

露天煤矿区生态风险评估方法

程建龙, 陆兆华*, 范英宏

(中国矿业大学(北京)恢复生态研究所, 北京 100083)

摘要:以露天煤矿区这一脆弱生态系统为对象进行了生态风险评估方法的探讨,阐述了生态风险评估的基本概念。针对露天矿区生态环境特点,通过描述露天矿区的主要生态环境问题,分析了矿区风险源、风险受体以及评价终点,最后建立了典型露天煤矿区生态风险评估的指标体系,对露天矿区这一典型退化生态系统进行了生态风险评估方法及评价步骤的探索。

关键词:露天煤矿区;生态风险评估;脆弱环境;生态指数;生态脆弱度指数;生态损失度指数

Method of ecological risk assessment for opencast mine area

CHENG Jian-Long, LU Zhao-Hua*, FAN Ying-Hong (Institute of Restoration Ecology, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12): 2945~2950.

Abstract: Opencast mines distribute mainly in vulnerable environment areas in china, where the climate is drought and semiarid. The main ecological problems caused by opencast mine include destruction of intrinsic terrain and natural landscapes, solid wastes, wastewater, waste air, water and soil loss together with heavy metals pollution etc.

Ecological risk assessment commonly involves exposure assessment, hazard assessment, receptor assessment and risk characterization. The method and process of ecological risk assessment in mine area can be summarized as follows:

(1) Confirming risk assessment range. Those areas where pollution have occurred or be likely to occur should be paid high attention to.

(2) Risk source assessment. Risk source assessment includes risk source identification and risk source description. Risk source identification means identifying risk factor, the risk sources in opencast mine area include the destruction of intrinsic terrain and physiognomy because of digging and occupying together with poisonous and harmful substance. Risk source description is confirming probability, intensity and location of risk pressure.

(3) Receptor assessment. Receptor is the segment that has been or be easily impaired in ecosystem. In opencast mine area, vegetation and soil system should be considered, especially those sensitive propagation. The possible endpoints include native propagation annihilating, vegetation degrading and typical site disappearing etc.

(4) Exposure assessment and hazard assessment investigate the contact between receptor and pressure as well as receptor's impairment degree. According to landscape ecology, the opencast mine area can be divided into different fragments such as coal gangue hill, dump site, residential area etc. This paper will use ecological index, ecological fragility degree index and ecological loss degree index to compute the ecological risk value in mine area. (1) The ecological index can reflect fragment's ecological integrality, importance and natural degree, it includes three indexes: Species original index, species diversity index and nature index. Species original index is the percentage that native species in fragment account for that in mine area; Species diversity index is the percentage that species in fragment accounts for species in mine area; Nature index is negative relation with disturbance intensity, disturbance intensity can be expressed by corridor (road and ditch etc) length per acreage in fragment, then the reciprocal is nature index. Species originality index, species diversity index and nature index synthesize the

基金项目:国家自然科学基金资助项目(70273050)

收稿日期:2003-06-20; **修订日期:**2004-08-10

作者简介:程建龙(1976~),男,山西长治人,博士生,主要从事恢复生态和生态评价研究。E-mail: chjlong@etang.com

* **通讯作者** Author for correspondence. E-mail: lu-zhh@263.net

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (No. 70273050)

Received date: 2003-06-20; **Accepted date:** 2004-08-10

Biography: CHENG Jian-Long, Ph. D. candidate, mainly engaged in restoration ecology and ecological assessment.

ecological index. (2) Ecological fragility degree means the capability that population or ecosystem or landscape resists outside disturbance. Ecological fragility degree index considers such factors as vegetation factor (bareness degree, biodiversity) and soil factor (invertebrate diversity, soil fertility, heavy metal). (3) Ecological loss degree is the product of ecological index and ecological fragility degree index.

