

DOI: 10.5846/stxb201905291121

张世文, 卜中原, 沈强, 杨邵文, 胡青青, 周妍, 罗明. 粤北南岭大宝山矿流域山水林田湖草修复阻力与优先级分析. 生态学报, 2019, 39(23): 8920-8929.

Zhang S W, Bu Z Y, Shen Q, Yang S W, Hu Q Q, Zhou Y, Luo M. Resistance and priority analysis of landscape forest fields, lakes, and grass restoration in Dabaoshan mining basin. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(23): 8920-8929.

粤北南岭大宝山矿流域山水林田湖草修复阻力与优先级分析

张世文^{1,2}, 卜中原¹, 沈强³, 杨邵文³, 胡青青¹, 周妍^{2,4,*}, 罗明^{2,4}

1 安徽理工大学地球与环境学院, 淮南 232001

2 自然资源部土地整治重点实验室, 北京 100035

3 安徽理工大学测绘学院, 淮南 232001

4 自然资源部国土整治中心, 北京 100035

摘要: 遵循“防源、控流、治汇”理念, 以粤北南岭大宝山矿区作为风险源, 以所在流域为研究区, 分析研究区主要阻力因素, 采用最小累积阻力模型建立区域生态阻力面; 利用 Jenks 自然断点法, 分析生态修复优先级, 提出分区治理重点和对策。研究结果表明: 研究区综合阻力系数处于 9—32 之间, 各评价指标的阻力面空间分布格局相似, 其阻力值呈现出东南部大, 西北部小的空间格局; 长期的矿业开采污染了流域生态环境, 且距离矿区越近的区域生态修复的优先性越高。将研究区分为 4 个优先级区, 各区修复优先性依次为 I 区>II 区>III 区>IV 区。I 区重点在于治水, 提高 pH、降低重金属有效态含量和增加地表植被覆盖度。II 区重点在于河流治理与治土, 确保污染减排, 增强拦泥库的废水调节。III 区、IV 区核心在治土, 逐步改善土壤条件。研究结果为修复项目在时空尺度上落地和科学治理提供科学依据。

关键词: 最小累积阻力模型; 生态修复; 阻力面; 优先级

Resistance and priority analysis of landscape forest fields, lakes, and grass restoration in Dabaoshan mining basin

ZHANG Shiwen^{1,2}, BU Zhongyuan¹, SHEN Qiang³, YANG Shaowen³, HU Qingqing¹, ZHOU Yan^{2,4,*}, LUO Ming^{2,4}

1 College of Earth and Environmental Science, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China

2 Key Laboratory of Land Consolidation and Rehabilitation, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China

3 School of Geodesy and Geomatics, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China

4 Land Consolidation and Rehabilitation Center of the Ministry of Natural Resource, Beijing 100035, China

Abstract: Following the concept of "source prevention, flow control, and sink control", taking Dabaoshan mining area in nanling, north guangdong as the source of risk and the basin as a research area, the main resistance factors of the area were analyzed and studied. This paper utilized the minimal cumulative resistance (MCR) model to establish the regional ecological resistance surface, analyzed ecological restoration priorities using Jenks natural breakpoint method, and proposes key points and countermeasures for regionalized governance. The results show that the comprehensive resistance coefficient of the study area was between 9 and 32, and the spatial distribution pattern of the resistance surface of each evaluation index was similar, with a large resistance value in the southeast and a small spatial pattern in the northwest. Long-term mining has polluted the ecological environment of the basin, and the closer the mining area, the higher the priority of regional

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFD0800701)

收稿日期: 2019-05-29; 修订日期: 2019-09-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhouyanzzx@126.com

ecological restoration. The study area is divided into four priority areas, and the priority of each area is in turn: Area I > Area II > Area III > Area IV. Area I focuses on water control, increasing pH, reducing the available content of heavy metals, and increasing vegetation coverage. Area II focuses on river control and soil control, ensuring a reduction in pollution and enhancing the waste water regulation of sludge reservoirs. Areas III and IV focus on soil control, gradually improving soil conditions. The results provide a scientific basis for the landing and scientific management of restoration projects on spatial and temporal scales.

Key Words: minimal cumulative resistance model; ecological restoration; resistance surface; priority

生态系统的稳定不仅是社会经济可持续发展的前提,也是人类赖以生存的基础。长期以来自然资源的过度开发,对我国生态系统的平衡状态造成了巨大破坏,部分关系国家发展前景的核心地区的生态系统已经出现了不同程度的退化^[1-7]。粤北南岭是国家生态文明建设和生态环境保护的重要规划和试点区,生态退化将影响“粤港澳大湾区”和“一带一路”等国家区域战略目标的实现。山水林田湖草是一个生命共同体,具有相互联系、相互依存、相互制约的特点,单要素治理往往顾此失彼,不仅达不到很好效果,还会导致生态系统稳定性的破坏。因此,生态系统的保护和修复需要综合治理^[8],需要将过去单一的要害保护转变为以多要素构成的生命系统共治共管、统一保护和修复。

