

生物质气化灰渣和粉煤灰的农业化学行为比较

李俊飞, 王德汉, 刘承昊, 项钱彬

(华南农业大学 资源环境学院, 广东 广州 510642)

摘要:为了开拓生物质气化灰渣农用资源化利用,对稻壳灰和粉煤灰的农业化学行为进行了比较研究. 结果表明,稻壳灰组成以物理性砂粒为主,容重为 $0.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $\text{pH} > 10.0$, 可以用作粘质酸性土壤的改良剂. 稻壳灰中全磷和有效磷的质量分数分别为 0.12% 和 $204.73 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 都大于粉煤灰, 能向土壤提供更多量的磷. 稻壳灰中水溶性硅的质量分数为 $3.71 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 远远大于粉煤灰中水溶性硅的质量分数 $0.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 在 168 h 内, 稻壳灰有效硅的释放大于粉煤灰, 灰渣中硅的释放量随时间的变化关系可以用 Freundlich 方程较好地描述. 稻壳灰对磷的吸附随溶液中磷含量的增加而增大; 稻壳灰对加入磷的固定随着含水率的增加而增加, 颗粒越小对磷的固定率越高; 稻壳灰对磷的吸附固定作用小于粉煤灰.

关键词: 生物质气化灰渣; 稻壳灰; 粉煤灰; 土壤改良剂; 农业化学行为; 复合肥

中图分类号: S143.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-411X(2007)01-0027-04

Comparison of Agrochemistry Behavior of Biological Material Steal Melt Residue and Fly Ash

LI Jun-fei, WANG De-han, LIU Cheng-hao, XIANG Qian-bin

(College of Resources and Environment, South China Agric. Univ., Guangzhou 510642, China)

Abstract: To exploit biological material steal melt residue resource in agriculture, physical and chemical properties of ashes and their agrochemistry behavior were studied. The results showed that the rice husk ash could be used as soil modifier and its bulk density was lower than that of fly ash and its pH exceeded 10.0. The mass fraction of total P and available P in rice husk ash were 0.12% and $204.73 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ respectively, which were higher than those of fly ash, so rice husk ash could supply soil with more P. The mass fraction of water-soluble Si in rice husk ash was $3.71 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, which was higher than that in fly ash. The amount of silicon released from the rice husk ash in 168 h was 1.01 times as high as that in fly ash. The releasing process of silicon in the ashes could be well described with Freundlich equation. The adsorption of P in rice husk ash increased with addition of P content, and fixation amount increased obviously by the addition of fineness and water content of ashes. The capacity of P-fixation in rice husk ash was lower than that of fly ash.

Key words: biological material steal melt residue; rice husk ash; fly ash; soil amendants; agrochemical behavior; compound fertilizer

硅对水稻、小麦、玉米、甘蔗等禾本科植物有明显的增产作用,许多国家早在 20 世纪 60 年代就开展了对硅肥的研究和使用^[1]. 生产实践中使用的硅肥主要为硅酸钠和硅酸钙等,这些原料有价格昂贵、开采不易等缺点,而应用前景比较广阔的是各种硅灰渣^[2]. 硅灰渣尽管廉价易得,但其强碱性对土壤磷有效性的影响等倍受人们关注. 杨剑红等^[3]对粉煤灰的理化性质与农业化学行为的研究表明,粉煤灰

收稿日期: 2006-03-23

作者简介: 李俊飞(1981—),男,硕士研究生;通讯作者: 王德汉(1965—),男,教授, E-mail: dehanwang@scau.edu.cn

基金项目: 广东省科技计划项目(2004B333010101)

中的有效磷含量低,对加入的磷具有较大的吸附固定作用.高明等^[4]对灰渣的化学组成特征与农业化学行为研究表明,灰渣中磷的有效性低,对加入磷具有较强的吸附固定作用,固定量随灰渣细度和含水量的增加而显著增大.灰渣无论是直接磨细施入土壤中作为硅肥,还是以灰渣为原料生产含硅多元复合肥,都必须考虑灰渣对磷的固定作用.稻壳灰渣是稻壳生物质气化发电过程中产生的生物质气化灰渣,它是一种含硅极为丰富的潜在资源,在我国年产量约为 $8.0 \times 10^7 \text{ t}^{[5]}$. 目前对稻壳灰的研究和资源化利用多局限于化工、建筑等行业,而在农业方面的研

究和利用却鲜有报道.本研究对生物质气化灰渣——稻壳灰及粉煤灰中硅的形态和有效性以及固磷特性等农业化学行为进行了测试,比较了2种灰渣在理化性质与农业化学行为方面的差异,为稻壳灰作为土壤改良剂、硅肥或制取含硅多元复合肥等方面的农用提供理论参考.

