

曹殿云, 兰宇, 杨旭, 等. 生物炭调节盐化水稻土磷素形态及释放风险研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(11): 2536–2543.

CAO Dian-yun, LAN Yu, YANG Xu, et al. Regulation of phosphorus fractions and release risk upon biochar application in saline paddy soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(11): 2536–2543.

## 生物炭调节盐化水稻土磷素形态及释放风险研究

曹殿云<sup>1,2</sup>, 兰宇<sup>1,2\*</sup>, 杨旭<sup>1,2</sup>, 赫天一<sup>1,2</sup>, 刘遵奇<sup>1,2</sup>, 陈温福<sup>1,2</sup>, 蔡丹丹<sup>3</sup>, 温秋香<sup>4\*</sup>

(1. 沈阳农业大学农学院, 沈阳 110866; 2. 辽宁省生物炭工程技术研究中心, 沈阳 110866; 3. 中化化肥有限公司辽宁分公司, 沈阳 110866; 4. 桓仁县农业发展服务中心, 辽宁 桓仁 117200)

**摘要:**为探明生物炭施用对盐化水稻土磷素形态及释放风险的影响,以滨海草甸盐化水稻土为基础,结合室内分析,研究了不同用量生物炭还田方式(CK:0 t·hm<sup>-2</sup>; B1:20 t·hm<sup>-2</sup>; B2:40 t·hm<sup>-2</sup>)条件下土壤磷含量、组分特征及磷素释放风险。结果表明:生物炭能提高土壤全磷、有效磷、总有机磷和总无机磷含量,提高幅度分别为:11.40%~35.70%、28.96%~46.63%、11.30%~29.19%和10.54%~25.98%。生物炭提高了土壤NaHCO<sub>3</sub>浸提态磷(Ca<sub>2</sub>-P)、NH<sub>4</sub>AC浸提态磷(Ca<sub>8</sub>-P)和NH<sub>4</sub>F浸提态磷(Al-P)含量,随着施炭量的增加而增大,且各处理间差异显著;当施炭量为20 t·hm<sup>-2</sup>时,土壤NaOH-Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>浸提态磷(Fe-P)和闭蓄态磷(O-P)含量显著高于其他处理;施用生物炭对H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>浸提态磷(Ca<sub>10</sub>-P)无显著影响。生物炭显著提高了土壤活性有机磷(LOP)和中等活性有机磷(MLOP)含量,但显著降低了土壤中等稳定性有机磷(MROP)含量,当施炭量为40 t·hm<sup>-2</sup>时,土壤高等稳定性有机磷(HROP)含量最小,且显著低于其他处理。本试验中土壤的活性Al[Al<sub>(ox)</sub>]和活性Fe[Fe<sub>(ox)</sub>]均处于较高水平;施用生物炭显著提高了土壤磷吸持指数(PSI),增加了土壤固磷能力;土壤磷吸持饱和度(DPSS)为6.81%~8.34%,土壤磷释放风险指数(ERI)为54.55%~61.67%。综上所述,在本文试验条件下,施用生物炭可以改善盐化水稻土磷素状况,且不会增大土壤磷素释放的风险。

**关键词:**生物炭;水稻土;磷组分;磷吸持指数;吸持饱和度;环境风险

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2019)11-2536-08 doi:10.11654/jaes.2019-0682

### Regulation of phosphorus fractions and release risk upon biochar application in saline paddy soil

CAO Dian-yun<sup>1,2</sup>, LAN Yu<sup>1,2\*</sup>, YANG Xu<sup>1,2</sup>, HE Tian-yi<sup>1,2</sup>, LIU Zun-qi<sup>1,2</sup>, CHEN Wen-fu<sup>1,2</sup>, CAI Dan-dan<sup>3</sup>, WEN Qiu-xiang<sup>4\*</sup>

(1. Agronomy College, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 2. Liaoning Biochar Engineering & Technology Research Center, Shenyang 110866, China; 3. Liaoning Branch of Fertilizer Chinese Company, Shenyang 110866, China; 4. Huanren County Agricultural Development Service Center, Huanren 117200, China)

**Abstract:** In order to investigate the effect of biochar application on phosphorus fractions and release risk of coastal meadow saline paddy soils, a field experiment was conducted to investigate soil P content, characteristics of P fractions, and P release risk under different biochar application rates (CK: 0 t·hm<sup>-2</sup>; B1: 20 t·hm<sup>-2</sup>; B2: 40 t·hm<sup>-2</sup>). The results showed that biochar could increase the content of total P, Olsen-P, total organic P, and total inorganic P in soil by 11.40%~35.70%, 28.96%~46.63%, 11.30%~29.19%, and 10.54%~25.98%, respectively. Biochar increased the content of NaHCO<sub>3</sub> soluble P (Ca<sub>2</sub>-P), NH<sub>4</sub>AC soluble P (Ca<sub>8</sub>-P), and NH<sub>4</sub>F soluble P (Al-P) in soil, and there was a significant positive correlation with biochar dosage. When biochar application was 20 t·hm<sup>-2</sup>, the content of NaOH-Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> soluble P (Fe-P) and occluded P (O-P) in soil reached the highest values. The application of biochar had no significant effect on H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> soluble P (Ca<sub>10</sub>-P). Biochar significantly increased the content of soil labile organic P (LOP) and moderately labile organic P (MLOP), but sig-

收稿日期: 2019-06-18 录用日期: 2019-08-28

作者简介: 曹殿云(1992—), 吉林临江人, 博士研究生, 从事生物炭应用研究。E-mail: dianyuncao@126.com

\*通信作者: 兰宇 E-mail: lanyu312228@syau.edu.cn; 温秋香 E-mail: 18904032450@163.com

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503136); 国家自然科学基金项目(41401325); 辽宁省自然科学基金项目(20180550247); 国家水稻产业秸秆与副产物综合利用岗位(CARS-01-46)

