DOI: 10.20103/j.stxb.202310042132

张建香,汪亚峰,张耀宗,刘艳艳,王东,李旭升,唐述林.延河流域生态系统服务权衡/协同关系阈值效应.生态学报,2024,44(23):10573-10581.
Zhang J X, Wang Y F, Zhang Y Z, Liu Y Y, Wang D, Li X S, Tang S L.Threshold effects of trade-offs and synergies among ecosystem services in the Yanhe Basin.Acta Ecologica Sinica,2024,44(23):10573-10581.

延河流域生态系统服务权衡/协同关系阈值效应

张建香[1,2,3,*],汪亚峰[2],张耀宗[1],刘艳艳[1],王 东[1],李旭升[1],唐述林[1]

1 陇东学院地理与城乡规划学院 庆阳市水土保持与荒漠化防治遥感技术创新中心,庆阳 745000

2 中国科学院青藏高原研究所,北京 100101

3 兰州大学资源环境学院,兰州 730000

摘要:生态系统服务权衡/协同关系的变化为生态系统管理带来很大的挑战。随着生态服务的提升,不同服务间的权衡或协同关系可能发生非线性变化,即存在阈值效应。基于 1990—2020 年的遥感数据、野外观测和实地调查数据,结合生态学和地统计学方法,模拟了固碳、产水、土壤保持和粮食生产等四种生态系统服务。基于相关性分析和空间统计学方法,对生态系统服务的时空权衡和协同作用进行了量化。最后,利用断点分析法提取了生态系统服务的阈值。结果表明:(1)固碳、产水、土壤保持和粮食生产四种生态系统服务均呈先减后增的变化趋势,总体上以增加为主;(2)生态系统服务之间的协同关系减弱,而权衡关系增强;(3)随着生态系统服务的增加,服务之间的权衡或协同关系多存在阈值效应。例如,产水量在 150 t/hm^{2}左右时,与固碳的协同关系转为权衡,而与粮食生产的权衡关系转为协同。将生态系统服务控制在一定的阈值范围内,有助于生态系统服务的协同发展,为可持续的生态系统管理提供参考。

关键词:生态系统服务;权衡与协同;阈值;延河流域

Threshold effects of trade-offs and synergies among ecosystem services in the Yanhe Basin

ZHANG Jianxiang[1,2,3,*], WANG Yafeng[2], ZHANG Yaozong[1], LIU Yanyan[1], WANG Dong[1], LI Xusheng[1], TANG Shulin[1]

1 *School of Geography and Planning, Qingyang Tech Innovation Center of Remote Sensing on Soil and Water Conservation and Desertification Control, Longdong University, Qingyang* 745000, *China*

2 *Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, *China*

3 *College of Earth and Environment Science, Lanzhou University, Lanzhou* 730000, *China*

Abstract: Trade-offs and synergistic relationships among ecosystem service pose a significant challenge to ecosystem service management. With the enhancement of ecosystem services, trade-offs or synergies between different ecosystem services may change nonlinearly, i.e., threshold effects. Herein, remove sensing data, field observation data and field survey data have been collected from 1990 to 2020. Four ecosystem services, such as carbon sequestration, water production, soil conservation and food production have been quantified based on the CASA (Carnegie-Ames-Stanford Approach), the InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs), the CSLE (China Soil Lose Equation) and the PD (Pixel decomposition) model, respectively. The spatial and temporal trade-offs and synergies of ecosystem services were quantified based on correlation analysis and spatial statistics methods. Finally, the thresholds of ecosystem services were

基金项目:国家自然科学基金项目(U2243204);甘肃省自然科学基金项目(23JRRM0757);甘肃省教育科技创新项目(2024A-108);陇东学院博士基金计划项目(XYBYZK2406)

收稿日期:2023-10-04; **网络出版日期**:2024-08-29

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhangjianxiang_67@163.com

extracted using breakpoint analysis. The results showed as follows: (1) All four ecosystem services, namely carbon sequestration, water production, soil conservation and food production, showed a trend of decreasing and then increasing, with an overall increase. In particular, the average annual carbon sequestration of the Yanhe basin is about 200—450 g C/m^2, and the increase in carbon sequestration is the largest compared with other ecosystem services. However, the increase of carbon sequestration service is not the result from expansion of vegetation coverage but the improvement of vegetation quality. (2) There are high synergistic relationships among carbon sequestration, water production and soil conservation in the Yanhe basin, and all three have trade-off relationships with food production. In general, the synergistic relationship is weakening and the trade-off relationship is increasing in the Yanhe basin. At the same time, there is a scale effect in this relationship, which gradually strengthens or weakens or even reverses as the scale increases. (3) Most relationships among ecosystem services existed threshold effects with the increase of ecosystem services. For example, at water yields around 150 t/hm^2, its synergistic relationship with carbon sequestration shifts to a trade-off, while its trade-off relationship with food production shifts to a synergistic one. When ecosystem services are small, fewer resources are needed to maintain such services, resulting in services that tend to exhibit synergistic relationships with each other. When ecosystem services increase further, the demand for various resources also gradually increases, leading to a weakening of synergistic relationships and even a shift from synergistic to trade-off relationships. Controlling ecosystem services within certain thresholds can help the synergistic development of ecosystem services and provide a reference for sustainable ecosystem management.

