

北京市不同功能区不透水地表时空变化差异

乔 琨^{1,2,3}, 朱文泉^{1,2}, 胡德勇³, 郝 明⁴, 陈姗姗³, 曹诗颂³

(1. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;

2. 北京师范大学地理科学学部遥感科学与工程研究院, 北京 100875; 3. 首都师范大学
资源环境与旅游学院, 北京 100048; 4. 河北中核岩土工程有限责任公司, 石家庄 050021)

摘要: 目前有关北京市不透水地表的相关研究多数是从整体层面开展, 忽略了其内部功能区的作用及差异。运用分类回归树(CART)及系列变化检测模型得到北京市1991年、2001年、2011年和2015年四期不透水地表分布, 并运用标准差椭圆、洛伦兹曲线、贡献指数及景观格局理论对各功能区不透水地表的时空变化进行分析。结果显示: 1991-2015年北京市不透水地表的总面积增加了约144.18%, 分布的主导方向由早期的东北—西南趋向于当前的正北—正南。各功能区间不透水地表的空间分布异质性逐渐减弱, 但贡献指数值存在很大差异: 功能拓展区的贡献指数最高, 其四年中的最低值(1.79)高于其他功能区四年最高值, 是北京市不透水地表增长最主要的贡献区; 功能核心区的蔓延度指数值最高, 约为其他功能区的2倍, 为不透水地表的优势聚集区; 发展新区的贡献值由负值变为正值并成倍增长, 成为北京市不透水地表增长的主要源区; 生态涵养发展区的贡献指数始终为负, 并逐年减小。不同类型不透水地表的景观指数和质心偏移均存在差异, 高盖度不透水地表的形状指数和斑块密度值最小, 分布最为集中, 对生态环境影响较大, 北京市在未来发展过程中应合理规划控制其空间格局及增长模式, 尽量减缓其增长速度及团聚程度。

关键词: 不透水地表; 景观格局; CART; 功能区; 洛伦兹曲线; 贡献指数; 北京市

DOI: 10.11821/dlxb201711008

1 引言

2014年《国家新型城镇化规划》指出, 中国百万人口以上的城市已达142个, 其中千万人口以上的城市有6个, 并预测到2020年中国常住人口城镇化率将达到60%左右^[1]。城市是人类活动最为强烈的区域, 随着城市化进程的不断加快, 大量的自然地表不断被道路、高楼建筑等人工地表所替代^[2-4], 生态问题日益严重, 城市下垫面性质的改变及其对生态环境的影响已经成为政府及学者广泛关注的一个焦点。

不透水地表作为典型的城市下垫面类型, 一般指水不能直接渗透到土壤中的人工地貌特征, 包括道路、停车场、建筑物屋顶等^[5-6]。不透水地表具有蓄热能力强、蒸散能力

收稿日期: 2017-03-29; 修订日期: 2017-07-10

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2015CB953603); 国家自然科学基金项目(41671339); 地表过程与资源生态国家重点实验室资助项目(2017-FX-01(1)) [Foundation: National Basic Research Program of China, No.2015CB953603; National Natural Science Foundation of China, No.41671339; State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, No.2017-FX-01(1)]

作者简介: 乔琨(1989-), 女, 河北人, 博士, 研究方向为资源环境遥感、植被遥感。E-mail: qiaoyingying2009@126.com

通讯作者: 胡德勇(1974-), 男, 湖南人, 博士, 教授, 主要研究领域为资源环境遥感、自然灾害遥感监测与评估。

E-mail: deyonghu@163.com

弱及阻碍气流传输等特点^[7],对城市的能量辐射平衡、地表热环境、地表径流以及局地气候等都有很大的影响^[8-12]。不透水地表覆盖度(Impervious Surfaces Percentage, ISP)是指单位面积地表中不透水地表面积所占百分比^[13-15],其空间分布格局是对城市土地利用形态的一种连续化描述,能较好地反映出城市的变化形态和进程,而且ISP具有一定的稳定性,不易受季节、物候等其他外界因素的影响,是常用的城市生态环境考核指标之一。

北京作为中国政治、文化、国际交往和科技创新中心,是北方城市化水平最高的地区之一,近年来经历了快速的城市化进程。目前已有多位学者针对北京市不透水地表时空变化及生态影响等进行了研究^[16],肖荣波等和王静等分别用分类回归树(Classification and Regression Tree, CART)模型和V-I-S模型反演得到了北京市主城区不透水地表分布结果,发现其不透水地表表现出极强的空间梯度性,从市中心到郊区不透水地表盖度逐渐降低,不透水地表扩张面积和速度逐年增加^[17-18]。崔耀平和Hao等基于Landsat系列数据和多期土地利用变化数据集,提取得到长时间序列的北京市不透水地表空间数据和地表温度数据,发现北京市主城区不透水地表主要沿环线扩展,不透水地表的比例是影响地表温度的主要因素,且不透水地表的增温作用要大于植被层的降温作用^[19-20]。针对现有研究发现,此前的研究多数是从城市整体结构层面出发,针对北京市主城区来进行研究,忽略了北京市内部各功能区及区县的作用、差异和相互影响,不能够充分阐释北京市不透水地表的变化过程及发展模式。

此外,北京市同一功能区或不同功能区的不透水地表斑块有着不同的形状、组分类型以及空间形态,这些不同导致了不透水地表的异质性,会对城市环境产生影响^[21-22]。要了解不透水地表的动态模式及其相互作用,准确地量化其空间景观格局是必要的。将景观格局理论与遥感技术相结合用于城市不透水地表的研究,有助于分析不同尺度下不透水地表格局的动态发展模式及其对生态环境的影响。但目前相关的研究基本上都是基于不透水地表“硬”分类结果,而极少涉及“软”分类^[23-24],即基于亚像元结果来分析其景观格局。相比于“硬”分类方法得到的不透水地表,“软”分类结果的不透水地表结果能够提供更加丰富及真实的城市景观结构描述。

本文基于CART及系列变化检测模型提取1991年、2001年、2005年、2011和2015年北京市亚像元不透水地表数据,在此基础上主要对1991年、2001年、2011年和2015年不透水地表结果进行研究。首先分析了北京市整体及各功能区、区县的不透水地表时空分布特征和变化趋势,同时讨论了各功能区的贡献指数,明确各区的地位和作用;然后将连续的不透水地表盖度转换为离散的不透水地表类型,结合景观格局理论定量分析了北京市整体及各功能区不同百分比不透水地表景观的空间模式,以期为北京市城市规划和资源管理提供决策依据。

2 研究区和数据

2.1 研究区

北京市地处华北平原北部,位于39.4°N~41.6°N、115.7°E~117.4°E之间,地势自西北向东南倾斜,西北部为低山丘陵地带,东南部为平原地带。四季分明,地表植被冬枯夏荣,季相变化明显。全市总面积为16412 km²,其中主城区面积为1369 km²。近年,人口总数不断增加,城镇化水平逐年提高,到2015年北京市常住人口为2170.5万,其中城镇人口1877.7万,城镇化水平达到86.5%,城市化进程不断加快。

