

基于生态安全格局的东北典型黑土区 生态保护红线划定与优化

冯琳^{1,2}, 雷国平^{1,2}

(1. 东北大学文法学院, 沈阳 110169; 2. 辽宁省自然资源厅土地保护与利用重点实验室, 沈阳 110169)

摘要: 东北典型黑土区面临生态系统服务功能退化、景观格局破碎以及农业与生态空间冲突等问题, 科学制定具有指导性的黑土区生态保护红线划定与优化框架, 对于保障粮食安全与生态安全具有重要意义。基于生态安全格局视角明晰生态保护红线内涵, 在考虑生态保护重要性、农业与生态空间协调、自然与社会系统协调的基础上, 提出“点一线一面”多层次空间要素的系统性生态保护红线划定思路, 考虑生态系统完整性与连通性识别生态保护红线优化区域。结果表明: (1) 在保障不划入优质耕地的前提下 (阈值为 10%), 叠加生态系统服务极重要区、生态环境极敏感区、生态系统服务供需不匹配区域确定生态保护红线初步划定区域 69646.00 km², 并提取生态源地 34760.16 km²; (2) 基于生态源地与构建的综合生态阻力面识别生态廊道 10980.90 km 与生态节点 77 个, 其缓冲区与生态保护红线初步划定区域共同构成生态保护红线区域 76234.54 km²; (3) 基于破碎度 (0.20) 和连通度 (80) 优化阈值, 25.48% 的生态保护红线区域亟需优化。研究结果提高了生态保护红线划定与优化的科学性和系统性, 为东北典型黑土区国土空间精准管控与生态系统可持续性管理提供重要依据, 且对土地高度集约化利用、生态空间稀缺的中小尺度区域具有重要指导意义。

关键词: 生态保护红线; 生态安全格局; 划定思路; 优化阈值; 东北典型黑土区

城市化、工业化进程的加速推进与土地的过度开发利用导致生态系统结构和功能逐渐发生变化, 各区域无法维持稳定、协调、可持续的生态系统服务供给^[1], 并出现以水土流失、荒漠化和盐碱化为表现形式的土地退化^[2,3], 严重威胁区域生态安全与社会经济可持续发展。面临将生态环境问题纳入发展决策的巨大挑战, 2011 年国务院首次提出生态保护红线政策, 旨在维持并提高生态系统服务、减缓土地退化。目前, 生态保护红线政策作为中国缓解生态保护与经济发展冲突的制度创新已被提升至国家生态安全战略高度^[4], 解决了多种生态保护与恢复工程在实施过程存在的覆盖不完全、功能不匹配、目标交叉等问题而导致的生态管理效率低下与困难^[5,6]。山水林田湖草沙生命共同体理念的提出, 进一步加强了生态保护红线对生态空间高效管理与国土空间格局优化的影响。

生态保护红线确定了具有关键生态功能、丰富生物多样性、高度生态敏感的区域, 依据底线思维覆盖了维护生态功能所需最大限度保护、最严格管理的最小区域^[7,8]。然而, 考虑自然环境条件与资源利用特征的空间异质性, 统一刚性的生态保护红线划定基

收稿日期: 2023-07-03; 修订日期: 2023-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41671520)

作者简介: 冯琳 (1997-), 女, 黑龙江伊春人, 博士研究生, 研究方向为土地利用规划与管理。

E-mail: 2210008@stu.neu.edu.cn

通讯作者: 雷国平 (1963-), 男, 黑龙江青冈人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为土地利用规划与管理。

E-mail: guopinglei@126.com

本分析框架仅依赖生态系统服务重要性与生态环境敏感性评估,忽略了生态功能与社会需求空间不匹配的问题,忽略了以生态格局与生态过程全面保护为目标的生态安全格局,导致生态系统稳定性与生态效益显著降低。此外,生态保护红线在优化调整及实践管控中缺乏生态系统完整性与连通性的刚性约束指标和阈值,导致生态保护红线区域景观破碎且空间连通度差。究其原因,已有研究聚焦于生态保护红线划定方法与管控策略^[9,10],而内涵界定不统一、理论研究滞后严重阻碍生态保护红线划定与优化进程。

生态安全理念强调资源、环境和生态系统服务的健康性与可持续性^[11],通过生态安全格局的构建保证生态系统结构、功能和过程的完整性,促进土地资源的合理配置与优化^[12]。20世纪90年代,俞孔坚^[13]基于格局与过程互馈原理针对中国实际首次提出生态安全格局理论。目前已形成“识别源地—构建阻力面—提取生态廊道及节点”的构建范式^[14],所识别出的关键要素可为生态保护红线划定提供连续、完整、多层次的空间格局^[15]。然而,从理论关联与互动角度,将生态安全格局理论应用于生态保护红线划定与优化较为薄弱。在这种情况下,我们应该思考如何从生态安全格局的视角出发,在明晰生态保护红线内涵基础上构建科学系统、可操作性强的生态保护红线划定与优化框架,以实现生态保护红线精准落地管控与生态系统综合管理。

东北典型黑土区作为世界四大黑土区之一,集中分布性状好、肥力高、适宜农耕的优质黑土,在保障国家粮食安全和生态安全中发挥着关键作用^[16]。然而,黑土区确保粮食安全的紧迫性导致耕地面积急剧增加,具有重要生态功能的单元未得到有效保护,导致生态系统服务功能不断衰退^[17],景观破碎化程度日益增加^[18]。由于漫川漫岗的地形条件与水土保持措施的缺失,水土流失、沙漠化、草地退化等生态环境问题也日益凸显^[19]。东北典型黑土区生态保护红线是对生态系统的层级性监管以及发展权利的再分配,区域识别与格局优化的合理性对于保证生态系统结构、功能和过程的完整性具有重要意义^[20]。因此,亟待将生态功能极重要区域和生态环境极敏感区域划入生态保护红线,实施山水林田湖草沙一体化发展战略,开展黑土地生态保护(屏障)模式建设^[17]。本文基于生态安全格局视角明晰生态保护红线内涵,在土地高度集约化利用、生态空间稀缺的东北典型黑土区科学构建具有指导性的生态保护红线划定与优化框架,以期实现黑土地可持续利用与国土空间格局优化。

1 东北典型黑土区生态保护红线划定及优化思路

1.1 生态保护红线内涵界定

《生态保护红线划定指南》定义生态保护红线为依法在重点生态功能区、生态环境敏感区等区域划定的严格管控边界^[8]。本文认为在生态安全格局视角下,划定生态保护红线可以看作亟需生态保护的国土空间与开发利用的国土空间相互竞争的过程,即从“源”克服“阻力面”达到“汇”的过程。生态保护红线的实质是保障和维持生态系统结构、功能、过程稳定的最关键、最完整的国土空间。具体可从以下三方面认识:(1)生态保护红线是确定生态系统服务极重要和生态环境极敏感的国土生态保护空间。该空间作为生态保护红线划定的“源”,是人类和生物物种扩散、生态系统结构完整的原则^[21]。(2)生态保护红线是以克服竞争阻力确保生态系统完整性与连通性为目标的国土功能空间。在

厘清“格局—过程—功能”关系的基础上^[22],应当构建空间“源”向外演化所形成的阻力面,进而识别生态廊道等关键生态要素,刻画具有完整性与连通性的生态空间格局。(3)生态保护红线是落实空间刚性管控的政策线。生态系统服务需求作为“社会—经济—环境”系统的终端^[23],应当确保生态系统服务供给与社会需求之间的动态平衡,进而促进人口—资源—环境的均衡。

1.2 研究区概况

刘宝元等^[24]将黑土和黑钙土的集中分布区称为“东北典型黑土区”,按地理位置从西到东划分为蒙东典型黑土亚区、松嫩典型黑土亚区和三江典型黑土亚区,总面积约33.3万km²,涉及138个县级行政区(图1)。东北典型黑土区气候以温带大陆性季风气候为主,降水强度与气温年际变化较大且增速较快,低温干旱、高温干旱等复合型极端气候事件频发。黑土与黑钙土占总面积的76.3%,耕地作为最主要土地利用类型占比66.84%。《中华人民共和国黑土地保护法》与《东北黑土地保护规划纲要(2017—2030年)》指出需在山水林田湖草沙综合治理理念下充分发挥生态用地对耕地的生态保护功能,加强黑土区重要生态空间、生态系统的保护与修复。

