

DOI: 10.20103/j.stxb.202504261003

刘焱序, 王晨旭, 张 晓, 李长嘉, 徐子涵, 董建权, 张东海. 耦合生态水文-经济社会过程的中国旱区国土空间生态修复模拟器. 生态学报, 2025, 45(22): - .

Liu Y X, Wang C X, Zhang X, Li C J, Xu Z H, Dong J Q, Zhang D H. A simulator coupled ecohydrological and socioeconomic processes for territorial ecological restoration in China's dryland. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(22): - .

耦合生态水文-经济社会过程的中国旱区国土空间生态修复模拟器

刘焱序^{1,*}, 王晨旭¹, 张 晓², 李长嘉¹, 徐子涵³, 董建权⁴, 张东海⁵

1 北京师范大学地理科学学部 地表过程与水土风沙灾害风险防控全国重点实验室, 北京 100875

2 自然资源部国土整治中心(自然资源部土地科技创新中心) 自然资源部土地整治重点实验室, 北京 100035

3 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083

4 北京林业大学园林学院, 北京 100083

5 西安科技大学测绘科学与技术学院, 西安 710054

摘要:旱区由于缺水导致的强水分胁迫, 具有生态系统、社会系统和经济系统的多重脆弱性。开展旱区国土空间生态修复是应对气候变化和人类活动双重压力、提高旱区生态系统韧性的关键途径。面向建设绿色智慧的数字生态文明战略需求, 亟需从生态水文-经济社会过程耦合的角度, 开发集成生态风险评估、成本效益核算、空间规划选址技术的国土空间生态修复模拟软件, 提升规划管理的数字化智能化水平, 科学支撑旱区国土空间生态修复决策。本项目以中国北方旱区为主要研究区, 聚焦旱区生态-水文过程影响下的生态系统韧性形成机制、旱区社会-经济-生态过程的空间交互作用路径 2 项关键科学问题, 研发基于生态系统韧性的旱区生态风险评估技术、统筹旱区社会-经济-生态过程的生态修复成本效益核算技术、旱区国土空间生态修复规划与决策模型等 3 项关键技术, 旨在为突破国土空间生态修复定量化模拟的技术瓶颈提供科技支撑。

关键词:生态水文过程; 生态风险; 自然对人类贡献; 成本效益; 模型

A simulator coupled ecohydrological and socioeconomic processes for territorial ecological restoration in China's dryland

LIU Yanxu^{1,*}, WANG Chenxu¹, ZHANG Xiao², LI Changjia¹, XU Zihan³, DONG Jianquan⁴, ZHANG Donghai⁵

1 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Hazards Risk Governance (ESPHR), Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 Land Consolidation and Rehabilitation Center (Land Science and Technology Innovation Center), Key Laboratory of Land Consolidation and Rehabilitation, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China

3 School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

4 School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

5 College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China

Abstract: Due to severe water stress caused by water scarcity, the ecosystem, social system, and economic system in dryland regions exhibit multiple vulnerabilities. Implementing territorial ecological restoration in dryland areas is a key approach to adapting to the dual pressures of climate change and human activities, as well as enhancing ecosystem resilience. In response to the strategic demand for building a green and intelligent digital ecological civilization, it is

基金项目: 国家重点研发计划青年科学家项目(2024YFF1309200)

收稿日期: 2025-04-26; 网络出版日期: 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yanxuli@bnu.edu.cn

urgently necessary to develop a simulator for territorial ecological restoration that integrates ecological risk assessment, cost-benefit accounting, and spatial planning and location selection technologies from the perspective of coupling ecohydrological and socioeconomic processes. The overall goals of this project are to enhance the digital and intelligent level of territorial planning and to provide scientific support for decision-making on territorial ecological restoration in dryland regions. This project focuses on the dryland regions of northern China as the main study area, addressing two key scientific issues: the formation mechanism of ecosystem resilience under the influence of ecohydrological processes, and the spatial interaction pathways of socio-economic-ecological processes in dryland areas. Three key technologies have been developed, including the ecological risk assessment technology for dryland based on ecosystem resilience, the cost-benefit accounting technology for ecological restoration that integrates the social, economic and ecological processes in dryland, and the planning and decision-making model for territorial ecological restoration of dryland. The outcome would provide scientific and technological support for overcoming the technical bottlenecks in quantitative simulation of territorial ecological restoration.

