

地球系统科学与成矿学研究

翟裕生

(中国地质大学“岩石圈构造、深部过程及探测技术”教育部重点实验室 北京 100083)

摘要 在简述地球系统科学的基础上,文中提出了由地球系统科学引发的成矿学研究3个观点:(1)成矿系统是一个特色的地质系统;(2)成矿系统与其它系统的关联;(3)地质突发事件具有灾害和资源的两重性。针对地球系统科学要求和矿床学学科发展进程,提出了5个亟待加强的研究领域或课题:(1)深部过程、浅表环境与成矿系统;(2)重大事件与成矿;(3)生命活动与成矿;(4)物理成矿作用和(5)海洋成矿作用。在结语中,作者强调要从地球系统的大背景来研究成矿环境、成矿过程和成矿动力学,也即将传统的矿床成因研究提高到地球系统科学的层次,为矿床学的发展提供新的广阔的理论基础。

关键词 地球系统;成矿系统;生命活动;物理成矿作用;地质事件;地质灾害;矿产资源

中图分类号 P-0;P61 **文献标识码** A **文章编号** 1005-2321(2004)01-0001-10

世纪之交地球系统科学的提出和广泛研讨是地学界的一件大事,它对各个原有学科都有深刻影响。本文以成矿系统研究为重点,探讨地球系统科学的兴起对成矿学研究的积极影响,并据此提出了成矿学研究的3个观点和应重视研究的5个领域,以期引起关注和共同探索。

1 地球系统科学的兴起

20世纪80年代以来,由于对海洋、大气、生态和全球变化等科学研究取得重大进展(国际深海/大洋钻探计划(DSDP/ODP)、国际地圈生物圈计划(IGBP)及其他^[1~6])以及对地球物理、地球化学、地球动力学和深部过程的深入研究,发现地球上很多重大事件和自然现象是密切关联的,是地球系统演化过程中的种种表象。对这些问题的深入研究,已不是单一学科所能及,需要发展一门新的集成科学,从全球观点系统研究重大地学问题。这就逐步引发了地球系统科学概念的提出。开始是1983年,美国

NASA 下属的一个委员会的文件中,提到地球系统和地球系统科学两词,提出要把地球的各组成部分与相互作用作为一个系统来研究,并于1988年出版《地球系统科学》一书^[1],正式系统阐述了地球系统和地球系统科学的观点。它强调从整体出发,将大气圈、水圈、岩石圈和生物圈看作是有机联系的地球系统,发生在该系统中的各种时间尺度的全球变化是地球系统各分量(层圈)相互作用的结果,是三大基本过程(物理、化学、生物学)相互作用的结果,以及人与环境(生命与非生命)相互作用的结果,并首次提出将人类活动作为与太阳和地核并列的、能引发地球系统变化的驱动力——第三驱动因素^[2]。上述基本研究目标的实现,将能从根本上回答地球是怎样运行的,又是怎样演化的,它的未来将如何发展等问题,以便更好地为人类合理利用资源和改善全球环境服务,为人与自然和谐发展服务。

地球上的诸多事物互相联系,单一学科研究只探索和阐述其某一部分或某一侧面,而高度集成的地球系统科学则能从整体上揭示地球演化和地质过程的机理,阐明过去认为互不相干而其实是有内在联系的各种现象。例如,汪品先指出:“吹向大洋的风尘长期增多会造成大气降温,因为它会增加海洋的生产力,减少大气中CO₂含量。智利海岸外鱼类的大批死亡和印尼岛屿的森林火灾缘于同因,因为它们都属于厄尔尼诺效应^[3]”,而厄尔尼诺是否与

收稿日期 2004-03-06

基金项目 国家自然科学基金重点项目(40234051);教育部211工程项目

作者简介 翟裕生(1930—),男,教授,博士生导师,中国科学院院士,主要从事矿床学、矿田构造和区域成矿学的教学和研究工作。

洋中脊热水系统间歇性喷涌、海水显著增温有关,也是值得研究的问题。再有,大洋中脊热水成矿系统与高温环境下的洋底生命系统“相伴随”,这在以前是难以想象的。

经过十多年的研讨,现在比较公认,地球系统科学是地球科学发展的新阶段和更高层次。它的提出是20世纪后半叶经济全球化和科学技术迅猛进步的产物,也与人类要善待地球、可持续发展观念的兴起有关,它预示着地球科学的一场革命性突破正在来临。一些学者指出^[3,4],19世纪的地学革命是达尔文的生物进化论,20世纪的重大进展是板块构造论,而地球系统科学将对21世纪的地学研究起到统领作用,是地球科学研究的总方向。地球系统科学是各地学学科的集成与整合,将对资源、能源、环境、生态、灾害等学科的发展起到促进作用。以研究成矿规律为目的的矿床学的发展和走向,也必然会从地球系统科学的观念和方法中得到启示,从而显著提高本学科的研究水平,使21世纪的矿床学焕发出新的光彩,为保证矿产资源供应和促进地学发展作出更大贡献。

2 从地球系统科学着眼,矿床学研究的几个基本观点

从进入20世纪起,矿床学研究大体经历了3个阶段。20世纪50年代以前,主要是解剖典型矿床,探讨矿床成因,建立矿床模型。后50年中,除继续研究矿床成因和模型外,重视区域成矿研究,并逐步形成了以板块构造为主要基础的区域成矿学体系,是为第二阶段。上世纪80年代以来,各类成矿系统及其动力学背景尤其是超大型矿床的成矿环境受到重视,正逐步向全球成矿学的方向发展,同时也开展矿床-环境的一体化研究,以更好地为矿业开发和环境保护的协调发展服务^[7]。可以认为,进入21世纪,矿床学研究进入了一个新的阶段,即以全球演化和地球动力学为背景的成矿学研究阶段,从这个目标出发,传统的矿床学研究思路有些已不适应,要按照新形势新任务的要求,探索新的研究思路和方法。现初步提出几个基本思路或观点,供研究讨论。

2.1 成矿系统是一个有特色的地质系统

成矿系统作为地球上的一种特殊的物质运动系统,它凸现出地球有用物质由分散到浓集成矿的过程和机制,具体地讲,“成矿系统是指在一定的时空

域中,控制矿床形成和保存的全部地质要素和成矿作用动力过程,以及所形成的矿床系列、异常系列构成的整体,是具有成矿功能的一个自然系统^[8,9]。这一概念包括了成矿环境、控矿要素、成矿过程、成矿产物以及成矿后变化保存等内容,是一个广义的成矿系统概念,它体现了矿床形成有关的物质、运动、时间、空间、形成、改变的统一性、整体观与历史观,是一个日益受到重视和应用的成矿学基本观点。

