植物营养与肥料学报 2007,13(6):1197 - 1201
Plant Nutrition and Fertilizer Science

高温焚烧对秸秆灰渣磷、钾养分变化的影响

朱 红，常志州*，黄红英，费辉盈，陈 欣
（江苏省农业科学院农业资源与环境研究所，江苏南京 210014）

Effect of incineration temperature on the content and availability of P and K in straw ash

ZHU Hong, CHANG Zhi-zhou*, HUANG Hong-ying, FEI Hui-ying, CHEN Xin
(*Institue of Agricultural Resource and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China*)

中图分类号：S141.4　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1008-505X(2007)06-1197-05

生物质能是我国仅次于煤炭、石油和天然气的第4位能源资源，是可再生能源的一部分，在能源系统中占有重要地位[1]。农作物秸秆作为一种生物质能，也是我国广大农村中重要能源之一[2]。如何合理利用秸秆这一类生物质能已成为研究的热点[3]。自1988年丹麦建成世界第一座秸秆发电厂后，秸秆发电已成为秸秆能源化利用的新途径[4]，目前，秸秆发电技术在发达国家如美国、欧洲、日本等已广泛采用。受世界能源危机的影响，近两年，我国许多省市引进国外技术，开始陆续上马秸秆发电建设项目。然而，秸秆发电过程中，会产生约占秸秆量15%左右的灰渣，由于发电厂秸秆焚烧产热是在流化床中进行，温度高达500～1000℃，高温条件下产生的灰渣与普通草木灰相比，在养分总量以及有效性等方面是否存在差异？如何提高灰渣中养分利用效率等问题，是众多秸秆发电厂家解决灰渣农业利用中迫切关心的重要问题之一。本实验室通过模拟高温焚烧来探讨秸秆灰渣中磷、钾养分在高温条件下的变化规律，为秸秆发电、秸秆气化等高温焚烧所产生的大量灰渣的合理农业利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

实验材料为小麦、稻草、棉花和油菜四种作物秸秆，均采自江苏省农业科学院实验田。为当季作物秸秆，自然风干，其基本理化性状见表1。

表1 供试秸秆理化性状

Table 1 The physical and chemical characteristics of the experimental straws

秸秆 Straw	固物含量 TS(%)	全氮 Total N (%)	全磷 Total P (P_2O_5%)	全钾 Total K (K_2O %)
小麦秸 Wheat	92.29	0.813	0.332	1.226
稻草秸 Rice	92.02	1.062	0.449	3.986
油菜秸 Rape	90.14	0.389	0.146	1.421
棉花秸 Cotton	90.15	0.659	0.209	0.621

注(Note)：固物含量TS(%)=[烘干样重/风干样重]×100。TS(%)=drying weigh/air-dry weigh×100%.

1.2 试验设计

实验采用模拟高温焚烧的方法处理秸秆，设置三个温度梯度：常温燃烧(CK)取5 kg风干秸秆在干净的铝锅中自然燃烧(约300℃)；高温焚烧在可控温高温电阻炉(马福炉)中分别于550℃和800℃两个温度下燃烧，将常温燃烧后的灰渣置于坩锅中，

收稿日期：2006-09-03　　**修改稿收到日期**：2006-11-06
基金项目：江苏农科院基金(6110546)资助。
作者简介：朱红(1981—)，男，安徽安庆人，硕士研究生，主要从事农业固体废弃物处理与资源化研究。E-mail:zhuhong5@yahoo.com.cn
* 通讯作者 Tel:025-84390238，E-mail：czhizhou@hotmail.com

焚烧 1 h。焚烧后的灰渣经研磨后过 1 mm 筛，放入干燥器中备用。每个温度 3 次重复。

1.3 分析项目及方法

1.3.1 pH 值[5] 按灰渣∶蒸馏水 = 1∶5(m/v)比例加入蒸馏水，往复震荡机上震荡 15min，直接用酸度计测定。

1.3.2 灰分的测定[5] 秸秆在设置好试验温度的马福炉中焚烧 1 h，待冷却至约 100℃时，取出放置干燥器中冷却至室温，称重，计算其灰分。常温燃烧处理是将燃烧完全后的灰分直接称重，计算其灰分。

