ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报
Acta Ecologica Sinica

第32卷 第16期 Vol.32 No.16 2012

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版

中国科学院科学出版基金资助出版

生 态 学 报

（SHENGTAI XUEBAO）

第 32 卷 第 16 期　　2012 年 8 月　（半月刊）

目　　次

基于生物多样性保护的兴安落叶松与白桦最佳混交比例——以阿尔山林区为例…… 李　菁，骆有庆，石　娟（4943）
中国能源消费碳排放的时空特征 …… 舒娱琴（4950）
黄土丘陵沟壑区坡面尺度土壤水分空间变异及影响因子 …… 姚雪玲，傅伯杰，吕一河（4961）
新疆艾比湖流域土壤有机质的空间分布特征及其影响因素…… 王合玲，张辉国，秦　璐，等（4969）
雅鲁藏布江山南宽谷风沙化土地土壤养分和粒度特征…… 李海东，沈渭寿，邹长新，等（4981）
一株溶藻细菌对海洋原甲藻的溶藻效应…… 史荣君，黄洪辉，齐占会，等（4993）
砷形态对黑藻和竹叶眼子菜有机酸含量的影响…… 钟正燕，王宏镔，王海娟，等（5002）
七项河流附着硅藻指数在东江的适用性评估…… 邓培雁，雷远达，刘　威，等（5014）
杭州湾滨海湿地不同植被类型沉积物磷形态变化特征…… 梁　威，邵学新，吴　明，等（5025）
剪形臂尾轮虫形态的时空变化及其与生态因子间的关系…… 葛雅丽，席贻龙，马　杰，等（5034）
太湖流域河流水质状况对景观背景的响应…… 周　文，刘茂松，徐　驰，等（5043）
荒漠植物白刺属 4 个物种的生殖分配比较…… 李清河，辛智鸣，高婷婷，等（5054）
臭氧浓度升高对香樟叶片光合色素及抗过氧化的影响及其氮素响应…… 牛俊峰，张巍巍，李　丽，等（5062）
不同密度下凤仙花重要形态性状与花朵数的关系…… 田旭平，常　洁，李娟娟，等（5071）
五种高速公路边坡绿化植物的生理特性及抗旱性综合评价…… 谭雪红，高艳鹏，郭小平，等（5076）
散孔材与环孔材树种枝干、叶水力学特性的比较研究 …… 左力翔，李俊辉，李秧秧，等（5087）
北京城区行道树国槐叶面尘分布及重金属污染特征 …… 戴斯迪，马克明，宝　乐（5095）
南亚热带米老排人工林碳贮量及其分配特征 …… 刘　恩，刘世荣（5103）
植物生活史型定量划分及其权重配置方法——以四棱豆生活史型划分为例 …… 赵则海（5110）
半干旱区湿地-干草原交错带边界判定及其变化 …… 王　晓，张克斌，杨晓晖，等（5121）
氮肥运筹对晚播冬小麦氮素和干物质积累与转运的影响…… 吴光磊，郭立月，崔正勇，等（5128）
氮肥形态对冬小麦根际土壤氮素生理群活性及无机氮含量的影响…… 熊淑萍，车芳芳，马新明，等（5138）
基于数字相机的冬小麦物候和碳交换监测…… 周　磊，何洪林，孙晓敏，等（5146）
黄土高原半湿润区气候变化对冬小麦生长发育及产量的影响…… 姚玉璧，王润元，杨金虎，等（5154）
基于土地破坏的矿区生态风险评价：理论与方法 …… 常　青，邱　瑶，谢苗苗，等（5164）
基于生态位的山地农村居民点适宜度评价…… 秦天天，齐　伟，李云强，等（5175）
氯虫苯甲酰胺对黑肩绿盲蝽实验种群的影响 …… 杨　洪，王　召，金道超（5184）
6 种植物次生物质对斜纹夜蛾解毒酶活性的影响 …… 王瑞龙，孙玉林，梁笑婷，等（5191）
云南元江芒果园桔小实蝇成虫日活动规律及空间分布格局…… 叶文丰，李　林，孙来亮，等（5199）
重庆市蝴蝶多样性环境健康指示作用和环境监测评价体系构建 …… 邓合黎，马　琦，李爱民（5208）

专论与综述

生态系统服务竞争与协同研究进展…… 李　鹏，姜鲁光，封志明，等（5219）
中国沿海无柄蔓足类研究进展…… 严　涛，黎祖福，胡煜峰，等（5230）
冰雪灾害对森林的影响…… 郭淑红，薛　立（5242）
不同干扰因素对森林和湿地温室气体通量影响的研究进展…… 杨　平，仝　川（5254）
采石场废弃地的生态重建研究进展 …… 杨振意，薛　立，许建新（5264）

研究简报

基于地统计学和 CFI 样地的浙江省森林碳空间分布研究…… 张　峰，杜　群，葛宏立，等（5275）

期刊基本参数：CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 344 * zh * P * ￥70.00 * 1510 * 36 * 2012-08

封面图说：秋色藏野驴群——秋天已经降临在海拔 4200 多米的黄河源区，红色的西伯利亚蓼（生于盐碱荒地或砂质含盐碱土壤）铺满大地，间有的高原苔草也泛出了金黄，行走在上面的藏野驴们顾不上欣赏这美丽的秋色，只是抓紧时间在严冬到来之前取食，添肥增膘以求渡过青藏高原即将到来的漫长冬天。

彩图提供：陈建伟教授　北京林业大学　E-mail：cites.chenjw@163.com

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 16 August, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

