石智宇,董霁红.北方干旱半干旱区植被覆盖时空变化及其对生态系统服务的影响 [J]. 中国环境科学, 2026,46(1):379-388.
Shi Z Y, Dong J H. Spatiotemporal changes of vegetation cover in arid and semi-arid regions of northern China and its impact on ecosystem services [J]. China Environmental Science, 2026,46(1):379-388.

北方干旱半干旱区植被覆盖时空变化及其对生态系统服务的影响

石智宇,董霁红* (中国矿业大学环境与测绘学院,江苏 徐州 221116)

摘要：分析了 2000~2023 年北方干旱半干旱区植被覆盖(FVC)变化情况,评估 FVC 变化对生态系统服务的影响,并对影响阈值进行识别.结果表明:北方干旱半干旱区 FVC 整体呈现西低东高、北低南高的格局,研究区 FVC 增加区的面积占比为 40.01%.生态系统服务整体由南向北逐渐减少,高值区主要集中在甘肃省南部、新疆西北部等地,低值区主要集中在内蒙古中西部、宁夏北部等地,研究区生态系统服务整体呈增加趋势,呈增加趋势的地区面积占比为 85.01%.研究区 FVC 水平与碳固定服务、土壤保持服务和产水服务整体呈正相关,显著正相关面积占比分别为 54.56%、7.9%、11.43%,FVC 的增加推动生态系统服务综合指数(CIES)由 0.09 增至 0.23.林地和农田地区的 FVC 影响阈值不明显,草地植被覆盖达到 0.87 时,FVC 增加的促进作用趋于减弱.

关键词：植被覆盖度；生态系统服务；时空变化；阈值；北方干旱半干旱区
中图分类号：X171.1 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2026)01-0379-10

Spatiotemporal changes of vegetation cover in arid and semi-arid regions of northern China and its impact on ecosystem services. SHI Zhi-yu, DONG Ji-hong* (School of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China). *China Environmental Science*, 2026,46(1)：379~388

Abstract：Analyzed the changes in vegetation cover (FVC) in the arid and semi-arid regions of northern China from 2000 to 2023, the impacts of FVC changes on ecosystem services were evaluated, and the impact thresholds were identified. The results showed that the FVC in these regions was characterized by a spatial pattern of being low in the west and high in the east, and low in the north and high in the south. Areas with increasing FVC accounted for 40.01% of the total study area. Overall ecosystem services were observed to decrease gradually from south to north, with high-value areas mainly distributed in southern Gansu Province and northwestern Xinjiang, while low-value areas were concentrated in central and western Inner Mongolia and northern Ningxia. The overall trend of ecosystem services was found to be increasing, with 85.01% of the area showing an upward trend. The FVC level was positively correlated with carbon fixation, soil conservation, and water production services, with significantly positive correlation areas accounting for 54.56%, 7.9%, and 11.43%, respectively. The increase in FVC was found to promote the comprehensive ecosystem services index (CIES) from 0.09 to 0.23. The FVC impact threshold in forest and farmland areas was not significant, and the positive effect of increasing FVC tended to weaken when grassland vegetation coverage reached 0.87.

Key words：fractional vegetation cover；ecosystem services；spatiotemporal changes；threshold；arid and semi-arid regions

植被是全球生态系统的重要组成部分,在调节全球碳平衡和维持气候稳定方面发挥着关键作用[1-3].植被是影响生态系统服务的重要因素,重建并恢复退化植被已成为提升生态环境质量和维持生态系统平衡的重要手段[4].然而,植被变化对生态系统的的响应是一个十分复杂的过程.在植被变化背景下,不同生态系统服务类型变化趋势各异,各类服务之间存在权衡或协同关系,导致区域生态系统服务整体呈现高度非线性的变化特点[5].因此,揭示植被变化对生态系统服务的影响,能够为区域生态治理与保护提供有效支持.

我国大规模植被重建和恢复提升了全国生态环境质量和生态系统服务功能[4,6].当前针对植被恢复主导下的生态效应研究主要涉及生态恢复潜力[7-9]、生态综合效益[5,10-11]等方面,研究的区域主要包括流域[12-13]、生态脆弱区[5,14-16]、生态工程区[11,17-18]等.在“双碳”目标的大背景下,掌握典型生态脆弱区植被变化的时空动态特征,对增强区域生态系统固碳增汇能力,提高生态脆弱区环境治理效能等方面

收稿日期：2025-06-23
基金项目：2023 年度自然资源遥感监测项目(2023100088)
* 责任作者, 教授, dongjihong@cumt.edu.cn

具有重要意义[19].北方干旱半干旱区是我国水土流失最严重和生态环境最脆弱的地区之一,在我国生态安全、资源保护方面占据着极其重要的地位.自20世纪90年代末以来,随着退耕还林(草)工程,三北防护林工程等生态修复工程的实施,使得北方干旱半干旱区的植被得到恢复,生态环境逐步改善[20-21].然而,目前仍然缺少针对北方干旱半干旱区植被恢复态势的系统性研究,尤其缺少大规模植被恢复主导下的生态效应系统评价研究,造林活动对干旱半干旱区生态系统的长期影响亦不明确.因此,有必要从植被时空演变趋势入手,深入探究北方干旱半干旱区植被恢复态势及其生态效应.

本文以北方干旱半干旱区为研究区,在探究植被覆盖度时空演变特征的基础上,综合植被碳固定能力、土壤保持能力以及产水能力评价区域生态系统服务水平整体变化,并确定植被覆盖变化对生态系统服务的影响.研究结果可为干旱半干旱区资源合理利用、生态治理与恢复等提供理论基础与科学依据.

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

本文根据全国农业区划委员会所编制的《中国综合农业区划》划定北方干旱半干旱区.本文研究区共涉及内蒙古、陕西、甘肃、青海、宁夏和新疆等6个省市区[22-23],总面积约323.98万km^2(图1).研究区地势西高东低,地形地貌复杂,以高原、山地和盆地为主,包括内蒙古高原、黄土高原、青藏高原、天山山脉、祁连山脉以及塔里木盆地、准噶尔盆地等地貌单元,整体海拔较高,地势起伏大,差异显著.研究区气候由温带季风气候向西逐步过渡为温带大陆性气候,冬季寒冷漫长,夏季干燥炎热,气温年较差、日较差大,光照强,整体干旱少雨,水分蒸发量大.北方干旱半干旱区生态环境脆弱,同时也是我国重要的生态屏障,拥有包括森林、灌丛、草原、沼泽、荒漠等在内的多样自然景观,植被类型复杂多样,以荒漠植被和草原植被为主,多为旱生丛生禾草科及莎草科植被,旱生和超旱生小半灌木及灌木植被,少数地区分布有落叶阔叶林和针阔混交林等高大乔木[23-24].北方干旱半干旱区是我国畜牧业和农业的重要产区,此外,该区域还蕴藏着丰富的矿产资源,如煤炭、石油、天然气等,对区域经济发展具有重要意义.由于农业灌溉需求的急剧增加,畜牧业导致的草场退化以及化工产业带来的污染等问题的出现,导致该区域可持续发展与生态环境面临严峻挑战.

