

·技术方法·

# 专家辅助找矿系统中模糊综合评判(FCA)模型的软件实现及应用

——以云南会泽铅锌矿隐伏矿预测为例

邹海俊<sup>1</sup>, 韩润生<sup>1</sup>, 方维萱<sup>1</sup>, 刘名龙<sup>1</sup>, 党立春<sup>2</sup>

ZOU Hai-jun<sup>1</sup>, HAN Run-sheng<sup>1</sup>, FANG Wei-xuan<sup>1</sup>, LIU Ming-long<sup>1</sup>, DANG Li-chun<sup>2</sup>

1. 昆明理工大学国土资源工程学院、有色金属矿产地地质调查中心西南地质调查所, 云南 昆明 650093;

2. 贵州晴隆锑矿, 贵州 晴隆 561409

1. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093; Southwest Geological Survey, China Nonferrous Metals Geological Survey, Kunming 650093, Yunnan, China;

2. Guizhou Qinglong Antimony Mine, Qinglong 561409, Guizhou, China

**摘要:**模糊综合评判(FCA)模型是应用模糊数学的理论与方法,通过综合评判多个控制因素的权重,对某一事件进行评价的数学模型。以云南会泽铅锌矿为例,选择了地层、构造、岩性控矿因素为模糊评价因素集,建立了FCA模型,编制了计算机程序进行软件实现。对构造地球化学数据进行了评判试验,实现隐伏矿预测。研究结果表明,由多因素决定的矿化异常与实际工程验证结果吻合。FCA模型可用于评价地质、生态、环境、气象、农业、经济等多个领域中由多个因素控制的事件,具有普遍意义。

**关键词:**模糊综合评判(FCA);模糊数学理论;隐伏矿预测;构造地球化学;会泽铅锌矿;云南

**中图分类号:**P61;P62 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-2552(2006)04-0521-07

Zou H J, Han R S, Liu M L, Dang L C. Software realization and application of the Fuzzy Comprehensive Adjudgment (FCA) model in the expert-assisted mineral exploration system: A case study of the prognosis of concealed orebodies in the Huize Pb-Zn deposit, Yunnan, China. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25(04): 521-527

**Abstract:** The Fuzzy Comprehensive Adjudgment (FCA) model is a mathematical model that is designed to evaluate a particular event by using the theory and methods of fuzzy mathematics and through a comprehensive adjudgment of weights of several controlling factors. Take the Huize Pb-Zn deposit for example, ore-controlling strata, structures and lithologies are selected as the fuzzy evaluation factor set to construct a FCA model, and its software realization is done through the computer programming. Based on experiments of adjudging the tectono-geochemical data, the prognosis of concealed orebodies has been made. The results show that the mineralization anomalies controlled by multiple factors are in accord with what drilling has revealed. The FCA model has common significance, and it can be used to evaluate events controlled by multiple factors in fields of geology, ecology, environment, meteorology, agriculture and economy.

**Key words:** Fuzzy Comprehensive Adjudgment (FCA); fuzzy mathematics; prognosis of concealed orebody; tectono-geochemistry; Huize Pb-Zn deposit; Yunnan

收稿日期:2005-05-16;修订日期:2005-08-19

基金项目:云南省中青年学术和技术带头人培养基金(云南省自然科学基金, No.99D0003G)、新世纪优秀人才支持计划(NCET-04-917)和云南省省院省校合作项目(No.2002UBBEA05B004, 2000YK-04)联合资助。

