

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.01.044; CSTR:32311.14.rswc.2026.01.044.

段宝玲, 冯强, 王晶, 等. 基于偏相关网络与偏依赖分析的生态系统服务供需驱动因素研究:以三川河流域为例[J]. 水土保持研究, 2026, 33(1):248-260, 272.

Duan Baoling, Feng Qiang, Wang Jing, et al. Research on driving factors of ecosystem service supply and demand based on partial correlation network and partial dependence analysis: a case study of Sanchuan River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2026, 33(1):248-260, 272.

# 基于偏相关网络与偏依赖分析的生态系统服务 供需驱动因素研究 ——以三川河流域为例

段宝玲<sup>1</sup>, 冯强<sup>1</sup>, 王晶<sup>2</sup>, 董思言<sup>3</sup>

(1.山西财经大学 资源环境学院, 太原 030006; 2.中国科学院 生态环境研究中心区域与城市生态安全  
全国重点实验室, 北京 100085; 3.国家气候中心气候系统预测与变化应对全国重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** [目的] 从整体与局部视角揭示生态系统服务供需的驱动机制, 支撑国土空间生态保护修复实践。[方法] 利用 InVEST 模型评估三川河流域 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年固碳、土壤保持与产水服务, 将偏相关网络与偏依赖分析有效结合, 揭示生态系统服务供需网络的整体关联结构与具体驱动阈值。[结果] (1) 20 年间固碳供给整体呈增加趋势, 需求增加更为剧烈, 导致供需比均为负值, 高赤字区域的空间分布与中下游工矿城镇区重合。20 年间土壤保持供给与需求呈波动增加, 供需比呈现东部高盈余、西部高赤字的空间错配格局。产水供给与需求呈增加趋势, 供需比在赤字与盈余之间反复波动, 2020 年全流域恢复盈余, 较 2000 年供需比增加 332%。(2) 构建的生态系统服务供需—影响因子网络具有中等连接密度。土地利用、年降水量、人口密度等因素是网络中连接强度与中心性较高的节点, 成为影响多项服务供需、维系网络结构稳定的关键因子。(3) 人口密度对固碳供需比的影响呈现三阶段非线性驱动特征, 其负向效应在 < 200 人/km<sup>2</sup> 区间最敏感。耕地是土壤保持供需比最重要的负向驱动因子, 其影响在耕地比例处于 20%~40% 区间尤为显著。草地比例 < 25% 时产水供需比快速上升, > 25% 后趋于稳定。[结论] 偏相关网络方法与偏依赖分析的有效结合是生态系统服务供需驱动机制解析的新途径, 为生态保护修复提供了更为丰富的观察视角与参考依据。

**关键词:** 生态系统服务供给与需求; 偏相关网络; 偏依赖分析; 驱动机制; 三川河流域

中图分类号: X171

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)01-0248-13

## Research on driving factors of ecosystem service supply and demand based on partial correlation network and partial dependence analysis —a case study of Sanchuan River Basin

Duan Baoling<sup>1</sup>, Feng Qiang<sup>1</sup>, Wang Jing<sup>2</sup>, Dong Siyan<sup>3</sup>

(1.College of Resources and Environment, Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan, 030006,  
China; 2.State Key Laboratory of Regional and Urban Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3.State Key Laboratory of Climate System Prediction and  
Risk Management, National Climate Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to reveal the driving mechanisms of ecosystem service (ES) supply and demand from holistic and local perspectives, thereby providing support for ecological conservation and restoration practices in territorial spatial planning. [Methods] The InVEST model was employed to evaluate carbon sequestration, soil conservation, and water yield services in the Sanchuan River Basin in the years 2000, 2005, 2010, 2015, and 2020. By effectively integrating partial correlation networks and partial dependence analysis,

收稿日期: 2025-08-21

修回日期: 2025-09-21

接受日期: 2025-09-29

资助项目: 国家自然科学基金(42401129); 教育部人文社会科学研究规划项目(22YJAZH018)

第一作者: 段宝玲(1981—), 女, 山西祁县人, 副教授, 博士, 研究方向为资源环境评价与区域规划。E-mail: sxnddb1@163.com

通信作者: 冯强(1981—), 男, 辽宁凌海人, 副教授, 博士, 研究方向为土地利用与生态系统服务。E-mail: fengqiang921@163.com

<http://stbcyj.paperonice.org>

both the overall correlation structure of supply-demand network and specific driving thresholds were revealed. [Results] (1) Over the past 20 years, the overall carbon sequestration supply showed an increasing trend, while the demand grew more sharply, resulting in a consistently negative supply-demand ratio (SDR). The spatial distribution of high-deficit areas overlapped with midstream and downstream industrial and urban areas. Over the 20-year period, soil conservation supply and demand fluctuated with an increasing trend, and the SDR exhibited a spatial mismatch pattern characterized by high surplus in the east and high deficit in the west. Water yield supply and demand both exhibited an increasing trend, with the SDR fluctuating between deficit and surplus. By 2020, the entire river basin had returned to a surplus state, with the SDR increasing by 332% compared to the year 2000. (2) The constructed ES supply-demand-influencing factor network exhibited moderate connectivity density. Factors such as land use, annual precipitation, and population density were nodes with relatively high connection strength and centrality within the network, acting as key factors influencing multiple ES supply-demand relationships and maintaining the network's structural stability. (3) The impact of population density on the carbon sequestration SDR exhibited a three-stage non-linear driving characteristic, with its negative effect being most sensitive in the range of  $<200$  persons/km<sup>2</sup>. Cropland was the most important negative driving factor of the soil conservation SDR, and its impact was particularly significant when cropland proportion ranged between 20% and 40%. The water yield SDR increased rapidly when grassland proportion was  $<25\%$  and SDR stabilized after grassland proportion exceeded 25%. [Conclusion] The effective integration of partial correlation network and partial dependence analysis offers a novel approach for revealing the driving mechanisms of ES supply and demand, providing richer perspectives and reference for ecological conservation and restoration.

**Keywords:** ecosystem service supply and demand; partial correlation network; partial dependence analysis; driving mechanism; Sanchuan River Basin

生态系统服务是指人类直接或者间接从生态系统得到的所有收益,成为人类社会生存发展的基础<sup>[1]</sup>。生态系统服务供给是指自然生态系统向人类提供产品与服务,而生态系统服务需求则体现为人类对这些产品与服务的消费及使用需求,供给与需求的动态平衡是实现区域可持续发展的关键<sup>[2]</sup>。随着全球气候变化和人类活动加剧,生态系统服务供给能力不足但需求激增,导致供需关系在时空尺度上呈现显著的非均衡性演变,供需错配与矛盾日益凸显,深刻影响着区域生态安全与人类福祉提升<sup>[3-4]</sup>。揭示生态系统服务供需时空格局的演变规律,并深入解析其背后的驱动机制,有助于支撑国土空间生态修复实践,促进区域可持续发展,已成为当前地理学、生态学及环境管理领域的前沿和热点<sup>[5-7]</sup>。

随着生态系统服务管理从时空评估转向动态调控,供需关系的驱动机制解析成为学界关注的焦点。已有研究通过逐步回归、地理加权回归、随机森林模型、地理探测器等方法识别了供需关系的影响因素<sup>[8-10]</sup>。然而,生态系统服务供需关系本质上是自然生态系统与人类社会系统深度耦合的综合表现,其演变过程不仅涉及气候、地形、植被等自然要素的作用,还受到人口、经济、土地利用等社会经济因素的共同影响。自然与社会经济要素的复杂交互作用增加了

供需关系驱动机制解析的难度,使得当前对驱动机制的系统性认知不足。偏相关网络方法是解决该问题的有力工具,与传统方法不同,网络方法关注要素之间的关系而非其属性,能够揭示生态系统服务与自然—社会驱动因素间的复杂作用关系<sup>[11]</sup>。Wang等<sup>[12]</sup>将网络方法应用于黄土高原生态系统服务供给侧研究,证实了该方法的优越性与可靠性。网络方法的优势是揭示生态网络的整体关联结构,但无法识别驱动因素的具体阈值。广泛应用于生态环境领域的随机森林模型及偏依赖分析可以洞察因变量与自变量间复杂非线性关系,揭示驱动变量的阈值效应,进而弥补网络方法的不足<sup>[13]</sup>。因此,偏相关网络方法与偏依赖分析的有效结合将成为生态系统服务供需驱动机制解析的新途径,相关研究亟待开展。

三川河流域地处黄土高原中东部,是黄河中游重要的水源涵养区和生态屏障区,也是人地矛盾尖锐、生态环境脆弱的典型区域。该流域面临水土流失治理、快速城镇化与工矿业发展等多重压力,其生态系统服务供给能力与社会经济需求之间的矛盾尤为突出。已有研究在三川河流域景观格局、径流变化、生态系统服务福祉效应等方面取得了一定进展<sup>[14-16]</sup>,但是对生态系统服务供需关系驱动机制的研究仍然不足。因此,针对当前理论与实践需求,本研究期望回

答如下问题:(1)基于InVEST模型揭示2000—2020年三川河流域固碳、土壤保持与产水服务供需的时空格局;(2)结合偏相关网络与偏依赖分析,解析供需网络整体关联结构及关键驱动因子的阈值效应。本研究有助于加深对生态系统服务供需驱动机制的理解,其识别出的主导驱动因子与临界点为生态系统服务供需的差异化管控提供了明确的科学依据,对保障流域生态安全与可持续发展具有重要的参考价值。