1.3.3 灰渣中养分相对于原样中含量(即相对含量)的计算，按曹喜涛等提供的方法[6]。

假定秸秆燃烧过程中养分无损失(绝对量不变)：

M_n 为 n℃时相对养分百分比含量(%)，即相对于秸秆的养分含量；

N_n 为 n℃时灰渣中总养分百分比含量(%)；

H_n 为 n℃焚烧时灰分百分比含量(%)；

由于，n℃灰分 = n℃产生灰渣量/所需秸秆质量，

所以，相对养分百分含量 M_n = [总养分/秸秆质量] × 100% (1)

= [(灰渣养分含量 N_n × 灰渣量)/秸秆质量] × 100% (2)

= [灰渣养分含量 N_n × 灰分 H_n] × 100% (3)

由公式(3)计算出灰渣的相对养分含量。

1.3.4 养分测定 全磷、全钾测定[5]：样品用 H_2SO_4—H_2O_2 消煮，全磷用钒钼酸铵比色法，全钾用火焰光度法。有效性养分分析[5]：有效磷采用柠檬酸浸提—钒钼酸铵比色法；速效钾采用中性乙酸铵浸提—火焰光度法；水溶性磷、钾先用蒸馏水浸提，水溶性磷用钒钼酸铵比色法测定，水溶钾用火焰光度法。

数据统计按参考文献[7]进行。

2 结果与讨论

2.1 不同温度焚烧后秸秆灰分含量及灰渣形态的变化

粗灰分是指秸秆经高温灼烧后的残留物，主要是氧化物、无机盐等矿物元素，也包括混入秸秆中的砂石、泥土等，所以亦称矿物质[8]。一般规定的温度为(550 ± 20)℃(国标 GB/T6438-1994)。

从图 1 结果看出，随着温度的升高，秸秆灰分呈下降趋势。其中小麦和稻草秸秆在不同温度下的灰分含量较高，常温燃烧时含量分别为 17.71% 和 27.64%，800℃燃烧后为 7.44% 和 17.17%，分别减少了 57.99% 和 37.88%；油菜和棉花秸秆灰分含量相对较低，常温燃烧时含量仅分别为 7.36% 和 7.84%，800℃燃烧后为 4.90% 和 2.88%，分别减少了 33.42% 和 63.27%；统计结果表明，550℃焚烧后灰分含量与常温燃烧的之间达到极显著水平，除了棉花秸与 800℃焚烧后的灰分差异极显著外，其余秸秆差异均不显著。

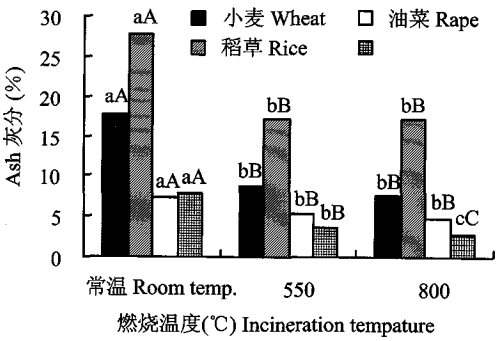

图 1 不同燃烧温度下秸秆灰分的变化

Fig.1 Changes of ash content under different incineration temperature

[注(Note)：常温燃烧(CK)的温度约为 300℃，不同大小写字母分别表示在 0.01 和 0.05 水平差异显著，下同。Different capital and small letters indicate significant difference among treatments at the $P < 0.01$ and $P < 0.05$ level, respectively. The combustion temperature at room temperature is about 300℃. The same below.]

秸秆在不同温度焚烧后产生的灰渣颜色和形态不同。常温燃烧时，温度较低，燃烧不是很充分，燃烧后的灰分呈黑色；在 550℃焚烧后，有机物进一步氧化，灰渣呈现出白色；在 800℃高温焚烧后，油菜秸秆完全结渣，呈固体块状，其余三种秸秆为粉末状白色灰渣(图 2)。造成灰渣形态变化的原因，是不同温度条件下，各元素之间会发生相互化学作用[9-12]。

2.2 秸秆灰渣 pH 变化

四种秸秆灰渣 pH 值的变化见图 3，其中油菜秸秆和棉花秸秆的 pH 值均超过了 11，550℃油菜秸秆灰渣 pH 值高达 13.08，稻草秸秆和小麦秸秆的 pH 在 10 之间变化，统计结果表明：油菜秸秆和棉花秸秆 pH 在不同温度之间差异均达到极显著水平，小麦秸秆和水稻秸秆 pH 在不同温度之间差异均达到显著水平，其中 550℃与 800℃之间达到了极显著水平。

