

DOI: 10.20103/j.stxb.202306091230

余思洁, 侯鹰, 刘长峰, 刘宝印, 陈卫平. 城市化区域生态风险驱动力及管控策略——以北京市为例. 生态学报, 2023, 43(24): 10443-10453.

Yu S J, Hou Y, Liu C F, Liu B Y, Chen W P. Driving forces and controlling strategies of ecological risks in urbanized areas: A case study of Beijing. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(24): 10443-10453.

城市化区域生态风险驱动力及管控策略

——以北京市为例

余思洁^{1,2}, 侯 鹰^{2,3,*}, 刘长峰⁴, 刘宝印⁵, 陈卫平^{2,3}

1 郑州大学河南先进技术研究院, 郑州 450003

2 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

3 中国科学院大学, 北京 100049

4 北京青远生态环境有限公司, 北京 102200

5 中国科学院科技战略咨询研究院, 北京 100190

摘要:快速城市化导致城市及周边区域生态风险不断增加, 认知城市化区域生态风险, 探究其变化的驱动因素, 提出行之有效的风险管控策略, 对城市化区域生态环境与社会经济协调发展具有重要意义。以北京市为例, 基于生态系统服务对生态风险进行了定量表征, 分析了城市化因素对生态风险的驱动作用, 探究了生态风险管控策略。研究表明: 不透水地表扩张、经济增长、人口增长均对生态风险有显著的驱动作用, 其中不透水地表扩张的驱动作用占主导地位。经济增长和人口增长通过影响不透水地表率间接作用于生态风险, 在 2005 年时, 人口密度对生态风险的驱动作用大于 GDP 强度, 在 2010 年及之后, GDP 强度对生态风险的驱动作用则变得比人口密度的驱动作用更大。北京市的生态风险管控策略为: 在不透水地表率介于 40%—70% 的区域降低不透水地表率和实施土地利用及景观格局优化; 不透水地表率大于 70% 的区域应防止不透水地表进一步扩张; 不透水地表率低于 40% 的区域需通过提升生态系统质量、强化风险防范、降低风险暴露等途径来管控风险。此外, 应通过提高海淀、昌平、通州、顺义等辖区的人口和经济城市化集约水平来降低生态风险。本研究阐明了城市化对区域生态风险的驱动作用, 可为北京市生态风险管控提供依据。

关键词:城市化; 生态系统服务; 生态风险; 驱动力; 风险管控; 不透水地表率

Driving forces and controlling strategies of ecological risks in urbanized areas: A case study of Beijing

YU Sijie^{1,2}, HOU Ying^{2,3,*}, LIU Changfeng⁴, LIU Baoyin⁵, CHEN Weiping^{2,3}

1 Henan Institutes of Advanced Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450003, China

2 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4 Beijing Qingyuan Ecological Environment Co., Beijing 102200, China

5 Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract: Rapid urbanization has been a driving force behind the continuous increase in ecological risks in both urban areas and their surrounding regions. Understanding these ecological risks in urbanized areas, exploring the factors responsible for their changes, and proposing effective risk control strategies are of paramount importance for achieving harmonious development between the ecological environment and socio-economics in urbanized regions. Taking Beijing as a case study,

基金项目:国家重点研发计划课题(2019YFB2102902, 2017YFC0505702)

收稿日期:2023-06-09; **采用日期:**2023-11-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yinghou@rcees.ac.cn

this study used ecosystem services to quantitatively characterize ecological risks, analyzed the influence of urbanization factors on ecological risks, and explored the strategies for risk control. The findings reveal that the expansion of impervious surfaces (IS), economic growth, and population growth have all had significant driving effects on ecological risks, with the expansion of IS emerging as the dominant driver. Economic and population growth indirectly affect ecological risks by impacting the impervious surface ratio. Notably, the direction and magnitude of their driving effects underwent substantial changes after the year 2010. For Beijing, the ecological risk control strategies involve addressing the IS in different IS ratio ranges. In areas with an IS ratios exceeding 70%, the primary strategy of risk reduction should be reducing the IS ratio. However, these areas tend to have high urban economic and social activity levels, making measures to reduce IS ratios socially and economically costly. Therefore, strict measures should be implemented to prevent further expansion of IS in these areas. Additionally, new urban development should be carried out with IS ratios kept below 70%. In areas where the IS ratio falls between 40% and 70%, the driving effect of IS expansion on ecological risks intensifies, while other factors simultaneously contribute significantly to increased risks. In these areas, multiple measures are recommended for risk control, such as increasing the permeability of paved surface, increasing the green space area, and building compact construction land. In areas with IS ratios ranging from 0% to 40%, ecological risks in Beijing are primarily influenced by factors other than IS. Thus, reducing the IS ratio alone is unlikely to effectively mitigate risks in these areas. Risk control strategies in these areas should focus on increasing ecosystem quality, strengthening risk prevention measures, and reducing exposure to risks. Furthermore, in districts such as Haidian, Changping, Tongzhou, and Shunyi, reducing ecological risks should involve elevating the population and economic urbanization intensity. This study offers insights into the impact of urbanization on regional ecological risks and can provide references for ecological risk control in Beijing.

Key Words: urbanization; ecosystem services; ecological risk; driving force; risk control; impervious surface coverage

改革开放以来,我国城市化进程迈入了快速发展阶段,经济社会快速发展的同时生态环境问题日益突出^[1]。城市不透水地表的迅速扩张以及不合理的经济发展模式导致城市化区域原有的生态系统结构发生改变,景观格局趋于破碎,城市内涝、热岛效应、空气和水体污染、生物多样性下降等生态风险不断增加,如何降低城市化区域面临的各种生态风险成为研究热点。认知和评价城市化区域生态风险,探究其变化的驱动因素,实施行之有效的风险管控措施,对城市化与区域生态环境协调可持续发展具有重要意义^[2]。

