

# 新疆粘土矿物材料在环境污染治理中的应用和展望

聂俊杰, 汪立今

(新疆大学 资源与环境科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830046)

**摘要:** 对粘土矿物在当前环境污染治理中的基本应用做了介绍, 并系统阐述了主要粘土矿物的结构特征、基本性能和主要应用。对粘土矿物材料在环境污染治理中的应用领域提出了一些思考, 这对当前粘土矿物材料在环境污染治理中的应用具有一定的指导意义。

**关键词:** 粘土矿物材料; 环境污染治理; 应用

中图分类号: P579. X5

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2007)06-0602-05

## The application and prospects of clay minerals in the environmental pollution control

NIE Jun-jie and WANG Li-jin

(College of Resources and Environmental Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

**Abstract:** This paper deals with the basic application of clay minerals to environmental pollution control and systematically describes the structural features and basic performance of these minerals. Some viewpoints are put forward concerning the application of clay minerals to environmental pollution control, which are surely of valuable significance in the research work of this field.

**Key words:** clay mineral materials; environmental pollution control; application

随着社会的发展, 工业和生活废弃物的排放日益增多, 造成了水污染、土壤污染和大气污染等一系列的环境问题, 严重影响着人类的生存环境和生态环境的安全。在解决人类所面临的一系列环境问题中, 各种环境矿物材料起着不可或缺的作用。大量的应用研究发现, 粘土矿物材料具有环境保护和环境污染治理作用, 特别是近几年来, 粘土矿物材料在环境治理中的应用越来越广泛, 在污水治理、大气吸附、过滤脱色等方面的应用水平不断提高。

粘土矿物是指粒径小于  $2 \mu\text{m}$  的含水层状硅酸盐矿物 (任磊夫, 1992), 主要包括伊利石族、蛭石族、高岭石族、蒙皂石族、坡缕石族等矿物。层状硅酸盐矿物具有由四面体片 (以  $T$  表示) 和八面体片 (以  $O$  表示) 组成的晶体结构。由 1 个四面体片和 1 个八面体片组成的结构单元层称为 1:1 型 (TO 型), 如高岭石、埃洛石和蛇纹石等; 由 2 个四面体片夹 1 个八面体片组成的结构单元层称为 2:1 型 (TOT 型), 如蒙脱石、

叶腊石、云母、蛭石等。另外, 还有间层 (混层) 结构, 如累托石等。结构单元层在垂直网片方向周期性地重复叠置构成矿物的空间格架, 而在结构单元层之间存在着空隙, 称为层间域。粘土矿物的层间域是一个良好的化学反应场所, 它具有层间交换、吸附、催化、聚合、柱撑等特性。粘土矿物的结构单元层 (四面体片和八面体片) 通常都带有电荷, 分为结构电荷 (永久电荷) 和表面电荷 (可变电荷)。结构电荷源于粘土矿物晶格中的离子类质同像置换或晶格缺陷所产生的过剩负电荷, 其数量与环境的 pH 值无关, 称为永久电荷。表面电荷一般源于发生在矿物表面的化学变化或表面离子的吸附, 与 pH 值有关, 称为可变电荷。由于粘土矿物颗粒细微、带有电荷、比表面积巨大和存在结构层间域等, 使之具有吸附性、膨胀性、可塑性和离子交换等特殊性能, 这些性能使粘土矿物材料得到广泛的应用 (潘兆鲁, 2003; 吴平霄, 2004)。

收稿日期: 2007-07-02; 修订日期: 2007-09-10

基金项目: 新疆维吾尔自治区高校科研计划科学研究重点资助项目 (XJEDU2007109), 新疆维吾尔自治区“矿产普查与勘探”重点学科建设科研基金资助项目

作者简介: 聂俊杰 (1983-) 男, 硕士研究生, 从事环境材料与矿物材料的应用研究, 通讯作者: 汪立今, E-mail: 1w668w@yahoo.com.cn

## 1 主要粘土矿物的性能及其应用

高岭石、蒙脱石、蛭石和伊利石等是粘土矿物的主要代表性矿物种类。粘土矿物由于其比表面积大、孔隙率高、极性强等特性而往往对水中的 Pb、Cd、Cr、Hg 等重金属有害污染物具有较强的吸附能力,是去除废水中重金属等有害元素较为理想的低成本吸附剂之一。

