#### DOI: 10.20103/j.stxb.202211123265

杨帆,张丽雪,石琳.沿海防护林体系建设工程区生态系统服务权衡/协同及驱动力.生态学报,2023,43(23):9952-9966. Yang F, Zhang L X, Shi L.Trade-off/synergy and driving force analysis of ecosystem services in the Coastal Shelter Forest System Construction Project region. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(23):9952-9966.

# 沿海防护林体系建设工程区生态系统服务权衡/协同 及驱动力

# 杨 帆,张丽雪\*,石 琳

浙江海洋大学经济与管理学院,舟山 316022

摘要:探究沿海地区的生态系统服务、权衡协同关系及其驱动机制是区域自然资源科学管理及生态合理规划的基础,对有效提 升地区生态、经济、社会效益和人类福祉具有重要理论意义。以海防林工程区为研究区,多角度探究区域内固碳、土壤保持、产 水量的生态系统服务、关系特征、驱动机制,从而为沿海地区制定合理生态建设规划提供参考。研究结果表明:(1)沿海防护林 体系建设工程区在 2000—2020 年期间生态系统服务水平整体提升,生态建设效果第二期最佳。(2)2000—2020 年区域内各生 态系统服务间以协同关系为主,土壤保持和产水量协同显著。(3)建设分区、建设分亚区生态系统服务间关系尺度效应主要存 在于土壤保持和产水量。(4)权衡协同关系北方主要受气象因子影响,南方受植被、地形地貌因子影响,人类活动对权衡协同 关系的影响以负效应为主,驱动因子存在空间异质性。

关键词:沿海防护林;InVEST模型;生态系统服务;权衡协同;驱动机制

# Trade-off/synergy and driving force analysis of ecosystem services in the Coastal Shelter Forest System Construction Project region

YANG Fan, ZHANG Lixue\*, SHI Lin

School of Economics and Management, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China

**Abstract**: Exploring ecosystem services, trade-off synergistic relationships, and their driving mechanisms is the basis for scientific management of natural resources and ecologically rational planning, and has importantly theoretical significance for effectively enhancing regional ecological, economic and social benefits, and human well-being. The coastal protection forest is an important coastal green ecological barrier in China, which is one of ten major ecological barriers and major ecological restoration projects being built in China. Using this area as the study area, we investigated the service quantities of carbon sequestration, soil conservation, and water production in the region based on the RUSLE model, InVEST model method, and analyzed the synergistic relationships and driving mechanisms based on Pearson correlation coefficient method, so as to provide reference for formulation of reasonable ecological construction plans in coastal areas and is essential for improving the ecological situation in coastal areas as well as promoting sustainable economic and social development in coastal areas. The results of the study showed that: (1) the overall level of ecosystem services in the Coastal Shelter Forest System Construction Project (CSFSCP) increased between 2000—2020, and the best ecological construction effect was achieved in the second phase. Temporally, the CSFSCP project increased the overall ecosystem service capacity by 10.63% between 2000—2015 and decreased the overall ecosystem service capacity by 10.63% between services increased significantly in the area south of the Yangtze River. (2) The overall synergistic relationship between

基金项目:国家自然科学青年基金项目(42001235);舟山市科技计划项目(2021C21022)

收稿日期:2022-11-12; 网络出版日期:2023-08-15

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhanglixue@ zjou.edu.cn

ecosystem services in the whole region between 2000—2020 was dominant, with significant synergy between soil conservation and water production. The overall level of synergy between ecosystem services was the highest in the second phase of CSFSCP construction. Among these, the correlation coefficient between carbon sequestration and soil conservation was 0.06, soil conservation and water production was 0.68, carbon sequestration and water production sub-region and construction sub-region existed mainly in soil conservation and water production. Soil conservation and water production was 0.68 in the construction sub-region and construction sub-region existed mainly in soil conservation and water production. Soil conservation and water production were significantly synergistic across the region and building sub-region, with significant trade-offs in the building sub-region. (4) There was spatial and temporal heterogeneity as well as complexity in the drivers and driving mechanisms affecting inter-ecosystem relationships in the four CSFSCP construction zones. The degree and direction of influence of different drivers on the trade-off synergistic relationships varied from region to region. The trade-off synergy was mainly influenced by meteorological factors in the north, vegetation and topographic factors in the south, and the impact of human activities on the trade-off synergy was mainly negative, with spatial heterogeneity in the driving factors.

Key Words: coastal shelter forests; InVEST model; ecosystem services; trade-off synergy; driving mechanisms

生态系统服务是人类直接或间接从生态系统中所得到的全部惠益<sup>[1]</sup>。受到自然因子和人类活动的影 响,生态系统服务之间存在着此消彼长的权衡、相互增益的协同等形式关系<sup>[2-3]</sup>,其关系呈现时空动态变化和 空间尺度效应<sup>[4-6]</sup>。研究发现,权衡协同关系的存在导致生态系统服务效用不能同时达到最大化<sup>[7]</sup>,生态系 统服务组成在人类利益偏好的选择下发生改变,区域内生态平衡、稳定性遭到破坏<sup>[8-9]</sup>,引发一系列的灾害效 应<sup>[10-11]</sup>。因此,明确研究区域环境变化下的生态系统服务关系特征、尺度效应、驱动因子及驱动机制对把握 生态决策制定的合理性、维持自然与人类利益的均衡性、优化生态系统服务管理具有重要的理论指导意义,在 促进区域的可持续发展,生态环境的保护上发挥着重要作用。

生态系统服务量及服务间权衡协同关系具有空间尺度性<sup>[6]</sup>。在当前研究结果中,决定服务及关系时空 异质性的驱动因子主要为气象、地形地貌、人类供需<sup>[12-14]</sup>。不同学者对于关系的驱动因素、驱动机制的研究 存在差异性<sup>[15]</sup>,表明在不同自然地理环境、不同区域,生态系统服务及关系与驱动因子间存在复杂的响应关 系,需要进行更具体的研究分析<sup>[8]</sup>。此外,研究中以短时间小区域为主,存在探索尺度效应时,生态系统服务 量变动小,权衡协同关系转变不显著等问题<sup>[6]</sup>。扩大区域范围探究生态系统服务权衡协同关系,增大生态系 统服务量变动及服务之间关系的转变程度,对增加生态系统服务相关数据分析的全面性,提高数据参考价值 是十分必要的。

