

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.01.024; CSTR:32311.14.rswc.2025.01.024.

安健吉, 杨悦, 员学锋, 等. 陕北地区生态系统服务的时空演变、集聚特征及权衡与协同关系[J]. 水土保持研究, 2025, 32(1): 316-327, 335.

An Jianji, Yangyue, Yuan Xuefeng, et al. Spatial and temporal variation, spatial agglomeration and trade-offs and synergies of ecosystem services in northern Shaanxi[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(1): 316-327, 335.

# 陕北地区生态系统服务的时空演变、 集聚特征及权衡与协同关系

安健吉<sup>1,2</sup>, 杨悦<sup>1,2</sup>, 员学锋<sup>1,2</sup>, 苏强俊<sup>1,2</sup>, 安琪岷<sup>1,2</sup>

(1. 长安大学 土地工程学院, 西安 710054; 2. 陕西省土地整治重点实验室, 西安 710054)

**摘要:** [目的] 揭示 2000—2020 年陕北地区典型生态系统服务的变化特征, 丰富生态系统服务的系统研究框架, 为陕北地区的可持续发展提供科学参考。[方法] 借助 INVEST 模型、RUSLE 方程和 NDVI 指数量化生态系统固碳、产水、土壤保持和食物供给服务; 应用 Getis-Ord  $G_i^*$  工具识别冷热点乡(镇、街道)的集聚特征; 应用聚类分析和异常值分析判断生态系统服务间权衡与协同关系的时空格局。[结果] (1) 2000—2020 年陕北地区单位面积碳储量、产水量、土壤保持量和食物供给量增加的区域分别占 10.23%, 77.91%, 90.44% 和 47.80%; (2) 各类生态系统服务均呈现出集聚分布的模式 ( $p < 0.01$ ), 且高值集聚效应均有所增强, 产水和食物供给服务的低值集聚效应同步增加, 固碳和土壤保持服务的低值集聚效应减弱; (3) 生态系统服务的相互作用关系逐渐由权衡主导过渡到由协同主导, 多数生态系统服务间的权衡关系减弱、协同关系增强。[结论] 陕北地区生态系统整体呈现向好趋势, 但部分区域仍需因地制宜地缓解水资源短板, 提高食物供给能力, 促进生产与生态的协调发展。

**关键词:** 生态系统服务; 时空演变; 集聚特征; 权衡与协同; 陕北地区

中图分类号: X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)01-0316-12

## Spatial and temporal variation, spatial agglomeration and trade-offs and synergies of ecosystem services in northern Shaanxi

An Jianji<sup>1,2</sup>, Yangyue<sup>1,2</sup>, Yuan Xuefeng<sup>1,2</sup>, Su Qiangjun<sup>1,2</sup>, An Qimin<sup>1,2</sup>

(1. School of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. Key Laboratory of Land Reclamation, Shaanxi Province, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to reveal the characteristics of changes in typical ecosystem services in northern Shaanxi from 2000 to 2020, to enrich the systematic research framework of ecosystem services, and to provide theoretical support for the sustainable development of northern Shaanxi. [Methods] The ecosystem services including carbon sequestration, water yield, soil conservation, and food supply were quantified through the use of the InVEST model, RUSLE equation, and NDVI index. Getis-Ord  $G_i^*$  analysis was applied to identify ecosystem services' spatial agglomeration. Anselin Local Moran's  $I$  analysis was applied to assess ecosystem services' trade-offs and synergies. [Results] (1) From 2000 to 2020, the regions with increases in carbon storage, water yield, soil conservation, and food supply per unit area accounted for 10.23%, 77.91%, 90.44%, and 47.80%, respectively. (2) All types of ecosystem services exhibited agglomeration distribution patterns ( $p < 0.01$ ), with strengthened high-value agglomeration effects and simultaneous increase in low-value agglomeration effects for water yield and food supply services, while the

收稿日期: 2024-04-11

修回日期: 2024-04-28

资助项目: 国家自然科学基金项目(42371210); 陕西省创新能力支撑计划创新团队项目(2024RS-CXTD-55); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(30010235203)

第一作者: 安健吉(2000—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 硕士研究生, 研究方向为土地利用与生态系统服务。E-mail: anjianji416@163.com

通信作者: 员学锋(1977—), 男, 陕西延安人, 博士, 教授, 研究方向为土地资源管理与生态系统服务。E-mail: zyxxyun@chd.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

low-value agglomeration effects for carbon sequestration and soil conservation services weakened. (3) The interaction among ecosystem services gradually transitioned from being dominated by trade-offs to being dominated by synergies, with weakening trade-off relationships and the enhanced synergistic relationships among most ecosystem services. [Conclusion] The ecosystem in northern Shaanxi is showing a positive trend, but some towns (townships, streets) still need tailored approaches to alleviate water resource shortages, to improve food supply capabilities, and to promote coordinated development between production and ecology based on local conditions.

**Keywords:** ecosystem services; spatial and temporal variation; spatial agglomeration; trade-offs and synergies; northern Shaanxi

生态系统服务(Ecosystem Services, ES)是生态系统向人类直接或间接提供的各种惠益,包括供给服务、调解服务、文化服务和支持服务等,是连接人类社会与自然环境的桥梁<sup>[1]</sup>。随着全世界范围内人口的大量增长,城市化、工业化进程的快速推进,人类向生态系统的索取不断增多,导致很多地区的生态系统超过了自身的承载能力,结构和功能受到破坏,生态系统向人类提供惠益的能力也随之减弱,严重影响着人类的生存和发展<sup>[2]</sup>。近年来,促进经济社会与自然环境的协调、可持续发展逐渐成为人类社会的共同目标<sup>[3]</sup>,生态系统服务与区域发展的关联日益紧密,相关研究受到了学者们的广泛关注,逐渐成为了连接多学科交叉性前沿热点<sup>[4]</sup>。

目前,国内外生态系统服务的研究主要集中在生态系统服务的时空演变、集聚特征、权衡与协同关系等热点主题。(1) 生态系统服务的时空演变方面,学者们通过价值参数法<sup>[5]</sup>、当量因子法<sup>[6]</sup>方法表示生态系统服务的货币化价值,或通过 InVEST(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs), SolVES(Social Values for Ecosystem Services), ARIES(Article Intelligence for Ecosystem Services)等评估模型分类计算碳储量<sup>[7]</sup>、产水量<sup>[8]</sup>、生境质量<sup>[9]</sup>、氮磷含量等<sup>[10]</sup>不同类型的生态系统物质量,以此直观反映生态系统服务的时空分布格局<sup>[7]</sup>和演变情况<sup>[11]</sup>。(2) 生态系统服务的集聚特征方面,学者们通过聚类分析<sup>[12]</sup>、叠加分析<sup>[13]</sup>方法,反映不同区域提供生态系统服务能力的差距,并揭示生态系统服务的低值集聚特征(冷点区)和高值集聚特征(热点区)<sup>[12]</sup>。(3) 生态系统服务的权衡与协同关系方面,学者们通过相关性分析<sup>[14]</sup>、耦合协调度等<sup>[15]</sup>数理分析方法探究区域整体范围内生态系统服务相互制约的权衡(Trade-offs)关系和相互增益的协同(Synergies)关系<sup>[16]</sup>,或通过空间自相关<sup>[17]</sup>、地理加权回归等<sup>[18]</sup>空间分析方法揭示权衡与协同关系具体的空间分布特征。综上所述,学者们围绕生态系统服务的热点主题已经形成了较为

完整的研究体系,但将各主题相互结合的研究较少,一定程度上限制了研究的深度。考虑到深入认识生态系统服务对于促进人类社会的可持续发展具有重要的意义,有必要综合分析生态系统服务的时空演变、集聚特征和权衡与协同关系,以期为促进区域可持续发展提供更为有力的科学支撑。

陕北地区位于黄土高原的核心地带,气候干旱、土质疏松、沟壑纵横、水土流失严重,自然本底条件薄弱,生态系统敏感而脆弱,极易受到人类活动等外界因素的干扰和破坏,是我国典型的生态脆弱地区。21 世纪以来,通过防沙治沙、“三北”防护林建设、退耕还林等生态工程,陕北地区的生态系统结构得到了明显的改善和优化,但生态系统服务的综合变化特征尚不明晰。本文选取陕北地区作为研究区域,通过基于 InVEST, RUSLE 方程和 NDVI 指数量化典型的生态系统服务,分析其时空演变情况,并借助 Getis-Ord  $G_i^*$  分析、聚类和异常值分析等空间分析工具,研究生态系统服务的集聚特征及权衡与协同关系,以期为陕北地区的可持续发展提供理论依据。

