

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 20 期 Vol.32 No.20 **2012**

中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
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 20 期

2012 年 10 月 (半月刊)

目 次

太湖流域源头溪流氧化亚氮(N_2O)释放特征.....	袁淑方, 王为东 (6279)
闽江河口湿地植物枯落物立枯和倒伏分解主要元素动态.....	曾从盛, 张林海, 王天鹅, 等 (6289)
宁夏荒漠草原小叶锦鸡儿可培养内生细菌多样性及其分布特征.....	代金霞, 王玉炯 (6300)
陕西省栎黄枯叶蛾蛹的空间分布.....	章一巧, 宗世祥, 刘永华, 等 (6308)
模拟喀斯特生境条件下干旱胁迫对青冈栎苗木的影响.....	张中峰, 尤业明, 黄玉清, 等 (6318)
中国井冈山生态系统多样性.....	陈宝明, 林真光, 李 贞, 等 (6326)
鄂西南木林子常绿落叶阔叶混交林恢复过程中优势树种生态位动态.....	汤景明, 艾训儒, 易咏梅, 等 (6334)
不同增温处理对夏蜡梅光合特性和叶绿素荧光参数的影响	徐兴利, 金则新, 何维明, 等 (6343)
模拟长期大风对木本猪毛菜表观特征的影响	南 江, 赵晓英, 余保峰 (6354)
雷竹林土壤和叶片 N、P 化学计量特征对林地覆盖的响应	郭子武, 陈双林, 杨清平, 等 (6361)
利用树木年轮重建赣南地区 1890 年以来 2—3 月份温度的变化	曹受金, 曹福祥, 项文化 (6369)
川西亚高山草甸土壤呼吸的昼夜变化及其季节动态.....	胡宗达, 刘世荣, 史作民, 等 (6376)
火干扰对小兴安岭白桦沼泽和落叶松-苔草沼泽凋落物和土壤碳储量的影响	周文昌, 牟长城, 刘 夏, 等 (6387)
黄土丘陵区三种典型退耕还林地土壤固碳效应差异.....	佟小刚, 韩新辉, 吴发启, 等 (6396)
岩质公路边坡生态恢复土壤特性与植物多样性	潘树林, 辜 彬, 李家祥 (6404)
坡位对东灵山辽东栎林土壤微生物量的影响.....	张 地, 张育新, 曲来叶, 等 (6412)
太湖流域典型入湖港口景观格局对河流水质的影响.....	王 瑛, 张建锋, 陈光才, 等 (6422)
基于多角度基尼系数的江西省资源环境公平性研究	黄和平 (6431)
中国土地利用空间格局动态变化模拟——以规划情景为例	孙晓芳, 岳天祥, 范泽孟 (6440)
世界主要国家耕地动态变化及其影响因素	赵文武 (6452)
不同氮源下好氧反硝化菌 <i>Deffluibacter lusatiensis</i> str. DN7 的脱氮特性	肖继波, 江惠霞, 褚淑祎 (6463)
基于生态足迹方法的南京可持续发展研究.....	周 静, 管卫华 (6471)
基于投入产出方法的甘肃省水足迹及虚拟水贸易研究.....	蔡振华, 沈来新, 刘俊国, 等 (6481)
浦江县土壤碱解氮的空间变异与农户 N 投入的关联分析	方 斌, 吴金凤, 倪绍祥 (6489)
长江河口潮间带盐沼植被分布区及邻近光滩鱼类组成特征	童春富 (6501)
深圳湾不同生境湿地大型底栖动物次级生产力的比较研究.....	周福芳, 史秀华, 邱国玉, 等 (6511)
灰斑古毒蛾口腔反吐物诱导沙冬青细胞 Ca^{2+} 内流及 H_2O_2 积累	高海波, 张淑静, 沈应柏 (6520)
濒危物种金斑喙凤蝶的行为特征及其对生境的适应性.....	曾菊平, 周善义, 丁 健, 等 (6527)
细叶榕榕小蜂群落结构及动态变化.....	吴文珊, 张彦杰, 李凤玉, 等 (6535)
专论与综述	
流域生态系统补偿机制研究进展	张志强, 程 莉, 尚海洋, 等 (6543)
可持续消费的内涵及研究进展——产业生态学视角	刘晶茹, 刘瑞权, 姚 亮 (6553)
工业水足迹评价与应用.....	贾 佳, 严 岩, 王辰星, 等 (6558)
矿区生态风险评价研究述评.....	潘雅婧, 王仰麟, 彭 建, 等 (6566)
研究简报	
围封条件下荒漠草原 4 种典型植物群落枯落物枯落量及其蓄积动态.....	李学斌, 陈 林, 张硕新, 等 (6575)
密度和种植方式对夏玉米酶活性和产量的影响.....	李洪岐, 蔺海明, 梁书荣, 等 (6584)
期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 312 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 35 * 2012-10	

封面图说: 草丛中的朱鹮——朱鹮有着鸟中“东方宝石”之称。洁白的羽毛, 艳红的头冠和黑色的长嘴, 加上细长的双脚, 朱鹮历来被日本皇室视为圣鸟。20 世纪前朱鹮在中国东部、日本、俄罗斯、朝鲜等地曾有较广泛地分布, 由于环境恶化等因素导致种群数量急剧下降, 至 20 世纪 70 年代野外已认为无踪影。1981 年 5 月, 中国鸟类学家经多年考察, 在陕西省洋县重新发现朱鹮种群, 一共只有 7 只, 也是世界上仅存的种群。此后对朱鹮的保护和科学研究做了大量工作, 并于 1989 年在世界首次人工孵化成功。

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

DOI: 10.5846/stxb201110191553

潘雅婧, 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.

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.

