

基于InVEST和MCR模型的南方山地丘陵区 生态保护红线优化

李 怡^{1,2}, 赵小敏^{1,2}, 郭 熙^{1,2}, 周丙娟^{1,2}, 黄心怡^{1,2},
易 丹^{1,2}, 丁 徽^{1,2}

(1. 江西农业大学国土资源与环境学院, 南昌 330045;

2. 江西省鄱阳湖流域农业资源与生态重点实验室, 南昌 330045)

摘要: 优化生态保护红线, 是顺应新时代多规融合趋势、推进国土空间高效管理与生态文明建设的重要举措。以南方山地丘陵区典型县奉新县为例, 基于InVEST模型进行生境质量评价以识别生态源地及其缓冲区, 采用水土流失敏感性修正基本阻力面, 运用MCR模型构建奉新县生态安全格局, 定量衡量与定性分析相结合对生态安全格局进行有效性评价, 继而提出奉新县生态保护红线优化方案。结果表明: (1) 生态源地及生态源地缓冲区面积分别为 144.42 km²、354.01 km², 分别占研究区总面积的 8.76% 与 21.47%, 并识别出 19 个生态节点; (2) 识别出关键生态廊道 76 km, 一般生态廊道 315 km, 与生态节点、生态源地、生态源地缓冲区共同构成研究区生态安全格局, 面积共 498.43 km², 占奉新县总面积的 30.23%, 集中分布于研究区西部山地丘陵区; (3) 经有效性评价证实生态安全格局较生态保护红线更具生态优化意义; (4) 划定生态保护红线补划区与生态保护红线储备区, 共为生态保护红线调整优化预留了 199.34 km² 的高质量后备资源, 形成研究区生态保护红线优化方案。研究成果可为南方山地丘陵区生态保护红线的评估优化提供科学参考。

关键词: 生态保护红线; 生态安全格局; InVEST 模型; MCR 模型; 南方山地丘陵区

新时代下我国经济已由高速增长转向高质量发展阶段, 对经济质量的高要求也让生态文明建设上升到具有全局性、整体性、系统性的发展理念层次^[1]。生态文明建设进程的深入推进促使生态空间格局构建成为国土空间格局管控的重要内容, 而生态保护红线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, 在保障国家和区域生态安全上发挥了至关重要的作用^[2,3]。然而, 受生态保护红线管理办法尚不明确、不同规划间底图底数未统一等因素的影响, 现阶段的生态保护红线内仍存在部分高强度的开发建设活动, 且与永久基本农田、城镇开发边界等存在矛盾冲突, 严重影响了生态保护红线的权威性和科学性。因此, 基于原有生态保护红线划定成果对其进一步优化, 确保其生态功能不降低、面积不减少、性质不改变是当前面临的严峻挑战, 这对加强生态保护红线的管控与生态资源的保护、推进国土空间的高效管理与生态文明建设具有重要意义。

当前, 我国针对生态保护红线优化的研究主要侧重于构建生态网络并以此优化生态

收稿日期: 2020-05-06; 修订日期: 2020-12-01

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41361049); 江西省赣鄱英才“555”领军人才项目 (201295)

作者简介: 李怡 (1998-), 女, 江西吉安人, 硕士, 主要从事土地利用规划与评价等研究。

E-mail: liyi5801@163.com

通讯作者: 赵小敏 (1962-), 男, 江西宜春人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土地利用规划与评价、土地遥感与信息研究。E-mail: zhaoxm889@126.com

保护红线的连通性和结构稳定性^[4,5]。生态安全格局相较于生态网络在注重生态空间结构的同时,更侧重关键生态用地的空间格局,对维持区域生态系统结构和功能的完整性具有重要意义,为生态保护红线的优化提供了重要的空间参考^[6,7]。同时,相较于生态保护红线对最核心生态空间的识别,生态安全格局虽更注重全域生态空间的营造,但营造过程识别出的区域的最关键的生态要素可为生态保护红线的优化提供完整的、多层次的空间格局^[8]。生态安全格局理论于20世纪90年代后期逐渐受到国内学者的高度重视,经过数十年的发展,已形成由源地、阻力面、廊道、节点等要素组合的较为成熟的构建范式^[9,10]。近年来,国内学者基于生态安全格局开展的研究日渐丰富。其中,余珮珩等^[11]通过构建杞麓湖流域的生态安全格局体系,开展了精细化的生态保护红线划定及管控研究;方莹等^[12]基于生态安全格局,对烟台市国土空间生态保护修复关键区域进行了全面诊断与识别;杜腾飞等^[13]基于生态安全格局,探讨了自然资源空间精准识别与管制的方法;杨天荣等^[14]基于生态安全格局构建,对关中城市群生态空间结构进行了优化布局;徐文彬等^[15]以南京都市区为例,基于生态安全格局划定了研究区生态控制边界,从而更好地实现区域生态系统的格局优化。已有研究为生态安全格局理论的精细化应用奠定了坚实基础,但针对生态保护红线的优化设计仍较为薄弱。

中国南方山地丘陵区生态资源丰富,生物物种多样,马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、毛竹(*Cunninghamia lanceolata*)等人工栽培的林种是该区域主要的生态系统类型,面积约占全国的63.3%^[16]。奉新县属南方山地丘陵区的典型区域,东部良田集中连片,西部林地延绵广布,是江西省农产品主产区向重点生态功能区的过渡地段,也是长江经济带的重要组成部分。如何在发挥好农产品主产区功能的同时保障区域生态安全,从林地集中连片分布的区域中有效识别出该区域内核心的生态安全区,进而为区域生态保护红线优化提供科学合理的补划范围,已成为当前南方山地丘陵区生态保护红线评估优化工作的迫切需求。本文以江西省奉新县为研究区,在辨别林地主要林种生态特性的基础上,综合运用生态系统服务评估与权衡模型(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs, InVEST)、最小累积阻力模型(Minimum Cumulative Resistance Model, MCR),构建奉新县生态安全格局,从定量评价和定性分析两个角度对生态安全格局进行有效性评价,在此基础上提出奉新县生态保护红线优化的具体方案,以期为南方山地丘陵区生态保护红线的评估优化提供科学参考,推进南方山地丘陵区国土空间开发与高效管护的进程。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

南方山地丘陵区是我国秦岭以南、云贵高原以东、雷州半岛以北的区域,陆域总面积约127.6万km²^[17]。区域内山地、丘陵、平原交错分布,生态系统类型多样,水土流失分布广泛。奉新县位于南方山地丘陵区的中部、江西省的西北部(28°34′~28°52′N、114°45′~115°33′E),隶属于宜春市,全县总面积1649 km²(图1)。境内地势西高东低,自西向东山地、丘陵、平原依次分布,属典型的南方山地丘陵地貌。奉新县属中亚热带季风性湿润气候,年平均气温17.3℃,年日照时数1803 h,年平均降雨量1612 mm,降雨集中在4~6月份。奉新县农林资源丰富,2018年底全县耕地面积359.77 km²、林地面积

