

矿业可持续勘查开发“四元”模型(QMM)

舒思齐^{1,2}, 张洪涛¹, 裴荣富², 向君峰², 孙张涛³

SHU Siqi^{1,2}, ZHANG Hongtao¹, PEI Rongfu², XIANG Junfeng², SUN Zhangtao³

1. 中国地质调查局, 北京 100037;

2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;

3. 中国地质调查局地学文献中心, 北京 100081

1. China Geological Survey, Beijing 100037, China;

2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

3. Center of Geological Library, China Geological Survey, Beijing 100081, China

摘要:为促进矿业可持续勘查开发,从地质、环境、技术和经济4个方面研究矿业可持续勘查开发问题,运用层次分析法构建矿业可持续勘查开发“四元”模型。该模型指出只有在地质背景显示有矿、勘查开发技术可行、能实现矿床经济效益最大化且又不破坏生态环境的情况下,矿产资源勘查开发活动才是合理而非盲目的。该模型对西藏冈底斯成矿带甲玛铜多金属矿勘查开发方案进行评价。模型评价甲玛铜多金属矿现行勘查开发方案是合理的,与实际情况吻合。

关键词:可持续勘查开发;绿色矿业;生态环境;勘查开发技术;经济评价;“三率”;“三废”

中图分类号:P416.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2017)08-1476-07

Shu S Q, Zhang H T, Pei R F, Xiang J F, Sun Z T. Quaternion model for sustainable exploration and development of mines (QMM). *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(8):1476-1482

Abstract: The problem of sustainable exploration and development of mines is studied from geological, environmental, technical and economic perspectives. A quaternion model for sustainable exploration and development of mines is developed based on the analytic hierarchy process. This model demonstrates that the exploration and development activities could be deemed reasonable only when they are geologically ore-bearing and technically viable and do not harm the environment while maximizing the economic benefit. Assessment on the Jiama Cu polymetallic deposit in Gangdise metallogenic belt in Tibet based on this model shows that the current exploration and development program of this deposit is reasonable, which is consistent with the real condition.

Key words: sustainable exploration and development of mines; green mines; ecological environment; exploration and development technology; economic evaluation; three rates; three wastes

矿业可持续勘查开发是当代社会经济发展中公认的难题,也是人类文明进步的重要方向。世界环境与发展委员会比较系统地分析和研究了可持续发展问题,指出可持续发展是既满足当代人的需求,又不对后代人满足其需求的能力构成危害的发展^[1]。矿业可持续勘查开发是指合理勘查开发矿产资源,实现资源利用、环境保护、科技创新和社会经

济协调发展,既能满足当代人对矿产资源的需求,又不对后代人利用矿产资源和生存环境等造成危害的可持续发展方式。

随着中国工业化、信息化、城镇化、农业现代化深入推进,矿产资源供需矛盾日益突出,人们对矿业勘查开发存在一些困惑。

(1)在地质勘查早期如何识别具有开发潜力的

收稿日期:2016-12-09;修订日期:2017-07-01

资助项目:中国地质调查局项目《全球巨型成矿带找矿勘查方法技术研究》(编号:12120113102100)

作者简介:舒思齐(1977-),男,博士后,从事矿业可持续勘查开发研究。E-mail: shusiqi@sina.com.cn

通讯作者:裴荣富(1924-),男,中国工程院院士,从事成矿学和矿产勘查地质学研究。E-mail: prirf@sohu.com

矿床(点)?不考虑经济成本和勘查开发技术条件的大量矿业勘查工作,导致一批已探明储量的矿床不能开发利用,形成一批“呆矿”,闲置了一批矿产资源勘查开发资金。据调查,中国1980年前探明的27种主要矿种的储量利用率仅为38%^[2]。

(2)如何做到矿业开发与生态环境保护协调发展?矿业勘查开发导致土壤污染、水污染、空气污染、生物多样性破坏和次生地质灾害等事件频发,矿业“三废”造成环境污染的事件屡见不鲜。目前仅金属矿山堆存的尾矿就高达 $100 \times 10^8 \text{t}$,并以每年超过 $10 \times 10^8 \text{t}$ 的排放量剧增。固体废物排放与堆存占用了大量宝贵的土地资源,并对空气、土壤、地表水和地下水产生二次污染。

