

中国北方农牧交错带生态格局演变与优化及修复调控策略

马 龙¹, 张子越¹, 孙柏林¹, 刘廷玺¹, 黄 星¹, 赵 勇²

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 010018, 呼和浩特; 2. 中国水利水电科学研究院, 100038, 北京)

摘 要:北方农牧交错带作为我国北方重要生态安全屏障与关键生产基地, 生态环境脆弱且战略地位特殊, 其生态格局演变及优化调控对区域可持续发展至关重要。本研究基于土地覆盖、气象观测、遥感反演及经济社会数据, 运用生态系统分布规律分析、最小累计阻力模型等方法, 结合“自然-社会”二元水循环理论, 系统研究区域生态格局演变规律、驱动机制, 构建优化体系与修复策略。结果表明: 1990—2023年, 北方农牧交错带生态格局呈显著时空分异, 生态改善区整体向东北湿润区迁移、在西南干旱区收缩, 森林集中于东北部, 农田与聚落分布于中东部及南部, 荒漠聚集于中西部; 生态质量与功能(以NPP、NDVI为表征)呈西北低、东北高梯度, 整体趋好, 但中西部存在“水分限制—功能低下—退化加剧”循环, 东部农田扩张导致生态破碎化, 核心症结为水循环失衡。驱动机制上, 降水是核心自然因子, 与生态功能相关性显著高于气温; 人类活动呈双向效应, 生态工程推动生态用地增加, 而不合理开发及水资源利用加剧局部生态退化, 水利工程与水资源管理通过水循环正负耦合影响格局动态。基于此, 构建“点-线-面”多层次优化体系, 识别31处核心生态源地、22条生态廊道, 划分四类管控区域, 提出东北部自然恢复、西部强化人工干预与水利支撑的差异化策略, 全域推广节水灌溉、生态补水并建立“天空地”一体化监测网络。研究成果可为筑牢北方生态安全屏障、协调生态保护与经济发展提供科学依据。

关键词:生态安全屏障; 农牧交错带; 生态格局演变; 最小累计阻力模型; 修复调控策略; “自然-社会”二元水循环理论

Evolution and optimization of ecological pattern and restoration and control strategies in agro-pastoral ecotone in northern China

MA Long¹, ZHANG Ziyue¹, SUN Bolin¹, LIU Tingxi¹, HUANG Xing¹, ZHAO Yong²

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: As a critical ecological security barrier and key production base in northern China, the agro-pastoral ecotone features a fragile ecological environment and holds a unique strategic position. The evolution and optimal regulation of its ecological pattern are crucial for regional sustainable development. Based on land cover data, meteorological observations, remote sensing retrievals, and socioeconomic data, this study systematically investigated the evolutionary patterns and driving mechanisms of the regional ecological pattern

收稿日期: 2025-10-13 修回日期: 2025-11-21

作者简介: 马龙, 教授, 研究方向为气候变化、水文水资源变化、生态演变及其间效应与应对。

基金项目: 中国工程院咨询项目“内蒙古农牧交错带保护修复与高质量发展战略研究”(2023NMZA-01); 国家重点研发计划项目“黄河几字弯区地下水—河湖系统保护与产业适水调控关键技术及应用示范”(2023YFC3206500); 内蒙古自治区教育厅一流学科科研专项重点项目(YLXKZX-NND-010)。

and constructed an optimization system and restoration strategies by integrating methods such as ecosystem distribution pattern analysis and the minimum cumulative resistance model, combined with the natural-artificial dualistic water cycle theory. The results indicate that from 1990 to 2023, the ecological pattern of the northern agro-pastoral ecotone exhibits significant spatiotemporal differentiation. Ecologically improved areas generally shift northeastward towards humid regions and are contracted in the southwestern arid regions. Forests are concentrated in the northeast, while farmland and settlements are distributed in the central-eastern and southern parts, with desert areas concentrated in the mid-west. Ecological quality and function, characterized by NPP and NDVI, show a gradient of low in the northwest and high in the northeast, with an overall improving trend. However, a cycle of “water limitation, low function, and aggravated degradation” persists in the mid-west, and farmland expansion in the east leads to ecological fragmentation, with the core issue being an imbalance in the water cycle. Regarding driving mechanisms, precipitation is the dominant natural factor, showing a significantly higher correlation with ecological function than temperature. Human activities exhibit a dual effect: Ecological engineering promotes an increase in ecological land, while unsustainable development and water resource utilization exacerbate local degradation. Hydraulic engineering and water resource management influence pattern dynamics through both positive and negative coupling effects on the water cycle. Consequently, a multi-level “point, corridor, and network” optimization system is constructed, identifying 31 core ecological sources and 22 ecological corridors and delineating four types of zones. Differentiated strategies are proposed, including natural restoration for the northeast and enhanced artificial intervention with water infrastructure support for the west. Furthermore, promoting water-saving irrigation and ecological water supplementation and establishing an integrated “sky, space, and ground” monitoring network are recommended. This research provides a scientific basis for strengthening the northern ecological security barrier and coordinating ecological protection with economic development.

Keywords: ecological security barrier; agro-pastoral ecotone; ecological pattern evolution; minimum cumulative resistance model; restoration and regulation strategy; natural-artificial dualistic water cycle theory

中图分类号: X171.4+TV 文献标识码: A 文章编号: 1000-1123(2026)05-0046-12

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2026.05.007

一、引言

北方农牧交错带生态环境脆弱,具有遏制荒漠化东移及南下的重要作用,是我国重要的生态屏障,也是能源、粮食和重要农畜产品生产基地,具有特殊的战略地位。然而,由于干旱少雨、水资源短缺、人类活动强度大等,该地区的土壤侵蚀、土地沙化、植被覆盖度下降问题仍然十分明显,生态修复调控成为长期工作。

揭示生态格局演变规律及驱动机制是优化生态格局的必要前提。已有研究显示,北方农牧交错带祁连山地区草地和梯田的土壤侵蚀格局存在显著差异,梯田具有一定的水土保持效益;风蚀气候侵蚀力呈显著的东高西低空间分布格局。在空间上,防风固沙服务集中在南部和西部地区,风速和表层土壤沙粒含量是对防风固沙服务影响较显著的因子,净初级生产力

等其余生态系统服务集中在东部地区,归一化植被指数(NDVI)和植被景观格局指数的提升缓解了实际侵蚀,增强土壤水蚀控制服务和防风固沙服务,从而提升净初级生产力。整体来看,2000—2020年北方农牧交错带95%以上区域的生态系统功能明显提高,植被生态环境呈现总体变好趋势,植被净初级生产力(NPP)、水土保持功能和水源涵养能力均有明显提升;从空间分布来看,中东部的生境质量相对较好,东南部的生境质量相对较差;2000—2020年北方农牧交错带生态格局分布发生了显著变化,其中耕地变化最为显著。

在生态格局优化方面,已有研究发现,在北方农牧交错带西部干旱地区落实退耕还草、沙地植被修复等政策,优先引进耐旱、耐碱植物,是生态系统优化的重要基础;植被恢复可以提高物种丰富度、植被盖度、地上地下生物量、枯落物生物量,从而有效降低土壤可蚀

性。2000—2020年气候暖湿化趋势和人类的生态保护活动都对北方农牧交错带生态功能提升起了积极作用,尤其是年降水量增加对生态功能提升有非常显著的促进作用。总体来看,北方农牧交错带(尤其中西部)受降水等因素影响,自然恢复能力与南方农牧交错带相比有明显的差异,生态格局优化及修复调控需要更多人为干预。

