

DOI: 10.5846/stxb202111203270

王凯平, 冯悦, 邱陈澜, 王欣言, 马嘉, 张云路. 环京津城市群生态系统服务的时空演变与驱动因素. 生态学报, 2022, 42(19): 7871-7883.

Wang K P, Feng Y, Qiu C L, Wang X Y, Ma J, Zhang Y L. Spatial and temporal evolution and drivers of ecosystem services in Beijing, Tianjin and the Beijing-Tianjin Ring urban agglomeration. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(19): 7871-7883.

环京津城市群生态系统服务的时空演变与驱动因素

王凯平, 冯悦, 邱陈澜, 王欣言, 马嘉, 张云路*

北京林业大学园林学院, 北京 100083

摘要:城市群已成为全球经济竞争的新空间单元,在促进城镇化建设,实现资源优质配置和发挥辐射带动作用等方面发挥着重要的功能。但剧烈的社会经济活动必然会对城市群生态系统服务造成破坏,因此开展城市群生态系统服务的时空演变研究,进而探索不同驱动因子对其的作用机制具有重要意义。目前,在已有的研究中缺少对城市群尺度和长时间跨度下的生态系统服务水平演变与驱动因素探究。为此,选取京津及环京津地区为研究区域,通过总结区域生态问题,构建起研究区域生态系统服务评价体系,并对 2000—2018 年生态系统服务进行计算,分析时空演变特征。然后,通过最小二乘法模型 (Ordinary Least Squares, OLS) 筛选出潜在的驱动因子,并导入地理加权回归模型 (Geographically Weighted Regression, GWR) 进行地理加权回归计算。最后,通过对结果分析,探讨自然和社会因子对生态系统服务的作用机制。研究结果表明:1) 2000—2018 年,研究区域生态系统服务呈现出先上升后下降,在 2015 年达到最高值的发展特征。2) 在空间上,研究区域生态系统服务内总体上呈现燕山山脉及太行山山脉北部区域为生态系统服务的高值区域,坝上区域为低值区的空间分异特征。同时,生态系统服务演变在空间上呈现以燕山和太行山为界,燕山和太行山区域呈现先减弱后提升的趋势,西北区域整体呈现减弱趋势,东南区域从 2015 年起逐渐降低的空间演化特征。3) 在驱动因素方面,自然环境和社会经济因素对生态系统服务的驱动作用从强到弱排列依次是:降雨量>土壤含沙>人口密度>温度>基础设施密度。4) 其中,人口密度、土壤含沙量、基础设施呈较为明显的负相关驱动特征,降雨量呈较为明显的正相关驱动特征,温度则呈南部负相关,北部正相关,由东南向西北影响增强的趋势。本研究通过评估环京津城市群生态系统服务,分析区域生态系统服务的分析演变特征,并探索区域自然、社会因子对生态系统服务的驱动作用,为环京津城市群未来的生态环境保护和规划策略制定提供了科学指导和决策依据。

关键词:生态系统服务;时空演变;驱动因素;城市群;地理加权回归模型 (GWR)

Spatial and temporal evolution and drivers of ecosystem services in Beijing, Tianjin and the Beijing-Tianjin Ring urban agglomeration

WANG Kaiping, FENG Yue, QIU Chenlan, WANG Xinyan, MA Jia, ZHANG Yunlu*

School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: Urban agglomerations have become a new spatial unit for global economic competition and had important functions in promoting urbanization, achieving high-quality allocation of resources and driving economic development. Intense socio-economic activities, however, are bound to cause damage to the ecosystem services of urban agglomerations. It is important to conduct studies on the spatio-temporal evolution of the ecosystem services of urban agglomerations and explore its driving factors. In this study, Beijing, Tianjin and the Beijing-Tianjin Ring were selected as the study area. The experiments constructed an ecosystem service evaluation system for the study area by summarizing regional issues, calculated ecosystem services from 2000—2018, and also analyzed their spatial and temporal evolution characteristics. Then, the potential drivers were screened out by the ordinary least squares model of the experimental data and imported into the

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助(2021ZY33);国家林草局重点项目(2019132703,2020132109)

收稿日期:2021-11-20; 采用日期:2022-04-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangyunlu1986829@163.com

geographically weighted regression model for regression. Finally, the driving role of natural and social factors on ecosystem services is explored, through an analysis of geographically weighted regression results. Firstly, the ecosystem services of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration showed an upward and then downward trend from 2000 to 2018, reaching the highest value in 2015. Secondly, Spatially, the ecosystem services in the study area generally show the spatial differentiation characteristics of high value areas in the northern regions of Yanshan Mountains and Taihang Mountains, and low value areas in the dam area. At the same time, the evolution of ecosystem services spatially shows the boundary between Yanshan and Taihang Mountains, with the Yanshan and Taihang Mountains regions showing a trend of first weakening and then improving, while the northwest region shows an overall weakening trend and the southeast region gradually decreases from 2015 onward. Thirdly, Natural environment and socio-economic factors drive ecosystem services in descending order of strength: rainfall > soil sand content > population density > temperature > infrastructure density. Fourth, the population density, soil sediment concentration and infrastructure showed significantly negative correlation driving characteristics, while the rainfall showed significantly positive correlation driving characteristics, while the temperature showed negative correlation in the south and positive correlation in the north, with an increasing trend from southeast to northwest. Overall, by assessing the ecosystem services of the Beijing-Tianjin urban agglomeration, analyzing the analytical evolution characteristics of regional ecosystem services, and exploring the driving roles of regional natural and social factors on ecosystem services, this study provides scientific guidance and decision basis for the future ecological environmental protection and planning strategy formulation of the Beijing-Tianjin urban agglomeration.

Key Words: ecosystem services; spatial-temporal evolution; drivers; urban agglomeration; geographically weighted regression model

生态系统服务被广泛定义为直接或间接促进可持续人类福祉的生态特征、功能或过程,并按照生态系统对人类产生的直接影响分为供给、调节、文化服务,以及对维持生态系统的其他功能具有重要作用的支持服务^[1]。当前,伴随着生态系统服务对人类发展的重要性被广泛认识,探求城市群生态系统服务的演变规律与驱动因子关系逐渐成为学界的关注点之一。相关研究主要将生态系统服务驱动因素划分为自然因素和社会经济因素两方面。在自然环境方面,纪建万、闫国振、苏常红等学者研究发现,气候、土壤、高程等自然气候因素变化与生态系统服务价值演变存在明显相关^[2-4]。在社会经济方面,徐媛银,耿甜伟、璩路路等学者发现社会因素对生态系统服务价值有较大的影响,并在空间上与生态系统服务具有高度相关性^[5-8]。由此可见,自然环境因素和经济社会因素变化对生态系统服务有显著影响和密切联系。因此,识别城市群生态系统服务的主要驱动因素,可以为未来规划者在城市群发展过程中做出决策提供依据。

2018年11月中共中央、国务院印发《关于建立更加有效的区域协调发展新机制的意见》,提出“以北京、天津为中心引领京津冀城市群发展,带动环渤海地区协同发展”的目标。环京津地区在自然资源的提供、废气废物的处理等方面为京津发展提供支持,是京津地区生态安全的绿色屏障和重要生态缓冲地带,因此对京津及环京津六市进行生态系统服务评价和驱动因素分析,可以为未来协调该地区生态保护与社会经济发展提供支撑,并更好地促进京津冀一体化发展^[9-11]。

