

郭曼曼, 路旭, 马青. 基于水生态系统服务权衡视角的流域生态修复成效评估[J]. 风景园林, 2025, 32 (8): 40-48.

基于水生态系统服务权衡视角的流域生态修复成效评估

郭曼曼 路旭* 马青

摘要: 【目的】生态修复从传统模式转向国土空间尺度后, 其成效评估亟需兼具全面性和有效性的指标和方法。水生态系统服务权衡强度的引入, 不仅有益于流域生态修复的成效评估, 更能为流域国土空间生态修复提供策略和方法。【方法】综合运用景观格局指数、InVEST 模型、均方根偏差和多尺度地理加权回归模型等方法对辽河干流流域 2000—2020 年的生态修复成效及成因进行分析。【结果】流域生态修复在生态要素、生态空间格局和水生态系统服务方面均取得积极成效, 但在水生态系统服务的权衡方面产生负面影响; 以水质净化为主的生态空间布局策略是导致水生态系统服务权衡强度上升的重要原因。【结论】未来, 将水生态系统服务权衡强度纳入成效评估体系, 有助于推动流域国土空间生态修复的多目标协同发展; 以生态空间格局优化为重要方式, 有助于提升流域国土空间生态修复的整体效率和人类福祉。

关键词: 国土空间生态修复; 流域空间; 水生态系统服务; 权衡强度; 成效评估

基金项目: 国家自然科学基金“基于老龄时空动态图谱的寒地城市绿地空间公平性评价与优化”(编号 52178045)

中图分类号: TU981; TU982 文章编号: 1673-1530(2025)08-0040-09 收稿日期: 2024-12-11
文献标识码: A DOI: 10.3724/j.fjyl.LA20240117 修回日期: 2025-06-19

文章亮点:

- 1、将水生态系统服务权衡强度纳入流域国土空间生态修复的成效评估体系, 能够有效评估流域生态修复多目标之间的协同程度, 帮助提升流域生态修复的整体成效。
- 2、提出以生态空间格局优化为手段的流域生态修复策略, 以响应国土空间生态修复对生态系统整体性和大、中尺度空间结构构建的需求, 帮助提升流域生态修复工作的系统性。

生态修复起源于 20 世纪 30 年代, 欧美地区开展了“大平原”生态修复、水土流失治理、森林恢复等系列生态修复工程, 并取得一定成效。2002 年, 国际学界对“生态修复”(ecological restoration)的概念界定基本达成共识: 生态修复是协助已退化、损害或彻底破坏的生态系统恢复、重建和改善的过程^[1]。中国自 20 世纪 50 年代开始生态修复实践探索, 主要针对特定生态要素开展小范围专项治理, 在微观尺度上局部成效显著, 但是宏观尺度上的整体成效并不突出。相关研究多以恢复生态学和环境生态学为理论指导, 聚焦于单一生态要素、单一生态过程和单点(局地), 其中, 生态修复的成效研究也多针对森林、草地、河湖等单一生态系统^[2], 或是退耕还林、水污染防治等单独生态工程的评估, 较关注水污染、土壤侵蚀和生态多样性减少等生态问题, 对生态系统的整体性、生态修复工作的系统性和生态功能的协调性等关注不足。自 2016 年开始, 在国家政策的推动下, 在景观生态学^[3]、人地关系论^[4]等理

论的支持下, 人们开始关注生态修复的系统性、整体性和综合性, 强调在大、中尺度下的空间结构构建和生态功能恢复, 生态修复逐渐向国土空间生态修复转变, 生态系统服务(ecosystem services, ES)成为生态修复成效研究的重要视角。

作为生态系统服务的一种特殊类型, 水生态系统服务(water-related ecosystem services, WES)是生态修复过程与人类福祉的联结^[4], 甚至是与人类福祉联系最紧密的服务^[5]。作为提供水生态系统服务的主体, 流域既是社会-经济复合单元^[3], 也是发生完整生态过程的自然地理单元, 是理论上生态修复效益更高的空间单元^[6-7]。流域是国土空间规划背景下探讨生态修复的理想尺度, 而水生态系统服务则是流域国土空间生态修复评估的重要指标^[8]。近年来, 流域生态修复的成效评估也开始向国土空间生态修复方向转变, 但现有的定量研究仍主要是对流域单一修复工程^[9]、单一生态要素^[10]或单一修复政策^[11]的评估, 对国土空间生态修复的特征关注不

足; 也有学者通过理论推演式的研究, 构建包括流域尺度在内的国土空间生态修复多尺度评估体系, 尝试响应流域生态修复的山林田湖草一体化^[12]和国土空间的整体性^[13]特征, 但是定量实证支撑有限。流域生态修复评估常见的指标有生态用地的数量和空间格局^[14]、生态系统质量^[15]、生态系统胁迫^[9]、生态系统服务^[9, 11, 14-15]、农户家庭收入^[16]等; 评估的方法大致可以归纳为基于生态指标的评估、基于生态系统服务及其价值的评估, 和基于综合指标的评估。总的来讲, 目前流域国土空间生态修复成效评估的研究还较为缺乏, 尤其对生态修复的多目标协调性和整体成效最大化的需求响应不足。

不同于传统问题诊断式的局地修复, 国土空间生态修复强调流域空间的整体性保护和修复工作的综合性部署, 而理清多目标之间的关系, 探明多目标协同的影响机制, 成为流域国土空间生态修复统筹部署、保证工作效率的重要前提。基于此, 本研究在现有研究基础上, 引入水生态系统服务权衡强度

指标，尝试对流域生态修复的多目标协同性评估进行补充。以辽河干流流域为例，对 2000—2020 年生态修复所产生的多维成效进行评估，并探讨其原因，为流域国土空间生态修复提供策略。

1 研究方法

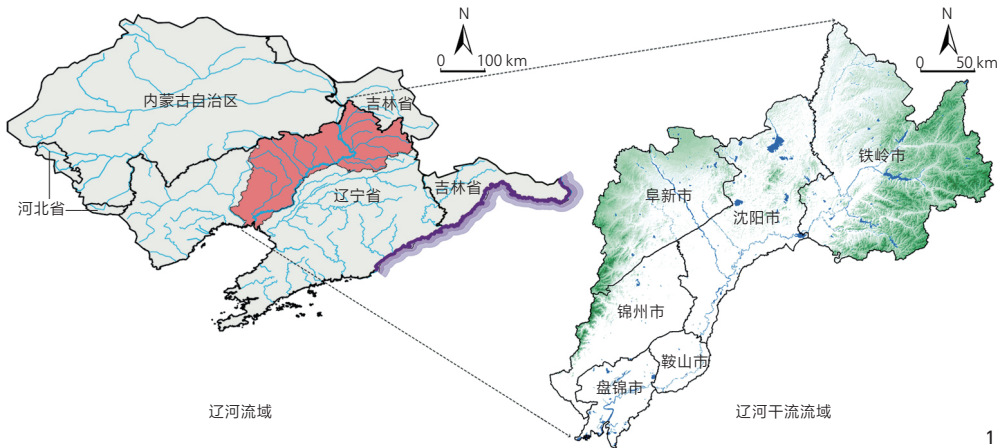
1.1 研究区域

辽河干流主要流经辽中平原——中国重要的商品粮食基地之一，流域面积达到 6.47 万 km²，其中 60% 以上的空间都是以耕地为主的农业农村景观，是典型的农业流域（图 1）。受城乡的快速扩张和地域气候的影响，辽河干流一直受到水环境污染、水土流失和生态系统退化等环境问题的困扰，特别是非点源污染，曾经一度因污染严重导致水质无法满足农业灌溉和畜牧饮用的需求^[17]。