已有研究揭示了北方农牧交错带生态系统功能提升、格局变化等特征,但水资源作为连接自然与人类活动的关键纽带,其调控作用尚未被充分关注。根据王浩院士提出的“自然-社会”二元水循环理论,干旱半干旱区生态演变是自然水循环与社会水循环协同作用的结果,为解析北方农牧交错带“生态-水文-人类活动”耦合关系提供了重要框架。此外,黄河流域梯级水库通过径流调节改善灌区植被、西北干旱区地下水超采加剧草地退化等研究,也证实了水利工程对生态格局的显著影响,为本文结合二元水循环理论完善调控策略提供了实践参考。

本研究以北方农牧交错带为研究区,围绕其生态格局演变规律及驱动机制、生态修复调控等基础科学问题展开讨论,以期筑牢我国北方重要生态安全屏障等战略提供基础理论和实践支撑。

二、研究区概况及研究方法

1. 研究区概况

北方地区是我国最重要的农牧业基地,由于农业和牧业长期共存形成独特的区域自然地理条件,自东北向西南形成了狭长的农牧交错带,是世界四大农牧交错带之一。因界定指标的差异,不同学科的学者对北方农牧交错带的划定范围不同,但大致为东起大兴安岭、西至青藏高原、从半干旱区向干旱区过渡的狭长地带,其核心区为内蒙古高原东南边缘和黄土高原北部。基于气候要素的定义,以年降水量、年均气温、相对湿度等气象指标进行农牧交错带范围的界定。本研究选用中国农业大学安萍莉教授团队提出的农牧交错带边界源,在此基础上去除了以林地为主的呼伦贝尔市的新巴尔虎左旗、鄂温克族自治旗等7个旗,以及以草地为主的乌兰察布市的四子王旗。

北方农牧交错带地貌类型复杂多样,海拔纵跨88~4945 m(图1),总体上由东北向西南递增,研究区东北端为大兴安岭西南缘丘陵及松辽平原,中部为吕梁山、阴山等丘陵及内蒙古高原,西南端为鄂尔

斯高原及黄土高原。植被类型自东北向西南依次为森林—森林草原—典型草原—荒漠草原。该地区土壤类型繁多,栗钙土广泛分布于研究区中段与东北部,黄绵土主要分布于研究区西南部的黄土高原及毛乌素沙地。东北地区及内蒙古东北部主要发展粮食、饲草作物的种植业,稳步发展露地错季菜等经济作物与特色作物。内蒙古、宁夏、甘肃等7省(自治区)发展以草食畜牧业为主的畜牧业产业结构。研究区农牧业交错发展,形成草牧业为主、粮食产业为辅,特色小杂粮、蔬菜、林果等产业为补充的农林牧结合的结构和产业体系。

2. 数据来源

收集了研究区1980—2023年降水、气温数据,2000—2023年潜在蒸散发及NDVI数据,1990—2023年土地覆盖数据,农业、畜牧业及其他产业产值数据,封山育林、退耕还草等数据。

其中,1980—2023年降水、气温等数据来源于中国气象局气象站点观测数据,并结合DEM数据插值成1 km×1 km空间分辨率的栅格数据。NDVI数据来源于美国宇航局中分辨率成像光谱辐射计传感器16 d时间分辨率、1 km×1 km空间分辨率的NDVI栅格产品。耕地、造林面积和农业、畜牧业产值及其他产业产值数据均来自统计年鉴。封山育林面积数据来自国家林业和草原局全国林业统计年报分析报告,退耕还草等数据来源于农业农村部全国草原监测报告。

3. 研究方法

针对生态格局演变,采用生态系统分布规律分析方法。采用NDVI、DEM、年降水、年气温等数据,通

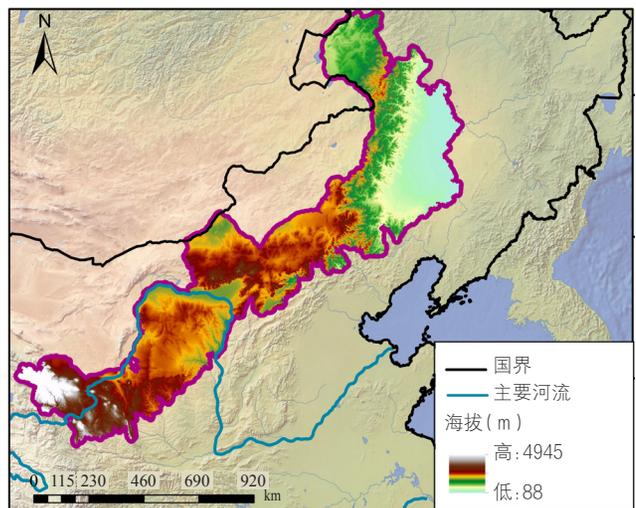


图1 北方农牧交错带研究区

过最大值合成法提取每年的NDVI值,用于计算北方农牧交错带植被净初级生产力(NPP),公式如下。

$$C_v = (V_{\text{NDVI}} - V_{\text{NDVI-soil}}) / (V_{\text{NDVI-MAX}} - V_{\text{NDVI-soil}}) \quad (1)$$

式中, C_v 为植被覆盖度; V_{NDVI} 为一年内最大的归一化植被指数; $V_{\text{NDVI-soil}}$ 为完全是裸土或无植被覆盖区域的NDVI值; $V_{\text{NDVI-MAX}}$ 为完全被植被所覆盖的像元NDVI,即纯植被像元的NDVI值。

$$V_{\text{NPP}} = 6.353943 - 0.05875t + 0.003497p + 0.000275tp - 0.00065A + 1.793308V_{\text{NDVI}} \quad (2)$$

式中, V_{NPP} 为净初级生产力; t 为年均气温($^{\circ}\text{C}$); p 为年降水(mm); A 为海拔高程(m); V_{NDVI} 为一年内最大的归一化植被指数NDVI。

针对生态格局优化,基于水源涵养、土壤保持、碳储存等数据,通过生态系统服务评估,得到生态源地分布情况。采用最小累计阻力模型(Minimum Cumulative Resistance, MCR),通过ArcGIS的Cost-distance和Cost path模块得到生态廊道分布情况。采用生境质量、防风固沙和水源涵养等数据,结合电路理论,构建生态阻力面。

三、生态格局演变规律及其驱动机制

1. 生态格局演变规律

(1) 生态格局范围演变规律

1990—2023年北方农牧交错带生态格局分布如图2所示,草地生态系统均匀分布,森林生态系统集中在东北部,农田生态系统分布在东部、中部和南部,荒漠生态系统主要在中西部和西南部,聚落生态系统集中在西南部 and 东部。整体上,1990—2023年北方农牧交错带生态改善区域向北/东北移动显著,每年扩大0.23%~0.29%。特别在西辽河平原和燕山丘陵区,向东北湿润区每年扩展3.5%~5%,主要集中在生态功能改善和退化区域的边界地带;自西南向内陆收缩移动,尤其在干旱和半干旱区域最为明显,特别是黄土高原边缘和河套平原区域,收缩范围占总面积的6.8%。生态改善区的迁移具有明显气候分异特征,呈现出由西南干旱区向东北湿润区逐渐移动的趋势。

这一趋势与水资源时空分配高度相关。东北部降水增加叠加松花江流域水库调蓄,水资源供给稳定,支撑森林草原扩张;西南部降水不足且河套灌区年引黄河水超50亿 m^3 ,生态用水被挤占,荒漠局部扩张,印证了“自然降水+水利工程”对生态格局的共

