

# 基于生态网络连通性评价的生态修复工程布局研究

王作为<sup>1</sup>, 魏庆明<sup>2\*</sup>, 田鑫<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学城市规划设计研究院有限公司, 哈尔滨 150001;

2. 齐齐哈尔市国土空间规划测绘研究院, 黑龙江 齐齐哈尔 161006)

**摘要:**全面推进国土空间生态修复,是新时期推进生态文明和美丽中国建设的重大举措,是推进国家治理体系和治理能力现代化的重要议题。在生态修复工作过程中,关于生态网络连通性分析的定量分析较多,关于生态修复工程实施绩效有效性的定量分析还需进一步加强。因此,借助最小累积阻力模型(MCR)和电路理论识别生态修复重点区域,结合第十师自然地理格局和生态资源概况,布局10项生态修复工程及92个重点项目,并借助CA-Markov模型模拟验证生态修复工程实施绩效。通过计算方法和数据模型将工程布局研究的各步骤量化计算,为科学开展国土空间生态修复提供了指导。

**关键词:**生态修复;工程布局;生态修复重点区域;工程实施绩效

**中图分类号:**TU984.1

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-2736(2024)09-0049-16

## 0 引言

全面推进国土空间生态修复,是新时期推进生态文明和美丽中国建设的重大举措,加快修复国土功能,提高国土开发利用质量和效益,是落实习近平生态文明思想、建设美丽中国和推进社会主义现代化的综合平台和重要抓手。

新疆生产建设兵团第十师位于西北内陆干旱半干旱地区,呈飞地状分布在阿勒泰和塔城地区,属于生态敏感和生态脆弱区,涵盖了“山水林田湖草沙”七大生态系统要素,是水源涵养、水土保持、防风固沙的重要区域。近年来第十师和两地区稳步推进生态保护修复项目,通过实施草畜平衡、防沙治沙、水土保持等一系列生态治理工程,严格控制水土流失、土地盐碱化沙化和草原沙化,显著提升了区域生态环境质量<sup>[1]</sup>。但是水资源空间分布不均、整体生态系统脆弱、生态系统多样复杂、生态修复重点区域难识别和工程绩效难保证等问题,给生态保护修复规划编制带来巨大压力。本文通过生态网络连通性分析识别生态修复的重点区域,并通过工程绩效模拟验证分析生态修复工程的布局对生态系统的

改变,以期科学开展国土空间生态修复工作提供科学指导。

## 1 研究方法

### 1.1 技术方法

在生态修复工程布局研究过程中,尝试将生态系统及各主要要素矢量化,选择最小累积阻力值模型、电路理论和CA-Markov模型进行模拟计算,通过计算结果数据,分析第十师和区域生态系统的变化情况。

#### 1.1.1 最小累积阻力值模型

最小累积阻力模型(Minimum Cumulative Resistance Model, MCR)是指一种用于描述和预测物体或个体在空间中运动的模型<sup>[2]</sup>。该模型可以模拟野生动植物在生态系统中活动的路径上所面临的困难和障碍的程度(地形、道路、用地类型等),并记录累积阻力值,并通过计算识别累积阻力值最小的路径,即野生动植物活动的最优路径,可理解为生态廊道。

该模型通过识别生态源地,选取合适的阻力因子识别构建阻力面并确定各阻力因子权重,代

入最小累积阻力模型,借助 Linkage Mapper 下的 Linkage pathway tool 提取连接源地的累积阻力较低的路径,作为生态廊道<sup>[3]</sup>。

$$MCR = \int \min \sum_{j=n}^{i=m} D_{ij} \times R_{i^4} \quad (1)$$

式中, $MCR$  为最小累积阻力值, $f$  表示最小阻力与生态活动的正相关, $D_{ij}$  为物种从源地到景观单元的空间距离, $R_i$  表示景观对某种物种运动的阻力。

### 1.1.2 电路理论

电路理论是利用电路中电子随意游走的特点来模仿物种扩散的流程<sup>[4]</sup>。而生态系统中的动植物活动呈随机状态,与电子在电路中的活动方式具有相似性,因此,本研究借助电路理论模型,模拟动植物在生态系统中的活动。

将区域生态系统模拟为一个电路,动植物即为在电路中随机活动的电子,利用 Linkage Mapper 下的 Circuitscape,通过计算各活动路径中电流的密度,提取电路中的夹点和障碍点,即作为生态系统中生态环境质量较好、连通性较好的关键点和质量较差、连通性较差的堵点。

### 1.1.3 生态网络连通性评价

生态连通性是指在生态系统中,各生态单元之间的连续性程度<sup>[5]</sup>。生态连通性的研究逐步形成“源地识别-阻力面构建-廊道提取”的基本范式<sup>[6]</sup>。本研究将电路理论提取的生态夹点和生态障碍点增加到分析过程中,分析第十师生态网络连通性(图 1)。

### 1.1.4 CA - Markov 模型

生态系统演变是一个复杂的地理变化,具有

多层次、多要素的特点,土地利用动态变化可从一定程度上反映出生态系统演变的情况<sup>[7,8]</sup>。

CA - Markov 模型是集合元胞自动机(Cellular Automata, CA)模型处理复杂系统在空间上变化能力与马尔科夫(Markov)模型适用于长序列土地利用结构动态变化双重优势的耦合模型,可以模拟和记录土地利用动态演变在空间形态变化和变化的信息,对土地利用变化过程进行规律分析和计算模拟,进而分析生态系统的变化情况<sup>[9]</sup>。分析前,通过模拟精度的评价指标 Kappa 系数的计算,验证模型和分析内容的适配度。

$$Kappa = \frac{P_0 - P_e}{1 - P_e} \quad (2)$$

式中: $P_0$  为总体模拟精度; $P_e$  为理论模拟精度。

Kappa 系数精度分为五级:0 - 0.2 模拟精度极低,不可信;0.2 - 0.4 模拟精度一般,不可信;0.4 - 0.6 模拟精度中等,一般可信;0.6 - 0.8 模拟精度较高,较可信;0.8 - 1.0 模拟精度非常高,可信。

## 1.2 技术路径

本研究将计算思维贯穿国土空间生态修复工程布局研究的过程,在摸清第十师和区域生态系统现状的基础上,根据已确定的“一屏三带”生态修复总体格局和生态修复分区,借助 MCR、电路理论、CA - Markov 等计算方法和数据模型,开展“生态网络连通性分析—生态节点识别—工程布局重点区域识别—工程布局绩效模拟验证”的研究(图 2)。

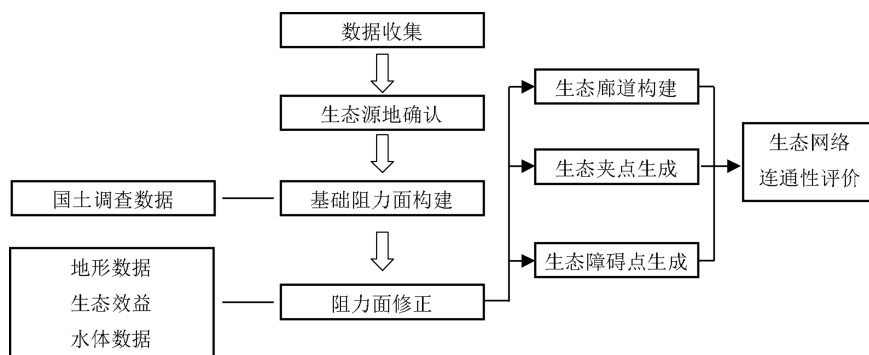


图 1 生态网络连通性评价技术路线图



图2 研究技术框架图

## 2 区域概况

### 2.1 生态系统现状

新疆生产建设兵团第十师位于西北内陆干旱半干旱地区,属于生态敏感区、脆弱区,是我国“三区四带”、新疆“三屏两环”和兵团“一环两带”生态空间格局中的重要节点,对于防范和阻止古尔班通古特沙漠北进,维护国家和区域生态