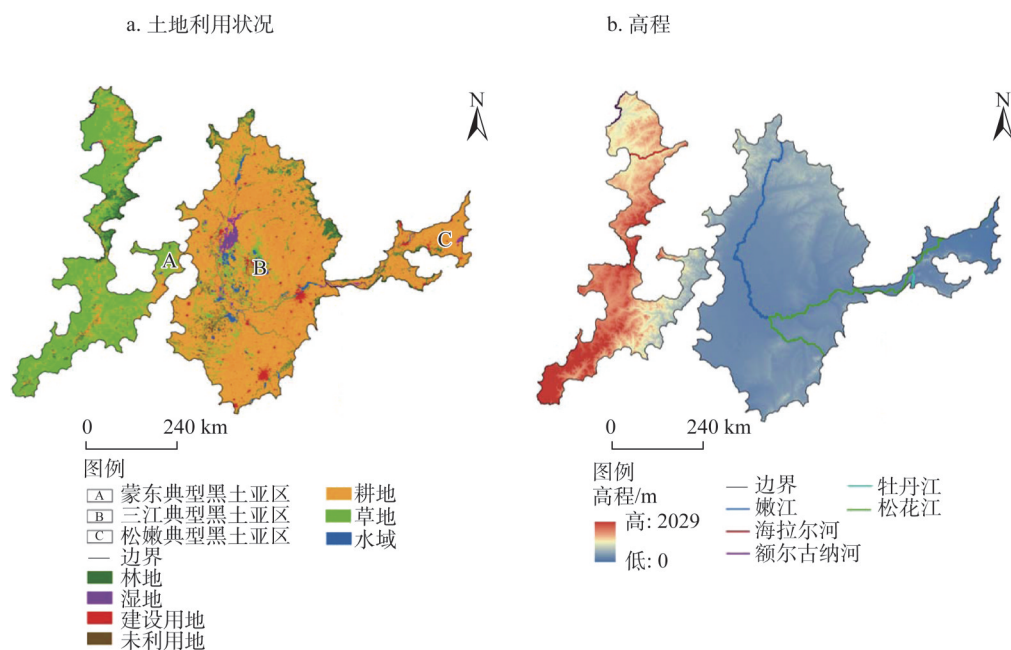


图1 研究区概况

Fig. 1 General situation of the study area

1.3 东北典型黑土区生态保护红线划定及优化的科学框架

本文结合东北典型黑土区生态状况,借鉴生态安全格局研究范式提出生态保护红线划定及优化框架(图2)。一是运用Delphi-AHP法评价东北典型黑土区耕地质量,在考虑不划入优质耕地的前提下,确定各生态系统服务(产水量、土壤保持、碳储量、生境质量)及生态敏感性(水土流失、沙漠化、生境敏感)指标的红线划定阈值,进而识别生态系统服务极重要区与生态环境极敏感区。二是通过评估生态系统服务供需有

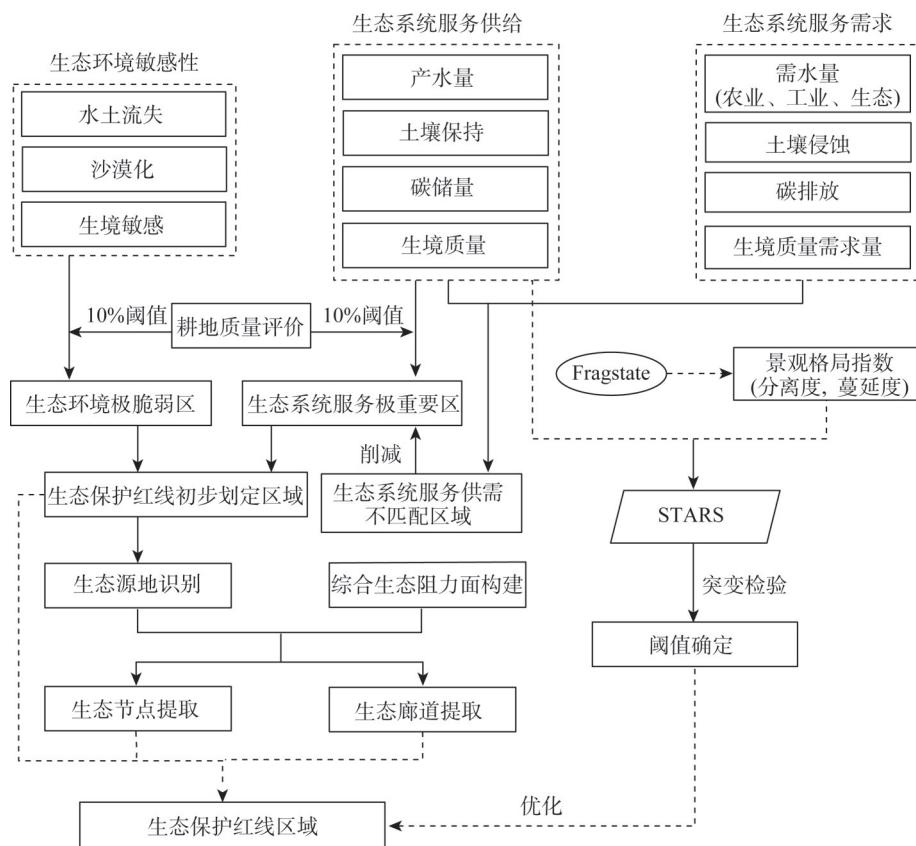


图2 生态保护红线划定与优化框架

Fig. 2 Ecological protection redline delineation and optimization framework

效识别供需不匹配的区域并排除在生态系统服务极重要区外，与生态环境极敏感区叠加获取生态保护红线初步划定区域。三是根据生态保护红线初步划定区域提取生态源地，结合构建的综合生态阻力面利用Linkage Mapper与最小累积阻力模型（MCR）提取生态廊道与生态节点，其缓冲区和生态保护红线初步划定区域共同构成生态保护红线区域。四是采用STARS算法辨识生态系统完整性与连通性对关键生态系统服务影响的突变点及优化阈值，以判别亟需优化的生态保护红线区域并对不同类型的管控区域提出针对性管控对策。

2 研究方法

2.1 生态系统服务供需计算

2.1.1 生态系统服务供给与需求评估

考虑东北典型黑土区存在的生态问题、利益相关者关心的问题与实地研究结果，选择与社会和人类福祉密切相关的产水量、土壤保持、碳储量和生境质量进行供给与需求量化^[17,25,26]。各生态系统服务计算方法及公式见表1。将InVEST模拟的产水量结果与水资源公报公布的地表水资源量进行比较，误差控制在0.09，模拟效果良好。InVEST模拟的

表1 生态系统服务供给与需求计算公式表

Table 1 Equations of calculating supplies and demands of ecosystem services

ES	供/需	方法	公式	备注
产水量 (m^3/km^2)	供	基于水量平衡法的InVEST模型产水模块 ^[27]	$S_{wy}(x) = \left(1 - \frac{AET_{sj}}{P_x}\right) \times P_x$	$S_{wy}(x)$ 为栅格单元 x 上的水生产服务供给量 (mm); P_x 为土地利用类型 j 上栅格单元 x 的年均蒸散量 (mm); AET_{sj} 为栅格单元 x 的年均降水量 (mm)
	需	实际用水量 ^[28]	$D_{wy}(x) = D_{Agrx} + D_{Indx} + D_{Domx} + D_{Ecox}$	$D_{wy}(x)$ 为栅格单元 x 上的水生产服务需求量 (m^3/km^2); D_{Agrx} 为农业用水量 (m^3/km^2); D_{Indx} 为工业用水量 (m^3/km^2); D_{Domx} 为生活用水量 (m^3/km^2); D_{Ecox} 为生态用水量 (m^3/km^2)
土壤保持 ($10^3 \text{ t}/\text{km}^2$)	供	InVEST模型土壤保持模块 ^[27]	$S_{sc}(x) = R_x \times K_x \times LS_x - R_x \times K_x \times LS_x \times C_x \times P_x$	$S_{sc}(x)$ 为栅格单元 x 上的土壤保持供给量 ($10^3 \text{ t}/\text{km}^2$); R_x 为降雨侵蚀力因子; K_x 为土壤可侵蚀因子; LS_x 为坡长坡度因子, 无量纲; C_x 为植被覆盖因子, 无量纲; P_x 为水土保持因子, 无量纲
	需	修正的土壤流失通用方程 ^[2]	$D_{sc}(x) = R_x \times K_x \times LS_x \times C_x \times P_x$	$D_{sc}(x)$ 为栅格单元 x 上的土壤保持服务需求量 ($10^3 \text{ t}/\text{km}^2$)
碳储量 ($10^9 \text{ g}/\text{km}^2$)	供	InVEST模型碳固持模块 ^[27]	$S_{cs}(x) = C_{Above_x} + C_{Below_x} + C_{Soil_x} + C_{Dead_x}$	$S_{cs}(x)$ 为栅格单元 x 上的碳固持服务供给量 ($10^9 \text{ g}/\text{km}^2$); C_{Above_x} 、 C_{Below_x} 、 C_{Soil_x} 、 C_{Dead_x} 分别代表地上物质、地下物质、土壤碳储量、枯枝落叶碳储量 ($10^9 \text{ g}/\text{km}^2$)
	需	碳排放量 ^[29]	$D_{cs}(x) = D_{pccc} \times \rho_i$	$D_{cs}(x)$ 为栅格单元 x 上的碳固持服务需求量 ($10^9 \text{ g}/\text{km}^2$); D_{pccc} 为年均碳排放量 ($10^9 \text{ g}/\text{人}$); ρ_i 为栅格单元 x 人口密度 ($\text{人}/\text{km}^2$)
生境质量	供	InVEST模型生境质量模块 ^[27]	$S_{HQ}(x) = H_j \left[1 - \left(\frac{D_{sj}^-}{D_{sj}^- + k^z} \right) \right]$	$S_{HQ}(x)$ 为栅格单元 x 的生境质量服务供给量; H_j 为土地利用类型 j 中生境适宜度; D_{sj}^- 为土地利用类型 j 中栅格 x 的生境退化度; k^z 为半饱和参数
	需	生境质量需求 ^[30]	$D_{HQ}(x) = \begin{cases} HQ_{st} - S_{HQ}(x) & S_{HQ}(x) < HQ_{st} \\ 0 & S_{HQ}(x) \geq HQ_{st} \end{cases}$	$D_{HQ}(x)$ 为栅格单元 x 的生境质量服务需求量; HQ_{st} 为生境质量平均水平; $S_{HQ}(x)$ 为栅格单元 x 的生境质量供给量