国家高度重视对“山水林田湖草”的综合治理和整体修复。2016年10月,由财政部、国土资源部、环境保护部联合发表的《关于推进山水林田湖生态保护修复工作的通知》中,明确要求全国各地开展山水林田湖生态修复,并在2017年8月,中央全面深化改革领导小组第三十七次会议上又将“草”纳入,自此构成“山水林田湖草”的生命共同体^[9-11]。遵循物质与能量的源汇理念,按流域尺度,揭示其内部的物质运移与转换以及对整个流域的影响,分析其修复阻力和优先级,可为修复项目在时空尺度上落地提供科学依据,从而达到科学治理的目的。目前该领域的研究尚存一定的不足。研究方向上局限于风险源的归类识别,较少考虑由于风险源所表现出的内外空间分布差异,包括对于植被覆盖、地形地貌、水质环境等多种因素间的综合作用^[12-16]。研究手段上直接将小尺度区域的方法应用到大尺度区域,很难达到满意的效果,降低了研究方法的实践价值。

综合考虑当前研究进展和不足,以粤北南岭大宝山矿流域为研究区,基于遥感和GIS软件,选取代表山水林田综合质量和治理可行性的地质灾害、植被覆盖状况等8种指标作为阻力面分级指标。利用最小累积阻力模型(minimal cumulative resistance, MCR)构建阻力面,并根据阻力大小进行修复优先级分区,分区提出修复重点和对策。研究结果可以为阻力识别、项目立项优选、山水林田湖草生态共治提供技术支持和理论依据。

1 研究区概况与数据获取

1.1 研究区概况

大宝山矿流域属于广东粤北南岭山区山水林田湖草生态保护修复试点中矿山及土壤生态修复的重点区域。大宝山矿位于研究区西北部,是以铁、铜、硫、钨为主的大型多金属矿山,历史上私挖乱采活动频繁,且老旧矿山较多,部分矿产资源开发利用至今仍然保持着粗放开发方式,技术设施落后,地表裸露严重,严重影响了矿区及其周边的生态环境。研究区地形总体呈现北高南低,以丘陵为主,流经矿区的水域流向大致由北向南,沿地势从东南部流出(图1)。

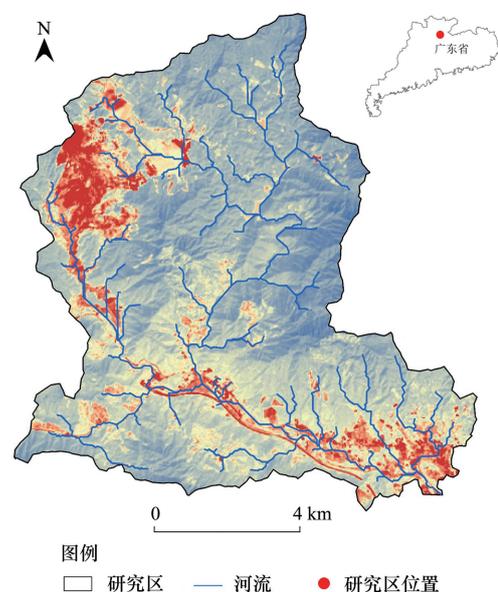


图1 研究区位置图

Fig.1 Location of study area

1.2 阻力评价指标体系建立与数据获取

基于山水林田湖草全要素系统理论,分析研究区生态问题和矿业开采情况,选取研究区水质、地表植被、重金属污染等主要的生态阻力因素,建立了涵盖生态修复 5 个要素类型、5 个阻力类型和 8 个指标的生态阻力评价体系(表 1)。

基于 ArcGIS 和 ENVI 软件完成数据统计与分析。数据栅格大小全部为 30 m,实地采样调查于 2017、2018 年完成,测试方法按《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)和《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018)执行。综合遥感影像、矿区复垦、实地调查采样等材料,获取研究区用地类型分布、土地损毁程度、工程难易程度、地表水质、土壤重金属含量。综合考虑空间预测精度和不确定性,基于经验贝叶斯方法获取土壤重金属综合污染指数和地表水综合污染指数的空间分布格局。

2 研究方法

2.1 土壤可蚀性

土壤可蚀性是指土壤对侵蚀的敏感性,是反映地质灾害程度的重要指标,是土壤对侵蚀抵抗力的倒数,一般用 K 表示^[17-19]。采用 Williams 等人建立的 EPIC(erosion productivity impact calculator)公式进行计算^[20-21]。

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.025 \text{san} \left(1 - \frac{\text{sil}}{100} \right) \right] \right\} \times \left[\frac{\text{sil}}{\text{cla} + \text{sil}} \right]^{0.3} \times \left[1 - 0.025 \frac{c}{c + \exp(3.72 - 2.95c)} \right] \times \left[1 - 0.7 \frac{\text{snl}}{\text{snl} + \exp(22.9\text{snl} - 5.51)} \right] \quad (1)$$

式中, san、sil、cla 和 c 分别代表土壤中砂粒、粉粒、黏粒、有机碳的含量(%), $\text{snl} = 1 - \text{san}/100$ 。

表 1 研究区生态阻力评价指标

Table 1 Evaluation index of resistance in study area

要素类型 Factor type	阻力类型 Resistance type	指标名称 Index type	数据来源 Data sources
山 Mountain	地质灾害	土壤可蚀性	世界土壤数据库
		坡度	地理国情监测云平台
水 Water	地表水质	地表水综合污染指数	
林 Woods	植被覆盖状况	植被覆盖度	2014—2018 年 OLI 影像
田 Cropland	土壤污染	土壤重金属综合污染指数	
		pH 值	世界土壤数据库
修复可行性 Repair feasibility	工程难度	土地损毁程度	OLI 影像和材料收集分析
		工程难易程度	OLI 影像和材料收集分析

