

# 气化渣粒径与添加比例对复混肥养分浸水释放的影响

南迪娜<sup>1</sup>, 刘忠义<sup>2</sup>, 索全义<sup>1\*</sup>, 朱波<sup>2</sup>, 陈颖<sup>1</sup>, 边伟<sup>2</sup>, 王瑞坤<sup>1</sup>, 惠帅帅<sup>2</sup>

<sup>1</sup>内蒙古农业大学草原与资源环境学院, 内蒙古自治区土壤质量与养分资源重点实验室, 农业生态安全与绿色发展自治区高等学校重点实验室, 内蒙古 呼和浩特

<sup>2</sup>内蒙古博大实地化学有限公司, 内蒙古 鄂尔多斯

收稿日期: 2021年10月12日; 录用日期: 2021年11月11日; 发布日期: 2021年11月18日

## 摘要

为筛选特定的气化渣粒径和气化渣与化肥的比例, 制作功能型高效气化渣复混肥, 在实验室开展浸水试验, 研究大颗粒(1.00~0.50 mm, B)、中颗粒(0.50~0.25 mm, M)、小颗粒(0.25~0.15 mm, S)气化渣粒径与气化渣添加15%、30%、45%比例对复混肥氮磷钾释放的影响。结果表明, 浸水48 h时, 与大颗粒、中颗粒相比, 小颗粒的铵态氮释放率分别降低了2.87%、0.02%, 磷素释放率分别降低了16.88%、12.46%, 钾素释放率分别降低了0.52%、0.79%。浸水48 h时, 15%处理与30%处理, 45%处理的铵态氮释放率相比分别降低了4.45%、3.93%, 磷素释放率分别降低了51.39%、24.64%, 钾素释放率分别降低了9.12%、10.01%。且15%处理的氮磷钾释放率与30%和45%处理分别相比有显著性差异。因此粒径和添加比例对复混肥养分释放都有影响。在相同气化渣添加比例(15%)下, 气化渣粒径为0.50~0.25 mm复混肥对肥料中的氮磷钾释放延缓效果比气化渣粒径为1.00~0.50 mm和0.25~0.15 mm的复混肥更好。在相同气化渣粒径(0.50~0.25 mm)下, 气化渣添加比例为15%时对养分的释放延缓效果最好, 添加比例为45%次之, 添加比例为30%最差。

## 关键词

气化渣, 复混肥, 浸水试验, 养分释放

## Effects of Particle Size of Gasification Residue and Addition Ratio on Nutrient Release of Compound Fertilizer by Immersion

Dina Nan<sup>1</sup>, Zhongyi Liu<sup>2</sup>, Quanyi Suo<sup>1\*</sup>, Bo Zhu<sup>2</sup>, Ying Chen<sup>1</sup>, Wei Bian<sup>2</sup>, Ruikun Wang<sup>1</sup>, Shuaishuai Hui<sup>2</sup>

\*通讯作者。

文章引用: 南迪娜, 刘忠义, 索全义, 朱波, 陈颖, 边伟, 王瑞坤, 惠帅帅. 气化渣粒径与添加比例对复混肥养分浸水释放的影响[J]. 农业科学, 2021, 11(11): 996-1004. DOI: 10.12677/hjas.2021.1111134

<sup>1</sup>College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Inner Mongolia Key Laboratory of Soil Quality and Nutrient Resources Laboratory of Agricultural Ecological Security and Green Development at Universities of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot Inner Mongolia

<sup>2</sup>Inner Mongolia Boda Field Chemical Co., Ltd., Ordos Inner Mongolia

Received: Oct. 12<sup>th</sup>, 2021; accepted: Nov. 11<sup>th</sup>, 2021; published: Nov. 18<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

