

生物炭对水稻土 Olsen-P 的影响^①

巢军委^{1,2}, 王建国^{1*}, 戴 敏^{1,2}, 沈明星³, 陆长婴³

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049; 3 苏州市农业科学院, 江苏苏州 215155)

摘 要: 生物炭如何影响土壤磷素的有效性目前尚不清楚。本研究以稻草和白杨树枝为原料, 采用室内培养方法, 研究了 300℃、450℃和 600℃制备的生物炭在 5、15 和 40 g/kg 施用量下对水稻土 Olsen-P 的影响。与树枝炭相比, 稻草炭显著提高了水稻土 Olsen-P 含量; 3 种温度制备的稻草炭对水稻土 Olsen-P 的影响不存在显著差异; 3 种施用量稻草炭均显著提高了水稻土 Olsen-P 含量。生物炭制备原料和施用量均显著影响土壤磷素的有效性, 不同温度制备的生物炭对土壤磷素的有效性影响不显著。

关键词: 稻草炭; 白杨树枝炭; pH; 全磷; 有效磷

中图分类号: S153.6

磷是一种不可再生资源。磷肥在稻田中的利用率仅 8% ~ 20%^[1], 导致磷在土壤中大量积累和直接流失, 进而对周边水体环境构成严重威胁^[2]。因此, 如何挖掘磷肥资源以及充分利用土壤中的积累态磷, 已成为当前研究的热点。生物炭施入土壤后, 在发挥生物炭固碳、改良土壤^[3-7]作用的同时, 也提高了土壤磷的有效性^[8-9]。Gundale 和 Deluca^[10]通过 5 个月的温室培养试验研究发现, 与对照相比, 施入 20 g/kg 花旗松及黄松炭(热解温度为 350℃)显著提高了土壤中 PO_4^{3-} 的含量; Yamato 等^[11]研究发现, 与单施化学磷肥相比, 树皮炭(10 L/m²)与化学磷肥混施使土壤中的有效磷提高了 15.6 ~ 16.8 mg/kg; Asai 等^[12]研究发现, 8 t/hm² 的生物炭施用量, 提高了土壤有效磷的含量。然而, 目前的研究均未涉及不同原料生物炭、不同热解温度制备的生物炭及其施用量对土壤有效磷的影响。由于不同原料制备的生物炭以及相同原料在不同热解温度下制备的生物炭在其理化性质上存在着较大的差异^[13], 可能导致生物炭及其施用量对土壤有效磷影响上的差别。本研究以稻草和白杨树枝为生物炭原料, 以江苏典型水稻土——黄泥土为供试土壤, 研究了不同制炭温度下获得的生物炭及其施用量对水稻土磷素有效性的影响, 以为生物炭的实践应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 土壤 供试土壤为中国太湖地区典型水稻土——黄泥土, 采样地点为江苏省太湖地区农业科学研究所的稻田, 利用“之字形”采样方法和土钻采集了 0 ~ 20 cm 表层土样 20 个, 所采样品混合均匀后带回实验室进行风干, 磨细, 过 2 mm 筛后备用。土壤全磷(TP)含量为 1.13 g/kg, 有效磷(Olsen-P)含量为 41 mg/kg, pH 为 6.83。

1.1.2 生物炭 以稻草和白杨树枝为原料, 经风干后置于炭化炉内以 100℃/h 速率分别升至 300℃、450℃和 600℃后停留 4 h, 冷却后取出, 即为 300℃稻草炭(RR300)、450℃稻草炭(RR450)、600℃稻草炭(RR600)和 450℃白杨树枝炭(PB450)。上述生物炭磨碎、过 2 mm 筛后备用, 其基本性质和电镜扫描图像(SEM)分别见表 1 和图 1(放大 5 000 倍)。

1.2 试验设计

试验共设置 13 个处理, 包括: 1 个不加生物炭的对照处理和 12 个添加生物炭的处理, 即生物炭 RR300、RR450、RR600 和 PB450 添加量分别为 5、15、40 g/kg 土, 每个处理重复 3 次; 各处理及其重复经充分混合后置于盆钵中, 添加蒸馏水至 60% 的田间最大持水量, 用多孔薄膜密封盆钵口, 在 25℃

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(40771119)资助。

* 通讯作者(jgwang@issas.ac.cn)

作者简介: 巢军委(1989—), 男, 山东泰安人, 硕士研究生, 主要从事水稻土磷素方面研究。E-mail: yuzhoukerenchina@163.com

