

莱芜铁矿区岩溶塌陷危险性评价及生态治理对策

王煜琴^{1,2}

(1. 中国矿业大学(北京)土地复垦与生态重建研究所, 北京 100083; 2. 山东旅游职业学院, 济南 250200)

摘 要:矿产资源开采带来的塌陷及其环境地质灾害已给矿区可持续发展带来严重影响,加快塌陷治理,搞好环境修复是实现自然经济和谐发展的重要前提。在对莱芜铁矿区岩溶塌陷调查的基础上,探讨了铁矿区岩溶塌陷的影响因素和形成机理,选取第四系厚度、第四系松散岩类孔隙水含水层厚度及其与岩溶水的水力联系、灰岩顶界面岩溶发育程度、“天窗”内塌陷坑密度5个指标对岩溶塌陷危险性进行了定性及半定量评价;根据评价依据将研究区内不同天窗进行危险性划分;并针对评估结果,提出了相应的治理方案。本文的研究结果可以为区域生态环境修复规划的编制,实现区域可持续发展提供科学的依据。同时本文提出的评估方法在类似矿山地质灾害危险性评估及治理中具有参考和借鉴价值。

关 键 词:岩溶塌陷;危险性;生态治理;莱芜市

矿业是人类生存、经济建设和社会发展的重要基础。然而,矿业在为国家经济发展和社会稳定做出巨大贡献的同时,也对矿区及区域环境产生了一系列负面影响。因此,加强矿山地质环境治理对实现经济社会可持续发展具有重要意义。铁矿区岩溶塌陷是指在隐伏岩溶分布区,由于自然条件或矿山排水和水源地供水等人为活动的影响,改变了地下水水力条件,而产生可溶岩上覆土层下落的灾害现象^[1-4]。莱芜市是山东省新兴的矿业城市,区内矿产资源丰富,种类繁多,铁、煤、冶金辅助原料以及建材非金属矿产等均属优势的资源,已在全市范围内初步形成以钢铁为龙头,能源、建材等各种矿产有序开发的矿业产业体系,成为莱芜市国民经济与社会全面发展的重要支柱产业之一。但随着矿产资源的大规模开采,矿山开采疏排地下水,改变了地下水水力条件,引发了大规模的岩溶塌陷(主要是铁矿区),并引发各种环境地质问题,导致矿区经济与生态严重失衡,影响了区域可持续发展。

因此,在现状调查的基础上理清研究区岩溶塌陷的形成机理、影响因素,进一步评价塌陷产生的风险,提出相应的防治措施,对保护区域地质环境,保证经济发展,确保当地居民的生产、生活安定,具有重要意义^[5]。

1 研究区岩溶塌陷现状及时空分布

1.1 铁矿区岩溶塌陷现状

莱芜市岩溶塌陷主要分布在矿山背斜两翼的石灰岩浅埋区和埋藏区的天窗附近,主要因地下水过量开采而造成。矿山排水是地下水开采的主要部分,因此将岩溶塌陷列入矿山环境地质问题之一。莱芜市岩溶塌陷主要分布于赵庄、主井、孟家庄、泉河等四个“天窗”附近。其中,赵庄、主井“天窗”附近发生塌陷最早,1973年谷家台铁矿大抽水时,赵庄、主井“天窗”分别发生岩溶塌陷17处和3处,使张公清村60余间民房造成不同程度损坏;1975年叶庄矿放水试验时,孟家庄、泉河“天窗”分别发生突发性塌陷16处和11处,矿山因此而停产。

近年来,随着岩溶水开采和矿山长期大量排水,目前,莱芜市已发生岩溶塌陷228处(表1),总面积9912.17m²。其中,泉河至孟家庄一带共发生135处,占全市塌陷总数的59.2%。

1.2 铁矿区岩溶塌陷时空分布规律

(1)铁矿区岩溶塌陷的发生在时间上季节性较为明显,据统计,80%以上的塌陷集中发生于每年汛期的较大降雨中或雨后的一段时期内(图1)。如2000年该区共发生岩溶塌陷56处,其中8月份(降