作者简介:邹海俊(1979-),男,在读博士,从事构造地球化学方向的研究。E-mail:zouhaijunlmq@yahoo.com.cn

成矿系统<sup>[1,2]</sup>是一个非常复杂的动力学系统,是由相互作用和相互依存的若干部分(要素)结合成的有机整体,成矿是很多因素综合作用的结果。由于地质过程的复杂性使地质找矿难度增大,必须综合各种地质因素,并对其进行分析和整合,逐步建立起多种因素的找矿模式。神经网络理论和模糊数学可将各种离散的地质因素综合起来,广泛应用于油气煤炭<sup>[3]</sup>、工程测量、地球物理<sup>[4]</sup>、地质灾害<sup>[5-6]</sup>、水文地质和工程地质<sup>[7,8]</sup>、岩石矿物<sup>[9,10]</sup>、矿产预测<sup>[11,12]</sup>等领域。以模糊数学为基础的模糊综合评判可以将定量指标与定性指标同时考虑进行综合评价,评价工作量大、准确性高、实用性强,具有科学性、先进性、便于操作等优点<sup>[13]</sup>,结合成矿的有利度,进行隐伏矿定位预测,值得探讨其在找矿方面的普适性。自20世纪70年代起,国内外许多学者已经将计算机技术引入到地质找矿领域,建立起专家辅助找矿系统<sup>[14]</sup>。在用模糊综合评判方法分析构造地球化学数据并进行隐伏矿预测方面,采用FCA尚属初步尝试。模糊综合评判(Fuzzy Comprehensive Adjudgement-FCA)模型是在云南会泽铅锌矿区隐伏矿预测中建立起来的专家辅助找矿系统<sup>[15]</sup>中的找矿模型,它是应用模糊数学的理论与方法,通过综合评判多个控制因素的权重,对某一事件进行评价的数学模型。

## 1 云南会泽铅锌矿矿床地质概况

会泽铅锌矿区(图1)<sup>[16]</sup>是中国著名的铅锌产地之一,位于扬子地块西南缘的滇东北拗陷盆地中,处于小江深断裂带

与昭通—曲靖隐伏深断裂带之间NE向构造带、SN向构造带和NW向构造带的复合部位<sup>[3]</sup>,具优越的成矿构造地质背景。

矿区地层由前震旦系组成基底,其上由上震旦统、古生界组成盖层,构成“两层式结构”<sup>[16]</sup>。下石炭统摆佐组( $C_1b$ )是矿区最主要的赋矿地层,其次是上泥盆统宰割组( $D_3zg$ )。矿区代表性的断裂构造有矿山厂、麒麟厂、银厂坡NE向断裂,与成矿密切相关。岩石类型主要为晚二叠世末峨眉山玄武岩。铅锌矿体多呈脉状、透镜状、囊状、扁柱状、网脉状、“似层”状等<sup>[19,20]</sup>。常见矿体骤然尖灭或膨缩等现象。矿体仅分布于摆佐组中—上部层位,与围岩接触界线明显。矿石主要呈致密块状,品位高( $Pb+Zn=30\%\sim35\%$ )。富集Fe、Ag及分散元素(Ge、In、Cd、Ti、Ga、Tl等)。围岩蚀变简单,除白云岩化较广泛外,硅化、黄铁矿化、碳酸盐化等热液蚀变分布局限。

会泽铅锌矿床明显受地层、构造、岩性等条件的控制<sup>[17-21]</sup>,因此在会泽铅锌矿采用构造地球化学研究具有充分的理论依据,对构造地球化学样品的分析数据用FCA预测模型进行处理,其结果能直观地反映矿化元素的组合异常,是直接的重要找矿标志。

## 2 模糊综合评判(FCA)模型的建立过程

许多学者采用模糊综合评判的方法评价具有多个因素的地质事件。孙洪泉等<sup>[22]</sup>用该方法确定了构造类型的定量指标,并给出了计算实例;王志宏等<sup>[23]</sup>也建立了模糊综合评价模型,评价应用于实例中;刘为付等<sup>[24]</sup>利用模糊数学综合评判评

