泾河流域生态系统服务权衡与协同动态关系及其社会因素驱动机制

张 博[1], 周自翔[1], 熊炫晨[2], 丁 娇[1]
(1.西安科技大学 测绘科学与技术学院,
陕西 西安 710054; 2.陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 陕西 西安 710062)

摘 要: [目的]研究生态系统服务权衡与协同关系的演变机制,为推动区域生态经济高质量发展提供科学指导。[方法]以黄土高原人类活动密集的泾河流域为研究区,使用InVEST模型、生态系统服务网络等方法分析该流域2000—2023年产水量、生境质量、土壤保持量和碳储量4项关键生态系统服务权衡协同关系的时空演变特征,并从自然生态、社会经济及景观格局层面解析其驱动机制。[结果]①2000—2023年产水量与土壤保持量呈现"升—降—再升"的N形变化趋势,生境质量整体稳定在约0.69,碳储量则总体上升且略有波动。产水量与生境质量呈较强权衡,与土壤保持量和碳储量为弱权衡;生境质量与土壤保持量、碳储量之间均表现出强协同关系,其中生境质量与碳储量的协同性最为显著。②生态系统网络分析,降水显著促进产水量与土壤保持功能,气温升高则抑制生境质量与碳储量;植被覆盖度(NDVI)对生态功能发挥积极作用。同时,土地利用强度、人口密度和GDP的提升对生态系统服务产生负向影响;而较高的景观聚集度与大斑块格局有利于生态功能维持,景观破碎化则对其形成抑制作用。③广义加性模型显示,坡度是产水量-生境质量关系的主导因子。人口密度和坡度分别主导产水量-土壤保持量与产水量-碳储量关系。生境质量与土壤保持量关系的主导因子是土地利用强度。NDVI和土地利用强度是生境质量-碳储量及土壤保持量-碳储量关系的关键驱动因子。[结论]泾河流域生态系统服务间存在显著的时空权衡与协同关系。该关系受自然、社会及景观格局因素共同影响。研究结果表明以人口密度和土地利用强度为主的社会因素占据主导地位。未来流域可持续发展政策制定需统筹3类因素的交互作用,重视社会因素作用,实现生态与经济协同发展。

关键词: 生态系统服务; 权衡与协同关系; 社会因素; 广义加性模型; 泾河流域
文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)03-0395-14 **中图分类号:** X196, X171.1

文献参数: 张博, 周自翔, 熊炫晨, 等.泾河流域生态系统服务权衡与协同动态关系及其社会因素驱动机制[J].水土保持通报,2026,46(3):395-408. Zhang Bo, Zhou Zixiang, Xiong Xuanchen, et al. Dynamic relationships of trade-offs and synergies in Jinghe River basin ecosystem services and their driving mechanisms by social factors [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(3):395-408.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.03.020 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.03.020**

Dynamic relationships of trade-offs and synergies in Jinghe River basin ecosystem services and their driving mechanisms by social factors

Zhang Bo[1], Zhou Zixiang[1], Xiong Xuanchen[2], Ding Jiao[1]
(1.*College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi* 710054, *China*;
2.*School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi* 710062, *China*)

Abstract: [Objective] The evolutionary mechanisms of trade-offs and synergies among ecosystem services were investigated in order to provide scientific guidance for promoting high-quality regional eco-economic development. [Methods] The Jinghe River basin, a region with intensive human activities on the Loess Plateau, was selected as a study area. The spatiotemporal evolution characteristics of trade-offs and synergies among four key ecosystem

收稿日期:2025-09-21 **修回日期:**2025-12-05 **采用日期:**2025-12-12
资助项目:国家自然科学基金项目:生态服务空间流动模拟研究:以泾河流域土壤保持服务为例(项目编号41771576)
第一作者:张博(1995—),男(汉族),陕西省渭南市人,硕士研究生,研究方向为景观生态学。Email:zb18391505107@163.com。
通信作者:周自翔(1977—),男(汉族),陕西省西安市人,博士,副教授,主要从事生态系统服务方面的研究。Email:zhouzixiang@xust.edu.cn。

services, including water yield, habitat quality, soil conservation, and carbon storage, from 2000 to 2023 were analyzed using the InVEST model and ecosystem service network methods. Their driving mechanisms were further explored from the perspectives of natural ecology, socio-economics, and landscape pattern. [Results] ① From 2000 to 2023, water yield and soil conservation exhibited an N-shaped trend of increase—decrease—increase. Habitat quality remained stable at approximately 0.69, whereas carbon storage showed an overall increasing trend with slight fluctuations. Water yield showed a strong trade-off with habitat quality, but weak trade-offs with soil conservation and carbon storage. Habitat quality exhibited strong synergistic relationships with both soil conservation and carbon storage, among which the synergy between habitat quality and carbon storage was the most significant. ② Ecosystem service network analysis showed that precipitation significantly promoted water yield and soil conservation, whereas increasing temperatures inhibited habitat quality and carbon storage. Vegetation coverage (NDVI) positively impacted ecological functions. Meanwhile, increases in land use intensity, population density, and GDP negatively impacted ecosystem services. Higher landscape aggregation and large patch patterns contributed to the maintenance of ecological functions, whereas landscape fragmentation exerted inhibitory effects. ③ The generalized additive model showed that slope was the dominant factor in the water yield-habitat quality relationship. Population density and slope dominated the water yield-soil conservation and water yield-carbon storage relationships, respectively. Land use intensity was the dominant factor in the habitat quality-soil conservation relationship. NDVI and land use intensity were the key driving factors in the habitat quality-carbon storage and soil conservation-carbon storage relationships. [Conclusion] Significant spatiotemporal trade-offs and synergistic relationships exist among ecosystem services in the Jinghe River basin. These relationships are jointly influenced by natural, social, and landscape pattern factors. The results indicate that social factors, primarily population density and land use intensity, play a dominant role. Future watershed sustainable development policies should consider the interaction among the three types of factors and emphasize the role of social factors in order to achieve coordinated development of ecology and economy.

Keywords: ecosystem services; trade-offs and synergies; social factors; generalized additive model; Jinghe River basin

生态系统服务是指生态系统为人类提供的直接或间接效益[1],涵盖供给、调节、支持和文化服务4类,是连接自然与社会生态系统的重要纽带[2]。近年来,伴随人口增长与快速城镇化,人地矛盾加剧,致使生态环境遭受破坏,生态系统结构与功能发生显著改变[3]。生态系统具有高度的多样性和异质性,其各项服务间既可能相互促进(协同),也可能此消彼长(权衡)。深入理解这种权衡与协同关系,对实现区域可持续发展具有重要科学意义[4]。

当前,国内外学者普遍采用统计分析与空间模型等方法开展生态系统服务研究。胡和兵等[5]在皖北粮食主产区应用动态权衡协同度(DESTI)与最优参数地理探测器(OPGD)模型,系统分析了2000—2023年产水量、碳储存、土壤保持、生境质量及粮食生产力的权衡/协同关系及其驱动机制,为区域生态管理提供支撑。孙才志等[6]基于InVEST模型,揭示了辽河流域产水量、生境质量、碳储量与土壤保持的时空演变及驱动因素,为流域生态修复提供依据。石晓蕊等[7]对雅鲁藏布江流域2000—2020年5项关键服务进行评估,结合海拔梯度分析其权衡/协同特征,为协调生态保护与经济发展提供参考。Shao Yuting等[8]研究中国南方地区发现,2000—2020年生态系统服务总价值呈下降趋势,但水源涵养与碳汇等服务与产品供给存在协同;通过FLUS模型模拟2035年情景,提出严格控制建设用地扩张并加强森林恢复,可显著提升生境质量与水源涵养能力,并构建“4类生态功能区”框架,助力生态保护与发展的空间协同。Simeon与Wana[9]在埃塞俄比亚Maze国家公园的研究显示,食物生产与其他服务显著权衡,而水供应、原材料供给与气候调节高度协同。Washbourne等[10]对城市宗地的研究表明,开发服务与其他生态系统服务存在明显权衡,而多数利益相关者更倾向多功能绿地。Aslaksen等[11]指出,北欧半自然草地造林虽有助于气候缓解,但可能导致土壤碳损失与生物多样性下降,强调需权衡气候目标与生态保护。影响生态系统服务权衡与协同的因素主要包括自然、社会经济及景观格局等。研究中广泛应用贝叶斯模型、地理探测器、回归模型等方法。其

中,地理探测器因其能有效识别因子交互作用并量化其对空间分异的解释力,成为解析驱动机制的重要工具。Zhang Zhimin 等[12]结合 Spearman 相关、地理加权回归(GWR)与 Geodetector,探讨多尺度下服务关系及驱动机制;Du X.[13]将 Geographic Detector 与耦合协调度模型结合,分析国家公园“三生”空间与栖息地质量的权衡;Huang Jixing 等[14]则通过 Pearson 相关、Geodetector 与时空 GWR,研究全国尺度 5 类关键服务的演化规律与驱动因素,并开展生态功能分区。尽管已有探究生态系统服务权衡与协同关系及驱动因素的方法较为丰富,推动了相关研究的进步,但是在泾河流域驱动因素定量化分析的研究较少。开展驱动因素定量化研究,可为相关部门结合流域实际制定生产生活实践方案提供支撑。