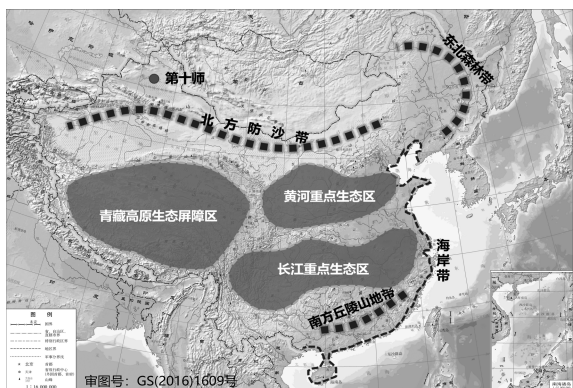


图3 第十师在“三区四带”生态安全格局中区位示意图

安全具有重要的作用(图3)。

第十师水资源空间分布不均,河湖、湿地缺少有效补水;因风力侵蚀和水力侵蚀造成的水土流失问题依然严峻;土地荒漠化、盐碱化现象严重;草原退化、沙化现象亟待改善;历史遗留矿山散点分布,修复难度大;生态系统存在不同程度的退化,部分地区生态系统恢复力丧失(图4)。

### 2.2 生态修复总体格局和分区

充分尊重第十师自然地理格局,积极融入国家和区域生态安全格局,强调山体、河流和戈壁等重点生态要素在区域生态系统中的重要地位,加强与阿勒泰和塔城地区协调和衔接,构建第十师“一屏三带”的生态修复总体格局(图5)。

### 2.3 数据选取

多时期土地利用遥感监测数据(2005年、2010年、2015年和2020年)来源于资源环境科学数据平台<sup>[11]</sup>用作区域层面分析;DEM数字高程数据来源于地理空间数据云;道路数据由

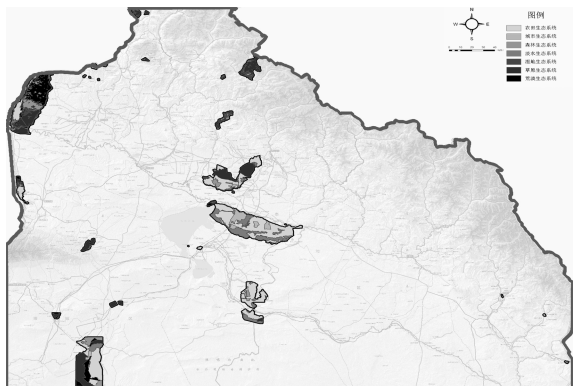


图4 第十师生态系统分布示意图

Open Street Map 网站获得;第十师“三调”永久基本农田数据和生态保护红线数据来源于第十师自然资源和规划局,用作第十师层面分析;生态保护重要性评价结果来自第十师资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价(表2)。

基于第十师生态修复总体格局,突出区域范围内自然地理完整性和生态系统连通性<sup>[10]</sup>,划定覆盖第十师全域的北部阿尔泰山地森林草原水源涵养与生物多样性保护区、西部库木托拜沙

漠水土保持与土地沙化治理区、南部古尔班通古特沙漠生物多样性保护与戈壁荒漠化治理区和中部两河一湖流域人居环境与水环境综合提升区4个生态修复一级分区及10个生态修复二级分区(图6、表1)。

### 3 生态修复重点区域识别

本节借助 MCR、电路理论模型识别生态修复重点区域。首先通过识别生态源地,提取野生动植物活动主要区域,构建阻力面,将野生动植物在区域间活动时的难易程度转译为可计算的图形,提取生态廊道,借助 MCR 模型进行生态网络连通性分析;再借助电路理论识别生态节点;最后通过叠加分析,识别生态修复重点区域,布局生态修复工程。