成矿系统与地球上其他自然系统相比,有下列特点:(1)综合性:矿床形成一般都经过源、运、储的复杂过程,又受物质、能量、构造、化学等多种因素制约,其成矿机理是由于物理的、化学的、生物的多种作用的耦合,而成矿又常需要经过多个地质阶段的元素反复富集才能完成。因此,矿床是综合地质作用的产物,其综合性比一般岩石更为突出。(2)稀有性:成矿作用的发生是由于多种有利因素在一定时空域中的耦合,它的几率很低、条件苛刻,是罕见的地质作用。矿床常被视为地质异常物,达到地球物质发展演化的最高层次,是不可再生的宝贵资源,弥足珍贵。(3)自然-经济复合性:矿石是指能被人类有效利用的地质产物,矿石和矿床的价值取决于人类社会的需求程度和科技水平。因此,与其他单纯的自然系统相比,成矿系统是由地质作用与人类生产活动相结合而界定的一个自然-经济复合系统。其具体内涵是动态的、历史的,除受地质因素影响外,还受社会、经济、技术、地理等多个因素的制约。

成矿系统发生在地球的各个层圈,在地球表层的沉积成矿系统、风化成矿系统和洋中脊热水成矿系统等可以直接观测,产在上地幔和地壳中的岩浆成矿系统(金刚石、铬、铂族元素等)可借助岩石学、地球物理和构造地质学研究等推测其成矿环境,下地幔和核/幔边界上的岩浆矿床可能大量存在,将随着科技的日新月异而被发现。

成矿系统是地球系统演化的产物,构造动力是成矿要素之一。每种构造动力体制都是一个系统,都有相应的构造组合、岩石建造、矿质来源和流体系统,并耦合为一定的成矿系统,因此,笔者按构造动力体制将成矿系统分为七大类^[8]:(1)伸展构造成矿系统;(2)挤压构造成矿系统;(3)走滑构造成矿系统;(4)隆升构造成矿系统;(5)沉降构造成矿系统;(6)大型韧性剪切成矿系统和少见的(7)陨击构造成矿系统。每一个大类中再按成矿环境、含矿建造、成矿机理等划分出若干成矿系统。

成矿系统发生在地球演化的各个阶段,太古宙时地壳较薄,镁铁质火山活动强烈,地表的VMS矿床及BIF矿床占较大比重,古元古代和中元古代时大陆壳逐渐加厚,以SEDEX、VMS型Pb、REE、Cu和镍岩型Au、U等矿床为特征。显生宙以来,板块构造运动明显,壳幔层圈发育趋于成熟,生物有机质大量繁衍并参与成矿,热液矿床数量剧增,生物成因矿床大量形成,多种稀有元素、分散元素等经过地史上反复多次浓集而形成花样繁多的矿床类型。每个时代的矿床,都是在一定的地质环境中形成的,都有其积淀背景和时代特征^[8]。从宏观尺度看,成矿系统是地球系统历史演化中千变万化的复杂巨网络中的一个环节,有其发生、演变和消亡的历史过程。

2.2 成矿系统与其它地质系统的关联

前已述及,成矿系统及所成矿床是多个地质系统综合作用的结果。岩浆矿床、热液矿床和变质矿床主要是地内各子系统(构造、岩浆、岩石、流体……)耦合作用而成的,沉积矿床、风化矿床则是地球表层系统含生物圈、水圈、大气圈和太阳能综合作用的产物,而火山成因矿床、喷流沉积矿床、热泉型矿床等则是地内系统(岩浆、流体、地热等)和表层系统综合作用的结果。没有地球系统中的各个相关子系统(各类地质作用、各个层圈及亚层圈等)的参与,成矿系统是不可能发生的。因此,成矿系统是依赖于其它地质系统而存在的,是其它各系统在特定时空域中联动的耦合的产物。

从另一方面看,成矿系统既是各类地质作用的综合产物,又是各种地质作用信息的载体,是各类地质系统和地质作用过程的标记和“见证人”。也即在成矿过程中,各种参与成矿的地质作用的踪迹会保存在矿床之中,包括其矿体、围岩、矿物组合、蚀变岩乃至矿物流体包裹体中。这些信息极为珍贵,例如,矿床中若干元素(如S、H、O、C)的同位素特征可提供有关成矿时大气和海洋的组成、演变等信息,也可提供关于地幔地壳组成、结构及其相互作用的系统信息,同时记录了有关构造、岩浆、流体、风化、变质等地质作用的过程。又例如,对BIF铁矿和含金砾岩矿床地球化学过程的研究,为认识太古宙和古元古代时的大气和水圈化学成分(O_2 少,还原程度高)提供了证据。对古矿床风化壳和表层次生矿石的研究可提供有关古气候、古地理、古生物活动及其相互作用的丰富信息。对热液矿床及其成矿流体的性状和成分研究可反演有关古热液系统、水岩反应

及所在地质环境的信息。对岩浆矿床和斑岩矿床的成因研究,增加了对岩浆物理化学反应、气相分异以及不同流体相中化学元素配分、组合等的了解。

由上述可见,矿床中包含的多种信息是标识不同地质环境和不同地质作用过程的“见证人”。它与古生物化石之能反演古地理、古海洋、古气候和古生态环境类似,可起到异曲同工的作用。不同的是,矿床信息除能反演地表环境外,还能记录地壳内部乃至上地幔的各类深部环境和热动力过程。也即对矿床包括超大型矿床的物质组成、时空分布和形成机制的认识,可用来反演岩石圈的组成和演化过程。

