

畜禽废水磷回收产物的磷素释放特性及肥效试验研究

邹璇¹, 王德汉^{1*}, 李亮², 马磊², 李东³, 孙永明³

(1.华南农业大学资源环境学院环境工程系, 广州 510642; 2.机科发展科技股份有限公司, 北京 100044; 3.中国科学院广州能源研究所, 广州 510640)

摘要:以畜禽废水沼气发酵液为磷回收对象,采用曝气沉淀结晶法磷回收工艺,对回收产物进行水溶性磷连续浸提试验和玉米盆栽试验,考察畜禽废水磷回收产物的磷素动态释放情况、玉米盆栽的肥效以及磷素利用情况。浸提试验表明,磷回收产物经6次浸提,水溶性磷的释放量呈缓慢下降的趋势,第6次与第1次相比只下降了1.42%,总释放量占总磷的57.97%,证明磷回收产物(RPP)具有良好的缓释性,作为肥料使用时不易被水淋失。盆栽试验表明,用RPP以不同比例代替磷酸一铵作为肥料对玉米均能起到显著的增产作用,最佳的质量替代比例为40%;RPP较磷酸一铵的地上部分和地下部分磷素利用率分别高出19.14%和2.50%,显示其具有较高的磷吸收效率。因此,从畜禽废水沼气发酵液中回收得到的磷回收产物具有较高的肥效价值,是一种节约资源、保护环境、缓解磷资源危机的新型肥料。

关键词:磷回收产物;肥效;缓释性;玉米

中图分类号:X713 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)05-1021-06

The Phosphorus Release Characteristics and Fertility of Recovery Product from the Livestock Wastewater After Digestion

ZOU Xuan¹, WANG De-han^{1*}, LI Liang², MA Lei², LI Dong³, SUN Yong-ming³

(1.College of Nature Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2.Machinery Technology Development Co., Ltd., Beijing 100044, China; 3.Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The precipitating crystallization with aeration was used to recover phosphorus from the livestock wastewater after anaerobic digestion. The release characteristics of soluble phosphorus in RPP (recovery product of phosphorus) were examined with the continuous water extraction method and a pot experiment was carried out to investigate the fertility of RPP. The results of the extraction experiment indicated that the release amount of soluble phosphorus decreased slowly when more extractions occurred; the phosphorus release amount of the sixth time extraction was only 1.42% lower than that of the first time; the cumulative release amount of phosphorus accounted for 57.97% of the total phosphorus; it proved that RPP was a good slow-released fertilizer whose nutrient was not easy to lose. The results of the pot experiment indicated that the biomass of maize all increased when RPP was used in different proportion, with monoammonium phosphate (MAP); the optimal application proportion was 40%; additionally, the absorption amount of phosphorus increased 19.14% in shoots and 2.50% in roots, respectively, when RPP was used as phosphorus fertilizer instead of MAP. In conclusion, RPP from livestock wastewater after digestion was a good phosphorus, which was beneficial to save resources, protect environment and alleviate the crisis of phosphorus.

Keywords: recovery product of phosphorus; fertility; slow-release; maize

目前全世界磷资源已严重短缺,而富含氮磷的水体带来了大规模的环境问题^[1-2],磷又是植物生长必需

的营养元素。因此,从肥料学、植物营养学角度来讲,必须高度重视正在发生的磷资源危机,应用生物技术挖掘作物对养分吸收的潜力;开发磷资源高效利用技术,研制缓释、控释肥料,提高磷肥利用率;开展中低品位磷矿粉应用研究以及从污水与动物粪便中进行磷回收已成为当前的重点研究内容^[3-6]。磷回收可以缓解环境压力,实现氮的回收和磷的利用,通过综合利

收稿日期:2010-11-29

基金项目:科技部“十一五”国家科技支撑计划重大项目(2008BADC4B04);
广东省科技计划项目(2008B030302044)