(3)如何提高资源利用效率?中国矿产资源产出率、综合利用效率和再生资源回收利用率均低,资源高消费低效益的经济增长方式急需得到改变。大量矿业固体废物的排放也造成大量有价金属与非金属资源的流失,成为矿山发展的严重制约因素。2013年,中国尾矿综合利用量为 $3.12 \times 10^8 \text{t}$,综合利用率为18.9%。

(4)青藏高原的矿产资源是否可以开发?具有“三江之源”和“中华水塔”之称的青藏高原矿产资源极为丰富,生态环境异常脆弱,西藏矿产资源可持续勘查开发是重要的研究课题。在查明的矿产资源中,西藏有12种矿产资源储量位居全国前五,18种矿产资源位居全国前十,铜、铬的保有储量及盐湖锂矿的远景储量位居全国第一。然而,其生态环境一旦破坏,不但很难恢复,而且会威胁数以亿计人民的健康。长期以来,中央及西藏地方政府对于西藏矿业开发持谨慎态度。

本研究基于地质、环境、技术和经济提出矿业可持续勘查开发“四元”模型,即通过实现地质、环境、技术、经济四项因素的耦合,评估矿产资源合理勘查开发的可行程度,进而规范和促进矿业可持续发展。该模型指出,只有在地质背景显示有矿、勘查开发技术可行、能实现矿床经济效益最大化,且又不破坏生态环境的情况下,矿产资源勘查开发活动才是合理的,而非盲目的。

1 矿业可持续勘查开发研究进展

在矿业勘查与开发过程中,国外较注重矿产勘查评价过程中的成矿保证程度与技术经济条件保

证程度关系的研究。加拿大的霍姆斯在其《有效勘查方法学》一书中,把识别每种地质环境、建立相应环境地质模式和寻找某种环境中特定矿产的有效勘查方法称为完整勘查程序。R. J. Huton总结了“完整勘查程序”理论,强调环境(成矿构造背景)、模型(成矿特征)和方法(勘查评价和经济投入)的有机联系^[5-6]。H. Reedman在论述矿产勘查评价性质的基础上,提出了勘查风险与投资理论值,探讨了合理风险投资问题^[5-6]。K. Milos等提出了投资百分比和评价周期的可能年限等^[5-6]。反映了矿产勘查评价在重视成矿地质背景、矿产地质特征研究的同时,合理使用成矿理论、勘查程序、方法和技术经济评价及风险投资等问题,在重视地质要素的同时,也强调对矿产勘查开发过程中经济效益的关注。20世纪80年代末,美国地质调查局提出矿产资源“三部式”评价方法。该方法将矿床的品位-吨位模型与矿床数估计相结合,把地质学家的资源评价用经济学的语言表示出来。裴荣富等^[3-6]先后提出矿产勘查开发的“景、场、相、床”等级体制成矿理论、“双控论”与“合理域”理论、矿业活动决策支持系统的模拟、矿山生产阶段合理划分理论、5R循环经济矿业可持续发展(即再发现原则、再减量原则、再利用原则、再循环原则与再复垦原则)等理论。赵鹏大等^[7-8]提出5P成矿预测与定量评价理论,并将地质异常矿体定位预测归纳为“5P”地段(成矿可能地段、找矿可行性地段、找矿有利地段、矿产资源体潜在地段和矿体远景地段)的圈定。

张洪涛等^[9]指出,矿产资源具有资源、资产和资本三重属性,三者存在内在的继承性和递进(变)关系,随生产关系的发展而逐渐凸显,并表现出不同的阶段特征。在矿业生产活动中,三者通过与外部要素结合,在价值上表现出螺旋式的递进关系,而非平面上的简单叠加。舒思齐等^[10]提出,矿产资源全球配置等合理化建议:一是充分发挥市场在矿产资源全球配置中的决定性作用,培育和打造三资一体化运营的跨国矿业公司;二是坚持“走出去”与“引进来”相结合;三是改变矿产资源-资源性资产直接配置,实现矿产资源-矿业资本间接配置;四是实现经营方式由“单营”向“多营”转变等。