### 1.1 蒙脱石

#### 1.1.1 蒙脱石的主要性能

蒙脱石成分为  $(\text{Na}, \text{Ca})_{0.33}(\text{Al}, \text{Mg})_2[\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2] \cdot n\text{H}_2\text{O}$  水的含量变化很大。颗粒细小,约  $0.2 \sim 1 \mu\text{m}$ ,具胶体分散特性,通常呈块状或土状集合体产出。在电子显微镜下观察,晶体属单斜晶系,一般呈不规则片状。颜色为白色带浅灰,有时带浅蓝或浅红色,光泽暗淡,摩氏硬度  $2 \sim 2.5$ ,密度  $2.0 \sim 2.7 \text{ g/cm}^3$ ,堆积密度为  $1 \sim 1.1 \text{ g/cm}^3$ 。

#### 1.1.2 蒙脱石的应用

蒙脱石可作为有害物质的吸附剂、浑浊水的澄清剂、放射性废料和有害物质的密封剂、污染水的净化、处理剂等。国外在这方面已广泛使用,我国开发利用比较少。

(1)在废料处理方面。由于蒙脱石具有很强的防渗性能和较强的核素吸附能力,所以可用蒙脱石做垃圾填埋场的防渗层,也可用作核废料的处理,是较理想的缓冲回填材料(Wheelwright, 1981; Radhakrishna *et al.*, 1989)。美国、德国、日本和韩国应用最多,我国也开始利用。

(2)在废水废油处理方面。蒙脱石是很好的吸附剂。用蒙脱石可以处理工业和生活废水,如污水中的汞及重金属离子(杭瑚等, 1994; 金辉等, 1999)、印染废水(叶玲, 2001)、造纸废水(孙家寿等, 1998)的净化与处理,效果很好。在国外也用蒙脱石吸附电力行业绝缘油和海上泄露的原油。蒙脱石具有的这种特殊离子交换性质可用于环境不同水处理,根据需要处理不同的水环境,分别选用钠基土或钙基土等,将其分散于水中,交换反应后将水、土分离,可用于水中重金属离子的去除,具有成本低、适用面广的特点。此外,对于不同型蒙脱石的选择也有一定差别:由于钠基土在水中易解离,分散性好,同重金属离子的交换速度更快,而钙基土具有使用成本低的特点。由于蒙脱石晶胞带有过剩负电荷,不仅发生层间离子同其他无机阳离子的交换反应,还由于加工和分散过程的片层剥离和边沿断键,使矿物已有的层面充分暴露,边沿断键形成新的表面,使分散或改性后分散的蒙脱石矿物表面积显著增大,导致蒙脱石对重金属和有机物具有较好的吸附能力。

(3)在废气处理方面。国外利用蒙脱石的吸附性能制成汽车尾气排气管过滤器来吸附有害汽车尾气。也制作卷烟复合过滤剂,将蒙脱石经过适当加工、改型后制成颗粒吸附剂用在卷烟复合滤嘴的制造上,对卷烟烟雾中焦油、自由基有明显的吸附作用,对尼古丁也有一定的吸附作用,可以降低卷烟对人体的危害(惠博然, 1997)。

(4)在饮用水的净化方面。利用天然蒙脱石吸附水中的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  离子使硬水软化,还可利用柱撑蒙脱石吸附水中的  $\text{F}^-$ 、 $\text{AsO}_4^{3-}$  等有害离子,降低饮用水中有害物质的含量,达到净化水的目的(王洪涛等, 2003)。

(5)在沙漠治理方面。利用蒙脱石的特性可以改良沙漠土壤,建造沙漠储水池和引水渠,保持水分,有利于植物的成活和生长,达到治理沙漠的目的(葛学贵等, 2001)。

### 1.2 高岭石

#### 1.2.1 高岭石的主要性能

高岭石的化学组成为  $\text{Al}_2[\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2]$ 。天然高岭石由于粒径极细,往往呈微粒胶体而吸附其他杂质,而且粒径细者交换吸附能力相对较高。但是,与其他粘土矿物相比,高岭石的阳离子交换能力较低,这主要归因于结构单元层内部已达到电性中和状态,对阳离子的吸附作用仅限于颗粒的周际或裂隙中。然而,由于结构单元层的外表  $\text{OH}^-$  的存在,高岭石的阴离子交换能力相对较高。此外,高岭石在颗粒界面上也可吸附有机分子。

