

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.01.033; CSTR:32311.14.rswc.2026.01.033.

邱芳婷, 党小虎. 黄土高原农牧交错带生态系统服务与生计资本权衡/协同关系及其机制[J]. 水土保持研究, 2026, 33(1): 351-361.

Qiu Fangting, Dang Xiaohu. Trade-offs and synergies between ecosystem services and livelihood capital in Loess Plateau agro-pastoral ecotone and their driving mechanisms[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2026, 33(1): 351-361.

# 黄土高原农牧交错带生态系统服务与 生计资本权衡/协同关系及其机制

邱芳婷<sup>1</sup>, 党小虎<sup>2</sup>

(1. 西安科技大学 测绘科学与技术学院, 西安 710054; 2. 西安科技大学 地质与环境学院, 西安 710054)

**摘要:** [目的] 揭示黄土高原农牧交错带生态系统服务供需格局与生计资本之间的耦合关系及其驱动机制, 以缓解区域生态脆弱性与人地矛盾, 为农牧业与生态保护的协调发展提供科学依据。[方法] 基于多模型方法, 量化 2000—2020 年黄土高原农牧交错带粮食、饲料、牲畜生产、产水与固碳服务的供需格局, 结合地理加权回归(GWR)与冗余分析(RDA), 识别生态系统服务与生计资本的空间耦合特征及其主导因子。[结果] (1) 粮食高供给区向中北部收缩(降幅 7.8%), 饲料、产水与固碳服务高供给区向西北部扩张, 牲畜供给呈“西北高、东南低”格局。(2) 生态系统服务需求持续增长, 人口密集与城市化区域供需矛盾显著加剧(ESDR<1)。(3) 粮食、饲料与牲畜生产服务与自然、物质资本显著协同, 产水与固碳服务则在生态保护区呈现协同增强与经济发展滞后的权衡分异。(4) 年降水量、年均温度与海拔等自然因素是生态系统服务与生计资本关系的主导驱动因素, 社会经济因素加剧了供需失衡与空间权衡。[结论] 黄土高原农牧交错带生态系统服务与生计资本高度耦合, 其驱动机制以自然因素为主导、社会经济因素为加剧因素, 且受气候与生态脆弱性影响呈现空间异质性, 明确了二者关系及驱动机制, 可服务于区域可持续性提升。

**关键词:** 生态系统服务; 人类福祉; 权衡协同; 驱动力; 黄土高原农牧交错带

中图分类号: X171; K901

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)01-0351-11

## Trade-offs and synergies between ecosystem services and livelihood capital in Loess Plateau agro-pastoral ecotone and their driving mechanisms

Qiu Fangting<sup>1</sup>, Dang Xiaohu<sup>2</sup>

(1. College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;  
2. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** [Objective] This study reveals the coupling relationship between the supply-demand patterns of ecosystem services (ESs) and livelihood capital in the Loess Plateau agro-pastoral ecotone (LPAPE), and identifies its driving mechanisms, aiming to alleviate regional ecological vulnerability and human-land conflicts and provide a scientific basis for the coordinated agro-pastoral development and ecological conservation. [Methods] A multi-model approach was used to quantify the supply-demand patterns of food, fodder, livestock production, water yield, and carbon sequestration services in the LPAPE from 2000 to 2020. Geographically weighted regression (GWR) and redundancy analysis (RDA) were then applied to identify the characteristics of the spatial coupling between ESs and livelihood capital and their dominant factors. [Results] (1) The area of high food supply decreased by 7.8% and contracted toward the north-central region. The high-supply areas of fodder, water yield, and carbon sequestration services expanded to the northwest, and livestock supply showed a spatial pattern of “high in the northwest and low in the southeast”. (2) The demand for ESs continued to increase, leading to

收稿日期: 2025-04-15

修回日期: 2025-04-28

接受日期: 2025-05-05

资助项目: 国家自然科学基金项目“系统流视角下黄土高原农牧交错带草-牧耦合机制与调控”(42271309)

第一作者: 邱芳婷(1998—), 女, 河南商丘人, 硕士研究生, 主要从事土地生态研究。E-mail: 2458067325@qq.com

通信作者: 党小虎(1968—), 男, 宁夏隆德人, 博士, 教授, 主要从事生态修复与水土保持研究。E-mail: dangxh2018@xust.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

more pronounced supply-demand mismatches in densely populated and urbanized areas ( $ESDR < 1$ ). (3) Food, fodder, and livestock production services were strongly synergistic with natural and physical capital, while water yield and carbon sequestration services exhibited a trade-offs between ecological synergy and lagging economic development in ecological protection zones. (4) Natural factors such as annual precipitation, mean annual temperature, and elevation were the dominant driving factors of the relationship between ESs and livelihood capital, while socioeconomic factors intensified supply-demand imbalances and spatial trade-offs. [Conclusion] ESs and livelihood capital are strongly coupled in the LPAPE. The driving mechanisms are dominated by natural factors and exacerbated by socioeconomic factors, and exhibit spatial heterogeneity under the influence of climate and ecological vulnerability. This study clarifies their relationship and the driving mechanisms, which can contribute to improving regional sustainability.

**Keywords:** ecosystem services; human well-being; trade-offs and synergies; driving factors; Loess Plateau agro-pastoral ecotone (LPAPE)

随着全球变化与人类活动不断增强,生态系统服务能否支撑日益增长的人类需求,已成为全球可持续发展亟需应对的重大科学问题<sup>[1]</sup>。根据MEA<sup>[2]</sup>报告,全球约60%的生态系统服务正处于不同程度的退化状态,严重削弱了其供给能力并威胁到人类福祉。作为生态系统服务的最终受益者与调控者,人类社会通过其生计资本结构反馈作用于生态系统服务的供给过程与演变轨迹<sup>[3]</sup>。在土地利用变化<sup>[4]</sup>、人口增长<sup>[5]</sup>及气候变化等<sup>[6]</sup>多重因素驱动下,生态系统服务与生计资本常呈现复杂的权衡/协同关系,厘清二者的驱动机制,对制定促进生态系统服务持续供给与人类福祉提升的政策措施,具有重要的理论价值与实践意义。

近年来,生态系统服务供需关系与人类福祉的交互机制日益成为研究热点。一方面,生态系统服务的空间错配加剧了生态脆弱区的生计风险,并加深了区域发展的不平衡性<sup>[7-8]</sup>;另一方面,居民的生计策略、资本结构及资源获取方式深刻影响其对生态系统服务的需求特征及空间流动模式<sup>[9]</sup>。已有研究表明,在生态退化区域或生态补偿政策实施区,提升农户的自然资本与社会资本水平,有助于增强其生态友好型行为意愿,从而促进生态系统服务供给的可持续性<sup>[10-11]</sup>。因此,在供需错配背景下,识别生计资本对生态系统服务供给的反馈作用机制,已成为区域可持续发展研究的重要方向。

黄土高原农牧交错带是典型的生态脆弱带和农业与牧业的过渡区<sup>[12]</sup>,兼具生态安全、粮食安全和牧业发展等多重功能<sup>[4]</sup>。由于人口增长和城市化发展,区域内生态系统服务供需矛盾突出,导致生态系统服务与生计资本的权衡/协同关系尤为复杂<sup>[13-14]</sup>。然而,关于该地区生态系统服务供需格局与生计资本交互机制的研究仍较有限。基于此,本

文选取粮食生产、饲料生产、牲畜生产、产水服务与固碳服务5类关键生态系统服务,构建生态系统服务供需分析框架,综合运用时空分析、地理加权回归(Geographically Weighted Regression, GWR)与冗余分析(Redundancy Analysis, RDA)方法,分析2000—2020年生态系统服务供需格局及其与生计资本的空间权衡/协同特征,揭示关键驱动机制,旨在深化对生态系统服务与生计福祉关系的理解,为区域生态系统服务优化配置、生计资本提升及生态脆弱区可持续治理提供理论依据与决策参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