当前,全国沿海防护林(海防林)体系建设是中国为减少灾害,实现经济与生态均衡发展而实行的重要生态建设工程<sup>[16]</sup>。工程区受到台风、洪涝、风沙等自然灾害长期破坏的同时,生态环境也因人为干扰发生退化,沿海地区因此产生不同程度的经济损失<sup>[17]</sup>。20多年间,在经过多期规划后,沿海林地面积增加,区域内生态系统的防震减灾、调节区域小气候、保育和改善土壤、涵养水源、固碳释氧功能作用增强<sup>[18]</sup>。沿海地区森林复杂的结构对海啸等自然灾害存在抗性和缓冲的作用<sup>[19]</sup>,其地表植被特点及生物过程会改善土壤结构、肥力、物理化学性质,提高土壤质量,增强土壤保持能力,提高水文调节水平<sup>[20-21]</sup>。随着海防林的建设,植被、土壤性质发生变化,造成生态系统服务质量、权衡协同关系的转变,对沿海系统生态环境、复原性(沿海地区减轻自然灾害的效应)、人类惠益具有重要影响<sup>[12]</sup>。目前,众多研究者对于沿海地区的探究集中于海防林的灾难特性<sup>[22-23]</sup>、减灾效用<sup>[24-25]</sup>、林地结构<sup>[26-27]</sup>、土壤性质<sup>[16,28]</sup>等方面,对于沿海林地建设工程实施后的生态系统服务量、生态系统服务关系缺乏研究。探究沿海防护林体系建设工程区生态系统服务及权衡协同关系,能够为沿海生态建设工程实施效果定量评估提供数据参考,查找建设过程中的缺点为未来海防林合理规划提供理论依据。基于上述沿海区域的研究局限、生态系统服务关系时空尺度特征及驱动因子、机制的研究不够深

人全面的问题。文章以沿海防护林体系建设工程区为研究对象,选取区域内生态效应明显的三种生态系统服务(固碳、土壤保持、产水量),通过修正的通用土壤流失方程(RUSLE)模型、InVEST模型计算的生态系统服务量及 21 年海防林建设自然环境格局的变化分析,揭示了区域内生态系统服务关系时空特征演化、热点区域转变、驱动因子及机制区域性特征,并且对工程区内 4 个建设分区、13 建设工程分亚区,建设期三阶段的尺度效应进行分区分时分析。从不同角度、不同分析路径对海防林工程区的生态系统服务关系进行分析,明确区域内生态系统服务关系的转变特点及内在机制,为以后海防林区域性生态建设和管理提供决策依据,使区域在不同时空尺度下的生态系统服务能够协调可持续发展。

#### 1 研究区概况

工程区沿中国海岸线呈窄带状分布,东西跨越 106°33′E—125°41′E,南北跨越 3°30′N—41°49′N(图 1)。 整个大陆部分呈半圆弧形状,有辽东、山东和雷州三个突出的半岛。气候以季风性气候为主,夏季受海洋季风 的影响,高温多雨。日照、热量、降雨以长江为界,南北差异明显,年日照时长数长江以北达 2800h,以南达 2000h,长江以南热量高,无霜期长,降雨量在 1000mm 以上。土壤以铁铝土、半水成土、人为土为主。工程区 由于人为活动频繁,形成了以人工林、天然次生林为主的森林植被类型。海防林工程区是我国最重要的经济 产业带,虽然面积不到我国国土面积的 5%,但集中了我国 18%以上的人口和 31%以上的国内生产总值。



Fig.1 Overview of the study area

#### 2 研究方法

#### 2.1 生态系统服务定量评估方法

### 2.1.1 固碳(CS)

植被净初级生产力(NPP)是地表植被单位时间内在单元区域中所累积的有机物总量,受植被生物过程的影响。NPP是地表碳循环的重要组成部分,体现自然环境条件下生态系统的供给能力及反映陆地生态系统的质量状况。因此将 NPP 作为研究区生态系统的固碳服务。数据选自 MODIS 产品中分辨率为1 km 的2000—2020 年 MOD17A3 数据集。

#### 2.1.2 土壤保持(SC)

海防林生态系统服务的土壤保持功能对沿海地区减少水土流失和土壤肥力的保持发挥着重要作用。文章采用基于水土流失方程(RUSLE)原理的 InVEST 模型计算,公式为:

$$\begin{split} A_{c} &= A_{p} - A_{r} \\ A_{p} &= R \times K \times L \times S \\ R &= 0.0534 \ P_{x}^{-1.6548} \\ A_{r} &= R \times K \times L \times S \times C \times P_{w} \\ K &= 0.1317 \Big\{ 0.2 + 0.3 \exp \bigg[ -0.0265 \text{Sand} (1 - \frac{\text{Silt}}{100}) \bigg] \Big\} \left( \frac{\text{Silt}}{\text{Clay} + \text{Silt}} \right)^{0.3} \\ \Big\{ 1 - \frac{0.25 \ C_{x}}{C_{x} + \exp (3.72 - 2.95 \ C_{x})} \Big\} \Big\{ 1 - \frac{0.7 \text{San}}{\text{San} + \exp (22.9 \text{Sand} - 5.51)} \Big\} \end{split}$$

式中,  $A_c$  为年实际土壤保持量(t/hm<sup>2</sup>);  $A_p$  为年潜在土壤侵蚀量(t/hm<sup>2</sup>);  $A_r$  为年实际土壤侵蚀量(t/hm<sup>2</sup>);  $P_x$  为降雨量; K 为土壤可蚀性因子,采用土壤侵蚀与生产力评价模型(EPIC)计算得到; Sand 为砂粒(%); Silt 为粉粒(%); Clay 为粘粒(%);  $C_x$  为有机碳含量(%); San 为 1-Sand/100; L、S 分别为坡长和坡度因子,采用 GIS 对数字高程模型(DEM)数据填洼得到; R 为降雨侵蚀力因子(MJ mm hm<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>); C 为植被覆盖因子;  $P_w$  为水土保持措施,根据实际情况及参考文献获得<sup>[29-31]</sup>。

