DOI: 10.20103/j.stxb.202312252813

韩宇,刘焱序,王晨旭.基于水生态系统服务的黄河流域生态修复投资优先区识别.生态学报,2024,44(18):8126-8137. Han Y, Liu Y X, Wang C X. Identification of priority areas for ecological restoration supported by investment based on water ecosystem services in the Yellow River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(18):8126-8137.

基于水生态系统服务的黄河流域生态修复投资优先区 识别

韩 宇,刘焱序*,王晨旭

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:国土空间生态修复需要国家投资和社会投资支持其顺利开展。然而,国土空间生态修复研究很少从修复成本和投资潜力 角度考虑投资的经济可行性。以黄河流域为研究区,从4种土地利用模拟情景、2种水生态系统服务和4种生态产品价值实现 模式出发,建立了"土地利用模拟-生态系统服务供需评估-生态修复可行性分析"步骤下的社会投资支持优先区识别框架。研 究结果表明,水土保持情景下 2030 年黄河流域草地增加明显,自然演变情景、水源涵养情景和湿地保护情景的人造地表有所扩 张;基准情景国家投资优先流域主要分布在中下游;基准情景一致表明,碳交易和排污权交易最具社会投资吸引力,特色养殖和 特色中药的投资吸引不具有普适性。研究识别的空间位置可以为黄河流域投资支持生态修复、生态产品价值实现的宏观区位 选址提供参考。

关键词:生态产品价值实现;水质净化;土壤保持;国土空间生态修复;流域

Identification of priority areas for ecological restoration supported by investment based on water ecosystem services in the Yellow River Basin

HAN Yu, LIU Yanxu*, WANG Chenxu

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

Abstract: For the ecological restoration of territorial space to go smoothly, state investment and social investment is required. However, very few studies on the ecological restoration of territorial space take the economic viability of investment from the restoration cost and investment potential into account. The Yellow River Basin is the focus of this study. The identification framework of priority basins for social investment support under the steps of "land use simulation-supply and demand assessment of ecosystem services-feasibility of ecological restoration" is established using 4 land use simulation scenarios, 2 water ecosystem services, and 4 ecological product value realization development patterns. The results showed that, under the soil and water conservation scenario, the grassland in the Yellow River Basin would increase significantly in 2030, and the man-made surface expansion would be rapid in the natural evolution scenario, water source conservation scenario; the priority watersheds for national investment in the three scenarios were mainly distributed in the middle and lower reaches; the three scenarios unanimously showed that carbon trading and emission rights trading were the most attractive for social investment, while investment attraction for specialty breeding and specialty traditional Chinese medicine was not universal. The spatial location identified in this study can provide a reference for the macro location selection of investment in the Yellow River Basin to support ecological restoration and realize the value of ecological products.

基金项目:国家自然科学基金项目(42041007,U2243601);中央高校基本科研业务费专项资金资助

收稿日期:2023-12-25; 网络出版日期:2024-07-12

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: yanxuliu@ bnu.edu.cn

Key Words: realization of ecological product value; soil conservation; water purification; ecological restoration of territorial space; basin

生态修复是帮助退化、受损或被破坏的生态系统恢复的过程,以反映生态系统的固有价值,并提供人类重视的商品和服务^[1]。生态修复不仅需要准确评估生态效益,还需评估其经济可行性^[2],如何吸引国家投资和社会投资是目前生态修复的难题^[3-4]。中国重大生态修复工程是一项以提供公共生态产品与服务为主的生态环境建设工程,土壤保持、水质净化等生态修复目标往往以国家投资为主,在国家投资的引领下进行社会投资。2021年颁布的《关于鼓励和支持社会资本参与生态保护修复的意见》指出,鼓励和支持社会资本参与生态保护修复项目投资、设计、修复、管护等全过程,围绕生态保护修复开展生态产品开发、产业发展等。基于生态产品价值实现模式的生态修复能够为社会资本提供效益参考^[5],从区位选址的角度建立社会投资评估指标能够为确定生态修复社会投资支持的优先区提供指导^[6]。

生态系统服务是生态和社会过程之间的纽带^[7],生态系统服务制图可以用于识别生态修复的潜在位置, 从而促进生态功能提升^[8]。水生态系统服务是指与水相关的生态系统服务,是生态系统与流域社会经济系 统之间的桥梁^[9],是流域尺度生态修复评价的核心指标^[10]。基于水生态系统服务供给视角,Zhang^[11]评估了 广东省产水量、土壤保持和水质净化服务之间的权衡和协同,Xia^[12]则分析了辽河流域景观格局变化对以上 三种水生态系统服务的影响。然而,多数研究没有评估水生态系统服务需求,可能存在生态系统服务供需不 匹配的现象,例如存在人口密度较高的地区,水生态系统服务的供给能力难以满足实际需求。因此,生态修复 不能只关注生态过程,还需关注社会过程,兼顾水生态系统服务供需以连接生态与社会过程是生态修复优先 区识别的重要技术要求^[13-15]。

