

宋洁,张龙飞,宋文凯,等.汾河流域生态系统服务供需匹配特征与分区分管[J].中国沙漠,2026,46(3):41-53.

# 汾河流域生态系统服务供需匹配特征与分区分管

宋洁<sup>1</sup>,张龙飞<sup>1</sup>,宋文凯<sup>1</sup>,陈培森<sup>1</sup>,何雨函<sup>1</sup>,梁雯<sup>2</sup>

(1.太原师范学院地理科学学院/汾河流域地表过程与资源生态安全山西省重点实验室,山西晋中 030619; 2.运城市生态环境局,山西运城 044000)

**摘要:**厘清流域生态系统服务供需关系及匹配特征是实现差异化生态管控的基础。本文量化2000—2020年汾河流域6种典型生态系统服务供需格局,采用自组织映射神经网络以供需比为基础识别乡镇尺度供需簇,结合簇的空间分布和供需结构特点等提出生态分区分管策略。结果表明:(1)2000—2020年,产水、固碳、土壤保持、水质净化和生境质量的供给格局呈现东西高、中间低的特点,而粮食生产服务供给格局相反。产水、固碳、粮食生产、水质净化和生境质量的高需求区集中在太原城区及中下游人口密集的区域,而土壤保持需求格局则相反。(2)流域内供需空间错配严重,上游的管涔山、中下游的吕梁山和太行山是区内集中的供需盈余区。中下游盆地区水质净化和生境质量服务的赤字区显著增加,山区产水、固碳和粮食生产服务大量高盈余区转为低盈余区。(3)流域内有综合生态系统服务供需强错配簇(B1)、综合生态系统服务供需弱错配簇(B2)、水质净化-生境质量服务错配簇(B3)和综合生态系统服务供需匹配簇(B4)。总体而言,生态系统服务供需错配区趋于集中,且中心城区错配程度最高。簇类之间的转化主要体现在B2向B1和B3,B3向B4的转变,空间上太原主城区周边错配区扩张显著且错配强度增强。

**关键词:**生态系统服务;供需匹配;供需簇;汾河流域;生态管控策略

文章编号:1000-694X(2026)03-041-13

DOI:10.7522/j.issn.1000-694X.2025.00152

中图分类号:X82

文献标志码:A

## 0 引言

快速城镇化进程极大地推动了经济的发展,却使得生态系统的结构和功能严重受损,深刻影响了人类福祉以及自然-社会-经济系统的可持续发展,导致生态系统服务供给与需求在时空上出现了错配<sup>[1-3]</sup>。流域是以水为纽带的兼具生产、生活和生态功能的复合系统,由于城镇空间扩张与生态空间保护之间的矛盾日趋激烈,水源涵养、土壤保持、固碳等流域生态系统服务功能的供给能力受阻,从而严重影响当今人们对高质量生态系统服务功能的追求<sup>[4-5]</sup>。因此,厘清流域生态系统服务供需关系及空间匹配特征,有利于进一步提升生态系统综合管理能力,优化自然资源合理配置,构建流域生态安全格局。

生态系统服务供需关系的研究旨在阐明复杂

环境下生态系统服务过程-格局与人类福祉之间的相互关系,而如何有效地将生态系统服务供需关系纳入生态环境管理与国土空间优化配置已成为学者关注的热点<sup>[6-8]</sup>。当前的研究主要采用供需比、空间自相关分析、供需协调性分析等,从供需耦合的视角评估各单一指标生态系统服务供需的匹配格局,从而指导生态管理及修复分区、生态风险评价等<sup>[9-12]</sup>。近年来,融合多种生态系统服务功能并探究其相互作用关系为开展可持续管理决策提供了重要的依据<sup>[13-14]</sup>。生态系统服务簇可以反映一组在时间或空间上重复出现的生态系统服务组合,有助于阐明各生态系统服务之间的非线性关系,适合用在多目标规划体系下构建空间管理框架和生态系统管理体系<sup>[15-17]</sup>。已有研究主要在城市<sup>[18]</sup>、都市圈<sup>[19]</sup>、省域<sup>[20]</sup>等方面,从生态系统服务供给这一单一维度出发,采用K-means聚类分析法<sup>[21]</sup>、自组织映

收稿日期:2025-08-13; 改回日期:2025-10-15

资助项目:山西省基础研究计划项目(202403021212107);山西省哲学社会科学规划课题(2024QN125)

作者简介:宋洁(1986—),女,山西太原人,副教授,主要从事区域生态环境管理与碳减排研究。E-mail:songjie@tynu.edu.cn

神经网络<sup>[22]</sup>等识别簇的类型,进而分析其演变特征。此外,越来越多的学者开始认识到生态系统服务之间的相互作用会受到尺度效应的强烈影响,从网格尺度到乡镇、县域尺度的跨尺度供需关系也存在显著差异<sup>[23-24]</sup>。小尺度的分析结果有助于精准把握局部特征,而容易忽略供给的溢出性和需求的可移动性。大尺度的研究则有助于掌握生态环境治理的大方向,而缺乏对局部治理的针对性<sup>[1]</sup>。

综上所述,从供需复合维度出发,综合分析空间内多重矛盾的组合结构及时空共现特征的研究还略显不足。从量化网格尺度供需特征,进而协助行政尺度下生态管控措施的提出还有待进一步探索。此外,现有研究对于长期以资源型经济为主导的生态脆弱的流域地区关注较少。在生态安全新格局构建与经济社会持续健康发展的协同推进下,采用生态系统服务供需理论探究区域生态系统服务供需簇的组合与演化特征,有助于推动生态系统服务供需理论从单一功能匹配向多功能组合匹配的转变,也是对基于供需簇空间组合及演化特征提出生态管控策略这一理论框架的有益探索,对于进一步理解流域各类生态系统服务与人类需求之间的关系,推进区域内“三生”功能的优化,协同多目标的流域生态环境管理具有重要意义。

汾河流域是黄河流域的重要组成单元,是山西省重要的生态屏障,在维系区域生态安全方面意义重大<sup>[25]</sup>。作为山西省粮食主产区和重要的能源基地,在山西省经济社会发展中居于十分重要的地位。流域内地表结构复杂,生态脆弱,自然本底条件差<sup>[26-28]</sup>。伴随高强度的资源开采和频繁的人类活动,流域内原本就脆弱的生态环境负荷加重,人地矛盾突出,导致生态系统服务供需失衡。基于此,本文融合2000—2020年汾河流域自然与经济社会空间大数据,在量化网格尺度6种典型生态系统服务供需的基础上,通过供需比构建乡镇尺度供需匹配模型。进而,利用自组织映射神经网络识别生态系统服务供需簇的组成。最后,结合供需簇的空间分布与结构特点提出汾河流域生态分区管控策略,以为汾河流域生态管理分区乃至黄河流域生态安全格局的构建提供理论支撑和决策依据。

## 1 研究区概况

汾河流域位于山西省腹地,是黄河流域和黄土

高原的重要组成部分,干流自北向南流经忻州、太原、晋中、吕梁、临汾、运城等6个地级市(图1)。作为全省的工农业集聚区,以全省四分之一的土地面积养育了41%的人口。流域呈狭长带状,地势北高南低,上游为吕梁山、太行山夹峙的河谷地带,为全省提供了关键的生态系统调节和支持服务功能,中、下游则以盆地为主,为全省提供生态系统支持服务的同时也是生态系统服务的高需求区。流域内生态系统服务功能时空上的错配,使得区域高质量发展与居民生活的需求不能得到充分满足,需对其各功能之间的供需关系进行精准识别并进行分区管控。

为保障研究的科学性、合理性和数据的可获得性,以《汾河流域生态景观规划(2020—2035年)》中划定的汾河流域自然地理单元为依据,且保证流域内各县域行政单元的完整性,研究区共涉及6个地级市、41个县域、502个乡镇及街道,以太原市上兰村和洪洞县石滩村为界,流域分为上、中、下游<sup>[29]</sup>。

