

资源型城市工矿用地系统修复的生态安全格局构建

王回苗¹, 李汉廷¹, 谢苗苗^{1,2}, 许萌¹, 李少玲¹, 白中科^{1,2}

(1. 中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083;

2. 自然资源部土地整治重点实验室, 北京 100035)

摘要: 资源型城市可持续发展的关键是对其工矿用地进行系统修复, 在空间上统筹工矿用地的生态修复, 使其从整体上参与区域生态安全格局构建十分必要。基于生态安全格局与电路理论, 以典型资源型城市内蒙古自治区乌海市为例, 分别识别2000年、2005年、2011年、2017年生态廊道和关键点, 根据优先修复程度设置修复分级方案。研究表明: (1) 2000-2017年, 廊道路径上工矿用地面积增加和城市扩张导致生态廊道质量下降、位置发生变化。7条最小耗路径总长度从120.74 km增加到125.71 km; 加权耗费总距离从692.58 km增加到1162.28 km。(2) 识别出2017年障碍点14处, 总面积为16.06 km²。其中关键点12处, 总面积14.09 km²。(3) 修复区域为识别出的2000-2017年四期生态廊道和2017年关键点, 共划分三个修复等级, 总面积为475.86 km²。研究通过区域生态安全格局理念统筹工矿用地生态修复, 使之成为国土空间系统修复的有机整体, 为资源型城市可持续发展提供决策参考。

关键词: 资源型城市; 生态安全格局; 系统修复; 生态廊道; 电路理论

资源型城市为我国经济社会快速发展做出了巨大贡献^[1], 但在发展过程中, 由于长期强调资源开采和缺乏统筹规划, 资源型城市普遍面临自然资源过度开发、生态环境破坏等问题^[2]。土地损毁面积逐年增加, 至2020年中国因生产建设和矿业开发造成的损毁土地面积将累计约1200万hm²^[3]。针对损毁土地的复垦与生态修复开展诸多探索, 形成了“理论方法—工程技术—试验示范—标准规程—监测监管—推广应用”互逆研究范式^[4], 将国外先进理念结合国内矿山废弃地修复实际进行了大量融合性研究^[5], 获得大量单个矿山废弃地规划设计与生态修复的成功案例^[6,7]。但在矿山损毁已形成“点—线—面—网”格局^[4]、并对区域生态安全造成严重威胁的资源型城市, 单纯局限于矿区内部进行时间不同步的小范围生态修复, 其效果难以在区域上发挥保障生态安全的作用, 空间割裂的生态修复活动难以参与区域整体生态安全格局的构建, 迫切需要开展工矿用地的系统修复, 改变各个矿区独立开展生态修复、缺少基于生态系统管理进行时空统筹的现状^[4]。

国土空间“整体保护、系统修复与综合治理”是解决区域生态环境问题的根本路径^[4], 进行工矿用地系统修复是实现资源型城市可持续发展的关键途径, 旨在通过优化国土空间格局、修复关键生态结构、提升生态系统服务价值和生态系统恢复力、维护区域生态安全^[8]。生态安全格局理论通过识别并维持具有关键作用的节点、网络、廊道, 保证区域生态系统整体健康和可持续发展^[9]。资源型城市中整体的生态安全格局构建与单个

收稿日期: 2019-07-31; 修订日期: 2019-10-13

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFC0504401)

作者简介: 王回苗 (1996-), 男, 四川南部人, 硕士, 主要从事景观生态与土地利用研究。

E-mail: wanghh@cugb.edu.cn

通讯作者: 谢苗苗 (1982-), 女, 河北保定人, 博士, 副教授, 主要从事景观生态与土地利用研究。

E-mail: xiemiaomiao@cugb.edu.cn

矿区“地貌重塑、土壤重构、植被重建、景观再现、生物多样性重组与保护”等土地复垦与生态修复同样重要,是达到工矿用地系统修复的关键路径。

“源地—廊道—关键点”模式作为构建生态安全格局的主要范式^[9,10],得到国内学者广泛运用。目前应用最广泛的生态安全格局构建方法是最小累积耗费(Minimal Cumulative Resistance, MCR)模型。该方法通过构建生态阻力面,并识别源地之间最小耗费路径来构建生态廊道,但该方法难以直接体现廊道中的关键点^[11]。电路理论(Circuit Theory)基于电子在电路中随机游走的特性,通过计算廊道中电流大小,体现廊道中各像元在生态过程中的重要程度,同时考虑了景观中所有可能路径^[12]。目前生态安全格局研究多以快速城市化地区为案例,以土地利用现状为基础,构建潜在的生态廊道连通生态源地,并提出提升与恢复措施^[13,14]。由于资源型城市矿产资源开发活动和生态重建同时进行,潜在生态廊道往往发生剧烈变化,在分析不同时期生态廊道及变化的基础上表征资源型城市面临的胁迫作用,并提出不同等级的修复策略,对科学统筹国土空间生态修复具有重要意义。

本文选择西北干旱区资源型城市乌海市为例,基于生态安全格局与电路理论,构建面向区域生态安全的空间途径统筹工矿用地生态修复,使之成为国土空间系统修复的有机整体。分别识别2000年、2005年、2011年、2017年生态廊道和关键点,设置修复分级方案,为乌海市统筹工矿用地生态修复、矿产资源开采和城市可持续发展提供决策参考。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

