

# 几种天然斜发沸石矿的组成结构及性质对比研究

王程<sup>1,2</sup>, 冯锴<sup>1</sup>, 王李鹏<sup>1</sup>, 都扶岭<sup>1</sup>, 于倩茹<sup>1</sup>

1. 陕西科技大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710021;
2. 陕西省无机材料绿色制备与功能化重点实验室, 陕西 西安 710021

中图分类号: TD91; TD985 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2023)02-0148-06  
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2023.02.023

**摘要** 我国天然斜发沸石矿分布较广且储量丰富, 具有巨大的开发利用价值。但由于成矿条件的差异, 不同产地甚至同一产地不同区块天然斜发沸石的组成结构及诸多性质存在一定的差异, 使其实际应用受到影响。因此, 开展天然斜发沸石矿组成结构及性质的对比研究很有必要。选取河北一处(Z1)和辽宁两处(Z2 和 Z3)天然斜发沸石矿, 研究并对比其组成、结构、pH 值、阳离子交换容量以及重金属离子、水蒸气和甲醛的吸附效果。结果表明: 三种天然沸石矿主要由斜发沸石、石英及少量方解石等矿物组成, 含有 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO、TiO<sub>2</sub>、CaO 及少量重金属等成分, 三者的矿物和化学组成存在一定差异。Z2 样品表现出相对较好的重金属离子、水蒸气和甲醛气体吸附效果, 其对 Cd<sup>2+</sup>、Cr<sup>3+</sup>、水蒸气和甲醛气体的吸附容量分别为 14.89 mg/g、6.65 mg/g、21.33 mg/g 和 7.12 mg/g, 这与其具有更高的比表面积、介孔体积以及阳离子交换容量有关。该研究可为天然斜发沸石矿的评价、高效利用及环境应用提供一定的支持。

**关键词** 天然斜发沸石; 比表面积; 阳离子交换容量; 水蒸气; 甲醛气体; 吸附容量

## 引言

天然沸石是一类多孔含水铝硅酸盐矿物, 在自然界的储量非常丰富, 仅在我国就达 40 亿 t 左右, 矿床点已发现 400 余处, 属我国优势非金属矿产资源。目前已知的天然沸石有 80 余种, 有工业开采和利用价值的主要有斜发沸石、丝光沸石、菱沸石、毛沸石、片沸石和钙十字沸石等, 以斜发沸石和丝光沸石为主, 其中斜发沸石储量最为丰富<sup>[1-2]</sup>。斜发沸石为 HEU 型沸石(斜发沸石和片沸石; 单斜晶系; 空间群  $C_2^2-Cm$ ; 晶胞参数  $a \approx 17.7 \text{ \AA}$ ,  $b \approx 17.9 \text{ \AA}$ ,  $c \approx 7.4 \text{ \AA}$ <sup>[3]</sup>, 其中  $1 \text{ \AA} = 0.1 \text{ nm}$ ), 其化学组成为  $(Na, K, Ca)_4Al_6Si_3O_{72} \cdot 24H_2O$ , 具有良好的吸附、离子交换和催化性能, 已被应用于废水处理<sup>[4-5]</sup>、有机化合物催化降解和转化<sup>[6-7]</sup>、医药<sup>[8]</sup>、农业<sup>[9]</sup>、建材<sup>[10]</sup>等领域。由于成矿条件的差异, 不同产地甚至同一产地不同区块天然斜发沸石的组成结构及诸多性质存在一定的差异。然而, 目前关于不同天然斜发沸石组成结构和性质对比方面的研究尚不够深入, 使得天然斜发沸石的实际应用受到影响。

基于此, 本论文以河北一处、辽宁两处天然斜发

沸石为研究对象, 研究并对比其组成、结构、pH 值、阳离子交换容量以及重金属离子(镉、铬)、水蒸气和甲醛气体的吸附效果, 以期天然斜发沸石矿的选择、高效利用及环境应用提供一定的支持。

## 1 试验部分

### 1.1 试验样品

天然斜发沸石样品分别取自河北(命名为 Z1)和辽宁(两处沸石样品, 分别命名为 Z2 和 Z3)。氯化铬(AR, 99%)、氯化镉(AR, 99%)均购自上海阿拉丁科技股份有限公司。三氯化六氨合钴(AR, 99%)和甲醛溶液(AR, 37%)均购自麦克林有限公司。

