DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.06.023 CSTR:32311.14.rswc.2026.06.023
程静, 王鹏, 孙会, 等. 宁夏荒漠草原区生态系统服务时空演变及其影响因素研究[J]. 水土保持研究,2026,33(6):384-394.
Cheng Jing, Wang Peng, Sun Hui, et al. Spatiotemporal evolution and influencing factors of ecosystem services in desert steppe region of Ningxia[J]. Research of Soil and Water Conservation,2026,33(6):384-394.

宁夏荒漠草原区生态系统服务时空演变及其影响因素研究

程 静[1], 王 鹏[2], 孙 会[3], 宋小龙[4]
(1.宁夏大学 林业与草业学院, 银川 750021; 2.宁夏大学 地理科学与规划学院, 银川 750021;
3.陕西省环境科学研究院, 西安 710061; 4.宁夏师范大学 资源环境与生命科学学院, 宁夏 固原 756000)

摘 要:[目的]探明宁夏荒漠草原区生态系统服务时空演变格局及其权衡关系与影响因素,为区域生态系统科学管理以及黄河流域生态保护与高质量发展先行区建设提供科学依据。[方法]以宁夏荒漠草原区为例,在量化1990—2020年生态系统服务的基础上,采用均方根误差计算生态系统服务权衡强度,借助地理探测器和时空地理加权回归模型揭示了其关键影响因素的时空分异特征。[结果](1)1990—2020年宁夏荒漠草原区碳储量、生境质量以及土壤保持服务分别增加0.84%,2.73%和34.96%,其余各类生态系统服务呈不同程度的下降态势。(2)生态系统服务权衡强度呈现出先增后减的波动增加趋势,增幅约2.23%,空间分布上以较高等级分布区为主。(3)自然因素对荒漠草原区生态系统服务的影响远大于社会经济因素,但其影响程度有所弱化,而自然因素与社会经济因素的交互作用显著增强了其空间分异特征。[结论]受自然和社会经济因素的影响,荒漠草原区生态系统服务供给能力较低,权衡强度较大,未来应持续推进草原区生态保护与修复工程,统筹推进山水林田湖草沙系统治理,以提高草地生态功能及其稳定性。

关键词:生态系统服务; 权衡强度; 地理探测器; 时空地理加权回归; 宁夏荒漠草原区
中图分类号:X171.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-3409(2026)06-0384-11

Spatiotemporal evolution and influencing factors of ecosystem services in desert steppe region of Ningxia

Cheng Jing[1], Wang Peng[2], Sun Hui[3], Song Xiaolong[4]
(1.*School of Forestry and Grassland Science, Ningxia University, Yinchuan* 750021, *China*;
2.*School of Geography and Planning, Ningxia University, Yinchuan* 750021, *China*; 3.*Shaanxi Provincial Academy of Environmental Science, Xi'an* 710061, *China*; 4.*College of Resources, Environment and Life Sciences, Ningxia Normal University, Guyuan, Ningxia* 756000, *China*)

Abstract: [**Objective**] This study explores the spatiotemporal evolution patterns of ecosystem services in the desert steppe region of Ningxia, along with their trade-off relationships and influencing factors, to provide a scientific basis for the management of regional ecosystems and for the construction of a pilot zone for ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin. [**Methods**] Taking the desert steppe region of Ningxia as an example, and based on quantified ecosystem services from 1990 to 2020, the root mean square error was used to calculate the strength of ecosystem service trade-offs, and the geodetector and geographically and temporally weighted regression models were used to reveal the spatiotemporal differentiation characteristics of key influencing factors. [**Results**] (1) From 1990 to 2020, carbon storage, habitat quality, and soil conservation services in the desert steppe region of Ningxia increased by 0.84%, 2.73%, and 34.96%, respectively, while

收稿日期:2025-12-03 **修回日期:**2026-01-05 **接受日期:**2026-01-21
资助项目:宁夏自然科学基金项目"宁夏荒漠草原区草地生态系统服务评估及多尺度优化研究"(2025AAC050019)
第一作者:程静(1995—),女,宁夏固原人,博士研究生,主要从事草地生态与管理研究。E-mail:958830559@qq.com
通信作者:王鹏(1993—),男,内蒙古阿拉善人,博士,副教授,主要从事生态地理与区域可持续发展研究。E-mail:nxdxwp24@nxu.edu.cn.

other ecosystem services decreased to different degrees. (2) The ecosystem service trade-off intensity showed a fluctuating trend characterized by an initial rise followed by a decline, with an increase of about 2.23%, and the spatial distribution was mainly dominated by areas with relatively high levels. (3) Natural factors had a much greater influence on ecosystem services in the desert steppe region than socio-economic factors, but the degree of their influence weakened, while the interaction between natural factors and socio-economic factors significantly enhanced the spatial differentiation of ecosystem services. [**Conclusion**] Under the influence of natural and socio-economic factors, the ecosystem service supply capacity of the desert steppe region is relatively low and the trade-off intensity is high. In the future, continuous efforts should be made to promote grassland ecological protection and restoration projects, and to coordinate the systematic management of mountains, rivers, forests, farmlands, lakes, grasslands, and deserts, thereby improving the ecological functions of grassland and its stability.

Keywords: ecosystem services; trade-off intensity; geodetector; geographically and temporally weighted regression; desert steppe region of Ningxia

生态系统服务是人类直接或间接从生态系统中获得的所有惠益,作为连接自然环境与人类社会的桥梁和纽带,其可持续供给对人类福祉与社会可持续发展至关重要[1-2]。然而,随着社会经济的快速发展以及人类活动的增强,引起全球土地利用格局和气候的变化,全球超过 75% 的陆地生态系统受到不同程度的人类干扰[3],严重威胁到了人类福祉的提升以及区域生态安全[4]。因此,揭示区域生态系统服务的时空演变特征,阐明其驱动机制,并提出精准的生态系统管理策略,已成为当前生态学、地理学等学科研究与实践亟需解决的核心问题。

目前,国内外关于生态系统服务评估主要采取价值量和物质量两种评估方法[5],其中价值量评估法是基于 Costanza 等[1]提出的价值系数,结合区域生态系统面积对不同生态系统类型进行量化评估,该方法虽便于宏观比较,但其未考虑自然过程和人类活动对生态服务的动态影响,属于静态研究,难以有效刻画生态系统服务的时空异质性,在支撑具体管理决策时存在一定的局限性[6-7]。而物质量评估法主要通过实地调查或构建评价指标体系等方法进行量化评估,该方法虽具有较高的准确性,但其成本高昂、实施周期长,多适用于样点或小尺度研究[8-9],难以推广至流域或区域等大尺度,也难以实现长时间序列的连续评估[10]。随着地理信息技术与生态模型的发展与应用,基于遥感数据的模型方法为在大尺度上开展长时间序列的生态系统服务评估提供了有力工具[8]。其中,InVEST 模型通过“供应-服务-价值”框架将生产函数与人类福祉联系起来,使用生产函数来定量评估多个生态系统服务,显著提升了生态系统服务评估结果的准确性和空间异质性的可视化能力,已成为该领域广泛应用的主流模型之一[11]。国内外学者基于 InVEST 模型对区域、流域、省市县等[12-14]不同尺度下农田、草地、森林以及湿地等[15-18]多种生态系统类型的生态系统服务进行了综合评估与模拟研究,深化了对生态系统服务时空格局及驱动机制的理解,为生态保护政策提供了重要依据。但总体来看,现有研究多聚焦于单项服务的评估,缺乏对多项服务的综合分析与权衡协同关系的深入探讨[19],而在驱动机制分析中,多从全局视角探测影响因素,往往忽略了驱动力的空间非平稳性,因而难以揭示影响因素的空间异质性格局及其局部作用机制。

