

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.01.008; CSTR:32311.14.rswc.2025.01.008.

温昕, 王继军, 韩晓佳. 基于地理分区的陕北黄土高原生态系统服务权衡/协同的尺度效应研究[J]. 水土保持研究, 2025, 32(1): 305-315.

Wen Xin, Wang Jijun, Han Xiaojia. Scale effects of ecosystem service trade-offs/synergies in the Loess Plateau of northern Shaanxi based on geographical regions[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(1): 305-315.

基于地理分区的陕北黄土高原生态系统服务权衡/ 协同的尺度效应研究

温昕^{1,2,4}, 王继军^{1,2,3}, 韩晓佳⁵

(1.中国科学院 水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100;

2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4.中国科学院大学, 北京 100049; 5.中国科学院 生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要: [目的]明晰生态系统服务的权衡/协同关系, 保证生态系统服务长期有效供应, 实现流域生态保护与高质量发展。[方法]以典型退耕区陕北黄土高原为例, 利用 1990—2020 年土地利用变化数据, 基于 InVEST 模型量化 4 种关键生态系统服务即碳储量、产水量、土壤保持量和生境质量的时空分布特征, 通过相关性分析探讨了各类生态系统服务间的权衡/协同关系和呈现的尺度特征。[结果](1) 1990—2020 年碳储量和生境质量处于不断增加的趋势, 产水量和土壤保持量呈现先降低后增加总体增加的趋势, 空间上呈东南略低西北略高的分布。(2) 陕北黄土高原生态系统服务以协同作用为主, 且在 1990—2020 年协同效应不断增强, 权衡作用主要发生在产水量与其他生态系统服务之间, 权衡作用的区域主要分布在研究区西部和东北部地区。(3) 生态系统服务间的权衡/协同作用存在着空间尺度效应, 随着空间尺度的增加, 相关性逐渐增强而显著性有所下降, 且作用关系的方向性会发生改变。[结论]陕北黄土高原生态系统服务以协同为主, 生态系统服务间的权衡/协同作用存在着空间尺度效应。

关键词: 生态系统服务; 权衡/协同作用; 尺度效应; 地理分区; 陕北黄土高原

中图分类号: X321

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)01-0305-11

Scale effects of ecosystem service trade-offs/synergies in the Loess Plateau of northern Shaanxi based on geographical regions

Wen Xin^{1,2,4}, Wang Jijun^{1,2,3}, Han Xiaojia⁵

(1. Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 5. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to clearly understand the trade-offs and synergies within ecosystem services, to ensure the sustained effective supply of ecosystem services, and to achieve the dual objectives of watershed ecological conservation and high-quality development. [Methods] The typical returned farmland area of the Loess Plateau in northern Shaanxi Province was taken as an example. Based on the land-use change data from 1990 to 2020, the InVEST model was utilized to quantify the spatiotemporal characteristics of four key ecosystem services: carbon storage, water yield, soil conservation, and habitat quality. Through correlation analysis, the trade-offs, synergies, and scale characteristics among various

收稿日期: 2024-04-15

修回日期: 2024-05-06

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄土高原刺槐人工林结构与生态功能相互作用机制及调控”(42130717)

第一作者: 温昕(1995—), 女, 山东潍坊人, 博士研究生, 主要从事生态系统评估研究。E-mail: wenxin20@mails.uca.ac.cn

通信作者: 王继军(1964—), 男, 陕西渭南人, 研究员, 主要从事生态经济研究。E-mails: jjwang@ms.iswc.ac.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

ecosystem services were thoroughly investigated. [Results] (1) From 1990 to 2020, carbon storage and habitat quality were improved continuously, while water yield and soil conservation showed an overall increasing trend after an initial decrease, with a spatial pattern of lower level in the southeast and higher level in the northwest. (2) The ecosystem services of the Loess Plateau in northern Shaanxi Province were predominantly synergistic. The synergistic effects had continuously strengthened from 1990 to 2020. Trade-off effects mainly occur between water yield and other ecosystem services, with trade-off regions primarily distributed in the western and northeastern parts of the study area. (3) A spatial scale effect was evident in the trade-offs and synergies among ecosystem services. With increasing spatial scale, the correlation gradually strengthened while the significance decreased, and the directionality of the relationship was changed. [Conclusion] The ecosystem services within the northern Shaanxi Loess Plateau predominantly exhibit synergistic interactions, and these interactions are influenced by spatial scale effects in the trade-offs and synergies among different ecosystem services.

Keywords: ecosystem services; trade-offs/synergies; Scale effect; geographical division; Loess Plateau in northern Shaanxi

生态系统提供的产品和维护功能,如气候调节、水土保持、碳封存和其他难以商业化的功能,被称为生态系统服务^[1-2]。然而,由于全球变化和人类干预的压力,生态系统服务的供应正在下降^[3]。同时,它导致生态系统管理中相互竞争的经济和环境目标存在着复杂的权衡和协同效应^[4]。多年来,人类对自然生态系统的干预旨在以牺牲或损失一些生态系统服务为代价,实现经济效益和效用最大化^[5]。这种权衡导致了对环境和人类社会的不利后果^[6]。因此,明晰生态系统服务的时空演变及权衡和协同关系,是确保其长期供应与区域可持续发展的决策依据。

近年来,全球和区域尺度上生态系统服务间的权衡与协同已成为生态系统服务研究热点。例如,使用冗余分析来阐明环境因素对生态系统服务权衡作用的影响。结果表明,环境因素对生态系统服务权衡具有复杂的影响,且这种影响具有规模依赖性^[7-9]。目前的研究主要表现在以下几个方面:从时间上看,以往的研究大多只考虑了两个时间节点上生态系统服务权衡/协同作用,且集中在 2000—2015 年;在空间上,学者们在全球、洲际、国家、区域和流域尺度上开展了多种研究^[10],证明生态系统的权衡关系具有一定的规模效应。因此,迫切需要开展长时间序列生态系统服务间的研究,有效提高权衡结果的可靠性,避免生态系统长期演化中因意外因素和时间滞后而产生误判^[11]。目前,评估生态系统服务的主要模型包括 SWAT (Soil and Water Assessment Tool)、ARIES (Artificial Intelligence for Ecosystem Services)、RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation)、SolVES (Social Values for Ecosystem Services) 和

InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem services and tradeoffs)。InVEST 模型涵盖了多种生态系统过程,与其他模型相比,具有参数灵活、稳定性高、可视化能力强等优点^[12]。该模型为生态系统管理提供了强有力的技术支持,在生态环境评价中得到了广泛应用^[13]。相关性分析已被广泛应用于确定生态系统服务及其相互作用^[14]。

