

水稻秸秆生物质炭对土壤磷吸附影响的研究^①

张 朴¹, 李仁英^{1,2*}, 吴洪生¹, 李 霖¹, 罗晶晶¹, 汪方圆¹,
高雅晓玲¹, 肖 城¹, 张 钱¹

(1 南京信息工程大学应用气象学院农业资源与环境系/江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044;

2 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

摘 要: 以水稻秸秆为原料, 分析了不同热解温度下所制备的生物质炭的性质, 并采用批处理法, 分析了生物质炭添加量和不同热解温度制备的生物质炭对土壤磷吸附特性的影响。结果表明: 随着热解温度的升高, 生物质炭的碳化程度、比表面积和磷含量增加。添加生物质炭显著减少了土壤对磷的吸附量, 而且随着生物质炭热解温度的增加, 土壤对磷的吸附量显著增加。Langmuir 方程和 Freundlich 方程都能够较好地拟合添加生物质炭土壤的磷等温吸附曲线。准一级动力学方程和准二级动力学方程可较好地描述添加生物质炭土壤的磷吸附动力学行为。通过以上研究结果可知, 水稻秸秆生物质炭可以减少土壤对磷的吸附并增加土壤有效磷的含量, 因此在土壤磷肥肥效改良方面具有一定的应用潜力。

关键词: 水稻秸秆; 生物质炭; 热解温度; 磷; 吸附

中图分类号: S156.2 **文献标识码:** A

磷是植物生长发育所必需的营养元素。由于土壤黏粒和无定形氧化物对磷具有较强的吸附与化学固定作用, 土壤溶液的磷浓度一般都很低, 大部分磷在土壤中以难溶性化合物形态存在^[1], 磷肥的当季植物利用率一般不超过 20%^[2]。如何提高土壤中的磷肥有效性是当今研究的热点之一。

生物质炭是指生物质在限氧或无氧条件下, 热解形成的富碳材料^[3]。生物质炭独特的多孔状结构使其在土壤改良、污染治理、固碳减排等方面具有广阔的应用前景。有研究表明, 生物质炭对磷吸附及磷有效性产生一定的影响, 其效应取决于生物质炭的来源、热解温度等因素^[4-5]。郎印海等^[6]研究发现, 施用柚子皮制备的生物质炭减少了土壤对磷的吸附, 且吸附量随生物质炭添加量的增加而降低。代银分等^[4]的研究表明, 生物质炭添加到土壤中, 减少了土壤对磷的吸附, 5 种原料制备的生物质炭对磷的最大吸附量依次为: 水葫芦 > 秸秆 > 竹子 > 松针 > 核桃壳。生物质炭除了影响土壤对磷的吸附外, 还通过改变土壤磷的形态而影响土壤磷的有效性。有研究表明, 添加

水稻秸秆生物质炭能够显著提高水稻土的 Olsen-P 含量^[7]。生物质炭制备的热解温度对生物质炭吸附磷有明显的影 响。张璐等^[8]报道, 随着热解温度的升高, 所制备的生物质炭对溶液磷的吸附量增大^[8]; 而施川等^[5]发现, 污泥生物质炭的磷吸附量在一定温度范围内随着热解温度的升高而增加, 而超过一定温度后其吸附量转而降低。这些研究表明, 可通过选择生物质炭原料类型以及热解温度而得到合适的生物质炭, 以用于增加土壤磷的有效性。

江苏是我国水稻的主要种植区之一, 近年全省水稻种植面积在 3 300 万亩左右, 每年都会产出大量水稻秸秆, 如何处理水稻秸秆已成为一大问题。虽然已有以秸秆为原料制备生物质炭, 并将生物质炭用于环境污染治理和改善土壤理化性质等方面的研究, 但关于水稻秸秆生物质炭对土壤磷吸附固定的影响有待进一步研究。本文以水稻秸秆为原料在不同热解温度下制备生物质炭, 研究生物质炭类型(热解温度)和用量对土壤磷吸附等温线以及吸附动力学的影响, 以为生物质炭用于提高土壤磷肥利用率的技术途径提供理论依据。

基金项目: 江苏省自然科学基金项目(BK20141479)、十二五环保科技重大水专项子课题项目(2015ZX07204-002)、南京信息工程大学大学生实践创新训练项目和土壤与农业可持续发展国家重点实验室项目(Y052010018)资助。

* 通讯作者(ryli75@163.com)