基于此,本研究以黄土高原人类活动较为频繁的典型区域泾河流域为对象,选取产水量、生境质量、土壤保持量与碳储量 4 项关键服务,结合皮尔逊相关分析判断服务间权衡与协同关系,利用网络分析探究各因子与生态系统服务的关系以及各因子之间的关系,随后进一步运用广义加性模型识别影响权衡与协同关系动态变化的主导因素,旨在为流域生态管理与可持续发展政策制定提供科学依据[15]。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

泾河流域位于黄土高原中部腹地(106°14′—108°42′E,34°46′—37°19′N),是典型的生态脆弱区,河流流经陕西、甘肃、宁夏 3 省(区)。流域内地形复杂,海拔 219～2 908 m,流域位于温带半湿润向半干旱气候的过渡地带,属典型的温带大陆性气候,年均降水量 350～650 mm,降水量由南向北递减,具有明显的季节性差异,70% 以上的降水集中于 6—9 月,年际波动较大,局地暴雨频发。土壤类型丰富,植被类型多样,生物物种多样,呈明显的地带性分布,自南向北依次为落叶阔叶林、森林草原和草原。2000—2023 年在人类活动影响和退耕还林还草政策的推动下,流域内土地利用类型变化显著,林地和草地占比明显提升,随着城市化的不断推进,建设用地占比也有所上升,人口数量及 GDP 增长快速,且仍呈增长的趋势。然而,长期以来受人类活动干扰,天然植被大面积破坏,植被覆盖率较低,水土流失严重,使得泾河流域成为黄土高原水土流失最为严重的区域之一[16]。

1.2　数据来源与处理

本研究所需要的数据包括 DEM(数字高程模型)、土壤数据、气象数据以及土地利用数据。具体的处理方式包括:对于气象数据社会经济数据采用邻近重采样,保持数据分类精度。对于土地利用数据采用重分类方法,整理为耕地、林地、草地、水体、建设用地、未利用地 6 类。所有数据均重采样为 30 m 分辨率,利用分区统计将数据空间化为县域尺度,并统一投影为 WGS_1984_UTM_Zone_48N 坐标系统。数据来源详见表 1。

表 1　数据及其来源

Table 1　Data and its sources

数据类型	数据分辨率	数据来源
DEM(数字高程数据)	30 m	地理空间数据云(https://www.gscloud.cn)
年降水	1 km	
年均气温(2000—2023 年)	1 km	国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn/)
年潜在蒸散发	1 km	
土壤数据	250 m	世界土壤数据库 HWSD(https://www.fao.org/soils-portal/en/)
人口密度	1 km	
GDP(2000—2023 年)	1 km	中国科学院资源环境科学与数据平台(https://www.resdc.cn/)
NDVI	1 km	
土地利用数据(2000—2023 年)	30 m	China land cover dataset(CLCD)(https://zenodo.org/)

2　研究方法

2.1　InVEST 模型

InVEST 模型是由世界自然基金会(WWF)、大自然保护协会(TNC)及其他相关机构携手开发的。它能够对区域生态系统服务状况进行全面而综合的评估,涵盖的功能类型丰富多样,包括年产水量、生境质量、土壤保持量和碳储量等。各功能模块的协同应用,不仅可量化生态系统服务功能的时空变化特征,还为其影响因素分析提供有力支撑。InVEST

模型中产水量模块所用的Z系数根据前人研究并经过多次试验所得，产水量与泾河流域实际径流量进行比对，另外土壤保持量模块中所需参数根据中国河流泥沙公报公布的泾河流域多年平均输沙量进行校对，所得产水量与土壤保持量均属于合理范围。植物根系数据来源于Yan Fapeng[17]及刘洋[18]的研究结果和模型指导手册自带数据库进行赋值。本研究所需要的全域尺度生态系统服务定量化由InVEST模型根据基础数据及流域边界产生，而县域尺度生态系统服务定量化是在全域尺度基础上根据分区统计实现。

2.1.1 产水量

InVEST模型的“产水能力”模块（water yield，WY），是基于Budyko曲线和年平均降水量，计算公式为

$$Y(x)=\left[1-\frac{\mathrm{AET}(x)}{P(x)}\right]\cdot P(x) \tag{1}$$

式中：$Y(x)$为年产水能力（mm）；AET(x)为实际年潜在蒸散量（mm）；$P(x)$为年降水量（mm）。

2.1.2 生境质量

InVEST模型的生境质量是基于土地利用数据（habitat quality，HQ），同时考虑不同的威胁因子对生境质量的影响程度，计算公式为

$$Q_{xj}=H_j\left[1-\left(\frac{D_{xj}^{z}}{D_{xj}^{z}+K^{z}}\right)\right] \tag{2}$$

式中：Q_{xj}为生境类型j中栅格x的生境质量；H_j为生境类型j的生境适宜性；D_{xj}为生境类型j中的栅格受到威胁因子x的威胁性水平；k为半饱和常数；z为归一化常量。

2.1.3 土壤保持量

InVEST模型的土壤保持模块（soil conservation，SC）根据地形数据、气象数据以及土地利用数据等利用通用土壤流失方程[19]计算土壤保持量，其中以栅格为计算单位，潜在土壤侵蚀量减去实际土壤侵蚀量为土壤保持量，计算公式为

潜在土壤侵蚀量：

$$\mathrm{RKLS}=R\cdot K\cdot LS \tag{3}$$

实际土壤侵蚀量：

$$\mathrm{USLE}=R\cdot K\cdot LS\cdot P\cdot C \tag{4}$$

土壤保持量：

$$\mathrm{SD}=\mathrm{RKLS}-\mathrm{USLE} \tag{5}$$

式中：R表示降雨侵蚀力因子；K表示土壤可蚀性因子；LS表示坡度坡长因子；C表示植被覆盖和管理因子；P表示水土保持措施因子。

2.1.4 碳储量

InVEST模型的碳储存模块（carbon storage and sequestration），将碳储量分为4个部分，分别为地上碳、地下碳、土壤碳、有机物死亡碳[20]。本研究参考前人的生物物理表输入参数[21]，计算公式为

$$C_{\mathrm{tot}}=C_{\mathrm{above}}+C_{\mathbf{below}}+C_{\mathrm{soil}}+C_{\mathrm{dead}} \tag{6}$$

式中：C_{tot}为总碳存储量；C_{above}为地上碳存储量；C_{below}为地下碳存储量；C_{soil}为土壤碳存储量；C_{dead}为死亡有机质碳存储量；单位均为t/hm^2。

2.2 生态系统服务权衡与协同关系研究

采用皮尔逊相关系数对生态系统服务权衡与协同关系进行分析[22]，正相关表示协同关系，负相关表示权衡关系，空间相关分析计算公式为

$$r=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i-\bar{x}\right)\left(y_i-\bar{y}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i-\bar{x}\right)^2}\cdot\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(y_i-\bar{y}\right)^2}} \tag{7}$$

式中：r为相关系数；x,y分别为两因素的值；i为样本序号；$\bar{x},\bar{y}$为两因素的平均值。

2.3 生态系统网络分析方法

本研究引入网络分析方法，基于图论思想将生态系统服务系统抽象为由“节点”和“边”构成的复杂网络：以产水量、生境质量、土壤保持和碳储量及各类影响因子等作为节点，通过Pearson相关分析识别服务与因子之间及各类因子之间的显著相关关系，并以其相关系数作为边的权重，构建加权无向网络。选取的因素为自然因子：降水（PRE）、气温（TEM）、DEM、坡度（SLOPE）、NDVI；社会经济因子：GDP、人口密度（POP）、土地利用强度（LUI）；景观格局因子：聚集指数（AI）、最大斑块指数（LPI）、斑块密度（PD）。

2.4 广义加性模型

广义加性模型（generalized additive model，GAM）是一种在广义线性模型（GLM）基础上发展而来的非参数回归方法。与传统回归不同，GAM允许解释变量与响应变量之间呈现非线性关系，并通过引入光滑函数来拟合这种复杂关系。计算公式为

$$g\left(E[Y]\right)=\beta_0+f_1(X_1)+f_2(X_2)+\cdots+f_P(X_P)+\varepsilon \tag{8}$$

式中：Y为响应变量；$g(\cdot)$为连接函数（如恒等函数、对数函数、logit函数等）；β_0为截距项，表示当所有光滑函数取其平均效应时，$g(E[Y])$的基准水平；$f_{\mathrm{P}}(X_{\mathrm{P}})$表示解释变量；$X_{\mathrm{P}}$的光滑函数，常采用惩罚样条函数进行拟合；$\varepsilon$为随机误差项。

