

DOI: 10.5846/stxb201808141730

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分析——以延安市为例.生态学报,2019,39(10):

Sun Y J, Ren Z Y, Hao M Y, Duan Y F. Spatial and temporal changes in the synergy and trade-off between ecosystem services, and its influencing factors in Yanan, Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(10): - - .

黄土高原生态系统服务权衡与协同时空变化及影响因素分析

——以延安市为例

孙艺杰,任志远*,郝梦雅,段艺芳

陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 西安 710119

摘要:明确黄土高原生态系统服务权衡与协同时空变化特征及影响因素,深刻理解能源开发和经济发展背景下黄土高原多种生态系统服务之间的相关关系,为实现经济与生态保护的协调发展提供理论依据。以黄土高原典型区延安市为例,探讨1993—2013年间生态服务价值(植被净初级生产力、土壤保持、水源涵养和食物供给)之间权衡与协同关系的时空变化特征,以及退耕还林政策和地形坡度对生态系统服务权衡与协同关系动态变化的影响。结果表明:①各类生态系统服务之间呈现不同的相关关系,食物供给与土壤保持、水源涵养以及NPP之间均为权衡关系,NPP与土壤保持、水源涵养之间为协同关系,土壤保持与水源涵养呈现协同关系;②20年来延安市生态系统服务整体表现为权衡加强协同减弱的趋势;③对比退耕还林区与非退耕还林区权衡与协同的动态变化,发现退耕还林区各类生态服务多呈协同关系且不断加强,而在非退耕还林区多表现为权衡关系;④坡度为15°—25°地区生态服务冲突最为显著,大于25°地区生态服务协同作用显著;⑤NPP与水源涵养的协同关系呈现北部高南部低的分布规律,NPP与食物供给权衡程度在延安市北部较强而东部较弱,水源涵养与食物供给的权衡关系在延安市西南部更为突出而北部最弱。

关键词:黄土高原;延安市;权衡与协同;退耕还林区与非退耕还林区

Spatial and temporal changes in the synergy and trade-off between ecosystem services, and its influencing factors in Yanan, Loess Plateau

SUN Yijie, REN Zhiyuan*, HAO Mengya, DUAN Yifang

School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China

Abstract: Clarifying the temporal and spatial changes in the trade-off and synergy between ecosystem services and its influencing factors in the Loess Plateau (LP) provides the basis for a better understanding of the interaction of ecosystem services in the background of energy and economic development. It also provides a theoretical basis for the coordinated development of economy and ecological protection. Using the partial correlation spatial statistical analysis, we investigated the spatio-temporal variation in the trade-off and synergy between ecosystem services (net primary productivity (NPP), soil conservation, water conservation, and food supply) and analyzed its influencing factors through the study of Grain-for-Green Program (GFGP) and non-Grain-for-Green Program (non-GFGP). We also assessed the effect of terrain slope on the dynamic changes in the trade-off and synergy during 1993—2013. The results obtained were as follows. (1) Various kinds of ecosystem services in Yanan have different correlations. We found that food supply and soil conservation, food supply and

基金项目:教育部人文社会科学重点研究基地项目(14JJD840004);国家自然科学基金项目(41371523)

收稿日期:2018-08-14; **网络出版日期:**2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: renzhy@snnu.edu.cn

water conservation, and food supply and NPP have a trade-off relationship. There was a synergistic relationship between NPP and soil conservation, NPP and water conservation, and soil conservation and water conservation. (2) In addition, between 1993 and 2013, this synergistic relationship showed a downward trend, whereas, the trade-off relationship demonstrated an upward trend. (3) Furthermore, a comparison of the dynamic changes in the trade-off and synergy between GFGP and non-GFGP showed that various ecosystem services in GFGP have a synergistic relationship, and it continued to increase, but it showed a conflicting relationship in non-GFGP. (4) The conflict between ecosystem services in the area of 15° — 25° was obvious, but in the area of $> 25^{\circ}$, the synergistic relationship was evident. (5) In terms of the synergistic relationship between NPP and water conservation, the strongest evidence was found in the north of Yanan and the lowest was observed in the south. Moreover, the strongest trade-off relationship between NPP and food supply was in the north, whereas, the weakest was in the east. While exploring the trade-off between water conservation and food supply, we found that it is the strongest in the southeast of Yanan and the lowest in the north.

Key Words: Loess Plateau; Yan'an; trade-off and synergy; Grain-for-Green Program; non-Grain-for-Green Program

生态系统服务是指生态系统所形成和维持人类赖以生存和发展的自然环境条件与效用^[1],为人类直接或间接从生态系统得到的所有效益^[2]。MA 千年生态系统评估将生态系统服务划分为四大类,包括植被净初级生产力、养分循环等支持服务,粮食生产、产水等供给服务,水源涵养、土壤保持等调节服务以及休闲娱乐、社会活动等文化服务^[3]。各类生态系统服务并不是独立的,而是相互影响的,往往表现为此消彼长的权衡关系和相互增益的协同关系^[4],通过分析各类生态系统服务之间的相关关系,进一步揭示生态服务之间的潜在联系及驱动因子,从而提高人类福祉提供更多的参考依据。目前多种生态系统服务之间的相关关系已经成为生态系统服务研究的热点,国内外学者对于生态系统服务权衡与协同关系进行了深入研究,包括定义、类型、时间变化与空间尺度效应、研究方法、驱动机制、研究意义以及相应措施等^[5-12]。Cord 等^[13]系统阐述了生态系统服务权衡与协同的主要概念、研究方法和发展方向,针对识别和分辨生态系统服务的共时性、驱动因素、多功能服务的限制性以及生态规划、管理和决策等提出了不同建议,并强调了目前仍需要解决的关键问题;Richards^[14]探究了热带城市沿海地区生态系统服务与未来城市发展之间的权衡关系,采用帕累托曲线分析生境质量与各生态指标之间的权衡与协同关系;Michael 等^[15]对澳大利亚 2050 年农业生产和土地利用进行了情景预测分析,研究在生产效率提高、资源退化不足、温室气体减排以及全球需求不断变化的条件下,土地利用类型变化与农业总产值的时空变化趋势;Adams 等^[16]在定义情景目标和评估已有情景的基础上,结合决策利益偏好规划设计情景,实现土地资源利用和社会环境的优化配置;Trodahl 等^[17]基于 LUCI 模块,研究新西兰富饶海湾水质与农业生产率之间的权衡与协同关系;Tolessa 等^[18]探究了 1973—2015 年埃塞俄比亚中部高原地区土地利用与土地覆盖变化对生态系统服务的影响,结果表明森林覆盖面积减少会导致生态系统服务价值降低,主要表现为营养循环、原材料供给和侵蚀控制等生态系统服务;彭建等^[19]对生态系统服务权衡的研究进展进行了系统梳理,阐述了生态系统服务权衡的时空变化特征,提出生态系统权衡的最终目标是满足人类福祉,将生态补偿作为权衡决策的基本保障途径,并且认为生态系统服务权衡多尺度关联、生态系统服务流与远程耦合、生态系统服务消费与生态补偿是生态系统服务权衡研究的重点;戴尔阜等^[20]基于前人研究,进一步探讨了未来生态系统权衡与协同的发展趋势及研究内容,包括评估优化、量化模型等;傅伯杰等^[21]探索了生态系统服务权衡及区域集成方法,分析土地利用变化与生态系统服务的关系;Li Delong 等^[22]对水生生态系统服务的空间流动进行了模拟,通过淡水生态安全综合评价指数来评估区域水资源安全情况,将淡水服务供给、消费与流动相结合,研究发现北京—天津—河北区域淡水生态服务安全主要受上游水流动的影响,定量表达了淡水生态系统服务供给与淡水生态系统消耗之间的关系以及淡水生态系统服务流量对下游的影响。尽管目前生态系统服务权衡与协同研究已取得了丰硕的成果^[23-27],但同时也存在一些问题和局限,例如:权衡与协同研究多基于统计关系的数量分析,缺乏长时间序列生态服务相关关系的动态趋势变化分析,以及区