表 1 稻草炭和白杨树枝炭的理化性质
Table 1 Physicochemical properties of the rice-residue-chars and the poplar-branch-char

生物炭	pH	比表面积 (m ² /g)	TP (g/kg)	Olsen-P (mg/kg)	Ca (g/kg)	Mg (g/kg)	K (g/kg)
RR300	9.7 ± 0.05	3	4.56 ± 0.06	1 463 ± 19	12.36 ± 0.07	6.58 ± 0.04	46.47 ± 2.60
RR450	10.1 ± 0.09	22	4.63 ± 0.04	1 442 ± 68	13.43 ± 0.21	6.60 ± 0.02	56.51 ± 2.61
RR600	10.3 ± 0.05	91	4.84 ± 0.03	1 418 ± 37	13.50 ± 0.06	7.73 ± 0.25	63.76 ± 2.73
PB450	9.0 ± 0.04	267	1.27 ± 0.05	104 ± 17	18.58 ± 0.25	2.03 ± 0.07	3.44 ± 0.28

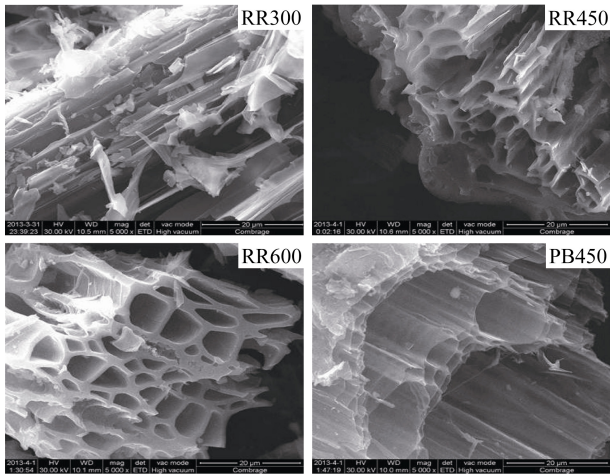


图 1 稻草炭和白杨树枝炭的 SEM 图像
Fig. 1 SEM images of the rice-residue-chars and the poplar-branch-char

条件下培养 45 天；在培养期间，通过添加蒸馏水保持 60%田间持水量；分别在培养的第 1、3、6、10、15、20、30 和 45 天取样，样品风干后测定 Olsen-P 和 pH。

1.3 测定与分析方法

土壤(包括土壤与生物炭的混合物)与生物炭的 pH^[14]分别以 1 : 2.5 和 1 : 15 固液比，用 pH 计(PHS-3CT, SHKY, China)进行测定；土壤(包括土壤与生物炭的混合物)与生物炭中的 Olsen-P 分别以 1 : 20 和 1 : 500 固液比进行测定^[15]；生物炭中的钾、钙、镁及磷总量用混合酸(HNO₃+HF+HClO₄)消解后，用 ICP-AES(Optima 8000 ,Perkin Elmer ,USA)进行测定；生物炭比表面积用比表面积及孔径分析仪进行测定(Micrometritics AsAP2050 , USA)；生物炭表面形态用扫描电镜(SEM)获得(FEI-quanta 200F , USA)；方差分析采用 SPSS 19.0 完成，*P*<0.05 和 *P*<0.01 分别表示差异性显著和极显著。

2 结果与讨论

2.1 不同原料生物炭对水稻土 Olsen-P 的影响

当 RR450 和 PB450 以相同用量(15 g/kg)分别施入土壤后，RR450 显著地提高了土壤中的 Olsen-P 含

量(*P*<0.05)，而 PB450 则未显著改变土壤中的 Olsen-P 含量(*P*> 0.05)(图 2)。表明不同原料生物炭对土壤 Olsen-P 有不同的影响。对于上述结果可作如下解释：

RR450 的 TP 和 Olsen-P 含量(表 1)分别是土壤(TP : 1.13 g/kg，Olsen-P : 41 mg/kg)的 4.1 和 35.2 倍，当 RR450 施入土壤后，可通过浓度梯度扩散作用显著提高土壤 Olsen-P 的含量(图 2)；而 PB450 的 TP 和 Olsen-P 含量(表 1)仅分别是土壤的 1.1 和 2.5 倍且又以 15 g/kg 的比例施入土壤中，从而难以对土壤 Olsen-P 产生显著影响(图 2)；RR450 和 PB450 的 pH(表 1)分别比土壤(pH 6.83)高出 3.27 和 2.16 单位，当 RR450 和 PB450 分别施入土壤后，均提高了土壤的 pH(图 3)，进而促进了土壤中铁、铝结合态磷的释放^[16-17]，提高了土壤中 Olsen-P 的含量(图 2)；但由于 PB450 的小孔隙密布(图 1)且比表面积较大(表 1)，易吸附土壤中的 Olsen-P^[4]，从而导致土壤中的 Olsen-P 含量未显著变化。