The optimum mixture ratio of larch and birch in terms of biodiversity conservation: a case study in Aershan forest area ····· LI Jing, LUO Youqing, SHI Juan (4943)
Spatiotemporal characteristics of carbon emissions from energy consumption in China ····· SHU Yuqin (4950)
Spatial patterns of soil moisture at transect scale in the Loess Plateau of China ····· YAO Xueling, FU Bojie, LÜ Yihe (4961)
The characteristics of the spatial distribution of soil organic matter and factors influencing it in Ebinur Lake Basin of Xinjiang Autonomous Region, China ····· WANG Heling, ZHANG Huiguo, QIN Lu, et al (4969)
Soil nutrients content and grain size fraction of aeolian sandy land in the Shannan Wide Valley of the Yarlung Zangbo River, China ····· LI Haidong, SHEN Weishou, ZOU Changxin, et al (4981)
Algicidal activity against *Prorocentrum micans* by a marine bacterium isolated from a HABs area, South China ····· SHI Rongjun, HUANG Honghui, QI Zhanhui, et al (4993)
Effects of arsenic speciations on contents of main organic acids in *Hydrilla verticillata* and *Potamogeton malaianus* ····· ZHONG Zhengyan, WANG Hongbin, WANG Haijuan, et al (5002)
Exploration of benthic diatom indices to evaluate water quality in rivers in the Dongjiang basin ····· DENG Peiyan, LEI Yuanda, LIU Wei, et al (5014)
Phosphorus fraction in the sediments from different vegetation type in hangzhou bay coastal wetlands ····· LIANG Wei, SHAO Xuexin, WU Ming, et al (5025)
Spatio-temporal variation of morphometric characteristics of *Brachionus forficula* in relation to ecological factors ····· GE Yali, XI Yilong, MA Jie, et al (5034)
Response of river water quality to background characteristics of landscapes in Taihu Lake basin ····· ZHOU Wen, LIU Maosong, XU Chi, et al (5043)
Reproductive allocation in four desert species of the genus *Nitraria* L. ····· LI Qinghe, XIN Zhiming, GAO Tingting, et al (5054)
Effects of elevated ozone on foliar chlorophyll content and antioxidant capacity in leaves of *Cinnamomum camphora* under enhanced nitrogen loads ····· NIU Junfeng, ZHANG Weiwei, LI Li, et al (5062)
Correlation analysis between floret numbers and important traits of *Impatiens balsamina* under different planting density ····· TIAN Xuping, CHANG Jie, LI Juanjuan, et al (5071)
Physiological characteristics and comprehensive evaluation of drought resistance in five plants used for roadside ecological restoration ····· TAN Xuehong, GAO Yanpeng, GUO Xiaoping, et al (5076)
Comparison of hydraulic traits in branches and leaves of diffuse- and ring-porous species ····· ZUO Lixiang, LI Junhui, LI Yangyang, et al (5087)
Distribution and heavy metal character of foliar dust on roadside tree *Sophora japonica* of urban area in Beijing ····· DAI Sidi, MA Keming, BAO Le (5095)
The research of carbon storage and distribution feature of the *Mytilaria laosensis* plantation in south sub-tropical area ····· LIU En, LIU Shirong (5103)
The novel methods of quantitative classification of plant life cycle forms and weight collocation: taking classification of life cycle forms of *Psophocarpus tetragonolobus* as an example ····· ZHAO Zehai (5110)
Research on boundary definition and changes of wetland-dry grassland ··· WANG Xiao, ZHANG Kebin, YANG Xiaohui, et al (5121)
Differential effects of nitrogen managements on nitrogen, dry matter accumulation and transportation in late-sowing winter wheat ····· WU Guanglei, GUO Liyue, CUI Zhengyong, et al (5128)
Effects of nitrogen form on the activity of nitrogen bacteria group and inorganic nitrogen in rhizosphere soil of winter wheat ····· XIONG Shuping, CHE Fangfang, MA Xinming, et al (5138)
Using digital repeat photography to model winter wheat phenology and photosynthetic CO_2 uptake ····· ZHOU Lei, HE Honglin, SUN Xiaomin, et al (5146)
Impacts of climate change on growth and yield of winter wheat in the semi-humid region of the Loess Plateau ····· YAO Yubi, WANG Runyuan, YANG Jinhu, et al (5154)
Theory and method of ecological risk assessment for mining areas based on the land destruction ····· CHANG Qing, QIU Yao, XIE Miaomiao, et al (5164)
Suitability evaluation of rural residential land based on niche theory in mountainous area ····· QIN Tiantian, QI Wei, LI Yunqiang, et al (5175)
Effects of chlorantraniliprole on experimental populations of *Cyrtorhinus lividipennis* (Reuter) (Hemiptera: Miridae) ····· YANG Hong, WANG Zhao, JIN Daochao (5184)
Effects of six plant secondary metabolites on activities of detoxification enzymes in *Spodoptera litura* ····· WANG Ruilong, SUN Yulin, LIANG Xiaoting, et al (5191)
Daily activity and spatial distribution pattern of the oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis* (Diptera: Tephritidae) in mango orchard, Yuanjiang, Yunnan ····· YE Wenfeng, LI Lin, SUN Lailiang, et al (5199)
The establishment of the indication on environmental health of butterfly and of the environmental monitoring evaluation system in Chongqing ····· DENG Heli, MA Qi, LI Aimin (5208)

Review and Monograph

Research progress on trade-offs and synergies of ecosystem services: an overview ····· LI Peng, JIANG Luguang, FENG Zhiming, et al (5219)
A review on the balanomorph barnacles in the coastal waters of China ····· YAN Tao, LI Zufu, HU Yufeng, et al (5230)
Effects of ice-snow damage on forests ····· GUO Shuhong, XUE Li (5242)
Greenhouse gas flux from forests and wetlands: a review of the effects of disturbance ····· YANG Ping, TONG Chuan (5254)
Advances in ecology restoration of abandoned quarries ····· YANG Zhenyi, XUE Li, XU Jianxin (5264)

Scientific Note

Spatial distribution of forest carbon in Zhejiang Province with geostatistics based on CFI sample plots ····· ZHANG Feng, DU Qun, GE Hongli, et al (5275)

DOI: 10.5846/stxb201108031140
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.
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.

基于土地破坏的矿区生态风险评价:理论与方法

常 青[1,*],邱 瑶[1],谢苗苗[2],彭 建[3]
(1. 中国农业大学观赏园艺与园林系,北京 100193; 2. 中国地质大学(北京)土地科学技术学院,北京 100083;
3. 北京大学城市与环境学院,北京 100871)

摘要:矿区生态风险评价已成为区域生态风险研究的热点领域。如何合理选择和表征区域生态风险源和风险受体,量化多风险源和多风险受体的交互作用,是目前区域生态风险评价研究的焦点。为此,在总结矿区生态风险评价研究成果的基础上,构建了矿区生态风险源、风险受体及作用对象与过程的因果链模型,结合矿区生态环境问题产生过程的独特性,将土地挖损、占用及塌陷等土地破坏作为矿区的直接生态风险源。基于土地破坏类型提出了适宜矿区的区域生态风险评价流程、指标体系与计算方法;并专门在定量化多风险源与多风险受体交互作用上做出探讨,构建了生态系统单元暴露指数和土地破坏累积作用指数来评价矿区土地破坏与生态系统单元间的暴露与危害作用关系。为矿区生态风险评价的实证研究提出了理论基础与方法框架,未来可结合实证研究对此方法及相关指标参数做出完善与改进,为矿区生态环境管理与生态安全建设提供科学的参考依据。

关键词:矿区;区域生态风险评价;土地破坏;暴露指数;累积作用指数

Theory and method of ecological risk assessment for mining areas based on the land destruction

CHANG Qing[1,*], QIU Yao[1], XIE Miaomiao[2], PENG Jian[3]
1 *Department of Ornamental Horticulture and Landscape Architecture, China Agricultural University, Beijing* 100193, *China*
2 *School of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing* 100083, *China*
3 *College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing* 100871, *China*

Abstract: Ecological risk assessment in mining areas is a hotspot and frontier of regional ecological risk researches. At present, how to rationally select and quantify multiple regional ecological risk sources, receptors and their relationships have been the key issues of regional ecological risk assessment studies. Based on the relative ecological risk assessment researches in mining areas, this paper established the cause-effect chain analysis model from ecological risk incentives, sources, receptors to the ecological effect objects and processes, summarized the specificity of environmental problems, and reasonably took the destructed lands by mining activities as the original ecological risk sources, such as the subsided land caused by underground mining, the excavated land caused by open-pit mining, and various occupied lands caused by the mining dumps and tailings. On the basis of the definition and description of the land destruction, the ecological risk assessment procedure, indicator system and method suitable for the mining areas were proposed. The main contents include defining the boundary of mining areas, identifying and interpreting land destruction types, quantifying the degree and probability of multiple destructed lands, evaluating the integrated ecological losing degree of ecosystem units by the ecological niche and vulnerability index, and quantifying the coupling relationship between the land destruction and ecosystem units. The quantitative method of the coupling relationship was especially discussed in this paper, which included

基金项目:国土资源部公益性行业科研资助项目(200911015-2)
收稿日期:2011-08-03; **修订日期**:2012-02-14
* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: changqing@cau.edu.cn

the spatial exposure chance index of ecosystem units and the spatial cumulative effect index of multiple land destructions based on the geographic information system (GIS). In summary, this paper developed an operational ecological risk assessment framework and calculation model for mining areas. The more ecological risk assessment case studies of mining areas will be carried out, and the proposed ecological risk assessment method will be practiced and improved in the future research, which are helpful for promoting the ecological security and sustainable development in mining areas.