In order to select the specific particle size of gasification slag and the ratio of gasification slag to chemical fertilizer, the functional high efficiency gasification slag compound fertilizer was prepared. The immersion test was carried out in the laboratory to study the large particles (1.00~0.50 mm, B), medium particles (0.50~0.25 mm, M), small particles (0.25~0.15 mm, S) Effect of gasification slag particle size and proportion of 15%, 30% and 45% addition of gasification slag on NPK release of compound fertilizer. The results showed that when immersed for 48 h, the release rate of ammonium nitrogen, phosphorus and potassium of small particles decreased by 2.87% and 0.02%, 16.88% and 12.46%, respectively, compared with that of large and medium particles, respectively. After soaking for 48 h, the release rate of ammonium nitrogen, phosphorus and potassium in 15% treatment decreased by 4.45% and 3.93%, 51.39% and 24.64%, respectively, compared with 30% and 45% treatment, respectively. Moreover, the NPK release rate of 15% treatment was significantly different from that of 30% and 45% treatment, respectively. Therefore, particle size and addition proportion have influence on nutrient release of compound fertilizer. Under the same proportion of gasification slag (15%), the compound fertilizer with gasification slag particle size of 0.50~0.25 mm had better retarded effect on NPK release than that with gasification slag particle size of 1.00~0.50 mm and 0.25~0.15 mm. Under the same gasification slag particle size (0.50~0.25 mm), the addition proportion of 15% gasification slag had the best delaying effect on the release of nutrients, followed by 45%, and the worst was 30%.

## Keywords

Gasification Residue, Compound Fertilizer, Immersion Test, Nutrient Release

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

气化渣是煤气化制尿素过程中产生的大量废弃副产物。将气化渣存放地表，占用大量土地资源，遇到大风天气，粉尘飞扬，污染空气；填埋地下可能造成土壤污染和水体污染等后果[1]。因此综合利用气化渣十分紧迫和必要。

气化渣包括细渣和粗渣两种[2] [3]。粗渣即浆化煤炭颗粒在气化炉高温高压条件下经熔融、激冷、凝结等流程，并由气化炉底部排渣锁斗排出的含水渣；细渣即通过气化炉顶部由粗煤气气流携出并经初步洗涤净化、沉淀得到的含水渣[4]。气化渣主要成分为 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、Fe<sub>3</sub>O<sub>2</sub> 和残余碳[5]。粗渣和细渣的理化性质有一定差异[6]。细渣中的残炭量、孔隙率都比粗渣高[7]。

目前气化渣粗渣多用于建材领域[8]。气化细渣集中在制取硅肥[9]，作为土壤改良剂[10]，改善土壤

酸性[11]、改良碱沙地[12]和制备吸附材料[13]等方面。气化渣具有和生物炭相似的多孔性，比表面积大的特点，因此气化渣也具有保水保肥和提高土壤透气性的作用。但利用气化渣多孔性、比表面积大、高吸附性和残碳含量高等特点进行复混肥料生产的研究很少，特别开展气化渣分级利用生产复混肥未见报道。因此，本研究将不同粒径气化渣按不同的比例与化肥复配，通过浸水试验，研究气化渣粒径和肥料添加量对气化渣复混肥的氮、磷、钾养分释放产生的影响，为筛选特定的气化渣粒径和气化渣与化肥的比例制作功能型高效气化渣复混肥提供技术支持。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 供试材料

供试肥料：硫酸铵、磷酸一铵、氯化钾。

供试气化渣：气化粗渣和细渣，由内蒙古博大实地化学有限公司提供，基本性质见表 1。

### 2.2. 试验设计与方法

#### 2.2.1. 试验设计

试验采用二因素三水平独立设计，二因素分别为气化渣粒径和气化渣添加比例。在气化渣粒径为 0.50~0.25 mm 时，设置三个气化渣添加比例，分别为 15%，30%，45%；在气化渣添加比例为 15%时，设置三种气化渣粒径，分别为大颗粒(1.00 mm~0.50 mm，代号 B)、中颗粒(0.50~0.25 mm，代号 M)和小颗粒(0.25~0.15 mm，代号 S)。试验共 6 个处理，每个处理 3 次重复，设 6 个取样时间(每次取样后该处理废弃)，共计 108 个处理数量。气化渣复混肥按  $N:P_2O_5:K_2O = 1:0.32:0.6$  制备，计算各种物料投入量后混合均匀，用 BY-400 荸荠式包衣机造粒。

