

DOI: 10.20103/j.stxb.202403270649

刘鑫, 韩宇, 李永红, 李丽娟, 刘焱序. 基于“以水而定”的生态系统健康提升潜力评价——以内蒙古察汗淖尔流域为例. 生态学报, 2025, 45(6): 2868-2876.

Liu X, Han Y, Li Y H, Li L J, Liu Y X. Evaluation of ecosystem health improvement potential based on “water-based”: taking the Chahannaoer basin of Inner Mongolia Autonomous Region as an example. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(6): 2868-2876.

基于“以水而定”的生态系统健康提升潜力评价 ——以内蒙古察汗淖尔流域为例

刘 鑫¹, 韩 宇², 李永红¹, 李丽娟¹, 刘焱序^{2,*}

1 内蒙古自治区地质调查研究院, 呼和浩特 010020

2 北京师范大学地理科学学部 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

摘要: 水约束下的生态恢复是维持生态系统健康的关键性工作之一。基于彭曼-蒙蒂斯-勒宁 (Penman-Monteith-Leuning, PML) 模型和“活力-组织力-恢复力-生态系统服务” (Vigor-Organization-Resilience-Service, VORS) 框架, 从土地利用和植被双重条件评估和预测五种恢复情景下的内蒙古察汗淖尔流域生态系统健康的时空特征, 探究人类活动较弱的 SSP126 情景和人类活动强烈的 SSP545 下乡镇尺度生态系统健康提升潜力。研究结果表明: (1) 植被恢复对活力和生态系统服务有较强的正向作用, 人类活动较弱的土地利用恢复对组织力影响不大。(2) 植被恢复对生态系统健康的积极影响大于土地利用恢复, 人类活动越强烈对生态系统健康的消极作用越大; 土地利用恢复-植被不恢复-SSP126 情景和土地利用恢复-植被不恢复-SSP545 情景两种情景下分别增加 3km² 和 2km² 生态系统健康良的斑块面积。(3) 土地利用不恢复-植被恢复情景对生态系统健康促进作用更大。生态系统健康提升高潜力乡镇主要分布在研究区西部和南部, 北部和东部提升潜力低。基于“以水而定”的生态系统健康潜力评价结果可为研究区未来生态恢复选址提供参考。

关键词: 生态系统健康; 以水而定; 旱区; 彭曼-蒙蒂斯-勒宁 (Penman-Monteith-Leuning, PML) 模型; 活力-组织力-恢复力-生态系统服务 (Vigor-Organization-Resilience-Service, VORS) 模型

Evaluation of ecosystem health improvement potential based on “water-based”: taking the Chahannaoer basin of Inner Mongolia Autonomous Region as an example

LIU Xin¹, HAN Yu², LI Yonghong¹, LI Lijuan¹, LIU Yanxu^{2,*}

1 Inner Mongolia Institute of Geological Survey, Hohhot 010020, China

2 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: Ecological restoration under water constraints is one of the key tasks to maintain ecosystem health. This study is based on the Penman-Monteith-Leuning (PML) model and the “Vitality-Organization-Resilience-Ecosystem Services” framework to evaluate and predict the spatiotemporal characteristics of ecosystem health in the Chahannaoer basin within the Inner Mongolia Autonomous Region watershed. It examines five restoration scenarios by restorations of both land use and vegetation, and explore potential for improving the health of township-scale ecosystems under SSP126 and SSP545 scenarios for different human activity intensity. The results showed that: (1) Land use restoration with minimal human interference exerts negligible impact on organizational force, whereas vegetation restoration significantly bolsters vitality and ecosystem services. (2) Vegetation restoration has a greater positive impact on ecosystem health. The more intense human activities,

基金项目: 内蒙古自治区科技计划项目 (2022YFHH0024)

收稿日期: 2024-03-27; 网络出版日期: 2024-12-23

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

the greater the negative impact on ecosystem health. The land use restoration-vegetation is non-restoration-SSP126 scenario and land use restoration-vegetation non-restoration-SSP545 scenario increases the patch area of good ecosystem health by 3km^2 and 2km^2 respectively. (3) Land use non-restoration-vegetation restoration scenario has a greater effect on promoting ecosystem health. Townships with high potential for improving ecosystem health are mainly located in the west and south of the study area, while the north and east exhibit lower potential for such improvement. The evaluation results of ecosystem health potential based on “water-based” can provide reference for future ecological restoration site selection in the study area.

Key Words: ecosystem health; water-based; dry land; Penman-Monteith-Leuning (PML) model; Vigor-Organization-Resilience-Service (VORS) model

生态系统健康是指生态系统在外界干扰下的自我维持和恢复能力以及其在时空尺度上提供生态系统服务的稳定性和可持续性,健康的生态系统对社会-生态系统的可持续至关重要^[1-2]。旱区占全球土地面积的41%,能够产生多种多样的生态系统服务,在极端天气和气候变暖的影响下旱区景观越来越脆弱,干旱事件发生更频繁,生态系统健康受到严重威胁^[3]。因此,旱区应遵循“以水而定”原则,强调水资源约束,有效处理生态修复模式与水资源承载力空间匹配关系,以确保生态系统长期健康并稳定提供人类福祉。