根据2005年发布的《中共北京市委北京人民政府关于区县功能定位及评价指标的指导意见》以及《北京城市总体规划(2004-2020年)》,北京市16个区县被划分为4类功能区(图1),分别是:① 功能核心区,是北京“四个服务”职能的主要承载区;② 城市功能拓展区,是北京面向全国和世界的高端服务功能的重要承载区,也是经济辐射力和控制力的主要支撑区;③ 城市发展新区,是北京经济未来发展的新增长极,也是高新技术产业的聚集区;④ 生态涵养发展区,是北京生态屏障和重要水源保护地,为北京可持续发展提供保障。

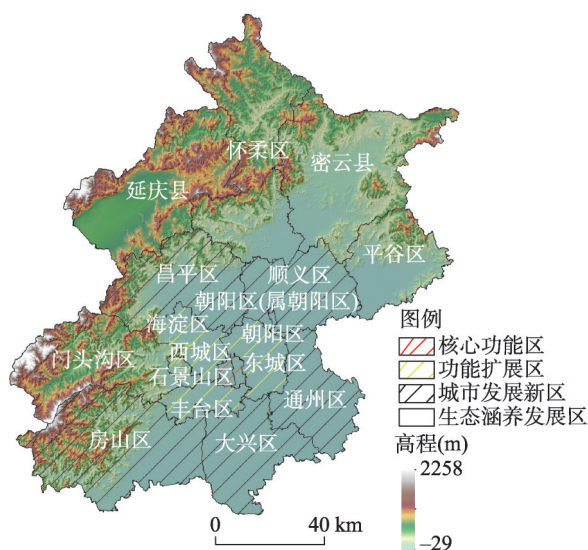


图1 研究区示意图

Fig. 1 Location of the study area and its functional zones

2.2 数据

本文选取1991年(5月16日)、2001年(5月19日、8月31日)、2005年(5月6日、11月14日)以及2011年(6月8日)的Landsat 5 TM数据(分辨率为30 m),2015年(2月11日、9月7日)的Landsat 8 OLI数据(分辨率为30 m)作为城市不透水地表盖度提取的主要数据源。同时采用2005年同期覆盖研究区核心区的高分辨率遥感影像(QuickBird,分辨率为2.4 m)作为2005年不透水地表盖度估算中训练/测试样本获取的数据源。此外,本文还收集了1992年、2001年、2005年、2011年和2016年覆盖研究区的DMSP/OLS和VIIRS/NPP夜间灯光数据辅助预测,对上述数据进行了精确的几何配准和重投影,投影方式为UTM,坐标系为WGS-84,将DMSP/OLS和VIIRS/NPP夜间灯光数据用最近邻法重采样成与Landsat影像统一的分辨率30 m。

3 研究方法

3.1 不透水地表的提取

分类回归树(CART)模型是当前不透水地表提取中常用的一种方法,它是一种二分递归的决策树结构模型,可以有效处理大量、高维数据和非线性数据,并且对输入数据没有统计分布要求,允许连续变量或者离散变量的输入,因此有利于大范围不透水地表信息的提取。目前该方法已成为美国国家土地覆盖数据库(NLCD)中不透水地表提取的主要技术支撑^[29],本文选择此方法来提取北京市不透水地表,主要包括三个步骤:① 对覆盖北京主城区的QuickBird遥感影像进行非监督分类,归并得到不透水地表二值分类结果。然后通过邻域统计得到空间分辨率为30 m的训练和测试样本;② 以2005年Landsat 5 TM影像的7个波段及对应的夜间灯光数据作为预测独立变量,以QuickBird影像统计得到的30 m分辨率不透水地表盖度数据作为目标变量,基于CART模型估算2005年北京市不透水地表盖度;③ 利用1991年、2001年、2011年Landsat 5 TM影像和2015年Landsat 8 OLI影像的7个波段和相关的夜间灯光数据,结合2005年不透水地表盖度结

果,基于CART和系列变化检测模型估算对应年份的不透水地表盖度。在此建模过程中,样本数据的制备主要考虑到城市化进程大多是向前推进的,对应像元的不透水地表盖度大多会随着时间推进而增加,因而利用2005年不透水地表盖度数据和夜间灯光数据的组合,收集了高城市化区域的不透水地表盖度作为样本数据。

基于CART和系列变化检测模型估算的不透水地表盖度采用十折交叉验证的方式进行精度评价,也就是将样本数据首先分成10份,每次抽选出9份用于训练、1份用于验证,依次循环10次^[25]。由于2005年有覆盖研究区核心区的QuickBird高分辨率遥感影像,因此首先对2005年的模型估算结果采用QuickBird影像提取得到的不透水地表盖度数据作为测试数据进行评估,其余年份则利用2005年不透水地表盖度数据和夜间灯光数据的组合,通过收集高城市化区域的不透水地表盖度作为测试数据(此处假定高城市化区域的不透水地表盖度在1991-2015年期间无变化或变化很小),并结合Google Earth高分辨率影像进行评价。

3.2 标准差椭圆和洛伦兹曲线

为了探讨北京市不透水地表的空间变化特征,运用标准差椭圆对其进行分析。标准差椭圆法是分析空间分布方向性特征的经典方法之一,反映的是空间要素组织的总体轮廓和主导分布方向,其中椭圆长短半轴长度反映空间格局总体要素的集中密度,偏角反映格局的主导方向^[26],标准差椭圆各关键参数的计算见文献^[27-28]。

此外,运用洛伦兹曲线来分析北京市不透水地表格局的空间异质性变化。洛伦兹曲线是美国统计学家M Lorenz为研究财富、土地和工资收入是否公平而提出的,它利用频率累积数绘制成的曲线来刻画不平等(集中或分散)程度,能够直观的表现收入分配平等或不平等的状况^[29]。洛伦兹曲线也可以按空间(地区)来绘制,所得结果能形象、直观地描述地理要素分布在地域空间上的集中化程度与异质性^[30]。

3.3 贡献指数

本文计算了各功能区的贡献指数值来定量分析其在北京市不透水地表发展过程中的作用,公式如式(1):

$$CI = (\overline{ISP}_F - \overline{ISP}) \times (S_F / S) \quad (1)$$

式中:CI为贡献指数; \overline{ISP}_F 、 \overline{ISP} 分别代表各功能区和整个北京市不透水地表盖度的均值; S_F 、S分别为各功能区和整个北京市的区域面积。

