

草原生态恢复工程下新疆草原植被覆盖动态及其对生态系统服务的约束效应

胡文可,刘维忠,彭亚萍

(新疆农业大学经济管理学院,乌鲁木齐 830052)

摘要: [目的] 探索大型生态工程对草原植被覆盖动态的影响,阐明植被变化对生态系统服务的约束效应,为区域可持续发展和生态恢复工程的改进提供可靠的科学依据。[方法] 以地处干旱地带的新疆地区为例,采用趋势分析法,探析生态恢复工程对植被覆盖的影响,基于 InVEST 模型和 CASA 模型,评估其产水量、碳储存、土壤保持和净初级生产力(NPP)4种草原生态系统服务,揭示生态恢复工程下植被覆盖对4种草原生态系统服务的约束效应。[结果] 1)在生态恢复工程驱动下,有79.2%的区域草原归一化植被指数(NDVI)残差为正值,草原植被覆盖度呈波动式上升。2)新疆地区草原生态系统服务整体呈上升趋势。产水服务与土壤保持服务均在2010年达最高值,随后降低,高值区均集聚于伊犁河谷、阿尔泰山脉北侧;碳储存服务与NPP呈上升趋势,高值区空间分布均匀。3)植被NDVI与4种生态系统服务之间呈现3种约束关系,分别为左抛物线状、驼峰状、右抛物线状;植被NDVI与碳储存服务、NPP间阈值分别为0.49、0.35。[结论] 2000—2020年,草原植被生长季NDVI呈上升趋势,且草原生态恢复工程对植被覆盖改善具有显著效果,植被覆盖对生态系统服务阈值为0.3~0.5时,草原综合生态系统服务能达到最优,未来生态修复政策可依据区域草原植被覆盖度阈值进行相应改进。

关键词: 生态恢复工程;草原植被覆盖;生态系统服务;约束关系

中图分类号:X32

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2025)03-0202-13

Vegetation Cover Dynamics of Xinjiang Grassland under Grassland Ecological Restoration Project and Its Constraining Effects on Ecosystem Services

HU Wenke, LIU Weizhong, PENG Yaping

(Faculty of Economics and Management, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: [Objective] To explore the impact of large-scale ecological projects on the dynamics of grassland vegetation cover, and to elucidate the constraining effects of vegetation changes on ecosystem services, in order to provide a reliable scientific basis for the sustainable development of the region and the improvement of ecological restoration projects. [Methods] Taking the Xinjiang region, which is located in the arid zone, as an example, trend analysis was used to explore the impact of ecological restoration projects on vegetation cover. Based on the InVEST model and the CASA model, four grassland ecosystem services, namely, water production, carbon storage, soil conservation, and net primary productivity (NPP), were evaluated to reveal the constraining effects of vegetation cover on these services under ecological restoration projects. [Results] 1) Driven by ecological restoration projects, 79.2% of regional grasslands showed positive normalized vegetation index (NDVI) residuals, and there was a fluctuating increase in grassland vegetation cover. 2) Grassland ecosystem services in Xinjiang region showed an overall upward trend. Water production and soil conservation services reached their maximum values in 2010, and then decreased, with the high-value areas clustered in the Yili River Valley and the

收稿日期:2024-11-04

修回日期:2024-12-28

录用日期:2025-01-02

网络首发日期(www.cnki.net):2025-03-21

资助项目:国家社会科学基金项目(18BJY166);国家林业和草原局软科学研究项目(2018-R27)

第一作者:胡文可(2000—),女,硕士研究生,主要从事草原生态系统服务评估研究。E-mail:huwenke2022@163.com

通信作者:刘维忠(1961—),男,博士,教授,主要从事草原生态系统服务评估研究。E-mail:2080054388@qq.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

northern side of Altai Mountains. Carbon storage and NPP services showed an increasing trend, with uniform spatial distribution of high-value areas. 3) Three constraints between vegetation NDVI and the four ecosystem services were presented as left parabolic, humpbacked, and right parabolic, respectively. The thresholds between vegetation NDVI and Carbon storage service and NPP were 0.49 and 0.35, respectively. [Conclusion] NDVI of the grassland vegetation in the growing season has shown an increasing trend, and grassland ecological restoration projects have significantly improved vegetation cover from 2000 to 2020. When vegetation cover to ecosystem services threshold reaches 0.3-0.5, grassland integrated ecosystem services can be the optimal. Future ecological restoration policies can be improved based on regional grassland vegetation cover thresholds.

Keywords: ecological restoration projects; grassland vegetation cover; ecosystem services; constraining relationships

Received: 2024-11-04

Revised: 2024-12-28

Accepted: 2025-01-02

Online(www.cnki.net): 2025-03-21

草原生态系统服务是指草原生态系统与生态过程形成及所维持的人类赖以生存的自然环境条件与效用,包括水源涵养、水土保持、防风固沙、碳储存、牧草生产等重要生态系统服务功能,在维持生命系统运行和生态环境的动态平衡方面有着不可替代的作用,同时是人类社会前进发展的物质基础^[1]。快速发展的社会经济与日益频繁的人类活动促使草原生态系统发生急剧变化,引致草原生态环境不断退化,生态系统服务逐渐降低,严重威胁到人类的可持续发展^[2]。为缓解草原生态环境退化态势,全球已开展一系列人为干预的草原生态恢复工程^[3],特别是中国政府,自2000年以来,先后实施退耕还林还草工程、草原围栏工程、退牧还草工程、草原生态保护补助奖励政策等一系列重点项目,对遏制草原退化速度、改善草原植被数量和质量作出巨大贡献^[4]。草原生态工程作为一项重大的人类活动,是植被恢复和草原生态系统服务提升的关键驱动力^[5]。探析生态工程实施对草原植被覆盖及其生态系统服务的影响是当前生态系统服务的研究热点,也是改进未来草原生态修复措施亟须解决的现实问题。

综观以往研究,当前学者针对青藏高原^[6]、黄河流域^[7]、西北地区^[8]等生态功能区,聚焦生态恢复工程对生态系统服务的影响研究,包括工程实施前后生态系统服务的时空演变^[9]、权衡关系^[10]、转变区域识别^[11]、影响路径^[12]等主题。但发现多数研究较少关注生态恢复工程下植被覆盖对生态系统服务的影响。植被是生态系统服务产生和传递的显化载体,驱动因素影响结果直接反映在植被上,植被长势同样影响区域生态系统服务供给^[13]。生态恢复工程直接作用于土地,通过改善植被覆盖来恢复区域生态环境和服务,继而映射于生态系统服务时空格局^[14]。因此,精确认知生态恢复工程下植被覆盖变化是探析生态恢复工程对生态系统服务影响的前提。同时

植被覆盖与生态系统服务相互作用,二者存在复杂的非线性关系,科学寻求植被覆盖对生态系统服务的约束阈值是生态工程持续推进的基础^[15]。此外,已有研究仅关注工程直接对整体土地类型生态系统服务的影响,缺乏针对工程实施对草原类型生态系统服务的细化主题探索。草原作为我国最大的陆地生态系统,占国土面积的27.6%,发挥着“水库、钱库、粮库、碳库、基因库”的重要功能^[16],探索草原类型生态恢复新路径对维护国家生态安全、稳定边疆具有至关重要的作用。

生态系统运行是复杂的过程,其中除生态系统服务之间的相互作用,还受到气候因素、经济因素、社会因素、人类活动等驱动因素的影响,进而2个因子之间呈散点状分布。呈现此分布特征的原因为限制因子不能完全控制响应因子的变化,而是限制因子对响应因子只存在限制作用,同时受到诸多因素影响,使得响应因子分布不超过某个范围,此范围所构成的边界即约束线^[17]。现有研究方法集聚于主成分分析、聚类分析、传统一元回归方程、二元回归方程来揭示生态系统服务之间及生态系统服务与驱动因素之间的相关关系^[18]。但生态系统服务间并不是简单的线性关系,传统相关、回归方法不适用于2个变量之间呈散点状分布的相关关系研究,其要求数据均匀分布于平均值周围,生态研究数据特征违背相关、回归方法的基本假设。故相对于传统回归和相关统计方法,约束线法更适用于受多方因素影响的复杂生态系统中限制因子对响应因子的约束作用。因此,本文选用约束线方法探求植被覆盖对生态系统服务的约束阈值。

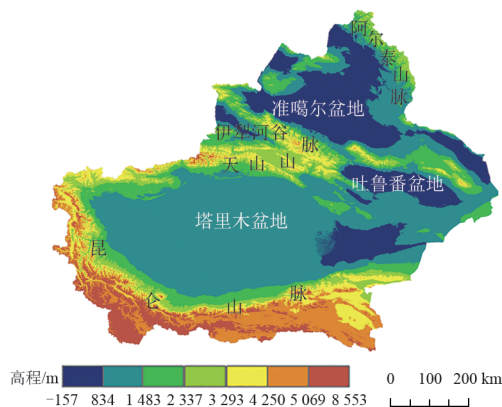
新疆地区位于我国西北干旱区,是“一带一路”建设的核心区域,受极端气候和经济发展的双重影响,其生态系统更为脆弱,对气候的敏感性也尤为显著,是敏感的生态脆弱区之一,也是维护边疆稳定、

