

DOI: 10.5846/stxb201912272813

张飞,邵媛,黄晖,朱帕尔·巴合提拜.近 20 年城市遥感研究现状及其发展趋势.生态学报,2021,41(8):3255-3276.

Zhang F, Shao Y, Huang H, Jupar Bahtebay. Review of urban remote sensing research in the last two decades. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(8): 3255-3276.

近 20 年城市遥感研究现状及其发展趋势

张 飞^{1,2,3,*}, 邵 媛⁴, 黄 晖⁴, 朱帕尔·巴合提拜^{1,2}

1 新疆大学资源与环境科学学院/智慧城市与环境建模自治区普通高校重点实验室, 乌鲁木齐 830046

2 新疆大学绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046

3 CSIRO, Land & Water, Canberra ACT 2601, Australia

4 新疆大学图书馆, 乌鲁木齐 830046

摘要:随着城市化进程的不断加速,城市遥感研究已成为地理学、生态学、城市规划学等学科领域主要发展方向之一。城市化使人口与经济增长的同时,也使得城市原有的生态环境状况发生改变,从而引起了一系列城市生态环境问题。城市遥感是一门多学科交叉研究领域,近年来已经取得了一系列显著的研究成果。对近年来城市遥感研究涉及的城市地表温度、边界扩张、不透水表面、景观格局以及生态安全 5 个方面的理论、研究方法、应用动态以及发展方向进行了较为详细的总结与探讨。主要得出如下结论:(1)数据源从单个遥感数据研究走向多源遥感数据融合发展,多源遥感数据尤其是结合高分辨率数据越来越多的被应用到城市研究的各个领域;(2)城市遥感的研究目标不断扩展、深化和聚焦;(3)城市遥感研究已开始从二维空间向三维空间拓展;(4)城市遥感涉及的研究对象之间相互作用,相互影响在深入解读城市遥感研究理论意义和潜在挑战的基础上,结合最新研究对本文所涉及的主题进行了补充和完善,为城市典型生态环境问题的解决提供新的思路;今后应按照城市形态与构成、城市关键要素、生态环境响应、生态环境评价以及城市扩展与环境预测的体系结构进行综合分析。

关键词:城市地表温度;城市扩张;城市不透水表面;城市景观格局;城市生态安全

Review of urban remote sensing research in the last two decades

ZHANG Fei^{1,2,3,*}, SHAO Yuan⁴, HUANG Hui⁴, JUPAR Bahtebay^{1,2}

1 College of Resources and Environmental Sciences, Xinjiang University/Key Laboratory of Smart City and Environmental Modeling of Higher Education Institute, Urumqi 830046, China

2 Key Laboratory of Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

3 CSIRO, Land & Water, Canberra ACT 2601, Australia

4 Xinjiang University Library, Urumqi 830046, China

Abstract: In recent decades, accelerated economic development and rapid urbanization of urban areas globally have emerged huge environmental challenges of the 21st century that require both new analytic approaches and new sources of data and information. The availability of satellite remote sensing data has increased significantly in the last two decades, and these data constitute a useful data source for mapping the composition of urban settings and analyzing changes over time. Most importantly, remote sensing can play a key role in providing information on urbanization to help science and policy making. Urban remote sensing is a significant field of remote sensing applications, which has become one of the important aspects in geography, ecology, urban planning and other disciplines. Urbanization not only changes the population and economy, but also changes the originally ecological environment of the city, which causes a series of urban ecological environment problems. Urban remote sensing has been used and applied by many fields in urban studies and is an

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(XDA20040400);新疆维吾尔自治区天山英才项目(40007001029)

收稿日期:2019-12-27; **网络出版日期:**2021-02-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangfei3s@163.com

interdisciplinary research field which has progressed and made great advancement in recent years. In the stage of the country's new type urbanization planning, ecological civilization and smart city construction, urban remote sensing faces new opportunities and challenges. Based on the researches of urban remote sensing in this paper, we reviewed the theory, methodology, and application of urban surface temperature, urban boundary expansion, urban impervious surfaces, urban landscape pattern, and urban ecological security. This paper discusses the dynamics and trends of these five aspects in the last two decades. The main conclusions are as follows: Firstly, the data sources have changed from single remote sensing data to multi-source remote sensing data. In particular, the combination of high-resolution data is increasingly used in various fields of urban research; Secondly, the research objectives of urban remote sensing continue to expand, deepen, and become more focused; Thirdly, urban remote sensing research has begun to expand from two-dimensional to three-dimensional spatial analysis; and Fourthly, the contexts involved in urban remote sensing interaction and affected each other. Based on an in-depth understanding of the theoretical significance and potential challenges of urban remote sensing research, the paper provides a comprehensive background for future studies in the area. The paper also provides some information and future research challenges in urban ecological environment problems. The future study of urban areas using remote sensing should focus more on the urban form and composition, key urban elements, ecological environment response, ecological environment assessment, and urban expansion and urban environmental prediction. This study provides the background information, trend, and challenges of the future study of urban remote sensing research. Challenges include greater demands, richer datum, more advanced methods, more comprehensive information, more elaborate expressions, and a wider range of goals.

Key Words: urban surface temperature; urban expansion; urban impervious surface; urban landscape pattern; urban ecological security

城市化包括人口城市化、经济城市化和土地城市化三大最显著的特征^[1]。在城市化水平快速发展状况下,以城市化为背景的城市生态环境问题一直是地理学研究的热点。城市化造成了大量农用地被侵占,环境恶化、资源危机等一系列“城市病”,严重影响人们的正常生活^[2-6]。面对日益严峻的生态环境问题,迫切需要国内外学者借助新技术、新手段、新方法深入开展城市化相关问题研究。

城市化在多源、多尺度、主动和被动遥感图像上,均表现出对资源生态环境系统的影响。事实上,尽管城市应用通常需要以最佳的地面分辨率获取数据,但许多宏观的地物特征可以使用低分辨率遥感影像获得(图1)^[7]。城市遥感应用的主要方向是空间城市化过程及其在这个过程中引发的自然变化和人文变化。在上述研究过程中,“3S”技术是集监测、管理和分析城市化进程及其生态环境响应最有效信息源和研究方法^[8-9]。国家新型城镇化规划(2014—2020)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、地理时空大数据分析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。现已进入大数据时代,利用“星—空—地”一体化遥感监测平台和 Google Earth Engine(GEE)云遥感数据处理平台,可为城市及城市群遥感的分析提供坚实的基础,为城市可持续健康发展提供有力支持。

通过文献检索,目前国内外对于城市遥感的研究,多集中在单一领域,对城市遥感诸多要素的综合性研究较少。很少将城市中遥感所涉及的问题进行统一阐述,因此,本文将总结国内外学者在城市地表温度、城市边界扩张、城市不透水表面、城市景观格局和城市生态安全5个方面的研究动态以及发展态势,较为完整的从理论、方法以及应用几个层面展开讨论,为城市遥感的深层次研究指明方向。

1 城市遥感研究的主题和主要进展

遥感技术已渗透到城市建设和研究的各个领域,在城市规划管理中具有重要的作用,为全面、有效和实时地了解城市的发展变化提供了强有力的技术支持(图2)。本文通过 CNKI 和 Web of Science 数据库共检索出

图1 城市区域数据融合方法(改自^[7])

Fig.1 Data fusion method in urban area

包含基于遥感技术的城市地表温度、城市边界扩张、城市不透水表面、城市景观格局和城市生态安全 5 个方面的 1501 篇中文文章和 3368 篇英文文章,通过文献梳理,根据年代发展筛选出国内外城市遥感部分研究主题和主要内容,如表 1 所示。

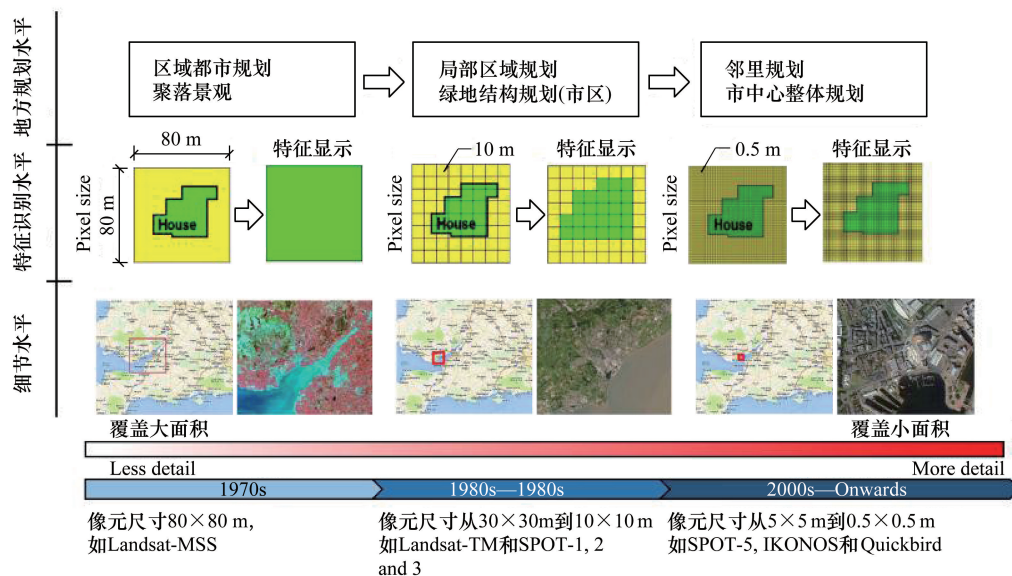
图2 不同卫星在城市细节、特征识别、地方规划上的比较(改自^[10])

Fig.2 A comparison of satellite generations in terms of detail, feature recognition and planning requirements

1.1 城市地表温度

地表温度(Land Surface Temperature, LST),即陆地表面的温度^[31]。地表温度(LST)是研究地表能量预算、陆地表面过程以及城市热岛中最重要的参数之一^[28,32]。通过中国知网数据库,按照主题为遥感*城市*(“地表温度”+“LST”+“热岛”+“TVDI”+“微气候”)共检索出 965 篇文献,通过 Web of Science 数据库,按照

主题为 Remote Sensing * Urban * (“Land Surface Temperature” OR “LST” OR “Heat Island” OR “TVDI” OR “Microclimate”)共检索出 798 篇文献。图 3 揭示了 1999—2019 年间的中英文发文数量趋势,图 4 揭示了我国不同的研究机构及不同国家/地区发文现状(图 4)。

表 1 国内外城市遥感部分研究主题和主要研究内容

Table 1 Some research topics and main research contents of urban remote sensing in the domestic and oversea			
年份 Year	研究者 Authors	研究主题 Research theme	研究内容 Research contents
1994	赵俊华 ^[11]	城市热岛遥感研究	探讨了城市热岛效应的形成因子,分析了对城市居民生产生活和健康带来有利和不利的因素
1999	江涛 ^[12]	城市扩张动态变化的遥感研究	利用多时相 TM 图像,提取城市扩展信息
2001	Ji 等 ^[13]	利用遥感监测中国城市扩张	使用 Landsat TM 图像来检查城市扩张的范围和速度
2002	陈云浩 ^[14]	城市空间热环境研究	借鉴景观生态学的研究方法,首次提出热力景观概念,以景观的观点来研究城市热环境的空间格局
2004	周伟等 ^[15]	宁波市城市热岛遥感分析	从 Landsat TM 影像提取宁波市城区植被指数特征和城区热场分布,应用 Quickbird 数据完成城区土地利用类型解释,利用空间叠加分析和剖面分析研究了宁波市土地利用格局对热岛效应的影响
2005	胡华浪 ^[16]	城市热岛遥感研究	系统总结了应用遥感技术开展城市热岛研究的数据、方法与成果,并对未来城市热岛遥感研究的方向进行了展望
2007	徐丽华等 ^[17]	上海市城市土地利用景观的空间尺度效应	应用 2002 年上海市 5m 分辨率的 SPOT 数据和上海城市土地利用景观类型,定量分析了几种常用景观格局指数随尺度的变化
	周纪 ^[18]	北京城市不透水层覆盖度遥感估算	以同种纯净地物光谱曲线形状具有相似性为出发点,提出了一种端元优化选取方法,在此基础上计算了北京城市地表不透水层覆盖度
2009	袁超等 ^[19]	城市不透水表面遥感估算	利用植被、土壤、高/低反照率光谱端点的线性组合来表征城市土地利用/覆盖类型,从而估算了北京城区不透水面分布情况
2011	占文凤 ^[20]	城市热岛模拟	基于 MODIS 数据,利用 SVM 算法,对北京市热岛曲面进行模拟,之后,利用城市热岛容量模型,分析北京城市热岛强度与乡村背景温度的关系,刻画热岛的年内和年际变化特征
2012	林卉等 ^[21]	基于遥感影像的城市景观格局变化分析	采用徐州市主城区四期 TM 影像和其他相关非遥感数据,通过处理得到主城区景观空间结构信息和景观格局的各种指数、景观类型转移矩阵和景观演变动态度来对主城区景观结构在时空尺度的演化进行定量评价
2014	任鹏飞等 ^[22]	基于遥感数据的城市空间扩张研究	利用 RULEGEN 的决策树分类方法从 Landsat ETM+遥感数据中提取昆明市建设用地信息,通过皮尔逊卡方检验和香农熵模型计算城市空间扩张的自由度和蔓延度
2017	Singh 等 ^[23]	土地利用变化和城市化对城市热岛的影响	采用单窗算法、土地利用变化图、植被覆盖度、归一化差分指数(NDVI)、城市热场方差分析等方法对城市地表温度(LST)进行了估算,并对城市进行了生态评价
2018	Zhang 等 ^[24]	基于遥感的中国城市扩张研究	从城市区域界定,遥感图像在城市扩展中的应用,城市扩展的监测方法以及城市扩展的应用等方面对基于遥感技术的中国城市扩展的研究进展进行了总结和分析,讨论并提出了中国城市扩张的现有问题和未来发展方向
2019	Fan 等 ^[25]	基于遥感和开放街道感兴趣点(POI)数据的城市不透水面研究	在充分利用遥感数据和社会数据优势的基础上,提出了一种新颖的方法用于不透水表面估计,使其精度更高
	Gebremedhin 等 ^[26]	利用 GIS 和遥感技术探测城市土地利用土地覆盖动态	基于 Landsat 数据,应用监督分类的最大似然算法,生成研究区域的土地利用和土地覆盖图。探测了过去 30 年的城市扩张,并预测了 2025 年的城市扩张趋势
	Bilbisi ^[27]	基于遥感影像的城市扩张空间监测	使用 Landsat 图像评估,监测和绘制过去三十年(从 1987—2017 年)安曼的城市扩展,以便为城市建模提供所需的输入数据
	Shatnawi 等 ^[28]	基于遥感技术和神经网络模型的城市地表温度研究	使用遥感技术和人工神经网络模型来绘制和模拟 2000—2016 年间约旦北部城市 LST 的时空变化
2020	Prakash 等 ^[29]	基于遥感的城市地表温度研究	利用 Aqua MODIS 产品全面评估了 2003—2017 年印度各地的 LST 变化
	Alexander ^[30]	基于归一化差异光谱指数和城市土地覆盖的地表温度研究	主要是了解高纬度城市及其周边地区 LST 的空间格局,并从光谱指数和土地覆盖方面确定 LST 的变化