黄土高原农牧交错带位于中国黄土高原中东部( $34^{\circ}52' - 41^{\circ}49' N, 105^{\circ}11' - 114^{\circ}33' E$ ),横跨甘肃、宁夏、内蒙古、陕西和山西五省(自治区),总面积约24.8万 $km^2$ 。该地区地处东部吕梁山与南部六盘山之间,地势整体呈西高东低分布,海拔1500~2000 m。气候类型为半湿润向半干旱的过渡带,年降水量介于300~600 mm,降水主要集中在夏季,冬季降水稀少。年均气温 $-2.1 \sim 13.89^{\circ}C$ ,呈西南高、东北低的分布格局。光照条件良好,年均日照时数约为2537 h;无霜期较长,为120~200 d。区域水系以黄河为主,主要支流包括渭河、汾河等。植被类型由南向北逐渐由阔叶林过渡为草地,土壤类型以黄土和褐土为主。该地区以农牧业为主要经济形态,矿产资源开发活跃,生态环境曾长期受到水土流失等问题的困扰。近年来,随着退耕还林等生态修复政策的实施,区域生态功能逐步恢复,生态环境质量显著改善。

### 1.2 数据来源与处理

本研究利用2000—2020年多源数据,包括土地利用/覆被数据、数字高程模型(Digital Elevation

Model, DEM)数据、土壤数据、气象数据及社会经济数据等。土地利用数据采用《第三次全国国土调查工作分类地类认定细则》建立的土地分类体系,划分为6类:耕地、林地、草地、水域、建设用地与未利用地。社会经济数据包括人口数量、地区生产总值(Gross Domestic Product, GDP)与牲畜年末存栏量,数据来源于相关省市统计年鉴。为保证空间数据的一致性与可比性,所有栅格类数据均统一重采样至1 km空间分辨率,并采用WGS\_1984\_Web\_Mercator\_Auxiliary\_Sphere坐标系进行投影转换。多源数据详细信息见表1。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 生态系统服务评估

(1) 生态系统服务供给。基于对农户生计的实地调研,并结合黄土高原农牧交错带资源禀赋与生态环境特征,选取5类能够代表区域生计方式及生态系统特征的生态系统服务类型:粮食生产、饲料生产、牲畜生产、产水服务和固碳服务。其中,粮食生产基于当量因子法估算;饲料生产与固碳服务应用植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)数据计算;牲畜生产依据载畜量估算;产水服务借助InVEST模型中的Water Yield模块模拟(表2)。

(2) 生态系统服务需求。通过整合人口密度、膳

食结构、人均碳排放及社会经济发展等指标,构建生态系统服务需求评估模型,具体方法见表3。

表 1 数据来源及描述  
Table 1 Data sources and descriptions

数据类型	数据来源	格式
行政边界	地理监测云平台( <a href="http://www.dsac.cn/">http://www.dsac.cn/</a> )	矢量
土壤数据	世界土壤数据库(HWSD) ( <a href="https://www.fao.org/">https://www.fao.org/</a> )	栅格
降水量数据	中国科学院资源环境科学与数据中心 ( <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a> )	栅格
基岩深度数据	世界土壤信息数据库(ISIRC) ( <a href="https://www.isric.org/">https://www.isric.org/</a> )	栅格
蒸散发数据	国家青藏高原科学数据中心 ( <a href="https://data.tpdc.ac.cn/">https://data.tpdc.ac.cn/</a> )	栅格
海拔数据	地理空间数据云( <a href="http://www.gscloud.cn/">http://www.gscloud.cn/</a> )	栅格
土地利用数据	中国科学院资源环境科学与数据中心 ( <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a> )	栅格
净初级生产力	Google Earth Engine(GEE) ( <a href="https://earthengine.google.com/">https://earthengine.google.com/</a> )	栅格
人口数据	中国科学院资源环境科学与数据中心 ( <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a> )	栅格
GDP数据	中国科学院资源环境科学与数据中心 ( <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a> )	栅格
碳排放数据	中国碳核算数据库(CEADs) ( <a href="https://www.ceads.net.cn/">https://www.ceads.net.cn/</a> )	文本

表 2 生态系统服务供给评估方法  
Table 2 Assessment methods for ecosystem service supply

生态系统服务	数学方法	代码
粮食生产	采用生态系统服务价值评估模型计算 <sup>[15]</sup> ,主要公式: $ESV_i = \sum_{k=1}^n A_{ik} \times EV_k$ ,式中:ESV <sub>i</sub> 为i地区的粮食生产供给量;A <sub>ik</sub> 为i地区k地类土地面积;EV <sub>k</sub> 为k地类单位面积粮食生产价值系数,价值系数计算参照谢高地等学者 <sup>[16]</sup> 的研究	FS
饲料生产	通过NPP与干草产量转换计算 <sup>[17]</sup> ,主要公式: $Yield = \frac{ANPP \times I_{dry}}{S_{bn}}$ ,式中:Yield为单位面积的可利用干草产量;ANPP为草地地上净初级生产力(碳含量),具体计算参照Sun等 <sup>[18]</sup> 的研究;I <sub>dry</sub> 为标准干草折算系数;S <sub>bn</sub> 为草地生物量与NPP间转换系数,数值取0.45 <sup>[17]</sup>	GS
牲畜生产	统计农户家畜年末存栏量,将各类牲畜数量转换为标准羊单位 <sup>[19]</sup> ,计算公式为: $N_i = 骆驼 \times 7 + 马 \times 5 + 牛 \times 5 + 驴 \times 5 + 猪 \times 2 + 羊 \times 1$ ,式中:N <sub>i</sub> 为i地区饲养各类牲畜换算成羊单位后的数量	LS
产水服务	通过InVEST3.14.2模型中的Water Yield模块,基于水量平衡原理计算: $Y_{(x)} = \left\{ 1 - \frac{AET_{(x)}}{P_{(x)}} \right\} \times P_{(x)}$ ,式中:Y <sub>(x)</sub> 为栅格x中的年产水量;P <sub>(x)</sub> 为栅格x年降水量;AET <sub>(x)</sub> 为栅格x中实际年蒸散发量	WS
固碳服务	通过NPP与碳固定转换能力计算 <sup>[20-22]</sup> : $CS_x = NPP_x \times 1.63$ ,式中:CS <sub>x</sub> 为栅格x的固碳服务供给量;NPP <sub>x</sub> 为栅格x的植被NPP	CS

#### 1.3.2 生态系统服务供需关系

(1) 数据标准化。标准化各县(区、旗)的生态系统服务供给量与需求量<sup>[13]</sup>。计算公式为:

$$A_i = x_i / \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

式中:A<sub>i</sub>为i县(区、旗)标准化后的生态系统服务供

给量(需求量);x<sub>i</sub>为i县(区、旗)的供给量(需求量);n为县(区、旗)总数。

(2) 生态系统服务供需比率。根据标准化后的供给量(需求量),采用生态系统服务供需比率(Ecosystem Service Supply-Demand Ratio, ESDR)评估黄土高原农牧交错带生态系统服务供需关

系<sup>[13]</sup>。计算公式为:

$$ESDR_i = \frac{S_i - D_i}{S_i + D_i} \quad (2)$$

式中:ESDR<sub>i</sub>为*i*县(区、旗)生态系统服务供需比率;