国家生态安全的特殊区域^[19]。自 2002 年以来,新疆的 48 个县先后实施国家天然草原恢复与建设、天然草原围栏建设、天然草原退牧还草等草原生态建设项目,但其对区域植被覆盖和草原生态系统服务产生何种效益,尚不明晰。鉴于此,本文以新疆地区为例,基于研究期土地利用数据、气象数据等,利用趋势分析法、InVEST 模型、CASA 模型,定量分析植被覆盖变化趋势及评估产水量、碳储存、土壤保持、初级净生产力 4 种关键草原生态系统服务在生态恢复工程实施前后的时空格局;查明植被覆盖对草原生态系统服务的约束关系,并精准识别其约束阈值,以期为干旱脆弱区草原生态系统恢复管理提供理论依据,同时为未来草原生态修复工程改进提供重要参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

新疆地区(34°20′11″~49°10′55″N,73°29′54″~96°23′03″E)地处中国西北部,包括山地、绿洲、沙地等多种景观类型(图 1)。属温带大陆性气候,气候干燥,温差较大,年平均降水量为 150 mm,远低于全国其他地区,是我国典型干旱半干旱区。独特的气候地貌特点造就新疆丰富多样的 11 种草地类型,其拥有天然草原 573.34×10⁵ hm²,其中荒漠草地占 44.75%,草甸及草原草地分别占 25.20%、29.54%,是我国五大牧区之一。但同时极端气候和复杂地形也导致新疆草原生态系统的脆弱性,出现植被覆盖退化、水土流失、沙尘暴等众多生态问题。



注:该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2023)2763 号的标准地图制作,底图边界无修改。下同。

图 1 研究区概况示意

Fig. 1 Overview of the study area

新疆地区是一系列草原生态恢复工程的重点实施区,退牧还草工程、草原保护补助奖励政策等先后在此实施,显著改善区域生态环境。《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035 年)》^[20]中指

出,新疆地区所在的青藏高原生态屏障区还要继续推进草原生态修复工作。因此,本文以新疆地区为例,探析草原生态恢复工程对干旱区植被覆盖和其草原生态系统服务的影响,具有典型的代表性。

1.2 数据来源

本研究所需数据包括地形数据、气象数据、土壤数据和统计数据(表 1)。为便于后续相关计算及结果分析,本文对数据进行预处理:1)统一数据像元。根据研究区特点,选取 1 km×1 km 的像元大小作为标准单位,利用 Arcgis 软件将所有空间数据调整至该精度。2)统一坐标系。所有空间数据均采用 WGS-1984-Albers 投影坐标系。3)统计数据处理。使用 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年当年新疆地区数据进行统计,如有年份缺少,则以相邻年份进行填补。

1.3 研究方法

1.3.1 趋势分析 Theil-Sen 趋势分析能够有效反映长时间序列数据变化趋势,对 NDVI 时间序列逐像元计算每个栅格的变化率,以此反映研究期间区域植被覆盖变化的综合趋势;Mann Kendall 非参数统计检验用于检验变化趋势的显著性。2 种方法相结合降低数据要求,不需要遵循正态或线性分布,减少数据中异常值干扰。本研究 NDVI 趋势计算公式为:

$$\text{Slope} = \text{Median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right) \quad (1 < i < j < n) \quad (1)$$

式中: i 和 j 为时间序列; x_i 和 x_j 为第 i 年和第 j 年的 NDVI 平均值。斜率为正值表示增加趋势,负值为减少趋势。

1.3.2 残差趋势分析 残差趋势分析方法可以通过模拟 NDVI 长时间序列变化中的降水和温度因素对植被覆盖的影响,剥离生态政策因素对植被覆盖的影响。通过建立降水、气温与 NDVI 之间的多元线性回归模型,利用回归模型参数计算预测的 NDVI。模拟的高拟合优度表明,气候因素对 NDVI 的变化起主导作用;低拟合优度表明,NDVI 的变化更受人类活动的影响。该方法已在多空间尺度上得到广泛应用,其计算预测的 NDVI 值公式为:

$$\text{NDVI}_{\text{CC}} = a \times \text{Pre} + b \times \text{Tem} + c \quad (2)$$

$$\text{NDVI}_{\text{HA}} = \text{NDVI}_{\text{obs}} - \text{NDVI}_{\text{CC}} \quad (3)$$

式中: NDVI_{obs} 为基于遥感影像的 NDVI 真实观测值; NDVI_{CC} 为基于回归模型的 NDVI 预测值; NDVI_{HA} 为 NDVI 残差值;Pre 为研究区生长季平均气温,℃;Tem 为研究区生长季累计降水量,mm,其中根据新疆气候特征,其生长季为 4—10 月^[21];a、b 分别为 NDVI 预测值对降水和温度的回归系数;c 为回归常数项。

表 1 数据来源
Table 1 Data sources

数据类型	具体指标	分辨率	数据来源
土地利用类型数据	2000 年、2010 年、2020 年土地利用数据	30 m	1990—2022 年的中国 30 m 的年度土地覆盖栅格数据 https://zenodo.org/record/8176941
降水数据	年平均降雨量、月平均降水量、月总降水量	1 km	国家环境信息中心(NCEI) https://www.ncei.noaa.gov/
气温数据	年平均温度、月平均气温	1 km	国家环境信息中心(NCEI) https://www.ncei.noaa.gov/
潜在蒸散量数据	年平均潜在蒸散量	1 km	国家地球系统科学数据中心 http://www.geodata.cn
地表太阳辐射数据	年平均地表太阳辐射	10 km	国家地球系统科学数据中心 http://www.geodata.cn
高程数据	DEM 数据	30 m	欧洲航天局发布的 Copernicus DEM 数据 https://panda.copernicus.eu/panda
归一化植被指数数据	年平均 NDVI 值、生长季 NDVI 值	1 km	美国国家航天航空局发布的 MOD13A3 数据集 https://search.earthdata.nasa.gov/search
土壤数据	土壤沙粒、粉粒、黏粒、有机质、土壤根系限制深度	100 km	HWSD 土壤数据库 http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/

NDVI 预测值与 NDVI 真实观测值的差异是人类活动对植被变化的贡献。人类活动对草原生态系统中植被恢复的正向贡献主要是草原生态恢复工程,即 NDVI 残差正值。

根据 $NDVI_{CC}$ 和 $NDVI_{HA}$ 的不同变化趋势组合,计算草原生态恢复工程对植被恢复的贡献率:

$$\text{Contribution rate} = \begin{cases} 0 & \text{Slope}_{NDVI_{CC}} > 0, \text{Slope}_{NDVI_{HA}} < 0 \\ \frac{\text{Slope}_{NDVI_{HA}}}{\text{Slope}_{NDVI_{obs}}} & \text{Slope}_{NDVI_{CC}} > 0, \text{Slope}_{NDVI_{HA}} > 0 \\ 1 & \text{Slope}_{NDVI_{CC}} < 0, \text{Slope}_{NDVI_{HA}} > 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中:Contribution rate 为草原生态恢复工程对植被恢复的贡献率。

1.3.3 生态系统服务评估 本研究根据新疆地区草原生态系统的主要生长规律及其社会经济影响,选取产水量、碳储存、土壤保持、NPP 4 个指标来代表新疆地区草原生态系统服务功能。

使用 InVEST 模型的产水量模块(water yield)计算产水量,计算公式为:

$$Y_x = \left(1 - \frac{AET_x}{P_x}\right) \times P_x \quad (5)$$

式中: Y_x 为栅格 x 的产水量,mm; AET_x 为栅格 x 的潜在蒸散量,mm; P_x 为栅格 x 的年平均降水量,mm。

使用 InVEST 模型的碳储存模块(carbon)计算碳储存,计算公式为:

$$C_{\text{total}} = \sum_{k=1}^n A_k \times (C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{soil}} + C_{\text{dead}}) \quad (6)$$

式中: C_{total} 为研究区碳储存量,t; A_k 为第 k 类土地类型面积, hm^2 ; C_{above} 为地上碳库, t/hm^2 ; C_{below} 为地下碳

库, t/hm^2 ; C_{soil} 为土壤碳库, t/hm^2 ; C_{dead} 为死亡物质碳库, t/hm^2 。

使用 InVEST 模型的土壤保持模块(sediment delivery ratio)计算土壤保持,该模块在修订后的通用土壤流失方程(RUSLE)基础上考虑地块对泥沙的拦截力,计算公式为:

$$RKLS = R \times K \times LS \quad (7)$$

$$USLE = R \times K \times LS \times C \times P \quad (8)$$

$$SD = RKLS - USLE \quad (9)$$

式中:SD 为研究区年土壤保持量,t;RKLS 为研究区潜在土壤侵蚀量,t;USLE 为研究区实际土壤侵蚀,t; R 为降雨侵蚀因子, $(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$; K 为土壤可侵蚀性因子, $(\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})/(\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2)$; LS 为地形因子, $\text{m} \cdot (^\circ)$; C 为植被覆盖因子,无量纲; P 为土壤保持措施因子,无量纲。