## 1 研究区概况、数据与研究方法

### 1.1 研究区概况

三川河流域(37°03′—38°10′N, 110°34′—111°37′E)位于黄土高原中东部,山西省吕梁市境内(图1)。流域包含离石、柳林、中阳与方山4县(区),地貌可以分为黄土梁峁区、黄土塬区、山地区和平原区四大类。流域土壤类型以黄绵土、褐土为主,质地疏松,抗蚀性差。流域属温带大陆性季风气候,降水集中于7—9月,水土流失严重。流域植被覆盖呈现东高西低的空间分异,东部山地区以森林、灌丛为主,西部黄土地貌区则以耕地、草地为主。三川河流域以煤炭、焦化等资源型产业为支柱,流域内人口较为集中,城镇化进程加快。可见,三川河流域脆弱自然本底与人类活动干扰的叠加效应使其成为生态系统服务供需关系研究的理想场所。

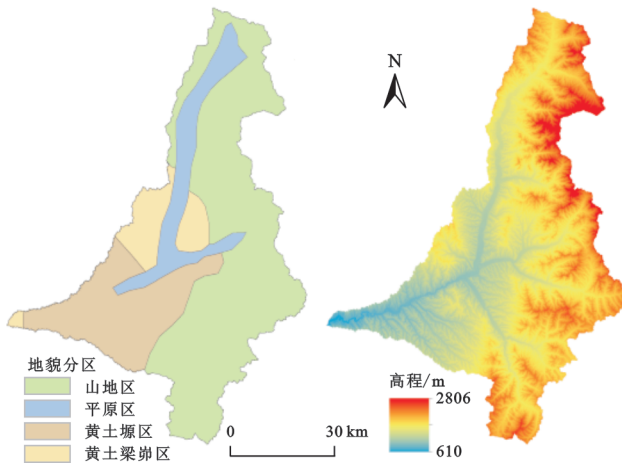


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

### 1.2 数据来源

数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)来自地理空间数据云平台(<https://www.gscloud.cn>);各年土地利用、净初级生产力、人口密度及国内生产总值来自中国资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn>);各年归一化植被指数、蒸散发、降水量及土壤属性通过国家地球系统科学数据中心(<https://www.geodata.cn>)获取;各年用水量数

据源自《山西省水资源公报》,各年能源消费数据源自《山西省统计年鉴》。

### 1.3 生态系统服务供给与需求评估

1.3.1 土壤保持服务 土壤保持供给量通过InVEST模型土壤保持模块计算<sup>[17]</sup>:

$$SEP_x = R_x \times K_x \times LS_x \quad (1)$$

$$SED_x = R_x \times K_x \times LS_x \times C_x \times P_x \quad (2)$$

$$SES_x = (SEP_x - SED_x) \times SDR_x + INT_x \quad (3)$$

式中:SEP<sub>x</sub>为栅格单元x的潜在土壤流失量;R<sub>x</sub>为降雨侵蚀力因子;K<sub>x</sub>为土壤可蚀性因子;LS<sub>x</sub>为地形因子;SED<sub>x</sub>为实际土壤流失量;C<sub>x</sub>为植被覆盖与管理因子;P<sub>x</sub>为水土保持措施因子;SES<sub>x</sub>为土壤保持供给量;SDR<sub>x</sub>为泥沙输移比;INT<sub>x</sub>为对上坡输出泥沙的拦截量。将实际土壤流失量(SED<sub>x</sub>)作为土壤保持需求量。

1.3.2 产水服务 产水供给量通过InVEST模型产水模块计算<sup>[17]</sup>:

$$WYS_{xj} = (1 - \frac{AET_{xj}}{P_x}) P_x \quad (4)$$

式中:WYS<sub>xj</sub>为栅格单元x中土地利用类型j的年产水量;AET<sub>xj</sub>为栅格单元x中土地利用类型j的实际蒸散发;P<sub>x</sub>为栅格单元x的降水量。

产水需求量由农业、工业、生态及生活四大类用水加总获得,将农业用水数据分配至耕地,工业用水数据分配至工矿用地,生态用水数据分配至林地、草地及水域,生活用水数据分配至居住用地,完成产水需求空间制图。

$$WYD = WYD_i \times WYD_a \times WYD_e \times WYD_d \quad (5)$$

式中:WYD为产水需求量;WYD<sub>i</sub>, WYD<sub>a</sub>, WYD<sub>e</sub>, WYD<sub>d</sub>分别为工业生产用水量、农业灌溉用水量、生态用水量及生活用水量。

1.3.3 固碳服务 按照《生态产品总值核算规范》推荐的方法计算固碳供给量<sup>[18]</sup>:

$$CAS = \alpha \times NPP \quad (6)$$

式中:NPP为净初级生产力;CAS为固碳供给量;α为NPP与CAS的转换系数。

固碳需求量利用碳排放量表征,采用碳排放系数计算能源利用产生的碳排放量,通过人口密度栅格数据完成固碳需求空间制图:

$$CAD_x = CAE_{per} \times Pod_x \quad (7)$$

$$CAE_{per} = CAE_{sum} / P_s \quad (8)$$

式中:CAD<sub>x</sub>为栅格x的固碳需求量;CAE<sub>per</sub>为人均碳排放量;Pod<sub>x</sub>为栅格x的人口数;CAE<sub>sum</sub>为碳排放总量;P<sub>s</sub>为人口总量。

### 1.4 生态系统服务供需比计算

生态系统服务供需比的计算公式如下<sup>[19]</sup>:

$$ESR = \frac{ESS - ESD}{(ESS_{max} + ESD_{max})/2} \quad (9)$$

式中:ESS,ESD,ESR表示生态系统服务的供给量、需求量、供需比;ESS<sub>max</sub>与ESD<sub>max</sub>表示生态系统服务供给与需求在流域内的最大值。ESR正值表示服务供过于求,零值表示供需平衡,负值表示供不应求。

### 1.5 数据分析

基于生态系统服务供给与需求的基础理论,考虑影响因素的必要性与可获得性,选择气候(年降水量、年均气温)、土壤地形(土壤有机质含量、坡度、海拔)、土地覆盖(归一化植被指数、主要土地利用类型)、社会经济(人口密度、国内生产总值)4大类影响因素。鉴于政策、文化等潜在因素对生态系统服务影响的间接性,并且其空间异质性不易量化,因此本研究未采用。本研究利用偏相关网络揭示生态系统供需(供给、需求、供需比)与影响因素的相互作用机制。利用R软件bootnet, qgraph包完成偏相关网络分析。使用estimateNetwork函数EBICglasso方法估计偏相关网络,相关性计算采用spearman函数。利用centralityPlot函数可视化网络节点的中心性指标,使用corStability函数估计中心性指数的相关稳定性系数。同时,利用R软件randomForest包训练随机森林模型,利用rfPermute包进行驱动变量的显著性检

验;利用pdp包绘制偏依赖图,解析生态系统服务供需的具体驱动阈值。

## 2 结果与分析

### 2.1 生态系统服务的时空演变

由图2可知,2000—2020年三川河流域固碳服务供给量表现为增加的趋势。各年份地貌分区之间固碳供给多表现为山地区最高,平原区与黄土梁峁区次之,黄土塬区最低的趋势。2000—2020年土壤保持服务供给表现为波动增加的趋势。地貌分区之间土壤保持服务供给往往表现为山地区>黄土塬区>平原区。2000—2020年产水服务供给表现为下降—增加—下降—增加的趋势,并且波动幅度较大。2000—2015年平原区、黄土塬区、黄土梁峁区、山地区分别增加—12.1%,—45.7%,—22.4%,23.9%,而2000—2020年则分别增加139.8%,147.4%,143.4%,192.1%。2000—2015年降水变幅较小但2020年大幅增加,上述结果说明一般降水年份下平原区与黄土塬区及梁峁区产水供给能力呈现下降趋势,而高降水年份扭转了该趋势。地貌分区之间产水供给表现为平原区与黄土梁峁区较高,而山地区与黄土塬区较低的趋势。

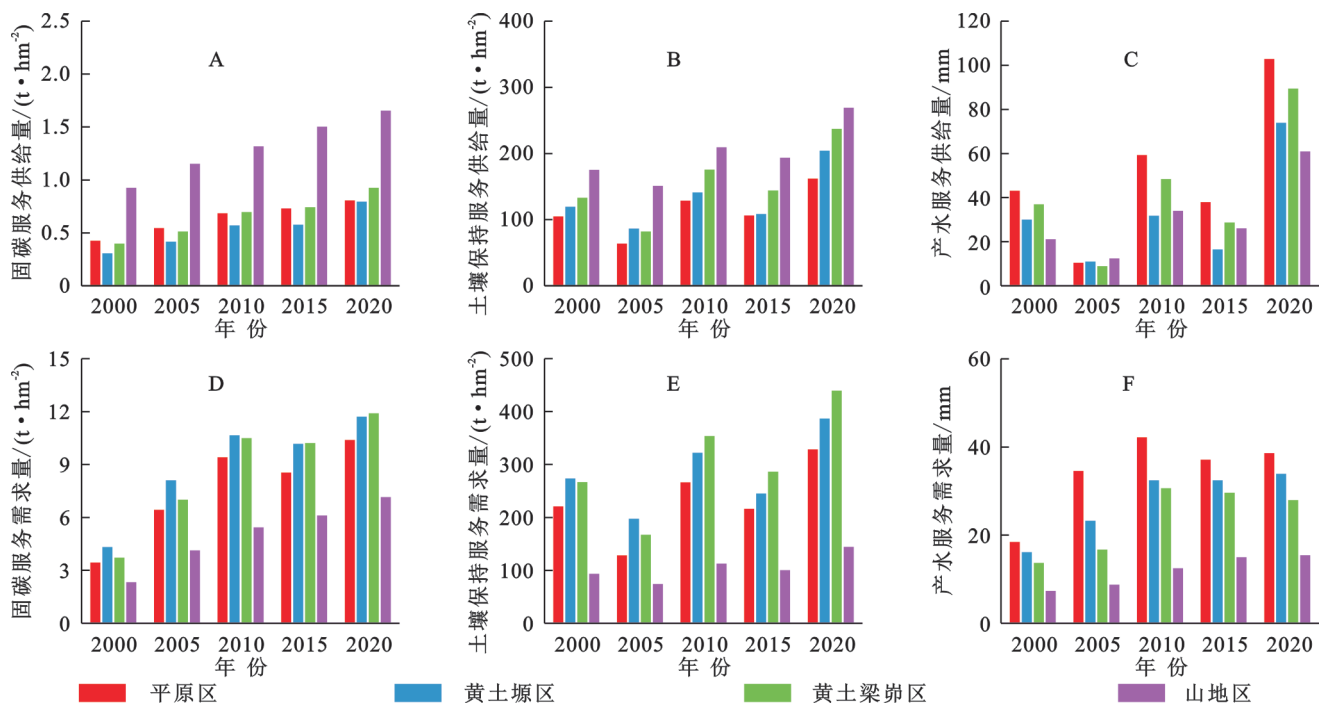


图2 不同地貌分区生态系统服务供给与需求的时间演变

Fig. 2 Temporal evolution of ecosystem service supply and demand in different geomorphic zones

