

DOI: 10.20103/j.stxb.202205311530

王耕, 冯妍. 辽宁太子河流域生态系统服务权衡/协同关系时空变化与情景预测. 生态学报, 2024, 44(1): 96-106.

Wang G, Feng Y. Spatio-temporal variation and scenario prediction of ecosystem service tradeoffs/synergies in the Taizi River Basin, Liaoning Province. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(1): 96-106.

# 辽宁太子河流域生态系统服务权衡/协同关系时空变化与情景预测

王 耕\*, 冯 妍

辽宁师范大学地理科学学院, 大连 116029

**摘要:** 研究生态系统服务权衡与协同关系为制定合理的区域社会-生态系统管理方案提供依据, 促进区域可持续发展。太子河是维护辽宁中部城市群生态安全和用水安全的重要保障, 以重工业为主的产业布局使得该区生态安全受到威胁, 严重影响社会经济的可持续发展。综合气象、土地利用等多源数据, 借助 InVEST 模型, 探究太子河流域固碳、土壤保持、生境质量的时空特征; 采用 Pearson 相关分析法, 探讨不同样点尺度、不同地类上权衡与协同关系的时空变化, 并对 2030 年不同土地利用情景进行预测。结果表明: ①三种生态系统服务在各尺度上(除 100m 尺度)均为协同关系, 且样点尺度越大, 相关系数越高。②在不同地类中, 耕地、林地、草地三种地类生态系统服务功能类似, 以土壤保持功能为主, 碳储功能其次; 生态系统服务的热点区分布在流域的东部, 冷点区集中在流域西部。③不同预测情景下三种生态系统服务间仍为协同关系, 在保护情景下生境质量最好、水域面积最多, 生态系统服务能力最高; 开发情景下建设用地面积增加最多, 但生境质量最差。

**关键词:** 生态系统服务; 权衡与协同; 时空变化; 情景预测; 太子河流域

## Spatio-temporal variation and scenario prediction of ecosystem service tradeoffs/synergies in the Taizi River Basin, Liaoning Province

WANG Geng\*, FENG Yan

College of Geographical Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

**Abstract:** Studying ecosystem service tradeoffs and synergistic relationships can not only provide a basis for formulating reasonably regional social-ecological system management schemes but can also provide lessons for promoting sustainable regional development. Taizi River is an important guarantee for maintaining the ecological security and water security of the urban agglomeration in central Liaoning Province. For a long time, the industrial layout, which is dominated by heavy industry, has threatened the ecological security of the area and seriously affected the sustainable development of the social economy. In this paper, the spatio-temporal characteristics of carbon sequestration, soil conservation, and habitat quality in the Taizi River Basin were investigated by using the InVEST model based on multi-source data such as meteorology and land use. Pearson correlation analysis was used to explore the spatio-temporal changes of tradeoffs and synergistic relationships at different point scales and different land classes, at the same time, using the IDRISI to predict three different land use scenarios in 2030. The results showed that: (1) the three ecosystem services had a synergistic relationship at all scales (except the 100m scale), the ecosystem service of carbon storage and habitat quality have a consistently high positive correlation, with correlations greater than 0.9 in 2000 and 2010, indicating a significant positive correlation between the two. The larger the sample scale was, the higher the correlation coefficient was, so the two-by-two correlation between the three ecosystem services was highest at the 10km scale. (2) Among the different land use types, the ecosystem service

基金项目: 辽宁省教育厅自然基金项目(LJ2020014)

收稿日期: 2022-05-31; 网络出版日期: 2023-09-28

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wanggeng@lnnu.edu.cn

functions of the three land use types of arable land, forest land, and grassland were relatively similar, with soil conservation as the main ecosystem service function among all three, followed by the ecosystem services of carbon storage. The hot spots of ecosystem services in Taizi River Basin were distributed in the eastern part of the basin, dominated by forest land, while the cold spots were concentrated in the western part of the basin, dominated by arable land and construction land. (3) There are synergistic relationships among the three ecosystem services under three different forecast scenarios in 2030. Under the conservation scenario, the ecosystem of habitat quality is the best (0.68), the water area has the largest expansion in 2030, and the ecosystem service capacity is the highest. The development scenario has the largest increase in construction land, a reduction of 871.4km<sup>2</sup> in arable land and 224.58km<sup>2</sup> in watershed area, but the worst habitat quality of 0.617.

**Key Words:** ecosystem services; tradeoff and synergy; spatio-temporal change; scenario prediction; Taizi River Basin

生态系统服务,是指生态系统为人类生产生活所提供的环境条件和物质产品的统称<sup>[1]</sup>,包括直接价值和间接价值,Costanza 认为生态系统服务不仅具有环境效益还具有经济效益,并提出生态系统服务的经济价值评估<sup>[2]</sup>,国内学者在其基础上结合国情制作了中国的当量因子表<sup>[3-4]</sup>并开展了区域生态系统服务的价值核算<sup>[5]</sup>。生态系统服务并不是孤立的,而是存在着此增彼减的权衡状态<sup>[6]</sup>或同增同减的协同状态<sup>[7]</sup>。这种权衡与协同关系受多因素的影响:土地利用类型是影响因素之一<sup>[8]</sup>,研究发现林地具有更高的增汇、调蓄水源、保持水土能力<sup>[9]</sup>;张琨等<sup>[10]</sup>对黄土高原植被覆盖度与生态系统服务关系的研究得出植被覆盖与固碳服务的相关性最强,与水土保持功能的相关性其次。此外,研究尺度的划分是另一影响因素,Qiao 等<sup>[11]</sup>通过对中国太湖流域生态系统服务的时空变化得出结论时间序列和像元大小的划分会影响权衡与协同关系,这也使得生态系统服务间关联分析结果也存在多样化<sup>[12]</sup>。

生态系统服务研究广泛使用空间分析法<sup>[13-15]</sup>、情景模拟法<sup>[16-17]</sup>和制图综合法<sup>[18-19]</sup>等方法;研究内容上包括生态系统服务的时空分布<sup>[20-21]</sup>、多尺度效应的综合分析<sup>[22-24]</sup>以及驱动机制<sup>[25-26]</sup>等。近年来流域尺度的生态系统服务权衡协同研究中已经关注到时空格局的演变<sup>[27-29]</sup>,但具有重工业背景的小流域生态系统服务权衡与协同关系的研究较少,相关研究存在研究方法单一、时间序列较短等不足。