### 1.2 组成结构表征

采用 Bruker S4 X 射线荧光光谱仪分析样品的化学组成。采用 AXS D8-Focus X 射线衍射仪分析样品的矿物组成和晶体结构, 使用 Cu 靶分别在 40 kV 和 40 Ma 条件下进行测试。采用马尔文 Mastersizer 2000 激光粒度分析仪测试样品的粒度分布。采用 TGA Q500

收稿日期: 2022-11-21

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2022GY-163); 陕西省教育厅服务地方专项项目(22JC020); 咸阳市重点研发计划项目(S2021ZDYF-GY-0189)

作者简介: 王程(1981-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为矿物材料及生态环境材料, E-mail: wangcheng@sust.edu.cn。

热重分析仪分析样品的热失重行为,测试温度为室温~1 000 °C,加热速率为10 K/min。采用VECTOR-22傅立叶变换红外光谱仪分析样品的分子结构,利用KBr压片技术进行测试。采用Gemini VII2390自动物理吸附分析仪分析样品的比表面积和孔结构特征。采用TESCAN-Vega3扫描电子显微镜和能谱仪分析样品的表面形貌和元素含量。采用7300V等离子体发射光谱仪测定溶液中重金属离子含量。

### 1.3 性能表征

#### 1.3.1 pH值测定

pH值测定采用JC/T 2270—2014标准。首先称取约5 g试样,置于250 mL烧杯中。往烧杯中倒入10 mL蒸馏水,用玻璃棒仔细搅拌,使试样完全润湿后再倒入90 mL蒸馏水并在烧杯外壁标出液面高度。置烧杯于电炉上煮沸后,有水蒸气散发后持续5~10 min(在过程中,不断搅拌并补充蒸失的水量),取下,冷却到室温。用pH值计测定冷却后的悬浮液的pH值。

#### 1.3.2 阳离子交换容量

阳离子交换容量的测定采用HJ 889—2017标准。将风干样品过200目筛,充分混匀。称取3.5 g混匀后的样品,置于100 mL离心管中,加入50 mL三氯化六氨合钴溶液,旋紧离心管密封盖,置于振荡器上,在20 °C条件下振荡60 min,调节振荡频率,使浸提液混合物在振荡过程中保持悬浮状态。以4 000 r/min离心10 min,收集上清液于比色管中,用紫外分光光度计测量吸光度。采用公式(1)计算样品的阳离子交换容量CEC:

$$CEC = \frac{(A_0 - A) \times V \times 3}{b \times m \times w_{dm}} \quad (1)$$

式中:CEC—样品阳离子交换容量,cmol/kg;  $A_0$ —空白试样吸光度;  $A$ —试样吸光度或校正吸光度;  $V$ —浸提液体积, mL; 3— $[\text{Co}(\text{NH}_3)_6]^{3+}$ 的电荷数;  $b$ —标准曲线斜率;  $m$ —取样量, g;  $w_{dm}$ —样品干物质含量, %。

#### 1.3.3 重金属离子去除性能

采用 $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Cr}^{3+}$ 溶液来评价样品的重金属离子去除性能。按照2.4 mg/L将沸石粉加入到100 mg/L的 $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Cr}^{3+}$ 离子溶液中,然后将混合物放在旋转速度为80 r/min的旋转混匀仪上,持续搅拌4 h。最后通过过滤收集上清液。采用ICP-AES来测定溶液中 $\text{Cd}^{2+}$ 和 $\text{Cr}^{3+}$ 的浓度。 $\text{Cd}^{2+}$ 和 $\text{Cr}^{3+}$ 的吸附容量计算见公式(2):

$$q_e = (C_0 - C_t) \times V/W \quad (2)$$

式中:  $C_0$ 和 $C_t$  (mg/L)分别为 $\text{Cd}^{2+}$ 或 $\text{Cr}^{3+}$ 的初始和最终浓度;  $V$  (mL)为水溶液的体积;  $W$  (mg)为吸附剂的质量。

