

DOI: 10.5846/stxb202110102836

韩磊, 杨梅丽, 刘钊, 赵永华, 赵子林, 张永锋. 黄土高原典型退耕区生态系统服务权衡与协同关系研究——以延安市为例. 生态学报, 2022, 42(20): 8115-8125.

Han L, Yang M L, Liu Z, Zhao Y H, Zhao Z L, Zhang Y F. Ecosystem service tradeoffs and synergies in typical farmland conversion area of the Loess Plateau: Taking Yan'an City as an example. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(20): 8115-8125.

黄土高原典型退耕区生态系统服务权衡与协同关系研究

——以延安市为例

韩磊^{1,2,3,*}, 杨梅丽⁴, 刘钊^{1,2}, 赵永华^{1,2}, 赵子林⁴, 张永锋⁵

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

3 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710061

4 长安大学地球科学与资源学院, 西安 710054

5 陕西地建土地勘测规划设计院, 西安 710075

摘要:在退耕还林的背景下,从多尺度分析黄土高原生态系统服务的时空变化及权衡协同关系对促进该区经济发展和生态效益多赢具有重要意义。以黄土高原退耕还林典型区延安市为例,运用 InVEST 模型评估 1988—2018 年农作物生产、碳储量、生境质量、土壤保持、产水量 5 种关键生态系统服务物质量,采用偏相关分析法探讨生态系统服务间的权衡与协同关系及其时空变化特征。研究结果表明:(1)受土地利用变化影响,延安市农作物生产水平、土壤保持年际变化趋势波动较大,农作物生产水平呈波动增加的趋势,土壤保持退耕还林前呈减少,退耕还林后呈波动增加的趋势,碳储量和生境质量呈逐渐增加的趋势,产水量呈逐渐减弱的趋势。(2)生态系统服务与土地利用格局联系紧密。碳储量、生境质量的高值区域以及产水量的低值区域随林地分布格局变化而变化。(3)协同关系是延安市生态系统服务间相关关系的主体,主要发生在碳储量、生境质量、土壤保持、农作物生产之间,权衡关系主要存在于产水量和其他生态系统服务之间。(4)市、县域生态系统服务间关系的差异主要发生在生境质量和土壤保持之间。

关键词:生态系统服务;InVEST 模型;权衡与协同;土地利用;典型退耕区

Ecosystem service tradeoffs and synergies in typical farmland conversion area of the Loess Plateau: Taking Yan'an City as an example

HAN Lei^{1,2,3,*}, YANG Meili⁴, LIU Zhao^{1,2}, ZHAO Yonghua^{1,2}, ZHAO Zilin⁴, ZHANG Yongfeng⁵

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

2 Shaanxi Key Laboratory of Land Consolidation, Xi'an 710054, China

3 State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China

4 School of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China

5 Shaanxi Dijian Land Surveying Planning and Design Institute, Xi'an 710075, China

Abstract: The Conversion of Cropland to Forest Project (CCFP) can improve the ecological benefits, but also threaten food security. It is important to create a win-win situation in economic development and environmental protection. In the context

基金项目:国家自然科学基金项目(41871190);陕西省重点研发计划(2021SF-440);黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金(SKLLQG2002)

收稿日期:2021-10-10; **网络出版日期:**2022-06-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hanshuanglei@chd.edu.cn

of returning farmland into forest, in order to further promote ecological protection and sustainable development, it is essential to identify the trade-offs and synergies of multiple ecosystem services at different spatial scales. Under the influence of human activities and the natural environment, the relationship of ecosystem services changes over time and spatial scales. Studying the spatio-temporal dynamics of these relationships is of great significance for understanding the trends in ecosystem services, evaluating the effects of returning farmland into forest, and determining appropriate land use patterns and ecological restoration measures. However, it is still a challenge to fully understand the temporal and spatial dynamics of ecosystem service relationships in the Loess hilly and gully region before and after the CCFP, due to the research on different types of ecosystem services, as well as the information about the adaptable units of ecosystem service management is often insufficient. Therefore, the purpose of this study is to identify the relationship among ecosystem services at the municipal and county levels before and after the CCFP. Using physical methods, five key ecosystem services in Yan'an City, including crop production, carbon storage and sequestration, habitat quality, soil conservation, and water yield were quantitatively evaluated from 1988 to 2018 by InVEST model. The tradeoffs and synergies among five key ecosystem services, and their temporal and spatial variation characteristics, were analyzed through partial correlation analysis. The results showed that: (1) Affected by land use changes, the interannual trends of crop production and soil conservation in Yan'an fluctuated greatly; the crop production level showed a fluctuating upward trend; the soil conservation decreased before the CCFP, fluctuated and increased after the CCFP; the carbon storage and sequestration and habitat quality showed a gradually increasing trend; the water yield decreased gradually. (2) Ecosystem services were closely related to land use patterns. Areas with high carbon storage and sequestration, habitat quality, and areas with low water yield, varied with changes in woodland distribution patterns. (3) Within the research period in Yan'an city, the ecosystem services were dominated by synergistic relationships, which mainly occurred between carbon storage and sequestration, habitat quality, soil conservation, and crop production. While water yield with other ecosystem services showed a trade-off relationship. (4) The differences in ecosystem services between city and county mainly occurred in habitat quality and soil conservation.

Key Words: ecosystem services; InVEST model; tradeoffs and synergies; land use; typical farmland conversion area

随着“生态系统为人类提供‘服务’”理念^[1]的提出及千年生态系统评估项目(MA)^[2]、生物多样性和生态系统服务政府间科学政策平台^[3]的启动,生态系统服务已成为多领域的前沿问题^[4]。生态系统服务是生态系统所形成的用于维持人类赖以生存和发展的自然环境条件与效用^[5],关乎人类福祉^[6]。在一定尺度下,生态系统服务间非完全独立^[7],而是以多种复杂方式相互作用。此消彼长的权衡、相互增益的协同是其中的典型^[8-9]。正因为这种复杂的关系,为获得更大的某种服务而改变生态系统时,势必会影响其他服务^[10]。近50多年来,剧烈的土地利用变化影响生态系统格局,驱使生态系统服务及其关系的变化^[11]。因此,分析生态系统服务的时空动态及相互关系,探讨其尺度效应、区域差异和作用机制等^[12],是生态文明研究领域的紧迫问题,可为土地利用决策和区域生态系统服务和自然资本管理提供理论指南^[13]。目前,生态系统服务间的关系已成为生态系统研究的热点,国内外学者普遍借助 InVEST^[14]、SolVES^[15]和 ARIES^[16]等模型,采用空间分析法^[17]、统计分析法^[18]及情景模拟法^[19]等方法,主要从地区^[20]、流域^[21]、山区^[22]、生态功能区^[23]等不同空间尺度或者对耕地^[24]、森林^[25]、草地^[26]、湖泊^[27]等不同系统对生态系统服务权衡与协同关系的尺度效应^[22]、空间格局和驱动机制^[28]等方面进行研究。生态系统服务权衡与协同研究已取得丰富的成果。

