

DOI: 10.20103/j.stxb.202407041559

王迪, 郑华, 刘智, 王磊, 苗永刚, 赵美超. 基于生态修复效益的生态修复优先区识别. 生态学报, 2025, 45(11): 5137-5146.

Wang D, Zheng H, Liu Z, Wang L, Miao Y G, Zhao M C. Identification of priority areas for ecological restoration based on ecological restoration benefits. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(11): 5137-5146.

基于生态修复效益的生态修复优先区识别

王 迪^{1,2}, 郑 华^{2,*}, 刘 智¹, 王 磊¹, 苗永刚¹, 赵美超¹

¹ 沈阳环境科学研究院辽宁省城市生态重点实验室, 沈阳 110167

² 中国科学院生态环境研究中心区域与城市生态安全全国重点实验室, 北京 100085

摘要: 生态系统修复旨在增加植被覆盖度基础上最大化提升生态系统服务功能, 科学识别生态修复优先区对精准实施生态修复工程具有重要意义。以沈阳市为例, 基于生态系统质量和区域自然属性识别潜在森林生态修复区, 分析生态修复效益与潜在生态修复区耦合关系, 进而确定生态修复优先区域。结果表明: ①不同立地条件生态系统质量参照值差异较大, 基于气候因子与土壤肥力设定生态分区, 结合植被净初级生产力生态质量表征指标, 可准确量化不同区域生态系统质量参考值和现状; ②利用生态系统质量与理想参照值进行对比的方法, 可以较准确反映研究区森林生态系统生态质量的恢复潜力, 进而选择合适的生态修复方式; ③生态修复优先区识别过程中, 对于是否考虑生态修复效益在生态修复优先区空间识别中存在明显差异, 基于潜在修复区与防风固沙效益耦合的方法适用于沙地治理需求地区。研究提出了“理想参照系构建-生态质量评估-潜在生态修复区识别-生态修复效益权衡-高效益低成本区域优先”的生态修复优先区识别方法框架, 可广泛应用于森林生态系统生态修复政策制定。

关键词: 生态系统修复; 生态质量评估; 理想参照系; 生态修复效益; 决策者偏好

Identification of priority areas for ecological restoration based on ecological restoration benefits

WANG Di^{1,2}, ZHENG Hua^{2,*}, LIU Zhi¹, WANG Lei¹, MIAO Yonggang¹, ZHAO Meichao¹

¹ Liaoning Provincial Key Laboratory of Urban Ecology, Shenyang Academy of Environmental Sciences, Shenyang 110167, China

² State Key Laboratory of Regional and Urban Ecology, Research Center for Eco-Environmental Science, Chinese Academy of Science, Beijing 100085, China

Abstract: Ecosystem restoration aims to maximum the ecosystem services on the basis of increasing vegetation coverage, scientific identification of priority areas for ecological restoration is of great significance to accurately implement ecological restoration projects. Based on the forest restoration in Shenyang, identification of potential forest ecological restoration areas based on ecosystem quality and regional natural properties, the coupling relationship between ecological restoration benefits and potential ecological restoration areas was analyzed, and then the priority areas for ecological restoration were determined. The results showed that: (1) The reference values of ecosystem quality varied greatly under different site conditions. The ecology zoning method which considered the climate factors and soil fertility, combined with the net primary productivity index of vegetation, could accurately characterize and quantify the reference values and status of ecosystem quality in different regions; (2) By comparing the ecosystem quality with the ideal reference value, the recovery potential of forest ecosystem ecological quality was accurately reflected, and then a more suitable ecological restoration method was selected; (3) In the process of identifying priority areas for ecological restoration, there were significant differences in

基金项目: 国家自然科学基金(41925005); 辽宁省生态环境厅生态环境科研计划项目(2024 年); 辽宁省博士科研启动基金计划项目(2022-BS-350)

收稿日期: 2024-07-04; 采用日期: 2025-05-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhenghua@rcees.ac.cn

whether to consider the trade-off relationship of ecological restoration benefits in spatial identification of priority areas for ecological restoration, and the method based on the coupling of potential restoration areas and windbreak and sand fixation benefits was suitable for the areas with sandy land management needs. The identification of ecological restoration priority areas based on the coupling of potential ecological restoration areas and wind and sand prevention benefits was suitable for regions with sandy land management needs. In this paper, a method of identifying priority areas for ecological restoration in areas requiring sandy land management is proposed, which includes “construction of ideal reference system-assessment of ecological quality-identification of potential ecological restoration areas-trade-off of ecosystem restoration benefits- priority of high-benefit and low-cost areas”, can be widely used in the formulation of forest ecosystem restoration policy-making.