收稿日期:2008-06; 修订日期:2008-10。

基金项目:山东省自然科学基金项目(Y2004E03)。

作者简介:王煜琴,副教授,在读博士。研究方向:土地复垦与生态重建。E-mail:wyq666999@163.com

雨量 326mm)发生 54 处(暴雨中发生 48 处), 占全年岩溶塌陷总量的 96.4%。

(2)在空间上,岩溶塌陷多发生在矿山背斜两翼构造带附近。

地质构造特别是断裂构造,控制了可溶岩的岩溶发育程度和空间分布规律。莱芜市岩溶塌陷主要分布在矿山背斜两翼的石灰岩浅埋区和埋藏区的天窗附近, 矿山背斜两翼断裂发育,奥陶系灰岩裂隙岩溶发育程度较强,断裂带控制了区内“天窗”形成与分布,是岩溶塌陷主要发生地段。

2 铁矿区岩溶塌陷危险性评价

矿山环境治理工程不同于一般建筑工程,它是控制不良地质作用和加强地质环境稳定性的特殊工程,其治理对象是有必要工程措施去加以防治的地质灾害体。治理工程措施的选择、工程布置、结构设计和施工要求等,皆以地质灾害体的发育规模,危害程度和危险性大小为依据^[7,8]。因此,做好研究区岩溶塌陷地质灾害危险性评估工作,查明地质灾害体的危险状况对铁矿区生态环境的治理恢复具有重要意义。研究区“天窗”内分布的第四系松散盖层稳定性均较差,且已发生的岩溶塌陷主要分布于“天窗”及其附近,其它大部地区因分布巨厚的第三系地层,不具备形成岩溶塌陷的地质环境条件。因此,将①“赵庄天窗”、②“主井天窗”、③“孟家庄天窗”、④“泉河—汶河天窗”、⑤“杜官庄天窗”、⑥“牛王泉天窗”、⑦“山子后天窗”、⑧“侯家沟天窗”作为本次重点研究地段。

2.1 铁矿区岩溶塌陷主要影响因素分析

2.1.1 岩溶塌陷的水力因素分析

岩溶塌陷的原因是地下水流速和坡度增大形成的潜蚀作用,但主要问题是导致地下水流速和坡度增大的动力条件。地下水对岩土体的潜蚀破坏形式主要为管涌和渗流液化,但这两种破坏作用的形成需要一定的水力坡度,发生管涌的临界水力坡度主要取决于土的颗粒级配,当级配连续时临界水力坡度一般为 0.2~0.4,级配不连续时为 0.1~0.3。产生渗

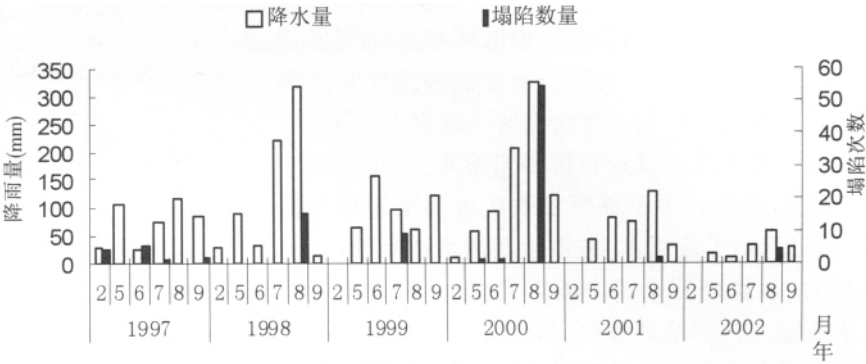


图 1 岩溶塌陷与降水量关系图

Fig.1 Histogram showing relationship between karst collapse and precipitation

表 1 莱芜市铁矿区岩溶塌陷统计表

Tab.1 Statistics of karst collapse in Laiwu iron mining areas

塌陷位置	塌陷数量 (个)	塌陷直径 (m)	可见深度 (m)	塌陷面积 (m ²)
孟公清	47	1~30	1~3.0	3100
耿公清	9	1~20	1~3.0	308.22
张公清	28	1.2~21	1.2~4.0	1298.8
孟家庄	24	1.0~8.0	2~6.0	294.94
曹西村	3	2~6.5	1~3.0	36.70
曹东村	2	1~1.5	0.4~1.3	1.89
西泉河	106	2~35.0	3~12	4389.22
东泉河	1	14.0	13.0	112.0
侯家沟	8	1~5	大于 4	250
合计	228			9912.17