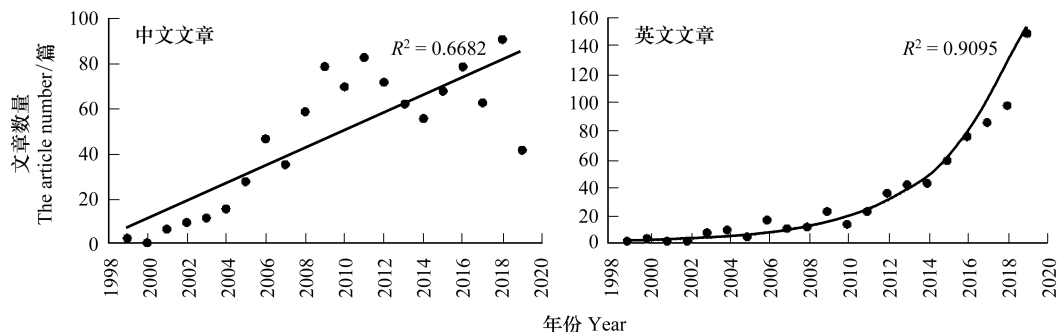


图 3 近 20 年中英文发表文章数量趋势图

Fig.3 Trend chart of publishing article number in Chinese and English about twenty years

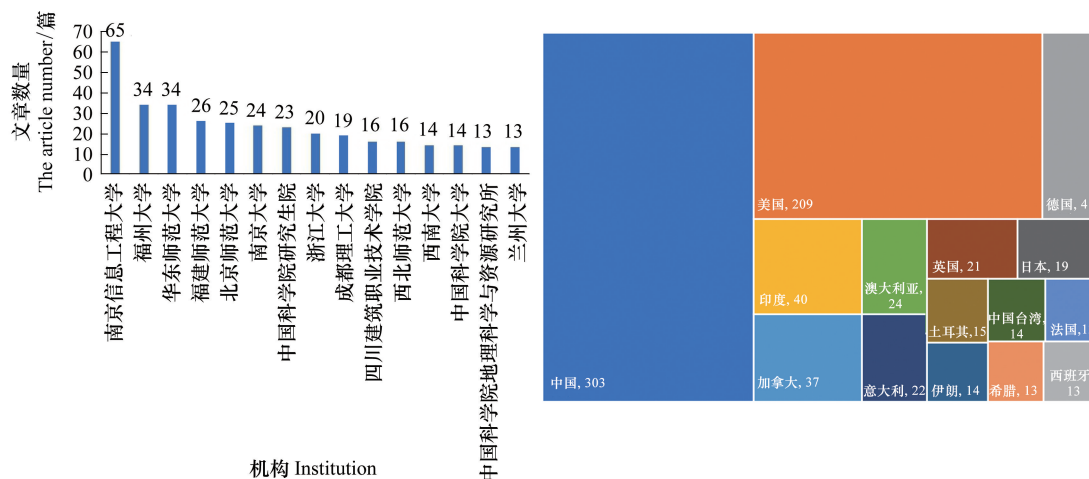


图 4 近 20 年国内不同机构及不同国家/地区发表文章现状

Fig.4 The status of publishing article in different domestic institution and different countries/regions about twenty years

从图 3 可以看出,关于城市地表温度遥感研究的中英文文章数量虽然在个别年份有回落现象,但是整体呈现逐年迅速增长的趋势。从图 4 中可以看出南京信息工程大学在城市热环境研究中发表中文文章数量最多,为 65 篇。发文数量排名前三的高校都来自华东地区,该地区是我国城市化水平最高、气象观测站点分布最为密集的区域,非常有利于从事城市地表温度研究。从不同国家/地区发表文章数量来看,中国发表文章数量最多,达到了 303 篇,其次为美国,为 209 篇,德国为 41 篇。

目前,地表温度的研究数据主要利用 ASTER 和 Landsat TM/ETM+等卫星数据以及 MODIS 地表温度产品数据反演 LST^[33]。针对地表温度方法研究,黄妙芬等^[34]、裴亚平等^[35]采用 TM、ETM+和 TIRS 数据进行了 LST 算法的精度对比分析,均发现单窗算法与实测数据的一致性较好。严安等^[36]、周梅等^[37]也利用单窗算法反演了各自研究区夏季地表温度,发现效果理想。而 Yu 等^[38]利用实测数据,比较了多种算法,发现反演精度为辐射传输方程法>分裂窗算法>普适性单通道算法。之后,孟翔晨等^[39]利用 ASTER 数据,Landsat 8 地表反射率及实测地表温度数据分析了验证点的空间异质性,发现普适性单通道算法估计的地表温度(LST)总体精度较高,可更好的用于城市热岛效应(UHI)、地表蒸散发估算等研究。

改革开放以来,中国的城镇化进程显著加快。根据《国家新型城镇化发展规划》,2020 年中国的城镇化率将达到 60%。快速城镇化带来日益严峻的生态环境问题,尤其产生城市热岛效应^[40-41]。城市热岛效应(UHI)是由于人类的活动,大规模改造局部下垫面条件而影响了局部区域的气候环境。Dihkan 等^[42]对土耳

其不同气候区域的七个城市进行城市热岛效应研究,得出热岛效应是城市化地区的主要环境问题。Dwivedi 等^[43]通过 Landsat 遥感数据,研究了印度孟买都市区微观层面的城市热岛现象和室外热环境,研究表明可以通过控制区域绿化的百分比来减轻城市高温热场的影响。Shafizadeh-Moghadam 等^[44]探索了城市 LST 与环境 和人为因素的关系,并利用随机森林(Random Forests, RF),增强回归树(Boosting Regression Tree, BRT),广 义加性模型(Generalized Additive Model, GAM)和支持向量机(Support Vector Machines, SVM)模型评价城市 LST 的模拟精度。国内学者徐涵秋^[45]通过反演福州市地表温度,分析了城市热岛形成的原因。方刚^[46]采用 Landsat 8 影像,分析了苏州城市热岛效应,初步探讨了城市热岛效应与建筑用地,水体,裸土和植被四个不同 指标之间的定量关系。黎良财等^[47]运用 Landsat 8 遥感影像,引入热岛强度(Heat Island Intensity, HII)因子, 并与 LST 反演结果相结合,分析了柳州市城市热岛效应,结果表明该研究区热岛效应的轮廓与城市建成区轮 廓吻合。上述研究者都是对城市的热岛效应进行了研究,然而,还有少部分学者^[48-52]对城市冷岛(Urban Cool Island)效应也进行了深入研究,其中 Rasul 等^[53]指出未来的城市研究方向还是应该多集中于城市热岛群的 研究。

随着时间的推移,虽然一些经典的算法依然在使用,但是这些方法都在不同程度上进行了融合和改进 (表 2)。总之,随着反演算法及遥感技术的发展,城市地表温度研究还将继续在研究方法以及实际应用中进 行探索,大多数 LST 研究的分辨率都较低,虽然这些研究可以为热岛带来的环境问题治理提供一定依 据,但是若要制定小范围区域的政策仍需要高空间分辨率影像的支持。另外,LST 动态变化是确定城市发展 和气候变化对居住场所温度状况影响的一个良好指标。季节及日变化 LST 会严重影响人们在城市的日常生 活。进一步的研究可以考虑对多个热卫星数据进行时间序列分析,以验证 LST 值的 增长趋势和气候变化以及灯光指数大小等潜在原因。

表 2 常用的 LST 反演算法
Table 2 LST inversion algorithm in common

年份 Year	研究者 Authors	运用算法/模型名称 Application of algorithm/models name
1975	McMillin 等 ^[54]	多通道算法
1990	Becker 等 ^[55]	分裂窗算法(劈窗算法)
2001	覃志豪等 ^[56]	单窗算法
2002	Dash 等 ^[57]	单通道算法,劈窗算法,多角度多通道算法
2004	覃志豪等 ^[58]	大气校正法,单窗算法和普适性单通道算法
2005	尹楠等 ^[59]	分裂窗算法(劈窗算法)
	毛克彪等 ^[60-61]	劈窗算法
	丁莉东等 ^[62]	劈窗算法
2006	丁凤和徐涵秋 ^[63]	单窗算法和单通道算法
	毛克彪等 ^[64]	多通道算法
2008	白洁等 ^[65]	辐射传输方程算法,单窗算法,普适性单通道算法
2009	Jiménez-Muñoz 等 ^[66]	普适性单通道算法
2013	Li 等 ^[67]	单通道算法,多通道算法,多角度算法
2014	Rozenstein 等 ^[68] 和 Jiménez-Muñoz 等 ^[69]	劈窗算法
2016	李召良等 ^[70]	单通道算法、多通道算法、多角度算法、多时相算法、高光谱反演算法
2018	Morrison 等 ^[71]	COSMO+DART+DSM 模型
2019	Weng 等 ^[72]	单通道算法
	Wang 等 ^[73]	劈窗算法
	Li 等 ^[74]	耦合 TRM+IBM 方法
	Fu 等 ^[75]	耦合 WRF/UCM 系统和随机森林(RF)回归技术
2020	Duan 等 ^[76]	基于 MODTRAN 的辐射传输模型

1.2 城市扩张

随着全球城市化的发展,城市边界扩张研究逐渐成为学术界关注的焦点^[77-78]。著名学者 He 等^[79]提出一种全卷积网络(Fully Convolutional Networks, FCN)方法,并运用该方法来检测 1992—2016 年全球城市扩张情况,研究得出全球城市土地面积从 $27.47 \times 10^4 \text{ km}^2$ 增加到 $62.11 \times 10^4 \text{ km}^2$,增加了 $34.64 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。作者所提出的 FCN 方法在有效检测全球城市扩张方面具有巨大潜力。通过中国知网数据库,按照主题为遥感 * (“城市边界扩张”+“城市扩展”+“城市形态”+“城市面积增长”+“城市动态变化监测”)共检索出 119 篇文献,通过 Web of Science 数据库,按照主题为 Remote Sensing * (“Urban Boundary Expansion”OR“Urban Expansion”OR“Urban Form”OR“Urban Area Expansion”OR“Urban Dynamic Change monitoring”)共检索出 872 篇文献。图 5 揭示了 1999—2019 年间的中英文发文数量趋势,图 6 揭示了我国不同的研究机构及不同国家/地区发文现状。

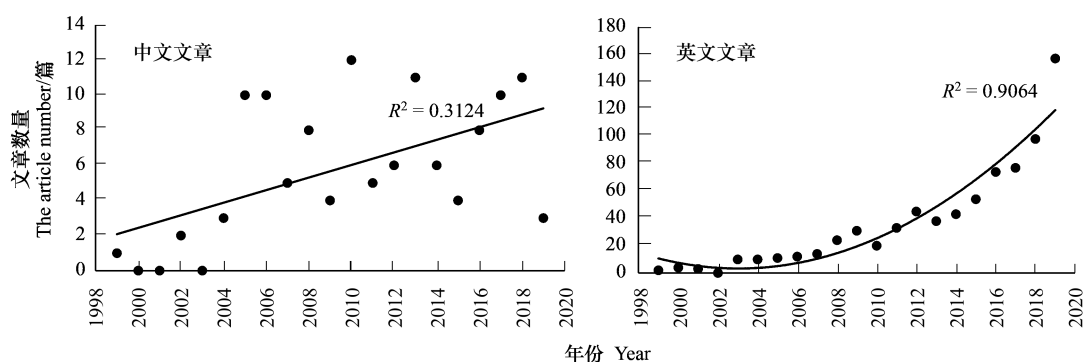


图 5 近 20 年中英文发表文章数量趋势图

Fig.5 Trend chart of publishing article number in Chinese and English about twenty years

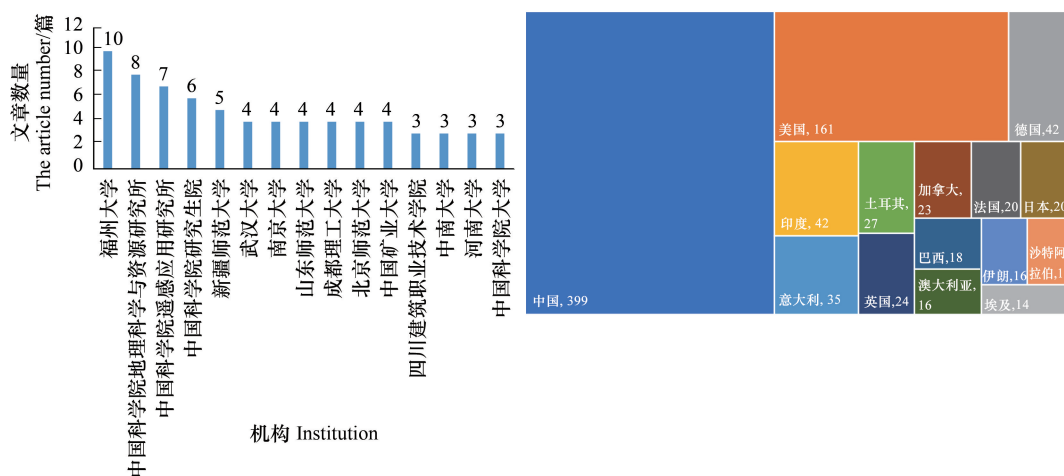


图 6 近 20 年国内不同机构及不同国家/地区发表文章现状

Fig.6 The status of publishing article in different domestic institution and different countries/regions about twenty years