Key Words: ecosystem restoration; ecological quality assessment; ideal reference; ecological restoration benefits; decision maker preference

在全球气候变化和人类活动的双重压力下,生物多样性丧失、水土流失、土地退化等生态问题日益凸显,严重威胁着区域生态安全和可持续发展^[1-2]。为了应对各类生态问题,确保生态系统服务功能的可持续供应,我国已实施多项生态修复计划,并取得良好的生态成效,如天然林保护工程、退耕还林(草)工程、“三北”防护林工程、长江/珠江流域防护林工程、京津风沙治理和退牧还草工程等^[3-5]。然而,资金不足限制了生态修复的大规模实施^[6-7],为了提高生态修复效率,科学有效地识别生态修复优先区域尤为重要。目前,生态修复优先区识别的研究主要基于生态安全格局构建法^[8-10]、生态系统服务簇法^[11-12]、多准则决策法^[13]等,生态安全格局构建的方法主要采用“源头识别-阻力面构建-廊道提取”的基本研究框架,从生态安全廊道构建的角度识别重要的生态修复区域^[9,14];生态系统服务簇评估方法强调跨越时空重复出现在同一范围内的多个生态系统服务类型的集合,识别区域内主导的生态系统服务类型,划定以不同生态系统服务功能主导的生态修复区域;多准则决策方法倾向于从生态系统的多种特征叠加分析中识别生态修复优先区,例如从生态系统自身的组成、质量和服务以及人类利益^[15]。生态修复工程的实施主要目标为增加生态系统服务功能的供应量,但同时需要针对性考虑区域生态系统服务的实际需求与生态修复效率,尽量减少或避免生态系统服务功能供需不匹配、生态修复效率低的情况发生^[2,16],因此本研究提出“理想参照系构建-生态质量评估-潜在生态修复区识别-生态修复效益权衡-高效益低成本区域优先”的生态修复优先区识别框架体系,进一步解决生态系统服务功能供需不匹配、生态修复效率低的问题。

沈阳市作为东北地区维护国家“五大安全”的重要枢纽区,也是位于我国生态环境一级敏感带上的生态脆弱区^[17]。特殊的地理位置和自然资源匮乏的双重属性导致其土地沙化敏感性较高,特别是西北部地区,是一个典型的自然资源匮乏与土地沙化敏感双重问题交织的区域。本研究基于“理想参照系构建-生态质量评估-潜在生态修复区识别-防风固沙效益权衡-高效益低成本区域优先”的研究框架,探究基于防风固沙需求的大空间尺度森林生态系统生态修复优先区识别方法,形成生态修复优先区空间分布范围和修复顺序,实现低成本投入、高防风固沙效益的生态修复目标,研究成果为生态修复政策制定与工程实践提供参考依据。

1 研究区概况

沈阳市(122°25'9"—123°48'24"E,41°11'51"—43°2'13"N)东西宽 115 km,南北长 205 km,总面积 12860 km²,位于我国东北地区的南部,辽宁省的中部,科尔沁沙地南缘,西北部的康平、法库、新民、辽中与处于沙地南侵咽喉要道的辽西地区紧密相连,是沈阳市科尔沁沙地歼灭战行动的主战区。沈阳市地处长白山余脉与辽河冲积平原过渡地带,地形地貌以河流沉积作用形成的冲击平原地貌为主,植物区系为温带落叶阔叶林区,属于长白植物区系与华北植物区系的过渡带。

2 研究方法

2.1 森林生态系统生态质量评估方法

2.1.1 生态分区划分

本研究生态分区划分以气候因子分区为基础,以土壤肥力作为校正,对沈阳市市域范围进行生态分区划分。

(1) 气候分区

沈阳市年平均降水量数值在 491.68—771.09 mm 之间,年平均温度范围处于 6.83—10.01 ℃ 之间,将上述两个气候因子均分为高、中、低三个等级(见表 1)。

(2) 土壤肥力分区

本研究以土壤有机质百分比来表征土壤肥力,并依据全国第二次土壤普查中的土壤肥力分级标准将土壤有机质百分比分为 6 个等级(见表 2)。

2.1.2 理想参照系构建

本研究以 NPP 指标来表征生态系统的生态质量,选取各生态分区中森林生态系统、草原生态系统范围内 NPP 值前 10% 栅格像元值作为各分区森林和草地生态系统生态质量的理想参照系值,即背景值,生态系统质量分级标准见表 3。

2.2 防风固沙效益分析方法

2.2.1 防风固沙功能评估

本研究采用修正风蚀方程(Revised Wind Erosion Equation, RWEE)计算防风固沙量的方法来表征 2020 年沈阳市土地沙化特征,详细计算方法同张路等^[18]研究方法。