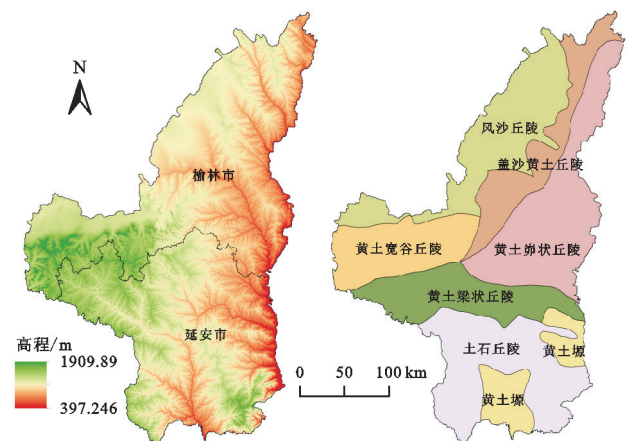
20 世纪末,黄土高原实施了一项大规模的生态恢复项目“退耕还林计划”,旨在将陡坡上的农田转移到林地或草地,以增加植被覆盖率,减轻水土流失,从而实现生态恢复^[15]。先前的研究表明,退耕还林工程改善了生态环境,提高了植被覆盖率、碳固存和土壤有机碳^[16]。陕北作为退耕还林工程主要实施的区域,其土地利用情况和生态系统服务产生了一系列的变化。因此,本研究以陕北黄土高原为研究区,基于多期土地利用数据,结合气象、土壤等多元数据,利用 InVEST 模型定量评估 1990—2020 年土地利用变化和 4 种关键生态系统服务类型,即碳储量、产水量、土壤保持和生境质量,分析生态系统服务的时空变化和作用关系,探讨生态系统服务间的尺度效应。

1 研究方法和数据

1.1 研究区

陕北黄土高原(35°21′—39°35′N 和 107°28′—111°15′)位于中国西北内陆黄土高原腹地(图 1),地势呈现东北低西南高走向,西北部分布着风沙丘陵区 and 黄土宽谷丘陵,东部有广泛的黄土峁状丘陵区,中部为黄土梁状丘陵区,南部为土石丘陵区 and 黄土塬区。包括榆林和延安两个地级市,共 25 个区县。区域气候属

于暖湿带大陆性季风半湿润气候向温带半干旱气候过渡带,降水主要集中在7月—9月,具有季节性特征。陕北黄土高原土地面积8.2万 km²,2020年陕北常住人口590.74万人,城镇化率为61.51%,区域GDP总量为5 695.45亿元,研究区内各县市区自然资源禀赋差异较大,区域间经济发展不平衡,陕北作为国家重点生态功能区,经过二十多年的退耕还林工程,该区域土地利用空间格局发生了很大变化,表现为耕地和未利用地减少,林地和果园面积增加。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号GS(2022)4308号的标准地图制作,底图未做修改,下同。

图1 研究区位置

Fig. 1 Location of the research area

1.2 数据来源

本研究使用的数据包括陕北黄土高原退耕还林工程前后不同时间节点的土地利用覆被数据、DEM数据、气象数据、土壤数据以及其他地理数据。(1)土地利用数据包括1990年、1995年、2000年、2005年、2010年、2015年和2020年土地利用分类图,根据“中国土地利用/土地覆盖遥感监测数据分类系统”对土地利用进行了重分类,并将陕北黄土高原的土地利用分为以下7类:农田、林地、草地、园地、水域、建设用地和未利用土地。基于谷歌影像,结合实地获取的土地利用数据勾画2020年陕北黄土高原土地利用分类样本,最终获取到7种地类的1 645个训练样本。基于GEE平台(<https://earthengine.google.com/>)选取Landsat影像作为数据源,通过提取光谱特征、纹理特征、地形特征和缨帽特征等特征指标,进行用于随机森林的土地利用分类计算,得到2020年陕北黄土高原土地利用分类,分类总体精度达到89.62以上。并依据建立好的分类规则对1990年、1995年、2000年、2005年、2010年、2015年土地利用数据进行分类,得到1990—2020年陕北黄土高原土地利用分类数据。(2)逐月降雨量、气温和蒸散发数据来自黄土高原数据中心(<http://loess.geodata.cn/>)。 (3)土壤数据来自联合国粮农组

织(FAO)和维也纳国际应用系统研究所(IIASA)所构建的世界土壤数据库(Harmonized World Soil Database version 1.1)(HWSD)。(4)DEM数据来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)的GDEM V3数据,空间分辨率为30 m。(5)其他地理数据主要包括地理分区、行政区划、居民点、交通道路、水系、地形图等,来源于黄土高原数据中心和已有的研究成果。

1.3 研究方法

本文使用InVEST模型和ArcGIS 10.6软件,定量评估陕北黄土高原地区碳存储、产水量、土壤保持量和生境质量4种生态系统服务。

1.3.1 碳存储 碳存储服务是指生态系统在大气中CO₂的固定和存储作用。InVEST模型碳储存和固碳模块根据不同的土地利用类型中4种碳库储量的总和来估计生态系统的碳储量^[17]。计算公式如下:

$$C_{\text{tot},i} = C_{\text{above},i} + C_{\text{below},i} + C_{\text{soil},i} + C_{\text{dead},i} \quad (1)$$

式中: $C_{\text{tot},i}$ 为单元格*i*的总碳储量(t/hm²); $C_{\text{above},i}$, $C_{\text{below},i}$, $C_{\text{soil},i}$, $C_{\text{dead},i}$ 分别表示单元格*i*的地上碳储量、地下碳储量、土壤碳储量和死亡有机碳储量(t/hm²)。其中碳密度数据参考已有以及黄土高原区域的碳储量研究成果^[17]。

1.3.2 产水量 产水量是生态系统供水能力的测度之一。InVEST模型中产水量是以水量平衡原理为基础,基于Budyko水热耦合平衡假设,根据年均降水量和年实际蒸散量之差来计算年均产水量。计算公式如下:

$$Y_{xj} = \left(1 - \frac{\text{AET}_{xj}}{P_x}\right) \times P_x \quad (2)$$

式中: Y_{xj} 为年产水量; P_x 为栅格单元*x*的年均降雨量; AET_{xj} 为土地利用类型*j*上栅格单元*x*的实际年平均蒸散发量。模型运行所需生物物理系数表以及其他参数参考已有的相关研究、联合国粮农组织作物参考值以及模型推荐的参数获取^[18]。