太子河作为辽河的支流之一,流经沈阳、鞍山、本溪等中部城市群主要城市,是辽宁省的生态廊道,也是构建东北地区生态安全战略的重点。流域内地势东高西低,东部林业资源丰富,西部平原以农业为主,是辽宁重要的商品粮基地<sup>[30]</sup>,耕地及建设用地集中分布在流域西部。由于沿岸城市多以煤炭、钢铁、化工等重工业为主,使得该区环境污染严重,水域安全遭到破坏,生态环境问题突出,同时城市化快速扩张,加重了人地关系矛盾,导致生态系统服务供给失衡,出现了空气污染、水土流失以及环境恶化等问题。“十三五”时期在辽河流域水专项中,针对太子河流域提出坚持问题导向,构筑水生态安全格局的目标<sup>[31]</sup>;2019年,国家提出“支持东北地区山水林田湖草生态保护修复”试点工程<sup>[32]</sup>,太子河流域作为“浑太水系修复工程”中的组成部分,区域生态安全和可持续发展受到重视。因此,研究流域水土保持、固碳和生境质量三种生态系统服务对促进太子河流域社会—生态可持续发展具有重要意义。

从流域生态系统的整体性和综合性视角分析流域生态服务功能的协同关系变化,有助于甄别整个流域发展的生态冲突,精准权衡生态服务关系,从而有针对性地提出流域可持续发展的相应空间对策。鉴于此,本文以太子河流域作为研究对象,以碳储量、生境质量和土壤保持三种生态系统服务为基础,借助 InVEST 模型、ArcGIS、RStudio 等工具,对其时空变化进行分析,探究各服务间权衡与协同关系,并对生态系统服务的冷热点进行分析,同时对 2030 年的土地利用变化情景进行模拟预测,以期促进区域多种生态系统服务功能总体效益最优化,为流域生态文明建设和构建生态安全格局提供决策参考。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

太子河流域位于 122°26'E—124°53'E,40°29'N—41°32'N,处于辽宁省东部(图 1),河流长约 413km,流域

面积 13883km<sup>2</sup>, 河流落差超过 450m, 流量较大。河流发源于抚顺市, 上游流经低山丘陵区, 下游经营口市注入渤海湾, 形成辽河冲积平原; 属温带季风气候, 降水集中在 6—9 月。太子河是辽宁省的工农业生产基地, 人口稠密, 工业发展和生活用水量大的共同作用下, 导致该地缺水严重。

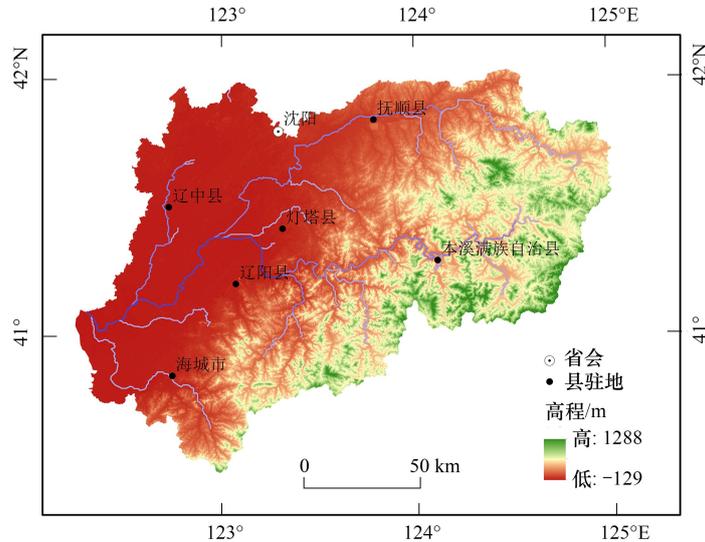


图 1 研究区概况

Fig.1 Study area

## 1.2 数据来源与处理

本文所使用的数据包括(1)土壤属性数据:来源于世界土壤数据库(HWSD),数据类型包括流域内土壤类型分布、砂粒、粘粒、粉粒占比以及土壤有机碳含量等,分辨率为 1km, (<http://www.fao.org/soils-portal/so>)。 (2)土地利用数据:来源于 Global Land30 网站,检验精度达到 82%以上,空间分辨率为 30m,在 ArcGIS 中经过重分类,分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地六类; (3)气象数据:共获取研究区及周边共 18 个气象站的降水数据,其中 2000、2010 年数据来源于中国气象数据共享服务网 (<http://data.cma.cn/>), 2020 年降水数据来源于各地气象站,在 ArcGIS 中进行克里金插值后使用; (4) DEM 数据:来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>), 下载后在 ArcGIS 中经过拼接、裁剪、填洼等处理,分辨率为 30m。

## 2 研究方法

### 2.1 生态系统服务评估方法

本文借助 InVEST 模型和 ArcGIS 定量评估研究区固碳、土壤保持和生境质量 3 种服务的时空格局。模型所需参数及计算过程如表 1 所示。

### 2.2 生态系统服务权衡与协同关系分析方法

本文采用了 Pearson 相关分析法,对太子河流域三种生态系统服务间的相关关系进行量化,以分析两变量间相关程度,其计算公式如下:

$$P_{X,Y} = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2}}$$

式中, $X$ 、 $Y$ 为两个变量, $n$ 为变量取值的个数。当 $p_{XY} = 0$ 时, $X$ 和 $Y$ 不具有线性相关的关系;当 $p_{XY} > 0$ ,即两种生态系统服务之间的相关系数为正,且通过显著性检验( $P < 0.01$ )时,则认为两者之间是协同关系;反之则为

权衡关系<sup>[43]</sup>, 且  $p_{XY}$  越接近  $\pm 1$  时, 相关性越高。

表 1 模型所需参数及计算方法

Table 1 Required parameters of model and calculation method

服务类型 Ecosystem Services	计算模型及原理 Calculation method	所需参数及处理方法 Main parameters and processing
固碳 Carbon storage	InVEST 模型碳储量模块 $C_{tot} = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead}$ 其中 $C_{above}$ 地上生物碳储量 ( $t/hm^2$ )、 $C_{below}$ 地下生物碳储量、 $C_{soil}$ 为土壤碳储量、 $C_{dead}$ 为死亡有机碳储量 <sup>[33]</sup> 。	四种碳密度数据主要来源于前人研究成果 <sup>[34-36]</sup> , 并生成碳密度表。碳储量通过计算六种用地类型上各有机碳库的平均碳密度, 然后乘以各地类的面积并求和获得。
生境质量 Habitat quality	InVEST 模型生境质量模块 $Q_{xj} = H_j \left\{ 1 - \left( \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right) \right\}$ $Q_{xj}$ 为土地利用类型 $j$ 中栅格 $x$ 的生境质量; $H_j$ 是生境适宜度, 取值 0—1 之间; $D_{xj}$ 为 $j$ 中栅格 $x$ 的生境退化度; $z$ 为归一化常量, 取值 2.5 <sup>[37]</sup> ; $k$ 为半饱和常数, 通常是生境退化度最大值的一半。	生境威胁源包括耕地、居民点、建设用地, 通过提取 2000、2010、2020 年土地利用数据获得, 分辨率为 30m, 生境威胁源表中不同威胁因子的最大距离、权重、衰减方式根据前人相关研究成果 <sup>[38]</sup> 并结合专家意见确定; 敏感性表参照文献 <sup>[39]</sup> , 并结合研究区实际情况进行赋值。
土壤保持 Soil conservation	InVEST 模型土壤保持模块 采用通用土壤流失方程原理 $USLE = R \times K \times C \times LS \times P$ USLE 是年均土壤侵蚀量, $R$ 为降雨侵蚀因子; $K$ 为土壤侵蚀性因子; $C$ 为植被覆盖与管理因子; $LS$ 为坡度坡长因子; $P$ 为水土保持因子 <sup>[25]</sup> 。	降水侵蚀力 ( $R$ ) 利用 Wischmeier <sup>[40]</sup> 提出的公式进行计算, 获取研究区及附近降水数据, 通过 Kriging 插值获得年平均降水量图; 土壤可蚀性 ( $K$ ) 通过 Sharply Williams 提出的 EPIC 模型 <sup>[41]</sup> 进行计算, 从 HWSD 获取的土壤类型数据中提取所需研究区的土壤类型表与分布图; 地形因子 ( $LS$ ) 由 InVEST 模型输入的 DEM 数据进行计算获得, 植被覆盖因子 ( $C$ ) 和水土保持因子 ( $P$ ) 参考前人的研究并结合研究区情况确定 <sup>[42]</sup> 。