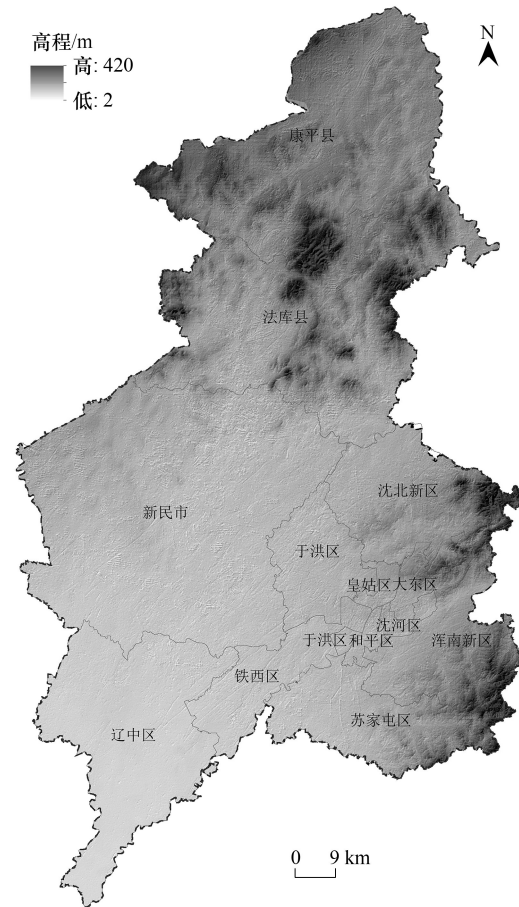


图 1 沈阳市地理位置分布图

Fig.1 Geographical distribution map of Shenyang City

表 1 气候因子分类标准

Table 1 Criteria for classification of climatic factors

序号 Code	指标 Index	分类标准 Classified standard		
		高 High	中 Medium	低 Low
1	年平均降水量/mm	>600	(500,600]	≤500
2	年平均温度/℃	>9	(8,9]	≤8

表 2 土壤有机质分级标准

Table 2 Criteria for classification of soil organic matter

丰缺 Abundant and lack of degree	极高 Extremely high	高 High	中上 Upper middle	中 Middle	低 Low	极低 Extremely low
有机质 Soil organic matter/%	>4	(3,4]	(2,3]	(1,2]	(0.6,1]	≤0.6

2.2.2 生态修复成本计算

(1) 确定单位面积林木生物量

本研究以杨树作为森林生态修复的树种,以 3 年龄杨树为例进行森林生态系统生态修复成本估算。通过查询辽宁省地方标准《速生杨二元立木材积表》(DB21/T 2276—2014)获得单株杨树的材积量,通过查询《造林技术规程》得到中温带地区出于水源涵养培育目的造林的杨树平均造林密度,进而得出种植单位面积杨树的生物量。

表 3 生态系统质量分级标准

Table 3 Ecosystem quality classification criteria

分级 Level				
优(5级) Excellent(5 level)	良(4级) Good(4 level)	中(3级) Medium(3 level)	差(2级) Poor(2 level)	劣(1级) Bad(1 level)
85%NPP _{参考值} ≤ NPP < 100%NPP _{参考值}	70%NPP _{参考值} ≤ NPP < 85%NPP _{参考值}	55%NPP _{参考值} ≤ NPP < 70%NPP _{参考值}	40%NPP _{参考值} ≤ NPP < 55%NPP _{参考值}	NPP < 40%NPP _{参考值}

NPP: 植被净初级生产力 Net primary productivity; NPP_{参考值}: NPP 值前 10% 栅格像元值作为各分区森林和草地生态系统质量的理想参照系值

生物量转换因子研究方法参考方精云等^[19]文献中研究方法, 计算公式如下:

$$B = aV + b \tag{1}$$

式中: B 为单位面积林木生物量; V 为单位面积蓄积量, 由平均单株材积乘以单位面积乔木株数再乘以木材密度获得, 木材密度, 由 IPCC 推荐使用木材密度表获得, 本研究取杨树 0.35 t/cm^3 计算; a 、 b 为常数, 由 IPCC 推荐使用的生物量转换因子表获取, 本文中分别取值 0.48 和 30.60。

(2) 确定修复单位面积 NPP 所需成本

生物量与 NPP 的转换方法参考罗磊等^[20]文献中研究方法, NPP 通过森林群落年生长量 (P) 和年凋落量 (L) 来估算, 计算公式如下:

$$NPP = P + L \tag{2}$$

$$P = B / (c \times A + d \times B) \tag{3}$$

$$L = 1 / (e / B + f) \tag{4}$$

式中: B 为地上生物量; A 为树龄, 本研究按照 3 年为准; c 、 d 、 e 、 f 为对应的林分类型常数, 群落年生长量和年凋落量的预估模型参数如下表, 本研究选取杨树林函数式进行估算^[21]。

