

DOI: 10.5846/stxb201207301083

吴健生, 乔娜, 彭建, 黄秀兰, 刘建政, 潘雅婧. 露天矿区景观生态风险空间分异. 生态学报, 2013, 33(12): 3816–3824.

Wu J S, Qiao N, Peng J, Huang X L, Liu J Z, Pan Y J. Spatial variation of landscape eco-risk in open mine area. Acta Ecologica Sinica 2013, 33(12): 3816–3824.

## 露天矿区景观生态风险空间分异

吴健生<sup>1,2</sup>, 乔娜<sup>1,\*</sup>, 彭建<sup>1,2</sup>, 黄秀兰<sup>1</sup>, 刘建政<sup>1</sup>, 潘雅婧<sup>2</sup>

(1. 城市人居环境科学与技术重点实验室, 北京大学深圳研究生院城市规划与设计学院, 深圳 518055;

2. 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京大学城市与环境学院, 北京 100871)

**摘要:** 以露天矿区为研究对象, 评价矿区景观生态风险, 并采用 ESDA 方法定量研究矿区生态风险空间分异特征。结果表明, 矿区景观生态风险空间分布以高风险区域为核心, 由高到低呈环形包围特征。其中, 高风险主要分布在矿业生产及城市生活区域, 以土地破坏、压占及城市建设为主要风险来源; 中等风险主要分布于自然、半自然功能区, 以城市生活与农业生产为主要风险来源; 低风险区域以林地、荒草地等植被覆盖区域为主, 但大面积植被退化、水土流失导致该区域生态基底较差、环境脆弱, 加之露天煤矿作业频繁, 整体生态环境质量堪忧。同时, 不同功能区的风险高低排序(人工区>半自然区>自然区)特征符合常规的区域生态风险等级差异规律。此外, 基于 ESDA 分析矿区景观生态风险, 其空间自相关性高达 0.7521, 风险的空间集聚效应明显; 而对比矿区景观生态风险的空间分异特征发现, 景观干扰度是高、低风险区域的主要驱动因子; 而景观脆弱度则是中等风险区域的驱动因子; 基于以上研究结果可对矿区环境管理和风险决策提供一定的数据支撑和理论依据。

**关键词:** 露天矿区; 景观生态风险; ESDA

## Spatial variation of landscape eco-risk in open mine area

WU Jiansheng<sup>1,2</sup>, QIAO Na<sup>1,\*</sup>, PENG Jian<sup>1,2</sup>, HUANG Xiulan<sup>1</sup>, LIU Jianzheng<sup>1</sup>, PAN Yajing<sup>2</sup>

1 The Key Laboratory for Environmental and Urban Sciences, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, China

2 Key Laboratory for Earth Surface Processes of the Ministry of Education, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

**Abstract:** The demand for coal resources is increasing with economic development in China. But, the rich mineral resources along with the intensive mining activities, which have led to a lot of ecological and environmental problems, such as environmental pollution, ecological destruction and geological disasters. Eco-risk assessment is an important tool for effective ecological environment management with evaluations of the likelihood and degree of harm.

Thus, this paper applied landscape eco-risk assessment methods to estimate the level of the opencast mine area eco-risk. But also the ESDA (Exploratory spatial data analysis) methods were used to analyze the spatial association characteristic of landscape eco-risk in mining area. It turned out that those high-risk areas is the core of the spatial distribution of Landscape eco-risk and from high-risk to low-risk present ring features. In addition, high-risk is mainly distributed in the mining industry and city life areas, sources of which are the mining, coal gangue tie up land and city construction activities. Medium-risk are mainly distributed in nature, half natural functional areas, the main sources of which are the city life and the agricultural production activities. Low-risk areas are covered by sparse vegetation, such as shrub and grassland. However, in research areas, vegetation degradation, soil and water loss leads to the regional ecological base quality was poor. So the ecosystems and environmental factors are fragile here. Moreover, the frequent production

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项课题(200911015-2)

收稿日期: 2012-07-30; 修订日期: 2013-04-18

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 1001213122@pku.edu.cn

<http://www.ecologica.cn>

activities in mining areas cause more serious ecological and environment problems. The risk degree of the artificial area is higher than the half natural area, and the half natural area is higher than the natural area. It is conform to the conventional law of ecological risk level difference. At the same time, based on the ESDA of the landscape eco-risk in opencast mine area, the space correlation of the risk is up to 0.7521, which indicate that the agglomeration features of the risk obviously. Different characteristics of agglomeration provide the basis for the ecological and environment management. Space differentiation study of Landscape eco-risk in this opencast mine area shows that interference are the main driving factors in the high-risk and low-risk areas. But in the medium-risk area, fragile degree is the main driving factors. With the increase of human interference, landscape lost diversity and tend to simplification. The results of the study on the mining area provide certain data support and theoretical basis to environment management.