黄河流域生态保护和高质量发展是重大国家战略。黄河生态本底差,水资源十分短缺,水土流失严重,资 源环境承载能力弱^[16]。通过水土保持协调黄河水沙关系一直是保障黄河安澜的重要需求,在耕地高强度利 用下流域水质净化问题也被高度关注,二者构成了黄河流域两项典型的水生态系统服务。鉴于以往国土空间 生态修复研究缺乏对水生态系统服务供需和生态修复经济可行性的考虑,本研究的科学问题是如何将社会经 济指标纳入流域尺度生态修复优先区识别,以拉动投资支持,提高生态修复的可操作性。以黄河流域为研究 对象,设定以下三个研究步骤:(1)模拟多种土地利用情景下 2030 年黄河流域土地利用;(2)评估水生态系统 服务供需以确定生态修复国家投资优先流域;(3) 基于成本效益分析,确定不同生态产品价值实现模式的社 会投资支持优先区。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

黄河流经中国九省,是中国第二长河,全长 5464 km。黄河流域上游和中游面积大,下游狭窄,其范围内 大部分地区年降水量在 200—650 mm 之间。本研究以黄河的自然流域范围作为研究区,并区分上、中、下游 开展相应计算(图 1)。

1.2 数据来源

本研究中使用的社会经济、地形和气象数据的来源、年份和分辨率见表1。

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用模拟

Markov 模型是一种随机模型,使用矩阵表示一个时期到另一个时期土地利用类别之间的变化,用于预测时域中土地利用变化转移概率,具有稳定性、无后效性的特点,是模拟土地利用转移的最有效且广泛应用的方法之一^[19-20]。Markov 模型的原理如下:



图1 黄河流域区位及其上中下游边界

Fig.1 The location of the Yellow River Basin and its upper, middle and lower reaches

Tab	le 1 Data sources		
数据	来源	年份	分辨率
Data	Source	Year	Resolution
GDEMV3 30m 分辨率数字高程数据	地理空间数据云		20
GDEMV3 30m resolution digital elevation data	https://www.gscloud.cn/	—	50 m
中国 1km 栅格逐年平均降雨数据集	国家地球系统科学数据中心	2010 2015	1 hm
China's 1km grid annual average rainfall data set	http://www.geodata.cn/	2010-2013	1 KIII
Harmonized World Soil Database v 1.2	联合国粮农组织 https://www.fao.org/	_	_
GlobeLand30 全球 30 米地表覆盖	GlobeLand30	2010	20
GlobeLand30 global 30-meter surface coverage	http://globeland30.org/	2020	30 m
流域单元 Watershed unit	HydroATLAS 数据库 https://www.hydrosheds.org/hydroatlas	_	6级
集水区单元 Catchment unit	HydroATLAS 数据库 https://www.hydrosheds.org/hydroatlas	_	12 级
中国人口空间分布公里网格数据集 China's population spatial distribution kilometer grid data set	资源环境科学与数据中心 https://www.resdc.cn/	2010 2015 2019	1 km
中国 GDP 空间分布公里网格数据集 China's GDP spatial distribution kilometer grid data set	资源环境科学与数据中心 https://www.resdc.cn/	2005 2010 2015 2019	1 km
中国 1km 分辨率逐月平均气温数据集 China's monthly average temperature data set with 1km resolution	国家地球系统科学数据中心 http://www.geodata.cn/	2010—2015	1 km
全国兴趣点 POI 数据 National points of interest POI data	资源环境科学与数据中心 https://www.resdc.cn/	2020	1 km
未来 GDP 格网数据 Future GDP grid data	SSP1 情景 GDP 数据集 ^[17]	2030	1 km
未来人口格网数据 Future population grid data	SSP1 情景人口数据集 ^[18]	2030	1 km
中药单价	中药材天地网		
Unit price of traditional Chinese medicine	https://www.zyctd.com/	—	—
水产品交易价格指数	观研报告网	2021	
Aquatic product transaction price index	https://data.chinabaogao.com/	2021	_
碳排放量 Crbon emission	中国节能协会碳中和专业委员会 http://www.acet-ceca.com/	2017	_
氮排放量 Nitrogen emissions	中国统计年鉴 http://www.stats.gov.cn/	2020	_

表1 数据来源

式中,
$$S_{t+1}$$
表示未来 $t+1$ 时刻土地利用类型的状态; S_t 表示当前 t 时刻土地利用类型的状态; P_{ij} 表示土地利用变化转移概率矩阵. $0 \leq P_u < 1$ ($i, j = 1, 2 \cdots n$), i 表示转移矩阵的行, j 表示转移矩阵的列, n 表示土地利用类型的数量。