3.4 景观格局变化分析

通过计算面积加权质心和景观指数来分析北京市不透水地表景观格局的变化特征。空间质心分析主要用于研究不同盖度不透水地表景观的动态变化,景观指数用来反映不透水地表景观的结构组成和空间配置特征。其中景观水平的指数用于描述不透水地表的整体特征,选择常用的蔓延度指数(CONTAG);斑块类型水平的指数着重用于对亚像元级别各类型不透水地表特征进行分析,包括斑块密度(PD)和形状指数(LSI)。

CONTAG描述的是景观里不同斑块类型的团聚程度或延展趋势,CONTAG越高,斑块离散程度越低;PD表征景观被分割的破碎程度,反映其空间结构的复杂性,PD越大,破碎程度越高;LSI是斑块聚合或离散程度的量度,LSI越大,斑块越离散^[31]。

将北京市不透水地表景观按盖度值等间距划分为5类,作为景观格局分析的5种类型,分别是低盖度不透水地表($0 \leq ISP \leq 0.2$)、中低盖度不透水地表($0.2 < ISP \leq 0.4$)、中盖度不透水地表($0.4 < ISP \leq 0.6$)、中高盖度不透水地表($0.6 < ISP \leq 0.8$)和高盖度不透水地表($0.8 < ISP \leq 1.0$)。

4 结果

4.1 北京市不透水地表空间格局总体变化

1991年、2001年、2011年和2015年北京市不透水地表盖度估算结果如图2所示。将2005年模型估算的不透水地表盖度与同年QuickBird高分辨率遥感影像提取得到的结果进行对比，其平均误差（AE）为12.8%、相对误差（RE）为0.39、相关系数（*R*）为0.86。其余年份的精度评估结果如表1所示，4个年份预测结果的AE在14.50%以内、RE在0.44以内、*R*均大于0.73。

1991年以来北京市不透水地表扩张明显（图2），呈单一核心的“摊大饼”式发展。1991年北京市不透水地表明显集中于功能核心区和功能拓展区，零星分布于发

表 1 不透水地表盖度结果精度验证
Tab. 1 Accuracy assessment for impervious surface results

年份	AE(%)	RE	R
1991 年	10.40	0.43	0.73
2001 年	8.90	0.36	0.80
2011 年	8.60	0.44	0.76
2015 年	14.50	0.41	0.78

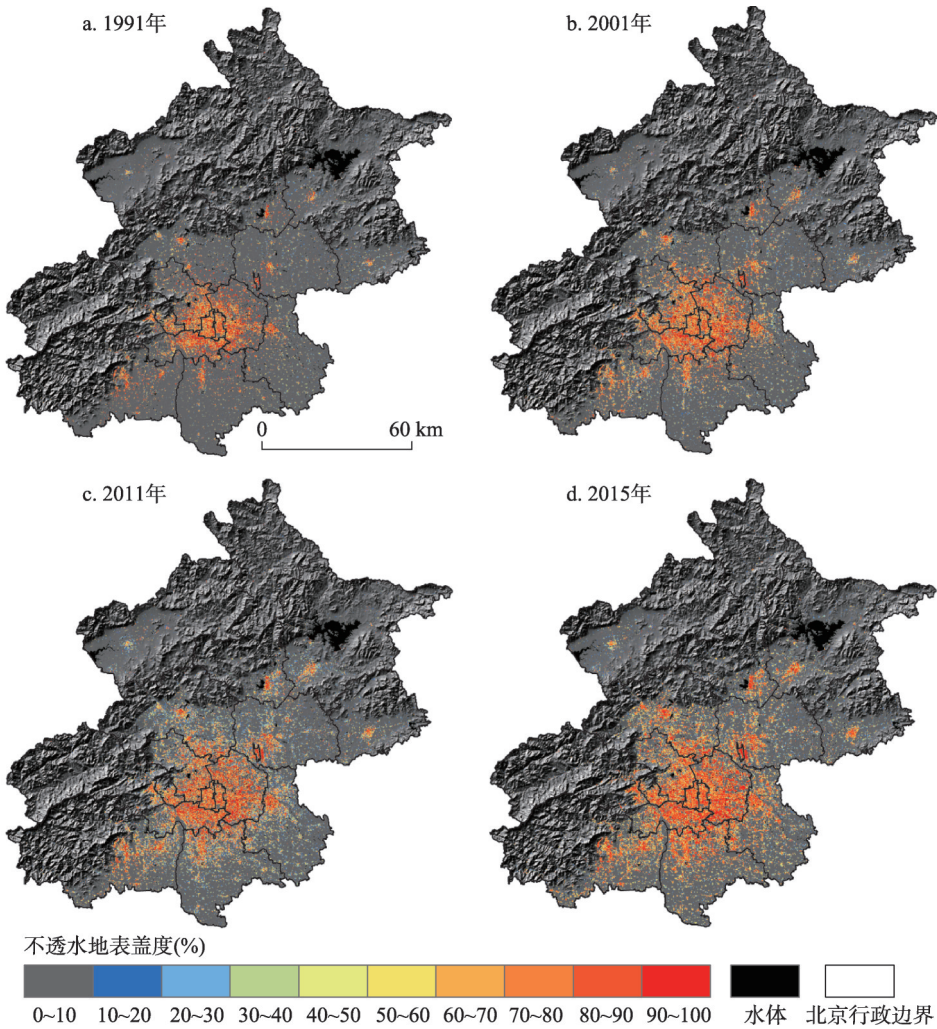


图2 北京市不透水地表盖度空间分布
Fig. 2 Spatial pattern of impervious surface percentage in Beijing

展新区。2001年不透水地表范围由中心区逐渐向四周辐散，发展新区开始出现小范围连续不透水地表。2011年，发展新区已成为不透水地表新的聚集区，不透水地表成片分布。2015年不透水地表范围继续扩大，盖度值明显升高。

不透水地表盖度与图斑面积乘积之和表示完全不透水地表面积，经统计可知1991年、2001年、2011年和2015年北京市完全不透水地表面积分别为714.69 km²、1109.65 km²、1429.77 km²和1745.13 km²，从1991年到2015年不透水地表面积增加了约144.18%，同时不透水地表盖度均值也增长明显，北京市不透水地表呈现快速递增的发展趋势。

从1991年到2015年标准差椭圆范围逐渐缩小且向北移动（图3），主轴方向偏转角从1991年的47.15°逐渐减小到2015年的38.82°（表2），表明北京市不透水地表空间分布总体上呈东北—西南方向主导的格局，但这种格局在逐渐弱化，有向正北—正南方向转变的趋势。

从长短半轴长度变化（表2）来看，1991-2001年长半轴由72.37 km增长为73.34 km，短半轴由49.42 km减小为46.88 km，表明不透水地表在主轴方向上呈现弱离散化，在辅轴方向上出现极化；2001-2015年长半轴由73.34 km持续减小为60.13 km，短半轴由46.88 km减小为41.41 km，说明不透水地表在主轴方向上出现极化，在辅轴方向上进一步呈极化发展。

