



## 天然多孔矿物材料的环境属性及在农业生产中的应用

张旭<sup>1,2,3</sup>, 王雅静<sup>1,2</sup>, 张小伟<sup>1,2</sup>, 赵志强<sup>4</sup>, 刘昶江<sup>1,3</sup>

(1. 河北地质大学 宝石与材料工艺学院, 河北 石家庄 050031; 2. 硅酸盐固废资源化利用河北省工程研究中心, 河北 石家庄 050031; 3. 河北省岩石矿物材料绿色开发重点实验室, 河北 石家庄 050031; 4. 北京矿冶科技集团有限公司, 北京 100160)

**摘要:** 这是一篇陶瓷及复合材料领域的论文。天然多孔矿物具有孔道结构、表面效应、环境水合效应、离子交换特性和良好的吸附能力等环境属性, 对地球的生态环境具有良好的协调性, 并能应用于农业肥料、土壤改良、饲料养殖等多个农业生产方面。基于天然多孔矿物及其矿物材料的环境属性, 开发其在农业生产和农业生态环境的特殊功能应该得到研究者的重视。天然多孔矿物自净化功能是大自然赋予地球生物生存发展的一种潜在功能, 其资源特性和环境属性非常适合于我国土壤修复和绿色农业生产的应用条件, 具有重要的研究和经济意义。

**关键词:** 陶瓷及复合材料; 多孔矿物; 矿物材料; 农业应用; 环境属性

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2024.02.001

中图分类号: TD989:P579 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2024)02-0001-07

**引用格式:** 张旭, 王雅静, 张小伟, 等. 天然多孔矿物材料的环境属性及在农业生产中的应用[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(2): 1-7.

ZHANG Xu, WANG Yajing, ZHANG Xiaowei, et al. Environmental properties of natural porous mineral materials and their application in agricultural production[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(2): 1-7.

天然多孔矿物是天然矿物的重要组成部分, 具有特殊的孔道结构。天然多孔矿物材料是指由天然多孔矿物及天然多孔矿物改性产物组成的矿物材料, 与生态环境具有良好的协调性, 能够应用于农业肥料、土壤改良、饲料养殖等多个农业生产方面<sup>[1-2]</sup>。

天然多孔矿物材料在生态修复、环境保护、建筑节能等领域应用已经成为研究热点, 但是如何利用天然矿物多孔矿物材料改善农业生态环境、建设绿色农业方面的特殊功能至今没有得到应有的重视和充分开发利用<sup>[3]</sup>。本文将对天然多孔

矿物材料的结构特性、环境属性、物理化学特性等进行详细的描述, 并对其在农业生产中的应用进行了系统的总结, 以期对天然多孔矿物在农业生产中的科学使用提供必要的技术依据。

### 1 环境属性和结构化学特性

天然多孔矿物材料的环境属性研究主要包括多孔矿物与地球环境之间交互作用、自然演变、对环境的净化、参与的生物作用等几个方面的研究<sup>[4]</sup>。天然多孔矿物多数为具有孔隙结构的硅酸盐矿物。由于硅酸盐矿物化学成分和晶体结构的多

收稿日期: 2022-08-25

基金项目: 河北省教育厅重点项目(D2019108); 河北省高校科研业务费资助(QN2021142); 西藏自治区重点研发计划项目(XZ202101ZY0008G); 河北省大学生科技创新能力培育项目(Z2022112)

作者简介: 张旭(1982-), 男, 博士, 讲师, 主要从事矿产综合利用、矿物材料研发及微生物金属提取等研究。  
通信作者: 王雅静(1981-), 女, 博士, 副教授, 主要从事矿物分选和资源回收利用等方向的研究。