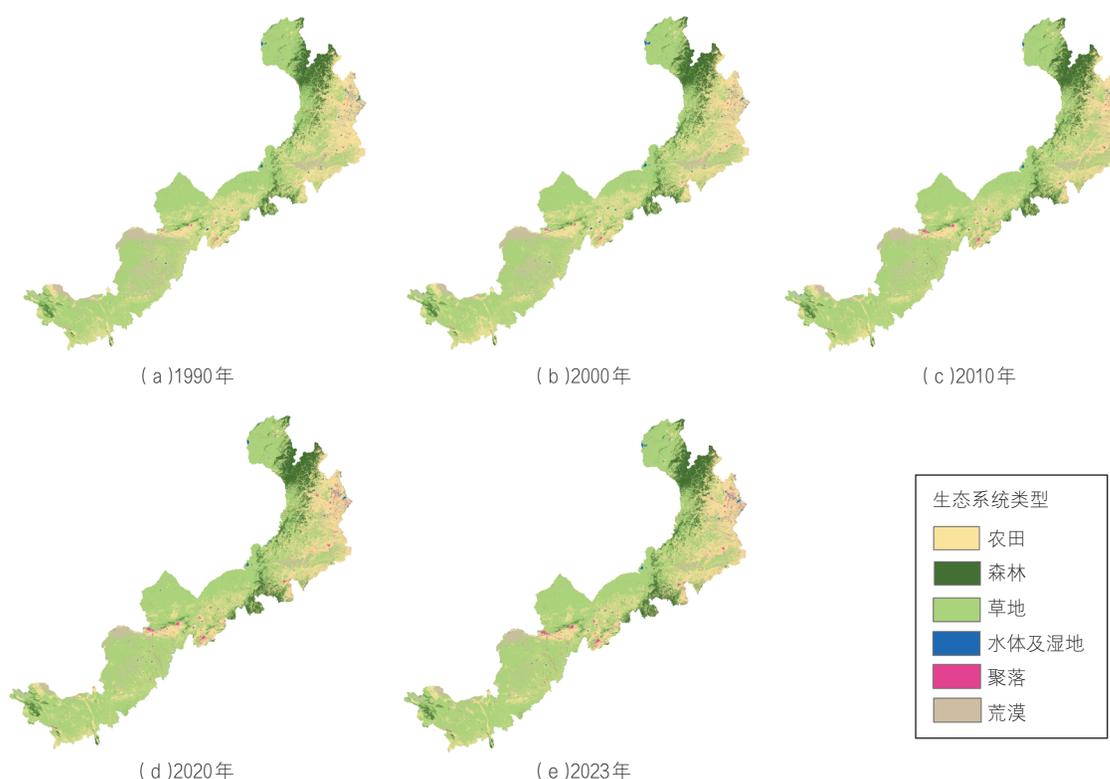


图2 1990—2023年北方农牧交错带生态格局分布

同塑造作用。

(2) 生态质量和功能演变规律

如图3所示, 2000—2023年北方农牧交错带平均NPP为780.71 g/(m²·a), NDVI为0.49。二者作为基本生态功能的表征, 空间差异比较显著, 但是具有相似的空间分布规律。2000—2023年北方农牧交错带NPP与NDVI分布趋势都是由西南及中部地区向东北递增。其中, NPP最低值出现在农牧交错带西北部, 约为377.8 g/(m²·a), 最高值出现在东北部, 约为944.9 g/(m²·a)。而NPP的多年空间变化幅度最缓慢的区域主要出现在农牧交错带中西部。总体来看, 无论是NPP总值还是多年变化, 其空间分布均存在较为明显的异质性, NPP总值整体表现为西北低、东南高的梯度特征, 而西北部NPP的变化出现负增长趋势。

分析NDVI值的总体分布, 发现其与NPP呈现出相似的空间分布模式。然而, NDVI在研究区域的空间分布差异性较小, 超过50%的地区显示出较小的变化或负增长。先前的研究表明, 气温和降水对NDVI的影响在空间上存在此消彼长的关系。因此, 本文进一步分析了2000—2023年北方农牧交错带NDVI与气温、降水的关系。

结果表明, 中部少部分地区的NDVI与气温的相

关性达到了-0.46, 这些区域位于温带大陆性季风气候区, 与低温地区相比对气候变化更为敏感。此外, NDVI与降水的相关性最高值达到0.8以上, 主要出现在中部及西部地区。这表明降水与NDVI的相关性比气温更高, 降水增加普遍对植物生长具有促进作用。总体来看, 北方农牧交错区NPP明显提高, 体现了植被生态质量改善和生态功能提升, 表明气候变化和人类活动共同推动该区域生态系统向良性发展。

值得注意的是, NDVI与降水的相关性显著高于与气温的相关性, 且社会水循环调节作用突出, 如西辽河灌区通过节水改造减少地下水开采, 周边NDVI提升, 鄂尔多斯煤炭开采导致地下水流失, 局部NDVI下降, 验证了社会用水活动对生态功能的直接影响。

(3) 生态格局演变中存在的主要问题

北方农牧交错带西部干旱半干旱区生态退化问题突出, 退化程度与生态功能水平呈显著负相关。沙化边缘地带草地退化区域植被覆盖度、草质和土壤有机质均下降, 与东北部植被健康区域形成对比, 反映出“水分限制—功能低—退化加剧”的恶性循环。中西部农业灌溉超额用水挤占生态用水, 东部农田扩张破坏自然径流, 导致水源涵养能力降低, 加剧了生态功能的区域分异。这些“自然—社会”水循环失衡现象, 导致健康生态系统面积减少, 生态功能进一步退化。

尽管区域整体生态质量呈改善趋势, 但生态系统破碎化问题显著, 削弱了功能提升的协同效应, 且破碎化程度与人类活动强度呈正相关。农田扩张区将原本连贯的森林、草地切割为孤立斑块, 森林、草地斑块数量增加且面积缩小, 无法形成有效生态廊道, 导致物种迁徙受阻, 生物多样性较完整区域降低, 与整体良性发展趋势中的“功能提升”形成矛盾, 局部功能改善但系统整合能力弱化。破碎化区域的水源涵养、碳储存等生态服务功能受损, 虽未影响整体生态服务提升趋势, 但导致部分区域的“降水—植被”正向反馈效应无法有效传导至退化区, 制约了整体生态功能的均衡改善。