乌海市位于内蒙古自治区中部,是典型的“因煤而建、因煤而兴”的资源型城市,因煤炭资源丰富被称为“乌金之海”,下辖乌达、海勃湾、海南三区,2018年常住人口56.11万人。北面是杭锦旗草原,南与宁夏石嘴山市毗邻,东与西鄂尔多斯自然保护区接壤,西接阿拉善盟。桌子山、甘德尔山、五虎山分别位于市域东、中、西部,以南北走向平行分布。黄河自南向北沿甘德尔山西侧穿城而过,依黄河而建的人工湖乌海湖于2013年底开始蓄水,现总面积118 km²。气候上为温带大陆性干旱气候,年平均降水量为160 mm,多年平均蒸发量为3256 mm。该区域生态本底较为脆弱,少林多草。受煤炭资源开采的影响,大气污染严重,土地荒漠化、土地损毁和植被退化严重。近年来,当地政府采取了一系列矿山修复、防风治沙举措,生态环境有所改善。为面向区域生态安全构建乌海市生态安全格局,研究区涵盖了乌海市周边的杭锦旗草原、西鄂尔多斯自然保护区等生态源地,以及向阿拉善沙地及乌达矿区等生态敏感与脆弱区扩展,总面积为3881 km²(图1)。

乌海市是内蒙古自治区特种煤的主要蕴藏区,是自治区最大的炼焦煤产地和全国炼焦基地之一,具有重要的煤炭资源战略地位。乌海市煤炭开采历史悠久,由最开始的私人小煤窑逐渐发展为统一管理运营的煤炭集团公司,在国家煤炭管理体制的改革中,将乌达矿务局和海勃湾矿务局划归为神华集团公司统一运营。截至目前,乌海市共有采矿权131个(含已过期未注销矿权及整合矿权22个),矿山企业129个。其中大型矿山16个、中型矿山33个、小型矿山80个,大中型矿山比例为37.98%。由于集中开矿,形成大面积露天采坑与排土场(图1),并仍在迅速扩张中。

1.2 数据来源与基础数据处理

研究数据主要包括：2000年、2005年、2011年、2017年四期 Landsat TM/OLI 遥感影像和土地利用数据，30 m 分辨率的数字高程模型（DEM）数据等（表1）。

利用 ENVI 5.2 软件对四期遥感影像进行辐射定标、大气校正和拼接等预处理，并提取归一化植被指数、温度植被干旱指数和不透水面系数。借助谷歌影像图、自然保护区图集，对土地利用类型数据进行修正，将土地利用数据重分类为林地、草地、灌丛、湿地、耕地、水域、建设用地（包括城镇用地、农村居民点、工业用地、交通用地、露天采场和排土场）、其他地类（包括裸岩和沙地）八类土地利用类型（图1）。

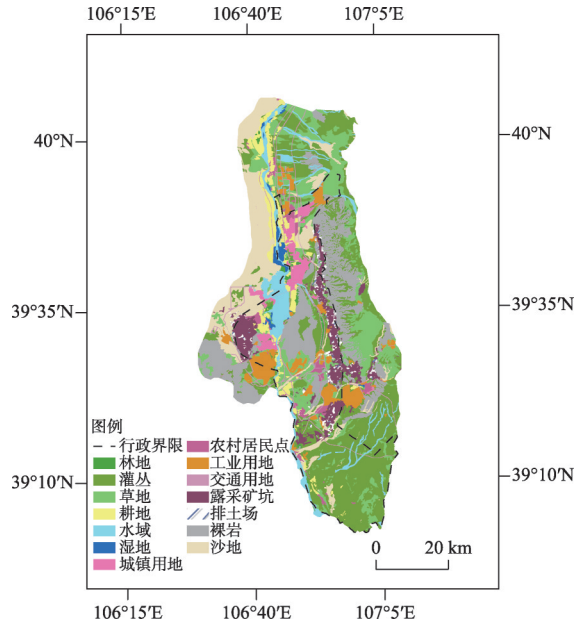


图1 研究区及土地利用现状

Fig. 1 Study area and its land use

表1 数据类型及来源

Table 1 Data sources and description

数据类型	数据时间	数据精度	数据来源
Landsat 5 TM 遥感影像	2000年8月、 2005年7月、 2011年6月	30 m, 云量 低于5%	USGS (美国地质勘探局, https://earthexplorer.usgs.gov/)
Landsat 8 OLI 遥感影像	2017年8月		
谷歌影像图	2019年3月	第12级	Google Earth
土地利用类型数据	2000年、2005年、 2011年、2017年	矢量数据	中国科学院资源环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn)
数字高程模型	2010年	30 m	地理空间数据云
研究区边界数据		矢量数据	国家基础地理信息中心、内蒙古自治区人民政府

1.3 资源型城市生态安全格局与工矿用地生态修复

1.3.1 研究框架

本文在资源型城市单个矿区生态修复的基础上，探索通过构建生态安全格局的方式统筹工矿用地生态修复，使之成为国土空间系统修复的有机整体。单一矿区生态修复范围较小，生态修复时间不同步，在资源型城市中难以保障区域生态安全。生态安全格局理论重点在识别生态源地进行保育与功能提升上，构建生态廊道提升生态源地之间的连通度，识别障碍点进行修复提升生态系统恢复力^[15]。为解决生态修复活动的空间割裂等问题，利用生态安全格局理论中的生态廊道将不同生态修复工程进行连通，提升对区域生态安全保障的作用；工矿用地生态修复的时序安排采用生态廊道和关键点识别进行判断，优先同步修复生态安全格局中的关键点，以及对潜在生态廊道进行林草用地功能提升；同时利用防风治沙措施和林草用地功能提升开展生态源地保育（图2）。本文重点在

