

矿物环境属性与无机界天然自净化功能

鲁安怀

(北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871)

摘 要: 本文将矿物学研究从岩石圈拓展到水圈、大气圈、生物圈与土壤圈之间交互作用的矿物环境属性范畴。研究表明, 矿物可成为记录环境演变信息的载体; 防止矿物的破坏与分解有可能减少甚至避免由此所造成的对人体健康的影响与生态环境的破坏; 矿物与生物交互作用的研究与天然矿物治理污染物的方法是建立在充分利用自然规律的基础之上, 体现了天然自净化作用的特色。天然矿物对污染物的净化功能主要体现在环境矿物材料基本性能方面。天然铁的硫化物、铁的氧化物、锰的氧化物、钛的氧化物、蛭石、有机蒙脱石和含高价阳离子蒙脱石, 以及黄钾铁矾等均在处理无机与有机污染物方面展现出良好效果。矿物与其环境界面原子尺度相互作用过程研究、矿物内部结构缺陷影响矿物表面活性规律研究、矿物晶体结构中不同维次连通性孔道效应研究、矿物化学活性作用净化污染物方法研究, 以及矿物晶芽与生物细胞层次上交互作用净化污染物机理研究等, 将是近期着力开发无机界矿物天然自净化功能的重点研究内容。

关 键 词: 矿物学; 资源属性; 环境属性; 环境矿物学; 环境矿物材料; 无机界自净化; 污染治理方法

中图分类号: X14: P57 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2802(2002)03-0192-06

长期以来人类多侧重于开发和利用岩石圈的矿物资源属性。但近年来随着环境污染的日益加重, 从岩石圈到水圈、大气圈、生物圈与土壤圈之间交互作用的崭新的矿物环境属性开始引起人们的注意。矿物环境属性研究正是在地球科学服务于人类新的历史发展时期中诞生的新的地学生长点^[1]。

天然自净化是大自然赋予人类与地球长久相互依存的一种潜在本能。过去在认识、开发和利用天然自净化作用过程中, 主要强调的是有机界生物如微生物、细菌与水生植物等对各类污染物的净化功能, 而对自然界中分布广泛的无机界天然矿物的净化功能尚未得到足够的重视。天然矿物对污染物的净化功能主要体现在环境矿物材料基本性能方面^[2]。环境矿物材料是指由矿物及其改性产物组成的、与生态环境具有良好协调性或直接具有防治污染和修复环境功能的一类矿物材料^[3], 是环境矿物学的重要研究内容之一^[1, 4]。

本文在简述矿物环境属性的基础上, 重点介绍我们自“九五”以来所完成的有关利用天然矿物治理水体、大气及固体污染物的一些研究成果, 旨在初步

阐明利用天然矿物有效治理环境污染与修复环境质量这一无机界天然自净化作用的原理和方法。

1 矿物学环境属性表现

矿物学环境属性研究即环境矿物学。它研究天然矿物与地球表面各个圈层之间交互作用及其反映自然演变、防治生态破坏、净化环境污染及参与生物作用的科学^[1]。目前, 环境矿物学主要研究矿物作为反映不同时间空间尺度上环境变化的信息载体, 探讨矿物影响人类健康与破坏生态环境的本质及其防治方法, 开发矿物具有治理环境污染与修复环境质量的基本性能以及研究纳米级别上矿物与生物发生交互作用的微观细节与机理等。

天然矿物是自然演化的产物, 在矿物所经历的发生、发展、变化和消亡的整个生命周期过程中, 不同时间和空间尺度上的环境变化都会在矿物中留下烙印, 使之含有丰富的反映环境变化的信息, 成为记录环境演变信息的载体。第四纪以来的冰川和黄土是人们重点研究对象之一。而冰川中重矿物微粒和

收稿日期: 2002-03-25 收到, 04-25 改回

基金项目: 科学技术部基础研究重大项目前期研究专项(2001CCA02400)、攀登特别支持课题(99019)、国家自然科学基金课题(49672097, 49972017, 40172022)、国土资源部科技司课题(9505207)及中国地质调查局综合研究课题(9902007)资助项目

