

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.05.026

引用格式:黄露,杜毅倩,杨秀春.新疆退牧还草工程区草地生态恢复效果评价[J].草地学报,2026,34(5):1852—1866

HUANG Lu, DU Yi-qian, YANG Xiu-chun. Assessment of Grassland Ecological Restoration in the Xinjiang Grazing Withdrawal and Grassland Restoration Project Area[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(5):1852—1866

新疆退牧还草工程区草地生态恢复效果评价

黄露,杜毅倩,杨秀春*

(北京林业大学草业与草原学院,北京 100083)

摘要:草地具有保障生态安全和维持生态功能的作用,新疆是我国草地资源最丰富的地区之一,但受气候和人类影响,近年来草地退化问题突出。为全面评估新疆退牧还草工程区生态恢复现状和恢复程度,从生态系统结构、生态质量和生态系统服务分析,综合运用InVEST和RUSLE模型定量评估新疆退牧还草工程生态恢复效果。结果表明:(1)生态质量方面,植被净初级生产力(NPP)由2003年 $190.96\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 上升至2021年 $205.34\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,植被覆盖度(FVC)持续增加,向好区域面积占比达69.78%。(2)生态系统服务方面,水源涵养量由2003—2015年的98.2 mm增长至2015—2021年的121.1 mm。土壤保持量由 $273.74\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 上升至 $283.61\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,防风固沙量由 $2.82\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 降至 $3.62\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。(3)生态恢复指数(ERI), $\text{ERI}>0.5$ 高恢复区域占全区面积19.08%,而 $\text{ERI}\leq 0.2$ 的低恢复区仅占0.02%。研究结果为新疆退牧还草工程区生态保护管理提供量化依据,支撑分区、分级、差异化生态修复策略制定。

关键词:退牧还草;生态质量;生态系统服务;生态恢复程度

中图分类号:S812

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)05-1852-15

Assessment of Grassland Ecological Restoration in the Xinjiang Grazing Withdrawal and Grassland Restoration Project Area

HUANG Lu, DU Yi-qian, YANG Xiu-chun*

(School of Grassland Science, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Grasslands play a vital role in safeguarding ecological security and sustaining ecosystem functions. Xinjiang hosts some of China's most abundant grassland resources. However, under the combined impacts of climate change and human activities, grassland degradation has become increasingly prominent in recent years. To comprehensively assess the current status and degree of ecological restoration in the Xinjiang "Grazing Withdrawal and Grassland Restoration" project areas, we evaluated ecosystem structure, ecosystem quality, and ecosystem services by integrating the InVEST and RUSLE models to quantify restoration outcomes. The results show that: (1) In terms of ecosystem quality, net primary productivity (NPP) increased from $190.96\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ in 2003 to $205.34\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ in 2021, and fractional vegetation cover (FVC) continued to rise, with improving areas accounting for 69.78% of the total areas. (2) Regarding ecosystem services, water conservation increased from 98.2 mm during 2003—2015 to 121.1 mm during 2015—2021. Soil retention increased from 273.74 to $283.61\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, while windbreak and sand-fixation capacity changed from 2.82 to $3.62\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$. (3) The ecological restoration index (ERI) indicated that high-restoration areas ($\text{ERI}>0.5$) accounted for 19.08% of the study areas, whereas low-restoration areas ($\text{ERI}\leq 0.2$) represented only 0.02%. These findings provide quantitative evidence to support ecological protection and management in the project areas, facilitating zoned, graded, and differentiated ecological restoration strategies.

Key words: Grazing withdrawal; Ecosystem quality; Ecosystem services; Degree of ecological restoration

收稿日期:2025-04-21;修回日期:2025-07-13

基金项目:第三次新疆综合科学考察项目(2022xjkk0402)资助

作者简介:黄露(2001-),女,汉族,重庆人,硕士研究生,主要从事草地遥感研究, E-mail: 2275231078@qq.com; *通信作者 Author for correspondence, E-mail: yangxiuchun@bjfu.edu.cn

全球草地总面积 52.5 亿 hm^2 , 占全球陆地总面积的 40.5%^[1], 中国草地面积约占全球草地面积的 12%, 是草地资源丰富的国家之一。草地生态系统在陆地碳、氮、水等物质循环中发挥重要作用, 储存了全球陆地生态系统有机碳总量的 34%, 其中约 90% 的碳储存在植物根系和土壤中^[2]; 同时草地生态系统还承担着防风固沙、保持水土、涵养水源、调节气候、维护生物多样性等生态功能。尽管草地承载着重要生态功能, 但气候变化耦合放牧垦殖等人类活动^[2], 正通过改变生态系统关键过程加剧草地退化。根据中国第三次全国土地调查(以下简称“国土三调”)结果, 中国草地退化问题依然严峻, 部分重点草原区退化程度加深。新疆维吾尔自治区作为我国重要的牧区之一, 草地面积广阔, 但由于长期受到气候变化、人类放牧活动及资源开垦等多重因素的影响, 草地退化问题日益突出。

为了恢复退化的草地生态系统, 中国启动了一系列重大生态工程, 例如退牧还草工程(Returing grazing land to grassland project)^[3]。生态工程实施以来, 在国土绿化、碳固定、水源涵养、土壤保持等方面产生了良好的生态效益^[4], 但在局部地区也引起了生物量下降, 土壤保持能力降低等问题, 生态工程实施数量越多的地区, 生态恢复程度越高^[5]。新疆作为中国西北部的重要生态屏障之一, 其草地生态环境面临严峻挑战。自 2003 年起, 新疆正式启动第一轮退牧还草工程, 作为国家实施生态退化区综合治理的重要组成部分, 该工程在新疆的投入力度较大。第一轮工程以“退牧、还草、转产”为主线, 重点推进草原封育围栏、人工饲草地建设、退化草原改良、毒害草防治及配套基础设施建设。根据统计, 新疆退牧还草一期工程共涉及 49 个县(市), 中央和自治区财政累计投入数十亿元, 建设围栏面积超过 200 万 hm^2 , 人工草地建设面积达到 33 万 hm^2 , 显著改善了部分地区的草地质量与生态服务功能。随着第一轮工程成效的逐步显现, 2015 年新疆启动了第二轮退牧还草工程, 实施范围进一步扩大, 工程内容更加多元化, 除延续围栏建设与草地改良外, 还加强了草畜平衡管理、草原补奖政策、生态保护机制等制度建设。同时, 投入力度也进一步增强, 财政投入持续增长, 工程实施更加精细化、系统化。尽管退牧还草工程在全国范围内取得了一定成效, 已有研究主要集中于生态恢复的热点区域, 但针对新疆退牧还草工程区, 尤其是两轮工程实施

前后草地生态时空变化及其驱动机制的研究仍较为薄弱, 亟需深入探讨。

生态工程评价的指标体系是科学评估其成效的核心依据。近年来, 国内外学者从不同角度构建了多种生态恢复评价体系^[6]。许多研究聚焦于综合效益评估, 从资源利用效率、生态环境改善、经济增长与社会发展等方面设立评价指标, 如草地生物量、草地面积、工程净收益、农牧民人均收入等^[7-9]; 也有研究侧重于生态效益本身, 选取如生物多样性指数、植被净初级生产力(NPP)、水源涵养、土壤保持、防风固沙等生态系统服务指标进行分析^[10]。此外, 邵全琴等^[5]则耦合生态系统结构-质量-服务三个维度, 构建了涵盖生态系统面积、植被 NPP、植被覆盖度、水源涵养、土壤保持与防风固沙等指标的系统评价体系。尽管已有研究为生态工程评价提供了丰富的理论基础, 但相关成果多集中于生态问题突出的重点区域, 如青藏高原退化草地治理区、黄土高原水土流失治理区、三北防护林区及矿区生态修复区等。这些研究多采用短时间尺度的监测数据, 侧重于单一阶段或某一具体措施的生态响应效果分析, 缺乏对长期时序与政策演进过程的综合评估。本研究通过系统梳理发现, 新疆退牧还草工程区的生态恢复研究尚未形成系统性积累。现有成果多聚焦于特定地理单元或单一观测维度(如短期植被覆盖度变化), 针对 2003—2015 年两轮工程实施的时空耦合分析框架尚未构建。值得注意的是, 随着 2015 年后工程进入提质增效阶段, 现有成果对政策演进的追踪分析存在明显滞后, 特别是对于 2003—2021 年间工程实施的动态演变规律与多尺度驱动机制的系统解析仍显不足。

本研究将聚焦新疆退牧还草工程区, 综合考虑生态系统服务与生态系统质量相关的指标, 结合草地土壤特征变化, 评估第一轮与第二轮(2003—2021 年)退牧还草工程实施对草地生态恢复的生态成效与时空差异。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

新疆维吾尔自治区位于亚欧大陆腹地, 地处 $73^{\circ}40' \sim 96^{\circ}18' \text{E}$, $34^{\circ}25' \sim 48^{\circ}10' \text{N}$, 是我国陆地面积最大的省级行政区, 总面积约为 $1.66 \times 10^8 \text{ km}^2$, 占全国陆地总面积的六分之一。新疆地势复杂, 地

貌类型多样,整体呈现“三山夹两盆”的典型格局,自北向南依次为阿尔泰山、准噶尔盆地、天山、塔里木盆地和昆仑山,形成了山地-绿洲-荒漠交错分布的自然地理格局。同时,新疆是我国重要的草原资源分布区之一,也是全国六大牧区之一。新疆草地类型丰富,生态功能多样。退牧还草工程区内典型的草地类型包括:天山北部的山地草甸类、准噶尔盆地的温性荒漠类、巴音布鲁克的高寒草原草地,