1079.34 km²，分别占区域总面积的21.82%和65.46%。境内原生植被稀少，毛竹林、马尾松林、杉木林等是奉新县主要的人工林类型，分布较为广泛，占奉新县林地总面积的87.92%。

1.2 数据来源与处理

数据主要包括土地利用数据、土壤数据、DEM (Digital Elevation Model) 数据、降水数据、NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) 数据、生态保护红线评估优化系列数据等 (表1)。其中，土地利用数据和NDVI数据 (MOD13Q1) 来源于美国地质调查局 (<https://glovis.usgs.gov/>)；土壤质地数据来自中国科学院南京土壤研究所提供的1：100万土壤类型数据；DEM数据下载自地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>)；降水数据下载自中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>)；生态保护红线评估优化系列数据由奉新县自然资源局统一提供。基于ArcGIS 10.2平台，将空间数据重采样为30 m×30 m的栅格单元，统一采用CGCS2000_3_Degree_GK_Zone_38坐标格式。

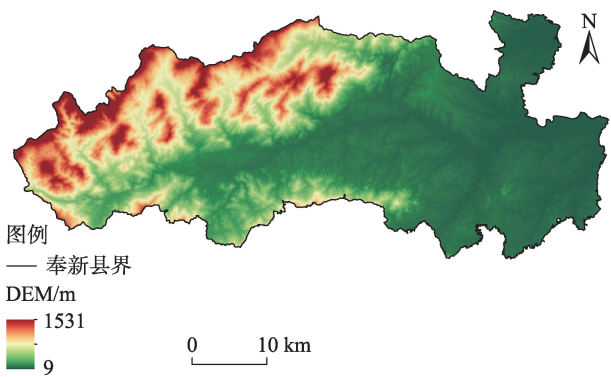


图1 奉新县地形图
Fig. 1 Location of Fengxin county

表1 数据说明
Table 1 Data description

数据名称	数据格式	数据描述
土地利用数据	30 m×30 m 栅格	解译2018年Landsat 8影像，参考张磊等 ^[18] 的研究并结合奉新县实际情况，将研究区土地覆被类型分为一级类6类、二级类17类
土壤质地数据	1 km×1 km 栅格	采用卡克斯基土壤质地分类制
DEM数据	30 m×30 m 栅格	来自GDEMDEM数据产品，用于坡度提取
降水数据	文本数据	选取奉新县及其周边县共7个气象站点的降雨数据，采用协同克里金插值方法计算年均降雨量
NDVI数据	250 m×250 m 栅格	选取2018年6-9月的MOD13Q1 NDVI数据产品，计算月均值得到
生态保护红线评估优化系列数据	矢量数据	包括奉新县行政区划、永久基本农田、人工商品林、探矿权、采矿权、城市总体规划、土地利用总体规划、自然保护地、生态保护红线等矢量数据

1.3 研究方法

1.3.1 InVEST模型识别生态源地及其缓冲区

生态源地是物种扩散和维持的源点，是生态安全格局的核心要素，其本身应具有较高的生境质量^[19]。由美国自然资本项目组开发的InVEST模型，其Habitat Quality模块在综合考虑生境类型对各威胁因子的相对敏感性、各威胁因子的相对影响、生境栅格与威胁因子之间的距离、土地受到合法保护的四个因素的基础上，对研究区的生境质量进行综合评价，为生境质量的量化分析提供了便利^[20]。本文基于InVEST 3.8.0中的Habitat Quality模块计算奉新县生境质量指数，计算公式如下^[21]：

$$Q_{xy}=H_j\left(1-\left(\frac{D_{xy}^z}{D_{xy}^z+k^z}\right)\right)$$

(1)

式中： Q_{xy} 为第 j 种生境类型中栅格 x 的生境质量指数（ $Q_{xy} \in [0, 1]$ ）； H_j 为第 j 种生境类型的生境适宜性分值； D_{xy} 为第 j 种生境类型中栅格 x 的生境退化度； z 为尺度常数，默认取 2.5； k 为半饱和常数，是最高生境退化栅格值的一半。

参考 InVEST 模型用户手册^[21]、已有相关研究^[22-25]及专家的意见，选取了 12 种生境类型与 6 种威胁因子，进一步结合余蓉等^[26]对长沙市 4 种人工林生态系统碳储量的研究成果，将以马尾松林和杉木林为主的乔木林地生境质量得分值设为 1，竹林地设为 0.9，并立足奉新县其他生境类型实际依次设置其余模型参数值，使模型参数本地化（表 2、表 3）。输出的生境质量指数变化范围在 0~1 之间，越趋近 1 表示生境质量越高。结合自然断点法将生境质量指数划分为 5 级：低等（0~0.4）、较低等（0.4~0.6）、中等（0.6~0.8）、次高等（0.8~0.9）、高等（0.9~1）。为避免细碎斑块降低源地生态系统服务功能，参考相关源地面积阈值设定的研究^[27]，选取高等生境质量区域中面积不小于 4 km² 的斑块作为研究区生态源地备选区；再将面积不小于 1 km² 的高等与次高等生境质量区域作为生态源地缓冲区的备选区；针对具有关键物种多样性的细小斑块，结合奉新县生物分布的实际情况与自然保护地划定成果加以识别和保留。

表 2 各生境类型对威胁因子的敏感性

Table 2 Sensitivity of different habitat types to threat factors

生境类型	生境得分值	威胁因子					
		耕地	工矿用地	城镇住宅	农村居民点	主要公路	其他道路
水田	0.4	0.3	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3
旱地	0.3	0.2	0.4	0.5	0.3	0.3	0.2
灌木园地	0.6	0.4	0.6	0.5	0.4	0.4	0.3
乔木林地	1.0	0.8	0.8	0.9	0.7	0.8	0.6
竹林地	0.9	0.7	0.7	0.8	0.7	0.7	0.5
灌木林地	0.6	0.6	0.7	0.7	0.6	0.5	0.4
其他林地	0.7	0.8	0.7	0.8	0.6	0.6	0.5
草丛	0.5	0.6	0.5	0.6	0.5	0.4	0.2
河流	1.0	0.7	0.9	0.9	0.8	0.6	0.4
水库	0.8	0.7	0.8	0.8	0.7	0.5	0.3
坑塘	0.7	0.7	0.6	0.7	0.7	0.4	0.3
水渠	0.6	0.2	0.3	0.4	0.5	0.3	0.2

生态保护红线作为受刚性约束的核心生态空间，原则上严格禁止开发性、生产性建设活动。立足于生态保护红线的这一性质，同时也为顺应新时代多规融合的趋势，实现奉新县生态安全格局与社会经济发展的有效衔接，对生态源地和生态源地缓冲区进一步梳理。将其与永久基本农田、城镇开发边界、允许建设区、矿业权用地等区域分别衔接，扣除由此产生的矛盾冲突区。考虑到人工商品林既是生态资源也是商品资源，商品林林权人以商品林的经济效益为首要追求，依法对其所有的商品林享有占有、使用、收益、处分的权利，为充分保障商品林林权人的权益，确保其生产性的采伐活动可以正常