1.3.3 土壤保持 土壤保持服务是指生态系统通过防止因风、径流等侵蚀过程导致的土壤流失的调节功能。使用InVEST模型中的沉积物输送模块对陕北退耕区的土壤保持服务进行评估。此模块综合考虑地表拦截和植被的双重保持功能:即减缓侵蚀和拦截沉积物。沉积物输送模块基于土壤水土流失方程,计算每个栅格单元的土壤流失,通过侵蚀减少量和泥沙持流量来计算土壤保持量。计算公式如下:

$$\text{SEDRET} = \text{PKLS}_x - \text{USLE}_x + \text{SEDR}_x \quad (3)$$

$$\text{PKLS}_x = R_x \times K_x \times \text{LS}_x \quad (4)$$

$$\text{USLE}_x = R_x \times K_x \times \text{LS}_x \times C_x \times P_x \quad (5)$$

$$\text{SEDR}_x = \text{SE}_x \sum_{y=1}^{x-1} \text{USLE}_y \prod_{z=y+1}^{x-1} \text{SE}_z \quad (6)$$

式中:SEDRET 为土壤保持量;SEDR_x 为栅格 x 的泥沙持留量,SE_x 为栅格单元 x 的泥沙持留效率;PKLS_x 为栅格单元 x 潜在土壤流失量;USLE_x 和 USLE_x 分别为栅格 x 及其上坡栅格 y 的实际侵蚀量,即有植被覆盖和水土保持措施下的土壤侵蚀量; R_x 、 K_x 、 LS_x 、 C_x 和 P_x 分别为栅格 x 的降雨侵蚀力因子、土壤可蚀性因子、地形因子、植被覆盖因子和水土保持措施因子。

1.3.4 生境质量 生物生存环境经受人为活动与自然灾害等多重威胁因子的影响。它的大小是由区域内可用于生物生存、繁殖和发展的资源的数量决定的,并与该区域的结构和生态功能有关。更好的生境质量通常意味着更高的生物多样性。因此,生境质量可作为表征区域内生物多样性的一个重要指标。在评估过程中,基于土地利用覆盖数据,并结合适宜性、影响距离和威胁因子权重信息来进行生境质量的评估。计算过程如下:

$$Q_i = H_i \times \left(1 - \frac{D_i^z}{D_i^z + k^z} \right) \quad (7)$$

式中: Q_i 表示栅格单元 i 的生境质量,无量纲,取值为 0~1,值越大表示生境质量越好; H_i 代表生境适应性; D_i 代表栅格单元 i 的生境退化度,与威胁因子、威胁强度以及各类土地利用对威胁因子的敏感度有关; k 为半饱和常数,取值为生境退化度最大值的 1/2; z 是模型的归一化常数。

1.3.5 生态系统服务权衡/协同关系评估方法 为了分析陕北黄土高原各类生态系统服务间的相关性,揭示其权衡/协同的关系,在 ArcGIS 10.6 中使用“创

建随机点”工具随机创建了 6 000 个点(图 2),提取了每个点的生态系统服务值进行相关分析。如果生态系统服务间的相关性数值为正,即为协同关系,反之则为权衡关系。相关性分析在 SPSS 19 中实现。以栅格尺度为基础基于 Python 平台计算了 1990—2020 年空间上各类生态系统服务的相关性和显著性水平,将陕北黄土高原生态系统的权衡与协同分为强权衡、中权衡、弱权衡、弱协同、中协同、强协同和无相关关系(表 1),定量分析陕北黄土高原 4 类生态系统服务在时间和空间上的权衡与协同关系。



图 2 随机采样点分布

Fig. 2 Distribution of random sampling points

表 1 生态系统服务相关性类别的划分

Table 1 Classification of ecosystem services relevance categories

相关性类别	强权衡	中权衡	弱权衡	弱协同	中协同	强协同	不相关
R	<0	<0	<0	>0	>0	>0	0
p	<0.05	0.05~0.1	>0.1	>0.1	0.05~0.1	<0.05	—

2 结果与分析

2.1 生态系统服务情况

陕北黄土高原 6 种生态系统服务的时空分布和不同土地类型的生态系统服务时空差异分别由图 3, 图 4 所示。结果显示碳储量总体上处于增加的趋势, 1990—2020 年陕北黄土高原的碳储量从 5.12 亿 t 增加到 5.49 亿 t;从空间分布来看,东南部高西北部低,南部和东部林地、草地和园地资源丰富的区域碳储存能力最强,耕地次之,建设用地和水域依次降低。产水量先降低后增加,总体呈现增加趋势,平均产水深度从 1990 年的 42.81 mm 先下降到 2000 年最

低值 33.04 mm,随后波动增加至 2020 年的 46.96 mm;空间上看研究区南部的产水量增加明显。土壤保持能力先降低后增加总体呈现增加的趋势,从 1990 年的 18.01 亿 t 减少至 2000 年 12.66 亿 t 达到最低值,随后波动增加至 2020 年 19.69 亿 t;空间上研究区中部和南部增加明显。生境质量处于不断增加的趋势,1990—2020 年从 0.64 增加至 0.69,说明整体上生物多样性维持服务较高并且处于逐步变好的发展趋势,空间上研究区中部地区生境质量增加比较明显。