4.2 北京市各功能区不透水地表空间格局变化差异

1991-2015年，基于各区县不透水地表统计得到的洛伦兹曲线的弯曲程度在逐渐减缓（图4），说明北京市不透水地表在16个区县内的空间分布异质性在不断减弱。进一步探讨各功能区及区县对不透水地表的贡献作用（图5），功能拓展区的贡献指数最高且逐年增大，表明其不透水地表盖度均值远高于北京市不透水地表盖度均值，是北京市不透水地表最主要的贡献区；其次是功能核心区和发展新区，功能核心区不透水地表盖度均值虽然最高，但受限于其区域面积，贡献指数相对较小且变化不大，为北京市不透水地表第二主要贡献区；而发展新区不透水地表快速扩展，贡献指数逐年迅速增长，由负值变



图3 1991-2015年北京市不透水地表空间格局变化
Fig. 3 The spatial pattern evolution of impervious surface in Beijing from 1991 to 2015

表2 1991-2015年北京市不透水地表空间分布
标准差椭圆参数变化

Tab. 2 The variation of parameter values of standard ellipsed in Beijing from 1991 to 2015

年份	偏转角(°)	主轴半径(km)	辅轴半径(km)
1991年	47.15	72.37	49.42
2001年	43.79	73.34	46.88
2011年	40.05	66.37	44.69
2015年	38.82	60.13	41.41

为正值并成倍增长,在逐步取代功能核心区的地位;最后是生态涵养发展区,贡献指数一直为负值,并逐年减小,表明虽然其不透水地表面积在逐渐扩大,但其不透水地表盖度均值始终远低于北京市不透水地表盖度均值。

从各区县之间的对比来看,区县间的贡献指数存在着很大的差异,以2015年为例,贡献指数最大的是朝阳区,属于功能拓展区,贡献指数为1.21;贡献指数最小的是平谷区,属于生态涵养发展区,贡献指数为-1.15。此外,同一功能区内区县间的贡献指数也存在着一定的差异,只有功能核心区的两个区贡献指数值差别不大,比较稳定。但功能区内各区县的贡献指数年间变化趋势与功能区的变化趋势基本保持一致。

4.3 北京市各功能区不透水地表景观格局变化差异

4.3.1 质心变化 北京市各类型不透水地表一直都呈现以功能核心区为中心的集聚态势,其景观质心主要集中在西城区(属功能核心区)到朝阳区(属城市功能拓展区)之间的地带(图6)。1991-2015年,高盖度和中盖度不透水地表前期在东北方向增长较快,其质心先趋向于东北方向偏移,继而在北部增长较快,质心趋向于北方;中高盖度不透水地表质心的变化趋势为持续向东北方向偏移;中低盖度不透水地表质心1991-2001年向西南方向偏移,2001-2011年向东北方向偏移,2011-2015年向西北方向偏移;低盖度不透水地表质心的变化为先向南方偏移,再向西方偏移,继而向北,呈“U”型。2011-2015年

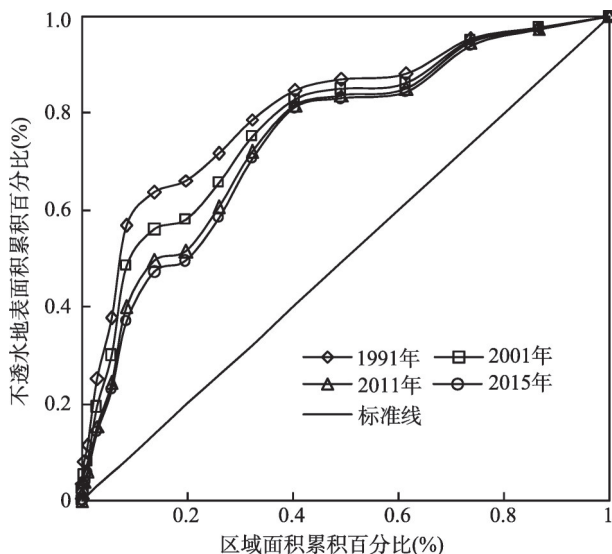


图4 1991-2015年北京市不透水地表空间分布洛伦兹曲线
Fig. 4 Spatial Lorenz curve in Beijing metropolitan region in 1991, 2001, 2011 and 2015

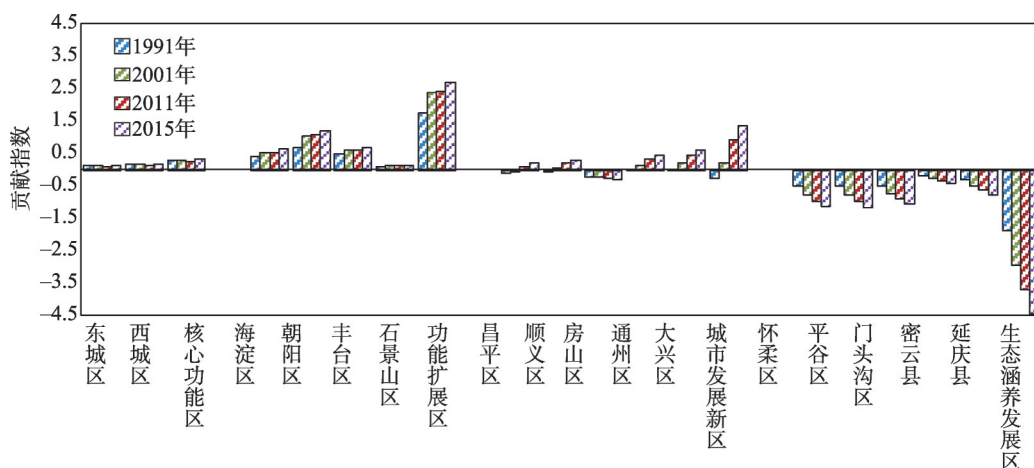


图5 1991-2015年北京市各功能区及区县不透水地表贡献指数

Fig. 5 Contributions of the functional zones and districts to the growth of impermeable surface in Beijing