2000—2020年固碳服务需求量表现为增加的趋势,各年份地貌分区之间表现为黄土塬区及梁峁区最高,平原区次之,山地区最低的趋势。土壤保持服务需求的时间趋势与土壤保持供给一致,地貌分区之间土壤保持需求表现为黄土塬区及梁峁区最高,

平原区次之,山地区最低的趋势,说明黄土地貌土壤侵蚀最为严重。2000—2020年产水服务需求整体表现为增加的趋势,各年地貌分区之间产水服务需求均表现为平原区>黄土塬区>黄土梁峁区>山地区的趋势,这与用水趋势一致。

固碳服务供给呈东高西低的空间格局(图3),高值区向低值区过渡趋势明显。固碳供给高值区处于吕梁山脉主体区域,海拔较高,植被以森林、灌丛为主,生态系统固碳能力强。固碳供给低值区则主要位于流域西部的黄土地貌区及平原区,耕地、建设用地与草地比例较高,林地比例较低,固碳能力较弱。固碳服务需求的空间分布与供给形成鲜明对比,呈现流域中部高、南北

低的空间格局(图3)。需求高值区主要位于流域中下游主河谷核心城镇及工矿集中区,这些区域碳排放强度大。固碳服务需求低值区则广泛存在于人口较少、经济活动弱的流域周边山地。2000—2020年固碳服务需求经历了急剧且广泛的空间扩展,从流域中西部的局部区域扩大到整个中部区域,并开始向南北方向拓展,体现了20年来经济社会的快速发展。

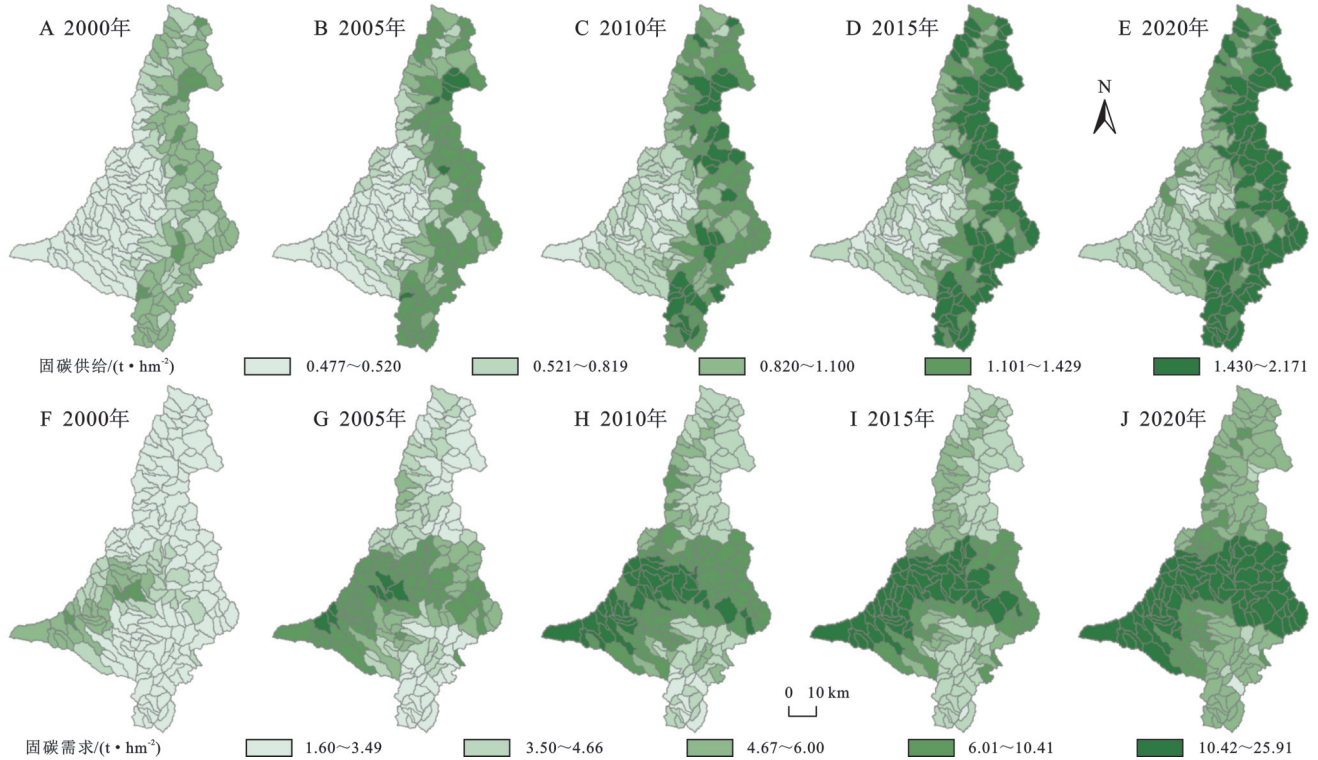


图3 固碳服务供给与需求的空间分异

Fig. 3 Spatial differentiation of carbon sequestration service supply and demand

土壤保持服务供给的空间分异与固碳服务供给具有一定相似性,呈现东高西低的空间格局(图4)。其高值区主要分布于流域东部山地区,这些区域坡度大导致潜在土壤侵蚀量高,林地比例高且森林质量优良导致实际土壤侵蚀量低,因此土壤保持服务供给量较高。土壤保持服务供给低值区主要位于流域西部的黄土地貌区,土壤抗蚀性差,耕地比例较高且林地比例较低,因此土壤保持能力较低。20年间土壤保持服务供给高值区总体表现为空间扩张的趋势,这是植被恢复活动与降水变化综合作用的结果。与土壤保持服务供给相反,土壤保持服务需求表现为东低西高的空间格局(图5),高值区主要分布于流域中下游的黄土梁峁区与黄土塬区及平原区,自然本地条件差且人类工农业活动干扰强烈,土壤侵蚀量高。需求低值区位于流域东部边缘的高海拔山地区,包含关帝山与北武当山部分区域,森林质量优良,土壤侵蚀量较低。

20年来产水服务供给的空间格局变化较大,总

体来看高值区位于流域北部平原区与中部黄土梁峁区,低值区在流域内散布(图5)。产水服务的计算方法为降水量与实际蒸散发量之差,流域东部山地森林覆盖率高导致蒸散发较高,但是该区域降水量也高,流域西部植被覆盖不及东部,实际蒸散发较低但降水量也低,降水与蒸散发的同向变化最终导致产水供给增减的多变性。产水需求高值区主要分布于流域西部的黄土梁峁区与黄土塬区及平原区,尤其是其中的离石城区及柳林工矿区,需求低值区分布于流域东部边缘山地的人口稀疏区。20年来产水需求高值区呈现空间扩张的趋势。

## 2.2 生态系统服务供需比的时空演变

所有地貌区固碳服务供需比均为负值,近20年赤字呈持续扩大趋势(图6)。这一趋势反映流域碳排放持续增加,生态系统固碳能力的提升远远滞后于社会经济发展需求。山地区土壤保持服务供需比始终为正值,且呈现波动上升的趋势。其他地貌区土壤保持服务均为赤字,且赤字水平呈增加的趋势。

其中黄土梁峁区具有最高的赤字水平和赤字增长率,原因是该区域沟壑纵横、土壤抗蚀性差、植被覆盖不佳,应继续加强水土保持的林草措施与工程措施。产水服务供需比波动幅度最大,且存在明显阶

段性特征:2000年所有区域均盈余;2005年除山地区外均转为赤字;2020年全流域恢复盈余,供需比相对2000年增加332%。产水服务供需关系的波动是植被恢复、降水与用水变化综合作用的结果。