随着旱区生态系统的重要性日益凸显,对旱区生态系统健康进行评价至关重要。近年来,旱区传统生态系统健康评价模型如“压力-状态-响应”模型(PSR)^[4]、“活力-组织力-恢复力”模型(VOR)^[5]、“基况-活力-组织力-恢复力”模型(CVOR)^[6]等被广泛应用于旱区过去或当前生态系统健康评价。也有学者对未来生态系统健康进行预测,常常使用灰色预测模型、统计趋势预测、最小方差模型预测、德尔菲法等^[7-8]。然而,现有评估和预测方法虽能准确地绘制生态系统健康地图,却无法将生态系统与人类社会活动紧密相连,尤其是未考虑生态系统服务。特别在错综复杂的旱区景观中,水资源对旱地生态系统健康具有重要约束作用,因此同时考虑生态系统可持续性和人类用水对生态系统服务稳定性的影响下的生态系统健康至为关键^[9]。Costanza于2012年提出“活力-组织力-恢复力-生态系统服务”模型(VORS),强调可持续的生态系统健康与生态系统服务的紧密相关性,并强调指标选择的可比性^[10]。其中,活力指生态系统新陈代谢能力,组织力指生态系统结构稳定性,恢复力指生态系统在压力条件下维持其原有结构和功能的能力,生态系统服务指生态系统为人类社会提供产品和服务的能力^[11]。尽管如此,将“以水而定”理念融入旱地生态修复并解决水限制下旱地未来的生态系统健康预测仍然面临合理性与技术可行性的挑战。

内蒙古自治区是我国的典型旱地,广泛的植树造林工程直接或间接地给当地水资源造成压力,影响当地的生态系统健康^[12]。自治区内察汗淖尔流域在生态安全、涵养水源等方面具有重要作用。基于以上现状,本研究选取内蒙古自治区察汗淖尔流域为研究区,采用 Penman-Monteith-Leuning (PML) 模型和 VORS 模型,评估2020年和预测五种恢复情景下2030年内蒙古察汗淖尔流域生态系统健康的时空特征,探究土地利用恢复与水资源约束下的植被恢复对研究区当前和未来的影响并评估研究区生态系统健康的提升潜力。

1 研究区概况

内蒙古自治区地处中国北部,平均海拔1014m,年均温变化大($-4-10^{\circ}\text{C}$),年降雨量空间呈现异质性,西部地区小于150mm,东部则超过600mm^[12]。内蒙古察汗淖尔流域位于内蒙古自治区国土空间生态修复重点区域,地处内蒙古自治区东南部(图1),地处坝上高原,气候干燥,面积 4925km^2 ,占流域总面积67%。平均水深2—4m。由于耕地扩张、地下水超采等,察汗淖尔流域水体大幅缩减,湖泊干涸为沼泽,成为季节性湖泊。

2 研究方法

2.1 数据来源与预处理

以土地利用数据为基础评估和预测组织力,比较多种数据后,采用评价结果最好的欧空局土地利用数据。

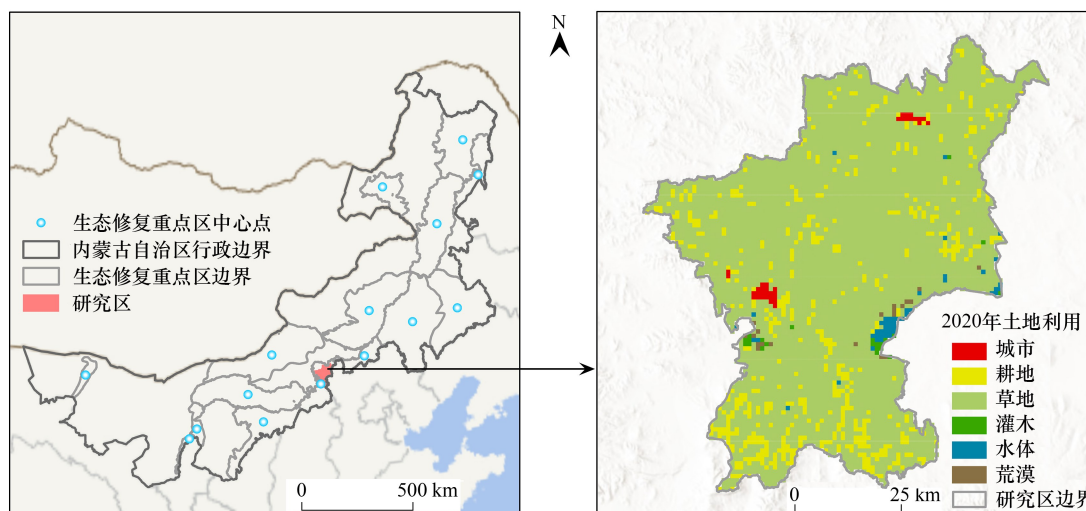


图1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

土地利用数据包括历史和未来土地利用,2010 年和 2020 年数据来自欧空局 300m 土地利用/覆盖数据 (<https://www.esa-landcover-cci.org/>),SSP1-RCP2.6 和 SSP5-RCP4.5 情景下的 2030 年数据则来自 Luo 等人发布的社会经济和气候情景 1km 土地利用/覆盖数据集^[13],基于 Luo 等人的文章,将欧空局 300m 土地利用分类重采样为 1km,并重分类为城市、农田、草地、灌木、森林、水、荒地和冰 8 种土地利用类型。