于利用电路理论识别生态安全格局中的生态廊道和关键点,从而识别工矿用地修复的关键地区,并通过生态廊道将工矿用地生态修复的重点区段及其他修复区域进行相连。

电路理论借鉴了物理学中电子在电路中随机游走的特性,预测异质景观中物种的运动过程和基因交流^[12]。在生态安全格局中,景观被视为电导面,低电阻的景观类型表示物种在这种景观类型中易于运动或基因交流,而高电阻的景观类型则表示物种在此类景观中运动所受障碍较大,节点代表生态源地^[16,17]。模拟得到的电流和电压与整个生态过程相关,电流大小代表物种沿着某路径运动概率的大小^[18,19]。

1.3.2 生态源地选取

根据研究区自然环境状况,选择五个生境质量良好的景观和自然保护区斑块作为生态源地。这些斑块是研究区内提供生态系统服务价值的“源”,也是生物物种的主要活动范围和重要栖息地,更为物种的生存、繁衍提供重要保障,是极其重要的生态过程要素^[20]。

1.3.3 电阻面构建及生态廊道识别

在电路理论中,景观被抽象成具有不同电阻值的单元,反映物种或能量在各景观斑块中运动所受到的阻碍程度^[21]。土地利用类型被广泛应用于生态阻力面构建,不同土地利用类型能直接反映出生态系统类型,是生态阻力面的基础阻力因素^[22]。参考彭建等^[23]的研究,将研究区各土地利用类型的电阻值设定为1~200:林地为1,湿地为5,灌丛为10,草地为20,耕地为30,水域为50,其他地类为100,建设用为200。同一土地利用中由于生物物理特性的差异,形成的阻碍程度不同,根据归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、温度植被干旱指数(Temperature Vegetation Dryness Index, TVDI)、不透水表面系数(Impervious surface area, ISA)、DEM高程数据对阻力值进行修正[式(1)、式(2)]。

首先将研究区内建设用地和非建设用地(包括林地、草地、灌丛、湿地、耕地、水域和其他地类)分别进行修正。考虑到高程差异对物种运动和基因交流的影响,对建设用地和非建设用地同时使用DEM数据进行修正。归一化植被指数反映了植被覆盖状况,在一定程度上反映了生境质量^[24];温度植被干旱指数能指示地表水分含量,值越高,表示地表水分含量越低^[25,26]。研究区位于西北干旱区,属于温带大陆性干旱气候,年均蒸发量远大于降水量,地表水分含量是植被生长的主要限制因子。因此选择TVDI和NDVI对非建设用地电阻值进行修正。不透水表面指数ISA为像元内不透水材料所占比例,能体现人类活动强度^[27]。使用不透水指数修正建设用地阻力值[式(3)]。本文构建了不同土地类型电阻值公式:

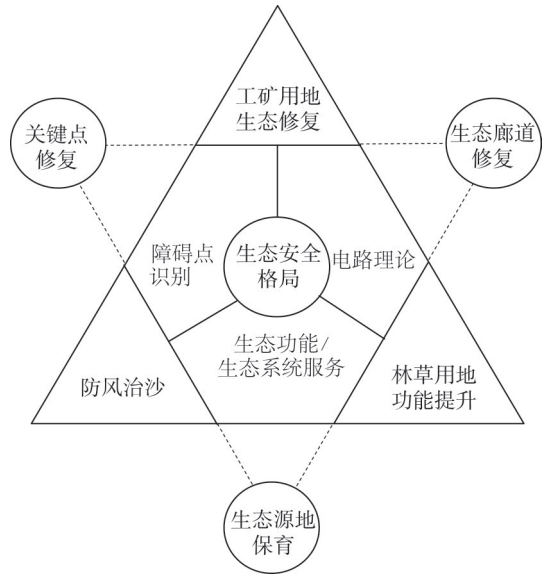


图2 西北干旱区资源型城市生态安全格局构建框架

Fig. 2 Framework of ecological security pattern for resources-based cities in Northwest China

$$R = Cf \times R_i \quad (1)$$

式中： R_i 为地类*i*的电阻值； Cf 为修正系数，由TVDI、NDVI、ISA和DEM组成，计算公式如下：

$$Cf = 1/2f + 1/2DEM \quad (2)$$

式中： f 为地类修正因子，计算公式如下：

$$f = \begin{cases} 1 - (1 - TVDI) \times NDVI & \text{当}i\text{为非建设用地时} \\ ISA & \text{当}i\text{为建设用地时} \end{cases} \quad (3)$$

式中：TVDI、NDVI、ISA、DEM均为标准化处理结果，取值范围为(0, 1)； f 的取值范围为(0, 1)； Cf 修正系数取值范围为(0, 1)。

借助廊道识别 (Linkage Mapper) 工具在 ArcGIS 10.2 平台上提取连接生态源地耗费阻力最小的廊道。运算步骤为：通过计算阻力面上每个像元到最近源地的加权耗费距离 (Cost Weighted Distance, CWD)，创建加权耗费距离面；计算生态廊道走向最小耗费路径 (Least Cost Path, LCP)；最后，设置截断距离 (本文将截断距离设置为 5000) 生成廊道。