2 矿业可持续勘查开发“四元”模型建立

矿业可持续勘查开发评价是一项综合性较强

的工作,涉及专业知识广。要求在建立总图设计评价体系时,全面分析,选择合理的评价指标。本研究运用层次分析法,综合考虑地质、环境、技术、经济4个要素,对矿产资源勘查开发过程中涉及的定量元素和定性元素进行分析,并根据分析结果建立矿业可持续勘查开发“四元”模型(Quaternion Model for sustainable Exploration and Development of Mines: QMM)(图1)。

矿业可持续勘查开发“四元”模型框架图中最高层级为矿业可持续勘查开发指数(GETE)。一级评价元素组成的元素集为: $A=\{\text{地质,环境,技术,经济}\}$ 。

一级评价元素“地质”对应的二级评价元素组成的元素集为: $A_1=\{\text{成矿构造背景,成矿构造聚敛场,金属成矿相,矿床}\}$ 。矿业可持续勘查开发模型的第一要素是成矿地质背景。本研究运用裴荣富院士提出的“景、场、相、床”等级体制成矿理论,研究成矿地质条件。所谓“景”,就是成矿构造背景,即宏观的可能成矿环境。“场”是成矿构造聚敛场,只有在有利空间和物源基础上形成成矿构造聚敛场,才有成矿的可能。“相”也就是上述成矿构造背景、环境和成矿构造聚敛场耦合部位的成矿物理化学条件。“床”是已发现矿床(点)成矿组构及其空间配置规律及矿床结构构造模式。成矿构造背“景”、成矿构造聚敛“场”、金属成矿“相”和矿“床”4个成矿等级通过一定地质时期的地质事件,促发4个不同等级的成矿组成以一定规律耦合。不耦合者不成矿,一般耦合仅成一般规模矿床,最佳耦合导致巨量金属堆积,形成特大型矿床^[4]。

一级评价元素“环境”对应的二级评价元素组成的元素集为: $A_2=\{\text{土壤污染,水污染,大气污染,生态脆弱性,地质灾害易发性}\}$ 。生态环境保护是矿业可持续勘查开发的前提条件。矿业活动要接触土壤、水体、大气、生物等各种环境介质。不合理勘查开发矿产资源,不仅会造成土壤、水体和大气等环境介质的污染,而且会引发次生地质灾害,进而破坏矿区生态环境。针对矿业活动的各个过程,分析其可能产生的污染,将环境保护贯穿于矿业活动过程,促进矿山绿色经营。本研究从矿区土壤污染、水体污染、大气污染、生态脆弱性、地质灾害易发性5个方面(即“土”、“水”、“气”、“生”、“灾”)研究矿区的环境保护问题。

一级评价元素“技术”对应的二级评价元素组成的元素集为: $A_3=\{\text{勘查技术组合,开采回采率,选矿回收率,综合利用率}\}$ 。技术合理是开展矿产资源合理勘查的必要手段。本研究对固体矿产资源勘查、开采和选冶过程中的重要技术指标进行研究,提出了矿产资源合理勘查开发的重要影响因素和条件。矿产资源勘查开发技术涉及物探、化探、遥感、钻探等勘查技术,以及采矿、选矿等开发技术。本研究选择综合勘查技术、开采回采率、选矿回收率和综合利用率为技术合理性评价元素。

一级评价元素“经济”对应的二级评价元素组成的元素集为: $A_4=\{\text{单位矿产品销售价和成本比,矿山路、水、电条件,再发现资源潜力,政治经济情况}\}$ 。矿山经济评价元素指标包括如下内容:一是拟建矿山单位矿产品售价和成本比值,本研究采用美国地质调查局专家发明的经济成本筛选法计算单