## 2 数据来源与研究方法

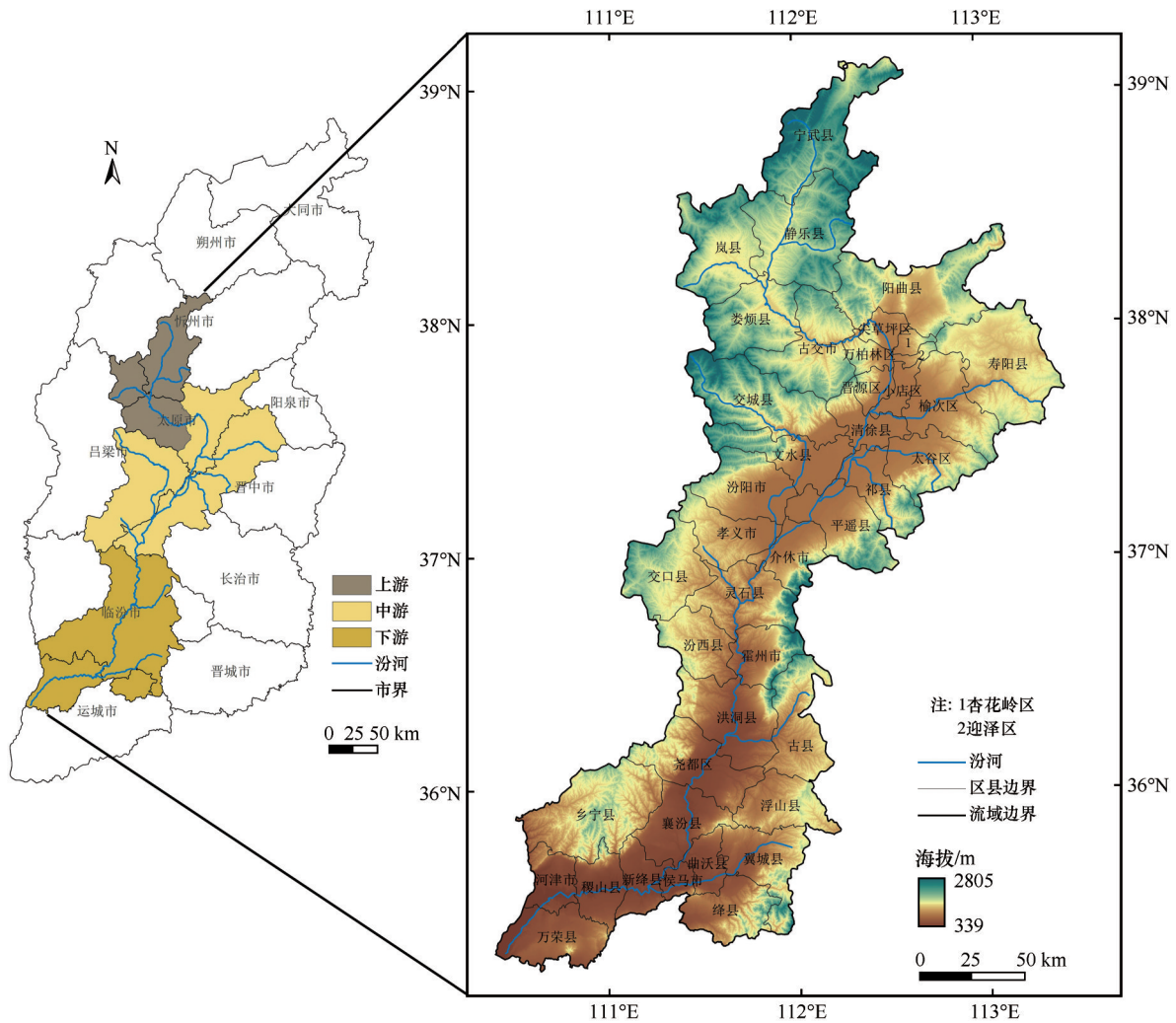
### 2.1 数据来源

采用多源数据对汾河流域典型生态系统服务供需进行量化,研究截面为2000、2010年和2020年。将资源环境科学与数据中心下载的土地利用类型数据重新划分为耕地、林地、草地、建设用地、水域及未利用地。所有栅格数据均重采样至1 km分辨率,投影坐标系统一为WGS\_1984\_World\_Mercator。为消除多源数据在时空尺度上的差异性,本研究创建矢量渔网点,并采用“值提取至点”工具从多源栅格数据中提取对应栅格值,将携带栅格值的渔网点要素转换为栅格数据,以此避免不同源数据带来的偏差。数据来源详见表1。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 生态系统服务供需评估

综合考虑汾河流域自然环境本底特征及面临的主要问题,选择了6种典型生态系统服务类型,包括产水服务(WY)、固碳服务(CS)、粮食生产服务(GP)、土壤保持服务(SC)、水质净化服务(WP)和生境质量服务(HQ)。具体量化方法见表2<sup>[17,28,30-37]</sup>。



注：基于自然资源部标准地图服务网站标准地图(审图号GS(2019)1822号)制作,底图边界无修改

图1 汾河流域区位及流域划分

Fig.1 Location and division of Fenhe River Basin

### 2.2.2 生态系统服务供需关系

生态系统服务在精细尺度上具有较强的流动性<sup>[9]</sup>,因此在该尺度上识别的供需匹配特征难以衔接宏观尺度的治理决策。乡镇作为国土空间规划的基本单元,可以有效衔接宏观和微观的生态管理决策。因此,本文选取乡镇作为评价汾河流域生态系统服务供需匹配特征的基本单元,旨在减少在评价过程中造成的生态系统服务流不确定性,同时有助于制定精细化的生态分区分管策略。本研究通过生态系统服务供需比(ESDR)来揭示汾河流域生态系统服务供需匹配特征<sup>[38]</sup>,量化汾河流域502个乡镇及街道的生态系统服务供需匹配特征,并以此为依据进行供需簇的识别。公式如下:

$$ESDR = \frac{S - D}{(S_{max} + D_{max})} \times 2 \quad (1)$$

式中:ESDR为生态系统服务供需比;S为生态系统服务供给量;D为生态系统服务需求量。 $S_{max}$ 表示生态系统服务供给最大值; $D_{max}$ 表示生态系统服务需求最大值。 $ESDR > 0$ 表明生态系统服务处于盈余状态; $ESDR = 0$ 表明生态系统服务处于平衡状态; $ESDR < 0$ 表明生态系统服务处于赤字状态。

### 2.2.3 生态系统服务供需簇的识别

自组织映射神经网络(SOM)是无监督学习类神经网络模型<sup>[39]</sup>。与其他聚类分析方法相比,SOM无需预先标注数据,更擅长处理非线性数据,自适应能力强,能够根据数据分布自动调整权重节点。首先,本研究通过“k-means”确定最佳簇类数量(图2),当簇类数量为4时,数据的簇内误差平方和趋于稳定。然后采用R语言4.3.2中的“kohonen”包执行SOM分析,训练次数达到2 000次时,

表1 数据来源  
Table 1 Descriptions of the data

数据类型	来源	格式	空间分辨率
土地利用	资源环境科学与数据中心( <a href="http://www.resde.cn/">http://www.resde.cn/</a> )	栅格	30 m
NDVI	资源环境科学与数据中心( <a href="http://www.resde.cn/">http://www.resde.cn/</a> )	栅格	1 km
降水量	国家地球系统科学数据中( <a href="http://www.geodata.cn">http://www.geodata.cn</a> )	栅格	1 km
蒸散发量	国家生态系统科学数据中心( <a href="http://www.nesde.org.c">http://www.nesde.org.c</a> )	栅格	1 km
根系深度、土壤质地和有 机碳含量	《基于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集》(V1.1)( <a href="http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data">http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data</a> )	栅格	1 km
需水量	山西省水资源公报	统计	
碳排放量	中国碳核算数据库(CEADS)( <a href="http://www.ceads.net/">http://www.ceads.net/</a> )	统计	
粮食产量	省、市统计年鉴	统计	
人口密度	WorldPop( <a href="https://www.Worldpop.org/">https://www.Worldpop.org/</a> )	栅格	1 km
社会经济统计数据	省、市统计年鉴	统计	
行政区划	全国地理信息资源目录( <a href="http://www.webmap.cn/">http://www.webmap.cn/</a> )	矢量	

表2 生态系统服务供需量化方法  
Table 2 Quantification methods for supply and demand of ecosystem services