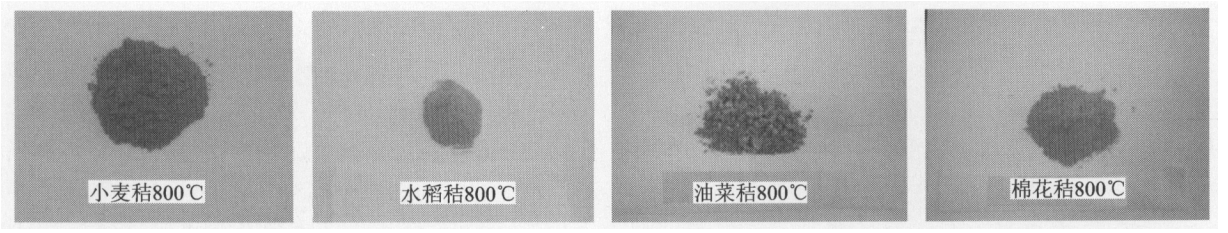

图 2　800℃焚烧后的秸秆灰渣

Fig.2　The ash under 800℃ incineration

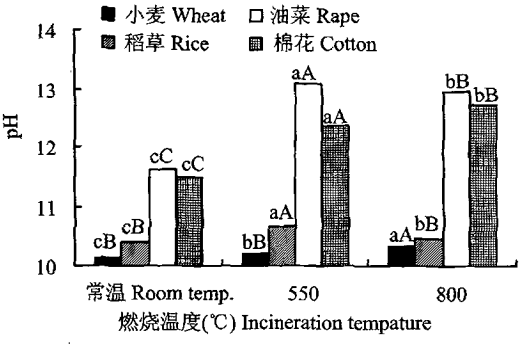

图 3　不同燃烧温度下 pH 值变化

Fig.3　Change of pH values in ash under different incineration temperature

2.3　不同温度焚烧灰渣全磷、全钾含量变化

由表 2 可见，在 550℃温度下焚烧后的灰渣中全磷含量相对较高。新复极差统计结果表明，小麦和稻草秸 550℃焚烧灰渣全磷含量与常温燃烧差异达到显著水平，油菜、棉花差异不显著。而按照不同温度条件下灰分含量折算的相对全磷含量可以看出，秸秆相对全磷含量随温度升高而下降。表 2 中常温燃烧换算出来的相对全磷含量跟秸秆的全磷含量（表 1）相差不大。统计结果显示，800℃焚烧的灰渣相对全磷含量与常温燃烧均达到显著水平，其中稻草秸、油菜秸和棉花秸达到了极显著水平。

表 3 显示的全钾变化的结果与全磷相似，灰渣全钾含量受焚烧温度的影响，但变化规律不明显，而按灰分含量折算的相对全钾含量则呈递减趋势。同样，常温燃烧换算出的相对全钾含量跟秸秆含量差异不大。分析表明，小麦秸、油菜秸、棉花秸 550℃焚烧灰渣的全钾含量与常温燃烧均差异显著，稻草秸、油菜秸、棉花秸 800℃焚烧灰渣的全钾含量与常温燃烧灰渣的全钾含量则达到极显著水平；相对全钾含量 800℃焚烧与常温燃烧均达到了极显著水平。

表 2　不同温度秸秆灰渣全磷变化

Table 2　Change of total P in straw ash with different incineration temperature

秸秆 Straw	灰渣全磷含量 TP in ash(P_2O_5%)			相对全磷含量 Relative TP in ash(P_2O_5%)		
	常温(CK) Room temp.	550℃	800℃	常温(CK) Room temp.	550℃	800℃
小麦秸 Wheat	1.84 bA	3.05 aA	2.75 abA	0.33 aA	0.27 abA	0.20 bA
稻草秸 Rice	1.63 bA	2.02 aA	1.75 abA	0.45 aA	0.34 bB	0.30 bB
油菜秸 Rape	1.97 aA	2.05 aA	2.07 aA	0.15 aA	0.11 bAB	0.10 bB
棉花秸 Cotton	2.61 aA	2.85 aA	2.42 aA	0.21 aA	0.10 bB	0.07 bB

注：相对全磷含量按试验方法中推导公式(3)计算，不同大小写字母分别表示在 0.01 和 0.05 水平差异显著，下同。The content of talkative TP in ash was calculated with Formula(3). Different capital and small letters indicate significant difference among different straw treatment at the $P < 0.01$ and $P < 0.05$ level, respectively. The same below.