#### 2.2.2. 试验方法

称取气化渣复混肥样品 1 g (称准至 0.01 g)，放入尼龙纱网(200 目)做成的小袋中，封口，放到盛有 200 ml 蒸馏水的烧杯中(肥水比 1:200)，用封口膜密封后将烧杯放置在  $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$  恒温箱中进行培养，分别在浸水 1 h、3 h、5 h、10 h、24 h、48 h 取样，每次取样时，将肥料包取出弃去，瓶子上下摇动使瓶内液体浓度一致，过滤液体作为备测液。

#### 2.2.3. 测定项目及方法

测定备测液中铵态氮、水溶性磷、水溶性钾。铵态氮采用流动注射分析仪[14]；水溶性磷采用钒钼黄比色法[15]；水溶性钾采用火焰光度计法[16]。根据测定结果，分别计算肥料氮磷钾不同时间点释放率。

#### 2.2.4. 养分释放率的计算公式

$$vt = \frac{wt}{w} \times 100\%$$

式中：vt—在 t 时间的释放率(%)

wt—在 t 时间内测得的复混肥的养分释放量的质量分数(%)

w—复混肥的总养分的质量分数(%)

## 2.3. 数据分析

试验数据利用 Microsoft Office Excel 2010 软件进行处理及图标绘制，用 SAS9.4 软件进行方差分析(ANOVA)和显著性检验，差异显著性水平为  $P < 0.05$ 。

**Table 1.** Basic properties of gasification slags with different particle sizes**表 1.** 不同粒径气化渣的基本性质

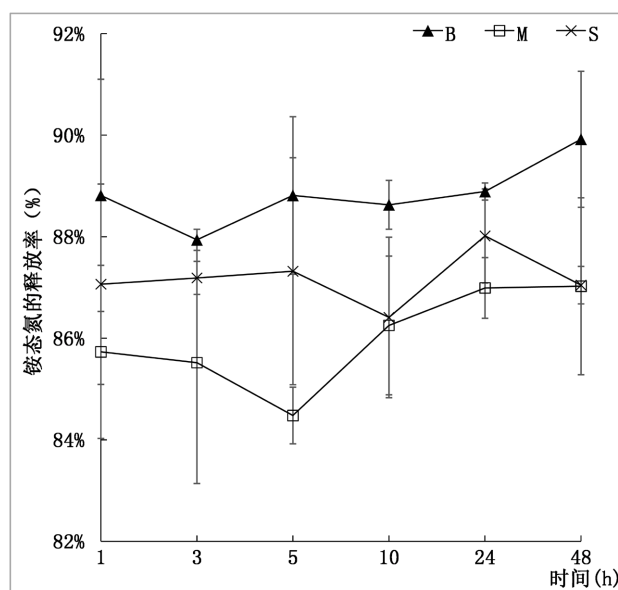
指标	粗渣(mm)		细渣(mm)	
	1.00~0.50	0.50~0.25	0.25~0.15	
碱解氮(mg/kg)	17.0	1006.2	1460.5	
有效磷(mg/kg)	9.7	301.8	402.7	
速效钾(mg/kg)	9.8	1157.5	1370.2	
全氮(g/kg)	0.25	4.22	4.90	
全磷(g/kg)	4.48	2.61	3.43	
全钾(g/kg)	10.56	5.98	8.16	
有机质(g/kg)	452.1	629.3	608.8	

### 3. 结果与分析

#### 3.1. 气化渣粒径对复混肥养分释放影响

##### 3.1.1. 不同气化渣粒径复混肥铵态氮释放动态变化特点

在气化渣添加比例为 15%条件下, 不同气化渣粒径复混肥在浸水过程中铵态氮释放率随时间的动态变化如图 1。在整个浸水试验过程中, 大颗粒粒径处理铵态氮释放率曲线一直在中颗粒粒径和小颗粒粒径处理之上, 中颗粒处理铵态氮释放曲线在小颗粒处理之下。各处理的释放率由高到低为大颗粒处理 > 小颗粒处理 > 中颗粒处理。中颗粒处理曲线在整个浸水期间呈先下降再上升最后趋于平缓趋势。5 h 时, 中颗粒处理释放率降低为 84.48%, 与大颗粒处理相比降低了 4.33%, 且在 5%水平有显著差异, 出现释放率降低与 M 处理的气化渣对铵态氮的再吸附作用有关。48 h 时, 中颗粒处理的铵态氮释放率达到 87.03%, 与大颗粒、小颗粒处理相比分别降低 2.87%, 0.02%。因此中颗粒处理的缓释效果比大颗粒和小颗粒处理更好。