陕北的地形特征影响着各类生态系统服务的变化。陕北的碳储量主要由黄土峁状丘陵区 and 土石丘

陵区提供。产水量主要由风沙丘陵区 and 土石丘陵区提供。土壤保持服务主要由土石丘陵区、黄土梁状丘

陵区和黄土梁状丘陵区提供。生境质量在各地理分区相差不大,其中最高的是土石丘陵区。

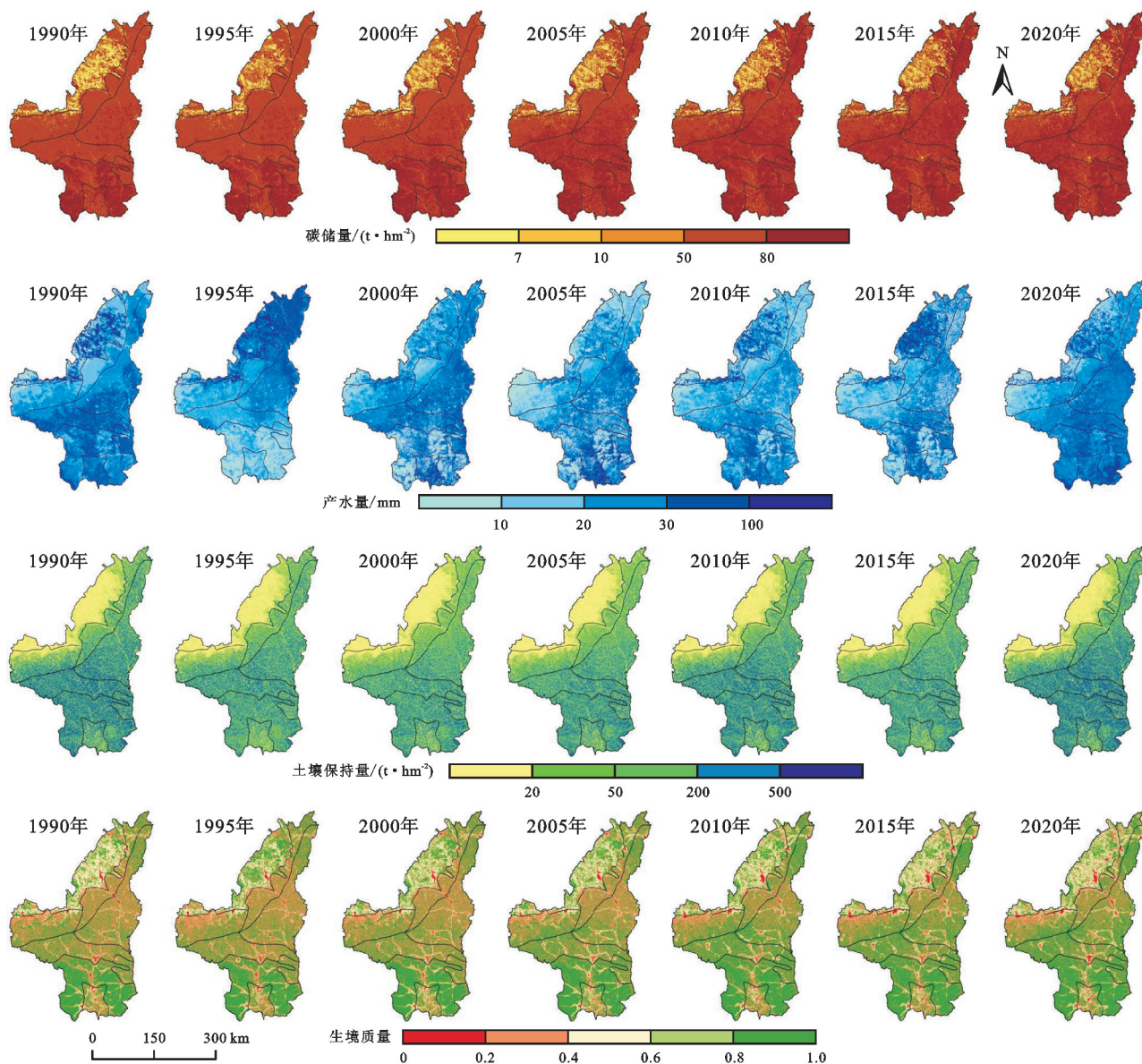


图 3 1990—2020 年生态系统服务空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of ecosystem services from 1990 to 2020

2.2 生态系统服务的权衡/协同关系

2.2.1 生态系统服务权衡/协同的时间变化 通过对随机提取的 6 000 个样本点基于 spearman 系数进行相关性分析,研究 4 种生态系统服务间的相关性关系和强度(表 2)。研究区的 4 种服务间几乎以相互增益的协同关系为主。1990—2020 年碳储量和土壤保持服务、碳储量和生境质量、生境质量和土壤保持服务两两之间都存在显著的正相关,属于协同关系,其中碳储量和土壤保持间的协同关系更为突出,相关系数在 2005 年最高达 0.697,其余年份的相关系数均在 0.5 以上。碳储存与生境质量的协同关系在 1990—2020 年不断增强,到 2020 年它们的相关系数高达 0.554。权衡

作用主要发生在产水量服务与土壤保持、碳储存和生境质量之间,1995 年产水量服务与土壤保持服务和碳储存之间具有显著的相关关系,并且在产水量和碳储存服务间权衡作用最强,相关系数为-0.573。

2.2.2 生态系统服务权衡/协同的空间分布 在空间上计算 1990—2020 年空间上各类生态系统服务的相关性和显著性水平,结果如图 5 所示。协同作用最明显是碳储量和生境质量之间,协同面积占研究区总面积的 76.36% 以上,其中强协同区域的面积占总面积的 32.99% 且集中于研究区中部地区,权衡的区域零星分布在南部的土石丘陵区 and 东北部的风沙丘陵区。此外协同作用为主的也体现在土壤保持与产

水量、碳储量和生境质量之间,协同作用面积占比大约都是 60%。土壤保持与产水量间的强协同作用面积超过了 10.12%,同样发生在研究区南部的土石丘陵区 and 东北部的风沙丘陵区,而研究区中部和东部海拔较低地区的土壤保持与产水量呈现出弱权衡作用。土壤保持与碳储量和生境质量间多为弱协同作用。

产水量与碳储量和生境质量间以权衡作用为主,且空间分布较为相似,弱权衡作用比较显著,强权衡作用的区域主要分布在黄土宽谷丘陵区 and 黄土梁状丘陵区的西部,以及研究区西北部盖沙黄土丘陵区 and 黄土峁状丘陵区的东北部,研究区中部和南部地区的权衡和协同作用不强。