PLUS 模型是基于土地扩张分析策略和基于多类随机斑块种子的元胞自动机模型的用于模拟未来土地 利用空间变化的模型^[21],其在保留元胞自动机模型基本特征的基础上,结合了机器学习捕捉土地利用扩张和 驱动因子之间的复杂关系,有利于从政策影响等复杂机制角度理解土地利用变化^[22]。考虑到数据的可获得 性和前人研究^[23-25],本研究选择了两个社会经济因子(人口和 GDP),三个自然驱动因素(海拔、坡度和气 温),以及三个从 POI 数据中提取的交通驱动因子(距国道的距离、距水系的距离和距铁路的距离),根据土地 利用数据和驱动因子时间匹配原则,GDP和人口数据采用2010、2015和2019年(2020年产品未发布)三年的 平均值作为驱动因子。国土空间生态修复分为自然恢复和人工辅助修复,后者往往在短期对生态系统产生较 强的人为干预。人为进行土地利用结构优化,其一方面是人工辅助修复的重要方式,具有投资大、见效快的特 征;另一方面具有较强的建模预测可行性。因此本研究基于土地利用结构优化建模,识别人工辅助修复的优 先投资流域。根据《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》(以下简称"纲要")加强上游水源涵养能力 建设、加强中游水土保持和推进下游湿地保护和生态治理的要求,设定水源涵养情景、水土保持情景和湿地保 护情景为基准情景,并设置自然演变情景作为对照组。参考已有文献土地利用转移概率设置^[26-29],自然演变 情景的土地利用转移概率不变;水源涵养情景下,林地、灌木地向人造地表、未利用地的转移概率减少50%, 未利用地向林地、灌木地转移概率增加50%;水土保持情景下,林地、草地向人造地表、未利用地的转移概率 减少 50%,未利用地向林地、草地的转移概率增加 50%;湿地保护情景下,湿地、水体向人造地表、未利用地的 转移概率减少 50%,未利用地向湿地、水体的转移概率增加 50%(表 2)。 基于 2010 年和 2020 年黄河流域土 地利用数据提取土地扩张因子进行土地扩张策略分析,模拟土地利用变化,基于 Markov Chain 预测土地利用 转移矩阵;以 2010 年至 2020 年土地利用扩张数据为基础,基于 2020 年土地利用,模拟三种情景下 2030 年土 地利用,除土地利用转移概率和成本矩阵(表3)变化,其余参数均相同。为验证模拟的准确性,引入 Kappa 系 数验证模拟精度,Kappa 系数大于 0.6 则模拟精度较好,模拟结果与实际结果一致性程度较高^[30-31]。

												Tabl	le 2	Sce	enar	io p	resu	ppos	ition	1												
自然演变情景 Natural evolution scenario								水源涵养情景 Water yield scenario 水土保持情景 Soil and water conservation scenario											湿地保护情景 Wetland conservation scenario													
	А	В	С	D	Е	F	G	Н	А	В	С	D	Е	F	G	Н	А	В	С	D	Е	F	G	Н	А	В	С	D	Е	F	G	Н
А	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
В	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Î	-	-	-	-	\downarrow	\downarrow	-	Î	-	-	-	-	\downarrow	\downarrow	-	-	-	-	-	-	-	-
С	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Î	-	-	-	\downarrow	\downarrow	-	-	-	-	-	-	-	-
D	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Î	-	-	\downarrow	\downarrow	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Е	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Î	-	\downarrow	\downarrow
F	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Î	\downarrow	\downarrow
G	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Н	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Î	-	Î	-	-	-	\downarrow	-	Î	Î	-	-	-	-	\downarrow	-	-	-	-	Î	Î	-	\downarrow

A 到 H 分别代表耕地、林地、草地、灌木地、湿地、水体、人造地表和未利用地,--代表地类转换概率不变,↑代表地类转换概率增加,↓代表地类转换概率降低,增 加或降低的概率均为 50%

	自然演变情景 Natural evolution scenario										水 Wate	源涵 r yiel	养情 d sco	景 enario)			Soil	水 l and	土保 wate scer	持情 r con nario	景 serva	tion				洛 Wet	显地仍 land o sce	只护作 conse nario	青景 rvatio	n	
	Α	В	С	D	Е	F	G	Н	Α	В	С	D	Е	F	G	Н	А	В	С	D	Е	F	G	Η	A	В	С	D	Е	F	G	Н
А	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
В	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
С	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
D	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Е	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
F	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
G	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Н	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

表 3 成本矩阵

1.3.2 水生态系统服务供需评估

InVEST 模型的 Sediment Delivery Ratio (SDR)模型能够绘制陆地沉积物的生成和输送到河流的地图。 该模型利用修正后的通用土壤流失方程计算年土壤流失量,然后计算沉积物输送比率[32]。参数设置参照类 似研究区的文章[33-34],计算公式如下:

$$usle_i = R_i \times K_i \times LS_i \times C_i \times P_i \tag{3}$$

式中,usle,是年土壤流失量,单位为thm⁻²a⁻¹;R,是降雨侵蚀力,单位为MJmmhm⁻²h⁻¹a⁻¹;K,是土壤可蚀性,单 位为 t h $MJ^{-1}mm^{-1}$; LS 是坡度长度-梯度因子, 无单位; C 是覆盖管理因子, 无单位; P 是支持实践因子, 无 单位。

