

生物质灰渣与化肥配施 对土壤性质及油菜生长的影响

陈 龙 王 敏 王 硕 胡红青

华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070

摘要 通过土培和盆栽试验研究生物质灰渣与土壤混合培养后对土壤性质的改良作用及对油菜苗期生长的影响。结果表明:随灰渣用量的增加,土壤中有效养分含量增加,尤其是速效磷和速效钾增加显著;随灰渣施用量的增加,土壤pH值升高,平均增幅7.78%,趋于中性;在肥料用量低时,灰渣施用量的增加更有利于土壤中速效磷含量的提高,最大增幅可达4.2倍;肥料施用量的变化对油菜吸收磷的影响不大,但随着灰渣施用量的增加,油菜全磷含量均呈先减小后增大的变化趋势;在中等用量的肥料水平下,灰渣增强油菜植株吸收钾的能力,油菜全钾含量最大增幅达44.43%;在高用量肥料处理下,灰渣不影响植株吸收钾量;灰渣的施入可改变油菜钾与钙、镁之间拮抗作用的表现形式,随着灰渣用量的增加,植株钙、镁吸收量呈先增大后减小的变化趋势。生物质灰渣能达到较好的土壤改良效果,按照合理的比例进行灰渣与化肥的配施,能促进土壤—植物系统中营养元素的转化迁移和油菜苗期的生长。

关键词 生物质灰渣; 土壤性质; 盆栽; 油菜; 土壤—植物系统

中图分类号 S 565.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2011)06-0727-07

近年来,随着社会的发展和科技的进步,生物质燃料发电逐渐兴起并初具规模^[1]。伴随生物质燃料发电产业的发展,生物质燃料发电厂产生大量生物质灰渣废弃物。大量的灰渣废弃物如何得到充分有效地利用,成为生物质燃料发电企业面临的紧迫问题。朱雅兰等^[2]研究表明,可以通过施入草木灰、污泥、草木灰污泥混合物来修复Cd污染土壤。与普通草木灰相比,生物质灰渣废弃物产量大、pH值高,含有一定量P、K、Si等矿质营养,其中有效钾含量提高约20%^[3-4],因而灰渣应具有更大的利用空间。

生物质灰渣并没有得到充分有效地利用^[5],笔者将其与化肥混合施用(包括直接施用或造粒后施用),既可作为植物营养来源,又可增加土壤盐基离子、改善土壤理化性质,使其变废为宝。

本试验以武汉某电力股份有限公司生物质燃料发电的灰渣为材料,通过土壤培养和盆栽的方法,并结合SAS软件聚类分析技术,研究灰渣对土壤的改良作用和对油菜生长与养分吸收的影响,以期为灰

渣综合应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试油菜(*Brassica napus* L.)品种为中油821,供试土壤采自武汉市洪山区狮子山,包括石英砂岩发育的红壤,发育于第四纪褐色粘土的黄棕壤和常年植稻的水稻土,所有土壤均采自表层(0~20cm)。试验前土壤基本性质见表1。

试验所用生物质灰渣由武汉某电力股份有限公司提供,基本性质为:pH值10.04,全磷、全钾含量分别为7.00和12.82g/kg,速效磷和速效钾含量分别为443.0mg/kg和7.51g/kg,Fe和Mg的含量分别为4.304和6.23g/kg,Cr、Cu、Pb、Zn含量分别为9.86、23.18、9.00、200.02mg/kg。根据土壤环境质量标准(GB 15618—1995)中关于土壤环境质量分类和标准分级的规定,将以上供试土壤列为Ⅱ类土壤环境质量,执行2级标准。将灰渣中Cr、Cu、Pb、Zn含量与各标准值作比较,均满足2级标

表1 供试土壤的基本化学性质

Table 1 The basic chemical properties of experimental soils

土壤类型 Soils	pH	全磷/(g/kg) Total phosphorus	全钾/(g/kg) Total potassium	速效磷/(mg/kg) Available phosphorus	速效钾/(mg/kg) Available potassium	全氮/(g/kg) Total nitrogen	有机质/(g/kg) Organic matter	交换性酸/(cmol(+)/kg) Exchange acid
红壤 Red soil	5.30	0.27	26.21	1.78	75.5	0.71	7.41	0.54
黄棕壤 Yellow brown soil	5.47	1.04	25.09	8.67	144.1	1.18	19.66	0.43
水稻土 Paddy soil	6.70	0.57	28.35	2.56	99.7	1.14	19.39	0.00

