

DOI: 10.5846/stxb202207192066

汪东川, 龙慧, 王康健, 王鸿艺, 柴华, 高建设. 京津冀城市群城市化强度与生态韧性的耦合协调分析. 生态学报, 2023, 43(15): 6321-6331.

Wang D C, Long H, Wang K J, Wang H Y, Chai H, Gao J S. Coupling coordination analysis of urbanization intensity and ecological resilience in Beijing-Tianjin-Hebei. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(15): 6321-6331.

京津冀城市群城市化强度与生态韧性的耦合协调分析

汪东川, 龙慧*, 王康健, 王鸿艺, 柴华, 高建设

天津城建大学地质与测绘学院, 天津 300384

摘要: 探索市域尺度与格网尺度下城市化强度与生态韧性之间的作用机制, 对提高生态韧性水平、提升城市发展质量、促进城市群可持续发展具有重要意义。以京津冀城市群为研究区, 基于 2000—2020 年土地利用数据、人口密度数据和社会经济数据, 尝试构建一套完整的城市化强度与生态韧性指标体系。利用景观安全度模型修正了“规模-密度-形态”生态韧性方法, 以市域尺度与格网尺度对比分析为手段, 结合耦合协调度模型与 Tapio 解耦模型, 探究二者的时空分异格局及协同演化特征。结果表明: (1) 不同尺度下, 城市化强度和生态韧性在全局上变化趋势相反且错位关系明显, 北京、天津城市化强度高而生态韧性较低; 格网尺度下, 城市化强度与生态韧性的分布形状存在差异: 城市化强度多呈现中心-外围空间分布, 生态韧性呈多样化、零散化特征。 (2) 不同尺度下, 城市化强度与生态韧性的耦合协调度逐年增强, 北京、天津最高, 廊坊、石家庄、衡水、沧州次之, 邯郸、邢台相对较低; 格网尺度下, 局部区域出现特殊现象: 北京、天津中部出现初级协调、轻度失调; 邯郸、邢台小部分区域达到良好协调。 (3) 城市化强度与生态韧性的脱钩关系处于良性发展状态, 弱脱钩、扩张负脱钩呈上升变化, 而强脱钩呈下降变化, 表明城市化发展到一定水平, 推动生态韧性正向发展, 城市化强度与生态韧性达到可持续发展的协调状态。此次研究结果为城市化强度与生态韧性的耦合协调分析提供科学依据。

关键词: 城市化强度; 生态韧性; 耦合协调度模型; Tapio 解耦模型; 京津冀城市群

Coupling coordination analysis of urbanization intensity and ecological resilience in Beijing-Tianjin-Hebei

WANG Dongchuan, LONG Hui*, WANG Kangjian, WANG Hongyi, CHAI Hua, GAO Jianshe

School of Geology and Geomatics, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China

Abstract: Exploring the mechanism between urbanization intensity and ecological resilience at city scale and grid scale is of great significance to improve the level of ecological resilience, improve the quality of urban development, and promote the sustainable development of urban agglomeration. This paper takes the Beijing-Tianjin-Hebei as the study area, and tries to build a complete index system of urbanization intensity and ecological resilience based on land use data, population density data and socioeconomic data from 2000 to 2020. The landscape security model is used to modify the “scale-density-form” ecological resilience method, and the spatial and temporal differentiation patterns and co-evolution characteristics between the urban scale and grid scale are explored by combining the coupling coordination degree model and Tapio decoupling model. The results show that: (1) at different scales, the overall trend of urbanization intensity and ecological resilience was opposite and the dislocation relationship was obvious. Beijing and Tianjin had high urbanization intensity but low ecological resilience. At the grid scale, the distribution shapes of urbanization intensity and ecological resilience were different: urbanization intensity mostly presented a center-periphery spatial distribution, and the ecological resilience was characterized by diversification and fragmentation. (2) At different scales, the coupling coordination degree of urbanization

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0503001)

收稿日期: 2022-07-19; **采用日期:** 2022-10-31

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: longhui1208@163.com

intensity and ecological resilience increased year by year, with the highest in Beijing and Tianjin, followed by Langfang, Shijiazhuang, Hengshui and Cangzhou, and relatively low in Handan and Xingtai. At the grid scale, special phenomena appeared in local areas: primary coordination and mild imbalance occurred in the central Beijing and Tianjin; Handan, Xingtai small area to achieve good coordination. (3) The decoupling relationship between urbanization intensity and ecological resilience was in a state of benign development. Weak decoupling and expansion negative decoupling showed an upward trend, while strong decoupling showed a downward trend, indicating that urbanization had reached a certain level, which promoted the positive development of ecological resilience, and urbanization intensity and ecological resilience reached a coordinated state of sustainable development. The results of this study provide a scientific basis for the coupling analysis of urbanization intensity and ecological resilience.

Key Words: urbanization intensity; ecological resilience; coupling coordination degree model; Tapio decoupling model; Beijing-Tianjin-Hebei

生态韧性指城市生态系统面对不确定因素干扰时的抗压和恢复能力^[1]。自 20 世纪 70 年代生态学家 Holling 最早将韧性概念引入生态学领域以来^[2],国内外众多学者针对不同区域^[3]、不同视角^[4-5]和不同方法^[6],在景观生态学韧性^[7]、灾害学韧性^[8]、地理学韧性^[9]和规划学韧性^[10]开展了大量的研究工作,并取得了一系列重要成果。目前,基于地理学和景观生态学理论与方法构建的“规模-密度-形态”三维模型成为评估生态韧性的基本模式^[11]。王文瑞等基于此方法发现兰州市等西部干旱区韧性组合度低于大连市等东部地区,而区县之间的差异性却远高于东部地区^[12];为进一步厘清小尺度的差异性,识别问题所在,赵晓全等借助地理探测器模型研究经济、自然、社会等不同因子对生态韧性的驱动机制^[13]。然而,现有研究局限于分析单元粒度较大的宏观区域,未能多尺度精确评估生态韧性的时空异质性^[14];形态韧性中“源-汇”景观耦合性方面需要有天然优势,因此选择研究区时具有一定的特殊性^[11]。结合景观结构与功能两方面构建的景观安全度模型^[15],既可以定量评估微观尺度下的城市化强度与生态韧性之间的关系,还适用于研究“源-汇”景观组合度较差的区域。

