

# 北京城市空间扩展的生态环境响应及驱动力

蔺雪芹<sup>1</sup>, 王岱<sup>2\*</sup>, 刘旭<sup>1</sup>

1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

**摘要:**城市土地利用变化及其生态环境响应是全球环境变化研究的重要组成部分,是可持续发展研究的核心问题。大都市作为人口和产业密集地区,城市土地利用变化剧烈,由此带来的生态环境问题更为显著。在新型城镇化建设背景下,研究大都市城市空间扩展及其生态环境响应,对提高大都市土地利用效能,转变经济增长方式和实现可持续发展具有重要指导意义。文章基于北京市遥感影像数据及相关社会经济数据,构建北京市空间扩展的生态环境响应评价指标体系和模型,对1995—2010年北京市空间扩展的生态环境响应进行了综合评价并分析其驱动力。研究认为:1995—2010年北京市各区县空间扩展的社会经济压力指数不断增大,首都功能核心区和城市功能拓展区各区县社会经济压力指数上升幅度最大,城市发展新区和生态涵养发展区各区县上升趋势较为平缓;除东城区和西城区外,各区县土地利用状态指数有所下降,降低幅度较大的区县有通州、顺义、大兴、平谷和昌平,较小的区县有朝阳、海淀、丰台、石景山和密云;除通州和大兴外,各区县空间扩展的生态环境响应指数均呈上升趋势,净变化量较大的区县主要位于首都功能核心区,生态涵养区和城市发展新区各区县净变化量较小;除通州、顺义、延庆和昌平外,各区县城市空间扩展的生态环境响应综合指数均有所提高,其中东城、西城、海淀和朝阳净变化量较大,顺义、平谷和怀柔净变化量较小,空间格局表现出“中心低、外围高、东南低、西北高”的特征;人口增长、城市化、经济发展、建设用地高速扩展、生态用地减少等对北京城市空间扩展的生态环境响应具有重要影响。

**关键词:**空间扩展;生态环境响应;时空分异;驱动力;北京

**DOI:** 10.16258/j.cnki.1674-5906.2015.07.013

**中图分类号:** X21

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-5906 (2015) 07-1159-07

**引用格式:** 蔺雪芹, 王岱, 刘旭. 北京城市空间扩展的生态环境响应及驱动力[J]. 生态环境学报, 2015, 24(7): 1159-1165.

LIN Xueqin, WANG Dai, LIU Xu. Eco-environment Response to Urban Spatial Expansion and Its Driving Forces in Beijing [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(7): 1159-1165.

伴随我国进入城镇化加速发展阶段,城市规模快速扩张,由此带来的一系列生态环境问题已成为制约我国城市可持续发展的重要因素。关于城市土地利用变化和空间扩张与生态环境二者关系国内外已有诸多研究。主要有以下几个方面:(1)城市空间扩展的生态环境响应要素研究。包括城市空间扩展对大气成分及气候变化的影响(Meyer et al., 2003),对水文变化的影响(Croke et al., 2004; Mark et al., 2003),对土壤性质的影响(Islam et al., 2000; 郭旭东等, 2001),对自然灾害的影响(史培军, 2003)等。(2)城市空间扩展的生态环境影响要素辨析。陈莹认为土地利用规模结构变化及水资源减少是造成北京生态环境质量变动的重要原因(陈莹等, 2007),王宏伟等(2008)认为农业活动的开发造成各用地类型的消长转化以及人文经济活动是生态环境恶化的主要原因,卞正富和张燕平(2006)探讨了煤矿区土地利用格局的演变对环境的影响。(3)城市空间扩展的生态环境响应评

价。一些学者通过遥感图像解译信息如归一化植被指数、地面辐射温度、MODIS 地表温度等对区域空间扩展的生态环境影响进行了评价(Arthur et al., 2003; 杨山等, 2003; 李洪义等, 2006),一些学者将土地利用结构、河网密度、水土侵蚀强度、森林覆盖率等作为评价区域生态环境质量变化的重要组成部分,对区域生态环境质量进行评价(黄宝荣等, 2008; 徐鹏炜等, 2006),一些学者基于生态系统服务价值、生态足迹等对城市空间扩张的生态环境响应进行评价(徐超平等, 2010; 郑辛酉等, 2006),我国环境保护总局于2006年提出的基于遥感影像解译的生态环境状况评价指标体系及方法,也成为诸多学者对大都市区空间扩张的生态环境影响进行评价的有效手段(王瑶等, 2007; 杨楠等, 2008; 张华等, 2008)。(4)城市空间扩展的生态安全格局分析。俄罗斯地理学家认为保护景观多样性在一定程度上决定了土地覆被和利用的可持续性。存在的自然生态系统越多,区域生态稳定性越