为评估和预测活力、恢复力和生态系统服务,从资源环境科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn/>) 获取了 2020 年分辨率为 1km 的降水量数据、分辨率为 1km 的数字高程模型 (DEM) 数据以及 2019 年分辨率为 1km 的人口密度数据。从国家青藏高原科学数据中心 (<https://data.tpdc.ac.cn/>) 获取了 2020 年分辨率为 0.1° 的近地表气温、近地表气压等气候数据,2019 年分辨率为 0.5° 的 PML-V2 陆地蒸散量与总初级生产力数据集。使用联合国粮农组织 (<https://www.fao.org/>) 发布的世界土壤数据库 (HWSD)。使用 MODIS (<https://modis.gsfc.nasa.gov/>) 的植被叶面积指数 (LAI) 和归一化植被指数 (NDVI)。

县级边界及乡镇边界从 OpenStreetMap (<https://www.openstreetmap.org>) 获取,流域边界使用 HydroBasins 数据库 (<https://www.hydrosheds.org/products/hydrobasins>)。

使用双线性差值将低分辨率栅格数据差值到 1km 分辨率,将所有数据坐标投影为 WGS_1984_Albers。

2.2 植被生长潜力预测

基于“以水而定”思想,未来区域植被增长主要发生在可用水充足的地块,即植被蒸腾耗水不应高于降水的输入^[12]。Penman-Monteith-Leuning (PML) 模型是一种将水和植被指数相关联的广泛使用模型,适用于各种环境条件、多气象变量下基于 LAI 较高精度估算植被蒸腾量,能够预测植被蒸腾耗水上限对应的植被恢复后 LAI 的最大增加量^[14]。基于 PML 模型,以 LAI 表示植被生长潜力,建立 LAI 与区域水资源可用性之间的关系,植被冠层蒸腾作用与 LAI 关系如下:

$$E_c = \frac{1000}{\lambda_{\rho_w}} \left(\frac{\frac{s}{\gamma} R_{nc} + 96400 \left(\frac{\rho C_p}{\gamma} \right) D_a G_a}{\frac{s}{\gamma} + 1 + \frac{G_a}{G_c}} \right) \quad (1)$$

$$G_c = \frac{g_{sx}}{K_Q} \ln \left[\frac{Q_h + Q_{50}}{Q_h \exp(-K_Q \text{LAI}) + Q_{50}} \right] \left[\frac{1}{1 + \frac{D_a}{D_{50}}} \right] \quad (2)$$

式中, E_c 是每日平均植被冠层蒸腾量 (mm/d); λ 是蒸发潜热 (MJ/kg); ρ_w 是水密度 (kg m^{-3}); γ 是湿度常数 ($\text{kPa/}^\circ\text{C}$); s 是饱和水压力曲线的斜率 ($\text{kPa/}^\circ\text{C}$); R_{nc} 是冠层吸收的净辐射 ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); ρ 是空气密度 (kg/m^3); C_p 是恒定压强下的空气比热 ($\text{MJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$); D_a 是蒸汽压差 (VPD); G_a 是空气电导率 (m/s); G_c 是冠层电导率 (m/s)。 g_{sx} 是最大气孔导度 (m/s); Q_h 是冠层高度顶部的光合有效辐射 (PAR); K_Q 是 PAR 的消光系数; Q_{50} 是吸收的 PAR ; LAI 是叶面积指数; D_{50} 是最大气孔导度为 $g_{sx}/2$ 时的 D_a 。

利用非线性方程计算 LAI 。牛顿法作为非线性方程的近似解方法,具有快速收敛和局部二阶收敛的优点^[15],迭代次数设置为 2000。为确保降水大于整备蒸腾耗水,即植被恢复强度小于区域水资源承载力,本研究使用水量平衡方程确定可用于植被恢复的剩余水量,将 60% 的剩余水量作为河流的生态需水量^[16],以确保与内陆河流的连通,公式如下所示:

$$\Delta E_c = 0.6(\text{Per} - E_c - E_s - E_i) \quad (3)$$

式中, ΔE_c 是植被恢复中允许植被蒸腾的增加量; Per 为日平均降水量; E_s 为日平均土壤蒸散量; E_i 是降雨截留的汽化。

2.3 生态系统健康评估

生态系统健康既包括生态系统的自然健康,也强调生态系统服务的供给能力^[8],因此本研究采用 VORS 评估框架评估不同情景的生态系统健康。该框架强调四个关键指标:活力、组织力、恢复力和生态系统服务,在面对外部压力时能够保持空间结构和生态系统进程的调节、更新和恢复,并能保证生态系统服务功能,评估公式如下^[17-18]:

$$EH = \sqrt{PH \times ES} \quad (4)$$

$$PH = \sqrt[3]{EV \times EO \times ER} \quad (5)$$

式中, EH 表示生态系统健康, PH 表示生态系统自然健康, ES 表示综合生态系统服务, EV 表示生态系统活力, EO 表示生态系统组织力, ER 表示生态系统恢复力。

基于生态系统健康已有分级^[19],将其分为五类, $0 < EH \leq 0.2$ 为生态系统健康差, $0.2 < EH \leq 0.4$ 为生态系统健康较差, $0.4 < EH \leq 0.6$ 为生态系统健康一般, $0.6 < EH \leq 0.8$ 为生态系统健康良, $0.8 < EH \leq 1$ 为生态系统健康优。土地利用和植被影响生态系统健康,因此按照不同情景的模拟指标,设置五类恢复情景,即土地利用不恢复-植被恢复、土地利用恢复-植被不恢复-SSP126、土地利用恢复-植被不恢复-SSP545、双恢复-SSP126 和双恢复-SSP545 情景。土地利用不恢复-植被恢复情景使用植被影响下的 2030 年活力、恢复力和生态系统服务,组织力不变。而土地利用恢复-植被不恢复则基于不同 SSP-RCP 情景下土地利用类型影响的 2030 年组织力,其余三种指标不变,仍为 2020 年。SSP126 表示低温室气体排放情景,全球社会逐渐转向更加可持续的发展路径,SSP545 表示在一定程度上实现了资源有效利用和环境保护,可被视为在气候行动和可持续发展方面相比 SSP585 相对乐观的情景之一,因此 SSP126 和 SSP545 可视为土地利用恢复情景。而双恢复情景基于植被和土地利用类型双重影响的指标,均使用 2030 年指标,如表 1 所示:

表 1 情景设置
Table 1 Scenario settings

恢复情景 Restoration scenarios	活力 Vigor	组织力 Organization	恢复力 Resilience	服务 Service
土地利用不恢复-植被恢复 Land use not restored-vegetation restored	2030	2020	2030	2030
土地利用恢复-植被不恢复-SSP126 Land use restored-vegetation not restored-SSP126	2020	2030-SSP126	2020	2020
土地利用恢复-植被不恢复-SSP545 Land use restored-vegetation not restored-SSP545	2020	2030-SSP545	2020	2020
双恢复-SSP126 Both restored-SSP126	2030	2030-SSP126	2030	2030
双恢复-SSP545 Both restored-SSP545	2030	2030-SSP545	2030	2030

2.3.1 活力-组织力-恢复力

生态系统活力是指生态系统的新陈代谢或初级生产力^[20],本研究采用植被叶面积指数(LAI)代替早期研究使用的归一化植被指数(NDVI)表征生态系统活力。

生态系统组织力能够反映多样性和结构稳定性,与土地利用类型密切联系^[20]。本研究选取最大斑块占景观面积比例(LPI)、Shannon 多样性指数(SHDI)、蔓延度指数(CONTAG)、聚集度(AI)和斑块凝聚度指数(COHESION)五个正向指标评估生态系统组织力。使用 Fragstates 移动窗口计算 5 个景观格局指数,移动半径以 1000 为基础递增测试,结果显示半径为 3000 时结果稳定。采用熵权法确定指标权重计算活力,结果显示,SHDI、LPI、CONTAG、COHESION、AI 的权重分别为 0.3777、0.0350、0.5585、0.0138 和 0.0150,对指标最大-最小值归一化后按照权重计算生态系统组织力。

生态系统恢复力是生态系统在外界扰动后恢复原有结构和功能的能力^[21],生态系统恢复力与 LAI 的关系如下:

$$RC_i = \frac{LAI_i}{LAI_mean_j} \times RC_j \quad (6)$$

式中, RC_i 表示栅格 i 的恢复力系数, LAI_i 表示栅格 i 的 LAI 值, LAI_mean_j 表示栅格所在地类 j 的 LAI 平均值, RC_j 表示地类 j 的恢复力系数。城市、农田、草地、灌木、森林、水、荒地的恢复力系数分别为 0.2、0.3、0.8、0.6、0.6、0.7 和 0.1^[22-23]。

2.3.2 生态系统服务

内蒙古察汗淖尔流域固碳服务高,而由于风蚀和水蚀等,土壤保持、水源涵养和防风固沙对察汗淖尔流域至关重要。因此选取固碳、土壤保持、水源涵养和防风固沙四种生态系统服务。固碳服务以净初级生产力(NPP)表示。使用修订的风蚀方程(REWQ)评估防风固沙服务。基于 InVEST 模型的 Water Yield 模块和 Sediment Delivery Ration 模块评估水源涵养和土壤保持服务。LAI 受植被冠层蒸腾作用影响,使用广义加性模型(GAM)拟合 LAI 和 NDVI 的关系,2030 年以“以水而定”思想预测的 LAI 增加潜力作为四种服务的植被覆盖指标。使用熵权法确定四种服务的权重,固碳、土壤保持、水源涵养和防风固沙服务的权重分别为 0.0824、0.3897、0.2691 和 0.2588。对指标最大-最小值归一化后按照权重计算综合生态系统服务。

3 结果

3.1 生态系统健康指标空间特征

图 2 显示了识别的 2020 年和不同情景下 2030 年的活力-组织力-恢复力-服务空间格局,按照与评估生态系统健康程度的方法评估各指标高低程度。组织力的整体呈现消极变化,但人类活动强烈的 SSP5-RCP4.5 情景对组织力的消极影响更大,从 2020 年的 0.3803 下降到 0.3084,人类影响小的 SSP1-RCP2.6 情景下的 2030 年的组织力为 0.3789。中等及以上组织力主要分布在兴和县和化德县,SSP1-RCP2.6 情景比 SSP5-RCP4.5 情景的高组织力分布多,低组织力主要分布在商都县。

2020 和 2030 年活力空间分布差异大(图 2)。在以水定地理念和措施下,植被恢复对活力起到推动作用,从 2020 年的 0.2684 上升到 2030 年的 0.4489,各县整体活力上升明显。2030 年,高活力值集中分布于南部的兴和县,低活力值主要分布在中部的商都县和北部的化德县。

2020 年恢复力为 0.5806,2030 年恢复力为 0.5529,恢复力略有下降。恢复力由东北向西南呈现上升趋势,化德县中等恢复力占比高,商都县高恢复力占比高,尽管兴和县相较其他两县低恢复力面积更大,但兴和县高恢复力占比仍旧较高。植被恢复对生态系统服务起到了促进作用,从 2020 年的 0.1629 上升到 2030 年的 0.2187。其空间分布格局与活力类似。