生态系统 服务类型	公式	描述
产水服务供给	$WY_x = \left(1 - \frac{AET_x}{P_x}\right) \times P_x$ [30-31]	$AET_x$ 为栅格 $x$ 实际蒸散量; $P_x$ 为栅格 $x$ 降水量
产水服务需求	$WY_{dx} = D_w \times p_{xpop}$ [32]	$D_w$ 为人均用水量; $p_{xpop}$ 为栅格 $x$ 人口密度
固碳服务供给	$C_x = C_{above} + C_{below} + C_{dead} + C_{soil}$ [33]	$C_{above}$ 、 $C_{below}$ 、 $C_{dead}$ 、 $C_{soil}$ 分别为地上生物碳储量、地下生物碳储量、死亡有机质碳储量、土壤碳储量
固碳服务需求	$C_{dx} = D_c \times p_{xpop}$ [34]	$D_c$ 为人均碳排放量; $p_{xpop}$ 为栅格 $x$ 人口密度
粮食生产服务供给	$GP_x = \frac{NDVI_x}{NDVI_{sum}} \times G_{sum}$ [7]	$NDVI_x$ 为栅格 $x$ 的NDVI值; $NDVI_{sum}$ 为流域内耕地的NDVI值总和; $G_{sum}$ 为研究区粮食总产量
粮食生产服务需求	$GP_{dx} = D_f \times p_{xpop}$ [7,35]	$D_f$ 为人均粮食消费量; $p_{xpop}$ 为栅格 $x$ 人口密度
土壤保持服务供给	$SDR_x = RKLS_x - USLE_x$ [35]	$RKLS_x$ 为栅格 $x$ 土壤潜在侵蚀量; $USLE_x$ 为栅格 $x$ 土壤实际侵蚀量
土壤保持服务需求	$USLE_x = R \times K \times LS \times C \times P$ [34]	$R$ 、 $K$ 、 $LS$ 、 $C$ 、 $P$ 分别为降雨侵蚀因子、土壤可蚀性因子、地形因子、植被因子、土壤保持措施因子
水质净化服务供给	$WP_x = Q_{IIIgrade} \times V_{water}$ [28,32,36]	$Q_{IIIgrade}$ 表示III类水质标准下允许排放的氮输出量; $V_{water}$ 表示流域的产水量
水质净化服务需求	$WP_{dx} = NL_x \times NDR_x$ [34,36]	$NL_x$ 表示栅格 $x$ 的氮负荷量; $NDR_x$ 表示栅格 $x$ 氮输出率
生境质量服务供给	$HQ_x = H \times \left[1 - \frac{D_x^z}{D_x^2 + k^z}\right]$ [37]	$H$ 为生境适宜度; $D_x$ 为栅格 $x$ 生境胁迫水平; $k$ 为半饱和常数; $z$ 为归一化常数
生境质量服务需求	$HQ_{dx} = C + \lg(P_x) + \lg(E_x)$ [37]	$C$ 为土地利用强度; $P_x$ 为人口空间分布; $E_x$ 为地区生产总值空间分布

聚类结果趋于稳定。最后,根据簇间组合、簇内特征将4类生态系统服务供需簇分别命名为B1簇(综合生态系统服务供需强错配簇)、B2簇(综合生

态系统服务供需弱错配簇)、B3簇(水质净化-生境质量服务供需错配簇)、B4簇(综合生态系统服务供需匹配簇)。

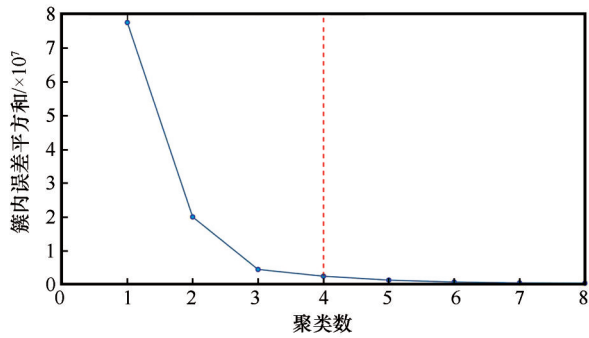


图2 最佳聚类数

Fig.2 The optimal clustering number

### 3 结果与分析

#### 3.1 生态系统服务供需时空演化特征

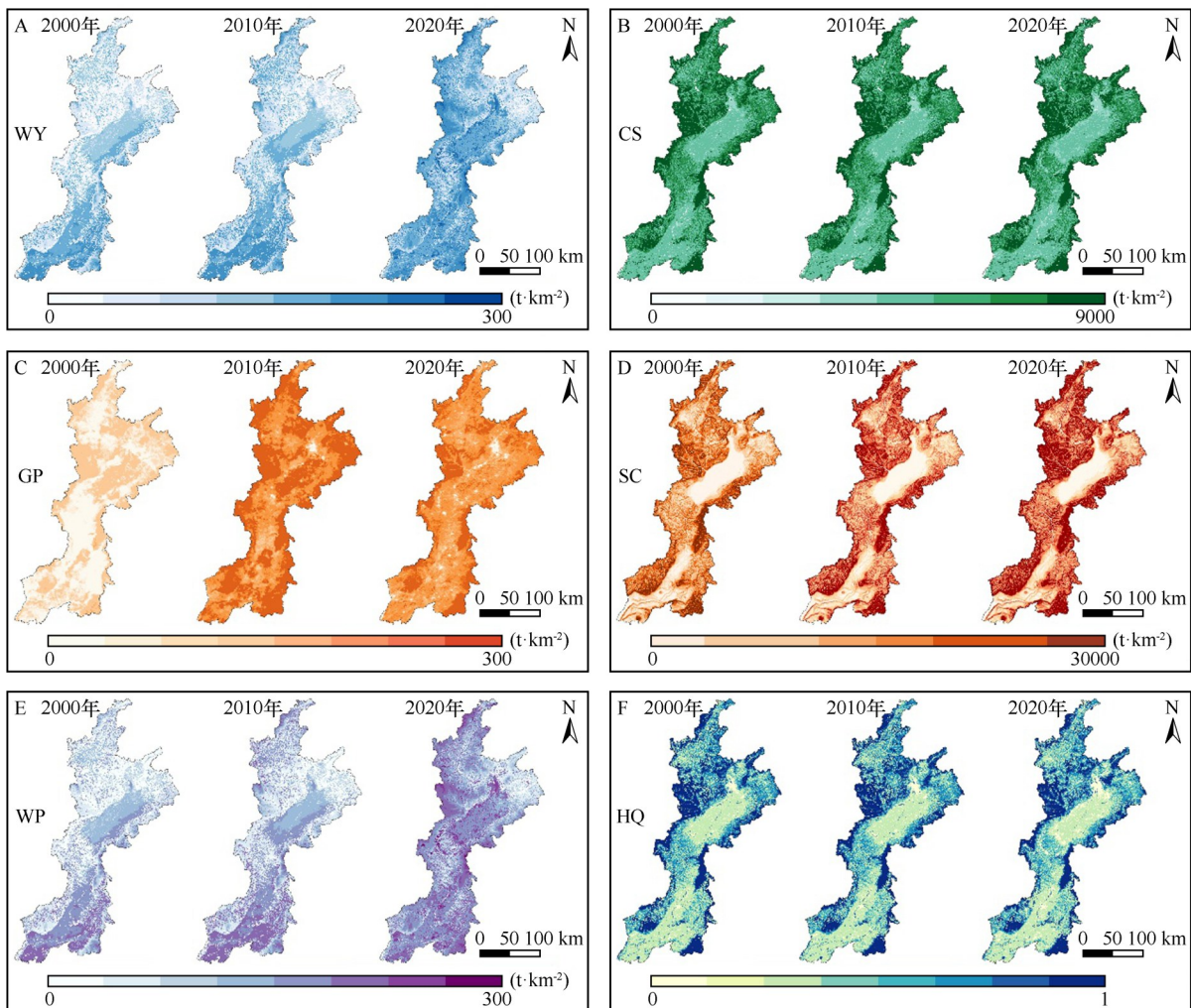
##### 3.1.1 生态系统服务供给时空演化特征

汾河流域各生态系统服务供给量的空间分布

存在明显差异(图3)。WY和WP的供给量显著增加,空间上大体呈现南高北低、东高西低的分布格局。CS和SC的供给量持续增加,空间上呈现出东西高、中间低的分布格局。GP供给量先增加后减少,高供给区集中在太原盆地、临汾盆地、运城盆地等优质耕地资源区,低供给区零散分布于人口密集的建成区。HQ供给指数呈下降趋势,高供给区主要分布于受人类活动影响较小的吕梁山区和太行山区,而人口密集的城镇则为低供给区,呈零散分布格局。