流液化的临界水力坡度可以通过下式计算:

$$i_{cr} = \frac{r'}{r_w} \tag{1}$$

$$r' = r_s - r_w \tag{2}$$

式中: i_{cr} 为临界水力坡度; r' 为土的浮容重; r_w 为水的容重; r_s 为土容重。

按上式计算,粗至细砂的临界水力坡度大约在 0.9~1.0 之间。由于渗透力与水力坡度成正比,很显然,在相同条件下,砂土发生渗流液化要较管涌所需的孔隙水渗透力大得多,但对于厚度较薄或富水性较弱的第四系孔隙水含水层而言,在地下水自然入渗补给岩溶水的情况下,形成的渗透力通常不足以引起砂土管涌和渗流液化。因此,此类含水层发生管涌和渗流液化需要借助于外力的作用,而这种力应源于岩溶水位频繁升降引起的岩溶腔内气压变化。其形成过程可概括如下:岩溶水水位下降至灰岩顶界面以下时,导致岩溶腔内水面以上空间出

现低压(或负压)区→在吸嘬作用下,孔隙水水力坡度和渗流速度增大→含水层松散颗粒发生管涌或渗流液化→负压区扩大至松散层被淘空区→空洞上部盖层在负压作用下继续塌落→地表出现塌陷。

铁矿排水主要排放目标是岩溶水,形成岩溶水水头降落漏斗。由于莱芜市铁矿周围岩溶水富集,同时又是工业用水、城市生活用水的目的层,矿坑排水、水源地开采两方面因素叠加,加重了岩溶水水头漏斗的形成和程度,从而导致了岩溶塌陷的发生。通过多年水位监测,矿山背斜两翼叶马曹水源地与西泉河水源地已形成整体水位降落漏斗,面积达 27.5km²,水位埋深 110~130m,年变幅大于 72m(2002 年),改变了地下水的天然流场,影响水资源的开发,引发岩溶塌陷等环境地质问题或地质灾害。

2.1.2 第四系松散盖层稳定性分析

岩溶塌陷的形成,首先是从含水层砂土颗粒被地下水潜蚀后形成空洞开始。土体内部在未形成空洞之前,在垂直应力和水平应力作用下处于自然平衡状态,随着土洞的出现,上部土体失去支撑,应力状态发生变化,如图 2 所示,假若此时作用在土洞顶板上的压力为 δ ,那么 δ 主要由以下作用力组成:

$$\delta=G-2F \tag{3}$$

式中: δ 为空洞单位长度顶板上所受的压强(KN/m);
 G 为空洞单位长度顶板上土层的总重量(KN/m);

$$G=2\alpha rH \tag{4}$$

式中: α 为空洞长度的一半 (m); r 为土的容重(KN/m³); H 为空洞埋藏深度 (m); F 为空洞单位长度侧壁的摩阻力(KN/m);

$$F=P\tan\varphi \tag{5}$$

式中: φ 为空洞上覆岩土层内摩擦角; P 为楔形体在侧壁上的主压力,当取其最大值时为:

$$P=\frac{rH^2}{2}\tan^2\left(45^\circ-\frac{\varphi}{2}\right) \tag{6}$$

因此,(3)式可变为:

$$\delta=rH\left[2\alpha-H\tan\varphi\tan^2\left(45^\circ-\frac{\varphi}{2}\right)\right] \tag{7}$$

由上式可以看出,当 $\delta=0$ 时,亦即 H 增大到一定厚度时,顶板上方土体恰好保持自然平衡而不塌落,若将这时的 H 称为临界厚度 H_0 ,那么有:

$$H_0=\frac{2\alpha}{\tan^2\left(45^\circ-\frac{\varphi}{2}\right)\tan\varphi} \tag{8}$$

当土体表面存在附加单位压力为 R ,则:

$$\delta=rH\left[2\alpha-H\tan\varphi\tan^2\left(45^\circ-\frac{\varphi}{2}\right)\right]+2\alpha R \tag{9}$$

