Eco-Environmental Knowledge Web

# 环境科学

# ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力

李辉，孙雪丽，庞博，朱法华，王圣，晏培


■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2021年12月
第42卷 第12期
Vol.42 No.12

环境科学 (HUANJING KEXUE) ENVIRONMENTAL SCIENCE 第42卷 第12期 2021年12月15日

# 目　　次(卷终)

Eco-Environmental Knowledge Web

环 境 科 学
Environmental Science

第42卷第12期 2021年12月
Vol.42,No.12 Dec.,2021

# 化肥和有机肥配施生物炭对紫色土壤养分及磷赋存形态的影响

向书江[1], 余泺[2], 熊子怡[1], 罗东海[1], 王蓥燕[1], 邓正昕[1], 王子芳[1], 高明[1]*

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715;2. 重庆市璧山区防汛抗旱调度中心, 重庆 402760)

**摘要**:研究紫色土壤养分含量与不同形态磷含量对生物炭配施化肥和有机肥的响应,探明不同施肥处理对紫色土壤养分和磷形态的影响,以期为生物炭在紫色土区的合理农用提供科学依据. 采用盆栽试验方法,设置对照(CK)、传统施肥(F)、化肥 + 20 t·hm$^{-2}$稻壳生物炭(FP)、化肥 + 10 t·hm$^{-2}$稻壳生物炭 + 10 t·hm$^{-2}$玉米生物炭(FPM)、有机肥 + 20 t·hm$^{-2}$稻壳生物炭(PP)和新鲜有机肥 + 20 t·hm$^{-2}$稻壳生物炭(NPP)这 6 个处理,通过测定土壤养分含量的变化和不同形态磷之间的转化,阐明化肥和有机肥配施生物炭对紫色土壤养分及磷赋存形态的影响. 结果表明:①生物炭施用可提高土壤 pH 值,其中 PP 和 NPP 处理的效果最好,其根际土壤 pH 较 F 处理分别提高了 1.78 和 1.87 个单位. ②配施生物炭(FP、FPM、PP 和 NPP)处理较 F 处理能显著提高土壤有机质、全氮、全磷和有效磷含量,表现出明显的根际效应,而显著降低速效钾的含量. ③与 F 处理相比,PP 和 NPP 处理能够显著增加植株根部生物量、植株全磷和全钾含量,而显著降低植株全氮含量. ④土壤中最主要的磷赋存形态是中度活性磷,其占比为 46.64% ~ 57.46%. 施用生物炭能够促进土壤难溶态磷向有效磷转化,提高活性磷和中度活性磷的比例,且表现出明显的根际效应. ⑤施用生物炭有利于土壤有机磷的矿化,促进 $NaHCO_3$-$P_o$ 向 $NaHCO_3$-$P_i$ 转化,其中 PP 处理的矿化作用最明显. 配施生物炭可以改善土壤磷营养状况,促进土壤难溶态磷向有效态磷转化,其中 PP 处理的效果最优. 因此,生物炭配施腐熟猪粪是紫色土区最有效的养分管理方式.

**关键词**:生物炭; 紫色土; 有机肥; 土壤养分; 磷分级

**中图分类号**: X171.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2020)12-6067-11 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202104324

# Effects of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Nutrients and Phosphorus Forms in Purple Soils

XIANG Shu-jiang[1], YU Luo[2], XIONG Zi-yi[1], LUO Dong-hai[1], WANG Ying-yan[1], DENG Zheng-xin[1], WANG Zi-fang[1], GAO Ming[1]*

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Flood Control and Drought Relief Dispatching Center, Bishan District, Chongqing City, Chongqing 402760, China)

**Abstract**: This study investigated the changes in purple soil nutrient content and different forms of phosphorus content under the treatment of biochar combined with chemical fertilizers and organic fertilizers and explored the effects of different fertilization methods on purple soil nutrients and phosphorus forms to provide a scientific basis for the rationality of using biochar in the purple soil area. Using the pot experiment method, we established the following treatments: control (CK), traditional fertilization (F), chemical fertilizer + 20 t·hm$^{-2}$ rice husk biochar (FP), chemical fertilizer + 10 t·hm$^{-2}$ rice husk biochar + 10 t·hm$^{-2}$ corn biochar (FPM), organic fertilizer + 20 t·hm$^{-2}$ rice husk biochar (PP), and fresh organic fertilizer + 20 t·hm$^{-2}$ rice husk biochar (NPP). The change in soil nutrient content and the conversion between different forms of phosphorus were analyzed to identify the effects of chemical fertilizer and organic fertilizer combined with biochar on purple soil nutrients and phosphorus forms. The results showed that: ① The application of biochar can increase the pH value of the soil. Among the treatments, PP and NPP had the greatest effect on pH. The pH of the rhizosphere soil increased by 1.78 and 1.87 units, respectively, compared with that under the F treatment. ② Compared with the F treatment, the combined application of biochar (FP, FPM, PP, and NPP) significantly increased the content of soil organic matter, total nitrogen, total phosphorus, and available phosphorus, showing an obvious rhizosphere effect and significantly reducing the content of available potassium. ③ Compared with the F treatment, the PP and NPP treatments significantly increased plant biomass, plant total phosphorus, and total potassium content and significantly reduced plant total nitrogen content. ④ The most important phosphorus occurrence form in the soil was moderately active phosphorus, which accounted for 46.64% to 57.46%. The application of biochar can promote the conversion of soil insoluble phosphorus to available phosphorus, increase the ratio of active phosphorus to moderately active phosphorus, and show obvious rhizosphere effects. ⑤ The application of biochar is beneficial to the mineralization of soil organic phosphorus and can promote the conversion of $NaHCO_3$-$P_o$ to $NaHCO_3$-$P_i$, with the mineralization under the PP treatment being the most apparent. The combined application of biochar can improve the soil phosphorus status and promote the conversion of soil insoluble phosphorus to available phosphorus and the mineralization of organic phosphorus; among treatments, the PP treatment had the greatest such effects. Therefore, biochar combined with decomposed pig manure is the most effective nutrient management strategy in purple soil areas.

**Key words**: biochar; purple soil; organic fertilizer; soil nutrients; phosphorus classification

磷是作物生长发育的必需营养元素,土壤中常见的磷化合物通常是难溶的[1],很难被作物吸收利

**收稿日期**: 2021-04-28; **修订日期**: 2021-05-17

**基金项目**: 国家重大水利工程建设基金三峡后续工作科研项目(5001022019CF50001); 重庆市技术创新与应用示范专项重点研发项目(cstc2018jscx-mszdX0061); 国家重点研发计划项目(2017YFD0800101)

**作者简介**: 向书江(1998 ~),男,硕士研究生,主要研究方向为土壤质量与环境和土地利用规划,E-mail:xiang786957739@163.com

* 通信作者,E-mail:gaoming@swu.edu.cn

用,因此土壤缺磷成为限制作物生长的原因之一[2]. 尽管施加磷肥能够缓解作物缺磷状况,但作物对磷肥的利用率较低,当季利用率通常仅为5%~20%[3]. 另外,农业生产中磷肥的过量施用,不仅提高了生产成本,还增加了土壤养分流失的风险,磷素通过地表径流、淋溶等方式进入水体,促进水体富营养化,引起环境恶化[4]. 因此,减少含磷化肥施用,寻找一种能有效改良土壤性质、提高土壤肥力和环境友好的养分管理方式,是当前农业绿色发展的重要方向.

近年来,生物炭作为一种新型环境功能材料,在土壤改良和环境污染修复方面得到广泛应用[5]. 生物炭是生物质原料在低氧条件下经过高温热裂解所形成的固体产物,是一种富碳、高度芳香化和稳定性高的有机物质,具有多孔、比表面积大、吸附性强和持水能力强等特点[6]. 生物炭可以通过化学、物理和生物作用来改良土壤性质,戴中民[7]的研究发现生物炭施用可以降低土壤的酸度,缓解铝毒,对酸性土壤有较好的改良效果. 此外,生物炭对土壤磷的影响也十分重要,高天一等[8]的研究指出生物炭可以促进棕壤中磷的积累,提高土壤磷的有效性. 杨彩迪等[9]的研究发现生物炭能够不同程度增加水稻土中总磷和速效磷含量.