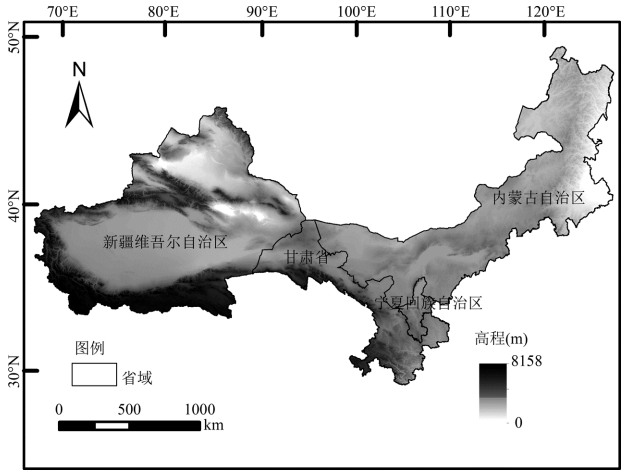


图1 研究区示意

Fig.1 Study area diagram

基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)1822号的标准地图制作,底图界线无修改.下同.

1.2 数据来源与处理

文中植被指数数据使用MOD13A1数据的增强型植被指数(EVI),空间分辨率为500m,时间分辨率为16d.植被净初级生产力(NPP)数据采用MOD17A3HGF V6.0数据,时间分辨率为1a,空间分辨率为500m.基于GEE平台获取2000~2023年北方干旱半干旱区EVI与NPP数据集,并对原始影像进行拼接、裁剪和格式转换,统一坐标后下载,将下载的NPP数据乘以转换因子并剔除无效值.气温、降水和蒸散发数据来自国家青藏高原科学数据中心(http://www.geodata.cn),空间分辨率为1km,土壤数据来自联合国粮农组织的全球土壤数据库(HWSD v1.2),空间分辨率为1km,土地利用数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/),空间分辨率为1km.将上述数据按照研究区边界裁剪,求取年均值数据,并将空间分辨率统一至500m.DEM数据来源于地理空间数据云的STRM数据,空间分辨率为30m.

1.3 研究方法

1.3.1 植被覆盖度 本研究基于增强型植被指数(EVI)构建像元二分模型反演植被覆盖度(FVC)[5,11,25].计算公式如下:

$$FVC=\frac{EVI-EVI_S}{EVI_V-EVI_S} \tag{1}$$

式中:FVC 为像元的植被覆盖度;EVI_V 为像元 EVI 最大值,取 95%置信区间处对应的 EVI 值;EVI_S 为像元 EVI 最小值,取 5%置信区间处对应的 EVI 值.

1.3.2　生态系统服务　(1)水源涵养服务:本文利用 InVEST 模型中的产水量模块计算产水量,具体公式如下:

$$WY=\left(1-\frac{AET}{P}\right)\times P \tag{2}$$

$$PET=K_C\times ET_0 \tag{3}$$

$$\frac{AET}{P}=1+\frac{PET}{P}-\left[1+\frac{PET^w}{P}\right]^{1/w} \tag{4}$$

$$w=\frac{AWC\times Z}{P}+1.25 \tag{5}$$

式中:WY 为年平均产水量,mm;AET 为年实际蒸散量,mm;P 为年平均降水量,mm;PET 为年潜在蒸散量,mm;ET_0 为参考(植被)蒸散量,mm;w 为自然气候和土壤特性的非物理经验参数;AWC 为植物可利用含水量,mm; Z 为 Zhang 系数.

(2)土壤保持服务:本文采用土壤水蚀模数衡量研究区土壤保持服务.土壤水蚀模数由修正通用土壤流失方程(RUSLE)计算得到[26-27],公式如下:

$$SC=A_P-A_R \tag{6}$$

$$AP=R\times K\times L\times S \tag{7}$$

$$A_R=R\times K\times L\times S\times C\times P \tag{8}$$

式中:SC 为年均土壤保持量,t/(hm^2·a);A_P 为潜在土壤侵蚀量,t/(hm^2·a);A_R 为实际土壤侵蚀量,t/(hm^2·a);R 为降雨侵蚀力因子;K 为土壤可侵蚀性因子;L 为坡长因子;S 为坡度因子;C 为植被覆盖因子;P 为水土保持措施因子.

(3)碳固定服务:本文利用 NPP 表征植被碳固定能力[28].NPP 数据基于 MOD17A3HGF V6.0 数据获得,该数据是 MOD17A3 数据的改进产品,采用 BIOME-BGC 模型、光能利用率模型以及新型生物属性调查表和 GMAO 日气象数据提升 NPP 反演精度,目前已经在全球不同地区研究中得到验证与应用[20-21,29-30].

(4)生态系统服务综合指数:分别对水源涵养服务、土壤保持服务和碳固定服务进行逐年标准化并累加,得到生态系统服务综合指数(CIES),以表征北方干旱半干旱区生态系统服务总体水平[5],计算公式如下:

$$ES_S=\frac{ES-ES_{min}}{ES_{max}-ES_{min}} \tag{9}$$

$$CIES=\sum_{i=1}^{n}ES_{si} \tag{10}$$

式中:ES_S 为标准化后的生态系统服务,ES 表示生态系统服务初始值,ES_{max} 和 ES_{min} 分别表示生态系统服务最大值和生态系统服务最小值,将 ES_{max} 与 ES_{min} 分别取 95%和 5%分位数以避免异常值干扰.CIES 为综合指数;ES_{si} 为第 i 类生态系统服务的标准化结果;n 为 3.

1.3.3　趋势分析　本文采用 Theil-Sen Median 趋势分析法分别计算植被变化(植被覆盖度)、生态系统服务(水源涵养服务、土壤保持服务、碳固定服务、生态系统服务综合指数)的逐年趋势变化,并通过 Mann-Kendall 显著性检验法对植被变化和生态系统服务指标进行显著性检验,具体计算公式见参考文献[31].通过分析 2000~2023 年北方干旱半干旱区各类生态指标的时空变化趋势,判定研究区生态环境总体变化态势.