作者简介: 张朴(1991—), 男, 江苏宜兴人, 硕士研究生, 主要从事土壤重金属污染及修复方面的研究。E-mail: 835187965@qq.com

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验土壤采自南京信息工程大学农业气象试验站表层水稻土(0~20 cm)。土壤自然风干, 拣去枯枝落叶和小石子后, 过 2 mm 筛备用。供试土壤的基本理化性质按照常规方法测定^[9]。供试土壤 pH 为 6.8、有机质含量为 9.28 g/kg、全氮含量为 1.06 g/kg、有效磷为 6.89 mg/kg、速效钾为 62.8 mg/kg。

生物质炭的制备: 生物质炭原料为水稻秸秆, 取自南京信息工程大学农业试验站。将水稻秸秆洗净、烘干、研磨过 2 mm 筛, 于 105 °C 下干燥 24 h, 然后将水稻秸秆粉末装入容量为 260 g 的瓷罐中, 再放置于温度分别为 450, 500 和 600 °C 的马弗炉中热解 1 h, 待冷却至室温后取出, 研磨过 0.25 mm 筛。将生物质炭于 1 L 1 mol/L HCl 中浸泡 1 h, 然后用蒸馏水冲洗过滤, 直至过滤液呈中性(这一步是为了除去生物质炭中的灰分) 然后置于 75 °C 烘箱中烘干, 放入真空干燥器中备用。

1.2 测定方法

1.2.1 生物质炭基本理化性质的测定 生物质炭的有机碳含量(TOC)采用重铬酸钾容量法(外加加热法)测定; 生物质炭样品用硫酸和过氧化氢消解后, 其总磷含量采用钼蓝比色法测定, 总氮含量采用凯氏定氮法测定。

1.2.2 生物质炭的阳离子交换量(CEC) 按 Gaskin 等^[10]的方法进行测定。称取过 0.25 mm 筛的生物质炭 0.500 g, 先用 100 ml 去离子水 5 次淋洗, 每次 20 ml, 目的是为了减少炭中可溶性盐的干扰; 然后用 100 ml pH = 7.0 的 1 mol/L 乙酸钠溶液淋洗生物质炭 5 次, 每次 20 ml, 确保可交换位点被 Na⁺ 饱和; 再用 100 ml 的无水乙醇淋洗生物质炭 5 次, 每次 20 ml, 以洗去多余的 Na⁺; 最后用 100 ml pH = 7.0 的 1 mol/L 乙酸铵溶液淋洗生物质炭 5 次, 每次 20 ml, 收集滤液并用火焰光度计测定溶液中的 Na⁺ 浓度, 根据 Na⁺ 浓度计算生物质炭的 CEC。

1.2.3 生物质炭比表面积 采用全自动物理化学吸附仪(Autosorb-1, Quantachrome, 美国)测定。

1.3 试验设计

1.3.1 生物质炭热解温度对土壤磷吸附量的影响 准确称取过 10 目的风干土 1.25 g 于 50 ml 离心管中, 按照质量比 0%(BC0)和 4%(BC4)添加不同热解温度(450、500 和 600 °C)下制备的生物质炭, 各加入 25 ml 含磷为 60 mg/L 的 KH₂PO₄ 溶液(以 0.01 mol/L KCl 为平衡电解质, 调节 pH 为 7.0 左右), 每管加 2 滴

甲苯以抑制微生物活性。分别在 25 °C 下以 230 r/min 的转速恒温振荡 24 h 后, 离心、过滤, 用钼蓝比色法测定滤液中磷的浓度。

1.3.2 生物质炭对土壤磷吸附等温线的影响 准确称取过 10 目的风干土 1.25 g 于 50 ml 离心管中, 按照质量比为 0(BC0)、2%(BC2)、4%(BC4)、8%(BC8) 分别加入高温(600 °C)制备的生物质炭, 混匀后, 分别加入 25 ml 含磷量为 0、20、40、60、80、100、120、160 mg/L 的 KH₂PO₄ 溶液(以 0.01 mol/L KCl 为平衡电解质, 调节 pH 为 7.0 左右), 每管加 2 滴甲苯以抑制微生物活性。分别在 25 °C 下以 230 r/min 的转速恒温振荡 24 h 后, 离心、过滤, 用钼蓝比色法测定滤液中磷的浓度。