作者简介: 鲁安怀(1962—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 从事环境矿物学与环境矿物材料研究。

黄土中组成矿物便分别记载着它们形成与演化方面的信息^[5~7];深入研究这些信息载体特征,有助于揭示全球性的环境变化特征和演化规律。钟乳石和石笋的研究^[8,9]能精确揭示更小时间尺度上的古气候与古环境方面的演化规律。对于一个局部地区的环境质量特征与演变规律开展评价研究时,大气中矿物浮尘、水体中沉积物及土壤中组成矿物等均是直接的研究对象^[10,11],可以揭示较小空间尺度上环境演化规律。

自然界的矿物原本能够稳定地存在:天然矿物与生态环境具有良好的协调性。可是人们为了最大限度地发挥矿物的资源属性,尽可能去寻找各种矿物资源,对这些矿物资源进行高强度开采。结果使处于地表之下的矿物被移至地表,大大降低了矿物的稳定性,导致矿物破坏和分解,所产生的重金属和阴离子污染物直接影响了地表水体与土壤环境质量。一些金属矿物尤其是含有变价元素的金属矿物表现得更为突出^[4]。矿山酸性废水污染便是这方面的典型例子^[12]。矿业活动还使一些具有放射性的天然矿物被直接带到地表,对所产生的核废料的安全处置,就要发挥矿物化学屏障的环境属性作用^[13]。矿物资源的加工和利用过程对人类健康亦具危害性,如矿物粉尘对人体健康的影响^[14]。至于在能源利用过程中矿物的受热分解所造成的对人体健康和大气环境质量的影响问题更是广泛存在。矿物的风化作用也会直接影响到当地的土壤环境容量和水体环境质量,往往造成地方性人体健康和生态环境问题^[15]。对雕塑型文物的保护更要研究其组成矿物与蚀变特征^[16]。显然,由于人类活动引起的矿物破坏与分解,给人类健康和生存环境造成了不利影响。研究与利用矿物的环境属性,揭示矿物破坏与分解的本质,利用矿物抗分解的一面,采取积极与相应的措施防止矿物的破坏与分解,就有可能减少由此造成的对人体健康的影响与生态环境的破坏。

矿物与生物的交互作用研究^[17,18],尤其是在纳米级别矿物晶芽与生物细胞层次上揭示其交互作用的细节与机理研究,是无机界与有机界交叉研究的课题。事实上,无机矿物的形成和变化都有有机生物作用的参与,而有机细菌的繁殖和活动也有无机矿物作用的参与。化学家和生物学家正在探索分子、原子、电子与细菌的交互作用机理,矿物学家从纳米矿物角度的参与也是不可或缺的。因为纳米矿

物所表现出的超乎寻常的化学性质是其有效参与纳米生物作用的关键,何况生物作用过程中所形成的矿物也需要矿物学家去深入研究。这方面的研究成果对于保障人类健康与防治生态环境破坏都有着十分重要的理论意义和应用价值。

与有机界-生物处理方法类似,利用无机界-天然矿物治理污染物的方法^[19]是建立在充分利用自然规律的基础之上,体现了天然自净化作用的特色。

在地质学面临资源和环境两大任务的21世纪的今天,矿物学工作者期待着古老的矿物学学科能焕发出新的生机,再次能为地球科学的发展贡献新的力量,使矿物学继续成为新时期地质学的基础。实现矿物学研究由资源属性到环境属性的发展,明确环境矿物学研究方向,为矿物学带来巨大的发展机遇。

