

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.04.043.

唐志雄, 周自翔, 白继洲, 等. 泾河流域生态系统服务权衡/协同关系的尺度异质性研究[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 318-326.

TANG Zhixiong, ZHOU Zixiang, BAI Jizhou, et al. Scale Seterogeneity of Ecosystem Service Trade-offs/Synergies in the Jinghe River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4): 318-326.

# 泾河流域生态系统服务权衡/协同关系的 尺度异质性研究

唐志雄<sup>1</sup>, 周自翔<sup>1</sup>, 白继洲<sup>2</sup>, 付媛<sup>1</sup>

(1.西安科技大学 测绘科学与技术学院, 西安 710054; 2.陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 西安 710119)

**摘要:**[目的]探究泾河流域生态系统服务权衡/协同关系的尺度异质性,阐明权衡/协同关系在子流域尺度发生变化的主要原因,为黄土高原地区的生态保护和高质量发展提供科学参考。[方法]利用 SWAT 模型、CASA 模型、InVEST模型等量化粮食供给、土壤保持、产水、固碳、生境质量 5 种生态系统服务,并采用空间相关性统计方法从全流域和子流域两个尺度上进行生态系统服务及两两之间权衡/协同关系的尺度异质性研究。[结果](1)泾河流域粮食供给服务在流域东南部较强;土壤保持服务在流域北部、中部较弱,在西南部、东南部较强;产水服务在流域西部、南部以及东南部较强,在北部、东北部及东部地区较弱;固碳服务流域南部强于北部,东部强于西部;生境质量以中值区和高值区为主,其高值区主要分布在流域东部、东南部及西部,低值区主要分布在建设用地。(2)从全流域尺度来看,粮食产量和土壤保持、产水量、NPP 和生境质量以权衡关系为主;土壤保持和产水量、NPP 和生境质量以协同关系为主;产水量和 NPP 是协同关系为主,和生境质量是权衡关系为主;NPP 和生境质量是以协同关系为主。(3)泾河流域生态系统服务之间的权衡/协同关系在部分子流域发生改变,土地利用变化是其权衡/协同关系发生改变的重要原因。[结论]土地利用变化是泾河流域生态系统服务权衡/协同关系存在尺度差异性的主要性原因,未来应加强多尺度上的生态服务权衡/协同关系的研究。

**关键词:**生态系统服务; 权衡与协同; SWAT 模型; CASA 模型; InVEST 模型; 泾河流域

中图分类号:X171

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2023)04-0318-09

## Scale Seterogeneity of Ecosystem Service Trade-offs/Synergies in the Jinghe River Basin

TANG Zhixiong<sup>1</sup>, ZHOU Zixiang<sup>1</sup>, BAI Jizhou<sup>2</sup>, FU Yuan<sup>1</sup>

(1.College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2.School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China;)

**Abstract:**[Objective] The scale heterogeneity of ecosystem service trade-offs/synergies in Jinghe River Basin was investigated, and the main reasons for the change of trade-offs/synergies at sub-basin scale were elucidated, which could provide scientific reference for ecological protection and high-quality development in the Loess Plateau. [Methods] Soil and Water Assessment Tool (SWAT), Carnegie Ames-Stanford Approach (CASA) model, Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST) model were used to quantify five kinds of ecosystem services (food supply, soil conservation, water yield, carbon sequestration, and habitat quality), and spatial correlation statistical method was used to study the scale heterogeneity of ecosystem service trade-offs/synergies at the whole basin and sub-basin scales. [Results] (1) The food supply service in the Jinghe River Basin was stronger in the southeastern part of the basin. The soil conservation

收稿日期:2022-01-13

修回日期:2022-03-30

资助项目:国家自然科学基金(41771576, 42071285);国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目[合作交流-NSFC-NRF(中韩)](41811540400);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2018JM4010)

第一作者:唐志雄(1998—),男,湖南湘潭人,硕士研究生,主要从事生态系统服务研究。E-mail:tzx15675699729@163.com

通信作者:周自翔(1977—),男,陕西西安人,副教授,研究生导师,主要从事生态系统服务研究。E-mail:zzxcacat@qq.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

service was weaker in the northern and central parts of the basin, but stronger in the southwestern and southeastern parts of the basin. The water yield service was stronger in the western, southern and southeastern part of the basin, weaker in the north, northeast and eastern regions. The carbon sequestration service of the basin was stronger in the southern part than in the northern part, and in the eastern part than in the western part. The habitat quality was dominated by the median and high-value areas, and the high-value areas mainly distributed in the eastern part of the basin, southeast and west, low-value areas mainly distributed in construction land. (2) From the perspective of the whole basin scale, grain yield and soil conservation, water yield, NPP and habitat quality were mainly in trade-off relationship. Soil conservation and water yield, NPP and habitat quality were mainly in synergistic relationship. Water yield and NPP were mainly in synergistic relationship, and the trade-off relationship was the main one with the habitat quality. The NPP and the habitat quality were mainly based on the synergistic relationship. (3) The tradeoffs/synergies between ecosystem services in the Jinghe River Basin changed in some sub-basin, and land use change was the important reason for the changes in the tradeoffs/synergies. [Conclusion] Land use change is the main reason for the scale difference of ecosystem service trade-offs/synergies in the Jinghe River Basin. The research on ecosystem service trade-offs/synergies at multiple scales should be strengthened in the future.

**Keywords:** ecosystem services; trade-offs and synergy; SWAT model; CASA model; InVEST model; Jinghe River Basin

生态系统服务的相关概念最早在 20 世纪 60 年代被称为“环境服务”<sup>[1]</sup>。Daily 将生态系统服务定义为自然生态系统及其所包含的各类物种能够提供并满足人类生存所需的各种条件和过程,并阐述了生态系统服务的类型<sup>[2]</sup>。联合国千年生态系统评估将生态系统服务分为供给服务、调节服务、支持服务和文化服务四大类<sup>[3]</sup>。一种生态系统服务的增加或减少引起另一种生态系统服务的减少或增加,则称这两种生态系统服务是权衡关系,反之为协同关系<sup>[4]</sup>。21 世纪以来,随着人类社会的高速发展,人类活动对生态系统结构的破坏愈加明显,威胁了生态系统服务的可持续供给<sup>[5]</sup>,在全球共 24 项生态系统服务中,有 15 项现阶段处于下降状态<sup>[6]</sup>,并引发了一系列严峻的生态问题,如生物多样性下降<sup>[7]</sup>、水土流失<sup>[8]</sup>等,生态系统服务及其权衡/协同关系的相关研究成为了国际研究的热点和前沿<sup>[9-10]</sup>。目前评估生态系统服务间权衡/协同关系的常用方法有统计学方法<sup>[11-12]</sup>、情景模拟分析法<sup>[13-14]</sup>、空间分析制图法<sup>[15-16]</sup>、生态系统服务流分析方法<sup>[17-19]</sup>等。此外生态系统服务的权衡/协同关系受到不同空间尺度的影响,Hou 等<sup>[20]</sup>的研究结果表明粮食生产与产水量、NPP 之间的相关性在不同的空间尺度上表现不同。余玉洋等<sup>[21]</sup>研究发现在秦巴山区土壤保持等 5 种生态系统服务之间的权衡协同关系在不同的研究尺度下存在差异性。