此时的临界厚度 H_0 为:

$$H_0=\frac{2\alpha r+\sqrt{4\alpha^2 r^2+8\alpha r R\tan\varphi\tan^2\left(45^\circ-\frac{\varphi}{2}\right)}}{2r\tan\varphi\tan^2\left(45^\circ-\frac{\varphi}{2}\right)} \tag{10}$$

根据 H 与 H_0 的经验关系数据,可将顶板的稳定性划分为较稳定、不稳定和稳定三种状态(表 2)。

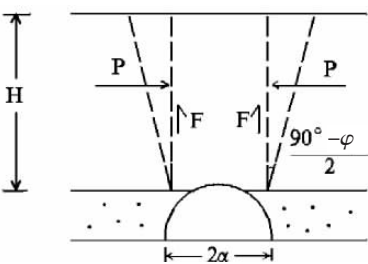


图 2 土洞顶板应力分布示意图

Fig.2 The sketch map of stress on the collapse hole roof

表 2 顶板稳定性划分

Tab.2 The relationship between roof stability and its thickness

H 与 H ₀ 的经验关系	顶板稳定性
H<H ₀	不稳定
H ₀ <H<1.5H ₀	较稳定
H>1.5H ₀	稳定

工作区第四系松散岩类以亚粘土为主,土体平均天然容重为 18KN/m³,内摩擦角为 25°左右。具备岩溶塌陷形成条件的地段,松散盖层的稳定性取决于含水层厚度,因此,若将各“天窗”区内松散盖层含水层平均厚度的 1.5 倍作为土洞的形成发展规模,那么在地表附加压力(土洞内、外气压差) $R=0$ 和 $R=103.4\text{KN/m}^2$ (相当于 1 个标准大气压)的情况下,根据(8)、(10)可概略计算出松散盖层在不同受力情况下的稳定厚度临界值(表 3 的 5~10 列)。工作区各“天窗”内第四系厚度一般 5~15m(表 3 第 4 列),将各“天窗”第四系厚度值与计算出的稳定厚度临界值相比较,便可知松散盖层稳定性均较差。

2.2 危险性评价指标因子的选择及评价方法

经过对研究区岩溶塌陷的现状调查及影响因素分析,本次研究危险性评价选取的主要因子包括第四系厚度、第四系松散岩类孔隙水含水层厚度及其与岩溶水的水力联系、灰岩顶界面岩溶发育程度、“天窗”内塌陷坑密度 5 个指标进行评价^[9-11]。

表 3 各“天窗”区松散盖层稳定性分析表

Tab.3 The stability assessment for loose overlying strata of each iron mine "dormant window"

天窗名称	含水层 平均厚 度 (m)	土洞直 径(m)	松散盖 层厚度 (m)	H_0 (R=0)			H_0 (R=103.4KN/m ²)			稳定性评价
				稳定	较稳定	不稳定	稳定	较稳定	不稳定	
赵庄	2	3	5~14	>23.8	15.9~23.8	<15.9	>30.5	23.6~30.5	<23.6	不稳定
主井	2.5	3.8	10~13	>30.1	20.1~30.1	<20.1	>37.1	24.7~37.1	<24.7	不稳定
孟家庄	2.2	3.3	10~11	>26.2	17.4~26.2	<17.4	>33	22~33	<22	不稳定
杜官庄东	2.3	3.5	5~10	>27.7	18.5~27.7	<18.5	>34.7	23.1~34.7	<23.1	不稳定
杜官庄西	0.5	0.8	<5	>6.3	4.2~6.3	<4.2	>11.2	7.4~11.2	<7.4	不稳定
牛王泉	1	1.5	5~10	>11.9	7.9~11.9	<7.9	>26.3	17.5~26.3	<17.5	较稳定~不稳定
泉河	1.5	2.3	10~15	>18.2	12.2~18.2	<12.2	>24.6	16.4~24.6	<16.4	不稳定
山子后	0.75	1.1	5~10	>8.7	5.8~8.7	<5.8	>13.7	9.1~13.7	<9.1	较稳定~不稳定
侯家沟	1	1.5	5~8	>11.9	7.9~11.9	<7.9	>26.3	17.5~26.3	<17.5	不稳定

评价方法采用综合指数法： $I=\sum_{i=1}^n W_i I_i$ (11)