准的要求,不会造成土壤污染^[5]。

供试肥料:尿素,含氮46%;氯化钾,含K₂O 60%;磷酸二氢钙,含P₂O₅ 52%。

1.2 试验方法

1)土培试验。不同用量的生物质灰渣与过2 mm筛的土壤250 g混匀,设6个处理:0(CK,对照组)、1 g/kg(A1,生物质灰渣占土壤的质量分数,下同)、5 g/kg(A2)、10 g/kg(A3)、50 g/kg(A4)、100 g/kg(A5),各处理均设2个平行。生物质灰渣与土壤混匀,用蒸馏水调节至田间持水量,在20℃下培养,每7 d取1次土样,共取5次,分别测定样品的pH值、速效磷、速效钾的含量。

2)盆栽试验。每盆用红壤2 kg,生物质灰渣施用量设5个水平(0、1、2、5、8 g/kg),根据生物质灰渣中N、P、K的含量,用化肥向土壤中补加,使N、P、K养分总量达到指定的水平。根据N、P、K总加入量,试验共设5个处理:CK(对照)、处理I、处理II、处理III、处理IV组,除对照外每处理根据生物质灰渣施用量不同分设5个亚处理即I1~I5、II1~II5、III1~III5、IV1~IV5;其中,CK为不加生物质灰渣及氮磷钾化肥;I1~I5生物质灰渣施加量分别为0、1、2、5、8 g/kg,补加氮磷钾化肥至氮0.3 g、磷0.1 g、钾0.1 g;II1~II5生物质灰渣施加量同I,补加氮磷钾化肥至氮0.3 g、磷0.15 g、钾0.15 g;III1~III5生物质灰渣施用量同I,补加氮磷钾化肥至氮0.3 g、磷0.2 g、钾0.2 g;IV1~IV5生物质灰渣施用量同I,补加氮磷钾化肥至氮0.3 g、磷0.25 g、钾0.25 g。每个亚处理设3次平行。盆栽试验在大棚中进行,于2009年10月11日播种,定期浇水,每盆浇水量一致。2009年12月20日收割采集植物样。测定不同处理油菜的鲜质量、叶绿素含量、过氧化氢酶活性及植株P、K、Ca、Mg的含量。

1.3 样品测试与数据统计

土培试验所取土样经自然风干,研磨过1.000和0.149 mm孔径筛,储存于塑料自封袋中备用。

油菜样品采集时,取地上部,用自来水洗去粘附于植物样品上的泥土和污物,晾干后测定鲜质量,部分植物样立即放入4℃冰箱中储存用于鲜样分析,其余样品用去离子水冲洗,在105℃下杀青15 min,65℃下烘干至恒质量,粉碎储存备用。

土壤样品和生物质灰渣的理化性质测定及植物样品分析参见鲍士旦等^[6]提供的方法。

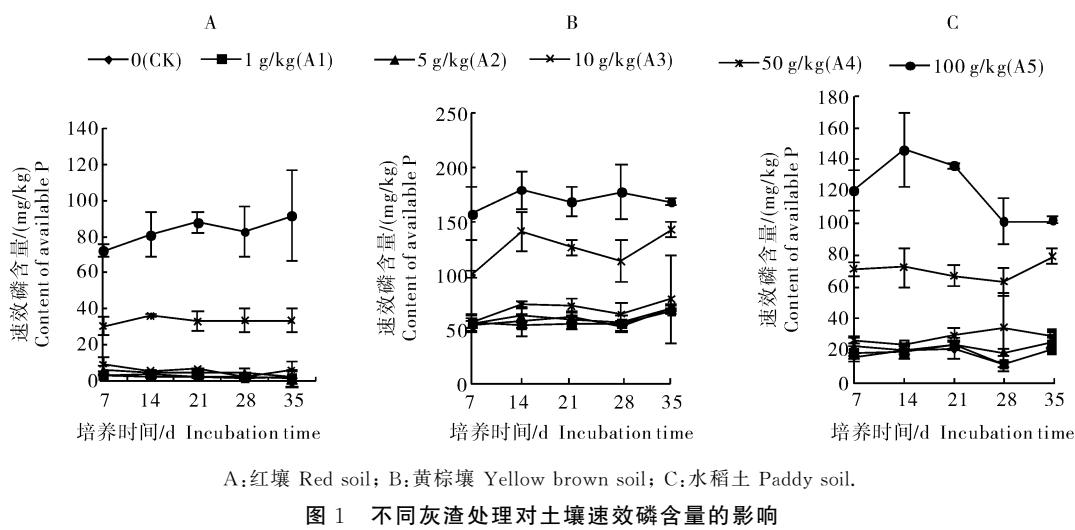
试验数据的统计与分析使用SAS 9.0和Excel 2003软件进行,其中单因素方差的多重比较采用LSD法进行。