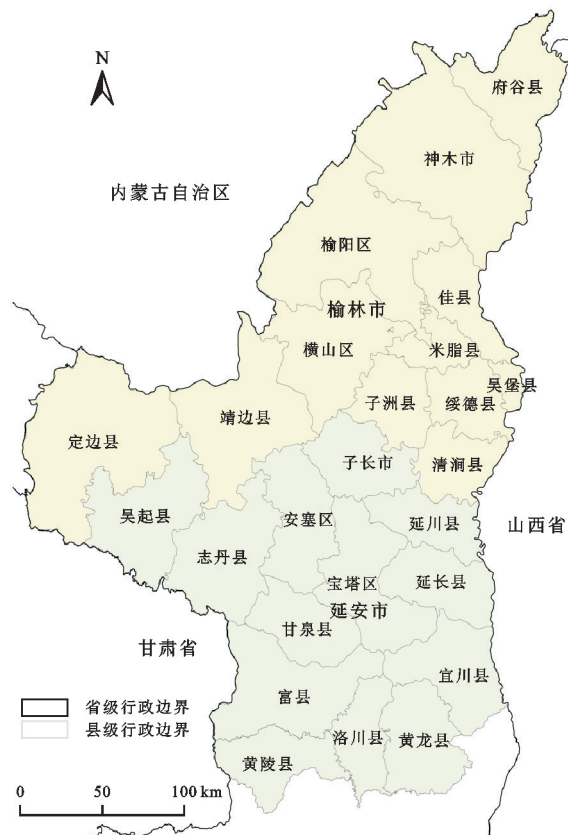
## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

陕北地区(35°02′—39°35′N, 107°15′—110°15′E)地处陕西省北部,位于黄土高原的中心地带,行政区划包括榆林市和延安市,25 个县(区、市),296 个乡镇、街道(图 1)。

陕北地区是我国典型的生态脆弱地区,西北部区域以绵延起伏的沙丘为主,气候干旱少雨,土壤质地较粗、保水保肥的能力较差,长期以来过度开垦、放牧和采矿导致沙漠逐渐东移,沙进人退,严重影响了当地人们的生产和生活;中部和南部区域主要为黄土丘陵沟壑和梁状低山丘陵,地表起伏较大,沟壑纵横、降雨集中、土壤疏松、地形破碎,是我国水土流失最为严重的区域,河流含沙量较大,是黄河泥沙的集中来源地区。21 世纪以来,通过大规模的防沙治沙、坡面治

理、小流域治理、退耕还林还草、三北防护林建设等生态工程,陕北地区的生态环境发生了明显的改善。《陕西省国土空间规划(2021—2035 年)》中显示,陕北地区将逐步尝试探索绿色低碳的可持续发展之路,促进经济社会与自然环境的协调已成为区域发展的关键所在。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2023)2767 号,的标准地图制作,底图未做修改,下同。

图 1 陕北地区地理位置示意图

Fig. 1 Location map of northern Shaanxi

## 1.2 数据来源

陕北地区的土地利用数据来源于“中国科学院资源环境科学数据中心”(http://www.resdc.cn),结合区域实际情况,通过重分类工具将土地利用类型划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地;DEM 数据来源于“地理空间数据云”(https://www.gscloud.cn/);气象数据包括降雨、温度和光照等,来源于“国家气象科学数据中心”(http://data.cma.cn/);土壤数据包括土壤类型、质地、含水量和根系深度等,来源于“寒区旱区科学数据中心”(http://bdc.casnw.net/index.shtm);行政区划矢量数据来源于“国家基础地理信息数据中心”(https://ngcc.cn/ngcc/)和“中国科学院资源环境科学与数据中心”(http://www.resdc.cn/);归一化植被指数(NDVI)数据来源于“国家生态科学数据中心”(http://www.

nesdc.org.cn/);潜在蒸发散(PET)数据来源于“国家青藏高原科学数据中心”(https://data.tpdac.ac.cn/);碳密度数据来源于“中国科学院生态学科数据中心”(http://www.cnern.org.cn/),所有空间数据均统一为阿尔伯斯投影(Krasovsky\_1940\_Albers)。社会经济的属性数据来源于陕西省统计局编制的《陕西省统计年鉴》及延安市、榆林市的统计年鉴,部分补充数据来源于陕西省图书馆的陕西地方文献收藏中心。

## 2 研究方法

### 2.1 生态系统服务评估

研究选取陕北地区 4 项典型的生态系统服务,即固碳、产水、土壤保持和食物供给服务,涵盖联合国千年生态系统评估中 3 类主要服务,固碳服务和食物供给服务属于供给服务(Supplying Services),土壤保持服务属于调节服务(Regulating Services),产水服务属于支持服务(Supporting Services)。

应用 InVEST 模型的 Carbon Storage and Sequestration 和 Annual Water Yield 模块分别评估固碳服务<sup>[19-20]</sup>和产水服务<sup>[21-22]</sup>,计算公式为:

$$CS_i = CS_{i\text{-above}} + CS_{i\text{-below}} + CS_{i\text{-dead}} + CS_{i\text{-soil}} \quad (1)$$

$$CS_t = CS_i \times A_i \quad (2)$$

$$WY_t = \frac{\sum WY_x}{A} \quad (3)$$

$$WY_{xi} = \left(1 - \frac{AET_{xi}}{P_x}\right) \times P_x \quad (4)$$

$$\frac{AET_{xi}}{P_x} = \frac{1 + \omega_x R_{xi}}{1 + \omega_x R_{xi} + \frac{1}{R_{xi}}} \quad (5)$$

$$R_{xi} = \frac{k_{xi} \times ET_{ox}}{P_x} \quad (6)$$

$$k_{xi} = \min\left(1, \frac{LAI}{3}\right) \quad (7)$$

$$ET_o = 0.0013 \times RA \times 0.408 \times (T_{avg} + 17) \times (TD - 0.123P)^{0.76} \quad (8)$$

$$\omega_x = \frac{Z \times AWC_x}{P_x} + 1.25 \quad (9)$$

$$AWC_x = \min(D_x, R_x) \times PAWC_x \quad (10)$$

$$PAWC_x = 54.509 - 0.132sd - 0.003(sd)^2 - 0.05st - 0.006(st)^2 - 0.738cy + 0.007(cy)^2 - 2.688om + 0.501(om)^2 \quad (11)$$

式中:  $CS_{i\text{-above}}$ ,  $CS_{i\text{-below}}$ ,  $CS_{i\text{-dead}}$  和  $CS_{i\text{-soil}}$  分别为地类  $i$  地上生物、地下生物、死亡有机质和土壤有机质中的碳储存量(t);  $CS_i$ ,  $CS_t$  分别为地类  $i$  的碳储存总量和区域的碳储存总量(t);  $A_i$  为地类  $i$  的面积(km<sup>2</sup>);



WY<sub>i</sub> 为区域的单位面积产水量(m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>); A 为研究区总面积(km<sup>2</sup>); WY<sub>xi</sub>, AET<sub>xi</sub> 和 P<sub>x</sub> 分别为地类 i 上栅格单元 x 的年均产水量、年实际蒸散量和年均降水量(mm); R<sub>xi</sub> 为地类 i 上栅格单元 x 潜在蒸散量与降雨量的比值; ω<sub>x</sub> 为栅格单元 x 的修正植被年可利用水量与降水量的比值; k<sub>xi</sub> 为地类 i 上栅格单元 x 的植物蒸散系数; ET<sub>ox</sub> 为栅格单元 x 的参考蒸散量(mm); LAI 为植被叶面积指数; RA 为大气顶部的太阳辐射值[MJ/(m<sup>2</sup>·d)]; T<sub>avg</sub>, TD 分别为区域最高和最低气温的平均值和差值(°C); Z 为表征区域降水的季节性特征的无量纲常数; AWC<sub>x</sub>, PAWC<sub>x</sub> 分别为栅格单元 x 的植被有效可利用水量和可利用水量(mm); D<sub>x</sub>, R<sub>x</sub> 分别为栅格单元 x 内土壤的最大深度和植被平均根系深度(mm); sd, st, cy 和 om 分别为土壤中沙粒、粉粒、黏粒和有机质的含量(%)。