目前国内外学者对生物炭的研究主要集中在生物炭结构表征、土壤质量提升、微生物群落结构变化和环境效应等方面[10~14],关于生物炭施用对土壤总磷和有效磷影响的研究也有报道[15~16],但施用生物炭对土壤磷形态变化的影响还鲜见报道[1],特别是紫色土区土壤根际磷的形态转化过程对生物炭的响应机制还不清楚. 因此本文以紫色土壤为研究对象,对生物炭配施化肥和有机肥的土壤做了养分含量以及磷形态分级测定,阐明生物炭施用对土壤养分含量变化以及磷赋存形态的影响,以期为合理利用生物炭提供一定的理论依据,实现农业资源可持续利用.

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试土壤为紫色潮土,采自重庆市潼南区太安镇小岭村柠檬基地,基本性质见表 1. 将采集的土壤经自然风干,去除混杂的石块、动植物残体等杂质,并研磨过 2 cm 筛后备用. 供试的玉米秸秆生物炭和稻壳生物炭由四川省久晟农业有限责任公司提供,分别以玉米秸秆和稻壳为原料,在 500℃ 高温厌氧条件下热解 2 h 制备,基本性质见表 2. 供试柠檬品种为尤力克(Eureka),苗龄为嫁接 7 个月的脱毒苗,来自重庆市潼南区国家科技农业园区智能化柠檬脱毒育苗中心.

**表 1 供试土壤基本性质**

Table 1 Soil physical and chemical properties

| pH | ω(有机质) /g·kg$^{-1}$ | ω(全氮) /g·kg$^{-1}$ | ω(全磷) /g·kg$^{-1}$ | ω(碱解氮) /mg·kg$^{-1}$ | ω(硝态氮) /mg·kg$^{-1}$ | ω(有效磷) /mg·kg$^{-1}$ | ω(速效钾) /mg·kg$^{-1}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5.20 | 18.68 | 0.68 | 0.27 | 67.31 | 23.64 | 9.14 | 64.12 |

**表 2 供试生物炭基本性质**

Table 2 Basic properties of biochar

| 项目 | pH | ω/g·kg$^{-1}$ | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 碳 | 氮 | 磷 | 钾 |
| 玉米秸秆生物炭 | 9.8 | 518.11 | 1.105 | 1.833 | 14.46 |
| 稻壳生物炭 | 9.5 | 238.52 | 0.807 7 | 1.754 | 6.827 |

### 1.2 试验设计

本试验设 6 个处理: ①对照(CK)、②传统施肥(F)、③化肥 +20 t·hm$^{-2}$ 稻壳生物炭(FP)、④化肥 +10 t·hm$^{-2}$ 稻壳生物炭 +10 t·hm$^{-2}$ 玉米生物炭(FPM)、⑤有机肥 +20 t·hm$^{-2}$ 稻壳生物炭(PP)和⑥新鲜有机肥 +20 t·hm$^{-2}$ 稻壳生物炭(NPP),4 次重复,随机排列. 施用的化学氮、磷和钾肥品种分别为尿素 ω(N)46%、过磷酸钙($P_2O_5$ 12%)和氯化钾($K_2O$ 60%); 供试的腐熟猪粪(有机肥)和新鲜猪粪(新鲜有机肥)取自潼南温氏种猪场,腐熟猪粪 ω(N)为 22.91 g·kg$^{-1}$、ω(有效氮)为 0.35 g·kg$^{-1}$、ω(P)(以 $P_2O_5$ 计)为 51.5 g·kg$^{-1}$、ω(K)(以 $K_2O$ 计)为 8.8 g·kg$^{-1}$和 pH 为 7.7; 新鲜猪粪 ω(N)为 21.46 g·kg$^{-1}$, ω(有效氮)为 0.13 g·kg$^{-1}$, ω(P)(以 $P_2O_5$ 计)为 31.3 g·kg$^{-1}$, ω(K)(以 $K_2O$ 计)为 7.9 g·kg$^{-1}$和 pH 为 7.7. 猪粪碱解氮、速效磷和速效钾的当季(120 d)缓释效率分别为 35.3%、34.8%和 41.5%. 微肥是北美农大集团生产的硼锌锰铁镁钙硅复合微量元素水溶肥料,各元素含量: B、Zn、Mg、Si、Ca、Mn 和 Fe 均大于 12%, pH

6.0. 除 CK 处理外，各处理保持等氮输入，具体施肥量见表 3.

于 2019 年 5 月 10 日施入基肥，按照上述施肥量将肥料与过 2 cm 筛的风干土壤充分混匀后，装入盆中，每盆 15 kg 土壤，盆钵为直径 22 cm，高 30 cm 的 PVC 圆桶. 放置 15 d 后定植柠檬，每钵 1 株，定植时各处理的柠檬苗保持生长状态基本一致，然后浇水灌透，之后每 2 个月以 1/3 基肥的量进行追肥. 平日浇水管理以桶底排水孔不流水为限，以防止肥料流失. 种植 9 个月后进行破坏性采样，分别采集根际和非根际土壤样品，用于测定土壤基本性质和磷分级等指标.

**表 3　各试验处理施肥量**

Table 3　Fertilizer amount in each experimental treatment

| 施肥处理 | m(化肥)/g | | | 有机肥/g | 新鲜有机肥/g | 稻壳生物质炭/g | 玉米生物质炭/g | 微量元素/g |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 尿素 | 过磷酸钙 | 氯化钾 | | | | | |
| CK | — | — | — | — | — | — | — | — |
| F | 5.70 | 21.87 | 3.05 | — | — | — | — | 2.16 |
| FP | 5.47 | 19.93 | 1.53 | — | — | 133.35 | — | 2.16 |
| FPM | 5.43 | 19.88 | 0.68 | — | — | 66.675 | 66.675 | 2.16 |
| PP | — | — | — | 307.85 | — | 133.35 | — | — |
| NPP | — | — | — | — | 337.12 | 133.35 | — | — |

### 1.3　测定方法

土壤样品采集为破坏性采样，先打开定植盆，取出带土试验苗，去除黏附在根系上的较大颗粒土，并用细毛刷轻轻刷下黏附在须根上的根际土，将其收集在无菌自封塑料袋中封好，同时收集等量的非根际土. 同时将试验苗用自来水洗净，测量每株植株株高，将新鲜植株根收集在无菌自封塑料袋中封好，称取植株鲜重，放入烘箱于 79℃ 烘干至恒重，以称取植株干物质积累量.

#### 1.3.1　基本理化性质测定

土壤 pH 采用 DMP-2mV/pH 计测定，土∶水比为1∶5；有机质采用重铬酸钾容量法；全磷采用 $H_2SO_4$-$H_2O_2$ 消煮，钒钼黄比色法；有效磷采用 Olsen 法；全氮采用 $H_2SO_4$-$H_2O_2$ 消煮，蒸馏滴定测定；全钾采用 $H_2SO_4$-$H_2O_2$ 消煮，火焰光度计法；碱解氮采用碱解扩散法；铵态氮采用纳氏试剂比色法；硝态氮采用紫外分光光度法；速效钾采用 $NH_4Ac$-火焰光度法.

#### 1.3.2　植株生物量和养分测定

植株株高利用塔尺和游标卡尺测定；植株生物量利用电子天平测定. 植株养分测定：全氮采用 $H_2SO_4$-$H_2O_2$ 消煮，奈氏比色法；全磷采用 $H_2SO_4$-$H_2O_2$ 消煮，钒钼黄比色法；全钾采用 $H_2SO_4$-$H_2O_2$ 消煮，火焰光度法.

#### 1.3.3　土壤磷分级测定

磷分级采用 Tiessen 等[17]对 Hedley 磷分级法的修正方法，将土壤磷分为 6 类：水溶性磷（$H_2O$-P）、0.5 mol·L$^{-1}$ $NaHCO_3$ 提取态磷（$NaHCO_3$-$P_i$ 和 $NaHCO_3$-$P_o$）、0.5 mol·L$^{-1}$ NaOH 提取态磷（NaOH-$P_i$ 和 NaOH-$P_o$）、1 mol·L$^{-1}$稀盐酸提取态磷（HCl-$P_i$ 和 HCl-$P_o$）、10 mol·L$^{-1}$ 浓盐酸提取态磷（hHCl-$P_i$ 和hHCl-$P_o$）和浓 $H_2SO_4$ 与 $H_2O_2$ 提取残余态磷（O-P）.