Key Words: ecosystem services; trade-offs and synergies; threshold; Yanhe basin

生态系统服务是连接自然生态与人类社会-经济系统的桥梁[1]。追求一种服务供应量最大化往往会导致另一种服务供应量的大幅下降,即生态系统服务的权衡[2—3]。相反,生态系统服务协同表示两种服务的供应量同时增加或减少[4]。生态系统服务之间的权衡与协同关系已成为相关领域关注的热点问题。近几十年来,对这些关系的研究经历了从静态非空间到动态空间研究的转变[5—6]。只有科学调整生态系统服务之间的权衡和协同关系,降低权衡概率,促进各种服务之间形成协同关系,才能在顺应自然的前提下,科学扭转全球生态系统服务功能下降的趋势[7]。阈值作为生态系统服务非线性变化的一个重要特征,可用于更好地评估生态系统发展的各个阶段,提高管理和决策行动的可预测性[8—9]。

未来地球项目的研究课题之一,是调查地球生命承载能力的极限和临界点,即阈值效应[10]。例如,水土流失防治在减小面积维度上应当达到的适宜程度,可视为水土保持工作的远期目标,即土壤保持服务的阈值。另外,植被覆盖对生态系统服务的影响存在阈值效应,当超过一定阈值时,植被覆盖度增加对生态系统服务的贡献会减少[8]。植被恢复工程能有效提升大多数的生态系统服务,进而增强生态系统服务之间的协同关系[11—12]。然而,这些工程可能会加剧用水冲突,从而增加生态系统服务之间的权衡[13]。因此,生态系统服务提升过程中,不同服务之间的权衡或协同关系可能存在阈值效应,但是,以往的研究很少将生态系统服务的关系作为因变量,主要基于线性回归模型,难以反映真实的非线性生态过程[14]。因此,本研究试图探索权衡或协同关系变化过程中生态系统服务的阈值问题。

延河流域长期遭受水土流失,是黄河流域生态保护与高质量发展的核心地区[15]。近半个世纪以来,流域先后实施了梯田、淤地坝和退耕还林等多种生态工程[16]。自然和人为干扰下,延河流域生态系统格局变化明显,成为探索生态系统服务时空权衡/协同关系及其阈值效应的理想区域[17]。本研究旨在量化 1990—2020 年固碳、产水、土壤保持和粮食生产等生态系统服务;阐明生态系统服务的权衡与协同关系在时间和空间上的变化特征;探讨这些关系随生态系统服务变化产生的阈值效应,以期为黄河流域可持续的生态系统管理提供参考。

1　研究区概况

延河流域地处黄河中游,总面积约 7845.11 km^2,位于 108°39′29″—110°28′40″ E,36°22′39″—37°19′12″ N 之间,地势相比高东南低,平均海拔 1212 m。流域年均温约 9 °C,年均降水量约 450 mm,多暴雨、沙尘、干旱和霜冻,自然灾害频发[18—19]。人均水资源仅为全国人均水资源占有量的 17%,水资源短缺问题十分突出,且河流含沙量高,是黄河泥沙的主要来源地之一[20]。流域天然植被稀少,土壤类型以黄绵土为主,受降雨和地形影响,极易遭受水土流失[17]。

2　数据与方法

2.1　数据及其来源

收集了覆盖延河流域 1980s 以来的遥感数据,地形、土壤、水文和气象等自然地理数据和粮食产量等社会经济数据(表 1)。使用 Erdas 软件对 1990、2000、2010 和 2020 年左右的 Landsat-5 TM 和 Landsat-8 OLI 遥感影像进行分类(总体分类准确率超过 80%,Kappa 系数超过 0.75),提取土地利用信息和植被指数信息。所有空间数据均定义为 WGS_1984_UTM_Zone 47 N,并重新采样为 30 m 分辨率。

表 1　主要数据及其来源

Table 1　Description of the data

数据类型 Data types	数据描述 Data description	来源(网址) Resource (Website)
遥感数据 Remove sensing data	Landsat 5 TM/8OLI(1990/2000/2010/2020)	Google Earth Engine(https://earthengine.google.com/)
地形土壤 Topography and soil	30 m 分辨率高程数据、中国土壤数据集(v1.1)	国家地球系统科学数据中心(http://loess.geodata.cn)
水文气象 Hydrology and meteorology	地表径流和泥沙模数(1980—2020) 1km 分辨率逐月气温、最高温、最低温和平均降水数据集	《黄河年鉴》(1981—1999) 《中国河流泥沙公报》(2000—2020)
社会经济 Socio-economic data	黄土高原社会经济数据集(1990—2011) 中国县域统计年鉴(2012—2021) 延河流域分乡镇社会经济指标(1978—2007)	国家地球系统科学数据中心(http://loess.geodata.cn)

