

固碳增汇目标下北方防沙带山水林田湖草沙生态保护 修复分区研究

唐园清, 龚直文¹, 黄怀玉, 高建中

(西北农林科技大学经济管理学院, 陕西 杨陵, 712100)

摘 要:【目的】北方防沙带是山水林田湖草沙一体化保护和修复工程实施的重难点区域。该区域生态系统敏感脆弱, 大量受损自然生态系统亟待恢复, 治理中缺乏系统性、整体性、区域性, 导致资源配置效率不高。固碳增汇目标下, 以生态系统固碳功能、生命共同体耦合协调性与生态安全性为核心, 综合开展北方防沙带山水林田湖草沙生态保护和修复分区识别, 提出差异化保护和修复策略, 以实现区域固碳功能持续提升, 为北方防沙带山水林田湖草沙系统治理提供支撑。【方法】依据“生态评价—问题诊断—分区施策”的思路, 在构建山水林田湖草沙生命共同体评价指标体系的基础上测度生命共同体耦合协调性, 运用 InVEST 模型测算生态系统碳储量, 构建景观生态风险指数模型定量评估区域生态风险, 依据三者的变化趋势与现状特征识别主要生态问题。运用象限划分法构建了 9 类生态分区, 并提出差异化保护和修复策略。【结果】1) 北方防沙带山水林田湖草沙生命共同体处于濒临失调状态, 2000~2020 年生命共同体耦合协调度总体上升了 0.0053; 2) 研究期内北方防沙带碳储量波动下降了 26.69Tg, 固碳功能分布呈现东高西低的特征, 草地对生态系统碳储量的贡献最大; 3) 北方防沙带生态风险呈中西高东部低的分布特征, 研究期内景观生态风险指数波动下降了 0.004; 4) 结合生命共同体耦合协调性、固碳功能和生态风险三个维度, 划分了改良提质优先区和重点区、保育涵养重点区和一般区、修复治理优先区和重点区及一般区 9 类分区, 可为北方防沙带山水林田湖草沙一体化保护和修复分区分管与精准施策提供支撑。【结论】北方防沙带山水林田湖草沙生命共同体耦合协调性逐渐提升, 生态系统固碳功能波动下降, 区域生态安全性总体改善。根据分区识别结果, 北方防沙带内塔里木河流域、内蒙古高原区东部、河西走廊西北段应以修复治理策略为主, 京津冀山地平原区、内蒙古高原区中西部以保育涵养策略为主, 以管控保护和改良提质策略为主的区域零散分布于天山和阿尔泰山森林草原区及内蒙古高原区中部。

关键词: 碳储量; 山水林田湖草沙; 耦合协调; 生态修复分区; 北方防沙带

Study on Ecological Protection and Restoration Zoning of Mountain-River-Forest-Farmland-Lake-Grassland-Sand in the Northern Sand-Prevention Belt Under the Carbon Sink Target

TANG Yuan-qing, GONG Zhi-wen*, HUANG Huai-yu, GAO Jian-zhong

(College of Economics and Management, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: 【Objective】The Northern Sand-Prevention Belt is a key and difficult area for the implementation of the integrated protection and restoration project for mountains, water, forests, farmlands, lakes, grasses and sands. The ecosystem in this region is sensitive and fragile, with a large number of damaged natural ecosystems in urgent need of restoration, and the lack of systematic, holistic and regional management has led to inefficient resource allocation. Under the goal of carbon sequestration and sink enhancement, with the ecosystem carbon sequestration

作者简介: 唐园清 (2000-), 女, 广西桂林人, 硕士, 研究方向为资源经济与环境管理。E-mail: 15078930388@163.com;

¹通讯作者: 龚直文 (1980-), 男, 福建寿宁人, 副教授, 博士, 研究方向为林业经济理论与政策研究。E-mail: gongzhiwen@nwfau.edu.cn

基金项目: 陕西省社会科学基金项目 (2020R053); 陕西省自然科学基金研究计划项目 (面上 2023-JC-YB -192)。

function, life community coupling coordination and ecological security as the core, we will comprehensively carry out the identification of ecological protection and restoration zones of mountains, water, forests, fields, lakes, grasses and sands in the Northern Sand-Prevention Belt, and put forward a differentiated protection and restoration strategy, so as to realize the sustainable enhancement of regional carbon sequestration function, and to provide support for systematic governance of the Northern Sand-Prevention Belt. 【Method】 This article uses the concept of "ecological evaluation, problem diagnosis, and zonal policy implementation" to separate the integrated protection and restoration regions of mountains, water, forests, lakes, grasses, and sands in the northern sand control belt under the heading of carbon sinks. First, we compute the ecosystem carbon stock, quantify the level of life community coupling coordination, and evaluate the ecological risk index. The patterns of the aforementioned three indicators were then combined with the present features to create the ecological zones, and distinct preservation and restoration measures were suggested. 【Result】 1) The life community of mountains, water, forests, lakes, lakes, grasses and sands in the Northern Sand-Prevention Belt is on the verge of dislocation, and the degree of coordination of the coupling of the life community has increased by 0.0053 from 2000 to 2020; 2) During the study period, the carbon stock in the Northern Sand-Prevention Belt fluctuated down by 26.69 Tg, and the distribution of carbon sequestration function showed the characteristic of high in the east and low in the west, with grassland contributing the most to the ecosystem carbon stock; 3) the ecological risk of the Northern Sand-Prevention Belt showed the characteristic of high in the middle and west and low in the east, and the fluctuation of the ecological risk index of the landscape decreased by 0.004 during the study period; 4) Nine types of zones are categorized into priority and key zones for upgrading and improvement, key zones and general zones for conservation and nourishment, key zones and general zones for control and protection, priority zones and key zones for restoration and management, and general zones by combining the coordination of life community coupling, carbon sequestration function, and ecological risk. With zonal management and precision policymaking, this can help the combined protection and restoration of the Northern Sand-Prevention Belt's mountains, water, forests, lakes, grasslands, and sands.

【Conclusion】 The coordination of the coupled life community of mountains, water, forests, fields, lakes, grasses and sands in the Northern Sand-Prevention Belt has gradually improved, the fluctuation of ecosystem carbon sequestration has decreased, and the regional ecological security has generally improved. According to the results of zonal identification, the Tarim River Basin, the eastern part of the Inner Mongolia Plateau Region and the northwestern part of the Hexi Corridor in the Northern Sand-Prevention Belt should focus on restoration and management strategies, the Beijing-Tianjin-Hebei mountainous plains and the central and western parts of the Inner Mongolia Plateau Region should focus on conservation and nourishment strategies, and the areas focusing on control and protection and improvement and quality enhancement strategies should be scattered in the Tianshan Mountains, Altay Mountains, and the central part of the Inner Mongolia Plateau Region.

Keywords: carbon storage; Mountain-River-Forest-Farmland-Lake-Grassland-Sand; ecological restoration zoning; coupled coordination; the Northern Sand-Prevention Belt

1 引言

在全球变暖的气候挑战下,减缓全球气候变暖、稳定气候格局成为了世界各国的共识。为实现“双碳”目标,在习近平生态文明思想指引下,我国作出了以山水林田湖草沙系统治理实现固碳增汇的谋划和部署(周妍等, 2023)。北方防沙带作为“三区四带”之一,是我国重要的生态安全屏障,也是生态环境最敏感脆弱的区域之一(Li et al., 2021)。过去,北方防沙带区域内陆续开展了三北防护林体系建设、天然林保护工程、京津风沙源治理等生态保护和修复工程,生态环境整体改善,但仍存在林草退化(纪平等, 2022)、荒漠化严重(Chen et al., 2021)、生态屏障功能不稳定(连虎刚等, 2023)、综合治理体系不健全等问题。这迫切需要更新过去单要素单目标的治理理念,运用生命共同体理念开展北方防沙带山水林田湖草沙系统

治理。

“山水林田湖草沙生命共同体”指各子系统在彼此依赖、相互作用中形成命脉相连的有机整体,其中不仅包含自然要素的依存关系,还体现了人与自然和谐统一的内在要求(张杨等,2022)。党的十八大以来,我国以生命共同体理念为指导,实施了一系列山水工程,有力推动了单要素、单目标整治向多要素、复合目标综合治理转变,破解了生态管理中各自为政、九龙治水的困境(成金华等,2019)。目前,我国山水工程累计已完成生态保护修复面积高达五百多万公顷,工程区碳汇效益显著提升(周妍等,2023),展现了山水林田湖草沙系统治理目标与固碳增汇需求的高度契合。因此,山水林田湖草沙一体化保护和修复的重点在于,在生态保护修复分区识别基础上,提出分区分类修复策略,提升区域固碳增汇能力。

目前,有关“山水林田湖草沙生命共同体”的研究主要集中于理念阐述与路径构想(张杨等,2022;张利民等,2024)、生态健康评价(吕思思等,2019;苏敏等,2024)、耦合协调性评价(张中秋等,2021;李子辉等,2023)等方面。生态保护和修复分区研究中,大多从生态安全格局(苏冲等,2019;GAO et al.,2022)、生态系统功能(付扬军和师学义,2023;李勇等,2023)、生态系统服务供需(王林艳等,2024;Liang et al.,2024)、生态要素耦合(Li et al.,2021;谢三桃等,2023)及生态效益(沈钰仟等,2023;李晓文等,2023)等角度,进行分区识别和修复策略制定。这些视角虽然为科学推进山水林田湖草沙系统治理提供了重要参考,但忽略了生命共同体耦合协调性对生态功能可持续性的影响,且没有注重分区结果对实际规划建设的支撑作用。生命共同体内各子系统间存在着相互制约或相互增益的耦合协调关系,这种关系的强度和方向决定了生命共同体的稳定性和为人类提供福祉的能力(张中秋等,2021;萨娜等,2023)。固碳增汇目标下生命共同体的生态保护和分区修复,需要综合各子系统协调性、整体的生态安全性(王田雨等,2024)。因为,生命共同体耦合协调决定了固碳功能可持续发挥的内在基础,只有各子系统协同优化时,生命共同体才能在协调统一中循环发展,可持续地发挥生态服务功能;而区域生态安全状况,衡量了固碳功能发挥是否具备安全、稳定的外部环境,可用景观风险评价来表征(曹祺文等,2018)。因此,融合生命共同体耦合协调度、景观生态风险指数与生态系统固碳效应三个指标到山水林田湖草沙一体化保护和修复分区研究中,有利于更科学精准地划定生态系统治理分区、制定保护和修复策略,实现碳增汇目标。