#### 1.3.4 水蒸气和甲醛气体吸附性能

水蒸气的吸附:将0.5 g在60 °C下真空干燥12 h后的沸石粉置入30 °C恒温恒湿箱(BPS-50CL,上海一恒科学仪器有限公司)中,70%的湿度下保持12 h,分别称量样品吸附前后质量的变化,计算吸附容量。甲醛气体的吸附:将0.5 g在60 °C下真空干燥12 h后的沸石粉置入放入有2 mL的甲醛溶液的干燥皿中,72 h后记录样品吸附前后质量的变化,计算吸附容量。吸附容量 $Q$ 计算见公式(3):

$$Q = \frac{m_e - m_0}{m_0} \quad (3)$$

式中,  $m_0$ 和 $m_e$  (g)分别为吸附前后的样品质量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 沸石的组成结构分析结果

表1是三种天然沸石的XRF分析结果,表明三种沸石主要含 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{TiO}_2$ 和 $\text{CaO}$ 等。Z1、Z2和Z3样品中 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 的含量分别为87.41%、89.75%和85.22%,三种样品的 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 质量比分别为6.4、6.6和6.3。Z3样品中 $\text{CaO}$ 含量明显高于其他两个样品。表2显示三种天然斜发沸石中含有一定量的重金属 $\text{Cd}$ 、 $\text{Cr}$ 、 $\text{As}$ 、 $\text{Pb}$ 和 $\text{Hg}$ ,三种天然沸石中重金属的含量有所不同,样品中 $\text{Cr}$ 和 $\text{Pb}$ 的含量相对高于其他重金属。

表1 三种天然沸石的化学组成 /%

氧化物	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{MgO}$	$\text{TiO}_2$	$\text{CaO}$	Others
Z1	75.61	11.8	4.09	0.911	1.47	1.17	0.199	4.41	0.34
Z2	77.89	11.81	3.37	0.838	1.89	0.853	0.146	2.92	0.283
Z3	73.57	11.65	3.0	0.697	1.57	1.27	0.209	6.77	1.264

表2 三种天然沸石的重金属元素含量 / (mg·kg<sup>-1</sup>)

样品	Z1	Z2	Z3
镉 (Cd)	1.25	2.32	1.92
铬 (Cr)	26.3	30.55	30.15
铅 (Pb)	16.9	52.9	18.4
砷 (As)	12.15	9.2	19.1
汞 (Hg)	0.66	0.44	0.38

图1(a)是三种天然沸石的XRD图谱,可以看出三种样品主要含斜发沸石、石英及方解石。结合XRD特征峰强度可知,Z2样品中石英和方解石的含量相对较低;Z3样品中石英、方解石的含量相对较高,这与XRF的结果一致。图1(b)是三种沸石的TG-DTG曲

线, Z1、Z2 和 Z3 室温~1 000 °C 范围内的失重量分别为 8.08%、7.49% 和 9.09%。三种样品在 78.0~100.5 °C 左右的失重峰对应于吸附水的蒸发, 在 628.5 °C 左右的失重峰对应于碳酸盐的分解<sup>[11]</sup>, 其中 Z3 样品在该处的失重峰较为明显, 这与其较高的方解石含量有关。图 1(c) 是三种沸石的 FTIR 图谱, 其中, 3 633 cm<sup>-1</sup> 处的吸收峰对应于 Si-O(H)-Al 键的伸缩振动, 1 051 cm<sup>-1</sup>

对应于 T-O 键(T=Si 和 Al)的伸缩振动, 1 639 cm<sup>-1</sup> 对应于 O-H 键的变角振动, 1 433 cm<sup>-1</sup> 对应于 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 中 C-O 键的伸缩振动<sup>[12]</sup>; 其中 Z3 样品中 C-O 键的特征峰强度明显强于其他两个样品, 这主要是由于该样品中含有较多方解石所致。图 1(d) 的粒度分布测试结果显示, Z1、Z2 和 Z3 样品的 d<sub>50</sub> 分别为 14.097 μm、7.157 μm 和 20.786 μm, 颗粒粒径分布范围差异不大。