草地生态系统是陆地生态系统的重要组成部分,在维持农牧民生计和保障生态安全方面发挥着关键作用[20]。荒漠草原区是草原向荒漠过渡的生态脆弱带,对外界环境的变化和干扰极端敏感。在气候变化与高强度人类活动的双重压力下,该类区域生物多样性丧失、土地荒漠化等问题日益凸显,严重影响了生态系统服务的可持续供给。宁夏荒漠草原区位于中国北方生态脆弱带的核心区域,其生态系统结构与功能受环境变化与人为干扰影响显著,呈现出明显的退化趋势,是研究生态系统服务响应与驱动机制的典型区域。因此,本研究以宁夏荒漠草原区为例,综合利用多期遥感数据,InVEST 模型、地理探测器和时空地理加权回归模型揭示该区关键生态系统服务的时空演变格局,识别其关键影响因素,解析驱动因素空间作用的异质性特征,以期为干旱半干旱区生态脆弱系统恢复、管理与可持续高质量发展提供科学参考。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

宁夏中部荒漠草原带(105°41′45″—107°39′24″E,36°7′13″—38°9′43″N)包括海原、同心、红寺堡、盐池 4 个县区,总面积约 20 712 km^2,占宁夏总面积的

31.19%。该区域地处宁南黄土丘陵区向宁北银川平原的生态过渡带,属于典型的农牧交错与生态脆弱区,海拔1 300~2 400 m,气候属温带大陆性干旱气候,降水稀少且年际变率大,年均日照时数超过3 000 h,潜在年蒸发量高达2 200 mm,水分盈亏严重失衡。受干旱气候与强烈风沙侵蚀共同影响,地表植被覆盖度普遍较低(10%~15%),植被类型以强旱生、超旱生的小半灌木及多年生丛生禾草为主,群落结构简单,生物量有限,生态系统稳定性差。该区域是宁夏水资源最为短缺、土地沙化与荒漠化问题最为突出的地区,生态环境极度脆弱,独特的自然地理条件与显著的生态退化过程,使其成为研究干旱半干旱区生态系统服务演变及其驱动机制的理想典型区域。

1.2 数据来源及处理

本文所使用数据包括1990—2020年4期土地利用数据、气象数据以及社会经济数据等多源数据,其中降水和潜在蒸散发数据来源于国家地球系统科学数据中心(https://www.geodata.cn/main/),空间分辨率1 000 m。海拔、坡度数据来源于地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/),空间分辨率30 m。土地覆被数据来源于Yang等[21]提供的遥感分类产品。矢量边界来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/),空间分辨率30 m。土壤数据HWSD(Harmonized World Soil Database v 1.2)下载于联合国粮农组织FAO(Food and Agriculture Organization of the United Nations,https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/),社会经济数据来源于资源环境科学与数据平台(http://www.resdc.cn/)。为确保数据分辨率和大小一致性,所使用数据均利用ArcGIS软件重采样为1 km,并统一投影为WGS_1984_UTM_Zone_50N。

1.3 研究方法

1.3.1 生态系统服务评价模型

(1)水源涵养。采用InVEST模型中的产水量模块计算水源涵养服务,该模块是基于水热耦合平衡假设,通过降水量和蒸散量的差值计算年均产水量[12,16],其计算公式如下:

$$WY_i=\left(1-\frac{AET_i}{P_i}\right)\times P_i \tag{1}$$

式中:WY_i为年产水量;P_i为栅格单元i的年降水量;AET_i为栅格单元i的年蒸散量。

水源涵养服务是在产水量的计算结果上,结合地形指数、流速系数和土壤饱和导水率将其进行修正所得到,其计算公式如下:

$$WR=\min(1,249/V)\times\min\left(1,0.9TI/3\right)\times\min\left(1,0.9K_{sat}/300\right)\times WY \tag{2}$$

式中:WR为研究区内单位面积水源涵养量(mm);V为流速系数;TI为地形指数;K_{sat}为土壤饱和导水率(cm/d);WY为产水量(mm/a)。

(2)土壤保持。InVEST模型中土壤保持模块是基于通用土壤流失方程进行计算,该方程包括侵蚀减少和泥沙持留两部分[22]。我们使用土壤输出量来表征土壤保持服务,即土壤输出量越多,土壤保持服务越低,反之亦然。模型公式如下:

$$USLE=R\times K\times LS\times C\times P \tag{3}$$

式中:USLE为实际土壤侵蚀量;R为年降雨量侵蚀因子;K为土壤可侵蚀因子;LS为坡度坡长因子;C为植被覆盖和管理因子;P为人为管理因子。

(3)水质净化。InVEST模型中水质净化模块的原理是植被和土壤可以截留径流中的氮、磷污染物,由于氮对景观格局的响应更为敏感,因此,本文以氮输出量为衡量标准,氮输出越多,水净化服务就越低,反之亦然[2,22]。模型公式如下:

$$ALV_i=HSS_i\times POL_i \tag{4}$$

式中:ALV_i为栅格单元i的调节负荷值;HSS_i为栅格单元i的水文敏感性;POL_i为栅格单元i的输出系数。

(4)生境质量。生境质量是将不同土地利用类型视为相应的生态系统类型或人为活动干扰因子,依据各生态系统类型对动植物的生境适宜度和人类干扰因子的威胁强度来模拟和评估[8]。计算公式为:

$$Q_{xj}=H_j\times\left[1-D_{xj}^z/(D_{xj}^z+k^z)\right] \tag{5}$$

式中:Q_{xj}为土地利用j中栅格单元x的生境质量指数;H_j为土地利用j的生境适宜度;D_{xj}为土地利用中j栅格单元x的胁迫水平;k为半饱和常数;z为归一化常量。

(5)碳储量。碳储量是基于土地利用/覆盖类型中地上生物量碳储量、地下生物量碳储量、土壤碳储量和死亡有机碳储量的叠加计算得到的[16,22]。计算公式如下:

$$C_{tot}=C_1+C_2+C_3+C_4 \tag{6}$$

式中:C_{tot}为总碳储量;C_1,C_2,C_3,C_4分别为地上生物量碳储量、地下生物量碳储量、土壤碳储量和死亡有机碳储量。

1.3.2 核密度估计

核密度估计(Kernel Density Estimation, KDE)主要通过数据样本本身来估计其分布形态,可用以分析宁夏中部荒漠草原带生态系统服务分布的整体情况,以及随着时间变化生态系统服务分布的动态特征[23]。表达式如下:

$$f(x)=(1/Nh)\sum_{i=1}^{n}\left\{K\left[(x_i-\bar{x})/h\right]\right\} \quad (7)$$