2.1.3 产水量(WP)

产水量基于水量平衡法和 Budyko 水热耦合平衡假设<sup>[32]</sup>,假设除了蒸散发的雨量损失,剩余的降雨都达 到流域出水口,由 InVEST 模型计算出流域分水岭尺度的产水量,其中涉及降雨、蒸散、土壤等因素。具体公 式如下:

$$Y = \left(1 - \frac{\text{AET}}{P_x}\right) P_x$$

$$\frac{\text{AET}}{P_x} = 1 + \frac{\text{PET}}{P_x} - \left[\left(1 + \frac{\text{PET}}{P_x}\right)^W\right]^{1/W}$$

$$\frac{\text{PET}}{P_x} = \frac{K \times ET}{P_x}$$

$$W = Z \frac{\text{AWC}}{P_x} + 1.25$$

式中,*Y*为该区域产水量(mm);*P<sub>x</sub>*为研究区域年降水量(mm);AET为研究区域实际蒸散量(mm);PET为该 区域潜在蒸发量(mm),受气象、地形地貌等因素的影响;*W*为土壤性质的经验参数;*K*为蒸散系数,参考相关 文献获得<sup>[33-34]</sup>;*ET*为在土壤充分保持湿润的情况下,地面被特定短小植物覆盖的蒸散量;*Z*表示降水季节性 特征,数值介于1—10,基于区域水资源总量调整<sup>[32]</sup>;AWC为植物有效可利用水,受土壤深度和特性影响,由 Zhou 提出的公式计算得到<sup>[35]</sup>。

#### 2.1.4 皮尔逊相关系数法与热点分析

通过基于逐像元偏相关的皮尔逊相关系数法定量评估时间序列的生态系统服务间的权衡协同关系及相关驱动因素对其关系的影响,能够在时间演变规律下对生态系统服务间权衡协同关系进行空间定量制图及驱动因子对关系变动影响的探究。在研究固碳、土壤保持、产水量两两相关性时,采用偏相关分析,从而去除研究以外的其他生态系统服务的影响,同时通过T检验对其关系的显著性进行检验。计算公式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x - E(x)) (y - E(y))}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x - E(x))^{2} \sum_{i=1}^{n} (y - E(y))^{2}}}$$

#### http://www.ecologica.cn

9955

$$r_{mj \times h} = \frac{r_{mj} - r_{mh} r_{jh}}{\sqrt{(1 - r_{mh}^{2})(1 - r_{jh}^{2})}}$$
$$t = \frac{\sqrt{n - b - 2} \times r}{\sqrt{1 - r^{2}}}$$

式中,r为生态系统服务两者之间的相关系数;n为年份或面板数据; $m_j$ 、h分别代表不同的生态系统服务变量; $r_{mj \times h}$ 为变量 $m \pi_j$ 在排除h后的一阶偏相关系数; $r_{mj}$ 、 $r_{mh}$ 、 $r_{jh}$ 分别为两个变量之间的相关系数,一阶偏相关系数 > 0 为协同,反之为权衡;b为可控制变量的数目。T 检验的自由度为n-b-2,当 $t > t_{0.1}(n-b-2)$ , 即P<0.1,其相关性较显著; $t > t_{0.05}(n-b-2)$ ,即P<0.05,其相关性显著。

通过 ArcGIS 软件,采用空间叠置分析法,将生态系统相关性及其显著性叠加,并根据结果将三个生态系统的关系分为7类;根据其各自栅格单元值超过当年各自生态服务的平均值,划定热点区<sup>[36]</sup>。其中,0类热点区为0种生态系统服务超过当年各自平均值,以此类推,等级越高,其生态系统服务水平能力越强。将固碳、土壤保持、产水量热点区进行叠加,并进行热点区分级。分级情况详见表1。

Table 1         Ecosystem service relationships, hot spots grade						
生态系统服务关系条件 Ecosystem service relationships conditions	生态系统服务关系分类 Ecosystem service relationships classify	生态系统服务热点区条件 Ecosystem service hotspots conditions	生态系统服务热点区分类 Ecosystem service hotspots classify			
<i>r</i> = 0	无相关	$\overline{WP} \cap \overline{SC} \cap \overline{CS}$	0 类热点区			
$r > 0, P \le 0.05$	显著协同					
$r > 0, 0.05 < P \le 0.1$	较显著协同	$WP \ \overline{SC} \ \overline{CS} \ \cup \ CS \ \overline{WP} \ \overline{SC} \ \cup \ SC \ \overline{WP} \ \overline{CS}$	1 类热点区			
r>0,0.1 <p< td=""><td>协同</td><td></td><td></td></p<>	协同					
$r < 0, P \le 0.05$	显著权衡	$WPSC \ \overline{CS} \ \cup \ WPCS \ \overline{SC} \ \cup \ SCCS \ \overline{WP}$	2 类热点区			
$r < 0, 0.05 < P \le 0.1$	较显著权衡	$WP \cap SC \cap CS$	3 类热点区			
r<0,0.1 <p< td=""><td>权衡</td><td></td><td></td></p<>	权衡					

表1 生态系统服务关系、热点区等级

r为生态系统服务相关系数;WP:产水量Water Production;SC:土壤保质Soil Conservation;CS:固碳Carbon Sequestration; ∪为或; ∩为且

#### 2.2 驱动力及机制分析法

文章根据相关参考文献<sup>[37-39]</sup>、区域特点选取降水等6个自然因子及人口密度等4个人类活动因子,通过 地理探测器探究驱动因子对生态系统服务及关系空间分异的解释力以及各影响因子交互作用对生态系统服 务及关系的影响<sup>[40]</sup>。其表达式:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^{l} N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{\text{SSW}}{\text{SST}}$$
$$\text{SSW} = \sum_{h=1}^{l} N_h \sigma_h^2$$
$$\text{SST} = N \sigma^2$$

式中,q值是度量影响因子对生态系统服务空间分异的解释度,h表示生态系统服务及关系或影响因子的分层, $N_h$ 表示 h 层单元数,N 表示全层单元数, $\sigma_h^2$ 表示 h 层生态系统服务及关系的方差和, $\sigma^2$ 表示全层生态系统服务及关系的方差和,SSW 为层内方差之和,SST 为全层方差之和。