矿区生态风险评价研究述评

潘雅婧^{1,2}, 王仰麟^{1,*}, 彭建^{1,2}, 韩忆楠^{1,2}

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

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

摘要: 作为世界上矿产资源最丰富的国家之一, 我国的矿山开采活动在给经济发展注入强大拉动力的同时, 也给矿区生态环境带来了巨大的生态风险。总结前人相关研究, 在对比分析了矿区生态风险及其评价与区域生态风险评价异同的基础上, 初步明晰矿区生态风险具有风险源的多样性、空间影响边界的模糊性、随空间距离的衰减性及时间累积的延续性等特性。目前矿区生态风险评价的矿区类型过多集中于金属矿区的重金属污染等单项风险, 对综合生态风险评价的重视不充分, 多基于景观格局、生态环境问题视角, 结果多对斑块或生态系统风险评价进行拼接, 欠缺基于空间异质性的整体综合; 风险度量模型、指标体系法和空间分析法则较为常用的矿区生态风险评价方法, 但在模型模拟方面略显不足。基于现有研究进展, 预期矿区独特性的体现、空间格局的关注、“3S”技术的综合应用、生态安全阈值的设定、不确定性表征、基于评价结果的风险规避等将有望成为未来研究的重点。

关键词: 矿区生态风险; 评价理论与方法; 研究进展; 研究展望

Research progress in ecological risk assessment of mining area

PAN Yajing^{1,2}, WANG Yanglin^{1,*}, PENG Jian^{1,2}, HAN Yinan^{1,2}

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

2 Key Laboratory for Environmental and Urban Sciences, School of Urban Planning and Design, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, China

Abstract: The rich mineral resources along with the active mining industry in China have contributed a lot to the economic boom for the past years. However, it has also posed tremendous ecological risk to the regional socio-economic system and ecosystem. Therefore, researchers have started to evaluate ecological risk for mining areas since the end of 1990s. From ecological risk assessment to regional ecological risk assessment, and then to ecological risk assessment for mining areas, the research paradigm has a significant shift. Traditional ecological risk assessment usually focuses on a simplex stress factor in the single risk source on a special situation, while regional ecological risk assessment, as a branch of ecological risk assessment, emphasizes several stress factors caused by different risk sources. Based on these related conceptions and references of ecological risk assessment, the study first discussed the features of ecological risk assessment for mining areas, such as accumulation effects with increase of spatial distance and temporal evolution, diversity of risk sources, and fuzziness of affected edges, which make the ecological risk assessment for mining areas different from other regional ecological risk assessments. Ecological risk assessment for mining areas should emphasize to express the accumulation and faintness effects with variation in spatial and temporal scale by different risk sources with proper models on the background of the mining areas so as to characterize the possibility of the disadvantageous effects caused by mining industry to ecological and socio-economic systems. After that, the basic methodologies and theories concerning mining and risk types, research perspectives

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: 2011-10-19; 修订日期: 2012-08-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ylwang@urban.pku.edu.cn

and methods were discussed. The previous researches focused on metal mining and the risk of heavy metal pollution because the Hakanson method was almost mature, and tended to diversify in terms of the types of mining areas, the indexes, the types of risk types. But previous studies ignored to deal with a common comprehensive risk, especially in the coal mining area. Most researchers made ecological risk assessment from the perspective of landscape ecology or ecological problems or both of them, while comprehensiveness of results based on spatial heterogeneity should be considered. As for the methods, risk measurement models, index system methods and spatial analysis have been frequently used. Risk measurement models consider the possibility of ecological risk and the damages caused by ecological risk, such as landscape ecological pattern indexes. But the index systems are mostly large, confusing and subjective, which are also the disadvantages of index system methods. For index system methods, another problem to be dealt with is a kind of appropriate method to determine the weight of each index. The spatial analysis method just uses the spatial analysis functions of RS and GIS to describe the spatial distribution characters of ecological risk and needs to be further researched. So in general there are some flaws in the model simulation of existing researches. After all, the paper concluded the prospects for further study. Considering the deficiencies of former researches and prospective technological developments, researchers should pay more attention to the employment of 3S techniques, the application of methods and theories of landscape ecology, the determination of ecological security threshold, and application of research results in risk management in further studies.

Key Words: ecological risk; assessment methodology; research progress and prospects; mining areas

我国疆域辽阔、成矿地质条件优越、矿种齐全配套、资源总量丰富,矿山开采在带动国民经济发展的同时,作为对自然原生态的一种强烈扰动,也导致了诸多生态风险,引发了一系列社会与经济问题;加之矿藏位置的不可选择性,矿区生态环境保护及生态风险规避显得尤为重要^[1]。目前生态环境保护是矿产资源开发建设需要考虑的重要因素^[2],已成为我国能源与资源持续发展政策优先关注的关键问题之一^[3],矿区生态风险评价也应运成为诸多学者关注的热点研究方向。定量地确定矿区生态风险对人类产生负效应的概率及强度,用以科学指导矿区生态风险管理,有利于规避生态风险,保护生态环境;建立矿区生态风险评价体系,有利于以生态健康的标准指导矿区生态恢复与重建,实现矿产资源开发与生态环境的协调健康发展^[4]。

目前区域生态风险评价已经成为宏观生态学领域的研究热点之一,研究尺度的变化及矿区自身的特殊性,必然导致矿区生态风险评价不同于区域生态风险评价,相应的评价原理与方法亦有所不同^[5]。本研究结合目前国内外矿区生态风险评价的相关研究进展,探讨矿区生态风险评价的基本原理与方法,展望未来研究的重点方向。

1 从区域生态风险评价到矿区生态风险评价

1.1 区域生态风险评价

生态风险评价(ERA)起源于为保护人类免受化学暴露的威胁而进行的人类健康评价(HHA)和污染物对生态系统或其中某些组分产生有害影响的环境健康评价^[6-9],因能够为风险管理提供科学依据和技术支持而得到了迅速发展^[10-11]。涵盖于宏观生态学范畴,生态风险评价的实现必然存在尺度依赖性。自20世纪90年代一系列基于美国EPA(Environment Protection Agency)导则^[12-14]的流域和大尺度的生态风险评价文章被发表以来,区域生态风险评价得到了迅速发展。