1 材料与方法

1.1 材料

稻壳灰采自江苏省某生物质能发电厂;粉煤灰采自广东某发电厂.2种灰渣的理化性状见表1.

表1 稻壳灰与粉煤灰的物理化学性质

Tab. 1 Some physical and chemical properties of ashes

样品 samples	颜色 color	容重 bulk density/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	w(水) water)/%	w/%			pH	w(全磷 total P)/%	w(全钾 total K)/%	w(有效磷 available P)/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	w(SiO_2)/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)		
				砂粒 sand	粉砂 siltp article	粘粒 viscous grain					水溶性硅 water-souble Si	无定形硅 amorphous Si	有效硅 available Si
稻壳灰 rice husk ash	黑	0.30	4.26	87.88	4.18	7.94	10.20	0.12	1.24	204.73	3.71	9.61	5.60
粉煤灰 fly ash	灰白	1.42	1.49	65.90	29.44	4.67	10.30	0.08	0.15	80.01	0.05	10.66	11.31

1.2 方法

1.2.1 灰渣中硅的释放 采用 $0.025 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 柠檬酸连续浸提法,浸提温度 30°C , $m(\text{水}):m(\text{样})$ 为 10:1,间歇振荡,每间隔 24 h,测定 1 次浸提液中硅含量(以 SiO_2 计),共测定 7 次,研究灰渣中硅的释放随时间的变化情况.

1.2.2 灰渣对磷的吸附 称取若干份过 40 目筛的灰渣 1.00 g 于塑料离心管中,分别向各个塑料管中加入磷质量浓度为 0、100、200、400、600、800、1 000、1 500 和 2 000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的溶液 10.0 mL(用 KH_2PO_4 配制),每个浓度 3 次重复,间歇振荡 24 h,离心分离,测定上清液磷质量浓度,并计算出灰渣对磷的吸附量.

1.2.3 含水量对灰渣磷固定的影响 称取过 40 目筛的灰渣 5.00 g,与尿素 0.75 g、KCl 0.75 g、 KH_2PO_4 1.00 g 混匀置于 250 mL 三角瓶中,加入去离子水,使灰渣与肥料混合后的含水量(w)分别为 200、500 和 $800 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,并设置不加去离子水的作对照(即风干状).密封瓶口,在 25°C 下放置 30 d,加入 NaHCO_3 溶液,使 NaHCO_3 的浓度为 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$,pH 8.5,浸提 30 min,测定灰渣中的有效磷^{[6]180-181},并计算灰渣对加入磷的固定率.

1.2.4 灰渣粒径对磷固定的影响 分别称取过 40、60、100 目筛孔粒径的不同灰渣样品 5.0 g,物料配比

[含水量(w)为 $150 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$]、贮存时间及有效磷浸提、测定和磷固定率计算与 1.2.3 相同,比较不同粒径灰渣对磷固定的影响.

1.2.5 分析测定方法 颗粒组成用比重计法;pH 用电极法;磷用钼锑抗比色法;钾用火焰光度法;硅用硅钼蓝比色法^{[6]203}.

2 结果与分析

2.1 灰渣中有效硅的释放规律

用 $0.025 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的柠檬酸连续浸提条件下,稻壳灰和粉煤灰中有效硅的释放动态如图 1 所示.从图 1 可见,2 种灰渣硅的释放速率都较快,释放速率在一定的时间内有较大的变化:在前 72 h 内,稻壳灰中硅的释放量占稻壳灰在 168 h 内释放总量的 53.2%,而粉煤灰占 69.46%,稻壳灰中硅的平均释放速率为 $0.65 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,而粉煤灰为 $0.83 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,表明在试验的前期,粉煤灰中硅的释放速率大于稻壳灰;随后的 96 h 里,稻壳灰中硅的平均释放速率为 $0.43 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,粉煤灰为 $0.27 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$;168 h 后 2 种灰渣的释放速率线趋于重合.在整个试验期内(168 h) SiO_2 的平均释放速率为稻壳灰大于粉煤灰,稻壳灰 SiO_2 的释放量是粉煤灰的 1.01 倍.在特定时间里稻壳灰中硅的释放量大于粉煤灰;在开始的 72 h 里,粉煤灰的硅释放量和释放速率大于稻壳灰,稻壳灰和

粉煤灰中硅的释放量占整个释放量的50%以上;在随后的96 h里,稻壳灰的硅释放量和释放速率大于粉煤灰.对有效硅释放量进行方差分析表明,试验期内稻壳灰和粉煤灰的硅释放量没有显著差异($F=0.08, P\leq 0.787$).