式中:$f(x)$为生态系统服务x的密度函数;x_i为独立同分布的观测值;$\bar{x}$为均值;N为观测数值;h为带宽;$K(\cdot)$为核函数。

1.3.3　均方根误差　生态系统服务的多样性及其相互间的联系表现出此消彼长的权衡关系和同增同减的协同关系。均方根误差通过测度单个生态系统服务标准差与平均生态系统服务标准差之间的差异,描述了距离平均生态系统服务标准差的分散度,从而能够更加细致地刻画生态系统服务之间相互影响的程度,被广泛应用于生态系统服务权衡协同关系的量化[24]。因此,本研究采用均方根误差揭示宁夏荒漠草原带生态系统服务之间的权衡强度,并采用自然断点法对权衡强度进行分类。计算公式如下:

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\left[1/(n-1)\right]\times\sum_{i=1}^{n}\left(\mathrm{CEF}_i-\mathrm{CEF}\right)^2} \quad (8)$$

式中:CEF_i为第i项生态系统服务标准化值;CEF为n项生态系统服务标准化值的均值;RMSE为均方根误差,该值越大表示宁夏荒漠草原带单个生态系统服务的值与均值之间的差异越大,即生态系统服务之间的权衡程度越强。

1.3.4　地理探测器　地理探测器能够检验因变量的空间分异特征并解释其驱动力,该方法具有不受自变量共线性影响和乘性交互影响的优点,研究结果具有较高的可靠性[25]。本文参考相关研究[14],从自然环境因素和社会经济因素两个方面选取8项指标作为影响因素来探究宁夏荒漠草原带生态系统服务的驱动因素。自然因素包括年均降水、年均气温、海拔、坡度和年蒸散发,社会经济因素包括人口密度、人均GDP和夜间灯光,上述指标被广泛应用于生态系统服务及其权衡关系的驱动因素分析中。地理探测器计算公式如下:

$$q=1-\left(\sum_{h=1}^{L}N_h{\sigma_h}^2\right)\Big/\left(N\sigma^2\right) \quad (9)$$

式中:N和N_h分别为研究区单元数、分区h单元数;${\sigma_h}^2$和σ^2分别为研究区方差和分区h的方差;q值范围为0~1,值越大,说明驱动因素对宁夏荒漠草原带生态系统服务的影响越大。

1.3.5　时空地理加权回归模型　时空地理加权回归(Geographically and Temporally Weighted Regression, GTWR)是在传统的地理加权回归模型(Geographically Weighted Regression, GWR)基础上,加入时间维度,得到时间和空间双重维度信息,更精准地捕捉数据中的时空异质性,揭示时空数据的局部特征和变化趋势,具有更高的精确度和更广泛的应用场景[26]。计算公式如下:

$$Y_i=\beta_0(\mu_i,v_i,t_i)+\sum_{j=1}^{k}\beta_i(\mu_i,v_i,t_i)x_{ij}+\varepsilon_i \quad (10)$$

式中:Y_i,x_{ij},ε_i分别为空间上i点的因变量、自变量和模型残差;μ_i,v_i,t_i为第i个样本的经度、纬度和时间坐标;$\beta_0(\mu_i,v_i,t_i)$为回归常数;$\beta_i(\mu_i,v_i,t_i)$为i点的回归系数;k为研究变量的个数。

2　结果与分析

2.1　宁夏荒漠草原区生态系统服务评估

从宁夏荒漠草原区生态系统服务功能核密度曲线图可以看出(图2),固碳服务核密度曲线重心经历了“右—左—右”的变迁过程,曲线由1990年的多峰曲线向单峰曲线过渡且高度在下降,说明研究期内宁夏荒漠草原区碳储量水平整体呈增加态势,各地区碳储量功能的极化现象有所减弱,差异减小。从水质净化服务的核密度曲线图来看,研究期间曲线高度不断增加,但峰值未发生显著变化,说明研究区水质净化服务的差异程度不断增加,特别是2000年曲线右尾存在显著的拉长现象,说明该时期的差异最为显著;从生境质量服务的核密度曲线图来看,曲线重心发生偏移,呈现出先向右转移再向左转移的变化趋势,说明生境质量整体呈先增后减的变化趋势,且随时间增加生境质量集聚特征增加,相较于1990年,2020年右尾出现缩减现象,说明生境质量空间分异现象减弱;从水源涵养服务的核密度曲线图来看,其变化较为显著。1990年曲线拖尾最长,说明各地区差异较大;2000年呈现多峰形态,说明该时期多级分化现象明显;2010年、2020年曲线变化趋势相似,且拖尾相较于1990年较小,说明研究区水源涵养服务差异有所缩减;从土壤保持服务的核密度曲线图来看,不同时期的曲线变化具有相似性,但2000年、2010年、2020年曲线拖尾相较于1990年较小,说明土壤保持服务的差异在不断缩小。

从宁夏荒漠草原区生态系统服务空间变化来看,不同生态系统服务的空间变化具有显著的空间异质性特征(图3)。其中,水源涵养服务高值区主要集中分布在海原县西南部地区,整体呈现出“西南高、东北低”的非均衡空间分布格局,地区差异较为显著;碳储量服务高值区主要集中分布在盐池县以及红寺堡区境内,其他地区均以中等或低值区为主,空间上呈现由东北向西南递减的变化格局;水质净化服务空间分布较为明显,高值区主要分布在清水河沿岸地区,贯穿同心和海原8个乡镇,其次是南华

山附近区域，而低值区主要分布在盐池县的北部沙地区域；生境质量服务与水质净化服务具有相反的变化趋势，以中高等级区分布为主，且集中分布在荒漠草原区的中部、东北部地区，而低值区主要集中分布在清水河人类活动强度较大的地区，其次红寺堡北部以及盐池县乡镇中心地带也是低值区分布密集区域；研究期间土壤保持服务的空间分布格局基本保持一致，以低值区分布为主，高值区主要分布在罗山、南华山等地区，低值区主要分布在盐池以及同心等地区。