5. Synthesis risk assessment is the last stage of ecological risk assessment in opencast mine area. Fragment's risk degree can be calculated by risk speed and the intensity grade of different risk source, the final risk value in each fragment is the product of risk degree and ecological loss degree, the risk assessment map of mine area comes into being through classifying ecological risk value. According to the risk outcome the risk, managers can put forward proper projects and make rational risk decision for minimizing ecological risk and for harmonizing the development of environment-economy in coal mine area.

Key words: opencast mine area; ecological risk assessment; vulnerable environment; ecological index; ecological fragility degree index; ecological loss degree index

文章编号: 1000-0933(2004)12-2945-06 中图分类号: X826 文献标识码: A

人口、资源、环境是制约当今经济社会实现可持续发展的 3 个基本要素。矿产资源中煤炭是重要组成部分, 煤炭业的发展对后续产业乃至国民经济的长远发展关系极大。据统计, 截止到 1994 年底, 我国煤炭累计探明储量为 $14480 \times 10^8 \text{t}$, 保有储量为 $10016.65 \times 10^8 \text{t}$, 其中露天可采储量约 $460 \times 10^8 \text{t}$ ^[1]。从煤炭资源分布情况看, 我国的露天煤矿大多处于干旱、半干旱的生态脆弱区, 如平朔矿区位于黄土高原水土流失严重区, 霍林河矿区、伊敏河矿区位于草原风沙区, 神府东胜矿区位于毛乌素沙漠和西北黄土高原过渡地带的沙化区。与井工开采相比, 露天煤矿开采不仅侵占大面积良田, 而且对开采区生态环境的人为改变相当大, 矿区原有的地形、地貌和自然景观遭到破坏, 自然植被完全被破坏。这些干旱、半干旱的生态脆弱区缺乏水源, 土地贫瘠, 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。总之, 在脆弱环境区域开发露天矿造成的严重生态环境问题不仅威胁到人类生存安全, 而且成为制约城市、区域经济和社会可持续发展的主要障碍。因此, 从发展的、安全的角度, 从为保证矿区生态风险管理决策的科学性的角度, 进行生态风险评价确保煤矿区环境、社会和经济的可持续发展具有重要的战略意义。

生态风险评价在欧美都有其法律基础, 1993 年欧盟就颁布了对化学品进行生态风险评价的规定和技术指导文件, 在法律框架下, 欧洲各国进行了系统的化学品生态风险评价和广泛的工业污染物排放的生态风险评价, 在污染物生态风险评价中有丰富的实践经验^[2]。美国国家环保局在 1998 年正式颁布了生态风险评价指南, 对不同生态系统风险评价制定相关技术规范。我国开展生态风险评价方面的研究比较少, 但国内已经有许多学者开始研究并运用生态风险评价, 如钱迎倩、李国旗、曹洪法、殷浩文、徐镜波等对生态风险评价概念的阐述^[3~7], 刘文新、马宝艳等研究了微量元素或重金属的生态风险^[8,9], 张学林、许学工、付在毅等对农业和湿地区域生态风险评价进行了研究^[10~12]。但是对属于典型生态脆弱型和矿产资源型相结合的煤矿区, 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。目前针对煤矿区的生态风险评价和管理的理论以及应用研究在国内外还未见报道, 因此选取典型露天煤矿区进行生态风险评价, 确定矿区风险源、风险受体和评价终点, 定量地确定矿区环境危害对人类负效应的概率及其强度, 有利于更进一步的煤矿区生态风险管理, 实现生态避险; 建立露天煤矿区生态风险评价体系, 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; 结合矿区社会、政治和经济等因素, 提出适合我国矿业特点的煤矿区生态风险评价理论与方法, 有利于生态风险评价理论的丰富和完善, 具有很好的创新意义。

1 露天煤矿区主要生态环境问题简述

无论是井工开采还是露天开采都不可避免地造成生态环境的破坏, 尤其是我国长期以来以粗放型经济发展为主, 生态平衡受到严重破坏, 阻碍和制约了区域的可持续发展。矿区生态环境问题已经引起人们的高度关注, 生态安全将是急需解决的重要问题之一。