**基金项目:**北京市自然科学基金项目(8122015)

**作者简介:** 蔺雪芹(1980年生),副教授,博士,主要研究方向为区域可持续发展。E-mail: lin-xueqin@139.com

**\*通讯作者:** 王岱。E-mail: wangdai@igsnrr.ac.cn

**收稿日期:** 2015-03-18

大(陈百明等, 2003), 在我国岳书平等(2006)、李俊祥等(2004)从景观生态学的角度对区域空间扩展的生态安全格局进行了研究。(5)城市空间扩展的生态响应预测、生态导向的大都市区空间扩展模拟预测研究。如 Bewket et al. (2005) 预测了未来土地利用/覆被潜在变化对水温水资源的影响, Allan et al. (2002) 以保护区域水质为目标, 建立了小流域土地利用格局优化模型, 何春阳等(2003)考虑道路交通、河流、绿地、面状水体等约束因素基础上, 从城镇用地数量最优和结构最佳的角度, 对北京大都市区发展格局进行了预测。已有研究对城市空间扩展与生态环境二者关系进行了较为全面的研究, 但重空间扩展与生态环境的因果关系确认, 轻空间扩展对生态环境的影响因素剖析; 且效果评价多, 过程研究少。本文以 1995—2010 年北京市土地利用变化和社会经济发展数据为基础, 基于 P-S-R 压力-状态-响应模型, 构建北京城市空间扩张的生态环境响应评价综合指标体系和评价模型, 对 1995—2010 年北京市空间扩展的生态环境响应进行评价, 并从社会经济发展、土地利用变化各要素入手, 分析北京市城市空间扩展的生态环境响应的驱动力。研究对于优化城市空间扩展模式, 促进城市和生态环境协调发展, 建立资源节约和环境友好型社会具有重要意义。

1 研究方法和数据来源

1.1 构建北京城市空间扩展的生态环境响应综合评价指标体系

在压力-状态-响应(P-S-R)概念模型框架下, 遵循科学性、综合性、简明普适性、可获性、可持续性、动态性原则, 采用频度统计分析法、理论分析法和专家咨询法得到北京城市空间扩展的生态环境响应评价指标体系。指标体系包括社会经济压力、土地利用状态、生态环境响应 3 个方面共 17 个指标。其中社会经济压力指标 7 个, 土地利用状态指标 5 个, 生态环境响应指标 5 个。由于各指标存在量纲差异, 其性质有正有负, 缺乏可比性, 本文利用半升梯形模糊隶属度函数模型来解决各指标因量纲不同而难以汇总的问题, 并在 SPSS 18.0 中利用主成分分析法确定各标准层的权重值以及各具体指标相应对于所属标准层的权重值(见表 1)。其中生物丰度指数、水网密度指数、植被覆盖指数、污染负荷指数、土地退化指数根据 2006 年颁布的中华人民共和国环境保护行业标准《生态环境质量评级技术规范(试行)》(HJ/T192—2006)的规定计算。

1.2 构建北京城市空间扩展的生态环境响应综合评价模型

采用加权综合函数法构建北京城市空间扩展

表 1 北京城市空间扩展的生态环境响应综合评价指标体系  
Table 1 The evaluation index system of eco-environmental response to spatial expansion in Beijing

标准层		指标层		指标性质
名称	权重	名称	权重	
社会经济压力	0.294	人口密度/(人/平方公里)	0.090	正向
		城市化水平/%	0.014	正向
		人均GDP/(元/人)	0.147	正向
		非农产业产值占GDP比重/%	0.024	正向
		地均GDP/(万元/平方公里)	0.383	正向
		万元GDP能耗/(吨标准煤)	0.158	负向
		单位工业用水工业产值/(万元/立方米)	0.184	正向
土地利用状态	0.356	建设用地面积比重/%	0.231	负向
		建设用地扩展强度/%	0.103	负向
		建设用地开发强度/(万元/平方公里)	0.100	正向
		人均耕地面积/(平方公里/人)	0.216	正向
		人均林地面积/(平方公里/人)	0.350	正向
生态环境响应	0.350	生物丰度指数	0.003	正向
		水网密度指数	0.154	正向
		植被覆盖指数	0.635	正向
		污染负荷指数	0.192	负向
		土地退化指数	0.016	负向

的生态环境响应综合评价模型如下:

$$F_j = M_1 + M_2 + M_3 = \alpha_1 \sum_{m=1}^{p_1} (v_{1m} \times \Phi_{1mj}) + \alpha_2 \sum_{m=1}^{p_2} (v_{2m} \times \Phi_{2mj}) + \alpha_3 \sum_{m=1}^{p_3} (v_{3m} \times \Phi_{3mj}) \tag{1}$$

式中,  $F_j$  表示第  $j$  区县土地利用变化的生态环境响应综合评价指数;  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$  分别代表社会经济压力指数、土地利用变化指数和生态环境响应指数;  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$  分别表示 3 个评价标准层的权重值;  $v_{1m}$ 、 $v_{2m}$ 、 $v_{3m}$  分别表示 3 个评价标准层中第  $m$  个具体指标的权重值;  $\Phi_{1mj}$ 、 $\Phi_{2mj}$ 、 $\Phi_{3mj}$  分别代表 3 个评价标准层中第  $j$  个区县第  $m$  个具体指标的历年得分值;  $p_i$  表示第  $i$  个评价标准层中具体指标的个数,  $i=1, 2, 3$ 。

1.3 构建北京城市空间扩展生态响应影响因素分析模型

基于上述分析, 辨析社会经济发展压力、土地利用要素变化对城市空间扩展生态环境响应的影响。理论上, 社会经济发展与生态环境变化之间存在曲线关系(Markus, 2002; 黄金川等, 2003)。因此, 本文借助 SPSS 18.0 软件, 采用相关分析中的一次和二次曲线拟合法来探讨社会经济压力要素和土地利用要素变化对生态环境响应的影响。建立空间扩展生态环境响应影响因素分析模型如下:

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1 X + \epsilon \tag{2}$$

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1 X + \alpha_2 X^2 + \epsilon \tag{3}$$

式中,  $Y$  是因变量, 为空间扩展的生态环境响应指数,  $X$  为自变量, 分别为人口密度( $X_1$ )、城市化水平( $X_2$ )、人均 GDP( $X_3$ )、非农产业产值占 GDP 比重( $X_4$ )、地均 GDP( $X_5$ )、万元 GDP 能耗( $X_6$ )、单位工业用水工业产值( $X_7$ )、建设用地面积比重( $X_8$ )、建设用地扩展强度( $X_9$ )、建设用地开

发强度 ( $X_{10}$ )、人均耕地面积 ( $X_{11}$ )、人均林地面积 ( $X_{12}$ )， $\alpha_0$ 、 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  为模型参数， $\varepsilon$  为误差随机项。

## 1.4 数据来源

本文研究所用土地利用变化数据来源于 1995、2000、2005、2010 年 4 个年份北京市遥感影像 (SPOT-5 TM 遥感影像数据)，其他社会经济数据来源于 1995、2000、2005、2010 年北京市及各区县统计年鉴、北京区域统计年鉴、中国区域经济统计年鉴。

## 2 结果与分析

### 2.1 空间扩展的社会经济压力指数时空变化特征

从时间变化看，1995—2010 年北京市各区县空间扩展的社会经济压力指数不断增大 (图 1)。其中，首都功能核心区包括东城区、西城区，城市功能拓展区包括海淀区、朝阳区、石景山区和丰台区社会经济压力指数上升幅度最大，上升趋势最为明显；城市发展新区包括通州区、顺义区、房山区、大兴区、昌平区、生态涵养发展区包括怀柔区、平谷区、门头沟区、密云县、延庆县等社会经济压力指数上升趋势较为平缓；社会经济压力指数多年平均值较高的区县为首都核心功能区的东城、西城和城市功能拓展区的丰台、朝阳、海淀；多年平均值较低的区县为城市功能拓展区的石景山和生态涵养发展区的房山、平谷、延庆。从空间分布来看，1995—2010 年北京市空间扩展的社会经济压力指数整体表现为“中心高、外围低，东南高、西北低”的空间分布格局。北京空间扩展的社会经济压力指数的时空变化特征与各区县所承担的主要城市功能相关。首都功能核心区是首都政治、文化、国际交往、

教育科研和金融管理中心，人口密集，现代服务业集聚，高新技术产业比重高，经济活动密度大，单位产出效能高，使得这两个区域总体社会经济活动压力较大，且增长较快；城市发展新区服务业具有一定规模，是北京市现代制造业和现代农业发展的主要载体，社会经济活动压力较首都功能核心区和城市功能拓展区小；生态涵养区是首都生态屏障和水源保护地，工业基础薄弱，产业发展空间相对较小，社会经济压力最小，且增幅较慢。

### 2.2 空间扩展的土地利用状态指数时空变化特征

从时间变化来看，1995—2010 年北京市各区县除东城区和西城区土地利用状态指数有所升高外，其余各区县土地利用状态指数均呈下降态势，其中净减少量较大的区县为通州、顺义、大兴、平谷和昌平，净减少量较小的区县为朝阳、海淀、丰台、石景山和密云 (图 1)。土地利用状态指数多年平均值较高的区县为延庆、大兴、顺义和通州；多年平均值较低的区县为东城和西城。从空间分布来看，北京市土地利用状态指数整体表现为“中心低，外围高”的空间格局。土地利用状态指数的时空变化特征与各区县土地资源特质和开发利用水平密切相关。首都功能核心区和城市功能拓展区地形平坦，主要以建设用地面积为主，林地和草地面积总量和人均水平较低，使得这两个区域土地利用状态指数较低。与首都功能核心区和城市功能拓展区相比，城市发展新区建设用地比重、建设用地扩展强度、开发强度相对较低，同时人均耕地面积和林地面积相对较高，因此这一区域总体土地利用状态指数高于首都功能核心区和城市功能拓展区，但是作