城市化过程是非城市区域向城市区域转变的过程,在不同学科领域有着不同定义^[3];土地城市化代表土地利用空间结构的改变^[4];经济城市化则是产业结构发生改变,第一产业向第二、三产业的转型^[5];人口城市化则不仅表现为农村人口向城市迁移集中、城镇人口占总人口比例的增加,还表现为农村生活方式向城市生活方式的转变^[6-8]。以往研究表明,城镇用地的扩张直接导致了区域生态风险增加,如热岛效应扩张和强度增强^[9]、水环境质量下降^[10]。此外,城市发展导致区域植被、水体等景观破碎化,对生态系统的结构、功能产生影响,进一步增加生态风险^[11],如物种多样性下降^[12]、城市内涝加剧等^[13]。经济城市化和人口城市化是城市化的内生动力:一方面,更多的人口流入城市创造更多的劳动力和市场需求,刺激了经济增长,而另一方面,更强大的经济则吸引了更多的人口迁入城市。二者的相互作用导致城镇建设用地不断扩张,周边区域景观格局持续变化,从而导致城市化区域生态风险的变化。因此,经济和人口城市化对生态风险的驱动作用不容忽视。

生态风险管控近年来受到学界和决策管理者越来越多的关注^[14]。过去对于土壤、水体污染等化学风险管控的研究较为成熟,研究者基于已有评估体系及实验对污染物的元素赋存形态、来源、空间分布特征等开展了大量研究,针对性的制定了一系列管控标准及准则^[15-17]。针对外来生物入侵的生态风险,研究者利用数理统计、模型模拟等方法,在分析其危害状况和入侵原因的基础上,提出了外来入侵生物的预防及管理对策^[18-19]。此外,有学者开展了城市风险管理的理论研究,提出了风险管理的关键问题、管理体系、管理流程

等^[20-21]。然而,由于城市化区域的风险来源较多、作用机制复杂,对生态环境的不利影响不易量化,目前对城市化所驱动的生态风险管控的案例研究多针对单一的风险类型,针对综合生态风险管控的案例研究还很缺乏。

本研究以北京为例,进行生态风险定量表征,分析土地、经济、人口城市化对生态风险的驱动作用,针对不同驱动因素探索生态风险管控策略,以期为城市化区域生态风险驱动力分析提供方法,为北京市生态风险管控提供依据。

1 研究区域和研究方法

1.1 研究区域

北京市地处华北平原北部(115°20'E—117°30'E,39°28'N—41°05'N),东面与天津市毗连,其余与河北省相邻,西部、北部和东北部三面环山,东南部是平原,整体地势呈现出由西北向东南逐渐降低趋势(图1)。北京市总面积16410 km²,其中山区面积10200 km²,约占总面积的62%,平原区面积为6200 km²,约占总面积的38%,属暖温带半湿润半干旱季风气候,年平均气温为11—12℃,年平均降水量为540 mm(1980—2010年)^[22]。

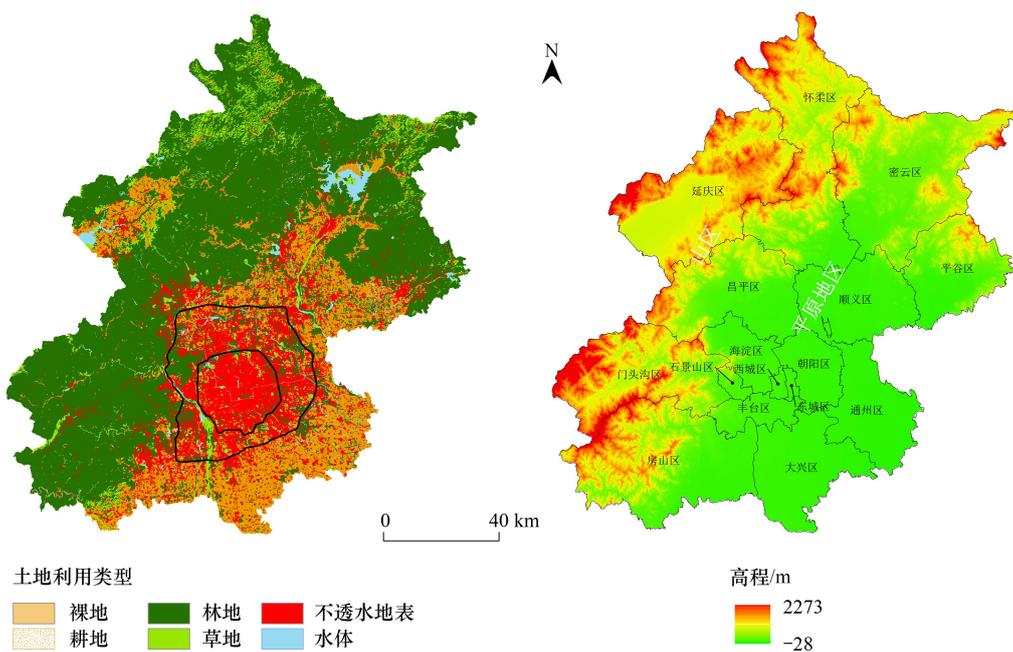


图1 2015年北京市土地利用分类及高程

Fig.1 Land use classification in 2015 and elevation of Beijing

改革开放后北京市迎来城市化快速发展阶段,1985年全市不透水地表面积为497.44 km²,2018年增长到3770.14 km²,尤其是1994年后城市发展速度明显提高^[23]。城市总体呈现出单中心多层次结构,不透水地表主要集中在六环以内的主城区,呈现出由中心向四周扩散的趋势,城郊梯度特征明显^[24]。城市化快速发展导致了北京市的城市内涝、空气污染、热岛效应、地下水资源损失等生态风险的快速增加,是开展城市化区域生态风险驱动力及管控研究的理想案例区域。北京市在2001年成功申办奥运会后到2008年举办奥运会的几年间进行了大规模的基础设施建设,吸引了大量的外来人口,使得这几年间城市人口迅速增加,不透水地表快速扩张。2008年以后人口增长和城市扩张速度开始放缓。因此,本研究以5年为一个时间跨度,选取奥运会之前的2005年和奥运会之后的2010、2015年三个年份,分析城市化对生态风险的驱动作用。

1.2 研究方法

1.2.1 数据来源

本研究主要使用 2005、2010、2015 年北京市土地利用分类 30 m 分辨率栅格数据^[25]作为空间数据来源, GDP 和人口密度 1000 m 分辨率栅格数据来自于地理国情监测云平台, 气象站点降雨数据和植被指数 (NDVI) 空间数据来自中科院地理科学与资源研究所资源环境科学与数据中心, 各行政区的经济及人口数据来自相应年份的统计年鉴。