1.1 地形地貌的破坏

露天矿的开采构成一个新的凹坑—高丘特殊地貌类型。截止 1994 年底, 全国露天开采挖损土地面积达 80km^2 , 平均每采万吨煤挖损土地 800m^2 ^[13]。现在我国露天矿外排土压占土地面积达 16300hm^2 ^[14]。排土场堆垫的岩土结构松散、地层层序缺损或紊乱^[15], 极易遭受侵蚀。

1.2 “三废”污染

(1) 固体废弃物 我国是矿业大国, 国有煤矿堆积山累计 1500 余座, 仅矸石一项约 30 亿 t, 且其中有 300 余座自燃^[16], 排放大量煤尘、 SO_2 、 CO_2 、CO 等有毒有害气体和热辐射。

(2)废水污染 疏排水、矸石堆淋溶水、选煤废水等排放量大且成分非常复杂,含有大量的悬浮物、重金属和放射性物质。

(3)废气污染 采掘场、矸石山自燃及煤炭的利用释放出大量的 SO_2 、 CO_2 、 CO 等有毒有害气体,严重污染大气环境;露天开采作业为开放式,由爆破、采掘、运输形成的粉尘较大,直接影响植物的光合和呼吸作用。

1.3 水土流失及盐渍化

露天矿排土场边坡较陡(大于 30°),地表物质组成绝大部分为赋存于表土下数十米厚的岩土,地面粗糙率大,抗蚀性小,养分贫乏,天然植被侵入极少,干旱、半干旱区降水量少且暴雨集中,加剧水土流失;由于排土堆积使含 Ca 、 Mg 、 K 、 Na 等盐类流失,汇集到低洼地区,再经过蒸发作用使土壤产生盐渍化,已有研究表明:距离排土场越近,盐分含量越高(含盐量高达 0.7%以上)^[17]。

1.4 重金属污染

煤矿区重金属主要是由于煤矸石风化自燃及淋溶而迁移到土壤、水体中的^[18]。煤矸石含有大量的硫铁矿和重金属元素,在堆放过程中由于自燃和降雨淋滤形成的溶液使周围土壤、水体受到污染。其中,毒性最大的是 Cd 、 Pb 、 Hg 、 As ,它们能在生物放大作用下大量地富集,对人体健康产生长远的不良影响。

2 矿区生态风险评价方法

2.1 生态风险评价的概念

生态风险就是生态系统及其组分所承受的风险,指一个种群、生态系统或者整个景观的正常功能受外界胁迫,从而在目前和将来减少该系统内部某些要素或其本身的健康、生产力、遗传结构、经济价值和美学价值的可能性^[19]。其中风险(R)是指不幸事件发生的可能性及其发生后将要造成的损害。这里“不幸事件发生的可能性”称为“风险概率”(P ,也称风险度);不幸事件发生后所造成的损害称为“风险后果”(D)。有关专家对风险定义为两者的积,即风险=风险度 $\times$ 风险后果。

生态风险评价是指定量的确定环境危害对人类负效应之概率及其强度的过程^[20],它是随着社会经济的需要而逐步发展起来的一种使用不同方法来评价环境中各种风险问题的方法体系,它主要研究各种灾害或人类活动对生态系统及其组分的可能影响^[21],这一研究从最初关注人类健康已经扩展到生态系统以至景观和区域^[22,23],生态风险评价在保护环境生态,维护公共健康、发展经济中起着不可代替的作用。20 世纪 90 年代以后,生态风险评价的成果不断得到应用,已经成为美国国家环保局制定环境保护和环境管理政策的重要依据之一。

2.2 矿区生态风险评价方法

矿区生态系统是以矿山生产作业区为核心的一个独特的人工、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^[15]。该系统结构和功能的恶化将会严重影响矿区经济效益、社会效益,运用生态风险评价可以确定风险对环境负效应的概率及其强度,建立生态风险管理机制,实现矿产资源开发与生态环境的协调健康发展。

