

# 新疆气流床煤气化炉渣的特性研究及在砂质土壤改良中的应用

余蕾<sup>1,2\*</sup>, 岳蕴辉<sup>1,2</sup>, 张朝青<sup>1,2</sup>, 李慧<sup>1,2</sup>

(1.新疆维吾尔自治区矿产实验研究所, 新疆乌鲁木齐 830000;

2.新疆岩石矿物分析及工艺矿物学研究重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830000)

**摘要:**新疆气流床加压气化炉渣的主要化学成分为  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$  及残余碳, 岩相组成主要为残余碳、石英、磁黄铁矿和方镁石, 有较大的比表面积、较高的常量和微量养分。气化炉渣中的重金属质量分数较低, 满足土壤质量环境标准要求。将该气化炉渣与砂质土壤按照一定比例混合后, 土壤全盐量下降 2.8%~18.8%, 速效钾、有效磷、水解性氮、全氮等营养元素提高 5.8%~246.0%, 该气化炉渣能疏松土壤、阻断盐析、提供土壤所需的有效营养及微量元素, 可作为改良土壤的可生化基质。

**关键词:** 气化炉渣; 气流床加压; 土壤改良; 砂质土壤

中图分类号: TQ536

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2023)S2-0148-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2023.S2.029

## Study on characteristics of entrained flow pressurized gasification slag in Xinjiang and its application in sandy soil improvement

YU Lei<sup>1,2\*</sup>, YUE Yun-hui<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhao-qing<sup>1,2</sup>, LI Hui<sup>1,2</sup>

(1.Xinjiang Mineral Experimental Research Institute, Urumqi 830000, China;

2.Xinjiang Key Laboratory of Rock Mineral Analysis and Technological Mineralogy, Urumqi 830000, China)

**Abstract:** In Xinjiang, China, the entrained flow coal gasification process accounts for more than 60% of the coal gasification technology. The slag from such process contains  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  and residual carbon. The petrographic composition in the slag is mainly composed of residual carbon, quartz, pyrrhotite and periclase, which has large specific surface area, high constant and trace nutrients. In addition, the mass fraction of heavy metals in the slag is relatively low, which meets the requirements of quality environmental standards for soil. After mixing the slag with sandy soil in a certain proportion, the total salt content of the soil decreases by 2.8%–18.8%, and the content of nutrient elements such as available potassium, available phosphorus, hydrolyzable nitrogen, and total nitrogen increase by 5.8%–246.0%. The slag can loosen the soil, block salt precipitation, and provide effective nutrients and trace elements required by the soil, and can be used as a biochemical substrate for soil improvement.

**Key words:** gasification slag; airflow bed pressurization; soil improvement; sandy soil

新疆煤炭资源丰富, 预测总量大约为 21 942 亿 t, 居全国首位<sup>[1-2]</sup>。气流床气化炉因其煤种适应性强和碳转化率、有效气体积分数、冷却煤气效率高而备受关注, 是煤气化的首选技术<sup>[3-6]</sup>。新疆拥有的准东、伊犁、吐哈、库拜四大煤化工基地中, 气流床气化炉占 60% 以上<sup>[7]</sup>。

随着新疆煤化工项目的开展, 煤气化炉渣排放量急剧增加, 气化炉渣的无害化处理及二次利用是当前煤化工技术的重点创新目标。气化炉渣是煤在气化炉中完全气化后剩余的残渣, 作为煤气化的副产物, 气化炉渣产生量占整个残渣总量的 90% 以上, 但其综合利用率却低于 20%<sup>[8-9]</sup>。气化炉渣多

以堆放、填埋进行处理, 不仅造成土地侵占、扬尘污染、水及土壤污染等环境问题, 还会产生大量的处置费用<sup>[10-12]</sup>。为此, 煤气化炉渣的特性及综合利用研究逐渐受到重视<sup>[13]</sup>。