##### 3.1.2 生态系统服务需求时空演化特征

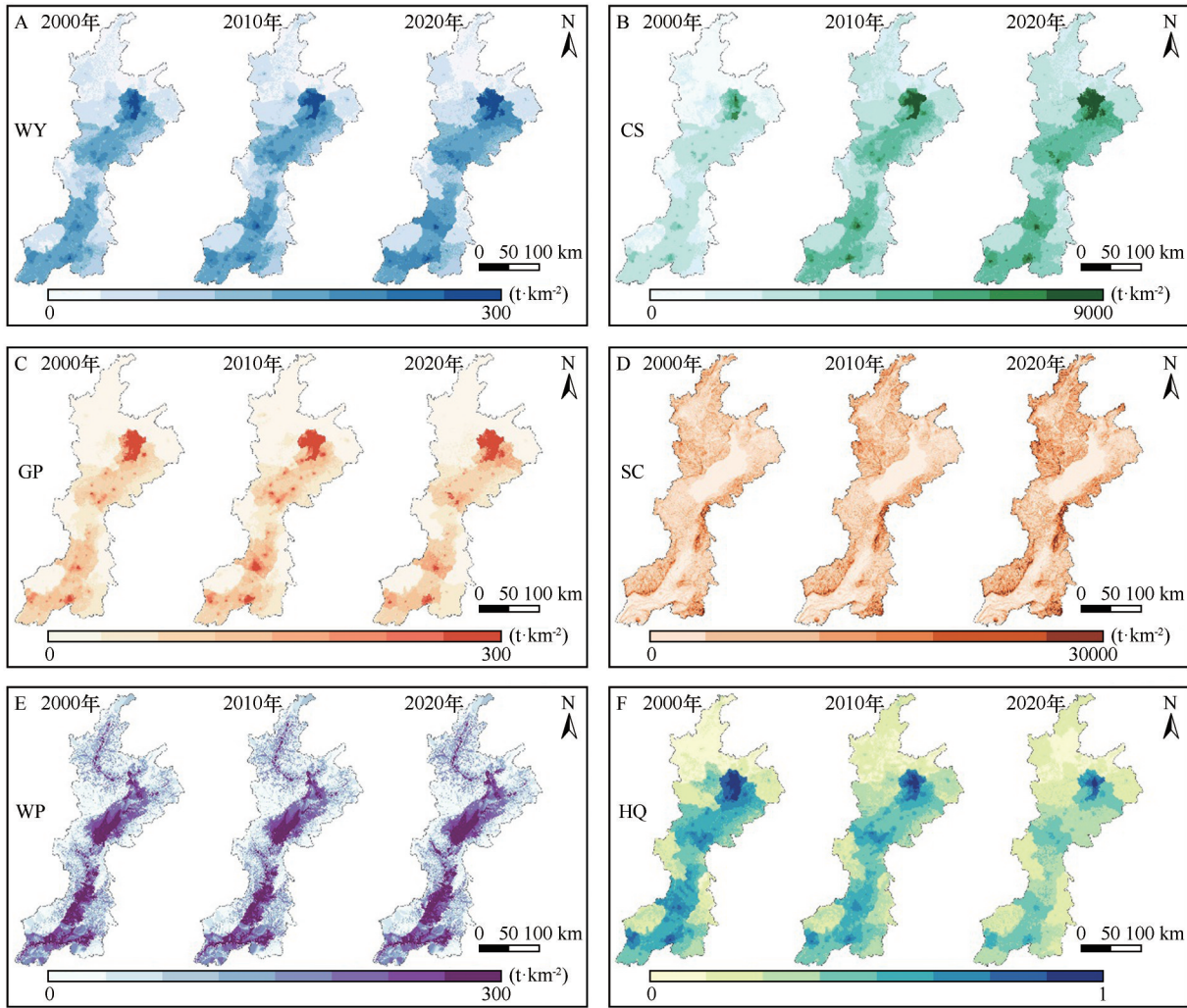
各生态系统服务需求量的空间分布存在显著差异(图4)。WY需求量呈增加趋势,中游高需求区由太原城区逐渐向晋中市榆次区扩展,下游临汾盆地和运城盆地高需求区呈相向发展趋势。CS需求



注:基于自然资源部标准地图服务网站标准地图(审图号GS(2019)1822号)制作,底图边界无修改

图3 2000—2020年生态系统服务供给时空分布

Fig.3 Spatial and temporal distribution of ecosystem services supply from 2000 to 2020



注:基于自然资源部标准地图服务网站标准地图(审图号GS(2019)1822号)制作,底图边界无修改

图4 2000—2020年生态系统服务需求时空分布

Fig.4 Spatial and temporal distribution of ecosystem services demand from 2000 to 2020

量显著增加,高需求区集中在太原-榆次核心区,并呈片状快速向四周扩张,低值区则逐渐收缩。GP需求量增幅趋缓,高需求区呈点状集中在人口密集的城镇,低需求区分布于东西两侧山地区域。SC需求量平稳增加,高需求区主要集中在流域东西两侧高海拔地区。WP需求量先降后升,高需求区集中在耕地资源丰富的中游和下游地区。HQ需求平均指数呈现先增后减的趋势,说明2010年后大规模的生态工程削弱了人类活动对自然生境的干扰程度。高需求区以城市建成区为主且空间上趋于收缩。

### 3.2 生态系统服务供需匹配时空演变特征

从整体上来看,到2020年各生态系统服务平均供需比均大于0(表3),然而上、中、下游却呈现不同的变化趋势(图5)。WP、SC和HQ的上、中、下游供

需比呈现同增趋势。CS出现同减趋势,其中中游供需比在2020年变为负值,呈现供不应求的状态。WY上、下游供需比增加,而中游供需比减少,且一直处于供不应求状态。GP供需比呈现先增加后减少的趋势,上游降幅最大,中下游由供不应求转为供大于求。

从空间格局上看,WY和GP的高赤字区主要集中在太原主城区,上游及中、下游东西两侧山区由高盈余区变为低盈余区(图6)。CS在太原主城区东部逐渐由高赤字区转变为平衡区,上游及中、下游高盈余区全部转变为低盈余区。SC在上游岚县、娄烦的部分乡镇由低盈余区转变为高盈余区。WP的高赤字区广泛分布于太原主城区与太原盆地南缘的“孝汾平介灵”城镇组团,下游临汾盆地和运城盆地的赤字区显著增加,而中、下游山区靠近

表3 生态系统服务平均供需比  
Table 3 The average value of ecosystem services supply-demand ratio

生态系统服务 平均供需比	2000年	2010年	2020年
产水服务	-0.0009	-0.0018	0.0062
固碳服务	0.0816	0.0111	0.0018
粮食生产服务	0.0035	0.0153	0.0081
土壤保持服务	0.0150	0.0160	0.0172
水质净化服务	-0.0200	-0.0147	0.0012
生境质量服务	0.1870	0.1877	0.2376

赤字区的高盈余区逐渐转变为低盈余区。HQ赤字区主要集中在太原盆地、临汾盆地和运城盆地。

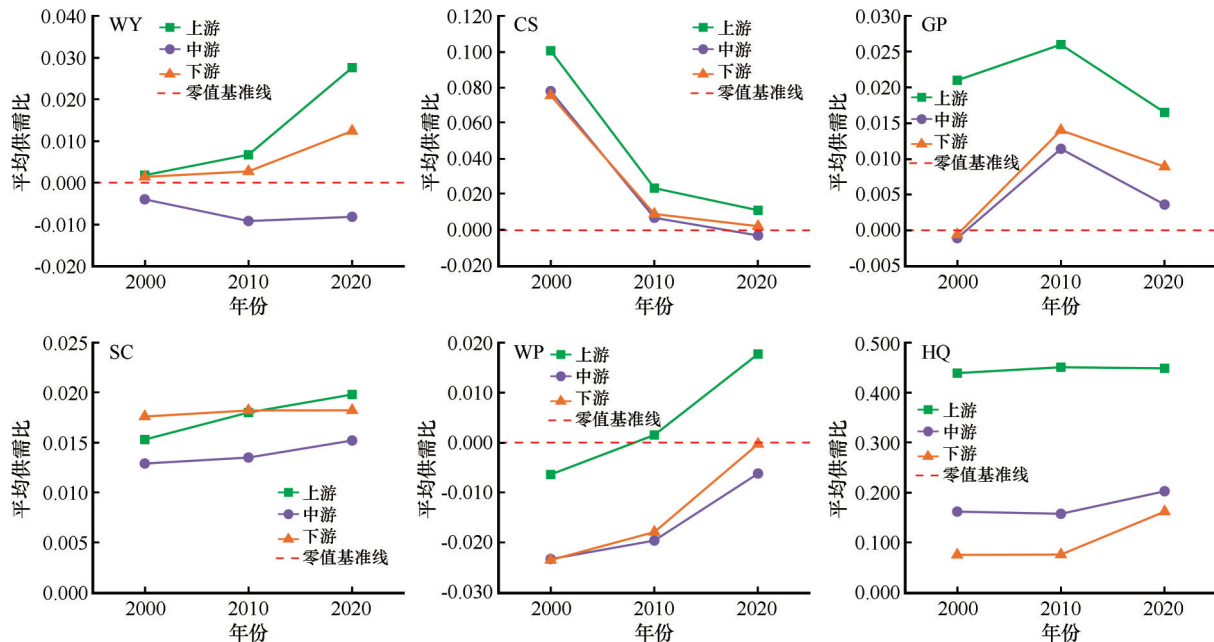


图5 上、中、下游供需比变化趋势

Fig.5 Change trend of ecosystem services supply-demand ratio in upstream, midstream, and downstream