(3) 低等级修复至高等级所需成本

低生态质量等级的森林生态系统修复至更高等级生态质量成本估算, 首先根据 2.1 中森林生态系统质量 NPP 分级阈值表确定将各生态分区生态质量为劣、差、中修复至理想参照系值优、良所需 NPP 增量; 其次, 根据森林生态系统单位面积 NPP 生态修复费用与各生态质量等级之间 NPP 的增量值, 得出由低质量修复至高质量所需费用; 最后, 根据各生态分区中森林生态系统各质量等级的面积与低质量等级修复至高质量等级的单位面积修复成本, 加权计算得出各生态分区森林生态质量修复至参考值所需成本。

2.3 生态修复优先区确定方法

2.3.1 潜在生态修复区

本研究从区域修复适宜性^[2, 22—23]、生态系统转移转换^[24—25]和生态系统质量^[26—28]角度, 确定潜在生态修复区识别标准^[29—31]。其中潜在退化林修复区域确定标准为森林生态系统质量未达到参考值的区域; 潜在造林区域确定主要包括三个方面: ①森林生态系统被其他生态系统侵占的区域(基于 2000 年和 2020 年两期生态系统类型数据, 通过构建转移矩阵识别); ②在相对坡度较大的农田区域进行造林(结合沈阳市地形较平缓的实际情况, 提取坡度 $> 15^\circ$ 的农田(基本农田除外)作为生态修复备选区域, 坡度通过 DEM 数据计算获取); ③草地生态系统质量评价为劣、差区域。

2.3.2 生态修复优先区

(1) 造林优先区域

森林生态系统造林优先区域在潜在造林区域的基础上叠加防风固沙重要性的评估结果, 选择在防风固沙重要性较强的区域作为最终造林优先区。

(2) 退化林修复优先区

森林生态系统退化林修复优先区在潜在退化林修复区域的基础上, 选择在相同修复成本的基础上能够带来更高的防风固沙效益的区域作为最终的退化林修复优先区。

3.2 森林生态系统潜在生态修复区域识别

潜在生态修复区域主要包括四部分,首先为森林生态系统被侵占区域,康平、法库、新民、辽中分别为 4.29、1.68、7.54、5.89 km²,合计 19.4 km²;其次为坡度>15°的农田(基本农田除外),康平、法库、新民、辽中分别为 2.45、6.09、13.68 km²和 0.83 km²,合计 23.05 km²;森林生态系统质量非参考值区域,森林生态系统质量非参考值区域面积共计 573.43 km²,其中康平、法库、新民、辽中分别为 110.59、247.63、189.63、25.58 km²;草地生态系统质量评价为劣、差区域面积共计 69.36 km²,康平、法库、新民、辽中分别为 52.18、9.80、7.38 km²和 0 km²。

综合上述,将潜在造林区域进行合并去重复后得出康平、法库、新民、辽中潜在造林区域分别为 25.04、9.38、22.28 km²和 6.57 km²,潜在退化林修复区域面积仍分别为 110.59、247.63、189.63、25.58 km²(见图 4)。

3.3 森林生态系统生态修复优先区识别

(1) 生态修复防风固沙效益评估

根据风蚀方程计算结果表明,沈阳市森林生态系统防风固沙总量现状为 709.20 万 t,防风固沙均值为 7839.06 t/km²(见图 5),本研究通过开展模拟森林生态系统生态修复工作,分别模拟三种情况下将生态质量低于“参考值”区域、生态质量为“劣”区域、生态质量为“差”区域分别修复至“参考值”,防风固沙总量分别增加了 11442.42、3688.39、2599.17 t。