从图 5 可以看出,关于城市扩张遥感研究的中文文章数量虽然在个别年份呈现波动起伏现象,但是整体上呈现增加的趋势,而英文文章出现陡增的趋势。由于福州大学在城市研究领域具有一定特色,所以该校在关于城市扩张遥感研究中发表中文文章数量最多(图 6),从不同国家/地区发表文章数量来看,中国发表文章数量最多,为 399 篇,其次为美国,为 161 篇,之后为德国和印度,都为 42 篇。

目前,城市用地扩张空间模式可分为填充性、廊道型、外延型和卫星城型等^[80-81]。Patino 和 Duque^[82]研

究表明有许多方法和措施可用于评估城市发展和蔓延,而卫星遥感已被证明是获取地面信息以大规模评估规划和政策成果的有用工具。Masek 等^[83]基于多期 Landsat TM 影像,利用 NDVI 插值结合地物的纹理特征分析方法,研究长时间序列华盛顿市域建成区的时空扩张规律。Pesaresi 等^[84]以 Landsat 等卫星数据为主,辅以其他数据,向全球免费提供了 1975—2014 年全球人居环境数据集(GHS),主要包括建设用地面积与人口空间分布信息,精确的对城市扩张过程中面积增长与人口聚集情况进行了分析。Bilbisi^[27]以约旦安曼市为例,利用卫星遥感图像进行城市扩展的空间监测。国内学者张晓平等^[85]从城市土地扩张的影响机制方面进行了研究。管驰明等^[86]从空间角度方面总结了我国城市土地扩张规律,并阐述了城市扩张的形态和模式。张岩等^[87]修改了元胞自动机(SLEUTH)模型并应用于北京城市扩展的模拟和预测中,深入研究了北京城市发展的模式和成因。此外,国内一些学者分别以上海、广州等几个城市为研究区,分析了城市土地扩张过程的空间形态及其影响机制^[88-94]。随着遥感数据的多源化,新的数据源对城市边界扩张识别有着显著的作用,夜间灯光数据具有长时间序列及范围广的优势,利用夜间灯光对城市边界进行提取是一种效率较高的方式。如王翠平等^[95]从空间扩张强度、扩张类型和方向性空间扩张特征角度分析了京津冀-长江三角-珠江三角城市群城市用地的空间扩张特征,从社会经济角度分析城市群空间扩张的驱动因素。邹欣怡等^[96]在重庆市南岸区 1996—2016 年建成区扩展的数量及形态研究的基础上,采用改进的压力-状态-响应模型 DPSIR 综合生态评价模型定量评价了城市用地扩张的生态环境效应,并识别了城市用地扩张系统与生态环境系统的主要影响因素,从小尺度、系统、动态的角度对城市扩张/蔓延的生态环境耦合效应进行了研究。邓刘洋等^[97]采用面向对象均值漂移分割方法、构建决策树分类方法和基于土地利用类型的标准差变量信息实现高空间分辨影像建成区提取,探讨了虞城县 2000—2017 年城区扩张过程。此外,学界也积极地将 CA 模型与其他模型相结合形成混合模型,来进行城市增长边界研究^[98-99]。城市增长边界(Urban Growth Boundary, UGB)作为空间增长管理的政策工具之一,以“生态优先”保护城市生态本底,以“精明增长”提升城市内部空间绩效,在协调保护与发展需求之间起到了重要作用^[100],有研究表明 UGB 也是有效控制城市土地扩张的手段之一^[101]。作者通过文献分析发现 UGB 的主要划定方法以及研究内容如表 3 所示。

与此同时,国内有部分学者利用遥感技术从国家尺度和全球尺度的角度研究了城市扩张带来了一些生态环境问题。如:He 等^[113]通过整合夜间灯光、植被指数和地表温度的数据,准确地总结 1992—2012 年中国的城市扩张动态变化情况。分别从国家、生态区域和地方三个尺度对这一时期的自然生境损失进行了评估。结果显示,1992—2012 年,中国城市发展极为迅速,年均增长率为 8.74%,而全球平均水平为 3.20%。大规模的城市扩张导致中国部分地区的自然生境损失严重。Liu 等^[114]使用分辨率为 30m 的 Landsat 地表反射率数据,绘制了 1985—2015 年的全球年度城市动态图。全球城市范围每年扩大 9687 km²。这一速度比以往对全球各个城市的可靠估计高出四倍,表明全球城市化的速度是前所未有的。城市扩张的速度明显快于人口增长的速度,说明城市土地面积已经超过了维持人口增长的需要。将这些地图与综合评估模型结合使用,有助于更好地了解城市化对环境的复杂影响,并帮助城市规划者避免自然灾害。Liu 等^[115]也使用 GlobeLand30 以及 MODIS 产品中的土地利用、NDVI 和 NPP 数据集发现在 2000 年至 2010 年之间,全球城市土地的扩张速度远远超过预期。在这 10 年间,世界城市面积每年增加 5694 km²,占 2000 年城市总面积的 5%左右。但是相反,快速的城市扩张却减少了全球陆地的净初级生产力(NPP)。Chen 等^[116]在共享社会经济路径(SSPs)的框架下,利用 FLUS 模型对 1 km 分辨率下的未来城市土地扩张进行了预测。预测结果显示,虽然在 2040 年之前,全球城市土地继续快速扩张,但预计 2050 年之后,中国和许多其他亚洲国家将面临城市人口减少的巨大压力。预计约有 50%—63%新扩张的城市土地将出现在现有的耕地上,全球农作物产量将下降约 1%—4%。因此,利用现有的遥感产品数据研究城市扩张所引起的生态环境、自然生境、作物产量问题已迫在眉睫。

总之,城市边界扩张的长时间序列研究中,多源数据处理中的不确定性是导致误差的重要原因之一,此外,还需要考虑不同遥感影像数据之间的尺度问题。城市遥感研究对象从之前以单个城市为核心转向现在的城市群和城市重点区发展为主(如:珠三角城市群、京津冀城市群、成渝城市群、长江三角洲核心区城市群、苏

锡常城市群等)。随着多尺度对地观测数据和产品的快速发展,遥感提供了对不同尺度城市化及其资源环境响应的综合观测,为开展不同范围的城市遥感研究创造了条件。目前,已进行了对城镇用地扩展方面的多地域、多尺度的综合性和典型性研究,如:王惠霞^[117]研究了武汉城市群、长株潭城市圈、中原城市群在不同时间阶段上的城镇扩展规律,并探讨了不同规模等级城市的城镇扩展模式。Fei 等^[118]绘制并量化了 1978 年至 2015 年中国六大城市(北京、重庆、广州、上海、深圳、天津)扩张的时空动态。

表 3 城市增长边界的主要划定方法
Table 3 Mainly delimitation method of urban growth boundary

年份 Year	研究者 Authors	方法名称 Methods name	研究内容 Research contents
2006	龙瀛等 ^[102]	元胞自动机(CA)法	根据区位变量、邻里变量和政府变量的变化程度,采用多指标评价方法对约束性 CA 状态转移规则进行评价,得出各类因素限制下适宜建设的土地规模
2009	祝仲文等 ^[103]	土地生态适宜性评价法	各评价因子的权重值由 AHP 来确定,其次,进行土地的生态适宜性评价后得出生态敏感度,再依据生态敏感度高低划分城市增长边界(UGB)的弹性和刚性边界
	龙瀛等 ^[104]	利用约束性 CA 法	利用约束性元胞自动机模型(CC-CA)法,以北京市域为研究区域,制定了中心城、新城和乡镇三个层次的 UGBs
2011	李咏华 ^[105]	生态视角下的 GIA-CA 空间模型	将生态保护的传统被动防御转变为主动控制的模式,以城市存量土地“质”的生态分级和“量”的有限供给作为空间增长模拟的宏观约束条件,从而划定城市增长边界,达到控制城市蔓延和引导城市在适宜发展区域增长的目标。
	Tayyebi 等 ^[106]	城市增长射线群法	以距离为测度,选择城市的多个中心点为目标,建立预测模型,模拟城市边界变化位置,以便划定城市增长边界(UGB)
2018	Chakraborti 等 ^[107]	神经网络结合景观指数法	使用人工神经网络(ANN)模型和一组景观指数来描绘城市增长边界(UGB),并描述印度西里古里市政公司的未来增长模式
	吴欣昕等 ^[108]	FLUS 模型与基于形态学膨胀与腐蚀方法	提出了一种基于未来用地模拟(FLUS)模型和膨胀与腐蚀的算法的多情景 UGBs 划定模型(FLUS—UGB),用于多情景下城市发展形态的高效 UGBs 划定
	丛佃敏等 ^[109]	耦合生态安全格局与 CA—Markov 模型	提出了一种新的城市增长边界划定方法,该法能够有效解决城市增长与生态保护之间的矛盾,对河谷型城市等建设用地匮乏、生态环境脆弱城市的生长边界划定具有良好的应用价值
2019	李全宝 ^[110]	最小累积阻力模型 MCR 结合 Markov-CA 法	选取相对阻力因子,利用 MCR 建立城镇扩张最小累积阻力图,从而获得城镇增长刚性边界。然后,利用 Markov-CA 模型预测城镇扩张,从而划定城镇增长弹性边界;最后,结合城镇刚性增长边界、城镇用地扩张模拟结果来获取最终城镇增长边界(UCB)
2020	Ren 等 ^[111]	多变量准则(MCE)结合元胞自动机(CA)法	MCE-CA 模型考虑了与城市增长相关的影响因素,并基于时空动态模拟生成了 UGBs
	Zhang 等 ^[112]	DEE 结合 FLUS-CA 法	结合双重环境评估(DEE)和 FLUS-CA 模型来界定未来的 UGBs

1.3 城市不透水表面

城市不透水面的信息提取是研究城市化进程的一个重要手段^[119]。城市不透水表面(Urban Impervious Surface,UIS)为城市管理策略、可持续发展和环境变化监测提供有价值的信息^[120-121]。著名学者 Gong 等^[122]使用 Google Earth Engine(GEE)平台上 30m 分辨率的 Landsat 图像,绘制了 1985—2018 年年均全球人工不透水面分布图。揭示了在过去的 30 年里,全球不透水面积发生了相当大的增长。2018 年全球人工不透水面的总面积为 797,076km²,与 1990 年的面积相比增加了 1.5 倍。在各大洲中,亚洲的增长最为显著,尤其是东亚地区。中国和美国是人工不透水面积总量最多的两个国家,2018 年占全球总量约 50%。通过中国知网数据库,按照主题为遥感*城市*(“不透水面”+“不透水层”+“建成区提取”)共检索出 171 篇文献,通过 Web of Science 数据库,按照主题为 Remote Sensing*Urban*(“Impervious Surface”OR“Impervious Layer”OR“Built Area Extraction”)共检索出 378 篇文献。图 7 揭示了 1999—2019 年间的中英文发文数趋势,图 8 揭示了我国不同的研究机构及不同国家/地区发文现状。

从图 7 可以看出,关于城市不透水表面遥感研究的中文文章数量虽然在个别年份呈现微弱回落现象,但是整体呈现陡增的趋势,而英文文章数量呈现阶梯上升的趋势。由于武汉大学等单位已成功完成了“城市不

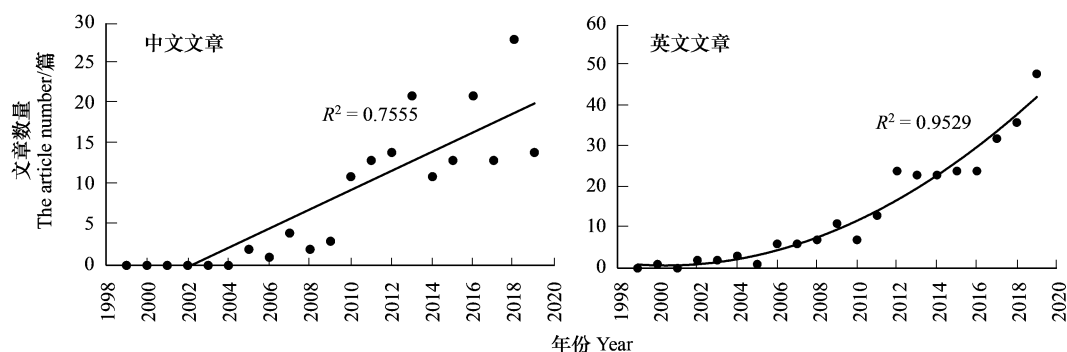


图7 近20年中英文发表文章数量趋势图

Fig.7 Trend chart of publishing article number in Chinese and English about twenty years

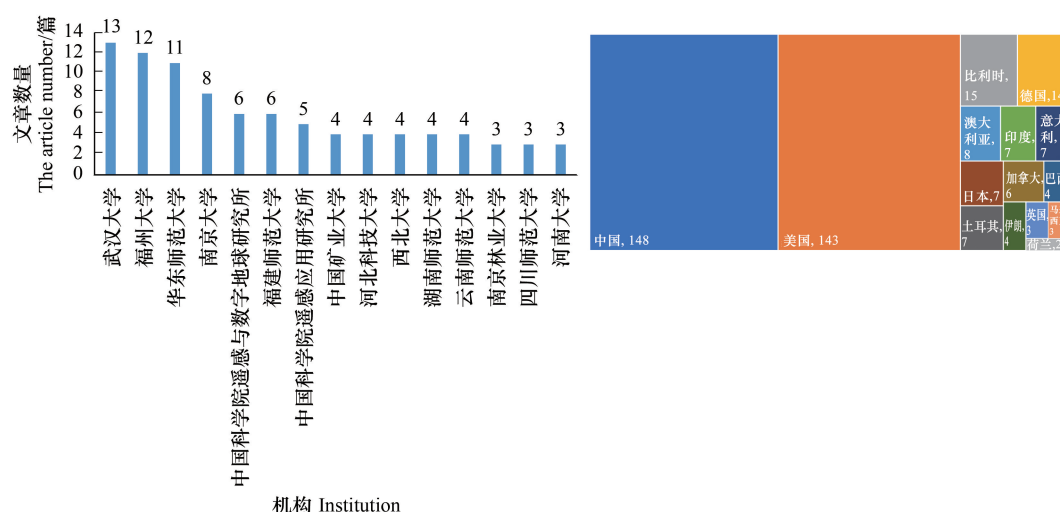


图8 近20年国内不同机构及不同国家/地区发表文章现状

Fig.8 The status of publishing article in different domestic institution and different countries/regions about twenty years