样性,使得天然多孔矿物在孔隙结构、吸附特性、离子交换特性、催化特性、微溶效应等多方面呈现明显差异,可以应用于农业生产中的多个方面。

### 1.1 环境属性

矿物及由矿物组成的岩石是自然环境重要的组成部分,对周围自然环境具有各种环境属性。天然多孔矿物的环境属性主要包括多孔矿物分解对周围环境质量的影响、对环境中成分负载能力的影响、治理和修复环境的能力和与生物联合作用对周围环境影响等<sup>[2]</sup>。天然多孔矿物多为硅酸盐矿物,因此天然多孔矿物可以与大气中二氧化碳、水溶液中的无机离子和自然界中微生物发生风化作用,释放矿物中钙、镁、钠、钾、硅及微量元素于土壤和水环境中,进而影响周围的环境质量。天然多孔矿物的表面化学特性影响着环境中无机和有机物质的负载能力、赋存状态、变化过程、迁移能力与环境危害程度等,如土壤和水环境中的污染物与无机矿物之间存在吸附、固定、释放的平衡关系,环境中矿物的存在可以调整土壤和水环境中污染物对周围环境的影响<sup>[5]</sup>。天然多孔矿物的孔道效应、离子交换效应、催化效应和结构效应对自然环境中污染物的脱除和环境生态修复具有明显作用<sup>[5-9]</sup>。微生物是自然环境中富有活力的组成部分,微生物在生长代谢过程中,会释放各种生物有机成分。微生物、微生物生长养分、微生物代谢的有机成分会选择性的被天然多孔矿物所吸附,组成微生物-矿物-环境微小的生态系统对环境进行影响<sup>[7]</sup>。天然多孔矿物的物理化学特性使得天然多孔矿物具有特殊的环境属性,广泛应用于防治环境污染和生态修复等方面,是对矿物资源特性的进一步的发展。

### 1.2 结构化学特性

天然多孔矿物的物理化学性能与矿物的晶体结构和化学成分存在很大关系。天然多孔矿物主要以硅酸盐矿物和铝硅酸盐矿物为主,其主要成分为  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{OH}^-$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  和表面交换的阳离子等<sup>[8]</sup>。另外,少数成分简单矿物如硅藻土和石墨也是重要的天然多孔矿物,其中硅藻土主要成分为非晶质的二氧化硅及少量的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$  等杂质<sup>[9]</sup>。由于硅酸盐矿物的结构特性和形成条件不同,部分  $\text{Fe}$ 、 $\text{Mn}$ 、 $\text{Ti}$ 、 $\text{P}$  及其他微量元素(其他金属或稀土元素)进入硅酸盐矿物的晶体结构中,使得部分多孔矿物存在一定的催化和生物特性。

天然多孔矿物的结构化学特性对矿物表面特性具有决定性作用,进而影响多孔矿物对自然环境的作用(很多反应都发生在矿物的表面上)。硅酸盐多孔矿物表面特性包括:硅醇和金属醇的表面羟基性、表面荷电性、表面离子交换性和表面酸性(Lewis 或 Bronsted 酸性)等量度参数<sup>[10]</sup>。硅酸盐多孔矿物的不同表面羟基基团和表面酸性使得硅酸盐多孔矿物具有不同的反应特性,如硅藻土表面羟基  $\equiv\text{Si-OH}$  在水溶液中分解为  $\equiv\text{Si-O}^-$  和  $\text{H}^+$  或与有机物发生络合作用进而与环境中的离子发生反应。多孔矿物表面羟基化及离子交换反应后可以造成矿物表面电位变化。矿物的孔隙结构是天然多孔矿物的基本特性。天然多孔矿物的内部孔隙结构通常可以分为 3 类:沸石、硅藻土和膨胀矿物的三维孔隙结构;蒙脱石、蛭石等二维层状孔隙结构;凹凸棒石、海泡石等一维柱状孔隙。同时,根据矿物结构化学特性可以针对性的对多孔矿物的孔隙结构、表面键性、表面带电性、表面络合物形态、表面官能团等进行选择性的矿物改性处理,以促进矿物在作业环境或农业生产中的应用<sup>[11]</sup>。

## 2 在农业肥料中的应用

### 2.1 应用机理及研究进展

天然多孔矿物及改性材料具有良好的微溶性、吸附性能和离子交换性能,可以作为农业肥料载体或控释材料,控制农业肥料中养分的释放,进而影响农业肥料的利用率<sup>[12]</sup>。另外,利用天然多孔矿物和微生物组合可以促进硅酸盐矿物的溶解,使得土壤和矿物中的难溶性的  $\text{K}$ 、 $\text{P}$  和  $\text{Si}$  元素得到有效释放或产生植物需要的生物活性物质促进植物生长。天然多孔矿物具有资源储量丰富、价格低廉和能够补充土壤缺少的微量元素等特点,可以作为农业肥料的有效补充,为现代农业的发展提供重要保证。

沸石是天然矿物中的典型多孔矿物,  $\text{SiO}_4$  四面体通过桥氧连接形成空间网络,进而形成多孔性微观孔隙结构。 $\text{SiO}_4$  四面体中金属离子的取代可以形成金属硅酸盐化合物,并造成沸石晶体结构中电价的不平衡,必须与阳离子结合平衡维系整个晶体结构的平衡,而阳离子的规律性取代使得沸石具有选择性离子交换的性能<sup>[13]</sup>。天然沸石或天然沸石改性材料可以将土壤中  $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  及可溶性  $\text{P}$  等元素进行选择性吸附作为土壤养