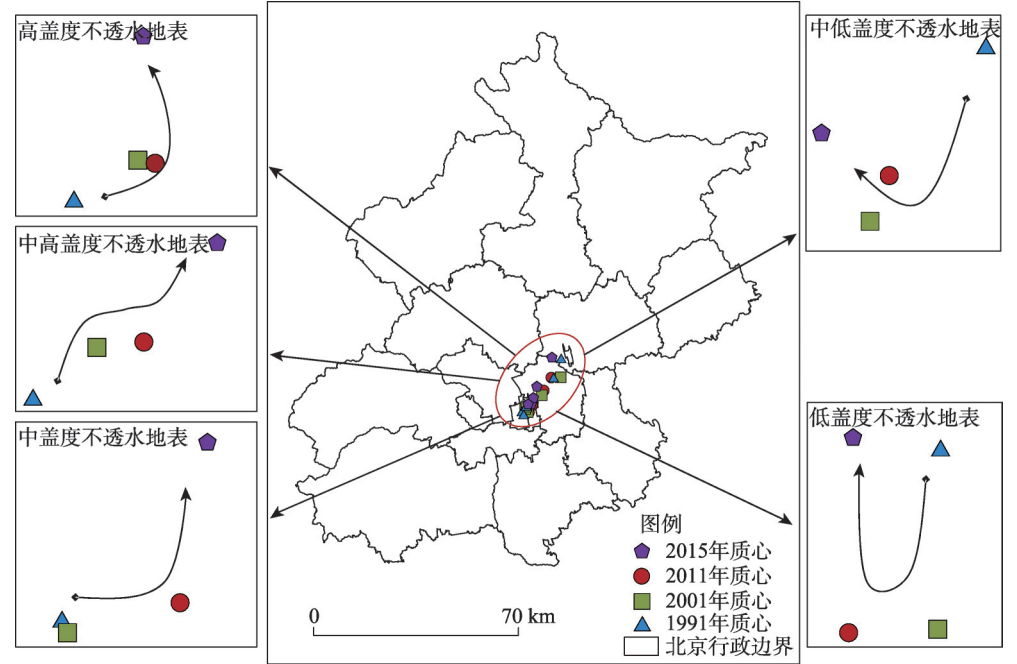


图6 北京市不透水地表景观空间质心演变

Fig. 6 The migration of space centroids of impervious surface landscapes in Beijing

质心偏移量明显大于其他年份，不透水地表的变化有明显的方向性，整体向北偏移，而2001-2011年质心偏移量最小，不透水地表的变化呈多方向性。

4.3.2 不透水地表景观指数 北京市四个功能区中，功能核心区的蔓延度指数值始终最高（表3），为不透水地表聚集的优势区；其次是功能拓展区；最后是城市发展新区和生态涵养区，这两个区域不透水地表快速增长，其蔓延度指数值与功能拓展区蔓延度指数值差距在不断减小。随着时间的推移，功能核心区和功能拓展区的蔓延度指数均先逐渐减小再增大，其不透水地表的延展趋势和团聚程度逐渐减弱再增强；城市发展新区和生态涵养区的蔓延度指数一直在增大，两个功能区不透水地表景观的聚集程度不断增强。对于北京市整体而言，不透水地表景观的蔓延度指数波动较小，先减小后增加，前期主要是不透水地表向外扩展，新增不透水地表斑块增多，而后期主要是不透水地表景观斑块间的连通性增加。

北京市功能核心区和功能拓展区不透水地表的LSI和PD均随着ISP的升高先递增再减小（图7、图8），不透水地表景观的离散程度和破碎程度随ISP的升高先增强后减弱；城市发展新区和生态涵养区的LSI和PD大致呈递减的趋势，景观离散度和破碎程度随

表3 北京市及各功能区不透水地表景观蔓延度指数					
Tab. 3 The CONTAG values of four functional zones and Beijing in 1991, 2001, 2011 and 2015					
年份	功能核心区	功能拓展区	城市发展新区	生态涵养发展区	北京
1991年	31.75	23.20	9.04	10.62	13.19
2001年	31.22	23.41	11.05	10.52	13.42
2011年	30.64	19.50	12.35	12.35	12.61
2015年	36.90	24.17	16.03	19.96	15.72

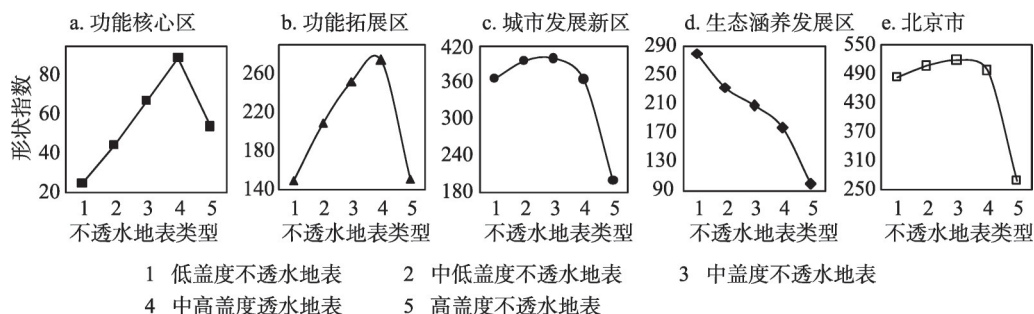


图7 2015年北京市及各功能区不同类型不透水地表景观形状指数

Fig. 7 The landscape shape index values of different impervious surface types in four functional zones and Beijing in 2015

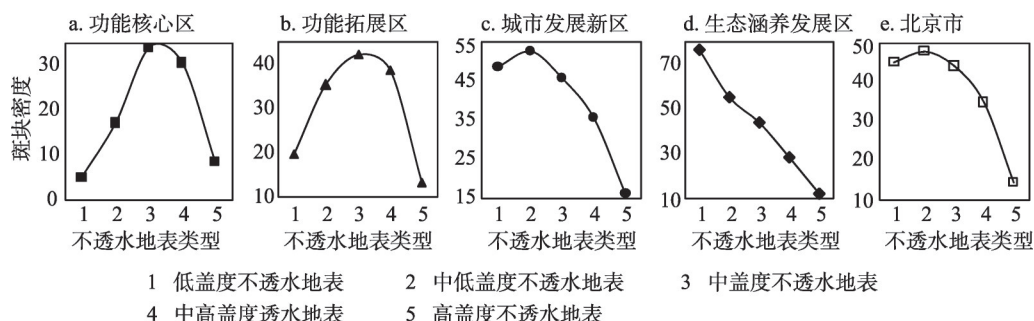


图8 2015年北京市及各功能区不同类型不透水地表景观斑块密度

Fig. 8 The patch density values of different impervious surface types in four functional zones and Beijing in 2015

ISP的增加而减弱。四个功能区均是高盖度不透水地表的聚集度最强，结构比较单一、稳定（功能核心区低盖度不透水景观指数值偏低是因其面积较小）。北京市整体不透水地表景观的LSI和PD值随ISP的增加呈递减趋势，高盖度不透水地表的LSI和PD值远低于其他类型不透水地表。

5 讨论

5.1 北京市不透水面的扩展及各功能区的贡献

1991-2015年是北京城市化、城镇化进程快速发展的阶段，其不透水地表范围及强度增长明显，不透水地表的优势聚集区逐步由功能核心区扩展到城市发展新区，呈“摊大饼”式的发展格局。多位学者^[18, 32-33]的研究在一定程度上也证实了这一结论，但以前研究多集中在城市整体不透水地表形态结构的时空变化方面，极少关注城市内部不同功能区不透水地表的动态及其作用^[34]。

