

引用格式: 曾兴兰, 陈田田. 基于生态系统服务供需的贵州省生态安全网络构建与优化[J]. 山地学报, 2023, 41(4): 493-507.

ZENG Xinglan, CHEN Tiantian. Construction and optimization of ecological security network in Guizhou province of China based on ecosystem services supply and demand [J]. Mountain Research, 2023, 41(4): 493-507.

基于生态系统服务供需的贵州省生态安全网络构建与优化

曾兴兰^a, 陈田田^{a,b*}

(重庆师范大学 a. 三峡库区地表过程与环境遥感重庆市重点实验室; b. 三峡库区地表生态过程野外科学观测研究站, 重庆 401331)

摘要: 贵州喀斯特地区生态本底条件脆弱、生态问题频发, 严重制约了区域可持续发展。构建合理的生态安全网络对保障生态环境健康、促进社会-经济可持续发展意义重大。当前针对喀斯特生态安全网络构建的研究多强调生态系统服务的最大输出, 忽视了社会-生态系统的相互联系和制约关系, 导致构建的生态安全网络总体效果欠佳。基于此, 本文以贵州省为例, 依据生态系统服务总供给、供需关系界定生态斑块, 并结合景观连通性以及重要生态斑块的数量和面积识别生态源地, 筛选合适指标构建生态阻力面, 通过最小累积阻力模型和重力模型生成生态廊道, 并选出重要的生态节点, 构建区域生态安全网络; 在此基础上, 结合生态保护与修复规划, 提出区域生态安全格局优化策略。结果显示: (1) 基于生态系统服务供需和景观连通性, 共识别出研究区 23 个生态源地, 面积为 $3.42 \times 10^4 \text{ km}^2$, 以林草地和耕地的景观类型为主, 其中大型生境斑块主要分布在研究区东南部和北部。(2) 构建了 31 条一级生态廊道和 34 条二级生态廊道, 廊道总长度为 $8.75 \times 10^4 \text{ km}$; 识别出生态节点共 78 个, 沿廊道分布于各区县。(3) 为加强盲区生态建设, 在西部新增五处生态源地辐射区, 生态源地辐射区面积为 $9.37 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。同时, 根据本文研究及区域相关规划, 提出了“一带两轴三区多中点”的生态安全格局优化策略。本研究可为贵州省生态保护及区域生态安全提供科学参考。

关键词: 生态系统服务供需; 景观连通性; 生态安全网络; 优化; 贵州省

中图分类号: X321

文献标志码: A

喀斯特生态系统是全球陆地生态系统的重要组成部分, 也是全球碳循环的重要组成部分和关键环节, 具有强大的碳汇功能^[1]。同时, 喀斯特生态系统具有稳定性弱、环境容量小、抗干扰能力差的特征, 具有高度的敏感性和脆弱性^[2]。贵州省作为中国喀斯特地貌的典型分布区, 区内土层浅薄、持水能力弱, 具有明显的地上、地下二元结构^[3]。人类活动加剧了当地生态环境的脆弱性。加强区域生态修复、构

建区域生态安全网络, 对促进喀斯特地区生态安全建设具有重要意义。

关于贵州喀斯特地区生态安全网络的研究主要集中于两个方面: 一是生态安全网络构建; 二是生态安全网络优化。就生态安全网络构建而言, 基本上形成了“源地—阻力面—廊道”的研究框架。其中, 源地识别主要是选择生境质量较好的林草地或水域作为生态源地^[4]; 在阻力面构建上, 通常是对综合

收稿日期 (Received date): 2023-02-07; 改回日期 (Accepted date): 2023-08-11

基金项目 (Foundation item): 重庆市教委社科规划项目 (2020BS45)。[Social Science Planning Program of Chongqing Municipal Education Commission (2020BS45)]

作者简介 (Biography): 曾兴兰 (1997-), 女, 四川成都人, 硕士研究生, 主要研究方向: 土地利用与生态系统服务响应。[ZENG Xinglan (1997-), female, born in Chengdu, Sichuan province, M. Sc. candidate, research on land use and ecosystem service response] E-mail: 2021110514079@stu.cqnu.edu.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): 陈田田 (1989-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向: 土地利用变化与生态响应。[CHEN Tiantian (1989-), female, Ph. D., associate professor, research on land use change and ecological response] E-mail: chentiantian@cqnu.edu.cn

阻力面赋值所得^[5],也有采用不透水表面指数^[6]、灯光数据^[7]等对阻力面进行修正;生态廊道提取的方法有最小累积阻力模型^[8]和电路理论^[9]。在生态安全网络优化上,主要方法有泰森盲区多边形^[10]、力导向布局算法^[11]、元胞自动机^[12]等,具体措施有保护核心生态源地^[13]、建设踏脚石^[14]、增添新廊道^[15]等。整体来看,上述研究为区域生态安全网络构建和优化提供了重要的理论支撑和方法来源,生态系统服务也成为了生态安全网络构建和优化的主要媒介。然而,此类研究多强调生态系统服务的供给能力,对生态系统服务给人类福祉带来的贡献,以及物种扩散、迁移的畅通性涉及较少。实际上,依据生态安全的系统属性,其既应包括经济、环境等多个方面,又应反映各维度之间的作用联系^[16]。作为连接自然-社会系统的桥梁,生态系统服务供需为确保生态可持续和人类需求的满足提供了可操作路径,有必要将其纳入到生态安全网络构建中^[17]。

本文以贵州省为例,依据“源地—阻力面—廊道”的范式,将生态系统服务供需关系纳入到重要斑块识别中,并结合斑块数量和面积、景观连通性识别生态源地,通过综合指标构建阻力面,借助重力模型和最小阻力模型筛选生态廊道,构建贵州省生态安全网络;在此基础上,诊断出区域生态网络中存在的问题,对其进行针对性优化,并提出“一带两轴三区多中心”的生态修复方案,以期促进区域经济与生态协调发展。

1 研究区域概况

贵州省地处中国西南部,总面积约 $17.62 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图 1)。属亚热带季风气候,年降水量 1200 mm 左右,年均气温 15°C 左右。贵州省由山地、丘陵、盆地、高原地貌类型组成,由于境内特殊的自然地理特征,促使其发育了世界上最为典型的喀斯特地貌^[18],具有典型的喀斯特生态环境脆弱性。近年来人口数量增加,导致环境承载能力不足,加剧了水土流失、土地荒漠化、生态廊道局部断裂、生物多样性受损等生态环境问题。为此,贵州省提出了“生态优先,绿色发展”的总体目标,而生态安全网络的构建为保证区域生态安全、生物多样性,推进人与生态和谐共生提供了有力措施。

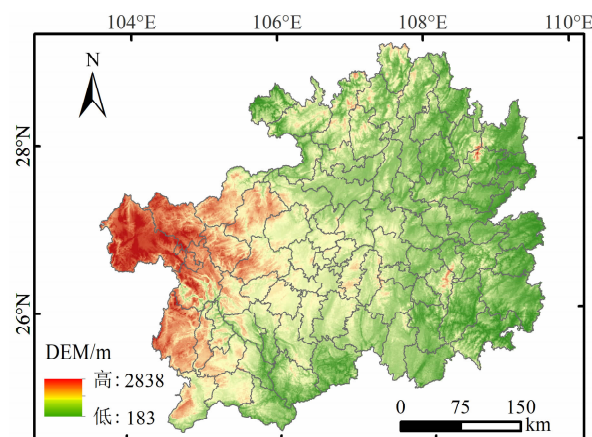


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of study area

2 数据与研究方法

2.1 数据来源与处理

本文的国界、省界、县域边界、河流等基础地理信息数据来源于国家自然资源部 (<https://www.mnr.gov.cn/>);数字高程地形、土地利用类型和归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 均采用中国科学院资源与环境中心提供的数据 (<https://www.resdc.cn/>),DEM 和土地类型空间分辨率为 30 m,NDVI 空间分辨率为 1 km;气象数据来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>),通过 ANUSPLIN 软件进行插值获得了长时间序列逐月的栅格数据 (空间分辨率为 1 km);实际蒸散发数据 (空间分辨率为 0.1°) 来源于国家青藏高原科学数据中心 (<http://data.tpdc.ac.cn/>);土壤数据来源于兰州寒区旱区科学数据中心《基于世界土壤数据库 (HWSD) 的中国土壤数据集》 (<http://data.casnw.net/>);植被净初级生产力 (Net Primary Productivity, NPP) 采用美国航天航空局制备好的空间分辨率为 500 m 的数据 (<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/>);能源排放数据来源于中国能源统计年鉴;粮食、肉类、油料、用水量等数据来源于贵州省统计年鉴和水资源公报;人口密度数据来源世界人口数据网 (<https://landscan.ornl.gov/>)。人均公园绿地使用面积来源于《贵州统计年鉴 2021》,人均面积为 15.38 m^2 。获取 2020 年相关数据后,本文对各类数据的坐标系统、分辨率等进行统一。

2.2 研究方法

2.2.1 生态源地识别

定义生态源地^[19]:①保证高质量的生态功能,

以生态系统服务供给能力表示该维度;②为人类福祉提供可持续的生态系统服务,以综合生态系统供需比表示该维度;③保持景观连通性,维持物种迁移和扩散,以整体连通性和可能连通性指数代表该维度。具体步骤如下:

2.2.1.1 生态系统服务重要性

(1)粮食生产。本文以区域粮食产量的统计数据为基础,结合 NDVI 的空间分布,实现粮食生产的空间表达。其公式如下^[20-21]:

供给:

$$G_x = (NDVI_x / NDVI_{sum}) \times G_{sum} \quad (1)$$

需求:

$$G_{cpx} = D_{percrop} \times p_{xpop} \quad (2)$$

式中, G_x 为栅格粮食服务供给; $NDVI_x$ 为栅格 NDVI 值; $NDVI_{sum}$ 为各区县耕地上 NDVI 值之和; G_{sum} 为食物总产量; G_{cpx} 为栅格粮食需求量; $D_{percrop}$ 为人均粮食消费量; p_{xpop} 为栅格人口密度。

(2)产水服务。基于水量平衡原理,通过计算降水总量与实际蒸散发间的差值来表示区域产水服务。其公式如下^[22]:

供给:

$$Y_x = \left(1 - \frac{AET_x}{P_x}\right) \times P_x \quad (3)$$

需求:

$$D_{wx} = D_{perwater} \times P_{xpop} \quad (4)$$

式中, Y_x 为产水服务供给量; AET_x 为栅格年实际蒸发量; P_x 为栅格年降水量; D_{wx} 为栅格产水服务需求量; $D_{perwater}$ 为人均用水量,具体为农业、工业、生活和生态用水量。

(3)植被净初级生产力。基于 MRT (Modis Reprojection Tool) 软件,对 NPP 数据进行处理得到研究区植被净初级生产力。人均碳排放量基于贵州省年煤炭、原油、天然气的消耗总量,乘以相应的碳排放系数^[23]。其公式如下:

供给:

$$NPP/45\% \times 1.63 \quad (5)$$

需求:

$$D_{cx} = D_{percarbon} \times p_{xpop} \quad (6)$$

式中, D_{cx} 为栅格 x 的碳固定服务需求量; $D_{percarbon}$ 为人均碳排放量。

(4)土壤保持服务。基于 InVEST 模型中的 SDR (Sediment Delivery Ratiomodel) 模块计算土壤

保持服务^[24]。其公式如下:

供给:

$$SEDRET_x = RKLS_x - USLE_x \quad (7)$$

$$RKLS_x = R \times K \times LS \quad (8)$$

需求:

$$USLE_x = R \times K \times LS \times C \times P \quad (9)$$

式中, $SEDRET_x$ 为栅格 x 的土壤保持量; $RKLS_x$ 和 $USLE_x$ 分别为栅格 x 的土壤潜在侵蚀量和土壤实际侵蚀量; R 为降雨侵蚀因子^[25]; K 为土壤侵蚀因子; LS 为地形因子; P 为水土保持因子; C 为植被覆盖因子。

(5)游憩服务。本文参考相关研究^[26],将林地、草地、水体等能够提供休闲游憩服务的土地利用类型定义为生态用地,以栅格内生态用地表征供给量。人均公园绿地使用面积乘以人口数量表征需求量,其公式如下:

供给:

$$S_{rec} = A_{rec-grid} / A_{grid} \quad (10)$$

需求:

$$D_{rec} = P_{xpop} \times park_{per} \quad (11)$$

式中, S_{rec} 为游憩服务供给量; $A_{rec-grid}$ 为每个栅格中的生态用地面积; A_{grid} 为栅格的面积; D_{rec} 为游憩服务需求量; P_{arkper} 为人均公园绿地使用面积。

(6)生态系统服务供需比。反映区域生态系统服务供需的匹配关系总体情况。其公式如下^[27]:

$$ESDR_x = \frac{S_x - D_x}{S_x + D_x} \quad (12)$$

$$CESD = \frac{1}{n} \sum_x^n ESDR_x \quad (13)$$

式中, $ESDR_x$ 为栅格生态系统服务供需比; S_x 为生态系统服务实际供给量; D_x 为生态系统服务实际需求量; $CESD$ 为综合生态供需比; n 为五类生态系统服务。

2.2.1.2 识别生态源地

首先对生态系统服务供给进行归一化处理,并通过叠加分析得到贵州省生态系统服务综合供给量的空间分布,考虑到综合供给量和综合生态供需比,提取其值前 1/3 的高值区作为重要生态区域。同时,考虑到生态源应具有足够的规模才确保生态功能的稳定性以及整体连通性,于是通过分段线性回归找到生态斑块面积阈值为 10 km²,剔除小面积的生态斑块,并结合景观连通性指数界定了重要生态斑块。最后叠加贵州省国家级重点生态功能区分

布,确定了生态源地。

景观连通性在决定生态斑块对维持景观中生态过程的完整性、生态功能的稳定性和生物多样性等方面有重要作用^[28]。连通性指数包括整体连通性(IIC)和可能连通性(PC)指数。

$$\text{Ecolog icaisource} = (\text{Supply} > 1/3) \cap (\text{CESDR} > 1/3) \quad (14)$$

$$IIC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{a_i \times a_j}{1 + nl_{ij}}}{A_L^2} \quad (15)$$

$$PC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_{ij}^* \times a_i \times a_j}{A_L^2} \quad (16)$$

式中, $\text{Supply} > 1/3$, $\text{CESDR} > 1/3$ 表示前 1/3 的区域; n 为区域斑块的总数; a_i 和 a_j 分别为 i j 斑块的面积; nl_{ij} 为 i 和 j 两斑块间的连接数量; P_{ij}^* 为物种在 i 和 j 两斑块间扩散的最大概率; A_L 为整个景观面积。

2.2.2 阻力面设定

阻力面描述了景观中物种迁移的困难,反映了生态过程中的障碍,生态过程流动更容易通过低阻力区域。本文综合现有研究成果和贵州省现状^[29-30]设置阻力面,选取土地利用、高程、坡度、主要道路、归一化植被指数、岩性为主要阻力因子;对各阻力因子的权重主要采用层次分析法所得。本文构建的阻力体系如表 1 所示。

2.2.3 廊道提取

最小累积阻力模型(Minimum Cumulative Resistance, MCR)是计算物种在景观阻力面上从源点运动到目标地消化最少能量流和物质流的路径,即为物种在两地间迁移扩散的最优路径。其公式如下^[31]:

$$MCR = f_{\min} \sum_{j=n}^{i=m} (D_{ij} \times R_i) \quad (17)$$

式中, MCR 为最小累积阻力值; f 为 MCR 与变量间($D_{ij} \times R_i$)正相关关系; D_{ij} 为物种从源地 j 扩散到景观单元 i 的距离; R_i 为斑块 i 的阻力系数。

重力模型通过计算源地间的相互作用强度定量评价廊道的重要性,以减小物种迁移过程的生态阻力。本文通过该模型得到源地间的相互作用力,由此筛选出重要的生态廊道。其公式如下^[32]:

$$G_{ab} = \frac{N_a N_b}{N_{ab}^2} = \frac{\left(\frac{1}{P_a} \times \ln S_a\right) \left(\frac{1}{P_b} \times \ln S_b\right)}{\left(\frac{L_{ab}}{L_{\max}}\right)} = \frac{L_{\max}^2 \ln(S_a S_b)}{L_{ab}^2 P_a P_b} \quad (18)$$

式中, G_{ab} 为两斑块间的相互作用力; N_a 、 N_b 分别为两斑块的权重值; N_{ab} 为两斑块间的潜在廊道阻力值; P_a 、 P_b 分别为两斑块的阻力值; S_a 、 S_b 分别为两斑块的面积; L_{ab} 为两斑块间的廊道累计阻力值; L_{\max} 为廊道的最大阻力值。

2.2.4 生态网络结构分析

网络分析方法是衡量区域物质循环、能量流动等生态功能联系程度的工具。其网络闭合度(α 指数)在 $[0,1]$ 、线点率(β 指数)在 $[0,3]$,数值越大表明网络结构越复杂、生态效能越好。公式如下^[33]:

$$\alpha = (n - m + 1) / (2m - 5) \quad (19)$$

$$\beta = n / m \quad (20)$$

式中, n 为廊道数; m 为节点数。

3 结果分析

3.1 生态源地的空间格局

3.1.1 生态系统服务重要性的空间格局

就贵州省五类服务的供给而言(图 2),粮食供

表 1 生态阻力评价体系表

Tab. 1 Evaluation system of ecological resistance

阻力因子	阻力赋值	土地利用	坡度/(°)	高程/m	归一化植被指数	主要道路/m	岩性
阻力值	1	草地	0 ~ 5.21	183 ~ 714	0.77 ~ 0.92	200 000 ~ 300 000	非碳酸盐岩
	20	林地	5.21 ~ 10.83	714 ~ 1245	0.63 ~ 0.77	100 000 ~ 200 000	—
	60	耕地	10.83 ~ 16.15	1245 ~ 1776	0.49 ~ 0.63	50 000 ~ 100 000	碳酸盐岩类非碳酸盐岩
	80	水域	16.15 ~ 21.62	1776 ~ 2307	0.34 ~ 0.49	25 000 ~ 50 000	—
	100	建设用地	21.62 ~ 26.79	2307 ~ 2838	0.13 ~ 0.34	0 ~ 25 000	碳酸盐岩
权重	1	0.24	0.13	0.21	0.15	0.11	0.16