式中： I 为综合评价指数， W_i 为加权系数， n 为参评因素个数， I_i 为分指数。

在以上因素分析的基础上,根据山东省地质环境监测总站 1997 年公布的《山东省莱芜市孟公清—西泉河地区矿山地质灾害勘查报告》,结合现有研究资料和实地调查结果,确定了各指标因子的取值标准,分别以 Z、Z₁、K、P、S 指代第四系厚度、含水层厚度、岩溶发育程度、塌陷坑密度、水力联系五个指标的分指数取值(表 4),并对研究区重点预测地段进行了因子取值(表 5)。

2.3 研究区岩溶塌陷危险性评价结果

利用公式(11)对总指数进行计算,由于较难分

表 4 研究区岩溶塌陷危险性评价因子取值标准
Tab.4 Factor valuation standard for risk assessment of karst collapse in the study area

第四系厚度 (m)	>30	20~30	10~20	5~10	<5
Z 值	1	3	5	7	1
含水层厚度(m)	>3	1~3	0.5~1	<0.5	—
Z ₁ 值	7	5	3	1	—
岩溶发育程度	强	中等	弱~不发育	—	—
K 值	7	5	0	—	—
塌陷坑密度 (个/Km ²)	>100	50~100	30~50	10~30	<10
P 值	7	5	3	2	1
水力联系	强烈	中等	弱	—	—
S 值	7	5	1		

析各指标对岩溶塌陷危险性的贡献率,所以权重以等权处理,即 $I=Z+Z_1+K+P+S$ 得到综合指数 (I),根

表 5 研究区岩溶塌陷危险性评价因子取值

Tab.5 Factor Valuation for risk assessment of karst collapse in the study area

评价因子 评价区域	第四系厚度		含水层厚度		岩溶发育程度		塌陷坑密度		水力联系	
	初值(m)	Z 值	初值(m)	Z ₁ 值		K 值	初值(个/km ²)	P 值		S 值
赵庄“天窗”	10~14	5	3~5	7	强	7	252.7	7	强烈	7
	5~10	7	1~1.5	5	强	7		7	强烈	7
主井“天窗”	10~13	5	2~3	5	强	7	75	7	强烈	7
孟家庄“天窗”	11.0	5	1.8~2.6	5	强	7	96.6	5	强烈	7
泉河—汶河“天窗”	5~10 (村北)	7	1.8~2.5	5	强	7	0	1	强烈	7
	10~14.8 (村南)	5	0.5~1.0	3	强	7	201.8	7	强烈	7
杜官庄“天窗”	5~10 (村东)	7	1.5~3.0	5	强	7	0	1	强烈	7
	10~20 (村西)	5	0.5	3	中等	5	0	1	中等	5
牛王泉“天窗”	5~10	7	2.0	5	中等	5	0	1	中等	5
山子后“天窗”	5~10	7	0.5~1.0	3	中等	5	0	1	中等	5
侯家沟“天窗”	5~8	7	0.5~1.0	3	中等	5	400	7	强烈	7
其他地段	10~15	5	1~1.5	5	强至中等	4	0	1	弱	1

据 I 将研究区划分为四个危险性标准,即: $I \geq 27$ 为岩溶塌陷高易发区; $21 \leq I < 27$ 为岩溶塌陷中易发区; $16 \leq I < 21$ 为岩溶塌陷低易发区; $I \leq 16$ 为岩溶塌陷不易发区。经评价,评价区内赵庄“天窗”、主井“天窗”、孟家庄“天窗”、泉河—汶河“天窗”、侯家沟

“天窗”及杜官庄“天窗”东部均属岩溶塌陷高易发区;牛王泉“天窗”、山子后“天窗”属岩溶塌陷中易发区;杜官庄“天窗”西部地段则属岩溶塌陷低易发区;其他地区属岩溶塌陷不易发区(表 6)。

表 6 工作区岩溶塌陷预测分区表

Tab.6 Karst collapse prediction blocks in the study area

评价区域	赵庄“天窗”	主井“天窗”	孟家庄“天窗”	泉河—汶河“天窗”		杜官庄“天窗”		牛王泉“天窗”	山子后“天窗”	侯家沟“天窗”	其他地段
综合指数	33	31	29	村北 27	村南 29	村东 27	村西 19	23	21	29	16
危险性分区	高易发区	高易发区	高易发区	高易发区	高易发区	高易发区	低易发区	中易发区	中易发区	高易发区	不易发区