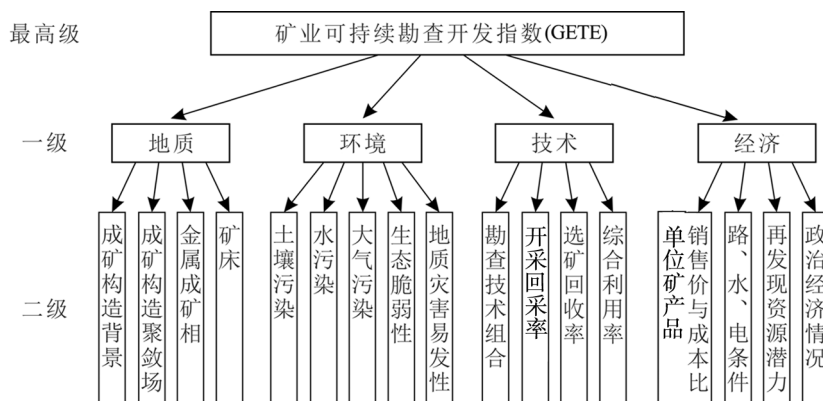


图1 矿业可持续勘查开发“四元”模型框架

Fig. 1 Framework of quaternion model for sustainable exploration and development of mines(QMM)

位矿产品生产成本,并运用单位矿产品销售价和生产成本的比值对拟建矿山经济价值进行评价^[11-14];二是根据拟建矿山路、水和电需求量和矿区可供量的比值对拟建矿山进行评价;三是拟建矿山再发现矿产资源储量潜力;四是政治经济条件,根据矿区所在国家(地区)政治经济风险等级对拟建矿山进行评价,如表1所示。

根据矿业可持续勘查开发“四元”模型框架图和层次分析法,建立矿业可持续勘查开发“四元”模型:

$$GETE = W_1 \cdot \sum_{k=1}^4 w_{1k} \cdot u_{1k} + W_2 \cdot \sum_{l=1}^5 w_{2l} \cdot u_{2l} + W_3 \cdot$$

$$\sum_{m=1}^4 w_{3m} \cdot u_{3m} + W_4 \cdot \sum_{n=1}^4 w_{4n} \cdot u_{4n} \quad (1)$$

式中: u_{ij} 为评价元素, $u_{ij} \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$;

W_i 为一级评价元素权重, $\sum_{i=1}^4 W_i = 1$;

w_{ij} 为二级评价元素权重, $\sum_{j=1}^p w_{ij} = 1, P=4$ 或 5 ;

专家打分确定权值。经广泛征求地质、环境、勘查、采矿、选矿、经济等领域20余位院士、专家、管理人员和生产一线技术人员意见,确定“四元”模型(QMM)各影响元素的权值,如表2所示。

表1 矿业可持续勘查开发“四元”模型(QMM)评价元素与分级
Table 1 Evaluation elements of quaternion model for sustainable exploration and development of mines (QMM) and grading

一级评价元素	二级评价元素	评价元素分级				
地质	成矿构造背景	很好	较好	中等	较差	很差
	成矿构造聚敛场	很好	较好	中等	较差	很差
	金属成矿相	很好	较好	中等	较差	很差
	矿床	很好	较好	中等	较差	很差
环境	土壤污染	无污染	轻度污染	中度污染	重度污染	极度污染
	水污染	无污染	轻度污染	中度污染	重度污染	极度污染
	大气污染	无污染	轻度污染	中度污染	重度污染	极度污染
	生态脆弱性	潜在	轻度	中度	重度	极度
	地质灾害易发性	潜在	轻度	中度	重度	极度
技术	勘查技术组合	很好	较好	中等	较差	很差
	开采回收率	很好	较好	中等	较差	很差
	选矿回收率	很好	较好	中等	较差	很差
	综合利用率	很好	较好	中等	较差	很差
经济	销售价和成本比	很好	-	中等	-	很差
	矿区路水电条件	很好	较好	中等	较差	很差
	再发现资源潜力	很好	较好	中等	较差	很差
	政治经济条件	很好	-	中等	-	很差
赋值		5	4	3	2	1