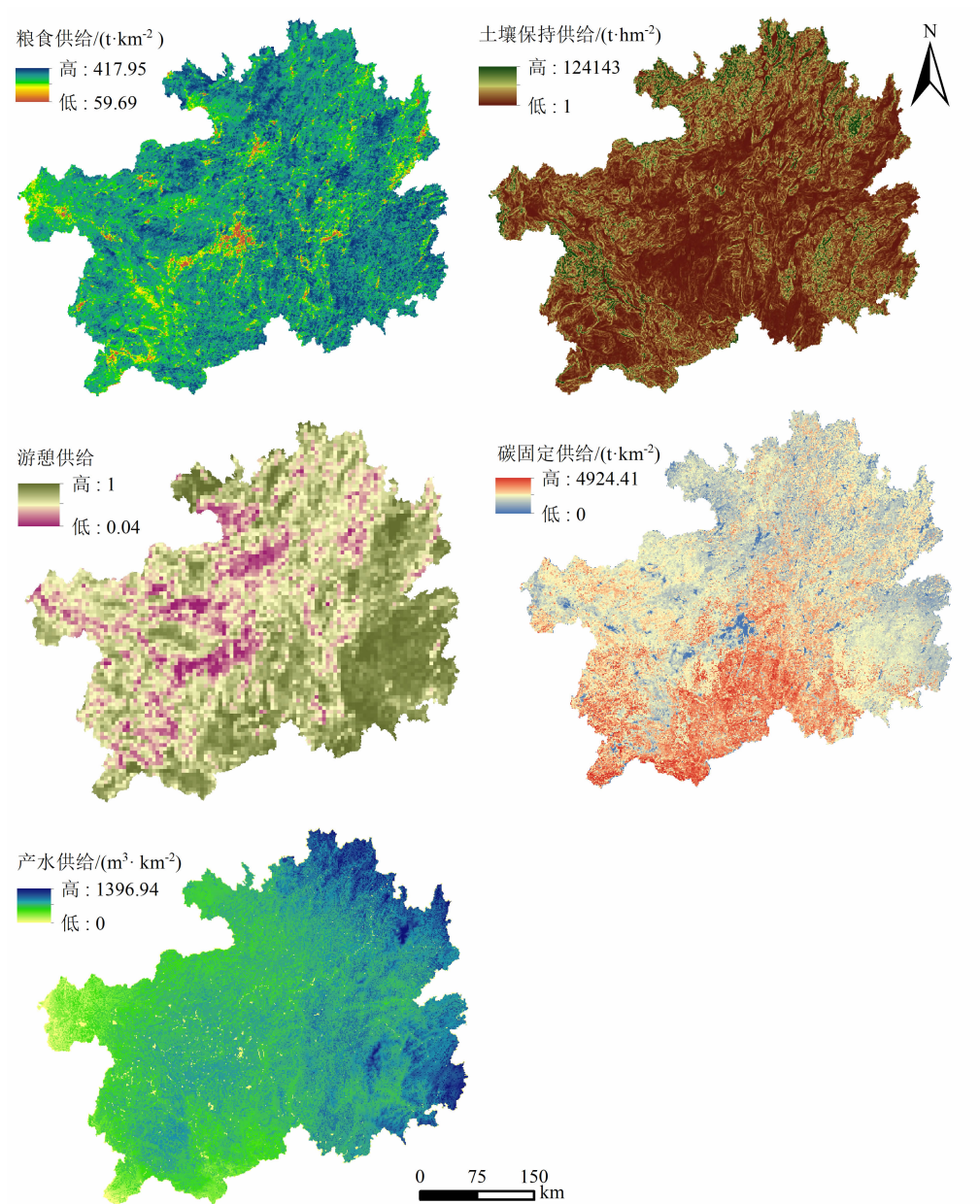


图 2 研究区生态系统服务供给空间格局

Fig. 2 Spatial pattern of ecosystem services supply in the study area

给高值区主要分布在四周平坦开阔的地区,低值区分布于中部地区;产水供给呈南北高中部低的格局;碳固定的高值区主要分布在研究区南部,低值区分布在中部以及北部;土壤保持供给呈南北高、中间低的格局;游憩服务供给高值区分布在东部以及南部,低值区分布在研究区中部。从图 3 可知,综合生态系统服务高供给分布在北部和东南部,低供给主要分布在遵义市中心和贵阳市中心。从图 4 可知,综合生态系统服务总供给值分布在 0 ~ 2000 的区县有 7 个,占比为 7.95%;总供给值在 2000 ~ 5000 的区

县有 34 个区县,占比为 38.64%;总供给值大于 5000 的区县共是 47 个,占比 53.41%。可见,大多数区县的综合生态系统服务供给能力处于中等偏上水平。

粮食需求、用水需求、碳固定需求、游憩需求的高值区分布在贵州省中部以及西部人口密集区,低值区分布在人口较分散的区域;土壤保持需求的高值区分布在西南部和北部,低值区分布在中部(图 5)。可见,生态系统服务需求的空间布局与人口分布较相似。

