

废弃工矿区生态修复潜力分析

——以水口山镇为例

周 敏^{1,2,3}, 齐增湘^{1,2,3*}, 吕婧玮^{1,2,3}, 刘 鑫^{1,2}

(1. 南华大学 建筑学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 湖南省健康城市营造工程技术研究中心, 湖南 衡阳 421001;
3. 衡阳市科技局 生态型区域/城市规划与管理重点实验室, 湖南 衡阳 421001)

摘 要:废弃矿区及工业生产基地是城镇发展中遗留的历史问题,影响着城市空间发展格局,同时也是城市生态用地建设的后备资源。以水口山镇为例,识别城市空间和生态用地两者扩张源地,以土壤重金属综合污染指数、土地类型等 9 个因子构建阻力面,模拟城市空间与生态源地的水平竞合过程,分析工矿区发展为生态用地的潜力,确定生态修复的优先级分区。结果表明:1)城市与生态空间扩张源地的面积为 355.95 hm² 和 3 880 hm²,分别占总面积的 4.13%和 45.02%;2)城市空间和生态源地竞合的差值-24 883.7~3 313.76,并呈现出城市中心区向四周减少的趋势,其高值区分布在北部志辉冶炼厂区,低值区集中在南部裸露矿区;3)工矿区可修复的生态用地面积为 333.09 hm²,主要分布在金铜冶炼项目等集中的工业园区、康家湾矿区、水口山金属有色公司和部分裸露的采矿区以及尾矿填埋区,且距北部冶炼厂越近的工矿区,其生态修复优先性越高;4)对工矿区 4 个优先级区提出治水、治土、植被恢复等不同治理措施与规划策略。研究结果为规划设计以及修复项目在空间尺度上落地和科学治理提供客观依据。

关键词:最小累积阻力模型;工矿区;生态修复;优先级

中图分类号:S731.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2021)04-0273-09

Ecological Restoration Potential of Abandoned Industrial and Mining Areas
——A Case Study of Shuikoushan Township

ZHOU Min^{1,2,3}, QI Zeng-Xiang^{1,2,3*}, LÜ Jing-Wei^{1,2,3}, LIU Xin^{1,2}

(1. School of Architecture, University of South China, Hengyang 421001, Hunan, China; 2. Hunan Healthy City Construction Engineering Technology Research Center, Hengyang 421001, Hunan, China; 3. Key Laboratory of Ecological Region-Urban Planning and Management of Hengyang Science and Technology Department, Hengyang 421001, Hunan, China)

Abstract: Abandoned mining areas and industrial production bases are the historical problems left over in the urban development, which affect the urban spatial development pattern. On the other hand, these abandoned areas can be taken as the reserve resources for urban ecological land construction. Taking Shuikoushan Township as an example, expansion sources of the urban space and ecological land were identified, meanwhile resistance surface based on nine factors (such as soil heavy metal pollution index and land type, for example) was constructed and the horizontal competition and cooperation process between urban space and ecological source was simulated to analyze the potential of converting industrial and mining areas into ecological land, and to determine the priority division of ecological restoration. The results showed that 1) the areas of urban and ecological space expansion sources were 355.95 hm² and 3 880 hm², respectively, ac-

收稿日期:2020-10-30 修回日期:2021-01-03
基金项目:湖南省科技厅科技计划重点项目(2015SK2003);湖南省哲学社会科学基金(18YBQ106);南华大学 2020 年研究生科研创新项目(203YXC023)。
作者简介:周 敏。研究方向:生态修复。E-mail:214973988@qq.com
*通信作者:齐增湘,博士,副教授。研究方向:生态规划。E-mail:qizengxiang@126.com

counting for 4.13% and 45.02% of the total area. 2) The difference value of horizontal competition and co-operation process between urban space and ecological source ranged from 24 883.7—3 313.76 and presented a reduction tendency from the central district to all directions. The high value area distributed in the Zhihui Smelting Factory, which was located in northern part of the township. The low value area concentrated in southern bare mining area. 3) The recoverable ecological land area in the industrial and mining area was 333.09 hm², which were mainly located in industrial parks of gold and copper smelting projects such as Kangjiawan mining area, Shuikoushan Metal Nonferrous Company, partially exposed mining areas and tailings landfill areas, and the closer to the industrial and mining area of the northern smelter, the higher priority of ecological restoration. 4) Different treatment measures and planning strategies such as water control, soil control and vegetation restoration in the 4 priority areas of the industrial and mining areas were proposed. The research results provide an objective basis for implementation of planning, designing the restoration projects in spatial scale and scientific governance.

Key words: minimum cumulative resistance model; industrial and mining area; ecological restoration; priority

工矿城镇不仅在我国经济发展中做出了巨大的贡献^[1],而且对加快现代化建设和推动工业化进程起了有力的支撑作用。但由于缺乏统筹规划和对资源粗放型的开发,致使城市建设用地与非城市用地发展不协调,从而带来了生态环境破坏、资源过度开发、产业衰退等城市问题^[2],其中废弃工矿区成为了制约城市化进程与可持续发展的主导因素。1977年生态修复被作为生态学分支进行研究后,其逐渐被认为对促进生态文明建设、废弃矿区土地再利用、城镇可持续发展具有重要支撑作用^[3]。尤其在党的“十八大”全面深化改革和“十九大”报告的重大战略部署下,“生态修复,城市修补”形成了城市整体小干预、渐进性的治理模式^[4-5]。因此,历史遗留的废弃工矿区及生态环境问题在新的城市治理模式下进行生态修复以及土地再利用具有迫切的现实意义。