1.3.3 生物质炭对土壤磷吸附动力学的影响 准确称取过 10 目的风干土 1.25 g 于 50 ml 的离心管中, 按照质量比分别为 0、2%、4%、8% 加入高温(600 °C)制备的生物质炭, 加入 25 ml 含磷为 20 mg/L 的 KH₂PO₄ 溶液(以 0.01 mol/L KCl 为平衡电解质, 调节 pH 为 7 左右), 每管加 2 滴甲苯以抑制微生物活性。在 25 °C 恒温振荡器中以 230 r/min 振荡 0、0.25、0.5、1、2、4、8、12、24、48 h 后, 离心、过滤, 用钼蓝比色法测定滤液中磷的浓度。

1.4 计算方法

土壤对磷吸附容量(q_e)的计算方法:

$$q_e = \frac{(c_0 - c_e)V}{m} \quad (1)$$

式中: q_e 为土壤对磷的吸附量(mg/kg); V 为溶液的体积(ml); m 为土壤质量(g); c_0 和 c_e 分别为溶液中磷的初始浓度和平衡浓度(mg/L)

$$\text{Langmuir 方程: } \frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K_L q_m} + \frac{C_e}{q_m} \quad (2)$$

$$\text{Freundlich 方程: } \lg q_e = n \lg C_e + \lg K_F \quad (3)$$

式中: q_e 指达到吸附平衡时土壤对磷的吸附量(mg/g); q_m 为最大吸附量(mg/g); C_e 是指平衡溶液中磷的浓度(mg/L); K_L 、 K_F 、 n 均为常数。

$$\text{准一级动力学方程: } \lg(q_e - q_t) = \lg q_e - \frac{k_1 t}{2.303} \quad (4)$$

$$\text{准二级动力学方程: } \frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (5)$$

式中 q_e 、 q_t 分别为吸附平衡及 t 时刻的吸附量(mg/g); k_1 、 k_2 均为速率常数, 单位分别为 h⁻¹、g/(mg·h)。

1.5 数据分析

数据采用 Excel 2010 软件进行处理和拟合, 用 SPSS 19.0 统计软件, 采用单因素方差分析比较处理

间的差异显著性($P < 0.05$, LSD 检验)。

2 结果与分析

2.1 生物质炭的表征

水稻秸秆生物质炭的基本理化性质见表 1。由表 1 可知,热解温度影响了生物质炭的有机碳含量、阳

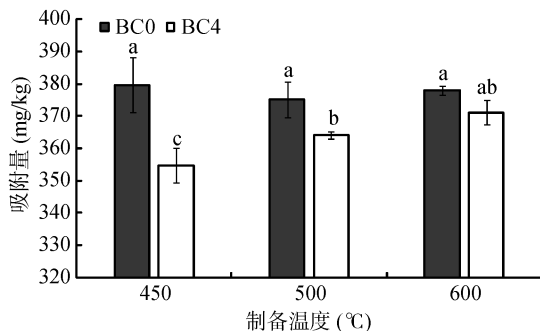
离子交换量、总磷、总氮及比表面积等基本理化性质。随着热解温度的升高,生物质炭中的有机碳含量不断增加,而阳离子交换量则不断降低。生物质炭中的总磷含量随着热解温度升高而增加,而总氮含量则相对稳定,基本不受热解温度的影响。随着热解温度的增加,生物质炭的比表面积增加。

表 1 生物质炭的基本性质
Table 1 Basic properties of tested biochars made under different temperatures

| 生物质炭 | 有机碳(g/kg) | 阳离子交换量(cmol/kg) | 总磷(g/kg) | 总氮(g/kg) | 比表面积(m ² /g) |
|-------|-----------|-----------------|----------|----------|-------------------------|
| BC450 | 351.29 | 38.25 | 0.581 | 0.266 | 32.22 |
| BC500 | 386.12 | 34.50 | 0.865 | 0.260 | 49.35 |
| BC600 | 450.35 | 29.12 | 0.922 | 0.267 | 70.40 |

2.2 不同热解温度生物质炭对土壤磷吸附的影响

由图 1 可知,生物质炭的添加显著减少了土壤对磷的吸附($P < 0.05$)。与对照相比(未添加生物质炭),添加 450 °C 和 500 °C 制备的生物质炭分别使土壤磷的吸附量显著降低 6%、3%($P < 0.05$),因此生物质炭的添加对土壤磷吸附具有抑制作用。不同热解温度制备的生物质炭对土壤磷的吸附量随着热解温度的增加显著增加。添加热解温度为 600 °C 的生物质炭后土壤磷吸附量比添加 450 °C 生物质炭的显著增加 4.43%($P < 0.05$),说明热解温度越低,所制备的生物质炭对土壤磷吸附的抑制作用越明显。



