



纳米地球科学及资源环境效应

据宜文^{1*}, 蔡卓程^{1†}, 冯宏业^{1,2*}, 万泉³, 李金华⁴, 孙岩⁵, 黄菲⁶, 杨毅⁷, 王学求⁸, 曹建劲⁹, 邵龙义¹⁰, 孙晓明⁹, 陈韧哲¹, 黄骋^{1,11}, 朱洪建^{1,12}, 裴紫杞¹, 琚丽婷^{1,13}, 牟家骏¹, 郭红根¹

1. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 地球系统数值模拟与应用全国重点实验室, 北京 101408

2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

3. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550081

4. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

5. 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210046

6. 东北大学资源与土木工程学院, 沈阳 110819

7. 华东师范大学地理科学学院, 上海 200241

8. 中国地质科学院地球物理地球化学勘察研究所, 廊坊 065000

9. 中山大学地球科学与工程学院, 珠海 519082

10. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

11. 华北水利水电大学地球科学与工程学院, 郑州 450045

12. 燕山大学车辆与能源学院, 秦皇岛 066000

13. 中国铁建投资集团有限公司, 中国铁建新材料产业研究院, 北京 100855

† 同等贡献

* 联系人, E-mail: juyw03@163.com; fhy0205@163.com

2026-04-07 收稿, 2026-05-20 修回, 2026-06-18 接受, 2026-07-20 网络版发表

国家重点研发计划(2023YFF0804304)、国家自然科学基金(42372153, 41530315)和国家科技重大专项(2016ZX05066, 2017ZX05064)资助

摘要 纳米地球科学致力于从纳米尺度认识地球乃至行星系统中各圈层中物质与孔隙的形成、演化及界面过程, 是揭示地球与行星系统形成与演化、推动资源高效勘探开发与环境精准治理的新兴交叉学科; 本文以纳米科技与地球科学为依托, 聚焦地球各圈层中纳米颗粒、纳米结构与纳米孔隙等形貌、成分与形成过程, 揭示了纳米尺度物质形成、运移、聚集及纳米孔隙演化机制; 纳米物质与纳米结构在地球各圈层具有普遍性、动态稳定性与纳米效应; 以地球圈层结构为主线, 剖析并总结了大气圈、水圈、土壤圈与岩石圈等的纳米物质与纳米孔隙的主要类型、赋存特征、尺度效应及跨圈层迁移转化规律, 并阐明了其在矿物风化、富有机岩形成与非常规油气赋存、成矿元素富集、污染物迁移与环境暴露等过程中的控制作用. 纳米尺度构造变形与变位表明: 构造应力可在岩石及其组成矿物、有机质和流体诱发颗粒细化、纳米涂层形成、纳米分层、纳米颗粒聚集、孔隙重构和界面反应等响应; 岩石中界面化学反应则通过溶解、沉淀、相变和胶体形成等过程持续改造矿物的微纳米结构, 为从纳米尺度深理解构造地质学与地球化学的学科交叉提供了全新视角. 当颗粒粒径降至纳米尺度($<100\text{ nm}$)时, 其比表面积可较微米以上尺度提高1~3个数量级, 达 $100\sim600\text{ m}^2/\text{g}$, 由此带来的表面活性、限域效应及纳米尺度依赖性行为可显著改变物质循环、界面反应与能量转化的路径与速率, 这是认识资源形成与环境演化的重要微观基础. 未来研究中纳米地球科学应聚焦于构建“原位超微成像-精细谱学表征-跨尺度模拟计算-机器学习与人工智能预测”联合验证体系, 发展扫描隧道显微镜、高压原位透射电子显微镜、原子探针层析等前沿技术, 以实现跨圈层纳米物质迁移通量的定量约束与纳米尺度地质过程

引用格式: 据宜文, 蔡卓程, 冯宏业, 等. 纳米地球科学及资源环境效应. 科学通报, 2026, 71: 5912–5934

Ju Y, Cai Z, Feng H, et al. Nanogeoscience and its resource and environmental effects (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 5912–5934, doi: [10.1360/CSB-2026-0440](https://doi.org/10.1360/CSB-2026-0440)

的实时刻画,推动纳米地球科学从现象描述向机理定量的范式转变,也是从纳米地球认识地球与行星系统的关键之所在。

关键词 纳米地球科学,地球圈层,纳米物质,资源,环境

纳米科技的迅猛发展已带来地球科学革命,为解析地球及行星系统圈层内微细颗粒的形貌、晶体结构及元素空间分布开辟了全新途径^[1,2]。从纳米尺度研究地质问题和现象,为揭示地球不同圈层矿物的结晶生长过程,生物有机质的大量繁殖及地球演化过程提供了新的机遇与挑战^[3,4],是地球科学发展的必然之路。纳米地球科学最初是从纳米矿物颗粒及其表-界面反应的研究发展起来的^[4]。纳米地球科学以地球各圈层中纳米颗粒和孔隙的形貌、成分、结构等为研究对象,重点探究纳米尺度颗粒的形成、运移、聚集和赋存形式,以及纳米孔隙的形成与演化等关键过程与演化机制,深化对矿物学、岩石学、构造地质学、地球化学、能源地质学和矿床学等传统分支学科的纳米尺度的微观认知,进而揭示各类地球演化过程背后蕴含的纳米尺度相应特征与成因演化规律^[5-7]。

国际上,2002年美国地球化学与矿物学家Michael F. Hochella Jr.教授阐释了纳米技术对地球科学发展的革命性意义,将纳米科学理论与方法引入地学研究体系,催生了聚焦地球物质纳米尺度非线性响应规律的新兴研究方向^[1],其中,特殊多相纳米矿物的形貌、结构及相态转化过程^[8],以及纳米矿物和矿物纳米颗粒对有毒金属元素迁移、分馏与沉淀的调控作用^[9]均是该领域的早期研究突破。此外,国外不少学者围绕纳米地球科学多个方向的研究开展了大量的探索性工作,积累了一定的研究成果^[7-10]。在国内,20世纪80年代后期地质学开始出现了超微观尺度的研究;1991年,唐孝威等人^[11]率先提出了“纳米地质”和“纳米天文”的创新构想;章振根和姜泽春^[12]进一步提出了“纳米矿床学”这一分支学科,并尝试依托纳米科技方法阐释微细浸染型金矿的成矿作用机制,为矿床学研究提供了新思路;陈敬中等人^[13]则聚焦透射电子显微镜(transmission electron microscope, TEM)、扫描隧道显微镜(scanning tunneling microscope, STM)等纳米尺度研究方法,纳米科技的飞速发展在地学研究开辟了新的研究领域。此后,以据宜文等人为代表的中国学者在系统总结前人研究成果的基础上,并通过2013年“纳米地质学及纳米成藏成矿前

沿科学问题”为主题的第476次香山科学会议,构建了“纳米地质学”(nanogeology)的学科体系,明确了该学科的研究对象、科学内涵及各分支研究方向,涵盖纳米矿物学^[14]、纳米岩石学^[15]、纳米地球化学^[16]、纳米构造地质学^[17]、纳米能源地质学^[18]、纳米矿床学^[16]、纳米地质材料学^[3]、纳米灾害地质学和纳米环境地质学^[19]等多个领域,该研究工作将以往零散、碎片化的纳米尺度地学研究成果进行系统性整合,形成规范化、体系化的纳米地球科学研究框架。2014年,中国地质学会纳米地质专业委员会正式成立,成为国际范围内首个聚焦纳米地球科学研究的专业学术组织。近年来,“纳米矿物学”“纳米地质学”和“纳米地球科学”的理论体系持续完善、逐步成熟^[3,6,14],2025年修订的《地球科学大辞典》(第二版)首次将“纳米地学”收录为正式学科词条,标志着纳米地学已完成学科建制化,形成独立、完整的学科体系^[6]。由此,十多年来纳米地球科学研究进入了快速发展期,国内外学者的相关研究主要集中在以下六个方面:(1)地球乃至行星系统中纳米物质本体特征^[20];(2)非常规资源与纳米孔隙^[21];(3)构造变形的纳米响应;(4)生物-纳米矿物耦合^[10];(5)纳米成藏与成矿机制^[22];(6)纳米物质的环境与健康效应^[23]。然而,上述研究大多围绕纳米地球科学的某些方向以及特定圈层或特定领域展开,以地球圈层结构为主线、系统探讨纳米地球科学的总体认识、不同圈层间纳米物质循环与转化及其对资源勘探开发和环境保护等重大问题的综合研究目前仍不完善,亟待深入。

本文以地球系统圈层结构为主线,归纳总结纳米地球科学的研究方法体系,并进一步研究不同圈层中纳米物质的形成、运移、聚集与赋存形式,以及纳米孔隙的发育规律与演化机制,阐释纳米物质的普遍性、稳定性与纳米效应等共性特征,揭示其物理化学演化与跨圈层循环规律,并深入剖析纳米尺度物质循环对岩石圈资源富集、水圈和土壤圈污染物迁移、大气圈颗粒演化及生物圈健康效应等重大科学问题的制约作用,旨在为揭示地球不同圈层间物质与能量交换的驱动机制与作用路径提供系统性的纳米尺度科学认识。

1 纳米地球科学研究方法

纳米地球科学研究方法主要包括纳米尺度物质观测、纳米-亚纳米结构谱学、纳米孔隙定量表征、分子动力学模拟与量子化学计算以及纳米地球科学中机器学习与人工智能研究等五大方法体系。天然纳米物质赋存于成分复杂、环境多变的地球科学体系中,其形貌、成分、结构与动力学特征往往需要在从原子到孔隙的跨尺度范围内协同表征,单一技术手段难以完整解析,因此需要纳米地球科学研究方法的构建遵循“多技术协同、观测-实验-模拟闭环”的核心原则^[3]。

1.1 纳米尺度物质观测方法

纳米尺度物质的直接形貌与结构观测是纳米地球科学研究的基础,常见技术可分为电子显微学、扫描探针显微学和同步辐射成像三类。电子显微学技术包括扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)、高分辨透射电子显微镜(high-resolution transmission electron microscope, HRTEM)、高角环形暗场扫描透射电子显微镜(high-angle annular dark-field scanning transmission electron microscope, HAADF-STEM)等衍生技术;聚焦离子束扫描电子显微镜(focused ion beam-scanning electron microscope, FIB-SEM)通过连续截面切割与成像,可实现纳米孔隙网络的三维高分辨重建。计算机控制扫描电子显微镜(computer-controlled scanning electron microscope, CCSEM)在传统SEM基础上优化升级,提升了单颗粒分析的自动化水平与统计代表性^[23]。扫描探针显微学以STM和扫描探针显微镜(scanning probe microscope, SPM)为代表,可在原子级分辨率下表征矿物表面电子态化学键环境;磁力显微镜(magnetic force microscope, MFM)专用于纳米磁性矿物的磁畴结构表征。同步辐射成像与原子探针技术则代表当前观测能力的前沿,扫描透射X射线显微镜(scanning transmission X-ray microscope, STXM)可在10~100 nm分辨率下同步获取形貌与元素化学态分布^[24];微米/纳米计算机断层扫描(micro/nano-CT)实现岩石孔裂隙网络的无损三维重建;原子探针层析技术(atom probe tomography, APT)在亚纳米空间分辨率下对纳米体积内全元素进行三维成分图谱测定。

1.2 纳米-亚纳米结构谱学方法

纳米-亚纳米结构谱学方法以化学键振动、晶格衍射和核自旋弛豫为信号基础,可在纳米至分子尺度获

取物相组成、分子结构与化学环境信息,主要包括衍射技术、振动光谱技术、核磁共振技术和脉冲激光技术等。X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)可精确测定矿物物相组成与晶粒尺寸,小角X射线散射(small-angle X-ray scattering, SAXS)对纳米孔隙尺寸分布表征具有独特优势^[25]。振动光谱以傅里叶红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)和激光拉曼光谱(laser Raman spectroscopy, LRS)为核心,FTIR可定性识别有机官能团与无机矿物,纳米红外(atomic force microscope-infrared spectroscopy, AFM-IR)将空间分辨率突破至数十纳米,实现单颗粒有机质化学非均质性的纳米尺度映射;拉曼光谱对有机碳的石墨化程度极为敏感,G带半峰宽与D/G面积比可定量评估有机质热演化程度,二者联合使用是矿物-有机质复合体纳米结构表征的最优组合。扫描电子显微镜-拉曼光谱联用技术(scanning electron microscope-Raman, SEM-Raman)、扫描电子显微镜-能谱仪-拉曼光谱联用技术(scanning electron microscope-energy dispersive spectroscopy-Raman, SEM-EDS-Raman)及表面增强拉曼散射-扫描电子显微镜-能量色散X射线光谱联用技术(surface-enhanced Raman scattering-scanning electron microscope-energy dispersive X-ray spectroscopy, SERS-SEM-EDX)联用技术可在同一颗粒上同步获得形貌、粒径、元素组成和分子振动信息:SEM/能量色散X射线谱仪(energy dispersive X-ray spectroscopy, EDS)用于确定颗粒大小、形貌及主量元素组成,Raman或表面增强拉曼光谱(surface-enhanced Raman scattering, SERS)则用于识别硫酸盐、硝酸盐、有机官能团、碳质组分和矿物相。

1.3 纳米孔隙定量表征方法

常见纳米孔隙表征技术主要包括以下几类:TEM可在纳米尺度直接成像孔隙形态与矿物边界^[26];原子力显微镜(atomic force microscope, AFM)可在亚纳米精度下获取孔隙表面形貌与粗糙度信息^[27];低温低压流体注入法基于气体吸附等温线,可定量表征微孔-介孔范围内的孔径分布与比表面积^[28];核磁共振(nuclear magnetic resonance, NMR)技术通过弛豫时间谱反映孔隙尺寸分布与连通性,适用于含流体储层原位表征^[29];以FIB-SEM和纳米透射X射线显微镜(nano-TXM)为核心的三维数字岩心方法,可重建纳米至微米尺度的三维孔隙网络,定量获取孔隙度、连通率与迂曲度等参数^[30]。

1.4 分子动力学模拟与量子化学计算方法

分子动力学模拟与量子化学计算是在实验观测难以直接获取原子/分子尺度动态信息时,从理论角度揭示纳米物质结构特征与地球化学过程机制的重要互补手段。分子动力学模拟通过设定原子间相互作用势函数并追踪其运动轨迹,可获取纳米受限空间内流体扩散系数与界面相互作用等动力学参数。蒙特卡罗方法,特别是巨正则蒙特卡罗(grand canonical Monte Carlo, GCMC),基于概率统计理论对纳米孔隙内气体分子的吸附/脱附平衡态进行随机采样模拟,是预测CH₄、CO₂等气体在页岩纳米孔中赋存状态与吸附容量的主要方法^[31]。量子化学计算以密度泛函理论(density functional theory, DFT)为核心,以量子力学基本原理为基础,通过求解Kohn-Sham方程获取体系电子结构,能够在原子尺度精确描述矿物表面电子态密度、化学键特征与吸附反应能垒,为揭示纳米矿物相变的热力学稳定性及成矿元素在矿物表面的富集机制提供第一性原理层面的理论依据^[32]。