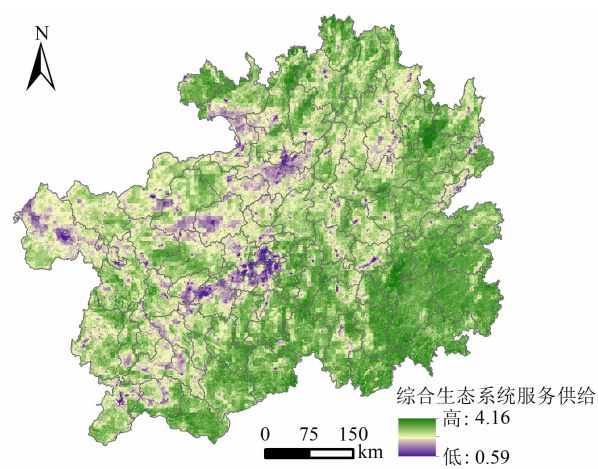


图 3 研究区综合生态系统服务供给空间格局

Fig. 3 Spatial pattern of integrated ecosystem services in the study area

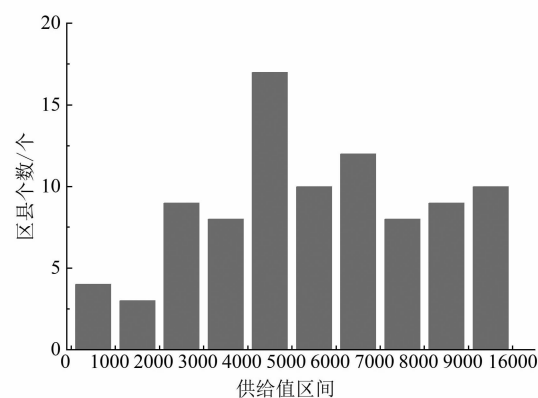


图 4 生态系统服务供给值的分布区间

Fig. 4 Distribution range of ecosystem services supply value

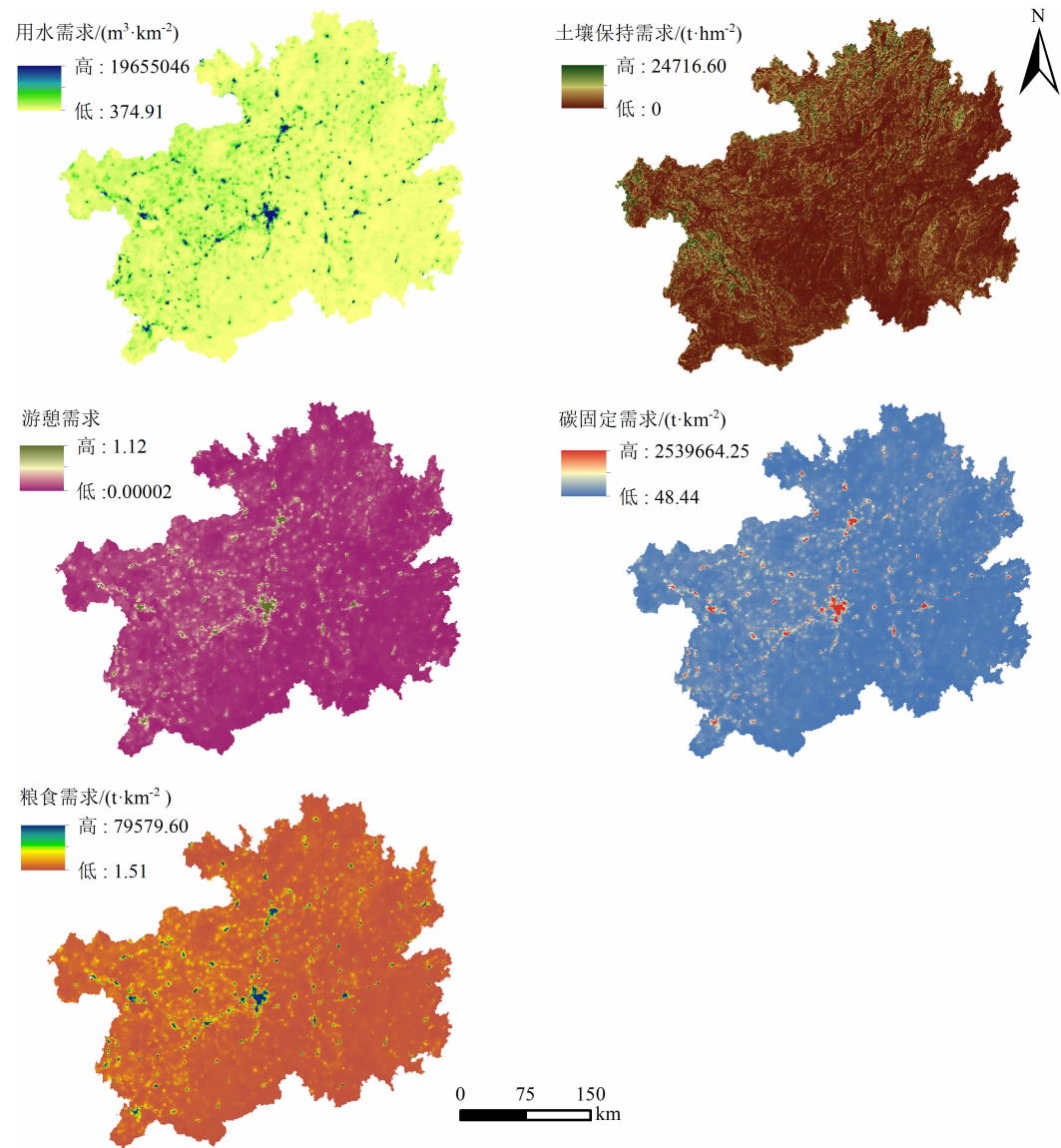


图 5 研究区生态系统服务需求空间格局

Fig. 5 Spatial pattern of ecosystem services demand in the study area

贵州省生态系统服务的供需比呈现明显的空间差异(图6)。在北部和东南部地区,人口密度小、植被覆盖率高、生态系统服务高供给和低需求使得生态供需比大。在中部和西部的部分地区,建设用地区比大,人口密度高,低供给和高需求使得生态供需比小。整体上供大于求,表明生态系统服务基本能满足需求,但局部矛盾突出。

3.1.2 生态源地

得到综合供给能力和生态供需比交集的高值区后,以面积 2 km² 为步长,统计生态斑块小于面积阈值的个数和总面积(图7)。剔除小于面积阈值 10 km² 的生态斑块,结合景观连通性识别了 20 个重要生态斑块(表2)。

研究区最终确定了 23 个生态源地(图8),总面积为 3.42 × 10⁴ km²,主要分布在研究区东南部和北部。研究区东南部生态源地集中连片,表明这些区域生态服务能力强、景观连通性好;而北部生态源地数量少且斑块面积较小,表明这些区域生态服务能力较弱、景观连通性较差。同时,从生态源地所占地类可知(表3),源地主要为林地、草地、耕地三类景观类型;其中,草地面积共 5.16 × 10³ km²,约占源地总面积 15.09%;耕地面积共 5.54 × 10³ km²,约占源地总面积 16.21%;林地面积共 2.23 × 10⁴ km²,约占源地总面积 67.96%。

3.2 阻力面和生态廊道的空间格局

3.2.1 阻力面

从构建的生态阻力面可得(图9),阻力值为 7.49 ~ 82.93,高值区主要集中在中部和西部,普遍

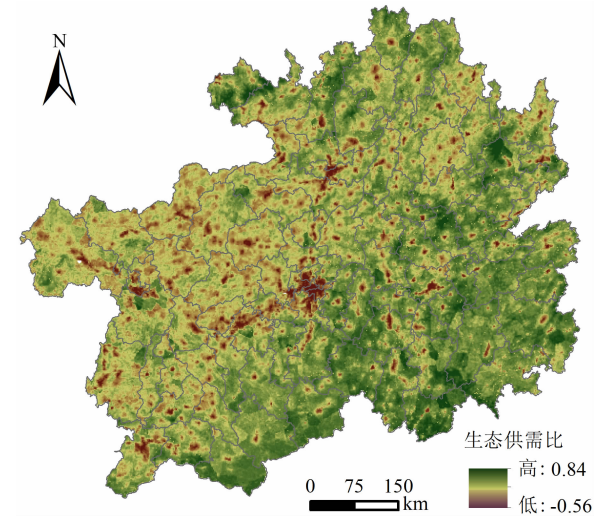


图6 研究区生态系统服务供需比

Fig. 6 Supply-demand ratio of ecosystem services in the study area

表2 景观连通性指数

Tab. 2 Landscape connectivity index

斑块序号	重要性指数	整体连通性指数	斑块序号	重要性指数	整体连通性指数
1	0.03	0.03	11	1.59	1.57
2	0.02	0.02	12	0.01	0.01
3	0.17	0.17	13	1.71	0.88
4	0.09	0.09	14	2.19	2.12
5	0.02	0.02	15	1.50	0.77
6	0.15	0.15	16	1.43	1.45
7	0.01	0.01	17	0.01	0.01
8	0.01	0.01	18	0.08	0.08
9	0.11	0.06	19	97.27	97.28
10	0.32	0.33	20	0.49	0.50

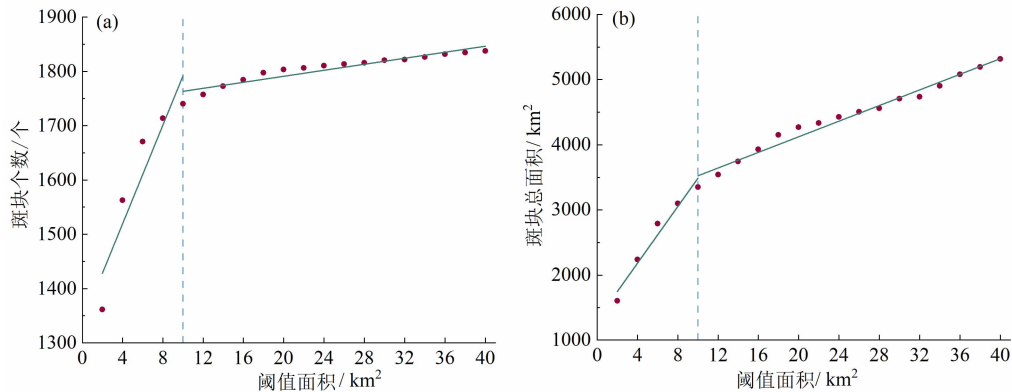


图7 面积小于阈值的生态斑块个数和总面积的变化:

(a) 面积小于阈值的生态斑块个数;(b) 面积小于阈值的生态斑块总面积

Fig. 7 Change of the number and total area of ecological patches with the area less than the threshold: (a) The number of ecological patches with an area less than the threshold; (b) The total area of ecological patches with an area less than the threshold

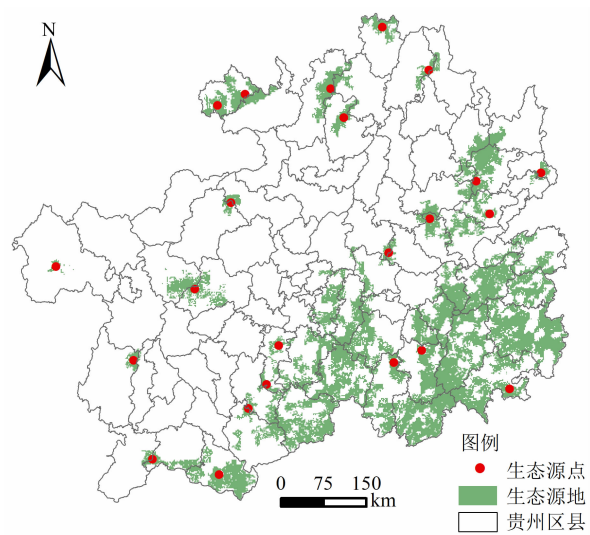


图 8 研究区生态源地分布

Fig. 8 Distribution of ecological sources in the study area

表 3 生态源地景观要素面积及占比

Tab. 3 Ecological source landscape elements area and proportion

类型	总面积/km ²	面积占比/%
耕地	5543	16.21
林地	23 243	67.96
草地	5160	15.09
水域	109	0.32
建设用地	96	0.28
未利用地	49	0.14

为城镇化率高,交通相对便捷的地区;低值区主要分布在南部和东部地区,该区生境质量好,人类活动强度较弱。

3.2.2 生态廊道

研究区最小成本路径共计 253 条,结合重力模型对廊道重要性进行筛选,避开主要的城镇建设用地,筛选出一级廊道共 31 条,占廊道总数的 12.25%,廊道总长度为 3.04×10^4 km;二级廊道共 34 条,占廊道总数的 13.44%,廊道总长度为 5.71×10^4 km。生态廊道分布密度总体北部和东南部高、西部低,中部无廊道分布(图 10)。

3.2.3 生态节点

生态节点在生态网络中有踏脚石作用。本文参考相关文献^[34],在廊道与廊道的交叉处选取 36 个节点、廊道的薄弱处选取 18 个节点、廊道与较大阻力景观的交界处选取 24 个节点,共计 78 个生态节点,主要沿着生态廊道分布于各区县。就贵州省生