开展,故将源地及其缓冲区内的人工商品林扣除。经上述与人类活动冲突区的梳理过程,得到奉新县最具生态价值的生态源地及生态源地缓冲区。

1.3.2 生态阻力面建立与修正

物种基于生态源地向外扩散的水平运动过程所受阻力,因人类活动干扰与土地覆被类型的差异而不同^[28],参考相关研究^[27,29]基于奉新县土地覆被类型建立基本阻力面(表4)。

由于建立的基本阻力面不能反映同一土地覆被类型下物种运动受阻的空间差异,故需对其进行修正。南方山地丘陵区水土流失分布广泛,水土流失防治同水土资源利用和生态保护的矛盾突出^[30]。奉新县作为南方山地丘陵地貌的典型县,其水土流失问题亦不容小觑,故采用水土流失敏感性对基本阻力面进行修正。基于研究区水土流失的成因,参考相关研究^[31,32],构建奉新县水土流失敏感性评价指标体系(表5)。将各指标评价结果等权叠加后得到水土流失敏感性指数以修正基本阻力面,修正公式如下:

表3 威胁因子参数

Table 3 Parameters for threat factors

威胁因子	最大影响距离/km	权重	衰减类型
耕地	0.5	0.4	指数
工矿用地	5	0.8	指数
城镇住宅	6	1.0	指数
农村居民点	4	0.6	指数
主要公路	3	1.0	线性
其他道路	1	0.6	线性

$$R_i = \frac{NL_i}{NL_a} \times R$$

(2)

式中: R_i 为修正后的栅格 i 的生态阻力值; NL_i 为栅格 i 的水土流失敏感性指数; NL_a 为栅格 i 对应土地覆被类型 a 的平均水土流失敏感性指数; R 为栅格 i 对应土地覆被类型的基本阻力系数。

1.3.3 MCR 模型提取生态廊道

生态廊道是生态源地间的低阻力通道,能促进源地间生物因素的运动^[33]。由 Knaapen 等^[34]提出的 MCR 模型由于具有良好的实用性和扩展性,现广泛应用于城市规划和生态安全格局构建等领域^[35,36]。该模型通过计算从源到目的地所需克服的阻力,识别出两地间的最低阻力路径作为维系物种运动的生态廊道,公式如下:

$$MCR = f_{\min} \sum_{j=n}^{i=m} D_{ij} \times R_i$$

(3)

表4 基本阻力系数

Table 4 Basic resistance coefficients

地类	乔木林地	竹林地	其他林地	灌木林地	灌木园地	草丛	湿地	耕地	其他用地	人工表面
阻力系数	1	3	5	10	20	30	50	100	300	500

表5 水土流失敏感性评价指标体系

Table 5 Index system of soil and water loss evaluation

分级	分级赋值	坡度/(°)	降雨侵蚀力/(J·cm/m²·h)	土壤质地	植被覆盖度/%
不敏感	1	[0, 8]	[0, 25]	重壤	(80, 100], 0 (指建设用地和水域)
轻度敏感	2	(8, 15]	(25, 100]	中壤	(50, 80]
中度敏感	3	(15, 25]	(100, 400]	黏土	(20, 50]
高度敏感	4	25 以上	400 以上	砂壤	(0, 20]

式中: MCR 为最小累积阻力值; f 是正函数, 表示源 j 到栅格单元 i 的距离关系; R_i 为已修正的阻力系数; m 为栅格单元总数 (个); n 为源地总数 (个)。

本文采用 ArcGIS 10.2 中的 Cost Distance 和 Cost Path 工具计算最小累积阻力值并识别生态廊道。以生态源地的中心点为生态节点, 基于区域提取每个生态节点到其余所有生态节点集群的最小阻力路径作为一般廊道; 基于图层提取每个生态节点到其余所有生态节点集群的最小阻力路径作为关键廊道, 共同构成研究区生态廊道。

1.3.4 生态安全格局有效性评价

生态安全格局有效性评价是区域生态安全格局构建研究的关键环节^[8], 分析已构建生态安全格局的有效性和合理性, 能为其运用于实际提供科学佐证。本文采用成果对比法将奉新县生态安全格局与奉新县生态环境局划定的生态保护红线进行对比, 从斑块数量、与自然保护地重合率、景观连通性三个定量指标以及对当地经济、居民生计影响的定性分析两大方面展开有效性评价。

景观连通性反映了景观对生态流的便利或阻碍程度, 对于物种丰富度有正面影响, 是维持生态系统稳定性和整体性的关键^[37,38]。由 Saura 等^[39]开发的 Conefor Sensinode 2.6 软件可用于量化生境对维护或改善景观连通性的重要性, 常用于景观规划与保护的决策制定过程。本文采用该软件提供的可能连通性指数 (Probability of Connectivity, PC) 及各斑块对维持景观连通性的重要性值两个指标, 以研究区为背景斑块, 以研究区生态安全格局与生态保护红线为生境斑块, 分别求取两者所含斑块的景观连通性均值, 计算公式如下:

$$\overline{PC} = \frac{\sum_{i=1}^n \left\{ \left(\sum_{j=1}^n a_i \times a_j \times p_{ij} \right) / A_L^2 \right\}}{n} \quad (4)$$

$$\overline{d}_I = \left(\sum_{i=1}^n \frac{I - I_{remove}}{I} \right) / n \quad (5)$$

式中: \overline{PC} 为所有斑块的可能连通性均值; n 为斑块总数 (个); a_i 和 a_j 分别是斑块 i 和斑块 j 的面积 (km^2); A_L 是研究区的总面积 (km^2); p_{ij} 为物种在斑块 i 与 j 间的扩散概率; \overline{d}_I 为所有斑块重要性的均值; I 为景观中所有斑块的整体指数值; I_{remove} 为扣除单个斑块后剩余斑块的整体指数值。

2 结果分析

2.1 奉新县生态安全格局建立

2.1.1 生态源地及其缓冲区

基于 InVEST 模型得到奉新县生境质量评价结果 (图 2a)。奉新县生境质量高等区和次高等区集中分布在北部、西部和南部, 这些地区林木茂密, 生物多样, 具有丰富的生态资源和较高的生态价值。经面积阈值筛选以及与人类活动冲突区的梳理后, 识别出生态源地 19 个, 面积达 144.42 km^2 , 占奉新县总面积的 8.76%, 与自然保护地的重合率为 81.57% (图 2b)。林地是生态源地最主要的生境类型, 占其总面积的 93.57%; 其次是水域, 占源地总面积的 5.2%。生态源地主要分布在奉新县的西北侧、中北侧、中南侧的山地丘陵区以及潦河的上游与中游段, 这些地区物种丰富, 具有极高的生态服务价值, 应作为奉新县