不同样点尺度的相关性研究中, 本文通过 ArcGIS 中的创建渔网工具创建随机点, 分别按照 100m、1km、5km、7km、10km 五种尺度设置取样点, 利用 RStudio 中 Corrgram 包进行计算并将结果可视化, 探讨每种尺度下的权衡与协同关系。

本研究借助南丁格尔玫瑰图表达不同用地类型上三种生态系统服务功能的差异, 首先在 ArcGIS 中按照用地类型进行分类, 并对各地类上的 3 种生态系统服务进行统计, 得到每种地类上各服务对应的均值, 通过 Z-Score 标准化进行去量纲处理<sup>[12]</sup>, 将处理后的结果在 RStudio 中通过 ggplot2 包制作不同地类中三种生态系统服务的南丁格尔玫瑰图。

对太子河流域生态系统服务的冷热点分析, 本文首先求得每年内 3 种生态系统服务的均值, 然后将大于当年平均值的地区, 视为此服务的热点区<sup>[44]</sup>, 能提供 2 种服务类型的视为次热点区, 依次类推并进行热点区制图。

### 2.3 生态系统服务权衡/协同情景预测

本文基于 IDRISI 软件进一步对太子河流域 2030 年的土地利用变化进行预测, 过程如下: ①在 Markov 模块以 2010—2020 年土地利用栅格数据为初始数据, 得到转移概率矩阵和转移面积矩阵; ②通过多标准评价模块 (MCE) 建立适宜性规则, 生成适宜性图集<sup>[45]</sup>并分别设置约束条件, 在开发情景下, 设置公路、铁路等为驱动因子, 大力促进城市发展; 保护情景下, 限制林地、草地的开发, 加强对水域、湖泊等的保护; 计划情景下, 不进行人为干预, 假设未来十年仍按照现在的方式发展; ③构造 CA 滤波器, 本文选取  $5 \times 5$  的元胞矩阵; ④以 2010 年为起始时刻, 以 10a 为周期, 模拟 2020 年土地利用空间分布状况, 并进行模型的精度检验, 检验结果 Kappa 系数为 0.794, 符合精度要求。⑤最后以 2020 年为起始时刻, 选择适宜性图集, 以 10a 为周期迭代, 对 2030 年的土地利用状况进行预测。

### 3 结果与分析

#### 3.1 生态系统服务时空变化特征

2000—2020 年各项生态系统服务空间分布如图 2 所示,从图中可知,太子河流域近 20 年的碳储量变化不大,2000、2010、2020 的碳储量分别为  $23.35 \times 10^4 \text{t}/\text{hm}^2$ 、 $23.35 \times 10^4 \text{t}/\text{hm}^2$ 、 $23.90 \times 10^4 \text{t}/\text{hm}^2$ ,碳储量空间分布格局变化较小,高值区主要在东部,用地类型以林地为主;低值区分布在西部,以耕地为主,建设用地区的碳储量最低,但 2020 年建设用地区的碳储量略有增加。2000 年到 2020 年流域内生境质量平均值分别为 0.661、0.652、0.626,数值越小表明生境质量越差,因此流域内总体生境质量有所下降,高值区主要分布在流域东部,呈现东高西低的分布态势,水域附近的生境质量多年内均较好。流域内土壤保持的变化没有特殊规律,上游地区的土壤保持量多,下游地区少;水土保持总量分别为  $3.44 \times 10^8 \text{t}$ 、 $25.8 \times 10^8 \text{t}$ 、 $11.62 \times 10^8 \text{t}$ ,多年平均土壤保持量为  $377.82 \text{t}/\text{hm}^2$ ,在 2010 年水土保持量增加明显,这可能是由 2010 年比 2000、2020 年降水量多,降水对流域的侵蚀强造成的;到了 2020 年水土保持量有所下降,西部地区处于多年稳定状态,总体变化幅度不大。

图 3 表示流域内三种生态服务功能从 2000 年到 2010 年和从 2010 年到 2020 年每十年间的生态系统服务的变化量,从图 3 中可以看出,2000 年到 2010 年,流域内碳储量呈增加趋势,碳储量的亏损区零星出现在北部、中部城镇地区;在 2010—2020 年十年间,流域内碳储量呈亏损状态。从 2000 年到 2010 年,流域内生境