注: 不同小写字母表示同一时间点不同气化渣添加比例间差异显著性( $P < 0.05$ )。下同。

**Figure 1.** Effect of particle size of gasification slag on release of ammonium nitrogen in compound fertilizer

**图 1.** 气化渣粒径对复混肥铵态氮释放的影响

### 3.1.2. 不同气化渣粒径复混肥磷素释放动态变化特点

由图 2 可知,在整个浸水试验过程中,各处理的磷素释放率曲线趋势一致,随着浸水时间的延长,释放率先增加后降低再增加。出现释放率降低与气化渣对磷酸根的再吸附作用有关。各处理的释放率由高到低为大颗粒处理>小颗粒处理>中颗粒处理,且各处理之间的释放速率在 5%水平均有显著差异。浸水 48 h 后,大颗粒、中颗粒和小颗粒处理释放率分别为 49.24%、32.36%和 44.82%,中颗粒处理释放率比大颗粒、小颗粒处理分别降低 16.88%、12.46%。相同时间内,释放率越低,它的缓释效果就越好,因此中颗粒处理对磷素的延缓释放效果较好,小颗粒处理次之,大颗粒处理最差。

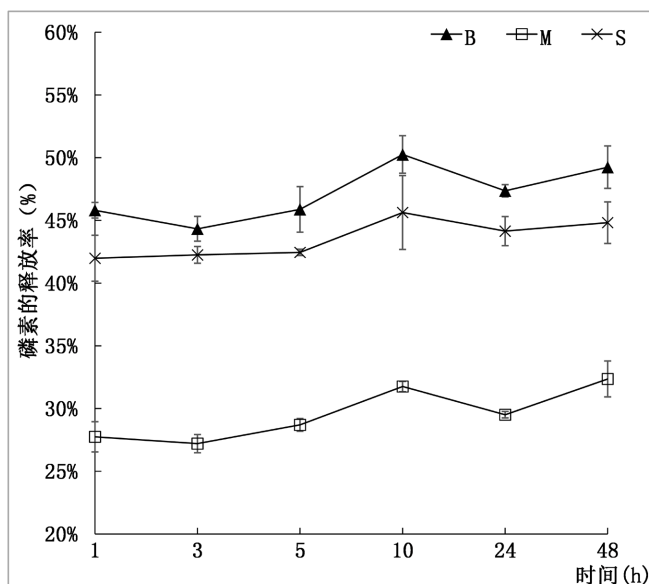


Figure 2. Effect of particle size of gasification slag on phosphorus release of compound fertilizer  
图 2. 气化渣粒径对复混肥磷素释放的影响