土壤保持、碳储量、生境质量结果与相关文献进行对比^[6,25,26], 结果较为一致。

2.1.2 生态系统服务供需比

本文通过生态系统服务供需比 (ESDR) 反映生态系统服务供需盈余、平衡或赤字情况^[31]。计算公式如下^[30]:

$$ESDR = \frac{S - D}{(S_{\max} + D_{\max})/2} \quad (1)$$

式中: S 、 D 与 $ESDR$ 分别代表生态系统服务供给量、需求量与供需比; S_{\max} 与 D_{\max} 分别代表生态系统服务供给量与需求量最大值。 $ESDR > 0$ 处于盈余状态 (供大于求); $ESDR < 0$

处于赤字状态（供不应求）； $ESDR=0$ 处于平衡状态（供等于求）。

2.2 生态敏感性评价

结合东北典型黑土区的生态状况，参照国家环保总局颁布的《生态功能区划技术暂行规程》与《生态红线划定指南》，选择生态问题较突出的水土流失、沙漠化和生境敏感三个生态环境要素开展生态敏感性评估，运用德尔菲法定量揭示生态环境敏感性程度及其空间分布规律。选择土壤质地、降雨侵蚀力、地形、植被覆盖度进行水土流失敏感性评价^[27]，选取大风天数、干燥指数、土壤质地、坡度、植被覆盖度进行沙漠化敏感性评价^[27]，生境敏感性选取归一化植被指数反映植被原生状态和植物生长状况^[32]。

2.3 耕地质量评价

Delphi能够有效判断和预测评价指标的权重，AHP方法将复杂问题分解为多个具体指标，通过目标、指南、指标等层次建立综合评价^[33]。本文采用Delphi-AHP法评估东北典型黑土区耕地质量，具体步骤如下：（1）考虑东北典型黑土区特点并参考相关文献^[33,34]，从自然条件、土壤条件、土壤管理三方面选取11个评价指标。（2）运用主观与客观赋权相结合的方式，即AHP-Entropy法确定各指标权重（表2）。（3）为避免定量和定性指标同时存在导致评估过程中出现的维度不统一，利用百分比（0~100）表示各指标得分，通过加权线性模型得到耕地质量得分。（4）运用累积频率曲线法^[34]，通过曲线斜率突变点（拐点）确定等级数目并划分综合指数临界点，将耕地质量划分为十个等级。

2.4 生态廊道及生态节点的提取

2.4.1 构建综合生态阻力面

生态源地之间生态要素流通与交换受自然条件制约与人类活动干扰^[35]。参考相关研究引入高程、坡度、土地利用类型、距道路距离、距河流距离、土地利用类型等因子并赋予生态阻力值，运用层次分析法确定各因子权重（判断矩阵的检验系数为0.0375，通过一致性检验），进而构建综合生态阻力面^[36,37]。

2.4.2 提取生态廊道及生态节点

生态廊道是为维持生态源地之间物质、能量和信息流通与交换的低阻力通道^[38]，生态节点是生态要素流动与生态源地的关键作用点^[39]。本文在生态保护红线初步划定区域中选取斑块面积大且集中连片的区域作为生态源地。根据生态源地和综合生态阻力面结果，利用Circuitscape插件中的Linkage Mapper与最小累积阻力模型（MCR）确定从源到目的地克服阻力的最低阻力路径作为生态廊道。将生态廊道与运用等值线工具生成阻力等值线的交点作为生态节点，与最大阻力等值线的交点为关键生态节点，与其他等值线的交点为潜在生态节点。通过增设、改造和恢复战略点，能够有效提升区域生态效能。

2.5 连通性与完整性阈值的确定

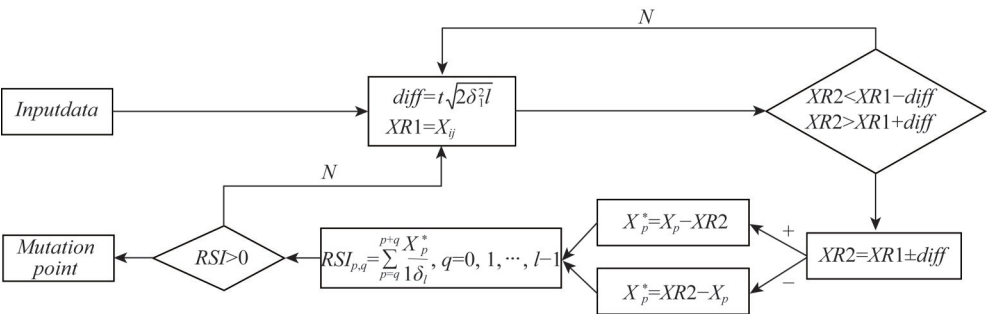
景观破碎化程度增加、景观连通度降低是生态系统服务弱化的主要原因^[40]。从空间异质性角度，选择蔓延度指数（CONTAG）与景观分离指数（DIVISION）表征生态系统破碎度与连通度。结合半变异函数球状模型^[41]，观察不同窗口半径下决定系数 R^2 与块基比 $C_0/(C_0+C)$ 的变化，确定最佳移动窗口半径3000 m，利用Fragstats 4.2软件可视化景观指数空间格局。

突变检验常被用于检验生态系统、气候变化等突变趋势^[42]。Rodionov^[43]提出的序贯 t 检验方法（STARS）能够在未经突变时间先验假设的前提下，同步识别突然与渐进变化

表2 耕地质量评价指标体系
Table 2 Cultivated land quality evaluation index system

准则层	指标层	权重	得分										
			0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
自然 条件	降水 /mm	0.1117	<300	300~350	350~400	400~450	450~500	500~550	550~600	600~650	650~700	700~750	>750
	积温 /10 ³ °C	0.1076	>12	12~14	14~16	16~18	18~20	20~22	22~24	24~26	26~28	28~30	>30
	坡度(°)	0.0928	>25			15~25			6~15		2~6		<2
	有效土层厚度/cm	0.0772				<30	30~40	40~50	50~60	60~70	70~80	80~90	>90
	土壤质地	0.0845		基岩			粘质			砾质			壤质
土壤 条件	pH	0.0676	>9				8.5~9.0		8.0~8.5		7.5~8.0	7.0~7.5	6.5~7.0
	有机质(g/kg)	0.1136	<10		10~15		15~20		20~30		30~40		>40
	土壤容重	0.0596	>1.4		1.3~1.4		1.2~1.3		1.1~1.2		1.0~1.1		<1.0
	土壤利用水分	0.0767	<0.1		0.1~0.2		0.2~0.3		0.3~0.4		0.4~0.5		>0.5
土壤 管理	灌溉能力	0.1174					无		一般		良好		极好
	排水能力	0.0913					无		一般		良好		极好

并确定多个突变点。本文采用STARS算法检验四类生态系统服务在不同破碎度与连通度下的变化趋势和突变点、阈值。STRAS算法的计算流程如图3所示。



注：diff为两组连续数据平均值的差值；l为所选格局的切断长度，用以确定变量x。

图3 STARS算法计算流程
Fig. 3 Flowchart of STARS algorithm calculation

2.6 数据来源

土地利用数据来源于Climate Change Initiative（CCI，<http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer>），空间分辨率为300 m×300 m。考虑本文需要及黑土区实际情况，将37类土地利用类型分成耕地、林地、草地、湿地、水域、建设用地、未利用地7类。其他数据来源见表3，基于ArcGIS重采样工具将各项数据空间分辨率均统一为300 m×300 m，投影坐标系统一采用Albers Conic Equal Area。

表3 数据说明
Table 3 Data description

数据类型	数据名称	分辨率	数据来源
气象数据	月降水	1 km	the National Earth System Science Data Center (http://www.geodata.cn)
	月潜在蒸散量		
土壤数据	根系深度	1 km	the Harmonized World Dataset ver 1.2 of the National Tibetan Plateau Third Pole Enviornment Data Center (http://data.tpdac.ac.cn/)
	土壤质地		
	有机碳		
	土壤容重		
遥感数据	DEM数据	30 m	NASA Earthdata Center (https://earthdata.nasa.gov/)
	NDVI数据	250 m	MOD13Q1 of Land Process Distributed Active Archive Centre (https://lpdaac.usgs.gov/)
社会经济数据	人口数据	1 km	the Data Center for Resources and Enviornment Sciences of the Chinese Academy of Sciences (http://www.resdc.cn)
	GDP数据		
	道路数据	—	the National Earth System Science Data Center (http://www.geodata.cn)
	河流数据		