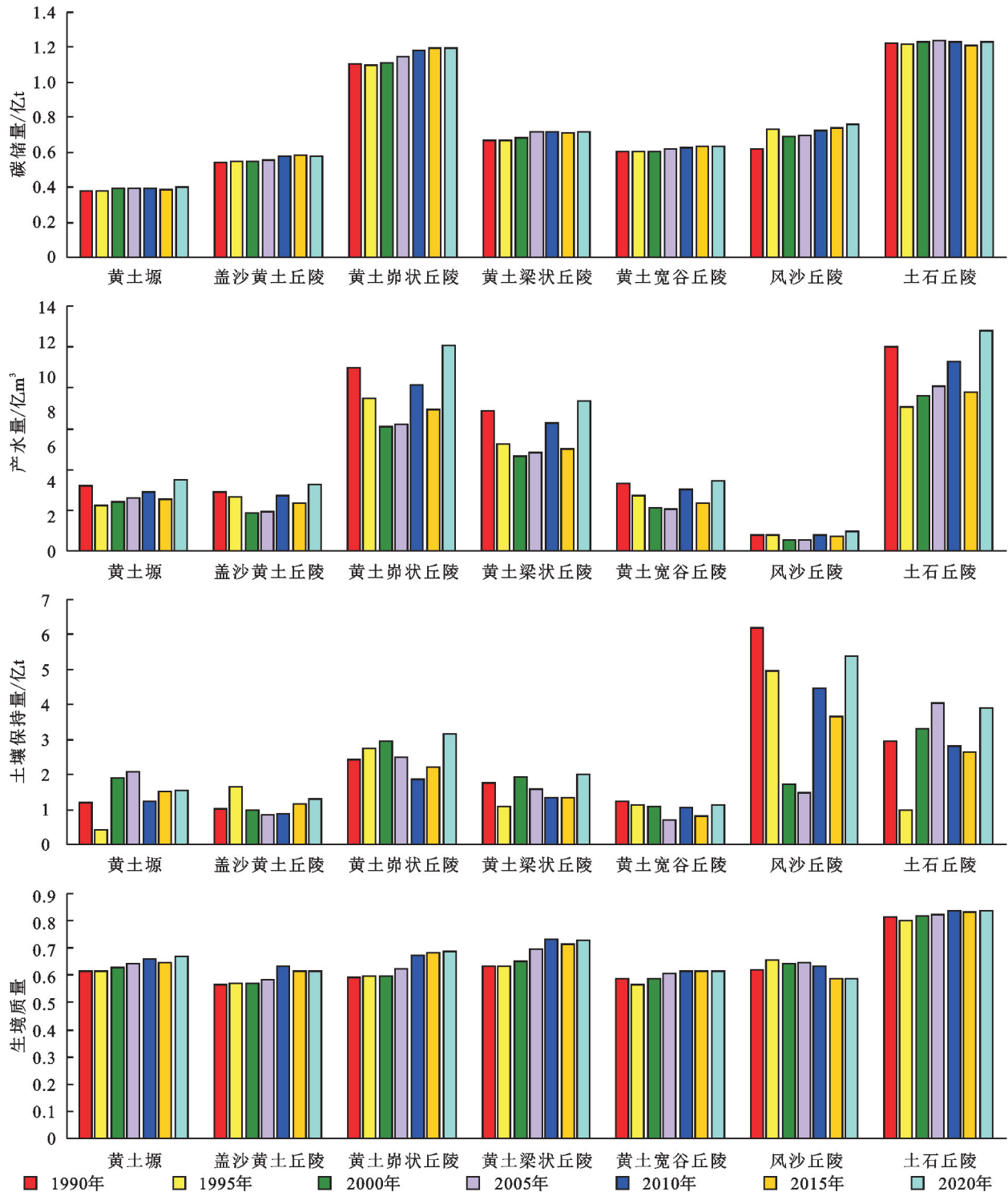


图 4 各地理分区的生态系统服务变化

Fig. 4 Changes in ecosystem services by geographic region

通过提取不同地理分区中陕北退耕区产水量、碳 储量、土壤保持量和生境质量 4 项生态系统服务量,

可以获得不同地理分区间生态系统服务的相关性情况(图 6)。黄土塬区、盖沙黄土丘陵区 and 黄土峁状丘陵区的各类生态系统间的作用关系分布相似,其他地理分区略有不同。土壤保持和生境质量服务在黄土宽谷丘陵区属于弱权衡关系,在其他地理分区都属于协同关系,协同关系最强的是黄土梁状丘陵区,相关系数为 0.55。产水量与土壤保持服务间除了在黄土

宽谷丘陵区 and 土石丘陵区为弱权衡关系,在其他地理分区都处于不同程度的协同关系。碳储存与生境质量服务、碳储存与土壤保持服务间在各地地理分区都处于协同关系,产水量与生境质量服务、产水量与碳储存服务间在各个地理分区都处于权衡关系。其中产水量与碳储存服务权衡关系最强的是黄土宽谷丘陵区,相关系数为-0.45。

表 2 1990—2020 年陕北黄土高原生态系统服务相关性
Table 2 Correlation of ecosystem services in Loess Plateau of northern Shaanxi from 1990 to 2020

生态系统服务	土壤保持量	碳储量	产水量	生境质量
土壤保持量 2020 年	1	0.533 **	0.098 **	0.441 **
土壤保持量 2015 年	1	0.549 **	-0.086 **	0.433 **
土壤保持量 2010 年	1	0.597 **	-0.001	0.402 **
土壤保持量 2005 年	1	0.697 **	0.444 **	0.363 **
土壤保持量 2000 年	1	0.679 **	0.388 **	0.326 **
土壤保持量 1995 年	1	0.492 **	-0.418 **	0.189 **
土壤保持量 1990 年	1	0.609 **	0.031	0.308 **
碳储量 2020 年	0.533 **	1	-0.138 **	0.554 **
碳储量 2015 年	0.549 **	1	-0.356 **	0.522 **
碳储量 2010 年	0.597 **	1	-0.225 **	0.517 **
碳储量 2005 年	0.697 **	1	0.166 **	0.499 **
碳储量 2000 年	0.679 **	1	0.155 **	0.475 **
碳储量 1995 年	0.492 **	1	-0.573 **	0.477 **
碳储量 1990 年	0.609 **	1	-0.130 **	0.484 **
产水量 2020 年	0.098 **	-0.138 **	1	-0.024
产水量 2015 年	-0.086 **	-0.356 **	1	-0.242 **
产水量 2010 年	-0.001	-0.225 **	1	-0.065 **
产水量 2005 年	0.444 **	0.166 **	1	0.006
产水量 2000 年	0.388 **	0.155 **	1	-0.029 **
产水量 1995 年	-0.418 **	-0.573 **	1	-0.290 **
产水量 1990 年	0.031	-0.130 **	1	0.079 **
生境质量 2020 年	0.441 **	0.554 **	-0.024	1
生境质量 2015 年	0.433 **	0.522 **	-0.242 **	1
生境质量 2010 年	0.402 **	0.517 **	-0.065 **	1
生境质量 2005 年	0.363 **	0.499 **	0.006	1
生境质量 2000 年	0.326 **	0.475 **	-0.029 **	1
生境质量 1995 年	0.189 **	0.477 **	-0.290 **	1
生境质量 1990 年	0.308 **	0.484 **	0.079 **	1

注:** 表示在置信度(双测)为 0.01 时,相关性显著。

2.3 生态系统服务权衡/协同的尺度效应

本文基于 python 来分析碳储量、产水量、土壤保持量和生境质量间的 Spearman 相关性时间变化,分别从栅格尺度、乡镇尺度和县域尺度来分析 1990—2020 年 4 类生态系统服务间的权衡与协同关系的时间变化(图 7)。研究结果显示随着研究尺度的增大,

各生态系统服务间的相关性逐渐增强而显著性逐渐降低。在所有协同关系中碳储量与土壤保持量间在乡镇尺度的协同性最强,2005 年的相关系数为 0.92。而 1995 年的碳储量与产水量在乡镇尺度的相关系数达到了-0.91,是陕北 4 种生态系统服务中权衡作用最明显的组合。