黄土高原生态脆弱,是我国重要的生态屏障区,在《全国重要生态保护和修复重大工程总体规划(2021—2035年)》中是“三区四带”重大工程布局点之一。为改变恶劣的生态环境,该区实施严格的退耕还林工程。然而也有研究提出退耕还林威胁粮食安全^[29],影响水沙关系^[30],造成土壤干层加剧^[31-32]。退耕还林对生态系统服务及其相互关系的影响存在矛盾^[13]。因此,正确了解生态系统服务的特征及其关系对于评价退耕还林等生态修复工程的生态效益以及改善生态修复治理举措尤为重要。目前对于黄土高原的研究,在尺度上多集中在黄土高原^[33-34]、黄河流域^[26]等大中尺度,在县市的小尺度及多尺度研究较少,对于小区域的土地利用

方案优化针对性不够;类型上主要集中在生态系统服务价值量的评估及其相关关系研究^[35],对于物质质量的评估及其相关关系研究较少,而物质质量评估在区域、景观、空间异质性研究方面存在优势^[36];内容上主要集中在土壤保持、碳固持、水源涵养方面^[34-37],不能全面评估生态系统服务。鉴于此,在退耕还林等生态修复工程实施的大背景下,亟待全面系统开展基于土地利用的黄丘区多尺度生态系统服务权衡与协同关系研究。本文以延安市为研究对象,旨在(1)评估退耕还林前后农作物生产(Crop Production, CP)、碳储量(Carbon Storage, CS)、生境质量(Habitat Quality, HQ)、土壤保持(Soil Conservation, SC)、产水量(Water Yield, WY)五种生态系统服务物质质量,分析退耕还林对生态系统服务的影响;(2)阐明退耕还林前后生态系统服务时空动态;(3)分析用地类型与生态系统服务之间的关系;(4)揭示市、县不同尺度上生态系统服务间权衡和协同关系的时间演变规律和空间格局。本研究可为认识和掌握退耕还林对生产和生态的正负效应提供理论依据,为区域可持续发展和综合治理提供科学支撑。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

延安市(35°21'N—37°31'N, 107°41'E—110°31'E)属黄土丘陵沟壑区,地势西北高东南低,平均海拔1200m(图1)。属暖温带半湿润半干旱大陆性季风气候,年均降雨约500mm,集中在夏季,年均蒸发量较大。矿产资源丰富,主要有石油、天然气、煤炭,是国家重要的能源接续地,拥有坚实的能源化工产业的发展基础。自1999年实施大规模的退耕还林工程以来,累积完成退耕还林面积71.83万hm²,森林覆盖率增加19%,植被覆盖提高35.3%,生态效益显著,为探究土地利用变化对生态系统服务及其权衡和协同关系的演变过程和空间格局特征的影响提供了良好的平台。

1.2 数据来源及预处理

本文数据主要包括:①行政边界数据,源于国家基础信息中心(<http://www.ngcc.cn/ngcc/>)。②1988、1998、2008、2018年4期土地利用数据,经Landsat4-5 TM、Landsat8 OLI卫星遥感影像数据解译生成,分类精度均大于80%,kappa系数均在0.8以上。土地利用类型依据一级分类分为耕地、林地、草地、建设用地、水域、未利用地。③社会经济数据,源于《陕西省统计年鉴》、《延安市统计年鉴》等。④气象数据,延安市内及周围17个站点数据来源于国家气象信息中心(<http://data.cma.cn/>)的中国地面气候资料日值数据集(V3.0)。⑤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(HWSD)(<http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/>)。⑥DEM数据,为ASTER GDEM数据,源于地理空间数据云。

1.3 研究方法

1.3.1 农作物生产模型

参考InVEST模型中农作物生产模块的计算原理^[38],通过对延安统计年鉴中县级单元的各种农作物产量进行统计求和,用单位面积的农作物产量来估计CP,计算公式如下:

$$F_{(x)} = \frac{\sum_{i=1}^n CY_i}{S_{(x)}}$$

式中, $F_{(x)}$ 代表 x 县的农作物生产服务(t/hm²); CY_i 表示第 i 种农作物的产量(t); $S_{(x)}$ 表示第 x 县的作物播种面积(hm²); n 表示共有 n 种农作物。

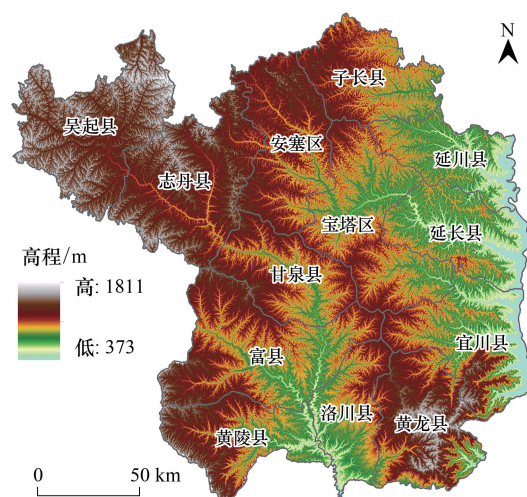


图1 延安市地形图

Fig.1 Topographic map of Yan'an City

1.3.2 碳储量模型

碳储量代表陆地生态系统的固碳能力,本研究采用 InVEST 模型进行估算,计算公式如下:

$$C_{\text{total}} = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{soil}} + C_{\text{dead}}$$

式中, C_{total} 表示碳总量(t); C_{above} 、 C_{below} 、 C_{soil} 、 C_{dead} 分别表示地上、地下、土壤和死亡生物碳储量。

1.3.3 生境质量模型

InVEST 生境质量模型根据生境类型敏感性和外界因素威胁计算生境质量指数,并根据生境质量指数评估生境质量。生境质量指数数值范围 0—1,越接近 1,生境质量越好。计算公式如下:

$$Q_{xj} = H_j \times \left[1 - \frac{D_{xj}^z}{(k^z + D_{xj}^z)} \right]$$

式中, Q_{xj} 为生境质量指数, H_j 、 D_{xj}^z 分别表示土地利用类型 j 的生境适宜度和生境退化度; k 为半饱和系数,本文取值 0.5, z 表示归一化常量,取值 2.5^[38]。