水污染治理一直是辽河流域生态修复的核心。第一版水污染防治规划——《辽河流域水污染防治“九五”规划及 2010 年规划》于 1999 年正式批复实施，2000 年开始开展大批量的治理行动，而后逐步开展水土保持规划、造林绿化、河道生态建设规划等多项修复规划。在不同专项规划指引下，开展生态封育、湿地公园建设、退牧还草、退耕还湿、河道整治、护堤林建设等多项生态修复工程；至 2020 年，开始转向国土空间生态修复。基于研究目的和数据基础，本研究主要以 2000、2020 年为时间节点，在评估流域生态修复的成效基础上，探寻国土空间和生态系统服务理论下流域生态修复的方法和策略。

1.2 数据来源及处理

本研究涉及的数据主要包括高程数据、土壤数据、土地利用数据、降雨量等气候数据和水文水质监测数据（表 1）。其中主要对土地利用数据进行了预处理。为提高土地利用数据精度，结合陆地卫星遥感影像与实地调查数据，通过重分类将原始数据划分为 8 类：水田、旱地、林地、草地、水体、湿地、未利用地及建设用地。然后，为了评估流域生态修复产生的生态空间格局成效，基于相关研究，进一步将土地利用类型划分为生产空间（水田、旱地）、生活空间（未利用地



1 辽河干流流域区位
Location of the mainstream watershed of the Liaohe River

表1 研究数据来源
Tab. 1 Data sources

名称	分辨率/m	来源
高程数据	30	
卫星图	Landsat 4-5 TM Landsat 8 OLI	地理空间数据云（ www.gscloud.cn ）
土地利用数据	30	资源与环境科学数据平台（ www.resdc.cn ）
降雨量数据		中国气象局官网（ www.cma.gov.cn ）
蒸散量数据	1 000	哈佛数据储存库（ doi.org/10.7910/DVN/ZGOUED ）
土壤数据	1 000	世界土壤数据库（HWSD, webarchive.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HTML ）；100 m分辨率的中国深基岩地图（ globalchange.bnu.edu.cn/research/cdtb.jsp ）
水文水质数据	水资源公报 水土保持公报 水质监测报告	辽宁省水利厅官网（ slt.ln.gov.cn/jbgb/szygb ） 辽宁省生态环境厅官网（ sthj.ln.gov.cn ）

和建设用地）和生态空间（林地、草地、水体和湿地）^[18]。此外，基于高程数据，采用 Strahler- Horton 水系分级定律划定流域边界，结合行政区边界确定本研究范围，即辽河干流流域空间范围。

1.3 研究步骤

1.3.1 流域国土空间生态修复的成效计算

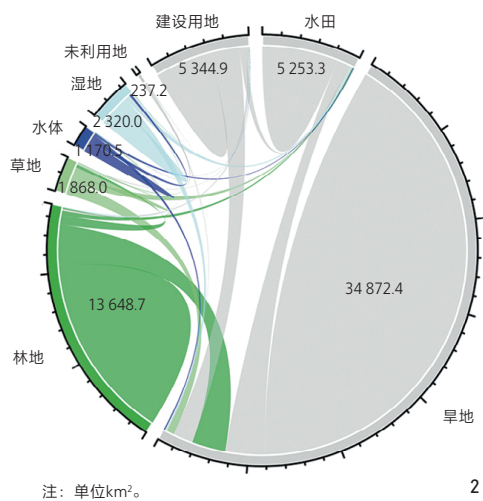
1.3.1.1 生态要素类型变化评估

基于本研究的生态要素与土地利用类型之间的外延从属关系，为了定量评估生态修复期间流域范围内生态要素的类型变化，基

于马尔可夫模型（Markov）建立土地利用转移矩阵，不仅能定量评估各类生态要素的面积增长情况，更能知晓其具体来源。

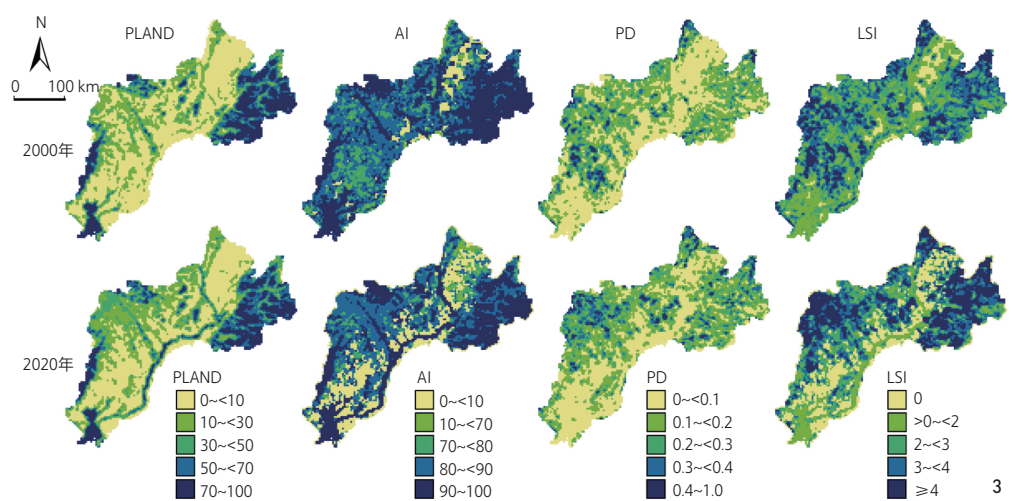
1.3.1.2 生态空间格局指数选取及计算

为响应国土空间生态修复的整体性和综合性，本研究从生态空间一体化的视角出发，评估流域生态修复的生态空间格局成效。根据景观格局指数的生态学意义和辽河干流流域的实际情况，再结合相关研究的经验，初步选取斑块类型水平的斑块面积占比（PLAND）、斑块密度（PD）、斑块形状指数（LSI）、斑



2 流域生态要素的转移情况变化

Changes in the transfer of ecological elements in the watershed



3 流域生态空间格局指数的时空变化

Spatio-temporal changes in the ecological space pattern index of the watershed

块分离度 (DIVISION)、斑块聚集度 (AI)、最大斑块指数 (LPI) 以及景观水平的香农多样性指数 (SHDI)、蔓延度指数 (CONTAG) 表征流域的生态空间格局特征。为了避免指数信息的冗余, 进一步采用 Spearman 相关系数剔除高度相关的指数 (相关性指数 $r > 0.8$), 最终选择 1 项景观组分指数 (PLAND) 和 3 项景观配置指数 (AI、PD、LSI) 分别表征流域生态空间的丰富度、聚集度和破碎度特征。考虑到辽河干流流域空间范围较大, 结合 Fragstats v4.2.1 和 ArcGIS 10.8 软件, 采用网格分析法表征景观指数的空间异质性。依据以往的研究经验, 选择 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 、 $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$ 、 $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ 和 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ 等多尺度网格进行预实验, 并最终确定 $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$ 为合适的网格尺度。