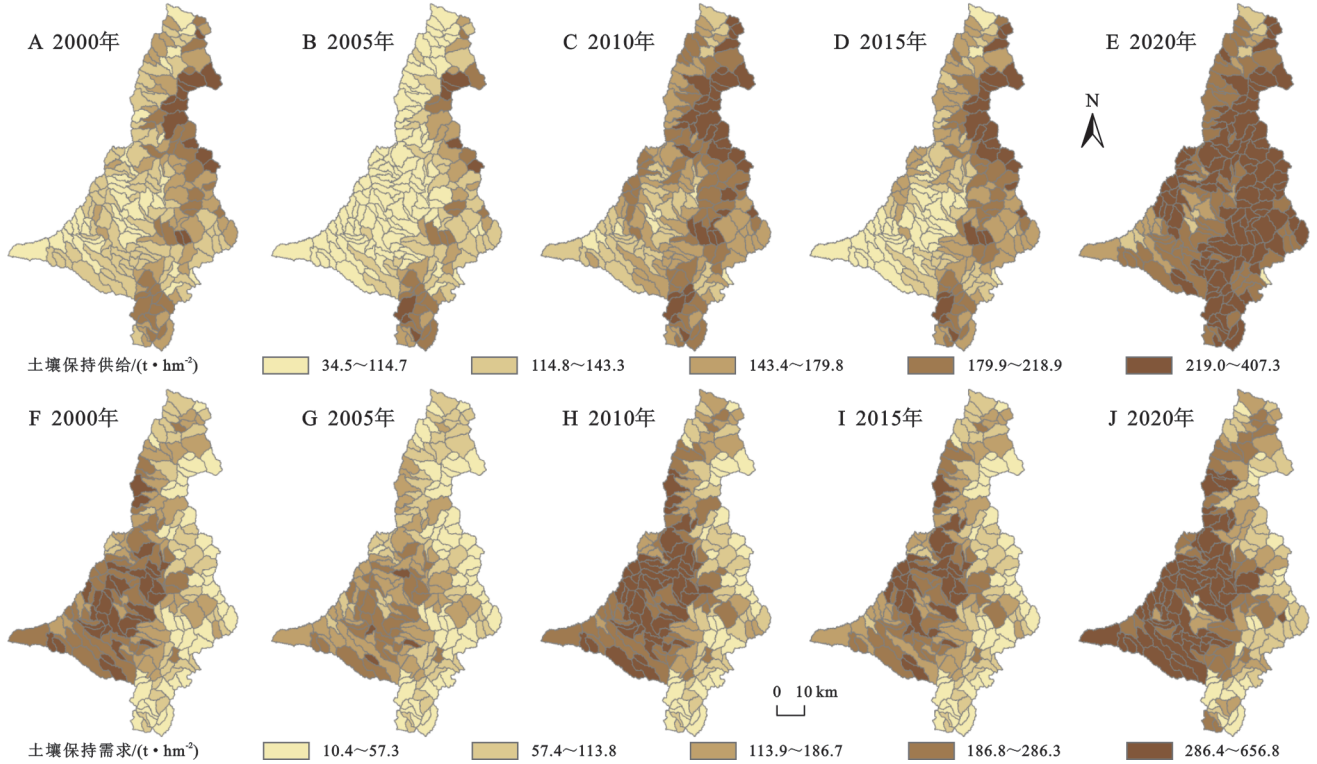


图 4 水土保持服务供给与需求的空间分异

Fig. 4 Spatial differentiation of soil conservation service supply and demand

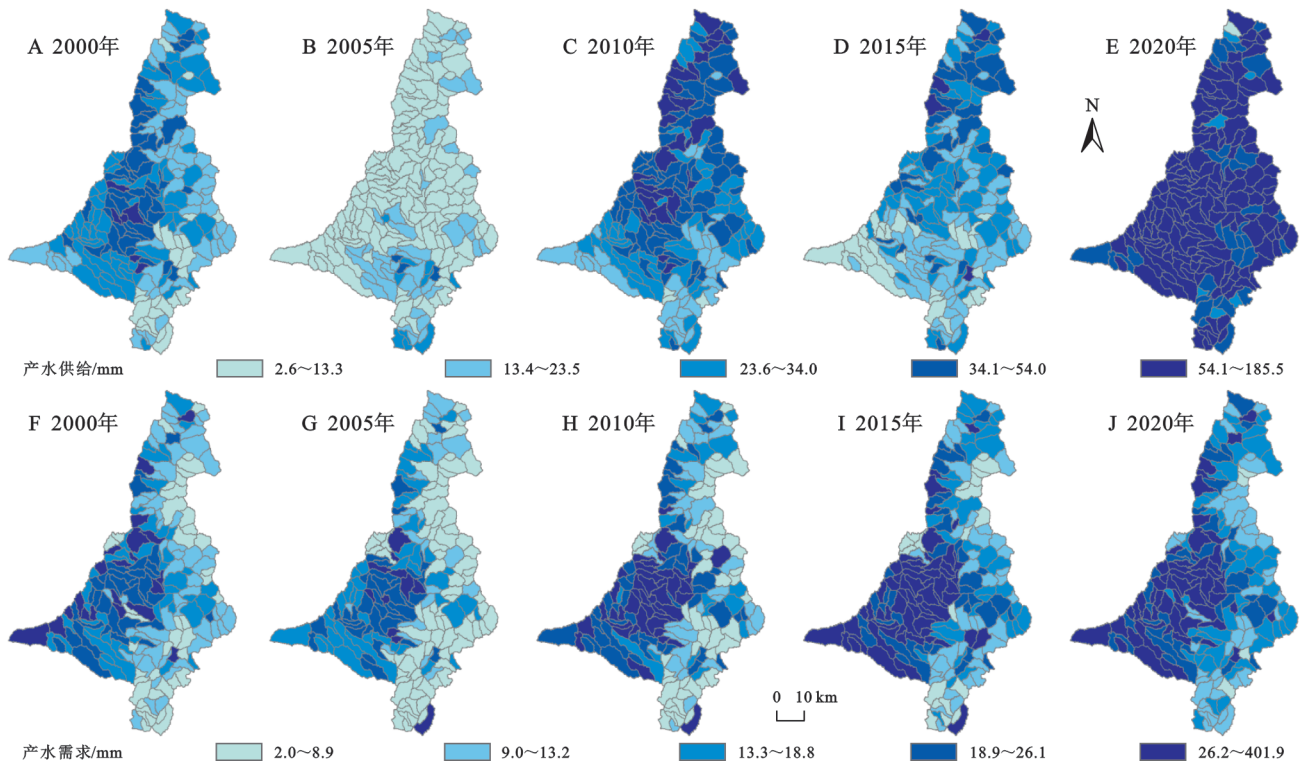


图 5 产水服务供给与需求的空间分异

Fig. 5 Spatial differentiation of water yield service supply and demand

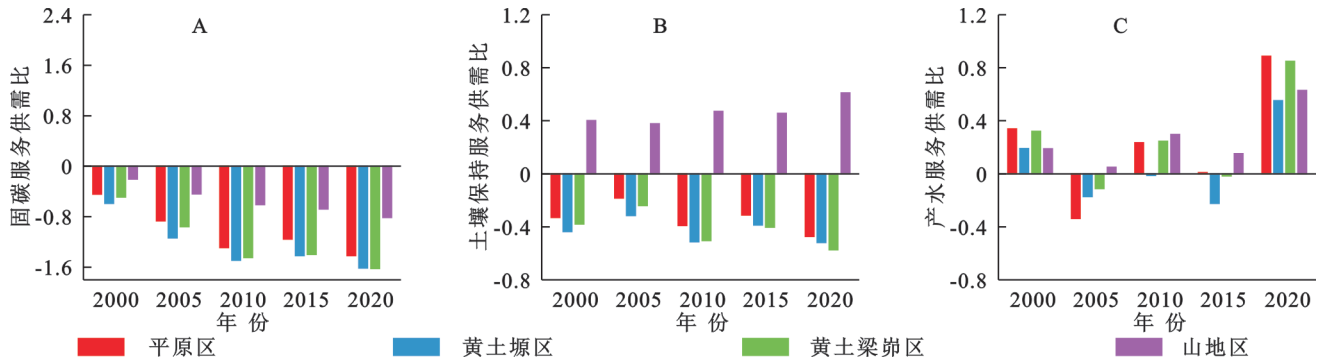


图 6 不同地貌分区生态系统服务供需比的时间演变

Fig. 6 Temporal evolution of ecosystem service supply-demand ratio in different geomorphic zones

固碳供需比低值区集中分布于中部河谷地带, 高值区主要位于流域北部和南部的吕梁山山地(图 7)。河谷区域的工矿活动与城镇扩张导致固碳需求激增, 而山地森林生态系统提供了较高的固碳供给水平。整体来看, 固碳供需比的空间格局与固碳需求相似, 说明需求一方在供需关系中的主导地位。20 年来供需比低值区范围持续扩大, 高值区明显萎缩, 说明尽管退耕还林工程与森林保育提升了流域固碳供给, 但碳排放需求增速远超生态恢复增速, 导致流域固碳服务赤字态势加剧。水土保持服务高盈余区主要分布于流域东部的山地区, 该区域以天然林地为主, 水土保持服务供给高而需求低。其高赤字区主要位于流域西部的黄土梁峁与黄土塬区, 供给不足而需求高。20 年来水土保持供给(东高西低)与需求(东低西高)呈现空间错配状态(图 4), 两者的综合作用形成供需比空间格局的相对稳定状态(图 7)。产水服务供需格局呈现显著的年际波动特征, 其空间分异与产水服务供给(图 5)更为相似, 说明供给一方在供需关系中的主导地位。供需格局的波动主要受降水影响, 2020 年较高的降水量形成了全流域产水服务盈余的空间格局。

### 2.3 生态系统服务供需与影响因素的关系网络

受篇幅限制, 仅分析 2020 年生态系统服务供需与影响因素数据, 阐释近期的偏相关网络结构。生态系统服务供需-影响因素网络共包含 21 个节点, 最大可能边数为 210, 实际连接边数为 75, 网络密度为 0.357, 表明该网络具有中等程度的连接密度, 保留关键结构信息的同时有效抑制了假阳性边的数量(图 8)。

网络图通过节点间距离与连线粗细及颜色呈现指标间作用关系的强弱与方向(图 8)。产水服务供给、需求、供需比之间存在很高的连接强度, 供需比与供给之间的边强度大于其与需求之间的边强度, 说明了供给方对供需关系的主导作用。水土保持服务与之相似, 三者之间关系紧密, 但是水土保持需求对供需关系的影响远远大于供给。固碳供需比主要