1.2.2 生态风险指数计算

生态系统服务价值考虑了生态系统提供的多种服务, 能够全面体现生态系统的状况, 服务价值受损的情况能够反映区域生态风险的情况, 并为风险管控提供思路。因此, 生态系统服务价值是城市化区域生态风险的理想评价终点^[26]。

生态系统服务价值量的评估方法主要包括功能价值评估法和当量因子评估法^[27], 本研究使用当量因子法对北京市 2005、2010、2015 年三个年份生态系统服务价值进行评估。当量因子法基于对生态系统服务的分类, 通过专家咨询得到不同生态系统类型不同服务类型的价值当量因子, 再通过降水量、NPP 等修正得到本地化的当量因子, 并结合本地粮食经济价值计算服务价值^[28]。根据生态风险评估框架, 生态风险表征通常要基于风险阈值。由于本研究没有可供参考的风险阈值, 因此, 基于 TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution) 方法, 设定正理想样本点, 将该点的服务价值作为不存在风险的阈值, 使用生态系统服务价值相对损失量表表征生态风险。该方法将区域样本点 (空间像元) 中各类生态系统服务价值最大和最小值所对应的像元作为理想样本点 (正理想样本点和负理想样本点), 使用这两个样本点的服务价值间的欧氏距离来表征该区域生态系统服务损失的最大值, 将真实样本点的服务价值与正理想样本点的服务价值之间的欧氏距离除以该区域生态系统服务损失的最大值作为综合风险指数^[29]。

1.2.3 生态风险驱动力分析

城市化概念涉及到土地城市化、经济城市化及人口城市化三个方面。本研究选取了三个与之对应的指标描述城市化的空间分布格局 (表 1), 以探究城市化对北京市生态风险的驱动作用。土地城市化即城市空间规模与所占面积的增加, 因此选取不透水地表率作为城市区域空间扩张指标^[30-31]。经济城市化过程通常体现为区域经济总量的增加, 因此使用每平方公里 GDP 作为度量指标^[32]。人口城市化过程通常伴随区域人口密度的增加, 因此使用每平方公里人口数进行度量^[33]。

表 1 城市化类型及其指标

Table 1 Urbanization types and the corresponding indicators

城市化类型 Urbanization type	量化指标 Indicators
土地城市化 Land urbanization	不透水地表率/%
经济城市化 Economic urbanization	每平方公里 GDP/(元/km ²)
人口城市化 Population urbanization	每平方公里人口数/(人/km ²)

本研究根据前面描述的方法得到北京市 2005、2010、2015 年生态风险指数和 3 类城市化指标的空间数据, 形成各年份几个指数 (指标) 的空间样本。使用 Logistic 回归模型^[34-35]定量描述各城市化指标对生态风险的驱动作用, 在拟合 Logistic 回归方程前, 对 GDP 强度和人口密度进行单位转换, 以消除其数量级的不同对结果的影响, 使用决定系数 R^2 和显著性检验的 p 值来刻画拟合的效果, 具体计算公式如下:

$$\text{logit}RI = \ln\left(\frac{RI}{1 - RI}\right) = a_0 + a_1 \times \text{ISC} + a_2 \times \text{GDP}/100 + a_3 \times \text{POP}/100 + \varepsilon \quad (1)$$

式中, RI : 生态风险指数; ISC 表示不透水地表率, 单位为%; GDP 表示每平方公里 GDP, 单位为元/km²; POP 表示每平方公里人口数, 单位为人/km²; a_i 表示模型拟合的系数; ε 表示模型残差。

自变量的拟合系数可以直观反映三类城市化指标对生态风险驱动作用的大小, 通过对比三个时期的模型

系数可以分析城市化因素对生态风险驱动作用的时间变化特征。针对回归模型可能存在多重共线性的问题,通过计算自变量方差膨胀因子对模型的多重共线性进行了检验。

1.2.4 区域生态风险管控策略分析

针对三类生态风险驱动因素,本研究分别从不透水地表率、人口城市化、经济城市化三个方面探索生态风险管控策略。

据以往研究可知,不透水地表率对城市地表径流和地表城市地表温度有着显著影响^[36-37],控制不透水地表面积可以有效控制城市化区域生态风险^[38-39]。为探索不透水地表管控策略,本研究使用 2015 年北京市全部像元做空间样本,按 10%间距对不透水地表率进行区间划分^[40],分段进行生态风险指数与不透水地表率的线性回归分析,通过线性回归模型残差和决定系数 R^2 的变化情况,分析二者关系的变化特征,提出不透水地表率分类管控策略。

在人口与经济层面,城市化体现为人口和经济活动向城镇区域的聚集,该聚集过程对城市化区域生态环境产生影响^[41]。本研究提出人口城市化集约指数与经济城市化集约指数来量化人口和经济在城镇空间上的聚集性,分析北京市各辖区城市化集约指数的变化特征,量化集约指数与生态风险指数的关系,提出通过人口和经济城市化集约化发展调控生态风险的策略^[42]。两类城市化集约指数计算如下:

$$PUII = \frac{PU}{ISC} = \frac{\frac{UP}{TP}}{\frac{AU}{AT}} = \frac{\frac{UP}{AU}}{\frac{TP}{AT}} = \frac{UPD}{TPD} \quad (2)$$

$$EUII = \frac{EU}{ISC} = \frac{\frac{UE}{TE}}{\frac{AU}{AT}} = \frac{\frac{UE}{AU}}{\frac{TE}{AT}} = \frac{UED}{TED} \quad (3)$$

式中, $PUII$ 为人口城市化指数(PU)与不透水地表率(ISC)的比值,将其定义为人口城市化集约指数。人口城市化指数是指城镇人口(UP)占地区总人口(TP)的比例;而不透水地表率是指城镇区域面积(AU)占区域总面积(AT)的比例。通过换算可得, $PUII$ 即为城镇人口密度(UPD)占区域总人口密度(TPD)的比例。类似的,经济城市化集约指数($EUII$)是经济城市化指数(EU)与不透水地表率(ISC)的比值,也是城镇经济密度(UED)占区域总经济密度(TED)的比例(表 2)。

