

矿山地质环境质量评价数学模型研究概述^{*}

刘金涛¹, 冯文凯¹, 胥 良², 吕 键³

(1. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059;

2. 四川省地质环境监测总站, 四川 成都 610081; 3. 中石化西南油气分公司工程技术研究院, 四川 德阳 618000)

摘 要: 在对大量文献和典型矿山地质调查资料研究的基础上, 从矿山环境地质问题所导致的结果(资源损毁、地质灾害、环境污染)出发, 筛选出合理的评价因子并建立评价指标体系。采用不同的评价方法, 通过进行现状—预测—综合评价最终确定矿山地质环境质量评价数学模型; 并将评价方法应用于实际矿山地质环境质量评价中, 获得了较好的一致性。

关键词: 矿山; 地质环境质量; 评价指标; 评价模型

中图分类号: P642. 22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2011)04-0110-06

矿山环境问题一直受到国际社会的广泛关注和重视。国际上矿业发达的国家如美国、加拿大等, 早在 1970 年代就十分重视矿山环境保护和治理, 大部分西方国家均实行了比较严格的矿山环境保护和矿山环境评估制度。矿产资源开发与环境保护一体化已成为当前国际矿业发展的一个重要趋势^[1]。

除了定性地根据相关国家或行业规范对矿山地质环境进行评价(评估)之外, 国内在矿山地质环境调查研究工作中对评价因子选取、指标制定和评价方法方面进行了积极的探索, 取得了可喜进展, 但在指标制定、多层次评价方法方面存在着众多亟待研究解决与深化的问题。主要有^[2]:

(1) 选择的评价因素不够全面, 评价结果不够客观;

(2) 评价指标多为定性描述, 缺乏量化指标, 评价结果的科学性不够严谨;

(3) 综合评价方法不甚合理, 评价结果缺乏可比性。

因此, 矿山地质环境定量(半定量)评价的热点和难点问题主要表现在两个方面: 一是制定科学性、实用性的量化评价指标体系; 二是建立多指标、多层次的综合评价模型^[3-5]。

1 评价指标体系

1.1 评价指标选取

矿山环境地质问题所导致的结果是最直观明了, 总体可以分为资源损毁、地质灾害和环境污染三大类型, 因此从矿山环境地质问题导致的结果出发选取合理的指标建立评价指标体系, 如图 1 所示。

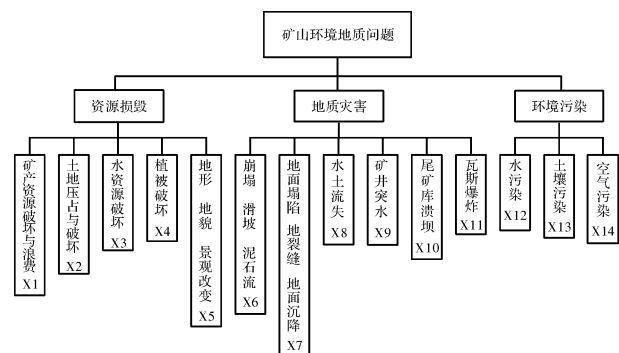


图 1 矿山地质环境质量评价指标体系

1.2 指标等级确定

以中国地质调查局颁行的《区域环境地质调查总则(试行)(DD2004.1-02)》中关于区域地质环境质量等级分区的规定为原则将评定矿山地质环

* 收稿日期: 2011-04-25

基金项目: 国家自然科学基金(青年)(40802073); 四川省国土资源厅科技项目(KJ-2007-8)

作者简介: 刘金涛(1985-), 女, 河南三门峡人, 硕士研究生, 主要从事地质灾害预测评价与防治方面的研究工作。

E-mail: 895833090@qq.com

境质量的指标因子及矿山地质环境质量等级划分为“好”(Ⅰ级)、“较好”(Ⅱ级)、“较差”(Ⅲ级)和“差”(Ⅳ级)等4个等级^[6]。

评价指标等级的确定可以根据:①直接采用国家标准、行业标准作为矿山地质环境质量评价指标因子等级的依据;②采用行业推荐值或地区(矿区)平均值作为划分指标等级的依据;③依据矿山地质环境调查评价实际情况,借鉴相关学科方法,制定适应于矿山地质环境质量评价的指标。