作者简介:邹璇(1987—),女,湖南常德人,硕士研究生,研究方向为
废弃物资源化利用。E-mail:zouxuanvip@foxmail.com

* 通讯作者:王德汉 E-mail:dehanwang@scau.edu.cn

用的方式解决我国复合缓释肥料缺乏等问题,其环境效益和社会效益是十分显著的。

目前磷回收的沉淀形式主要为鸟粪石、磷酸钙^[7-10]。由于磷回收产物含有鸟粪石和磷酸钙等物质,可以作为良好的缓释肥料使用或出售。近年来国内对磷回收工艺的研究已经非常深入,但对磷回收产物的应用研究还较少。国外有很多学者对磷回收产物的肥效进行了试验研究,AT Leiser 对黑麦草进行的试验表明,鸟粪石作为氮源和硝酸铵一样,比尿醛更有效;作为磷源,它优于重钙,在某些情况下其肥效是重钙的两倍。GL Bridger 等在缺镁土壤中进行的镁肥效试验表明,添加水溶性镁后马铃薯增产 20%,添加鸟粪石后增产 42%。AF Burns 的研究认为鸟粪石中的镁几乎完全能溶解在中性柠檬酸铵中,可供作物吸收利用^[11]。由此可见,磷回收产物作为缓释肥具有开发应用价值,值得进一步深入研究。

目前,对于从污水中进行磷回收后的产物在肥效方面的考察在国内还未见报道,本文通过结晶沉淀法磷回收工艺对畜禽养殖废水中的磷进行回收,并收集回收产物开展肥效试验,主要通过磷素动态释放试验和玉米盆栽试验来考察磷回收产物的肥效,为磷回收工艺在农业上的发展提供科学依据,缓解磷资源危机,减轻环境问题,同时也为磷肥产业提供一条新的磷资源渠道。本文拟通过对磷回收产物开展连续浸提试验和玉米盆栽试验,考察磷素的动态释放情况,通过对玉米的增产效果和磷吸收效率的分析来综合评价磷回收产物的肥效。

1 材料与方法

1.1 磷回收产物的制备

1.1.1 供试材料

试验用水取自广州市某大型畜禽养殖厂,以其废水经厌氧消化处理后的发酵液为磷回收对象。其主要性质如下:pH7.27,总磷(TP)、 PO_4^{3-} 、 NH_4^+ -N 含量分别为 75.36、67.67、138.15 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,化学需氧量(COD_Cr)、生化需氧量(BOD_5)分别为 968.8、93.6 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 浓度分别为 107.41、35.98 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

1.1.2 试验装置

本试验进行磷回收的装置为流化床结晶絮凝反应器(CFR)。装置由有机玻璃制成,分为进水与进样区、结晶絮凝反应柱、出水与回流区、曝气机、恒流泵等主要部分,容积约为 3 L,有效容积 2.7 L。其结构示意图见图 1。

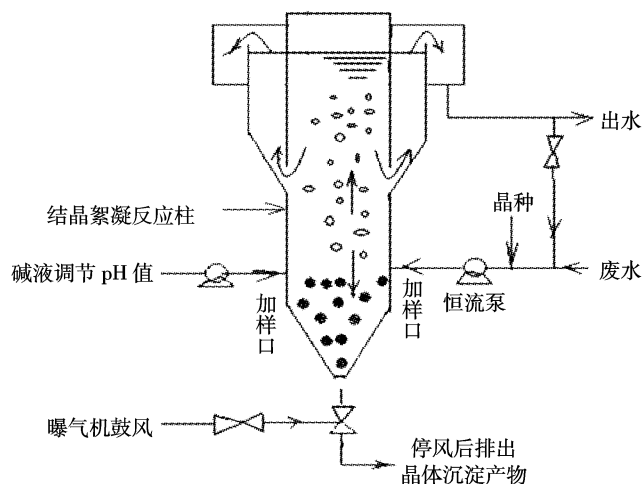


图 1 结晶絮凝反应器(CFR)结构图

Figure 1 Structural diagram of the crystallizing and flocculating reactor(CFR)