表 2 人口城市化集约指数和经济城市化集约指数的说明

Table 2 Description of population urbanization intensification index and economic urbanization intensification index

PUII (EUII) 不同取值 Different PUII (EUII) values	对应的情形 Corresponding situation	情形说明 Description
集约指数 = 0 PUII (EUII) = 0	$PU (EU) = 0$	完全没有城市化
$0 < \text{集约指数} < 1$ $0 < PUII (EUII) < 1$	$PU (EU) < ISC$	不透水地表使用不充分
集约指数 = 1 PUII (EUII) = 1	$PU (EU) = ISC \neq 1$	城镇人口(城市经济产出值)按其占总人口(经济总产出值)的比例占据相同比例的土地资源
	$PU (EU) = ISC = 1$	区域完全被不透水地表覆盖,所有的人居住在城镇中,所有的经济产出来自城镇
集约指数 > 1 PUII (EUII) > 1	$PU (EU) > ISC$	更少的不透水地表被用于承载更多的城镇人口或更多的城镇经济产出

PUII: 人口城市化集约指数 Population urbanization intensification index; EUII: 经济城市化集约指数 Economic urbanization intensification index; PU: 人口城市化指数 Population urbanization index; EU: 经济城市化指数 Economic urbanization index; ISC: 不透水地表率 Impervious surface coverage

2 结果与讨论

2.1 生态风险驱动力分析

三个年份的 Logistic 回归模型的决定系数 R^2 均大于 0.7, 且三年所有的回归系数均达到 0.001 显著性水平, 表明三类城市化因素均对北京市生态风险有明显的驱动作用(表 3)。回归模型多重共线性检验的结果显示, 三个分析年份中, 2005 年 GDP 强度的方差膨胀因子为 6.4, 其余自变量的方差膨胀因子均小于 5, 表明三个年份的 Logistic 回归模型可靠。

表 3 三个年份 Logistic 回归系数拟合结果

Table 3 Fitting results of Logistic regression coefficients in three years

年份 Year	决定系数 R^2	截距 Intercept	不透水地表率 Impervious surface coverage	地区生产总值 GDP	人口 POP
2005	0.720 ***	0.241 ***	3.142 (0.766) ***	-0.004 (-0.092) ***	0.002 (0.178) ***
2010	0.741 ***	0.170 ***	2.928 (0.746) ***	0.001 (0.181) ***	-0.002 (-0.053) ***
2015	0.749 ***	0.145 ***	3.009 (0.783) ***	0.001 (0.129) ***	-0.001 (-0.032) ***

* * * 表示系数在 0.001 水平上达到显著; 括号中是标准化后的回归系数

标准化后的模型回归系数绝对值可以用来衡量不同驱动因素作用力的大小, 其中不透水地表率是驱动作用最大的因素。不透水地表率的增加会直接影响生态系统的功能, 如地表径流下渗受阻、土地蒸散发作用下降、面源污染物流失加剧, 是城市化区域生态风险增加的直接驱动因素^[43—45]。人口密度和 GDP 强度的回归系数虽然达到显著水平, 但其作用远低于不透水地表率对生态风险的驱动作用。人口增长是城市化的主要推动因素之一, 城市人口密度和对自然资源需求的增加导致土地开发和不透水地表扩张, 从而对生态风险造成间接影响^[46]。经济发展对城市化也同样具有巨大推动作用, 发展过程需要城市周边的城郊区域提供建设用地, 导致农田、森林、草地等土地用途的转变; 经济活动产生的污染物也可能对生态系统和生物多样性产生不利影响^[47]。在 2005 年时, 人口密度对生态风险的驱动作用大于 GDP 强度, 而在 2010 年及之后, GDP 强度对生态风险的驱动作用则变得比人口密度的驱动作用更大。

回归模型系数的正负号表示驱动作用的方向, 三个年份不透水地表率的系数值略有起伏, 都与生态风险指数呈正相关关系, 但 GDP 强度和人口密度的系数变化却出现了正负逆转情况。人口密度的标准化系数在 2005 年时为 0.178, 在 2010 年时变为 -0.053, 2015 年为 -0.032。GDP 强度的标准化系数的变化正好与人口密度的相反, 在 2005 年时, GDP 强度的标准化系数为 -0.092, 与生态风险在空间上呈现出负相关关系, 而在 2010 年标准化系数达到最大, 说明 GDP 强度对生态风险的影响在 2010 年达到最大, 在 15 年仍保持正相关关系, 即经济增长导致了生态风险的增加。

为解释这一现象, 研究参考了 2005 年和 2015 年北京市统计年鉴以及《2005 年城镇房屋概况统计公报》和《北京市 2015 年暨“十二五”时期国民经济和社会发展统计公报》。由于对新增建设用地的控制, 以及人口向昌平、大兴、通州、顺义等近郊区疏解, 2005 到 2015 年北京市城区和近郊区人口增长率远高于不透水地表率的增长率(表 4), 人口对城镇建设用地增加的驱动作用明显下降^[48]。2001 年加入世界贸易组织后, 我国工业化发展速度大幅加快, 包括北京市在内的各大城市经济快速发展。二、三产业的快速发展对建设用地需求不断增加, 使得北京市 GDP 增长对不透水地表率增加的驱动作用明显增强。这与以往研究中 GDP 对我国建设用地扩张的驱动大于人口的结果相一致^[49]。这也导致了 GDP 增长对生态风险的驱动作用明显增强。

2.2 不透水地表管控策略

北京市 2015 年不透水地表率同生态风险指数线性回归模型的残差变异和 R^2 的变化表明(图 2), 当不透水地表率为 0—10% 时, 模型残差存在大量的异常值, 说明此范围内线性模型的适用性很差。当不透水地表率低于 40% 时, 模型残差的变异幅度大于其他区间, 且 3 个区间的残差变异幅度接近。当不透水地表率超过 40% 时, 模型残差变异幅度下降明显, 在此范围内, 不透水地表率对生态风险的驱动力不断增大。当不透水地

表率大于 70% 后,模型残差变异幅度变得很小,且 R^2 明显增大,说明在此范围内,不透水地表率增加对生态风险增加的驱动作用很强。

表 4 2005 年、2015 年北京市各区常住人口、不透水地表率及增长率

Table 4 Permanent resident population and ISC in different districts of Beijing in 2005 and 2015 and the growth rate