$S_i$ 与 $D_i$ 分别代表*i*县(区、旗)标准化后的生态系统服务供给量和需求量。ESDR<0为供需亏损,数值越小,亏损越明显;ESDR=0为供需平衡;ESDR>0为供需盈余。

表3 生态系统服务需求评估方法

Table 3 Assessment methods for ecosystem service demand

生态系统服务	数学方法	代码
粮食需求	采用人均粮食需求量 <sup>[23]</sup> ,计算公式为: $F_x = P_x \times \text{Crop}_j$ ,式中: $F_x$ 为栅格 $x$ 的粮食需求量; $P_x$ 为栅格 $x$ 的人口数量; $\text{Crop}_j$ 为 <i>j</i> 年人均粮食需求量	FD
饲料需求	计算满足牲畜正常生长和生产的标准干草量作为饲料需求 <sup>[24]</sup> ,计算公式为: $G_i = W \times N_i$ ,式中: $G_i$ 为 <i>i</i> 县(区、旗)产草服务需求量; $W$ 为标准羊单位年消耗的标准干草量657 kg <sup>[24]</sup> ; $N_i$ 为 <i>i</i> 县(区、旗)饲养各类牲畜换算成羊单位后的数量	GD
牲畜需求	牲畜需求量公式为: $F_j = D_j \times \text{POP}_j$ ,式中: $F_j$ 为 <i>j</i> 年单位面积牲畜需求量; $D_j$ 为 <i>j</i> 年基于平衡膳食模式下畜、禽肉人均需求量值 <sup>[25]</sup> ; $\text{POP}_j$ 为 <i>j</i> 年的人口密度。	LD
产水需求	通过用水定额法计算 <sup>[26]</sup> ,公式为: $W_x = P_x \times \text{DOM}_j + G_x \times \text{Ind}_j + A_x \times \text{Agr}_j$ ,式中: $W_x$ 为栅格 $x$ 的需水量; $P_x$ 为栅格 $x$ 的人口数量; $\text{DOM}_j$ 为 <i>j</i> 年居民人均生活用水量; $G_x$ 为栅格 $x$ 的GDP值; $\text{Ind}_j$ 为 <i>j</i> 年每万元GDP需水量; $A_x$ 为栅格 $x$ 的耕地面积; $\text{Agr}_j$ 为 <i>j</i> 年单位面积灌溉耗水量	WD
固碳需求	采用人均碳排放量计算,公式为: $\text{CD}_x = \text{CE} \times \text{POP}_x$ ,式中: $\text{CD}_x$ 为栅格 $x$ 的碳排放量; $\text{CE}$ 为人均碳排放量,根据中国碳核算数据库(CEADs)和人口数据获得各地区碳排放数据计算; $\text{POP}_x$ 为栅格 $x$ 的人口数量	CD

1.3.3 生计资本测算 基于OFID提出的可持续生计框架(Sustainable Livelihoods Framework, SLF)<sup>[27]</sup>,借助实地调研与前人研究经验<sup>[28]</sup>,构建包括人力资本、自然资本、物质资本、金融资本和社会资本5类生计资本评价体系,包含15个生计指标(表4)。

表4 生计资本评价体系

Table 4 Assessment framework for livelihood capital

生计资本	生计指标	权重	单位	代码
人力资本	乡村就业人员	0.041	人	Hu
	平均受教育程度	0.020	年	
自然资本	人均耕地面积	0.039	m <sup>2</sup> /人	Na
	人均草地面积	0.088	m <sup>2</sup> /人	
	年均降水量	0.016	mm	
	粮食总产量	0.058	t	
物质资本	牲畜数	0.058	头	Ma
	农用机械总动力	0.043	兆瓦	
	万人医疗机构床位	0.074	床	
金融资本	农村居民人均可支配收入	0.028	元	Fi
	城乡居民储蓄存款	0.076	万元	
	年末金融机构各项贷款余额	0.094	万元	
社会资本	地方财政一般预算支出	0.049	万元	So
	城镇化率	0.231	%	
	规模以上工业企业数	0.078	个	

1.3.4 供需比与生计资本权衡/协同关系 通过地理加权回归(GWR)模型,揭示生态系统服务供需比(自变量)与生计资本(因变量)在空间上的相关性特征<sup>[29]</sup>。局部回归系数 $\beta_k > 0$ 代表两者为空间协同关系, $\beta_k < 0$ 代表两者为空间权衡关系。计算公式如下:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} + \epsilon_i \quad (3)$$

式中: $y_i$ 为第*i*个位置的生计资本; $x_{ik}$ 为第*i*个位置的*k*类生态系统服务供需比; $\beta_k(u_i, v_i)$ 表示随空间位置( $u_i, v_i$ )变化的回归系数; $\epsilon_i$ 是随机误差。采用“GWmodel”包在R 4.4中执行。

1.3.5 驱动机制分析 鉴于生态系统服务供需与生计资本权衡/协同格局在自然生态过程、社会经济发展与景观格局的驱动下呈现出的空间异质性,本文借鉴相关研究成果<sup>[6,28]</sup>,并考虑数据可获取性及空间分异性,选取11个关键驱动因素:自然生态因素(年降水量、年均温度、植被覆盖度、年蒸发量和海拔)、社会经济因素(人口密度、经济密度和土地利用强度),以及景观格局因素(建设用地占比、耕地占比和草地占比)(表5)。通过冗余分析(RDA)揭示各类驱动因素对生态系统服务供需关系、供需比与生计资本权衡/协同关系这两方面的影响。

## 2 结果与分析

### 2.1 生态系统服务时空变化

2.1.1 生态系统服务供给变化 2000—2020年黄土高原农牧交错带粮食高供给主要集中在东部山西、南部固原市和平凉市,北部及中部地区供给量下降。饲料供给显著增长,高供给区由南向中东部扩张,形成以静宁县、志丹县和伊川县为核心的高供给区。牲畜高供给集中在西部和东北部,南部低供给区向北扩张。产水和固碳服务呈东南高、西北低的梯度分布,东南高供给区向北扩张(图1)。

表 5 驱动因素描述  
Table 5 Description of driving factors

驱动因素	描述	代码
年降水量	一年内每月降水量的总和	PRE
年均温度	一年内的日平均气温	TEM
植被覆盖度	植被垂直投影面积占总面积的百分比	FVC
年蒸发量	一年内由地表蒸发到大气中的水分总量	EVP
海拔	描述垂直于海平面的距离	EM
人口密度	居民人数与区域面积之比	PD
经济密度	国民生产总值与区域面积之比	ED
土地利用强度	衡量土地资源开发利用程度	LD
建设用地占比	衡量土地利用结构和城镇化水平	BC
耕地占比	衡量区域农业用地资源	AC
草地占比	衡量草地资源丰富程度	GC

2.1.2 生态系统服务需求变化 2000—2020年黄土高原农牧交错带生态系统服务需求上升。粮食与牲

畜需求在大同市、呼和浩特市等地持续增加,西部与北部边缘区需求较低。饲料高需求集中在北部与西南部,如环县、镇原县和托克托县,单位面积超 200 t/km<sup>2</sup>,南部饲料需求较低且呈扩张趋势。产水需求稳定,单位面积达 9.5×10<sup>5</sup> t/km<sup>2</sup>的高需求区主要集中在东北部和西部。固碳需求显著增加,北部高需求集中在神木市—吴起县—赛罕区一带(图 2)。

2.2 生态系统服务供需关系时空动态及其驱动力

2.2.1 供需关系时空动态 2000—2020年黄土高原农牧交错带粮食生产服务供需盈余区主要集中在西北部,供需亏损区集中在以牧业为主或人口密集区,如呼和浩特四区。饲料生产供需格局波动,亏损县由 58个减少至 48个。牲畜生产供需盈余区减少,亏损县从 46个增至 49个。产水服务供需关系改善,南部长期盈余,北部和西部供需失衡严重。固碳服务供需亏损县由 35个增至 40个,严重失衡区域缩小,主要集中在呼和浩特四区、大同市区和榆林市等地区(图 3)。

