

DOI: 10.20103/j.stxb.202303310625

周亚鹏, 刘欣, 刘琳, 李富平, 李小光, 白艳. 2000—2020 年京津冀地区国土空间多功能权衡强度时空演变及影响机制. 生态学报, 2024, 44(3): 977-991.

Zhou Y P, Liu X, Liu L, Li F P, Li X G, Bai Y. Spatio-temporal dynamics and influencing factors of trade-off intensity among territorial space functions in the Beijing-Tianjin-Hebei region (2000—2020). Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(3): 977-991.

2000—2020 年京津冀地区国土空间多功能权衡强度时空演变及影响机制

周亚鹏¹, 刘欣¹, 刘琳², 李富平^{3,4}, 李小光^{3,4}, 白艳^{5,*}

1 河北农业大学国土资源学院, 保定 071001

2 河北地质大学, 石家庄 050031

3 河北省矿区生态修复产业技术研究院, 唐山 063210

4 华北理工大学矿业工程学院, 唐山 063210

5 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

摘要:厘清国土空间多功能相互关系及影响因素, 对实现国土空间可持续利用与保护具有重要意义。以京津冀地区为例, 揭示了其国土空间多功能时空变化特征, 利用 Spearman 相关性分析、均方根误差和地理探测器诊断了多功能之间相互关系与权衡强度, 并探析了多功能权衡强度影响机制。结果表明, 生产功能和生活功能主要集中在东南部平原区, 生态功能主要集中在西北山区, 2000—2020 年生产功能和生活功能提升而生态功能呈退化态势。国土空间多功能权衡强度均值表现为“生活功能-生态功能”>“生产功能-生态功能”>“生产功能-生活功能”。2000—2020 年生产与生活功能间的权衡强度增强, 从 0.038 上升至 0.060; 而生产与生态功能间权衡强度减弱, 从 0.190 下降至 0.180; 生活与生态功能间的权衡强度轻微减弱, 从 0.206 下降至 0.205。京津冀西北区是生产与生态功能以及生活与生态功能权衡强度高值区, 集中在承德、秦皇岛和北京市。东南部平原区是生产与生活功能权衡强度高值区, 尤其是衡水、邯郸和邢台等地权衡明显加剧。国土空间多功能权衡强度空间分异受土地利用、自然因素和社会经济因素共同影响, 其中土地利用强度是最主要影响因子, 各影响因素在不同年份影响程度略有不同。研究结果可以帮助决策者将国土空间多功能权衡理念纳入国土空间规划与管理。

关键词:国土空间多功能; 权衡强度; 影响机制; 京津冀地区

Spatio-temporal dynamics and influencing factors of trade-off intensity among territorial space functions in the Beijing-Tianjin-Hebei region (2000—2020)

ZHOU Yapeng¹, LIU Xin¹, LIU Lin², LI Fuping^{3,4}, LI Xiaoguang^{3,4}, BAI Yan^{5,*}

1 College of Land and Resources, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China

2 Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China

3 Hebei Industrial Technology Institute of Mine Ecological Restoration, Tangshan 063210, China

4 College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China

5 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: Understanding the relationships among multiple territorial space functions and their influencing factors is of great significance to achieve the sustainable development and protection of territorial space. By taking the Beijing-Tianjin-Hebei region as a case study area, this study explored the spatio-temporal evolution process of multiple territorial space functions at

基金项目: 河北省重点研发计划项目 (21373807D)

收稿日期: 2023-03-31; 网络出版日期: 2023-11-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 36963880@qq.com

the grid scale by assimilating datasets from multiple sources. Then, the trade-offs and synergy among multiple territorial space functions were identified by Spearman correlation analysis and root mean squared error (RMSE). Furthermore, geographic detector model was applied to explore influencing factors associated with the trade-off intensity of territorial space functions. The results revealed that the high value areas of production function and living function were mainly concentrated in the southeastern area, while the ecological function in the northwestern area was higher. In terms of temporal evolution, the results showed a trend of increasing grain production, non-agricultural production, living maintenance, residential support and water conservation, but decreasing carbon storage, soil conservation and habitat quality from 2000 to 2020. Additionally, the Beijing-Tianjin-Hebei region has the highest trade-off intensity between living function and ecological function, followed by production function and ecological function, and the lowest trade-off intensity between production function and living function. During 2000 and 2020, the trade-off intensity between living function and ecological function slightly weakened from 0.206 to 0.205, and the trade-off intensity between production function and ecological function weakened from 0.190 to 0.180. However, the trade-off intensity between production function and living function increased from 0.038 to 0.060. The strong trade-off intensity between living function and ecological function, as well as between living function and ecological function, primarily occurred in the northwest of Beijing-Tianjin-Hebei region, especially in Chengde, Qinhuangdao, and Beijing. The southeastern plains area was the main agglomeration area with strong trade-off intensity between production function and living function, especially in Hengshui, Handan and Xingtai. The natural factors, land use factors, and socioeconomic factors were the common factors affecting the spatial differentiation of multifunctional trade-off intensity. Land use factors, especially land use intensity, had the greatest impacts on the trade-offs among multiple territorial space functions. The influence intensity of each factor is slightly different in different years. Policymakers are suggested to optimize the territorial space development and protection pattern by coordinating territorial space composite functions. Thus, the results of this study provide a quantitative reference and policy decision basis to help mitigate conflicts and further improve the harmonization of territorial space.

Key Words: territorial space composite functions; trade-off intensity; influencing mechanism; Beijing-Tianjin-Hebei region

国土空间承载着自然生态系统和社会经济系统,不仅为人类提供食物、纤维生产和居住生活等生产和生活功能,还提供气候调节、水源涵养和生物多样性保护等生态服务^[1],各服务功能之间以或积极或消极的方式相互联系、相互影响,共同推动国土空间系统的演变与发展。由于区域资源禀赋差异以及社会经济发展,人类对多样化产品的需求不断扩大,造成了国土空间结构和功能的竞争与权衡加剧,易使国土空间开发与保护失衡^[2-3]。这在社会经济繁荣的城市群系统中表现得尤为明显^[4]。因此,亟需深入探究国土空间多功能之间的相互关系及影响机理,以促进国土空间多目标协同治理,实现开发与保护共赢。

“多功能”一词由农业多功能拓展到生态系统服务^[5]、景观多功能^[6]以及土地利用多功能^[7],并逐渐趋向于国土空间综合功能^[8]。当前研究主要集中在多功能分类与评价、相互作用关系和多功能分区管理等方面^[9-12]。国土空间多功能分类主要包括生产-生活-生态功能^[13],社会-经济-生态功能^[14]和城市-农业-生态功能^[15]。多功能评价方法主要包括两类:一是从社会经济和生态多个维度构建评价指标体系^[9-14],二是以土地利用类型作为分类依据,识别不同地理空间功能模式^[16]。权衡通常定义为一种功能的提升以其他功能减弱为代价^[17]。权衡分析最早应用于研究生态系统服务相互关系,如特定地区作物供给与调节和支持服务之间的权衡关系^[18]。其研究方法主要包括空间分析方法^[19]、相关性分析^[20]、均方根误差^[21]以及模型模拟^[22]等。但目前有关城市群地区国土空间多功能之间权衡强度的空间差异及动态变化研究仍较少,探讨国土空间多功能权衡的自然和社会经济驱动因素分析存在不足,相关研究表明国土空间多功能权衡由自然和人类社会多种因素共同影响,且作用于区域而产生地表复杂变化过程,但这些因素在不同时期的影响程度通常是不同

的。当前研究大多仅限于单个时间节点,忽略了社会生态过程 and 影响因素的时变性。

京津冀地区是首都经济圈,也是华北平原重要的生态屏障区。城镇化和经济快速发展导致的区域生态系统退化已成为限制可持续发展的主要障碍^[23]。本研究以京津冀地区为例,旨在揭示国土空间功能权衡强度的时空变化特征并识别主导影响因素。研究内容主要包括:首先,在格网尺度上测度了 2000—2020 年京津冀地区国土空间多功能时空演变特征;其次,利用 Spearman 相关性分析和均方根误差揭示国土空间多功能相互关系和权衡强度时空异质性;最后,借助地理探测器模型探究不同年份各影响因素对国土空间多功能权衡强度的影响程度,该研究为京津冀地区国土空间布局的优化提供了政策支持,也为其他城市群空间发展提供指导。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