1.3.4 障碍点识别与修复分级

障碍点表示源地间对物种运动阻力较大的区域。本文的修复关键点为位于 2017 年生态廊道内的障碍点，修复后能大幅度提高源地间的连通性。通过设置移动窗口搜索半径，借助障碍点识别 (Barrier Mapper) 工具识别障碍点。调整搜索半径试验表明：半径小于 200 m 时，部分障碍点未能识别；大于 200 m 障碍点位置不变，因此本文将搜索半径设置为 200 m。使用像元阻力值改变前后的最小耗费距离之差 ΔLCD 与搜索半径 D 的比值 ($\Delta LCD/D$ ，即每米改善值) 来表征障碍点移除后连通性的改善状况。比值越大，障碍点修复后源地间连通性恢复程度越大。障碍点识别后，与土地利用现状图进行叠加，分析其现状用途，并根据其空间分布制定修复策略。

资源型城市矿产资源开发和修复具有同时性，工矿用地的系统修复应由局部向整体、由满足生态安全必要型需求向改善型需求不断推进，形成点、线、面的修复工程分布。因此以系统修复的紧迫性、完整性和整体性为目标，将修复关键点设置为一级修复区，除去关键点的 2017 年生态廊道设置为二级修复区，2000-2017 年消失的廊道设置为三级修复区。

2 结果分析

2.1 生态源地变化

生态源地具有重要的生态系统功能，是重要的区域生态系统服务供给源。源地 1 为黄河两岸连片湿地及河道源地，由于河流凌汛现象，河水向两岸溢出，形成大面积湿地，是重要的鸟类栖息地；源地 2、源地 4 为西鄂尔多斯自然保护区核心区；源地 3 为桌子山，为西鄂尔多斯自然保护区试验区，是西鄂尔多斯自然保护区核心区的重要生态屏障；源地 5 是乌海市四合木保护区核心区，其中生长的四合木是中国特有的孑遗种植物，有植物“大熊猫”之称 (图 3)。

源地 2~源地 5 的面积在 2000-2017 年间无变化，源地 1 位置随湿地及河道位置变化而变化 (图 3)，乌海湖于 2013 年开始蓄水形成，2017 年时源地 1 面积最大。四期生态源地

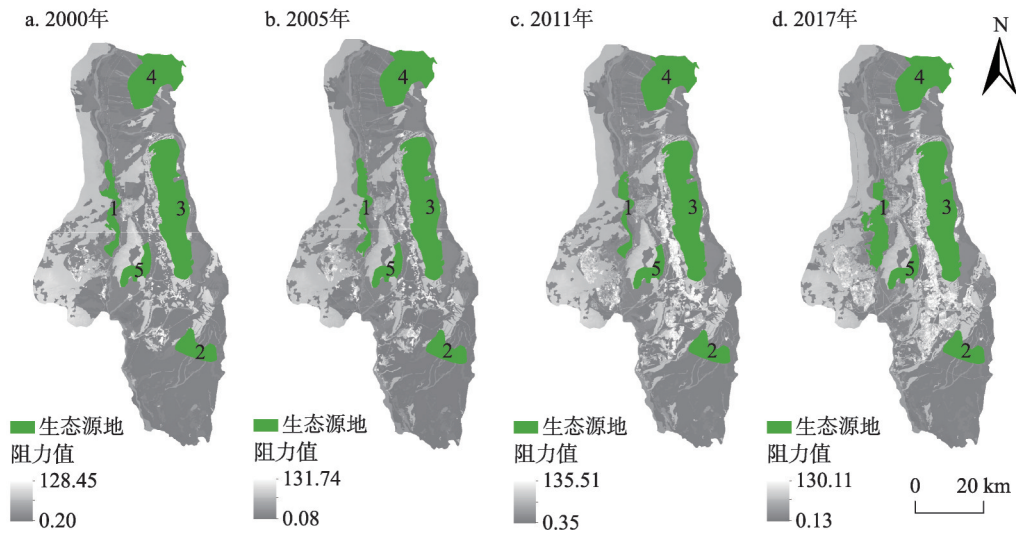


图3 2000-2017年研究区生态源地和电阻分布

Fig. 3 Ecological sources and resistance in the study area from 2000 to 2017

总面积分别为: 2000年 621.79 km², 2005年 622.16 km², 2011年 605.89 km², 2017年 662.17 km²。

2.2 生态廊道变化

研究发现, 不同时期识别的生态廊道质量和路径发生较大变化(图4、图5)。2000-2017年, 7条最小耗费路径总长度从 120.74 km 增加到 125.71 km。加权耗费总距离从 692.58 km 增加到 1162.28 km, 说明源地间连通性状况变差。源地1面积增大, 与源地5间廊道 CWD 变小; 其余廊道 CWD 呈增大趋势。廊道总面积从2000年的 225.92 km² 缩小到2017年的 162.25 km²。