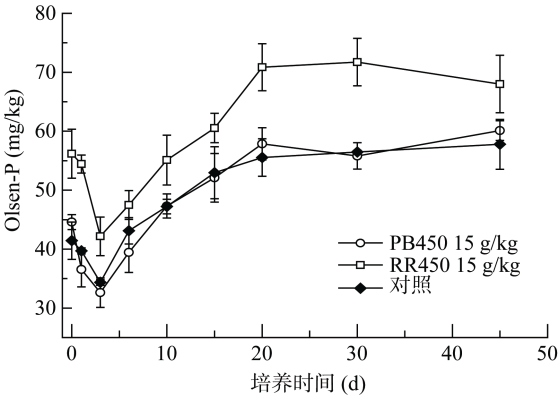


图 2 添加生物炭对水稻土 Olsen-P 含量的影响
Fig. 2 Effects of added biochars on the Olsen-P contents in paddy soils

2.2 不同热解温度制备的稻草炭对水稻土 Olsen-P 的影响

当 RR300、RR450 和 RR600 以相同用量(15 g/kg)分别施入土壤后，均显著地提高了土壤中的 Olsen-P 含量(*P*<0.05)，3 个处理间整体上不存在显著差异(图 4)。表明不同热解温度(300 ~ 600℃)制备的同种原料生物炭不显著影响土壤中的 Olsen-P 含量。对

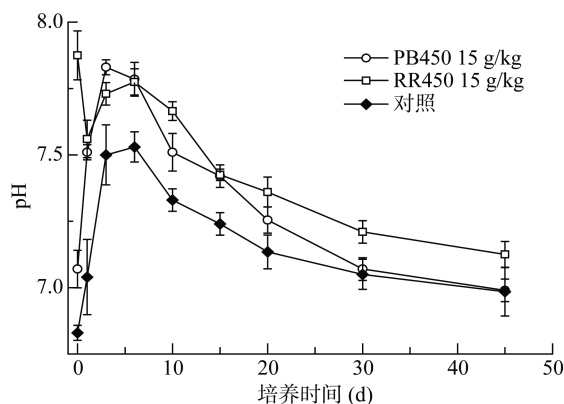


图 3 添加生物炭对水稻土 pH 的影响

Fig. 3 Effects of added biochars on pH of paddy soils

于上述结果可作如下解释：RR300、RR450 和 RR600 的 TP 和 Olsen-P 含量(表 1)是土壤(TP :1.13 g/kg ,Olsen-P : 41 mg/kg)的 4 和 35 倍，当 RR300、RR450 和 RR600 施入土壤后，可通过浓度梯度扩散作用显著提高了土壤 Olsen-P 的含量(图 4)；RR300、RR450 和 RR600 的 pH(表 1)分别比土壤(pH 6.83)高 2.84、3.27 和 3.47，当 RR300、RR450 和 RR600 施入土壤后，均提高了土壤的 pH(图 5)，pH 升高会释放土壤中被铁、铝固定的磷，从而提高土壤 Olsen-P 的含量^[17](图 4)；随着热解温度的提高所制备的 RR300、RR450 和 RR600 的 pH、TP 含量和比表面积在递增(表 1)，其中，高的 pH 和高的 TP 含量有利于提高土壤 Olsen-P 的含量(图 6、图 7)，而大的比表面积由于吸附作用则减少了土壤 Olsen-P 的含量，因此，RR300、RR450 和 RR600 的 pH、TP 含量和比表面积对土壤的综合影响，导致这 3 个处理间在对土壤 Olsen-P 的影响上表现为差异不显著(图 4)。Xu 等^[18]也发现生物质炭的 pH 和 TP 含量是导致土壤有效磷提高的主要原因。