3　结果与分析

3.1　泾河流域生态系统服务时空变化特征

单位面积产水量平均为 365.42 mm,产水总量达 8.03×10^9 m^3。如图 1 所示,产水量在 2000—2010 年持续上升,2010 年较 2000 年增幅达 29.8%;2015 年降至最低值 297.01 mm;此后显著回升,2023 年达研究期峰值 437.81 mm,较 2015 年增加 140.8 mm,增幅为 47.4%。空间分布上(图 2),产水量总体呈“南高北低,西高东低”格局,高值区主要分布在庄浪县、隆德县、乾县和礼泉县等南部与西部县域。流域平均生境质量指数为 0.692,整体保持稳定。2010 年前维持在 0.68 左右,2010 年达最高值 0.698,之后趋于平稳,总体呈稳中有升的态势。空间分布上,呈现“东西部高、中北部低”的格局,黄陵县、耀州区、旬邑县(东部)及庄浪县、隆德县、张家川回族自治县(西部)等县域生境质量较高。单位面积土壤保持量平均为 1 177.86 t/hm^2。由图 1 可知,其变化趋势亦为“先升-后降-再升”。2023 年达 1 301.98 t/hm^2,较 2000 年增加 331.51 t/hm^2,增幅 34.2%。2015 年较 2010 年显著下降 355.87 t/hm^2(降幅 37.7%),随后快速恢复,2020 和 2023 年分别较 2015 年回升 35.3% 和 38.0%。空间上,土壤保持量呈“东西南部高、中北部低”格局,耀州区(东部)、泾阳县(南部)、庄浪县、隆德县和凤翔区(西部)为高值区。碳储量平均为 5.13×10^8 t,总体呈上升趋势,细节上表现出“持续增加-随后下降-再次回升”。空间分布上,高碳储量区主要集中于林地和草地覆盖密集区域,而建设用地和未利用地则为低值区,分布格局与植被覆盖状况高度吻合,符合区域实际生态特征。

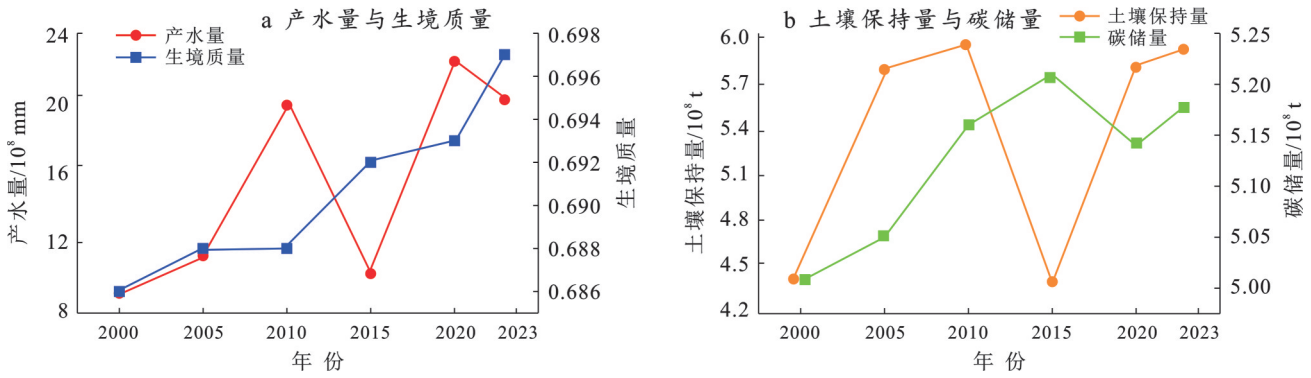


图 1　泾河流域生态系统服务整体变化趋势

Fig.1　Overall trends of ecosystem services in Jinghe River basin

3.2　生态系统服务权衡与协同关系分析

3.2.1　全域尺度

泾河流域全域尺度的 4 种生态系统服务分别为产水量(WY)、生境质量(HQ)、土壤保持量(SC)、碳储量(CS)。其两两之间存在着不同的权衡与协同关系(图 3)。由图 3 可知,2000—2023 年 4 种生态系统服务之间的 6 对组合权衡与协同关系总体上趋于稳定,不同之处的就是强弱程度有变化。其中 WY-HQ, WY-CS 呈权衡关系,而 HQ-SC, HQ-CS, SC-CS 呈协同关系。从图 3 可以看出,2000,2005 和 2010 年 WY-HQ 是弱权衡关系,而在 2015,2020 和 2023 年则变为强权衡关系,2015,2020 和 2023 年 WY-CS 是极强的权衡关系。HQ-SC, HQ-CS, SC-CS 在所有年份都呈现出较强的协同关系,HQ-SC, HQ-CS 的协同关系尤为明显,所有年份均高于 0.5。

3.2.2　县域尺度

泾河流域县域尺度的生态系统服务权衡与协同关系呈现出显著的空间分异特征(图 4)。WY-HQ 关系在北部以较强协同为主,中部多为强协同,而南部局部地区的乾县、礼泉县和泾阳县则表现为强权衡;WY-SC 整体呈协同趋势,且自西北向东南依次递进为弱协同、较强协同、强协同至极强协同,层次分明;WY-CS 空间格局较为复杂,大部分县域为较强协同,中东部部分县域达强协同,南部少数区域如灵台县、长武县为较强权衡,乾县、礼泉县、泾阳县等地则呈强权衡。HQ-SC 以弱协同为主,占比超过 90%,西部局部为强协同,南部个别县域出现弱权衡或强权衡;HQ-CS 在所有县域均为协同关系,北部大部及南部局部为极强协同,东部和西部为强协同,中部则以弱协同和较强协同为主;SC-CS 以强协同为主,但中部部分县域及东北部局部存在弱权衡,南部局部地区为强权衡。整体表明,不同服务组合的空间格局差异明显,反映了自然条件与人类活动共同作用下的生态系统复杂响应。