域内部空间差异表达^[28];生态服务冲突驱动机制缺乏体系化研究,尤其在有时空尺度下自然或人为活动对生态服务动态变化的影响分析。

本文以黄土高原典型区延安市为例,基于栅格尺度和区县尺度,综合土地利用、植被、土壤类型、气象等多源数据,测评 1993—2013 年延安市 4 种生态系统服务价值量(植被净初级生产力、土壤保持、水源涵养和食物供给),基于 R 语言的相关分析函数探讨生态服务之间的权衡与协同关系,然后采用逐像元偏相关空间统计方法分析权衡与协同的时空演变规律,最后从退耕还林政策以及地形坡度角度来分析其动态变化的影响因素,进一步揭示在不同政策管理和激励措施下,特定区域在不同土地利用和生产方式下生态系统服务权衡与协同关系的动态变化特征,为不同区域制定合理的土地管理决策提供依据,从而实现黄土高原地区生态经济的和谐发展。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

黄土高原地处我国中部,包括青海省、甘肃省、宁夏回族自治区、内蒙古自治区、陕西省、山西省、河南省等 7 个省份和自治区(图 1),地处半干旱半湿润气候带,水土流失严重,生态环境脆弱。延安市位于黄土高原中南部(图 2),纬度位置为 $35^{\circ}21'—37^{\circ}31'N$, $107^{\circ}41'—110^{\circ}31'E$ 之间,属于温带季风气候,降雨多集中在 7、8 月份,占全年总降水量的 57%,最高温可到达 $39.7^{\circ}C$ 。延安市拥有丰富的矿产资源,其中煤炭、石油、天然气为本地的工业发展提供了坚实的基础和优越的条件。资源大规模开发的同时也带来了许多生态环境问题,人类长期不合理的开发利用,导致原本脆弱的生态环境日趋恶化。

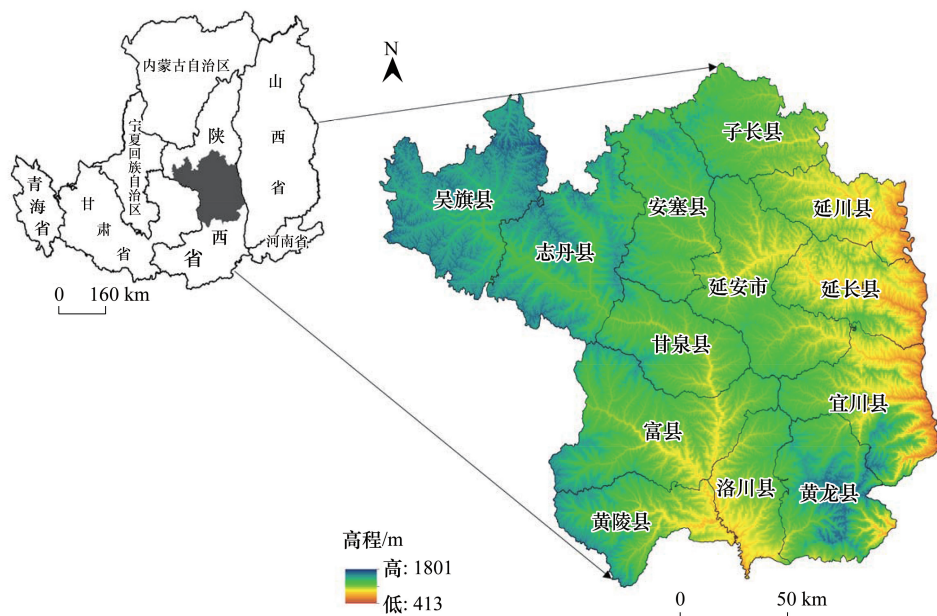


图 1 研究区概况

Fig.1 Study area

1.2 数据来源与处理

本文主要研究数据包括遥感数据、气象数据、DEM 数据、土壤数据以及各类社会经济数据等:①遥感数据,下载自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)的 Landsat5 和 Landsat8 TM 影像,空间分辨率为 30 米;②气象数据,降水、温度、日照时数等来源于中国气象科学数据共享网(<http://data.cma.cn/>);③DEM 数据,同样从地理空间数据云下载,空间分辨率为 30 米;④土壤数据,采用中国科学院 1:100 万土壤及植被类型数据集;⑤社会经济数据,来源于 1993—2013 年《延安市统计年鉴》、《延川县统计年鉴》、《宜川县统计年鉴》等;

⑥其余行政区域、道路、水系等矢量数据,来自国家基础地理数据库。

2 研究方法

2.1 植被净初级生产力模型

植被净初级生产力(NPP)是反映生态系统服务功能的一个重要指标,作为碳循环的关键要素,它反映了气候、环境以及人类活动对植被的综合作用^[29]。本文采用光能利用 CASA 模型对 NPP 进行估算,具体模型如下^[30-31]:

$$NPP(x,t) = APAR(x,t) \times \varepsilon(x,t) \quad (1)$$

式中, $NPP(x,t)$ 表示像元 x 在 t 时间内的净初级生产力 (g C m^{-2}); $APAR(x,t)$ 和 $\varepsilon(x,t)$ 分别表示像元 x 在时间 t 内吸收的光合有效辐射 (MJ/m^2) 和实际光能利用率 (g C MJ^{-1})。

基于 NPP 物质质量,利用能量固定替换法计算其价值量^[32],计算公式如下:

$$V = \frac{AQ_1}{BQ_2} \times P \quad (2)$$

式中, V 为 NPP 价值量 (元); A 为 NPP 物质质量 ($\text{t C hm}^{-2} \text{a}^{-1}$); B 为标准煤系数,取 1; P 为单位标准煤价格 (元/t),取 345.5 元/t; Q_1 表示干重折合热量,取 6.7 KJ/g; Q_2 为标准煤折合热量,取 10 KJ/g。