分的过渡房，当植物需要营养成分时，再对  $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  及可溶性 P 等元素进行释放，满足植物生长的需要。硅藻土、海泡石、凹凸棒石等天然多孔矿物对肥料中  $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{K}^+$ 、可溶性 P 等元素也具有吸附、离子交换和缓慢释放的能力<sup>[14]</sup>。另外，微生物吸附于多孔矿物表面，结合矿物表面金属氧化物或配位化合物能够影响土壤有机质的转换过程，进而影响土壤养分的保持，为植物提供必需的氮、磷、钾和硫等元素。

## 2.2 应用实践

天然多孔矿物材料由于其自身的特殊结构和较高的比表面活性可以作为控释材料在缓释肥中应用，在土壤保肥能力、土壤有机质的转换、提供植物微量元素方面也具有重要作用<sup>[14-15]</sup>。蒙脱石、凹凸棒石、硅藻土等天然多孔矿物具有一定的粘附性、吸附性和填充性，可以作为农业肥料的粘结剂和造粒添加剂。通过添加一定量的粘土多孔矿物或矿物改性材料，能够得到反应性能优良的肥料包覆材料，并具有土壤调节和肥料控释作用。国内外学者研究了膨润土、沸石、硅藻土、蒙脱石等多孔矿物材料作为包覆材料能够与尿素和磷铵中 C-N 键、N-H 键和其他配位键进行键合，使肥料中养分组分固结并缓慢释放，从而提高了 N 和 P 元素的利用率<sup>[15-16]</sup>。利用天然多孔矿物的孔隙和离子交换特性，沸石、膨润土、硅藻土、膨胀珍珠岩等多孔矿物可以作为缓/控释肥料的载体。国内外曾对粘土多孔矿物在氮、磷、钾肥料的控释载体作用方面进行了一系列研究，研究发现硅藻土、膨润土、凹凸棒石等粘土多孔矿物对尿素中的氮、钾肥（硫酸钾、硝酸钾或磷酸二氢钾）中的钾和磷肥中磷均具有缓释性能<sup>[15-16]</sup>。另外天然多孔矿物或改性矿物材料还可以作为微量元素肥料的缓释和稀释的载体，以避免微量元素释放过快或不均匀造成的农作物中毒。

## 3 在土壤环境修复中的应用

天然多孔矿物的独特结构和良好物理化学特性对生态环境具有良好的协调、防治污染和修复环境的功能，其对土壤的净化修复作用与矿物的表面吸附能力、离子交换性、化学活性、矿物生物活性等性质存在密切联系<sup>[6]</sup>。矿物的自然净化能力是大自然赋予人类与地球长久相互依存发展的一种天然本能。随着人们对环境协调绿色理念的广泛认可，充分发挥天然多孔矿物在土壤修复中的修