煤矿区生态风险评价的方法与污染物的生态风险评价相似,也大致包括暴露评价、危害评价、受体分析和风险表征等内容^[24]。暴露评价、危害评价、受体分析分别与风险表征直接联系,风险表征需要暴露评价、危害评价和受体分析的支持,暴露评价、危害评价和受体分析是风险评价的基础,这三者之间是相对独立的,对风险表征的支持作用是相互平行的。

矿区生态风险评价方法步骤概括如下:

2.2.1 评价范围的确定 可能发生或已经发生污染和破坏的区域及生态系统是生态风险评价应注重的区域,在进行评价前必须对研究区充分认识,恰当地确定研究区的时空范围,避免工作的盲目性。

2.2.2 风险源分析 “风险源分析”是指对可能对生态系统或其组分产生不利作用的干扰进行识别、分析和度量。可以有几种方法定义一个源:压力释放的地方(例如烟囱,污染的沉积物);产生压力的有关活动(如挖掘)等。风险源分析又可分为风险源识别和风险源描述两部分^[25]。①风险源识别就是根据评价目的找出具有风险的因素。煤矿区的生态风险源在选择时应该充分考虑到矿区生态系统不同于一般自然生态系统,其自身所独有的属性对生态风险评价有十分重要的作用。如上所述,排土场和矸石山对土地资源的破坏和占用,矿坑疏排水和矸石山的渗滤水对水资源的破坏和污染,矸石山自燃及机动车排放物对大气的污染等都对矿区的脆弱生态环境构成威胁,因此应考虑选取挖损、压占等造成的土地破坏以及有毒、有害物质(如 Cd 、 Pb 、 Hg 、 As 和无机硫)的污染。②风险源描述就是对各种风险源进行定性、定量分析,确定风险发生的概率、强度、时间和地方。露天矿区的风险属于持久型、累进性风险,对它们进行评价的内容主要是今后风险源的活动程度,因此其危险性要素不是风险发生概率,而是风险的发展速率。本研究采用约束外推法来确定风险发展速率,其基本过程是首先根据历史的风险(如挖损、压占土地)记录,建立风险与时间的关系,依照所形成的自然趋势外延,预测未来不同时期的风险规模,并计算风险发展速率。

2.2.3 风险受体分析 受体即风险承受者,在风险评价中指生态系统中已受到或可能受到某种污染物或其它胁迫因子有害影响的组成部分。生态系统可以分为物种、种群、群落和生态系统等多级层次,每级层次又由许多个体组成,它们之间是相互联系

的。通常选取那些对风险因子的作用较为敏感,或者在生态系统中具有重要作用和地位的关键物种、种群、群落或重要生态过程作为风险因子作用的受体。对于煤矿区,地形、地貌发生很大变化,易造成严重的水土流失,促使并加速土壤盐渍化,甚至造成排土场的塌陷滑坡;工程建设和不合理土地利用以及各种废气、废液将破坏、干扰周围的土壤、植被,从而引起生态系统的退化。因此本研究考虑植被系统、土壤系统作为受体,尤其要注意本土物种及非本土物种的变化。

评价终点是“期望保护的环境价值的明确表征”,评价终点与生态风险评价的关联取决于它们对敏感的生态完整性的反映程度^[25]。它是环境胁迫因子对某一受体的特殊典型危害或潜在危害表现。露天煤矿区可能的评价终点包括本土物种的灭绝、生物种群数量的减少、植被的退化、土壤盐渍化加重、当地典型生境的退化和消失等。