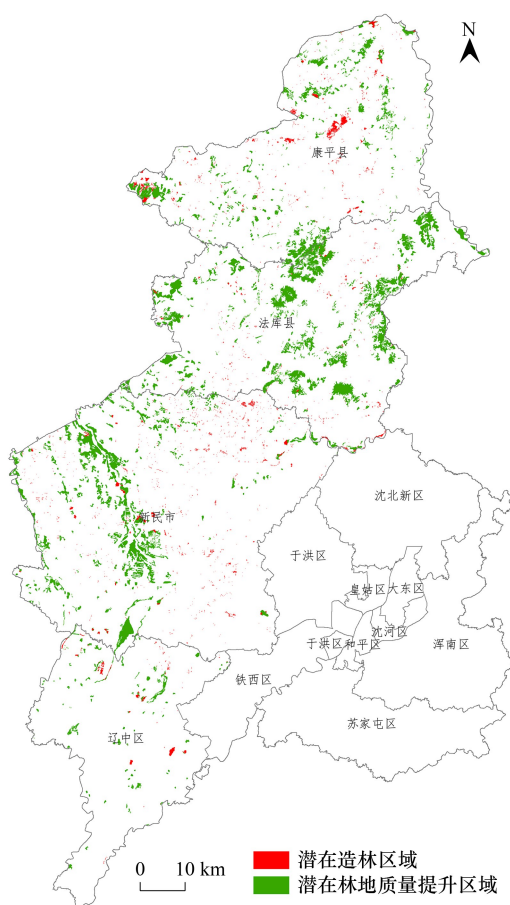


图 4 森林生态系统潜在生态修复区域

Fig.4 Potential ecological restoration area of forest ecosystems

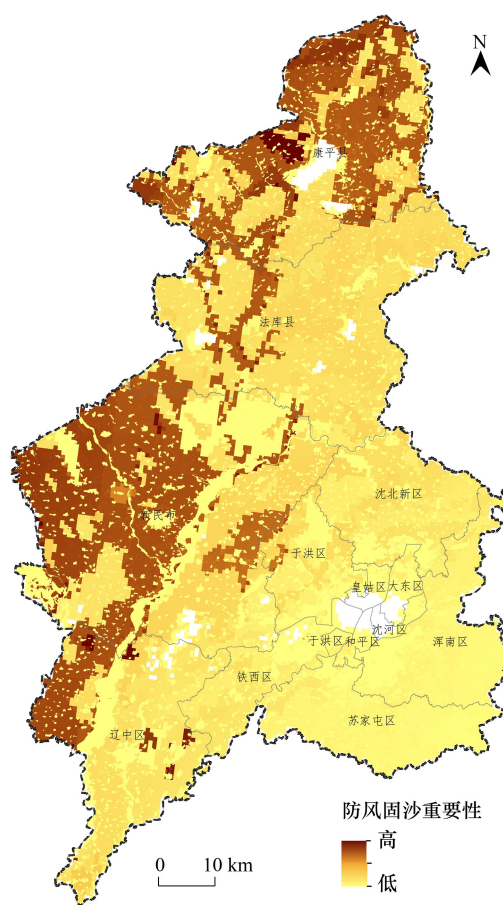


图 5 防风固沙重要性分布图

Fig.5 Distribution map of importance of windbreak and sand fixation

结合森林生态系统修复至“参考值”后防风固沙增量结果与各生态分区不同生态质量修复至参考值所需成本,得出森林生态系统防风固沙效益处于0—0.65 t/万元(见图6),防风固沙效益空间分布格局表明康平县张家窑林场、新民市的柳河沿岸防风固沙效益相对较大且空间分布位置集中,有助于生态系统完整性恢复,适合优先修复。

(2) 造林优先区域识别

森林生态系统造林优先区域在潜在造林区域的基础上叠加防风固沙重要性的评估结果,选择在防风固沙重要性较强的区域作为最终造林优先区。造林优先区结果表明(见图7),优先区在潜在造林区的基础上,按照各生态分区防风固沙重要性由高到低依次进行造林优先区选择,最终分布在康平县西北角张家窑林场和卧龙湖的北部;新民市主要分布在柳河和辽河干流河岸带周边;辽中区分布在辽河干流河岸带;法库县分布相对分散、不集中。

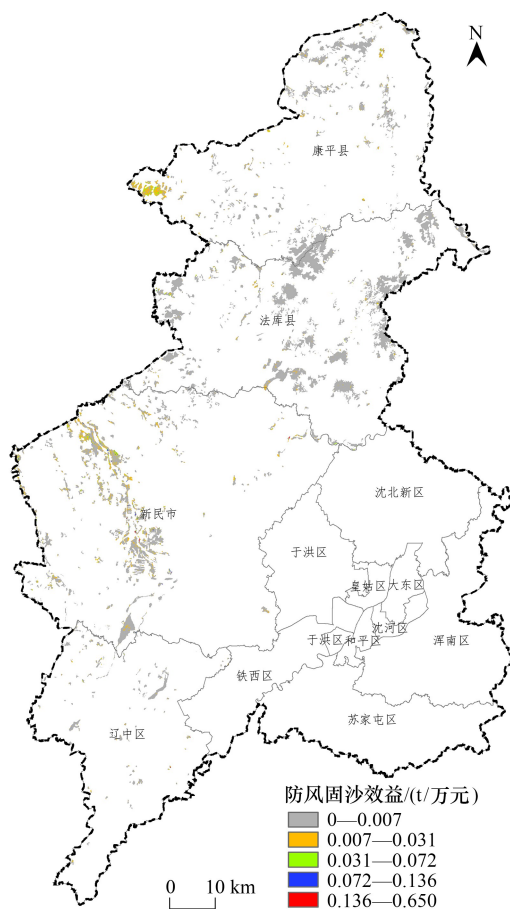


图6 防风固沙效益分布图

Fig.6 Distribution map of benefits of windbreak and sand fixation



图7 森林生态系统系统造林优先区分布图

Fig.7 Afforestation priority area of forest ecosystems

(3) 退化林修复优先区域识别

森林生态系统退化林修复优先区在潜在退化林修复区域的基础上叠加防风固沙生态效益评估结果,选择在相同修复成本的基础上能够带来更高的防风固沙效益的区域作为最终的退化林修复优先区,根据优先区中林地生态质量情况,将林地生态质量为“差”和“劣”的区域进行人工修复干预,对生态质量为“优”、“中”和“良”的区域建议采取自然恢复,进而确定退化林修复优先区域空间分布范围(见图8)。