透水面遥感高精度监测关键技术及应用”的项目,而且全球首次完成了国家尺度的米级不透水面产品,促使该校在城市不透水面遥感研究中取得了丰硕的成果,因此,武汉大学在城市不透水面遥感研究中发表中文文章数量最多,为13篇。从不同国家/地区发表文章数量来看,中国发表文章数量最多,为148篇,其次为美国,为143篇。

近年来,不透水面已成为城市化进程的评价指标,同时也是环境质量的评价指标^[123]。早在1994年, Deguchi 等^[124]就已经使用两种方法和多种数据源对日本一个小城市进行城市不透水面的提取。1995年, Ridd^[125]提出了研究城市生态的植被-不透水面-土壤(V-I-S)模型。2000年之后, Ward 等^[126]通过遥感提取城市不透水面成功监测了城市动态发展变化和土地利用组成。Phinn^[127]依据V-I-S模型,应用亚像元分析方法得到了澳大利亚布里斯班市的不透水面分布,并分析了城市的环境构成情况。Braun 等^[128]采用ASTER数据,以研究德国西部科隆/波恩城市群的不透水面程度,比较了基于线性光谱分离的植被分数和NDVI的两种方法。国内学者Wu 等^[129]通过使用Landsat ETM+数据的完全约束线性光谱混合模型估算不透水面分布以及植被和土壤覆盖。陈爽等^[130]基于IKONOS数据首次在我国城市中心城区尺度上探索土地利用的不透水性。王俊松等^[131]提取了城市区域尺度上的不透水面信息,利用监督分类方法得到了绿地、裸地等城市透水面高精度信息。Deng 等^[132],Zhang 等^[133]利用多时期遥感图像分析了珠三角地区不透水面的变

化及城市扩张情况。程熙等^[134]整合夜间灯光遥感与 Landsat TM 影像中的空间和光谱信息实现了不透水面覆盖范围的自动提取。周玄德等^[135]利用归一化不透水面指数(Normalized Impervious Surface Index, NDISI),提取了乌鲁木齐市主城区的不透水面。通过文献分析梳理出不透水层表面提取的主要方法如表 4 所示。

表 4 不透水层提取的主要方法
Table 4 Mainly methods of extracting impervious layer

年份 Year	研究者 Authors	方法名称 Methods name
1995	Ridd ^[125]	植被—不透水层—土壤(vegetation—impervious surface—soil, V—I—S)分布模型
2002	Phinn 等 ^[127]	基于像元分解的亚像元分类方法
2003	Hodgson 等 ^[136]	基于像元图像分类方法
	Yang 等 ^[137]	决策树分类(DTC)模型
2007	岳文泽和吴次芳 ^[138]	基于混合光谱分解技术
2008	徐涵秋 ^[139]	归一化差值不透水面指数(NDISI)
2010	潘竞虎等 ^[140]	植被—不透水面—大气污染物(V—I—AP)模型结合合线性混合光谱分解技术
2011	夏俊士等 ^[141]	基于线性光谱混合模型(LSMA)
	Xia 等 ^[142]	基于非线性光谱混合模型(NLSMA)
	王浩等 ^[143]	多端元光谱混合分解模型
2016	朱爽等 ^[144]	扩展支撑向量机(extended support vector machines, ESVM)结合光谱和纹理特征
2017	徐成华等 ^[145]	基于规则的高分影像不透水层提取
	田玉刚等 ^[146]	垂直不透水层指数(PII)
2019	Kuang ^[147]	建筑密度指数(BDI)
	Wang 和 Li ^[121]	基于深度压缩的卷积深度置信网络(de—CDBN)方法
2020	Li ^[148]	光谱混合分析和光谱指数
	Deng 和 Zhu ^[149]	连续的亚像素监测(Continuous Subpixel Monitoring, CSM)
	范佳辉等 ^[150]	采用线性混合光谱模型(LMM)、混合调制匹配滤波(MTMF)、双线性混合光谱模型(BMM)及 BP 神经网络算法

不透水层分布是城市和区域环境的生态考核指标之一,对城市和区域的发展规划和生态评估具有重要意义^[151]。因此,已经有很多学者都开展了此类研究,城市不透水表面是影响城市生态环境的重要因素。不透水表面信息已被广泛应用土地利用现状、城市环境保护、城市水文模拟和城市专题制图等,故获取及持续监测不透水层并从中获取更多信息,用于各个领域的讨论和研究,从而改变城市面貌,改善人居环境。但是,城市遥感研究中不透水面信息的准确提取一直都是需要攻克的难题。如:市区不透水面信息低估和农村不透水面信息高估是典型的问题。这样的问题可以通过结合志愿者地理信息(VGI)^[152-153]来解决。今后可以使用 VGI 将错误分类的建筑物阴影和水覆盖物纠正到不透水表面。此外,VGI 还可以提供有用的土地覆盖信息^[154],以改善城市不透水的地表分类。

1.4 城市景观格局

景观格局包括景观组成单元的数目、类型以及空间分布与配置^[155]。定量分析景观格局及其变化对于监测和评估城市化的生态后果至关重要^[156],从景观空间格局角度来理解以及解决城市化问题是景观生态学的一个研究热点^[157]。通过中国知网数据库,按照主题为遥感*城市*(“景观格局”+“景观”+“LUCC”+“土地利用变化”)共检索出 113 篇文献,通过 Web of Science 数据库,按照主题为 Remote Sensing*Urban*(“Landscape Pattern”OR“Landscape”+“LUCC”+“Land Use Change”)共检索出 1290 篇文献。图 9 揭示了 1999—2019 年间的中英文发文数量趋势,图 10 揭示了我国不同的研究机构及不同国家/地区发文现状。

从图 9 可以看出,关于城市景观格局遥感研究的中英文文章数量虽然在个别年份出现了明显的回落现象,但是整体上呈现陡增上升的趋势,从图 10 中可以得知北京林业大学在城市景观格局遥感研究中发表中文文章数量最多,为 35 篇。其次为南京林业大学和华东师范大学,因为这三所高校在景观生态学的研究中都具

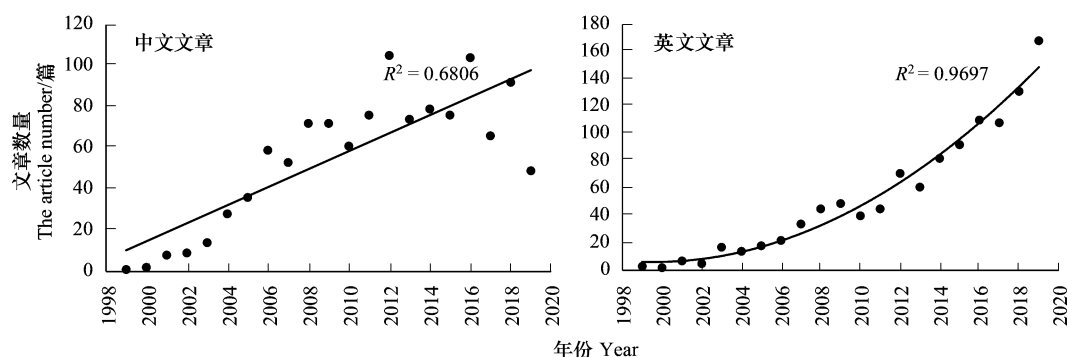


图9 近20年中英文发表文章数量趋势图

Fig.9 Trend chart of publishing article number in Chinese and English about twenty years

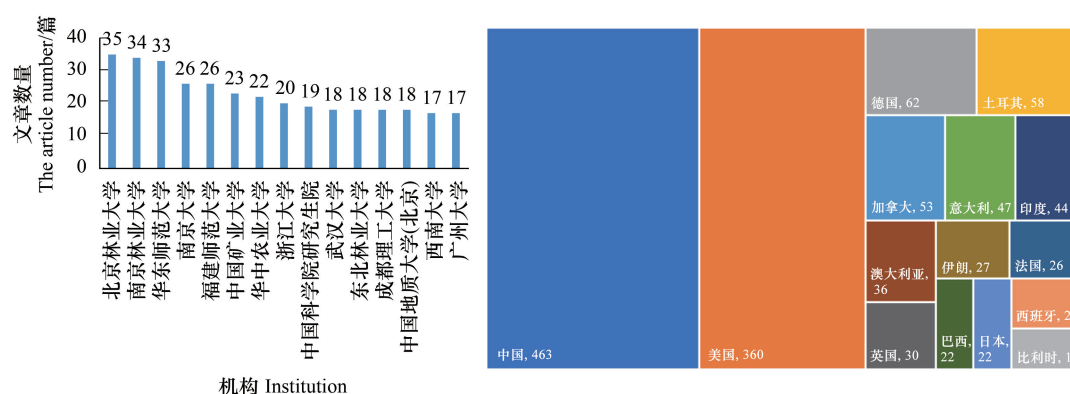


图10 近20年国内不同机构及不同国家/地区发表文章现状

Fig.10 The status of publishing article in different domestic institution and different countries/regions about twenty years

有一定优势。从不同国家/地区发表文章数量来看,中国发表文章数量最多,为463篇,其次为美国,为360篇,之后为德国,为62篇。

国外学者 Batty^[158] 在构建细胞自动机模型的基础上,探讨了该模型与城市格局之间的关系。Luck & Wu^[156] 以美国亚利桑那州凤凰城为例,分析城市景观格局变化与空间幅度大小的关系。Raúl & George^[159] 研究了西班牙 Encinares 城市景观格局变化并进一步解释了产生变化的原因及其生态意义。Kabisch 等^[160] 利用一种多传感器多时相的遥感方法,用于检测城市景观格局异质性中的土地利用动态变化。Ramachandra 等^[161] 利用完善的景观指标和遥感数据量化了城市动态。国内学者徐建华等^[162] 通过 SPOT 全色波段数据和地理信息系统技术,用空间统计分析方法研究城市景观格局的空间尺度效应。杜秀敏等^[163] 基于人工神经网络技术,建立了厦门市景观格局分析的模型。逯萍等^[164] 选取景观破碎度、分维数、分离度等指数进行了延吉市景观格局定量分析。范辰等^[165], 陈文术等^[166] 均利用多期遥感数据探讨了城市景观格局的动态变化以及其驱动因素。此外,付凤杰等^[167] 还运用景观格局指数和景观连通性等方法定量分析了建筑景观和绿地景观变化及空间影响,常用于城市遥感的景观指数有破碎度指数、分离度指数、孔隙度指数和多样性指数等。

总之,正如潘泓君^[168] 在研究中指出:利用景观指数描述景观格局存在一定不足,如:景观格局指数有几十种,它们之间存在着一定的联系,因此,在研究中应该更多考虑景观指数应用的合理性。其次,由于景观格局指数具有尺度效应,从而使研究的难度和不确定性增加。

1.5 城市生态安全

城市生态安全指支持城市经济社会持续发展的基础上,人类生活的城市自然生态环境条件处于其承载力

内的一种城市生态系统状况^[169]。而城市生态安全格局是维持城市自然生命系统正常运行,保持经济社会可持续发展的关键性格局^[170]。通过中国知网数据库,按照主题为遥感 * 城市 * (“生态安全”+“生态变化”+“环境承载力”+“生态足迹”+“生态红线”)共检索出 133 篇文献,通过 Web of Science 数据库,按照主题为 Remote Sensing * Urban * ("Ecological Security" OR "Ecological Environmental Change" OR "Ecological Carrying Capacity" OR "Ecological Footprint" OR "Ecological Red Line") 共检索出 30 篇文献,图 11 揭示了 1999—2019 年间的中英文发文数量趋势图,图 12 揭示了我国不同的研究机构及不同国家/地区发发现状。

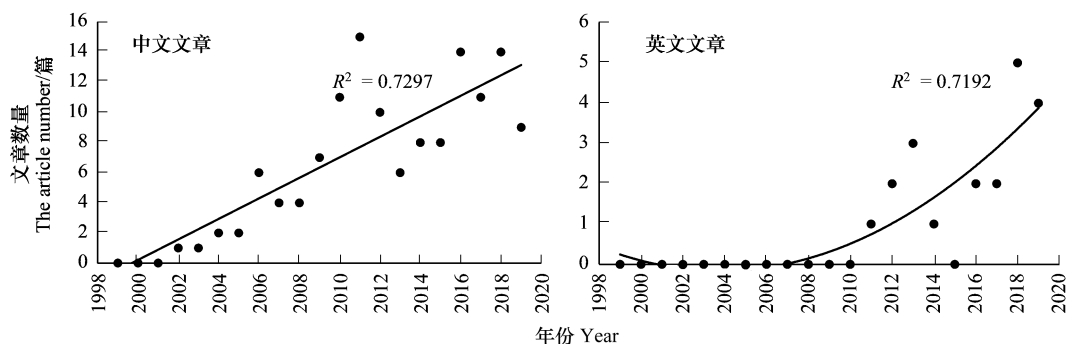


图 11 近 20 年中英文发表文章数量趋势图

Fig.11 Trend chart of publishing article number in Chinese and English about twenty years