### 1.4　数据处理

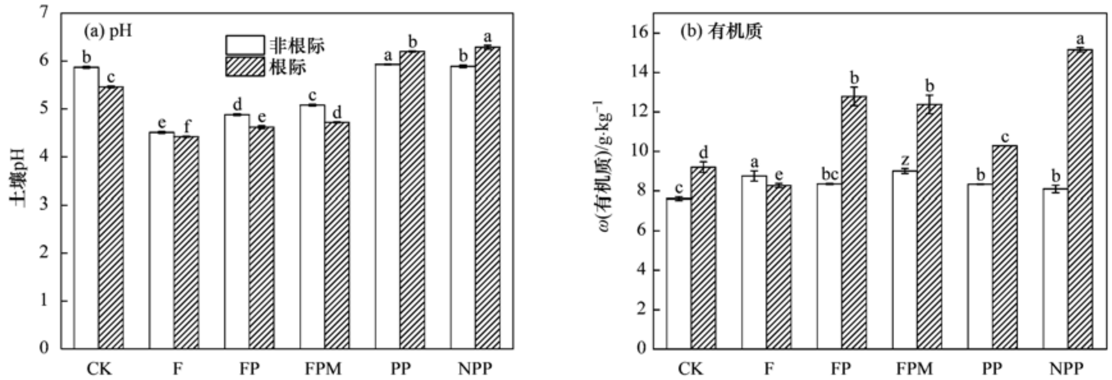
采用 Excel 2019、SPSS 23.0 和 Origin 2018 软件进行数据处理和图表绘制，表中数据均为平均值 ± 标准偏差，不同处理之间的多重比较采用 LSD 最小显著差异法.

## 2　结果与分析

### 2.1　化肥和有机肥配施生物炭对紫色土 pH 和有机质的影响

不同处理对土壤 pH 和有机质的影响见图 1. 土壤 pH 变化范围为 4.42 ~ 6.29，非根际土壤中 F 处理的 pH 最低（4.51），PP 处理最高（5.93）；根际土壤中 F 处理的 pH 最低，NPP 处理最高，非根际和根际土壤 pH 的变化趋势相似. F 处理的 pH 较 CK 处理显著降低（$P < 0.05$），配施生物炭（FP、FPM、PP 和 NPP）处理的 pH 较 F 处理显著提高（$P < 0.05$），依次提高 0.20、0.30、1.78 和 1.87 个单位. 土壤 ω(有机质) 的变化范围为 7.35 ~ 15.16 g·kg$^{-1}$，在非根际土壤中，CK 处理最低，FPM 处理最高；在根际土壤中，F 处理最低，NPP 处理最高. 与 F 处理相比，配施生物炭处理能够显著增加根际土壤的有机质含量（$P < 0.05$），分别增加了 54.66%、49.70%、24.30% 和 83.31%，且表现出明显的根际效应.

不同处理对土壤全磷和有效磷含量的影响见图 2. ω(全磷) 变化在 0.21 ~ 0.58 g·kg$^{-1}$，非根际土壤中 CK 处理最低（0.21 g·kg$^{-1}$），F 处理最高（0.58 g·kg$^{-1}$）；根际土壤中 CK 处理最低（0.22 g·kg$^{-1}$），

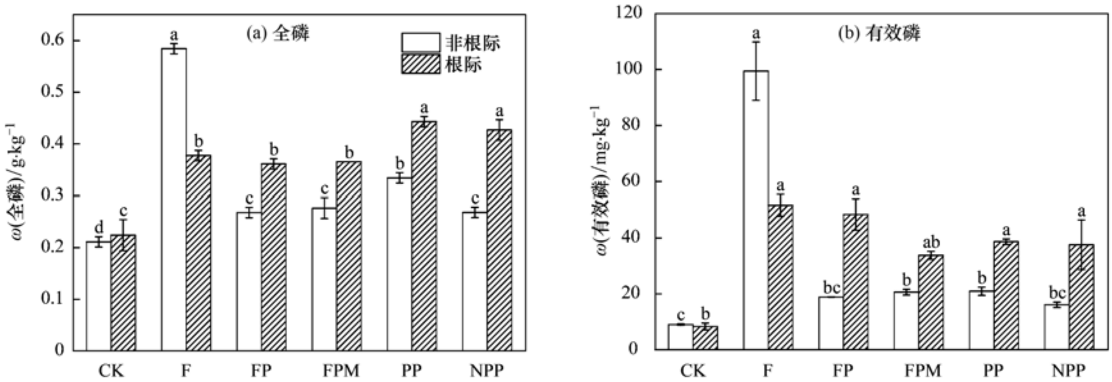



不同小写字母表示不同处理下同一区域之间的显著性差异($P<0.05$)；CK 表示对照组的非根际区域，GCK 表示对照组的根际区域

**图 1 不同处理对土壤 pH 和有机质的影响**

Fig. 1 Effects of different treatments on soil pH and organic matter

PP 处理最高($0.44\ g\cdot kg^{-1}$)，有机肥配施生物炭处理均显著高于 F 处理和化肥配施生物炭(FP 和 FPM)处理($P<0.05$)。ω(有效磷)变化在 8.34 ~ 99.42 $mg\cdot kg^{-1}$，在非根际和根际土壤中均是 CK 处理最低，F 处理最高。与 F 处理相比，配施生物炭处理的非根际土壤有效磷含量呈现显著降低($P<0.05$)，而根际土壤有效磷含量降低不显著($P>0.05$)。此外配施生物炭处理的根际土壤全磷和有效磷含量都显著高于非根际($P<0.05$)，表现出明显的根际效应。




不同小写字母表示不同处理下同一区域之间的显著性差异($P<0.05$)；CK 表示对照组的非根际区域，GCK 表示对照组的根际区域

**图 2 不同处理对土壤全磷和有效磷的影响**

Fig. 2 Effects of different treatments on total phosphorus and available phosphorus in soil

## 2.2 化肥和有机肥配施生物炭对紫色土养分含量的影响

从表 4 可知，ω(全氮)变化在 0.56 ~ 0.85 $g\cdot kg^{-1}$，在根际土壤中 CK 处理最低(0.56 $g\cdot kg^{-1}$)，与 F 处理相比，配施生物炭(FP、FPM、PP 和 NPP)处理的根际土壤全氮含量显著增加($P<0.05$)，依次提高 16.67%、21.21%、7.58% 和 28.79%；ω(速效钾)为 152.07 ~ 616.10 $mg\cdot kg^{-1}$，在根际土壤中 F 处理最高(616.10 $mg\cdot kg^{-1}$)，配施生物炭处理的根际土壤速效钾含量较 F 处理显著降低($P<0.05$)；ω(全钾)和 ω(碱解氮)分别为 8.67 ~ 11.16 $g\cdot kg^{-1}$ 和 50.70 ~ 69.16 $mg\cdot kg^{-1}$，配施生物炭处理的根际土壤速效钾含量较 F 处理降低不显著($P>0.05$)。总体上，配施生物炭处理的根际土壤养分含量表现出明显的根际效应。

## 2.3 化肥和有机肥配施生物炭对植株生物量和养分含量的影响

不同处理对植株株高和生物量的影响如图 3 所示。有机肥配施生物炭处理(PP 和 NPP)的株高较 F 处理分别增加 30.46% 和 40.40%。在柠檬上部鲜重中，PP 处理最高为 153.5 g，NPP 处理最低为 112 g。配施生物炭处理(FP、FPM、PP 和 NPP)的上部干重较 F 处理提高 23.96% ~ 47.92%，其中 PP 和 NPP 处理效果最好。有机肥配施生物炭处理较 F 处理显著提高了柠檬根部鲜重和根部干重($P<0.05$)，且 PP 处理效果最佳。