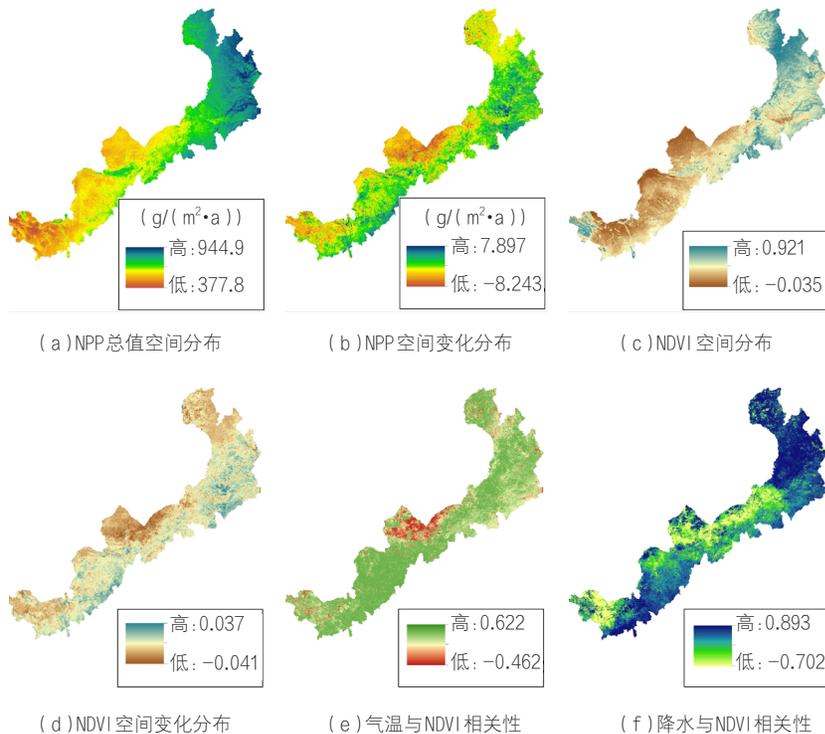


图3 2000—2023年北方农牧交错带生态功能变化分布

2. 生态格局演变驱动机制

(1) 气候变化驱动

降水是驱动北方农牧交错带生态格局演变的核心自然因素,直接影响植被覆盖度、生态服务功能和生态格局类型分布,如图4、图5所示。年降水量增加时,生态质量有明显提升,在东部湿润区,提升更为显著;年降水量减少时,土壤侵蚀率则会增加,尤其在坡地和退化草地区域。气温对生态格局的动态影响具有区域性差异,东部和南部地区气温升高显著促进了生态质量的改善,推动东部湿润区草原向林地转化;西部干旱区气温升高则加剧了草地退化,沙化土地增加10%~15%。气温降低会缩短植被生长期,进而降低植被覆盖度和生产量。

如图5所示,1980—1990年北方农牧交错带年均气温变化出现近43年最高值,为0.195℃/a,年降水量最大上升幅度达到30.81mm/a。1990—2000年西南地区年均气温变化趋势呈现更明显的增幅状态,最大增长幅度达到0.046℃/a,而年降水量自东向西增加,整体呈现自东向西暖湿化趋势。2000—2010年,南部地区出现暖干化现象,东部小范围地区年降水量增长量出现43年最高值,达38.91mm/a。2010—2023年,东北部分区域年均气温增长量最高值为0.187℃/a,东北地区年降水量增长趋势明显,增长量达17.35mm/a,这13年内,气温和降水量整体呈现自西向东最高递增趋势,自西南向东北呈现暖湿化状态。

理论上,气温和降水量都与植被生态质量密切相关,气温和降水量变化都是植被变化的重要驱动力。如

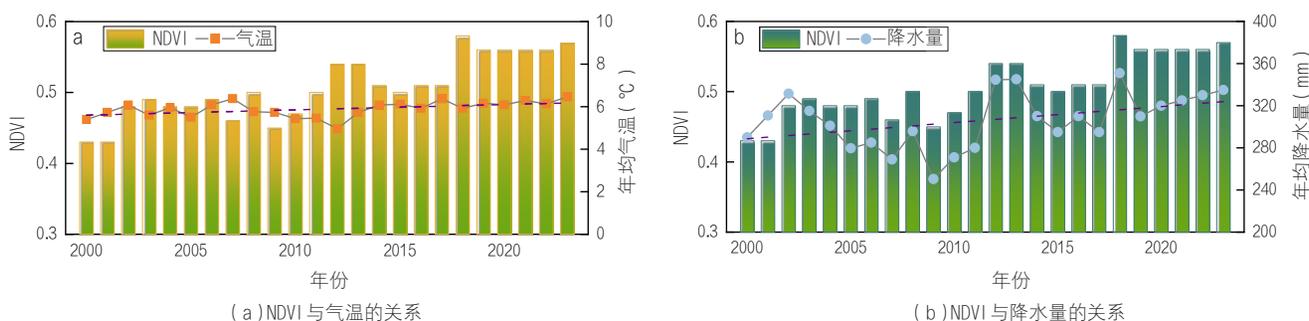


图4 2000—2023年北方农牧交错带气温、降水量与NDVI的变化关系

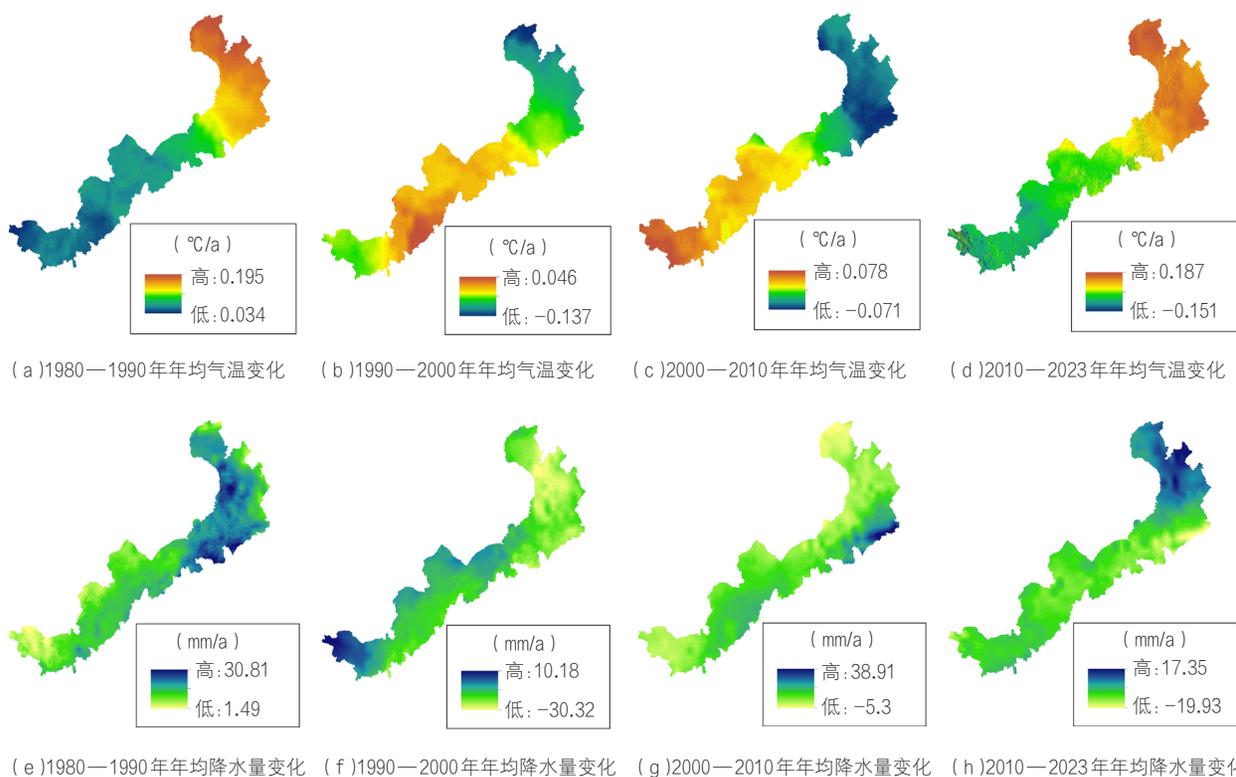


图5 1980—2023年北方农牧交错带年均气温和年降水量变化趋势

图6所示,2000—2023年北方农牧交错带出现平缓暖湿化趋势,NDVI与气温的相关性较低($r=0.33$),与降水量相关性较高($r=0.71$),表明农牧交错带区域降水量为影响NDVI的主要因素。NPP主要受降水影响($r=0.56$),年降水量与NPP的低值变化均出现在2007年前后。此外,NPP与年降水量也有较为一致的上升和下降趋势。

(2) 人类活动驱动

土地利用对北方农牧交错区生态结构和功能的影响十分明显。一方面,退耕还林还草、“三北”防护林和天然林保护生态工程促进了生态环境改善;另一方面,开荒、建设用地扩展对局部生态造成一定程度破坏。农牧交错带生态格局结构以草地和农田为主,生态格局变化频繁且剧烈,农田与草地之间互相转化是其动态特点。