各等级赋值标准分值分别为:Ⅰ级0.3分、Ⅱ级0.5分、Ⅲ级0.7分、Ⅳ级0.9分。

指标因子等级赋值标准及指标加权综合评价时,由加权评定分值确定相应等级的标准(表1)。

表1 指标等级赋值标准及加权评定分值对应等级

	好	较好	较差	差
各等级指标评定分值	0.3	0.5	0.7	0.9
加权评定分值 F_0	<0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	>0.8

1.3 指标权值计算

要素的权值是指在评定矿山地质环境质量等级时,各要素在总的评价中的重要程度。各指标的权值则表征其在评定相应要素等级时的重要程度。目前,有多种确定评价指标权值的方法,如专家打分法、数理统计法、层次分析法等,但是这些方法都不能很好地将主观和客观要素结合起来。研究将熵值法得到的客观权值和层次分析法得到的主观权值有机结合为综合权值作为评价时各指标的权重。

2 评价方法

经过大量查阅分析文献、期刊资料并实际计算验证,选取了以下三种能适合本研究课题的、相对简单、实用、效果明显的数学(定量、半定量)评价方法。

2.1 要素、指标加权分值评价法

(1)要素各指标加权评价

$$F_j = \sum_{i=1}^n F_i W_i, \quad (1)$$

式中: F_j 为要素加权分值($j = \text{I} - \text{资源损毁}$, $\text{II} - \text{地质灾害}$, $\text{III} - \text{环境污染要素}$); F_i 为每一要素中各指标评定分值; n 为各指标权值; n 为各要素指标个数(每一要素中 n 可能不同)。

(2)地质环境质量等级综合评价

$$F_0 = \sum_{j=1}^n F_j W_j, \quad (2)$$

式中: F_0 为综合加权评价分值; W_i 为各要素权值; j 为环境地质问题所含要素,一般 $n = 1, 2, 3$, 对应于Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ要素。

最后根据综合加权评定分值确定地质环境质量综合评定等级。

2.2 模糊数学多层次评判法

由于各因素对矿山地质环境影响的程度不尽相同,以其作为划分矿山地质环境影响程度与界限具有外延的模糊性,很难用精确的量化关系来划分和表达。虽然各个因素在矿山地质环境影响中所起到的作用和方式是很复杂的,但它们具有系统性和层次性,可以利用系统的思想,把影响因素分解为构成要素和评价因子两个层次,采用二级综合模糊评判方法进行评价。

(1)初级评判

以资源损毁、地质灾害和环境污染三个要素为例进行详细说明。

①建立评价集 $V = \{V_1, V_2, V_3, V_4\} = \{\text{I}, \text{II}, \text{III}, \text{IV}\}$, 式中 V_1, V_2, V_3, V_4 分别对应为“好”(Ⅰ级)、“较好”(Ⅱ级)、“较差”(Ⅲ级)和“差”(Ⅳ级)等4个等级。

②确定参评要素集 $U = \{U_1, U_2, U_3\}$, 式中 U_1, U_2, U_3 分别为资源损毁、地质灾害和环境污染三大要素。

③确定参评要素的评价指标

即每一要素所对应的各个指标,如资源损毁所对应的矿产资源破坏与浪费、土地压占与破坏、水资源破坏。

④构建隶属度矩阵 R

以资源损毁、地质灾害和环境污染三个要素各个指标的评定等级构建各要素对评价等级的隶属度矩阵。

⑤确定权值集 A

通过客观赋权法和主观赋权法得到各要素下属指标的各个权值,在此基础上将客观权值 W_s 、主观权值 W_z 转换为各个指标的综合权值 W_o 并以此作为初级评判时每个要素层指标的模糊子集 A , 则三要素初级评判的模糊子集分别为 A_1, A_2, A_3 。

⑥进行模糊复合运算

得 $B_1 = A_1 \circ R_1 = (b_{11}, b_{12}, b_{13}, b_{14})$, 同理可求得 B_2, B_3 。

(2)二级评判

与初级评判类似,以三要素的初级评判结果 B

构建矿山环境地质问题对评价等级的隶属度矩阵 R_0 :

$$R_0 = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} \end{bmatrix} \quad (3)$$

三要素的模糊子集 W_0 即各要素的综合权值 W_0 , 采用 $M(\bullet, +)$ 模糊变换算子进行二级模糊变换: $F_0 = W_0 \circ R_0$ 。