**Project supported:** The Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest of China (201503136); The National Natural Science Foundation of China (41401325); The Natural Science Funds of Liaoning (20180550247); Comprehensive Utilization of Straw and Byproduct in National Rice Industry (CARS-01-46)

nificantly reduced the content of moderately resistant soil organic P (MROP). When the amount of biochar was  $40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ , the content of highly resistant soil organic phosphorus (HROP) reached the lowest value. In this experiment, soil  $\text{Al}_{(\text{ox})}$  and  $\text{Fe}_{(\text{ox})}$  were at a high level and the application of biochar significantly increased soil P sorption index (PSI) and increased the fixation capacity of soil P. Soil P adsorption saturation (DPSS) was only 6.81%~8.34%, and soil environmental risk index (ERI) was 54.55%~61.67%. In conclusion, the application of biochar can improve the P availability of salinized paddy soil, but do not increase the risk of soil P release under the conditions of this study.

**Keywords:** biochar; paddy soil; P fractions; P sorption index; degree of P sorption saturation; environmental risk

我国盐碱地的面积约占全国土地面积的四分之一,大约有9913万 $\text{hm}^2$ ,其中500万 $\text{hm}^2$ 的盐碱地为滨海盐碱地,种植水稻可以有效地改良盐碱土<sup>[1]</sup>。磷是植物生长发育所必需的营养元素。为促进作物正常生长发育,维持作物高产水平,满足粮食生产安全需要,全球每年大约有1500万t磷肥投入到农业土壤中<sup>[2]</sup>,而磷肥在农业生产中的利用率仅为5%~20%<sup>[3]</sup>。施入土壤中的磷素大部分以无效态形式储存在土壤中,会通过地表径流、侵蚀和淋溶等途径进入水体,造成水体富营养化<sup>[4-5]</sup>。而水稻土壤中磷的高流失风险制约了水稻经济可持续生产的发展<sup>[2]</sup>。

将农林废弃物制成生物炭并将其作为土壤改良剂投入土壤是提高土壤肥力和加强环境可持续管理的有效途径<sup>[6]</sup>。生物炭的输入不但能通过自身有机磷矿化来改善土壤磷素形态,生物炭还可以通过巨大的比表面积,丰富的孔隙结构和复杂的表面官能团等特性影响土壤对磷的吸附、解吸等特性来调节土壤磷素形态;并且还可以促进一些生物化学过程来活化土壤中难溶态磷,使其转化为可溶态磷<sup>[7]</sup>。生物炭作为一种磷源施入土壤,其磷含量是农作物秸秆平均磷含量的2~3倍<sup>[8]</sup>,因此,施用生物炭可以直接提高土壤中磷素含量。但是,目前关于生物炭对土壤磷有效性和持留率影响的研究结果并不一致。大量研究表明,施用生物炭能够提高土壤磷的有效性,也有报道指出生物炭能够吸附土壤中的磷酸盐,但生物炭作为一种持磷肥料在土壤中有释放磷的潜力。生物炭可以与土壤竞争吸附 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 和 $\text{Ca}^{2+}$ 来活化被土壤固定的磷<sup>[9]</sup>,进而促进土壤沉淀反应的磷的含量,提高土壤中磷的植物有效性<sup>[10]</sup>。作物对磷的吸收和积累也可以增加吸附态磷的释放,进而影响土壤磷素的循环<sup>[9]</sup>。也有研究表明,生物炭可以通过吸附磷来降低土壤溶液中的磷浓度,大量的磷在生物炭中富集,使生物炭变成一个磷储存库<sup>[2]</sup>。由于生物炭对磷的固定作用,其施入土壤后会降低中性土壤或碱性土壤的磷的有效性<sup>[11]</sup>。

综上,生物炭对磷的有效性和迁移转化过程有显著影响,但长期或大量施用生物炭是否会带来土壤磷素释放风险亟待深入研究。本研究以滨海盐化水稻土为研究对象,分析生物炭对土壤磷素形态及释放风险的影响,以期生物炭在提高水稻磷肥利用率和减少磷素流失方面的研究提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地及试验材料概况

试验于2016年9月至2018年9月在辽宁盘锦市盘山县( $122^{\circ}03'51''\text{E}$ , $40^{\circ}56'09''\text{N}$ )试验田进行,供试土壤为典型滨海盐化水稻土,水稻品种为盐丰47。生物炭为玉米秸秆炭,购于辽宁金和福农业科技股份有限公司。生物炭及土壤基础理化性质如表1所示。

### 1.2 试验材料及测定方法

试验设计:设3个施炭量处理分别为: $0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  (CK)、 $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  (B1)、 $40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  (B2),各处理设3次重复,随机区组设计。生物炭仅于2016年水稻收获后,人工均匀撒施在地表,然后用旋耕机均匀混入耕层土壤。氮、磷和钾肥在2017年和2018年播种前施用,各处理均等量施用,施肥量为:氮肥(N)总施用量为 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,磷肥( $\text{P}_2\text{O}_5$ )总施用量为 $70 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,钾肥( $\text{K}_2\text{O}$ )总施用量为 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,磷、钾肥作底肥一次性施用,氮肥50%作基肥,30%作分蘖肥,20%作穗肥,均统一田间管理。2018年水稻收获后,在各试验小区以五点取样方法用土钻采集0~20 cm耕层土壤样品,经风干、去杂、磨细、过筛、混匀处理后备用。