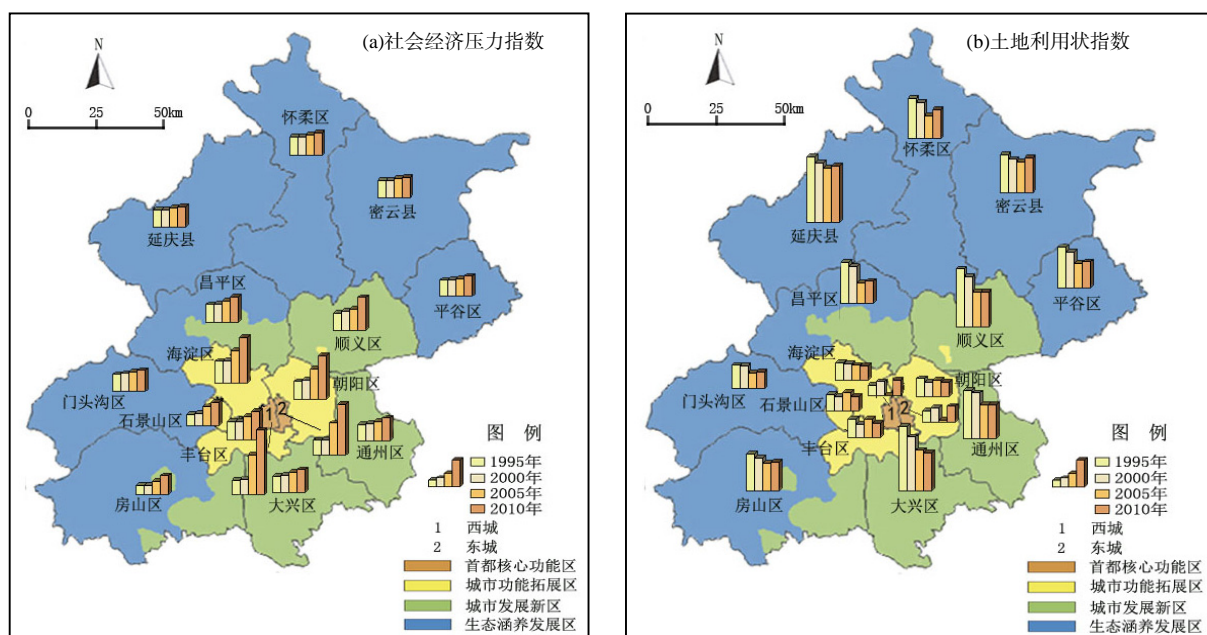


图 1 1995—2010 年北京城市空间扩展的社会经济压力指数和土地利用状态指数空间分布

Fig. 1 Social-economic pressure index and land use status index of spatial expansion in Beijing (1995—2010)



为北京市疏散中心城区人口和产业的重要区域,土地利用状态多年不断下降。生态涵养发展区林地和草地面积比重大,建设用地比重小,同时产业活动和人口压力小,使得这一区域土地利用状态指数较高,同时随着这一区域环保型工业和总部经济等的发展,部分区县如平谷、怀柔等土地利用状态指数出现下降趋势。

### 2.3 空间扩展的生态环境响应指数时空变化特征

从时间变化来看,1995—2010年北京市各区县空间扩展的生态环境响应指数除通州和大兴两个区有所下降外,其他各区县均呈上升趋势(图2)。其中首都核心功能区各区县净变化量较大,生态涵养发展区和城市发展新区各区县净变化量较小,城市发展新区的通州和大兴甚至出现了负增长。空间扩展的生态环境响应指数多年平均值较高的区县为生态涵养发展区的门头沟、房山、昌平、延庆、怀柔 and 密云;多年平均值较低的区县为首都核心功能区的东城、西城和城市功能拓展区的石景山、朝阳、丰台、海淀。从空间分布来看,北京市空间扩展的生态环境响应指数整体呈现出“中心低、外围高,东南低、西北高”的空间格局特征。由于制造业外迁、城市功能提升以及产业结构转型升级,首都功能核心区和城市功能拓展区制造业比重降低,以金融、咨询、法律等为主的现代服务业快速发展,导致经济活动的生态环境负向影响减弱,同时产业发展的生态环境需求提高,造成这一地区城市空间扩展的生态环境响应指数较低,但是多年增长率高。而城市发展新区,由于承担疏散中心城区人口和产业的职能,制造业及相关服务业不断集聚,造成生态环境响应指数虽高于首都功能核心区和城

市功能拓展区,但是多年波动变化,没有显著提升。而外围的生态涵养区由于土地利用结构中生态用地面积大、比重高,且发展职能为强化生态修复与水源保护,因此城市空间扩展的生态环境响应指数最高,且大部分区县多年有不断增长的态势。

### 2.4 空间扩展的生态环境响应综合指数时空变化特征

从时间变化来看,1995—2010年除通州、顺义、延庆和昌平的空间扩展的生态环境响应综合评价指数略有下降,其余各区县该指数均有所提高,其中东城、西城、海淀和朝阳净变化量较大,平谷和怀柔净变化量较小。多年平均值较高的区县为密云延庆和昌平;多年平均值较低的区县为东城、西城、丰台和石景山。从空间分布来看,北京市土地利用变化的生态环境响应综合评价指数整体表现为“中心低、外围高,东南低、西北高”的空间格局(图2)。可以看出,考虑社会经济压力和土地利用变化状态,首都功能核心区空间扩展的生态环境响应综合指数值最小但增长迅猛,尤其是2005—2010年,东城区和西城区生态环境响应综合指数年均增速分别达到16.47%和14.48%,远大于其他区县2.39%的平均增速;城市功能拓展区中海淀区和朝阳区空间扩展的生态环境响应综合指数数值和增速远大于丰台区和石景山区,后者2000—2005年快速增大,其余年份稳步上升;城市发展新区生态环境响应综合指数较大,但由于近些年社会经济载荷日益增大,导致生态环境响应综合指数波动缓慢上升,甚至有一些区县生态环境响应综合指数出现波动下降,如大兴区、通州区和昌平区;生态涵养区生态环境响应综合指数最大,但受到产业发展以及经