2.2 土壤保持量模型

通过 RUSLE 模型估算延安市土壤保持量,该模型适用范围广,操作性强,具体公式如下^[33]:

$$A_m = R \times K \times C \times LS \times P \quad (3)$$

$$A_p = LS \times K \times R \quad (4)$$

$$A_c = A_p - A_m \quad (5)$$

式中, A_m 为平均实际土壤流失量 ($\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$), A_p 为平均潜在土壤流失量 ($\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$), A_c 为平均土壤保持量 ($\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$); R 为降水侵蚀因子 ($\text{MJ mm hm}^{-2} \text{h}^{-1} \text{a}^{-1}$); K 为土壤侵蚀因子 ($\text{t h MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$); L 为坡长因子; S 为坡度因子; C 为植被覆盖因子; P 为土壤保持措施因子。各因子的详细计算模型参考以下文献^[34-37]。

土壤保持价值量由保持土壤肥力价值量、减少土地废弃价值量和减少淤积损失价值量得到,具体计算公式如下:

$$E_f = M_f \times S_i \times P_i \quad E_o = M_o \times S_o \times P \quad (6)$$

$$E = S \times B \quad S = Z \times 100 / (h \times \rho) \quad (7)$$

$$E_y = Z \times 24\% \times P_y \quad (8)$$

式中, E_f 为土壤保持氮、磷、钾养分价值量 (元/ hm^2), E_o 为土壤保持有机质价值量 (元/ hm^2), E 为减少土地废弃价值量 (元/ hm^2), E_y 为减少土壤淤积价值量 (元/ hm^2), M_f 为氮、磷、钾保持量 (t/hm^2), S_i 为氮、磷、钾转换为化肥的系数, P_i 为氮、磷、钾肥料价格 (元/t), M_o 为有机质物质质量 (t/hm^2), P 为木材机会成本 (元/t), S_o 为木材转为有机质系数, S 为减少土地废弃面积 (hm^2), B 为土地机会成本 (元/ hm^2), Z 为土壤保持量 (t/hm^2), h 为耕作层厚度 (cm), ρ 为土壤容重 (g/cm^3), P_y 为建设水库费用 (元/ m^3)。

2.3 水源涵养测评模型

本文采用综合蓄水能力法来估算保水量,该方法考虑了林冠层、枯枝落叶层及土壤层的涵养水源,估算模型如下^[38]:

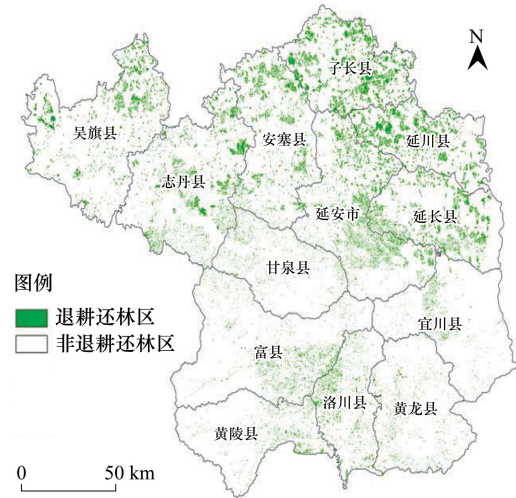


图2 延安市退耕还林空间分布图

Fig.2 The distribution of Grain-for-Green Programme in Yanan

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (9)$$

式中, Q 为蓄水能力, Q_1 为林冠截留量, Q_2 为枯枝落叶吸持水分量, Q_3 为土壤最大持水量。

采用工程替代法估算涵养水源价值量:

$$V = L \times \frac{Q}{Q_g} \times V_g \quad (10)$$

式中, V 为涵养水源价值量, Q 为涵养水源物质量, Q_g 为替代生态系统某工程的水容量, V_g 为替代工程的价值, L 为发展阶段系数。

2.4 食物供给测评模型

食物供给服务是生态系统最基本、最直接的服务,它不仅满足人类对食物的需求,而且还提供了木材、纤维等生产生活用品。本文结合土地利用和统计年鉴数据,测算研究区内各土地利用的食物总产值,实现食物供给的空间化。计算公式如下:

$$N_i = \frac{F_i}{S_i} \quad (11)$$

$$G_i = A_i \times N_i \quad (12)$$

式中, G_i 为研究区栅格所对应的食物 i 的总产值(元), A_i 为各类食物 i 相对应的土地利用类型的面积(km^2), N_i 为食物 i 的单位面积产值(元/ km^2)。 F_i 为食物总产值, S_i 为各土地利用类型的总面积。其中,耕地面积对应种植业总产值,林地面积对应林业总产值,草地面积对应牧业总产值,水域面积对应渔业总产值。

2.5 权衡与协同的空间统计方法

生态系统服务具有复杂性和异质性,一种服务的变化会影响另一种服务甚至是多种服务的变化。因此,需要在排除不相关因素的基础上分析两两生态服务之间的相关关系,即偏相关分析。这里我们考虑年降水量和 NDVI 对生态系统服务都有具有线性影响,所以通过消除这两种因素来求 NPP、水源涵养和食物供给三种生态系统服务两两之间的偏相关系数^[39]。偏相关系数的计算过程是基于 MATLAB 软件平台实现,计算公式如下:

(1) 计算相关系数

$$r_{12(ij)} = \frac{\sum_{n=1}^n (ES1_{n(ij)} - \overline{ES1(ij)}) (ES2_{n(ij)} - \overline{ES2(ij)})}{\sqrt{\sum_{n=1}^n (ES1_{n(ij)} - \overline{ES1(ij)})^2 \sum_{n=1}^n (ES2_{n(ij)} - \overline{ES2(ij)})^2}} \quad (13)$$

(2) 计算一级偏相关系数:

$$r_{12 \cdot 3(ij)} = \frac{r_{12(ij)} - r_{13(ij)} r_{23(ij)}}{\sqrt{(1 - r_{13(ij)}^2)(1 - r_{23(ij)}^2)}} \quad (14)$$

(3) 计算二级偏相关系数:

$$r_{12 \cdot 34(ij)} = \frac{r_{12 \cdot 3(ij)} - r_{14 \cdot 3(ij)} r_{24 \cdot 3(ij)}}{\sqrt{(1 - r_{14 \cdot 3(ij)}^2)(1 - r_{24 \cdot 3(ij)}^2)}} \quad (15)$$

式中: $ES1$ 、 $ES2$ 分别代表两种生态系统服务; r 代表两类生态系统服务间的相关系数; i, j 代表栅格中像元的行号和列号; n 代表时间序列; $r_{12(ij)}$ 代表年降水量与 NDVI 均发生变化时, $ES1$ 、 $ES2$ 的相关系数,同理求得 $r_{13(ij)}$ 、 $r_{23(ij)}$ 、 $r_{14(ij)}$ 、 $r_{24(ij)}$ 、 $r_{34(ij)}$; $r_{12 \cdot 3}$ 代表年降水量不变的情况下,两种生态系统服务在像元 ij 上的一级偏相关系数;同理求得 $r_{14 \cdot 3}$ 、 $r_{24 \cdot 3}$; $r_{12 \cdot 34}$ 代表年降水量与 NDVI 不变的情况下,两种生态系统服务在像元 ij 上的二级偏相关系数。通过 t 检验判断两种生态系统服务相关性的显著性。若 $r > 0$,则表明两类生态系统服务之间呈协同关系;若 $r < 0$,则表明两类生态服务之间呈权衡关系,若 $r = 0$,则表明两类生态服务之间无相关关系。

