

# 初论裴荣富院士的矿床成因“系统论”学术思想

## (代前言)

为庆贺中国工程院院士、著名矿床学家和矿产勘查学家裴荣富先生百岁华诞,中国地质科学院矿产资源研究所于2024年8月24日隆重举行了“裴荣富院士百岁华诞暨从事地质工作80年学术研讨会”。筹办过程中,裴荣富先生的同仁和弟子们商定出版“《矿床地质》裴荣富院士百岁华诞专辑”,以示敬意。近半年过去了,专家学者纷纷提交了高水平论文,特别是翟明国院士的《大陆成矿学的研究前沿与关键科学问题》,重点对华北克拉通元古宙暴贫暴富成矿(白云鄂博REE矿等)、中生代华北克拉通破坏与华南大花岗岩省成矿(含低温成矿域)、中亚增生型-青藏碰撞型造山带矿与特提斯构造域叠合成矿、峨眉山幔柱成矿及高分异花岗岩-伟晶岩成矿等进行了详细解析,体现了成矿作用的中国大陆特色。还有梅燕雄等的《世界超大型铀矿床的成矿偏在性》,谢桂青等的《大冶式铁矿床模型》、秦克章等的《北方东部复合造山成矿》、张连昌等的《沉积锰矿成矿机制》,曾普胜等的《中国东部燕山期构造圈热侵蚀成矿》,董建辉等的《基于随机森林的二维找矿预测》,刘艳荣等的《阿尔金瓦石峡南稀有金属伟晶岩成矿机制》、程南南等的《胶东牟平-乳山成矿带载金黄铁矿元素组成特征》,赵光辉等的《老挝Sepon斑岩型铜金铂矿集区岩石地球化学及其地质意义》,郑航等的《塞尔维亚Čukaru Peki铜金矿床绿泥石地球化学特征》、左力艳的《也门Dhi Samir铜镍矿床成因》,李晓夏等的《江西银坑矿田钨钼与铅锌银成因关系研究》等,从不同角度诠释、发展了成矿作用研究的“系统论”思想,编撰工作非常顺利。但令人悲痛的是,裴荣富先生不幸在2025年除夕前驾鹤西去,看着眼前的书样,心如刀绞。矿产资源研究所王登红所长嘱我为“专辑”撰写前言,作为裴荣富先生的众弟子之一,我如何能推辞?既诚惶诚恐,又忐忑不安!

细细想来,裴荣富先生101年的人生故事无比精彩,从事地质工作长达80年的丰富经历更是业内翘楚,但是作为“代前言”,我特别想写一写他老人家的学术贡献,亦即一生勤勉,三大贡献。

### 1 裴荣富先生是运用“系统论”思想研究矿床成因的先驱者之一

裴荣富先生告诉我们,一个金属矿床的形成过程,其实是一个复杂的自然“巨系统”,是岩石圈系统、构造系统、岩浆系统、热液系统、地表系统等一系列地质作用的终极“成果”,只有详细考察各类系统的自然属性及其相关性,才能科学揭示其演化规律和赋存规律,才能产生与之相关的“成因理论”和“勘查模型”认知。这一思想,奠定了裴荣富先生矿床成因研究中的理论基础,也深深植入了我们这些弟子们的心底。

裴荣富先生身体力行,从20世纪80年代开始就率领他的科研团队,远赴南岭、华北、长江中下游等代表性矿区,深入研究了不同矿种的区域成矿规律,总结了成矿作用的统一性、不同区域成矿作用的特殊性,提出在金属成矿省内部,存在着成矿地质背景、成矿构造聚敛场、金属成矿相、金属矿床4个从宏观到微观的不同层次、不同等级的成矿组成,它们呈现出随地质历史演化、按不同层次耦合的成矿规律,亦即孕育准备(成矿地质背景中的成矿场地)→构造聚敛场(有利控矿因素汇聚)→物理化学成矿相(有利制约条件)→成矿物质终极堆积场,创造性地提出了金属成矿省“景、场、相、床”的“等级系统”。裴荣富先生认为,“时间维”造就“空间维”,成矿演化是一切成矿因素的函数,而成矿年代学是认识和研究金属成矿省地质历史演化的钥匙,只有它才能打开金属成矿省演化规律。受生物繁衍的遗传与变异理论的启发,他进一步提出了“姻袭成矿”、“变异相矿床”、“衍生相矿床”等新概念,提出用衍生矿床成矿导向、成矿轨迹追踪等新方法来寻找和发现新类型矿床。我以为,成矿作用“等级系统”,就是“地球系统”在矿床学领域的科学表达。