#### 1.2.2 高岭石的应用

首先,可作为环境演变标志矿物。高岭土是硅酸盐矿物如长石、云母和辉石在各种不同的自然地理环境中的分解产物,一般认为,它是岩石在潮湿气候酸性介质中被强烈淋滤形成的,是低纬度地区的产物,代表潮湿温暖的气候条件(陈涛等, 2003)。

其次,它还可用于环境污染的防治。高岭石具有比表面积大、孔隙多以及极性强等特征,特殊的晶体结构赋予高岭石许多特性,如较强的吸附性、脱水、复水性能、膨胀、收缩性能、可塑性能和离子交换性能等。因此它可用于化工和生活用水的过滤,水中重金属离子  $\text{Ni}^{2+}$ 、 $\text{Hg}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cr}^{3+}$ 、 $\text{As}^{3+}$  等的去除,阳离子污染物和有机污染物的吸附以及废水中的  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ 、 $\text{HPO}_4^{2-}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$  等的清除处理。高岭石因为吸附性强,还可用于大气污染的净化和对土壤进行自净化,前者主要用于臭气、毒气及有害气体如  $\text{NO}_x$ 、 $\text{H}_2\text{S}$  等的吸附过滤,后者主要用于土壤中有机农药、有机洗涤剂及工业废水中的酚和苯等,通过稀释、扩散、挥发、氧化还原及络合作用、离子交换和吸附作用而实现自净化。

### 1.3 伊利石

#### 1.3.1 伊利石的主要性能

伊利石化学组成为  $\text{K}_{0.75}(\text{Al}_{1.75}\text{R}^{2+})[\text{Si}_{3.5}\text{Al}_{0.5}\text{O}_{10}](\text{OH})_2$ ,属单斜晶系的含水层状结构硅酸盐矿物,式中  $\text{R}^{2+}$  代表二价金属阳离子,主要为  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$  等。晶体结构与白云母基本相同,也属于 2:1 型结构单元层的二八面体型。晶体有 1M、2M、1Md 和 3T 等多型变体。与白云母不同的是,层间 K 的数量比白云母少,而且有水分子存在,因此伊利石也被称为水白云母,还有人把它作为水云母的同义词。伊利石常呈极细小的鳞片状晶体,透射电子显微镜下呈不规则或带棱角的薄片状,有时也呈不完整的六边形和板条状,通常呈土状集合体产出。纯的伊利石粘土呈白色,但常因杂质而呈黄、

绿、褐等色。底面解理完全,摩氏硬度 1~2,密度 2.6~2.9 g/cm<sup>3</sup>。伊利石是一种常见的粘土矿物,常由白云母、钾长石风化而成,并产于泥质岩中,或由其他矿物蚀变形成。它常是形成其他粘土矿物的中间过渡性矿物。

### 1.3.2 伊利石的应用

在改良土壤方面,利用伊利石含钾高且矿石具分散等特性,通过焙烧矿石,使矿物中的 K<sub>2</sub>O 变成活性 K<sub>2</sub>O,从矿石中淋滤出来,形成易被植物吸收的 K<sub>2</sub>O 溶液,起到了施钾肥的作用。

在环境保护方面,利用伊利石的高吸附性能处理废水、废气、废物,还可利用其对放射性铯的吸附作用,做放射性贮藏器中的缓冲剂、隧道和钻井的回填物及用作空气净化废气处理材料。

## 1.4 蛭石

### 1.4.1 蛭石的主要性能

蛭石是一种层状结构的含镁的水铝硅酸盐次生变质矿物,原矿外似云母,通常由黑(金)云母经热液蚀变作用或风化而成,因其受热失水膨胀时呈挠曲状,形态酷似水蛭,故称蛭石。蛭石的化学式为 (Mg, Fe, Al)<sub>2</sub>[ (Si, Al)<sub>4</sub>O<sub>10</sub>] (OH)<sub>2</sub> · 4H<sub>2</sub>O。蛭石按阶段性划分为蛭石原矿和膨胀蛭石,按颜色可分为金黄色蛭石、银白色蛭石、乳白色蛭石。