根据最大隶属度等级为模糊数学评定等级的原则, 求出矿山地质环境质量在不同种类权值下的模糊综合评定等级。

2.3 灰色局势决策分析法

决策即是对发生了的某种事件采取诸多对策解决问题。不同的对策有不同的效果, 要用目标去衡量各种对策的效果, 最后从这些对策中挑选一个效果最佳者。灰色局势决策是指从事件、对策、效果三者统一的前提下, 对明显含有灰元的系统进行决策。环境质量评价过程实际也是一个决策的过程, 可以把评价的对象及系统视为灰色系统, 用灰色局势决策方法进行环境质量评价^[7]。

(1) 确定事件、对策、局势、目标

①事件集 a_i

事件集为(评价一矿地质环境质量, 评价二矿地质环境质量, 评价三矿地质环境质量)。

②确定对策集 b_j

对策即矿山地质环境质量分级, $b_j = (b_1, b_2, b_3, b_4)$, 分别代表地质环境质量属于好、较好、差、较差级别。

③确定局势

$S_{ij} = (a_i, b_j)$ (评价 i 矿地质环境质量, 地质环境质量等级)。如 S_{11} 表示(评价一矿地质环境质量, 好); S_{12} 表示(评价一矿地质环境质量, 较好)。

④确定目标集

目标集 = (指标 1, 指标 2, … 指标 11) = (矿产资源破坏与浪费, 土地压占与破坏, … 空气污染)。

(2) 求各个事件对不同决策的效果测度, 写出决策矩阵。

(3) 计算多目标的局势综合效果测度, 写出综合决策矩阵。

(4) 按决策准则进行决策。

(5) 根据综合效果测度值进行排序

将各矿的综合效果测度值进行相加即可得到各矿的相对排序, 所得数值越大其地质环境质量越差。

灰色局势决策分析法省去了繁琐的权值计算, 大大减少了评价过程的复杂性, 但由于其不区分不同指标的重要性, 完全根据所给数值进行评价, 对于内容复杂或不能只依靠定量数据进行评价的对象来说可能会使评价结果与实际情况有一定的偏离。

3 评价步骤

3.1 现状评价

以矿山或矿区作为评价对象, 选择合理的评价指标和数学模型对矿业开发产生的环境地质问题进行评价, 每一个矿山或矿区不同的环境地质问题分为差、较差、较好、好四级。

3.2 预测评价

在现状评价的基础上, 根据矿山类型和开发利用方案确定的开采范围、深度, 规模和采、选、冶方法等, 结合评价区地质环境条件及变化特征, 预测新一轮矿业活动可能产生、加剧的矿山环境地质问题^[8], 并对其发展趋势、危害对象、影响程度进行评价。

3.3 综合评价

通过考虑现状评价、预测评价、矿山地质背景条件及矿山恢复治理的难易程度四个因子进行综合评价, 将矿山环境地质问题的严重程度划分为轻度、中等、严重和极严重四级。

4 评价模式

4.1 多个矿山评价

将一个区域内的几个矿山或不同区域内的几个矿山放在一起计算客观权值, 进而和层次分析法求得的主观权值有机结合为综合权值通过要素指标加权分值法和模糊数学多层次评判法进行现状、预测评价或直接选用灰色决策分析法评价。

根据几个矿山的现状、预测评价结果, 考虑各个矿山的地质背景条件及矿山恢复治理的难易程度进行综合评价。

4.2 单个矿山评价

当只有一个矿山时,通过要素、指标加权分值法和模糊数学多层次评判法对其进行现状、预测评价,综合评价方法同多个矿山。

根据熵权法单个矿山不能计算客观权值,故单矿评价时采用层次分析法所得的主观权值进行评价计算,其原理简单,有较严格的数学依据,广泛应用于复杂系统的分析与决策^[9]。

5 实例验证

在此主要针对多个矿山进行评价实例验证,单矿评价方法与多矿一样,只是不能采用灰色局势决策法进行单个矿山评价。

选取三个生产矿山分别作为一矿、二矿和三矿。根据典型实际材料^[10],三个矿山的基本特征主要从矿区的基本环境地质条件、矿山开采活动的影响、矿山环境地质问题发展预测三方面考虑。