InVEST 模型的 Nutrient Delivery Ratio(NDR)模型基于植被和土壤截留径流中养分污染物的机理,可以计 算氮输出和磷输出,本研究以氮输出表征流域生态系统的水质净化服务^[35]。参数设置参照类似研究区的文 章[33,36],计算公式如下:

$$ALV_{x} = HSS_{x} \times pol_{x}$$

$$\tag{4}$$

$$HSS_{x} = \frac{\Lambda_{x}}{\lambda}$$
(5)

$$\lambda_x = \lg \left(\sum Y u \right) \tag{6}$$

式中,ALV_x表示栅格 x 修正后的负荷量;HSS_x表示栅格 x 的水文敏感度评分;pol_x表示栅格 x 的输出系数; λ_x 表示栅格 x 的径流系数; λ_w 表示研究区的平均径流系数; $\sum_{u} Yu$ 表示汇入栅格 x 的总产水量。

在计算生态系统服务需求时,本研究使用社会经济发展来表示理论上的生态系统服务需求[37],即使用人 口密度、土地利用开发程度和 GDP 进行量化^[38]。人口密度在一定程度上可以表征人类对生态系统服务的需 求,人口密度越大,需求越大[39-40]。土地利用开发程度可以用建设用地的比重表示,开发程度越高,人类对生 态系统服务的需求就越高^[41-42]。GDP 间接反映了每个小流域的经济发达程度,GDP 越高,表明人类对该区 域生态系统服务的需求越高^[43-44]。考虑到 GDP 和人口的数据限制和数据源差异,2030 年生态系统服务需 求在资源环境科学与数据中心的 GDP 和人口数据的基础上,叠加 SSP1 路径(可持续发展路径)中的 GDP 和 人口数据格网数据的差值。由于区域经济发展速度的不一致可能导致不同流域的人口密度和 GDP 存在较大 差异,会降低结果的可靠性,因此采用统计方法对人口密度和 GDP 进行对数分析。生态系统服务需求如下公 式所示[38]:

$$X = x_{i1} \times \lg x_{i2} \times \lg x_{i3} \tag{7}$$

式中,X表示生态系统服务需求; x_n 表示土地利用开发程度; lgx_n 表示人口密度; lgx_n 表示地均 GDP。

为判断需求的高低,利用 z-score 标准化方法对需求量进行标准化,大于 0 则为高需求流域,反之则为低需求流域。z-score 标准化公式如下:

$$x = \frac{x_i - x}{s} \tag{8}$$

$$x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i \tag{9}$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (x - x)^{2}}$$
(10)

式中,x表示标准化单元标准化后的生态系统服务供给增加量和需求量;x_i表示第*i*个标准化单元的供给增加量和需求量;x为研究区平均值;s为研究区标准差;n为标准化单元的总数。

1.3.3 国家投资优先流域识别

基于水生态系统服务供需变化识别国家投资优先流域的空间位置。黄河流域 2030 年三种情景减去自然 演变情景下的土壤保持服务代表生态修复后土壤保持服务的供给变化。水质净化服务用氮输出表征,输出越 多服务越低,故用 2030 年自然演变情景减去三种情景的氮输出代表水质净化服务的供给变化。供给增加量 大于增加中值的流域为供给增加量大的流域,需求大于 0 的流域为高需求流域,反之则为供给增加量小的流 域和低需求流域。供给增加量大-高需求流域为国家投资一级优先流域;供给增加量大-低需求流域和供给增 加量小-高需求流域为国家投资二级优先流域。

1.3.4 社会投资支持优先区识别

对有利于改善水生态系统服务的土地利用类型变化进行生态修复,参照我国有关生态修复规划的单位面积修复成本估算标准计算集水区修复成本,林地、灌木地、草地依据国家发改委印发的《重点区域生态保护和修复中央预算内投资专项管理办法》设定为人造乔木林、人造灌木林、人工种草保护修复成本,即12375元/hm²、5445元/hm²、4875元/hm²;湿地和水体依据中国国家林业和草原局发布的"十三五"时期中央对湿地保护修复投资金额与保护修复面积计算平均值,即14805元/hm²。

投资潜力是生态产品价值实现模式的社会投资可行性判断依据。考虑到不同修复模式投资潜力涉及的 社会和生态条件,以及与国家投资优先流域中的水质净化服务和土壤保持服务的生态修复工程的相关关系, 按照生态修复市场化投入路径的总结和分类^[5],从地类转换、自然因素、产业收益/市场需求三个方面分析国 家投资优先流域内不同集水区在特色中药、特色养殖、碳交易和排污权交易四种生态产品价值实现模式下的 投资潜力。自然因素作为修正系数对投资潜力进行修正(表4)。特色中药、特色养殖和碳交易分别考虑其他 地类转换为灌木、湿地和乔木的面积,排污权交易则考虑耕地转换为其他地类的面积。从产业收益角度,将黄 河各省的各种中药单价(去除冬虫夏草等价格过高的离群值)取平均值作为计算特色中药的投资潜力,黄河 九省水产品交易价格指数用于计算特色养殖的投资潜力;从市场需求角度统计黄河九省碳排放量和氮排放量 用于计算碳交易和排污权交易。投资潜力评价公式如下:

$$Q_i = a_i \times b \times c \tag{11}$$

式中,*i*为集水区编号,*Q*为集水区投资潜力;*a*为集水区地类转换数量;*b*是自然修正系数,即各阈值内自然因素的权重;*c*为产业收益或市场需求。参数范围均标准化到0—1。