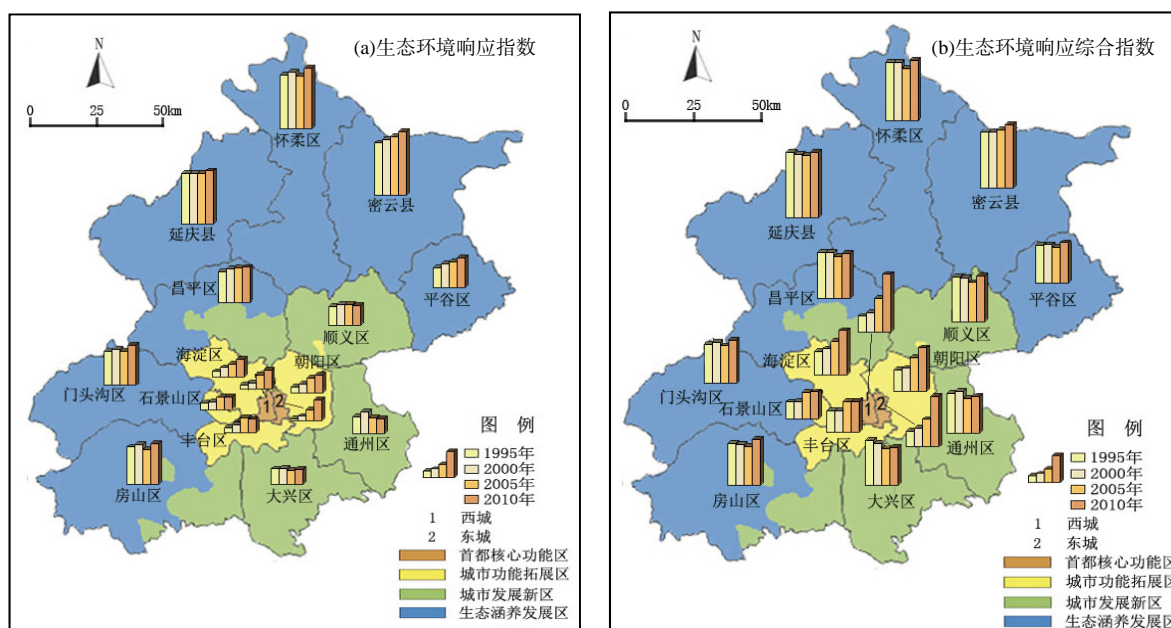


图2 1995—2010年北京市土地利用变化的生态环境响应指数空间分异

Fig. 2 Eco-environment response index and its comprehensive index of spatial expansion in Beijing (1995—2010)

济实力等方面的影响，生态涵养保障能力相对较低，多年波动缓慢上升。

3 北京市空间扩展的生态环境响应驱动力

采用 2010 年 16 个区县空间扩展生态环境响应指数和 2010 年 16 个区县社会经济压力相关指标、土地利用变化相关指标，包括人口密度 ( $X_1$ )、城市化水平 ( $X_2$ )、人均 GDP ( $X_3$ )、非农产业产值占 GDP 比重 ( $X_4$ )、地均 GDP ( $X_5$ )、万元 GDP 能耗 ( $X_6$ )、单位工业用水工业产值 ( $X_7$ )、建设用地面积比重 ( $X_8$ )、建设用地扩展强度 ( $X_9$ )、建设用地开发强度 ( $X_{10}$ )、人均耕地面积 ( $X_{11}$ )、人均林地面积 ( $X_{12}$ ) 等 12 个指标。根据公式 (2)、公式 (3)，利用 SPSS 软件，分别对城市空间扩展生态环境响应指数  $Y$  与  $X_1$ 、... $X_{11}$  之间进行一次方程、二次方程拟合回归，来分析城市空间扩展生态环境响应的社会经济和土地利用变化驱动因素 (表 2)。

表 2 2010 年北京市城市空间扩展的生态环境响应驱动力  
Table 2 The driving forces of eco-environment response to spatial expansion in Beijing in 2010

自变量	类型	$r^2$	$F$	Sig	$a_0$	$a_1$	$a_2$
$X_1$	一次回归	0.249	4.634	0.049**	1.298	-0.632	
	二次回归	0.506	6.651	0.010**	1.426	-2.895	2.627
$X_2$	一次回归	0.373	8.340	0.012**	0.255	-0.178	
	二次回归	0.430	4.894	0.026**	0.427	0.486	-0.816
$X_3$	一次回归	0.316	6.471	0.023**	0.223	-0.153	
	二次回归	0.429	4.890	0.026**	0.339	-0.696	0.460
$X_4$	一次回归	0.403	9.453	0.008***			
	二次回归	0.404	4.403	0.035**	0.396	-0.101	-0.196
$X_5$	一次回归	0.092	1.417	0.254	0.157	-0.087	
	二次回归	0.223	1.868	0.194	0.173	-0.571	0.528
$X_6$	一次回归	0.002	0.027	0.872	0.163	-0.022	
	二次回归	0.039	0.260	0.775	-0.063	0.699	-0.522
$X_7$	一次回归	0.240	4.431	0.054	0.181	-0.127	
	二次回归	0.415	4.610	0.031**	0.222	-0.571	0.474
$X_8$	一次回归	0.588	19.953	0.001***	-0.015	0.250	
	二次回归	0.755	20.037	0.000***	0.214	-0.645	0.729
$X_9$	一次回归	0.083	1.260	0.280	-0.297	0.592	
	二次回归	0.123	0.913	0.426	-5.777	14.972	-9.405
$X_{10}$	一次回归	0.099	1.547	0.234	0.159	-0.088	
	二次回归	0.261	2.299	0.140	0.183	-0.652	0.600
$X_{11}$	一次回归	0.503	9.565	0.080*	0.109	0.161	
	二次回归	0.511	8.738	0.214	0.104	0.239	-0.118
$X_{12}$	一次回归	0.612	19.234	0.093*	0.217	0.365	
	二次回归	0.618	19.785	0.315	0.298	0.787	-0.543