从四项指标整体来看,无论是当前还是未来,生态系统服务整体相比于组织力、活力和恢复力较低,而研究区中的商都县和化德县各项指标较低。人类活动较弱的土地利用恢复对组织力影响不大,反之会大大降低

组织力,植被恢复对活力和生态系统服务有较强的正向作用,对恢复力的负向作用不大。

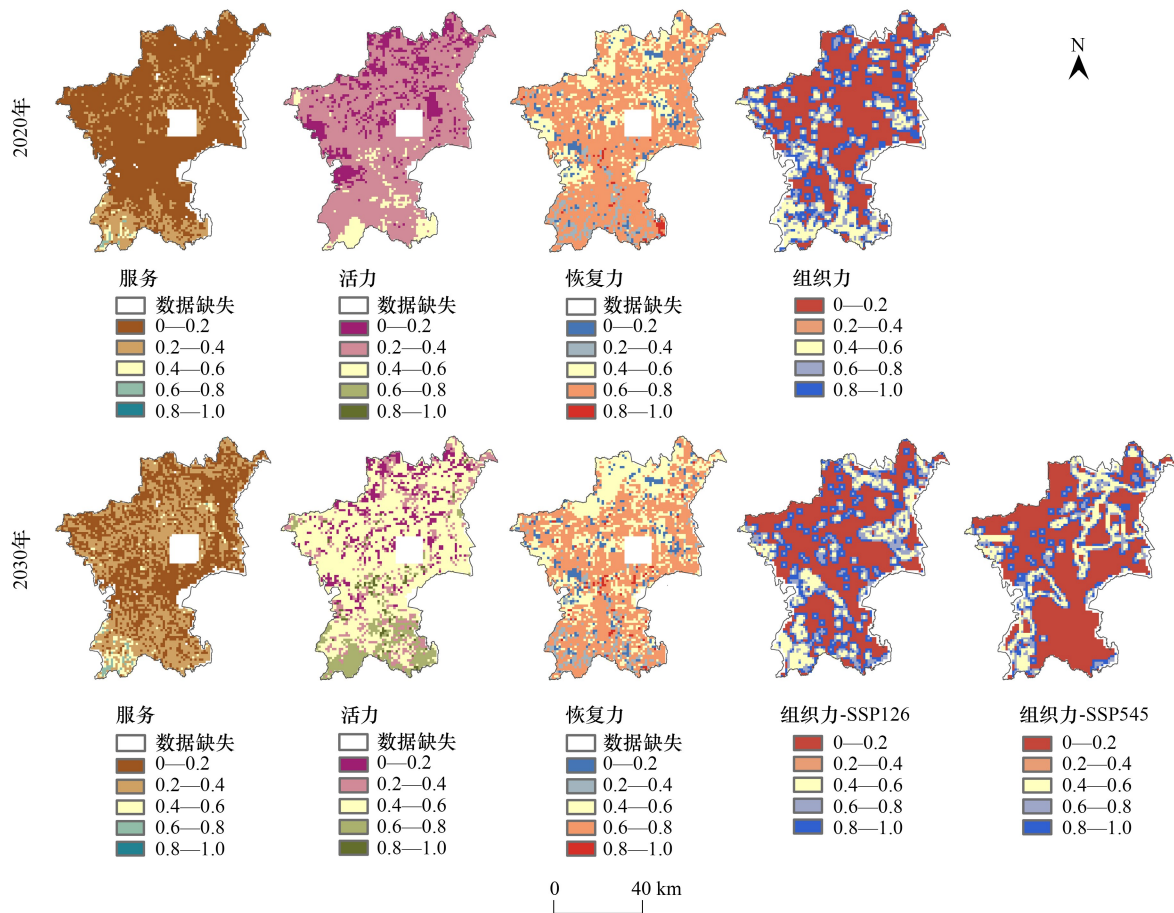


图2 生态系统健康指标空间格局

Fig.2 Spatial pattern of ecosystem health indicators

3.2 生态系统健康时空演变

2020年和2030年生态系统健康空间格局及变化如图3所示。从时间变化来看,土地利用不恢复-植被恢复情景和双恢复情景对生态系统健康具有积极作用,2020年生态系统健康为0.2021,土地利用不恢复-植被恢复情景、双恢复-SSP126情景、双恢复-SSP545情景分别提高0.0512、0.0508和0.0380,而土地利用恢复-植被不恢复情景则对生态系统健康有不同程度消极作用,特别是人类活动越强烈对生态系统健康消极作用越大,土地利用恢复-植被不恢复-SSP126情景和土地利用恢复-植被不恢复-SSP545情景的生态系统健康分别下降0.0001和0.0097。无论植被是否恢复,人类强烈干扰都会抑制生态系统健康。

内蒙古察汗淖尔流域生态系统健康状况差,不存在生态系统健康优的斑块。尽管同时恢复土地和植被比只恢复植被提高生态系统健康的斑块数量少,但双恢复-SSP126情景、双恢复-SSP545情景仍分别提高了36km²和31km²生态系统健康良的斑块面积。仅仅依靠土地恢复不能明显提高大多数斑块的生态系统健康,土地利用恢复-植被不恢复-SSP126情景和土地利用恢复-植被不恢复-SS545情景两种情景下分别增加3km²和2km²生态系统健康良的斑块面积。