2.3 数据来源与处理

气象数据(降雨、蒸散、气温)选取 2000—2020 年 1000m 的逐月数据,数字高程模型 DEM 选取 ASTER GDEM 30M 数据集。2000—2020 年 30m 土地利用数据来源于武汉大学数据库,经过矫正使用。根系深度数 据选取 200m 土壤绝对深度(即地表到岩层的深度)数据,植物可利用水选取 200m 可用土壤水容量(体积分

数)直到枯萎点。流域数据选取中国 I 级流域、中国行政边界选取县级。国内生产总值(GDP)、人口密度(POP)数据选取 1km 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2019 年数据。二氧化碳选取 1km 2000—2020 年数据。夜间灯光数据集选取 1km 2000—2020 年,下载数据利用伪不变像素方法校准并进行数据修复。数据统一投影为 Krasovsky\_1940\_Albers。详细数据信息见表 2:

衣 2						
Table 2   Dataset information used in the study						
数据类型	格式	空间分辨率	来源			
Data types	Format	Spatial resolution	Source			
逐月降雨、逐月潜在蒸散、逐月温度 Month-by-month rainfall, potential evapotranspiration, temperature	NetCDF	1km	国家地球系统科学数据中心 http://www.geodata.cn/			
高程 Digital elevation model	TIFF	30m	地理空间数据云网站 http://www.Gscloud.cn			
根系深度、植物可利用水 Root depth, plant availability of water	TIFF	1km	ISRIC https://data.isric.org/			
土地利用 Land use and cover change	TIFF	30m	武汉大学			
二氧化碳 Carbon dioxide	TIFF	1km	ODIAC https://data.isric.org/			
夜间灯光数据集 Night light dataset	TIFF	1km	哈佛大学 https://dataverse.harvard.edu			
国内生产总值、人口密度 Gross domestic product、population	TIFF	1km	中国科学院资源环境科学数据中心 https://www.resdc.cn/			
中国行政边界 China's administrative boundaries	Shapefile					
中国流域 China river basin	Shapefile					

NetCDF:网络通用数据格式 Network common data format; TIFF:标签图像文件格式 Tag image file format; ISRIC:国际土壤参考和资料中心 International soil reference and information centre; ODIAC:人为二氧化碳开放数据 Open-data inventory for anthropogenic carbon

## 3 结果与分析

#### 3.1 生态系统服务时空特征

在海防林建设期间(2000—2020年),生态系统服务整体呈上升趋势,其中固碳和土壤保持服务增加趋势 明显。如图2所示,区域内生态系统服务间协同度高的时间段分别在2001—2017年(土壤保持和产水量)、 2011—2015年(固碳和土壤保持)、2011—2015年和2017—2019年(固碳和产水量)。产水量的高值区在 1048.95—1051.27mm/km<sup>2</sup>(2016—2018年),土壤保持高值区在79.56—84.14t/hm<sup>2</sup>(2012—2016年),固碳高 值区在651.99—665.93gC/m<sup>2</sup>(2018—2020年)。高值时间主要集中在研究阶段的中后期,高值主要集中在长 三角沿海地区以南。如图3所示,固碳、土壤保持多年高值区分布在东南丘陵南部、广西盆地及海南岛西南 部,产水量多年高值区分布在三角洲平原、广西盆地西部及海南岛东北部。在海防林建设期间,生态系统服务 在绝大部分区域呈增加态势,服务能力增加的区域面积占比都在95%以上,其显著增加区域大多与生态系统 服务高值区一致,主要分布在长江以南地区,减少区域集中分在人类经济活动密集区。生态系统服务在这些 区域呈减少趋势与区域内的植被、土壤、地形、人类活动密切相关。

#### 3.2 生态系统服务热点区特征

生态系统服务热点区的划定能体现生态系统服务能力的强弱。从热点区分布特点来看,沿海防护林体系 建设工程第二期的生态系统服务能力水平最高(图4),生态效益转变最好的区域为长三角地区。如图5所 示,2000—2015年期间,0类和1类热点区面积有所减少,分别减少13.86%、7.64%,2类、3类热点区面积增加 明显,分别增加20.09%、8.76%,增加的2类热点区主要由长三角沿海、珠三角及西南地区的1类热点区转化,



Fig.2 Trends in carbon sequestration, soil conservation and water production from 2000 to 2020

增加的3类热点区主要由东南沿海北部地区的1类热点区,珠三角北部2类热点区转化。2016—2020年期间,0类、3类热点区面积减少,分别减少18.38%、61.65%,1类热点区面积占比增加明显,增加82%,2类热点 区面积增加不显著。增加的1类热点区主要由环渤海湾沿海地区的0类热点区,东南沿海临海、珠三角及西 南沿海地区的2类热点区转化,增加的2类热点区主要由东南沿海地区、珠三角及西南沿海地区的3类热点 区转化。

#### 3.3 生态系统服务关系时空特征

# 3.3.1 生态系统服务关系时间分布

2000—2020年间,沿海防护林体系建设工程区的生态系统服务之间关系主要以协同为主(图 6)。固碳和土壤保持协同关系高值年为 2003年(0.68),低值年为 2000年(0.33),土壤保持和产水量协同关系高值年为 2006年(0.72),低值年为 2011年(0.05),固碳和产水量协同关系高值年为 2011年(0.66),低值区为 2001年(0.01)。权衡出现在产水量和固碳之间,分别在 2006年(-0.04)和 2020年(-0.11),这两年降雨量偏低,日照时间充足,产水量和固碳出现相反的高低值,导致这两年的生态系统服务呈现权衡关系。沿海防护林体系建设工程二期(2001—2015年),生态系统服务间为协同关系,固碳和土壤保持协同度呈先增加后降低趋势, 土壤保持和产水量关系协同度呈现先降低后增加趋势,固碳和产水量关系协同度呈现轻幅度降低后增加趋势。三期前阶段(2016—2020年)固碳和土壤保持关系协同度呈现增加后降低趋势,固碳和土壤保持关系协同度呈现增加趋势,固碳和产水量关系协同度呈现时间差异性。