#### 3.1 生态网络连通性分析

##### 3.1.1 识别生态源地

本研究提取生态保护重要性评价结果中的极重要和重要区斑块,并与第十师范围内的自然

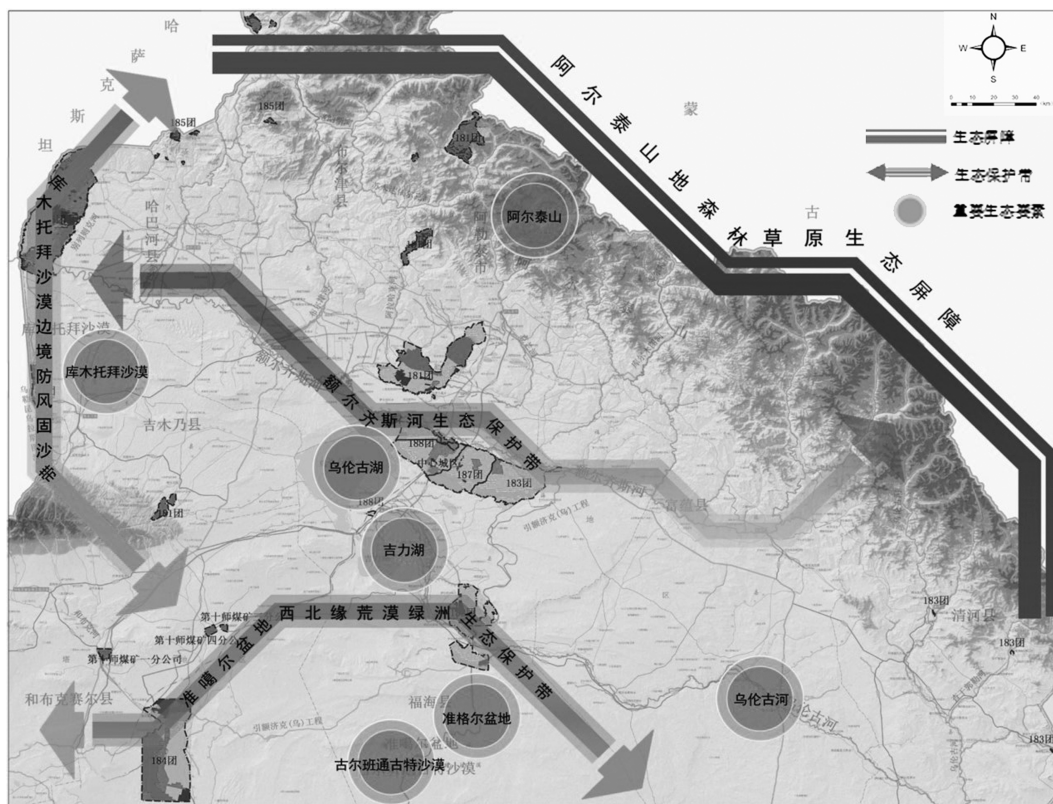


图5 第十师“一屏三带”生态修复总体格局示意图

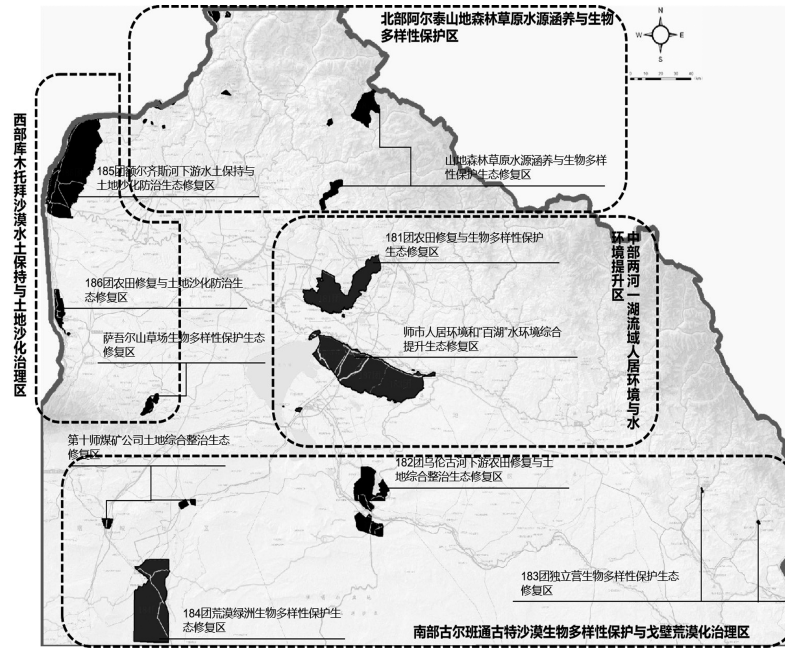


图 6 第十师生态修复分区

表 1 第十师生态修复分区统计表

一级分区	二级分区
北部阿尔泰山地森林草原水源涵养与生物多样性保护区	山地森林草原水源涵养与生物多样性保护生态修复区
西部库木托拜沙漠水土保持与土地沙化治理区	185 团额尔齐斯河下游水土保持与土地沙化防治生态修复区
南部古尔班通古特沙漠生物多样性保护与戈壁荒漠化治理区	186 团农田修复与土地沙化防治生态修复区
中部两河一湖流域人居环境和水环境综合提升区	沙吾尔山草场生物多样性保护生态修复区
	182 团乌伦古河下游农田修复与土地综合整治生态修复区
	184 团荒漠绿洲生物多样性保护生态修复区
	第十师煤矿公司土地综合整治生态修复区
	181 团克兰河流域农田修复与生物多样性保护生态修复区
	183 团 1、2、3 连生物多样性保护生态修复区
	第十师人居环境和“百湖”水环境综合提升生态修复区

表 2 数据来源统计表

序号	数据	来源
1	多时期土地利用遥感监测数据 (2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年)	资源环境科学数据平台 <a href="https://www.resdc.cn/DOL/">https://www.resdc.cn/DOL/</a>
2	DEM 数字高程数据 (30M)	地理空间数据云 <a href="https://www.gscloud.cn/home">https://www.gscloud.cn/home</a>
3	道路数据	Open Street Map 网站 <a href="https://www.openstreetmap.org/">https://www.openstreetmap.org/</a>
4	第十师“三调”、永久基本农田和生态保护红线	第十师自然资和规划源局提供
5	生态保护重要性评价结果	第十师资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价

保护地<sup>[12]</sup>和生态红线范围进行叠加计算,初步筛选出生态源地 968.71km<sup>2</sup>,主要分布在北部山区草场和西部沙漠、湿地周边(图 7)。

第十师呈飞地状分布在阿勒泰和塔城地区,各团场用地不连续且距离较远,因此在选取生态源地时综合考虑干旱半干旱地区的气候、戈壁和盐碱地为主的土地利用类型、结合野生动植物围绕水源栖息的生活习性等因素,将区域范围内的大型水域(乌伦古湖)1084.57km<sup>2</sup>、重要水源地(水库)29.10km<sup>2</sup>、重要的自然保护地 70.13km<sup>2</sup>及由小型生态斑块构成的“生态踏脚石<sup>[13]</sup>”52.73km<sup>2</sup>纳入生态源地识别范围,最终筛选出 2205.24km<sup>2</sup>的生态源地(图 8)。

### 3.1.2 构建阻力面

物种在区域间进行空间运动需要克服阻力,阻力值反映了动植物在区域范围内活动时的难易程度,生态功能完善区域阻力值越小,反之越

大<sup>[14]</sup>。不同的生态本底和地形地貌特征对物质能量及信息交流的影响程度不同,本研究选取土地覆被类型、距道路的距离、高程、坡度等共 4 个指标作为主要阻力因子,采用土地覆盖分类数据从区域层面构建区域阻力模型(图 9)。

从分析结果上看,生态阻力高的区域主要分布在城市用地、道路周边和北部高山地区,高密度建成区增加了不透水表面积,削弱了景观连通性,阻碍了物种迁徙。生态阻力值低的区域主要位于研究区的北部、东部、西部。这些区域林地覆盖度高,水资源丰富,生境维护价值高,为生物提供了优质的栖息地;第十师层面,生态阻力值高的区域面积为 170.90km<sup>2</sup>,占市域面积的 4.47%,主要分布在中部建成区和隔壁周边范围;生态阻力值一般的区域面积为 1014.88km<sup>2</sup>,占市域面积的 26.54%,各团场均有分布;生态阻力值低的区域面积为 2637.54km<sup>2</sup>,占市域面积的 68.99%,主要位于山区、草场和湿地周边