以及塔里木河中下游地区的低地草甸草地。为持续推进生态保护修复工作,2015年新疆维吾尔自治区林业和草原局印发了《新疆维吾尔自治区新一轮退耕还林还草实施方案》,明确提出第二轮退耕还林还草工程建设范围覆盖全区14个地(州)85个市(县),重点在生态敏感区、生态退化区内推进退牧还草、退耕还林和草地改良等综合性生态工程(图1)。

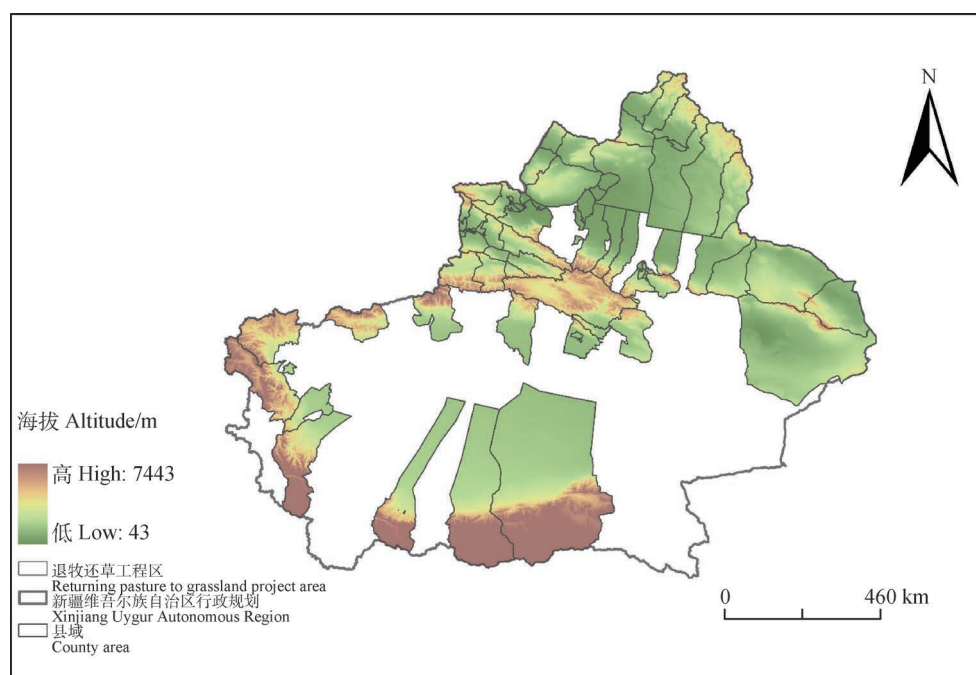


图1 新疆维吾尔自治区界

Fig. 1 Xinjiang Uygur autonomous region boundary

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新S(2016)047号的标准地图制作,底图无修改

Note: This map is based on the standard map with review number Xin S (2016) 047 downloaded from the Standard Map Service website of the Ministry of Natural Resources, and the base map has not been modified

1.2 数据来源与预处理

本研究收集了2003—2021年数据、土壤属性数据、地形数据、土地利用数据以及退牧还草工程区边界数据,利用ArcGis软件对数据进行投影、剪裁、重采样等一系列处理。基本数据类型及数据来源如表1所示。

1.3 研究方法

本研究从生态系统结构、生态系统质量与生态系统服务3个方面出发,对2003—2021年新疆退牧还草工程区草地生态恢复效果进行综合评价。采用土地利用转移、InVest模型Sen趋势法和Mann-Kendall显著性检验等方法重点分析退牧还草工程对区域生态系统服务的影响。

1.3.1 土地利用转移矩阵 土地利用/土地覆被变化(Land Use/Cover Change, LUCC)是人类活动与自然环境相互作用最直接的表现形式^[11],采用土地利用转移矩阵(Land Use Transition Matrix)方法,分析研究区不同土地利用类型(尤其是草地)在不同年份之间的相互转化。该方法通过构建不同年份土地利用类型之间的面积转移矩阵,定量描述各类土地之间的转移方向及其面积大小。设土地利用类型共有 n 类,则土地利用转移矩阵表示为:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{N1} & \cdots & S_{NN} \end{bmatrix}$$

式中, S 代表面积, n 代表土地利用的类型数, i, j 分别代表研究期初与研究期末的土地利用类型。

表1 数据类型及来源

Table 1 Data type and source

数据类型 Data type	数据名称 Data name	数据来源 Data source	空间分辨率 Spatial resolution	数据处理说明 Processing notes
遥感数据 Remote sensing data	NDVI(归一化植被指数) NDVI(Normalized difference vegetation index)	MODIS MOD13A2	1 km	原始产品,直接使用 Used directly from the original product
遥感数据 Remote sensing data	NPP(净初级生产力) NPP(Net primary productivity)	MODIS MOD17A3	500 m	重采样为 1 km Resampled to 1 km
气象数据 Meteorological data	气温、降水量等 Temperature, precipitation, etc.	中国气象数据网(http://data.cma.cn)China Meteorological Data Service Center (CMDC)	插值处理后为 1 km 1 km after interpolation	插值与栅格化处理 Interpolation and rasterization
土壤属性数据 Soil property data	土壤质地、有机质、pH等 Soil texture, organic matter, pH, etc.	中国科学院资源环境科学数据中心 Data Center for Resources and Environmental Sciences, CAS (RESDC)	Vector (1:1,000,000)	矢量转栅格为 1 km Vector-to-raster conversion to 1 km
地形数据 Land topographic data	DEM(数字高程模型) DEM (Digital elevation model)	地理空间数据云(SRTM) Geospatial Data Cloud (SRTM)	90 m	重采样为 1 km Resampled to 1 km
土地利用数据 Land use/land cover data	CLCD 土地利用数据集 CLCD land use/land cover dataset	地球系统科学数据 Earth System Science Data platform	30 m	重分类与重采样为 1 km Reclassified and resampled to 1 km
区域边界数据 Regional boundary data	退牧还草工程区边界 Boundary of the "Grazing Withdrawal and Grassland Restoration" project area	国家生态数据中心资源共享服务平台 National Ecosystem Science Data Center (data sharing platform)	矢量 Vector	用于界定研究区域 Used to delineate the study area

1.3.2 植被覆盖度计算方法 根据像元二分的原理利用 NDVI 估算植被覆盖度^[12],其公式如下:

$$FVC = \frac{(NDVI - NDVI_{\min})}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}};$$

式中:NDVI_{max}取 95% 处的 NDVI 值作为纯植被像元 NDVI 值,高于该值用最大值替代;NDVI_{min}取 5% 处的 NDVI 值作为裸土像元 NDVI 值,低于该值用最小值替代,最终生成 2003—2021 年 1 km 分辨率的植被覆盖度数据。

1.3.3 生态系统服务评估方法 生态系统服务是一项非常复杂的评估过程,可分为供给服务、调节服务和文化服务^[10]。本研究选取了对新疆退牧还草工程区生态环境变化响应最直接的 3 项基础生态系统调节服务,包括水源涵养、土壤保持和防风固沙。

(1) 水源涵养服务评估方法

在生态系统服务评估中,水源涵养服务反映了生态系统对降水的调蓄、截留与下渗能力,是衡量草地生态系统水文调节功能的重要指标^[13-14]。该研究采用 InVEST 模型中的 Annual Water Yield 模块对 2003—2021 年新疆退牧还草工程区的水源涵养服务进行模拟评估。该模块基于水量平衡原理,在年尺度下对像元的年产水量进行估算^[15],其核心公式为:

$$Y(x) = P(x) - AET(x);$$

$$\frac{AET}{P} = 1 - \left[1 + \left(\frac{PET}{P} \right)^w \right]^{-\frac{1}{w}};$$

其中 AET 为潜在蒸散量, w 为 Budyko 干湿指数调节参数,受土壤、地形和植被影响。模型所需输入数据包括年平均降水数据、潜在蒸散量、土地利用类型、土壤最大持水容量等。

(2) 土壤保持服务评估方法

土壤保持服务用于衡量生态系统防止水力侵蚀、减少土壤流失的能力,是评估退牧还草工程生态效益的重要指标之一^[16]。该研究采用 InVEST 模型中的 Sediment Delivery Ratio (SDR) 模块对 2003—2021 年新疆退牧还草工程区的土壤保持服务进行模拟分析。该模块基于通用土壤流失方程 (Revised universal soil loss equation, RUSLE) 进行建模,估算潜在土壤流失量与实际泥沙输出量,从而推算生态系统的土壤保持量。模型核心计算公式如下:

$$(A) = R \times K \times LS \times C \times P;$$

其中: A 为潜在土壤流失量 (t·ha⁻¹·a⁻¹); R 为降雨侵蚀力因子; K 为土壤可蚀性因子; LS 为坡长坡度因子; C 为植被覆盖与管理因子; P 为水土保持措施因子。土壤保持量等于潜在土壤流失量与实际土壤流失量之间的差值,即:土壤保持量=潜在土壤流失量-实际土壤输出量。实际泥沙输出量通过 SDR 模块考虑坡度、汇流长度、土地利用等因