同时,为避免当前广泛使用的“基于单位服务功能价格的方法”和“基于单位面积价值当量因子的方法”分别存在的忽略生态系统服务在时空尺度上的内在丰富信息,不利于对生态系统保护的管理决策^[12-13]和可以转化为市场交易价格的生态系统服务指标较少,限制了对区域关键生态系统服务的评估^[14-15]的问题。本次研究在系统梳理研究区域的发展脉络的基础上,选取长时间跨度中的多个时间节点,并以当前京津及环京津六市面临的生态挑战作为研究指标构建符合区域特征的生态系统服务评价体系,生成生态系统服务综合指数。通过PCA-OLS-GWR空间统计分析,较为科学地分析研究时期内,生态系统服务演变的特征,辨析其发展的动态驱动机制。通过分析实现主要研究目标如下:(1)分析2000—2018年间生态系统服务的时空演变特

征;(2)构建自然环境因素和社会经济驱动因子指标体系,阐释各项驱动因子对生态系统服务演变的驱动机制;(3)结合政策导向提出区域生态系统服务优化提升路径。

1 实验数据与方法

1.1 研究区域与研究数据

本次研究将北京、天津以及环京津六市(承德、唐山、张家口、保定、沧州、廊坊)8个城市划定为研究区域,总面积16万 km^2 。该区域地处东经 $113^{\circ}40'—119^{\circ}19'$,北纬 $37^{\circ}29'—42^{\circ}37'$,位于黄河下游以北,北靠燕山山脉,南朝华北平原,西倚太行山,东临渤海湾,属于典型温带季风气候。地势由西北向东南逐渐倾斜,降水量自东南向西北递减,地貌类型和生态系统类型多样,从西北向东南依次分为坝上高原区、燕山和太行山区、京津保中心区、海岸海域区以及低平原区五大区域(图1)。2018年常住人口为7486.8万人,2018年GDP总值高达68081.46亿元,是中国北方地区经济发展、人口聚集的城市群,在中国经济社会发展中具有重要的战略地位。

研究数据包括基础地理信息数据、土地利用数据、遥感(NPP、NDVI)数据、数字高程(DEM)数据、气象数据、土壤属性数据、社会经济统计数据7类。基础地理信息数据及行政区划、土地利用数据、温度、降雨量等气象数据和土壤属性数据均来源于中国科学院资源环境科学数据中心(www.resdc.cn);遥感数据和高程数据来自国家地理信息空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>);人口等社会数据来源于2019年北京、天津及河北各市县的统计年鉴;基础交通设施POI矢量数据来自于世界数据地图(www.openstreetmap.org),以上数据分辨率均为 $1\text{km}\times 1\text{km}$ 。通过对比1998—2018年NDVI的平均值,根据突变点并结合研究区域的发展历程筛选出具有代表性的4个时间点——2000年、2005年、2015年和2018年,划分3个时期进行研究。

1.2 研究方法

相关学者的研究表明,研究区域近年来面临着植被减少、水土流失、水源匮乏、城市热岛、动物多样性等一系列问题^[16-19]。因此,本研究根据“千年生态系统评估”框架并依据当前研究区域生态系统的特征和面临的生态压力,从供给服务、调节服务、支持服务和文化服务4种服务类型出发,综合净初级生产力(NPP)、水土保持、固碳释氧、水源涵养、热岛缓解、生物多样性保护、游憩利用7种指标表征区域生态系统服务整体水平(表1)。通过ENVI遥感解译、地理信息叠加分析等技术进行生态系统服务评估。

1.2.1 净初级生产力(NPP)

净初级生产力(NPP)是绿色植物呼吸后所剩下的单位面积单位时间内所固定的能量或所生产的有机物质。公式如下:

$$NPP = GPP - R_a$$

式中,NPP单位为 $\text{g m}^{-2} \text{a}^{-1}$, R_a 表示自养呼吸的消耗量,GPP表示总初级生产量。

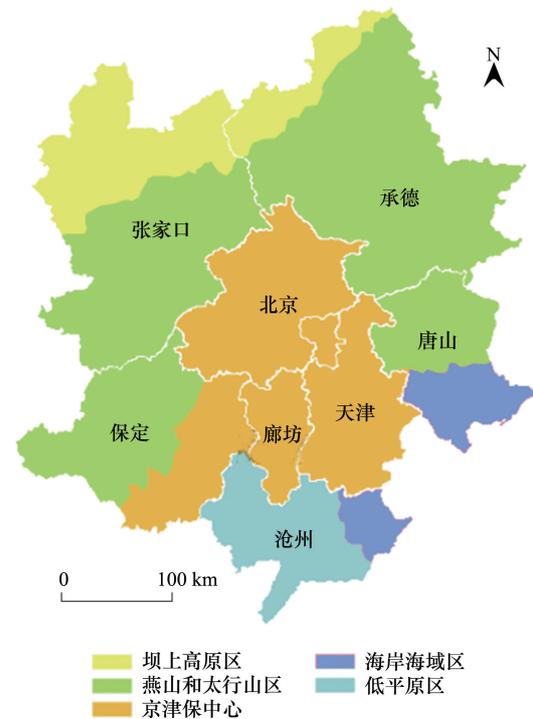


图1 研究区空间类型分区图

Fig.1 Spatial type zoning map of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration

表 1 生态系统服务评价指标

Table 1 Ecosystem services evaluation indicators

服务类型 Type of service	评价指标 Evaluation indicators
供给服务 Supply services	净初级生产力(NPP)
调节服务 Regulating services	水土保持、固碳释氧、水源涵养、热岛缓解
支持服务 Supporting services	生物多样性维护
文化服务 Cultural services	游憩利用

1.2.2 水土保持

水土保持是生态系统通过其结构与过程减少由于水蚀所导致的土壤侵蚀的作用。公式如下：

$$S_{\text{pro}} = \text{NPP}_{\text{mean}} \times (1-K) \times (1-F_{\text{slo}})$$

式中, S_{pro} 为水土保持服务能力指数, NPP_{mean} 为植被净初级生产力平均值, F_{slo} 为坡度因子, K 为土壤可蚀性因子。

1.2.3 固碳释氧

固碳释氧是生态系统通过绿色植物的光合作用进行氧气和二氧化碳的物质交换过程,生态空间每生产 1g 的植物干物质,可以固定 1.63g 的 CO_2 ,同时会释放出 1.2g 的 O_2 。公式如下：

$$G_v = 1.63R_c \times A \times \text{NPP}; G_0 = 1.19A \times \text{NPP}$$

式中, G_v 为植被年固碳量,单位为 g/d, G_0 为生态空间年释氧量, R_c 为 CO_2 中碳的含量,取值 27.27%, A 为生态空间面积 (hm^2), NPP 为植被净初级生产力平均值。

1.2.4 水源涵养

水源涵养是生态系统通过其特有的结构与水相互作用,对降水进行截留、渗透、蓄积,并通过蒸散发,实现对水流、水循环的调控。公式如下：

$$WR = \text{NPP}_{\text{mean}} \times F_{\text{sic}} \times F_{\text{pre}} \times (1-F_{\text{slo}})$$

