

个旧地区区域地球化学环境的系统评价

周余国^{1,2}, 高启芝^{2,3}, 刘继顺⁴, 马慧英⁴, 黄元有⁵

(1. 云南大学 资源环境与地球科学学院, 云南 昆明 650091; 2. 云南吉赛矿业有限公司, 云南 昆明 650200; 3. 云南省地质矿产勘查开发局 物化探队, 云南 昆明 652100; 4. 中南大学 地学与环境工程学院, 湖南 长沙 410083; 5. 云南省地质调查局 物化探所, 云南 昆明 652100)

摘要:以云南个旧地区区域地球化学资料为基础, 结合医学地质学、农业地质学和环境地质学的研究成果, 对个旧地区区域地球化学环境进行了深入的讨论, 引入并运用 FCA 模糊综合评价对个旧地区区域地球化学环境进行了系统评价, 得出了个旧地区 630 km² 范围内区域人居地球化学环境污染严重的结论, 其原因既有第一环境的先天不足, 也有第二环境的后天人为污染, 应引起足够的重视。

关键词:区域地球化学; 环境地球化学; 元素容许值; 污染分级; FCA; 云南个旧

中图分类号: P632 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2009)06-0620-06

个旧地处滇中湖盆高原南部, 属山地丘陵地区, 经济欠发达。最高为莲花山, 东距个旧约 10 km, 海拔为 2 740 m, 最低处为红河边的蔓耗镇, 东南距个旧约 40 km, 海拔仅 150 m, 属南亚热带季风气候, 年均气温 15.8 ℃。有锡、铅、锌、铜、金等多种矿产, 锡储量居全国首位, 是我国著名的锡都, 有着数百年的采矿史。解放以来, 特别是改革开放以来, 以锡为主的锡多金属采选冶业都得到了飞速的发展。矿业经济发展的同时, 环境污染问题也日趋显现, 主要表现在三个方面: ①土壤重金属污染、水土流失加剧; ②地面水污染严重、洪水灾害频繁; ③放射性污染严重、地方病盛行^[1]。其结果是以生物的变异(包括病变)或物种消失为代价。早在 20 世纪 60 年代, 个旧市矿工突出的矽肺病问题就引起了周总理的关注, 并抽调国内权威专家成立了劳动防护研究机构。一直以来, 环境地质工作者和当地政府对个旧地区环境污染问题开展了大量的科研调查和评价工作。云南地矿局甘懋金、陈阳玉等, 1990 年利用 1: 20 万区域地球化学资料, 对个旧南部卡房一老厂地区 900 km² 的 Hg、Pb、Cd、As、F、U、Cu、Zn、Mn、Ag、P 进行了初步环境评价^[2-3]; 个旧市环保局近几年先后开展了大气、水、酸雨、噪声等专项研究和鸡街地区区域环境综合研究、个旧市经济与环境协调发展规划研究^[4]; 云南大学谈树成、赵筱青和昆明理工大学薛传东等, 于 1997~2000 年在个旧市城区周边 30 km² 开展了土壤污染调查、以个旧湖流域为重点

的污染洪灾调查、放射性污染调查^[1,5-6]; 中南大学周余国、刘继顺和云南地矿局物化探队高启芝等, 于 2006 年利用区划资料研究了个旧地区的区域性污染问题^[7]。

然而上述研究都未提及一个重要问题——如何系统评价多元素污染的问题, 即解决孰重孰轻, 总体污染情况如何评价的问题。

笔者利用云南省地矿局区域地质调查队和云南地矿局第二地质队开展的 1: 20 万金平幅、河口幅、个旧幅区域地球化学测量资料, 选取主要的污染元素数据进行分析, 同时通过引入和应用 FCA 模糊综合评价方法, 对个旧地区区域地球化学环境污染的状况进行系统评价, 以期能够对个旧地区的环境状况作出较为科学合理的解释。