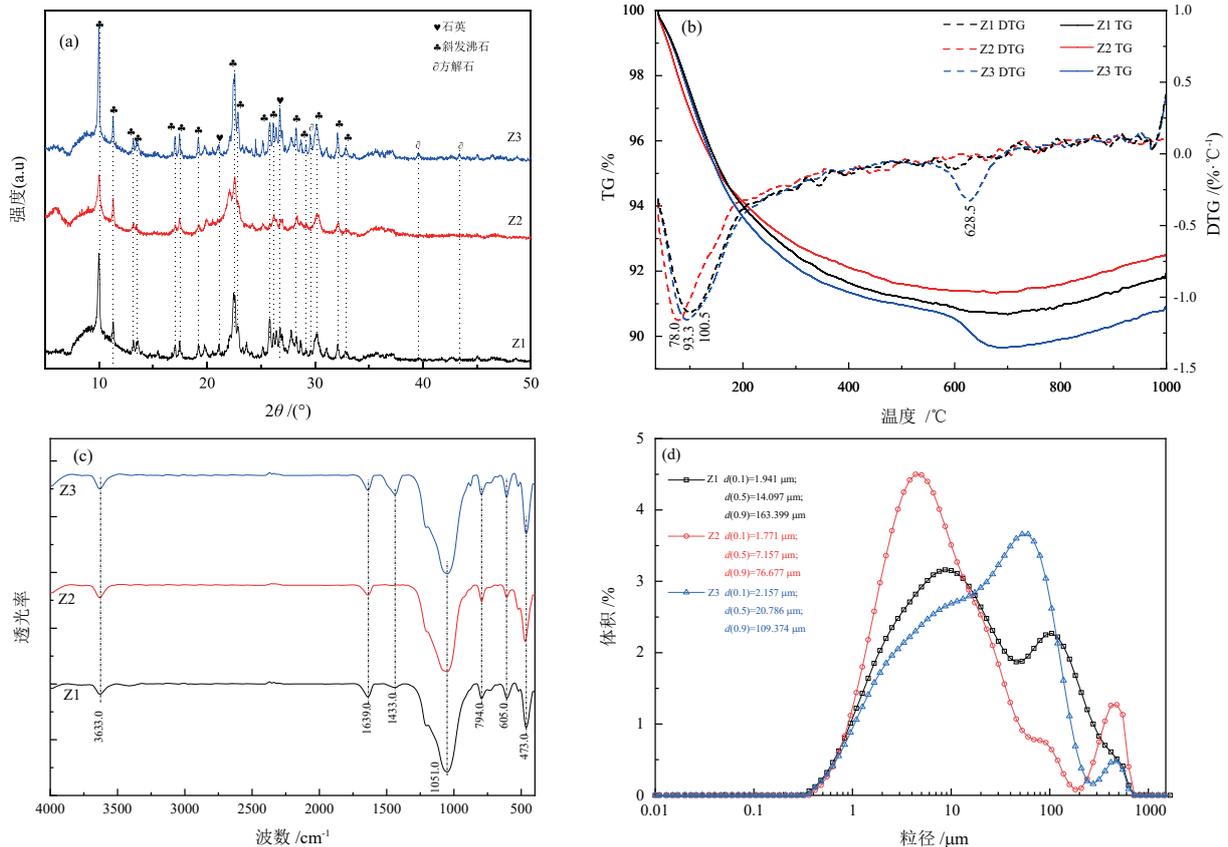


图 1 三种天然沸石的 XRD 图谱(a), TG-DTG 曲线(b), FTIR 图谱(c), 粒径分布曲线(d)  
 Fig. 1 XRD patterns of the three natural zeolites(a), TG-DTG curves(b), FTIR spectra(c), particle size distribution curves(d)

图 2 是三种天然沸石样品的 N<sub>2</sub> 吸附-脱附等温曲线图。图中显示, 等温线在低 P/P<sub>0</sub> (~0.005) 下稍有

上升, 在高 P/P<sub>0</sub> (0.7~1.0) 下出现明显的滞后环, 表明三种沸石样品均具有微孔和介孔。利用 BET 理论计算三者的比表面积, 显示 Z1、Z2 和 Z3 样品的比表面积分别为 36.8 m<sup>2</sup>/g、61.6 m<sup>2</sup>/g 和 32.8 m<sup>2</sup>/g。Z1 样品具有更高的微孔体积(0.012 285 cm<sup>3</sup>/g), Z2 样品具有更高的介孔体积(0.122 213 3 cm<sup>3</sup>/g)。结合三种样品的矿物组成、粒度和孔结构等特征, Z2 样品较高的比表面积与其杂质矿物(如方解石)含量少、颗粒粒径相对较小和介孔体积相对较高有关。