Key Words: ecohydrological process; ecological risk; nature's contribution to people; cost-benefit; model

旱区(Dryland)指年平均降雨量与潜在蒸散发之比小于 0.65 的区域,是最易受气候变化影响的地区之一^[1-2]。中国旱区分布广、类型多,具有生态系统、社会系统和经济系统的多重脆弱性^[3]。开展旱区国土空间生态修复是应对气候变化和人类活动双重压力、提高旱区生态系统韧性的关键途径^[4-5]。由于缺水导致的强水分胁迫,旱区生态修复不宜以绿化面积和绿化程度作为主要评价标准^[6-8]。然而,已有研究对旱区国土空间生态修复的量化评估和优化方法往往忽略了生态-水文过程和社会-经济过程间的复杂交互作用关系,难以量化阐释生态修复区域的生态系统稳定性和社会经济可持续性^[8]。如何更加整体性、系统性的理解和刻画旱区国土空间生态修复中人与自然的的关系,成为行业内重要科学问题和技术挑战^[9]。

首先,全球气候变化加剧了干旱风险,促使旱区多种生态系统结构和功能属性发生系统性突变^[10-12]。因此,需要塑造具有韧性的生态系统以应对复杂多样的气候变化风险^[13]。然而,目前针对气候变化和人类活动复合压力条件下的中国旱区生态系统韧性阈值尚未形成科学定论,制约了对旱区生态系统韧性特征和形成机制的科学认识与相关生态修复行动^[14-15]。因此,需要建立以国土空间为对象的景观尺度中国旱区生态-水文过程参数集,空间化、量化识别中国旱区生态系统韧性,为未来气候变化下骤旱、高温干旱、极端干旱情景下的生态风险判别提供临界值^[16-18],从而科学指导保障修复区域生态系统稳定性的旱区国土空间生态修复选址。

其次,中国旱区主要分布在西部省份,经济发展水平相对滞后,居民生计对土地的依赖程度高,生态效益的提升不宜以牺牲社会经济利益为代价。因此,从成本效益的角度量化评估生态修复的社会、经济、生态多重效益,对于指导生态修复项目兼顾实现效益最大化和成本最小化具有重要价值^[5, 19]。然而,已有研究对利益相关者的生态修复效益需求差异仍没有得到充分考虑,在景观尺度上生态修复的供给-需求匹配、成本-效益匹配、近程-远程匹配、当前-未来匹配路径尚不清晰^[20-21]。基于社会-生态系统视角,将生态、社会和经济效益整合到修复规划的设计和评估中,有助于实现全球、国家尺度生态修复目标与本地利益相关者福祉的协调^[22-23],从而科学指导保障修复区域社会经济可持续性的旱区国土空间生态修复选址。

最后,传统的生态修复规划和管理往往依赖于决策部门的经验和实践,缺乏对旱区生态系统韧性和生态风险的科学判别,对未来生态修复活动-社会经济-气候变化的共同作用也缺乏系统研判^[8, 24]。国土空间生态修复是一项跨学科的工作,数字智能化高新技术是国土空间生态修复决策技术转型的重要标志,可以将旱区社会-生态系统前沿科学规律与专家知识算法化、模块化,并通过有效衔接各个模块的输入输出数据,进行系统性的国土空间生态修复情景模拟、分析与优选^[25-26]。因此,串联生态学、地理学相关前沿理论知识点,统筹旱区生态风险评估、利益相关者需求匹配、生态修复空间布局、环境变化下的适应性管理等算法,开展智能化生态修复规划与决策,是国土空间生态修复前沿技术领域和重要业务需求^[27-28]。