1.5 纳米地球科学中机器学习与人工智能研究方法

机器学习正在成为纳米地球科学模拟与计算体系中的新兴工具。其作用并非替代分子动力学、密度泛函理论等传统模型,而是针对高维、多源、海量数据完成特征提取、模式识别与快速预测。例如,机器学习可用于显微图像自动分割、单颗粒谱图分类、孔隙网络参数预测、矿物相识别、反应路径筛选,以及分子动力学和密度泛函理论计算结果的代理模型构建。机器学习可在固体地球科学中用于复杂数据的特征提取、反演和预测^[33];机器学习在分子与材料科学中挖掘结构-性质关系和预测材料性能方面具备潜力^[34]。随着地学数据的爆发式增长,大数据平台与人工智能技术的深度融合正推动纳米地球科学进入数据驱动的新阶段:卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)可实现海量电子显微镜图像中纳米矿物的自动识别与统计,图神经网络(graph neural network, GNN)则为纳米孔隙网络的渗流行为建模提供新途径,有望显著突破传统物理模型在多尺度耦合模拟中的计算瓶颈。

2 地球圈层中纳米物质与纳米孔隙及其性质

2.1 纳米物质形式

纳米物质通常指三维空间中至少有一维处于纳米

尺寸(0.1~100 nm)的物质^[11]。本文所述“纳米物质”是一个广义概念,既包含以独立颗粒形式存在的纳米矿物、纳米单质及纳米尺度生物矿物等实体,也涵盖物质在纳米尺度上呈现的特征结构形式。本节将纳米物质划分为以下五类(图1):纳米矿物与矿物纳米结构(图1(a, b)),指由两种或两种以上元素组成、化学式以氧化物/硫化物/碳酸盐/硅酸盐为主的纳米尺度矿物及其内部纳米级晶粒和孔隙结构单元;纳米单质(图1(c, d)),指由单一金属元素(Au、Cu、Ag等)或非金属元素(C、S等)以零价态形式存在的纳米颗粒;纳米矿物组合与有机质大分子结构(图1(e, f)),指有机质中具有重复单元的纳米尺度BSU排列;纳米尺度生物矿物(图1(g, h)),指由生物有机体调控形成的纳米尺度矿物相;纳米包裹体(图1(i, j)),指捕获于宿主矿物晶格或有机质结构内部的纳米尺度流体或固体相。

2.1.1 纳米矿物与矿物纳米结构

纳米尺度的矿物分为“纳米矿物”(nanominerals)和“矿物纳米颗粒”(mineral nanoparticles)两类^[39](图1(a, b)),二者与内部晶粒或孔隙结构单元具有纳米尺度特征的多孔矿物(图1(c, d))统称为纳米矿物与矿物纳米结构^[3,11]。纳米矿物作为连接原子/分子和矿物材料的桥梁,在矿物微观反应机制和宏观现象的研究中具有重要的意义^[40]。纳米结构则不是独立的纳米矿物颗粒,而是岩石内部由矿物晶粒、孔隙、裂隙、有机质基本结构单元或矿物-有机质界面在纳米尺度上形成的结构特征。水铁矿是一类天然普遍存在的纳米三价铁羟基氧化物,其晶体有序度低、表面羟基位点丰富;新鲜2-line水铁矿粒径约2.6 nm,比表面积可达650 m²/g,而粒径约5~6 nm的6-line水铁矿比表面积约280±30 m²/g^[41]。这种高比表面积和高密度表面羟基使其对As(V)、磷酸盐、Pb、Cu、U和天然有机质具有强吸附能力,因而直接控制污染水体和土壤中金属/类金属元素的生物有效性与迁移风险。水钠锰矿代表层状Mn氧化物纳米矿物,其约0.7 nm层间结构、Mn空位和边面位点不仅提供吸附位点,而且可通过Mn(IV)/Mn(III)氧化还原反应改变As、Cr、Co等元素价态^[42]。

2.1.2 纳米单质

在金属矿床及其外围的多圈层介质(涵盖隐伏矿石、上覆地层、土壤乃至动植物组织)中,广泛赋存着以纯金属存在的微纳米颗粒及其组合体(图1(e, f)),本文统称为纳米单质^[43,44]。在资源地质体系中,纳米单质最具代表性的实例是自然金纳米颗粒,与宏观自然金

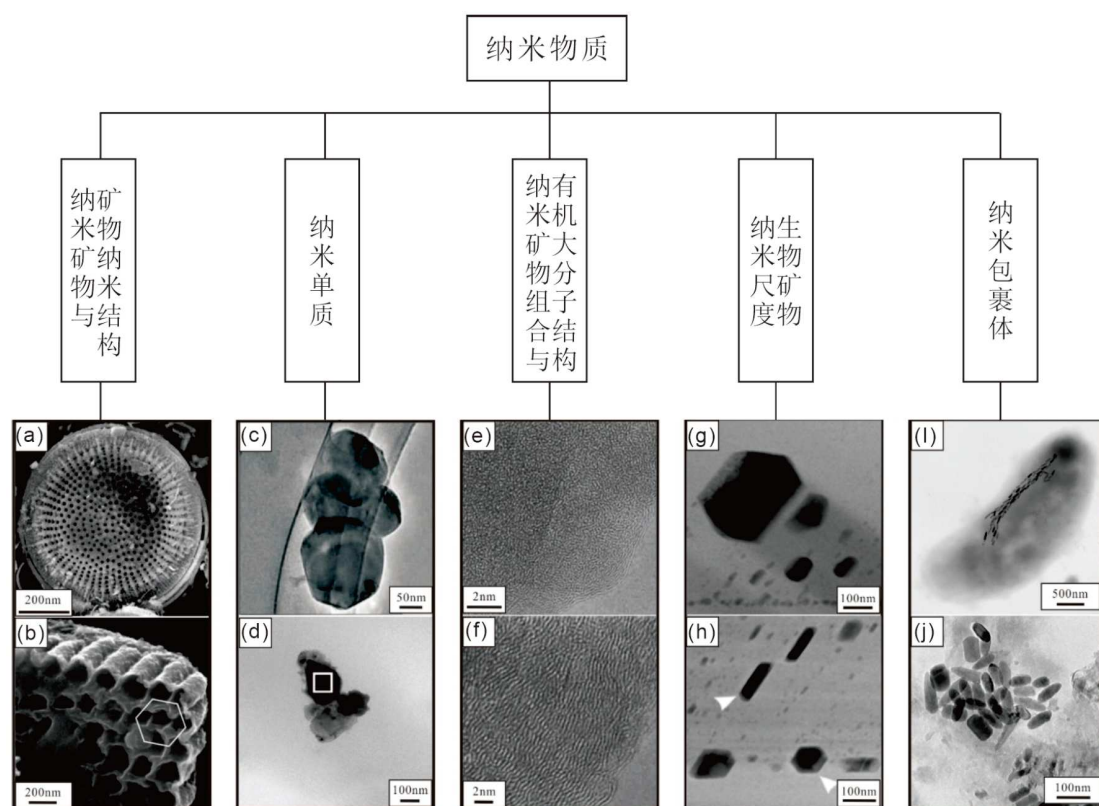


图 1 (网络版彩色)地球圈层中主要纳米物质与结构分类图及典型图片。(a) 硅藻质蛋白石SEM图^[37];(b) 多孔炭的有序大孔排列SEM图^[37];(c) 河南南阳周庵铜镍矿床矿石中纳米铜晶体TEM图^[16];(d) 矿区动物组织中的金属单质纳米物质^[38];(e) 低煤级构造煤大分子BSU单元呈分散、孤立状,定向性差的HRTEM图^[39];(f) 高煤级构造煤的大分子BSU单元呈蠕虫状、条斑状,定向性强的HRTEM图^[39];(g) 以连续阵列形式分布的最细包裹体HAADF-STEM图(<20 nm)^[39];(h) 纳米级夹杂物和空穴的混合物HAADF-STEM图^[39];(i) 趋磁细菌WYHR-1细胞内的子弹头形磁铁矿TEM图^[102];(j) 海洋钻孔MD11-3353沉积物中的磁铁矿型磁小体化石TEM图^[40]

Figure 1 (Color online) Classification and representative images of major nanomaterials and nanostructures in Earth's spheres. (a) SEM image of diatomaceous opal^[37]; (b) SEM image of ordered macropores in porous carbon^[37]; (c) TEM image of nanoscale copper crystals in ores from the Zhou'an Cu-Ni deposit, Nanyang, Henan Province^[16]; (d) native metallic nanomaterials in animal tissues from a mining area^[38]; (e) HRTEM image showing dispersed, isolated and poorly oriented basic structural units (BSUs) in low-rank tectonically deformed coal^[39]; (f) HRTEM image showing worm-like and stripe-like, strongly oriented BSUs in high-rank tectonically deformed coal^[39]; (g) HAADF-STEM image of the finest inclusions arranged as continuous arrays (<20 nm)^[39]; (h) HAADF-STEM image showing a mixture of nanoscale inclusions and voids^[39]; (i) TEM image of bullet-shaped magnetite crystals in magnetotactic bacterium WYHR-1^[102]; (j) TEM image of magnetite-type magnetofossils from sediment core MD11-3353^[40]

不同, 纳米金颗粒可在成矿流体演化、硫化物生长、胶体失稳和后期热事件改造过程中形成, 并以离散纳米颗粒、团聚体或与硫化物/砷化物共生的形式赋存^[43]。以内华达卡林型金矿为例, TEM和HAADF-STEM研究显示, 自然金可作为约5~10 nm的离散纳米颗粒赋存于富As黄铁矿增生边中。纳米尺度表征不仅改变了对金赋存状态和沉淀机制的认识, 也为难处理金矿选冶、深穿透地球化学找矿和关键金属纳米尺度富集机制研究提供了直接证据。

2.1.3 纳米矿物组合与有机质大分子结构

纳米矿物组合是指多种纳米矿物或纳米矿物-有机

质-流体在纳米至亚微米尺度上形成的复合体, 常由纳米黏土矿物、Fe/Mn氧化物、硫化物、碳酸盐及有机质共同构成^[41,42]。其形成受成核速率、表面电荷、离子强度、pH、氧化还原条件和有机配体共同控制, 可通过表面吸附、离子桥联、共沉淀、层间嵌入和胶体絮凝等方式稳定存在^[39,43,44]。与单一纳米矿物相比, 纳米矿物组合具有更高的界面异质性和反应位点密度, 可影响有机质保存、重金属固定、营养元素迁移及污染物归趋, 并进一步制约富有机质岩石中的有机质演化和纳米孔隙发育^[45,46]。

地质体中的有机质主要包括: 煤岩和含有机质页

岩. 有机大分子结构是指相对分子质量通常在500~1000 Da量级、且具有重复结构单元的有机化合物结构^[45]. 在煤岩和富有机质岩石中, 纳米黏土矿物与有机大分子相互缠绕, 形成纳米矿物-有机质复合体; 这一复合组合显著影响有机质热演化路径与纳米孔隙网络的连通性^[11]. 富有机质页岩中的干酪根(kerogen)作为沉积有机质经成岩作用形成的不溶性高分子聚合物, 同样具有典型的纳米级大分子结构特征, 其分子骨架由芳香核、脂肪链和含杂原子官能团组成, 单个基本结构单元(basic structural units, BSU)的尺寸多处于纳米量级^[26]. 随着埋藏深度增加和热演化程度升高, 干酪根大分子经历脱官能团、芳构化和缩聚等一系列不可逆化学反应, 其纳米结构呈现出显著的演化规律. 这一纳米结构演化过程不仅伴随着大量烃类的生成与排出, 还直接驱动了页岩内部有机质纳米孔隙的形成与发育, 是控制页岩气储集空间的关键微观机制^[46].

2.1.4 纳米尺度生物矿物

纳米尺度生物矿物是指由微生物、原生动物、真菌、植物及动物通过控制或诱导作用形成的具有独特生理生化功能, 可参与微生物的代谢活动的纳米级物质^[47]. 生物参与有助于纳米物质的形成, 研究表明微生物至少参与60余种矿物的形成和转化, 如微生物表面官能团可以与 Ce^{3+} 结合, 形成纳米级磷酸铈^[48]. 趋磁细菌可以在细胞内通过生物控制矿化作用形成多呈链状排列的纳米磁铁矿或胶黄铁矿晶体颗粒^[38], 铁还原细菌和有些铁氧化细菌则能在细胞外通过生物诱导矿化作用形成聚集成簇的纳米磁铁矿颗粒物, 显著影响沉积物或岩石的磁化率^[21].

2.1.5 纳米包裹体

天然矿物和有机岩石中的纳米尺度包裹体称为纳米包裹体, 按相态可分为固态纳米矿物包裹体、纯气相、气液两相以及含子晶的三相流体纳米包裹体^[49]. 金属矿床及其周围介质中常见大量纳米金属颗粒, 纳米包裹体通常富集极高浓度的金属元素^[49]. 金矿床黄铁矿晶格缺陷、成矿期石英等脉石矿物及孔裂隙中常见纳米金包裹体^[50]. 在富有机质页岩与煤系地层中, 烃类流体可在成岩-热演化过程中被捕获于矿物晶格缺陷、粒间孔隙及有机质基质的纳米孔道内, 形成以液态烃、气态烃或气液混合相为主的有机质纳米包裹体^[26]. 此外, 干酪根大分子网络中的纳米级孔隙可对烃类分子形成限域封存, 即纳米限域效应显著改变了孔内流体的相态行为与热力学性质, 受孔壁分子作用力

制约, 纳米孔道内烃类的泡点压力、黏度和扩散系数均与宏观体相存在显著偏差^[51].

2.2 纳米孔隙

纳米孔隙通常是指孔径在纳米尺度(一般为1~100 nm)的超微孔隙. 广泛分布于地球表层及深部的岩石、土壤、大气颗粒物中, 也普遍存在于生物体及人工合成材料内^[3]. 在地质体中, 纳米孔隙可划分为有机质孔、无机质孔以及微裂隙三大类. 在非常规油气领域, 这三类孔裂隙共同构成了复杂的储集与渗流网络. 以四川盆地龙马溪组页岩为例, 其纳米孔隙的演化受埋深和构造变形等显著控制, 比如纳米尺寸呈双峰型分布且孔径与埋深成反比. 露头页岩的孔径峰值约为2.46~7.84和30 nm, 露头页岩的孔径峰值约为2.46~7.84和30 nm(图2(a, b)), 而随着埋深增加, 中、深层页岩的孔径峰值逐渐向更小尺度收缩(图2(c, f)). 在这类富有机质地层中, 孔径介于0.1~100 nm的有机质纳米孔隙占比高达约80%^[52]; 相比之下, 大于100 nm的微米孔及微裂隙则主要为游离气提供了渗流通道^[37]. 此外, 无机质纳米孔隙在各类金属矿床及造岩矿物中同样扮演着不可忽视的角色^[53].

2.3 纳米物质及其结构的特性

纳米物质的物理化学性质与其宏观等效物存在显著差异. 这种独特性主要源于其极高的比表面积、表面缺陷以及显著的量子尺寸效应, 导致其化学活性(如溶解度、催化能力)、力学特征(如弹性模量、屈服强度)、电学(如电导率、氧化还原电位)和磁性特征均会随其尺寸变化而发生非线性突变^[55]. 总体而言, 纳米物质及其结构在地球多圈层系统中主要表现出以下几个方面的共性特征: 跨圈层广泛发育而又显著受环境制约的普遍性; 受表面能、界面过程和地球化学条件共同控制的动态稳定性; 以及由高比表面积、小尺寸效应和量子尺度效应所引发的特殊物理化学行为, 即纳米效应.