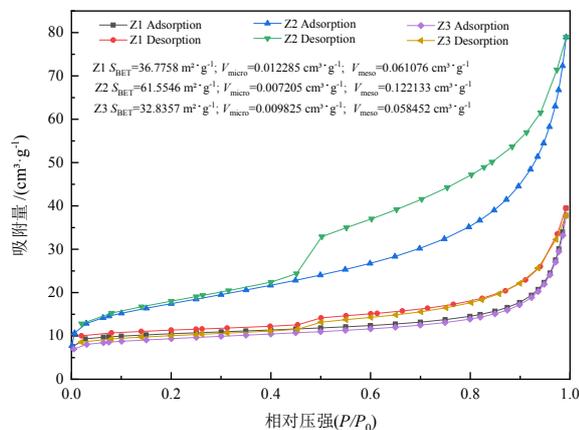


图 2 三种天然沸石的 N<sub>2</sub> 吸附-脱附曲线  
 Fig. 2 N<sub>2</sub> adsorption-desorption curves of the three natural zeolites

图 3 是三种天然沸石的 SEM-EDS 测试结果, 可以看出, 天然沸石颗粒呈不规则状, 三种样品颗粒形貌差别不大; 表面主要元素为 Si、Al、K、Ca、Na、Mg 和 O 等, 与 XRF 分析结果一致。

## 2.2 天然沸石的性质分析

采用 JC/T 2270—2014 标准测试得到 Z1、Z2 和

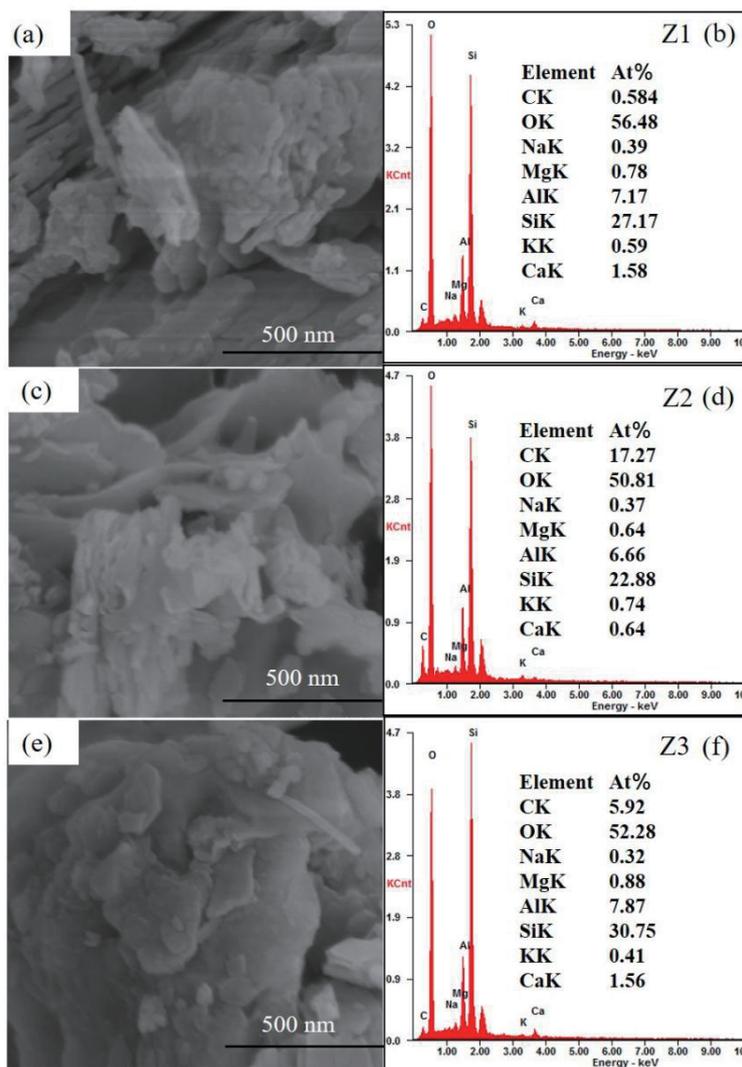


图 3 三种天然沸石的 SEM 照片(a, c, e)和 EDS(b, d, f)能谱

Fig. 3 SEM (a, c, e) images and EDS spectra(b, d, f) of the three natural zeolites

Z3 样品的 pH 值分别为 8.6、8.05 和 8.74。采用 HJ 889—2017 标准测得 Z1、Z2 和 Z3 样品的阳离子交换容量分别为 4.95 cmol<sup>+</sup>/kg、21.5 cmol<sup>+</sup>/kg 和 5.85 cmol<sup>+</sup>/kg。