图 3 2000—2020 年固碳、土壤保持、产水量空间分布

Fig.3 Spatial distribution of carbon sequestration, soil conservation and water production from 2000 to 2020





## 3.3.2 生态系统服务关系空间分布

海防林建设期间,固碳与土壤保持关系空间分布和固碳与产水量关系空间分布截然相反,土壤保持与产水量关系呈现显著协同(图7)。2000—2020年,固碳和土壤保持以协同关系为主,协同关系为0.25(表3),协同面积为15.13×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,占比46.9%,主要分布在环渤海湾、长三角平原、东南丘陵南部、雷州半岛、广西盆

23 期



图 5 2000—2020 年生态系统服务热点区空间变化







Fig.6 Changes in the temporal relationship of ecosystem services from 2000 to 2020

地,权衡关系面积占比35.93%,主要分布在山东半岛、江淮平原、东南丘陵中部、珠三角平原及海南岛中部地区。土壤保持和产水量协同关系明显,协同关系为0.69,协同面积占比82%,其中显著协同占比78.21%。固碳与产水量以协同关系为主,协同关系为0.24,协同关系面积为18.63×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,占比44.24%,主要分布在长江以北、珠三角平原、广西盆地、海南岛西北部,权衡关系面积占比38.59%,主要分布于东南丘陵、珠三角平原、雷州半岛及海南岛东南部。受其气象、地形地貌影响,生态系统服务关系空间布局复杂。

3.3.3 生态系统服务关系尺度效应

基于气候带、自然灾害特点、区域规划划分的四个工程分区,存在显著尺度效应的生态系统服务关系为长 江三角洲的固碳与土壤保持关系、东南沿海地区和珠三角及西南沿海地区的固碳与产水量关系,与全区域生 态系统服务间协同关系相反,这些地区关系为权衡。长三角沿海地区固碳和土壤保持主要为权衡关系,权衡



图 7 2000—2020 年生态系统服务关系空间分布 Fig.7 Spatial distribution of ecosystem service relationships from 2000 to 2020

系数为-0.03,权衡面积占比高于协同 10.27%(图 8)。该区域其它生态系统服务之间为协同关系,协同系数 为 0.65(土壤保持和产水量)、0.18(固碳和产水量),其面积分别占 77.72%、60.91%。东南、珠三角及西南沿 海地区固碳和产水量主要为权衡关系,权衡相关系数分别为-0.21、-0.03,其权衡面积占比高于协同关系的 8.28%—50.65%。两个区域的土壤保持与产水量、固碳主要为协同关系,协同相关系数分别为 0.77、0.63(土壤保持和产水量)、0.01、0.07(固碳和土壤保持)。东南沿海地区的固碳与土壤保持权衡关系比协同关系面积 占比高 2.6%,但区域协同强度高,在均衡之后,全域整体呈现较低的协同关系。

	Table 3         Ecosystem services corre	lation coefficient from 2000 to 2020	0		
	沿海防护林体系建设工程区生态系统服务相关系数				
生态系统服务类型	CSFSCP ecosystem services correlation coefficient				
Types of ecosystem service	固碳	土壤保持	产水量		
	Carbon sequestration	Soil conservation	Water production		
固碳 Carbon sequestration	1	0.06 <sup>3</sup>	$0.02^{3}$		
土壤保持 Soil conservation	$0.25^{1}$	1	0.68 <sup>3 **</sup>		
	$-0.2^{2}$				
产水量 Water production	$0.24^{1}$	$0.69^{1**}$	1		
	$-0.23^{2}$	$-0.18^{2}$			

表 3	2000—2020 年生态系统服务相关系数	

CSFSCP:沿海防护林体系建设工程区 Coastal Shelter Forest System Construction Project;<sup>1</sup>表示协同关系;<sup>2</sup>表示权衡关系;<sup>3</sup>表示总体区域权衡协同关系;\*\*表示在 0.05 水平上显著相关

### 3.4 生态系统服务间权衡协同关系驱动因子及驱动机制

基于生态系统内部构造的复杂性及自然因子对生态服务间关系的约束性,不同区域、不同生态系统服务 之间存在驱动因子作用的多样性<sup>[41]</sup>。如表4所示,固碳与土壤保持权衡协同关系主要自然驱动因子在长江 以北为气温(-0.61、0.24),长江以南为植被(-0.29、-0.3)。土壤保持和产水量权衡协同关系主要自然驱动因 子在珠三角以北为植被(0.16、0.32、0.2),珠三角及西南沿海地区为气温(0.26)、高程(-0.23)。固碳与产水量 间关系在环渤海湾、东南沿海地区主要自然驱动因子为气温(0.57、-0.38),长三角、珠三角及西南沿海地区为植 被(0.15、0.14)。人类活动对生态系统服务关系显著负效应程度在-0.2—-0.35,显著正效应程度在 0.21—0.31 (表5)。在因子交互作用中,对权衡协同关系的影响效果为双因子增强、非线性增强两种,60%以上为非线性增 强,多因子影响效果显著增加。权衡协同关系转变是由气候、地形地貌、人类活动强度等因子综合作用产生的复 杂效果,并不是单纯几个因素单一方向的作用,其特点表现为主导因素的空间异质性、影响效果差异性。



图 8 2000—2020 年沿海防护林体系建设工程分区权衡协同关系面积占比 Fig.8 Trade-offs and synergy area ratio of CSFSCP zoning from 2000 to 2020