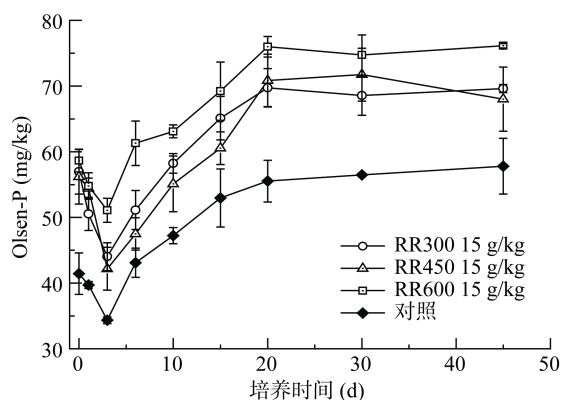


图 4 不同温度制备的稻草炭对水稻土 Olsen-P 含量的影响

Fig. 4 Effects of rice-residue-chars prepared at different temperatures on the Olsen-P contents in paddy soils

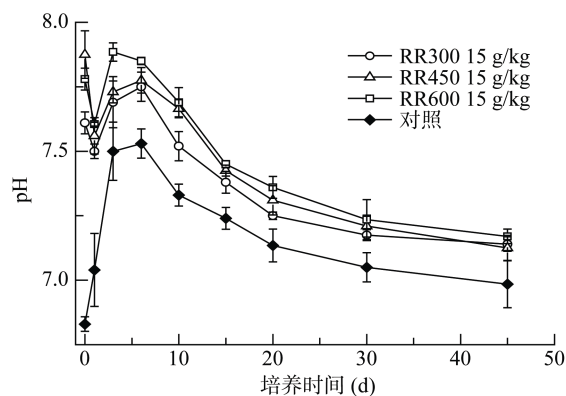


图 5 不同温度制备的稻草炭对水稻土 pH 的影响

Fig. 5 Effects of rice-residue-chars prepared at different temperatures on the pH of paddy soils

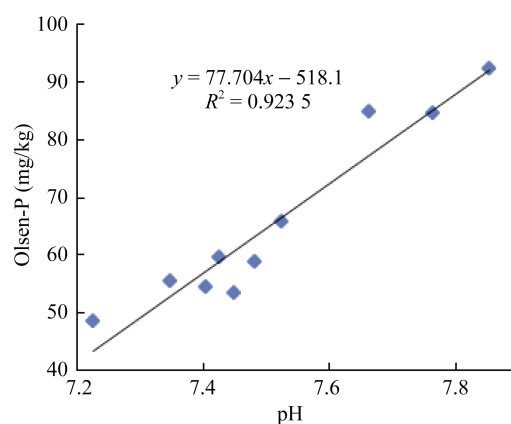


图 6 土壤 Olsen-P 含量与 pH 相关关系

Fig. 6 Relationship between Olsen-P contents and pH values

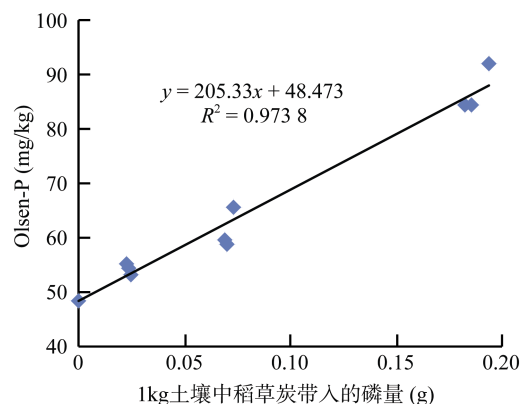


图 7 土壤 Olsen-P 含量与稻草炭带入磷量的相关关系

Fig. 7 Relationship between the Olsen-P contents and the P contents added through rice-residue-chars

2.3 不同稻草炭施用量对水稻土 Olsen-P 的影响

当 RR450 分别以 5、15 和 40 g/kg 的施用量施入土壤后，均显著地提高了土壤中的 Olsen-P 含量($P < 0.05$)，其中，40 g/kg 处理土壤中的 Olsen-P 含量显著高于 5 和 15 g/kg 处理($P < 0.05$)，15 g/kg 处理土壤中的 Olsen-P 含量高于且部分显著高于 5 g/kg 处理($P < 0.05$)(图 8)。这表明生物炭施用量影响土壤中 Olsen-P 的含量。

