

# 诱导成矿学：一门亟待建设的新兴交叉学科

王 焰<sup>1,2,3</sup>, 李宁波<sup>1,2,3</sup>, 朱建喜<sup>1,2,3</sup>, 鲜海洋<sup>1,2,3</sup>, 朱润良<sup>1,2,3</sup>,  
陈情泽<sup>1,2,3</sup>, 马灵涯<sup>1,2,3</sup>, 吴世军<sup>1,2,3</sup>, 梁晓亮<sup>1,2,3</sup>, 肖 兵<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院 广州地球化学研究所 中国科学院矿物学与成矿学重点实验室/广东省矿物物理与材料研究开发重点实验室, 广东 广州 510640; 2. 中国科学院深地科学卓越创新中心, 广东 广州 510640; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 矿产资源是人类社会发展的重要物质基础, 绝大部分矿产属于不可再生资源, 因此, 迫切需要新的思路和方法实现矿产资源增储和高效绿色开发。本文提出创建一门新兴交叉学科——“诱导成矿学”的基本设想, 该学科主要研究如何利用人工干预手段, 加速并控制成矿元素的活化、迁移与富集, 使得当前技术经济条件下不具开采价值的矿物岩石、低品位矿石以及尾矿、工业废弃物等转化为具有一定经济价值的矿产资源。“诱导成矿学”以岩石学、矿物学、矿床学、地球化学和构造地质学等地质学主要分支学科为基础, 融合化学、生物学和环境科学等学科的新进展, 旨在表生成矿人工调控和人类世矿产再造两个研究领域对矿产资源的增储和开发提出变革性思路和方案。

**关键词:** 诱导成矿; 表生成矿调控; 人类世矿产; 矿产资源增储; 高效绿色开发

**中图分类号:** P57; P58; P59; P61 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1552(2022)05-0842-006

## 0 引 言

基于矿物学和矿床学研究应面向国家重大需求的主旨, 中国科学院矿物学与成矿学重点实验室组织中青年科研人员进行了广泛研讨, 提出了创建“诱导成矿学”这一新兴交叉学科的基本设想, 以助力我国矿产资源增储和高效绿色开发。应中国科学院青年创新促进会广州地球化学研究所小组的邀请, 现将研讨的初步想法整理成文, 供有兴趣的同行共同探讨, 以使其不断完善和向前推进。

## 1 诱导成矿学概念的提出及其科学价值

成矿学研究多针对已知矿床的成因, 建立相应

的成矿模型, 并指导找矿勘查实践。而诱导成矿学则是研究如何利用人工干预手段, 加速并控制成矿元素的活化、迁移与富集, 使当前技术经济条件下不具开采价值的矿物岩石、低品位矿石以及尾矿、工业废弃物等转化为具有一定经济价值矿产资源的新兴交叉学科, 其主要研究内容是通过友好环境手段, 人为改变目标地质体所处的地形地貌、物理化学条件、生态条件等, 加速并控制岩石矿物中具有重要经济价值元素的聚集, 最终转化为具备开采价值、可被利用的矿产资源。该学科的提出与建设有望对未来全球矿产资源的分布与综合利用产生重大影响。