目前, 对煤气化炉渣利用主要是将其残炭分选出来, 再将其作为水泥混合料和混凝土掺合料等建筑材料使用<sup>[14-16]</sup>; 利用硫酸烧结或浓硫酸溶法等对其进行铝再生<sup>[10]</sup>; 利用煤气化炉渣无需破碎、易成浆的特点, 可与水、砂、碎石等混合制成浆状实现井下回填<sup>[17]</sup>; 对气化炉渣进行改性, 用作吸附材料处理工业废水<sup>[18-19]</sup>、染色废水<sup>[20]</sup>、吸附重金属离子<sup>[21-23]</sup>等; 利用气化炉渣的酸碱性和多孔性及有效

收稿日期: 2023-04-25; 修回日期: 2023-07-01

基金项目: 新疆煤气化炉渣的资源化利用综合研究 (XGMB201949)

作者简介: 余蕾 (1987-), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为岩石矿物分析、环境检测评价, 通讯联系人, 402969095@qq.com。

化学组分对种植土壤<sup>[24-25]</sup>、砂土等进行改良<sup>[26-27]</sup>。

笔者以兖矿新疆煤化工产生的气流床煤气化炉渣为研究对象,采用电子探针扫描电镜、X-衍射、X-荧光、傅里叶红外光谱、电感耦合等离子质谱等对气化炉渣的化学组成、物理性质、矿物成分、显微构造、红外特征等进行综合分析<sup>[25]</sup>。

## 1 实验部分

### 1.1 实验材料

#### 1.1.1 土壤

土壤来源于新疆玛纳斯荒草地土壤区,在选定的采样区域内,采样深度为0~20 cm;将采集的土样去除碎石、植物根茎等杂物后,自然风干过2 mm 尼龙筛,混匀,备用。

#### 1.1.2 气化炉渣

煤气化炉渣由兖矿新疆煤化工有限公司生产。结合炉渣的通常施用量<sup>[28]</sup>,分别称取6 kg 土壤,按照土壤质量的0.50%、1.00%、2.00%、3.00%、5.00%添加该气化炉渣,用玻璃棒充分搅拌均匀后置于培养箱中。该气化炉渣编号为YK01,空白土壤编号为TR-0,按照气化炉渣添加质量分数从小到大土壤编号为TR-1、TR-2、TR-3、TR-4、TR-5。

### 1.2 实验方法

将盛有空白土壤和添加气化炉渣的土壤培养箱于25℃室温下培养90 d,每7 d加入适量去离子水,保持实验期间土壤处于湿润状态。90 d后将各组土壤取出,用环刀取出3份原状土壤,另取土壤破碎过2 mm 筛,混合均匀,分成3份。2 mm 土壤测定pH、有效态、阳离子交换量等参数;进一步研磨至0.25 mm 测定全氮、有机质等参数;研磨至0.149 mm 测定土壤全量元素等。

### 1.3 分析测试方法

#### 1.3.1 土壤样品分析

土壤样品依照全国第3次土壤普查《土壤样品制备与检测技术规范》(试行)的要求,测定土壤饱和含水量、田间持水量、pH、有效态、全量元素等参数。环刀法测定土壤饱和含水量、田间持水量;利用S40型pH/离子电导多功能测试仪测定土壤pH;利用UV-1800紫外分光光度计测定土壤有效磷;利用BAF-4000原子荧光光谱仪测定土壤中砷;利用ICAP-6300电感耦合等离子体发射光谱仪测定土壤有效硫、速效钾、全钾、全磷等元素;利用NEXION 350电感耦合等

离子体质谱仪测定土壤金属元素;利用容量法测定土壤全氮、有机质、阳离子交换量;利用重量法测定土壤全盐。

#### 1.3.2 气化炉渣分析

利用标准套筛筛分得到气化炉渣粒度分布;利用D8 ADVANCE X射线衍射仪分析气化炉渣成分;利用JXA-8230电子探针-扫描电镜分析其表面形态;利用ASAP2020 HD88全自动微孔物理吸附分析仪测定气化炉渣的比表面积;利用Bruker Tensor II傅里叶红外光谱仪分析表面含有的官能团和化合键。