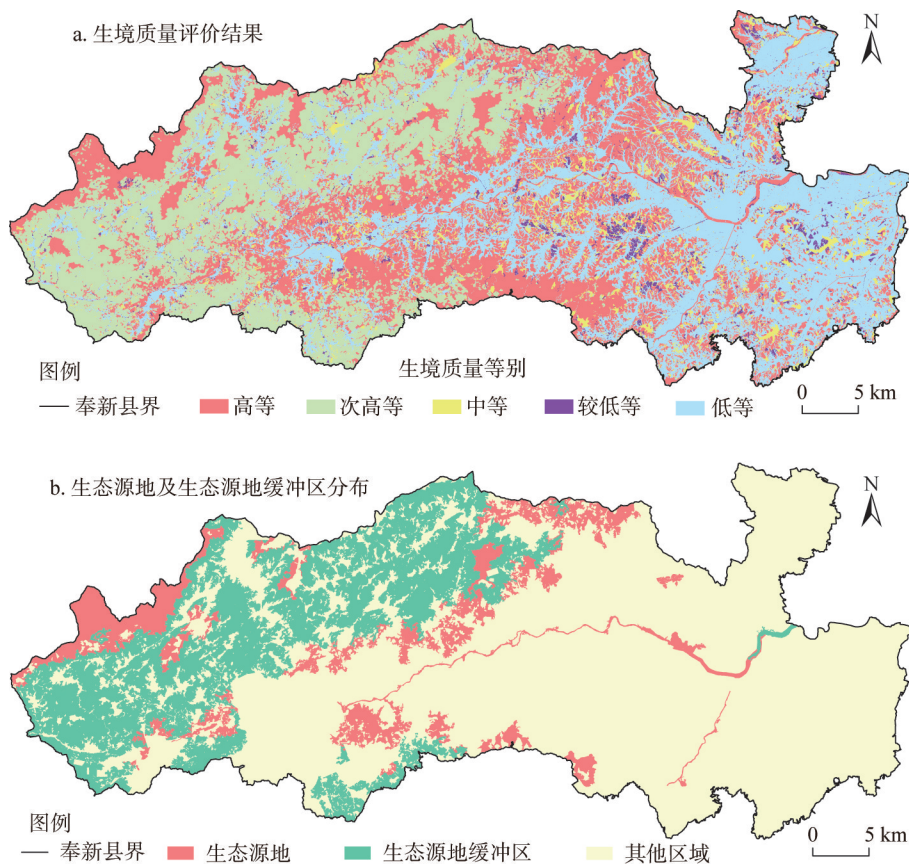


图2 生境质量评价结果、生态源地及生态源地缓冲区分布

Fig. 2 Distribution of habitat quality evaluation, ecological sources and ecological source buffer regions

生态环境保护的核心区，禁止其内部的开发建设活动，实施最严格的管控措施。

次高等区虽在生境质量上略低于高等区，但其生态保护价值远高于其他更低等区域。为降低生态源地受人类活动等因素干扰的风险，基于次高等生境质量区，进一步划定生态源地缓冲区，面积共计354.01 km²，占奉新县总面积的21.47%（图2b）。林地和水域是该区域内主要的生境类型，分别占缓冲区总面积的98.96%和0.63%。生态源地缓冲区集中分布在奉新县西北部和西南部的山地丘陵区，在中部也有零散分布。这些地区同样具有较高的生态服务功能，应严格限制人类活动强度，强化对生态资源的保护。

2.1.2 生态阻力面及生态廊道

奉新县水土流失敏感性评价结果及基于此修正的生态阻力面如图3所示。奉新县地形由西向东依次为山地、丘陵、平原，年均降雨量由西向东递减，植被覆盖度总体亦成西高东低的趋势，综合影响下，奉新县水土流失敏感性在空间上整体呈现西高东低的趋势。修正后的生态阻力值总体呈现西低东高的趋势，主要仍受土地覆被类型的影响，但在同一用地类型下受水土流失敏感性修正作用，亦存在空间分异，更能凸显南方山地丘陵区物种运动的阻力差异。运用MCR模型共识别出生态廊道391 km，其中关键廊道76 km，一般廊道315 km（图3）。廊道主要分布在奉新县西部和中部的山地丘陵区，较好地避开了人为扰动大的城镇村区域及水土流失高敏感区。生态廊道经由19个生态节点

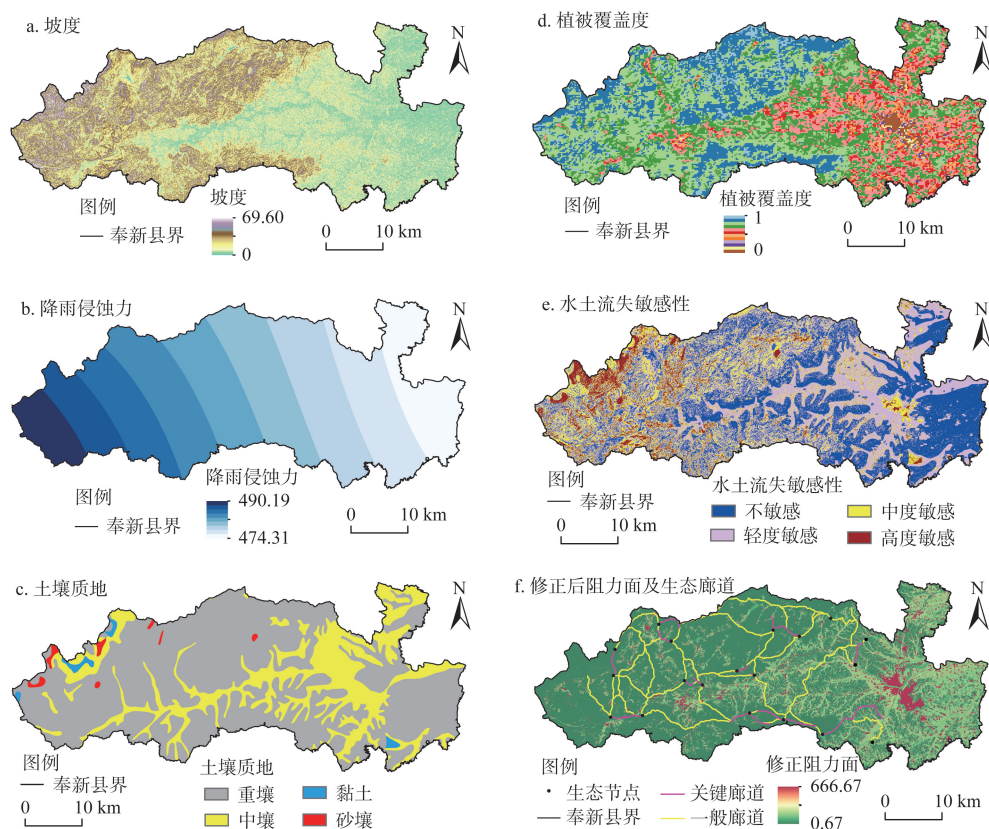


图3 水土流失敏感性评价、生态阻力面与生态廊道分布

Fig. 3 Distribution of soil and water loss evaluation, ecological resistance surface and ecological corridors