2.3.1 普遍性

纳米物质与结构在地球与行星系统中具有跨圈层普遍性^[56], 在地球系统的各个圈层中广泛存在, 并在多圈层耦合与物质循环中扮演着不可替代的角色^[39], 特别是在地球关键带中^[17], 其存在形式与地质过程密切相关, 为揭示地球圈层相互作用和资源勘探与环境演化提供纳米尺度证据. 纳米物质的普遍赋存并非均匀

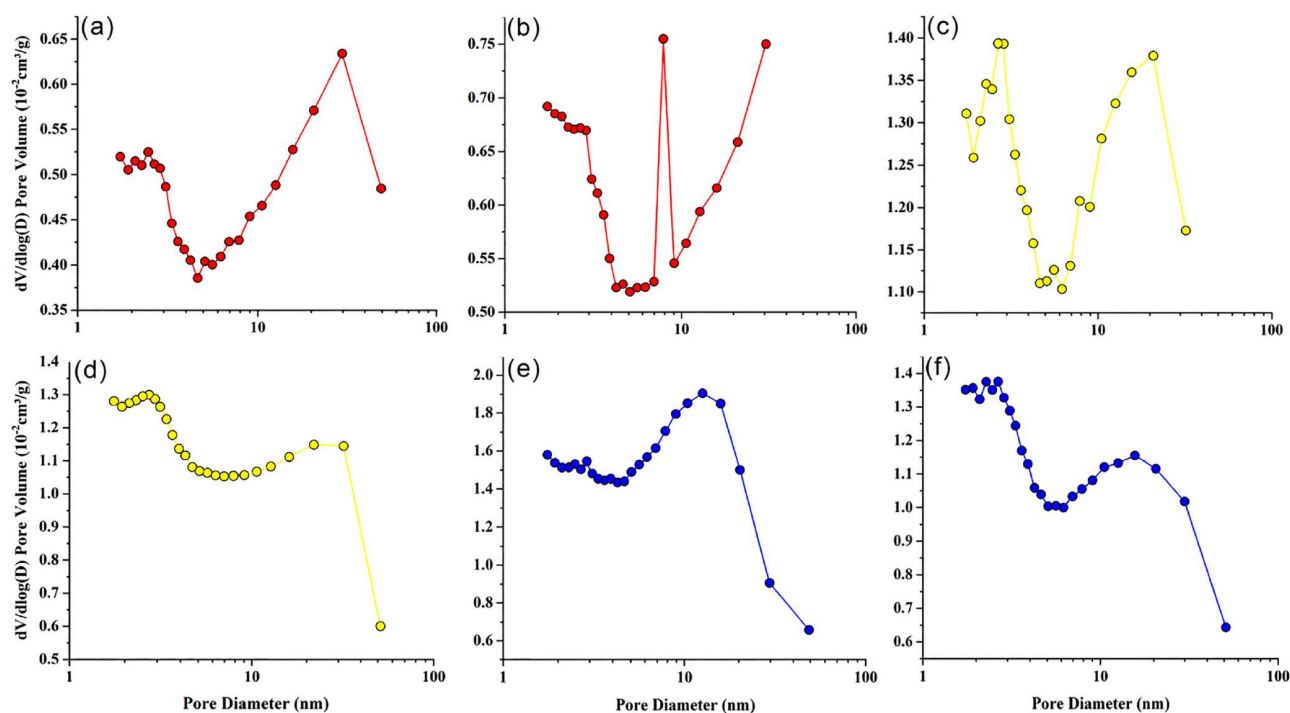


图2 (网络版彩色)四川盆地及周缘龙马溪组页岩纳米孔隙孔径分布图。(a, b) 露头样品O1和O2; (c, d) 中浅层样品M1和M5; (e, f) 深层样品D1和D11^[36]

Figure 2 (Color online) Nanopore-size distribution of the Longmaxi Formation shale in and around the Sichuan Basin. (a, b) Outcrop samples O1 and O2; (c, d) middle-depth samples M1 and M5; (e, f) deep-buried samples D1 and D11^[36]

分布, 其赋存状态与形貌结构具有极强的环境依赖性, 记录了特定的地球深部过程。在深部岩石圈与构造演化过程中, 造山带蛇绿岩中发育纳米级斜方晶系Ca-Mn-钙钛矿(图3(a))、纳米级Mn-石榴石、Ni-Mn-Co金属纳米物质及纳米级流体包裹体, 不仅是地幔深部物质的直接残留, 更记录了极端的温压环境与板块折返过程中的快速相变历史^[57]; 在构造断裂带内部, 强烈的动力剪切作用常诱发大量纳米颗粒的生成(图3(b)), 这些纳米物质在断层面上富集, 能显著改变断层泥的流变学与摩擦学性质^[58]; 在地球关键带与表层系统中, 流体活动进一步塑造了纳米物质分布的非均质性。页岩等富有机质地层中发育的大量纳米孔隙(图3(c)), 其连通性与孔径分布直接受控于有机质的热演化程度^[59]。此外, 在矿床地球化学勘探领域, 隐伏矿场上方土壤、地气、生物以及矿石中存在大量的纳米金属颗粒(图3(b, d-f))^[43,60]。

2.3.2 稳定性

纳米物质与结构的稳定性变化较大, 在复杂地质介质中整体表现为热力学亚稳态与动力学稳定性特征。

由于极高的比表面积和表面自由能, 纳米颗粒在热力学上具有自发降低表面能的趋势, 因而在地质介质中极易发生碰撞与团聚。这种团聚与沉降行为受控于矿物表面的零电荷点与微观晶体缺陷, 以及周围地质介质的地球化学条件。例如, 在离子强度较高的深层卤水或海水中, 双电层被压缩, 纳米颗粒极易失稳并最终微米级团聚体的形式沉淀^[64]。然而, 在特定的地球演化阶段, 纳米物质也能表现出惊人的长期稳定性。例如在海底热液喷口或表生地表风化壳等环境中, 广泛存在持久稳定的纳米黄铁矿及纳米黏土矿物^[65]。这种稳定性通常源于两方面机制: 一是体系内极高的过饱和度导致成核速率远大于晶体生长速率; 二是环境中广泛存在的溶解有机质或腐殖酸可通过空间位阻效应包覆在纳米颗粒表面, 阻断了颗粒间的聚结^[17]。这种动力学上的稳定机制, 使得纳米物质能够作为独立相在多圈层流体中长期存续。

2.3.3 纳米效应

由于纳米物质尺度较小(0.1~100 nm), 因此具有许多不同于其宏微观物体的物化特性, 包括表面与界面

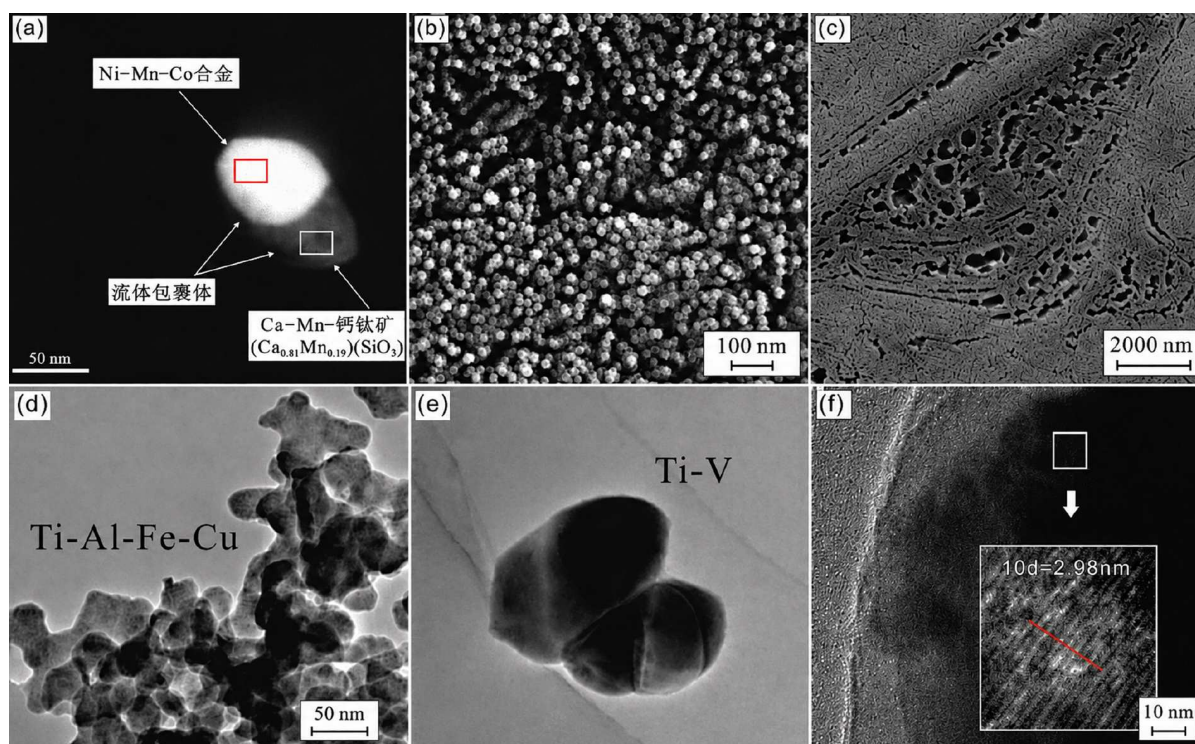


图3 (网络版彩色)地球系统广泛发育的纳米物质/结构。(a) 西藏蛇绿岩中金刚石中的纳米矿物与流体包裹体^[61]；(b) 红河断裂带中纳米物质SEM形态特征^[58]；(c) 页岩中的有机质孔SEM图^[62]；(d) 河南南阳周庵铜镍矿床地气、土壤和矿石中纳米颗粒TEM图^[15]；(e) 河南某金矿床断裂带上行地气中含钛纳米物质的TEM图^[63]；(f) 凡口矿区蜘蛛组织内含Pb、O纳米物质的TEM和HRTEM图^[36]

Figure 3 (Color online) Representative nanomaterials and nanostructures in different Earth-system. (a) Nanominerals and fluid inclusions in diamond from ophiolites^[61]; (b) SEM morphology of nanomaterials in the Red River fault zone^[58]; (c) SEM image of organic-matter pores in shale^[62]; (d) TEM image of nanoparticles in geogas, soil and ore from the Zhou'an Cu-Ni deposit, Nanyang, Henan Province^[15]; (e) TEM image of Ti-bearing nanomaterials in ascending geogas from a fault zone in a gold deposit, Henan Province^[63]; (f) TEM and HRTEM images of Pb-O-bearing nanomaterials in spider tissues from the Fankou mining area^[36]

效应、小尺寸效应、宏观量子隧道效应和量子尺寸效应等^[56]，广泛影响着地球系统各圈层结构及其演化过程。其中，表面与界面效应源于纳米颗粒极高的比表面积和表面原子占比。当颗粒粒径降至纳米量级时，表面原子数占总原子数的比例急剧增大，导致表面自由能显著升高，赋予纳米物质远超宏观矿物的化学反应活性与吸附能力^[41]。该效应可通过比表面积和表面位点密度进行量化表达。若将矿物颗粒近似为球形，其理论比表面积可表示为 $SSA \approx 6/(\rho d)$ ，其中 ρ 为颗粒密度， d 为颗粒直径。以 $\rho \approx 3 \text{ g/cm}^3$ 的氧化物颗粒为例，粒径为1、100和10 nm时，理论比表面积分别约为2、20和200 m^2/g ；天然和合成三价铁羟基氧化物的实测结果与这一尺度关系基本一致：新鲜2-line水铁矿粒径约2.6 nm，比表面积可达约650 m^2/g ，而粒径约5~6 nm的6-line水铁矿比表面积约为 $280 \pm 30 \text{ m}^2/\text{g}$ ，均明显高于多数晶质铁氧化物的10~100 m^2/g 量级^[41]。

3 纳米物质与结构演化的物理化学变化

3.1 纳米尺度构造变形与变位

构造应力作用下，岩石、矿物、有机质与流体会发生纳米尺度变形与结构调整，表现为颗粒细化、纳米涂层形成、纳米分层、颗粒聚集、孔隙重构、界面反应等一系列响应行为，统称为纳米尺度构造变形与变位^[58]。近年来，随着SEM、TEM/HRTEM、AFM以及纳米尺度谱学技术的发展，岩石构造变形研究已由宏观断裂、褶皱和显微组构，进一步推进到纳米粒、纳米线、纳米层、纳米孔裂隙和剪切薄壳等尺度，并逐渐形成了纳米构造地质学这一新兴交叉学科^[6]。

岩石圈中纳米尺度构造响应主要表现为剪切滑动面上的纳米涂层、纳米分层、剪切薄壳、纳米颗粒集合体和纳米孔裂隙。基于天然和实验岩石剪切滑动面的SEM观察结果可知，剪切滑动面上普遍发育纳米涂

层结构; 粒径40~80 nm、具有中等圆度和球度的纳米颗粒可进一步聚集为复体颗粒, 纳米涂层可表现为颗粒状、剥离状和流变状等纹理特征^[66]. 在此基础上, H. Odé剪切变形理论的纳米尺度表象进一步说明, 岩石在高温/高压条件下发生塑性或黏弹性变形时, 可形成与轴压方向近垂直的H. Odé破裂. 煤岩代表了有机质岩石中构造应力作用下的纳米结构响应, 煤岩对构造应力高度敏感. HRTEM、XRD、FTIR等研究表明, 构造变形可引起煤大分子结构的破裂、旋转、定向排列和重新堆叠, 使基本构造单元的尺寸、堆叠度和取向发生系统变化. 此外, 断层带中的纳米颗粒进一步体现了纳米结构对构造滑动行为的反馈作用. 蔡周荣等人^[58]对红河断裂带韧性剪切带的研究表明, 纳米颗粒广泛发育于韧性剪切带内, 其形态、聚集状态和空间分布可记录不同温压条件、变形机制和剪切阶段.

3.2 纳米尺度地球化学行为

地球各圈层中的纳米物质和结构不仅发生构造变形, 而且还会引起地球化学行为的改变. 纳米地球化学的研究进展集中体现在以下几个相互关联的方向: 在矿物-流体界面过程方面, 纳米孔隙结构显著影响矿物风化速率与有机质生物有效性^[67]; 在能源地质方面, 纳米孔隙对非常规油气储集与运移的制约及CO₂地质封存机理已获广泛关注^[68,69]; 在环境地球化学方面, 纳米物质参与污染物迁移与转化过程的研究方兴未艾^[70]. 上述三个方向共同指向一个核心科学问题: 纳米尺度的物质性质如何通过界面反应放大并耦合至宏观地球化学过程. 以天然水铁矿为例, 该类1~10 nm尺度的三价铁羟基氧化物广泛分布于土壤、沉积物、地下水系统中, 属于粒径、界面能共同控制的纳米亚稳定相, 其粒径减小会大幅提升表面自由能. 热化学模型表明, 在298 K条件下, 当水铁矿粒径超过约8 nm时, 其相对于纳米针铁矿和纳米赤铁矿趋于热学不稳定, 易通过奥式熟化、脱水重结晶或二价铁诱导转化等过程向更结晶的铁氧化物演化^[71]. 水铁矿可由不同结构端元组成, 其结构比例受粒径、温度和水化状态共同控制; 在水悬浮体系的环境条件下, 不同结构端元在粒径≤12 nm时最容易共存^[72]. 这种尺寸依赖稳定性直接影响其表面吸附能力: 新鲜2-line水铁矿粒径约2.6 nm, 比表面积可达约650 m²/g; 当其老化为5~6 nm的6-line水铁矿时, 比表面积降至约280±30 m²/g^[41]. 因此, 水铁矿由新生纳米相向针铁矿或赤铁矿转化的过程, 实质上伴随着

比表面积、表面羟基密度和高亲和吸附位点的减少, 进而降低其对As、Pb、Cu、U、磷酸盐和有机质等组分的吸附或固定能力^[73].