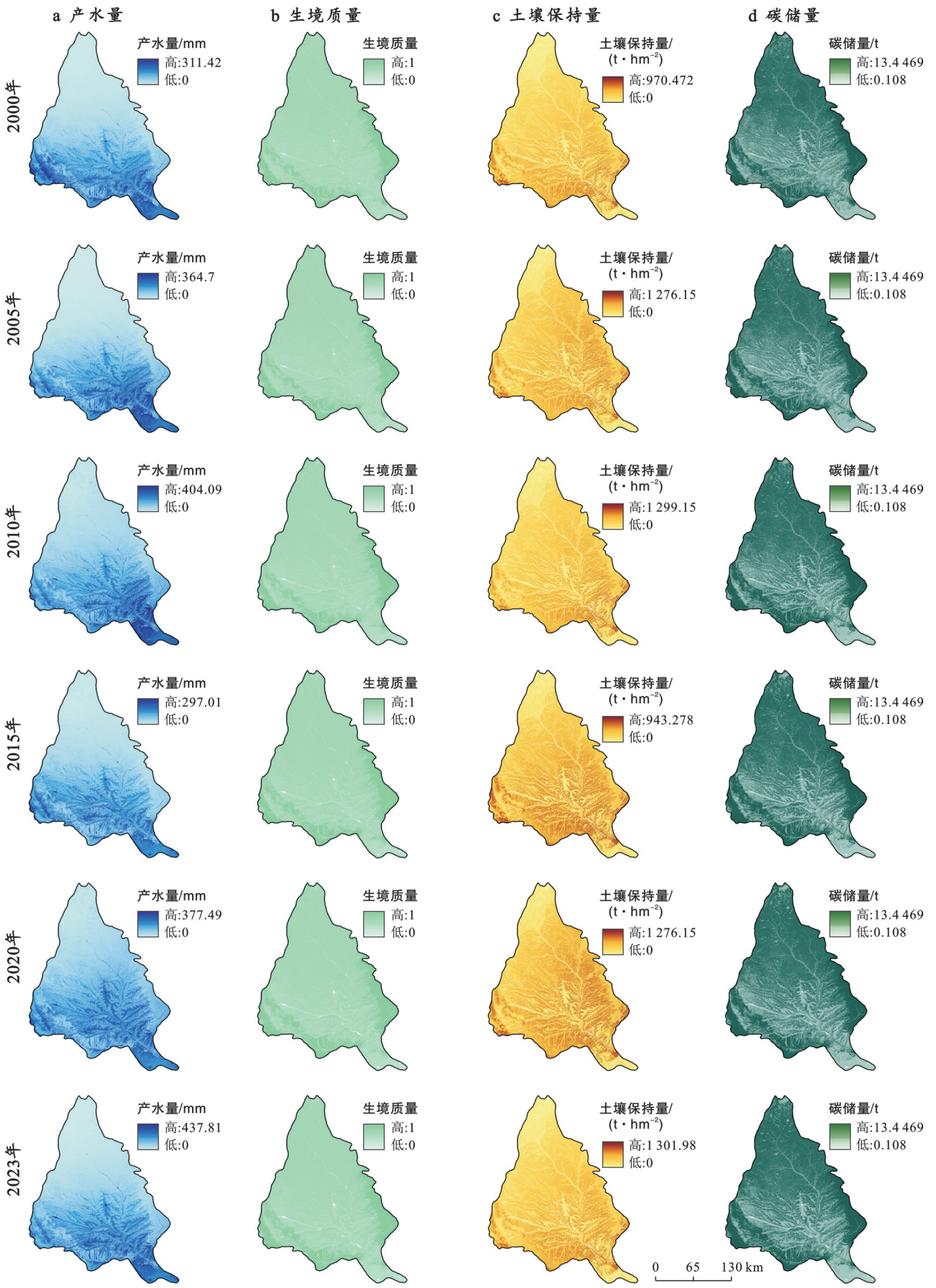


图 2 泾河流域生态系统服务时空变化

Fig.2 Spatiotemporal changes of ecosystem services in Jinghe River basin

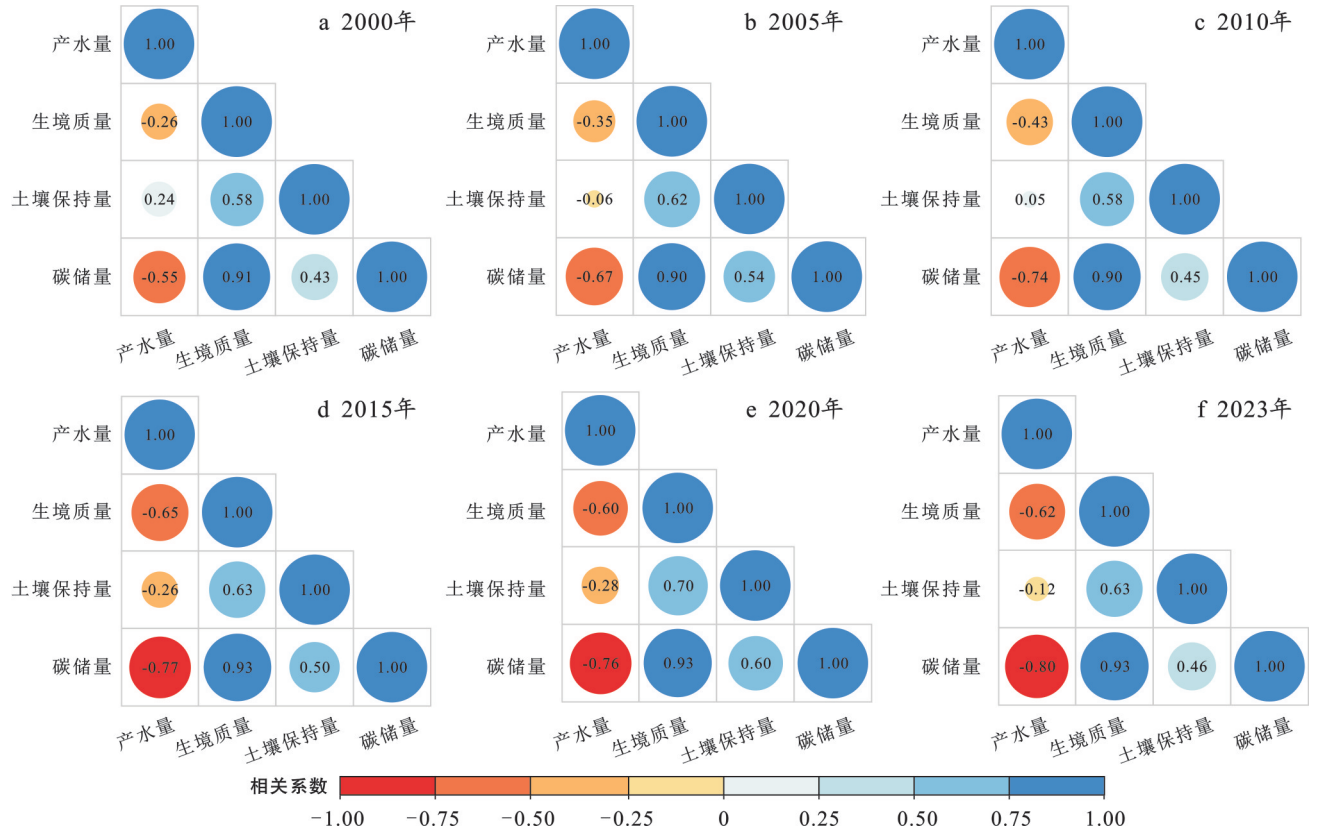
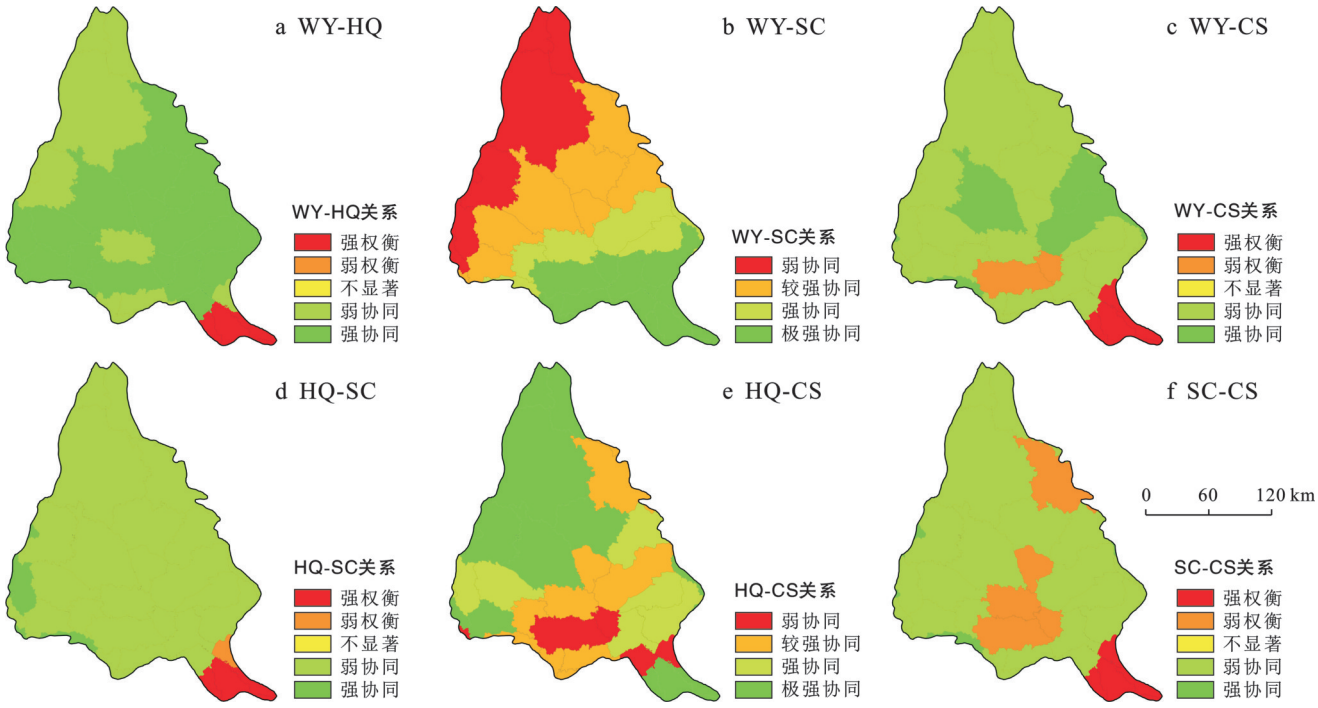


图 3　泾河流域全域生态系统服务权衡与协同关系

Fig.3　Trade-offs and synergies among ecosystem services across Jinghe River basin