5.1 矿山基本特征概述

(1)基本环境地质条件

主要包括地形地貌、地质构造、气象与水文、水文地质、岩土体工程地质特征、人类工程活动。

(2)矿山开采活动的影响

1)对地质环境的破坏:①采空区地面开裂塌陷、地裂缝;②崩滑流;③水土流失。

2)对水环境的破坏:①水污染,矿区废水对地下水、地表水污染;②水资源变化、采区附近地表水、地下水疏干。

3)土壤污染:土壤中某些元素超标。

4)土地压占、植被破坏:矸石等堆放对地表植被和土地造成一定影响和破坏。

(3)矿山环境地质发展问题预测

1)对地质环境的破坏:①地面开裂、塌陷范围可能进一步增加;②崩滑流发生加重,原有滑坡将继续滑动、局部发生滑坡、崩塌和泥石流;③水土流失加剧;④区内褶皱断裂发育,岩体破碎,裂隙发育,随着开采深度增加,与地表水发生水力联系的可能性增大,因此,矿坑排水量可能增大或发生矿坑涌水事故。

2)对水资源破坏、水污染、土壤污染受影响加重;土地压占、植被破坏范围增大。

5.2 现状评价

(1)指标及其等级确定

每个矿山的环境地质问题类型一样但具体严重程度、影响范围各有不同。通过分析资料并研

究这三个矿山目前所造成的环境地质问题,确定了三个要素层 11 个评价指标:

① 资源损毁要素——矿产资源破坏与浪费、土地压占与破坏、水资源破坏、植被破坏、地形地貌景观改变;

② 地质灾害要素——崩滑流、地面塌陷地裂缝、水土流失;

③ 环境污染要素——水污染、土壤污染、空气污染。

根据各个矿山的基本特征,参照指标等级标准对各评价指标所对应的环境地质问题进行等级划分。由于每个指标及其因子较多,在此列出环境污染要素下属的三项指标因子的等级标准(表 2~表 4)。三个矿山的现状评价等级分值如表 5 所示。

表 2 水污染指标等级标准

污染等级	评价指数等级	单项因子
没有污染(Ⅰ级)	好(0.3)	不超标
轻度污染(Ⅱ级)	较好(0.5)	超标小于 1 倍
中度污染(Ⅲ级)	较差(0.7)	超标 1~5 倍
重度污染(Ⅳ级)	差(0.9)	大于 5 倍

注:地表水质量评价执行《地表水环境质量标准》GB3838-2002,地下水质量评价执行《地下水质量标准》GB/T 14848-93。

表 3 土壤污染指标等级标准

污染等级	评价指数等级	综合污染指数	污染水平
警戒线	好(0.3)	$P_{综} \leq 1.0$	半清洁
轻度	较好(0.5)	$1.0 < P_{综} \leq 2.0$	土壤污染物超过背景值,为轻污染,农作物开始污染
中度	较差(0.7)	$2.0 < P_{综} \leq 3.0$	土壤农作物受到中度污染
重度	差(0.9)	$3.0 < P_{综}$	土壤农作物受到污染,相当严重

注:土壤评价执行《土壤环境质量标准》GB15618-1995。

表 4 空气污染指标等级标准

指标等级分值	空气污染指数	空气质量	对健康的影响
好(0.3)	$API \leq 100$	优良	可正常活动
较好(0.5)	$100 < API \leq 150$	轻微污染	易感人群症状有轻度加剧,健康人群出现刺激症状
较差(0.7)	$150 < API \leq 200$	中度污染	心脏病和肺病患者症状显著加剧,运动耐受力降低,健康人群中普遍出现症状
差(0.9)	> 200	重度污染	健康人运动耐受力降低,有明显强烈症状,提前出现某些疾病

注:空气污染等级标准引自 <http://www.tj.xinhuanet.com>。

表 5 现状评价指标等级分值

评价指标	评价指标等级分值		
	一矿	二矿	三矿
矿产资源破坏与浪费	0.7	0.7	0.5
土地压占与破坏	0.5	0.5	0.5
水资源破坏	0.7	0.7	0.9
植被破坏	0.5	0.9	0.5
地形地貌景观改变	0.5	0.7	0.7
崩滑流	0.5	0.3	0.5
地面塌陷、地裂缝	0.5	0.5	0.3
水土流失	0.7	0.7	0.5
水污染	0.9	0.9	0.9
土壤污染	0.5	0.5	0.7
空气污染	0.5	0.7	0.5