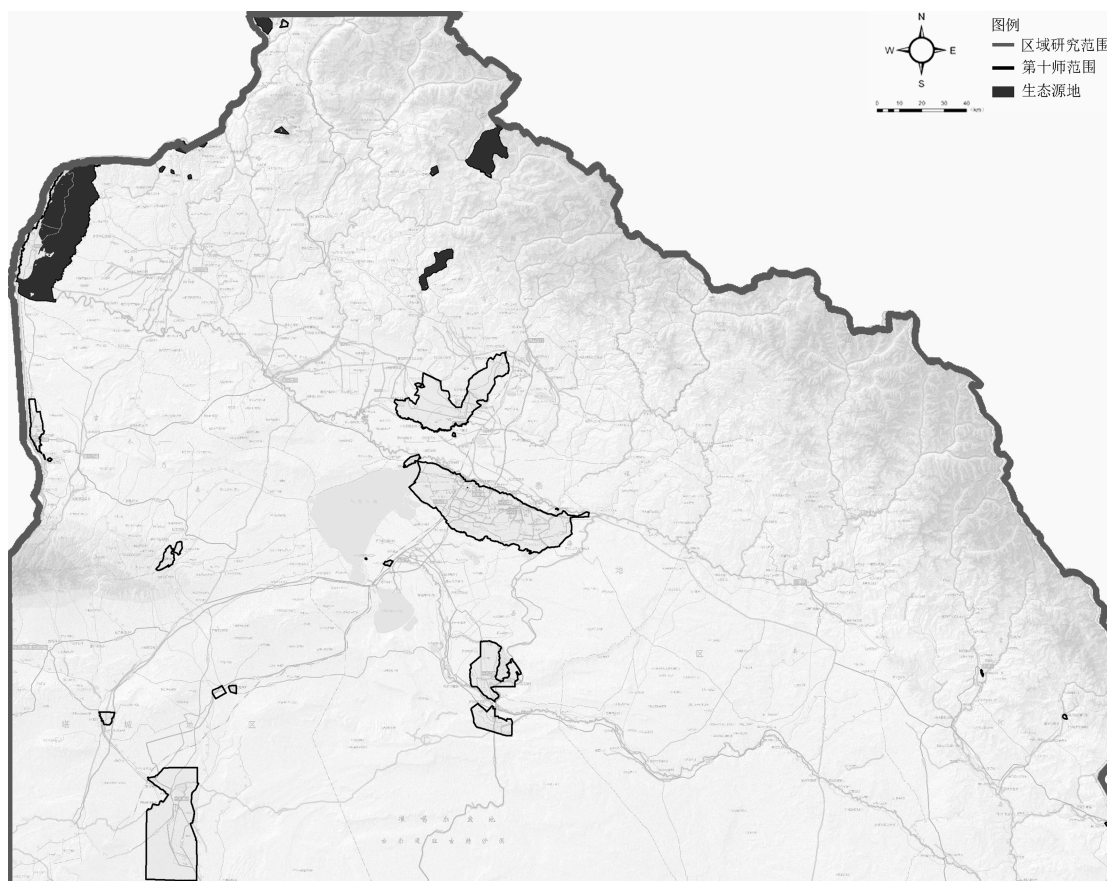


图 7 初步筛选的生态源地

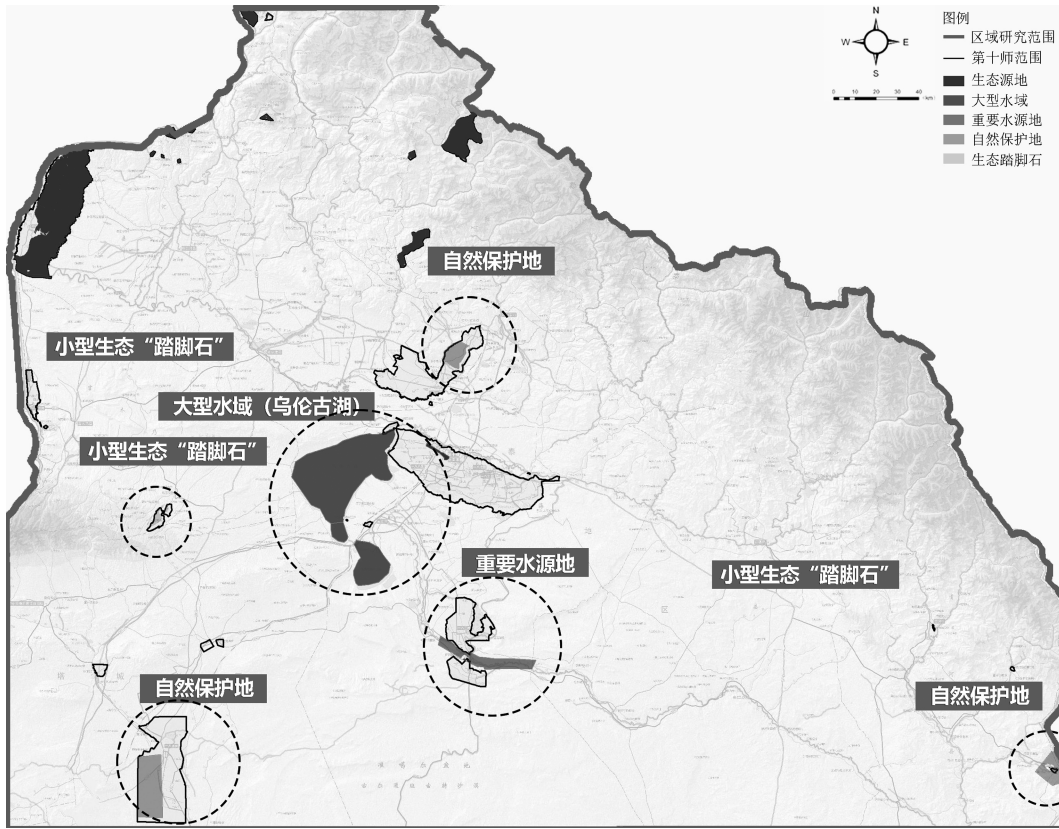


图8 优化后的生态源地

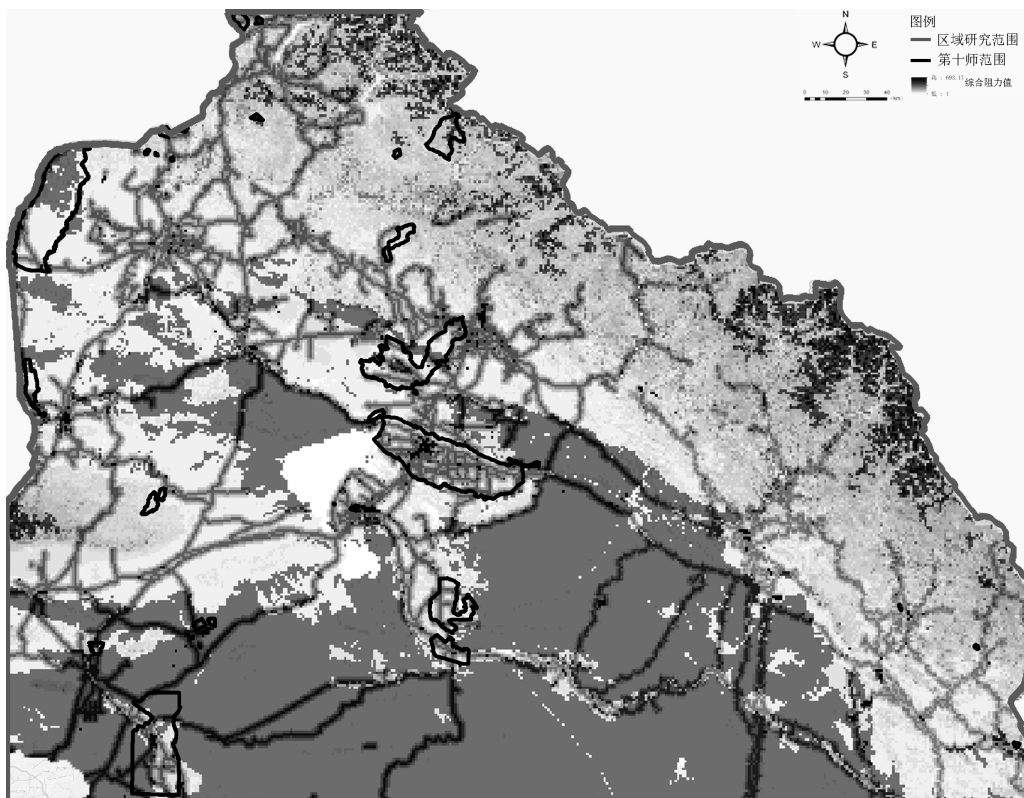


图9 区域阻力面构建结果示意图

范围(表 3)。

### 3.1.3 生态廊道提取

通过 Linkage Mapper 提取 54 条生态廊道,长度 2729.04 千米。密集分布在生态源地密度高,生物迁徙阻力小的北部、中东部地区,景观连通性良好,形成了紧密相连的循环生态网络。根据第十师、阿勒泰和塔城地区生态环境现状,综合识别出师市范围内有 2 条潜在重要廊道,与其他廊道呈网状交织,共同构成区域生态系统网络(图 10),根据不同物种,因地制宜地采用修复措施,对这些重点生态廊道进行保护和恢复。