在当前生态文明发展下,生态安全格局的构建被认为是实现区域生态安全与土地可持续发展的基本保障和必要途径^[6]。其理论通过识别和保护关键的局部、点、空间关系来维护区域生态系统的稳定发展^[7]。R. T. T. Forman^[8]首先系统性总结了景观格局的优化方法,俞孔坚^[7]则是在此基础上提出了景观生态安全格局的概念,此后成为国内的研究热点,引发了学者在城市的景观安全格局^[9]、风景名胜区^[10]、地质灾害区^[11]、农村居民点^[12]等方面都做了广泛研究。目前,除了少量基于“格局—过程”的区域生态安全格局构建模式^[13]外,“源地识别—阻力面构建—提取廊道”的方法已成为构建生态安全格局的基本范式^[11]。近些年, J. P. Knaapen^[14]提出的最小累积阻力模型(minimum cumulative resistance model, MCR)成为了主要的模型方法研究之一,其针对于景观对空间运动过程的阻碍作用展现

出良好的模拟效果,相比传统模型能更好地表达景观安全格局与生态过程的相互关系。目前景观安全格局研究中存有不足,首先,在研究范围方面,虽已形成镇域、县域、市域等多个不同尺度和区域的研究,但针对典型的工矿区域城镇研究鲜少。其次,在源的构建与识别方面,局限于单一源,尚少考虑“多源”综合下所表现出的内外空间分布差异,源的识别方法上以直接识别为主,缺乏客观性。最后,在构建生态阻力面上仅考虑景观类型的空间位置却忽略景观类型间的相互影响,因此,很难达到满意的研究效果,降低了研究方法的实践价值。

鉴于当前研究不足,以水口山镇为研究区,综合考虑城市和生态两者的扩张过程,基于遥感和 ArcGIS 软件,选取土壤重金属综合污染指数、土地类型、归一化植被指数等 9 个因子构建阻力面,模拟城市空间和生态源地的水平竞合过程,量化工矿区构建生态用地的潜力,提出生态修复分区和治理对策,为城市的空间布局及生态治理提供技术支持。

1 研究区与研究数据

1.1 研究区概况

水口山镇位于常宁市东北角,北傍湘江、东依舂陵河、南与烟洲镇相连、西与蓬塘乡、柏坊镇接址,总面积 86.19 km²,区内以平原、低山丘陵区地貌为主。气候属于亚热带半湿润季风气候,年平均气温 17.9℃,年平均风速 3.5 m/s,年平均降雨量 1 394.9 mm,年平均日照时数 122.9 h。镇内蕴藏着丰富的铅、锌、金等 20 多种矿产资源,其铅锌储量居全国第 1 位,素有“世界铅都”“有色金属之乡”的美誉,在国家经济发展中占居重要的地位。100 多 a 的开采历史背景下,私挖乱采的活动频繁,部分矿产

资源开发利用至今都保持着粗放的开发模式,未经处理的污水排放,对生态环境造成严重的破坏,裸露

的矿区及淘汰的工业基地达到 588.69 hm²,严重制约了经济的可持续发展(图 1)。

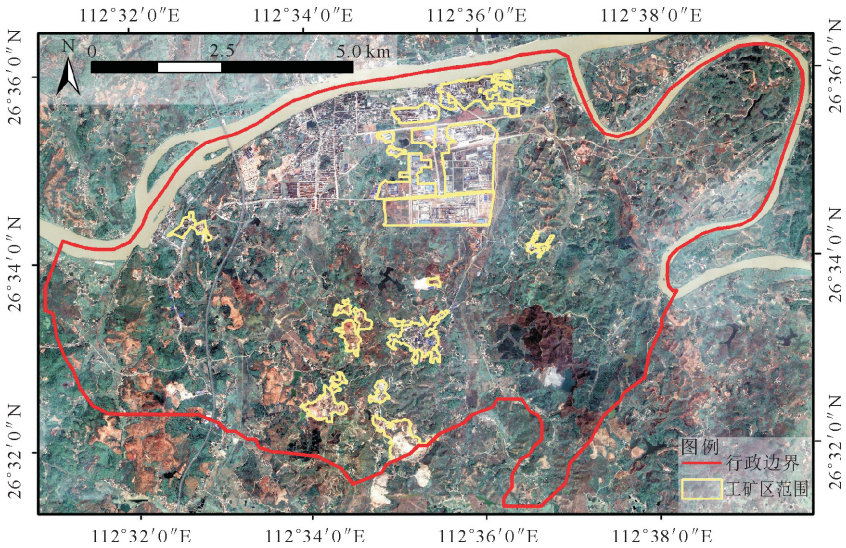


图 1 工矿区分布示意图

Fig. 1 Distribution diagram of industrial and mining area

1.2 数据获取和处理

采用的数据主要包括研究区 2018 年 3 月 Landsat 8 OLI 遥感影像数据、DEM 30 m 分辨率的数字高程数据(www.gscloud.cn)、土地利用类型数据利用遥感影像,结合常宁市水口山镇(工业新城)总体规划(2015—2030)及实地调查和定位,在 ENVI5.4 软件中目视解译为水田、旱地、有林地、灌木林、疏林地、其他林地、高覆盖度草地、河渠、水库坑塘、城镇用地、农村居民点、其他建设用地共 12 种用地类型。土壤重金属综合污染指数于 2020 年 6 月采用随机与网格布点(500 m×500 m)结合的方法,严格按《土壤环境监测技术规范》(HJ/T166-2006)完成实地采样,并用 X-MET 8000 手持式分析仪器测定土壤中 Pb、Cu、Zn、As、Cd 和 Hg 6 种重金属含量,运用 SPSS 软件对实测数据进行正态检验及处理,最后在 ArcGIS 中采用地统计学的 Kriging 法插值生成。NDVI 在 ENVI 中通过波段公式获得。数据栅格大小全部为 30 m×30 m,统一投影坐标为 WGS 1984 UTM ZONE 49N。