B1簇主要分布于流域内城市化水平最高的太原城区,随着太原市“南移西进”发展战略的实施,B1簇的范围也向西向南逐渐扩张,乡镇数量从2000年的27个增加至2020年的33个,主要由B2簇转化而来。

B2簇主要分布于流域内城镇化进程较快的乡镇,中游地区主要分布于太原城区周边,以及太原盆地南缘的“孝汾平介灵”城镇组群;下游地区主要分布于临汾市区、河津、稷山等城镇扩张较快的地区。研究期内,B2簇的乡镇数量由2000年的90个显著减少至2020年的62个,太原城区周边大部分乡镇转入B1簇,中下游盆地其他城镇扩张较快乡镇

到2020年,太原盆地几乎所有乡镇都转变为赤字区。

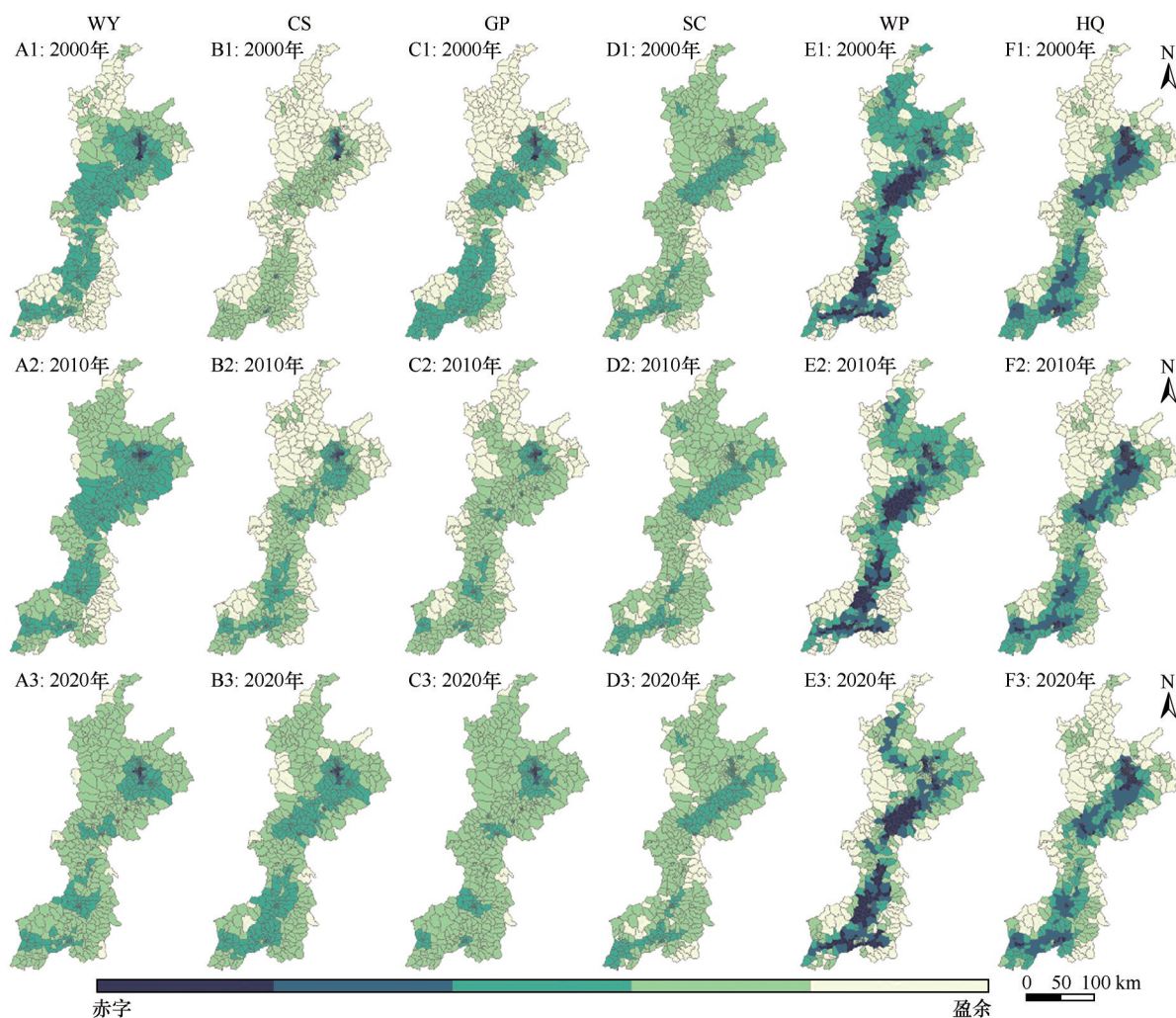
### 3.3 生态系统服务供需簇的时空演化特征

本文采用SOM模型在乡镇尺度识别出汾河流域4种生态系统服务供需簇。B1簇内SC呈现基本平衡状态,其余服务供需均呈严重错配状态;B2簇内SC供需基本平衡,其他服务供需错配状态较B1簇有所减缓;B3簇内WP和HQ供不应求,CS供大于求,其余服务均呈现平衡状态;B4簇内所有服务均呈现供大于求的状态。研究期内,B1、B3和B4簇的乡镇数量有所增加,B2簇的乡镇数量减少,主要体现在B2簇向B1簇和B3簇,B3簇向B4簇的转变(图7)。

大都转入B3簇。

B3簇主要分布于中下游平原地区,乡镇数量最多,是山西省粮食主产区。研究期内,B3簇乡镇数量未发生显著变化,主要由中下游盆地人口密集的B2簇转入,同时在临汾盆地东缘太行山区转入B4簇。高强度的农业生产活动增强了人类对生态系统的扰动,使得生境质量服务供不应求,而由此产生的农业面源污染又使得B3簇的水质净化服务不能满足人们生产生活的需要。

B4簇主要分布于上游管涔山,中、下游盆地边缘的吕梁山和太行山,以林地和草地为主,受人类活动



注:基于自然资源部标准地图服务网站标准地图(审图号GS(2019)1822号)制作,底图边界无修改

图6 2000—2020年生态系统服务供需比时空分布

Fig.6 Spatial and temporal distribution of ecosystem services supply-demand ratio from 2000 to 2020

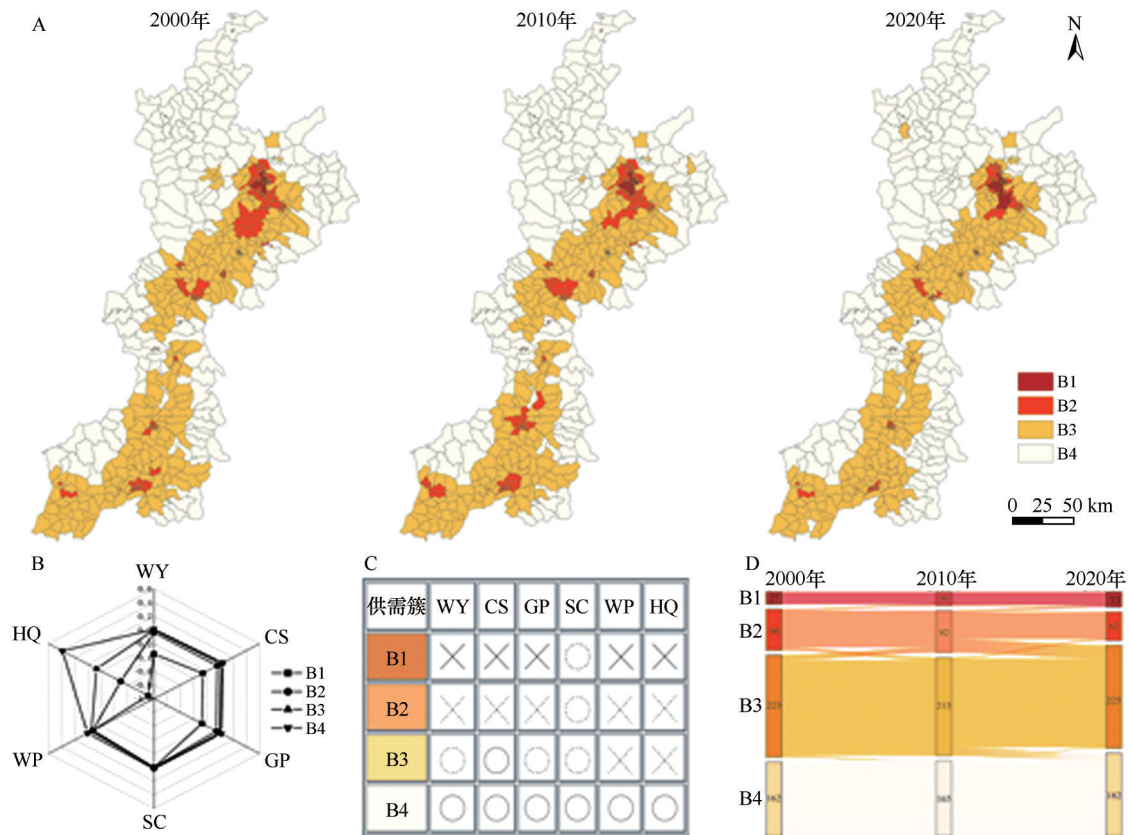
干扰较少,因此产水服务和水质净化服务基本呈平衡状态,其余各项生态系统服务均呈现供大于求的状态。研究期内,B4簇的乡镇数量由2000年的162个增加至2020年的182个,B3簇是其主要转入簇。