3 结果分析

3.1 生态保护红线初步划定

3.1.1 生态系统服务供需空间分布特征

受自然地理条件与经济发展水平影响,东北典型黑土区生态系统服务供给与需求空间分异显著(图4)。由于蒙东典型黑土亚区与松嫩典型黑土亚区西部降水量较低、潜在蒸散量较高,产水服务供给呈“西低东高”的分布格局,高需求区集中在作物产量较高的农业发展区与高度城市化人口密集区。土壤保持服务高供给区与高需求区集中在植被覆盖较高的蒙东典型黑土亚区,人类高强度利用耕地导致松嫩典型黑土亚区与三江典型黑土亚区侵蚀量较大。碳储量、生境质量供给空间分布格局相似,高供给区集中在植被覆盖度较高的蒙东典型黑土亚区与松嫩典型黑土亚区中部、东北部,高需求区与人口密集区域高度重叠。总体来看,东北典型黑土区大部分区域各项生态系统服务供需关系均表现出供大于求的状态,且不同类型的生态系统服务供需存在明显的空间差异。各生态系统服务赤字远小于盈余区域,集中分布在松嫩典型黑土亚区。

3.1.2 生态敏感性空间分布

生态敏感性较高的区域主要分布在蒙东典型黑土亚区南部与松嫩典型黑土亚区西南部(图5)。蒙东典型黑土亚区南部地形起伏度较大,降雨对土壤的冲刷侵蚀力较强。该区域蒸散量较高,冬春季节常年多大风,干燥化程度严重,使得抵抗风沙侵蚀的作用弱。松嫩典型黑土亚区西南部虽然地形起伏度较低,但土地利用类型以沙地、戈壁等未利用土地为主,土壤中沙粒含量高,加之大风日数与持续时间的增加,地表土壤的风力侵蚀作用不断增强。高强度的人类活动导致土壤结构被破坏、植被覆盖度较低,生态敏感性随之增强。该区域一旦遭到不合理干扰,则会引发严重生态环境问题。

3.1.3 耕地质量空间分布

通过对东北典型黑土区耕地与耕地质量得分空间分布叠加得到了耕地质量空间分布图(图6a),平均耕地质量得分为71.44。高等级(1.2.3级)、中等级(4.5.6.7级)、低等级(8.9.10级)耕地分别占全部耕地面积的9.85%、63.03%、27.12%,松嫩典型黑土亚区东部与三江典型黑土亚区耕地质量较高。该区域地势平坦,土壤类型以黑土、黑钙土、草甸土为主,有机质含量高。耕层质地主要为壤土和粘壤土,既有较强的保水保肥作用,又具有较好的通透性。同时,农业生产条件优越,灌溉条件充分满足需求,排水系统健全。而松嫩典型黑土亚区西南部耕地质量较低。该区域土壤质地含沙率高,土壤肥力低,水保肥能力差,农业生产条件较差(尤其是灌溉条件)。

3.1.4 生态保护红线初步划定区域空间分布

本文将生态系统服务与生态环境敏感性指标的前5%、10%、15%、20%分别与耕地质量等级空间分布图叠加。对比结果发现,前5%生态系统服务与生态环境敏感性区域不足以覆盖所有生态敏感性区域,前15%与20%的生态系统服务与生态环境敏感性区域将占用部分优质耕地。因此,在保障不划入优质耕地的前提下,各指标的最佳红线划定阈值为10%。值得注意的是,供需赤字状态的地区意味着没有足够的供应来满足社会需求,不包括生态系统服务极重要区。本文将生态系统服务供需不匹配区排除在生态系统

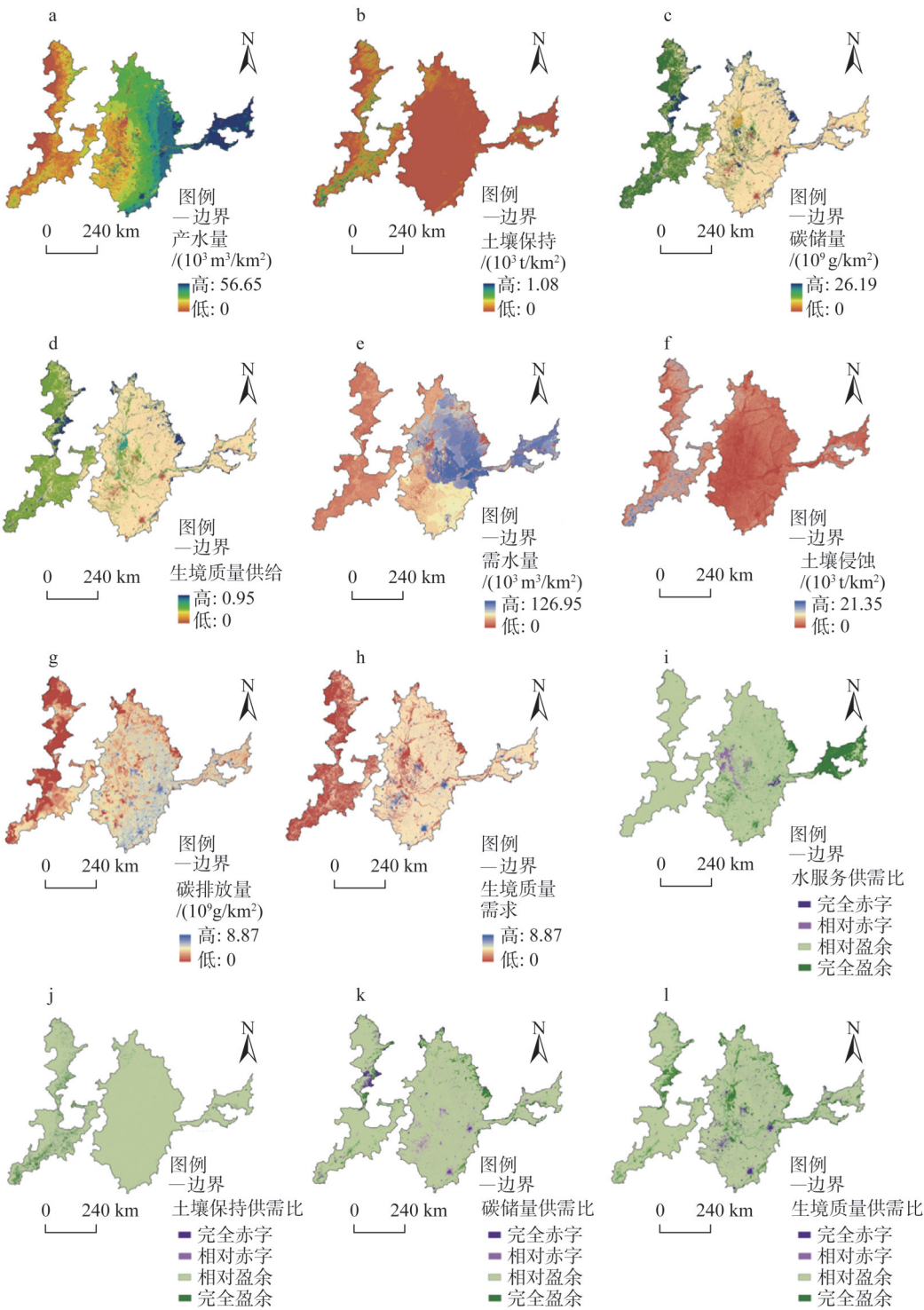


图4 生态系统服务供需空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of ecosystem service supply and demand

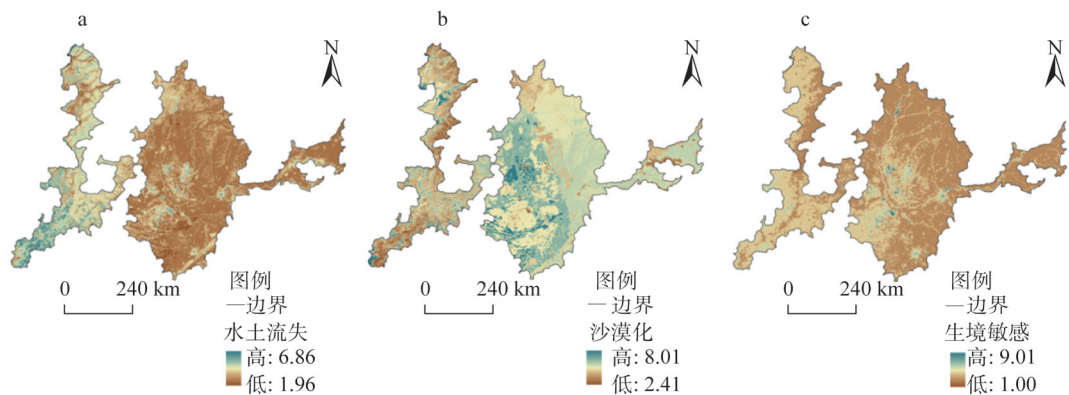


图5 生态敏感性空间分布
Fig. 5 Spatial distribution of ecological sensitivity

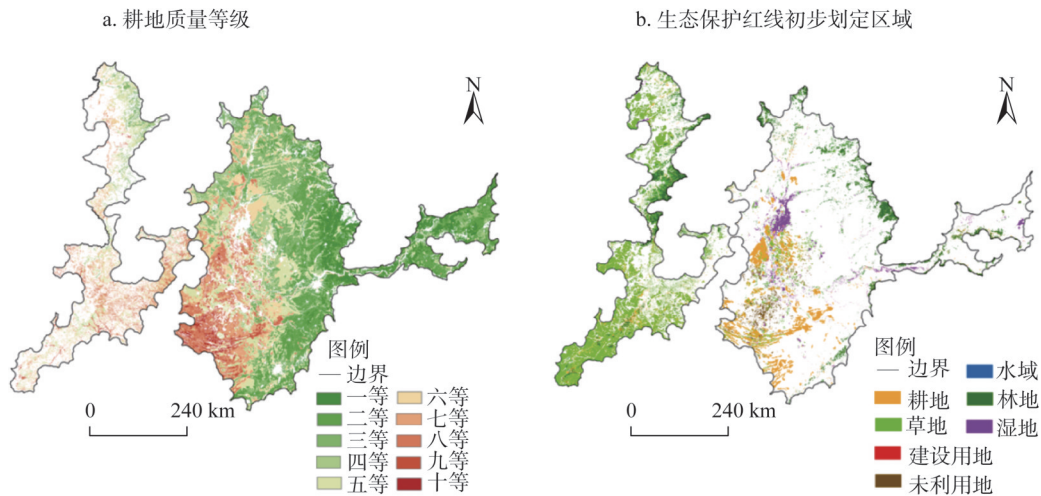


图6 耕地质量等级及生态保护红线初步划定区域空间分布
Fig. 6 Spatial distribution of cultivated land quality grade and ecological protection area