2.2.4 暴露评价 暴露评价研究环境中压力的时-空分布和压力与受体之间的接触或共生的方式和范围^[25]。例如化学污染物在评价区域中的形态、浓度分布、传输及其与风险受体之间的接触暴露关系。暴露描述是风险评价的关键要素,如果没有暴露便没有风险。描述压力和受体接触、共生的问题包括:不利效应的发生是否一定有压力与受体的接触?产生不利效应的压力是否一定是被受体摄入?受体的哪些性质会影响接触?环境中哪些非生物特性会影响接触?区域生态风险评价的暴露评价相对难以进行,因为风险源与受体都具有空间分异的特点,不同种类和级别的影响会复合叠加,从而使风险源与受体之间的关系更加复杂。

3.2.5 危害评价 危害评价是生态风险评价的核心,其目的要确定风险源对煤矿区脆弱生态系统及其风险受体的损害程度。危害评价要研究风险压力的作用与受体响应之间的关系,例如什么样的污染物在多大浓度下,受体暴露多长时间,会产生什么性质的危害,以及危害程度如何。一般情况下,危害评价结果会提出某种控制指标或阈值。矿区生态风险评价的危害分析很难采用传统毒理实验外推技术,只能根据长期野外观测进行推测和评估。

按照景观生态学的均一性原则将露天煤矿区内的矸石山、排土场、采掘场、矿区内农田和居民区等作为不同的景观斑块。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是有差别的,各类斑块对于某种环境扰动的相对耐受程度也是不同的,相对耐受程度愈弱,敏感度越高,则斑块越脆弱。其中采掘场、矸石山和排土场形成平台、边坡相间分布的阶梯式地形,采掘场平台由上至下所形成的时间依次缩短,矸石山和排土场平台反之,以不同年代的平台为研究对象,可以测定出矸石山、排土场、采掘场内的风险程度和风险分布。本研究采用生态指数、生态脆弱度指数和生态损失度指数来计算矿区不同斑块生态风险值的大小。

(1)生态指数(E_i) 生态指数反映各斑块的生态完整性、生态重要性及自然性大小。付在毅等^[12]对辽河三角洲湿地区域进行生态风险评价时采用了生态指数,较好地反映了湿地区域不同生态系统的生态意义和地位。本研究中测量生态指数的指标有物种原生性指数、生物多样性指数、自然度 3 个指数。

物种原生性指数 用某斑块中本土物种数占矿区本土物种数的百分比表示: $O_i = C_i / C$

式中, O_i 为 i 斑块的物种原生性指数, C_i 为 i 斑块中本土物种数, C 为矿区总的本土物种数。

生物多样性指数 用某一斑块中植物种数占整个矿区中植物种数的比例来表示: $V_i = N_i / N$

式中, V_i 为 i 斑块的生物多样性指数, N_i 为 i 斑块中植物物种数, N 为整个矿区植物物种数。

自然度与干扰强度呈负相关,干扰强度为人类的干扰作用,以单位面积斑块内廊道(公路、沟渠等)长度表示: $D_i = L_i / S_i$

式中, D_i 为受干扰强度, L_i 为 i 斑块内廊道(公路、铁路、沟渠)的总长度, S_i 为 i 斑块总面积。则 $Z_i = 1/D_i$ 表示 i 斑块的自

然度。

根据以上公式计算出 O_i 、 V_i 和 Z_i 三个指数后,进行归一化处理,并加权合成各斑块的生态指数: $E_i = aO_i + bV_i + cZ_i$