从空间分布来看,2020年和2030年,生态系统健康一般及以上的斑块主要分布在内蒙古察汗淖尔流域南部的兴和县,而生态系统健康较差和差的斑块主要分布在商都县和化德县。土地利用不恢复-植被恢复情景和双恢复情景下,兴和县生态系统健康有不同程度的提高。在人类活动强烈干扰下,商都县东部生态系统健康退化严重,仅仅恢复土地利用而不考虑植被作用的恢复造成商都县出现集中且连续的生态系统健康差的斑块。

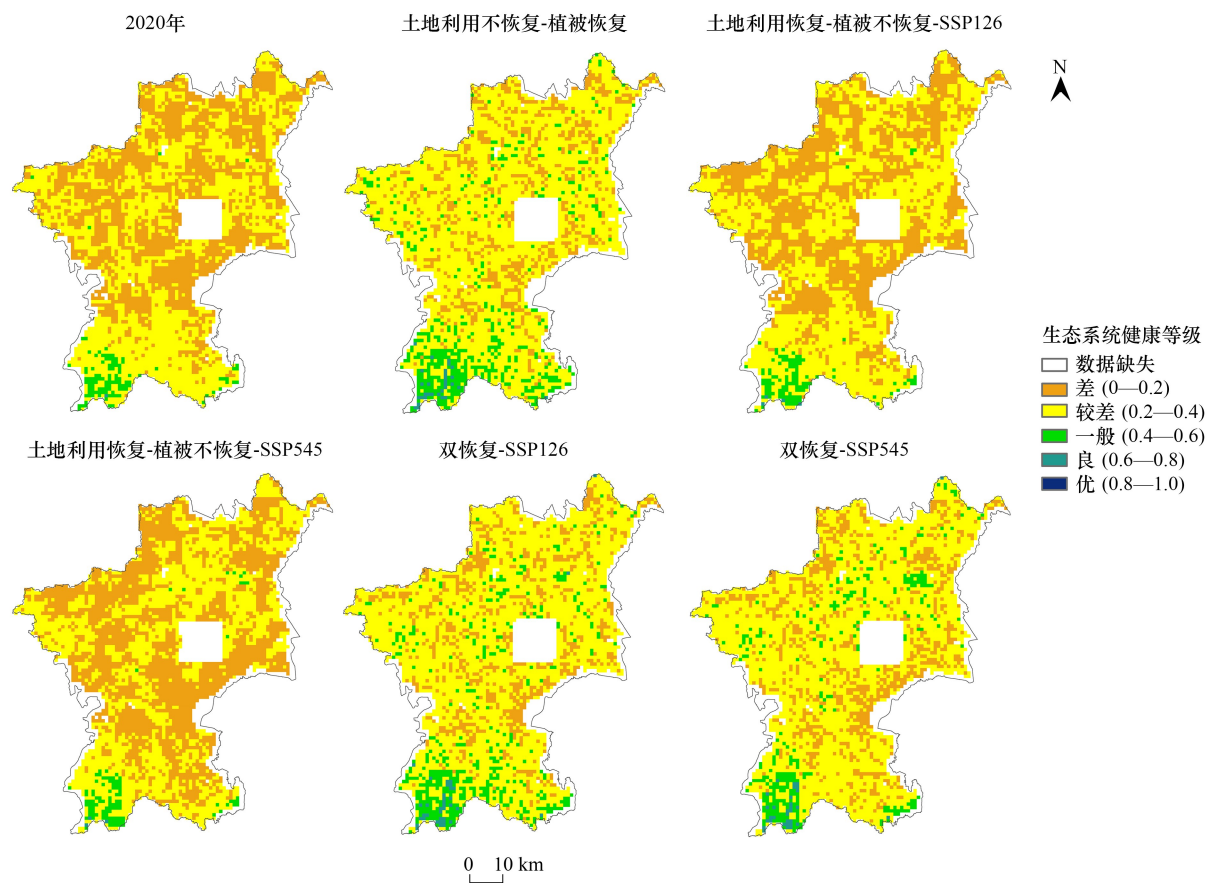


图 3 各情景生态系统健康时间演变与空间格局

Fig.3 Temporal evolution and spatial pattern of ecosystem health in each scenario

3.3 生态系统健康提升潜力

植被恢复情景与 2020 年生态系统健康差值和潜力分级空间分布如图 4 所示,表 2 显示了不同乡镇的生态系统提升潜力。生态系统健康高增加值主要分布在研究区南部,东部增加值较低。生态系统健康一级提升