Table 4         The influence coefficient of CSFSCP zoning natural factors on ecosystem service relationships								
沿海防护林体系建设	生态系统服务	自然因子 Natural factors						
工程分区	Ecosystem	降雨	蒸散	气温	植被密度	高程	土地利用	
CSFSCP project zoning	services	Precipitation	Evapotranspiration	Temperature	NDVI	DEM	LUCC	
环渤海湾沿海地区	CS-SC	0.19 **	-0.37 **	-0.61 **	0.27 **	0.32 **	0.10 **	
Bohai bay coastal area	SC-WP	-0.09 **	0.002	0.07 **	0.16 **	-0.05 **	-0.07 **	
	CS-WP	-0.31 **	0.35 **	0.57 **	-0.30 **	-0.34 **	-0.13 **	
长三角沿海地区	CS-SC	0.25 **	0.20 **	0.24 **	-0.14 **	0.06 **	0.11 **	
Yangtze river delta	SC-WP	0.12 **	-0.17 **	-0.04 **	0.32 **	0.19 **	-0.21 **	
coastal area	CS-WP	-0.08 **	-0.15 **	-0.06 **	0.15 **	0.11 **	-0.07 **	
东南沿海地区	CS-SC	-0.08 **	0.19 **	0.13 **	-0.29 **	-0.14 **	-0.05 **	
Southeast coastal area	SC-WP	0.07 **	0.08 **	0.03 **	0.20 **	0.03 **	-0.07 **	
	CS-WP	-0.14 **	-0.37 **	-0.38 **	0.21 **	-0.02 **	0.03 **	
珠三角及西南沿海地区	CS-SC	-0.17 **	0.18 **	0.10 **	-0.30 **	-0.31 **	-0.16 **	
Pearl river delta and	SC-WP	-0.07 **	0.17 **	0.26 **	0.03 **	-0.23 **	-0.14 **	
southwest coastal areas	CS-WP	-0.04 **	0.13 **	0.02 **	0.14 **	-0.05 **	0.02 **	

	表 4	沿海防护林体系建设工程分区自然因子对生态系统服务关系的影响系数	
ble 4	The inf	uence coefficient of CSFSCP zoning natural factors on ecosystem service relationsh	ip

CS-SC:固碳-土壤保持 Carbon Sequestration-Soil Conservation; SC-WP:土壤保持-产水量 Soil Conservation-Water Production; CS-WP:固碳-产水量 Carbon Sequestration-Water Production; NDVI:归一化植被指数 Normalized Difference Vegetation Index; \*\*表示在 0.05 水平上显著相关

# 4 讨论

# 4.1 生态系统服务及关系特征分析

植被固碳是由植物的生态生理特征和气候因子之间相互复杂的作用决定的,会对植被产生不同的区域、时间效应<sup>[42-43]</sup>。工程区内植被是固碳服务的最大单因子影响因素,气温与降水是固碳服务最大多因子综合影响因素。降雨与地形、地表特点是土壤保持、产水量主要多因子影响因素。2006—2015年间区域内降雨水

平较其他时间段增加8.44%,日照时数减少,太阳辐射降低,影响植被的光合作用<sup>[44]</sup>,导致时间段内区域固碳 能力水平不高。在环渤海湾地区,由于北部地区植被对温度的敏感性,在气温升高时,固碳能力提升较大[45], 区域内固碳较其它服务增加明显。到 2020年,在海防林工程的进行下,森林面积提高 0.13%,进一步增加沿 海地区森林蓄积,增加地表植被覆盖率和土壤根系丰富度[46],提高降雨拦截率[47],稳定土壤构造、特 性[48-49],从而使区域土壤保持、产水量能力增强[50]。2000—2020年期间,土壤保持和产水量之间的协同较 高,固碳与土壤保持、产水量整体协同度较低,其主要是降水、地表特点(植被、城镇化)和其他因素相互作用 的结果。此外,三种生态系统服务之间整体相关系数也受到学者们计算生态系统服务量方法、权衡协同关系 强度和分布区域面积的影响[51]。

表 5 沿海防护林体系建设工程分区人类活动因子对生态系统服务关系的影响系数

辺海防护林林亥建设工建公区	生态系统服务	人类活动因子 Human activities factors			
CSFSCP project zoning	Ecosystem services	国内生产总值 GDP	人口密度 POP	二氧化碳 Carbon dioxide	灯光密度 Light
环渤海湾沿海地区	CS-SC	-0.28 **	0.08 **	-0.02 **	-0.22 **
Bohai bay coastal area	SC-WP	-0.002	0.31 **	-0.12 **	-0.07 **
	CS-WP	0.27 **	-0.35 **	0.02 *	0.21 **
长三角沿海地区	CS-SC	0.16 **	0.14 **	0.18 **	0.22 **
Yangtze river delta coastal area	SC-WP	-0.21 **	-0.25 **	-0.31 **	-0.35 **
	CS-WP	-0.10 **	-0.09 **	-0.15 **	-0.17 **
东南沿海地区	CS-SC	0.06 **	0.04 **	0.09 **	0.13 **
Southeast coastal area	SC-WP	-0.14 **	-0.18 **	-0.20 **	-0.21 **
	CS-WP	-0.04 **	-0.03 **	-0.05 **	-0.07 **
珠三角及西南沿海地区	CS-SC	0.03 **	-0.05 **	0.02 *	0.06 **
Pearl river delta and southwest coastal areas	SC-WP	-0.14 **	-0.10 **	-0.20 **	-0.13 **
	CS-WP	-0.07 **	0.06 **	-0.07 **	-0.13 **

Table 5 The influence coefficient of CSFSCP zoning human activities factors on ecosystem service relationships

\*\* 表示在 0.05 水平上显著相关; \* 表示在 0.1 水平上显著相关

#### 4.2 生态系统服务权衡协同关系尺度效应分析

生态系统服务间的权衡协同关系存在尺度效应,随着空间和时间的变化而变化[5-6],为了进一步探究更 小区域生态系统服务关系变化,以研究区建设工程分亚区为界限探究不同区域关系层级特性。研究发现,在 13个分亚区中生态系统服务关系尺度效应更加显著,出现更多权衡关系和更强协同关系。如图9所示,在分 亚区中固碳和土壤保持呈高度协同且多年维持平稳状态,9/13的区域多年平均协同系数在0.5以上,和全区 域固碳与土壤保持弱协同关系差异性明显。分亚区中9/13的区域土壤保持与产水量关系为权衡关系,与全 区域、建设工程分区中多年呈现协同关系截然相反。土壤保持与固碳、产水量关系在全区域与分亚区中差异 性显著,证明区域越大,其与小区域中生态系统服务关系的尺度效应越明显。而小区域的生态系统服务关系 可能由于驱动因子相互间作用的简化往往更符合大多数学者的研究结果,在分亚区中固碳与土壤保持呈高度 协同,土壤保持与产水量呈较高的权衡,这与学者<sup>[52]</sup>研究一致。