4 纳米尺度与地球圈层

4.1 圈层结构

地球及行星系统中各圈层内的微纳米物质依托深部物质迁移、大气沉降、水-岩作用、生物富集等多种方式, 持续开展跨圈层物质交换与循环^[74], 且各圈层之间的微纳米物质通过深部物质迁移、大气沉降、水-岩相互作用以及生物富集等多种途径持续进行跨圈层交换与循环^[75]. 大气圈中的纳米颗粒物来源包括自然源和人为源, 这些颗粒多在微米或纳米尺寸范围^[76], 可以通过深部迁移和大气沉降对所有类型的环境和生态以及人类健康产生巨大的污染影响^[77]. 水圈中, 结晶矿物组分因溶解度低、传质速率受限或杂质离子干扰, 晶体生长受到抑制而稳定于纳米粒径, 这是自然水体、沉积物及土壤中纳米物质形成的重要机制之一. 土壤圈与岩石圈中的微纳米物质则分别通过风化成土过程和深部地质作用形成, 并参与元素的迁移富集.

4.2 大气圈

大气圈中纳米颗粒主要通过均相成核、气相化学反应两种途径形成: 前者是过饱和蒸气发生自发生成核, 后者由难挥发性物质经光化学氧化反应生成, 最终形成以硫酸盐、硝酸盐、有机物为主要组分的纳米颗粒^[78]. 后续生长过程涵盖聚集、表面冷凝、潮解及吸湿性颗粒的吸水膨胀, 最终通过凝聚与凝结形成稳定颗粒^[79]. 在空间电荷参与下, 几纳米至十几纳米的颗粒簇可借助静电斥力规避碰撞并捕集, 从而延长寿命^[80], 并在特定高度层形成高浓度纳米物质层(图4(a, c)), 经由大气环流实现洲际尺度的长程输运^[81]. 大气中有机纳米颗粒包括原生有机物(primary organic matter, POM)、次生有机物(secondary organic matter, SOM)和焦油球. 原生有机纳米颗粒常呈球形或近似球形^[82], 其中, 以黑碳(black carbon, BC)为代表的原生有机纳米颗粒主要来源于地球过程, 排放时呈粒径10~100 nm的链状聚集集体(图4(d)); 在老化过程中, 链状结构转变为簇状(图4(e)), 并最终变成致密状(图4(f))^[83]. 次生有机纳米颗粒往往形状不规则^[84], 如汽车尾气中的次生纳米

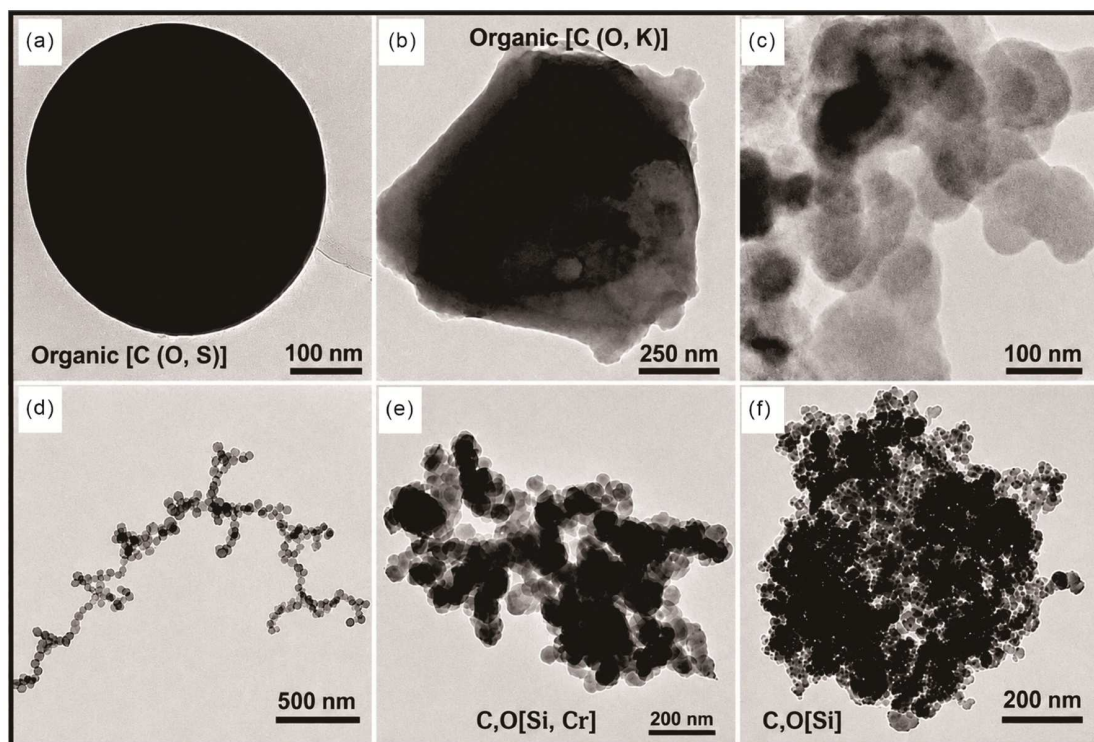


图4 (网络版彩色)大气圈纳米颗粒TEM图像。(a) 深圳市采集的PM_{2.5}中的有机颗粒物^[82], (b) 北京市冬季采集的PM_{2.5}中的不规则形状的有机颗粒物^[86], (c) 典型大气碳纳米物质^[19]; (d~f) 不同形态及老化程度的煤烟颗粒^[87]

Figure 4 (Color online) TEM images of atmospheric nanoparticles. (a) Organic particles in PM_{2.5} collected in Shenzhen^[82], (b) irregularly shaped organic particles in PM_{2.5} collected in Beijing during winter^[86], (c) typical atmospheric carbonaceous nanomaterials^[17], (d~f) soot particles with different morphologies and aging states^[87]

物质, 为柴油添加剂中5~15 nm的氧化铈团聚体在燃烧过程中形成50~300 nm的次生氧化铈, 最终进入地表灰尘和土壤环境中^[85]。

4.3 水圈

近年来, 地球科学和环境科学领域对水圈纳米物质的研究聚焦于纳米颗粒的成矿条件、污染过程和化学行为, 特别是水体中纳米物质对成矿元素富集和污染物的迁移、降解、生物有效性的影响及其相互作用^[88]。水体中纳米物质与传统颗粒物(>1 μm)在迁移机制上存在显著差异, 纳米物质主要受布朗运动、流体动力学和表面相互作用主导, 水体中的纳米颗粒小尺寸效应, 能够利用布朗运动在水中快速移动^[89], 其迁移速率与粒径呈反比, 20 nm铜颗粒的迁移率比50 nm颗粒高出37.4%~68.7%, 比80 nm颗粒高出89.7%~174.4%^[90]。而微米级以上颗粒则主要依赖重力沉降和湍流扩散, 其迁移沉降速率<0.1 mm/s。纳米物质在溶解反应性上同样与微米颗粒存在本质差异, 纳米级

方铅矿颗粒因具有极高的比表面积, 在酸性矿山废水中方铅矿纳米物质溶解和释放速率比其微米颗粒快10%~100%, 使污染物的生物可利用性与环境毒性大幅增强^[91]。

4.4 土壤圈

土壤圈中包含许多纳米级(<100 nm)或者微纳米级范围(1~1000 nm)的无机和有机颗粒, 主要包括黏土矿物、金属氧化物和氢氧化物(图5(a))、酶、腐殖质、病毒和流动胶体等^[92], 这些纳米颗粒因具有极高的比表面积和表面反应活性, 是土壤中营养元素、有机碳、重金属污染物及有害元素迁移的重要载体。其中, 黏土矿物多呈纳米级片层结构或具有纳米级孔隙, 表面缺陷与位错密度高, 对外部溶质分子极为敏感^[92], 可通过静电吸附、表面络合剂等机制有效富集纳米金属颗粒, 如天然伊利石层状结构中夹带纳米铜(图5(b))。值得注意的是, 土壤中的流动胶体, 粒径介于1~1000 nm的可迁移微纳米颗粒, 能够携带吸附态污染物穿越土壤孔隙

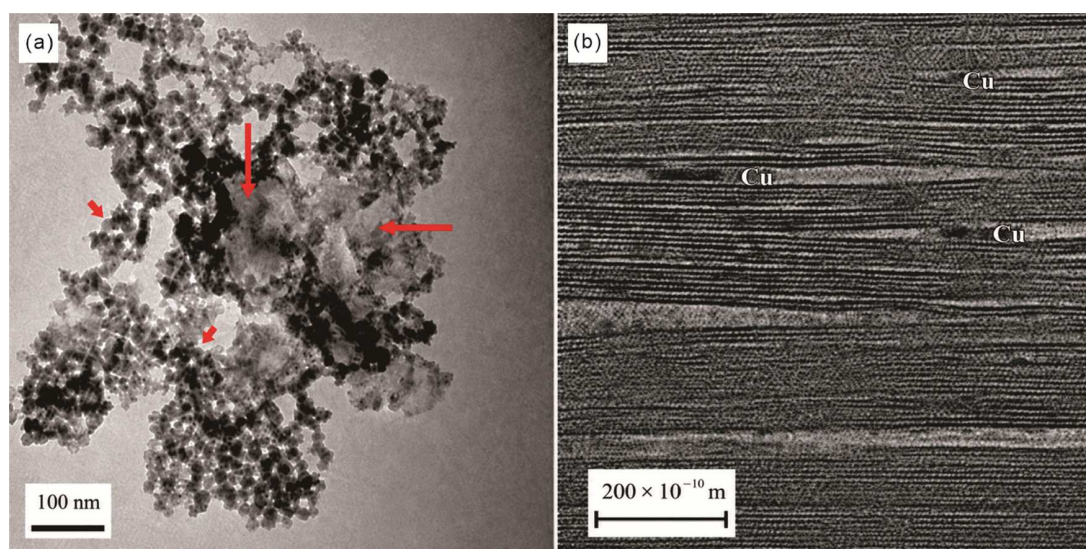


图5 (网络版彩色)土壤中常见的纳米黏土矿物及纳米金属物质。(a) 黏土中的纳米高岭石(长箭头)和纳米铁氧化物颗粒(短箭头); (b) 天然伊利石中包含的纳米铜颗粒^[93]

Figure 5 (Color online) Common nanoscale clay minerals and metallic nanomaterials in soils. (a) Nanoscale kaolinite (long arrow) and nanoscale iron oxide particles (short arrow) in clay; (b) nanoscale copper particles enclosed in natural illite^[93]

网络发生垂向迁移, 绕过土壤的传统过滤屏障进入地下水系统, 是重金属与有机污染物发生深层迁移的重要机制, 也有深部纳米级金属物质通过岩层纳米孔隙系统进入土壤并富集, 这样可以在土壤实现纳米找矿。

4.5 岩石圈

岩石圈是地球纳米物质最为多样、赋存环境最为极端的圈层。按成因环境可将其中的纳米物质与纳米结构分为三类: 其一为深部高温高压地质作用形成的纳米矿物颗粒、纳米包裹体与纳米单质颗粒; 其二为断层、褶皱等构造变形带中应力驱动形成的纳米物质与纳米结构; 其三为致密油气储层中有机质热演化形成的大分子纳米结构与纳米孔裂隙^[61]。岩石圈中的纳米物质与纳米结构在深部地质作用中扮演着重要角色, 尤其在高温高压环境下的矿物相变过程中。蛇绿岩铬铁矿、地幔橄榄岩中产出纳米金刚石、斜方晶系Ca-Mn-钙铁矿、Mn-石榴石、Ni-Mn-Co纳米物质及纳米级流体包裹体等超高压尖晶石(图6(a))和自然金属等纳米物质以及纳米级流体包裹体(图6(b, d))等超高压矿物组合^[61], 实验岩石学研究证明, 上述矿物组合对应下地幔压力条件(>660 km)^[94], 表明其经历了从地表经俯冲带下沉至下地幔、再由地幔柱上升至浅部的完整深部循环路径。

4.6 地球圈层的纳米物质相互作用

大气圈、水圈、土壤圈与岩石圈之间的物质与能量交换并发生相互作用, 共同维系着地球系统的宜居性^[95], 纳米物质在地球关键带中可实现自身及其他元素跨圈层长距离传输, 是促成土壤发育、元素循环和水质等动态变化的主要因素之一。造山带蛇绿岩地幔橄榄岩中微纳米级金刚石常含纳米级Mn-石榴石、Ni-Mn-Co纳米物质共存, 表明其为俯冲洋壳物质深部再循环的产物^[61], 其碳同位素值($\delta^{13}\text{C}$)介于-28‰~18‰之间, 表明来源于地表有机碳的再循环^[96]。因此, 地表物质可以通过纳米矿物形式参与岩石圈物质循环, 到达下地幔, 并被地幔柱上升流带到上地幔, 最终由金伯利岩运移至地表。深部岩浆热液可以带动纳米物质循环, 并在合适的位置形成矿床。来自矿体的纳米金属颗粒可以直接或通过地气流发生垂向迁移而到达地表, 被土壤中黏土矿物或氧化物膜吸附或被地表生物所捕获, 并以多种状态(气溶胶、悬浮液、固态沉积等)和组分(单质或合金、氧化物、硫化物等)广泛存在于这些介质中^[88]。地球表层风化氧化层中铁、锰纳米矿物的形成和转化通常受非生物、生物以及生物-非生物耦合过程共同控制。非生物途径主要包括Fe(II)/Mn(II)在氧气、过氧化物或光化学活性氧参与下发生氧化、水解和沉淀, 形成水铁矿、针铁矿、纤铁矿、层状水钠