反应器根据传统的磷回收结晶反应器改进,废水通过恒流泵控制流速从反应柱中下部泵入,以黏砂块作为微孔曝气头曝气,玻璃转子流量计调节曝气强度实现吹脱 CO_2 与搅拌。反应器内沼液的 pH 值会随曝气时间逐渐升高,达到磷酸铵镁和磷酸钙的沉淀条件、产生结晶沉淀,底部设有开口收集沉淀产物^[12]。

1.2 磷回收产物水溶性磷的连续浸提试验

1.2.1 供试材料

过磷酸钙,有效磷含量(P_2O_5)14.05%;磷回收产物(recovery product of phosphorus, RPP),收集反应器底部的沉淀物风干磨碎过 60 目筛,RPP 基本性质见表 1。

表 1 RPP 的基本性质

Table 1 Basic characteristics of RPP

pH 值	全氮(N)	全磷(P_2O_5)	全钾(K_2O)	镁(Mg)	钙(Ca)
9.03	1.83%	22.65%	3.46%	4.11%	6.28%

1.2.2 研究方法

对 RPP 进行水溶性磷浸提试验,并以过磷酸钙作为对比。按等重量称取 0.5 g 样品放入 100 mL 离心管中,准确加入蒸馏水 50 mL,拧紧瓶塞,摇匀,在振荡机(速率为 $180\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$)上振荡 30 min。然后用离心机(转速为 $3\,500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$)离心 10 min,小心取出上清液,即得滤液 1;剩下样品留在离心管中再次加入蒸馏水 50 mL 浸提,摇匀,振荡 30 min,以相同转速离心 15 min,小心取出上清液,即得滤液 2。用相同的方法浸提 6 次,共得到 6 份滤液。每次处理 3 个重复。采用钼锑抗比色法测定滤液中水溶性磷的含量^[13]。过磷酸

钙的浸提及测定方法同上。

1.3 磷回收产物的玉米肥效试验

1.3.1 供试材料

(1)土壤

赤红壤上发育的水稻土,0~20 cm 的耕层,自然风干过 4 mm 筛后用于盆栽。土壤基本理化性质见表 2。

表 2 供试土壤的基本性质

Table 2 Basic characteristics of experimental soil							
pH	有机质/ g·kg ⁻¹	全量/g·kg ⁻¹			有效成分含量/mg·kg ⁻¹		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
6.08	16.24	0.89	0.98	0.38	78.36	24.63	122.26

(2)作物

糯玉米,华农 2009。

(3)肥料

磷酸一铵(有效磷 48.5%,以 P₂O₅ 计)、尿素(含氮 46.0%,以 N 计)、氯化钾(有效钾 60%,以 K₂O 计)、过磷酸钙(有效磷 14.05%,以 P₂O₅ 计)、钙镁磷肥(含磷 14.6%,以 P₂O₅ 计)、磷回收产物。

1.3.2 试验方法

(1)试验设计

为了考察磷回收产物的肥效价值,将结晶产物以一定比例(质量)代替磷酸一铵,开展盆栽试验。试验设计如表 3 所示。

表 3 磷回收产物玉米盆栽试验方案

Table 3 Scheme of the pot experiment using RPP		
处理编号	施肥种类	肥料用量
CK	不施磷肥	—
T1	100%磷酸一铵	磷酸一铵 0.65 g
T2	20% RPP + 80%磷酸一铵	0.13 g RPP + 0.52 g 磷酸一铵
T3	40% RPP + 60%磷酸一铵	0.26 g RPP + 0.39 g 磷酸一铵
T4	60% RPP + 40%磷酸一铵	0.39 g RPP + 0.26 g 磷酸一铵
T5	80% RPP + 20%磷酸一铵	0.52 g RPP + 0.13 g 磷酸一铵
T6	100% RPP	0.65 g RPP