4.3 不足

生态系统结构复杂多样,能提供多种生态系统服务,并且各种服务之间相互联系、影响<sup>[33]</sup>,它们之间存在 着线性、非线性关系<sup>[3]</sup>。目前文章虽然对两种生态系统服务之间剔除第三种的影响,但仍存在其他生态系统 服务的影响,后续将进行多种生态系统多重关系的空间自相关研究。同时,对于当前缺乏海防林措施实施效 果及可能出现问题的讨论,在以后的研究过程中应该基于对未来的权衡协同关系情景进行预测,掌握当前生 态保护与管理措施对生态系统服务及关系的功能提升效果。此外,基于皮尔逊系数、地理探测器对建设工程 分区生态系统服务权衡协同关系的驱动因子的区域分析,为区域性制定生态保护政策提供理论依据,虽然考





虑了因子的区域性特点、影响程度、作用方向,但其因子的影响机制探究不足。未来应考虑通过建立相关模型 探究其影响因素的综合驱动机制。

#### 5 结论

文章对海防林背景下的生态系统服务及关系在时空特征、热点区转变、尺度效应、内在机制多角度进行分析,揭示海防林建设后的生态系统服务关系状况及驱动力。主要结论有:(1)经过海防林二期、三期建设,地表植被增加显著,区域内的生态系统服务量呈增加趋势。区域内生态系统服务量增加显著地区主要为长江以南区域。(2)海防林二期建设取得的生态效果较好,热点区转变升级明显,总体生态系统服务能力提高10.63%,提升效果最好的区域为长三角地区。(3)工程区内生态系统服务间关系为协同,但这种关系在建设工程亚区中存在明显的尺度效应。(4)权衡协同关系的驱动因子、驱动机制存在空间异质性,在长江以北主要受到气象因子的影响,长江以南则为地形、高程,人类对权衡协同关系存在重要影响。(5)建议在对区域之

间关系调节建设过程中应当依据气候、植被、地形、人类活动等因素进行区域规划设计,并依据生态系统服务 及关系特征分布划分不同生态管理分区。针对区域尺度内弱项生态系统服务、生态系统服务关系内在发生机 制以改良生态服务结构为主,提高生态服务效应为方向采取措施来提高整体生态服务能力和生态管理水平。

#### 参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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 E, Reed D J. Coastal ecosystem-based management with nonlinear ecological functions and values. Science, 2008, 319(5861): 321-323.
- [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] 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.
- [6] 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.
- [7] 曹祺文, 卫晓梅, 吴健生. 生态系统服务权衡与协同研究进展. 生态学杂志, 2016, 35(11): 3102-3111.
- [8] Li G Y, Jiang C H, Gao Y, Du J. Natural driving mechanism and trade-off and synergy analysis of the spatiotemporal dynamics of multiple typical ecosystem services in Northeast Qinghai-Tibet Plateau. Journal of Cleaner Production, 2022, 374: 134075.
- [9] Hao R F, Yu D Y, Wu J G. Relationship between paired ecosystem services in the grassland and agro-pastoral transitional zone of China using the constraint line method. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2017, 240: 171-181.
- [10] Fu Q, Xu L L, Zheng H Y, Chen J H. Spatiotemporal dynamics of carbon storage in response to urbanization: a case study in the su-xi-Chang region, China. Processes, 2019, 7(11): 836.
- [11] -J Wang S, -M Liu Q, -F Zhang D. Karst rocky desertification in southwestern China: geomorphology, landuse, impact and rehabilitation. Land Degradation & Development, 2004, 15(2): 115-121.
- [12] Wu Y F, Zhang X, Li C, Xu Y, Hao F H, Yin G D. Ecosystem service trade-offs and synergies under influence of climate and land cover change in an afforested semiarid basin, China. Ecological Engineering, 2021, 159: 106083.
- [13] He Z Q, Shang X, Zhang T H, Yun J Y. Coupled regulatory mechanisms and synergy/trade-off strategies of human activity and climate change on ecosystem service value in the loess hilly fragile region of northern Shaanxi, China. Ecological Indicators, 2022, 143: 109325.
- [14] Bohensky E L, Reyers B, Van Jaarsveld A S. Future ecosystem services in a Southern African River Basin: a scenario planning approach to uncertainty. Conservation Biology: the Journal of the Society for Conservation Biology, 2006, 20(4): 1051-1061.
- [15] Ganjurjav H, Gao Q Z, Gornish E S, Schwartz M W, Liang Y, Cao X J, Zhang W N, Zhang Y, Li W H, Wan Y F, Li Y, Danjiu L B, Guo H B, Lin E D. Differential response of alpine steppe and alpine meadow to climate warming in the central Qinghai-Tibetan Plateau. Agricultural and Forest Meteorology, 2016, 223: 233-240.
- [16] Yang H J, Xia J B, Cui Q, Liu J T, Wei S C, Feng L, Dong K K. Effects of different *Tamarix chinensis*-grass patterns on the soil quality of coastal saline soil in the Yellow River Delta, China. Science of the Total Environment, 2021, 772; 145501.
- [17] Abuodha P A O, Woodroffe C D. Assessing vulnerability to sea-level rise using a coastal sensitivity index: a case study from southeast Australia. Journal of Coastal Conservation, 2010, 14(3): 189-205.
- [18] Lee W K, Tay S H X, Ooi S K, Friess D A. Potential short wave attenuation function of disturbed mangroves. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2021, 248; 106747.
- [19] Danielsen F, Sørensen M K, Olwig M F, Selvam V, Parish F, Burgess N D, Hiraishi T, Karunagaran V M, Rasmussen M S, Hansen L B, Quarto A, Suryadiputra N. The Asian tsunami: a protective role for coastal vegetation. Science, 2005, 310(5748): 643.
- [20] Xia J B, Ren J Y, Zhang S Y, Wang Y H, Fang Y. Forest and grass composite patterns improve the soil quality in the coastal saline-alkali land of the Yellow River Delta, China. Geoderma, 2019, 349: 25-35.
- [21] Pan Q, Wen Z, Wu T, Zheng T C, Yang Y Z, Li R N, Zheng H. Trade-offs and synergies of forest ecosystem services from the perspective of plant functional traits: a systematic review. Ecosystem Services, 2022, 58: 101484.
- [22] Rutledge B T, Cannon J B, McIntyre R K, Holland A M, Jack S B. Tree, stand, and landscape factors contributing to hurricane damage in a coastal plain forest: post-hurricane assessment in a longleaf pine landscape. Forest Ecology and Management, 2021, 481: 118724.
- [23] Nandi G, Neogy S, Roy A K, Datta D. Immediate disturbances induced by tropical cyclone Fani on the coastal forest landscape of eastern India: a geospatial analysis. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2020, 20: 100407.
- [24] Takabatake T, Esteban M, Shibayama T. Simulated effectiveness of coastal forests on reduction in loss of lives from a tsunami. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2022, 74: 102954.