式中, WR 为生态空间水源涵养服务能力指数, NPP_{mean} 为植被净初级生产力平均值, F_{sic} 为土壤渗透因子, F_{pre} 为平均降水量因子, F_{slo} 为坡度因子。

1.2.5 热岛缓解

热岛缓解是通过增加植被、水体及湿地等生态系统,减轻由于人为原因导致的城市温度高于周边地区的热岛效应。公式如下：

$$T_s = T_i + A(T_i - T_j) \times B$$

式中, T_s 为地表温度,单位为 $^{\circ}\text{C}/\text{a}$, T_i 和 T_j 为热通道 i 和 j 的亮度温度, A 和 B 为系数,由大气透过率和地表比辐射率等因子决定。

1.2.6 生物多样性维护

生物多样性维护是生态系统支撑服务的重要内容之一,旨在维持物种、基因多样性中发挥的作用。通过该项指标的评价,识别现状和未来不同区域承担生物多样性保护的能力强弱。公式如下：

$$S_{\text{blo}} = \text{NPP}_{\text{mean}} \times F_{\text{pre}} \times F_{\text{tem}} \times (1-F_{\text{alt}})$$

式中, S_{blo} 为生物多样性维护服务能力指数, NPP_{mean} 为植被净初级生产力平均值, F_{pre} 为平均降雨量, F_{tem} 为平均气温, F_{alt} 为海拔因子。

1.2.7 游憩利用

游憩娱乐为人类生活提供了休闲、娱乐与美学享受。通过对游憩资源、游憩设施、游憩区位三方面多个指标进行评价,判断生态系统文化服务的能力水平^[12]。公式如下：

$$S = \sum_i^n W_i \times X_i$$

式中, S 为游憩利用综合评价指数, W_i 为游憩因子等级值, X_i 为不同游憩因子权重值, n 为评价因子的个数。

1.3 生态系统服务综合指数

为避免同一类型服务因指标因子多而造成数值过高的问题,本次计算首先对上述 7 项服务指标进行最大值-最小值归一化,然后按照生态系统服务 4 大分类等权叠加后再次进行归一化,最终将四项服务指标累加获取生态系统服务综合指数,表征区域生态系统服务的总体水平。具体公式如下:

$$x_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

式中, y_{ij}, x_{ij} 为生态系统服务因子 i 的标准化数据和原始数据; x_{\max} 和 x_{\min} 分别为状态指数 j 的原始数据的最大值和最小值。

$$CIES = \sum_{i=1}^n ES_i$$

CIES 为生态系统服务综合指数; ES 为第 i 类生态系统服务的标准化结果; n 为 4。

1.4 因子筛选与相关性分析

1.4.1 普通最小二乘法(Ordinary Least Squares, OLS)

OLS 模型作为全局回归模型,常用于解释单一因变量与多个自变量之间的驱动关联。本研究将其作为筛选影响城市群生态系统服务相关因子的评价途径,计算生态系统服务价值与各项驱动因子基础回归关系,并进行因子筛选。计算公式如下:

$$y_i = \beta_0 + \sum_i \beta_i x_i + \varepsilon_i$$

式中, β_0 是常数项; β_i 为回归系数; ε_i 为随机误差项

1.4.2 地理加权回归(Geographical Weighted Regression, GWR)

在建立 OLS 模型的基础上,通过 GWR 模型建立嵌入空间加权函数的线性回归模型,用以探索研究对象在某一尺度下的空间变化关系及驱动因素。相比使用 OLS 模型进行回归分析,GWR 模型能够反映参数在不同空间的非平稳性,使变量间关系可以随空间位置变化,同时考虑空间对象的局部效应,其结果具有更高的准确性^[20-21]。其评价公式如下:

$$y_i = \beta_0(U_i, V_i) + \sum_{k=1}^n \beta_k(U_i, V_i) x_k(U_i, V_i) + \varepsilon_i$$

$$\beta_k(U_i, V_i) = (X^T W(U_i, V_i) X)^{-1} X^T W(U_i, V_i) y$$

$$W_{ij} = \exp\left(-\frac{d_{ij}^2}{h^2}\right)$$

式中, $\beta_{0(U_i, V_i)}$ 是 (U_i, V_i) 空间位置的地理加权回归截距, $\beta_{k(U_i, V_i)}$ 是 k 项自变量(驱动因子)在 (U_i, V_i) 空间位置的加权回归系数, $x_k(U_i, V_i)$ 为第 k 项自变量(驱动因子)在 (U_i, V_i) 空间位置的取值, ε_i 为算法残差, X^T 是自变量(驱动因子)的转置, $W(U_i, V_i)$ 是距离权重矩阵, h 为 AIC 准则的带宽,为空间 i 位置与空间 j 位置的距离。

2 研究结果

2.1 生态系统服务时空演变特征

对研究区域生态系统服务指数进行具体分析发现,4 类服务指数在各个时期表现出的特征各异(图 2),具体情况如下:1)供给服务指数在 2000—2018 年间总体上呈现从上升向平稳过渡的特征,并在 2015 年达到研究时期最大值 0.316。2)调节服务指数在 2000—2018 年间呈现波动逐渐增强的变化特征,在 2015 年达到

研究时期最高值 0.333 后并在 2018 年骤降至 0.292。3) 文化服务指数在 2000—2018 年间在总体上呈现先上升后下降末期数值高于初期的特征, 在 2005 年达到研究时期最高值 0.057。4) 支持服务指数在 2000—2018 年间变化幅度较大, 总体呈现先上升后下降再上升的特征。在 2005 年达到研究时期最高值 0.057 并在 2015 年降至研究时期最低值 0.020, 整体波动较大。

通过对研究区域在 2000 年、2005 年、2015 年、2018 年生态系统服务综合指数进行综合量化分析, 发现研究区域生态系统服务综合指数呈现出先上升后下降、研究期末生态系统服务综合指数略高于研究初期的总体特征。