由此可以引伸出,矿床学研究不仅为矿产勘查和开发服务,同时,也为地球科学有关学科提供重要信息和“见证”,为成矿系统与其他地质系统内在联系提供事实依据。因此,它也能对地球系统科学的发展贡献力量。从地质学科发展史看,由矿床学最先引用并进而推广到其他地学学科的方法手段是不少的,如稳定同位素(H、O、S、C)地球化学、流体包裹体测温及成分分析,用于示踪和测年的放射性地球化学(U-Pb、Re-Os、Ar-Ar体系等)。矿床学的发展也相应推动了广泛的实验研究,如硫化物、氧化物和硅酸盐体系的相平衡,矿石和脉石矿物的液相和气相溶解度及水化学反应速度以及水和多相体系中稳定同位素的分配等^①。这些例子清楚地表明矿床学研究已经提供了有关地球性质和各种地质过程的重要信息,矿床研究对广泛的地学领域产生了深刻影响。相信随着地球系统科学的兴起和新技术方法的应用,矿床学对其他地学学科的影响和信息提供,将会更加有力。由此可明确无误地提出矿床学既扎根于地学基础研究,又能反演地质作用过程和促进地球科学的观点。

2.3 地质突发事件具有灾害、资源两重性

地质作用过程既有渐变,又有突变。渐变是积累,突变是爆发。突变常造成地质环境的巨变,有着革命的意义。研究表明,地球的动力学有临界阈值,超过一定“阈值”后就会发生突发事件,如火山爆发,巨大地震,生物灭绝等。这类突发事件有全球尺度的,也有区域尺度的,它们不同程度地破坏了稳定的地球系统。从成矿作用分析,有的矿床形成是以渐进、渐变形式,如稳定大陆边缘的沉积砂矿和炎热

① 中国地质调查局发展研究中心. 21世纪初地质调查挑战与机遇. 地调情报, 2003(4): 216-225(内部版).

潮湿气候下的风化壳矿床,都是在比较稳定的漫长时间内生成的。另一类矿床的形成,则与地质突变作用如火山、地震等有关,成矿过程具有快速、突发性质。

以火山活动与成矿为例,火山活动既造成明显的灾害,又为某些矿床的形成创造条件。火山孕育和爆发过程可导致巨量物质和能量的突然释放,加速了物质的分异运动,将深源物质快速输运到浅表,并集中在火山口附近,由于构造、热能、化学反应等多种要素的耦合,常能引起有用物质浓集,形成多种矿床类型。如火山熔岩冷却可形成玄武岩、辉绿岩等工业岩石,经过热液蚀变的火山岩可作为非金属矿产(高岭石、明矾石、膨润土等);此外,还有火山-矿浆型铁矿(智利 de Lago,安徽姑山),火山-热液矿床(Cu, Pb, Zn, Au, Ag 等)和火山-沉积矿床。古代海底火山活动区常有 VMS 矿床和 SEDEX 型矿床,有极大的经济价值。现代洋中脊火山-热水集中区的黑烟囱等是正在形成的热液硫化物矿床,有巨大的潜在经济价值。与火山伴随的地热资源是一种清洁能源,有广泛的应用前景。

再以地震活动为例,这里主要是指地壳中发生最多的断层地震。地层和岩石受强烈错动时释放出大量能量,对地壳表层造成很大的破坏。但另一方面,大型活动断层又是一个断层-裂隙网络带,属高渗透性通道,地震时引起地下水位变化,沟通不同深度的含水层,水量突增,水温升高,这就造成了赋存在受震岩石中含矿溶液比正常情况下大规模地加速运动和在某些地段的汇合。断裂带的空隙网络又为矿石堆积提供空间,以长江中下游成矿带为例,沿着古长江深断裂带,含矿角砾岩普遍发育,其中除隐爆角砾岩外,主要是断层角砾岩和震积角砾岩,它们多发育在断层交会处,常含有矿石,被称为角砾型矿石(铜陵、宁芜等地矿床)。从角砾的形态、产状和结构看,它们是边破裂,边被含矿热液充填交代的,是一种有代表性的震裂-垮塌角砾岩。

现今地震多发生在地下 10~30 km 处,这个深度恰好也是大型热液矿床的根部,地震多发生在断裂交叉处,是热液矿床产出的最有利地段,地震又常与火山相伴,大地震可引起火山爆发,火山爆发过程中又出现频发地震,火山-地震的联合成矿作用值得研究;火山、地震主要发生在活动板块边界,这里又是金属矿床的汇聚地带……上述情况看来不是偶然的,都为构造地震成矿作用提供了直接或间接信息。

总之,火山和地震在一定条件下是一柄“双刃剑”,它既造成地球表层系统的巨大灾害,又可形成多种有用的矿产资源,可以认为这是地质突发事件的两重性(功能)。但这种两重性不是等同的,其中,火山、地震的灾害是直观的,与地质作用同步的和现实的,而火山、地震有关矿床的形成则是隐蔽的、滞后的和随机的。从总的地球成矿历史看,确实有相当一部分矿床形成与火山、地震作用有关,但不能认定每一次火山、地震活动都伴有成矿作用,而每一次火山、地震活动都伴有灾害后果(有强有弱)则是明确的。

除火山、地震外,突发的陨石撞击事件既对地球造成巨大灾变,有时也会导致地壳物质的剧烈分异并可形成矿床。世界上最大的镍-铜矿床肖德贝里就是公认的陨击成矿实例。

由上述可见,自然灾害科学和自然资源科学之间虽有明显区别,但不存在绝对的界限,从地球系统观出发,应该加强不同学科间的交叉、渗透与融合。

3 矿床学研究的若干重点问题

从地球系统科学考虑,也从矿床学本身发展趋势看,矿床研究应在深入矿床模型和成矿区带研究的基础上,向着整合集成的方向,探索带有全球意义的重大问题,包括以系统成矿学与演化成矿学相结合为基础的地球成矿学的基本问题。这方面的研究内容十分丰富,笔者试提出几个值得重视的研究领域及课题。

3.1 深部过程、浅表环境与成矿系统

矿床学研究显示,分布在地壳浅表的矿床,尤其是大型矿床,多是大规模的地质事件和地质作用的结果,受深部过程的控制。这是因为,各类矿床的成矿物质或直接来自地幔或下地壳,或经过壳幔物质多次循环反复,归根结底是来自地幔和地壳。大规模成矿又是在大尺度的构造热事件中发生的,它们多集中在壳幔边界、地壳内各层圈边界、板块边界和构造不连续带中,其热动力源于深部,而矿床就位于浅表环境,即矿在浅表,而根源在深部。因此,成矿的深部过程背景和表层响应就成为矿床学研究的一个重点。