## 2 结果与讨论

### 2.1 气化炉渣特性分析

#### 2.1.1 粒径分布特点

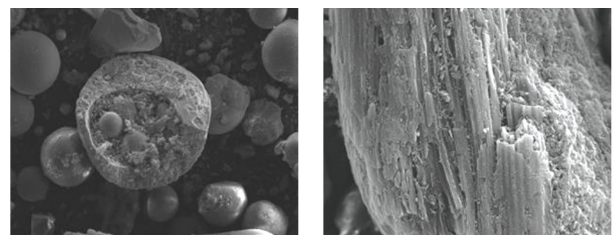
兖矿新疆煤化工有限公司采用的是多喷嘴水煤浆气流床加压气化工工艺<sup>[29]</sup>,得到的气化炉渣粒度较细、颗粒均匀,粒度在0.5~5 mm 的炉渣占71.8% (该气化炉渣编号为YK01)。这种粒度细小均匀的气化炉渣对于风沙土壤改良十分有利。该气化炉渣的粒径组成分析结果如表1所示。

表1 新疆兖矿气化炉渣粒径组成分析

粒度/mm	>10	5~10	3~5	1~3	0.5~1
w(YK01)/%	0.2	4.7	18.5	36.9	16.4
粒度/mm	0.25~0.5	0.15~0.25	0.074~0.15	0.045~0.074	<0.045
w(YK01)/%	11.9	5.9	3.5	0.9	1.1

#### 2.1.2 扫描电镜结构分析

气化炉渣的扫描电镜图如图1所示。从图1(a)中可观察到炉渣多为多孔不规则颗粒、黏结球形颗粒和孤立球形颗粒,有些球形颗粒附着于平滑大颗粒表面或存在于疏松的大颗粒内部。经能谱分析,主要元素组成为Si、Al、Fe、Ca。气化炉渣中还存在未完全燃烧的碳颗粒,从图1(b)中明显可观察到炉渣中残碳颗粒保留束状纤维状集体结构。



(a) 气化炉渣(放大270倍)

(b) 气化炉渣(放大450倍)

图1 气化炉渣扫描电镜图

### 2.1.3 X 射线衍射结构分析

将气化炉渣用玛瑙研钵细磨至 0.074 mm 后进行 X 射线衍射分析,结果如图 2 所示。从图 2 中可以看出,该气化炉渣矿物组分为石英、磁黄铁矿、方镁石。石英为高温稳定产物,来自于煤自身石英成分或高岭石高温分解产物,磁铁矿来自于黄铁矿高温产物,方镁石应为碳酸镁高温产物。

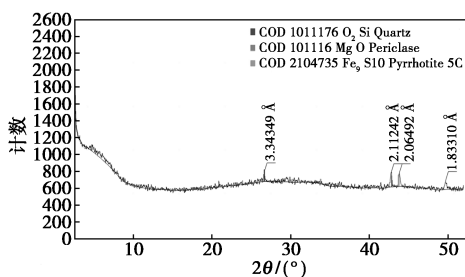


图 2 气化炉渣 X 射线衍射图谱

### 2.1.4 傅里叶变换红外光谱分析

气化炉渣的红外光谱图如图 3 所示。从图 3 中可以看出,1 021  $\text{cm}^{-1}$  处为玻璃质 Si—O 不对称伸缩振动,463  $\text{cm}^{-1}$  处为 O—Si—O 弯曲振动,还存在少量水和碳酸盐的红外吸收峰,结合扫描电镜、X 射线衍射分析结果,样品中存在大量非晶态玻璃质。