受固碳需求影响(边强度达 $-0.872$ ), 供给的影响很小(边强度仅为 $0.097$ ), 说明需求方的主导作用。土地利用类型之间、海拔与土壤有机质含量及年均气温之间、国内生产总值与人口密度之间、植被指数与年降水量及土壤保持及产水服务关联较强; 土地覆盖因素及坡度的影响最为广泛, 其与三项服务关联均较强; 社会经济因素主要影响固碳及产水服务的供需关系。

图 9 展示了节点强度、接近中心性和中介中心性的分布特征, 反映不同节点对维持网络结构与功能的相对重要性。节点强度表征节点与网络中其他节点的连接权重总和, 数值越高表明该节点对网络关系的综合影响力越大。产水供给及供需比、土壤保持供给及需求、林地比例、年降水量、坡度具有较高的节点强度, 其变化会直接牵动多个关联生态系统服务及影响因素, 表明其在整个生态网络中的关键作用。三川河流域生态保护修复中需对产水与土壤保持、退耕还林、降水及地形条件进行重点关注。接近中心性衡量某节点到其他节点平均路径长度的倒数。林地比例、年降水量、固碳供给、人口密度、植被指数、土壤保持供给具有较高的接近中心性, 其波动能迅速通过多条独立路径扩散到整个社会-生态系统, 为整个生态网络调控提供了便捷途径。中介中心性指该节点作为“中介”出现在其他任意两节点间最短路径上的频率, 反映节点作为“桥梁”控制其他节点间相互作用的潜力。中介中心性的指标分布与接近中心性较为相似, 林地比例、年降水量、固碳供给、人口密度等指标数值较高, 成为网络关系调控的关键抓手。进一步通过中心稳定性系数评估上述 3 个中心性指标的稳定性, 节点强度和接近中心性的稳定性系数分别为 $0.60$ ,  $0.52$ , 说明两者的结果是稳定可信的。但中介中心性的稳定性系数仅为 $0.28$ , 其指示的桥梁节点存在不确定性, 需进一步验证。

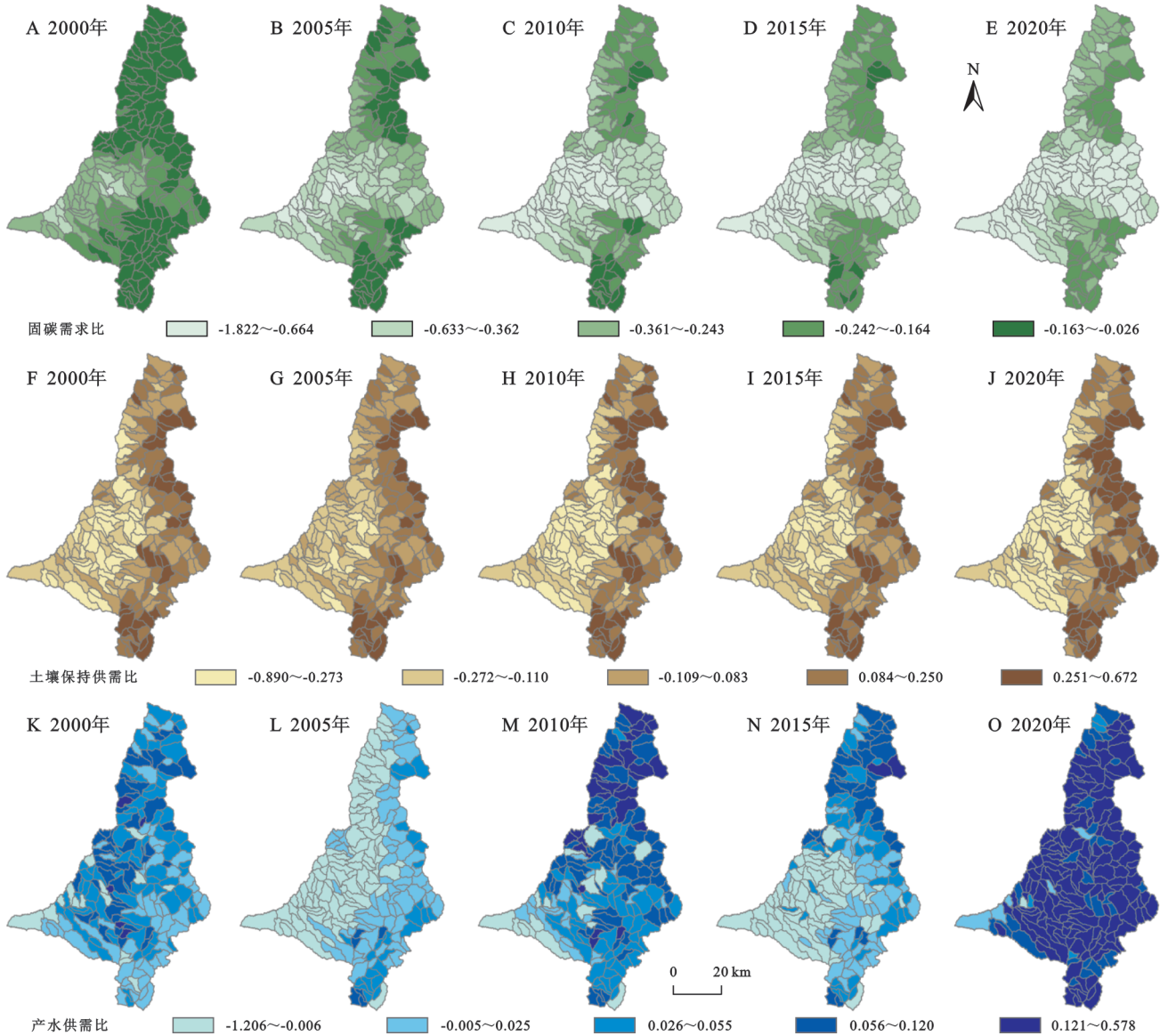


图 7 生态系统服务供需比的空间分异

Fig. 7 Spatial differentiation of ecosystem service supply-demand ratio

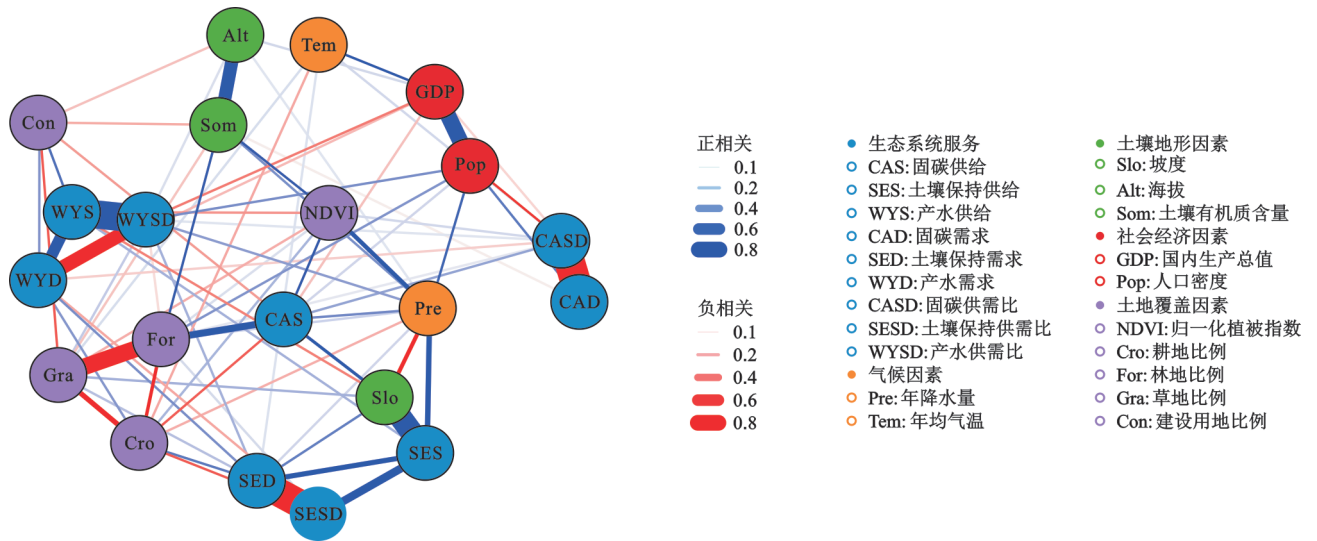


图 8 生态系统服务供需与影响因素之间的偏相关网络

Fig. 8 Partial correlation network between ecosystem service supply and demand and influencing factors