1 样品采集与分析方法

区域地球化学样品大都采自一级水系, 样品实际控制面积绝大多数都小于 1 km², 样品每 4 个单样组合成一个组合样送国内地矿部门权威化验室分析, 并有一级标样(国家级)和二级标样(省级)监控分析质量, 分析成果接近元素在自然界的真实含量, 常量元素检出限为 10⁻² 量级, 微量元素量级为 10⁻⁶, 个别元素的量级为 10⁻⁹, 可以满足找矿及科研工作量的要求。

个旧地区区域地球化学环境评价, 即以个旧地区区域地球化学资料为基础结合医学地质学、农业

地质学和环境地质学的研究成果,用区域地球化学环境污染的观点来重新认识区域地球化学异常。

2 主污染元素的选取

1979 年,在全国范围内系统地实施了区域地球化学扫面计划(RGNR),目前已覆盖了中国国土面积的 2/3,获得了海量的原始分析数据^[7-9],发现各类区化异常 42 880 个^[10],其主旨是为矿产勘查提供基础的区域性地球化学资料。RGNR 分析的 39 个元素大部分与人体和生物活动密切相关,所发现的各类区化异常(正异常)和微量元素亏损区(负异常),不仅可服务于矿产勘查,也可用于评价地球化学环境。童霆等从 1980 年就开始利用这套资料研究环境问题;谢学锦等于 1990 年起开展了用超低密度泛滥平原沉积物采样,来进行全国环境地球化学监控网络的试验;李家熙等利用化探扫面资料进行微量元素分布与地方病关系的研究^[11];周余国等于 2006 年利用化探扫面资料研究人居环境问题^[7]。

根据元素的生物地球化学分类^[7],对个旧地区区域地球化学资料进行系统研究,表明该区不存在 Cr、Ni、Co 等基性幔源特征元素的污染,超低温毒性元素 Hg 主要表现为轻微零星污染,故从所分析的 39 个元素中选取毒性元素 As、Cd、Pb、F 和潜在毒性元素 U、Th 以及人体必需微量元素 Cu、Zn、Sn 等 9 个元素作为个旧地区的主污染元素。

3 主污染元素容许上限值及污染分级标准

我国于上世纪中期开展土壤元素背景值研究,1982 和 1986 年该研究两次列为“六五”、“七五”重点科技攻关课题。分析元素 60 余个,出版了《环境

表 1 土壤环境质量标准 10⁻⁶

级别		二级				三级
土壤 pH 值		自然背景	<6.5	6.6~7.5	>7.5	>6.5
Cd		0.2	0.30	0.60	1.0	
Hg		0.15	0.30	0.50	1.0	1.5
As	水田	0.5	30	25	20	30
	旱地	0.5	40	30	25	40
Cu	农田等	35	50	100	100	400
	果园	-	150	200	200	400
Pb		35	250	300	350	500
Cr	水田	90	250	300	350	400
	旱地	90	150	200	250	300
Zn		100	200	250	300	500
Ni		40	40	50	60	200

注:①本表略有删节;②重金属(铬主要是三价)和砷均按元素量计,适用于阳离子(一价)交换量>5 cmol/kg 的土壤,若≤5 cmol/kg,其标准值为表内数值的半数;③水旱轮作地的土壤环境质量标准采用水田值,铬采用旱地值。

背景值数据手册》^[12]、《中国土壤元素背景值》^[13]等专著,在此基础上我国制定了 GB15618-1995《土壤质量标准》^[14](表 1)。

岩石、土壤和水系沉积物是一个逐渐变化的系统。对于绝大多数区化样品来说,一个样品实际控制面积都小于 1 km²,可认为:两种介质元素含量应在同一水平。水系沉积物样品因其综合性更具代表性,更能反映研究区污染的全貌,运用区域地球化学资料开展区域地球化学环境评价具有普遍适用性^[7]。

由表 1 可知,污染分级标准并不是按简单的倍数、指数或等差关系划分。为简便起见,可以认为,一、二、三类土壤大致相当于无污染、轻、中度污染土壤,重度污染土壤分级标准再翻一倍,并在表 1 基础上将水田、农田、旱地和果园作适当归并,轻度污染土壤以 pH 值小于 6.5 之取值为参考,中度污染土壤以 pH 值大于 6.5 之取值为参考,对无标准可参考的 F、U、Th、Sn 等污染元素,以元素在土壤中的 5 倍丰度^[15]为无污染土壤之元素容许(上限)值,轻中污染之上限酌情给出。据此确定的主污染元素容许(上限)值及分级标准见表 2。