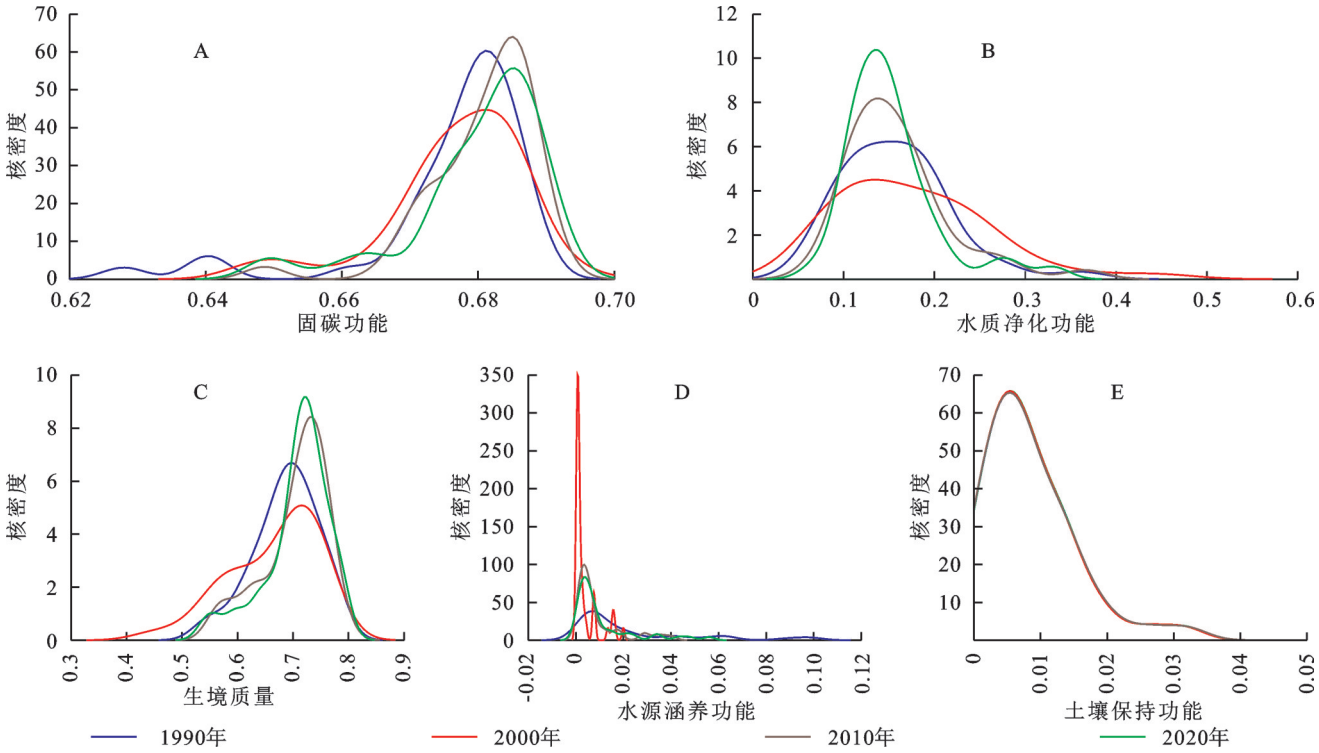


图2 1990—2020年宁夏荒漠草原区生态系统服务时序特征

Fig. 2 Temporal characteristics of ecosystem services in desert steppe region of Ningxia (1990—2020)

2.2 荒漠草原区生态系统服务权衡关系分析

基于1990—2020年宁夏荒漠草原区生态系统服务数据，采用均方根误差法计算不同时期多种生态系统服务间权衡强度关系并将其空间化表达（图4）。从图中可以看出，1990—2020年宁夏荒漠草原区生态系统服务权衡强度具有显著的空间异质性特征，其RMSE值由1990年的0.362 5增加至2010年的0.371 2，而后下降至2020年的0.370 6，整体呈现出波动增加的趋势，增长幅度约为2.23%。从空间分布格局来看，宁夏荒漠草原区生态系统服务权衡关系空间分布格局较为稳定，主要以较高等级分布区为主，其次是较低等级分布区，而其余各类等级分布区呈零星分布格局。从变化量来看，1990—2000年研究区RMSE值增加区域主要分布在同心县东南部、红寺堡区南部以及盐池县北部地区，RMSE值下降区域主要分布在海原县以及盐池县西南部地区。2000—2010年RMSE值增加区域主要分布在海原县以及盐池县北部地区，而下降区域主要分布在红寺堡区西北部地区，2010—2020年RMSE值下降区域面积不断扩张，而RMSE值增加趋势面积向研究区西南部收缩。整体来看，生态系统服务RMSE值变化量中12.90%的面积呈下降趋势，而18.07%的面积呈上升趋势，说明研究期间生态系统服务权衡强度不断增加，权衡关系不断加剧。

2.3 荒漠草原区生态系统服务影响因素分析

在揭示宁夏荒漠草原带生态系统服务演变格局的基础上，运用地理探测器识别各驱动因子对研究区生态系统服务的影响程度。从图5中可以看出，不同时期各个因子对研究区生态系统服务时空分异的解释力存在较大的差异，且各因子的p值均低于0.05，通过显著性检验。其中，年均降水量和人口密度的影响力最大，两者的平均解释力q值分别为0.666，0.561，说明两者是影响宁夏荒漠草原区生态系统服务空间分异的主要因素，其次是海拔、蒸散发、GDP，三者的平均解释力q值分别为0.526，0.512，0.427，说明三者对宁夏荒漠草原带生态系统服务的空间分异具有一定的影响，而夜间灯光指数、年均气温和坡度的解释力q值分别为0.361，0.345，0.233，说明三者对宁夏荒漠草原带生态系统服务空间分异的解释程度最低。整体来看，除人口密度、年

均降水量和海拔对宁夏荒漠草原带生态系统服务空间分异的影响解释程度随时间呈现出波动下降趋势外，其他影响因子的解释力均呈现出了不同程度的增加态势，其中人均GDP的增加速度最快，增幅约为20.6%。