表 3　不同温度秸秆灰渣全钾变化

Table 3　Change of total K in straw ash with different incineration temperature

秸秆 straw	灰渣全钾含量 TK in ash(K_2O%)			相对全钾含量 Relative TK in ash(K_2O%)		
	常温 Room temp.	550℃	800℃	常温 Room temp.	550℃	800℃
小麦秸 Wheat	6.71 bB	11.08 aA	6.89 bB	1.19 aA	0.96 bA	0.51 cB
稻草秸 Rice	14.42 aA	12.92 aA	7.68 bB	3.99 aA	2.19 bB	1.32 cC
油菜秸 Rape	19.21 cC	21.24 bB	22.40 aA	1.41 aA	1.16 bB	1.10 bB
棉花秸 Cotton	7.98 bB	14.63 aA	15.25 aA	0.63 aA	0.54 aAB	0.44 bB

2.4 不同温度焚烧灰渣中磷、钾有效性的变化

2.4.1 磷的有效性变化 从图4可以看出,灰渣中有效磷含量随焚烧温度的提高呈上升趋势,常温燃烧灰渣中,小麦秸、稻草秸、油菜秸和棉花秸灰渣中有效磷含量分别为0.53%、1.05%、0.81%和1.74%,占全磷的29%、64%、41%和67%;550℃分别为1.57%、1.43%、0.87%和1.85%,占全磷的52%、71%、40%和65%;800℃焚烧后分别为1.79%、1.51%、0.76%和2.08%,占全磷的65%、86%、36%和86%。结果显示,高温焚烧后磷的有效性提高。经新复极差分析,小麦秸和棉花秸灰渣中不同温度之间有效磷含量均达到了极显著差异水平;稻草秸550℃与800℃焚烧之间差异极显著;油菜秸常温燃烧与800℃焚烧差异显著。

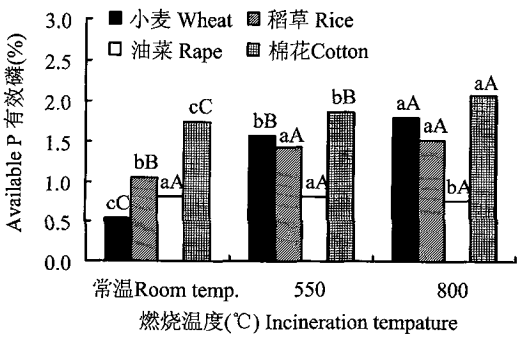

图4 不同燃烧度秸秆灰渣有效磷变化

Fig.4 Change of available P content in straw ash under different incineration temperature

水溶性磷是有效磷一部分,能直接被作物吸收利用,试验结果(图5)表明,灰渣中水溶性磷含量很低,常温燃烧灰渣中,小麦秸、稻草秸、油菜秸和棉花秸灰渣中水溶磷分别为0.16%、0.27%、0.04%和0.05%,分别占有效磷31.1%、26.1%、5.2%和2.8%;550℃分别为0.06%、0.06%、0.02%和未检出。800℃焚烧灰渣中仅稻草灰含0.02%水溶磷外,另3种秸秆灰渣水溶磷均未检出。这一结果与杨炯[13]对焚烧残渣研究的结果一致。

2.4.2 钾的有效性变化 植物一般能直接从土壤中吸收水溶性钾,但交换性钾能很快和水溶性钾达到平衡,所以速效钾一般包括水溶性钾和交换性钾。

从图6中可以看出,不同种类秸秆速效钾含量相差很大,其中油菜秸灰渣速效钾含量是其他3种秸秆的3~7倍,高达19.09%。焚烧温度对速效钾含量的影响较为复杂,其中油菜秸秆灰渣中速效钾含量随温度升高而增加,其它三种秸秆灰渣中速效钾含量变化趋势不明显。在常温燃烧灰渣中,小麦秸、稻草秸、油菜秸和棉花秸灰渣中速效钾含量分别为2.78%、3.72%、15.74%和5.20%,分别占全钾41%、26%、82%和65%;550℃焚烧灰渣分别为3.37%、4.35%、17.93%和9.46%,占全钾的30%、34%、84%和65%;800℃的分别为2.54%、3.25%、19.09%和8.76%,分别占全钾的37%、42%、85%和57%。经分析,稻草秸和油菜秸灰渣中不同温度之间速效钾含量均达到极显著水平;棉花秸不同温度之间差异显著,其中常温燃烧与800℃差异极显著;小麦秸常温燃烧与550℃的差异显著。