2.2 植被覆盖度

为消除部分辐射误差,利用多光谱遥感影像提取归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)^[22-24]。

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{R}}{\text{NIR} + \text{R}} \quad (2)$$

式中, NIR 为红外光谱反射值, R 为红光反射值。

利用归一化植被指数,采用像元二分模型估算植被覆盖度(vegetation fraction coverage, VFC)^[25-27]。

$$\text{VFC} = \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{soil}}}{\text{NDVI}_{\text{veg}} - \text{NDVI}_{\text{soil}}} \quad (3)$$

$$\text{NDVI}_{\text{soil}} = \frac{\text{VFC}_{\text{max}} \cdot \text{NDVI}_{\text{min}} - \text{VFC}_{\text{min}} \cdot \text{NDVI}_{\text{max}}}{\text{VFC}_{\text{max}} - \text{VFC}_{\text{min}}} \quad (4)$$

$$NDVI_{veg} = \frac{(1-VFC_{min}) \cdot NDVI_{max} - (1-VFC_{max}) \cdot NDVI_{min}}{VFC_{max} - VFC_{min}} \quad (5)$$

式中, $NDVI_{soil}$ 、 $NDVI_{veg}$ 分别表示裸地或无植被覆盖和完全植被覆盖的 NDVI 值, VFC_{max} 、 VFC_{min} 分别表示在一定置信范围内的最大值与最小值。

2.3 土壤重金属综合污染指数

参考《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/T 166—2006)^[28-29],采用内梅罗法计算土壤重金属综合污染指数。

$$P_n = \sqrt{\frac{PI_{mean}^2 + PI_{max}^2}{2}} \quad (6)$$

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

2.4 地表水综合污染指数

按照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)^[30],进行各单项组分评价,对各项指标分别按地表水单项组分评分值赋值 F_i ,并带入公式计算综合评价分值 F 。单项组分评分值赋值分为五级(I、II、III、IV、V),对应的 F_i 值分别为 0、1、3、6 和 10。

$$F = \sqrt{\frac{\bar{F}^2 + F_{max}^2}{2}} \quad (7)$$

$$\bar{F} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i \quad (8)$$

式中, F 为综合评价分数; \bar{F} 为各单项组分评分值 F_i 的平均值; F_{max} 为单项组分评价分值 F_i 中的最大值; n 为参加单项评价项数。

2.5 生态阻力模型的建立

在一定流域内的生态环境问题中,对区域生态环境安全造成威胁的景观称之为“风险源”。针对风险源,研究区的各指标因素之间存在着不同程度的连接,多个连接共同产生影响,进而产生生态风险,而这些由连接产生的生态风险是需要通过克服阻力实现的。本文以流域内的大宝山矿区为风险源。

最小累积阻力模型(MCR)是耗费距离模型的衍生应用,最初用来反映物种从源到目的地运动过程中所需耗费的最小代价^[31-32]。后来被广泛应用于生态领域,如物种保护、景观格局分析等方面。该模型考虑源、空间距离和阻力基面 3 方面因素,表达式为:

$$MCR = f \min \sum_{j=n}^{i=m} (D_{ij} \cdot R_i) \quad (9)$$

式中, MCR 为最小累积阻力; f 是一未知负函数,为最小累积阻力与生态适宜性的负相关关系; \min 为某景观单元对不同源取累积阻力最小值; D_{ij} 为从源 j 到景观单元 i 的空间距离; R_i 为景观单元 i 对运动过程的阻力系数。 f 函数是未知的,但 $D_{ij} \cdot R_i$ 的累积值,被认为是从源到空间某一点路径的相对易达性的衡量,其中从所有源到某点阻力的最小值被用来衡量该点的易达性。采用 Jenks 自然断点法,划分阻力级别(表 2)。

3 结果与分析

3.1 不同指标阻力分级

基于 ArcGIS 和 ENVI 软件,按照表 2,构建各指标的阻力系数分级图,并计算研究区综合阻力系数值(图 2)。

由图 2 可以看出,除地表水综合污染指数外,其他评价指标阻力系数空间分布格局具有一定的相似性,均表现出西北部高于东南部。研究区土壤可蚀性值变化范围不大,位于 0.25—0.32 之间。土壤可蚀性阻力系数三级以下占总面积的 77.32%,五级以上分布较少,仅占总面积的 6.28%。研究区近 75% 的区域植被覆盖度达

表 2 阻力分级

Table 2 Resistance classification

分级 Classification	一级 First level	二级 Second level	三级 Third level	四级 Fourth level	五级 Fifth level
土壤可蚀性 Soil erodibility	<0.28	0.28—0.29	0.29—0.30	0.30—0.31	>0.31
坡度 Gradient(°)	<7.8	7.8—15.1	15.1—22.3	22.3—30.3	>30.3
地表水综合污染指数 Comprehensive surface water pollution index	<4	4—6	6—8	8—9	>9
植被覆盖度 Vegetation coverage	<0.2	0.2—0.5	0.5—0.7	0.7—0.9	>0.9
土壤重金属综合污染指数 Soil heavy metal comprehensive pollution index	<3	3—7	7—9	9—10	>10
pH	<4.5	4.5—4.7	4.7—4.9	4.9—5.2	>5.2
土地损毁程度 Extent of land damage	无	轻度	中度	重度	—
工程难易程度 Degree of engineering difficulty	易	中	难	—	—