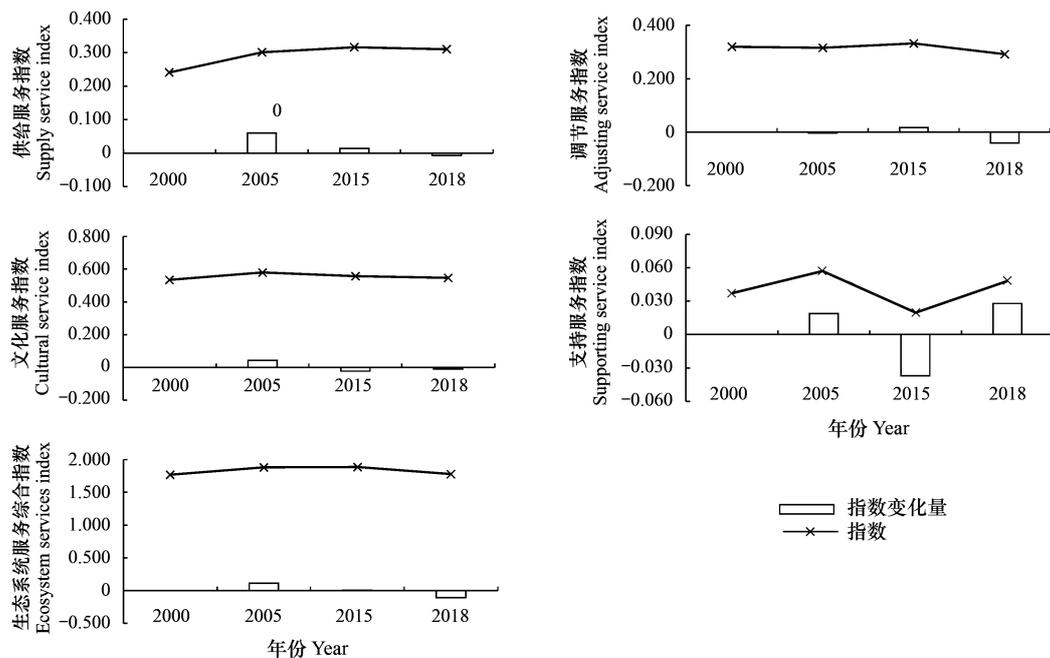


图 2 2000—2018 年生态系统服务指数变化图

Fig. 2 Map of changes in ecosystem service index from 2000 to 2018

通过对 4 类生态系统服务指数在空间变化上进行研究后发现(图 3): 1) 供给服务指数在研究期间内呈现以太行山燕山山脉为界东南、西北两侧分别以“增强-减弱-增强”和“减弱-增强-减弱”的间隔规律差异发展的总体特征。2) 调节服务指数在京津保中心区和燕山区域内逐渐增强, 但在坝上高原和西部太行山区呈现相反演变特征, 而海岸海地区、低平原区以 2015 年为界, 先增强后降低。3) 文化服务指数在研究期间, 以 2005 年为界, 燕山和太行山区、京津保中心区、低平原区呈现先增强后减弱变化趋势。海岸海地区则呈现相反的状态。坝上高原区在研究期间变化趋势不明显。4) 支持服务指数, 除了在太行山区呈现先增强后减弱再增强的变化波动现象外, 整体变化不明显。

生态系统服务综合指数的分级方法是在地理信息系统软件中将 4 类服务做叠加处理, 得到生态系统服务综合指数空间分布。同时, 进一步采用自然间断点分类对其进行 5 级分类。通过对在研究期间内的生态系统服务综合指数进行评估得出(图 4): 研究期间内, 总体上燕山山脉及太行山山脉北部区域为研究区域生态系统服务综合指数的高值区域, 坝上区域为低值区。生态系统服务综合指数波动主要集中在太行山和燕山区, 燕山区域生态系统服务综合指数在 2000—2015 年间呈下降的趋势, 2015—2018 年间呈上升的趋势, 而太行山区域在整个研究时期呈现下降趋势。

2.2 构建驱动模型

为了探索自然社会因素与生态系统服务之间的关系, 本研究在可获取的数据范围内, 结合研究区域实际

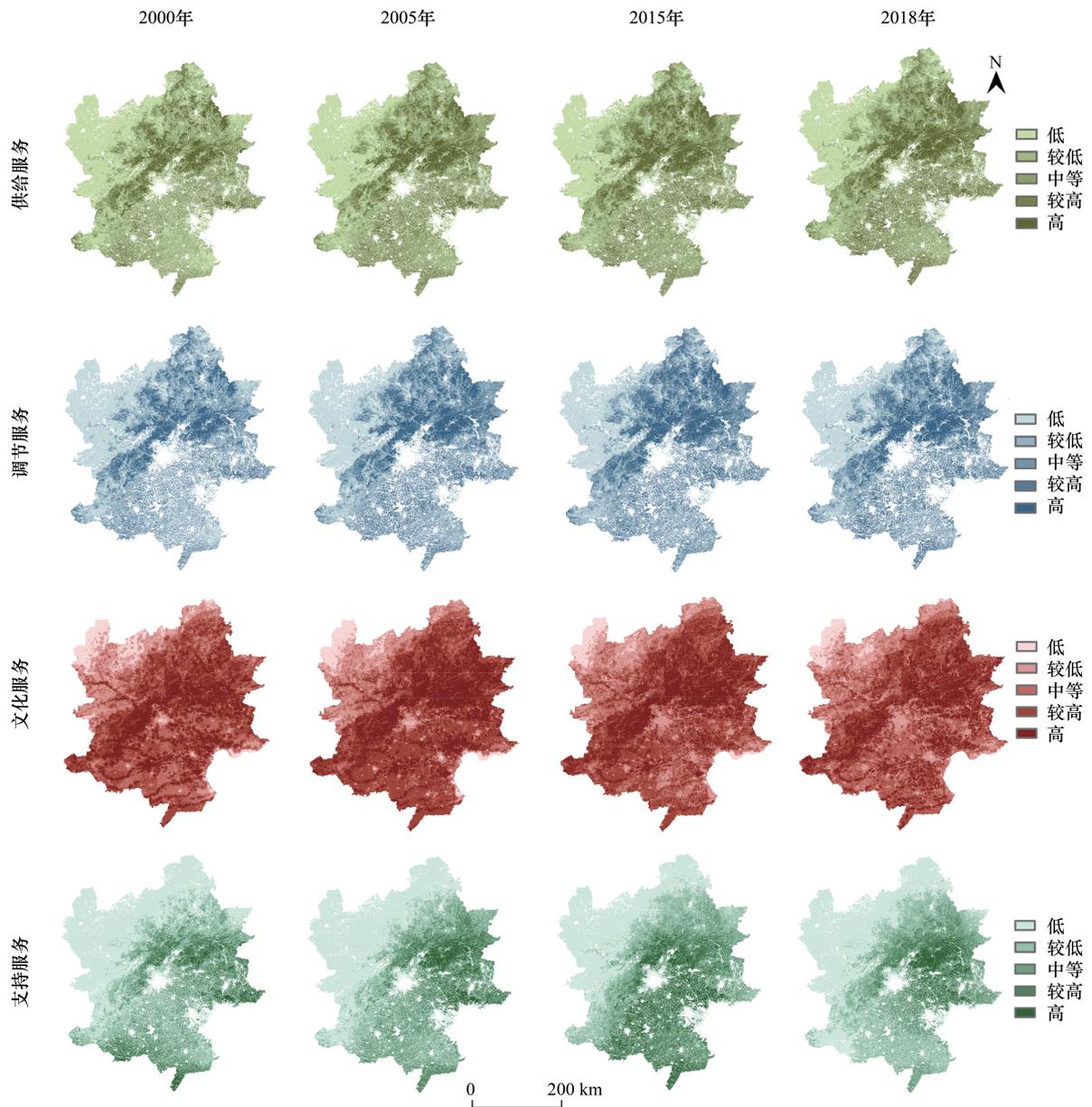


图3 生态系统服务指数空间分布图

Fig.3 Spatial distribution of ecosystem service index

情况^[22—24]和相关研究成果^[25—28],最终选择涵盖气候、地形土壤、人类活动及土地利用5类共8项因子代表区域自然地理特征和社会经济发展的特征(表2)。这些因子作为研究区域生态系统服务的预选驱动变量,并确定最邻近状态的2018年进行驱动要素分析评估。为避免自变量出现明显的共线性问题,导致因子对模型的解释力出现偏差,研究以拟合优度大于0.5、*P*值边界0.05、冗余检验小于7.5作为筛选条件,运用OLS模型筛选出5个驱动因子,即降雨量、温度、土壤含沙量、人口密度和基础设施密度。在对比OLS模型与GWR模型的基础上(表3),将驱动因子导入GWR模型中进行地理空间加权回归分析。模拟结果在ArcGIS 10.6软件中进行空间可视化,获得的GWR模型拟合结果显示图(图5)。在拟合优度(R^2)模拟结果上,除保定南部极少部分区域外整体拟合优度均高于0.6,平均值为0.655,模型效率可信;在拟合*t*值模拟结果上,整体区域模型*t*值范围均在-2.58—2.58内,模型结构可信。