2.2　研究方法

2.2.1　生态系统服务量化方法

采用多种生态学模型,模拟延河流域 1990 年以来固碳、产水、土壤保持和粮食生产等四种关键生态系统服务(表 2)。

2.2.2　相关分析

为了反映任意两种生态系统服务权衡/协同关系的总体特征,采用 Spearman 关性分析法[27]。该方法具有很好的适用性,公式如下:

$$\rho_s = 1 - \frac{6\sum d_i^2}{n(n^2-1)} \tag{1}$$

式中,ρ_s表示相关系数,为正表示协同,为负表示权衡; d_i表示二列成对变量的等级差数;n 为样本量。

此外,对关系变化的显著性进行了 F 检验[11]。置信度 $P<0.05$(显著),$P<0.01$(极显著),$P>0.05$(不显著)。

表 2 生态系统服务模型及其参数

Table 2 Models of ecosystem service and their parameters

服务类型 Services types	模型 Models	公式 Formulas	参数 Parameters	参考文献 References
固碳 Carbon sequestration	CASA	$NPP = 0.5 \times SOL \times FPAR \times T_{\varepsilon 1} \times T_{\varepsilon 2} \times W_{\varepsilon} \times \varepsilon_{max}$	SOL: 月总太阳辐射 FPAR: 植被冠层对入射有效太阳辐射的吸收比 $T_{\varepsilon 1}$: 低温对光能利用率的胁迫作用 $T_{\varepsilon 2}$:高温对光能利用率的胁迫作用 $W\varepsilon$: 水分胁迫系数 ε_{max}: 0.389	[21] [22]
产水 Water yield	InVEST	$WY = \left(\left[1 + \left(\frac{ET_o}{P}\right)^{\omega}\right]^{1/\omega} - \frac{ET_o}{P}\right) \times P$	ET_o: 潜在蒸散发;P: 年均降水量;ω: 植物可利用水系数	[23—24]
土壤保持 Soil conservation	CSLE	$SC = 17.02 \times R \times K \times LS(1 - B \times E \times T)$	R:降雨侵蚀力因子;K: 土壤可蚀性因子;LS:地形因子;B, E and T:生物、工程和耕作措施因子	[3,25—26]
粮食生产 Crop production	PD	$CP = C_c \times \frac{S_i \times NDVI_{mean}}{\sum S_i \times NDVI_{mean}} \times \frac{NDVI_x}{\sum NDVI_x}$	C_c: 县域粮食产量;S_i: 乡镇面积; $NDVI_{mean}$: NDVI 均值;$NDVI_x$: 像元 NDVI 值	[3]

CASA:卡内基-艾姆斯-斯坦福法 Carnegie-ames-stanford approach;InVEST:生态系统服务综合评估及权衡 Integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs; CSLE:中国土壤流失方程 China soil lose equation; PD:像元分解 Pixel decomposition;NPP:净初级生产力 Net primary productivity;WY:产水 Water yield;SC:土壤保持 Soil conservation;CP:粮食生产 Crop production;NDVI:归一化植被指数 Normalized vegetation index

2.2.3 基于热点分析的空间叠置

利用 ArcGIS 软件中的热点分析工具计算 Getis-Ord G_i^* 统计,利用标准差的倍数 z 得分和概率 P 值可知高值要素的空间聚类位置(热点),或低值要素的空间聚类位置(冷点)[3]。冷热点的 z 得分和 P 值包括极显著,较显著,显著和不显著 4 个等级。基于不同显著性水平下的热点分析结果,进行空间叠置分析,可以判断不同生态系统服务之间的空间权衡/协同关系。

具体而言,一种服务可能出现“高冷”“中冷”、“低冷”、“不冷”、“不热”、“低热”、“中热”和“高热”8 种情况,任意两种服务叠加后,会出现 64 种叠加方式。将涉及不冷或不热($P \leqslant 0.1$)的 28 种情况定义为无显著权衡/协同关系。剩余 36 种组合方式中,按照显著性等级(P 值)由高到低等间距划分的方法,将每 6 种组合方式归为一类,从而得到子流域尺度上,高、中、低 3 种不同等级的生态系统服务空间权衡/协同关系[11]。

2.2.4 断点分析

断点分析,即变量某一点处出现了一个断点,使得断点的左右两侧得到处理的概率不同,从而影响了结果。该方法用来提取服务关系变化对应的生态系统服务阈值,可以通过 R-studio 软件 segmented 包编程实现[28]。

3 结果与分析

3.1 生态系统服务变化特征

固碳、产水和土壤保持服务均呈先减后增的变化趋势,粮食产量总体变化不显著(图 1)。流域固碳从最初的 228 g C/m^{2}增加到 2020 年的 451 g C/m^2,平均固碳量约增加到原来的 2 倍。产水量在 2000 年以前减幅最大,之后迅速增加,2020 年达到最大值,约 150 t/hm^2。土壤保持量增幅最大,约 230—1350 t/hm^2,特别是 2020 年,年均土壤保持量是 1990 年的 4 倍之多。粮食生产总体比较稳定,年均粮食产量在 90 kg/hm^{2}左右(图 1)。