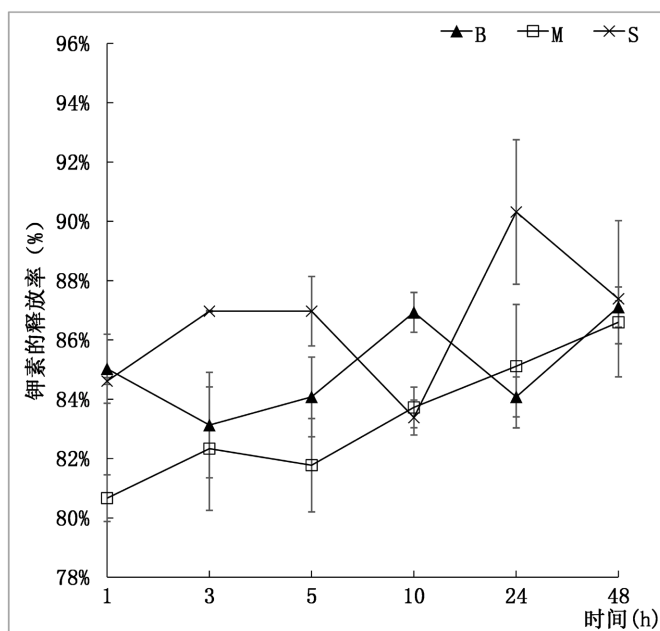
### 3.1.3. 不同气化渣粒径复混肥钾素释放动态变化特点

由图 3 可知,浸水 10 h 前,小颗粒处理的钾素释放率一直维持在较高水平,大颗粒处理的释放率居中,中颗粒处理的释放率维持在相对较低水平。48 h 时,小颗粒处理释放率降低,与大颗粒、中颗粒处理释放率几乎相等,大颗粒、中颗粒、小颗粒处理释放率分别是 87.11%、86.59%、87.39%,出现释放率降低与小颗粒气化渣对钾离子的再吸附作用有关。因此中颗粒处理的对钾素的缓释效果比大颗粒处理强,小颗粒处理最差。

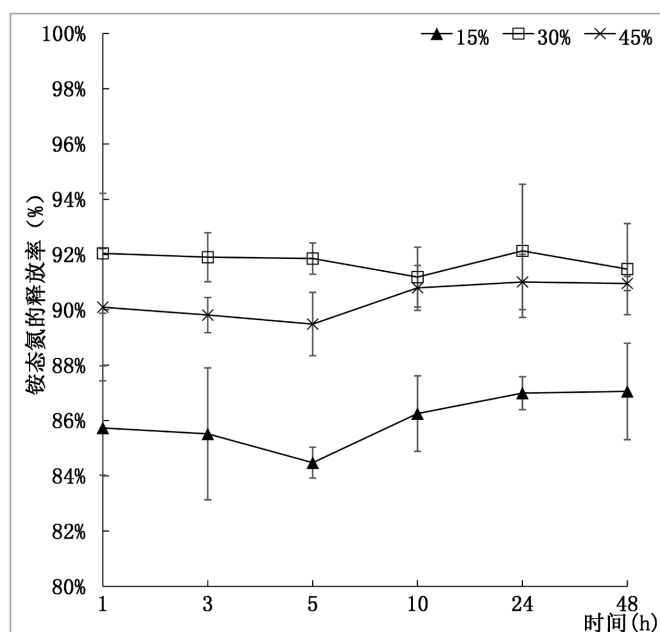
## 3.2. 气化渣添加比例对复混肥养分释放影响

### 3.2.1. 不同气化渣添加比例复混肥铵态氮释放动态变化特点

在气化渣粒径为 0.50~0.25 mm 条件下,不同气化渣添加比例复混肥在浸水过程中铵态氮释放率随时间的动态变化如图 4。在整个浸水过程中,各处理释放率由高到低为 30%处理 > 45%处理 > 15%处理。浸水 1 h 时,添加比例为 30%和 45%的处理的释放率就都达到了 90%以上,而添加比例为 15%处理的释放率低于 86%。浸水 5 h 时,15%处理的释放率降低,与 30%、45%处理相比分别降低了 7.38%、5.01%,且在 5%水平有显著差异,出现释放率降低与 15%处理的气化渣对铵态氮的再吸附作用有关。浸水 48 h 后,15%、30%、45%处理释放率分别是 87.03%、91.48%、90.96%。因此添加气化渣比例为 15%处理的复混肥铵态氮缓释效果好于添加比例为 30%和 45%的处理。



**Figure 3.** Effect of particle size of gasification slag on potassium release of compound fertilizer  
**图 3.** 气化渣粒径对复混肥钾素释放的影响



**Figure 4.** Influence of proportion of gasification residue on release of ammonium nitrogen  
**图 4.** 气化渣添加比例对铵态氮释放的影响

### 3.2.2. 不同气化渣添加比例复混肥磷素释放动态变化特点

由图 5 可知,在整个浸水过程中,30%处理的磷素释放率相对较高,45%处理的释放率居中,15%处理的释放率一直较低,各处理之间的释放率均有显著差异。在 48 h 时,15%、30%、45%处理的磷素释放速率分别为 32.36%、83.76%和 57%。因此气化渣添加比例为 15%处理对磷素的延缓释放能力比添加比例为 45%处理强,添加 30%气化渣的处理的最差。