1.3.1.3 水生态系统服务的选取及计算

根据辽河干流流域多年生态修复的目标、措施、途径和经验, 选择水源涵养 (water conservation, WC)、水质净化 (water purification, WP)、土壤保持 (soil conservation, SC) 和生境质量 (habitat quality, HQ) 4 项水生态系统服务, 以评估 20 年的生态修复成效。分别采用 InVEST 模型中的年产量 (annual water yield, AWY)、养分输送比 (nutrient delivery ratio, NDR)、

泥沙输送比 (sediment delivery ratio, SDR)、HQ 模块模拟并量化上述 4 项服务。为确保 InVEST 各模块模拟结果的可靠性, 参照该区域的相关研究^[19-20] 和辽河干流流域水质、水文监测数据调整模块的相关参数, 将各模块估算结果的相对误差控制在 15% 以内。具体的计算式和相关参数见参考文献^[9, 21], 在此不再赘述。

1.3.1.4 水生态系统服务权衡强度计算

均方根偏差 (root-mean-square deviation, RMSD) 可以有效表征 2 项以上生态系统服务之间的权衡关系, 更能够满足流域生态修复多目标协同评估的需求。本研究将上述 4 项水生态系统服务进行 Min-Max 标准化后, 进一步计算 RMSD 值。RMSD 的取值范围为 0~1, 值越大则生态系统服务越权衡, 值越小则生态系统服务越协同。

1.3.2 水生态系统服务权衡强度变化的成因分析

1.3.2.1 自然/人工影响因素贡献率厘定

生态修复是人工与自然共同作用的过程, 自然过程更多受气候等自然因素的影响, 人工过程主要表征为土地利用空间的变化。根据相关研究^[22], 气候和土地利用变化是影响生态系统服务的最主要因素^[23]。为了厘定生态修复的自然和人工因素的贡献率, 在 InVEST 模

型中分别输入多年平均气候值和真实气候值, 其中, 多年平均气候条件下模拟的是人工作用的成效, 真实气候条件下模拟的是气候变化与人工作用的综合成效。计算式

$$C_{ar} = \frac{X_{2020} - X_{2000}}{|W_{2020} - W_{2000}|},$$

$$C_{na} = \frac{W_{2020} - W_{2000}}{|W_{2020} - W_{2000}|} - C_{ar}。$$

式中: C_{ar} 代表人工因素 (以土地利用变化为主) 的贡献率; C_{na} 代表自然因素 (以气候变化为主) 的贡献率; X 、 W 分别表示平均气候和真实气候条件下的指标值。

1.3.2.2 生态空间格局对水生态系统服务权衡强度的影响分析

多尺度地理加权回归 (multiscale geographically weighted regression, MGWR) 模型在地理加权回归 (geographically weighted regression, GWR) 模型基础上, 通过为每一个自变量选择最佳的解释带宽实现自变量对因变量影响的空间异质性描述。本研究采用 MGWR 分析流域生态空间的景观组分和配置对其生态系统服务权衡强度产生的影响, 计算式

$$y_a = \beta_0 (u_a, v_a) + \sum_k \beta_k (u_a, v_a) x_{ak} + \varepsilon_a,$$

$$a \in \{1, 2, \dots, n\}。$$

式中: y_a 是第 a 个网格的水生态系统服务或

权衡强度值（因变量）； x_{ak} 是第 a 个网格的景观格局指数（自变量）； (u_a, v_a) 、 β_0 （ u_a, v_a ）、 β_k （ u_a, v_a ）分别表示分析网格的坐标、截距和回归系数； ε_a 表示残差。