$GETE$ 为矿业可持续勘查开发指数,取值区间为 $[1, 5]$ 。数值代表矿业可持续勘查开发合理性程度。

(1) $GETE \geq 4.5$, 矿产资源勘查开发方案“很合理”;该矿床应优先开发。

(2) $4.5 > GETE \geq 3.5$, 矿产资源勘查开发方案“合理”;该矿床可以开发。

(3) $3.5 > GETE \geq 2.5$, 矿产资源勘查开发方案“一般”;该矿床具有开发潜力,建议暂不开发。

(4) $2.5 > GETE \geq 1.5$, 矿产资源勘查开发方案“较不合理”;该矿床不能开发,待将来科技进步和经济发展再研究开发该矿床。

(5) $1.5 > GETE \geq 1$, 矿产资源勘查开发方案“很不合理”;严禁勘查开发该矿床。

3 冈底斯成矿带甲玛铜多金属矿勘查开发评价

本研究以冈底斯成矿带甲玛铜多金属矿为例,对其勘查开发合理性进行研究。研究组根据地质、环境、技术和经济4个要素对甲玛铜多金属矿山勘查开发合理性进行研究,并赴甲玛采场、选矿厂和尾矿库进行调研,采集土样和水样,取得一手数据和资料。

3.1 冈底斯成矿带甲玛铜多金属矿地质评价

冈底斯成矿带先后经历了至少3个历史演化阶段,包括元古宙—古生代冈瓦纳构造造成矿域、中生代新特提斯构造造成矿域多岛洋体系和新生代印度—欧亚陆陆碰撞体系。这样的演化历程,构成了冈底斯斑岩铜矿带的成矿构造背景,是成矿场地的准备^[15]。

冈底斯成矿带在地质历史上至少发育汇聚型和对接型2种大陆边缘,壳幔混合成因的花岗岩与大陆边缘的汇聚部位构成了斑岩铜矿成矿构造聚敛“场”。如:①雄村斑岩铜矿指示了侏罗纪汇聚型大陆边缘内的成矿构造聚敛“场”;②甲玛和驱龙斑岩铜矿指示了中新世对接型大陆边缘内的成矿构造聚敛“场”。

甲玛埃达克质花岗岩的岩浆混合作用发育,宏观上表现为岩浆暗色包体(黄铁

表2 矿业可持续勘查开发"四元"模型(QMM)权值
Table 2 Weights of quaternion model for sustainable
exploration and development of mines (QMM)

评价体系		权及权值				
一级元素	权	W_1 (地质)	W_2 (环境)	W_3 (技术)	W_4 (经济)	
	权值	0.27	0.30	0.23	0.20	
二级元素	权	w_{11} (成矿构造背景)	w_{12} (成矿构造聚敛场)	w_{13} (金属成矿相)	w_{14} (矿床)	
	权值	0.20	0.24	0.26	0.30	
	权	w_{21} (土壤污染)	w_{22} (水污染)	w_{23} (大气污染)	w_{24} (生态脆弱性)	w_{25} (地质灾害易发性)
	权值	0.25	0.20	0.15	0.30	0.10
	权	w_{31} (勘查技术组合)	w_{32} (开采回采率)	w_{33} (选矿回收率)	w_{34} (综合利用率)	
	权值	0.17	0.25	0.28	0.30	
	权	w_{41} (单位矿产品售价和成本比)	w_{42} (矿区路水电条件)	w_{43} (再发现资源潜力)	w_{44} (政治经济条件)	
	权值	0.45	0.2	0.25	0.1	
	权					
	权值					

矿、黄铜矿含量较高)广泛发育,并具冷凝边构造,岩石中具有石英-黄铁矿(角闪石)眼斑,斜长石发育不规则环带及海绵多孔状结构。镜下常见石英与单斜辉石共生、眼球状石英的钾长石边及磷灰石的针状构造。此外,区域内岩体(脉)中发育同期产出的辉绿玢岩岩脉,各脉体相互平行,呈似层状产出。以上特征表明,在岩浆形成过程中一直发生着广泛的岩浆混合作用^[16]。