基于上述分析,本文从生态系统固碳功能、生命共同体耦合协调性和生态安全性结合的新视角出发,依据“生态评价—问题诊断—分区施策”的分析思路层层递进,以生态系统协调稳定和固碳功能可持续提升为目标,构建北方防沙带生态保护和修复三级分区。首先,开展生态评价,构建山水林田湖草沙综合评价体系以评估生命共同体耦合协调性,运用 InVEST 模型测算生态系统碳储量,构建景观生态风险模型评估生态风险指数,厘定北方防沙带生命共同体耦合协调性、固碳功能与生态风险的现状与变化情况;其次,进行主要生态问题诊断,根据 2000~2020 年生命共同体耦合协调度、碳储量与生态风险指数变化趋势与现状特征,识别各区域的主要生态问题;最后,提出分区施策方案解决生态问题,依据各区域资源禀赋和生态现状,将研究区划分为一、二、三级保护修复区,因地制宜提出保护和修复策略,以期“双碳”愿景下北方防沙带山水林田湖草沙一体化保护和修复精准施策提供支撑。

2 研究区概况与数据来源

2.1 研究区概况

北方防沙带横跨我国北部,呈细长带状,区域范围广,涉及北京、内蒙古、甘肃、新疆等 9 个省(区、市) 181 个区县。北方防沙带位于北方农牧交错带、西北荒漠绿洲交错带,是我国北方重要的生态安全屏障。森林覆盖率 14.46%,区域草地面积占全国草地总面积的 27.02%。《北方防沙带生态保护和修复重大工程建设规划(2021—2035 年)》依据自然地理格局,将北方防沙带全域优化为天山和阿尔泰山森林草原区、塔里木河流域、河西走廊、内蒙古高原区和京津冀山地平原区 5 个板块(图 1)。

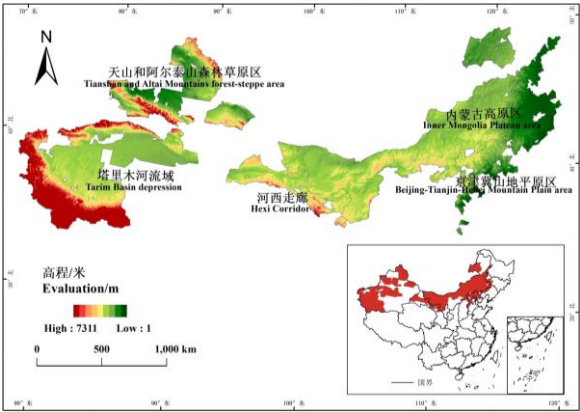


图 1 研究区示意图

Fig. 1 Location of the study area

(注：基于标准地图服务系统下载的标准地图号 GS(2019)1822 号的标准地图制作，底图无修改。)

2.2 数据来源

本文矢量边界数据来源于国家基础信息中心的全国 1:100 万基础地理数据库(<http://www.webmap.cn/>); 2000 年、2010 年、2020 年三期土地利用/覆被数据均来源于全球地表覆盖数据集 GlobeLand 30 产品官网 (<http://www.globallandcover.com/>), 将其重分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 大地类; 气温和降水数据来源于国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/>), 采用平均值合成预处理; DEM 数据来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>), 提取出坡度、起伏度、沟壑长度数据; 植被覆盖度数据来源于国家青藏高原数据中心 (<https://data.tpdac.ac.cn/>), 采用最大值合成法预处理; NPP 数据来源于美国国家航空航天局发布的 (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>) MOD17A3HGF 产品; 水系数据来自 OpenStreetMap (<http://www.openstreetmap.org/>); 人口密度数据来源于 WorldPop (<http://www.worldpop.org/>)。

3 研究方法

3.1 山水林田湖草沙生命共同体耦合协调性评价

3.1.1 山水林田湖草沙生命共同体综合水平评价

生命共同体不仅是自然子系统的有机组合, 还包含着人与自然生态系统的相互作用。为测度生命共同体耦合协调度, 基于综合性、客观性和数据可得性原则, 在参考前人研究成果基础上 (吕思思等, 2019; 张中秋等, 2021; 苏敏等, 2014), 本文将生命共同体划分为山、水、林、田、湖、草、沙、人子系统, 从各子系统数量和质量特征出发构建综合评价指标体系, 评估各子系统基本状态和发展水平。其中, 湖和水子系统共同反映了水资源数量与质量, 故对湖、水子系统统一评价。本文将研究区划分为 $5\text{km} \times 5\text{km}$ 的网格, 基于格网尺度测算生命共同体综合评价指数。首先, 对评价指标进行极差标准化, 计算公式为:

正向指标:

$$U_{ij} = \frac{X_{ij} - \min X_{ij}}{\max X_{ij} - \min X_{ij}} \quad (1)$$

负向指标:

$$U_{ij} = \frac{\max X_{ij} - X_{ij}}{\max X_{ij} - \min X_{ij}} \quad (2)$$

式中, U_{ij} 为标准化值, X_{ij} 为原始值, $\max X_{ij}$ 和 $\min X_{ij}$ 分别为原始值的最大值和最小值。

表 1 山水林田湖草沙生命共同体评价指标体系

Table 1 Comprehensive evaluation index system of life community

目标层	准则层	指标层	方向	权重	指标说明
-----	-----	-----	----	----	------

Target Layer	Criterion Layer	Index Layer	Direction	Weight	Indicator Description
北方防沙带 山水林田湖草沙 生命共同体综合 评价体系 Comprehensive evaluation system of mountain-water-forest-farmland-lake-grass-sand life community in the Northern Sand-Prevention Belt	山子系统 Mountain subsystem	相对高差 relative height difference	负 negative	0.74	地貌起伏程度 topographic undulation
		山地覆盖率 woodland coverage rate	负 negative	0.05	山地、丘陵面积占比 mountain area ratio
		沟壑密度 gully density	负 negative	0.21	地面在沟壑切割下的破碎程度 ground fragmentation degree
	水、湖子系统 Water and Lake subsystem	年降水量 annual precipitation	正 positive	0.10	水资源补给量 water resources replenishment
		水面率 the rate of water	正 positive	0.62	现有水资源面积占比 proportion of water resources area
		水网密度 water network density	正 positive	0.28	水分布的均匀程度 uniformity of water distribution
	林子系统 Forest subsystem	森林覆盖率 forest coverage rate	正 positive	0.30	林地规模 forest land scale
		林地植被覆盖度 FVC of forest	正 positive	0.34	森林茂密程度和生长态势 forest density and growth trend
		森林净初级生产力 NPP of forest	正 positive	0.36	林子系统生产力水平 forest productivity
	田子系统 Farmland subsystem	耕地覆盖率 farmland coverage rate	正 positive	0.32	耕地规模 farmland scale
		耕地植被覆盖度 FVC of farmland	正 positive	0.34	作物茂密程度和生长态势 crop density and growth trend
		耕地净初级生产力 NPP of farmland	正 positive	0.34	田子系统生产力水平 farmland productivity
	草子系统 Grass subsystem	草地覆盖率 grass coverage rate	正 positive	0.26	草地规模 grass land scale
		草地植被覆盖度 FVC of grass	正 positive	0.35	草地茂密程度和生长态势 grass density and growth trend
		草原净初级生产力 NPP of grass	正 positive	0.39	草子系统生产力水平 grass productivity
	沙子系统 Sand subsystem	沙地覆盖率 sand coverage rate	负 negative	0.15	沙地、沙漠规模 sand land scale
		沙地植被覆盖度 FVC of sand	正 positive	0.26	沙地、沙漠植被退化程度 Sandy vegetation growth trend
		沙地净初级生产力 NPP of sand	正 positive	0.59	沙地生境生产能力和质量状况 sand productivity
	人子系统 People subsystem	建设用地密度 construction land density	负 negative	0.59	人类对生命共同体的干扰程度 Degree of human interference
		人口密度 population density	负 negative	0.41	人口对生态环境的压力强度 Human stress intensity

进行数据标准化后，运用熵值法确定指标权重（表 1）。进一步，采用综合指数模型测算 2000 年、20

10 年、2020 年 3 个时点北方防沙带生命共同体综合水平，计算公式为：

$$S_i = \sum_{j=1}^m W_j \times U_{ij} \quad (3)$$

$$T = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^n S_i \quad (4)$$

式中： S_i 为*i*子系统的综合得分， W_j 为*j*指标的权重； T 为生命共同体综合评价指数，由于将生命共同体各子系统视作同等重要，故赋予各子系统的权重均为 1/7。

3.1.2 山水林田湖草沙生命共同体耦合协调度测算

生命共同体耦合协调度反映了山、水、林、田、湖、草、沙、人各子系统相互作用关系的强度和方向。运用耦合协调度模型测算生命共同体内各子系统协调程度，计算公式如下：

$$C = \left[\frac{\prod_{i=1}^n S_i}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i \right)^n} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (5)$$

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (6)$$

式中： C 为生命共同体子系统耦合度； D 为生命共同体耦合协调度， D 值越大说明生命共同体各子系统协同效应越强，其取值范围为[0,1]；其余参数涵义同上。

3.2 生态系统碳储量

3.2.1 碳储量估算

InVEST 模型在碳储量测算上稳定性和可信度较高（邓元杰等，2020）。本文运用 InVEST 模型 Carbon 模块对北方防沙带生态系统碳储量进行测算。由于死亡有机质碳库数据难以获取，本文仅考虑地上生物量、地下生物量、土壤有机质三大碳库碳储量。计算公式如下：

$$C_i = C_{i\text{-above}} + C_{i\text{-below}} + C_{i\text{-soil}} \quad (7)$$

$$C_{total} = \sum_{i=1}^n S_i \times C_i, \quad (i=1, 2, 3, \dots, n) \quad (8)$$

式中， C_i 为地类*i*的碳密度， $C_{i\text{-above}}$ 、 $C_{i\text{-below}}$ 、 $C_{i\text{-soil}}$ 分别为地类*i*的地上生物量碳密度、地下生物量碳密度、土壤碳密度， S_i 为土地利用类型*i*的面积， C_{total} 为区域碳储量。

3.2.2 碳密度修正

北方防沙带地域跨度广，气候与土壤类型不尽相同，故对天山和阿尔泰山森林草原区、塔里木河流域、河西走廊、内蒙古高原区和京津冀山地平原区五个区域的碳密度分别进行修正。全国水平下各类型土地的碳密度数据主要来源于现有相关研究（李克让等，2003；梁森等，2023），同时现有研究发现生物量碳密度和土壤碳密度受到降水和温度的影响显著（Tang et al.,2018），因此本文借助相关成果（陈光水等，2007；Alam S.A. et al.,2013；徐丽等，2018），结合气温和降水数据对碳密度进行本地化修正，计算方法如下（梁森等，2023）：