1.3.4 土壤保持量模型

本文采用修正通用土壤流失方程(RUSLE)来估算土壤保持量^[39],计算公式如下:

$$SC = R \times K \times LS \times (1 - C \times P)$$

式中, SC 为土壤保持量($\text{t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$), R 为降雨侵蚀力($\text{MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$); K 为土壤可蚀性($\text{t hm}^2 \text{ h hm}^{-2} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$); C 为植被覆盖因子, P 是水土保持措施因子; R 、 K 因子计算方法参考文献^[26]; C 、 P 因子参考文献^[26,40]。以上因子详细计算公式参考文献^[40]。 LS 为坡长坡度因子,由 InVEST 模型自动计算。流域通过 SWAT 模型提取。

1.3.5 产水量模型

InVEST 产水量评估模块是评估产水量的常用模型,基于 Budyko 水热耦合平衡假设,考虑了多种自然因素(包括气候、地形、植被、土壤等),确定每个栅格单元 x 的年产水量^[14]。水量估值等于降水量与蒸散量的差值,因此在降水量一定的情况下,蒸散量越大,产水量越低。计算公式如下:

$$Y(x) = \left(1 - \frac{\text{AET}(x)}{P(x)} \right) \times P(x)$$

式中, $Y(x)$ 为栅格单元 x 的年产水量(mm), $P(x)$ 表示栅格单元 x 的年降水量(mm), $\text{AET}(x)$ 表示栅格单元 x 的年实际蒸散量。

1.3.6 生态系统服务权衡与协同关系分析

本研究采用偏相关性分析法,探讨 5 种生态系统服务之间的权衡与协同关系。为保证运算中 5 种生态系统服务的一致性,将其统一到县级进行分析。生态系统服务之间不仅受彼此的相互影响,也受其他自然条件影响,尤其是年降水量^[41]。因此首先消除年降水量的影响,然后计算偏相关系数。具体计算公式如下^[42]:

(1) 简单相关系数:

$$r_{12(ij)} = \frac{\sum_{n=1}^n (ES1_{n \cdot (ij)} - \overline{ES1_{(ij)}})(ES2_{n \cdot (ij)} - \overline{ES2_{(ij)}})}{\sqrt{\sum_{n=1}^n (ES1_{n \cdot (ij)} - \overline{ES1_{(ij)}})^2 \sum_{n=1}^n (ES2_{n \cdot (ij)} - \overline{ES2_{(ij)}})^2}}$$

(2) 一级偏相关系数:

$$r_{12 \cdot 3(ij)} = \frac{r_{12(ij)} - r_{13(ij)}r_{23(ij)}}{\sqrt{(1 - r_{13(ij)}^2)(1 - r_{23(ij)}^2)}}$$

式中, $ES1$ 、 $ES2$ 分别代表两种生态系统服务; r 为两种生态系统服务之间的相关系数; i 、 j 代表像元的行列号; $r_{12(ij)}$ 代表未消除降水量的影响时, $ES1$ 、 $ES2$ 的相关系数; $r_{12 \cdot 3(ij)}$ 代表年降水量不变时, $ES1$ 、 $ES2$ 间的偏相关系数。在计算偏相关系数的基础上,结合 t 检验方法判断相关性的显著性,并根据偏相关系数(r)及其显著性

(P),划分显著性等级^[42](表1),定量描述生态系统服务之间相关关系的空间差异。

表1 权衡与协同关系显著性分类等级

Table 1 The significance classification level of tradeoffs and synergies

相关性等级 Relevance level	r 值 Partial correlation coefficient	P	相关性等级 Relevance level	r 值 Partial correlation coefficient	P
强协同 Very significant synergism	$r > 0$	$P < 0.05$	中权衡 Significant trade-off	$r < 0$	$0.05 < P < 0.1$
中协同 Significant synergism	$r > 0$	$0.05 < P < 0.1$	弱权衡 Low trade-off	$r < 0$	$0.1 < P$
弱协同 Low synergism	$r > 0$	$0.1 < P$	无相关性 No correlation	$r = 0$	
强权衡 Very significant trade-off	$r < 0$	$P < 0.05$			

r : 偏相关系数 Partial correlation coefficient; P : 一种概率,表示对原假设的支持程度 Probability

2 结果分析

2.1 生态系统服务时空分布格局分析

2.1.1 生态系统服务时间变化

1988—2018 年,延安市 5 种生态系统服务的变化趋势存在差异(图 2)。 CP 低值($0-3\text{t}/\text{hm}^2$)的面积占比在 1988—1998 年间减少,退耕还林后于 1998—2008 年间先增加,2008—2018 年又大幅下降,总体波动降低了 46.34%;中($3.0-6.0\text{t}/\text{hm}^2$)、高值范围($6.0-9.0\text{t}/\text{hm}^2$)的面积占比变化趋势则与低值相反,呈波动增加趋势,分别增加 26.12%和 20.31%;1988—2018 年整体呈波动增加趋势。 CS 低值($0-3.88\text{t}$)变化不明显,中值($3.88-7.76\text{t}$)逐渐降低,而高值($7.76-11.64$)则呈明显增加的趋势。 HQ 低值($0.00-0.25$)面积占比在降低,总体降低 41.05%,中($0.25-0.55$)、高值($0.55-0.85$)面积占比提高,存在一定的波动,但不明显。 SC 低值($0-400\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$)面积占比在退耕还林前十年呈增加趋势,在退耕还林后第一个十年增加,第二个十年减少,呈波动减少;中($400-1500\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$)、高值($1500-14000\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$)则与低值变化趋势刚好相反,在退耕还林后波动增加。 WY 低值($0-25\text{mm}$)面积占比呈一直上升的趋势,中($25-75\text{mm}$)、高值范围($75-395\text{mm}$)占比均呈逐渐降低的趋势,总体上 WY 降低趋势稳定。