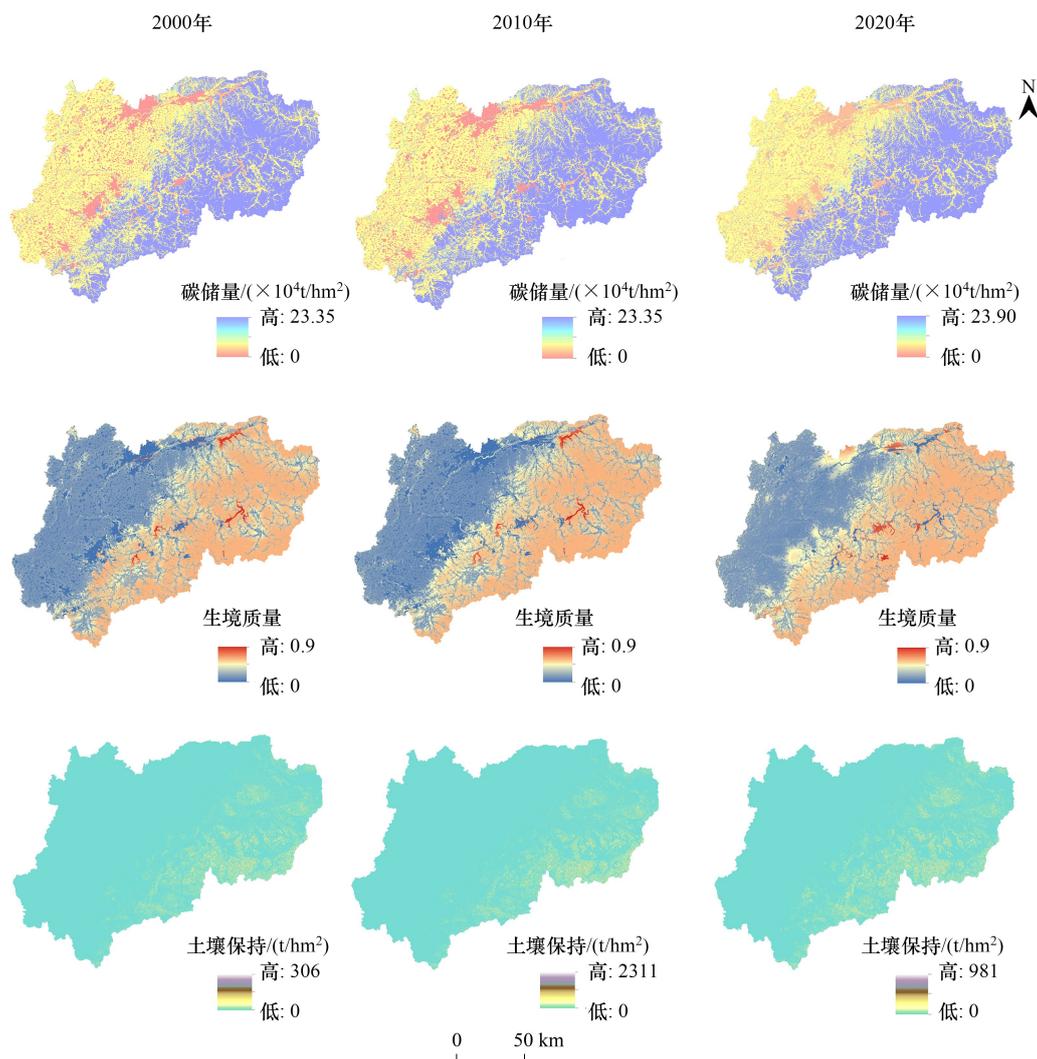


图 2 2000—2020 年太子河流域生态系统服务空间分布

Fig.2 Spatial distribution of ecosystem services in the Taizi River Basin from 2000 to 2020

质量处于西部、东部增益,中部建设用地区损失状态,但是在 2010—2020 年间,生境质量总体变化不大,处于相对稳定的状态,部分建设用地区生境质量有所增益。2000 年到 2010 年,土壤保持处于亏损状态,仅有东南部部分地区有所增益,但在 2010 年至 2020 年,流域内绝大部分地区均为增益状态。