作为最主要的生态系统类型之一,流域生态系统和人类社会息息相关,在生物多样性、水源涵养、土壤保持等方面发挥着重要作用。黄土高原具有独特侵

蚀沟壑地貌,极易发生侵蚀,是世界上生态环境最为脆弱的地区之一<sup>[22]</sup>,本文选择位于黄土高原的泾河流域作为研究区,根据其区域特点选取 5 种关键生态系统服务,采用统计数据并结合土地利用数据可视化粮食产量、SWAT 模型模拟土壤保持量、InVEST 模型模拟产水量和生境质量、CASA 模型模拟植被净初级生产力,采用空间相关性统计等方法对 2000—2020 年泾河流域的土地利用变化、生态系统服务的时空格局、生态系统服务间的权衡/协同关系及其驱动因素进行定量分析和评估,揭示其演变规律,为黄土高原地区的生态保护和高质量发展提供科学参考。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

泾河流域位于黄土高原中部腹地(106°14'—108°42'E, 34°46'—37°19'N),横跨陕西、甘肃、宁夏三省(自治区)。流域内地形变化明显,海拔 219~2 908 m,流域地处温带半湿润向半干旱气候过渡的地带,是典型的温带大陆性气候。降水年内分布具有显著的季节性差异,夏丰冬枯,降水多集中于 6—9 月,约占全年降水量的 70%。受大陆季风气候影响,降水量由南向北逐渐减少,局地暴雨集中,年际变化大,年均降水量为 350~650 mm。流域内植被类型多样,分布地带性明显,自南向北依次分布有落叶阔叶林、森林、草原等大的植被类型带。泾河流域地理位置见图 1。

### 1.2 数据来源

本文所需数据:(1) 数字高程模型(DEM)下载

自地理空间数据云;(2) 土壤数据下载自寒区旱区科学数据中心提供的世界土壤数据库(HWSD);(3) 归一化植被指数(NDVI)数据下载自美国国家航空航天局的 MOD13A1 数据集;(4) 气象数据下载自中国气象科学数据共享服务网,主要包括日降水量、相对湿度、风速、最高最低温度(太阳辐射数据由 SWAT 气象发生器模拟);(5) 张家山水文站逐日径流数据和泥沙数据下载于中华人民共和国水文统计年鉴;(6) 土地利用数据下载自中国科学院资源与环境科学数据中心和全球 30 m 地表覆盖数据集;(7) 子流域、水文响应单元(HRU)矢量数据根据高程、坡度等属性,由 SWAT 进行划分,其集水面积阈值为 65 000  $\text{hm}^2$ ,将整个流域划分成 39 个子流域,张家山水文站在第 37 号子流域;(8) 统计数据来自各县级统计年鉴。



图1 泾河流域地理位置

## 2 试验材料与方法

### 2.1 生态系统服务评估

**2.1.1 粮食供给估算** 采用单位面积的粮食产量对泾河流域内的粮食供给能力进行评估<sup>[23]</sup>。在县级尺度上,基于粮食产量、粮食播种面积的统计数据,并结合土地利用数据,利用 ArcGIS 的栅格计算器工具,对耕地类型进行单位面积粮食产量的赋值,得到泾河流域的单位面积粮食产量分布图。

**2.1.2 土壤保持估算** 美国农业部农业研究中心研发的面向大中尺度流域的 SWAT 模型<sup>[24]</sup>,考虑了土地利用变化、降雨强度和地表径流对土壤侵蚀的影响,在黄土高原也具有较高的适用性<sup>[25-26]</sup>,因此本文选取 SWAT

模型进行土壤侵蚀模拟,其计算公式如下:

$$\text{sed}_c = \text{sed}_q - \text{sed}_a = 11.8 \times (Q_{\text{surf}} \times q_{\text{peak}} \times \text{area}_{\text{hru}})^{0.56} \times K_{\text{USLE}} \times (1 - C_{\text{USLE}} \times P_{\text{USLE}}) \times \text{LS}_{\text{USLE}} \times \text{CFRG} \quad (1)$$

式中: $\text{sed}_c$  为土壤保持量(t); $\text{sed}_q$  为潜在土壤侵蚀量(t); $\text{sed}_a$  为实际土壤侵蚀量(t); $Q_{\text{surf}}$  为地表径流量( $\text{mm}/\text{hm}^2$ ); $q_{\text{peak}}$  为洪峰流量( $\text{m}^3/\text{s}$ ); $\text{area}_{\text{hru}}$  为 HRU 的面积( $\text{hm}^2$ ); $K_{\text{USLE}}$  为土壤可蚀性因子; $C_{\text{USLE}}$  为植被覆盖与管理措施因子; $P_{\text{USLE}}$  为水土保持措施因子; $\text{LS}_{\text{USLE}}$  为地形因子; $\text{CFRG}$  为地表粗糙系数。借助 SWAT-CUP 软件对 SWAT 模型进行敏感性参数分析、率定和验证<sup>[27]</sup>,使用确定性系数( $R^2$ )和纳什效率系数(NSE)评价 SWAT 模型模拟精度。评价指标的表达式如下:

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{mi} - Q_{oi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_o)^2} \quad (2)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_o)(Q_{mi} - Q_m)]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_o)^2 \sum_{i=1}^n (Q_{mi} - Q_m)^2} \quad (3)$$

式中: $Q_{mi}$  为模拟值; $Q_{oi}$  为实测值; $Q_m$  为模拟均值; $Q_o$  为实测均值。 $R^2$  表征模拟值与实测值变化趋势的一致性,NSE 反映模拟值与实测值之间的拟合程度。当  $R^2 > 0.6$   $\text{NSE} > 0.5$  时,认为 SWAT 模型模拟取得显著性效果<sup>[28]</sup>。