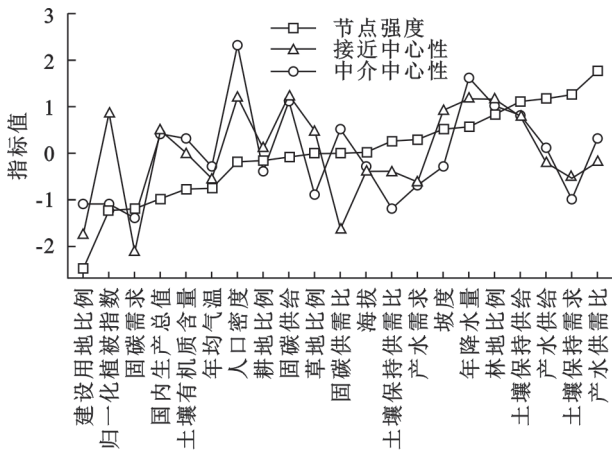
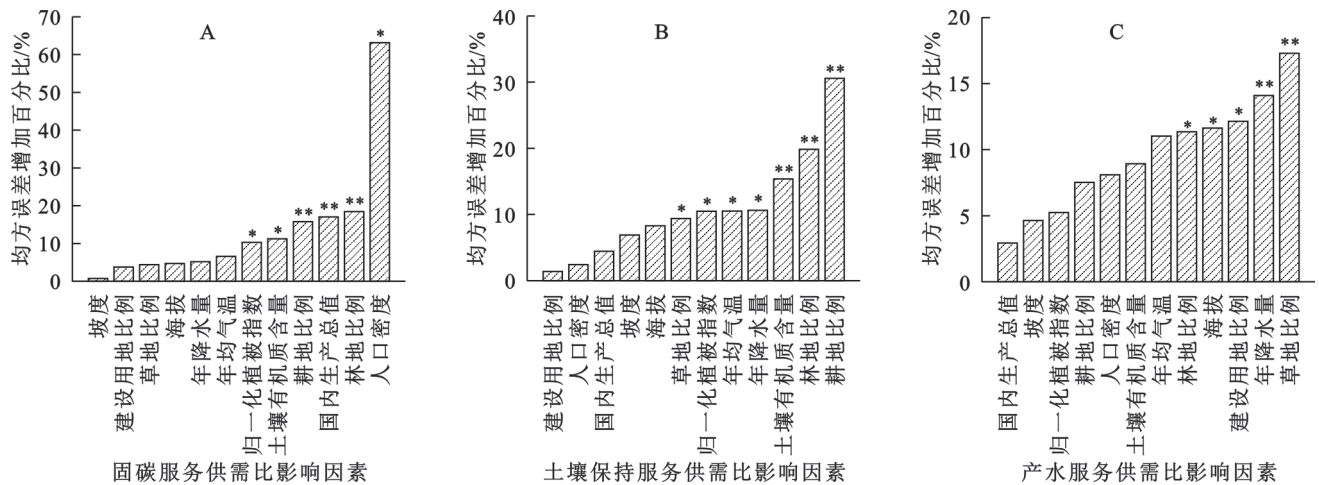


图9 网络节点中心性指标分布特征

Fig. 9 Distribution characteristics of network node centrality indicators

2.4 生态系统服务供需比的非线性驱动特征

分析 2020 年供需比与影响因素数据,揭示供需比的影响机制。基于随机森林模型的影响因素重要性排序见图 10,人口密度、林地比例、国内生产总值、耕地比例、土壤有机质含量、植被指数对固碳供需比的影响处于前六位且均达到了显著水平( $p < 0.05$ )。



注:\*\*表示  $p < 0.01$ , \*表示  $p < 0.05$ 。

图 10 生态系统服务供需比影响因素的重要性排序

Fig. 10 Importance ranking of influencing factors of ecosystem service supply-demand ratio

对水土保持服务供需比的影响处于前六位的影响因素为耕地比例、林地比例、土壤有机质含量、年降水量、年均气温与植被指数,其作用均达到显著水平( $p < 0.05$ )(图 10)。耕地比例呈现持续的负向作用,当耕地比例低于 20% 时,供需比随之缓慢降低,超过 20% 后供需比先急剧降低再趋于稳定(图 12)。林地比例和土壤有机质含量的偏依赖曲线均为先波动上升后趋于平缓的趋势,两者具有相似的空间分布格局,即林地比例越高则土壤有机质含量越高,反映了森林植被与土壤对水土流失控制的重要作用。降水量、年均气温与植被指数对水土保持供需比的影响分

其中人口密度的影响远远超过其他因素,说明需求一方对供需关系的主导作用。

偏依赖图进一步展示了单个因素对生态系统服务供需比影响的非线性特征(图 11)。人口密度对固碳供需比呈负向非线性作用,当人口密度低于 200 人/ $\text{km}^2$  时,固碳供需比随其快速下降,反映低人口压力阶段,人类活动强度的微弱增加(如基础设施建设扩张)即对固碳服务产生较强扰动。当人口密度介于 200~440 人/ $\text{km}^2$  时曲线稍缓,人口密度超过 440 人/ $\text{km}^2$  后,曲线趋于平直,人口密度的边际影响减弱,这是固碳供给与需求综合作用的结果。林地比例、土壤有机质含量与植被指数的作用相似,前期以接近线性的方式增加供需比,超过阈值后曲线平缓。国内生产总值与耕地比例的作用相似,对固碳供需比呈现了缓慢降低—快速降低—缓慢降低 3 个阶段的影响,说明低水平工农业发展对固碳供需关系影响较弱,而中级发展水平对供需关系影响最大,高级发展水平由于技术进步与规模效应,其对固碳供需关系的影响又趋于缓和。

别以 580 mm, 9.6 °C, 0.67 为临界点呈现先降低再促进的趋势。降水是土壤侵蚀的重要外力,能够降低供需比,但是高降水区域主要分布于高海拔山地,茂密的森林植被能够提高供需比,因此供需比出现了先降后升的趋势;年均气温较低时(4~5 °C),对应高海拔森林植被,作物生长的积温条件不足,农业活动干扰小,土壤保持能力强,耕地开发活动随着温度增加而增加,导致土壤保持供需比持续下降,年均气温超过 9.6 °C 的区域对应海拔较低的河谷平原区,土壤保持供需比升高;植被指数的作用与年均气温不同,临界点之前是地形的间接作用,临界点后是植被的作用。

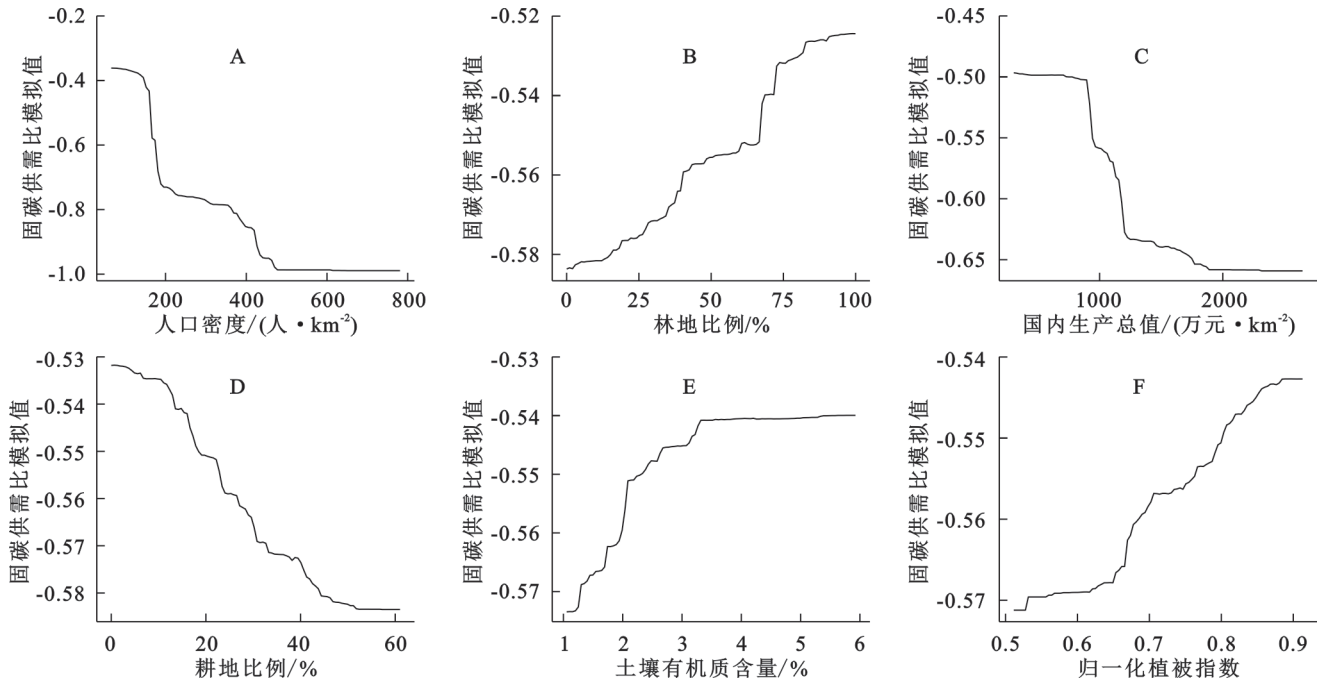


图 11 主导因素对固碳服务供需比的非线性作用

Fig. 11 Nonlinear effects of dominant factors on supply-demand ratio of carbon sequestration service

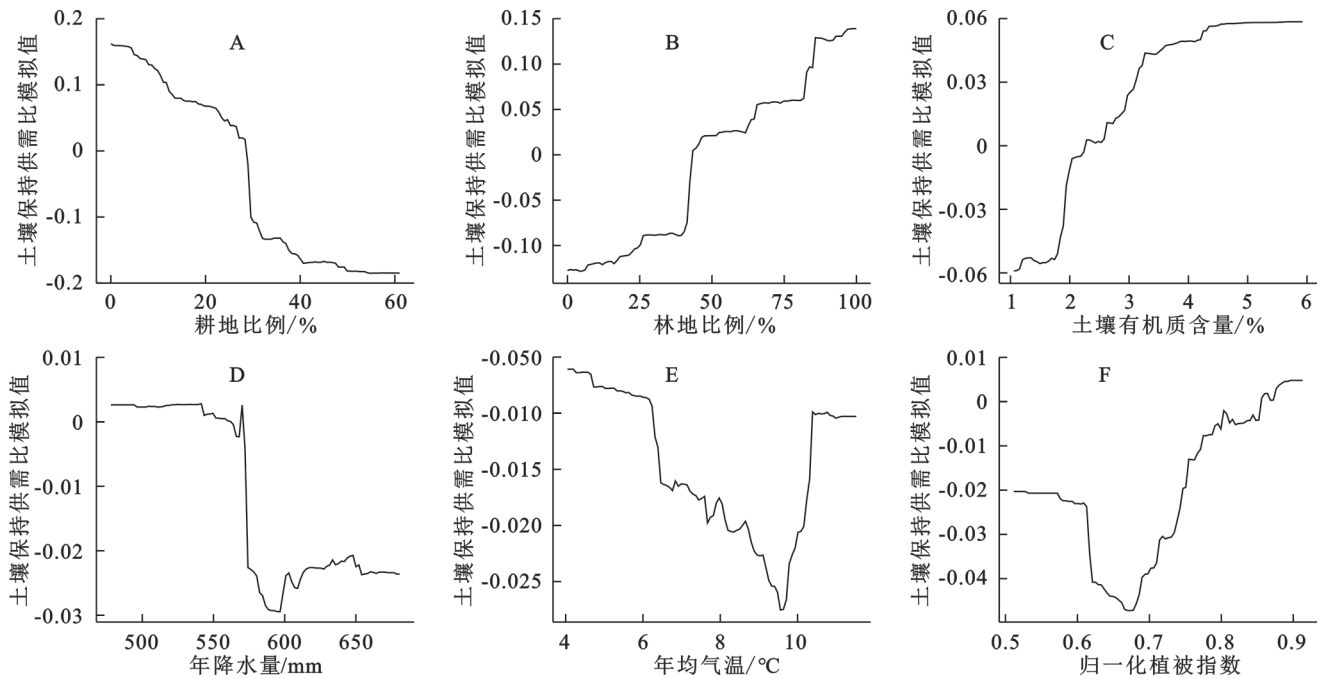


图 12 主导因素对土壤保持服务供需比的非线性作用

Fig. 12 Nonlinear effects of dominant factors on supply-demand ratio of soil conservation service