相互交织成网，能够促进生物的运动与联系。

2.1.3 生态安全格局

基于InVEST与MCR模型识别出的生态节点、生态源地、生态源地缓冲区、一般生态廊道、关键生态廊道共同构成了奉新县生态安全格局(图4a),面积共计498.43 km²,占奉新县总面积的30.23%。林地和水域是其主要的土地覆被类型,分别占其总面积的97.40%与1.96%。奉新县生态安全格局集中分布在奉新县的西部和西北部,属山地丘陵区,区域内植被覆盖度高、生物物种多样,受人类活动干扰小,内含九岭山国家级自然保护区、五梅山省级自然保护区、潦河省级湿地公园、狮山省级森林公园等重点生态功能区,具有极高的生态保护价值,是江西西北部的重要生态屏障。

2.2 奉新县生态安全格局有效性评价

采用成果对比法将奉新县生态安全格局与奉新县生态保护红线对比以进行有效性评价。奉新县生态保护红线是基于生态系统服务功能重要性与生态敏感性评价划定的,面积共455.86 km²,占区域总面积的27.65%(图4b)。现行生态保护红线斑块较为破碎,景观连通性低,部分重点生态功能区仍未纳入红线中。相较于生态保护红线,此次构建的生态安全格局面积共498.43 km²,占县域总面积的30.23%,较红线面积略高2.58%,两者空间重合率达78.47%。基于ArcGIS 10.2与Conefor Sensinode 2.6软件,定量分析两者

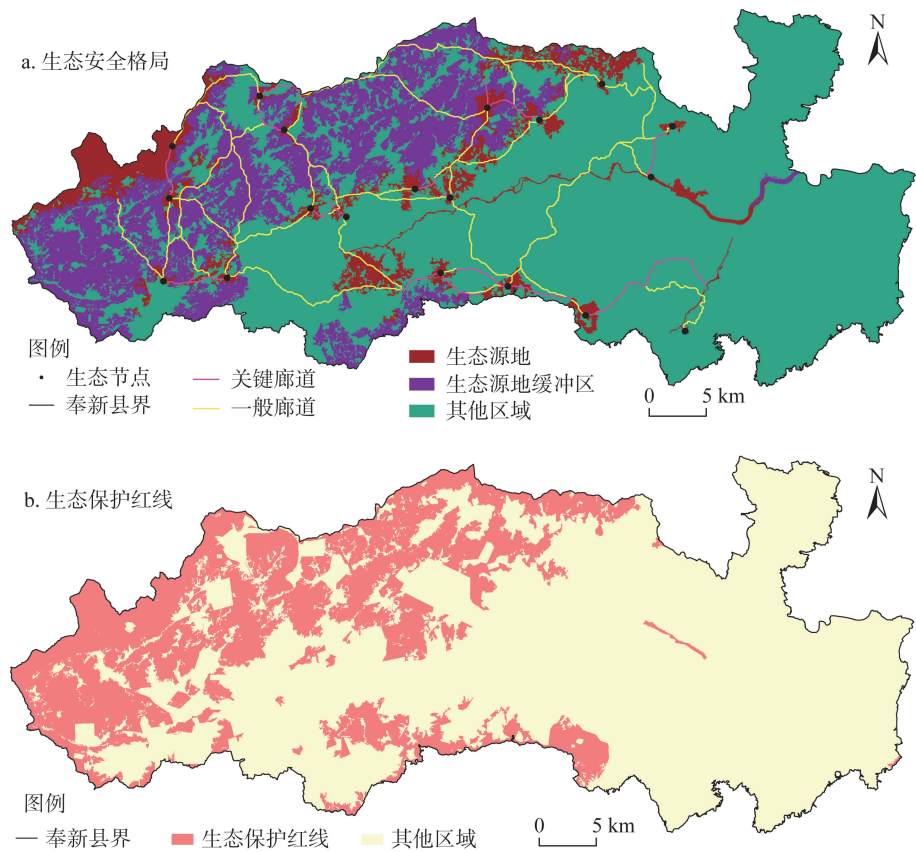


图4 生态安全格局与生态保护红线

Fig. 4 Ecological security pattern and ecological red line

在斑块数量、与自然保护地重合率、景观连通性间的差异，结果见表6。对比发现，生态安全格局的斑块数量远低于红线斑块数量，与自然保护地重合率较红线提高了37.38%，各斑块PC指数与dI指数均值均显著高于生态保护红线，景观连通性显著提升。通过构建生态安全格局识别出了奉新县生境质量高、生态系统连通性好的生态节点、生态廊道以及生态源地等区域，可实现奉新县生态环境的点、线、面多层次空间要素的系统性保护。

通过数据分析与实地踏勘发现，当前奉新县生态保护红线中仍存在高强度的开发性、生产性建设活动，与城镇开发边界、农村居民点、矿业权用地、人工商品林等区域均存在冲突，面积共计42 km²，占红线总面积的9.21%，严重影响了生态保护红线的科学性与权威性，不利于当地经济的协调发展与居民生活的安居乐业。而调研发现，受历

表6 成果对比

Table 6 Comparison between results

对比类型	总面积/km ²	斑块数量/个	占县域总面积比例/%	与自然保护地重合率/%	各斑块PC指数均值	各斑块dI指数均值
生态保护红线	455.86	61	27.65	51.93	0.17	0.21
生态安全格局	498.43	14	30.23	89.31	0.40	0.69

史和地形等因素的影响,奉新县的农村居民点空间上呈“小集中、大分散”的分布模式,为保障村民居住的和谐安稳,扣除生态安全格局中的农村居民点;为充分保障采矿权人与商品林林权人的合法权益,确保其开采采伐行为不受红线的刚性管控,扣除生态安全格局中的矿业权与人工商品林用地;为顺应多规融合趋势,实现生态保护与社会经济发展的协调兼顾,扣除生态安全格局与城镇开发边界、永久基本农田、允许建设区的冲突区。此次构建的生态安全格局经过与人类活动冲突区的梳理过程,已不含高强度的开发建设活动,更能提升民生福祉,促进奉新县社会经济的高质量发展,助力乡村振兴。

2.3 奉新县生态保护红线优化设计

本文的生态保护红线优化不是对生态保护红线的重新划定,而是针对现有生态保护红线暴露出的矛盾加以梳理,提出基于原红线划定成果的优化解决方案。基于此,先扣除奉新县生态保护红线中仍存在的 42 km² 的高强度开发建设区域,然后择取生态安全格局中尚未划入红线的区域,作为此次生态保护红线评估优化的补划区,确保其优化后生态功能不降低、面积不减少、性质不改变。这些区域经过验证,生态资源丰富且具有极高的生态保护价值,与奉新县的各类规划已充分衔接,可作为生态保护红线补划的首选区域。