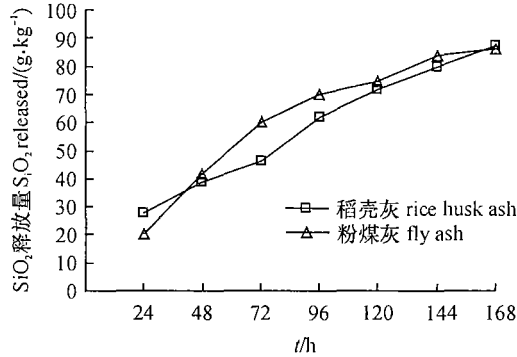


图1 灰渣有效硅(SiO_2)的累计释放量

Fig.1 The available silicon (SiO_2) released in ashes

2.2 灰渣中硅释放的动力学模型

用 Elovich 方程和 Freundlich 方程,都能很好地拟合灰渣中硅的释放,其中以 Freundlich 方程的吻合程度最好, r 分别为 0.993 1 和 0.995 7(表 2). 方程中,2 种灰渣的 k 值为粉煤灰 > 稻壳灰,表明粉煤灰中硅的释放速率快于稻壳灰; $1/m$ 的大小决定硅释放速率的变化,如 $1/m < 1$,则释放速率随时间延长而变小,相反,释放速率逐渐变大^[7]. 稻壳灰和粉煤灰的 $1/m$ 分别为 1.33、0.74,表明稻壳灰硅的释放将随时间的延长而逐渐变大,而粉煤灰则变小.

2.3 磷在灰渣中的农业化学行为

2.3.1 灰渣对磷的吸附特征

表3 灰渣对磷的吸附特征¹⁾

Tab.3 Characteristics of ashes adsorbing P

$\rho(\text{KH}_2\text{PO}_4)/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho\text{P}_{\text{平衡平衡}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$		$\rho\text{P}_{\text{吸附吸附}}/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	
	稻壳灰 rice husk ash	粉煤灰 fly ash	稻壳灰 rice husk ash	粉煤灰 fly ash
100	50.15 ± 0.45a	15.90 ± 0.10b	0.50 ± 0.01a	0.84 ± 0.00b
200	91.40 ± 1.80a	14.25 ± 0.05b	1.09 ± 0.02a	1.86 ± 0.00b
400	199.55 ± 0.13a	17.56 ± 0.10b	2.00 ± 0.04a	3.82 ± 0.00b
600	271.92 ± 0.00a	87.08 ± 1.43b	3.28 ± 0.00a	5.13 ± 0.01b
800	372.30 ± 2.25a	144.19 ± 0.72b	4.28 ± 0.02a	6.56 ± 0.01b
1000	432.21 ± 0.00a	205.43 ± 1.67b	5.68 ± 0.00a	7.95 ± 0.02b
1500	696.68 ± 17.61a	361.21 ± 0.91b	8.08 ± 0.07a	11.39 ± 0.01b
2000	915.78 ± 35.21a	578.05 ± 8.45b	10.84 ± 0.14a	14.22 ± 0.03b

1) 表中数据均为 $\bar{x} \pm \text{SE}$, $n=3$; 表中同项同行数据后字母相同者示差异不显著($P>0.05$, Duncan's 法)

2.3.2 不同粒径和含水量对灰渣固定磷的影响
从表 4 可以看出,当灰渣混合物处于风干状态时,灰渣仍有一定的磷固定率,稻壳灰为 14.96%,粉煤灰为 20.23%,此时磷的固定反应可能是发生在加入 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaHCO}_3$ 浸提剂时磷与 2 种灰渣的短

表2 灰渣中硅的释放动力学模型¹⁾

Tab.2 The kinetic model of silicon released from ashes

灰渣 ashes	Elovich			Freundlich		
	a	b	r	k	1/m	r
稻壳灰 rice husk ash	-78.92	31.375	0.968 5	1.840 5	1.33	0.993 1
粉煤灰 fly ash	-90.89	34.872	0.991 0	2.221 8	0.74	0.995 7