素进一步估算得出。

模型输入数据包括:土地利用/覆盖类型、降雨侵蚀力(R 值)、土壤类型(K 值)、数字高程模型(DEM)、植被覆盖因子(C 值)以及水土保持因子(P 值)等。

(3)防风固沙服务评估方法

防风固沙服务的评估采用修正风蚀方程(Revised wind erosion equation, RWEQ)进行建模分析^[17]。该模型通过综合考虑气象因子、土壤可蚀性、地表粗糙度、植被覆盖度以及风蚀路径长度等要素,估算区域单位面积年风蚀土壤流失量。其核心计算公式为:

$$E = WF \times EF \times K' \times C' \times L;$$

其中, E 表示年风蚀量($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$); WF 为气象因子(如风速、风频等); EF 为土壤可蚀性因子; K' 为地表粗糙度因子; C' 为植被覆盖因子; L 为风蚀路径长度因子。各因子依据区域风速、土壤类型、NDVI、土地利用类型等数据进行赋值。

防风固沙服务量的计算公式为:

防风固沙服务量=无植被风蚀量-实际风蚀量。通过上述方法,定量评估新疆退牧还草工程区在2003—2021年间防风固沙能力的空间分布与时序变化,为干旱风蚀区生态工程成效评估提供了科学依据。

1.3.4 生态恢复程度评估方法 本文利用Sen趋势法和Mann-Kendall显著性检验方法,分别计算生态系统质量(植被覆盖度、植被净初级生产力)和生态系统服务(水源涵养、土壤保持、防风固沙)变化斜率或趋势,具体计算方法参考相关文献^[18]。

1.3.4 生态系统服务综合分析 本研究选取2003—2021年期间植被覆盖度(NPP)、水源涵养、土壤保持、防风固沙和生态系统服务5种生态指标,采用Sen趋势分析法计算各指标的变化趋势,为消除不同指标间的量纲影响,对所有数据进行归一化处理。根据各指标的重要性设定权重(各权重均为0.2),对归一化后的数据进行加权叠加,计算生态恢复指数(ERI),并根据ERI值划分生态恢复等级,其中,高恢复($ERI > 0.5$)、中等恢复($0.2 < ERI \leq 0.5$)、低恢复($ERI \leq 0.2$),以综合反映生态系统恢复程度。

2 结果与分析

2.1 草地转移面积分析

新疆2003—2021年草地变化结果显示(图2),2003—2015年间草地面积快速减少 $3.22 \times 10^6 \text{ hm}^2$ (11.6%),年均转出量达 $2.69 \times 10^5 \text{ hm}^2$,其中 $1.56 \times 10^6 \text{ hm}^2$ (48.4%)转为荒地,主要分布在准噶尔盆地南缘和塔城地区, $1.27 \times 10^6 \text{ hm}^2$ (39.3%)转为耕地,集中在伊犁河谷等区域。2015—2021年期间,面积减少 $2.17 \times 10^6 \text{ hm}^2$ (8.8%),年递减率较前阶段下降35%。这一时期最显著的变化是建设用地取代荒地成为主要转出方向,占比跃升至77.4%($1.678 \times 10^6 \text{ hm}^2$),主要发生在乌鲁木齐—昌吉城市群;同时耕地转出比例降至17.2%($3.724 \times 10^5 \text{ hm}^2$),荒地转出比例更降至5.4%($1.17 \times 10^5 \text{ hm}^2$)。转入方面,来自耕地的转入量显著增加66.8%,达到 $5.45 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 。

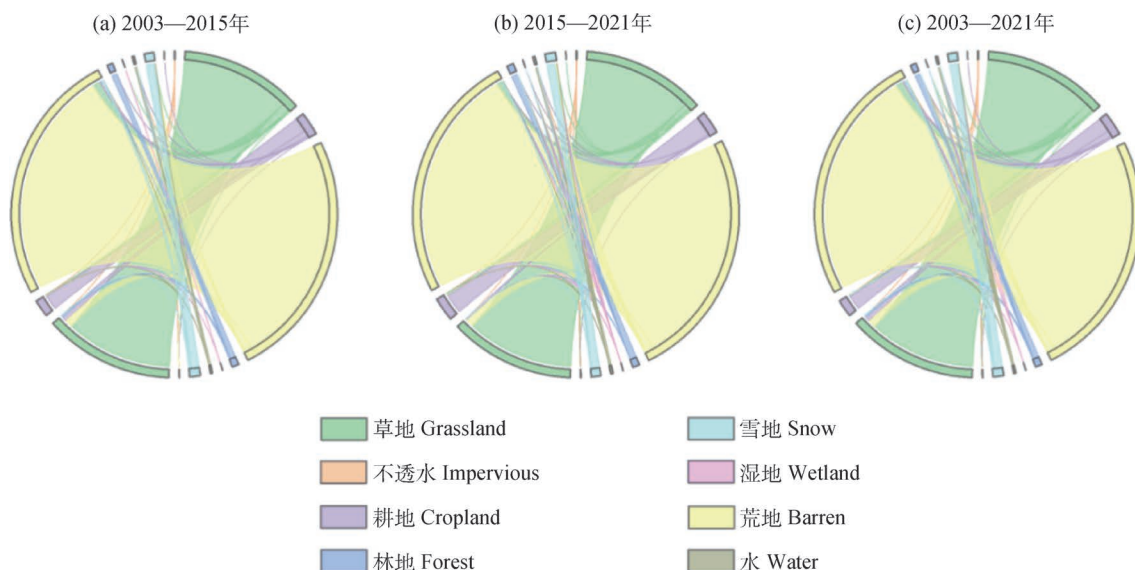


图2 新疆2003—2021年土地利用转移

Fig. 2 Land use change in Xinjiang from 2003 to 2021

2.2 生态质量恢复状况分析

2.2.1 植被覆盖度恢复状况分析 2003—2021 年研究区植被覆盖度的时空变化结果显示,2003—2015 年研究区的平均植被覆盖度为 41.67%,其中和静县的平均植被覆盖度最高(65.04%),且末县最低(20.39%)(图 3a)。2015—2021 年,研究区的平均植被覆盖度下降至 39.87%,和静县依然保持

最高值(64.28%),而最低值则出现在富蕴县(18.96%)(图 3b)。整体来看,2003—2021 年间研究区的平均植被覆盖度为 41.17%,和静县仍为最高(66%),且末县最低(21.24%)(图 3c)。从空间分布来看,研究区植被覆盖度呈现出“西北部较高,东南部较低”的趋势,与区域水热条件的空间格局密切相关。

表 2 研究区植被覆盖度(FVC)时空变化特征(2003—2021 年)

Table 2 Spatiotemporal characteristics of vegetation fractional coverage (FVC) in the study region from 2003 to 2021

时间段 Period	平均 FVC Mean FVC/%	年变化率 Annual change rate/%	空间分布特征 Spatial pattern
2003—2015 年	41.67	-0.15	西北高,东南低 Higher in the northwest, lower in the southeast
2015—2021 年	39.87	-0.18	西北高,东南低 Higher in the northwest, lower in the southeast
2003—2021 年	41.17	-0.16	西北高,东南低 Higher in the northwest, lower in the southeast

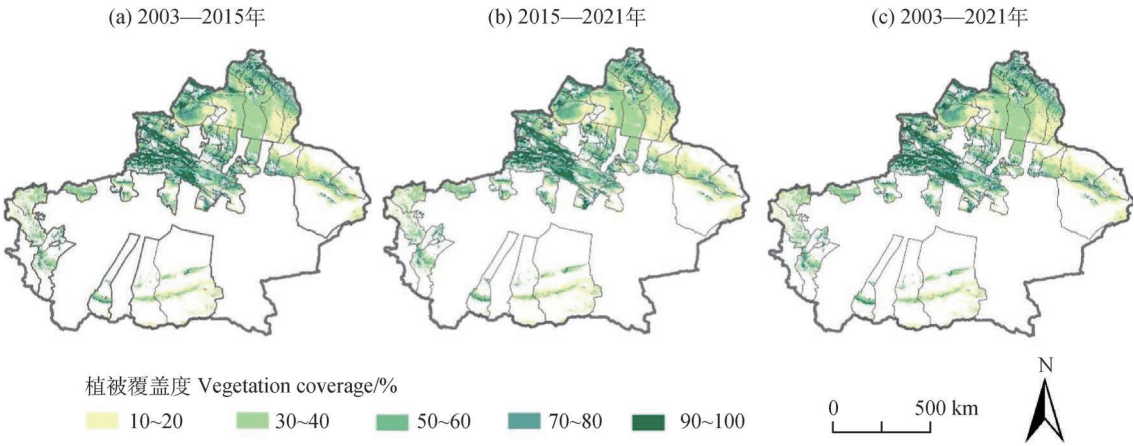


图 3 2003—2021 年植被覆盖度空间分布

Fig. 3 Spatial patterns of vegetation cover (2003-2021)

2003—2021 年植被覆盖度变化的分析结果显示(图 4),显著减少的面积占比为 19.18%,极显著增加的面积占比为 20.80%。其中,且末县和库车市的植被覆盖度显著增加,主要分布在塔里木盆地的边缘区域。而极显著减少的区域主要集中在福

海县和阜康市,这些地区由于地势较为平坦,耕地面积扩张导致草地退化加剧,同时,由于靠近乌鲁木齐,受城市扩张和基础设施建设的影响较大,部分草地被转为建设用地,植被覆盖度呈现下降趋势,草地退化现象严重。