近年来,城市化进程加快,人口迅速增加,资源的不合理开发利用,不但损害了生态韧性,还打破了生态系统平衡。人类活动的强烈干扰是生态韧性受损的关键因素。国内外学者对此展开一系列研究:一方面关注人类活动对生态韧性过程的影响。例如,对人口密度的计算证明,城市人口不断增多,加大资源消耗与污染物排放,从而加剧生态赤字风险^[16-17];对人类活动强度与生态系统服务质量交互关系的研究发现,城建区扩张等人类活动会提高对土地利用的强度,降低生态系统服务质量^[18]。另一方面对生态系统变化进行人类活动的归因分析,并剖析其影响效应。例如,为追求经济效益,资源型城市过度开发矿产资源,造成水土流失,自然灾害频发^[19];大城市人口与建设活动过密与用地集中连片,增强城市脆弱性^[20];城市地貌环境变化引起河流淤积加厚、植被趋向单一等生态效应^[21]。从可持续发展视角,《关于推进城市安全发展的意见》强调加快城市韧性建设,坚持生态优先、绿色发展^[22]。在现有框架中,学者们基于多种计量空间分析方法,测度不同区域的城市化与生态韧性的交互胁迫效应,众多结果表明:城市化与生态韧性耦合作用呈良好趋势^[23-25]。但目前研究多采用基于行政边界的宏观尺度分析城市化与生态韧性的关系,未从宏观与微观两种角度对比分析结果的差异性,通过市域尺度与格网尺度对比分析,既可以从宏观上表现出研究结果的协调性和完整性,还可以在微观上体现评价结果的空间异质性。在指标选取上,也需要综合考虑资源、经济、人口、交通等影响因素^[26]。

京津冀城市群是新型城市化的“主体区”和未来经济发展的“核心区”,但在发展中面临严峻的资源与生态系统的胁迫压力,生态韧性遭受不同程度的破坏^[27]。为推动京津冀高质量发展,实现《京津冀协调发展规划纲要》中提出的“京津冀协同发展”目标^[28],有必要对城市化与生态韧性耦合机理与胁迫效应进行系统研究。本文从韧性视角出发,尝试构建一套完整的城市化强度与生态韧性指标体系,利用景观安全度模型修正了“规模-密度-形态”方法,选取 5km×5km 的格网,以市域尺度与格网尺度对比分析为手段,结合耦合协调度

模型与 Tapio 解耦模型,探究 2000、2005、2010、2015、2020 年城市化强度与生态韧性交互胁迫关系及其时空动态演化规律性,以期为京津冀协同发展提供参考依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

京津冀城市群位于 $113^{\circ}34'—120^{\circ}05'E$, $36^{\circ}00'—42^{\circ}40'N$ 之间(图 1),由北京、天津 2 个直辖市和河北省 11 个地级市组成,土地面积约 21.72 万 km^2 。全区地势由西北向东南倾斜,地貌以平原和山地为主。山地集中在西北部,林地、草地资源丰富,生态韧性较高;平原集中在东南部,耕地、人工表面所占比例较大,城市化强度较高。

1.2 数据来源

土地利用数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),通过人工目视解译出林地、草地、水域、耕地、人工表面、未利用地共 6 类;人口密度数据来源于 Worldpop(<http://www.worldpop.org/>);社会经济数据来源于研究区所辖各省、市、县《统计年鉴》和《国民经济与社会发展统计公报》。

2 研究方法

2.1 评价指标体系

(1) 生态韧性指标体系

生态韧性(Ecological resilience, *ER*)反映城市规模、人口密度、空间组织形式对生态系统产生的压力。规模韧性体现城市规模与生态基础设施的相对关系,利用生态源地理论^[29]对城市建设规模进行约束,当其超出最低生态安全标准,规模韧性受损,城市发展面临困境;密度韧性反映生态系统对资源消耗的支撑能力,从生态足迹与生态承载力角度评估人口增长对密度韧性产生的影响^[30];形态韧性反映生态空间格局的合理性,建成环境与生态空间均衡布局、良好交融能有效提高形态韧性。

(2) 城市化强度指标体系

城市化强度(Urbanization intensity, *UI*)是通过城镇人口增长、产业结构调整、城镇用地扩张和生活质量提高等衡量地区经济发展程度的重要标志^[31]。其内在逻辑为:人口增长是核心,经济发展是动力,地域扩张是表现,生活质量提高是目标。人口城市化、经济城市化、土地城市化作为评价城市化强度的传统指标^[32],分别从人口增长、产业结构、空间布局与生态韧性建立联系。具体表现在:城市人口增多和二、三产业规模扩大,会提高对资源的消耗能力,从而增加对生态系统的服务需求,损害密度韧性;建筑密度增大和城市用地扩张,侵占生态用地,损害形态韧性和规模韧性。此外,本文还考虑了自然资源、经济条件、交通设施等基本要素。土地资源作为最基本的自然资源,是城市生产生活的基石,选用土地利用强度来反映城市发展对自然资源的利用状况^[33];从经济角度来看,为了保证城市经济活动的适宜性,选取经济活动强度、交通强度来反映经济活动规模、范围对生态承载力的影响^[26](表 1)。

2.2 指标预处理

为了消除各指标的数量及量纲差异对结果的影响,对各项指标进行归一化^[35]。公式为:

$$Y_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

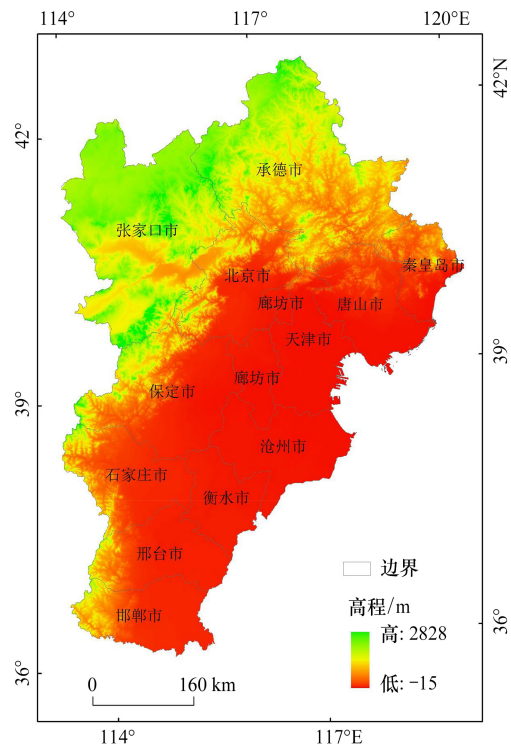


图 1 研究区地理位置

Fig.1 Geographical location of study area

式中, Y_i 为标准化值, X_i 为实际值; $X_{\max}$ 和 $X_{\min}$ 分别为 5 个时间节点内同一指标中最大值和最小值。

表 1 *ER* 和 *UI* 评价指标体系
Table 1 Evaluation index system of *ER* and *UI*

	指标 Index	公式 Formula	参考文献 References	说明 Description
<i>ER</i>	R_s	$R_s = \frac{L_s}{L_d}$	[14]	R_s 为规模韧性; L_s 为适宜建设用地面积; L_d 为已经建设用地面积。
	R_d	$R_d = \frac{(1-12\%) \sum_{j=1, k=1}^n S_{kj} y_j}{N_k \sum_{i=1}^{11} \frac{r_i h_i}{P_i}}$	[14]、[34]	R_d 为密度韧性; S_{kj} 为第 k 个格网第 j 类土地面积; y_j 为第 j 类土地的产量因子; N_k 为第 k 个格网人口数; r_i 、 P_i 、 h_i 分别为第 i 种消费品的均衡因子、年平均生产力、人均年消费量。
	R_m	$R_m = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{S_{kj}}{S_k} \times [1-10 \times (\alpha B_j + \beta E_j + \gamma F_j) \times LVI_j]}{LVI_j}$	[15]	R_m 为形态韧性; S_k 为第 k 个格网面积; B_j 、 E_j 、 F_j 、 LVI_j 分别为第 j 类土地的破碎度、分离度、优势度、脆弱度。
<i>UI</i>	LCD	$LCD = 100 \sum_{j=1}^n D_j \times G_j$	[33]	LCD 为土地利用强度; D_j 、 G_j 分别为第 j 类土地利用程度分级指数、面积百分比。
	EAI	$EAI = GDP/A$	[26]	EAI 为经济活动强度; GDP 为国民生产总值; A 为研究区总面积。
	TI	$TI = A_t/A$		TI 为交通强度; A_t 为道路总面积。
	PUI	$PUI = PO_1/PO$		PUI 为人口城市化; PO_1 、 PO 分别为非农业人口、总人口。
	EUI	$EUI = (GDP_2 + GDP_3)/GDP$	[32]	EUI 为经济城市化; GDP_2 、 GDP_3 分别为二、三产业国民生产总值。
	LUI	$LUI = A_l/A$		LUI 为土地城市化; A_l 为建成区面积。

2.3 耦合协调度模型

耦合协调度是全面评价两个系统间相互作用的物理量^[36]。本文利用此模型探讨 *UI* 与 *ER* 的交互关系, 公式为:

$$C = \left\{ \frac{UI \times ER}{\left(\frac{UI + ER}{2} \right)^2} \right\}^{\frac{1}{2}} \tag{2}$$

$$T = \mu_1 \times UI + \mu_2 \times ER \tag{3}$$

$$D = \sqrt{C \times T} \tag{4}$$

式中, C 为耦合度; T 为协调度; D 为耦合协调度, $D \in [0, 1]$, D 值越高说明两系统是高水平的相互促进关系, 反之亦然; μ_1 、 μ_2 为待定系数, $\mu_1 = \mu_2 = 0.5$ 。

2.4 Tapio 脱钩模型

Tapio 脱钩模型利用增长率相对大小探究多个变量间相对发展情况的物理量^[37]。利用 Tapio 模型, 从解耦路径探讨格网尺度下 *UI* 与 *ER* 的交互胁迫关系。脱钩指数公式为:

$$DI_t = \frac{\Delta ER}{\Delta UI} \tag{5}$$

式中, DI_t 为脱钩指数, ΔER 为 *ER* 增长率; ΔUI 为 *UI* 增长率。

Tapio 以 0、0.8、1.2 为临界值将 DI_t 细分为 8 类^[38](表 2)。 $DI_t \in (-\infty, 0)$ 表示 *UI* 与 *ER* 变化方向相反; $DI_t \in [0, 0.8)$ 表示 *UI* 变化速度大于 *ER*; $DI_t \in [0.8, 1.2)$ 表示二者变化速度基本一致; $DI_t \in [1.2, +\infty)$ 表示 *UI* 变化速度小于 *ER*。

城市化初期,城市人口稀疏、空间规模小,未实现经济增长,而生态韧性较好, UI 与 ER 处于强负脱钩状态;随着城市化快速发展,城镇人口增多、建筑密集,加上粗放型发展模式给生态系统造成巨大压力,生态韧性受损严重, UI 与 ER 处于强脱钩状态;城市化发展到一定程度,对生态系统的依赖性增强,通过调整产业结构、节能减排,推动 ER 迅速提升, UI 与 ER 处于扩张负脱钩、弱脱钩;城市化发展后期,由于政策、技术、管理等因素,经济发展逐渐平稳,生态系统控制在合理范围内, UI 与 ER 达到扩张连接状态,这是最理想的脱钩状态。

表 2 脱钩类型划分标准

Table 2 Classification standards of decoupling types

类型 Types	ΔER	ΔUI	DI_t	含义 Implication
脱钩	-	-	$[1.2, +\infty)$	ER 降速大于 UI
Decoupling	-	+	$(-\infty, 0)$	ER 下降, UI 上升
	+	+	$[0, 0.8)$	ER 增速小于 UI
连接	+	+	$[0.8, 1.2)$	ER 与 UI 增速基本一致
Connection	-	-	$[0.8, 1.2)$	ER 与 UI 降速基本一致
负脱钩	+	+	$[1.2, +\infty)$	ER 增速大于 UI
Negative decoupling	+	-	$(-\infty, 0)$	ER 上升, UI 下降
	-	-	$[0, 0.8)$	ER 降速小于 UI

3 结果分析

3.1 城市化强度时空演化分析

(1) 市域尺度。2000—2020 年 UI 整体呈上升趋势,中等水平以上的城市增多,较低水平以下的城市相对减少(图 2),说明区域内部发展差异逐渐缩小。北京、天津起点高,发展速度快,截止 2020 年底 UI 排名位居前二;相比较之下,承德城市化起步晚,起点低,速度慢,效率低,目前仍处于低水平。