表 2 个旧地区水系沉积物主污染元素容许上限值 10⁻⁶

污染元素	土壤丰度	污染分级			
		无污染	轻污染	中污染	重污染
As	5	25	60	150	
Cd	0.5	0.4	1.0	2.5	
Pb	10	250	500	1000	
F	200	1000	2000	3000	
U	1	5	10	20	
Th	6	30	60	100	
Cu	20	100	500	1000	
Zn	50	250	500	1000	
Sn	10	50	100	200	

4 水系沉积物元素污染特征

根据表 2 所确定的分级标准,可以认定个旧地区千余平方公里范围内存在不同元素不同程度的污

表 3 个旧地区水系污染沉积物主污染元素污染程度

元素	污染权重				最大值 10 ⁻⁶	污染强度 (K)
	无污染	轻污染	中污染	重污染		
As	0.047	0.236	0.234	0.483	6100	40.7
Cd	0.159	0.383	0.247	0.211	65.2	26.1
Pb	0.400	0.161	0.130	0.310	19777	19.8
F	0.378	0.400	0.084	0.141	18800	6.3
U	0.069	0.436	0.470	0.025	31.1	1.6
Th	0.566	0.278	0.122	0.034	179.7	1.8
Cu	0.441	0.371	0.092	0.096	6046	6.0
Zn	0.326	0.215	0.187	0.271	12455	12.4
Sn	0.375	0.165	0.113	0.347	7760	38.8