Key Words: mining areas; regional ecological risk assessment; land destruction; the exposure chance index; the cumulative effect index

我国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[1]。矿产资源开采利用,在促进我国社会经济快速发展的同时,不可避免地产生了环境污染、生态资源破坏以及地质灾害等生态环境问题,已对人类生存与城市、区域的可持续发展造成威胁,矿区生态环境综合治理已迫在眉睫[2]。定量评价和表征矿山开采利用对矿区生态系统造成的可能影响,是制定矿区生态环境治理规划的基础。目前,广泛开展的区域生态风险评价,为此提供了一个行之有效的方法。

生态风险是一定区域内由外界自然变化或人类活动引起的生态系统结构、功能与生态过程、甚至生态系统稳定性和可持续性的可能损伤[3-5]。区域生态风险评价是从区域尺度上描述和评估环境污染、人为活动或自然灾害对生态系统及其组分产生不利作用的可能性和大小的过程[4]。与一般生态风险评价不同,区域生态风险评价通过将风险扩展到多种生境领域,综合评价风险源、生境受体和评价终点之间的整体效应[6],更加重视空间要素配置对生态风险过程的影响,其主要标志是考虑了景观空间结构对暴露过程和危害过程的影响[7-8]。目前区域生态风险评价已成为生态风险评价研究中的一个重要领域[5],热点关注区域包括流域[9]、三角洲湿地[10]或海岸带[11]、雨林[12]或山地森林[13]以及青藏铁路/公路沿线[14]、垃圾场[15]、采矿区[16-19]等。综观以上区域生态风险评价相关研究,国内外湿地、流域等区域的综合生态风险评价[9,10]与单一风险评价[11]均较为成熟,但在矿区开展的综合生态风险评价研究却仍停留于定性或半定量分析上[17,20-21],定量评价多集中于土壤重金属污染风险评价研究[18-19,22],缺乏对矿区综合生态风险定量评价方法和指标的系统归纳,这在一定程度上也制约了矿区生态环境治理的深入开展。

本文在总结目前矿区生态风险评价研究进展的基础上,通过因果链模型分析矿区生态风险源、风险受体及作用对象与过程,梳理总结矿区生态风险评价的特殊之处;从而提出适合矿区的区域生态风险评价方法、指标体系及其计算模型,探索矿区多风险源、多风险受体交互作用的定量表征方法,为矿区生态风险评价实证研究提供理论支撑,最终作为矿区生态风险防范与生态安全格局构建的基础依据。

1　矿区生态风险评价研究进展

矿区生态风险评价指在一定的地域范围内,描述和评估矿业活动对生态系统结构、功能乃至生态过程产生的不利作用的可能性和大小。目前国内外矿区生态风险评价研究主要集中在煤矿区综合生态风险评价和单一生态风险(特别是土壤重金属污染)评价两个方面。

我国煤炭资源大部分处于干旱、半干旱的生态脆弱区,在这些脆弱区进行煤矿开采存在很大生态风险,地形地貌破坏、“三废”污染、水土流失及盐渍化、重金属污染等是普遍存在的煤矿区生态环境问题。随着煤矿区生态风险分析的不断深入[2,20-21],其定量评价方法的探讨已成为我国矿区生态风险研究的热点之一。程建龙等[17] 2004 年提出了露天煤矿生态风险评价方法,此研究认为挖损、压占等土地破坏是煤矿区主要的风险源,植被和土壤系统是主要的风险受体,并基于风险度和生态损失度构建了综合生态风险指数来定量表征矿区生态风险值;此方法虽然在前人研究[10]基础上提出了适合煤矿区的生态损失度指数,但对于表征风险源的风险度并没有给出可操作性的度量方法,使得此方法至今难以在实证研究中加以运用。贾媛与曹玲娴[23]、张思锋等[24] 2011 年分别基于矿区生态系统承载力和生态梯度风险分析[25]构建了煤矿区综合生态风险评价指标体系,这两种方法能够明确矿区内每个煤矿单元的生态风险等级,但很难对煤矿单元内部各类生态风险等

级进行定量化和空间化。李昭阳等[26] 2011 年基于 GIS 和景观格局指数(景观干扰度和景观脆弱度)提出空间化煤矿区景观生态风险的定量评价方法,并以吉林省各大煤矿进行了案例研究;此研究为矿区生态风险评价定量化和空间化方法做出一定贡献,但在指数选择及其表征生态学含义方面存在不足,未能与矿区综合生态风险评价很好的结合。

与煤矿区综合生态风险评价相比,国内外矿区土壤重金属污染潜在生态风险评价方法较为成熟,目前多数研究采用 Hakanson 潜在生态风险指数进行度量[18,27-28]。同时,矿区土壤重金属污染生态风险评价的研究范围也十分广泛,不仅涉及煤矿、金属矿与非金属矿等不同矿种区,而且对矿区内采掘区、废弃物堆积地与复垦区的重金属污染生态风险均有研究:1)矿区环境普遍受到重金属污染,以 Hakanson 潜在生态风险指数来看,Cd 和 Hg 是矿区重金属污染生态风险的普遍的贡献因子[29-30]。2)矿区重金属污染高风险区多分布在矿山废水处理厂、排水沟附近以及尾矿坝、废渣堆附近[31],以潜在生态风险指数大小为例,在冶炼厂排污口的重金属污染风险>尾矿坝或矸石堆>复垦区[29]。3)复垦区土壤重金属污染潜在生态风险大小受不同复垦方式的影响[18,27],煤矸石充填复垦土壤的综合污染指数平均值和生态风险指数均大于粉煤灰充填复垦土壤[27],这主要与复垦土壤母质性质及其重金属含量、煤矸石自燃以及复垦时间长短等因素有关[32],有研究表明复垦 12 年—13 年的土壤受母质(粉煤灰或煤矸石)的影响最重[32-33]。4)矿区河流普遍受到重金属污染[34-35],其下游潜在生态风险指数低于上游,这说明由于重金属经长距离迁移和形态转化,其污染生态风险有随距离减弱的特征[35]。

综上可见,目前多数矿区单一生态风险评价仍停留在某一片区重金属污染风险值的等级评估上,缺乏与所在区域自然地理背景条件的相互耦合关系研究,这就不可避免地导致了矿区重金属污染生态风险评价研究成果未能推广到更大尺度的区域综合生态风险上。同时,矿区生态风险综合评价则多以生态风险定性或半定量分析为主,定量评价方法研究仅见煤矿区,且缺乏对矿区生态风险源、风险受体及其暴露与危害评价的普适性的综合分析与评价模型;评价方法多以矿区单个煤矿生态风险等级划定为主,缺乏对矿区综合生态风险空间差异的可视化和定量化,这与风险源、受体及相互作用关系都具空间异质性的矿区特点是不相匹配的,也不利于矿区生产者或管理者对未来生态风险的发生做出积极的预警和防范。因此,从矿区生态风险源的特殊性入手,综合现有矿区生态风险分析与评价研究成果,构建可操作性强的矿区生态风险评价方法与指标体系,定量化和空间化矿区生态风险,是矿区生态风险评价十分紧迫的任务之一。

2 矿区生态风险评价的特殊性

与其他区域类似,矿区生态风险评价亦可分为风险源识别、风险受体及暴露危害评价和综合生态风险评价等过程。其中,合理选择和表征区域生态风险源和风险受体,科学探讨和量化多风险源和多风险受体的交互作用,是区域生态风险评价的核心和关键[5,36]。然而,由于受矿藏不可移动性和矿业生产活动特点的影响,从矿藏勘探到矿石采掘、冶炼加工等整个矿产开发过程,都会对矿区生态系统产生直接和间接的危害或影响,作用过程极为复杂。如何有针对性的选择和评价矿区生态风险源、风险受体以及相互间作用关系,就成为矿区生态风险评价的首要难题。

为梳理矿区各类生态环境问题与矿业生产活动、矿区自然生态背景间潜在的因果关系,本文以矿业生产过程为纽带构建因果链模型(图 1),将风险诱因、风险源、风险受体和作用后果间的相互作用以因果链条的形式加以表征。