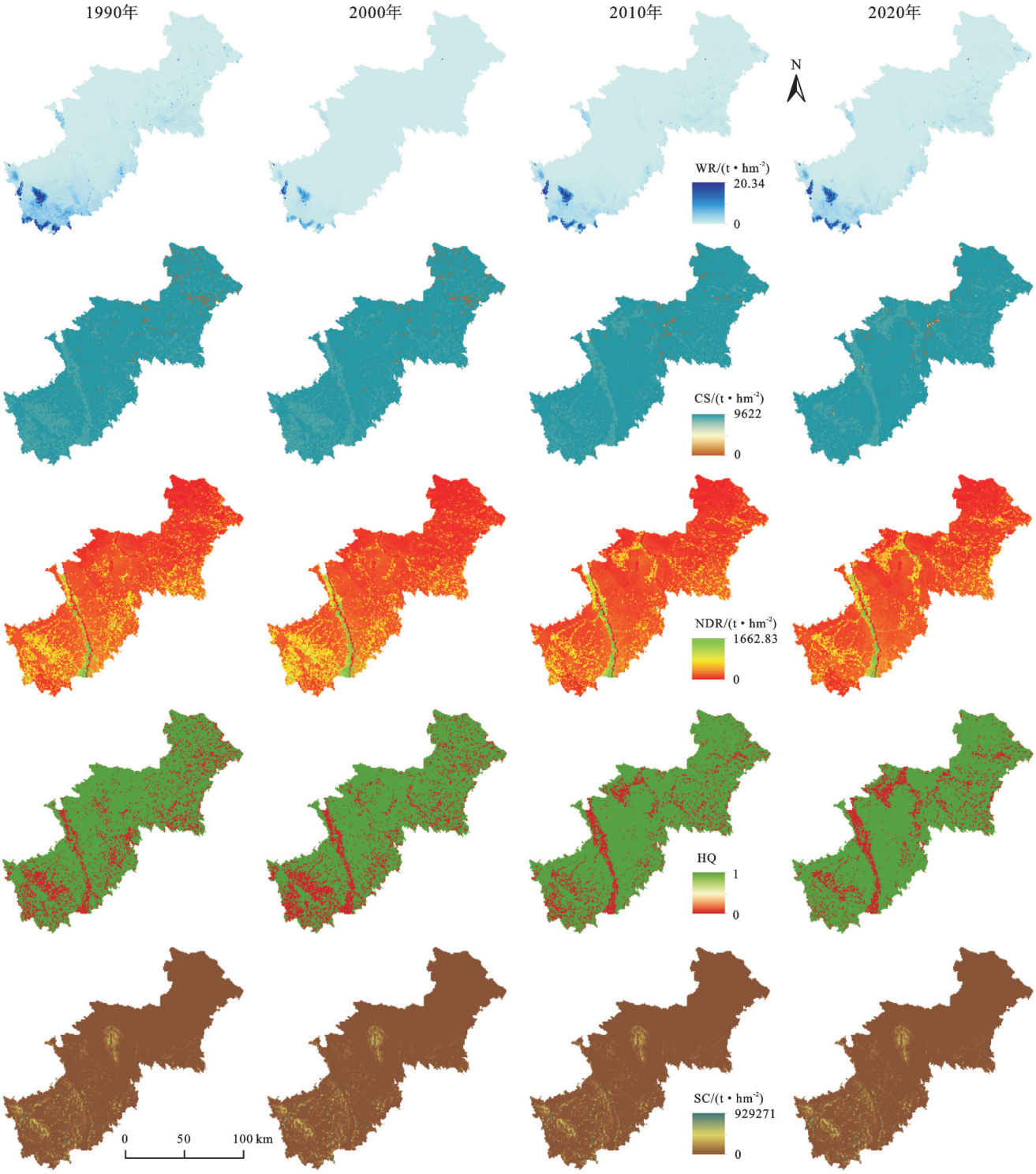


图 3　1990—2020 年宁夏荒漠草原区生态系统服务空间分布格局

Fig. 3　Spatial distribution patterns of ecosystem services in desert steppe region of Ningxia (1990—2020)

从因子交互作用来看，不同因子的交互作用对宁夏荒漠草原区生态系统服务空间分异特征的解释强度均大于单个因子的解释强度，这也进一步表明宁夏荒漠草原区生态系统服务的空间分异是由多因子交互作用形成的结果。从各因子的交互解释力来看，年降水量与其余各因子的交互作用最大，平均交互作用力 q 值分别为 0.703，0.686，0.676，0.640，0.662，0.643，0.677，其次是海拔，其与人口密度、夜间灯光指数、坡度和年蒸散发的交互作用最大，解释力 q 值分别为 0.562，0.538，0.557，0.541，而地形因子与

其余各因子的交互作用最低，解释力q值均不足0.3。从图中可以看出，自然因素对荒漠草原区生态系统服务的影响远大于社会经济因素，与自然因素交互后，社会经济因子决定力q值显著提升，说明自然因素显著增强了社会经济因素对荒漠草原区生态系统服务的影响程度。

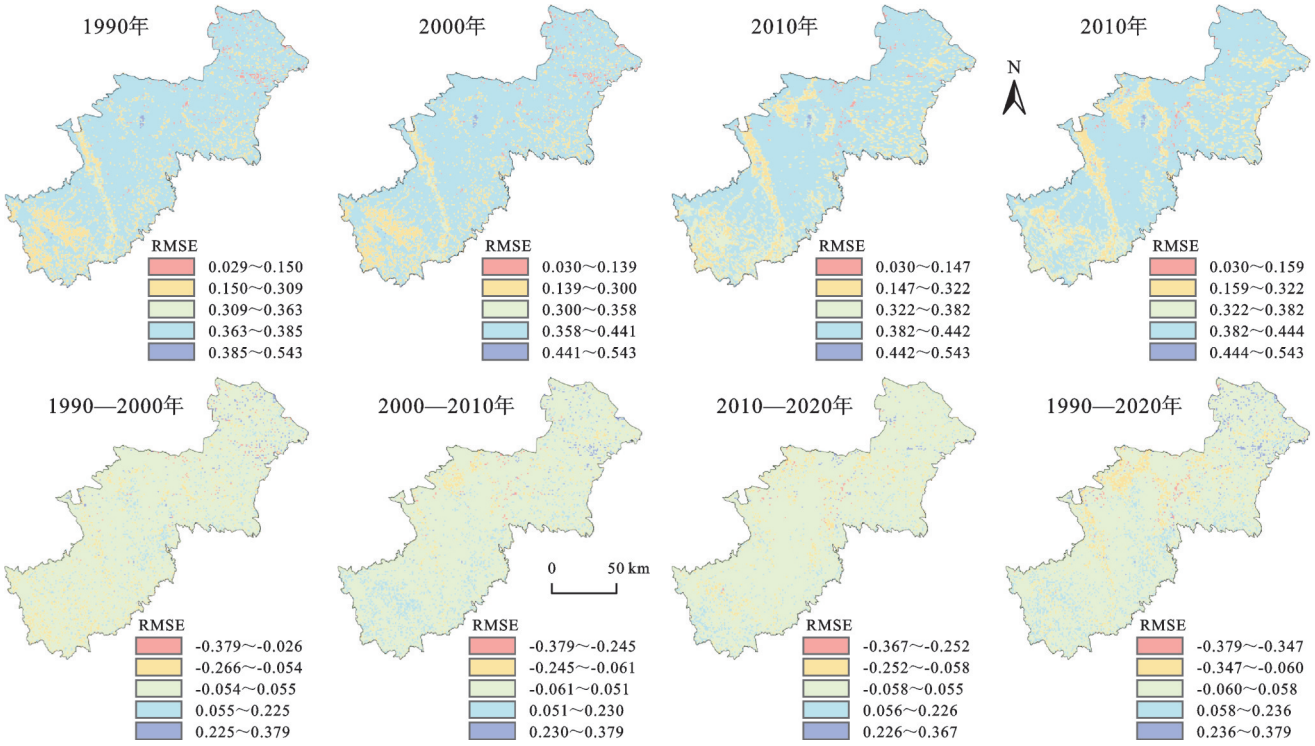


图4 1990—2020年宁夏荒漠草原区生态系统服务权衡RMSE值及其变化

Fig. 4 RMSE values of ecosystem service trade-offs and their changes in desert steppe region of Ningxia (1990—2020)