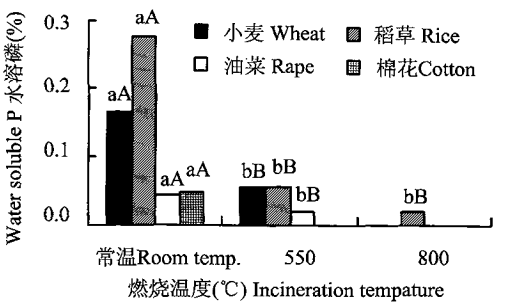

图5 不同燃烧温度下秸秆灰渣水溶磷变化

Fig.5 Change of water soluble P content in straw ash under different incineration temperature

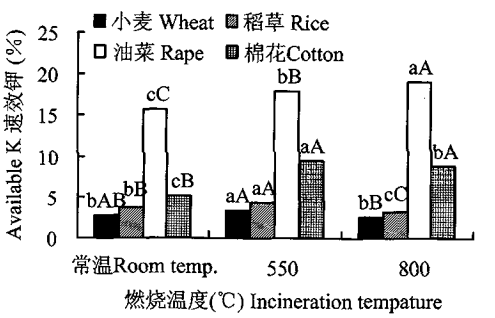

图6 不同燃烧温度秸秆灰渣速效钾变化

Fig.6 Change of available K content in straw ash under different incineration temperature

水溶钾含量(图7)与速效钾相差不大。常温燃烧灰渣中水溶钾分别占速效钾的88%、95%、90%和95%。550℃焚烧灰渣水溶钾含量分别占速效钾的79%、99%、90%和91%;800℃时分别占速效钾的93%、98%、88%和86%。说明高温焚烧灰渣中大部分钾素是以水溶态存在。

3 讨论与小结

1)秸秆高温焚烧时,温度不同秸秆损失量不同,温度越高,焚烧损失量越大,形成的灰渣量越少。

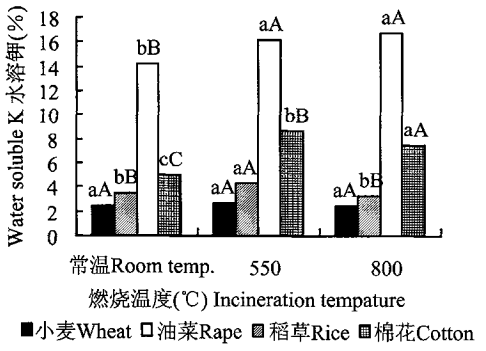

图 7　不同燃烧温度秸秆灰渣水溶钾变化

Fig.7　Change of water soluble K content in straw ash under different incineration temperature

2)不同温度焚烧条件下，秸秆灰分中磷、钾含量按灰分折算出的灰渣总养分量均呈现出随温度提高递减的趋势。本研究结果表明，高温焚烧比常温焚烧使秸秆中的磷、钾等养分损失高。这可能因为秸秆在高温气化过程中部分 K、P 挥发损失[14-16]以及在热解过程中通过对流输送被释放出来的缘故[9]。

3)高温焚烧使秸秆灰渣的总养分损失增加，但仍含有较高的有效养分比例，特别是速效钾含量的比例提高较多，这为秸秆发电厂灰渣的进一步农业利用提供了有利条件，但如果要充分合理地利用灰渣，还需要对秸秆发电厂产生灰渣中微量元素含量、有效性和重金属含量变化特征以及对作物的影响作进一步深入分析，并进行田间试验验证。

参 考 文 献：

[1] 邓可蕴.21 世纪我国生物质能发展战略[J].中国电力，2000，9(33)：82-84.
Deng K Y. Development strategy of China's bio energy in 21st Century[J]. Electr. Pow., 2000, 9(33): 82-84.