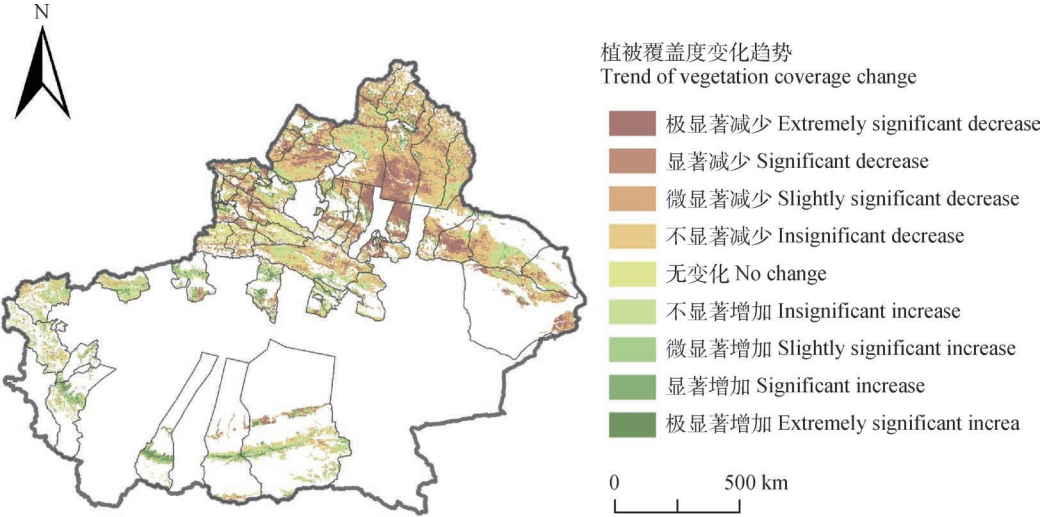


图 4 植被覆盖度变化趋势图

Fig. 4 Vegetation coverage change trend map

2.2.2 植被 NPP 恢复状况分析 本研究对新疆 2003—2021 年植被净初级生产力(NPP)的年际变化进行了系统分析。研究结果显示(图 5),研究期间植被 NPP 总体呈现波动上升趋势。平均 NPP 从 2003 年的 $190.96 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 增长至 2021 年的 $205.34 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 年均增长率为 0.45% ; 最大 NPP 从 $684.50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 增长至 $734.00 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 年均增长率为 0.39% 。空间上,研究区的 NPP 呈现出明显的“西北部较高,南部较低”的趋势,与植被覆盖度的分布情况相似。昭苏县和新源县等地由于水热条件较好, NPP 值较高,分别为 $227.29 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $225.49 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 主要与这些地区的山地草甸类型相关。而新市区、伊宁市、头屯河区和天山区等地则表现出较低的 NPP 值,最低可至 $3.28 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 主要集中在塔里木盆地和城市区域,这些地区的植被覆盖度较低,属于温

性荒漠或城市化较为集中的地区。

从空间分布的角度来看,研究区 NPP 较高的区域主要集中在天山山脉及其周边的山地草甸地带,这些地区水热条件较为适宜,植被生长良好,呈现出较高的 NPP 值。低 NPP 区域则主要分布在塔里木盆地、沙漠地带以及城市化程度较高的地区,这些地区的降水量少,气候干旱,植被生长有限,因此 NPP 值较低。

对比 2003—2015 年和 2015—2021 年两个时间段的 NPP 空间变化,可以看出高值区面积有所增加,低值区变化不显著,主要集中在塔里木盆地和城市地带。部分高 NPP 区域在 2015—2021 年期间得到恢复和扩展,尤其是山地草甸和温性荒漠的过渡地带。而低 NPP 区域如塔里木盆地和城市地带则未发生显著变化。

表 3 研究区植被 NPP 时空变化特征表 (2003—2021 年)

Table 3 Temporal and spatial patterns of vegetation net primary productivity in the study region (2003-2021)

时间段 Period	平均 NPP Mean NPP/($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	年变化率 Annual change rate/%	空间分布特征 Spatial pattern
2003—2015 年	194.25	+0.42	西北高,南部低 Higher in the northwest, lower in the south
2015—2021 年	203.45	+0.48	西北高,南部低 Higher in the northwest, lower in the south
2003—2021 年	198.15	+0.45	西北高,南部低 Higher in the northwest, lower in the south

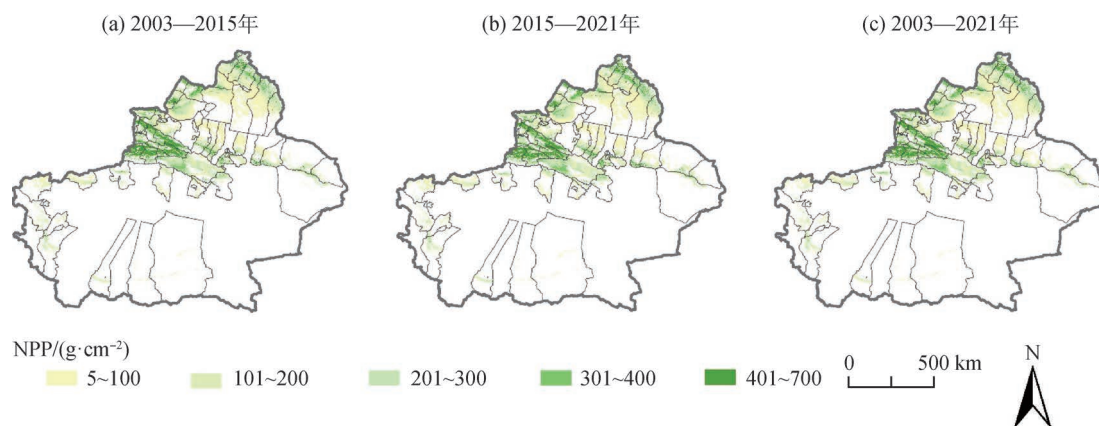


图 5 植被 NPP 空间分布情况

Fig. 5 Spatial distribution of vegetation NPP

根据 2003—2021 年间植被 NPP 变化的分析结果,研究显示(图 6),植被 NPP 显著减少的区域占比为 8.11% ,显著增加的区域占比为 13.30% 。其中,富蕴县植被 NPP 极显著增加,主要分布在准格尔盆地以北。而极显著减少的区域主要集中在库车市。此外,约 60.53% 的区域植被 NPP 保持稳定。

2.3 生态系统服务恢复状况分析

2.3.1 水源涵养量恢复状况分析 研究区 2003—2021 年水源涵养量的时空变化特征较为明显。整

体来看,2003—2015 年间(图 7a),研究区单位面积水源涵养量为 98.2 mm , 2015—2021 年增长至 121.4 mm , 长期均值为 110 mm , 呈现波动上升趋势(图 7b)。不同区域间存在显著的空间差异,其中,水源涵养量最高的区域主要集中在和布克赛尔蒙古自治县和哈巴河县,分别在不同时间段内达到 1286.7 mm , 1292.7 mm 和 1415.2 mm , 而且末县的水源涵养量始终处于最低水平。

空间分布上,研究区水源涵养量表现出“西北部较高,东南部较低”的总体趋势,与伊犁河谷流域

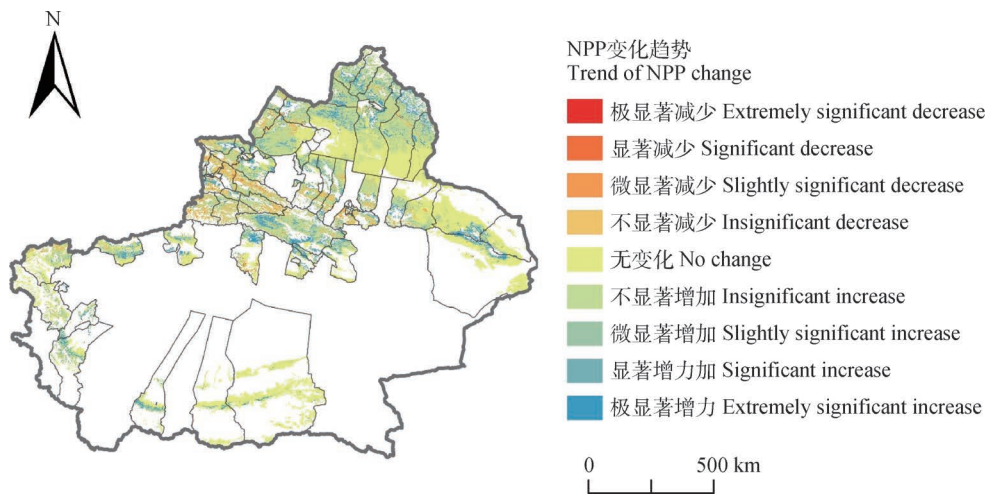


图 6 植被 NPP 变化趋势图
Fig. 6 Vegetation NPP change trend Map

表 4 研究区水源涵养量时空变化特征表 (2003—2021 年)

Table 4 Temporal and spatial variations of water retention services in the study region (2003-2021)

时间段 Period	平均水源涵养量 Mean water yield water conservation/mm	年变化率 Annual change rate/%	空间分布特征 Spatial pattern
2003—2015	98.2	+1.85	西北高,东南低 Higher in the northwest, lower in the southeast
2015—2021	121.4	+3.12	西北高,东南低 Higher in the northwest, lower in the southeast
2003—2021	110.0	+2.35	西北高,东南低 Higher in the northwest, lower in the southeast

的水热条件密切相关。伊犁河谷地区由于降水充沛、植被覆盖度较高,具备较强的水源涵养能力,而塔里木盆地及其周边地区由于干旱少雨,植被稀疏,水源涵养量较低。这一趋势与植被覆盖度的空间格局相一致,表明植被状况在水源涵养过程中发