各区 Districts	人口数/万人 Population		人口增长率 Population growth rate/%	不透水地表率 ISC/%		ISC 增长率 ISC growth rate/%
	2005 年	2015 年		2005 年	2015 年	
东城区	86	90.5	5.23	91.34	89.58	-1.92
西城区	119.2	129.8	8.89	92.55	93.00	0.48
朝阳区	280.2	395.5	41.15	68.78	73.86	7.39
丰台区	156.8	232.4	48.21	65.47	67.53	3.15
石景山区	52.4	65.2	24.43	61.20	59.81	-2.27
海淀区	258.6	369.4	42.85	49.52	54.39	9.81
房山区	87	104.6	20.23	13.64	17.19	26.02
通州区	86.7	137.8	58.94	26.96	32.90	22.03
顺义区	71.1	102	43.46	22.87	29.21	27.74
昌平区	78.2	196.3	151.02	18.28	22.04	20.51
大兴区	88.6	156.2	76.30	25.80	32.70	26.76
门头沟区	27.7	30.8	11.19	4.28	4.67	9.11
怀柔区	32.2	38.4	19.25	4.12	4.56	10.62
平谷区	41.4	42.3	2.17	9.89	11.63	17.59
密云区	43.9	47.9	9.11	5.00	5.85	16.95
延庆区	28	31.4	12.14	4.14	4.79	15.89

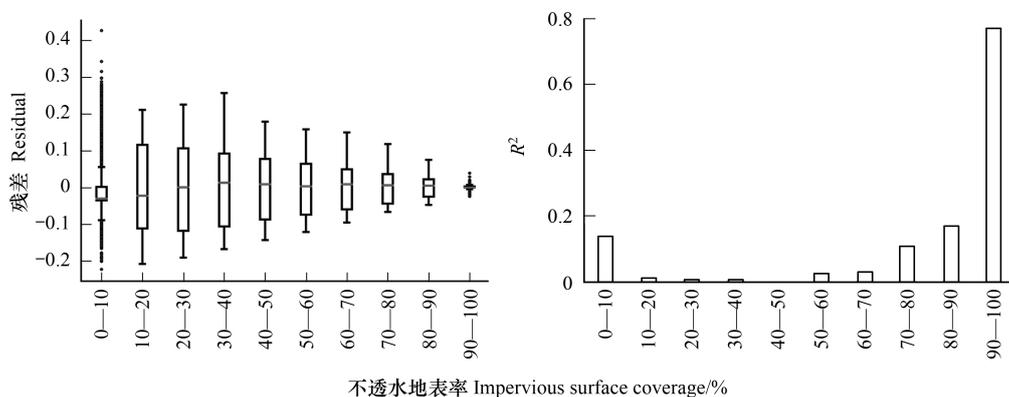


图 2 北京市 2015 年不透水地表率同生态风险指数线性回归模型的残差变异和 R^2

Fig.2 Residuals and R^2 of the linear regression models between ISC and the ecological risk index in Beijing in 2015

上述模型残差变异和 R^2 变化表明,不透水地表率有两个明显的分界点(40%和70%),将不透水地表率分为三个范围,每个范围应采取不同的风险管控策略。不透水地表率大于70%的区域,生态风险增加主要由不透水地表率增加驱动,主要需通过降低不透水地表率来降低生态风险。但这些区域城市经济和社会活动强度高,降低不透水地表率措施的社会经济成本很高。因此,这些区域需严格控制不透水地表率的进一步增加。此外,新增建设用地应将不透水地表率控制在70%以内^[50]。不透水地表率为40%—70%范围的区域,不透水地表率增加对生态风险增加的驱动作用逐渐增强,其他因素同时也对生态风险增加有较大影响,应采取多种措施管控生态风险,包括改造不透水地表增加其透水性(铺设透水砖、棕地改造等),增加城区绿地(特别是下凹式绿地)面积、集约化布局建设用地和交通用地等^[51]。不透水地表率为0—40%范围的区域,北京市生态风

险主要受除不透水地表外的其他因素的影响,降低不透水地表率不能有效降低生态风险,控制风险需要从其他方面入手,如优化生态系统、加强风险防范措施、降低风险受体暴露等^[52]。

2.3 人口和经济城市化集约化发展策略

北京市人口和经济城市化集约指数数值很高且明显高于其他辖区的有门头沟区、怀柔区、密云区和延庆区(图3、图4);城市核心区的两个辖区(东城区、西城区)两类集约指数最低(接近1)。

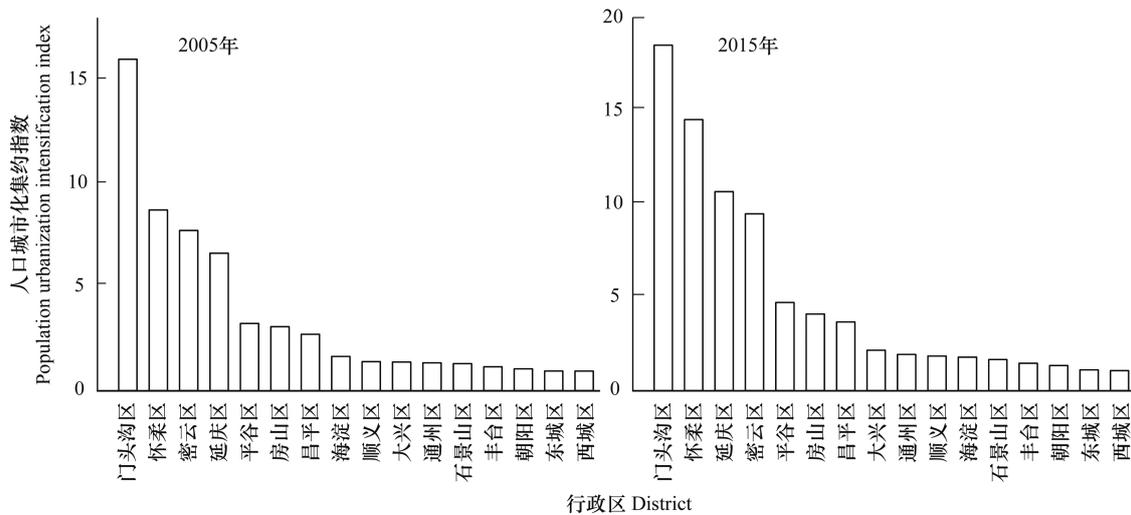


图3 北京市2005年、2015年各区人口城市化集约指数

Fig.3 Population urbanization intensification index of each district of Beijing in 2005 and 2015