2 天然矿物治理污染物研究新进展

2.1 天然铁的硫化物处理含 Cr(VI) 废水

我们的研究表明,微溶性的金属矿物往往是自然界中一些极不稳定的金属矿物,其化学成分多由变价元素构成,化学性质不稳定易被氧化分解,在一定的水介质中可表现出一定的溶解度。此类矿物本身就是一个污染源,成为矿山酸性废水污染。发挥此类矿物治理污染的作用,是污染控制与废弃物资源化的典范。结果显示,天然铁的硫化物对处理含 Cr^{6+} 、 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Hg^{2+} 等有毒废水效果良好,这决定于该矿物在一定条件下的微溶作用(Fe^{2+} 、 S^{2-} 、 S_2^{2-}),也是氧化还原作用(S/S^{2-} 与 $\text{Cr}^{6+}/\text{Cr}^{3+}$ 电对、 S/S_2^{2-} 与 $\text{Cr}^{6+}/\text{Cr}^{3+}$ 电对、 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 与 $\text{Cr}^{6+}/\text{Cr}^{3+}$ 电对)和沉淀转化作用(S^{2-} 与 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Hg^{2+} 及 Cr^{3+})的反映。新发现的 Cr_2S_3 难溶物可节省加碱以形成 $\text{Cr}(\text{OH})_3$ 沉淀物的传统工艺,大大减少污泥。以天然铁的硫化物代替常用的亚硫酸钠还原六价铬,还能提高硫资源的利用率近4倍^[4,20~23]。

矿物内部结构缺陷与位错影响矿物整体性质,增加矿物表面的活性。基于此而开展的矿物结构改型研究,成为提高矿物活性的一条重要途径。矿物由于氧化作用化学成分的变化也会发生结构缺陷^[24]。如与六方磁黄铁矿相比,单斜磁黄铁矿除 $\text{Cr}(\text{VI})$ 效率较高,表明后者反应活性较强。这与单斜磁黄铁矿(Fe_{1-x}S)中 Fe 不足而产生的结构缺陷有一定关系,因为晶体结构中的缺陷是化学反应的活

性点。而理论上六方磁黄铁矿(FeS)中不存在Fe缺位,晶体结构相对较为完整,从一定程度上降低了化学反应活性。一个有意义的现象是久置于大气中的六方磁黄铁矿除Gr(VI)效率却有所提高,我们认为这可能与表面受到氧化有关。因为六方磁黄铁矿表面及裂隙氧化产物中常有磁铁矿的形成^[25],使六方磁黄铁矿近表面产生Fe缺位: $3\text{FeS} + 2x\text{O}_2 = 3\text{Fe}_{1-x}\text{S} + x\text{Fe}_3\text{O}_4$,这样形成的具有结构缺陷的六方磁黄铁矿表面上和裂隙中化学活性便有所提高。

2.2 天然铁的氧化物处理含Hg(II)废水

实验研究表明^[26],当温度为25℃、吸附平衡时间为60 min、试样用量为20 g/L、pH值为6.40、离子强度为零时,初始浓度为1.12 mg/L的Hg(II)离子在天然磁铁矿上的吸附率可达98%,使废水中的Hg(II)离子的浓度达到国家规定的排放标准。介质pH值和离子强度、试样粒径和用量、废水浓度、实验温度及反应时间均对Hg(II)的吸附率有一定影响,其中pH值的影响最大,而温度、试样粒径、用量和Hg(II)的初始浓度对吸附率的影响较小。发现Hg(II)在天然磁铁矿上的吸附并不简单地遵守Langmuir或Freundlich等温式,而是由两条首尾相连的“S”型曲线组成,中间出现饱和吸附“平台”的“台阶”式的等温曲线,符合分级离子/配位子交换等温曲线。反映Hg(II)在天然磁铁矿上的吸附过程具有多步骤、吸附机理具有多样性的吸附作用特征。