对2000—2023年生态格局情况进行叠加分析(见图7),结果显示:转化为生态用地的面积明显大于转化为非生态用地的面积,表明退耕还林还草、人工造林等生态保护措施明显增加了生态用地,有助于生态环境整体改善。

除生态保护措施外,水利工程与水资源管理是关

键驱动。青铜峡水库通过径流调节,使下游乌兰察布湿地面积增加;鄂尔多斯地下水超采导致干层土壤面积增加,加剧了草地退化;宁夏灌区实施的“量水到户”政策提升了用水效率,节余水量使周边NDVI提升。这种“自然-社会”水循环的正负耦合,共同决定了生态格局的动态变化。

生态工程实施后,2000—2020年北方农牧交错带累计造林面积超过1200万 hm^2 ,其中西北部分县区造林面积超过2万 hm^2 。而图2显示森林、草地生态系统呈持续增加趋势,农田、荒漠生态系统面积相应减少,且造林时间序列与生态格局演变阶段高度契合,印证了造林工程是驱动区域生态系统类型转变的核心人为因素。

造林工程不仅实现了林地面积扩张,更推动了“沙化-林地”的生态系统类型转变。西北部分县区造林面积相对集中,图7显示该区域林地、绿地等生态用地占比显著提升,土地沙化、荒漠等退化类型占比持续下降;且造林面积最大的区域多属于“林地-绿地”生态格局类型,其空间范围随造林进程不断扩大,体现了造林工程对破碎化生态格局的整合作用,实现了从“沙化主导”到“林地主导”的生态格局转型。

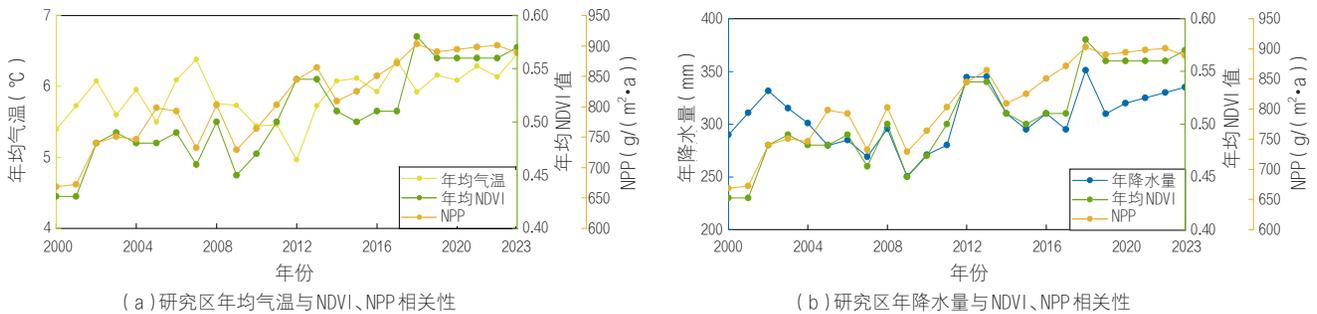


图6 2000—2023年研究区NDVI和NPP与年均气温、年降水量变化趋势

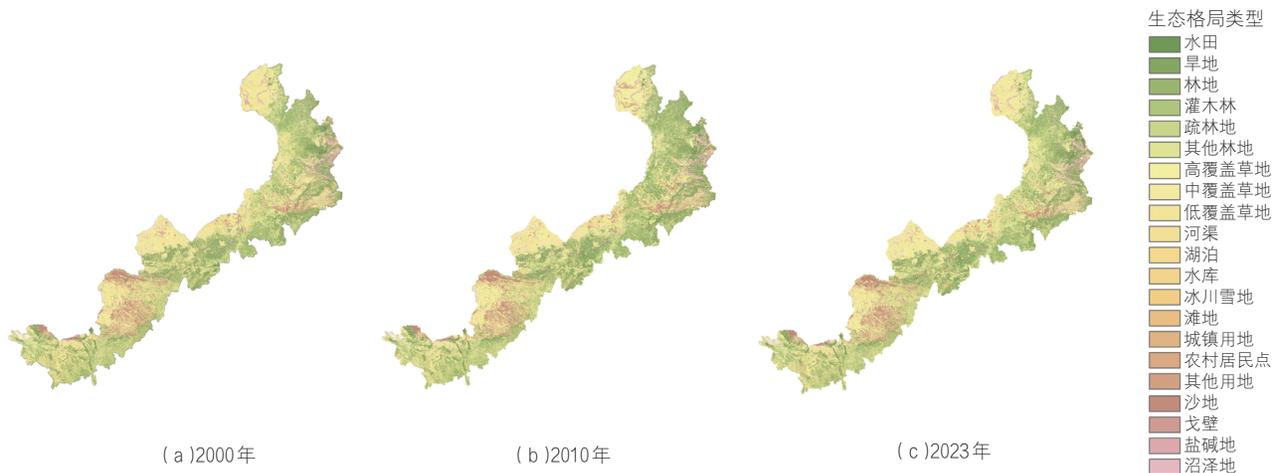


图7 2000—2023年研究区生态格局变化

如图8所示,北方农牧交错带农业产值稳步上升,特别是在2005—2010年间增长速度较快,之后增速放缓但仍保持增长。畜牧业产值也呈现出逐年增长的趋势,与农业产值类似,增速在2005—2010年间较快,之后放缓。

北方农牧交错带第一产业、第二产业、第三产业自2000年以来均呈持续增长趋势。2000—2010年间增长较缓慢,2010年之后第二产业和第三产业增加较快,相比之下第一产业增加较为缓慢。2020年之后第二产业增长速度超过第三产业。农业产值和畜牧业产值同样保持持续增长趋势,畜牧业产值增速相对较慢。实有耕地面积逐渐增加,造林面积呈现波动下降趋势,2000—2005年、2010—2015年两个时间段增加,2005—2010年、2015—2023年两个时间段下降。

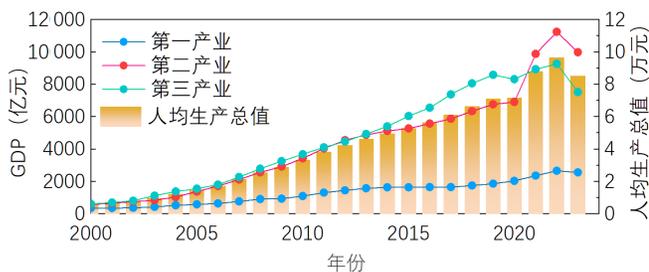
北方农牧交错带生态格局演变中,气候变化,尤其是气温升高和降水减少加剧了地区的干旱化和沙漠化,限制了生态系统的恢复能力,特别是在年均降水量不足400 mm的中西部地区,农业生产和放牧强度增加,导致草地退化率达到18.6%,沙化风险显著上升。而在东部降水充足的地区,降水增加显著放大了退耕政策的生态效益。人类活动,特别是产业结构转型、耕地扩展、过度放牧和城市化进程,通过改变土地利用方式或加剧资源消耗,深刻影响了生态环境。农业现代化和集约化导致草地和森林面积减少,生态系统破碎化加剧,水源涵养功能下降,城市化和基础设施建设的扩展也加剧了生态连通性的丧失。综上,自然因素和人类活动的共同作用加剧了生态退化,使区域生态服务功能受限,生态系统变得更加脆弱。

四、生态格局优化及修复调控策略

1. 生态格局优化

从生态脆弱性和生态服务功能(生境质量、防风固沙和水源涵养)出发,结合电路理论,基于前文揭示的生态改善区范围向东北湿润区迁移、中西部退化突出、生态系统破碎化等问题,确定生态源地、识别生态节点、提取生态廊道,结合“自然-社会”二元水循环理论,将水资源承载力作为核心约束,形成涵盖点-线-面多层级的生态格局优化体系,针对不同级别区域提出生态健康格局优化对策。