(近)地表矿产资源的形成经历了以百万年计的漫长地质成矿过程, 而人类却通过近两百年迅速提

升的勘探开采技术, 快速消耗着这些短期内无法再生的有限资源。自古以来, 人类不断从自然界寻找出露地表或隐伏地下的矿体以获取矿产资源。在人类耗费的自然资源中, 80%以上为矿产资源, 仅 2018 年, 全球就消耗了 227 亿吨的化石能源、金属和重要非金属矿产(自然资源部中国地质调查局国际矿业研究中心和自然资源部中国地质调查局中国矿业报社, 2019)。氮、磷、钾是农业三大基础肥料, 对保障粮食生产安全意义重大, 其中磷和钾均属于我国 24 种战略性矿产之一(中华人民共和国国土资源部, 2016), 我国现有磷矿和钾矿储量仅占世界的 4.5%和 9.7%, 但每年开采量分别占全球开采量的 45.8%和 13.0%(USGS, 2020)。按现有开采规模测算, 我国的磷矿和钾矿基础储量将在未来 30~70 年内消耗殆尽, 具有不可持续性。虽然, 全球矿产资源不会在短期内枯竭, 但地球上有限的矿产资源终将无法满足人类社会巨量的消耗。而且, 世界各国矿产资源分布极不均衡, 围绕矿产资源开展的垄断、竞争、控制以及争夺一直是各国资源战略安全的核心问题。随着勘探开发力度的不断加强, 在地壳千米以浅获得新的找矿突破难度日益增大, 虽然我国已将深部找矿作为勘探的重点, 但千米以深的矿产资源因找矿和开采难度急剧上升而大受制约, 深部矿产资源的高效开发和利用也面临一系列的工程挑战(Cai and Brown, 2017)。因此, 寻找新的资源突破口对于国家未来的矿产资源战略布局至关重要。

诱导成矿, 本质上就是一种模拟自然过程、以人工再造矿产资源为目的的人类活动。目前已有不少学者开始关注微生物群落、气候条件以及地形地貌对金、钴、镍、铀和稀土等矿床形成的影响(陈毓川等, 2000; 王登红等, 2017), 但是对于如何利用人工干预手段促进矿产资源的富集还鲜有报道, 更缺乏理论基础。就学科发展而言, 人工干预成矿尚处在思想萌芽阶段, 已获得的认识呈碎片化, 未形成系统性的理论框架。因此, 亟待建立诱导成矿学学科的理论基础和研究方向, 开展不同类型矿产资源的诱导成矿学研究, 形成诱导成矿理论体系, 并服务于国家战略资源重大需求。

## 2 诱导成矿学的理论基础

矿床的形成是有用元素在地壳浅部的富集过程。从系统科学的角度来看, 成矿过程处于一个非平衡的开放体系, 矿体不断与外界进行成矿元素和

能量的交换, 并维系成矿过程的形成和发展(申维, 2000)。根据“耗散结构”理论(“分支理论”和“涨落理论”), 成矿作用或矿化富集这些不可逆过程发生的实质就是无矿的非平衡定态失稳, 并转变为耗散结构(成矿状态)的原因、条件和机制问题(於崇文, 1987)。对特定的矿化类型及其形成条件和成矿过程, 可通过计算模拟手段获得成矿过程参数, 反演成矿进程, 进而通过所确立的成矿过程参数指导诱导成矿的实现。

20 世纪 80 年代发展起来的地球系统科学首次将人类活动作为与太阳和地核并列, 能引发地球系统变化的第三驱动因素, 该学科重要目标之一是描述和认识人类活动诱发的重大地球变化(中国科学院地学部地球科学发展战略研究组, 2009)。而人类有目的地主动改造自然、诱发成矿过程、催生新矿床形成等, 这无疑是人类活动作为地球系统变化第三驱动力的极好证明。

## 3 诱导成矿学的学科体系与主要研究范畴

“诱导成矿学”属于地质学的分支学科, 其立足于传统成矿学, 以矿物学、岩石学、矿床学、地球化学、构造地质学等基础学科作为理论支柱, 通过与化学、生物学和环境科学等学科的深度融合(图 1), 实现“不可再生资源”的再生利用, 解决当前矿产资源



图 1 诱导成矿学与其他学科关系示意图

Fig.1 A schematic diagram showing the relationship of induced metallogeny and other disciplines

短缺及过度开采带来的严峻问题。根据不同的研究对象和目的,诱导成矿学的研究方向可分为表生成矿调控和人类世矿产再造两大主要研究范畴。

### 3.1 表生成矿调控

表生成矿调控是指对具有成矿潜力的低品位表生矿床进行人工干预,采用地质、化学、生物等多学科交叉的方法和手段,促进矿石矿物的形成或生长;通过加速成矿元素的迁移、富集来缩短成矿时间、调控成矿方向,在一定区域或局部范围内构建具有经济价值、可供开采利用的人工诱导矿床(图 2)。