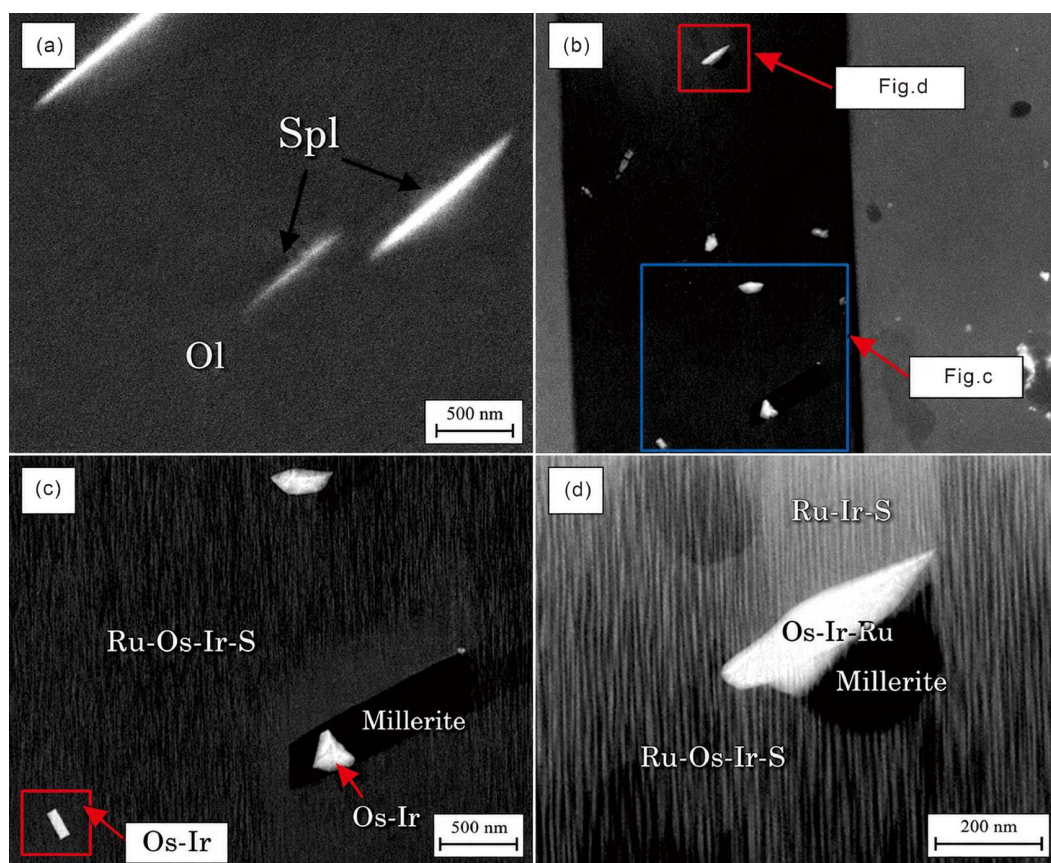


图6 (网络版彩色)岩石圈纯橄岩中橄榄石。(a) 纳米颗粒铬尖晶石(磁铁矿); (b~d) 纳米金属包裹体

Figure 6 (Color online) Olivine in lithospheric peridotite. (a) Nanoscale granular chromian spinel (magnetite); (b~d) nanoscale metallic inclusion

锰矿及隧道状Mn氧化物等纳米相。生物途径则包括铁氧化菌、锰氧化菌、真菌和生物膜胞外聚合物(EPS)对Fe/Mn氧化还原状态、成核位置和晶体形貌的调控。表层水体泡沫一次破碎和二次生物氧化形成大气中纳米物质^[17],并通过大气传输影响水生和陆地环境^[74]。地球不同圈层间纳米物质的主要迁移与循环方式见图7。

5 纳米尺度相关的资源与环境

5.1 纳米尺度资源效应

地球资源体系中的纳米尺度研究主要涉及非常规能源储层、纳米矿床以及纳米矿物材料与复合材料等方面。纳米矿物、纳米颗粒、微-纳米孔裂隙及其表面过程,不仅控制页岩气、煤层气等非常规油气的储集与运移行为,也深刻影响成矿元素的赋存、迁移与富集,并推动石墨、石墨烯以及黏土矿物等矿物材料在资源开发与环境治理中的应用拓展^[6]。

5.1.1 纳米能源

纳米能源主要包括非常规油气资源和纳米能源资源,纳米能源资源主要包括金属元素为主的纳米能源,如煤型铀以及煤系中呈现纳米尺度的砂岩型铀矿等。本文重点讨论与纳米尺度有关的非常规油气资源^[53]。页岩中介孔占比高达40%以上,微孔次之,大孔占比最低。其中2~50 nm的介孔提供了巨大的比表面积,通过范德华力形成吸附态气体存储,为页岩气的主要存储空间。有机质纳米孔尺寸以100 nm左右的纳米孔隙结构为主^[53],为吸附态甲烷提供大量的吸附位^[97]。天然宏观和微裂隙网络体系的发育则为游离态甲烷提供储集和运移空间^[98]。应力作用下,煤岩发生构造变形,形成纳米大分子结构(碳纳米结构)和纳米孔结构(0.1~100 nm),为煤层气主要的吸附和扩散空间,其吸附能力随着构造变形程度而增加^[45]。与微米尺度变形不同,构造煤纳米结构的变化会引起物性(含气性、孔隙度、渗透率等)的异常变化^[29],可以使无序的纳米碳

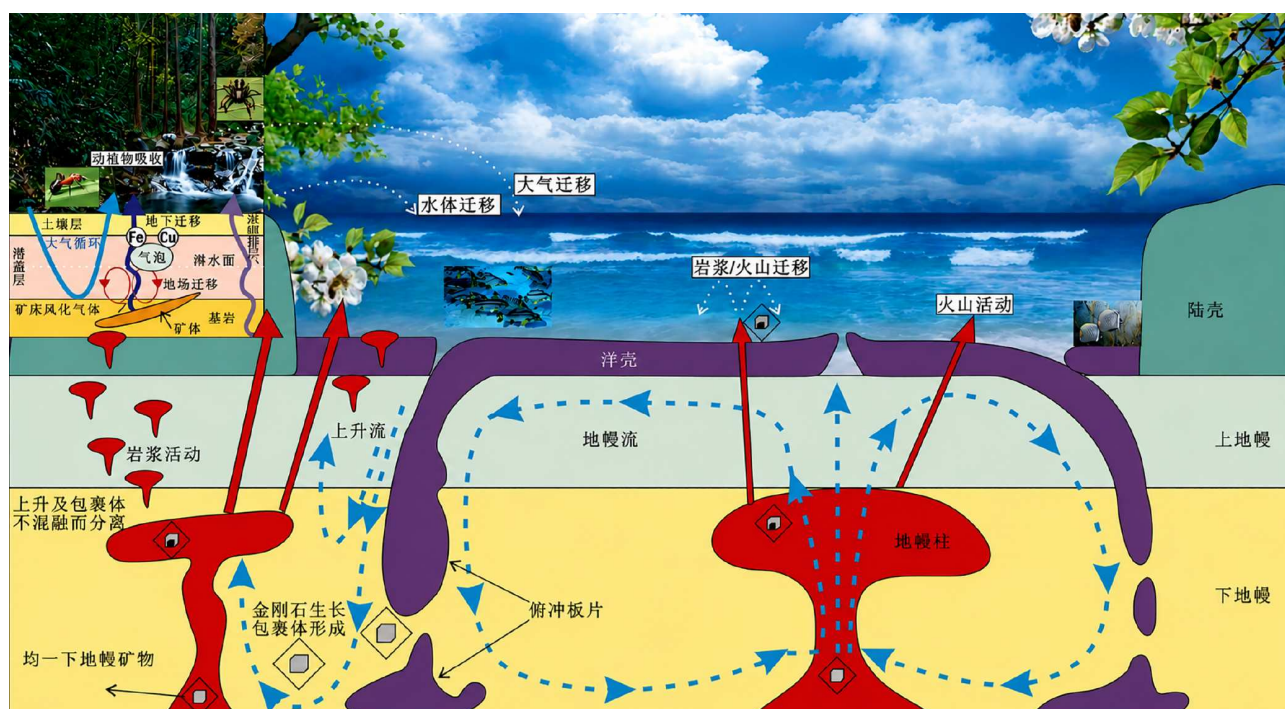


图7 (网络版彩色)地球不同圈层间纳米物质循环示意图

Figure 7 (Color online) Schematic diagram showing the cycling of nanomaterials among different Earth spheres

定向排列形成石墨(图1(e, f))^[6]并伴有液体, 气体产生和释放。

5.1.2 纳米矿床

部分矿床或资源体系的开采对象、运移载体及富集介质与纳米矿物、纳米颗粒及其集合体密切相关, 如卡林型金矿、鲕状赤铁矿矿床、深海锰结核矿床、黏土矿床以及稀土矿床^[99]。此外, 在若干关键金属资源体系中, 其迁移、吸附、赋存和富集过程往往与纳米矿物表面、纳米孔隙及胶体/纳米颗粒密切相关, 例如风化体系与湖相卤水中的锂、离子吸附型稀土矿床中的稀土元素, 以及煤中镓、锗等关键金属的富集过程均具有明显的纳米尺度控制特征^[100]。

纳米尺度成矿与富集作用可以分布在陆地、海洋以至行星系统。纳米尺度成矿与富集作用主要包括吸附、离子交换、表面络合、胶体迁移和絮凝沉淀等过程。当成矿热液的物理化学条件发生改变时, 流体中的纳米金颗粒会发生絮凝沉淀, 并在石英脉中富集形成矿体(图8(a))^[103]。借助纳米尺度表征技术, 可有效揭示成岩与成矿演化过程, 如斑岩铜矿中斜长石斑晶具有微尺度(10~100 μm)和纳米尺度(10~100 nm)成分带结构(图8(b)), 分别反映了缓慢结晶的成岩过程和纳米尺

度快速出溶的成矿过程^[20]。钒钛磁铁矿床中纳米级氧化物交叉关系可以用来确定氧化铁相的溶解顺序, 而钛磁铁矿原子排列特征则可以揭示纳米出溶与岩浆演化的关系(图8(c, d))^[104]。

5.1.3 纳米矿物材料与复合材料

纳米材料按组成和性质可概括为黏土矿物材料、碳质材料、金属及金属氧化物纳米材料, 以及由此发展而来的复合纳米材料。其中, 以天然矿物为母体或前驱体改造而成的纳米矿物材料(如纳米黏土、纳米水合氧化铁、石墨等), 因兼具天然矿物的低廉成本、丰富储量与纳米尺度的优异功能特征, 在地球科学与资源环境领域具有尤其重要的应用价值。黏土矿物是地表最为丰富的层状硅酸盐矿物, 其晶层厚度本身即处于纳米尺度, 通过插层、剥离与改性可获得高比表面积(50~800 m^2/g)、强吸附性与可调层间间距的纳米黏土材料^[11]。铁氧化物/羟基氧化物(磁铁矿 Fe_3O_4 、赤铁矿 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、针铁矿 $\alpha\text{-FeOOH}$ 、水铁矿等)是地表最重要的天然纳米矿物之一, 其纳米化形式具有高比表面积(80~300 m^2/g)、丰富的表面羟基(-OH)以及独特的磁性(磁铁矿)与光催化活性(赤铁矿)^[104]。此外, 石墨是重要的战略矿产资源^[105], 也是应用最为广泛的碳质纳米

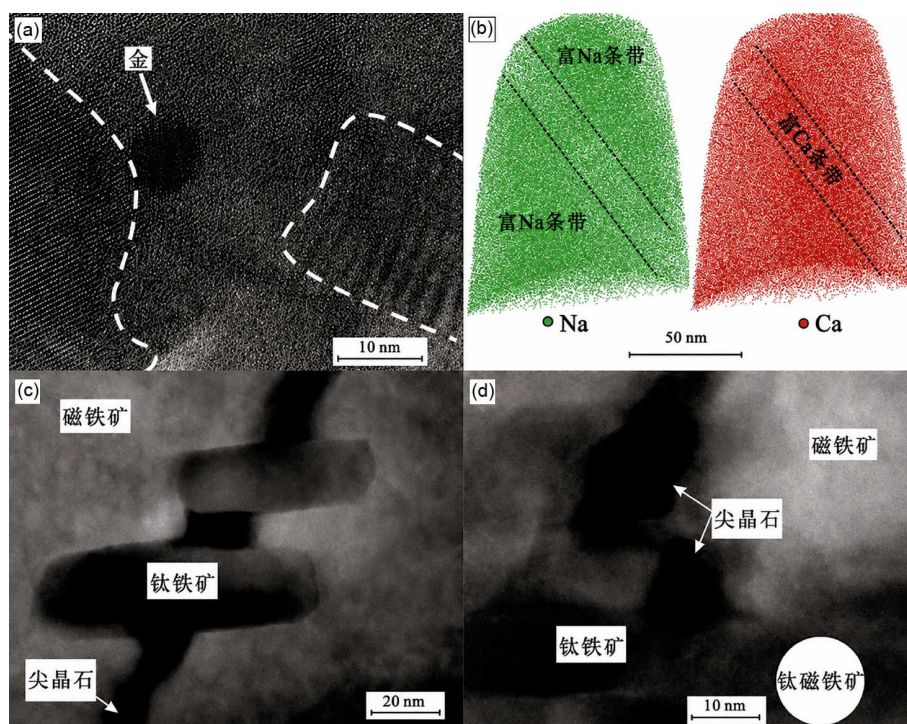


图 8 (网络版彩色)与纳米尺度资源有关的纳米物质与纳米结构。(a) 美国内华达州Betz Post Screamer卡林型金矿床中纳米金颗粒^[103]；(b) 菲律宾黑山斑岩铜金矿床同矿化闪长斑岩中斜长石斑晶的纳米级结构和成分分带^[20]；(c, d) 四川攀枝花钒钛磁铁矿床单斜辉石中铁氧化物出熔关系^[104]

Figure 8 (Color online) Nanomaterials and nanostructures related to nano-resources. (a) Gold nanoparticles from the Betze-Post-Screamer Carlin-type gold deposit, Nevada, USA; (b) nanoscale structures and compositional zoning in plagioclase phenocrysts from mineralized diorite porphyry in the Baguio porphyry Cu-Au deposit, Philippines^[20]; (c, d) exsolution relationships of iron oxides in clinopyroxene from the Panzhihua V-Ti magnetite deposit, Sichuan Province^[103]

材料。微晶石墨由于单晶尺寸 $<1\ \mu\text{m}$ ，而常被作为加工纳米石墨的原材料^[106]。微晶石墨相较于鳞片石墨结构缺陷与无序度逐渐增加，进而拥有丰富的网络型孔隙结构，孔径集中在2~5 nm(图9(a, b))^[107]。

5.2 纳米尺度环境效应

地球表层环境中存在大量的天然成因及人工合成纳米物质^[108]，研究其带来的风险，对环境的承载力和可持续发展意义重大^[109]。天然成因纳米物质总量远远大于人工合成的，但研究相对较少，近年来探究天然环境中纳米物质参与生物地球化学过程及其对生态环境的影响已经形成了一个稳定的前沿热点^[3]。

5.2.1 大气污染

大气中纳米颗粒具有粒径小、数量多、比表面积大、化学成分复杂等特性，对大气环境具有较大影响，在地球环境的演变中发挥着至关重要的作用，由于其对健康的不利影响，近年来也成为公众迫切关注的问

题^[83]。按其来源通常分为自然源大气纳米颗粒物和人为源大气纳米颗粒物两种类型。自然源大气纳米颗粒物包括地壳尘埃、野火、火山活动、陨石撞击、海喷雾、花粉和孢子等生物排放物以及大气中通过气体-颗粒转化产生的颗粒物^[110]。人为源大气颗粒物主要来源包括化石燃料燃烧、工业加工、废物焚烧和农业活动等，是重要的空气污染物^[17]。大气纳米污染物的TEM、SEM及单颗粒化学分析能够直接揭示不同人为源纳米颗粒的形貌、粒径、矿物组成和潜在健康效应，是识别大气纳米污染物来源的重要手段。需要指出的是，人为源纳米颗粒进入大气后并非保持初始状态不变，而会与含硫、含氮气体、氧化剂及水汽发生非均相反应和混合态演化，形成矿物-硫酸盐复合颗粒、表面包覆层及含硫酸盐纳米颗粒等二次转化产物(图10(a~c))^[75]。