**Key Words:** opencast mine area; landscape eco-risk; ESDA

我国疆域辽阔,成矿地质条件优良、矿种齐全、总量丰富,95%以上的能源、80%以上的工业原料、70%以上的农业生产资料都来自矿业<sup>[1]</sup>。目前,我国因矿产资源开发造成的挖损、塌陷、压占等已损毁土地约21亿亩<sup>[2]</sup>,由此引发的环境污染、生态资源破坏以及地质灾害等生态环境问题日益严峻。

生态风险评价作为管理生态环境的重要工具,其主要内容是评价负面影响发生的可能性及危害程度<sup>[3-4]</sup>。当前对生态风险压力的描述已从单一化学因子,扩展到多来源、多层次的风险因子及生态事件<sup>[5]</sup>。随着研究尺度的扩大,基于流域、城市等尺度进行描述和评估生态风险的工作日益增多<sup>[6-9]</sup>。矿区是以矿山生产作业区为核心的一个独立的人工、半人工生态系统,其辐射范围包括矿山职工及矿区农民所在地,甚至包括依托矿业演替形成的乡镇、县市及工业小区<sup>[2,10]</sup>。矿区独特的生态环境、经济和社会发展规划促使其风险形成机理与发展方向有别于流域、城市、农村等综合性区域。由于存在诸多生态环境问题,矿区日益成为生态风险评价的热点,但多以定性或半定量研究为主<sup>[11-15]</sup>。

景观生态学强调空间格局及生态学过程与尺度之间的相互作用,并将人类活动与生态系统的结构和功能相整合<sup>[16]</sup>。随着景观生态学理论与生态风险的结合,景观生态风险评价成为区域生态风险评价的热点方向,但是针对矿区景观生态风险的研究仍较为少见。而从景观斑块的层面考虑,更能体现矿区生态风险评价的综合性和系统性<sup>[10,17]</sup>。因此,本研究以平朔矿区为例,构建综合指数定量评估露天矿区景观生态风险,并尝试采用ESDA方法探析矿区景观生态风险的空间分异特征。

## 1 研究区概况

平朔矿区位于东经112°17′—112°26′,北纬39°24′—39°32′,地处黄土高原晋陕蒙接壤的黑三角地带,山西省北部的朔州市境内,属于我国煤炭大规模集中开发地区,以露天开采为主的作业方式对该区造成严重的土地破坏。研究区总面积为1764 km<sup>2</sup>,其中煤矿核心作业区面积约380 km<sup>2</sup>,约占研究区面积的20%。研究区属温带半干旱大陆性季风气候,年均降雨量428.2—449.0 mm,而蒸发量1786.6—2598.0 mm,超过降水量的4倍,导致干旱与雨水侵蚀并发。研究区自然环境呈现风蚀、水土流失严重、植被覆盖度低等特征。

本研究采用30 m分辨率的2010年7月的TM影像为数据源(处于植被生长茂盛期,利于采用NDVI进行植被与非植被和植被种类的区分),经几何精校正与影像预处理,应用决策树算法进行遥感解译。参考相关专家关于露天煤矿生态风险的研究成果,将挖损与压占等土地破坏视为煤矿区主要的人类干扰活动<sup>[1,18]</sup>,综合全国土地利用分类标准,将研究区景观类型为林地、荒草地、坡耕地、平原耕地、裸地、采掘地、压占地、水域、居民点九类。基于已有文献的研究尺度<sup>[19]</sup>,及研究区的空间异质性、斑块大小并保证栅格信息的完整,将研究区划分为1.5 km×1.5 km的采样单元,共计784个(图1)。

同时,根据人类活动对景观的干扰程度将矿区分为人工区、半自然区和自然区(图1)。其中,人工区包括矿业核心区、城市生活区与矿业生活区,依据明显的道路及矿区作业边缘等人工线性地物划分;半自然区依据山脊线、道路、河流等自然线性与人工线性地物综合划分;自然区则以山脊线(自然线性地物)为划分依据。

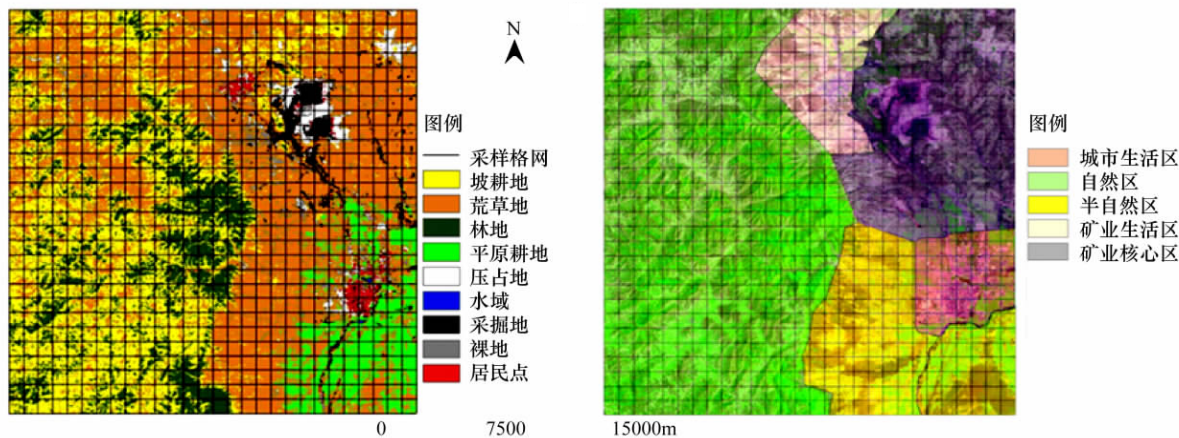


图1 研究区景观分类及功能分区

Fig. 1 Landscape classification and different functional zones of opencast mining area

## 2 研究方法

### 2.1 景观生态风险评价

景观生态风险指基于景观尺度的环境污染、人为活动及自然灾害等干扰源对生态系统的结构和功能造成不利影响的可能性和危害程度<sup>[20]</sup>。评价的核心内容分为3部分:确定干扰源对区域生态环境的作用效果,构建景观干扰度指数;评估景观要素抵抗外界干扰的能力,构建景观脆弱度指数;应用恰当的评估模型综合两者得到景观生态风险指数,评价研究区景观生态风险水平。