基于修订后的通用水土流失方程(Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE)评估土壤保持服务<sup>[23-24]</sup>, 计算公式为:

$$SC_t = \frac{\sum SC_x}{A} \quad (12)$$

$$SC_x = RSC_x - USC_x \quad (13)$$

$$RSC_x = R_x \times K_x \times LS_x \quad (14)$$

$$USC_x = R_x \times K_x \times LS_x \times C_x \times P_x \quad (15)$$

$$R_x = \sum_{i=1}^{12} [1.735 \times 10^{(1.5 \times \log(\frac{P_i}{P_{avg}} - 0.8188))}] \quad (16)$$

$$K_x = \left\{ 0.2 + 0.3 \times \exp \left[ -0.256sd \left( 1 - \frac{st}{100} \right) \right] \right\} \times \left( \frac{st}{st + cy} \right)^{0.3} \times \frac{0.25om}{om + \exp(3.72 - 2.95om)} \times \frac{1 - 0.7 \times \left( 1 - \frac{sd}{100} \right)}{1 - sd} \quad (17)$$

$$LS_x = \left( \frac{l \times \cos \alpha}{22.13} \right)^m \times S_x \quad (18)$$

$$S_x = \begin{cases} 10.8 \sin \theta + 0.03 & \theta \leq 5 \\ 16.8 \sin \theta - 0.5 & 5 < \theta \leq 10 \\ 21.9 \sin \theta - 0.96 & \theta > 10 \end{cases} \quad (19)$$

$$C_x = \begin{cases} 1 & f = 0 \\ 0.6508 - 0.3436 \log f & 0 < f \leq 78.3\% \\ 0 & f \geq 78.3\% \end{cases} \quad (20)$$

$$f = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \quad (21)$$

式中: SC<sub>t</sub> 为区域的单位面积土壤保持量(t/km<sup>2</sup>); A 为

研究区总面积(km<sup>2</sup>); SC<sub>x</sub> 为栅格单元 x 的土壤保持量(t); RSC<sub>x</sub>, USC<sub>x</sub> 分别为栅格单元 x 的潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量(t); R<sub>x</sub>, K<sub>x</sub>, LS<sub>x</sub>, C<sub>x</sub> 和 P<sub>x</sub> 分别为降雨侵蚀力因子、土壤可蚀性因子、坡度坡长因子、植被覆盖因子和水土保持因子; P<sub>i</sub> 为第 i 月的平均降水量(mm); P<sub>avg</sub> 为年均降水量(mm); sd, st, cy 和 om 分别为土壤中沙粒、粉粒、黏粒和有机质的含量(%); l 为地表水流长度(m); α 为水流地区的坡度(°); m 为坡度指数; θ 为坡度(°); S<sub>x</sub> 为坡长因子; f 为植被覆盖度(%); NDVI 为归一化植被指数。

基于归一化植被指数(NDVI)与食物产量的线性关系评估食物供给服务<sup>[21]</sup>, 计算公式为:

$$FS_x = \frac{NDVI_x}{NDVI_t} \times P_t \quad (22)$$

$$FS_t = \sum_x FS_x \quad (23)$$

式中: FS<sub>x</sub> 栅格单元 x 上各类食物的产量(kg); NDVI<sub>x</sub> 为栅格单元 x 的归一化植被指数; NDVI<sub>t</sub> 为研究区域内的归一化植被指数之和; P<sub>t</sub> 为区域内粮食、肉类、水产等食物的产量之和(t); FS<sub>t</sub> 为区域内食物产量的总和(t)。

## 2.2 生态系统服务集聚特征

### 2.2.1 单变量全局空间自相关

空间自相关(Spatial Autocorrelation Analysis)是分析空间数据的分布特征和相互关系的常用方法, 根据变量个数可以分为单变量空间自相关和双变量空间自相关。其中单变量空间自相关可以根据单一变量数值和空间位置, 判定其空间关联特征, 通过单变量全局空间自相关可以反映变量空间关联的总体趋势, 单变量局部空间自相关则可以揭示不同空间单元集聚或离散分布的异质性特征。

借助空间分析软件, 首先通过计算全局莫兰指数(Global Moran's I)进行单变量全局空间自相关分析, 判断各类生态系统服务的空间分布模式<sup>[17]</sup>。计算过程中, 空间关系采用欧氏距离的反距离法进行概念化。具体计算公式为:

$$I = \frac{m \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m W_{ij} (x_i - \bar{x})}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m W_{ij} \sum_{j=1}^m (x_j - \bar{x})^2} \quad (24)$$

式中: m 为空间单元的数量; i, j 分别为不同的空间单元; x<sub>i</sub>, x<sub>j</sub> 分别为不同单元内生态系统服务的数值; W<sub>ij</sub> 为 i, j 的空间权重矩阵; I 为全局莫兰指数, 范围为[-1, 1], 取值为正表示空间正相关, 越接近于 1 则正相关性越强, 取值为负表示空间负相关, 越接近于 -1 则负相关性越强, 取值为 0 则表示不相关。

结合全局莫兰指数以及表示标准差倍数的 z 得分和表示概率的 p 值, 可以判断各类生态系统服务的分布

模式及置信度(表 1)。置信度 90%,95%和 99%分别表示随机产生此模式的可能性小于 0.1,0.05,0.01。

表 1 单变量全局空间自相关分布模式的判断标准

$z$ 得分	$p$ 值	分布模式	置信度/%
$\geq 2.58$	$<0.01$	集聚分布	99
$[1.96, 2.58)$	$[0.01, 0.05)$	集聚分布	95
$[1.65, 1.96)$	$[0.05, 0.10)$	集聚分布	90
$[-1.65, 1.65)$	$\geq 0.10$	随机分布	—
$[-1.96, -1.65)$	$[0.05, 0.10)$	离散分布	90
$[-2.58, -1.96)$	$[0.01, 0.05)$	离散分布	95
$< -2.58$	$<0.01$	离散分布	99

2.2.2 Getis-Ord  $G_i^*$  分析 若单变量全局空间自相关结果显示不是随机分布,则可以继续计算局部莫兰指数(Local Moran's  $I$ ),进行单变量局部空间自相关分析,探究生态系统服务空间分布规律的具体表现。具体计算公式为:

$$I_i = \frac{m(x_i - \bar{x}) \times \sum_{j=1}^m (x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2} \quad (25)$$

式中: $m$  为空间单元的数量; $i, j$  分别为不同的空间单元; $x_i, x_j$  分别为不同单元内生态系统服务的数值; $\bar{x}$  为各单元生态系统服务的平均值; $I_i$  为局部莫兰指数。

使用空间分析软件中基于  $G_i^*$  统计的冷热点分析工具(Getis-Ord  $G_i^*$  分析)进行单变量局部空间自相关分析。相对于其他分析工具,Getis-Ord  $G_i^*$  分析基于正态分布假设检验,对局部差异的敏感性更高,对生态系统冷热点的辨识能力更强。根据  $z$  得分和  $p$  值判定乡镇尺度上生态系统服务的冷热点类型及其置信度,判定标准如表 2 所示。

表 2 单变量局部空间自相关冷热点类型的判断标准

$z$ 得分	$p$ 值	冷热点类型	显著性	置信度/%
$\geq 2.58$	$<0.01$	热点	极显著	99
$[1.96, 2.58)$	$[0.01, 0.05)$	热点	显著	95
$[1.65, 1.96)$	$[0.05, 0.10)$	热点	弱显著	90
$[-1.65, 1.65)$	$\geq 0.10$	不显著	不显著	—
$[-1.96, -1.65)$	$[0.05, 0.10)$	冷点	弱显著	90
$[-2.58, -1.96)$	$[0.01, 0.05)$	冷点	显著	95
$< -2.58$	$<0.01$	冷点	极显著	99

### 2.3 生态系统服务权衡与协同

2.3.1 双变量全局空间自相关 双变量空间自相关也是空间自相关的常见类型,是基于单变量空间自相关的扩展和延伸,可以反映 2 个不同的变量之间的空间关联特征。双变量空间自相关也可以分为双变量全局空间自相关和双变量局部空间自相关,分别用全

局莫兰指数和局部莫兰指数表示。

本文应用双变量空间自相关分析不同生态系统服务间的相关关系,空间关系概念化的方式与单变量空间自相关相同。首先计算全局莫兰指数,从整体上探究生态系统服务之间的相关性,随后计算局部莫兰指数,探究相关关系的具体空间分布特征<sup>[25]</sup>。具体计算公式为:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij} (x_i^p - \bar{x}_i^p) (x_j^q - \bar{x}_j^q)}{S^2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij}} \quad (26)$$

$$I_i = \frac{x_i^p - \bar{x}_i^p}{S^p} \times \sum_{j=1}^N W_{ij} \frac{x_j^q - \bar{x}_j^q}{S^q} \quad (27)$$

式中: $I$  为全局莫兰指数; $I_i$  为局部莫兰指数; $N$  为空间单元的数量; $i, j$  分别为不同的空间单元; $p, q$  分别为不同的生态系统服务类型; $x_i^p, x_j^q$  分别为空间单元  $i$  上生态系统服务  $p, q$  的数值; $W_{ij}$  为  $i, j$  的空间权重矩阵; $S^p, S^q$  分别为生态系统服务  $p, q$  变化量的方差。

全局莫兰指数的计算结果范围为 $[-1, 1]$ ,取值为正代表呈现协同关系;取值为负代表呈现权衡关系;取值为 0 代表权衡与协同关系不显著,具体判断标准与表 2 相同。

2.3.2 聚类与异常值分析 若双变量全局空间自相关结果显示不是随机分布,则可以继续计算局部莫兰指数。借助聚类和异常值分析(Anselin Local Moran's  $I$ )工具计算局部莫兰指数,在空间图层中可以得到高一高、高一低、低一低、低一高和不显著 5 种集聚特征的区域。其中,高一高和低一低集聚的乡(镇、街道)为 2 种生态系统服务相协同的区域,而高一低和低一高集聚的乡(镇、街道)为 2 种生态系统服务相权衡的区域<sup>[26]</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 陕北地区生态系统服务的时空演化