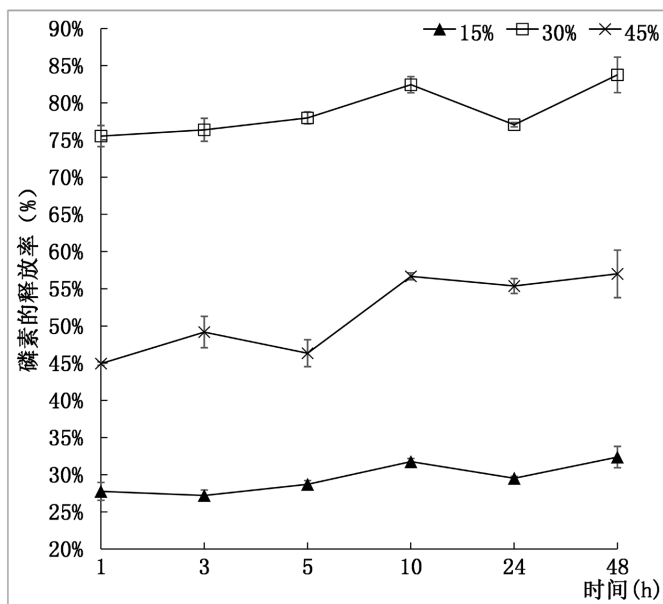


Figure 5. Effect of gasification residue addition ratio on phosphorus release of compound fertilizer  
 图 5. 气化渣添加比例对复混肥磷素释放的影响

### 3.2.3. 不同气化渣添加比例复混肥钾素累积释放动态变化

由图 6 可知，在整个浸水过程中，气化渣添加比例为 15% 处理的钾素释放率一直低于 30% 和 45% 处理。气化渣添加比例为 30% 和 45% 的处理的钾素释放率曲线变化趋势基本一致。5 h 时，各处理钾素释放率下降，这可能是气化渣对钾离子的再吸附现象。48 h 时，15%、30% 和 45% 处理释放率分别为 86.59%，95.72%，96.60%。15% 处理与 30% 和 45% 处理的钾素释放率分别降低 9.12%，10.01%。因此气化渣添加比例为 15% 处理对钾素的缓释效果更好，30% 处理次之，45% 最差。

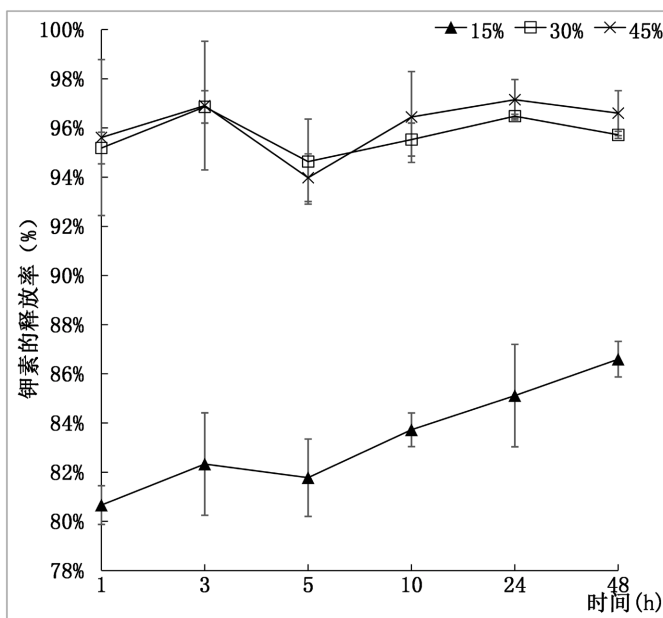


Figure 6. Effect of gasification residue addition ratio on potassium release of compound Fertilizer  
 图 6. 气化渣添加比例对复混肥钾素释放的影响