试验设 7 个处理,每个处理 4 次重复,各处理肥料用量如表 3 所示。所有处理的肥料均以基肥形式施入,氮和钾施用量相同,按照 150 mgN·kg⁻¹ 土、120 mgK₂O·kg⁻¹ 土的标准,用尿素和氯化钾补充 N、K 至相同水平。盆栽于 2009 年 11 月 3 日播种,每盆装土 4 kg,播种发芽玉米 4 株,一周后定植为 3 株。采用相同的管理方法,随机排列盆栽,灌水相同,减少人为因素对试验的影响。12 月 23 日收获,生长期为 51 d。收获时分别取植株地上和地下部称鲜重和干重,测量株

高和茎粗。样品取回后及时在 105 ℃烘 2 h 进行杀青处理,减少因酶的作用导致植株样品的变化。按照 5 点取样法取各盆土样,风干后过 100 目筛待测。

(2)测定项目及方法

磷回收产物的全氮全磷全钾采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,分别用全自动定氮仪、钼锑抗比色法和火焰光度计法测定。将产物经 1%的稀盐酸溶解后采用 GB 11905—1989 方法测定钙镁含量。植株全磷均用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,钒钼黄比色法测定。土壤有效磷采用 0.05 mol·L⁻¹HCl-0.025 mol·L⁻¹(1/2H₂SO₄)法^[13]测定。

(3)数据分析方法

采用 Microsoft Excel 和 SAS9.0 软件进行统计,并通过 Duncan 检验进行分析。

2 结果与分析

2.1 磷回收产物的磷素释放动态分析

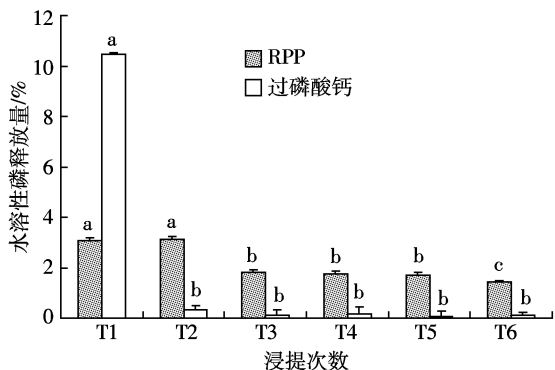
如图 2 所示,在水溶性磷浸提试验中,磷回收产物经蒸馏水连续浸提 6 次,滤液中磷含量总体呈下降趋势,且每次浸提出的含量变化不大,前两次浸提水溶性磷含量之间没有差异,后 4 次之间没有差异,第 6 次与第 1 次相比只下降了 1.42%,连续浸提 6 次的水溶性磷总量为 13.13%,占总磷的 57.97%。证明磷回收产物的水溶性磷具有良好的缓释性,作为肥料使用时不易被水淋失。而过磷酸钙的释放速度明显很快,第一次释放 10.48%,之后依次为 0.35%、0.12%、0.16%、0.08%、0.13%,可以明显看出无缓释性。由于磷回收工艺是在碱性条件下完成的,回收产物的 pH 值为 9.03,在碱性及中性条件下难溶,在酸性或弱酸条件下较易溶。因此,在南方地区的酸性土壤中施用可以达到较高的磷释放率,可以避免水溶性磷释放太快造成早期磷元素过剩,而后期磷元素含量偏低的现象,有利于作物对磷素的需求。

综合分析,磷回收工艺不仅可以回收磷资源,而且产物具有良好的缓释性能,作为肥料使用可以降低因作物浇灌而导致的养分淋失和对环境造成的污染,是一种环境友好的新型肥料。

2.2 玉米盆栽试验结果分析

2.2.1 玉米盆栽的生物量及长势

表 4 为施用 6 种不同肥料的 6 个处理 T1 至 T6 及不施磷肥的 CK 处理在玉米生长 51 d 后收获的每盆生物量的均值数据。从地上和地下部分生物量的鲜重及干重数据来看,施加磷酸一铵的 T1 处理均为最