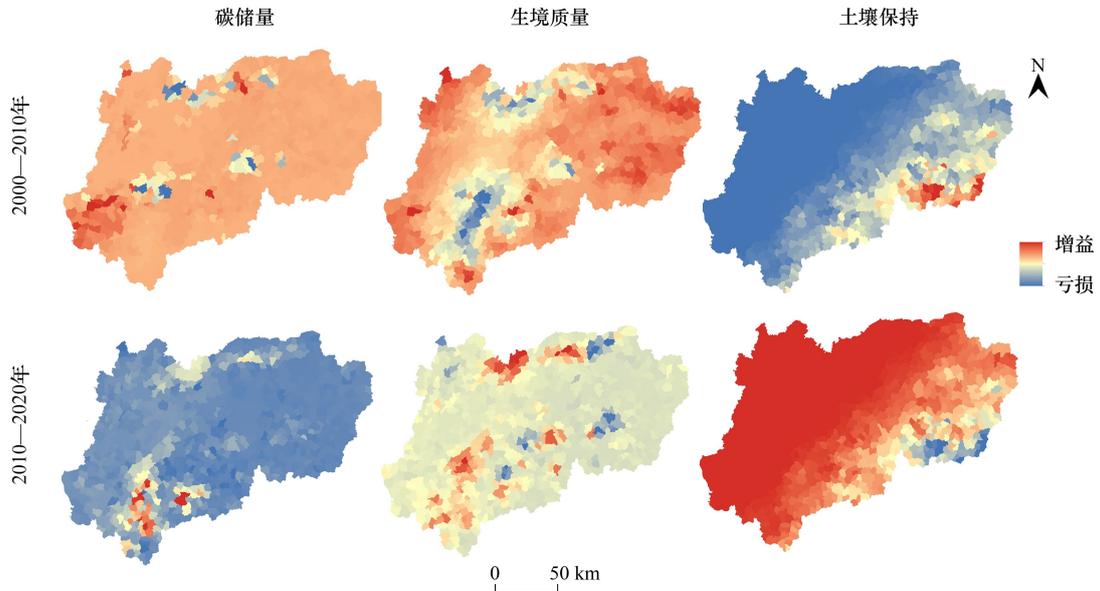


图 3 2000—2020 年每 10 年间太子河流域生态系统服务变化量

Fig.3 Changes of ecosystem services in the Taizi River Basin from 2000 to 2020

### 3.2 基于样点尺度的生态系统服务权衡/协同时空变化

图 4 的饼状图填充范围和颜色代表相关系数大小,填充范围越大,颜色越深,相关系数越高。流域内三种

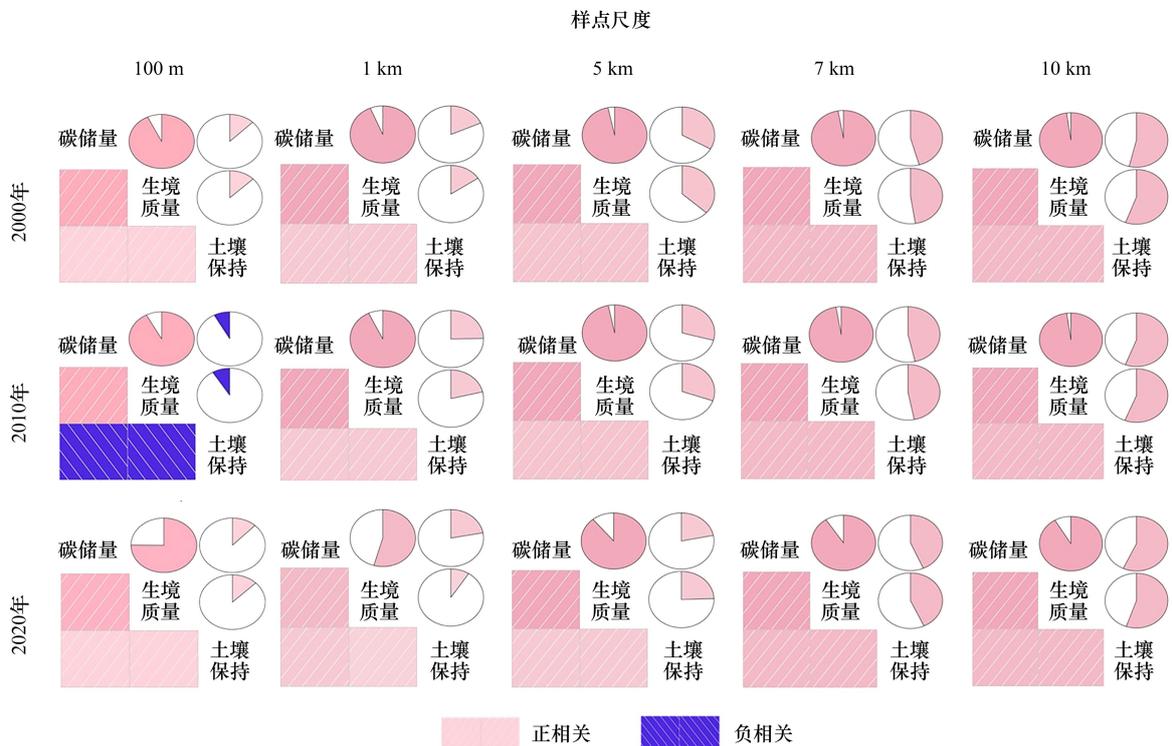


图 4 2000—2020 年太子河流域生态系统服务相关关系时空变化

Fig.4 Spatial-temporal changes of ecosystem services in the Taizi River Basin from 2000 to 2020

生态系统服务均通过了 0.01 的显著性检验,在不同的样点尺度上,除在 2010 年 100m 尺度上,碳储量和生境质量以及生境质量和土壤保持之间出现微弱的负相关关系外,其余样点尺度下三者之间均为正相关关系,即协同关系;从尺度上来看,随着样点间隔的增大,生态系统服务两两之间的相关性不断增强。2000 年和 2010 年中,生境质量和碳储量在不同尺度上的相关系数均大于 0.9,说明两者存在显著正相关性,生境质量高值区和碳储量高值区高度吻合,这是因为生态系统服务的固碳能力通常由植被初级生产力、枯落物等决定,植被茂密的地区碳储量相对高,而植被覆盖度高的地区通常情况下其生境质量也相对较好;碳储量和土壤保持,生境质量和土壤保持之间虽通过了显著性检验,但是在 100m、1km、5km 等尺度上相关系数较低,显著性较弱。总体而言,生态系统服务间的关系是由其相互作用引起的,比如土壤保持能力由降水、植被覆盖以及坡度等共同作用,在坡度一定、降水均匀的年份,植被覆盖对土壤保持的作用更为明显,而植被覆盖度高的地区相应的生境质量也会有所提高,所以两者之间出现协同关系。

### 3.3 基于地类的生态系统服务权衡/协同时空变化

不同地类间生态系统服务变化的南丁格尔玫瑰图如图 5 所示,从图中可以看出,研究期内土壤保持功能一直较高,耕地、林地、草地三者生态服务功能比较相似,均以土壤保持功能为主,碳储功能其次;2000 年,耕地、建设用地的固碳和土壤保持功能均较好,水域的碳储量最大,建设用地的生态系统服务功能变化较大,前期以固碳和土壤保持功能为主,2010 年,碳储能力下降,2020 年又有所恢复;未利用地的生境质量在 2000 年、2010 年均较好,土壤保持功能也在不断增强。以 2020 年为例,固碳价值在各土地利用类型中表现为:林地>草地>耕地>水体;土壤保持服务的价值量:草地>耕地>林地>水体;生境质量价值为:林地>耕地>草地>水体。

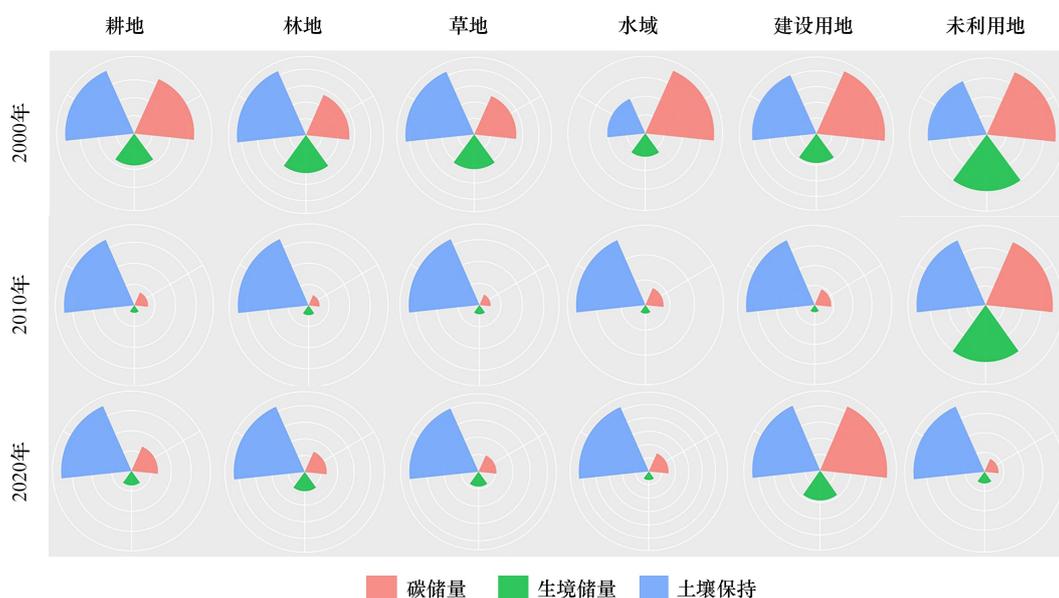


图 5 2000—2020 年太子河流域不同地类生态系统服务时空变化

Fig.5 Spatial-temporal changes of ecosystem services of different land types in the Taizi River Basin from 2000 to 2020

### 3.4 基于冷热点的生态系统服务权衡/协同时空变化

以太子河的子流域作为最小研究尺度绘制了流域内冷热点分析图(图 6),统计结果表明,2000、2010、2020 年三类服务热点区分别占 39.83%、39.14%、43.32%,2010—2020 年,热点区的占比有明显增长,反映太子河流域总体生态环境的不断改善。从空间分异来看,流域西部大多数地区提供的生态服务种类为 0,三年间占比分别为 43.92%、44.49%、41.25%,为生态系统服务的冷点区,整体生态系统服务能力较弱;东部地区大多数为生态系统服务的热点区,固碳、土壤保持以及生境质量维持能力强;而在两者之间的过渡带为生态系统服务的次热点区,可以提供 2 种类型的生态系统服务。总体来看,太子河流域植被覆盖度高、人类活动少的地