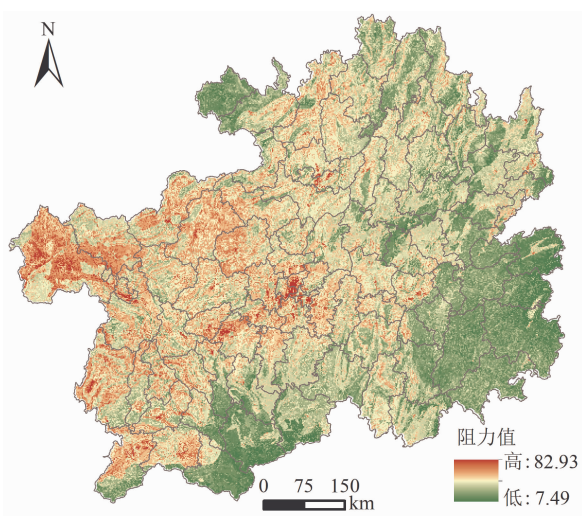


图 9 研究区生态阻力面

Fig. 9 Ecological resistance surface of the study area

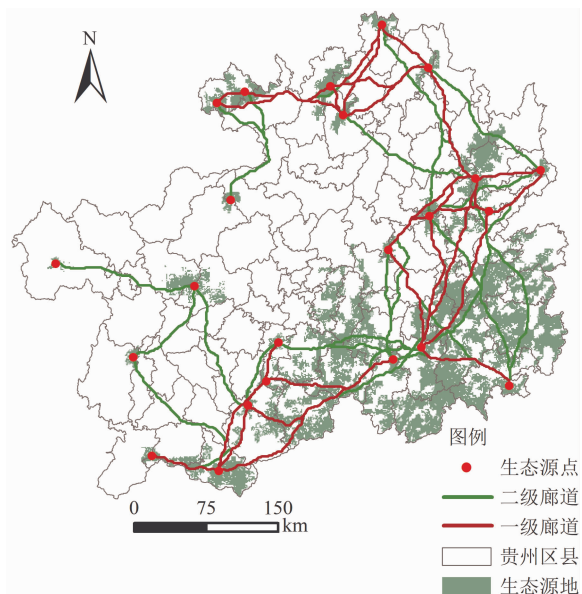


图 10 研究区生态廊道

Fig. 10 Ecological corridors of the study area

态安全网络而言(图 11),研究区北部和东南部的生态网络分布集中,西部以及中部几乎没有,生态网络分布极不均衡。一旦北部和东南部地区发生生境破碎、生态破坏等现象时,物种将无法迁移,进而威胁整个生态系统平衡。

3.3 生态安全网络优化

以生态源点为中心,设置 8 km 宽度建立缓冲区^[35],作为生态源地的辐射区(图 12)。贵州省生态源地影响范围约为 8.71×10^4 km²,占总面积的 49.43%;未被生态源地辐射区影响的原始生态盲区主要集中于中部和西部,面积约为 8.91×10^4 m²,占

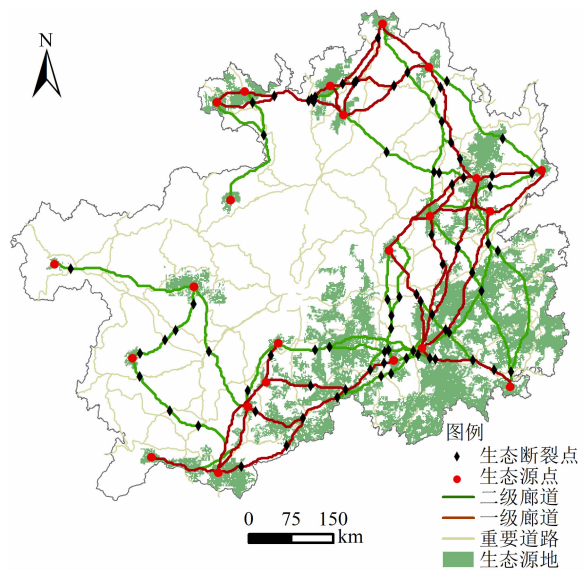


图 11 研究区生态安全网络

Fig. 11 Ecological security network of the study area

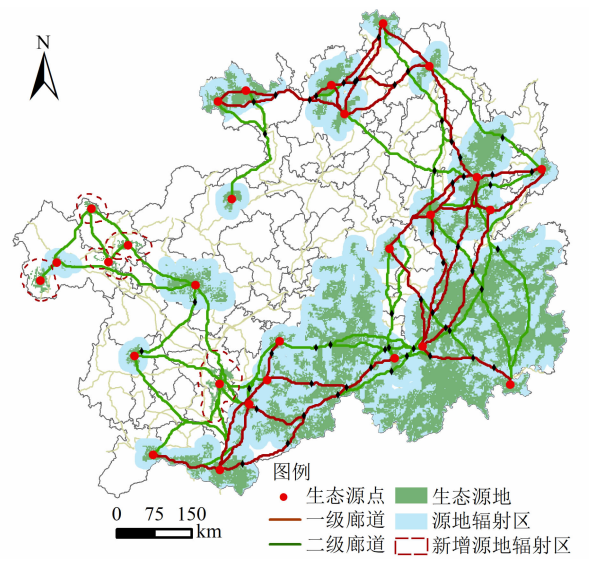


图 13 研究区生态安全网络优化

Fig. 13 Optimization of ecological security network of the study area

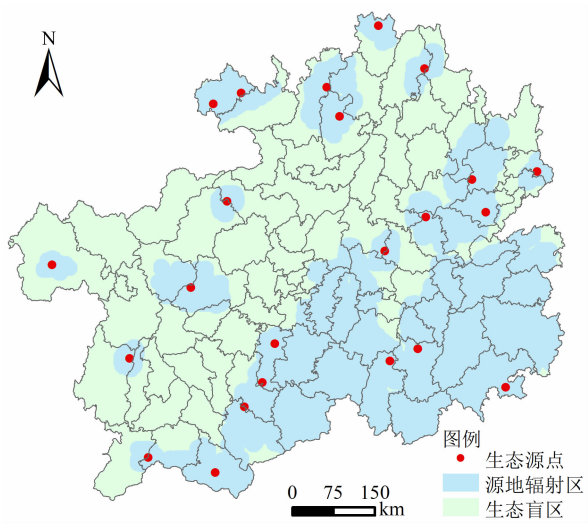


图 12 研究区生态源地辐射区

Fig. 12 Ecological source radiation area of the study area

总面积的 50.57%。为优化生态盲区,需新增生态源地建立缓冲区。结合生态供需比、贵州省“十四五”文化和旅游发展规划中的重点功能区,在西部新增五处生态源地以辐射周围盲区,主要分布在毕节市和安顺市。优化后的生态源地辐射面积为 $9.37 \times 10^4 \text{ km}^2$,以新增生态源点和原有源点为基础,构建了 12 条规划生态廊道,得到优化后的生态网络(图 13),优化后的生态源地总面积比现有增加 $1.08 \times 10^3 \text{ km}^2$ 。且优化后的生态网络闭合度、连接度较之前的生态安全网络有了大幅提升(表 4),表

表 4 优化前后生态安全网络性能评价表

Tab. 4 Evaluation results of ecological security network before and after optimization

时期	α	β
变化前	0.83	2.50
变化后	0.90	2.68

明优化后的生态安全网络整体循环和流通较好。

基于生态供需比和生态安全网络,结合《贵州省国土空间生态修复规划》《贵州省“十四五”新型城镇化发展规划》,提出贵州省“一带两轴三区多中心”生态安全格局优化方案(图 14)。

一带:一带为重要生态廊道带,该廊道带处于贵州省生态源地集中区,生境质量好且物种丰富,规划目的是为了增强区域物种迁移和能量流动的连通性。

两轴:一轴为南北盘江流域生态保护与修复轴,因流域内河网密度大,水源涵养能力强,规划目的是为了保护植被覆盖对水源涵养的能力,并修复北盘江下游的石漠化;另一轴为连接南北方向生态源地的生态轴,规划目的是为了维持生态过程的连续性。

城镇建设区:包括贵阳-安顺-贵安、遵义两大核心都市圈。该区作为贵州省政治-经济-文化中心,在贵州省的社会发展中发挥核心支撑作用。区域内人口密度大、城镇化率高、经济发达,也由此成为研

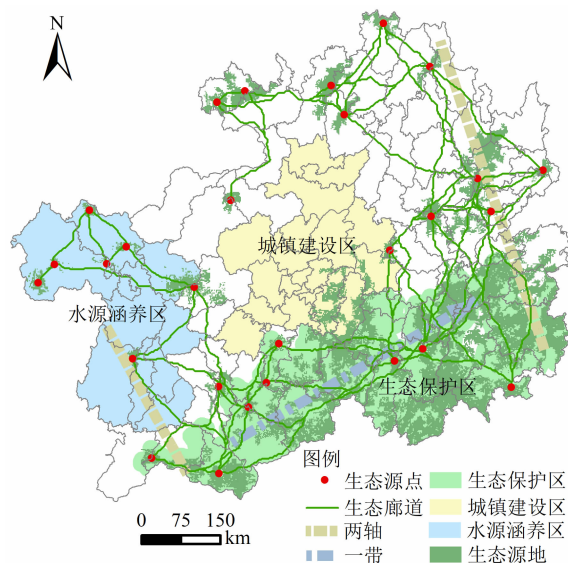


图 14 研究区生态安全格局

Fig. 14 Ecological security pattern of the study area

究区生态系统服务供给能力相对薄弱的地区。同时,城市基础设施、交通道路等建设可能会加重生态廊道被截断、割裂,进而影响物种迁移和生态平衡。因此,合理控制城市建设向外扩张的规模和速度,并考虑建设公园、规划绿地等景观要素构筑绿化屏障,推进该地区生态环境与经济的协调发展。