## 4. 讨论

目前研究发现, 气化渣与粉煤灰、沸石、生物炭性质有相似之处。研究表明, 粉煤灰与化肥复混施在大豆上, 可以改良土壤, 提高肥效, 增加作物产量[17]。沸石与化肥复合后, 可以延缓养分释放, 减少有效营养元素的流失, 还可以提高作物产量[18]。生物炭与化肥复配可延缓养分的释放, 可持续供给作物在生长后期对土壤中养分的需要[19]。气化渣与沙土复配有与沙地苜蓿生长[20]。本试验结果表明, 气化渣和化肥复配制成的复混肥在浸水过程中可以延缓氮、磷、钾释放速率, 这与其他研究人员关于多孔结构物质和化肥复混制成的肥料可以延缓养分释放, 延长肥效, 提高养分利用率的结论一致。

潘婵娟研究发现, 气化渣中的残碳含量, 空隙结构, 元素含量与粒径有较强的关联性[21]。盛羽静研究发现气化渣的孔隙率随粒径的变化也不同。与粗渣相比, 细渣的孔隙率比较大[7]。本研究结果表明, 随着气化渣粒径的减小, 养分释放率在相同时间降低, 说明养分释放率和孔隙率成正比关系。

有研究发现, 煤泥和化肥按一定比例复配, 可以延缓养分的释放[22]。生物炭和腐植酸在一定比例范围内复配可以提高土壤养分的有效性, 增加作物生物量[23]。还有学者发现, 在肥料中添加 20%的气化细渣, 可以提高土壤保水能力[12]。这些研究结果与本研究结果有相似之处, 均表明多孔结构的物质添加比例对复混肥养分释放有一定影响。本研究结果表明, 在相同气化渣粒径(0.50~0.25 mm)情况下, 添加 15%气化渣与化肥复配是较合适的比例。

刘大锐研究发现, 气化渣对磷酸根有良好的解吸能力和再吸附性能[24]。马超等人以气化细渣为原料制成吸附剂, 可以很好的吸附铵态氮[25]。这些研究成果表明, 气化渣对养分有一定的吸附作用。我们研究也发现, 气化渣复混肥在浸水过程中在一定的时间范围出现养分释放率降低的现象, 说明与养分再吸附有关。

## 5. 结论

气化渣粒径大小影响复混肥的养分释放。在浸水试验中, 在气化渣添加比例相同(15%)时, 气化渣粒径为 0.50~0.25 mm 的复混肥对肥料中的氮磷钾延缓效果比气化渣粒径为 1.00~0.50 mm 和 0.25~0.15 mm 的复混肥更好。因此复混肥选用 0.50~0.25 mm 气化渣更适宜。

气化渣添加比例也影响复混肥的养分释放。在气化渣粒径相同(0.50~0.25 mm)情况下, 气化渣添加比例为 15%时对铵态氮、磷素和钾素的释放延缓效果更好, 添加比例为 45%次之, 添加比例为 30%最差。因此, 气化渣添加比例为 15%时是较为适宜配比。

## 参考文献

- [1] 胡俊阳. 北方某煤气化炉渣的综合利用研究[D]: [硕士学位论文]. 绵阳: 西南科技大学, 2018.
- [2] Wu, S.Y., Huang, S., Wu, Y.Q. and Gao, J.S. (2015) Characteristics and Catalytic Actions of Inorganic Constituents from Entrained-Flow Coal Gasification Slag. *Journal of the Energy Institute*, **88**, 93-103. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2014.04.001>
- [3] Wu, S.Y., Huang, S., Ji, L.Y., Wu, Y.Q. and Gao, J.S. (2014) Structure Characteristics and Gasification Activity of Residual Carbon from Entrained-Flow Coal Gasification Slag. *Fuel*, **122**, 67-75. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.01.011>
- [4] 商晓甫, 游洋洋, 周金倩, 张诚, 朱琳, 霍宁, 马建立. 煤气化渣利用技术研究现状及应用趋势浅析[C]//中国环境科学学会. 2016 中国环境科学学会学术年会论文集(第三卷). 海口: 中共环境科学学会, 2016: 823-826.
- [5] 曲江山, 张建波, 孙志刚, 杨晨年, 史达, 李少鹏, 李会泉. 煤气化渣综合利用研究进展[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(1): 184-193.
- [6] 张婷, 于露, 李宇, 高艳鹏, 孙丽娅, 刘乐, 易汉平, 张弦. 水煤浆气化炉渣的特性分析及应用探讨[J]. 当代化工研究, 2020(19): 88-90.