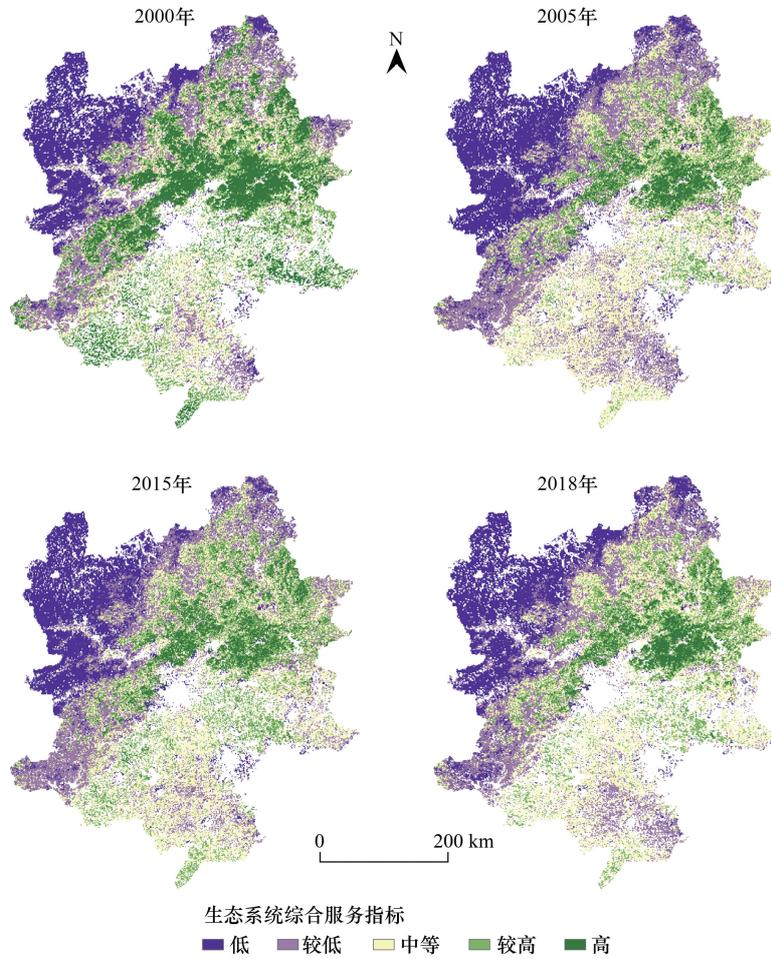


图 4 生态系统服务综合指数空间分布及变化

Fig.4 Spatial distribution and change of ecosystem service index

表 2 驱动因子统计分析表

Table 2 Table of ecosystem service function intensity evaluation indicators table of driving factors statistical analysis table

驱动因子 Driving factor		平均因子 Average value	标准差 Standard deviation	最大值 Maximum value	最小值 Minimum value
自然环境因子 Natural Environmental factor	高程/m	610.041	573.780	2836.000	-51.000
	土壤/%	50.768	7.282	94.000	14.000
	降雨量/mm	583.600	463.283	862.300	388.800
	温度/°C	12.200	14.600	39.900	-25.600
社会经济因子 Socioeconomic factor	人口密度/(人/km ²)	1328.673	3752.553	2354.762	120.886
	已建成区面积比例/%	0.0973	0.735	0.962	0.004
	林地面积比例/%	0.115	0.437	0.726	0.001
	基础设施密度/(个/km ²)	0.573	0.952	7.736	0.002

2.3 驱动结果分析

全局回归结果表明(表 4),各因子的驱动强度排序如下:降雨量(5.244405)>土壤含沙(-2.185510)>人口密度(-1.009130)>温度(0.788722)>基础设施密度(-0.649611)。由此可见,与社会经济因素相比,自然环境因素对研究区域生态系统服务能力影响更大。GWR 回归结果如图 6 所示。在自然驱动因子中,降雨量对生态系统服务的驱动影响呈现明显的正相关性,驱动作用强度从承德西北部和张家口东南部山地向南呈现递

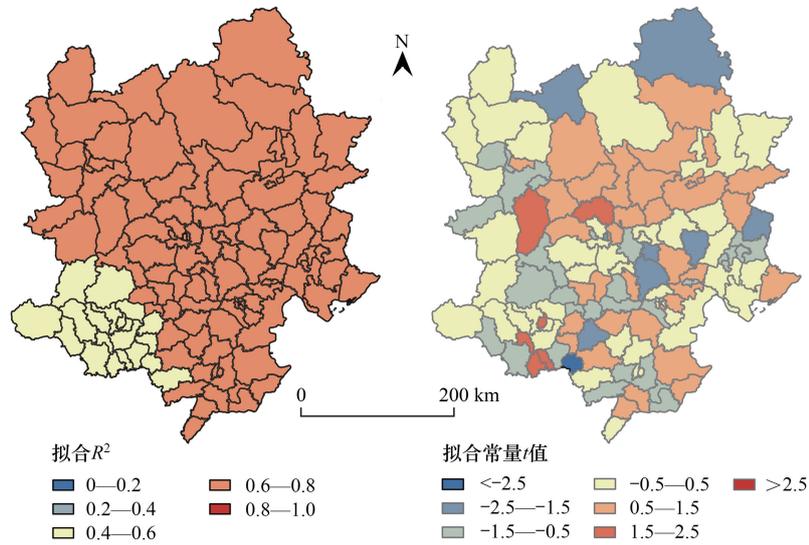


图 5 地理加权回归模型拟合常量 R^2 和 t 值分布图

Fig.5 Geographically weighted regression model fitting constants R^2 and t -value distribution

表 3 基于探索性回归的最小二乘法 (OLS) 模型参数因子筛选结果表

Table3 Results table of Ordinary Least Squares (OLS) model parameter factor screening based on exploratory regression

驱动因子 Driving factor		初始模型 Initial model		选模型 Filtered model	
		平均值 Average value	标准差 Standard deviation	概率/稳健概率 Probability/robust probability	概率/稳健概率 Probability/robust probability
自然环境因子 Natural Environmental factor	高程	0.15729	0.23535		
	土壤(含沙量)	0.44787	0.98189	* / *	* * * / * * *
	降雨量	0.31090	0.14830	* * / * *	* * * / * * *
社会经济因子 Socioeconomic factor	温度	0.74129	0.23290	* / *	
	人口密度	0.13380	0.03808	* * / * *	* * * / * * *
	已建成区面积比例	0.69835	0.62731		
	林地面积比例	0.54862	0.035521		
	基础设施密度	0.05712	0.18696	* / *	* * * / * * *

、 *、* * * 分别为 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 、 $P < 0.001$ 且初始模型与筛选后模型均满足 $R^2 > 0.6$