本文分析发现，北京市四个功能区间不透水地表空间分布的异质性在逐渐减弱，而各功能区由于职能作用不同，在北京市整个不透水地表环境中扮演着不同的角色。功能核心区为不透水地表聚集的传统优势区，不透水地表盖度值较高，但由于其发展较早，又受到区域面积的限制^[18, 35]，不透水地表增幅较小，为北京市不透水地表增长的第二主要贡献区。功能拓展区不透水地表快速增长，其盖度均值远高于北京市整体，贡献指数值最高，是北京市不透水地表增长最主要的贡献区。发展新区作为北京市发展的重要着力区和新增长极^[36]，不透水地表变化剧烈，贡献指数由负值变为正值并成倍增长，逐步

成为北京市不透水地表增长的主要源区。随着经济发展和人口增长，功能拓展区和发展新区是未来北京市发展的重点区域，将会进一步承担人口疏解和产业聚集等重要职能^[37]，在未来的发展中应更加关注这两个功能区的建设与生态环境的协调发展。生态涵养区的不透水地表面积和盖度值也在逐渐扩大，但因其地势较高，多为山区，植被生长状况良好^[35]，不透水地表盖度均值远低于北京市均值，贡献指数始终为负，且呈减小趋势。生态涵养发展区是北京生态屏障和重要水源保护地，既是保证北京可持续发展的关键区域^[26]，也是唯一不透水地表增长速度低于北京市整体的功能区。然而其不透水地表的绝对面积在增长，不断侵蚀着原有的森林、水域和湿地等自然资源，在今后的发展中要更加注重保护该区域，以保障北京市整体的透水环境和生态功能。

5.2 基于软分类统计景观指数的优势及其生态含义

景观指数对于“软”分类结果的不透水地表信息变化十分敏感。对于各功能区来说，基于“软”分类得到的不透水地表蔓延度指数相较于“硬”分类方法的区分度更大（表4），尤其是针对功能核心区与城市发展新区和生态涵养发展区来说，在“软”分类结果中的蔓延度指数差异更为明显。这是因为在“软”分类结果的统计中，细小的斑块被保留，景观空间异质性较大，对景观局部的特征有较好的反映效果^[38]。

表4 2015年北京市“软”分类不透水地表与“硬”分类不透水地表蔓延度指数对比
Tab. 4 The comparisons of CONTAG values calculated from the "hard" classifications and "soft" classifications for different function zones in 2015

		功能核心区	功能拓展区	城市发展新区	生态涵养发展区
蔓延度指数	软分类	36.90	24.17	16.03	19.96
	硬分类	44.84	30.12	23.23	28.17

注：“硬”分类不透水地表结果由“软”分类不透水地表中ISP > 50%的部分归类得到。

景观水平上，功能核心区不透水地表的蔓延度指数最大，聚集程度最强，聚集度随时间推移先减弱后增强；功能拓展区作为北京市的重点开发区域，不透水地表主要以低密度蔓延和填充相结合的方式扩展^[37]，蔓延度指数先减小再增加，不透水地表聚集程度先减弱再增强；而城市发展新区和生态涵养区作为北京市发展的新增长极和生态功能保障区，不透水地表扩展主要以填充式为主^[39]，蔓延度指数逐渐增大，聚集度增强。斑块类型水平上，在功能核心区和功能拓展区随着ISP的增加，LSI和PD呈现先增后减的趋势，即景观离散度和破碎程度先加剧后减弱；在城市发展新区和生态涵养区，LSI和PD大致呈递减趋势，即景观离散度和破碎程度逐渐减弱。

不透水地表格局是影响城市生态系统服务、水环境及热环境效应的重要因素之一^[23, 40-42]，与流域河流水质的污染程度^[12]和城市热岛效应有着明显的相关关系，不透水地表盖度的快速增长会加剧流域河流水质的污染程度和城市热岛效应^[38, 43-44]。北京市高盖度不透水地表的分布最为集中紧凑，相比于其他类型不透水地表，高盖度不透水地表对城市环境的影响更大^[45-46]，因而北京市在以后的发展过程中要更加关注高盖度不透水地表的格局及增长模式，尽量减缓其增长速度及团聚程度。

6 结论

本文以Landsat系列影像和QuickBird高分辨率遥感影像为主要数据源，运用分类回归树（CART）模型得到北京市1991年、2001年、2011年和2015年4期亚像元不透水地表分布数据，在此基础上运用标准差椭圆、洛伦兹曲线、贡献指数及景观格局理论等分

析了北京市各功能区及区县不透水地表的时空变化差异,得到以下主要结论:

景观指数对于“软”分类不透水地表信息的变化十分敏感,这为定量分析不同类型不透水地表空间模式对城市生态环境的影响奠定了基础,为探究不透水地表和生态环境因子间的定量关系提供了一种新的视角。

1991-2015年北京市不透水地表呈扩张趋势,总面积增加了约144.18%;分布的主导方向由早期的东北—西南趋向于当前的正北—正南。各功能区间不透水地表的分布异质性逐渐减弱,但贡献指数值存在很大差异:功能拓展区贡献指数最高,四年(1991年、2001年、2011年和2015年)中的最低值(1.79)高于其他功能区四年最高值,是北京市不透水地表增长最主要的贡献区;功能核心区的蔓延度指数值最高,各年值均大于30,约为其他功能区的2倍,为不透水地表的优势聚集区;发展新区的贡献值由负值变为正值并成倍增长,成为北京市不透水地表增长的主要源区;生态涵养发展区的贡献指数始终为负,并逐年减小。不同类型不透水地表的景观指数和质心偏移均存在差异,高盖度不透水地表形状指数和斑块密度值最小,分布最为集中,对生态环境影响较大,北京市在未来发展过程中应合理规划控制其空间格局及增长模式,尽量减缓其增长速度及团聚程度,更加关注区域建设与生态功能的协调发展。

参考文献(References)