甲玛铜多金属矿床是一个典型的斑岩型矿床,是由产于深部隐伏的斑岩型钼(铜)矿体、围绕斑岩体沿下白垩统林布宗组砂板岩-角岩与上侏罗统多底沟组灰岩-大理岩层间构造带产出的矽卡岩型铜多金属矿体,产于斑岩体上部裂隙系统中的角岩型铜钼矿体,以及产于外围构造破碎带中的独立金矿体构成的“四位一体”矿体组合形式。甲玛铜多金属矿主要矿体为矽卡岩型铜多金属矿体、角岩型铜钼矿体,前者赋存在下白垩统林布宗组(K₁l)砂板岩、角岩(顶板)与上侏罗统多底沟组(J₃d)灰岩、大理岩(底板)的层间构造中,或甲玛-卡军果推覆构造体系中的多底沟组(J₃d)灰岩、大理岩中;后者分布于林布宗组角岩中。少量花岗斑岩脉中铜钼矿化也很强烈^[17]。

3.2 西藏甲玛铜多金属矿环境影响评价

(1) 矿区土壤污染测定

在矿区采场和尾矿库 100m 外采集样品,测得矿区土壤中 Cu、Cd、Hg、Pb、As、Cr 含量及 pH 值见表 3。

(2) 矿区地表水污染测定

在矿区排水口取地表水测得矿区地表水中硫化物、氨氮、Cu、Cd、Hg、Pb、As、Cr 含量和 pH 值见表 4。

(3) 矿区地下水污染测定

在矿区附近抽取地下水,并测得地下 pH 值及水中硫化物、氨氮、Cu、Cd、Hg、Pb、As、Cr 含量(表 5)。

(4) 矿区大气污染测定

选矿厂锅炉房配备 2 台 5t 全自动燃油蒸汽锅炉和 1 台 1t 全自动燃油蒸汽锅炉,燃料采用 20# 柴油。选矿厂破碎机的上部及胶带下料口、筛分机、粉矿仓及其下部振动給料系统等均有粉尘产生。选矿厂的破碎车间、筛分车间、粉矿仓顶的通风除尘系统,均采用布袋除尘器处理,处理后废气分别经 20m 排气筒排放,排放浓度及速率满足《大气污染物综合排放标准》(GB16297—1996)二级标准。各种废气治理及排放情况见表 6。

表3 土壤污染物含量
Table 3 Content of soil contaminants

污染类型	污染物	污染指数
土壤污染	pH	7
	Cu(mg/kg)	45
	Cd(mg/kg)	0.2
	Hg(mg/kg)	0.15
	Pb(mg/kg)	35
	As(mg/kg)	15
	Cr(mg/kg)	90

表 4 地表水污染物含量
Table 4 Content of surface water contaminants

污染类型	污染物	污染指数
地表水 污染	pH	6.5
	硫化物(mg/L)	0.1
	氨氮(mg/L)	0.5
	Cu(mg/L)	0.1
	Cd(mg/L)	0.001
	Hg(mg/L)	0.00005
	Pb(mg/L)	0.03
	As(mg/L)	0.06
	Cr ⁶⁺ (mg/L)	0.01

(5)甲玛矿山生态脆弱性评价

西藏甲玛属于宽阔河谷地貌,气候为高原温带半干旱季风气候区,年最高气温 26.7℃,最低气温-23℃,年平均气温 5.7℃。受高寒、干旱、高海拔自然条件的制约,西藏草地质量差,灾害严重,草地生态脆弱。西藏寒旱气候使地表存在丰富的疏松物质,稀疏的地表覆被使疏松物质处于不固定状态,频繁的大风是沙漠化的基本动力,土地沙漠化的敏感性较强。甲玛地区土壤耕层浅、砂性重、石砾多、质地偏粗、易漏水漏肥。

(5)矿山地质灾害易发性评价

甲玛矿区山高沟深、地势陡峻、沟床纵坡大,并且陡坡上风化破碎物较多,植被稀疏,矿床开挖会改变陡峻岩体的自然边坡角,增大岩体临空面,加之地形切割较强烈,高差较大,在强降雨等诱发因素作用下易产生崩、滑、流灾害,加剧矿区的水土流失和沙漠化。