服务极重要区外，与生态环境极敏感区进行叠加得到生态保护红线初步划定区域面积共 69646.00 km²，占总面积的 20.91%（图 6b）。

3.2 生态廊道与生态节点识别

3.2.1 生态源地及综合生态阻力面空间分布

选取生态保护红线初步划定区域中斑块面积较大且集中连片的区域得到东北典型黑土区生态源地 34760.16 km²。东北典型黑土区综合阻力值在 2.017~8.533 之间，总体呈现高低阻力值交错分布，部分区域存在聚集性（图 7a）。高值区主要集中在距离公路、水系、城镇用地较近且地形平坦的区域，更适宜人类活动且人类干扰较大，而生态流扩张阻力地形起伏度较大、水系较少、人类活动较少的区域形成低值谷地。与生态源地空间分布对比发现，生态源地缺乏与高阻力区域之间有效连接，难以形成促进物质流动、能量交换与维持生态平衡的通道。因此，亟待构建生态廊道增强景观连续性，进而促进生态系统健康与可持续发展。

3.2.2 生态廊道与生态节点空间分布

基于生态源地与综合生态阻力面,本文共识别东北典型黑土区生态廊道58条,总长度为10980.90 km(图7b)。其中,关键廊道31条(4612.01 km),潜在廊道27条(6368.89 km)。生态节点共77个,其中关键节点24个,潜在节点53个。从空间分布来看,关键廊道与节点主要存在于生态阻力较低、生态功能较重要的区域;潜在廊道与节点主要存在于生态阻力较高、生态功能较弱的区域。松嫩典型黑土亚区廊道与节点的密集程度要远大于蒙东典型黑土区与三江典型黑土亚区。这主要是由于松嫩典型黑土亚区地形极为平坦且分布大量典型黑土,长期高强度的农业耕种等人类活动导致区域生态环境极为脆弱,尤其是西南部地区。生态用地与耕地、建设用地冲突较为严重,导致生态空间被割裂,空间上不连续。

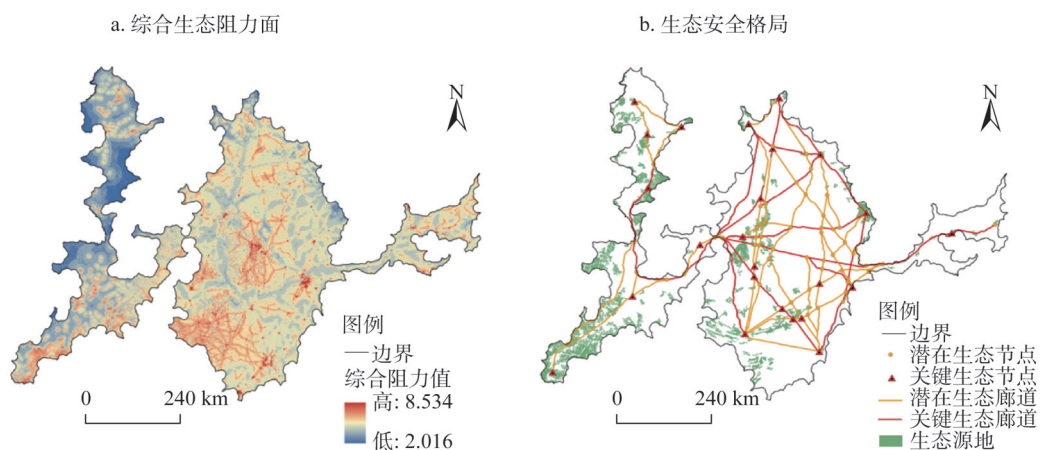


图7 综合阻力面及生态安全格局空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of integrated resistance surface and ecological security pattern

3.3 生态保护红线区域空间分布

生态保护红线初步划定区与生态廊道缓冲区、生态节点缓冲区共同构成东北典型黑土区生态保护红线区域,面积共计76234.54 km²,占总面积的22.89%(图8a),主要分布在蒙东典型黑土亚区与松嫩典型黑土亚区西南部。对比发现:(1)蒙东典型黑土亚区、松嫩典型黑土亚区内的生态保护红线区域分布大量的林地与草地,具有极重要的生态功能。(2)松嫩典型黑土亚区内的生态红线区域分布大量的耕地与未利用地,各生态系统服务功能较低而生态敏感性较高。同时,分布着大量的生态廊道与生态节点。该区域应当严禁人为因素对生态廊道与节点区域自然景观的干扰,并通过生态廊道以及战略点的生态建设优先保证生态系统完整性和连通性,降低人类活动对生态功能所造成的威胁。

3.4 生态保护红线区域空间格局优化

图9与图10表明,随着生态系统破碎度持续增加,各生态系统服务均呈下降趋势,且均存在多个梯度下降突变点。遵循生态保护红线最严格保护与突变点一致性原则,破碎度优化阈值为0.20。各生态系统服务随着生态系统连通度的增加呈上升趋势,遵循最严格保护与突变点RSI最大原则,连通度优化阈值为80。基于破碎度(0.20)和连通度(80)作为控制阈值,可以发现均未满足破碎度小于0.20和连通度大于80约束条件的面