挥了关键作用。

进一步分析 2003—2015 年和 2015—2021 年两个阶段的变化趋势可以发现,研究区水源涵养量在 2015 年后有所增加。然而,东南部干旱区的水源涵养能力未发生显著提升。

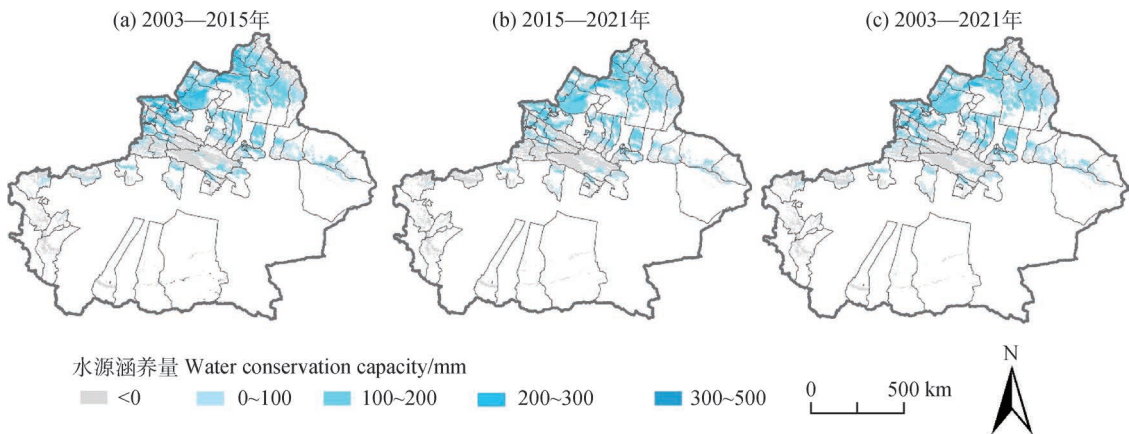


图 7 水源涵养量空间分布状况
Fig. 7 Spatial distribution of water conservation capacity

根据 2003—2021 年植被水源涵养量的变化趋势分析,研究区内水源涵养量整体呈现一定的空间差异(图 8)。其中,显著减少的区域占比为 18.06%,主要集中在阿合奇县和乌恰县。与此同

时,研究发现水源涵养量显著增加的区域占比为 23.52%,主要分布在尼勒克县。近年来,生态恢复和水土保持措施的实施在一定程度上改善了部分区域的生态状况,使得植被覆盖度增加,从而提升

了水源涵养能力。尤其是尼勒克县,该地位于天山山脉北麓,水热条件较好,植被恢复较为明显,因此水源涵养功能得到了增强。整体来看,2003—2021

年,研究区内大范围水源涵养量保持稳定,表明在自然因素和人类活动的共同作用下,该区域的水源涵养功能总体未发生剧烈变化。

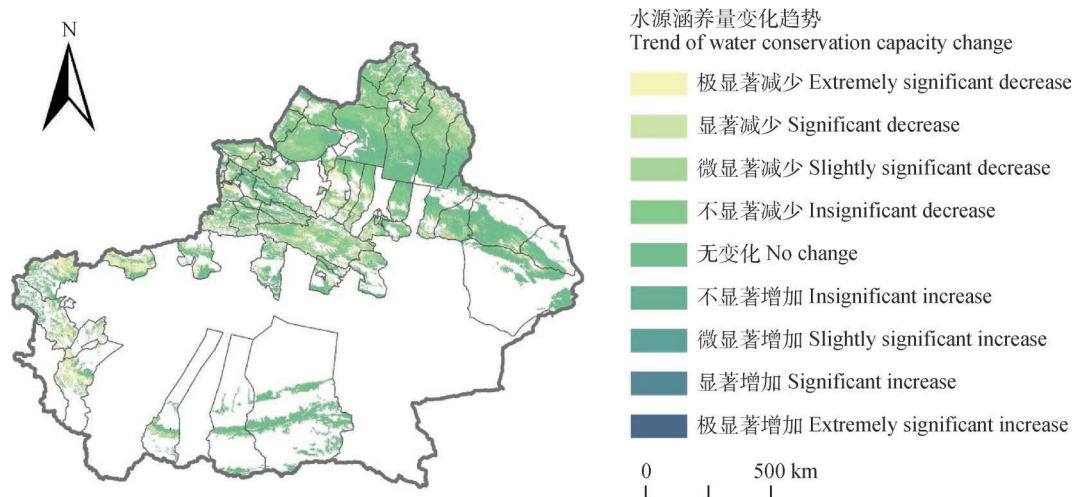


图8 水源涵养量变化趋势图

Fig. 8 Trend analysis of water conservation function

2.3.2 土壤保持量恢复状况分析 基于2003—2021年土壤保持量的分析结果,研究区整体土壤保持量呈现上升趋势,但空间差异显著(图9c)。2003—2015年,研究区平均土壤保持量为 $273.74 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,其中和静县的土壤保持量最高($911.80 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$),而白碱滩区的土壤保持量最低($38.02 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)(图9a)。2015—2021年,研究区平均土壤保持量明显

上升至 $293.50 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,其中温泉县的土壤保持量最高($253.71 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$),且末县的土壤保持量最低($82.53 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)(图9b)。从长期变化来看,2003—2021年研究区平均土壤保持量为 $283.61 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,和静县依然表现出较高的侵蚀强度($763.38 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$),而且末县的土壤保持量最低($48.20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)(图9c)。

表5 研究区土壤保持量时空变化特征表(2003—2021年)

Table 5 Spatiotemporal characteristics of soil conservation in the study area (2003–2021)

时间段 Period	平均土壤保持量 Mean soil retention/($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	年变化率 Annual change rate/%	空间分布特征 Spatial pattern
2003—2015年	273.74	+1.45	山地高,平原低 Higher in mountainous areas, lower in plains
2015—2021年	293.50	+1.21	山地高,平原低 Higher in mountainous areas, lower in plains
2003—2021年	283.61	+1.32	山地高,平原低 Higher in mountainous areas, lower in plains

从空间分布来看,研究区的土壤保持量呈现出明显的地域差异。和静县、温泉县等区域因地势起伏较

大、降水集中,土壤保持量较高,而白碱滩区、且末县等地地势相对平缓、降水稀少,土壤保持量较低。

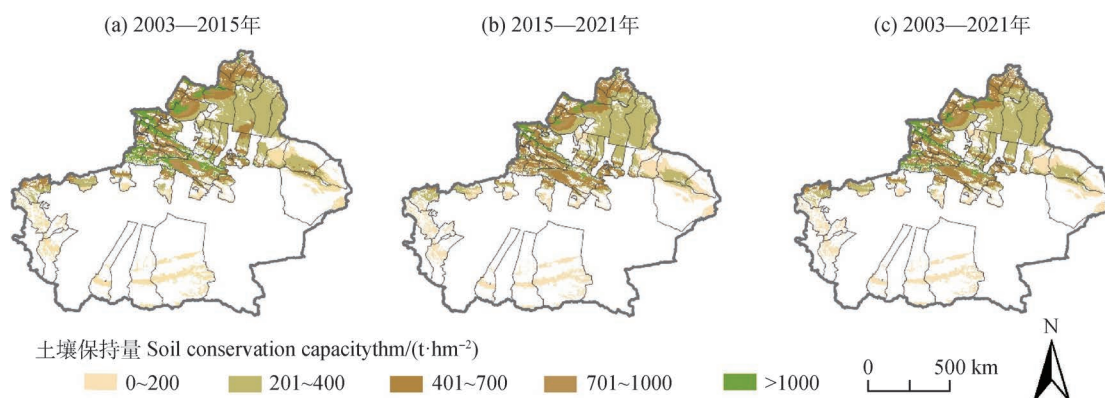


图9 土壤保持量空间分布状况

Fig. 9 Spatial distribution of soil conservation

根据 2003—2021 年土壤保持量的变化趋势分析(图 10),研究区内土壤保持量表现出显著的空间差异。显著减少的区域占比为 5.42%,主要集中在且末县和福海县。尤其是且末县和福海县,这些地区因地势较平坦、降水稀少,且人为活动较为频繁,导致土壤退化问题较为严重。与此同时,研究发现土壤保持量显著增加的区域占比为 8.32%,主要分布在库车市和和静县。特别是和静县,该地区在近

年来加强了水土保持措施并促进了植被恢复,土壤保持能力得到了明显提升。整体来看,2003—2021 年,研究区内土壤保持量呈现出较为稳定的变化趋势,这表明在自然因素和人类活动共同作用下,该区域土壤保持服务功能没有发生剧烈波动。尽管局部地区存在土壤保持量下降的情况,但部分地区通过生态修复措施的实施,土壤保持功能有所提升。

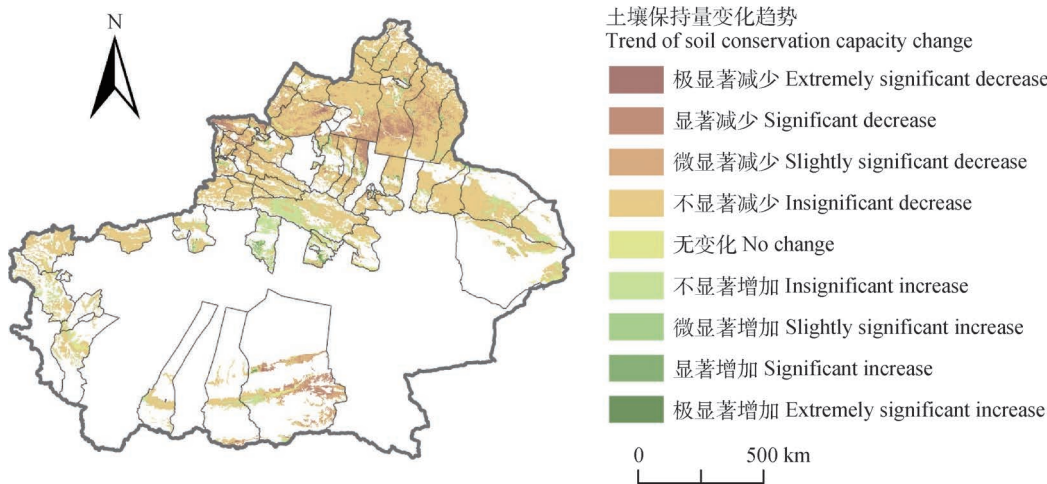


图 10 土壤保持量变化趋势图
Fig. 10 The trend of soil conservation variation chart.