**2.1.3 产水量估算** 本文采用 InVEST 模型中的产水模块计算泾河流域的产水量,其基本原理是根据地形、土地利用、气候和土壤等数据,基于水量平衡计算产水量<sup>[29]</sup>。其计算公式如下:

$$Y_{xj} = (1 - \frac{\text{AET}_{xj}}{P_x}) \times P_x \quad (4)$$

$$\frac{\text{AET}_{xj}}{P_x} = \frac{1 + W_x \times R_{xj}}{1 + W_x \times R_{xj} + \frac{1}{R_{xj}}} \quad (5)$$

$$W_x = Z \times \frac{\text{AWC}_x}{P_x} + 1.25 \quad (6)$$

$$R = \frac{K_{xj} \times \text{ET}_x}{P_x} \quad (7)$$

式中: $Y_{xj}$  为栅格单元  $x$  中土地利用类型  $j$  的年产水量; $\text{AET}_{xj}$  为栅格单元  $x$  中土地利用类型  $j$  的实际蒸散量; $P_x$  为栅格单元  $x$  的降水量; $W_x$  为改进的植物可利用含水量与年预期降水量的比值; $R_{xj}$  为干燥指数; $Z$  为 Zhang 系数(季节因子,与降雨季节分布有关的位于 1~30 之间的浮点型数据); $\text{AWC}_x$  为栅格单元  $x$  的土壤有效含水量; $K_{xj}$  为栅格单元  $x$  中土地利用类型  $j$  的蒸散系数; $\text{ET}$  为参考作物蒸散。

**2.1.4 固碳服务估算** 固碳服务采用的指标为植被净初级生产力(NPP),在 NDVI、气象数据等支持下,采用



CASA 模型<sup>[30-31]</sup>, 通过光能利用率的原理来模拟植被吸收的光合有效辐射以及对光合有效辐射的转换比例, 从而估算研究区域的净初级生产力。计算表达式如下:

$$\text{NPP}(x, t) = \text{APAR}(x, t) \times \epsilon(x, t) \quad (8)$$

式中:  $\text{NPP}(x, t)$  是像元  $x$  在  $t$  月份的植被净初级生产力 ( $\text{gC}/\text{m}^2$ );  $\text{APAR}(x, t)$  代表的是像元  $x$  在  $t$  月吸收的光合有效辐射 ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ );  $\epsilon(x, t)$  代表的是像元  $x$  在  $t$  月的实际光能利用率 ( $\text{gC}/\text{MJ}$ )。植物吸收的光合有效辐射 (APAR) 的计算公式为:

$$\text{APAR}(x, t) = S(x, t) \times \text{FPAR}(x, t) \times 0.5 \quad (9)$$

式中:  $S(x, t)$  表示像元  $x$  在  $t$  月份太阳总辐射量 ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ );  $\text{FPAR}(x, t)$  为植被层对入射光合有效辐射的吸收比例, 其计算公式为:

$$\text{FPAR}(x, t) = \frac{\text{NDVI}(x, t) - \text{NDVI}_{\min}}{\text{NDVI}_{\max} - \text{NDVI}_{\min}} \times (\text{FPAR}_{\max} - \text{FPAR}_{\min}) + \text{FPAR}_{\min} \quad (10)$$

式中:  $\text{NDVI}_{\min}$  和  $\text{NDVI}_{\max}$  分别为 NDVI 最小值和最大值。

**2.1.5 生境质量估算** 生境质量是指生态环境能够提供适合自然生态条件的能力, 具有较强的地域性。生境质量的高低能反映区域生境的破碎程度以及对生境退化的抗干扰能力<sup>[32-33]</sup>。本文采用 InVEST 模型计算泾河流域的生境质量, 计算结果范围为 0—1, 值越大代表研究区对生境退化的抗干扰能力越强。计算公式为:

$$Q_{x,j} = H_j \left[ 1 - \left( \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z - k^z} \right) \right] \quad (11)$$

式中:  $Q_{x,j}$  表示土地利用类型  $j$  中的栅格  $x$  的生境质量;  $H_j$  表示土地利用类型  $j$  的生境适合性;  $D_{xj}$  表示土地利用类型  $j$  中的栅格  $x$  所受胁迫水平;  $Z$  表示归一化常量;  $k$  是缩放常数。

2.2 权衡协同研究方法

本研究使用空间统计方法探究逐像元下的生态系统服务相关性<sup>[21]</sup>, 将统计学方法和生态系统服务相结合, 可以研究长时间序列下生态系统服务的演变规律, 揭示生态系统服务间相互关系的空间格局。具体计算公式如下:

$$r_{i,j} = \frac{\sum_l^n (\text{ES}_{1n(i,j)} - \overline{\text{ES}}_{1i,j})(\text{ES}_{2n(i,j)} - \overline{\text{ES}}_{2i,j})}{\sqrt{\sum_l^n (\text{ES}_{1n(i,j)} - \overline{\text{ES}}_{1i,j})^2 (\text{ES}_{2n(i,j)} - \overline{\text{ES}}_{2i,j})^2 \sum_l^n (\text{ES}_{2n(i,j)} - \overline{\text{ES}}_{2i,j})^2}} \quad (12)$$

式中:  $r_{(ij)}$  表示  $\text{ES}_1, \text{ES}_2$  之间的相关系数;  $\text{ES}_1, \text{ES}_2$  分别表示两种生态系统服务;  $i, j$  表示研究区栅格的行列号;  $n$  表示研究的时间段。若  $r > 0$ , 表示两种生态系统服务为正相关, 即存在协同效应, 若  $r < 0$ , 表

示两种生态系统服务为负相关, 即存在权衡关系; 若  $r = 0$ , 表示两种生态系统服务之间不存在相关性。

3 结果与分析

3.1 土地利用变化

统计泾河流域 2000 年和 2020 年的土地类型面积比例 (表 1), 分析土地利用变化情况 (图 2), 得到下列结论: 耕地在 2000 年、2020 年面积占研究区面积比例分别为 47.52%, 45.94%; 草地分别占研究区面积比例为 33.76%, 33.23%; 林地分别占研究区面积比例为 17.71%, 18.51%。流域内耕地、草地、林地为主要土地类型, 占研究区面积的 95% 以上, 水域、建设用地、未利用地面积占比较小。6 种土地类型面积从大到小依次排序均为: 耕地 > 草地 > 林地 > 建设用地 > 未利用地 > 水域。耕地增加主要集中在 2, 3, 5, 6, 9, 22, 34 号子流域; 林地增加主要集中在 22, 24, 28, 29, 32, 34, 35, 36 号子流域; 草地增加主要集中在 2, 3, 5, 6, 9, 11, 17, 19, 22, 24, 28, 29, 34 号子流域; 水域增加主要集中在 11, 31, 35, 37, 38, 39 号子流域; 建设用地增加集中在 11, 17, 19, 22, 24, 28, 29, 34, 35, 36, 37, 38, 39 号子流域; 未利用地增加主要集中在 1, 2, 22 号子流域。