结果表明,康平县和辽中区森林生态系统中生态质量评价为“参考值”以外的结果的面积分别为

110.59 km²和 25.58 km²,略小于《行动方案》中要求退化林生态修复的面积,因此全部进行退化林修复。其中康平县退化林生态质量为“劣”和“差”的区域为 5.73 km²,采取人工修复,主要分布在张家窑林场和大辛屯林场及周边;生态质量为“中”、“良”和“优”的区域为 104.81 km²,以自然恢复为主。辽中区的人工修复面积为 1.87 km²,区县内零散分布;自然恢复面积为 23.7 km²。

4 讨论

明确生态系统生态修复区域是生态修复工程实施的首要条件,通常来讲将生态系统质量较低的区域作为潜在生态修复区已达成共识^[33—34],然而由于不同区域的生态修复需求目标不同,如防风固沙、水源涵养、水土保持、生物多样性保护、植被覆盖度提升等,因此如何通过耦合分析生态系统质量与生态修复效益更加精准的识别生态修复优先区成为生态修复管理需解决的重要问题。传统的生态修复优先区识别方法往往以生态系统生态质量或生态系统服务功能评估结果为基础,对于生态质量或某种服务功能薄弱区进行相应的优先修复区设置^[35],其结果表现为生态修复区域识别结果“概而全”,但与实际生态修复工程实施需求适配性不是很高。另外基于生态系统安全格局的生态修复优先区识别的方法被广泛应用,该方法通过识别源地、廊道、关键节点等关键生态要素的空间分布,进而确定国土空间生态修复关键区域,研究表明该方法更适合宏观的国土空间生态修复区域布局^[36—37]。

生态系统修复旨在提高生态系统服务功能,在符合生态修复需求目标的前提下,追求生态修复效益最大化已成为生态修复工程管理者 and 决策者下一步应考虑的关键问题^[31,38—39]。本研究从市域生态修复政策需求出发,以生态系统生态质量评估结果为基础,选取沈阳市生态修复政策重点关注的防风固沙功能作为权衡指标,耦合分析生态系统质量与防风固沙效益评估结果,选取有限的预算下生态修复带来的防风固沙效益较高的区域作为生态修复优先区,其研究结果具有合需求、精细化、可落地等特征。研究表明,采用与本研究相似的方法将海南省生态修复带来的生态系统服务效益与扶贫的社会需求相结合,试图将社会关注纳入到土地利用规划以缓解冲突和提高公平的重要性,特别是在贫困、生物多样性和生态系统服务热点地区高度重合区域,取得了较合理的结果^[31]。此外,在潜在森林修复区的基础上,评估潜在森林修复区生态系统服务收益与修复成本,进而确定最具效益的优先修复区域,提出“理想参照系构建-生态质量评估-潜在生态修复区识别-防风固沙效益权衡-高效益低成本区域优先”的流程与方法,为其他地区的生态修复工程实践提供参考借鉴^[38]。

本研究的创新之处在于生态系统修复中生态修复优先区的识别在生态系统质量的基础上考虑了生态效益的权衡关系,生态修复优先区识别结果为生态修复工程的布局和实施提供区域参考。同时,本研究的不足之处在于研究区域自然生态资源禀赋一般,生态系统服务功能的多样性较差,仅考虑了生态系统质量和防风固沙效益的耦合关系,没有尝试多需求下统一多种生态系统服务功能作为优化目标^[39]。研究表明生态



图 8 退化林修复优先区分布图

Fig.8 Distribution map of priority areas for degraded forest restoration

系统修复中不同生态系统服务最佳修复区域存在差异性^[40-41],需要应用多目标规划来平衡这些冲突,以寻求考虑到资源竞争驱动因素的可行解决方案。因此,下一步的研究可以结合沈阳市生态状况实际,将尝试生态修复带来的地上防风固沙和地下产水生态效益共同作为权衡和优化目标,比较分析生态修复优先区空间布局的变化情况。

5 结论

本研究构建了基于生态质量与防风固沙效益的生态修复优先区识别体系,基于气候因子和土壤肥力因子进行生态分区划分、利用植被净初级生产力指标量化生态质量并确定各生态分区理想参照系的方法,可以较准确反应森林和草地生态系统的生态质量,将生态系统质量与参照系进行对比确定生态系统质量恢复潜力,辅助决策者适当选取或组合“自然恢复”和“人工修复”生态修复方式,实现各区域生态修复实施方案因地制宜、按需施策。另外,是否考虑生态系统服务功能提升效率,所识别的生态修复优先区的范围和修复顺序有所不同,通过在潜在生态修复优先区识别的基础上,考虑生态系统服务功能提升的效率与权衡关系,可以准确得出不同决策者需求下生态修复优先区空间修复顺序,最大限度满足生态修复工程解决的生态问题,为生态修复政策制定和实施方案编制提供方法依据和案例参考。