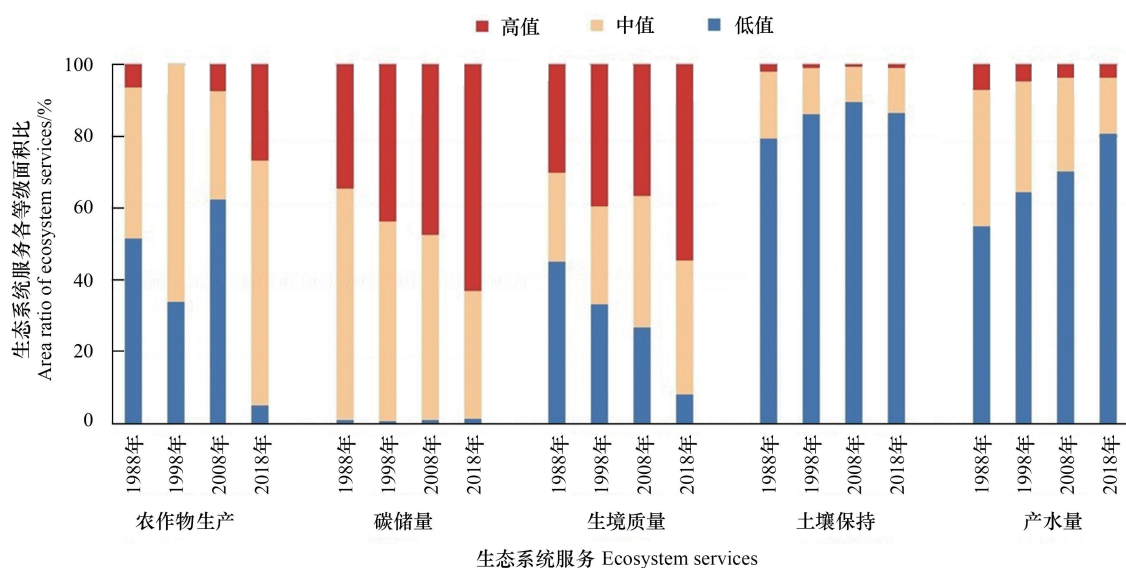


图2 1988—2018 延安市生态系统服务各等级面积比值/%

Fig.2 Area ratio of ecosystem services in Yan 'an city from 1988 to 2018

2.1.2 生态系统服务空间变化

1988—2018 年,延安市 5 种生态系统服务空间分布格局如图 3 所示。 CP 的空间格局为南高北低,西高东低。高值主要分布在南部县区。低值主要分布在北部及中东部县区。1988—2018 年 $0-3\text{t}/\text{hm}^2$ 的区域减少,变化区域主要分布在北部,而大于 $4.5\text{t}/\text{hm}^2$ 的区域明显增加,增加区域分布在南部。 CS 和 HQ 的空间分布规律相似,呈南高北低,东南、西南两边的林地是高值的集中区,并且高值区域不断向北部扩大规模。 SC 空间分布格局整体呈现中南部低两边高的特征,低值($0-400\text{t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)大致分布在河流及河谷周围,大于 $1500\text{t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的范围先减少,后增加。 WY 空间分布格局呈现为南中部为高值区($75-395\text{mm}$),北部及中东部为中值区($25-75\text{mm}$),东南部及西南部为低值区($0-25\text{mm}$);高值主要分布在水域、部分耕地、建设用地,中值主要分布在草地,低值分布在林地。用地类型不同,其降雨侵蚀力、冠层截留及径流阻拦的作用不同,蒸散量也

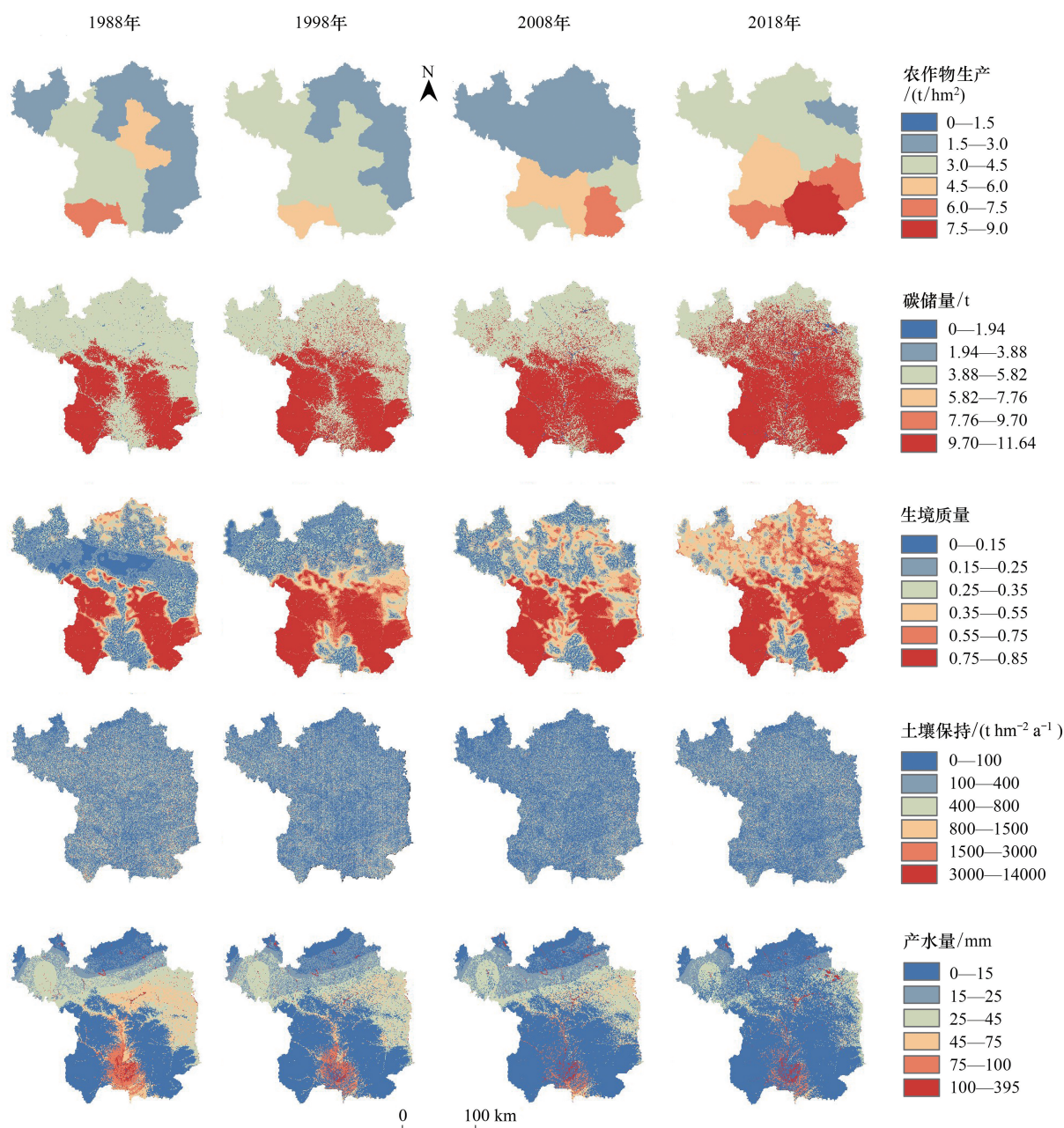


图3 延安市不同时期生态系统服务空间分布

Fig.3 Spatial distribution of ecosystem services in different periods in Yan'an city