2 结果与分析

2.1 生物质灰渣对土壤性质的影响

1)生物质灰渣对土壤速效磷含量的影响。由图1-A可知,红壤与灰渣混合培养7 d时,随灰渣用量从0增加到100 g/kg,土壤速效磷含量由对照的2.97 mg/kg增加到72.0 mg/kg,即随生物质灰渣施用量的增加,土壤速效磷含量显著增高,其他培养时间也有类似趋势。A5处理红壤速效磷含量比对照增加约40倍,且其速效磷含量始终处于高水平,可见施加100 g/kg的生物质灰渣可以显著增加红壤速效磷的含量。A5处理红壤速效磷含量随培养时间的延长而增加,其他5个处理随着培养时间延长基本保持恒定。图1-B中6个处理黄棕壤速效磷含量在第14天达峰值,14~28 d有下降趋势,随后除A4处理速效磷含量有所增加外,其余处理速效磷含量基本保持恒定。图1-C中除处理A5水稻土速效磷含量随培养时间的延长波动较大(先增加后减少,随后保持稳定)外,其他处理的速效磷含量随培养时间延长基本保持恒定。

2)生物质灰渣对土壤速效钾含量的影响。由图2-A可知,红壤培养7 d时,随灰渣用量从0增加到100 g/kg,土壤速效钾含量由对照的100.3 mg/kg增加到905.9 mg/kg,即随着生物质灰渣施用量的增加,土壤速效钾含量增高,其他培养时间也有类似趋势;其中A5处理红壤速效钾含量比对照增加近



A:红壤 Red soil; B:黄棕壤 Yellow brown soil; C:水稻土 Paddy soil.

图1 不同灰渣处理对土壤速效磷含量的影响

Fig. 1 Effect of different ash treatments on the content of available P in soils

10倍,并且该处理速效钾含量始终处于高水平。施加100 g/kg的生物质灰渣可以显著增加红壤速效钾含量。同时,施加生物质灰渣对黄棕壤(图2-B)、水稻土(图2-C)亦能够显著增加土壤中速效钾含量。

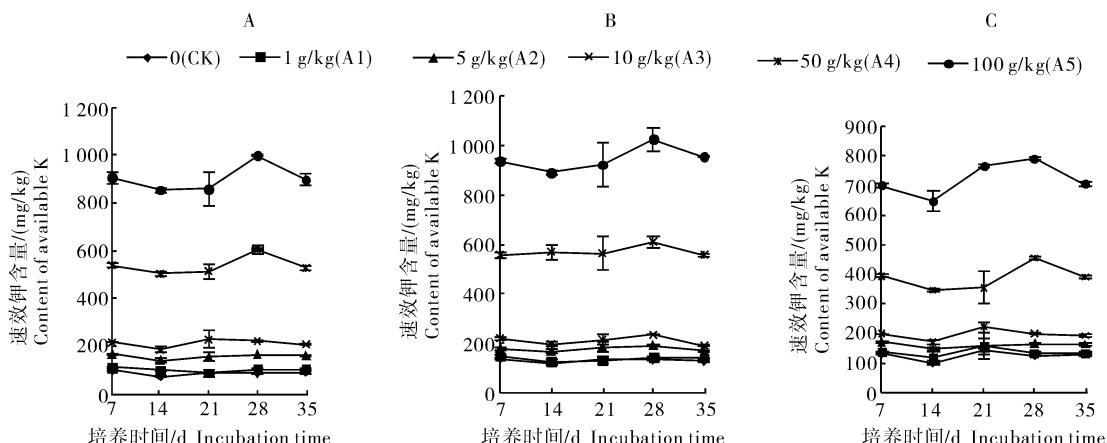
由图2-A可知,A4和A5处理红壤速效钾含量由7~14 d有下降趋势,而后从14~28 d逐渐升高,至第28天时达到最大值,而后呈下降趋势。CK至A3处理红壤中速效钾含量从7~14 d有下降趋势,14~35 d变化较缓慢,基本保持恒定。图2-B、C中,灰渣施入土壤后,土壤中速效钾含量7~14 d有下降趋势,A4和A5处理14~28 d逐渐升高,至第28天达到最大值;然而图2-B中CK至A3处理土壤中速效钾含量基本保持恒定,图2-C中CK至A3