使用基于光合有效辐射和光能利用效率的光能利用模型—CASA 模型计算 NPP,计算公式为:

$$NPP_{x,t} = A_{x,t} \times \epsilon_{x,t} \quad (10)$$

式中: $NPP_{x,t}$ 为栅格 x 处 t 月的植被净初级生产力, g/m^2 (以 C 计); $A_{x,t}$ 栅格 x 处 t 月的太阳总辐射量, MJ/m^2 ; $\epsilon_{x,t}$ 为栅格 x 处 t 月的实际光能利用率, g/MJ (以 C 计)。

1.3.4 约束线性法的定义与提取 草原生态系统受多种驱动因素影响,是一个复杂生态系统。约束线性法能够刻画驱动因素与复杂生态系统之间的限制关系及表征复杂生态系统在主要限制因子作用下潜在范围或者最高值(图 2)^[17]。植被覆盖是生态系统服务能力高低的主要限制因素。基于此,本研究采

用分位数分割的约束线性法,揭示植被覆盖与草原生态系统服务之间的约束关系。具体步骤为:首先,将植被覆盖(NDVI)作为限制变量(X),生态系统服务功能作为响应变量(Y),绘制散点图;其次,借助R语言将限制变量X轴等分100份,将每份的99.9%分位数作为边界,其中边界内最大值作为分界点;最后,利用Origin 2021软件的拟合函数,提取约束线^[17]。

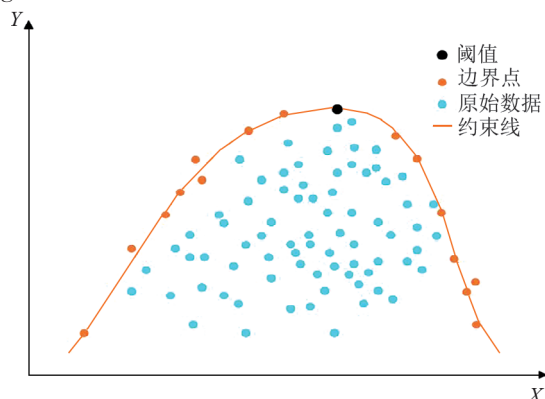


图2 约束线提取示意

Fig. 2 Schematic diagram of constraint line extraction

2 结果与分析

2.1 生态恢复工程对植被覆盖的影响

2.1.1 草原植被覆盖的时空格局 通过分析2000—2020年新疆地区草原生长季植被覆盖时间趋势(图3)可知,新疆地区NDVI值增长速率为 $1.100 \times 10^{-3}/a$,说明2000—2020年该地区植被覆盖度呈波动增长趋势,NDVI值最低和最高年份出现在2001年和2017年,分别为 1.229×10^{-1} 、 $1.469 \times 10^{-1}/a$,其增长量为 $2.400 \times 10^{-2}/a$ 。具体而言,新疆地区2000—2008年NDVI值呈锯齿状上升,2008年—2013年中,除2012年份,呈现稳步上升趋势,且增长率为 $3.030 \times 10^{-2}/a$ 。但在2014年前后出现“突降”“突升”现象,可能与2014年新疆地区遭遇降雨偏枯的年份及同年气温偏高相关。随后2014年后迅速上升至2017年最高值,与新疆地区自2011年开始大规模实施草原生态恢复工程密切相关,得益于第1轮(2011—2015年)草原生态补奖政策稳步实施,新疆草原NDVI值达最高值。结果表明,尽管面临气候的不利影响,但在生态恢复工程的推动下,新疆地区植被覆盖整体趋向良好状态。

由图4a可知,在空间格局上,新疆大部分草原区域的2000—2020年平均NDVI值为0.12~0.34,整体偏低,植被覆盖空间展示出“西北高、东南低”的空间态势,与新疆地区山脉和水域分布空间十分契合。NDVI值 <0.12 的区域主要分布在准噶尔盆地与阿尔泰山脉、天山山脉东部交界处、塔里木盆地

与昆仑山脉交界处、昆仑山脉两侧,这是由于盆地与山脉交界处,其气候干旱、水源干涸,致使草原植被生长受阻;同时昆仑山脉南侧海拔较高,气候环境十分苛刻,对植物生长要求严格,因此草原植被覆盖较低。NDVI值为0.12~0.25的区域主要分布于阿勒泰山脉南侧、天山山脉北侧、昆仑山脉,这是气候因素和人类活动共同所致,受全球变暖影响,其区域山川积雪融化为草原生长提供丰富水资源,但东部地区受准噶尔盆地和人类开发影响,致使草原面积退化。NDVI值 >0.25 的区域主要集中在伊犁河谷,是因为伊犁河谷降雨充沛,气温适宜,地势平坦,造就良好的生态环境,因此草原资源十分丰富。整体而言,新疆草原植被覆盖质量相对较差,与新疆地区干旱气候和独特地貌密切相关。

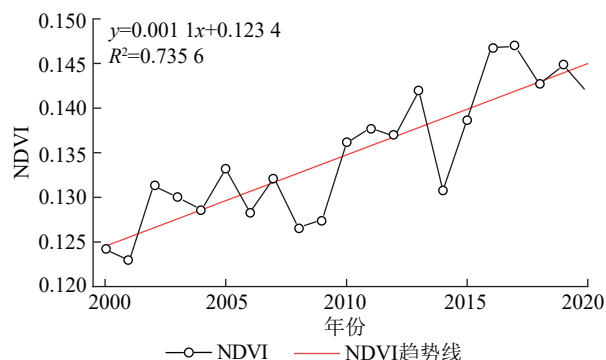


图3 2000—2020年新疆地区草原NDVI年际变化特征

Fig. 3 Interannual variation characteristics of NDVI in grasslands in Xinjiang from 2000 to 2020

由表2、图4b可知,研究区域草原植被覆盖度主要以增加为主,增加区域面积占整体草原面积的76.60%,显著增加区域占35.90%,集聚于克孜勒苏柯尔克孜自治州、喀什地区、和田地区、巴音郭楞蒙古自治州、哈密地区,主要原因是草原生态恢复工程持续稳步实施,显著提升区域内的生物多样性、优化土壤质量,并大幅增加草原植被覆盖量。减少区域面积占整体草原面积的24.90%,显著减少区域占2.40%,主要分布在伊犁河谷、天山山脉中部等受经济发展、社会活动影响较大的区域。保持稳定区域占0.50%,呈碎斑状空间格局。综上表明,新疆地区草原植被覆盖呈现良好改善态势。

2.1.2 生态恢复工程对恢复植被的贡献 新疆地区草原植被分布广泛,处于高、中海拔区域的植被变化与气候因素相关性较显著,低海拔的平谷生态环境适宜,是人类生存主要地区,此处植被变化更易受人类活动的影响^[22]。本研究中生态恢复工程作为一项巨大的人类活动,因此可以利用残差分析法量化生态恢复工程对草原植被变化的贡献。

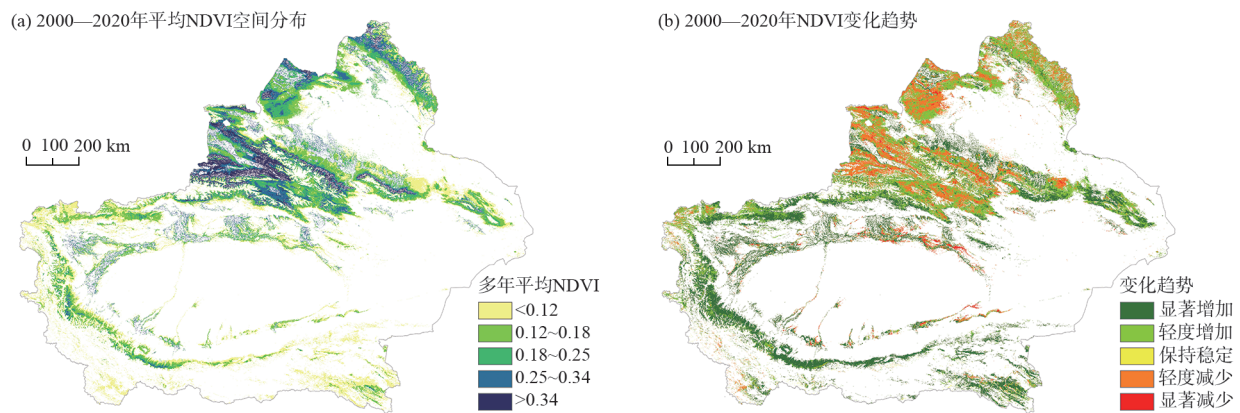


图 4 新疆地区草原植被生长季 NDVI 空间分布特征及变化趋势

Fig. 4 Characteristics and trends of spatial distribution of NDVI during the growing season of grassland vegetation in Xinjiang region

表 2 新疆地区草原植被生长季 NDVI 变化趋势

Table 2 Trend statistics of NDVI changes during the growing season of grassland vegetation in Xinjiang region

植被覆盖的 Sen 趋势	Z	生长季 NDVI 变化趋势	占比/%
>0	>1.96	显著增加	35.90
>0	-1.96~1.96	轻度增加	40.70
=0	-1.96~1.96	保持稳定	0.50
<0	-1.96~1.96	轻度减少	20.50
<0	<-1.96	显著减少	2.40