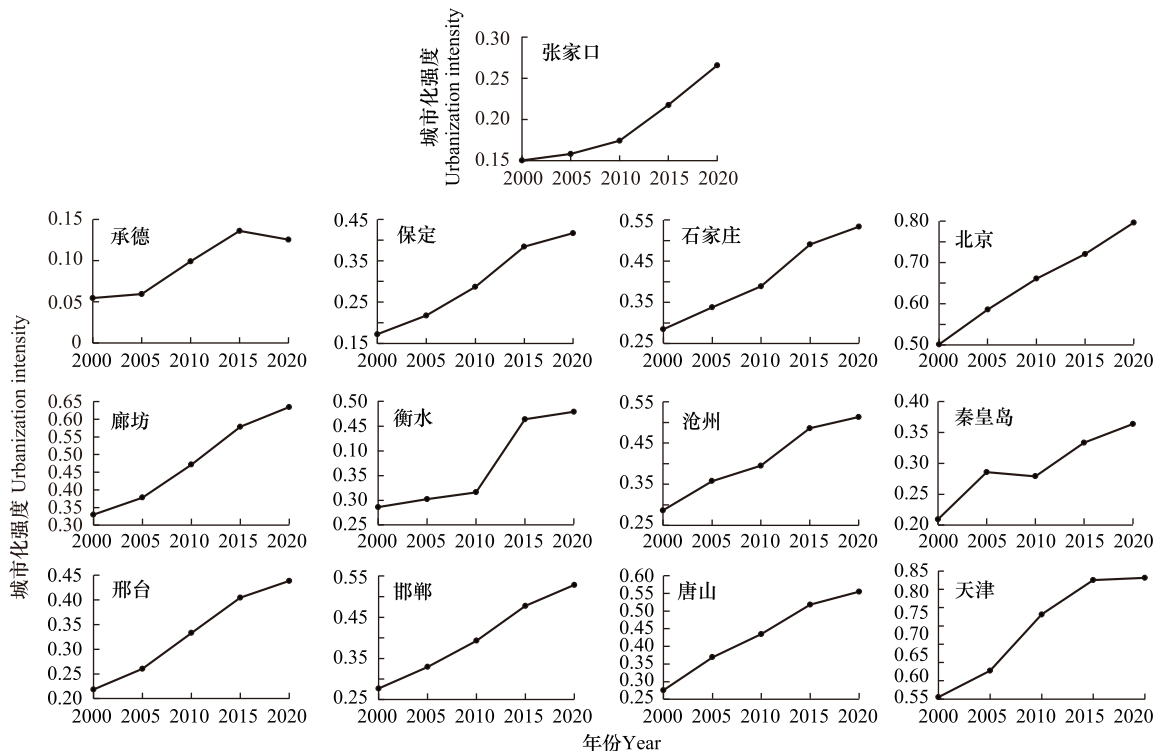


图 2 2000—2020 年各地级市城市化强度时间演变

Fig.2 Time evolution of UI for each prefecture-level city from 2000 to 2020

(2) 格网尺度。从整体上看,格网尺度与市域尺度下的 UI 变化趋势一致,但在空间上具有明显的异质性且空间溢出特征突出(图 3)。受益于经济基础、政策扶持和区位优势,北京、天津呈现出以中南部为核心,逐渐向外围扩散的圈层式格局特征,高值区先以点状集中在城市中心,后演变为面状覆盖全市;廊坊呈现北高南低的分布特征;石家庄高速发展集中地逐渐由中部向周围地区扩散,且高值区范围不断扩大。相比较下,承德普遍处于低水平,仅部分区域有所发展,从长远来看,这是京津冀未来发展的潜力区。

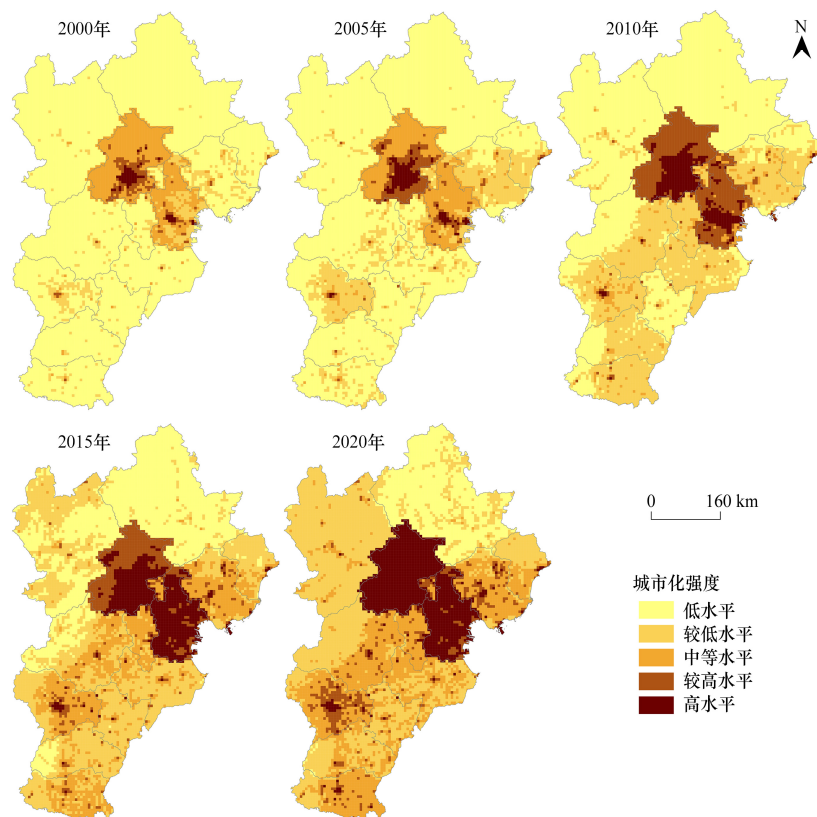


图 3 2000—2020 年各地级市城市化强度空间演变

Fig.3 Spatial evolution of UI for each prefecture-level city from 2000 to 2020

3.2 生态韧性时空演化分析

(1) 市域尺度。2000—2020 年 ER 出现不同程度的下降变化,但起点高,生态基础好,截止 2020 年底 ER 仍较好(图 4)。承德、张家口受山地、丘陵等地形因素影响,生态韧性保持在较高水平;天津、唐山、石家庄、邢台、邯郸等传统工业城市受粗放型发展模式的影响, ER 相对较低;北京生态建设持续推进,但由于人口增多,建筑用地密集, ER 提升效果不太明显,呈现基本保持平稳、略有下降趋势。

(2) 格网尺度。市域尺度与格网尺度下的 ER 整体变化情况基本相同。受城市空间扩张模式的影响,建设用地多形式并存, ER 空间集聚特征与分布形状存在差异(图 5)。高值区集中在北部(承德)、西北部(张家口),从面状连片转向块状零散分布;低值区集中在东部(北京、天津、唐山)、西南部(石家庄)、南部(邢台、邯郸),分布形状从零散的点状向连续的条带状和块状转变。

3.3 城市化强度与生态韧性耦合协调度的时空分异特征

(1) 市域尺度。2000—2020 年耦合协调度整体呈现“轻度失调”向“中级协调”发展的递增特征(图 6)。北京、天津 ER 控制在可承受范围内, UI 迅猛发展,推动 ER 正向发展, ER 的改善对 UI 持续发展具有导向作用,二者耦合协调发展到较高水平;廊坊、沧州、衡水、石家庄生态基础较好,城镇化水平较高,耦合性较好;邯郸、邢台属老工业城市,经济发展较慢, ER 受到不同程度的威胁,耦合度不高;承德属群山之城,交通不便,经济落后, UI 与 ER 发展趋势相背离,耦合性较差。