2 研究方法

2.1 归一化植被指数

为了消除部分辐射误差与大气的影 响,用 ENVI 对多光谱遥感影像进行辐射定标和大气校正后提取归一化植被指数(normalized difference vegetation index,NDVI)^[15]。

$$NDVI=\frac{NIR-R}{NIR+R} \#$$

(1)

式中,NIR 为红外光谱反射值,R 为红光反射值。

2.2 土壤重金属综合污染指数

根据《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018)和《土壤环境监测技术规范》(HJ/T166-2006)^[16-17],采用内梅罗法计算土壤重金属综合污染指数。

$$P_n=\sqrt{\frac{PI_{mean}^2+PI_{max}^2}{2}} \#$$

(2)

式中,PI_{mean} 和 PI_{max} 分别为平均单项污染指数和最大单项污染指数。

2.3 水平竞合模型构建

城市空间演变可看作是城市生态用地与城市建设用地两者相互对弈的过程。为了实现生态服务功能与社会经济效益两者的最大化,城市的生态用地和建设用地两者同样需要扩张,将工矿区生态修复结果看成是城市建设与生态用地竞合的过程。引入 MCR 模型形成建设用地和生态扩张的累积阻力面,并以两者的差值量化模拟城市空间和生态用地的竞合过程,以此来评价工矿区的生态修复潜力。

2.3.1 最小累积阻力模型 最小累积阻力模型(MCR)是耗费距离模型的衍生应用,其实质是通过“源”克服其扩散或迁徙“阻力”的耗费,反映的是一种可达性^[18]。模型考虑源、距离和阻力面特征三个要素,其公式^[19]:

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

(3)

式中,MCR 为最小累积模型;*f* 为一个未知的正函数,反映的是空间中任何一点的最小阻力与其到所

有源的距离和景观基面特征的正相关关系。 D_{ij} 代表从空间中某单元 i 到源 j 的实地距离, R_i 是某一景观 i 的阻力值。

本研究借鉴类似方法,将工矿区修复为城市建设和生态用地两种用途,由此建立两种用途的最小累积阻力差值模型,模拟工矿区生态修复的潜力并划分优先级:

$$\Delta MCR = MCR_{\text{生态用地}} - MCR_{\text{建设用地}} \quad (4)$$

式中, $MCR_{\text{生态用地}}$ 为生态用地综合最小累积阻力表面, $MCR_{\text{建设用地}}$ 为城市扩张用地综合最小累积阻力表面。 ΔMCR 为生态用地与城市用地两者综合最小累积阻力表面的差值结果。

3 结果与分析

3.1 源的选取

在城市空间扩张源地识别方面,城市集中建设的区域是其重点发展的对象,可作为城市空间扩张过程的源地。基于 2015 年水口山镇土地利用变更调查与实地调研,提取了集中分布的中心区及大型交通用地,总面积达到 355.95 hm^2 (图 2)。

在生态扩张源地识别方面,源地为事物或事物向外起点和基地^[20],因此必须是生态服务功能较

强、生境质量服务较高的区域^[19]。借鉴相关研究^[21],采用生态服务价值评价与生境质量评价等权叠加的方法,得到水口山镇生态用地综合评价结果,再用自然断点法选取等级最高的作为生态用地扩张的源地,面积为 3 880 hm^2 ,结构上看源地分布均匀 (图 2)。

3.2 水平竞合分析

生态过程中,源地是通过克服阻力对空间水平方向的竞争性控制和覆盖过程来建立空间联系^[20]。该阻力是通过不同因子构成的阻力面来实现的,其反映了源在空间运行时受到阻力强度空间的分布与生态用地空间连通的趋势^[20]。本研究的 MCR 模型是建立在城市和生态用地竞合过程之上,为了建立可比性,需要建立统一的阻力面体系。基于相关文献^[22-23],结合镇区现状,选取了土壤重金属综合污染指数、土地类型、高程、坡度、归一化植被指数、交通、河流、距城镇距离、距矿区距离 9 个指标为评价因子来构建阻力表面评价体系 (表 1),为使评价因子具有可比性,在衡量阻力因子时,通过查阅资料,将各项阻力因素用 5 分制进行等级划分 (图 3),最后各阻力因子按权重^[20,24-25]叠加构成城镇和生态扩张的综合因子阻力面 (图 4)。



图 2 城市与生态扩张源地分布

Fig. 2 Distribution of urban and ecological expansion sources

一般而言高差大,植被指数高、坡度大的适合生态用地,反之适合城市建设用地。鉴于本研究的生态修复潜力与优先级,是在城市空间和生态两者用地扩张竞合量化工矿区生态修复范围的基础上,因此需要采用构建综合生态用地 MCR 阻力表面减去综合城市建设用地 MCR 阻力表面,得到两过程的综合 ΔMCR 差值表面。