生态源地及其缓冲区和生态保护红线现存开发建设活动的梳理过程显示,人工商品林是占比最大的冲突区域,分别占各自总扣除面积的 59.67% 和 62.40%。商品林同时具有商品资源与生态资源属性,此次优化基于保障商品林经营人权益的需求,将人工商品林扣除。但与此同时,商品林作为生态资源,具有涵养水源、防风固沙等生态系统服务功能,其生态效益亦不容忽视。故择取梳理时被扣除人工商品林中可与周边保护区集中连片的部分区域,作为生态保护红线的储备区,为生态保护红线未来的调整预留弹性空间。对于生态保护红线储备区的管护,应以人为本,充分保障商品林林权人的权益。借鉴近年来国家推行的重点生态区位商品林赎买等改革试点经验^[40],对储备区内的商品林进行赎买、改造提升、置换等实践探索,通过政府适度干预,提升生态保护红线储备区的生境质量,也兼顾商品林经营者的切身利益,化解奉新县生态保护与林权保障间的矛盾。同时,可依托良好的生态资源优势,大力发展森林生态旅游等生态产业,筑牢绿色发展基础。

优化后的奉新县生态保护红线方案由生态节点、一般生态廊道、关键生态廊道、调整后的生态保护红线、生态保护红线补划区、生态保护红线储备区构成,后三者的面积分别为 413.86 km²、132.46 km²、66.88 km²,占奉新县总面积的比例分别为 25.10%、8.03%、4.01%,空间分布如图 5 所示。设立的 132.46 km² 的生态保护红线补划区,从数量和质量上均完全满足不低于 42 km² 的生态保护红线补划需求,可由政府决策部门结合各村镇生态保护与社会经济发展的需要再圈定具体的补划区域,具有较高的空间自主选择弹性,能够满足决策部门灵活自主、协调多方的管理决策需要。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文基于南方山地丘陵区典型县奉新县的区域特色,运用 InVEST 和 MCR 模型,构建奉新县生态安全格局,识别出奉新县高生境质量的空间结构要素;对已构建的生态安

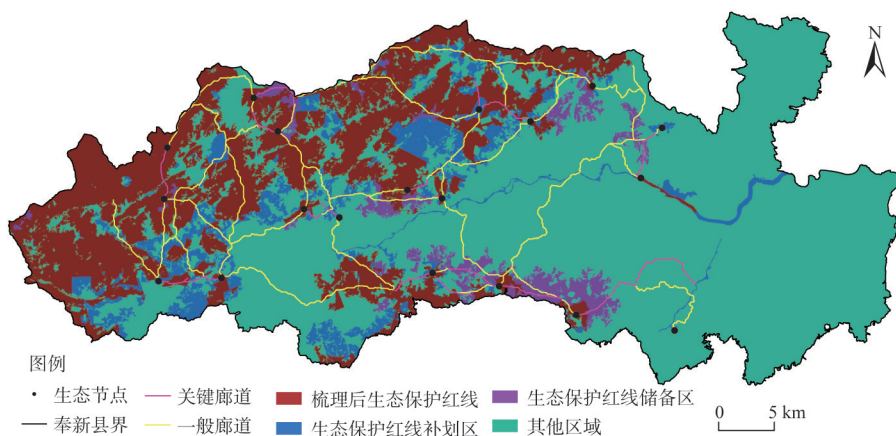


图5 生态保护红线优化方案

Fig. 5 Optimal layout of ecological red line

全格局进行有效性评价,验证其合理性,基于构建成果提出奉新县生态保护红线优化的布局方案。主要结论有:(1)生态源地及生态源地缓冲区面积分别为144.42 km²与354.01 km²,分别占奉新县总面积的8.76%与21.47%,主要分布在奉新县的西北侧和西南侧;(2)识别出生态节点19个,关键生态廊道76 km,一般生态廊道315 km,主要分布在奉新县西部和中部的山地丘陵区,生态廊道经由生态节点交织成网,与生态源地、生态源地缓冲区共同构成了奉新县生态安全格局,面积共计498.43 km²,占奉新县总面积的30.23%,主要集中于奉新县的西部山地丘陵区;(3)经有效性评价,从定量和定性分析两个角度验证了生态安全格局的景观连通性、与自然保护地重合率以及同社会经济发展的协调性均高于现有生态保护红线,更具生态优化意义;(4)基于生态安全格局构建结果,设计生态保护红线优化方案,并设立生态保护红线补划区与储备区,共为生态保护红线调整优化预留了199.34 km²的高质量后备生态资源。

3.2 讨论

优化生态保护红线是顺应新时代多规融合趋势、推进国土空间高效管理与生态文明建设的重要举措,生态安全格局的构建能够明晰区域生境质量高的空间要素,为生态保护红线的优化提供重要的空间参考。针对南方山地丘陵区林地占比大且集中连片分布的区域特色,如何在发挥好农产品主产区功能且协调好经济发展的同时保障区域生态安全,科学细致地识别出研究区内最具生态保护价值的区域,是当前该区域生态保护红线优化工作面临的首要问题。本文基于InVEST模型,并未直接将林地作为生境类型之一进行生境质量评价,而是对比研究区主要林种的生态效益差异,进一步细化奉新县林地类型,针对不同类型的林地分别设置适宜的生境得分值,从而识别出符合研究区实际的高生境质量的空间要素。基于MCR模型进一步构建奉新县的生态安全格局,进而提出决策自主、协调灵活的生态保护红线优化方案,能够有效保障优化后生态保护红线质量的提升,并为生态保护红线未来的调整优化储备高质量后备生态资源,确保奉新县生态环境管护的可持续性;同时也能为南方山地丘陵区生态保护红线评估优化提供科学参考,推进南方山地丘陵区国土空间开发与保护的进程。然而,囿于研究区高强度的开发建设活动主要集中于东部平原地带,本文对东部平原农产品主产区的生态环境保护研究尚显不

足,应在下一步的研究中,增强对城镇村与耕地广布的平原地区生态环境保护的研究;此外,受现有数据限制本文仅以行政边界为研究界线,未能考虑研究区所处自然地理空间的完整性,对研究区与邻近区域间的空间相关性与连续性的探讨存在空白,在后续的研究中应进一步探讨如何破解行政边界带来的局限性,以期生态保护红线的优化提供更加丰富科学的实践参考。

参考文献(References):