面向以上理论和方法需求,本项目聚焦生态水文与经济社会过程耦合视角下旱区国土空间生态修复的新技术、新模式及其原理,针对旱区国土空间生态修复量化模拟技术瓶颈,重点从旱区生态风险评估、生态修复成本效益核算、生态修复模拟决策 3 个层面开展研究。拟在旱区生态水文过程参数率定、高精度经济社会过程参数率定、生态修复模拟软件研发的关键技术及原理方面取得突破,为针对性修复旱区生态系统提供理论依据和技术支撑。

1 项目目标

本项目针对旱区生态-水文过程参数和生态系统韧性阈值不准确、生态修复利益相关者的效益标定不清晰、生态修复规划与部门决策数字化智能化程度弱等问题,拟以中国北方旱区为主要研究区,耦合生态水文-社会经济过程,揭示干旱胁迫下生态系统韧性的形成机制,解析旱区生态修复的成本投入效益产出路径,研发旱区国土空间生态修复模拟软件,为突破国土空间生态修复量化模拟瓶颈提供科技支撑。研究成果将助力“典型脆弱生态系统保护与修复”重点专项的总体目标“促进生态与生产功能协同提升,形成整体和系统治理技术体系,并进行推广应用,在 2035 年远景目标下,推动筑牢生态安全屏障、保护生物多样性,统筹部署山水林田湖草沙系统治理科技创新”的实现。

2 拟解决的关键科学和技术问题

本项目以中国北方旱区为主要研究区,聚焦旱区生态水文过程影响下的生态系统韧性形成机制、旱区社会-经济-生态过程的空间交互作用路径 2 项关键科学问题,研发基于生态系统韧性的旱区生态风险评估技术、统筹旱区社会-经济-生态过程的生态修复成本效益核算技术、旱区国土空间生态修复规划与决策模型等 3 项关键技术。具体包括:

(1)通过探究旱区水约束条件下林灌草生态系统的空间结构和自组织过程,率定中国旱区景观尺度生态水文过程参数,基于干旱事件分析植被恢复和水资源管理措施对生态系统的短期和长期影响过程,揭示干旱影响下的旱区生态系统韧性特征与阈值,以期回答“旱区生态-水文过程影响下的生态系统韧性形成机制是什么”的科学问题。

(2)通过综合对地观测数据和社会行为大数据与社区实地调研,率定社会经济过程的关键参数,研制考虑利益相关者需求的生态修复成本与社会、经济、生态效益核算方法,识别生态修复的供给-需求匹配、成本-效益匹配、近程-远程匹配、当前-未来匹配路径,以期回答“旱区社会-经济-生态过程的空间交互作用路径是什么”的科学问题。

(3)通过景观尺度生态水文过程参数率定和模拟,揭示干旱胁迫下中国旱区生态系统韧性形成及维持机制,基于生态韧性阈值研发未来干旱事件下的生态风险评估技术,为预测水资源约束下未来生态修复效果提供科学依据。

(4)通过识别中国旱区国土空间生态修复的成本投入和效益产出路径,实现生态修复效益与利益相关者需求在景观尺度上的对应,为国土空间生态修复提供一种社会-生态系统视角下更为全面、公平和高效的决策支持。

(5)研发集成生态水文过程、生态风险评估、成本核算、效益预测、空间布局决策、适应性管理等多重模块的交互式国土空间生态修复模拟软件,辅助生态修复规划方案的适应性优化,为中国旱区各级行政区域的国土空间生态修复全生命周期管理提供技术支撑。