由于成矿过程的复杂性,很难识别和梳理诸多成矿要素中的主要、次要因子,而我们这些弟子也往往以“多成因多阶段说”予以简化(甚至掩饰“不可知”)。裴荣富先生不以为然,他明确指出,大型、超大型矿床偏爱产于某一特定的地质背景、成矿环境和它们现存的构造位置上,它们对矿产种类、矿床类型、成矿时代、成矿背景等均具有十分明显的选择性,可称之为“成矿偏在性”。在成矿作用“巨系统”环境下,某一矿床类型呈现出不同的区域特点,须一步一个脚印,从矿床特性总结区域共性,在普遍规律中寻找“偏在性”。为此,在“八五”期间,裴荣富先生组织地质矿产部矿床地质研究所等28个科研、教学、生产单位的专家、学者,分门别类,在全国范围内研究、划分出4大成矿域和26个成矿堆积环境,建立了92个普适性矿床模式,编辑出版了《中国矿床模式》专著,涉及41种主要矿产,既见矿床模式之“木”、又见成矿系统之“林”,充分体现了成矿作用“系统论”思想的理论与实践价值。

20世纪70年代后期,国际矿床学界发生了一件轰动全球的大事,在澳大利亚南部发现了埋藏于300 m以下的储量惊人的“奥林匹克坝(Olympic Dam)”铜铀金银多金属矿床,直到今天依然是矿床勘探史上的奇迹。裴荣富先生高度关注,决定从更宏观角度剖析该矿床成因,他持续领导科技部、地质矿产部、中国地质调查局、世界地质图委员会、国际地质对比计划等多个重大研究项目,开展了全球尺度的成矿“巨系统”,以及包括奥林匹克坝在内的大型、超大型矿床研究,工作量非常大。裴荣富先生研究认为,大型、超大型矿床的形成,是常规成矿作用过程中受特定地质事件激发的异常成矿作用的产物,具有与中小型矿床显著不同的成矿环境及成矿机制,太古宙氧大气变态(过氧事件)、元古宙还原大气变态(缺氧事件)和显生宙构造圈热侵蚀(大规模构造岩浆事件)是异常成矿作用发生的主因。在此期间,研究出版了《中国特大型矿床成矿偏在性与异常成矿构造聚敛场》、《难识别及隐伏大矿富矿资源潜力的地质评价》、《1:2500万世界大型超大型矿床成矿图》、《全国海陆矿产资源1:100万和1:25万国际分幅矿产图》(大陆裂解增生、洋壳新生消减、大洋开启闭合的全球构造演化和海陆成矿体系)等,大大突破了矿床学研究的传统范式,成果影响极大,对提升中国矿床学研究水平、促进地质找矿突破、助力矿业高质量发展具有重要意义。

裴荣富先生学术视野之所以开阔,造诣之所以深厚,是由于长期的学术修养,清华大学期间曾师从孟宪民、冯景兰、杨遵仪等地质大师,大地构造、古生物学、地质史、矿床学、岩石学、矿物鉴定等基本功底扎实,毕业后坚持野外实践,注重矿床成因研究,足迹遍布祖国三山五岳。他还访问了近30个国家,5次参加国际地质大会,被国际同行推选为国际矿床成因协会(IAGOD)主席,兼大构造与成矿委员会(TOD)和矿物共生专业委员会(PAC)副主席,2000年当选为美国纽约科学院院士,2004年国际矿床成因协会授予他终身荣誉会员(Honorary Life Membership),这是国际矿床地质科学界的最高荣誉。