3 结果分析

3.1 生态系统服务权衡与协同分析

本文基于 R 语言的相关分析函数探究生态系统服务之间的权衡与协同关系,通过 ArcGIS 的 Sample 工具分别对 1993—2013 年延安市 NPP、食物供给、水源涵养和土壤保持四种生态系统服务价值进行样点采集,获取点矢量图层,然后利用 Corrgram 函数和 Scatterplot Matrix 函数,通过饼状图和散点矩阵图表示各生态系统服务功能之间的相关性。在饼图中,蓝色表示正相关,红色表示负相关,颜色越深说明两个变量的相关性越大。图中上三角单元格颜色的含义和下三角单元格相同,但相关程度的大小是由饼状图被填充的面积多少来表示的,相关性越大则填充的面积越多,正相关性从 12 点钟处顺时针方向填充饼图,负相关则逆时针方向填充饼图。在散点图中,主对角线表示核密度曲线图,主对角线下部横轴则为轴须图,其余图形表示平滑拟合曲线,通过拟合曲线来显示各类生态系统服务的相关关系及状态。

各类生态系统服务之间的相关性如饼图所示(图 3),食物供给与土壤保持、水源涵养以及 NPP 均呈负相关,且食物供给与 NPP 的负相关程度较强,NPP 与土壤保持、水源涵养之间均呈正相关,且水源涵养与 NPP 之间的正相关最强,其次土壤保持与水源涵养存在较为显著的正相关。该时期生态服务之间的变化关系如散点图所示(图 4),NPP 与土壤保持、NPP 与水源涵养、土壤保持与水源涵养之间都呈明显随之增加而增加的变化。结果表明,NPP 与土壤保持、NPP 与水源涵养、土壤保持与水源涵养为协同关系;食物供给与 NPP、土壤保持以及水源涵养为权衡关系。分析其成因可知,NPP、土壤保持和水源涵养价值较高的林草地区域,食物供给功能较弱;而食物供给功能较强的耕地区域,NPP、土壤保持和水源涵养服务较弱。

3.2 生态系统服务权衡与协同的时间动态变化

以 1993—2013 年为时间序列,对延安市 4 种生态系统服务价值权衡与协同关系进行动态趋势分析,结果如图

5 所示,图中相关系数均通过 0.05 显著性检验。从图中可以看出,延安市各类生态系统服务权衡与协同程度都发生了一定变化,以协同程度的动态变化最为明显,波动幅度较大,整体呈下降趋势。其中,NPP 与水源涵养协同关系的波动幅度最大,递减趋势较为显著,而 NPP 与土壤保持、土壤保持与水源涵养协同关系的下降幅度较小,两者变化趋势大致相同。NPP 主要来源于森林覆盖区域植被的有机物质量,而高植被覆盖区域土壤保持价值量也较高,其次水源涵养主要受降水和土地覆盖变化影响,平均价值量较高的区域为林地,因此三者之间具有较强的协同作用;另一方面,生态服务权衡程度波动幅度较小,呈现冲突不断增加的趋势,以水源涵养和食物供给权衡程度的增加最为明显,而土壤保持与食物供给权衡关系波动幅度较小,呈现平稳增加趋势。其次 NPP 与食物供给的冲突关系最为明显,且不断增加,由于食物供给价值量以耕种业、渔业和牧业为主,在耕地区域平均价值量较高,而 NPP 价值量较低,所以权衡程度较强。总之,20 年来延安市生态系统服务整体表现为权衡加强协同减弱的趋势。

3.3 退耕还林对权衡与协同动态变化的影响

退耕还林政策是通过对不宜耕种的土地进行有序的还林、还草等,以植被恢复为主,改变土地利用结构和方式,使耕地转化为林地或草地,对该区域生态系统服务功能产生了一定的影响。因此,提取退耕还林区及非

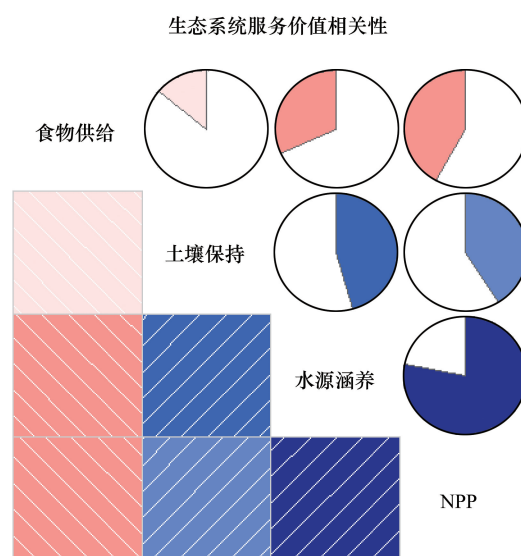


图 3 1993—2013 年延安市生态系统服务相关性饼状图

Fig.3 The Pie chart of correlation between ecosystem services in Yanan from 1993 to 2013

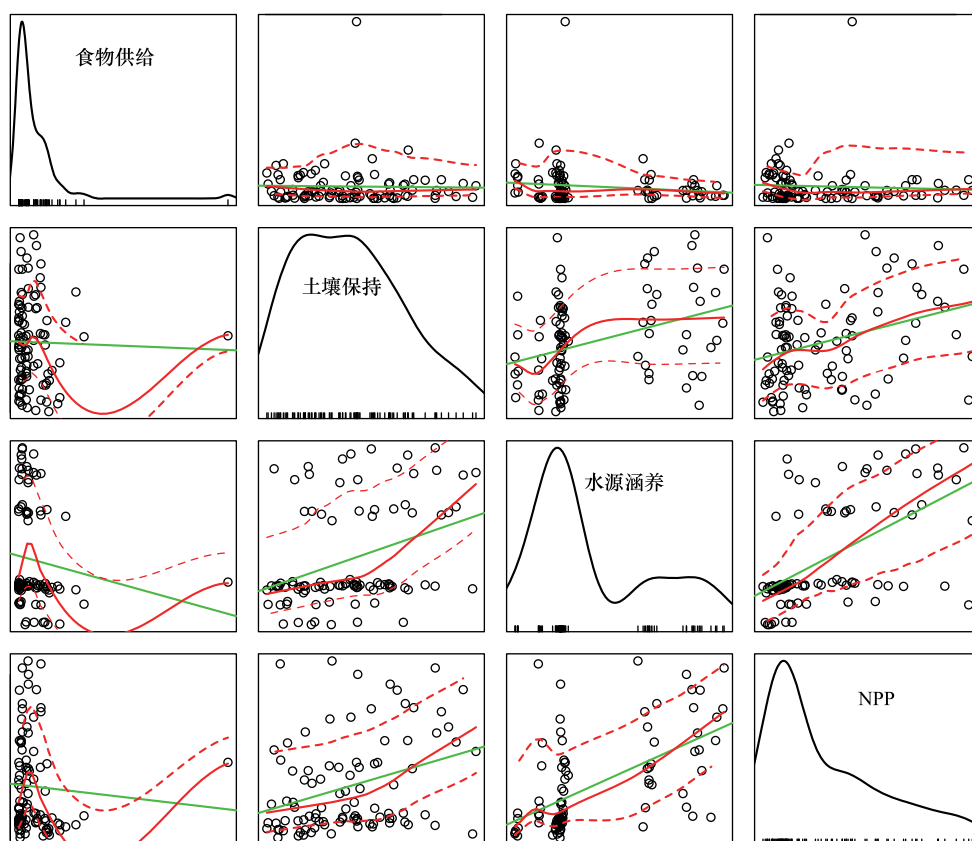


图 4 1993—2013 年延安市生态系统服务相关性散点图

Fig.4 The Scatter plot of correlation between ecosystem services in Yanan from 1993 to 2013