#### 2.1.1 景观干扰度指数

不同景观类型在维护生态系统结构和功能完整性的过程中会面临外界环境的干扰<sup>[21]</sup>,而景观所受外界干扰的程度可由其景观结构的变化程度予以度量。参考相关文献以景观结构指数为基础,通过表征景观结构的各指数叠加构建景观干扰度指数 $E_i$ <sup>[17]</sup>,表达式如下:

$$E_i = W_1 C_i + W_2 S_i + W_3 DQ_i \quad (1)$$

式中, $C_i$ 、 $D_i$ 、 $DQ_i$ 分别为景观破碎度、景观分离度、景观优势度,公式内容及表征意义详见文献<sup>[16-22]</sup>。其中,破碎度值越大,表明景观单元内部稳定性越低;分离度指数越大,表明景观在地域上分布越分散,受到的干扰程度越大;景观优势度表征景观结构中某一类型支配景观的程度,反映了该景观类型对景观格局形成和变化影响的大小。

对上述指标进行归一化,以 $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$ 为对应权重,三者相加为1。权重值不同,反映各景观指数解释景观所受干扰的能力不同<sup>[17]</sup>,参考相关文献综合确定破碎度指数、分离度指数和优势度指数的重要性差异,将三者分别赋值为0.6、0.3、0.1的权值<sup>[23-24]</sup>。

#### 2.1.2 景观脆弱度指数

不同的景观类型在维护生物多样性、保护物种与促进景观结构自然演替等方面的作用是有差别的,同时抵抗外界干扰的能力也不同<sup>[17-21]</sup>,由此构建景观脆弱度指数表征各景观类型内部结构的易损性。易损性越大,抗干扰的能力越小,表明生态风险越大。综合各类景观易损性的特点<sup>[18-21]</sup>,将九类景观按脆弱程度由高到低赋值:采掘地9、压占地8、裸地7、水域6、坡耕地5、荒草地4、平原耕地3、居民点2、林地1,归一化得到脆弱度指数 $F_i$ 。

#### 2.1.3 景观生态风险指数

基于景观结构,引入景观面积比重,建立景观结构指数与矿区生态风险之间的联系,用于描述一个样地内整体生态风险的相对大小,通过采样的方法将景观空间格局转化为空间化的生态风险变量<sup>[17]</sup>。其计算公式如下:

$$ERI_i = \sum_{k=1}^n \frac{A_{ki}}{A_k} (E_i \times F_i) \quad (2)$$

式中  $ERI$  为景观生态风险指数;  $n$  为景观类型数量;  $E_i$  为景观类型  $i$  的干扰度指数;  $F_i$  为景观类型  $i$  的脆弱度指数;  $A_{ki}$  为第  $k$  个采样单元  $i$  类景观组分的面积,  $A_k$  为第  $k$  个采样单元的总面积。

## 2.2 空间数据探索性分析(ESDA)

ESDA 是一系列空间数据分析方法和技术的集合<sup>[25]</sup>, 它以空间关联测度为核心, 注重数据的空间关联性、集聚性与异质性, 通过对事物空间分布格局的描述, 揭示空间关联特征与模式<sup>[25-26]</sup>。国内外研究多集中于区域经济<sup>[27-29]</sup>、社会和政治研究、城市社会结构<sup>[26, 30]</sup>、空间结构演变<sup>[31]</sup>等方面。景观生态风险作为空间变量, 探析其空间特征有助于理解风险的发生机理及变化趋势等深层次问题。

### 2.2.1 全局空间自相关

空间自相关反映了某一变量在空间上是否相关及其相关程度, 常用测度指标为 Moran's  $I$  指数, 计算公式详见有关文献<sup>[25-26]</sup>。Moran's  $I$  系数取值在  $-1$  至  $+1$  之间, 其绝对值越趋近于  $1$ , 表示研究单元的空间自相关程度越强。一般使用 Moran's  $I$  的标准化统计量  $Z$  来检验。基于一定显著性水平, 当 Moran's  $I > 0$ , 表明存在正的空间自相关, 研究单元属性值呈趋同集聚; Moran's  $I < 0$ , 表明存在负的空间自相关, 研究单元属性值呈离散分布; Moran's  $I = 0$ , 表明不存在空间自相关, 空间单元观测值呈随机分布<sup>[25, 27]</sup>。

### 2.2.2 局部空间自相关

全局 Moran's  $I$  指数值能够测度事物在整体空间上的相关程度, 但对于局部异常现象, 需引入局部空间自相关方法进行探析<sup>[25]</sup>。Moran's  $I$  散点图不能反映空间关联类型的显著性水平, 而 LISA (Local Indicators of Spatial Association, 局域空间关联指数) 分析方法可解决此类问题。其计算公式如下:

$$I_i = Z_i \sum_{j=1}^n W_{ij} Z_j \quad (i \neq j) \quad (3)$$

式中  $I_i$  为 LISA 指数空间单元值;  $Z_i$  和  $Z_j$  分别为空间单元  $i$  和  $j$  上观测值的标准化值;  $W_{ij}$  为空间权重矩阵。LISA 的实质在于将 Moran's  $I$  分解并呈现到各个区域单元, 并形成 LISA 聚类图, 由此识别局部空间高高集聚的“热点”和低低集聚的“冷点”, 并探析局部空间异常特征。