本研究表明,2000—2010 年以来新疆地区草原植被 NDVI 平均残差值约为 -5.37×10^{-3} ,即人类活动对草原植被变化影响呈负向影响;2011—2020 年植被 NDVI 平均残差值约为 5.91×10^{-3} ,即人类活动对草原植被变化影响整体呈正向影响,与新疆地区自 2011 年大力实施草原生态保护补助奖励政策的现状吻合。具体而言,残差值 2000—2010 年空间分布(图 5a)显示,生态恢复工程对植被影响最显著的区域主要集中在伊犁河谷,主要原因是政府实施退耕还草、围栏禁牧等一系列生态恢复措施有效改善伊犁河谷植被覆盖状况。残差值 2011—2020 年的空间分布格局与 NDVI 变化趋势的空间分布展现出高度相似性(图 5b),生态恢复工程对植被覆盖变化显著影响的区域分布在昆仑山脉、天山山脉南侧、阿尔泰山脉南侧。

从 NDVI 残差变化速率(图 5c)可知,变化速率为 $-1.756 \times 10^{-2} \sim 2.470 \times 10^{-2}/a$,其中 $0 \sim 0.50 \times 10^{-2}/a$ 的区域占草原面积的 72%,是新疆地区草原植被变化的主速率。其中,草原植被 NDVI 残差变化速率为正的区域占比超过 79.20%,表明生态恢复工程对草原植被的正面影响正在逐渐加强。从生态恢复工程贡献率空间格局(图 5d)可以看出,在植被 NDVI 显著增加的区域,生态恢复工程贡献率高达 60%~

100%,结果表明,新疆地区实施的围栏封育、人工种草、草地改良、草原生态补水等一系列生态恢复工程正扎实推进。

2.2 生态恢复工程对生态系统服务的影响

2.2.1 实施前后单项生态系统服务时空格局

由表 3 可知,2000—2020 年,新疆地区单项草原生态服务呈现不同趋势变化,年平均产水量与年平均土壤保持量均先增后减,其中,年平均产水量在 2000—2010 年增加 123.72 mm,而在 2010—2020 年减少 141.61 mm,这种变化可能与新疆地区频发的极端气温和降水现象相关;年平均土壤保持量在此期间的增量(357.96 t)远低于减量(1 008.48 t),说明新疆地区防风治沙任务的严峻性。与此同时,年平均碳储量由 589.46 t 增长至 591.47 t,增量为 2.01 t,主要归因于草原植被覆盖的提升,增加四大碳库的储量;年平均 NPP 则由 2000 年的 $90.88 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 增至 2020 年的 $94.68 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,增量为 $3.80 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,表明新疆地区草原植被的物质生产能力在不断增强。

由图 6 可知,2000—2020 年,产水量服务在空间分布上稳定呈现出北高南低的格局,其中高值区域主要集中于伊犁河谷与阿尔泰山脉周边,低值区域主要分布在塔里木盆地和准噶尔盆地附近的草原区,低值区的形成归因于草原植被覆盖低、降雨量少及蒸散作用强烈,致使其产水量较低。值得注意的是,从 2010 年空间态势可见,昆仑山脉区域产水量有所增加,主要由于自 2002 年起实施的天然草原恢复与建设等项目取得良好效益,使得草原质量提升,增强草原根系对水源固定能力,从而产水量得到提升。但发现 2020 年产水量减少,该现象的原因是草原覆盖度的提升促使生态系统趋向稳定,这一正面变化伴随着草原生长所需水源量的增加,进而导致产水量减少。

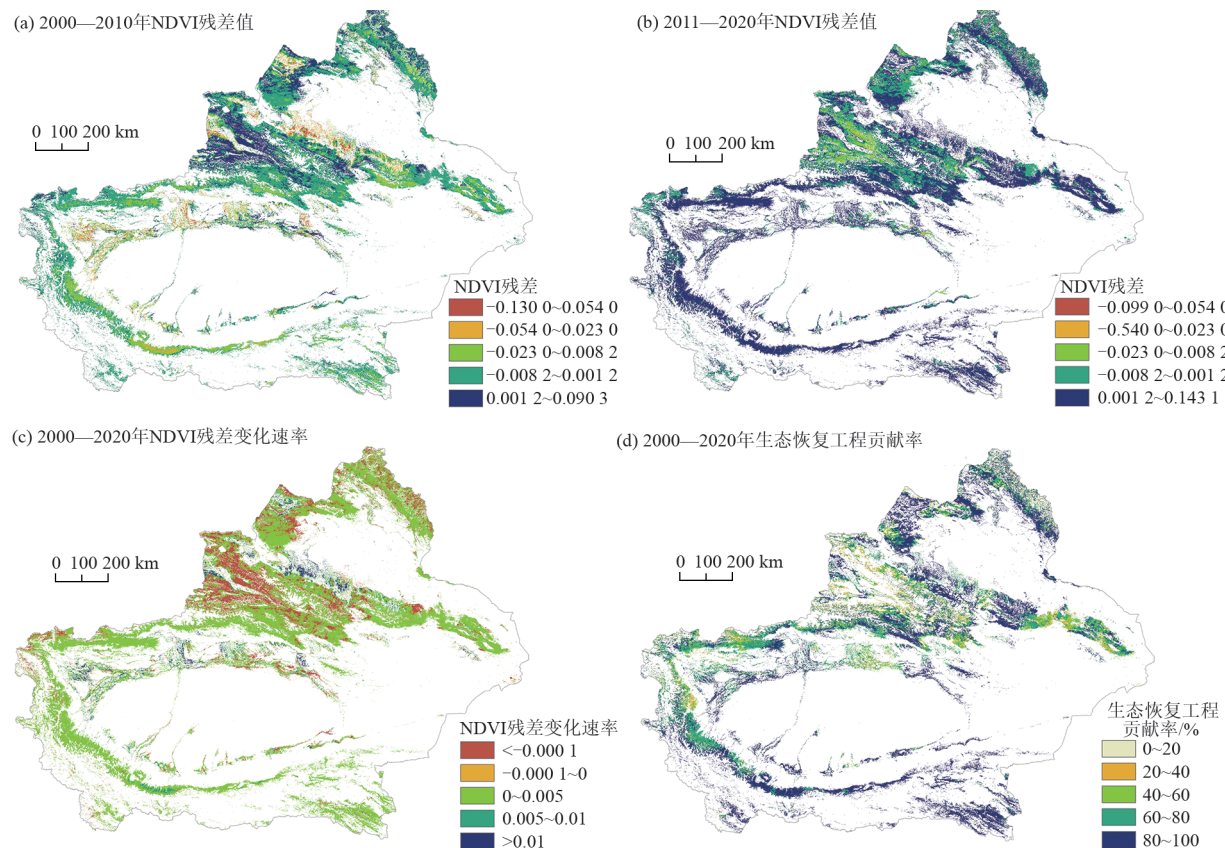


图5 新疆地区草原植被覆盖残差值、变化速率及生态恢复工程贡献率

Fig. 5 Residual values of grassland vegetation cover, rate of change and contribution rate of ecological restoration projects in Xinjiang region

表3 2000年、2010年、2020年新疆地区草原生态系统服务量化
Table 3 Quantification of grassland ecosystem services in Xinjiang in 2000, 2010 and 2020

年份	平均产水量/mm	平均碳储量/t	平均土壤保持量/t	平均NPP/ ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) (以C计)
2000	69.46	589.46	3 957.96	90.88
2010	193.18	595.49	4 315.92	93.62
2020	51.57	591.47	3 307.44	94.68

碳储存服务的空间分布相对均匀,高值区域依然聚焦于天山山脉与昆仑山脉的草原地带。通过对比图5可知,碳储量增长区与NDVI提升区高度重合。新疆地区的草原植被得到有效恢复,导致植物的光合作用显著增强,促使碳储量的增长速度加快。这一现象有力地证明生态恢复工程已经取得一定成效,促进草原植被的生长与恢复,进而增强草原的碳汇能力。

土壤保持服务呈两端低、中间高的空间态势,与新疆地区山脉、盆地分布格局契合。主要是由于在河谷地带,地势相对平坦,地形对土壤流失的影响较小,因此土壤侵蚀现象相对较少。相比之下,山脉附近地区海拔落差大、地形陡峭,土壤流失的风险显著增加,故此类区域为低值区。其中,通过对比2000

年与2010年,天山西部地区的土壤保持量有显著提升,这一变化主要得益于退牧还草工程的实施,草原植被覆盖增加,其根系在土壤中分布广泛且稠密,能够更有效地减少径流对土壤的冲刷作用,进而优化土壤的渗透效能并加强径流的蓄积能力。但对比2000年与2020年,天山北侧土壤保持量明显减少,可能与发展农业生产时,开垦植被覆盖、生产力高的区域有关,农作物对土壤保持力度低于草地保持力度,因此土壤保持量下降。

2000—2020年,NPP空间格局分布规律一致且变化不大,展示出西北高、东南低的发展态势。2000—2010年昆仑山脉高值区呈收缩趋势,可能与过度放牧、开垦农田行为有关。昆仑山脉海拔落差大,极端气温条件对植被的呼吸作用和光合作用产生不利影响,进而导致NPP下降。2010—2020年,新疆草原的NPP普遍呈现增长态势,且高值区域的范围不断扩大,呈现出明显的扩张趋势,与生态恢复工程全面开展有直接关系,其区域植被覆盖度的显著提升有效促进植物的固碳吐氧功能。结果表明,生态恢复工程对草原植被恢复的积极作用,也进一步证实植被覆盖度提升对增强生态系统碳汇功能的重要性。