3.3 甲玛铜多金属矿勘查开发技术评价

(1)勘探技术方法

甲玛矿区在勘查过程中使用的勘查技术方法主要包括地球物理(即 1:1 万高精度磁测与 1:1 万

表 5 地下水污染物含量
Table 5 Content of underground
water contaminants

污染类型	污染物	污染指数
地下水 污染	pH	7.5
	硫酸盐(mg/L)	50
	氨氮(mg/L)	0.02
	Cu(mg/L)	0.01
	Cd(mg/L)	0.0001
	Hg(mg/L)	0.00005
	Pb(mg/L)	0.005
	As(mg/L)	0.005
	Cr ⁶⁺ (mg/L)	0.005

表 6 甲玛铜多金属矿废气治理及排放
Table 6 Treatment and discharge of waster
gas of the Jiama Cu polymetallic deposit

污染源名称	治理措施	排气量 (m ³ /h)	排放浓度 (mg/m ³)	排放速率 (kg/h)
5t 燃油锅炉		5000 度	烟尘<100 SO ₂ <500	烟尘:1.16 SO ₂ :5.8
1t 燃油锅炉		1600	NO _x <400	NO _x :4.64
粗碎车间含尘废气	布袋除尘器	24000	粉尘<100	粉尘:2.4
中细碎车间含尘废气	布袋除尘器	29000	粉尘<100	粉尘:2.9
筛分车间含尘废气	布袋除尘器	101500	粉尘<80	粉尘:8.12
粉矿仓顶含尘废气	布袋除尘器	18000	粉尘<100	粉尘:1.8

激电探测)、地球化学(主要为 1:5 万水系沉积物测量、1:1 万土壤地球化学与典型剖面岩石地球化学测量)及遥感解译工作。根据上述对甲玛矿区开展的各项勘查技术方法的分析,各种方法在勘查评价过程中都具有一定的作用。就甲玛矿区而言,利用高精度磁测发现中低磁异常区是对矿区找矿的突破,它的发现基本确定了甲玛斑岩矿床系统主体部分的位置;再结合化探结果中成矿元素由则古朗至铅山具有 Mo, Bi(W)→Cu, Pb, Zn, Au, Ag, Sb 的组合及分带特征,确定了成矿流体的演化路径,从而“顺藤摸瓜”由浅部矽卡岩铅锌矿体寻找到深部矽卡岩铜钼矿体及斑岩铜钼矿体。

(2)开采回采率。甲玛矿开采回采率为 87%。

(3)选矿回收率。甲玛矿选矿回收率为 88%。

(4)综合利用率。综合利用率为 84%。

3.4 经 济

根据经济成本筛选法,可计算出甲玛铜多金属矿产品售价和成本比值大于 2,甲玛铜多金属矿再发现资源潜大于矿山设计储量的 2 倍,矿区路水电设计容量大于矿山生产需求量的 2 倍,政治经济风险中等。

根据矿业可持续勘查开发“四元”模型评价元素分级标准,对甲玛铜多金属矿合理勘查评价元素进行分级,如表 7 所示。

基于矿业可持续勘查开发“四元”模型,根据表 1 和表 7 可计算出甲玛铜多金矿可持续勘查开发指数 GETE=3.71,位于[3.5, 4.5])间。模型预测甲玛铜多金属矿现行勘查开发方案为合理。但甲玛铜多金属矿在“三废”减少和“三率”提高等方面仍有改进空间。模型预测结果与甲玛铜多金属矿实际情况符合。

表7 甲玛铜多金属矿各评价元素及评价价值
Table 7 Evaluation elements of the Jiama Cu polymetallic deposit and their values

一级评价元素	二级评价元素及评价价值				
地质	成矿构造背景	成矿构造聚敛场	金属成矿相	矿床	
	5	4	4	4	
环境	土壤污染	水污染	大气污染	生态脆弱性	地质灾害易发性
	4	4	1	2	2
技术	勘查技术组合	开采回采率	选矿回收率	综合利用率	
	5	4	4	5	
经济	产品售价和成本比	矿区路水电条件	再发现资源潜力	政治经济条件	
	5	5	5	3	

4 结 论

本研究在分析地质、环境、技术和经济因素对矿业可持续勘查开发影响的基础上,指出只有在地质背景显示有矿、勘查技术可行、能实现经济效益最大化且又不破坏生态环境的情况下,矿产资源勘查开发活动才是合理的而非盲目的。