深部作用过程的时空尺度大,运动缓慢,其对地壳表层系统的影响动辄会有几百、几千万年的滞后效应^[3]。以岩浆活动为例,其由深部向浅表的运移

除通过火山管道直达地表外(如含金刚石的金伯利岩筒),更多地是要经过几个“转运站”,包括地幔岩石圈中的“不连续层”、Moho 面、拆沉-底侵带、地壳中的深位岩浆房和浅位岩浆房等。这些“中转站”多是垂向排列,也有斜向排列的。岩浆中的成矿组分随着温度、压力的变化,在总体向浅部运移过程中逐层分异,逐层浓集,还经常与不同深度岩石发生同化混染等作用。总的趋势是向地壳浅部环境“散射”,其中的部分成矿物质得以保存,直到在适宜的构造-岩石环境和适度的物理化学反应中,含矿流体大量卸载,矿石堆积成矿床。经过这样的多层次转变,矿床定位时的物质组合与原来的深部矿源已不全相同,而由深部起源到浅表定位已经历了漫长的过程。

深部成矿物质在向浅表环境运输过程中,在不同深度可形成不同的矿石组合。例如同为富 Ni、Cu 的镁铁-超镁铁质岩浆在深部就位时可形成岩浆型 Cu、Ni 硫化物矿床,在喷溢地表时则形成产于超基性火山岩底部的熔岩型硫化物矿层,如西澳的 Kamalda 矿床,即与富 Mg 的火山岩科马提岩伴生。再如,与长英质岩浆关系密切的 Cu、Mo、Au、Ag 组合,在地壳中(距地表 3~5 km 或更深)常生成斑岩-夕卡岩型矿床,而当其衍生的含矿流体溢出地表时则成为热泉型矿床。由此可以认为,同一成矿系统,在不同深度条件下,可能形成同一类矿种但成因类型不同的矿床,表现为成矿多样性和可比性,有如矿物学中的“同质异象”。了解这一点对研究区域成矿规律和深部找矿是很有意义的。

起源于深部过程又涌现在地表的重大事件以地幔柱及其产生的巨型火成岩省(LIP)最为突出,这是当前地学界包括岩石、矿床学家都很关注的一个热点问题^[3,10]。地幔柱起源于核幔边界,是地球内部物质能量大规模对流运动形成的。地幔柱活动的一个直接标志是它在较短时间内(通常 ≤ 1 Ma),有大量地幔岩浆喷溢到地面(通常 > 100 km²),形成巨厚的玄武岩层。由于其体积庞大,能量超群,因而显著地改变了地球表层环境,甚至可造成大量生物灭绝。在大火成岩省形成与演化过程中,可在其伴随的侵入岩——镁铁质-超镁铁质岩中生成 V-Ti-Fe 矿床(如川西攀枝花矿床)和 Cu-Ni-Pt 矿床(如西伯利亚 Norilsk 矿床)。在玄武岩喷溢末期(或间歇期),也可在适当的还原环境中形成一定规模的沥青-自然铜矿床(如云南鲁甸)。我国西南峨眉山玄

武岩有关矿床除铁、钛、钒、铜外,其与附近区域广泛分布的铅、锌、银矿床的形成是否有内在联系也是值得研究的问题。

以上讲的是古生代与中生代之交时的大火成岩省与成矿,更早的前寒武纪的地幔柱成矿可以南非 Bushveld 火成岩套为例^[11],这里的镁铁-超镁铁质层状杂岩体呈清晰层状构造,岩系厚度达 8 km 以上,产有世界最大的铬矿床和铂族元素矿床,且有丰富的 Cu、Ni、V、Ti、Fe、Sn 等矿产资源。这一生成于 20 亿年前的巨大宝盆能保存至今,基本未受破坏,不能不说是造化之功。

需要指出的是,大火成岩省多数不位于板块边界上,其动力和过程受地幔活动控制,而难以用经典的板块理论来解释。因此,深入系统地研究地幔柱及其成矿作用,可促进深部过程、浅表环境与成矿系统的结合研究,有助于从全新角度来认识矿床的形成和分布规律。

3.2 重大地质事件与成矿系统

近年的研究表明,在地球演化的若干重要时段,地球的活动一反渐进的常态,而发生一系列的重大事件,如地幔柱强烈活动,地磁极变化异常,地表温度和大气成分突变、生命大爆发或生物大量灭绝以及巨大陨石撞击地球等,这些事件常带有突发性,它们对地球尤其是其表层系统造成重大变异和损害的同时,往往也伴有大规模成矿作用,因而引起人们的重视研究。涂光炽曾探讨了地球演化重大事件与成矿的关系,他列举出(1)晚震旦—早寒武世的生命大爆发与大量磷块岩矿床的形成;(2)中元古代的 Pb 和 REE 的爆发性成矿;(3)地幔柱事件与暗色岩(溢流玄武岩)成矿;(4)白垩纪重大地质事件与成矿、成石油;(5)斑岩铜矿与板块活动;(6)Hg、Sb、As 矿床形成主要与该区最晚一次地壳运动耦合等实例,并提出要注意研究大规模成矿作用与地球演化重大事件的耦合^[12]。

以当前备受关注、积累了一定资料、讨论较多的白垩纪重大事件为例,探讨其与大规模成矿的关系。多种资料显示^[3,13]:中白垩世时海水和大气的温度明显升高,高出现今 10 °C(温室效应);大洋中脊快速扩张,其生产率是正常值的 1.8 倍;地磁极性长期稳定为正极(121~84 Ma 间)未发生倒转;海平面显著上升,最高比现今高出 200~250 m;大气中 CO₂ 含量为现今含量的 4~10 倍;恐龙及其它生物大量灭绝,在 C/T 界限 0.5 Ma 期间埋藏有机碳总量达

1.6×10^{18} mol, 全球性大量缺 O_2 , 海相和陆相黑色页岩广泛发育, ……这些重大变异事件都是在白垩纪发生且互相联系, 可称为“重大事件链”。其起因可能十分复杂, 除巨大内动力外, 地外影响也不能忽视。

值得注意的是, 白垩纪期间全球有大规模的火成活动。在洋底形成了多处洋底高原、洋中脊和洋盆溢流玄武岩及海山群。突出的有西太平洋翁通—爪哇海台, 溢出玄武岩体积达 $3\ 600\ \text{万 km}^3$ [3]。此外, 在环太平洋的大陆板块边缘也发生了强烈的火山—岩浆活动。这样规模巨大的火山活动可能是造成同时期气候显著变化、大规模生物灭绝和热液活动速度加快等异常的一个重要原因。