复和净化功能受到国内外研究工作者的广泛重视。

### 3.1 应用机理及研究进展

天然多孔矿物材料对土壤的净化修复作用主要体现在矿物与土壤中金属离子相互作用、矿物与土壤有机物相互作用和矿物与土壤中微生物相互作用三个方面。天然多孔矿物材料在土壤环境修复中的应用，可以显著改善土壤的离子交换能力，钝化或固结土壤体系中污染的重金属离子，实现对土壤生态环境的修复缓冲功能<sup>[17]</sup>。天然多孔矿物与土壤中金属离子的相互作用主要表现在金属离子在矿物表面上的吸附、离子交换、配位化合作用和共沉淀等几个方面。天然多孔矿物材料往往具有较高的表面能和大量的极性表面，矿物表面本身特性、表面羟基化或与其他阴离子基团的配位作用使得矿物表面呈现电负性，使得重金属离子在矿物表面形成物理吸附和配位化合作用。另外，多孔矿物的表面微溶解、表面羟基化和矿物表面吸附的其他阴离子（ $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$ 、 $\text{SiO}_4^{2-}$ 等）均可以与金属阳离子发生化学沉淀作用<sup>[18]</sup>。部分铝硅酸盐多孔矿物的晶体结构中存在  $\text{Al}^{3+}$  取代  $\text{Si}^{4+}$  或 2 价阳离子和 3 价阳离子的相互替代等情况，使得结构单元层内负电荷过剩，补偿阳离子可以进入结构单元层间，由于补偿阳离子具有活动和离子交换的特性，使得重金属离子可以与矿物结构单元层间的阳离子进行离子交换的作用。天然多孔矿物及其改性材料除了能够吸附土壤中重金属离子外，还能够利用矿物表面的配位交换、分子作用力、静电力、离子交换、阳离子桥等对土壤有机物或有机污染物进行吸附<sup>[19]</sup>。天然多孔矿物本身或改性后通常存在表面羟基、高价阳离子或改性官能团等，可以与土壤中的羧基、羟基、酚基或阳离子有机配位有机化合物等物质发生作用，进而使有机物吸附在矿物表面。土壤中的微生物或功能生物菌落可以选择性的与多孔矿物或矿物改性材料发生作用，实现微生物的固定化或区域功能化。蒙脱石、高岭石等粘土多孔矿物可以与合适的微生物结合来吸附土壤中有机污染物和重金属离子，并利用特定微生物的生物化学特性实现土壤中有机污染物和重金属污染物的毒性的降解或降低。天然多孔矿物材料在土壤生态环境修复中的应用是一个涉及多学科交叉的复杂的过程，加强其过程中的物理、化学、生物等基础研究将对天然多孔矿物材料在土壤生态环境修复的应用具有重要意义。

### 3.2 应用实践

随着人类社会的高速发展, 工业生产中排放的污染物没有得到很好的控制, 尤其是农业生产中大量化学肥料和农药的使用, 使得土壤的生态环境受到破坏情况逐年加深, 因此, 加强土壤环境修复研究已经成为当前环境和农业科学工作者共同的研究重点。天然多孔矿物材料尤其是粘土类多孔矿物材料, 由于其发育的孔隙结构和优异的物理化学性能, 在土壤环境修复中受到国内外学者的广泛关注。膨润土是一种天然的含水粘土矿物, 对重金属污染的土壤有很好的改良和修复作用, 尤其是经过改性的膨润土矿物材料对土壤中如铅、镉、铬和砷等重金属元素具有明显的吸附固化作用<sup>[20]</sup>。国内外曾对沸石吸附土壤中重金属离子进行了一系列研究, 认为沸石或沸石与其他材料共同作用能够调整土壤的 pH 值和与金属离子进行离子交换, 进而显著钝化土壤中重金属元素溶解和迁移<sup>[21]</sup>。另外, 海泡石、高岭土也可以显著降低土壤中铅和镉等元素在土壤中的含量, 实现污染土壤的环境生态修复<sup>[22]</sup>。天然多孔矿物虽然具有较大的比表面面积和较强的吸附能力, 但是由于其表面较强的亲水性, 往往不能够有效地吸附污染土壤中的有机物污染物, 因此, 使用

天然多孔矿物对有机污染土壤进行环境生态修复, 一般需要对天然多孔矿物进行选择性的改性处理以应对不同污染土壤中有机污染物的有效吸附。国内外研究了部分改性粘土类多孔矿物对土壤中苯、苯酚、有机氯化物、抗生素类有机物等有机污染物均具有较好的吸附特性, 较未改性的粘土类多孔矿物的吸附量能提高 1~2 个数量级<sup>[22-23]</sup>。另外多孔矿物材料中金属离子或金属化合物对土壤中有机污染物也具有一定的光催化和氧化还原作用, 能够显著促进有机污染物的氧化分解。土壤中微生物菌落丰富, 是土壤的重要组成部分。利用微生物和多孔矿土壤进行改良和环境生态修复是一种环境友好的生态修复技术。微生物在多孔矿物表面的吸附可以影响矿物表面电位和催化活性, 进而影响多孔矿物和微生物对土壤生态修复的能力。国内研究工作者曾对蒙脱石和凹凸棒石联合苍白杆菌处理土壤中阿特拉津进行研究, 研究表明多孔矿物和微生物的联合使用可以促进土壤中阿特拉津污染物的有效降解<sup>[24]</sup>。另外, 微生物-粘土多孔矿物的联合使用也可以提高多孔矿物对土壤中重金属污染物的吸附能力。近年来, 天然多孔矿物或其改性材料在土壤环境修复中的应用研究见表 1。

表 1 近五年来天然多孔矿物及其改性材料在土壤环境修复中的应用

Table 1 Application of natural porous minerals and their modified materials in soil environmental remediation in the past five years