表 1 泾河流域土地利用类型面积比例 %

| 土地利用类型 | 2000 年 | 2020 年 |
|--------|--------|--------|
| 耕地     | 47.52  | 45.94  |
| 林地     | 17.71  | 18.51  |
| 草地     | 33.76  | 33.23  |
| 水域     | 0.16   | 0.06   |
| 建设用地   | 0.68   | 2.10   |
| 未利用地   | 0.17   | 0.17   |

3.2 泾河流域 SWAT 模型率定与验证

**3.2.1 参数敏感性分析** 通过敏感性分析, 最终得到对 SWAT 模型敏感性影响最强的 16 个参数, 敏感性参数及最优校准值见表 2, 其中调参方法 R 表示参数初始值乘以 (1 + 最优值), V 表示参数直接使用最优值替换。依据“先校准径流参数, 再校准泥沙参数”的原则<sup>[34]</sup>, 根据张家山水文站的实测数据对 SWAT 模型进行校准。

**3.2.2 SWAT 模型径流校准** 本文设定 1997—1999 年为模型的预热期, 2000—2010 年为率定期, 2011—2020 年为验证期。校准后模型率定期和验证期径流模拟的结果见图 3。分别为:  $R^2 = 0.74$ ,  $\text{NSE} = 0.73$  和  $R^2 = 0.78$ ,  $\text{NSE} = 0.78$ , 满足  $R^2 > 0.6$ ,  $\text{NSE} > 0.5$ , 月尺度径流量模拟结果与逐月实测数据相关性强, 周期分布一致, 模拟结果中的波峰、波谷与实测值接近, 表明校准后的 SWAT 模型在泾河流域径流的模拟结果达到模型模拟要求。

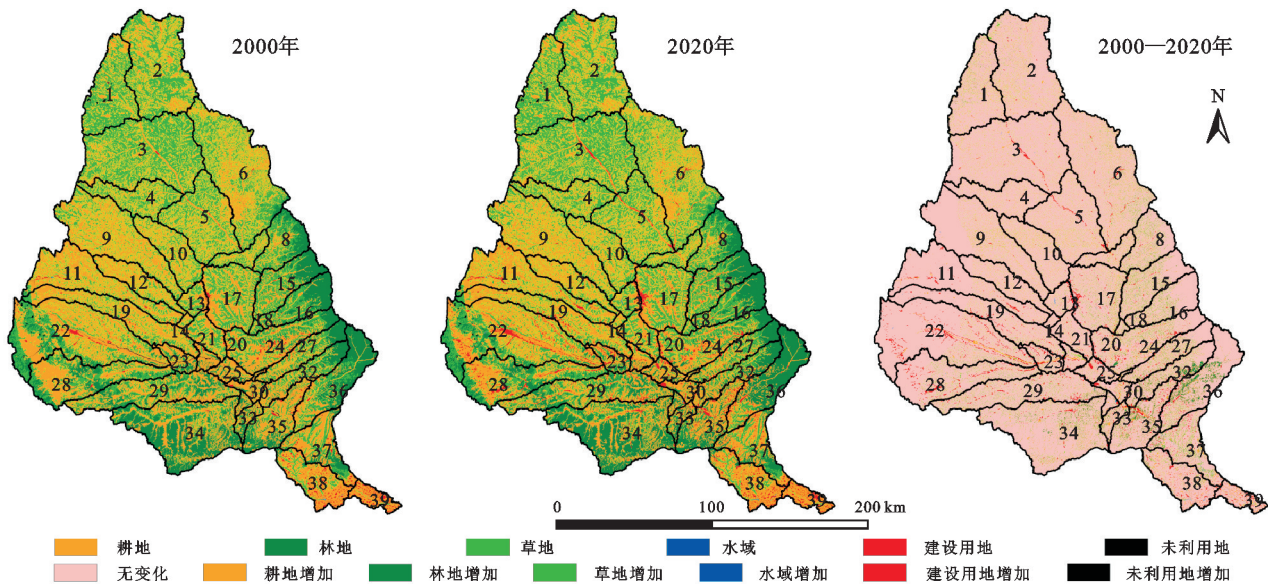


图 2 泾河流域土地利用类型空间分布

表 2 参数敏感性分析

| ++调参对象 | 参数名称     | 参数含义         | 敏感性排名 | 调参方法 | 参数范围        | 最优校准值     |
|--------|----------|--------------|-------|------|-------------|-----------|
| 径流     | SOL_K    | 土壤饱和导水率      | 1     | R    | -0.9~0.9    | -0.8425   |
|        | SOL_AWC  | 土壤有效含水率      | 2     | R    | -0.5~0.5    | 0.3959    |
|        | GWQMN    | 浅层地下水径流系数    | 3     | V    | 0~5000      | 2409.2715 |
|        | ESCO     | 土壤蒸发补偿系数     | 4     | V    | 0.01~1      | 0.0294    |
|        | SOL_BD   | 土壤湿密度        | 5     | R    | -0.5~0.5    | -0.4496   |
|        | CH_K2    | 主河道水力传导度     | 6     | V    | 0~150       | 58.8517   |
|        | ALPHA_BF | 基流系数         | 7     | V    | 0~1         | 0.9276    |
|        | CH_N2    | 主河道曼宁系数      | 8     | V    | 0~0.3       | 0.0179    |
|        | GW_DELAY | 地下水滞留系数      | 9     | V    | 0~500       | 390.1691  |
|        | CN2      | SCS 径流曲线系数   | 10    | R    | -0.5~0.5    | -0.4983   |
| 泥沙     | HRU_SLP  | 平均坡度         | 1     | R    | 0~1         | 0.6871    |
|        | SPEXP    | 计算最大沉积量的指数系数 | 2     | V    | 0~2         | 0.7569    |
|        | SPCON    | 计算最大沉积量的线性系数 | 3     | V    | 0.0001~0.01 | 0.0086    |
|        | CH_COV2  | 沟道覆盖因子       | 4     | R    | -0.001~1    | 0.8904    |
|        | CH_COV1  | 沟道可侵蚀因子      | 5     | R    | -0.05~0.6   | 0.2482    |
|        | EPCO     | 植被吸水补偿系数     | 6     | V    | 0.01~1      | 0.4993    |