而恰好在这一时期, 中国东部的地质构造格局发生突变, 以东西向为主的构造体制转变为以东北向为主的构造体制, 华北地区岩石圈强烈减薄, 大规模的火山—侵入岩浆活动频繁, 沉积盆地广泛分布, 还有显著的热液系统与水岩反应。受这些因素的共同作用, 导致了我国东部中生代成矿大爆发。如在中国占主导地位的金矿主要形成在 $(120 \pm 10)\ \text{Ma}$ 期内, 大量的 Cu, Pb, Zn, Ag, Hg, Sb, As 和部分 W, Sn, Mo 矿床形成在白垩纪。成矿的高强度、高密度和多样性是十分突出的, 构成了我国东部乃至东中部的很多重要矿集区。全世界约 70% 的石油、天然气资源也赋存在白垩系。我国已探明石油储量的 34.8% 产于白垩系, 其中松辽盆地占很大比例 [14]。涂光炽指出, 白垩纪的多个特殊事件是许多大型、超大型金属、非金属矿床和油气藏形成的关键 [12]。邓晋福等认为, “中国东部中生代成矿大爆发是特定地质背景下发生岩石圈大减薄和构造格局大转折相结合从而导致大规模壳幔相互作用和构造圈热侵蚀事件的产物” [15]。笔者认为, 重大地质事件伴有大规模成矿的原因很复杂, 其中的一个原因可能是重大构造转折引发的一系列不同尺度的成矿参数的联动转换作用。成矿是在物质分异运动中发生的, 重大构造变动导致地球物质、能量得以大量、快速转运, 并向地壳浅部集中, 为大规模成矿提供了前提。大型构造界面(如大型韧性剪切带、大型拆离带、大型走滑断层带等)又常是温度、压力、 $f(O_2)$ 、 $f(S)$, pH, Eh 等成矿参数转折带(急变带), 也是不同类型含矿流体的混合、排泄和沉淀堆积带。由于上述原因, 这些带中发生了显著的物理化学和生物化学作用, 导致成矿物质的大量沉淀堆积。对此, 笔者在另

两篇论文中专门讨论过 [16, 17]。

3.3 生命活动与成矿系统

在地壳表层, 生物作用是最活跃的地质营力, 它对大气圈、水圈和岩石圈有强大的影响, 同时也对表层系统中的矿床形成和改造产生巨大的作用。从上世纪 60 年代起, 一些学者开始生物成矿作用的专门研究, 包括生物有机质在元素迁移富集中的作用和生物成矿实验等。在我国, 叶连俊、涂光炽、傅家谟、范德廉等对生物成矿机理有深入论述, 殷鸿福提出生物—有机质—流体成矿系统 [18], 不少学者研究范围不只限于沉积矿床和沉积改造矿床, 还涉及大量的热液矿床以及产在沉积岩、变质岩和岩浆岩等岩石中的与生物有机质有关的矿床。

1980 年以来, 大洋观测和大洋钻探发现, 生物可以在极端环境中发育和繁衍。如在洋中脊, 人们发现在热液喷口附近存在以大量软体动物为主的生物群, 以及以化合作用自养细菌为主体的“黑暗食物链”。它们不是靠常温和光合作用产生有机质, 而是在黑暗洋底的高温(达 $300 \sim 400\ ^\circ\text{C}$)还原条件下, 通过化合作用产生有机质和微生物, 这些微生物以摄取富含金属的热流体为食料, 而软体动物等则以微生物为食。此外, 深海钻探还发现, 在数 km 深海底下面数百米处, 还有微生物在地层的极端条件下生存, 大都是微小的原核生物, 估计其生物量相当于全球地表生物总量的 $1/10$ [3]。这些重要发现说明“生物圈”的空间范围有很大扩展, 同样在地球历史上, 它也占有很长的时间坐标 [3]。这些广泛分布的微生物通过生物地球化学作用影响岩石圈, 改造深部与地表的沉积物和岩石, 自然也就广泛深入地影响到成矿作用。

生物成矿作用表现在 (1) 直接由生物遗体及其产物形成矿产, 如煤、石油、磷块岩等; (2) 细菌和微生物能大量摄取或吸附多种金属元素, 并使之富集成矿石, 如锰结核、铁矿石和硫矿石等; (3) 有机质流体对金属的活化萃取、络合、吸附、搬运和富集作用。U, V, Cu, Mn, Ag, Au, Pb, Zn 等多种矿产的形成与有机流体密切相关; (4) 生物有机质改变环境的物理化学条件, 促使某些成矿元素发生活化并沉淀聚集。

生物有机质的广泛存在和其对成矿的多种影响, 开拓了人们的眼界; “从金属到天然气水合物, 从火山口到岩溶洞, 无处不有微生物的活动, 许多原来以为是‘无机’的地质过程, 其实都是生命活动的

结果^[3]。现代分子生物学研究,推测地球上生命起源于还原环境下高温的洋底热液喷口^[3],这里既有高温热液携带的营养和能量,又有微生物易于保存繁衍的稳定环境。而同时,它也伴有热液硫化物矿石的大量堆积。洋底的生命活动与成矿系统相“伴生”,而且可以直接观察到,世界真是奇妙无比。如果上述推论能被证实,也即生物自起源之际就与金属成矿作用相伴随,是否可以这样认为,生物生长依赖成矿环境和成矿流体提供的热能和源源不断的多种营养(C、H、O、常量金属、微量元素和S、P、Cl等),而成矿作用也需要生物有机质的参与和帮助。由此可以看出,深入研究生命系统与成矿系统的结合,进一步探索生物成矿作用机理,将对认识矿床成因和成矿规律有深远意义。

此外,生物有机质成矿的深入研究,还可帮助揭示油气矿床与金属成矿相关性的奥秘。生物遗体及其演变物既直接产生石油、天然气和煤层,而当其参与流体中形成十分活跃的有机流体时又对活泼性金属的活化、运移、富集成矿起重要作用。油气盆地边缘常伴有Pb、Zn、Au等矿床。例如,加拿大西部阿尔伯达油田附近的Pine Point大型Pb-Zn矿床,日本的黑矿带与石油天然气田相邻,我国桂中、桂北等地与油气凹陷相邻的隆起区发现Au、Pb、Zn矿床^[18]。很多金属矿床中也常出现沥青、有机质流体等。油气矿产与金属矿产相伴产出的原因,若能借助生物成矿作用的深入研究,加以阐明,这将有助于突破原有学科界限,为构筑成矿系统、油气系统和成煤系统等统一的大地质资源科学提供基础理论。