用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-HClO}_4$ 消煮,钼锑抗比色法测定全磷含量<sup>[12]</sup>,土壤有效磷含量测定采用Olsen法<sup>[13]</sup>。土壤无机磷形态测定采用顾益初等<sup>[14]</sup>分级方法。1 g土壤样品依次用 $0.25 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaHCO}_3$ [ $\text{NaHCO}_3$ 浸提态磷( $\text{Ca}_2\text{-P}$ )], $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NH}_4\text{OAC}$ [ $\text{NH}_4\text{OAC}$ 浸提态磷( $\text{Ca}_8\text{-P}$ )], $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NH}_4\text{F}$ [ $\text{NH}_4\text{F}$ 浸提态磷( $\text{Al-P}$ )], $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaOH}$ - $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{Na}_2\text{CO}_3$ [ $\text{NaOH-Na}_2\text{CO}_3$ 浸提态磷( $\text{Fe-P}$ )], $0.3 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ [闭蓄态磷

表1 生物炭和土壤的基本理化性质

Table 1 The basic properties of the soil and biochar

项目 Item	土壤 Soil	生物炭 Biochar
pH	8.04	9.2
全碳 Total C/g·kg <sup>-1</sup>	—	660
全氮 Total N/g·kg <sup>-1</sup>	1.25	12.7
全磷 Total P/g·kg <sup>-1</sup>	0.58	8.87
有机质 Organic matter/g·kg <sup>-1</sup>	25.38	—
灰分 Ash content/%	—	15.57
表面积 Surface area/m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup>	—	8.87
平均孔径 Average pore size/nm	—	16.23
挥发分 Volatile matter/%	—	21.94

(O-P)], 0.5 mol·L<sup>-1</sup> 1/2 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>[Na<sub>3</sub>C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>O<sub>7</sub> 浸提态磷 (Ca<sub>10</sub>-P)]提取。土壤有机磷的分组采用 Bowman-Cole 的土壤有机磷分组方法<sup>[15]</sup>。取 5 g 土壤样品用 0.5 mol·L<sup>-1</sup> NaHCO<sub>3</sub> 提取活性有机磷 (LOP), 取 2 g 土壤样品用 1 mol·L<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 提取中等活性有机磷 (MLOP), 然后用 1 mol·L<sup>-1</sup> NaOH 提取土壤 MROP 和 HROP。土壤 pH 测定方法为水土比 2.5:1, 用 pH 计 (Hanna HI2221, Italy) 测定。

土壤磷吸持指数 (PSI) 采用周惠平等<sup>[16]</sup>的测定方法, 测定土壤吸持溶液平衡时 P 的浓度 C (μmol·L<sup>-1</sup>) 和土壤吸 P 量 X (mg·100g<sup>-1</sup>), PSI 计算公式如下:

$$PSI = \frac{X}{\lg C} \quad (1)$$

土壤磷吸持饱和度 (DPSS) 采用 Andersson 等<sup>[17]</sup>的测定方法, 用钼锑抗显色法测定土壤中有效磷 P<sub>(ox)</sub> 的浓度 (mmol·L<sup>-1</sup>), 用原子吸收分光光度计 (AA-7000) 测定 Al<sub>(ox)</sub> 和 Fe<sub>(ox)</sub> 的浓度。

DPSS 计算公式如下:

$$DPSS (\%) = \frac{100 (P_{(ox)})}{0.5 [(Fe_{(ox)}) + (Al_{(ox)})]} \quad (2)$$

磷素释放风险指数 (Phosphorus release risk index, ERI) 计算公式如下:

$$ERI = \frac{DPSS}{PSI} \times 100\% \quad (3)$$

表2 生物炭对土壤 pH、全磷、有效磷、总有机磷和总无机磷含量的影响

Table 2 Effect of biochar on soil pH, total P, Olsen-P, total organic P and total inorganic P

处理 Treatment	pH	全磷 Total P/ mg·kg <sup>-1</sup>	有效磷 Olsen-P/ mg·kg <sup>-1</sup>	总有机磷 Total organic P/ mg·kg <sup>-1</sup>	总无机磷 Total inorganic P/ mg·kg <sup>-1</sup>
CK	8.24±0.01b	661.43±9.23c	24.62±2.67b	240.53±7.35b	409.51±10.56b
B1	8.34±0.02a	736.86±9.74b	31.75±2.98a	267.71±8.05b	452.68±48.73ab
B2	8.33±0.01a	897.56±23.00a	36.10±2.09a	310.74±26.29a	515.90±38.72a

注: 不同小写字母表示处理间差异显著 (P<0.05)。下同。

Note: The different lowercase letters indicate significant differences among treatments. The same below.

### 1.3 数据分析

采用 Excel 2010 和 SPSS 19.0 进行试验数据处理, 不同处理差异显著性分析用单因素方差分析 (One-way ANOVA, 最小显著差法 LSD), 使用 Origin 2018 进行作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 生物炭对土壤 pH、全磷、有效磷、总有机磷和总无机磷含量的影响

由表 2 可知, 施用生物炭能显著提高土壤 pH 值, 但施炭处理间差异不显著。施用生物炭能显著提高土壤全磷含量, 与 CK 处理相比, B1 与 B2 处理土壤全磷含量分别增加 11.40% 和 35.70%。B1 与 B2 处理土壤有效磷含量分别比 CK 处理高 28.96% 和 46.63%, 且均达到差异显著水平。施用生物炭提高了土壤总有机磷含量, 且当施炭量为 40 t·hm<sup>-2</sup> (B2 处理) 时差异达到显著水平。