注:所有数据均作 3 个重复,进行标准偏差分析,对 RPP 和过磷酸钙分别进行差异显著性分析(Duncan 法, $P=0.05$)。

图 2 水溶性磷释放的动态变化
Figure 2 Dynamic variations of soluble phosphorous

高,按不同比例用磷回收产物替代磷酸一铵的 T2 处理至 T6 处理其各项生物量均小于 T1,但地上生物量鲜重方面 T2、T3 处理与 T1 处理并没有显著差异,证明在以 40%的 RPP 代替磷酸一铵时其肥效可以达到施用 100%磷酸一铵的效果。其中施用 100%RPP 的 T6 处理在地上部分鲜重、干重及地下部分鲜重、干重分别较 CK 提高了 25.17%、24.05%、27.69% 和 15.97%,也能达到良好的增产效果。T4 处理生物量明显较低,与其他处理存在显著差异,其原因可能是 T4 处理的玉米在生长过程中出现了黄叶现象,导致玉米生长不正常而生物量偏低。

玉米盆栽试验中植株的长势如表 5 所示。在株高方面,T1 至 T6 各处理相对于 CK 均有显著提高,增高幅度均在 30%以上。从数据分析来看,T1 与 T2、T3、T4、T5、T6 处理之间均无显著差异。在茎粗方面,6 个处理较 CK 也均有显著的增粗效果。表明施用以不同比例的磷回收产物 RPP 代替磷酸一铵对玉米生长起到了显著的促进作用。

综上可见,用 RPP 以不同比例代替磷酸一铵作为肥料在生物量上均能起到显著的增产作用,证明本实验中采用结晶沉淀法从畜禽废水沼气发酵液中回收下来的产物对玉米生长促进作用明显,且能在一定程度上达到化学肥料磷酸一铵的肥效效果,可以按一定的质量比例替代化学肥料施用。试验证明磷回收产物最佳的质量替代比例为 40%。相对于化学肥料,这种从废水中进行磷资源回收后得到的新型肥料在资源节约、环境保护、生态农业方面的意义重大,能够为解决磷资源危机、富营养化等问题以及磷肥产业提供一个新思路。

表 5 肥效试验的玉米长势情况
Table 5 The maize growth vigor of fertilizer efficiency experiment

处理编号	株高/cm	增高(较 CK)	茎粗(直径)/cm	增粗(较 CK)
CK	71.92±2.81d	—	0.94±0.09d	—
T1	96.89±2.54abc	34.71%	1.33±0.02a	35.88%
T2	97.78±1.31ab	35.94%	1.27±0.05a	35.79%
T3	95.83±2.87bc	33.24%	1.23±0.02ab	30.85%
T4	94.44±2.95c	31.31%	1.15±0.02c	22.56%
T5	99.58±1.73a	38.46%	1.20±0.02bc	27.66%
T6	95.67±1.16bc	33.02%	1.22±0.07ab	30.37%

2.2.2 玉米盆栽的磷素利用情况

植物对养分的吸收情况可用植物体内该养分的含量以及对土壤中该养分的吸收量来表示。植物对肥料的磷效率主要包括磷吸收率和磷利用率。由于磷在土壤中极易被固定且很难移动,吸收效率对植物更为重要,植物的磷吸收效率可用植株体内的磷含量和吸磷量来表征^[14]。本文玉米盆栽试验中植物对磷的吸收情况如表 6 所示。

在玉米地上部植株的含磷量方面,T1 至 T6 处理均显著高于不施磷肥的 CK,以不同比例的 RPP 代替

表 4 肥效试验的玉米生物量
Table 4 The maize biomass of fertilizer efficiency experiment

处理编号	生物量(鲜重)/g·pot ⁻¹				生物量(干重)/g·pot ⁻¹			
	地上部	增产	地下部	增产	地上部	增产	地下部	增产
CK	106.81±5.74d	—	16.79±3.88d	—	19.89±1.09d	—	4.07±0.88c	—
T1	146.49±5.68a	37.15%	27.32±1.30a	62.67%	28.07±1.07a	41.11%	5.87±0.30a	44.22%
T2	145.09±5.35a	35.83%	26.85±1.65a	59.88%	27.57±1.01a	38.56%	5.83±0.65a	43.24%
T3	145.00±12.0a	35.75%	24.37±1.77ab	45.08%	26.75±2.28ab	34.46%	5.45±0.77ab	33.90%
T4	122.46±6.03c	14.64%	19.46±0.56cd	15.87%	23.27±1.14c	16.95%	4.90±0.56bc	20.39%
T5	129.19±3.64bc	20.95%	25.19±4.24a	50.00%	26.73±0.69ab	34.34%	5.12±0.24ab	25.80%
T6	133.70±4.89b	25.17%	21.83±2.14bc	30.01%	25.40±0.93b	27.77%	4.72±1.14bc	15.97%