图 4 为三种天然沸石对 Cd<sup>2+</sup>、Cr<sup>3+</sup>、水蒸气和甲醛气体的吸附效果。从图中可以看出, Z2 样品对 Cd<sup>2+</sup> 的吸附容量为 14.89 mg/g, 明显高于 Z1 和 Z3 样品的 4.73 mg/g 和 6.67 mg/g; Z1、Z2 和 Z3 样品对 Cr<sup>3+</sup> 的吸附容量相差不大, 分别为 6.21 mg/g、6.65 mg/g 和 7.37 mg/g(这可能与三种样品较高含量的 Cr 有关, 见表 2)。Z2 样品对水蒸气和甲醛气体的吸附容量分别为 21.33 mg/g 和 7.12 mg/g, 高于 Z1 样品的 6.26 mg/g 和 3.03 mg/g 以及 Z2 样品的 9.46 mg/g 和 2.15 mg/g。

综上所述可以看出, 三种天然沸石样品的 pH 值、阳离子交换容量、重金属离子、水蒸气和甲醛气体的吸附效果等性质存在一定差异。其中, Z2 样品的阳离子交换容量相对较高, 且表现出更高的重金属离子、水蒸气和甲醛气体吸附性能。结合三种沸石矿的组成和结构特征, 三者性质的差异主要与其杂质矿物(如

方解石)含量、颗粒粒度分布、比表面积和孔结构特征等的差异有关; 其中, 样品的比表面积和介孔体积对其吸附性能贡献较大。因此, 在天然斜发沸石的实际应用中, 应对其组成、结构和性质等特征进行分析, 进而针对性地筛选合适的样品。同时, 还应采用多种手段(如粉碎、分级、除杂、脱硅/铝、表面修饰、水热改性、功能化改性)对天然斜发沸石矿进行改性和结构调控等, 进而提升其性能和实际应用效果。

### 3 结论

选取河北一处和辽宁两处天然斜发沸石矿, 研究并对比了三种天然沸石的组成、结构、pH 值、阳离子交换容量以及重金属离子、水蒸气和甲醛气体的吸附效果。结果表明:

(1) 三种天然沸石样品的化学组成主要为 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO、TiO<sub>2</sub> 和 CaO 等, 样品中均含有一定的重金属 Cd、Cr、As、Pb 和 Hg。