水源涵养区:从西部岩溶高原地貌向南延伸至峰丛洼地地貌,包括钟山区、水城区、织金县、纳雍县等区县。因高耸的地势和高海拔山地,该区有生态屏障的作用,同时也是乌江、南北盘江源头区。然而,区域地势险峻陡峭、严重的石漠化和频繁的人类活动,生态环境易受到破坏。因此,要尽可能减少人类活动影响,按照“山水林田湖草沙”理念,对万峰湖、光照湖、草海等湿地生态系统开展保护修复工程,并沿河湖岸线构筑生态缓冲带。

生态保护区:该区主要分布在贵州省南部和东南部,由西到东呈连片分布,包括册亨县、荔波县、平塘县、望谟县等区县。区域自然生态环境较好,是贵州省生态源地、廊道集中分布区。该区丰富的林地资源能提供的生态系统服务潜力巨大,综合生态系统服务供需表现为高度盈余的特征,尤其体现在水资源、碳固定和土壤保持等方面。因此,该区可以发挥自身优势,着重发展绿色产业,形成的紧密网络连接周围的生态源地,优化生态环境,

多中心:为生态源地的中心,是生态网络中的重

要组成部分。多中心作为贵州省生态安全格局中的生态源地,为生物流动起着踏脚石的作用。因此需加强对生态环境的重点管控,有效提升区域环境质量。

4 讨论与结论

4.1 讨论

4.1.1 本文生态源地识别方法的优越性

生态源地是在生态安全网络中发挥关键作用的自然区域,不仅要具有较高的栖息地质量、维持景观连通性能力,而且要具有为人类社会提供生态系统服务的能力^[36]。基于此,本文将生态系统服务供需关系、景观连通性及区域重点生态功能区共同纳入到生态源地识别中。在生态系统服务的选取上,本文选择了产水服务、碳固定、粮食生产、土壤保持、游憩五类服务,主要是基于以下原因:首先,五类服务对维持人类生存和发展、缓解气候变化和提高人类福祉等方面具有重要作用,在很多研究已得到了证实^[37]。其次,贵州省有较大规模的水土流失,土壤肥力受到严重影响,针对水土流失严重的区域,土壤保持功能对区域生态保护十分重要;同时,作为退耕还林还草工程的重点试验区,碳固定是衡量贵州省植被生态系统生长状态的重要指标^[38]。最后,优越的自然气候和人文环境造就了贵州省独特的自然、人文景观,生态旅游业已成为区域重要的经济支撑,游憩服务对区域可持续发展意义重大。相较于传统生态源地识别的方法^[39],本文加入生态系统服务供需后充分体现了社会-生态系统的紧密关联,是对传统方法的补充。实际上,生态源地的识别是不同时空尺度上的自然生态和社会文化过程相互作用的结果,因而对其进行描述的评价尺度也多种多样^[40]。其中,在较小尺度上(例如,栅格等)的生态源地识别研究可以揭示更多异质性信息,却很难推广到大尺度^[41];而大尺度的生态源地识别研究可以为全域规划决策提供可操作性路径,却会忽略不同社会-生态子系统间的差异^[42]。本文基于相关研究并结合数据的可获取性,在 1 km 的网格尺度识别了生态源地,与其他研究结果较符合^[43-44];但本文没有着重揭示识别生态源地的最优尺度,以此构建生态安全网络。未来,有必要加强多个空间尺度的生态源地识别的对比研究并进行最优尺度选择,在此尺度下

进行生态安全网络的构建和优化。

4.1.2 本文生态安全格局与《规划》的对比

本文基于构建的生态安全网络,提出了“一带两轴三区多中心”的生态安全格局,再与《贵州省国土空间生态修复规划》(简称《规划》)的“一源一城、两带两区”的生态修复格局进行对比,发现本文提出的城镇建设区具有城镇化率高、人口密度大的特点,与《规划》中的“一城”(黔中城市生态功能区)范围、位置基本相符。同时,本文提出的生态保护区拥有集中成片的生态廊道和生态源地,且区域的水源涵养、土壤保持功能突出,与《规划》中的“两区”(武陵山生物多样性保护区和苗岭生物多样性保护区)较一致。但本文提出的两轴与《规划》中的“两带”(赤水河生态廊道保护区和南部石漠化集中连片区)有一定区别,其主要原因在于:《规划》中是以保护流域与修复石漠化为目的进行的划分;而本文设置两轴是为了加强廊道沿线生态建设,并侧重保护新增源地的建设。同时,本文多中心是在生态源地划定的基础上,对源点进行系统保护与建设的条件下提出的,这与《规划》中生态保护的发展趋势相符合。

4.1.3 局限性及未来研究重点

本研究存在的不足。首先,对贵州省而言,其生物多样性在西南地区乃至全国都具有重要意义。但由于这类服务多以小尺度的调研为主^[45],很难进行大范围的准确估算,未来可以选择合适的方法和模型对这类服务进行精准量化,以实现更综合、准确的生态安全网络构建。同时,相关研究指出生态廊道的宽度会影响物种的迁移^[46],但廊道的适宜宽度设定存在不确定性,后续需结合研究区景观以及区域内物种状况进行深入研究。

4.2 结论

本文以贵州省为研究区,基于“生态源地—阻力面—廊道”的研究方法构建区域生态安全网络,识别出生态安全网络中重点保护与修复的生态区域,并提出生态安全格局修复方案,主要研究结论如下:

(1)贵州省既有的生态源地、廊道和生态节点主要分布于研究区东南部和北部,空间上非对称分布现象明显,且连通过渡区域较少;单纯考虑生态过程的生态安全网络难以反映人类社会带来的影响,需进行针对性优化与调控。

(2)通过新增源地并进行生态盲区修复,区域生态安全网络的闭合度、连接度明显提升,系统稳定性增强;同时,建议实施“一带两轴三区多中心”的区域生态安全格局优化方案,满足了景观生态过程和社会经济增长需求的双向耦合和错位发展。

(3)本文采用自然和社会条件相结合的综合分析视角,为生态安全网络构建提供了多样化的实现路径。未来应进一步完善生态系统服务供需大小、方向及范围的研究、统筹不同尺度的生态安全网络构建,以更好地实现人地关系协调。

参考文献(References)

- [1] ZHANG Xuemei, BRAND M, YUE Yuemin, et al. The carbon sink potential of southern China after two decades of afforestation [J]. *Earth's Future*, 2022, **10**: e2022EF002674. DOI: 10.1029/2022EF002674
- [2] 王鹏, 赵微. 典型喀斯特地区国土空间生态修复分区研究——以贵州猫跳河流域为例[J]. *自然资源学报*, 2022, **37**(9): 2403 – 2417. [WANG Peng, ZHAO Wei. Ecological restoration zoning of territorial space in typical karst region: A case study of Maotiao River Basin in Guizhou [J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, **37**(9): 2403 – 2417] DOI: 10.31497/zrzyxb.20220914
- [3] DONG Jianquan, PENG Jian, XU Zihan, et al. Integrating regional and interregional approaches to identify ecological security patterns [J]. *Landscape Ecology*, 2021, **36**: 2151 – 2164. DOI: 10.1007/s10980-021-01233-7
- [4] 刘伊萌, 杨赛霓, 倪维, 等. 生态斑块重要性综合评价方法研究——以四川省为例[J]. *生态学报*, 2020, **40**(11): 3602 – 3611. [LIU Yimeng, YANG Saini, NI Wei, et al. Comprehensive assessment method on ecological patch importance: A case study in Sichuan province, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(11): 3602 – 3611] DOI: 10.5846/stxb201806231380
- [5] 朱捷, 苏杰, 尹海伟, 等. 基于源地综合识别与多尺度嵌套的徐州生态网络构建[J]. *自然资源学报*, 2020, **35**(8): 1986 – 2001. [ZHU Jie, SU Jie, YIN Haiwei, et al. Construction of Xuzhou ecological network based on comprehensive sources identification and multi-scale nesting [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, **35**(8): 1986 – 2001] DOI: 10.31497/zrzyxb.20200817
- [6] 刘珍环, 王仰麟, 彭建, 等. 基于不透水表面指数的城市地表覆被格局特征——以深圳市为例[J]. *地理学报*, 2011, **66**(7): 961 – 971. [LIU Zhenhuan, WANG Yanglin, PENG Jian, et al. Using ISA to analyze the spatial pattern of urban land cover change: A case study in Shenzhen [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, **66**(7): 961 – 971] DOI: 10.11821/xb201107009
- [7] 彭建, 李慧蕾, 刘焱序, 等. 雄安新区生态安全格局识别与优化策略[J]. *地理学报*, 2018, **73**(4): 701 – 710. [PENG Jian,