处理土壤中速效钾含量14~21 d逐渐升高,而后逐渐下降。

2.2 生物质灰渣对土壤—植物系统性质的影响

1)生物质灰渣施用对红壤pH的影响。各处理土壤的pH值随着灰渣用量的增加均不断升高,其中,处理I由5.48增加到5.94,处理II由5.49增加到5.87,处理III由5.56增加到5.92,处理IV由5.47增加到5.98,平均增幅7.78%。在几种处理中,土壤pH的增幅大小和变化规律相近。由于灰渣呈强碱性,与红壤混合种植油菜后,使红壤pH增高,可改良红壤酸性。

2)生物质灰渣对土壤—植物系统中P含量的影响。由图3可知,处理I、II、III、IV中,土壤速效磷含量不断增加。



A:红壤 Red soil; B:黄棕壤 Yellow brown soil; C:水稻土 Paddy soil.

图2 不同灰渣处理对土壤速效钾含量的影响

Fig. 2 Effect of different ash treatments on the content of available K in soils

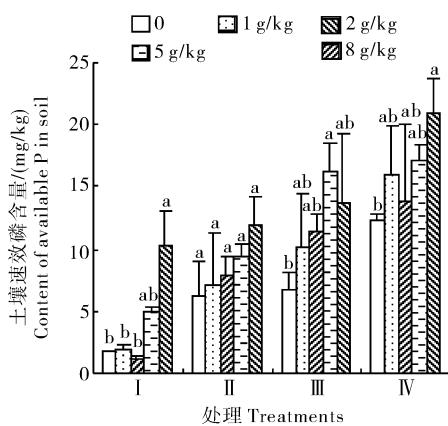


图3 不同处理下土壤速效磷含量的变化
Fig. 3 Changes of the content of available P in soil under different treatments

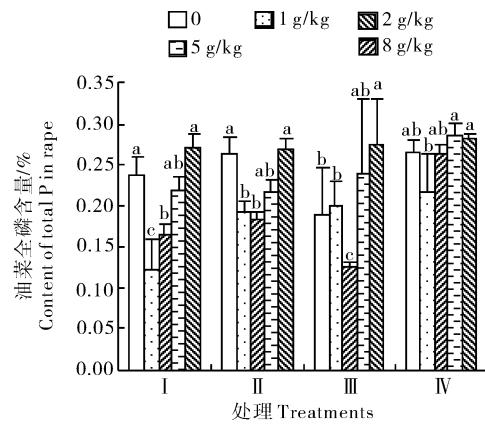


图4 不同处理下油菜全磷含量的变化
Fig. 4 Changes of the content of total P in rape under different treatments

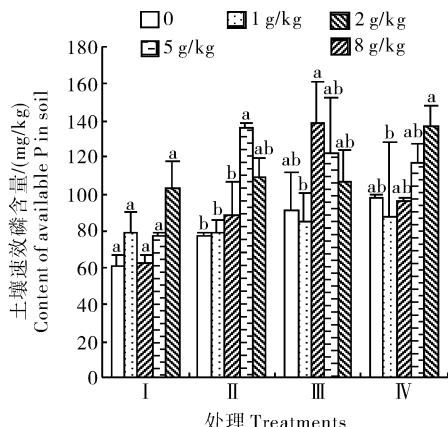


图5 不同处理下土壤速效钾含量的变化
Fig. 5 Changes of the content of available K in soil under different treatments