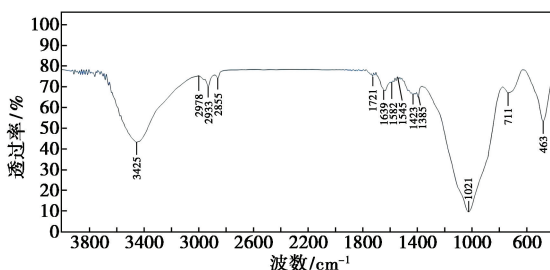


图 3 气化炉渣红外光谱图

### 2.1.5 气化炉渣成分及理化性质分析

气化炉渣成分及微量元素质量分数如表 2 所示。从表 2 中可以看出,其主要成分为  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ ,有害重金属元素质量分数不超过 GB 15618—2018《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》中规定的风险筛选值,可以作为土壤改良剂安全使用。该气化炉渣含有作物所需的大量及微量营养元素,如 P、K、Fe、Mg、Ca、B、Se 等,可以刺激作物生长,提高作物产量。气化炉渣养分及理化性质如表 3 所示。从表 3 中可以看出,该气化炉渣比表面积较大,可以起到保水作用,有效磷、水解性氮质量分数较高,可以被植物迅速利用,增加土壤肥力<sup>[30]</sup>。

表 2 气化炉渣成分及微量元素分析

参数	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	CaO	MgO	
质量分数/%	39.53	18.83	12.90	12.11	5.75	
参数	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{TiO}_2$	MnO	
质量分数/%	5.21	0.87	0.47	1.01	0.19	
参数	TC	Cd	Hg	Pb	Cr	As
质量分数/%	4.69	0.11	0.009	4.6	232	5.4
参数	Ni	Cu	Zn	Se	B	Mo
质量分数/%	55.8	56.7	17.1	0.77	188	4.63

表 3 气化炉渣养分及理化性质分析

参数	含量
pH	9.10
全盐质量分数/( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	0.91
速效钾质量分数/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	67.8
有效磷质量分数/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	11.4
全氮质量分数/( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	2.34
水解性氮质量分数/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	63.7
阳离子交换量/( $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	10.51
比表面积/( $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ )	23.51

## 2.2 气化炉渣的添加对土壤理化性质及保水能力的影响

施用气化炉渣后土壤水分及理化性质的变化如表 4 所示。从表 4 中可以看出,随着气化炉渣施用量的增加,土壤的持水能力均有显著提高,其中饱和含水量、毛管持水量和田间持水量分别增加了 11.7%~69.0%、9.7%~110.9% 和 21.6%~112.0%。土壤质地从壤质砂土逐渐转变为砂质壤土,容重也随着气化炉渣施用量的增加而降低,容重降低后土壤的通透性更加良好,有利于植物生长。由此可见,增加气化炉渣的用量可以改善土壤粒径结构、提高砂质土壤的保水能力。

表 4 施用气化炉渣后土壤水分及理化性质的变化

参数	TR-0	TR-1	TR-2	TR-3	TR-4	TR-5
沙粒质量分数/%	88.7	86.3	85.4	83.7	81.9	78.4
粉粒质量分数/%	4.1	5.9	6.7	8.9	10.3	13.1
黏粒质量分数/%	7.2	7.8	7.9	7.4	7.8	8.5
质地	砂土及壤质砂土	砂土及壤质砂土	砂土及壤质砂土	砂质壤土	砂质壤土	砂质壤土
饱和含水量质量分数/%	22.15	24.74	28.65	31.17	33.68	37.43
毛管持水质量分数/%	12.54	13.76	15.68	18.63	21.89	26.45
田间持水质量分数/%	7.19	8.74	10.06	12.36	13.62	15.24
容重/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	1.58	1.53	1.47	1.42	1.39	1.33

### 2.3 气化炉渣的添加对土壤 pH、全盐量和阳离子交换量的影响

施用气化炉渣后土壤 pH、全盐量和阳离子交换量的变化情况如表 5 所示。从表 5 中可以看出,由于气化炉渣的 pH 比土壤要高,随着气化炉渣添加质量分数的逐渐加大,土壤的 pH 稍有增加。全盐质量分数随着气化炉渣的添加降低了 2.8% ~ 18.8%。因此,施用气化炉渣可减缓表层土壤盐分累积,可用于新疆盐渍化砂质土壤的改良。