传统的生态风险评价多着眼于对一个特定场地的单风险源中某单一胁迫因子进行风险评价;区域生态风险评价作为生态风险评价的一个分支,则强调基于区域尺度对由多种不同风险源引起的多种胁迫因子进行风险分析和评价^[14],在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及其大小的过程^[13]。区域生态风险评价具有大尺度、多因素、多风险受体、强调不确定性因素以及空间异质性等突出特点^[4,15],其所涉及的环境问题的成因及结果都具有区域性特征,区域社会、经济、自然环境状况的分析是进行区域生态风险评价的基础^[16]。

1.2 矿区生态风险及其评价的特殊性

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而形成的乡镇、县市及工业小区^[17]。矿区属于典型生态脆弱型和矿产资源型相结合的区域,其内在风险因素及发展方向既有别于农业、湿地等自然半自然生态系统,也不同于现代化大都市,它在生态环境、经济和社会发展等方面独具特色^[4]。因此,矿区生态风险及其评价也独具特殊性,主要表现在以下4个方面:

第一,风险源的多样性 矿产资源复杂的、多程序的开采及处理过程会形成多种风险源,通过多种途径对生态系统造成风险。以大气污染为例,煤矿开采造成的大气污染具有多源性,包括露天爆破一次会产生大量烟尘;煤炭在装卸、堆放和运输过程中产生大量煤尘;排土场废弃土石露天堆积、风化破碎,产生大量粉尘,加重大气粉尘污染等。因此,在分析、评价一种矿区生态风险类型时,其风险源可能是多样的,这大大增加了矿区风险评价的难度。

第二,空间影响边界的模糊性 矿区生态风险是面源风险,而非点源风险。尽管矿区作业范围边界清晰且有限,但矿区生态风险类型却具有空间分布上的延展性,导致矿区生态风险的空间影响边界具有模糊性特征。例如,煤矿开采过程中会排放大量煤尘、二氧化硫、二氧化碳、一氧化碳等有毒气体和热辐射,以及成分复杂且含有大量重金属等污染物质的废水,这些物质具有明显的流动性。这就意味着矿区风险源的影响范围具有扩展性,空间影响边界并不与矿区作业范围边界重合。除了能确定已经发生污染和破坏的地区是矿区生态风险评价应重点关注的区域外,确切的生态风险影响范围因区域和生态系统相对于污染源的方向以及地区风向、地势特征等多因素而异。因此,在进行生态风险评价前必须对研究区进行充分的了解和认识,通过一定的数理方法,明确研究区的空间范围,避免工作的盲目性。

第三,随空间距离的衰减性 距离矿区开采地越近的地方,通常遭受风险的威胁越大;反之越小。以煤炭开采造成的粉尘污染为例,以产生粉尘的作业点源为起点,粉尘随空气流动向四周扩散,由于重力及如树林等障碍物的作用,粉尘在运输过程中不断沉积到地面,因此一般情况下,与风险点源距离越近,遭受风险危害的可能性和程度越大,反之越小。金属矿藏开采导致的水污染问题亦有此特点。这种衰减受诸多因素影响,规律复杂,定量的描述需要更进一步的深入研究,目前尚未见相关报道。

第四,时间累积的延续性 煤炭矿区的风险属于持久型、累进型风险,因此其危险性不是对应时间“点”的风险发生概率,而是时间“轴”上的风险累积概率^[18]。譬如,露天煤矿的开采会构成一个新的凹坑-高丘特殊地貌类型,容易发生塌陷等现象。但是这个过程需要时间的累积,当这种地貌类型经历一段时间的发展而达到一定程度时,才会导致塌陷现象的发生。风险类型的时间累积直接影响风险的发生概率。

1.3 矿区生态风险评价

矿区生态风险评价作为一种特殊类型的区域生态风险评价,具有多因素、多风险受体、空间异质性等一般区域生态风险评价的特点,也因矿区生态风险的特殊性而有别于一般区域生态风险评价。

矿区生态风险评价应在明确矿区边界范围的基础上,强调以适当的机理模型表达由不同风险源引起的多种胁迫因子的空间距离衰减性及时间累积延续性,对其进行风险分析与评价,从而定量表征矿区生产活动对生态系统及其组分产生不利作用的可能性及其大小。矿区生态风险评价所涉及的环境问题起源并作用于矿区,应以区域背景下对特定矿区的社会、经济、自然环境状况分析为基础。

2 矿区生态风险评价的基本原理和方法

近年来,国外的矿区生态风险评价逐渐形成了新的研究范式,由原先的单一风险评价向多级风险评价转移,体现出风险评价作为矿区复合生态系统管理重要手段的应用价值。尤其是在美国、澳大利亚等国家,矿区生态风险评价已经成为矿业开采区域生态系统管理的重要工具,其研究模式主要是有针对性地对矿区开采过程中产生的潜在生态风险威胁提出相应的风险防范模式。国外矿区生态风险评价大体经历了两个阶段:前期关于矿区生态风险的研究大多延续针对单一风险源的评价思路,评价模式类似于环境影响评价的污染物路径

分析,主要评价矿山开采废弃物对人体健康的影响,隶属于人体健康风险评价的研究范畴;随着对自然生态系统健康状况关注度的增加,风险受体逐步由人体扩展到不同种类的生态系统,目前主要包括矿区塌陷影响水生态系统的风险评价以及矿山废弃物对种群-群落影响的风险评价等^[19-23]。

面对矿山开采引发的一系列生态环境问题,我国学者逐渐意识到建立矿区生态风险评价模型,有利于以生态健康的标准进行矿区生态恢复与重建,实现矿产资源开发与生态环境的协调健康发展。据对正式发表文献的不完全统计,国内针对矿区生态风险评价的最早研究是1999年白中科等以平朔露天煤矿为例进行了大型露天煤矿生态系统受损研究^[24],较早意识到了矿区的生态系统受损问题。但其重点在于分析与生态风险评价相关的煤炭矿区生态系统演变过程及其受损特征,终点并未落实于风险评价。此后国内学者对矿区生态系统的关注度逐步提高,并结合具体案例,从多方面进行了矿区生态风险评价研究。不同学者所关注的矿区类型、风险类型、研究视角及研究方法体系等均存在差异,极大地丰富了我国矿区生态风险评价研究的内容。