## 3 结果分析

### 3.1 矿区景观生态风险

根据自然断裂点法分级原理<sup>[32-33]</sup>将景观生态风险值分为 3 级(图 2): 风险等级由高到低呈环形包围趋势, 核心区域为高风险区, 景观组分以采掘地、压占地、居民点、水域为主; 中等风险区域部分集中于高风险区域外围的平原耕地、居民点及部分压占地, 部分集中于人类扰动相对较少的裸地、坡耕地区域; 低风险区域基本介于两部分中等风险区域之间, 景观组分以人类扰动最少的林地、荒草地为主。

由此可见, 高风险集中于矿业生产与城市生活区域, 并且由中心向外呈现水平递减的趋势。与此相应, 风险等级逐渐过渡到中、低水平, 扰动过渡为城市生活、农业生产为主, 波及范围较大, 景观逐渐转为半自然、自然类型。如图 2 所示, 城市生活区风险最高, 次之为矿业核心区, 半自然区域中等, 最低为自然区。矿业核心区除了大部分采矿用地类型还分布有风险值较低的矿区复垦林、荒草地及坡耕地, 这些景观对整体生态环境有缓冲、调节作用, 而城市生活区由于包含高风险的水域、居民点、裸地使得整体的风险值最高。半自然区依河流划分为两块区域, 右侧紧邻城市生活区的区域风险值高于左侧区域。矿业生活区的风险水平位于两者之间, 但半自然区域平均生态风险值小于矿业生活区。自然区生态风险最小, 主要原因是区域内存在大面积干扰度较低、脆弱度较低的林地、荒草地等景观。

综合研究区景观生态风险特征(表 1), 可以发现, 干扰度、脆弱度、景观生态风险各等级采样单元的比例差异明显。其中, 干扰度整体以中、低水平为主, 说明研究区承受外界扰动的剧烈程度在空间上差异较小; 而采样单元中 74.36% 为中等脆弱度水平, 呈现“两头少, 中间多”的正态分布模式, 说明研究区景观脆弱度总体水平较为均衡; 由干扰度与脆弱度得到的景观生态风险综合了两者的比例特征, 高风险区比例最小, 中等风

险区比例最大,各等级风险的采样单元比例近似等于同等级干扰度与脆弱度比例加和的平均值。

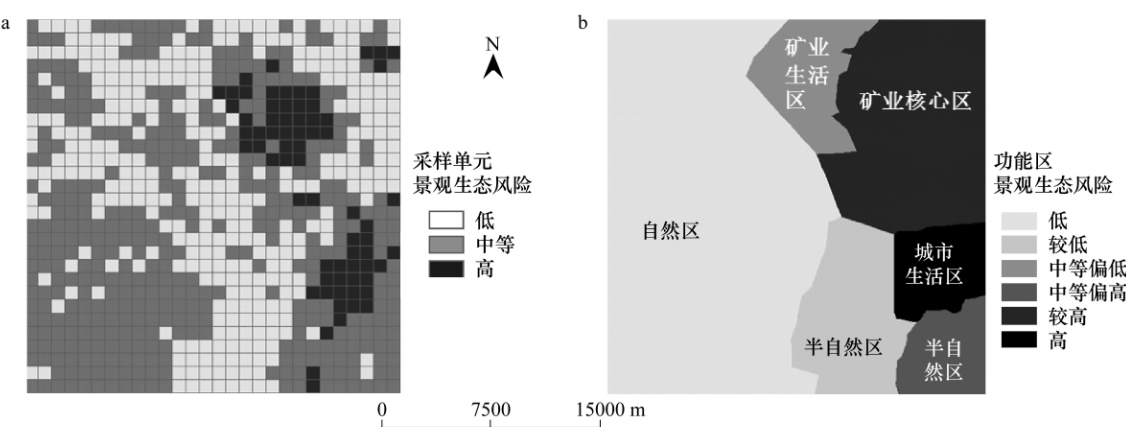


图2 矿区采样单元与功能分区景观生态风险空间分布

Fig.2 landscape eco-risk of sample units and the different functional zones of opencast mining area

表1 矿区景观生态风险统计

Table 1 landscape eco-risk statistics of opencast mining area

等级划分 Different Level	高干扰 High interference degree	中干扰 Medium interference degree	低干扰 Low Interference degree	高脆弱 High Vulnerability	中脆弱 Medium Vulnerability	低脆弱 Low Vulnerability	高风险 High Eco-risk	中风险 Medium Eco-risk	低风险 Low Eco-risk
单元个数 Units number	99	350	335	30	583	171	69	393	322
所占比重 The percentage	12.63%	44.64%	42.73%	3.83%	74.36%	21.81%	8.80%	50.13%	41.07%

3.2 矿区景观生态风险空间自相关性

矿区景观生态风险空间自相关指数的计算结果表明,Moran’s I 为 0.7521 且随机分布检验 Z 值高达 39.7341,说明矿区景观生态风险值存在显著的空间正相关,即风险值高的区域,周边区域的风险值亦高;风险值低的区域,周边区域的风险值亦低;空间趋同集聚现象明显。同时,标准差仅为 0.0252,相对较小,说明风险值大小波动不明显,总体水平较为平稳。

对比景观生态风险指数值的空间邻接特征(图3),可以发现,HH 象限内的研究单元风险值差距较大,散点较为分散,即高风险的区域内部差异较大;LL 象限内的研究单元风险值差距较小,散点较密集,即低风险的区域内部差异不明显;LH 象限的研究单元数目较少,低高离群程度较为显著。即存在有一部分风险“低洼”区域(低风险区被高风险区包围);HL 象限的研究单元数目最少且高低离群程度更低。即存在个别风险“高耸”区域(高风险区被低风险区包围)。同时,散点接近于回归线,表明在局部空间上,它们呈现更显著的“同质集聚、异质隔离”特征。