3.3 最小累积阻力表面的计算

根据构建阻力可否直接判断,可将阻力分为显性与隐形阻力两类^[26]。以传统构建方法利用 MCR 模型构建出生态用地和城镇两者扩展源的显性阻力表面,其次为减少单一阻力面导致阻力表面的构建与实际情况偏差,考虑物质与能量之间的相互影响,

采用地统计学中的 Kriging 以空间自相关为基础构建出两者的隐性阻力面,参考已有的研究成果^[26],确定显性与隐性两者阻力面权重值为 0.7 和 0.3,构建出两者综合 MCR 阻力表面 (图 5)。最后采用式 (4) 计算出生态与城市用地扩张 ΔMCR 差值表面 (图 6),其呈现出大值区分布在北部的志辉冶炼厂区,而小值区则集中在南部的裸露矿区,并由城市中心区域向周边减少。

3.4 生态修复用地潜力

根据最小累积阻力表面的差值结果,选取 $\Delta MCR < 0$ 时宜为生态用地的值,用自然断点法将镇区划分 I ~ V 级的潜力区 (图 7),其阻力相差值越大,则潜力区级别越大,修复为城市生态用地的后

备潜力越高而生态修复优先性越低。通过计算(表 2)镇区适宜地后备潜力面积为 5 603.22 hm²,Ⅰ与Ⅱ级潜力区占到生态适宜地后备潜力总面积的 28.65%和 26.57%,Ⅲ与Ⅳ级潜力区占到 23.97%和 15.59%,Ⅴ级潜力区达到 5.22%。

表 1 阻力因子评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of resistance factor				
阻力因子	权重	阻力等级	生态用地 扩张阻力值	城市用地 扩张阻力值
坡度/(°)	0.05	>20	1	5
		15~20	2	4
		10~15	3	3
		5~10	4	2
		0~5	5	1
NDVI	0.25	>0.3	1	5
		0.2~0.3	2	4
		0.1~0.2	3	3
		0~0.1	4	2
		<0	5	1
距道路距离/m	0.1	>1 000	1	5
		500~1 000	2	4
		200~500	3	3
		100~200	4	2
		0~100	5	1
距城镇距离/m	0.1	>2 500	1	5
		1 500~2 500	2	4
		1 000~1 500	3	3
		500~1 000	4	2
		0~500	5	1
土地利用类型	0.2	林地/水体	1	5
		草地	2	3
		耕地	3	2
		建设用地	5	1
高程/m	0.05	>194	1	5
		138~194	2	4
		100~138	3	3
		75~100	4	2
		<75	5	1
距河流距离/m	0.05	0~200	1	1
		200~400	2	2
		400~600	3	3
		600~1 000	4	4
		>1 000	5	5
距矿区距离/m	0.1	>1 000	1	1
		800~1 000	2	2
		500~800	3	3
		300~500	4	4
		0~300	5	5
土壤重金属综合污染指数	0.1	<3	1	1
		3~30	2	2
		30~60	3	3
		30~90	4	4
		>90	5	5

依据工矿区范围内不同区域优化对生态系统功能发挥的作用有不同影响,区内 4 种潜力区的修复优先性分别为Ⅰ区>Ⅱ区>Ⅲ区>Ⅳ区(图 7)。通过统计(表 2)工矿生态适宜地后备潜力面积为 333.09 hm²,Ⅰ级与Ⅱ级潜力区面积为 166.41 hm²和 90.9 hm²,分别占到工矿区生态适宜地后备潜力总面积的 49.96%与 27.29%;Ⅲ级与Ⅳ级潜力区面积为 73.98 hm²和 1.8 hm²,分别占到工矿区生态适宜地后备潜力总面积的 22.21%与 0.54%;其中金铜项目冶炼等集中的工业园区、康家湾矿区、水口山金属有色公司和部分裸露的采矿区以及尾矿填埋区为重点潜力区。在今后规划设计中,可以将这些区域作为重点生态项目建设区。

4 结论与讨论

基于 ΔMCR 差值表面分析和修复优先级分区,工矿区内修复生态用地的面积占工矿用地面积的 59.62%,可为城市生态用地建设提供 333.09 hm²用地。就工矿城镇而言,对废弃工矿区生态修复不仅可以维护生态系统的稳定性也一定程度上缓解了城市问题,将城市和生态两者扩张因素纳入生态修复的评价体系中,对生态修复依据更具有科学性和指导性价值。

根据不同修复优先级分区的治理重点,可采用有区别的措施与规划策略进行生态修复。Ⅰ级潜力区是最主要的生态用地修复区,占到工矿区生态适宜地后备潜力总面积的 49.96%,其主要分布在金铜项目冶炼等集中的工业园区,在治理方面该区域是污染物扩散的源头,重金属复合污染程度强,工业冶炼活动产生的“三废”导致重金属的沉降和集聚,降低土壤中的重金属是生态修复的核心。可采用低成本且有效的绿色修复技术—微生物修复或植物修复,通过微生物的吸附、转化来降低土壤重金属,或通过超积累植物利用其对污染元素特殊的富集能力,将重金属从土壤中移除。如狼把草(*Bidens tripartita*)、龙葵(*Solanum nigrum*)对 Cd 和 Zn 有富集作用,蜈蚣草(*Eremochloa ciliaris*)可修复萃取 Pb-As、Zn-As、Cu-As 等复合污染土壤。在规划策略上,由于距城镇中心区较近,可纳入城市用地的开敞空间来协调发展,在城镇转型发展期,依托现存工厂遗址,在保留工业文化记忆基础上发展第 3 产业。