正如多数研究结果[1],图 1 显示矿山开采引起的生态环境破坏,主要由以下三类过程引起:一是开采活动对土地的直接破坏,如露天开采毁坏地表土层和植被,地下开采会导致地层塌陷而引起土地和植被破坏;二是矿山开采过程中的废弃物,如金属矿山尾矿、煤矸石山与粉煤灰堆等需大面积堆置场地,从而导致过量占用土地和破坏原有生态系统;三是以上土地破坏产生的酸性、碱性、毒性或重金属等成分污染土地及周边环境。这些由矿业开采破坏的土地及其次生污染物,除直接破坏和污染原有生态系统组分外,通过地表径流、食物链、太阳辐射、大气循环以及其他物质迁移转化等生态过程,间接影响区域地质地貌、土壤、地表/地下水、生物群

落、大气质量以及地表温度,从而引发区域性矿震、地裂、滑坡、坍塌、泥石流等地质灾害,地下水位下降,地表或地下水污染,土壤污染或盐碱化,土地荒漠化,生物多样性退化或丧失,大气污染以及局部热岛等各类矿区生态环境问题。也就是说,与其他区域不同,土地挖损、占用与塌陷等土地破坏是矿区主要的生态风险源,废水、废气及重金属等土地污染均来自于土地破坏,属于次生或间接风险源(图 1)。专门针对矿区土地破坏进行生态风险评价,应成为矿区生态风险评价的核心。

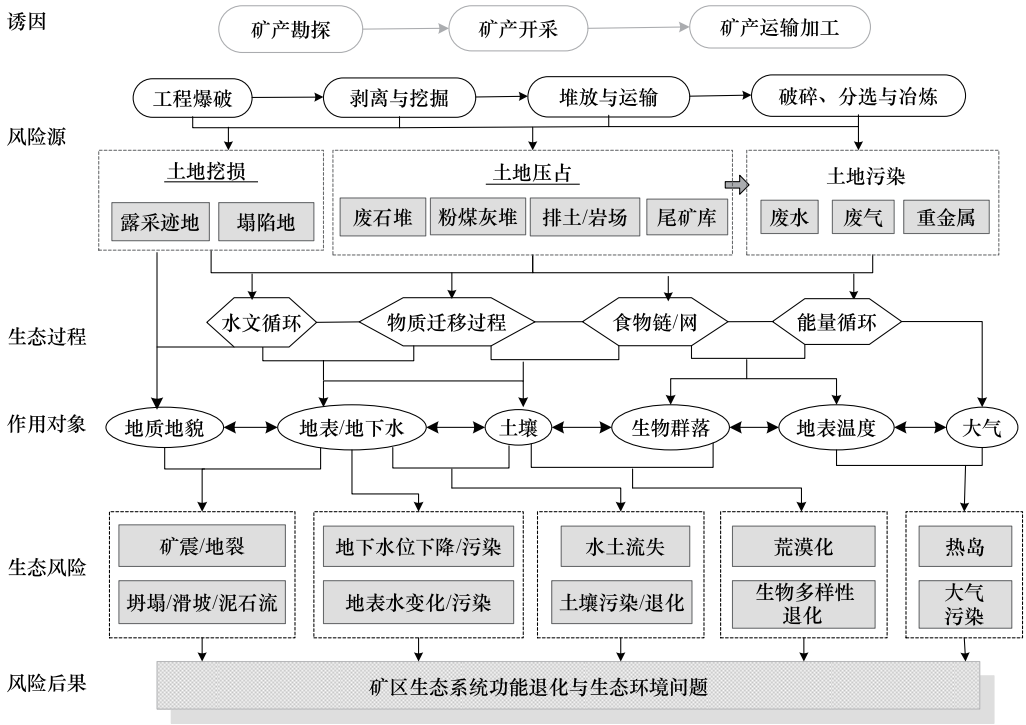

图 1　矿区生态风险因果链模型图示

Fig. 1　The ecological risk identification in mining areas using the cause-effect chain analysis

3　基于土地破坏的矿区生态风险评价流程与方法

3.1　矿区范围及界定原则

为避免工作的盲目性[17],矿区生态风险评价应首先确定研究范围。考虑到矿业生产与土地破坏、生态环境问题的之间相互作用关系(图 1),矿区是曾经开采、正在开采或准备开采的含矿区域,可包括一个或若干个矿井或露天矿,有完整的生产工艺、地面运输、电力供应、通讯调度、生产管理及生活服务等设施,其范围视矿床规模而定[37]。研究者界定矿区范围时,应特别注意以下原则。

3.1.1　区域差异性原则

矿山所处区域的地质构造、矿岩的稳定性以及水文、地形、地物及气候等区域自然条件,往往在很大程度上决定了矿山开采技术以及矿区生态环境问题类型与程度。研究者必须对矿区自然背景条件和现有生态环境问题有充分认识,并对现有生态风险源与生态环境问题已发生范围间的关系进行仔细研究,以合理判断研究区的时空范围。

3.1.2　生态整体性原则

矿区是以矿产采矿、开发与加工为主要特征的空间区域[38],其辐射范围不仅包括矿业生产地段、矿山职工所在地,而且包括依托矿业生产必需的基础设施(水、电、交通等)和劳动力来源等而形成的乡镇、县市及工业小区[17],甚至包括被矿业生产而污染、破坏的外围乡村区域。矿区生态风险评价研究者应根据生态系统的完整性和连续性灵活确定研究区范围,而不可生硬限定于矿业集镇或矿业城市区域。

3.1.3 预见性原则

矿业生产活动具有显著的时空异质性,矿区内不同矿山往往处于不同的开采阶段。在具体研究中,评价区域不仅要包含正在开采和准备开采的矿井区或露采区,而且更应包括曾经开采和可能开采的含矿地段,这些可能发生污染和破坏的生态系统是矿区生态风险评价更应重点关注的区域。

3.2 风险源识别与表征

3.2.1 风险源的识别

矿区生态风险源可从压力释放的地方(如烟囱、煤矸石、污染沉积物等)和产生压力的有关活动(如挖掘、剥离等)两个方面进行识别和描述[17]。由矿区生态风险因果链识别模型可知,土地破坏是矿区最直接的生态风险源(图1)。尽管其产生和作用过程极为复杂,但基本上可归纳为塌陷地、露采迹地、压占地三类[39-40]:塌陷地即由井工挖掘活动引发的地面下沉甚至塌陷的土地;露采迹地是由露天开采而被挖损的土地,包括为采石/砂场、采煤区和采空回填区3个小类;压占地是指矿业开采中各类设施及工业原料、废渣堆放压占的土地,包括矿业生产广场与矸石山、粉煤灰堆、排土/岩场、废石渣堆、尾矿库(包括铀矿等放射性尾矿库)等废弃物堆积地。

各类土地破坏对矿区生态系统的影响种类、影响程度及范围,与矿种特征、开采方式及开采阶段等因素有关。一般来讲,露天开采矿山的土地占用以及由此产生的扬尘、滑坡、水土流失与生物多样性损失等问题比较突出[2];地下开采引起的地面沉降与塌陷、地裂缝、破坏地下水等问题较多,冶金矿山区域的废石堆积地及由此引起的“三废”污染与生物多样性破坏比非金属矿山的严重[1]。

3.2.2 风险源的定量表征方法

在区域生态风险评价中,除了以发生概率和强度表征风险源外,还应表述其作用的区域范围[10]。本文主要通过土地破坏类型发生地段、破坏程度及其发生发展概率3个方面来描述表征矿区主要生态风险源。在实证研究中,研究者可基于卫星影像(如Landsat、SPOT与QUICKBIRD等)、结合矿区土地利用数据及矿产开发整理规划资料等、通过遥感解译技术获取矿区各类土地破坏斑块分布图(即发生地段)。在此基础上,参考矿山土地破坏程度评价方法[40],可定量化不同土地破坏类型斑块上的破坏程度值(λ)。另外,研究者整理矿区资源开采规划、复垦计划、矿业生产相关资料,可判定未来各类土地破坏在矿区不同地段上的发生/发展的概率(ρ)。