注:WY 为产水量; HQ 为生境质量; SC 为土壤保持量; CS 为碳储量。下同。

图 4　泾河流域县域生态系统服务权衡与协同关系

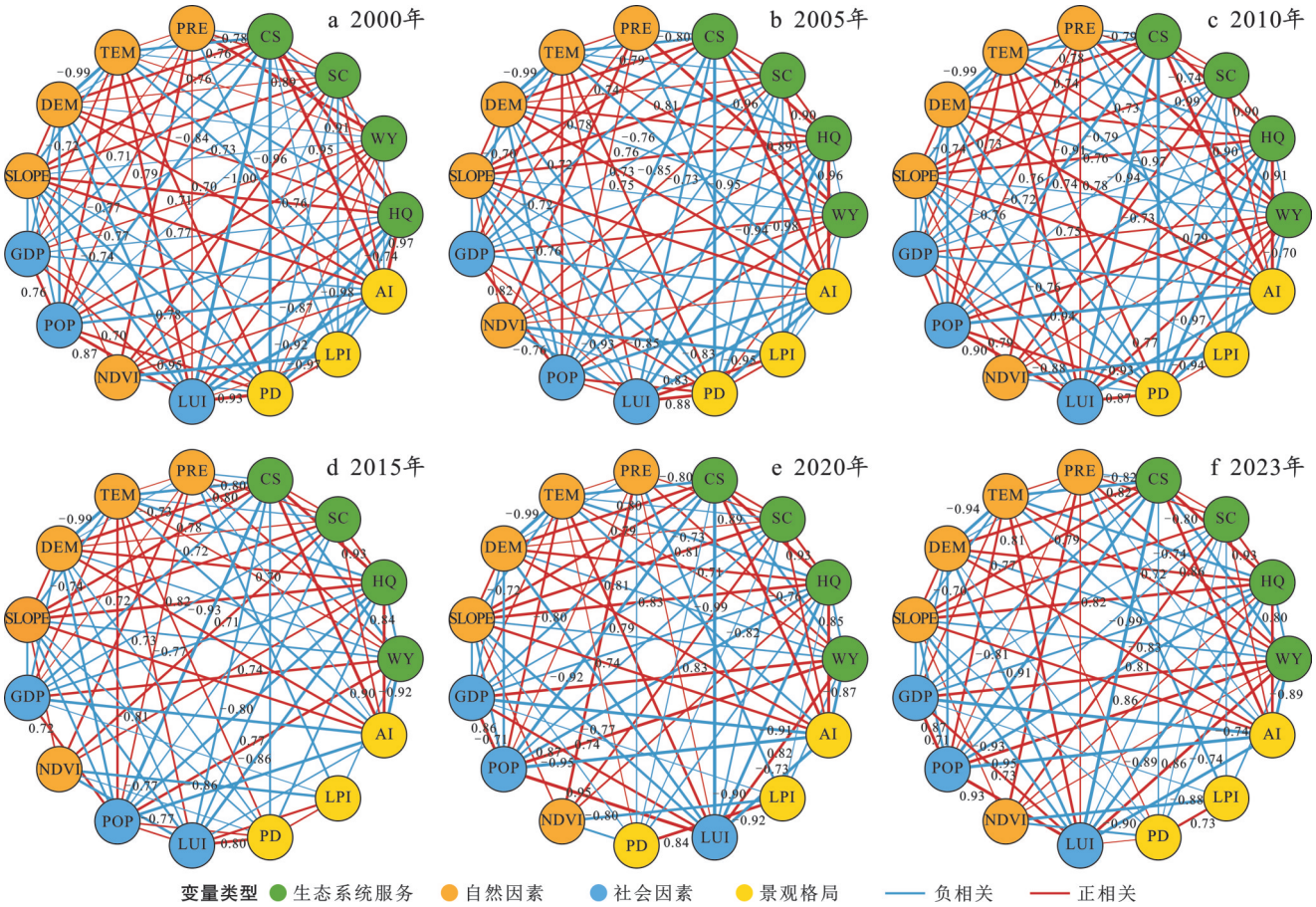
Fig.4　Trade-offs and synergies among ecosystem services at county level in Jinghe River basin

3.3　生态系统服务网络分析

基于 Pearson 相关系数($p \leqslant 0.05$),构建生态系统服务、自然因子、社会经济因子及景观格局指数间的相关性网络(图 5)。节点代表变量,边的粗细反映相关性强度,并以相关系数值为依据。为突出主要关系,图 5 中仅保留$|r| \geqslant 0.7$的显著关联,从自然因子、社

会经济因子、景观格局因子及生态系统服务等4个维度进行探究。

研究表明，2000—2023年生态系统服务受多类因子共同驱动，表现出“气候-社会-景观格局”多重耦合的态势。自然因子中，降水与产水量呈显著正相关，并促进土壤保持；气温升高可能加剧植被胁迫与碳损失；归一化植被指数与生境质量长期保持稳定正相关，与产水量整体呈正向关系，说明植被改善对生态系统质量与水源涵养具有积极作用。社会经济因子方面，土地利用强度、人口密度和GDP与生境质量、碳储量普遍负相关，表明城镇化与高强度开发持续削弱生态功能。景观格局因子中，聚集指数和最大斑块指数与生境质量、碳储量正相关，而斑块密度与生境质量、碳储量显著负相关，表明景观连通和大斑块格局有利于维持生态系统稳定性，破碎化则削弱其功能。整体上，研究区的生态系统服务驱动网络在2000—2023年趋于稳定，形成多因子协同驱动格局。



注：X_1为降雨因子(PRE)，X_2为气温因子(TEM)，X_3为DEM，X_4为坡度因子(SLOPE)，X_5为NDVI因子，X_6为GDP因子，X_7为人口密度因子(POP)，X_8为土地利用强度因子(LUI)，X_9为斑块密度(PD)，X_{10}为最大斑块指数(LPI)，X_{11}为高聚集度(AI)。下同。

图5 泾河流域生态系统服务网络图

Fig.5 Ecosystem service network of Jinghe River basin

3.4 广义加性模型的非线性拟合分析

采用广义加性模型(GAM)对泾河流域生态系统服务权衡与协同关系的非线性驱动因素进行分析，最终从11个影响因子中筛选出拟合效果最明显的主导因子(图6蓝色阴影为95%的置信区间)，结果表明，坡度(X_4)是WY-HQ和WY-CS的主导因子，随坡度增加，WY-HQ在多数年份于约22°处由权衡转为协同，2000年和2020年则由强权衡减弱为弱权衡；WY-CS同样在22°左右由权衡转为协同，且年际影响趋于稳定。人口密度(X_7)主导了WY-SC关系，当人口密度低于200人/km²时呈权衡，超过200人/km²后关系改善，达到700人/km²左右时转为协同。土地利用强度(X_8)对HQ-SC影响显著且具年际差异：2000和2010年整体协同，2020和2023年在强度指数超过3.5时由协同转为权衡，而2005和2015年则随强度增加协同增强。NDVI(X_5)作为HQ-CS的主导因子，二者始终协同，但随NDVI升高，协同强度由强转弱，整体趋于稳定。土地利用强度(X_8)主导SC-CS关系，2000—2015年整体协同，表明土地利用强度指数在2.0～3.0对SC-CS平衡关系是一个积极的

作用;2020年开始,当土地利用强度指数大于3.5时,SC-CS由协同转向为弱权衡,反映出复杂的非线性响应特征。

研究结果总体表明,各驱动因子对生态系统服务权衡与协同关系的影响具有显著的非线性与阈值效应,且随时间动态变化,以社会因素最为突出,这表明在实际生产生活实践中应当注重这些社会因素关键阈值的变化,及时做出调控和应对措施。