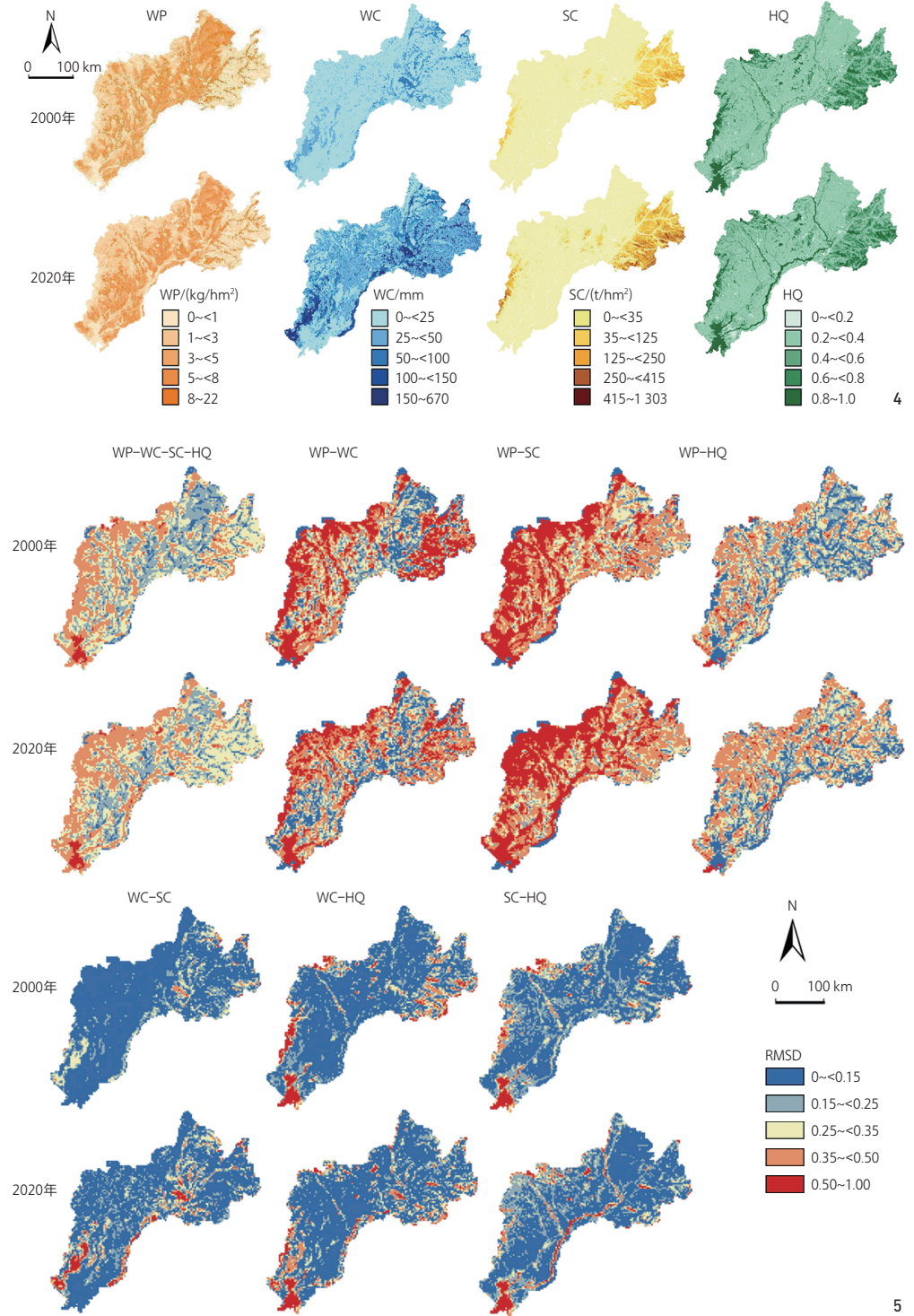
2 流域生态修复的成效评估

2.1 生态空间格局的变化

在 2000—2020 年的生态修复期间，辽河干流流域的土地利用类型之间存在相互转化的现象，总体表现为以旱田为主的耕地转化为生态空间和生活空间。在减少的 2 765.45 km² 的耕地中，有 67.75% 转化为生态空间，其中林地占比最大，共增长 980.10 km²，其余依次是湿地、草地和水体，增长面积分别为 382.96、292.67 和 217.33 km²（图 2）。流域生态要素面积增长的同时也改变了原有的生态空间格局。流域生态空间格局最直观的成效是景观组分（PLAND）的显著增长，从 27.76 增至 30.53，集中于干流沿线及西北支流上游（图 3）。生态空间配置呈差异化变化：整体聚合度（AI）下降 17.47%，但干流沿线局部增长；斑块密度（PD）和形状指数（LSI）分别增加 11.77% 和 2.64%，表明生态空间破碎化加剧，尤以西北支流上游和东部山林区显著（图 3）。生态修复导致流域生态空间“聚集式”（干流沿线）与“分散式”（支流上游）增长并存，形成空间异质性格局。

2.2 水生态系统服务的变化

2000—2020 年，流域 4 项水生态系统服务均显著提升（图 4）。本研究以氮输出量表征水质净化水平，氮输出量越小则水质净化水平越高。经计算，水质净化整体提升 9.14%（氮输出总量从 1.74×10^7 增至 1.58×10^7 kg），提升区域集中于干流中上游及主要支流上游。水源涵养总量增长 184.00%（从 9.81×10^7 增至 27.86×10^7 m³），高值区稳定分布于东西部山区及干流沿线。水土保持总量增长 74.70%（从 114.75×10^6 增至 200.48×10^6 t），高值区始终位于东、西部山林地区。生境质量的均值由 0.315 增至 0.321，增长区域主要沿干流分布。经 20 年的生态修复后，流域 4 项水生态系统服务的空间差异显著。



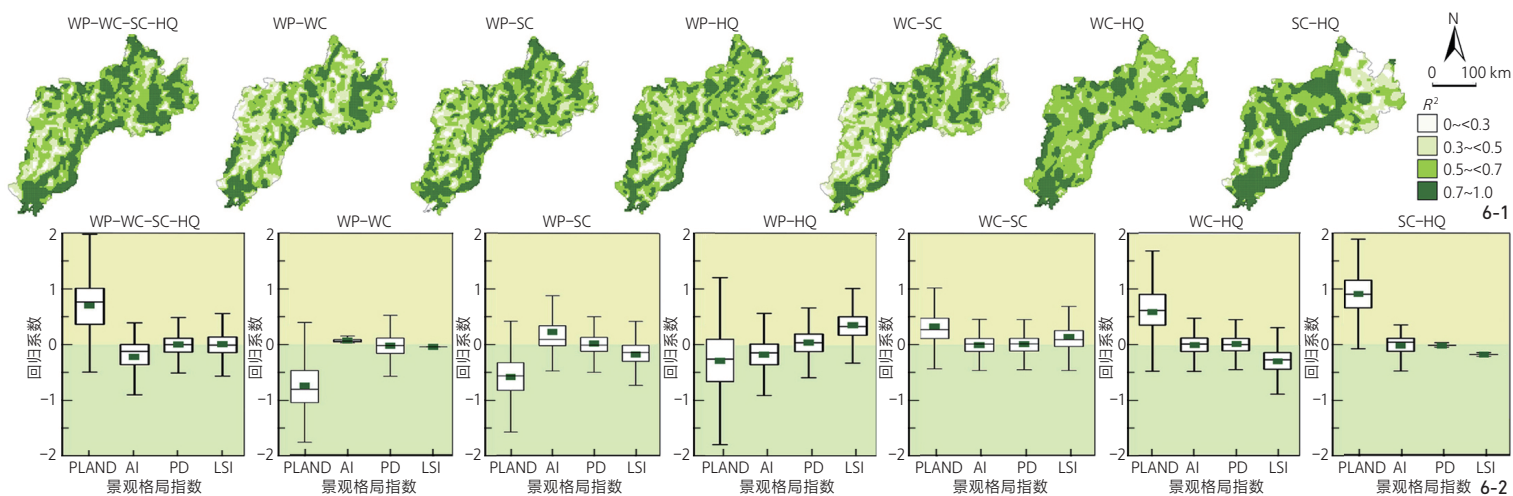
4 流域水生态系统服务的时空变化
Spatio-temporal changes in the WES in the watershed

5 流域水生态系统服务权衡强度变化
Spatio-temporal changes in trade-off intensity of WES in the watershed

2.3 水生态系统服务权衡强度的变化

在 4 项水生态系统服务中，水质净化高值多聚集在污染源丰富的流域中下游地区，与其他服务的权衡强度整体较高；生境质量

高值多聚集在受人类干扰较少的生态空间核心区，与其他服务的权衡强度整体较低。经 20 年的生态修复后，流域水生态系统服务权衡强度呈现差异化变化（图 5）：仅水源涵养-



6 生态空间格局对水生态系统服务权衡的影响
Effect of ecological space pattern on WES trade-offs

6-1 MGWR 的 R^2 空间分布
Spatial distribution of R^2 in MGWR

6-2 MGWR 的回归系数箱线图
Box plots of MGWR regression coefficients

表2 水生态系统服务权衡强度的归因统计
Tab. 2 Attributional statistics of the trade-off intensity of WES

水生态系统服务权衡关系	总增长量	人工贡献率/%	自然贡献率/%
WP-WC	-0.033 9	-80.83	180.83
WP-SC	0.021 9	163.47	-63.47
WP-HQ	0.019 2	134.38	-34.38
WC-SC	0.051 5	14.56	85.44
WC-HQ	-0.003 5	-268.57	368.57
SC-HQ	0.003 9	110.26	-10.26
WP-WC-SC-HQ	0.010 9	212.84	-112.84

水质净化、水源涵养-生境质量 2 组服务呈协同化发展 (RMSD 分别下降 0.033 9 和 0.003 5), 改善区集中于东西部山林及柳河、绕阳河沿线。其余 5 组服务权衡强度均上升, 尤以水质净化-土壤保持 (+0.021 9)、水质净化-生境质量 (+0.019 2) 最显著, 主要分布在干流沿线及柳河上游。在流域的生态修复过程中, 以土地利用变化为主的人工因素是权衡加剧的主要原因 (表 2)。

2000—2020 年, 辽河干流流域生态修复成效显著: 生态空间增加 1 873.06 km² (林地、草地等), 空间格局呈现聚集 (干流沿线) 与破碎 (支流上游) 并存特征, 单项水生态系统服务增长。然而, 水生态系统服务权衡强度普遍上升, 表明单目标修复虽能提升单项服务, 却削弱了多目标协同性, 制约了流