(图中小写字母不同表示不同处理间差异达到 $P < 0.05$ 显著水平)

图 1 生物质炭热解温度以及添加量对土壤吸附磷的影响
Fig. 1 Effects of preparation temperature and applying amount of biochar on P adsorption in soil

2.3 生物质炭对土壤磷吸附等温线的影响

由图 2 可知,土壤对磷的吸附量随着平衡溶液中磷浓度的增大而增加,最大吸附量达到 800 mg/kg。在平衡溶液磷浓度小于 70 mg/L 时,生物质炭添加量对土壤磷吸附无显著影响;在平衡溶液磷浓度大于 90 mg/L 时,添加生物质炭降低了土壤对磷的吸附量,且生物质炭添加量为 4% 时,土壤对磷的吸附量最低;在平衡溶液磷浓度达到 120 mg/L

左右时,生物质炭添加 8%(BC8)时,土壤对磷的吸附量最低。

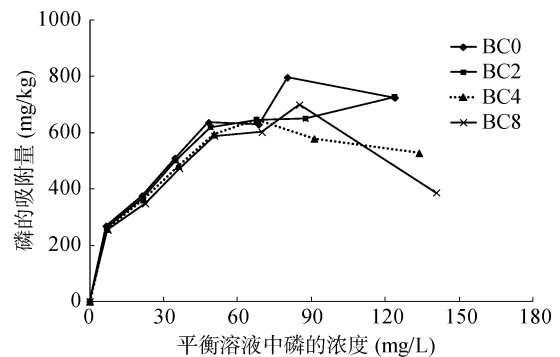


图 2 生物质炭对磷吸附等温线的影响
Fig. 2 Effects of biochars on P adsorption isotherms

为了更好地描述土壤对磷的吸附特征,揭示土壤磷的吸附量与平衡溶液中磷浓度之间的关系以及生物质炭对土壤磷吸附的影响,本文采用 Langmuir (方程 2)和 Freundlich(方程 3)等温吸附方程分别对试验结果进行拟合,拟合参数如表 2 所示。由表 2 可知,除了 BC8 处理,Langmuir 方程和 Freundlich 方程都能较好地描述生物质炭添加条件下土壤对磷的吸附行为,拟合系数达到极显著水平($P < 0.01$ 或 $P < 0.001$)。

2.4 生物质炭对土壤磷吸附动力学的影响

添加生物质炭条件下,土壤对磷的吸附量随时间变化见图 3。由图 3 可知,在初始 10 h 内,土壤对磷的吸附速率较快,之后便趋于缓慢,24 h 后磷的吸附量不再明显增加,达到吸附平衡状态。图 3 也表明,添加生物质炭抑制了土壤对磷的吸附。达到吸附平衡时,添加 2%(BC2)、4%(BC4)和 8%(BC8)生物质炭的土壤对磷的吸附量与未添加生物质炭土壤(CK)相比分别减少了 1.45%、2.17% 和 2.54%。

表 2 水稻秸秆生物质炭对土壤磷吸附的等温方程参数的影响
Table 2 Effects of rice straw biochars on parameters of isothermal equation of P adsorption in soil

| 处理 | Langmuir 方程 | | | Freundlich 方程 | | |
|-----|--------------|-------|----------|---------------|-------|----------|
| | q_m (mg/g) | K_L | R^2 | n | K_F | R^2 |
| CK | 0.735 | 0.082 | 0.912*** | 0.380 | 0.130 | 0.932*** |
| BC2 | 0.699 | 0.084 | 0.922*** | 0.365 | 0.132 | 0.954*** |
| BC4 | 0.625 | 0.096 | 0.913*** | 0.292 | 0.158 | 0.787** |
| BC8 | 0.584 | 0.103 | 0.742** | 0.258 | 0.173 | 0.496 |