表生风化矿床是各类地质建造及矿床剥蚀出露于地表,经长期风化、淋滤等作用而形成的矿床,是一种便于开采的优质矿产资源。而表生成矿过程中形成的一些品位达不到但是已经非常接近工业开采标准的含矿围岩、矿化区或矿化体,目前无法进行资源的有效利用,甚为可惜。如果根据地质、环境、气候等条件,通过人工干预的方式,在一定时期内将其矿化程度提升至工业开采标准,一方面可实现资源增储,缓解某些关键矿产紧缺局面,创造重大资源价值;另一方面也可通过对矿质元素的活化、迁移和富集过程的监测,加深人们对成矿过程的理解和认识,丰富成矿理论。

表生成矿调控的切入点可包括以下几方面:

①成矿潜力评估:岩石的成矿潜力受控于其地球化学特征、矿物组成、岩石结构及所处的构造条件等因素,通过对上述条件的综合研究,对岩石的成矿潜力进行评估,并建立完善的岩石成矿潜力评价理论体系;同时,通过研究具有成矿潜力岩石的地球动力学背景和源区特征,限定该类型岩石的分布规律,圈定目标区域。②人工干预成矿:通过对水文条件和地貌条件进行干预,促进成矿元素的有效活

化、迁移和富集,限定控制表生成矿的最优条件,进而促进表生矿床的形成。③生物富集成矿:对有利于成矿元素富集的植物和微生物等进行培养和基因改造,通过生物手段将赋存于岩石中的成矿元素进行选择性富集并促使其成矿;同时利用植被覆盖条件控制岩石的风化过程,实现对风化过程的调控。④清洁能源加速成矿:利用绿色清洁能源(如地热、风能、太阳能等)加速表生矿床的聚集,从而形成更具规模和更易开采的矿床;同时研发相关新技术和新工艺,提高开采效率。

离子吸附型稀土矿床作为表生成矿调控研究的典型代表,其风化壳通常可分为表土层、全风化层和半风化层。现有研究表明,全风化层中的稀土元素含量高于半风化层和表土层,其主要以离子态形式赋存于风化壳的载体矿物中,可通过简单的离子交换方式来提取,但是目前主流的原地浸出法采收率低且环境污染严重。受风化程度和离子态占比影响,不同矿山稀土提取过程中的采收率波动幅度极大(10%~95%)(李永绣, 2014)。弱风化矿床开采后的矿体中依然存在大量离子态和其他形式的稀土元素,如果仅依靠自然风化过程,再次形成具有经济价值的离子吸附型稀土矿床可能需要数万年甚至数百万年的时间,因此,人工加速离子吸附型稀土矿床的成矿过程对保持我国稀土资源的长期主导地位至关重要。如果能够采用人工干预的方法,调控稀土元素在风化壳中活化、迁移和富集等地球化学行为,使其运移到指定区域,且丰度达到可开采水平,这将极大促进离子吸附型稀土矿床的开发利用。在离子吸附型稀土矿床成矿过程研究中,微生物、超累积植物、气候、水文乃至地形和地貌等因素对稀土元素的迁移与聚集作用影响获得了极大关注(Huang et al., 2021; Li et al., 2021; 王登红等, 2017),但是,