#### http://www.ecologica.cn

- [26] Singh J K. Structural characteristics of mangrove forest in different coastal habitats of Gulf of Khambhat arid region of Gujarat, west coast of India. Heliyon, 2020, 6(8); e04685.
- [27] Acuña-Piedra J F, Quesada-Román A. Multidecadal biogeomorphic dynamics of a deltaic mangrove forest in Costa Rica. Ocean & Coastal Management, 2021, 211: 105770.
- [28] Fan L L, Tarin M W K, Zhang Y Y, Han Y Z, Rong J D, Cai X H, Chen L G, Shi C K, Zheng Y S. Patterns of soil microorganisms and enzymatic activities of various forest types in coastal sandy land. Global Ecology and Conservation, 2021, 28: e01625.
- [29] Jiang C, Li D Q, Wang D W, Zhang L B. Quantification and assessment of changes in ecosystem service in the Three-River Headwaters Region, China as a result of climate variability and land cover change. Ecological Indicators, 2016, 66; 199-211.
- [30] Fu B J, Liu Y, Lü Y H, He C S, Zeng Y, Wu B F. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China. Ecological Complexity, 2011, 8(4): 284-293.
- [31] Lufafa A, Tenywa M M, Isabirye M, Majaliwa M J G, Woomer P L. Prediction of soil erosion in a Lake Victoria basin catchment using a GIS-based Universal Soil Loss model. Agricultural Systems, 2003, 76(3): 883-894.
- [32] Yang Y, Li M W, Feng X M, Yan H M, Su M R, Wu M W. Spatiotemporal variation of essential ecosystem services and their trade-off/synergy along with rapid urbanization in the Lower Pearl River Basin, China. Ecological Indicators, 2021, 133: 108439.
- [33] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao, Rome 1998, 300(9): D05109.
- [34] Wang B S, Chen H X, Dong Z, Zhu W, Qiu Q Y, Tang L N. Impact of land use change on the water conservation service of ecosystems in the urban agglomeration of the Golden Triangle of Southern Fujian, China, in 2030. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(2): 484-498.
- [35] Zhou W Z, Liu G H, Pan J J, Feng X F. Distribution of available soil water capacity in China. Journal of Geographical Sciences, 2005, 15(1): 3-12.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 严俊霞,黄浩,高彦华,王甜甜,张莹.吉林省长时间序列陆地生态系统 NPP 时空变化特征.水土保持学报, 2021, 35(5): 172-180.
- [39] 马新萍,李晶,余玉洋,邓晨晖.秦岭山地碳中和空间服务范围及其模拟预测.生态学报,2022,42(23):9431-9441.
- [40] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [41] Sun X Y, Shan R F, Liu F. Spatio-temporal quantification of patterns, trade-offs and synergies among multiple hydrological ecosystem services in different topographic basins. Journal of Cleaner Production, 2020, 268: 122338.
- [42] Zhang H, Gao S Y, Zheng Q H. Responses of NPP of salinized meadows to global change in hyperarid regions. Journal of Arid Environments, 2002, 50(3): 489-498.
- [43] Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, Jolly W M, Piper S C, Tucker C J, Myneni R B, Running S W. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. Science, 2003, 300(5625): 1560-1563.
- [44] Chuai X W, Qi X X, Zhang X Y, Li J S, Yuan Y, Guo X M, Huang X J, Park S, Zhao R Q, Xie X L, Feng J X, Tang S S, Zuo T H, Lu J Y, Li J B, Lv X. Land degradation monitoring using terrestrial ecosystem carbon sinks/sources and their response to climate change in China. Land Degradation & Development, 2018, 29(10): 3489-3502.
- [45] Chuai X W, Huang X J, Wang W J, Bao G. NDVI, temperature and precipitation changes and their relationships with different vegetation types during 1998—2007 in Inner Mongolia, China. International Journal of Climatology, 2013, 33(7): 1696-1706.
- [46] Sun W Y, Shao Q Q, Liu J Y, Zhai J. Assessing the effects of land use and topography on soil erosion on the Loess Plateau in China. CATENA, 2014, 121: 151-163.
- [47] Jin F M, Yang W C, Fu J X, Li Z. Effects of vegetation and climate on the changes of soil erosion in the Loess Plateau of China. Science of the Total Environment, 2021, 773: 145514.
- [48] Zhu H X, Fu B J, Wang S, Zhu L H, Zhang L W, Jiao L, Wang C. Reducing soil erosion by improving community functional diversity in semiarid grasslands. Journal of Applied Ecology, 2015, 52(4): 1063-1072.
- [49] Handa I T, Aerts R, Berendse F, Berg M P, Bruder A, Butenschoen O, Chauvet E, Gessner M O, Jabiol J, Makkonen M, McKie B G, Malmqvist B, Peeters E T H M, Scheu S, Schmid B, van Ruijven J, Vos V C A, Hättenschwiler S. Consequences of biodiversity loss for litter decomposition across biomes. Nature, 2014, 509(7499): 218-221.
- [50] Xiong M Q, Sun R H, Chen L D. A global comparison of soil erosion associated with land use and climate type. Geoderma, 2019, 343: 31-39.
- [51] 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.
- [52] 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.中国沙漠,2021,41(6):78-87.
- [53] Farber S C, Costanza R, Wilson M A. Economic and ecological concepts for valuing ecosystem services. Ecological Economics, 2002, 41(3): 375-392.