仅草地比例、年降水量、建设用地比例、海拔、林地比例 5 个因素对产水供需比的影响达到显著水平 ( $p < 0.05$ ) (图 10)。产水供需比随草地比例增加呈先升后稳的两段式响应:当草地比例  $< 25\%$  时,供需比随草地比例快速升高;超过  $25\%$  后供需比趋于平稳 (图 13)。年降水量、建设用地比例、海拔对产水供需比呈现阶梯式的促进作用。降水是产水服务的直接来源,促进产水供给;建设用地植被蒸散发低,用水量高,产水供给与需求均较高;海拔升高,降水相对

丰沛且蒸散受限,产水供给高。

三者对供需比的促进作用说明供给一方对供需关系的主导作用。林地比例以接近线性的方式降低供需比,说明植被蒸散发对产水供给的抑制作用超过了人类活动对产水需求的促进作用。年均气温在  $9\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下时产水供需比趋于稳定,说明降水、植被蒸散、人类活动用水处于相对平衡状态;超过  $9\text{ }^{\circ}\text{C}$  后供需比快速降低,这是蒸散发与人类活动用水共同增加的综合结果。

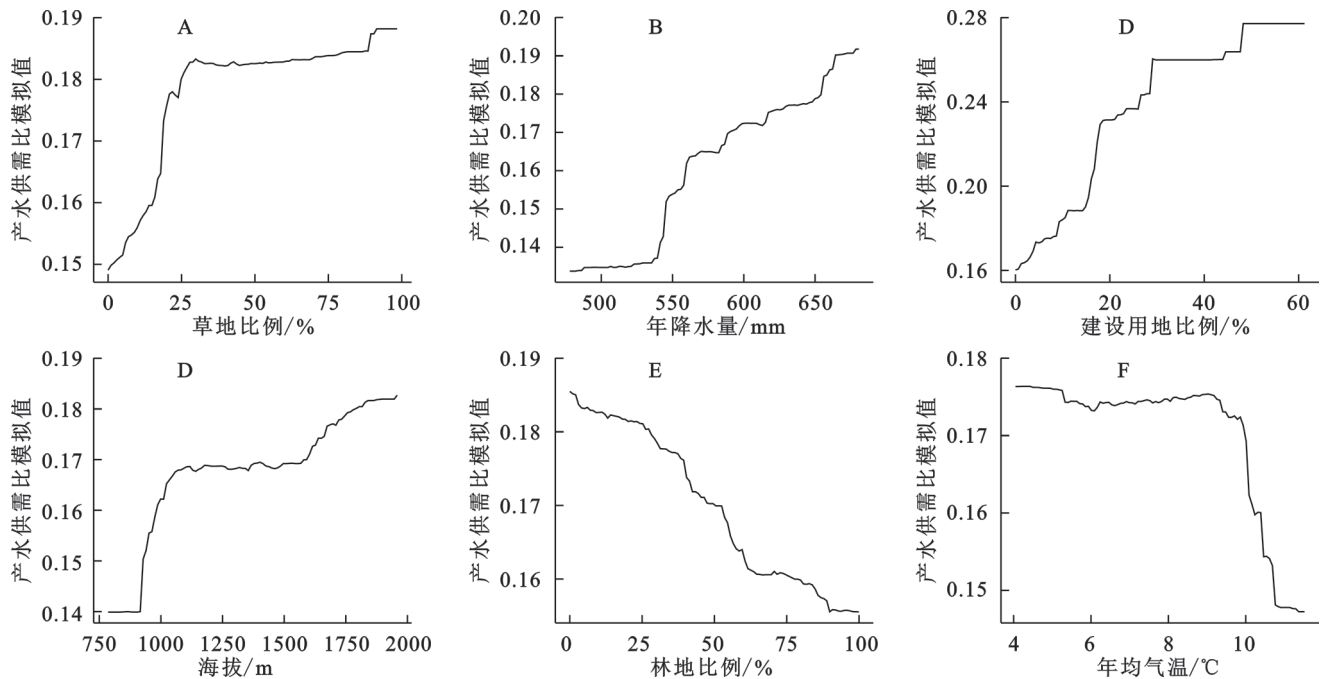


图 13 主导因素对产水服务供需比的非线性作用

Fig. 13 Nonlinear effects of dominant factors on supply-demand ratio of water yield service

### 3 讨论与结论

#### 3.1 讨论

3.1.1 三川河流域生态系统服务供需时空演变的稳定性与变异性 生态系统供给与需求的时空格局是自然-社会经济因素综合作用的结果,本研究发现 20 年来固碳供给与需求均呈现持续增加的稳定趋势,供需比的趋势相反。退耕还林(草)工程、天然林保护工程等生态保护修复政策的实施显著提升了流域固碳水平,但流域的经济社会发展更快,生态修复活动无法满足经济发展对固碳的需求,已有研究在城市群<sup>[20]</sup>、省域<sup>[21]</sup>、全国尺度<sup>[22]</sup>均得到相同的结果,说明该现象的普遍性。同时,固碳供给与需求的空间格局也相对稳定,高值区向低值区稳定扩张,进而导致供需比低值区持续向外扩大,这与已有研究相似<sup>[20]</sup>。土壤保持供给与需求的稳定性不及固碳,20 年来供给与需求呈现波动上升的趋势,空间格局相应呈现为高值区不稳定扩张的趋势,土壤保持供需比亦随之呈现波动变化。这是流域大地形地貌相对稳定、水土保持林草与工程政策实施并伴随降水波动综合作用的结果,土壤保持时空格局的总体趋势与 Xu 等对黄河流域山西段的研究相同<sup>[23]</sup>。产水供给与需求及供需比的时空格局呈现了最大的变异性,尽管供给与需求整体上均表现为增加趋势,但 20 年来产水供给经历了降低—增加—降低—增加的持续变动,空间格局亦持续演变,说明降水变化的主导作用,已有研究亦发现产水服务的时空格局受降水

变化而显著改变<sup>[24]</sup>。

3.1.2 偏相关网络与偏依赖图结合有效揭示供需网络的整体结构和具体驱动阈值 本研究构建的偏相关网络从整体上揭示了生态系统服务供需之间、影响因素之间以及供需与影响因素之间的关联关系,发现土地覆盖及地形因素与产水、土壤保持及固碳服务关联均较强,社会经济因素主要影响固碳及产水服务,这与黄土高原已有研究结果相似<sup>[25-26]</sup>。节点中心性指标为流域社会-生态系统管理提供了重要依据,产水与土壤保持供给节点强度最高,其变化将影响整个网络结构,这与研究区处于水土保持与水源涵养功能区的定位相吻合。林地比例、年降水量、人口密度、植被指数的接近中心性较高,其变动将快速扩散到整个生态网络。Wang 等<sup>[12]</sup>对黄土高原的研究发现核归一化植被指数(kNDVI)趋势在生态系统服务网络中处于中心地位,该结果与本研究相近。可见,偏相关网络方法能够揭示生态系统服务网络的整体关联结构,但是相关研究成果较少,未来研究中应进一步丰富网络节点并强化因果机制探析。

偏依赖图揭示了生态系统服务供需比与驱动因子间的复杂非线性关系。固碳服务中,人口密度低于 200 人/km<sup>2</sup>时,人类活动扰动(如基建扩张)即可引发供需比骤降,反映研究区低密度人口区域的自然生态系统对初期开发较为敏感,应控制其开发强度。Wu 等<sup>[27]</sup>对赣江流域上游的研究发现了相似的驱动规律,不同的是人口密度的临界点为 400 人/km<sup>2</sup>,反映了阈值的区域差异。土壤保持服务中,耕地比例

表现为持续的负向作用:耕地比例 $<20\%$ 时影响较弱, $20\% \sim 40\%$ 之间时影响强烈,超过 $40\%$ 后影响又减弱,这是植被、地貌、土壤综合作用的结果。林地与土壤有机质的作用呈现先促进后趋于稳定的趋势,两者空间格局相近,共同控制水土流失过程。前人也关注了土壤侵蚀及土壤保持对土地覆盖的响应阈值:刘晓燕等<sup>[28]</sup>对黄土丘陵沟壑区的研究发现在林草有效覆盖率达到 $40\% \sim 45\%$ 之前,产沙指数随覆盖率呈现快速下降趋势;Zhao等<sup>[29]</sup>识别了土壤保持供需平衡需要的土地利用阈值。产水供需比随草地比例呈两阶段响应: $<25\%$ 时快速上升, $>25\%$ 后趋于稳定。降水、建设用地、海拔对供需比呈阶梯式促进作用。林地比例以线性方式减弱供需比。已有研究在赣江流域上游和太湖流域也发现了土地利用对产水供需关系的影响阈值<sup>[26,30]</sup>,但是作用方向与本研究相反,原因是已有研究处于湿润区而本研究处于半干旱区,降水—植被蒸散发—产水之间作用关系的区域差异较大。总之,这些阈值成为供需关系突变与管理干预的临界标识,为差异化生态治理提供了科学依据。