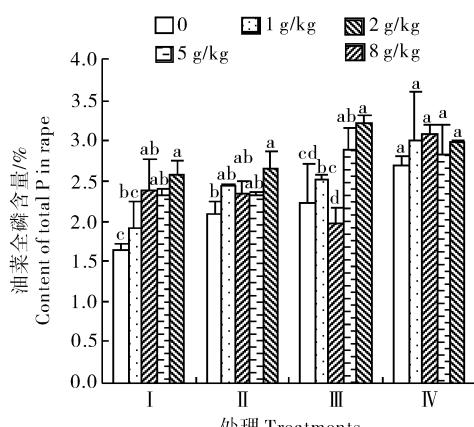


图6 不同处理下油菜全钾含量的变化
Fig. 6 Changes of the content of total K in rape under different treatments

对于I、II、III、IV各个处理,随着灰渣施用量的增加,土壤速效磷的含量呈增加趋势,且处理I相比于其他3个处理,增加更加明显,亚处理I5相比于I1增加了约4.2倍。可见,当肥料用量低时,灰渣施用量的增加更有利土壤中速效磷含量的提高。由图4可知,处理I、II、III、IV下的油菜体内P含量基本一致,即肥料施用量的变化对油菜吸收P的影响不大。对于I、II、III、IV各个处理,随着灰渣施用量的增加,油菜全磷含量都呈先减小后增大的变化趋势,显然,灰渣的施用量影响油菜P的吸收量。

3)生物质灰渣对土壤—植物系统中K含量的影响。由图5可知,化肥用量影响灰渣用量与土壤速效钾含量的关系。对于处理I、IV,土壤速效钾的

含量随着灰渣用量的增加而增加,而对于处理II、III,速效钾的含量随灰渣用量的增加先增后减。由图6可知,化肥用量也影响灰渣用量与油菜含K量的关系。对于处理I、II、III,油菜K含量随着灰渣用量的增加而增加,其中亚处理III5与III1相比增加了44.43%,而处理IV中,油菜K含量基本保持不变。

结合土壤和油菜中的K含量变化可知,在中等用量的肥料水平下,灰渣可增强油菜植株吸收K的能力,从而使油菜体内K含量增加,土壤中速效钾含量先增加后减少。在高用量的肥料水平下,植株吸收K量趋于稳定,灰渣不影响其吸收能力,从而出现在土壤中速效钾含量不断增加的条件下,油菜体内K含量基本保持不变。

4) 生物质灰渣对油菜中 Ca、Mg 含量的影响。由图 7 和图 8 可知,油菜中 Ca、Mg 含量在不同处理时变化情况相似。对于处理 I、II、III,随着灰渣用量的增加,油菜中 Ca、Mg 含量先增后减。对于处理 IV,随着灰渣用量的增加,Ca、Mg 含量基本不变并保持在较低水平。显然,在低、中等肥料水平下,灰渣用量影响油菜 Ca、Mg 的吸收。