1.3.4　弹性系数　本文采用弹性系数法识别植被变化对生态系统服务影响的阈值.弹性系数是指 FVC 每增加 1 个单位给 CIES 带来的变化,其通过对 FVC 和 CIES 的拟合函数进行求导来获取,可以表征 FVC 变化所带来的影响的强度和效率[5,27].设 CIES=f(FVC)为生态系统服务综合指数和植被覆盖度之间的表达函数,则弹性系数 EC 计算公式为:

$$EC=\frac{d(CIES)}{d(FVC)} \tag{11}$$

2　结果分析

2.1　北方干旱半干旱区植被覆盖时空变化

北方干旱半干旱区 FVC 空间分布与变化如图 2 所示.FVC 高值区主要分布在研究区东北部的大兴安岭地区、南部的秦岭山区以及西北部的伊犁河谷等地,研究区植被覆盖水平整体呈现西低东高、北低南高的格局.相较于 2000 年,北方干旱半干旱区 2023 年植被覆盖水平在部分地区有明显提升,高植被覆盖区(FVC>0.6)面积在内蒙古东部、甘肃南部和新疆西北部明显增加.整体上,FVC 显著增加的地区主要集中在研究区东部和南部地区,包

括内蒙古高原东部、黄土高原北部、秦岭山脉西部等地,此外,天山山脉及塔里木盆地西部等地也有明显分布.FVC 显著减少的地区主要集中在研究区中西部,包括内蒙古高原西部、阿拉善高原、塔里木盆地以及准噶尔盆地等地.分别统计各类变化趋势积及占比情况(表 1),北方干旱半干旱区植被覆盖呈增加趋势的地区面积占比为 40.01%,其中呈极显著增加和显著增加的地区面积占比分别为 14.71%和 7.52%,植被覆盖呈减少趋势的区域面积占比为 59.99%,其中极显著减少和显著减少的地区面积占比分别为 23.78%和 13.75%.结合相关研究与研究区生态保护动态,分析认为北方干旱半干旱区植被覆盖增加的区域主要得益于 2000 年开始实施的退耕还林与天然林保护工程以及 2009 年前后的大规模植树造林工程,使得植被出现恢复[32],但植被恢复地区主要集中在研究区边缘地区,即生态保护工程的实施范围内,而内陆的沙漠戈壁地区植被没有明显好转.

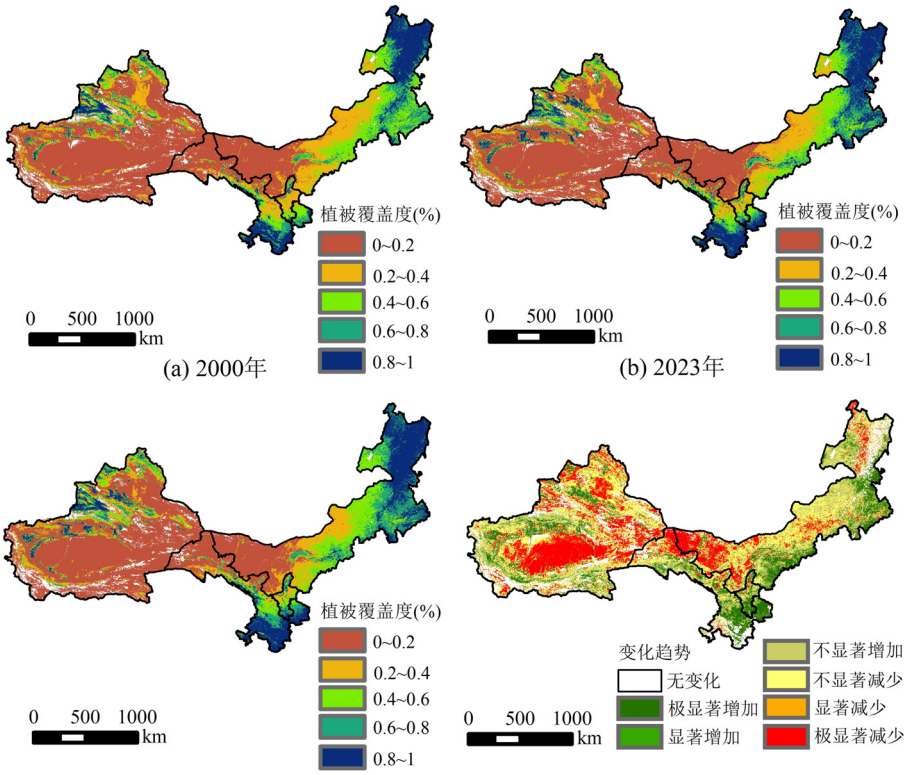


图 2 2000~2023 年北方干旱半干旱区植被覆盖度空间分布及变化趋势

Fig.2 Spatial distribution and variation trend of FVC in arid and semi-arid regions of northern China from 2000 to 2023

表 1 2000~2023 年中国北方干旱半干旱区 FVC 变化趋势统计

Table 1 Statistical analysis of FVC variation trend in arid and semi-arid regions of northern China from 2000 to 2023

变化类型	面积(km^2)	面积占比(%)
极显著增加	415321.70	14.71
显著增加	212393.69	7.52
不显著增加	502022.90	17.78
不显著减少	634403.60	22.46
显著减少	388616.20	13.75
极显著减少	671822.10	23.78

2.2 研究区植被恢复生态效应

2.2.1 生态系统服务综合评估

2000~2023 年北方干旱半干旱区碳固定服务、土壤保持服务和产水服务均值空间分布及变化趋势如图 3 所示.碳固定服务、土壤保持服务和产水服务的空间分布特征相似,整体呈东高西低,南高北低的分布格局,其中甘肃省南部的三类生态系统服务均值明显高于其他地区,东北部大兴安岭地区的碳固定和产水服务相对较高,西北部伊犁河谷地区的 3 类生态系统服务明显高于新疆其他地区.从变化趋势上看,研究区碳固定服务整体呈显著增加和极显著增加趋势,土壤保持服务和产水服务的变化趋势具有明显的空间分异,整体呈东部增加,西部减少的格局.土壤保持服务和

产水服务呈显著增加和极显著增加的地区集中在研究区东北部,主要包括内蒙古高原东部和大兴安岭地区,呈极显著减少和显著减少的地区集中在研究区西北部的伊犁河谷地区.