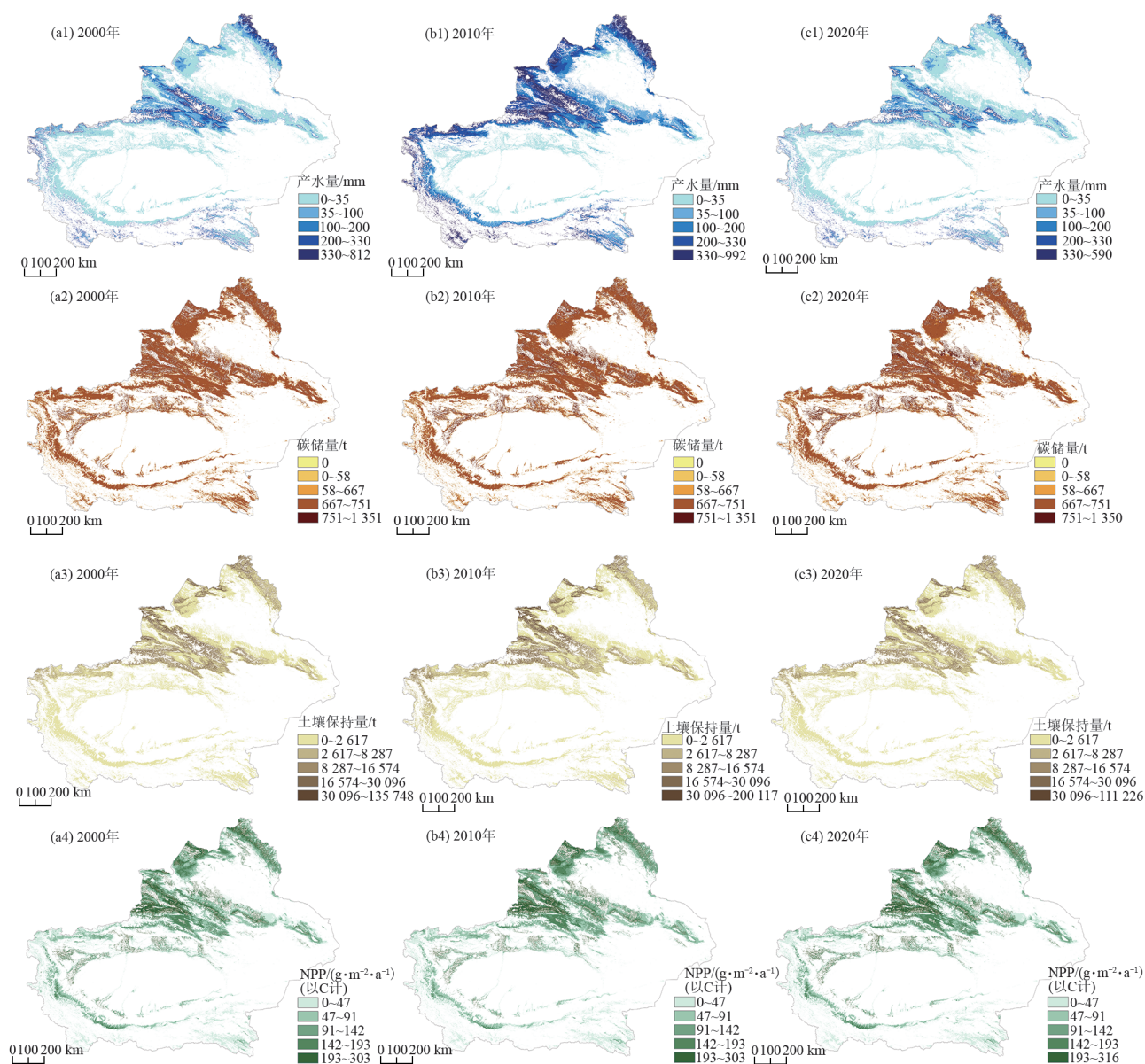


图 6 新疆地区草原生态系统服务格局及演化

Fig. 6 Patterns and evolution of grassland ecosystem services in Xinjiang region

2.2.2 实施前后整体生态系统服务时空格局 整体草原生态系统服务是反映生态系统服务供给的有效指标。新疆地区的平均草原生态系统服务由2000年的3.33上升至2020年的3.34(图7)。具体来看,增值区占全疆草原的61.46%,分布面积广泛,其空间分布与碳储量服务、NPP显著增长区域重叠,表明此区域综合生态系统服务的增长主要得益于碳储存服务、NPP服务的改善。剩余区域占38.40%为减值区,主要集中在伊犁河谷、天山山脉东部区域,与产水服务、土壤保持服务大规模减少区域相同,说明减值区的形成主要因产水量、土壤保持量的减少。结果表明,生态恢复工程在新疆地区取得显著成效。

2.3 植被覆盖对生态系统服务的约束效应

2.3.1 植被覆盖对产水量服务的约束效应 为进一

步厘清植被覆盖与生态系统服务之间的关系,本文对NDVI和4种生态系统服务之间分别进行约束线提取。由图8可知,NDVI与产水量之间在新疆地区呈现出显著的非线性负向关联,生态恢复工程实施前后约束线相似,即随着NDVI值的递增,产水量呈现持续递减的趋势,表明NDVI对产水量持续的制约作用。其中,当NDVI值超过0.5后,产水量的减少速率显著加速。主要因为新疆作为干旱半干旱区域,植物蒸腾作用强烈,尽管降水量有所提升,但植被覆盖度的增加导致植物对水分的截留能力增强,使得有限的水资源难以满足植被生长需求。此外,高植被覆盖区通常位于伊犁河谷、天山山脉中部及阿尔泰山脉北侧等山区,海拔差异大,径流作用显著,高植被区产生的径流易导致低植被覆盖的

山坡地带发生水土流失,进而破坏草原生态环境,降低植被的产水服务能力。整体趋势表明,高NDVI值成为制约新疆草原植被产水服务能力的关键因素。

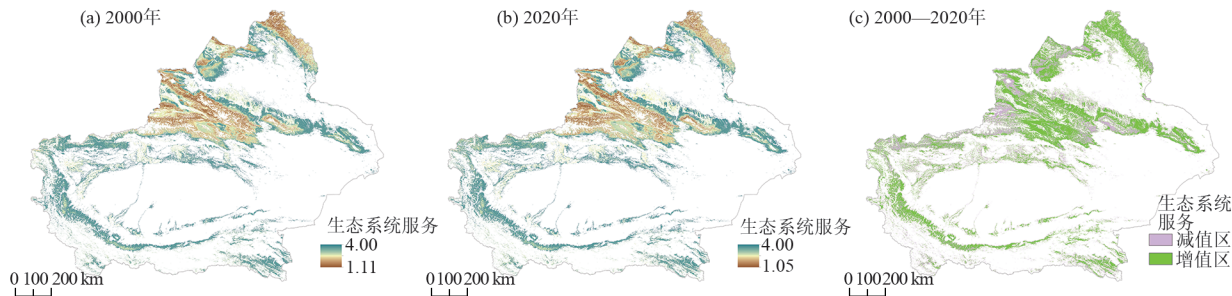
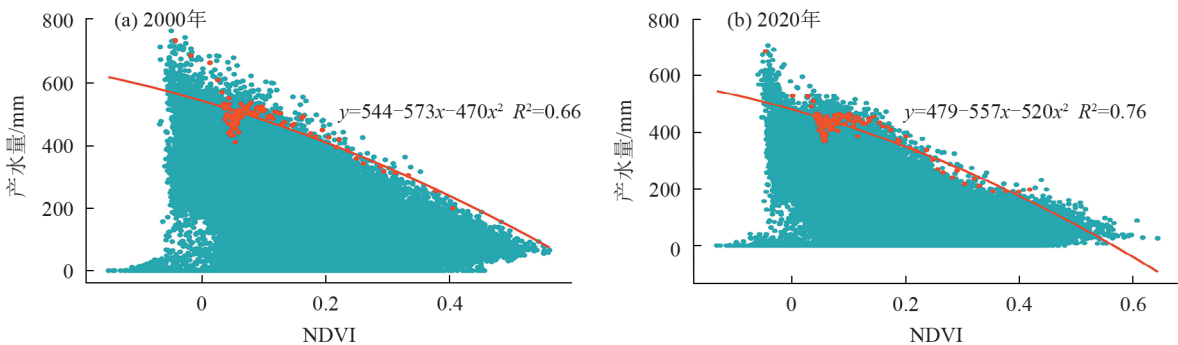


图 7 新疆地区整体草原生态系统服务格局及变化

Fig. 7 Patterns and change of grassland ecosystem services in Xinjiang region



注:蓝色点为散点;橙色点为边界点;橙色线为NDVI与产水量之间的约束线。下同。

图 8 新疆地区草原NDVI对产水服务的约束效应

Fig. 8 Constraining effects of grassland NDVI on water production service in Xinjiang region