在此基础上,采用不同土地破坏作用权重来定量表征土地破坏类型对矿区生态系统的危害程度。研究区空间单元上某类土地破坏类型的作用权重值,计算方法如下:

$$\beta_{yi} = \lambda_{yi} \cdot \rho_{yi} \tag{1}$$

式中,β_{yi} 是研究区任一点上某类土地破坏类型的权重,λ_{yi} 是该点上此类土地破坏类型的破坏程度值,ρ_{yi} 是该点上此类土地破坏类型的发生/发展概率。

具体参考指标如表1所示,其中,为了确保区域风险评价结果的客观性和可比性,一些指标如土地破坏类型的面积、深度及地基岩性等为必选指标,其他指标可根据矿区自身特点与数据可获取性进行遴选。

3.3 风险受体选取与评价

3.3.1 风险受体的选取

矿区生态风险受体是区域内所有的生态系统,既包括生物群落,也包括水、热、土、气等非生物环境要素。考虑到数据可获取性和可比性,本文选择地质地貌、水文状况、土壤、生物群落等自然条件较为一致,且受矿业干扰程度相似的生态单元作为风险受体的类型。具体可划分为林地、草地、农田、水域(包括河流与水库)、荒地或荒漠、村庄(农村居民点)、城市建成区与采矿区等8个类型,每个类型均可由多个斑块单元构成。

3.3.2 生态终点

生态终点是人类所不希望发生的生态事件[10],在矿区可能出现的生态终点包括地形地貌破坏、植被退化、生物多样性丧失、热岛、水土流失、土壤与水体污染、空气污染[1-2]。这些生态终点,是进行风险受体特性

和暴露危害评价时指标选择的基本准则。

表 1　矿区土地破坏综合作用评价指标体系

Table 1　The indicator system for the land destruction action assessment in mining areas

土地破坏类型 Land destruction type	土地破坏程度 Land destruction degree		土地破坏发生发展概率 Land destruction probability	
	评价准则 Rules	参考指标 Reference indicators	评价准则 Rules	参考指标 Reference indicators
塌陷地	地表变形	塌陷深度 * 、面积 * 、边坡度	干扰强度	与井道距离 * 、年均开采时数
The subsided land	地表裂缝	裂缝宽度、间距	地质构造	地层岩性 * 或地基承载力
	水文	积水状况 *	开采规划	矿藏储量、待开采时序
	其他指标	稳定性 * 、土壤质量等	其他指标	年均矿震次数等
露采迹地	地表变形	深度 * 、面积 * 、边坡度	开采规划	矿藏储量、开采时序与工艺
The opencast surface	土体剖面	土层厚度 * 、表土存放状况	干扰强度	矿藏埋深 * 、年均开采时数
	地表裂缝	裂缝宽度、间距	其他指标	地下水埋深、废石回填量等
	水文条件	积水状况 *		
压占地	地表变化	压占面积 * 、边坡坡度 *	地质构造	高程 * 、坡度 * 、地层岩性 *
The occupied land	土壤质量	有毒物质含量、pH 值等	气象条件	降雨量、洪灾次数 * 等
	植物性状	有毒元素含量、生长状况等	运输成本	与采区距离 *
	其他指标	稳定性 * 、废渣再利用率等	开采规划	待堆放区、开采时序与工艺

* 必选指标

3.3.3　风险受体的定量表征

矿区内不同的生态系统在维持矿区生态系统功能以及生态平衡等方面的能力是有差别的。同一类型、相同强度的土地破坏作用于不同类型的生态系统,会对整个矿区生态过程与生态环境质量产生不同程度的影响,例如若林地发生土地塌陷所引发的生态风险要远远超出农田或裸荒地。另一方面,不同生态系统对于同一类型生态风险的抵御能力也是不同的,例如荒漠等生态脆弱区对土地破坏的抵抗能力很低,破坏后很难恢复。因此,本方法分别采用生态位指数和脆弱度指数定量表征不同生态系统单元对矿区生态平衡维续的重要性与抵抗矿区土地破坏风险的能力[1]。

生态位指数(ENI),源于生态学中生物种群的生态位概念,可理解为某一生态系统或生态系统单元在维持区域生态平衡中的地位和角色,可从结构和功能两个方面进行评价。此值越高,说明此类生态系统对整个区域越重要,若遭到风险源破坏后,造成的生态后果越严重。其中,结构性指标反映生态系统结构的健康程度,参考指标如乡土物种比例、生物多样性以及不透水地表比例等;功能性指数反映生态系统服务功能的强弱,参考指标如土壤肥力、生境破碎化指数以及服务功能系数等(表 2)。

生态脆弱度指数(EVI)用于度量不同生态系统是否容易受到土地破坏的伤害、损害或破坏。此值越大,说明此类生态系统对土地破坏的抵抗能力越弱,受到土地破坏的影响越严重。它可从地形地貌、气象条件、地表覆盖以及环境质量等方面进行评价,参考指标如高程、坡度、地形起伏度、植被覆盖度、干燥度以及土壤重金属污染指数等(表 2)。参考相关研究结果[31],其中部分指标(如土壤重金属污染指数、地表/下水污染指数等)可根据实测数据通过筛选比较、使用 GIS 中的克里格插值法获取。

两指数具体计算:

$$\mathrm{ENI}_i = \sum (W_{S_l} \cdot S'_l + W_{F_m} \cdot F'_m) \tag{2}$$

式中, ENI_i 表示研究区任一空间单元上的生态位指数, S_l 和 F_m 分别为结构性和功能性指标, S'_l , F'_m 分别为 S_l 和 F_m 的标准化值; W_{S_l} 和 W_{F_m} 为各指标的权重,且 $\sum W_{S_l} + \sum W_{F_m} = 1$。

$$\mathrm{EVI}_i = \sum (W_{T_h} \cdot T'_h + W_{V_g} \cdot V'_g + W_{C_j} \cdot C'_j + W_{P_k} \cdot P'_k) \tag{3}$$

式中, EVI_i 表示研究区任一空间点的生态脆弱度指数, T_h , V_g , C_j 和 P_k 分别为地形、覆被、气象和环境质量

评价指标，T'_h，V'_g，C'_j，P'_k 分别为 T_h，V_g，C_j 和 P_k 的标准化值；W_{T_h}，W_{V_g}，W_{C_j} 和 W_{P_k} 为各指标权重，且 $\sum W_{T_h} + \sum W_{V_g} + \sum W_{C_j} + \sum W_{P_k} = 1$。

表 2 矿区生态系统单元综合损失度评价指标体系

Table 2 The indicator system for the integrated ecological losing degree assessment in mining areas