依据修复成本和各实现模式投资潜力的平均值,将修复成本和各实现模式下的投资潜力分为低修复成 本、高修复成本、低投资潜力、高投资潜力。设定低修复成本-高投资潜力的集水区为一级社会投资支持优先 区,高修复成本-高投资潜力的集水区为二级社会投资支持优先区,低修复成本-高投资潜力优先区代表国家 投资优先流域中投资回报比最高的集水区,而高修复成本-高投资潜力的集水区投资回报比仅次于低修复成 本-高投资潜力的集水区。

		表 4	目然因素适且性			
		Table 4 Suit	ability of natural fact	ors		
	阈值 Threshold	权重 Weight	特色中药 Special Chinese medicine	特色养殖 Special breeding	碳交易 Carbon trading	排污权交易 Emissions trading
高程(b1)	>1000	0.6	+	+	-	-
Elevation (b1)	500—1000	0.8				
	≤500	1				
降雨(b2)	>500	1	+	+	+	-
Precipitation(b2)	250—500	0.8				
	≤250	0.6				
气温(b3)	>25	0.8	+	+	+	-
Temperature (b3)	5—25	1				
	≤5	0.6				

+代表该路径考虑该自然因素,-代表该路径不考虑该自然因素

2 结果分析

2.1 土地利用模拟

精度验证结果表明,Kappa 系数为 0.80,整体精度为 0.86,模拟精度满足要求。四种情景的林地、湿地、水体和人造地表均呈现扩张,耕地和灌木地呈现减少趋势(图 2),水土保持情景人造地表扩张最慢,仅为 4.51%,内蒙古南部和陕北的自然植被得到有效保护,而自然演变情景人造地表扩张最快,达到 34.26%。水土保持情景是草地增加的唯一情景,增加 7541 km²,与 2020 年相比增加 1.32%。湿地保护情景中湿地和水体的扩张速度比其他三种情景快,比 2020 年分别增长了 4.83% 和 8.34%。水土保持情景中的未利用地开发 11942 km²,其中大面积开发为草地。总体上看,水源涵养情景、水土保持情景和湿地保护情景都比自然演变情景的生态用地更多。但在自然演变情景、水源涵养情景和湿地保护情景中,晋陕蒙交界地区人造地表将大面积扩张,表现为草地转化为人造地表,原因可能是工矿用地开发。





2.2 国家投资优先流域

三种基准情景中,水土保持情景土壤保持服务和水质净化服务提升最多,分别为 6.68×10⁷ t 和 5.22× 10⁶ kg,水源涵养情景次之。湿地保护情景土壤保持服务总体呈现下降趋势,而水质净化服务呈现上升趋势。 基于供需分析,三种情景的国家投资优先流域空间分布如图 3 所示。水源涵养情景国家投资一级优先流域和 二级优先流域均最多,分别为 9 个和 55 个,一级优先流域集中在内蒙古自治区,二级优先流域上中下游分布 较均匀。水土保持情景国家投资一级优先流域呈现零星分布,二级优先流域为 53 个,仅次于水源涵养情景国 家投资二级优先流域。湿地保护情景国家投资一级优先流域为 7 个,比水土保持情景一级优先流域多 2 个。 不同于水源涵养情景和水土保持情景,湿地保护情景国家投资一级优先流域主要集中于山东省,二级优先流 域则集中在内蒙古自治区。总体来看,各情景国家投资二级优先流域占比大于一级优先流域。



图 3 国家投资优先流域 Fig.3 National investment priority watersheds

2.3 社会投资支持优先区

总体来看,碳交易社会投资支持优先区总量在各情景和实现模式中占比较高,特色中药社会投资支持优 先区总量在各情景的实现模式中占比最少(图4)。水源涵养情景中,排污权交易一级社会投资支持优先区最 多,而碳交易最少,但碳交易二级社会投资支持优先区在水源涵养情景下各实现模式的一级和二级优先区中 占比最多,达到474个。水土保持情景下各实现模式中,排污权交易一级社会投资支持优先区最多,但二级社 会投资支持优先区最少。湿地保护情景的特色中药社会投资支持优先区在所有情景所有实现模式中的总量 最少,仅有123个,其中一级社会投资支持优先区43个,二级社会投资支持优先区 80个。

各情景下不同生态产品价值实现模式的社会投资支持优先区分布如图 4 所示。空间分布上,社会投资更 适合支持中下游的碳交易和排污权交易,上游地区社会投资支持效益一般。碳交易和排污权交易的社会投资 支持一级优先区主要分布于黄河流域内的陕南、山西中南、河南省和山东省,特色养殖社会投资支持一级优先 区零星分布在黄河流域内,但甘肃省和陕西省分布较少。黄河流域内的内蒙古中南部、陕北、宁夏是特色中药 的集中分布区域。