2.3.2 植被覆盖对碳储存服务的约束效应 由图9可知,NDVI与碳储量之间的约束关系表现为驼峰状。在阈值左侧,随着草原植被覆盖的增加,其对碳储量的约束作用减弱,其他驱动因素对碳储量的约束作用逐渐加强。与植被恢复的土壤固碳效应有关,在干旱半干旱地区,植被恢复降低土壤中水分含量,进而使土壤矿化效率降低,提升土壤固碳能力。在阈值右侧,随着植被覆盖的增加,其对碳储量约束效应逐渐

加大,其他驱动因素对碳储量的约束作用不断减少。同时,生态恢复工程实施前后阈值及峰值发生明显变化。具体而言,生态恢复工程前阈值为0.44,峰值为1 152.78,生态恢复工程后阈值为0.49,峰值为1 221.55。可见,2020年相对于2000年阈值、峰值都有所提升,表明在生态恢复工程影响下,NDVI对碳储量的约束效应延后,同时提升碳储量的最高值。

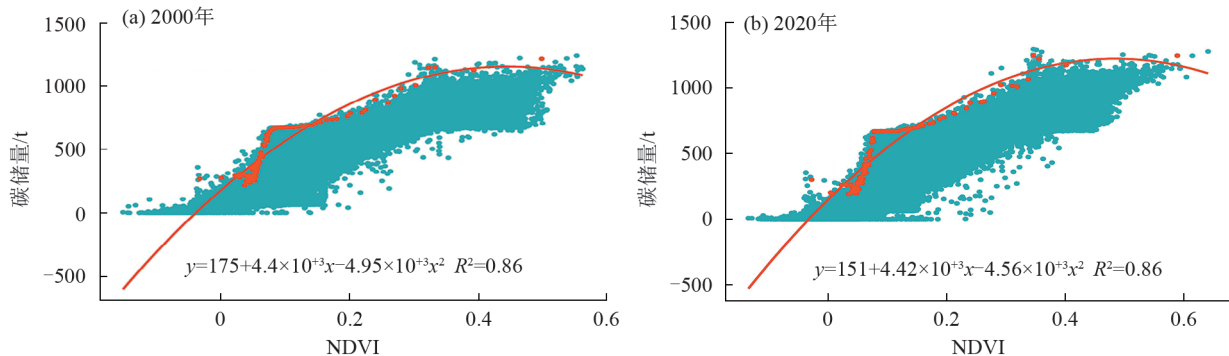


图 9 新疆地区草原NDVI对碳储存服务的约束效应

Fig. 9 Constraining effect of grassland NDVI on carbon storage service in Xinjiang region

2.3.3 植被覆盖对土壤保持服务的约束效应 由图10可知,NDVI与土壤保持服务之间的关系呈现出左抛物线特征趋势。具体而言,在工程实施前,当NDVI值约为0.28时,可以视为一个转折点。在NDVI值低于0.28时,其对土壤保持能力的约束作用相对较

弱;而当NDVI值超过0.28后,其对土壤保持服务的约束作用则显著增强。工程实施后,NDVI对土壤保持服务的约束作用保持在一个相对较低的水平。随着NDVI值的增长,草原的土壤保持服务也在不断增加。主要由于实施生态恢复工程后,草原数量和质量得到

提升,使得草原根部对土壤的固定能力相对增强,有效改善土壤质地,降低土壤可蚀性因子,从而减少土壤流失现象。但是这种改善也带来一定的副作用,即产水

量的减少。由此可见,NDVI与土壤保持服务之间的关系复杂且多变,受到多种因素的影响。结果表明,NDVI对土壤保持服务呈相互促进增长关系。

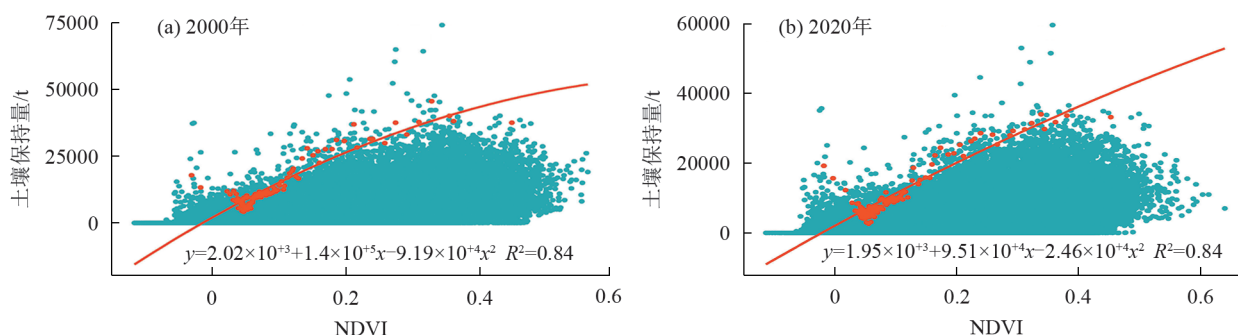


图10 新疆地区草原NDVI对土壤保持服务的约束效应

Fig. 10 Constraining effect of grassland NDVI on soil conservation service in Xinjiang region

2.3.4 植被覆盖对NPP的约束效应 由图11可知,在生态恢复工程前后,NDVI与NPP之间的约束关系呈现不同状态,表明生态恢复工程实施前后的相关关系显著变化。在生态恢复工程实施之前,NDVI与NPP之间的关系呈驼峰状形态,其阈值点为0.35,峰值为281.51。在生态恢复工程实施后,NDVI与NPP之间的关系转变为半抛物线型,且二者之间的拟合度高达0.95,显示出高度的相关性。尽管生态恢复工程实施之后阈值不明显,但可以发

现,相对于工程实施之前峰值为281.51时,工程实施之后在NDVI值在0.42时能够达到,且后续NDVI对NPP的约束作用依旧较小,归因于生态恢复工程在草原地区的实施,通过改善草原生态系统的结构和功能,提升草原植被的物质生产能力及生物量的积累。结果表明,生态恢复工程的实施对NDVI与NPP之间的约束关系产生显著影响,提高它们之间的拟合度,并减弱NDVI对NPP的约束作用。

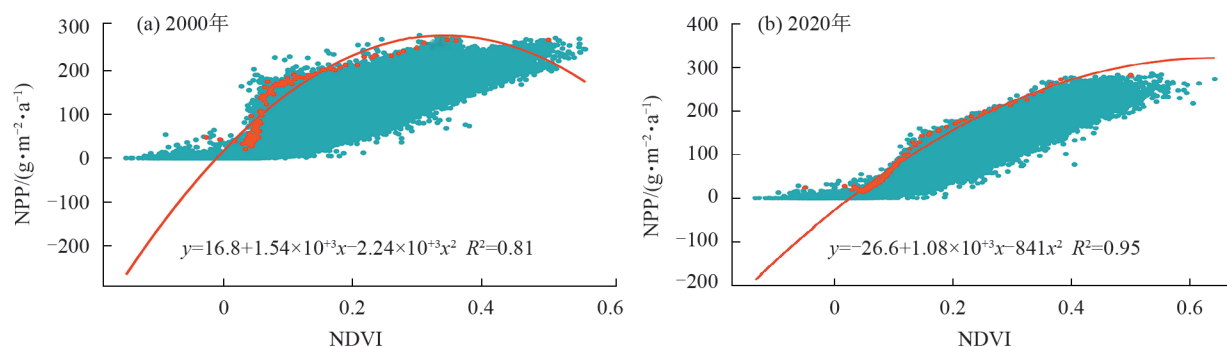


图11 新疆地区草原NDVI对NPP的约束效应

Fig. 11 Constraining effect of grassland NDVI on NPP in Xinjiang region

3 讨论

3.1 生态恢复工程对新疆植被动态的影响

新疆地区2000—2020年植被生长季NDVI整体呈波动式上升趋势,与马楠等^[23]研究结果一致。2014年前后出现“突升”“突降”。“突降”原因可能与新疆地区出现降水偏枯、气温偏高有关,干旱半干旱区水资源是植被覆盖增长的关键因素,新疆地区的降水量减少,导致土壤沙化、侵蚀和水分缺失,破坏草原生态环境,从而使得草原植被覆盖降低^[24]。气温偏高导致土壤水分快速蒸发,限制草原植物生长根系所汲取的水分,同时促使叶片气孔关闭,从而降低植物的光合作用,使植物面临严重的

水资源危机^[25]。新疆地区草原植被的“突升”与生态恢复工程的实施密切相关。自2002年起,该地区陆续开展退耕还林还草工程、退牧还草工程等;2011年,又专门针对草原制定草原生态补奖政策。截至2015年,这些生态恢复工程已持续推进13a^[4]。正是前期工程的扎实开展,使得草原植被得到显著恢复。在空间上,新疆草原植被覆盖空间展示出“西北高、东南低”的空间态势。新疆地区西北部分主要为海拔较低的山坡及河谷,东南部分主要为沙漠及海拔较高的山脉,此区域生长环境十分恶劣,不利于草原植被生存。因此,草原植被生长季NDVI在西部和北部较高,而东部、中部及东南