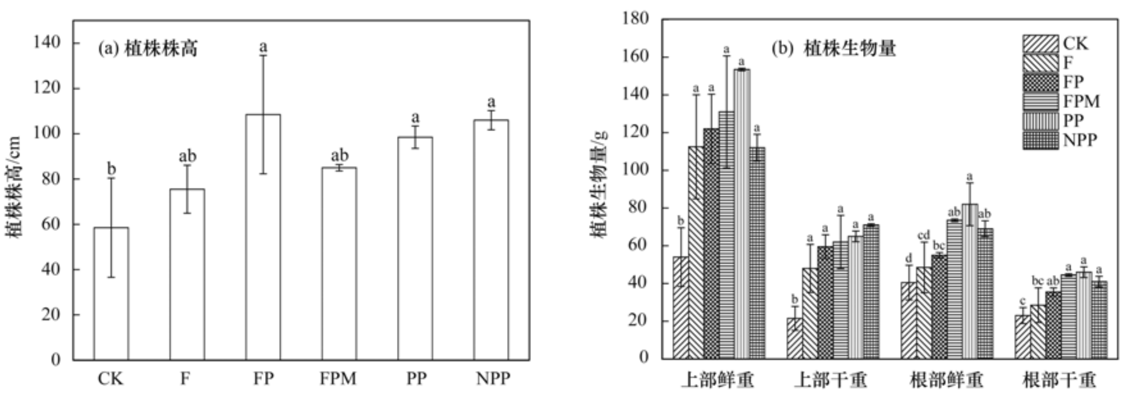
不同处理对柠檬氮、磷和钾含量的影响如图 4 所示。ω(植株全氮)为 13.99 ~ 20.59 $g\cdot kg^{-1}$，其中配施生物炭处理显著低于 F 处理($P<0.05$)。PP 和 NPP 处理的 ω(植株全磷)显著高于 F 处理($P<0.05$)，依次提高 91.13% 和 93.97%。PP 和 NPP 处

**表 4　不同处理对土壤养分含量的影响**

Table 4　Effects of different treatments on soil nutrient content

| 区域 | 处理 | ω(全氮) /g·kg$^{-1}$ | ω(全钾) /g·kg$^{-1}$ | ω(碱解氮) /mg·kg$^{-1}$ | ω(硝态氮) /mg·kg$^{-1}$ | ω(铵态氮) /mg·kg$^{-1}$ | ω(速效钾) /mg·kg$^{-1}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 非根际土壤 | CK | 0.62 ±0.03c | 11.16 ±1.29a | 58.57 ±8.75bc | 23.62 ±1.08e | 10.81 ±3.43b | 223.30 ±1.81d |
| | F | 0.76 ±0.01a | 8.67 ±0.04b | 75.14 ±0.23a | 269.21 ±24.36a | 24.64 ±4.91a | 573.86 ±4.88a |
| | FP | 0.64 ±0.01bc | 9.41 ±1.70b | 50.70 ±2.13c | 234.76 ±14.32a | 9.67 ±6.66b | 273.12 ±0.64c |
| | FPM | 0.67 ±0.01b | 9.66 ±0.47bc | 66.68 ±5.25ab | 141.03 ±0.02c | 8.92 ±1.75b | 280.80 ±0.72c |
| | PP | 0.63 ±0.02c | 9.88 ±0.87bc | 49.15 ±0.01c | 197.45 ±6.77b | 3.07 ±0.49b | 323.18 ±9.14b |
| | NPP | 0.61 ±0.01c | 10.19 ±0.45bc | 50.71 ±2.33c | 84.60 ±1.35d | 4.16 ±3.71b | 311.84 ±4.35b |
| 根际土壤 | GCK | 0.56 ±0.01f | 10.48 ±0.71ab | 51.10 ±4.78b | 53.04 ±2.71d | 4.56 ±0.63b | 152.07 ±3.63f |
| | GF | 0.66 ±0.00e | 11.78 ±1.86a | 69.16 ±0.61a | 385.87 ±27.01b | 13.19 ±3.86a | 616.10 ±9.04a |
| | GFP | 0.77 ±0.01c | 9.97 ±0.04ab | 68.36 ±0.07a | 391.61 ±2.65b | 7.29 ±7.22b | 426.62 ±3.24d |
| | GFPM | 0.80 ±0.01b | 9.24 ±0.42b | 62.14 ±2.70ab | 450.94 ±18.91a | 18.34 ±0.07a | 485.33 ±4.22c |
| | GPP | 0.71 ±0.01d | 9.97 ±0.50ab | 58.47 ±7.77ab | 207.97 ±15.18c | 3.82 ±1.12b | 351.9 ±4.12e |
| | GNPP | 0.85 ±0.01a | 9.72 ±0.25ab | 66.11 ±6.18a | 85.55 ±16.23d | 6.29 ±3.50b | 521.51 ±2.52b |

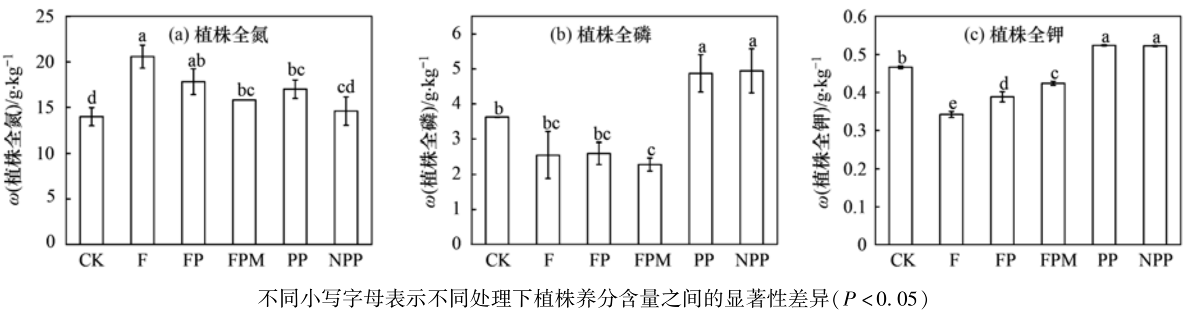
1)组间不同小写字母表示不同处理下同一区域之间的显著性差异($P<0.05$)




(a)中不同小写字母表示不同处理下株高之间的显著性差异($P<0.05$);(b)中不同小写字母表示不同处理下同一区域之间植株生物量的显著性差异($P<0.05$)

**图 3　不同处理对植株株高和生物量的影响**

Fig. 3　Effects of different treatments on plant height and biomass




不同小写字母表示不同处理下植株养分含量之间的显著性差异($P<0.05$)

**图 4　不同处理对植株养分含量的影响**

Fig. 4　Effects of different treatments on plant nutrient content

理的 ω(植株全钾)显著高于 F 处理($P<0.05$),依次提高 91.13% 和 93.97%.

## 2.4　化肥和有机肥配施生物炭对紫色土壤磷赋存形态的影响

土壤磷形态大致分为活性磷($H_2O$-P 和 $NaHCO_3$-P)、中度活性磷(NaOH-P 和 HCl-P)和稳态磷(hHCl-P 和 O-P)[18]. 由表 5 可知,F 处理的磷形态占比(ω)为:中度活性磷 > 活性磷 > 稳态磷; F、FP、FPM、PP 和 NPP 施肥处理的磷形态占比均为:中度活性磷 > 稳态磷 > 活性磷. 与 CK 处理相比,施肥处理均能够提高活性磷和中度活性磷比例,降低稳态磷比例. 从含量上看,配施生物炭(FP、FPM、PP 和 NPP)处理的活性磷和中度活性磷含量均远远高于 CK 处理,但低于 F 处理,其中有机肥配施生物炭(PP、NPP)处理效果好于化肥配施生物炭(FP、FPM)处理.