\*代表 10% 水平下显著，\*\*代表 5% 水平下显著，\*\*\*代表 1% 水平下显著

3.1 人口增长、城市化推进是北京空间扩展生态环境负向演化的重要因素

人口密度变化和生态环境响应指数之间表现出显著的二次曲线关系，即随着人口密度的增大，空间扩展的生态环境响应指数呈先下降后上升的变化趋势。但是，目前大部分区县都位于二次曲线的左侧，即人口密度增大，城市空间扩展的生态环境响应指数减小。从各功能区变化来看，首都功能核心区、城市功能拓展区、城市发展新区、生态涵

养发展区依次随着人口密度的减少，生态环境响应指数增大。这是因为人口增长带来城市建设用地需求上升，进而改变土地规模和结构，增强了对土地利用的干预程度，进而使土地利用程度和生态环境质量发生了相应的变化。城市化水平与生态环境响应之间也呈现出较为显著的二次曲线关系，且大部分曲线位于曲线的左侧，即随着城市化水平的提高，生态环境响应指数下降。从各功能区变化来看，由首都功能核心区、城市功能拓展区、城市发展新区到生态涵养区，随着城市化水平的降低，生态环境响应指数不断提高。北京在快速城市化发展的过程中，人口不断增加、经济扩展、地域扩张，在这个过程中城市有机体内的各种细胞不断分裂生殖和更新发展，并通过资源利用和能源消耗不断向区域排放废物，进而影响区域生态环境质量的变化。

3.2 经济发展尚未对城市空间扩展生态环境效应带来显著正向推动作用

人均 GDP 与生态环境响应指数之间表现为较为显著的二次函数关系。随着人均 GDP 的不断提高，生态环境响应指数先下降后升高。这也符合经济发展与环境变化之间的“环境库兹涅兹倒 U 型曲线”关系。但大部分曲线目前位于曲线的左侧，即随着人均 GDP 的提高，生态环境响应指数下降，生态环境恶化。只有海淀区、朝阳区、东城区、西城区、顺义区位于曲线的右侧，即人均 GDP 提高，生态环境响应指数增大，生态环境好转。从国际经验来看，当人均 GDP 达到 8 000 美元时，生态环境质量达到峰值之后开始下降。2010 年北京市各区县人均 GDP 已经超过 8 000 美元，但并没有带来生态环境的显著好转。选择非农产业产值占 GDP 比重，地均 GDP、万元 GDP 能耗、单位工业用水工业产值与生态环境响应指数进行相关性分析，非农产业产值与其呈较为显著的负向线性相关关系，即非农产业产值占 GDP 比重越大，城市空间扩展的生态环境响应指数越小，生态环境状况变差；单位工业用水工业产值用水与生态环境响应指数呈较为显著的二次曲线关系，即单位工业用水工业产值增大，生态环境响应指数变大，生态环境质量好转；其余两个指标和生态环境响应指数相关性不明显。这说明，虽然北京市及各区县经济发展已进入较高阶段，但是随着产业结构转型、结构调整和技术进步等，并没有带来生态环境的显著好转，相反由于经济发展对于水资源的过度消耗，挤占生态用水，导致生态用地减少，生态环境质量恶化。

3.3 建设用地的快速扩展对生态环境的负向变化影响显著

建设用地面积比重和生态环境响应指数之间表现出显著的相关关系，即随着建设用地面积的增

大,生态环境响应指数增大,生态环境恶化。说明人口增长、城市化快速推进、经济高速发展带来的建设用地面积规模增大,是影响土地利用变化生态环境响应的重要因素。同时选取建设用地扩张强度、建设用地开发强度与生态环境响应指数进行相关分析,发现二者之间并没有显著的相关关系。北京市单位建设用地 GDP 产值由 1995 年的 6843.97 万元/km<sup>2</sup> 增加至 2010 年的 40461.56 万元/km<sup>2</sup>,单位建设用地工业产值由 1995 年的 2395.86 万元/km<sup>2</sup>,增加至 2010 年的 7923.97 万元/km<sup>2</sup>,城市建设土地集约利用程度高于全国平均水平,且不断提高,但并没有明显带动土地利用生态环境响应指数的增大或减小幅度的降低。

### 3.4 耕地减少对生态环境的负向影响大,林地增加正向影响大

人均耕地面积、人均林地面积和生态环境响应指数之间呈线性正相关关系,即随着人均耕地面积增加,人均林地面积增大,生态环境响应指数增大。二者变化对于生态环境均具有较为显著的影响。1995—2010 年北京市耕地面积不断减少,林地面积不断增多,说明林地面积增多对北京市空间扩展的生态环境响应正向影响大,而耕地面积减少对北京市空间扩展的生态环境响应负向影响大(图 3)。