- LI Huilei, LIU Yanxu, et al. Identification and optimization of ecological security pattern in Xiong'an New Area [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, **73**(4): 701 – 710] DOI: 10.11821/dlxb201804009
- [8] 李志英, 李媛媛, 李文星, 等. 基于形态学空间格局分析与最小累积阻力模型的昆明市生态安全格局构建研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2023, **39**(1): 69 – 79. [LI Zhiying, LI Yuanyuan, LI Wenxing, et al. Study on the construction of ecological security pattern in Kunming based on MSPA and MCR model [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2023, **39**(1): 69 – 79] DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2022.0211
- [9] 周浪, 李明慧, 周启刚, 等. 基于电路理论的特大山地城市生态安全格局构建——以重庆市都市区为例[J]. *水土保持研究*, 2021, **28**(2): 319 – 325 + 334. [ZHOU Lang, LI Minghui, ZHOU Qigang, et al. Construction of ecological security pattern in very large mountainous city based on circuit theory — taking Chongqing metropolitan area as an example [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, **28**(2): 319 – 325 + 334] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2021.02.041
- [10] 于强, 岳德鹏, YANG Di, 等. 基于 BCBS 模型的生态节点布局优化[J]. *农业机械学报*, 2016, **47**(12): 330 – 336 + 329. [YU Qiang, YUE Depeng, YANG Di, et al. Layout optimization of ecological nodes based on BCBS model [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, **47**(12): 330 – 336 + 329] DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.041
- [11] 苏凯, 岳德鹏, YANG Di, 等. 基于改进力导向模型的生态节点布局优化[J]. *农业机械学报*, 2017, **48**(11): 215 – 221. [SU Kai, YUE Depeng, YANG Di, et al. Layout optimization of ecological nodes based on the improved force-directed model [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, **48**(11): 215 – 221] DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.026
- [12] 张远景, 俞滨洋. 城市生态网络空间评价及其格局优化[J]. *生态学报*, 2016, **36**(21): 6969 – 6984. [ZHANG Yuanjing, YU Binyang. Analysis of urban ecological network space and optimization of ecological network pattern [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(21): 6969 – 6984] DOI: 10.5846/stxb201504270870
- [13] 史娜娜, 韩煜, 王琦, 等. 青海省保护地生态网络构建与优化[J]. *生态学报*, 2018, **37**(6): 1910 – 1916. [SHI Nana, HAN Yu, WANG Qi, et al. Construction and optimization of ecological network for protected areas in Qinghai province [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, **37**(6): 1910 – 1916] DOI: 10.13292/j.1000-4890.201806.006
- [14] 张守法, 李翹, 赵凯茜. 基于生态网络构建的贵阳市绿地景观格局优化研究[J]. *中国园林*, 2022, **38**(5): 68 – 73. [ZHANG Shoufa, LI Chi, ZHAO Kaixi. Green space landscape layout optimization of Guiyang based on ecological network construction [J]. *Chinese Landscape Architecture*, 2022, **38**(5): 68 – 73] DOI: 10.19775/j.cla.2022.05.0068
- [15] 胡炳旭, 汪东川, 王志恒, 等. 京津冀城市群生态网络构建与优化[J]. *生态学报*, 2018, **38**(12): 4383 – 4392. [HU Bingxu, WANG Dongchuan, WANG Zhiheng, et al. Development and optimization of the ecological network in the Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(12): 4383 – 4392] DOI: 10.5846/stxb201801310259
- [16] 郭韩悦阳, 刘嘉伟, 陈春旭, 等. 云南省澜沧江流域自然保护地生态网络构建[J]. *水土保持通报*, 2023, **43**(2): 193 – 201. [GAO Hanyueyang, LIU Jiawei, CHEN Chunxu, et al. Construction of an ecological network for nature reserves in the Lancang River Basin, Yunnan province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, **43**(2): 193 – 201] DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20230425.001
- [17] 黄智洵, 王飞飞, 曹文志. 耦合生态系统服务供求关系的生态安全格局动态分析——以闽三角城市群为例[J]. *生态学报*, 2018, **38**(12): 4327 – 4340. [HUANG Zhixun, WANG Feifei, CAO Wenzhi. Dynamic analysis of an ecological security pattern relying on the relationship between ecosystem service supply and demand: A case study on the Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou city cluster [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(12): 4327 – 4340] DOI: 10.5846/stxb201802260391
- [18] 高家勇, 李瑞, 杨坪坪, 等. 贵州省土壤可蚀性 K 值空间分布特征及主要影响因子[J]. *水土保持研究*, 2022, **29**(5): 77 – 84. [GAO Jiayong, LI Rui, YANG Pingping, et al. Spatial distribution characteristics and main influencing factors of soil erodibility K values in Guizhou province [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, **29**(5): 77 – 84] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2022.05.017
- [19] PENG Jian, PAN Yajing, LIU Yanxu, et al. Linking ecological degradation risk to identify ecological security patterns in a rapidly urbanizing landscape [J]. *Habitat International*, 2018, **71**: 110 – 124. DOI: 10.1016/j.habitatint.2017.11.010
- [20] 陈田田, 黄强, 王强. 基于生态系统服务供需关系的成渝城市群生态安全分区识别[J]. *山地学报*, 2022, **40**(5): 727 – 740. [CHEN Tiantian, HUANG Qiang, WANG Qiang. Ecological security zoning identification of the Chengdu-Chongqing urban agglomeration based on supply-demand relation of ecosystem services [J]. *Mountain Research*, 2022, **40**(5): 727 – 740] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000707
- [21] 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[J]. *地理学报*, 2021, **76**(11): 2780 – 2796. [ZHAO Xueyan, MA Pingyi, LI Wenqing, et al. Spatiotemporal changes of supply and demand relationships of ecosystem services in the Loess Plateau [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, **76**(11): 2780 – 2796] DOI: 10.11821/dlxb202111013
- [22] 陈田田, 王钰茜, 曾兴兰, 等. 西南地区生态系统服务关系特征及其与植被覆盖的约束效应[J]. *生态学报*, 2023, **43**(6): 2253 – 2270. [CHEN Tiantian, WANG Yuxi, ZENG Xinglan,

- et al. Characteristics and the constraint relationship between ecosystem services and vegetation coverage in the Southwest China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43**(6): 2253 – 2270] DOI: 10.5846/stxb202204080915
- [23] 伍丹, 朱康文, 张晟, 等. 基于 PLUS 模型和 InVEST 模型的成渝经济区碳储量演化分析[J]. 三峡生态环境监测, 2022, **7**(2): 85 – 96. [WU Dan, ZHU Kangwen, ZHANG Sheng, et al. Evolution analysis of carbon stock in Chengdu-Chongqing Economic Zone based on PLUS model and InVEST model [J]. *Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges*, 2022, **7**(2): 85 – 96] DOI: 10.19478/j.cnki.2096-2347.2022.02.10
- [24] 高娜, 原野, 赵艺芳. 基于生态系统服务供需的农牧交错带流域生态修复分区——以桑干河上游为例[J]. 环境工程技术学报, 2023, **13**(3): 1214 – 1222. [GAO Yuan, YUAN Ye, ZHAO Yifang. Ecological restoration zoning in farming-grazing transitional zone based on the supply and demand of ecosystem services: A case study of the upper Sanggan River [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, **13**(3): 1214 – 1222] DOI: 10.12153/j.issn.1674-991X.20220387
- [25] WISCHMEIER W H, SMITH D D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning [J]. Washington DC: USDA, 1978(537): 285 – 291.
- [26] CHEN Junyu, JIANG Bo, BAI Yang, et al. Quantifying ecosystem services supply and demand shortfalls and mismatches for management optimization [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **650**: 1426 – 1439. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.126
- [27] 张蓬涛, 刘双嘉, 周智, 等. 京津冀地区生态系统服务供需测度及时空演变[J]. 生态学报, 2021, **41**(9): 3354 – 3367. [ZHANG Pengtao, LIU Shuangjia, ZHOU Zhi, et al. Supply and demand measurement and spatio-temporal evolution of ecosystem services in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(9): 3354 – 3367] DOI: 10.5846/stxb202006101511
- [28] 王雪然, 万荣荣, 潘佩佩. 太湖流域生态安全格局构建与调控——基于空间形态学-最小累积阻力模型[J]. 生态学报, 2022, **42**(5): 1968 – 1980. [WANG Xueran, WAN Rongrong, PAN Peipei. Construction and adjustment of ecological security pattern based on MSPA-MCR model in Taihu Lake Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(5): 1968 – 1980] DOI: 10.5846/stxb202103020571
- [29] 李怡欣, 李菁, 陈辉, 等. 基于 MSPA 和 MCR 模型的贵阳市 2008—2017 年景观连通性评价与时空特征[J]. 生态学杂志, 2022, **41**(6): 1240 – 1248. [LI Yixin, LI Jing, CEHN Hui, et al. Landscape connectivity evaluation and temporal-spatial characteristics of Guiyang city from 2008 to 2017 based on MSPA and MCR models [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, **41**(6): 1240 – 1248] DOI: 10.13292/j.1000-4890.202206.020
- [30] CHEN Liding, FU Bojie, ZHAO Wenwu. Source-sink landscape theory and its ecological significance [J]. *Frontiers of Biology in China*, 2008, **3**(2): 131 – 136. DOI: 10.1007/s11515-008-0026-x
- [31] 陈小平, 陈文波. 鄱阳湖生态经济区生态网络构建与评价[J]. 应用生态学报, 2016, **27**(5): 1611 – 1618. [CHEN Xiaoping, CEHN Wenbo. Construction and evaluation of ecological network in Poyang Lake Eco-economic Zone, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(5): 1611 – 1618] DOI: 10.13287/j.1001-9332.201605.016
- [32] 曾真, 艾婧文, 王梓凌, 等. 三明市区景观格局时空演变及生态网络构建研究[J]. 生态与农村环境学报, 2023, **39**(7): 1 – 13. [ZENG Zhen, AI Jingwen, WANG Ziling, et al. Research on the spatial and temporal evolution of landscape pattern in Sanming urban area and the construction of ecological network [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2023, **39**(7): 1 – 13] DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2022.1013
- [33] 陈瑾, 赵超超, 赵青, 等. 基于 MSPA 分析的福建省生态网络构建[J]. 生态学报, 2023, **43**(2): 603 – 614. [CHEN Jin, ZHAO Chaochao, ZHAO Qing, et al. Construction of ecological network in Fujian province based on morphological spatial pattern analysis [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43**(2): 603 – 614] DOI: 10.5846/stxb202107101863
- [34] 牛腾, 岳德鹏, 张启斌, 等. 潜在生态网络空间结构与特性研究[J]. 农业机械学报, 2019, **50**(8): 166 – 175. [NIU Teng, YUE Depeng, ZHANG Qibin, et al. Spatial structure and characteristics of potential ecological networks [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2019, **50**(8): 166 – 175] DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.019
- [35] 毛源远, 张正栋, 董剑彬, 等. “水—能源—粮食”视角下粤港澳大湾区生态安全格局的构建及优化[J]. 热带地理, 2022, **42**(2): 328 – 338. [MAO Yuanyuan, ZHANG Zhengdong, DONG Jianbin, et al. Construction and optimization of ecological security pattern in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from the perspective of “water-energy-food” [J]. *Tropical Geography*, 2022, **42**(2): 328 – 338] DOI: 10.13284/j.cnki.rddl.003440
- [36] 王海云, 匡耀求, 文薪荐, 等. 粤港澳大湾区生态网络构建及廊道优化[J]. 中国环境科学, 2022, **42**(5): 2289 – 2298. [WANG Haiyun, KUANG Yaoqiu, WEN Xinjian, et al. Study on ecological network construction and corridor optimization in Guangdong, Hong Kong and Macao Greater Bay Area [J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(5): 2289 – 2298] DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20220112.017
- [37] ZHAO Yuhao, WANG Na, LUO Yuhang, et al. Quantification of ecosystem services supply-demand and the impact of demographic change on cultural services in Shenzhen, China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022 (304): 114280. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.114280
- [38] 唐玉芝, 邵全琴, 曹巍, 等. 基于物质质量评估的贵州南部地区