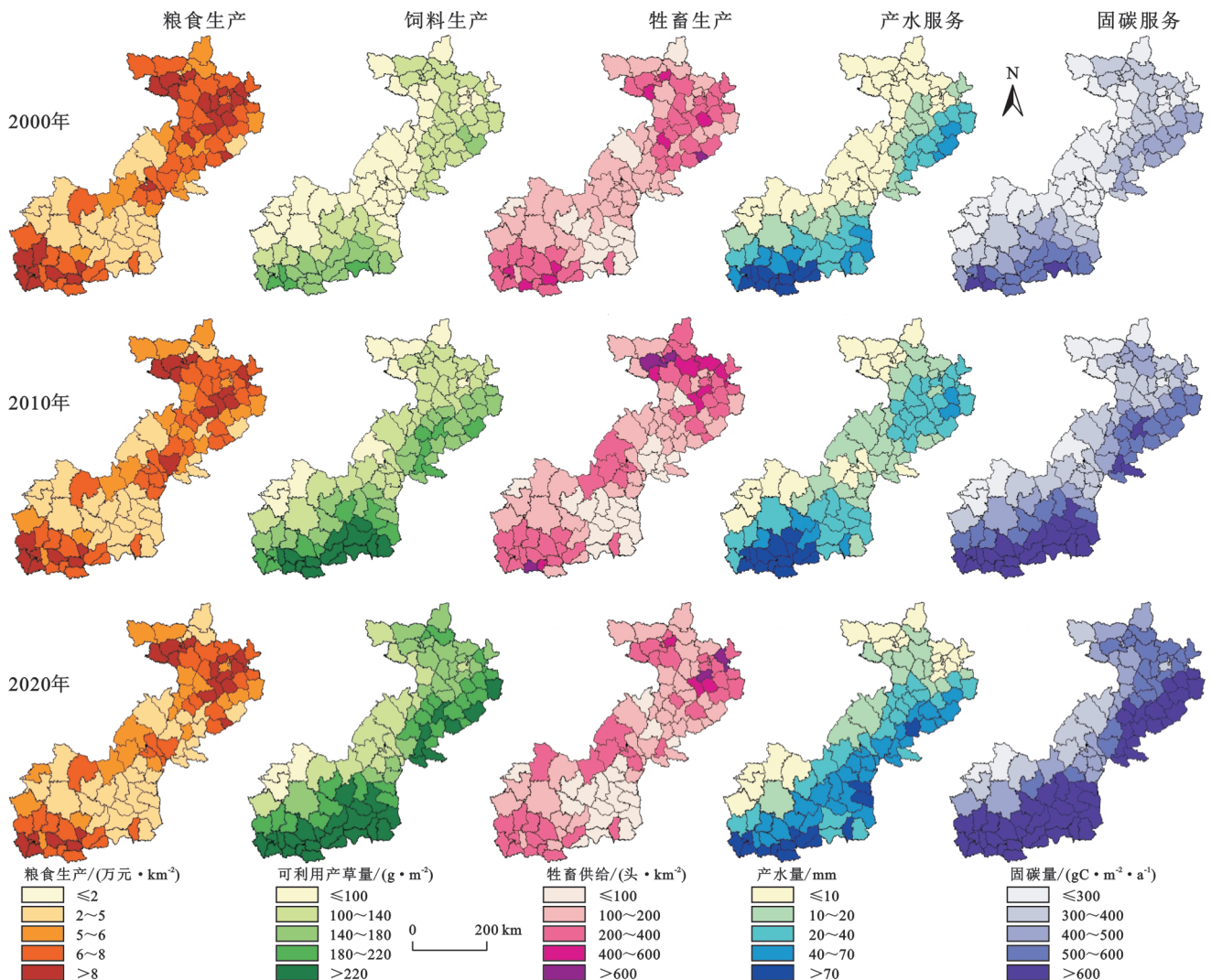


图 1 2000—2020年黄土高原农牧交错带 5 类生态系统服务供给格局  
Fig. 1 Supply patterns of five ecosystem services in LPAPE (2000—2020)

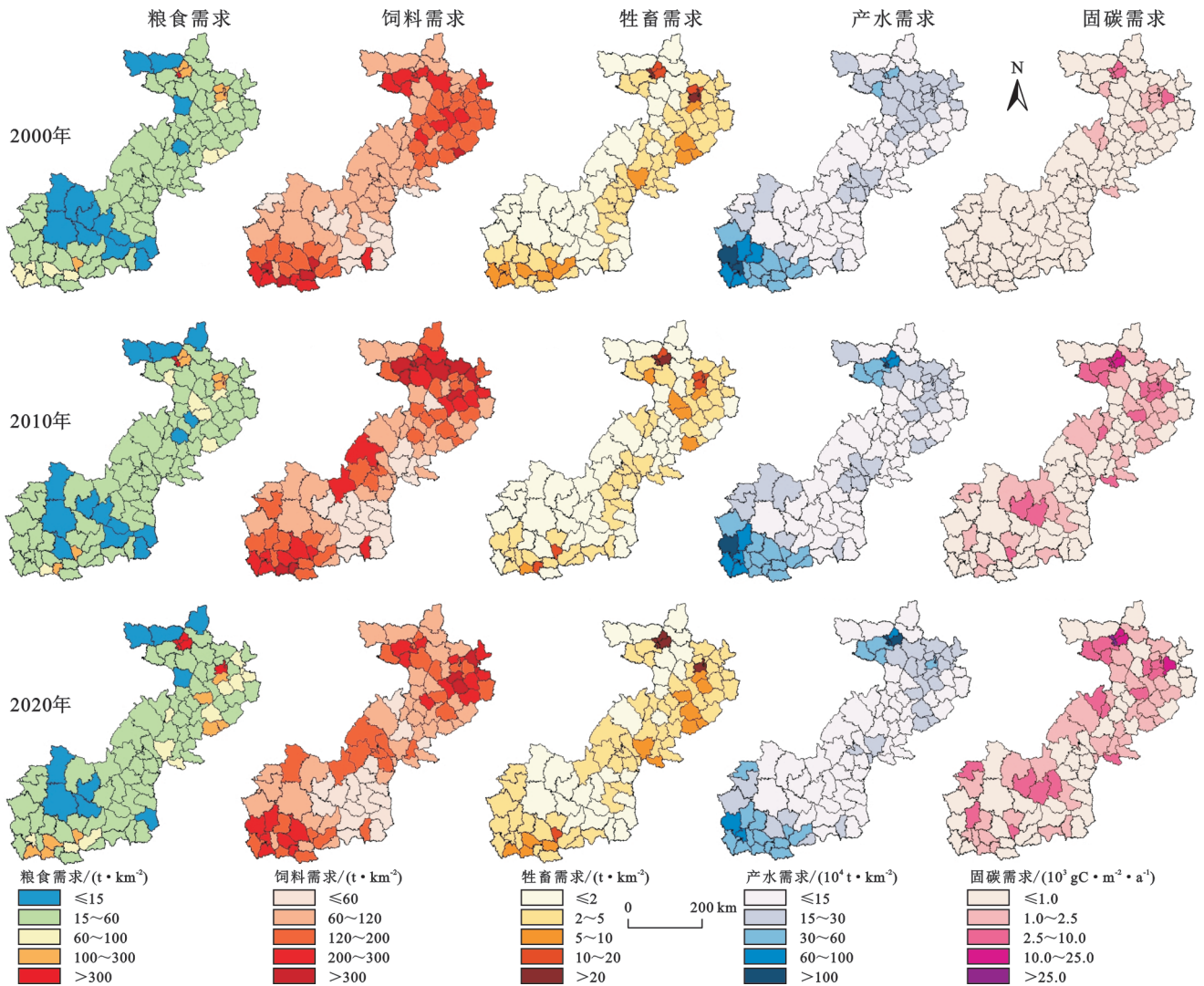


图 2 2000—2020年黄土高原农牧交错带 5类生态系统服务需求格局

Fig. 2 Demand patterns of five ecosystem services in LPAPE (2000—2020)