材料	改性方法	应用	特征
沸石 <sup>[25]</sup>	酸碱处理改性、微生物修饰改性和接枝改性	土壤中铅、镉、锌等重金属元素的固定化	具有三维孔隙结构、吸附能力强、表面活性高和较强的离子交换能力
膨润土 <sup>[26]</sup>	有机包覆处理改性、沉淀反应改性和热处理改性	土壤中铬、镍、汞重金属和部分有机污染物的吸附	比表面积大、较高的离子交换能力、吸附性能强和具备部分再生能力
海泡石 <sup>[27]</sup>	羟基化改性、有机修饰改性和微生物修饰改性	土壤中镉、铅等重金属的钝化和农药类污染物吸附	具有较高的离子交换能力和吸附性能强, 且其表面容易羟基化等性能
硅藻土 <sup>[28]</sup>	羟基化改性、金属氧化物改性和表面巯基改性	土壤中铜、锌、镉重金属元素和菲类污染物的吸附	多孔的粘土性矿物、较好的生物相容性、良好的吸附性和来源广泛的特点
蒙脱石 <sup>[29]</sup>	表面巯基改性、微生物修饰改性和有机酸处理改性	土壤中铜、镉、汞重金属的钝化和酚类污染物吸附	多孔的粘土性矿物和具有较高的离子吸附能力
凹凸棒石 <sup>[30]</sup>	酸碱改性、有机修饰改性和热活化	土壤中镉、铜、钼金属元素的钝化和酚类污染物吸附	纤维状特性、较强的离子交换性和化学惰性

## 4 在养殖饲料中的应用

天然多孔矿物通常含有硅、钠、钾、钙、镁、铁、锌、铝等矿物元素, 而天然多孔矿物中矿物质和矿物元素可以为动物生长发育提供必要的矿物质和营养元素。天然多孔矿物作为饲料添加剂主要有膨润土、沸石、海泡石、凹凸棒石等天然多孔矿物或其改性矿物材料<sup>[31]</sup>。天然多孔矿

物作为饲料添加剂具有补充动物生长的营养物质、促进动物生长、提高动物免疫能力和改善动物肉类品质的功能。天然多孔矿物通常为硅酸盐矿物, 其含有的硅、钠、钾、钙、镁、铝及其他微量元素可以通过离子交换或微溶解的途径被动物所吸收利用。天然多孔矿物通常具有较好的吸附特性和生物活性, 能够对动物肠胃中的有害气

体和有害细菌进行强有力的吸附，进而改善动物生长的消化功能，同时多孔矿物表面化学活性可以提高动物体内生物酶的活性，进而促进饲料营养物质的分解利用。

天然蒙脱石或改性蒙脱石广泛应用于动物饲料行业。国内外研究表明蒙脱石可以有效吸附受污染的饲料中的黄曲霉菌、饲料中的农药、饲料中的重金属和体内产生的氨、硫化氢、二氧化碳等有害气体，进而改良饲料的品质以提高动物的生产性能和预防动物疾病的功能<sup>[32]</sup>。另外，蒙脱石或蒙脱石改性材料可以代替部分微量元素和益生菌在饲料中添加使用，以改善动物体内环境促进动物生长<sup>[33]</sup>。海泡石多孔矿物的流变性和催化性对于海泡石在饲料中应用也具有较大影响。国外研究发现海泡石在肉鸡饲料中使用，可以提高饲料中有机物的消化率，改变能量和蛋白质的流变性，提高蛋白质利用率。沸石、凹凸棒石等天然多孔矿物均可作为饲料添加剂，并对动物生长起不同的作用。

## 5 在其他农业生产中的应用

天然多孔矿物及改性材料除了能够在农业肥料、土壤环境生态修复和动物饲料中使用以外，还可以应用于农药载体、动物饲养环境保护、动物粪便除臭剂或农产品保鲜等农业生产方面<sup>[34]</sup>。随着现代农业发展的需要，在农药制剂过程中添加硅藻土、海泡石、高岭石、蒙脱石等天然多孔矿物材料来实现农药中有效成分缓慢释放，提高农药有效成分利用率，减少环境污染已经成为农药研究工作者研究的热点。天然多孔矿物或其改性材料通常具有较强的离子交换性和吸附性，通过对农药有用成分的吸附，可以实现农药有用成分的缓慢释放和供应，将高毒性的农药低度化，延长农药的使用寿命，并减少对自然生态环境的影响<sup>[35]</sup>。动物饲养场地、农田或水体环境中由于动植物的新陈代谢和微生物作用通常会产生氨、硫化氢等臭味或有毒气体，通过加入天然多孔矿物可以有效去除有毒气体和水体中污染物进而改善动植物生长环境。另外，随着人们对天然保鲜技术的重视，天然多孔矿物材料对水果和蔬菜保鲜技术的发展将受到广泛关注。中科院曾研究了一种复合硅藻土矿物材料，具有很强的吸附和吸湿性能，对多种病毒和有毒气体具有很强的吸附