2000—2020 年陕北地区生态系统服务的时空演化情况如图 2 所示。固碳服务方面,陕北地区的单位面积碳储量由 9 083.77 t/km<sup>2</sup> 增加到 9 322.72 t/km<sup>2</sup>,增加了 238.95 t/km<sup>2</sup>,整体上呈现出“多数区域保持不变,西北部区域增幅显著”的演化特征。79.75%的区域单位面积碳储量保持不变,10.23%的区域单位面积碳储量增加,增幅最明显的是北部的榆阳区、神木市等地,10.01%的区域单位面积碳储量有所下降,呈零散分布;产水服务方面,陕北地区的单位面积产水量由 28.28 mm 增加到 42.80 mm,增加了 14.52 mm,整体上呈现出“西部减少,中部和东部增加,增幅自西向东逐渐扩大”的演化特征。22.09%的区域单位面积产水量减少,主要位于西部

的定边县、吴起县等地,77.91%的区域单位面积产水量增加,其中东部黄河沿线各区县的增幅均超过了 100%。除此之外,榆阳区、神木市、横山区的部分区域的单位面积产水量也有所减少,下降幅度超过了 50%;土壤保持服务方面,陕北地区的单位面积土壤保持量由 15 204.52 t/km<sup>2</sup>增加到 19 521.67 t/km<sup>2</sup>,增加了 4 316.78 t/km<sup>2</sup>,整体上呈现出“南部少数区域减少,其余多数区域增加,增幅自东南向西北逐渐扩大”的演化特征。9.56%的区域单位面积土壤保持量减少,主要位于黄陵县、富县、延长县等地;90.44%的区域单位面积土壤保持量增加,增

幅自东南向西北逐渐增大,西北部定边县、靖边县、横山区、榆阳区、神木市和府谷县的增加幅度均超过了 100%;食物供给服务方面,陕北地区的单位面积食物产量由 100.48 t/km<sup>2</sup>增加到 171.22 t/km<sup>2</sup>,增加了 64.04 t/km<sup>2</sup>,对于具体区域而言,整体上呈现出“减少的区域和增加的区域范围大小大致相同,以县域为单元交错分布”的演化特征。52.20%的区域单位面积食物产量减少,主要位于靖边县、神木市等地,47.80%的区域单位面积食物产量增加,主要位于洛川县、定边县、榆阳区、黄陵县等地。

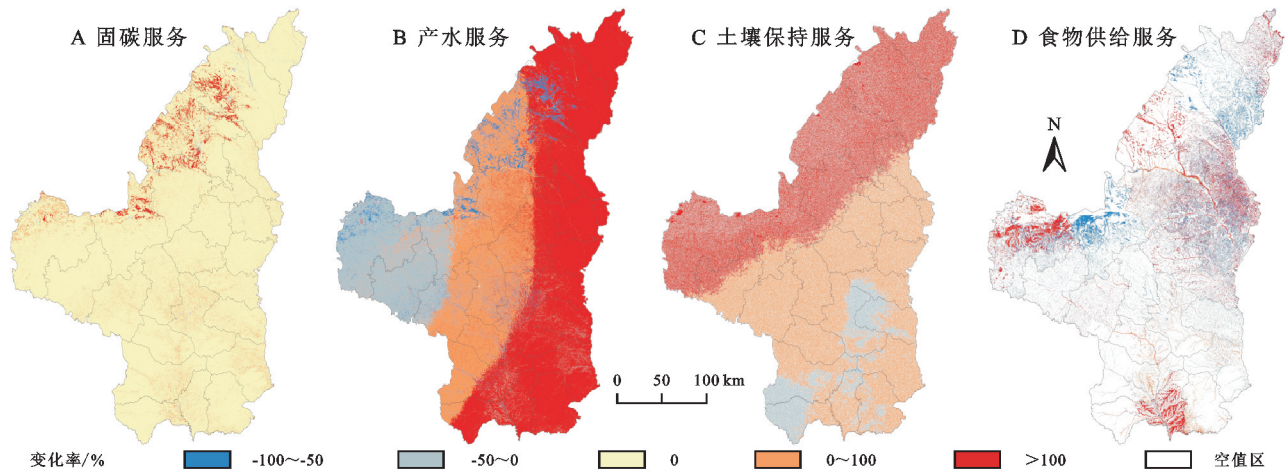


图 2 2000—2020 年陕北地区生态系统服务的时空演变

Fig. 2 Spatial and temporal variation of ecosystem services in northern Shaanxi, 2000—2020

3.2 陕北地区生态系统服务的集聚特征

以乡(镇、街道)为单元,分别提取 2000 年、2020 年各类生态系统服务的平均值,进行单变量全局空间自相关分析,汇总各类生态系统服务全局莫兰指数、 $z$ 得分和  $p$  值的结果(表 3),可以看出  $z$  得分均超过 2.58,

$p$  值均小于 0.01,说明陕北地区各类生态系统服务都呈现出集聚分布的模式,且随机产生此模式的概率均小于 1%,置信度达到 99% 以上,可以继续进行单变量局部空间自相关分析,探究冷热点乡(镇、街道)的具体空间分布特征。

表 3 陕北地区生态系统服务的单变量全局莫兰指数及分布模式判断

Table 3 Results of univariate Global Moran's  $I$  of ecosystem services in northern Shaanxi

参数	2000 年				2020 年			
	固碳服务	产水服务	土壤保持服务	食物供给服务	固碳服务	产水服务	土壤保持服务	食物供给服务
全局 Moran's $I$	0.72	0.71	0.87	0.56	0.70	0.77	0.78	0.77
$z$ 得分	24.86	23.26	29.49	18.83	24.35	25.36	27.38	26.51
$p$ 值	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
分布模式	集聚分布	集聚分布	集聚分布	集聚分布	集聚分布	集聚分布	集聚分布	集聚分布
置信度/%	99	99	99	99	99	99	99	99

通过 Getis-Ord  $G_i^*$  分析,得到陕北地区各类生态系统服务冷热点乡(镇、街道)的空间分布(图 3)。分析结果的置信度均在 90% 以上,即随机产生此结果的可能性小于 0.1。从多年均值上看,固碳服务的热点乡(镇、街道)主要集中在南部的黄陵县、富县、宜川县、黄龙县等地,冷点乡(镇、街道)主要分布在北部的榆阳区、神木市等地。产水服务的热点乡(镇、街道)主要集中在中部偏东的米脂县、绥德县、吴堡县、清涧县等地,冷点乡(镇、街道)主要分布在西部和北

部的定边县、横山区、神木市、府谷县等地;土壤保持服务的热点乡(镇、街道)集中在中部和南部的吴起县、志丹县、甘泉县、富县、宜川县等地,冷点乡(镇、街道)集中在西北部的横山区、榆阳区、神木市等地;食物供给服务的热点乡(镇、街道)分布相对零散,在府谷县、子洲县、米脂县、绥德县、吴堡县、黄陵县等地均有小范围的集中分布,冷点乡(镇、街道)在中部和南部呈大范围的集中连片分布。

2000—2020 年,固碳服务的热点乡(镇、街道)的



数量小幅增加,但空间分布变化不大,冷点乡(镇、街道)数量大幅减少;产水服务的热点乡(镇、街道)数量小幅减少,分布向东南方向转移,冷点乡(镇、街道)数量明显增加,并向西北方向转移;土壤保持服务的热点

点乡(镇、街道)向北移动,冷点乡(镇、街道)在榆阳区、神木市的部分区域呈收缩趋势;食物供给服务的冷热点乡(镇、街道)都大幅增加,空间分布形态由零散转变为集中连片。