3.2 权衡与协同关系

3.2.1 时间特征

固碳、产水和土壤保持三者之间以协同关系为主($r>0.6$,$P<0.0001$),它们与粮食生产均表现为弱权衡关

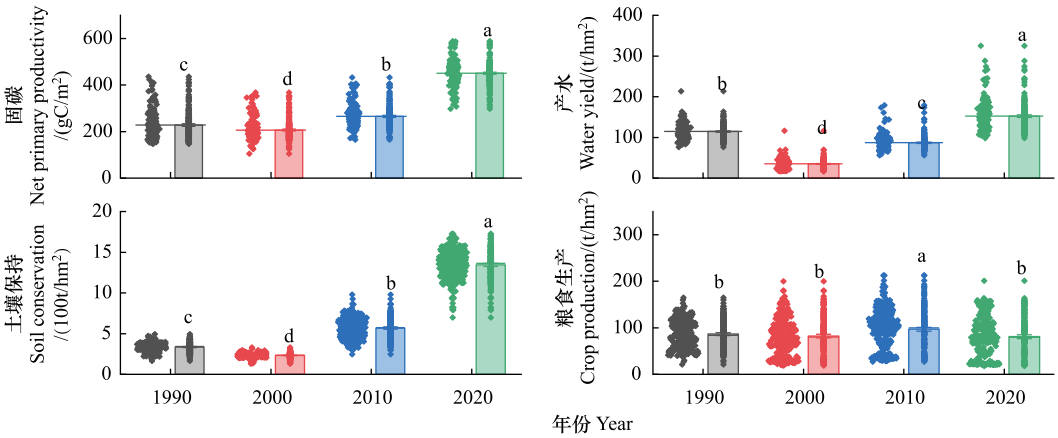

图 1　延河流域不同时期生态系统服务的差异

Fig.1　Differences of ecosystem services in the Yanhe basin over time.

不同小写字母表示非参数检验结果,字母相同表示无显著差异,反之则差异显著

系。但是,在不同时期,这种关系可能弱化甚至发生逆转。例如,固碳与土壤保持之间的协同性最强(r=0.872,P<0.0001),但从时间上看,1990 和 2000 年的协同关系均不显著,到 2010 呈显著协同关系,此后这种协同作用又明显减弱。土壤保持和产水的协同性也比较强(r=0.687,P<0.0001),仅次于土壤保持和固碳。尽管在较小时间尺度上这种协同作用会减弱,但是 1990 年两者之间的显著正相关关系仍然是所有其他任意两种服务关系中最强的一组(r=0.331,P<0.0001)。但是,随着时间的推移,这种显著协同关系逐渐减弱,甚至到 2020 年演变为显著的负相关关系(r=−0.144,P<0.05),即权衡关系。固碳和产水之间的关系变化与土壤保持和产水的变化过程类似,均表现为协同关系的减弱和权衡关系的增强,而且这种由协同向权衡转变的趋势更为明显。粮食生产与产水始终以权衡关系为主,且权衡作用逐渐增强,到 2020 年两者的负相关系数达到最高(r=−0.398,P<0.0001)。土壤保持和粮食生产的负相关性在 2010 年达到最高值,而固碳与粮食生产的正相关性在 2010 年最高。总而言之,生态系统服务之间的协同作用减弱和权衡作用增强(图 2)。

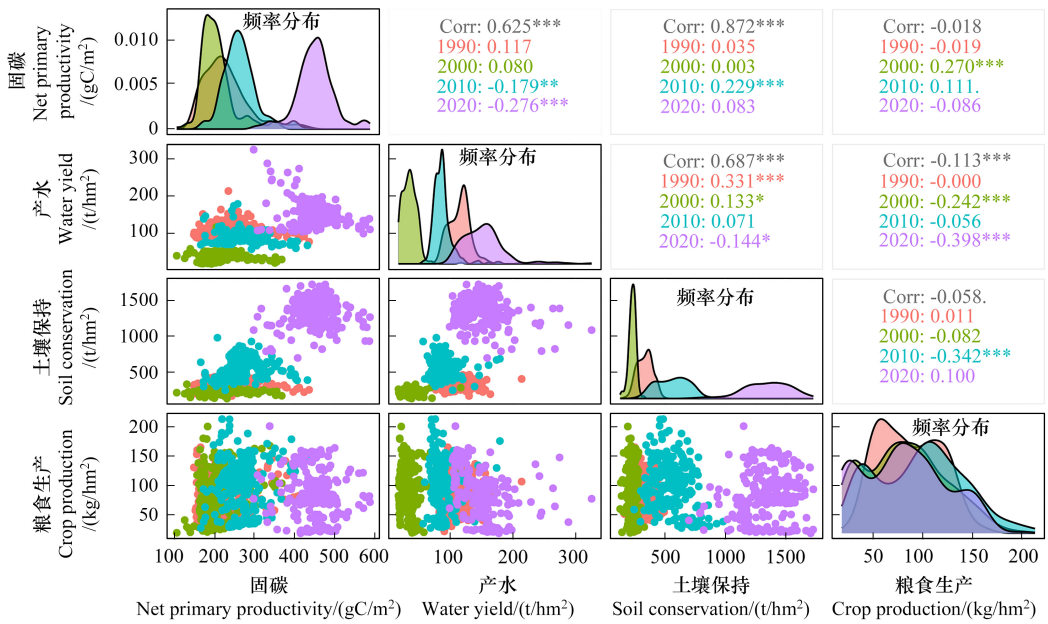

图 2　延河流域不同时期生态系统服务的权衡/协同关系

Fig.2　Trade-offs/synergies of ecosystem services in the yanhe basin in different periods