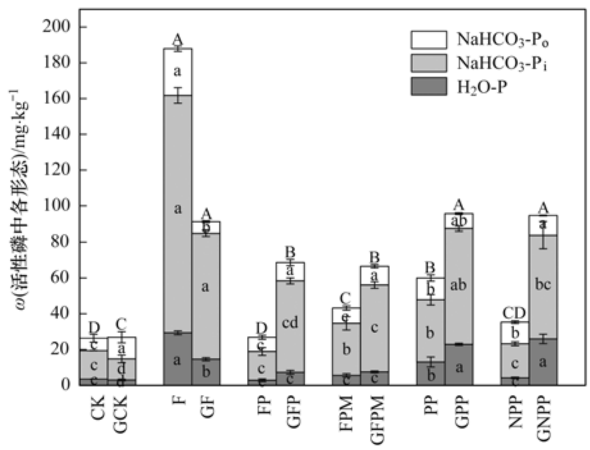
**表 5 不同处理下各磷形态含量及占比**

Table 5 Proportion distribution of different phosphorus forms

| 处理 | 活性磷 | | 中度活性磷 | | 稳态磷 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 含量/mg·kg$^{-1}$ | 占比/% | 含量/mg·kg$^{-1}$ | 占比/% | 含量/mg·kg$^{-1}$ | 占比/% |
| CK | 53.13 | 13.00 | 190.62 | 46.64 | 164.99 | 40.36 |
| F | 279.05 | 30.43 | 448.03 | 48.87 | 189.78 | 20.70 |
| FP | 95.46 | 16.12 | 340.19 | 57.46 | 156.39 | 26.42 |
| FPM | 109.72 | 18.30 | 333.03 | 55.55 | 156.73 | 26.15 |
| PP | 155.62 | 21.23 | 388.59 | 53.02 | 188.72 | 25.75 |
| NPP | 129.90 | 19.78 | 355.87 | 54.18 | 171.04 | 26.04 |

**2.4.1** 不同处理对土壤活性磷中各形态含量的影响

从图 5 可知,非根际土壤 ω(活性磷)范围为 26.30 ~ 187.92 mg·kg$^{-1}$,CK 处理最低,F 处理最高;根际土壤 ω(活性磷)范围为 26.83 ~ 95.65 mg·kg$^{-1}$,CK 处理最低,PP 处理最高,化肥配施生物炭(FP 和 FPM)处理较 F 处理减少了 24.70% 和 26.97%,有机肥配施生物炭(PP 和 NPP)处理相比于 F 处理略有提高.施用生物炭(FP、FPM、PP 和 NPP)处理的根际土壤活性磷含量显著高于非根际($P<0.05$).进一步比较具体磷形态含量发现,与 CK 处理相比,单施化肥(F)处理和施用生物炭处理的根际土壤中 $NaHCO_3$-$P_i$ 含量显著增加($P<0.05$),$NaHCO_3$-$P_o$ 含量有所降低,其中 F 处理和 PP 处理的效果最好.




不同小写字母表示不同处理下同一区域之间各具体磷形态含量的显著性差异($P<0.05$),不同大写字母表示不同处理下同一区域之间活性磷总量的显著性差异($P<0.05$);CK 表示对照组的非根际区域,GCK 表示对照组的根际区域;下同

**图 5 不同处理对土壤活性磷中各形态含量的影响**

Fig. 5 Effect of different treatments on active phosphorus content in soil

**2.4.2** 不同处理对土壤中度活性磷中各形态含量的影响

从图 6 可知,非根际土壤 ω(中度活性磷)在 81.03 ~ 265.27 mg·kg$^{-1}$,其中 CK 处理最低,F 处理最高;根际土壤 ω(中度活性磷)在 109.59 ~ 226.53 mg·kg$^{-1}$,其中 CK 处理最低,PP 处理最高,配施生物炭(FP、FPM、PP 和 NPP)处理较 F 处理增加了 6.46、14.89、43.77 和 32.28 mg·kg$^{-1}$.此外配施生物炭处理的根际土壤活性磷含量显著高于非根际($P<0.05$).比较具体磷形态的含量发现,单施化肥(F)和配施生物炭处理的 NaOH-$P_i$ 和 HCl-$P_i$ 含量较 CK 处理有显著提高($P<0.05$),而 NaOH-$P_o$ 和 HCl-$P_o$ 含量的变化不显著($P>0.05$).

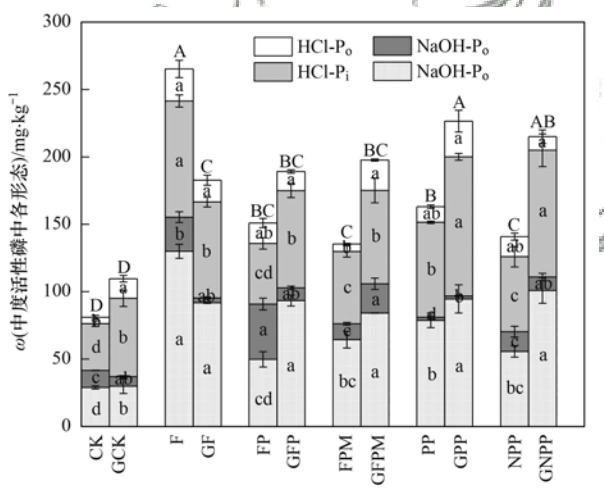



**图 6 不同处理对土壤中度活性磷中各形态含量的影响**

Fig. 6 Effects of different treatments on the content of moderate active phosphorus in soil

**2.4.3** 不同处理对土壤稳态磷中各形态含量的影响

由图 7 可知,非根际土壤 ω(稳态磷)范围为

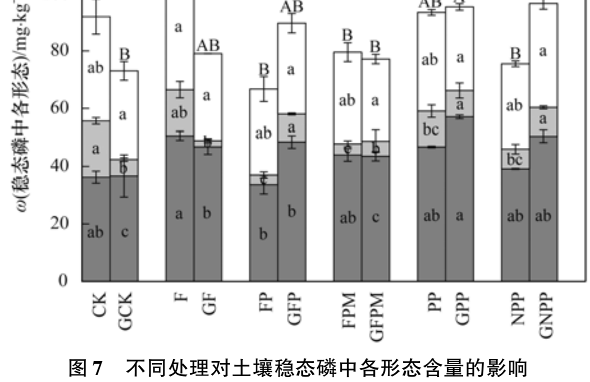



**图 7 不同处理对土壤稳态磷中各形态含量的影响**

Fig. 7 Effects of different treatments on the steady-state phosphorus content in soil

66.74～110.71 $mg\cdot kg^{-1}$，其中 FP 处理最低，F 处理最高；根际土壤 $\omega$(稳态磷)范围为 73.06～96.53 $mg\cdot kg^{-1}$，其中 CK 处理最低，NPP 处理最高. 通过比较具体磷形态发现，各处理的 O-P 含量差异不显著($P>0.05$)；在非根际土壤中，配施生物炭(FP、FPM、PP 和 NPP)处理的 hHCl-$P_o$ 含量较 F 处理显著降低($P<0.05$)；在根际土壤中，配施生物炭能够显著增加 hHCl-$P_i$ 含量($P<0.05$)，其中 PP 处理最为明显，比 F 处理提高了 22.03%.

## 3　讨论

### 3.1　化肥和有机肥配施生物炭对土壤 pH、有机质及养分含量的影响

土壤 pH、有机质、全磷和有效磷含量等是土壤理化性质的重要指标[19,20]. 洪欠欠等[21]的研究发现，不同施肥方式对土壤理化性质影响显著，与本研究结果一致. 本试验结果表明单施化肥(F)会显著降低土壤 pH，而配施生物炭(FP、FPM、PP 和 NPP)能提高土壤 pH，这与陈淼等[22]的研究结果一致，其原因是生物炭呈碱性[23]，并且本试验使用的玉米生物炭和稻壳生物炭属于草本植物生物炭，pH 值要比一般木本类生物炭更高[24]，在施入土壤后能够中和土壤中的 $H^+$. 肖辉等[25]的研究对比商品有机肥、化肥、鸡粪和猪粪对土壤 pH 的影响，结果表明施用无机化肥会降低土壤 pH，有机肥会增加土壤 pH，这和本试验结果一致，即施用有机肥(PP 和 NPP)对土壤 pH 的改良效果最好，因为有机肥富含有机官能团，能够增强对土壤 $H^+$ 和 $Al^+$ 的吸附[26]. 因此在延缓和改良土壤酸化的施肥方法中，有机肥和生物炭配施是一种有效的方式.

本研究中施肥显著增加土壤有机质含量，并且有机肥配施生物炭(PP 和 NPP)处理的增加效果最明显，与王强等[27]和王晓娟等[28]的研究结果一致. 其原因是一方面有机肥施加到土壤后，直接增加土壤有机质含量；另一方面生物炭自身具有较强的吸附能力，施加到土壤后可以提升土壤对有机质的吸持能力，并吸附大量有机分子，通过表面催化活性促进小分子聚合形成有机质，进一步提高土壤有机质含量[29]. 各处理的根际土壤有机质含量比非根际更高，表现出明显的根际效应，因为生物炭可以显著促进植物根系发育，增加植物根际土壤酶活性，使根系分泌更多的分泌物，提高根际土壤的有机质含量[30]；同时根系分泌物能够促进微生物增殖，加强对土壤中动植物残体的分解，进一步增加土壤有机质含量，所以生物炭对根际土壤的有机质含量的提升效果更加明显[31].