3.2.3 SWAT 模型泥沙校准 张家山水文站 2015 年及以后的泾河输沙量数据尚未公开,在现有泥沙数据的基础上(1997—2014 年),对泥沙参数进行校准:1997—1999 年为预热期,2000—2007 年为率定期,2008—2014 年为验证期。校准后的模型率定期和验证期泥沙模拟结果见图 4,分别为: $R^2=0.61$ , $NSE=0.58$  和  $R^2=0.63$ , $NSE=0.61$ ,满足  $R^2>0.6$ , $NSE>0.5$ ,月尺度输沙量模拟结果与逐月实测数据相关性强,周期分布一致,模拟结果中波峰、波谷与实测值接近,表明校准后的 SWAT 模型在泾河流域泥沙的模拟结果达到模型模拟要求。

3.3 生态系统服务格局分析

从图 5 可知,泾河流域多年平均单位面积粮食产量在 0~5 304 kg/hm<sup>2</sup> 之间变化,其高值区主要分布在流域东南部的 30,32,33,35,37,38,39 号子流域,低值区广泛分布在流域东部、北部、西南部。泾河流域不同区域

单位面积土壤保持量差异明显,整体呈现北部、中部低,西南部和东南部高的分布趋势,通过空间分析可知,泾河流域单位面积土壤保持量多年平均值在 0~660.085 t/hm<sup>2</sup> 内变化,全流域平均值为 105.39 t/hm<sup>2</sup>。

单位面积土壤保持量高值区相对集中,主要分布在流域西南部六盘山的 22,28 号子流域和东南部子午岭的 27,33,38,39 号子流域;单位面积土壤保持量低值区位置零散,主要分布在流域北部黄土丘陵区 1,2,3 号子流域和中部董志原区的 17,19,24 号子流域。泾河流域多年平均产水量在 0~601.469 mm 的范围之间变化,泾河流域产水量低值区主要集中在流域北部的 1,2,3,6 号子流域和东部的 8,6,36 号子流域,而高值区分布在流域西部的 11,19,22,28,29 号子流域,中部的 24,25,30,32 号子流域以及东南部的 37,38,39 号子流域,说明泾河流域产水量南部强于北部,西部强于东部。泾河流域多年平均 NPP 值在 77.975 2~1 514.03 gC/m<sup>2</sup> 范围之间,

NPP 低值区主要集中在流域北部的 1,2,3,4,6 号子流域,西北部的 9,11,12,19 号子流域,中值区主要集中在流域中部的 13,14,17,21,24 号子流域,而高值区分布在流域的东部的 15,16,27,32,36 号子流域,南部的 33,34,35 号子流域以及东南部的 37,38,39 号子流域,说明泾河流域植被固碳服务南部强于北部,东部强于西部。泾河流域生境质量主要以中值区和高值区为

主,其高值区主要分布在流域东部的 8,15,16,36 号子流域,西部的 22 号子流域,低值区主要零散分布在城镇区域,包括流域中部的 13,17,21,24 号子流域,东南部的 38,39 号子流域。值得注意的是,低值区、高值区的生境质量变化趋势为增长,而中值区生境质量变化趋势为下降,这是城镇化发展和实施退耕还林还草工程双重作用导致的结果。