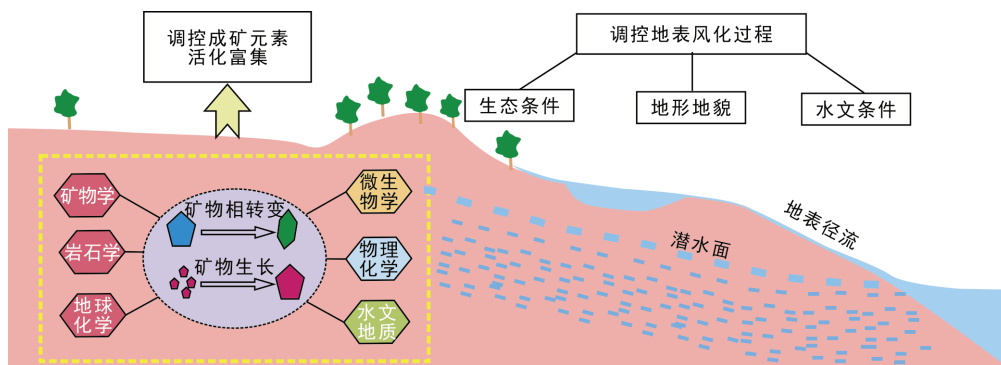


图 2 表生成矿调控研究方向示意图

Fig.2 A cartoon showing the major factors to adjust supergene mineralization



对于如何利用人工手段进行表生成矿调控还未得到应有的重视, 如何利用物理、化学、生物学科交叉的方法实现对表生矿床的形成过程进行人工调控面临前所未有的挑战。

我们认为, 表生成矿的人工调控将对我国稀土等战略金属资源的增储和开发利用产生重大影响, 也将对全球矿产资源的开发利用提供新的思路。就学科发展而言, 表生成矿人工调控这一理念属于首次提出, 尽快确立和开展相关的预研究, 构建系统的理论体系, 将有助于我国在全球范围内引领该领域的发展。

### 3.2 人类世矿产再造

人类世矿产再造是指现代人类社会资源开采和生产生活过程中产生的尾矿、固体废弃物、废水和废渣中价值元素的人工再富集和提取(图3)。

人类世矿产再造的切入点可包括以下三个方面:

(1) 尾矿矿质元素活化富集: 大型-超大型矿床长期持续开采会产生巨量的矿山尾矿堆积, 不仅占用了大量的土地资源, 还对自然环境造成严重破坏。与发达国家相比, 我国矿产资源利用率和回收率都较低, 大量有价值的金属及非金属资源仍长期遗留在尾矿中, 因而对矿山尾矿资源进行再次开发利用, 对我国经济社会可持续发展具有十分重要的意义。目前, 已有不少国内外学者开始利用微生物、植物等手段, 对关键金属(以稀土、铀矿为代表)、贵金属(以金矿为代表)和贱金属(以铜矿为代表)开展了矿质富集的相关实验研究, 并取得了一定的成效(贾蓉芬和高梅影, 2009; Sigel et al., 2018; Su et al., 2020)。然而, 这些手段大多还停留在实验室阶段且局限于环境污染治理范畴, 应尝试利用生物、物理、化学等人工干预手段, 对金属矿山的尾矿开展矿质活化和聚集成矿的实验探索和理论研究, 为尾矿资源的再开发利用提供理论支撑, 并对典型尾矿实例进行成果应用及示范推广。

(2) 固体废弃物金属元素富集成矿: 人类活动产生了大量的固体废弃物, 它们种类繁多, 成分复杂, 处置难度大, 严重破坏土壤、大气和水体等生态环境。目前, 我国固体废弃物综合利用率为75%, 主要通过深埋回填、制造混凝土制品、道路铺设等低价值途径实现(国家发展和改革委员会, 2021)。事实上, 固体废弃物包括废旧电池、电子垃圾、城市垃圾焚烧飞灰、工业废渣等, 其中含有大量的金属元素, 如铅、汞、铜、镍、钴、锌、锰及“三稀”金属等, 是一种潜在的二次矿产资源。由此可见, 传统的固体废弃物利用方式往往会导致资源的巨大浪费。近年来, 采空区充填被认为是解决固体废弃物的优选方法, 不仅解决固体废弃物堆存的占地问题, 还实现废弃物中有害物质的固定化(张明磊等, 2013)。然而, 该方法也降低了金属元素的迁移性, 导致重要金属元素的可提取性下降。为了实现固体废弃物中金属元素的资源化再利用, 需要思考和提出固体废弃物处置的新方法和新思路, 如原位诱导金属元素富集成矿。这需要借助矿物学、矿床学、地球化学、生物学等学科交叉融合, 涉及一系列重要的研究方向, 如: ①地形、地貌及气候对固体废弃物诱导成矿的控制机制; ②固体废弃物填充区的微生物群落结构、生存策略及生态功能; ③功能微生物与固体废弃物的界面作用机制, 及金属元素的迁移和富集规律; ④物理化学生物过程诱导金属成矿动力学; ⑤主要矿物的精细结构及金属元素的可提取性; ⑥地质催化作用与成矿等。上述知识体系的形成, 将为固体废弃物的资源化利用提供理论支撑。