在对土壤全磷和有效磷的影响研究中，配施生物炭处理较 CK 处理可以显著提高土壤全磷和有效磷含量，这与 Enders 等[32]和占亚楠等[33]的研究结果一致，一方面是因为生物炭在烧制过程中会释放产生磷酸盐，而这部分磷几乎完全保留于生物炭中，并且大部分以可溶性的磷酸盐形态存在，将其施入土壤后，可以直接增加土壤有效磷含量[34]；另一方面是因为生物炭在施入土壤后会提高土壤 pH，其改变会对磷形态转化产生重要影响[35]. 在本试验中，配施生物炭处理虽然较 CK 处理能显著提高土壤全磷和有效磷含量，但仍低于单施化肥(F)处理，其原因在于单施化肥是直接向土壤中输入大量速效养分，所以在短期内能够显著提高土壤磷含量，其缺点是会极大增加土壤磷流失的风险，使化肥利用率降低，不利于农业绿色可持续发展，而生物炭的添加可以改善传统施肥的缺点，使肥效更持久，减少土壤养分流失[36]，降低环境污染风险，因此配施生物炭是更优的施肥方式，其中有机肥配施生物炭(PP 和 NPP)处理的效果最优. 孟令军等[37]和邱权等[38]的研究发现，土壤养分都会呈现一种明显的根际富聚集效应，即根际土壤的速效养分明显高于非根际土壤，与本研究结果一致. 此外，本试验发现配施生物炭处理的根际土壤全氮含量较 F 处理显著增加，这与吕贝贝等[39]的研究结果一致，其原因是施入生物炭可以影响土壤氮素的持留、转化以及循环，进而提高全氮含量[40]；而速效钾含量显著降低，其原因是施用生物炭能够提高作物对钾的吸收利用，从而使土壤中剩余的钾含量降低[41].

### 3.2　化肥和有机肥配施生物炭对植株生物量和养分含量的影响

本研究中配施生物炭处理(FP、FPM、PP 和 NPP)的株高较 F 处理均有提高，其中 FPM、PP 和 NPP 处理表现最好，这与其他学者的研究结果类似. 陈森等[42]的研究发现施用 0.5% 的生物炭能够显著提高白菜株高，戚琳等[43]的研究发现在土壤中施用生物炭可以增加菠菜株高，且增量与生物炭施用量成正比. 另外在配施生物炭后，植株根部生物量得到显著增加，其中 PP 处理表现最佳，这是由于生物炭疏松多孔的结构有利于植物根系生长，同时生物炭通过改良土壤结构，增加土壤持水性和透气性，为植物根系的发育创造适宜条件，使植株能够获取更大范围的土壤养分[36]. Sigua 等[44]的研究发现春小麦在松树生物炭和硬木生物炭处理下根系生长分别增加 36% 和 44%，这与本研究结果相似.

本研究中，与单施化肥相比，配施生物炭总体显著降低植株全氮含量，这和李军佐[45]和邱志腾[46]

的研究结果一致,可能是由于生物炭中氮的有效性较低,使植物对氮的吸收减少[46]. 另外植株全磷含量的变化趋势与全钾含量相似,其总体趋势为化肥配施生物炭(FP、FPM)显著降低植株全磷和全钾含量($P<0.05$),而有机肥配施生物炭(PP 和 NPP)显著增加植株全磷和全钾含量($P<0.05$). 潘润等[47]的研究结果表明生物炭施用能够促进奶油小白菜、四季小白菜和小青菜等 3 种蔬菜对全磷和全钾养分的吸收,这与本研究结果一致. 总体而言,有机肥配施生物炭能够显著促进柠檬的生长及其对养分的吸收利用.

### 3.3 化肥和有机肥配施生物炭对紫色土壤磷赋存形态的影响

土壤磷形态及其相互转化受到诸多因素影响,施加生物炭是影响土壤磷转化的重要因素之一. 水溶态磷既是作物最易吸收的磷组分,也是土壤中最易流失的磷组分,其含量极低[48]. 本试验结果(除 F 处理外)表明活性磷占总磷比例最小,因此活性磷不是紫色土壤中磷的主要赋存形态. 配施生物炭能够提高活性磷含量及占比,其中 PP 处理效果最好,且表现出明显的根际效应. 配施生物炭的根际土壤中 $NaHCO_3$-$P_o$ 含量有所降低,$NaHCO_3$-$P_i$ 含量显著提高($P<0.05$),其原因可能是生物炭施入土壤后加快了土壤中微生物活动,从而促进 $NaHCO_3$-$P_o$ 向无机磷 $NaHCO_3$-$P_i$ 转化[1].

本试验结果均表现为中度活性磷占比最高,表明中度活性磷是紫色土壤最主要的磷赋存形态,这与穆晓慧等[49]和何岩等[50]的研究结果一致. 本试验结果还表明,配施生物炭可以提高土壤中度活性磷的比例和含量,这与邢璐等[51]在研究粪肥对潮土磷形态转化的结果一致,其中 PP 处理效果最好,并且表现出明显的根际效应. 进一步比较中度活性磷的具体磷形态发现,配施生物炭处理的 NaOH-$P_i$ 和 HCl-$P_i$ 含量较 CK 处理都显著增加,这说明配施生物炭能够显著增加 NaOH-$P_i$ 和 HCl-$P_i$ 含量,其原因是生物炭富含 Al 和 Fe 等无机元素[8],且自身和配施的化肥、有机肥都含有大量磷,在施入土壤后,磷迅速被生物炭中的 Al、Fe 固定,从而提高土壤中 NaOH-$P_i$ 的含量[52],而 HCl-$P_i$ 主要是与 Ca 结合紧密的磷酸盐[53],生物炭中含有大量的含钙物质,能够进一步促进磷素向钙结合态转变,从而增加土壤中 HCl-$P_i$ 含量[54].

稳态磷是植物最难吸收的形态,通常被认为其有效性很差[55]. 配施生物炭处理的非根际土壤稳态磷含量较 F 处理均有所降低,这是因为生物炭的特殊结构可以为微生物提供良好的生存环境,从而改善微生物的群落结构以及增加微生物的活性,增加磷酸酶的活性,促进微生物分解有机酸和溶解难溶性磷,这些分解作用可以促进惰性有机磷 hHCl-$P_o$ 转化为更高有效性形态的磷[56],从而表现出在非根际土壤中生物炭可以促进部分稳态磷的活化.

## 4 结论

(1)配施生物炭能够显著提高土壤 pH,以 PP 和 NPP 处理的改良效果最好,其根际土壤 pH 较 F 处理分别提高了 1.78 和 1.87 个单位. 配施生物炭处理较 F 处理能显著提高土壤有机质、全氮、全磷和有效磷含量,速效钾含量显著降低. 与 F 处理相比,PP 和 NPP 处理能够显著增加植株根部生物量、植株全磷和全钾含量,而显著降低植株全氮含量.

(2)紫色土壤最主要的磷赋存形态是中度活性磷,其占比为 46.64%~57.46%,占比最小的是活性磷,为 13.00%~30.43%. 施用生物炭可以促进土壤难溶态磷向有效磷转化,提高活性磷和中度活性磷比例,且表现出明显的根际效应. 此外,施用生物炭有利于土壤有机磷的矿化,能促进土壤有机磷转化为无机磷.

(3)在不同处理对土壤养分的改良效果中,PP 和 NPP 处理表现最优; 在对提高土壤各形态磷含量以及促进磷向更高有效态转化的效果中,PP 处理表现最好. 综合来看,生物炭配施腐熟猪粪(PP)是紫色土区最有效的养分管理方式.

**参考文献:**


[1] 武玉. 生物炭对土壤中磷的形态转化以及有效性的影响[D]. 烟台: 中国科学院烟台海岸带研究所, 2015.
Wu Y. Influence of biochar addition on phosphorus transformation and bioavailability in soils[D]. Yantai: Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, 2015.