蛭石具有隔热、耐冻、抗菌、防火、吸水、吸声等优异性能,因而是一种优良的保温、隔热、吸音、耐冻蚀建筑材料、工业填料、涂料及耐火材料。在 800~1000℃ 下焙烧 0.5~1.0 min,蛭石体积可迅速增大 8~15 倍,最高达 30 倍,膨胀后的密度为 50~200 g/cm<sup>3</sup>,颜色变为金黄或银白色,生成一种质地疏松的膨胀蛭石,但不耐酸,其介电特性也较差。膨胀蛭石广泛用于建筑、冶金、化工、轻工、机械、电力、石油、环保及交通运输等部门,国外主要用在建筑、绝缘、填料和农业、园艺等方面。

### 1.4.2 蛭石的应用

在环境保护方面主要是利用蛭石良好的吸附性和离子交换性处理废水及其有害物质。蛭石对某些放射性元素有吸附功能,对某些放射性元素(如<sup>137</sup>Cs)还具有一定的固定作用,因此,可作为核废料的处理剂。用蛭石制成的蛭石絮凝剂也可用来处理废水,方法是先把蛭石用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 进行淋滤活化,然后过滤得到废水处理用的絮凝剂,也可采用以 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸滤的方法制得蛭石废水絮凝剂,加进厨房废水中可以清除其中可萃取的乙烷,处理后厨房废水中的乙烷含量可以从 190 mg/L 降低到 6~7 mg/L(彭同江等,1997)。这种絮凝剂也可用于工业废水的沉淀净化。有时也利用膨胀性蛭石吸附海、湖和河水中漂浮的油污,达到净化环境的目的。

## 2 新疆主要粘土矿物资源简介

新疆粘土矿产种类多,资源配套,储量丰富,分布广泛,品位富,质量好。新疆拥有一些我国特大型粘土矿床,其中阿尔

泰山白云母矿探明储量约占全国总储量的一半,和布克赛尔县日月雷-乌兰林格、托克逊县克尔碱两处大型膨润土矿床探明储量达全国总储量的 20%,阿尔金山石棉成矿带已探明储量是我国最大的石棉矿带,陶土储量居全国首位,还有远景大的高岭土和陶粒页岩,布尔津县的滑石质量好,出口苏联。

### 2.1 新疆托克逊县榆树沟蒙皂石矿

新疆托克逊县境内克尔碱膨润土是优质膨润土,质量好,色浅,多数呈白色,钠基膨润土(Sodium-based bentonite)含量达到 61.64%,在世界上也是少见的。榆树沟蒙皂石矿于 1983 年发现,矿床产于萨阿尔明背斜榆树沟单斜构造带中,分布在海西早期侵入的斜辉橄榄岩与泥盆纪硅质灰岩、条带状硅质灰岩接触带中。到海西中晚期,碱性花岗岩沿接触带侵入,热液中的 Mg、Li 阳离子交代前期形成的蒙脱石结构单元层中的 Al 形成三八面体皂石。从整体观察,矿床地表形态为马蹄形,矿石矿物主要是皂石、镁皂石和锂皂石,矿石一般为白色、灰白色、淡绿色及淡肉红色,质地松软,细腻,有滑感。丁兆明等(2000)通过化学分析、X 衍射、差热分析、红外线光谱及电子显微镜等测试,证实榆树沟矿床为三八面体层状含锂的镁铝硅盐矿。

榆树沟蒙皂石矿是世界上仅次于美国、我国唯一具有工业价值的大型蒙皂石矿床。经新疆地矿厅调查,该矿藏为原生蒙皂石矿,是生产三八面体硅酸铝镁无机凝胶的优质原料。三八面体正电性无机凝胶的矿产资源非常稀少,人工合成的技术难度较大,榆树沟蒙皂石质量上乘,先后进行实验室规模和半工业试验均获得成功,利用榆树沟蒙皂石矿生产的凝胶经证明完全可以替代进口凝胶。因此,榆树沟蒙皂石矿的开发制备三八面体正电性无机凝胶的经济价值和社会效益均很大。

### 2.2 新疆巴里坤膨润土

位于新疆巴里坤县的巴里坤膨润土由中-酸性火山岩(特别是各类凝灰岩)水解蚀变而成,原岩结构、构造保留十分完好,肉眼可鉴别出岩屑、晶屑、玻屑、火山角砾等火山物质,大致可判断出岩石的类型。膨润土颜色多种多样,主要有灰绿-灰白色膨润土、粉红色膨润土、砖红色膨润土、灰黑色膨润土、杂色膨润土等。膨润土主要为致密块状,隐晶质结构,质地细腻,另外还有含岩屑、晶屑膨润土,含角砾状膨润土以及杂色条带状膨润土,含碳质条带膨润土和含植物碎片膨润土。