能力，能够抑制霉菌繁殖，具有较好的保存和保鲜的能力。

## 6 应用前景

天然矿物的自净化功能是大自然赋予地球生物生存发展的一种潜在功能，而天然多孔矿物由于其特殊的晶体结构和孔道效应，具有良好的表面吸附、孔道过滤、离子交换、表面催化氧化和表面生物作用等，可以有效应用于农业肥料、土壤污染修复、动物养殖饲料、农药载体、饲养环境生态改善和农产品保鲜等农业生产活动中。天然多孔矿物的资源特性和环境属性非常适合于我国土壤修复和绿色农业生产的应用条件，也受到国内研究的广泛重视。因此建议加强天然多孔矿物在农业生产各方面的应用基础研究工作，相信天然多孔矿物环境属性及在农业中应用研究必将对农业绿色和谐发展和地球环境科学发展产生重大影响。

## 参考文献：

- [1] 鲁安怀. 矿物法-环境污染治理的第四类方法[J]. 地学前缘, 2005, 12(1): 198-207.
- [2] 尹琳, 陆现彩, 胡欢, 等. 多孔结构矿物(岩石)及其环境修复材料的实用性[J]. 岩石矿物学杂志, 2003, 22(s1):405-408.
- [3] 赵磊, 董发勤, 王光华, 等. 多孔矿物材料的孔道结构及应用进展[J]. 中国粉体技术, 2008, 14(1):46-49.
- [4] 刘云, 董元华, 杭小帅, 等. 环境矿物材料在土壤环境修复中的应用研究进展[J]. 土壤学报, 2011, 48(3):629-638.
- [5] 鲁安怀. 环境矿物材料在土壤、水体、大气污染治理中的利用[J]. 岩石矿物学杂志, 1999, 18(4):292-300.
- [6] 董海良. 矿物-微生物相互作用在环境治理中的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015, 83(s1):135.