基于 LISA 指数分析矿区景观生态风险的集聚特征(图3),并通过  $P \leq 0.05$  的显著性检验。图中“热点”、“冷点”十分突出,同时存在一定数量的空间“奇异值”。其中,“热点”主要集聚于矿业核心区与城市生活区;“冷点”主要集聚在半自然、自然区域。“热点”、“冷点”的位置与功能分区的对应关系证明人类活动的集聚程度与风险的空间集聚程度是对应的。低高离群“奇异点”位于矿业核心区,原因是该区域的复垦林地周边存在较高风险的裸地、采掘地;而高低离群“奇异点”位于半自然、自然区,原因是裸地、区域被林地与坡耕地包围。总体而言,“奇异点”一般为局部风险发生急剧变化的区域,也是风险最可能蔓延的位置。

3.3 景观生态风险驱动因子分析

景观生态风险的空间差异的决定因素包括:景观的干扰度与脆弱度。景观干扰度可视为外因(人为干扰),景观脆弱度可视为内因(景观自身维持生态稳定性的能力),而内、外因在影响风险的大小及空间分异的

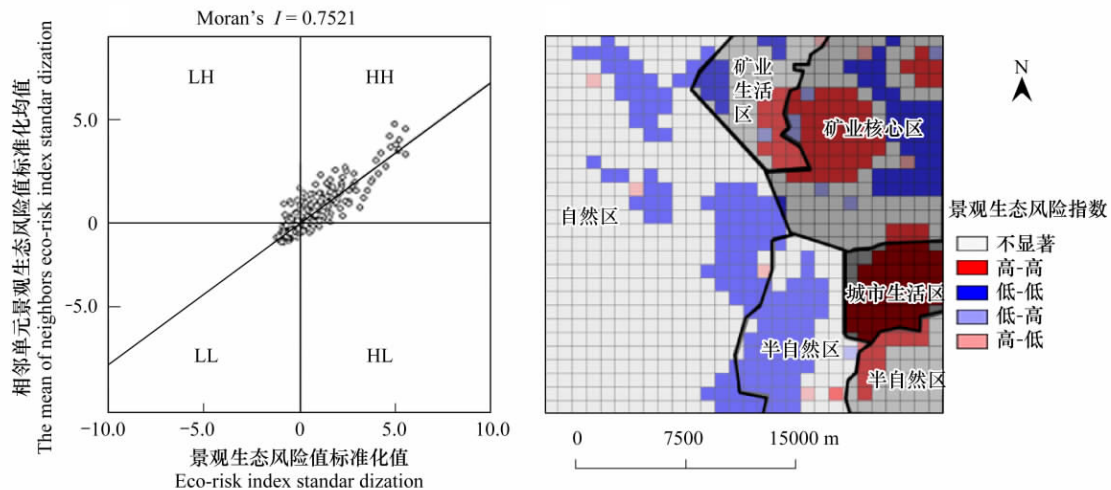


图3 矿区景观生态风险 Moran 散点分布与生态风险值 LISA 指数空间特征

Fig. 3 Moran scatter plot and Cluster map of LISA of landscape eco-risk of opencast mining area

作用是有差别的。

本研究分析各风险等级与干扰度及脆弱度水平的对应关系,理论上共有 27 种组合模式,但实际叠加只有 14 种对应模式(图 4)。其中,低风险采样单元比例较高,以 LLM、LML 模式为主,各模式比例差异较大;中等风险采样单元比例最高,各模式比例差距较小,其中以 MMM、MLM 与 MML 模式为主,其余模式均为零星分布;高风险采样单元以 HHM、HHH 两种模式为主。总结而言,低风险且低干扰度的采样单元比例最大(31.5%),说明决定低风险状态的主导因素是景观干扰度;同理,高风险状态下,高干扰度的采样单元比例最大(7.65%),即景观干扰度起主导作用;而中等风险状态下,中等脆弱度采样单元比例最大(39.8%),即景观脆弱度起主导作用。由此可知,低、高风险主要由“外因”驱动为主,而中等风险以“内因”驱动为主。

同时,对比各风险组合模式的空间分布格局(图 5)

与景观功能分区,可以发现,由低风险到高风险,各种结构的集聚形式趋于简单。其中,HHH 模式主要集聚于矿业核心区,HHM 主要集聚于矿业生活区外围与城市生活区的核心;MML、MMM 与 MLM 3 种主要模式大面积分布于自然、半自然区域、城市生活区及矿业核心区边缘,整体面积较大、分布较散;LLM、LML 模式局部集聚特征明显,且于自然区、半自然区、矿业核心区分布较多。综合景观生态风险的数量结构与空间格局,总体来看,区域景观生态风险越大,景观类型越单一,风险的空间集聚程度越大。由此可见,人类干扰是景观多样性丧失、景观结构单一化的重要影响因素。

#### 4 结论与讨论

本研究基于风险评价原理,结合景观生态学与生态风险理论,构建景观生态风险评价模型定量表征露天矿区景观生态风险状况。研究结果表明,矿区大部分区域的景观生态风险处于中、低水平,矿业生产地区处于高水平;而大规模的土地破坏、压占等矿业生产与生活扰动是高风险的主要来源。虽然这种干扰波及范围小,但呈现出由矿业核心生产区向外蔓延的趋势;中等风险区域以裸地、坡耕地、平原耕地等景观类型为主,风险