考虑降水的回归模型

$MAT \leq 10^\circ\text{C}$ ：

$$C_{SP} = 0.07 \times MAP + 79.1 \quad (9)$$

$$C_{BP} = 0.03 \times MAP + 14.4 \quad (10)$$

$MAT \geq 10^\circ\text{C}$ ：

$$C_{SP}=0.03\times MAP+45.3$$
$$C_{BP}=0.02\times MAP+5.87$$

(1
1)
(1
2)

考虑温度的回归模型
MAP≤400mm:

$$C_{ST}= - 5.8\times MAT+100.5$$
$$C_{BT}= - 1.3\times MAT+16.7$$

(1
3)
(1
4)

MAP≥400mm:

$$C_{ST}= - 3.4\times MAT+157.7$$
$$C_{BT}= - 0.4\times MAT+43$$

(1
5)
(1
6)

式中，MAP 和 MAT 分别为年均降水量和年均气温；C_{SP}和C_{ST}分别为经过降水和气温修正所得的土壤碳密度值；C_{BP}和C_{BT}分别为经过降水和气温修正所得到的生物量碳密度值。

$$K_{SP}=\frac{C_{SP}}{C'_{SP}}, K_{ST}=\frac{C_{ST}}{C'_{ST}}; K_{BP}=\frac{C_{BP}}{C'_{BP}}, K_{BT}=\frac{C_{BT}}{C'_{BT}}$$
$$K_S=Average(K_{SP}, K_{ST})$$
$$K_B=Average(K_{BP}, K_{BT})$$

(1
7)
(1
8)
(1
9)

式中，K_{SP}和K_{ST}分别为考虑降水和气温的土壤碳密度修正系数，C'_{SP}和C'_{ST}分别为全国水平下考虑降水和气温的土壤碳密度值；K_{BP}和K_{BT}分别为考虑降水和气温的生物量碳密度修正系数，C'_{BP}和C'_{BT}分别为全国水平下考虑降水和气温的生物量碳密度值；K_S和K_B分别为土壤碳密度和生物量碳密度的最终修正系数。修正所得碳密度如表 2 所示。经比较，本文修正所得碳密度数据与现有研究结果（陈耀亮等，2013；付宇佳等，2023）差距较小，验证其一定程度上具有准确性与可靠性。

表 2 北方防沙带不同土地利用类型碳密度（Mg/hm²）
Table 2 Carbon density of different land use types in the Northern Sand-Prevention Belt
(Mg/hm²)

区域	碳库	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
area	Carbon pool	mland	forest	grass	water	settlement	Unused land
京津冀山地平原区	C_above	0.15	10.72	1.38	0.06	1.00	0.26
Beijing-Tianjin-Hebei Mountain Plain area	C_below	10.72	29.31	3.45	0.00	2.45	0.00
	C_soil	76.83	90.67	70.80	0.00	49.87	22.25
内蒙古高原区	C_above	0.10	7.03	0.91	0.04	0.66	0.17
Inner Mongolia Plateau area	C_below	1.41	19.22	2.26	0.00	1.61	0.00
	C_soil	73.49	86.73	67.73	0.00	47.70	21.29
河西走廊	C_above	0.19	13.54	1.74	0.08	1.26	0.33
Hexi Corridor	C_below	2.72	36.99	4.35	0.00	3.09	0.00
	C_soil	102.9	121.4	94.8	0.00	66.8	29.8

天山和阿尔泰山森林草原区	C_above	0.11	7.61	0.98	0.05	0.71	0.18
	C_below	1.53	20.79	2.45	0.00	1.74	0.00
Tianshan and Altai Mountains area	C_soil	80.32	94.79	74.02	0.00	52.13	23.27
塔里木河流域	C_above	0.11	8.14	1.05	0.05	0.76	0.20
Tarim Basin depression	C_below	1.64	22.24	2.62	0.00	1.86	0.00
	C_soil	37.79	44.60	34.83	0.00	24.53	10.95

3.3 景观生态风险指数的构建

在综合考虑研究区范围及特性的基础上，本文基于格网尺度将研究区划分为 5km×5km 的网格，选取景观脆弱度指数、干扰度指数构建景观生态风险指数（ERI）（张学斌等，2014）：

$$ERI = \sum_{i=1}^n \frac{A_{ij}}{A_j} (E_i \times R_i) \quad (2)$$

式中： n 为景观类型的数量； A_{ij} 为网格 j 内景观类型 i 的面积， A_j 为网格 j 的面积； E_i 、 R_i 分别为景观类型 i 的干扰度指数和脆弱度指数。

景观干扰度反映了外界对景观的扰动程度，选取破碎度、分离度和优势度三个指标构建景观干扰度指数，分别赋以 0.5、0.3、0.2 的权重值并进行叠加（张学斌等，2014）。景观脆弱度反映了景观类型在面对外界扰动时的响应特性。由于各地类脆弱性从小到大依次为建设用地、林地、草地、耕地、水域、未利用地，故对其脆弱度依次赋值 1、2、3、4、5、6（周汝佳等，2016），归一化处理后得到各景观类型的脆弱度指数 R_i 。计算公式如表 3 所示：

表 3 景观干扰度指数计算公式

Table 3 Calculation formula of landscape disturbance index

景观指数	计算公式	参数含义
landscape index	computing formula	parameter meaning
景观干扰度指数	$E_i = aC_i + bS_i + cD_i$	a 、 b 、 c 为各指标相应权重，且 $a+b+c=1$
景观破碎度指数	$C_i = N_i / A_i$	N_i 为景观类型 i 斑块数， A_i 为景观类型 i 总面积
景观分离度指数	$S_i = \frac{A}{2A_i} \sqrt{\frac{N_i}{A}}$	N_i 、 A_i 含义同上， A 为景观总面积
景观优势度指数	$D_i = dM_i + eL_i$	M_i 即相对密度，为斑块 i 的数目与总斑块数之比； L_i 即相对盖度，为斑块 i 与样方总面积之比； d 、 e 分别为两者的权重，借鉴前人成果取 $d=0.4$ 、 $e=0.6$

3.4 北方防沙带生态保护和修复三级分区

山水林田湖草沙生命共同体各子系统是相伴相生、相辅相成的命运共同体关系，牵一发而动全身。生命共同体表现出来的生态功能，是各子系统相互作用的结果。若为了提升生态系统固碳效益，只注重林草子系统建设，忽略各子系统的协同优化，会步入地下水资源匮乏、林草退化、荒漠化加剧的恶性循环中，造成固碳功能的退化和生态风险的加剧。同时，生态保护和修复过程中的增汇措施涉及到土地利用结构的改变，区域生态安全因此受到影响。高风险状态下，固碳功能受外部环境的制约难以有效发挥，生命共同体的协调性在胁迫与压力中也会难以维持。因此，生态系统处于协调且安全的状态下，是生态系统可持续、稳定地发挥固碳效益的前提和保障。

基于上述分析，本文从山水林田湖草沙生命共同体视角出发，构建“基础框架搭建-优先区域识别-重点任务厘定”的分区框架，根据各区域生命共同体耦合协调性、固碳功能、景观生态风险的现状特征和变化趋势，层层递进，构建北方防沙带生态保护和修复三级分区，依据各类分区的特征和差异提出相匹配的保护和修复策略。

(1) 一级分区方法。一级区划分旨在搭建生态保护和修复的基础框架,依据自然立地条件划分区域生态保护和修复整体格局,确保各类分区的地理单元连续、生态系统完整。《北方防沙带生态保护和修复重大工程建设规划(2021—2035年)》结合北方防沙带资源禀赋与自然特征,将北方防沙带全域划分为五个保护修复板块。为加强分区结果与顶层设计的衔接,本文以现有规划成果为一级分区的依据,将天山和阿尔泰山森林草原区、塔里木河流域、河西走廊、内蒙古高原区、京津冀山地平原区作为一级分区,增强分区结果对实际规划建设的指导意义。

(2) 二级分区方法。二级分区旨在划分各区域开展一体化保护和修复工程的优先序。过去,北方防沙带区域内实施了系列生态工程,在自然资源禀赋、实施力度等因素影响下,各区县生态建设成效存在差异。各区县 2000~2020 年生命共同体耦合协调度、碳储量和生态风险指数的年均增长率,可以反映其生境状态变化方向(王天福等, 2022),以此为依据识别生境受损区域,将有限的资源优先投入到更急需开展生态保护和修复的区域。其中,耦合协调度、碳储量年均增长率为负且生态风险指数为正,表明该区域各子系统向相互制约发展,固碳功能有所下降,区域风险不断上升,生境全面受损,应作为优先区开展保护修复,及时遏止生态恶化趋势;耦合协调度、碳储量正向增长且风险指数负向增长的区域,各子系统的良性互动和区域安全进一步增强,固碳功能持续提升,生态建设成效最好,应作为保护修复的示范区;耦合协调度、固碳功能、生态风险既没有全面恶化也没有全部改善的区域,生境受损程度适中,应作为重点区开展保护修复。年均增长率计算公式如下:

$$m = \sqrt[n]{\frac{B}{A}} - 1 \quad (2)$$

式中, m 为年均增长率, n 为年数, A 、 B 为各区县第一年和最后一年生命共同体耦合协调度、碳储量和景观生态风险值。

(3) 三级分区方法。三级分区旨在根据生命共同体协调状态、固碳功能与生态风险现状特征,厘定区域生态保护和修复重点任务的基础上,合理选择保护修复模式与策略。对各区县 2020 年生命共同体耦合协调度、碳储量和景观生态风险指数的 Z-score 标准化结果进行象限划分(谢丽霞等, 2021),可以划分为高碳储量-高生态风险-协调、低碳储量-高生态风险-失调、高碳储量-低生态风险-协调等类型。落入不同象限的区县隶属于不同类型,在二级分区结果上叠加各区县类型特征得到三级分区。Z-score 标准化计算公式如下:

$$x = \frac{x_i - \bar{x}}{S} \quad (2)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

式中, x 、 x_i 分别为区县 i 标准化后和标准化前的碳储量和生态风险指数值, $\bar{x}$ 为研究区生命共同体耦合协调度、碳储量和生态风险指数平均值, S 为标准差, n 为研究区区县总数。