深入研究生物成矿作用,系统研究沉积盆地(及火山-沉积盆地)是关键,盆地的沉积环境决定生物及原地有机物能否形成矿层或矿源层以及它们的展布,盆地的构造位置和沉积动力学条件决定生物有机质的丰度和类型及其埋藏过程;盆地构造演化史还决定生物成矿矿源层的层序位置,而金属硫化物矿床的最终形成时间与盆山构造作用密切相关^[18]。在盆山体系中,由于盆地压实埋深,温度升高,生物演化为有机质和有机流体,参与对成矿物质的活化萃取,并在盆地边缘地带形成矿石堆积。盆山转换过程中地壳流体活动加剧,热卤水大规模远距离运移并形成大型Pb、Zn矿床及部分油气藏的机制(如美国MVT型Pb-Zn矿),已引起广泛关注。

3.4 地球物理成矿作用

地球系统中的各种地质作用是三大基本过程

(物理、化学、生物)相互作用的结果。同样,作为地球系统一个组成部分的成矿系统也是物理、化学、生物作用相互作用的产物。在矿床学的形成和发展过程中,人们一开始就注意到化学作用对成矿的极端重要性,探讨了各类矿床形成的化学和物理化学反应过程(包括化学实验、化学热力学和化学动力学分析等),并以此为基础逐步构筑起矿床成因的理论基础,经过长期的研究积累和检验,很多化学成矿或地球化学成矿理论已比较成熟,近年来也有发展。生物成矿作用自上世纪中叶兴起且引起广泛关注,并不断扩展研究范围,已如前述。而物理成矿作用,这里主要指各类物理场如地电、地磁、地重、地热等对金属成矿的控制则很少研究。这是成矿学研究中的一个薄弱环节。

在矿床研究中,不时遇到一些难解问题,如Fe、V、Ti等矿石组合与Cu、Pb、Zn、Ag矿石为何总是分别产出?鄂东南鄂城、铁山等五大侵入岩体中的主要铁矿体为什么都产在岩体的南缘接触带?地史上的大型-超大型岩浆型和岩浆热液型铁矿床为什么多集中在中元古代,如Kiruna、Olympic Dam、白云鄂博、承德大庙-黑山等。这些现象是偶然的,还是有更深层次的原因?除去化学作用外,是否与成矿当时的地磁场和地球环境电-磁力有关,有待探索。

如前所述,矿床学研究的趋势之一是探讨矿床形成和分布的深部背景,包括中下地壳和上地幔的相互作用过程。而越向深部,除温度、压力的增大对成矿有直接作用外,深部的磁场、电场等的变化对成矿元素的分异-富集作用的影响也值得研究,而且这两方面研究内容的结合更值得关注。Ishido^[19]曾进行过水/岩反应系统中电动力的实验和理论模拟。孙忠实等^[20-21]注意到地球物理场对成矿的作用,他们以吉林夹皮沟金矿床及附近镍矿床为例,研究了磁引力和磁斥力对铁磁性元素组合(Fe、Co、Ni、Cr)矿物和抗磁性元素组合(Cu、Pb、Zn、Au、Ag)矿物在区域内分离存在的制约作用,以及电磁场强度变化对金属元素富集的影响等。

除上述处,局部地热场在矿床形成中的作用也需进一步研究,最近H. C. Barnes^[22]强调了深源岩浆在向浅表环境就位时,如能在同一构造-岩石空间多次侵位,使成矿所需热能充分供应和持续保存,这很利于大型矿床的形成。

尽管上述研究是初步的,但它展示了一个过去不太注意但很有意义的研究领域。从地球系统科学

的目标出发,成矿学研究也应在传统研究内容的基础上,加强对物理成矿作用的研究,这不仅有利于阐明大型金属矿床的形成机理,还对非金属矿床的形成以及开发矿物、岩石的有用性质有重要意义。在此基础上,还应开展化学成矿、生物成矿和物理成矿作用的综合研究,以便全面阐明矿床成因及其动力学背景,进一步掌握矿床的时空分布规律。

3.5 海洋成矿作用

浩瀚的海洋占地球表面积的 $2/3$,有丰富的矿产资源。如滨海 Au、Ti、稀土和金刚石的砂矿,盐类矿床,煤、石油和天然气资源;深海的富钴铁锰结壳和锰结核;大洋中脊的洋底热水沉积硫化物矿床以及海底火山活动有关的 VMS 矿床,海水自生沉积的磷灰石、海绿石矿床等。

现代的大洋钻探和洋底直接观测又提供了新颖而丰富的新型海底能源。例如,大洋钻探发现了大陆坡沉积物中存在着冻结的甲烷(天然气水合物)矿床,其数量巨大,即使根据最保守的估计,天然气水合物所蕴含的能量超过已知所有其他碳氢化合物的总和。尽管目前其商业价值有限,但是有极大的资源潜力。

对海洋沉积物和洋壳剖面的钻探,发现了洋中脊多处发育海底金属硫化物矿床,它们或产于沉积物中或在火山岩中,已查明其热液系统中与成矿有关的流体来源、迁移轨迹、成分以及能量,也提示了流体循环对海水成分、洋壳变化及深部生物圈的影响作用。同时也认识到,海底硫化物矿床与陆地上的巨型硫化物矿床之间在矿床形成过程、矿化类型等方面可直接进行对比,对海底矿床的钻探和研究,可为陆地上同类矿床的勘探提供新的启示^[13]。

除大洋中脊外,在汇聚板块边缘的前弧盆地区也发现了与硅质破火山口有关的正在生成的金属硫化物矿床(如日本东京南 400 km 的海底 Sunrise 矿床,该地水深 1 200 ~ 1 300 m,矿石组合为 Au-Ag, Zn-Cu-Pb),其形成过程和矿物组合与洋中脊产物可以对比,只是 Ag, Au, Zn 的含量更高,被认为类似于日本北鹿地区黑矿型块状硫化物矿床。

现代海洋的成矿物源多种多样且十分丰富,既包括陆地来源,也有海底火山、热液携带的洋壳物质,更多的是海水自生的矿产资源,它们或沉积海底,或保存在海水中。在汇聚板块的洋壳俯冲带中,表层物质和深层物质相互沟通,矿质更为复杂多样,且经历过更深层次的壳幔作用,直到在岛弧及其内