从矿床成因研究角度而言,裴荣富先生是“地球系统科学”最早的倡导者和实践者之一。

## 2 裴荣富先生主张重点提升矿床评价中的“经济性”权重

裴荣富先生强调,矿床由地壳中成矿地质作用形成,其成果表现为储量、品位和地质条件,固然不错,但是不够,因为矿床的定义中有更加重要的、不可或缺的前提,就是“符合当前经济和技术条件、并能被开采和利用的”。他强调和倡导“矿床评价中必须强化‘经济性’,否则矿产资源与普通石头无异”。从20世纪50年代开始,裴荣富先生跟随王曰伦、程裕淇、宋叔和等大家在辽宁鞍山、本溪、青城子、丹东和华北地区从事黑色、有色金属矿产普查评价工作;1955年裴荣富先生调任地质部地质矿产司黑色金属处主任工程师,指导了内蒙古白云鄂博、甘肃镜铁山、河北庞家堡、四川攀枝花等铁矿、辽宁瓦房子锰矿、内蒙古锡林郭勒铬矿的地质普查勘探工作,经济评价始终是他关注的重点之一,他坚持认为“经济性”是“必答题”。1965年裴荣富先生被国家派往巴基斯坦,帮助解决位于拉合尔西北部的卡拉巴赫羚羊石铁矿的开发利用问题,用资源勘查结果对接矿床的开发利用。20世纪70年代末至80年代初,裴荣富先生组织了地质部综合地质大队等单位近30人组成的研究队伍,首次在全国完成10个矿种、30多个矿山的固体矿产地质勘探与矿山开采工程验证对比研究,获得了大量的第一手资料,在此基础上研究提出了矿产

勘查“双控论”、“合理域”模型及风险投资决策支持系统。1973年,裴荣富先生出任地质部援助苏丹铬矿勘查地质队总工程师,主持东非裂谷北段铬铁矿普查勘探工作,矿床成因研究与“经济性”紧密结合的学术思想上升至新的台阶。

裴荣富先生认为,地质、技术、经济是矿产勘查的3个基本因素:地质因素解答“哪里有矿”,技术因素判断“矿床是否有价值”,经济因素决定“能否合理地开发利用”。继而又提出矿产勘查“双控论”：“矿床地质条件及其研究保证程度”和“矿床技术经济条件及可行性研究程度”,是决定矿产普查勘探开发是否可行的两个决定性控制因素,他呼吁改变过去那种主要以地质研究控制程度作为矿产普查勘探开发阶段划分标志、地质研究程度与技术经济研究程度相互脱节的状况。根据“双控论”,他将矿产普查勘探开发过程划分为矿产普查、矿床初步勘探(评价勘探)、矿床详细勘探(工业勘探)、可行性研究、矿山设计、矿山建设、矿山生产七大阶段,提出了不同阶段的工作性质与主要任务,这是中国第一个“探采选冶用”全流程技术路线图。

裴荣富先生研究认为,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、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),进而明确指出“矿床地质条件及其研究保证程度”、“矿床技术经济条件及可行性研究程度”是相互矛盾的两大因素,它们在相互矛盾中达到某种平衡的合理程度,则反映了找矿决策的优化程度。根据矿床地质复杂程度和决策相对最优化准则、在要求(任务)与可能(地质-技术经济条件)的辩证关系中,确定和获得的两者合理平衡范围,可确认为可供矿产勘查开发决策参考的“合理域”。一个矿床,或一个矿田,乃至一个成矿区域,之所以达到大型及超大型,一定是成矿物质聚合过程中达到“最佳耦合”,若耦合梯度较陡,即4个“等级体制”密切叠置,将可能形成大矿;若梯度缓,“等级体制”不叠置或互相配置不密切,则成矿不佳。据此,裴荣富先生建立了“5R”循环经济评价模型(减量化 Reducing、再利用 Reusing、再循环 Recycling、再发现 Rediscovery 和复垦 Reclamation),旨在最大限度提高矿产资源的利用率、延长矿山合理开发年限和保护生态环境,从而使矿产资源经过合理勘查开发变成资产,再经过合理利用变成资本。显然,裴荣富先生创立的“多重叠加-最佳耦合”矿床成因理论、“合理”勘查模型以及“5R”循环经济评价方法,对于推动矿业可持续发展具有重大的理论和实践意义。