部较低,与以往研究^[23]相一致。西北部伊犁河谷地区生态环境优越,加之目前生态恢复工程的实施,对草原植被生长季 NDVI 的增加十分有益。

新疆地区 2000—2020 年草原植被 NDVI 增长区域与生态恢复工程贡献度较高区域相重叠,与新疆地区自 2011 年大力实施草原生态保护补助奖励政策的现状吻合,主要集聚于昆仑山脉与天山山脉西部,与以往研究^[26]相一致。这些区域由于在快速发展经济时期,牧民超载放牧、草地转化耕地、建设用地行为频繁,致使草原植被 NDVI 处于较低水平^[26]。然而随着生态恢复工程的大力开展,这些区域成为政策实施重点,草原得以休养生息,同时围栏禁牧、草种改良等措施的落实,使草原生态环境得到明显改善,从而草原植被 NDVI 显著增加^[4]。与此同时,减少区域主要集聚于伊犁河谷,因其地理位置优越性,成为人类活动频繁区,然而过度放牧、耕地扩张等行为导致草原植被覆盖下降,表明社会经济扰动对草原植被具有较大影响,应当予以重视,与以往研究^[24]相一致。

3.2 植被覆盖对生态系统服务约束作用的内在机制

生态恢复工程的实施改变草原植被覆盖的结构、数量和质量,进而改变植被覆盖与草原生态系统服务之间的约束关系^[14]。值得注意的是,高覆盖度植被并不一定促进草原生态系统服务的增长。有学者^[27]研究表明,退耕还草工程使研究区域产水量减少。因为植物生长具有自身的生物物理特性,土壤有机物、植物光合作用均对某些生态系统服务产生约束作用。新疆地区因生态恢复工程产生的草原植被改善也促使 NDVI 与生态系统服务之间约束关系发生变化。

NDVI 与 4 种草原生态系统服务约束关系: 1) NDVI 增加对产水量始终具有约束作用, NDVI 与产水量保持负相关,表明由于植物蒸腾作用的不断加强,且植物根系发达对土壤中水分截留能力增强,导致新疆地区气候虽然向“暖湿化”转变^[28],但水资源仍不足以使草原植被稳定生长,因此生态恢复工程应注重加强新疆地区水利基础设施建设。2) 在碳储存方面, NDVI 与碳储存呈驼峰状, 2000—2020 年 NDVI 的影响由正相关变为负相关。但部分学者^[13]研究表明,在石羊河流域植被覆盖度与碳储存始终呈正相关,不存在阈值。新疆地区研究结果与之存在偏差,可能与新疆独特的地形相关,新疆沙漠-山脉、沙漠-绿洲此类交接带居多,致使土壤沙化严重,即使在高植被覆盖区域的土壤依然面临沙化、侵蚀问题,进而

导致土壤有机碳库无法及时储存碳源^[29]。同时结合产水量趋势变化,随着产水量的降低,植物叶片气孔关闭,导致植物光合作用效率降低,从而降低植物固碳能力。3) 在土壤保持方面, NDVI 与土壤保持服务呈左抛物线状,二者相关关系常年保持较高水平,表明草原植被覆盖增加可以缓解土壤侵蚀现象。生态恢复工程实施前后,二者约束关系没有明显变化,但仔细观察可知,生态恢复工程实施后 NDVI 对土壤保持服务约束作用持续减弱,是由于当植被覆盖度增加到一定程度时,草原植被可以有效拦截泥沙和径流,同时植物发达根系可以改善土壤理化性质,减少土壤可蚀性因子,以使草原植被提供更好的土壤保持服务^[30]。因此,生态恢复工程应根据土壤保持预测阈值来客观调整政策实施范围和强度。4) 在 NPP 方面, NDVI 与 NPP 之间约束关系在生态恢复工程实施前后发生显著变化。具体而言,生态恢复工程实施之前, NDVI 与 NPP 约束关系呈驼峰状,是由于自 2000 年以来,极端天气的频繁发生对植物生长所需的光热条件造成不利影响,进而加强 NDVI 对 NPP 的约束作用。生态恢复工程实施之后, NPP 与 NDVI 约束关系呈半抛物线形态,且相关性增强,与生态恢复工程持续推进密切相关,其中草种改良、毒害草治理、飞播补种等措施的落实,使得草原质量明显提升,进而增加牧草产量和植被净生产力。

3.3 可能存在的局限性

本文在草原具体类型对生态系统服务的影响方面未展开深入研究,如荒漠草原、高寒草原、温性草甸草原等类型,不同草原类型引发的土壤肥力、土壤的理化性状、固碳释氧、有机物质产生能力的差异对草原生态系统服务的影响有显著变化。后续可利用遥感技术结合大量实地考察等手段,进行精准识别草原类型、捕捉草原类型之间转化面积,为因地制宜地实施生态恢复措施、提高工程建设效益做进一步探索。

4 结 论

1) 生态恢复工程背景下新疆地区植被覆盖变化显著。草原植被改善区域占草原总面积的 76.6%, 人类活动对草原植被呈现正向影响区域超过总面积的 79.2%, 生态恢复工程在昆仑山脉、天山山脉南侧、阿尔泰山脉南侧区域贡献度高达 60%~100%。

2) 生态恢复工程实施期间综合草原生态系统服务整体呈上升趋势,但产水量服务、土壤保持服务均

有所下降。其中,植被改善对草原生态系统服务提升具有显著效果,主要体现在昆仑山脉周围区域。值得注意的是NPP与NDVI空间态势形似,同时在生态恢复工程接续推进中,全疆NPP高值区呈扩张趋势,草原生态环境得到有效改善。

3)NDVI与4种草原生态系统服务的约束效应及其变化为未来生态恢复工程改进提供参考。新疆地区NDVI值应在0.3~0.5,以达到综合草原生态系统服务最优。对于不同植被覆盖区,应注意新疆西北区域土壤保持与产水量之间的权衡,以控制植被修复的力度。

参考文献:

- [1] COSTANZA R, DE GROOT R, BRAAT L, et al. Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go? [J]. *Ecosystem Services*, 2017, 28: 1-16.
- [2] ELLIS E C. The Anthropocene condition: Evolving through social-ecological transformations [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences*, 2024, 379(1893): e20220255.
- [3] SVEJCAR L N, DAVIES K W, RITCHIE A L. Ecological restoration in the age of apocalypse [J]. *Global Change Biology*, 2023, 29(17): 4706-4710.
- [4] 张一然, 苏敏, 方婷婷, 等. 我国草原生态保护补偿机制的实践与重点建设任务 [J]. *中国草地学报*, 2024, 46(3): 139-150.
- ZHANG Y R, SU M, FANG T T, et al. Practice and key construction tasks of grassland ecological protection compensation mechanism in China [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(3): 139-150.
- [5] 王玉纯, 赵军, 付杰文. 退耕还林还草工程对于旱区内陆河流域生态系统服务的影响 [J]. *生态科学*, 2021, 40(6): 56-66.
- WANG Y C, ZHAO J, FU J W. Effects of the Grain for Green Program on the ecosystem services of inland river basin in arid area [J]. *Ecological Science*, 2021, 40(6): 56-66.
- [6] 马月伟, 潘健峰, 蔡思青, 等. 生态系统服务社会价值与生态价值的权衡与协同关系: 以普达措国家公园为例 [J]. *地理科学*, 2022, 42(7): 1283-1294.
- MA Y W, PAN J F, CAI S Q, et al. Trade-offs and synergies between social value and ecological value of ecosystem services: A case study of the Potatso National Park [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2022, 42(7): 1283-1294.
- [7] 杨华庆, 朱睿, 尹振良, 等. 2001—2020年黄河流域水源涵养区植被覆盖变化及其对气候变化和人类活动的响应 [J]. *中国沙漠*, 2024, 44(4): 57-70.
- YANG H Q, ZHU R, YIN Z L, et al. Dynamic changes of vegetation in water conservation area of the Yellow River Basin and its response to climate change and human activities during 2001—2020 [J]. *Journal of Desert Research*, 2024, 44(4): 57-70.
- [8] 李晓英, 禹熙, 王方, 等. 西北干旱荒漠地区退耕还林还草工程综合效益评价 [J]. *水土保持研究*, 2023, 30(1): 216-223.
- LI X Y, YU X, WANG F, et al. Comprehensive benefit evaluation on the project of converting farmland to forestland and grassland in arid desert area of northwest China [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(1): 216-223.
- [9] 何佳瑛, 蒋晓辉, 雷宇昕. 黄土高原生态工程对关键生态系统服务时空变化的影响: 以延河流域为例 [J]. *生态学报*, 2023, 43(12): 4823-4834.
- HE J Y, JIANG X H, LEI Y X. Effects of ecological engineering on spatio-temporal changes of key ecosystem services on the Loess Plateau: A case study in the Yanhe River Basin, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(12): 4823-4834.
- [10] 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 [J]. *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 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(23): 9952-9966.
- [11] 王世豪, 徐新良, 黄麟, 等. 东北黑土区生态系统服务权衡与协同 [J]. *生态学报*, 2024, 44(21): 9504-9519.
- WANG S H, XU X L, HUANG L, et al. Trade-offs and synergies of ecosystem services in the black soil region of northeast China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(21): 9504-9519.
- [12] 谢丽霞, 白永平, 车磊, 等. 基于价值—风险的黄河上游生态功能区生态分区建设 [J]. *自然资源学报*, 2021, 36(1): 196-207.
- XIE L X, BAI Y P, CHE L, et al. Construction of ecological zone based on value-risk ecological function area in the upper Yellow River [J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(1): 196-207.
- [13] 高超, 赵军, 王玉纯, 等. 石羊河流域自然植被对生态系统服务的约束效应 [J]. *生态学报*, 2020, 40(9): 2851-2862.
- GAO C, ZHAO J, WANG Y C, et al. Study on the constraint effect of natural vegetation on ecosystem services in the Shiyang River Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(9): 2851-2862.
- [14] 冀正欣, 许月卿, 胡起源, 等. 农牧交错区生态工程建设