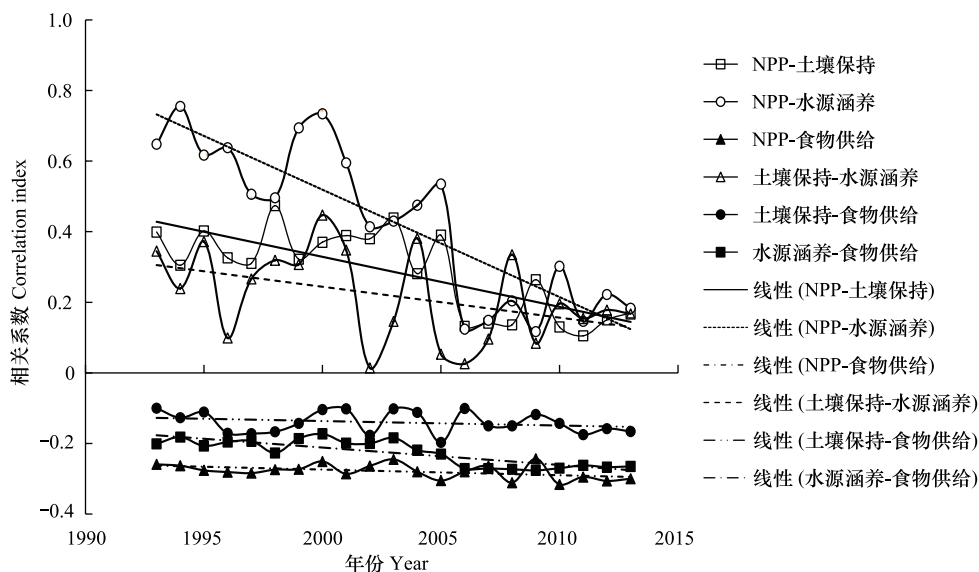


图 5 1993—2013 年延安市生态系统服务之间相关系数的动态变化

Fig.5 The dynamic change of correlation coefficient between ecosystem services in Yanan from 1993 to 2013

退耕还林区各类生态系统服务价值,分析其权衡与协同关系的动态变化(图 6),探讨退耕还林政策对生态系统权衡与协同的影响。

从图 6 中可以看出,退耕还林区与非退耕还林区 NPP 与土壤保持、NPP 与水源涵养均呈协同关系。在

2006 年之前,非退耕还林区 NPP 和土壤保持的协同程度要大于退耕还林区,2006 年之后情况与之相反,此外 NPP 与水源涵养在 2005 年前后也表现出相同的变化特征。从动态变化来看,协同关系总体呈现减弱趋势,但退耕还林区协同减弱的趋势明显小于非退耕还林区,这表明退耕还林提高了生态服务的支持功能,伴随 NPP 的增加土壤保持与水源涵养也不断增加,彼此之间相互促进,协同关系不断加强;非退耕还林区 NPP 与食物供给呈负相关,退耕还林区 NPP 与食物供给呈正相关,NPP 随着食物供给的增加而增加,由此可见随着林地面积不断增加,人类合理开发利用木材资源使得林业总产值增加,食物供给价值量不断增加,导致 NPP 与食物供给同向增加;其次,土壤保持与水源涵养在退耕还林区均表现为协同关系,而非退耕还林区协同作用不断下降并最终在 2002 年之后转为冲突关系;土壤保持与食物供给、水源涵养与食物供给在退耕还林区与非退耕还林区相关性均为负值,即为权衡关系,但退耕还林区权衡程度更小,冲突关系较弱。从整体动态变化来看,退耕还林区大多呈现协同加强权衡减弱的趋势,这与生态系统服务加强协同、减弱冲突的生态管理目标相符合,促进了生态环境的协调发展;而在非退耕还林区,存在生态服务冲突加强、协同减弱的现象。因此,降低人类社会对生态服务的干扰性,减少生态冲突的发生,对现在和未来生态系统服务权衡关系具有减弱作用,反映了退耕还林政策有利于实现自然环境和人类社会的协调发展。

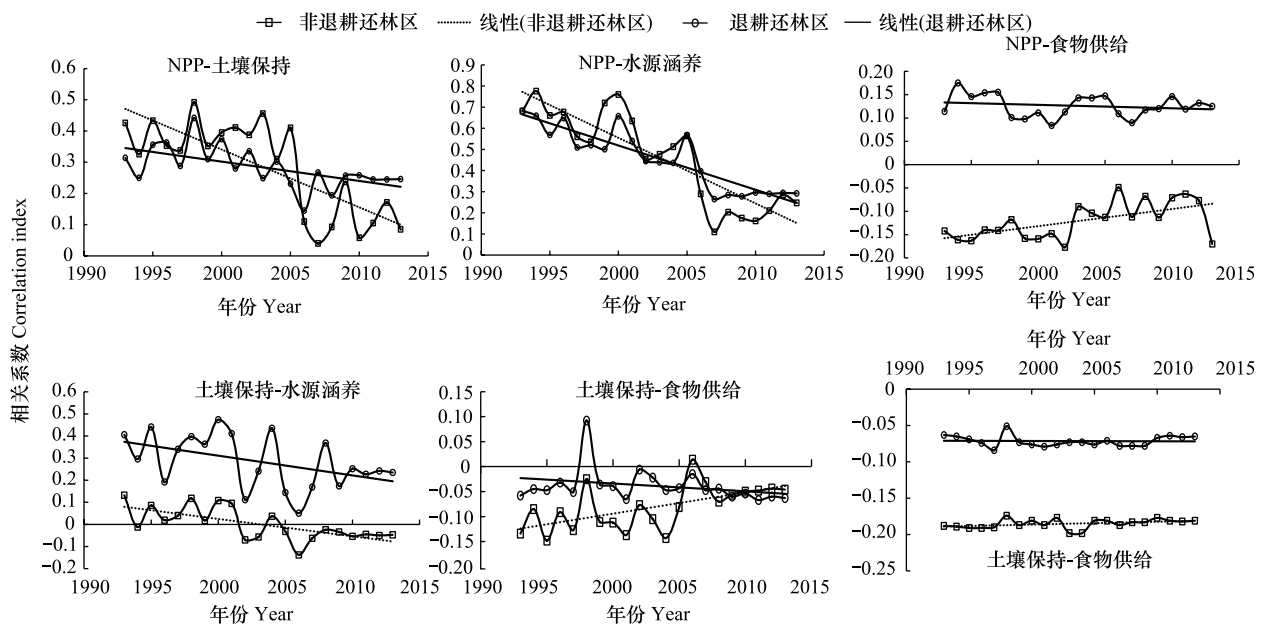


图 6 延安市退耕还林区与非退耕还林区生态服务间相关系数动态变化图

Fig.6 The dynamic change of correlation coefficient between ecosystem services in Yanan of Grain-for-Green Program and non-Grain-for-Green Program