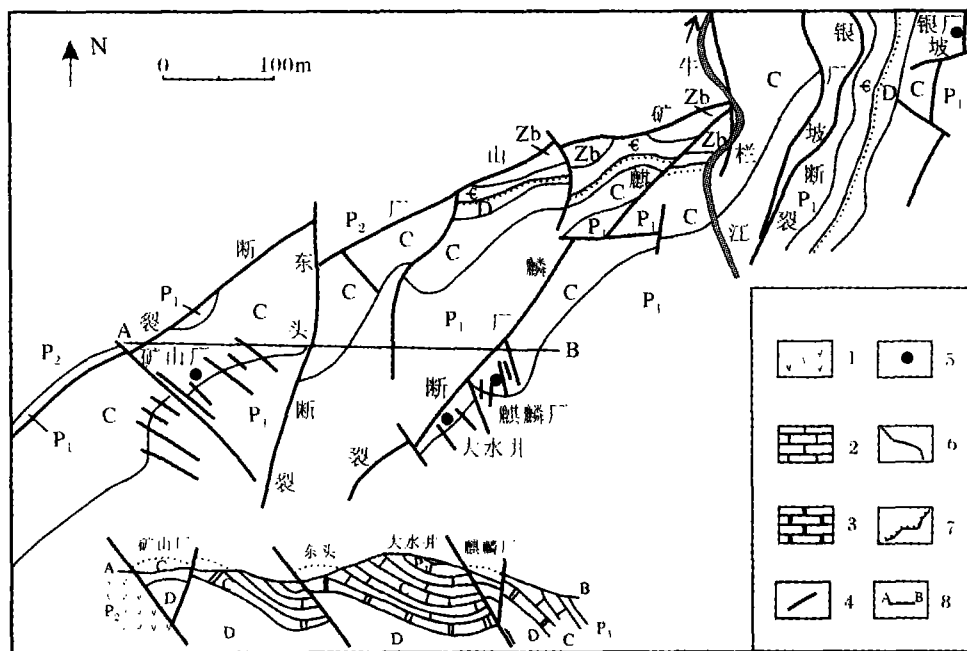


图1 会泽银铅锌矿区地质简图

Fig.1 Geological sketch map of the Huize Pb-Zn deposit

Zb—震旦系;ε—寒武系;D—泥盆系;C—石炭系;P<sub>1</sub>—下二叠统;P<sub>2</sub>—上二叠统;1—玄武岩;2—灰岩;  
3—白云岩;4—断裂;5—矿床;6—地层界线;7—假整合线;8—剖面线

价了火山岩储层。模糊综合评判模型的建立总体来说有4个步骤:确定评价因素集和评语集→构造评价矩阵→确定评价因素的权重→综合评价。本文根据会泽铅锌矿床的成矿地质条件,拟定了FCA模型建立过程的6个步骤(图2)。

(1)确定评价因素集:选择模糊评价因素集为 $FCAFS=\{\text{断裂}F, \text{地层}S, F_{\text{SCORE}}\}$ ,设评价集为 $FCAS=\{\text{矿化好}MG, \text{矿化一般}MC, \text{无矿化}NM\}$ 。

(2)构造评价矩阵:对于用构造地球化学方法填制的地质图,用MapGIS和Morpas进行网格化处理,其每个单元格的评价矩阵为

$$GSSM = FCAFS' \times FCAS = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$$

其中,3列分别代表矿化好、矿化一般和无矿化评判值。

(3)确定评价因素的权重:据专家经验给出地层、构造、岩性3个主因素的综合权重 $W=(b_1, b_2, b_3)$ ;也可利用贴近度法对专家给出的经验权重进行拟合运算而得出权重<sup>[7]</sup>。

(4)综合评价:计算综合评判矩阵 $CA=GSSM \times W'$ ,得到一个 $n \times 1$ 的矩阵。其中, $n$ 为单元格总数, $CA$ 的列就是所有单元格的模糊综合评判得分。

(5)构建成图矩阵:将矩阵 $CA$ 的列数值 $CA_{n1}$ 和网格单元的坐标 $(X, Y)$ 组成矩阵 $(X, Y, CA_{n1})$ 。

(6)成矿预测:用MapGIS对矩阵 $(X, Y, CA_{n1})$ 做出模糊综合评判异常图,据此进行隐伏矿预测。

### 3 用FCA模型进行隐伏矿预测的软件实现

根据以上过程,利用中国地质大学的地理信息系统软件MapGIS和矿产“金属矿产资源评价分析系统(MORPAS)”对构造地球化学方法填制的地质图进行网格化处理;用数理统计分析软件Statistics对构造地球化学数据进行因子分析<sup>[29]</sup>,得到矿化因子组合及其得分值。用C语言编写FCA模型的计算程序,并做成FCA软件直接实现FCA的计算过程。FCA模型进行隐伏矿预测的软件实现流程见图3。