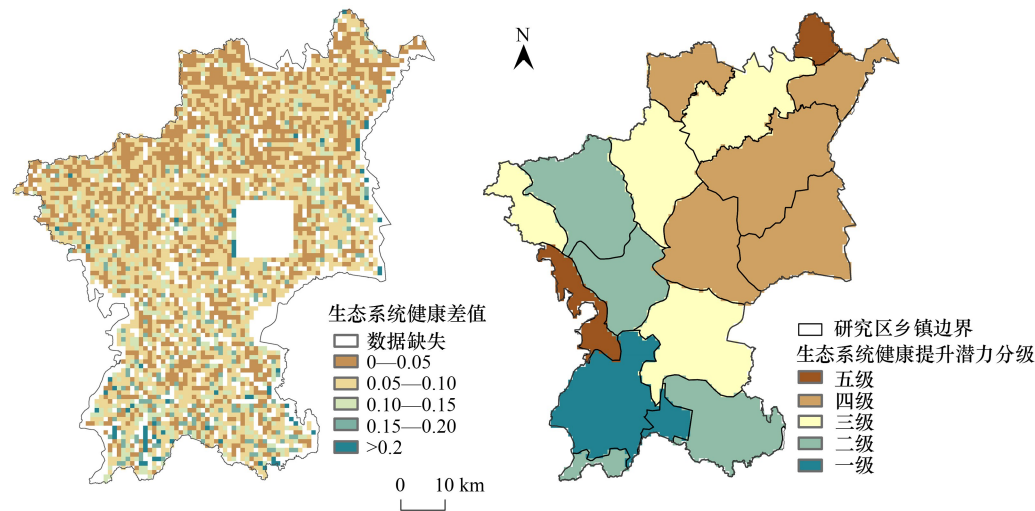


图 4 生态系统健康提升潜力

Fig.4 Potential for improving ecosystem health

潜力分布在相邻的赛乌素镇和五股泉乡,均位于兴和县。生态系统健康二级提升潜力和三级提升潜力乡镇均有 4 个,是生态系统健康五个提升潜力中乡镇数量位于第二的两个级别,主要分布在商都县。生态系统健康四级提升潜力集中分布在商都县东部和化德县,如白音特拉乡、朝阳镇、大黑沙土镇、十八顷镇等行政边界相连的乡镇连续分布四级提升潜力。生态系统健康五级提升潜力乡镇仅有两个,分别分布在化德县和商都县。研究区内位于商都县的乡镇相对于化德县和兴和县生态系统健康提升潜力多样化。

表 2 乡镇生态系统健康提升潜力

Table 2 Potential for improving the health of township ecosystems

	一级 Level 1	二级 Level 2	三级 Level 3	四级 Level 4	五级 Level 5
乡镇名称	赛乌素镇	屯垦队镇	长顺镇	公腊胡洞乡	德包图乡
Township name	五股泉乡	七台镇	玻璃忽镜乡	白音特拉乡	三大顷乡
		玫瑰营镇	西井子镇	朝阳镇	
		大库联乡	小海子镇	大黑沙土镇	
				十八顷镇	

4 讨论与结论

4.1 讨论

研究结果表明,恢复植被比恢复土地对旱区生态系统健康更有益。与自然发展和快速城镇化造成生态系统健康大幅下降相比,土地利用恢复对生态系统健康具有更加积极的影响^[8]。但缺水状态的旱区生态系统健康更依赖植被,植被的叶面积指数高不仅会提高生态系统活力和恢复力,也会促进固碳等生态系统服务^[24]。本研究的研究结果也证实,土地利用恢复受到人类微弱干扰或强烈干扰两种影响下,土地利用不恢复-植被恢复下未来的生态系统健康会比土地利用恢复-植被不恢复的高 0.0513—0.0609。植树造林工程的大力实施往往会带来正面影响和负面影响,已有研究证明,2001—2014 年内蒙古自治区开展土地利用恢复的地区,森林净增加量超过 19 万公顷^[25],然而树木的大面积扩张会造成旱区水资源更加紧张,因此旱区植被恢复下的生态修复过程应着重考虑水资源的限制,特别是赛乌素镇、五股泉乡等生态系统健康提升潜力高的乡镇。

强烈的人类活动会降低生态系统健康。研究结果表明,无论是仅恢复土地利用还是土地利用和植被同时恢复情景,强烈的人类活动会比微弱的人类活动更加损害生态系统健康,土地利用恢复-植被不恢复-SSP545 比土地利用恢复-植被不恢复-SSP126 情景减少 0.0096 的生态系统健康,而双恢复-SSP545 情景比双恢复-SSP126 情景减少 0.0119 的生态系统健康。正如已有研究指出,水资源开发利用的强度反映了人类活动对生态系统需求的强度,强烈的人为压力推动旱区生态系统水位下降^[26],这可能是造成德包图乡、三大顷乡、公腊胡洞乡、白音特拉乡等乡镇生态系统健康提升潜力低的重要原因之一。

本研究采用 PML 模型和 VORS 模型评估和预测内蒙古自治区东南部流域的生态系统健康,由于数据获取限制,气候数据和陆地蒸散发等数据分辨率低,可能会造成一定误差。“活力-组织力-恢复力-生态系统服务”评估框架的四个维度中,活力、恢复力和生态系统服务考虑了水约束下的植被恢复,而仅有组织力一项指标依赖于土地利用恢复,未来如何更好平衡植被恢复和土地利用恢复涉及的指标有待进一步探索。

4.2 结论

(1) 生态系统健康指标空间特征表明,生态系统服务整体相比于组织力、活力和恢复力较低,人类活动较弱的土地利用恢复对组织力影响不大,反之会大大降低组织力,植被恢复对活力和生态系统服务有较强的正向作用。

(2) 生态系统健康时空演变表明,植被恢复对生态系统健康积极影响更大,人类活动越强烈对生态系统健康消极作用越大,无论植被是否恢复,人类强烈干扰都会抑制生态系统健康。

(3)生态系统健康提升潜力表明,生态系统健康提升高潜力乡镇主要分布在研究区南部和西部,例如德包图乡、三大坝乡等,而东部和北部提升潜力低。

参考文献 (References):