表 5 施用气化炉渣后土壤 pH、全盐量和阳离子交换量的变化

参数	TR-0	TR-1	TR-2	TR-3	TR-4	TR-5
pH	8.67	8.69	8.71	8.72	8.74	8.78
全盐质量分数/(g·kg <sup>-1</sup> )	1.76	1.71	1.65	1.59	1.52	1.43
阳离子交换量/(cmol·kg <sup>-1</sup> )	3.26	6.32	8.42	10.74	12.25	15.69

阳离子交换量是评价土壤肥力和土壤缓冲性能的主要指标,可为土壤改良和合理施肥提供依据。实验表明,阳离子交换量随着气化炉渣的添加大幅度增加,由于气化炉渣中存在大量残余碳,比表面积大,为 23.51 m<sup>2</sup>/g,有较强的阳离子交换能力,能增加土壤阳离子交换量。同时,土壤 pH 的增加也有利于阳离子交换量增加<sup>[31]</sup>。通过气化炉渣的添加,土壤中阳离子交换量由 3.26 cmol/kg 增加到 15.69 cmol/kg,土壤保肥能力由弱变为中等。

### 2.4 气化炉渣的添加对土壤养分的影响

施用气化炉渣后土壤养分的变化如表 6 所示。从表 6 中可以看出,砂质土壤施用气化炉渣后,显著提升了土壤的有效磷、速效钾、全氮、有机质和水解性氮的质量分数,较未施用气化炉渣的土壤分别提高了 26.4% ~ 246.0%、5.8% ~ 52.5%、35.3% ~ 182.4%、14.1% ~ 96.2%、32.9% ~ 162.0%。土壤中养分的提高是由于气化炉渣提高了保水能力,减少了土壤中可溶养分的流失,同时气化炉渣增强了土壤中氮的水解,从而水解性氮的质量分数大幅度提

表 6 施用气化炉渣后土壤养分的变化

参数	TR-0	TR-1	TR-2	TR-3	TR-4	TR-5
有效磷质量分数/(mg·kg <sup>-1</sup> )	2.5	3.2	4.3	5.7	7.1	8.7
速效钾质量分数/(mg·kg <sup>-1</sup> )	139	147	162	178	185	212
全氮质量分数/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.17	0.23	0.29	0.35	0.4	0.48
有机质质量分数/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.78	0.89	1.02	1.11	1.31	1.53
水解性氮质量分数/(mg·kg <sup>-1</sup> )	10.2	13.6	16.2	20.8	23.1	26.8

升。结合表 5,土壤中全氮质量分数、有机质质量分数、阳离子交换量呈正相关,有机质质量分数的增加也可导致全氮质量分数、阳离子交换量的增加。

## 3 结论

新疆气流床煤气化炉渣粒度均匀、比表面积大、组分简单,由石英、方镁石、磁黄铁矿、残余碳构成,含有钙、镁、硼、锌、硒等植物所需微量元素,有害重金属元素质量分数低。在砂质土壤中施用该气化炉渣后,加大了砂土的透气性,改善了砂土的粒径结构,显著提升了砂土的保水能力、保肥能力和养分元素,同时土壤微量元素肥力也得到提升,使得土壤的综合肥力水平得到提高。为改良砂质土壤提供了一种重要、廉价的技术途径。

气化炉渣在改良砂土时,对土壤有效磷、速效钾提升效果较低,主要原因是气化炉渣 pH 较高,一定程度上抑制了有效磷、速效钾的释放,因此,在改良砂质土壤时可适当添加脱硫石膏、有机肥等降低土壤 pH。