京津冀地区位于华北平原北部(36°01′—42°37′N, 113°04′—119°53′E),是中国第三大城市群,总面积约 21.8 万 km²,包含首都北京、天津市以及河北省(图 1)。地势西北高东南低,山地和平原分别约占 48.2% 和 43.8%。属于典型的暖温带大陆性季风气候。京津冀地区耕地和林地分布最为广泛,分别占总面积的 46% 和 39%。建设用地仅占总面积的 13%,且主要分布在东南部平原地区。该地区是中国北方第一个经济增长中心,人口密度高,经济总量大,人口占全国 7.82%,GDP 占全国 8.5%。京津冀南部平原地区是我国重要的粮食产区之一,北部山区具有防风固沙和水源涵养等多个生态服务功能。

城市化和工业化的快速发展加速了区域自然资源消耗和生态功能退化。2000—2020 年间建设用地增加 10243.04km²,耕地面积减少 9463.14km²,草地面积减少 1205.30km²。2021 年中国水土保持公报显示京津冀地区水土流失面积约 4.25×10⁴km²。根据《中国环境统计年鉴 2021》显示 2020 年北京、天津市人均水资源量约占全国平均水平的 1/20,河北省仅占全国水平的 1/11,水资源极度短缺,约 70% 的河流在全年内出现断流现象^[24]。

1.2 数据来源

本研究所使用的基础数据包括土地利用数据、遥感数据、土壤数据和气象数据以及社会经济数据等多源信息(表 1)。其中土地利用/覆被分类按照中国科学院资源环境数据中心的“土地利用/土地覆盖遥感监测数据分类系统”划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地六类。夜间灯光数据参考 Wu 等^[25],通过整合 DMSP/OLS 和 NPP/VIRS 数据得到矫正后的 2000、2010 和 2020 年的 DMSP-OLS 数据。降水和温度数据是基于气象要素站点观测数据进行空间插值生成。潜在蒸散发数据基于气象数据采用 Hargreaves 潜在蒸散发计算公式得到。社会经济数据包括粮食产量、第二产业产值和第三产业产值。将栅格数据统一为 Albert 投影和 WGS84 地理坐标系,并创建了 1km×1km 网格对国土空间多功能指标空间化。

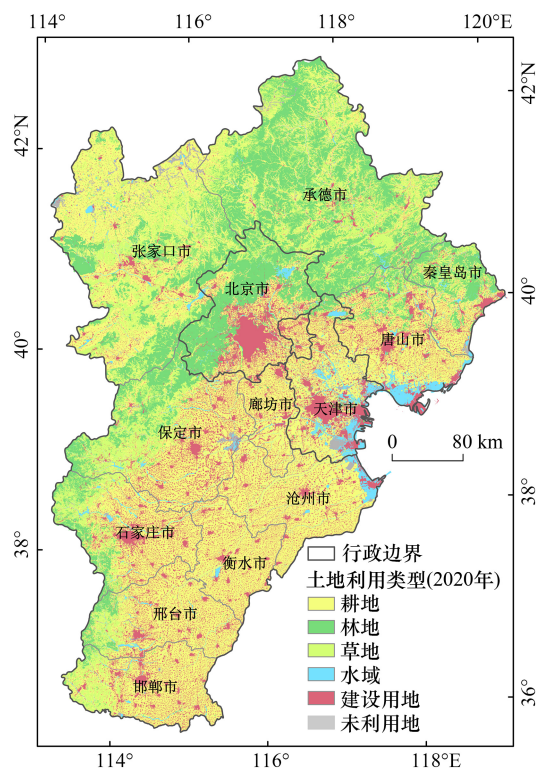


图 1 研究区域位置

Fig.1 Location map of study area

表 1 数据获取及说明

Table 1 Data acquisition and description

数据 Data	来源 Source	分辨率 Resolution	时间 Time
土地利用/覆被 Land use/cover	中国科学院资源环境科学与数据中心 (http://www.resdc.cn)	30m	2000、2010、2020
归一化植被指数 Normalized differential vegetation index	中国科学院资源环境科学与数据中心 (http://www.resdc.cn)	30m	2000、2010、2020
夜间灯光数据 Nighttime light data	中国科学院资源环境科学与数据中心 (http://www.resdc.cn)	1000m	2000、2010、2020
净初级生产力 NPP Net primary productivity	中国科学院资源环境科学与数据中心 (http://www.resdc.cn)	1000m	2000、2010、2020
土壤数据 Soil data	世界土壤数据库 (Harmonized World Soil Database, HWSD) (http://www.fao.org/soil-portal/en/)	1000m	
高程数据 Digital elevation data	地理空间数据云 (http://www.gscloud.cn)	30m	
降水量 Precipitation	国家科技资源共享服务平台-国家地球系统 科学数据中心 (http://www.geodata.cn)	1000m	2000、2010、2020
潜在蒸散发数据 Potential evapotranspiration	国家科技资源共享服务平台-国家地球系统 科学数据中心 (http://www.geodata.cn)	1000m	2000、2010、2020
温度 Temperature	中国科学院资源环境科学与数据中心 (http://www.resdc.cn)	1000m	2000、2010、2020
人口密度 Population Density	WorldPop 数据集 (http://www.worldpop.org.uk/data/get_data/)	100m	2000、2010、2020
国内生产总值 GDP Gross domestic product	中国科学院资源环境科学与数据中心 (http://www.resdc.cn)	1000m	2000、2010、2019
社会经济数据 Socioeconomic data	《北京统计年鉴》《天津统计年鉴》《河北经 济年鉴》《中国城市统计年鉴》		2000、2010、2020
道路数据 Road data	中国科学院资源环境科学与数据中心 (http://www.resdc.cn)		

1.3 研究方法

1.3.1 国土空间多功能指标量化

结合京津冀地区社会经济状况和自然条件,考虑到数据的可获取性,在参考已有研究成果的基础上^[26–28],将国土空间多功能分为生产、生活和生态三个一级功能和 8 个二级功能,并构建国土空间多功能评价指标体系,综合应用 ArcGIS 和 InVEST 模型实现各指标的量化和空间化制图(表 2)。生产功能是通过物质供给和经营活动维持人类生存的基础。京津冀地区是重要的粮食生产区,也是经济增长中心,因此选取粮食产量和二三产值表征粮食生产和非农生产功能。生活功能是三者之间相互联系的纽带,是以实现人类福祉为核心,提供人类生存的承载空间。因此选取城乡建设用地密度和人口密度表征居住支撑和生活维持功能。生态功能为人类的生产和生活提供保障,适宜的环境是高质量生活的前提。结合京津冀地区生态资源禀赋和居民需求,选取碳储量、水源涵养量、土壤保持量和生境质量对土地利用生态功能进行评价。

为消除各类国土空间功能不同量纲的影响,采用极差标准化法将各指标值统一到 0—1 之间,再采用综合评价法计算生产、生活和生态功能值。其计算公式如下:

$$\text{Prod} = \sum_{n=1}^2 I_{(x,n)} \times w_n \tag{1}$$

$$\text{Livi} = \sum_{n=1}^2 I_{(x,n)} \times w_n \tag{2}$$

$$\text{Ecol} = \sum_{n=1}^4 I_{(x,n)} \times w_n \tag{3}$$

式中, $Prod$ 、 $Livi$ 、 $Ecol$ 分别表示生产、生活和生态功能指标, $I_{(x,n)}$ 表示栅格 x 第 n 个指标的值, w_n 为第 n 个指标的权重。生产功能和生活功能的指标权重均设为 0.5, 生态功能指标权重均设为 0.25^[8,27]。