[2] 王莹莹, 肖谋良, 张昀, 等. 水稻光合碳在植株-土壤系统中分配与稳定对施磷的响应[J]. 环境科学, 2019, **40**(4): 1957-1964.
Wang Y Y, Xiao M L, Zhang Y, *et al*. Allocation and stabilization responses of rice photosynthetic carbon in the plant-soil system to phosphorus application[J]. Environmental Science, 2019, **40**(4): 1957-1964.

[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] 罗东海, 王子芳, 龙翼, 等. 化肥减量配施生物炭对紫色土坡耕地磷流失的影响[J]. 环境科学, 2020, **41**(3): 1286-1295.
Luo D H, Wang Z F, Long Y, *et al*. Effect of optimized fertilization and biochar application on phosphorus loss in purple soil sloping farmland[J]. Environmental Science, 2020, **41**(3): 1286-1295.

[5] 梁婷, 李莲芳, 朱昌雄, 等. 铈锰改性生物炭对土壤 As 的固

定效应[J]. 环境科学, 2019, **40**(11): 5114-5123.

Liang T, Li L F, Zhu C X, *et al*. Cerium-manganese modified biochar immobilizes arsenic in farmland soils[J]. Environmental Science, 2019, **40**(11): 5114-5123.

[6] 仇祯, 周欣彤, 韩卉, 等. 互花米草生物炭的理化特性及其对镉的吸附效应[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(1): 172-178.

Qiu Z, Zhou X T, Han H, *et al*. Properties of *Spartina alterniflora* Loisel. derived-biochar and its effect on cadmium adsorption[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, **37**(1): 172-178.

[7] 戴中民. 生物炭对酸化土壤的改良效应与生物化学机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.

Dai Z M. The effects of biochar on acid soil improvement and the related biochemical mechanisms [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.

[8] 高天一, 李娜, 彭靖, 等. 连续施用生物炭对棕壤磷素形态及有效性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, **25**(9): 1451-1460.

Gao T Y, Li N, Peng J, *et al*. Effect of consecutive application of biochar on phosphate morphology and availability in brown soil [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, **25**(9): 1451-1460.

[9] 杨彩迪, 宗玉统, 卢升高. 不同生物炭对酸性农田土壤性质和作物产量的动态影响[J]. 环境科学, 2020, **41**(4): 1914-1920.

Yang C D, Zong Y T, Lu S G. Dynamic effects of different biochars on soil properties and crop yield of acid farmland[J]. Environmental Science, 2020, **41**(4): 1914-1920.

[10] 吕宏虹, 宫艳艳, 唐景春, 等. 生物炭及其复合材料的制备与应用研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2015, **34**(8): 1429-1440.

Lv H H, Gong Y Y, Tang J C, *et al*. Advances in preparation and applications of biochar and its composites[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, **34**(8): 1429-1440.

[11] 李倩倩, 许晨阳, 耿增超, 等. 生物炭对塿土土壤容重和团聚体的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(7): 3388-3396.

Li Q Q, Xu C Y, Geng Z C, *et al*. Impact of biochar on soil bulk density and aggregates of Lou soil [J]. Environmental Science, 2019, **40**(7): 3388-3396.

[12] Huang R, Wang Y Y, Liu J, *et al*. Variation in $N_2O$ emission and $N_2O$ related microbial functional genes in straw- and biochar-amended and non-amended soils[J]. Applied Soil Ecology, 2019, **137**: 57-68.

[13] Huang R, Gao X S, Wang F H, *et al*. Effects of biochar incorporation and fertilizations on nitrogen and phosphorus losses through surface and subsurface flows in a sloping farmland of Entisol[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, **300**, doi: 10.1016/j.agee.2020.106988.

[14] Qi L, Pokharel P, Chang S X, *et al*. Biochar application increased methane emission, soil carbon storage and net ecosystem carbon budget in a 2-year vegetable-rice rotation[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, **292**, doi: 10.1016/j.agee.2020.106831.

[15] 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 D Y, Lan Y, Yang X, *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.

[16] 夏丽丹, 曹升, 张虹, 等. 不同水分条件下生物炭对红壤磷素形态及磷酸酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(5): 1101-1111.

Xia L D, Cao S, Zhang H, *et al*. Effect of biochar on phosphorus forms and phosphatase activity in red soil under different water conditions[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, **38**(5): 1101-1111.

[17] Tiessen H, Moir J O. Characterization of available P by sequential extraction[A]. In: Carter M R (Ed.). Soil Sampling and Methods of Analysis[M]. Boca Raton: Lewis Publishers, 1993. 75-86.

[18] Picone L I, Zamuner E C, Berardo A, *et al*. Phosphorus transformations as affected by sampling date, fertilizer rate and phosphorus uptake in a soil under pasture[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2003, **67**(3): 225-232.

[19] 付平南, 贡晓飞, 罗丽韵, 等. 不同价态铬和土壤理化性质对大麦根系毒性阈值的影响[J]. 环境科学, 2020, **41**(5): 2398-2405.

Fu P N, Gong X F, Luo L Y, *et al*. Toxicity of chromium to root growth of barley as affected by chromium speciation and soil properties[J]. Environmental Science, 2020, **41**(5): 2398-2405.

[20] 王瑞宏, 贾彤, 曹苗文, 等. 铜尾矿坝不同恢复年限土壤理化性质和酶活性的特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(7): 3339-3348.

Wang R H, Jia T, Cao M W, *et al*. Characteristics of soil physicochemical properties and enzyme activities over different reclaimed years in a copper tailings dam[J]. Environmental Science, 2018, **39**(7): 3339-3348.

[21] 洪欠欠, 颜晓, 魏宗强, 等. 长期施肥与土壤性质对水稻土磷吸附的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2018, (3): 61-66, 84.

Hong Q Q, Yan X, Wei Z Q, *et al*. Effects of long-term fertilization on phosphorus sorption and soil properties in paddy soil[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2018, (3): 61-66, 84.

[22] 陈淼, 李小娟, 陈歆, 等. 不同施肥处理下热带土壤硝态氮累积特征及与土壤 pH 值、辣椒产量的关系[J]. 西南农业学报, 2018, **31**(5): 1045-1050.

Chen M, Li X J, Chen X, *et al*. Characteristics of nitrate nitrogen accumulation in tropical soil and its relationship with pH and chilli yield under different fertilization treatments [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2018, **31**(5): 1045-1050.

[23] 魏忠平, 朱永乐, 赵楚峒, 等. 生物炭吸附重金属机理及其应用技术研究进展[J]. 土壤通报, 2020, **51**(3): 741-747.

Wei Z P, Zhu Y L, Zhao C T, *et al*. Research advances on biochar adsorption mechanism for heavy metals and its application technology[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020, **51**(3): 741-747.

[24] 李成江, 李大肥, 周桂夙, 等. 不同种类生物炭对植烟土壤微生物及根茎病害发生的影响[J]. 作物学报, 2019, **45**(2): 289-296.

Li C J, Li D F, Zhou G S, *et al*. Effects of different types of biochar on soil microorganism and rhizome diseases occurrence of flue-cured tobacco[J]. Acta Agronomica Sinica, 2019, **45**(2): 289-296.

[25] 肖辉, 潘洁, 程文娟, 等. 不同有机肥对设施土壤全盐累积与 pH 值变化的影响[J]. 中国农学通报, 2014, **30**(2): 248-252.