域整体生态效益的最大化。

3 流域生态修复成效的成因解析

3.1 生态空间格局对水生态系统服务权衡强度的影响

通常人们以创造更多生态空间的方式进行生态修复, 因此生态空间的格局变化是研究生态修复对成效影响的重要视角。MGWR 模型分析 (图 6) 表明: 尽管不同的权衡关系中的 R^2 高值区域具有空间异质性, 但是辽河干流沿线及周边普遍是高值区域。与相关实证研究^[24] 的结论类似, 比起景观配置, 景观组分对生态系统服务产生更多影响, 并且在特定的生态系统服务关系中产生不同的作用方向。

进一步分解景观格局对单项水生态系统

服务的影响 (图 7), 发现与 Ran 等^[25] 的研究结论类似, 产生服务权衡的主要原因在于同样的生态景观格局对不同生态系统服务的作用方向相反。基于开阔水面的蒸散效应, 河流沿线以水体和湿地为主的生态空间景观组分对水源涵养产生负面影响, 但是对其他服务则具有积极作用, 从而导致服务间的权衡。景观配置产生的权衡主要在水质净化与其他服务之间, 在东部山林表现最为显著: 流域地势最高的山林聚集区由于缺少污染源而使水质净化水平较低, 同时对其他服务影响积极; 与其他空间穿插程度更高、形状更复杂的生态空间, 拦截污染物的能力更强^[21], 而破碎化的生态空间对其他服务作用消极, 进而产生服务间的权衡。

3.2 生态修复对水生态系统服务权衡强度的影响

过去 20 年, 辽河流域实施的生态修复工程使生态空间呈现干流沿线聚集化、支流上游分散化的格局变化 (图 3)。这种格局虽提升了各项水生态系统服务, 但也加剧了服务间权衡强度。

进一步调查发现, 人为的修复目标偏好决定多项生态修复工程的布设, 进而导致生态空间格局的改变和水生态系统服务及其权衡强度的变化。自 20 世纪 80 年代以来, 水污染治理始终是流域生态修复的首要目标。

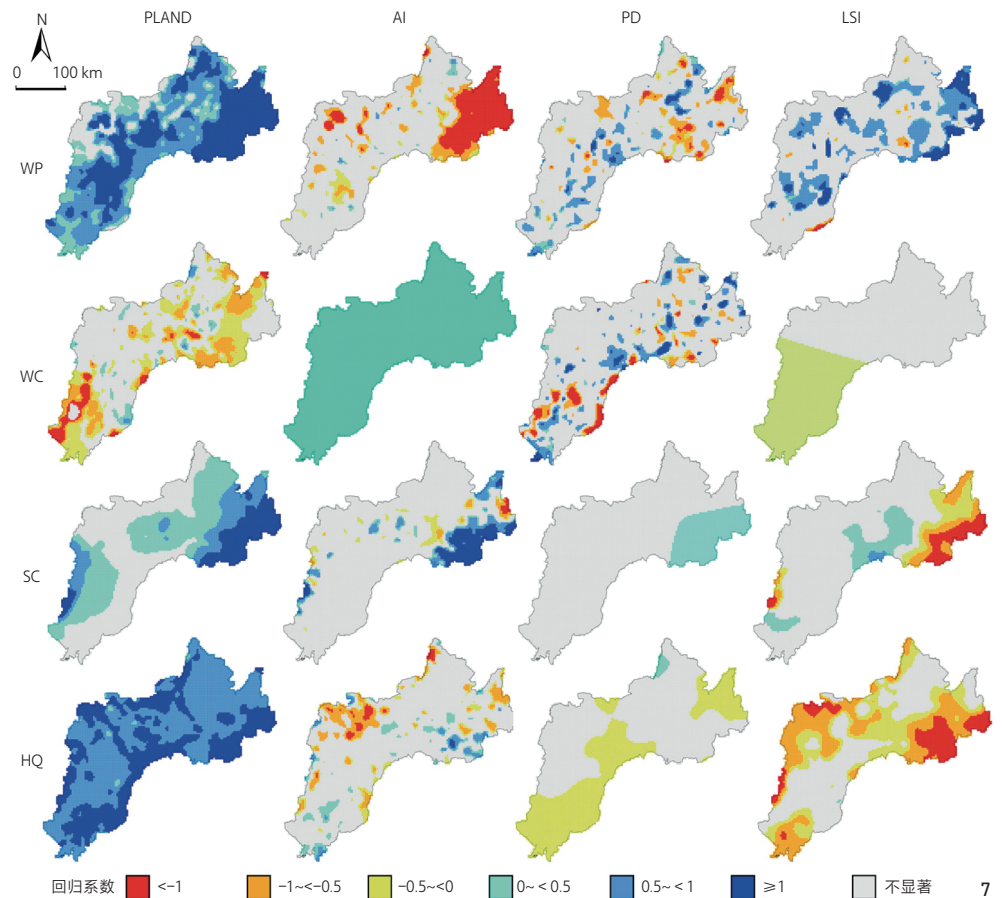
尽管同时进行了其他修复工作，但水质改善始终是成效评估的关键指标。已有研究表明，河岸带周边新增的湿地、林地等生态空间能够有效截断面源污染，显著提升水质净化服务^[26]。然而，分布在平坦区域的生态空间对土壤保持的贡献有限，新增的水体和湿地因蒸散作用会削弱水源涵养服务（图 4、7），最终导致干流沿线的服务权衡增长。近年来，随着支流水质监测站点的建设，支流沿线生态空间有所增加，但尚未形成明显的聚集态势。本研究通过量化分析证实，传统的单目标、局地式修复模式虽能有效改善特定生态系统服务，但会加剧服务间的权衡关系^[6]。这一发现为未来流域生态修复的多目标协同优化提供了重要依据。

4 流域国土空间生态修复的空间规划策略

国土空间生态修复发生转向以后，流域生态修复的目标从“保证生态质量不恶化”转向“生态向好”^[27]，修复对象从受损的生态系统扩展到社会-生态耦合系统。

流域国土空间生态修复的根本目标是提升人类福祉，生态系统服务又是人类福祉提升的基础^[28]，生态系统服务的权衡/协同关系产生于人类的选择偏好^[29]，对应生态修复多元利益主体之间的冲突/共赢关系^[30]。水生态系统服务权衡强度的评估有利于协调国土空间生态修复的多元目标；基于评估结果的权衡强度调节则有利于化冲突为共赢，实现水生态系统服务的最大效用，更大限度地提升人类福祉。因此，水生态系统服务的权衡是评估国土空间生态修复多目标协同性的重要指标，也是研究流域国土空间生态修复的重要视角。

根据景观生态学的“格局—过程”范式，景观格局与生态过程相互作用，共同驱动景观变化，并呈现一定的生态功能和生态系统服务。流域现状的生态空间格局既是过去自然与人工修复过程的结果，又对未来的生态修复产生影响。进一步结合“格局—过程—服务”范式，人们通过影响生态系统的结构、过程和功能的方式直接或间接地获取生态系



7 生态空间格局对水生态系统服务影响的回归系数格局
Regression coefficient pattern of the effect of ecological space pattern on WES

统服务。本研究及相关实证研究^[31-32]均表明，景观组分和景观配置对水生态系统服务及其权衡存在显著的影响。基于景观可持续性科学（Landscape Sustainability Science），优化空间格局是一种空间显式方法（spatially explicit approach）^[33]，可通过协调水生态系统服务的权衡关系提升人类福祉，同时也是大中尺度国土空间生态修复的重要手段^[1]。国土空间生态修复可以理解为人们通过影响生态结构和过程尽可能多地获取生态系统服务，进而提升人类福祉的过程。其中，作为人与自然互动的社会-生态耦合系统，景观尺度的空间格局优化是国土空间生态修复的重要抓手，尤其是以提供生态产品和服务为主导功能的生态空间，其景观格局的优化更是国土空间生态修复的焦点。在布设具体的局地生态修复工程之前，先统筹部署流域全局全生