巴里坤膨润土矿石的主要矿物成分是蒙脱石,含量为 45%~94%,其他伴生的杂质矿物主要为石英,另外还有少量长石和高岭土。蒙脱石晶粒比较小,主要杂质矿物石英的粒度也细,分布均匀,与蒙脱石的共生关系比较密切。

### 2.3 新疆尉犁县且干布拉克蛭石矿

新疆尉犁县境内的且干布拉克蛭石矿,是我国目前最大的蛭石矿床,其地质储量高达 1.3×10<sup>7</sup> t,品位高,蛭石质量好,交通较便利,开采、选矿条件良好。且干布拉克蛭石矿的蛭石原矿多呈大片状、厚片状或颗粒状集合体,通常含有 20% 左右的泥土和脉石等杂质,其中脉石分为磁性、弱磁性、

非磁性矿物。磁性脉石矿物有磁铁矿,弱磁性脉石矿物有变体云母、黑云母、金云母、磷灰石和蛇纹石等。非磁性脉石矿物有长石、石英、透辉石和方解石等。大部分脉石呈自由分散状,部分脉石镶嵌在蛭石原矿的颗粒状集合体中。

### 3 粘土矿物材料在环境应用中的展望

粘土矿物的矿物学特性决定了其良好的吸附性能,对其进行改性处理可以增强粘土矿物的吸附性能。粘土矿物对废水中有害物质的吸附作用既有非选择性吸附又有选择性吸附,这两种吸附作用往往同时存在。以高岭石、蒙脱石、伊利石为代表的粘土矿物在水处理中都已应用,并具有一定的发展潜力。此外,埃洛石、贝得石、绿泥石、海绿石、滑石等粘土矿物也具有吸附作用(鲁安怀,1999)。赵金等(2006)认为,粘土矿物由于其结构与组成特性在水体中都不同程度的具备吸附有机、无机废物的能力,但粘土矿物应用于废水处理还仅限于吸附作用,并不具备降解废物的能力,吸附效果也很难与一些化学、生物絮凝剂相比。此外资源状况和开采成本也限制其实际应用。将粘土矿物与微生物絮凝剂组合应用于废水处理,应该是一条有效的环保途径。已有研究表明微生物与矿物共同作用对水体中的有机污染物具有更强的吸附能力,但前人并未阐明其作用机理。连宾(1998)率先提出细菌-矿物复合体的概念,并从微生物学和矿物学的角度阐明复合体表面微环境变化及其吸附作用机理,将细菌-矿物复合体应用于食品、酿造厂废水、生活污水及废水脱色处理等方面,取得了较好效果。如果把微生物与矿物相互作用形成的复合体也看作为矿物改性,那么这种新型的矿物-微生物絮凝剂或微生物改性的矿物絮凝剂值得进一步研究。

蒙脱石是非金属矿产资源中一种性质独特的宝贵资源,其特殊的矿物结构和理化性能,为其深层次开发利用提供了广阔的前景。随着科学技术的发展,充分合理利用该资源,开发蒙脱石高科技产品必将大有可为。蒙脱石无机凝胶、生态型改性蒙脱石复合材料、分子自组装改型蒙脱石环境材料、复配蒙脱石医药辅料、大型隐蔽工程新型蒙脱石基防水材料等研究是未来几年蒙脱石的主要开发方向。

高岭土的用途多种多样,随着经济的发展,各行各业对高岭土的需求量急速增加,对高岭土的质量要求也越来越高,普通高岭土已不能满足工业的需求,综合开发利用高岭土资源是很有必要的。开发途径就是发展深加工,开发新产品,从传统的应用领域转向高科技、新技术、高效益的领域。造纸涂料级高岭土、煅烧高岭土、超细和提纯高岭土以及其他高精尖产品的研制将会使高岭土具有更好的物化性能,随着科学技术的进步,它的应用范围将会越来越广泛。

伊利石是一种有着广阔应用前景和市场潜力的粘土矿物资源,在化肥、橡塑、造纸、陶瓷等许多行业都占有重要的位置,随着合理选矿流程的选择,深加工改性(黄继泰等,1995;杨慧芬等,1998)、除铁(陈金中,1999)、增白(吕宪俊等,