式中, E_i 是 i 斑块的生态指数, a 、 b 、 c 是各指标的权重, $a + b + c = 1$ 。

(2)生态脆弱度指数(CR_i) 生态脆弱度表示一个种群、生态系统或景观对外界施加胁迫或干扰的抵抗力^[26],生态脆弱度指数反映了不同斑块的敏感度。如果抵抗力弱,就说它是脆弱的,则脆弱度高。它由两个变量敏感性和恢复力确定,是两者之间的关系函数。目前还没有准确又公认的脆弱度指标可借鉴应用。由于露天矿区生态系统的恶化主要表现在地形地貌变化、植被退化、生物生产能力降低、水土流失、土壤质量降低等方面,所以生态脆弱度指标考虑了植被因素:植被盖度 A、物种多样性 B(Shannon-Wiener 指数);土壤因素:土壤无脊椎动物多样性 C(Shannon-Wiener 指数)、土壤肥力 D(营养元素含量)、重金属污染指数 E(Hakanson 生态风险指数)。生态脆弱度计算的着眼点是考虑对生态环境的不利因素,生态脆弱度指标的确定采用各项系数、各项指标的标准化方法:①原始数据的处理,对不同斑块各项数据的来源进行可靠性分析,核对、验证和修正数据。②数据的标准化处理,各项数据单位不同,计算方法各异,为便于生态脆弱度计算,均采用标准化进行归一处理:

$$\frac{X_i - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} = F(A - E)$$

式中, F 值取 0~1 之间 F 含 $A-E$ 项; X_i 为(A)至(E)各项指标的第 i 个斑块的数据; $\min(X)$ 为(A)至(E)各项指标的系列的

最小值; $\max(X)$ 为(A)至(E)各项指标的系列的最大值。

生态脆弱度计算:

$$CR_i = \frac{[1 - F(A)] \cdot a_1 + [1 - F(B)] \cdot a_2 + [1 - F(C)] \cdot a_3 + [1 - F(D)] \cdot a_4 + F(E) \cdot a_5}{\sum_{i=1}^5 a_i}$$

式中, CR_i 为*i*斑块生态脆弱度, CR_i 值越大表明斑块的生态脆弱度越大; $F(A)$ 至 $F(E)$:(A)项到(E)项标准化后比值数, $F=1$ 为最大值; a_1 至 a_5 为(A)到(E)项的权重。

(3) 生态损失度指数 生态损失度指数是指各斑块的生态指数和生态脆弱度指数的综合,在相同风险下,不同斑块的生态损失度指数是不同的。生态损失度指数以公式 $SS_i = E_i \times CR_i$ 表示, SS_i :*i*斑块生态损失度指数, E_i :*i*斑块的生态指数, CR_i :*i*斑块生态脆弱度指数。

2.2.6 生态风险综合评价 风险综合评价是矿区风险评价最后的阶段,要结合受体分析、风险源分析和暴露评价、危害评价的结果,综合评价矿区内生态风险值的大小,从而为生态风险管理提供理论依据。矿区生态风险评价的一个重要特征就是受体和风险源在区域内的空间异质性。露天煤矿区划分的矸石山、排土场、作业场、矿区内农田、公路和居民区等不同的景观斑块在生物多样性、生态系统的结构和功能等方面的作用是有差别的,每一斑块与周围斑块在外貌或性质上不同,而斑块内部具有一定均质性和相同的耐受程度。因此就受体而言可以认为每个斑块内具有同质性和风险源的异质性。

(1) 风险值的度量 风险值是区域生态风险的表征,风险值包含风险源的强度、风险受体的特征、风险源对受体的危害等信息,风险值即是这些信息指标的综合。每个斑块受到不同种类、不同级别的风险源的叠加作用,求各斑块内综合风险度的公式为: $P_i = \sum \beta_j \cdot P_{ij}$ 。其中: P_i 为*i*斑块的风险度, P_{ij} 为*i*斑块内*j*类生态风险的发生速率, β_j 为*j*类风险的权重。求出各个斑块的生态损失度 SS_i ,每个斑块的风险值采用公式 $R_i = P_i \cdot SS_i$ 计算出。其中 R_i 为*i*斑块的风险值, P_i 为*i*斑块的风险度, SS_i 为*i*斑块的生态损失度。

(2) 综合评价图 把风险值进行分级,不同的斑块对应不同的风险级别,形成矿区生态风险综合评价图,为矿区生态环境管理提供了数量化的决策依据和理论支持。

煤矿区生态风险综合评价要给风险管理者提供有关风险本质和范围的综合研究结果。风险评价中包含有不确定性的成分,承认不确定性的存在,可以使评价结果更可信,因此风险综合评价应该说明不确定性的来源、性质,并对不确定性的大小作出定量的评价。