“＊＊＊”和“＊”分别表示在置信度 P 为 0.0001 和 0.05 时,相关性是显著的

3.2.2 空间特征

延河流域大部分区域没有明显的权衡或协同关系,但部分子流域存在显著空间关联关系,且具有明显的时空分异特征(图 3)。其中,产水和土壤保持分别与固碳服务之间的空间关系比较一致,均表现为流域上游的协同分布和流域中下游的权衡分布,并且这种协同作用逐渐减弱而权衡作用逐渐增强。粮食生产与固碳的关系则与之相反,即上游权衡为主,而中下游权衡为主,其权衡关系仍然呈逐渐增强的趋势。产水和土壤保持始终以协同作用为主,主要分布在上游和中游部分子流域,且协同区域的面积逐渐缩小。产水和土壤保持均与粮食生产在空间呈权衡关系,但具有明显的空间分异性。其中,产水和粮食均在上游地区产生权衡,下游大面积权衡主要发生在 2000 年,而中游以协同为主。土壤保持与粮食生产在 1990 年协同与权衡均衡分布在流域上游和中下游地区,此后协同区域逐渐减少而权衡区域明显扩张,特别在 2010 年权衡区域最大。总体而言,延河流域空间尺度上协同不断缩小,而权衡区域不断扩大,这将是流域未来生态系统管理面临的巨大挑战(图 3)。

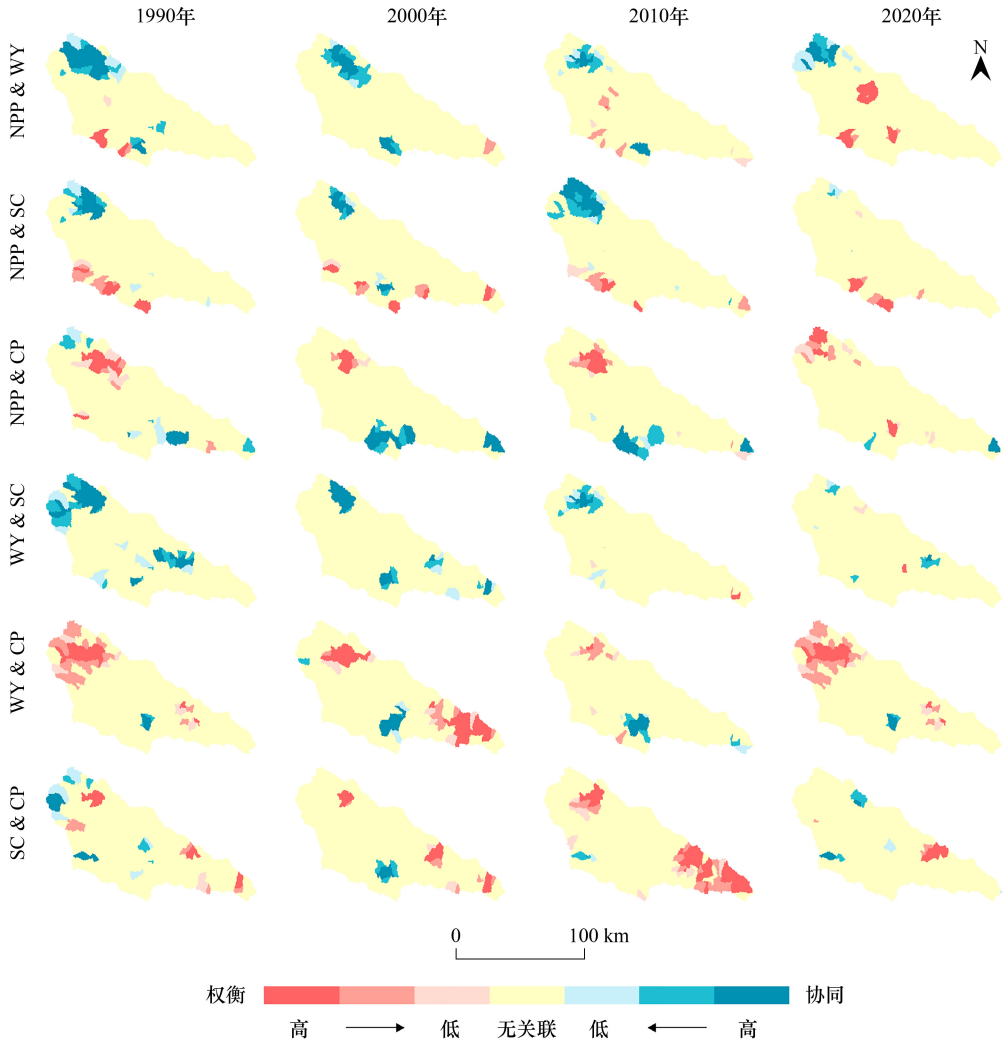

图 3 延河流域 1990—2020 年生态系统服务的空间权衡/协同关系

Fig.3 Spatial distribution of trade-offs and synergies among ecosystem services in the Yanhe basin from 1990 to 2020

NPP:净初级生产力 Net primary productivity;WY:产水 Water yield;SC:土壤保持 Soil conservation;CP:粮食生产 Crop production