表 2 国土空间多功能评价指标体系
Table 2 Evaluation index system of territorial space functions

一级功能 Primary functions	二级功能 Sub-functions	指标 Indicators	计算方法 Formula and description
生产功能 Production function	粮食生产	粮食产量	$Grain_i = \frac{Grain_j}{NPP_j} \times NPP_i$ 式中, $Grain_i$ 和 $Grain_j$ 分别代表格网 i 和区县 j 的粮食产量, NPP_i 和 NPP_j 分别代表格网 i 和区县 j 的归一化植被指数^[27]。
	非农生产	二三产值	$Econ_i = \frac{GDP_{2j} + GDP_{3j}}{DL_j} \times DL_i$ 式中, $Econ_i$ 为格网 i 的二三产业产值, GDP_{2j} 和 GDP_{3j} 分别代表区县 j 第二产业产值和第三产业产值, DL_i 和 DL_j 分别是格网 i 和区县 j 的夜间灯光^[27]。
生活功能 Living function	居住承载	城乡建设用地密度	$CD_i = \frac{C_i}{S_i}$ 式中, CD_i 代表格网 i 的城乡建设用地密度, C_i 和 S_i 分别代表格网 i 内城乡建设用地面积和格网面积。
	生活维持	人口密度	$Pop_i = \frac{Pop_j}{Q_j} \times Q_i$ 式中, Pop_i 和 Pop_j 分别代表格网 i 和区县 j 的人口, Q_i 和 Q_j 分别代表格网 i 和区县 j 土地利用类型、夜间灯光和居住密度的总权重。
生态功能 Ecological function	气候调节	碳储量	$C_i = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead}$ 式中, C_i 代表每种土地利用类型的碳密度, C_{above} 为地上生物碳储量, C_{below} 为地下碳储量, C_{soil} 为土壤碳储量, C_{dead} 为死亡有机质碳储量。各土地利用类型的碳密度值根据相关研究整理得到^[29]。
	土壤保持	土壤保持量	$A = R \times K \times L \times S \times (1 - C \times P)$ 式中, A 为土壤保持量; R 为降雨侵蚀系数; K 为土壤可蚀性因子; L、S 为坡长、坡度因子; C 为植被盖度及管理因子; P 为水土保持措施因子^[30]。
	水源涵养	水源涵养量	$Y_{xj} = \left(1 - \frac{AET_{xj}}{P_x}\right) + P_x$ $WR_{xj} = \min\left(1, \frac{249}{V}\right) \times \min\left(1, \frac{0.9 \times TI}{3}\right) \times \min\left(1, \frac{K_{sat}}{300}\right) \times Y_{xj}$ $TI = \log_{10}\left(\frac{D_{area}}{SoilDepth \times PercentSlope}\right)$ 式中, Y_{xj} 为土地利用类型 j 像元 x 的产水量, AET_{xj} 为土地利用类型 j 像元 x 的年均实际蒸散量, P_x 为像元 x 的年均降雨量。 WR_{xj} 土地利用类型 j 像元 x 的水源涵养量, V 为流速系数, K_{sat} 为土壤饱和导水率, 利用 SPAW 软件计算获得; TI 为地形指数, D_{area} 为集水区栅格数量, $SoilDepth$ 为土壤深度; $PercentSlope$ 为百分比坡度^[31]。
	生境维持	生境质量	$Q_{xj} = H_j \left(1 - \left(\frac{D_{xj}^2}{D_{xj}^2 + k_i}\right)\right)$ 式中, Q_{xj} 为土地利用类型 j 像元 x 的生境质量, H_j 代表土地利用类型 j 的生境适宜性, 取值范围为 0—1, D_{xj} 为土地利用类型 j 像元 x 威胁源的权重, k 为半饱和常数, z 的默认值为 2.5^[21]。

1.3.2 Spearman 相关性分析

Spearman 相关系数是一种衡量两个变量之间相关性的非参数指标, 其系数大小反映两个变量之间关系的强弱程度^[21]。考虑到地理数据的非线性和非正态特点, 本文借助该方法从整体层面分析研究区国土空间多功能之间的相关关系, 并在 0.05 水平下检验功能之间的相关程度, 其计算公式如下:

$$r_{s(i,j)} = \frac{6 \sum_{k=1}^n [(x_{ik} - x_i)(x_{jk} - x_j)]^2}{n(n^2 - 1)} \quad (4)$$

式中, $r_{s(i,j)}$ 表示功能 i 和功能 j 之间的秩相关系数, n 为样本个数, x_{ik} 和 x_{jk} 分别代表 i 和 j 在样本 k 中的秩次。 $r_{s(i,j)}$ 为正数则表明两变量之间为协同关系, 反之则为权衡关系。

1.3.3 均方根误差

参考 Bradford 等^[17]的收益均衡思路, 引入均方根误差 (RMSE) 用于量化单个功能指标值与多功能指标值平均值之间的差异水平, 表征国土空间多功能在相同方向变化的不均匀率, 以直观地表达生产、生活和生态功能之间的权衡强度空间差异^[11]。RMSE 值介于 0—1 之间, 越接近于 1 表明权衡强度越大, 反之权衡强度越小。RMSE 计算公式如下:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \times \sum_{i=1}^n (\text{LUF}_i - \overline{\text{LUF}})^2} \quad (5)$$

式中, LUF_i 为第 i 种国土空间功能标准值, $\overline{\text{LUF}}$ 为国土空间功能的平均值。

1.3.4 地理探测器模型

地理探测器模型是用于探测因变量空间分层异质性并揭示其驱动机理的统计学方法^[32]。在揭示国土空间多功能权衡空间分异特征后, 借助地理探测器的核心部分因子探测, 采用 q 统计值定量揭示各自变量 X (影响因子) 对因变量 Y (国土空间多功能权衡强度) 的解释程度。 q 统计值的计算公式如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (6)$$

式中, h 为研究区解释变量层数, N 和 N_h 分别代表整个研究区和第 h 层的观测次数, σ^2 和 σ_h^2 分别表示整个研究区和第 h 层因变量 Y 的方差。 q 值的范围为 0—1, q 值越接近于 1, 表明自变量 X 对因变量 Y 的解释程度越大。

2 结果与分析

2.1 京津冀地区国土空间多功能时空演变特征

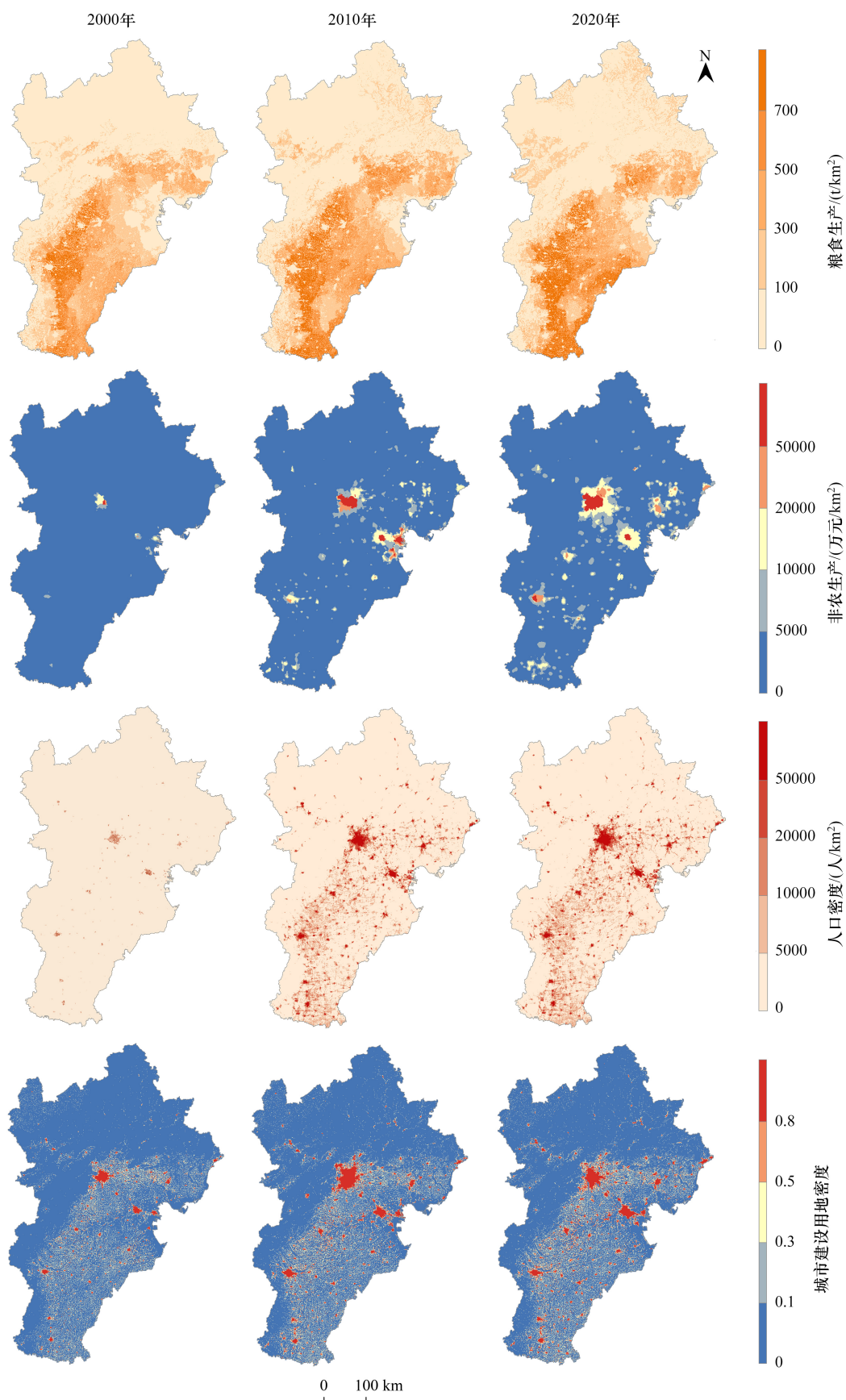
2000—2020 年京津冀地区国土空间多功能整体上呈波动性变化 (表 3)。在生产功能方面, 粮食产量增加了 $8.60 \times 10^6 \text{t}$, 非农生产增长近 10 倍, 主要归因于农业现代化和城镇化的快速发展。在生活功能方面, 生活维持增长近 9 倍, 居住承载增长 57.14%, 人口密度增加以及建设用地扩张使生活功能快速提升。在生态功能方面, 与 2000 年相比, 2020 年碳储量减少 $3 \times 10^7 \text{Mg C}$, 土壤保持量减少了 $3.6 \times 10^8 \text{t}$, 生境质量降低 9.8%, 这主要是由于近年来建设用地和耕地侵占生态用地。水源涵养量增加了 $6.08 \times 10^7 \text{m}^3$, 这与降水量增加有关。