### 3.1.4 生态节点识别

将电路理论中的夹点和障碍点作为生态节点,包括生态夹点和生态障碍点 2 类。

生态夹点在电路理论中是电流高度密集的区域,在生态系统中是指区域景观连通中具有不可替代性的关键节点,是防止生态源地退化或损失的关键位置<sup>[15]</sup>。利用 Linkage Mapper 插件中的 Pinchpoint Mapper 模块,选择“all to one”模式迭代运算<sup>[16]</sup>。通过累积电流值的计算结果,可

以看出,生态夹点面积约 233.63km<sup>2</sup>,均位于第十师行政范围外,主要位于阿勒泰地区的中部,且大多数位于生态廊道上,具有现状生态环境较好、离水源地、河流较近处,土地利用类型主要以草地和未利用地为主(图 11)。

生态障碍点是累积电流恢复高值区域,是阻碍动植物在重要生态区域之间运动的节点<sup>[15]</sup>。利用 Linkage Mapper 插件中的 Barrier Mapper 模块选择“Maximum”模式,以 1km 为半径进行迭代计算<sup>[16]</sup>,得到生态障碍点面积约 431.77km<sup>2</sup>,主要位于铁路、高速公路、建设用地或建设用地周围等受人类活动干扰严重的区域,土地利用类型主要以林地和建设用地等为主(图 12)。

### 3.1.5 生态网络连通性分析结果

将阻力面、生态障碍点与生态廊道矢量面叠加,生态廊道中阻力值较高和生态障碍点所在的区域即为生态网络连通性差的区域;生态连通性高的区域面积为 1632.84km<sup>2</sup>;生态连通性一般的区域面积为 804.19km<sup>2</sup>;生态连通性低的区域面积为 650.59km<sup>2</sup>,占市域面积的 21.07%,各团

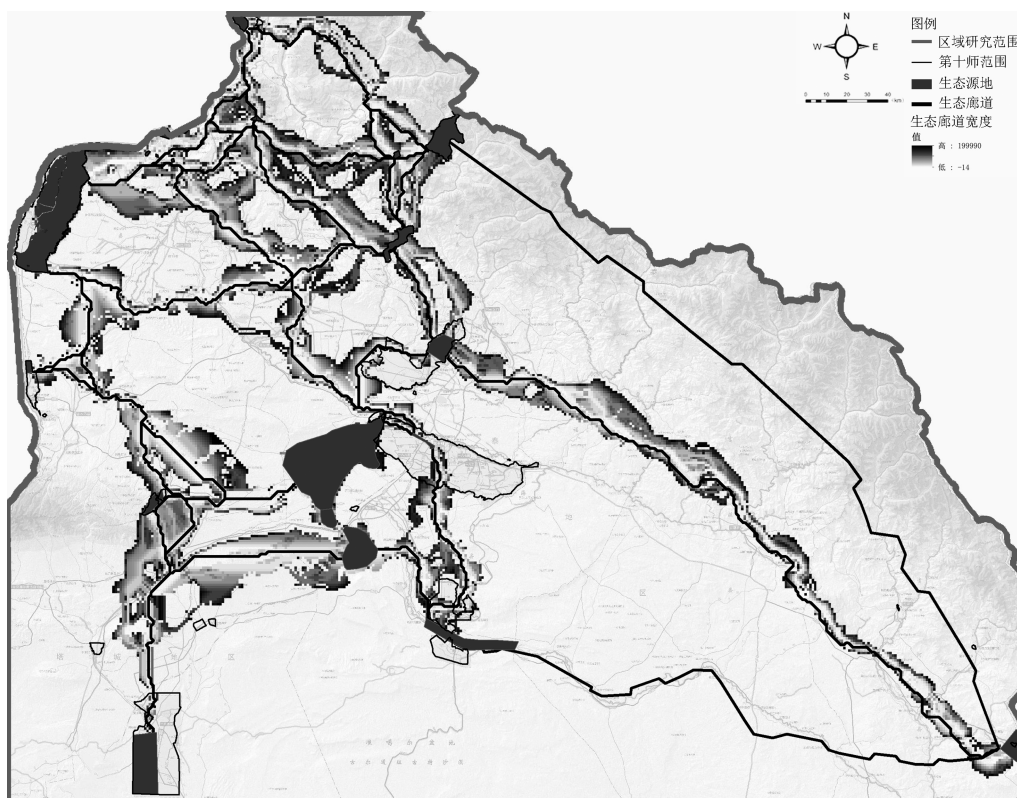


图 10 MCR 模型生态廊道识别图

表3 区域层面阻力因子及阻力值统计表

阻力因子	权重	指标	阻力系数
土地覆盖类型	0.4	林地	1
		水域	10
		草地	50
		耕地	100
		未利用地	500
		建设用地	1000
		> 2000	1
距道路距离	0.26	1500 - 2000	100
		1000 - 1500	300
		500 - 1000	500
		0 - 500	800
		< 1500	1
		1500 - 2000	100
		2000 - 2500	200
高程	0.17	2500 - 3000	300
		> 3000	500
		——	——
		0 - 5	1
		5 - 15	100
		15 - 25	200
		25 - 35	500
坡度	0.17	35 - 80	1000

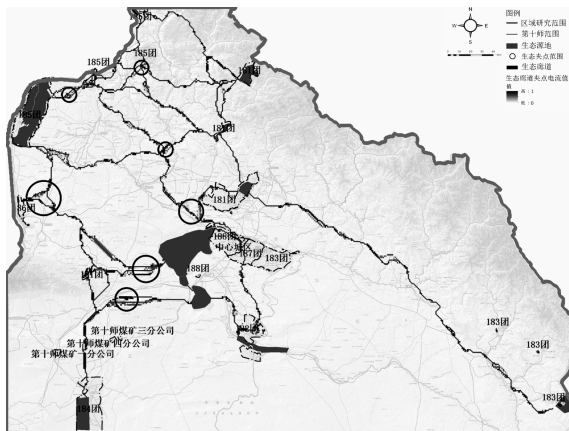


图11 生态夹点识别结果示意图

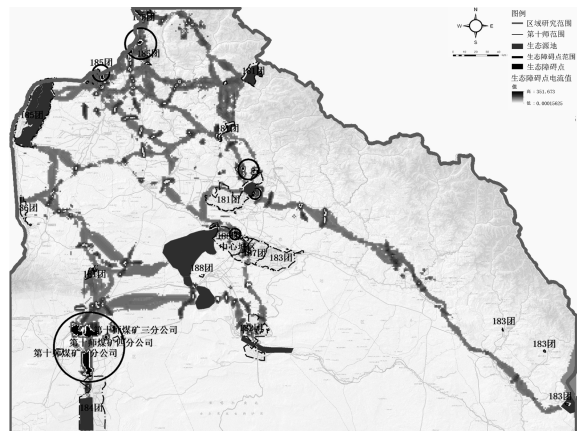


图12 生态障碍点识别示意图

场均有分布(图 13)。

### 3.2 生态修复重点区域划定和工程布局

将生态连通性低的区域作为生态修复工程布局的重点区域,重点强化土地综合整治,重塑生态环境,维护生态系统稳定,主要包括:库木托拜沙漠边缘土地沙化治理重点区,古尔班通古特沙漠西北缘土地荒漠化综合整治重点区,历史遗留矿山治理重点区。将连通性一般和生态夹点中生态质量一般的区域作为工程布局的一般区域。重点强化山水林田湖草沙冰一体化保护修复,主要包括:中心城区、团场连队人居环境提升重点区,沙吾尔山草原生态修复重点区,灌区耕地质量提升重点区,“百湖”水环境综合提升区。