(1)用STATISTICS分析原始数据,得出每个采样点的矿化因子及其得分值。

(2)在MapGIS中导入点文件,处理后导出点的MapGIS明码格式(\*.dat),并用写字板打开,得到每个采样点的坐标 $(X, Y)$ 。

(3)用Excel将矿化因子得分值作为 $Z$ 坐标与采样点坐标 $(X, Y)$ 连成3列,并存储为\*.dat文件。

(4)用MapGIS对这个\*.dat文件数据网格化,得到\*.grd格式文件。

(5)用MorPas对包含采样点的工程图进行网格化(网格间距同MapGIS网格化

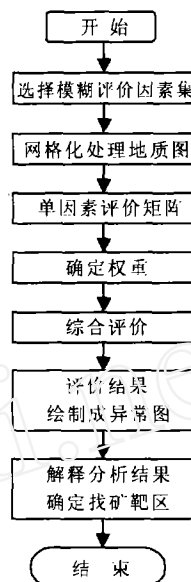


图2 FCA模型建立流程

Fig.2 Flow chart of the construction of the FCA model

间距),注意将MorPas网格图框往外推半格。

(6)将\*.grd文件数据导入MorPas中,并修改网格的属性结构,人工添加网格属性 $(NEF, NWF, C, b, D, zg)$ 。

(7)在MorPas中导出每个网格单元的评判属性值(以HD、2D文件格式存储)。

(8)用写字板(或Excel)打开\*.2D文件,并将其中代表因子得分值的一系列数据另存为文件1\*.txt(或文件1\*.dat),代表 $NEF, NWF, C, b, D, zg$ 值的4列数据另存为文件2\*.txt(或文件2\*.dat)。

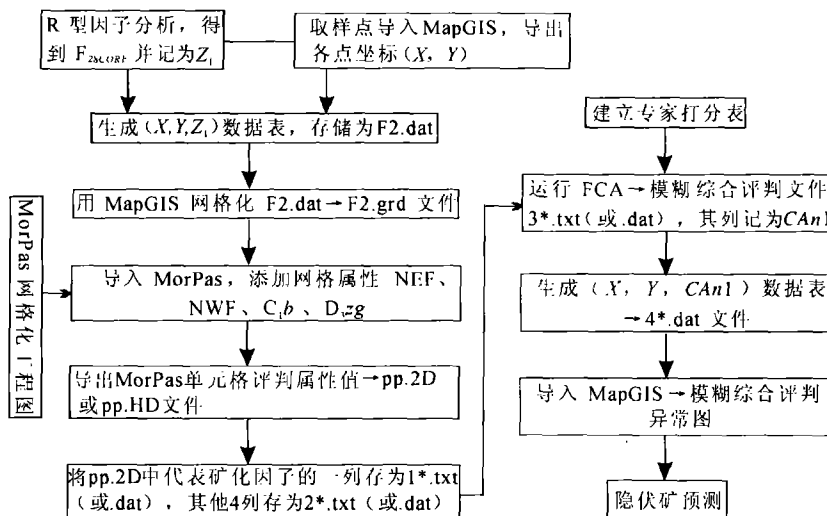


图3 FCA模型隐伏矿预测流程

Fig.3 Flow chart of prognosis of concealed ore deposits with the FCA model



(9)按照FCA模型的建立过程,用 Turbo C语言编制模糊综合评判计算程序(FCA源程序略);运行FCA程序,得到模糊综合评判值(一列),存为文本文件3\*.txt(或文件3\*.dat)。

(10)用Excel计算经MapGIS网格化的网格各个格点的坐标XY,并将其与文件3\*.txt数据连成3列,另存为4\*.dat格式文件。

(11)在MapGIS中,用4\*.dat文件数据绘制异常平面图和立体图,将作出的图件提交给专家,进行隐伏矿的预测。

4 FCA模型在云南会泽铅锌矿隐伏矿预测中的应用

采用FCA模型对会泽铅锌矿区1631中段的构造地球化学样品分析数据进行模糊综合评判,经过多次评判试验,最终确定在权重为 $(f_0, strata, fault)=(0.4, 0.1, 0.5)$ 时预测效果佳,得出模糊评判矩阵CA(表1),并做出模糊综合评判异常平面图和异常立体图(图4、图5)。根据异常图和专家建议确定有利矿化区,进行了隐伏矿预测。从图上可看出,由多因素决定的矿化异常与实际工程验证结果吻合,进一步说明通过FCA模型确定找矿靶区是可信的。

5 结 论

通过FCA模型的建立及其在会泽铅锌矿隐伏矿定位预测中的应用,可得出以下结论。

表1 会泽铅锌矿深部1631m中段FCA矩阵CA  
Table 1 FCA array: CA of the deep 1631 level  
in the Huize Pb-Zn deposit