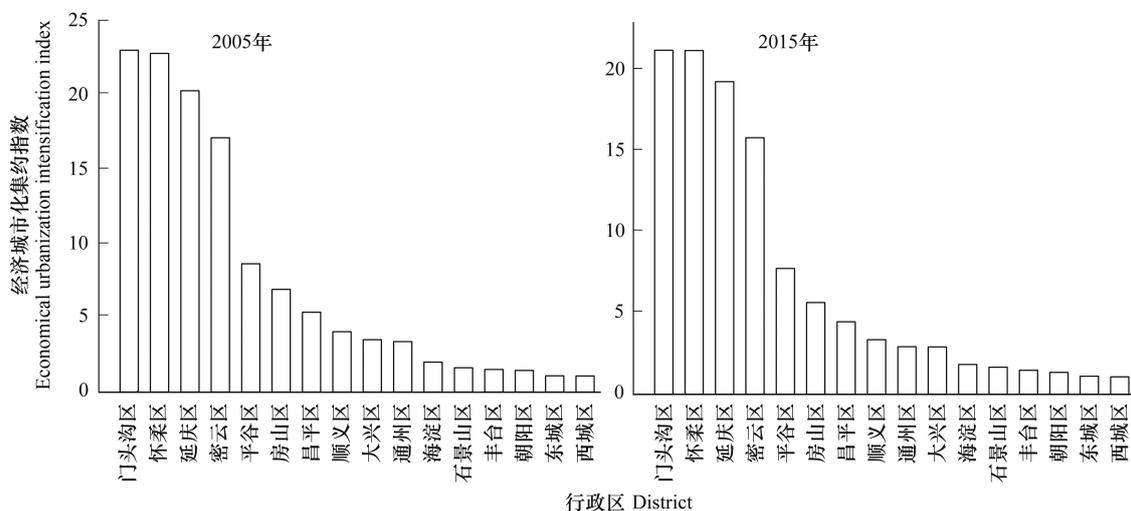


图4 北京市2005年、2015年各区经济城市化集约指数

Fig.4 Economical urbanization intensification index of each district of Beijing in 2005 and 2015

北京市人口城市化和经济城市化集约指数总体呈现出由城区向郊区逐渐上升的趋势。这一现象的主要原因是高度城市化的城市中心辖区,绝大多数人口为城镇人口,城镇人口密度与总人口密度之比即人口城市化集约指数趋近于1。类似的,这些区域绝大部分经济产出也来自城镇建成区。而位于西部、北部山区的行政区,由于地形原因,导致城镇面积占辖区总面积的比例很小,整个行政区的人口密度和经济强度很低,故而集约化指数很大。对比2005和2015年,各区人口城市化集约指数普遍呈升高的趋势,而经济城市化集约

指数大多下降,也反映了十年间北京市人口密度增加的同时居住用地更加集约,而建设用地的增加更多由经济增长所驱动。

以 2015 年北京市 16 个区作为样本点,对两类集约化指数同生态风险指数进行回归分析(图 5)。结果表明,两类集约指数与风险指数呈现出负指数函数关系,生态风险随集约化指数的增加而下降,下降速率由快转慢。

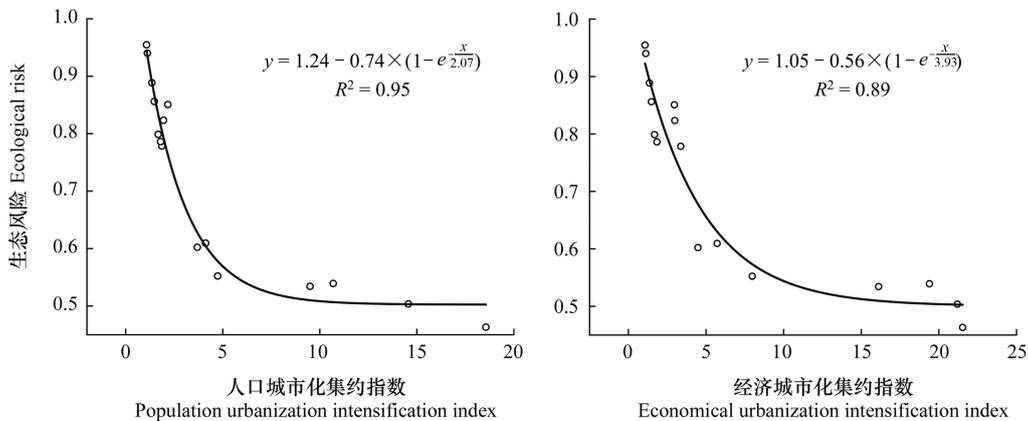


图 5 2015 年人口和经济城市化集约指数与生态风险的关系

Fig.5 The relationship between population and economic urbanization intensification indices and ecological risk in 2015

当集约指数处于较大范围内时,其变化对生态风险的影响并不明显,因此增加相应辖区的人口和经济城市化集约水平对降低这些辖区的生态风险作用不明显。当集约指数处于很小范围时(北京市中心城区),因其不透水地表率和社会经济活动强度已很高,难以进一步提高城市化集约水平。因此,提高人口和经济城市化集约水平的重点应放在集约指数中等的辖区,如海淀区、昌平区、通州区、顺义区等。在这些区域降低不透水地表率以提高城市化集约水平,从而降低生态风险是有效可行的。具体而言,这些辖区应继续优化土地利用和景观格局,引入“田园城市”“海绵城市”等建设模式^[53],在城市建设中注重土地资源合理分配^[54],增加城镇区域绿地面积^[55],尽可能减少土地资源消耗型产业,提高建筑和交通用地集约化水平^[56]。