对于上述结果可作如下解释：RR450 的 TP 和 Olsen-P 含量(表 1)显著高于土壤(TP :1.13 g/kg ,Olsen-P : 41 mg/kg), 随着 RR450 施入量的增加, 带入土壤中的 TP 和 Olsen-P 量也在增加, 在浓度梯度的作用下 RR450 中的 TP 和 Olsen-P 逐渐向土壤中扩散, 从而提高了土壤中的 Olsen-P 含量(图 8); RR450 的 pH(表 1)显著高于土壤(pH 6.83), 随着 RR450 施入量的增加, 显著提高了土壤的 pH(图 9), 并将土壤中部分被铁铝固定的磷释放出来^[17], 从而提高了土壤中 Olsen-P 的含量(图 8); 从图 8、图 9 可以看出, 15 g/kg 处理土壤 Olsen-P 含量显著高于 5 g/kg 处理的区间与 15 g/kg 处理土壤中 pH 显著高于 5 g/kg 处理的区间是完全一致的, 说明 15 g/kg 处理土壤中 Olsen-P 含量显著高于 5 g/kg 处理, 正是由于 RR450 施入量的增加引起土壤 pH 升高, 进而促进了土壤中铁铝结合态磷的释放, 最终导致了土壤中 Olsen-P 含量的提高等连锁反应的结果。由此是否可以得出生物炭通过提高土壤 pH 来提高土壤中 Olsen-P 的含量, 是生物炭调节水稻土(铁铝磷含量高)磷库的重要机制这一结论, 尚需进一步研究证实。

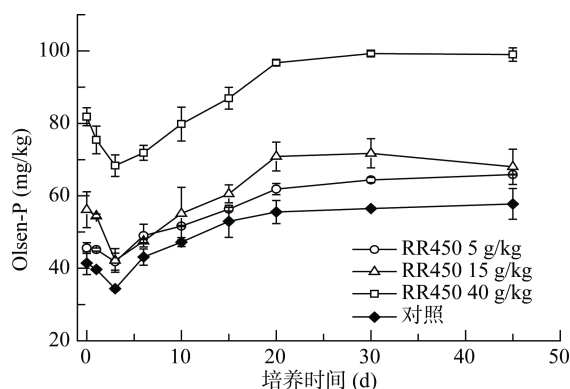


图 8 不同稻草炭施用量对水稻土 Olsen-P 含量的影响
Fig. 8 Effects of different application rates of rice-residue-chars on the Olsen-P contents in paddy soils

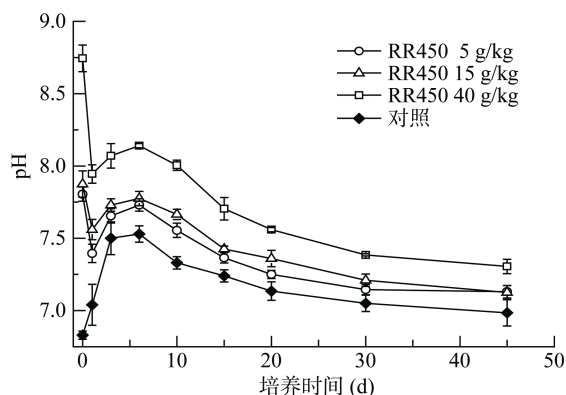


图 9 不同稻草炭施用量对水稻土 pH 的影响
Fig. 9 Effects of different application rates of rice-residue-chars on the pH of paddy soils

3 结论

不同原料制备的生物炭对土壤 Olsen-P 的影响显著; 不同热解温度制备的生物炭对土壤中 Olsen-P 含量的影响不显著; 生物炭的施用量与土壤中 Olsen-P 的含量呈正相关。生物炭的磷含量、pH 和比表面积是影响水稻土 Olsen-P 含量的主要因素, 其中, pH 为首要因素。生物炭对水稻土 Olsen-P 的影响机理以生物炭磷库和土壤铁铝磷库为源泉, 通过生物炭磷库的扩散、生物炭 pH 促进土壤铁铝磷库的释放和生物炭对土壤磷的吸附等方式, 影响水稻土中 Olsen-P 的含量。本研究的结果不仅可为生物炭的原料选取、制备及施用量的选择提供理论依据, 也为生物炭的生产应用提供指导。今后需要针对多种量多价廉的生物炭原料和不同的土壤类型, 开展生物炭对土壤有效磷的影响研究。

致谢: 感谢中国科学院南京土壤研究所谢祖彬研究员在生物炭制备方面给予的指导和帮助。

参考文献:

- [1] 李庆远, 朱兆良, 于天仁. 中国农业持续发展中的肥料问题[J]. 江西: 江西科学技术出版社, 1998: 3-5
- [2] 高超, 张桃林. 太湖地区农田土壤磷素动态及流失风险分析[J]. 农村生态环境, 2000, 16 (4): 24-27
- [3] Liang B, Lehmann J, Solomon D, Kinyangi J, Grossman J, Neill B, Skjemstad JO, Thies J, Luizão FJ, Petersen J, Neves EG. Black Carbon Increases Cation Exchange Capacity in Soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70(5): 1 719-1 730
- [4] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal-A review[J]. Biology and Fertility of Soils, 2002, 35(4): 219-230
- [5] Major J, Lehmann J, Rondon M, Goodale C. Fate of soil-applied black carbon: Downward migration, leaching and soil respiration[J]. Global Change Biology, 2010, 16 (4): 1 366-1 379
- [6] Pietikäinen J, Kiikkilä O, Fritze H. Charcoal as a habitat for microbes and its effect on the microbial community of the underlying humus[J]. Oikos, 2000, 89(2): 231-242
- [7] Chan KY, Van ZL, Meszaros I, Downie A, Joseph S. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment[J]. Australian Journal of Soil Research, 2007, 45(8): 629-634
- [8] 才吉卓玛, 翟丽梅, 习斌, 刘宏斌, 任天志. 生物炭对不同类型土壤中 Olsen-P 和 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 的影响[J]. 土壤通报, 2014, 45(1): 163-168
- [9] Chan KY, Van ZL, Meszaros I, Downie A, Joseph S. Using poultry litter biochars as soil amendments[J]. Australian Journal of Soil Research, 2008, 46: 437-444

- [10] Gundale MJ, Deluca TH. Charcoal effects on soil solution chemistry and growth of *Koeleria macrantha* in the ponderosa pine/Douglas-fir ecosystem[J]. *Biology and Fertility of soils*, 2007, 43(3): 303–311
- [11] Yamato M, Okimori Y, Wibowo IF, Anshori S, Ogawa M. Effects of the application of charred bark of *Acacia mangium* on the yield of maize, cowpea and peanut, and soil chemical properties in South Sumatra, Indonesia[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2006, 52 (4): 489–495
- [12] Asai H, Samson BK, Stephan HM, Songyikhangsuthor K, Homma K, Kiyono Y, Inoue Y, Shiraiwa T, Horie T. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos: 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield[J]. *Field Crops Research*, 2009, 111(1): 81–84
- [13] Gundale MJ, Deluca TH. Temperature and source material influence ecological attributes of ponderosa pine and Douglas-fir charcoal[J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, 231(1–3): 86–93
- [14] 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: 12–16
- [15] Murphy J, Riley J. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters[J]. *Analytica chimica acta*, 1962, 27: 31–36
- [16] Steiner C, Teixeira WG, Lehmann J, Nehls T, Macêdo J, Blum W, Zech W. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil[J]. *Plant and Soil*, 2007, 291 (1/2): 275–290
- [17] Topoliantz S, Ponge JF, Ballof S. Manioc peel and charcoal: a potential organic amendment for sustainable soil fertility in the tropics[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2005, 41(1): 15–21
- [18] Xu G, Wei LL, Sun JN, Shao HB, Chang SX. What is more important for enhancing nutrient bioavailability with biochar application into a sandy soil: Direct or indirect mechanism? [J]. *Ecological Engineering*, 2013, 52: 119–124

Effects of Biochar Amendment on Phosphorus Availability in Paddy Soil

CHAO Jun-wei^{1, 2}, WANG Jian-guo^{1*}, DAI Min^{1, 2}, SHEN Ming-xing³, LU Chang-ying³

(1 *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*; 2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 3 *Suzhou Academy of Agricultural Sciences, Suzhou, Jiangsu 215155, China*)

Abstract: Little information is available on biochar effects on phosphorus (P) availability in soil. Effects of the rice-residue-chars prepared at 300°C, 450°C and 600°C, and the poplar-branch-char prepared at 450°C with the rates of 5, 15 and 40 g/kg, respectively on P availability in paddy soils were studied by using indoor incubation. The Olsen-P content increased significantly in paddy soil amended by the rice-residue-char compared with the poplar-branch-char under the same conditions. There were no significant differences in Olsen-P contents of paddy soils amended by the rice-residue-chars prepared at 300°C, 450°C and 600°C, respectively. The results demonstrated that P availability in paddy soil is significantly affected by the amended biochar prepared by different feedstock and by application rate of the amended biochar, but not affected by the amended biochar prepared at different temperatures.

Key words: Rice-residue-char; Poplar-branch-char; pH; Total P; Available P