受实验周期限制,针对特定区域砂质土壤改良还需进行气化炉渣与其他改良剂的配比研究,对种植适合作物生长情况、作用机理等进行进一步深入、细致的实验研究。

## 参考文献

- [1] 张海峰.关于煤化工产品路线选择的探析[J].现代化工,2022,42(S2):9-11.
- [2] 孟庆鹏,岳蕴辉,杨念,等.新疆准东德士古气化炉渣特性研究[J].煤炭科学技术,2020,48(S1):226-231.
- [3] Huang Z L, Zhang P, Yang Y, et al. Acoustic emission detection of slag performance in coal gasifiers[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2020, 28: 2200-2207.
- [4] Xuan W W, Zhang Y Q, Zhang J S. Chemistry variation of slag and the layered characteristics of deposits in an industrialized entrained-flow gasifier system with radiant syngas cooler[J]. Energy, 2022, 260: 124942.
- [5] 王子元,刘世平,苗谦,等.气流床气化炉反应模式在实时优化(RTO)中的应用[J].煤化工,2022,50(1):35-39.
- [6] Lin K, Shen Z J, Liang Q F, et al. The study of slag discharge behavior of entrained-flow gasifier based on the viscosity-temperature characteristics of different types of coals [J]. Fuel, 2021, 292: 120314.
- [7] 董继勇.新疆煤化工的发展与现状[J].现代化工,2016,36(2):1-4.
- [8] Xu X W, Mo W L, Hao C X, et al. Ash composition, structural characteristics and thermal conversion performance of Texaco gasifier based on Zhundong coal [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2022, 50(7): 777-786.

- [9] 杨宏泉,孙志刚,曲江山,等.中石化典型地区气化炉渣基础性分析研究[J].洁净煤技术,2021,27(3):101-108.
- [10] 江宏伟,樊丽华,于娜林,等.生物质与煤共萃取的研究进展[J].现代化工,2022,42(S2):39-42.
- [11] Fu B, Cheng Z Y, Wang D Z, *et al.* Investigation on the utilization of coal gasification slag in Portland cement: Reaction kinetics and microstructure [J]. Construction and Building Materials, 2022, 323: 126587.
- [12] 高鹏,李庆宏,田建平,等.煤气化炉渣路面基层材料研究与应用[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2021,45(1):155-160.
- [13] 尚颖颖,王新刚,王孝妹.甘肃华亭多原料浆气炉渣的特定研究[J].煤炭与化工,2022,45(4):135-138.
- [14] 高晓甫,马建立,张剑,等.煤气化炉渣研究现状及利用技术展望[J].环境工程技术学报,2017,7(6):712-717.
- [15] Schupsky J P, Netter T, Wu G X, *et al.* Crystal morphology data for viscosity modelling of fuel slags-supplementation of spinel phase and validation by crystallisation in entrained flow gasifiers [J]. Fuel, 2021, 303: 121114.
- [16] Wang J, Kong L X, Bai J, *et al.* Characterization of slag from anthracite gasification in moving bed slagging gasifier [J]. Fuel, 2021, 292: 120390.
- [17] 刘琪,尹洪峰,汤云,等.利用煤气化炉渣制备中空陶粒及其发泡机理研究[J].煤炭转化,2020,43(4):89-96.
- [18] 董茹,陈碧.气化炉渣吸附剂的制备及其处理洗煤废水效果的研究[J].当代化工,2019,48(6):1149-1153.
- [19] 马旭东,李辉,吴锋,等.高盐废水对  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  激发煤气化炉渣基胶凝材料动力学性能的影响机理[J].材料科学与工程学报,2022,40(1):83-87.
- [20] 胡俊阳,黄阳,王维清,等.煤气化炉渣浮选精炭在染色废水中的应用[J].环境工程,2018,36(3):59-63.
- [21] Chen X Y, Hossain M F, Duan C Y, *et al.* Isotherm models for adsorption of heavy metals from water-A review [J]. Chemosphere, 2022, 307: 135545.
- [22] Chakraborty R, Asthana A, Singh A K, *et al.* Adsorption of heavy metal ions by various low-cost adsorbents: A review [J]. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 2022, 102(2):342-349.
- [23] 赵子科,陈春亮,柯盛,等.榴莲壳和不同炭材料对低汞溶液的吸附动力学[J].岩矿测试,2022,41(1):90-98.
- [24] Zhao W, Zhou Q, Tian Z Z, *et al.* Apply biochar to ameliorate soda saline-alkali land, improve soil function and increase corn nutrient availability in the Songnen Plain [J]. Science of the Total Environment, 2020, 722: 137428.
- [25] 谢邦廷,贺灵,江官军,等.中国南方典型富硒区土壤硒有效性调控与评价[J].岩矿测试,2017,36(3):273-281.
- [26] 赵炜,赵举,魏占民,等.气化炉渣改良风沙土对土壤水分物理性质的影响[J].水土保持研究,2022,29(2):64-69.
- [27] 尹春艳,赵举,刘虎,等.水煤浆气化炉渣对毛乌素沙地土壤改良与菊芋生长的促进效应研究[J].土壤通报,2021,52(6):1411-1417.
- [28] 宿俊杰,刘永兵,王鹤立,等.面向碱性农地镉污染土壤钝化的凹凸棒改性特征及效果研究[J].岩矿测试,2022,41(6):1029-1039.
- [29] Yudin A S M, Oumer A N, Roslan N M F, *et al.* Computational and experimental study on pressure drop in a fluidised bed with different air distributor designs [J]. International Journal of Automotive and Mechanical Engineering, 2020, 17(2):8043-8051.
- [30] 黄晶,孔亚丽,徐青山,等.盐渍土壤特征及改良措施研究进展[J].土壤,2022,54(1):18-23.
- [31] 刘蓉,邓茂,李莹莹,等.不同酸碱度土壤阳离子交换量的测定研究[J].中国环境监测,2020,36(1):125-130. ■