3 结论

本研究以典型城市化区域北京市为例,开展基于生态系统服务的生态风险定量表征,分析土地、经济、人口城市化对生态风险的驱动作用,探索生态风险管控策略。各城市化因素中,不透水地表率是北京市生态风险的主要驱动因素,其驱动作用远大于经济强度和人口密度;2005 年经济强度呈现出对生态风险负向驱动作用,2010 年后则变为正向驱动并且驱动力大小有所增加;而人口密度的驱动作用及时间变化则同经济强度正好相反。不透水地表率在 40%—70% 的区域需要同时通过降低不透水地表率和进行土地利用和景观格局优化等其他措施来降低生态风险;而不透水地表率高于 70% 的区域需严格控制不透水地表的进一步扩张。此外,北京市为降低生态风险,应将提高人口和经济城市化集约水平的重点放在海淀、昌平、通州、顺义等集约指数中等的辖区。本研究存在的主要不足是只开展了 3 个历史年份的分析,不足以发现生态风险驱动力突变的年份,未来可增加分析的年份,从而更加全面地揭示风险变化的驱动机制。

参考文献 (References):

- [1] 王美娥, 陈卫平, 彭驰. 城市生态风险评价研究进展. 应用生态学报, 2014, 25(3): 911-918.
- [2] 梁辰月, 曹春, 李锦超, 等. 近 20 年兰西城市群生态系统服务价值对土地利用转型的时空响应. 环境科学, 2023; 1-17. doi:10.13227/j.hjlx.202306222.

- [3] Montgomery M R. The urban transformation of the developing world. *Science*, 2008, 319(5864): 761-764.
- [4] 杨建新, 杨圣兵, 石锐, 袁满, 任英健, 叶菁, 董贤慧, 高燕, 龚健. 土地城市化过程的波纹扩散规律——基于中国 234 个地级市的实证分析. *中国土地科学*, 2023, 37(4): 119-130.
- [5] 胡晶晶, 倪泽楷. 贵州省人口、经济、空间、生活城市化耦合协调性研究. *贵州社会科学*, 2017(7): 155-161.
- [6] 伍润楠, 陈楷锐, 刘立欣, 周春山. 珠三角城镇化研究回顾与展望——基于科学知识图谱的文献计量分析. *热带地理*, 2023, 43(2): 343-356.
- [7] 方创琳, 赵文杰. 新型城镇化及城乡融合发展促进中国式现代化建设. *经济地理*, 2023, 43(1): 10-16.
- [8] Zhang M M, Tan S K, Zhang Y W, He J, Ni Q L. Does land transfer promote the development of new-type urbanization? New evidence from urban agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River. *Ecological Indicators*, 2022, 136: 108705.
- [9] Gao Z, Hou Y, Chen W P. Enhanced sensitivity of the urban heat island effect to summer temperatures induced by urban expansion. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(9): 094005.
- [10] Meierdiercks K L, Kolozsvary M B, Rhoads K P, Golden M, McCloskey N F. The role of land surface versus drainage network characteristics in controlling water quality and quantity in a small urban watershed. *Hydrological Processes*, 2017, 31(24): 4384-4397.
- [11] 吕永龙, 王尘辰, 曹祥会. 城市化的生态风险及其管理. *生态学报*, 2018, 38(2): 359-370.
- [12] de Lima Filho J A, Vieira R J A G, de Souza C A M, Ferreira F F, de Oliveira V M. Effects of habitat fragmentation on biodiversity patterns of ecosystems with resource competition. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2021, 564: 125497.
- [13] Chang B X, Wherley B, Aitkenhead-Peterson J A, McInnes K J. Effects of urban residential landscape composition on surface runoff generation. *Science of the Total Environment*, 2021, 783: 146977.
- [14] 裴晓菲. 我国环境标准体系的现状、问题与对策. *环境保护*, 2016, 44(14): 16-19.
- [15] Zhong S Z, Geng Y, Qian Y Y, Chen W, Pan H Y. Analyzing ecosystem services of freshwater lakes and their driving forces: the case of Erhai Lake, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(10): 10219-10229.
- [16] 李小红, 刘正实, 徐龙君. 渝北区农村土壤重金属污染及生态风险评价. *安徽大学学报: 自然科学版*, 2022, 46(4): 94-101.
- [17] 田亦琦, 陈征, 王文杰. 国内外非水相液体污染场地调查评估及风险管控研究进展. *环境污染与防治*, 2022, 44(10): 1386-1391.
- [18] 王运生, 谢丙炎, 万方浩, 肖启明, 戴良英. ROC 曲线分析在评价入侵物种分布模型中的应用. *生物多样性*, 2007, 15(4): 365-372.
- [19] 张辉盛, 徐琳, 吕韦韦, 周昱, 王卫锋, 高瑞贺, 崔绍朋, 张志伟. 扶桑绵粉蚧多维气候生态位保守性与入侵风险. *应用生态学报*, 2023, 34(6): 1649-1658.
- [20] 陈卫平, 康鹏, 王美娥, 侯鹰. 城市生态风险管理关键问题与研究进展. *生态学报*, 2018, 38(14): 5224-5233.
- [21] 夏南凯, 宋海瑜. 大规模城市开发风险研究的思路与方法. *城市规划学刊*, 2007(6): 84-89.
- [22] 左斌斌, 钟伟强, 谭超, 刘达, 程涛. 基于 Copula 函数的北京市气候变化及人类活动对 NDVI 影响的识别. *水利与建筑工程学报*, 2023, 21(1): 219-225, 238.
- [23] 郑自琪, 庞博. 快速城市化背景下北京不透水面时空演变特征分析. *北京规划建设*, 2022(4): 14-17.
- [24] 付刚, 肖能文, 乔梦萍, 齐月, 闫冰, 刘高慧, 高晓奇, 李俊生. 北京市近二十年景观破碎化格局的时空变化. *生态学报*, 2017, 37(8): 2551-2562.
- [25] Yu W J, Zhou W Q, Qian Y G, Yan J L. A new approach for land cover classification and change analysis: integrating backdating and an object-based method. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 177: 37-47.
- [26] 康鹏, 陈卫平, 王美娥. 基于生态系统服务的生态风险评价研究进展. *生态学报*, 2016, 36(5): 1192-1203.
- [27] 景晓栋, 田贵良, 班晴晴, 胡豪, 张钰宁. 基于文献计量的 21 世纪以来我国生态系统服务研究现状及发展趋势. *生态学报*, 2023, 43(17): 7341-7351.
- [28] Xie G D, Zhang C X, Zhen L, Zhang L M. Dynamic changes in the value of China's ecosystem services. *Ecosystem Services*, 2017, 26: 146-154.
- [29] 刘长峰, 侯鹰, 陈卫平, 崔昊天. 基于生态系统服务的城市化区域生态风险表征方法研究. *生态学报*, 2021, 41(9): 3343-3353.
- [30] 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.
- [31] Xing L, Hu M S, Wang Y. Integrating ecosystem services value and uncertainty into regional ecological risk assessment: a case study of Hubei Province, Central China. *Science of the Total Environment*, 2020, 740: 140126.
- [32] 胡苗苗, 李建辉, 闫庆武. 两种夜光数据测算社会经济指标能力对比. *测绘科学*, 2022, 47(7): 111-118, 159.
- [33] 赵武生, 石培基. 基于 InVEST 模型的复合生态系统耦合协调关系研究——以兰西城市群为例. *中国环境科学*, 2023, 43(4): 1883-1894.
- [34] Yadav G, Singh R B, Anand S, Pandey B W, Mohanty A, Dash S S. Ecological model analysis of respiratory health risk factors by ambient air pollution in Lucknow, the capital City of Uttar Pradesh, India. *GeoJournal*, 2022, 87(4): 469-483.
- [35] Wang M, Cai L Y, Xu H, Zhao S L. Predicting land use changes in Northern China using logistic regression, cellular automata, and a Markov model. *Arabian Journal of Geosciences*, 2019, 12(24): 790.