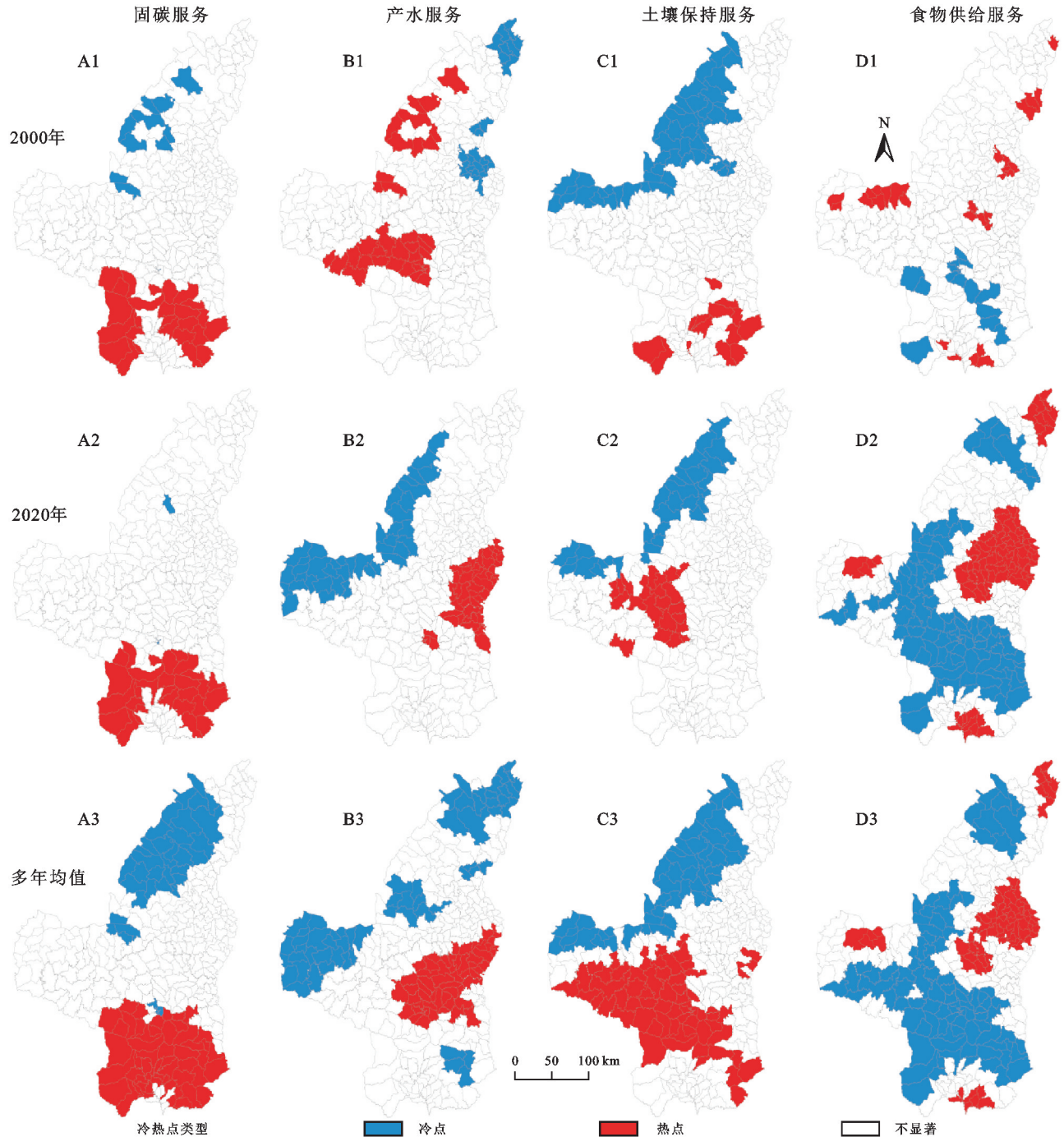


图 3 陕北地区各类生态系统服务冷热点乡(镇、街道)的空间集聚特征

Fig. 3 Cold/hot spatial agglomeration of ecosystem services in notherm Shaanxi

进一步对比 2000 年、2020 年陕北地区各类生态系统服务冷热点乡(镇、街道)的占比(图 4),可以看出 2000 年各类生态系统服务热点乡(镇、街道)的占比由大到小依次为产水服务(12.75%)、食物供给服务(9.40%)、固碳服务(8.72%)和土壤保持服务(4.70%),冷点乡(镇、街道)的占比由大到小依次为土壤保持服务(16.78%)、产

水服务(9.06%)、食物供给服务(5.70%)和固碳服务(3.69%);2020 年,各类生态系统服务热点乡(镇、街道)的占比由大到小依次为食物供给服务(29.87%)、产水服务(15.77%)、固碳服务(9.73%)和土壤保持服务(7.38%),冷点乡(镇、街道)的占比由大到小依次为食物供给服务(32.21%)、产水服务(13.42%)、土

壤保持服务(10.40%)和固碳服务(1.01%)。可见,研究期初产水服务的高值集聚效应最为明显,土壤保持服务的低值集聚效应最为明显,而研究期末食物供给服务高值和低值的空间集聚效应均最为明显。

2000—2020 年,除了固碳服务和土壤保持服务冷点乡(镇、街道)的数量呈下降趋势外,其余各类生态系统服务冷热点乡(镇、街道)的数量均呈上升趋势

势,其中食物供给服务的增幅最为明显,热点、冷点乡(镇、街道)的数量分别增加了 217.86%和 464.71%。由此可见,20 年间陕北地区各类生态系统服务的高值集聚效应均有所增强,增幅由大到小依次为食物供给服务、土壤保持服务、产水服务和固碳服务;固碳服务和土壤保持服务的低值集聚效应减弱,产水服务和食物供给服务的低值集聚效应增强。

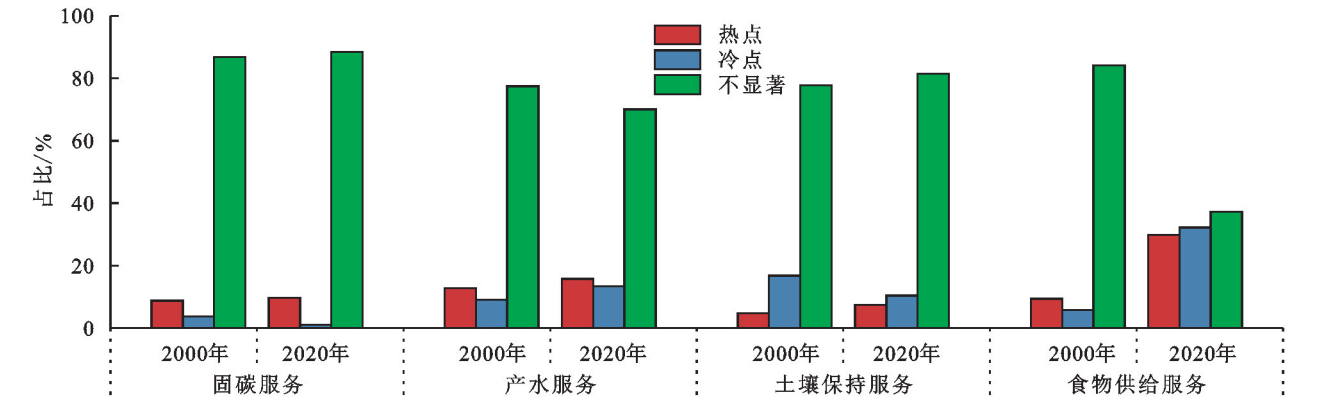


图 4 陕北地区生态系统服务集聚特征及权衡与协同关系的结果统计

Fig. 4 Results of ecosystem services' cold/hot spatial agglomeration in northern Shaanxi

3.3 陕北地区生态系统服务的权衡与协同关系

对 2000 年、2020 年陕北地区的各类生态系统服务两两一组进行双变量空间全局自相关分析,全局莫兰指数、 $z$  得分和  $p$  值的结果可以看出,2000—2020 年陕北地区乡镇尺度的固碳服务—土壤保持服务之间始终呈现协同关系,固碳服务—食物供给服务、土壤保持服务—食物供给服务之间始终呈现权衡关系,固碳服务—产水服务、产水服务—土壤保持服务、产水服务—

食物供给服务之间由权衡转向协同。总体上,20 年间生态系统服务间的关系逐渐由权衡主导过渡到由协同主导,表明陕北地区乡(镇、街道)内部生态系统服务之间的关系得到一定改善。不同生态系统服务间  $z$  得分的绝对值均大于 2.58,  $p$  值均小于 0.01,说明 2000 年、2020 年陕北地区各类生态系统服务两两之间都具有空间关联特征,且随机产生关联特征的可能性都小于 1%,可以继续进行双变量局部空间自相关分析(表 4)。

表 4 陕北地区生态系统服务的双变量全局莫兰指数及分布模式判断

Table 4 Results of bivariate Global Moran's  $I$  of ecosystem services in northern Shaanxi

年份	参数	固碳服务— 产水服务	固碳服务— 土壤保持服务	固碳服务— 食物供给服务	产水服务— 土壤保持服务	产水服务— 食物供给服务	土壤保持服务— 食物供给服务
2000	全局 Moran's $I$	−0.25	0.64	−0.10	−0.15	−0.26	−0.20
	$z$ 得分	−10.04	25.26	−4.47	−6.66	−11.56	−8.70
	$p$ 值	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	分布模式	集聚分布	集聚分布	集聚分布	集聚分布	集聚分布	集聚分布
	置信度/%	99	99	99	99	99	99
2020	全局 Moran's $I$	0.08	0.08	−0.22	0.36	0.18	−0.10
	$z$ 得分	3.48	3.47	−9.78	15.61	8.21	−4.62
	$p$ 值	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	分布模式	集聚分布	集聚分布	集聚分布	集聚分布	集聚分布	集聚分布
	置信度/%	99	99	99	99	99	99

通过空间聚类 and 异常值分析,得到 2000 年、2020 年陕北地区生态系统服务两两之间的高—高集聚、高—低集聚、低—低集聚、低—高集聚和不显著 5 种区域,并据此判断生态系统服务两两之间权衡与协同关系的空间分布,如图 5 所示。

固碳服务—产水服务呈协同关系的乡(镇、街道)

2000 年主要集中在东北部的府谷县、神木市等地和中  
部志丹县、安塞区的南侧区域,2020 年转移至西北部的  
定边县和靖边县、横山区、榆阳区等地的西北侧区域和  
中部的子长市、延川县。呈权衡关系的乡(镇、街道)  
2000 年在北部的榆阳区、靖边县,中部的志丹县、安塞  
区、子长市和南部的黄龙县、宜川县均有集中分布,