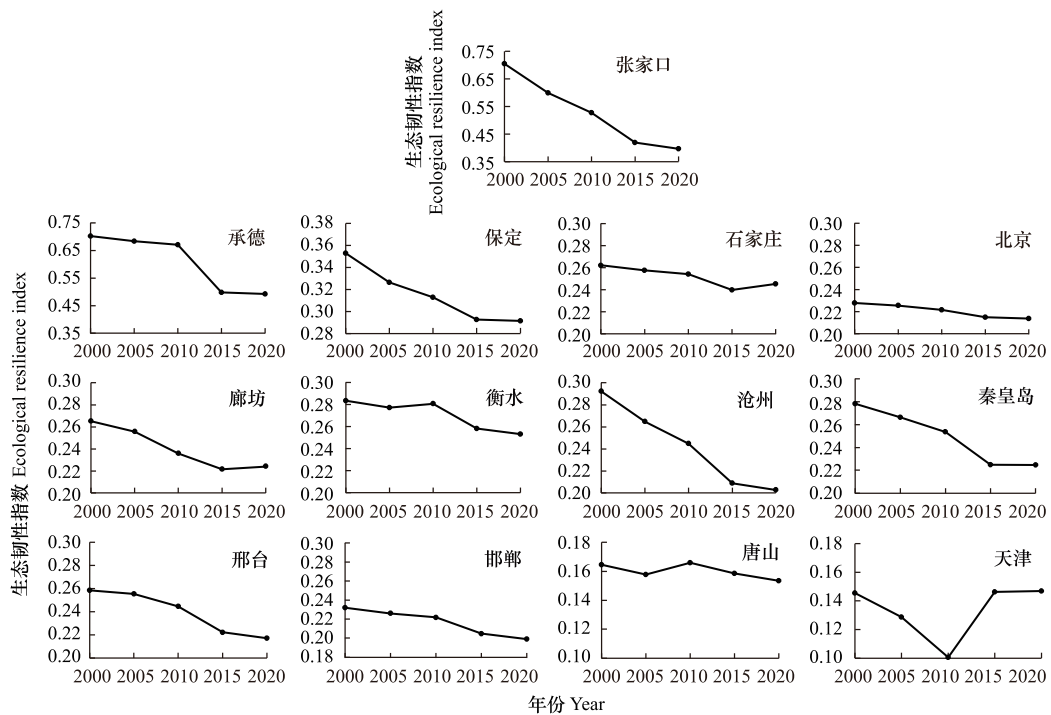


图4 2000—2020年各地级市生态韧性时间演变

Fig.4 Time evolution of ER for each prefecture-level city from 2000 to 2020

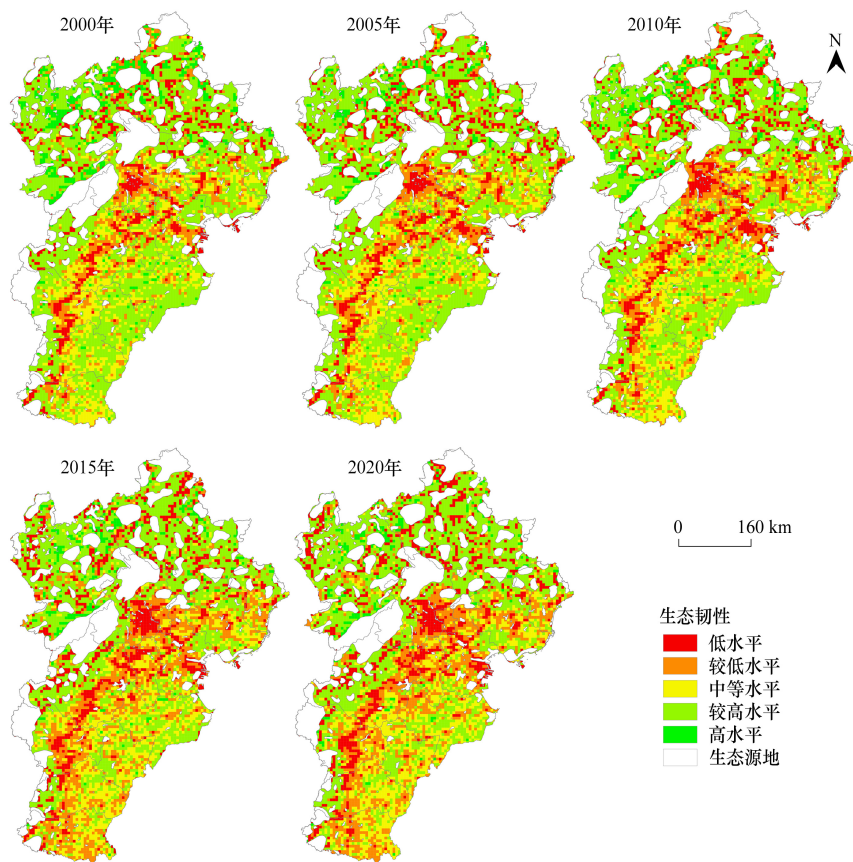


图5 2000—2020年各地级市生态韧性空间演变

Fig.5 Spatial evolution of ER for each prefecture-level city from 2000 to 2020

(2) 格网尺度。从总体看,市域与格网尺度的耦合协调度在变化趋势、分布特征上基本一致,但后者在局部上表现出特殊现象(图 7)。北京、天津整体处于良好协调,但小部分区域出现初级协调、轻度失调现象;邯郸、邢台整体为初级协调,但局部区域出现良好协调现象。此外,受城镇用地扩展速度与范围的影响,协调与失调的分布形状也存在差异,前者由零散的点状、不连续的线状和块状变成连续的线状和面状,后者则完全相反,典型城市为北京、天津、张家口。