3.3 权衡与协同关系的阈值分析

随着生态系统服务的变化,服务之间的空间关系均发生显著变化($P<0.05$),并且大多数权衡或协同关系

的变化存在阈值效应(图 4)。具体而言,当固碳量在 150 g C/m^{2}左右时,固碳与粮食生产的权衡作用减弱。在固碳量超过 300 g C/m^{2}时,与粮食生产的权衡关系转为协同关系,而与产水的协同关系转为权衡关系。土壤保持与固碳的权衡关系随着固碳的增加会增强,但当固碳超过 300 g C/m^{2}左右时,这种权衡增强的速率会减小。当产水量超过 150 t/hm^{2}时,其与固碳的协同关系转为权衡关系,而与粮食生产的权衡关系转为协同关系。土壤保持在 400 t/hm^{2}作用时,与固碳的协同作用最强;当土壤保持增加到约 600 t/hm^{2}时,与粮食生产的权衡作用最强;当在 800 t/hm^{2}左右时,与固碳的协同作用转为权衡,与产水的协同作用最弱。当粮食产量在 50 kg/hm^{2}左右时,与固碳的协同作用转为权衡,并且与土壤保持的权衡左右最弱;当粮食产量在 60—120 kg/hm^{2}左右时,与产水的权衡关系最弱(图 4)。

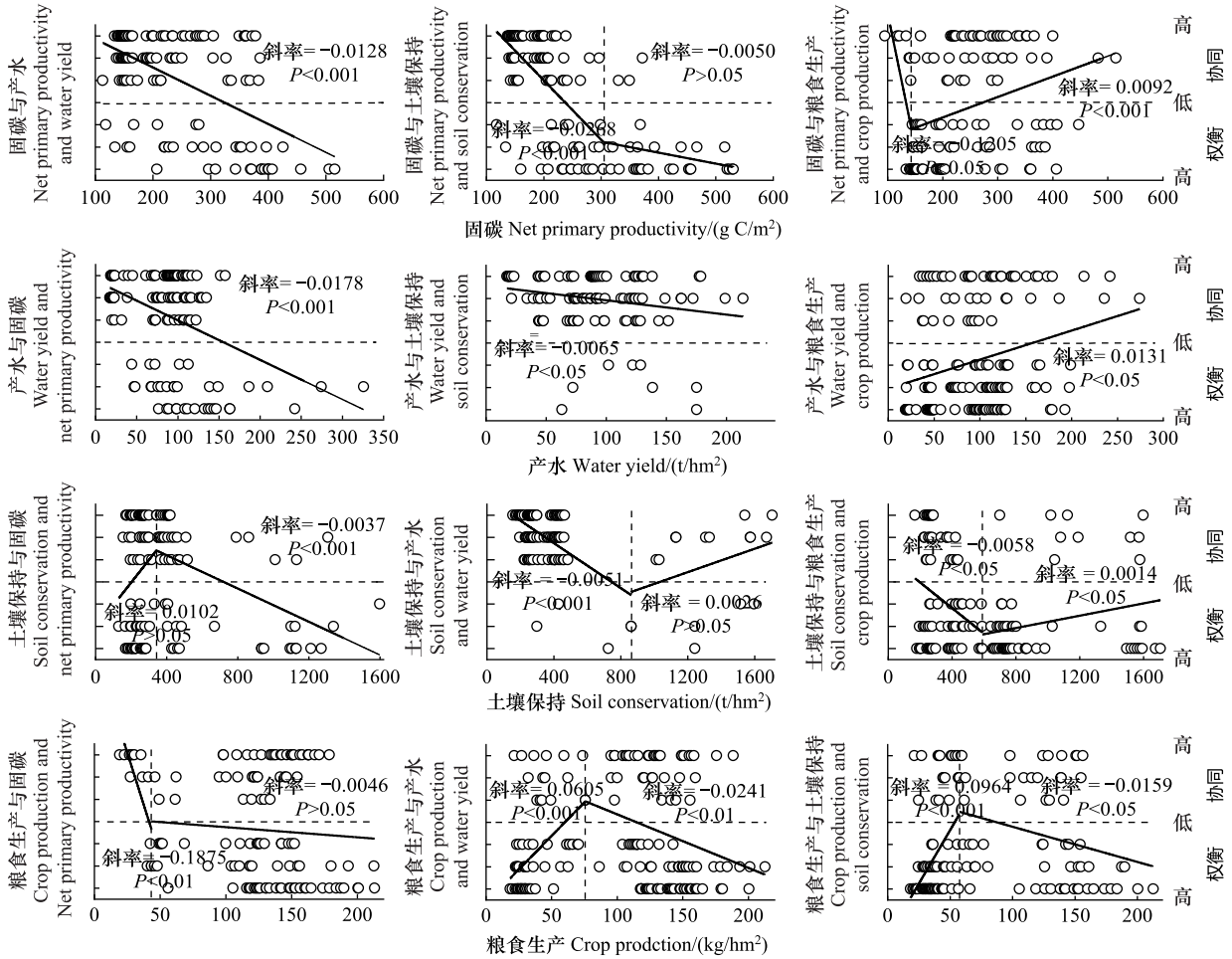

图 4　延河流域生态服务空间权衡/协同关系随生态系统服务的变化

Fig.4　Changes of trade-offs/synergies among ecosystem services in the Yanhe basin.