注：**表示 $P < 0.01$ 显著水平；***表示 $P < 0.001$ 显著水平，下同。

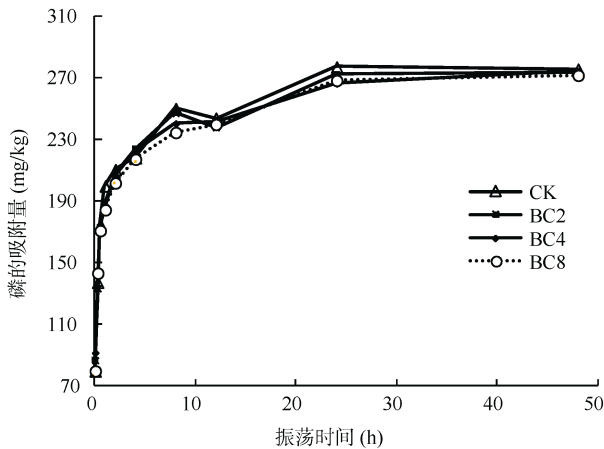


图 3 生物质炭添加量对土壤磷吸附动力学的影响
Fig. 3 Effects of biochar-added amounts on soil P adsorption kinetics

吸附动力学主要用来描述吸附剂吸附溶质速率的动态变化，对更好地理解吸附机理有着重要的作用。为了分析不同生物质炭添加量对土壤磷吸附速率的影响，探讨其可能的吸附机理，分别用准一级动力学模型(方程 4)和准二级动力学模型(方程 5)对试验结果进行拟合(表 3)。

从表 3 可以看出，准一级动力学方程和准二级动力学方程都能很好地描述添加生物质炭土壤对磷吸附的动力学行为。对于 CK 和 BC2 处理，准二级动力学方程的相关系数(R^2)大于准一级动力学方程。通过模型计算的理论平衡吸附量($q_{e,cal}$)与试验结果($q_{e,exp}$)比较接近，表明准二级动力学方程能更好地描述生物质炭添加土壤对磷的吸附过程。

表 3 添加水稻秸秆生物质炭对土壤磷吸附的动力学参数
Table 3 Kinetic parameters of soil adsorption of P with rice straw biochars

| 处理 | 准一级动力学方程 | | | 准二级动力学方程 | | |
|-----|----------|-------|----------|----------|--------|----------|
| | q_e | K_1 | R^2 | q_e | K_2 | R^2 |
| CK | 0.275 | 0.113 | 0.842** | 0.251 | 18.457 | 0.943*** |
| BC2 | 0.274 | 0.098 | 0.889*** | 0.247 | 18.212 | 0.939*** |
| BC4 | 0.273 | 0.108 | 0.978*** | 0.243 | 21.437 | 0.911*** |
| BC8 | 0.271 | 0.079 | 0.897*** | 0.240 | 22.547 | 0.890*** |

3 讨论

关于生物质炭对土壤磷吸附影响的研究，目前主要集中在生物质炭的原料来源、热解温度及添加量等方面。张璐等^[8]研究表明随着生物质炭热解温度的升高，所得的生物质炭对水溶液中磷的吸附量增加。Hollister 等^[11]也得到了相似的结果，即较高温度制备的生物质炭对磷的吸附量也较高。本研究的结果也表明随着热解温度的增加，生物质炭对磷的吸附量增加。本研究表明随着生物质炭热解温度增高，其比表面积增大(表 1)，这可能是生物质炭热解温度升高引起土壤磷吸附量增加的原因。王震宇等^[12]也认为随

着热解温度升高，生物质炭碳化程度增加和比表面积增大等因素是导致不同热解温度生物质炭上镉吸附能力差异的原因。但王章鸿等^[13]报道，在一定温度范围内随着热解温度的增加，生物质炭对溶液中磷的吸附量增加，但当达到 500 °C 以后，继续增温，磷的吸附量反而降低。这说明生物质炭对磷吸附的影响不仅与生物质炭的热解温度有关，还可能与温度的增加方式及生物质炭原料来源有关。

本研究中 Langmuir 方程和 Freundlich 方程较好地拟合生物质炭添加条件下土壤对磷的吸附行为，这说明在水稻秸秆生物质炭存在下，土壤对磷的吸附是多層吸附，在高浓度时，吸附容量会持续增加。此外，

通过 Langmuir 模型计算得到的参数表明, q_m 随着生物质炭添加量的增大而减小, 说明生物质炭的添加抑制了土壤对磷的吸附, 且随着添加量的增加, 抑制作用更明显。Freundlich 模型能反映吸附剂对吸附质的多层吸附行为, 同时吸附表面也存在着一定的不均匀性^[14], Freundlich 方程中非线性 n 反映了吸附质吸附位点能量分布特征。本研究中 n 值均小于 1, 这表明在添加生物质炭的土壤中磷吸附位点的分布具有异质性, 土壤对磷的吸附呈非线性。