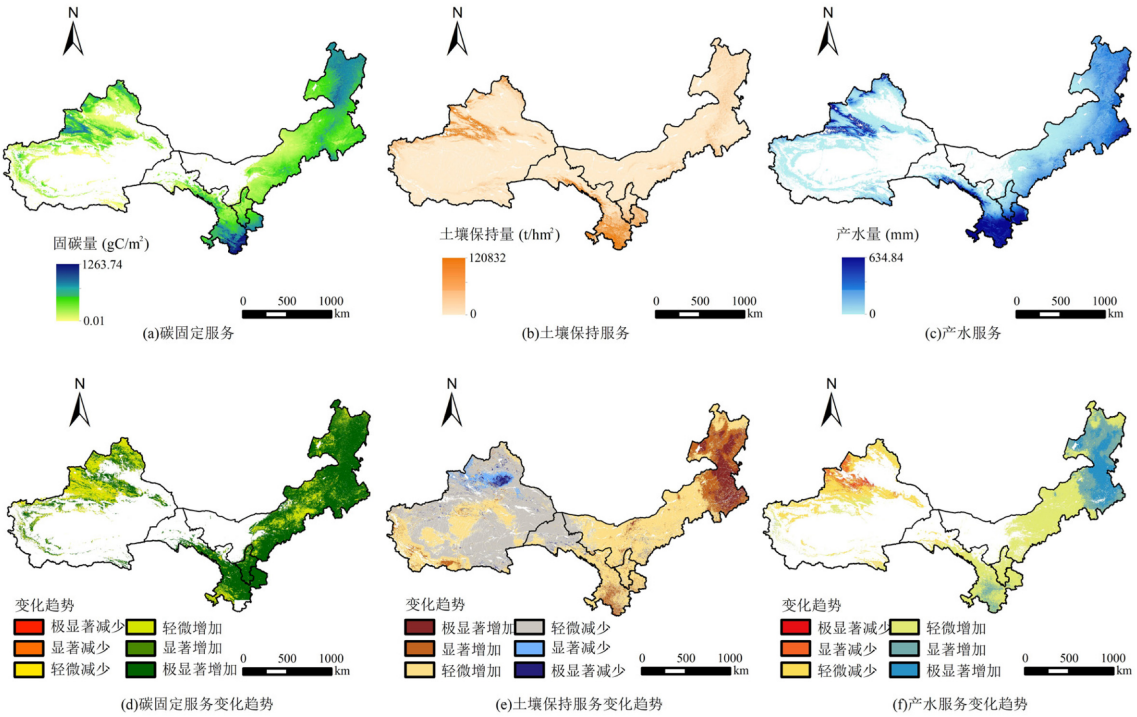


图 3　2000~2023 年北方干旱半干旱区生态系统服务空间分布及变化趋势

Fig.3　Spatial distribution and trend of ecosystem services in arid and semi-arid regions of northern China from 2000 to 2023

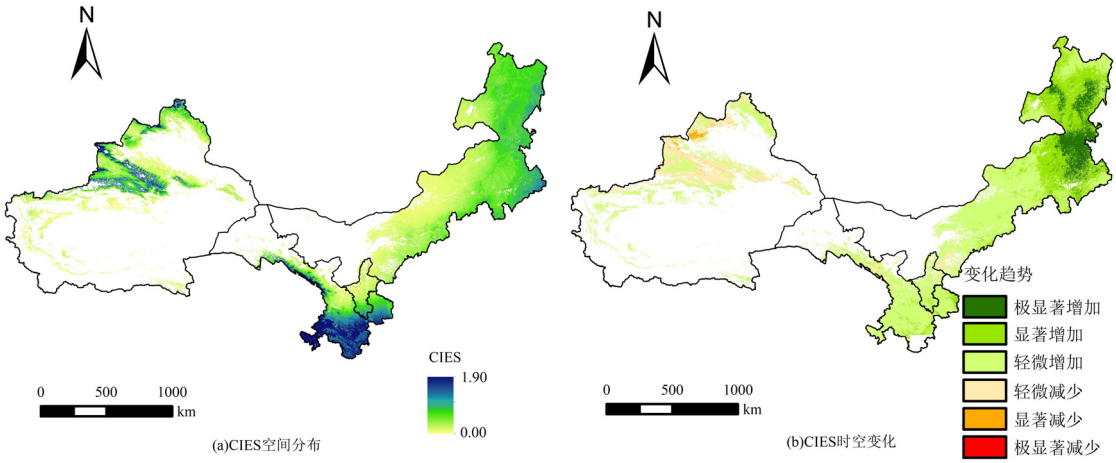


图 4　2000~2023 年北方干旱半干旱区生态系统服务综合指数空间分布及变化

Fig.4　Spatial distribution and changes of CIES in arid and semi-arid regions of northern China from 2000 to 2023

CIES 可以通过累计多个生态系统服务,来表征整体生态环境效益.从生态系统服务综合指数的空间分布可以看出(图 4),北方干旱半干旱区生态系统服务整体由南向北逐渐减少,具有较明显的空间异质性,且具有集聚性.CIES 高值区主要集中在甘肃省南部、新疆西北部等地,这些地区海拔适中,水热条件相对优越,植被状况较好,生态系统服务能力较强;CIES 低值区主要集中在内蒙古中西部、宁夏北部等地,主要包括内蒙古高原及黄土高原地区,这些地区气候较干燥,海拔较高,且多为沙漠荒原地貌,植被稀疏,生态系统服务能力较差.统计 CIES 变化趋势(表 2),呈增加趋势的地区面积占比为 85.01%.其中,

呈极显著增加和显著增加的区域面积占比分别为8.05%和 20.46%,主要集中在内蒙古东北部,该地区是京津冀生态屏障区的核心部分,近年来植被覆盖水平显著提高,防风固沙能力显著增强,生态系统服务能力得到了显著提升[33].CIES 呈减少趋势的地区面积占比较小,其中极显著减少和显著减少地区的面积占比分别为 0.01%和 0.64%,主要集中在新疆西北部地区,该地区近几十年来人类活动强度提升,但相应的生态保护政策和措施较少,导致生态系统服务能力显著下降.

2.2.2 植被覆盖与生态系统服务的关系 分别计算植被覆盖与各类生态系统服务的相关性,结果如图 5 所示.植被覆盖与碳固定服务整体呈正相关,其中呈显著正相关的区域面积占比最大,为 54.56%,主要分布在研究区南部、东部和西北部,表明研究区植被覆盖与碳固定之间呈高度相关性,植被覆盖的增加可以显著提升北方干旱半干旱区碳固定能力.呈显著负相关的区域面积占比极小,仅为 1.40%,主要集中在研究区北部的大兴安岭地区;研究区植被覆盖与土壤保持服务整体呈正相关,面积占比达到82.01%,其中呈显著正相关的地区面积占比为 7.9%,主要集中在黄土高原地区,少量分布在内蒙古东北部,以上地区是植被恢复工程的核心地区,表明植被覆盖的增加可以显著提升北方干旱半干旱区提升水土保持能力;植被覆盖与产水服务整体呈正相关,其中呈显著正相关的地区占研究区总面积的11.43%,主要集中在研究区南部和东部,呈显著负相关的地区面积占比为 2.6%,主要集中在研究区东北部的大兴安岭地区.分析认为,植被恢复与产水服务具有密切关系,植被覆盖的增加能够明显促进干旱区产水服务的提升.整体来看,植被覆盖与碳固定服务的相关性强度明显高于其他服务类型.