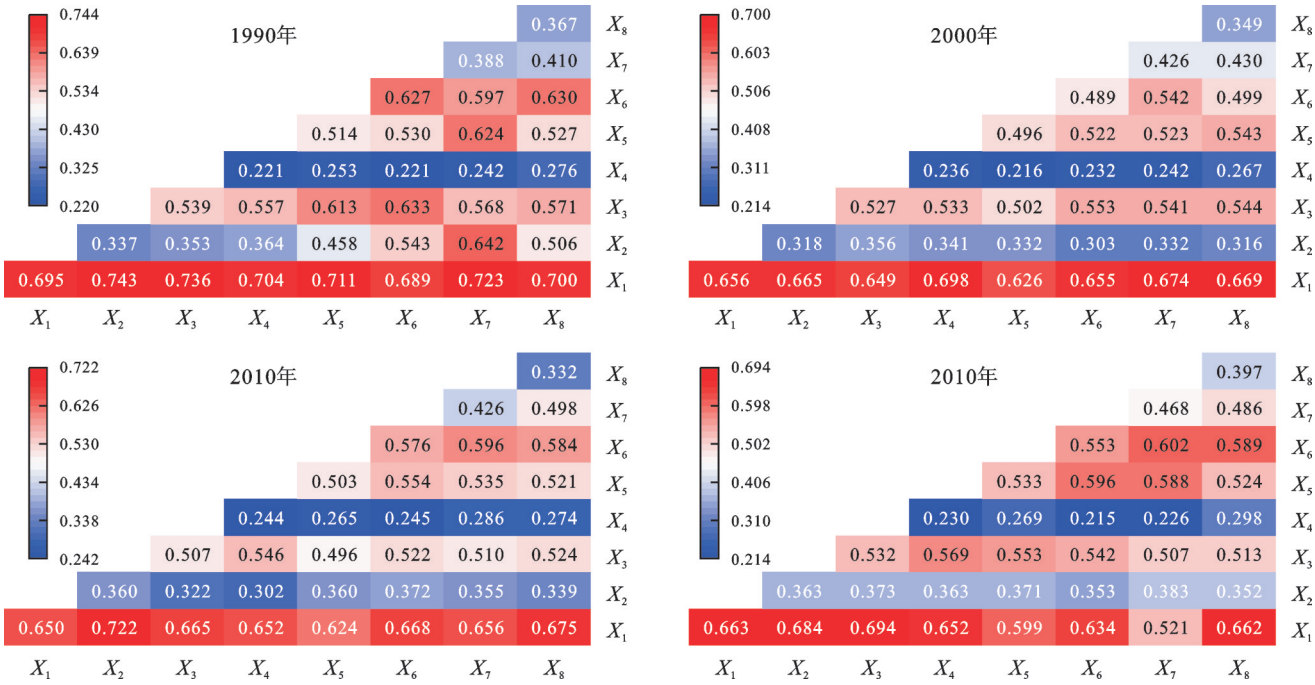


图5 宁夏荒漠草原区生态系统服务影响因素决定力q值

Fig. 5 q-values of determinant influencing factors of ecosystem services in desert steppe region of Ningxia

2.4 基于时空地理加权回归模型的影响因素分析

为进一步揭示各影响因子对荒漠草原区生态系统服务空间分异特征，采用GTWR模型解析其空间驱动机制。首先需要对各因子进行标准化处理，并进行共线性诊断，结果显示年降水量、坡度、人均GDP以及夜间灯光指数的方差膨胀因子（Variance Inflation Factor，VIF）值小于7.5，其余指标均大于7.5，存在共线性，需要将其剔除。此外，将时空地理加权回归模型

(GTWR)拟合结果与最小二乘法回归模型(Ordinary Least Squares, OLS)和地理加权回归模型(GWR)进行比较发现,GTWR模型R^2(0.674)>GWR模型R^2(0.565)>OLS模型R^2(0.482),而GTWR模型的赤池信息准则(Corrected Akaike Information Criterion, AICc)(−3 956.7)<GWR模型的赤池信息准则AICc(−3 416.3)<OLS模型的赤池信息准则AICc(−2 967.8),说明GTWR模型更具分析优势。

从图6中可以看出,各因子的影响存在着明显的时空差异,其中年降水量的回归系数介于−16.73~11.02,正向影响分布较广,且随时间推移分布范围不断向西南乡镇扩散,空间上主要集中分布在盐池县、红寺堡以及同心县等乡镇地区,而负向影响主要集中分布在海原县等乡镇。坡度的回归系数介于−3 733.17~36 053.56,且与年降水量在空间上具有相反的变化趋势,呈现出由西南向东北递减的变化趋势,其中低值区乡镇分布数量不断增加(144.44%),并向同心县以及海原县等乡镇转移和扩散,而高值区乡镇分布数量不断下降(−31.25%)。人均GDP与夜间灯光指数对荒漠草原区生态系统服务的影响具有相似性特征,均以负向影响为主,空间上呈现出由西南向东北先减后增的变化趋势,但不同的是人均GDP的低值区乡镇个数不断下降,高值区乡镇个数不断增加,而夜间灯光指数的低值区和高值区乡镇个数均在下降,下降幅度分别为23.08%和33.33%。总体而言,人均GDP与夜间灯光指数回归系数随着时间的推移而不断增大,逐渐成为主导因素。

3　讨　论

本研究发现,宁夏荒漠草原区碳储量整体呈增加态势,而水质净化呈小幅下降趋势,这与田慧慧等[27]对宁夏草地碳储量的研究结果一致,且与杨强强等[28]对宁夏碳储量和水质净化的研究结果不存在差异,但从空间分布格局来看,各项服务之间仍表现出较高一致性,反映出空间尺度效应对评估结果的重要影响,这印证了生态系统服务具有显著的多尺度响应特征,不同研究因数据来源、分辨率及评估模型的不同可能导致结论的差异。生境质量低值区主要集中在清水河一带以及红寺堡引黄灌区,这与武丹等[29]研究结果一致,这些地区受农业开发、城镇建设等社会经济活动干扰强烈,景观破碎化程度高,自然栖息地丧失与退化显著,导致生境质量整体偏低。水源涵养功能在时间序列上波动明显,整体区域差异趋于减小,高值区主要位于西南部降水相对充沛、植被覆盖良好的山地,这与王鹏等[30]对宁夏水源涵养的研究结果一致,但与吕明轩等[31]对黄河流域水源涵养部分年份的研究结果不一致,这进一步说明数据来源、模型参数时空尺度的设定对生态系统服务量化具有敏感性。土壤保持服务呈增加趋势,且空间差异不断缩小,高值区主要集中在南华山以及罗山周边,这与杨强强等[28]的研究结果一致,森林生态系统因其较强的冠层截留、枯落物层蓄渗以及根系固土能力,在土壤保持方面显著优于其他土地利用类型,形成自南向北递减的空间梯度,反映了植被类型与覆盖度对调控土壤侵蚀的关键作用。

从驱动因素来看,自然因素对宁夏荒漠草原区生态系统服务的影响更为显著,其中年降水量对荒漠草原区生态系统服务具有决定性作用,这与王鹏等[30]的研究结果一致,降水通过调控土壤水分可利用性与植被生产力,直接推动生态系统结构与功能的自我维持与更新。植被作为关键中介,其生长状况受水热组合、地形等自然条件制约,进而影响各类生态系统服务的供给能力。此外,人类社会经济活动的干扰效应日益凸显,人口密度增加与经济增长往往伴随生态用地的占用与转化,导致景观连通性下降、生态系统服务受损,尤其在灌区、河谷等人类聚居区表现显著。

整体来看,荒漠草原区生态系统服务权衡强度总体较高,空间分异明显。而复杂的局地气候、土地利用、地貌特征、社会经济发展水平等差异,会对生态系统服务关系产生影响,从而导致生态系统服务权衡强度呈现空间差异性[26]。宁夏荒漠草原区西南地区以山地和丘陵为主,植被盖度高,具有较高的碳储量、土壤保持以及水源涵养供给能力,但该区以旱作农业为主,耕地分布较广,导致生境质量水平不高,因此该区以较低权衡强度为主。而中北部地区以中低覆盖度草地为主,植被的生长可以增加区域固碳量,同时植物物种的丰富程度,可以通过改善区域景观连通性以增加生境质量水平。但植被也增加了区域的蒸散发,导致区域水源涵养和土壤保持能力较低,同时也增强了植物对污染物的截留效用,降低了氮输出量。尽管大量生态政策和工程的实施,增加了区域植被盖度,提升了生态系统服务的综合供给能力,但受气候变化和社会经济发展的综合影响,荒漠草原区生态系统服务权衡强度仍较大,特别是农田与生态用地提供的生态系统服务存在较强的权衡关系。