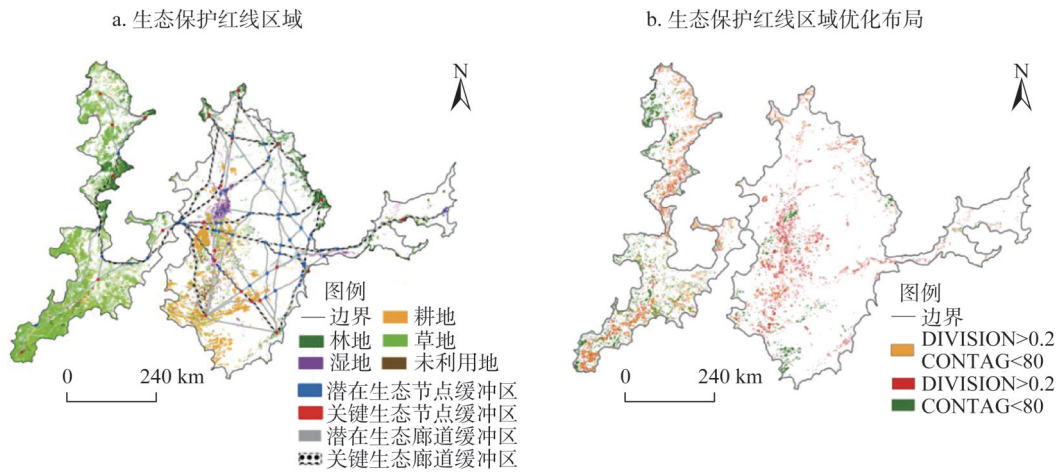


图8 生态保护红线区域及优化空间分布

Fig. 8 Ecological redline area and optimization spatial distribution

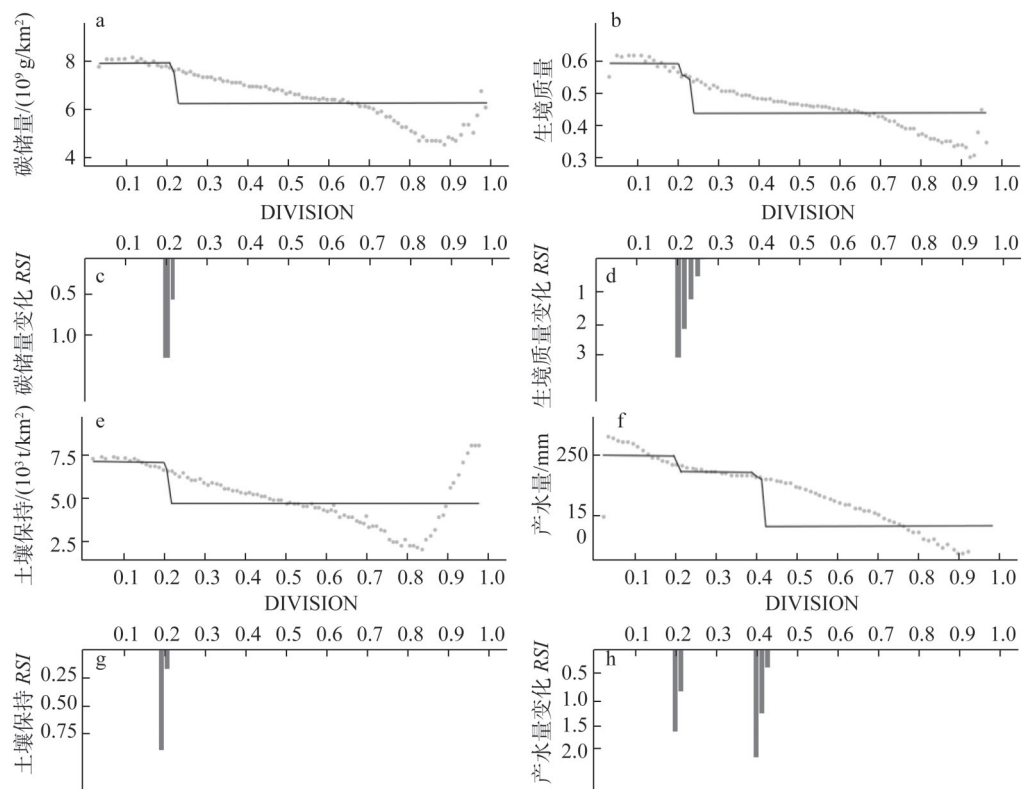


图9 生态系统服务随破碎度变化的突变趋势

Fig. 9 Abrupt trends in ecosystem services in response to fragmentation change

积占比为25.48%且亟待进行优化(图8b)。其中,不满足完整性与连通性的区域分别占比6.78%与13.80%,二者条件均不满足的占比4.90%。破碎度超过0.20或连通度低于80的区域应当加强生态廊道的建设与连通,使其破碎度降低至0.20以下,连通度增加至80以上。

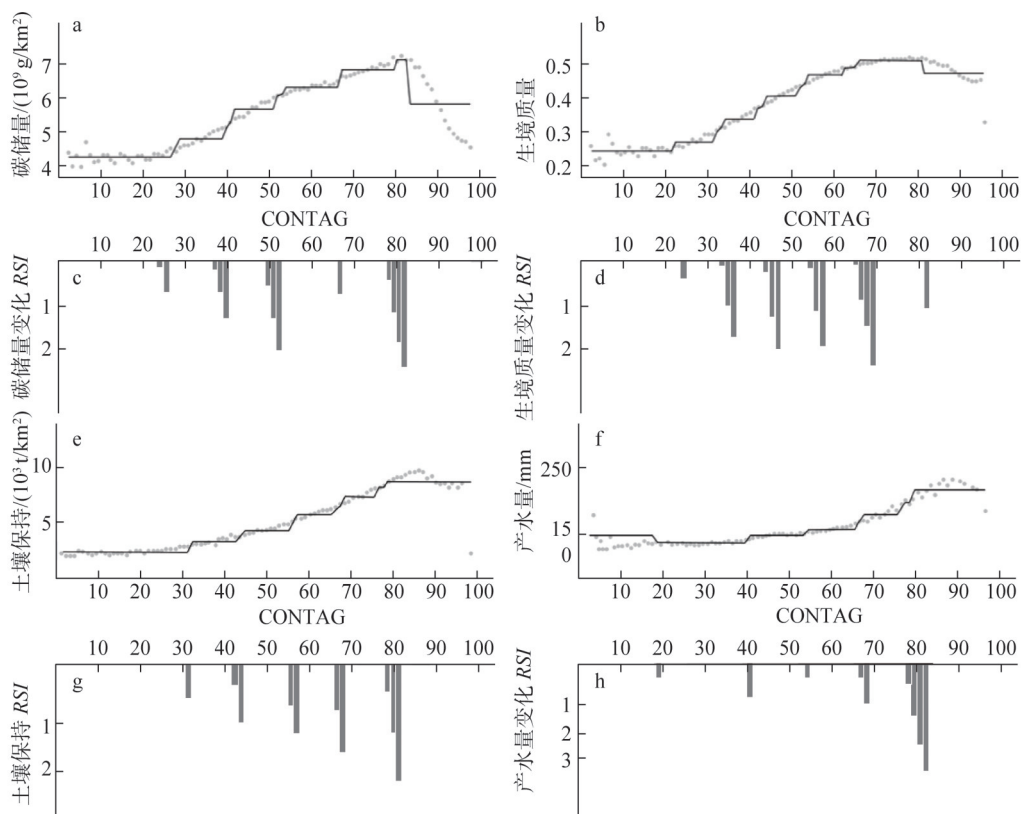


图10 生态系统服务随连通度变化的突变趋势

Fig. 10 Abrupt trends in ecosystem services in response to connectivity change

4 讨论

4.1 构建黑土区生态保护红线划定与优化框架的优势

中国政府计划在2030年前优化生态保护红线并建立生态保护红线治理体系,使全国各区域生态功能得到有效改善以保障生态安全^[44]。本文对生态保护红线内涵重新进行界定,将生态保护红线划定过程看作“源”克服“阻力面”到达“汇”的过程。针对东北典型黑土区土地高度集约化利用、生态空间稀缺的区域特色,如何在保障粮食安全且协调社会经济发展的同时保障生态安全,从生态安全格局视角刻画“点—线—面”多层次空间要素的最优生态保护红线区域,是当前推进国土空间高效管理与生态文明建设面临的首要问题。

本文通过将黑土区耕地质量评价结果与四类生态系统服务功能、三类生态敏感性空间分布进行对比,确定10%为最佳指标阈值进而提高生态保护红线空间识别的准确性。此外,提出了生态系统服务供给与社会需求相结合的方法,将生态系统服务供需不匹配状态的空间排除生态系统服务极重要区外。事实上,社会和生态系统之间的冲突往往发生在人们特定需求高而生态系统服务供给不足的区域^[45]。东北典型黑土区生态系统服务赤字主要分布在松嫩典型黑土亚区,该区域在一系列惠农政策与粮食增产政策的驱动下,地方政府与农民非理性的耕地开垦活动日益加剧,导致生态系统服务功能退化^[25]。

由于人类活动的存在,城市与农村对各生态系统服务均表现出较高的社会需求^[44]。

与传统生态保护红线划定框架相比,在生态安全格局模式下划定生态保护红线区域更具备保障生态系统稳定与可持续的发展潜力^[39]。本文将生态节点及生态廊道缓冲区纳入生态保护红线区域,以实现横向生态格局和纵向生态过程的全面保护。研究发现,生态廊道与生态节点数量均大于以往研究,且生态廊道长度较长(10980.90 km)。这是由于以往研究仅将生态功能区与自然保护区作为生态源地,其数量远小于本文识别的生态源地^[46]。同时,松嫩典型黑土亚区作为农业优先发展区分布大量农村居民点,大量农村道路形成生态阻力高值网络,在一定程度增加了生态廊道长度^[47]。为进一步保证生态系统完整性与连通性,采用STARS算法确定0.20与80分别作为生态系统完整性与连通性的优化阈值,并识别优化区域面积19424.56 km²。生态廊道缓冲区与生态节点缓冲区的建立,能够提高生态保护红线区域的生态系统稳定性,而优化区域的空间识别更加有助于生态保护红线精准落地与管控。

4.2 生态保护红线与国土空间管控

生态保护红线区域作为生态空间中最核心的刚性约束区域,原则上等同于禁止开发区。本文生态保护红线区域由生态系统服务极重要区、生态环境极敏感区、生态廊道缓冲区与生态节点缓冲区共同构成,并从生态系统完整性与连通性视角识别出优化区域。针对不同类型管控区域采取不同管控与生态修复方式,对于推进国土空间的高效管理具有重要意义^[48]。

对于生态系统服务极重要区与生态环境极敏感区,应当利用耕地和生态用地转换的长期反馈机制合理规划粮食主产区、生态功能区与灵活转化区,推动耕地保护和生态保护政策整合。同时,合理规划建设农田防护林体系进而改善小气候与水文条件、减缓土壤侵蚀、减缓风速与乱流交换^[49]。当防护林达到成熟高度时,防护林保护的耕地比未种植防护林前的耕地平均粮食产量提高20%~30%^[50]。地形起伏度较大的蒙东典型黑土亚区南部可开展坡改梯工程或实行等高种植等技术措施,土壤沙粒含量较高、大风日数与持续时间较强的松嫩典型黑土亚区西南部可开展引水拉沙、止沙生绿等工程措施,进而降低生态环境敏感性。

对于生态廊道与生态节点缓冲区,应当将生态廊道与节点作为生态修复关键区域进行生态问题诊断,在道路与生态廊道、生态节点相交的节点区域设置生态流通道降低截断效应,推进生态修复工程措施从而降低生态阻力。此外,在考虑经济投入与生态效益的基础上,识别时空尺度上生态保护与恢复先后次序,进而实现生态保护红线区域多层次协同优化^[51]。

对于生态系统完整性与连通性亟待优化区域,亟待实施草原综合治理封育工程、加强湿地自然保护区管理、完善生态用地保护问责机制等,形成草地与湿地合理利用及保护的良性循环。同时,识别区域破碎化问题的演变规律、生态退化机理等,对应研发一批生态保护修复的关键设备和核心技术予以应用,从而支撑优化区域自然资源源头保护和全过程修复治理,避免形成“生态孤岛”。