- [36] Xu H Q, Lin D F, Tang F. The impact of impervious surface development on land surface temperature in a subtropical city: Xiamen, China. *International Journal of Climatology*, 2013, 33(8): 1873-1883.
- [37] Kuang W H, Yang T R, Yan F Q. Examining urban land-cover characteristics and ecological regulation during the construction of Xiong'an New District, Hebei Province, China. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(1): 109-123.
- [38] 胡梦姗, 叶长盛, 顾茉莉. 基于不透水地表扩展的南昌市景观生态风险评价. *水土保持研究*, 2023, 30(3): 448-459.
- [39] Yu, Zhao, Fu. Optimization of impervious surface space layout for prevention of urban rainstorm waterlogging: a case study of Guangzhou, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(19): 3613.
- [40] Guo L J, Liu R M, Men C, Wang Q R, Miao Y X, Zhang Y. Quantifying and simulating landscape composition and pattern impacts on land surface temperature: a decadal study of the rapidly urbanizing city of Beijing, China. *Science of the Total Environment*, 2019, 654: 430-440.
- [41] 周睿, 陈鹏, 胡啸峰, 原鹏辉, 赵晗. 雄安新区城市化进程中人口风险驱动的社会治理策略初探. *中国安全生产科学技术*, 2018, 14(8): 5-11.
- [42] Zhao Z, Bai Y P, Wang G F, Chen J C, Yu J L, Liu W. Land eco-efficiency for new-type urbanization in the Beijing-Tianjin-Hebei region. *Technological Forecasting and Social Change*, 2018, 137: 19-26.
- [43] S. T. A. Pickett, M. L. Cadenasso, J. M. Grove, C. H. Nilon, R. V. Pouyat, W. C. Zipperer, R. Costanza. Urban Ecological Systems: Linking Terrestrial Ecological, Physical, and Socioeconomic Components of Metropolitan Areas. *Annual Review of Ecology and Systematics* 2001 32:1, 127-157.
- [44] Fu B J, Meng Q H, Qiu Y, Zhao W W, Zhang Q J, Davidson D A. Effects of land use on soil erosion and nitrogen loss in the hilly area of the Loess Plateau, China. *Land Degradation & Development*, 2004, 15(1): 87-96.
- [45] Walsh C J, Roy A H, Feminella J W, Cottingham P D, Li R P M. The Urban Stream Syndrome: Current Knowledge and the Search For A Cure. *Journal of the North American Benthological Society*, 2005, 24(3): 706-723.
- [46] 和春兰, 普军伟, 沈金祥. 2005—2018 年澜沧江下游流域景观生态安全时空变化及其驱动因素. *水土保持通报*, 2020, 40(4): 219-227.
- [47] Liang W, Yang M. Urbanization, economic growth and environmental pollution: evidence from China. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 2019, 21: 1-9.
- [48] 楼梦醒, 冯长春. 京津冀地区城市建设用地变化及差异化驱动力研究. *城市发展研究*, 2018, 25(9): 23-28, 41.
- [49] 汪伟, 刘玉飞, 史青. 人口老龄化、城市化与中国经济增长. *学术月刊*, 2022, 54(1): 68-82.
- [50] 杨昆, 潘梅娥, 杨荣, 宋毅, 孟超. 滇池流域不透水表面的水环境影响分析及其治理措施. *环境工程学报*, 2016, 10(10): 5407-5412.
- [51] Wu J, Zhang P. The effect of urban landscape pattern on urban waterlogging. *Journal of Geographical Sciences*, 2017, 72: 444-56.
- [52] Hu T Y, Li X C, Gong P, Yu W C, Huang X C. Evaluating the effect of plain afforestation project and future spatial suitability in Beijing. *Science China Earth Sciences*, 2020, 63(10): 1587-1598.
- [53] Li P, Xiao H, Li X, Hu W, Gu S, Yu Z. Ecological risk Evaluation and Green Infrastructure planning for coping with global climate change, a case study of Shanghai, China. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, 108(4): 42077.
- [54] Cao S X, Chen L, Shankman D, Wang C M, Wang X B, Zhang H. Excessive reliance on afforestation in China's arid and semi-arid regions: lessons in ecological restoration. *Earth-Science Reviews*, 2011, 104(4): 240-245.
- [55] 张琨, 吕一河, 傅伯杰, 尹礼唱, 于丹丹. 黄土高原植被覆盖变化对生态系统服务影响及其阈值. *地理学报*, 2020, 75(5): 949-960.
- [56] Gong Q X, Guo G X, Li S P, Liang X D. Examining the coupling coordinated relationship between urban industrial co-agglomeration and intensive land use. *Land*, 2021, 10: 499.