3 讨论

3.1 方法优势

从社会生态角度确定生态修复国家投资优先流域和社会投资支持优先区,对于保障黄河流域生态修复的



Fig.4 Distribution of priority basins for social investment support

实施和生态系统结构与过程的稳定具有实际意义。本研究通过土地利用模拟、生态系统服务供需评估、生态 修复可行性分析,讨论生态修复的投资潜力。一些研究已经注意到生态修复可行性分析对于实施生态修复项 目的重要性,例如Li等人^[45]对青藏高原生态修复进行了成本效益分析,Lin等人^[46]分析了台湾流域保护和 恢复的生态效益。但是,仅仅基于生态效益的可行性分析并不能促进社会资本参与生态修复,因为它可能无 法保证足够的经济效益。相比之下,本研究不仅考虑了基于生态系统服务的生态修复可行性,还考虑了如何 从不同生态产品价值实现模式上吸引社会资本投资,即从改善水生态系统服务的角度确定生态修复国家投资 优先流域,并根据可行性分析确定社会投资支持优先区,响应了中央《关于鼓励和支持社会资本参与生态保 护修复的意见》中"促进社会资本参与生态建设,加快推进山水林田湖草沙一体化保护和修复"的政策需求。 3.2 投资模式的区域差异

本研究发现基于水生态系统服务供需的黄河流域生态修复国家投资优先流域主要位于中游东部和下游。 从县级尺度看,位于黄河流域的达拉特旗、固阳县的土壤保持服务提升潜力较大,水质净化服务提升潜力较大 的区域集中在黄河流域陕南、内蒙古东部和山东省,如杭锦旗、海原县、甘德县,与已有研究结果相比一致性 高^[47-48]。中游黄土高原曾经土地退化严重^[49],同时受到降雨侵蚀的影响^[50],导致土壤保持需求量大的流域 主要位于黄河中游东部和下游,主要分布在内蒙古自治区、陕西省、山西省、河南省和山东省,该地区的生态修 复有助于缓解黄土高原东部和南部的巨大退化风险^[51]。研究结果表明,碳交易和排污权交易在黄河流域具 有较高的普适性,特色中药的效益不高。湿地保护情景的社会投资支持优先区数量占比最少,水土保持情景 次之,社会投资支持更适合从水源涵养情景下开展。

3.3 评估的局限性

在投资可行性分析中,由于难以捕捉生态产品价值实现模式的经济价值,本研究根据不同的投资潜力来 评估效益,而并未采用货币化的效益减去货币化的成本。随着未来生态产品估值的不断完善,可用货币化评 估效益为国土空间生态修复规划提供经济参考。其次,本研究没有考虑生态系统的本地供给对外地需求的影 响,黄河流域下游发展对于上游保护的需求有待深化。另外,本研究单位面积的国土空间生态修复成本估算 标准尚存在不确定性,流域上中下游及区域差异化的修复成本有待讨论。

4 结论

针对如何识别国家和社会投资支持的生态修复优先流域这一科学问题,本研究采用"土地利用模拟-生态 系统服务供需评估-生态修复可行性分析"的分析框架,基于4种情景模拟的2030年土地利用评估2种水生 态系统服务,结合需求判定国家投资优先流域,根据不同生态产品价值实现的投资潜力判别社会投资支持优 先区,取得以下主要结论:(1)2030年黄河流域土地利用显示,除水土保持情景外,其他三种情景下晋陕蒙交 界地区由草地转化为人造地表的面积增加;青海省和四川省的湿地扩张幅度大。(2)识别出水质净化服务国 家投资优先流域和土壤保持服务国家投资优先流域主要分布在黄河流域中下游。(3)黄河流域生态修复的 社会投资支持优先区显示,碳交易和排污权交易的吸引力普遍较强,特色养殖和特色中药的投资吸引不具有 普适性。未来政策制定应优先考虑在黄河流域中下游积极探索碳交易和排污权交易等市场机制,以吸引更多 的社会资本参与生态修复。

参考文献(References):

- [1] Martin D M. Ecological restoration should be redefined for the twenty-first century. Restoration Ecology, 2017, 25(5): 668-673.
- [2] Scemama P, Levrel H. Influence of the organization of actors in the ecological outcomes of investment in restoration of biodiversity. Ecological Economics, 2019, 157: 71-79.
- [3] Becchetti L, Cordella M, Morone P. Measuring investments progress in ecological transition: The Green Investment Financial Tool (GIFT) approach. Journal of Cleaner Production, 2022, 357.
- [4] Löfqvist S, Ghazoul J. Private funding is essential to leverage forest and landscape restoration at global scales. Nature Ecology & Evolution, 2019,

3: 1612-1615.