以生态修复重点区域为指引,布局“8+1+1”重点工程,包括 8 项以生态系统治理为重点工程,1 项生态网络建设联通工程和 1 项生态系统支撑工程,布局 92 个重点项目(图 14、表 4)。

## 4 生态修复工程实施绩效模拟验证

本节通过 CA - Markov 模型模拟生态修复工程的合理性,进而验证生态修复工程的有效性。借助 ArcGIS 10.2 和 IDRISI 软件,建立耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 个变量的适应性图集;计算模拟精度的评价指标 Kappa 系数,验证 CA - Markov 模型分析和本研究的适配程度;模拟自然演替和实施生态修复工程 2 种情境下的土地利用变化,通过数值对比,验证工程布局的合理性。

### 4.1 建立适宜性图集

土地利用的变化会受到地形、气候、交通、人口及经济等多方面因素的影响,本研究选取与生态系统相关性较大的耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 个要素,建立适宜性图集,将对用地变化预测的结果转化为数学模型。其中:水域一般不会转化为耕地,所以将水域设置为限制因素;耕地的发展不仅受到高程和坡度的

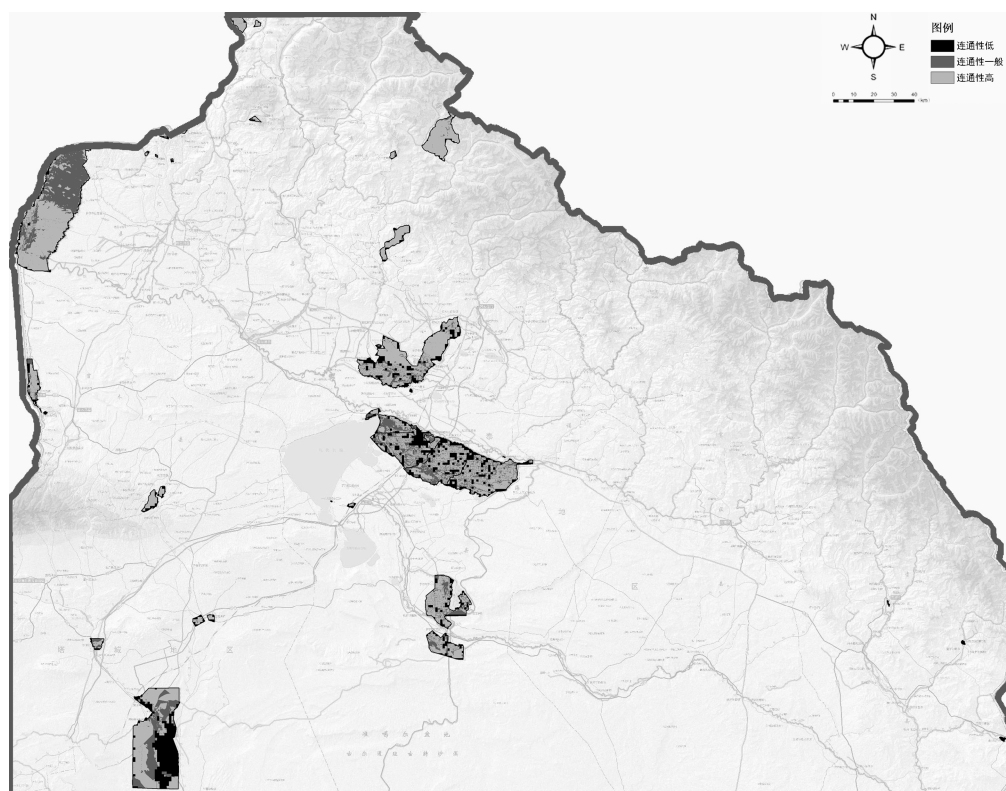


图 13 生态网络连通性分析图

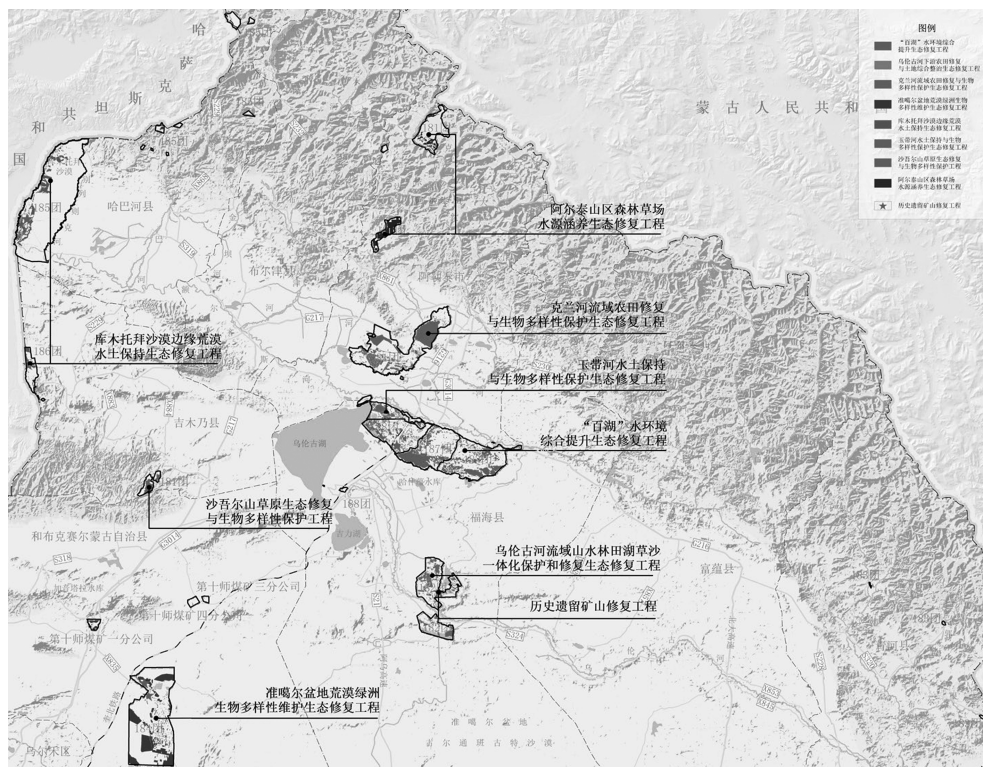


图 14 生态修复工程布局图

表 4 第十师生态修复工程汇总表

序号	工程名称	实施范围	重点项目数量
1	玉带河水土保持与生物多样性保护生态修复工程	188 团	17
2	百湖水环境综合提升生态修复工程	183、187、188 团	12
3	库木托拜沙漠边缘荒漠水土保持生态修复工程	185、186 团	17
4	阿尔泰山区森林草场水源涵养生态修复工程	181 团山区草场	4
5	萨吾尔山草原生态修复与生物多样性保护工程	181 团萨吾尔山草场	1
6	克兰河流域农田修复与生物多样性保护生态修复工程	181 团	10
7	乌伦古河下游农田修复与土地综合整治生态修复工程	182 团	11
8	准噶尔盆地荒漠绿洲生物多样性维护生态修复工程	184 团	10
9	“一屏三带”生态网络建设工程	全域	3
10	生态修复支撑体系建设工程	全域	7