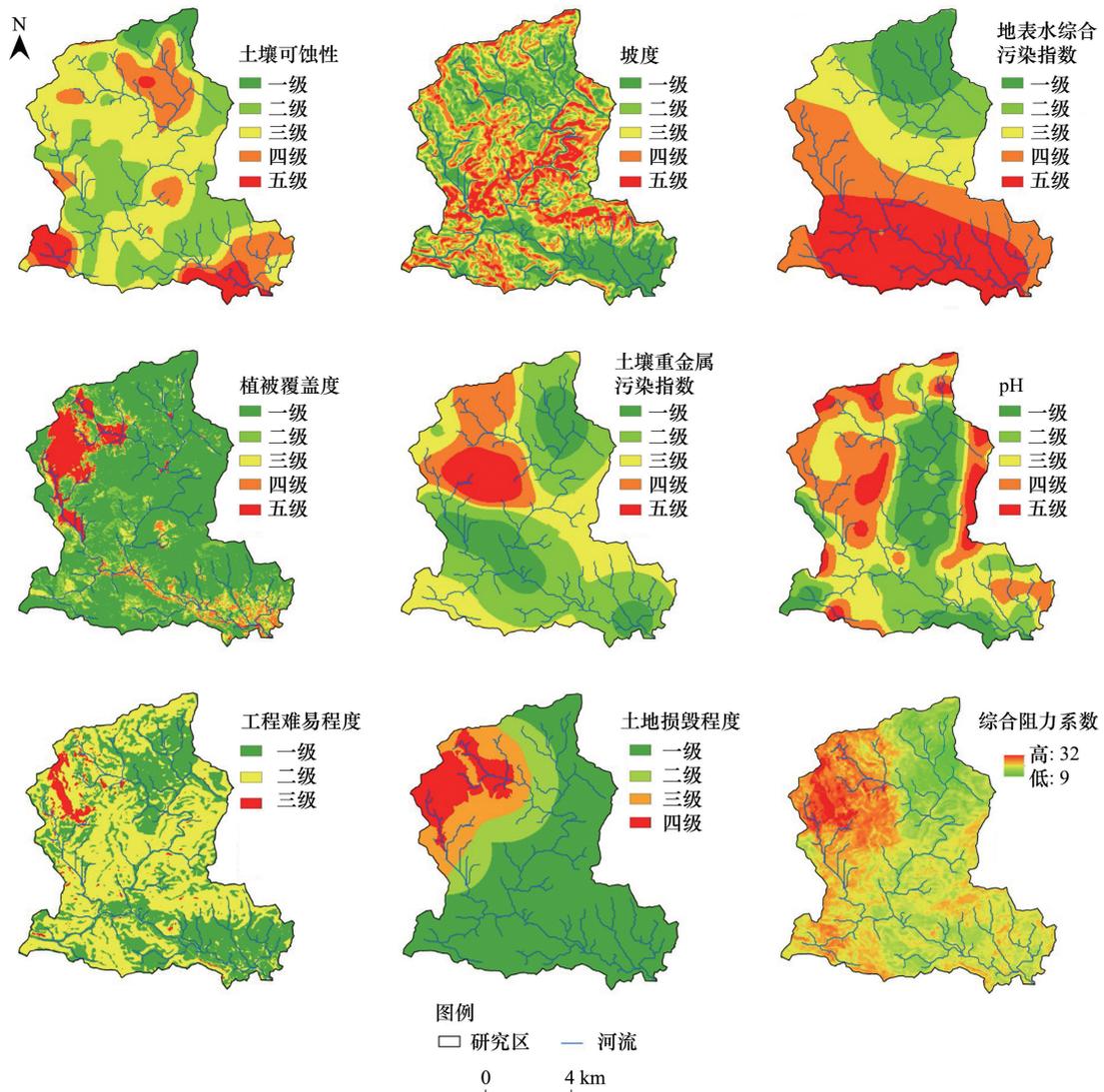


图 2 阻力系数分级图

Fig.2 Map of classification of resistance coefficient

到了 70% 以上,研究区西北部和东南部植被覆盖度普遍低于 50%。植被覆盖度以一级为主,占总面积比为 64.97%,三级和五级分别集中在研究区东南部和西北部,其占比率依次为 7.92% 和 7.56%。矿区由于长期开采,造成矿区土壤重金属严重超标,矿区土壤重金属综合污染指数阻力系数为五级,占总面积的 6.91%,周边受其影响阻力系数为四级,其余区域阻力系数均在三级以下,合占总面积的 81.20%;研究区地势北高南低,矿区排放的污染物经雨水冲刷渗入土壤并流入河流,大部分地区土壤 pH 明显低于韶关平均值(5.8),研究区西部土壤 pH 和南部地表水综合污染指数较低,阻力系数均以四级和五级为主,其中五级分别占总面积的 7.39% 和 32.52%。土地损毁程度四级主要集中在研究区西北部矿区,占研究区总面积的 9.61%,矿区周边受到开采和排污影响,损毁系数分别为二级和三级,均占总面积的 12.49%;从坡度阻力和工程难易程度来看,其一级分布区域较为相似,主要集中在研究区东南部和东北部,坡度阻力五级和工程难易程度三级分布较少,依次占总面积的 9.49% 和 3.75%。研究区综合阻力系数处于 9—32 之间,西北部高,东南部低。