3.4 地形坡度对生态系统服务的影响

除了退耕还林等人为影响因子外,自然环境也是生态系统服务权衡与协同关系的重要影响因素,黄土高原具有典型的沟壑纵横地貌形态,景观差异较大,不同地形坡度下土地利用类型不同。因此,本文依据《土地利用现状调查技术规程》分别提取 $\leq 2^\circ$ 、 $2^\circ-6^\circ$ 、 $6^\circ-15^\circ$ 、 $15^\circ-25^\circ$ 、 $>25^\circ$ 地形坡度下 NPP、水源涵养、食物供给价值量,分析各类生态系统服务在不同地形坡度下权衡与协同关系的动态变化。

从图 7 可以看出,NPP 与水源涵养的协同关系在坡度为 $2^\circ-6^\circ$ 时最大,到 2005 年协同程度整体显著下降,以 $6^\circ-15^\circ$ 和 $15^\circ-25^\circ$ 最为明显,而坡度大于 25° 变化趋于稳定;NPP 与食物供给的相关关系在不同坡度上较为复杂,既存在协同又存在权衡关系,坡度为 $2^\circ-6^\circ$ 、 $6^\circ-15^\circ$ 和 $15^\circ-25^\circ$ 以权衡关系为主,其中坡度 $15^\circ-25^\circ$ 地区矛盾冲突最大,且逐年增加。坡度为 $0^\circ-2^\circ$ 和 $>25^\circ$ 以协同作用为主, $>25^\circ$ 地区协同作用最为显著,变化趋势较为平稳;在图 7 中,水源涵养与食物供给在坡度为 $15^\circ-25^\circ$ 和 $0^\circ-2^\circ$ 相关系数为负,矛盾冲突

较大,权衡关系显著。坡度为 2° — 6° 和 6° — 15° 地区相互作用基本一致,以协同为主,坡度 $>25^{\circ}$ 地区协同作用显著,呈不断上升状态。通过以上研究可以看出,在坡度 0° — 2° 、 2° — 6° 和 6° — 15° 地区生态服务之间相互作用基本保持稳定,对生态服务管理影响不大;坡度为 15° — 25° 地区各类服务之间矛盾冲突显著且不断增强,这与该地区生态修复措施不适宜或执行不全面有关,坡度为 15° — 25° 不属于退耕还林政策范畴,但其地形倾斜程度较大,水土流失现象严重,由于修复管理政策和修复标准不统一,使得该地区成为生态修复盲区,生态环境问题突出;但在坡度 $>25^{\circ}$ 地区各类生态服务之间表现为同向发展,即同增或同减,且协同关系趋于稳定,这与该地区实行较好的生态措施有关,坡度大于 25° 地区不允许开垦农作物,已开垦地区要退耕还林还草,这也证实了上文关于退耕还林措施有利于生态系统服务协同作用增强的研究。

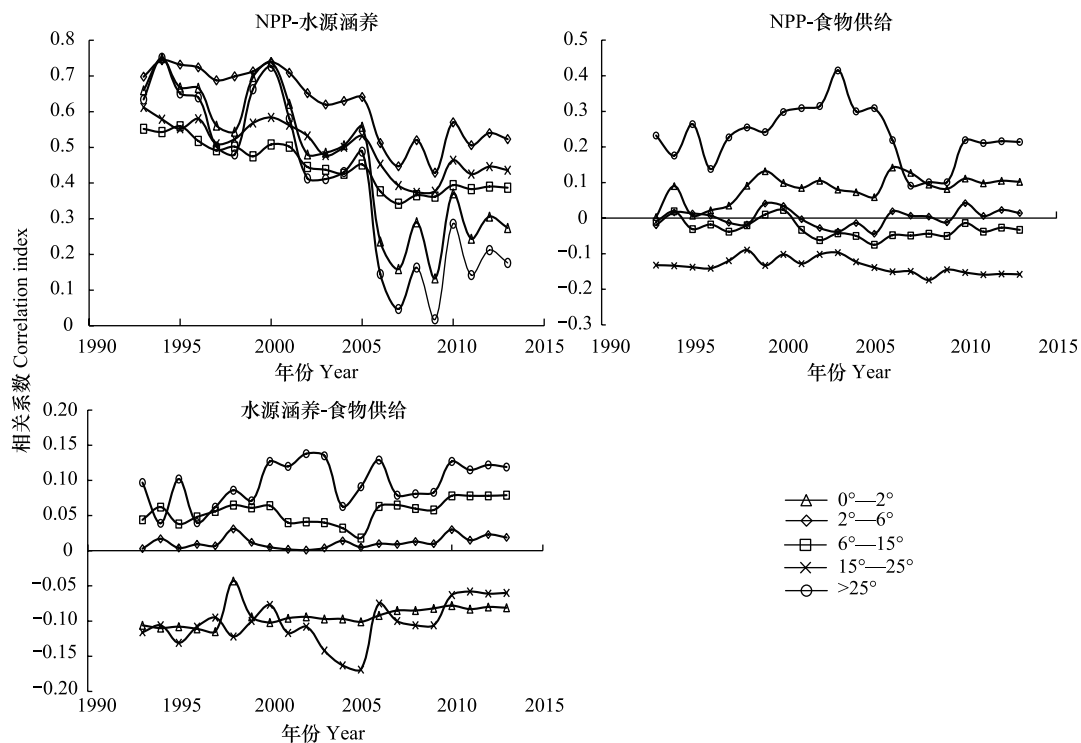


图7 延安市不同地形坡度下各类生态系统服务间相关系数变化图

Fig.7 The dynamic change of correlation coefficient between ecosystem services in Yanan

3.5 权衡与协同的空间差异分析

本文以 20 年连续时间序列的 NPP、水源涵养和食物供给价值量为基础,基于像元尺度对其进行偏相关分析,对延安市生态系统服务间的权衡和协同关系进行空间差异分析(图 8)。在图 8 中,NPP 与水源涵养的协同关系较为显著,空间上呈现北高南低的分布规律,在延安市北部以及中部地区协同关系较强,其中安塞县最为显著,其次是宝塔区、甘泉县、志丹县和吴旗县,主要分布在草地和部分林地地区。延安市西南部及东南部的耕地和林地地区协同关系较弱,以黄陵县、富县西部、黄龙县南部以及宜川县东部为主;NPP 与食物供给权衡与协同关系的空间分布特征较为复杂,整体呈现此消彼长的权衡关系,在延安市东北部及中部地区冲突关系显著,以安塞县、子长县、宝塔区南部以及延川县东部为主,该区域主要以耕地和部分草地为主,NPP 减少伴随着食物供给价值量的增加,人口增加,城市扩张,粮食需求增加,扩大农田面积导致林地面积减少,固碳能力降低,NPP 价值量减少,从而使得 NPP 与食物供给的制约关系更为突出;水源涵养与食物供给此消彼长的权衡关系在区域范围内广泛存在,权衡程度较高的区域主要分布在延安市西南和东南部,土地利用类型以林地和耕地为主,黄陵县权衡关系最为显著,其次为富县西南部和黄龙县。延安市北部和西部权衡关系较弱,以安塞县、志丹县南部以及甘泉县西部为主。