本研究中, 准一级动力学方程和准二级动力学方程都能很好地描述添加生物质炭土壤对磷吸附的动力学行为。对于 CK 和 BC2 处理, 准二级动力学方程的相关系数(R^2)大于准一级动力学方程。有学者研究认为准二级动力学方程包含了外部膜扩散、表面吸附和粒子内扩散等, 化学键的形成是影响准二级动力学吸附作用的主要因子, 说明该吸附过程主要以化学吸附为主^[15], 具体原因尚需进一步探讨。

本研究还发现, 生物质炭添加到土壤中抑制了土壤对磷的吸附, 在磷浓度较高的情况下这种抑制作用更加明显。这个结果也被其他研究者所证实^[4,6]。生物质炭抑制土壤磷吸附的可能原因有以下几个方面:

解热后, 生物质炭中的 PO_4^{3-} 增加^[16], 当加入土壤中时, 生物质炭中的部分磷元素会释放出来, 占据一部分土壤磷的吸附位点, 从而减弱土壤对磷元素的吸附。在本研究中, 水稻秸秆生物质炭的磷含量在 0.581 ~ 0.922 mg/kg 之间(表 2), 这使生物质炭释放磷元素成为可能; 土壤添加生物质炭后干扰了土壤铁铝氧化物对磷的吸附, 从而减少土壤对磷的吸附; 生物质炭有较高的阳离子交换量, 土壤中添加生物质炭后可通过增加阳离子交换能力或影响与磷相互作用的阳离子活性而改变磷的有效性, 从而间接影响对磷的吸附量^[17]。

生物质炭的用量也会影响土壤对磷的吸附。随着生物质炭添加量的增加, 生物质炭对土壤磷吸附量减少。周丽丽等^[18]也得出类似的结果, 即土壤有效磷含量随生物质炭施入量增大而依次增加, 且均明显高于对照处理 20% 以上。出现这一现象的主要原因可能是水稻秸秆生物质炭本身含有一定的磷(表 2), 随着生物质炭添加量的增加, 输入到土壤中的磷相应增加, 且磷在生物质炭中主要以无机磷存在^[19], 因此添加量越多, 越不利于磷的吸附, 相应地有效性增加。苏倩等^[20]研究表明, 施用生物质炭使土壤水溶性磷、速效磷及全磷含量显著增加, 显著提高土壤磷素含量及其有效性。侯建伟等^[21]报道, 施用生物质炭后,

沙土中的有效磷含量增加 323%。这些研究结果都表明生物质炭增加了土壤磷的有效性。

综上所述, 热解温度的升高能提高所获得生物质炭的碳化程度, 增大比表面积, 从而影响土壤对磷的吸附。生物质炭本身含有一定的磷, 因而同时可以利用生物质炭增加土壤磷的有效性。由于水稻秸秆是农业生产的废弃物, 容易获得, 因此水稻秸秆生物质炭在改善土壤磷肥有效性方面具有广阔的应用前景。

4 结论

制备生物质炭的热解温度能影响其本身的理化性质, 提高碳化程度, 增大比表面积和磷含量。水稻秸秆生物质炭能显著降低土壤磷的吸附量, 但吸附量随着生物质炭热解温度的升高而增加。加入水稻秸秆生物质炭土壤磷等温吸附曲线符合 Langmuir 方程和 Freundlich 方程, 且土壤对磷的最大吸附量随着生物质炭添加量的增加而减小。添加生物质炭的土壤磷吸附动力行为符合准一级动力学模型和准二级动力学模型。

参考文献:

- [1] 葛顺峰, 周乐, 门永阁, 等. 添加不同碳源对苹果园土壤氮磷淋溶损失的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(2): 31-35
- [2] 李春越, 王益, 党廷辉, 等. 不同施肥配比对土壤磷素固液相分配及组分的影响[J]. 中国环境科学, 2011, 31(2): 265-270
- [3] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems—A review[J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2006, 11(2): 395-419
- [4] 代银分, 李永梅, 范茂攀, 等. 不同原料生物炭对磷的吸附解吸能力及其对土壤磷吸附解析的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2016, 36(5): 345-351
- [5] 施川, 张盼月, 郭建斌, 等. 污泥生物炭的磷吸附特性[J]. 环境工程学报, 2016, 10(12): 7202-7208
- [6] 郎印海, 王慧, 刘伟. 柚皮生物炭对土壤中磷吸附能力的影响[J]. 中国海洋大学学报, 2015, 45(4): 78-84
- [7] 巢军委, 王建国, 戴敏, 等. 生物炭对水稻土 Olsen-P 的影响[J]. 土壤, 2015, 47(4): 670-674
- [8] 张璐, 贾丽, 陆文龙, 等. 不同碳化温度下玉米秸秆生物炭的结构性质及其对氮磷的吸附特性[J]. 吉林大学学报, 2015, 53(4): 802-808
- [9] 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, 1999
- [10] Gaskin J W, Steiner C, Harris K, et al. Effect of low temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use[J]. Transactions of American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2008, 51(6): 2061-2069

- [11] Hollister C C, Bisogni J J, Lehmann J. Ammonium, nitrate, and phosphate sorption to and solute leaching from biochars prepared from corn stover (*Zea mays* L.) and oak wood (*Quercus* spp.) [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42(1): 137–144
- [12] 王震宇, 刘国成, 李锋民, 等. 不同热解温度生物炭对 Cd() 的吸附特性[J]. *环境科学*, 2014, 35(12): 4735–4744
- [13] 王章鸿, 郭海艳, 沈飞, 等. 热解条件对生物炭性质和氮、磷吸附性能的影响[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(9): 2805–2812
- [14] 张晓蕾, 薛文平, 徐恒振, 等. 近海沉积物对粪固醇的等温吸附和热力学研究[J]. *环境科学*, 2012, 33(10): 3547–3553
- [15] 郑祥, 雷洋, 陈迪, 等. 纳米 TiO₂ 对模型病毒-f2 噬菌体的吸附特性[J]. *中国科学: 化学*, 2013(5): 610–617
- [16] Gundale M J, Deluca T H. Temperature and substrate influence the chemical properties of charcoal in the ponderosa pine/Douglas-fir ecosystem[J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, 231: 86–93
- [17] Lehmann J, Joseph S. Biochar for environmental management: science, technology and implementation[M]. London: Earthscan Publications Ltd, 2009: 251–270
- [18] 周丽丽, 李婧楠, 米彩虹, 等. 秸秆生物炭输入对冻融期棕壤磷有效性的影响[J]. *土壤学报*, 2017, 54(1): 171–179
- [19] Hossain M K, Strezov V, Chan K Y, et al. Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar[J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(1): 223–228
- [20] 苏倩, 侯振安, 赵靓, 等. 生物炭对土壤磷素和棉花养分吸收的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(3): 642–650
- [21] 侯建伟, 索全义, 梁桓, 等. 有机物料对沙蒿生物炭改良沙土中有效养分的增效作用[J]. *土壤*, 2016, 48(3): 463–467

Effect of Rice Straw Biochar on Phosphorus Adsorption in Paddy Soil

ZHANG Pu¹, LI Renying^{1,2*}, WU Hongsheng¹, LI Lin¹, LUO Jingjing¹, WANG Fangyuan¹,
GAO Yaxiaoling¹, XIAO Cheng¹, ZHANG Qian¹

(1 *Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology / Department of Agricultural Resources and Environment, College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China*; 2 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Nanjing Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*)

Abstract: Properties of rice straw biochars made under different temperatures were analysed and effects of biochars addition amount on Phosphorus (P) adsorption in a paddy soil were investigated by batch method. The results showed that carbonization degree, specific surface area and P concentration of biochar increased with the increase of pyrolysis temperature. Compared with the control (without biochar), biochar addition reduced P adsorption by inhibiting P adsorption to soil. Moreover, P adsorption of rice straw biochar was affected significantly by the pyrolysis temperature, which increased with the increase of pyrolysis temperature. Langmuir and Freundlich isotherm equations well described P adsorption isotherm behavior, and Pseudo first-and second-order kinetics well described the behavior of P adsorption kinetics in soils amended with rice straw biochar. Overall, rice straw biochar could improve phosphorus availability in soil through reducing P adsorption in soil and introducing additional P to soil, therefore, it has a great potential in improving phosphorus fertility in soils.

Key words: Rice straw; Biochar; Pyrolysis temperature; Phosphorus; Adsorption