5.2.2 水体污染

水中纳米污染物具有来源和分布广、质量浓度低

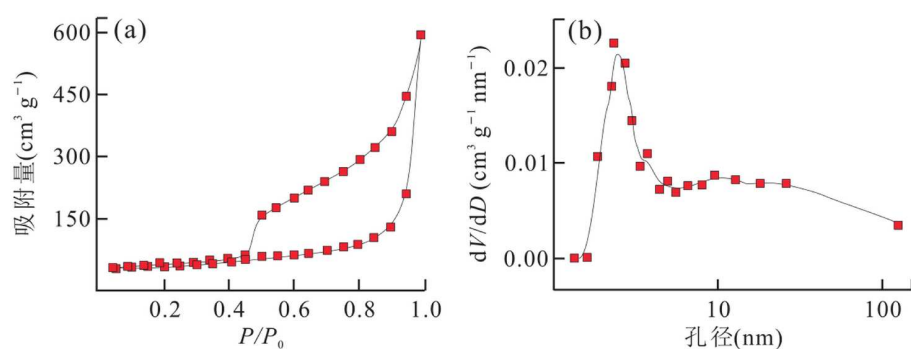


图9 (网络版彩色)微晶石墨氮气脱吸附曲线(a)及孔径分布曲线(b)^[107]

Figure 9 (Color online) Nitrogen adsorption-desorption isotherm (a) and pore-size distribution curve (b) of microcrystalline graphite^[107]

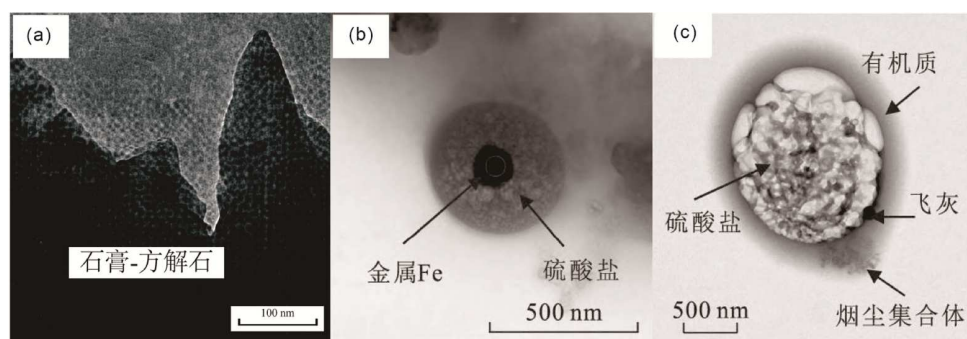


图10 (网络版彩色)大气中常见纳米物质与纳米结构。(a) 石膏和方解石纳米尺度连生体或复合颗粒; (b, c) 大气中含硫酸盐的纳米颗粒及其混合态特征^[111]

Figure 10 (Color online) Common atmospheric nanomaterials and nanostructures. (a) Nanoscale gypsum-calcite intergrowths or composite particles; (b, c) sulfate-bearing atmospheric nanoparticles and their internally mixed states^[111]

但数量浓度高等特点^[3], 主要包括碳基纳米污染物、半导体纳米污染物、纳米金属和金属氧化物以及纳米工程聚合物^[112], 这些纳米物质凭借较高的比表面积和表面能, 能高效地吸附水中重金属及有机污染物^[113], 通过悬浮于水中的胶体或纳米物质的共输运作用, 具有更高的迁移效率^[20]。在酸性条件下部分纳米物质可溶解并释放出有毒金属离子, 含有Pb、Zn、Cd的纳米碳酸盐易溶于水中, 纳米尺寸的氧化锌(ZnO)和银(Ag)溶于水产生有毒的 Zn^{2+} 和 Ag^+ , 吸附在细胞表面, 阻断细胞膜的传递功能, 导致藻类和软体动物的死亡^[114], 最终富集在水底沉积物中, 形成严重污染, 随着纳米污染物在水体中的不断积累, 其迁移转化过程对水环境的影响日益显著。对于确需使用纳米材料的修复过程, 应优先采用负载化、固定化或磁性回收型材料, 以降低材料二次释放及潜在生态风险。

5.2.3 土壤污染

表层土壤中广泛存在纳米级金属氧化物/氢氧化物、纳米黏土矿物、纳米级腐殖质及有机-矿物复合

体等天然纳米物质, 这些组分既可由母岩风化、成壤作用和有机质分解形成, 也可通过大气沉降、农业活动和工业排放等进入土壤系统^[3]。由于比表面积高、表面电荷和活性位点丰富, 土壤纳米物质可通过表面络合、离子交换、共沉淀、团聚-解聚和胶体共输运等过程, 调控As、Pb、Cd、Hg等重金属以及有机污染物的吸附固定、再活化和生物有效性^[115]。尤其在水分充足、离子强度变化或根际微生物活动强烈的条件下, 纳米胶体可增强污染物向深层土壤、地下水或植物根际迁移的能力。未来研究应聚焦表层土壤中纳米物质的迁移、转化及其与污染物的相互作用, 深入探讨纳米物质在土壤-水界面中的动态行为及其在土壤污染修复中的应用。

5.2.4 纳米污染物与人体健康

纳米污染物是指环境中具有纳米尺度特征、并可能对生物体和人体健康产生不利影响的颗粒或颗粒复

合体。它们既可来源于工业排放、燃烧过程和工程纳米材料释放,也可在大气、水体和土壤等地表环境中通过吸附、络合、团聚和转化等过程形成次生纳米颗粒。由于粒径小、比表面积大、表面活性强,纳米污染物更易与重金属、有机污染物及病原微生物等发生耦合迁移,并可通过呼吸吸入、饮水摄入、食物链富集及皮肤接触等途径进入人体,导致一系列生物学效应。纳米颗粒的生物利用度与粒径呈负相关:粒径20~100 nm的颗粒,生物利用度仅5%~15%;而粒径小于5 nm的颗粒,生物利用度可达30%~50%。由此可见,纳米颗粒粒径越小,毒性与健康风险越高^[116],更易引起呼吸系统炎症^[117],危害心血管系统^[118],或影响中枢神经系统及消化系统等。因而,受到国内外研究者的重视^[119]。

6 纳米地球科学存在的难题与未来研究方向

自Hochella首次系统阐述纳米科学在地球科学中的革命性意义以来^[1],纳米地球科学已由纳米矿物和表-界面反应以及有机质纳米结构研究,扩展到大气圈、水圈、土壤圈、岩石圈及行星物质中的纳米颗粒、纳米结构和纳米孔隙过程,并在非常规能源、成矿元素富集和环境健康风险等方面形成了重要应用^[3]。但总体看,该领域仍处于由“现象识别”向“机制定量”转变的关键阶段。

天然纳米物质的成因、识别和定量标准尚未完全统一。不同技术在粒径窗口、样品前处理、团聚/解聚过程、表面包覆层保存和元素形态识别方面存在差异,容易导致自然纳米颗粒、工程纳米颗粒、胶体和溶解态组分之间的边界模糊。未来应加强场流分离-电感耦合等离子体质谱(asymmetrical flow field-flow fractionation coupled with inductively coupled plasma mass spectrometry, AF4-ICP-MS)、单颗粒ICP-MS/ICP-TOFMS、STXM、SEM-Raman和同步辐射谱学等多技术联用,建立面向天然复杂体系的粒径、组成、价态和表面性质协同表征流程^[3,120]。

资源与环境效应研究需要由案例归纳转向机制检验。非常规油气和煤系气储层中,纳米孔隙控制吸附、扩散与解吸过程,但孔隙连通性、有机质-矿物界面和温压演化的共同制约仍需量化^[121]。成矿体系中,纳米包裹体、纳米金属颗粒和表面吸附可解释部分元素超常富集,但其能否驱动矿床尺度富集,仍需与流体演化、构造通道和热液沉淀过程耦合验证。环境方面,风

险评价应从“材料毒性”转向“来源-迁移-转化-暴露-生物效应”链条,重点关注纳米塑料、金属氧化物和含Pb、As、Hg等有害元素天然纳米颗粒的长期复合暴露效应^[3]。

未来,纳米地球科学的突破不应仅依赖更高分辨率观测,而应构建“原位超微成像-精细谱学表征-实验反应约束-跨尺度模拟计算-机器学习预测”的闭环体系。开放数据库需系统记录样品来源、粒径分布、矿物相、表面化学、溶液条件、反应时间和迁移通量等信息;机器学习可服务于图像分割、单颗粒谱图分类、孔隙网络重建和反应路径筛选,但必须受高质量标注数据、可解释模型和地球化学规律约束。由此,纳米地球科学才能从多学科交叉的现象汇集,发展为解释资源形成、环境演化和地球系统过程的定量科学^[3,33,34]。

7 结论

纳米地球科学以地球与行星各圈层的纳米物质、纳米结构、纳米孔隙为核心研究对象,在解析地球演化机理、指导资源勘探、管控生态环境、评估人体健康风险等领域具备重要科学价值与应用前景。本文通过对纳米地球科学及资源环境效应的系统研究获得以下结论和认识。

(1) 纳米地球科学以地球各圈层中纳米颗粒和孔隙的形貌、成分、结构为研究对象,深入揭示了纳米尺度颗粒形成、运移、聚集与赋存形式及纳米孔隙形成与演化的作用过程与机制。纳米地球科学已建立起从纳米矿物学、纳米岩石学、纳米地球化学、纳米构造地质学、纳米能源地质学、纳米矿床学、纳米地质材料学、纳米灾害地质学、纳米环境地质学,到纳米大气科学与纳米海洋科学涵盖十个研究领域的完整学科体系。其方法体系涵盖纳米尺度物质观测(SEM、高压原位TEM、原子探针层析等)、纳米-亚纳米结构谱学(FTIR、AFM-IR、固态NMR等)、纳米孔隙定量表征(低温气体吸附、同步辐射纳米CT等)以及分子动力学模拟、量子化学计算DFT与机器学习-人工智能预测等五大类,共同构成“原位超微成像-精细谱学表征-跨尺度模拟计算-机器学习与人工智能预测”的闭环研究体系,为识别复杂地质体系中的纳米尺度物质、结构和过程提供了重要支撑。

(2) 地球系统中纳米物质形态多样,涵盖纳米矿物与矿物纳米结构、纳米单质、纳米矿物组合与有机大分子结构、纳米尺度生物矿物、纳米包裹体;该类纳

米物质跨大气圈、水圈、土壤圈、岩石圈等广泛分布,其动态稳定性由粒径、比表面积、表面能、晶体缺陷、流体条件及生物作用共同调控。当物质尺度进入纳米范围后,高比表面积、限域效应、表面缺陷和界面反应活性可引起溶解度、吸附能力、氧化还原行为、扩散能力和力学响应等性质的非线性变化,进而影响矿物风化、元素迁移、成矿富集、非常规油气储集和污染物归趋等宏微观演化过程。此外,纳米物质与纳米结构演化体现出显著的物理变形-地球化学反应耦合特征。构造应力可在无机岩、构造煤及变形页岩和断层带中分别形成纳米涂层与纳米分层、BSU重排与纳米孔隙重构,以及不同形态和聚集状态的纳米颗粒,从而改变岩石力学性质、孔裂隙结构和流体运移条件;界面化学反应则通过溶解、沉淀、相变和胶体形成持续改造矿物纳微米结构及其表面活性。该机制为理解构造变形、流体-岩石相互作用、元素迁移富集和储层物性演化之间的跨尺度联系提供了纳米尺度约束。

(3) 微纳米物质的跨圈层循环是驱动地球表层系统演化的重要机制,其环境与健康效应的定量评估是纳米地球科学面向重大社会需求的核心方向。微纳米物质广泛分布于大气圈、水圈、土壤圈与岩石圈,通过大气输运、水-岩相互作用、生物富集及地幔对流

等多种途径实现跨圈层物质交换,深刻影响大气颗粒辐射效应、水体重金属赋存与归趋、土壤有机碳封存及成矿元素迁移等资源富集、污染物归趋与全球元素循环过程。然而,当前研究对各圈层间纳米物质迁移通量的定量约束仍严重不足,工程纳米材料进入自然地球化学循环后的转化路径与食物链富集效应尚待系统厘清,是纳米地球科学亟待突破的重大科学命题。

(4) 在资源与环境两大核心应用领域,非常规油气主体赋存于1~100 nm的有机质纳米孔隙中,甲烷以吸附态赋存于孔隙表面、以游离态充填于较大孔喉与微裂隙中,纳米孔隙结构从根本上制约着页岩和煤层等非常规储层中油气的赋存状态与运移行为;纳米矿物及其包裹体通过高比表面积、表面活性与晶格限域效应驱动成矿元素的超常富集,黄铁矿纳米孔隙对不可见金的捕获、卡林型金矿中纳米金颗粒的赋存及斑岩铜矿中斜长石纳米成分分带均为典型例证,可作为示踪隐伏矿床的纳米尺度找矿标志;在环境领域,纳米污染物对Hg(II)、Pb(II)、Cd(II)、As(V)等重金属的最大吸附容量可达同种宏观矿物的5~20倍,其跨介质迁移、生物可利用性与人体暴露风险均显著高于宏观颗粒,其治理修复需以对纳米界面过程的精准认知为前提。

参考文献

- Hochella Jr M F. Nanoscience and technology: the next revolution in the Earth sciences. *Earth Planet Sci Lett*, 2002, 203: 593–605
- Ju Y, Sun Y, Wan Q, et al. Nanogeology: a revolutionary challenge in geosciences (in Chinese). *Bull Mineral Petrol Geochem*, 2016, 35: 1–20 [据宜文, 孙岩, 万泉, 等. 纳米地质学: 地质领域革命性挑战. *矿物岩石地球化学通报*, 2016, 35: 1–20]
- Ju Y, Li X, Ju L, et al. Nanoparticles in the Earth surface systems and their effects on the environment and resource. *Gondwana Res*, 2022, 110: 370–392
- Penn R L, Banfield J F. Imperfect oriented attachment: dislocation generation in defect-free nanocrystals. *Science*, 1998, 281: 969–971
- Ju Y, Huang C, Sun Y, et al. Nanogeoscience: connotation and significance (in Chinese). *Earth Sci*, 2018, 43: 1367–1383 [据宜文, 黄骋, 孙岩, 等. 纳米地球科学: 内涵与意义. *地球科学*, 2018, 43: 1367–1383]
- Ju Y, Huang C, Sun Y, et al. Nanogeology in China: a review. *China Geol*, 2018, 1: 286–303
- Ju Y, Huang C, Sun Y, et al. Nanogeosciences: research history, current status, and development trends. *J Nanosci Nanotechnol*, 2017, 17: 5930–5965
- French R A, Caraballo M A, Kim B, et al. The enigmatic iron oxyhydroxysulfate nanomineral schwertmannite: morphology, structure, and composition. *Am Mineral*, 2012, 97: 1469–1482
- Plathe K L, von der Kammer F, Hassellöv M, et al. The role of nanominerals and mineral nanoparticles in the transport of toxic trace metals: field-flow fractionation and analytical TEM analyses after nanoparticle isolation and density separation. *Geochim Cosmochim Acta*, 2013, 102: 213–225
- Li J, Zhang B, Gong Q, et al. Microscopic morphology and indicative significance of nanoscale Au particles in soils and fault muds: a case study of Jiaojia, Shandong Province. *Appl Sci*, 2023, 13: 2126
- Tang X, Hu Z, Xu Y, et al. About nanogeology and nanoastronomy (in Chinese). *Chin J Nat*, 1991, 14: 563–565 [唐孝威, 胡中为, 许胤林, 等. 关