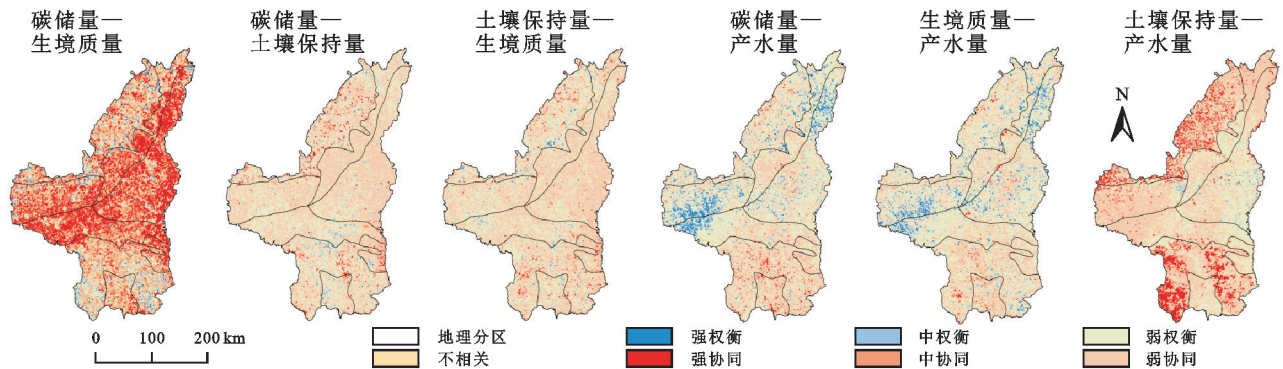


图 5 各项生态系统服务空间权衡与协同关系

Fig. 5 Spatial tradeoffs and synergies of various ecosystem services

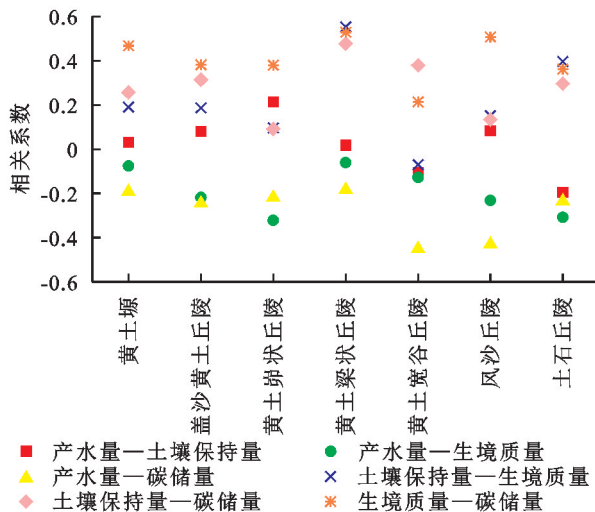


图 6 不同地理分区的生态系统服务作用关系情况

Fig. 6 Relationship of ecosystem services in different geographical regions

空间分布上来看,四项生态系统服务间的权衡/协同关系在栅格、乡镇和县域尺度呈现出一致的分布趋势,随着研究尺度的增大,权衡/协同特征更加明显(图 8)。其中,协同作用最强的是碳储量与生境质量,协同作用随着尺度的增大而增大(栅格尺度 76.36%,乡镇尺度 85.57%,县域尺度 96.00%)。值得注意的是,陕北西部的定边县在栅格尺度权衡作用不明显,而在县域尺度中呈现明显的强权衡作用。土壤保持量与碳储量、生境质量和产水量之间,在各个尺度均呈现出不同程度的协同作用。产水量与碳储量之间在栅格尺度以弱权衡作用为主,到乡镇尺度以强权衡作用突出,到了乡镇尺度以协同作用为主,强权衡/协同作用更加明显。产水量与生境质量之间在栅格、乡镇和县域尺度都是权衡作用。

3 讨论与结论

3.1 讨论

生态环境是自然环境和社会经济活动共同作用的结果^[19],量化其时空异质性有利于挖掘区域发展潜

力。在本研究中,近 30 年每种生态系统服务的空间分布具有一定的相似性,表明生态系统的结构和功能具有一定的差异性,与土地利用格局密切相关。土壤保持、碳储量和生境质量的高值区主要位于森林和果园集中的土石丘陵区、黄土梁和黄土峁,低值区主要位于平原区。因为林地是一种贡献较高的土地类型^[20],具有控制土壤侵蚀^[21]、增加固碳^[22]、保持生物多样性等生态效益。退耕还林工程增加了植树造林和果园、草地等植被,这些土地类型的根系发达,对土壤的吸附能力强。植树造林和种植新草地可以提高固碳、调节气候,削弱土壤冲刷,提高土壤保持能力^[23]。而土壤保持服务的提升,也会维持生物多样性的稳定,提高生境质量^[24]。伴随着耕地(一种生境威胁因子)减少和退耕还林工程中生态措施的实施,人类活动对生态系统的干扰减少,也有利于生境质量的增加。相比之下,产水量的高值区位于风沙丘陵区和研究区中部的城镇,建设用地、农田和未利用地相对集中的地区,地面硬化不透水面的增加有利于增加产水。

在特定的时间和空间尺度上,生态系统服务呈现出复杂的相互作用,在多种生态系统服务之间形成权衡/协同。本研究通过定量评估陕北黄土高原主要的生态系统服务,识别不同服务间的作用得出,生态系统服务之间以协同关系为主。其中,以碳储存、生境质量和土壤保持服务之间存在显著的正相关。并且三项生态系统服务的协同度在 2000 年之后呈现上升的趋势,表明退耕还林工程对陕北黄土高原的正向作用。权衡关系主要体现在产水量与碳储量和生境质量之间,主要原因在于植被盖度的增加使得需水量增加、土壤含水量减少并形成了土壤干层,尤其是在研究区北部和西部的干旱半干旱地区,权衡作用更加明显,这之前学者的研究相一致^[25-26]。此外在各个空间尺度中,作用关系也有所差异。陕北西部的定边县在碳储量与生境质量作用中,栅格和乡镇尺度属于协同关系而县域尺度属于权衡关系,说明作用关系的方