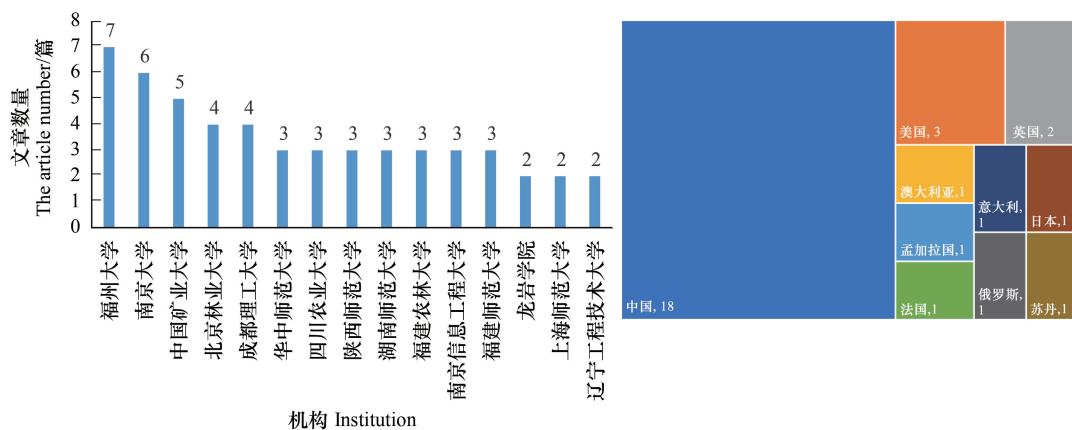


图 12 近 20 年国内不同机构及不同国家/地区发表文章现状

Fig.12 The status of publishing article in different domestic institution and different countries/regions about twenty years

从图 11 可以看出,关于城市生态安全遥感研究的中英文文章数量都普遍偏低,两者均存在比较明显的波动现象,虽然中英文文章数量都呈现增加的趋势,但是之间的差别不大,发展较为缓慢。从图 12 中可以得知福州大学在城市生态安全遥感研究中发表中文文章数量最多,通过之前的分析发现福州大学在城市遥感研究的很多领域都是领先的,说明了这些领域之间存在一定共性。从不同国家/地区发表文章数量来看,中国发表英文文章数量最多,为 18 篇,其次为美国,为 3 篇。从统计中可知,国内外利用遥感技术评价城市生态安全的文章较少,这可能是由于很多学者都是采用模型,算法进行城市生态安全评价。

国外学者 Brauch^[171]运用 PSR 模型作为生态安全的评价模型,完成了区域的生态安全评价研究。Hodson 和 Marvin^[172]提出了如何在城市生态安全条件下确保世界城市物质和生态再生产的论点和一系列命题。国内学者张浩等^[173],郭斌等^[174]对快速城市化下区域开发的生态承载力及生态风险度进行了动态评价,且提出相应的生态风险调控措施。麻秋玲等^[175]基于压力—状态—响应(P—S—R)模型,利用突变级数法对福州市

2000—2009 年生态安全进行综合评价。Lu 等^[176]提出了一个滨海旅游城市生态安全系统模型,该研究所提供的方法可以用于评估潜在的社会经济对沿海旅游城市生态安全系统的影响,并为科学管理提供有用的信息。黄焕春等^[177]把天津市滨海新区作为研究区,对其生态安全格局底线运用 GIS 和大数据技术进行综合分析,最终得出优化城市扩张模式的合理途径。艾媛巧等^[178]将生态安全等级划分为了 5 个等级,然后在 PSR 模型和熵权法的支持下分别对 2007—2016 年的长沙市生态安全进行了评价,并运用无偏 GM(1,1)模型对长沙市 2017—2021 年的生态安全值进行了预测。通过文献的分析,作者梳理出生态安全评价的模型框架如表 5 所示。

表 5 生态安全评价的模型框架
Table 5 Model Framework for Ecological Security Assessment

年份 Year	研究者 Authors	方法名称 Methods name
1996	Corvalán 等 ^[179]	DPSEEA 模型(驱动力-压力-状态-暴露-影响-响应)
2003	左伟 ^[180]	DESER 模型(驱动力-压力-状态-暴露-响应)
2008	杨俊 ^[181]	DPSRC 模型(驱动力-压力-状态-响应-控制)
2009	李佩武 ^[182]	PSR 模型(压力-状态-响应)、DSR 模型(驱动力-状态-响应)、DPSIR 模型(驱动力-压力-状态-影响-响应)
2011	王晶 ^[183]	DPSR 模型(驱动力-压力-状态-响应)
2015	Han 等 ^[184]	PSR 模型(压力-状态-响应)
	Wang 等 ^[185]	DPSIR 模型(驱动力-压力-状态-影响-响应)
2018	Liu 等 ^[186]	CA-Markov 模型结合 PSRP(压力-状态-响应-格局)
2019	Guo and Wang ^[187]	生态足迹模型(Ecological Footprint Model)
2020	韩雅琴等 ^[188]	TOPSIS 模型
	郭利刚等 ^[189]	PSR 模型结合物元模型
	Bi 等 ^[190]	可再生生态足迹(Renewable Ecological Footprint, REF)模型
	Yang 等 ^[191]	修正的生态足迹(Adapted Ecological Footprint, AEF)模型

总之,在城市生态安全及风险评估过程中,可借助 3S 技术手段,将其以空间的形式进行表达。然后对其进行归因分析,之后再借助相关模型(熵权 TOPSIS 法、ARIMA 模型、人工神经网络模型等)或者改进的模型来开展对生态安全的预测和预警分析。

通过上述的国内外文献梳理,发现我国学者非常重视在城市地表温度、城市边界扩张、城市不透水面、城市景观以及城市生态安全这个五个主题的研究,促使我国学者的文章数量呈现出递增的趋势。作者认为虽然这些研究都是单独统计和分析的,但它们彼此也存在一定的联系(图 13),城市不透水面和城市扩张变化都会驱使城市地表温度发生改变,随之城市景观格局也会发生变化,在此基础上,可以探讨城市生态安全性。如: Huang 等^[192]对 2050 年的城市土地扩张和热岛强度进行了全球空间精确的预测。研究得出:城市扩张造成的气温升高与温室气体排放造成的气温升高一样严重,在某些地方甚至更严重。结合温室气体空间变化和社会经济发展,揭示了一个新的全球极端热风险增加的地理环境。因此,今后如何更好的开展这五个主题的交互研究,需要作者以及科研工作者不断的去探索和完善。

2 讨论与结论

2.1 讨论

目前,城市陆表环境(城市绿度、城市热度、城市湿度、城市灰度、城市亮度以及城市高度)决定城市宜居性,与人们日常生活密切相关,其内部作用机理复杂,已成为重要命题和研究热点。伴随着城市的边界扩展,不透水面继续扩张,城市热岛效应加剧,其中 LST 受高覆盖的不透水面影响较大。由于植被的降温效果较好,因此在城市生态环境建设中,要考虑绿地面积和空间分布,既可以美化城市,又可以降低城市热岛效应。

通过一些措施,如优化不透水面的空间格局;降低不透水面的斑块密度等措施,以便减弱不透水面对地表温度的正相关作用。还可以从道路的材质选择、屋顶绿化等措施,来优化城市生态环境。

虽然,有关城市遥感的研究已经取得了丰硕的成果,学者们也在不断完善研究方法,但是由于受数据的可获取性和方法的精度性限制,目前还有许多问题需要进一步分析,因此,从目前的研究态势来看,研究还主要存在以下不足和问题:

(1)城市地表温度研究方面:遥感图像已被广泛用于估计陆地表面温度(空气温度的主要驱动力)以及绘制 LST 的空间分布图^[193]。此外,遥感反演的是地表温度,而实测的是 1.5—2.0m 处的气温,所以两者之间会有一定差异。现有许多地表温度算法的参数已经较少,而且较为成熟。当前地表温度反演的问题是如何将地表温度与气温进行耦合和关联的问题。针对此问题,国

内外学者^[194-196]已经研究了地温与气温的时空特征,发现地温和气温相关性极强。目前各种算法的反演结果与实测温度都存在一定差异,如何提高各算法反演的准确度?如何细化定量评价影响地表温度因子(人为热排放对地表温度的影响)?因此,有必要开发一种新技术,通过协同使用红外和微波测量来估计全天候条件下的全球 LST。此外,加强对 LST 的地面观测会进一步提高全球和区域卫星对 LST 估计的准确性。

(2)城市扩张研究方面:目前已经从各个方面研究了城市扩张对生态环境带来的影响,但仍然存在一些局限性。在研究城市扩张带来的生态环境影响时,缺乏相对系统,客观和全面的评估体系。而且,参与生态环境影响评估的大多数影响因素都来自低分辨率和中等分辨率遥感图像,有必要采用更高分辨率遥感图像提高其评价准确性。城市地区的扩展通常有助于城市热岛的形成,从而增加 LST 的规模。建议今后应考虑夏季和冬季之间的季节性,开展 LST 的季节变化研究。总体而言,必须融合多源遥感图像,以满足不同规模城市扩展的需求,而目视判读和自动分类方法的集成已成为当今的趋势。遥感技术在我国城市扩展领域的应用随着数据建设、方法和模型从初始阶段发展到创新阶段而得到了推广。但是,仍需要从城市扩张过程及其对当地土地利用的长期和高频影响方面着眼于全国城市化趋势和模式。

(3)城市不透水表面研究方面:由于城市地表覆盖的多样性,人造地面物体材料的复杂性以及地表成分的异质性,如何准确地提取城市不透水表面是一个仍需要解决的复杂问题。虽然,Huang 等人^[197]提出了基于深度学习和多源遥感数据的城市不透水表面自动提取(AEIDLMRS)方法,但是一方面由于 AEIDLMRS 方法的复杂性导致提取效率不如传统的方法,因此,要提高计算机硬件设备或者采取云计算平台,另一方面还需要解决由于植被覆盖路面产生阴影后导致的不透水表面提取遗漏问题。因此,不透水表面的精确估计仍然具有挑战性。另外,Wang 和 Li^[121]提出了一种基于深度压缩的卷积深度置信网络(dc-CDBN)方法和一种用于多源数据融合模型的新颖分类策略,但是该作者的研究并没有详细探究针对不透水面问题的科学难点和解决方案,因为在科学研究中会不断出现新的挑战,所以,在出现新问题时合理采用最佳方法来解决这些问题是今后要面临的科学难点。城市不透水面监测的准确性直接影响城市管理的决策和环境治理的质量。为了提高城市不透水面监测的准确性,我们必须清楚还要面临很多的技术挑战。总体来看,基于多源数据的不透水表面提取是一个研究趋势,而具体的融合方法也将成为一个研究重点。

(4)城市景观格局及生态安全方面:景观格局指数之间存在相关性,在研究中需要更多的考虑景观指数应用的合理性。由于景观格局指数的尺度效应问题,以至于增加了研究的难度和不确定性。在城市景观格局

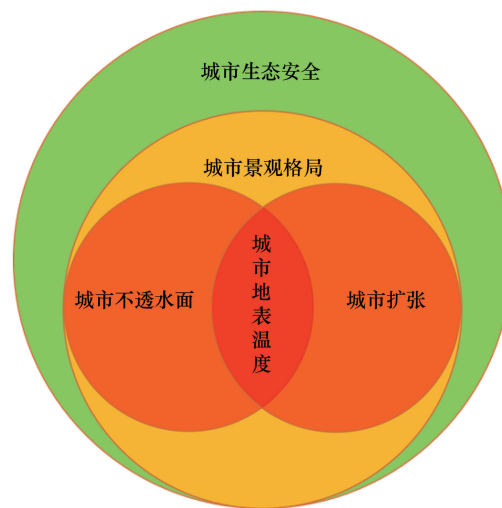


图 13 本研究主题的关系图

Fig.13 Relationship map of research subject in the paper

以及生态安全研究中,仍然有一些问题需要解决,如:①传感器图像的空间分辨率必须足够高,以区分城市土地利用和城市土地覆盖的不同结构;②传感器设计应允许有意义的指标,如 NDVI 是最普遍采用的植被指数,但是,考虑到城市地区的复杂性和多维性,NDVI 可能会低估城市绿色空间中的绿色程度;③城市地区是地物复杂的区域,复杂的城市结构可能会随着时间的推移而在很小的时间内发生变化;④虽然在景观格局及生态安全研究中,所采用的遥感图像,如 Landsat, SPOT 或 IRS 之类的卫星已经提供了超过 25 年的产品,而 Rapid Eye 已经提供了 10 年的图像,这些图像可用于监测随时间变化的城市状态和结构。然而,在某种程度上,不同的光学遥感数据针对小尺度城市区域的复杂性,异质性的研究具有不确定性。

尽管土地利用/土地覆盖方式对城市小气候的变化有很大的影响,但是管理者很少关注发展适应气候变化的局部战略。为了在不损害城市环境的情况下应对城市扩张的挑战,未来的工作应探讨城市扩张对景观格局变化和生态安全变化的影响。

总之,快速的城市化导致了城市用地扩张时空变化加速^[198-199]。进一步,城市扩张导致不透水表面空间格局发生变化,从而引起城市地表温度空间格局发生变化。通过引入景观生态学理论,可以分析不透水面景观格局的空间变化规律。城市居住环境的迅速蔓延改变了城市生态环境的时空分布^[200-201],因此,引发了一系列城市生态安全问题^[202-204]。在未来新型城镇化过程中,坚持可持续发展的理念,将生态安全的价值观与现代文明建设置于同一高度^[205],从上述五个方面,采取交互研究的方式,为城市遥感研究发展提供一定理论指导。

2.2 结论

本研究通过梳理国内外研究文献,对城市遥感的 5 个主要研究主题进行了归纳和总结。主要得出如下结论:

(1)从研究对象来看:城市地表温度(LST)的研究以热岛效应研究为主,但也有学者开展了城市冷岛效应的研究,此外,LST 的反演方法也逐渐得到了改进和提升;城市扩张研究中针对城市增长边界的研究方法逐渐提高和改进,而且基于城市群的时间序列研究也逐渐成为主流趋势,但是不同规模的城市以及城市群扩张的特点、扩张强度、扩张类型有待深入研究;虽然城市不透水层的提取方法逐渐改进和提高,但是,城乡交接区域不透水层信息提取的精度研究依然是今后的难点。城市景观格局研究方法较为成熟,但是,针对不同类型、不同规模城市的景观格局指数选择依据还依然存在一定的不足,因此,景观指数的最优化选择是今后的难点。城市生态安全研究中采用的方法是以模型,算法为主,而且算法也在不断的改进和完善,但是借助遥感技术构建适合不同类型城市的生态安全指数的研究较少。

城市遥感的研究目标将不断扩展、深化和聚焦。除了本研究探讨的五个主题以外,还有很多领域有待探讨,如:城市水环境、城市微气候、城市绿地生态系统、城市固体废弃物、城市噪声污染、城市地面沉降、城市光污染和电磁污染、城市林业、城市人口以及城市房地产等。作者认为对城市遥感领域之间的交互研究将是今后科学研究的前沿。

(2)从采用的数据源来看:数据源从单个遥感数据研究走向多源遥感数据融合发展的方向,多源遥感数据尤其是结合高分辨率数据越来越多的被应用到城市研究的各个领域。如何充分整合和利用更多的遥感派生产品、公开专题信息、行业监测数据等,将是今后城市遥感数据资料选择的一个重要方向,不仅可以降低城市遥感数据选择的难度,还可以提高数据资料综合分析能力,便于得出更客观、可靠的研究成果。将遥感数据整合到单中心城市空间结构模型中对于在缺乏空间分解数据的发展中国家的应用而言是一个有用的选择;为了实现这种可能性,需要对城市建模和空间数据采集进行进一步研究。

(3)从研究内容来看:城市遥感研究已开始了从二维到三维空间的拓展,如:三维城市地表温度的研究、植被三维结构提取、绿度空间三维分布与配置评价等。此外,数字城市、智慧城市建设这些领域都要求建立城市三维模型,加强对三维城市建筑模式与城市热岛效应之间关系的探讨,有利于合理规划城市建设布局。城市遥感涉及的内容之间相互作用,相互影响。今后应按照城市形态与构成、城市关键要素、生态环境响应、生

态环境评价以及城市扩展与环境预测的体系结构进行综合分析。

参考文献(References):

- [1] 王桂林, 张伟. 中国城市扩张及空间特征变化对 PM_{2.5} 污染的影响. 环境科学, 2019, 40(8): 3447-3456.
- [2] 吴琳娜, 杨胜天, 刘晓燕, 罗娅, 周旭, 赵海根. 1976 年以来北洛河流域土地利用变化对人类活动程度的响应. 地理学报, 2014, 69(1): 54-63.
- [3] 陈臻. 城市蔓延机理、测度体系与实证——以山东省临沂市为例[D]. 南京: 南京大学, 2018.
- [4] 张磊. 基于遥感的湘潭市主城区土地覆盖变化与城市扩张研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2018.
- [5] 米媛, 姜博, 陈颜, 崔顺利. 基于 SLEUTH 模型的鄂尔多斯城市扩张模拟分析. 中国农业大学学报, 2019, 24(2): 183-190.
- [6] 约日古丽卡斯木, 孜比布拉克·司马义, 王蕾, 肖合来提·巴义. 新疆博乐市生态环境变化对城市建设用地扩张的响应. 农业工程学报, 2019, 35(1): 252-259.
- [7] Gamba P, Dell'Acqua F, Dasarathy B V. Urban remote sensing using multiple data sets: past, present, and future. Information Fusion, 2005, 6(4): 319-326.
- [8] 杜培军, 白旭宇, 罗洁琼, 李二珠, 林聪. 城市遥感研究进展. 南京信息工程大学学报: 自然科学版, 2018, 10(1): 16-29.
- [9] 杜培军. 城市遥感的研究动态与发展趋势——“城市遥感”专栏导读. 地理与地理信息科学, 2018, 34(3): 1-4.
- [10] Kadhim N, Mourshed M, Bray M. Advances in remote sensing applications for urban sustainability. Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration, 2016, 1: 7.
- [11] 赵俊华. 城市热岛的遥感研究. 城市环境与城市生态, 1994, 7(4): 40-43.
- [12] 江涛, 张传霞. 城市扩展动态变化的遥感研究. 遥感信息, 1999, (4): 50-53.
- [13] Ji C Y, Liu Q H, Sun D F, Wang S, Lin P, Li X W. Monitoring urban expansion with remote sensing in China. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(8): 1441-1455.
- [14] 陈云浩, 史培军, 李晓兵. 基于遥感和 GIS 的上海城市空间热环境研究. 测绘学报, 2002, 31(2): 139-144.
- [15] 周伟, 袁春, 谢苗苗, 袁涛. 宁波市城市热岛遥感分析//全国国土资源与环境遥感技术应用交流会论文集. 武汉: 中国地质学会遥感地质专业委员会, 中国地理学会环境遥感分会, 中国感光学会遥感技术专业委员会, 中国土地学会土地信息与遥感分会, 中国地质学会地质灾害研究分会, 2004.
- [16] 胡华浪, 陈云浩, 官阿都. 城市热岛的遥感研究进展. 国土资源遥感, 2005, 17(3): 5-9, 13-13.
- [17] 徐丽华, 岳文泽, 曹宇. 上海市城市土地利用景观的空间尺度效应. 应用生态学报, 2007, 18(12): 2827-2834.
- [18] 周纪, 陈云浩, 张锦水, 李京. 北京城市不透水层覆盖度遥感估算. 国土资源遥感, 2007, 19(3): 13-17, 27-27.
- [19] 袁超, 吴炳方, 罗兴顺, 李志伟, 闫娜娜. 城市不透水表面遥感估算研究. 测绘工程, 2009, 18(3): 32-36, 39-39.
- [20] 占文凤, 陈云浩, 周纪, 李京. 支持向量机的北京城市热岛模拟: 热岛强度空间格局曲面模拟及其应用. 测绘学报, 2011, 40(1): 96-103.
- [21] 林卉, 刘培, 杜培军, 杨苏新. 基于遥感影像的城市景观格局变化分析. 国土与自然资源研究, 2012, (4): 9-10.
- [22] 任鹏飞, 甘淑, 宗慧琳, 谢显奇. 基于遥感数据的城市空间扩张研究. 水土保持通报, 2014, 34(3): 116-120, 149-149.
- [23] Singh P, Kikon N, Verma P. Impact of land use change and urbanization on urban heat island in Lucknow city, Central India. A remote sensing based estimate. Sustainable Cities and Society, 2017, 32: 100-114.
- [24] Zhang Z X, Liu F, Zhao X L, Wang X, Shi L F, Xu J Y, Yu S S, Wen Q K, Zuo L J, Yi L, Hu S G, Liu B. Urban expansion in China based on remote sensing technology: a review. Chinese Geographical Science, 2018, 28(5): 727-743.
- [25] Fan W, Wu C S, Wang J. Improving impervious surface estimation by using remote sensed imagery combined with open street map points-of-interest (POI) data. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2019, 12(11): 4265-4274.
- [26] GebreMedhin A, Biruh W, Govindu V, Demissie B, Mehari A. Detection of urban land use land cover dynamics using GIS and remote sensing: a case study of Axum town, northern Ethiopia. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2019, 47(7): 1209-1222.
- [27] Al-Bilbisi H. Spatial monitoring of urban expansion using satellite remote sensing images: a case study of Amman city, Jordan. Sustainability, 2019, 11(8): 2260.
- [28] Shatnawi N, Qdais H A. Mapping urban land surface temperature using remote sensing techniques and artificial neural network modelling. International Journal of Remote Sensing, 2019, 40(10): 3968-3983.
- [29] Prakash S, Norouzi H. Land surface temperature variability across India: a remote sensing satellite perspective. Theoretical and Applied Climatology, 2020, 139(1): 773-784.
- [30] Alexander C. Normalised difference spectral indices and urban land cover as indicators of land surface temperature (LST). International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2020, 86: 102013.
- [31] 朱贞榕, 程朋根, 桂新, 腾月, 童成卓. 地表温度反演的算法综述. 测绘与空间地理信息, 2016, 39(5): 70-75.
- [32] Weng Q H, Firozjaei M K, Kiavarz M, Alavipanah S K, Hamzeh S. Normalizing land surface temperature for environmental parameters in mountainous and urban areas of a cold semi-arid climate. Science of the Total Environment, 2019, 650: 515-529.
- [33] 郑飞, 张殿发, 孙伟伟, 杨刚. 基于 ASTER 遥感的杭州城市热/冷岛的景观特征分析. 遥感技术与应用, 2017, 32(5): 938-947.
- [34] 黄妙芬, 邢旭峰, 王培娟, 王昌佐. 利用 LANDSAT/TM 热红外通道反演地表温度的三种方法比较. 干旱区地理, 2006, 29(1): 132-137.
- [35] 裴亚平, 张世强, 赵求东. 高寒山区地表温度反演算法对比——以疏勒河上游流域为例. 遥感信息, 2016, 31(4): 122-128.

- [36] 严安, 万幼川, 张晗. Landsat ETM+数据的武汉市地表温度反演研究. 地理空间信息, 2011, 9(4): 140-142.
- [37] 周梅, 张飞, 姜红涛, 张严峻. 渭干河-库车河三角洲绿洲地表温度时空变化特征研究. 水土保持研究, 2013, 20(6): 151-157.
- [38] Yu X L, Guo X L, Wu Z C. Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS—Comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm and single channel method. Remote Sensing, 2014, 6(10): 9829-9852.
- [39] 孟翔晨, 历华, 杜永明, 曹彪, 柳钦火, 李彬. Landsat 8 地表温度反演及验证——以黑河流域为例. 遥感学报, 2018, 22(5): 857-871.
- [40] 卢惠敏, 李飞, 张美亮, 杨刚, 孙伟伟. 景观格局对杭州城市热环境年内变化的影响分析. 遥感技术与应用, 2018, 33(3): 398-407.
- [41] Li F, Sun W W, Yang G, Weng Q H. Investigating spatiotemporal patterns of surface urban heat islands in the Hangzhou metropolitan area, China, 2000-2015. Remote Sensing, 2019, 11(13): 1553.
- [42] Dihkan M, Karsli F, Guneroglu N, Guneroglu. Evaluation of urban heat island effect in Turkey. Arabian Journal of Geosciences, 2018, 11(8): 186.
- [43] Dwivedi A, Mohan B K. Impact of green roof on micro climate to reduce Urban Heat Island. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2018, 10: 56-69.
- [44] Shafizadeh-Moghadam H, Weng Q H, Liu H, Valavi R. Modeling the spatial variation of urban land surface temperature in relation to environmental and anthropogenic factors: a case study of Tehran, Iran. GIScience & Remote Sensing, 2020, 57(4): 483-496.
- [45] 徐涵秋. 基于城市地表参数变化的城市热岛效应分析. 生态学报, 2011, 31(14): 3890-3901.
- [46] 方刚. 基于 Landsat 8 卫星影像和地表参数的宿州市城市热岛效应分析. 土壤通报, 2014, 45(5): 1241-1246.
- [47] 黎良财, Lu D S, 张晓丽, 邓利, 买凯乐. 基于 Landsat8 卫星影像的重工业城市热岛效应研究——以柳州市为例. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(7): 74-80.
- [48] 余兆武, 郭青海, 孙然好. 基于景观尺度的城市冷岛效应研究综述. 应用生态学报, 2015, 26(2): 636-642.
- [49] Rasul A, Balzter H, Smith C. Spatial variation of the daytime surface urban cool island during the dry season in Erbil, Iraqi Kurdistan, from Landsat 8. Urban Climate, 2015, 14: 176-186.
- [50] Rasul A, Balzter H, Smith C. Diurnal and seasonal variation of surface urban cool and heat islands in the semi-arid city of Erbil, Iraq. Climate, 2016, 4(3): 42.
- [51] Yang X Y, Li Y G, Luo Z W, Chan P W. The urban cool island phenomenon in a high-rise high-density city and its mechanisms. International Journal of Climatology, 2017, 37(2): 890-904.
- [52] Govind N R, Ramesh H. The impact of spatiotemporal patterns of land use land cover and land surface temperature on an urban cool island: a case study of Bengaluru. Environmental Monitoring and Assessment, 2019, 191(5): 283.
- [53] Rasul A, Balzter H, Smith C, Remedios J, Adamu B, Sobrino J A, Srivani M, Weng Q H. A review on remote sensing of urban heat and cool islands. Land, 2017, 6(2): 38.
- [54] McMillin L M. Estimation of sea surface temperatures from two infrared window measurements with different absorption. Journal of Geophysical Research, 1975, 80(36): 5113-5117.
- [55] Becker F, Li Z L. Towards a local split window method over land surfaces. International Journal of Remote Sensing, 1990, 11(3): 369-393.
- [56] 覃志豪, Zhang M H, Karnieli A, Berliner P. 用陆地卫星 TM6 数据演算地表温度的单窗算法. 地理学报, 2001, 56(4): 456-466.
- [57] Dash P, Göttsche F M, Olesen F S, Fischer H 等等. Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data: theory and practice-current trends. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(13): 2563-2594.
- [58] 覃志豪, 李文娟, 徐斌, 张万昌. 利用 Landsat TM6 反演地表温度所需地表辐射率参数的估计方法. 海洋科学进展, 2004, 22(S1): 129-137.
- [59] 尹楠, 周云轩, 王黎明, 万力. NOAA/AVHRR 的分裂窗算法在地表温度反演中的应用. 测绘与空间地理信息, 2005, 28(4): 8-11, 32-32.
- [60] 毛克彪, 覃志豪, 宫鹏, 余琴. 劈窗算法 LST 精度评价和参数敏感性分析. 中国矿业大学学报, 2005, 34(3): 318-322.
- [61] 毛克彪, 覃志豪, 施建成, 宫鹏. 针对 MODIS 影像的劈窗算法研究. 武汉大学学报: 信息科学版, 2005, 30(8): 703-707.
- [62] 丁莉东, 覃志豪, 毛克彪. 基于 MODIS 影像数据的劈窗算法研究及其参数确定. 遥感技术与应用, 2005, 20(2): 284-289.
- [63] 丁凤, 徐涵秋. TM 热波段图像的地表温度反演算法与实验分析. 地球信息科学, 2006, 8(3): 125-130.
- [64] 毛克彪, 施建成, 覃志豪, 宫鹏, 徐斌, 蒋玲梅. 一个针对 ASTER 数据同时反演地表温度和比辐射率的四通道算法. 遥感学报, 2006, 10(4): 593-599.
- [65] 白洁, 刘绍民, 扈光. 针对 TM/ETM+遥感数据的地表温度反演与验证. 农业工程学报, 2008, 24(9): 148-154.
- [66] Jiménez-Muñoz J C, Cristóbal J, Sobrino J A, Soria G, Ninyerola M, Pons X. Revision of the single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat thermal-infrared data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(1): 339-349.
- [67] Li Z L, Tang B H, Wu H, Ren H Z, Yan G J, Wan Z M, Trigo I F, Sobrino J A. Satellite-derived land surface temperature: current status and perspectives. Remote Sensing of Environment, 2013, 131: 14-37.
- [68] Rozenstein O, Qin Z H, Derimian Y, Karnieli A. Derivation of land surface temperature for Landsat-8 TIRS using a split window algorithm. Sensors, 2014, 14(4): 5768-5780.
- [69] Jiménez-Muñoz J C, Sobrino J A, Skoković D, Mattar C, Cristóbal J. Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(10): 1840-1843.
- [70] 李召良, 段四波, 唐伯惠, 吴骅, 任华忠, 阎广建, 唐荣林, 冷佩. 热红外地表温度遥感反演方法研究进展. 遥感学报, 2016, 20(5): 899-920.