- [7] 盛羽静. 气流床气化灰渣的理化特性研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 华东理工大学, 2017.
- [8] 刘开平, 赵红艳, 李祖仲, 关羽, 汤卓群, 陈骞. 煤气化渣对水泥混凝土性能的影响[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(5): 190-195.
- [9] 李宝霞, 张济宇. 无烟粉煤催化气化碱渣煅烧脱碱制取硅肥[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(11): 128-132.
- [10] 史兆臣, 戴高峰, 王学斌, 董永胜, 李攀, 于伟, 谭厚章. 煤气化细渣的资源化综合利用技术研究进展[J]. 华电技术, 2020, 42(7): 63-73.
- [11] Xu, J.Q., Yu, R.L., Dong, X.-Y., Hu, G.-R., Shang, X.-S., Wang, Q. and Li, H.-W. (2012) Effects of Municipal Sewage Sludge Stabilized by Fly Ash on the Growth of Manilagrass and Transfer of Heavy Metals. *Journal of Hazardous Materials*, **217-218**, 58-66. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.02.065>
- [12] Zhu, D.D., Miao, S.D., Xue, B., Jiang, Y.S. and Wei, C.D. (2019) Effect of Coal Gasification Fine Slag on the Physicochemical Properties of Soil. *Water, Air, & Soil Pollution*, **230**, 155. <https://doi.org/10.1007/s11270-019-4214-x>
- [13] 姚阳阳. 煤气化粗渣制备活性炭/沸石复合吸附材料及其性能研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [14] 陈晓群, 孙玉芳, 罗健航, 张学军. 农田水中铵态氮测定方法比较[J]. 宁夏农林科技, 2010(3): 26-27.
- [15] 刘振法, 郭茹辉, 张利辉, 李冬, 付翠轻. 磷钼钼黄比色法测定水处理剂中总磷含量[J]. 环境工程, 2004, 22(6): 74-75+5.
- [16] 马丽慧, 王彦华. 原子吸收火焰发射法测定水中钾离子含量[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2017, 37(7): 37-38.
- [17] 孙克刚, 黄绍敏. 大豆施用粉煤灰磁化肥最佳用量及增产效果研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2003(5): 12-13.
- [18] 夏文. 沸石与化肥制成复混肥减少无效施肥的高昂成本[J]. 化工管理, 2016(4): 53-54.
- [19] 康日峰, 张乃明, 史静, 包立, 张传光. 生物炭基肥料对小麦生长、养分吸收及土壤肥力的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2014(6): 33-38.
- [20] 刘娜, 李强, 孙利鹏, 张凯煜, 亢福仁. 增施养分对复配气化渣-沙土的激发效应研究[J]. 榆林学院学报, 2021, 31(2): 28-31.
- [21] 潘婵婵. 气流床煤气化灰渣的特性研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 华东理工大学, 2014.
- [22] 李正秋, 黄欢, 崔艳杰, 等. 利用煤泥研制具有肥效的生态缓释材料[J]. 应用化工, 2011, 40(11): 1929-1931.
- [23] 郭军康, 任倩, 赵瑾, 李永涛, 林雁冰, 丑敏霞. 生物炭与腐殖酸复配对油菜(*Brassica campestris* L.)生长与镉累积的影响[J]. 生态环境学报, 2019, 28(12): 2425-2432.
- [24] 刘大锐, 朱丹丹. 煤气化渣对磷酸根的吸附与解吸性能研究[J]. 无机盐工业, 2021, 53(2): 84-87+104.
- [25] 马超, 王兵, 樊盼盼, 严晓辉, 鲍卫仁, 常丽萍, 王建成. 煤气化渣基氨氮吸附剂的制备及吸附性能研究[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(3): 109-115.