2.3 天然锰的氧化物孔道效应表现

我们近期的研究结果表明,天然锰钾矿晶体结构中由Mn—O八面体构建的良好孔道及孔道中K⁺等所表现出来的环境属性,类似于天然沸石晶体结构中由Si—O四面体构建的良好孔道及孔道中Na⁺和Ca²⁺等所表现的并已得到广泛利用的环境属性。天然锰钾矿与沸石相比,孔径大小接近,如锰钾矿的孔径为0.46 nm^[27],大多数沸石的孔径为0.23~0.52 nm,仅八面沸石具有0.74 nm的大孔径。目前已将合成的锰钾矿和钡镁锰矿等由[MnO₆]八面体链连接而成、具有孔道特征的材料,统称为氧化物八面体分子筛(OMS),如具有2×2孔道特征的锰钾矿称为OMS-2,具有3×3孔道特征、孔径为0.69 nm的钡镁锰矿被称为OMS-1^[27~29]。锰钾矿的孔道效应表现为大于孔径0.46 nm的离子或分子被拒之孔道之外,而小于其孔径的则可进入孔道,即锰钾矿起到离子筛或分子筛的作用。

与沸石孔道内的Na⁺和Ca²⁺离子相似,锰钾矿孔道内的离子交换作用主要是指其孔道内的碱金属离子K⁺及少量Na⁺和Ca²⁺,可与溶液中离子半径、电荷数和电负性等性质相近的金属离子相替代。与大多数天然氧化物矿物类似,天然锰钾矿表面具有较强的亲水性,与水溶液或空气中的水接触时,易在表面形成表面基——羟基,羟基可吸附介质中的有毒有害金属离子,形成表面络合物。锰钾矿的氧化还原性缘于其所含变价的Mn⁴⁺和Mn³⁺,当锰钾矿与某些易被氧化或还原的分子或离子发生化学反应时,可表现为两种性质,将甲烷完全氧化为CO₂和H₂O,也可以将毒性较大的Cr⁶⁺还原为毒性较小的Cr³⁺。

2.4 天然钛的氧化物处理卤代有机污染物

光催化降解法是一种高效的深度氧化过程,可以将水体中的卤代烃类、脂肪、羧酸、表面活性剂、染料、含氮有机物、有机磷杀虫剂等较快地完全氧化为CO₂和H₂O或HCl等无害物质^[30]。在诸多光催化氧化剂中TiO₂因具有稳定性好、光催化活性强、对人体无害等性质,被公认为是目前所发现的光反应最佳催化剂。我们正在进行的实验研究表明,天然钛的氧化物矿物的杂质成分特征、晶格缺陷类型、受热相变特性及超细粉体效应等,在光催化氧化方面有独特性能,在降解卤代有机物方面存在有潜在功能。在查明天然钛的氧化物矿物学特征和介质条件对降解卤代芳烃、卤代烷烃与卤代烯烃等典型卤代有机污染物的影响因素的基础上,正在进一步探讨增强天然钛的氧化物矿物光催化氧化活性的有效改性途径,以筛选出具有高强度氧化降解卤代有机污染物的最佳实验条件,揭示天然钛的氧化物矿物降解卤代有机污染物环境属性,提出天然矿物有效治理卤代有机性污染物方法。利用天然钛的氧化物降解有机污染物技术与利用其它天然矿物处理无机污染物技术相配合,有助于进一步完善无机界矿物学方法治理污染与修复环境的基本功能,拓宽环境矿物学的研究领域,有效降解地表水与地下水中日趋严重的卤代有机污染物,提高金红石优势矿产资源的利用水平^[2]。