Xiao H, Pan J, Cheng W J, *et al*. Effect of organic fertilizer on

soil salt accumulation and pH changes in greenhouse [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, **30**(2): 248-252.
[26] Hue N V. Alleviating soil acidity with crop residues[J]. Soil Science, 2011, **176**(10): 543-549.
[27] 王强, 耿增超, 许晨阳, 等. 施用生物炭对塿土土壤微生物代谢养分限制和碳利用效率的影响[J]. 环境科学, 2020, **41**(5): 2425-2433.
Wang Q, Geng Z C, Xu C Y, *et al*. Effects of biochar application on soil microbial nutrient limitations and carbon use efficiency in Lou soil[J]. Environmental Science, 2020, **41**(5): 2425-2433.
[28] 王晓娟, 贾志宽, 梁连友, 等. 旱地施有机肥对土壤有机质和水稳性团聚体的影响[J]. 应用生态学报, 2012, **23**(1): 159-165.
Wang X J, Jia Z K, Liang L Y, *et al*. Effects of organic manure application on dry land soil organic matter and water stable aggregates[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, **23**(1): 159-165.
[29] 勾芒芒, 屈忠义. 生物炭对改善土壤理化性质及作物产量影响的研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2013, (5): 1-5.
Gou M M, Qu Z Y. Research on using biochar to agricultural soil amendment and crop yield[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2013, (5): 1-5.
[30] 毕博远. 黄土高原不同种植年限紫花苜蓿根系分泌物差异性分析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
BI B Y. The root exudates difference of alfalfa in different planting years in the Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018.
[31] Liu C, Wang H L, Li P H, *et al*. Biochar's impact on dissolved organic matter (DOM) export from a cropland soil during natural rainfalls[J]. Science of the Total Environment, 2019, **650**: 1988-1995.
[32] Enders A, Hanley K, Whitman T, *et al*. Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance [J]. Bioresource Technology, 2012, **114**: 644-653.
[33] 占亚楠, 王智, 孟亚利. 生物炭提高土壤磷素有效性的整合分析[J]. 应用生态学报, 2020, **31**(4): 1185-1193.
Zhan Y N, Wang Z, Meng Y L. Biochar addition improves soil phosphorus availability: a meta-analysis[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, **31**(4): 1185-1193.
[34] Angst T E, Sohi S P. Establishing release dynamics for plant nutrients from biochar[J]. GCB Bioenergy, 2013, **5**(2): 221-226.
[35] Xu N, Tan G C, Wang H Y, *et al*. Effect of biochar additions to soil on nitrogen leaching, microbial biomass and bacterial community structure[J]. European Journal of Soil Biology, 2016, **74**: 1-8.
[36] 何秀峰. 生物炭、有机肥不同处理对葡萄幼苗生长发育及根际环境的影响[D]. 石河子: 石河子大学, 2020.
He X F. Effects of biochar, organic fertilizer under different treatments on growth and rhizosphere environment of grape seedlings[D]. Shihezi: Shihezi University, 2020.
[37] 孟令军, 耿增超, 殷金岩, 等. 秦岭太白山区6种中草药根际与非根际土壤化学性质及酶活性[J]. 应用生态学报, 2012, **23**(10): 2685-2692.
Meng L J, Geng Z C, Yin J Y, *et al*. Chemical properties and enzyme activities of rhizosphere and non-rhizosphere soils under six Chinese herbal medicines on Mt. Taibai of Qinling Mountains, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, **23**(10): 2685-2692.
[38] 邱权, 李吉跃, 王军辉, 等. 西宁南山4种灌木根际和非根际土壤微生物、酶活性和养分特征[J]. 生态学报, 2014, **34**(24): 7411-7420.
Qiu Q, Li J Y, Wang J H, *et al*. Microbes, enzyme activities and nutrient characteristics of rhizosphere and non-rhizosphere soils under four shrubs in Xining Nanshan, Prefecture, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, **34**(24): 7411-7420.
[39] 吕贝贝, 张丽萍, 张贵云, 等. 生物炭配施化肥对土壤肥力及玉米生长的影响[J]. 山西农业科学, 2020, **48**(1): 81-86.
Lv B B, Zhang L P, Zhang G Y, *et al*. Effects of biochar and fertilizer application on soil fertility and maize growth[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2020, **48**(1): 81-86.
[40] 刘悦, 黎子涵, 邹博, 等. 生物炭影响作物生长及其与化肥混施的增效机制研究进展[J]. 应用生态学报, 2017, **28**(3): 1030-1038.
Liu Y, Li Z H, Zou B, *et al*. Research progress in effects of biochar application on crop growth and synergistic mechanism of biochar with fertilizer[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, **28**(3): 1030-1038.
[41] Yao Q, Liu J J, Yu Z H, *et al*. Three years of biochar amendment alters soil physiochemical properties and fungal community composition in a black soil of northeast China[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2017, **110**: 56-67.
[42] 陈森, 张子谦, 李婧, 等. 土壤镉污染下生物炭对白菜生长及植株镉浓度的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, **46**(5): 129-131.
[43] 戚琳, 宋修超, 韩承辉, 等. 不同热解温度水稻秸秆生物炭对菠菜生物量和品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, **45**(23): 132-135.
[44] Sigua G C, Novak J M, Watts D W, *et al*. Efficacies of designer biochars in improving biomass and nutrient uptake of winter wheat grown in a hard setting subsoil layer[J]. Chemosphere, 2016, **142**: 176-183.
[45] 李军佐. 生物炭对优质粳稻秋田小町生理特性的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.
Li J Z. Effects of bio-carbon on physiological characteristics of high-quality Japonica rice[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017.
[46] 邱志腾. 生物炭对红壤的降酸效果与毛豆生长的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
Qiu Z T. Effects of biochar on acidity reduction of red soil and soybean growth[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
[47] 潘润, 杲悦悦, 任国宇, 等. 炭基肥对土壤性质以及蔬菜生长的影响[J]. 安徽农业科学, 2020, **48**(21): 159-161.
Pan R, Gao Y Y, Ren G Y, *et al*. Effects of carbon-based fertilizer on soil properties and vegetable growth[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2020, **48**(21): 159-161.
[48] 刘娟, 张乃明, 张淑香. 潮土磷素累积流失风险及环境阈值[J]. 农业工程学报, 2020, **36**(20): 8-16.
Liu J, Zhang N M, Zhang S X. Accumulative loss risk of phosphorus and its environmental threshold in fluvo-aquic soil [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, **36**(20): 8-16.
[49] 穆晓慧, 李世清, 党蕊娟. 黄土高原石灰性土壤不同形态磷组分分布特征[J]. 中国生态农业学报, 2008, **16**(6): 1341-1347.
Mu X H, Li S Q, Dang R J. Distribution of phosphorus fractionations in calcareous soils of the Loess Plateau [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, **16**(6): 1341-1347.
[50] 何岩, 赵由才, 柴晓利, 等. 生活垃圾堆放场和填埋场矿化

垃圾中磷的形态及其磷素活化[J]. 环境化学, 2008, **27**(1): 77-80.
He Y, Zhao Y C, Chai X L, *et al*. Phosphorus fractions and activation in aged refuse from municipal solid waste dumpling site and landfill[J]. Environmental Chemistry, 2008, **27**(1): 77-80.

[51] 邢璐, 王火焰, 陈玉东, 等. 施加粪肥对潮土有机磷形态转化的影响[J]. 土壤, 2013, **45**(5): 845-849.
Xing L, Wang H Y, Chen Y D, *et al*. Transformation of phosphorus forms in calcareous soils with manure application[J]. Soils, 2013, **45**(5): 845-849.

[52] Almeida D S, Rosolem C A. Ruzigrass grown in rotation with soybean increases soil labile phosphorus[J]. Agronomy Journal, 2016, **108**(6): 2444-2452.

[53] Joshi S R, Li X N, Jaisi D P. Transformation of phosphorus pools in an agricultural soil: an application of oxygen-18 labeling in phosphate[J]. Soil Science Society of America Journal, 2016, **80**(1): 69-78.

[54] 徐秋桐, 邱志腾, 章明奎. 生物质炭对不同 pH 土壤中碳氮磷的转化与形态的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2014, **40**(3): 303-313.
Xu Q T, Qiu Z T, Zhang M K. Effects of biochar application on transformation and chemical forms of C, N and P in soils with different pH[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences), 2014, **40**(3): 303-313.

[55] 李蕴慧, 吴景贵, 赵欣宇, 等. 农业废弃物对黑土有机磷形态长期动态影响[J]. 水土保持学报, 2017, **31**(1): 260-264, 271.
Li Y H, Wu J G, Zhao X Y, *et al*. Dynamic changes of organic phosphorus forms applied different agricultural waste materials in black soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, **31**(1): 260-264, 271.

[56] Gong H, Li Y, Li S. Effects of the interaction between biochar and nutrients on soil organic carbon sequestration in soda saline-alkali grassland: a review[J]. Global Ecology and Conservation, 2021, **26**, doi: 10.1016/j.gecco.2020.e01449.

# HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 42 No. 12

Dec. 15, 2021


## CONTENTS