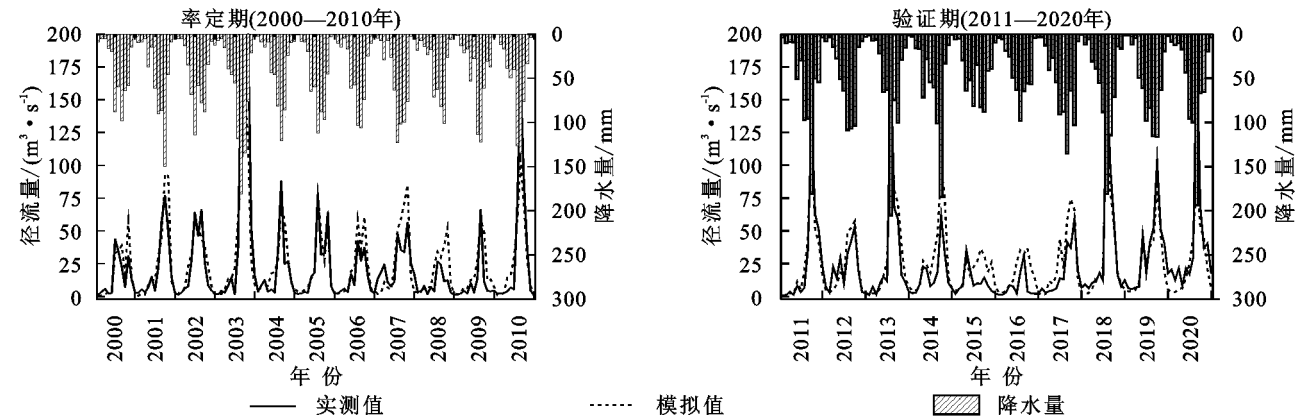


图 3 泾河流域逐月径流量实测值与模拟值对比

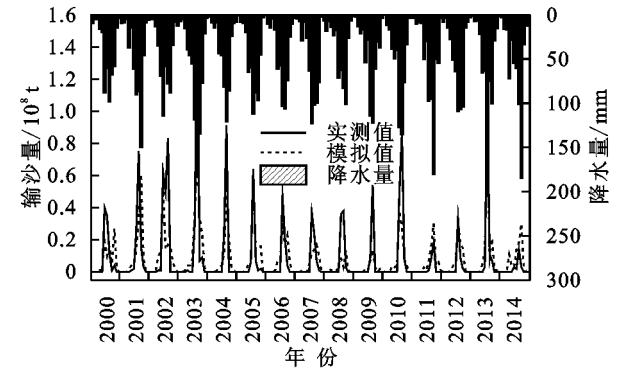


图 4 泾河流域逐月输沙量实测值与模拟值对比

3.4 生态系统服务权衡

对泾河流域 2000—2020 年生态系统服务间的相关系数进行计算,分析不同生态系统服务间权衡关系的空间格局。由表 3 可知,粮食产量和土壤保持、产

水量、NPP 和生境质量以权衡关系为主,是因为粮食生产主要发生在耕地,而耕地的土壤保持、产水量、NPP 和生境质量均较差。土壤保持和产水量、NPP 和生境质量以协同关系为主,是因为土壤保持主要发生在林地、草地,而林地、草地的产水量、NPP、生境质量较好。产水量和 NPP 之间是协同关系,是因为两者都和植被覆盖有关,植被覆盖较好的区域产水能力和 NPP 比较强,两者的协同关系更强;产水量和生境质量之间是权衡关系,产水服务在林地、草地、水域较强,生境质量在林地、草地较强,在降水、温度、地形等因子的共同作用,两者呈现权衡关系。NPP 和生境质量是以协同关系为主,NPP 和生境质量主要发生在林地、草地等高植被覆盖区域,植被覆盖度越高,两者的协同关系越强。

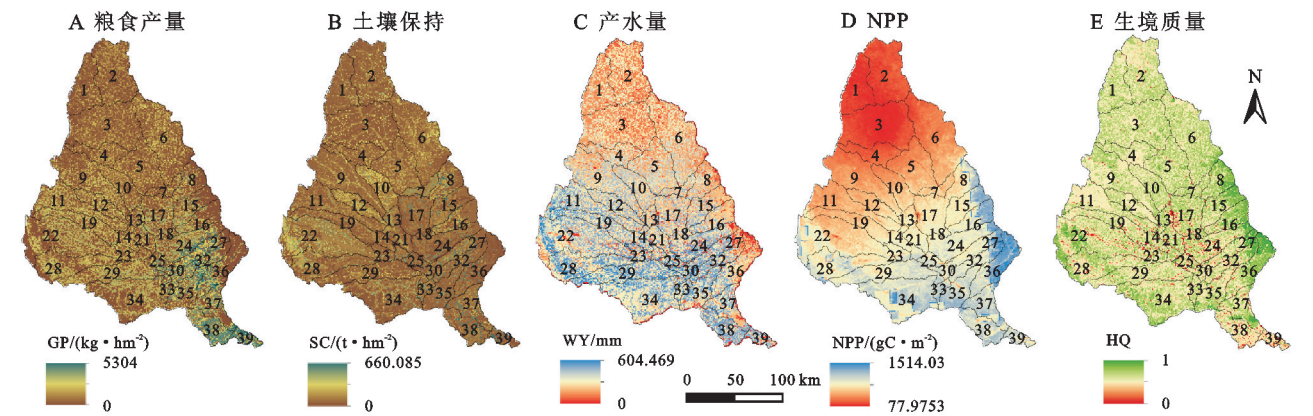


图 5 泾河流域生态系统服务空间分布

生态系统服务间存在权衡/协同关系的其中一个重要原因是某种特定的外部因素对两种或两种以上

的生态系统服务产生了影响,土地利用变化是最直接最具代表性的外部因素。由图 6 可知,粮食产量和土



壤保持服务、产水服务以权衡关系为主,但在子流域 38,39 中呈现协同关系,主要原因是该区域海拔较低,坡度较大,不适合粮食生产,同时结合土地利用变化发现建设用地变多,耕地减少,导致粮食产量减少,实际和潜在侵蚀量较小,促使土壤保持能力和产水能力减弱。土壤保持和产水量总体上是协同关系,但在子流域 8,14,15,16,17,18,20,21,23,32,34 中呈现权衡关系,该区域退耕还林(还草)工程效应显著,林地、草地增加,植被恢复改善了生态环境,抑制了水土流失,加强了土壤保持服务和产水服务;土壤保持和 NPP 总体上是协同关系,但在子流域 8,15,16,18,24,25,26,27,30,31,32,33,34,36 中呈现权衡关系,此区域土地利用变化特征为林地、草地、建设用地增加,林地、草地增加改善了生态环境,土壤保持服务增强,城市化进程又抑制了 NPP;土壤保持和生境质量总体上是协同关系,但在子流域 1,2,4,8,13,15,16,17,20,24,26,27,31,34,35,36,37,39 中呈现权衡关系,主要原因是此区域建设用地增多,导致土壤保持服务减弱,同时由于退耕还林还草工程使得植被恢复显著,导致生境质量增强。产水量和生境质量总体上是权衡关系,但在子流域 8,26,27,29,31 中呈现协同关系,原因是子流域内建设用地增多,生活和工业用水增多,植被覆盖减少导致生境质量下降,同时减弱了地表植被的蒸腾作用,促使产水服务减弱。NPP 和生境质量总体上是协同关系,但在子流域 1,4,13,14,17,18,20,30,32,33,35,36,37,38,39 中呈现权衡关系,此区域林地、草地、耕地、建设用地增加,林地、草地增加改善了植被恢复,加强了 NPP 和生境质量,但是耕地、建设用地增加导致植被减少,减弱了 NPP 和生境质量,综合影响下使得 NPP 和生境质量

表 3 泾河流域生态系统服务间的相关性系数

| 类型    | 粮食产量 | 土壤保持量   | 产水量     | NPP     | 生境质量    |
|-------|------|---------|---------|---------|---------|
| 粮食产量  | 1    | -0.6946 | -0.5807 | -0.5853 | -0.7803 |
| 土壤保持量 | -    | 1       | 0.4382  | 0.3727  | 0.0047  |
| 产水量   | -    | -       | 1       | 0.6365  | -0.0889 |
| NPP   | -    | -       | -       | 1       | 0.0663  |
| 生境质量  | -    | -       | -       | -       | 1       |

## 4 结论

通过 SWAT 模型、InVEST 模型、CASA 模型等对 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年泾河流域的粮食供给服务、土壤保持服务、产水服务、固碳服务和生境质量进行量化研究。结果表明:

(1) 流域内耕地、草地、林地为主要土地类型,占研

究区面积的 95% 以上,水域、建设用地、未利用地面积占比较小。耕地增加主要集中在 2,3,5,6,9,22,34 号子流域;林地增加主要集中在 22,24,28,29,32,34,35,36 号子流域;草地增加主要集中在 2,3,5,6,9,11,17,19,22,24,28,29,34 号子流域;水域增加主要集中在 11,31,35,37,38,39 号子流域;建设用地增加集中在 11,17,19,22,24,28,29,34,35,36,37,38,39 号子流域;未利用地增加主要集中在 1,2,22 号子流域。