表2 2000~2023 年中国北方干旱半干旱区 CIES 变化趋势统计

Table 2 Statistical analysis of CIES variation trend in arid and semi-arid regions of northern China from 2000 to 2023

变化类型	面积(km^2)	面积占比(%)
极显著增加	110939.80	8.05
显著增加	282093.30	20.46
不显著增加	778929.00	56.50
不显著减少	197645.80	14.34
显著减少	8828.96	0.64
极显著减少	142.52	0.01

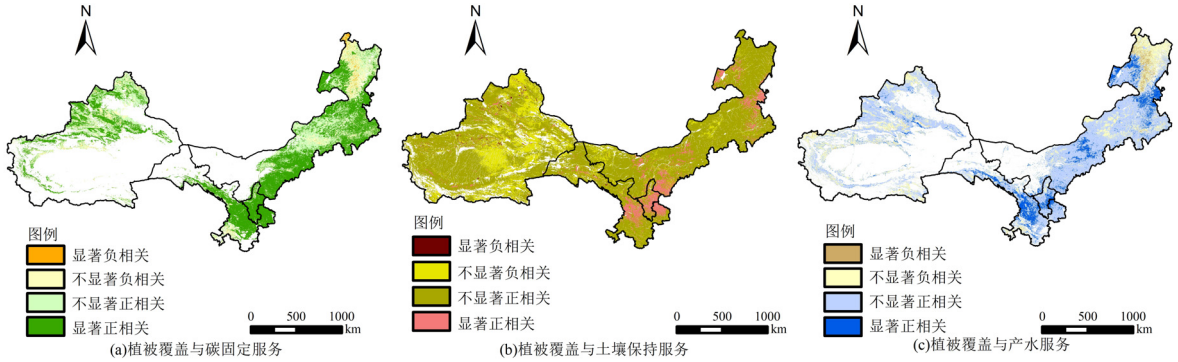


图 5 北方干旱半干旱区 FVC 与不同生态系统服务的关系

Fig.5 The relationship between FVC and different ecosystem services in arid and semi-arid regions of the North

分别统计北方干旱半干旱区 FVC 和 CIES 均值,结果如图 6 所示.可以看出,FVC 呈波动上升的趋势,植被覆盖水平和趋势具体可以分为两阶段,第一阶段为 2000~2009 年,该时段内北方干旱半干旱区整体植被覆盖度水平较低但 FVC 整体波动幅度较大且增速较慢;第二阶段为 2009~2023 年,该时段前期研究区 FVC 持续快速增长至 2012 年,此后 FVC 保持小幅波动上升趋势.CIES 整体变化同样较为剧烈且频繁,增加趋势较 FVC 大,CIES 由 2000 年的最低值 0.09 上升至 2023 年的最高值 0.23,可以看出北方干旱半干旱区生态系统服务功能明显增强.具体来看 FVC 与 CIES 的变化曲线,可以看出,FVC 的变化与 CIES 的变化具有一定相似性,FVC 高值往往与 CIES 高值相对应,且 CIES 的变化相较于 FVC 具有滞后性,这主要是因为植被恢复对生态环境的改善并非简单的线性过程,植被恢复首先推动生态系统结构与功能的系统性重建,进而改善生态环境质量.

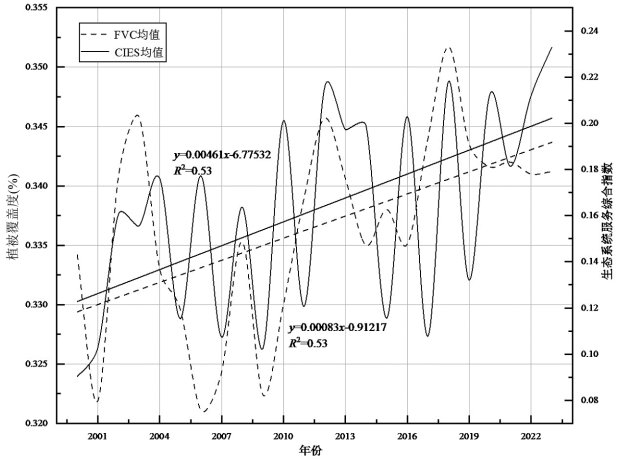


图 6　北方干旱半干旱区 FVC 与 CIES 的变化趋势

Fig.6　Trends of FVC and CIES changes in arid and semi-arid regions of North China

通过计算 FVC 与 CIES 的相关性(图 7)可以看出,北方干旱半干旱区 FVC 与 CIES 主要呈不显著正相关和不显著负相关,显著正相关的地区主要集中在甘肃中部、宁夏、内蒙古中东部等地,显著负相关面积很少,主要集中在内蒙古东北部的大兴安岭地区.结合 FVC 变化趋势分析,可以看出,CIES 整体随 FVC 的增加而增加,随 FVC 的减少而减少,但 FVC 的显著增加并不一定会带来 CIES 的显著提升.此外,分别统计 3 种主要植被类型(林地、草地、农田)下的 FVC 与 CIES 相关性面积占比,可以看出,显著负相关主要集中在农田地区,面积占比超过 98%,显著正相关则主要分布在草地和农田地区,面积占比均在 49%以上,这表明草地和农田地区的生态系统服务对植被覆盖的变化更加敏感.

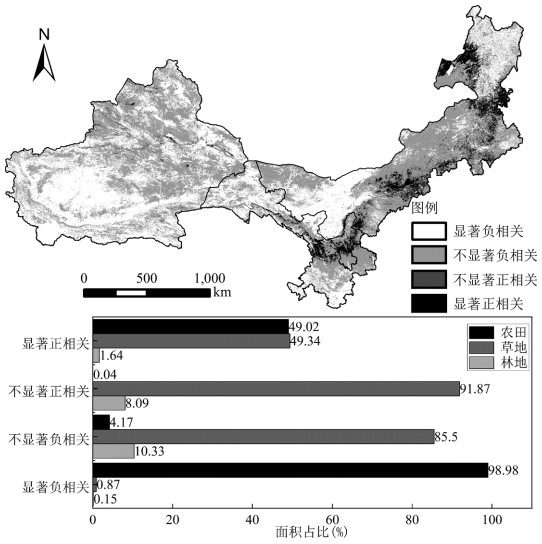


图 7　北方干旱半干旱区 FVC 与 CIES 的相关性

Fig.7　The correlation between FVC and CIES in arid and semi-arid regions of North China