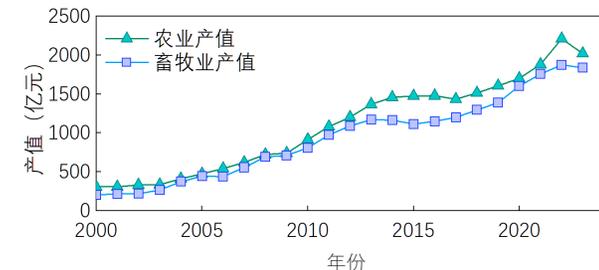
在构建合理生态格局“点”方面,结合生态格局演变中“东北部生态功能优越、西南部受人类活动干扰强烈”的空间特征,如图9所示,选取面积较大的保护



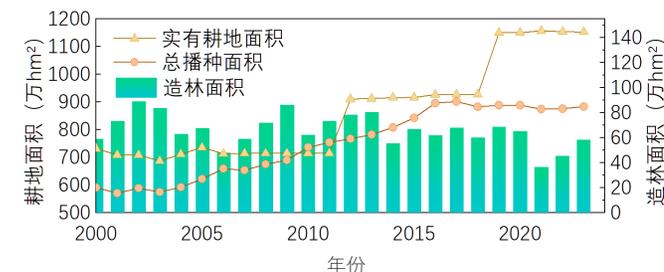
(a) 三次产业、人均生产总值变化



(b) 人口数、人口密度变化



(c) 农业与畜牧业产值变化



(d) 种植面积变化

图8 研究区人类活动变化趋势

区、草原、森林和重要水体作为核心生态源地。基于生态功能、生态健康、土地利用、生态连通性、生物多样性以及社会经济因素,针对“中西部草地退化、荒漠扩张”的问题进行综合考虑,最终确定核心生态源地包括雅鲁河-嫩江流域、呼伦贝尔草原保护区、大兴安岭南麓林草交错区、乌兰察布草原湿地、阴山北麓草原、青铜峡水库保护区等关键生态资源区域31处,优先将生态功能稳定、抗干扰能力强的区域纳入。如选定青铜峡水库保护区,既因其湿地功能重要,更因其可通过水库调度提供稳定生态用水,符合“生态-水文”协同

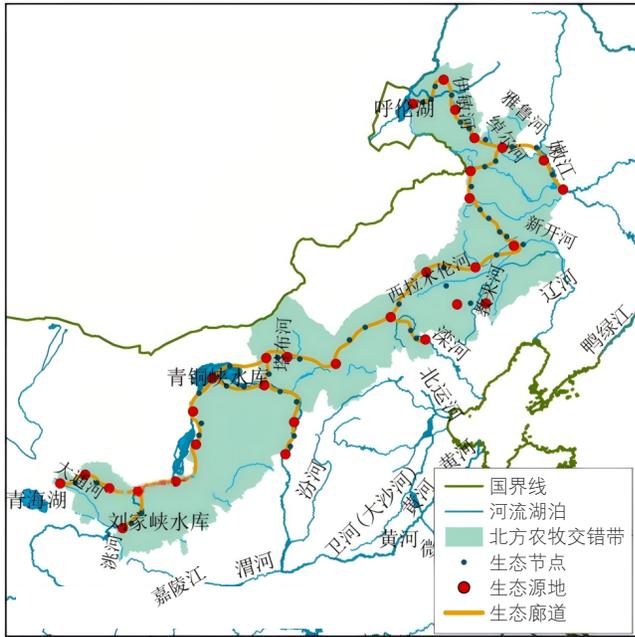


图9 北方农牧交错带生态节点、生态源地及生态廊道空间分布

原则,从而为退化区生态修复提供“源动力”。

这些生态源地涵盖湿地、草原、森林、沙漠等多种生态类型,每个区域在维持生态功能、促进生态恢复和保障水源供应等方面具有不可替代的重要作用。通过保护和修复这些生态源地,可以为区域的生态安全、可持续发展和生物多样性保护提供坚实保障,为未来生态格局的优化和生态文明建设奠定基础。生态源地在空间上呈现“北多南少”的格局,高度契合“生态格局向北迁移、南部生态连通性低”的演变规律;核心生态源地“东强西弱”和“沿河集聚”的特征,恰好匹配东北部植被覆盖率高、生境质量好,而西南部受耕地和建设用地挤占、生境质量较差的现状,印证了生态源地选取的合理性。

在构建合理生态格局“线”方面,结合“生态系统破碎化、廊道缺失导致连通性下降”的核心问题,如图9所示,针对性规划不同功能导向的生态廊道。东部草原-森林廊道(如呼伦贝尔-大兴安岭廊道),聚焦东北部生态功能优势区,强化物种基因交流和栖息地连通性,弥补“森林、草地被切割为孤立斑块”的缺陷;中西部廊道(如黄河流域生态廊道),应对“中西部沙化、风蚀严重”的问题,以阻止沙化和风蚀扩展为主,同时连接分散的草原生态系统,增强生态稳定性,依托自然径流与水利工程布局,将节余水量用于廊道植被灌溉,提升连通性;西南部廊道(如青铜峡-刘家峡水库廊道),针对干旱区水资源短缺的现状,承担蓄水涵养功能,稳固生态脆弱

地,协调水资源短缺与经济发展需求的矛盾。

从生态廊道分布来看,这些廊道大多位于不同生态区域之间的过渡带,贯穿了草原、森林、湿地及沙地等生态类型,特别是在黄河流域、嫩江流域和河套平原等生态敏感区,通过遵循山脉、河流等自然地理特征布局,有效规避农田、城镇等人工阻隔,连接周边生态源地。同时,针对部分廊道可能面临的耕地扩张、聚落侵占等人工阻隔问题,在廊道规划中预留生态缓冲带,明确禁止高强度人类活动,确保廊道连通性。因廊道内的植被覆盖度和生态功能与周边核心生态源地高度相关,连接强度直接影响区域生态安全格局,故需确保廊道规划与生态问题的空间分布一一对应,保障优化措施的靶向性。

在生态廊道中添加生态节点,能够有效增强生态连通性,有助于破解“生态系统破碎化导致物种迁徙受阻”的困境,提升生态服务功能,促进生态修复与保护,保障生物多样性的持续性,同时为区域的生态安全和可持续发展提供支撑。如图9所示,生态节点呈现“南北两侧密集、中部地区稀疏”的空间分布格局,这与中部地区农田集中、生态阻力大的现状相符,密集分布的节点可降低中部人工阻隔对廊道连通性的影响。

应对人类活动影响较大的生态节点进行重点保护,减少干扰。特别关注生态廊道中的敏感点和脆弱点,尤其是生态阻力值较大的节点,这些区域容易遭到破坏,导致生态廊道断裂,影响生态功能。节点的选取和保护策略围绕“人类活动强度与生态退化正相关”的结论,针对高干扰区域强化保护,确保廊道整体连通性。

在构建合理生态格局“面”方面,基于选定的生态源地、生态廊道,结合“生态质量空间分异、局部退化突出”的特征,进行研究区生态格局“面”优化。如图10所示,将北方农牧交错带分为重点保护区、生态修复区、一般管控区和协调发展区四类地区。分区管理有助于根据不同区域的生态特征和经济社会状况实施差异化的保护和管理策略:重点保护区聚焦东北部高功能区,保护现有优质生态系统,严控水资源开发,维持自然水循环;生态修复区针对中西部沙化、草地退化核心区,结合雨水集蓄、生态输水工程,集中开展修复工程;一般管控区覆盖生态功能中等、人类活动适度的区域,维持生态与生产平衡;协调发展区兼顾南部人类活动密集区的经济社会发展与生态保护,通过农业节水、生态补水实现“自然-社会”协同。