2.2.2 供需关系变化驱动力 2020年驱动因素对5类生态系统服务供需关系的总体解释率为91.69%，表明其对空间变化具有强解释力。年降水量的单独解释率最高(51.6%)，人口密度与耕地占比的共同解释率为28.2%(表6)。海拔与草地占比对粮食生产、牲畜生产及固碳服务为正驱动，年降水量、植被覆盖度与年均温度对饲料生产、产水及固碳服务为正驱动，对粮食与牲畜生产则为负驱动。社会经济因素(如人口密度、经济密度与土地利用强度)普遍为负驱动(图4)。

### 2.3 生态系统服务与生计资本权衡/协同驱动机制

2.3.1 供需关系与生计资本权衡/协同空间格局 2020年黄土高原农牧交错带粮食生产与自然、物质资本呈空间协同，东北部协同程度较高。粮食生产与人力、金融、社会资本在东北部为权衡关系。饲料生产与自然资本在北部为协同，与其他4类资本为权衡。牲畜生产与自然、物质资本整体呈空间协同，东北部与其他3类资本为权衡。产水服务与自然资本

在北部和南部为协同，与其他4类资本为权衡。固碳服务与自然资本空间协同显著，南部与西北部为高协同，与金融、社会资本为权衡(图5)。

2.3.2 供需关系与生计资本权衡/协同驱动机制 2020年自然生态因素主导了生态系统服务供需与生计资本的关系，年均温度、年降水量和海拔对两者的关系影响显著(表7)。粮食生产服务的权衡/协同关系主要受年均温度(33.5%)和海拔(39.3%)影响，表现为对社会、金融资本的正向驱动，以及对自然、物质资本的负驱动(图6)。饲料生产服务主要受年降水量(14.1%)和草地占比(12.7%)影响，年降水量正向驱动对人力、物质资本的协同，草地占比则为负向驱动。年均温度对牲畜生产(40.9%)和固碳服务(30.7%)的权衡/协同影响较大，表现为正向驱动牲畜生产与人力、金融及社会资本的协同，负向影响固碳服务与社会、自然资本。海拔对固碳服务的权衡/协同影响较大(52.1%)，表现为对人力、金融资本的正向驱动，对物质、社会及自然资本的负向驱动。

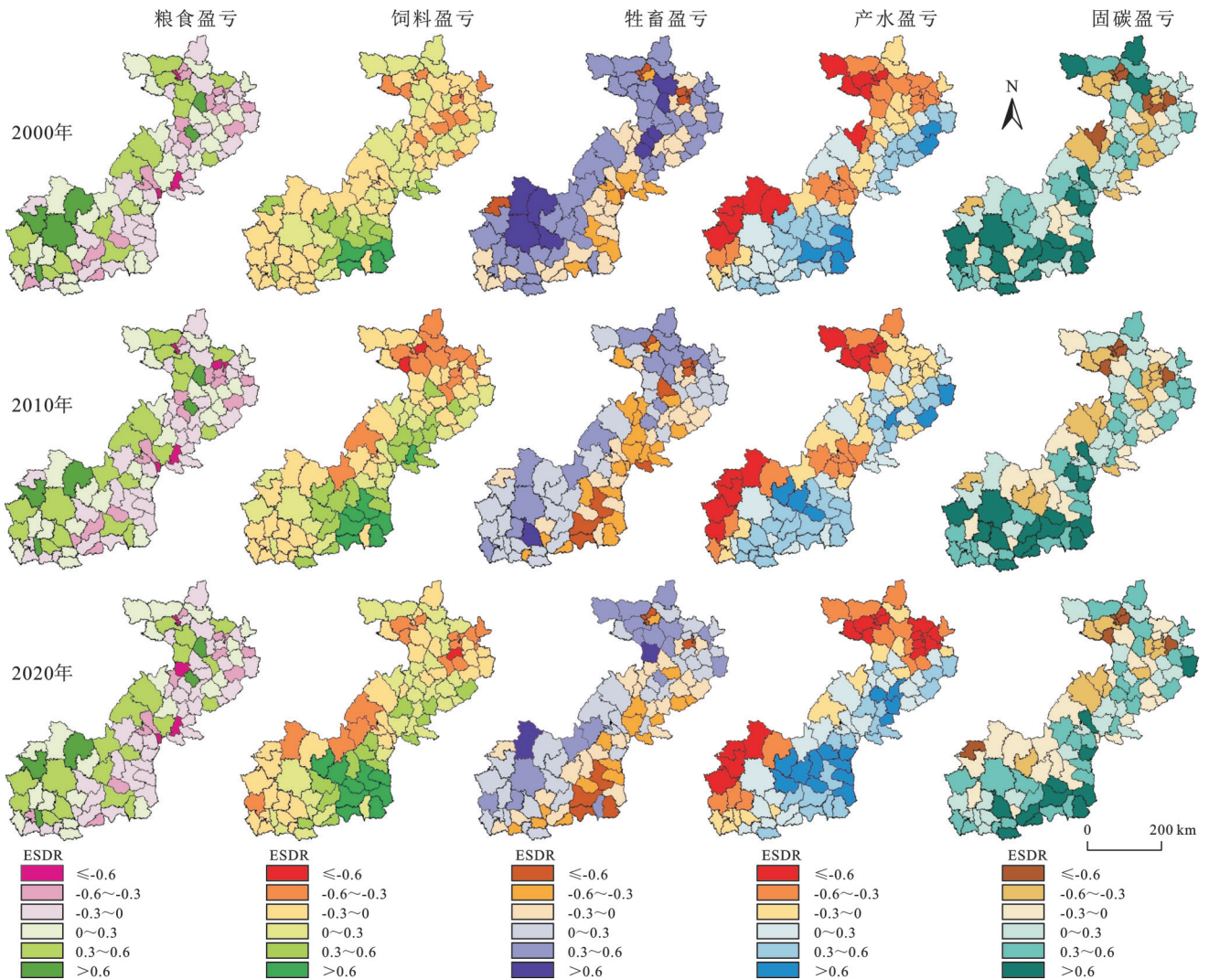


图 3 2000—2020 年黄土高原农牧交错带 5 类生态系统服务供需关系

Fig. 3 ESDR patterns of five ecosystem services in LPAPE (2000—2020)