### 3 裴荣富先生创立的矿床勘查开发“四元模型”是中国版的“ESG”

近年来,全球ESG(环境 Environmental、社会 Social、治理 Governance)发展迅猛,虽然该理念最早起源于18世纪的美国,但真正成为全球管理框架和实践指南则是在2004年,联合国发布了《Who Cares Wins》报告,正式提出ESG概念,强调统筹兼顾经济、社会和环境的和谐可持续发展。而裴荣富先生早在20世纪五六十年代就提出的“合理域”模型,其要义之一就是“经济效益最大化又不破坏生态环境”,当时裴荣富先生担任中国地质科学院综合地质普查勘探方法第九研究室的工程师。

裴荣富先生研究认为,地球的大气圈、水圈、岩石圈和生物圈构成了一个完整的“地球系统”,成矿作用的本质则是四大层圈中的物质迁移和能量交换,矿床勘查开发应该“合乎自然规律”,应该也可能做到“合理”。21世纪初,基于地质、环境、技术和经济4个评价单元,裴荣富先生及其研究团队正式提出了矿床勘查开发“四元模型”,并提出了矿产资源可持续勘查开发的评价标准。“四元模型”的准确表述是“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”。从这意义上讲,裴荣富先生是国际上最早关注矿床开发过程中环境问题的学者之一,“四元模型”可理解为裴荣富先生“矿床成因系统论”学术思想的升级版,甚至可认为是中国版的“ESG”。

“四元模型”注重矿产资源勘查开发中的生态环境问题,提出通过复垦等工程恢复、重建矿区生态环境等一系列可操作、可复制的技术方案,与中国当前生态文明建设的方向完全契合。随着治理理念的进一步拓展和科学技术的飞速发展,已过耄耋之年的裴荣富先生,与时俱进,奋发如初,指导研究团队中的年轻博士后、

博士生们,利用全球巨型成矿带研究成果,挖掘全球大型-超大型矿床数据,持续攻关,研发“四元模型”人工智能技术,建成了“矿业可持续勘查开发智能系统”,目前已成功对西藏甲玛铜多金属矿、广西平果铝土矿、辽宁大台沟铁矿、山东焦家金矿以及美国宾汉姆铜矿等典型矿床等金属矿山进行了验证、反演和再评价,评价结果与实际情况吻合,这一成果影响深远。对此,裴荣富先生在多个重要场合亲自予以解读,如他指出的,大台沟铁矿为典型的鞍山式铁矿,在中国分布最广、储量最大,但品位偏低,而且有的埋藏深度很大,往往深达上千米,当务之急是运用“四元模型”推算勘查、开发活动的“合理性”,使其居于最佳平衡点。甲玛铜矿不同,因为该矿位于生态环境脆弱的青藏高原,勘查开发始终是社会舆论关注乃至争论的焦点,对其开展“四元模型”评价,优先项必须是“生态环境”,包括矿区土壤污染、地表水污染、地下水污染、大气污染、生态脆弱性和地质灾害易发性等综合评价,为做到开发和环保“平衡”和“双赢”,数据模型可给出“承载度”和“合理域”,确保在规范、约束中开发,在开发中得到保护。

从“四元模型”到“智能系统”,裴荣富先生和其研究团队跨出了历史性的一步。弥留之际,裴荣富先生仍对矿业可持续发展念念不忘,希望在“双控论与合理域模型”(勘查)的基础上,继续研发矿山合理开发的“四元模型”(开发)。但愿后生们能用实际行动接棒他老人家未竟的事业。

是以为“代前言”,希冀不吝指正。

中国地质调查局 张洪涛

2025年02月15日