3 基于危险性评价的岩溶塌陷生态治理对策

3.1 岩溶塌陷生态治理措施

(1)突出重点,总体规划^[2]。对于岩溶塌陷的生态治理首先应根据岩溶塌陷危险性评价结果进行生态修复总体规划,突出重点,合理布署,优先对危险性高、对矿山生态环境有重大影响或破坏的区域进行治理。从而在生态修复的重点和范围上确定目标。

(2)对塌陷坑及时回填,进行土地复垦。土地复垦是采空区塌陷、排土场、尾矿库以及露天采场治理的最佳途径,不仅可改善矿山环境,还可恢复大量土地,因而具有深远的社会效益、环境效益和经济效益。对城镇附近的地下矿山及塌陷危险性较高的区域,为了避免塌陷区引起严重的生态破坏和人员伤亡,在可能的情况下,应该尽量采用充填法防止地表塌陷。回填时一般应清理至基岩,待封住洞口后再填土石;而对不易积水的塌陷坑,在灰岩隐伏地段宜采用粘土回填夯实,灰岩裸露地段宜先用大块石或水泥封堵洞口,然后再用粘土夯实。进而根据外露物质的理化性质,采空区的体积和位置,塌陷危险性的大小进行进一步的规划,确定土地用途和复垦方案。

(3)对“天窗”进行帷幕灌浆,减少塌陷水源的进入。“天窗”内第四系松散盖层具备良好的渗透性,各类水源的汇入一是增加了松散盖层的容重,减少了土体颗粒间的凝聚力,二是在长期的垂直入渗过程中,增加了对盖层的潜蚀作用,从而加剧了塌陷的形成过程。帷幕灌浆的目的是:减少第四系松散岩类孔隙水和地表水通过“天窗”地带向奥灰水渗漏,从而达到削弱两者之间因水力联系对松散盖层产生的潜蚀破坏作用。

(4)加强污水处理,排供结合、联合调度,减少岩溶水的区域开采量。研究区内现有马庄、叶庄和谷家台三个开采矿区,总排水量为 6000m³/d 左右。据调查,各矿区外排矿坑水水质均良好,除悬浮物较高外,常规组分和微量元素含量均低于国家Ⅲ类水质量标准,只需经过沉淀和消毒等简单物理方法处理,即可达到国家规定的生活饮用水卫生标准。因此,将这部分矿坑水进行处理后进行综合利用(如用工业、农业、生活等),不仅可以减少区域岩溶水(特别是水源地)的开采量,而且对减轻区内岩溶塌陷的发生程度将起到一定控制作用。

3.2 高易发区的重点防治对策

为确保人民生命财产安全,在岩溶塌陷多发区和预测高易发区禁止规划重要建筑物或民用住宅,对建立在塌陷多发地段的村庄住宅,应及时搬迁。在塌陷高易发区设立警示标志是提高群众对岩溶塌陷防范意识的主要手段之一,对塌陷多发地段和易发地段,可在醒目位置设立如“岩溶塌陷多发区”、“岩溶塌陷易发区”等标志牌,或进行围网圈定等,以到达防灾减灾之目的。此外,还应及时掌握地下水位动态,加强汛期的预警与防范工作。在牛王泉、孟家庄、赵庄和杜官庄等塌陷高易发区应分别建立地下水(岩溶水和孔隙水)位长期监测点,通过地下水位动态变化及时作好汛期的预警、预报工作,防范塌陷发生。

4 结论

矿业在发展的同时由于过量或不合理的开采、挖掘,都会引起一系列的环境污染和生态破坏问题,对公众的安全、健康、生命、财产和生活都会造成很大的危害。所以应重视矿山环境的综合治理,减少矿山地质环境问题对居民和生态安全的影响,