- 于纳米地质和纳米天文. 自然杂志, 1991, 14: 563–565]
- 12 Zhang Z, Jiang Z. Nanomineralogy: a promising new science (in Chinese). *Miner Resour Geol*, 1993, (3): 161–165 [章振根, 姜泽春. 纳米矿床学——一门有前途的新科学. *矿产与地质*, 1993, (3): 161–165]
 - 13 Chen J. Development of nanotechnology and research on nanomineralogy (in Chinese). *Geol Sci Technol Inf*, 1994, 13: 32–38 [陈敬中. 纳米科技的发展与纳米矿物学研究. *地质科技情报*, 1994, 13: 32–38]
 - 14 Yuan P. Unique structure and surface-interface reactivity of nanostructured minerals (in Chinese). *Earth Sci*, 2018, 43: 1384–1407 [袁鹏. 纳米结构矿物的特殊结构和表—界面反应性. *地球科学*, 2018, 43: 1384–1407]
 - 15 Ju Y, Jiang B, Hou Q, et al. ^{13}C NMR spectra of tectonic coals and the effects of stress on structural components. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2005, 48: 1418–1437
 - 16 Wang X, Zhang B, Liu X. Nano-geochemistry: geochemical exploration through overburden (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2012, 19: 101–112 [王学求, 张必敏, 刘雪敏. 纳米地球化学: 穿透覆盖层的地球化学勘查. *地学前缘*, 2012, 19: 101–112]
 - 17 Sun Y, Ju Y, Huang C, et al. Representation of HO δ é shear deformation theory at nanoscale (in Chinese). *J Earth Sci*, 2018, 43: 1518–1523 [孙岩, 据宜文, 黄骋, 等. HO δ é剪切变形理论在纳米尺度的表象. *地球科学*, 2018, 43: 1518–1523]
 - 18 Zou C, Zhu R, Bai B, et al. First discovery of nanopores in Chinese oil and gas reservoirs and its scientific value (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2011, 27: 1857–1864 [邹才能, 朱如凯, 白斌, 等. 中国油气储集层中纳米孔首次发现及其科学价值. *岩石学报*, 2011, 27: 1857–1864]
 - 19 Yang Y, Zhou L, Dou F, et al. Nanoparticles: unique geochemical composition (in Chinese). *Earth Sci*, 2018, 43: 1489–1502 [杨毅, 周立旻, 斜斐昉, 等. 纳米颗粒物: 独具特性的地球化学组成. *地球科学*, 2018, 43: 1489–1502]
 - 20 Cao M, Evans N J, Reddy S M, et al. Micro- and nano-scale textural and compositional zonation in plagioclase at the Black Mountain porphyry Cu deposit: implications for magmatic processes. *Am Mineral*, 2019, 104: 391–402
 - 21 Yang Y, Lin X, Xian H, et al. Three-dimensional electron diffraction: a transformative technology for crystal structure analysis of nanominerals (in Chinese). *Acta Min Sin*, 2024, 44: 655–668 [杨宜坪, 林泉举, 鲜海洋, 等. 三维电子衍射: 纳米矿物晶体结构分析的变革性技术. *矿物学报*, 2024, 44: 655–668]
 - 22 Song D, Guan P, Zhang C, et al. Molecular dynamics simulation of helium migration in mineral nanopores. *Sci China Earth Sci*, 2025, 68: 237–252 [宋丹丹, 关平, 张驰, 等. 氦气在矿物纳米孔隙中运移的分子动力学模拟. *中国科学: 地球科学*, 2025, 55: 239–254]
 - 23 Milliken K L, Curtis M E. Imaging pores in sedimentary rocks: foundation of porosity prediction. *Mar Pet Geol*, 2016, 73: 590–608
 - 24 Qiu X, Yang H, Zheng Z, et al. Applications and prospects of nano-ion probe analytical techniques in geomicrobiology and biosedimentology (in Chinese). *Earth Sci*, 2025, 50: 1220–1233 [仇鑫程, 杨浩, 郑子杰, 等. 纳米离子探针分析技术在地质微生物学和生物沉积学研究中的应用与展望. *地球科学*, 2025, 50: 1220–1233]
 - 25 Li W, Shao L, Geng H, et al. Computer-controlled scanning electron microscope: methodologies and application scenarios in atmospheric particle research. *Sci Total Environ*, 2023, 885: 163651
 - 26 Zhou Y, Wang T, Zhi D, et al. Applications of nanoscale zero-valent iron and its composites to the removal of antibiotics: a review. *J Mater Sci*, 2019, 54: 12171–12188
 - 27 Chalmers G R, Bustin R M, Power I M. Characterization of gas shale pore systems by porosimetry, pycnometry, surface area, and field emission scanning electron microscopy/transmission electron microscopy image analyses: examples from the Barnett, Woodford, Haynesville, Marcellus, and Doig units. *AAPG Bull*, 2012, 96: 1099–1119
 - 28 Javadpour F. Nanopores and apparent permeability of gas flow in Mudrocks (shales and siltstone). *J Canadian Pet Tech*, 2009, 48: 16–21
 - 29 Wang G, Ju Y. Organic shale micropore and mesopore structure characterization by ultra-low pressure N_2 physisorption: experimental procedure and interpretation model. *J Nat Gas Sci Eng*, 2015, 27: 452–465
 - 30 Wei M, Zhang L, Xiong Y, et al. Nanopore structure characterization for organic-rich shale using the non-local-density functional theory by a combination of N_2 and CO_2 adsorption. *Microporous Mesoporous Mater*, 2016, 227: 88–94
 - 31 Zhou S, Yan G, Xue H, et al. 2D and 3D nanopore characterization of gas shale in Longmaxi formation based on FIB-SEM. *Mar Pet Geol*, 2016, 73: 174–180
 - 32 Zhang J, Clennell M B, Dewhurst D N, et al. Combined Monte Carlo and molecular dynamics simulation of methane adsorption on dry and moist coal. *Fuel*, 2014, 122: 186–197
 - 33 Bergen K J, Johnson P A, de Hoop M V, et al. Machine learning for data-driven discovery in solid Earth geoscience. *Science*, 2019, 363: eaau0323
 - 34 Butler K T, Davies D W, Cartwright H, et al. Machine learning for molecular and materials science. *Nature*, 2018, 559: 547–555
 - 35 Lu S, Zhang Y, Li J, et al. Application of nanotechnology in the exploration and development of unconventional oil and gas (in Chinese). *Bull Mineral Petrol Geochem*, 2016, 35: 28–36 [卢双舫, 张亚念, 李俊乾, 等. 纳米技术在非常规油气勘探开发中的应用. *矿物岩石地球化学通报*, 2016, 35: 28–36]
 - 36 Yang M, Pan Y, Feng H, et al. Fractal characteristics of pore structure of longmaxi shales with different burial depths in southern Sichuan and its

- geological significance. *Fractal Fract*, 2024, 9: 2
- 37 Liu D, Yuan P, Tan D, et al. Effects of inherent/enhanced solid acidity and morphology of diatomite templates on the synthesis and porosity of hierarchically porous carbon. *Langmuir*, 2010, 26: 18624–18627
- 38 Hu G, Cao J, Jiang T. Discovery and prospecting significance of metal-bearing nanoparticles within natural invertebrate tissues. *Ore Geol Rev*, 2018, 99: 151–165
- 39 Ju Y, Li X. New progress in the study of ultrastructure of tectonically deformed coal (in Chinese). *Prog Nat Sci*, 2009, 19: 131–140 [琚宜文, 李小诗. 构造煤超微结构研究新进展. *自然科学进展*, 2009, 19: 131–140]
- 40 Liu Y, He G, Chu B, et al. Atmospheric heterogeneous reactions on soot: a review. *Fundamental Res*, 2023, 3: 579–591
- 41 Hochella Jr M F, Lower S K, Maurice P A, et al. Nanominerals, mineral nanoparticles, and Earth systems. *Science*, 2008, 319: 1631–1635
- 42 Shi A, Xu C, Wei C, et al. Research advances of nanominerals in geosciences (in Chinese). *Acta Min Sin*, 2024, 44: 457–477 [石爱国, 许成, 韦春婉, 等. 纳米矿物在地球科学的研究进展. *矿物学报*, 2024, 44: 457–477]
- 43 Li P, Wang Y, Wang J, et al. The photocatalytic oxidation of As(III) on birnessite. *npj Clean Water*, 2024, 7: 19
- 44 Cao J J, Liu C, Xiong Z H, et al. Cao J, Liu C, Xiong Z, et al. Particles carried by ascending gas flow at the Tongchanghe copper mine, Guizhou Province, China. *Sci China Earth Sci*, 2010, 53: 1647–1654
- 45 Cao J J, Li Y K, Jiang T, 等. Cao J, Li Y, Jiang T, et al. Sulfur-containing particles emitted by concealed sulfide ore deposits: an unknown source of sulfur-containing particles in the atmosphere. *Atmos Chem Phys*, 2015, 15: 6959–6969
- 46 Ju Y, Jiang B, Hou Q, et al. Relationship between nanoscale deformation of coal structure and metamorphic-deformational environments (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2005, 50: 1884–1892 [琚宜文, 姜波, 侯泉林, 等. 煤岩结构纳米级变形与变质变形环境的关系. *科学通报*, 2005, 50: 1884–1892]
- 47 Miot J, Benzerara K, Kappler A. Investigating microbe-mineral interactions: recent advances in X-ray and electron microscopy and redox-sensitive methods. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2014, 42: 271–289
- 48 Zan G, Wu Q. Biomimetic and bioinspired synthesis of nanomaterials/nanostructures. *Adv Mater*, 2016, 28: 2099–2147
- 49 Ohnuki T, Jiang M, Sakamoto F, et al. Sorption of trivalent cerium by a mixture of microbial cells and manganese oxides: effect of microbial cells on the oxidation of trivalent cerium. *Geochim Cosmochim Acta*, 2015, 163: 1–13
- 50 Prokofiev V Y, Banks D A, Lobanov K V, et al. Exceptional concentrations of gold nanoparticles in 1,7 Ga fluid inclusions from the Kola Superdeep Borehole, Northwest Russia. *Sci Rep*, 2020, 10: 1108
- 51 Feng H, Ju Y, Fang W, et al. Indication of micro-nano gold particles to mineralization of Carlin-type gold deposits (in Chinese). *Geol Rev*, 2024, 70: 65–66 [冯宏业, 琚宜文, 方维萱, 等. 微纳米金颗粒对卡林型金矿成矿的指示. *地质论评*, 2024, 70: 65–66]
- 52 Klaver J, Desbois G, Urai J L, et al. BIB-SEM study of the pore space morphology in early mature Posidonia Shale from the Hils area, Germany. *Int J Coal Geol*, 2012, 103: 12–25
- 53 Jin Z, Firoozabadi A. Thermodynamic modeling of phase behavior in shale media. *SPE J*, 2016, 21: 190–207
- 54 Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, et al. Morphology, genesis, and distribution of nanometer-scale pores in siliceous mudstones of the Mississippian Barnett Shale. *J Sediment Res*, 2009, 79: 848–861
- 55 Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, et al. Spectrum of pore types and networks in Mudrocks and a descriptive classification for matrix-related Mudrock pores. *AAPG Bull*, 2012, 96: 1071–1098
- 56 Han Y, Zhu H, Yan L, et al. Direct observation of clay fabrics and clay pores in naturally faulted shales. *Energy Fuels*, 2025, 39: 11122–11133
- 57 Wang Y. Nanogeochemistry: nanostructures, emergent properties and their control on geochemical reactions and mass transfers. *Chem Geol*, 2014, 378–379: 1–23
- 58 Wu W, Yang J, Wirth R, et al. Carbon and nitrogen isotopes and mineral inclusions in diamonds from chromitites of the Mirdita ophiolite (Albania) demonstrate recycling of oceanic crust into the mantle. *Am Mineral*, 2019, 104: 485–500
- 59 Simakov S, Scribano V, Melnik N, et al. Nano and Micro Diamond Formation in Nature: Ultrafine Carbon Particles on Earth and Space. Cham: Springer International Publishing, 2023
- 60 Cai Z, Xiang J, Huang Q, et al. Morphology and tectonic significance of nanoparticles in the ductile shear zone of the Red River Fault (in Chinese). *Earth Sci*, 2018, 43: 1524–1531 [蔡周荣, 向俊洋, 黄强太, 等. 红河断裂韧性剪切带内纳米颗粒的形态及其构造意义. *地球科学*, 2018, 43: 1524–1531]
- 61 Zhang N, Yao S. Atomic force microscopy study on nanopores and roughness of tectonically deformed coal in brittle deformation sequence (in Chinese). *Coal Geol Explor*, 2022, 50: 32–42 [张宁远, 姚素平. 脆性变形序列构造煤纳米孔隙和粗糙度的原子力显微镜研究. *煤田地质与勘探*, 2022, 50: 32–42]
- 62 Platt J. A process-based theory for subgrain-size and grain-size piezometry. *J Struct Geol*, 2023, 177: 104987
- 63 Chen T, Xie Q, Liu H, et al. Nanominerals and nanomineral resources (in Chinese). *J Earth Sci*, 2018, 43: 1439–1449 [陈天虎, 谢巧勤, 刘海波, 等. 纳米矿物与纳米矿物资源. *地球科学*, 2018, 43: 1439–1449]