表 3 2000—2020 年京津冀地区各国土空间二级功能变化

Table 3 Changes of territorial space sub-functions in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2000—2020

年份 Year	粮食生产 Grain production/t	非农生产/元 Non-agricultural production	生活维持 Living maintenance/ people	居住支撑 Residential support	气候调节 Climate regulation/ Mg C	水源涵养 Water conservation/ m ³	土壤保持 Soil conservation/t	生境质量 Habitat quality
2000	3.12×10^7	5.09×10^7	6.94×10^7	0.07	2.62×10^9	3.08×10^7	3.12×10^9	0.51
2010	3.94×10^7	2.98×10^8	6.05×10^8	0.09	2.60×10^9	7.78×10^7	4.37×10^9	0.47
2020	3.98×10^7	5.24×10^8	6.79×10^8	0.11	2.59×10^9	9.16×10^7	2.76×10^9	0.46
变化 Change	8.60×10^6	4.72×10^8	6.10×10^8	0.04	-3.00×10^7	6.08×10^7	-3.6×10^8	-0.05

空间分布上,国土空间多功能存在显著的空间异质性,整体呈“西北部生态功能较强,东南部生产与生活功能较强”的空间分布格局(图 2)。



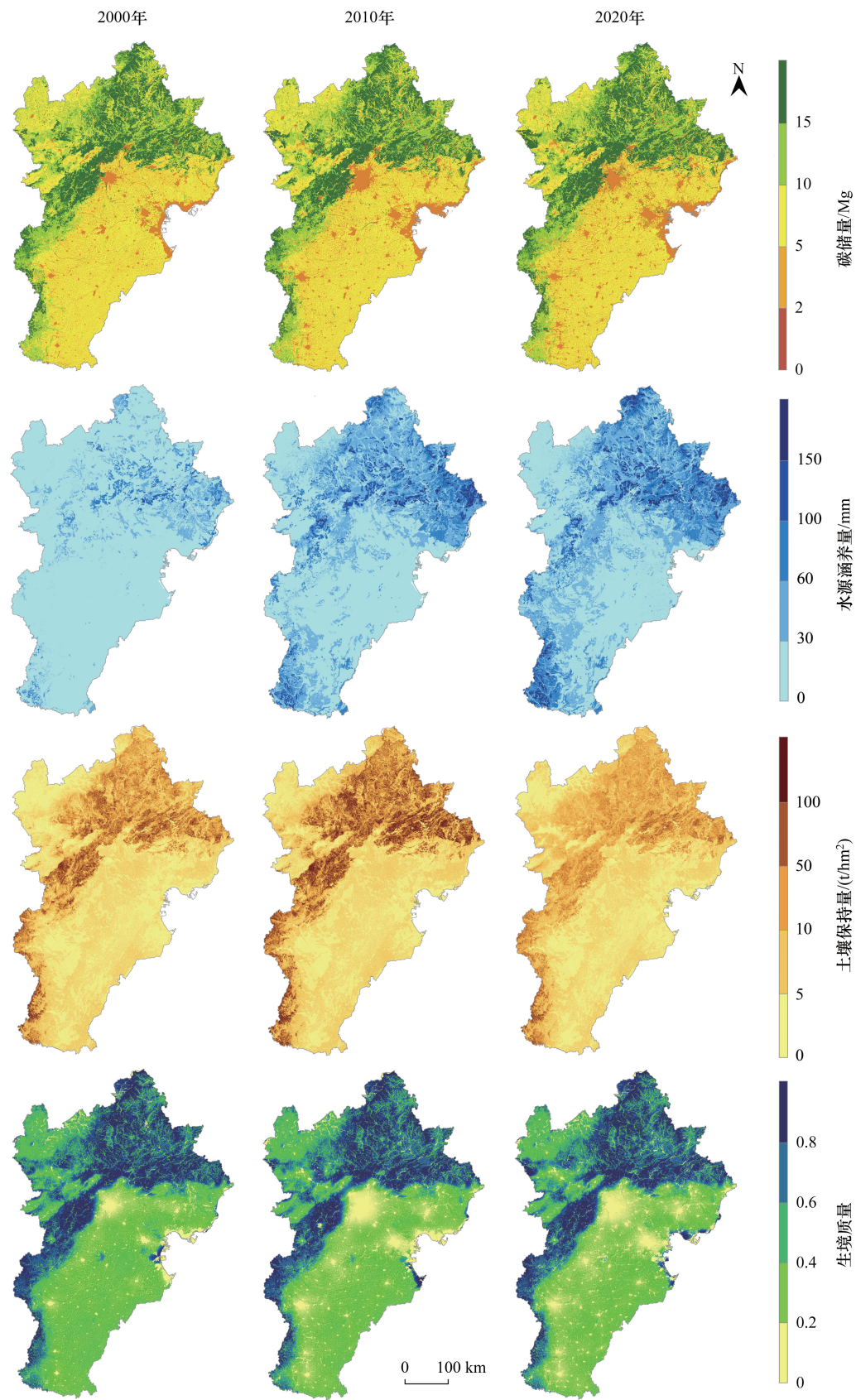


图2 2000—2020年京津冀地区国土空间多功能空间分布

Fig.2 Spatial pattern of territorial space sub-functions in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2000—2020

粮食生产功能高值区沿唐山-秦皇岛和保定-石家庄-邢台-邯郸为轴线逐步向沧州-衡水扩张,低值区主要分布于冀北张家口和承德市。非农生产、生活维持和居住承载功能呈现出以北京、天津、保定和石家庄等中心城市为高值核心区向外围逐渐扩散。气候调节、土壤保持和生境质量高值区集中分布于西北部林地和草地覆盖的区域,水源涵养功能高值区集中在东北部承德和秦皇岛市。东南部地区受人类活动干扰强度大导致生态功能水平整体较低。