3 研究内容

本项目设置 5 项研究任务,各任务之间的联系见图 1。

(1)任务一:干旱胁迫下生态系统韧性的形成机制与阈值识别

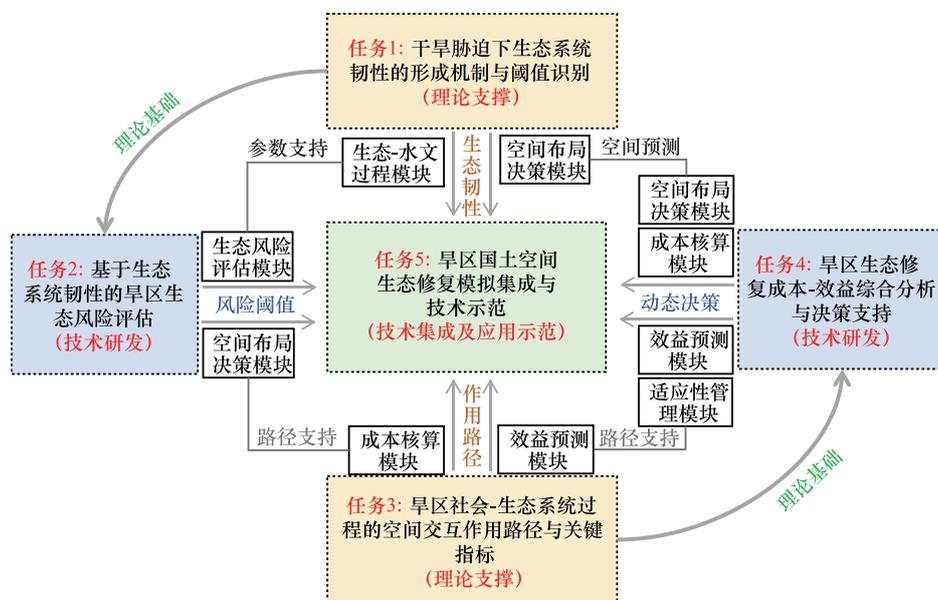


图 1 研究任务设置及其逻辑关系

Fig.1 Research task settings and their logical relationships

协同高分辨率遥感产品、实地监测数据和植被土壤样带调查,探究旱区水约束条件下生态系统植被的空间结构和自组织过程,率定适用于中国北方旱区的景观尺度生态-水文过程参数;刻画干旱事件下的生态系统响应曲线,基于抵抗力、恢复力和稳定性等指标维度,阐明生态-水文过程影响下旱区生态系统韧性的形成机制;阐明不同植被恢复和水资源管理措施对生态系统的短期和长期影响,识别林灌草生态系统关键结构和功能的突变阈值。

(2) 任务二:基于生态系统韧性的旱区生态风险评估

围绕 CMIP6 情景,析取干旱、高温、人口增长、放牧压力等影响旱区生态风险的关键指标,降尺度建立高时空分辨率的生态风险评估指标集;基于干旱事件下的生态系统响应曲线,判定多重压力叠加下的旱区林灌草生态系统关键结构和功能突变阈值,预测 CMIP6 情景下的阈值突破概率;面向气候变化下的未来生态风险,基于该国土空间中的林灌草生态系统抵抗力、恢复力等韧性指标,分析韧性作用下生态系统对未来生态风险的适应能力,识别未来气候变化下景观尺度生态保护和修复的主要位置及生态系统类型。

(3) 任务三:旱区社会-生态系统过程的空间交互作用路径与关键指标

综合对地观测数据、社会行为大数据和社区实地调研,以高空间分辨率揭示人类活动在中国旱区的景观尺度分布格局及其演变趋势;在此基础上采用大数据、深度学习等技术方法,识别旱区社会-经济-生态过程的空间交互作用路径,包括旱区社会经济发展对生态系统的影响路径,以及人类福祉需求视角下生态系统变化对利益相关者的反馈路径;析取关键指标,建立基于复杂网络的旱区社会-生态系统结构,率定社会经济过程的关键参数,实现生态修复投入和产出的路径可视化。

(4) 任务四:旱区生态修复成本-效益综合分析与决策支持

解析旱区不同类型的生态修复项目的成本构成,明确资金投入的关键领域与分配比例;从利益相关者的需求视角出发,预测国土空间生态修复提供的自然对人类贡献,及其空间供需与流动特征,研制考虑利益相关者数量、结构和空间分布的生态修复成本与社会、经济、生态效益核算方法;在生态修复投入和产出的路径可视化的基础上,构建基于成本-效益分析的生态修复决策支持模型,为项目选择、资源配置和风险管控提供科学依据。