(2) 三种天然沸石样品的矿物组成主要为斜发沸

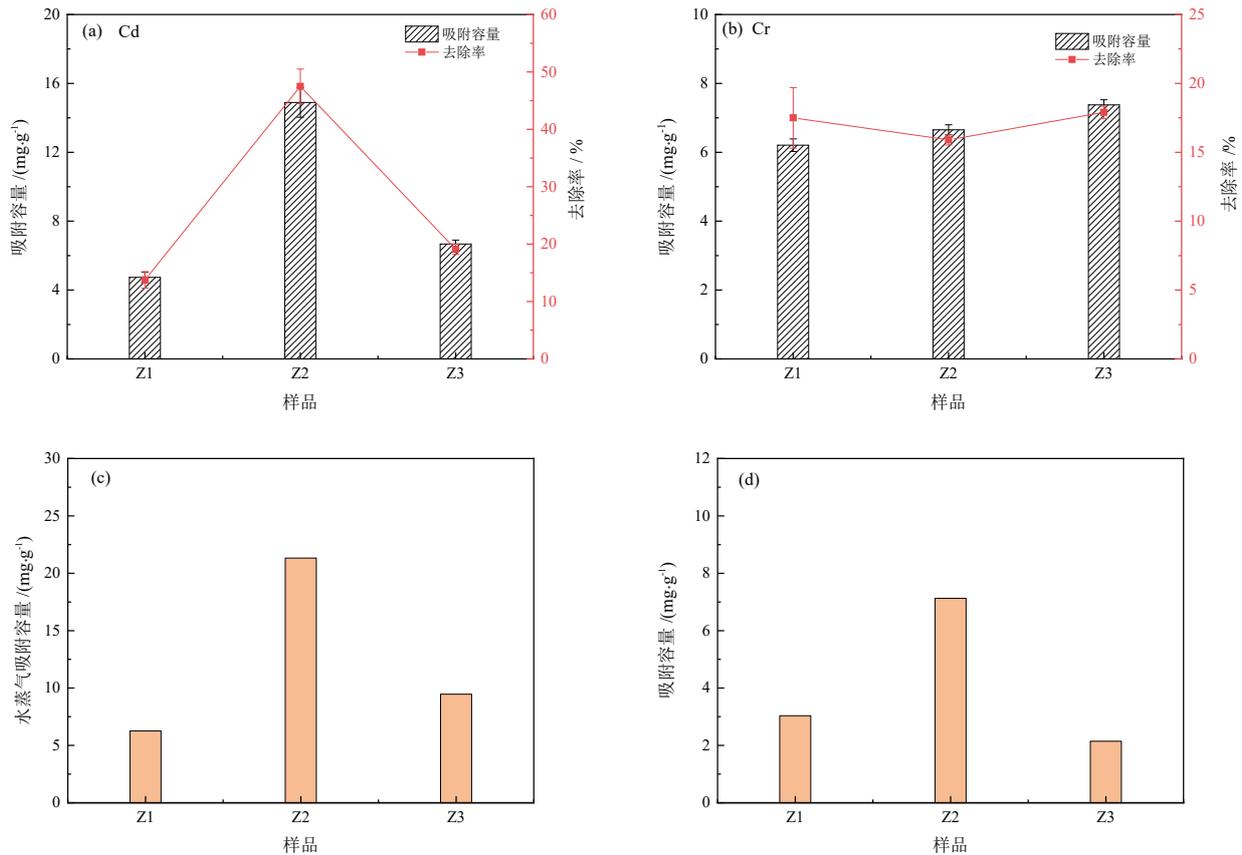


图4 三种天然沸石对Cd<sup>2+</sup>(a)、Cr<sup>3+</sup>(b)、水蒸气(c)和甲醛气体(d)的吸附效果  
 Fig. 4 Adsorption efficiencies of the three natural zeolites on Cd<sup>2+</sup>(a), Cr<sup>3+</sup>(b), water vapor(c) and formaldehyde gas(d)

石、石英和方解石。Z1、Z2 和 Z3 样品的比表面积分别为 36.8 m<sup>2</sup>/g、61.6 m<sup>2</sup>/g 和 32.8 m<sup>2</sup>/g, pH 值分别为 8.6、8.05 和 8.74, 阳离子交换容量分别为 4.95 cmol<sup>+</sup>/kg、21.5 cmol<sup>+</sup>/kg 和 5.85 cmol<sup>+</sup>/kg。

(3) Z1、Z2 和 Z3 样品对 Cd<sup>2+</sup> 的吸附容量分别为 4.73 mg/g、14.89 mg/g、6.67 mg/g, 对 Cr<sup>3+</sup> 的吸附容量分别为 6.21 mg/g、6.65 mg/g 和 7.37 mg/g, 对水蒸气的吸附容量分别为 6.26 mg/g、21.33 mg/g 和 9.46 mg/g, 对甲醛气体的吸附容量分别为 3.03 mg/g、7.12 mg/g 和 2.15 mg/g。Z2 样品良好的吸附性能与其较高的比表面积、介孔体积和阳离子交换容量等密切相关。

参考文献:

[1] 王程, 于佳乐, 冯锴, 等. 天然斜发沸石水热转化Na-P沸石及其吸附性能的研究[J]. 矿产保护与利用, 2021, 41(6): 96-102.  
 WANG C, YU J L, FENG K, et al. Hydrothermal conversion of natural plagioclase zeolite to Na-P zeolite and its performance in adsorption of Cd<sup>2+</sup>[J]. Conservation and Utilization of Uineral Resources, 2021, 41(6): 96-102.

[2] 余振宝. 沸石加工与应用: 第2版[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.  
 YU Z B. Zeolite processing and applications: 2nd edition[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013.

[3] FILIPPOUSI M, TURNER S, KATSIKINI M, et al. Direct observation and structural characterization of natural and metal ion-exchanged HEU-type zeolites[J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2015, 210: 185-193.

[4] LI Y R, BAI P, YAN Y, et al. Removal of Zn<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, and Cu<sup>2+</sup> from aqueous solution by synthetic clinoptilolite[J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2019, 273: 203-211.

[5] ABUKHADRA M R, BASYOUNY M G, EL-SHERBEENY A M, et al. The effect of different green alkali modification processes on the clinoptilolite surface as adsorbent for ammonium ions; characterization and application[J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2020, 300: 110145.