(3) 营养元素人工富集: 氮、磷的无序或超标排放是导致水体富营养化的主要因素, 早已超出可持续发展的边界。现有措施主要将废水中氮、磷当做污染物去除, 也有不少研究关注废水中磷的回收和利用, 但我国在相关领域进展缓慢。应从成矿角度出发, 通过人工调控, 促进废水、废渣(包括但不限于生活污水、市政污泥、人畜排泄物、采矿特别是原地浸矿废水)中氮、磷、钾等营养元素的富集与成矿, 根据各成矿元素特性和富集程度开发相应的回用策略, 最终同步实现污染元素的去除和营养元素的人工富集及回用。

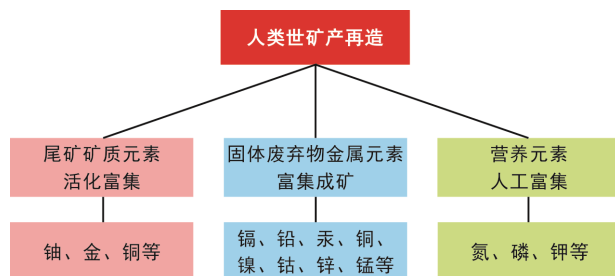


图3 人类世矿产再造研究方向示意图

Fig.3 A schematic hierarchy showing the major fields of anthropogene mineral resource regeneration

## 4 结语和展望

作为一个新兴交叉学科, “诱导成矿学”通过传统地质学的各分支学科与地球化学工程学、纳米矿

床学、生物成矿学、地质催化作用等诸多新兴学科或方向的深度融合,将为矿产资源的开发利用提供新的途径,服务国家资源安全战略。该学科的发展急需建立一套相应的实验技术分析平台,开发分析测试新技术和方法,创建新理论,最终形成完善的“理论-技术-实践”体系。当然,如何在局部甚至区域范围内进行高效、经济的人为干预和诱导矿质元素富集,目前尚无先例,所以谬误难免,我们真诚盼望地学界同行能给予批评指正。