注:表中所示数值为平均值±标准误,n=4;同列数据中具有相同字母者表示无显著性差异(Duncan 法, $P=0.05$)。下同。

表 6 肥效试验的磷素利用情况

Table 6 Phosphorus using situation of fertilizer efficiency experiment

处理编号	地上部分			地下部分		
	含磷量/g·kg ⁻¹	吸磷量/mg·pot ⁻¹	磷素利用率/%	吸磷量/mg·pot ⁻¹	含磷量/g·kg ⁻¹	磷素利用率/%
CK	2.54±0.15c	50.42±1.59e	—	1.33±0.08e	5.43±0.52f	—
T1	3.29±0.09a	92.49±1.91a	23.05±0.04e	1.59±0.06a	9.33±0.31a	2.33±0.14e
T2	3.11±0.35b	85.74±1.00ab	24.47±0.28de	1.47±0.05cd	8.58±0.32b	2.45±0.53e
T3	2.98±0.12b	79.58±1.45bcd	26.56±0.76cd	1.47±0.04d	7.98±0.25c	2.66±0.63d
T4	3.10±0.34b	72.26±0.57d	29.04±0.65c	1.46±0.06d	7.15±0.18e	2.87±1.01c
T5	3.10±0.26b	82.73±1.33bc	41.78±1.72b	1.53±0.05b	7.80±0.46d	3.79±1.45b
T6	3.03±0.08b	76.84±1.06cd	52.19±1.93a	1.50±0.07bc	7.10±0.73e	4.83±1.57a

磷酸一铵的 T2、T3、T4、T5、T6 处理之间无显著差异,但都低于 T1 处理,且差异显著。T2 至 T6 处理的地上部分吸磷量也均高于 CK,低于 T1 处理。地下部植株在含磷量和吸磷量方面与地上部分的情况相同,T2 至 T6 处理均显著高于 CK,但显著低于 T1 处理。但由于 RPP 的总磷含量低于磷酸一铵,以不同比例代替磷酸一铵后肥料中磷素的施用总量也随代替比例的增大而降低,T2 至 T6 处理在含磷量和吸磷量上会不同程度的低于 T1 处理。

本文中磷素利用率为收获时植株中磷素的总量与栽种时施用磷素的总量之比。从表 6 可以看出,磷素利用率随着 RPP 比例的增加呈明显的增大趋势,其中 RPP 在地上部的磷素利用率和地下部磷素利用率分别为 52.19% 和 4.83%,而磷酸一铵分别为 23.05% 和 2.33%,RPP 较磷酸一铵分别高出 19.14% 和 2.50%,表明本试验从畜禽废水沼气发酵液中回收得到的产物具有良好的可吸收性。由于磷酸一铵属于水溶性化学肥料,在植株生长过程中极易被水淋失,造成磷素流失而使磷的利用效率大大降低^[15-17]。而本文中所用的磷回收产物 RPP 是在碱性条件下制成,其主要成分是磷酸铵镁、磷酸钙或其结晶中间产物。RPP 水溶性磷的释放情况如 2.1 试验结果所示,具有良好的缓释性能,因此其总磷含量虽然低于磷酸一铵,但磷素利用率却明显较高,减少了磷的流失。

3 讨论

目前,通过磷回收工艺制得的回收产物可以作为肥料使用已得到国内外学者的普遍肯定,也有学者提出了磷回收产物具有缓释性能的观点^[18-19]。本试验结果从磷素释放情况和对于玉米生长的肥效作用两方面,充分证明了这些观点,并且提供了参考数据。