2.1 评价的矿区类型

目前我国关于矿区生态风险评价的研究主要针对金属矿区和煤炭矿区,其中金属矿区的重金属污染风险评价占绝对优势。这一方面与我国金属矿数量较多、开发较早有关,另一方面在于国外已基本发展成熟的Hakanson潜在生态危害指数法为国内金属矿区的重金属污染潜在生态风险评价提供了新的探索性方法。相比于金属矿区,煤炭矿区的生态风险评价现有研究较少,但正在引起越来越多的学者的关注。煤炭矿区作为我国独特的能源消耗特点的必然产物,其开采工序及技术可能导致严重的矿区生态风险^[25],且我国的煤炭矿区大多分布在干旱、半干旱的生态脆弱区,缺乏水源,土壤贫瘠,加之气候干燥,使得农作物单位面积产量不高,农民生活难以保障,退耕还林、还牧也难以做到,煤炭矿区的生态风险升级。因此,煤炭矿区作为矿区的一种重要类型,应该也有望成为未来研究的重点。

2.2 评价的风险类型

矿区作为独特的综合的人工、半人工生态系统,风险源与风险受体的多元化及其空间异质性共同导致生态风险类型的多样性及复杂性,每项生态风险评价研究关注的风险类型往往不同。目前已有矿区生态风险评价更侧重于对矿区重金属污染风险评价的探讨^[25-33]等专项生态风险评价。为数不多的综合评价中所考虑的风险类型可分为三类:第一类着重考虑矿区景观生态风险,由景观角度切入,借助景观生态指数,从整体景观格局进行考察;第二类侧重传统分项生态风险,如大气污染风险、重金属污染风险等,由生态问题切入,借助不同指标体系,分项评价多种生态风险类型后进行综合;第三类前瞻性地综合了景观生态风险角度与传统风险类型划分,从风险类型上讲是“综合的”。现有生态风险评价研究均对矿区生态风险进行了切割,或切割为斑块,或切割为单项风险类型,均忽略了矿区生态风险独特的空间异质性。矿区作为区域的一种,根本特征在于空间异质性^[5],加之矿区生态风险具有空间衰减性等特征,即矿区生态风险具备空间分布上的“异质性”,导致矿区的空间异质性表现得尤为独特和复杂。因此综合生态风险评价是不同生态系统风险在地域单元上的空间叠加,而非由不同目标单元、不同生态系统或者不同风险的独立的生态风险评价堆砌而成,综合的矿区生态风险评价最终应进行收敛,形成系统的、综合的认识和评价结果,否则将不能揭示矿区整体的风险状况。

根据上述对综合生态风险评价的界定,目前矿区综合生态风险研究,要么将最终结论落脚于综合风险分析,要么以对各单项风险的总结收尾^[34],要么归于景观格局,都不能算作真正意义上的“综合”的矿区生态风险评价。基于空间异质性的综合的矿区生态风险评价有待深入研究。

2.3 评价的研究视角

矿区生态风险综合评价一般选取两个研究视角:一是从风险的角度划分风险类型,二是从景观生态学的角度划分景观斑块。从风险类型的角度考虑,不同的风险类型具有不同的作用对象、分布规律、生态终点等,可据此针对各类生态风险类型对整个矿区进行生态风险评价^[18]。从景观生态学的视角切入,按照景观生态学的均一性原则,可将矿区内的矸石山、排土场、采掘场、矿区内农田和居民区等视为不同的景观斑块。不同的斑块在维护生物多样性、保护物种、完善生态系统的结构和功能等方面的作用各异,各斑块对于某种环境扰

动的相对耐受程度不一^[35]。因此可根据不同景观斑块内的综合生态风险进行评价。此外,也可从地理空间的角度考虑:一个煤炭矿区是由多个煤矿组成的,由于各煤矿地理位置、资源量及煤层赋存条件不同,各煤矿的开拓方案不同,区域内不同地点所受到的综合风险也有所差别。考虑到生态风险评价中风险源和风险受体在区域内的空间异质性,可选择矿区中的各个煤矿作为风险单元,每个风险单元的风险源和风险受体具有单元内的同质性和单元间的异质性^[18]。

综合来讲,从景观斑块的角度考虑,更能体现矿区生态风险评价的综合性和系统性。景观斑块的空间镶嵌特点会对矿区生态风险评价造成明显的影响。例如,煤矸石景观斑块如果与林地景观斑块相邻,则会对煤矸石斑块可能造成的扬尘风险有一定削弱作用;如果与河流相邻,则可能导致重金属污染的风险提高。但只有以景观斑块为单元,同时从生态问题的角度划分生态风险类型,从而使“景观”与“生态问题”紧密结合,即做到风险类型和切入角度同时综合景观与传统生态风险类型,才能实现真正的综合的生态风险评价。

需要指出的是,无论从何种角度切入,矿区生态风险评价的最终结论都应收敛于矿区整体的综合生态风险评价,即将不同风险类型或不同景观斑块或不同矿区的生态风险有机地叠加起来,形成对各生态风险或景观斑块或多矿区的镶嵌体的综合评价。

2.4 评价的研究方法

评价方法的选择是矿区乃至区域生态系统风险评价的核心,直接决定评价结果的可信度和可用性。目前对矿区重金属污染生态风险评价的研究中,90%以上都采用 Hakanson 潜在生态危害指数法,侧重于综合土壤重金属的含量、生态效应、环境效应与毒理学,以采样法进行污染程度分析,往往只单纯考虑单项风险源——金属污染的潜在危险性。