- 对生态系统服务的影响[J]. 农业工程学报, 2024, 40(18):262-271.
- JI Z X, XU Y Q, HU Q Y, et al. Effects of ecological engineering construction on ecosystem services in the agro-pastoral transitional zone: A case study of Zhangbei County, Hebei Province of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(18):262-271.
- [15] MA S, WANG L J, YE L M, et al. Vegetation restoration thresholds under different vegetation types and altitude gradients in the Sichuan-Yunnan ecological shelter, China[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 340: e117910.
- [16] 黄麟, 李佳慧, 张海燕, 等. 草原生态价值的内涵、核算及评估[J]. 草业学报, 2024, 33(6):47-63.
- HUANG L, LI J H, ZHANG H Y, et al. Accounting and assessment of grassland ecological values [J]. Acta Prataculurae Sinica, 2024, 33(6):47-63.
- [17] 郝蕊芳, 于德永, 邬建国, 等. 约束线方法在生态学研究中的应用[J]. 植物生态学报, 2016, 40(10):1100-1109.
- HAO R F, YU D Y, WU J G, et al. Constraint line methods and the applications in ecology [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016, 40(10):1100-1109.
- [18] 方露露, 许德华, 王伦澈, 等. 长江、黄河流域生态系统服务变化及权衡协同关系研究[J]. 地理研究, 2021, 40(3):821-838.
- FANG L L, XU H D, WANG L C, et al. Changes in ecosystem services and trade-offs in the Yangtze and Yellow River Basins [J]. Geography Research, 2021, 40(3):821-838.
- [19] 孙琳琳, 刘琼, 黄观, 等. 新疆和周边“一带一路”地区不同云天条件下地表太阳辐射[J]. 干旱区研究, 2024, 41(9):1480-1490.
- SUN L L, LIU Q, HUANG G, et al. Analysis of surface solar radiation under different cloud conditions in Xinjiang and the surrounding “Belt and Road” regions[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(9):1480-1490.
- [20] 关凤峻, 刘连和, 刘建伟, 等. 系统推进自然生态保护和治理能力建设:《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035年)》专家笔谈[J]. 自然资源学报, 2021, 36(2):290-299.
- GUAN F J, LIU L H, LIU J W, et al. Systematically Promoting Natural Ecology Protection and Governance Capacity Building: Expert Commentary on the Overall Plan for the Protection and Restoration of Nationally Important Ecosystems and Major Projects (2021—2035)[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(2):290-299.
- [21] 何宝忠, 丁建丽, 李焕, 等. 新疆植被物候时空变化特征[J]. 生态学报, 2018, 38(6):2139-2155.
- HE B Z, DING J L, LI H, et al. Spatiotemporal variation of vegetation phenology in Xinjiang from 2001 to 2016 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(6):2139-2155.
- [22] 雒新萍, 刘晓煌, 严宇翔, 等. 2000—2020年宁夏植被生长季变化及其对人类活动的响应[J]. 现代地质, 2025, 39(2):504-513.
- LUO X P, LIU X H, YAN Y X, et al. Seasonal variation of vegetation growth in Ningxia from 2000 to 2020 and its response to human activities[J]. Geoscience, 2025, 39(2):504-513.
- [23] 马楠, 白涛, 蔡朝朝. 2000—2021年新疆植被覆盖度变化及驱动力[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1):385-394.
- MA N, BAI T, CAI Z Z. Vegetation cover change and its response to climate and surface factors in Xinjiang based on different vegetation types [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1):385-394.
- [24] 杨舒慧, 崔雪锋. 新疆生态区的生态系统服务的时空变化特征分析[J]. 气候与环境研究, 2024, 29(3):302-316.
- YANG S H, CUI X F. Characteristics of spatiotemporal changes in ecosystem services in Xinjiang ecological zones [J]. Climatic and Environmental Research, 2024, 29(3):302-316.
- [25] 蒋菊芳, 梁从虎, 杨华, 等. 近十年气温和降水对荒漠植物梭梭、刺蓬物候期的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(2):141-146.
- JIANG J F, LIANG C H, YANG H, et al. Influence of temperature and precipitation on phenology of desert plant *Haloxyylon ammodendron* and *Cornulaca alaschanica* in recent ten years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(2):141-146.
- [26] 李洪庆, 杨瑀, 李文麒, 等. 草原生态保护补助奖励标准评价:以山南市为案例[J]. 资源科学, 2023, 45(8):1662-1675.
- LI H Q, YANG Y, LI W Q, et al. Evaluation of the standards of subsidy and reward for grassland ecological protection: A case study of Shannan City [J]. Resources Science, 2023, 45(8):1662-1675.
- [27] FENG X M, FU B J, PIAO S L, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits [J]. Nature Climate Change, 2016, 6:1019-1022.
- [28] 董思言, 石英, 王朋岭, 等. 21世纪新疆区域气候暖湿化趋势预估分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2024, 18(5):74-81.
- DONG S Y, SHI Y, WANG P L, et al. Future changes of regional climate warming and wetting trend in Xinjiang in 21th century [J]. Desert and Oasis Meteorology, 2024, 18(5):74-81.

(下转第 223 页)

- 45(1):335-342.
- CHEN J Q, JIA Y N, HE Q F, et al. Effect of land use on the stability of soil organic carbon in a karst region [J]. Environmental Science, 2024, 45 (1) : 335-342.
- [23] GRYBOS M, DAVRANCHE M, GRUAU G, et al. Increasing pH drives organic matter solubilization from wetland soils under reducing conditions [J]. Geoderma, 2009, 154(1/2):13-19.
- [24] XU C, KUANG S P, HE L, et al. Effects of changing restoration years on soil nutrient traits and plant community diversity in a phosphate mining area [J]. Forests, 2023, 14(7):e1468.
- [25] FINN D, KOPITKE P M, DENNIS P G, et al. Microbial energy and matter transformation in agricultural soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2017, 111:176-192.
- [26] 袁继红,任琼,周莉荫,等.鄱阳湖湿地不同环境条件土壤有机碳组分特征及其影响因素[J].生态学杂志, 2023, 42(6):1323-1329.
- YUAN J H, REN Q, ZHOU L Y, et al. Characteristics and influencing factors of soil organic carbon components under different environmental conditions in Poyang Lake wetland [J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42 (6) : 1323-1329.
- [27] 陈进斌,李林,陈建宏,等.矿山生态修复中微生物技术的应用[J].能源与环境, 2020(4):102-103.
- CHEN J B, LI L, CHEN J H, et al. Application of microbial technology in mine ecological restoration [J]. Energy and Environment, 2020(4):102-103.
- [28] 朱浩宇,王子芳,陆畅,等.缙云山5种植被下土壤活性有机碳及碳库变化特征[J].土壤, 2021, 53(2):354-360.
- ZHU H Y, WANG Z F, LU C, et al. Variation characteristics of soil active organic carbon and carbon pools under five vegetation types in Jinyun Mountain [J]. Soils, 2021, 53(2):354-360.
- [29] 赵敏.喀斯特区不同植被类型对土壤有机碳及其活性组分的影响[D].贵阳:贵州大学, 2023.
- ZHAO M. Effects of different vegetation types on soil organic carbon and its active components in karst area [D]. Guiyang: Guizhou University, 2023.
- [30] ZHANG X X, WANG L J, ZHOU W X, et al. Changes in litter traits induced by vegetation restoration accelerate litter decomposition in *Robinia pseudoacacia* plantations [J]. Land Degradation and Development, 2022, 33(1):179-192.
- [31] EZEOKOLI O T, BEZUIDENHOUT C C, MABOETA M S, et al. Structural and functional differentiation of bacterial communities in post-coal mining reclamation soils of South Africa: Bioindicators of soil ecosystem restoration [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1):e1759.
- (上接第214页)
- [29] 段绪萌,韩美,孔祥伦,等.退耕还林(草)工程前后黄河流域生态系统碳储量时空演变与模拟预测[J].环境科学, 2024, 45(10):5943-5956.
- DUAN X M, HAN M, KONG X L, et al. Spatiotemporal evolution and simulation prediction of ecosystem carbon storage in the Yellow River Basin before and after the grain for green project [J]. Environmental Science, 2024, 45(10):5943-5956.
- [30] 金海珍,于德永,郝蕊芳,等.科尔沁沙地关键生态系统服务的约束关系分析[J].生态学报, 2021, 41(18):7249-7259.
- JIN H Z, YU D Y, HAO R F, et al. Analysis of constraint relationship among key ecosystem services in the Horqin Sandy Land [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(18):7249-7259.