- [5] 韩宇, 刘焱序, 刘鑫. 面向生态产品价值实现的生态修复市场化投入研究进展. 生态学报, 2023, 43(1): 176-188.
- [6] Martínez-Martínez Y, Dewulf J, Casas-Ledón Y. GIS-based site suitability analysis and ecosystem services approach for supporting renewable energy development in south-central Chile. Renewable Energy, 2022, 182: 363-376.
- [7] Kolosz B, Athanasiadis I, Cadisch G, Dawson T, Giupponi C, Honzák M, Martinez-Lopez J, Marvuglia A, Mojtahed V, Ogutu K, Van Delden H, Villa F, Balbi S. Conceptual advancement of socio-ecological modelling of ecosystem services for re-evaluating Brownfield land. Ecosystem Services, 2018, 33: 29-39.
- [8] Xu Z H, Peng J, Dong J Q, Liu Y X, Liu Q Y, Lyu D N, Qiao R L, Zhang Z M. Spatial correlation between the changes of ecosystem service supply and demand: an ecological zoning approach. Landscape and Urban Planning, 2022, 217; 104258.
- [9] Lu Y L, Liu M Y, Zeng S Y, Wang C. Screening and mitigating major threats of regional development to water ecosystems using ecosystem services as endpoints. Journal of Environmental Management, 2021, 293: 112787.
- [10] Wang Z K, Guo J, Ling H B, Han F F, Kong Z J, Wang W Q. Function zoning based on spatial and temporal changes in quantity and quality of ecosystem services under enhanced management of water resources in arid basins. Ecological Indicators, 2022, 137: 108725.
- [11] Zhang Q R, Sun X C, Ma J J, Xu S J. Scale effects on the relationships of water-related ecosystem services in Guangdong Province, China. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2022, 44: 101278.
- [12] Xia H J, Kong W J, Zhou G, Sun O J. Impacts of landscape patterns on water-related ecosystem services under natural restoration in Liaohe River Reserve, China. The Science of the Total Environment, 2021, 792: 148290.
- [13] Burkhard B, Kroll F, Nedkov S, Müller F. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. Ecological Indicators, 2012, 21: 17-29.
- [14] Zhang L Q, Peng J, Liu Y X, Wu J S. Coupling ecosystem services supply and human ecological demand to identify landscape ecological security pattern: a case study in Beijing-Tianjin-Hebei region, China. Urban Ecosystems, 2017, 20(3): 701-714.
- [15] Zhang Y L, Zhao Z Y, Fu B J, Ma R M, Yang Y Y, Lü Y H, Wu X. Identifying ecological security patterns based on the supply, demand and sensitivity of ecosystem service: a case study in the Yellow River Basin, China. Journal of Environmental Management, 2022, 315: 115158.
- [16] 王静,刘晶晶,宋子秋,黄隆杨,方莹,李泽慧.黄河流域高质量发展的生态保护与国土空间利用策略.自然资源学报,2022,37(11): 2930-2945.
- [17] Wang T T, Sun F B. Global gridded GDP data set consistent with the shared socioeconomic pathways. Scientific Data, 2022, 9: 221.
- [18] Wang X Y, Meng X F, Long Y. Projecting 1 km-grid population distributions from 2020 to 2100 globally under shared socioeconomic pathways. Scientific Data, 2022, 9: 563.
- [19] Fu F, Deng S M, Wu D, Liu W W, Bai Z H. Research on the spatiotemporal evolution of land use landscape pattern in a county area based on CA-Markov model. Sustainable Cities and Society, 2022, 80: 103760.
- [20] Rahnama M R. Forecasting land-use changes in Mashhad Metropolitan area using Cellular Automata and Markov chain model for 2016-2030. Sustainable Cities and Society, 2021, 64: 102548.
- [21] Liang X, Guan Q F, Clarke K C, Liu S S, Wang B Y, Yao Y. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model; a case study in Wuhan, China. 2020; arXiv: 2010.11541. http://arxiv.org/abs/2010.11541
- [22] Li S P, Cao Y G, Liu J L, Wang S F. Simulating land use change for sustainable land management in China's coal resource-based cities under different scenarios. The Science of the Total Environment, 2024, 916; 170126.
- [23] Lin W B, Sun Y M, Nijhuis S, Wang Z L. Scenario-based flood risk assessment for urbanizing deltas using future land-use simulation (FLUS): Guangzhou Metropolitan Area as a case study. The Science of the Total Environment, 2020, 739: 139899.
- [24] Xu H T, Song Y C, Tian Y. Simulation of land-use pattern evolution in hilly mountainous areas of North China: a case study in Jincheng. Land Use Policy, 2022, 112: 105826.
- [25] Wu J Y, Luo J G, Zhang H, Qin S, Yu M J. Projections of land use change and habitat quality assessment by coupling climate change and development patterns. The Science of the Total Environment, 2022, 847: 157491.
- [26] 马利邦, 牛叔文, 杨丽娜. 基于 Markov 和 CLUE-S 模型的敦煌市土地利用/覆盖格局情景模拟. 生态学杂志, 2012, 31(7): 1823-1831.
- [27] 何丹, 金凤君, 周璟. 基于 Logistic-CA-Markov 的土地利用景观格局变化——以京津冀都市圈为例. 地理科学, 2011, 31(8): 903-910.
- [28] 唐志雄, 宁荣荣, 王德, 田信鹏, 毕晓丽, 周自翔, 罗富彬, 宁吉才. 黄河三角洲滨海湿地碳储量及其对未来多情景的响应. 生态学报, 2024(08): 1-13.
- [29] 杜怀玉, 俞金凤, 张媛, 王家亮. 石羊河流域多情景土地利用优化及碳储量评估. 环境科学: 1-25.
- [30] Shi Q, Gu C J, Xiao C. Multiple scenarios analysis on land use simulation by coupling socioeconomic and ecological sustainability in Shanghai, China. Sustainable Cities and Society, 2023, 95: 104578.
- [31] Pontius R G Jr, Millones M. Death to Kappa: birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment. International

Journal of Remote Sensing, 2011, 32(15): 4407-4429.