综合的矿区生态风险评价的研究方法,主要分为定性、定量评价及定量与定性相结合三大类。定性评价以综述风险类型及其表现形式为主,结合风险发生频率等少量定量化指标^[36]做出评估,如专家判断法^[25]。定量研究是将问题与现象用数量加以表征,进而分析、考验、解释,从而获得意义的研究方法和过程,目前主要包括指标体系法、风险度量模型法和空间分析法等。

指标体系法是通过选取对生态风险有显著影响的指标,根据其对生态风险的影响程度确定权重,加权求和得到生态风险程度。基于对生态风险评价的概念理解及研究视角的不同,存在多种矿区生态风险评价指标体系分解方案,如综合生态指数^[4]、“风险源-风险受体-生态终点”指标体系^[18]、按照风险类型划分的指标体系^[35]、按五大圈层构建的指标体系^[37]等,其中前3种应用更广泛。现有指标体系虽能在一定程度上表征矿区的相对风险,但主要是对区域生态风险评价指标体系的借用,指标体系庞大,支撑解释不充足,不能充分反映矿区生态风险评价的特殊性。权重确定的有效方法通常有熵权法、层次分析法、灰色隶属度法、模糊数学法等。熵权法比较客观、方便计算,但当某指标的观察值分布离散程度很大时,该指标对总体评价的影响会很大,造成某些信息丢失,从而使评价结果有所偏失;层次分析法受主观干扰较大;灰色隶属度、模糊数学法计算过程复杂。

风险度量模型是将生态风险的评价值用生态风险发生的概率和生态风险发生后所造成的不利程度的乘积来表征,较常用的有生态损失度指数评价法^[35]、景观生态格局指数评价法^[2,38]等。指标体系层次较多且指数间的串、并联结构混合,指数的选择在客观性上加入主观性的干扰,提高不确定性。空间分析法是利用 RS、GIS 等技术的空间分析功能对生态系统的相关数据进行系统分析,描述生态风险的空间分布特征及内在机制^[39]。在现有研究中,RS、GIS 等往往仅作为矿区生态风险评价的辅助性技术手段,用以获取评价指标等基础数据及信息,其深入应用有待进一步研究和探索。

综上所述,可以发现,现有矿区生态风险研究多侧重于金属矿的重金属污染生态风险等单项生态风险,对于生态脆弱、社会经济条件敏感的煤炭矿区的综合生态风险研究不多。矿区生态风险作为景观生态风险与多风险源-风险受体的空间异质性叠加的综合性风险,具有与一般区域存在显著差异的诸多特性,因此其评价的危害分析很难采用传统毒理实验外推技术提取参数来计算指标,只能根据长期野外观测进行推测和评估^[4],

发现规律性赋值方法,如对于矿区风险随空间距离的衰减性、随时间的累积延续性,如何确定评价系数、积分方法等,需要根据大量的野外观测进行推导和分析。目前矿区生态风险评价的量化研究方法尚未得到学术界的普遍认可,模型模拟方法应用匮乏。因此,依靠 RS、GIS 等分析技术的发展,期望通过对矿区生态风险机理的客观模拟,建立适应矿区特点的、具有充足和客观的科学支撑的模型十分必要。对于矿区生态风险评价的结果,一方面,现有研究多是相对性的——综合风险值高的区域生态风险高,反之则低,对于阈值设定没有过多深入的研究,多参考其他行业现有标准,缺乏一套考虑矿区及其生态风险评价的特殊性的专用阈值设定标准体系;另一方面,模型的建立、信息和数据的不完备、自然风险源等的多样性、来源范围很广的误差等,都可能导致矿区生态风险结果的不确定性^[40-41]。为了使评价结果更全面地反映客观现实,考察评价结果的不确定性分析应成为一个重要的步骤。

3 矿区生态风险评价研究展望

未来矿产资源对于人类的生存仍然必不可少,持续的矿山开采活动也依然会继续剧烈地干扰生态系统,矿区生态风险评价应受到高度重视,以维持矿区生态系统平衡,保证矿区可持续发展。尽管近年来矿区生态风险评价引起了学术界和公众的普遍关注,但其原理和技术方法尚不成熟,许多问题还有待进一步的深入研究和探索。下述问题预期将成为进一步深化矿区生态风险评价理论与方法研究的有效途径与重点方向。

3.1 矿区独特性的体现

矿区生态系统不同于其他生态系统,其具有影响范围空间边界的模糊性、时间累积延续性、风险受体多样化、风险随空间距离的衰减性等特征。这使得矿区生态风险评价过程中需要进一步明确矿区边界,确定评价范围;定位评价过程的起点和终点,挖掘风险随时间的演变规律;识别风险源类型及风险受体,组合空间异质叠加;表征不同空间位置风险,探求风险随空间距离的分布规律。综合实地测量、遥感等多种手段,合理确定空间分布和时间演化的特征参数,是矿区生态风险评价面临的一个重要挑战。

3.2 空间格局的关注

随着研究对象范围的扩展,从区域尺度的生态风险评价到矿区生态风险评价,评价理论和技术方法也相应地发生了变革,其中最核心的变化就是由生态系统结构与功能的研究转变为不同生态系统所构成的地域空间镶嵌体——景观的结构与功能的研究^[5],而这也正是以格局与功能的相互关联为理论核心的景观生态学的主要研究内容。因此,景观生态学的理论与方法是矿区生态风险评价的重要依据,将其与传统生态问题、风险类型分析紧密结合,具有广阔的发展前景。

3.3 “3S”技术的综合应用

随着从区域生态风险评价到矿区生态风险评价的转变,研究所需要的基础数据转换为以大中尺度上的宏观生态环境监测数据为主。同时,矿区的生态风险分布问题也是一个空间分布问题,需要在空间范围内进行展示,这就需要 GIS 技术辅助研究。在未来进行生态风险评价的过程中,利用“3S”信息技术,可以快速、全面地获取不同空间分辨率、不同空间范围的资源环境动态基础数据,也可将矿区生态风险评价的结果更直观地表现出来,这将成为今后该研究领域的努力方向。