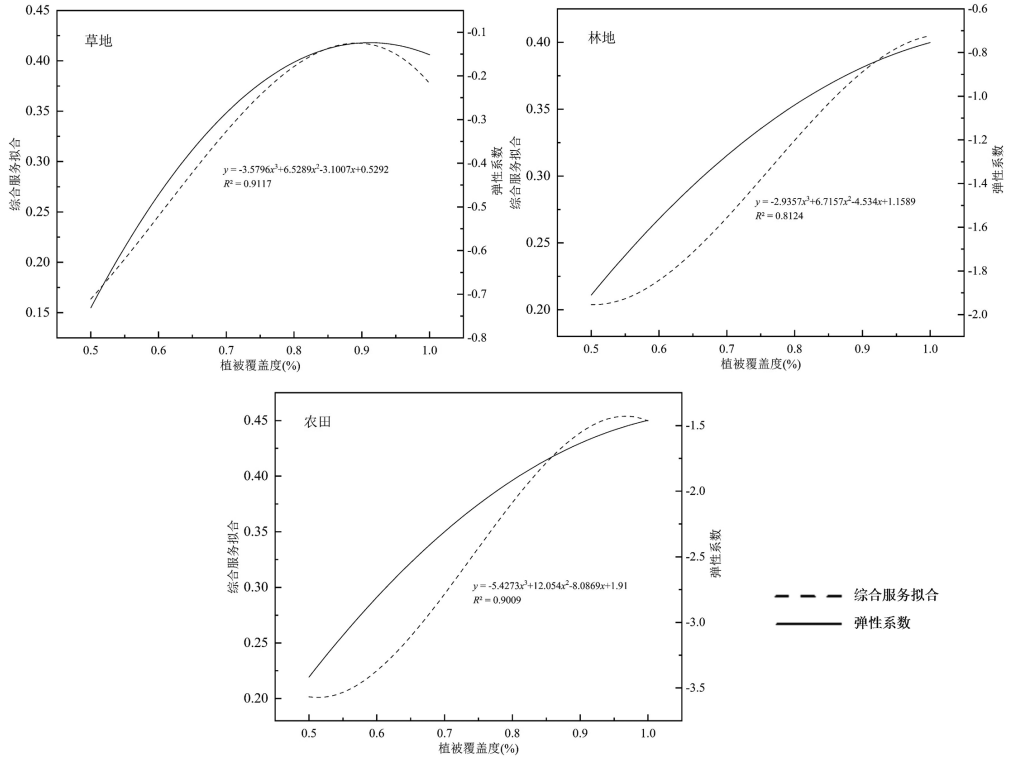


图 8　不同植被类型服务综合指数和弹性系数随植被覆盖度的变化

Fig.8　Changes in comprehensive index and elasticity coefficient of different vegetation types with vegetation coverage

2.2.3 植被覆盖对生态系统服务的阈值效应 植被覆盖变化对不同植被类型分区下生态系统服务的影响趋势各异,且植被覆盖变化对生态系统服务功能的促进作用存在阈值,超过该阈值后植被恢复对生态系统服务的促进作用将减弱.综合 CIES 指数和 FVC 定量分析区域尺度植被覆盖变化对生态系统服务总体影响的趋势,并识别影响的阈值(图 8).草地区域 CIES 指数随 FVC 的增加呈现先增加后减少的趋势,FVC 达到 0.90 时,生态系统服务综合指数达到最大值;弹性系数同样呈现先增加后减少的变化曲线,但下降速度较平缓,在 FVC 为 0.87 时弹性系数达到最大,即植被覆盖对生态系统服务的影响达到最大强度.超过阈值,FVC 的影响强度降低,植被改善对生态系统服务的提升趋于减弱.林地区域 CIES 指数随 FVC 增加呈持续增加趋势,增加速度先减少后加速,弹性系数的变化显示,林地植被覆盖对生态系统服务的影响强度持续增加,表明林地区域生态系统服务随植被覆盖增加而增加.农田地区 CIES 随 FVC 的增加呈先下降后上升而后再下降的趋势,植被覆盖度达到 0.93 时,生态系统服务综合指数达到最大值,弹性系数的变化显示,农田地区植被覆盖对生态系统服务的促进作用持续增加,表明农田地区生态系统服务随植被覆盖增加而增加.

3 讨论

3.1 北方干旱半干旱区植被覆盖变化特征

北方干旱半干旱区植被覆盖空间差异明显,植被覆盖水平以半干旱气候区与干旱气候区过渡地带为明显分界,该区域为农牧交错带地区,生态环境极为脆弱,是遏制中国荒漠化东移的重要生态屏障.总体而言,2000~2023 年间北方干旱半干旱区植被覆盖呈增加趋势,植被状况得到了一定程度的改善,这与前人的研究结论一致[34].在过去的二十多年内,为改善北方干旱半干旱区生态环境,中国政府开展了诸如水土保持、退耕还林还草、三北防护林建设以及阿拉善荒漠治理等一系列大规模生态工程,极大改善了区内植被状况[35-36].此外,随着气候变暖和降水增加,生态工程的实施叠加气候变化的影响,也加速了北方干旱半干旱区植被的恢复[37-38].

3.2 生态系统服务对植被覆盖度的响应

生态系统变化是一个受多种因素耦合作用的动态过程,其会在短时间内受某一生态因素的变化出现大幅度波动[39].目前的研究也多着眼于小空间尺度、短时间尺度下的空间格局变化,缺少大空间尺度、长时间序列下的动态分析[27].植被变化是生态系统服务变化的主要驱动因素,生态系统服务对 FVC 变化的响应需要在针对性更强的评估框架下实现量化分析.本文针对 FVC 与 CIES 的分析表明,北方干旱半干旱区植被覆盖变化对生态系统服务变化整体呈正相关,但植被覆盖的变化并不能完全主导生态系统服务的变化.此外,植被覆盖对生态系统服务具有阈值效应,草地的阈值相较于林地和农田稍低,表明不同植被类型对生态系统服务的敏感性存在差异.

本文在计算生态系统服务方面针对北方干旱半干旱区生态环境特点选取土壤保持服务、产水服务和碳固定服务三种服务类型,但是这三种服务类型难以充分表征区域生态系统服务状态,未来研究可以考虑增加生态系统服务类型,如粮食供给服务、防风固沙服务等.此外,植被覆盖的阈值效应有明显的尺度依赖性[40],阈值的出现随空间尺度不同和植被种类的不同而改变,因此未来可以在多尺度条件下开展阈值识别研究.在实施大规模生态修复工程时,可以将植被覆盖作为重要修复手段,通过定量识别不同植被类型和地形区下生态系统服务对植被覆盖度的响应阈值实现对生态修复的科学调控和精细化管理,促进资源的合理利用[27, 41].

4 结论

4.1 2000~2023 年北方干旱半干旱区植被覆盖水平整体呈现西低东高、北低南高的格局,高值区主要分布在研究区东北部的大兴安岭地区、南部的秦岭山区以及西北部的伊犁河谷等地.植被覆盖增加地区面积占比为 40.01%,显著增加的地区主要集中在东部和南部地区,显著减少的地区主要集中在西部的沙漠戈壁地区.