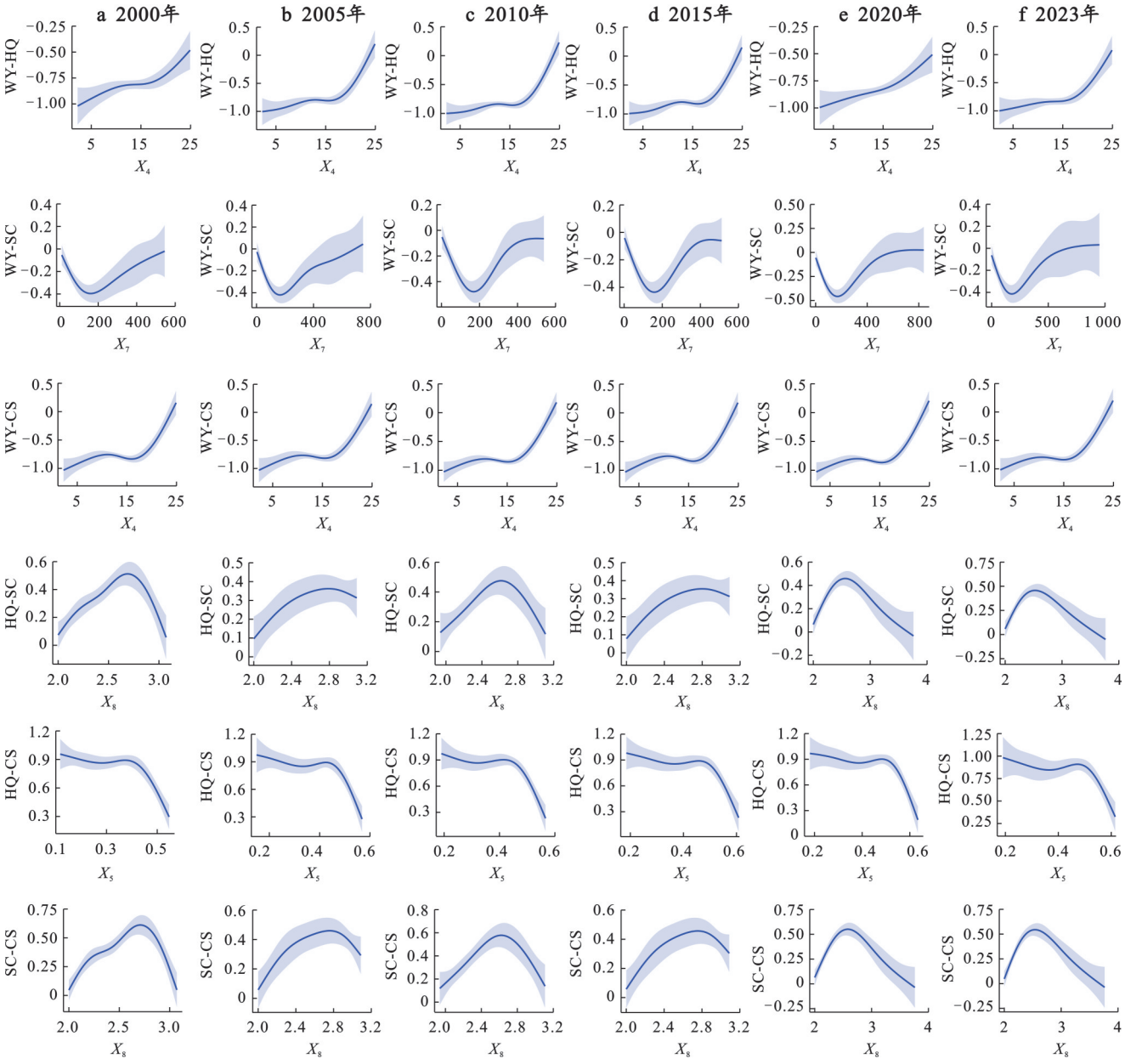


图 6　泾河流域生态系统服务权衡与协同关系广义加模型单因子拟合结果

Fig.6　Single-factor fitting results of generalized additive model for trade-offs and synergies among ecosystem services in Jinghe River basin

交互因子对生态系统服务权衡与协同关系的影响具有明显的时空动态性。如图7所示,2000—2023年各服务组合的主导交互因子随时间变化,表现出“同年不同因,同响应变量不同影响因子”的特征。WY-HQ的主导交互因子在2000年为X_2(气温)和X_3(DEM),当气温低于8 ℃,高程低于500 m时,二者交互作用显著,使关系呈强协同;在气温约10 ℃、高程约1 000 m时,由权衡转为协同。2005年主导因子为X_1(降雨)和X_3(DEM),2010年为X_1(降雨)和X_6(GDP),2015年为X_5(NDVI)和X_6(GDP),2020年和2023年再次转为X_1(降雨)和X_3(DEM),表明该组合在研究后期趋于稳定。WY-SC的主导因子同样动态变化:2000年和2010年为X_1(降雨)和X_3(DEM),2005年为X_1(降雨)和X_{11}(AI),2015年和2023年为

X_1（降雨）和 X_8（LUI），2020 年为 X_7（人口密度）和 X_{10}（LPI）。

尽管因子更替，WY-SC 整体呈协同趋势，多数年份由弱协同向强协同转变。WY-CS 主要受 X_1（降雨）和 X_3（DEM）驱动，当降雨小于 450 mm 且高程大于 1 000 m 时协同显著；反之则呈权衡，降雨量 450 mm 和高程 1 000 m 为关键转折点。HQ-SC 以 X_3（DEM）和 X_{10}（LPI）为主导因子，2005 年当高程处于 1 300 m，LPI 为 25 时，HQ-SC 由权衡转为协同，高程低于 1 300 m 且 LPI 小于 25 时权衡关系明显；2010 和 2015 年二者交互维持协同状态。HQ-CS 始终为协同关系，主导因子为 X_2（气温），X_9（PD）和 X_3（DEM）和 X_4（坡度），其交互变化主要影响 HQ-CS 强协同与弱协同的转换。SC-CS 的主导因子年际变化最显著：2000 年为 X_7（人口密度）和 X_9（PD），2005 年为 X_3（DEM）和 X_{10}（LPI），2010 年为 X_3（DEM）和 X_8（LUI），2015 年为 X_6（GDP）和 X_{11}（AI），2020 年为 X_7（人口密度）和 X_{10}（LPI），2023 年为 X_7（人口密度）和 X_8（土地利用强度），反映出该组合关系的高度活跃性及权衡协同状态的频繁转换。

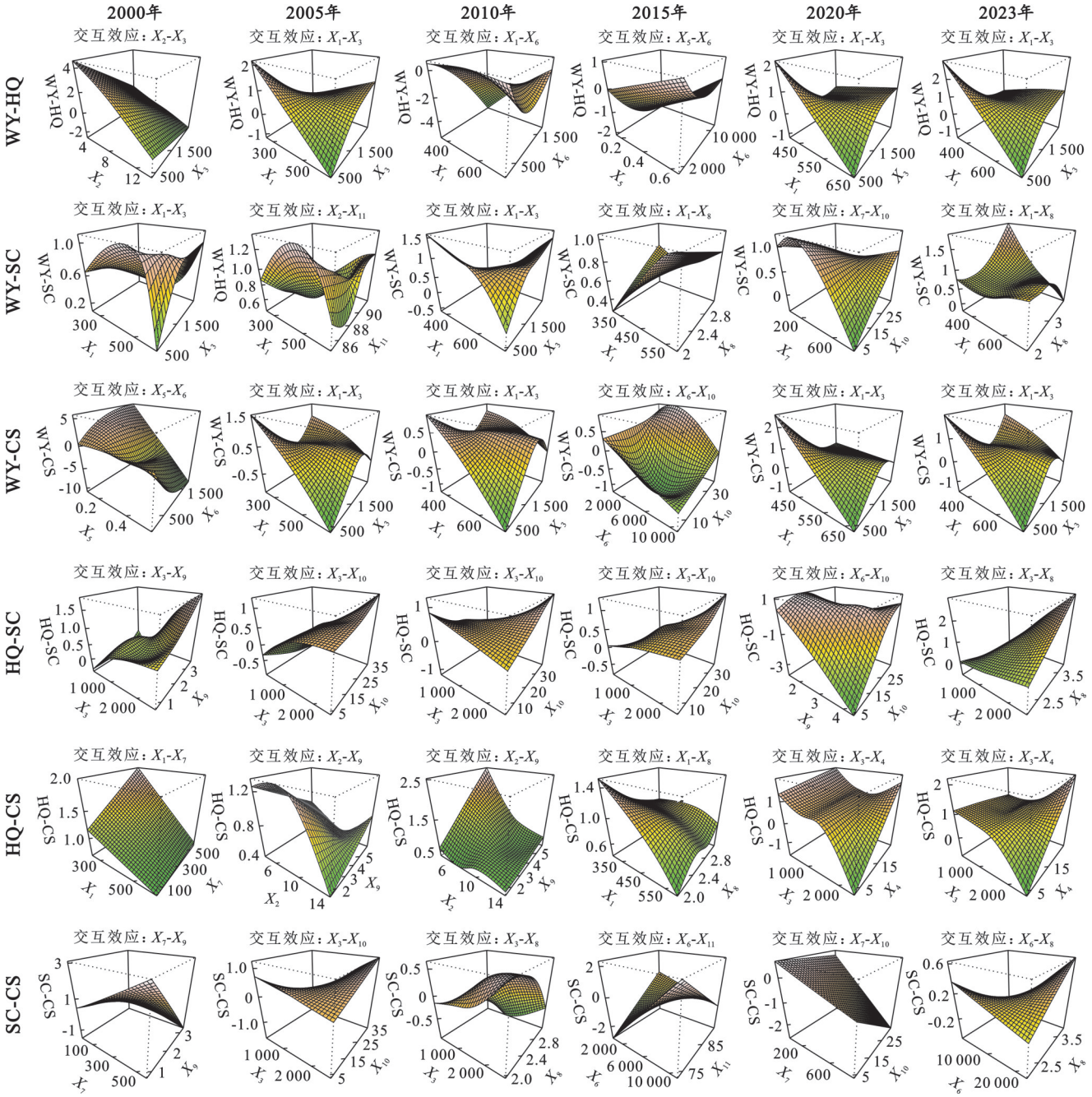


图 7　泾河流域生态系统服务权衡与协同关系广义加模型交互因子拟合结果

Fig.7　Interaction factor fitting results of generalized additive model for trade-offs and synergies among ecosystem services in Jinghe River basin

4　讨　论

4.1　泾河流域2000—2023年生态系统服务评估

泾河流域2000—2023年产水量经历了“增加-减少-再增加”的变化过程,空间分布上呈现“南多北少”的空间格局。不难发现这与同期的降雨量大小有直接关系,降雨量较大的年份,产水量普遍偏高,同时,空间分布格局与实际降雨量情况比较相符,与管子隆[23]的研究基本一致。景观格局因素是影响生境质量与其他生态系统服务之间关系的最大因子,土壤保持量与土地利用强度和地形因素有较强的联系,坡度较大地区,土质疏松容易流失,不易积累,与薛曾辉等[24]研究基本一致。生境质量与碳储量在空间分布上出现明显的相似性,与两者有着共同的影响因素密切相关[25]。