3.4 风险阈值的设定

目前的研究大多专注于计算出矿区生态风险值的大小和评价指标体系的构建,对于风险发生与否的判定仍停留在定性的识别上,即风险值越高,意味着风险发生的可能性越大,是一种相对的风险评价,对于安全与不安全阈值的判别尚未受到足够重视。在未来的研究中应进一步在阈值确定方面加强研究的定量性,进一步确定对于某种类型的生态风险或者综合生态风险,超过风险阈值就是高风险状态,或者考虑对风险进行分等,以提高其预警意义,增强直观性和定量性。

3.5 不确定性的表征

目前矿区生态风险评价中的某些机理尚未完全清楚,针对不确定性分析的模型研究也并不多见,导致评价结果的可信度和可用性受到一定程度的制约。在未来的研究中,一方面应努力探索及改善矿区生态风险模

型,力图实现结构完整、模式验证、参数合理及适时适地修正模型;另一方面,提高资料获取的准确度,明确数据来源,提高第一手资料使用率,实现与模型的配套,从而降低矿区生态风险评价的不确定性并提高对不确定性进行表征的可能性。

3.6 风险后果的规避

目前,风险评价研究更多地停留在理论研究层面,相应的风险规避尚未得到足够重视。科学研究应以指导实践为最终目的,随着矿区生态风险评价研究的深化和逐步成熟,加强其应用性十分必要。基于科学理论研究成果,针对不同的风险类型和风险等级,积极采取不同的管理措施,制定规范的操作流程。积极建设矿区生态风险的管理体系、机制,进行矿区生态风险管理的机制研究尤其是预警和防范研究。

References:

- [1] Zhao G J, Liu Y H. Research on Ecological Environment Comprehensive Improvement and Restoration Technology. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 1995.
- [2] Li L X, Wang B, Zhou L B, Yu X B. Ecological landscape risks evaluation in mineral resources exploitation. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2011, (2): 1-5.
- [3] Zhu Q, Luo Z H, Lu Q. Establishing the compensation mechanism of mineral exploitation and ecological restoration of Jiangxi. Energy and Environment, 2009, (5): 11-13.
- [4] 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.
- [5] Peng J, Wang Y L, Wu J S, Zhang Y Q. Evaluation for regional ecosystem health: methodology and research progress. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(11): 4877-4885.
- [6] Yin H W. Ecological Risk Assessment. Shanghai: East China University of Science and Technology Press, 2001.
- [7] Li G Q, An S Q, Chen X L, Zhang J L, Zhang J H, Tan J K, Zhu X L. A summary on ecological risk assessment. Chinese Journal of Ecology, 1999, 18(4): 57-64.
- [8] Xu J B, Wang Y. Ecological risk assessment. Songliao Journal: National Science Edition, 1999, (2): 10-13.
- [9] Han L, Dai N J. Study on ecological risk assessment. Environmental Science Trends, 2001, (3): 7-10.
- [10] Barnthouse L W, Suter G W II, Bartell S M. Quantifying risks of toxic chemicals to aquatic populations and ecosystems. Chemosphere, 1988, 17(8): 1487-1492.
- [11] Cao H F, Shen Y W. Brief review: ecological risk assessment research. Environmental Chemistry, 1991, 10(3): 26-30.
- [12] Chen C K. The concept of region and its research accesses. Areal Research and Development, 1986, (1): 10-14.
- [13] Fu Z Y, Xu X G. Regional ecological risk assessment. Advance in Earth Sciences, 2001, 16(2): 267-271.
- [14] Chen C L, Lü Y L, Wang T Y, Shi Y J, Hu W Y, Li J, Zhang X, Geng J. Emerging issues and prospects for regional ecological risk assessment. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(3): 808-816.
- [15] Zeng Y. The regional ecological risk assessment of Hohhot City. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(3): 668-673.
- [16] Chen H, Liu J S, Cao Y, Ouyang H. Progresses of ecological risk assessment. Acta Ecologica Sinica, 2010, 26(5): 1558-1567.
- [17] Li J C, Bai Z K. Land Reclamation and Ecological Rehabilitation of Land in Surface Mines. Beijing: Science Press, 2000.
- [18] Jia Y, Cao L X. Review on ecological risk assessment method for coal-mining area. Environmental Science and Management, 2011, 36(4): 177-182.
- [19] 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.
- [20] Komnitsas K, Modis K. Soil risk assessment of As and Zn contamination in a coal mining region using geostatistics. Science of the Total Environment, 2006, 371(1/3): 190-196.
- [21] 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.
- [22] Bae D Y, Kumar H K, Han J H, Kim J Y, Kim K W, Kwon Y H, An K G. Integrative ecological health assessments of an acid mine stream and *in situ* pilot tests for wastewater treatments. Ecological Engineering, 2010, 36(5): 653-663.
- [23] Antunes S C, Pereira R, Marque S M, Castro B B, Gonçalves F. Impaired microbial activity caused by metal pollution: a field study in a deactivated uranium mining area. Science of the Total Environment, 2011, 410-411: 87-95.
- [24] Bai Z K, Zhao J K, Li J C, Wang W Y, Lu C E, Ding X Q, Chai 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.
- [25] 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, 45-45.
- [26] Yang Z, Hu M A, Huang S. Heavy metals pollution in stream sediments and potential ecological risk assessment in Dabaoshan mining area. *Journal of Guilin University of Technology*, 2007, 27(1): 44-48.
- [27] Yang G, Zhou Y, Bei R Y, 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): 80-82.
- [28] Chen F, Hu Z Q, Bo Y, Ji J J. Ecological risk assessment of soils polluted by heavy metals around coal wastes piles. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(S2): 575-578.
- [29] Li H X, Hu Z Q, Li N, Fan C Y, Liang 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] Ge Y Y, Cui X, Bai Z K. Evaluation on potential ecological risk of heavy metal pollution in reclaimed soil of ppencast — Taking Pingshuo Opencast Mine as an example. *Journal of Shanxi Agricultural University: National Science Edition*, 2008, 28(1): 85-88.
- [31] Yin R Z, Luo Y P, Li J C, Luo W L, Zhu Y N. Evaluation of the potential ecological risk of heavy metal pollution in soil and bioaccumulation characteristics of dominant plants in Siding Pb-Zn Mine. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(6): 2158-2165.
- [32] Wu P, Liu C Q, Zhang G P, Yang Y G. Chemical forms and ecological risks of heavy metals in river sediment at carbonatite mining area. *Rural Eco-Environment*, 2004, 20(3): 28-31.
- [33] Dou 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 Ji'nan University: Natural Science and Medicine Edition*, 2011, 32(1): 48-52.
- [34] Ning X Y. Research on Ecological Risk Assessment in Heavy Metal Mining Site [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [35] Tian D P. Ecological Risk Assessment for Antaibao Opencast Coal Mine Area [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007.
- [36] Ma X. Ecological Risk Assessment of Vulnerable Mine Area [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2011.
- [37] Wang G, Gao H J, Gao X L, Ding X J. An evaluation of ecological security of mineral-rich cities based on danger factors. *Resources Science*, 2010, 32(2): 331-337.
- [38] Li Z Y, Zhang N, Tang J, 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.
- [39] Zhao T. Monitoring and Evaluation of Mine Environment Based on Remote Sensing and GIS [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2007.
- [40] Ma L Y, Xu X G, Xu L F. Uncertainty analysis of integrated ecological risk assessment of China. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2011, 47(5): 893-900.
- [41] U. S. EPA. Framework for Ecological Risk Assessment. EPA/630/R-92/001, 1992.