注:K=最大值/重污染下限。

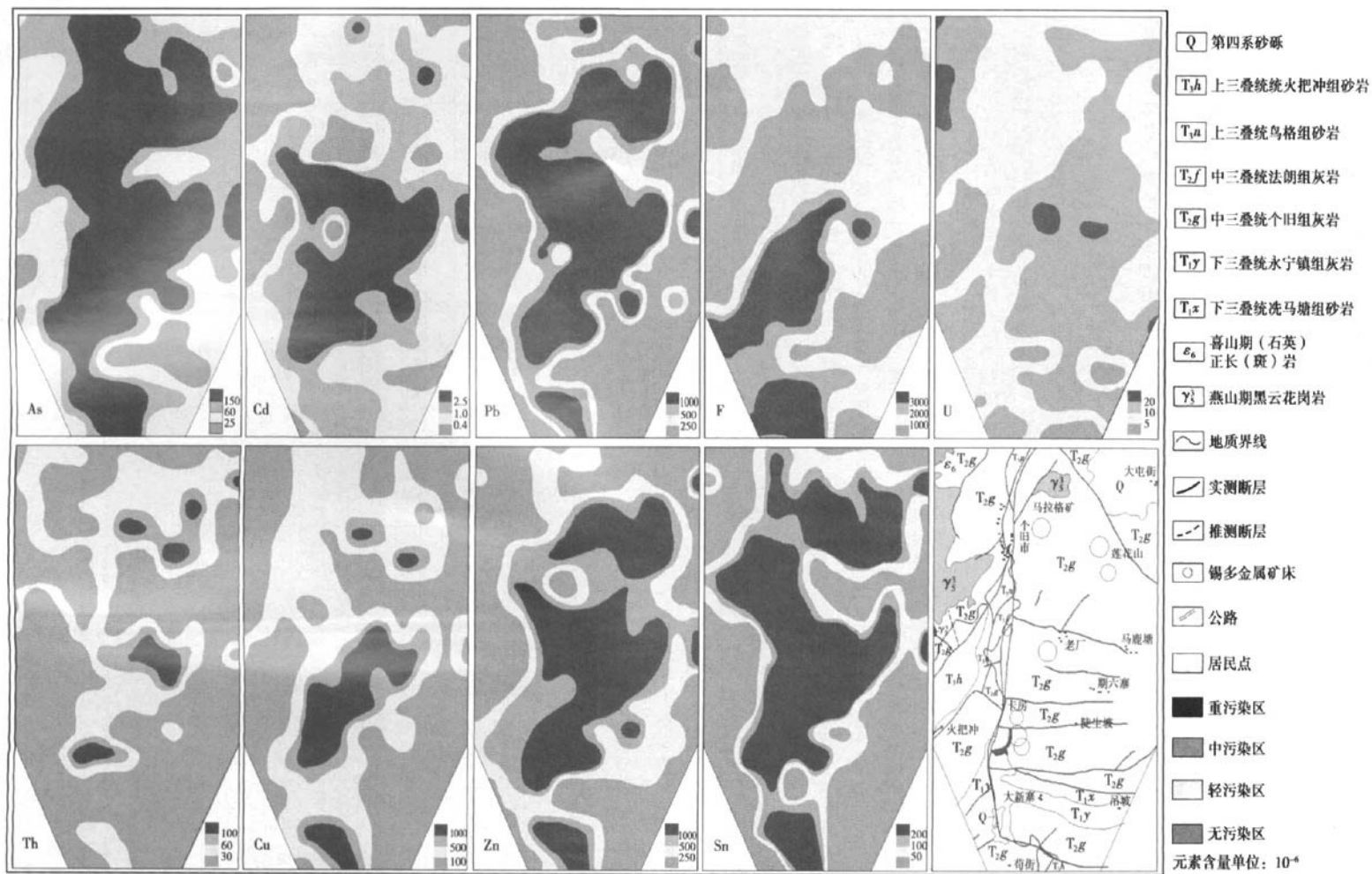


图1 个旧地区主污染元素污染分布

染,最主要的污染集中在个旧—卡房 630 km² 的范围内,各污染元素污染权重、污染强度列于表 3。个旧地区污染具如下特征(图 1)。

(1)主污染元素大都呈南北向不规则带状展布,重污染区连片集中,北张南缩,向南经苟街直入红河,这为污染的集中治理提供了理论依据。

(2)从地质地貌上看,这些元素的重污染主要沿(隐伏)花岗岩接触带,马拉格、莲花山、老厂和卡房等矿区,以及南北走向的主干公路和主干水系分布。这反映了不同污染因素复合作用的结果。

(3)从元素的污染形态看 Sn、Pb、Zn、Cu、Cd 等重污染区形态十分相似,套合很好,As 面积稍大,反映出既受成岩成矿作用的影响,也受到后天人工采选冶和雨水自然冲刷的作用;F 主要集中在卡房以南地区,反映出该元素在表生条件下易于迁移;放射性污染元素 U、Th 主要受控于花岗质岩浆的成岩作用,主要呈弥漫性分布,集中表现为中轻污染。

(4)以污染权重看,中度污染加重污染的元素由大到小可分为三个级次:As(0.717)-U(0.495)、Sn(0.460)、Cd(0.458)、Zn(0.458)、Pb(0.440)-F(0.225)、Cu(0.188)、Th(0.156),从污染强度看,元素可分为三个层次,As(40.7)、Sn(38.8)、Cd(26.1)、Pb(19.8)、Zn(12.4)-F(6.3)、Cu(6.0)-Th(1.8)、U(1.6),综合上述两个指标,可以认定:①污染最为严重的元素为 As,次为 Sn、Cd、Pb、Zn,再次为 F、Cu、U、Th;②一般地,元素的污染强度越高,污染面积也越大。

(5)Sn、Cu 最大值大于 0.5%,Pb、Zn 最大值达 1%~2%,在治污的过程中如能在富集地段加以综合回收,完全有可能变废为宝,产生直接的经济效益。

5 用 FCA 评价区域人居地球化学环境

某一地区区域人居地球化学环境质量好坏的评价,在不同的景观条件下难以制定一个统一的环境污染分级标准。环境评价的分级如污染的轻中重本身就是一个模糊概念,特别是不同污染元素的污染区域是不一样的,对人体的危害程度也不一样,所评价的面积越大,可信度就越低,而面积越小,又难以反映污染的全貌,所以,环境的好坏是客观存在,对其评价又带有主观性,这就有必要运用一种新的方法对污染进行笼而统之的评价。