目标层 Target Layer	准则层 Rule Layer	指标层 Indicator Layer	权重 Weight	指标含义 The indicator meanings	备注 Remark
生态位，ENI	结构 Sl	物种原生性指数，S_1	W_{S1}	乡土物种比，%	+
Ecological niche		生物多样性指数，S_2 *	W_{S2}	物种数占总数比例，%	+
index		自然度指数，S_3 *	W_{S3}	不透水表面比例，%	–
	功能 F_m	服务功能系数，F_1 *	W_{F1}	全球生态系统服务价值，万元	+
		土壤肥力，F_2 *	W_{F2}	土壤有机质含量，g/kg	+
		破碎化指数，F_3 *	W_{F3}	平均斑块面积，m^2	–
脆弱性，EVI	地形地貌 Th	高程，T_1 *	W_{T1}	m	+
Ecological		坡度，T_2 *	W_{T2}	(°)	+
vulnerability index		起伏度，T_3 *	W_{T3}	m	+
	地表覆被 V_g		W_{V1}	归一化植被指数	–
	气象 C_j	干燥度指数，C_1	W_{C1}	叶面缺水指数，	+
		最大降雨指数，C_2	W_{C2}	50 年一遇洪水量，mm	+
	环境质量 P_k	土壤污染指数，P_1	W_{P1}	Hakanson 重金属危害指数	+
		水污染指数，P_2	W_{P2}	污染物浓度，mg/L	+
		土壤侵蚀指数，P_3	W_{P3}	单位面积年均土壤流失量，$t \cdot a^{-1} \cdot hm^{-2}$	+
		大气污染指数，P_4	W_{P4}	污染物浓度，mg/m^3	+

* 必选指标；—指标无量纲；+ 正向指标；–负向指标

此外，由于表 2 中各指标有正负向作用，因此正向和负向指标分别采用不同的标准化方法分别为公式 4 和公式 5。

$$X' = [x_\alpha - \min(x)] / [\max(x) - \min(x)] \tag{4}$$

$$X' = [\max(x) - x_\alpha] / [\max(x) - \min(x)] \tag{5}$$

3.4 暴露与危害评价

矿区各类土地破坏对不同生态系统单元造成危害的程度，不仅受到土地破坏和生态系统单元的自身特性影响，而且与它们之间的空间距离、邻接斑块性质以及不同土地破坏类型的累积作用密切相关。为此，本文采用生态系统单元暴露系数和风险源累积作用系数来定量表征矿区生态风险源与受体间的暴露-危害关系。

生态单元暴露系数(ECI)是研究区任一空间单元暴露于某类土地破坏的机会，它是土地破坏(即风险源)对外扩散时所需生态耗费的反函数(公式 6)，也就是说，风险源扩散到空间上某点的生态耗费(阻力)越小，那么该点暴露于风险源的机会越大，此点的暴露系数越大。风险源扩散生态耗费系数(SCI)，即某土地破坏类型(源)向外围施加威胁或胁迫时所越到的阻力大小，它与扩散时通过的空间距离以及所通过斑块对其的抵抗作用有关。SCI 可借助 GIS 中 Cost distance 模块进行计算，在此计算模型中，可将采矿点作为源，生态单元邻接兼容系数为耗费表面。这里，生态单元邻接兼容系数源自 Marulli 和 Mallarach[41] 提出的生态系统功能兼容矩阵(表 3)，本文将其定义为生态系统斑块间在抵抗土地破坏生态风险时功能上的互补性和协同性，某斑块与其周围斑块间的兼容系数越高，越有利于此斑块抵抗外来风险。

$$ECI_{yi} = 1 - SCI'_{yi} \tag{6}$$

式中，ECI_{yi} 是空间内任意点对某类风险源的暴露系数，SCI'_{yi} 是 SCI_{yi} 的标准化值，SCI_{yi} 是该类风险源的扩散

到此点时的生态耗费系数。

表 3　生态系统单元邻接兼容系数(修正自 Marulli 和 Mallarach[41])

Table 3　The adjacency units' function affinity of the ecological patches in mining areas (Revised based on Marulli 和 Mallarach's affinity matrix[41])

代码 Code	目标单元 Target units / 邻接单元 Adjacent units	水体 Water		林地 Forestlands		C5	农地 Agro lands			C9	C10	C11
		C1	C2	C3	C4		C6	C7	C8			
C1	河流湿地 Rivers/Wetlands	1	0.1	0.7	0.6	0.6	0.5	0.4	0.2	0.1	0.1	0.1
C2	坑塘 Water ponds	0.1	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
C3	森林 Forests	0.7	0.3	1	0.9	0.9	0.5	0.3	0.4	0.9	0.9	0.9
C4	灌丛 Shrubs	0.6	0.8	0.9	1	0.9	0.4	0.3	0.5	0.8	0.8	0.8
C5	草地 Meadows	0.6	0.9	0.9	0.9	1	0.4	0.3	0.5	0.7	0.7	0.7
C6	园地 Groves	0.5	0.4	0.6	0.6	0.6	1	0.8	0.8	0.6	0.6	0.6
C7	水田 Irrigated croplands	0.4	0.6	0.4	0.3	0.3	0.9	1	0.8	0.4	0.4	0.4
C8	旱地 Dry croplands	0.3	0.5	0.2	0.5	0.5	0.7	0.8	1	0.3	0.3	0.3
C9	荒漠或裸地 Deserts or denude areas	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C10	村庄或城市绿地 Villages or urban green space	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
C11	城市建成区 Urban areas	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0
C12	采矿用地 mining patches	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

风险源间的累积作用是矿区生态风险评价不容忽视的问题[23]。考虑到数据的可比性和可获取性,本法采用风险源累积作用系数来表示空间单元受到不同风险源综合作用的机会大小,此值可通过各类风险源的累积耗费系数之和的反函数来计算(公式 7)。此值越高,说明此点受到风险源的累积作用影响越大。

$$CAI_i = 1 - TSCI'_i \tag{7}$$

式中, CAI_i 是空间内任意点的风险源累积作用系数, $TSCI'_i$ 是 $TSCI_i$ 的标准化值, $TSCI_i$ 是风险源扩散到该点时的耗费系数之和,即 $TSCI_i = \sum_y SCI_{yi}$ 。

3.5　矿区生态风险综合评价与空间化

风险综合评价是矿区风险评价的最后阶段,此阶段要结合受体、风险源和暴露危害评价结果,评价矿区空间单元的综合生态风险值的大小,为矿区生态风险管理提供理论依据[17]。

3.5.1　综合生态风险值的度量

综合生态风险值是矿区生态风险大小的定量表征,它是各类土地破坏综合作用于矿区生态系统的结果。矿区空间单元上的综合风险值,是土地破坏作用权重、土地破坏累积作用、以及生态系统单元重要性、脆弱度以及暴露机会的综合,其计算方法如下:

$$ERI_i = \sum_y \beta'_{yi} \cdot ECI_{yi} \cdot CAI_i \cdot ENI_i \cdot EVI_i \tag{8}$$

式中, ERI_i 是研究区空间单元上的综合生态风险值, β'_{yi} 是 β_{yi} 的标准化值(标准化方法见公式 5),其他参数含义同上。

3.5.2　综合生态风险分级分类图

根据公式 8 计算出研究区空间各点的综合生态风险值。最终,基于矿区综合生态风险值分布图,选择适宜的分类方法(如 Natural Breaks、Equal Interval 或 Standard Deviation 等),对研究区内综合生态风险进行分级分类,并通过 GIS 实现矿区生态风险评价结果的可视化。

4　结语

大量国内外相关领域研究成果表明,区域生态风险评价流程已较为明确,一般包括风险源识别与描述、风险受体分析、暴露危害评价以及综合生态风险评价四个过程,包括区域内各生态系统的地位和作用评价、脆弱

性评价以及可能遭受的风险概率评价等3个关键环节[6],其中前两个环节评价指标与计算方法在相关研究中较为成熟和普遍[4-6,9,17]。但由于区域生态风险评价包括多种风险源、多种风险受体和多种评价终点,如何合理选择和定量表征区域生态风险源和风险受体,量化多风险源和多风险受体的交互作用,仍是区域生态风险评价研究的焦点问题[5,36]。