参考文献:

- [1] 赵桂久, 刘燕华. 生态环境综合整治和恢复技术研究 (第二集). 北京: 科学技术出版社, 1995.
- [2] 李立新, 王兵, 周立波, 鱼小兵. 矿产资源开发生态景观风险评价. 矿产保护与利用, 2011, (2): 1-5.
- [3] 朱青, 罗志红, 鲁强. 江西矿产资源开发与生态补偿机制构建. 能源与环境, 2009, (5): 11-13.
- [4] 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.
- [5] 彭建, 王仰麟, 吴健生, 张玉清. 区域生态系统健康评价——研究方法与发展. 生态学报, 2007, 27(11): 4877-4885.
- [6] 殷浩文. 生态风险评价. 上海: 华东理工大学出版社, 2001.
- [7] 李国旗, 安树青, 陈兴龙, 张纪林, 张久海, 谈健康, 朱学雷. 生态风险研究述评. 生态学杂志, 1999, 18(4): 57-64.
- [8] 徐镜波, 王咏. 生态风险评价. 松辽学刊: 自然科学版, 1999, (2): 10-13.
- [9] 韩丽, 戴志军. 生态风险评价研究. 环境科学动态, 2001, (3): 7-10.
- [11] 曹洪法, 沈英娃. 生态风险评价研究概述. 环境化学, 1991, 10(3): 26-30.
- [12] 陈传康. 区域概念及其研究途径. 地域研究与开发, 1986, (1): 10-14.
- [13] 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.
- [14] 陈春丽, 吕永龙, 王铁宇, 史雅娟, 胡文友, 李静, 张翔, 耿静. 区域生态风险评价的关键问题与展望. 生态学报, 2010, 30(3): 808-816.
- [15] 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.
- [16] 陈辉, 刘劲松, 曹宇, 欧阳华. 生态风险评价研究进展. 生态学报, 2010, 26(5): 1558-1567.