3 结束语

矿区生态风险评价研究利用环境学、生态学、地理学、生物学等多学科的综合知识,分析和评价矿区污染物暴露危害发生的概率或不确定性的灾害和事件对矿区生态系统及其组分的损伤。与单一确定地点的生态风险评价相比,矿区生态风险评价是在景观空间异质性区域内对多风险源及受体的研究,在整个分析评价过程中对不确定性因素进行定性和定量化研究,并在结果中体现风险程度,更具有复杂性。

References:

- [1] He S J, Guo H C, Wei C Y, et al. Land restoration in coal mining fields in China. *Acta Geography. Sin*, 1996, **9**(3): 12~17.
- [2] Von Leeuwen C J, Hherinens J L M. *Risk assessment of chemicals*. Kluwer, Dordrecht, 1995.
- [3] Qian Y Q, Tian Y, Wei W. Ecological risk assessment of transgenic plants. *Acta Phytoecol. Sinica*, 1998, **22**(4): 289~299.
- [4] Li G Q, An S Q, Chen X L, et al. A Summary on Ecological Risk Assessment. *Chinese Journal of Ecology*, 1999, **18**(4): 57~64.
- [5] Cao H F, Shen Y W. Summarization of ecological risk assessment. *Environmental Chemistry*, 1991, **10**(3): 26~29.
- [6] Yin H W. Procedure of ecological risk Assessment for Water environment. *Shanghai Environmental Science*, 1995, **14**(11): 11~14.
- [7] Xu J B, Wang Y. Ecological risk assessment. *Songliao Journal* (Natural Science Edition), 1995, **2**: 10~13.
- [8] Liu W X, Luan Z K, Tang H X. environmental Assessment on Heavy Metal Pollution in The Sediments of Le An River with Potential Ecological Risk Index. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, **19**(2): 206~211.
- [9] Ma B Y, Zhang X L. Ecological risk of selenium in regional environment of Jilin province. *China Environmental Science*, 2000, **20**(1): 91~96.
- [10] Zhang X L, Wang J D, et al. Preliminary idea of ecological risk assessment of regional agriculture landscape in china. *Advance in Earth Sciences*, 2000, **15**(6): 712~716.
- [11] Xu X G, Lin H P, Fu Z Y. Regional ecological risk assessment of wetland in the Huanghe river delta. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2001, **37**(1): 111~120.

- [12] Fu Z Y, Xu X G. Regional ecological risk assessment of wetland in the Liaohe river delta. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(3):365~373.
- [13] Cui S J, Song Z M. Current Situation of geological environmental disasters, trend of development and the way to deal with them in the area of coal mine. *Journal of Catastrophology*, 2000, **15**(3):67~71.
- [14] Xiao X T, Wang Z H. The research for land destruction by coal mine and reclamation. *Opencast Mining Technology*, 2001, (4):21~25.
- [15] Li J C, Bai Z K. *Land Reclamation and Ecological Rehabilitation in Opencast Mine Area*. Beijing: Science press, 2000.
- [16] Li Q Y, Zheng M, Wang Y S. Influences of Mineral Resource Exploitation on Environmental Quality in China. *China Mining Magazine*, 2002, **11**(2):47~51.
- [17] Sun T H, Jiang F Q. *The environmental influence of mine area exploitation in grassland and ecological engineering*. Beijing: Science Press, 1996.
- [18] Feng Q Y, Liu G J. Harmful microelements contained in gangue from Yanzhou coal mine and their influences to the soil. *China Mining Magazine*, 2002, **11**(1):67~69.
- [19] Han L, Dai Z J. Study on f Ecological Risk Assessment. *Environmental science dynamic*, 2001, **3**:7~10.
- [20] Suter G W. Predictive risk assessments of chemicals. Lewis Publishers. Boca Raton, Ann. Arbor., 1993, **3**:49~90
- [21] EPA. Ecological Risk Assessment Guidance Proposed. *Environ. Sci. Technol.*, 1996, **30**(11):472~473
- [22] Travis C, et al. The Emergence of Ecological Risk Assessment. *Risk Anal.*, 1992, **12**(2):167~168
- [23] Patrick Sheehan. Assessments of Ecological Impacts on a Regional Scale. Methods to Assess the Effects of Chemicals on Ecosystems. Published by John Wiley & Sons Ltd, 1995. 307~336.
- [24] Barnthouse L W, Suter G W. *User's manual for ecological risk assessment*. ORNL~6251, 1986
- [25] Yin H W. *Ecological Risk Assessment*. Shanghai: University of Science and technology in East China Press, 2001.
- [26] Zhao G J, Liu Y H, Zhao M C. *The research for Eco~environment Management and restoration technique*. Beijing: Beijing Science & Technology Press, 1995.