4.3 不足与展望

本文从生态安全格局视角构建生态保护红线划定及优化框架,对黑土区生态系统可

持续管理提供参考,但仍存在一些问题值得关注:(1)本文虽然基于生态安全格局明晰了生态保护红线内涵并提出“点一线一面”系统生态保护红线划定框架,但如何在平衡经济效益和生态效益前提下确定合理生态廊道与生态节点缓冲区宽度及阈值仍是下一步的研究重点。(2)基于生态系统服务与生态敏感性评价划定生态保护红线,忽略了对土地利用变化规律的学习^[52],不能保证划定结果与土地利用变化趋势相适应。未来研究应当关注东北典型黑土区耕地和生态用地转换的长期反馈机制,借鉴生态系统“格局—过程—功能”研究,促进耕地与生态空间的协调开发。(3)在生态保护红线空间优化过程中,除考虑生态系统完整性与连通性外,还应当从生态系统功能完整性(水—土—粮—碳—能)、稳定性、韧性、弹性等方面筛选更全面系统的优化指标体系,并探讨不同突变点的阈值优化方案。

5 结论

生态保护红线是中国解决保护与发展冲突问题的重要手段,其划定对于国家生态安全战略实施具有重要意义。本文摆脱了依赖于生态系统服务重要性与敏感性评估的传统生态保护红线划定框架,从生态安全格局视角重新明晰生态保护红线内涵,并基于东北典型黑土区土地高度集约化利用、生态空间稀缺的区域特色,考虑生态系统完整性与连通性,构建了“点一线一面”多层次空间要素的系统性生态保护红线划定与优化框架。

本文在保证不划入优质耕地的前提下确定生态保护红线初步划定区域69646.00 km²;在生态安全格局研究范式下,依据生态保护红线初步划定区域提取生态源地34760.16 km²,进一步建立生态廊道、生态节点缓冲区共同构成生态保护红线区域76234.54 km²。为进一步提高生态系统的完整性与连通性,基于破碎度(0.20)和连通度(80)的控制阈值识别生态保护红线区域约25.48%的面积需要通过生态保护与恢复工程优化。尽管本文未获取东北典型黑土区生态保护红线数据进行对比,但研究设计框架可为生态保护红线划定与优化提供思路和技术支撑,有助于深化和完善生态保护红线划定与优化的理论基础。

参考文献(References):

- [1] 邵宇婷,肖轶,桑卫国. 南方丘陵地区生态系统服务变化对国土空间规划的指示意义. 生态学报, 2022, 42(21): 8702-8712. [SHAO Y T, XIAO Y, SANG W G. Change of ecosystem service functions in the southern hilly region of China and its indication significance to the land use planning at the regional scale. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(21): 8702-8712.]
- [2] BORRELLI P, ROBINSON D A, PANAGOS P, et al. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070). *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020, 117(36): 21994-22001.
- [3] YUE C, CIAIS P, HOUGHTON R A, et al. Contribution of land use to the interannual variability of the land carbon cycle. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 3170, Doi: 10.1038/s41467-020-16953-8.
- [4] 姚岚,丁庆龙,俞振宁,等. 生态保护红线研究评述及框架体系构建. 中国土地科学, 2019, 33(7): 11-18. [YAO L, DING Q L, YU Z N, et al. Review on the research of ecological red-line and systematic framework construction. *China Land Science*, 2019, 33(7): 11-18.]
- [5] HUANG Y, FU J, WANG W, et al. Development of China's nature reserves over the past 60 years: An overview. *Land Use Policy*, 2019, 80: 224-232.

- [6] WANG L J, MA S, ZHAO Y G, et al. Ecological restoration projects did not increase the value of all ecosystem services in Northeast China. *Forest Ecology and Management*, 2021, 495: 119340, Doi: 10.1016/j.foreco.2021.119340.
- [7] BAI Y, JIANG B, WANG M, et al. New ecological redline policy (ERP) to secure ecosystem services in China. *Land Use Policy*, 2016, 55: 348-351.
- [8] 中华人民共和国生态环境部. 生态保护红线划定指南. www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201707/t20170728_418679.html (2017-07-20/2021-10-10). [Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Technical guidelines for the delineation of ecological protection redline. www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201707/t20170728_418679.html (2017-07-20/2021-10-10).]
- [9] 孔令桥, 王雅晴, 郑华, 等. 流域生态空间与生态保护红线规划方法: 以长江流域为例. *生态学报*, 2019, 39(3): 835-843. [KONG L Q, WANG Y Q, ZHENG H, et al. A method for evaluating ecological space and ecological conservation redlines in river basins: A case of the Yangtze River Basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(3): 835-843.]
- [10] 范小杉, 高吉喜, 何萍, 等. 基于生态安全问题的生态保护红线管控方案. *中国环境科学*, 2018, 38(12): 4749-4754. [FAN X S, GAO J X, HE P, et al. Technical solutions for ecological red-line management based on problems of ecological security. *China Environmental Science*, 2018, 38(12): 4749-4754.]
- [11] 马克明, 傅伯杰, 黎晓亚, 等. 区域生态安全格局: 概念与理论基础. *生态学报*, 2004, 24(4): 761-768. [MA K M, FU B J, LI X Y, et al. The regional pattern for ecological security (RPES): The concept and theoretical basis. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(4): 761-768.]
- [12] 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. [FU B J. Several key point in territorial ecological restoration. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36(1): 64-69.]
- [13] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局. *生态学报*, 1999, 19(1): 10-17. [YU K J. Landscape ecological security patterns in biological conversation. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(1): 10-17.]
- [14] 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 等. 区域生态安全格局构建研究进展与展望. *地理研究*, 2017, 36(3): 407-419. [PENG J, ZHAO H J, LIU Y X, et al. Research progress and prospect on regional ecological security pattern construction. *Geographical Research*, 2017, 36(3): 407-419.]
- [15] 马晓武, 徐昔保. 区域尺度生态保护红线连通性优化与管控: 以长三角为例. *自然资源学报*, 2022, 37(12): 3088-3101. [MA X W, XU X B. Optimization and management of the connectivity of ecological red lines at regional scale: A case study of Yangtze River Delta. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(12): 3088-3101.]
- [16] 李玉恒, 黄惠倩, 郭桐冰, 等. 多重压力胁迫下东北黑土区耕地韧性研究及其启示: 以黑龙江省拜泉县为例. *中国土地科学*, 2022, 36(5): 71-79. [LI Y H, HUANG H Q, GUO T B, et al. Research on cultivated land resilience of the black soil region in the Northesat China under multiple stresses and its implications: The study of Baiquan county, Heilongjiang province. *China Land Science*, 2022, 36(5): 71-79.]
- [17] 张佳宝, 孙波, 朱教君, 等. 黑土地保护利用与山水林田湖草沙系统的协调及生态屏障建设战略. *中国科学院院刊*, 2021, 36(10): 1155-1164. [ZHANG J B, SUN B, ZHU J J, et al. Black soil protection and utilization based on harmonization of mountain-river-forest-farmland-sandy land ecosystems and strategic construction of ecological barrier. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36(10): 1155-1164.]
- [18] WANG H, ZHANG C, YAO X, et al. Scenario simulation of the tradeoff between ecological land and farmland in black soil region of Northeast China. *Land Use Policy*, 2022, 114: 105991, Doi: 10.1016/j.landusepol.2022.105991.
- [19] WANG H, YANG S, WANG Y, et al. Rates and causes of black soil erosion in Northeast China. *CATENA*, 2022, 214: 106250, Doi: 10.1016/j.catena.2022.106250.
- [20] 王子琳, 李志刚, 方世明. 基于遗传算法和图论法的生态安全格局构建与优化: 以武汉市为例. *地理科学*, 2022, 42(10): 1685-1694. [WANG Z L, LI Z G, FANG S M. Construction and optimization of ecological security pattern based on genetic algorithm and graph theory: A case study of Wuhan city. *Scientia Geographica Sinica*, 2022, 42(10): 1685-1694.]
- [21] 陈立顶, 傅伯杰, 赵文武. “源”“汇”景观理论及其生态学含义. *生态学报*, 2006, 26(5): 1444-1449. [CHEN L D, FU B J, ZHAO W W. The theory of "source" and "sink" landscape and its ecological implications. *Acta Ecologica Sinica*,