(2) 泾河流域粮食供给服务在东南部的 30,32,33,35,37,38 号子流域较强;土壤保持服务整体呈现北部、中部低,西南部的 22,28 号子流域和东南部的 27,33,38,39 号子流域较高的分布趋势;产水服务在流域西部的 11,19,22,28,29 号子流域、中部的 24,25,30,32 号子流域以及东南部的 37,38,39 号子流域较强,在流域北部、东北部及东部地区较弱;固碳服务流域南部优于流域北部,流域东部由于流域西部,高值区主要分布在流域东部的 15,16,27,32,36 号子流域、南部的 33,34,35 号子流域以及东南部的 37,38,39 号子流域;生境质量主要以中值区和高值区为主,其高值区主要分布在流域东部、东南部及西部,低值区主要分布在流域中部的 13,17,21,24 号子流域,东南部的 38,39 号子流域。

(3) 从全流域尺度来看,粮食产量和土壤保持、产水量、NPP 和生境质量以权衡关系为主;土壤保持和产水量、NPP 和生境质量以协同关系为主;产水量和 NPP 是协同关系为主,和生境质量是权衡关系为主;NPP 和生境质量是以协同关系为主。权衡/协同关系在子流域尺度发生了变化的有:粮食产量和土壤保持、产水服务是权衡关系,但在子流域 38,39 中呈现协同关系;土壤保持和产水量是协同关系,但在子流域 8,14,15,16,17,18,20,21,23,32,34 中呈现权衡关系;土壤保持和 NPP 是协同关系,但在子流域 8,15,16,18,24,25,26,27,30,31,32,33,34,36 中呈现权衡关系;土壤保持和生境质量是协同关系,但在子流域 1,2,4,8,13,15,16,17,20,24,26,27,31,34,35,36,37,39 中呈现权衡关系;产水量和生境质量是权衡关系,但在子流域 8,26,27,29,31 中呈现协同关系;NPP 和生境质量是协同关系,但在子流域 1,4,13,14,17,18,20,30,32,33,35,36,37,38,39 中呈现权衡关系。

(4) 从子流域尺度来看,土地利用变化是生态系统服务之间的权衡/协同关系在部分子流域发生改变的重要原因。建设用地增加,耕地减少是改变粮食产量和土壤保持服务、产水服务权衡/协同关系的主要原因;林地、草地、建设用地增加是改变土壤保持服务

和产水服务、NPP、生境质量的重要原因; 建设用地增加是改变产水服务和生境质量权衡/协同关系的主要

原因; 林地、草地、耕地、建设用地增加是影响 NPP 和生境质量权衡/协同关系的主要原因。

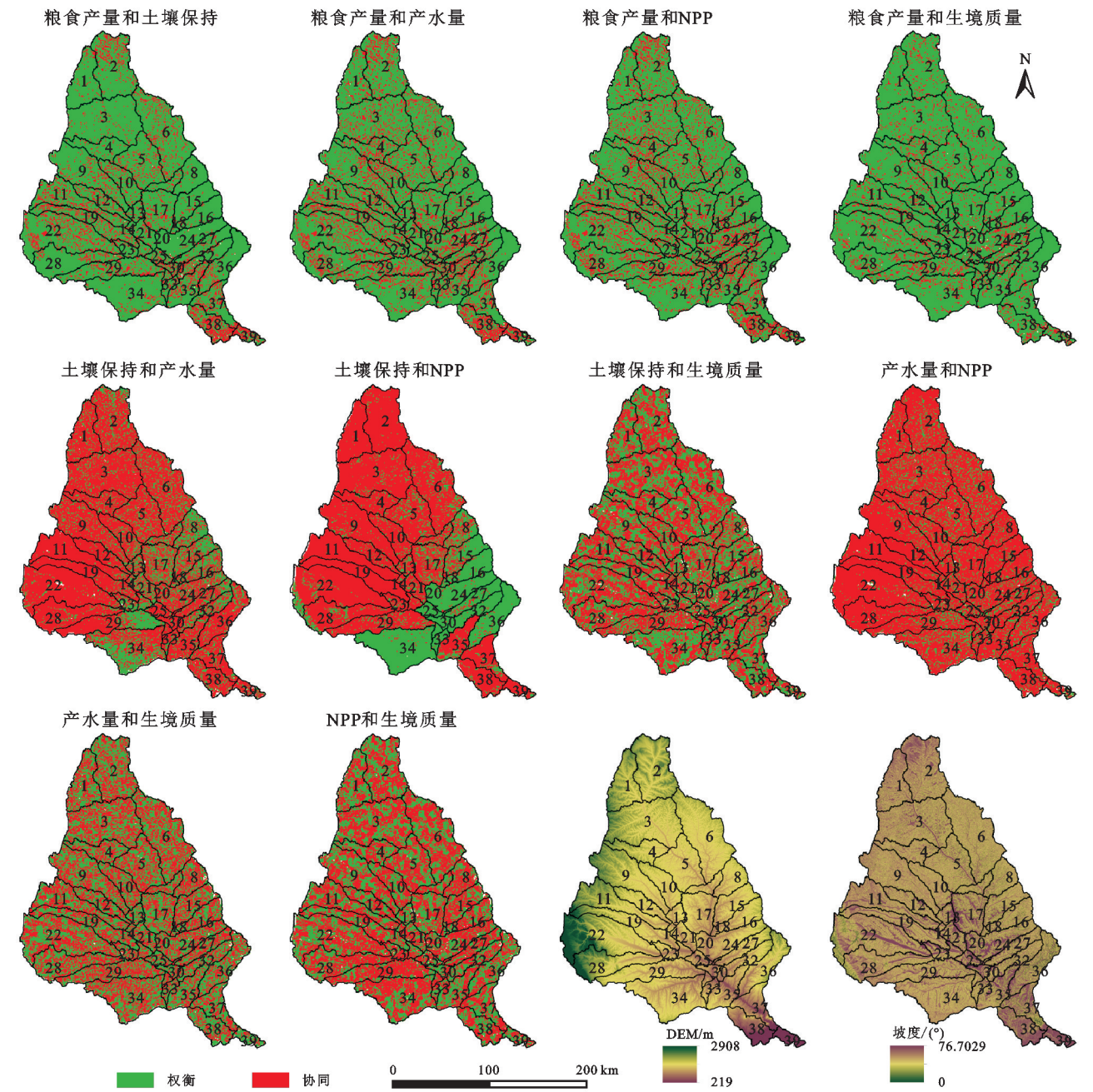


图 6 全流域尺度的生态系统服务空间权衡/协同关系

本文存在一定的不足之处,如本研究评估的生态系统服务种类不足,无法全面系统地认识泾河流域的生态系统服务,同时本文相关模型采用的部分参数是参考了前人的研究成果,具有一定的经验意义,因此未来应更多地结合实测数据与遥感数据,评估更多种类的生态系统服务,定量探究生态系统服务间的权衡/协同关系及其政策因素、气候变化、地形因素等其他驱动因素的影响。