(1)地质、环境、技术和经济是影响固体矿产资源合理勘查开发的4个重要因素,并建立了矿业可持续勘查开发“四元”模型。

(2)成矿构造背景、成矿构造聚敛场、金属成矿相、矿床、是成矿地质条件评价指标;土壤污染、水污染、气体污染、生态脆弱性和地质灾害易发性5个因素是评价矿山环境的指标;勘查技术组合、开采回采率、选矿回收率和综合利用率是表征矿山勘查开发技术合理性的重要指标;经济评价充分考虑拟建矿山运行成本、潜在资源潜力、矿山路水电基础设施和政治经济条件。并通过专家打分,确定了地质、环境、技术和经济4个领域、17个重要影响因素的影响权重。

(3)以冈底斯成矿带甲玛铜多金属矿为例,用矿业可持续勘查开发“四元”模型对甲玛铜多金属矿勘查开发合理性进行评价,模型预测甲玛铜多金属矿的现行勘查开发方案是合理的。模型预测结果与甲玛铜多金属矿实际情况符合。

致谢:中国地质大学(北京)赵鹏大、王成善院士,西藏自治区多吉院士,中国矿业大学(北京)武强院士,国务院发展研究中心资源与环境政策研究所谷树忠研究员,国土资源部李裕伟研究员等专家对本研究提供指导和建议,在此表示衷心感谢。

参考文献

[1]古德生,李夕兵,等.现代金属矿床开采科学技术[M].北京:冶金工业出版社,2009:1-20.
[2]俞沧海.矿床技术经济评价[J].有色金属设计,2002,29(2):46-49.
[3]裴荣富,梅燕雄.矿产勘查的双控论与合理域模型[J].矿床地质,2001,20(4):307-12.
[4]裴荣富,李进文,梅燕雄.金属成矿省等级体制成矿[J].矿床地质,2004,23(2):131-41.
[5]裴荣富,梅燕雄,李进文.固体矿产合理勘查开发与矿业可持续发展[J].中国钨业,2005,20(2):11-15.
[6]裴荣富,李莉,王浩琳.矿产地质勘查与矿业可持续发展的科学技术模拟[J].矿产保护与利用,2009,1:7-12.
[7]赵鹏大,池顺都,陈永清.查明地质异常:成矿预测的基础[J].高校地质学报,1996,2(4):361-373.
[8]赵鹏大,陈永清.地质异常矿体定位的基本途径[J].地球科学(中国地质大学学报),1998,23(2):111-114.
[9]张洪涛,唐金荣,齐亚斌,等.矿产资源资产资本理论与实践[M].北京:地质出版社,2014:10-20.
[10]舒思齐,张洪涛,周平,等.基于“三资”理论的矿产资源全球配置研究[J].中国矿业,2015,24(1):56-59.
[11]Camm T W. Simplified cost models for prefeasibility mineral evaluations[J]. Bureau of Mines Information Circular, 9298, 1991:1-35.
[12]Singer D A, Menzie W D, Long K R A. Simplified economic filter for underground mining of massivesulfide deposits[M]. U.S. Geological Survey Open File Report, 2000:1-20.
[13]Singer D A, Menzie W D. Quantitative mineral resource assessments: an integrated approach[M]. New York: Oxford University Press, 2000.
[14]Long K R, Singer D A. A simplified economic Filter for open-pit miningand heap-leach recovery of copper in the United States[M]. U.S. Geological Survey Open File Report, 2001: 1-218.
[15]许志琴,杨经绥,李化启,等.中国大陆印支碰撞造山系及其造山机制[J].岩石学报,2012,28(6):1697-1709.
[16]秦志鹏,汪雄武,唐菊兴,等.西藏甲玛铜多金属矿床围岩蚀变特征及成矿流体运移规律浅析[J].矿产与地质,2013,27(1):65-69.
[17]唐菊兴,王登红,汪雄武,等.西藏甲玛铜多金属矿矿床地质特征及其矿床模型[J].地球学报,2010,31(4):495-506.