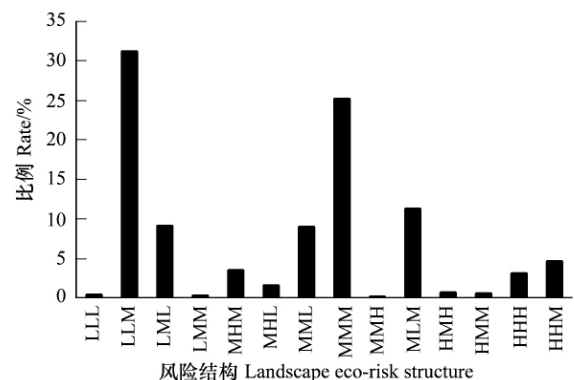


图4 矿区景观生态风险结构统计

Fig. 4 The statistics of landscape eco-risk structure

某一组合如 HHM,由左到右分别表示: M(风险中等)、H(干扰度高)、M(脆弱度中等); LLM 表示, L(风险低)、L(干扰度低)、M(脆弱度中等); HHM 表示, H(风险高)、H(干扰度高)、M(脆弱度高)

来源主要是城市生活与农业生产。此外,恶劣的自然条件造成水土流失严重、植被退化,形成大面积生态稳定性低的裸地、荒草地,使得平朔矿区的自然生态环境整体较为脆弱。因此,在生态环境治理、生态风险防范的过程中,需要从自然条件出发,因地制宜,采用适宜的植被覆盖类型、多层次的治理、复垦手段对矿区环境进行分类、分重点治理。

对比不同功能区的景观生态风险,表明矿区整体呈现人工区风险>半自然区>自然区的空间分异特征。但是,矿业核心区不是风险最高的区域,城市生活区风险水平反而更高,同样矿业生活区比部分半自然区域风险值小。这些异常可能是风险值在空间的累积速度小于面积的扩张速度(面积越大,其均值就越小),且这种面积与均值的关系在决定功能分区风险平均水平方面呈主导作用。此外,不同区域风险值的差异一方面表明干扰的空间分异特征较为明显,另一方面说明人类的生产、生活扰动是主要的风险源。因此,从基础环节层面控制风险要从减少人类扰动、减轻破坏程度、科学处理已有破坏痕迹等方面出发。

进一步的景观生态风险空间自相关分析表明,矿区景观生态风险值呈现明显的空间正相关关系,说明风险

具有显著的空间集聚特征。局部空间的景观生态风险值具有明显的“冷点”、“热点”区域,这为针对性开展生态环境治理工作提供了空间参考范围。同时,明显的“奇异点”为预测区域的风险水平将要发生变化提供了依据,对风险防控起到预警作用;尤其是“低洼”区域极易成为下阶段风险扩散的突破口,应在矿区环境管理工作中予以重点关注。而对比风险驱动因子的组合形式发现,高风险与低风险区域,干扰度为主要驱动因子,即造成风险的外因起主导作用;而中等风险区域,脆弱度为主要驱动因子,即景观内在的特质为决定性因素。因此,对于低风险和高风险区域,宜重点控制外界扰动强度,从风险源头控制;而针对中等风险区域,则需加强脆弱度低的景观类型的覆盖度。

但是,需要指出的是,上述研究结果均为基于一期遥感影像对未来风险的估测,对风险驱动的规律有待于在多期影像的长时间序列评估中进一步验证。同时,囿于 TM 遥感影像空间分辨率,本研究未能进一步细分矿业核心生产区域,有待深入探析矿山开采作业区内部不同矿业生产单元之间的景观生态风险空间分异特征。此外,采用专家打分法对干扰度权重及脆弱度进行赋值,这种方法尽管具备专家经验的优点,仍存在一定主观性,对研究结果带来了一定的不确定性。

#### References:

- [1] Chang Q, Qiu Y, Xie M M, Peng J. Theory and method of ecological risk assessment for mining areas based on the land destruction. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(16): 5164-5174.
- [2] Li J C, Bai Z K. *Land Reclamation and Ecological Rehabilitation of Land in Surface Mines*. Beijing: Science Press, 2000.
- [3] Suter G W II, Norton S B, Barnhouse L W. The evolution of frameworks for ecological risk assessment from the Red Book Ancestor. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2003, 9(5): 1349-1360.
- [4] Chen H, Liu J S, Cao Y, Li S C, Ouyang H. Progresses of ecological risk assessment. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1558-1566.
- [5] Landis W G. Twenty years before and hence: ecological risk assessment at multiple scales with multiple stressors and multiple endpoints. *Human*