X	Y	CAn1	X	Y	CAn1	X	Y	CAn1
395.165	31.703	0.048	490.216	114.030	0.189	861.126	-92.631	0.569
393.302	29.293	0.014	394.461	-3.601	0.233	846.409	-84.865	0.057
379.383	14.310	0.355	343.878	12.548	0.413	819.024	-66.055	0.109
342.551	207.195	0.348	290.958	32.392	0.534	801.922	-54.385	0.416
320.913	187.296	0.224	269.149	36.816	0.009	791.116	-39.502	0.430
302.376	162.778	0.241	751.353	71.040	0.484	773.194	-26.426	0.644
284.921	138.362	0.376	641.931	35.978	0.213	792.206	-7.299	0.096
271.615	119.271	0.930	617.045	92.771	0.522	332.382	199.788	0.639
267.663	112.804	0.952	602.096	24.875	0.058	279.446	131.088	0.930
258.411	97.855	0.820	584.874	89.194	0.545	296.170	210.620	0.778
238.670	68.550	0.471	563.964	101.634	0.180	288.088	222.283	0.818
225.843	49.310	0.318	725.867	48.988	0.469	253.805	219.042	0.338
356.249	184.785	0.009	715.106	18.896	0.145	215.031	222.629	0.427
372.017	176.987	0.216	748.610	19.317	0.651	210.301	214.773	0.716
398.567	160.844	0.029	761.985	13.551	0.552	206.551	204.338	0.608
672.744	80.663	0.408	789.811	9.031	0.293	188.978	175.644	0.501
404.907	137.670	0.114	823.268	-11.071	0.030	182.176	155.321	0.941
419.673	116.827	0.409	851.771	-37.102	0.292	178.177	148.348	0.919
423.454	143.327	0.529	884.731	-65.294	0.075	172.250	136.146	0.963
447.152	115.472	0.292	887.369	-93.392	0.388	426.544	82.062	0.287
471.068	93.111	0.136	874.616	-127.242	0.235	420.962	73.844	0.048
465.358	79.969	0.281						

(1)由于成矿过程的复杂性,采用模糊数学理论与方法,综合各种成矿有利地质因素,值得探讨其普适性。

(2)联合Statistics、MapGIS、Morpas等计算机软件对构造地球化学地质图和数据进行处理是有效的方法之一。

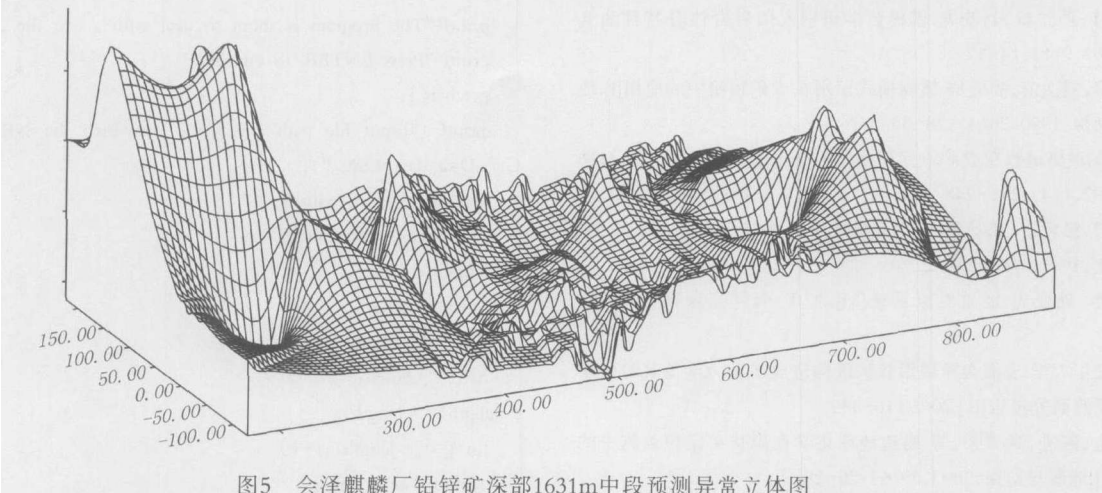


图5 会泽麒麟厂铅锌矿深部1631m中段预测异常立体图

Fig. 5. Block diagram showing the prognostic anomaly in the deep 1631 level in the Qilinchang Pb-Zn deposit, Huize