4.2 北方干旱半干旱区生态系统服务整体由南向北逐渐减少,高值区主要集中在甘肃省南部、新疆西北部等地,低值区主要集中在内蒙古中西部、宁夏北部等地.北方干旱半干旱区生态系统服务整体呈增加趋势,呈增加趋势的地区面积占比为 85.01%.生态系统服务显著减少的地区面积占比仅 0.65%,主要

集中在新疆西北部地区.

4.3　北方干旱半干旱区植被覆盖的改善可以促进区域植被碳固定能力、水土保持能力和水源涵养能力的提升,CIES 从 0.09 增至 0.23,整体生态系统服务也得到提升.草地和农田地区生态系统对植被覆盖的变化更敏感,在 FVC 分别达到 0.87 和 0.93 时达到阈值,超过阈值后其对生态系统的促进作用趋于弱化.而林地生态系统服务则随 FVC 持续增加而稳步提升.

参考文献：

[1] Wang B, Gao P, Niu X, et al. Policy-driven China's grain to green program: Implications forecosystem services [J]. Ecosystem Services, 2017,27:38-47.

[2] Eeb K H, Kastner T, Plutzar C, et al. Unexpectedly large impact of forest management andgrazing on global vegetation biomass [J]. Nature, 2018,553:73-76.

[3] Li X, Li Y, Chen A, et al. The impact of the 2009/2010 drought on vegetation growth and terrestrial carbon balance in Southwest China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019,269:239-248.

[4] 曹　莹,曾　彪,张富广,等.黄河上游水源涵养区植被恢复合理目标及恢复策略 [J]. 生态学报, 2024,44(18):8219-8233.
Cao Y, Zeng B, Zhang F G, et al. Reasonable target and restoration strategies of vegetation restoration in a water conservation area of the upper Yellow River Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(18): 8219-8233.

[5] 张　琨,吕一河,傅伯杰,等.黄土高原植被覆盖变化对生态系统服务影响及其阈值 [J]. 地理学报, 2020,75(5):949-960.
Zhang K, Lyu Y H, Fu B J, et al. The effects of vegetationcoverage changes on ecosystemservice and their threshold in the Loess Plateau [J]. Acta Geographica Sinica, 2020,75(5):949-960.

[6] 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.

[7] Xu X, Zhang D J, Zhang Y, et al. Evaluating the vegetation restoration potential achievement of ecological projects: acase study of Yan'an, China [J]. Land Use Policy, 2020,90:104290.

[8] 吕振涛,李生宇,范敬龙,等.蒙古国植被自然恢复潜力 [J]. 中国沙漠, 2021,41(5):192-201.
Lv Z T, Li S Y, Fan J L, et al. Natural restoration potential of vegetation in Mongolia [J]. Journal of Desert Research, 2021,41(5): 192-201.

[9] 牛丽楠,邵全琴,刘国波,等.黄土高原生态恢复程度及恢复潜力评估 [J]. 自然资源学报, 2023,38(3):779-794.
Niu L N, Shao Q Q, Liu G B, et al. Evaluation on the degree and potential of ecologicalrestoration in Loess Plateau [J]. Journal of Natural Resources, 2023,38(3):779-794.

[10] Gao Y, Zhong B L, Yue H, et al. A degradation threshold for irreversible loss of soil productivity: a long-term case study in China [J]. Journal of Applied Ecology, 2011,48(5):1145-1154.

[11] 张文强,孙从建,李新功.晋西南黄土高原区植被覆盖度变化及其生态效应评估 [J]. 自然资源学报, 2019,34(8):1748-1758.
Zhang W Q, Sun C J, Li X G. Vegetation cover change and ecological effect assessment in theLoess Plateau of Southwest Shanxi province based on remotesensing image [J]. Journal of Natural Resources, 2019,34(8):1748-1758.

[12] 曲　怡,饶良懿.黄河中游地区生态敏感性时空分异特征 [J]. 环境科学, 2025,46(7):4568-4579.
Qu Y, Rao L Y. Spatio-temporal differentiation characteristics of ecological sensitivity in the middle reaches of the Yellow River [J]. Environmental Science, 2025,46(7):4568-4579.

[13] 张雄一,邵全琴,宁　佳,等.长江上游地区生态恢复程度及植被恢复潜力空间差异分析 [J]. 地理研究, 2023,42(7):1904-1920.
Zhang X Y, Shao Q Q, Ning J, et al. Spatial difference analysis of ecological restoration degree andvegetation restoration potential in the upper reaches of theYangtze River [J]. Geographic research, 2023,42 (7):1904-1920.

[14] 高江波,赵志强,李双成.基于地理信息系统的青藏铁路穿越区生态系统恢复力评价 [J]. 应用生态学报, 2008,19(11):2473-2479.
Gao J B, Zhao Z Q, Li S C. Evaluation of ecosystem resilience across the Qinghai-Tibet railway Based on GIS [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008,19(11):2473-2479.

[15] 张　骞,马　丽,张中华,等.青藏高寒区退化草地生态恢复:退化现状、恢复措施、效应与展望 [J]. 生态学报, 2019,39(20):7441-7451.
Zhang Q, Ma L, Zhang Z H, et al. Ecological restoration ofdegraded grassland in Qinghai-Tibet alpine region: Degradation status, restorationmeasures, effects and prospects. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(20):7441-7451.

[16] 王　聪,伍　星,傅伯杰,等.重点脆弱生态区生态恢复模式现状与发展方向 [J]. 生态学报, 2019,39(20):7333-7343.
Wang C, Wu X, Fu B J, et al. Ecological restoration in the key ecologically vulnerable regions:Current situation and development direction. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(20):7333-7343.

[17] 赵恒谦,刘轩绮,刘　鬲,等.京津风沙源区 NPP 时空变化及其对治理工程实施的响应 [J]. 生态学报, 2024,44(6):2406-2419.
Zhao H Q, Liu X Q, Liu G, et al. Spatio-temporal variation of Net Primary Productivity in the Beijing-Tianjin sandstorm source area and its response to the implementation of control projects [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(6):2406-2419.

[18] 孙泽兴,李汶怡,刘嘉敏,等.陕西省生态恢复综合效益评估 [J]. 生态学报, 2022,42(7):2718-2729.
Sun Z X, Li W Y, Liu J M, et al. Evaluation of comprehensive benefit for ecological restoration in Shaanxi Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(7):2718-2419.

[19] 张镱锂,胡忠俊,祁　威,等.基于 NPP 数据和样区对比法的青藏高原自然保护区保护成效分析 [J]. 地理学报, 2015,70(7):1027-1040.
Zhang Y L, Hu Z J, Qi W, et al. Assessment of protection effectiveness of nature reserves onthe Tibetan Plateau based on net primary production andthe large-sample-comparison method [J]. Acta Geographica Sinica, 2015,70(7):1027-1040.