制约,更会受到水资源的制约,所以选取道路、坡度和高程作为影响因素;水域和永久基本农田基本不会发展为建设用地,故将水域、永久基本农田生态保护红线设置为建设用地的限制因素,道路、坡度和高程设置为影响因素(表 5)。

#### 4.2 CA - Markov 模型可信度验证

首先,将 2005、2010 和 2015 年的土地利用现状作为基础年数据,模拟耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地 6 个地类变化趋势矩阵,记作土地利用变化趋势 A(图 15、16、17)。

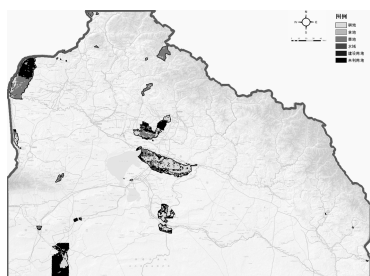


图 15 2005 年土地利用现状图

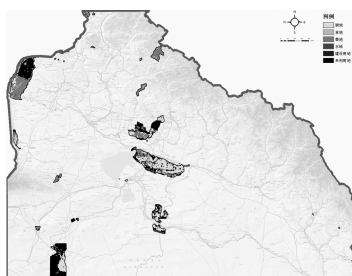


图 16 2010 年土地利用现状图

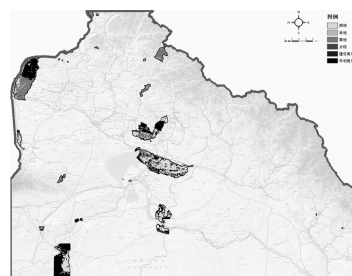


图 17 2015 年土地利用现状图

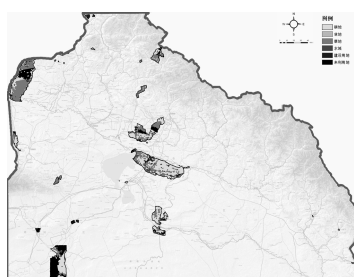


图 18 2025 年模拟结果图

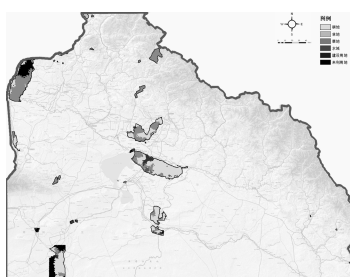


图 19 2035 年模拟结果图

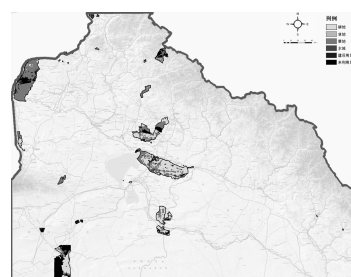


图 20 2060 年模拟结果图

表 5 适宜性图集要素与限制因素一览表

土地利用类型	永久基本农田	生态保护红线	水域	坡度 > 15°
耕地	—	x	x	x
林地	x	—	x	—
草地	x	—	—	—
水域	x	—	—	—
建设用地	x	x	x	—
未利用地	x	—	—	—

注：“—”表示不做限制，“x”表示限制。

其次,以 2010 年为基准年,将土地利用数据与土地利用变化趋势 A 叠加计算,以 5 年为时间节点,得到 2015 年和 2020 年的土地利用模拟数据。

最后,将模拟得到的 2015 年与 2020 年土地利用数据与实际的土地利用数据对比,得到的 Kappa 系数分别为 0.9601、0.8369,均大于 0.8。根据 Kappa 系数精度分级,Kappa 系数在 0.8 - 1.0 之间表明模拟精度非常高,表明 CA - Markov 模型和本研究的适配度高,是可信的,适合用来预测土地利用变化和生态系统变化。

### 4.3 生态修复工程绩效模拟验证

考虑到土地利用动态变化与经济社会的发展与演变有着密切的关系,不同时期土地利用空间演变规律存在不确定性。因此,提出自然发展情景、生态保护情景 2 种土地利用变化情景,预测第十师生态系统的变化趋势,以期通过模拟结果对比,验证修复工程实施的有效性。

#### 4.3.1 自然演替情景

自然演替情景是不考虑人为因素和政府政策的宏观调控影响,不再额外开展生态修复工程,不改变各土地利用类型之间的变化速率与转

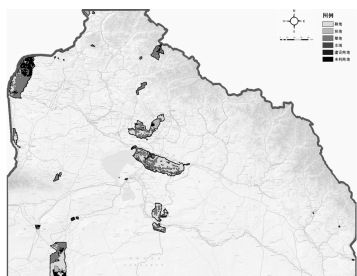


图 21 2025 年模拟结果图

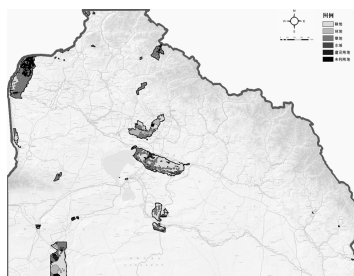


图 22 2035 年模拟结果图

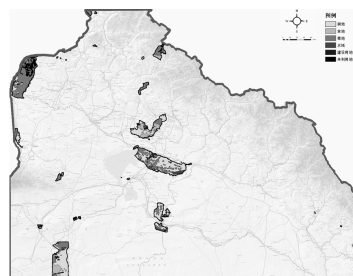


图 23 2060 年模拟结果图

换规则,让生态系统自然演替,模拟土地利用和生态系统变化的一种较理想化情景。以 2020 年为基准年,选取规划近期 2025 年、规划期末 2035 年和碳中和 2060 年为预测年。

首先,将 2020 年土地利用数据与第十师 2010—2020 年土地利用变化趋势叠加,得到 2025 年预测数据;其次,将 2025 年土地利用数据与 2010—2025 年土地利用变化趋势叠加,得到 2035 年预测数据;最后,将 2035 年土地利用数据与 2010—2035 年土地利用变化趋势叠加,得到 2060 年预测数据。

将预测得到的数据与 2020 年数据做对比,可以看出,在自然演替情境下,2025—2060 年土地利用变化呈现出“三增三减”的变化规律,即耕地、林地、未利用地减少,草地、水域、建设用地面积增加。

#### 4.3.2 生态修复工程有效实施情景

生态修复工程有效实施情景是以规划期内(至 2035 年)本研究提出的生态修复工程有效实施为前提,限制各地类之间的任意转化,模拟土地利用和生态系统变化的情景。以 2020 年为基准年,选取规划近期 2025 年、规划期末 2035 年和碳中和 2060 年为预测年。

首先,将 2020 年土地利用数据与第十师 2010—2020 年土地利用变化趋势叠加,得到 2025 年预测数据。在其基础上,叠加近期生态修复工程图斑,得到 2025 年土地利用数据。

其次,将 2025 年土地利用数据与 2010—2025 年土地利用变化趋势叠加,得到 2035 年预测数据。在其基础上,叠加远期生态修复工程图斑,得到 2035 年土地利用数据。

最后,将 2035 年土地利用数据与 2010—2035 年土地利用变化趋势叠加,得到 2060 年预测数据。

将预测得到的数据与 2020 年数据做对比,可以看出,在生态修复工程有效实施情景下,土地利用变化呈现出“四增一减一稳定”的变化规律,即耕地、林地、草地和建设用地面积增加,水域面积变化小,趋于稳定,未利用地减少。