3.2 不同评价指标阻力面特征

利用最小累积阻力模型计算出单项指标的生态阻力值。其中生态阻力值越高,区域生态环境的稳定性越高,安全水平越高,生态修复阻力越小(图 3)。

由图 3 可知,不同评价指标阻力值均呈现出东南部大,西北部小的空间格局。研究区土壤可蚀性阻力值位于 0—33589,矿区及周边地区较低。土壤可蚀性反映了土壤受侵蚀的速度和能力,土壤可蚀性越低,生态阻力值越大。研究区地表水综合污染指数阻力值位于 0—40361,表现为上游阻力值低,下游阻力值高。地表水综合污染指数阻力主要取决于高程和距离矿山的远近,水分汇聚到地势较低的地区,不容易产生分流,风险源的扩散能力降低,阻力值增大。研究区植被覆盖度阻力值位于 0—13960,呈现矿区内及其下游河流沿岸相对较低,其他区域较高的空间格局。植被覆盖度反映了生态修改和质量工作的质量情况和环境的恶化程度,植被覆盖度越高,生态阻力值越大,生态修复阻力越小。大宝山矿有近 70 年的开创历史,且位于研究区上游,大量污染物渗透到土壤、水体、大气中并迁移到研究区中下游的其他地区,造成了一系列重金属污染和土壤酸化等问题^[33-34]。土壤重金属综合污染指数阻力值位于 0—19049,pH 阻力值位于 0—23523,重金属污染指数越低,阻力值越大,研究区 pH 明显低于区域自然背景值^[35],pH 越高,阻力越大。研究区土地损毁程度阻力值位于 0—14054,与矿业开采区域的空间分布格局一致,常年采矿形成大面积的尾矿库和排土场,破坏了流域范围内的地质环境,土地损毁程度越小,生态阻力越大,修复阻力越小。研究区工程难易程度阻力值位于 0—13878,呈现矿区内及上游河流沿岸相对较低,其他区域较高的空间格局,工程难易程度越低,生态阻力越大。研究区坡度阻力值位于 0—15792,研究区主要以丘陵为主,地表起伏大,西北部坡度阻力值低,东南部坡度阻力值高。坡度越低,生态阻力值越大。

4 优先级分区分析

根据景观生态学中的源-汇理论,综合分析由于矿业生产活动造成生态环境问题,叠加各单项生态阻力值,计算综合阻力值。依据研究区不同区域格局优化所针对的生态过程决定生态系统功能发挥的作用不同,并利用 Jenks 自然断点法将研究区进行修复实施的优先级分区(图 4)。

整个流域共分成 4 个区。由图 4 可知,I—IV 区分别占整个研究区面积的 27.36%、33.63%、25.05%、13.96%。I 区位于在研究区的西北部矿区,为整个流域的风险源,由于采矿活动导致植被覆盖度下降,地表破坏,土地损毁和污染严重。植被覆盖度、重金属含量、土地损毁是其主导阻力因素。II—IV 区位于流域中下游,依次远离大宝山矿区。矿山生产,特别是早期的私挖乱采活动导致大量污水排放和矿渣侵渗,污染了下游的水质和土壤,造成了区域重金属超标、土壤酸化、土地破坏等问题,致使研究区生态系统服务功能遭到破坏、生态环境退化。II—IV 区的主要影响因素是重金属含量和水质。

阻力值越低,生态修复越具有紧迫性和优先性。研究区修复优先性依次为 I 区>II 区>III 区>IV 区。这也与广东省山水林田湖草生态保护修复试点项目强调“源头控制,末端治理”的理念相一致。广东省山水林田