2.3.3 防风固沙量恢复状况分析 根据 2003—2021 年防风固沙量的变化趋势分析,研究区防风固沙量整体呈现下降趋势,但不同区域之间的风蚀强度差异较为明显(图 11c)。2003—2015 年,研究区平均防风固沙量为 $2.82 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,其中伊吾县防风固沙量最高,达到 $9.59 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,而新市区防风固沙量最低,仅为 $0.31 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (图 11a)。2015—2021 年,

研究区平均防风固沙量上升至 $3.62 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,其中和静县的防风固沙量最高,为 $7.03 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,而且末县防风固沙量最低,为 $1.68 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (图 11b)。从长期变化来看,2003—2021 年研究区平均防风固沙量为 $3.22 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,伊吾县依然表现出较高的风蚀强度,达到 $19.52 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,而且末县防风固沙量最低,仅为 $1.12 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

表 6 研究区防风固沙量时空变化特征表 (2003—2021 年)
Table 6 Spatiotemporal characteristics of wind erosion control capacity in the study area (2003-2021)

时间段 Period	平均防风固沙量 Mean windbreak & sand fixation/($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	年变化率 Annual change rate/%	空间分布特征 Spatial pattern
2003—2015 年	2.82	-1.12	区域差异显著 Pronounced regional differences
2015—2021 年	3.62	+2.34	区域差异显著 Pronounced regional differences
2003—2021 年	3.22	+0.63	区域差异显著 Pronounced regional differences

从空间分布来看,研究区的防风固沙量与地貌特征和气候条件密切相关,整体呈现出“沙漠及荒漠地区风蚀较强,植被覆盖较高区域风蚀较弱”的特征。且末县等区域由于地处风蚀作用强烈的干旱荒漠区,地表植被稀少,地面易受风力侵蚀,从而表现出较低的防风固沙量。

根据 2003—2021 年防风固沙功能的变化趋势

分析(图 12),研究区整体防风固沙能力在时空上呈现一定的差异性。其中,显著减少的区域占比为 13.78%,主要集中在奇台县和青河县。奇台县和青河县地处新疆北疆地区,受干旱半干旱气候影响,植被覆盖度相对较低,且部分区域由于人类活动(如过度放牧、土地开发等)导致风蚀加剧,使得防风固沙功能减弱。研究发现极显著增加的区域

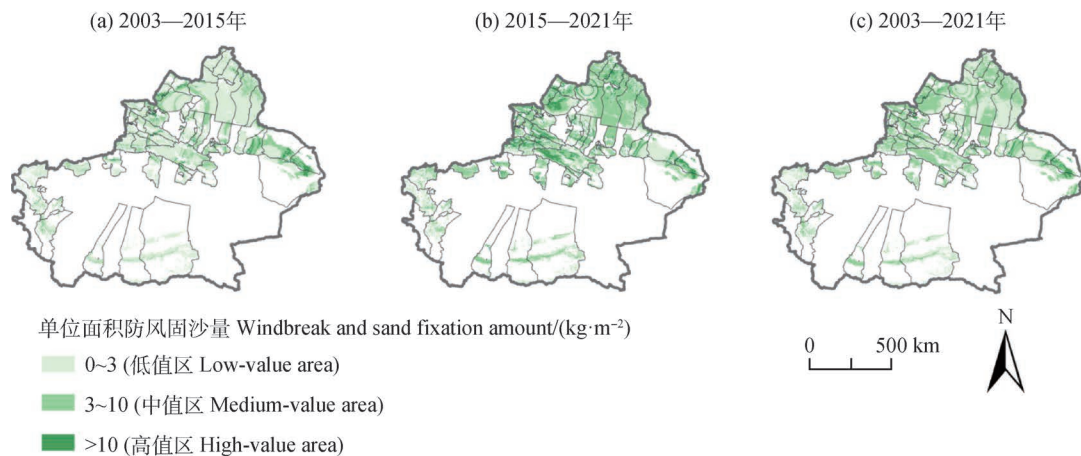


图 11 防风固沙量空间分布状况

Fig. 11 Spatial distribution of windbreak and sand-fixation capacity

占比为 23.21%，主要分布在吉木乃县。近年来，新疆地区积极开展“三北”防护林、人工草方格固沙、封沙育草等生态工程，这些措施在一定程度上改善了该区域的生态环境，增强了防风固沙能力。吉木乃县地处阿勒泰地区，近年来降水量相对稳定，加之草地恢复和植被覆盖率的提高，使得地表风蚀程

度有所降低，防风固沙功能显著增强。

整体来看，北疆地区的干旱区和沙漠区成为防风固沙功能变化的主要响应区，表现出明显的时空分异特征。部分地区由于生态治理和植被恢复，防风固沙能力得到提升，而另一些地区则因土地退化、气候干旱等因素导致防风固沙能力下降。

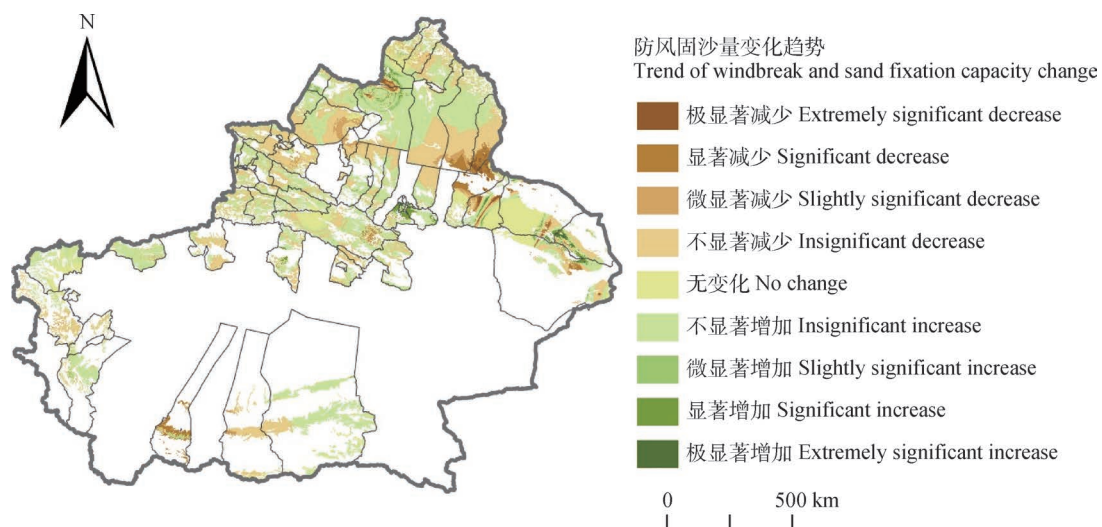


图 12 防风固沙量变化趋势图

Fig. 12 Trend map of windbreak and sand-fixation capacity

2.4 生态恢复程度综合分析

本研究构建的生态恢复指数(ERI)结果表明(图 13)，新疆生态恢复状况呈现显著的空间异质性特征。其中，面积占比最大的是中等恢复水平区域($0.2 < \text{ERI} \leq 0.5$)，达 $3.424 \times 10^7 \text{ hm}^2$ (占全疆面积的 80.9%)，这类区域主要分布在准噶尔盆地南缘、塔里木盆地北缘等典型的绿洲-荒漠过渡带，其生态恢复主要得益于退耕还林还草等生态工程的实施，但由于受水资源限制，恢复程度

尚未达到最优状态。高恢复水平区域($\text{ERI} > 0.5$)面积为 $8.08 \times 10^6 \text{ hm}^2$ (占 19.08%)，在空间上呈斑块状集中分布，主要位于天山北坡森林草原带、伊犁河谷湿地以及塔里木河下游生态输水区等水热条件优越的区域，这些地区通过实施天然林保护、退牧还草等工程措施，植被生产力显著提升，生态系统服务功能明显改善。值得注意的是，仍有 $4.7 \times 10^3 \text{ hm}^2$ (占 0.02%) 的区域处于低恢复状态($\text{ERI} \leq 0.2$)。