表 4 全局回归结果的计算结果

Table 4 Calculation results of global regression result

自变量 Independent variables	估计值 Estimate	标准误 Standard Error	回归系数 t t (Est/SE)
土壤(含沙量) Soil (sediment concentration)	-0.352587	0.161330	-2.185510
降雨量 Rainfall	0.571081	0.108893	5.244405
温度 Temperature	0.175874	0.222986	0.788722
人口密度 Population density	-0.612244	0.606705	-1.009130
基础设施密度 Infrastructure density	-0.097709	0.150411	-0.649611

减的趋势。温度对生态系统服务驱动影响呈现由北向南从正相关向负相关过渡的趋势,正向驱动作用在保定及廊坊以北逐渐增强,在承德则出现最为明显的正驱动作用,而在以南地区呈现负相关。土壤含沙量与研究区域生态系统服务整体呈负相关性,土壤含沙量的增加会给生态系统服务带来负面影响,且从北向南逐渐增强。南部地区保定、沧州市较中北部城市呈现的负驱动作用最为明显。人口密度和基础设施密度 2 项社会驱

动因素都对生态系统服务驱动呈现负相关。人口的增长会给生态系统服务能力带来负面影响,且从东北向西南逐渐增强,南部地区保定、沧州市较中北部城市呈现出更为明显的负驱动作用。基础设施密度对生态系统服务的负向驱动作用由太行山脉部向东南和东北方向逐渐增强,以坝上高原区及海岸海域区负向驱动作用最为明显。

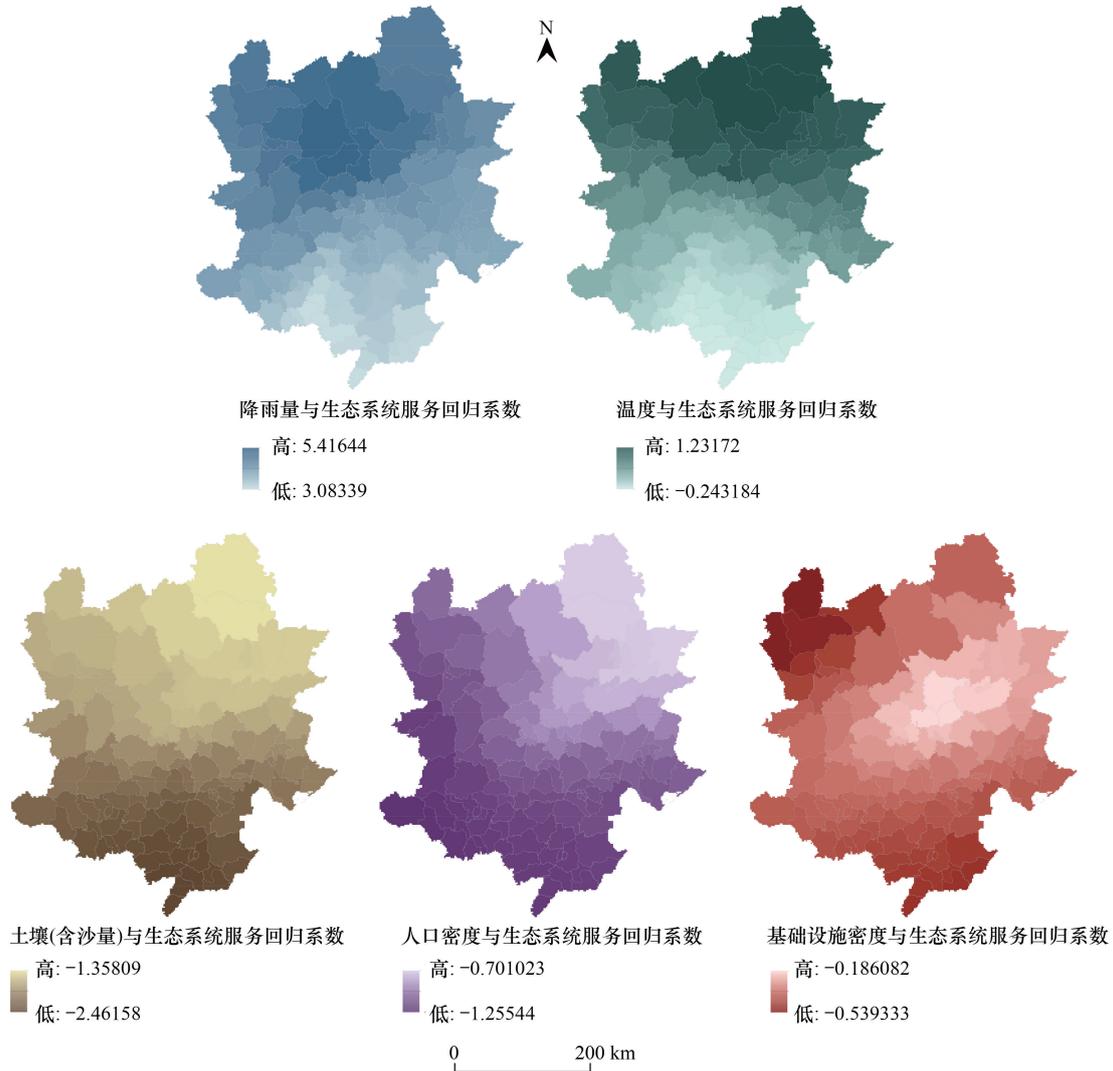


图6 各因子与生态系统服务回归系数空间分布图

Fig.6 Spatial distribution diagram of regression coefficients between various factors and ecosystem service

3 讨论

3.1 自然-社会因子对生态系统服务的驱动作用分析

人为因素和自然因素是生态系统变化的主要驱动力因素,在长时间跨度上,自然因素对生态系统服务的影响是巨大的,而在短时间内,生态系统服务则更易受人为因素影响^[29]。京津及环京津六市是京津冀城市群中人口最为稠密、土地利用方式复杂、经济生态社会胁迫效应显著的区域。在研究期间内,该区域的生态系统服务呈现明显且明确的空间分异,即在空间维度上,生态系统服务的高值区域集中在燕山山脉区域,而生态系统服务低值区域集中在坝上高原地区。本研究运用“OLS 降维模型+GWR 回归模型”探索了驱动因素对生态系统服务的空间异质性影响^[30-31],使得研究结果更加全面且符合区域实际。GWR 回归结果表明,由于研究

区域位于属于中国半干旱向半湿润过渡的地带北方农牧交错带,水资源较为匮乏,生态本底较差^[32]。因此,降雨量对该区域生态系统服务的正向演化具有积极作用,并对较为干旱的坝上高原区域表现出更强的驱动力。同时温度也是限制植物生长的主要因素^[33],由于太行山区及坝上高原区气候寒冷,而南部平原地区较为温暖,所以温度对生态系统服务的正向驱动作用由南向北增强。其次,土壤的颗粒组成及含沙量是影响土壤可蚀性差异的主要因素。土壤中其含沙量越大,土壤可蚀性越高,易发生侵蚀^[34]。而在研究区域内,南部地区用地性质以农田为主,植被单一加之人类不合理的生产活动,导致土壤养分流失和土地退化以及水土流失等生态问题,从而影响生态系统的稳定性^[35-37]。社会因子对生态系统服务的影响也较为明显,人口密度和人类活动强度的增加对生态系统产生较强的干扰和破坏作用^[38-39]。人口增长会增加对周边自然资源需求和改变土地覆盖变化,对周边生态环境造成不利影响^[31]。本研究区域北部山地城市人口密度较小,基础设施建设量也相对较少,对自然系统的破坏较小。而中部南部平原城市由于北京首都功能疏解导致的人口外溢和人口的高流动性,使该区域人口聚集,对生态系统服务的负驱动作用更为显著。由此可见,人类活动多集中在易于建设的平原地区,社会因素对平原的生态系统服务负向驱动力明显高于山区与高原地区。