参考文献:

[1] King R. Valuation of wildlife resources[J]. Regional Studies,

1966,3(1):41-47.  
[2] Daily G C. Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems [M]. Washington D C, Island Press, 1997.  
[3] Toth F L. Ecosystem and Human Well-being: A Framework for Assessment[C]. Washington D C: Island Press, 2003.  
[4] Rodriguez J P, Beard T D, Bennett E M, et al. Trade-offs across space, time, and ecosystem services[J]. Ecology and Society, 2006,11:28-41.  
[5] Martine M, Matthew G E M, Rebecca K R, et al. Towards a threat assessment framework for ecosystem services[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2017,32:240-248.



- [6] Arico S, Bridgewater P, Elbeltagy A, et al. Ecosystems and Human Well-being[M]. World Health Organization, 2005.
- [7] Pontius J, Schaberg P, Hanavan R. Remote Sensing for Early, Detailed, and Accurate Detection of Forest Disturbance and Decline for Protection of Biodiversity[M]. Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2020.
- [8] Ran H, Li J, Zhou Z, et al. Predicting the spatiotemporal characteristics of flash droughts with downscaled CMIP5 models in the Jinghe River basin of China[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2020,32:40370-40382.
- [9] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 黄河流域生态系统服务权衡协同关系时空异质性[J]. 中国沙漠, 2021,41(6):78-87.
- [10] 白羽萍, 王佳斌, 刘恋, 等. 黑河流域生态系统服务价值预测及权衡分析: 以张掖市为例[J]. 生态学报, 2022,42(13):1-13.
- [11] 李晶, 李红艳, 张良. 关中一天水经济区生态系统服务权衡与协同关系[J]. 生态学报, 2016,36(10):3053-3062.
- [12] Turner K G, Odgaard M V, Bocher P K, et al. Bundling ecosystem services in Denmark: trade-offs and synergies in a cultural landscape[J]. Landscape and Urban Planning, 2014,125:89-104.
- [13] Bai Y, Wong C P, Jiang B, et al. Developing China's Ecological Redline policy using ecosystem services assessments for land use planning[J]. Nature Communications, 2018,9:3034.
- [14] Nelson E, Mendoza G, Regetz J, et al. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2019,7:4-11.
- [15] 杨晓楠, 李晶, 秦克玉, 等. 关中一天水经济区生态系统服务的权衡关系[J]. 地理学报, 2015,70(11):1762-1773.
- [16] Haase D, Schwarz N, Strohbach M, et al. Synergies, trade-offs, and losses of ecosystem services in urban regions: An integrated multiscale framework applied to the Leipzig-Halle Region, Germany[J]. Ecology and Society, 2012,17(3):22-45.
- [17] Zheng T, Zhou Z, Zou Y, et al. Analysis of spatial and temporal characteristics and spatial flow process of soil conservation service in Jinghe Basin of China[J]. Sustainability, 2021,13(4):1-17.
- [18] 姚婧, 何兴元, 陈玮. 生态系统服务流研究方法最新进展[J]. 应用生态学报, 2018,29(1):335-342.
- [19] 王嘉丽, 周伟奇. 生态系统服务流研究进展[J]. 生态学报, 2019,39(12):4213-4222.
- [20] Hou Y, Lü Y H, Chen W P, et al. Temporal variation and spatial scale dependency of ecosystem service interactions: A case study on the central Loess Plateau of China[J]. Landscape Ecology, 2017,32:1201-1217.
- [21] 余玉洋, 李晶, 周自翔, 等. 基于多尺度秦巴山区生态系统服务权衡协同关系的表达[J]. 生态学报, 2020,40(16):5465-5477.
- [22] Bai J, Zhou Z, Zou Y, et al. Watershed drought and ecosystem services: Spatiotemporal characteristics and gray relational analysis[J]. International Journal of Geo-Information, 2021,10(2):43-64.
- [23] Tang C, Li J, Zhou Z, et al. How to optimize ecosystem services based on a Bayesian Model: A case study of Jinghe River Basin[J]. Sustainability, 2019,11(15):1-18.
- [24] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment. Part I: Model development[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998,34(1):73-89.
- [25] 朱青, 周自翔, 刘婷, 等. 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[J]. 生态学报, 2021,41(7):2557-2570.
- [26] 刘婷, 周自翔, 朱青, 等. 延河流域生态系统土壤保持服务时空变化[J]. 水土保持研究, 2021,28(1):93-100.
- [27] Yu Y, Li J, Zhou Z, et al. Response of multiple mountain ecosystem services on environmental gradients: How to respond, and where should be priority conservation[J]. Journal of Cleaner Production, 2020,278:123264.
- [28] Ren Z, Feng Z, Li P, et al. Response of runoff and sediment yield from climate change in the Yanhe Watershed, China[J]. Journal of Coastal Research, 2017,80(1):30-35.
- [29] 余玉洋, 李晶, 曾莉. 中国南北过渡带生态系统固碳服务及价值量空间格局[J]. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 2020,48(1):11-20.
- [30] Renard B, Kavetski D, Kuczera G, et al. Understanding predictive uncertainty in hydrologic modeling: The challenge of identifying input and structural errors[J]. Water Resources Research, 2010,46(5):1-22.
- [31] Cla B, Wei S A, Man L C. Evolution of ecosystem service value in rural regions based on geographical scope of entities: A case study of Nanjing, China[J]. Ecological Informatics, 2021,64:101368.
- [32] 孙彦旭, 周自翔, 米朝娟. 基于土地利用覆被变化(LUCC)的人类活动与流域生物多样性灰色关联分析[J]. 干旱区研究, 2021,38(6):1782-1792.
- [33] 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[J]. 生态学报, 2021,41(20):8003-8015.
- [34] Abbaspour K C, Rouholahnejad E, Vaghefi S, et al. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model[J]. Journal of Hydrology, 2015,524:733-752.