(3)利用FCA模型处理的数据作出的模糊综合评判异常图,结合专家经验进行隐伏矿定位预测,可取得较好的效果。

FCA模型以会泽铅锌矿区长期勘探实践所证实的成矿规律和构造地球化学样品分析数据为依据,融合模糊数学、神经网络、多元数理统计等方法,对隐伏矿找矿的多元信息进行处理与数据挖掘,进行隐伏矿找矿预测模型的研究和探索,为实现矿床深部及外围的定位预测提供准确高效的数据处理方法和辅助决策工具。因此,FCA模型的普适性对由多因素控制的预测事件有实际效果,可用于地质、生态、环境、气象、农业、经济等多个领域中。结合耗散结构理论中的自组织过程<sup>[20]</sup>,将考虑更多的相关因素,让模型更加完备和深入。

#### 参考文献:

- [1]於崇文,岑况,鲍征宇,等.成矿作用动力学[M].北京:地质出版社,1998.1-23.
- [2]翟裕生.论成矿系统[J].地学前缘,1999,6(1):13-27.
- [3]胡宝林,杨起,刘大猛.鄂尔多斯盆地煤层气资源多层次模糊综合评价[J].中国煤田地质,2003,15(2):16-19.
- [4]韩自豪,廖鸿文,付成修.模糊数学在常规电法中的应用[J].中国煤田地质,1998,10(4):84-85.
- [5]陈情来.模糊综合评判地质灾害的危险性[J].油气储运,2000,19(5):38-43.
- [6]姚春梅,刘洪亮.模糊数学综合评判法在矿山地质灾害危害程度评价中的应用[J].中国地质灾害与防治学报,1998,19(3):48-53.
- [7]伊藤秀美著.潘元振译.地震预报与模糊数学[J].模糊动态(日本),1993,(1):315-317.
- [8]徐建芳,武强,王欣宝.河北省太行山泥石流分布规律及其危险程度评价[J].勘察科学技术,2003,(3):18-22.
- [9]王文科,李俊亭.关于地下水动态类型的一个FUZZY数学判别方法[J].西安地质学院学报,1991,(增刊13):76-83.
- [10]韩银富,杨林.运用模糊数学综合评判法评价宝应县地下水质量[J].地质灾害与环境,2000,11(1):17-20.
- [11]王建峰.软岩的Fuzzy综合评判分类[J].矿山地质,1989,(3):46-50.
- [12]刘为付,孙立新,刘双龙.模糊数学识别火山岩岩性[J].特种油气藏,2002,9(1):14-17.
- [13]王硕儒,刘文滨,姜效典.模糊模式识别在成矿预测中的应用[J].地质与勘探,1990,26(4):28-33.
- [14]魏俊浩.隶属函数在成矿单元预测中的应用[J].有色金属矿产与勘查,1992,1(4):245-248.
- [15]王志宏,彭世济,张达贤.矿产资源地质条件综合评价方法[J].中国矿业,1995,4(4):20-22.
- [16]刘承祚,陈亚光.地质专家系统[M].北京:海洋出版社,1991.1-245.
- [17]昆明理工大学.云南会泽银铅锌矿区构造动力学及其隐伏矿定位预测研究报告[R].2003.116-142.
- [18]韩润生,陈进,高德荣,等.构造地球化学在隐伏矿定位预测中的应用[J].地质与勘探,2003,39(6):25-28.
- [19]陈进,韩润生,高德荣,等.云南会泽铅锌矿床地质特征及找矿方法模式[J].地质地球化学,2001,29(3):124-129.
- [20]韩润生,刘丛强,黄智龙,等.云南会泽铅锌矿床构造控矿及断裂构造岩稀土元素组成特征[J].矿物岩石,2000,20(4):11-18.
- [21]韩润生,陈进,李元,等.云南会泽铅锌矿构造控矿规律及隐伏矿预测[J].矿物学报,2001,21(2):265-269.
- [22]韩润生,陈进,李元,等.云南会泽麒麟厂铅锌矿床八号矿体的发现[J].地质地球化学,2001,29(3):191-195.
- [23]孙洪泉,王健.构造地质研究中的数学地质方法综述[J].矿业世界,1996,4:7-10.
- [24]刘为付,旷红伟.利用模糊数学综合评价火山岩储层[J].油气地质与采收率,2003,10(2):9-13.
- [25]邹海俊,韩润生,胡彬.云南昭通毛坪铅锌矿成矿物质来源的新证据[J].地质与勘探,2004,(5):43-43.
- [26]孙岩,徐士进,刘德良,等.断裂构造地球化学导论[M].北京:科学出版社,1998.1-161.