- 生态系统服务及其县域差异比较[J]. 地理科学, 2018, **38**(1): 122 – 134. [TANG Yuzhi, SHAO Quanqin, CAO Wei, et al. The ecosystem services and its spatial variation at countyscale in the southern Guizhou based on physical assessment method [J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, **38**(1): 122 – 134] DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2018.01.014
- [39] 王贝, 刘纯青. 基于 MSPA 与 MCR 的生态网络构建与优化——以吉安市吉州区为例[J]. 环境保护科学, 2021, **47**(5): 37 – 43. [WANG Bei, LIU Chunqing. Construction and optimization of ecological network based on MSPA and MCR-taking Jizhou District of Ji'an city as an example [J]. Environmental Protection Science, 2021, **47**(5): 37 – 43] DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004 – 6216.2021.05.007
- [40] GOLDENBERG R, KALANTARI Z, CVETKOVIC V, et al. Distinction, quantification and mapping of potential and realized supply-demand of flow-dependent ecosystem services [J]. Science of the Total Environment, 2017 (593 – 594): 599 – 609. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.03.130
- [41] MADRIGAL-MARTINEZ S, GARCIA J L M. Assessment method and scale of observation influence ecosystem service bundles [J]. Land, 2020, **9**(10): 392. DOI: 10.3390/land9100392
- [42] 黄木易, 岳文泽, 方斌, 等. 1970—2015 年大别山区生态服务价值尺度响应特征及地理探测机制[J]. 地理学报, 2019, **74**(9): 1904 – 1920. [HUANG MUYI, YUE WENZE, FANG BIN, et al. Scale response characteristics and geographic exploration mechanism of spatial differentiation of ecosystem service values in Dabie Mountain area, central China from 1970 to 2015 [J]. Acta Geographica Sinica, 2019, **74**(9): 1904 – 1920] DOI: 10.11821/dlxb201909015
- [43] 范春苗, 王志泰, 汤娜, 等. 基于形态学空间格局和空间主成分的贵阳市中心城区生态网络构建[J]. 生态学报, 2022, **42**(16): 6620 – 6632. [FAN Chunmiao, WANG Zhitai, TANG Na, et al. Construction of ecological network in downtown of Guiyang city based on morphologically spatial pattern and spatially principal component analysis [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, **42**(16): 6620 – 6632] DOI: 10.5846/stxb202012213241
- [44] 陈艳, 马月伟, 潘健峰, 等. 顾及石漠化敏感性的山地型城市生态网络构建——以云南省曲靖市为例[J]. 生态学报, 2023, **43**(17): 1 – 12. [CHEN Yan, MA Yuewei, PAN Jianfeng, et al. Ecological network construction of mountainous cities considering rocky desertification sensitivity: A case study of Qujing city, Yunnan province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, **43**(17): 1 – 12] DOI: 10.20103/j.stxb.stxb202208162350
- [45] 齐珂, 樊正球. 基于图论的景观连接度量化方法应用研究——以福建省闽清县自然森林为例[J]. 生态学报, 2016, **36**(23): 7580 – 7593. [QI Ke, FAN Zhengqiu. Evaluation method for landscape connectivity based on graph theory: A case study of natural forests in Minqing county, Fujian province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, **36**(23): 7580 – 7593] DOI: 10.5846/stxb201507301599
- [46] 朱强, 俞孔坚, 李迪华. 景观规划中的生态廊道宽度[J]. 生态学报, 2005, **25**(9): 2406 – 2412. [ZHU Qiang, YU Kongjian, LI Dihua. The width of ecological corridor in landscape planning [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, **25**(9): 2406 – 2412]

Construction and Optimization of Ecological Security Network in Guizhou Province of China Based on Ecosystem Service Supply and Demand

ZENG Xinglan^a, CHEN Tiantian^{a,b*}

(*a. Chongqing Key Laboratory of Surface Process and Environment Remote Sensing in the Three Gorges Reservoir Area;*

b. Field Observation and Research Station of Surface Ecological Process in the Three Gorges Reservoir Area,

Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: The fragile ecological background conditions and frequent ecological events in the karst areas of Guizhou province, China have challenged the regional sustainable development. Constructing a reasonable ecological security network is of great significance to ensure a healthy ecological environment and sustainable socio-economic development in the region. Unfortunately, little attention was paid by scientists in their researches to the interrelationships and reciprocal constraints between social system and ecological system in the course of building up a karst ecological security network; instead, more emphasis was placed on the output of supply potential of

ecosystem service, inevitably all of which brought about a poor construction of local ecological security network. In this study, it took Guizhou province, China to conduct a case study of karst ecological security evaluation. It defined ecological patches in accordance with the relationship between total supply and supply-demand of an ecosystem service; it identified ecological sources in terms of landscape connectivity in combination with the number and area of important ecological patches; it selected suitable indicators to construct resistance surface, and generated ecological corridors by using the minimum cumulative resistance model and the gravity model; a regional ecological security network was constructed properly after its key ecological nodes was carefully chosen. In the end, this study proposed a strategy for an optimized regional ecological security layout which seriously took advantage of the regional ecological protection and restoration program to be officially issued before by local authorities. Results are listed here. (1) 23 ecological sources, with an area of $3.42 \times 10^4 \text{ km}^2$ in total, were recognized by the study based on the supply-demand of the local ecosystem service and landscape connectivity. The main types of landscapes were forest, grassland, and cultivated land, of which the macro-habitat patches were mainly distributed in the southeast and north of the study area. (2) 31 primary ecological corridors and 34 secondary ecological corridors were delineated, with a total length of $8.75 \times 10^4 \text{ km}$. A total of 78 ecological nodes were positioned along the corridors. (3) In order to strengthen the ecological construction in some ecology-blind areas, five ecological source radiation zones were advised to build in the western of Guizhou, with an area coverage up to $9.37 \times 10^4 \text{ km}^2$. Conclusively, this study outlined a strategy optimization of ecological security pattern, which could be depicted by a geographical layout of “one belt, two axes, three zones, and multiple midpoints”, and it would provide scientific references for karst ecological protection and regional ecological security in Guizhou province.

Key words: supply-demand of ecosystem services; landscape connectivity; ecological security network; optimization; Guizhou province

(责任编辑 李嵘)