### 2.2 生物炭对土壤有机磷组分的影响

由图 1a 可知, 施用生物炭显著提高了土壤 LOP 含量, 且 B1 处理的土壤 LOP 含量达到最大值, 较 CK 处理高 189.19%, 但各施炭处理间差异不显著。施用生物炭提高了土壤的 MLOP 含量 (图 1b), B2 处理达到最大值, 较 CK 处理提高 36.74%, 且达到差异显著水平。施用生物炭显著降低了土壤 MROP 含量 (图 1c), B1 和 B2 处理的土壤 MROP 含量较 CK 处理分别降低了 71.25% 和 84.38%。各处理间土壤 HROP 含量表现为 B1>CK>B2 (图 1d), B1 处理较 CK 处理含量提高 45.02%, B2 处理较 CK 处理降低 57.24%, 且均达到显著性差异水平。

### 2.3 生物炭对土壤无机磷组分的影响

由图 2 可知, 施用生物炭能够显著提高土壤 Ca<sub>2</sub>-P、Ca<sub>8</sub>-P 和 Al-P 含量, B1 和 B2 处理的 Ca<sub>2</sub>-P 含量分别较 CK 处理高 30.33% 和 128.24%。B1 和 B2 处理的 Ca<sub>8</sub>-P 含量分别较 CK 处理高 85.32% 和 527.87%, 且均达到差异显著水平。B1 和 B2 处理 Al-P 含量分别

较CK处理高57.73%和232.91%,且均达到差异显著水平。B1处理Fe-P含量较CK处理高30.52%;而B2处理较CK处理低11.55%,且均达到差异显著水平。施用生物炭增加了土壤O-P含量,且B1处理的土壤O-P含量比CK处理高56.04%,达到差异显著水平。Ca<sub>10</sub>-P含量在各处理间差异不显著。

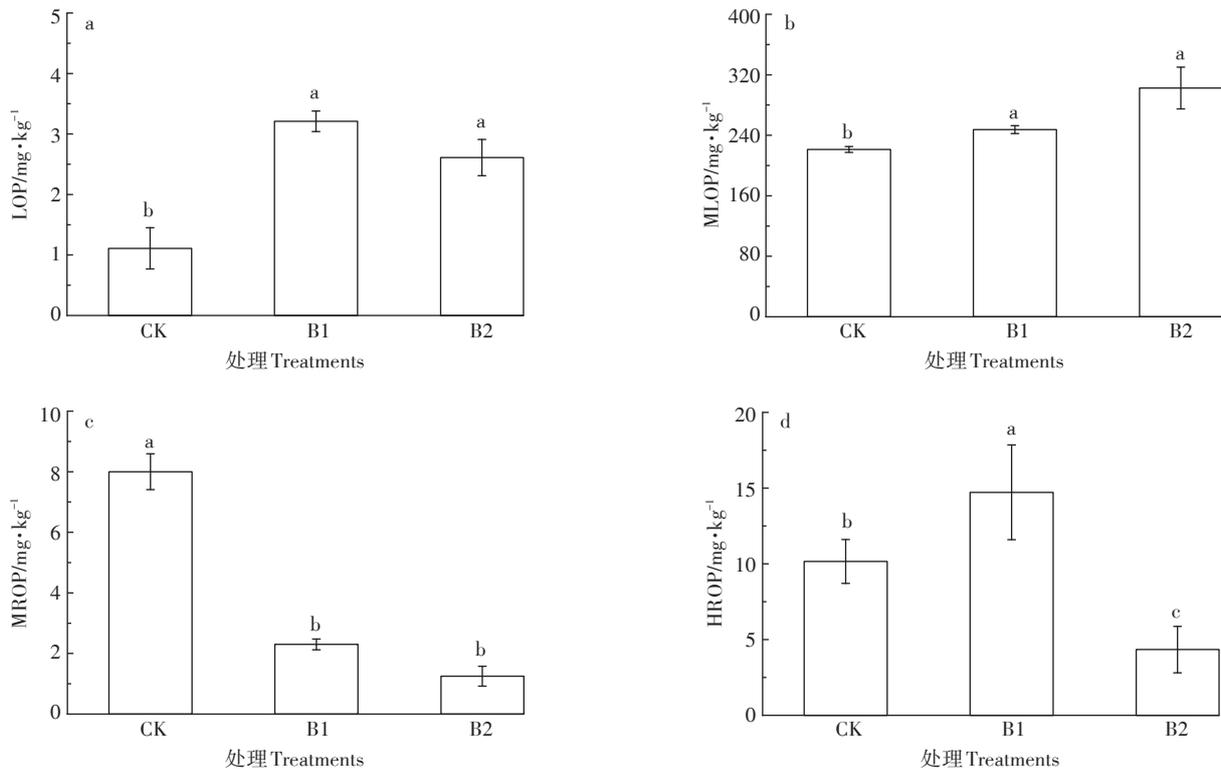
#### 2.4 生物炭对土壤磷释放风险相关指标的影响

由表3可以看出,施用生物炭降低了土壤活性Al含量,B1和B2处理的活性Al含量较CK处理分别降低了7.22%和15.07%,且均达到差异显著水平。施用生物炭提高了土壤活性Fe含量,B1和B2处理的活性

Fe含量分别较CK处理提高21.57%和37.75%,且均达到差异显著水平。施用生物炭提高了土壤P吸持指数,B1和B2处理的P吸持指数分别较CK处理高19.10%和38.55%,且均达到差异显著水平。P吸持饱和度随着施炭量的增加而增加,B2处理时达到最大,且B2较CK处理提高了22.47%,达到差异显著水平。各处理间P释放风险指数差异不显著。

#### 2.5 生物炭对土壤P释放风险相关指标与土壤P组分相关系数的影响

由表4可见,Al<sub>(ox)</sub>与MROP呈显著正相关关系,而Al<sub>(ox)</sub>与MLOP、Ca<sub>2</sub>-P、Ca<sub>8</sub>-P和Al-P呈显著的负相