2.5 天然蒙脱石有机化改性产物吸附有机污染物

研究成果显示^[31,32],天然蒙脱石层间域存在大量可交换的亲水性无机阳离子,使蒙脱石表面通常有一层薄薄的水膜,具有强烈的亲水性。因而不能

有效地吸附疏水性有机污染物。若将天然蒙脱石改性制成有机蒙脱石, 改性剂有机季铵盐阳离子的 N 端被交换吸附在带负电荷的蒙脱石层间, 而烷基链形成的有机相, 可以提高蒙脱石表面的疏水性, 从而达到有效吸附疏水性有机污染物的目的。其次, 由于有机阳离子的水合作用明显小于无机阳离子, 改性有机蒙脱石表面通常没有水膜, 也能提高其吸附有机污染物的能力。第三, 改性有机蒙脱石层间域由于大量有机阳离子的存在而形成憎水相, 成为有机污染物的有机分配相, 即有机污染物在水相和有机相之间发生分配作用。改性剂在层间的排列由平铺逐渐转向直立过程中, 蒙脱石 d_{001} 值达 3.087 nm。此时蒙脱石层间距为 2.427 nm (蒙脱石 d_{001} 值 3.087 nm, 蒙脱石结构单元层厚度 0.66 nm), 略大于改性剂溴化十六烷基三甲铵的链长 2.35 nm, 表明改性剂在蒙脱石层间的排列已完全直立^[33]。研究还表明, 含重金属离子如 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Al^{3+} 和 Cr^{3+} 的蒙脱石对于有机物的吸附能力主要取决于离子化合价的高低, 总体上蒙脱石含有的离子化合价越高, 吸附有机污染物的能力越强。显然, 经过多种方法改性的有机蒙脱石和含高化合价离子蒙脱石均能提高对有机污染物的吸附能力^[34, 35]。改性蒙脱石作为垃圾填埋场防渗衬层建造材料, 能有效地阻止垃圾渗滤液中有有机污染物在衬层中的迁移与渗漏, 还不散失其粘性以防止所建衬层的断裂, 能堵塞地下溶洞, 而适用于具有较强的地应力地质特征与喀斯特地貌特征的地区城市垃圾卫生填埋场中防渗衬层的建造工程。

2.6 天然蛭石在燃煤中的固硫除尘作用

天然矿物的热效脱硫除尘作用, 可具体表现为高温条件下天然矿物仍具有孔道特性和化学活性作用^[4]。其中高温条件下具孔道特性的矿物应有良好的热稳定性, 利用其固有的孔道结构、热膨胀空隙, 可制作成多孔材料。而高温条件下具化学活性的矿物加热不稳定, 利用其热分解后的产物与二氧化硫等气体反应, 可形成高温条件下稳定的新物相。这是应用环境矿物材料开发燃煤烟尘型大气污染防治技术的基础。研究表明^[36, 37], 新疆且干布拉克蛭石矿区选矿厂尾矿主要为蛭石和蛭石化金云母尾砂。蛭石尾砂的膨胀倍数因粒度增加、时间延长而提高, 较为理想的膨胀温度条件为 950~1050℃, 用于固硫实验粒度为 80~100 目。固硫灰渣中主要物相为石英、石膏、玻璃体和铁质氧化物。石膏的含量和形

态与燃煤种类、燃烧温度、燃烧时间和固硫添加剂种类及数量等有关。蛭石尾砂具有较好的固硫效果, 其固硫活性因燃烧温度而异, 在 950℃和 1050℃时, 膨胀性能好, 活性强。蛭石尾砂对于燃煤的固硫作用, 主要是高温下膨胀性能在型煤内部形成疏松结构, 以便于空气流通, 产生能抑制固硫产物硫酸钙分解的氧化环境。蛭石尾砂在型煤燃烧过程中膨胀产生的疏松结构, 不仅能提高燃煤固硫效率, 还能为煤中碳质成分的充分燃烧创造条件, 降低煤炭不完全燃烧而形成的炭质飞灰, 明显减少烟尘污染。

2.7 天然黄钾铁矾治理矿山酸性废水

由变价元素组成的矿物往往是自然界中一些极不稳定的金属矿物, 会造成矿山酸性废水污染, 关键问题是有效防止这些矿物被氧化分解。我们正在进行的实验表明, 可利用黄钾铁矾的形成作用防治矿山酸性废水污染。因为 Fe^{3+} 、 SO_4^{2-} 和 H_2O 是矿山酸性废水中的主要化学成分, 只要在废石堆上喷洒 KOH 溶液, 便可形成黄钾铁矾; 这是一种胶态物质, 能够隔绝大气, 达到防止废石堆中金属硫化物矿物的氧化分解的目的^[2]。

显然, 天然矿物在污染治理与环境修复领域中发挥着独特的作用, 并在污染治理的规模、成本、工艺、设备、操作、效果及无二次污染等方面具有明显的特点和优势。深入系统地研究环境矿物的基本性能, 揭示环境矿物的净化机理, 开发环境矿物的净化功能, 将有利于进一步扩大环境矿物的应用领域。