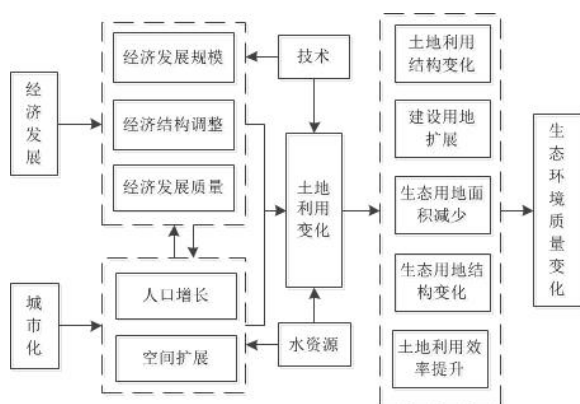


图3 北京城市空间扩展的生态环境响应机制

Fig. 3 The mechanism of eco-environment response to spatial expansion in Beijing

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

本文以北京市各区县土地利用变化、社会经济发展、生态环境变化等相关数据为基础,构建北京城市空间扩展的生态环境响应评价指标体系和模型,对 1995—2010 年北京城市空间扩展的生态环境响应时空变化特征及其驱动力进行分析,得到如下结论:

(1) 北京市各区县空间扩展的社会经济压力指数不断增大,其中首都功能核心区和城市功能拓展区社会经济压力指数多年均值较高且上升幅度最大,社会经济压力指数整体表现为“中心高、外围

低,东南高、西北低”的空间分布格局;除东城区和西城区外,北京市各区县土地利用状态指数均呈下降态势,其中多年平均值较低的区县为东城和西城,净减少量较大的区县主要位于城市发展新城区,净减少量较小的区县主要位于城市功能拓展区和外围生态涵养区,土地利用状态指数表现为“中心低,外围高”的空间格局;北京市各区县空间扩展的生态环境响应指数均总体呈上升趋势,首都核心功能区各区县净增长量较大,生态涵养发展区和城市发展新城区各区县净增长量较小,生态环境响应指数整体呈现出“中心低、外围高,东南低、西北高”的空间格局特征;除通州、顺义、延庆和昌平外,北京各区县空间扩展的生态环境响应综合指数均有所提高,其中位于首都功能核心区和城市功能拓展区的东城、西城、海淀和朝阳净变化量较大,生态涵养区的平谷和怀柔净变化量较小,生态环境响应综合评价指数整体表现为“中心低、外围高,东南低、西北高”的空间格局。

(2) 人口增长、城市化、建设用地高速扩展对北京市生态环境的负向影响显著;经济发展水平对城市空间扩展生态环境响应正向演化的推动作用不显著,相反经济发展对水资源的过度消耗,导致生态用地减少,生态环境恶化;生态用地总量减少是引起生态环境负向演化的主要因素,其中耕地减少对生态环境的负向影响最大,林地增加正向影响大。

### 4.2 讨论

未来北京城市空间扩展必须由规模扩张为主的粗放式扩张向以控制开发强度为主的精细化扩张转变,加强现有城市空间的结构优化、内潜挖掘,促进地下空间开发、纵向扩展,实现以新城建设为核心的组团式扩展和以生态空间建设为中心的可持续扩展模式;同时,在世界城市和新型城镇化建设大背景下,北京经济在发展动力转换、产业结构深度调整和升级过程中,要更注重高端引领、创新驱动、绿色发展,实现经济效益好、资源消耗低、环境污染少、技术含量高的发展;在人口方面,需要继续加强人口调控管理,控制人口增长,加快人口疏解,统筹城乡发展,优化城镇空间布局,以促进社会经济与资源、环境的均衡协调发展。

### 参考文献:

- ALLAN I, PETERSON J. 2002. Spatial modeling in decision support for land-use planning: a demonstration from the Lallal catchment, Victoria, Australia [J]. Australian Geographical Studies, 40(1): 84-92.
- ARTHUR H S T, CARLSON B T N, CLARKER K C. 2003. Satellite and ground-based microclimate and hydrologic analyses coupled with a regional urban growth model [J]. Remote Sensing of Environment, 86(3): 385-400.
- BEWKET W, GEERT S. 2005. Dynamics in land cover and its effect on stream flow in the Chemoga watershed, Blue Nile basin, Ethiopia [J]. Hydrological Process, 19(2): 445-458.