2.2 京津冀地区国土空间多功能权衡分析

计算 Spearman 相关性系数得到研究区 2000—2020 年国土空间多功能之间的相互关系(图 3)。结果表

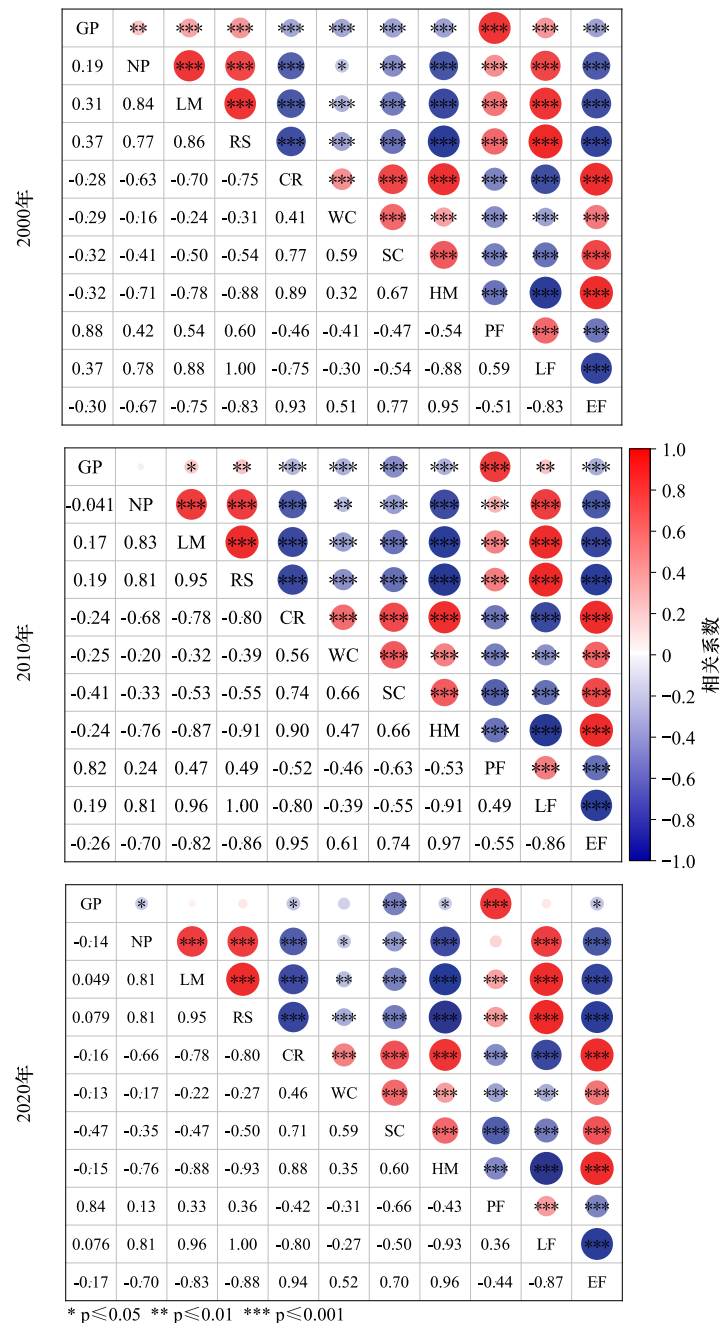


图 3 2000—2020 年京津冀地区国土空间多功能权衡协同关系

Fig.3 trade-off and synergy coefficients of territorial space functions in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2000—2020

GP:粮食生产 Grain production; NP:非农生产 Non-agricultural production; LM:生活维持 Living maintenance; RS:居住承载 Residential support; CR:气候调节 Climate regulation; WC:水源涵养 Water conservation; SC:土壤保持 Soil conservation; HM:生境维持 Habitat maintenance; PF:生产功能 Production function; LF:生活功能 Living function; EF:生态功能 Ecological function

明,生产与生活功能呈显著正相关,相关系数呈降低趋势,分别为 0.59、0.49 和 0.36。生产与生态功能、生活与生态功能之间呈显著负相关性。生产与生态功能之间的负相关系数呈先增后减趋势,分别为 0.51、0.55 和 0.44。生活与生态功能之间的负相关性增强,相关系数分别为 0.83、0.86 和 0.87。表明京津冀地区社会经济发展与生态保护始终存在矛盾。

在国土空间二级功能方面,生活子功能内部以及生态子功能内部均呈现显著正相关,生产、生活子功能均与各生态子功能间呈显著负相关,且随时间的推移有轻微变化。2000—2020 年,粮食生产与非农生产由正相关向负相关转变,与土壤保持之间的负相关性呈增强态势,主要归因于建设占用耕地使粮食生产面临威胁,为提高粮食产量,过度施用化肥造成土壤恶化,土壤保持能力退化。生活维持与居住承载始终呈较强的正相关,二者与生境保护之间的负相关性最强且呈逐年上升趋势,表明人口密度增加和建设用地扩张对生境质量的影响愈发严重。研究发现气候调节与生境维持的正相关性最强,相关系数分别为 0.89、0.90 和 0.88,表明植被固碳高的区域往往物种越丰富,生境质量较高。

本文进一步揭示了 2000—2020 年京津冀地区生产、生活与生态功能之间的权衡程度时空异质性。生产与生活功能的权衡强度由 2000 年的 0.038 上升至 2020 年的 0.060,高值区主要分布在东南部经济发展水平较高的中心城市,且随着农业生产水平的提升,衡水、邯郸和邢台等地生产与生活功能的权衡强度增长较快。低值区分布在张家口和承德市,由于这些地区以山地为主,建设用地和耕地面积小且分散,造成工农业发展水平均较低(图 4)。生产与生态功能的权衡强度由 2000 年的 0.190 下降至 2020 年的 0.180,高权衡区主要分布于京津冀西北部林地和草地覆盖区域,其中承德市的权衡强度最高,平均权衡强度为 0.321。低值区分布在东南部地区,其中沧州市、廊坊市和衡水市生产与生态功能权衡强度明显减弱(图 5),这主要归功于农田生态系统

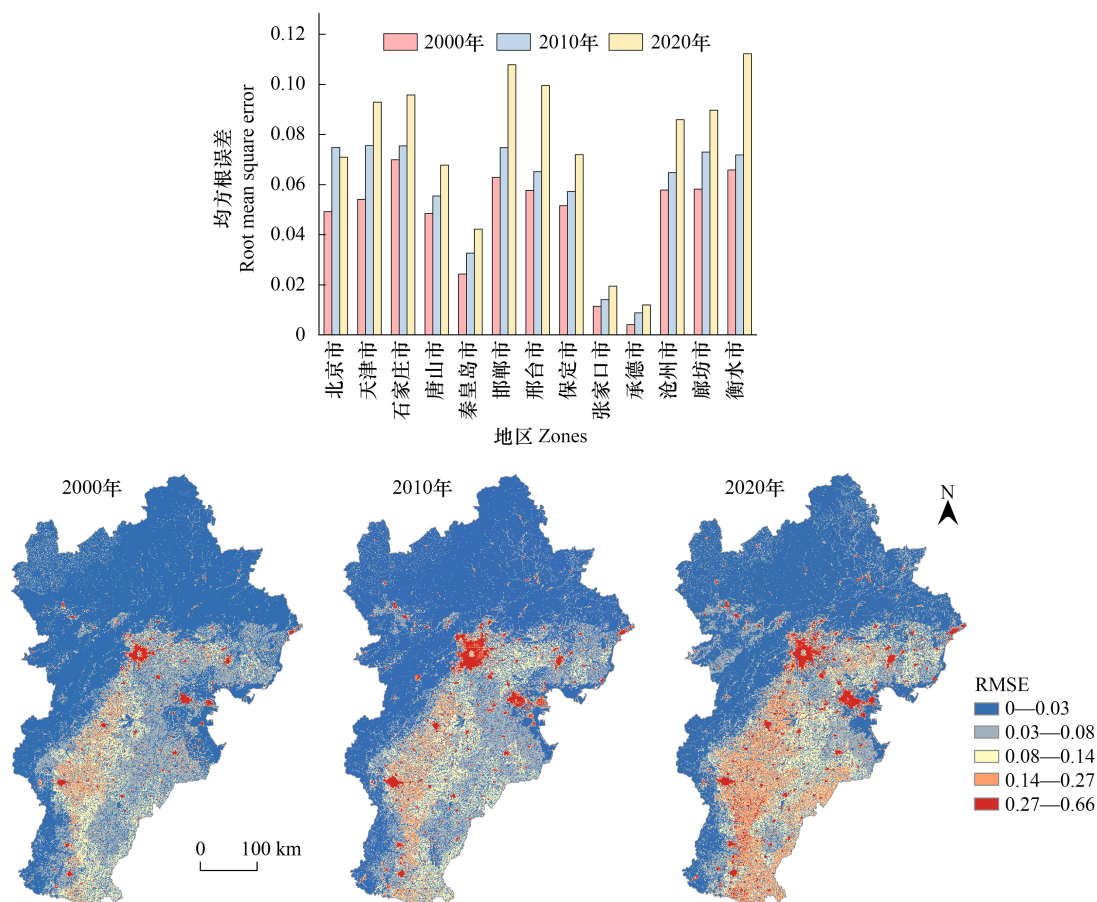


图 4 2000—2020 年生产与生活功能权衡强度空间分布与区域统计

Fig.4 Spatial pattern and regional statistic of trade-off intensity between production and living function from 2000—2020

多样性上升和城市绿地增加。生活与生态功能间的权衡强度由 2000 年的 0.206 下降至 2020 年的 0.205,高权衡区主要分布于京津冀西北部以及东南部中心城区,其规模随着建设用地扩张而扩大。由于西北部地区林地覆盖面积广,生态功能高而生活功能较低,东南部高强度的人类活动提升了生活功能的同时削弱了生态功能(图 6)。