外侧盆地中堆积成多种矿床类型。海洋中成矿更有其多种多样的成矿机制,包括化学作用、生物作用和物理作用,其形成过程与大陆上成矿有明显差别。

海底现代热液成矿现象和天然气水合物的大量发现与观测,不仅为人类提供了有着良好开发前景的新的矿产资源类型,也提供了可直接观察“矿床形成过程”的天然实验室,因而开拓了矿床学的一个崭新领域,更新了人们对热液成矿和生物有机质成矿作用的认识,极大地促进了成矿理论的发展。

如果我们从现代洋底成矿向古代海洋成矿回溯,也能认识到海水成矿的重大意义。人们已知的矿床类型中,如与古海相火山有关的 VMS 矿床,海底喷流沉积形成的 SEDEX 矿床,滨海砂矿,各类沉积和生物沉积 Fe, Mn, P, Al 矿床,蒸发岩类矿床,石灰岩、石英岩、白云岩、砂岩、页岩等沉积矿产,还有部分变质矿床类型(如 BIF、大理岩、片岩、片麻岩等)的前身都是在古海洋环境中形成的。可以认为,在广大的地球表层系统演化过程中,由古到今,海洋中形成的矿床类型占了很大的比例,其矿床类型之多、矿床规模之大是大陆表生矿床难以比拟的。因此,海洋成矿研究至关重要的意义不言而喻。

海洋成矿研究不仅对了解和开发海洋矿产资源提供理论基础和前提,也为认识原为古海洋成矿现已转入大陆地体中的多种矿床的成因提供“将今论古”的参照系。同时,从地球系统科学考虑,古今海洋成矿的对比研究还能认识海水、大气、生物的历史演化过程提供重要的线索。海底热水硫化物矿床以及蛇绿岩套有关铬铁矿矿床等的形成都是在大洋中脊或近似的伸展构造环境形成的,这些构造环境正是地球内外动力作用的交汇地带,也是开展地幔柱活动和地幔动力学研究的良好场所。因此,无论从成矿学角度,还是从地球系统角度,海洋成矿作用及相关问题研究,都是一个非常重要的领域。当今,全球地学研究进展快速,在海洋科学方面尤为突出,对于海洋成矿学,我们应抓住时机,尽早加强系统研究。这不仅是由于忽视占地球表面 $2/3$ 的海洋的成矿研究,全球成矿学研究将无从谈起,而且海洋矿产资源竞争日益激烈,也不容许我们延误时机。

4 结语

以上讲到进入 21 世纪以来,值得注意的成矿学研究的 3 个观点和亟需加强的 5 个研究领域及课

题, 总的从地球系统的大背景来研究成矿环境、成矿过程和成矿动力学, 也即将传统的矿床学研究提高到地球系统科学的层次, 这是一项艰巨工作, 需要坚持不懈地努力。

矿床学发展有两个并行不悖的方向, 一个是本文重点讨论的成矿学(成矿理论)方向, 它侧重于成矿过程、成矿机理及其背景研究; 一个是应用矿床学或经济地质学方向, 它侧重于矿床模型和矿床预测、评价, 包括经济、技术、环境等因素的研究。限于篇幅和重点, 本文对应用矿床学未作更多研讨, 但绝不是忽视它的意义, 作者在有关论文中曾专门论述^[9, 23]。应用矿床学和成矿学是互为依托的。应用矿床学是成矿学的基础, 而成矿学是矿床地质学的进一步整合和提高。它们在新的世纪中都将有所侧重地发展, 达到“比翼齐飞”的良好态势, 为保证矿产资源的持续供应和促进地学发展服务。

在研究过程中, 汪品先教授提供有关国际会议文献, 且文中多次引用他的文献, 国家自然科学基金委员会地学部多次组织有关地球系统科学的研讨会, 给笔者以多方面的启发, 孙忠实博士提供了有关地球物理成矿作用的文献材料, 管志宁教授审阅了有关地球物理成矿的内容并提出中肯建议, 王建平博士对论文初稿作了加工整理, 在此一并深表谢意。

References[参考文献]:

- [1] CHEN Panqin, MA Zhenhua, WANG Gengchen(translated). *Earth System Science*[M]. Beijing : Seismological Press , 1992. 1-189(in Chinese). [陈泮勤, 马振华, 王庚辰, 译. 地球系统科学[M]. 北京: 地震出版社, 1992. 1-189.]
- [2] CHEN Panqin. Earth system sciences : Progress and prospect [J]. *Advances in Earth Sciences* , 2003 , 18(6) : 974-979(in Chinese). [陈泮勤. 地球系统科学的发展与展望[J]. 地球科学进展 2003 , 18(6) : 974-979.]
- [3] WANG Pinxian. Earth system sciences in China *Quo Vadi*[J]? *Advances in Earth Sciences* , 2003 , 18(6) : 837-851(in Chinese). [汪品先. 我国的地球系统科学研究向何处去[J]? 地球科学进展 2003 , 18(6) : 837-851.]
- [4] BI Siwen. Earth system sciences : The frontier of earth science and scientific basis of the sustainable development strategy in the 21st Century[J]. *Geology Bulletin of China* , 2003 22(8) : 601-612(in Chinese). [毕思文. 地球系统科学——21 世纪地球科学前沿与可持续发展战略科学基础[J]. 地质通报, 2003 22(8) : 601-612.]
- [5] DFG. *Geotechnologien , Das " System Erde " : Vom Prozessverständnis zum Erdmanagement*[M]. Lanzhou : Lanzhou

University Press , 2003. 1-116(in Chinese). [德意志研究联合会(DFG)地球科学联合研究评议委员会著. 孙成权, 赵才生, 等译. 地球工程技术、地球系统 : 从工程认识到地球[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2003. 1-116.]