[20] Wang C, Li W, Sun M, et al. Exploring the formulation of ecological

management policies by quantifying interregional primary ecosystem service flows in Yangtze River Delta region, China [J]. Journal of Environmental Management, 2021,284:112042.

[21] Venter Z, Hawkins H, Cramer M, et al. Mapping soil organic carbon stocks and trends with satellite-driven high resolution maps over South Africa [J]. Science of the Total Environment, 2021,771:145384.

[22] 陈 曦,胡汝骥,姜逢清,等.中国干旱区自然地理 [M]. 2015.
Chen X, Hu R J, Jiang F Q, et al. Natural Geography of Arid Regions in China [M]. 2015.

[23] 尤 其,许宝荣,邹松兵,等.中国北方干旱半干旱区植被—气候响应关系特征 [J]. 中国沙漠, 2023,43(4):274-287.
You Q, Xu B R, Zou S B, et al. The vegetation-climate quantitative relationship and characteristics in arid and semi-arid region of northern China [J]. Journal of Desert Research, 2023,43(4):274-287.

[24] 陈 硕,赵文武,韩 逸.中国干旱半干旱区植被降水利用效率时空变化特征及影响因素分析 [J]. 生态学报, 2023,43(24):10295-10307.
Chen S, Zhao W W, Han Y. Spatio-temporal variation of vegetation precipitation use efficiency and influencing factorsin arid and semi-arid areas of China [J]. Acta Ecologica Sincia, 2023,43(24):10295-10307.

[25] 井梅秀,蔡 福,王学江,等.三江源区植被覆盖度空间特征 [J]. 干旱区资源与环境, 2020,34(2):141-147.
Jing M X, Cai F, Wang X J, et al. The vegetation coverage spatial characteristics in the Three-River source region [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020,34(2):141-147.

[26] Fu B J, Zhao W W, Chen L D, et al. Assessment of soil erosion at large watershed scale using RUSLE and GIS: A case study in the Loess Plateau of China [J]. Land Degradation & Development, 2005, 16(1):73-85.

[27] 王晓峰,白 娟,冯晓明,等.秦巴山区生态系统服务对植被覆盖变化的响应阈值 [J]. 生态学报, 2024,44(15):6811-6827.
Wang X F, Bai J, Feng X M, et al. Thresholds for ecosystem service to changes of vegetation cover in the Qinba Mountain region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(15):6811-6827.

[28] Feng X M, Fu B J, Lu N, et al. How ecological restoration alters ecosystem services: An analysis of carbon sequestration in China's Loess Plateau [J]. Scientific Reports, 2013,3:2846.

[29] Ge W, Deng L, Wang F, et al. Quantifying the contributions of human activities and climate change to vegetation net primary productivity dynamics in China from 2001 to 2016 [J]. Science of the Total Environment, 2021,773:145648.

[30] 刘文瑞,李晓婷,李 彤,等.基于MODIS和CASA模型的伊春市森林植被NPP变化特征及其影响因子分析 [J]. 生态学杂志, 2022,41(1):150-158.
Liu W R, Li X T, Li T, et al. Spatiotemporal variations of forest NPP and related driving factors based on MODIS and CASA models in Yichun [J]. Chinese Journal of Ecology, 2022,41(1):150-158.

[31] 石智宇,王雅婷,赵 清,等.2001~2020 年中国植被净初级生产力时空变化及其驱动机制分析 [J]. 生态环境学报, 2022,31(11):2111-2123.
Shi Z Y, Wang Y T, Zhao Q, et al. The spatiotemporal changes of NPP and its driving mechanisms in China from 2001 to 2020 [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022,31(11):2111-2123.

[32] 樊 奇.中国共产党领导植树造林的百年探索及其优化路径 [J]. 干旱区资源与环境, 2021,35(10):1-6.
Fan Q A. Century of exploration of afforestation led by the Chinese Communist Partyand its optimization path [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021,35(10):1-6.

[33] 闫 丰,李晨阳,王 靖,等.京津冀生态屏障区植被 NPP 时空演变驱动力定量解析 [J]. 环境科学, 2025,46(1):327-339.
Yan F, Li C Y, Wang J, et al. Quantitative analysis of the drivers of the spatio-temporal evolution of vegetation NPP in the Beijing-Tianjin-Hebei Ecological Barrier Area [J]. Environmental Science, 2025,46(1):327-339.

[34] 李卓忆,杨 庆,马柱国,等.中国北方干旱半干旱区植被对气候变化和人类活动的响应 [J]. 大气科学, 2024,48(3):859-874.
Li Z Y, Yang Q, Ma Z G, et al. Responses of vegetation to climate change and human activities in the arid and semiarid regions of Northern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2024, 48(3):859-874.

[35] 王玉涛.2000 年以来人类活动对中国植被净初级生产力的影响 [D]. 兰州:西北师范大学, 2020.
Wang Y T. Human impacts on vegetation net primary productivity in China since 2000 [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2020.

[36] 欧阳玲,马会瑶,王宗明,等.气候变化与人类活动对内蒙古东部草地净初级生产力的影响 [J]. 生态学报, 2020,40(19):6912-6924.
Ouyang L, Ma H Y, Wang Z M, et al. Impacts of climate change and human activities on net primary productivity of grassland in the eastern Inner Mongolia [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(19):6912-6924.

[37] Liang L Q, Cuo L, Liu Q. Mass balance variation and associative climate drivers for the dongkemadi Glacier in the central Tibetan Plateau [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, 124(20):10814-10825.

[38] 赵东升,郭彩赟,郭义强,等.气候变化对"山水林田湖草"重大生态工程的影响 [J]. 生态学报, 2019,39(23):8780-8788.
Zhao D S, Guo C Y, Guo Y Q, et al. Effects of climate change on major ecological projects of mountains-riversforests-farmlands-lakes-grasslands [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(23):8780-8788.

[39] Zheng H, Li Y F, Robinson B E, et al. Using ecosystem service trade-offs to inform water conservation policies and management practices [J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2016,14(10): 527-532.

[40] Peng J, Tian L, Liu Y X, et al. Ecosystem services response to urbanization in metropolitan areas: Thresholds identification [J]. Science of the Total Environment, 2017,607(2017):706-714.

[41] Cao S X, Chen L, Shankman D, et al. Excessive reliance on afforestation in China's arid and semi-arid regions: Lessons in ecological restoration [J]. Earth-Science Reviews, 2011,104(4):240-245.

作者简介：石智宇(1998-),男,江苏徐州人,中国矿业大学博士研究生,主要从事生态遥感与环境变化研究.shizhiyu98@163.com.