实现矿山的可持续发展^[13-15]。本文以莱芜铁矿区为研究区域,探讨了铁矿区岩溶塌陷的影响因素和形成机理,选取第四系厚度、第四系松散岩类孔隙水含水层厚度及其与岩溶水的水力联系、灰岩顶界面岩溶发育程度、“天窗”内塌陷坑密度 5 个指标对岩溶塌陷危险性进行了定性及半定量评价,将研究区内的不同天窗划分为岩溶塌陷高易发区、岩溶塌陷中易发区、岩溶塌陷低易发区和岩溶塌陷不易发区,根据评价依据将研究区内不同天窗进行危险性划分,并针对评估结果,提出了相应的治理方案,可以为区域生态环境修复规划的编制,实现区域可持续发展提供科学的依据,同时本文提出的评估方法在类似矿山地质灾害危险性评估及治理中具有参考和借鉴价值。

参考文献

- [1] 纪万斌,刘君.关于工矿城市矿山塌陷环境恢复与治理的探讨.资源·产业,2003,5(6).
- [2] 胡少伟,周跃.对云南铁矿土地复垦的探讨.安全与环境工程,2004,11(1).
- [3] 张德明,刘树臣,项仁杰.矿产资源的合理开发与矿山环境的综合治理.国土资源情报,2003,(12).
- [4] 吴烈善,彭省临.金属矿山生态环境问题及其防治对策.南方国土资源,2004,(11).
- [5] 韩华,孙保卫,王峰等.矿山环境治理地质灾害危险性评估技术探讨.城市地质,2006,(1).
- [6] Weber T.C. Spatial and temporal simulation of forest succession with implications for management of bioreserves.

- M.S. Thesis. Department of Environmental Engineering Sciences. University of Florida, Gainesville, 1994,258.
- [7] 于广明,董春胜,邹建喜等.资源枯竭矿区深井开采引起地层再破坏的复杂性研究.岩石力学与工程学报,2004,(7):2341~2345.
- [8] 王来贵,刘向峰,吕明海等.资源枯竭城市衍生灾害中的环境岩石力学问题.岩石力学与工程学报,2005,(8):2715~2717.
- [9] 李香芹,吴殿廷,宋金平.北京山区生态经济综合分区与发展研究.北京师范大学学报(自然科学版),2005,41(4):437~440.
- [10] Hwey -Lian Hsieh, Chang -Po Chen,Yaw -Yuan Lin. Strategic planning for a wetlands conservation greenway along the west coast of Taiwan. Ocean & Coastal Management,2004,47:257~272.
- [11] Zhao Chuanyan, Nan Zhongren, Cheng Guodong, et.al. GIS-assisted modelling of the spatial distribution of Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) in the Qilian Mountains, northwestern China based on biophysical parameters. Ecological Modelling, 2006, 191: 487~500.
- [12] 王霖琳,胡振琪,赵艳玲等.中国煤矿区生态修复规划的方法与实例.金属矿山,2007,(5):17~20.
- [13] 黄春晖,高峻.生态构建——恢复生态学的新视点.地理与地理信息科学,2004,20(4):52~56.
- [14] John M Teal, Lee Weishar. Ecological engineering, adaptive management, and restoration management in Delaware Bay salt marsh restoration. Ecological Engineering,2005,25:304~314.
- [15] Joon Hwan Shin, Don Koo Lee. Strategies for restoration of forest ecosystems degraded by forest fire in Kangwon Ecoregion of Korea. Forest Ecology and Management, 2004, 201:43~56.

Risk Assessment and Ecological Rehabilitation Strategies of Karst Collapse in Laiwu Iron Mining Areas

WANG Yuqin^{1,2}

- (1. Institute of Land Reclamation & Ecological Reconstruction, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;
2. Shandong College of Tourism and Hospitality, Jinan 250200, China)

Abstract: Collapse and the corresponding environmental geologic hazards because of mining activities have exerted serious impact on sustainable development of the mining area. The rapid control of the collapse and rehabilitation of the eco-environment are a very important prerequisite to the harmonious development of economy and environment. This paper analyzed the influencing factors and development mechanism for karst collapse of iron mining areas in Laiwu city based on the in situ investigations. Five indexes were selected to assess the hazard of the karst collapse, then the risk degree of the study area was assessed. Finally, the strategies based on the research results were put forward. The results of this research provide scientific basis for planning regional ecological restoration and sustainable development. And the assessment indexes and the method proposed in this paper serve as valuable reference for similar researches.

Key words: karst collapse; risk; ecological rehabilitation; Laiwu city