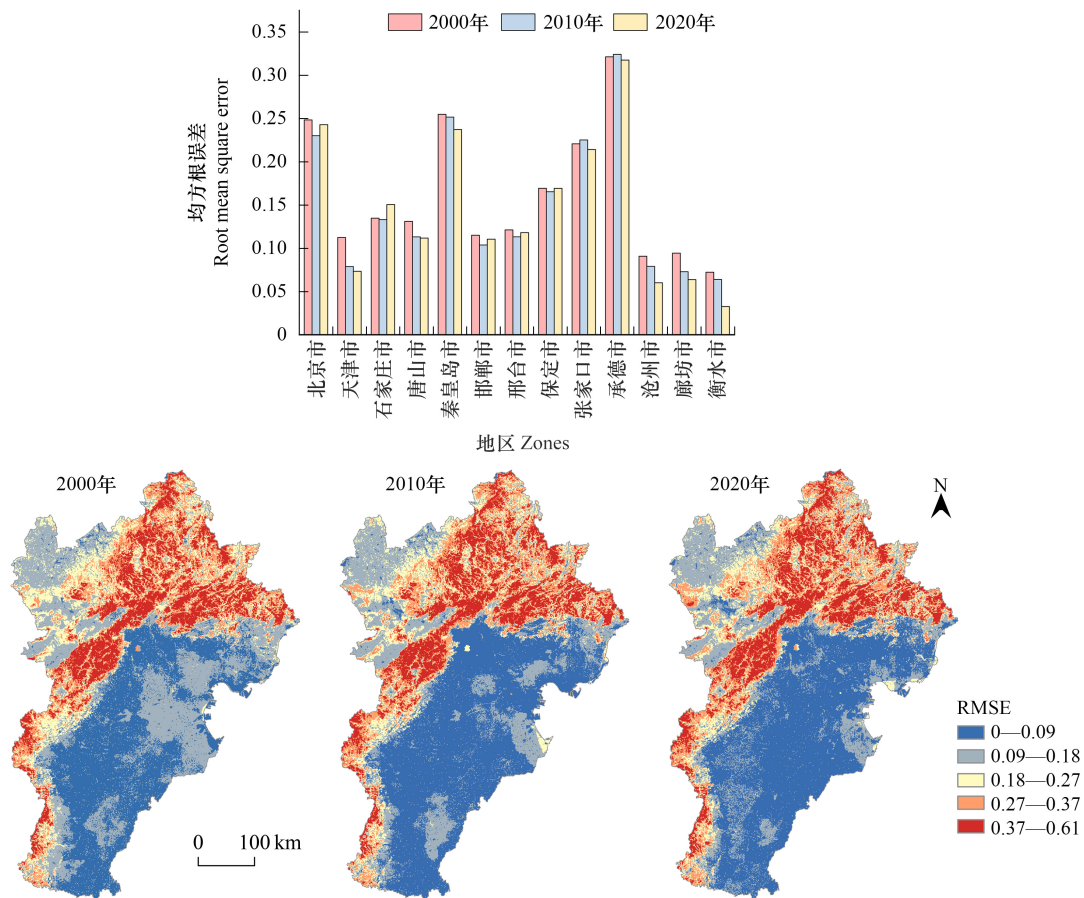


图 5 2000—2020 年生产与生态功能权衡强度空间分布与区域统计

Fig.5 Spatial pattern and regional statistic of trade-off intensity between production and ecological function from 2000—2020

2.3 京津冀地区国土空间多功能权衡的影响因素分析

相关研究表明多功能权衡是由自然因素和社会经济因素之间相互作用的结果。坡度、温度和降水等自然因素决定了景观和人类活动的空间分布,经济发展和人口增长等宏观因素导致剧烈的土地利用变化^[11,20]。土地利用结构和布局变化直接影响物质循环、土壤侵蚀和生物多样性等生态过程,造成国土空间多功能间的权衡。因此,本文从自然因素、土地利用因子、社会经济因素三个方面分别选取坡度(X1)、降雨(X2)、蒸散(X3)、温度(X4)、NDVI(X5)、土地利用强度(X6)、聚集度指数 AI(Aggregation Index)(X7)、Shannon 多样性指数 SHDI(Shannon Diversity Index)(X8)、Shannon 均匀度指数 SHEI(Shannon Evenness Index)(X9)、人口密度(X10)、GDP(X11)和路网密度(X12)12 个指标作为影响变量,利用地理探测器模型探究各影响变量对研究区生产、生活和生态功能权衡强度空间分异的影响程度。

不同影响因素在不同年份对国土空间多功能权衡强度空间分异的影响不同(图 7)。从影响因素层面来看,2000—2020 年生产与生活功能权衡强度空间分异受社会经济因素影响程度最大,平均 q 值为 0.603,其次是土地利用因子,平均 q 值为 0.550,自然因素影响最小,平均 q 值为 0.226。随着时间的变化,自然因素影响程度呈增强趋势,增幅为 31.68%,土地利用因子和社会经济因素影响程度减弱,降幅分别为 20.45%和 12.4%。生产与生态功能以及生活与生态功能权衡强度空间分异均受土地利用因子影响程度最大,平均 q 值分别为

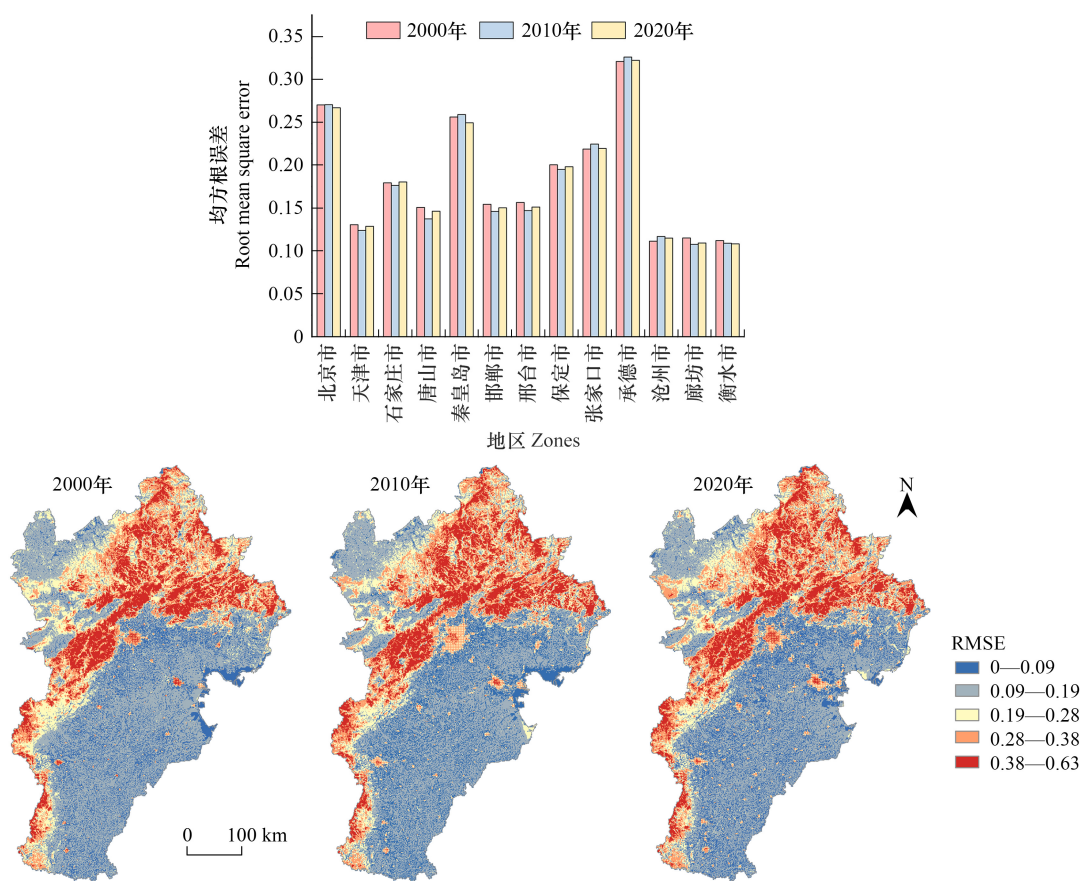


图 6 2000—2020 年生活与生态功能权衡强度空间分布与区域统计

Fig.6 Spatial pattern and regional statistic of trade-off intensity between living and ecological function from 2000—2020