- 64 Han Z, Zhang B, Wu H, et al. Microscopic characterisation of metallic nanoparticles in ore rocks, fault gouge and geogas from the Shangong gold deposit, China. *J GeoChem Explor*, 2020, 217: 106562
- 65 Hotze E M, Phenrat T, Lowry G V. Nanoparticle aggregation: challenges to understanding transport and reactivity in the environment. *J Env Qual*, 2010, 39: 1909–1924
- 66 Goodman A J, Karkee H, Huang S, et al. Analysis of nano-mineral chemistry with single particle ICP-Time-of-Flight-MS; a novel approach to discriminate between geological environments. *Chem Geol*, 2025, 671: 122498
- 67 Sun Y, Jiang S Y, Wei Z, et al. Sun Y, Jiang S, Wei Z, et al. Nano-coating texture on the shear slip surface in rocky materials. *Adv Mater Res*, 2013, 669: 108–114
- 68 Wang Y, Bryan C, Xu H, et al. Nanogeochemistry: geochemical reactions and mass transfers in nanopores. *Geology*, 2003, 31: 387–390
- 69 Zou C, Yang Z, Dong D, et al. Formation, distribution and prospects of hydrocarbons in unconventional source-rock strata (in Chinese). *Earth Sci*, 2022, 47: 1517–1533 [邹才能, 杨智, 董大忠, 等. 非常规源岩层系油气形成分布与前景展望. *地球科学*, 2022, 47: 1517–1533]
- 70 Cheng H, Hu E, Hu Y. Impact of mineral micropores on transport and fate of organic contaminants: a review. *J Contam Hydrol*, 2012, 129–130: 80–90
- 71 Wang L, Zou R, Yuan Y, et al. Dynamics of impure CO₂ and composite oil in mineral nanopores: implications for shale oil recovery and gas storage performance. *Chem Eng J*, 2024, 500: 157421
- 72 Yang C, Jin Z. Hydrogen storage state in clay mineral nanopores: a molecular dynamics simulation study. *Int J Hydrogen Energy*, 2025, 105: 1491–1502
- 73 Hiemstra T. Formation, stability, and solubility of metal oxide nanoparticles: surface entropy, enthalpy, and free energy of ferrihydrite. *Geochim Cosmochim Acta*, 2015, 158: 179–198
- 74 Antelo J, Arce F, Fiol S. Arsenate and phosphate adsorption on ferrihydrite nanoparticles. Synergetic interaction with calcium ions. *Chem Geol*, 2015, 410: 53–62
- 75 Brahney J, Mahowald N, Prank M, et al. Constraining the atmospheric limb of the plastic cycle. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2021, 118: e2020719118
- 76 Zhang J, Li X, Zou X, et al. Characterization of multi-type pore structure and fractal characteristics of the Dalong Formation marine shale in northern Sichuan Basin. *Energy Sources Part A-Recovery Utilization Environ Effects*, 2020, 42: 2764–2777
- 77 Shao L, Liu P, Jones T, et al. A review of atmospheric individual particle analyses: methodologies and applications in environmental research. *Gondwana Res*, 2022, 110: 347–369
- 78 Petersen F, Hubbart J A. The occurrence and transport of microplastics: the state of the science. *Sci Total Environ*, 2021, 758: 143936
- 79 Lee S, Gordon H, Yu H, et al. New particle formation in the atmosphere: from molecular clusters to global climate. *J Geophys Res Atmos*, 2019, 124: 7098–7146
- 80 Riemer N, Ault A P, West M, et al. Aerosol mixing state: measurements, modeling, and impacts. *Rev Geophys*, 2019, 57: 187–249
- 81 Schindler M, Xu J, Hochella Jr M F. Abiotic and biotic-controlled nanomaterial formation pathways within the Earth's nanomaterial cycle. *Commun Earth Environ*, 2024, 5: 646
- 82 Yu H, Li C, Yan J, et al. A review on adsorption characteristics and influencing mechanism of heavy metals in farmland soil. *RSC Adv*, 2023, 13: 3505–3519
- 83 Xing J, Shao L, Zhang W, et al. Morphology and composition of particles emitted from a port fuel injection gasoline vehicle under real-world driving test cycles. *J Environ Sci*, 2019, 76: 339–348
- 84 Li W, Shao L, Zhang D, et al. A review of single aerosol particle studies in the atmosphere of East Asia: morphology, mixing state, source, and heterogeneous reactions. *J Cleaner Prod*, 2016, 112: 1330–1349
- 85 Shao L, Li Y, Jones T, et al. Airborne microplastics: a review of current perspectives and environmental implications. *J Cleaner Prod*, 2022, 347: 131048
- 86 Hou C, Shao L, Hu W, et al. Characteristics and aging of traffic-derived particles in a highway tunnel at a coastal city in southern China. *Sci Total Environ*, 2018, 619–620: 1385–1393
- 87 Hoang A T. Combustion behavior, performance and emission characteristics of diesel engine fuelled with biodiesel containing cerium oxide nanoparticles: a review. *Fuel Processing Tech*, 2021, 218: 106840
- 88 Xing J, Shao L, Zhang W, et al. Morphology and size of the particles emitted from a gasoline-direct-injection-engine vehicle and their ageing in an environmental chamber. *Atmos Chem Phys*, 2020, 20: 2781–2794
- 89 Sellaoui L, Hessou E P, Badawi M, et al. Trapping of Ag⁺, Cu²⁺, and Co²⁺ by faujasite zeolite Y: new interpretations of the adsorption mechanism via DFT and statistical modeling investigation. *Chem Eng J*, 2021, 420: 127712
- 90 Namratha K, Nayan M B, Pandareesh M D, et al. Hydrothermal from – geology to nanotechnology and nanogeoscience (Part-II). *J Geol Soc India*, 2022, 98: 1708–1720

- 91 Xiao H, Lu Y, Tao H. Research progress on co-migration of micro-nano particles and pollutants (in Chinese). *Mater Sci*, 2025, 15: 370–379 [肖华, 陆艳星, 陶虹秀. 微纳米颗粒物与污染物共迁移的研究进展. *材料科学*, 2025, 15: 370–379]
- 92 Liu J, Aruguete D M, Murayama M, et al. Influence of size and aggregation on the reactivity of an environmentally and industrially relevant nanomaterial (PbS). *Environ Sci Technol*, 2009, 43: 8178–8183
- 93 Chi J, Fan Y, Wang L, et al. Retention of soil organic matter by occlusion within soil minerals. *Rev Environ Sci Biotechnol*, 2022, 21: 727–746
- 94 Johnston C T. Probing the nanoscale architecture of clay minerals. *Clay Miner*, 2010, 45: 245–279
- 95 Ahn J H, Xu H, Buseck P R. Transmission electron microscopy of native copper inclusions in illite. *Clays Clay Miner*, 1997, 45: 295–297
- 96 Huang D, Tao J, Cheng M, et al. Microplastics and nanoplastics in the environment: macroscopic transport and effects on creatures. *J Hazard Mater*, 2021, 407: 124399
- 97 Rui H C, Yang J S, Lian D Y, et al. Rui H, Yang J, Lian D, et al. Deep origin of mantle peridotites from the Aladağ ophiolite, Turkey: implication from trace element geochemistry of pyroxenes and mineralogy of ophiolitic diamonds. *J Asian Earth Sci*, 2022, 228: 105153
- 98 Pang X, Wang G, Kuang L, et al. Lamellation fractures in shale oil reservoirs: recognition, prediction and their influence on oil enrichment. *Mar Pet Geol*, 2023, 148: 106032
- 99 Mao Y, Xue X, Li Y, et al. Study on microscopic pore characteristics of Longmaxi Formation shale reservoir in northeastern Yunnan (in Chinese). *Geol Yunnan*, 2023, 42: 457–461 [毛雨, 薛晓辉, 李遇, 等. 滇东北龙马溪组页岩储层微观孔隙特征研究. *云南地质*, 2023, 42: 457–461]
- 100 Chen X, Li W, Xu Q, et al. Microscopic characteristics and genesis of micro-fractures in the Jinjingzigou Formation, Jimsar Sag, Junggar Basin (in Chinese). *Geol Rev*, 2025, 71: 181–191 [陈晓轩, 李雯, 徐倩茹, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷井井子沟组微裂缝微观特征及成因. *地质论评*, 2025, 71: 181–191]
- 101 Guan Y, Ren Y, Sun X, et al. Fine scale study of major and trace elements in the Fe-Mn nodules from the South China Sea and their metallogenic constraints. *Mar Geol*, 2019, 416: 105978
- 102 Li D, Fu Y, Sun X, et al. Critical metal enrichment mechanism of deep-sea hydrogenetic nodules: insights from mineralogy and element mobility. *Ore Geol Rev*, 2020, 118: 103371
- 103 McLeish D F, Williams-Jones A E, Vasyukova O V, et al. Colloidal transport and flocculation are the cause of the hyperenrichment of gold in nature. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2021, 118: e210069118
- 104 Gao W, Ciobanu C L, Cook N J, et al. Nanoscale study of lamellar exsolutions in clinopyroxene from olivine gabbro: recording crystallization sequences in iron-rich layered intrusions. *Am Mineral*, 2019, 104: 244–261
- 105 Liu J, Sheng A, Liu F, et al. Nanominerals and their environmental effects (in Chinese). *Earth Sci*, 2018, 43: 1450–1463 [刘娟, 盛安旭, 刘枫, 等. 纳米矿物及其环境效应. *地球科学*, 2018, 43: 1450–1463]
- 106 Du L, Liu L, Dai T, et al. Evolution of China-EU strategic mineral resource policies amid climate and geopolitical changes (in Chinese). *China Min*, 2025, 34: 57–69 [杜力普, 刘立涛, 等. 气候与地缘政治变化背景下中欧战略性矿产资源政策演变研究. *中国矿业*, 2025, 34: 57–69]
- 107 Liu C, Zhao T, Liu S, et al. Demand forecast of China's natural graphite resources from 2025 to 2035 (in Chinese). *China Min*, 2024, 33: 78–88 [刘超, 赵汀, 刘胜前, 等. 2025–2035年中国天然石墨资源需求预测. *中国矿业*, 2024, 33: 78–88]
- 108 Xian H, Peng T, Sun H, et al. Mineralogical characteristics of graphite from several typical graphite mines in China (in Chinese). *Acta Min Sin*, 2015, 35: 395–405 [鲜海洋, 彭同江, 孙红娟, 等. 我国若干典型石墨矿山石墨的矿物学特征. *矿物学报*, 2015, 35: 395–405]
- 109 Sun H, Liu B, Peng T, et al. Micromorphological and structural changes during the oxidation-expansion process of microcrystalline graphite (in Chinese). *Earth Sci*, 2018, 43: 1481–1488 [孙红娟, 刘波, 彭同江, 等. 微晶石墨氧化—膨胀过程中微形貌与结构变化. *地球科学*, 2018, 43: 1481–1488]
- 110 Zhao B, Rehati P, Yang Z, et al. The potential toxicity of microplastics on human health. *Sci Total Environ*, 2024, 912: 168946
- 111 Silva L F O, Santosh M, Schindler M, et al. Nanoparticles in fossil and mineral fuel sectors and their impact on environment and human health: a review and perspective. *Gondwana Res*, 2021, 92: 184–201
- 112 Shao L, Li J, Zhang M, et al. Morphology, composition and mixing state of individual airborne particles: effects of the 2017 Action Plan in Beijing, China. *J Cleaner Prod*, 2021, 329: 129748
- 113 Shao L, Wang W, Xing J, et al. Research progress and prospect on physicochemical characteristics and impact effects of atmospheric particles (in Chinese). *Earth Sci*, 2018, 43: 1691–1708 [邵龙义, 王文华, 幸娇萍, 等. 大气颗粒物理化特征和影响效应的研究进展及展望. *地球科学*, 2018, 43: 1691–1708]
- 114 Schindler M, Santosh M, Dotto G, et al. A review on Pb-bearing nanoparticles, particulate matter and colloids released from mining and smelting activities. *Gondwana Res*, 2022, 110: 330–346
- 115 Choi S, Johnston M, Wang G S, et al. Rui H, Yang J, Lian D, et al. A seasonal observation on the distribution of engineered nanoparticles in municipal wastewater treatment systems exemplified by TiO₂ and ZnO. *Sci Total Environ*, 2018, 625: 1321–1329
- 116 Ouyang S, Bi Z, Zhou Q. Nanocolloids in the soil environment: transformation, transport and ecological effects. *Environ Res*, 2024, 262: 119852
- 117 Malakar A, Kanel S R, Ray C, et al. Nanomaterials in the environment, human exposure pathway, and health effects: a review. *Sci Total Environ*,

2021, 759: 143470

- 118 Hu B, Chen R, Xu J X, et al. Health effects of ultrafine particles in haze (in Chinese). [Chin Sci Bull](#), 2015, 60: 2808–2823 [胡彬, 陈瑞, 徐建勋, 等. 雾霾超细颗粒物的健康效应. 科学通报, 2015, 60: 2808–2823]
- 119 Borm P J A, Kreyling W. Toxicological hazards of inhaled nanoparticles—potential implications for drug delivery. [J Nanosci Nanotech](#), 2004, 4: 521–531
- 120 Worms I A M, Tharaud M, Gasco R, et al. Exploring environmental nanobiogeochemistry using field-flow fractionation and ICP-MS-based tools: progress and frontiers. [Environ Sci-Nano](#), 2025, 12: 3821–3846
- 121 Koelmans A A, Redondo-Hasselerharm P E, Nor N H M, et al. Risk assessment of microplastic particles. [Nat Rev Mater](#), 2022, 7: 138–152

Summary for “纳米地球科学及资源环境效应”

Nanogeoscience and its resource and environmental effects

Yiwen Ju^{1*†}, Zhuocheng Cai^{1†}, Hongye Feng^{1,2*}, Quan Wan³, Jinhua Li⁴, Yan Sun⁵, Fei Huang⁶, Yi Yang⁷, Xueqiu Wang⁸, Jianjin Cao⁹, Longyi Shao¹⁰, Xiaoming Sun⁹, Renzhe Chen¹, Cheng Huang^{1,11}, Hongjian Zhu^{1,12}, Ziqi Pei¹, Liting Ju^{1,13}, Jiajun Mu¹ & Honggen Guo¹

¹ State Key Laboratory of Numerical Simulation and Application of Earth System, College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China

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

³ Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China

⁴ Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

⁵ School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210046, China

⁶ School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China

⁷ School of Geographic Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China

⁸ Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China

⁹ School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China

¹⁰ College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China

¹¹ College of Earth Sciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China

¹² School of Vehicle and Energy, Yanshan University, Qinhuangdao 066000, China

¹³ China Railway Construction New Materials Industrial Research Institute, China Railway Construction Investment Group Co., Ltd., Beijing 100855, China

† Equally contributed to this work

* Corresponding authors, E-mail: juyw03@163.com; fhy0205@163.com

Nanogeoscience is an emerging interdisciplinary field that examines how nanoscale materials, structures, pores and interfaces participate in the formation and evolution of Earth and planetary systems. Advances in high-resolution microscopy, spectroscopy, pore characterization, molecular simulation and data-driven methods now allow geological processes previously described mainly at macroscopic or microscopic scales to be reinterpreted through nanoparticles, nanopores and interfacial reactions. This review presents nanogeoscience as a framework linking atomic-scale properties and nanoscale transport with Earth-sphere material cycling, resource formation, environmental change and human health. We first summarize its methodological foundations. Electron and scanning-probe microscopy, synchrotron imaging, spectroscopy, diffraction, NMR, nano-CT and digital-rock approaches constrain the morphology, composition, structure and distribution of natural nanomaterials and nanopores. Molecular dynamics, density functional theory and machine learning further resolve interfacial reactions, confined-fluid behavior and structure–property relationships that cannot be directly observed. We then synthesize the major nanoscale geological entities, including nanominerals, mineral and elemental nanoparticles, mineral–organic nanocomposites, organic macromolecular structures, biogenic nanominerals, nanoinclusions and nanopores. These entities occur widely in the atmosphere, hydrosphere, pedosphere, lithosphere and biosphere, but their occurrence and stability depend on temperature, pressure, fluid chemistry, redox conditions, biological activity and tectonic evolution. Their high specific surface area, lattice defects, surface charge, confinement effects and size-dependent behavior modify solubility, adsorption, redox reactivity, diffusion, mechanical response and catalytic activity, thereby influencing mineral weathering, element migration, organic-matter evolution, rock deformation, pore-network development and fluid transport. A central theme is the coupling of nanoscale processes across Earth’s spheres. Atmospheric nanoparticles form through nucleation, gas-to-particle conversion, combustion, weathering, sea spray and biological emissions. In water and soil systems, nanoclays, metal oxides, organic colloids and engineered nanoparticles regulate the mobility, transformation and bioavailability of nutrients, metals and organic pollutants. In the lithosphere, nanominerals, nanoinclusions and deformation-induced nanostructures record deep recycling, hydrothermal activity, faulting, metamorphism and unconventional reservoir evolution. These processes are linked by atmospheric deposition, water–rock interaction, biological uptake, sedimentation, subduction and mantle recycling. The resource and environmental implications are substantial. Organic and inorganic nanopores govern gas adsorption, diffusion and storage in unconventional energy systems, whereas gold nanoparticles, mineral zoning and surface-reactive minerals help explain invisible metal enrichment and may provide exploration indicators. Natural nanoclays, iron oxides and graphite have applications in adsorption, catalysis, remediation and functional composites. Conversely, nanoscale pollutants may co-transport toxic metals and organic contaminants, penetrate biological barriers and increase exposure risks through air, water, soil and food chains. Future research should move from phenomenological description to mechanistic quantification through unified identification standards, *in situ* characterization, quantitative constraints on cross-sphere nanomaterial fluxes, open databases and interpretable machine-learning models constrained by geochemical principles.

nanogeoscience, Earth spheres, nanomaterials, resource, environment

doi: [10.1360/CSB-2026-0440](https://doi.org/10.1360/CSB-2026-0440)