Ⅱ级潜力区占到工矿区生态适宜地后备潜力总面积的 27.29%,其主要分布在尾矿填埋区、水口山金属有限公司及部分裸露矿区。长期的选矿及尾矿填埋是区域的主要活动,选矿废水的排放以及坑塘洼地内大面积废弃尾矿的堆积,对水资源造成了严重污染。

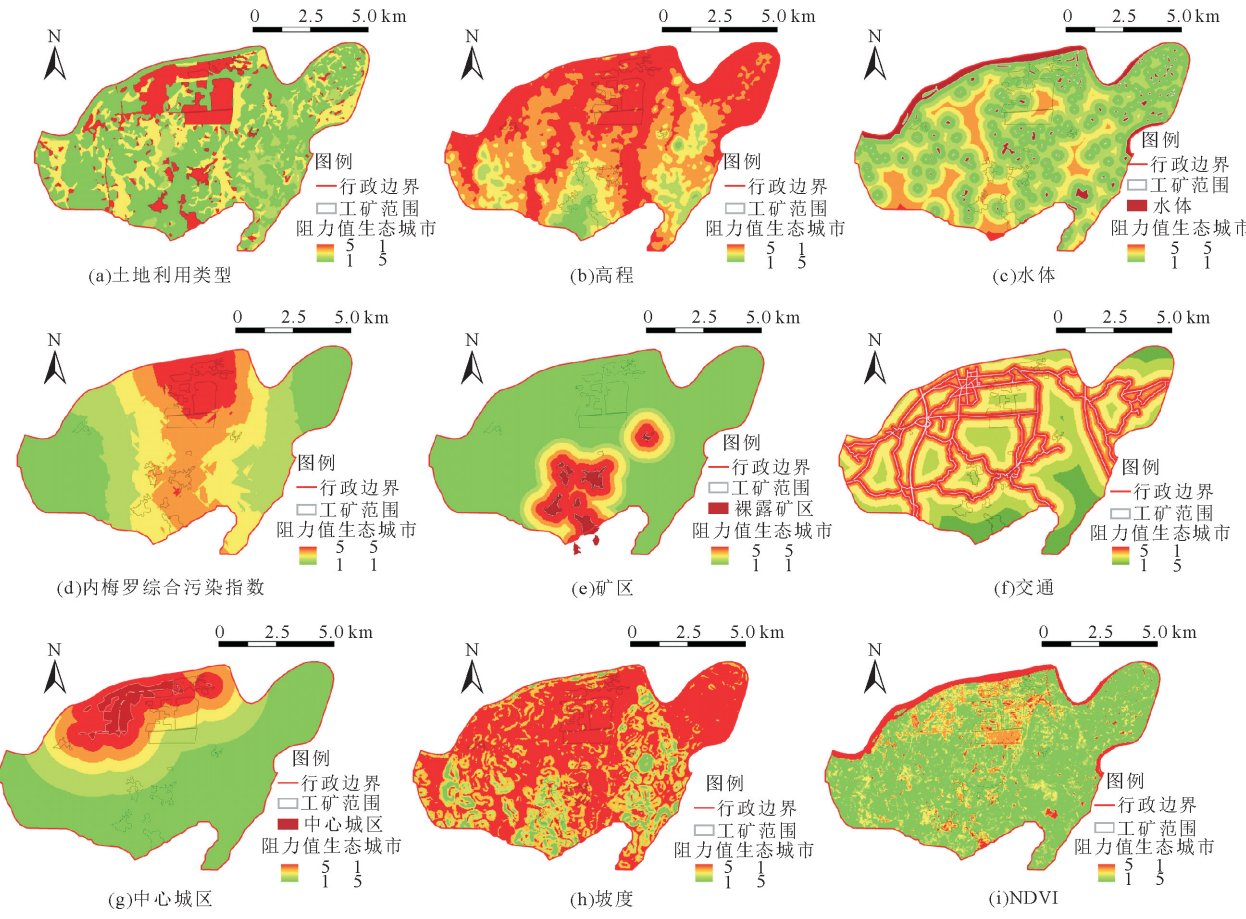


图 3 单因素阻力面

Fig. 3 Single factor resistance surface

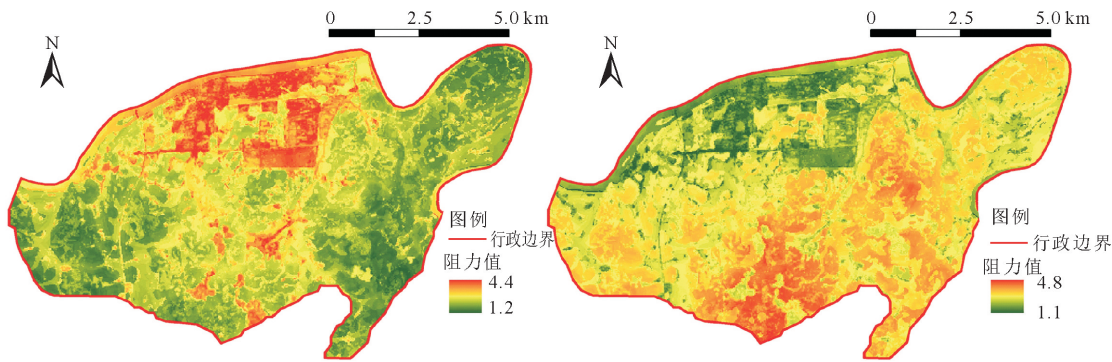


图 4 生态扩张与城镇扩张综合阻力面

Fig. 4 The comprehensive resistance surface of ecological expansion and urban expansion