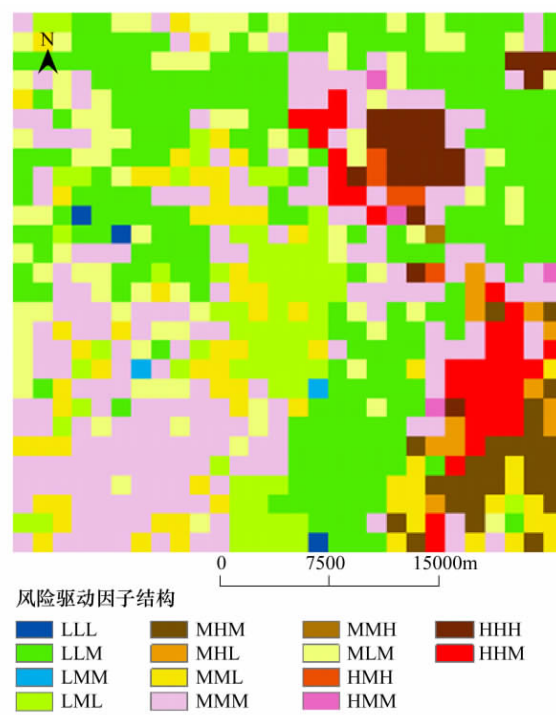


图5 矿区景观生态风险结构空间分布

Fig. 5 Landscape eco-risk structure and distribution in opencast mine area

结构缩写含义如图3

- and Ecological Risk Assessment ,2003 ,9( 5) : 1317-1326.
- [ 6 ] Fu Z Y , Xu X G. Regional ecological risk assessment. Advance in Earth Sciences ,2001 ,16( 2) : 267-271.
- [ 7 ] Fu Z Y , Xu X G , Lin H P , Wang X L. Regional ecological risk assessment of in the Liaohe river delta wetlands. Acta Ecologica Sinica ,2001 ,21( 3) : 365-373.
- [ 8 ] Sun H B , Yang G S , Su W Z , Zhu T M , Wang R R. Ecological risk assessment of land use in the area along Changjiang River: a case study of Nanjing , China. Acta Ecologica Sinica ,2010 ,30( 20) : 5616-5625.
- [ 9 ] Zeng Y. The regional ecological risk assessment of Hohhot City. Acta Ecologica Sinica ,2010 ,30( 3) : 668-673.
- [ 10 ] Pan Y J , Wang Y L , Peng J , Han Y N. Research progress in ecological risk assessment of mining area. Acta Ecologica Sinica ,2012 ,32( 20) : 6566-6574.
- [ 11 ] Bai Z K , Zhao J K , Li J C , Wang W Y , Lu C E , Ding X Q , Cai S J , Chen J J. Ecosystem damage in a large opencast coal mine — A case study on PINGSHUO Surface Coal Mine , China. Acta Ecologica Sinica ,1999 ,19( 6) : 870-875.
- [ 12 ] Hattemer-Frey H A , Quinlan R E , Krieger G R. Ecological risk assessment case study: impacts to aquatic receptors at a former metals mining superfund site. Risk Analysis ,1995 ,15( 2) : 253-265.
- [ 13 ] Michalik B. NORM impacts on the environment: an approach to complete environmental risk assessment using the example of areas contaminated due to mining activity. Applied Radiation and Isotopes ,2008 ,66( 11) : 1661-1665.
- [ 14 ] Jia Y , Cao L X. Review on ecological risk assessment method for coal-mining area. Environmental Science and Management ,2011 ,36( 4) : 177-182.
- [ 15 ] Ma X. Ecological Risk Assessment of Vulnerable Mine Area [ D ]: Beijing: China University of Geoscience ,2011.
- [ 16 ] Wu J G. Landscape Ecology-Pattern , Process , Scale and Grade. 2nd ed. Beijing: Beijing Higher Education Press ,2000.
- [ 17 ] Xie H L. Regional eco risk analysis of based on landscape structure and spatial statistics. Acta Ecologica Sinica ,2008 ,28( 10) : 5020-5026.
- [ 18 ] Cheng J L , Lu Z H , Fan Y H. Method of ecological risk assessment for opencast mine area. Acta Ecologica Sinica ,2004 ,24( 12) : 2945 -2950.
- [ 19 ] Hu H B , Liu H Y , Hao J F , An J. The urbanization effects on watershed landscape structure and their ecological risk assessment. Acta Ecologica Sinica ,2011 ,31( 12) : 3432-3440.
- [ 20 ] Li X H , Li J Y. Analysis on regional landscape ecological risk based on GIS — A case study along the lower reaches of the Weihe river. Arid Zone Research ,2008 ,25( 6) : 899-903.
- [ 21 ] Cheng P , Pan X L. Ecological risk analysis of regional landscape in inland river watershed of arid area — a case study of Sangong river basin in Fukang. Chinese Journal of Ecology ,2003 ,22( 4) : 116-120.
- [ 22 ] Wang G X , Chen G D. Study on the landscape pattern of a desert-Oasis ecological system: a spatial grid method and its application. Arid Zone Research ,1999 ,16( 3) : 6-11.
- [ 23 ] Gao B , Li X Y , Li Z G , Chen W , He X Y , Qi S Z. Assessment of ecological risk of coastal economic developing zone in Jinzhou Bay based on Landscape pattern. Acta Ecologica Sinica ,2011 ,31( 12) : 3441-3450.
- [ 24 ] Lu Y , Su W J , Hua C , Tang C Y. Landscape ecological risk assessment for upper Zuojiang River basin. Tropical Geography ,2010 ,30( 5) : 496-503.
- [ 25 ] Anselin L. Local indicators of spatial association-LISA. Geographical Analysis ,1995 ,27( 2) : 93-115.
- [ 26 ] Xuan G F , Xu J G , Zhao J. An analysis of urban social space based on ESDA — A case study of the central urban district in Shanghai. Scientia Geographica Sinica ,2010 ,30( 1) : 22-29.
- [ 27 ] Lee S H. Spatial Association Measures for an ESDA-GIS Framework: Developments , Significance Tests , and Applications to Spatio-Temporal Income Dynamics of United States Labor Market Areas ,1969—1999 [ D ]. Ohio: Ohio State University ,2001.
- [ 28 ] Meng B , Wang J F , Zhang W Z , Liu X H. Evaluation of regional disparity in China based on spatial analysis. Scientia Geographica Sinica ,2005 ,25( 4) : 393-400.
- [ 29 ] Zhang H F , Bai Y P , Chen Q , Wang B H , Niu D W. Regional economic disparities in Qinghai Province based on ESDA and GIS. Arid Land Geography ,2009 ,32( 3) : 454-461.
- [ 30 ] Lü A M , Li C M , Lin Z J , Shi W Z. Population growth rate and its spatial association by providence in China. Acta Geographica Sinica ,2002 ,57( 2) : 143-150.
- [ 31 ] Huang H C , Li M Y. Spatial urban structure evolution analysis of the forerunner development zone of the Changchun-Jilin-Tumen River development region based on the ESDA-Take Yanji as the example. Journal of Hebei Normal University: Natural Science Edition ,2011 ,35( 6) : 633-639.
- [ 32 ] Jiang W G , Zhu X H , Wu J J , Gu L , Ma G B , Liu X C. Retrieval and analysis of coal fire temperature in Wuda Coalfield , Inner Mongolia , China. Chinese Geographical Science ,2011 ,21( 2) : 159-166.