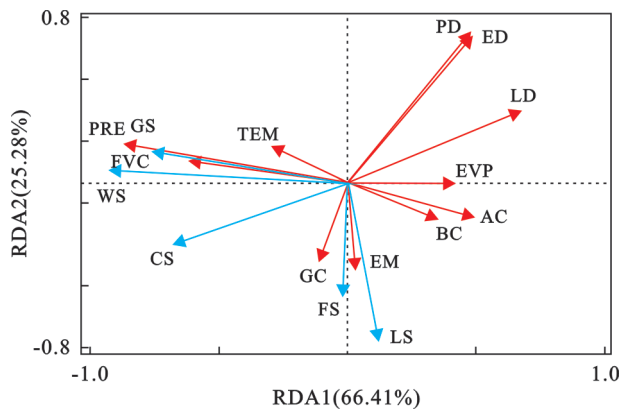


图 4 2020 年黄土高原农牧交错带供需关系与驱动因素 RDA 双标图

Fig. 4 RDA biplot of ESDR and driving factors in LPAPE in 2020

### 3 讨论

#### 3.1 生态系统服务供需变化及驱动机制

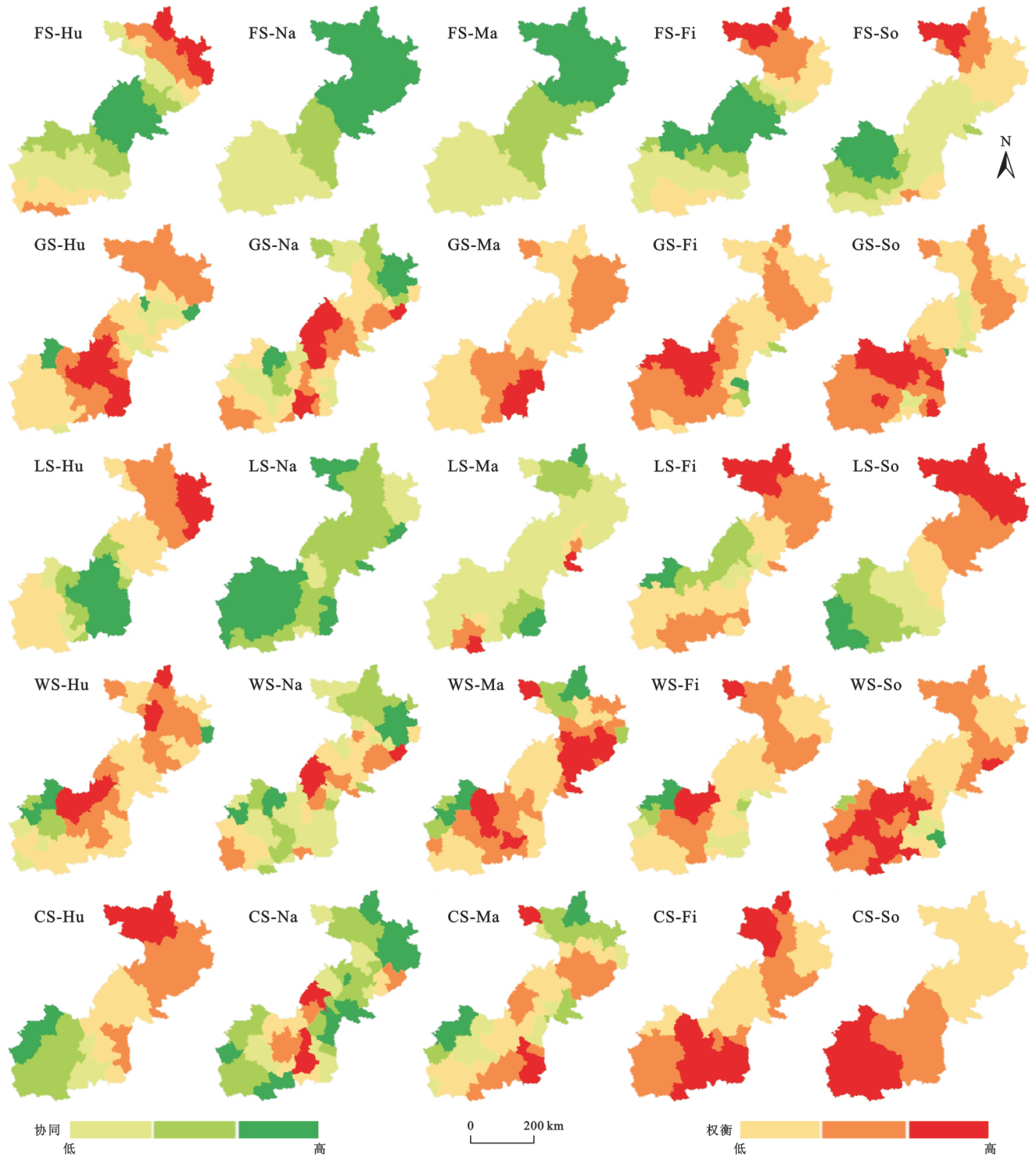
2000—2020 年黄土高原农牧交错带生态系统服

务供需格局在自然资源禀赋与人类活动驱动下呈现显著空间异质性。不同服务类型在供需强度和空间分布上差异明显:粮食与饲料生产的高供给区集中在东部和南部地区,并逐渐向中北部转移扩张;产水与固碳服务呈“东南高、西北低”的梯度分布特征,高供给区呈北扩趋势。该格局演变既受年降水量、地形等自然因素直接影响,也显著受到退耕还林还草、天然林保护、禁牧封育等生态工程及农业结构调整等人为干预的驱动<sup>[4,30]</sup>。

生态系统服务需求总体增加,尤其集中在城市化程度高、人口密集的地区(如大同市、呼和浩特市)。随着粮食与牲畜产品需求的持续增长,这些地区的生态系统服务的供需矛盾日益加剧,体现出城镇扩张在一定程度上加剧了生态系统服务供给能力与社会需求的结构性失衡<sup>[13]</sup>。Wang 等<sup>[6]</sup>的研究表明,年降水量是影响黄土高原地区供需关系的关键驱动因子,其对黄土高原农牧交错带供需关系变化的解释率达 51.6%,体

现了黄土高原地区对气候变化的敏感性特征。此外,人口密度、经济密度和土地利用强度等人类活动因素

作为生态系统服务需求变化的核心驱动因子,显著加剧了5类服务在城乡之间的供需失衡<sup>[4]</sup>。



注:FS为粮食生产;LS为牲畜生产;GS为饲料生产;WS为产水服务;CS为固碳服务;Hu为人力资本;Na为自然资本;Ma为物质资本;Fi为金融资本;So为社会资本。

图5 2020年黄土高原农牧交错带供需比与生计资本权衡/协同

Fig. 5 Trade-offs and synergies between ESDR and livelihood capital in LPAPE in 2020