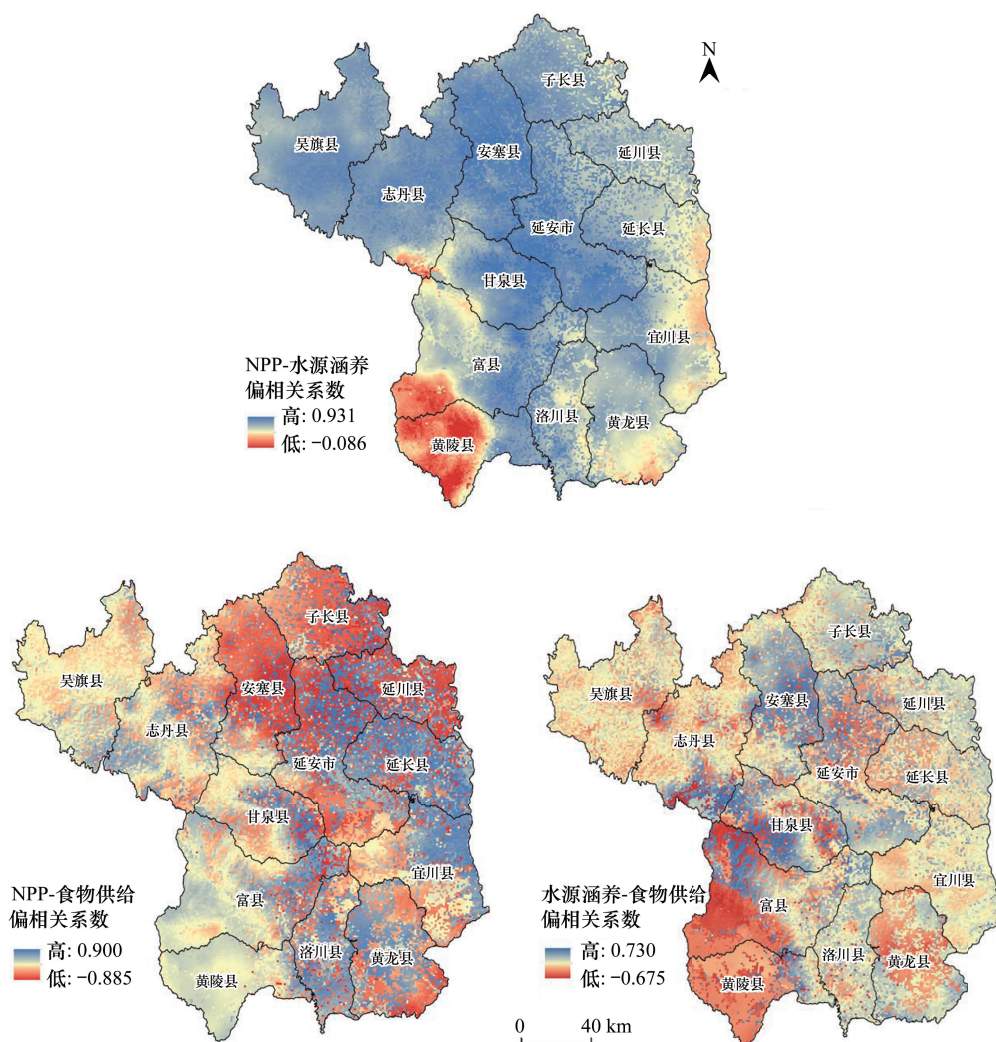


图8 延安市生态系统服务之间相关关系空间分布图

Fig.8 The distribution of correlation between ecosystem services in Yanan

4 结论与讨论

4.1 结论

(1) 延安市各类生态系统服务呈现不同的相关性,食物供给与土壤保持、水源涵养、NPP 均呈现权衡关系,NPP 与土壤保持、水源涵养呈现协同关系,土壤保持与水源涵养呈现协同关系。20 年来,延安市生态系统服务整体表现为权衡加强协同减弱的趋势。

(2) 退耕还林区各类生态系统服务间多呈协同关系,非退耕还林区多表现为冲突关系。从动态变化趋势来看,退耕还林区呈现协同加强权衡减弱的趋势,这与减少冲突增加协同的生态管理目标相一致,表明退耕还林措施有利于生态环境的可持续发展。

(3) 在不同地形坡度下,各类生态系统服务的权衡与协同关系变化存在差异,在坡度为 $\leq 2^\circ$, $2^\circ-6^\circ$ 和 $6^\circ-15^\circ$ 地区生态服务相互作用动态变化保持稳定;在坡度为 $15^\circ-25^\circ$ 地区表现为显著冲突关系,且不断加强;坡度大于 25° 地区生态服务之间相互促进,以协同作用为主。

(4) NPP 与水源涵养的协同关系在延安市北部和中部较强,西南部及东南部较弱;NPP 与食物供给的冲突关系在东北部及中部较高,东部和南部则较低;水源涵养与食物供给权衡程度在西南部和东南部地区较强,

北部和西部则较低。

4.2 讨论

目前对于生态系统服务权衡与协同研究多集中于各类生态系统服务的相互作用、自然人文系统的耦合分析以及表现类型上,对于权衡与协同关系的空间动态表达以及影响因素分析较少。因此,本文基于偏相关空间统计分析,直观定量地展现了不同区域各类生态系统服务之间相互关系的空间分布特征,并对生态服务相互作用动态变化的影响因素进行了区域分析。生态系统服务类型较多,各类服务之间存在着复杂的权衡与协同关系,造林可以增加碳存储,加强固碳释氧、调节气候的能力,在土壤侵蚀严重地区也起到了水土保持作用,提高了生态系统的支持与调节服务。此外,耕地面积增加,可以提高粮食产量,但其导致植被覆盖度减少固碳量减少,同时城市扩张又使得农田面积减少威胁着粮食安全问题。因此,合理优化配置生态服务之间的相关关系,协调人口、生态、资源、环境的和谐发展显得尤为重要。生态系统服务具有尺度效应,不同区域权衡与协同关系不同,对于相互增益的生态系统,如果选取区域不当,也会出现权衡关系。本研究只选取了黄土高原典型区延安市,在接下来的研究中有必要基于小尺度、中尺度和大尺度探讨生态系统服务权衡与协同关系的动态变化及影响因素,例如涉及整个黄土高原地区、陕北矿区以及延安市典型区南泥湾等,根据区域特点权衡土地资源中的各类冲突,从而提出更加精准的土地管理政策。

参考文献 (References):