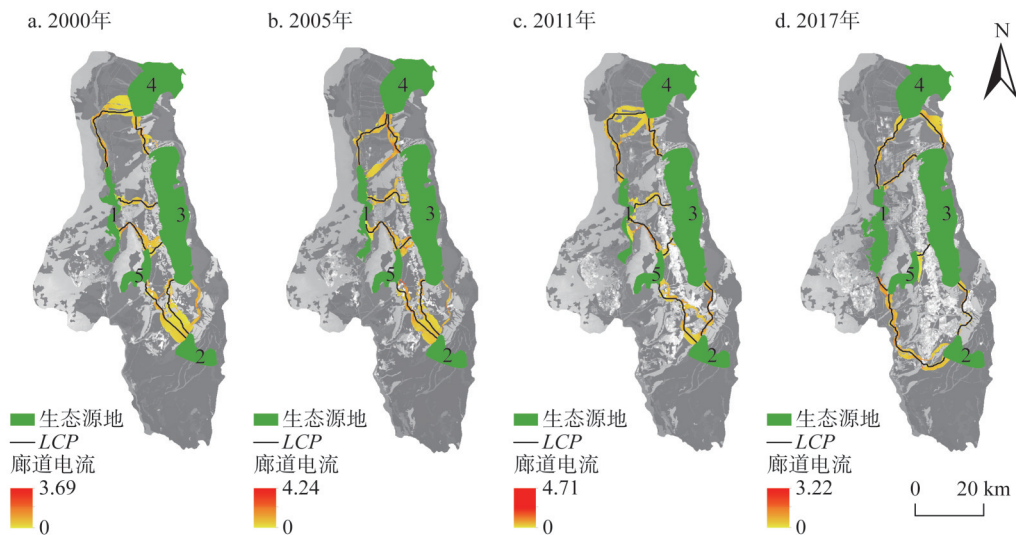


图4 2000-2017年源地间最小耗费路径与廊道电流

Fig. 4 LCP between ecological sources from 2000 to 2017

2.3 障碍点与修复关键点现状分析

通过 Barrier Mapper 工具共识别出 2017 年障碍点 14 处，总面积为 16.06 km²，其中位于廊道上的障碍点共 12 处，总面积 14.09 km²，多位于研究区中部和南部（图 6）。

障碍点的土地利用类型主要为建设用地和其他地类。建设用地（主要为露天采场、排土场和工业用地）面积占修复关键点总面积的 53.32%（表 2）。图 6c 与图 6f 两处障碍点位于 2017 年廊道外，下垫面类型分别为排土场和工业用地。工矿用地中露天采场和排土场直接破坏了局部生境质量；连片的工业

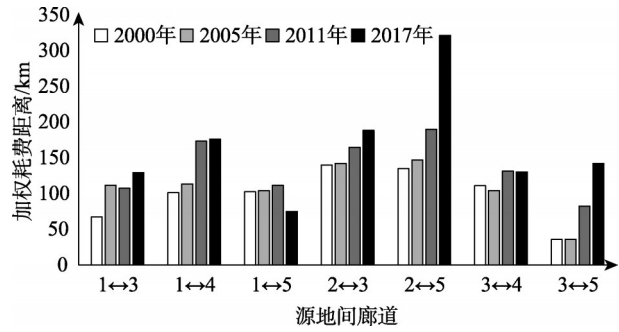


图 5 2000-2017 年源地间廊道的加权耗费距离
Fig. 5 CWD of corridors between ecological sources from 2000 to 2017