FCA(fuzzy comprehensive assessment,模糊综合评判)就是解决此类问题的一种好工具。FCA 是汪培庄教授于 1980 年在《数学实践与认识》杂志的模

糊数学简介一文中首先提出的,应用范围十分广泛。它主要分两步:第一步先按单个因素单独评判,第二步再按所有因素综合评判^[16]。现以个旧地区区域人居地球化学环境评价为例,其基本方法和步骤简介如下。

5.1 建立污染元素集

在此把污染元素构成的集合,称为污染元素集,它是一个普通的集合,用 X 表示:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}.$$

其中, x_i 表示第 i 个污染元素, m 为元素的数量。在此,可定义

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_9\}.$$

其中, $x_1 \sim x_9$ 分别代表 As、Cd、Pb、F、U、Th、Cu、Zn、Sn。

5.2 建立权重集

各个污染元素在区域地球化学环境中的重要程度是不同的,对重要的污染元素特别看重,对不太重要的污染元素虽然应当考虑,但不必十分看重,为了反映各污染元素的重要程度,对每个污染元素 x_i 应赋予一定的权重,建立起对应于 X 的权重集

$$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\},$$

并满足 $\sum_{i=1}^m y_i = 1$ 。根据元素的生物地球化学分类^[7],对 As、Cd、Pb、F、U、Th、Cu、Zn、Sn 的权重分别赋值为 25%, 21%, 18%, 10%, 8%, 6%, 4%, 4%, 4%。如此,对应于 X 的权重 Y 可记为:

$$Y = \{0.25, 0.21, 0.18, 0.10, 0.08, 0.06, 0.04, 0.04, 0.04\}.$$

5.3 建立评价集

评价集是评价者对评价对象可能作出的各种总的评价结果组成的集合,用

$$Z = \{z_1, z_2, \dots, z_n\}$$

表示。其中, z_j 代表第 j 个评价结果, n 为总的评价结果数。对个旧地区区域地球化学环境进行评价时,评价集可设为: $Z = \{\text{无污染, 轻污染, 中污染, 重污染}\}$ 。

5.4 进行单污染元素模糊评价

单独用一个污染元素进行评价,以确定评价对象对评价集 Z 的隶属程度,设取污染元素集 X 中的第 i 个污染元素 x_i 进行评价,对评价集 Z 中的第 j 个评价结果 z_j 的隶属程度为 r_{ij} ,则对 x_i 的单元评价可得到模糊集

$$R_i = \{r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in}\}.$$

对某一污染元素 x_i ,其对评价集 Z 的隶属度可以通过不同污染程度在个旧地区所占面积的百分比

给出。由此,可得到一个模糊关系矩阵

$$R = \begin{Bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_m \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \text{As} & 0.047 & 0.236 & 0.234 & 0.483 \\ \text{Cd} & 0.159 & 0.383 & 0.247 & 0.211 \\ \text{Pb} & 0.400 & 0.161 & 0.130 & 0.130 \\ \text{F} & 0.378 & 0.400 & 0.084 & 0.141 \\ \text{U} & 0.069 & 0.436 & 0.470 & 0.025 \\ \text{Th} & 0.566 & 0.278 & 0.122 & 0.034 \\ \text{Cu} & 0.441 & 0.371 & 0.092 & 0.096 \\ \text{Zn} & 0.326 & 0.215 & 0.187 & 0.271 \\ \text{Sn} & 0.375 & 0.165 & 0.113 & 0.347 \end{Bmatrix}。$$