- [32] Liu X P, Liang X, Li X, Xu X C, Ou J P, Chen Y M, Li S Y, Wang S J, Pei F S. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects. Landscape and Urban Planning, 2017, 168: 94-116.
- [33] Lyu R F, Clarke K C, Zhang J M, Feng J L, Jia X H, Li J J. Spatial correlations among ecosystem services and their socio-ecological driving factors: a case study in the city belt along the Yellow River in Ningxia, China. Applied Geography, 2019, 108: 64-73.
- [34] Feng Q, Zhao W W, Fu B J, Ding J Y, Wang S. Ecosystem service trade-offs and their influencing factors: a case study in the Loess Plateau of China. The Science of the Total Environment, 2017, 607/608: 1250-1263.
- [35] Yang J B, Zhai D L, Fang Z, Alatalo J M, Yao Z L, Yang W, Su Y F, Bai Y, Zhao G J, Xu J C. Changes in and driving forces of ecosystem services in tropical southwestern China. Ecological Indicators, 2023, 149; 110180.
- [36] 方露露,许德华,王伦澈,牛自耕,张明.长江,黄河流域生态系统服务变化及权衡协同关系研究.地理研究,2021,40(3):821-838.
- [37] Villamagna A M, Angermeier P L, Bennett E M. Capacity, pressure, demand, and flow: a conceptual framework for analyzing ecosystem service provision and delivery. Ecological Complexity, 2013, 15: 114-121.
- [38] 彭建,杨旸,谢盼,刘焱序.基于生态系统服务供需的广东省绿地生态网络建设分区.生态学报,2017,37(13):4562-4572.
- [39] 刘立程,刘春芳,王川,李鹏杰.黄土丘陵区生态系统服务供需匹配研究——以兰州市为例.地理学报,2019,74(9):1921-1937.
- [40] 李潇,吴克宁,冯喆,王颖涵. 基于固碳服务供需视角的河南省碳平衡研究. 生态学报, 2022, 42(23): 9627-9635.
- [41] 赵诚诚,潘竟虎.基于供需视角的黄河流域甘肃段生态安全格局识别与优化.生态学报,2022,42(17):6973-6984.
- [42] 韩增林, 刘澄浩, 闫晓露, 李欣媛, 王学哲. 基于生态系统服务供需匹配与耦合协调的生态管理分区——以大连市为例. 生态学报, 2021, 41(22): 9064-9075.
- [43] 谢余初,张素欣,林冰,赵银军,胡宝清.基于生态系统服务供需关系的广西县域国土生态修复空间分区.自然资源学报,2020,35(1): 217-229.
- [44] 翟天林,王静,金志丰,祁元.长江经济带生态系统服务供需格局变化与关联性分析.生态学报, 2019, 39(15): 5414-5424.
- [45] Li M Q, Liu S L, Wang F F, Liu H, Liu Y X, Wang Q B. Cost-benefit analysis of ecological restoration based on land use scenario simulation and ecosystem service on the Qinghai-Tibet Plateau. Global Ecology and Conservation, 2022, 34: e02006.
- [46] Lin J Y, Chen Y C, Chang C T. Costs and environmental benefits of watershed conservation and restoration in Taiwan. Ecological Engineering, 2020, 142; 105633.
- [47] Liu Q, Qiao J J, Li M J, Huang M J. Spatiotemporal heterogeneity of ecosystem service interactions and their drivers at different spatial scales in the Yellow River Basin. The Science of the Total Environment, 2024, 908: 168486.
- [48] Fang L L, Wang L, Chen W X, Sun J, Cao Q, Wang S Q, Wang L Z. Identifying the impacts of natural and human factors on ecosystem service in the Yangtze and Yellow River Basins. Journal of Cleaner Production, 2021, 314: 127995.
- [49] Huang L M, Shao M A. Advances and perspectives on soil water research in China's Loess Plateau. Earth-Science Reviews, 2019, 199: 102962.
- [50] Chang Y M, Lei H M, Zhou F, Yang D W. Spatial and temporal variations of rainfall erosivity in the middle Yellow River Basin based on hourly rainfall data. CATENA, 2022, 216: 106406.
- [51] Sun J F, Li G D, Zhang Y, Qin W S, Wang M Y. Identification of priority areas for afforestation in the Loess Plateau region of China. Ecological Indicators, 2022, 140: 108998.