- [17] 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.
- [18] 贾媛, 曹玲娟. 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] 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.
- [25] 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, 45-45.
- [26] 杨振, 胡明安, 黄松. 大宝山矿区河流表层沉积物重金属污染及潜在生态风险评价. 桂林工学院学报, 2007, 27(1): 44-48.
- [27] 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): 80-82.
- [28] 陈峰, 胡振琪, 柏玉, 纪晶晶. 研石山周围土壤重金属污染的生态风险评价. 农业环境科学学报, 2006, 25(Z2): 575-578.
- [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.
- [30] 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.
- [31] 尹仁湛, 罗亚平, 李金城, 罗文连, 朱义年. 泗顶铅锌矿周边土壤重金属污染潜在生态风险评价及优势植物对重金属累积特征. 农业环境科学学报, 2008, 27(6): 2158-2165.
- [32] 吴攀, 刘丛强, 张国平, 杨元根. 碳酸盐岩矿区河流沉积物中重金属的形态特征及潜在生态风险. 农村生态环境, 2004, 20(3): 28-31.
- [33] 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.
- [34] 宁雄义. 重金属矿区生态风险评价研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [35] 田大平. 安太堡露天煤矿区生态风险评价 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- [36] 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.
- [37] 王耕, 高红娟, 高香玲, 丁晓静. 基于隐患因素的矿业城市生态安全评价研究——以辽宁省为例. 资源科学, 2010, 32(2): 331-337.
- [38] 李昭阳, 张楠, 汤洁, 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.
- [39] 赵汀. 基于遥感和 GIS 的矿山环境监测与评价 [D]. 北京: 中国地质科学院, 2007.
- [40] 马禄义, 徐学工, 徐丽芬. 中国综合生态风险评价的不确定性分析. 北京大学学报: 自然科学版, 2011, 47(5): 893-900.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 20 October, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Characteristics of nitrous oxide (N ₂ O) emission from a headstream in the upper Taihu Lake Basin	YUAN Shufang, WANG Weidong (6279)
Nutrient dynamics of the litters during standing and sediment surface decay in the Min River estuarine marsh	ZENG Congsheng, ZHANG Linhai, WANG Tian'e, et al (6289)
Diversity and distribution of endophytic bacteria isolated from <i>Caragana microphylla</i> grown in desert grassland in Ningxia	DAI Jinxia, WANG Yujiong (6300)
Spatial distribution of <i>Trabala vishnou gigantina</i> Yang pupae in Shaanxi Province, China	ZHANG Yiqiao, ZONG Shixiang, LIU Yonghua, et al (6308)
Effects of drought stress on <i>Cyclobalanopsis glauca</i> seedlings under simulating karst environment condition	ZHANG Zhongfeng, YOU Yeming, HUANG Yuqing, et al (6318)
Ecosystem diversity in Jinggangshan area, China	CHEN Baoming, LIN Zhengguang, LI Zhen, et al (6326)
Niche dynamics during restoration process for the dominant tree species in montane mixed evergreen and deciduous broadleaved forests at Mulinzi of southwest Hubei	TANG Jingming, AI Xuenru, YI Yongmei, et al (6334)
Effects of different day/night warming on the photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of <i>Sinocalycanthus chinensis</i> seedlings	XU Xingli, JIN Zexin, HE Weiming, et al (6343)
The effect of simulated chronic high wind on the phenotype of <i>Salsola arbuscula</i>	NAN Jiang, ZHAO Xiaoying, YU Baofeng (6354)
Responses of N and P stoichiometry on mulching management in the stand of <i>Phyllostachys praecox</i>	GUO Ziwu, CHEN Shuanglin, YANG Qingping, et al (6361)
Tree-ring-based reconstruction of the temperature variations in February and March since 1890 AD in southern Jiangxi Province, China	CAO Shoujin, CAO Fuxiang, XIANG Wenhua (6369)
Diel variations and seasonal dynamics of soil respirations in subalpine meadow in western Sichuan Province, China	HU Zongda, LIU Shirong, SHI Zuomin, et al (6376)
Effects of fire disturbance on litter mass and soil carbon storage of <i>Betula platyphylla</i> and <i>Larix gmelinii</i> - <i>Carex schmidtii</i> swamps in the Xiaoxing'an Mountains of Northeast China	ZHOU Wenchang, MU Changcheng, LIU Xia, et al (6387)
Variance analysis of soil carbon sequestration under three typical forest lands converted from farmland in a Loess Hilly Area	TONG Xiaogang, HAN Xinhui, WU Faqi, et al (6396)
Soil-property and plant diversity of highway rocky slopes	PAN Shulin, GU Bin, LI Jiaxiang (6404)
Effects of slope position on soil microbial biomass of <i>Quercus liaotungensis</i> forest in Dongling Mountain	ZHANG Di, ZHANG Yuxin, QU Laiye, et al (6412)
Responses of water quality to landscape pattern in Taihu watershed: case study of 3 typical streams in Yixing	WANG Ying, ZHANG Jianfeng, CHEN Guangcai, et al (6422)
Study on the fairness of resource-environment system of Jiangxi Province based on different methods of Gini coefficient	HUANG Heping (6431)
Simulation of the spatial pattern of land use change in China: the case of planned development scenario	SUN Xiaofang, YUE Tianxiang, FAN Zemeng (6440)
Arable land change dynamics and their driving forces for the major countries of the world	ZHAO Wenwu (6452)
Denitrification characteristics of an aerobic denitrifying bacterium <i>Deffluibacter lusatiensis</i> str. DN7 using different sources of nitrogen	XIAO Jibo, JIANG Huixia, CHU Shuyi (6463)
Study on sustainable development in nanjing based on ecological footprint model	ZHOU Jing, GUAN Weihua (6471)
Applying input-output analysis method for calculation of water footprint and virtual water trade in Gansu Province	CAI Zhenhua, SHEN Laixin, LIU Junguo, et al (6481)
Correlation analysis of spatial variability of Soil available nitrogen and household nitrogen inputs at Pujiang County	FANG Bin, WU Jinfeng, NI Shaoxiang (6489)
Characteristics of the fish assemblages in the intertidal salt marsh zone and adjacent mudflat in the Yangtze Estuary	TONG Chunfu (6501)
A comparison study on the secondary production of macrobenthos in different wetland habitats in Shenzhen Bay	ZHOU Fufang, SHI Xiuhua, QIU Guoyu, et al (6511)
Regurgitant from <i>Orgyia ericae</i> Germar induces calcium influx and accumulation of hydrogen peroxide in <i>Ammopiptanthus mongolicus</i> (Maxim. ex Kom.) Cheng f. cells	GAO Haibo, ZHANG Shujing, SHEN Yingbai (6520)
Behavior characteristics and habitat adaptabilities of the endangered butterfly <i>Teinopalpus aureus</i> in Mount Dayao	ZENG Juping, ZHOU Shanyi, DING Jian, et al (6527)
Community structure and dynamics of fig wasps in syconia of <i>Ficus microcarpa</i> Linn. f. in Fuzhou	WU Wenshan, ZHANG Yanjie, LI Fengyu, et al (6535)
Review and Monograph	
Review and trend of eco-compensation mechanism on river basin	ZHANG Zhiqiang, CHENG Li, SHANG Haiyang, et al (6543)
Definition and research progress of sustainable consumption: from industrial ecology view	LIU Jingru, LIU Ruiquan, YAO Liang (6553)
The estimation and application of the water footprint in industrial processes	JIA Jia, YAN Yan, WANG Chenxing, et al (6558)
Research progress in ecological risk assessment of mining area	PAN Yajing, WANG Yanglin, PENG Jian, et al (6566)
Scientific Note	
Litter amount and its dynamic change of four typical plant community under the fenced condition in desert steppe	LI Xuebin, CHEN Lin, ZHANG Shuoxin, et al (6575)
Effects of planting densities and modes on activities of some enzymes and yield in summer maize	LI Hongqi, LIN Haiming, LIANG Shurong, et al (6584)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,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,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 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 20 期 (2012 年 10 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 20 (October, 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:1000717	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
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