水质的治理是该区域生态修复的重点,选矿区应主要以治污水、抓节水为目标。可采取污水分流措施且集中建设污水处理系统,达到污水的排放标准后循环使用,从根本上治理了超标污水的排放且降低了治水成本和保护了水资源,同时加大水系淤泥清理和河堤工程建设力度。在规划策略上,可将部分修复成小型的绿色场地,如经济型农林用地等。

Ⅲ级和Ⅳ级潜力区面积分别占到工矿区生态适宜地后备潜力总面积的 22.21%与 0.54%,由于长

期的采矿活动,区域植被覆盖度低,土地结构损坏严重,在治理方面,植被恢复是区域生态修复的侧重点,针对自然环境及露天矿区构成特点采用综合治理的方式进行植被恢复,在极端的环境下,应选择耐干旱瘠薄、抗逆性好、优良土壤能力、根系发达、成活率强的植物种类,如紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)、小叶榕(*F. microcarpa*)、车桑子(*Dodonaea viscosa*)、类芦(*Neyraudia reynaudiana*)、滇合欢(*Albizia simeonis*)等,在群落配置中,以草灌植物为主,

突出以绿色为基调的层次感。为彰显地方特色,适当选用一定量的当地先锋乔木,如樟树(*Cinnamomum camphora*)等。乔木、灌木和草本的配置面积比例分别是 10%~20%、20%~30%、50%~70%。

为提高存活率,根据不同的地类和植被类型进行整地,采取覆土措施、自然与人为增肥措施恢复土壤基质和肥力。在规划策略上,建议结合部分裸露的矿区修复为城市的郊野公园与半开放的生态保育区。

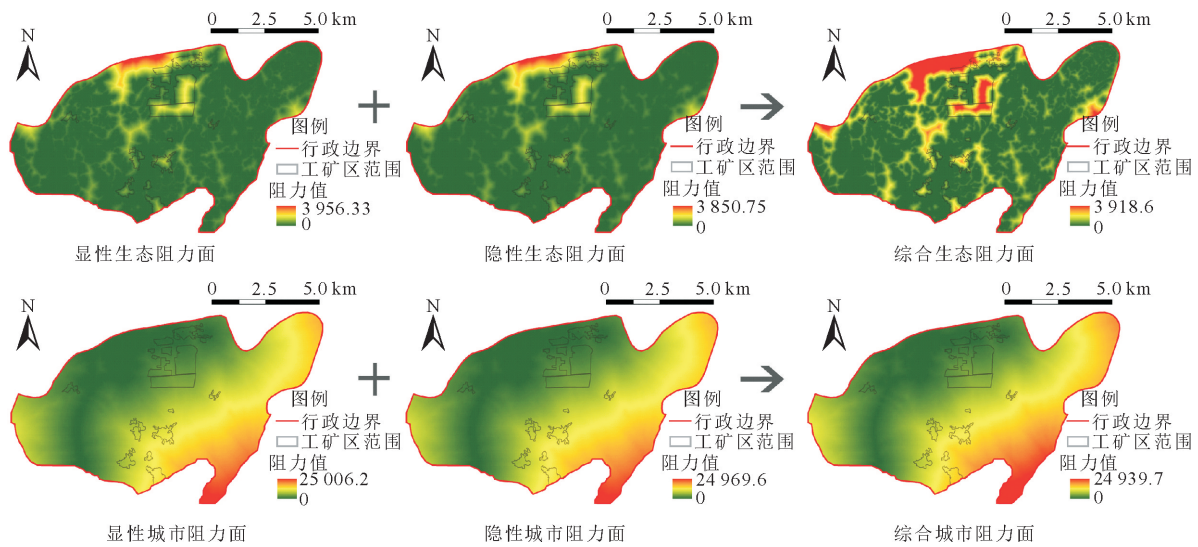


图 5 生态与城市两者扩张综合最小累积阻力表面

Fig. 5 The minimum cumulative resistance surface for both ecological and urban expansion

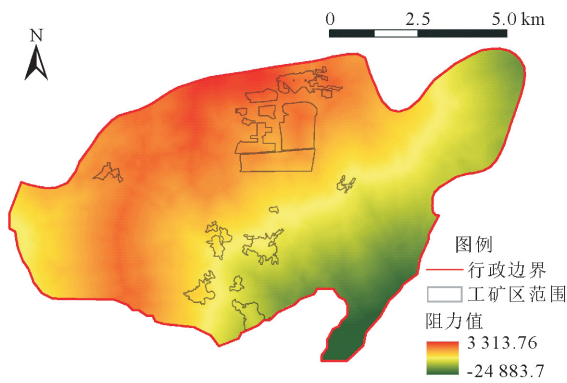
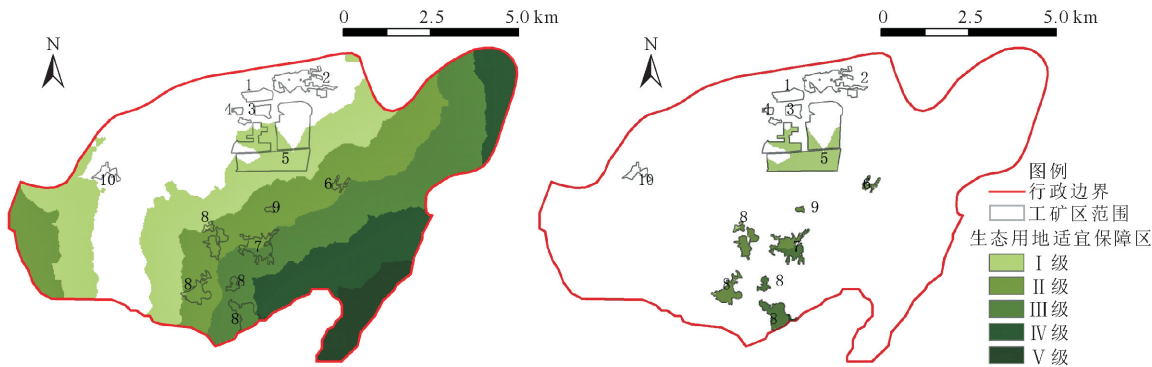