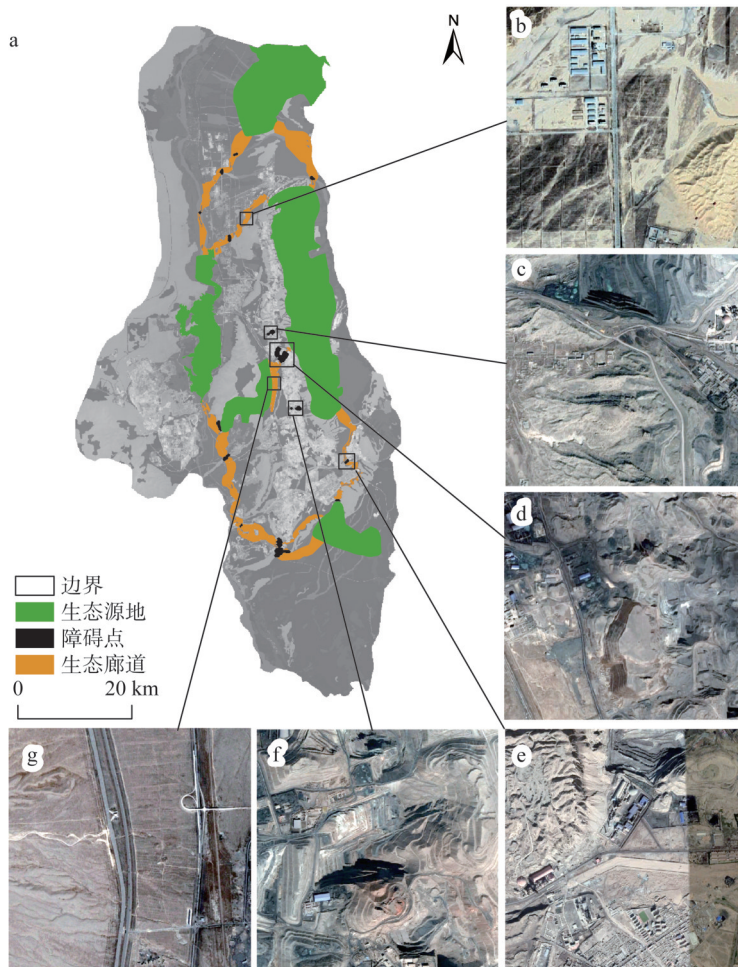


图 6 廊道与障碍点部分细节
Fig. 6 Some details of corridors and barriers

用地分隔了生境。通过科学规划矿业开采活动时序,及时对废弃的露天采场和排土场进行生态修复,能保障源地间连通性。

2.4 生态安全格局与分级修复策略

以系统修复的针对性、完整性和整体性为目标,按优先修复需求,将修复区域分为三个等级(图7)。修复关键点为一级修复区,是位于2017年廊道中的障碍点,修复后能大幅度提高源地间的连通性,为目前迫切需要修复的区域,面积为14.09 km²。基于生态安全格局理论实现资源型城市的工矿用地系统修复,需要利用2017年源地间7条生态廊道连接生态源地和不同生态修复工程,以形成完整的系统,实现区域生态安全。从地类面积上看,二级修复区面积为156.95 km²,80.83%为灌丛和草地,仅5.00%为建设用地(表2)。对于二级修复区应在加强生境管护的基础上进行矿山废弃地修复、道路两侧植被恢复等修复措施,以提升廊道林草功能。2000-2017年间消失的生态廊道被破坏前有着较好的生态禀赋,具有提高景观连通性的潜力,可作为三级修复区,总面积为304.82 km²,是未来资源型城市转型过程中所需要开展修复的区域。2017年廊道外的两处障碍点位于三级修复区范围内。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文从资源型城市工矿系统修复角度,基于“源地—廊道—关键点”生态安全格局构建范式,使用电路理论识别乌海市生态廊道和关键点,通过2000-2017年生态廊道及变化表征资源型城市面临的胁迫作用,并提出不同等级的修复策略,研究结论如下:

(1) 2000-2017年,7条最小耗费路径总长度从120.74 km增加到125.71 km;加权耗费总距离从692.58 km增加到1162.28 km。2000-2017年,由于乌海湖的形成,源地1与

表2 修复关键点与二级修复区土地利用类型面积比率

Table 2 Land use type ratio of key points and secondary restoration area (%)

土地利用类型	修复关键点	二级修复区
林地	0	4.28
湿地	0	1.98
灌丛	6.86	44.23
草地	8.37	36.60
水域	4.84	1.60
耕地	2.31	5.95
其他地类	24.30	0.36
建设用地	53.32	5.00

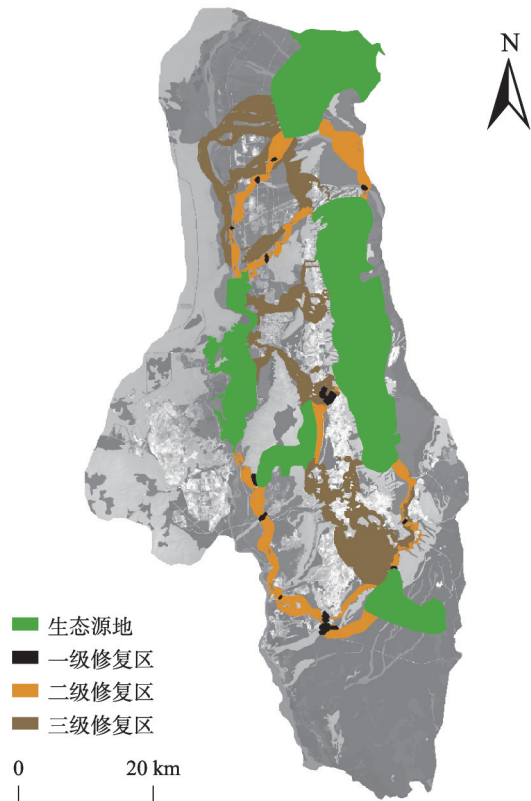


图7 资源型城市生态安全格局与分级修复策略

Fig. 7 Ecological security pattern and important level of restoration priority of the resource-based city

源地5间最小耗费路径变短、加权耗费距离减小；由于其余廊道路径上工矿用地面积增加和城市扩张，加权耗费距离呈增大趋势，廊道质量明显下降、位置发生改变。

(2) 障碍点表示源地间对物种运动阻力较大的区域。共识别出障碍点14处，总面积为16.06 km²；2017年廊道路径上的障碍点共12处，总面积14.09 km²，作为工矿用地系统修复关键点。

(3) 以系统修复的针对性、完整性和整体性为目标，将2000-2017年识别出的四期生态廊道和关键点设置为修复区域，总面积为475.86 km²。按优先修复程度，一级修复区为关键点，面积为14.09 km²；二级修复区为2017年生态廊道，面积为156.95 km²；三级修复区为2000-2017年消失的潜在生态廊道，面积为304.82 km²。

3.2 讨论

在廊道识别的基础上，本文分别比较了2000-2005年、2005-2011年和2011-2017年三个阶段廊道消失前后土地利用类型组成(图8)。廊道消失区域工矿用地等高阻力值土地利用类型面积增加，湿地、灌丛等低阻力值土地利用类型面积减少。廊道路径的改变主要由工业与矿业活动和城市扩张导致。路径周围的异质景观阻力值也决定了廊道面积。