态要素的数量配比和空间格局，是降低水生态系统服务权衡强度、提升修复工作效率的关键。

流域国土空间是“山、水、林、田、湖、草”等生态要素和“城、乡”等人文要素的集合体^[34]，具有生产-生活-生态复合功能属性^[4]，其多功能协同是流域可持续发展和人类福祉提升的基础。对于追求整体性和系统性的国土空间生态修复而言，协调生态空间与生产、生活空间的关系，摆正生态空间在国土空间保护与开发格局中的位置^[35]，是开展具体生态修复工作的先导条件。

5 结论

本研究综合运用土地利用转移矩阵、景观格局指数、InVEST 模型和 RMSD 方法对辽河干流流域生态修复的生态要素数量、生态

空间格局、水生态系统服务和水生态系统服务权衡强度成效进行评估。2000—2020年,流域的生态修复在前三方面均取得积极成效:各类生态要素面积增长的同时,流域生态空间的景观组分显著增长,也改变了生态空间的景观配置;水质净化、水源涵养、土壤保持和生境质量4项水生态系统服务在不同空间发生不同程度的增长。但是,从水生态系统服务权衡强度角度评估修复成效时,发现过去20年的生态修复成效不总是积极的,在水生态系统服务分别增长的同时,整体水生态系统服务的权衡强度也呈上升态势。通过自然/人工因素厘定和MGWR模型分析成因,发现人为的水生态系统服务选择性偏好导致大多数新增的生态空间分布在干流沿线和西部支流上游地区,虽然水质净化和生境质量得到显著改善,但对水源涵养和土壤保持的贡献率较低,从而导致水生态系统服务权衡强度的上升。由此启发,将水生态系统服务权衡强度纳入成效评估体系,可有效考核流域国土空间生态修复的多目标协同性。此外,以生态空间布局为抓手,统筹流域国土空间关系,部署全域生态要素空间格局,能够进一步提升流域国土空间生态修复的整体成效。

辽河干流流域是位于辽河中下游的农业流域,其生态修复过程和成效具有一定的典型性和特殊性。一方面,农业流域以氮、磷等非点源污染物为主的特征是以改变土地利用类型的修复方式发挥重要作用的前提,因此本研究提出的优化生态空间格局的修复策略主要对农业流域生态修复有借鉴价值,对其他类型流域的适用性有待进一步验证。另一方面,辽河干流流域地处寒冷地区且整体地势较为平缓,受气候和地势等自然条件影响,生态修复的水生态系统服务及其权衡强度出现上述成效,在山区或南方水网地区等自然条件差异较大的流域,其水生态系统服务权衡强度成效有待更多的实证研究。不过,重要的是,本研究所提出的将水生态系统服务权衡强度纳入流域生态修复成效评估体系,理论上适用于所有类型的流域,将有助于推动流域国土空间生态修复的多目标协同发展,提高修复效率,更大限度地提升人类福祉。

参考文献 (References):

- [1] 曹宇, 王嘉怡, 李国煜. 国土空间生态修复: 概念思辨与理论认知[J]. 中国土地科学, 2019, 33 (7): 1-10.
- [2] CAO Y, WANG J Y, LI G Y. Ecological Restoration for Territorial Space: Basic Concepts and Foundations[J]. China Land Science, 2019, 33 (7): 1-10.
- [3] 李志国, 徐昔保, 李景宜, 等. 生态修复研究进展与展望[J]. 环境生态学, 2024, 6 (1): 103-110.
- [4] LI Z G, XU X B, LI J Y, et al. Research Progress and Prospect of Ecological Restoration[J]. Environmental Ecology, 2024, 6 (1): 103-110.
- [5] 彭建, 吕丹娜, 董建权, 等. 过程耦合与空间集成: 国土空间生态修复的景观生态学认知[J]. 自然资源学报, 2020, 35 (1): 3-13.
- [6] PENG J, LYU D N, DONG J Q, et al. Processes Coupling and Spatial Integration: Characterizing Ecological Restoration of Territorial Space in View of Landscape Ecology[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35 (1): 3-13.
- [7] 傅伯杰. 国土空间生态修复亟待把握的几个要点[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36 (1): 64-69.
- [8] FU B J. Several Key Points in Territorial Ecological Restoration[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36 (1): 64-69.
- [9] HACKBART V C S, DE LIMA G T N P, DOS SANTOS R F. Theory and Practice of Water Ecosystem Services Valuation: Where Are We Going?[J]. Ecosystem Services, 2017, 23: 218-227.
- [10] 顾恬玮, 彭建, 姜虹, 等. 流域国土空间生态修复: 理论认知与规划要点[J]. 自然资源学报, 2023, 38 (10): 2464-2474.
- [11] GU T W, PENG J, JIANG H, et al. Watershed-Based Territorial Ecological Restoration: Theoretical Cognition and Key Planning Issues[J]. Journal of Natural Resources, 2023, 38 (10): 2464-2474.
- [12] GRIZZETTI B, LIQUETE C, PISTOCCHI A, et al. Relationship Between Ecological Condition and Ecosystem Services in European Rivers, Lakes and Coastal Waters[J]. Science of The Total Environment, 2019, 671: 452-465.
- [13] WANG Z K, GUO J, LING H B, et al. Function Zoning Based on Spatial and Temporal Changes in Quantity and Quality of Ecosystem Services Under Enhanced Management of Water Resources in Arid Basins[J]. Ecological Indicators, 2022, 137: 108725.
- [14] 程艳, 崔瑶, 林涛, 等. 额尔齐斯河流域山水林田湖草工程生态保护修复成效评价[J]. 自然资源学报, 2024, 39 (12): 2798-2818.
- [15] CHENG Y, CUI Y, LIN T, et al. Ecological Protection and Restoration Performance Evaluation of the Mountains - Waters - Forests - Fields - Lakes - Grasslands Project in the Irtysh River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2024, 39 (12): 2798-2818.
- [16] 李冠城, 侯敏驰, 李梓君, 等. 珠江流域“十三五”水污染防治成效与经验[J]. 环境保护, 2021, 49 (19): 9-13.
- [17] LI G C, HOU M C, LI Z J, et al. Success and Experience of Water Pollution Prevention and Control During the 13th Five-Year Plan in the Pearl River Valley[J]. Environmental Protection, 2021, 49 (19): 9-13.
- [18] 董晓蝶. 基于生态系统服务视角的常州市河长制推行成效评价[J]. 湖北农业科学, 2020, 59 (15): 163-168.
- [19] DONG X D. Performance Evaluation of River Chief System in Changzhou City Based on the Perspective of Ecosystem Service[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2020, 59 (15): 163-168.
- [20] 陈妍, 周妍, 包岩峰, 等. 山水林田湖草沙一体化保护和修复工程综合成效评估技术框架[J]. 生态学报, 2023, 43 (21): 8894-8902.
- [21] CHEN Y, ZHOU Y, BAO Y F, et al. A Technical Framework for Effectiveness Evaluation of Holistically Ecological Conservation and Restoration Project of Mountains, Rivers, Forests, Farmlands, Grasslands, and Deserts[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43 (21): 8894-8902.
- [22] 肖武, 阮琳琳, 岳文泽, 等. 面向国土空间生态保护修复的多尺度成效评估体系构建[J]. 应用生态学报, 2023, 34 (9): 2566-2574.
- [23] XIAO W, RUAN L L, YUE W Z, et al. Construction of a Multi-scale Effectiveness Evaluation System for Ecological Restoration and Protection of Territorial Space[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34 (9): 2566-2574.
- [24] HU X W, XU W W, LI F Y. Spatiotemporal Evolution and Optimization of Landscape Patterns Based on the Ecological Restoration of Territorial Space[J]. Land, 2022, 11 (12): 2114.
- [25] WANG L X, LI Z W, WANG D Y, et al. Unbalanced Social-Ecological Development Within the Dongting Lake Basin: Inspiration from Evaluation of Ecological Restoration Projects[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 315: 128161.
- [26] SHENG W P, ZHEN L, XIAO Y, et al. Ecological and Socioeconomic Effects of Ecological Restoration in China's Three Rivers Source Region[J]. Science of The Total Environment, 2019, 650: 2307-2313.
- [27] 袁哲, 许秋瑾, 宋永会, 等. 辽河流域水污染治理历程与“十四五”控制策略[J]. 环境科学研究, 2020, 33 (8): 1805-1812.
- [28] YUAN Z, XU Q J, SONG Y H, et al. Water Pollution Management Process and “14th Five-Year Plan” Pollution Control Strategy for Liao River Basin[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33 (8): 1805-1812.
- [29] GENG S B, ZHU W R, SHI P L. A Functional Land Use Classification for Ecological, Production and Living Spaces in the Taihang Mountains[J]. Journal of Resources and Ecology, 2019, 10 (3): 246.
- [30] 贾振宇, 王世曦, 刘学, 等. 辽河保护区土壤保持功能时空变化及其影响因素分析[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11 (4): 686-692.
- [31] JIA Z Y, WANG S X, LIU X, et al. Spatial and Temporal Variation of Soil Conservation Function and Its Influencing Factors in Liaohe Conservation Area[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11 (4): 686-692.
- [32] 孙才志, 安志英. 基于生态系统服务流的东北地区水安全格局[J]. 水资源保护, 2024, 40 (3): 11-19, 27.
- [33] SUN C Z, AN Z Y. Water Security Pattern in Northeast China Based on Ecosystem Service Flow[J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (3): 11-19, 27.
- [34] 王飞, 陶芹, 程宪波, 等. 快速城镇化地区景观格局变化对水生态系统服务的影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37 (1): 159-167.
- [35] WANG F, TAO Q, CHENG X B, et al. Influence of Landscape Pattern Change on Water Ecosystem Service in Rapidly Urbanization Areas[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37 (1): 159-167.
- [36] 刘晓曼, 王超, 王燕, 等. 青海祁连山区山水林田湖草生态保护修复工程生态成效评估[J]. 生态学报, 2024, 44 (14): 5960-5973.