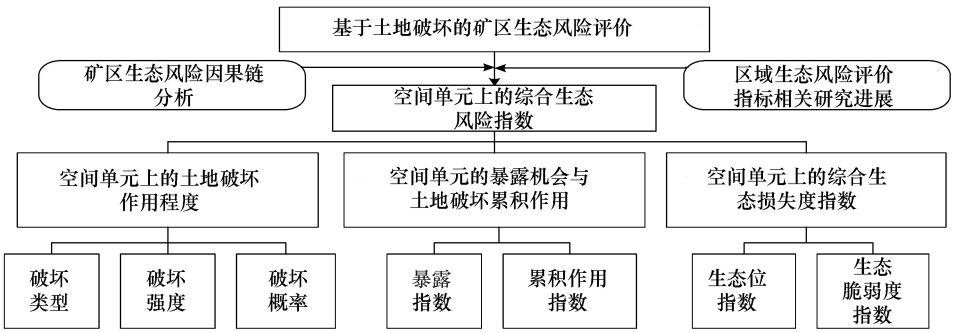

图2 矿区生态风险评价指标体系

Fig. 2 The indicator system for the ecological risk assessment in mining areas

本研究以生态环境问题与潜在生态风险凸显的矿区为研究对象,根据矿业生产的特点,系统梳理了矿区生态风险源、风险受体及二者间相互作用关系,发现土地挖损、占用及塌陷等土地破坏是矿区最直接生态风险源,也是矿区不同于其他区域生态风险评价的特殊之处。鉴于此,本文专门针对矿区土地破坏,提出了适宜矿区的区域生态风险评价流程、指标体系(图2)与计算方法(公式1—公式8)。此方法除了对风险源(即土地破坏类型、破坏程度、发生发展概率)与生态系统生态位和脆弱度等进行评价外,特别对区域内多风险源和风险受体的综合作用予以关注;并提出了生态系统暴露系数和土地破坏累积作用系数两个指标,评价矿区生态系统与土地破坏间的暴露危害作用关系,在定量化多风险源与多风险受体交互作用方面做了探索。

本文对矿区生态风险评价方法做了指标体系与理论模型探讨,今后要加强矿区生态风险评价的实证研究,以期对此方法及相关指标参数做出进一步的修正和完善,从而为矿区生态环境管理与生态安全建设提供科学的参考依据。

致谢:感谢北京大学李双成教授对本研究的帮助。

References:

[1] Wang G C, Yan X Q. Study on Theories and Methods of Ecosystem Health Assessment in Mining Area. Beijing: Economic Science Press, 2006.

[2] Fan Y H, Lu Z H, Cheng J L, Zhou Z X, Wu G. Major ecological and environmental problems and the ecological reconstruction technologies of the coal mining areas in China. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(10): 2144-2160.

[3] Zhang S F, Liu H M. Review of ecological risk assessment methods. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(10): 2735-2744.

[4] Fu Z Y, Xu X G. Regional ecological risk assessment. Advance in Earth Sciences, 2001, 16(2): 267-271.

[5] Yin H, Wang Y L, Cai J L, Lü X F, Liu X Q. Regional ecological risk assessment: its research progress and prospect. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(5): 969-975.

[6] Meng J J, Zhao C H. Research progress on index system of regional ecological risk assessment. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(4): 983-990.

[7] Hunsaker C T, Graham R L, Suter G W, O'Neill R V, Barnthouse L W, Gradner R H. Assessing ecological risk on a regional scale. Environmental Management, 1990, 14(3): 325-332.

[8] Graham R L, Hunsaker C T, O'Neill R V. Ecological risk assessment at the regional scale. Ecological Applications, 1991, 1(2): 196-206.

[9] Lu H W, Zeng G M, Xie G X, Zhang S F, Huang G H, Jin X C, Liu H L. The regional ecological risk assessment of the Dongting Lake watershed. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(12): 2520-2530.

[10] Xu X G, Lin H P, Fu Z Y. Probe into the method of regional ecological risk assessment-a case study of wetland in the Yellow River Delta in China. Journal of Environmental Management, 2004, 70(3): 253-262.

[11] Caeiro S, Costa M H, Ramos T B, Fernandes F, Silverra N, Coimbra A, Medeiros G, Painho M. Assessing heavy metal contamination in Sado Estuary sediment: an index analysis approach. Ecological Indicators, 2005, 5(2): 151-169.

[12] Moraes R, Landis W G, Molander S. Regional risk assessment of a Brazilian rain forest reserve. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2002, 8(7): 1779-1803.

[13] Wang C M, Wang J D, Liu J S, Zhang X L, Yan D H. Ecological risk assessment of forest resource in northeast China. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(6): 863-866.

[14] Chen H, Li S C, Zheng D. Ecological risk assessment of regions alongside Qinghai-Xizang Highway and railway based on artificial neural network. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2005, 41(4): 586-593.

[15] Redfeam A, May M, Roberts D. Ecological risk-assessment methodology: a UK case study for landfills. Water and Environment Journal, 2004, 18(3): 139-143.

[16] Pereira R, Ribeiroc R, Gonçalves F. Plan for an integrated human and environmental risk assessment in the S. Domingos Mine Area (Portugal). Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2004, 10(3): 543-578.

[17] 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.

[18] Ge Y Y, Cui X, Bai Z K. Evaluation on potential ecological risk of heavy metal pollution in reclaimed soil of opencast-taking Pingshuo opencast mine as an example. Journal of Shanxi Agricultural University: Natural Science Edition, 2008, 28(1): 85-88.

[19] Susaya J, Kim K H, Jung M C. The impact of mining activities in alteration of as levels in the surrounding ecosystems: an encompassing risk assessment and evaluation of remediation strategies. Journal of Hazardous Materials, 2010, 182(1/3): 427-438.

[20] Ma X J, Chang Z H, Cheng J L, Lu Z H. Ecological risk analysis for Fuxin open cast mine area. China Mining Magazine, 2006, 15(8): 19-21.

[21] Tian D P, Zhang S X, Chen L Q, Guo F. Ecological risk analysis for Antaibao opencast mine area. Opencast Mining Technology, 2007, (5): 62-64.

[22] Boularbah A, Schwartz C, Bitton G, Morel J L. Heavy metal contamination from mining sites in South Morocco: 1. Use of a biotest to assess metal toxicity of tailings and soils. Chemosphere, 2006, 63(5): 802-810.

[23] Jia Y, Cao L X. Review on ecological risk assessment method for coal-mining area. Environmental Science and Management, 2011, 36(4): 177-182.

[24] Zhang S F, Zhang L, Zhang Y H. Ecological risk assessment of the Yulin coal mining area based on the PETAR method. Resources Science, 2011, 33(10): 1914-1923.

[25] Moraes R, Molander S. A procedure for ecological tiered assessment of risks (PETAR). Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2004, 10(2): 349-371.

[26] Li Z Y, Zhang N, Tang H, Ji Y, Liu J L. Analysis on the landscape ecological risk of Jilin coal mining area. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2011, 41(1): 207-214.

[27] Wang Y, Dong J H. Potential ecological risk assessment of filling reclaimed soils polluted by heavy metals in mining area. Journal of China Coal Society, 2009, 34(5): 650-655.

[28] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.

[29] Li H X, Hu Z Q, Li N, Fan C Y, Fan S. Integrate risk assessment of the heavy metal contamination in key regions of mining area in Huainan. Journal of China Coal Society, 2008, 33(4): 423-426.

[30] Wu Y G, Xu Y N, Zhang J H, Hu S H. Evaluation of ecological risk and primary empirical research on heavy metals in polluted soil over Xiaoqinling gold mining region, Shaanxi, China. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(4): 688-694.

[31] Kou S W, Cai S Y, Zhang B, He J M, Huang S Y, Zheng J H, Yi R H. Speciation distribution and potential ecological risk assessment of Cd and Pb in Yunfu Pyrite area. Journal of Jinan University: Natural Science and Medicine Edition, 2011, 32(1): 48-52.