图 6 基于 ΔMCR 模型结果

Fig. 6 ΔMCR model based results

本研究探索了在工矿区小尺度上生态修复潜力的评价方法,其阻力因子体系及模型的构建可为类似的研究提供借鉴。但仍有几个方面需要强调:1) 最小阻力模型建立是在指标体系构建的基础之上,模型中阻力因子参数是相对值而非绝对值且评价体系无量纲,其权重的设定都是基于相关研究成果进行的,有待深入探讨;2) 模型构建方面,只考虑单元有促进或阻碍作用以及社会效益最大化和生态受到最小破坏的用地竞合,而未考虑政策制度、技术水平、开发理念等一些非指标因素的影响;3) 在内梅罗综合污染指数方面,只在 0~20 cm 土壤取样测算,可进一步探讨土壤纵向深度各金属的变化,对重金



注:1. 志辉冶炼;2. 松柏化肥厂;3. 宏纬度冶炼厂;4. 化工四厂;5. 金铜项目冶炼集中工业园区;6. 康家湾矿区;7. 水口山金属有限公司;8. 裸露矿区;9. 尾矿填埋区;10. 康华化肥公司。

图 7 镇区与工矿区生态修复潜力等级空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of ecological restoration potential grades in towns and industrial and mining areas

表 2 工矿区生态修复潜力分区阈值区间

Table 2 Threshold interval of ecological restoration potential in industrial and mining areas

生态恢复潜力分区	阻力差值区间	水口山镇		工矿区	
		面积/hm ²	比例/%	面积/hm ²	比例/%
I	[−24 883.66~−17 364.35]	1 605.15	28.65	166.41	49.96
II	[−17 364.35~−12 941.22]	1 488.96	26.57	90.9	27.29
III	[−12 941.22~−9 292.15]	1 343.34	23.97	73.98	22.21
IV	[−9 292.15~−5 532.49]	873.36	15.59	1.8	0.54
V	[−5 532.49~−2 104.57]	292.41	5.22	—	—

属综合污染分布研究进行完善。今后可在完善阻力因子及模型体系构建基础上进一步对工矿区的修复利用做深入的探究,如建立完整的工矿城镇修复体系、建立工矿城镇多元化修复模式以及多产业重组模式等。但本研究结果可为水口山镇规划设计以及修复项目在空间尺度上落地和科学治理提供客观依据,以期促进工矿城镇的可持续发展,并为同类型矿区的生态修复提供借鉴。

参考文献:

[1] 李惠娟,龙如银,兰新萍.资源型城市的生态效率评价[J].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[J]. Resources Science, 2010, 32(7): 1296-1300. (in Chinese)

[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[J].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[J]. China Population, Resources and Environment, 2014, 24(8): 81-89. (in Chinese)

[3] 汤姚楠,周伟奇.废弃矿区生态修复的资源再利用价值评估——以徐州为例[J].生态学杂志,2020,39(10):3430-3441.
TANG Y N, ZHOU W Q. Resource reuse valuation of ecological restoration in abandoned mining areas: a case study of Xuzhou city, Jiangsu Province, China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(10): 3430-3441. (in Chinese)

[4] 张兵.迈向城市的整体性治理——“生态修复,城市修补”的政策意义[J].城市规划,2016,40(Supp. 2):12-18.
ZHANG B. Towards holistic urban governance: the implications of the new policy of “city betterment and ecological restoration”[J]. City Planning Review, 2016, 40(Supp. 2): 12-18. (in Chinese)

[5] 黄艳.促进城市转型发展增强人民的获得感——兼论“生态修复,城市修补”工作[J].城市规划,2016,40(A02):7-11.
HUANG Y. City betterment and ecological restoration: an agenda for enhancing transformative urban development and advancing the people’s sense of gain[J]. City Planning Review, 2016, 40(A02): 7-11. (in Chinese)

[6] 马欢,岳德鹏,于强,等.生态脆弱区防护网络构建及分区研究——以磴口县为例[J].西北林学院学报,2017,32(4):193-202.
MA H, YUE D P, YU Q, et al. Construction of ecological net-

[14] KNAAPEN J P,SCHEFFER M,HARMS B. Estimating habitat isolation in landscape planning-science direct[J]. Landscape and Urban Planning,1992,23(1):1-16.

[15] TUCKER C,PINZON J,BROWN M,*et al.* An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT veget—ation NDVI data[J]. International Journal of Remote Sensing,2005,26(20):4485-4498.

[16] 国家环境保护总局. 土壤环境监测技术规范,HJ/T 166-2004[S]. 北京:中国环境科学出版社,2004.

[17] 国家生态环境部. 土壤环境质量-农用地土壤污染风险管控标准,GB15618-2018[S]. 北京:中国标准出版社,2018.