不同,进而影响 WY,林地大多具有多层垂直结构,因而能够有效阻挡雨滴击溅和拦截地表径流,因此林地 WY 最小。

2.2 不同用地类型生态系统服务动态变化

同一种用地类型,不同生态系统服务物质质量的分布存在明显差异。同一种生态系统服务,在不同用地类型上也具有不同的特点。本文利用 4 期土地利用数据对 CS、HQ、SC、WY 进行分区统计。得到各用地类型上每种生态系统服务的均值。对数据标准化,消除量纲的影响,并通过玫瑰图表示不同用地类型上 4 种生态系统服务的多年变化情况(图 4)。

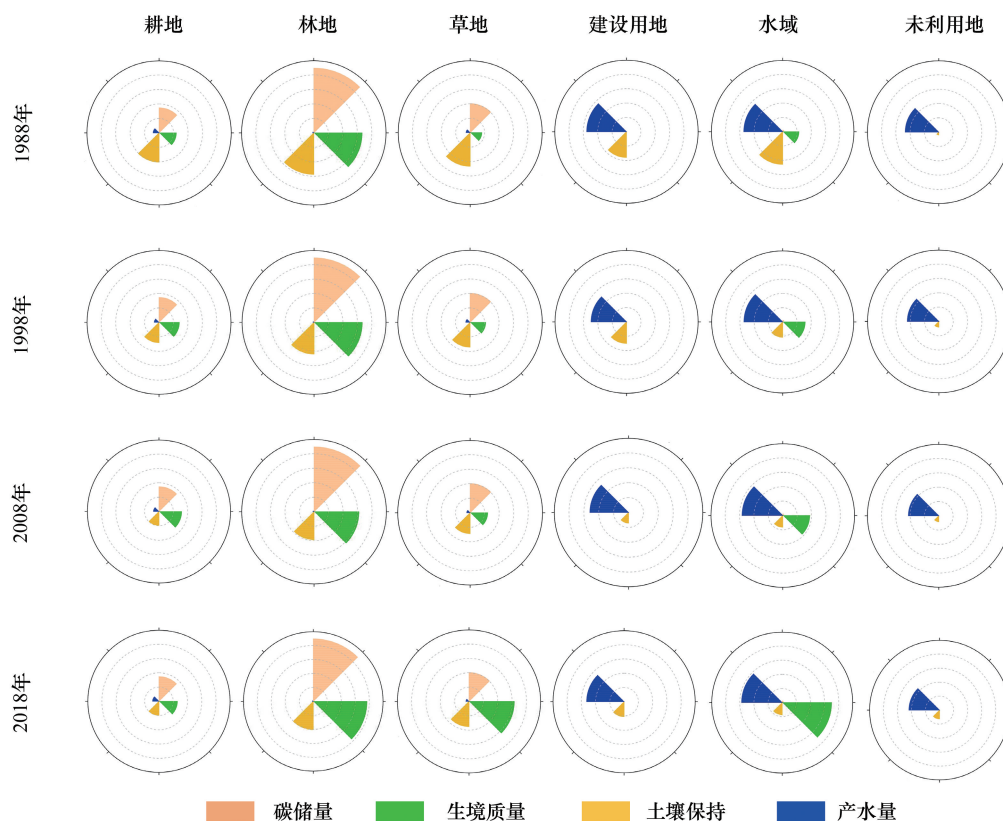


图 4 延安市不同地类生态系统服务玫瑰图

Fig.4 Rose map of ecosystem services in different land use types in Yan'an city

在耕、草地中,CS、HQ 是主要的生态系统服务,HQ 次之,最后是 WY。林地中,CS 及 HQ 最突出,然后为 SC,WY 最后。建设用地和未利用地中,WY 最突出,SC 次之,无 CS 和 HQ。水域中,WY 最突出,HQ 次之,SC 和 CS 最少。

1988—2018 年各用地类型生态系统服务均值变化规律存在一定差别,耕地的 CS 基本保持稳定,HQ 和 WY 波动增长,SC 呈减少趋势。林地中 CS 基本保持稳定,HQ 呈增长趋势,SC 和 WY 呈波动减少的趋势。草地上 CS 基本保持稳定,HQ 呈逐渐增长趋势,SC 和 WY 呈波动减少的趋势。建设用地上,SC 呈减少趋势,WY 呈增加趋势。水域中,HQ 逐渐增强,SC 呈明显减少趋势,WY 呈不断增加趋势。未利用地中,SC 呈增加趋势,WY 呈下降趋势。

不同用地类型中在各生态系统服务贡献大小不同,CS 表现为:林地>草地>耕地>水体>建设用地>未利用地;HQ 呈现为:林地>水体>草地>耕地>建设用地>未利用地;SC 表现为:林地>草地>耕地>建设用地>水体>未利用地;WY 表现为:水体>建设用地>未利用地>耕地>草地>林地。这表明林地在生态系统服务的发展中最关键。

2.3 生态系统服务间的权衡和协同关系分析

2.3.1 生态系统服务间权衡和协同关系的时间变化分析

对 1988—2018 年五种生态系统服务进行偏相关性分析,得到生态系统服务间相关关系表(表 2)。CP 和 CS、HQ 间 $r>0$ ($P<0.05$) 呈显著的协同关系,且 r 值逐渐上升,协同关系密切。CP 和 SC、WY 间 $|r|<0.2$,相关性在协同和强权衡之间波动,总体上呈不密切的权衡关系。CS 和 HQ 间 $r>0.5$ 且变化幅度较小,呈显著、非常密切且稳定的协同关系,CS 和 SC 多年间 r 值均小于 0.11,呈显著但不密切的协同关系,存在波动但幅度很小,说明 CS 和 SC 协同关系较为稳定。1988—2018 年,CS 和 WY 间 r 值均分布在 -0.6 附近,呈显著、非常密切且较稳定的权衡关系;HQ 与 SC 间由弱权衡向弱协同转变,且 r 接近于 0,表明两者之间的相关关系不稳定且不密切。HQ 与 WY 间 r 值分布在 0.4 附近,呈显著且密切的权衡关系。1988—2018 年,SC 与 WY 间 r 值均分布在 -0.1 附近,表明 SC 和 WY 间保持着稳定的但不密切的权衡关系。