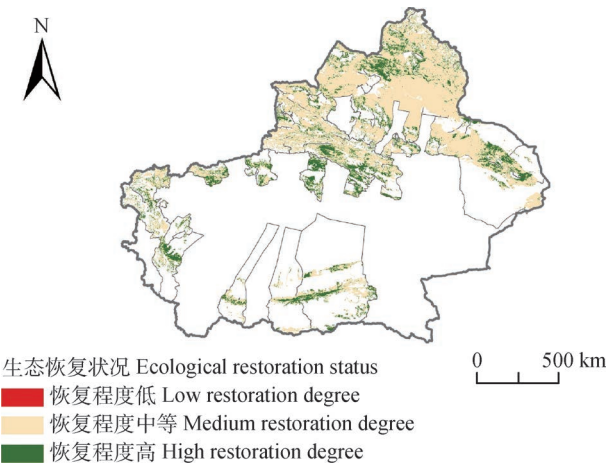


图 13 生态恢复综合评估

Fig. 13 Integrated assessment of ecological restoration

表 7 2003—2021 年研究区生态恢复状况面积统计

Table 7 Area statistics of ecological restoration status in the study area from 2003 to 2021

生态恢复状况 Ecological restoration status	面积 Area/hm ²	面积占比 Area proportion/ %
恢复程度低 Low restoration level	4.70×10 ³	0.02
恢复程度中等 Moderate restoration level	3.42×10 ⁷	80.90
恢复程度高 High restoration level	8.08×10 ⁶	19.08

3 讨论

3.1 工程实施的情况及存在的问题

自 2003 年新疆正式启动退牧还草工程以来,生态工程在广阔草地上持续推进,至今已历时近 20 年,先后实施了第一轮(2003 年起)和第二轮(2015 年起)工程,涉及 49 个县(市)及 14 个地州 85 个市县,实施范围广、政策持续性强。在“禁牧、休牧、舍饲结合”的措施基础上,配套建设了围栏、人工饲草料地、草原改良和毒害草防治等项目,并引入了草原生态保护补助奖励机制,有效提升了农牧民保护草地的积极性。研究结果表明,工程区内草地生态系统的结构、质量与服务功能均呈现积极转变趋势。草地面积总体稳定或略有扩张,NPP 和 FVC 指标逐年提高,说明草地生产能力和植被覆盖水平在逐步恢复。同时,生态系统服务中水源涵养、土壤保持和防风固沙功能也得到提升,尤其在伊犁河谷和塔克拉玛干沙漠边缘区域成效显著。

尽管如此,当前退牧还草工程区在实施过程中仍面临诸多现实问题。首先,新疆荒漠草原分布广,生态系统极其脆弱,降水量低、恢复期长,一旦

退化很难在短期内恢复。其次,在部分区域存在禁牧政策落实不到位的情况,出现返牧、偷牧等现象,加之监管力量不足,工程区草地保护面临挑战。再次,随着市场经济发展和人口增长,部分地区(如伊犁河流域)^[19]出现草地向耕地转移的现象,土地利用结构变化对草地生态系统造成压力。此外,草原生态保护补助机制若后续资金投入不足,将影响工程的可持续性,甚至可能引发退牧区草地再次退化或沙化反弹。因此,当前生态工程区虽然取得了一定的生态成效,但其持续性和系统性仍需加强,未来需在政策执行、资金保障、生态监管与牧民生计协同等多维度进一步完善退牧还草工程实施体系。

3.2 土地转移驱动下的草地变化

本研究表明,2003—2021 年新疆退牧还草工程区草地生态系统呈现出显著的阶段性变化特征,草地数量与质量的演变在很大程度上受到政策驱动和土地利用转移的双重影响。2003—2015 年间,草地面积大幅减少 $3.22 \times 10^6 \text{ hm}^2$,主要转为荒地和耕地。与前人研究的“新疆北部草地持续向耕地和裸地转化”趋势一致^[20],反映了“十一五”时期农业开发优先的土地利用导向对生态系统造成了较大干扰^[21]。这一时期草地 NPP 和植被覆盖度(FVC)呈下降趋势,FVC 下降区域面积占比高达 27.6%,生态系统质量持续退化。

2015—2021 年,随着国家生态文明建设推进,新疆实施草原生态补奖政策(投入达 5.87×10^9 元),草地退化趋势得到有效遏制,NPP 从 2015 年的 $268.45 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 增加至 2021 年的 $301.87 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,FVC 也表现出明显上升趋势,改善面积显著大于退化区域。与纪平等^[22]在三北防护林区发现的“生态工程带动植被生产力恢复”结论一致,本研究进一步在新疆典型退牧还草区域验证了该趋势,说明政策干预在改善草地生态系统质量方面发挥了积极作用^[23]。不过,草地转移结构的变化也暴露出生态修复过程中的短板。2015 年后,草地向建设用地大量转出(77.4%),集中于乌昌城市群,与胡凯群等^[24]提出的“城市扩张对北疆草地生态空间造成持续挤压”的观点相一致。耕地向草地的转入量增加 66.8%,但转入草地的生态质量普遍低于原生草地 30%~40%,也印证“退耕还草后草地初期生态服务功能不足”这一问题^[25]。综上,草地系统演变不仅受生态政策影响,更与土地利用结构变迁密切相

关^[26]。若仅关注面积恢复而忽视生态质量,将难以实现草地生态系统服务的持续提升。因此,未来应结合“第三次新疆综合科学考察”成果,建立草地质量分级监管体系和差异化补偿机制,实现生态保护与区域发展的协调统一。

3.3 结果准确性比较

本研究基于2003—2021年新疆退牧还草工程区的多源遥感数据,从植被净初级生产力(NPP)、水源涵养、土壤保持、防风固沙等多个方面评估了生态系统服务的变化趋势,并构建了综合生态恢复指数(ERI)。结果表明:2003—2021年间,研究区平均NPP从 $190.96 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 上升至 $205.34 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,年均增长率为0.45%;水源涵养量从98.2 mm增加至121.4 mm;土壤保持量从 $273.74 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 上升至 $293.50 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$;防风固沙量由 $2.82 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 上升至 $3.62 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,生态恢复指数中等以上水平区域占比接近81%。这些结果与新疆草原总站得出的结论基本一致^[27];李艳菊研究中指出,伊犁河谷和天山北坡退牧区的植被生产力显著提升^[28],与本研究伊犁地区NPP达到 $225.49 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的结论吻合。然而,两者也存在一定差异。本研究发现2003—2015年NPP提升速度相对缓慢(年均增长率为0.33%),而2015—2021年增长加快至0.52%。而李传华^[29]研究认为2000—2015年增长较快,而近年趋于稳定,可能因其采用MOD17A3产品受干旱区地表异质性影响较大,低估了退牧后期草地NPP的回升趋势。在水源涵养方面,本研究发现2015年后单位面积水源涵养量显著提升,2015—2021年平均价值达到121.4 mm,表明该时期区域水文调节功能有所增强。相比之下,丁程峰等^[30]指出2010年后新疆水源涵养提升趋势趋于平缓,其研究结果与本研究存在差异,可能与数据分辨率、时段划分及模型参数设定不同有关。在土壤保持与防风固沙量方面,本研究结果显示和静县与温泉县仍为水土流失高发区,这与王淮亮等^[31]结论一致。在防风固沙量方面,本研究监测到的下降幅度相对更大,与部分前人研究中风蚀变化相对缓慢的结论存在差异^[32]。这种差异可能源于研究时段划分不同,本研究将重点放在2015年后生态治理政策强化的时期。综上,本研究结果在整体趋势与空间分布特征上与前人研究高度一致,但在部分具体数值与阶段性趋势上存在差异,主要由于遥感数据源分辨率不同、指标

体系多样化、时空尺度处理方式不同以及生态工程响应时滞所致。这提示我们在区域生态评估中应结合多源数据与多尺度综合评估手段,以提升生态系统恢复监测的科学性与适应性。

4 结论

2003—2021年,新疆退牧还草工程区生态系统服务功能(以NPP、水源涵养等为表征)整体提升,生态恢复指数(ERI)进一步证实了工程成效的空间分异规律:高恢复区域($\text{ERI} > 0.5$)与低恢复区域($\text{ERI} \leq 0.2$)在空间上形成鲜明对比。这种空间分异特征与自然环境本底和人类活动强度的空间格局密切相关。生态工程在自然条件优越的地区成效更为显著;而在干旱荒漠区和人类活动密集区,恢复程度相对有限,揭示了后者是生态恢复的关键制约因素。核心结论在于,退牧还草工程的生态成效并非均质,其空间分异规律是未来实施差异化生态管理策略的根本依据。为此,建议在高效恢复区巩固成果,在低效恢复区(如干旱荒漠与人类活动区)采取更具针对性的修复与管控措施。

参考文献

- [1] 白永飞,赵玉金,王扬,等. 中国北方草地生态系统服务评估和功能区划助力生态安全屏障建设[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(6): 675-689
BAI Y F, ZHAO Y J, WANG Y, et al. Assessment of ecosystem services and ecological regionalization of grasslands support establishment of ecological security barriers in northern China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(6): 675-689
- [2] BAI Y F, COTRUFO M F. Grassland soil carbon sequestration: current understanding, challenges, and solutions[J]. Science, 2022, 377(6606): 603-608
- [3] 杨林生,郭亚南,朱会义,等. 中国生态文明制度体系建设进展与走向[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(12): 1793-1803
YANG L S, GUO Y N, ZHU H Y, et al. Progress and prospects on institutional system construction of ecological civilization in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(12): 1793-1803
- [4] 魏轩,周立华,韩张雄,等. 生态脆弱区生态工程效益评价的比较研究[J]. 生态学报, 2020, 40(1): 377-383
WEI X, ZHOU L H, HAN Z X, et al. Comparative study on benefit evaluation of ecological engineering in ecologically fragile areas[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(1): 377-383
- [5] 邵全琴,刘树超,宁佳,等. 2000—2019年中国重大生态工程生态效益遥感评估[J]. 地理学报, 2022, 77(9): 2133-2153
SHAO Q Q, LIU S C, NING J, et al. Assessment of ecological