(2) 指标权值计算

根据权值计算方法，得到各个指标的三类权值，如表 6 所示。

表 6 现状评价要素、指标各类权值

要素、指标	权值		
	客观	主观	综合
资源损毁	0.311	0.633	0.570
矿产资源破坏与浪费	0.026	0.404	0.097
土地压占与破坏	0.284	0.076	0.195
水资源破坏	0.029	0.294	0.076
植被破坏	0.376	0.061	0.208
地形地貌景观改变	0.284	0.165	0.424
地质灾害	0.487	0.260	0.368
崩滑流	0.492	0.619	0.683
地面塌陷、地裂缝	0.492	0.284	0.313
水土流失	0.017	0.096	0.004
环境污染	0.202	0.106	0.062
水污染	0.000	0.619	0.000
土壤污染	0.500	0.096	0.253
空气污染	0.500	0.284	0.747

(3) 评价结果

选用综合权值采用要素、指标加权分值法和模糊数学多层次评判，得到各个矿山的现状评价结果，见表 7、表 8。

表 7 要素指标加权分值现状评价(多矿)

评定结果	一矿	二矿	三矿
评定分值	0.520	0.575	0.546
等级(排序)	较好(1)	较好(3)	较好(2)

表 8 模糊数学多层次评判现状评价(多矿)

矿山	一矿		二矿		三矿	
	隶属度	分值	隶属度	分值	隶属度	分值
好(0.3)	0	0	0.251	0.075	0.115	0.035
较好(0.5)	0.900	0.450	0.242	0.121	0.584	0.292
较差(0.7)	0.100	0.070	0.388	0.271	0.257	0.180
差(0.9)	0.000	0.000	0.119	0.107	0.043	0.039
分值求和	0.520		0.575		0.546	
等级(排序)	1(较好)		3(较差)		2(较好)	

灰色局势决策分析评价不需要计算权值，现状评价结果见表 9。

表 9 灰色局势决策分析现状评价(多矿)

评定结果	一矿	二矿	三矿
最大效果测度	0.354	0.354	0.303
评定分值	0.657	0.717	0.657
等级(排序)	较好(1)	较差(3)	较好(2)

5.3 预测评价

分析研究资料认为预测评价中三个矿山的地质环境问题依然分为资源损毁、地质灾害和环境污染三个要素层，不同的是地质灾害要素评价指标在原来的基础上增加了矿井突水和瓦斯爆炸 2 个指标，其它指标的预测评价等级分值与现状评价有所不同。

预测评价计算方法同现状评价。

5.4 综合评价

选择三种评价方法中与实际矿山地质环境情况最符合的现状评价和预测评价结果，考虑矿山的地质背景和恢复治理难易程度进行综合评价。

各个综合评价指标的等级分值如表 10 所示。

表 10 综合评价指标分值(等级)

综合评价指标	一矿	二矿	三矿
现状评价	0.5(较好)	0.7(较差)	0.5(较好)
预测评价	0.7(较差)	0.5(较好)	0.5(较好)
地质背景	0.9(差)	0.9(差)	0.9(差)
恢复治理难易程度	0.9(差)	0.9(差)	0.9(差)

综合评价时通过层次分析法对综合评价的四个指标进行权值计算，计算结果如表 11 所示。

表 11 综合评价指标权值

综合评价指标	权值
现状评价	0.400
预测评价	0.337
地质背景	0.165
恢复治理难易程度	0.098

经过模糊综合评价得到多个矿山的综合评价隶属度、分值及等级排序(表 12)。

表 12 模糊数学多层次评判综合评价(多矿)

矿山	一矿		二矿		三矿	
	隶属度	分值	隶属度	分值	隶属度	分值
好(0.3)	0	0	0	0	0	0
较好(0.5)	0.400	0.200	0.337	0.168	0.737	0.369
较差(0.7)	0.337	0.236	0.400	0.280	0	0
差(0.9)	0.263	0.236	0.263	0.236	0.257	0.263
分值求和	0.672		0.685		0.605	
等级(排序)	2(较好)		3(较差)		1(较好)	

模糊数学综合评价结果显示：一、二、三矿的地质环境质量等级分别为好、较差、较差，符合实际资料评价结果。

6 结论

(1) 建立了矿山地质环境质量评价体系,运用客观权值和主观权值有机结合所得到的综合权值作为评价过程中的最终权值,确定了评价体系中指标及要素的权重值获取方法。

(2) 建立了适合多个矿山和单个矿山的定量(半定量)矿山地质环境质量评价模型。

(3) 通过对生产矿山的现状、预测及综合评价,得到与矿山实际情况比较相符的评价结果,充分验证了地质环境质量评价模型的合理性。

参考文献:

[1] 高培. 基于 GIS 和 RS 的葫芦岛矿山地质环境综合评价研究

[D]. 北京:中国地质大学(北京),2009.