- CROKE B F W, MERRITT W S, JAKEMAN A J. 2004. A dynamic model for predicting hydrologic response to land cover changes in gauged and ungauged catchments [J]. *Journal of Hydrology*, 291(1): 115-131.
- ISLAM K R, WEIL R R. 2000. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 79(1): 9-16.
- MARKUS. 2002. Technical progress, structural change, and the environment Kuznets curve [J]. *Ecological Economics*, 42(3): 381-389.
- MARK S J, WILLIAM F C, VISHAL K M, et al. 2003. Application of two hydrologic models with different runoff mechanisms to a hillslope dominated watershed in the northeastern US: a comparison of HSPF and SMR [J]. *Journal of Hydrology*, 284(1): 57-76.
- MEYER W B, TURNER B L. 2003. Human population growth and global land-use/cover change [J]. *Annual Review of Ecology and Systematic*, 23(1): 39-61.
- 卞正富, 张燕平. 2006. 徐州煤矿区土地利用格局演变分析[J]. *地理学报*, 61(4): 349-358.
- 陈百明, 刘新卫, 杨红. 2003. LUCC 研究的最新进展评述[J]. *地理科学进展*, 22(1): 22-29.
- 陈莹, 宫辉力, 李小娟. 2007. 北京市生态环境质量动态变化及其影响因素分析[J]. *首都师范大学学报(自然科学版)*, 28(6): 83-87.
- 郭旭东, 傅伯杰, 陈利顶. 等. 2001. 低山丘陵区土地利用方式对土壤质量的影响[J]. *地理学报*, 56(4): 447-455.
- 何春阳, 陈晋, 史培军. 等. 2003. 大都市区城市扩展模型-以北京市扩展模拟为例[J]. *地理学报*, 58(2): 294-304.
- 黄宝荣, 欧阳志云, 张慧智. 等. 2008. 中国省级行政区生态环境可持续性评价[J]. *生态学报*, 28(1): 327-337.
- 黄金川, 方创琳. 2003. 城市化与生态环境交互耦合机制与规律性分析[J]. *地理研究*, 22(2): 211-220.
- 李洪义, 史舟, 沙晋明. 等. 2006. 基于人口神经网络的生态环境质量遥感评价[J]. *应用生态学报*, 17(8): 1475-1480.
- 李俊祥, 王玉洁, 沈晓红. 等. 2004. 上海市城乡梯度景观格局分析[J]. *生态学报*, 24(9): 1973-1981.
- 史培军, 袁艺. 2003. 土地利用变化对城市洪涝灾害的影响[J]. *自然灾害学报*, 12(3): 6-13.
- 王宏伟, 张小雷, 乔木. 等. 2008. 基于 GIS 的伊犁河流域生态环境质量评价与动态分析[J]. *干旱区地理*, 31(2): 215-221.
- 王瑶, 宫辉力, 李小娟. 2007. 基于 GIS 的北京市生态环境质量检测与分析[J]. *国土资源遥感*, 75(1): 91-96.
- 徐超平, 夏斌. 2010. 资源型城市土地利用变化及其对生态系统服务价值的影响[J]. *生态环境学报*, 19(12): 2887-2891.
- 徐鹏伟, 赵多. 2006. 基于 RS 和 GIS 的杭州城市生态环境质量综合评价技术[J]. *应用生态学报*, 17(6): 1034-1038.
- 杨楠, 王小文, 卓悦. 2008. 陕南地区生态环境状况综合评价及对策[J]. *水土保持通报*, 28(2): 190-194.
- 杨山, 汤军友. 2003. 无锡市空间扩展的生态环境质量综合评价研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 13(1): 65-69.
- 岳书平, 张树文, 闫业超. 等. 2006. 公主岭土地利用变化的生态效应研究[J]. *资源科学*, 28(6): 161-166.
- 张华, 曹月, 武晶. 等. 2008. 科尔沁沙地生态环境质量综合评价[J]. *中国人口·资源与环境*, 18(2): 125-128.
- 郑辛酉, 贾铁飞, 倪少春. 2006. 基于土地利用变化的区域城市化生态效应分析-以上海城市边缘区轴向城市化样带为例[J]. *资源科学*, 28(6): 146-153.

## Eco-environment Response to Urban Spatial Expansion and Its Driving Forces in Beijing

LIN Xueqin<sup>1</sup>, WANG Dai<sup>2\*</sup>, LIU Xu<sup>1</sup>

1. College of Resources Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China

**Abstract:** That of spatial expansion, land use change and their ecological effects is the core issue should be investigated in urban sustainable development, and moreover this is also a critical topic in global environment change. As densely populated and industrial areas, metropolis experiences dramatic land use changes and therefore significant ecological environment problems as well. Toward to China's new urbanization, the investigation on spatial expansion and its eco-effects could significantly contribute to improve the land-use efficiency, transform the ways to achieve economic growth and finally meet sustainable development. This paper builds a comprehensive index system to evaluate eco-environment response to urban expansion, and then uses it to analyze the spatial differentiation of eco-environment response and driving forces in 16 districts in Beijing from 1995 to 2010, based on the remote sensing data and related economic-social data of Beijing. We reach five main conclusions: Firstly, the social economy pressure index to urban expansion of all 16 districts in Beijing rise during this period. The index of core urban area and urban function expansion area have largest growth, while that of new urban area and ecological conservation area have more gentle upward trend. Secondly, the land-use state index of districts except Dongcheng and Xicheng declined. The index of Tongzhou, Shunyi, Daxing, Pinggu and Changping have fast reduction, while Chaoyang, Haidian, Fengtai, Shijingshan and Miyun have slower reduction. Then the ecological environment index of districts except Tongzhou and Daxing showed an upward trend, with core urban area having largest growth and the ecological conservation areas and new urban area experiencing smaller growth. Fourthly, the ecological environment comprehensive index of districts except Tongzhou, Shunyi, Yanqing and Changping increased. The index of Dongcheng, Xicheng, Haidian and Chaoyang have the larger increase, while that of Shunyi, Pinggu and Huairou have the smaller increase. Beijing show spatial patterns of "lower in center, higher in periphery" and "lower in southeast, higher in northwest". Finally, factors such as population growth, urbanization, economic development, expansion of urban construction land and reduction of ecological land, have huge influence on eco-environmental response to urban expansion in Beijing.

**Key words:** urban expansion; eco-environment response; spatiotemporal differences; driving forces; Beijing