[18] 钟式玉,吴箐,李宇,等. 基于最小累积阻力模型的城镇土地空间重构——以广州市新塘镇为例[J]. 应用生态学报,2012,23(11):3173-3179.

ZHONG S Y,WU Q,LI Y,*et al.* Reconstruction of urban land space based on minimum cumulative resistance model;a case study of Xintang town,Guangzhou city[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2012,23(11):3173-3179. (in Chinese)

[19] 潘竞虎,刘晓. 疏勒河流域景观生态风险评价与生态安全格局优化构建[J]. 生态学杂志,2016,35(3):791-799.

PAN J H,LIU X. Landscape ecological risk assessment and landscape security pattern optimization in Shule river basin[J]. Chinese Journal of Ecology,2016,35(3):791-799. (in Chinese)

[20] 周锐,王新军,苏海龙,等. 平顶山新区生态用地的识别与安全格局构建[J]. 生态学报,2015,35(6):2003-2012.

ZHOU R,WANG X J,SUN H L,*et al.* Identification and security pattern of ecological land in Pingdingshan newly developed area[J]. Acta Ecological Sinica,2015,35(6):2003-2012. (in Chinese)

[21] 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[J]. 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[J]. Acta Ecological Sinica,2013,33(13):4125-4133. (in Chinese)

[22] 冯姗姗,常江,侯伟. GI 引导下的采煤塌陷地生态恢复优先级评价[J]. 生态学报,2016,36(9):2724-2731.

FENG S S,CHANG J,HOU W. A framework for setting restoration priorities for coal subsidence areas based on green infrastructure (GI) [J]. Acta Ecological Sinica,2016,36(9):2724-2731. (in Chinese)

[23] 黄鑫,曹学章,张明,等. 基于最小累积阻力模型的内蒙古胜利煤田景观生态安全格局构建[J]. 生态与农村环境学报,2019,35(1):55-62.

HUANG X,CAO X Z,ZAHNG M,*et al.* Construction of landscape ecological security pattern of Shengli coalfield in Inner Mongolia based on the minimum cumulative resistance model[J]. Journal of Ecology and Rural Environment,2019,35(1):55-62. (in Chinese)

[24] 曾黎,杨庆媛,杨人豪,等. 三峡库区生态屏障区景观格局优化——以重庆市江津区为例[J]. 生态学杂志,2017,36(5):1364-1373.

ZENG L,YANG Q Y,YANG R H,*et al.* Landscape pattern optimization forecological barrier in the three gorges reservoir area;a case study in Jiangjin,Chongqing[J]. Chinese Journal of Ecology,2017,36(5):1364-1373. (in Chinese)

[25] 严军,项竹君,凌静. 石臼湖马鞍山环湖片区景观生态规划研究[J]. 长江流域资源与环境,2016,25(9):1375-1383.

YAN J,XIANG Z J,LING J. Research on the landscape eco—planning of the area surrounding Shijiu lake, Maanshan[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2016,25(9):137-1383. (in Chinese)

[26] 余宇晨,陈彩虹,贺丹,等. 基于 MCR 模型和 Kriging 的海口市景观格局优化分析[J]. 西北林学院学报,2016,31(3):233-238.

SHE Y C,CHEN C H,HE D,*et al.* Landscape pattern optimization analysis based on MCR model and Kriging in Haikou[J]. Journal of Northwest Forestry University,2016,31(3):233-238. (in Chinese)

(上接第 208 页)

[6] 钟旻良,秦丽丽,刘镇波. 开裂缺陷对木材振动性能的影响[J]. 西北林学院学报,2016,31(5):261-266.

ZHONG M L,QIN L L,LIU Z B. Influence of crack on vibration properties of wood [J]. Journal of Northwest Forestry University,2016,31(5):261-266. (in Chinese)

[7] 袁云梅,多化琼,马坤. 基于权重系数的木材图像增强及识别[J]. 西北林学院学报,2018,33(2):209-212.

YUAN Y M,DUO H Q,MA K. Wood image enhancement and recognition based on weight coefficient [J]. Journal of Northwest Forestry University,2018,33(2):209-212. (in Chinese)

[8] 康牧. 图像处理中几个关键算法的研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2009.

[9] 张德丰. MATLAB 数字图像处理[M]. 北京:机械工业出版社,2009:190-192.

[10] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics,1979,9(1):62-66.

[11] ANGULO J,SERRA J. Modelling and segmentation of colour images in polar representations [J]. Image & Vision Computing,2007,25(4):475-495.

[12] 戴天虹,邱筱斐. 基于形态学的木材缺陷检测[J]. 机电产品开 发与创新,2011,24(5):79-81.

DAI T H, QIU X F. Detection of wood defects based on morphology [J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products,2011,24(5):79-81. (in Chinese)

[13] 中国国家标准化管理委员会. 原木缺陷[S]. 北京:中国标准出版社,2017:12-13.

[14] 侯卫萍,王立海. 数学形态学与 Canny 算子在木材腐朽图像特征提取中的应用[J]. 森林工程,2011,27(2):28-30.

HOU W P,WANG L H. Application of mathematical morphology and canny operator in pattern extraction of rotten wood image [J]. Forest Engineering,2011,27(2):28-30. (in Chinese)

[15] RAFAEL C. GONZALEZ,RICHARD E. Woods. 数字图像处理[M]. 3 版. 阮秋琦,译. 北京:电子工业出版社,2017:455-457.