1997)、超微粉加工等多方面技术的改善和提高,不同品质的伊利石资源必将得到最科学、最合理的综合开发利用。我国的伊利石资源比较丰富,近年来,浙江、甘肃、河南、吉林等地都有多处大型伊利石矿床被发现并进行勘查。从单纯的低价原矿出口,到深层次、多方面的综合开发利用,不仅可以带来巨大的经济效益,更符合全球性的资源保护和可持续发展战略的宗旨,因此,必将产生更加良好的社会效益。

蛭石是一种天然矿物,具有成本低、处理效果好的特点,应用于水污染处理中可以降低处理成本,因为在废水处理中,应用蛭石的处理设备比较简单。蛭石用于去除废水中氨氮、重金属元素、磷酸盐、稀土离子、有机污染物等都有明显的效果,是一种有发展前途的水处理材料。但是,目前用蛭石处理废水还存在一些问题,蛭石能否用于吸附柱,吸附柱的泄漏和耗竭曲线如何,能否取代目前广泛使用的活性炭,这些问题尚未解决,有待进一步研究。

### References

- Chen Jinzhong. 1999. Erie Rail quarry falling down Titanium Mineral Processing Research [J]. Non-Metallic Mines, 22(2): 26~28 (in Chinese).
- Chen Tao, Wang Huan, Zhang Zuqing, et al. 2003. Clay minerals as indicators of paleoclimat [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 22(4): 416~420 (in Chinese with English abstract).
- Ding Zhaoming and Zhao Xingsen. 2000. A special kind of rare minerals in the world—veegum, its formation and special use [J]. Geology and Prospecting, 36(4): 41~44 (in Chinese).
- Ge Xuegui, Huang Shaoyun, Ma Guangwei, et al. 2001. A tentative study of applying environmental minerals, SAP and chemical sandy fixation slurry material to comprehensive desert control [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 20(4): 511~514 (in Chinese with English abstract).
- Hang Hu, Hu Bolu, Ma Bing, et al. 1994. The adsorption—Flocculation method using bentonite for treatment of heavy metal-containing waste water [J]. Research of Environmental Sciences, (1): 48~52 (in Chinese).
- Huang Jitai, Dai Jincuo, Bei Yiling, et al. 1995. Modification of illite fines and its application to rubber [J]. China Mining Magazine, 4(6): 52~55 (in Chinese).
- Hui Boran. 1997. Study on a new adsorbent [J]. Chemical World, 38(6): 292~294 (in Chinese).
- Jin Hui, Fu Jiang, Zheng Shanjie, et al. 1999. Study of adsorption on bentonite to mercury [J]. Technology of Water Treatment, (4): 226~229 (in Chinese).
- Lian Bin. 1998. A study on how silicate bacteria GY 92 dissolves potassium from illite [J]. Acta Mineralogica Sinica, 18(2): 234~238 (in Chinese with English abstract).
- Lu Anhuai. 1999. The application of environmental mineral materials to the treatment of contaminated soil, water and air [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 18(4): 292~300 (in Chinese with English abstract).