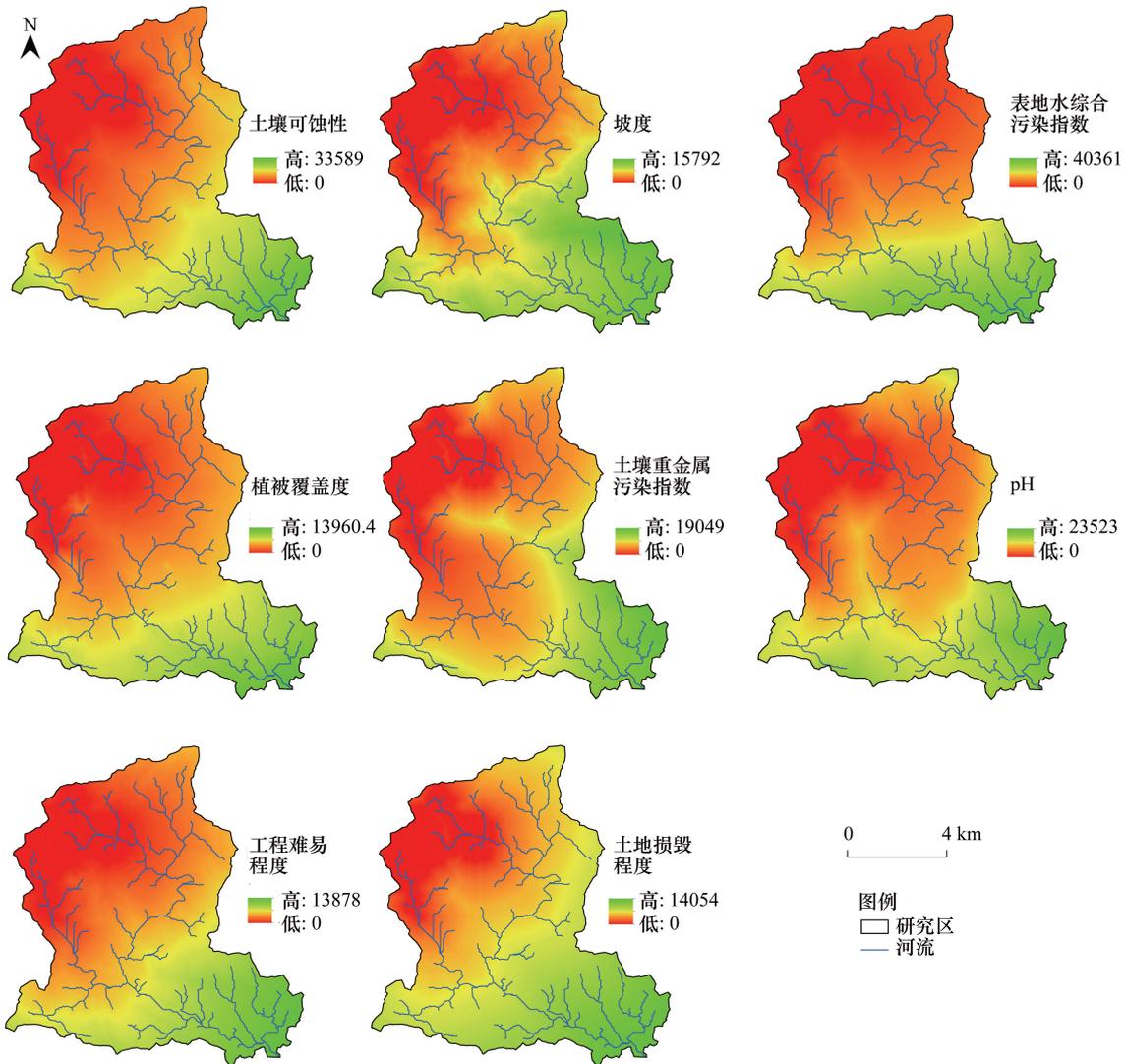


图3 生态阻力面

Fig.3 Ecological resistance surface

湖草生态保护修复试点框架下的首选落地项目应为 I 区。

5 分区治理重点与对策

基于阻力面分析和修复优先级分区,分区提出治理重点与对策。

(1) I 区为矿区集中区,也是流域的源头,植被覆盖度低、重金属含量高、土地损毁严重是其主导的修复障碍,治水、降低重金属含量和恢复植被是生态修复的核心内容。

①治水。采用清污分流措施(设置截洪沟、排洪隧洞、排洪竖井等)、拦水渠技术,从根本上治理酸性与重金属超标矿水外排的问题。

②提高 pH,降低重金属有效态含量。采取生物或化学措施对矿区土地进行基质改良,如施加化学肥料(150—400 kg/hm²)、石灰(10—20 t/hm²)、有机肥(10—30 t/hm²)等材料,培肥地力,中和土壤酸度,降低土壤重金属的生物有效性,以保证一个良好的植被重建效果。

③恢复植被。选择耐贫瘠、耐干旱的重金属耐性植物种类:如泡桐、桉树、苕麻、类芦、高羊茅和狗牙根等,在群落结构配置上以草灌植物为主,适当客土移植耐性较强的乔木。乔木、灌木和草本的配置面积比例分别是 10%—20%、20%—30%、50%—70%。为了提高植物的成活率,植物采用营养袋繁殖,将营养袋直接放置到植穴或种植带中,草种采用撒播、条播或点播法,然后盖一层稻草保证种子顺利

萌发。

(2) II区核心制约因素为水质,阻力值在该区域较小,其次是酸碱度和土壤重金属污染。①河流治理。建设矿区外排水处理厂,实现污染减排的目的;继续加大实施拦泥库清淤工程力度,增强拦泥库的废水调节能力,同时加大河道清理和河堤工程建设等。②治土。根据污染程度对矿区周边耕地进行分类污染治理。对于污染严重的农田,宜采用植物稳定技术。如能源作物麻疯树+土壤改良(0.5%石灰石和2%粉煤灰)组合。对于污染程度中等的农田土壤,适宜采用植物提取技术进行修复,即通过种植重金属超富集植物(东南景天、籽粒苋),将土壤中的重金属含量逐步降低。可采用东南景天+低累积玉米套种+土壤改良(0.2%石灰石)或刈割处理籽粒苋模式,来恢复土壤的农业使用用途。

(3) III、IV区为轻度污染农田区,核心在于治土。采用植物阻隔技术进行修复。低积累玉米、低积累水稻、豆角、花生等作物均适合在适当的改良基础上(轻度污染旱地为白云石,轻度污染水田为粉煤灰),作为植物阻隔技术的实施材料,在逐步改善土壤条件的同时,又可为农民带来经济收益。