- [1] He J H, Pan Z Z, Liu D F, Guo X N. Exploring the regional differences of ecosystem health and its driving factors in China. *Science of the Total Environment*, 2019, 673: 553-564.
- [2] Han Y, Liu Y X, Wang C X, Wu X T, Wang K. Assessment of the cultural-natural importance of the scenic spots from a network perspective. *Landscape and Urban Planning*, 2023, 239: 104861.
- [3] Stoy P C. Deforestation intensifies hot days. *Nature Climate Change*, 2018, 8: 366-368.
- [4] 刘欣, 查妮依, 王欣言, 王维奇, 王凯平, 张云路. 退耕还林(草)工程对中国北方农牧交错带生态系统健康的影响. *生态学报*, 2023, 43(15): 6392-6405.
- [5] 李灏欣, 万华伟, 孙林, 刘玉平, 李利平, 王永财. 新疆生态系统健康遥感评估及关键驱动因子研究. *干旱区地理*, 2021, 44(2): 460-470.
- [6] 史国锋, 张佳宁, 姚林杰, 赵艳云, 丁勇, 张庆. 内蒙古草原生态系统健康评价体系构建——基于植被型、植被亚型、群系三个等级. *内蒙古大学学报: 自然科学版*, 2022, 53(1): 55-65.
- [7] 景彩娥, 张福平. 太原市城市生态系统健康评价及其趋势预测. *水土保持通报*, 2013, 33(3): 280-286.
- [8] 袁贞贞, 王秋红, 王勇, 李维杰, 高洁, 程先, 朱大运. 多情景模拟下重庆市土地利用变化对生态系统健康的影响. *生态学报*, 2023, 43(20): 8279-8291.
- [9] 刘一鸣, 徐媛银, 曾辉. 中国东海岸带地区生态系统健康评估及其尺度依赖性. *生态学报*, 2022, 42(24): 9913-9926.
- [10] 袁毛宁, 刘焱序, 王曼, 田璐, 彭建. 基于“活力-组织力-恢复力-贡献力”框架的广州市生态系统健康评估. *生态学杂志*, 2019, 38(4): 1249-1257.
- [11] Li Y Y, Qin L, Wang Y H, Liu H, Zhang M, Hao H G. Ecosystem health assessment of the largest lake wetland in the Yellow River Basin using an improved vigor-organization-resilience-services model. *Ecological Indicators*, 2024, 166: 112539.
- [12] Wang C X, Liu X, Wu J C, Qiao W G, Liu Y X. Planning a water-constrained ecological restoration pattern to enhance sustainable landscape management in drylands. *Journal of Environmental Management*, 2023, 335: 117514.
- [13] Luo M, Hu G H, Chen G Z, Liu X J, Hou H Y, Li X. 1 km land use/land cover change of China under comprehensive socioeconomic and climate scenarios for 2020-2100. *Scientific Data*, 2022, 9(1): 110.
- [14] Leuning R, Zhang Y Q, Rajaud A, Cleugh H, Tu K. A simple surface conductance model to estimate regional evaporation using MODIS leaf area index and the Penman-Monteith equation. *Water Resources Research*, 2008, 44(10): W10419.
- [15] Sulaiman I M, Mamat M, Malik M, Nisar K S, Elfakhany A. Performance analysis of a modified Newton method for parameterized dual fuzzy nonlinear equations and its application. *Results in Physics*, 2022, 33: 105140.
- [16] Yan D, Wang G Q, Wang H, Qin T. Assessing ecological land use and water demand of river systems: a case study in Luanhe river, North China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16: 2469-2483.
- [17] Peng J, Liu Y X, Li T Y, Wu J S. Regional ecosystem health response to rural land use change: a case study in Lijiang City, China. *Ecological Indicators*, 2017, 72: 399-410.
- [18] Shen W, Li Y, Qin Y C. Research on the influencing factors and multi-scale regulatory pathway of ecosystem health: a case study in the middle reaches of the Yellow River, China. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 406: 137038.
- [19] Shi Z T, Zhou S L. A study on the dynamic evaluation of ecosystem health in the Yangtze River Basin of China. *Ecological Indicators*, 2023, 153: 110445.
- [20] 刘焱序, 彭建, 汪安, 谢盼, 韩忆楠. 生态系统健康研究进展. *生态学报*, 2015, 35(18): 5920-5930.
- [21] Jiang S M, Feng F, Zhang X N, Xu C Y, Jia B Q, Laforteza R. Ecological transformation is the key to improve ecosystem health for resource-exhausted cities: a case study in China based on future development scenarios. *Science of the Total Environment*, 2024, 921: 171147.
- [22] Lv T Y, Zeng C, Lin C X, Liu W P, Cheng Y J, Li Y B. Towards an integrated approach for land spatial ecological restoration zoning based on ecosystem health assessment. *Ecological Indicators*, 2023, 147: 110016.
- [23] Lei J J, Li C S, Yang W N. Ecosystem health assessment and approaches to improve Sichuan Province based on an improved vigor organization resilience model. *Ecological Indicators*, 2023, 155: 110925.
- [24] 许小明, 张晓萍, 王浩嘉, 贺洁, 王妙倩, 易海杰, 薛帆, 邹亚东, 田起隆, 何亮. 黄土高原子午岭植被自然恢复下的固碳特征. *环境科学*, 2023, 44(5): 2756-2766.
- [25] 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.
- [26] Zhao L F, Ma R, Yang Z J, Ning K, Chen P, Wu J. Ecosystem health risk assessment of lakes in the Inner Mongolian Plateau based on the coupled AHP-SOM-CGT model. *Ecological Indicators*, 2023, 156: 111168.