(上接第 147 页)

- [34] Lin Z, Chen Y L, Zhang X H, *et al.* Zeolites developed from mixed alkali modified coal fly ash for adsorption of volatile organic compounds [J]. Materials Letters, 2014, 119: 140-142.
- [35] Wang J, Hao J, Liu D, *et al.* Flower stamen-like porous boron carbon nitride nanoscrolls for water cleaning [J]. Nanoscale, 2017, 28: 9787-9791.
- [36] Amy-Louise J, Edward L, Orla W, *et al.* Understanding layered double hydroxide properties as sorbent materials for removing organic pollutants from environmental waters [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(4):105197.
- [37] Fu H, Yang Y, Zhu R, *et al.* Superior adsorption of phosphate by ferrihydrite-coated and lanthanum-decorated magnetite [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2018, 530: 704-713.
- [38] 宋磊,陈众,浦玉炳,等.改性粉煤灰的沉淀与吸附协同作用去除水体中磷研究[J].环境工程,2016,34(12):1-5.
- [39] Grubb D G, Guimaraes M S, Valencia R. Phosphate immobilization using an acidic type fly ash [J]. Journal of Hazardous Materials, 2000, 76(2-3):217-236.
- [40] Chen G, Shah K J, Shi L, *et al.* Removal of Cd(II) and Pb(II) ions from aqueous solutions by synthetic mineral adsorbent: performance and mechanisms [J]. Applied Surface Science, 2017, 409: 296-305.
- [41] Alqadami A A, Naushad M, Allothman Z A, *et al.* Novel metal-organic framework (MOF) based composite material for the sequestration of U(VI) and Th(IV) metal ions from aqueous environment [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(41):36026-36037.
- [42] Motsi T, Rowson N A, Simmons M. Adsorption of heavy metals from acid mine drainage by natural zeolite [J]. International Journal of Mineral Processing, 2009, 92(1-2):42-48.
- [43] Jiao C, Xiong J, Tao J, *et al.* Sodium alginate/graphene oxide aerogel with enhanced strength-toughness and its heavy metal adsorption study [J]. International Journal of Biological Macromolecules: Structure, Function and Interactions, 2016, 83: 133-141. ■