(5) 任务五:旱区国土空间生态修复模拟集成与技术示范

基于加性效益函数、遗传及模拟退火算法等多目标优化手段,构建生态修复空间布局模拟算法与优化模型;集成基于生态系统韧性的未来风险判定、成本投入-效益产出核算等算法,研发旱区自然恢复和人工修复优先布局选址算法,构建适用于旱区国土空间生态修复规划的多情景智能决策算法,开发旱区国土空间生态修复模拟器,辅助决策者开展生态修复规划方案的适应性管理;通过在中国北方旱区开展应用示范,展示模拟器在旱区生态修复中的实用性与效果,推动国土空间生态修复规划与管理的数字化智能化技术应用。

4 技术路线与关键计量步骤

围绕总体研究目标,本项目按照“研判-预测-评估-规划”的总体思路,开展生态韧性研判、生态风险预测、成本效益评估、生态修复规划四项工作,建立从多源数据整合到国土空间生态修复模拟器构建的全链条技术路线(图 2),从生态-水文过程影响下的生态系统结构和功能的韧性形成机理出发,预测未来气候变化和人类活动对旱区生态系统的影响,评估利益相关者视角下的生态修复成本效益,并构建基于成本-效益分析的旱区生态修复项目规划决策支持算法,集成各项算法研发国土空间生态修复模拟器,为决策者开展生态修复规划提供决策支持。