4 结果分析

4.1 山水林田湖草沙生命共同体耦合协调性分析

4.1.1 生命共同体综合评价结果分析

北方防沙带 2000~2020 年生命共同体综合状态和发展水平的评估结果显示,北方防沙带 2000 年、201

0 年、2020 年生命共同体综合指数分别为 0.4491、0.4468、0.4488，总体水平呈现先恶化再转好的变化特征。

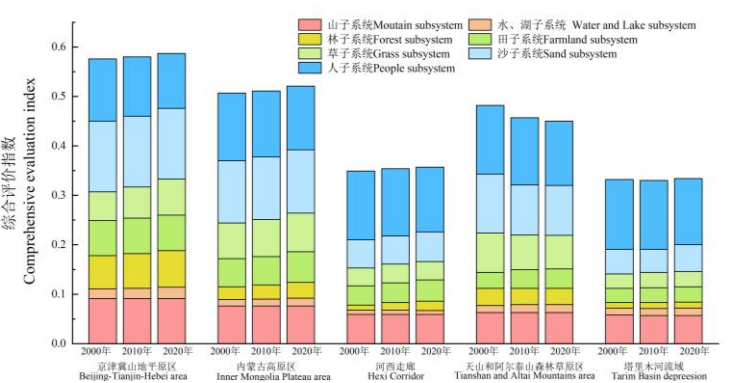


图 2 2000~2020 年北方防沙带生命共同体各子系统综合评价得分

Fig. 2 Comprehensive evaluation score of subsystems of life community in Northern Sand Control Belt from 2000 to 2020

横向对比发现，京津冀山地平原区的生命共同体综合评价指数最高，该区域地势平缓、河网密布，为耕地、林草资源的蓬勃发展提供了优越的条件，但人口增长较快，建设用地面积骤增，人子系统得分逐年下降。内蒙古高原区、河西走廊在 2000~2020 年间生命共同体综合水平稳步提升，但河西走廊水子系统得分最低且连年下降，可见水资源匮乏问题较为突出。塔里木河流域在 2000~2010 年间综合水平有所降低，沙子系统得分骤减，原因在于这十年间塔克拉玛干沙漠南缘沙化严重。天山和阿尔泰山森林草原区是唯一一个在 2000~2020 年综合水平降低的区域，缘于阿勒泰地区大量草地退化，对草、沙子系统均产生了显著负面影响。

4.1.2 生命共同体耦合协调性时空变化

按照现有耦合协调度等级标准（张中秋等，2021），将北方防沙带生命共同体耦合协调度测算结果划分为良好协调（ $D>0.7$ ）、基本协调（ $0.5<D\leq0.7$ ）、濒临失调（ $0.4<D\leq0.5$ ）、轻度失调（ $0.3<D\leq0.4$ ）、中度失调（ $D\leq0.3$ ）五个等级。

时间变化上，北方防沙带在 2000、2010、2020 年三个时点的生命共同体耦合协调度分别为 0.4600、0.4606、0.4653，总体上虽处于濒临失调状态，但各子系统呈协同优化趋势发展。其中，京津冀山地平原区、内蒙古高原区、塔里木河流域生命共同体耦合协调性均有所提升。河西走廊、天山和阿尔泰山森林草原区生命共同体耦合协调性呈恶化趋势，后者生命共同体耦合协调度骤降了 7%。

表 4 2000~2020 年北方防沙带生命共同体耦合协调度

Table 4 Coupling coordination degree of life community in the Northern Sand-Prevention Belt from 2000 to 2020

时段 time	耦合协调度 Coupling coordination degree					
	京津冀山地平原区	内蒙古高原区	河西走廊	天山和阿尔泰山森林草原区	塔里木河流域	全域
	Beijing-Tianjin-Hebei area	Inner Mongolia Plateau area	Hexi Corridor	Tianshan and Altai Mountains area	Tarim Basin depression	All
2000 年 2000 year	0.5708	0.5066	0.3519	0.5245	0.3460	0.4600
2010 年 2010 year	0.5775	0.5094	0.3589	0.4933	0.3638	0.4606
2020 年 2020 year	0.5905	0.5309	0.3495	0.4876	0.3682	0.4653

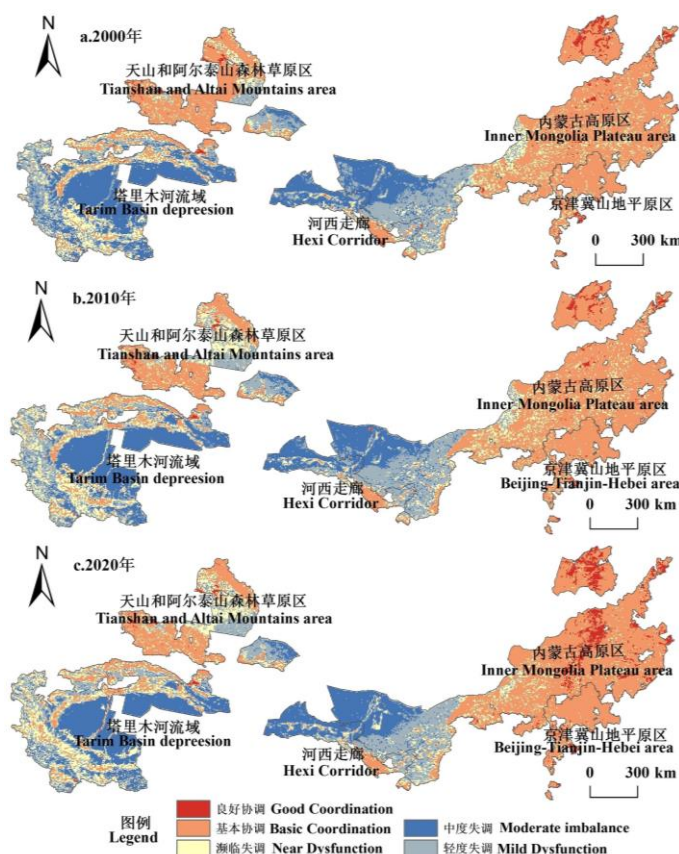


图3 2000~2020年北方防沙带生命共同体耦合协调度分布

Fig.3 Distribution of Coupling coordination degree of Life Community in the Northern Sand-Prevention Belt from 2000 to 2020

应用克里金插值对生命共同体耦合协调度进行可视化绘制。空间分布上,京津冀山地平原区、内蒙古高原区中东部和天山区域山水林田湖草沙耦合协调度较高,塔里木河流域、河西走廊、内蒙古高原区西部协调度较低。其中,京津冀山地平原区以基本协调区为主,且失调区域逐渐减少。内蒙古高原区以基本协调区为主,东部锡林郭勒草原和呼伦贝尔草原内有大量区域在2010~2020年间转变为良好协调区,丰沛的水资源和平缓的地势为田、林、草子系统的发展提供了条件,进一步抑制了沙地的扩张,各子系统在相互增益中循环发展。天山和阿尔泰山森林草原区中,天山山脉和阿尔泰山山脉所在区域的生命共同体耦合协调度较高,山体凝聚水分、结构稳定的优势为植被生长提供了基础环境。内蒙古高原区西部、河西走廊西北部、塔里木河流域东部分别涵盖了巴丹吉林和腾格里、库木塔格、塔克拉玛干等原生沙漠,沙子系统一家独大,生命共同体处于失调状态。

4.2 北方防沙带生态系统固碳功能时空变化

4.2.1 生态系统碳储量时间变化

本文基于InVEST模型Carbon模块对北方防沙带碳储量进行了测算,在2000、2010、2020年三期的碳储量分别为9191.06Tg、9056.32Tg、9164.37Tg(1Tg=10⁶Mg),碳储量整体减少了26.69Tg,但呈现先减后增的特征。2000~2010年碳储量减少了134.74Tg,降幅为1.47%;2010~2020年碳储量增加了108.05Tg,增幅为1.19%。

从各地类碳储量来看,草地对北方防沙带生态系统碳储量贡献最大,贡献率高达50.84%,水域与建设用地贡献率相对较低,均不足1%(表5)。耕地、林地面积增加是碳储量增加的主要原因,耕地固碳增加量占总增加量46.23%;草地面积的持续减少是碳储量减少的最主要原因,草地退化损失的碳储量占总损失量的82.14%,但草地仍是北方防沙带生态系统碳储量的最主要来源。建设用地在2000~2020年间对碳储量的贡献持续增加,主要缘于建设用地面积的大量扩张,但草地、耕地向建设用地的转移也引发了生态系

统总碳储量的损失。

表 5 2000~2020 年北方防沙带不同土地利用类型碳储量 (Tg)

Table 5 Carbon storage of different land use types in the Northern Sand-Prevention Belt from 2000 to 2020 (Tg)

时段	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
time	farmland	forest	grass	water	settlement	unused land
2000 年	1699.44	927.29	4848.65	0.11	58.74	1656.83
2000 year						
2010 年	1686.65	998.63	4569.04	0.10	66.24	1735.67
2010 year						
2020 年	1839.17	1016.01	4519.72	0.12	112.38	1676.96
2020 year						
2000-2010 年	-12.80	71.34	-279.60	-0.01	7.50	78.84
2000-2010 year						
2010-2020 年	152.53	17.38	-49.32	0.02	46.15	-58.71
2010-2020 year						
2000-2020 年	139.73	88.72	-328.93	0.01	53.64	20.13
2000-2020 year						

4.2.2 生态系统固碳功能空间分布格局

从碳储量空间分布来看（图 4），北方防沙带固碳功能在区域上呈现出东高西低的地带性分布特征。碳储量高值区主要分布在京津冀山地平原区、天山和阿尔泰山森林草原区西部及内蒙古高原区东部，低值区域主要分布在塔里木河流域、河西走廊与内蒙古高原区西部。

其中，京津冀山地平原区平均碳密度为 93.07Mg/hm²，区域内以林草地为主，光热充足，降雨丰沛，固碳能力较强。内蒙古高原区平均碳密度为 55.64Mg/hm²，西部沙漠广布，碳储量较低，中东部为锡林郭勒、呼伦贝尔等草原，具有一定的固碳能力。河西走廊平均碳密度为 46.88Mg/hm²，单位面积碳储量北高南低，其中，西北部因荒漠广布固碳能力较低，中东部绿洲平原广布，固碳能力较高。天山和阿尔泰山森林草原区平均碳密度为 52.83Mg/hm²，西南部的天山、伊犁河谷区域固碳能力较强，东部为古尔班通古特沙漠，单位面积碳储量较低，西北部的阿尔泰山脉区域在 2000~2020 年局部沙化严重，碳储量下降明显。塔里木河流域平均碳密度为 18.61Mg/hm²，该区域内塔克拉玛干沙漠广布，固碳能力较差。