- [6] SUN Chengquan , LIN Hai , QU Jiansheng. *Intel Global Change Research Key Projects and Partnership*[M]. Beijing : Meteorology Press , 2003. 1-211(in Chinese). [孙成权, 林海, 曲建升. 国际全球变化研究核心与集成研究[M]. 北京: 气象出版社, 2003. 1-211.]
- [7] ZHAI Yusheng. Hundred years' retrospect and developing trend of mineral deposit geology[J]. *Advance in Earth Sciences* , 2001 , 16(5) : 719-725(in Chinese). [翟裕生. 矿床学的百年回顾与发展趋势[J]. 地球科学进展 2001 , 16(5) : 719-725.]
- [8] ZHAI Yusheng. On the metallogenic system[J]. *Earth Science Frontiers* , 1999 , 6(1) : 13-27(in Chinese). [翟裕生. 论成矿系统[J]. 地学前缘, 1999 , 6(1) : 13-27.]
- [9] ZHAI Yusheng , DENG Jun , LI Xiaobo. *Regional Metallogeny* [M]. Beijing : Geological Publishing House , 1999. 1-287(in Chinese). [翟裕生, 邓军, 李晓波. 区域成矿学[M]. 北京: 地质出版社, 1999. 1-287.]
- [10] Department of Earth Sciences , National Natural Science Foundation of China. *Strategic Key Point of the Development of Earth Science in the 21st Century*[M]. Beijing : Science and Technology Publishing House of China , 2002. 1-176(in Chinese). [国家自然科学基金委员会地球科学部. 21 世纪地球科学战略重点[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2002. 1-176.]
- [11] SCHÜRMANN L W. *Chromium , the Mineral Resources of South Africa*[M]. Parow , Cape Town , SA : CTP Book Printers , 1998. 90-105.
- [12] TU Guangchi. Consideration about some problems on the prospecting of super large ore deposits[A]. *Super large Ore Deposits of China*(II) [M]. Beijing : Science Press , 2003. 1-13(in Chinese). [涂光炽. 寻找超大型矿床基础研究若干问题思考[A]. 中国超大型矿床(II) [M]. 北京: 科学出版社, 2003. 1-13.]
- [13] IPSC. *Earth , Oceans and Life : Integrated Ocean Drilling Program*[M]. Washington D. C. : Initial Science Plan , 2001 , 2003-2013.
- [14] ZHU Xun. *Mineral Resources of China. Volume 1 , Pandect and Energy Resources*[M]. Beijing : Science Press , 1999. 382-383(in Chinese). [朱训. 中国矿情. 第一卷, 总论·能源矿产[M]. 北京: 科学出版社, 1999. 382-383.]
- [15] DENG Jinfu , MO Xuanxue , ZHAO Hailing , et al. The Yanshanian lithosphere-aesthenosphere catastrophe and metallogenic environment in East China[J]. *Mineral Deposits* , 1999 , 18(4) : 309-315(in Chinese). [邓晋福, 莫宣学, 赵海玲, 等. 中国东部燕山期岩石圈-软流圈系统大灾变与成矿环境[J]. 矿床地质, 1999 , 18(4) : 309-315.]
- [16] ZHAI Yusheng , DENG Jun , DING Shijiang , et al. Discussion on critical transition of ore-forming parameters(factors) [J]. *Mineral Deposits* , 2001 , 20(4) : 301-306(in Chinese). [翟裕

- 生, 邓军, 丁式江, 等. 关于成矿参数临界转换的探讨[J]. 矿床地质, 2001, 20(4): 301-306.]
- [17] ZHAI Yusheng, LU Guxian. Transition of tectonic and dynamic regime and mineralization[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2002, 23(2): 97-102(in Chinese). [翟裕生, 吕古贤. 构造动力体制转换与成矿作用[J]. 地球学报, 2002, 23(2): 97-102.]
- [18] YIN Hongfu, ZHANG Wenhui, ZHANG Zhijian, et al. *The Bi-metallogenesis System*[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1999. 1-207(in Chinese). [殷鸿福, 张文淮, 张志坚, 等. 生物成矿系统论[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999. 1-207.]
- [19] ISHIDO I. Experimental and theoretical basis of electrokinetics phenomena in rock-water systems and its applications to geophysics[J]. *Journal of Geophysics Research*, 1981, 3: 86.
- [20] SUN Zhongshi, DENG Jun. Electro-magnetic force controlling pulsing injection of metallogenic fluid[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2003, 38(1): 97-106(in Chinese). [孙忠实, 邓军. 电-磁力对成矿流体脉动贯入的控制作用[J]. 地质科学, 2003, 38(1): 97-106.]
- [21] DENG Jun, WANG Qingfei, SUN Zhongshi, et al. The possible relationship between ore mineral's magnetic characteristic and gold element enrichment[J]. *Geoscience*, 2002, 16(2): 177-179(in Chinese). [邓军, 王庆飞, 孙忠实, 等. 矿物磁性与金元素富集的可能关系[J]. 现代地质, 2002, 16(2): 177-179.]
- [22] BARNES H L. *Energetics of Hydrothermal Ore Deposits in Frontiers in Geochemistry: Organic, Solution and Ore Deposit Geochemistry*[M]. Columbia: Bellwether Publishing, Ltd, 2002. 184-190.
- [23] ZHAI Yusheng. Mineral deposits geology towards the 21st Century[J]. *Mineral Deposits*, 2001, 20(1): 10-14(in Chinese). [翟裕生. 走向 21 世纪的矿床学[J]. 矿床地质, 2001, 20(1): 10-14.]

EARTH SYSTEM SCIENCES AND THE STUDY ON METALLOGENESIS

ZHAI Yu-sheng

(*Key Laboratory of Lithospheric Tectonics and Lithoprobng Technology, China University
of Geosciences, Ministry of Education, Beijing 100083, China*)

Abstract : Inspired by Earth system sciences that have been discussed briefly in the paper, the author puts forward three viewpoints on the study of metallogeny. They are as follows : (1) metallogenic system is a kind of special geological systems ; (2) metallogenic system is closely related with other systems ; (3) abrupt geo-events show dual features that are both of disaster and of mineral resources. In order to meet the demand of Earth system sciences and the development of ore deposit geology, the author has proposed five research fields that should be strengthened, namely, (1) deep processes, shallow environment and ore-forming system ; (2) important geological event and mineralization ; (3) life activity and mineralization ; (4) geophysical ore-formation ; (5) ore-forming processes in the ocean. At last, the author stressed that the research on ore-forming environment, ore-forming processes and ore-forming dynamics should be synchronized with the study of Earth system sciences, i. e., we should enhance traditional mineral deposit research to the level of Earth system sciences, so as to provide more expansive basis for the development of ore deposit geology.

Key words : Earth system ; metallogenic system ; life activity ; physical ore-formation ; geological event ; geological disaster ; mineral resource