### 3.2 生态系统服务与生计资本的权衡/协同机制

黄土高原农牧交错带生态系统服务与生计资本之间普遍存在显著的空间协同与权衡特征,反映出生态-生计关系的多样性与复杂性。2020年粮食、

饲料、牲畜生产服务普遍与自然、物质资本呈空间协同关系,东北部地区高协同特征显著,体现自然资源禀赋与基础设施条件的改善在提升农户物质保障能

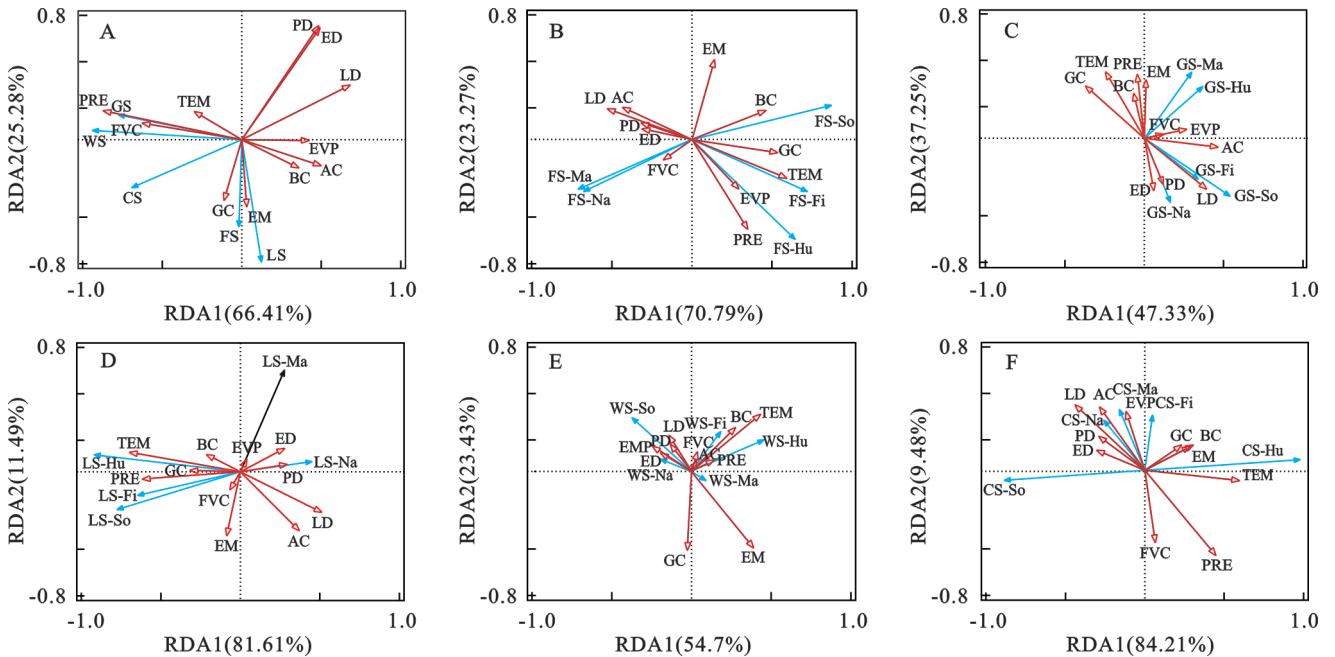
力方面的积极作用。然而,与人力、金融和社会资本则多表现为空间权衡关系,反映出供应类服务对于提升金融、社会资本能力的有限性,尤其在边缘地区和经济发达地区,这种权衡现象更为突出<sup>[3]</sup>。在调节类服务中,产水与固碳服务表现为与自然资本的空

间协同特征,与金融、社会资本的空间权衡特征,尤其在南部生态保护优先区(如陕甘宁交界地区)表现显著,其原因可能源于指标与方法差异,也可能如屠文竹等<sup>[13]</sup>所指的生态保护与经济发展之间的失衡,仍需进一步研究探讨。

表 6 驱动因素对生态系统服务供需关系解释力  
Table 6 Explanatory power of driving factors on ESDR

因素	PRE	PD	AC	EVP	FVC	BC	DEM	ED	TEM	GC	LD
解释率/%	51.600	21.600	6.600	5.500	5.100	2.700	1.700	1.500	1.400	0.800	1.600
<i>p</i>	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.012	0.020	0.026	0.204	0.008

注:PRE为年降水量;TEM为年均温度;FVC为植被覆盖率;EVP为年蒸发量;EM为海拔;PD为人口密度;ED为经济密度;BC为建设用地占比;AC为耕地占比;GC为草地占比;LD为土地利用强度。下表同。



注:FS为粮食生产;LS为牲畜生产;GS为饲料生产;WS为产水服务;CS为固碳服务;Hu为人力资本;Na为自然资本;Ma为物质资本;Fi为金融资本;So为社会资本;PRE为年降水量;TEM为年均温度;FVC为植被覆盖率;EVP为年蒸发量;EM为海拔;PD为人口密度;ED为经济密度;BC为建设用地占比;AC为耕地占比;GC为草地占比;LD为土地利用强度。

图 6 2020年黄土高原农牧交错带供需比与生计资本关系 RDA 双标图  
Fig. 6 RDA biplot of relationship between ESDR and livelihood capital in LPAPE in 2020

表 7 驱动因素对权衡/协同关系的解释力

Table 7 Explanatory power of driving factors on trade-offs and synergies

粮食生产-生计资本		饲料生产-生计资本		牲畜生产-生计资本		产水服务-生计资本		固碳服务-生计资本	
因素	解释率/%	因素	解释率/%	因素	解释率/%	因素	解释率/%	因素	解释率/%
TEM	33.5**	PRE	14.1**	TEM	40.9**	TEM	14.8*	TEM	30.7**
EM	39.3**	GC	12.7*	EM	34.2**	EM	38.3**	EM	52.1**
EVP	9.2**	EVP	15.6**	LD	7.9**	PRE	16.5*	PRE	5.4**
PRE	12.1**	EM	15.0**	ED	3.6**	GC	8.9*	AC	4.9**
AC	1.8**	TEM	18.2**	AC	2.3*	BC	7.1*	EVP	1.1
ED	0.9*	AC	11.7**	EVP	2.0*	EVP	2.1	BC	1.9
LD	1.1**	PD	1.9	PRE	3.1**	FVC	1.7	PD	0.3
BC	0.6	ED	4.4	FVC	2.9**	AC	1.2	ED	2.3*
GC	0.6	FVC	2.0	GC	2.0*	ED	1.5	LD	0.7
FVC	0.8*	BC	2.7	PD	0.8	LD	4.7	GC	0.5
PD	<0.1	LD	1.7	BC	0.3	PD	3.2	FVC	<0.1

注:\*表示相关性显著( $p < 0.05$ );\*\*表示相关性极显著( $p < 0.01$ )。

生态系统服务-生计资本权衡/协同关系的驱动因素中,自然生态因素在空间变异中占据主导地位。其中,年降水量对饲料生产与物质、人力资本之间的关系具有显著正向影响(解释率14.1%),说明水资源丰沛地区更利于构建草畜平衡的生态-生计系统。年均温度与海拔同样深刻影响粮食、牲畜生产和固碳服务的权衡/协同关系。例如,年均温度(解释率40.9%)正向驱动牲畜生产与人力、金融及社会资本的关系,海拔(解释率52.1%)负向驱动固碳服务与物质、社会及自然资本的关系,正向驱动与人力、金融资本的关系。该现象反映出黄土高原的生态脆弱性(如低温、风蚀与地形复杂)对资源配置效率和生计适应能力的限制作用<sup>[9]</sup>。此外,草地资源作为畜牧业的重要基础,虽然其扩张(解释率12.7%)有助于增强饲料生产与物质资本(如牲畜存栏量)的协同关系,但由于对耕地的挤占效应,可能削弱与自然资本(如粮食生产能力)的协同力度,从而引发其他生态系统服务之间的权衡<sup>[8,28]</sup>。

因此,为缓解黄土高原农牧交错带生态系统服务与生计资本间的空间权衡,构建协同发展格局,应提升金融与社会资本对生态系统服务利用的支撑能力;优化土地利用结构,发展复合农林业,缓解服务间资源竞争;实施因地制宜的差异化发展策略,以提升自然资本配置效率与生态系统服务可持续供给能力。

## 4 结论

(1)在自然与人为因素共同驱动下,黄土高原农牧交错带生态系统服务呈现出明显的梯度分布特征。区内农业与畜牧业资源竞争加剧,导致粮食高供给区呈缩减趋势。生态工程及气候变化共同推动饲料生产、产水和固碳服务由东南高供给格局向西北低供给区域扩张。

(2)生态系统服务需求持续增长,经济发达与人口密集地区(如大同市平城区、呼和浩特市四区)需求增长较快,粮食、牲畜生产与固碳服务的供需失衡问题突出。西北部生态系统脆弱,饲料生产和产水服务长期保持供需亏损状态。

(3)5类生态系统服务与自然资本呈空间协同,与人力、金融及社会资本呈空间权衡,反映生态保护与经济发展之间存在一定程度的冲突,应基于这种权衡关系的空间异质性,实施差异化的保护政策,来减缓这种保护与发展之间的冲突。

### 参考文献(References):

[1] de Groot R S, Wilson M A, Boumans R M J. A typology for the classification, description and valuation of eco-

system functions, goods and services[J]. *Ecological Economics*, 2002,41(3):393-408.