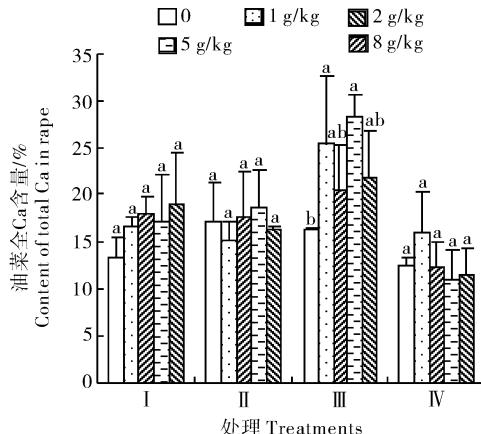


图 7 不同处理下油菜全 Ca 含量的变化

Fig. 7 Changes of the content of total Ca in rape under different treatments

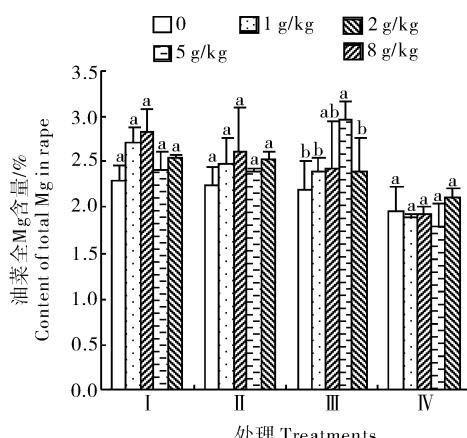


图 8 不同处理下油菜全 Mg 含量的变化

Fig. 8 Changes of the content of total Mg in rape under different treatments

2.3 生物质灰渣对油菜生长的影响和聚类分析

通过鲜质量、叶绿素含量和过氧化氢酶活性 3 项指标来描述油菜苗期的生长情况,测定结果见表 2。不同处理下的生长指标呈现出一定的变化规律,处理 I 中的 3 项指标值都较高,处理 II 中的 3 项指标值都较低。处理 I 鲜质量的平均值是处理 II 的 1.21 倍,叶绿素含量为 1.04 倍,过氧化氢酶活性为

表 2 不同处理的油菜生长状况与性质¹⁾

Table 2 Growth condition and properties of rape under different treatments

处理 Treatment	平均鲜质量/g Average fresh weight	叶绿素含量 (SPAD 值) Chlorophyll content (SPAD)	过氧化氢酶活性/ (mg/(g·min)) Catalase activity
CK	0.21	nd	nd
I 1	7.66	40.1	1.826
I 2	7.45	36.0	1.702
I 3	7.61	39.8	1.967
I 4	7.80	41.1	1.618
I 5	7.88	36.6	1.770
II 1	6.43	37.8	1.684
II 2	7.84	39.1	1.623
II 3	6.06	35.2	1.557
II 4	4.98	36.2	1.573
II 5	6.37	38.2	1.602
III 1	6.00	37.5	1.705
III 2	7.91	37.5	1.814
III 3	6.90	39.0	1.865
III 4	6.16	39.6	1.713
III 5	7.45	39.1	1.730
IV 1	7.91	36.6	1.849
IV 2	8.02	38.7	1.608
IV 3	7.83	37.7	1.683
IV 4	7.48	37.4	1.863
IV 5	6.28	37.6	1.823

1) CK 处理中油菜生长缓慢,植株矮小,无法取样进行叶绿素含量和过氧化氢酶活性测定,故结果取 0。The rape in treatment CK grew slowly and the height of rape plant was low, chlorophyll content and catalase activity can not be tested, so the results may take 0.

1.11 倍。在处理 I、II、III、IV 中,叶绿素含量随着灰渣用量的增加呈现先增后减的趋势。在处理 III 中,叶绿素含量 SPAD 值由开始的 37.5,增加到 39.6,增加 5.6%,而后降到 39.1。在处理 I、III、IV 中,过氧化氢酶活性随着灰渣用量的增加也呈现先增后减的趋势。在处理 III 中,过氧化氢酶活性由开始的 1.704 mg/(g·min),增加到 1.865 mg/(g·min),增加 9.4%,而后降到 1.730 mg/(g·min),降低 7.2%。

通过平均鲜质量等 3 项生长指标值对油菜苗期生长情况进行聚类分级。SAS 软件的聚类分析是通过对平均鲜质量等 3 项指标数据进行归一化和相似统计量的计算并聚类,将所有配比组合分成 4 组,即好(i)、较好(ii)、较差(iii)、差(iv)4 个等级。其中,等级 i 包含 I 1、I 3、I 4、II 2、III 3、III 4、III 5、IV 2;等级 ii 包含 I 2、I 5、III 2、IV 1、IV 3、IV 4;等级 iii 包含 II 1、II 3、II 4、II 5、III 1、IV 5;等级 iv 包含 CK。通过对各等级配比组合的观察可知:处理 I 有 3 个配