3.2 生态系统服务时空演变分析

本研究通过总结研究区域当前面临的关键挑战,选取确定了净初级生产力(NPP)、水土保持、固碳释氧、水源涵养、热岛缓解、生物多样性保护、游憩利用7种评价指标,生成该区域生态系统服务综合指数,与相关学者对该区域的生态系统服务时空分布的研究结果相似^[28],但由于在指标选取方面存在差异,生态系统服务的空间分布也存在一定的差异,同时相比与运用生态系统服务价值时空分布,该实验结果可以更加准确地反应时空尺度上的内在丰富信息。通过对2018年研究区域生态系统服务驱动因子的分析,结合研究区2000—2018年生态系统服务指标时空演变的特征,对近20年的生态系统服务的驱动因子作用机制进行分析:2000—2015年间,退耕还林等生态治理工程、京津风沙源治理工程等生态治理工程在研究区域内不断推进。这些生态保护项目注重地表覆盖的绿化,植被覆盖的明显提升,能够降低土壤侵蚀,促进水土保持服务、固碳等服务能力的提升^[40-41]。2015年,中共中央政治局召开会议,审议通过《京津冀协同发展规划纲要》,为京津冀地区注入了新的发展活力。在这4年间,中国政府开始大规模推进京津冀城市群一体化发展战略,开展一系列的基础设施建设活动,改变了区域土地利用的方式,造成了绿地面积的减少和生态空间的破碎化。这无疑加大对生态资源的消耗,对当地的降雨、温度等自然环境因子产生了影响,造成生态系统服务能力的退化^[42-43],也使得研究区域生态系统服务总体则呈现下降的趋势。因此在未来该区域发展的过程中,应与人口密度、基础设施建设相关的政策作为必要的辅助行动,来维护区域的生态系统健康。

3.3 生态资源与空间管控优化策略

社会与生态是相辅相成的,二者只有相互协调达到良好的耦合状态,才能实现研究区域生态保护和社会发展的双重目标。因此,未来应该依据分区规划,因地制宜的采取有针对性的生态资源与空间管控优化策略,并积极推动生态补偿体系建设,以实现区域协调发展^[44-45]。在京津保中心区,通过疏解非必要的首都功能,控制人口聚集、城市扩张来减弱对周边生态系统的影响,并适当增加生态用地比重。在燕山和太行山区内应继续开展一系列的生态修复工程。在保护生物多样性的前提下,可以适当促进文旅产业发展,增加当地收入。在坝上高原区,受到降雨等影响较大,且生物多样性低,应通过增加植被覆盖、保护河流,增强该区域的水源涵养和地表蓄水能力,提升区域生物多样性^[46]。在低平原区应关注土壤沙化问题,合理开发水资源,保护生态系统免受退化^[47]。

4 结论

由于城市化进程的加快,人类活动极大地改变了城市群的生态系统服务能力。本研究选择以2000—2018年近20年的长时间跨度,探索生态系统对研究区域的功能反馈效益。并探讨了生态-社会驱动因子与生态系统服务的关系,揭示其在空间尺度上对生态系统服务的影响程度与作用机制。结果表明:1)2000—

2018年,研究区域的生态系统服务综合指数呈现出先上升后下降,在2015年达到最高值。2)2000—2018年生态系统服务综合指数呈现明显的空间分异特征,以燕山和太行山为界,燕山和太行山区域呈现先减弱后提升的趋势,西北区域则整体呈现减弱趋势,东南区域从2015年起逐渐降低。3)自然-社会因子对生态系统服务的驱动作用从强到弱排列依次是:降雨量>土壤含沙>人口>温度>基础设施4)。在驱动因子中,分析结果表明:人口密度、土壤含沙量、基础设施密度呈较为明显的负相关驱动特征,降雨量呈较为明显的正相关驱动特征。温度呈南部负相关,北部正相关。同时,本文还依据实验结果提出了相应的优化策略,为研究区域实现生态系统可持续管控提供有价值的政策指引。

参考文献 (References):

- [1] MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. Ecosystems and human well-being: a framework for assessment. Report of the Conceptual Framework Working Group of the Millennium Ecosystem Assessment. Island Press: Washington, D.C., USA, 2005; 4-7.
- [2] Ji J W, Wang S X, Zhou Y, Liu W L, Wang L T. Studying the Eco-Environmental Quality Variations of Jing-Jin-Ji Urban Agglomeration and Its Driving Factors in Different Ecosystem Service Regions From 2001 to 2015. IEEE Access, 2020, 8: 154940-154952.
- [3] 闫国振, 张征, 梁康, 姜华君. 鄂尔多斯高原泊江海子流域土地利用动态变化及驱动因素分析. 中国生态农业学报, 2017, 25(11): 1693-1706.
- [4] 苏常红, 王亚璐. 汾河上游流域生态系统服务变化及驱动因素. 生态学报, 2018, 38(22): 7886-7898.
- [5] 徐媛银, 郭泓, 薛达元, 孙思琦. 赣南地区土地利用格局及生态系统服务价值的时空演变. 生态学报, 2019, 39(6): 1969-1978.
- [6] 耿甜伟, 陈海, 张行, 史琴琴, 刘迪. 基于 GWR 的陕西省生态系统服务价值时空演变特征及影响因素分析. 自然资源学报, 2020, 35(7): 1714-1727.
- [7] 璩路路, 刘彦随, 周扬, 李裕瑞. 罗霄山区生态用地时空演变及其生态系统服务功能的响应——以井冈山为例. 生态学报, 2019, 39(10): 3468-3481.
- [8] 孟孟, 张运, 支俊俊, 丁玥, 王爱芳, 沈豪. 快速城市化背景下生态系统服务价值时空演变——以南京市为例. 水土保持通报, 2021, 41(3): 296-304.
- [9] 李超, 杜哲, 陈亚恒, 张利, 许峰. 环京津地区土地生态服务价值时空分异特征. 土壤通报, 2015, 46(1): 42-47.
- [10] 赵青, 于水潇, 夏书培, 许峰. 环京津地区耕地利用系统健康评价研究. 土壤通报, 2017, 48(2): 285-291.
- [11] 刘军卫, 于水潇, 王印传, 陈红月, 崔欣. 基于生态资产价值的环京津地区生态经济系统协调度研究. 水土保持研究, 2018, 25(4): 324-329.
- [12] 陈峰, 李红波, 张安录. 基于生态系统服务的中国陆地生态风险评价. 地理学报, 2019, 74(3): 432-445.
- [13] 袁周炎妍, 万荣荣. 生态系统服务评估方法研究进展. 生态科学, 2019, 38(5): 210-219.
- [14] Verkerk P J, Mavsar R, Giergiczny M, Lindner M, Edwards D, Schelhaas M J. Assessing impacts of intensified biomass production and biodiversity protection on ecosystem services provided by European forests. Ecosystem Services, 2014, 9: 155-165.
- [15] McHale M R, Beck S M, Pickett S T A, Childers D L, Cadenasso M L, Rivers L, Swemmer L, Ebersohn L, Twine W, Bunn D N. Democratization of ecosystem services—a radical approach for assessing nature's benefits in the face of urbanization. Ecosystem Health and Sustainability, 2018, 4(5): 115-131.
- [16] 闫章美, 周德成, 张良侠. 我国三大城市群地区城市和农业用地地表热环境效应对比研究. 生态学报, 2021, 41(22): 8870-8881.
- [17] 赵安周, 裴韬, 曹森, 张安兵, 范倩倩, 王金杰. 京津冀城市扩张对植被和地表城市热岛的影响. 中国环境科学, 2020, 40(4): 1825-1833.
- [18] 迟妍妍, 许开鹏, 王晶晶, 张丽苹. 京津冀地区生态空间识别研究. 生态学报, 2018, 38(23): 8555-8563.
- [19] 徐卫华, 杨琰瑛, 张路, 肖焱, 王效科, 欧阳志云. 区域生态承载力预警评估方法及案例研究. 地理科学进展, 2017, 36(3): 306-312.
- [20] 李效文, 田甜, 王敏增, 贾黎明, 杨宏伟. 游憩者对北京风景游憩林营建需求的研究. 北京林业大学学报: 社会科学版, 2009, 8(3): 45-49.
- [21] 马勇, 黄智洵. 长江中游城市群绿色发展指数测度及时空演变探析——基于 GWR 模型. 生态环境学报, 2017, 26(5): 794-807.
- [22] 庞瑞秋, 腾飞, 魏冶. 基于地理加权回归的吉林省人口城镇化动力机制分析. 地理科学, 2014, 34(10): 1210-1217.
- [23] 邓煌炜, 廖振良. 生态系统服务驱动因素及供需研究进展. 环境科技, 2020, 33(1): 74-78.
- [24] Liu C L, Wang T, Guo Q B. Factors aggregating ability and the regional differences among China's urban agglomerations. Sustainability, 2018, 10(11): 4179.
- [25] Dai X, Wang L C, Huang C B, Fang L L, Wang S Q, Wang L Z. Spatio-temporal variations of ecosystem services in the urban agglomerations in