- [1] 张天勇,季海波. 70年来生态文明中国道路的演进历程及其历史经验. 理论探讨, 2019, (6): 11-16. [ZHANG T Y, JI H B. The evolution and historical experience of ecological civilization in China in the past 70 years. Theoretical Investigation, 2019, (6): 11-16.]
- [2] 张雪飞,王传胜,李萌. 国土空间规划中生态空间和生态保护红线的划定. 地理研究, 2019, 38(10): 2430-2446. [ZHANG X F, WANG C S, LI M. Demarcating ecological space and ecological protection red line under the framework of territory spatial planning. Geographical Research, 2019, 38(10): 2430-2446.]
- [3] 高吉喜,徐德琳,乔青,等. 自然生态空间格局构建与规划理论研究. 生态学报, 2020, 40(3): 749-755. [GAO J X, XU D L, QIAO Q, et al. Pattern construction of natural ecological space and planning theory exploration. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(3): 749-755.]
- [4] 傅丽华,莫振淳,彭耀辉,等. 湖南茶陵县域生态空间网络稳定性识别与重构策略. 地理学报, 2019, 74(7): 1409-1419. [FU L H, MO Z C, PENG Y H, et al. Stability identification and reconstruction strategy of ecological space network at the county scale: A case study of Chaling county, Hunan province. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(7): 1409-1419.]
- [5] 王成新,万军,于雷,等. 基于生态网络格局的城市生态保护红线优化研究: 以青岛市为例. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(s1): 9-14. [WANG C X, WAN J, YU L, et al. Research on the optimization of urban ecological redline based on ecological network pattern: Taking Qingdao as an example. China Population, Resources and Environment, 2017, 27(s1): 9-14.]
- [6] 傅强,顾朝林. 基于生态网络的生态安全格局评价. 应用生态学报, 2017, 28(3): 1021-1029. [FU Q, GU C L. Delineation of ecological security pattern based on ecological network. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(3): 1021-1029.]
- [7] 刘洋,蒙古军,朱利凯. 区域生态安全格局研究进展. 生态学报, 2010, 30(24): 6980-6989. [LIU Y, MENG J J, ZHU L K. Progress in the research on regional ecological security pattern. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(24): 6980-6989.]
- [8] 韩宗伟,焦胜,胡亮,等. 廊道与源地协调的国土空间生态安全格局构建. 自然资源学报, 2019, 34(10): 2244-2256. [HAN Z W, JIAO S, HU L, et al. Construction of ecological security pattern based on coordination between corridors and sources in national territorial space. Journal of Natural Resources, 2019, 34(10): 2244-2256.]
- [9] 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.]
- [10] 陈星,周成虎. 生态安全: 国内外研究综述. 地理科学进展, 2005, 24(6): 8-20. [CHEN X, ZHOU C H. Review of the studies on ecological security. Progress In Geography, 2005, 24(6): 8-20.]
- [11] 余珮珩,冯明雪,刘斌,等. 顾及生态安全格局的流域生态保护红线划定及管控研究: 以云南杞麓湖流域为例. 湖泊科学, 2020, 32(1): 89-99. [YU P H, FENG M X, LIU B, et al. Demarcation and administration of watershed ecological protection red line considering the ecological security pattern: A case of the Qilu Lake Watershed, Yunnan province. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(1): 89-99.]
- [12] 方莹,王静,黄隆扬,等. 基于生态安全格局的国土空间生态保护修复关键区域诊断与识别: 以烟台市为例. 自然资源学报, 2020, 35(1): 190-203. [FANG Y, WANG J, HUANG L Y, et al. Determining and identifying key areas of ecosystem preservation and restoration for territorial spatial planning based on ecological security patterns: A case study of Yantai city. Journal of Natural Resources, 2020, 35(1): 190-203.]
- [13] 杜腾飞,齐伟,朱西存,等. 基于生态安全格局的山地丘陵区自然资源空间精准识别与管制方法. 自然资源学报, 2020, 35(1): 190-203.

- 2020, 35(5): 1190-1200. [DU T F, QI W, ZHU X C, et al. Precise identification and control method of natural resources space based on ecological security pattern in mountainous hilly area. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(5): 1190-1200.]
- [14] 杨天荣, 匡文慧, 刘卫东, 等. 基于生态安全格局的关中城市群生态空间结构优化布局. *地理研究*, 2017, 36(3): 441-452. [YANG T R, KUANG W H, LIU W D, et al. Optimizing the layout of eco-spatial structure in Guanzhong Urban Agglomeration based on the ecological security pattern. *Geographical Research*, 2017, 36(3): 441-452.]
- [15] 徐文彬, 尹海伟, 孔繁花. 基于生态安全格局的南京都市区生态控制边界划定. *生态学报*, 2017, 37(12): 4019-4028. [XU W B, YIN H W, KONG F H. Development of ecological control boundaries in Nanjing metropolis district based on ecological security patterns. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(12): 4019-4028.]
- [16] LIU S, WU S, WANG H. Managing planted forests for multiple uses under a changing environment in China. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 2014, 44(1): S3, Doi: 10.1186/1179-5395-44-S1-S3.
- [17] 王治国, 张超, 孙保平, 等. 全国水土保持区划概述. *中国水土保持*, 2015, (12): 12-17. [WANG Z G, ZHANG C, SUN B P, et al. Overview of China soil and water conservation division. *Soil and Water Conservation in China*, 2015, (12): 12-17.]
- [18] 张磊, 吴炳方, 李晓松, 等. 基于碳收支的中国土地覆被分类系统. *生态学报*, 2014, 34(24): 7158-7166. [ZHANG L, WU B F, LI X S, et al. Classification system of China land cover for carbon budget. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(24): 7158-7166.]
- [19] 吴健生, 张理卿, 彭建, 等. 深圳市景观生态安全格局源地综合识别. *生态学报*, 2013, 33(13): 4125-4133. [WU J S, ZHANG L Q, PENG J, et al. The integrated recognition of the source area of the urban ecological security pattern in Shenzhen. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(13): 4125-4133.]
- [20] NELSON E, MENDOZA G, REGETZ J, et al. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2009, 7(1): 4-11.
- [21] SHARP R, CHAPLIN-KRAMER R, WOOD S, et al. InVEST User's Guide. 2019.
- [22] 褚琳, 张欣然, 王天巍, 等. 基于CA-Markov和InVEST模型的城市景观格局与生境质量时空演变及预测. *应用生态学报*, 2018, 29(12): 4106-4118. [CHU L, ZHANG X R, WANG T W, et al. Spatial-temporal evolution and prediction of urban landscape pattern and habitat quality based on CA-Markov and InVEST model. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(12): 4106-4118.]
- [23] 刘园, 周勇, 杜越天. 基于InVEST模型的长江中游经济带生境质量的时空分异特征及其地形梯度效应. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(10): 2429-2440. [LIU Y, ZHOU Y, DU Y T. Study on the spatio-temporal patterns of habitat quality and its terrain gradient effects of the middle of the Yangtze River Economic Belt based on InVEST model. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(10): 2429-2440.]
- [24] 钟莉娜, 王军. 基于InVEST模型评估土地整治对生境质量的影响. *农业工程学报*, 2017, 33(1): 250-255. [ZHONG L N, WANG J. Evaluation on effect of land consolidation on habitat quality based on InVEST model. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(1): 250-255.]
- [25] 郝月, 张娜, 杜亚娟, 等. 基于生境质量的唐县生态安全格局构建. *应用生态学报*, 2019, 30(3): 1015-1024. [HAO Y, ZHANG N, DU Y J, et al. Construction of ecological security pattern based on habitat quality in Tang county, Hebei, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(3): 1015-1024.]
- [26] 余蓉, 项文化, 宁晨, 等. 长沙市4种人工林生态系统碳储量与分布特征. *生态学报*, 2016, 36(12): 3499-3509. [YU R, XIANG W H, NING C, et al. Carbon storage and sequestration in four urban forest ecosystems in Changsha, Hunan. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(12): 3499-3509.]
- [27] 彭建, 郭小楠, 胡熠娜, 等. 基于地质灾害敏感性的山地生态安全格局构建: 以云南省玉溪市为例. *应用生态学报*, 2017, 28(2): 627-635. [PENG J, GUO X N, HU Y N, et al. Constructing ecological security patterns in mountain areas based on geological disaster sensitivity: A case study in Yuxi city, Yunnan province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(2): 627-635.]
- [28] 张玉虎, 李义禄, 贾海峰. 永定河流域门头沟区景观生态安全格局评价. *干旱区地理*, 2013, 36(6): 1049-1057. [ZHANG Y H, LI Y L, JIA H F. Constructing landscape ecological security pattern in Yongding River Watershed: A case of Mengtougou Basin, Beijing. *Arid Land Geography*, 2013, 36(6): 1049-1057.]