- [33] Cao X L, Zhang L M, Xue D S, Wang D P. The changes in disparity of urban transportation development level rank in China. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(10): 1034-1040.

#### 参考文献:

- [1] 常青, 邱瑶, 谢苗苗, 彭建. 基于土地破坏的矿区生态风险评价: 理论与方法. *生态学报*, 2012, 32(16): 5164-5174.
- [2] 李晋川, 白中科. 露天煤矿土地复垦与生态重建. 北京: 科学出版社, 2000.
- [4] 陈辉, 刘劲松, 曹宇, 李双成, 欧阳华. 生态风险评价研究进展. *生态学报*, 2006, 26(5): 1558-1566.
- [6] 付在毅, 许学工. 区域生态风险评价. *地理科学进展*, 2001, 16(2): 267-271.
- [7] 付在毅, 许学工, 林辉平, 王宪礼. 辽河三角洲湿地区域生态风险评价. *生态学报*, 2001, 21(3): 365-373.
- [9] 曾勇. 区域生态风险评价——以呼和浩特市为例. *生态学报*, 2010, 30(3): 668-673.
- [10] 潘雅静, 王仰麟, 彭建, 韩忆楠. 矿区生态风险评价研究述评. *生态学报*, 2012, 32(20): 6566-6574.
- [11] 白中科, 赵景逵, 李晋川, 王文英, 卢崇恩, 丁新启, 柴书杰, 陈建军. 大型露天煤矿生态系统受损研究——以平朔露天煤矿为例. *生态学报*, 1999, 19(6): 870-875.
- [14] 贾媛, 曹玲娴. 煤炭矿区生态风险评价方法研究. *环境科学与管理*, 2011, 36(4): 177-182.
- [15] 马萧. 脆弱性矿区生态风险评价——以胜利东二号露天矿为例 [D]. 北京: 中国地质大学, 2011.
- [16] 邬建国. 景观生态学, 格局、过程、尺度与等级 (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [17] 谢花林. 基于景观结构和空间统计学的区域生态风险分析. *生态学报*, 2008, 28(10): 5020-5026.
- [18] 程建龙, 陆兆华, 范英宏. 露天煤矿区生态风险评价方法. *生态学报*, 2004, 24(12): 2945-2950.
- [19] 胡和兵, 刘红玉, 郝敬锋, 安静. 流域景观结构的城市化影响与生态风险评价. *生态学报*, 2011, 31(12): 3432-3440.
- [20] 李谢辉, 李景宜. 基于 GIS 的区域景观生态风险分析——以渭河下游河流沿线区域为例. *干旱区研究*, 2008, 25(6): 899-903.
- [21] 陈鹏, 潘晓玲. 干旱区内陆流域区域景观生态风险分析——以阜康三工河流域为例. *生态学杂志*, 2003, 22(4): 116-120.
- [22] 王根绪, 程国栋. 荒漠绿洲生态系统的景观格局分析——景观空间方法与应用. *干旱区研究*, 1999, 16(3): 6-11.
- [23] 高宾, 李小玉, 李玉刚, 陈玮, 何兴元, 齐善忠. 基于景观格局的锦州湾沿海经济开发区生态风险分析. *生态学报*, 2011, 31(12): 3441-3450.
- [24] 卢远, 苏文静, 华瑾, 汤传勇. 左江上游流域景观生态风险评价. *热带地理*, 2010, 30(5): 496-503.
- [26] 宣国富, 徐建刚, 赵静. 基于 ESDA 的城市社会空间研究——以上海市中心城区为例. *地理科学*, 2010, 30(1): 22-29.
- [28] 孟斌, 王劲峰, 张文忠, 刘旭华. 基于空间分析方法的区域差异研究. *地理科学*, 2005, 25(4): 393-400.
- [29] 张海峰, 白永平, 陈琼, 王保宏, 牛定伟. 基于 ESDA-GIS 的青海省区域经济差异研究. *干旱区地理*, 2009, 32(3): 454-461.
- [30] 吕安民, 李成名, 林宗坚, 史文中. 中国省级人口增长率及其空间关联分析. *地理学报*, 2002, 57(2): 143-150.
- [31] 黄焕春, 李明玉. 基于 ESDA 的长吉图开发先导区城市内部空间结构演化分析——以延吉市为例. *河北师范大学学报: 自然科学版*, 2011, 35(6): 633-639.
- [33] 曹小曙, 张利敏, 薛德升, 王大鹏. 中国城市交通运输发展水平等级差异变动特征. *地理学报*, 2007, 62(10): 1034-1040.