2020 年则主要集中在中部偏东的子洲县、绥德县、清涧县、吴堡县等地;固碳服务—土壤保持服务呈协同关系的乡(镇、街道)2000 年大量集中连片分布在南部的各个区县以及北部的榆阳区、横山区等地,2020 年在南部区域的分布大幅减少,而在北部区域的分布有所增加并向西部扩展。呈权衡关系的乡(镇、街道)2000 年主要分布在中部偏东的延川县、清涧县等地,2020 年在中部的吴起县、安塞区、子长市、清涧县等地集中连片分布;固碳服务—食物供给服务呈协同关系和权衡关系的乡(镇、街道)交错分布,呈协同关系的乡(镇、街道)2000 年在吴起县、安塞区、洛川县、黄龙县等地的分布相对较多,2020 年在靖边县、神木市、横山区等地的分布相对较多。呈权衡关系的乡(镇、街道)2000 年在甘泉县、宜川县、富县等地的分布相对较多,2020 年在中部偏东的子洲县、绥德县、米脂县、吴堡县等地和南部的宜川县、宝塔区、甘泉县等地集中连片分布;产水服务—土壤保持服务呈协同关系的乡(镇、街道)2000 年主要分布在定边县、米脂县、宝塔区等地,2020 年集中

分布在北部定边县、靖边县、横山区、榆阳区等地的西北侧和中部的安塞区、宝塔区、子长市和清涧县。呈权衡关系的乡(镇、街道)2000 年集中分布在南部的大量区县以及北部的榆阳区、靖边县,2020 年集中分布在中部偏西的吴起县、志丹县、靖边县南侧和南部的洛川县、黄龙县。产水服务—食物供给服务呈协同关系和权衡关系的乡(镇、街道)交错分布,呈协同关系的乡(镇、街道)2000 年多为零散分布,2020 年在靖边县、子洲县、绥德县、吴堡县和洛川县等地的分布相对集中。呈权衡关系的乡(镇、街道)2000 年在中部偏西的吴起县、志丹县、安塞区、甘泉县等地的分布相对集中,2020 年在府谷县、宝塔区、延长县等地的分布相对集中;土壤保持服务—食物供给服务呈协同关系的乡(镇、街道)在 2000 年、2020 年均呈现相对零散的空间分布,呈权衡关系的乡(镇、街道)2000 年集中连片分布在中部的吴起县、志丹县、甘泉县、安塞区和宝塔区等地,2020 年的空间分布向东转移,吴起县、志丹县的分布减少,延川县、延长县的分布增多。

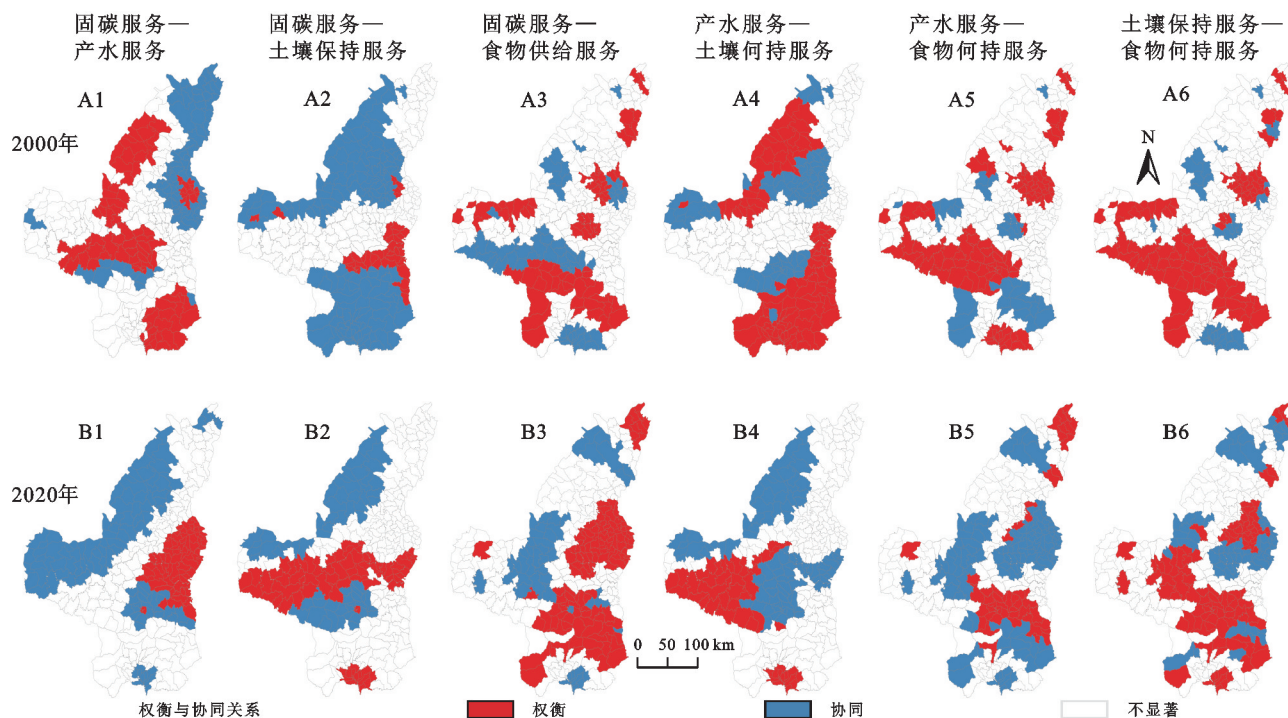


图 5 陕北地区生态系统服务权衡与协同的空间格局

Fig. 5 Spatial patterns of ecosystem services' trade-offs and synergies in northern Shaanxi

进一步统计 2000 年、2020 年陕北地区各类生态系统服务两两之间呈现权衡与协同关系的乡(镇、街道)占比(图 6)。可以看出,2000 年固碳服务—土壤保持服务呈协同关系的乡(镇、街道)最多(48.99%),呈权衡关系的乡(镇、街道)最少(12.50%);产水服务—食物供给服务和土壤保持服务—食物供给服务呈权衡关系的乡(镇、街道)最多(36.49%),呈协同关系的乡(镇、街道)最少(11.82%)。2020 年,产水服

务—食物供给服务呈协同关系的乡(镇、街道)最多(40.54%),产水服务—土壤保持服务呈权衡关系的乡(镇、街道)最少(15.88%);固碳服务—食物供给服务呈权衡关系的乡(镇、街道)最多(41.55%),呈协同关系的乡(镇、街道)最少(17.23%)。

2000—2020 年,固碳服务—产水服务、产水服务—土壤保持服务、产水服务—食物供给服务和土壤保持服务—食物供给服务呈协同关系的乡(镇、街道)

分别增加 27.71%, 9.76%, 242.86% 和 91.43%, 呈权衡关系的乡(镇、街道)也都有所减少, 促使陕北地区整体固碳服务—产水服务、产水服务—土壤保持服务、产水服务—食物供给服务的关系已由权衡转向协同, 土壤保持服务—食物供给服务的权衡关系也有所

减弱。与之相反, 固碳服务—土壤保持服务和固碳服务—食物供给服务呈协同关系的乡(镇、街道)有所减少, 而呈权衡关系的乡(镇、街道)大量增加, 导致陕北地区整体固碳服务—土壤保持服务的协同关系减弱, 固碳服务—食物供给服务的权衡关系增强。

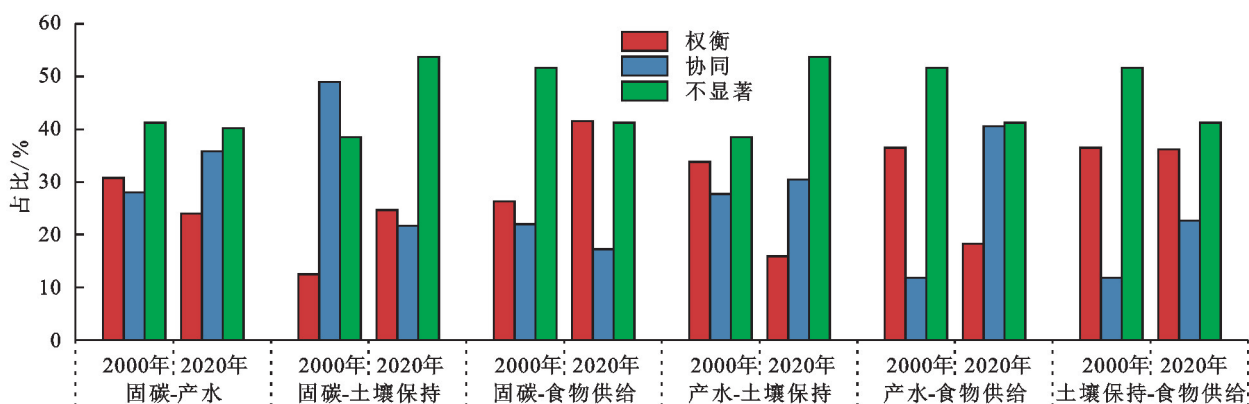


图6 陕北地区生态系统服务权衡与协同关系的结果统计

Fig. 6 Results of ecosystem services' trade-offs and synergies in northern Shaanxi