#### 4.3.3 对比分析

通过对比两种情景下各主要地类的的数据变化可以看出:

在自然演替情景下,到规划期末 2035 年,少量未利用地转变为林地、草地和建设用地,说明生态系统在改善的同时,也遭到一定程度的破坏,林地面积减少,反映出整体生态系统安全仍面临巨大威胁。

在生态修复工程有效实施情景下,大量的未利用地转化为林地、草地,生态修复工程的实施有效遏制了第十师林地和草地的退化,林地面积大量增加,反映出生态系统质量得到有效提升。

同时,通过对比碳中和 2060 年数据,可以看出,生态修复情景下,未利用地继续呈减少趋势,并转化为大量耕地、林地、草地,生态修复重点区域周边的林地、草地图斑增多,说明生态修复工程有效实施后,区域生态系统得到明显改善并持续正向演替,生态系统质量得到有效提升,本研究提出的生态修复工程布局是合理的(表 6)。

## 5 结语

本研究借助计算方法和数据模型将生态系统及各主要要素进行量化,在生态网络连通性分

表 6 两种情景下各主要地类面积统计表

单位:公顷

土地利用类型	2020 年现状	自然演替情景			生态修复情景		
		2025 年近期	2035 年远期	2060 年碳中和	2025 年近期	2035 年远期	2060 年碳中和
耕地	121900	132000 ↑	122033 ↑	118000 ↓	139882 ↑	139824 ↑	144887 ↑
林地	8000	9900 ↑	6948 ↓	5600 ↓	32588 ↑	36634 ↑	40789 ↑
草地	139100	137199 ↓	143932 ↑	158200 ↑	142762 ↑	143006 ↑	145129 ↑
水域	10800	11900 ↑	12510 ↑	13800 ↑	11870 ↑	11841 ↑	11200 ↑
建设用地	7800	10800 ↑	11346 ↑	12200 ↑	9154 ↑	9585 ↑	10671 ↑
未利用地	95200	82601 ↓	88789 ↓	76599 ↓	48244 ↓	43611 ↓	31924 ↓

注:“↑”表示数据较 2020 年增加,“↓”表示数据较 2020 年减少。

析中将电路理论和最小累积阻力模型(MCR)模型结合,使分析结果更贴合第十师情况;运用 CA - Markov 模型,模拟验证生态修复工程实施的绩效,通过对比分析得到生态修复工程的实施,可以有效改善区域生态环境,并持续正向演替。

本研究在区域层面采用土地利用遥感监测数据进行阻力面构建,数据精度较利用第十师“三调”分析的结果低,在后续的研究中应使用更高精度的数据,保证分析的准确性;CA - Markov 模型预测土地利用变化趋势过程中,随着预测年限和预测步骤的增加,计算误差逐渐积累,导致模型预测的准确性降低,在后续的研究中应进行分析方法的优化,减少计算误差。

#### 参考文献(References):

- [1] 赵子平,许晓红.干旱对生态环境的影响及对策[J].水利技术监督,2009,17(03):30-32,37.
- [2] 姚妤.基于RUSLE和最小累积阻力模型的水土流失格局分析[D].杭州:浙江大学,2011.
- [3] 卢培嘉,韦燕飞,董新华,等.国土空间生态修复关键区域识别研究——以西安市为例[J].环境工程技术学报,2024,14(06):1877-1891.
- [4] 方莹,王静,黄隆杨,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[J].自然资源学报,2020,35(01):190-203.
- [5] 李谦,戴靓,朱青,等.基于最小阻力模型的土地整治中生态连通性变化及其优化研究[J].地理科学,2014,34(06):733-739.
- [6] 冉红玲,向楠,吕春艳,等.基于RSEI与CA - Markov模型的生态环境质量动态评价及预测——以贵州省铜仁市为例[J/OL].环境保护科学,1-11[2024-12-09].<https://doi.org/10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.202405012>.
- [7] 胡碧松,张涵玥.基于CA - Markov模型的鄱阳湖区土地利用变化模拟研究[J].长江流域资源与环境,2018,27(06):1207-1219.
- [8] 黄杰,黄义忠.基于CA - Markov模型的东川区生态网络构建[J].环境监测管理与技术,2024,36(06):66-71.
- [9] 田锐,郑嘉鑫,宋东阳,等.基于生态系统服务价值与生态安全格局的国土空间生态修复区域识别——以天津市蓟州区为例[J].兰州大学学报(自然科学版),2024,60(04):456-465.
- [10] 王作为,王琳琳,杨家宝.黑龙江抚远段滨江湿地生态修复规划策略研究[J].黑龙江国土资源,2024,22(04):26-37.
- [11] 徐新良,刘纪远,张树文,李仁东,颜长珍,吴世新.中国多时期土地利用遥感监测数据集(CN-LUCC).资源环境科学数据注册与出版系统(<http://www.resdc.cn/DOI>),2018.
- [12] 赵晨曦,姚允龙,王文姬,等.基于GEE的森林动态变化研究——以中央站国家级自然保护区为

- 例 [J]. 黑龙江国土资源, 2024, 22(03): 51 - 61.
- [13] 周东东. 城市存量开发中生态空间优化策略研究——“生态踏脚石”在存量生态空间的应用模型[C]//2017 中国城市规划年会. [2024 - 12 - 09].
- [14] 王晓玉, 冯喆, 吴克宁, 等. 基于生态安全格局的山水林田湖草生态保护与修复[J]. 生态学报, 2019, 39(23): 8725 - 8732.
- [15] Mcrae B H, Beier P. Circuit theory predicts gene flow in plant and animal populations [ J ]. PNAS, 2007, 104(50): 19885 - 19890.
- [16] 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(08): 1986 - 2001.

---

**作者简介:**

第一作者:王作为,1987年生,男,黑龙江人,硕士,哈尔滨工业大学城市规划设计研究院有限公司,高级城市规划师,主要研究方向为城市规划与设计。Email: 474209666@qq.com;

通讯作者:魏庆明,1989年生,男,黑龙江人,硕士,齐齐哈尔市国土空间规划测绘研究院,工程师,主要研究方向为城市规划与设计。Email:18934865@qq.com

---

## Research on the Layout of Ecological Restoration Projects based on Ecological Network Connectivity Evaluation

WANG Zuowei<sup>1</sup>, WEI Qingming<sup>2\*</sup>, TIAN Xin<sup>1</sup>

(1. Harbin Institute of Technology Urban Planning and Design Institute Co. , Ltd. Harbin 150001, China;

2. Qiqihar Land and Space Planning and Surveying Research Institute, Qiqihar 161006, China)

**Abstract:** It's a significant measure to comprehensively advancing the ecological restoration of territorial space for the promotion of ecological civilization and the construction of a beautiful China in the new era, which is also an important topic in advancing the modernization of the national governance system and governance capabilities. During the process of ecological restoration work, quantitative analysis needs to be further strengthened while there is a predominance of qualitative analysis. In this paper, the Minimum Cumulative Resistance (MCR) model and circuit theory are used to identify key areas for ecological restoration. In combination with the natural geographical pattern and overview of ecological resource, 10 ecological restoration projects and 92 key projects are planned, and the CA-Markov model is used to simulate and verify the performance of ecological restoration projects. By quantifying each step of the engineering layout research through computational methods and data models, this research provides guidance for the scientific conduct of territorial space ecological restoration.

**Key words:** ecological restoration; engineering layout; key areas for ecological restoration; project implementation performance