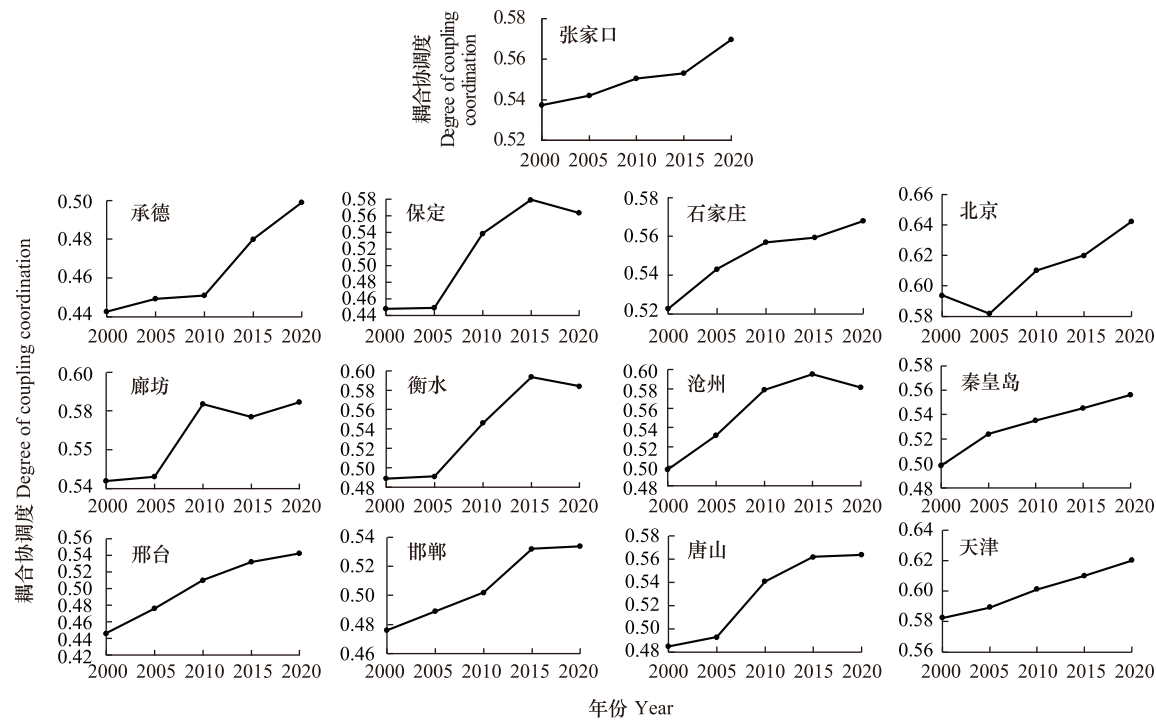


图 6 2000—2020 年城市化强度与生态韧性耦合协调关系时间演变

Fig.6 Time evolution of coupling coordination relationship between UI and ER from 2000 to 2020

3.4 城市化强度与生态韧性交互关系解耦路径分析

2000—2020 年脱钩类型主要为强脱钩、弱脱钩、扩张负脱钩。从整体上看,脱钩关系趋于良性发展状态,弱脱钩、扩张负脱钩面积占比明显上升,增幅分别达 4.48%、16.09%,而强脱钩下降明显,降幅为 21.82% (表 3),表明城市化发展到一定水平,开始注重提升城市质量,兼顾经济与生态协同发展,UI 与 ER 达到可持续发展的协调状态。在空间上,2000—2010 年,东部以强脱钩状态为主,主要是天津、唐山、廊坊钢铁和化工产业正兴起,UI 迅速发展,资源消耗增加,环境破坏加剧,ER 受损严重;北部、西南部、南部脱钩关系不稳定,主要以强脱钩、弱脱钩状态为主;2010—2020 年,脱钩状态波动较为明显,表现为强脱钩、弱脱钩和扩张负脱

表 3 脱钩类型面积占比

Table 3 Percentage of area of decoupling types

脱钩类型 Decoupling types	2000—2005	2005—2010	2010—2015	2015—2020	变化 Change
弱脱钩 Weak decoupling	13.32	26.65	19.82	17.80	4.48
扩张连接 Expansion connection	1.01	0.95	2.42	2.33	1.32
扩张负脱钩 Negative decoupling of expansion	8.18	1.72	16.59	24.27	16.09
强负脱钩 Strong negative decoupling	0.17	0.09	0.02	0.10	-0.07
强脱钩 Strong decoupling	77.19	70.51	61.15	55.37	-21.82
弱负脱钩 Weak negative decoupling	0.11	0.05	0	0.02	-0.09
衰退脱钩 Recession decoupling	0.02	0.03	0	0.11	0.1

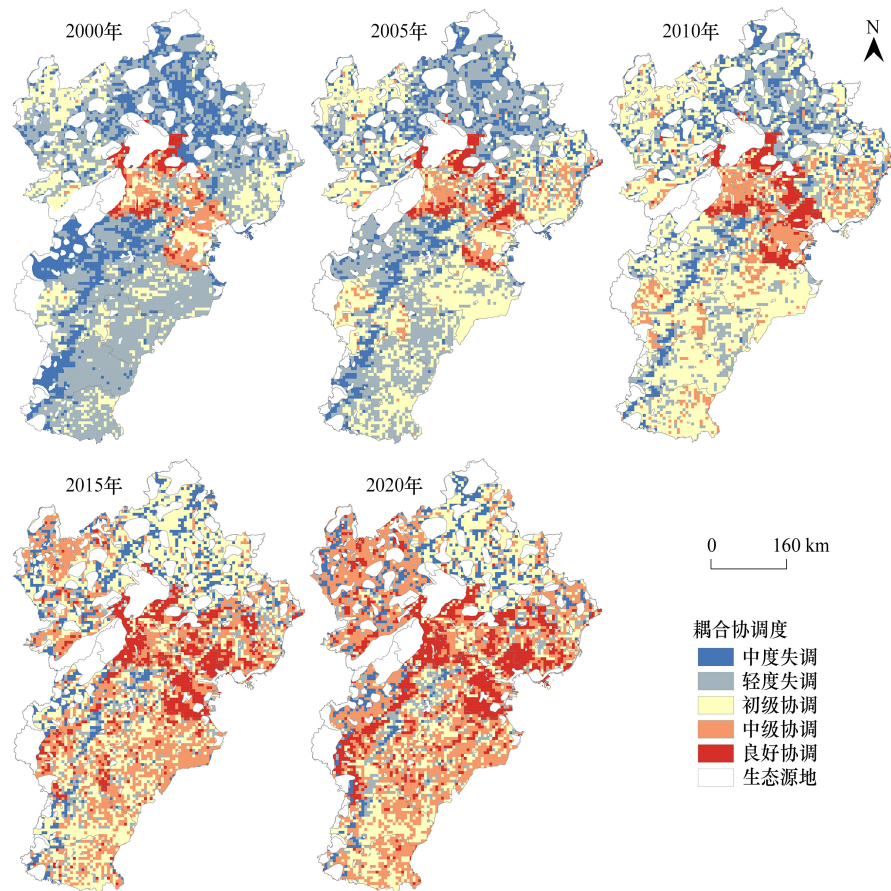


图 7 2000—2020 年城市化强度与生态韧性耦合协调关系空间演变

Fig.7 Spatial evolution of coupling coordination relationship between *UI* and *ER* from 2000 to 2020

钩交替变化(图 8),主要是 2014 年京津冀协同发展战略,颁布一系列环境治理政策,优化资源结构,*ER* 提升速度加快,但实现 *UI* 与 *ER* 整体上高水平协同发展还需一个过程。