- DONG H L. Application of mineral microbial interaction in environmental treatment[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2015, 83(s1):135.
- [7] 连 宾. 矿物-微生物相互作用研究进展: 地质微生物专栏文章评述[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2014, 33(6):759-763.
- LIAN B. Research progress in mineral microbial interaction: review of geological microbiology column articles[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2014, 33(6):759-763.
- [8] Heng J Y Y, Bismarck A, Williams D R. Anisotropic surface chemistry of crystalline pharmaceutical solids[J]. *Aaps Pharmscitech*, 2006, 7(4):E12-E20.
- [9] 张 旭. 硅藻土的矿物学特征及改性沥青中的应用[D]. 长春: 吉林大学, 2004.
- ZHANG X. Mineralogy characteristic of diatomite and application in modified asphalt[D]. Changchun: Jilin University, 2004.
- [10] XU L, TIAN J, WU H, et al. Anisotropic surface chemistry properties and adsorption behavior of silicate mineral crystals[J]. *Adv Colloid Interface Sci*, 2018, 256.
- [11] 王 昶, 于金鹤, 王耀琛, 等. 改性蛭石絮凝剂对养殖废水的应用研究[J]. *环境工程*, 2018, 36(3):13-17.
- WANG C, YU J H, WANG Y C, et al. Application of modified vermiculite flocculant on swine wastewater treatment[J]. *Environmental Engineering*, 2018, 36(3):13-17.
- [12] 候翠红, 张宝林, 王光龙. 吸附性矿物在复混肥生产中的应用研究[J]. *化工矿物与加工*, 2002, 31(1):13-15.
- HOU C H, ZHANG B L, WANG G L. Study on the application of absorptive mineral in compound fertilizer production[J]. *Industrial Minerals and Processing*, 2002, 31(1):13-15.
- [13] 陈延华, 郭 宁, 王甲辰, 等. 沸石不同粒径组成对  $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  和  $\text{K}^+$  吸附-解吸的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2017(5):7-11.
- CHEN Y H, GUO N, WANG J C, et al. Effect of different particle size of clinoptilolite on the adsorption and desorption capacity of  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  and  $\text{K}^+$ [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017(5):7-11.
- [14] 许 焯, 周春晖, 谢华丽, 等. 粘土矿物在肥料和农药控释技术中的应用综述[J]. *化工矿物与加工*, 2006(10):35-37.
- XU Y, ZHOU C H, XIE H L, et al. Review on agrochemical applications of clay minerals in controlled- released fertilizers[J]. *Industrial Minerals and Processing*, 2006(10):35-37.
- [15] 吴平霄. 有机和无机(矿物)控释材料及其控释机理研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2000.
- WU P X. Study on the organic-inorganic (minerals) controlled release materials and their controlled release mechanism[D]. Guangzhou: South China agricultural university, 2000.
- [16] KRZYSZTOF L. Environmental impact of fertilizer use and slow release of mineral nutrients as a response to this challenge[J]. *Polish Journal of Chemical Technology*, 2016, 18(1):72-79.
- [17] 罗阳坡, 赵赛锋, 潘国祥, 等. 黏土基氮磷钾缓释肥的制备及其释放特征[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(2):813-816.
- LUO Y P, ZHAO S F, PAN G X, et al. Preparation of clay based slow-release fertilizers containing nitrogen, phosphorus and potassium and its release characteristics[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40(2):813-816.
- [18] 李爱民, 冉炜, 代静玉. 天然有机质与矿物间的吸附及其环境效应的研究进展[J]. *岩石矿物学杂志*, 2005, 24(6):173-182.
- LI A M, RAN W, DAI J Y. Advances in the study of adsorption of natural organic material on minerals and its environmental[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2005, 24(6):173-182.
- [19] J. PŘIKRYL, JHA D, A. Stefánsson, et al. Mineral dissolution in porous media: an experimental and modeling study on kinetics, porosity and surface area evolution[J]. *Applied Geochemistry*, 2017, 87.
- [20] 郑长文, 管俊芳, 郑佳敏, 等. 矿业领域膨润土应用的研究进展[J]. *矿产综合利用*, 2020(3):22-27.
- ZHENG C W, GUAN J F, ZHENG J M, et al. Progress in the application of bentonite in mining industry[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(3):22-27.
- [21] 鞠建英, 向俐云. 膨润土在污染场地土壤修复和地下水污染防治中的应用[J]. *中国非金属矿工业导刊*, 2014(6):4-6.
- JU J Y, XIANG L Y. Application of bentonite in soil remediation of contaminated sites and groundwater pollution prevention[J]. *China Non-metallic Minerals Industry*, 2014(6):4-6.
- [22] LOPEZLINARES F, CARBOGNANI L, SOSASTULL C, et al. Adsorption of virgin and visbroken residue asphaltenes over solid surfaces. 1. kaolin, smectite clay minerals, and athabasca siltstone[J]. *Energy & Fuels*, 2012, 23(1):1901-1908.
- [23] SOTELO J L, OVEJERO G, RODRIGUEZ A, et al. Study of natural clay adsorbent sepiolite for the removal of caffeine from aqueous solutions: batch and fixed-bed column operation[J]. *Water Air & Soil Pollution*, 2013, 224(3):1-15.
- [24] SAJID M, NAZAL M K, IHSANULLAH, et al. Removal of heavy metals and organic pollutants from water using dendritic polymers based adsorbents: A critical review[J]. *Separation & Purification Technology*, 2017, 191.
- [25] 魏 威, 余 江, 王亚婷, 等. SRB-沸石联合技术对土壤铅的固定效果[J]. *深圳大学学报(理工版)*, 2018, 35(6):597-602.
- WEI W, YU J, WANG Y T, et al. Effect of SRB-zeolite technology on immobilization of lead in soil[J]. *Journal of Shenzhen University(Science and Engineering)*, 2018, 35(6):597-602.
- [26] 江海燕, 王志国, 赵秋香, 等. 胡敏酸改性膨润土钝化污染土壤 Pb 和 Cd 及机理[J]. *环境保护科学*, 2014, 40(1):46-50.
- JIANG H Y, WANG Z G, ZHAO Q X, et al. Mechanism of humic acid modified bentonite for immobilizing lead and cadmium in contaminated soils[J]. *Environmental Protection Science*, 2014, 40(1):46-50.
- [27] 江湛如, 雷鸣, 龙九妹, 等. 改性非金属矿物材料用于重金