- [1] Daily G C. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington DC: Island Press, 1997: 1-25.
- [2] Costanza R, D'Arge R, De Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, Van Den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [3] Rodríguez J P, Beard T D Jr, Bennett E M, et al. Trade-offs across space, time, and ecosystem services. *Ecology and Society*, 2006, 11(1): 28-28.
- [4] Barbier E B, Koch E W, Silliman B R, Hacker S D, Wolanski E, Primavera J, Granek E F, Polasky S, Aswani S, Cramer L A, Stoms D M, Kennedy C J, Bael D, Kappel C V, Perillo G M, Reed D J. Coastal ecosystem-based management with nonlinear ecological functions and values. *Science*, 2008, 319(5861): 321-323.
- [5] 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.
- [6] 欧阳志云, 朱春全, 杨广斌, 徐卫华, 郑华, 张琰, 肖隼. 生态系统生产总值核算: 概念、核算方法与案例研究. *生态学报*, 2013, 33(21): 6747-6761.
- [7] 李鹏, 姜鲁光, 封志明, 于秀波. 生态系统服务竞争与协同研究进展. *生态学报*, 2012, 32(16): 5219-5229.
- [8] Song W, Deng X Z. Land-use/Land-cover change and ecosystem service provision in China. *Science of the Total Environment*, 2017, 576: 705-719.
- [9] Costanza R, De Groot R, Sutton P, Van Der Ploeg S, Anderson S J, Kubiszewski I, Farber S, Turner R K. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 2014, 26: 152-158.
- [10] Costanza R, De Groot R, Braat L, Kubiszewski I, Fioramonti L, Sutton P, Farber S, Grasso M. Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go? *Ecosystem Services*, 2017, 28: 1-16.
- [11] Martinez-Harms M J, Bryan B A, Figueroa E, Plissock P, Runtz R K, Wilson K A. Scenarios for land use and ecosystem services under global change. *Ecosystem Services*, 2017, 25: 56-68.
- [12] Francesconi W, Srinivasan R, Pérez-Miñana E, Willcock S P, Quintero M. Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to model ecosystem services: A systematic review. *Journal of Hydrology*, 2016, 535: 625-636.
- [13] Cord A F, Bartkowski B, Beckmann M, Dittrich A, Hermans-Neumann K, Kaim A, Lienhoop N, Locher-Krause K, Priess J, Schröter-Schlaack C, Schwarz N, Seppelt R, Strauch M, Václavík T, Volk M. Towards systematic analyses of ecosystem service trade-offs and synergies: Main concepts, methods and the road ahead. *Ecosystem Services*, 2017, 28: 264-272.
- [14] Richards D R, Friess D A. Characterizing coastal ecosystem service trade-offs with future urban development in a tropical city. *Environmental Management*, 2017, 60(5): 961-973.
- [15] Grundy M J, Bryan B A, Nolan M, Battaglia M, Hatfield-Dodds S, Connor J D, Keating B A. Scenarios for Australian agricultural production and land use to 2050. *Agricultural Systems*, 2016, 142: 70-83.

- [16] Adams V M, Pressey R L, Álvarez-Romero J G. Using Optimal land-use scenarios to assess trade-offs between conservation, development, and social values. *PLoS One*, 2016, 11(6): e0158350.
- [17] Trodahl M I, Jackson B M, Deslippe J R, Metherell A K. Investigating trade-offs between water quality and agricultural productivity using the Land Utilisation and Capability Indicator (LUCI)-A New Zealand application. *Ecosystem Services*, 2017, 26: 388-399.
- [18] Tolessa T, Senbeta F, Kidane M. The impact of land use/land cover change on ecosystem services in the central highlands of Ethiopia. *Ecosystem Services*, 2017, 23: 47-54.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 傅伯杰, 于丹丹. 生态系统服务权衡与集成方法. *资源科学*, 2016, 38(1): 1-9.
- [22] Li D L, Wu S Y, Liu L B, Liang Z, Li S C. Evaluating regional water security through a freshwater ecosystem service flow model: a case study in Beijing-Tianjian-Hebei region, China. *Ecological Indicators*, 2017, 81: 159-170.
- [23] Jia X Q, Fu B J, Feng X M, Hou G H, Liu Y, Wang X F. The tradeoff and synergy between ecosystem services in the Grain-for-Green areas in Northern Shaanxi, China. *Ecological Indicators*, 2014, 43: 103-113.
- [24] Feng Q, Zhao W W, Fu B J, Ding J Y, Wang S. Ecosystem service trade-offs and their influencing factors: a case study in the Loess Plateau of China. *Science of the Total Environment*, 2017, 607-608: 1250-1263.
- [25] Wu J X, Zhao Y, Yu C Q, Luo L M, Pan Y. Land management influences trade-offs and the total supply of ecosystem services in alpine grassland in Tibet, China. *Journal of Environmental Management*, 2017, 193: 70-78.
- [26] Karner K, Dißauer C, Enigl M, Strasser C, Schmid E. Environmental trade-offs between residential oil-fired and wood pellet heating systems: forecast scenarios for Austria until 2030. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 80: 868-879.
- [27] Cruz-Garcia G S, Sachet E, Blundo-Canto G, Vanegas M, Quintero M. To what extent have the links between ecosystem services and human well-being been researched in Africa, Asia, and Latin America? *Ecosystem Services*, 2017, 25: 201-212.
- [28] 孙艺杰, 任志远, 赵胜男, 张静. 陕西河谷盆地生态系统服务协同与权衡时空差异分析. *地理学报*, 2017, 72(3): 521-532.
- [29] Field C B, Randerson J T, Malmström C M. Global net primary production: combining ecology and remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 51(1): 74-88.
- [30] 任志远, 刘焱序. 西北地区植被净初级生产力估算模型对比与其生态价值评价. *中国生态农业学报*, 2013, 21(4): 494-502.
- [31] 王宗明, 张柏, 宋开山, 刘殿伟, 张树清, 李方, 国志兴. 松嫩平原土地利用变化对区域生态系统服务价值的影响研究. *中国人口·资源与环境*, 2008, 18(1): 149-154.
- [32] Foody G M, Cutler M E, Memmorrow J, Pelz D, Tangki H, Boyd D S, Douglas I. Mapping the biomass of Bornean tropical rain forest from remotely sensed data. *Global Ecology and Biogeography*, 2001, 10(4): 379-387.
- [33] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, McCool D K, Yoder D C. Predicting Soil Erosion By Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Washington D C: US Department of Agriculture Handbook, 1997: 703-703.
- [34] 章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究. *地理科学*, 2002, 22(6): 705-711.
- [35] Williams J R, Jones C A, Dyke P T. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Transactions of the ASAE*, 1984, 27(1): 129-144.
- [36] Liu B Y, Nearing M A, Shi P J, Jia Z W. Slope length effects on soil loss for steep slopes. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 64(5): 1759-1763.
- [37] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 黄丽, 张光元. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究. *水土保持学报*, 2000, 14(2): 19-24.
- [38] 李晶, 任志远. 秦巴山区植被涵养水源价值测评研究. *水土保持学报*, 2003, 17(4): 132-134, 138-138.
- [39] 王鹏涛, 张立伟, 李英杰, 焦磊, 王浩, 延军平, 吕一河, 傅伯杰. 汉江上游生态系统服务权衡与协同关系时空特征. *地理学报*, 2017, 72(11): 2064-2078.