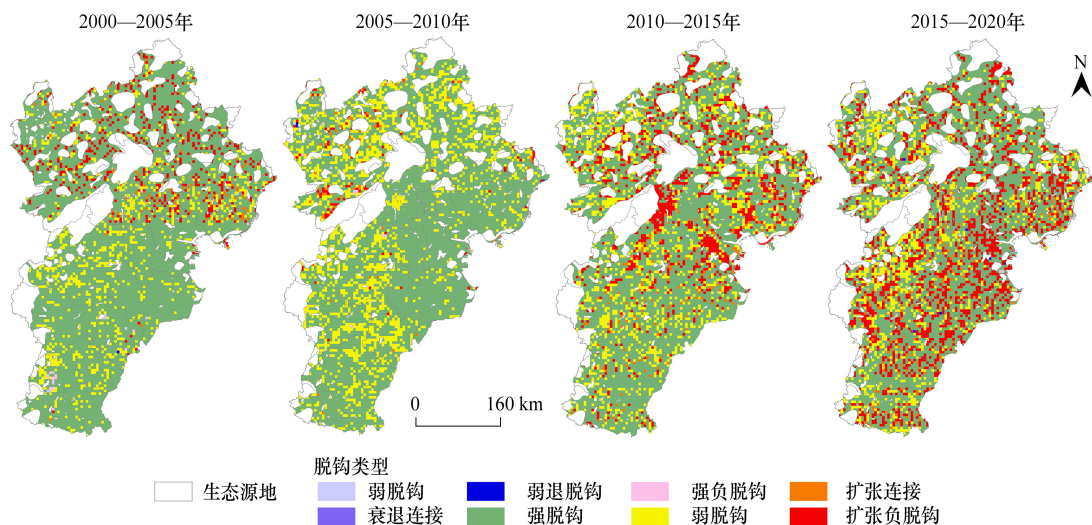


图 8 2000—2020 年城市化强度与生态韧性脱钩关系时空演变

Fig.8 Temporal and spatial evolution of the decoupling relationship between *UI* and *ER* from 2000 to 2020

4 讨论与结论

4.1 讨论

(1) 本文在研究方法上取得了一定的突破。已有研究^[14]表明城市化与生态韧性间存在着相互作用,但在研究方法上多采用基于行政边界的“规模-密度-形态”生态韧性模型。本研究不仅引入景观安全度模型对生态韧性方法进行修正,还通过市域尺度与格网尺度进行对比分析,一方面市域尺度在宏观上可以使评价结果更加完善与协调,另一方面格网化可以提高研究精度,在微观上探索耦合作用的空间分布特征,实现对评价结果的空间化表达。

(2) 针对本研究结果,从宏观上,市域与格网尺度下的 *UI* 与 *ER* 发展状况及其耦合作用高度相似,这与已有研究^[23]基本一致,但在格网尺度下二者存在空间异质性。市域尺度下,北京、天津耦合协调度高,邯郸、邢台相对较低;格网尺度下,北京和天津小部分地区出现初级协调、轻度失调,邯郸、邢台局部区域出现良好协调。尺度效应理论指出不同的地理现象和特征有其对应的时空尺度^[39];方创琳^[40]也表明耦合的一般规律仅适用于大尺度、长时间序列,但在局部区域或特殊时段会出现“灾变”与“善变”,即失调与协调现象。

究其具体原因:2014 年京津冀协调发展战略,坚持“生态优先,绿色发展”。受益于政策扶持、区位优势,北京、天津加大自主创新投入,实现从传统重工业向高新技术产业升级,并注重对生态系统的治理与修复,在全局上推动 *UI* 与 *ER* 高水平协调发展,但局部区域由于人口不断增长、城镇用地不断扩张^[41],建设用地无法满足现有需求,生态系统压力增大,*ER* 严重受损,*UI* 与 *ER* 发展趋势不吻合。邯郸和邢台作为钢铁、化工等传统工业基地,在生态系统可承受范围内,经济加快发展,*UI* 与 *ER* 整体达到初级协调,为实现“推动邯郸、邢台一体化发展,融入中原城市群”目标^[42],邢台、邯郸突出绿色发展,积极发展节能环保产业,小部分地区 *UI* 与 *ER* 达到良好协调,但由于滞后效应,其整体协调水平的提升仍需一个过程。

4.2 结论

本研究尝试构建一套完整的 *UI* 与 *ER* 综合指标体系,以市域尺度与格网尺度对比分析为手段,基于景观安全度模型修正了传统的生态韧性方法,利用耦合协调度模型与 Tapio 解耦模型探索 2000—2020 年 *UI* 与 *ER* 的交互胁迫关系及其时空动态演化规律。

(1) 不同尺度下,*UI* 与 *ER* 变化趋势相反且错位关系明显,*UI* 呈上升变化,*ER* 呈下降变化,北京、天津 *UI* 较高而 *ER* 相对较低,张家口、承德则完全相反。格网尺度下 *UI* 与 *ER* 存在空间差异性:受益于经济基础、政策扶持和区位优势,北京、天津、石家庄 *UI* 呈现中心-外围的格局特征,廊坊 *UI* 呈现北高南低的空间特征;受城市空间扩张模式影响,*ER* 高值区从面状连片转向块状零散分布,低值区从零散的点状转向连续的条带状和块状分布。

(2) 不同尺度下,*UI* 与 *ER* 的耦合协调度呈现“轻度失调”向“中级协调”发展的递增特征,北京、天津耦合协调度最高,廊坊、沧州、衡水、石家庄次之,邯郸、邢台相对较低。格网尺度下,在局部区域与特殊时段出现失调与协调现象:北京、天津整体为良好协调,但小部分地区出现初级协调、轻度失调现象;邯郸、邢台以初级协调为主,但局部区域却出现良好协调。此外,协调与失调的分布形状也存在差异,前者由零散的点状、不连续的线状和块状变成连续的线状和面状,后者则完全相反。

(3) 2000—2020 年 *UI* 与 *ER* 脱钩关系整体上趋于良好发展状态,弱脱钩、扩张负脱钩呈上升变化,而强脱钩呈下降变化,表明城市化发展到一定水平,开始注重提升城市质量,*ER* 提升速度加快,*UI* 与 *ER* 达到可持续发展的协调状态,但实现 *UI* 与 *ER* 整体上高水平的协同发展还需一个过程。

参考文献 (References):

- [1] Ahern J. From *fail-safe* to *safe-to-fail*: sustainability and resilience in the new urban world. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 100(4): 341-343.
- [2] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4(1): 1-23.