表 2 延安市生态系统服务间相关关系
Table 2 Correlation between ecosystem services in Yan'an city

生态系统服务 Ecosystem services	农作物生产 Crop Production (CP)				碳储量 Carbon Storage (CS)			
年份 Years	1988	1998	2008	2018	1988	1998	2008	2018
农作物生产 Crop Production (CP)	1	1	1	1				
碳储量 Carbon Storage (CS)	0.100 **	0.191 **	0.388 **	0.379 **	1	1	1	1
生境质量 Habitat Quality (HQ)	0.060 **	0.167 **	0.389 **	0.270 **	0.746 **	0.689 **	0.573 **	0.542 **
土壤保持 Soil Conservation (SC)	-0.026 **	-0.023 *	0.058 **	-0.043 **	0.064 **	0.094 **	0.106 **	0.099 **
产水量 Water Yield (WY)	0.005 *	-0.046 **	-0.113 **	0.005	-0.686 **	-0.652 **	-0.600 **	-0.545 **

生态系统服务 Ecosystem services	生境质量 Habitat Quality (HQ)				土壤保持 Soil Conservation (SC)				产水量 Water Yield (WY)			
年份 Years	1988	1998	2008	2018	1988	1998	2008	2018	1988	1998	2008	2018
农作物生产 Crop Production (CP)												
碳储量 Carbon Storage (CS)												
生境质量 Habitat Quality (HQ)	1	1	1	1								
土壤保持 Soil Conservation (SC)	0.008	-0.016	0.016	0.019	1	1	1	1				
产水量 Water Yield (WY)	-0.468 **	-0.295 **	-0.318 **	-0.344 **	-0.061 **	-0.116 **	-0.102 **	-0.107 **	1	1	1	1

* 在 0.1 水平(双侧)上显著相关; ** 在 0.05 水平(双侧)上显著相关

2.3.2 生态系统服务间权衡和协同关系的空间变化分析

延安市生态系统服务间相关关系的主体是协同关系(图 5)。CP 和 CS 间仅在东南部(黄龙、洛川县)表现为弱权衡关系,其余地区均为协同关系。CP 和 HQ 协同关系分布广泛,呈北部协同,南部权衡的分布格局。CP 与 SC 大部分区域为弱协同关系,仅北部子长县,西北吴起县及东南黄龙、洛川县为弱权衡关系。CP 和 WY 在中北部均为权衡关系,仅南部小部分区域为协同关系。CS 和 HQ 大部分区域为协同关系,主要分布在中北部及东南部的黄龙县。CS 和 SC 间仅在北部的子长县和西北的吴起县为权衡关系。CS、HQ、SC 三者和 WY 之间几乎全域表现为权衡关系,仅在一两个区县表现为协同关系。HQ 和 SC 间呈东部协同,西部权衡的分布格局,其中协同关系分布在东南部的黄龙县,东北部的安塞区、宝塔区、延长县和延川县。其他区县则为权衡关系。

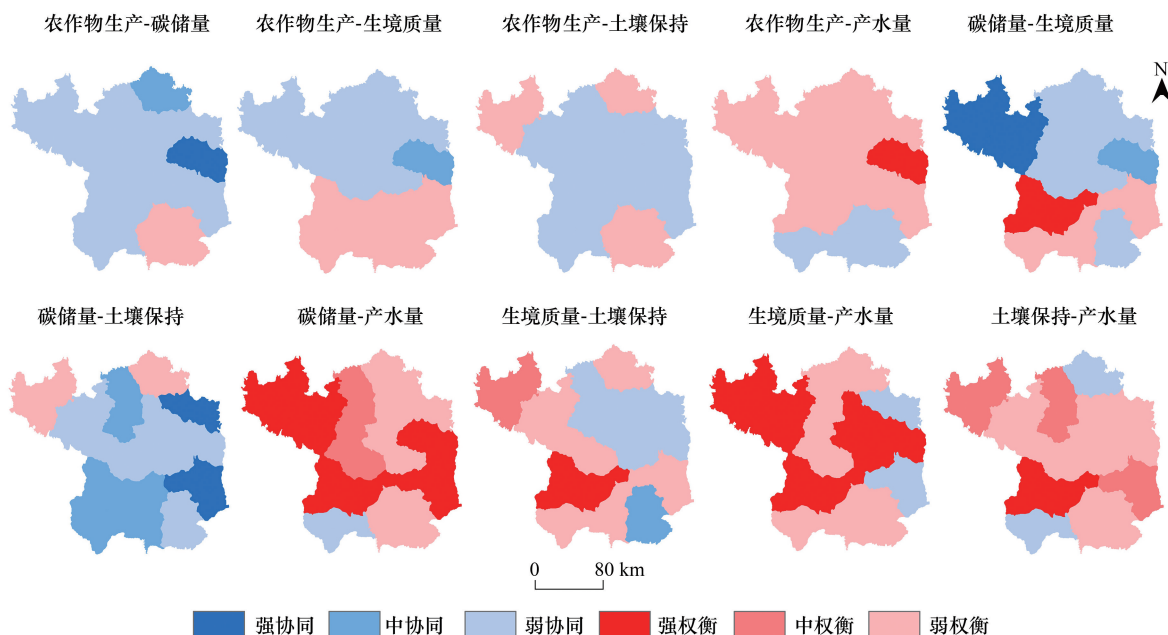


图 5 生态系统服务的权衡与协同

Fig.5 Tradeoffs and synergies of ecosystem services

3 讨论与结论

3.1 讨论

本研究区, CP 和 CS , HQ 之间存在协同关系, 此结果与王修文^[43]分析基本一致, 表明通过提高农业生产水平, 增加农作物单产可以填补退耕还林所引起的耕地及粮食减少问题。与杨强强^[21]在分析青弋江流域食物生产与其他服务之间为权衡关系存在差异, 究其原因, 可能是研究尺度或者粮食生产政策和技术不同。因此退耕还林的实施配合高效适宜的农业生产措施有利于促进粮食安全和生态环境的和谐发展。 CS 和 HQ , SC 之间呈协同关系, 在林地分布区, 植被覆盖度、生物多样性较高, 截流雨水和保护坡地作用、土壤保持功能增强。杨洁^[26]在对黄河流域的研究中有一致的结论。然而 Egoh^[44]在南非的研究表明 CS 和 SC 间为权衡关系, 可能是不同地区环境差异导致。 WY 与其他生态系统服务之间存在权衡关系, 这是由于林地增加, 需水量增大以及截留降水增强, 产水量降低。但在不同地区 WY 与 SC 之间的关系不同, 如张文静等^[18]对南四湖的分析表明二者存在协同关系, 汪晓珍^[34]在黄土高原区得出二者之间在干旱气候区和高原气候区为协同关系, 在半干旱气候区和半湿润气候区为权衡关系, 刘华妍等^[45]对北京市的研究结果发现二者为权衡关系。其原因可能是气候、土壤以及人为影响程度等存在差异。市、县域尺度上, 生态系统服务间关系的差异主要表现在 HQ 和 SC 之间。市域尺度上二者表现为协同关系, 而县域尺度上二者则主要为权衡关系。可能是尺度越小, 区域内的地形、气候、土壤的差异会细化和凸显, 由此导致不同尺度生态系统服务关系的差异。余玉洋^[22]基于多尺度的秦巴山区分析得出大尺度上二者呈协同关系, 部分分区及小尺度样区呈权衡关系, 且尺度越大, 协同关系越强, 与本研究结果基本一致。