区具有更强的土壤保持和固碳能力,是多重服务热点区。

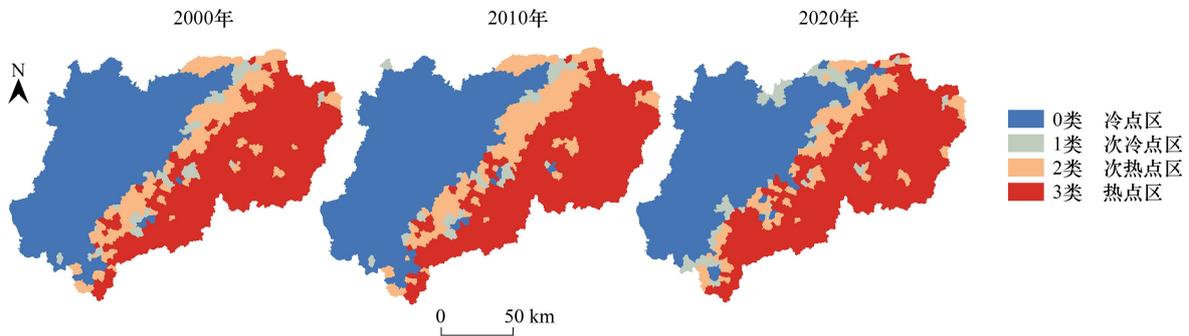


图 6 2000—2020 年太子河流域多重生态系统服务热点区

Fig.6 Multiple ecosystem service hotspots in the Taizi River Basin from 2000 to 2020

### 3.5 生态系统服务权衡/协同情景预测结果

采用 IDRISI 软件对 2030 年太子河流域内不同发展方式下土地利用状况进行了预测,相关预测结果如图 7 所示。

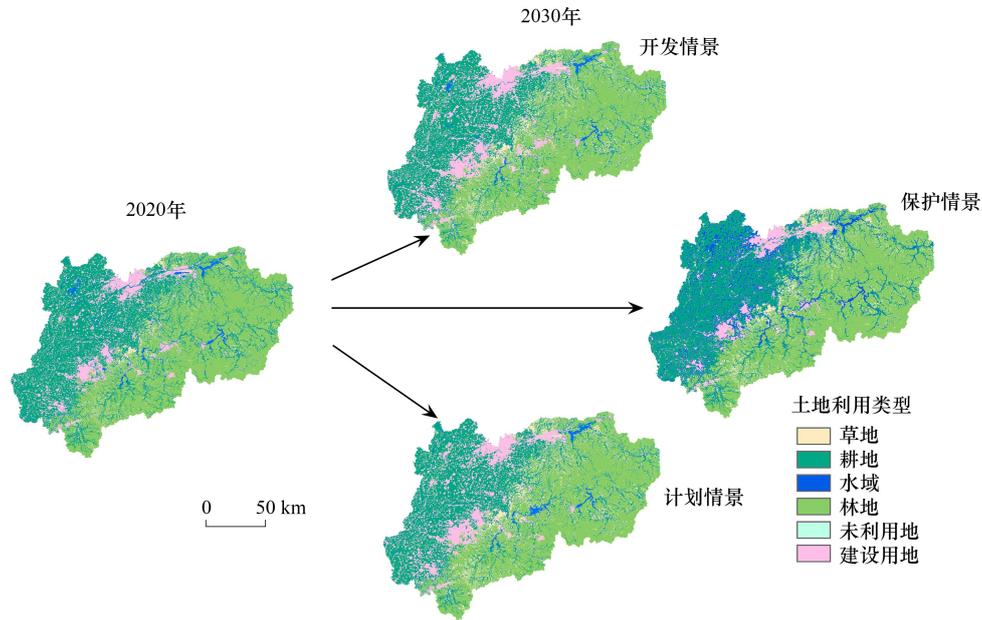


图 7 2030 年太子河流域多情境预测下土地利用状况

Fig.7 Land use in Taizi River Basin under multi-scenario prediction in 2030

三种情景中,保护情景下的生境质量最好,为 0.680,其次是计划情景,为 0.623,而开发情景下的生境质量最差,为 0.617;与太子河流域当前的生境质量相比,开发情景和自然情景下的生境质量都略有下降,而在保护情景下,生境质量将大幅提升;保护、开发、计划情景下碳储量分别为  $23.319 \times 10^4 \text{t}$ 、 $23.048 \times 10^4 \text{t}$ 、 $23.066 \times 10^4 \text{t}$ ,保护情景下的碳储量与当前流域碳储量相差无几,而在开发情景和计划情景下的碳储量均低于当前流域碳储量,表明过度开发或不加干预可能会使流域碳储量减少;土壤保持量在开发情景下最多,为  $11.41 \times 10^8 \text{t}$ ,说明在此情景下流域水土流失较为严重,计划情景和保护情景下的土壤保持量分别为  $11.17 \times 10^8 \text{t}$ 、 $11.18 \times 10^8 \text{t}$ ,均少于当前土壤保持量;在保护情景下,草地相较 2020 年会增加  $694.5 \text{km}^2$ ,建设用地减少  $1331.6 \text{km}^2$ ;开发情景下,耕地将减少  $871.4 \text{km}^2$ ,水域面积减少  $224.58 \text{km}^2$ 。

通过 Origin 相关性分析可知(图 8),在三种情景下,生态系统服务的相关性均为正相关,且通过了 $P<0.05$ 的显著性检验,相关性较高,因此,三种生态系统服务之间均为协同关系。其中,固碳和生境质量以及固碳和土壤保持之间在三种预测情景下相关系数均高于 0.75,具有显著正相关关系,而土壤保持和生境质量之间的相关系数略低。以子流域为最小研究尺度制作三种预测情景下的冷热点分析图(图 9),结合冷热点分析发现,生态系统服务的冷热点分布总体是“东热西冷”,局部地区略有差异;在开发、保护、计划三种情景下,能提供三类生态系统服务的占比分别为 40.88%、42.85%、40.88%;提供两类生态系统服务的区域占比分别为 12.07%、11.96%、13%,可见保护情景下生态系统服务总体状况最好。

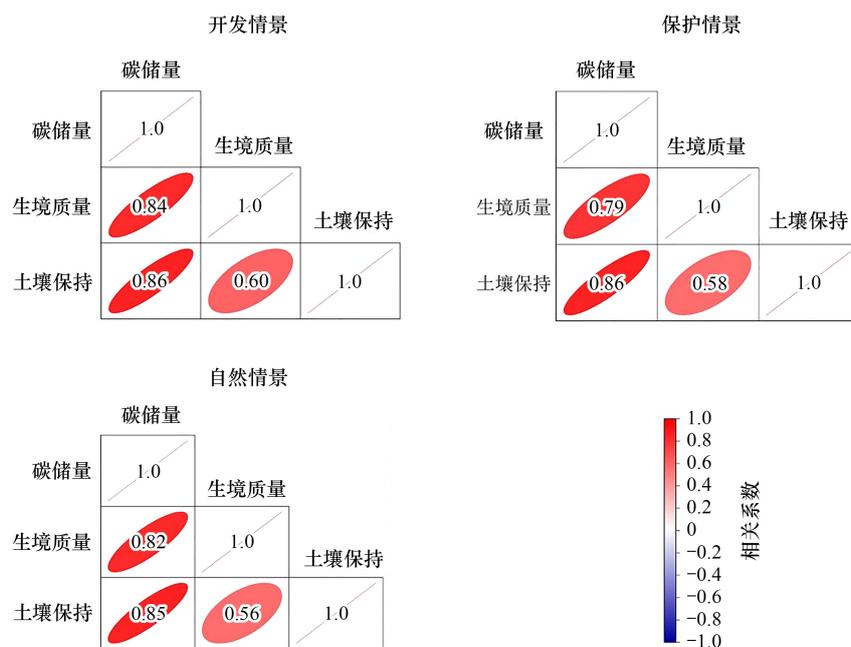


图 8 多情景预测下 2030 年太子河流域生态系统服务间相关关系

Fig.8 Correlation between ecosystem services in the Taizi River Basin under multiple scenarios in 2030