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

本文单位面积碳储量的评估结果与吕文宝等<sup>[27]</sup>的研究较为一致, 单位面积产水量的评估结果与 Li 等<sup>[28]</sup>的研究较为一致, 单位面积土壤保持量与赵雪雁等<sup>[29]</sup>的评估较为一致, 单位面积食物供给量的评估结果与邵雅静等<sup>[21]</sup>基于黄河流域整体的研究较为一致, 生态系统服务空间格局的变化特征与石金鑫等<sup>[30]</sup>的研究结果相似, 说明本文生态系统服务评估的结果相对准确。

本文全面、系统地分析了陕北地区生态系统服务的时空演变、集聚特征和权衡与协同关系, 可以为促进陕北地区的协调、可持续发展提供有力的科学支撑。总体上看, 2000—2020 年陕北地区多数生态系统服务的高值集聚效应增强, 生态系统服务之间的权衡关系减弱、协同关系增强, 对于区域的可持续发展具有积极的意义。但与此同时, 产水服务和食物供给服务的低值集聚效应增强, 固碳服务与食物供给服务的权衡关系加剧等现象也需要引起重视。

2020 年, 产水服务的冷点乡(镇、街道)集中在定边县、靖边县、横山区等地的西北部区域, 气候干旱、水资源短缺, 未来可以尝试通过推广节水灌溉、建设抗旱引调提水工程、加强水资源管理监测等方式缓解当地的水资源短缺问题; 食物供给服务的冷点乡(镇、街道)在陕北地区中部呈现大范围的集中连片分布, 有必要由县级、乡级管理部门从整体上进行规划部署, 结合区域实际情况合理优化农业布局、提升土地

利用效率、加强农业科技支撑, 以此提高生态系统的食物供给能力; 固碳服务—食物供给服务呈现权衡关系的乡(镇、街道)一部分与食物供给服务的冷点乡(镇、街道)重合, 应当以提升食物供给能力为首要目标, 另一部分集中在中部偏东的吴堡县、绥德县等地, 应当尝试优化农业结构, 通过立体农业、生态农业等生产模式, 提升生态系统的固碳效率和食物供给的可持续性, 促进农业生产与生态环境的协调发展。

同时, 本文也存在一定的不足之处, 有待进一步的改进和完善。一是本文选取了陕北地区 4 种主要的生态系统服务类型, 但仍未能全面地反映生态系统向人类提供的全部惠益, 未来需要尝试量化更多类型的生态系统服务, 尽可能全面地覆盖生态系统的供给服务、调解服务、文化服务和支持服务; 二是本文基于乡镇单元进行分析, 由于生态系统服务具有复杂的区域差异和尺度差异, 未来还需要开展其他空间尺度的研究, 更加全面地揭示陕北地区生态系统服务的特征; 三是本文未涉及生态系统服务变化的机理研究, 未来还可以进一步借助其他技术手段分析具体的影响因素和驱动机制, 以期更好地服务于陕北地区的可持续发展。

### 4.2 结论

(1) 2000—2020 年陕北地区单位面积碳储量、产水量、土壤保持量和食物供给量增加的区域分别占总面积的 10.23%, 77.91%, 90.44% 和 47.80%, 下降的区域分别占总面积的 10.01%, 22.09%, 9.56% 和 52.20%。固碳服务在多数区域保持不变, 在西北部区域增幅明显; 产水服务整体上呈现西部减少, 中部和东部增加, 增幅自西向东逐渐变大的趋势; 土壤保持服务

在南部少数区域减少,其余多数区域增加,增幅自东南向西北逐渐扩大;食物供给服务在洛川县、定边县等地增幅较大,在靖边县、神木市等地下降明显。

(2) 2000—2020年陕北地区各类生态系统服务都呈现出集聚分布的模式( $p < 0.01$ ),随着时间的推移高值集聚效应均有所增强。20年间,陕北地区各类生态系统服务的热点乡(镇、街道)分别增加3个(11.54%),9个(23.68%),8个(57.14%)和61个(217.86%)。产水服务和食物供给服务的低值集聚效应同步增加,而固碳服务和土壤保持服务的低值集聚效应减弱。

(3) 2000—2020年陕北地区生态系统服务的相互作用关系逐渐由权衡主导过渡到由协同主导,乡镇尺度上生态系统服务间的关系得到一定改善。固碳服务—产水服务、产水服务—土壤保持服务、产水服务—食物供给服务和土壤保持服务—食物供给服务呈协同关系的乡(镇、街道)增多,呈权衡关系的乡(镇、街道)减少;但固碳服务—土壤保持服务和固碳服务—食物供给服务呈协同关系的乡(镇、街道)减少,呈权衡关系的乡(镇、街道)增多。

(4) 为促进陕北地区的可持续发展,建议定边县、靖边县、横山区等地的西北部区域通过推广节水灌溉、建设提水工程等措施重点缓解水资源短缺的问题;中部的安塞区、宝塔区、甘泉县等地合理优化农业布局、提升土地利用效率,提高生态系统的食物供给能力;中部偏东的吴堡县、绥德县等地优化农业生产模式,促进农业生产与生态环境的协调发展。

#### 参考文献(References):

- [1] Finlayson M, Cruz R D, Davidson N, et al. Millennium ecosystem assessment: ecosystems and human well-being: wetlands and water synthesis[M]. Washington D C, USA: Island Press, 2005.
- [2] 李双成,张才玉,刘金龙,等.生态系统服务权衡与协同研究进展及地理学研究议题[J].地理研究,2013,32(8): 1379-1390.  
Li S C, Zhang C Y, Liu J L, et al. The tradeoffs and synergies of ecosystem services: Research progress, development trend, and themes of geography[J]. Geographical Research, 2013,32(8):1379-1390.
- [3] 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.
- [4] 傅伯杰,于丹丹.生态系统服务权衡与集成方法[J].资源科学,2016,38(1):1-9.
- [5] Costanza R, D'Arge R, Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Ecological Economics, 1998,25(1):3-15.
- [6] 马舒意,黄小兰,黄晶,环鄱阳湖城市群生态系统服务价值时空变化及权衡协同关系[J].水土保持研究,2024,31(3):391-400.  
Ma S Y, Huang X L, Huang J. Temporal and spatial variation of ecosystem service value and its trade-offs and synergies in the urban agglomeration around Poyang Lake[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(3):391-400.
- [7] Wu W H, Xu L Y, Zheng H Z, et al. How much carbon storage will the ecological space leave in a rapid urbanization area? Scenario analysis from Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2023,189:106774.
- [8] Liu X Q, Liu Y S, Wang Y S, et al. Evaluating potential impacts of land use changes on water supply-demand under multiple development scenarios in dryland region [J]. Journal of Hydrology, 2022,610:127811.
- [9] 郑启航,徐光来,刘永婷,等.基于 InVEST 和 MGWR 模型的安徽省生境质量评估及驱动[J].水土保持研究, 2024,31(3):373-382.  
Zheng Q H, Xu G L, Liu Y T, et al. Assessment and driving of habitat quality in Anhui Province based on InVEST and MGWR models[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(3):373-382.
- [10] 张建,雷刚,漆良华.南水北调中线水源区丹江口市域景观格局变化及氮磷净化能力[J].生态学报,2021,41(6):2261-2271.  
Zhang J, Lei G, Qi L H. Change of landscape pattern and nitrogen and phosphorus removal in Danjiangkou City, the Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(6):2261-2271.
- [11] 刘珺,俞博云,杨文府.多尺度地理加权回归模型支持下的汾河流域生态系统服务关系演化机理研究[J].遥感学报,2023,27(7):1667-1679.  
Liu J, Yu B Y, Yang W F. Evolution mechanism of ecosystem service relationship in the Fenhe River Basin based on multiscale geographically weighted regression [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2023,27(7): 1667-1679.
- [12] 赵筱青,石小倩,李驭豪,等.滇东南喀斯特山区生态系统服务时空格局及功能分区[J].地理学报,2022,77(3):736-756.