虽然退耕还林会带来一定的负面影响, 但从长远角度看, 尤其是在科技迅猛发展的背景下, 退耕还林有利于促进生态文明发展以及增加人类福祉。退耕还林的实施使得延安市生态环境好转, 但水土流失、植被退化、水资源不足仍然是该地区主要生态问题。建议延安北部低植被覆盖区, 以生态建设为重点, 在符合当地土壤、气候和水分等条件下, 优化用地布局, 增加植被, 控制水土流失; 延安南部应保持好生态基础条件, 巩固退耕还林成果, 重点调整林分结构, 保持生态稳定。

本研究存在一定的不足。如农作物播种面积难以收集到县级以下数据,难以体现更小区域空间分布差异。气象站点数量少且分布不均匀,导致降水量、蒸散发插值结果精度不高,影响产水量、土壤保持结果精度,因此更均匀密集的气象数据是数据精度提高的保证。此外,本文研究四期生态系统服务间的协同与权衡关系,对连续时序下生态系统服务关系的动态变化及驱动机制研究不足。下一步有必要探讨连续时序下生态系统服务关系的动态变化,深入探究生态系统权衡协同关系转变的原因,加强内在机理和驱动机制研究,为促进资源、人口、经济、生态环境间的多赢、优化生态系统服务及区域协调发展提出更加灵活的土地管理战略和生态修复措施。

3.2 结论

(1)退耕还林前后生态系统服务价值存在差异。*SC* 在退耕还林前呈减少的趋势,退耕还林后呈波动增加趋势。退耕还林后 *CP* 波动增加,*CS* 和 *HQ* 逐渐增加,*WY* 逐渐减弱。

(2)生态系统服务高、低值区与土地利用格局具有密切联系。研究区南部林地分布广泛,植被多,生物多样性高,是 *CS*、*HQ* 的高值区。建设用地、未利用地及水域植被覆盖小,径流截流弱,下渗量少,是产水量的高值区,林地则为低值区。

(3)林地是研究区生态系统服务发展中最关键的用地类型。其对于 *CS*、*HQ*、*SC* 的增加以及 *WY* 的减少的贡献最大。

(4)生态系统服务之间的权衡协同关系除 *CP* 与 *SC*、*WY* 间随时间变化波动较大,其他服务间关系较稳定。市级尺度上 *CP* 与 *CS*、*HQ* 之间以及 *HQ* 和 *SC* 之间为弱协同关系;*CS* 和 *HQ*、*SC* 之间呈较为明显的协同关系;*WY* 和 *CP*、*SC* 间为弱权衡关系,*WY* 与 *CS*、*HQ* 呈明显的权衡关系。从县级尺度上,各区县的生态系统服务间的关系存在明显差异。*WY* 和其他生态系统服务间在大部分区县中呈权衡关系,而其他四种服务之间均在大部分区县中呈协同关系。

参考文献 (References):

- [1] Dasgupta P. Economic value of biodiversity, overview. *Encyclopedia of Biodiversity*. Amsterdam: Elsevier, 2001: 291-304.
- [2] Assessment M E. *Ecosystems and Human Well-Being: Our Human Planet: Summary for Decision Makers*. 2005.
- [3] Larigauderie A, Mooney H A. The Intergovernmental science-policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services: moving a step closer to an IPCC-like mechanism for biodiversity. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2010, 2(1/2): 9-14.
- [4] 傅伯杰, 周国逸, 白永飞, 宋长春, 刘纪远, 张惠远, 吕一河, 郑华, 谢高地. 中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全. *地球科学进展*, 2009, 24(6): 571-576.
- [5] Daily G. Nature's services: societal dependence on natural ecosystems. *The Bryologist*, 1998, 101: 475.
- [6] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Ecological Economics*, 1998, 25(1): 3-15.
- [7] Nelson E, Polasky S, Lewis D J, Plantinga A J, Lonsdorf E, White D, Bael D, Lawler J J. Efficiency of incentives to jointly increase carbon sequestration and species conservation on a landscape. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(28): 9471-9476.
- [8] 李双成, 张才玉, 刘金龙, 朱文博, 马程, 王珏. 生态系统服务权衡与协同研究进展及地理学研究议题. *地理研究*, 2013, 32(8): 1379-1390.
- [9] 黄麟, 祝萍, 曹巍. 中国退耕还林还草对生态系统服务权衡与协同的影响. *生态学报*, 2021, 41(3): 1178-1188.
- [10] Foley J A, Defries R, Asner G P, Barford C, Bonan G, Carpenter S R, Chapin F S, Coe M T, Daily G C, Gibbs H K, Helkowski J H, Holloway T, Howard E A, Kucharik C J, Monfreda C, Patz J A, Prentice I C, Ramankutty N, Snyder P K. Global consequences of land use. *Science*, 2005, 309(5734): 570-574.
- [11] Hu J, Lü Y, Fu B J, Comber A J, Harris P. Quantifying the effect of ecological restoration on runoff and sediment yields. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2017, 41(6): 753-774.
- [12] 彭建, 胡晓旭, 赵明月, 刘焱序, 田璐. 生态系统服务权衡研究进展: 从认知到决策. *地理学报*, 2017, 72(6): 960-973.
- [13] Yang S Q, Zhao W W, Liu Y X, Wang S, Wang J, Zhai R J. Influence of land use change on the ecosystem service trade-offs in the ecological restoration area: dynamics and scenarios in the Yanhe watershed, China. *Science of the Total Environment*, 2018, 644: 556-566.
- [14] 潘韬, 吴绍洪, 戴尔阜, 刘玉洁. 基于 InVEST 模型的三江源区生态系统水源供给服务时空变化. *应用生态学报*, 2013, 24(1): 183-189.