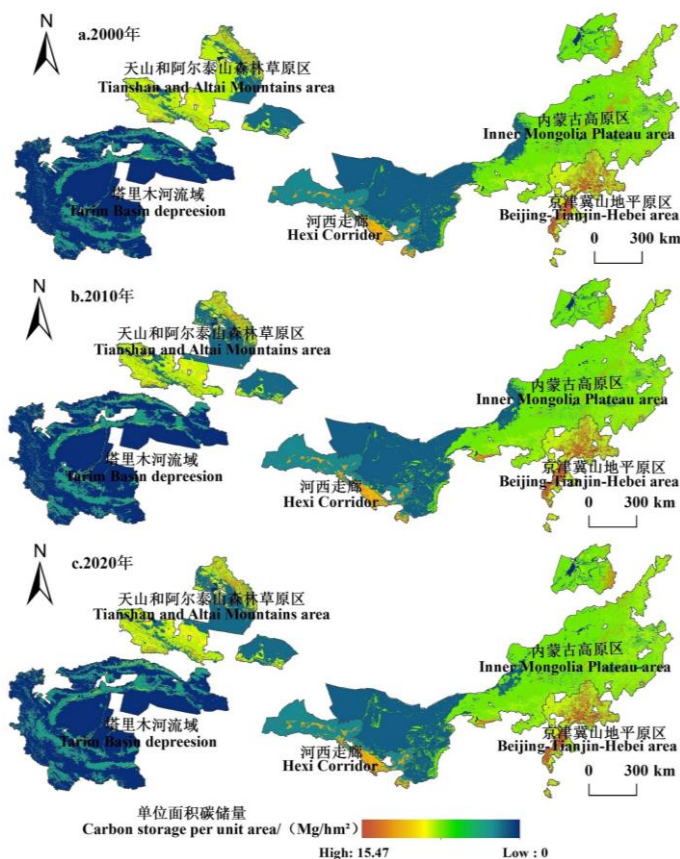


图4 2000~2020年北方防沙带碳储量分布

Fig.4 Distribution of Carbon Storage in the Northern Sand-Prevention Belt from 2000 to 2020

碳储量增加区域主要分布于内蒙古高原区中部、塔里木河流域的叶尔羌河流域,碳储量增加主要源于大量未利用地向草地转化、草地向林地转化。这与内蒙古高原区开展退牧还草与天然林保护工程有关,同时,塔里木河流域因气候变暖,冰川雪水的融化为未利用地向草地的转化提供了有力条件。碳储量减少区域主要位于天山和阿尔泰山森林草原区中部,源于大量草地退化,该地区长期干旱少雨造成了地表富沙、植被稀疏(卢雅焱等,2022),局部沙化明显。

4.3 景观生态风险时空分布特征

在网格尺度上,构建生态风险指数模型对北方防沙带生态风险指数值进行测算。北方防沙带在2000年、2010年、2020年的景观生态风险指数分别为0.240、0.241、0.236,总体呈现下降趋势。运用普通克里金插值法对生态风险指数值进行可视化绘制(图5),根据自然断点法将其划分为低风险($0 < \text{ERI} \leq 0.16$)、较低风险($0.16 < \text{ERI} \leq 0.18$)、中风险($0.18 < \text{ERI} \leq 0.22$)、较高风险($0.22 < \text{ERI} \leq 0.27$)、高风险($0.27 < \text{ERI} \leq 0.30$)五个等级。

可以看出,北方防沙带生态风险在空间上呈“中西高东部低”的分布格局。较高、高风险区集中连片分布于天山和阿尔泰山森林草原区的北部、塔里木河流域、河西走廊的西北部以及内蒙古高原区西部。其中,天山和阿尔泰山北部在2000~2020年间生态风险骤增,生态安全问题加剧,原因可能是该区域气候干旱,季节性断流时间长,植被生存受到限制,大量草地退化为未利用地,导致区域生态风险加剧中等、较低及低风险区呈带状分布于京津冀山地平原区、内蒙古高原区东部。其中,内蒙古高原区的乌梁素海流域和大兴安岭南段在2000~2020年间生态风险显著降低。乌梁素海流域在2018年被纳入山水工程试点,开展一体化保护和系统治理,生态安全得到了有效保障。而大兴安岭南段土地利用类型以耕地为主,生态系统较为稳定,抗干扰能力强,因此生态风险进一步降低。

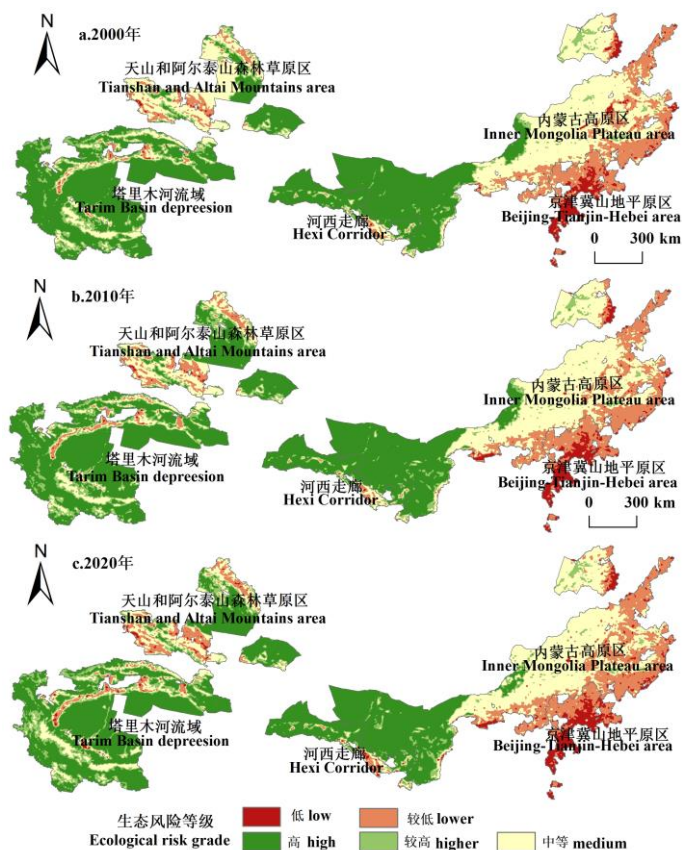


图5 2000~2020 年北方防沙带生态风险等级空间分布

Fig.5 Spatial Distribution of Ecological Risk Levels in the Northern Sand-Prevention Belt from 2000 to 2020

4.4 生态保护修复分区与策略

4.4.1 生态保护修复分区识别

一级分区按自然地理格局划分。一级分区以确保自然地理单元连续、山水林田湖草沙等基底要素完整为目标，搭建北方防沙带生态保护和修复分区的基础框架。本文以现有规划成果作为一级分区的依据，将北方防沙带划分为天山和阿尔泰山森林草原区、塔里木河流域、河西走廊、内蒙古高原区、京津冀山地平原区 5 个一级区。

二级分区按生命共同体协同效应、固碳功能及区域生态安全的变化方向划分。以北方防沙带 2000~2020 年生命共同体耦合协调度、碳储量和生态风险指数年均增长率的变化方向为衡量依据，将北方防沙带划分为生态保护和修复优先区、重点区与一般区 3 类二级分区。其中，优先区面积占比最小，仅为 7.9%，这类区域生境处于全面恶化趋势，应优先开展生态保护修复，及时遏制恶化态势。重点区是北方防沙带最主要的类型，面积占比高达 47.79%，该类区域生命共同体耦合协调度、固碳功能及生态风险没有全面恶化，紧迫程度更轻，作为生态保护和修复的重点区域。一般区面积占比为 44.31%，这类区域固碳功能和生态安全均有所增强，且各子系统向良性互动发展，可见在自然资源禀赋与生态工程的共同作用下，这类区域生态发展稳中向好，应作为生态保护和修复一般区。

三级分区按生命共同体耦合协调性、固碳功能和生态风险的现状划分，以明确现阶段生态保护修复的目标导向。对北方防沙带 2020 年生命共同体耦合协调度、碳储量和生态风险指数进行 Z-score 标准化，运用象限划分法得到高碳储量-高生态风险-协调、高碳储量-低生态风险-协调、低碳储量-高生态风险-失调、低碳储量-高风险-协调四种类型，各类型差异化保护和修复依据如下：

(1) 高碳储量-高风险-高协调度的区域固碳能力较强，各子系统协同强度高，但生态系统相对脆弱，应作为改良提质区，以加强保护、降低生态风险为主攻方向，在识别风险源的基础上严防不良干扰，让生态系统在自我修复中全面发展。

(2) 高碳储量-低风险-高协调度的区域生态系统固碳功能强且稳定性好,是北方防沙带重要的生态源地,生命共同体处于相互增益的良性循环发展状态,未来应作为保育涵养区,发挥生态系统自身的涵养功能,侧重于预防生态环境退化、确保固碳功能保值增值。

(3) 低碳储量-高风险-高协调度的区域,固碳功能较弱且生态风险高,但生命共同体各子系统处于相互增益的良性循环发展状态,具有一定的自我恢复能力。因此应作为管控保护区,对干扰生态系统的行为严加管控,充分发挥生态系统的自我恢复能力,为各子系统在良性互动中持续发展提供时间和空间,同时辅以一定的修复措施,加速生态基地修复。

(4) 低碳储量-高风险-低协调度的区域,生态系统自身固碳能力弱、抗干扰能力差,生态本底较差,加之生命共同体内部冲突拮抗,难以自我修复。应作为修复治理区,采用人工修复为主、自然恢复为辅的治理措施,重塑区域生态基底。

在二级分区的基础上叠加区域生命共同体耦合协调度、固碳与生态风险现状特征,得到改良提质优先区、改良提质重点区、保育涵养重点区、保育涵养一般区、管控保护重点区、管控保护一般区、修复治理优先区、修复治理重点区及修复治理一般区 9 个三级分区(图 6)。分区识别结果显示,三级分区中改良提质优先区和重点区面积占比较小,分别为 3.04%和 3.90%;保育涵养重点区涵盖区县 80 个,面积占比 20.83%,保育涵养一般区包含 25 个区县,二者均集中分布于北方防沙带东部;管控保护区重点区和一般区共涵盖 10 个区县,分布较为零散;修复治理一般区范围最广,面积占比 30.05%,涵盖 33 个区县,修复治理重点区涵盖 15 个区县,修复治理优先区涵盖 4 个区县,三者集中分布于北方防沙带中西部。