LIU X M, WANG C, WANG Y, et al. Evaluation on the Implementation Effect of Ecological Protection and Restoration Project of Mountain – Water – Forest – Cropland – Lake – Grass System in Qilian Mountains, Qinghai Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44 (14): 5960-5973.

[23] BAI Y, OCHUODHO T O, YANG J. Impact of Land Use and Climate Change on Water-Related Ecosystem Services in Kentucky, USA[J]. Ecological Indicators, 2019, 102: 51-64.

[24] RIEB J T, BENNETT E M. Landscape Structure as a Mediator of Ecosystem Service Interactions[J]. Landscape Ecology, 2020, 35 (12): 2863-2880.

[25] RAN P L, HU S G, FRAZIER A E, et al. The Dynamic Relationships Between Landscape Structure and Ecosystem Services: An Empirical Analysis from the Wuhan Metropolitan Area, China[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 325: 116575.

[26] 王飞, 陶宇, 欧维新.景观格局变化的水质净化服务响应关系研究进展[J].地球科学进展, 2021, 36 (1): 17-28.

WANG F, TAO Y, OU W X. Research Progress on Response Relationship of Water Quality Purification Service with Landscape Pattern Change[J]. Advances in Earth Science, 2021, 36 (1): 17-28.

[27] 李宁, 田川, 程小文, 等.流域视角下生态系统保护规划策略与实践[J].规划师, 2022, 38 (11): 28-34.

LI N, TIAN C, CHENG X W, et al. Strategy and Practice of Ecosystem Protection Planning from the Perspective of Watershed[J]. Planners, 2022, 38 (11): 28-34.

[28] 刘芦萌, 邬建国.生态系统服务与人类福祉关系的研究框架、途径与方法[J].自然资源学报, 2024, 39 (9): 2044-2065.

LIU L M, WU J G. Frameworks, Approaches, and Methods for Studying the Relationship Between Ecosystem Services and Human Wellbeing[J]. Journal of Natural Resources, 2024, 39 (9): 2044-2065.

[29] 岳邦瑞, 钱芝弘.生态系统服务权衡与协同机制及其在

景观规划中的应用[J].风景园林, 2022, 29 (10): 20-25.

YUE B R, QIAN Z H. Formation Mechanism of Trade-Offs and Synergies Between Ecosystem Services and Application in Landscape Planning[J]. Landscape Architecture, 2022, 29 (10): 20-25.

[30] 张碧天, 闵庆文, 焦雯珺, 等.生态系统服务权衡研究进展[J].生态学报, 2021, 41 (14): 5517-5532.

ZHANG B T, MIN Q W, JIAO W J, et al. Research Progress and Perspective on Ecosystem Services Trade-Offs[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41 (14): 5517-5532.

[31] ZHANG M, MA S, GONG J W, et al. A Coupling Effect of Landscape Patterns on the Spatial and Temporal Distribution of Water Ecosystem Services: A Case Study in the Jianghuai Ecological Economic Zone, China[J]. Ecological Indicators, 2023, 151: 110299.

[32] LI W J, KANG J W, WANG Y. Identifying the Impacts of Landscape Structure on Ecosystem Services Trade-Offs Among Ecosystem Services Bundles in the Mountains of Southwest China[J]. Ecological Engineering, 2024, 209: 107419.

[33] 黄璐, 邬建国, 王珂, 等.可持续景观规划: 融合景观可持续性研究与地理设计[J].生态学报, 2022, 42 (2): 442-449.

HUANG L, WU J G, WANG K, et al. Sustainable Landscape Planning: Integrating Landscape Sustainability Research with GeoDesign[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42 (2): 442-449.

[34] 彭建, 李冰, 董建权, 等.论国土空间生态修复基本逻辑[J].中国土地科学, 2020, 34 (5): 18-26.

PENG J, LI B, DONG J Q, et al. Basic Logic of Territorial Ecological Restoration[J]. China Land Science, 2020, 34 (5): 18-26.

[35] 王晨旭, 刘焱序, 于超月, 等.国土空间生态修复布局研究进展[J].地理科学进展, 2021, 40 (11): 1925-1941.

WANG C X, LIU Y X, YU C Y, et al. Research Progress on the Arrangement of Territorial Ecological Restoration[J].