[2] Assessment M E. *Ecosystems and human well-being* [M]. Washington, Dc: Island Press, 2005.

[3] 杨雪婷,邱孝枰,徐云,等.典型山区生态系统服务对居民福祉影响的空间差异及动态特征:以川西山区为例[J].*生态学报*,2021,41(19):7555-7567.

Yang X T, Qiu X P, Xu Y, et al. Spatial heterogeneity and dynamic features of the ecosystem services influence on human wellbeing in the West Sichuan Mountain Areas [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021,41(19):7555-7567.

[4] 傅伯杰.黄土高原土地利用变化的生态环境效应[J].*科学通报*,2022,67(32):3769-3779,3768.

Fu B J. Ecological and environmental effects of land-use changes in the Loess Plateau of China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2022,67(32):3769-3779,3768.

[5] 周新宇,孟士婷,黄庆旭,等.结合生态系统服务供需和人类福祉的区域规划[J].*生态学报*,2022,42(14):5748-5760.

Zhou X Y, Meng S T, Huang Q X, et al. Combining supply and demand of ecosystem services and human well-being for regional planning [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022,42(14):5748-5760.

[6] Wang Z Z, Fu B J, Wu X T, et al. Distinguishing trajectories and drivers of vegetated ecosystems in China's Loess Plateau[J]. *Earth's Future*, 2024,12(2): e2023EF003769.

[7] 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.

[8] 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.

Feng Q, Zhao W W, Duan B L. Relationship between trade-off intensity of ecosystem services and matching degree of supply and demand: a case study in Shanxi Province[J]. *Arid Zone Research*, 2022,39(4):1222-1233.

[9] 陈强强,杨凌,郝旭然.甘南黄河水源补给区生态系统服务与农户生计耦合协调分析[J].*草地学报*,2023,31(8): 2471-2480.

Chen Q Q, Yang L, Hao X R. Spatio-temporal analysis of coupling coordination between ecosystem service and farmers'livelihood in Gannan Yellow River water supply area[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023,31(8):2471-2480.

[10] Ma Y H, Chen H, Yang M M, et al. Ecological compensation based on multiscale ecosystem carbon sequestration service flow [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024,372:123396.

[11] Ding Z M, Yao S B. Theory and valuation of cross-

- regional ecological compensation for cultivated land: a case study of Shanxi Province, China [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 136:108609.
- [12] 张良侠,周德成,樊江文,等.黄土高原地区生态脆弱性的空间分布格局及与其控制因子关系的一致性[J]. *生态学报*, 2024, 44(22):10096-10105.  
Zhang L X, Zhou D C, Fan J W, et al. Consistency analysis of the spatial distribution patterns and their drivers of the ecological vulnerability on the Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(22):10096-10105.
- [13] 屠文竹,赵文武,刘月,等.基于生态系统服务供需关系的黄土高原生态修复分区[J]. *生态学报*, 2024, 44(21):9695-9707.  
Tu W Z, Zhao W W, Liu Y, et al. Ecological restoration zoning on the Loess Plateau based on the supply and demand of ecosystem services [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(21):9695-9707.
- [14] 常虹.荒漠草原区牧户生计、生态系统服务与福祉及其关联机制:以内蒙古达拉特旗为例[D].呼和浩特:内蒙古大学, 2023.  
Chang H. Correlation mechanisms of livelihood, ecosystem services, and human well-being of pastoral households in desert steppe areas: a case study of Damao Banner in Inner Mongolia, China [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2023.
- [15] 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.
- [16] 谢高地,张彩霞,张昌顺,等.中国生态系统服务的价值[J]. *资源科学*, 2015, 37(9):1740-1746.  
Xie G D, Zhang C X, Zhang C S, et al. The value of ecosystem services in China [J]. *Resources Science*, 2015, 37(9):1740-1746.
- [17] 朴世龙,方精云,贺金生,等.中国草地植被生物量及其空间分布格局[J]. *植物生态学报*, 2004, 28(4):491-498.  
Piao S L, Fang J Y, He J S, et al. Spatial distribution of grassland biomass in China [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(4):491-498.
- [18] Sun Y F, Chang J F, Fang J Y. Above-and belowground net-primary productivity: a field-based global database of grasslands [J]. *Ecology*, 2023, 104(2): e3904.
- [19] 任继周. *草业科学研究方法* [M]. 北京:中国农业出版社, 1998.  
Ren J Z. *Grassland science's research methods* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998.
- [20] Tao Y, Tao Q, Sun X, et al. Mapping ecosystem service supply and demand dynamics under rapid urban expansion: a case study in the Yangtze River Delta of China [J]. *Ecosystem Services*, 2022, 56:101448.
- [21] Yu H J, Xie W, Sun L, et al. Identifying the regional disparities of ecosystem services from a supply-demand perspective [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 169:105557.
- [22] Zhang J X, He C Y, Huang Q X, et al. Understanding ecosystem service flows through the metacoupling framework [J]. *Ecological Indicators*, 2023, 151:110303.
- [23] 唐华俊,李哲敏.基于中国居民平衡膳食模式的人均粮食需求量研究[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(11):2315-2327.  
Tang H J, Li Z M. Study on per capita grain demand based on Chinese reasonable dietary pattern [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(11):2315-2327.
- [24] 丁晓辉,武丽雯,严振杰,等.牧户草场载畜率特征及其影响因素研究[J]. *中国草地学报*, 2024, 46(9):105-117.  
Ding X H, Wu L W, Yan Z J, et al. Research on the characteristics and influencing factors of herdsmen's pasture stocking rate [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(9):105-117.
- [25] 郭燕枝,孙君茂.实现《中国食物与营养发展纲要(2014—2020年)》发展目标的思考[J]. *营养学报*, 2016, 38(3):218-221, 228.  
Guo Y Z, Sun J M. Thoughts on the goals of China's food and nutrition development outline (2014-2020) [J]. *Acta Nutrimenta Sinica*, 2016, 38(3):218-221, 228.
- [26] 相恒星,张健,王宗明,等.松嫩平原生态系统服务供需研究[J]. *生态环境学报*, 2021, 30(8):1769-1776.  
Xiang H X, Zhang J, Wang Z M, et al. Relationships between supply and demand of ecosystem services in the Songnen Plain [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(8):1769-1776.
- [27] Treasury H M. *UK aid: tackling global challenges in the national interest* [R]. London: Hm Treasury, 2015.
- [28] 李雪敏,李同宁,李道政,等.内蒙古县域生态系统服务与居民福祉耦合协调关系时空特征及影响因素研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2023, 37(7):27-37.  
Li X M, Li T N, Li D Z, et al. Spatial-temporal characteristics of county-range coupling coordination relationship between ecosystem services and human's well-being in Inner Mongolia [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2023, 37(7):27-37.
- [29] Gao J B, Zuo L Y. Revealing ecosystem services relationships and their driving factors for five basins of Beijing [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2021, 31(1):111-129.
- [30] 党小虎,吴彦斌,刘国彬,等.生态建设15年黄土高原生态足迹时空变化[J]. *地理研究*, 2018, 37(4):761-771.  
Dang X H, Wu Y B, Liu G B, et al. Spatial-temporal changes of ecological footprint in the Loess Plateau after ecological construction between 1995 and 2010 [J]. *Geographical Research*, 2018, 37(4):761-771.