不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同

The different lowercase letters indicate significant differences among treatments. The same below

图1 生物炭对土壤有机磷组分的影响

Figure 1 Effect of biochar on soil organic P fractions

表3 生物炭对土壤活性Al、活性Fe、P吸持指数、P吸持饱和度、P释放风险指数的影响

Table 3 Effect of biochar on soil Al<sub>(ox)</sub>, Fe<sub>(ox)</sub>, P sorption index (PSI), degree of P sorption saturation (DPSS), Environmental risk index (ERI)

处理 Treatment	活性Al Al <sub>(ox)</sub> /mg·kg <sup>-1</sup>	活性Fe Fe <sub>(ox)</sub> /mg·kg <sup>-1</sup>	P吸持指数 P sorption index PSI/mg P·(100 g) <sup>-1</sup> ·(μmol·L <sup>-1</sup> ) <sup>-1</sup>	P吸持饱和度 Degree of P sorption saturation DPSS/%	P释放风险指数 Environmental risk index ERI/%
CK	242.31±4.85a	479.32±29.33c	11.05±0.72c	6.81±0.47b	61.67±2.32a
B1	224.82±9.83b	582.73±15.42b	13.16±0.58b	7.87±0.77ab	59.68±3.70a
B2	205.80±8.15c	660.26±13.07a	15.31±0.59a	8.34±0.58a	54.55±4.55a

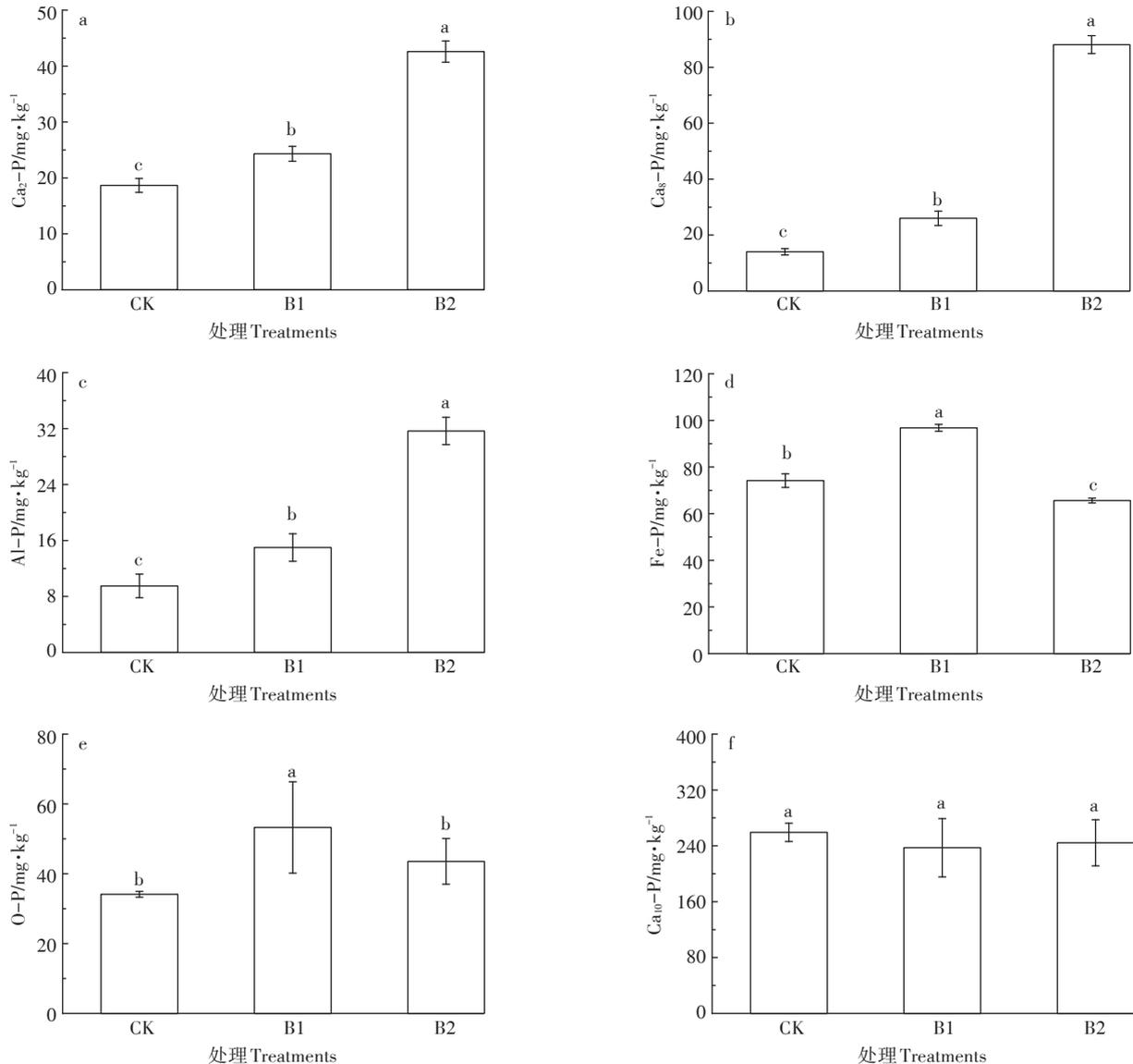


图2 生物炭对土壤无机磷组分的影响

Figure 2 Effect of biochar on soil inorganic P fractions

关系。 $Fe_{(ox)}$ 与MLOP、 $Ca_2$ -P、 $Ca_8$ -P和Al-P呈显著的正相关关系, $Fe_{(ox)}$ 与 $Al_{(ox)}$ 和MROP呈显著的负相关关系。 $PSI$ 与MLOP、 $Ca_2$ -P、 $Ca_8$ -P、Al-P和 $Fe_{(ox)}$ 呈显著的正相关关系, $PSI$ 与MROP呈显著的负相关关系。 $DPSS$ 与 $Ca_2$ -P、 $Fe_{(ox)}$ 和 $PSI$ 呈显著的正相关关系。 $ERI$ 与MROP和 $Al_{(ox)}$ 呈显著的正相关关系, $ERI$ 与MLOP、 $Ca_2$ -P、 $Ca_8$ -P、Al-P、 $Fe_{(ox)}$ 和 $PSI$ 呈显著的负相关关系。