偏相关网络对阐释生态系统服务供需网络的整体关联结构具有独特优势,有效呈现了多项生态系统服务内及其与社会生态因子之间的相互作用,有助于从整体视角探析生态系统供需这类复杂系统的驱动规律。偏依赖分析则善于揭示自变量对因变量的非线性驱动特征,识别驱动过程的阈值点,进而实现对驱动机制的精细解析。因此,两类方法的结合兼具了整体与局部视角,更为全面地揭示了生态系统服务供需的驱动机制。本研究偏相关网络与偏依赖分析从网络图的边强度(图8)与驱动因素重要性(图10)均揭示了固碳与产水服务供需关系由需求方与供给方分别主导的结果,两类方法分析逻辑不同但结果一致,说明两者结合提供了有效且丰富的分析路径,为今后的相关研究提供了借鉴。

### 3.2 结论

(1) 2000—2020年固碳供给量整体呈增加趋势,需求增加更为剧烈,导致供需比为负且持续降低。土壤保持供给与需求波动增加,仅山地区供需比维持盈余,其他地貌区赤字加剧。产水供给呈“下降—上升—下降—上升”的波动变化,产水需求呈增长趋势,供需比波动幅度较大,2020年全流域恢复盈余。

(2) 固碳供给表现为“东高西低”,而需求呈“中部高、南北低”的空间格局,形成供需比低值区与中下游工矿城镇区重合的空间特征。土壤保持供给呈现“东高西低”而需求呈“西高东低”的空间格局,供

需比因而呈现东部高盈余、西部高赤字的空间错配格局。产水供给高值区分布于北部平原与黄土梁峁区,需求高值区集中于中下游城镇及能矿区域,供需比空间格局与供给侧相似。

(3) 生态系统服务供需-影响因素网络具有中等连接密度,显示出多因素交互作用的复杂性。固碳供需关系强烈依赖于需求方,产水供需关系由供给方主导,土壤保持供需关系受需求方的影响更大,说明了供需矛盾的主次方面。年降水量、林地比例、人口密度及NDVI是网络中连接强度与中心性较高的节点,表明其是同时影响多项服务供需、维系网络结构稳定的关键因子,流域水土保持与水资源管理中应根据降水情况优先调控土地覆盖与人类活动。

(4) 人口密度对固碳供需比的影响呈现三阶段非线性驱动特征,其负向效应在 $<200$ 人/ $\text{km}^2$ 区间最敏感。耕地是土壤保持供需比最重要的负向驱动因子,其影响在耕地比例处于 $20\% \sim 40\%$ 区间尤为显著;林地和土壤有机质对供需比的促进作用呈现先快速后稳定的趋势。草地比例 $<25\%$ 时产水供需比随其快速上升, $>25\%$ 后趋于稳定;降水、海拔和建设用地产水供需比均呈阶梯式促进作用;林地比例以近乎线性方式降低供需比。偏依赖分析识别了具体驱动阈值,偏相关网络与其结合能够得到有效且丰富的分析路径,为三川河流域及黄土高原相似地区的生态保护修复提供了更为全面的科学参考。

### 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] Tian S Q, Wu W, Chen S F, et al. Global mismatch between ecosystem service supply and demand driven by climate change and human activity [J]. *Environmental Science and Ecotechnology*, 2025, 26:100573.
- [3] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and human well-being: synthesis*[M]. Washington D C: Island Press, 2005.
- [4] Gao M W, Hu Y C, Liu X W, et al. Revealing multi-scale characteristics of ecosystem services supply and demand imbalance to enhance refined ecosystem management in China[J]. *Ecological Indicators*, 2025, 170:112971.
- [5] Jiang W, Marggraf R. A theoretical rethinking of ecosystem services from the perspective of social-ecological system[J]. *iScience*, 2025, 28(5):112309.
- [6] Yang M Y, Chen Y F, Yang Y Y, et al. Nonlinear relationship and threshold-based zones between ecosystem service supply-demand ratio and land use intensity: a case study of the Beijing-Tianjin-Hebei region, China

- [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 481:144148.
- [7] 金贵, 郭柏枢, 成金华, 等. 基于资源效率的国土空间布局及支撑体系框架[J]. *地理学报*, 2022, 77(3):534-546.  
Jin G, Guo B S, Cheng J H, et al. Layout optimization and support system of territorial space: an analysis framework based on resource efficiency[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(3):534-546.
- [8] Jiang Y Q, Yang L P, Hu T Z, et al. Measuring ecosystem services supply and demand in rural areas: Cases from China's key counties to receive assistance in pursuing rural revitalization [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2024, 31(1):785-802.
- [9] Zhai T L, Ma Y B, Huang L Y, et al. Research on the spatiotemporal evolution characteristics and driving mechanisms of supply - demand risks of ecosystem services in the Yellow River Basin integrating the hierarchy of needs theory[J]. *Ecological Indicators*, 2025, 171:113229.
- [10] 高明惠, 李成, 赵虎. 江苏省生态系统服务供需格局与影响因素[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(5):315-324.  
Gao M H, Li C, Zhao H. Spatiotemporal pattern of supply-demand of ecosystem services and influencing factors in Jiangsu Province [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(5):315-324.
- [11] Stanworth A, Peh K S H, Morris R J. Linking network ecology and ecosystem services to benefit people [J]. *People and Nature*, 2024, 6(3):1048-1059.
- [12] Wang Z Z, Fu B J, Wu X T, et al. Exploring the interdependencies of ecosystem services and social-ecological factors on the Loess Plateau through network analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2025, 960:178362.
- [13] 魏伟, 曾诗瑶, 尹力, 等. 近40年海南岛国土空间格局演化的生态效应及其影响因素[J]. *生态学报*, 2024, 44(12):5083-5101.  
Wei W, Zeng S Y, Yin L, et al. Ecological effects and its influencing factors of Hainan Island's territorial spatial pattern evolution in the past 40 years[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(12):5083-5101.
- [14] 梁秀琴, 冯强, 段宝玲. 晋西黄土高原矿区生态系统服务福祉效应研究[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(4):431-437.  
Liang X Q, Feng Q, Duan B L. Research on well-being effect of ecosystem services in mining area of western Shanxi Loess Plateau [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(4):431-437.
- [15] 雷泽鑫, 罗俊杰, 张文正, 等. LUCC多情景模拟下黄土沟壑区流域径流响应规律及其适应性规划对策: 以晋西三川河流域为例[J]. *生态学报*, 2025, 45(3):1090-1101.  
Lei Z X, Luo J J, Zhang W Z, et al. Response pattern of watershed runoff in loess gully area under LUCC multi-scenario simulation and its adaptive planning strategy: a case study of Sanchuan River Basin in west of Shanxi Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(3):1090-1101.
- [16] 雷泽鑫, 傅健宇, 罗俊杰, 等. 景观格局视角下晋西三川河流域径流变化归因分析[J]. *生态学报*, 2022, 42(12):4946-4958.  
Lei Z X, Fu J Y, Luo J J, et al. Attribution analysis of runoff changes in the Sanchuan River Basin of Shanxi Province from the perspective of landscape patterns [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(12):4946-4958.
- [17] Feng Q, Duan B L, Zhang X. Relationship between ecosystem-services trade-offs and supply-demand balance along a precipitation gradient: a case study in the central Loess Plateau of China [J]. *Land*, 2024, 13(7):1057.
- [18] 国家发展和改革委员会/国家统计局. 生态产品总值核算规范[M]. 北京: 人民出版社, 2022.  
National Development and Reform Commission/National Bureau of Statistics. Specification for the calculation of the gross ecosystem product [M]. Beijing: People's Publishing House, 2022.
- [19] Li J H, Jiang H W, Bai Y, et al. Indicators for spatial-temporal comparisons of ecosystem service status between regions: a case study of the Taihu River Basin, China [J]. *Ecological Indicators*, 2016, 60:1008-1016.
- [20] Hong W H, Bao G D, Du Y X, et al. Spatiotemporal changes in supply-demand patterns of carbon sequestration services in an urban agglomeration under China's rapid urbanization [J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(3):811.
- [21] Luo Y H, Zhang Y, Ma S, et al. Spatial-temporal pattern and supply-demand balance of land use carbon sequestration from a low-carbon perspective: a case study of Guizhou Province [J]. *Ecological Indicators*, 2025, 175:113602.
- [22] Pan J H, Han X B, Yang W L. Impact of the tradeoff between urbanization and ecological construction on the supply and demand balance of carbon sequestration services in China [J]. *Human and Ecological Risk Assessment: an International Journal*, 2025, 31(5/6):694-717.
- [23] Xu M J, Feng Q, Zhang S R, et al. Ecosystem services supply - demand matching and its driving factors: a case study of the Shanxi section of the Yellow River Basin, China [J]. *Sustainability*, 2023, 15(14):11016.
- [24] 侯晋星, 潘换换, 杜自强, 等. 山西黄河流域水生态系统服务时空分析[J]. *干旱区地理*, 2024, 47(6):1047-1060.  
Hou J X, Pan H H, Du Z Q, et al. Spatiotemporal analysis of water ecosystem services of the Yellow River Basin in Shanxi Province [J]. *Arid Land Geography*, 2024, 47(6):1047-1060.