## 4 讨论

### 4.1 模型的有效性、可靠性与不确定性

当前,国内外学者广泛使用InVEST模型来测算生态系统供给服务,因此本文借助InVEST模型对汾河流域产水供给服务、固碳供给服务、土壤保持供给服务和生境质量供给服务进行量化评估。在产水服务供给测算方面,结合汾河流域水文特征调整相关参数,并将汾河流域模拟产水系数与全省多年平均产水系数进行对比发现:《山西省水资源

公报》显示山西省多年平均产水系数为0.14,而本研究模拟结果显示汾河流域平均产水系数为0.12,说明本研究模拟结果具有可靠性。冯强等<sup>[40]</sup>利用InVEST模型估算汾河流域产水服务及土壤保持服务,研究结果显示产水服务和土壤保持服务表现为增加趋势,其中2020年产水服务显著提高,这与本文研究结果一致。固碳服务供给测算所需的碳密度数据以及土壤保持供给服务测算所需参数参照类似研究区已有研究<sup>[41-42]</sup>确定。朱春霞等<sup>[43]</sup>通过Invest模型测算黄河流域碳储量,其空间分布与本文结果大致一致,说明本研究选取的碳密度参数具有可靠性。诸多研究表明农作物产量与NDVI之间具有显著的线性关系<sup>[7,33-34]</sup>,本文以此为依据测算粮食供给服务,赵雪雁等<sup>[7]</sup>通过该方法测算黄土高原粮食供给服务,空间分布与本文基本一致,说明本



注：基于自然资源部标准地图服务网站标准地图(审图号GS(2019)1822号)制作,底图边界无修改

图7 生态系统服务供需簇时空演变格局(A)、特征值(B)、组成(C)和数量转变(D)

Fig.7 Spatial pattern (A), relative magnitude (B), composition (C) and transformation (D) of ecosystem services supply-demand bundles from 2000 to 2020

研究对粮食供给服务的测算具有可靠性。水质净化服务与生境质量服务的供给空间分布与学者在黄河流域<sup>[41]</sup>、山西省<sup>[44]</sup>的相关研究基本一致,进一步印证了本文供给量化结果的可靠性。

在生态系统服务需求测算方面,相关指标和测算方法尚缺乏统一的标准,人口分布越集中、产业效益越高,从而导致人类对生态系统服务的需求越高<sup>[7]</sup>。因此,当前的研究多选取地区生产总值空间密度、人口空间密度、夜间灯光指数、土地利用强度等指标综合表征生态系统服务需求<sup>[20,45]</sup>,但这类指标难以全面反映不同区域、不同群体在生态系统服务需求上的差异性特征。因此,本研究以人定需求法<sup>[46-47]</sup>计算产水服务、固碳服务、粮食生产服务的需求,有效提高了研究结果的准确性。对于生境质量服务需求的测算采用土地利用强度、人口空间分布和地区生产总值空间分布进行估算,测算结果与黄河流域生境质量需求的空间分布基本一致,说明本研究需求量化结果具有可靠性。然而,人类活动的强度可能在较短时间受政策、灾害等因素的强烈干

扰产生剧烈波动<sup>[2]</sup>,因此水质净化、生境质量需求的测算可能会由于人类活动强度在局部地区的波动而产生空间的不确定性。

#### 4.2 生态系统服务供需与匹配关系的演变

生态系统服务供需匹配机制本质上反映了自然禀赋与人类活动之间的供求关系。本研究结果表明,6种生态系统服务供给量均呈现不同程度的增加,表明20年来汾河流域生态治理工程取得了显著的成效<sup>[20]</sup>。与此同时,伴随经济社会的快速发展,人们对各类生态系统服务的需求量迅速增加。对于资源型地区而言,资源的大面积开采与加工使得山西省人均碳排放量由2000年的4.56 t增加至2020年的16.71 t,在固碳供给量变化不大的情况下,固碳供需比呈快速下降趋势。2000—2010年产水服务和水质净化服务平均供需比均呈现赤字状态,而2020年均转为盈余状态。这是由于2020年降水量偏多,使得流域内产水供给量和水质净化供给量显著增加,侯晋星等<sup>[48]</sup>的研究也证实了这一结论。

就空间而言,各生态系统服务供需赤字区主要集中在人类活动强度大的中、下游地区,而高盈余区集中在上游山区和中下游东西两侧吕梁山区和太行山区。诸多研究也表明,在人口密集的工农业集聚区,人们对生态系统服务的需求更高,而人口稀疏且经济发展较落后的区域,人们对生态系统服务的需求较低<sup>[33]</sup>。而水质净化服务和生境质量服务在中、下游的赤字区显著增加,是由于中下游平原区是山西省重要的粮食种植区和工业发展区,工农业需水量大,且由工农业生产导致的水体污染也较其他区域更为严重,高强度的人类活动对生态系统产生了强烈的干扰,因此造成了生态系统服务供需在空间上的严重错配。

#### 4.3 基于生态系统服务供需簇开展生态管控分区的可靠性

流域是以水为纽带兼具“三生”功能的复杂系统,高强度的人类活动不仅深刻地影响和改变着流域的状态,同时还受益于流域所提供的各种生态系统服务。将供需关系纳入到生态管理与决策中,对于实现精细化的生态管控、构建区域生态安全格局具有重要意义。本研究基于生态系统服务供需簇进行生态管控分区的可靠性主要体现在3个方面:第一,基于生态系统服务供需理论,考虑了生态系统服务多功能供需间的非线性耦合关系,将单一指标供需匹配-时空演变-对策建议的研究框架拓展至供需簇组合识别-时空演变-管控策略,弥补了现有研究中对多功能供需耦合分析不足导致的类型误判和分区管控综合性差的问题,可以为进一步高效精准调控流域生态系统服务提供科学依据。第二,本研究基于SOM识别簇类特征,并根据其空间分布划分生态管理分区,与以往研究对多种生态系统服务供需比进行加权求和或求平均值作为分区依据相比,可以更加精准判别服务组合和错配类型。供需错配簇可以有效地将自然禀赋供给与经济社会需求的多种不匹配性有机地结合起来,既有助于准确把握区域生态冲突区,又可以通过综合考量各错配类型之间的复杂关系从而在不同错配区实施差异化管理措施。第三,本研究识别出的综合生态系统服务供需强错配簇主要分布于高度城市化的太原主城区,而综合生态系统服务供需弱错配簇主要分布于城郊过渡带及经济发达的县城,这与何国钰等<sup>[34]</sup>与孟令琦等<sup>[49]</sup>的研究结果相似,进一步

证明研究结果的可靠性。

## 5 结论与建议

### 5.1 结论

2000—2020年,汾河流域产水、固碳、土壤保持、水质净化和生境质量的供给格局均呈现东西高、中间低的空间分布特征,粮食生产服务供给高值区却集中在中下游盆地。产水、固碳、粮食生产、水质净化和生境质量的需求高值区均集中在太原城区及中下游人口密集的区域,而土壤保持需求格局则刚好相反。