6 讨论与结论

6.1 讨论

山水林田湖草生态保护修复强调综合治理和整体修复,随着试点工作逐步开展,试点过程中科学研究已成为山水林田湖草生态保护修复工作的瓶颈,项目立项和不同阶段实施片区的确定具有很大盲目性,导致区域核心生态问题把脉不准,项目落地时空不合理,治理缺乏针对性等问题。本文结合相关研究成果,提出了大尺度区域优先级分区治理的模式,具有一定的理论和现实意义,可以为修复项目在时空尺度上落地和科学治理提供科学依据。

早在2001年,陈述彭院士就提出了“统一规划,分类指导,分区推进,严格监督”的生态环境的指导思想和基本原则^[36]。为改变单要素治理的弊端,更好的助力于山水林田湖草生态环境治理,需要考虑由于风险源所表现出的内外空间分布差异,针对不同区域分析多种因素间的综合作用。本文结合研究区自然条件和矿业开采的历史遗留问题,系统分析了由于风险源所引起的一系列生态修复阻力因素。评价指标体系符合吴浓娣和余新晓等人提出的全面分析、系统治理的思想体系,遵循山水林田湖草全要素系统理论的要求^[37-38]。所提出的分区治理思路与王英等人的研究成果相似,进一步论证了优先级分区治理模式的合理性^[39]。制定的分区治理重点与对策,符合研究区实际情况,与《广东粤北南岭山区山水林田湖草生态保护修复试点实施方案》相契合。山水林田湖草生态环境修复是一项长期工程,需要全方位的考虑,因此在后续的研究过程中应针对不同优先级区域进行更为深入的专题研究,以便更加科学地制定出修复方案。

6.2 结论

以粤北南岭大宝山矿流域为研究区,采用最小累积阻力模型,构建区域生态阻力面,根据生态阻力对研究区进行修复优先级分析,并提出分区治理对策。

(1)不同评价指标阻力值均呈现出东南部大,西北部小的空间格局。长期的矿业开采活动污染了矿区流域水质和土壤,造成了区域重金属富集、土壤酸化、土地破坏等问题,并且距离矿区越近的区域生态修复的优

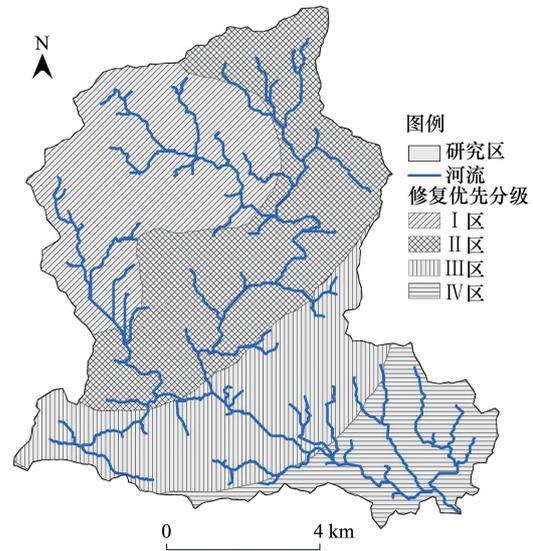


图4 修复优先级分区
Fig.4 Repair priority partition

先性越高。

(2) 阻力值越低,生态修复越具有紧迫性和优先性。研究区共分为 4 个优先级区,研究区修复优先性依次为 I 区>II 区>III 区>IV 区。

(3) I 区重点在于治水,降低 pH,降低重金属有效态含量,提高植被覆盖度,主要措施包括清污分流、土壤改良和植被恢复;II 区重点在于河流治理与治土,主要措施包括建立污水处理厂、植物稳定和植物提取;III 区、IV 区核心在治土,主要措施为植物阻隔。

参考文献 (References):