[32] Fan W H, Bai Z K, Li H F, Qiao J Y, Xu J W, Li X. Potential ecological risk assessment of heavy metals in reclaimed soils. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(1): 348-354.

[33] Hu Z Q, Qi J Z, Si J T. Contamination and assessment of heavy metals in fly ash reclaimed soil. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(2): 214-218.

[34] Chen C H, Ni S J, He B B, Zhang C J. Potential ecological risk analysis of heavy metals contamination based on GIS methods in sediments of Dexing, Jiangxi Province, China. Advances in Earth Science, 2008, 23(3): 312-322.

[35] Yang G, Zhou Y, Bei R T, Guo G J, Cun W J. Potential ecological risk assessment by heavy metal pollution in sediments of rivers in mining areas in the south-east of Yunnan. Environmental Science Survey, 2007, 26(1): 80-81.

[36] Yan L, Xu X G. Progress of regional ecological risk assessment. Areal Research and Development, 2010, 29(1): 113-118.

[37] Editorial Board of Chinese Encyclopedia. The Chinese Encyclopedia (Mining and Metallurgy). Beijing: Chinese Encyclopedia Press, 1984,

393-394.

[38] Chen Y H, Wang Y J, Li T J. Concept and sustainable development basic problems of mining area. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2000, 20(4): 299-303.

[39] Land Consolidation and Rehabilitation Center, Key Laboratory of Land Regulation in the Ministry of Land and Resources of China. Study on the Land Reclamation Project and Practice in Key Coal Bases in China. Beijing: Geological Press, 2008.

[40] Li F B, Li H C, Zhou J Y. Methods of land destruction extent assessment in mining areas. Mining Technology, 2006, 6(2): 25-28.

[41] Marulli J, Mallarach J M. A GIS methodology for assessing ecological connectivity: application to the Barcelona Metropolitan Area. Landscape and Urban Planning, 2005, 71(2/4): 243-262.

参考文献:

[1] 王广成, 闫旭骞. 矿区生态系统健康评价理论及其实证研究. 北京: 经济科学出版社, 2006.

[2] 范英宏, 陆兆华, 程建龙, 周忠轩, 吴钢. 中国煤矿区主要生态环境问题及生态重建技术. 生态学报, 2003, 23(10): 2144-2160.

[3] 张思锋, 刘晗梦. 生态风险评价方法述评. 生态学报, 2010, 30(10): 2735-2744.

[4] 付在毅, 许学工. 区域生态风险评价. 地球科学进展, 2001, 16(2): 267-271.

[5] 殷贺, 王仰麟, 蔡佳亮, 吕晓芳, 刘小茜. 区域生态风险评价研究进展. 生态学杂志, 2009, 28(5): 969-975.

[6] 蒙吉军, 赵春红. 区域生态风险评价指标体系. 应用生态学报, 2009, 20(4): 983-990.

[9] 卢宏玮, 曾光明, 谢更新, 张硕辅, 黄国和, 金相灿, 刘鸿亮. 洞庭湖流域区域生态风险评价. 生态学报, 2003, 23(12): 2520-2530.

[13] 王春梅, 王金达, 刘景双, 张学林, 严登华. 东北地区森林资源生态风险评价研究. 应用生态学报, 2003, 14(6): 863-866.

[14] 陈辉, 李双成, 郑度. 基于人工神经网络的青藏公路铁路沿线生态系统风险研究. 北京大学学报(自然科学版), 2005, 41(4): 586-593.

[17] 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.

[18] 葛元英, 崔旭, 白中科. 露天煤矿复垦土壤重金属污染及生态风险评价——以平朔安太堡露天矿区为例. 山西农业大学学报(自然科学版), 2008, 28(1): 85-88.

[20] 马喜君, 常志华, 程建龙, 陆兆华. 阜新露天煤矿区生态风险分析. 中国矿业, 2006, 15(8): 19-21.

[21] 田大平, 张世雄, 陈联乔, 郭芳. 安太堡露天矿区生态风险分析. 露天采矿技术, 2007, (5): 62-64.

[23] 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.

[24] 张思锋, 张立, 张一恒. 基于生态梯度风险评价方法的榆林煤炭开采区生态风险评价. 资源科学, 2011, 33(10): 1914-1923.

[26] 李昭阳, 张楠, 汤浩, 籍瑶, 刘继莉. 吉林省煤矿区景观生态风险分析. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(1): 207-214.

[27] 王莹, 董霁红. 徐州矿区充填复垦地重金属污染的潜在生态风险评价. 煤炭学报, 2009, 34(5): 650-655.

[29] 李海霞, 胡振琪, 李宁, 樊春燕, 梁爽. 淮南某废弃矿区污染场的土壤重金属污染风险评价. 煤炭学报, 2008, 33(4): 423-426.

[31] 寇士伟, 蔡素英, 张博, 何嘉敏, 黄诗苑, 郑杰辉, 亦如瀚. 云浮矿区土壤 Cd、Pb 形态分布及潜在生态风险评价. 暨南大学学报(自然科学与医学版), 2011, 32(1): 48-52.

[32] 樊文华, 白中科, 李慧峰, 乔俊耀, 许建伟, 李霞. 复垦土壤重金属污染潜在生态风险评价. 农业工程学报, 2011, 27(1): 348-354.

[33] 胡振琪, 戚家忠, 司继涛. 不同复垦时间的粉煤灰充填复垦土壤重金属污染与评价. 农业工程学报, 2003, 19(2): 214-218.

[34] 陈翠华, 倪师军, 何彬彬, 张成江. 基于 GIS 技术的江西德兴地区水系沉积物重金属污染的潜在生态危害研究. 地球科学进展, 2008, 23(3): 312-322.

[35] 杨歌, 周跃, 贝荣塔, 郭广军, 寸文娟. 滇东南矿区河流底泥重金属污染潜在生态风险评价. 环境科学导刊, 2007, 26(1): 80-81.

[36] 颜磊, 许学工. 区域生态风险评价研究进展. 地域研究与开发, 2010, 29(1): 113-118.

[37] 中国大百科全书编委会. 中国大百科全书 (矿冶卷). 北京: 中国大百科全书出版社, 1984, 393-394.

[38] 陈玉和, 王玉浚, 李堂军. 矿区的概念与矿区可持续发展的基本问题. 西安科技学院学报, 2000, 20(4): 299-303.

[39] 国土资源部土地整理中心与土地整治重点实验室. 重点煤炭基地土地复垦工程实施方案纲要研究. 北京: 地质出版社, 2008.

[40] 李发斌, 李何超, 周家云. 矿山土地破坏程度评价方法研究. 采矿技术, 2006, 6(2): 25-28.

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7　国外邮发代号:M670　标准刊号:ISSN 1000-0933　CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号　**电　话**:(010)62941099;62843362

E-mail:shengtaixuebao@rcees.ac.cn　**网　址**:www.ecologica.cn

编辑部主任　孔红梅　　**执行编辑**　刘天星　段　靖

生　态　学　报
(SHENGTAI　XUEBAO)
(半月刊　1981 年 3 月创刊)
第 32 卷　第 16 期　(2012 年 8 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 32　No. 16 (August, 2012)

编　辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	**Edited** by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主　编	冯宗炜	**Editor-in-chief**	FENG Zong-Wei
主　管	中国科学技术协会	**Supervised** by	China Association for Science and Technology
主　办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	**Sponsored** by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出　版	科学出版社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1R00717	**Published** by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing　100717, China
印　刷	北京北林印刷厂	**Printed** by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发　行	科学出版社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	**Distributed** by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订　购	全国各地邮局	**Domestic**	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	**Foreign**	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营许可证	京海工商广字第 8013 号		

ISSN 1000-0933

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q　　**国内外公开发行**　　**国内邮发代号** 82-7　　**国外发行代号** M670　　**定价** 70.00 元