- the middle reaches of the Yangtze River, China. *Ecological Indicators*, 2020, 115: 106394.
- [26] Gao J, Wang L C. Embedding spatiotemporal changes in carbon storage into urban agglomeration ecosystem management—A case study of the Yangtze River Delta, China. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 237: 117764.
- [27] Luo Q L, Zhou J F, Li Z G, Yu B L. Spatial differences of ecosystem services and their driving factors; a comparison analysis among three urban agglomerations in China's Yangtze River Economic Belt. *Science of the Total Environment*, 2020, 725: 138452.
- [28] Shen J S, Li S C, Liu L B, Liang Z, Wang Y Y, Wang H, Wu S Y. Uncovering the relationships between ecosystem services and social-ecological drivers at different spatial scales in the Beijing-Tianjin-Hebei region. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 290: 125193.
- [29] 刘浩, 孙丽慧, 吕文魁, 舒昶, 张惠远. 基于土地利用变化的洱河流域生态系统服务价值评估与变化分析. *生态经济*, 2022, 38(1): 147-152.
- [30] Brunson C, Fotheringham A S, Charlton M E. Geographically weighted regression; a method for exploring spatial nonstationarity. *Geographical Analysis*, 1996, 28(4): 281-298.
- [31] Clement F, Orange D, Williams M, Mulley C, Epprecht M. Drivers of afforestation in Northern Vietnam: assessing local variations using geographically weighted regression. *Applied Geography*, 2009, 29(4): 561-576.
- [32] 路洁, 刘晶, 刘明阳, 曹永强, 李玲慧, 宁月. 近 55 年京津冀地区降水多尺度分析. *水利水运工程学报*, 2020(6): 23-31.
- [33] 徐勇, 黄雯婷, 靖娟利, 张占奕, 李明杰, 欧昱贤, 卢梦缘, 窦世卿. 京津冀地区植被 NDVI 动态变化及其与气候因子的关系. *水土保持通报*, 2020, 40(5): 319-327.
- [34] 仲亚婷, 张文太, 李建贵, 黄俊华, 张佩佩, 张少博. 用人工模拟降雨研究不同土壤类型的产沙特征. *安徽农业大学学报*, 2017, 44(3): 465-470.
- [35] Arnold S, Lindner S, Lee B, Martin E, Kettering J, Nguyen T T, Koellner T, Ok Y S, Huwe B. Conventional and organic farming: Soil erosion and conservation potential for row crop cultivation. *Geoderma*, 2014, 219/220: 89-105.
- [36] Park S, Oh C, Jeon S, Jung H, Choi C. Soil erosion risk in Korean watersheds, assessed using the revised universal soil loss equation. *Journal of Hydrology*, 2011, 399(3/4): 263-273.
- [37] Borrelli P, Panagos P, Märker M, Modugno S, Schütt B. Assessment of the impacts of clear-cutting on soil loss by water erosion in Italian forests: First comprehensive monitoring and modelling approach. *CATENA*, 2017, 149: 770-781.
- [38] 全诗凡. 基于区域产业链视角的区域经济一体化——以京津冀地区为例[D]. 天津: 南开大学, 2014.
- [39] 王纪伟, 刘康, 瓮耐义. 关中地区人类活动对生态系统胁迫变化影响评估. *安徽农业科学*, 2014, 42(11): 3326-3329.
- [40] 王亚明, 王江, 余涛, 张茜. 基于京津风沙源治理工程的林业生态工程建设效果实证分析. *林业经济*, 2017, 39(7): 46-50, 83.
- [41] Xiao R, Lin M, Fei X F, Li Y S, Zhang Z H, Meng Q X. Exploring the interactive coercing relationship between urbanization and ecosystem service value in the Shanghai-Hangzhou Bay Metropolitan Region. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 253: 119803.
- [42] 郑华, 欧阳志云, 赵同谦, 李振新, 徐卫华. 人类活动对生态系统服务功能的影响. *自然资源学报*, 2003, 18(1): 118-126.
- [43] 白晓航, 赵文武, 尹彩春. 稳态转换视角下生态系统服务变化过程与作用机制. *生态学报*, 2022(15): 1-12.
- [44] 迟妍妍, 许开鹏, 王晶晶, 张丽苹. 新型城镇化时期京津冀地区生态环境分区管控框架. *环境保护*, 2015, 43(23): 63-65.
- [45] 何永, 赵丹, 贺健. 京津冀区域生态环境问题及其城乡规划对策. *城市与区域规划研究*, 2015, 7(3): 66-86.
- [46] 赵玉峰, 罗专溪, 于亚军, 陈迎辉, 张树刚, 张清华. 京津冀西北典型区域地下水位时空演变及驱动因素. *自然资源学报*, 2020, 35(6): 1301-1313.
- [47] 李立平, 邢维芹, 成永霞, 邱坤艳, 赵浩然, 武晓龙. 华北平原中部典型农区不同土地利用方式下的土壤性质比较. *土壤通报*, 2020, 51(6): 1275-1281.