5.5 进行模糊综合评价

某一污染元素模糊评价仅反映一个污染元素对环境的影响,这是不够完整的,要综合考虑所选污染元素的影响,得出更合理的评价结果,就要进行模糊综合评价(FCA),FCA的数学模型可表为 $B = Y \odot R$, $\odot$ 是模糊数学中的合成运算符,则个旧地区区域地球化学环境污染的评价结果为

$$B = Y \odot R = (0.180, 0.236, 0.234, 0.250)$$

B 中的数字是这样得到的:它是将 Y 中从左到右每个数与 R 中的第 j 列($j=1,2,3,4$)从上到下相对应位置的数相比较取较小者,得到9个数,然后再取这9个数中最大者作为 B 中的第 j 个数。对 B 进行归一化处理, $0.180 + 0.236 + 0.234 + 0.250 = 0.9$, $B' = (0.20, 0.26, 0.26, 0.28)$ 。

评价结果表明:在个旧地区630 km²范围内,重污染占28%,中度污染占26%,轻污染占26%,无污染占20%,按最大隶属度原则,个旧地区区域地球化学环境以重污染为主,中轻污染也占有相当比例,应引起政府有关职能部门和污染区内居民的高度重视,尽早采取防治措施。

6 污染原因剖析

个旧地区区域地球化学环境污染是以重金属毒性元素并有放射性潜在毒性元素为主要污染源的污染,其原因剖析如下。

(1)个旧地区位于华南褶皱带个旧断褶束,印支运动后,本区处于越北古陆、康滇古陆和哀牢山古陆之间,形成半封闭海盆,接受了巨厚的三叠系碳酸岩和砂泥质岩沉积,根据水系沉积物测量统计结果,该套地层与金平、河口全区比较明显富集的元素有Sn(4.26)、As(3.82)、Bi(3.75)、Pb(3.37)、Sb(2.88)、Ag(2.85)、W(2.70)、Zn(2.64)、Cu(2.58)、Hg(2.26)、Be(1.82)、Au(1.42),燕山运动使三叠系岩层发生断褶,同时伴随强烈的基性—酸性—碱性岩浆的侵入和重要的成矿作用,从而形成Sn、W、Bi、Mo、Pb、

Zn、Cu、Ag、Au等的区域性异常^[2-3]。这些元素的富集或异常带为Sn多金属矿的找矿工作提供了丰富的地球化学信息,也是引起区域地球化学环境污染的先天气因素。

(2)人类的经济活动如毁林开荒、开山炸石、公路铁路等基础设施的修建,特别是遍地开花的采矿活动,以及雨水的冲刷,使个旧地区区域地球化学环境进一步恶化。

(3)个旧地区50多家不同性质选冶厂的存在,加上防治污染措施不力,使个旧地区污水横流,粉尘弥漫,酸雨不断,这些因素是导致个旧地区区域地球化学环境进一步恶化的人为原因。

7 结论

(1)通过系统深入的分析,认定个旧地区630 km²范围内,区域地球化学环境污染以As为主(据2005年11月1日CCTV1《走进科学》栏目报道了个旧矿区患病矿工肺癌组织切片分析结果,As含量显著偏高,这与笔者从区域上分析的结果完全一致),Sn、Cd、Pb、Zn次之,再次为F、Cu、U、Th,这为区域地球化学环境污染的治理指明了方向。

(2)先天和后天人为的作用,都可造成区域地球化学环境元素的失谐,某一个元素的丰缺就会对该地区的环境起决定性的作用,而个旧地区区域环境问题是多因素、多元素长时间缓慢作用的结果。

(3)FCA模糊综合评价结果指出,个旧地区区域地球化学环境以重污染为主,中轻污染也占有相当比例,这与本区区域地球化学环境的实际情况是相符的。

(4)环境污染问题没有截然分明的评判标准,运用FCA这一系统评价方法,开展此类问题的评估具有相当优越性。需要指出:模糊综合评价不是随意评价,正确选好选准污染元素及确定其污染分级标准以及正确划定污染区、区分不同污染元素的重要程度(危害程度)是用好FCA的前提条件,否则,运用同样的评价方法有可能得出完全不同的结论。

本文的写作得益于中南大学商学院黄生权教授讲授的《商务决策数量方法教案》,在此特别致谢!