### 3 讨论

#### 3.1 生物炭对土壤全磷和有效磷含量的影响

与本研究供试土壤相比,生物炭的全磷和有效磷

含量较高,因此施用生物炭能够直接提高土壤的有效磷和全磷含量。许多研究指出施用生物炭可以提高红壤有效磷含量 $3\sim 46\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,潮土有效磷含量 $13\sim 137\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ [18]。也有研究指出施用生物炭(生物炭施用量分别为 $0, 2.5, 5, 10, 20, 30\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$  and  $40\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ )5年后对土壤的有效磷含量没有显著影响[19]。Xu等[11]研究表明在盐碱土壤中施用生物炭会降低土壤有效磷含量。磷的有效性主要依赖于土壤的pH值,而大量研究证明生物炭可以提高土壤的pH值。土壤pH值的增加可以增大磷酸盐的沉淀,使其转变为难溶形态[20]。在碱性土壤中,生物炭表面的大量自由态的 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Al^{3+}$ 和 $Fe^{3+}$ 的氧化物可以吸附磷并且可以

表4 生物炭对土壤P释放风险相关指标与土壤P组分相关系数的影响

Table 4 Effects of biochar on the pearson's correlation coefficients between release risk indicators of soil P and soil P fractions

	Al <sub>(ox)</sub>	Fe <sub>(ox)</sub>	PSI	DPSS	ERI
LOP	-0.56	0.61	0.56	0.53	-0.34
MLOP	-0.82*	0.89*	0.84**	0.58	-0.72*
MROP	0.76*	-0.86*	-0.78*	-0.57	0.68*
HROP	0.54	-0.50	-0.47	-0.13	0.63
Ca <sub>2</sub> -P	-0.88*	0.91*	0.94*	0.70*	-0.72*
Ca <sub>8</sub> -P	-0.88*	0.88*	0.90*	0.65	-0.72*
Al-P	-0.90*	0.92*	0.90*	0.65	-0.73*
Fe-P	0.25	-0.20	-0.28	-0.07	0.35
O-P	-0.44	0.41	0.29	0.26	-0.21
Ca <sub>10</sub> -P	0.33	-0.34	-0.27	-0.08	0.39
Al <sub>(ox)</sub>	1	-0.92*	-0.88	-0.57	0.80*
Fe <sub>(ox)</sub>		1	0.96*	0.74*	-0.73*
PSI			1	0.83*	-0.67*
DPSS				1	-0.15
ERI					1

\* $P < 0.05$ ; \*\* $P < 0.01$ .

和磷发生共沉淀反应<sup>[2]</sup>。但生物炭表面也含有大量阴离子,会影响土壤中能与磷发生反应的阳离子的有效性或活性,进而影响土壤中磷的有效性<sup>[21]</sup>。

### 3.2 生物炭对土壤无机磷组分的影响

铁铝磷酸盐通常被认为是中等植物有效磷,并且已被证明是潜在的有效磷源,尤其是在高度风化的土壤和沙土中<sup>[22-23]</sup>。部分钙磷酸盐不是植物可直接利用的磷,但是可以作为潜在的有效磷源。相关研究指出,生物炭中含有大量P-金属复合体,例如FePO<sub>4</sub>、AlPO<sub>4</sub>和CaPO<sub>4</sub><sup>[18]</sup>,因此,当生物炭施入土壤会直接提高土壤Ca-P、Al-P和Fe-P含量。也有研究表明施用稻草生物炭可以提高水稻土中易被作物吸收利用的Ca<sub>2</sub>-P、Ca<sub>8</sub>-P、Fe-P的含量,降低O-P和Ca<sub>10</sub>-P含量<sup>[24]</sup>。而在本试验中,施用生物炭显著提高了土壤的Ca<sub>2</sub>-P、Ca<sub>8</sub>-P和Al-P含量;但施炭量为40 t·hm<sup>-2</sup>时,生物炭对土壤O-P和Ca<sub>10</sub>-P含量无显著影响。这可能是由于生物炭自身的孔隙结构发达,为微生物提供了栖息和繁殖的适宜场所,减少了微生物之间的生存竞争,生物炭的添加提高了微生物活性,有利于土壤中较容易被吸收利用的Ca<sub>2</sub>-P、Ca<sub>8</sub>-P、Fe-P和Al-P的释放,而不容易被吸收利用的O-P或Ca<sub>10</sub>-P的含量不变或者降低。