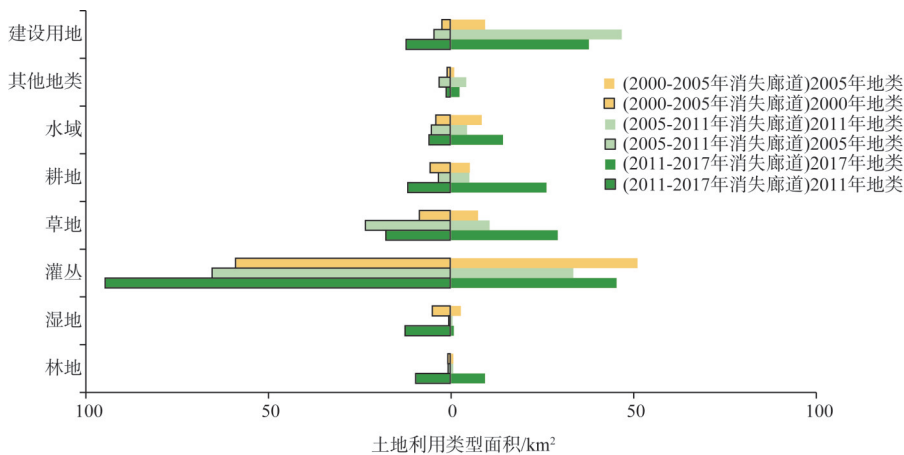


图8 不同阶段消失廊道各土地利用类型面积

Fig. 8 Area of different land use types in lost corridors

在资源型城市中，利用生态安全格局理论中的生态廊道连通不同的生态修复工程，能提升对区域生态安全的保障作用。当地政府已经开展了许多富有成效的生态修复工作，包括防风治沙区域(图6b)，源地5四合木保护区和骆驼山矿区之间的生态屏障等(图6g)。应在现有修复策略基础上，结合区域生态安全格局，整合已实施的修复工程，实现系统修复和综合治理。同步修复障碍点及提升廊道林草功能，并利用防风治沙措施和林草用地功能提升开展生态源地保育，以应对煤炭开采、城市扩张和其他自然生态风险，提升区域整体生态状况。研究区西北部为大面积沙地，需进行防风治沙以防止沙漠化损坏区域生态环境质量。

资源型城市矿业开采和生态修复具有同时性。在矿业开采活动破坏生态环境的同时，一系列的生态修复措施也维持着区域生态安全。表征区域生态安全在资源型城市破坏与修复生态环境之间的动态变化，并度量矿业开采强度和生态修复力度之间的协调关

系,是实现资源型城市可持续发展所需开展的研究。目前,在矿业开采集中和频繁的区域,需制定分阶段开采规划,并对废弃露天采场和排土场进行生态修复,以减小矿业开采活动对区域生态安全的影响。

在“源地—廊道—关键点”范式中,源地的选取是构建生态安全格局的首要步骤。多数研究直接选取区域内生境质量良好的景观和自然保护区斑块作为生态源地,已有少量研究尝试使用生境重要性、景观连通性等因素作为源地识别指标^[9]。后续研究可根据区域特点构建源地识别指标体系,识别面向人类需求且能保障区域生态系统服务能力的源地。

参考文献(References):

- [1] 李惠娟,龙如银,兰新萍.资源型城市的生态效率评价.资源科学,2010,32(7):1296-1300. [LI H J, LONG R Y, LAN X P. Assessment for eco-efficiency of resource-based cities. Resources Science, 2010, 32(7): 1296-1300.]
- [2] 郭存芝,罗琳琳,叶明.资源型城市可持续发展影响因素的实证分析.中国人口·资源与环境,2014,24(8):81-89. [GUO C Z, LUO L L, YE M. Empirical analysis of factors influencing the sustainable development of resource-based cities. China Population, Resources and Environment, 2014, 24(8): 81-89.]
- [3] 罗明,白中科,刘喜韬,等.土地复垦潜力调查评价研究.北京:中国农业科技出版社,2013:74-78. [LUO M, BAI Z K, LIU X T, et al. Investigation and Evaluation of Land Reclamation Potential. Beijing: China Agriculture Science and Technology Press, 2013: 74-78.]
- [4] 白中科,周伟,王金满,等.试论国土空间整体保护、系统修复与综合治理.中国土地科学,2019,33(2):1-11. [BAI Z K, ZHOU W, WANG J M, et al. Overall protection, systematic restoration and comprehensive management of land space. China Land Science, 2019, 33(2): 1-11.]
- [5] 杨艳平,罗福周,王博俊.基于朴门设计的煤矿废弃地生态修复规划研究.自然资源学报,2018,33(6):1080-1091. [YANG Y P, LUO F Z, WANG B J. Research on ecological restoration planning of coal mine wasteland based on permaculture design. Journal of Natural Resources, 2018, 33(6): 1080-1091.]
- [6] 胡振琪,多玲花,王晓彤.采煤沉陷地夹层式充填复垦原理与方法.煤炭学报,2018,43(1):198-206. [HU Z Q, DUO L H, WANG X T. Principle and method of reclaiming subsidence land with inter-layers of filling materials. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 198-206.]
- [7] WANG Y, DAWSON R, HAN D, et al. Landscape ecological planning and design of degraded mining land. Land Degradation & Development, 2001, 12(5): 449-459.
- [8] 王军,严慎纯,白中科,等.土地整理的景观格局与生态效应研究综述.中国土地科学,2012,26(9):87-94. [WANG J, YAN S C, BAI Z K, et al. Review on landscape patterns of land consolidation and the ecological effects. China Land Science, 2012, 26(9): 87-94.]
- [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] 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 conservation. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(1): 10-17.]
- [11] 王云,潘竟虎.基于生态系统服务价值重构的干旱内陆河流域生态安全格局优化:以张掖市甘州区为例.生态学报,2019,39(10):3455-3467. [WANG Y, PAN J H. Establishment of ecological security patterns based on ecosystem services value reconstruction in an arid inland basin: A case study of the Ganzhou district, Zhangye city, Gansu province. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(10): 3455-3467.]
- [12] MCRAE B H, SHAH V B, MOHAPATRA T K. Circuitscape 4 User Guide. The Nature Conservancy. <http://www.circuitscape.org>.
- [13] 王玉莹,金晓斌,沈春竹,等.东部发达区生态安全格局构建:以苏南地区为例.生态学报,2019,39(7):2298-2310. [WANG Y Y, JIN X B, SHEN C Z, et al. Establishment of an ecological security pattern in the eastern developed re-