- [29] 张豆, 渠丽萍, 张桀漓. 基于生态供需视角的生态安全格局构建与优化: 以长三角地区为例. 生态学报, 2019, 39(20): 7525-7537. [ZHANG D, QU L P, ZHANG J H. Ecological security pattern construction method based on the perspective of ecological supply and demand: A case study of Yangtze River Delta. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(20): 7525-7537.]
- [30] 史志华, 杨洁, 李忠武, 等. 南方红壤低山丘陵区水土流失综合治理. 水土保持学报, 2018, 32(1): 6-9. [SHI Z H, YANG J, LI Z W, et al. Soil conservation in the hilly red soil region of Southern China. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(1): 6-9.]
- [31] 李建军, 苏志珠, 王言荣. 基于 GIS 的万荣县生态敏感性评价与区划. 中国农业资源与区划, 2014, 35(5): 48-54. [LI J J, SU Z Z, WANG Y R. Study on the ecological sensitivity evaluation and regionalization in Wanrong county based on GIS. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2014, 35(5): 48-54.]
- [32] 李益敏, 管成文, 朱军. 基于 GIS 的星云湖流域生态敏感性评价. 水土保持研究, 2017, 24(5): 266-271. [LI Y M, GUAN C W, ZHU J. GIS-based ecological sensitivity analysis in Xingyun Lake Basin. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(5): 266-271.]
- [33] 朱强, 俞孔坚, 李迪华. 景观规划中的生态廊道宽度. 生态学报, 2005, 25(9): 2406-2412. [ZHU Q, YU K J, LI D H. The width of ecological corridor in landscape planning. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(9): 2406-2412.]
- [34] KNAAPEN J P, SCHEFFER M, HARMS B. Estimating habitat isolation in landscape planning. *Landscape and Urban Planning*, 1992, 23(1): 1-16.
- [35] 朱敏, 谢跟踪, 邱彭华. 海口市生态用地变化与安全格局构建. 生态学报, 2018, 38(9): 3281-3290. [ZHU M, XIE G Z, QIU P H. Ecological land use change and construction of ecological land security pattern in Haikou city. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(9): 3281-3290.]
- [36] 黄木易, 岳文泽, 冯少茹, 等. 基于 MCR 模型的大别山核心区生态安全格局异质性及优化. 自然资源学报, 2019, 34(4): 771-784. [HUANG M Y, YUE W Z, FENG S R, et al. Analysis of spatial heterogeneity of ecological security based on MCR model and ecological pattern optimization in the Yuexi county of the Dabie Mountain Area. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(4): 771-784.]
- [37] THIELE J, KELLNER S, BUCHHOLZ S, et al. Connectivity or area: what drives plant species richness in habitat corridors?. *Landscape Ecology*, 2018, 33(2): 173-181.
- [38] 蒙古军, 王雅, 王晓东, 等. 基于最小累积阻力模型的贵阳市景观生态安全格局构建. 长江流域资源与环境, 2016, 25(7): 1052-1061. [MENG J J, WANG Y, WANG X D, et al. Construction of landscape ecological security pattern in Guiyang based on MCR model. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(7): 1052-1061.]
- [39] SAURA S, TORNÉ J. Conefor sensinode 2.2: A software package for quantifying the importance of habitat patches for landscape connectivity. *Environmental Modelling & Software*, 2009, 24(1): 135-139.
- [40] 洪燕真, 戴永务. 福建省重点生态区位商品林赎买改革优化策略研究. 林业经济, 2019, 41(1): 92-97. [HONG Y Z, DAI Y W. Study on optimization strategy of redemption reform of commercial forest in key ecological areas of Fujian province. *Forestry Economics*, 2019, 41(1): 92-97.]

Optimization of ecological red line in the hilly region of Southern China based on InVEST and MCR model

LI Yi^{1,2}, ZHAO Xiao-min^{1,2}, GUO Xi^{1,2}, ZHOU Bing-juan^{1,2}, HUANG Xin-yi^{1,2},
YI Dan^{1,2}, DING Hui^{1,2}

(1. College of Land Resources and Environment, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China;

2. Key Laboratory of Poyang Lake Watershed Agricultural Resources and Ecology of Jiangxi Province,
Nanchang 330045, China)

Abstract: Optimizing the ecological red line is an important measure to comply with the multi-regulation integration trend in the New Era and promote efficient management of land and space as well as the construction of ecological civilization. Fengxin, a typical county in the mountainous and hilly areas of southern China, was taken as the study area. Based on InVEST model, the study carried out habitat quality evaluation to identify ecological sources and ecological source buffer zones. The basic resistance surface was modified by the sensitivity of soil and water loss. The ecological security pattern of the study area was constructed by MCR model. The effectiveness of ecological security pattern was analyzed qualitatively and quantitatively, and then an optimization scheme for ecological red line was proposed. Results showed that: (1) The areas of the ecological sources and buffer zones were 144.42 km² and 354.01 km², respectively, accounting for 8.76% and 21.47% of the region's total area, and 19 ecological nodes were identified. (2) A total of 76 km key ecological corridors and 315 km general ecological corridors were identified, together with ecological nodes, ecological source areas, and ecological source buffer zones, thus the ecological security pattern of the study area was formed. The area of ecological security pattern was 498.43 km², accounting for 30.23% of the total area, which was mainly distributed in the mountainous and hilly areas of Western Fengxin county. (3) The effectiveness evaluation confirms that the ecological security pattern is more ecologically optimized than the ecological protection red line. (4) The supplementary regions and reserve region of ecological red line were demarcated, and 199.34 km² of high-quality reserve resources have been reserved for the adjustment and optimization of the ecological red line, which is an ecological red line optimization scheme for the study area. This study provides a reference case for the evaluation and optimization of the ecological red line in the mountainous and hilly region of Southern China.

Keywords: ecological red line; ecological security pattern; InVEST model; MCR model; mountainous and hilly region of Southern China