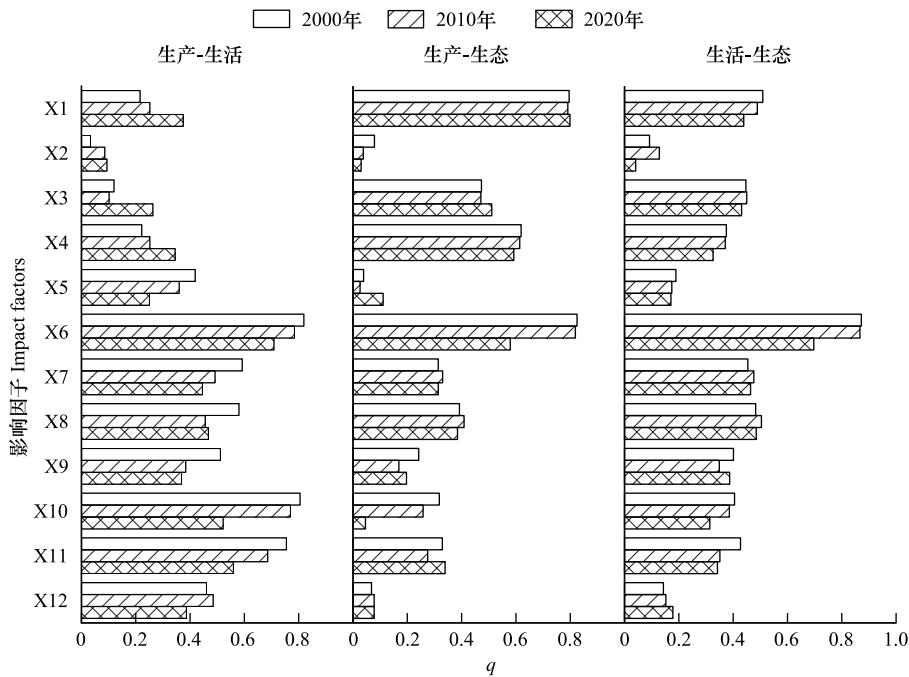


图 7 2000—2020 年国土空间多功能权衡强度影响因子探测结果

Fig.7 The q value of impact factors for the trade-off intensity among territorial space functions

坡度 (X1)、降雨 (X2)、蒸散 (X3)、温度 (X4)、NDVI (X5)、土地利用强度 (X6)、聚集度指数 AI (Aggregation Index) (X7)、Shannon 多样性指数 SHDI (Shannon Diversity Index) (X8)、Shannon 均匀度指数 SHEI (Shannon Evenness Index) (X9)、人口密度 (X10)、GDP (X11) 和路网密度 (X12)

0.415 和 0.530,自然因素影响次之,平均 q 值分别为 0.399 和 0.416,而社会经济因素影响最小,平均 q 值分别为 0.199 和 0.300。随着时间的变化,自然因素影响程度小幅增强,增幅为 2%,土地利用因子和社会经济因素对其影响程度降低,降幅分别 39%和 35.29%。对于生活与生态功能权衡强度而言,自然因素、土地利用因素和社会经济因素对其影响程度均有轻微减弱趋势,降幅分别为 12.42%、8.14%和 14.46%。

从具体影响因子来看,2000—2020 年生产与生活功能权衡主要受土地利用强度、人口密度和 GDP 影响, q 平均值分别为 0.771、0.699 和 0.667,但其影响程度有所下降。坡度、土地利用强度和温度对生产与生态功能权衡具有重要影响, q 平均值分别为 0.795、0.741 和 0.608,随着时间的变化,主导影响因素由土地利用强度转为坡度。土地利用强度、SHDI 和坡度对生活功能与生态功能权衡具有重要影响, q 平均值分别为 0.812、0.491 和 0.479,其影响程度有所下降。这表明国土空间多功能权衡的影响因素存在更多不确定性。

3 结论

本文分析了京津冀地区国土空间多功能的时空演变特征,采用 Spearman 相关性分析对各功能之间的权衡/协同关系进行了定性分析,进一步利用均方根误差定量测算了生产、生活与生态功能之间的权衡强度,采用地理探测器模型分析了国土空间多功能权衡强度分异影响因素,得出了以下主要结论:

(1) 2000—2020 年京津冀地区粮食生产功能、非农生产功能、居住承载功能、生活维持功能和水源涵养功能不断提升,气候调节功能、土壤保持功能和生境维持功能整体呈退化态势。整体呈西北部生态功能较强,东南部生产与生活功能较强的空间分布格局。

(2) 2000—2020 年京津冀地区生产与生活功能权衡强度由 2000 年的 0.038 上升至 2020 年的 0.060,生产与生态功能权衡强度由 2000 年的 0.190 下降至 2020 年的 0.180,生活与生态功能权衡强度由 2000 年的 0.206 下降至 2020 年的 0.205。京津冀西北部是生产与生态功能以及生活与生态功能权衡强度较高区域,集中在承德、张家口、秦皇岛以及北京市等。京津冀东南部中心城市是生产与生活功能以及生活与生态功能权衡强度高值区。

(3) 京津冀地区国土空间多功能权衡强度受多个因素共同影响。社会经济因素对生产与生活功能权衡强度影响程度最大,多年平均 q 值为 0.603,且自然因素对其影响程度呈增强趋势,增幅为 31.68%。土地利用因子对生产与生态功能以及生活与生态功能之间的权衡强度影响程度最大,多年平均 q 值为 0.415 和 0.530。在具体影响因子中,土地利用强度是生产、生活与生态功能两两之间权衡的关键影响因子,随着时间的变化,生活与生态功能权衡的主导影响因子由土地利用强度转为坡度。

4 讨论

4.1 国土空间多功能权衡强度与影响机制

京津冀地区国土空间多功能权衡强度均值表现为“生活功能-生态功能”>“生产功能-生态功能”>“生产功能-生活功能”,这表明社会经济发展与生态保护之间存在更加强烈的权衡关系,尤其是城市化水平较高的建成区以及森林覆盖率较高的西北部山区。随着时间的推移,生态功能与生产、生活功能之间的权衡强度轻微减弱,这主要归功于农田生态系统多样性上升和城市绿地增加。《京津冀现代农业协同发展规划》构建了“都市现代农业区”和“高产高效生态农业区”,极大促进了农业产业现代化、功能多元化以及环境生态化。研究表明,土地利用强度是多功能权衡的重要影响因子,这一结果与 Zhu 等^[20]和左丽媛等^[33]研究结论基本一致。人口和产业的高密度聚集必然需要更多的生产生活空间,表现为建设用地扩张迅速,这就导致了耕地和生态用地的流失和破碎化,使农业生产和生态系统服务供给水平降低。近年来京津冀地区实施太行山绿化、三北防护林和退耕还林等生态修复工程,耕地向林地的转换改善了生态系统服务,但给农业生产带来不可避免的负面影响^[34]。此外,SHDI、SHEI、AI 等景观因子对国土空间多功能权衡强度具有重要影响,与 Fan 等^[11]和 Bai 等^[35]的研究结果一致。因为景观结构复杂性的增加有利于增强生物多样性,而规则紧凑的景观

更有利于农业生产和城市发展。研究发现自然因素对国土空间多功能权衡影响逐渐增强,降水、温度和蒸散变化可以通过改变区域气候和水资源供应影响多功能相互作用^[36]。降水越多的地区,农业种植密度越高,人类活动也越多。与平原地区相比,由于地形条件和农业耕作环境的限制,山区农村居民点和耕地面积小且分散,限制了其生产经营活动,导致生产与生活功能之间的权衡加剧。

4.2 国土空间可持续管理建议

随着京津冀地区协同发展战略的实施,交通、产业、生态等重点领域不断转型发展,这将加剧生产、生活和生态功能用地之间的竞争。“生产空间集约高效,生活空间宜居适度,生态空间山清水秀”是国土空间治理的具体要求,也是多功能协调发展的有效手段。首先,城市化水平较高的地区要合理控制土地利用强度,在建成区周边划定严格的城镇开发边界,适当增加城市绿色基础设施,既要保障足够的蓝绿空间又要重视空间集聚发展,达到合理的密度空间是多功能协同发展的关键;其次,对于生态与生产、生活功能权衡强度较高的西北山区,应优先保护生态功能高的地区,将其划入生态保护红线。通过发展生态经济,促进工业绿色转型和农业生态化转型^[28]。再次,对于农业生产与生态功能权衡强度较高的东南部平原地区要发展生态农业,强调耕地的生态功能价值,防止耕地非农化和农业污染。在保持生态稳定的基础上,应用和推广多种农业种植制度和作物-畜养/水产一体化,促进经济效益和生态效益的协同效应^[37]。对于农业生产与生活功能权衡强度较高的地区,应优先保护具有高农业功能的地区,将优质农田作为基本农田进行集约经营,提高农业生产的可持续性。此外,在坚持主体功能区战略、发挥各地区比较优势的基础上,不断推进资源整合与优化配置,为不同的土地利用主体提供足够的发展空间,以满足利益相关者的需求,是促进国土空间多功能均衡发展的关键。