向由于像元的聚集发生变化。因此,在制定土地利用管理政策时,应考虑不同尺度间生态系统服务的权

衡/协同关系,这样才能目标明确,政策实施准确,实现高质量的生态发展。

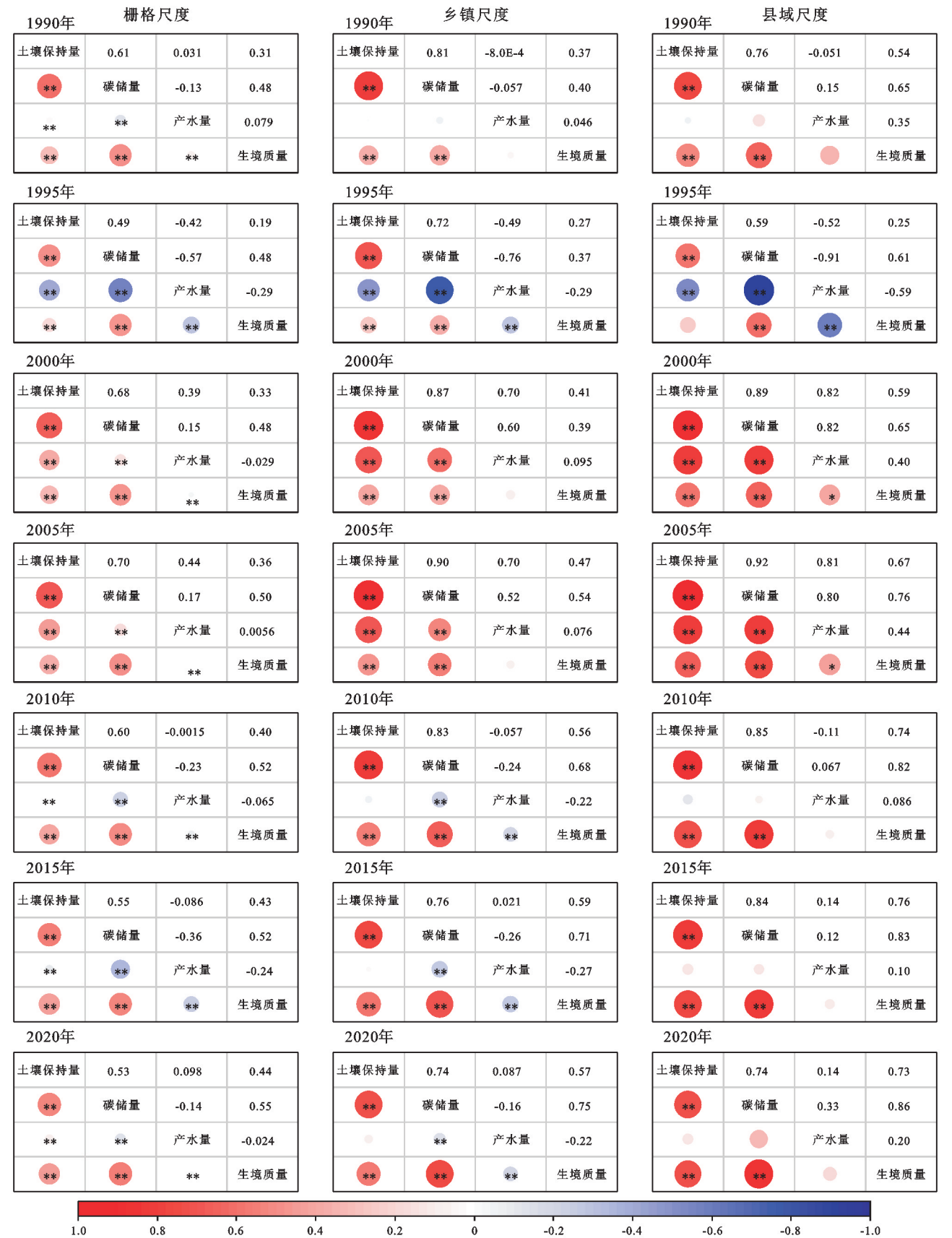


图 7 各尺度生态系统服务权衡/协同关系的时间变化

Fig. 7 Temporal changes of ecosystem service trade-offs/synergies at various scales

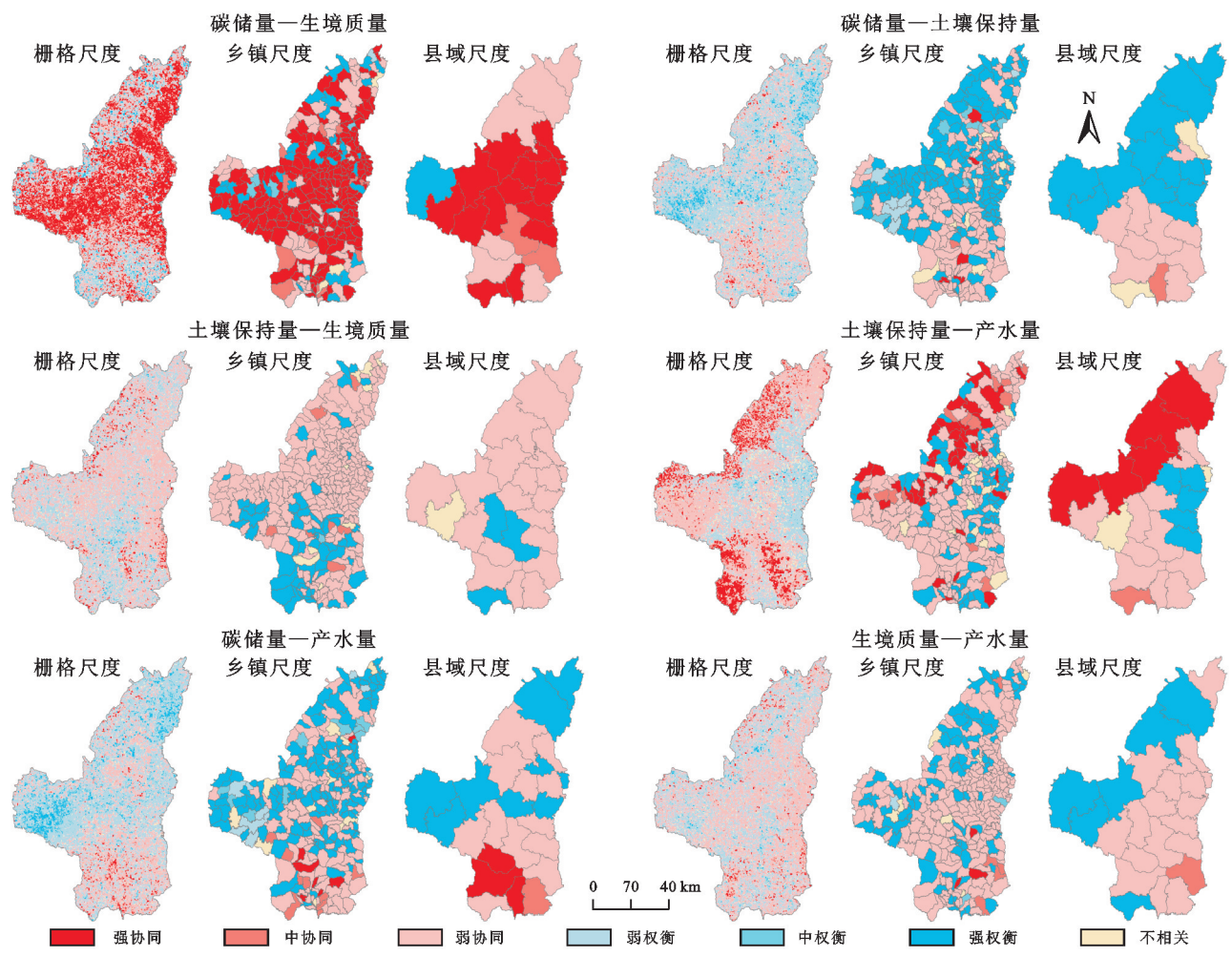


图 8 各尺度生态系统服务权衡/协同作用的空间特征

Fig. 8 Spatial characteristics of ecosystem service trade-offs/synergies at various scales