4.2　泾河流域生态系统服务权衡与协同关系研究

产水量与生境质量、土壤保持量、碳储量是比较稳定且较强的权衡(协同)关系,与张文静等[26]的研究大致一样。产水量与生境质量的权衡关系,是水土流失比较严重导致生态环境质量降低,随即导致生境质量产生变化。产水量与土壤保持量的权衡关系,是由于土壤侵蚀和径流作用增强带走很多的泥沙,与张宇洁等[27]的研究基本上相同。产水量与碳储量的显著权衡关系是由于流域内植被增多,拦截了水流,但有利于碳的堆积,即产水量的减少使得碳储量增大。生境质量与土壤保持量存在着比较显著的协同关系,土壤保持量较多,更有利于微生物及有机质的存活,那么生物多样性的增多,则会使生境质量变好。生境质量与碳储量在历年间都具有极强的协同关系,这是因为植被的增加不仅有固碳的作用,同时也利于生物的生存,由此生境质量得到提升。土壤保持量与碳储量也呈比较明显的协同关系,林地的增加使水土流失减少,吸收碳而释放氧气,很大程度上土壤保持效益较好,土壤保持量和碳储量皆明显增加。

4.3　泾河流域生态系统服务影响因子之间的相关性研究

泾河流域生态系统服务受自然因素、社会经济因素及景观格局的耦合调控,并体现出显著的因子间相关性。自然因子中,降水与NDVI呈强正相关,共同促进产水量和生境质量,与贾路等[28]的研究结果比较一致,而气温与NDVI、生境质量及碳储量呈负相关,表明升温对生态功能具有抑制作用,与金岩松等[29]得出的结果相近。社会经济因子内部,GDP、人口密度与土地利用强度高度正相关,并均与生境质量和碳储量显著负相关,反映城镇化和开发活动对生态系统服务的压力,这个研究结果与江伟康等[30]得出的结论相似。景观格局因子中,高聚集度(AI)和最大斑块指数(LPI)正相关并强化生态系统服务,而斑块密度(PD)升高则削弱功能,杨婉清等[31]也是这样的观点。因子间耦合关系明显:气候与社会因素相互作用影响土地利用与生态功能,景观格局与自然、社会因子共同决定生态系统服务空间分布。整体来看,2000—2023年生态系统服务驱动机制呈气候-社会-景观格局多重耦合,因子相关性在调控生态功能中起核心作用。

4.4　泾河流域生态系统服务权衡与协同关系的影响机制

相较于地理探测器主要从定性角度揭示驱动因子对空间分异的解释力,广义加性模型(GAM)能够同时从定性与定量两个维度深入解析驱动机制。本文基于广义加性模型,系统探究单因子及双因子对生态系统服务权衡与协同关系的影响,不仅识别关键驱动因素的作用方向与非线性特征(定性),还量化其解释力度与边际效应(定量),从而提供更全面、精细的驱动机制解析。根据试验结果的实际情况,结合最终驱动因子选取,社会因素对生态系统服务权衡与协同关系影响显著,与多数学者研究的自然因素占主导的情况存在明显差异。广义加性模型探究的驱动因子对生态系统服务权衡与协同关系微观上的影响,对于现实情况有一定的指导作用。例如,研究发现,土地利用强度是影响土壤保持量与碳储量关系的主导因子,当土地利用强度指数在2.0～3.5内,土壤保持量与碳储量呈协同关系,说明两者保持较好的状态,而当土地利用强度指数大于3.5时,两者关系由协同转向权衡,按照趋势来看,土地利用强度不能过大,否则土壤保持量和碳储量关系会呈失衡状态。此外,本研究发现各类影响因素相互作用也是影响生态系统服务权衡与协同关系的关键,与段如梦等[32]的研究大体上是一致的。

4.5　研究展望

对后续研究提出几点想法:①未来研究可以适当再增加一些生态系统服务功能,以增强研究的全面性。②研究可从多尺度来进行分析,可增加网格尺度、子流域尺度进行对比分析,使得研究更具有实际意义。③可以考虑多情景下和气候变化背景下生态系统服务权衡与协同关系研究,可为未来实际规划与精准治理提供依据。

5 结 论

（1）2000—2023年泾河流域产水量、土壤保持量和碳储量均呈“先增—后降—再增”的波动趋势，生境质量总体稳定。空间上，产水量和土壤保持量呈“南高北低”，生境质量与碳储量分布格局相似，均表现为东西部较高、中北部较低。

（2）全域尺度上，产水量与生境质量、碳储量持续权衡；与土壤保持量由协同转为权衡，主要受降雨变化影响；生境质量与土壤保持、碳储量呈较强至极强协同，土壤保持与碳储量也保持稳定协同。县域尺度上，协同关系占主导，空间差异显著：WY-HQ在南部乾县、礼泉县、泾阳县等地呈强权衡；WY-SC自西北向东南协同增强；WY-CS格局复杂，南部局部权衡；HQ-SC以弱协同为主；HQ-CS全域协同；SC-CS以强协同为主，局部存在权衡。

（3）生态系统网络分析，生态系统服务的驱动机制为“气候-社会-景观格局”多重耦合驱动。降水促进产水与土壤保持，升温抑制生境质量与碳储量，植被覆盖（NDVI）对生态功能具有正向作用；土地利用强度、人口密度和GDP的提升对生态系统服务呈负向影响；景观聚集度和大斑块有利于生态功能维持，而景观破碎化则产生抑制作用。

（4）广义加性模型揭示，坡度、人口密度、土地利用强度是关键驱动因子，说明了社会因子占主导地位，此外，其与自然因子、景观格局因子的交互作用也很明显。非线性分析显示，主导因子作用存在阈值效应和动态转换，经地理探测器模型验证后发现两种模型得出的主导因子结果高度一致，验证了驱动机制的稳定性。综上所述，泾河流域生态系统服务关系受多因素非线性交互作用调控，呈现复杂而有序的时空演变格局。

（5）在全域尺度上，应强化流域整体统筹，科学优化生态功能分区，建立健全跨县域生态补偿机制，并将生态风险评估前置到重大基础设施规划阶段，从源头规避对生态系统服务的不利影响。在县域尺度上，需推行“一县一策”的精准治理模式，结合各地主导驱动因子（如土地利用强度、人类活动等）的差异，制定针对性的管控措施；唯有将全域系统谋划与县域精细施策有机结合，才能有效协调生态保护与发展的关系，实现流域高质量发展与生态安全的协同共进。

参考文献（References）

[1] Daily G C. Nature’s Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems [M]. Washington, D C: Island Press, 1997.

[2] 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 Bojie, Zhang Liwei. Land-use change and ecosystem services: Concepts, methods and progress [J]. Progress in Geography, 2014, 33(4): 441-446.

[3] 翟家祺，罗永忠，罗昕，等.土地利用变化背景下山东省生态系统服务及权衡与协同关系[J].环境科学，2025，46(9)：5907-5918.
Zhai Jiaqi, Luo Yongzhong, Luo Xin, et al. Ecosystem services and trade-offs and synergies in Shandong Province under the background of LUCC [J]. Environmental Science, 2025, 46(9): 5907-5918.

[4] 张家其，朱莉，阳斌成.洞庭湖流域生态系统服务供需时空演变与情景预测[J].长江流域资源与环境，2024，33(8)：1702-1714.
Zhang Jiaqi, Zhu Li, Yang Bincheng. Temporal and spatial evolution and multi-scenario of ecosystem services supply and demand in Dongting Lake basin [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2024, 33(8): 1702-1714.

[5] 胡和兵，申雪萌，黄智祥，等.皖北粮食主产区生态系统服务权衡与协同作用强度及其驱动因素[J].水土保持通报，2025，45(2)：383-396.
Hu Hebing, Shen Xuemeng, Huang Zhixiang, et al. Trade-offs and synergy intensity among ecosystem services and driving factors in main grain-producing areas of northern Anhui Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(2): 383-396.

[6] 孙才志，于涵，郝帅.辽河流域生态系统服务权衡-协同效应及其驱动因素[J].生态学报，2025，45(6)：2952-2967.
Sun Caizhi, Yu Han, Hao Shuai. Analysis of the trade-off synergy effect and driving factors of ecosystem services in the Liaohe River basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(6): 2952-2967.

[7] 石晓蕊，信忠保.雅鲁藏布江流域生态系统服务评估及其权衡/协同关系[J].水土保持学报，2025，39(5)：209-218.
Shi Xiaorui, Xin Zhongbao. Ecosystem services evaluation and their trade-offs/synergies in Yarlung Tsangpo River basin [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(5): 209-218.

[8] Shao Yuting, Xiao Yi, Sang Weiguo. Land use trade-offs and synergies based on temporal and spatial patterns of ecosystem services in south China [J]. Ecological Indicators, 2022, 143: 109335.

[9] Simeon M, Wana D. Synergies and trade-offs among key ecosystem services in Maze National Park and its environs, southwestern Ethiopia [J]. Global Ecology and

Conservation, 2025,57:e03398.

[10] Washbourne C L, Goddard M A, Le Provost G, et al. Trade-offs and synergies in the ecosystem service demand of urban brownfield stakeholders [J]. Ecosystem Services, 2020,42:101074.