- Zhao X Q, Shi X Q, Li Y H, et al. Spatio-temporal pattern and functional zoning of ecosystem services in the Karst mountainous areas of southeastern Yunnan [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(3): 736-756.
- [13] 罗金玲, 谢余初, 刘秋华, 等. 流域生态系统服务权衡/协同关系时空格局及热点区识别: 以南流江流域为例 [J]. *水土保持研究*, 2023, 30(5): 397-407.
- Luo J L, Xie Y C, Liu Q H, et al. Spatiotemporal patterns and hot-spots of the trade-off and synergy relationship among ecosystem services in Nanlijiang River Basin [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(5): 397-407.
- [14] Li J H, Bai Y, Alatalo J M. Impacts of rural tourism-driven land use change on ecosystems services provision in Erhai Lake Basin, China [J]. *Ecosystem Services*, 2020, 42: 101081.
- [15] 廖江博, 毛德华, 邓美容. 洞庭湖流域典型生态系统服务评估及权衡/协同关系研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 2024, 33(2): 310-321.
- Liao J B, Mao D H, Deng M R. Evaluation of typical ecosystem services and trade-offs/synergies in Dongting Lake Basin [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2024, 33(2): 310-321.
- [16] 赵文武, 刘月, 冯强, 等. 人地系统耦合框架下的生态系统服务 [J]. *地理科学进展*, 2018, 37(1): 139-151.
- Zhao W W, Liu Y, Feng Q, et al. Ecosystem services for coupled human and environment systems [J]. *Progress in Geography*, 2018, 37(1): 139-151.
- [17] 陈相标, 丁文荣. 石林喀斯特岩溶区生态系统服务时空演变及权衡协同关系 [J]. *水土保持研究*, 2023, 30(2): 285-293.
- Chen X B, Ding W R. Spatial-temporal evolution and trade-off synergy relationships of ecosystem services in Karst Area of Shilin [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(2): 285-293.
- [18] 邓钰栋, 王丹, 许涵. 双尺度下广东韶关市生态系统服务及其权衡/协同关系及社会生态驱动因素 [J]. *应用生态学报*, 2023, 34(11): 3073-3084.
- Deng Y Y, Wang D, Xu H. Trade-offs and synergies relationships of ecosystem services and their socio-ecological driving factors under different spatial scales in Shaoguan City, Guangdong, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(11): 3073-3084.
- [19] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 基于 InVEST 和 CA-Markov 模型的黄河流域碳储量时空变化研究 [J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2021, 29(6): 1018-1029.
- Yang J, Xie B P, Zhang D G. Spatio-temporal evolution of carbon stocks in the Yellow River Basin based on InVEST and CA-Markov models [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 29(6): 1018-1029.
- [20] 姚楠, 刘广全, 姚顺波, 等. 基于 InVEST 模型的黄土丘陵沟壑区退耕还林还草工程对生态系统碳储量的影响评估 [J]. *水土保持通报*, 2022, 42(5): 329-336.
- Yao N, Liu G Q, Yao S B, et al. Evaluating on effect of conversion from Farmland to Forest and Grassland Porject on ecosystem carbon storage in Loess Hilly-gully Region based on InVEST model [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(5): 329-336.
- [21] 邵雅静, 杨悦, 员学锋. 黄河流域城镇化与生态系统服务的时空互动关系 [J]. *水土保持学报*, 2022, 36(3): 86-93, 99.
- Shao Y J, Yang Y, Yuan X F. Analysis of the spatial and temporal interactions between urbanization and ecosystem services in the Yellow River Basin [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(3): 86-93, 99.
- [22] 刘宥延, 刘兴元, 张博, 等. 基于 InVEST 模型的黄土高原丘陵区水源涵养功能空间特征分析 [J]. *生态学报*, 2020, 40(17): 6161-6170.
- Liu Y Y, Liu X Y, Zhang B, et al. Spatial features analysis of water conservation function in the hilly areas of the Loess Plateau based on InVEST model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(17): 6161-6170.
- [23] 杨阳, 窦艳星, 王云强, 等. 黄土丘陵沟壑区典型小流域生态系统服务权衡与协同关系研究 [J]. *生态学报*, 2022, 42(20): 8152-8168.
- Yang Y, Dou Y X, Wang Y Q, et al. Ecosystem service tradeoffs and synergies in typical small watersheds of the hilly and gully region of the Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(20): 8152-8168.
- [24] 何佳瑛, 蒋晓辉, 雷宇昕. 黄土高原生态工程对关键生态系统服务时空变化的影响: 以延河流域为例 [J]. *生态学报*, 2023, 43(12): 4823-4834.
- He J Y, Jiang X H, Lei Y X. Effects of ecological engineering on spatio-temporal changes of key ecosystem services on the Loess Plateau: a case study in the Yanhe River Basin, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(12): 4823-4834.
- [25] 王亚楠, 肖潇, 蒲金芳, 等. 40 年来长江经济带“三生”空间时空演化特征 [J]. *农业机械学报*, 2022, 53(11): 215-225.
- Wang Y N, Xiao X, Pu J F, et al. Spatial and temporal evolution characteristics of “production-living-ecological” space in Yangtze River Economic Belt in past 40 years [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(11): 215-225.
- [26] Liu Y, Wan C Y, Xu G L, et al. Exploring the relationship and influencing factors of cultivated land multifunction in China from the perspective of trade-off/synergy [J]. *Ecological Indicators*, 2023, 149: 110171.

- [21] 何颖,马松梅,张林,等.玛纳斯河流域 NPP 时空变化及其生物多样性维护功能重要性评价[J].生态学报, 2023,43(11):4664-4673.  
He Y, Ma S M, Zhang L, et al. Spatio-temporal change of net primary productivity and the evaluation of the importance of biodiversity maintenance functions in Manas River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(11):4664-4673.
- [22] 范文波,吴普特,马枫梅.膜下滴灌技术生态-经济与可持续性分析:以新疆玛纳斯河流域棉花为例[J].生态学报, 2012,32(23):7559-7567.  
Fan W B, Wu P T, Ma F M. Socio-economic impacts of under-film drip irrigation technology and sustainable assessment: A case in the Manas River Basin, Xinjiang, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012,32(23):7559-7567.
- [23] Xu H T, Song Y C, Tian Y. Simulation of land-use pattern evolution in hilly mountainous areas of North China: A case study in Jincheng[J]. Land Use Policy, 2022,112:105826.
- [24] 师君银,马勇刚,许仲林.喀什地区土地利用变化对生境质量的影响[J].西南农业学报, 2023,36(11):2480-2490.  
Shi J Y, Ma Y G, Xu Z L. Impact of land use changes on habitat quality in Kashgar region [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2023,36(11): 2480-2490.
- [25] 隋露,闫志明,李开放,等.人类活动及气候变化影响下伊犁河谷生境质量预测研究[J].干旱区地理, 2024,47(1):104-116.  
Sui L, Yan Z M, Li K F, et al. Prediction of habitat quality in the Ili River Valley under the influence of human activities and climate change[J]. Arid Land Geography, 2024,47(1):104-116.
- [26] 吕乐婷,张杰,孙才志,等.基于土地利用变化的细河流域景观生态风险评估[J].生态学报, 2018,38(16): 5952-5960.  
Lü L T, Zhang J, Sun C Z, et al. Landscapeecological risk assessment of Xi river Basin based on land-use change[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(16):5952-5960.
- [27] 康紫薇,张正勇,位宏,等.基于土地利用变化的玛纳斯河流域景观生态风险评价[J].生态学报, 2020,40(18): 6472-6485.  
Kang Z W, Zhang Z Y, Wei H, et al. Landscape ecological risk assessment in Manas River Basin based on land use change[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(18):6472-6485.
- [28] 张学斌,石培基,罗君,等.基于景观格局的干旱内陆河流域生态风险分析:以石羊河流域为例[J].自然资源学报, 2014,29(3):410-419.  
Zhang X B, Shi P J, Luo J, et al. The ecological risk assessment of arid inland river basin at the landscape scale: A case study on Shiyang River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2014,29(3):410-419.
- [29] 于航,刘学录,赵天明,等.基于景观格局的祁连山国家公园景观生态风险评价[J].生态科学, 2022,41(2):99-107.  
Yu H, Liu X L, Zhao T M, et al. Landscape ecological risk assessment of Qilian Mountain National Park based on landscape pattern [J]. Ecological Science, 2022,41(2):99-107.
- [30] An L, Shen L, Zhong S, et al. Transboundary ecological network identification for addressing conservation priorities and landscape ecological risks: Insights from the Altai Mountains[J]. Ecological Indicators, 2023,156:111159.

~~~~~  
(上接第 327 页)

- [27] 吕文宝,徐占军,郭琦,等.黄土高原陆地生态系统碳储量的时间演进与空间分异特征[J].水土保持研究, 2024,31(2):252-263.  
Lü W B, Xu Z J, Guo Q, et al. Research on the temporal evolution and spatial differentiation characteristics of carbon storage in terrestrial ecosystems on the Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(2):252-263.
- [28] Li Y L, He Y, Liu W Q, et al. Evaluation and prediction of water yield services in Shaanxi Province, China [J]. Forests, 2023,14(2):229.
- [29] 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.  
Zhao X Y, Ma P Y, Li W Q, et al. Spatiotemporal changes of supply and demand relationships of ecosystem services in the Loess Plateau[J]. Acta Geographica Sinica, 2021,76(11):2780-2796.
- [30] 石金鑫,梁小英,李辉蕾,等.陕北黄土高原景观格局对生态系统服务权衡关系的影响[J].生态学报, 2023,43(21):8958-8972.  
Shi J X, Liang X Y, Li H Q, et al. Impact of landscape pattern on ecosystem service trade-offs in the Loess Plateau of northern Shaanxi[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(21):8958-8972.