4　讨论与结论

4.1　讨论

通过模拟与实测数据的交叉验证发现,延河流域固碳比实测值低,因为在实地调查中,通常会选择植被覆盖率较高的样本点,而实际上区域的平均生物量会整体偏低。由于产水模型主要考虑降水和蒸散发,地面水土保持措施欠考虑,导致产水模拟值偏高。土壤保持,特别是粮食生产的准确度最好(R^2>0.9,P<0.001)。总体来说,延河流域固碳、产水、土壤保持和粮食生产等生态系统服务的模拟结果均可信(R^2>0.5,P <0.05)(图 5)。

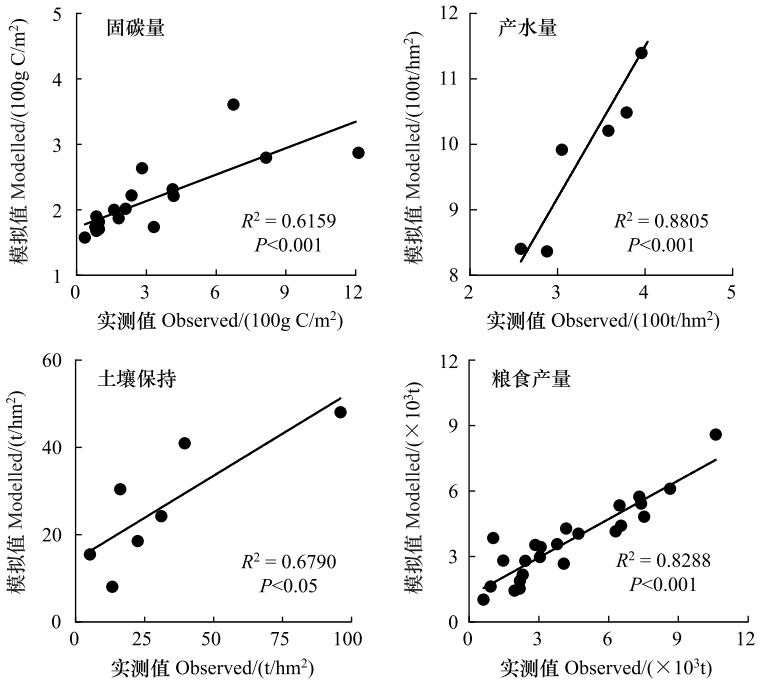

图 5 延河流域生态系统服务模拟结果验证

Fig.5 Validation of the simulated ecosystem services in the Yanhe basin

当生态系统服务增加到一定的阈值范围时,服务之间关系的稳定性可能会被打破。更有甚者,可能会出现权衡和协同效应的相互转化,从而导致阈值效应。当延河流域固碳量超过 350 g C/m^2时,它与产水和土壤保持的权衡作用会增强(图 4)。这与李若男等在黄土高原的研究不谋而合,该研究认为固碳量超过 400 g C/m^2时,会增加区域用水冲突[9]。也进一步说明半干旱地区植被固碳的阈值可能更低。另外,土壤保持量在接近 400 t/hm^2时,与固碳的协同性最强,当在 600 t/hm^2左右时,粮食生产的权衡作用最强,而在 800 t/hm^2左右时,与产水的协同性最弱。说明 400 t/hm^2附近是土壤保持的最佳阈值范围,超过该范围,土壤保持与其他服务的协同减弱而权衡增强。

总体而言,生态系统服务总量较小时,服务之间的协同作用往往较强,随着服务的提升,协同作用逐渐减弱,当到达一定阈值范围时,会发生协同向权衡的转变。原因在于,当单位面积的生态系统服务供给量较小时,维持其服务功能的资源需求量也比较少,服务之间通常以协同作用为主。当单位面积的生态系统服务供给量进一步增加时,对各种资源的需求量也逐渐加大,从而导致服务间协同关系减弱,甚至出现由协同向权衡关系的转变。这一看法在相关研究中已得到证实[29—30]。

4.2 结论

通过模拟黄河中游延河流域近 30 年以来的四种关键生态系统服务,探讨了任意两种服务之间的权衡/协同关系,旨在探索生态系统服务变化过程中,不同服务之间权衡/协同关系变化的阈值问题。研究发现,固碳、产水和土壤保持服务两两之间以协同为主,粮食生产与以上三种服务以权衡为主,并且协同减弱而权衡增强。同时,绝大多数权衡或协同关系会随着生态系统服务的提升产生非线性变化,即存在阈值效应。特别是固碳增加到 350 g C/m^2时,与其他服务的权衡作用会增强。为促进生态系统的协同发展,有必要将生态系统服务控制在一定的阈值范围内。该研究可为黄河流域水土保持、粮食安全保障以及生态环境和社会经济的可持续发展提供科学指导。

参考文献(References):

[1] 王悦露, 董威, 张云龙, 傅伯杰, 赵正媛, 吕一河, 张建军, 伍星. 基于生态系统服务的生态安全研究进展. 生态学报, 2023, 43(19):

7821-7829.

[2] 戴尔阜, 王晓莉, 朱建佳, 高江波. 生态系统服务权衡/协同研究进展与趋势展望. 地球科学进展, 2015, 30(11): 1250-1259.

[3] Feng Z, Jin X R, Chen T Q, Wu J S. Understanding trade-offs and synergies of ecosystem services to support the decision-making in the Beijing-Tianjin-Hebei region. Land Use Policy, 2021, 106: 105446.

[4] Rodríguez J P, Beard T D Jr, Bennett E M, Cumming G S, Cork S J, Agard J, Dobson A P, Peterson G D. Trade-offs across space, time, and ecosystem services. Ecology and Society, 2006, 11: art28.