- [1] Central Committee of the Communist Party of China and the State Council. The National New-type Urbanization Plan (2014-2020). Beijing: Xinhua News Agency, 2014. [中共中央国务院. 国家新型城镇化规划(2014-2020年). 北京: 新华社, 2014.]
- [2] Peng J, Xie P, Liu Y, et al. Urban Thermal environment dynamics and associated landscape pattern factors: A case study in the Beijing Metropolitan Region. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 173: 145-155.
- [3] Peng Jiangliang. Characteristics analysis of land-atmosphere energy transfer and turbulence over urban and suburban underlying surfaces in Nanjing winter [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2008. [彭江良. 南京冬季城、郊下垫面近地层地—气能量交换和湍流特征分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2008.]
- [4] Sun Shiqiang. Observation and simulation study on distribution characteristics of radiation and energy balance over Nanjing in summer [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2013. [孙仕强. 南京夏季城、郊辐射及能量平衡特征观测与模拟研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013.]
- [5] Chester L Arnold Jr, C James Gibbons. Impervious surface coverage: The emergence of a key environmental indicator. *Journal of the American Planning Association*, 1996, 62(2): 243-258.
- [6] Qiu Jianzhuang, Sang Fengyong, Gao Zhihong. RS estimating and analysis of urban impervious surface percentage and land surface temperature. *Science of Surveying and Mapping*, 2011, 36(4): 211-213. [邱健壮, 桑峰勇, 高志宏. 城市不透水面覆盖度与地面温度遥感估算与分析. 测绘科学, 2011, 36(4): 211-213.]
- [7] Nie Qin. Fractal investigation of urban impervious surfaces and its thermal environment effect in Shanghai City [D]. Shanghai: East China Normal University, 2013. [聂芹. 上海市城市不透水面及其热环境效应的分形研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2013.]
- [8] Fu P, Weng Q. A time series analysis of urbanization induced land use and land cover change and its impact on land surface temperature with landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 175(4): 205-214.
- [9] Xie Miaomiao, Wang Yanglin, Li Guicai. Spatial variation of impervious surface area and vegetation cover based on sub-pixel model in Shenzhen. *Resources Science*, 2009, 31(2): 257-264. [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覆盖空间分异测度: 以深圳市为例. 资源科学, 2009, 31(2): 257-264.]
- [10] Brun S E, Band L E. Simulating runoff behavior in an urbanizing watershed. *Computers Environment & Urban Systems*, 2000, 24(1): 5-22.
- [11] Gillies R R, Box J B, Symank 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.
- [12] Kuang Wenhui, Liu Jiyan, Lu Dengsheng. Pattern of impervious surface change and its effect on water environment in

- the Beijing-Tianjin-Tangshan metropolitan Area. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(11): 1486-1496. [匡文慧, 刘纪远, 陆灯盛. 京津唐城市群不透水地表增长格局以及水环境效应. *地理学报*, 2011, 66(11): 1486-1496.]
- [13] Gao Zhihong, Zhang Lu, Li Xinyan, et al. Detection and analysis of urban land use changes through multi-temporal impervious surface mapping. *Journal of Remote Sensing*, 2010, 14(3): 593-606. [高志宏, 张路, 李新延, 等. 城市土地利用变化的不透水面覆盖度检测方法. *遥感学报*, 2010, 14(3): 593-606.]
- [14] Zhang Lu, Gao Zhihong, Liao Mingsheng, et al. Estimating urban impervious surface percentage with multi-source remote sensing data. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(10): 1212-1216. [张路, 高志宏, 廖明生, 等. 利用多源遥感数据进行城市不透水面覆盖度估算. *武汉大学学报信息科学版*, 2010, 35(10): 1212-1216.]
- [15] Song Yi. The study of the relationship between impervious surface changes and urban heat island effect in Dianchi Lake Basin based on landsat data [D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2014. [宋毅. 基于Landsat影像的滇池流域不透水面变化与城市热岛效应关系研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2014.]
- [16] Peng J, Liu Y, Shen H, et al. Using impervious surfaces to detect urban expansion in Beijing of China in 2000s. *Chinese Geographical Science*, 2016, 26(2): 229-243.
- [17] Xiao Rongbo, Ouyang Zhiyun, Cai Yunan, et al. Urban landscape pattern study based on sub-pixel estimation of impervious surface. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(8): 3189-3197. [肖荣波, 欧阳志云, 蔡云楠, 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.]
- [18] Wang Jing, Su Gencheng, Kuang Wenhui, et al. Spatial and temporal patterns analysis of impervious surface in megacity: A case study of Beijing. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2014(4): 90-94. [王静, 苏根成, 匡文慧, 等. 特大城市不透水地表时空格局分析: 以北京市为例. *测绘通报*, 2014(4): 90-94.]
- [19] Cui Yaoping, Liu Jiuyan, Qin Yaochen, et al. The impact of urban sprawl on heat island intensity in Beijing. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(12): 3485-3493. [崔耀平, 刘纪远, 秦耀辰, 等. 北京城市扩展对热岛效应的影响. *生态学杂志*, 2015, 34(12): 3485-3493.]
- [20] Hao P, Niu Z, Zhan Y, et al. Spatiotemporal changes of urban impervious surface area and land surface temperature in Beijing from 1990 to 2014. *Giscience & Remote Sensing*, 2015, 53(1): 1-22.
- [21] Liu T, Yang X. Monitoring land changes in an urban area using satellite imagery, GIS and landscape metrics. *Applied Geography*, 2015, 56: 42-54.
- [22] Zhou W, Huang G, Cadenasso M L. Does spatial configuration matter? Understanding the effects of land cover pattern on land surface temperature in urban landscapes. *Landscape & Urban Planning*, 2011, 102(1): 54-63.
- [23] Zhang Y, Balzter H, Zou C, et al. Characterizing bi-temporal patterns of land surface temperature using landscape metrics based on sub-pixel classifications from Landsat TM/ETM+. *International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation*, 2015, 42: 87-96.
- [24] Peng J, Wang Y, Zhang Y, et al. Evaluating the effectiveness of landscape metrics in quantifying spatial patterns. *Ecological Indicators*, 2010, 10(2): 217-223.
- [25] Yang L, Huang C, Homer C G, et al. An approach for mapping large-area impervious surfaces: Synergistic use of Landsat-7 ETM+ and high spatial resolution imagery. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2003, 29(2): 230-240.
- [26] Li Zhi, Wei Zongqiang, Liu Yajing, et al. Reach on chinese central city impervious surface area growth pattern in recent 20 years: Take Nanchang as a case. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(11): 1444-1451. [李志, 魏宗强, 刘雅静, 等. 1995年以来中国中部城市不透水面增长变化监测及其增长模式研究: 以南昌市为例. *地理科学*, 2015, 35(11): 1444-1451.]
- [27] David W S Wong. Several fundamentals in implementing spatial statistics in GIS: Using centrographic measures as examples. *Geographic Information Sciences*, 1999, 5(2): 163-174.
- [28] Lauren M S, Mark V J. Spatial statistics in ArcGIS/Fischer M M, Getis A. *Handbook of Applied Spatial Analysis: Software Tools, Methods and Applications*. Berlin: Springer, 2010.
- [29] Zhang Jing, Feng Zhiming, Yang Yanzhao. Lorenz Curve and its application in the research of spatio-temporal pattern of cultivated land, grain and population in China. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2007, 21(11): 63-67. [张晶, 封志明, 杨艳昭. 洛伦兹曲线及其在中国耕地、粮食、人口时空演变格局研究中的应用. *干旱区资源与环境*, 2007, 21(11): 63-67.]
- [30] Yang Jun, Wang Jia, Zhang Zongyi. Inter-provincial discrepancy and abatement target achievement in carbon emissions: A study on carbon Lorenz Curve. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(8): 2016-2023. [杨俊, 王佳, 张宗