1) Elovich 方程为 $Q = a + b \ln t$, Freundlich 方程为 $\ln Q = \ln k + 1/m \ln t$, 其中, Q 为硅释放量/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 参数 k 代表硅释放的初速率, $r_{0.01} = 0.874$, $r_{0.05} = 0.754$, $n=7$

种灰渣对磷都具有较大的吸附量,并随加入液浓度的增加,灰渣对 P 的吸附逐渐增加,对 P 的吸附速率先缓和后增加.在不同加入液浓度下,2 种灰渣对磷的吸附量差异显著.稻壳灰渣对 P 的吸附量和吸附率小于粉煤灰,在最大试验浓度下,稻壳灰对磷的吸附量为 $10.84 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,粉煤灰为 $14.22 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$.粉煤灰颗粒表面有羟基活性基团($-\text{OH}$),以及活性 Fe、Al、Si、游离态 Ca、Mg 等均能与水溶态磷酸盐发生吸附作用,通常是专性吸附或者是化学吸附反应,磷酸盐被吸附后逐渐转化为固定态;稻壳灰由于活性 Fe、Al、游离态 Ca、Mg 等含量较粉煤灰少得多,导致其与水溶态磷酸盐发生的专性吸附或者是化学吸附不如粉煤灰强烈,且稻壳灰中含有相当量的有效磷,这些因素对稻壳灰对磷酸盐的吸附有所抑制.但低温条件下得到的稻壳灰渣,含有大量由 SiO_2 凝胶离子非紧密粘聚而形成的纳米尺度空隙,这种特殊的结构,大大增加了稻壳灰的比表面积和化学活性,使得它对磷酸盐也有较大的吸附能力.

时间湿混过程.随水分含量增加,磷固定率增加,当 $w(\text{水})$ 为 200、500、800 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,稻壳灰对磷固定率分别为 45.81%、53.98%、58.52%,粉煤灰对磷固定率分别为 72.13%、81.67%、72.13%.说明当 $w(\text{水}) < 200 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,稻壳灰和粉煤灰对磷的固定

率都随水分的增加而提高较明显. 当 $w(\text{水}) > 200 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 磷的固定率变化较小. 以灰渣为原料生产含硅多元复合肥时, 应充分考虑灰渣的理化特性和对养分的固定率, 尽量减少对养分的固定. 从试验结果可以看出, 粉煤灰对磷的固定率在任何水分条件下与稻壳灰对磷的固定率都有显著差异, 且粉煤灰对磷的固定率大于稻壳灰. 颗粒粗细影响灰渣的比表面积, 进而决定了灰渣对磷的吸附固定. 从表 5 可看出, 灰渣粒径越小, 磷固定率越大, 过 100、60 和 40 目筛的稻壳灰对磷的固定率分别为 21.10%、11.45% 和 7.94%, 100 目与 60 目之间相差 9.65%, 60 目与 40 目相差 3.51%. 100 和 60 目粒径的粉煤灰对磷的固定率分别为 22.86% 和 14.96%, 相差 7.90%. 100 目的 2 种灰渣对磷的固定率差异不显著, 而在 60 目下 2 种灰渣对磷固定率的差异显著, 且粉煤灰大于稻壳灰.

表 4 不同水分含量灰渣对磷的固定率¹⁾

Tab. 4 Effect of water contents on fixation P rates of ashes %

$w(\text{水 water}) /$ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	稻壳灰 rice husk ash	粉煤灰 fly ash
0	14.96 ± 0.46a	20.23 ± 0.11b
200	45.81 ± 0.76a	72.13 ± 0.49b
500	53.98 ± 1.02a	81.67 ± 0.91b
800	58.52 ± 1.92a	72.13 ± 0.64b

1) 同行数据后字母相同者示差异不显著 ($P > 0.05$, Duncan's 法)

表 5 不同粒径灰渣对磷的固定率¹⁾

Tab. 5 Fixation P rates of ashes in different partied diameters %

样品 samples	100 目	60 目	40 目
稻壳灰 rice husk ash	21.10 ± 2.03a	11.45 ± 0.25a	7.94 ± 1.24
粉煤灰 fly ash	22.86 ± 0.76a	14.96 ± 0.62b	— ²⁾

1) 同列数据后字母相同者示差异不显著 ($P > 0.05$, Duncan's 法); 2) 由于粉煤灰颗粒都小于 40 目, 故试验中未设置这一处理

3 讨论与结论

生物质气化灰渣——稻壳灰是稻壳低温 (500 ~ 600 °C) 气化发电得到的产物, 燃烧不充分, 含碳量高, 颗粒组成以砂粒为主, 占颗粒组成的 87.88%, 而粉煤灰组成则以砂粒和粉砂为主. 上述特性表明: 如将稻壳灰施入粘质土壤, 可降低粘土中粘粒含量, 增加粘土的孔隙度, 降低容重, 调节土壤的三相比.