- 2006, 26(5): 1444-1449.]
- [22] MITCHELL M G E, SUAREZ-CASTRO A F, MARTINEZ-HARMS M, et al. Reframing landscape fragmentation's effects on ecosystem services. *Trends in Ecology & Evolution*, 2015, 30(4): 190-198.
- [23] 赵诚诚, 潘竞虎. 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. [ZHAO C C, PAN J H. Ecological safety pattern identification and optimization based on the ecological supply and demand in Gansu section of the Yellow River Basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(17): 6973-6984.]
- [24] 刘宝元, 张甘霖, 谢云, 等. 东北黑土区和东北典型黑土区的范围与划界. *科学通报*, 2021, 66(1): 96-106. [LIU B Y, ZHANG G L, XIE Y, et al. Delineating the black soil region and typical black soil region of Northeastern China. *Chineses Science Bulletin*, 2021, 66(1): 96-106.]
- [25] XIANG H, ZHANG J, MAO D, et al. Identifying spatial similarities and mismatches between supply and demand of ecosystem services for sustainable Northeast China. *Ecological Indicators*, 2022, 134: 108501, Doi: 10.1016/j.ecolind.2021.108501.
- [26] MAO D, HE X, WANG Z, et al. Diverse policies leading to contrasting impacts on land cover and ecosystem services in Northeast China. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 240: 117961, Doi: 10.1016/j.jclepro.2019.117961.
- [27] BAI Y, WONG C P, JIANG B, et al. Developing China's Ecological Redline Policy using ecosystem services assessments for land use planning. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 1-13.
- [28] 王壮壮, 张立伟, 李旭谱, 等. 区域生态系统服务供需风险时空演变特征: 以陕西省产水服务为例. *生态学报*, 2020, 40(6): 1887-1900. [WANG Z Z, ZHANG L W, LI X P, et al. Spatio-temporal pattern of supply-demand risk of ecosystem services at regional scale: A case study of water yield service in Shaanxi province. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(6): 1887-1900.]
- [29] SHI Y, SHI D, ZHOU L, et al. Identification of ecosystem services supply and demand areas and simulation of ecosystem service flows in Shanghai. *Ecological Indicators*, 2020, 115: 106418, Doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106418.
- [30] 杨宜男, 李敬, 王立, 等. 长三角地区城市化对典型生态系统服务供需的影响. *自然资源学报*, 2022, 37(6): 1555-1571. [YANG Y N, LI J, WANG L, et al. Impact of urbanization on supply and demand of typical ecosystem services in Yangtze River Delta. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(6): 1555-1571.]
- [31] 赵雪雁, 马平易, 李文青, 等. 黄土高原生态系统服务供需关系的时空变化. *地理学报*, 2021, 76(11): 2780-2796. [ZHAO M Y, MA P Y, LI W Q, et al. Spatiotemporal changes of supply and demand relationships of ecosystem services in the Loess Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(11): 2780-2796.]
- [32] 刘军会, 高吉喜, 马苏, 等. 内蒙古生态环境敏感性综合评价. *中国环境科学*, 2015, 35(2): 591-598. [LIU H J, GAO J X, MA S, et al. Comprehensive evaluation of eco-environmental sensitivity in Inner Mongolia, China. *China Environmental Science*, 2015, 35(2): 591-598.]
- [33] LIU L, ZHOU D, CHANG X, et al. A new grading system for evaluating China's cultivated land quality. *Land Degradation & Development*, 2020, 31(12): 1482-1501.
- [34] SONG W, ZHANG H, ZHAO R, et al. Study on cultivated land quality evaluation from the perspective of farmland ecosystems. *Ecological Indicators*, 2022, 139: 108959, Doi: 10.1016/j.ecolind.2022.108959.
- [35] 卫新东, 林良国, 冯小龙, 等. 神木市生态安全格局构建与生态问题定量诊断. *生态学报*, 2023, 43(1): 1-13. [WEI X D, LIN L G, FENG X L, et al. Construction of ecological security pattern and quantitative diagnosis of ecological problems in Shenmu city. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(1): 1-13.]
- [36] PENG W, ZHOU J. Development of land resources in transitional zones based on ecological security pattern: A case study in China. *Natural Resources Research*, 2019, 28(1): 43-60.
- [37] DAI L, LIU Y, LUO X. Integrating the MCR and DOI models to construct an ecological security network for the urban agglomeration around Poyang Lake, China. *Science of the Total Environment*, 2021, 754: 141868, Doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141868.
- [38] SU Y, CHEN X, LIAO J, et al. Modeling the optimal ecological security pattern for guiding the urban constructed land expansions. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2016, 19: 35-46.

- [39] WANG C, YU C, CHEN T, et al. Can the establishment of ecological security patterns improve ecological protection? An example of Nanchang, China. *Science of the Total Environment*, 2020, 740: 140051, Doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140051.
- [40] ZHANG J X, LIU D Q, GONG J. Impact of landscape fragmentation on watershed soil conservation service: A case study on Bailongjiang Watershed of Gansu. *Resources Science*, 2018, 40(9): 1866-1877.
- [41] 高歆. 基于线性 GSI 二维半变异函数各向异性结构建模及估计研究: 以 DEM 数据为例. *地理研究*, 2020, 39(11): 2607-2625. [GAO X. Anisotropic modeling and estimation for a two-dimensional semi-variogram based on the linear GSI Model: Taking DEM data as an example. *Geographical Research*, 2020, 39(11): 2607-2625.]
- [42] ANDERSEN T, CARSTENSEN J, HERNANDEZ-GARCIA E, et al. Ecological thresholds and regime shifts: Approaches to identification. *Trends in Ecology & Evolution*, 2009, 24(1): 49-57.
- [43] RODIONOV S N. A sequential algorithm for testing climate regime shifts. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(9), Doi: 10.1029/2004GL019448.
- [44] CUI F, TANG H, ZHANG Q, et al. Integrating ecosystem services supply and demand into optimized management at different scales: A case study in Hulunbuir, China. *Ecosystem Services*, 2019, 39: 100984, Doi: 10.1016/j.ecoser.2019.100984.
- [45] PALACIOS-AGUNDEZ I, ONAINDIA M, BARRAQUETA P, et al. Provisioning ecosystem services supply and demand: The role of landscape management to reinforce supply and promote synergies with other ecosystem services. *Land Use Policy*, 2015, 47: 145-155.
- [46] 于成龙, 刘丹, 冯锐, 等. 基于最小累积阻力模型的东北地区生态安全格局构建. *生态学报*, 2021, 41(1): 290-301. [YU C L, LIU D, FENG R, et al. Construction of ecological security pattern in Northeast China based on MCR model. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(1): 290-301.]
- [47] 杨志鹏, 许嘉巍, 冯兴华, 等. 基于 InVEST 模型的东北地区土地利用变化对生境的影响研究. *生态科学*, 2018, 37(6): 139-147. [YANG Z P, XU J W, FENG X H, et al. Effects of land use change on habitat based on InVEST model in Northeast China. *Ecological Science*, 2018, 37(6): 139-147.]
- [48] SUDING K, HIGGS E, PALMER M, et al. Committing to ecological restoration. *Science*, 2015, 348(6235): 638-640.
- [49] LI X, LIU L, XIE J, et al. Optimizing the quantity and spatial patterns of farmland shelter forests increases cotton productivity in arid lands. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 292: 106832, Doi: 10.1016/j.agee.2020.106832.
- [50] GAO H, HUANG Y. Impacts of the Three-North shelter forest program on the main soil nutrients in Northern Shaanxi China: A meta-analysis. *Forest Ecology and Management*, 2020, 458: 117808, Doi: 10.1016/j.foreco.2019.117808.
- [51] JACKSON S T, HOBBS R J. Ecological restoration in the light of ecological history. *Science*, 2009, 325(5940): 567-569.
- [52] CHEN D, PAN Y, JIN X, et al. The delineation of ecological redline area for catchment sustainable management from the perspective of ecosystem services and social needs: A case study of the Xiangjiang Watershed, China. *Ecological Indicators*, 2021, 121: 107130, Doi: 10.1016/j.ecolind.2020.107130.

Research on the delineation and optimization of ecological protection redline based on the perspective of ecological security pattern in typical black soil areas of Northeast China

FENG Lin^{1,2}, LEI Guo-ping^{1,2}

(1. School of Humanities and Law Northeastern University, Shenyang 110169, China; 2. Key Laboratory of Land Protection and Use, Department of Natural Resources of Liaoning Province, Shenyang 110169, China)

Abstract: The typical black soil areas of Northeast China is facing problems such as degradation of ecosystem service functions, fragmented landscape patterns and conflicts between agriculture and ecological space. The scientific formulation of guiding framework for the delineation and optimization of ecological protection redline in black soil areas is of great significance in ensuring food security and ecological safety. This study clarified the meaning of ecological protection redline based on the perspective of ecological security pattern, and proposed the idea of systemic ecological protection redline delineation based on the importance of ecological protection, coordination of agriculture and ecological space, and coordination of natural and social system, and identified ecological protection redline optimization areas by considering the fragmentation and connectivity of ecosystem. The results show that: (1) On the premise of guaranteeing that no high-quality cropland was allocated (the threshold value was 10%), 69646.00 km² of the preliminary delineation area of the ecological protection redline were determined by overlaying extremely important areas for ecosystem services, extremely sensitive areas for ecological environment, and areas with mismatch between supply and demand of ecosystem services, and extracting 34760.16 km² of ecological source land; (2) A total of 10980.90 km² of ecological corridors and 77 ecological nodes were identified based on the ecological source and construction of a comprehensive ecological resistance surface, and their buffer zones and ecological protection areas together constituted an ecological protection redline area of 76234.54 km²; (3) Based on the optimization thresholds of fragmentation (0.20) and connectivity (80), approximately 25.48% of the ecological redline area was in urgent need of optimization. The results of the study improve the scientific and systematic nature of ecological protection redline delineation and optimization, and provide an important basis for the precise control of land space and strengthening ecosystem sustainability management in typical black soil areas of Northeast China, as well as important guidance for small and medium-scale regions with highly intensive land use and scarce ecological space.

Keywords: ecological protection redline; ecological security pattern; delineation ideas; optimization threshold; the typical black soil areas of Northeast China