- benefits of key national ecological projects in China in 2000-2019 using remote sensing[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(9):2133-2153
- [6] 李淑娟,郑鑫,隋玉正. 国内外生态修复效果评价研究进展[J]. *生态学报*, 2021, 41(10):4240-4249
LI S J, ZHENG X, SUI Y Z. Research progress on evaluation of ecological restoration effect at home and abroad [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(10):4240-4249
- [7] 李红举,宇振荣,梁军,等. 统一山水林田湖草生态保护修复标准体系研究[J]. *生态学报*, 2019, 39(23):8771-8779
LI H J, YU Z R, LIANG J, et al. Study on the unified standard system of ecological protection and rehabilitation of mountain-river-forest-farmland-lake-grass [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(23):8771-8779
- [8] 罗明,于恩逸,周妍,等. 山水林田湖草生态保护修复试点工程布局及技术策略[J]. *生态学报*, 2019, 39(23):8692-8701
LUO M, YU E Y, ZHOU Y, et al. Layout and technical strategy of pilot project for ecological protection and restoration of lake grass in landscape forest field [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(23):8692-8701
- [9] 彭建,吕丹娜,张甜,等. 山水林田湖草生态保护修复的系统性认知[J]. *生态学报*, 2019, 39(23):8755-8762
PENG J, LÜ D N, ZHANG T, et al. Systematic cognition of ecological protection and restoration of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(23):8755-8762
- [10] 傅伯杰,于丹丹,吕楠. 中国生物多样性与生态系统服务评估指标体系[J]. *生态学报*, 2017, 37(2):341-348
FU B J, YU D D, LÜ N. An indicator system for biodiversity and ecosystem services evaluation in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(2):341-348
- [11] 何春阳,张金茜,刘志锋,等. 1990—2018年土地利用/覆盖变化研究的特征和进展[J]. *地理学报*, 2021, 76(11):2730-2748
HE C Y, ZHANG J X, LIU Z F, et al. Characteristics and progress of land use/cover change research during 1990-2018 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(11):2730-2748
- [12] JIAPAER G, CHEN X, BAO A M. A comparison of methods for estimating fractional vegetation cover in arid regions [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(12):1698-1710
- [13] 杜军凯,谢敏,毛海睿,等. 黄河水源涵养区水源涵养能力与涵养量时空演变[C]//2024中国水利学术大会论文集. 2024: 22-30
DU J K, XIE M, MAO H R, et al. Spatio-temporal evolution of water conservation capacity and volume in the Yellow River water conservation area [C]//Proceedings of 2024 China Hydraulic Engineering Academic Conference. 2024:22-30
- [14] 贺淑霞,李叙勇,莫菲,等. 中国东部森林样带典型森林水源涵养功能[J]. *生态学报*, 2011, 31(12):3285-3295
HE S X, LI X Y, MO F, et al. The water conservation study of typical forest ecosystems in the forest transect of Eastern China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(12):3285-3295
- [15] 白致威,段兴武,丁剑宏,等. 土壤有效含水量的经验估算模型——以黑土为例[J]. *中国农学通报*, 2015, 31(20):153-159
BAI Z W, DUAN X W, DING J H, et al. An experience estimation model of soil available water-holding capacity: a case study of black soil [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(20):153-159
- [16] LIU Y, ZHAO W W, JIA L Z. Soil conservation service: concept, assessment, and outlook [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(2):stxb201709301770
LIU Y, ZHAO W W, JIA L Z. Soil conservation service: concept, assessment, and outlook [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(2):stxb201709301770
- [17] FRYREAR D W, BILBRO J D, SALEH A, et al. RWEQ: improved wind erosion technology [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 55(2):183-189
- [18] 刘文萍,王佃来,黄心渊. 基于 Sen+Mann-Kendall 的北京植被变化趋势分析[J]. *计算机工程与应用*, 2013, 49(5):13-17
LIU W P, WANG D L, HUANG X Y. Analysis of vegetation change trend in Beijing based on Sen+Mann-Kendall [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2013, 49(5):13-17.
- [19] 肖德顺,赵义峰,安志清. 伊犁地区降水特征及变化趋势分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2006, 20(4):47-50
XIAO D S, ZHAO Y F, AN Z Q. Analysis on precipitation characteristics and change trend in Ili area [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2006, 20(4):47-50
- [20] 米尔扎提江·木艾塔尔江,古丽米热·艾尔肯,阿依吐尔逊·沙木西. 基于 MODIS 数据的新疆土地利用/覆被时空变化及驱动因素分析[J]. *湖北农业科学*, 2022, 61(16):58-63
MIERZHATIJIANG M, GULIMIRE A, AYITUERXUN S. Spatio-temporal change and driving factors of land use/cover in Xinjiang based on MODIS data [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2022, 61(16):58-63
- [21] 蒙古军,朱丽君,王祺,等. 基于政策驱动的土地利用转型对土地多功能利用的影响——黑河中游案例研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2020, 56(6):1102-1112
MENG J J, ZHU L J, WANG Q, et al. Influence of policy-driven land use transformation on multifunctional land use in the middle reaches of the Heihe River Basin [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2020, 56(6):1102-1112
- [22] 纪平,邵全琴,王敏,等. 中国三北防护林工程第二阶段生态效益综合评价[J]. *林业科学*, 2022, 58(11):31-48
JI P, SHAO Q Q, WANG M, et al. Monitoring and assessment of ecological benefits of the shelter forest program in the three-north region during 2001—2020 [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2022, 58(11):31-48
- [23] 韩燕,穆娟,王莉,等. 新疆天然草地“退牧还草”工程实施后的效益及巩固措施[J]. *新疆畜牧业*, 2010(4):52-53
HAN Y, MU J, WANG L, et al. Benefits and consolidation measures after implementation of “returning grazing land to grassland” project in Xinjiang natural grassland [J]. *Xinjiang Animal Husbandry*, 2010(4):52-53
- [24] 胡凯群,林美霞,吝涛,等. 快速城镇化过程中的城市蔓延与

- 生态保护冲突空间识别与量化评估——以长三角生态绿色一体化发展示范区为例[J]. 生态学报, 2022, 42(2): 462-473
- HU K Q, LIN M X, LIN T, et al. Spatial identification and quantitative evaluation of conflict space between urban sprawl and ecological protection in the process of rapid urbanization: A case study of the Yangtze River Delta Eco-Green Integrated Development Demonstration Zone[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(2): 462-473
- [25] 黄麟, 祝萍, 曹巍. 中国退耕还林还草对生态系统服务权衡与协同的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(3): 1178-1188
- HUANG L, ZHU P, CAO W. The impacts of the Grain for Green Project on the trade-off and synergy relationships among multiple ecosystem services in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(3): 1178-1188
- [26] 白娥, 薛冰. 土地利用与土地覆盖变化对生态系统的影响[J]. 植物生态学报, 2020, 44(5): 543-552
- BAI E, XUE B. Effects of land use and land cover change on ecosystems [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2020, 44(5): 543-552.
- [27] 布仁巴依尔. 退牧还草工程对新疆草原植被恢复的影响[J]. 新疆畜牧业, 2020, 35(6): 27-29
- BAI E, XUE B. Effects of land use and land cover change on ecosystems [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2020, 44(5): 543-552
- [28] 李艳菊, 丁建丽, 张钧泳, 等. 2001—2015 年天山北坡植被覆盖对干旱的响应——基于土地利用/土地覆盖分析[J]. 生态学报, 2019, 39(17): 6206-6217
- LI Y J, DING J L, ZHANG J Y, et al. Response of vegetation cover to drought in the northern slope of the Tianshan Mountains during 2001—2015 based on the land-use and land-cover change[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(17): 6206-6217
- [29] 李传华, 朱同斌, 周敏, 等. 河西走廊植被净初级生产力时空变化及其影响因子研究 [J]. 生态学报, 2021, 41(5): 1931-1943
- LI C H, ZHU T B, ZHOU M, et al. Temporal and spatial change of net primary productivity of vegetation and its determinants in Hexi Corridor [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(5): 1931-1943
- [30] 丁程锋, 张绘芳, 李霞, 等. 天山中部云杉天然林水源涵养功能定量评估——以乌鲁木齐河流域为例[J]. 生态学报, 2017, 37(11): 3733-3743
- DING C F, ZHANG H F, LI X, et al. Quantitative assessment of water conservation function of the natural spruce forest in the central Tianshan Mountains: a case study of the Urumqi River Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(11): 3733-3743
- [31] 王淮亮, 刘凤婵, 许德浩, 等. 新疆水土流失分析及防治对策探讨[J]. 温带林业研究, 2023, 6(3): 65-71
- WANG H L, LIU F C, XU D H, et al. Analysis of soil and water loss and discussion on countermeasures in Xinjiang [J]. *Journal of Temperate Forestry Research*, 2023, 6(3): 65-71
- [32] 邢丽珠, 张方敏, 邢开成, 等. 基于 RWEQ 模型的内蒙古巴彦淖尔市土壤风蚀变化特征及归因分析[J]. 中国沙漠, 2021, 41(5): 111-119
- XING L Z, ZHANG F M, XING K C, et al. Change of soil wind erosion and attribution in Bayannur, Inner Mongolia based on the Revised Wind Erosion Equation [J]. *Journal of Desert Research*, 2021, 41(5): 111-119

(责任编辑 刘婷婷)