参考文献(References):

- [1] Nilashi M, Rupani P F, Rupani M M, Kamyab H, Aljojo N. Measuring sustainability through ecological sustainability and human sustainability: A machine learning approach. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 240(2): 118162.
- [2] Zhao Y, Luo J, Li T, Chen J, Mi Y, Wang K. A framework to identify priority areas for restoration: integrating human demand and ecosystem services in Dongting lake Eco-Economic zone, China. *Land*, 2023, 12(5): 965.
- [3] 张林, 王礼茂. 三北防护林体系森林碳密度及碳储量动态. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(8): 136-140.
- [4] 于贵瑞, 朱剑兴, 徐丽, 何念鹏. 中国生态系统碳汇功能提升的技术途径: 基于自然解决方案. *中国科学院院刊*, 2022, 37(4): 490-501.
- [5] 吴普侠, 汪晓珍, 吴建召, 张晓梅, 蔺雨阳, 王凯博. 中国退耕还林工程固碳现状及固碳潜力估算. *水土保持学报*, 2022, 36(4): 342-349.
- [6] Iftekhar M S, Polyakov M, Ansell D, Gibson F, Kay G M. How economics can further the success of ecological restoration. *Conservation Biology*, 2017, 31(2): 261-268.
- [7] Richardson B J, Davidson N J. Financing and governing ecological restoration projects: The Tasmanian Island Ark. *Ecological Management & Restoration*, 2021, 22(S2): 36-46.
- [8] Tang B, Wang H, Liu J M, Zhang W J, Zhao W D, Cheng D, Zhang L W, Jiao L. Identification of ecological restoration priority areas integrating ecological security and feasibility of restoration. *Ecological Indicators*, 2024, 158: 111557.
- [9] Jiao X, Tian Z, Yang H, Shang G, Ma J. Identification of key areas for ecological restoration of territorial space based on ecological security pattern: a case study of Kangbao County. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2024, 11: 1301149.
- [10] Du S, Xu D, Sun F, Dong X. Identification of key areas for territorial ecological restoration: focusing on ecological security and restoration potential. *Frontiers in Environmental Science*, 2024, 12: 1463683.
- [11] 蒋红波, 覃盟琳, 王政强, 罗丁丁, 吴欣芊. 基于生态系统服务簇评价的长沙市生态修复优先区识别. *环境工程技术学报*, 2023, 13(4): 1325-1333.
- [12] 徐彩瑶, 崔铭烨, 王宁, 孔凡斌. 浙江省生态保护修复优先区识别. *生态学报*, 2024, 44(8): 3223-3240.
- [13] Wang H, Tang B, Li W, Zhang W, Liu J, Zhang L, Jiao L. Identification of Ecological Restoration Priority Areas Integrating Human Activity Intensity and Multi-Criteria Decision Analysis. *Forests*, 2023, 14(12): 2348.
- [14] 窦寒梅, 赵锐锋, 陈喜东, 石晶. 西北干旱区国土空间生态修复优先区识别——以黑河流域张掖市为例. *应用生态学报*, 2024, 35(2): 469-479.
- [15] He J, Shi X. Detection of social-ecological drivers and impact thresholds of ecological degradation and ecological restoration in the last three decades. *Journal of Environmental Management*, 2022, 318: 115513.
- [16] Costa T L D S R, Mazzochini G G, Oliveira-Filho A T, Ganade G, Carvalho A R, Manhães A P. Priority areas for restoring ecosystem services to enhance human well-being in a dry forest. *Restoration Ecology*, 2021, 29(7): e13426.
- [17] 杨凤海, 宋佳佳, 赵烨荣, 赵佳琳, 牛超. 东北黑土水土流失区生态环境遥感动态监测. *环境科学研究*, 2018, 31(9): 1580-1587.