[5] Ndong G O, Therond O, Cousin I. Analysis of relationships between ecosystem services: A generic classification and review of the literature. Ecosystem Services, 2020, 43: 101120.

[6] Zhang J X, Wang Y F, Sun J, Chen J H, Zhang J T, Wang D, Huo H Y, Liang E Y. Interactions between the Grain-for-Green Program and check dams increased vegetation carbon sequestration in the Yanhe Basin, Loess Plateau. Land Degradation & Development, 2023, 34(8): 2310-2321.

[7] Duraiappah A. Millennium ecosystem assessment: synthesis report for the convention on biological diversity summary for decision-maker. Millennium Ecosystem Assessment. Washington: Island Press, 2005

[8] 张琨, 吕一河, 傅伯杰, 尹礼唱, 于丹丹. 黄土高原植被覆盖变化对生态系统服务影响及其阈值. 地理学报, 2020, 75(5): 949-960.

[9] 唐海萍, 陈姣, 薛海丽. 生态阈值: 概念、方法与研究展望. 植物生态学报, 2015, 39(9): 932-940.

[10] Future Earth. Future Earth initial design: Report of the transition team. Paris, FRA: International Council for Science (ICSU). http://www.icsu.org/future-earth/mediacentre/relevant_publications, 2013.

[11] Chen Y P, Wang K B, Lin Y S, Shi W Y, Song Y, He X H. Balancing green and grain trade. Nature Geoscience, 2015, 8(10): 739-741.

[12] Yu Z Y, Deng X Z, Cheshmehzangi A. The grain for green program enhanced synergies between ecosystem regulating services in Loess Plateau, China. Remote Sensing, 2022, 14(23): 5940.

[13] Feng X M, Fu B J, Piao S L, Wang S, Ciais P, Zeng Z Z, Lü Y H, Zeng Y, Li Y, Jiang X H, Wu B F. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. Nature Climate Change, 2016, 6: 1019-1022.

[14] Zhang Z Y, Tong Z M, Zhang L T, Liu Y L. What are the dominant factors and optimal driving threshold for the synergy and tradeoff between ecosystem services, from a nonlinear coupling perspective? Journal of Cleaner Production, 2023, 422: 138609.

[15] 刘强, 穆兴民, 赵广举, 高鹏, 孙文义, 南岭. 延河流域水沙变化及其对降水和土地利用变化的响应. 干旱区资源与环境, 2021, 35(7): 7.

[16] Li R N, Zheng H, O'Connor P, Xu H S, Li Y K, Lu F, Robinson B E, Ouyang Z Y, Hai Y, Daily G C. Time and space catch up with restoration programs that ignore ecosystem service trade-offs. Science Advances, 2021, 7(14): eabf8650.

[17] 张建香. 黄土高原沟壑区生态系统服务对生态工程的响应[D]. 兰州: 兰州大学, 2023.

[18] 杨思敏, 权全, 徐家隆, 张飞跃, 刘铁军. 延河流域土地利用变化过程中水源涵养功能研究. 中国水土保持, 2022,(8): 33-36.

[19] Yao Z H, Wang B, Huang J, Zhang Y, Yang J C, Deng R X, Yang Q K. Analysis of land use changes and driving forces in the Yanhe River Basin from 1980 to 2015. Journal of Sensors, 2021: 6692333.

[20] 张元星. 流域水沙变化对水土保持梯田措施的响应研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.

[21] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算. 植物生态学报, 2007, 31(3): 413-424.

[22] Potter C S, Randerson J T, Field C B, Matson P A, Vitousek P M, Mooney H A, Klooster S A. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. Global Biogeochemical Cycles, 1993, 7(4): 811-841.

[23] Liu S L, Yin Y J, Liu X H, Cheng F Y, Yang J J, Li J R, Dong S K, Zhu A. Ecosystem Services and landscape change associated with plantation expansion in a tropical rainforest region of Southwest China. Ecological Modelling, 2017, 353: 129-138.

[24] Hu Y F, Gao M, Batunacun. Evaluations of water yield and soil erosion in the Shaanxi-Gansu Loess Plateau under different land use and climate change scenarios. Environmental Development, 2020, 34: 100488.

[25] Liu B Y, Zhang K L, Xie Y. An Empirical Soil Loss Equation[C]//Sustainable Utilization of Global Soil and Water Resources vol.2: Process of Soil Erosion and Its Environment Effect. Beijing Tsinghua press, 2002: 143-149.

[26] 谢红霞, 李锐, 杨勤科, 李静, 梁伟. 退耕还林(草)和降雨变化对延河流域土壤侵蚀的影响. 中国农业科学, 2009, 42(2): 569-576.

[27] Zhou Y, Li S J. BP neural network modeling with sensitivity analysis on monotonicity based Spearman coefficient. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2020, 200: 103977.

[28] Imbens G W, Lemieux T. Regression discontinuity designs: a guide to practice. Journal of Econometrics, 2008, 142(2): 615-635.

[29] Kroll C, Warchold A, Pradhan P. Sustainable Development Goals (SDGs): are we successful in turning trade-offs into synergies? Palgrave Communications, 2019, 5(1): 140.

[30] Zhang X R, Wang Y S, Yuan X, Shao Y J. Identifying ecosystem service supply-demand imbalance for sustainable land management in China's Loess Plateau. Land Use Policy, 2022, 123: 106423.