该分区方式有助于根据不同区域的生态特征和经济

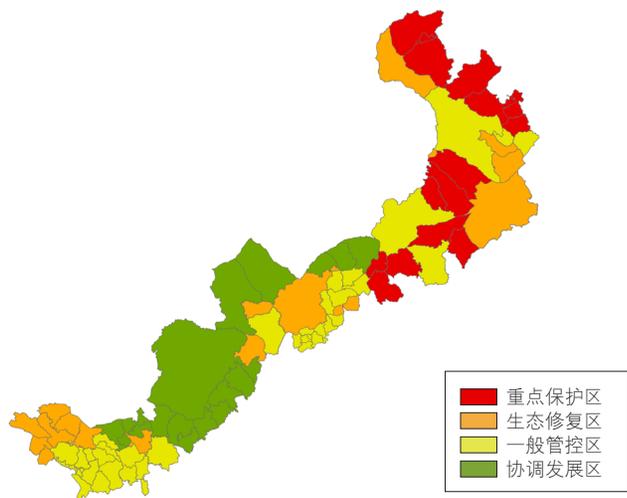


图10 研究区生态管控区分布

社会状况实施差异化的保护和管理策略,同时能够确保优先保护核心生态功能区,推动生态修复,提升生态系统的恢复能力,进而平衡生态保护与区域经济发展的需求。通过合理规划土地利用和生态保护措施,不仅有助于提高生态保护效率,还能够推动绿色经济和可持续发展,实现生态保护和经济发展的双赢。这一策略紧密衔接前文生态格局演变规律与存在的问题,为北方农牧交错带的生态安全和区域可持续发展提供科学依据和实际保障。

2. 生态修复调控策略

针对自然驱动主导的降水波动性,结合“降水与NDVI相关性显著、干旱区水分限制突出”的结论,建立气候适应性管理框架。在东北部湿润区,依托水热资源优势,推动林草复合系统建设,通过草田轮作、天然林保育增强生态系统的自我恢复能力,抑制农田扩张对草原的切割;在西南干旱区,严格限制高耗水农业和矿产开发,优先修复沙化、盐碱化土地,减少人类活动对脆弱生态的叠加破坏,针对性解决西南部干旱区水资源挤占加剧生态退化的问题。

针对人为驱动的产业矛盾,结合人类活动强度与生态退化正相关的规律,重构发展逻辑。在北方农牧交错带东部推广生态牧场、有机种植等低干扰产业,减少草场超载压力,缓解农业开发导致的生态破碎化;在西部生态退化区探索光伏治沙和特色种植模式,将治理工程转化为可持续生计来源,破解生态保护与经济发展失衡的困境。通过自然约束优化人类行为、人为干预弥补自然短板的双向调控,推动生态格局从被动响应退化转向主动提质稳基。

针对不同管控区提出不同修复调控策略:东北部

以自然恢复为核心,重点修复垦殖导致的草原破碎化斑块,通过退耕还草、生物廊道连接,提升生态系统的完整性和抗干扰能力,保护高功能生态区域;西部沙化-盐碱区以人工干预为先导,逐步重建耐旱植物群落,遏制沙丘东移和盐渍化扩散,针对性治理中西部核心退化区。针对自然降水波动,东北部依托水热优势推动林草复合系统建设,西南部限制高耗水产业;针对产业矛盾,东部推广生态牧场,西部探索光伏治沙。同时强化水利工程调控,西部干旱区建鱼鳞坑、水窖提升雨水利用水平,中部灌区推广滴灌,落实社会用水优化支撑生态修复的二元水循环思想。

全域协同层面,建立“天空地”一体化监测网络,利用卫星遥感识别草原退化、沙化扩张等风险点,结合地面传感器动态评估土壤水分、盐分阈值,全面提升区域生态韧性。重点保护区需强化自然恢复与生物多样性保护,解决东北部优质生态系统的保护需求;生态修复区应重点实施植被恢复、退耕还林还草等修复措施,解决中西部退化问题;一般管控区需推广农林复合经营与草畜平衡管理,维持生态与生产的平衡;协调发展区应发展智慧农业与沙产业经济,兼顾人类活动密集区的生态保护与经济发展。

五、总结与讨论

本研究以北方农牧交错带为研究区,系统探究生态格局演变规律、驱动机制,构建“点-线-面”多层次生态格局优化体系并提出修复调控策略。通过整合气象观测、遥感反演、土地覆盖及经济社会数据,运用生态系统分布规律分析、最小累计阻力模型、电路理论等方法,揭示了区域生态格局的时空演变特征,明确了气候变化与人类活动的协同驱动作用,最终形成针对性的生态保护与修复方案,为区域生态安全屏障建设和可持续发展提供科学支撑。

在生态格局演变规律及其驱动机制方面,本研究揭示的北方农牧交错带生态格局“向东北迁移、在西南收缩”特征,与区域“东北湿润、西南干旱”的气候分异高度契合,进一步印证了干旱半干旱区生态系统对水热条件的敏感性,西部因降水不足、蒸发强烈,叠加过度放牧与农业开发,形成“水分限制-退化加剧”的恶性循环,而东部水热条件优越,成为生态格局迁移的主要承接区,这一规律与北方农牧交错带“生态脆弱性由西向东递减”的区域特性一致。从驱动机制看,降水对生态质量(NDVI、NPP)的影响显著高于气温,

且东部湿润区降水的生态改善效应更突出,这与已有研究“半干旱区降水是植被生长首要限制因子”的结论相呼应。同时,人类活动呈现“双向影响”特征,造林工程、退耕还林还草等措施推动林地扩张,而农田扩张与城镇建设导致生态破碎化,二者的博弈决定了生态格局的动态平衡。不过,本研究暂未量化气候变化与人类活动的贡献度比例,未来可结合贡献率模型,进一步明确不同驱动因子的作用强度,尤其需关注气候暖湿化与生态工程的协同效应,以更精准解析生态演变的内在逻辑。此外,研究发现中西部荒漠在干旱年份存在局部扩张,这提示需加强极端气候事件对生态格局的短期冲击研究,为应对气候变化引发的生态风险提供更细致的科学依据。

在生态格局优化及修复调控策略方面,本研究构建的“点-线-面”优化体系,核心优势在于紧密衔接前文生态问题,避免了景观生态学概念的空泛应用——31处生态源地优先选择东北部高功能区与西部关键水源地,精准匹配“东强西弱”的生态功能格局;22条生态廊道按“东部促连通、西部防沙化、西南保水源”的功能定位规划,并通过预留缓冲带规避农田、城镇等人工阻隔,有效解决了“生态破碎化、廊道断裂”的核心矛盾,这一设计思路与北方农牧交错带“生态问题区域分异显著”的特点适配,提升了策略的针对性与可操作性。从修复调控来看,针对不同区域提出“东部自然恢复、西部人工干预”的差异化方案,既考虑了东北部生态系统较强的自我修复能力,又契合了西部沙化区自然恢复缓慢、需人为助推的现实需求,如西部推广的光伏治沙模式,可实现生态修复与经济收益双赢,为破解保护与发展矛盾提供了实践路径。但需注意,当前策略尚未充分融入水资源统筹管理视角,北方农牧交错带水资源时空分布不均,西部干旱区农业灌溉与生态用水矛盾突出,未来可进一步结合“自然-社会”二元水循环理论,在生态修复中增加节水灌溉、跨区域调水等水利工程协同措施,进一步优化“水-生态-生产”的平衡关系。此外,生态管控区的长期成效需依赖动态监测,建议后续结合“天空地”一体化监测数据,建立策略成效评估模型,及时调整修复措施,确保生态格局优化的持续性与稳定性。

参考文献:

[1] 姜婧妍,胡琦,楚希雅,等.中国北方农牧交错带风蚀气候侵蚀力时空变化特征及其成因分析[J].中国

农业气象,2025,46(4):459-470.