[6] DZIEDZICKA A, SULIKOWSKI B, RUGGIERO-MIKOŁAJCZYK M, et al. Catalytic and physicochemical properties of modified natural clinoptilolite[J]. Catalysis Today, 2016, 259: 50-58.

[7] SOBUŠ N, KRÓL M, PIOTROWSKI M, et al. Conversion of dihydroxyacetone to carboxylic acids on pretreated clinoptilolite modified with iron, copper, and cobalt[J]. Catalysis Communications, 2022, 171: 106509.

[8] PAVELIĆ S K, MEDICA J S, GUMBAREVIĆ D, et al. Critical review on zeolite clinoptilolite safety and medical applications in vivo[J]. Frontiers in Pharmacology, 2018, 9: 1350.

[9] TZANAKAKIS V A, MONOKROUSOS N, CHATZISTATHIS T. Effects of clinoptilolite zeolite and vermiculite on nitrification and nitrogen and phosphorus acquiring enzymes in a nitrogen applied agricultural soil[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2021, 21(4): 2791-2802.

[10] VAIČIUKYNIENĖ D, BALEVIČIUS G, VAIČIUKYNAS V, et al. Synergic effect between two pozzolans: Clinoptilolite and silica gel by-product in a ternary blend of a Portland cement system[J]. Construction and Building Materials, 2022, 344: 128155.

[11] YANG H S, CHE Y J, LENG F G. High volume fly ash mortar containing nano-calcium carbonate as a sustainable cementitious

material: microstructure and strength development[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 1-11.

[12] WANG C, YU J L, FENG K, et al. Alkali treatment to transform

natural clinoptilolite into zeolite Na-P: Influence of NaOH concentration[J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2022, 168: 110827.

## Comparison of Compositions, Structures and Properties of Several Natural Clinoptilolite Zeolites

WANG Cheng<sup>1,2</sup>, FENG Kai<sup>1</sup>, WANG Lipeng<sup>1</sup>, DU Fuling<sup>1</sup>, YU Qianru<sup>1</sup>

1. School of Material Science and Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, Shaanxi, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Green Preparation and Functionalization for Inorganic Materials, Xi'an 710021, Shaanxi, China

**Abstract:** The natural clinoptilolite ores in China are widely distributed and rich in reserves, which are of great value for development and utilization. However, due to the difference of mineralization conditions, the composition, structure and properties of natural clinoptilolite from different places or even from different blocks in the same place have some differences, which affects its practical application. Therefore, it is necessary to investigate and compare the composition, structure and properties of natural clinoptilolite ores. The natural clinoptilolite ores from one place in Hebei (Z1) and two places in Liaoning (Z2 and Z3) were selected to study and compare their composition, structure, pH value, cation exchange capacity, and adsorption properties on heavy metal ions, water vapor and formaldehyde vapor. The results showed that the three natural zeolites were mainly composed of clinoptilolite, quartz and a small amount of calcite, and they contained SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, TiO<sub>2</sub>, CaO and a small amount of heavy metals. There were some differences in the mineral and chemical composition of the three samples. The Z2 sample showed relatively high adsorption efficiency of heavy metal ions, water vapor and formaldehyde gas, with the adsorption capacities of Cd<sup>2+</sup>, Cr<sup>3+</sup>, water vapor and formaldehyde gas for 14.89 mg/g, 6.65 mg/g, 21.33 mg/g and 7.12 mg/g, respectively, and this was related to its higher specific surface area, mesoporous volume and cation exchange capacity. This study provides some support for the selection, efficient utilization and environmental application of natural clinoptilolite ores.

**Keywords:** natural clinoptilolite; specific surface area; cation exchange capacity; water vapor; formaldehyde gas; adsorption capacity

引用格式: 王程, 冯楷, 王李鹏, 都扶岭, 于倩茹. 几种天然斜发沸石矿的组成结构及性质对比研究[J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(2): 148-153.

WANG Cheng, FENG Kai, WANG Lipeng, DU Fuling, YU Qianru. Comparison of compositions, structures and properties of several natural clinoptilolite zeolites[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(2): 148-153.

投稿网址: <http://hcbh.cbpt.cnki.net>

E-mail: [kcbh@chinajournal.net.cn](mailto:kcbh@chinajournal.net.cn)