本文探索了国土空间多功能时空演化和权衡强度的影响机制,但并不能直接反映城市群系统受内外复杂因素影响的耦合效应。因此,有必要明确多元生态社会复杂的均衡发展需求和空间功能供给。

参考文献(References):

- [1] Hu Q Y, Zhang Z F, Niu L. Identification and evolution of territorial space from the perspective of composite functions. *Habitat International*, 2022, 128: 102662.
- [2] Liu C, Cheng L, Li J, Lu X H, Xu Y Q, Yang Q K. Trade-offs analysis of land use functions in a hilly-mountainous city of northwest Hubei Province: the interactive effects of urbanization and ecological construction. *Habitat International*, 2023, 131: 102705.
- [3] 曲衍波, 王世磊, 李岩, 朱伟亚, 王森. 基于多功能适宜性的黄河三角洲国土空间潜在冲突特征与优化格局研究. *地理科学*, 2023, 43(2): 301-312.
- [4] Yu M, Yang Y J, Chen F, Zhu F W, Qu J F, Zhang S L. Response of agricultural multifunctionality to farmland loss under rapidly urbanizing processes in Yangtze River Delta, China. *Science of the Total Environment*, 2019, 666, 1-11.
- [5] 潘梅, 陈天伟, 黄麟, 曹巍. 京津冀地区生态系统服务时空变化及驱动因素. *生态学报*, 2020, 40(15): 5151-5167.
- [6] 黄隆杨, 王静, 李泽慧, 赵晓东, 刘晶晶, 方莹. 基于自然资源大数据的城市多功能景观识别与国土空间规划分区. *地球信息科学学报*, 2021, 23(9): 1617-1631.
- [7] 刘超, 许月卿, 卢新海. 生态脆弱贫困区土地利用多功能权衡/协同格局演变与优化分区——以张家口市为例. *经济地理*, 2021, 41(1): 181-190.
- [8] 樊杰, 周侃, 盛科荣, 郭锐, 陈东, 王亚飞, 刘汉初, 王正, 孙勇, 张杰, 伍健雄, 赵浩. 中国陆域综合功能区及其划分方案. *中国科学: 地球科学*, 2023, 53(2): 236-255.
- [9] 侯蕊, 李红波. 武汉市土地利用多功能时空变化及耦合协调特征分析——基于“两型社会”试验区建设前后的对比. *中国土地科学*, 2021, 35(1): 69-78.
- [10] Fan Y T, Jin X B, Gan L, Jessup L H, Pijanowski B C, Yang X H, Xiang X M, Zhou Y K. Spatial identification and dynamic analysis of land use functions reveals distinct zones of multiple functions in Eastern China. *Science of the Total Environment*, 2018, 642: 33-44.
- [11] Fan Y T, Gan L, Hong C Q, Jessup L H, Jin X B, Pijanowski B C, Sun Y, Lv L G. Spatial identification and determinants of trade-offs among multiple land use functions in Jiangsu Province, China. *Science of the Total Environment*, 2021, 772: 145022.
- [12] Zou L L, Liu Y S, Wang J Y, Yang Y Y. An analysis of land use conflict potentials based on ecological-production-living function in the southeast coastal area of China. *Ecological Indicators*, 2021, 122: 107297.
- [13] 冯琰玮, 甄江红. 国土空间功能演变及协同/权衡关系研究——以内蒙古呼包鄂地区为例. *干旱区研究*, 2022, 39(5): 1642-1654.

- [14] Meng J J, Cheng H R, Li F, Han Z Y, Wei C J, Wu Y D, You N W, Zhu L K. Spatial-temporal trade-offs of land multi-functionality and function zoning at finer township scale in the middle reaches of the Heihe River. *Land Use Policy*, 2022, 115: 106019.
- [15] Ouyang X, Xu J, Li J Y, Wei X, Li Y H. Land space optimization of urban-agriculture-ecological functions in the Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration, China. *Land Use Policy*, 2022, 117: 106112.
- [16] 陈会, 李阳兵, 盛佳利. 基于土地利用变化的贵州坝子土地利用功能演变研究. *生态学报*, 2019, 39(24): 9325-9338.
- [17] Bradford J B, D'Amato A W. Recognizing trade-offs in multi-objective land management. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2012, 10(4): 210-216.
- [18] 张碧天, 闵庆文, 焦雯璐, 何思源, 刘某承, 杨伦. 生态系统服务权衡研究进展. *生态学报*, 2021, 41(14): 5517-5532.
- [19] 王世豪, 黄麟, 徐新良, 徐淑琬. 粤港澳大湾区生态系统服务时空演化及其权衡与协同特征. *生态学报*, 2020, 40(23): 8403-8416.
- [20] Zhu C M, Dong B Y, Li S N, Lin Y, Shahmahmadi A, You S X, Zhang J, Gan M Y, Yang L X, Wang K. Identifying the trade-offs and synergies among land use functions and their influencing factors from a geospatial perspective: a case study in Hangzhou, China. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 314: 128026.
- [21] 李成, 赵洁, 庄智程, 顾思浩. 长三角城市群生态系统服务权衡强度时空演变及影响因素. *生态学报*, 2022, 42(14): 5708-5720.
- [22] 税伟, 杜勇, 王亚楠, 杨海峰, 付银, 范冰冰, 黄梦圆. 闽三角城市群生态系统服务权衡的时空动态与情景模拟. *生态学报*, 2019, 39(14): 5188-5197.
- [23] 邓越, 蒋卫国, 王文杰, 吕金霞, 陈坤. 城市扩张导致京津冀区域生境质量下降. *生态学报*, 2018, 38(12): 4516-4525.
- [24] 宁立新, 梁晓瑶, 程昌秀. 京津冀地区生态系统健康评估及时空变化. *生态科学*, 2021, 40(6): 1-12.
- [25] Wu Y Z, Shi K F, Chen Z Q, Liu S R, Chang Z J. Developing improved time-series DMSP-OLS-like data (1992—2019) in China by integrating DMSP-OLS and SNPP-VIIRS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 1-14.
- [26] Lyu Y F, Wang M J, Zou Y N, Wu C F. Mapping trade-offs among urban fringe land use functions to accurately support spatial planning. *Science of the Total Environment*, 2022, 802: 149915.
- [27] Zhang Y N, Long H L, Tu S S, Ge D Z, Ma L, Wang L Z. Spatial identification of land use functions and their tradeoffs/synergies in China: implications for sustainable land management. *Ecological Indicators*, 2019, 107: 105550.
- [28] Liu C, Xu Y Q, Lu X H, Han J. Trade-offs and driving forces of land use functions in ecologically fragile areas of northern Hebei Province: Spatiotemporal analysis. *Land Use Policy*, 2021, 104: 105387.
- [29] Yang Y Y, Bao W K, Li Y H, Wang Y S, Chen Z F. Land use transition and its eco-environmental effects in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration: a production-living-ecological perspective. *Land*, 2020, 9(9): 285.
- [30] Wang H, Liu L B, Yin L, Shen J S, Li S C. Exploring the complex relationships and drivers of ecosystem services across different geomorphological types in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China(2000—2018). *Ecological Indicators*, 2021, 121: 107116.
- [31] 杜贺秋, 于铄, 张蓬涛, 张路路. 京津冀地区水源涵养价值流动分析及生态补偿额度. *生态学报*, 2022, 42(23): 9871-9885.
- [32] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.
- [33] 左丽媛, 姜远, 高江波, 杜馥君, 张怡博. 生态保护红线区生态系统服务多维驱动力的定量分离. *地理学报*, 2022, 77(9): 2174-2188.
- [34] Li F, Qin Z X, Liu X L, Chen Z H, Wei X L, Zhang Q M, Lei M. Grain production space reconstruction and land system function tradeoffs in China. *Geography and Sustainability*, 2021, 2(1): 22-30.
- [35] Bai Y, Chen Y Y, Alatalo J M, Yang Z Q, Jiang B. Scale effects on the relationships between land characteristics and ecosystem services- a case study in Taihu Lake Basin, China. *Science of the Total Environment*, 2020, 716: 137083.
- [36] Boone R B, Conant R T, Sircely J, Thornton P K, Herrero M. Climate change impacts on selected global rangeland ecosystem services. *Global Change Biology*, 2018, 24(3): 1382-1393.
- [37] Li H Y, Zhu N Y, Wang S C, Gao M N, Xia L Z, Kerr P G, Wu Y H. Dual benefits of long-term ecological agricultural engineering: mitigation of nutrient losses and improvement of soil quality. *Science of the Total Environment*, 2020, 721: 137848.