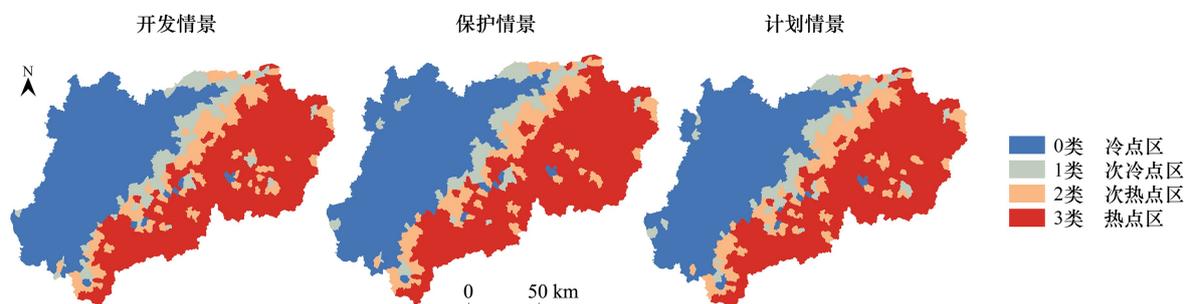


图 9 多情景预测下 2030 年太子河流域多重生态系统服务热点区

Fig.9 Multiple ecosystem service hotspots in the Taizi River Basin under multiple scenarios in 2030

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

生态系统服务具有异质性,厘清其相互关系,可以更好地认识土地利用存在的问题,避免人类对资源的肆意开发而忽略生态系统服务的内部作用,促进区域山水林田湖草修复和可持续发展。生物多样性是维持生态

系统服务权衡或协同关系的基础<sup>[46]</sup>,本研究中太子河流域固碳、生境质量和土壤保持服务的热点区均分布在流域的东部,这主要是因为东部地区主要以林地为主,占流域总土地面积的 40%左右,植被覆盖茂密。森林具有吸储 CO<sub>2</sub> 释放 O<sub>2</sub> 和保持土壤、防止水土流失的作用,因此在流域东部整体的碳储量、土壤保持量较高。这与张琨等<sup>[9]</sup>的研究结果一致,即植被覆盖度高的地区固碳和水土保持功能更好。土壤保持和生境质量、固碳和生境质量以及土壤保持和固碳之间为协同关系,这一结果与诸多已发表的观点一致<sup>[16,47]</sup>。此外,权衡与协同关系在各尺度上存在差异<sup>[47]</sup>,在本研究,100m 样点尺度下固碳和生境质量、生境质量和土壤保持出现负相关,这是由在样点尺度划分中不同像元内土地利用类型的组合与占比不同造成的。

三种预测情景中,保护情景最有利于促进区域生境质量改善,开发情景下生境质量最差。在未来太子河流域发展规划中,应寻求两者之间的平衡点,兼顾区域发展和环境保护,使流域生态系统服务能力达到最优。针对不同预测情景下生态系统服务能力的差别,在未来的土地利用规划中应进行相应的调整,在开发情景下,严守耕地保护红线,对已开发地区应加强相应的生态补偿措施;在保护情景下,坚持“两山”理念,加强旅游宣传,实现经济发展与生态保护双赢。

本研究仅探究了太子河流域三类生态系统服务间的权衡协同关系,后续可以增加生态系统服务驱动机制及时空异质性研究,此外,本文所用的降水数据来源较广,尤其是 2020 年降水数据来源于不同气象站点,增加了数据的差异性,同时模型参数的设置主要参考文献资料,一定程度上会影响研究结果。

## 4.2 结论

(1)太子河流域生态系统服务的权衡与协同关系的研究发现,流域内三种生态系统服务间的主导关系为协同关系,在各样点尺度上也均为协同关系(除 2010 年 100m 尺度下),样点尺度越大,相关性越显著。其中,碳储量和生境质量具有高度正相关性。

(2)各用地类型中,耕地的生境质量不断改善,固碳服务在耕地中呈现先上升后下降的趋势,在林地中则呈现下降趋势,而在建设用地中,固碳服务呈先降后升的趋势;土壤保持量则先升后降,三种服务均在林地中价值量最高。

(3)生态系统服务的热点区集中在流域东部林地地区;冷点区分布在西部,以耕地和建设用地为主,人类活动频繁;次热点区在两者之间的过渡带,以草地为主。耕地、林地、草地均具有较高的土壤保持能力。

(4)三种预测情景下,生态系统服务间均为协同关系,开发情景下,建设用地的面积增加最多,但是生境质量、固碳能力有所降低;保护情景下碳储量最高、生境质量最好、水域面积最多,生态系统服务的热点区占比也是最高的。

## 参考文献(References):

- [ 1 ] Daily G C. Nature's services: societal dependence on natural ecosystems. Washington, DC: Island Press, 1997.
- [ 2 ] 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. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [ 3 ] 谢高地,肖玉,鲁春霞.生态系统服务研究:进展、局限和基本范式. *植物生态学报*, 2006, 30(2): 191-199.
- [ 4 ] 谢高地,甄霖,鲁春霞,肖玉,陈操.一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法. *自然资源学报*, 2008, 23(5): 911-919.
- [ 5 ] 宋昌素,欧阳志云.面向生态效益评估的生态系统生产总值 GEP 核算研究——以青海省为例. *生态学报*, 2020, 40(10): 3207-3217.
- [ 6 ] 张碧天,闵庆文,焦雯珺,何思源,刘某承,杨伦.生态系统服务权衡研究进展. *生态学报*, 2021, 41(14): 5517-5532.
- [ 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 ] Lee H, Lautenbach S. A quantitative review of relationships between ecosystem services. *Ecological Indicators*, 2016, 66: 340-351.
- [ 9 ] Dymond J R, Ausseil A G E, Ekanayake J C, Kirschbaum M U F. Tradeoffs between soil, water, and carbon — a national scale analysis from New Zealand. *Journal of Environmental Management*, 2012, 95(1): 124-131.
- [ 10 ] 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.
- [ 11 ] Qiao X N, Gu Y Y, Zou C X, Xu D L, Wang L, Ye X, Yang Y, Huang X F. Temporal variation and spatial scale dependency of the trade-offs and synergies among multiple ecosystem services in the Taihu Lake Basin of China. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 218-229.