### 3.3 生物炭对土壤有机磷组分的影响

有机磷是土壤全磷含量的重要组成成分,将土壤有机磷分成LOP、MLOP、MROP和HROP,对理解有机磷组分的动力学改变具有重要意义<sup>[25]</sup>。施用生物炭可以提高土壤的有机磷组分。活性有机磷主要包括磷脂和核酸,植物可以直接吸收活性有机磷来满足植物生长发育的需要<sup>[26]</sup>。中等活性有机磷是由硫酸溶液提取的有机磷,与磷酸单酯和磷酸二酯密切相关,这些有机磷都容易被矿化供植物吸收利用<sup>[25]</sup>。在本研究中施用生物炭显著提高了土壤活性有机磷和中等活性有机磷含量,这与许多研究结果一致<sup>[25]</sup>。也有研究指出中等稳定性有机磷和高等稳定性有机磷是活性有机磷和中等活性有机磷的源或库<sup>[25]</sup>。在本研究中施用生物炭显著降低了土壤的中等稳定性有机磷含量,且当施炭量为40 t·hm<sup>-2</sup>时,高稳定性有机磷含量也被显著降低。这可能是由于生物炭施入土壤后会影响到土壤微生物的活性和群落结构,进而活化有机磷组分使其转变为活性有机磷,也会改变植物根系分泌物进而促进有机磷向植物可利用的形态转移<sup>[27]</sup>。

### 3.4 生物炭对土壤磷释放风险的影响

生物炭具有巨大的比表面积和丰富的官能团,施入土壤后可提高土壤对磷的吸附能力<sup>[8,28]</sup>。生物炭可以吸附土壤溶液中的磷主要是由于生物炭可以改变土壤电化学性能。Zhang等<sup>[2]</sup>研究表明生物炭具有较高的P持留能力,这先受快速化学吸附阶段的控制,然后受表面扩散阶段控制。由于生物炭具有较高的磷吸持能力,土壤总磷也会随着径流的减少而增加。

Al<sub>(ox)</sub>和Fe<sub>(ox)</sub>是水稻土中含量较高的氧化物,也是土壤结构体的重要胶结物质,影响磷素在土壤中的含量、形态和植物有效性。土壤中的铁铝氧化物(尤其是游离态铁铝氧化物)含量会对DPSS产生直接影响<sup>[7]</sup>。一般认为,土壤中P的吸附解析能力大小与土壤Al<sub>(ox)</sub>、Fe<sub>(ox)</sub>等含量有关。DPSS通常被作为一个评价磷释放风险的指数,DPSS越大,说明土壤中磷素越接近饱和状态,吸持P的能力就越低,释放P的数量就越多<sup>[2]</sup>。在本研究中,施用生物炭提高了土壤的DPSS,这说明生物炭可能会提高土壤的磷释放风险,有研究指出当DPSS超过15%时具有淋失风险<sup>[29]</sup>。习斌等<sup>[30]</sup>研究发现,潮土、红壤和水稻土磷素流失DPSS临界值分别是18.8%、12.9%和13.3%。但在本研究中土壤的DPSS仅为6.81%~8.34%,因此,基本不存在土壤磷素释放风险。PSI表示土壤固磷能力的大小,在本研究中

生物炭显著提高了土壤的 *PSI*, 说生物炭提高了土壤的固磷能力。根据目前 *ERI* 风险等级划分标准, *ERI* 一般分成 4 个等级, 即高风险 ( $ERI > 25$ )、较高风险 ( $20 < ERI \leq 25$ )、中度风险 ( $10 < ERI \leq 20$ ) 和低风险 ( $ERI \leq 10$ )<sup>[29]</sup>。在本试验中土壤 *ERI* 为 54.55%~61.67%, 因此, 本试验土壤诱发磷富营养化的风险处于高度风险范围。

#### 4 结论

(1) 生物炭能够显著提高土壤全磷、有效磷含量, 同时也能够提高土壤总有机磷和总无机磷含量, 且当施炭量为  $40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  时, 达到差异显著水平。

(2) 生物炭提高了土壤  $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$  和  $\text{Al-P}$  含量, 随着施炭量的增大而增大, 且各处理间差异显著; 当施炭量为  $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  时, 土壤  $\text{Fe-P}$  和  $\text{O-P}$  含量显著高于其他处理; 施用生物炭对  $\text{Ca}_{10}\text{-P}$  无显著影响。生物炭显著提高了土壤  $\text{LOP}$  和  $\text{MLOP}$  含量, 但显著降低了土壤  $\text{MROP}$  含量, 当施炭量为  $40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  时, 土壤  $\text{HROP}$  含量最小, 且显著低于其他处理。

(3) 本试验中土壤的  $\text{Al}_{(\text{ox})}$  和  $\text{Fe}_{(\text{ox})}$  均处于较高水平; 施用生物炭显著提高了土壤 *PSI*, 增加了土壤固磷能力; 本试验土壤的 *DPSS* 仅为 6.81%~8.34%, 因此, 土壤磷淋失风险较小; 施用生物炭对土壤 *ERI* 无显著影响。