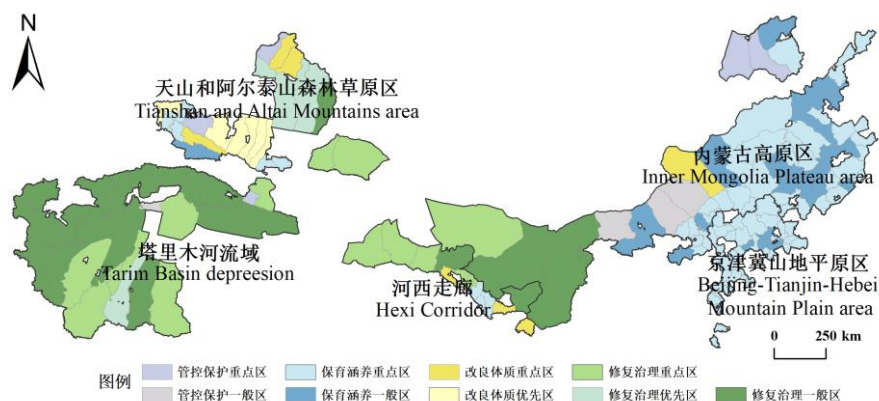


图 6 北方防沙带生态分区图

Fig.6 Ecological zoning of ecological function area in the Northern Sand-Prevention Belt

4.4.2 生态保护和修复策略

一级分区所得的天山和阿尔泰山森林草原区、塔里木河流域、河西走廊、内蒙古高原区和京津冀山地平原区 5 个板块具有自然地理格局完整的优点,本文的二、三级分区均是在此基础加以细化的结果。因此,应以一级分区为基础框架,制定生态保护修复策略,以确保各分区内山水林田湖草沙自然要素的一体化和完整性。

本文以山水林田湖草沙生命共同体理论为指导思想,坚持“保护优先、自然恢复为主”、“着力提升生态系统自我修复能力和稳定性”等系统治理原则,以生命共同体耦合协调性、生态系统固碳功能和生态风险的变化趋势与现状特征为差异化保护和修复的依据,结合区域自然资源禀赋,因地制宜、因区施策。具体如下:

(1) 天山和阿尔泰山森林草原区。该区域涵盖三级分区中除管控保护一般区外的所有类型。其中,修复治理优先区位于沙漠与绿洲的过渡带,由于区域季节性断流严重,水子系统与林草子系统协调性较差,草地显著退化,碳储量损失严重,生态风险也急剧上升,生态本底较差,应积极开展生态补水、增殖放流等人工修复活动,加大乡土草种植力度(伊丽君等, 2023),重塑生态基底。修复治理重点区分布于东部古尔班通古特沙漠,应在沙漠边缘建设锁边林带,加强对梭梭等林草资源的封育保护(曾凡江等, 2020),实现荒漠固碳潜力。改良提质重点区主要位于阿尔泰山山脉,气候变暖条件下冰川融水增加促进了林草生

长,但地形起伏较大,限制了林、田、湖、水子系统发展的基础状态,加上季节变化使得冰川融水难以稳定供应(尹力等,2023),生境稳定性差,应加大水源地保护力度,并开展水保工程建设(陈亚宁等,2023),提高节水灌溉效率,以改善固碳功能发挥的内外条件。改良提质优先区位于玛纳斯河流域,该区域地势平缓,水资源充足,山、水、田子系统协调度较高,但人工绿洲向沙漠边缘扩张加剧了沙化风险,应加强农田防护网建设,对沙漠边缘土地进行有序退耕(张红旗等,2021),控制耕地资源开发强度。保育涵养区分布于天山山脉与伊犁河谷区域,在林草工程的建设下固碳能力进一步增强(卢雅焱等,2022),未来应继续严格保护天然林,通过禁牧、轮牧等手段加强对草原的保育涵养,巩固和提升固碳功能。精河县是该区唯一的管控保护区,境内木特塔尔沙漠分布,固碳功能较弱,地类变化剧烈导致区域生态风险较高,但降水丰沛,水、田、林、草子系统相互增益,可以通过加大国家沙漠公园建设力度来加强对生态系统的养护与管控,为水田林草沙子系统的协同优化提供缓冲空间。

(2)塔里木河流域。该区域涵盖修复治理优先区、重点区与一般区三种类型。修复治理一般区分布最广,主要位于环绕塔克拉玛干沙漠的塔里木河干流、阿克苏河流域及叶尔羌河-喀什噶尔河流域,山地、绿洲与荒漠耦合性高,以河流为主体的水子系统对区域生境质量和生态安全起决定性作用。近年来得益于生态工程对“绿洲化”的推动(金都等,2023),固碳功能和生命共同体耦合协调性持续增强,自我恢复能力有所提升,在未来应采取自然恢复与辅助修复结合的策略,加强对水源的管控,通过开展防沙治沙工程与保护梭梭、沙柳等天然荒漠植被相结合来修复沙化草原,建设农田防护林遏制绿洲边缘沙化。修复治理重点区与优先区主要分布于和田地区,以荒漠和草地为主,在生态风险持续降低的一般区可以大力发展光伏治沙产业(盖志毅和哈斯,2022),推动生态固碳与区域发展的互促共进,而南缘的昆仑山脉等高原区域应进行封闭管理以保护生态系统的原真性(乔斌等,2023),避免生态脆弱的进一步加剧。

(3)河西走廊。该区域涵盖修复治理重点区与一般区、保育涵养重点区及改良提质重点区。修复治理重点区与一般区主要分布于河西走廊西北段,民勤、金塔等地区被腾格里、巴丹吉林沙漠合围,荒漠广布,水资源的匮乏难以支撑林草生长,应积极采取工程治沙、种植耐干旱草种和树种等人工干预方式修复区域生态基底(雷加强等,2023),阻断流沙向东南段绿洲入侵。保育涵养重点区位于黑河中游,生命共同体协调度高,表现在祁连山的水源涵养功能为田、林、草子系统的发展提供了水资源,生态系统固碳功能随着绿洲扩张进一步增强,生态本底较好,未来应以保育保护为主,对绿洲与沙漠过渡带实施封育保护,促进草地保育修复。改良提质重点区分布于河西走廊东南段的石羊河中下游,田、草子系统协调度较高,但石羊河作为内陆河,径流量对气候波动敏感(王诗语等,2023),致使区域生态风险较高,应加强水资源综合治理,加强河道管护,严禁地下水过度开采,巩固耕地、草地固碳功能。

(4)内蒙古高原区。该区域涵盖除优先区外的所有类型。修复治理重点区和一般区分布于内蒙古高原区西部腾格里、巴丹吉林、库布齐沙漠的聚集区,生态系统敏感脆弱,固碳能力较低,应加强对沙化土地的综合整治,开展飞播造林、人工种草等修复工程提高荒漠植被覆盖度,重塑生态基底,实现沙、草、林子系统协同优化。管控保护重点区位于呼伦贝尔草原西部,区域内以草甸草原为主,湖泊资源丰富,水、湖、草子系统协调度高,但草原权责不清晰、围栏破损严重等问题加剧了草地退化与碳汇损失(潘建伟等,2020),未来应加强草原管护体系建设,严格实施围栏放牧、轮牧休牧,促进草蓄平衡。保育涵养一般区主要位于乌梁素海流域、科尔沁草原,生态系统质量较高。乌梁素海流域在2000~2020年间大量草地向林地转变,促进了固碳功能的进一步提升,未来应以歼灭沙地为主攻方向,划定封禁区促进湿地、草原生态系统自然恢复。保育涵养重点区分布于锡林郭勒草原,过去露天煤矿开采、农田开垦等人类活动造成了草地退化(阿荣等,2019),碳储量有所损失。未来,应控制耕地开垦强度,采取人工修复措施重塑受损矿山地貌,进一步维护区域生态安全。

(5)京津冀山地平原区。该区域内主要包含保育涵养重点区与一般区两类三级分区。区域内地势较为平缓,山水林田湖草子系统综合水平和协调度均较高,生态资源禀赋优越,碳汇能力较强。其中,保育涵养一般区分布于密云水库上游流域,重点区分布于河北张承坝上地区与太行山山区,区域人口密度显著增加,城镇建设用地扩张、耕地增加导致该区域碳储量退化,人子系统与自然生态系统协调度有所降低。未来,应采取保护保育的治理策略,严格保护区域内天然林、公益林等林草资源,严厉禁止商业性采伐,推

行林长制加强对森林的抚育管护和经营,促进森林资源再生与良性循环,确保区域固碳功能保值增值。

5 结论与讨论

5.1 结论

本文集成耦合协调度模型、InVEST 模型与景观生态学方法,从客观上揭示了北方防沙带 2000~2020 年生命共同体耦合协调度、生态系统固碳功能及景观生态风险的时空演变特征。进一步,从上述三个维度,依据“生态评价—问题诊断—分区施策”的思路构建了北方防沙带山水林田湖草沙一体化保护和修复三级分区,并制定了相应的保护和修复策略,为北方防沙带一体化保护和修复分区管控、精准施策提供了重要参考。得出结论如下:

(1) 北方防沙带山水林田湖草沙生命共同体综合水平在 2000~2020 年间呈现先降低再提升的变化趋势,生命共同体耦合协调度持续上升,区域内基本协调区占比最大。

(2) 北方防沙带 2000、2010、2020 年碳储量分别为 9191.06Tg、9056.32Tg、9164.37Tg, 总体减少了 26.69Tg, 碳储量减少主要源于草地退化。生态系统固碳功能在时间上呈现先减少后增加的趋势,在空间上呈现出东高西低的分布特征。

(3) 北方防沙带生态风险等级呈现“中西高东部低”的分布特征,在 2000~2020 年景观生态风险总体下降。

(4) 北方防沙带共划分为 9 类生态保护和修复三级区。其中,修复治理一般区范围最广,集中连片分布于塔里木河流域及内蒙古高原区西部。改良提质优先区面积占比最小,仅为 3.04%,主要分布于天山和阿尔泰山森林草原区。

5.2 讨论

本文在对北方防沙带碳密度分区域修正的基础上,运用 InVEST 模型评估了北方防沙带碳储量。由评估结果可知研究区在 2000~2020 年间碳储量损失了 26.69Tg, 碳储量损失主要来源于林草退化。这与付宇佳、Zhu (Zhu et al.,2021; 付宇佳等, 2023) 等的研究成果一致,具有一定的准确度与可靠性。北方防沙带在过去 20 年中,先后实施了多项生态工程,整体上遏制了生态环境的恶化趋势,但局部生态系统固碳成效不佳。这可能与气候变化、生态治理缺乏系统性和分区施策有关。首先,北方防沙带气候干旱、荒漠广布,部分区域气温持续上升,但降雨稀少,植被生长严重受限(谢舒笛等, 2020),甚至有少数河流湖泊干涸消亡成为了新的沙源(弥宏卓等, 2023)。再者,过去的生态工程在建设中缺乏整体性与系统性,在分区治理上存在不足,例如“三北防护林”体系在林草建设过程中存在布局不合理、树种选择不科学、管护不到位等问题,导致造林成活率低、林分退化、土地局部沙化⁹,生态修复成果没有得到有效巩固,固碳成效也难以显现。