- [12] 武文欢, 彭建, 刘焱序, 胡熠娜. 鄂尔多斯市生态系统服务权衡与协同分析. 地理科学进展, 2017, 36(12): 1571-1581.
- [13] 孙艺杰, 任志远, 赵胜男. 关中盆地生态服务权衡与协同时空差异. 资源科学, 2016, 38(11): 2127-2136.
- [14] 祝萍, 刘鑫, 郑瑜晗, 王世豪, 黄麟. 北方重点生态功能区生态系统服务权衡与协同. 生态学报, 2020, 40(23): 8694-8706.
- [15] 陈心盟, 王晓峰, 冯晓明, 张欣蓉, 罗广祥. 青藏高原生态系统服务权衡与协同关系. 地理研究, 2021, 40(1): 18-34.
- [16] 陈登帅, 李晶, 杨晓楠, 刘岩. 渭河流域生态系统服务权衡优化研究. 生态学报, 2018, 38(9): 3260-3271.
- [17] 李冬花, 张晓瑶, 王咏, 张潇, 李磊, 陆林. 新安江流域生态系统服务演化过程及权衡协同关系. 生态学报, 2021, 41(17): 6981-6993.
- [18] 王世豪, 黄麟, 徐新良, 徐淑琬. 粤港澳大湾区生态系统服务时空演化及其权衡与协同特征. 生态学报, 2020, 40(23): 8403-8416.
- [19] 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.
- [20] 祁宁, 赵君, 杨延征, 苟睿坤, 陈佳琦, 赵鹏祥, 李卫忠. 基于服务簇的东北地区生态系统服务权衡与协同. 生态学报, 2020, 40(9): 2827-2837.
- [21] 刘璐璐, 曹巍, 吴丹, 黄麟. 国家重点生态功能区生态系统服务时空格局及其变化特征. 地理科学, 2018, 38(9): 1508-1515.
- [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] 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.
- [24] Chen H, Yan W T, Li Z H, Wende W, Xiao S L, Wan S L, Li S J. Spatial patterns of associations among ecosystem services across different spatial scales in metropolitan areas: a case study of Shanghai, China. *Ecological Indicators*, 2022, 136: 108682.
- [25] 方露露, 许德华, 王伦澈, 牛自耕, 张明. 长江、黄河流域生态系统服务变化及权衡协同关系研究. 地理研究, 2021, 40(3): 821-838.
- [26] 罗盛锋, 闫文德. 广西北部湾沿岸地区生态系统服务价值变化及其驱动力. 生态学报, 2018, 38(9): 3248-3259.
- [27] Hou Y, Lü Y H, Chen W P, Fu B J. Temporal variation and spatial scale dependency of ecosystem service interactions: a case study on the central Loess Plateau of China. *Landscape Ecology*, 2017, 32(6): 1201-1217.
- [28] 郑德凤, 郝帅, 吕乐婷, 徐文瑾, 王燕燕, 王辉. 三江源国家公园生态系统服务时空变化及权衡—协同关系. 地理研究, 2020, 39(1): 64-78.
- [29] Turner K G, Odgaard M V, Bøcher P K, Dalgaard T, Svenning J C. Bundling ecosystem services in Denmark: trade-offs and synergies in a cultural landscape. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 125: 89-104.
- [30] 李赛赛. 太子河流域土壤侵蚀时空分异特征及驱动因素研究.[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2020.
- [31] 苑芷茜, 李艳红, 邵姗姗, 惠婷婷, 刘畅. 水专项“十三五”时期辽河流域水环境管理研究思路初探. 环境科学与管理, 2017, 42(6): 8-17.
- [32] 姜霞, 王坤, 郑朔方, 胡小贞, 储昭升. 山水林田湖草生态保护修复的系统思想——践行“绿水青山就是金山银山”. 环境工程技术学报, 2019, 9(5): 475-481.
- [33] 李成, 赵洁, 庄智程, 顾思浩. 长三角城市群生态系统服务权衡强度时空演变及影响因素. 生态学报, 2022, 42(14): 5708-5720.
- [34] 奚小环, 杨忠芳, 崔玉军, 孙淑梅, 于成广, 李敏. 东北平原土壤有机碳分布与变化趋势研究. 地学前缘, 2010, 17(3): 213-221.
- [35] 奚小环, 杨忠芳, 廖启林, 张建新, 白荣杰, 张秀芝, 金立新, 王会峰, 李敏, 夏学齐. 中国典型地区土壤碳储量研究. 第四纪研究, 2010, 30(3): 573-583.
- [36] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 李忠佩, 李安波. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析. 土壤学报, 2004, 41(1): 35-43.
- [37] Gao Y, Ma L, Liu J X, Zhuang Z Z, Huang Q H, Li M C. Constructing ecological networks based on habitat quality assessment: a case study of Changzhou, China. *Scientific Reports*, 2017, 7: 46073.
- [38] 梁晓瑶, 袁丽华, 宁立新, 宋长青, 程昌秀, 王翔宇. 基于 InVEST 模型的黑龙江省生境质量空间格局及其影响因素. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2020, 56(6): 864-872.
- [39] 许宝荣, 刘一川, 董莹, 朱恭, 张永中, 陆志翔, 邹松兵. 基于 InVEST 模型的兰州地区生境质量评价. 中国沙漠, 2021, 41(5): 120-129.
- [40] Wischmeier W H, Smith D D. *Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning*. Washington, DC: Department of Agriculture, 1978: 5373-5377.
- [41] Sharpley A, Williams J R. EPIC-erosion/productivity impact calculator: 1. Model documentation. *Technical Bulletin-United States Department of Agriculture*, 1990, 1768: 3-9.
- [42] 常畅, 王耕. 基于 InVEST 模型的碧流河流域土壤保持功能研究. 国土与自然资源研究, 2019(4): 8-10.
- [43] 彭立, 邓伟, 黄佩, 刘颖. 四川盆地多重生态系统服务景观指数评价与服务簇识别. 生态学报, 2021, 41(23): 9328-9340.
- [44] 戴路炜, 唐海萍, 张钦, 崔凤琪. 北方农牧交错带多伦县生态系统服务权衡与协同关系研究. 生态学报, 2020, 40(9): 2863-2876.
- [45] 杨晓楠, 李晶, 秦克玉, 李婷, 刘婧雅. 关中—天水经济区生态系统服务的权衡关系. 地理学报, 2015, 70(11): 1762-1773.
- [46] 文志, 郑华, 欧阳志云. 生物多样性与生态系统服务关系研究进展. 应用生态学报, 2020, 31(1): 340-348.
- [47] 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.