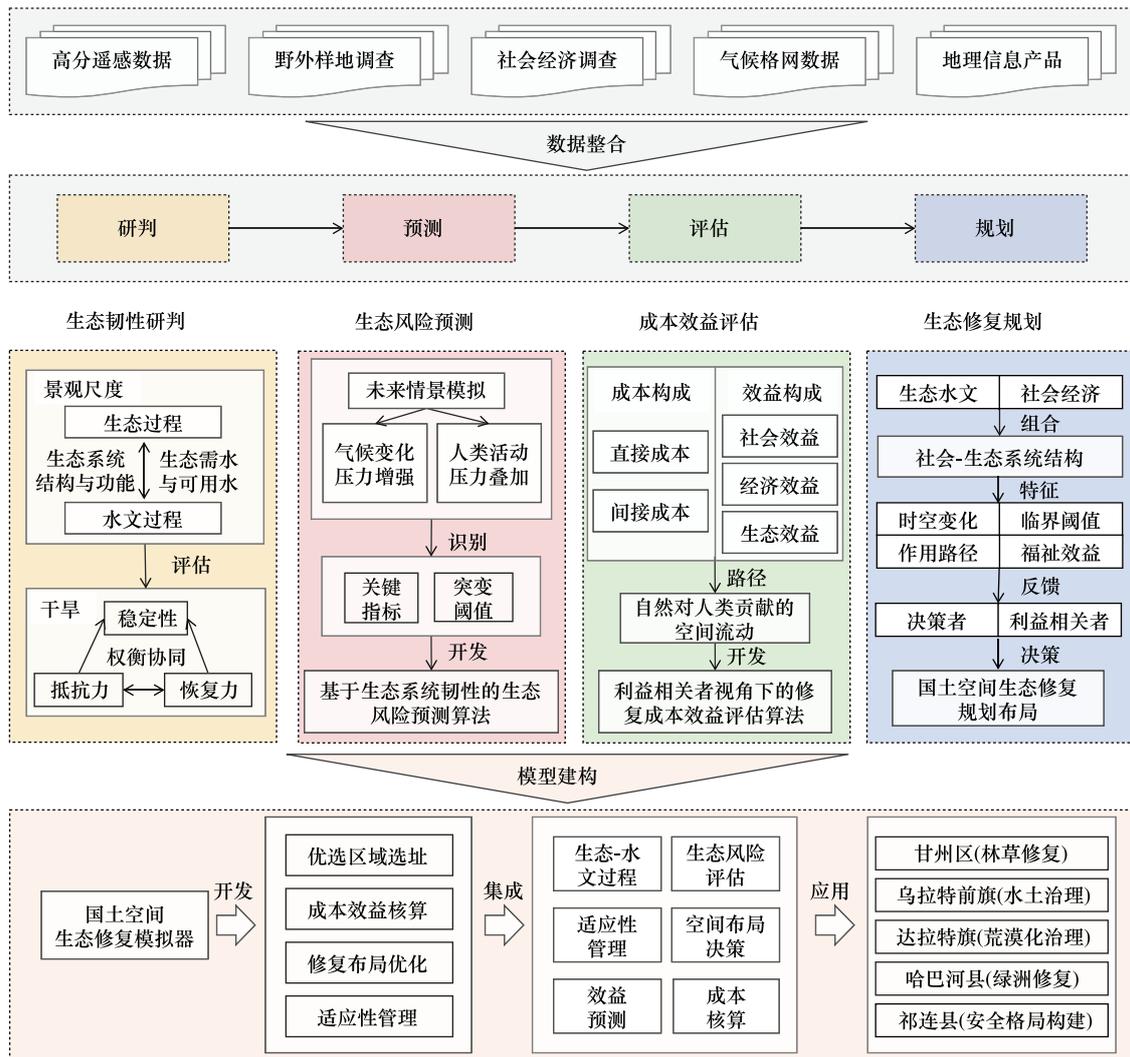


图 2 项目总体技术路线

Fig.2 Overall technical route of the project

(1) 识别生态修复措施对干旱下生态系统韧性的影响

项目应用两种反事实因果分析方法,时空量化识别生态修复措施对干旱下生态系统韧性的影响。针对时间序列数据,双重差分模型作为一种准自然实验方法,能够有效控制潜在混杂因素,通过对比处理组与对照组的时间序列变化捕捉政策净效应,被广泛应用于政策效应评估。项目针对生态修复措施实施的时间节点,采用双重差分模型识别生态修复措施是否会提升生态系统韧性。针对特定时间的空间数据集,倾向得分匹配可以使对照组与实验组的观测变量尽可能相似,从而尽量消除有措施和无措施样本的选择性偏差。项目选择倾向得分匹配的方法分别在生态修复区和未修复区进行采样,比较地理空间关键变量控制条件下,生态修复区样本相对于未修复区样本是否生态系统韧性显著提升。

(2) 预判未来气候变化下的生态修复优先位置

本项目分别选择 SSP126、SSP245、SSP370 和 SSP585 等 4 个情景,基于气候系统模式输出结果,预测未来干旱强度变化和生态系统韧性变化,基于四象限分析识别生态修复潜力区。未来需要修复的优先位置应定位当前处于“韧性低-干旱高”,此类区域未来具备较低的生态系统韧性并将面临更高的干旱风险但,需优先开展水资源管理、土地开发管制、生态保护修复等修复工作;相对的,当处于“韧性高-干旱低”时,考虑到其在未来受到更弱的干旱干扰并具备更高的生态系统韧性,该区域的修复优先级更低。

(3) 评估自然对人类的贡献以预测生态修复效益

项目构建中国北方旱区 1km 分辨率的社会经济要素数据集,包括人口、GDP、夜间灯光等。建立自然对人类的贡献(Nature's Contribution to People, NCP)评估框架,将 NCP 拆分为自然贡献和人类需求 2 个评估图层。基于阈值回归模型提取生态修复通过提升自然贡献影响人类福祉需求的关键距离阈值,区分不同生态修复措施对居民福祉的近远程影响机制。对于能够接收到自然贡献的地理位置,结合当地或类似区域已有的生态产品价值实现模式,区分不同 NCP 类别,评估生态修复带来的生态效益、社会效益和经济效益。

(4) 基于多目标优化框架开展生态修复空间布局

项目采用带约束的 NSGA-III 算法进行多目标寻优。目标函数包括全局决策函数,即最大化气候调节 NCP、最小化成本,并在符合水资源消耗量上限的前提下最小化用水量;以及局部决策函数,即最大化各生态修复单元的人类福祉需求。针对旱区生态修复布局的多层级优化需求,本项目采用“双层协同优化框架”构建多目标模型,包括全局优化层、局部响应层和层级协同机制三部分。通过多维决策空间映射,筛选出同时满足全局气候调节最优、资源消耗可控,且局部综合效益达标的非劣解集,使旱区生态修复布局既能满足全局资源和成本限制,又能服务于居民对生态修复福祉提升的差异化需求。