宁夏荒漠草原区生态系统服务演变受自然气候与人类活动共同驱动,其空间异质性与尺度依赖性显著,服务间存在复杂的权衡关系。未来生态管理应注重“三生”空间优化,推进系统治理。一方面可

在西南地区推行生态农业模式，缓解耕地扩张对生态系统服务的负面影响；另一方面在中北部持续实施植被恢复与生态修复工程，提升草地覆盖与景观完整性，增强调节服务功能，同时在政策层面需构建多尺度评估与动态监测体系，为区域生态保护与可持续发展提供科学依据。

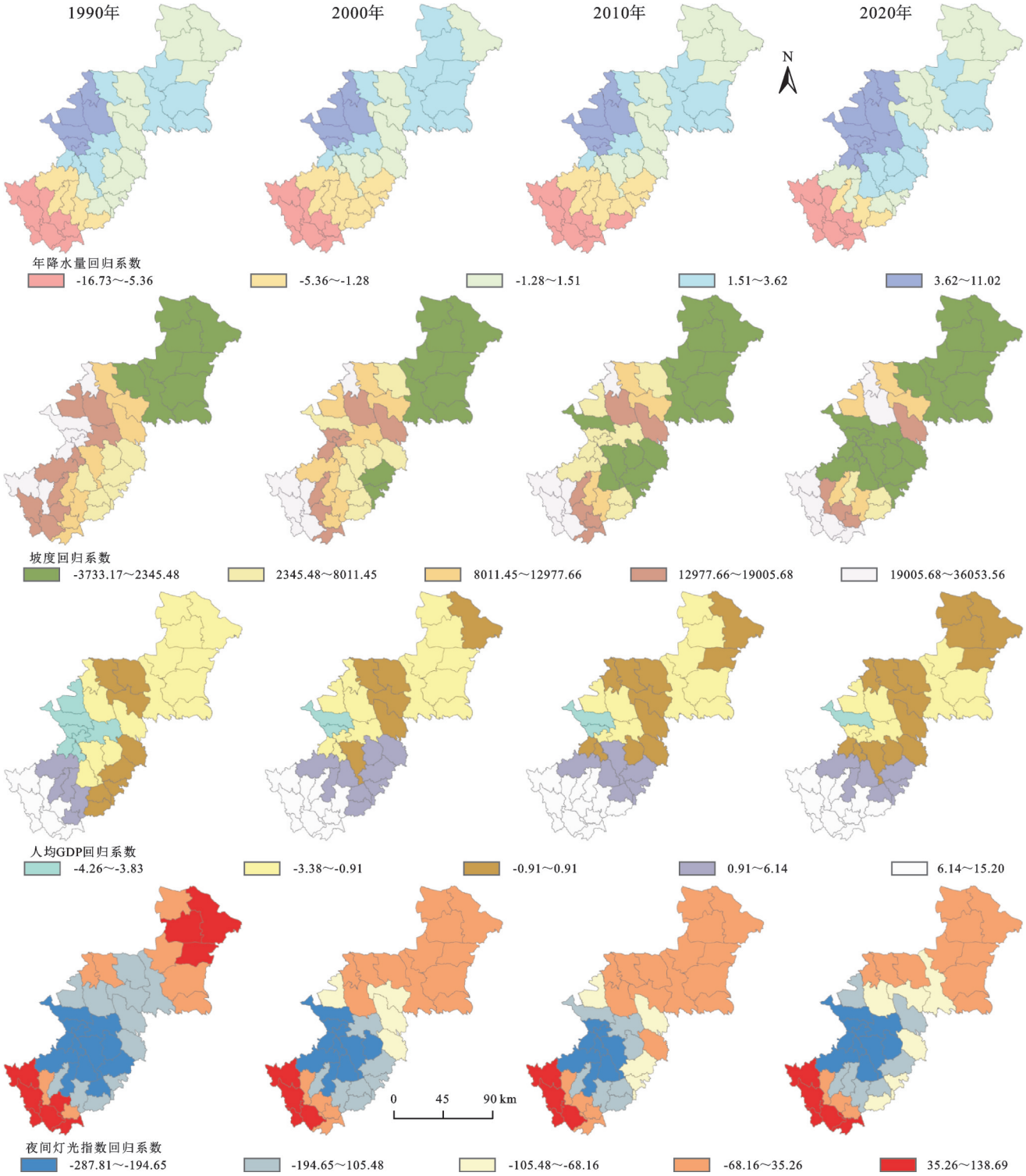


图 6 荒漠草原区生态系统服务影响因素回归系数空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of regression coefficients of influencing factors of ecosystem services in desert steppe region of Ningxia

4 结 论

（1）1990—2020年宁夏荒漠草原区碳储量、生境质量以及土壤保持服务分别增加了0.84%，2.73%和34.96%，而水质净化、水源涵养等服务出现不同程度下降趋势。

（2）1990—2020年宁夏荒漠草原区生态系统服务权衡强度由0.362 5增加至0.370 6，增幅为2.23%，

较高强度权衡区广泛分布,较低强度区次之,其余等级呈零星分布。

(3)宁夏荒漠草原区生态系统服务权衡强度受多个因素共同作用,其中自然因素对宁夏荒漠草原区生态系统服务的影响远大于社会经济因素,但其影响程度有所弱化,而自然因素与社会经济因素的交互作用显著增强其空间分异特征。

参考文献(References):

[1] Costanza R, d′ Arge R, de Groot R, et al. The value of the world′s ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997,387(6630):253-260.

[2] Wang P, Xu M X. Dynamics and interactions of water-related ecosystem services in the Yellow River Basin, China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2023, 33(8):1681-1701.

[3] 程静,王鹏,陈红翔,等.半干旱区生态风险时空演变及其影响因素的地理探测:以宁夏盐池县为例[J].干旱区地理,2022,45(5):1637-1648.
Cheng J, Wang P, Chen H X, et al. Geographical exploration of the spatial and temporal evolution of ecological risk and its influencing factors in semi-arid regions:a case of Yanchi County in Ningxia[J]. Arid Land Geography, 2022,45(5):1637-1648.

[4] 傅伯杰,张立伟.土地利用变化与生态系统服务:概念、方法与进展[J].地理科学进展,2014,33(4):441-446.
Fu B J, Zhang L W. Land-use change and ecosystem services: concepts, methods and progress[J]. Progress in Geography, 2014,33(4):441-446.

[5] Chen W, Chi G. Ecosystem services trade-offs and synergies in China, 2000—2015[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2023, 20(3): 3221-3236.

[6] 于德永.生态系统服务研究进展[J].北京师范大学学报:自然科学版,2025,61(1):108-117.
Yu D Y. Summary and review of the research progress in ecosystem services[J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2025,61(1):108-117.

[7] 张彩平,姜紫薇,韩宝龙,等.自然资本价值核算研究综述[J].生态学报,2021,41(23):9174-9185.
Zhang C P, Jiang Z W, Han B L, et al. Review on natural capital valuation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(23):9174-9185.

[8] 程静,王鹏,陈红翔,等.渭河流域生境质量时空演变及其地形梯度效应与影响因素[J].干旱区地理,2023,46(3):481-491.
Cheng J, Wang P, Chen H X, et al. Spatiotemporal evolution of habitat quality in the Weihe River Basin and its topographic gradient effects and influencing factors[J]. Arid Land Geography, 2023,46(3):481-491.