比组合在等级ⅰ中,即这些处理的油菜生长态势好,其有2个配比组合在等级ⅱ中,即其有2个配比组合的油菜生长态势较好。根据处理Ⅰ的分析方法,可得出处理Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ的配比组合在4个等级中的分布情况,进而得出不同配料用量对油菜苗期生长的促进作用的大小顺序为:处理Ⅰ>处理Ⅲ>处理Ⅳ>处理Ⅱ>CK。

在处理Ⅰ的肥料用量中,有3个配比组合(即I1、I3、I4)在等级ⅰ中,即能够促使油菜苗期生长态势好。鲜质量是体现作物生长状况最重要的指标,通过比较以上3种配比组合下油菜的鲜质量大小,确定出最佳配比组合为I4(灰渣5-N0.3-P0.1-K0.1),即供试每千克红壤施N0.3 g、P₂O₅ 0.065 g、K₂O 0.036 g、灰渣5 g。

3 讨 论

3.1 灰渣中磷、钾的土壤转化及其有效性

灰渣与土壤的混合施用研究有助于了解土壤对养分元素的吸持特性,明确土壤对养分的最大需求量和标准需求量,提高施肥科学性、植物对肥料的利用率和各营养元素的有效性^[7]。

研究^[8]表明,提高土壤pH可以降低酸性土壤对磷的吸持能力,增加土壤中磷酸盐的溶解度。在酸性土壤中磷的吸附与固定与无定型铁铝呈正相关^[9-10],磷肥施入土壤后,由于铁、铝在酸性条件下溶解度大,能够与磷生成磷酸铝铁沉淀,成为植物难以吸收利用的磷^[11]。另外,黄棕壤和水稻土中有机质含量高于红壤,有机质及低分子有机酸具有较强的络合作用,并与阴离子竞争吸附位点,因而能够减少磷素固定,提高磷的有效性^[12-13]。

本试验中,对加入相同灰渣的不同土壤进行对比发现,水稻土对钾的固定作用要显著大于红壤和黄棕壤,这可能是与水稻土的碱性显著强于红壤和黄棕壤有关。酸性土壤的水合铝离子常聚合成多价阳离子,吸附于粘粒矿物表面。由于这些聚合离子体积较大,一方面对晶片表面的蜂窝状孔穴产生阻塞作用,防止钾离子进入,同时又发挥“楔子”作用,把相邻两晶片撑住,使它们不能闭合在一起,从而增大了晶片之间的距离,使酸性土壤的固钾能力小于碱性土壤^[14]。

3.2 生物质灰渣对土壤—植物系统无机元素转化迁移的影响机理

供试生物质灰渣具有强碱性,可显著提高土壤

pH,使酸性土壤趋于中性。土壤pH的升高可增强土壤中P、K的活性,从而提高土壤速效磷、K的含量。然而土壤中P、K的转化不相同,土壤中的P活性较差,很容易被吸附固定,移动性差,所以土壤具有较大的P库资源,土壤P活性的提高一直是土壤化学的一个难题。较大的磷库资源,使灰渣施入在提高P活性时,土壤有效P含量不断增加。反过来,当灰渣施入量增加时,释放的K增多,植物吸收K增加,呈现图5处理Ⅱ、Ⅲ中先增大后减小的趋势,而在图3中,随着灰渣用量增加P含量也不断增加。

离子的吸收动力学方程表明,随着底物离子浓度的增加,离子的吸收速度逐渐增加并最终趋于稳定。在低用量肥料水平的条件下,土壤中P、K等离子的含量较低,油菜植株吸收离子的速率和能力较低。当肥料用量提高时,土壤中P、K等离子的含量增加,将大大增加植株吸收养分离子的速率和能力。当肥料用量提高到一定程度时,土壤中P、K等离子的含量达到较高水平,此时植株根细胞膜上的载体饱和,植株吸收养分离子的速率和能力达到最大并保持稳定。此时,灰渣用量的变化不影响植株吸收养分离子的能力。

随着钾肥用量的增加,油菜植株地上部的Ca、Mg浓度呈下降趋势,而根部Ca、Mg浓度保持恒定;Ca、Mg吸收量占Ca、Mg、K吸收总量的比例随钾肥用量的增加明显下降,K与Ca、Mg之间存在拮抗作用^[15]。灰渣的施入改变了油菜K与Ca、Mg之间拮抗作用的表现形式,当灰渣用量低时,植株吸收K较少,随着灰渣用量的增加,土壤中Ca、Mg活性不断增加,大于K对于Ca、Mg的拮抗作用,使植株Ca、Mg吸收量不断增加;当灰渣用量高时,植株吸收K较多,随着灰渣用量的增加,K对于Ca、Mg的拮抗作用大于灰渣改良土壤pH所带来的提高离子活性的作用,致使Ca、Mg的吸收减少。