- Lü Xianjun, Luo Fa, Li Sumei, *et al.*. 1997. Experimental study on whitening of erie mine from eastern Zhejiang Province[ J ]. *Non-Metallic Mines*, 20(2): 33~35 (in Chinese).
- Pan Zhaolu. 2003. *Crystallography and Mineralogy* (2)[ M ]. Beijing: Geological Publishing House, 164~190 (in Chinese).
- Peng Tongjiang and Liu Fusheng. 1986. Applied mineralogy of industrial vermiculite and its research and application[ J ]. *China Non-Metallic Mining Industry Herald*, S1: 26~29 (in Chinese).
- Radhokrishna H S, Chan H T, Crawford A M, *et al.*. 1989. Thermal and physical properties of candidate buffer-backfill materials for a nuclear fuel waste disposal vault[ J ]. *CGJON*, 26(4): 623.
- Ren Leifu. 1992. *Clay Minerals and Clay Rocks*[ M ]. Beijing: Geological Publishing House, 1~32 (in Chinese).
- Sun Jiashou, Liu Yu, Bao Shicong, *et al.*. 1998. Study on treatment black liquor acid-Flocculating paper manufactured by organic cross-linked bentonite[ J ]. *Chemical Production and Technology*, (1): 41~43 (in Chinese).
- Wang Hongtao, Ji Junfeng and Liu Lianwen. 2003. An experimental study on defluoridation of drinking water with montmorillonite[ J ]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(1): 71~73, 76 (in Chinese with English abstract).
- Whelearight E J. 1981. Development of Backfill Materials as an Engineered Barrier in the Water Package Systems[ Z ]. Interim Topical Report, PNL-38731049.
- Wu Pingxiao. 2004. *Clay Mineral Materials and Environmental Remediation*[ M ]. Beijing: Chemical Industry Press, 8~23 (in Chinese).
- Yang Huifen, Zhou Zhangjian, Jiang Shengxi, *et al.*. 1998. A research of mechanochemical modification on illite[ J ]. *China Mining Magazine*, 7(2): 62~64 (in Chinese).
- Ye Ling. 2001. Study on modification of montmorillonite and its properties of decoloration[ J ]. *Acta Mineralogica Sinica* (2): 179~182 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Jin, Lian Bin, Zhu Lijun, *et al.*. 2006. Application of clay minerals in wastewater treatment[ J ]. *Environment and Sustainable Development*, 1: 31~32 (in Chinese).
- (2): 26~28.
- 陈涛, 王欢, 张祖青, 等. 2003. 粘土矿物对古气候指示作用浅析[ J ]. *岩石矿物学杂志*, 22(4): 416~420.
- 丁兆明, 赵兴森. 2000. 锂镁皂土——一种稀缺矿种的形成机理和用途[ J ]. *地质与勘探*, 36(4): 41~44.
- 葛学贵, 黄少云, 马广伟, 等. 2001. 环境矿物、SAP、化学固沙浆材综合治理荒漠初探[ J ]. *岩石矿物学杂志*, 20(4): 511~514.
- 杭瑚, 胡博路, 马兵, 等. 1994. 膨润土吸附-絮凝法处理污水中的重金属离子[ J ]. *环境科学研究*, (1): 48~52.
- 黄继泰, 戴勳草, 贝逸翎, 等. 1995. 伊利石矿粉的改性及其在橡胶中的应用[ J ]. *中国矿业*, 4(6): 52~55.
- 惠博然. 1997. 一种新型吸附剂的研究[ J ]. *化学世界*, 38(6): 292~294.
- 金辉, 富江, 郑珊杰, 等. 1999. 膨润土对汞的吸附性能研究[ J ]. *水处理技术*, (4): 226~229.
- 连宾. 1998. 硅酸盐细菌 GY92 对伊利石矿粉释钾作用研究[ J ]. *矿物学报*, 18(2): 234~238.
- 鲁安怀. 1999. 环境矿物材料在土壤、水体、大气污染治理中的应用[ J ]. *岩石矿物学杂志*, 18(4): 292~300.
- 吕宪俊, 罗发, 李素梅, 等. 1997. 浙东伊利矿增白试验研究[ J ]. *非金属矿*, 20(2): 33~35.
- 潘兆鲁. 2003. *结晶学及矿物学(下)*[ M ]. 北京: 地质出版社, 164~190.
- 彭同江, 刘福生. 1997. 蛭石的应用矿物学研究及开发利用现状[ J ]. *中国非金属矿业工业导刊*, S1: 26~29.
- 任磊夫. 1992. 粘土矿物与粘土岩[ M ]. 北京: 地质出版社, 1~32.
- 孙家寿, 刘羽, 鲍世聪, 等. 1998. 有机交联膨润土对预处理造纸黑液 COD 的吸附研究[ J ]. *化工生产与技术*, (1): 41~43.
- 王洪涛, 季峻峰, 刘连文. 2003. 蒙脱石降氟作用的实验研究[ J ]. *岩石矿物学杂志*, 22(1): 71~73, 76.
- 吴平雷. 2004. 黏土矿物材料与环境修复[ M ]. 北京: 化学工业出版社, 8~23.
- 杨慧芬, 周张健, 蒋胜昔, 等. 1998. 伊利石的机械力化学改性研究[ J ]. *中国矿业*, 7(2): 62~64.
- 叶玲. 2001. 蒙脱石改性及其吸附脱色性能的研究[ J ]. *矿物学报*, (2): 179~182.
- 赵金, 连宾, 朱立军. 2006. 粘土矿物在废水处理中的应用[ J ]. *环境与可持续发展*, 1: 31~32.

#### 附中文参考文献

陈金中. 1999. 伊利石矿降铁降钛选矿工艺研究[ J ]. *非金属矿*, 22