- [18] 张路, 肖焱, 郑华, 徐卫华, 逯非, 江凌, 饶恩明, 肖洋, 吴炳方, 曾源, 欧阳志云. 2010 年中国生态系统服务空间数据集. 中国科学数据, 2018, 3(4): 11-23.
- [19] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量. 生态学报, 1996, 16(5): 497-508.
- [20] 罗磊, 王蕾, 刘平, 侯晓臣, 高亚琪. 阿尔泰山落叶松林碳储量与生产力时空特征及其气候成因分析. 生态学报, 2019, 39(22): 8575-8584.
- [21] 赵颖慧, 李思琪, 甄贞, 李凤日, 魏庆彬. 黑龙江省黑河地区森林地上生物量和 NPP 估测及时空格局. 应用生态学报, 2016, 27(10): 3070-3080.
- [22] Theuerkauf S J, Eggleston D B, Puckett B J. Integrating ecosystem services considerations within a GIS-based habitat suitability index for oyster restoration. PLoS One, 2019, 14(1): e0210936.
- [23] Medland S J, Shaker R R, Forsythe K W, MacKay B R, Rybarczyk G. A multi-criteria wetland suitability index for restoration across Ontario's mixedwood Plains. Sustainability, 2020, 12(23): 9953.
- [24] Jiang H, Peng J, Zhao Y N, Xu D M, Dong J Q. Zoning for ecosystem restoration based on ecological network in mountainous region. Ecological Indicators, 2022, 142: 109138.
- [25] Cao X F, Liu Z S, Li S J, Gao Z J. Integrating the ecological security pattern and the PLUS model to assess the effects of regional ecological restoration: a case study of Hefei City, Anhui Province. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(11): 6640.
- [26] Tang C H, Yi Y J, Yang Z F, Zhang S H, Liu H F. Effects of ecological flow release patterns on water quality and ecological restoration of a large shallow lake. Journal of Cleaner Production, 2018, 174(3): 577-590.
- [27] Hou X Y, Liu S L, Zhao S, Zhang Y Q, Wu X, Cheng F Y, Dong S K. Interaction mechanism between floristic quality and environmental factors during ecological restoration in a mine area based on structural equation modeling. Ecological Engineering, 2018, 124: 23-30.
- [28] Chen X C, Li F, Li X Q, Liu H X, Hu Y H, Hu P P. Integrating ecological assessments to target priority restoration areas: a case study in the Pearl River Delta urban agglomeration, China. Remote Sensing, 2021, 13(12): 2424.
- [29] Wang C C, Yang Y S, Zhang Y Q. Economic development, rural livelihoods, and ecological restoration: evidence from China. AMBIO, 2011, 40(1): 78-87.
- [30] Dong T, Xu W H, Zheng H, Xiao Y, Kong L Q, Ouyang Z Y. A framework for regional ecological risk warning based on ecosystem service approach: a case study in Ganzi, China. Sustainability, 2018, 10(8): 2699.
- [31] Li R D, Zheng H, Polasky S, Hawthorne P L, O'Connor P, Wang L J, Li R N, Xiao Y, Wu T, Ouyang Z. Ecosystem restoration on Hainan island: can we optimize for enhancing regulating services and poverty alleviation? Environmental Research Letters, 2020, 15(8): 084039.
- [32] 何念鹏, 徐丽, 何洪林. 生态系统质量评估方法——理想参照系和关键指标. 生态学报, 2020, 40(6): 1877-1886.
- [33] 王文静, 逯非, 欧阳志云. 国土空间生态修复与保护空间识别——以北京市为例. 生态学报, 2022, 42(6): 2074-2085.
- [34] Aide T M, Zimmerman J K, Pascarella J B, Rivera L, Marciano-Vega H. Forest regeneration in a chronosequence of tropical abandoned pastures: implications for restoration ecology. Restoration Ecology, 2000, 8(4): 328-338.
- [35] 苏冲, 董建权, 马志刚, 乔娜, 彭建. 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.
- [36] 袁媛, 白中科, 师学义, 赵雪娇, 张嘉楠, 杨博宇. 基于生态安全格局的国土空间生态保护修复优先区确定——以河北省遵化市为例. 生态学杂志, 2022, 41(4): 750-759.
- [37] 罗晶, 肖与轩, 李涛, 郑卫民, 李晟, 赵燕萍. 多目标需求情景下生态系统修复优先区选择——以浙江省德清县森林修复为例. 经济地理, 2023, 43(2): 172-180.
- [38] Brancalion P H S, Meli P, Tymus J R C, Lenti F E B, Benini R M, Silva A P M, Isernhagen I, Holl K D. What makes ecosystem restoration expensive? A systematic cost assessment of projects in Brazil. Biological Conservation, 2019, 240: 108274.
- [39] Kennedy C M, Hawthorne P L, Miteva D A, Baumgarten L, Sochi K, Matsumoto M, Evans J S, Polasky S, Hamel P, Vieira E M, Develey P F, Sekercioglu C H, Davidson A D, Uhlhorn E M, Kiesecker J. Optimizing land use decision-making to sustain Brazilian agricultural profits, biodiversity and ecosystem services. Biological Conservation, 2016, 204: 221-230.
- [40] Verhagen W, van der Zanden E H, Strauch M, van Teeffelen A J A, Verburg P H. Optimizing the allocation of agri-environment measures to navigate the trade-offs between ecosystem services, biodiversity and agricultural production. Environmental Science & Policy, 2018, 84: 186-196.
- [41] O'Connell C S, Carlson K M, Cuadra S, Feeley K J, Gerber J, West P C, Polasky S. Balancing tradeoffs: Reconciling multiple environmental goals when ecosystem services vary regionally. Environmental Research Letters, 2018, 13(6): 064008.