- [3] 夏楚瑜,董照樱子,陈彬.城市生态韧性时空变化及情景模拟研究——以杭州市为例.生态学报,2022,42(1):116-126.
- [4] 彭翀,陈思宇,王宝强.中断模拟下城市群网络结构韧性研究——以长江中游城市群客运网络为例.经济地理,2019,39(8):68-76.
- [5] 李艳,陈雯,孙阳.关联演化视角下地理学区域韧性分析的新思考.地理研究,2019,38(7):1694-1704.
- [6] 白立敏,修春亮,冯兴华,梅大伟,魏冶.中国城市韧性综合评估及其时空分异特征.世界地理研究,2019,28(6):77-87.
- [7] Meerow S, Newell J P. Spatial planning for multifunctional green infrastructure: growing resilience in Detroit. Landscape and Urban Planning, 2017, 159: 62-75.
- [8] Chiang Y C. Exploring community risk perceptions of climate change-A case study of a flood-prone urban area of Taiwan. Cities, 2018, 74: 42-51.
- [9] 李彤玥.基于“暴露-敏感-适应”的城市脆弱性空间研究——以兰州市为例.经济地理,2017,37(3):86-95.
- [10] Liao K H, Le T A, Van Nguyen K. Urban design principles for flood resilience: learning from the ecological wisdom of living with floods in the Vietnamese Mekong Delta. Landscape and Urban Planning, 2016, 155: 69-78.
- [11] 修春亮,魏冶,王绮.基于“规模-密度-形态”的大连市城市韧性评估.地理学报,2018,73(12):2315-2328.
- [12] 王文瑞,郭子萍,万炜,王宁馨,刘文娟.兰州市城市韧性时空特征研究——基于规模-密度-形态分析框架.兰州大学学报:自然科学版,2021,57(1):39-46.
- [13] 赵晓全.基于“规模-密度-形态”的城市韧性时空演变及影响因素探测——以成德绵经济发展带为例[D].成都:四川师范大学,2020.
- [14] 王少剑,崔子恬,林靖杰,谢金燕,苏坤.珠三角地区城镇化与生态韧性的耦合协调研究.地理学报,2021,76(4):973-991.
- [15] 王权,唐芳,李阳兵,黄娟,白雪飘.岩溶地区景观格局演变及其生态安全的时空分异——以贵州省东北部槽谷为例.生态学报,2021,41(18):7273-7291.
- [16] Cao T G, Yi Y J, Liu H X, Xu Q, Yang Z F. The relationship between ecosystem service supply and demand in plain areas undergoing urbanization: a case study of China's Baiyangdian Basin. Journal of Environmental Management, 2021, 289: 112492.
- [17] 韩磊,杨勇.黄河三角洲高效生态经济区2005-2019年生态足迹演变特征及其影响因素.水土保持通报,2021,41(4):284-291.
- [18] 刘永婷,杨钊,徐光来,杨强强,刘世杰,何开玲.基于四象限模型的生态系统服务与人类活动强度关联性分析——以皖南国际旅游文化示范区为例.生态学报,2022,42(13):5200-5210.
- [19] 朱晓磊,张建军,程明芳,徐琴.基于Meta分析的矿业城市生态服务价值转移研究.自然资源学报,2017,32(3):434-448.
- [20] Xiu C L, Cheng L, Song W, Wu W. Vulnerability of large city and its implication in urban planning: a perspective of intra-urban structure. Chinese Geographical Science, 2011, 21(2): 204-210.
- [21] 李超,戴雪荣.上海城市地貌形变的生态环境效应及应对策略.长江流域资源与环境,2011,20(S1):81-86.
- [22] 马奔,刘杰.韧性理念如何融入城市治理——基于D市安全发展示范城市创建的启示.行政论坛,2020,27(5):95-101.
- [23] 马德彬,沈正平.城市韧性与经济发展水平耦合协调研究——以京津冀城市群为例.资源开发与市场,2021,37(7):820-827.
- [24] 张明斗,冯晓青.长三角城市群内各城市城市韧性与发展水平的协调性对比研究.城市发展研究,2019,26(1):82-91.
- [25] 李苏,刘浩南.干旱区城市化与生态韧性耦合协调的时空格局演化分析——以宁夏为例.干旱区地理,2022,45(4):1281-1290.
- [26] Wang D C, Chen W G, Wei W, Bird B W, Zhang L H, Sang M Q, Wang Q Q. Research on the relationship between urban development intensity and eco-environmental stresses in Bohai Rim Coastal Area, China. Sustainability, 2016, 8(4): 406.
- [27] 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.
- [28] 毛汉英.京津冀协同发展的机制创新与区域政策研究.地理科学进展,2017,36(1):2-14.
- [29] 胡炳旭,汪东川,王志恒,汪翡翠,刘金雅,孙志超,陈俊合.京津冀城市群生态网络构建与优化.生态学报,2018,38(12):4383-4392.
- [30] 杨屹,加涛.21世纪以来陕西生态足迹和承载力变化.生态学报,2015,35(24):7987-7997.
- [31] 方创琳,鲍超,黄金川,李广东.中国城镇化发展的地理学贡献与责任使命.地理科学,2018,38(3):321-331.
- [32] 卫伟,汪东川,陈利顶.环渤海沿海地区生态环境评估.北京:科学出版社,2017:131-229.
- [33] 吕靓,郭砾,杜世宏,赵松婷.黔东南地区土地利用格局的空间梯度变化特征.安全与环境学报,2013,13(2):140-146.
- [34] 刘某承,李文华,谢高地.基于净初级生产力的中国生态足迹产量因子测算.生态学报,2010,29(3):592-597.
- [35] 马丽,金凤君,刘毅.中国经济与环境污染耦合度格局及工业结构解析.地理学报,2012,67(10):1299-1307.
- [36] Shi T, Yang S Y, Zhang W, Zhou Q. Coupling coordination degree measurement and spatiotemporal heterogeneity between economic development and ecological environment——empirical evidence from tropical and subtropical regions of China. Journal of Cleaner Production, 2020, 244: 118739.
- [37] 冯雨雪,李广东.青藏高原城镇化与生态环境交互影响关系分析.地理学报,2020,75(7):1386-1405.
- [38] 李坦,王静,张庆国,崔玉环,姚佐文.合肥市生态足迹时空特征与脱钩效应变化及灰色预测分析.生态学报,2019,39(5):1735-1747.
- [39] 傅伯杰.地理学综合研究的途径与方法:格局与过程耦合.地理学报,2014,69(8):1052-1059.
- [40] 黄金川,方创琳.城市化与生态环境交互耦合机制与规律性分析.地理研究,2003,22(2):211-220.
- [41] 王海军,张彬,刘耀林,刘艳芳,徐姗,邓羽,赵雲泰,陈宇琛,洪松.基于重心-GTWR模型的京津冀城市群城镇扩展格局与驱动力多维解析.地理学报,2018,73(6):1076-1092.
- [42] 孟祥林.京津冀协同发展背景下邯郸——邢台城市团整合发展探讨.青岛科技大学学报:社会科学版,2016,32(4):9-14.