[11] Aslaksen I, Bryn A, Clemmensen K, et al. Afforestation on Nordic grasslands: Trade-offs and synergies for climate mitigation, biodiversity, and ecosystem services [J]. Global Environmental Change Advances, 2025,4:100015.

[12] Zhang Zhimin, Chang Yachao, Yao Chongchong. The multiscale spatiotemporal heterogeneity of ecosystem service trade-offs/synergies and bundles and socioecological drivers in the Yangtze River delta region of China [J]. Sustainability, 2025,17(16):7200.

[13] Du Qianxihui, Wang Zhigang, Wang Jianlei, et al. Assessing the trade-off between ecological conservation and local development in Wuyishan National Park: A production-living-ecological space perspective [J]. Forests, 2024,15(7):1152.

[14] Huang Jixing, Yang Shuqi, Zhu Weihan, et al. Spatial and temporal characterization of critical ecosystem services in China's terrestrial area, 2000—2020: Trade-off synergies, driving mechanisms and functional zoning [J]. Frontiers in Ecology and Evolution, 2024, 12:1443683.

[15] Dashtbozorgi F, Hedayatiaghmashhadi A, Dashtbozorgi A, et al. Ecosystem services valuation using InVEST modeling: Case from southern Iranian mangrove forests [J]. Regional Studies in Marine Science, 2023,60:102813.

[16] 张嘉琪,刘招,韩忠青,等.气候变化下泾河流域蓝绿水变化趋势及预测[J].干旱区研究,2024,41(12):2045-2055.
Zhang Jiaqi, Liu Zhao, Han Zhongqing, et al. Trend change and prediction of blue-green water in the Jinghe River basin under climate change [J]. Arid Zone Research, 2024,41(12):2045-2055.

[17] Yan Fapeng, Shangguan Wei, Zhang Jing, et al. Depth-to-bedrock map of China at a spatial resolution of 100 meters [J]. Scientific Data, 2020,7:2.

[18] 刘洋.黄河流域生态系统服务及其权衡协同关系特征[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2023.
Liu Yang. Characterization of ecosystem services and their trade-off synergies in the Yellow River basin [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2023.

[19] 鞠琴,卜媛媛,申同庆,等.黄河水源涵养区生态系统服务要素时空演变及权衡与协同分析[J].水资源保护,2025,41(2):38-46.
Ju Qin, Bu Yuanyuan, Shen Tongqing, et al. Spatiotemporal evolution and trade-off and synergy analysis of ecosystem service factors in the Yellow River water conservation area [J]. Water Resources Protection, 2025,41(2):38-46.

[20] 王舒民,刘招,管子隆,等.油坊沟流域典型生态系统服务权衡与协同关系研究[J].水利水电技术,2025,56(5):71-85.
Wang Shumin, Liu Zhao, Guan Zilong, et al. Study on the trade-offs and synergistic relationships of typical ecosystem services in the Youfanggou watershed [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025,56(5):71-85.

[21] 刘康,张寒,张道军,等.黄土高原生态系统碳储量情景模拟与驱动因素:基于PLUS-InVEST-Geodector模型的研究[J].中国环境科学,2025,45(4):2159-2170.
Liu Kang, Zhang Han, Zhang Daojun, et al. Scenario simulation and driving factors of ecosystem carbon storage in the Loess Plateau: A study based on the PLUS-InVEST-Geodetector model [J]. China Environmental Science, 2025,45(4):2159-2170.

[22] 张薇,王凤春,万虹麟,等.大运河(河北段)土地利用变化驱动生态服务功能演变及权衡/协同分析[J].地球物理学进展,2025,40(6):2551-2567.
Zhang Wei, Wang Fengchun, Wan Honglin, et al. Analysis of spatiotemporal changes and tradeoffs/synergies of ecosystem services driven by land use change in Hebei Grand Canal [J]. Progress in Geophysics, 2025,40(6):2551-2567.

[23] 管子隆.变化条件下黄土台塬地区小流域水文生态演变机理及保护研究[D].陕西 西安:长安大学,2021.
Guan Zilong. Study on hydro-ecological evolution mechanism and protection of small watershed in loess tableland under changing conditions [D]. Xi'an, Shaanxi: Chang'an University, 2021.

[24] 薛曾辉,高驭洋,卢柽达,等.基于土地利用和地形的生态系统服务空间分布及权衡-协同-独立关系:以安塞区为例[J].水土保持研究,2024,31(2):240-251.
Xue Zenghui, Gao Yuyang, Lu Pingda, et al. Spatial distribution and tradeoff-synergy-independence relationships of ecosystem services based on land use and topography: Taking the Ansai District as an example [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(2):240-251.

[25] 钟绍卓,孙浩源.不同情景下祁连山国家级自然保护区生态系统服务时空变化及权衡与协同关系[J].水土保持研究,2023,30(5):358-369.
Zhong Shaozhuo, Sun Haoyuan. Assessment on spatiotemporal variation and synergies/tradeoffs relationships of ecosystem services in Qilian Mountain National Nature Reserve under different scenarios [J]. Research

of Soil and Water Conservation, 2023,30(5):358-369.

[26] 张文静,孙小银,周俊.南四湖流域关键生态系统服务的时空权衡关系[J].生态学报,2021,41(20):8003-8015.
Zhang Wenjing, Sun Xiaoyin, Zhou Jun. Spatio-temporal dynamics of tradeoffs between crucial ecosystem services in Nansihu Lake basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(20):8003-8015.

[27] 张宇洁,张晓萍,孙伟楠,等.1970—2020年北洛河流域产水、保土、固碳生态系统服务时空演变特征与权衡/协同关系[J].水土保持学报,2025,39(2):365-377.
Zhang Yujie, Zhang Xiaoping, Sun Weinan, et al. Spatiotemporal evolution characteristics and trade-offs/synergies of water yield, soil conservation, and carbon storage ecosystem services in the Beiluo River basin from 1970 to 2020 [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025,39(2):365-377.

[28] 贾路,于坤霞,徐国策,等.基于耦合协调度的黄土高原地区NDVI与降水关系的变异诊断[J].生态学报,2021,41(18):7357-7366.
Jia Lu, Yu Kunxia, Xu Guoce, et al. Diagnosis of the relationship between NDVI and precipitation based on the coupling coordination degree [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(18):7357-7366.

[29] 金岩松,金凯,王飞,等.气候变化和人类活动对东部沿海地区NDVI变化的影响分析[J].环境科学,2023,44(6):3329-3342.
Jin Yansong, Jin Kai, Wang Fei, et al. Impacts of climate change and human activities on NDVI change in eastern coastal areas of China [J]. Environmental Science, 2023,44(6):3329-3342.

[30] 江伟康,吴隽宇.基于地区GDP和人口空间分布的粤港澳大湾区生境质量时空演变研究[J].生态学报,2021,41(5):1747-1757.
Jiang Weikang, Wu Juanyu. Spatio-temporal evolution of habitat quality in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area based on regional GDP and population spatial distribution [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(5):1747-1757.

[31] 杨婉清,杨鹏,孙晓,等.北京市景观格局演变及其对多种生态系统服务的影响[J].生态学报,2022,42(16):6487-6498.
Yang Wanqing, Yang Peng, Sun Xiao, et al. Changes of landscape pattern and its impacts on multiple ecosystem services in Beijing [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(16):6487-6498.

[32] 段如梦,李晓宇,张清.吉林西部生态系统服务功能权衡/协同关系及生态服务簇时空演变[J].环境科学,2025,46(11):7222-7233.
Duan Rumeng, Li Xiaoyu, Zhang Qing. Spatio-temporal variation of ecosystem service trade-offs/synergies and ecosystem service bundles in western Jilin [J]. Environmental Science, 2025,46(11):7222-7233.

(上接第213页)

[28] 赵慧,李梦华,杨建玲,等.2000—2020年宁夏植被净初级生产力时空变化及其驱动因子分析[J].气象与环境学报,2024,40(4):107-115.
Zhao Hui, Li Menghua, Yang Jianling, et al. Spatial and temporal variations of vegetation net primary productivity and its driving factors in Ningxia from 2000 to 2020 [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2024,40(4):107-115.

[29] 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 Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(1):116-134.

[30] Wang Jinfeng, Li Xinhu, Christakos G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(1): 107-127.

[31] 吴楠,陈凝,程鹏,等.安徽省各生态分区的NDVI年际变化特征及归因分析[J].长江流域资源与环境,2023,32(6):1200-1207.
Wu Nan, Chen Ning, Cheng Peng, et al. Analysis on characteristics and attribution of NDVI interannual change in different ecological divisions in Anhui Province [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023,32(6):1200-1207.

[32] 孙语晗,郭兵,孙晓双.顾及时滞与累积效应的中国植被时空演变及其对气候-人类活动的响应机制[J].生态学报,2026,46(2):705-720.
Sun Yuhan, Guo Bing, Sun Xiaoshuang. Spatio-temporal evolution of vegetation in China and its response mechanism to climate-human activities based on time lag and cumulative effects [J]. Acta Ecologica Sinica, 2026,46(2):705-720.