Progress in Geography, 2021, 40 (11): 1925-1941.

图表来源(Sources of Figures and Tables):

图 1~7 均由作者绘制, 图 1 基于 GS (2016) 2923 号地图、辽 S (2023) 027 号地图制作, 未对边界进行修改, 其中的辽河流域边界主要基于地理空间数据云网站的高程数据, 采用流域分区分析获取。

(编辑 / 王一兰)

作者简介:

郭曼曼 / 女 / 沈阳建筑大学建筑与规划学院在读博士研究生 / 研究方向为流域规划与生态治理

路旭 / 男 / 博士 / 沈阳建筑大学建筑与规划学院教授、博士生导师 / 研究方向为城乡发展与区域规划
通信作者邮箱: luxupku@163.com

马青 / 女 / 回族 / 硕士 / 沈阳建筑大学建筑与规划学院教授、博士生导师 / 研究方向为人居环境建设与国土空间规划

GUO M M, LU X, MA Q. Assessment of Watershed Restoration Effectiveness from the Perspective of Water-Related Ecosystem Service Trade-Offs[J]. Landscape Architecture, 2025, 32(8): 40-48. DOI: 10.3724/j.fjyl.LA20240117.

Assessment of Watershed Restoration Effectiveness from the Perspective of Water-Related Ecosystem Service Trade-Offs

GUO Manman, LU Xu*, MA Qing

Abstract:

[Objective] Mountains, forests, grasslands, and other landscape elements are all intricately connected by hydrological processes in watersheds, which are essential ecological communities. Theoretically, watersheds are the best geographical scale for effectiveness of ecological restoration since they are whole ecological units with cohesive biological processes. As ecosystem services having the most direct impact on human civilizations and serving as the primary determinants of the effectiveness of watershed restoration, water-related ecosystem services (WES) are vital connections between ecological

restoration processes and human well-being. Additionally, one crucial metric for assessing the relationship between ecosystem services is the trade-offs between WES. Not merely the main source of WES, the ecological spatial pattern of watersheds is also the physical expression of coupled natural-anthropogenic processes, making it an essential analytical viewpoint for restoration ecology. In addition to improving effectiveness assessment, examining watershed restoration from the perspective of WES trade-offs may also help guide strategic approaches to integrated watershed management. **[Methods]** An integrated methodological approach is used in this research to



assess the effectiveness of ecological restoration in the mainstream watershed of the Liaohe River from 2000 to 2020. To thoroughly assess restoration results, the research employs a multi-model approach that includes geospatial analysis, landscape ecology measures, and ecosystem service modeling. In order to measure changes in the composition and layout of ecological spaces, satellite imagery processed in ArcGIS 10.8 is used to create land use transition matrices and landscape pattern indices. Four important WES are assessed using the InVEST 3.14.1 model, namely water purification (nutrient delivery ratio module), water conservation (annual water yield module), soil conservation (sediment delivery ratio module), and habitat quality (habitat quality module). Root mean square deviation (RMSD) is used to calculate the trade-off intensity between various services, and Origin 2024 is used for data standardization and statistical analysis. Additionally, the research adopts multiscale geographically weighted regression (MGWR 2.2 software) to distinguish between natural elements (driven by climate) and anthropogenic elements (driven by land use) affecting WES trade-offs in order to pinpoint the driving processes. Through spatial explicit modeling, this analytical methodology makes it possible to diagnose the root causes of restoration effectiveness and quantify them across several dimensions (spatial pattern, individual service, and ecosystem service trade-off). To guarantee region-specific accuracy, local hydrological and ecological data are used to calibrate all model parameters.

[Results] Research results are summarized as follows (covering the period from 2000 to 2020). 1) Landscape transformation: The conversion of agricultural production space ($2,765.45 \text{ km}^2$) creates $1,873.06 \text{ km}^2$ of new ecological space (including 292.67 km^2 of forests, 980.10 km^2 of grasslands, 382.96 km^2 of wetlands, and 217.33 km^2 of water bodies), and produces unique spatial patterns, such as aggregated growth down the mainstream (AI increases by over 17%), and dispersed expansion in upper tributaries (PD and LSI increase by 11.77% and 2.64%, respectively). 2) Despite regional variation, all the four WES display quantifiable improvements: There is a 9.14% improvement (with nitrogen output decreasing from $1.74 \times 10^7 \text{ kg}$ to $1.58 \times 10^7 \text{ kg}$) in water purification (WP), mostly along the mainstream of the Liaohe River and upper reaches of its tributaries; a remarkable 184% increase (from $9.81 \times 10^7 \text{ m}^3$ to $27.86 \times 10^7 \text{ m}^3$) in water conservation (WC); a significant gain of 85.73×10^6 tons in soil conservation (SC), representing a 74.7% improvement from the baseline in 2000; and a modest but ecologically significant progress in habitat quality (HQ), with the watershed-wide mean index increasing from 0.315 to 0.321 (a 1.9% increase). 3) Two of the six trade-off connections under investigation indicate a decline in trade-off intensity (WC-WP: RMSD decreases by 0.0339; WC-HQ: RMSD decreases by 0.0035), while the other four show the reverse pattern (WP-SC: RMSD increases by 0.0219; WP-HQ: RMSD increases by 0.0192; WC-SC: RMSD increases by 0.0515; SC-HQ: RMSD increases by 0.0039). 4) In particular, the landscape composition is advantageous for WP, SC, and HQ but detrimental for WC, the landscape fragmentation is advantageous for WP but detrimental for SC, while the landscape aggregation is opposite. These ecological spatial patterns have opposite effects on WES, which is the primary cause of the increase in WES trade-offs. 5) In addition, the ecological spatial layout plan previously centered on water purification is a significant factor in the rise in WES trade-offs.

[Conclusion] From the perspective of WES, this research has verified that ecological restoration in the mainstream watershed of the Liaohe River from 2000 to 2020 is a traditional single-objective ecological restoration mode, which is beneficial for single-objective local restoration, but detrimental for multi-objective coordinated restoration. Optimizing the ecological spatial pattern is a crucial tactic to raise the overall effectiveness of ecological restoration of territorial space and human well-being in watersheds. In the

future, integrating the trade-off intensity of WES into the effectiveness assessment system will support the multi-objective coordinated development of ecological restoration in watersheds. This research provides factual support for the shift from single-objective to multi-functional watershed restoration strategies, as well as a replicable assessment framework. There are new avenues for operationalizing "ecological civilization" principles in real-world watershed management through the scientific fusion of landscape ecology, ecosystem service research, and spatial statistics.

Keywords: ecological restoration of territorial space; watershed territorial space; water-related ecosystem services (WES); trade-off intensity; effect evaluation

Authors:

GUO Manman is a Ph.D. candidate in the School of Architecture and Urban Planning, Shenyang Jianzhu University. Her research focuses on watershed planning and ecological governance.

LU Xu, Ph.D., is a professor and doctoral supervisor in the School of Architecture and Urban Planning, Shenyang Jianzhu University. His research focuses on urban and rural development and regional planning.

Corresponding author Email: luxupku@163.com

MA Qing (Hui), Master, is a professor and doctoral supervisor in the School of Architecture and Urban Planning, Shenyang Jianzhu University. Her research focuses on human settlement environment construction and territorial spatial planning.