#### 附:部分源程序

```
# include "stdio.h"
# include "malloc.h"
# include "string.h"
# define LEN sizeof(TAB)
# define NULL 0

typedef struct table
{
    struct table *next;
    char data1;
    char attrbe[10];
}TAB;

extern float moren[12][3]={0},Rn[3][3]={0},w[3]={0.6,0.3,0.1};
extern int addr=0,hch=0,fzi=0,l=0;
char *count="0";

main()
{
    int i=0,j=0,lf=0,m=0,*length=0,length1=0,hch1=0,*huich=0,t=0;
    char g,*c1=0,*c2=0,*name=0,*name1=0,*temp="0";
    FILE *fq;
    printf("The program is about to deal with a text file...\n");
    printf("Press ENTER to continue! ");
    getchar();
    printf("Input file path and name in which the NEF-NWF-Cib-Dzg data exist...");
    gets(name);puts(name);
    c1=(char *)malloc(LEN);
    length=&addr;
    huich=&hch;
    openfile(c1,name,length,huich);
    hch1=*huich;
    length1=*length;
    for(i=0;i<length1;i++)
    {
        printf("%c",c1[i]);
    }
    printf("The next mission is about to deal with a text file which
```

```

has the f2score data.\n");
printf("Press ENTER to continue! ");
getchar();
printf("Input file path and name in which the f2score data ex-
ist...\n");
gets(name);puts(name);
c2=(char *)malloc(LEN);
openfile(c2,name,length);
for(i=0;i<length1;i++)
printf("%c",c2[i]);
printf("input a file name and path for writing... ");
gets(name1);puts(name1);
remove(name1);
if((fq=fopen(name1,"w+"))==NULL)
{printf("can't open out-file\n");
getchar();getchar();
exit(1);}
printf("\nIf you want to rebuild the valuing table, please input
the scores for each factor! ");
printf("\nRebuilding...y/n? ");
g=getchar();
valtable(moren,g);
creatW();
temp=(char *)malloc(LEN);
for(i=0;i<hch1;i++)
{lf*=i;
nncd(c1,lf);
f2deal(c2,length);
lf=8;
printf(" nncd again");
getchar();
for(m=0;m<3;m++)
printf("\tRn=%f\t%f\t%f",Rn[m][0],Rn[m][1],Rn[m][2]);
getchar();
creatBi();
printf("l main=%d",l);
for(j=0;j<l+1;j++,t++)
{
temp[t]=count[j];
printf("%c",temp[t]);
}
temp[t]=10;temp[t+1]='\0';
printf("Write file!\n");
for(j=0;j<t;j++)
printf("temp=%c",temp[j]);

for(j=0;j<t;j++)
{putc(temp[j],fq);
if(ferror(fq))
{printf("write file error\n");
getchar();getchar();
exit(0);
}
fclose(fq);
printf("write file over! OK\n");
printf("\nmain OK\nThank you for your using of this pro-
gram! ");
getchar();getchar();
openfile(c,name,length,huch)
{}
nncd(c,lf) /* To open the NEF-NWF- C,b-D,g data
and build the database. */
{}
extern float fault[3]={0},strata[3]={0},nef[3]={0},nwf[3]={0},C,b
[3]={0},D,g[3]={0};
{}
valtable(moren,g) /* To creat the valuing array for every factor.
*/
{}
morenb(recieve,l) /* search the moren table for the FCAS */
{}
outarray(out,m) /* build the 2 and 3 lines of GSSM(the
single factor valuing array of every
{}
f2deal(c2) /* To deal f2score file. */
{}
txt_num(char *b) /* This function is about to turn the text
f2score data into number data. */
{}
f2search(c)
{}
creatRi()
{}
creatW()
{}
creatBi()
{}
num_txt(c,count) /* To turn Bi [o](well-mineralized)
score into text format. */
{}
int mult(t) {}

```