- [2] 邱嘉琦,于德永.中国北方农牧交错带生态系统服务空间格局及影响因子——以内蒙古中西部地区为例[J].生态学报,2023,43(18):7598-7609.
- [3] 王丽霞,史园莉,张宏伟,等.2000—2020年北方农牧交错区植被生态功能变化及驱动因子分析[J].生态环境学报,2021,30(10):1990-1998.
- [4] 张莹,赵媛媛,刘如龙,等.中国北方农牧交错带生境质量时空演变与情景模拟[J].干旱区研究,2025,42(1):154-165.
- [5] 王玉石,武昱鑫,余新晓,等.北方农牧交错带植被恢复下坡向对土壤可蚀性的影响[J].中国水土保持科学(中英文),2025,23(2):116-126.
- [6] 王浩,孟现勇,丁建丽,等.数字孪生驱动的水-能-粮-生耦合系统协同治理新范式[J].中国水利,2025(18):1-11.
- [7] 张金良.黄河流域生态保护和高质量发展水战略思考[J].人民黄河,2020,42(4):1-6.
- [8] 毛德华,夏军,黄友波.西北地区水资源与生态环境问题及其形成机制分析[J].自然灾害学报,2004,13(4):55-61.
- [9] ZHANG J, SUN W, ZHONG W, et al. The substrate is an important factor in controlling the significance of heterotrophic nitrification in acidic forest soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 76: 143-148.
- [10] 李旭亮,杨礼箫,田伟,等.中国北方农牧交错带土地利用/覆盖变化研究综述[J].应用生态学报,2018,29(10):3487-3495.
- [11] 陈全功,张剑,杨丽娜.基于GIS的中国农牧交错带的计算和模拟[J].兰州大学学报(自然科学版),2007(5):24-28.
- [12] CHEN X, JIANG L, ZHANG G L, et al. Green-depressing cropping system: A referential land use practice for follow to ensure a harmonious human-land relationship in the farming-pastoral ecotone of northern China[J]. Land Use Policy, 2021, 100: 104917.
- [13] 贺缠生,张宝庆,张兰慧,等.农牧交错带土地利用变化对地表水热过程的影响[M].北京:科学出版社,2024.
- [14] 袁宏霞,乌兰图雅,郝强.北方农牧交错带界定的研究进展[J].内蒙古林业科技,2014,40(2):38-43.
- [15] 蒋卫国,陈云浩,李京,等.中国北方农牧交错带生态环境的空间格局演变[J].自然资源学报,2005,

- 20(6):871-878.
- [16] CHEN H, LUUK F, SCHILD J, et al. Impacts of large-scale landscape restoration on spatio-temporal dynamics of ecosystem services in the Chinese Loess Plateau[J]. *Landscape Ecology*, 2022, 37(1):329-346.
- [17] 刘婵, 刘冰, 赵文智, 等. 中亚地区植被净初级生产力时空动态及其与气候因子关系[J]. *遥感技术与应用*, 2020, 35(4):924-933.
- [18] LI M, WANG C, ZHANG X. Identification of the candidate areas of ecological protection red lines based on water conservation function in territory spatial planning[J]. *Geographical Research*, 2019, 38(10):2447-2457.
- [19] 王楠, 张凤燃, 刘姝芳, 等. 河套灌区水-粮食-生态耦合协调演变与驱动要素分析[J]. *灌溉排水学报*, 2025, 44(10):145-154.
- [20] LAMA S, VELESCU A, LEIMER S, et al. Plant diversity influenced gross nitrogen mineralization, microbial ammonium consumption and gross inorganic N immobilization in a grassland experiment[J]. *Oecologia*, 2020, 193:731-748.
- [21] ZHANG Y, WANG J, DAI S, et al. The effect of C:N ratio on heterotrophic nitrification in acidic soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 137:107562.
- [22] PAN H, LIU H, LIU Y, et al. Understanding the relationships between grazing intensity and the distribution of nitrifying communities in grassland soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 634:1157-1164.
- [23] 郭晓东, 刘强, 李文鹏, 等. 西辽河平原地下水失衡及其与土地利用的互馈关系[J]. *水文地质工程地质*, 2024, 51(4):77-87.
- [24] 王双明, 申艳军, 孙强, 等. 西部生态脆弱区煤炭减损开采地质保障科学问题及技术展望[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2020, 2(4):5-19.
- [25] 郑圆圆, 郭思彤, 苏筠. 我国北方农牧交错带的气候界线及其变迁[J]. *中国农业资源与区划*, 2014, 35(3):6-13.
- [26] RAZA S, MIAO N, WANG P, et al. Dramatic loss of inorganic carbon by nitrogen-induced soil acidification in Chinese croplands[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(6):3738-3751.
- [27] GALLOWAY J N, TOWNSEND A R, ERISMAN J W, et al. Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions[J]. *Science*, 2008, 320(5878):889-892.
- [28] 孟庆涛, 张文海, 常学礼. 我国北方农牧交错区形成的原因[J]. *内蒙古环境保护*, 2003, 15(1):16-19.
- [29] FRIENDLY M. Corrgrams: exploratory displays for correlation matrices[J]. *The American Statistician*, 2002, 56(4):316-324.
- [30] 史文娇, 刘奕婷, 石晓丽. 气候变化对北方农牧交错带界线变迁影响的定量探测方法研究[J]. *地理学报*, 2017, 72(3):407-419.
- [31] 魏学. 内蒙古农牧交错区草地植被指数及其对气候的响应[J]. *草业科学*, 2018, 35(10):2389-2394.
- [32] 赵阳, 辛艳, 王友胜, 等. 黄河上游宁夏段水土保持与水沙变化研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2023, 31(5):1075-1083.
- [33] 王红雨, 徐黎, 刘国庆, 等. 宁夏WUA项目区实施“量水到户”的可行性分析[J]. *中国农村水利水电*, 2010(5):45-49.
- [34] 徐斌, 杨秀春, 陶伟国, 等. 中国草原产草量遥感监测[J]. *生态学报*, 2007, 27(2):405-413.
- [35] 周立华, 侯彩霞. 北方农牧交错区草原利用与禁牧政策的关键问题研究[J]. *干旱区地理*, 2019, 42(2):354-362.
- [36] SUN R, YAO P, WANG W, et al. Assessment of wetland ecosystem health in the Yangtze and amazon river basins[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2017, 6(3):81.
- [37] 魏琦. 北方农牧交错带生态脆弱性评价与生态治理研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.
- [38] 郭忠升, 邵明安. 半干旱区人工林草地土壤旱化与土壤水分植被承载力[J]. *生态学报*, 2003, 23(8):1640-1647.
- [39] 秦大庸, 陆垂裕, 刘家宏, 等. 流域“自然-社会”二元水循环理论框架[J]. *科学通报*, 2014, 59(Z1):419-427.
- [40] 刘家宏, 秦大庸, 王浩, 等. 海河流域二元水循环模式及其演化规律[J]. *科学通报*, 2010, 55(6):512-521.
- [41] 陈默, 林育青, 张建云, 等. 水生生态系统生产总值核算体系及应用[J]. *水资源保护*, 2023, 39(1):234-242.

责任编辑 吕彩霞