根据有关研究,磷回收产物中的磷酸铵镁所含营

养元素在土壤中的转移性较小,植物根系可利用土壤中营养元素的半径是:磷酸根为 2.5 mm、镁离子为 5 mm。因此,沉淀物作为肥料必须施于耕作层内,植物根系能够伸及的地方,而撒施于土壤表面则肥效较差。农家肥(堆肥、厩肥)含有丰富的微生物,它们在发酵过程中,能产生大量碳酸,有利于水溶性营养元素的溶出。当以沉淀物作为肥料时,与农家肥混合作基肥,肥效更佳^[20]。

在国内关于回收产物肥效的研究较少,本文也仅在华南红壤的 51 d 玉米盆栽试验中对肥效进行了评价,对于在其他地区土壤或其他作物上的肥效价值以及继续延长种植时间来考察长期肥效和轮作时的效果等还有待进一步研究。同时将回收产物与有机肥、堆肥、厩肥等其他肥料混施是否有更好的效果也需要实际考察。

4 结论

(1)浸提试验证明了回收产物水溶性磷具有缓释特点,作为肥料使用时不易被水淋失。回收产物的总磷含量为 22.65%,经蒸馏水连续浸提 6 次,滤液中磷含量总体呈下降趋势,且每次浸提出的含量变化不大,第 6 次与第 1 次相比只下降了 1.42%。

(2)玉米盆栽试验结果表明,磷回收产物对玉米生长的促进作用明显,可以以一定的质量比例替代化学肥料施用,试验结果表明最佳的替代比例为 40%。

(3)磷回收产物较磷酸一铵的地上部分和地下部分磷素利用率分别高出 19.14% 和 2.50%,表明本文磷回收产物具有较高的磷吸收效率,且还含有钙镁等对植物生长有促进作用的微量元素,是一种能够节约资源、保护环境、缓解磷资源危机的新型肥料。今后深入开展这一领域的研究对于开拓磷肥产业资源的新渠道和解决富营养化问题都有重要意义。

参考文献:

- [1] 刘颐华. 我国与世界磷资源及开发利用现状[J]. 磷肥与复肥, 2005, 22(5):12-15.
LIU Yi-hua. Phosphorus resources at home & abroad, and the current situation of their exploitation & utilization[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2005, 22(5):12-15.
- [2] 刘 征, 胡山鹰, 陈定江, 等. 中国磷资源产业中磷元素循环的投入产出分析[J]. 清华大学学报, 2006, 1(46):6-7.
LIU Zheng, HU Shan-ying, CHEN Ding-jiang, et al. Input-output analysis of the phosphorus recycle of the Chinese phosphor industry [J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2006,1(46):6-7.
- [3] 陈利德, 王 偲. 浅议污水厂的磷回收[J]. 环境工程, 2004, 22(4):26-27.
CHEN Li-de, WANG Cai. Elementary introduction to phosphorus-recovering of sewage treatment plant[J]. *Environmental Engineering*, 2004, 22(4):26-27.
- [4] Suzuki K, Tanaka Y, Kuroda K, et al. Phosphorous in swine wastewater and its recovery as struvite in Japan[C]//International Conference for Struvite: Its Role in Phosphorus Recovery and Reuse. Cranfield University, UK, 2004.
- [5] 王建森, 宋永会, 袁 鹏, 等. 基于 PHREEQC 程序的磷酸铵镁结晶法处理工艺模型化研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(2):208-213.
WANG Jian-sen, SONG Yong-hui, YUAN Peng, et al. Modeling studies of the crystallization process of magnesium ammonium phosphate for wastewater treatment based on the PHREEQC Program[J]. *Acta Scientiae Circumst*, 2006, 26(2):208-213.
- [6] 刘可星, 郑 超, 廖宗文. 磷资源危机与磷的高效利用技术[J]. 化肥工业, 2006, 33(3):21-23.
LIU Ke-xing, ZHENG Chao, LIAO Zong-wen. Phosphate resource crisis and technology for high-efficiency utilization of phosphate[J]. *Chemical Fertilizer Industry*, 2006, 33(3):21-23.
- [7] 袁 鹏, 宋永会, 袁 芳, 等. 磷酸铵镁结晶法去除和回收养猪废水中营养元素的实验研究[J]. 环境科学学报, 2007, 27(7):1127-1134.
YUAN Peng, SONG Yong-hui, YUAN Fang, et al. Nutrient removal and recovery from swine wastewater by crystallization of magnesium ammonium phosphate[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(7):1127-1134.
- [8] Suzuki K, Tanaka Y, Kuroda K, et al. Removal and recovery of phosphorous from swine wastewater by demonstration crystallization reactor and struvite accumulation device[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(8):1573-1578.
- [9] Karapinar N, Hoffmann E, Hahn H H. P-recovery by secondary nucleation and growth of calcium phosphate on magnetite mineral[J]. *Water Research*, 2006, 40(6):1210-1216.
- [10] Le-Correa K S, Valsami-Jones E, Hobbs P, et al. Struvite crystallisation and recovery using a stainless steel structure as a seed material[J]. *Water Research*, 2007, 41(11):2449-2456.
- [11] 黄稳水. 以缓释肥形式回收石化废水中氮氮的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2004.
HUANG Wen-shui. Recovery of ammonium-nitrogen from petrochemical wastewater as a slow release fertilizer[D]. Changsha: Hunan University, 2004.
- [12] 李 亮, 王德汉, 邹 璇, 等. 曝气在沉淀法回收沼气发酵液氮磷中的作用[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1):313-318.
LI Liang, WANG De-han, ZOU Xuan, et al. Effect of aeration on crystallization technology for nitrogen and phosphorus recovery from biogas fermentative liquid[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(1):313-318.
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000:402-406.
LU Ru-kun. Analytical method of agrochemistry[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000:402-406.
- [14] 邱慧珍, 张福锁. 活化钙镁磷肥对不同磷效率基因型冬小麦生长及磷效率的影响[J]. 土壤通报, 2002, 33(4):295-299.
QIU Hui-zhen, ZHANG Fu-suo. Effects of modified calcium-magnesium phosphates on growth and phosphorus efficiency of winter wheat genotypes with different phosphorus efficiency[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33(4):295-299.
- [15] 宇万太, 姜子绍, 赵 鑫, 等. 不同施肥制度对肥料利用率的影响[J]. 土壤通报, 2009, 40(1):122-126.
YU Wan-tai, JIANG Zi-shao, ZHAO Xin, et al. Effect of different fertilization system on fertilizer utilization efficiency[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(1):122-126.
- [16] 郭 林, 罗迎娣, 袁 琳, 等. 关于提高我国化肥利用率的探讨[J]. 河南化工, 2007, 24(12):6-9.
GUO Lin, LUO Ying-di, YUAN Lin, et al. Discussion on raising chemical fertilizer utilization efficiency in our country[J]. *Henan Chemical Industry*, 2007, 24(12):6-9.
- [17] 侯云鹏, 谢佳贵, 尹彩侠, 等. 测土配方施肥对玉米产量及化肥利用率的影响[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(18):9452-9454.
HOU Yun-peng, XIE Jia-gui, YIN Cai-xia, et al. Effects of soil testing and formula fertilization on maize yield and fertilizer utilization efficiency[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(18):9452-9454.
- [18] De-Bashan L E, Bashan Y. Recent advances in removing phosphorus from wastewater and its future use as fertilizer(1997-2003)[J]. *Water Research*, 2004, 38(19):4222-4246.
- [19] Hu S W, Willey R J, Notari B. An investigation on the catalytic properties of titania-silica materials[J]. *Journal of Catalysis*, 2003, 220(1):240-248.
- [20] 江善襄, 方天翰, 戴元法. 磷酸、磷肥和复混肥料[M]. 北京: 化学工业出版社, 1999:937-949.
JIANG Shan-xiang, FANG Tian-han, DAI Yuan-fa. Phosphoric acid, phosphate fertilizer, compound fertilizer[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1999:937-949.