到2020年,汾河流域各典型生态系统服务供需关系整体处于平衡状态,但供需空间错配严重,固碳和水质净化服务在中游地区依然供不应求。上游的管涔山、中下游东西两侧的吕梁山和太行山均为区内重要的生态系统服务盈余区,中下游盆地水质净化和生境质量服务的赤字区显著增加,山区产水、固碳和粮食生产服务大部分高盈余区转变为低盈余区。

基于生态系统服务供需匹配特征,采用自组织映射网络识别出4种生态系统服务供需簇。总体而言,生态系统服务供需错配区趋于集中,且中心城区错配程度最高,簇类之间的转化主要体现在B2簇向B1簇和B3簇,B3簇向B4簇的转变,簇类之间的相互转化表明太原主城区周边错配区扩张显著且错配强度增强。

### 5.2 展望

本研究拓展了生态系统服务供需理论的应用,为促进流域内土地资源优化配置、助力构建汾河流域生态安全格局提供了理论参考。同时,基于乡镇尺度进行分区识别可以有效规避生态系统服务流在精细尺度评价中造成的不确定性,也更有利于决策的实施和传导。然而,研究也存在一定的局限性。本研究对于部分生态系统服务需求的测算囿于数据的获取,未能实现更加精准的测算。在未来的研究中,应结合马斯洛的人类需求理论深入探究各种生态系统服务需求的量化方法,以期实现更加精准的区域生态系统服务供需匹配测算。与此同时,本研究仅从3个时间截面量化生态系统服务供需的空间特征,而未考虑供需之间动态反馈机制。未来的研究可以对某些大型生态恢复治理工程对

区域供给的改善以及对需求重塑的角度入手,探究生态系统服务供需之间的动态平衡机制。生态系统服务供需匹配特征存在明显的尺度差异,未来可进一步探讨多尺度下汾河流域生态系统服务供需演变特征,以期为不同管理层级提供相应的生态管理决策依据。

### 5.3 建议

**综合生态系统服务供需强错配区:**主要位于太原主城区,以建设用地为主,人类生产生活强度高,资源承载力和环境自净能力弱。因此,该区域应以“精准供给、低碳转型”为原则,加强太原市区汾河滨水休闲区和街角口袋公园等城市蓝绿空间建设,推动老城区低效利用空间的更新,提升城市生态承载力的同时满足居民生态安全基本需求。继续推进资源型经济转型,推动零碳、低碳园区以及无废细胞以及绿色工厂在城市空间的推广建设,推动海绵城市系统建设,实现雨水调蓄与循环再利用,进一步降低城市空间的固碳需求。

**综合生态系统服务供需弱错配区:**主要位于太原主城区周边,以及中、下游经济发达的县城。土地利用碎片化特征显著,不合理的开发建设威胁居民福祉。因此,该区域应以“严控扩张、修复本底”为导向,合理规划城郊过渡带土地利用,维持农业生产潜力,保障城区食物供应的安全性和韧性。在沿河地区积极恢复湿地,打通并培育连接城市核心区和边缘区的生态廊道,恢复城郊过渡带为主城区提供减缓热岛效应、消纳污染物等生态屏障的作用。对于中下游处于资源型经济转型期的县域,应积极探索生态工程与产业发展深度融合的发展模式。尤其是作为山西中部城市群南引擎的“孝汾平介灵”城镇组团,应积极破除资源依赖路径,依托汾河流域生态治理的政策扶持,在磁窑河、惠河等汾河支流进行湿地恢复、生态廊道的建设等工程,同时配套建设生态康养设施,发展生态旅游和康养产业。在孝义-灵石西部丘陵区及平遥-介休东部山区提升造林强度,增强区域生物多样性和固碳能力。

**水质净化-生境质量服务错配区:**主要位于中下游平原地区,以耕地为主,农业灌溉条件好,机械化水平高。长期以来,化肥农药的大面积使用导致的农业面源污染超过了区内水体的自净能力,同时阻碍了农田生态系统服务功能的供给。因此,该

区域应遵循“循环利用、生态治理”的发展理念,推动乡村污水处理站建设,采用中水回灌农田,推广测土配方精准施肥,推进农药减量增效,资源化利用畜禽粪污,推广农业绿色基础设施建设,以保障区域水质安全。

**综合生态系统服务供需匹配区:**位于流域内海拔较高的山区,以林地为主,人类活动扰动少,生态本底条件好。因此该区域应以“保育优先、三生协同”为原则,以生态系统自我修复能力为基础,重点恢复退化区域生态保育能力。在汾河源头区推广静乐县人工湿地模式,提升上游水源涵养及水质净化功能。科学构建汾河流域水陆空智慧监测系统,及时发现潜在生态问题。发展林下经济等生态农业,以及徒步、观鸟等轻体验生态文旅产业,实现保护-收益的闭环路径,促进区域“三生”功能协同发展。