- 益. 中国省际碳排放差异与碳减排目标实现: 基于碳洛伦兹曲线的分析. 环境科学学报, 2012, 32(8): 2016-2023.]
- [31] Huang Jucong, Zhao Xiaofeng, Tang Lina, et al. Analysis on spatiotemporal changes of urban thermal landscape pattern in the context of urbanization: A case study of Xiamen City. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(2): 622-631. [黄聚聪, 赵小锋, 唐立娜, 等. 城市化进程中城市热岛景观格局演变的时空特征: 以厦门市为例. 生态学报, 2012, 32(2): 622-631.]
- [32] Li X, Gong P, Liang L. A 30-year (1984-2013) record of annual urban dynamics of Beijing City derived from Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 116(1): 78-90.
- [33] Wang J, Li C, Hu L, et al. Seasonal land cover dynamics in Beijing derived from Landsat 8 data using a spatio-temporal contextual approach. *Remote Sensing*, 2015, 7(1): 865-881.
- [34] Kuang W, Chi W, Lu D, et al. A comparative analysis of megacity expansions in China and the U.S.: Patterns, rates and driving forces. *Landscape & Urban Planning*, 2014, 133(132): 121-135.
- [35] Qiao Z, Tian G, Xiao L. Diurnal and seasonal impacts of urbanization on the urban thermal environment: A case study of Beijing using MODIS data. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2013, 85(2): 93-101.
- [36] State Council Letter [2005] No.2. Beijing City Master Plan (2004-2020). 2005. [国函[2005]2号. 北京市城市总体规划(2004-2020). 2005.]
- [37] Qiao Zhi, Tian Guangjin. Spatiotemporal diversity and regionalization of the urban thermal environment in Beijing. *Journal of Remote Sensing*, 2014, 18(3): 715-734. [乔治, 田光进. 北京市热环境时空分异与区划. 遥感学报, 2014, 18(3): 715-734.]
- [38] Zou Chuncheng, Zhang Youshui, Huang Huanhuan. Impacts of impervious surface area and landscape metrics on urban heat environment in Fuzhou City, China. *Journal of Geo-information Science*, 2014, 16(3): 490-498. [邹春城, 张友水, 黄欢欢. 福州市城市不透水面景观指数与城市热环境关系分析. 地球信息科学学报, 2014, 16(3): 490-498.]
- [39] Kuang Wenhui, Shao Quanqin, Liu Jiyan, et al. Spatio-temporal patterns and driving forces of urban expansion in Beijing Central City since 1932. *Journal of Geo-information Science*, 2009, 11(4): 428-435. [匡文慧, 邵全琴, 刘纪远, 等. 1932年以来北京主城区土地利用空间扩张特征与机制分析. 地球信息科学学报, 2009, 11(4): 428-435.]
- [40] Liu Yanxu, Wu Wenheng, Wen Xiaojin, et al. Urban process and its eco-environmental impact in Shanxi-Shaanxi-Inner Mongolia energy area. *Geographical Research*, 2013, 32(11): 2009-2020. [刘焱序, 吴文恒, 温晓金, 等. 晋陕蒙能源区城镇化过程及其对生态环境的影响. 地理研究, 2013, 32(11): 2009-2020.]
- [41] 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.
- [42] May C W, Horner R R, Karr J R, et al. Effects of urbanization on small streams in the Puget Sound Lowland Ecoregion. *Watershed Protection Techniques*, 1997(4): 79-90.
- [43] 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*, 2007, 106(3): 375-386.
- [44] 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 Earth Observation & Geoinformation*, 2009, 11(4): 256-264.
- [45] Weng Q. Modeling urban growth effects on surface runoff with the integration of remote sensing and GIS. *Environmental Management*, 2001, 28(6): 737-748.
- [46] Zhang Daowei, Guo Huadong, Sun Zhongchang. Estimating surface characteristic parameters in the megacities and the research on their effects towards the urban heat environment. *Remote Sensing Technology and Application*, 2012, 27(1): 51-57. [张道卫, 郭华东, 孙中昶. 超大城市地表特征参数估算及其对城市热环境的影响研究. 遥感技术与应用, 2012, 27(1): 51-57.]

Examining the distribution and dynamics of impervious surface in different functional zones of Beijing

QIAO Kun^{1,2,3}, ZHU Wenquan^{1,2}, HU Deyong³, HAO Ming⁴,
CHEN Shanshan³, CAO Shisong³

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Institute of Remote Sensing Science and Engineering, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. College of Resource Environment & Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 4. Nuclear Industry of China Geotechnical Engineering Co. Ltd., Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: Impervious surface (IS) is often recognized as the indicator of regional ecosystems and environmental changes. Its spatio-temporal dynamics and ecological effects have been studied by many researchers, especially for the IS in Beijing municipality. However, most previous relevant studies examined Beijing as a whole without considering the differences and heterogeneity among the functional zones. In this study, the urban expansion in Beijing in some typical years (1991, 2001, 2005, 2011 and 2015) was analyzed by sub-pixel IS that obtained through the simulation of CART and change detection models. Then the spatio-temporal dynamics and variations of IS (1991, 2001, 2011 and 2015) in different functional zones and counties were analyzed based on the method of standard deviation ellipse, Lorenz curve, contribution index (CI) and landscape theory. It is found that the total area of impervious surface in Beijing increased dramatically from 1991 to 2015, increasing about 144.18%. The deflection angle of major axis of standard deviation ellipse decreased from 47.15° to 38.82°, indicating a trend that the major development axis in Beijing moved from the northeast-southwest orientation to the north-south orientation. Moreover, the heterogeneity of IS distribution in different counties weakened gradually but the CI values and landscapes in different zones differed greatly. Urban function extended zone (UFEZ) had the highest CI value, which means it played the most important role in the growth of IS in Beijing, and its lowest CI value was 1.79 during the study period, which is much greater than the highest CI values of other functional zones. Core functional zone (CFZ) contributed less than UFEZ, but it has the highest CONTAG value, showing a more connected IS landscape compared with other zones. The CI values of new urban developed zone (NUDZ) increased rapidly from 1991 to 2015, which increased from negative to positive and multiplied, indicating the NUDZ has become the main source for the growth of IS in Beijing gradually. However, the ecological conservation zone made a negative contribution at all times, and its CI value decreased constantly. In addition, the variations of landscape indices and centroids of impervious surface in different density classes indicate that the high-density impervious surface had a more compact configuration and a greater impact on the ecological environment.

Keywords: impervious surface; landscape metrics; CART; functional zones; Lorenz curve; contribution index; Beijing