3 矿物天然自净化功能的进一步开发

发掘天然矿物环境属性, 实现矿物学研究从资源属性到环境属性的发展, 凝练与有机界生物相当的无机界矿物天然自净化功能的基本原理与应用方法, 提出继物理方法、化学方法和生物方法之后污染物治理的矿物方法, 发展环境污染治理与环境质量修复的新理论与新技术, 是今后开发利用无机界矿物天然自净化功能所面临的主要研究任务。

我们认为近期要着力开展的应用基础研究包括: 矿物与其环境界面原子尺度相互作用过程研究, 矿物内部结构缺陷影响矿物表面活性规律研究, 矿物晶体结构中不同维次连通性孔道效应研究, 矿物化学活性作用净化污染物方法研究以及矿物晶芽与生物细胞层次上交互作用净化污染物机理研究等。以精细描述、表征、模拟与预测矿物与其环境界面原

子水平上交作用过程, 探讨矿物结构缺陷控制电荷转移、能级移动、局域电子结构与化学反应的相关性, 确立吸着污染物与矿物表面之间具有强的交互作用时矿物结构中所具有的原子位移特征与结构重构方式。探讨具有孔道结构矿物的离子筛效应、分子筛效应与孔道内离子交换效应等一系列孔道效应特征。研究矿物结晶溶解、酸碱反应、氧化还原、离子交换、配位体交换、沉淀转化、矿物形成和催化作用等矿物化学活性。研究在细胞表面、细胞内部以及细胞与矿物晶芽界面导致矿物的沉淀与生长的机理, 开发利用细菌将环境中微量金属变成真正矿物的特性以除去环境中重金属污染物的方法等。

参考文献:

- [1] 鲁安怀. 矿物学研究从资源属性到环境属性的发展[J]. 高校地质学报, 2000, 6(2): 245–251.
- [2] 鲁安怀. 环境矿物材料基本性能——无机界矿物天然自净化功能[J]. 岩石矿物学杂志, 2001, 20(4): 371–381.
- [3] 鲁安怀. 环境矿物材料研究方向探讨[J]. 岩石矿物学杂志, 1997, 16(3): 184–187.
- [4] 鲁安怀. 环境矿物材料在土壤、水体、大气污染治理中的利用研究[J]. 岩石矿物学杂志, 1999, 18(4): 292–300.
- [5] Ehmann W, Polozek K. The heavy mineral record in the Pliocene to Quaternary sediments of the CIROS-2 drill core, McMurdo Sound, Antarctica[J]. *Sedimentary Geology*, 1999, 128(3–4): 223–244.
- [6] He Xiubin, Tang Keli, Lei Xiangyi. Heavy mineral record of the Holocene environment on the Loess Plateau in China and its pedogenetic significance[J]. *Catena* (Giessen), 1997, 29(3–4): 323–332.
- [7] Orgeira M J, Walther A M, Vasquez C A, *et al.* Mineral magnetic record of paleoclimate variation in loess and paleosol from the Buenos Aires Formation (Buenos Aires, Argentina) [J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 1998, 11(6): 561–570.
- [8] Davitaya T, Supatashvili G, Tatashidze Z, Lezhava Z. Chemical composition of stalactite concretions in some karst caves of Georgia[J]. *Bulletin of the Georgian Academy of Sciences*, 1998, 158(3): 466–469.
- [9] Dominique D G. Drip flow variations under a stalactite of the Pere Noel Cave (Belgium); Evidence of seasonal variations and air pressure constraints[J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 211(1–4): 208–232.
- [10] Kanfoush S L, Hodell D A. Eolian flux to Lake Qih Hu, China; A 45-kyr record of changing intensity of the Asian, annual meeting A. Abstracts with Programs – Geological Society of America[J], 1998, 30(7): 161.
- [11] Bronger A, Winter R, Sedov S. Weathering and clay mineral formation in two Holocene soils and in buried Paleosols in Tajikistan; towards a Quaternary paleoclimatic record in Central Asia, Catt J A (editor), Bronger A (editor), *Reconstruction and climatic implications of Paleosols* [J]. *Catena* (Giessen), 1998, 34(1–2): 19–34.
- [12] Gray N F. Environmental impact and remediation of acid mine drainage, a management problem[J]. *Environmental Geology*, 1997, 30(1–2): 62–71.
- [13] Pushkareva R A. Tritium adsorption in the montmorillonite[A]. 17th IMA, Canada, Abstract[R], 1998. A51.
- [14] Guthrie Jr G D, Mossman B T. Health Effects of Mineral Dusts. Reviews in Mineralogy[R], Mineralogical Society of America, Washington, D.C., 1993, V. 28.
- [15] Legendre O, Bodenan F, Ettler V. Mineralogy and weathering of Pb–Zn slags from Pribram, Czech Republic[A]. 17th IMA, Canada, Abstract[R], 1998. A50.
- [16] Rodriguez-Navarro C, Sebastian E, Doehne E, Ginell W S. The role of sepiolite palygorskite in the decay of ancient Egyptian limestone sculptures[J]. *Clays and Clay Minerals*, 1998, 46(4): 414–422.
- [17] Banfield J F, Nealson K H. Geomicrobiology: Interactions between Microbes and minerals, Reviews in Mineralogy[R]. Mineralogical Society of America, Washington D.C., V. 35, 1997.
- [18] McIntosh J M, Groat L A. Biological-mineralogical Interactions[R]. Mineralogical Association of Canada, Short Course Series, V. 25, Ottawa, Ontario, 1997.
- [19] 鲁安怀. 废水的矿物学处理[J]. 地学前缘, 1996, 3(1): 98.
- [20] 鲁安怀, 卢晓英, 唐军利. 天然磁黄铁矿处理含 Cr(VI) 废水实验研究[A]. 生物及环境材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 1997, 643–646.
- [21] 鲁安怀. 天然铁的硫化物净化含铬污水的新方法[J]. 地学前缘, 1998, 5(1): 243.
- [22] 鲁安怀, 陈洁, 石俊仙. 天然磁黄铁矿一步法处理含 Cr(VI) 废水[J]. 科学通报, 2000, 45(8): 870–872.
- [23] 石俊仙, 鲁安怀, 卢晓英. 自然状态与加热改性的黄铁矿处理含铬(VI) 废水的实验研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 1999, 18(4): 226–229.
- [24] 卢小英, 鲁安怀, 陈洁等. 单斜与六方磁黄铁矿处理含 Cr(VI) 废水过程中 pH 值变化规律[J]. 高校地质学报, 2000, 6(2): 271–277.
- [25] Ribbe P H. Sulfide mineralogy[A]. Review in Mineralogy, Mineralogical Society of America[R], V. 1, 1974.
- [26] 赵谨, 鲁安怀, 姜浩, 等. 天然磁铁矿处理含 Hg(II) 废水实验研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2001, 20(4): 549–554.
- [27] 高翔, 鲁安怀, 秦善, 等. 天然锰钾矿晶体化学特征及其环境属性[J]. 岩石矿物学杂志, 2001, 20(4): 477–484.
- [28] Vicat J, Fanchon E, Strobel P, Qui D T. The Structure of $K_{1.33}Mn_8O_{16}$ and Cation Ordering in Hollandite-Type Structure[J]. *Acta Cryst.*, 1986, B42: 162–167.
- [29] Yin Y G, Xu W Q, DeGuzman R, Suib S L. Studies of Stability and Reactivity of Synthetic Cryptomelane-like Manganese Oxide Octahedral Molecular Sieves[J]. *Inorg. Chem.*, 1994, 33: 4384–4389.
- [30] Luo J, Zhang Q H, Huang A M, Suib S L. Total Oxidation of Volatile Organic Compounds with Hydrophobic Cryptomelane-Type Octahedral Molecular Sieves[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2000, 35–36: 209–217.