### 参考文献:

- [1] 赵雪雁,丁静,马平易.人类活动对黄土高原生态系统服务权衡/协同关系影响的多尺度研究[J].地理学报,2025,80(7):1920-1936.
- [2] Gao Y L, Fu D L, Huang H, et al. Spatio-temporal evolution and scenario-based optimization of urban ecosystem services supply and demand: a block-scale study in Xiamen, China[J]. Ecological Indicators, 2025, 172: 113289.
- [3] Yang Y, Yuan X, An J, et al. Drivers of ecosystem services and their trade-offs and synergies in different land use policy zones of Shaanxi Province, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 452: 142077.
- [4] 刘海龙,王改艳,张鹏航,等.汾河流域新型城镇化与生态韧性耦合协调时空演变及协调影响力研究[J].自然资源学报,2024,39(3):640-667.
- [5] 杜可心,张福平,冯起,等.黑河流域生态系统服务的地形梯度效应及生态分区[J].中国沙漠,2023,43(2):139-149.
- [6] 刘雨婷,覃盟琳,欧阳慧婷,等.基于生态系统服务供需平衡的国土空间资源配置优化[J].自然资源学报,2024,39(6):1358-1383.
- [7] 赵雪雁,马平易,李文青,等.黄土高原生态系统服务供需关系的时空变化[J].地理学报,2021,76(11):2780-2796.
- [8] Zhang J W, Wang M, Liu K, et al. Social-ecological system sustainability in China from the perspective of supply-demand balance for ecosystem services[J]. Journal of Cleaner Production, 2025, 497: 145039.
- [9] He G Y, Zhang L, Wei X J, et al. Scale effects on the supply-demand mismatches of ecosystem services in Hubei Province, China[J]. Ecological Indicators, 2023, 153: 110461.
- [10] Xu M, Feng Q, Zhang S, 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.
- [11] Yue L, Zhang M, Gan MY, et al. Fine identification of the supply-demand mismatches and matches of urban green space ecosystem services with a spatial filtering tool[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 336: 130404.
- [12] 张中浩, 张永瑶, 胡熠娜, 等. 基于“水-能源-粮食”纽带的生态系统服务供需关系时空分布研究: 以长三角生态绿色一体化发展示范区为例[J]. 生态学报, 2023, 43(22): 9430-9445.
- [13] 李潇飞, 龚健, 叶菁, 等. 生态系统服务权衡协同下的甘肃省生态功能分区优化[J]. 干旱区地理, 2025, 48(3): 467-479.
- [14] Yang L P, Liu Y S, Liu Y Q, et al. Spatial-temporal dynamics and drivers of ecosystem service interactions along the Yellow River area in Shaanxi Province[J]. Journal of Cleaner Production, 2025, 496: 145095.
- [15] Shen J S, Li S C, Wang H, et al. Understanding the spatial relationships and drivers of ecosystem service supply-demand mismatches towards spatially-targeted management of social-ecological system [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 406: 136882.
- [16] Raudsepp-Hearne C, Peterson G D, Bennett E M. Ecosystem service bundles for analyzing tradeoffs in diverse landscapes [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107: 5242-5247.
- [17] Zhang X, Han R, Yang S, et al. Identification of bundles and driving factors of ecosystem services at multiple scales in the eastern China region [J]. Ecological Indicators, 2024, 158: 111378.
- [18] 闫晓露, 李欣媛, 刘澄浩, 等. 生态系统服务簇空间演变轨迹及其社会-生态驱动的地理探测: 以大连市为例[J]. 生态学报, 2022, 42(14): 5734-5747.
- [19] Shen J, Li S, Liang Z, et al. Exploring the heterogeneity and nonlinearity of trade-offs and synergies among ecosystem services bundles in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. Ecosystem services, 2020, 43: 101103.
- [20] Lyu F, Tang J, Olhnuud A, et al. The impact of large-scale ecological restoration projects on trade-offs/synergies and clusters of ecosystem services [J]. Journal of Environmental Management, 2024, 365: 121591.
- [21] 张春悦, 白永平, 杨雪薇, 等. 多情景模拟下宁夏平原生态系统服务簇识别研究[J]. 地理研究, 2022, 41(12): 3364-3382.
- [22] Dou H, Li X, Li S, et al. Mapping ecosystem services bundles for analyzing spatial trade-offs in Inner Mongolia, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 256: 120444.
- [23] 余昊轩, 汤江龙, 陈荣清. 湖北省生态系统服务供需时空演变特征及其多尺度的空间平衡与匹配分析[J]. 环境科学, 2024, 45(11): 6477-6488.
- [24] 张艺玫, 张淑怡, 朱泓恺, 等. 基于多尺度生态系统服务供需的大都市区生态安全格局构建与优化[J]. 生态学报, 2024, 44(21): 9596-9609.
- [25] Wang S, Zhang R, Wang J, et al. Identification and optimization of ecological corridors in the middle reaches of the Yellow River Basin [J]. Journal of Cleaner Production, 2025, 512: 145676-145676.
- [26] 解智涵, 宋洁, 张慧, 等. 汾河流域文化景观旅游开发潜力综合评价[J]. 中国沙漠, 2024, 44(4): 184-192.
- [27] 冯强, 赵文武, 段宝玲. 生态系统服务权衡强度与供需匹配度的关联性分析: 以山西省为例[J]. 干旱区研究, 2022, 39(4): 1222-1233.
- [28] 史利江, 刘敏, 李艳萍, 等. 汾河流域县域经济差异的时空格局演变及驱动因素[J]. 地理研究, 2020, 39(10): 2361-2378.
- [29] 李振涵, 李静文, 于洪伟, 等. 汾河流域水生态环境保护与可持续发展策略研究[J]. 环境科学学报, 2024, 4(8): 1-11.
- [30] Zhang X, Zhang G S, Long X, et al. Identifying the drivers of water yield ecosystem service: a case study in the Yangtze River Basin, China [J]. Ecological Indicators, 2021, 132: 108304.
- [31] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 基于InVEST模型的黄河流域产水量时空变化及其对降水和土地利用变化的响应[J]. 应用生态学报, 2020, 31(8): 2731-2739.
- [32] 李兆碧, 陶宇, 欧维新, 等. 基于水量与水质的太湖流域水生态服务供需关系及多情景评估[J]. 生态学报, 2023, 43(5): 2088-2100.
- [33] 安志英, 孙才志, 郝帅. 东北生态系统服务的供需匹配关系: 基于水-能源-粮食纽带视角[J]. 生态学报, 2024, 44(10): 1-17.
- [34] 何国钰, 张蕾, 雷锡琼, 等. 基于生态系统服务供需簇的武汉都市圈生态风险评估及影响因素[J]. 应用生态学报, 2024, 35(5): 1347-1358.
- [35] 王婧煜, 赵媛媛, 耿君, 等. 京津风沙源治理工程区生态系统服务供需匹配关系[J]. 农业工程学报, 2025, 41(4): 279-287.
- [36] 韩宇, 刘焱序, 王晨旭. 基于水生态系统服务的黄河流域生态修复投资优先区识别[J]. 生态学报, 2024, 44(18): 8126-8137.
- [37] 许宝荣, 刘一川, 董莹, 等. 基于InVEST模型的兰州地区生境质量评价[J]. 中国沙漠, 2021, 41(5): 120-129.
- [38] Yang M H, Zhao X N, Wu P T, et al. Quantification and spatially explicit driving forces of the incoordination between ecosystem service supply and social demand at a regional scale [J]. Ecological Indicators, 2022, 137: 108764.
- [39] 孟欣宇, 吴远翔. 城市生态系统服务供需簇与生态功能管控: 以齐齐哈尔市中心城区为例[J]. 应用生态学报, 2023, 34(12): 3393-3403.
- [40] 冯强, 赵文武, 王晶, 等. 类型识别视角下汾河流域生态系统服务权衡时空分异及非线性驱动特征[J]. 生态学报, 2025, 45(16): 7921-7937.
- [41] 盖莹莹, 赵衡, 王富强. 黄河流域生态系统服务供需变化及其驱动因素分析[J]. 环境科学, 2025, 46(6): 3672-3680.
- [42] 王奕洪, 孙学莹. 黄河流域生态系统服务权衡协同关系及其时空异质性[J]. 环境科学, 2025, 46(2): 972-989.
- [43] 朱春霞, 钟绍卓, 龙宇, 等. 黄河流域生态系统服务的时空演变及其驱动力[J]. 生态学杂志, 2023, 42(10): 2502-2513.
- [44] 陈小平, 李萱, 徐若凡, 等. 多尺度生态系统服务及其驱动力

- 制:以山西省为例[J].生态学杂志,2025,44(9):3106-3115.
- [45] 鄧宏宇,张磊. 黄河流域生态系统服务供需匹配及生态管理分区研究[J].环境污染与防治,2023,45(5):730-735.
- [46] 李大强,张飞龙,周红涛,等.基于生态系统服务供需的新疆天山北坡城市群生态安全格局构建[J].中国环境科学,2025,45(8):4706-4714.
- [47] 李智,苏洋,舒芹.基于生态系统服务供需匹配的西北地区生态管理分区[J].干旱区地理,2025,48(6):1115-1126.
- [48] 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.
- [49] 孟令琦,汤佳,胡希军,等.生态系统服务供需风险簇时空演变特征及影响因素:以信江流域为例[J/OL].生态学杂志,1-17 [2025-08-11]. <https://link.cnki.net/urlid/21.1148.Q.20250514.1009.002>.

## Supply-demand matching of ecosystem services and zoning control in the Fenhe River Basin, China

Song Jie<sup>1</sup>, Zhang Longfei<sup>1</sup>, Song Wenkai<sup>1</sup>, Chen Peisen<sup>1</sup>, He Yuhan<sup>1</sup>, Liang Wen<sup>2</sup>

(1.School of Geographical Science / Shanxi Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology Security in Fenhe River Basin, Taiyuan Normal University, Jinzhong 030619, Shanxi, China; 2.Yuncheng Environmental Protection Bureau, Yuncheng 044000, Shanxi, China)

**Abstract:** To implement effective, tailored ecological management within a watershed, it is essential to first understand how the supply of ecosystem services matches the demand for those services, as well as the spatial variations and characteristics of this relationship. This article quantifies the supply and demand patterns of six typical ecosystem services in the Fenhe River Basin from 2000 to 2020. Based on the supply-demand ratio, SOM is used to identify the supply-demand bundles of ecosystem services. Combined with the spatial distribution and supply-demand structure characteristics of the bundles, ecological zoning control strategies are proposed. The results showed that: (1) From 2000 to 2020, ecosystem services for water production, carbon sequestration, soil conservation, water purification, and habitat quality were higher in the east and west regions but lower in the middle, whereas the supply of food production services showed the opposite pattern. The high-demand areas for water production, carbon sequestration, food production, water purification, and habitat quality are concentrated in the urban area of Taiyuan and the midstream and downstream areas, particularly where population density is high; in contrast, soil conservation is in greater demand in other, less densely populated areas. (2) There is a serious spatial mismatch between supply and demand in the Fenhe River Basin; upstream areas (including Guancen Mountain) often show surpluses, whereas midstream and downstream areas (including Lvliang Mountain and Taihang Mountain) face deficits. The deficit of water purification and habitat quality services has considerably increased in the midstream and downstream areas, and in mountainous ecosystems, many high-surplus areas for water production, carbon sequestration, and food production services have declined. (3) There are a strong mismatch between the supply and demand bundles of comprehensive ecosystem services (B1), a weak mismatch between the supply and demand bundles of comprehensive ecosystem services (B2), mismatch bundles of water purification and habitat quality services (B3), and matching supply-demand bundles of comprehensive ecosystem services (B4) in the Fenhe River Basin. Overall, the mismatch between supply and demand of ecosystem services tends to be concentrated in central urban areas. The transformation between clusters is mainly reflected in the transition from B2 to B1 and B3, and from B3 to B4. Substantial expansion of the mismatch occurred around the main urban area of Taiyuan.

**Key words:** ecosystem services; supply-demand matching; supply-demand bundles; Fenhe River Basin; ecological management strategy