5 结语

中国旱区分布广、类型多,开展中国旱区国土空间生态修复是应对气候变化和人类活动双重压力、提高旱区生态系统韧性的关键途径。已有研究缺乏对旱区生态水文-社会经济过程的系统解析,旱区生态修复的量化评估和优化方法往往忽略了生态、水文过程和社会、经济过程间的复杂交互作用关系,不足以量化阐释修复区生态系统的稳定性和社会经济的可持续性。本项目以中国北方旱区为主要研究区,率定旱区生态-水文过程参数,揭示干旱胁迫下旱区生态系统韧性的形成机制,阐明旱区社会-生态系统要素的交互作用路径与关键指标,提出基于生态系统韧性的旱区生态风险评估技术,研发旱区生态修复成本-效益综合分析决策支持技术,构建旱区国土空间生态修复模拟器,服务旱区国土空间生态修复规划与管理。研究成果预期能够为旱区生态修复科学决策、精准施策提供重要科技支撑。

参考文献(References):

- [1] Fu B J, Stafford-Smith M. Dryland social-ecological systems in changing environments. Springer. 2024.
- [2] Koppa A, Keune J, Schumacher D L, Michaelides K, Singer M, Seneviratne S I, Miralles D G. Dryland self-expansion enabled by land-atmosphere feedbacks. Science, 2024, 385(6712): 967-972.