[2] 闫丽珍，闵庆文，成升魁.中国农村生活能源利用与生物质能开发[J].资源科学，2005，1(27)：8-13.
Yan L Z, Min Q W, Cheng S K. Energy consumption and bio-energy development in rural areas of China[J]. Resour. Sci., 2005, 1(27): 8-13.

[3] 韩鲁佳，闫巧娟，刘向阳，等.中国农作物秸秆资源及其利用现状[J].农业工程学报，2002，5(18)：87-91.
Han L J, Yan Q J, Liu X Y *et al*. Straw resources and their utilization in China[J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng., 2002, 5(18): 87-91.

[4] 林伟刚，宋文立. 丹麦生物质发电的现状和研究发展趋势[J]. 燃料化学学报，2005，33(6)：650-655.
Lin W G, Song W L. Power production from biomass in Denmark[J]. J. Fuel Chem. Techn., 2005, 33(6): 650-655.

[5] 中国土壤学会编. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京：中国农业科技出版社，2000.
China Soil Society. Analysis method in soil and agricultural chemistry [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.

[6] 曹喜涛，黄为一，常志州，等. 鸡粪堆制过程中氮素损失及减少氮素损失的机理[J]. 江苏农业学报，2004，20(2)：106-110.
Cao X T, Huang W Y, Chang Z Z *et al*. Mechanism of nitrogen loss and reduction in nitrogen loss during the compost of chicken manure [J]. Jiangsu J. Agr. Sci., 2004, 20(2): 106-110.

[7] 盖钧镒.试验统计方法[M]. 北京：中国农业出版社，2000.
Gai J Y. Methods of experimental statistics[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.

[8] 方丽萍. 水产饲料中粗灰分的控制[J]. 粮食与饲料工业，2001，(4)：37-38.
Fang L P. Ash in marine lives feedstuff[J]. Cereal Feed Indus., 2001, (4): 37-38.

[9] 宋鸿伟，郭民臣，王欣. 生物质燃烧过程中的积灰结渣特性[J].节能与环保，2003，9：29-31.
Song H W, Guo M C, Wang X. Ash characteristic study on biomass burning[J]. Ener. Conser. Environ. Prot., 2003, 9: 29-31.

[10] 程军，周俊虎，刘建忠，等. 大型电站煤粉炉自身固硫灰渣的微观晶相分析[J]. 燃料化学学报，2005，33(1)：38-42.
Chen J, Zhou J H, Liu J Z *et al*. Crystal compositions of self-desulfurization residues from a pulverized coal fired boiler[J]. J. Fuel Chem. Techn., 2005, 33(1): 38-42.

[11] 欧阳东，陈楷. 低温焚烧稻壳灰的显微结构及其化学活性[J]. 硅酸盐学报，2003，11(31)：1121-1124.
Ouyang D, Chen K. Microstructure and chemical activity of rice husk ash burned at low temperature[J]. J. Chin. Ceramic Soc., 2003, 11(31): 1121-1124.

[12] 兰泽全，曹欣玉，周俊虎，等. 炉内灰渣沉积物中矿物元素分布的电子探针分析[J].中国电机工程学报，2005，25(2)：114-119.
Lan Z Q, Cao X Y, Zhou J H *et al*. The electron probe analysis of mineral elementary distribution at ash deposition from furnace[J]. Proc. Chin. Soc. Ener. Eng., 2005, 25(2): 114-119.

[13] 杨炯. 垃圾焚烧残渣无机盐溶出实验[J]. 环境卫生工程，2005，13(4)：40-42.
Yang J. Test on inorganic salt dissolving out of waste incineration residual[J]. Environ. Sanit. Eng., 2005, 13(4): 40-42.

[14] 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.
Mi T, Chen H P, Wu Z S *et al*. Chemistry characteristic study on biomass ash[J]. Acta Ener. Solar. Sin., 2004, 25(2): 236-241.

[15] Wigmans T, Haringa H *et al*. Alkali salt ash formation in four finnish industrial recovery boiler[J]. Fuel, 1983, 62: 209-212.

[16] 赵强基，Gamity D P，王增远. 菲律宾以稻为基础的种植制度生态学评价 Ⅰ各种种植方式的养分平衡[J]. 作物学报，1993，19(5)：404-411.
Zhao Q J, Garrity D P, Wang Z Y. Ecological evaluation of rice-based cropping systems in the Philippines I. Nutrition balance of different cropping systems[J]. Acta Agron. Sin., 1993, 19(5): 404-411.