[2] 魏迎春,许友宁. 矿山地质环境量化评价模型研究[J]. 华南地质与矿产,2004(4):47-50.

[3] 郑国明,梁合诚,龙翔,等. 浅析矿山地质环境综合评价[J]. 安全与环境工程,2009,16(5):42-44.

[4] 徐友宁,袁汉春,何芳,等. 矿山环境地质问题综合评价指标体系[J]. 地质通报,2003,22(10):829-832.

[5] 杨毅. 神木县矿山地质环境影响评价研究[D]. 西安:西安科技大学,2008.

[6] 徐友宁,何芳,袁汉春,等. 中国西北地区矿山环境地质问题调查与评价[M]. 北京:地质出版社,2006.

[7] 刘志斌,钟爽. 基于灰色局势决策分析的地下水环境质量评价[J]. 辽宁工程技术大学学报,2005,24(1):129-131.

[8] 周爱国,周建伟,梁合成,等. 地质环境评价[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2006.

[9] 中国地质调查局. DD2004.1-02 区域环境地质调查总则(试行)[S]. 2004.

[10] 四川省地质环境监测总站. 典型矿山地质环境调查资料[R]. 成都:四川省地质环境监测总站,2005.

Overview on Mathematical Model for Mine Geological Environment Quality Evaluation

Liu Jintao¹, Feng Wenkai¹ and Xu Liang²

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geo-environment Protection (Chengdu University of Technology), Chengdu 610059, China; 2. Sichuan Geological Circumstance Inspect Center, Chengdu 610081, China)

Abstract: On the basis of a large number of documents and typical mine geology survey data, reasonable evaluation factors are selected and evaluation index system is established by research on the consequences (resource damage, geologic disasters, environmental pollution) resulted from mine geological environment problems. Different evaluation methods are used to establish mathematical model for mine geological environment quality evaluation through the status evaluation, forecast evaluation and comprehensive evaluation. These methods are applied to real mine geological environment quality evaluation and good consistency is got.

Key words: mine; geological environment quality; evaluation index; evaluation model

《灾害学》杂志征订启事

作为中国科技核心期刊和中国科学引文数据库(CSCD)源刊及 RCCSE 中国权威学术期刊的《灾害学》杂志是在知名学者和社会名流(钱学森、于光远等)的关注下、把灾害问题作为一门科学在我国最早(1986年)创办的科技期刊。《灾害学》杂志旨在对各种灾害(自然灾害和人文灾害)进行综合系统地探讨研究;通过对各种灾害事件的分析讨论,总结经验,吸取教训;广泛交流灾害科学的学术思想、研究方法、研究成果;报导国内外关于灾害问题的研究动态和防灾抗灾对策;揭示和探索各种灾害发生演化的客观规律;目的是提高人类抗御灾害的科技水平和能力,最大限度地减少灾害损失。

2012年《灾害学》杂志仍为季刊,每季初月20日出版,80克胶印纸印刷,大16开,144个页码,彩色插图,国内统一刊号:CN 61-1097/P。

《灾害学》杂志2012年定价每期为25元,全年100元(含邮费)。另外,编辑部还存有少量1988-1990年、1994-2011年的精装合订本,每册定价120元。

《灾害学》杂志编辑部热忱欢迎广大读者和作者订阅本刊。订阅方式有:

(1)通过邮局直接汇款至编辑部,即:西安市边家村水文巷4号《灾害学》编辑部,邮编:710068。

(2)通过银行转帐,单位:灾害学杂志编辑部;帐号:3700023109014486285;开户行:工行西安市含光路支行。

(3)也可通过全国非邮发报刊联合征订服务部征订。地址:天津市大寺泉集北里别墅17号;代号:9875;邮编:300385。