稻壳灰的 pH 10.20, 粉煤灰的 pH 10.30, 两者都属于碱性灰渣, 有调节酸性土壤 pH 的作用. 稻壳灰中的 $w(\text{全磷})$ 为 0.12%, 大于粉煤灰中的 $w(\text{全磷})$ 0.08%, 2 种灰渣全钾质量分数分别为 1.24% 和 0.15%. 稻壳灰的 $w(\text{有效磷})$ 为 204.73 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 远远大于粉煤灰中的 $w(\text{有效磷})$ 80.01 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 南方酸性土壤 $w(\text{全磷})$ 一般低于 0.056%^[8], 因此酸性土壤中施入稻壳灰渣和粉煤灰能为作物提供一定数量的磷和钾, 且稻壳灰渣提供的数量大于粉煤灰. 粉煤灰农用时, 要考虑重金属的含量对农作物及环境的危害, 而稻壳灰是由稻壳气化得到的灰渣, 不含有对作物有害的重金属^[9], 故将稻壳灰作硅肥或复合肥添加剂时, 比粉煤灰更安全.

灰渣中有效硅含量多少直接决定其作为硅肥利用价值的高低. 研究结果表明, 稻壳灰渣与粉煤灰 $w(\text{有效硅})$ 分别为 5.60 和 11.31 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 土壤中 $w(\text{有效硅})$ 为 0.014 ~ 0.230 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[8], 三者有效硅含量差异显著. 粉煤灰的无定形硅和有效硅含量高于稻壳灰渣. 稻壳灰渣中水溶性硅的质量分数为 3.71 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 远远高于粉煤灰中水溶性硅的含量. 这可能是因为稻壳灰渣是由纳米尺度的 SiO_2 ($d < 50 \text{ nm}$) 凝胶粒子疏松地粘聚而成, 且具有大量由 SiO_2 凝胶粒子非紧密粘聚而形成的纳米尺度空隙的微粒结构的特性^[10], 使得在水溶液的条件下, 有大量 SiO_2 溶出. 利用这一特殊的现象, 将稻壳灰渣直接施入水田中, 便可为作物提供大量的水溶性硅.

对稻壳灰、粉煤灰的农业化学行为比较研究表明, 稻壳灰颗粒组成以砂粒为主, 容重小, pH > 10.0, 可以作为粘质酸性土壤改良剂. 而粉煤灰组成以细小颗粒为主, pH > 10.0, 可以作为酸性砂土的改良剂. 灰渣中磷的含量远远大于土壤中磷的含量. 向土壤中施入灰渣, 稻壳灰比粉煤灰能够提供更多量的磷, 但要注意稻壳灰的施加量. 含硅灰渣中的硅要先释放进入溶液, 然后才能被植物吸收利用^[11]. 稻壳灰的水溶性硅含量高于有效硅和无定形硅的含量, 施入土壤后其水溶性硅会很快进入溶液, 被植物吸收利用. 因此, 稻壳灰也能起到改良土壤, 为土壤提供硅素的作用, 且随着施入时间的延长, 其硅的释放速率会变大.

稻壳灰和粉煤灰对磷都具有较大的吸附量, 对磷的吸附量随着加入溶液磷浓度的增加而增加, 其增加趋势表现为先增加后又逐渐缓和. 由于物质组成的不同, 稻壳灰的水溶态磷酸盐发生的专性吸附或化学吸附不如粉煤灰强烈, 粉煤灰对磷的吸附量

(下转第 49 页)

中期较相似,并向抗病方向发展,其菌群特征是对糖类和聚合物优先利用,而对羧酸类利用率较低;而发病率较高的 CK1、CK2 和 CK3 对羧酸类利用率较高,对糖类和聚合物率则较低。后期,发病率较低的处理的土壤微生物群落在 PCA 图中的位置进一步集中,形成较稳定的微生物群落结构。

参考文献:

- [1] 李海涛,邹庆道,吕书文,等. 番茄青枯病的研究进展[J]. 园艺学报, 2001, 28(增刊): 649-654.
- [2] 董春,曾宪铭,刘琼光. 利用无致病力青枯菌株防治番茄青枯病的研究[J]. 华南农业大学学报, 1999, 20(4): 1-4.
- [3] 黎起秦,罗宽,林伟,等. 番茄青枯病内生拮抗细菌的筛选[J]. 植物病理学报, 2003, 33(4): 364-367.
- [4] 赵斌,何绍江. 微生物学实验[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 217-219.
- [5] GARLAND J L, MILLS A L. Classification and characterization of heterotrophic microbial communities on the basis of patterns of community-level sole-carbon-source utilization[J]. Appl Environ Microbiol, 1991, 57: 2351-2359.
- [6] 杨永华,姚健,华晓梅. 农药污染对土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. 生态学杂志, 2000, 20(2): 23-25.
- [7] JULIET P M, LYNNE B, PETER F R. Analysis of microbial community functional diversity using sole-carbon-source utilization profiles-a critique[J]. FEMS Microbiol Ecol, 2002, 42: 1-14.
- [8] 黎起秦,林伟,陈永宁,等. 植物土传病害拮抗真菌的筛选[J]. 西南农业学报, 1999, 12(3): 81-84.
- [9] 席劲瑛,胡洪营,钱易. Biolog 方法在环境微生物群落研究中的应用[J]. 微生物学报, 2003, 43(1): 138-141.
- [10] YOSHITAKA Shiomi, MASAYA Nishiyama, TOMOKO Onizuka. Comparison of bacterial community structures in the rhizoplane of tomato plants grown in soils suppressive and conducive towards bacterial wilt[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1999, 65(9): 3996-4001.
- [11] 蔡燕飞,廖宗文,董春,等. 番茄青枯病的土壤微生态防治研究[J]. 农业环境保护, 2002, 21(5): 417-420.
- [12] 蔡燕飞,廖宗文,章家恩,等. 生态有机肥对番茄青枯病及土壤微生物多样性的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(3): 349-353.
- [13] 郑华,欧阳志云,方治国,等. BIOLOG 在土壤微生物群落功能多样性研究中的应用[J]. 土壤学报, 2004, 41(3): 456-461.
- [14] 孔维栋,刘可星,廖宗文. 有机物料种类及腐熟水平对土壤微生物群落的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(3): 487-492.

【责任编辑 周志红】

(上接第 30 页)

大于稻壳灰。磷的固定随水分含量增加而增加,灰渣粒径越小对磷的固定率越大。稻壳灰对磷的固定率小于粉煤灰,这和灰渣的化学组成成分不同有关。研究表明, Freundlich 方程可以很好地拟合灰渣中硅的释放速率。在施用灰渣或利用灰渣作复合肥时,稻壳灰更有利于养分的吸附与释放,起到对养分的控释作用。

参考文献:

- [1] 马同生. 我国水稻土硅素养分与硅肥施用研究现状[J]. 土壤学通报, 1990, 18(4): 1-5.
- [2] 魏朝富,杨剑虹,高明,等. 紫色水稻土硅有效性的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1997, 3(3): 229-236.
- [3] 杨剑虹,车福才,王定勇,等. 粉煤灰的理化性质与农业化学行为的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1997, 3(4): 341-348.
- [4] 高明,魏朝富,周保同,等. 含硅熔渣的化学组成特征与农业化学行为研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(2): 220-228.
- [5] 欧阳东,陈楷. 稻壳灰显微结构的研究[J]. 材料科学与工程学报, 2003, 21(5): 648.
- [6] 鲁如坤. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 180-181.
- [7] 冯跃华,邹应斌,胡瑞芝,等. 几种粉煤灰的特性及其硅、磷的农业化学行为研究[J]. 中国农业科学, 2005, 38(2): 341-349.
- [8] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2002: 70.
- [9] 米铁,陈汉平,吴正舜,等. 生物质灰化学特性的研究[J]. 太阳能学报, 2004, 25(2): 236-241.
- [10] 欧阳东,陈楷. 稻壳灰显微结构及其中纳米 SiO₂ 的电镜观察[J]. 电子显微学报, 2003, 22(5): 390-393.
- [11] 徐明岗,张一平,王锐群. 土壤磷扩散规律及其能量特征的研究: I. 水分、质地、温度及其相互作用对磷扩散的影响[J]. 土壤学报, 1996, 32(2): 148-157.

【责任编辑 李晓卉】