- [71] Morrison W, Kotthaus S, Grimmond C S B, Inagaki A, Yin TG, Gastellu-Etchegorry J P, Kanda M, Merchant C J. A novel method to obtain three-dimensional urban surface temperature from ground-based thermography. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 215: 268-283.
- [72] Weng Q H, Firozjaei M K, Sedighi A, Kiavarz M, Alavipanah S K. Statistical analysis of surface urban heat island intensity variations: a case study of Babol city, Iran. *GIScience & Remote Sensing*, 2019, 56(4): 576-604.
- [73] Wang H, Mao K B, Mu F Y, Shi J C, Yang J, Li Z L, Qin Z H 等等 A split window algorithm for retrieving land surface temperature from FY-3D MERSI-2 data. *Remote Sensing*, 2019, 11(8): 2083.
- [74] Li D, Liao W L, Rigden A J, Liu X P, Wang D G, Malyshev S, Shevliakova E. Urban heat island: aerodynamics or imperviousness? *Science Advances*, 2019, 5(4): eaau4299.
- [75] Fu P, Xie Y H, Weng Q H, Myint S, Meacham-Hensold K, Bernacchi C. A physical model-based method for retrieving urban land surface temperatures under cloudy conditions. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 230: 111191.
- [76] Duan S B, Li Z L, Gao C X, Zhao W, Wu H, Qian Y G, Leng P, Gao M F. Influence of adjacency effect on high-spatial-resolution thermal infrared imagery: implication for radiative transfer simulation and land surface temperature retrieval. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 245: 111852.
- [77] 高金龙, 陈江龙, 苏曦. 中国城市扩张态势与驱动机理研究学派综述. *地理科学进展*, 2013, 32(5): 743-754.
- [78] 胡珊珊. 武汉城市建设用地扩张模式研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.
- [79] He C Y, Liu Z F, Gou S Y, Zhang Q F, Zhang J S, Xu L L. Detecting global urban expansion over the last three decades using a fully convolutional network. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(3): 034008.
- [80] 王新生, 刘纪远, 庄大方, 王黎明. 中国特大城市空间形态变化的时空特征. *地理学报*, 2005, 60(3): 392-400.
- [81] 刘纪远, 王新生, 庄大方, 张稳, 胡文岩. 凸壳原理用于城市用地空间扩展类型识别. *地理学报*, 2003, 58(6): 885-892.
- [82] Patino J E, Duque J C. A review of regional science applications of satellite remote sensing in urban settings. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2013, 37: 1-17.
- [83] Masek J G, Lindsay F E, Goward S N. Dynamics of urban growth in the Washington DC metropolitan area, 1973-1996, from Landsat observations. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(18): 3473-3486.
- [84] Pesaresi M, Ehrlich D, Ferri S, Florczyk A, Carneiro Freire Sergio M, Halkia S, Syrris V 等等 Operating Procedure for the Production of The Global Human Settlement Layer from Landsat Data of the Epochs 1975, 1990, 2000, and 2014. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2016.
- [85] 张晓平, 刘卫东. 开发区与我国城市空间结构演进及其动力机制. *地理科学*, 2003, 23(2): 142-149.
- [86] 管驰明, 崔功豪. 100 多年来中国城市空间分布格局的时空演变研究. *地域研究与开发*, 2004, 23(5): 28-32.
- [87] 张岩, 李京, 陈云浩. 利用 SLEUTH 模型进行北京城市扩展模拟研究. *遥感信息*, 2007, (2): 50-54.
- [88] 刘盛和, 吴传钧, 沈洪泉. 基于 GIS 的北京城市土地利用扩展模式. *地理学报*, 2000, 55(4): 407-416.
- [89] 李晓文, 方精云, 朴世龙. 上海城市用地扩展强度、模式及其空间分异特征. *自然资源学报*, 2003, 18(4): 412-422.
- [90] 朱振国, 姚士谋, 许刚. 南京城市扩展与其空间增长管理的研究. *人文地理*, 2003, 18(5): 11-16.
- [91] 曾磊, 宗勇, 鲁奇. 保定市城市用地扩展的时空演变分析. *资源科学*, 2004, 26(4): 96-103.
- [92] 李书娟, 曾辉. 快速城市化地区建设用地沿城市化梯度的扩张特征——以南昌地区为例. *生态学报*, 2004, 24(1): 55-62.
- [93] 袁丽丽, 黄绿筠. 城市土地空间结构演变及其驱动机制分析. *城市发展研究*, 2005, 12(1): 64-69.
- [94] 王冠贤, 魏清泉. 广州城市空间形态扩展中土地供应动力机制的作用. *热带地理*, 2002, 22(1): 43-47.
- [95] 王翠平, 王豪伟, 李春明, 董仁才. 基于 DMSP/OLS 影像的我国主要城市群空间扩张特征分析. *生态学报*, 2012, 32(3): 942-954.
- [96] 邹欣怡, 赵伟, 蒲海霞, 周佳松. 重庆市南岸区城市边界扩张及生态环境效应研究. *水土保持研究*, 2019, 26(4): 252-258, 264-264.
- [97] 邓刘洋, 沈占锋, 柯映明. 城市建成区遥感影像边界提取与扩张分析. *地球信息科学学报*, 2018, 20(7): 996-1003.
- [98] 黄震. 城市周边基本农田背景下的土地利用变化模拟研究——以重庆市北碚区为例[D]. 重庆: 西南大学, 2018.
- [99] 张栋华, 叶长盛. 基于 CA-Markov 的南昌市城市增长边界划定研究. *人民长江*, 2019, 50(7): 64-70.
- [100] 王颖, 顾朝林, 李晓江. 中外城市增长边界研究进展. *国际城市规划*, 2014, 29(4): 1-11.
- [101] 万艳华, 程晓夏, 赵文恒. 城市空间增长边界(UGB)制定方法研究——以定州中心城区 UGB 的制定为例. *规划师*, 2013, 29(9): 113-117.
- [102] 龙瀛, 何永, 刘欣, 杜立群. 北京市限建区规划: 制订城市扩展的边界. *城市规划*, 2006, (12): 20-26.
- [103] 祝仲文, 莫滨, 谢芙蓉. 基于土地生态适宜性评价的城市空间增长边界划定——以防城港市为例. *规划师*, 2009, 25(11): 40-44.
- [104] 龙瀛, 韩昊英, 毛其智. 利用约束性 CA 制定城市增长边界. *地理学报*, 2009, 64(8): 999-1008.
- [105] 李咏华. 生态视角下的城市增长边界划定方法——以杭州市为例. *城市规划*, 2011, 35(12): 83-90.
- [106] Tayyebi A, Pijanowski B C, Pekin B. Two rule-based urban growth boundary models applied to the Tehran Metropolitan Area, Iran. *Applied Geography*, 2011, 31(3): 908-918.
- [107] Chakraborti S, Das D N, Mondal B, Shafizadeh-Moghadam H, Feng Y J. A neural network and landscape metrics to propose a flexible urban growth boundary: a case study. *Ecological Indicators*, 2018, 93: 952-965.
- [108] 吴欣昕, 刘小平, 梁迅, 陈广亮. FLUS-UGB 多情景模拟的珠江三角洲城市增长边界划定. *地球信息科学学报*, 2018, 20(4): 532-542.
- [109] 丛佃敏, 赵书河, 于涛, 陈诚, 王小标. 综合生态安全格局构建与城市扩张模拟的城市增长边界划定——以天水市规划区(2015—2030 年)为例. *自然资源学报*, 2018, 33(1): 14-26.
- [110] 李全宝. 基于 MCR 与 Markov-CA 模型的城镇增长边界划定研究——以江苏省新沂市为例. *中国国土资源经济*, 2019, 32(1): 83-88.

- [111] Ren J, Zhou W, Liu X L, Zhou L, Guo J, Wang Y H, Guan Y J, Mao J T, Huang Y H, Ma R R. Urban expansion and growth boundaries in an oasis city in an arid region; a case study of Jiayuguan City, China. *Sustainability*, 2020, 12(1): 210.
- [112] Zhang D C, Liu X P, Lin Z Y, Zhang X C, Zhang H H. The delineation of urban growth boundaries in complex ecological environment areas by using cellular automata and a dual-environmental evaluation. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 256: 120361.
- [113] He C Y, Liu Z F, Tian J, Ma Q. Urban expansion dynamics and natural habitat loss in China: a multiscale landscape perspective. *Global Change Biology*, 2014, 20(9): 2886-2902.
- [114] Liu X P, Huang Y H, Xu X C, Li X C, Li X, Ciais P, Lin P R, Gong K, Ziegler A D, Chen A P, Gong P, Chen J, Hu G H, Chen Y M, Wang S J, Wu Q S, Huang K N, Estes L, Zeng Z Z. High-spatiotemporal-resolution mapping of global urban change from 1985 to 2015. *Nature Sustainability*, 2020, 3(7): 564-570.
- [115] Liu X P, Pei F S, Wen Y Y, Li X, Wang S J, Wu C J, Cai Y L, Wu J G, Chen J, Feng K S, Liu J G, Hubacek K, Davis S J, Yuan W P, Yu L, Liu Z. Global urban expansion offsets climate-driven increases in terrestrial net primary productivity. *Nature Communications*, 2019, 10: 5558.
- [116] Chen G Z, Li X, Liu X P, Chen Y M, Liang X, Leng J Y, Xu X C, Liao W L, Qiu Y A, Wu Q L, Huang K N. Global projections of future urban land expansion under shared socioeconomic pathways. *Nature Communications*, 2020, 11: 537.
- [117] 王惠霞. 中部城市群城镇用地扩展时空格局与规模等级模式分异研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
- [118] Fei W C, Zhao S Q. Urban land expansion in China's six megacities from 1978 to 2015. *Science of the Total Environment*, 2019, 664: 60-71.
- [119] 鹿凤, 张绪芳, 汪玲玲, 余起怡, 韩海涛, 洪娅岚. 基于遥感影像的城市不透水面信息提取研究. *黑龙江工程学院学报*, 2018, 32(3): 15-18.
- [120] 余红娇. 干旱区城市不透水面的遥感估算及其气候效应分析——以乌鲁木齐市主城区为例[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2018.
- [121] Wang Y L, Li M H. Urban impervious surface detection from remote sensing images: a review of the methods and challenges. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2019, 7(3): 64-93.
- [122] Gong P, Li X C, Wang J, Bai Y Q, Chen B, Hu T Y, Liu X P, Xu B, Yang J, Zhang W, Zhou Y Y. Annual maps of global artificial impervious area (GAIA) between 1985 and 2018. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 236: 111510.
- [123] 沈文娟, 孙力, 明莉, 李明诗. 城市不透水面遥感监测研究进展. *安徽农业科学*, 2012, 40(10): 6347-6350.
- [124] Deguchi A & Hagishima S. Integration System for Urban Design from Planning Management to Visualization. Second Design and Decision Support Systems in Architecture & Urban Planning (Vaals, the Netherlands), August 15-19, 1994.
- [125] 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.
- [126] Ward D, Phinn S R, Murray A T. Monitoring growth in rapidly urbanizing areas using remotely sensed data. *The Professional Geographer*, 2000, 52(3): 371-386.
- [127] Phinn S, Stanford M, Scarth P, Murray A T, Shyy P T. Monitoring the composition of urban environments based on the vegetation-impervious surface-soil (VIS) model by subpixel analysis techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(20): 4131-4153.
- [128] Braun M, Herold M. Mapping imperviousness using NDVI and linear spectral unmixing of ASTER data in the Cologne-Bonn region (Germany)// *Proceedings of SPIE 5239, Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications, and Geology III*. Barcelona, Spain: SPIE, 2004: 274-284.
- [129] Wu C S, Murray A T. Estimating impervious surface distribution by spectral mixture analysis. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84(4): 493-505.
- [130] 陈爽, 张秀英, 彭立华. 基于高分辨卫星影像的城市用地不透水率分析. *资源科学*, 2006, 28(2): 41-46.
- [131] 王俊松, 杨逢乐, 贺彬, 赵磊. 利用 QuickBird 影像提取城市不透水率的研究. *遥感信息*, 2008, (3): 69-73.
- [132] Deng Y B, Fan F L, Chen R R. Extraction and analysis of impervious surfaces based on a spectral un-mixing method using Pearl River Delta of China Landsat TM/ETM+ imagery from 1998 to 2008. *Sensors*, 2012, 12(2): 1846-1862.
- [133] Zhang L, Weng Q H. Annual dynamics of impervious surface in the Pearl River Delta, China, from 1988 to 2013, using time series Landsat imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, 113: 86-96.
- [134] 程熙, 吴炜, 夏列钢, 罗瑞, 沈占锋. 集成夜间灯光数据与 Landsat TM 影像的不透水面自动提取方法研究. *地球信息科学学报*, 2017, 19(10): 1364-1374.
- [135] 周玄德, 郭华东, 孜比布拉·司马义. 城市扩张过程中不透水面空间格局演变及其对地表温度的影响——以乌鲁木齐市为例. *生态学报*, 2018, 38(20): 7336-7347.
- [136] Hodgson M E, Jensen J R, Tullis J A, Riordan K D, Archer C M. Synergistic use of lidar and color aerial photography for mapping urban parcel imperviousness. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2003, 69(9): 973-980.
- [137] Yang L M, Xian G, Klaver J M, Deal B. Urban land-cover change detection through sub-pixel imperviousness mapping using remotely sensed data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2003, 69(9): 1003-1010.
- [138] 岳文泽, 吴次芳. 基于混合光谱分解的城市不透水面分布估算. *遥感学报*, 2007, 11(6): 914-922.
- [139] 徐涵秋. 一种快速提取不透水面的新型遥感指数. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2008, 33(11): 1150-1153.
- [140] 潘竞虎, 李晓雪, 冯兆东. 基于 V-I-AP 模型的兰州市不透水面与植被盖度时空格局分析. *资源科学*, 2010, 32(3): 520-527.
- [141] 夏俊士, 杜培军, 逢云峰, 曹文, 王晓玲, 何建国, 陈鑫. 基于高光谱数据的城市不透水面提取与分析. *中国矿业大学学报*, 2011, 40(4): 660-666.
- [142] Xia J S, Du P J, Cao W. Urban impervious surface extraction from remote sensing image based on nonlinear spectral mixture model. *光子学报*,