- [1] 张惠远,郝海广,舒昶,王一超. 科学实施生态系统保护修复切实维护生命共同体. 环境保护, 2017, 45(6): 31-34.
- [2] 金锐. 加强我国水土保持与生态环境建设对策讨论. 水利学报, 2007, (S1): 582-585.
- [3] 孙翠玲,顾万春,郭玉文. 废弃矿区生态环境恢复林业复垦技术的研究. 资源科学, 1999, 21(3): 68-71.
- [4] Singh A N, Singh J S. Experiments on ecological restoration of coal mine spoil using native trees in a dry tropical environment, India: a synthesis. *New Forests*, 2006, 31(1): 25-39.
- [5] 高云峰,徐友宁,祝雅轩,张江华. 矿山生态环境修复研究热点与前沿分析—基于 VOSviewer 和 CiteSpace 的大数据可视化研究. 地质通报, 2018, 37(12): 2144-2153.
- [6] Pastorok R A, MacDonald A, Sampson J R, Wilber P, Yozzo D J, Titre J P. An ecological decision framework for environmental restoration projects. *Ecological Engineering*, 1997, 9(1/2): 89-107.
- [7] 胡良军,邵明安. 黄土高原植被恢复的水分生态环境研究. 应用生态学报, 2002, 13(8): 1045-1048.
- [8] 刘威尔,宇振荣. 山水林田湖生命共同体生态保护和修复. 国土资源情报, 2016, (10): 37-39, 15-15.
- [9] 王夏晖,何军,饶胜,蒋洪强. 山水林田湖草生态保护修复思路与实践. 环境保护, 2018, Z1: 17-20.
- [10] 李达净,张时煌,刘兵,张红旗,王辉民,颜放民. “山水林田湖草——人”生命共同体的内涵、问题与创新. 中国农业资源与区划, 2018, 39(11): 1-5, 93-93.
- [11] 王波,王夏晖. 推动山水林田湖生态保护修复示范工程落地出成效——以河北围场县为例. 环境与可持续发展, 2017, 42(4): 11-14.
- [12] Li T, Lü Y H, Fu B J, Comber A J, Harris P, Wu L H. Gauging policy-driven large-scale vegetation restoration programmes under a changing environment: their effectiveness and socio-economic relationships. *Science of the Total Environment*, 2017, 607-608: 911-919.
- [13] Wang J M, Liu H, Wu X H, Li C S, Wang X L. Effects of different types of mulches and legumes for the restoration of urban abandoned land in semi-arid northern China. *Ecological Engineering*, 2017, 102: 55-63.
- [14] 李春晖,郑小康,牛少凤,蔡宴朋,沈楠,庞爱萍. 城市湿地保护与修复研究进展. 地理科学进展, 2009, 28(2): 271-279.
- [15] 夏建国,魏朝富. 四川省农业生态环境恢复与重建研究. 水土保持学报, 2004, 18(2): 49-53.
- [16] 张汉雄,上官周平. 陇中半干旱区生态环境恢复重建与农牧业发展仿真研究. 山地学报, 2003, 21(5): 513-520.
- [17] 张科利,彭文英,杨红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算. 土壤学报, 2007, 44(1): 7-13.
- [18] 张科利,蔡永明,刘宝元,彭文英. 土壤可蚀性动态变化规律研究. 地理学报, 2001, 56(6): 673-681.
- [19] 梁音,史学正. 长江以南东部丘陵山区土壤可蚀性 K 值研究. 水土保持研究, 1999, 6(2): 47-52.
- [20] Spencer E A, Appleby P N, Davey G K, Key T J. Validity of self-reported height and weight in 4808 EPIC-Oxford participants. *Public Health Nutrition*, 2002, 5(4): 561-565.
- [21] Wallis T W R. A comparison between weather simulated within the erosion/productivity impact calculator (EPIC) and observed data. *International Journal of Environmental Studies*, 1993, 45(1): 1-12.
- [22] 陈朝晖,朱江,徐兴奎. 利用归一化植被指数研究植被分类、面积估算和不确定性分析的进展. 气候与环境研究, 2004, 9(4): 687-696.
- [23] 王福民,黄敬峰,唐延林,王秀珍. 采用不同光谱波段宽度的归一化植被指数估算水稻叶面积指数. 应用生态学报, 2007, 18(11): 2444-2450.
- [24] Tucker C J, Pinzon J E, Brown M E, Slayback D A, Pak E W, Mahoney R. An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(20): 4485-4498.
- [25] 程红芳,章文波,陈锋. 植被覆盖度遥感估算方法研究进展. 国土资源遥感, 2008, (1): 13-18.
- [26] 江洪,王钦敏,汪小钦. 福建省长汀县植被覆盖度遥感动态监测研究. 自然资源学报, 2006, 21(1): 126-132, 166-166.
- [27] 张世文,宁汇荣,许大亮,叶回春,郑印,张红艳,黄元仿. 草原区露天煤矿植被覆盖度时空演变与驱动因素分析. 农业工程学报, 2016, 32(17): 233-241.
- [28] 生态环境部,国家市场监督管理总局. GB 15618—2018 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行). 北京: 中国标准出版

社, 2018.

- [29] 国家环境保护总局. HJ/T 166—2004 土壤环境监测技术规范. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
- [30] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. GB 3838—2002 地表水环境质量标准. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [31] 程迎轩, 王红梅, 刘光盛, 郑标, 王海云, 刘翠霞. 基于最小累积阻力模型的生态用地空间布局优化. 农业工程学报, 2016, 32(16): 248-257.
- [32] 钟式玉, 吴箐, 李宇, 程金屏. 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. 应用生态学报, 2012, 23(11): 3173-3179.
- [33] 田晓龙. 巩义市城区地下水评价及趋势分析[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2016.
- [34] 张黎明. 我国南方不同类型土壤可蚀性 K 值及相关因子研究[D]. 海口: 华南热带农业大学, 2005.
- [35] 巫宝花, 邓冬梅, 张红红. 韶关市区周边耕地土壤养分现状分析. 现代农业科技, 2014, (11): 250-251.
- [36] 国务院. 全国生态环境保护纲要. 北京: 国务院, 2000.
- [37] 吴浓娣, 吴强, 刘定湘. 系统治理——坚持山水林田湖草是一个生命共同体. 水利发展研究, 2018, 18(9): 29-36.
- [38] 余新晓, 贾国栋. 统筹山水林田湖草系统治理带动水土保持新发展. 中国水土保持, 2019, (1): 5-8.
- [39] 王英. 陕南地区河流生态治理与保护利用模式研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.