- [31] Harada K, Hisanaga T, Tanaka K. Photocatalytic degradation of organophosphorous insecticides in aqueous semiconductor suspensions[J]. *Water Res.*, 1990, 24(11): 1415– 1417.
- [32] 韩丽荣, 鲁安怀, 郑红, 等. 有机膨润土吸附垃圾渗滤液中苯酚的研究[J]. *环境化学*, 2001, 20(5): 460– 465.
- [33] 郑红, 鲁安怀, 韩丽荣, 等. 有机膨润土对苯胺的吸附性能及应用研究[J]. *环境化学*, 2001, 20(5): 466– 469.
- [34] 韩丽荣, 鲁安怀, 陈从喜, 等. 有机膨润土制备条件对其吸附有机污染物性能的影响[J]. *岩石矿物学杂志*, 2001, 20(4): 455– 460.
- [35] 张金, 鲁安怀, 郑红, 等. 富含 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Al^{3+} 和 Cr^{3+} 的蒙脱石对苯酚的吸附性能研究[J]. *非金属矿*, 2001, 24(3): 45– 47.
- [36] 郑红, 鲁安怀, 张金, 等. 富含 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Al^{3+} 和 Cr^{3+} 蒙脱石对垃圾渗滤液中有机物的吸附[J]. *岩石矿物学杂志*, 2001, 20(4): 528– 532.
- [37] 李金洪, 鲁安怀, 高永华. 民用燃煤烟尘特征及环境矿物材料固硫剂开发[J]. *地学前缘*, 2001, 8(2): 315– 320.
- [38] 李金洪, 鲁安怀, 陈从喜, 等. 蛭石尾砂在燃煤固硫除尘中的利用[J]. *岩石矿物学杂志*, 2001, 20(4): 515– 519.

Environmental Properties of Minerals and Natural Self purification of Inorganic Minerals

LU An huai

(*School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China*)

Abstract: The investigation of environmental property of mineral i. e. environmental mineralogy is a branch of science dealing with interactions between natural minerals and spheres of the Earth surface as well as reflection of global change, prevention of ecological destroy, remediation of environmental pollution and participation in biomineralogy. Natural minerals actually become information carriers of recording global changes. There is negative effect to human hearth and living environment by destroy and decomposition of minerals derived from human life and production activities. Meanwhile, environmental properties of preventable decomposition of minerals can be used to decrease or avoid the negative effect. It is a vivid intersect research on interaction of biomineralization, especially on mechanisms of the interaction at nano scale. Pollutant treatment by natural minerals is based on the law of nature and reflects natural self-purification function in the inorganic world, similar to that of the organic world- biological treatment. Mineralogical method and biological method are well matched in pollutants disposal and jointly constitute a natural system of self-purification in terms of pollution treatment and environmental remediation in the spheres of interaction between mankind and the earth surface. The purification function of natural minerals for reducing pollutants is reflected mainly in the basic properties of environmental mineral materials. A series of case studies related to the natural self-purification, which were mostly completed by our group, are discussed in the paper. They are embodied by some natural minerals of pyrite, pyrrhotite, magnetite, goethite, cryptomelane, rutile, vermiculite, montmorillonite and jarosite and so on to disposal contaminants of heavy metals of Cr, Hg, Cd, Pb, Cu, Zn, Co and Ni etc. or to degrade volatile organic compounds in water, air and soil. Further research should be to reveal the subtle process of interaction on the interface of contaminants and minerals on the atomic level, to make the law to deal with the defects of crystal structure dominating the surface adsorption of contaminants, to discuss the microporous effect of the crystals connected with filtrating contaminants and to establish the mechanism that the effect of mineral chemical activity can purify contaminants as well as to bring forward the theory to disposal heavy metal ions by the interaction between minerals and bacteria.

Key words: mineralogy; resource properties; environmental properties; environmental mineralogy; environmental mineralogical materials; natural inorganic self-purification; method of disposal contaminants