the application of remote sensing research to urban natural resources and environmental studies in the future. From the aspect of remote sensing data source, the data of medium-resolution (10–100 m) image and high-resolution (0.3–5 m) image, which are used to estimate the index of impervious surface in multi-temporal and large-spatial area, can provide a reliable basis to monitor urban land use/cover change and environmental response. As an environmental indicator, impervious surface area (ISA) can be used to monitor urban land cover change and simulate future urban development, providing a basis for the decision making of urban planning and management. Referring to the fact that impervious surface has an important relation to the hydrological cycle, non-point source pollution, land surface temperature, vegetation variation and biological diversity, if we can understand the relationship between impervious surface area and the environmental or ecological indicators, we can better understand urban landscape pattern and ecological processes. Impervious surface area plays an important role in studying the eco-environmental effects of urbanization.

Key words: remote sensing of impervious surface; impervious surface area; environmental indicator; watershed planning and management; urbanization

本文引用格式:
刘珍环, 王仰麟, 彭建. 不透水表面遥感监测及其应用研究进展. 地理科学进展, 2010, 29(9): 1143–1152.