参考文献:

- [1] 何书金, 郭焕成, 韦朝阳, 等. 中国煤矿区的土地复垦. *地理学报*, 1996, **9**(3):12~17.
- [3] 钱迎倩, 田彦, 魏伟. 转基因植物的生态风险评价. *植物生态学报*, 1998, **22**(4):289~299.
- [4] 李国旗, 安树青, 等. 生态风险评价研究述评. *生态学杂志*, 1999, **18**(4):57~64.
- [5] 曹洪法, 沈英娃. 生态风险评价研究概述. *环境化学*, 1991, **10**(3):26~29.
- [6] 殷浩文. 水环境生态风险评价程序. *上海环境科学*, 1995, **14**(11):11~14.
- [7] 徐镜波, 王咏. 生态风险评价. *松辽学刊(自然科学版)*, 1995, **2**:10~13.
- [8] 刘文新, 栾兆坤, 汤鸿霄. 安乐江沉淀物中金属污染的潜在生态风险评价. *生态学报*, 1999, **19**(2):206~211.
- [9] 马宝艳, 张学林. 吉林省区域环境中硒的生态风险评价. *中国环境科学*, 2000, **20**(1):91~96.
- [10] 张学林, 王金达, 等. 区域农业景观生态风险评价初步构想. *地球科学进展*, 2000, **15**(6):712~716.
- [11] 许学工, 林辉平, 付在毅. 黄河三角洲湿地区域生态风险评价. *北京大学学报(自然科学版)*, 2001, **37**(1):111~120.
- [12] 付在毅, 许学工, 等. 辽河三角洲湿地区域生态风险评价. *生态学报*, 2001, **21**(3):365~373.
- [13] 崔树军, 宋志敏. 煤矿区地质环境灾害现状发展趋势及对策研究. *灾害学*, 2000, **15**(3):67~71.
- [14] 肖兴田, 王志宏. 煤炭资源开发对土地破坏及土地复垦之研究. *露天采煤技术*, 2001, (4):21~25.
- [15] 李晋川, 白中科著. 露天煤矿土地复垦与生态重建. 北京: 科学出版社, 2000.
- [16] 李秋元, 郑敏, 王永生. 我国矿产资源开发对环境的影响. *中国矿业*, 2002, **11**(2):47~51.
- [17] 孙铁珩, 姜凤歧. 草原矿区开发的环境影响与生态工程. 北京: 科学出版社, 1996.
- [18] 冯启言, 刘桂建. 兖州煤田矸石中的微量有害元素及其对土壤环境的影响. *中国矿业*, 2002, **11**(1):67~69.
- [19] 韩丽, 戴志军. 生态风险评价研究. *环境科学动态*, 2001, **3**:7~10.
- [25] 殷浩文. 生态风险评价. 上海: 华东理工大学出版社, 2001.
- [26] 赵桂久, 刘燕华, 赵明茶. 生态环境综合整治与恢复技术研究. 北京: 北京科学技术出版社, 1995.