属污染处理的研究进展[J]. 材料导报, 2017, 31(S2):210-213.  
JIANG Z R, LEI M, LONG J M, et al. Advances in applying modified nonmetallic mineral materials to heavy metal pollution control[J]. Materials Reports, 2017, 31(S2):210-213.  
[28] 杨雨中, 朱健, 肖媛媛, 等. Fe-Al 改性硅藻土的制备及其对土壤 Cd 污染固定化效果[J]. 环境科学, 2018, 39(8): 3854-3866.  
YANG Y Z, ZHU J, XIAO Y Y, et al. Preparation of iron-aluminum modified diatomite and its immobilization in cadmium-polluted soil[J]. Environmental Science, 2018, 39(8):3854-3866.  
[29] 曾燕君, 周志军, 赵秋香. 蒙脱石-OR-SH 复合体材料对土壤镉的钝化及机制[J]. 环境科学, 2015(6):2314-2319.  
ZENG Y J, ZHOU Z J, ZHAO Q X. Mechanism study of the smectite-OR-SH compound for reducing cadmium uptake by plants in contaminated soils[J]. Environmental Science, 2015(6):2314-2319.  
[30] 任珺, 陶玲, 郭永春, 等. 凹凸棒石粘土的改性方法研究现状[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2012(5):28-31.  
REN J, TAO L, GUO Y C, et al. Research on the modification of attapulgite clay[J]. China Non-metallic Minerals Industry, 2012(5):28-31.  
[31] 刘玉珍. 几种天然矿物质饲料添加剂在猪饲养中的作用[J]. 现代畜牧科技, 2013(8):78-78.  
LIU Y Z. Effects of several natural mineral feed additives on

pig breeding[J]. Modern Animal Husbandry Technology, 2013(8):78-78.  
[32] 温志新, 孙永欣, 李亚洁, 等. 麦饭石载体枯草芽孢杆菌饲料添加剂应用于刺参养殖的研究[J]. 中国饲料, 2014(1):29-32.  
WEN Z X, SUN Y X, LI Y J, et al. Study on the application of maifanshi carrier bacillus subtilis feed additive in sea cucumber culture[J]. China Feed, 2014(1):29-32.  
[33] 肖蕾, 邵永, 吴云霞, 等. 蒙脱石改性研究及在饲料行业的应用前景展望[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(12):4048-4053.  
XIAO L, SHAO Y, WU Y X, et al. Research of modified montmorillonite and its application prospects in feed industry[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(12):4048-4053.  
[34] 江熠辉. 多孔材料负载农药缓释剂的制备及缓释性能的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2011.  
JIANG Y H. Studying on preparation and controlled release performance of porous materials load pesticide controlled release formulations[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2011.  
[35] 吴亮, 龚道新, 张小东, 等. 咪鲜胺在4种粘土矿物上的吸附行为[J]. 安徽农业大学学报, 2016, 43(2):252-257.  
WU L, GONG D X, ZHANG X D, et al. Adsorption of prochloraz on four clay minerals[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2016, 43(2):252-257.

## Environmental Properties of Natural Porous Mineral Materials and Their Application in Agricultural Production

ZHANG Xu<sup>1,2,3</sup>, WANG Yajing<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiaowei<sup>1,2</sup>, ZHAO Zhiqiang<sup>4</sup>, LIU Changjiang<sup>1,3</sup>  
(1.School of Gemology and Materials Technology, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, Hebei, China; 2.Engineering Research Center for Silicate Solid Waste Resource Utilization of Hebei Province, Shijiazhuang 050031, Hebei, China; 3.Hebei Key Laboratory of Green Development of Rock and Mineral Materials, Shijiazhuang 050031, Hebei, China; 4.State Key Laboratory of Biochemical Engineering, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100160, China)

**Abstract:** This is an article in the field of ceramics and composites. Natural porous minerals have many environmental attributes, such as pore structure, surface effect, environmental hydration effect, ion exchange characteristics and good adsorption capacity. The natural porous minerals have good harmony with the earth's ecological environment and can be applied to agricultural fertilizers, soil reclamation, feed breeding and other aspects of agricultural production. Based on the environmental attributes of natural porous minerals and their mineral materials, researchers should pay attention to exploiting their special functions in agricultural production and agricultural ecological environment. The self-purification function of natural porous minerals is a potential function endowed by nature for the survival and development of the earth's environment. Its resource characteristics and environmental attributes are very suitable for the application conditions of soil remediation and green agricultural production in China. The research on using natural porous minerals in agricultural production has an important economic influence on society.

**Keywords:** Ceramics and composites; Porous minerals; Mineral materials; Agriculture application; Environmental properties