3.2 结 论

(1) 1990—2020 年陕北碳储量和生境质量处于不断增加的趋势,产水量和土壤保持量呈现先降低后增加总体增加的趋势,空间特征呈东南略低西北略高的分布。(2) 陕北黄土高原生态系统服务以协同为主,且在 1990—2020 年协同效应不断增强,证实了退耕还林工程的正向作用。权衡作用主要发生在产水量与其他生态系统服务之间,权衡作用的区域主要分布在研究区西部和东北部地区。

(3) 生态系统服务间的权衡/协同作用存在着空间尺度效应,随着空间尺度的增加,相关性逐渐增强而显著性有所下降,且作用关系的方向性会发生改变。

参考文献(References):

[1] Costanza R, de Groot R, Sutton P, et al. Changes in the global value of ecosystem services[J]. Global Environmental Change, 2014,26:152-158.

[2] Xie G D, Zhang C X, Zhen L, et al. Dynamic changes in the value of China's ecosystem services[J]. Ecosystem Services, 2017,26:146-154.

[3] Power A G. Ecosystem services and agriculture: tradeoffs and synergies[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2010,365(1554):2959-2971.

[4] Butler J R A, Wong G Y, Metcalfe D J, et al. An analysis of trade-offs between multiple ecosystem services and stakeholders linked to land use and water quality management in the Great Barrier Reef, Australia[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2013, 180: 176-191.

[5] Rodriguez J P, Beard T D Jr, Bennett E M, et al. Trade-offs across space, time, and ecosystem services [J]. Ecology and Society, 2006,11: art28.

[6] Li B Y, Wang W. Trade-offs and synergies in ecosystem services for the Yinchuan Basin in China[J]. Ecological Indicators, 2018,84:837-846.

[7] Feng Q, Zhao W W, Fu B J, et al. Ecosystem service trade-offs and their influencing factors: a case study in the Loess Plateau of China[J]. Science of the Total Environment, 2017,607-608:1250-1263.

[8] 韩晓佳,王继军,温昕.退耕区域生态系统服务作用关系尺度效应及分异机制:以安塞区为例[J].生态学报,

- 2024,44(5):1791-1807.
- Han X J, Wang J J, Wen X. The scale effect and differentiation mechanism of the relationship between ecosystem services in the grain for green area: a case study of Ansai District[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024,44(5):1791-1807.
- [9] 潘竞虎,李真.干旱内陆河流域生态系统服务空间权衡与协同作用分析[J].*农业工程学报*,2017,33(17):280-289.
- Pan J H, Li Z. Analysis on trade-offs and synergies of ecosystem services in arid inland river basin[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017,33(17):280-289.
- [10] 王蓓,赵军,胡秀芳.石羊河流域生态系统服务权衡与协同关系研究[J].*生态学报*,2018,38(21):7582-7595.
- Wang B, Zhao J, Hu X F. Analysis on trade-offs and synergistic relationships among multiple ecosystem services in the Shiyang River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018,38(21):7582-7595.
- [11] Dallimer M, Davies Z G, Diaz-Porrás D F, et al. Historical influences on the current provision of multiple ecosystem services[J]. *Global Environmental Change*, 2015,31:307-317.
- [12] Chen X, Yu L, Du Z R, et al. Distribution of ecological restoration projects associated with land use and land cover change in China and their ecological impacts[J]. *Science of the Total Environment*, 2022,825:153938.
- [13] Wang B X, Cheng W M. Effects of land use/cover on regional habitat quality under different geomorphic types based on InVEST model[J]. *Remote Sensing*, 2022,14(5):1279.
- [14] Maes J, Paracchini M L, Zulian G, et al. Synergies and trade-offs between ecosystem service supply, biodiversity, and habitat conservation status in Europe [J]. *Biological Conservation*, 2012,155:1-12.
- [15] Liu J G, Li S X, Ouyang Z Y, et al. Ecological and socioeconomic effects of China's policies for ecosystem services[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008,105(28):9477-9482.
- [16] Bryan B A, Gao L, Ye Y Q, et al. China's response to a national land-system sustainability emergency [J]. *Nature*, 2018,559(7713):193-204.
- [17] 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 Eco-Agriculture*, 2021,29(6):1018-1029.
- [18] 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.
- Yang J, Xie B P, Zhang D G. Spatio-temporal variation of water yield and its response to precipitation and land use change in the Yellow River Basin based on InVEST model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020,31(8):2731-2739.
- [19] Fu B J, Wei Y P. Editorial overview: keeping fit in the dynamics of coupled natural and human systems[J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2018,33: A1-A4.
- [20] Liu W, Zhan J Y, Zhao F, et al. Impacts of urbanization-induced land-use changes on ecosystem services: a case study of the Pearl River Delta Metropolitan Region, China[J]. *Ecological Indicators*, 2019,98:228-238.
- [21] Zhang B Q, He C S, Burnham M, et al. Evaluating the coupling effects of climate aridity and vegetation restoration on soil erosion over the Loess Plateau in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2016,539:436-449.
- [22] Tian L, Tao Y, Fu W X, et al. Dynamic simulation of land use/cover change and assessment of forest ecosystem carbon storage under climate change scenarios in Guangdong Province, China [J]. *Remote Sensing*, 2022,14(10):2330.
- [23] He J, Shi X Y, Fu Y J, et al. Spatiotemporal pattern of the trade-offs and synergies of ecosystem services after Grain for Green Program: a case study of the Loess Plateau, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2020,27(24):30020-30033.
- [24] 张琨,吕一河,傅伯杰.黄土高原典型区植被恢复及其对生态系统服务的影响[J].*生态与农村环境学报*, 2017,33(1):23-31.
- Zhang K, Lü Y H, Fu B J. Vegetation restoration and its influences on ecosystem services in areas typical of the Loess Plateau[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2017,33(1):23-31.
- [25] 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(11):5242-5247.
- [26] Wu X T, Wang S, Fu B J, et al. Socio-ecological changes on the Loess Plateau of China after grain to green program[J]. *Science of the Total Environment*, 2019,678:565-573.