- gions: A case study of the Sunan district. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(7): 2298-2310.]
- [14] 丛佃敏, 赵书河, 于涛, 等. 综合生态安全格局构建与城市扩张模拟的城市增长边界划定: 以天水市规划区(2015-2030年)为例. *自然资源学报*, 2018, 33(1): 14-26. [CONG D M, ZHAO S H, YU T, et al. Urban growth boundary delimitation method integrating comprehensive ecological security pattern and urban expansion simulation: A case study of planning areas in Tianshui city (2015-2030). *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(1): 14-26.]
- [15] PENG J, YANG Y, LIU Y X, et al. Linking ecosystem services and circuit theory to identify ecological security patterns. *Science of the Total Environment*, 2018, 644: 781-790.
- [16] MCRAE B H, DICKSON B G, KEITT T H, et al. Using circuit theory to model connectivity in ecology, evolution, and conservation. *Ecology*, 2008, 10: 2712-2722.
- [17] BEIER P, SPENCER W, BALDWEIN R F, et al. Toward best science practices for developing regional connectivity maps. *Conservation Biology*, 2011, 25(5): 879-892.
- [18] DEHAGHI I M, SOFFIANIAN A, HEMAMI M R, et al. Exploring structural and functional corridors for wild sheep (*Ovis orientalis*) in a semi-arid area. *Journal of Arid Environments*, 2018, 156: 27-33.
- [19] ZELLER K A, MCGARIGAL K, WHITELEY A R. Estimating landscape resistance to movement: A review. *Landscape Ecology*, 2012, 27(6): 777-797.
- [20] 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.]
- [21] 宋利利, 秦明周. 整合电路理论的生态廊道及其重要性识别. *应用生态学报*, 2016, 27(10): 3344-3352. [SONG L L, QIN M Z. Identification of ecological corridors and its importance by integrating circuit theory. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(10): 3344-3352.]
- [22] 叶玉瑶, 苏泳娴, 张虹鸥, 等. 生态阻力面模型构建及其在城市扩展模拟中的应用. *地理学报*, 2014, 69(4): 485-496. [YE Y Y, SU Y X, ZHANG H O, et al. Ecological resistance surface model and its application in urban expansion simulations. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(4): 485-496.]
- [23] 彭建, 贾靖雷, 胡熠娜, 等. 基于地表湿润指数的农牧交错带地区生态安全格局构建: 以内蒙古自治区杭锦旗为例. *应用生态学报*, 2018, 29(6): 1990-1998. [PENG J, JIA J L, HU Y N, et al. Construction of ecological security pattern in the agro-pastoral ecotone based on surface humid index: A case study of Hangjin Banner, Inner Mongolia Autonomous Region, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(6): 1990-1998.]
- [24] ZHAO L, DAI A G, DONG B. Changes in global vegetation activity and its driving factors during 1982-2013. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 249: 198-209.
- [25] SANDHOLT I, RASMUSSEN K, ANDERSEN J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79(2-3): 213-224.
- [26] 陈斌, 张学霞, 华开, 等. 温度植被干旱指数(TVDI)在草原干旱监测中的应用研究. *干旱区地理*, 2013, 36(5): 930-937. [CHEN B, ZHANG X X, HUA K, et al. Application study of temperature vegetation drought index (TVDI) in grassland drought monitoring. *Arid Land Geography*, 2013, 36(5): 930-937.]
- [27] 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. *地理学报*, 2011, 66(7): 961-971. [LIU Z H, WANG Y L, PENG J, et al. Using ISA to analyze the spatial pattern of urban land cover change: A case study in Shenzhen. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(7): 961-971.]

Construction of ecological security pattern for systematic restoration of industrial and mining land in resource-based cities

WANG Hui-hui¹, LI Han-ting¹, XIE Miao-miao^{1,2}, XU Meng¹, LI Shao-ling¹, BAI Zhong-ke^{1,2}

(1. School of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Land Consolidation and Rehabilitation Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China)

Abstract: The systematic restoration of industrial and mining land for resource-based cities is a critical method to achieve sustainable development. It is necessary to integrate ecological restoration of industrial and mining land in the construction of regional ecological security pattern as whole. Based on the ecological security pattern and circuit theory, this study identified the key points and ecological corridors in 2000, 2005, 2011 and 2017 in Wuhai, Inner Mongolia Autonomous Region, a typical resourced-based city, and established the important level of restoration priority. The results show that: (1) From 2000 to 2017, the increase of industrial and mining land area and urban expansion on corridor paths led to a decline in the quality and changes in the location of the ecological corridors. The total length of the seven minimum cost paths increased from 120.74 km to 125.71 km; the total of cost weighted distance increased from 692.58 km to 1162.28 km. (2) 14 barriers are identified in 2017 with a total area of 16.06 km², including 12 key points with a total area of 14.09 km². (3) The restoration area is the identified ecological corridors from 2000 to 2017 and the key points in 2017, which were divided into important level of restoration priority, with a total area of 475.86 km². Based on the paradigm of regional ecological security pattern, the study coordinates the ecological restoration of industrial and mining land, making it an organic whole for the restoration of territorial space, and providing decision-making reference for the sustainable development of resource-based cities.

Keywords: resource-based city; ecological security pattern; systematic restoration; ecological corridor; circuit theory