**致谢:** 中国科学院广州地球化学研究所陈华勇、杨武斌研究员,魏博、谭伟副研究员,王高峰、杨宜坪和刘晶博士等参与了主题讨论,提供了不少颇有创意的想法。感谢两位审稿人的积极评价和建议。

#### 参考文献(References):

- 陈毓川, 赵逊, 张之一, 项礼文, 蔡爱莉, 曹佑功, 陈廷愚. 2000. 世纪之交的地球科学——重大地学领域进展, 北京: 地质出版社.
- 国家发展和改革委员会. 2021. 关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见. [https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202103/t20210324\\_1270286\\_ext.html](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202103/t20210324_1270286_ext.html).
- 贾蓉芬, 高梅影. 2009. 微生物矿化. 北京: 科学出版社.
- 李永绣. 2014. 离子吸附型稀土资源与绿色提取. 北京: 化学工业出版社.
- 申维. 2000. 矿化富集的耗散结构研究. 矿物岩石地球化学通报, 19(4): 416-417.
- Sigel A, Sigel H, Sigel R K O. 2018. 生物矿化: 从自然到应用. 刘传林译. 北京: 科学出版社.
- 王登红, 赵芝, 于扬, 王成辉, 代晶晶, 孙艳, 赵汀, 李建康, 黄凡, 陈振宇, 曾载淋, 邓茂春, 邹新勇, 黄华谷, 周辉, 冯文杰. 2017. 我国离子吸附型稀土矿产科学研究和调查评价新进展. 地球学报, 38(3): 317-325.
- 於崇文. 1987. 成矿作用与耗散结构. 地质学报, 64(4): 336-348.
- 张明磊, 高少辉, 刘伟涛. 2013. 固体废弃物采空区充填前景浅析. 科技创新与应用, 21: 122-123.
- 中国科学院地学部地球科学发展战略研究组. 2009. 21世纪中国地球科学发展战略报告. 北京: 科学出版社.
- 中华人民共和国国土资源部. 2016. 全国矿产资源规划(2016-2020年).
- 自然资源部中国地质调查局国际矿业研究中心, 自然资源部中国地质调查局中国矿业报社. 2019. 全球矿业发展报告2019.
- 邹新勇, 黄华谷, 周辉, 冯文杰. 2017. 我国离子吸附型稀土矿产科学研究和调查评价新进展. 地球学报, 38(3): 317-325.
- Cai M, Brown E T. 2017. Challenges in the mining and utilization of deep mineral resources. *Engineering*, 3(4): 432-433.
- Huang J, He H P, Tan W, Liang X L, Ma L Y, Wang Y Y, Qin X R, Zhu J X. 2021. Groundwater controls REE mineralisation in the regolith of South China. *Chemical Geology*, 577, 120295.
- Li M Y H, Kwong H T, Williams-Jones A E, Zhou M F. 2021. The thermodynamics of rare earth element liberation, mobilization and supergene enrichment during groundwater-regolith interaction. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, doi: 10.1016/j.gca.2021.05.002.
- Su H F, Tan F R, Lin J F. 2020. An integrated approach combines hydrothermal chemical and biological treatment to enhance recycle of rare metals from coal fly ash. *Chemical Engineering Journal*, 395, 124640.
- U.S. Geological Survey. 2020. Mineral Commodity Summaries.

## Induced Metallogeny: An Emerging New Interdiscipline

WANG Christina Yan<sup>1, 2, 3</sup>, LI Ningbo<sup>1, 2, 3</sup>, ZHU Jianxi<sup>1, 2, 3</sup>, XIAN Haiyang<sup>1, 2, 3</sup>, ZHU Runliang<sup>1, 2, 3</sup>,  
CHEN Qingze<sup>1, 2, 3</sup>, MA Lingya<sup>1, 2, 3</sup>, WU Shijun<sup>1, 2, 3</sup>, LIANG Xiaoliang<sup>1, 2, 3</sup>, XIAO Bing<sup>1, 2, 3</sup>

(1. CAS Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny/Guangdong Provincial Key Laboratory of Mineral Physics and Materials, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 2. CAS Center for Excellence in Deep Earth Science, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Mineral resources are fundamental to the development of human society, and most of the mineral resources are non-renewable. It is urgent to find new ideas and methods to increase the reserves and to achieve efficient and green utilization of mineral resources. We propose to start a new interdiscipline, *i.e.*, induced metallogeny, which will be mainly focused on how to enhance the activation, migration, and enrichment of ore-forming elements through diverse artificial methods, so as to transform minerals and rocks with no economic value under current technical and economic conditions, low-grade ores, tailings, and industrial wastes into economic mineral resources. Induced metallogeny is based on major branches of geosciences including petrology, mineralogy, metallogeny, and geochemistry, and integrates chemistry, biology, and environmental science. It is aimed to innovate techniques in the utilization of supergene and Anthropocene mineral resources and increase the reserves of strategic metals.

**Keywords:** induced metallogeny; supergene mineralization control; regeneration of Anthropocene mineral resource; reserves of mineral resources; efficient and green utilization