在碳储量测算上,由于碳密度数据是在参考现有研究成果的基础上进行本地化修正所得,且默认碳密度在一定时期内、同一地类中固定不变,对碳储量测算的准确程度有一定负面影响,未来应采取实地测量与采样、固定站点监测、模型模拟相结合的多层次方法测算碳储量。

在生态分区上,本文从生命共同体耦合协调度、生态系统固碳功能和景观生态风险融合的新视角出发,沿着自然地理特征、功能和风险的变化趋势与现状特征分析思路,自上而下构建了北方防沙带山水林田湖草沙一体化保护和修复三级分区。从分区方法来看,本文的创新之处主要有二:一是将山水林田湖草沙协调发展、固碳功能提升和维护生态安全共同纳入保护和修复目标,可以有效避免一味追求服务提升导致生态系统失调甚至退化的现象出现,促进了山水林田湖草沙系统治理与碳达峰碳中和行动的广泛融通和深度融合;二是综合生态系统动态变化趋势与静态现状特征,注重衔接现有规划,沿着划定修复格局、识别关键区域、明确重点任务的主线构建了三级分区,丰富了分区结果的层级,增强了分区结果的实用性。山水林田湖草沙系统治理是一项系统性工程,未来还需融合多学科理论与经验,完善生命共同体综合水平评价体系,对生命共同体耦合协调度变化的原因进一步探析,更全面地甄别区域主要生态环境问题,完善分区技术方法,将生态保护和修复的潜力评价纳入分区研究。

参考文献

- 阿荣, 毕其格, 董振华. 基于MODIS/NDVI的锡林郭勒草原植被变化及其归因. 资源科学, 2019, 41(07):1374-1386. (A R, BI Q G, DONG Z H. Change of grassland vegetation and driving factors based on MODIS/NDVI in Xilingol China. Resources Science, 2019, 41(07):1374-1386.)
- 曹祺文, 张曦文, 马洪坤, 等. 景观生态风险研究进展及基于生态系统服务的评价框架:ESRISK. 地理学报, 2018, 73(05):843-855. (CAO Q W, ZHANG X W, MA H K, et al. Review of landscape ecological risk and an assessment framework based on ecological services: ESRISK. Journal of Geographical Sciences, 2018, 73(05):843-855.)
- 曾凡江, 张文军, 刘国军, 等. 中国典型沙漠区主要优势植被的稳定修复途径与可持续经营技术. 中国科学院院刊, 2020, 35(06):709-716. (ZENG F J, ZHANG W J, LIU G J, et al. Stable Restoration Pattern and Sustainable Management Technology of Main Dominant Vegetation in Typical Desert Areas of China. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(06):709-716.)
- 陈光水, 杨玉盛, 谢锦升, 等. 中国森林的地下碳分配. 生态学报, 2007(12):5148-5157. (CHEN G S, YANG Y S, XIE J S, et al. Total belowground carbon allocation in China's forests. Acta Ecologica Sinica, 2007(12):5148-5157.)
- 陈亚宁, 李忠勤, 徐建华, 等. 中国西北干旱区水资源与生态环境变化及保护建议. 中国科学院院刊, 2023, 38(03):385-393. (Chen Y N, Li Z Q, Xu J H, et al. Changes and protection suggestions in water resources and ecological environment in arid region of Northwest China. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(3): 385-393.)
- 陈耀亮, 罗格平, 叶辉, 等. 近 30 年土地利用变化对新疆森林生态系统碳库的影响. 地理研究, 2013, 32(11):1987-1999. (CHEN Y L, LUO G P, YE H, et al., Sources and sinks of carbon from forest land use change in Xinjiang, China during 1975-2005. Geographical Research, 2013, 32(11):1987-1999.)
- 成金华, 尤喆. “山水林田湖草是生命共同体”原则的科学内涵与实践路径. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(02):1-6. (CHENG J H, YOU Z. Scientific connotation and practical paths about the principle of 'taking mountains, rivers, forests, farmlands, lakes, and grasslands as a life community'. China Population, Resources and Environment, 2019, 29(02):1-6.)
- 邓元杰, 姚顺波, 侯孟阳, 等. 退耕还林还草工程对生态系统碳储存服务的影响——以黄土高原丘陵沟壑区子长县为例. 自然资源学报, 2020, 35(04):826-844. (DENG Y J, YAO S B, HOU M Y, et al. Assessing the effects of the Green for Grain Program on ecosystem carbon storage service by linking the InVEST and FLUS models: A case study of Zichang county in hilly and gully region of Loess Plateau. Journal of Natural Resources, 2020, 35(04):826-844.)
- 付扬军, 师学义. 基于小流域尺度的县域国土空间生态修复分区——以山西汾河上游为例. 自然资源学报, 2023, 38(05):1225-1239. (FU Y J, SHI X Y. Ecological restoration zoning of county-level territorial space based on small watershed scale: A case study of the upper Fenhe River in Shanxi. Journal of Natural Resources, 2023, 38(05):1225-1239.)
- 付宇佳, 刘晓煌, 孙兴丽, 等. 近 30 年西北内陆荒漠资源大区土地利用驱动下生态系统碳储量时空变化. 地质通报, 2023, 1-17. (FU Y J, LIU X H, SUN X L, et al. Spatial-temporal variation of ecosystem carbon storage driven by land use in northwest Inland desert resource region in recent 30 years. Geological Bulletin of China, 2023, 1-17.)
- 盖志毅, 哈斯. 库布其沙漠治理助力“双碳”:基于新发展理念阐释. 科学管理研究, 2022, 40(02):80-87. (GAI Z Y, HA S. The Governance of Kubuqi Desert Promotes “Emission Peak & Carbon Neutrality”: An Clarification Based on the New Development Concept. Scientific Management Research, 2022, 40(02):80-87.)
- 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. 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. Scientia Silvae Sinicae, 2022, 58(11):31-48.)
- 金都, 董文明, 刘新平. 新疆塔里木河流域土地利用变化对碳排放的影响: 考虑能源消耗中介效应和绿色科技调节效应. 环境工程学报, 2023, 17(11):1-12. (JIN D, DONG W M, LIU X P. Impacts of land use change on carbon emissions in the Tarim River Basin of Xinjiang. considering the mediating effect of energy consumption and the regulatory effect of green technology. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(11):1-12)
- 雷加强, 高鑫, 赵永成, 等. 河西走廊—塔克拉玛干沙漠边缘阻击战: 风沙形势与防治任务. 中国科学院院刊, 2023, 38(07):966-977. (LEI J Q, GAO X, ZHAO Y C, et al. The battle on the edge of Hexi Corridor-Taklimakan Desert: Wind-blown sand situation and prevention tasks of desertification control. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(07):966-977.)

- 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳贮量. 中国科学(D辑:地球科学), 2003(01):72-80. (LI K R, WANG S Q, CAO M K. Vegetation and soil carbon storage in China. Scientia Sinica(Terrae), 2003(01):72-80.)
- 李晓文, 吕江涛, 智烈慧, 等. 基于“目标-成本-效益”协同优化的山水林田湖草沙一体化生态保护与修复格局. 生态学报, 2023, 43(09):3625-3635. (LI X W, LV J T, ZHI L H, et al. Optimization of integrated ecological conservation and restoration pattern by trading off the targets costs, and ecological benefits. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(09):3625-3635.)
- 李勇, 赵云泽, 卓志清, 等. 小兴安岭——三江平原区生态问题辨析及山水林田湖草保护修复策略. 生态科学, 2023, 42(01):95-104. (LI Y, ZHAO Y Z, ZHUO Z Q, et al. Analysis of ecological problems and its conservation-restoration strategy of mountains, rivers, forests, farmlands, lakes and grasslands in the Xiaoxing'an Mountains-Sanjiang Plain. Ecological Science, 2023, 42(01):95-104.)
- 李子辉, 官冬杰, 贺光秀, 等. 长江经济带山水林田湖草生命共同体健康诊断及耦合协调关系分析. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2023, 40(03):61-77. (LI Z H, GUAN D J, HE G X, et al. Health Evaluation of the Mountain-Water-Forest-Field-Lake-Grass Life Community in the Yangtze River Economic Zone. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2023, 40(03):61-77.)
- 连虎刚, 曲张明, 刘春芳, 等. 北方防沙带河西走廊段景观格局时空演变及其防风固沙服务响应. 应用生态学报, 2023, 34(09):2518-2526. (LIAN H G, QU Z M, LIU C F, et al. Spatio-temporal variation of landscape pattern and the response of windbreak and sand fixation service in Hexi corridor of northern sand fixation belt. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(09):2518-2526.)
- 梁森, 张建军, 王柯, 等. 区域生态保护修复碳汇潜力评估方法与应用——基于第一批山水林田湖草生态保护修复工程的研究. 生态学报, 2023, 43(09):3517-3531. (LIANG S, ZHANG J J, WANG K, et al. Methodology and application of carbon sink potential assessment for regional ecological conservation and restoration: Based on the research of the first batch of pilots for ecological protection and restoration project of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes. grasslands system, Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(09):3517-3531.)
- 卢雅焱, 徐晓亮, 李基才, 等. 基于InVEST模型的新疆天山碳储量时空演变研究. 干旱区研究, 2022, 39(06):1896-1906. (LU Y Y, XU X L, LI J C, et al. Research on the spatio-temporal variation of carbon storage in the Xinjiang Tianshan Mountains based on the InVEST model. Arid Zone Research, 2022, 39(06):1896-1906.)
- 吕思思, 苏维词, 赵卫权, 等. 山水林田湖生命共同体健康评价——以红枫湖区域为例. 长江流域资源与环境, 2019, 28(08):1987-1997. (LV S S, SU W C, ZHAO W Q, et al. Life Community Health Evaluation of Mountains, Rivers, Forests, Fields, Farmland and Lakes—Taking Hongfeng Lake as an Example. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(08):1987-1997.)
- 弥宏卓, 于振海, 白艳, 等. 内蒙古自治区“三北”防护林体系建设工程状况分析. 内蒙古林业调查设计, 2023, 46(01):1-4+29. (MI H Z, YU Z H, BAI Y, et al. Analysis of Three-North Forest Shelterbelt System Construction Program in Inner Mongolia Autonomous Region. Inner Mongolia Forestry Investigation and Design, 2023, 46(01):1-4+29.)
- 潘建伟, 张立中, 辛国昌. 草原生态补助奖励政策效益评估——基于内蒙古呼伦贝尔新巴尔虎右旗的调查. 农业经济问题, 2020(09):111-121. (PAN J W, ZHANG L Z, XIN G C. Benefit Evaluation of Grassland Ecological Subsidy and Incentive Policy: Based on the Investigation of New Barag Right Banner in Hulun Buir. Issues in Agricultural Economy, 2020(09):111-121.)
- 乔斌, 曹晓云, 孙玮婕, 等. 基于生态系统服务价值和景观生态风险的生态分区识别与优化策略——以祁连山国家公园青海片区为例. 生态学报, 2023, 43(03):986-1004. (QIAO B, CAO X Y, SUN W J, et al., Ecological zoning identification and optimization strategies based on ecosystem service value and landscape ecological risk: Taking Qinghai area of Qilian Mountain National Park as an example. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(03):986-1004.)
- 萨娜, 赵金羽, 寇旭阳, 等. “山水林田湖草沙生命共同体”耦合框架、模型与展望. 生态学报, 2023, 43(11):4333-4343. (SA N, ZHAO J Y, KOU X Y, et al. Coupling mountains-waters-forests-farmlands-lakes-grasslands-sandlands life community: framework, models and prospect. Acta Ecologica Sinica, 43(11):4333-4343.)
- 沈钰仟, 杜傲, 林子雁, 等. 赣州市山水林田湖草修复工程生态保护效益. 生态学报, 2023, 43(02):650-659. (SHEN Y Q, DU A, LIN Z Y, et al. The ecological protection effectiveness of the restoration project for mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands in Ganzhou. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(02):650-659.)