[9] Li Q, Zhou Y, Cunningham M A, et al. Spatio-temporal changes in wildlife habitat quality in the middle and lower reaches of the Yangtze River from 1980 to 2100 based on the InVEST model[J]. Journal of Resources and Ecology, 2021,12(1):43-55.

[10] Tang F, Fu M C, Wang L, et al. Land-use change in Changli County, China: predicting its spatio-temporal evolution in habitat quality[J]. Ecological Indicators, 2020,117:106719.

[11] Xia H, Yuan S F, Prishchepov A V. Spatial-temporal heterogeneity of ecosystem service interactions and their social-ecological drivers: implications for spatial planning and management[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2023,189:106767.

[12] 黄钰婷,曹雅蓉,吴隽宇,等.长三角生态系统服务驱动因素的交互效应及其阈值[J].生态学报,2024,44(21):9956-9973.
Huang Y T, Cao Y R, Wu J Y, et al. Interaction effects and key threshold: analyzing the drivers of ecosystem service in the Yangtze River Delta region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(21):9956-9973.

[13] 刘春芳,李鹏杰,刘立程,等.西北生态脆弱区省域国土空间生态修复分区[J].农业工程学报,2020,36(17):254-263.
Liu C F, Li P J, Liu L C, et al. Ecological restoration zoning of provincial territorial space in the ecologically fragile areas of Northwest China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(17):254-263.

[14] 王琳,卫伟.黄土高原典型县域生态系统服务变化特征及驱动因素[J].生态环境学报,2023,32(6):1140-1148.
Wang L, Wei W. Characteristics and driving factors of ecosystem services changes in a typical county of the Loess Plateau[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2023,32(6):1140-1148.

[15] 兰永真,孙特生,李韦韦.陇东黄土高原农田生态系统服务及其权衡协同关系[J].农业工程学报,2023,39(12):236-244.
Lan Y Z, Sun T S, Li W W. Trade-offs and synergies of farmland ecosystem services in Loess Plateau: a case study of Longdong Region, Northwest China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023,39(12):236-244.

[16] 仲俊涛,王蓓,米文宝,等.农牧交错带禁牧草地生态系统服务空间权衡与协同关系[J].农业工程学报,2020,36(12):268-275.
Zhong J T, Wang B, Mi W B, et al. Spatial trade-offs and synergies of ecosystem services for grazing-prohibited grassland in agro-pasture ecotone[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020,36(12):268-275.

[17] Zhang J J, Zhu W B, Zhu L Q, et al. Multi-scale analysis of trade-off/synergistic effects of forest ecosystem services in the Funiu Mountain Region, China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2022,32(5):981-999.

[18] 周方文,马田田,李晓文,等.黄河三角洲滨海湿地生态系统服务模拟及评估[J].湿地科学,2015,13(6):667-674.
Zhou F W, Ma T T, Li X W, et al. The simulation and assessment of the ecosystem services in the coastal wetlands of the Yellow River Delta based on InVEST Model[J]. Wetland Science, 2015,13(6):667-674.

[19] 乐荣武,李巍,周思杨,等.呼包鄂榆城市群生态系统服务价值驱动因素及其交互效应[J].生态学报,2023,43(23):9967-9980.
Yue R W, Li W, Zhou S Y, et al. Driving factors and their interaction effects of ecosystem service value in the Hohhot-Baotou-Ordos-Yulin urban agglomeration [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(23):9967-9980.

[20] 脱登峰,卢琦,却晓娥,等.中国北方草地生态系统服务评估[J].生态学报,2024,44(2):455-462.
Tuo D F, Lu Q, Que X E, et al. Evaluation of grassland ecosystem services in Northern China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(2):455-462.

[21] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover datasets and its dynamics in China from 1985 to 2022[J]. Journal of Natural Resources,2023,13: 3907-3925.

[22] Wang P, Xu M X. Evaluating the inter-annual surplus/deficit dynamic of water retention service in the Yellow River Basin, China [J]. Ecological Indicators, 2022, 145:109695.

[23] 赵政楠,茹少峰,薛飞.黄河流域生态韧性的时空格局与分布动态演进:基于能值生态足迹模型的分析[J].中国人口·资源与环境,2024,34(8):136-147.
Zhao Z N, Ru S F, Xue F. Spatio-temporal pattern and dynamic evolution of ecological resilience in the Yellow River Basin: based on the analysis of emergy ecological footprint model [J]. China Population, Resources and Environment, 2024,34(8):136-147.

[24] 李成,赵洁,庄智程,等.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[J].生态学报,2022,42(14):5708-5720.
Li C, Zhao J, Zhuang Z C, et al. Spatiotemporal dynamics and influencing factors of ecosystem service trade-offs in the Yangtze River Delta urban agglomeration [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(14):5708-5720.

[25] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
Wang J F, Xu C D. Geodetector: principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(1):116-134.

[26] 侯迎,黄欣慧,褚阳,等.黄河"几字弯"大气水分亏缺及其影响因素的时空变化特征[J].中国环境科学,2025,45(2):637-647.
Hou Y, Huang X H, Chu Y, et al. Spatiotemporal variability of atmospheric moisture deficit and its influencing factors in the "Jizi Bay" of the Yellow River[J]. China Environmental Science, 2025,45(2):637-647.

[27] 田慧慧,韩新宁,王亦波,等.宁夏草地生态系统服务时空演变及权衡协同关系:2000—2020年[J].草地学报,2025,33(10):3419-3429.
Tian H H, Han X N, Wang Y B, et al. Spatio-temporal evolution and trade-offs synergies of grassland ecosystem services in Ningxia: 2000—2020 [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025,33(10):3419-3429.

[28] 杨强强,章翩,邱小琮,等.宁夏回族自治区生态系统服务时空变化及其权衡研究[J].中国环境科学,2023,43(10):5453-5465.
Yang Q Q, Zhang P, Qiu X C, et al. Spatiotemporal changes and trade-off analysis of ecosystem services in Ningxia Hui Autonomous Region [J]. China Environmental Science, 2023,43(10):5453-5465.

[29] 武丹,李欢,艾宁,等.基于CA-Markov的土地利用时空变化与生境质量预测:以宁夏中部干旱区为例[J].中国生态农业学报(中英文),2020,28(12):1969-1978.
Wu D, Li H, Ai N, et al. Predicting spatiotemporal changes in land use and habitat quality based on CA-Markov: a case study in central Ningxia, China [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(12): 1969-1978.

[30] 王鹏,马逸伦,程静,等.宁夏水源涵养功能时空演变格局及其归因分析[J].水土保持学报,2025,39(2):191-199.
Wang P, Ma Y L, Cheng J, et al. Spatial and temporal evolution pattern of water conservation function of Ningxia Province and its attribution analysis[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025,39(2):191-199.

[31] 吕明轩,张红,贺桂珍,等.黄河流域水源涵养服务功能动态演变及驱动因素[J].生态学报,2024,44(7):2761-2771.
Lü M X, Zhang H, He G Z, et al. Dynamic evolution and driving factors of water conservation service function in the Yellow River Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(7):2761-2771.