综上所述, 施用生物炭可以改善盐化水稻土土壤磷素状况, 提高土壤固磷能力, 而且不会增大土壤磷素释放的风险。

#### 参考文献:

- [1] 张博. 北方滨海盐土高效改良技术研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013: 1-2.  
ZHANG Bo. Study on the technology in efficiently improving the northern coastal saline soil[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013: 1-2.
- [2] Zhang H, Chen C, Gray E M, et al. Roles of biochar in improving phosphorus availability in soils: A phosphate adsorbent and a source of available phosphorus[J]. *Geoderma*, 2016, 276: 1-6.
- [3] Arif M, Ilyas M, Riaz M, et al. Biochar improves phosphorus use efficiency of organic-inorganic fertilizers, maize-wheat productivity and soil quality in a low fertility alkaline soil[J]. *Field Crops Research*, 2017, 214: 25-37.
- [4] Yao Y, Gao B, Chen H, et al. Adsorption of sulfamethoxazole on biochar and its impact on reclaimed water irrigation[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 209: 408-413.
- [5] Yao Y, Gao B, Chen J, et al. Engineered biochar reclaiming phosphate from aqueous solutions: Mechanisms and potential application as a slow-release fertilizer[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(15): 8700-8708.
- [6] Chen W, Meng J, Han X R, et al. Past, present, and future of biochar[J]. *Biochar*, 2019, 1(1): 75-87.
- [7] Xu M, Gao P, Yang Z J, et al. Biochar impacts on phosphorus cycling in rice ecosystem[J]. *Chemosphere*, 2019, 225: 311-319.
- [8] Zhai L M, Cai J, Zhou M, et al. Short-term effects of maize residue biochar on phosphorus availability in two soils with different phosphorus sorption capacities[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2015, 51(1): 113-122.
- [9] Song C, Han X Z, Tang C. Changes in phosphorus fractions, sorption and release in Udic Mollisols under different ecosystems[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, 44(1): 37-47.
- [10] von Tucher S, Horndl D, Schmidhalter U. Interaction of soil pH and phosphorus efficacy: Long-term effects of P fertilizer and lime applications on wheat, barley, and sugar beet[J]. *Ambio*, 2018, 47(Suppl 1): 41-49.
- [11] Xu G, Zhang Y, Sun J N, et al. Negative interactive effects between biochar and phosphorus fertilization on phosphorus availability and plant yield in saline sodic soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 568: 910-915.
- [12] Adesanwo O O, Ige D V, Thibault L, et al. Comparison of colorimetric and ICP methods of phosphorus determination in soil extracts[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2013, 44(21): 3061-3075.
- [13] Olsen S R. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate[R]. US Department of Agriculture Circular 939. US Department of Agriculture, Washington DC, 1954.
- [14] 顾益初, 蒋柏藩. 石灰性土壤无机磷分级的测定方法[J]. 土壤, 1990(2): 101-122.  
GU Yi-chu, JIANG Bai-fan. Determination of inorganic phosphorus fractionation in calcareous soils[J]. *Soil*, 1990(2): 101-122.
- [15] Bowman R A, Cole C V. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils[J]. *Soil Science*, 1978, 125(2): 95-101.
- [16] 周慧平, 高超, 王登峰, 等. 巢湖流域农田土壤磷吸附指数及吸附饱和度特征[J]. 农业环境科学学报, 2007(S2): 386-389.  
ZHOU Hui-ping, GAO Chao, WANG Deng-feng, et al. Phosphorus sorption and saturation in top soil of Chaohu Lake water shed[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007(S2): 386-389.
- [17] Andersson H, Bergstrom L, Djodjic F, et al. Topsoil and subsoil properties influence phosphorus leaching from four agricultural soils[J]. *Journal of Environment Quality*, 2013, 42(2): 455-463.
- [18] Sun D, Hale L, Kar G, et al. Phosphorus recovery and reuse by pyrolysis: Applications for agriculture and environment[J]. *Chemosphere*, 2018, 194: 682-691.
- [19] Jin Z W, Chen C, Chen X M, et al. Soil acidity, available phosphorus content, and optimal biochar and nitrogen fertilizer application rates: A five-year field trial in upland red soil, China[J]. *Field Crops Research*, 2019, 232: 77-87.
- [20] Biederman L A, Harpole W S. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: A meta-analysis[J]. *GCB Bioenergy*, 2013,

- 5(2):202-214.
- [21] Xu G, Sun J N, Shao H B, et al. Biochar had effects on phosphorus sorption and desorption in three soils with differing acidity[J]. *Ecological Engineering*, 2014, 62(1):54-60.
- [22] Guo F, Yost R S, Hue N V, et al. Changes in phosphorus fractions in soils under intensive plant growth[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(5):1681-1689.
- [23] Wang T, Camps-Arbestain M, Hedley M. The fate of phosphorus of ash-rich biochars in a soil-plant system[J]. *Plant & Soil*, 2014, 375(1/2):61-74.
- [24] 张 婷, 佟忠勇, 张广才, 等. 添加稻草生物炭对水稻土磷含量和形态的影响[J]. 华北农学报, 2018, 33(1):211-216.  
ZHANG Ting, TONG Zhong-yong, ZHANG Guang-cai, et al. Effects of rice straw-derived biochar on phosphorus content and form in paddy soil[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2018, 33(1):211-216.
- [25] Zhu J, Qu B, Li M. Phosphorus mobilization in the Yeyahu Wetland: phosphatase enzyme activities and organic phosphorus fractions in the rhizosphere soils[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2017, 124:304-313.
- [26] Steffens D, Leppin T, Luschinebengreuth N, et al. Organic soil phosphorus considerably contributes to plant nutrition but is neglected by routine soil-testing methods[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2010, 173(5):765-771.
- [27] Lehmann J, Rillig M C, Thies J, et al. Biochar effects on soil biota: A review[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43(9):1812-1836.
- [28] 曹 婷, 孟 军, 兰 宇, 等. 稻壳炭对不同土壤磷淋溶的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2017, 48(4):385-391.  
CAO Ting, MENG Jun, LAN Yu, et al. Effects of rice hull biochar on phosphorus leaching from different types of soil[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2017, 48(4):385-391.
- [29] 李 发, 王 农, 徐应明, 等. 水稻土对磷的吸持能力及环境风险研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(12):4734-4739.  
LI Fa, WANG Nong, XU Ying-ming, et al. Characteristics of phosphorus sorption capacity and its environmental risk in paddy soils[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(12):4734-4739.
- [30] 习 斌, 周 萍, 翟丽梅, 等. 土壤磷素吸持饱和度(DPS)评价土壤磷素流失风险研究[J]. 土壤通报, 2014, 45(6):1471-1476.  
XI Bin, ZHOU Ping, ZHAI Li-mei, et al. Study on potential evaluation index of soil P loss evaluated by degree of P sorption saturation (DPSS)[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(6):1471-1476.