- [3] Li C J, Fu B J, Wang S, Stringer L C, Wang Y P, Li Z D, Liu Y X, Zhou W X. Drivers and impacts of changes in China's drylands. *Nature Reviews Earth and Environment*, 2021, 2(12): 858-873.
- [4] Fu B J, Liu Y X, Meadows M E. Ecological restoration for sustainable development in China. *National Science Review*, 2023, 10(7): nwad033.
- [5] Liu Y X, Han Y, Wu J C, Wang C X, Fu B J. The response of geographical processes to landscape restoration; China's research progress. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2023, 47(5): 792-807.
- [6] Kannenberg S A, Anderegg W R L, Barnes M L, Dannenberg M P, Knapp A K. Dominant role of soil moisture in mediating carbon and water fluxes in dryland ecosystems. *Nature Geoscience*, 2024, 17(1): 38-43.
- [7] Zhang Y, Keenan T F, Zhou S. Exacerbated drought impacts on global ecosystems due to structural overshoot. *Nature Ecology & Evolution*, 2021, 5(11): 1490-1498.
- [8] 傅伯杰, 刘焱序, 王帅, 宋俊峰, 李泽江. 科学改善荒漠化地区人与自然关系. *中国科学院院刊*, 2024, 39(12): 2027-2036.
- [9] 傅伯杰. 国土空间生态修复亟待把握的几个要点. *中国科学院院刊*, 2021, 36(1): 64-69.
- [10] Li X Y, Piao S L, Huntingford C, Peñuelas J, Yang H, Xu H, Chen A P, Friedlingstein P, Keenan T F, Sitch S, Wang X H, Zscheischler J, Mahecha M D. Global variations in critical drought thresholds that impact vegetation. *National Science Review*, 2023, 10(5): nwad049.
- [11] Berdugo M, Delgado-Baquerizo M, Soliveres S, Hernández-Clemente R, Zhao Y C, Gaitán J J, Gross N, Saiz H, Maire V, Lehmann A, Rillig M C, Solé R V, Maestre F T. Global ecosystem thresholds driven by aridity. *Science*, 2020, 367(6479): 787-790.
- [12] Berdugo M, Gaitán J J, Delgado-Baquerizo M, Crowther T W, Dakos V. Prevalence and drivers of abrupt vegetation shifts in global drylands. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2022, 119(43): e2123393119.
- [13] Yao Y, Liu Y X, Fu F Y, Song J X, Wang Y J, Han Y, Wu T J, Fu B J. Declined terrestrial ecosystem resilience. *Global Change Biology*, 2024, 30(4): e17291.
- [14] Li C J, Fu B J, Wang S, Stringer L C, Zhou W X, Ren Z B, Hu M Q, Zhang Y J, Rodriguez-Caballero E, Weber B, Maestre F T. Climate-driven ecological thresholds in China's drylands modulated by grazing. *Nature Sustainability*, 2023, 6(11): 1363-1372.
- [15] Ren Z B, Li C J, Fu B J, Wang S, Zhou W X, Stringer L C. Belowground soil and vegetation components change across the aridity threshold in grasslands. *Environmental Research Letters*, 2023, 18(9): 094014.
- [16] Chen S L, Stark S C, Nobre A D, Cuartas L A, de Jesus Amore D, Restrepo-Coupe N, Smith M N, Chitra-Tarak R, Ko H, Nelson B W, Saleska S R. Amazon forest biogeography predicts resilience and vulnerability to drought. *Nature*, 2024, 631(8019): 111-117.
- [17] Smith T, Boers N. Global vegetation resilience linked to water availability and variability. *Nature Communications*, 2023, 14: 498.
- [18] Zhang Y, Wang J A, Berner L T, Goetz S J, Zhao K G, Liu Y L. Warming and disturbances affect Arctic-boreal vegetation resilience across northwestern North America. *Nature Ecology & Evolution*, 2024, 8(12): 2265-2276.
- [19] Wang C X, Liu Y X, Liu X, Qiao W G, Zhao M Y. Valuing ecological restoration benefits cannot fully support landscape sustainability: a case study in Inner Mongolia, China. *Landscape Ecology*, 2023, 38(12): 3289-3306.
- [20] Liu Y X, Wang C X, Dong J Q, Zhang J Z, Fu B J. Grasp the prior ecosystem services in multi-objective ecological restoration. *Transactions in Earth, Environment, and Sustainability*, 2023, 1(1): 55-67.
- [21] Liu Y X. Five key issues of assessing nature's contribution to people toward landscape sustainability. *Transactions in Earth, Environment, and Sustainability*, 2024, 2(2): 43-49.
- [22] Delevaux J M S, Silver J M, Winder S G, Bood N, Chevez L, Velásquez P, Calzada Vázquez Vela A, Barlett R, Porta M A, Wolny S A, Bailey A, McField M, Muñoz-Castillo A I, Arkema K K. Social-ecological benefits of land-sea planning at multiple scales in Mesoamerica. *Nature Sustainability*, 2024, 7(5): 545-557.
- [23] Scherzinger F, Schädler M, Reitz T, Yin R, Auge H, Merbach I, Roscher C, Harpole W S, Blagodatskaya E, Siebert J, Ciobanu M, Marder F, Eisenhauer N, Quaas M. Sustainable land management enhances ecological and economic multifunctionality under ambient and future climate. *Nature Communications*, 2024, 15: 4930.
- [24] 王军, 傅伯杰, 张骁, 刘焱序, 赵文武. 基于自然的青藏高原一体化生态保护修复优化管理. *中国科学院院刊*, 2024, 39(7): 1123-1130.
- [25] Ding Z W, Zheng H, Wang J, O'Connor P, Li C, Chen X D, Li R N, Ouyang Z Y. Integrating top-down and bottom-up approaches improves practicality and efficiency of large-scale ecological restoration planning; insights from a social-ecological system. *Engineering*, 2023, 31: 50-58.
- [26] Yue C, Xu M Y, Ciais P, Tao S, Shen H Z, Chang J F, Li W, Deng L, He J H, Leng Y, Li Y, Wang J M, Xu C, Zhang H, Zhang P Y, Zhang L K, Zhao J, Zhu L, Piao S L. Contributions of ecological restoration policies to China's land carbon balance. *Nature Communications*, 2024, 15: 9708.
- [27] Peng J, Xu D M, Xu Z H, Tang H, Jiang H, Dong J Q, Liu Y X. Ten key issues for ecological restoration of territorial space. *National Science Review*, 2024, 11(7): nwael176.
- [28] 王军, 孙雨芹, 杨智威, 彭建. 自然资源-社会经济-生态系统耦合视角下的生态保护修复转型思考. *地质通报*, 2024, 43(8): 1297-1304.