参考文献:

- [1] 谈树成,赵筱青,薛传东,等.云南省个旧市的环境问题与可持续发展[J].中国人口、资源与环境,2000,10(专刊):89-90.
- [2] 云南地矿局区域地质地查队.1:20万金平幅、河口幅地球化学图说明书(水系沉积物测量)[R].宜良:云南地矿局地球物理地球化学勘查队,1990.
- [3] 云南地矿局第二地质大队.1:20万个旧幅地球化学图说明书

- (水系沉积物测量)[R]. 宜良:云南地矿局地球物理地球化学勘查队,1992.
- [4] 个旧环保信息网. 我局的科研项目[EB/OL]. 2005-8-13 [2006-4-14]. <http://www.gjgpb.gov.cn/ReadNews.asp?NewsID=445>.
- [5] 谈树成,薛传东. 云南个旧城区突出的几个环境地质问题[M]. 昆明:云南大学出版社,1997:135-160.
- [6] 谈树成,赵筱青,薛传东,等. 云南个旧矿山环境氨污染研究[J]. 云南环境科学,1998,17(4):3-5.
- [7] 周余国,刘继顺,高启芝,等. 区域地球化学资料在人居环境评价中的应用[J]. 地球科学与环境学报,2006,28(4):81-86.
- [8] 谢学锦. 区域化探[M]. 北京:地质出版社,1979:1-192.
- [9] 谢学锦. 区域化探全国扫面工作方法的讨论[J]. 物探与化探,1979,1:18-26.
- [10] 谢学锦,刘大文,向运川,等. 地球化学块体:概念和方法学的研究[J]. 中国地质,2002,29(3):225-232.
- [11] 莫小环,张连. 地质矿产部“八五”期间物探、化探、遥感勘查若干新进展[J]. 物探与化探,1997,21:1-5.
- [12] 李健,郑春江,郭希利,等. 环境背景值数据手册[M]. 北京:中国环境科学出版社,1989.
- [13] 中国环境保护总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京:中国环境科学出版社,1990.
- [14] 国家环保总局. 土壤环境质量标准[S/OL]. 1995-12-06 [2006-4-14]. <http://www.Zhb.gov.cn/eic/650208312909889536/19951206/1023470.html>.
- [15] 黄熏德,吴郁彦. 地球化学找矿[M]. 北京:地质出版社,1986:87-93.
- [16] 黄生权. 商务决策数量方法教案[M]. 长沙:中南大学商学院,2004:66-70.
- [17] 吴传壁. 地球化学工程学:21 世纪的环保产业[J]. 物探与化探,2002,26(6):411-421.

A SYSTEMATICAL EVALUATION OF THE REGIONAL GEOCHEMICAL ENVIRONMENT OF GEJIU AREA

ZHOU Yu-guo^{1,2}, GAO Qi-zhi^{2,3}, LIU Ji-shun⁴, MA Hui-ying⁴, HUANG Yuan-you⁵

(1. School of Resource Environment and Geoscience, Yunnan University, Kunming 650091, China; 2. Yunnan Geoscience Mining Co. Ltd, Kunming 650200, China; 3. Geophysical and Geochemical Exploration team of Yunnan Geology and Mineral Resources Bureau, Kunming 652100, China; 4. School of Geoscience and Environment Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 5. Geophysical and Geochemical Exploration Institute of Yunnan Geology Survey Bureau, Kunming 652100, China)

Abstract: This paper deals in detail with the regional geochemical environment of Gejiu area in Yunnan Province on the basis of regional geochemical data combined with achievements obtained in such aspects as medical geology, agricultural geology and environmental geology. Fuzzy comprehensive assessment (FCA) was used to evaluate the regional geochemical environment over 630km² of Gejiu area. It is concluded that the regional geochemical environment of Gejiu area has been polluted severely, resulting not only from the disadvantageous natural environment but also from the pollution of local factories. The situation deserves serious attention.

Key words: regional geochemistry; environmental geochemistry; permitted value of element; pollution grade; FCA; Gejiu in Yunnan

作者简介: 周余国(1967-),男,云南镇雄人,物化探高级工程师,博士研究生,矿产普查与勘探专业,主要从事地质地球化学找矿与预测研究。