- 2011, 40(1): 13-18.
- [143] 王浩, 吴炳方, 李晓松, 卢善龙. 流域尺度的不透水面遥感提取. 遥感学报, 2011, 15(2): 388-400.
- [144] 朱爽, 崔有祯, 张锦水. 利用复合光谱纹理特征进行城市边缘区不透水层提取. 测绘通报, 2016, (11): 26-30.
- [145] 徐成华, 马志强, 乔晓冬, 王军锋, 宋雨娇. 基于规则的高分影像不透水层提取技术研究. 测绘与空间地理信息, 2017, 40(10): 1-4, 7-7.
- [146] 田玉刚, 徐韵, 杨晓楠. 一种提取城市多种不透水层的垂直不透水层指数. 测绘学报, 2017, 46(4): 468-477.
- [147] Kuang W H. Mapping global impervious surface area and green space within urban environments. *Science China Earth Sciences*, 2019, 62(10): 1591-1606.
- [148] Li W L. Mapping urban impervious surfaces by using spectral mixture analysis and spectral indices. *Remote Sensing*, 2020, 12(1): 94.
- [149] Deng C B, Zhu Z. Continuous subpixel monitoring of urban impervious surface using Landsat time series. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 238: 110929.
- [150] 范佳辉, 张亚丽, 李明诗. 基于空间光谱信息协同的城市不透水层提取方法比较研究. 南京林业大学学报: 自然科学版. (2020-06-18). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1161.S.20200618.1411.004.html>.
- [151] 李德仁, 罗晖, 邵振峰. 遥感技术在不透水层提取中的应用与展望. 武汉大学学报: 信息科学版, 2016, 41(5): 569-577, 703-703.
- [152] Goodchild M F. Citizens as sensors: the world of volunteered geography. *GeoJournal*, 2007, 69(4): 211-221.
- [153] Chen M X, Arribas-Bel D, Singleton A. Understanding the dynamics of urban areas of interest through volunteered geographic information. *Journal of Geographical Systems*, 2019, 21(1): 89-109.
- [154] Hagenauer J, Helbich M. Mining urban land-use patterns from volunteered geographic information by means of genetic algorithms and artificial neural Networks. *International Journal of Geographical Information Science*, 2012, 26(6): 963-982.
- [155] 施英俊, 高健, 雷亚君, 朱雅丽, 张绘芳, 地力夏提·包尔汉, 张景路. 阿尔泰山森林景观特征及其适宜粒度分析. 西部林业科学, 2019, 48(1): 63-69.
- [156] Luck M, Wu J G. A gradient analysis of urban landscape pattern: a case study from the Phoenix metropolitan region, Arizona, USA. *Landscape Ecology*, 2002, 17(4): 327-339.
- [157] 国巧真, 蒋卫国, 李京, 陈云浩, 易文斌. 1985-2006 年北京市海淀区城市景观格局演变及驱动因素分析. 城市环境与城市生态, 2008, 21(1): 18-21.
- [158] Batty M. Cellular automata and urban form: a primer. *Journal of the American Planning Association*, 1997, 63(2): 266-274.
- [159] Romero-Calcerrada R, Perry G L W. The role of land abandonment in landscape dynamics in the SPA 'Encinares del río Alberche y Cofio', Central Spain, 1984-1999. *Landscape and Urban Planning*, 2004, 66(4): 217-232.
- [160] Kabisch N, Selsam P, Kirsten T, Lausch, Bumberger J. A multi-sensor and multi-temporal remote sensing approach to detect land cover change dynamics in heterogeneous urban landscapes. *Ecological Indicators*, 2019, 99: 273-282.
- [161] Ramachandra T V, Aithal B H, Sanna D D. Insights to urban dynamics through landscape spatial pattern analysis. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, 18: 329-343.
- [162] 徐建华, 岳文泽, 谈文琦. 城市景观格局尺度效应的空间统计规律——以上海中心城区为例. 地理学报, 2004, 59(6): 1058-1067.
- [163] 杜秀敏, 黄义雄, 金蓉, 刘诗苑. 厦门市景观格局的 BP 人工神经网络模型. 资源科学, 2008, 30(9): 1362-1366.
- [164] 逯萍, 张博, 李明玉, 金明喜, 刘桂英. 基于 ALOS 影像的延吉市城市景观格局研究. 延边大学农学学报, 2010, 32(4): 243-248.
- [165] 范辰, 刘影. 2000-2011 年南昌市景观格局变化分析. 环境科学与技术, 2014, 37(8): 175-178, 197-197.
- [166] 陈文术, 王胜男, 杨波. 2007—2017 年三亚城市景观空间格局动态特征及驱动因素分析. 环境监测管理和技术, 2019, 31(3): 27-31.
- [167] 付凤杰, 刘珍环, 黄千杜. 深圳市福田区三维城市景观格局变化特征. 生态学报, 2019, 39(12): 4299-4308.
- [168] 潘泓君. 成都市及其城市小区景观格局对热环境的影响研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2018.
- [169] 李莹. 城市生态安全评价研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2014.
- [170] 吴健生, 马洪坤, 彭建. 基于“功能节点—关键廊道”的城市生态安全格局构建——以深圳市为例. 地理科学进展, 2018, 37(12): 1663-1671.
- [171] Brauch H G. Landscape ecology and environmental security: basic concepts and regional applications for the mediterranean. In: Petrosillo I, Müller F, Jones K B, Zurlini G, Krauze K, Victorov S, Li B L, Kepner W G, eds. *Use of Landscape Sciences for the Assessment of Environmental Security*. Dordrecht: Springer, 2008.
- [172] Hodson M, Marvin S. 'Urban ecological security': a new urban paradigm? *International Journal of Urban and Regional Research*, 2009, 33(1): 193-215.
- [173] 张浩, 汤晓敏, 王寿兵, 郭林, 雍怡, 王祥荣. 珠江三角洲快速城市化地区生态安全研究——以佛山市为例. 自然资源学报, 2006, 21(4): 615-624.
- [174] 郭斌, 任志远. RS、GIS 支持下的城市生态安全动态研究——以西安为例. 干旱区资源与环境, 2009, 23(10): 64-70.
- [175] 麻秋玲, 林惠花. 基于突变级数法的福州市生态安全评价. 福建师范大学学报: 自然科学版, 2013, 29(3): 118-124.
- [176] Lu X L, Yao S M, Fu G, Lv X F, Mao Y N. Dynamic simulation test of a model of ecological system security for a coastal tourist city. *Journal of Destination Marketing & Management*, 2019, 13: 73-82.
- [177] 黄焕春, 陈逸伦, 邓鑫, 许浩, 郑鑫. 基于地理设计的城市扩张与生态安全格局的协调优化研究——以天津滨海新区为例. 西部人居环境学刊, 2019, 34(3): 69-75.
- [178] 艾媛巧, 朱红梅, 谭雪兰. 基于 RS/GIS 与 GM(1,1) 模型的长沙市城市生态安全评估与预测. 江西农业学报, 2019, 31(7): 131-137.

- [179] Corvalán C, Briggs D J, Kjellstrom T. Development of environmental health indicators//Briggs D, Corvalán C, Nurminen M, eds. *Linkage Methods for Environment and Health Analysis*. Geneva: UNEP, USEPA, WHO, 1996: 19-53.
- [180] 左伟, 周慧珍, 王桥. 区域生态安全评价指标体系选取的概念框架研究. *土壤*, 2003, 35(1): 2-7.
- [181] 杨俊, 李雪铭, 张云, 孙才志, 徐惠民, 冀保程. 基于因果网络模型的城市生态安全空间分异——以大连市为例. *生态学报*, 2008, 28(6): 2774-2783.
- [182] 李佩武, 李贵才, 张金花, 徐凤, 陈莉. 城市生态安全的多种评价模型及应用. *地理研究*, 2009, 28(2): 293-302.
- [183] 王晶, 张雅君. 基于“D-P-S-R”模型的节水型绿色生态居民生活小区评价指标体系构建. *环境保护与循环经济*, 2011, 31(2): 45-49.
- [184] Han B L, Liu H X, Wang R S. Urban ecological security assessment for cities in the Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan region based on fuzzy and entropy methods. *Ecological Modelling*, 2015, 318: 217-225.
- [185] Wang Z, Zhou J Q, Loaiciga H, Guo H C, Hong S. A DPSIR Model for ecological security assessment through indicator screening: a case study at Dianchi lake in China. *PLoS One*, 2015, 10(6): e0131732.
- [186] Liu P, Jia S J, Han R M, Zhang H W. Landscape pattern and ecological security assessment and prediction using remote sensing approach. *Journal of Sensors*, 2018, 2018: 1058513.
- [187] Guo S S, Wang Y H. Ecological security assessment based on ecological footprint approach in Hulunbeir grassland, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(23): 4805.
- [188] 韩雅琴, 白中科, 张继栋, 潘健. “一带一路”背景下东南亚地区生态安全评价研究. *生态经济*, 2020, 36(6): 181-187.
- [189] 郭利刚, 冯珍珍, 刘庚, 石瑛, 王捷, 林菲, 马小红. 基于物元模型的汾河流域土地生态安全评价. *生态学杂志*, 2020, 39(6): 2061-2069.
- [190] Bi M L, Xie G D, Yao C Y. Ecological security assessment based on the renewable ecological footprint in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China. *Ecological Indicators*, 2020, 116: 106432.
- [191] Yang Y, Cai Z X. Ecological security assessment of the Guanzhong Plain urban agglomeration based on an adapted ecological footprint model. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 260: 120973.
- [192] Huang K N, Li X, Liu X P, Seto K C. Projecting global urban land expansion and heat island Intensification through 2050. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(11): 114037.
- [193] Voogt J A, Oke T R. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 86(3): 370-384.
- [194] 刘强军, 梁赞, 宋军芳, 张红霞, 赵慧琴. 近 42 年山西省晋城市地温与气温时空特征研究. *江苏农业科学*, 2020, 48(6): 240-245.
- [195] Al-Seroury F A. Temporal changes of air pollutants and land surface temperature around Jeddah desalination power plant, K S A. *Journal of American Science*, 2012, 8(2): 503-508.
- [196] Zheng S, Zhou R Y, Singh R P, Wu Y Z, Ye Y M, Wu C F 等等 The spatiotemporal distribution of air pollutants and their relationship with land-use patterns in Hangzhou City, China. *Atmosphere*, 2017, 8(6): 110.
- [197] Huang F H, Yu Y, Feng T H. Automatic extraction of urban impervious surfaces based on deep learning and multi-source remote sensing data. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2019, 60: 16-27.
- [198] 苏高华. 基于省域尺度的中国城市住宅用地扩张演变过程研究. *水土保持研究*, 2011, 18(3): 102-105.
- [199] Wang L, Li C C, Ying Q, Cheng X, Wang X Y, Li X Y, Hu L Y, Liang L, Yu L, Huang H B, Gong P. China's urban expansion from 1990 to 2010 determined with satellite remote sensing. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(22): 2802-2812.
- [200] Arnaiz-Schmitz C, Schmitz M F, Herrero-Jáuregui C, Gutiérrez-Angones J, Pineda F D, Montes C. Identifying socio-ecological networks in rural-urban gradients; diagnosis of a changing cultural landscape. *Science of the Total Environment*, 2018, 612: 625-635.
- [201] 陈晓红, 周宏浩. 城市化与生态环境关系研究热点与前沿的图谱分析. *地理科学进展*, 2018, 37(9): 1171-1185.
- [202] 高启晨, 陈利顶, 吕一河, 李国强, 姜昌亮. 西气东输工程沿线陕西段区域生态安全格局设计研究. *水土保持学报*, 2005, 19(4): 164-168, 172.
- [203] 李双成, 赵志强, 王仰麟. 中国城市化过程及其资源与生态环境效应机制. *地理科学进展*, 2009, 28(1): 63-70.
- [204] 方创琳, 周成虎, 顾朝林, 陈利顶, 李双成. 特大城市群地区城镇化与生态环境交互耦合效应解析的理论框架及技术路径. *地理学报*, 2016, 71(4): 531-550.
- [205] 吕天阳, 郭岱. 基于遥感和 PSR 模型的城市景观生态安全评价. *绿色科技*, 2019, (6): 144-148.