参 考 文 献

- [1] LIN W G, SONG W L. Power production from biomass in Denmark[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2005, 33(6): 650-655.
- [2] 朱雅兰,李明,黄巧云.草木灰污泥联合施用对Cd污染土壤中Cd形态变化的影响[J].华中农业大学学报,2010,29(4): 447-451.
- [3] 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.

[4] 朱红,常州,黄红英,等.高温焚烧对秸秆灰渣磷、钾养分变化的影响[J].植物营养与肥料学报,2007,13(6):1197-1201.

[5] MOILANEN M, FRITZE H, NIEMINEN M, et al. Does wood ash application increase heavy metal accumulation in forest berries and mushrooms? [J]. Forest Ecology and Management, 2006, 226:153-160.

[6] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000:42-108,263-271.

[7] 谭勇,张炎,李磐,等.土壤对养分离子吸附特性初步研究[J].土壤通报,2006,37(3):465-469.

[8] 赵小齐,鲁如坤.施用石灰对土壤吸附磷的影响[J].土壤,1991(2):82-86.

[9] BORGGAARD O K, JORGESEN S S, MOBERG J P, et al. Influence of organic matter on phosphate adsorption by alumini- num and iron oxides in sandy soils[J]. Soil Sci, 1990, 41: 443-449.

[10] YUAN G, LAVKULICH L M. Phosphate sorption in relation to extractable iron and aluminum in oodosols[J]. Soil Sci Soc Am J, 1994, 58:343-346.

[11] 章爱群,贺立源,赵会娥,等.有机酸对土壤无机态磷转化和速效磷的影响[J].生态学报,2009,29(8):4063-4069.

[12] XU R K, ZHAO A Z, JI G L. Effect of low-molecular-weight organic anions on surface charge of variable charge soils[J]. Colloid Interface Sci, 2003, 264:322-326.

[13] 沈宏,杨存义,范小威,等.大豆根系分泌物和根细胞壁对难溶性磷的活化[J].生态环境学报,2004,13(4):633-638.

[14] 黄昌勇.土壤学[M].北京:中国农业出版社,1999:206-207.

[15] 赵军霞.土壤酸碱性与植物的生长[J].内蒙古农业科技,2003(6):41-42.

Effects of integrated fertilization with bio-ash and chemical fertilizers on soil properties and growth of rape

CHEN Long WANG Min WANG Shuo HU Hong-qing

College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract Soil culture and pot experiments of bio-ash mixed with soil were employed to investigate the effects of bio-ash on soil properties and the seedling growth of rape. The results showed that the contents of soil effective nutrients increased with the increase of bio-ash application amount. Particularly the contents of available P and K in soil increased significantly. With the increase of ash amount, pH of soil increases and tends to neutral. The average increase is 7.78%. In low level of fertilizer, the increase of ash application amount is more conducive to the improvement of the soil available P, and the maximum increase is up to 4.2 times. The effect of changes in fertilizer application amount on the P absorption of rape is little. But with the increase of ash application amount, the content of total P in rape emerges the trend of increase first and then decrease. In middle level of fertilizer, the ash enhances the capacity of K absorption of rape plants, and the maximum increase of the content of total K in rape is up to 44.43%. In high level of fertilizer, the ash does not affect the capacity of K absorption of rape plants. The manifestation of antagonism between K and Ca, Mg in rape can be changed by the ash application. With the increase of ash application amount, the content of Ca and Mg absorption of rape emerges the trend of increase first and then decrease. All in all, a reasonable proportion of integrated fertilization with bio-ash and chemical fertilizers can promote the migration and transformation of nutrient elements in soil-plant system and the seedlings growth of rape.

Key words bio-ash; soil properties; pot experiments; rape; soil-plant system

(责任编辑:陆文昌)