- [15] Sherrouse B C, Clement J M, Semmens D J. A GIS application for assessing, mapping, and quantifying the social values of ecosystem services. *Applied Geography*, 2011, 31(2): 748-760.
- [16] Villa F, Bagstad K, Johnson G, Krivov S, Ceroni M. ARIES (ARtificial Intelligence for Ecosystem Services): a new tool for ecosystem services assessment, planning, and valuation. In: *Proceedings of the 11th International BioECON Conference on Economic Instruments to Enhance the Conservation and Sustainable Use of Biodiversity*, Venice, Italy, 2009.
- [17] 李晶, 李红艳, 张良. 关中-天水经济区生态系统服务权衡与协同关系. *生态学报*, 2016, 36(10): 3053-3062.
- [18] 张文静, 孙小银, 周俊. 南四湖流域关键生态系统服务的时空权衡关系. *生态学报*, 2021, 41(20): 8003-8015.
- [19] 林媚珍, 刘汉仪, 周汝波, 龚建周. 多情景模拟下粤港澳大湾区生态系统服务评估与权衡研究. *地理研究*, 2021, 40(9): 2657-2669.
- [20] 林子雁, 肖赓, 饶恩明, 史雪威, 张平. 中国西南地区不同类型生态系统服务的关系. *应用生态学报*, 2020, 31(3): 978-986.
- [21] 杨强强, 徐光来, 李爱娟, 刘永婷, 胡春生. 青弋江流域生态系统服务评估与权衡研究. *生态学报*, 2021, 41(23): 9315-9327.
- [22] 余玉洋, 李晶, 周自翔, 马新萍, 张城. 基于多尺度秦巴山区生态系统服务权衡协同关系的表达. *生态学报*, 2020, 40(16): 5465-5477.
- [23] 王晓峰, 马雪, 冯晓明, 周潮伟, 傅伯杰. 重点脆弱生态区生态系统服务权衡与协同关系时空特征. *生态学报*, 2019, 39(20): 7344-7355.
- [24] 田榆寒. 耕地生态系统服务协同与权衡关系及管理策略——以慈溪市为例[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [25] 张静静, 朱文博, 朱连奇, 李艳红. 伏牛山地区森林生态系统服务权衡/协同效应多尺度分析. *地理学报*, 2020, 75(5): 975-988.
- [26] 杨洁. 黄河流域草地生态系统服务功能及其权衡协同关系研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2021.
- [27] 董旭辉, 徐敏, 林媚珍, 李燕, 羊向东. 沉积记录揭示的湖泊长期生态系统服务权衡/协同机制: 进展、案例剖析与展望. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(1): 28-37.
- [28] 李理, 赵芳, 朱连奇, 何莎莎, 叶露培. 淇河流域生态系统服务权衡及空间分异机制的地理探测. *生态学报*, 2021, 41(19): 7568-7578.
- [29] Geng Q L, Ren Q F, Yan H M, Li L H, Zhao X N, Mu X M, Wu P T, Yu Q. Target areas for harmonizing the grain for green programme in China's loess plateau. *Land Degradation & Development*, 2020, 31(3): 325-333.
- [30] 蔺鹏飞, 张晓萍, 刘二佳, 张亭亭, 张建军. 黄土高原典型流域水沙关系对退耕还林(草)的响应. *水土保持学报*, 2015, 29(1): 1-6.
- [31] Wang Y Q, Shao M A, Zhu Y J, Liu Z P. Impacts of land use and plant characteristics on dried soil layers in different climatic regions on the Loess Plateau of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(4): 437-448.
- [32] 王云强. 黄土高原地区土壤干层的空间分布与影响因素[D]. 北京: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2010.
- [33] Liu Y X, Lü Y, Fu B J, Harris P, Wu L H. Quantifying the spatio-temporal drivers of planned vegetation restoration on ecosystem services at a regional scale. *Science of the Total Environment*, 2019, 650: 1029-1040.
- [34] 汪晓珍, 吴建召, 吴普侠, 上官周平, 邓蕾. 2000—2015年黄土高原生态系统水源涵养、土壤保持和NPP服务的时空分布与权衡/协同关系. *水土保持学报*, 2021, 35(4): 114-121, 128.
- [35] 孙艺杰, 任志远, 郝梦雅, 段艺芳. 黄土高原生态系统服务权衡与协同时空变化及影响因素——以延安市为例. *生态学报*, 2019, 39(10): 3443-3454.
- [36] Su C H, Fu B J. Evolution of ecosystem services in the Chinese Loess Plateau under climatic and land use changes. *Global and Planetary Change*, 2013, 101: 119-128.
- [37] 朱青, 周自翔, 刘婷, 白继洲. 黄土高原植被恢复与生态系统土壤保持服务价值增益研究——以延河流域为例. *生态学报*, 2021, 41(7): 2557-2570.
- [38] Sharp R, Douglass J, Wolny S, Arkema K, Bernhardt J, Bierbower W, Chaumont N, Denu D, Fisher D, Glowinski K, Griffin R, Guannel G, Guerri A, Johnson J, Hamel P, Kennedy C, Kim C K, Lacayo M, Lonsdorf E, Mandle L, Rogers L, Silver J, Toft J, Verutes G, Vogl A L, Wood S, Wyatt K. 2020, InVEST 3.9.1 User's Guide. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund.
- [39] Zhang L W, Fu B J, Lü Y H, Zeng Y. Balancing multiple ecosystem services in conservation priority setting. *Landscape Ecology*, 2015, 30(3): 535-546.
- [40] 秦伟, 朱清科, 张岩. 基于GIS和RUSLE的黄土高原小流域土壤侵蚀评估. *农业工程学报*, 2009, 25(8): 157-163, 4.
- [41] Li Y J, Zhang L W, Qiu J X, Yan J P, Wan L W, Wang P T, Hu N K, Cheng W, Fu B J. Spatially explicit quantification of the interactions among ecosystem services. *Landscape Ecology*, 2017, 32(6): 1181-1199.
- [42] 徐建华. 现代地理学中的数学方法. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [43] 王修文, 于书霞, 史志华, 王玲. 南方红壤区生态系统服务权衡与协同关系演变对退耕还林的响应. *生态学报*, 2021, 41(17): 7002-7014.
- [44] Egoh B, Reyers B, Rouget M, Bode M, Richardson D M. Spatial congruence between biodiversity and ecosystem services in South Africa. *Biological Conservation*, 2009, 142(3): 553-562.
- [45] 刘华妍, 肖文发, 李奇, 田宇, 张倩如, 朱建华. 北京市生态系统服务时空变化与权衡分析. *生态学杂志*, 2021, 40(1): 209-219.