- 苏冲, 董建权, 马志刚, 等. 基于生态安全格局的山水林田湖草生态保护修复优先区识别——以四川省华蓥山区为例. 生态学报, 2019, 39(23):8948-8956. (SU C, DONG J Q, MA Z G, et al. Identifying priority areas for ecological protection and restoration of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands based on ecological security patterns: a case study in Huaying Mountain, Sichuan Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(23):8948-8956.)
- 苏敏, 虞方伯, 方晓波. 浙江省钱塘江源区域山水林田湖草生命共同体健康评价. 水土保持通报, 2024, 44(01):97-108. (SU M, YU F B, FANG X B. Health Evaluation of Life Communities of Mountains-Rivers-Forests-Farmlands-Lakes-Grasslands in Source Area of Qiantang River in Zhejiang Province. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024, 44(01):97-108.)
- 王林艳, 夏敏, 邹伟. 耦合生态服务供需的县域农业空间生态保护修复分区——以宜兴市为例. 自然资源学报, 2024, 39(04):858-877. (WANG L Y, XIA M, ZOU W. Ecological conservation and restoration zoning of county-level agricultural spatial ecology coupled with ecological service supply and demand: A case study of Yixing. *Journal of Natural Resources*, 2024, 39(04):858-877.)
- 王诗语, 孙从建, 陈伟, 等. 基于水化学及径流组成的中国西北内陆河流域水资源风险评估. 地理学报, 2023, 78(11):2763-2780. (WANG S Y, SUN C J, CHEN W. Assessing water resource risks in inland river basins of Northwest China from water chemistry and runoff. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(11):2763-2780.)
- 王淑佳, 孔伟, 任亮, 等. 国内耦合协调度模型的误区及修正. 自然资源学报, 2021, 36(03):793-810. (WANG S J, KONG W, REN L, et al. Research on misuses and modification of coupling coordination degree model in China. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(03):793-810.)
- 王天福, 龚直文, 邓元杰. 基于土地利用变化的陕西省植被碳汇提质增效优先区识别. 自然资源学报, 2022, 37(05):1214-1232. (WANG T F, GONG Z W, DENG Y J. Identification of priority areas for improving quality and efficiency of vegetation carbon sinks in Shaanxi province based on land use change. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(05):1214-1232.)
- 王田雨, 岳文泽. 面向碳增汇的国土空间格局优化: 理论框架与行动逻辑. 自然资源学报, 2024, 39(5):1008-1021. (WANG T Y, YUE W Z. Optimizing territorial spatial pattern for carbon sink growth: Theoretical framework and action logic. *Journal of Natural Resources*, 2024, 39(5):1008-1021.)
- 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. 自然资源学报, 2021, 36(01):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. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(01):196-207.)
- 谢三桃, 朱慧雯, 唐晓先, 等. 巢湖流域山水林田湖草生态保护和修复. 水资源保护, 2023, 39(02):252-258. (XIE S T, ZHU H L, TANG X X, et al. Ecological protection and restoration of mountain-river-forest-farmland-lake-grassland system in the Chaohu Lake Basin. *Water Resources Protection*, 2023, 39(02):252-258.)
- 谢舒笛, 莫兴国, 胡实, 等. 三北防护林工程区植被绿度对温度和降水的响应. 地理研究, 2020, 39(01):152-165. (XIE S D, MO X G, HU S, et al. Responses of vegetation greenness to temperature and precipitation in the Three-North Shelter Forest Program. *Geographical Research*, 2020, 39(01):152-165.)
- 徐丽, 于贵瑞, 何念鹏. 1980s-2010s中国陆地生态系统土壤碳储量的变化. 地理学报, 2018, 73(11):2150-2167. (XU L, YU G R, HE N P. Changes of soil organic carbon storage in Chinese terrestrial ecosystems from the 1980s to the 2010s. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 73(11):2150-2167.)
- 伊丽君. 加快乡土草种发展与促进新疆草原生态修复治理的思考. 安徽农业科学, 2023, 51(22):69-71. (YI L J. Thoughts on Accelerating the Development of Native Grass Species and Promoting the Restoration and Management of Grassland Ecology in Xinjiang. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2023, 51(22):69-71.)
- 尹力, 魏伟, 薄立明, 等. 基于主体功能区战略的新疆地区“三区空间”演化解析. 经济地理, 2023, 43(07):52-64. (YING L, WEI W, BO L M, et al. Evolution of “Three-function Spaces” in Xinjiang Based on Major Function-oriented Zoning Strategy. *Economic Geography*, 2023, 43(07):52-64.)
- 张红旗, 李达净. 西北干旱区不稳定耕地概念与分类研究——以新疆昌吉州为例. 地理研究, 2021, 40(03):597-612. (ZHANG H Q, LI D J. Concept and classification of unstable farmland in arid area of Northwest China: A case study of Changji Prefecture, Xinjiang. *Geographical Research*, 2021, 40(03):597-612.)

- 张利民, 刘希刚. 山水林田湖草沙一体化保护的系统性逻辑. 南京工业大学学报(社会科学版), 2024, 23(01):24-32+113. (ZHANG L M, LIU X. Systematic Logic of Integrated Protection of Mountains, Rivers, Forests, Fields, Lakes, Grasslands and Sand. Journal of Nanjing Tech University(Social Science Edition), 2024,23(01):24-32+113.)
- 张学斌, 石培基, 罗君, 等. 基于景观格局的干旱内陆河流域生态风险分析——以石羊河流域为例. 自然资源学报, 2014, 29(03):410-419.(ZHANG X B, SHI P J, LUO J, et al. The Ecological Risk Assessment of Arid Inland River Basin at the Landscape Scale: A Case Study on Shiyang River Basin. Journal of Natural Resources, 2014, 29(03):410-419.)
- 张杨, 杨洋, 江平, 等. 山水林田湖草生命共同体的科学认知、路径及制度体系保障. 自然资源学报, 2022, 37(11):3005-3018. (ZHANG Y, YANG Y, JIANG P, et al. Scientific cognition, path and governance system guarantee of the Life Community of Mountains, Rivers, Forests, Fields, Lakes and Grasses. Journal of Natural Resources, 2022, 37(11):3005-3018.)
- 张中秋, 劳燕玲, 王莉莉, 等. 广西山水林田湖生命共同体的耦合协调性评价. 水土保持通报, 2021, 41(03):320-332+365. (ZHANG Z Q, LAO Y L, WANG L L, et al. Evaluation on Coupling and Coordination Status of Mountain, Water, Forest, Field, and Lake Life Community in Guangxi Zhuang Autonomous Region. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(03):320-332+365.)
- 周汝佳, 张永战, 何华春. 基于土地利用变化的盐城海岸带生态风险评价. 地理研究, 2016, 35(06):1017-1028. (ZHOU R J, ZHANG Y Z, HE H C, et al. Ecological risk assessment based on land use changes in the coastal area in Yancheng city. Geographical Research, 2016, 35 (06):1017-1028.)
- 周妍, 苏香燕, 应凌霄, 等. “双碳”目标下山水林田湖草沙一体化保护和修复工程优先区与技术策略研究. 生态学报, 2023, 43(09):3371-3383. (ZHOU Y, SU X Y, YING L X, et al. Research of priority areas and technical strategies of the integrated protection and restoration projects for full-array ecosystems with carbon peak and carbon neutrality goals in China. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43 (09):3371-3383.)
- Alam S.A., Starr M., Clark B J F. Tree biomass and soil organic carbon densities across the Sudanese woodland savannah: a regional carbon sequestration study. Journal of Arid Environments, 2013, 89:67-7
- CHEN A, YANG X C, GUO J, et al. Synthesized remote sensing-based desertification index reveals ecological restoration and its driving forces in the northern sand-prevention belt of China. Ecological Indicators, 2021, 131(324):108230.
- GAO M W, HU Y C, BAI Y P. Construction of Ecological Security Pattern in National Land Space from the Perspective of the Community of Life in Mountain, Water, Forest, Field, Lake and Grass: A Case Study in Guangxi Hechi, China. Ecological Indicators. 2022, 139(1):108867.
- LI X F, SONG L N, XIE Z B, et al. Assessment of Ecological Vulnerability on Northern Sand Prevention Belt of China Based on the Ecological Pressure – Sensibility – Resilience Model. Sustainability, 2021, 13(11):6078.
- LI Y, LIU Y J, ZHANG Q, et al. Research on Ecological Protection and Restoration Measures in Altay Region based on the Coupling Perspective of the Mountains-Rivers-Forests-Farmlands-Lakes-Grasslands System. Journal of Resources and Ecology, 2021, 12(06):791-800.
- Liang J, Pan J H. Identifying carbon sequestration's priority supply areas from the standpoint of ecosystem service flow: A case study for Northwestern China's Shiyang River Basin. Science of The Total Environment, 2024, 927(01):172283.
- Tang X L, Zhao X, Bai Y F, et al. Carbon pools in China's terrestrial ecosystems: new estimates based on an intensive field survey. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(16):4021-4026.
- ZHU G F, QIU D D, Zhang Z X, et al. Land-use changes lead to a decrease in carbon storage in arid region, China. Ecological Indicators, 2021, (127):107770