

# 热解材料对生物炭理化性质的影响

杨放<sup>1,2</sup>, 李心清<sup>2\*</sup>, 王兵<sup>2</sup>, 孙璐<sup>3</sup>, 何云勇<sup>2</sup>, 黄一敏<sup>2</sup>, 李阳<sup>2</sup>

(1. 四川省地矿局成都水文地质工程地质队, 成都 610072; 2. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002; 3. 中国冶金地质总局昆明地质勘查院, 昆明 650203)

**摘要** 生物质的热解材料会对其生物炭的物理化学性质产生较大影响, 进而影响其田间应用效果。选取四种乔木(橡树、桑树、樟树和松树)、三种草本植物(芦苇、蒿和蕨类)和两种作物秸秆(玉米秆和油菜秆), 在同等热解条件下(550 °C)制备生物炭, 对比其理化性质的差异。结果显示, 秸秆生物炭的可溶性 Cl<sup>-</sup>和 K<sup>+</sup>含量、EC和CEC均显著高于乔木和草本生物炭, 有效磷也呈现类似规律, 而可溶性 Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>和 Mg<sup>2+</sup>含量以及 pH、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 等指标在三类生物炭之间无显著差异。乔木生物炭和草本生物炭之间在各个指标上均无显著差异。这表明, 从营养元素、CEC和改良酸性土壤的角度来看, 秸秆生物炭比乔木和草本生物炭更适合作为土壤改良剂。

**关键词** 生物炭; 热解材料; 物理化学性质; 土壤改良

中图分类号: X71 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2015)09-1822-07 doi:10.11654/jaes.2015.09.027

## Effects of Different Feedstocks on Physicochemical Characteristics of Pyrolyzed Biochars

YANG Fang<sup>1,2</sup>, LEE Xin-qing<sup>2\*</sup>, WANG Bing<sup>2</sup>, SUN Lu<sup>3</sup>, HE Yun-yong<sup>2</sup>, HUANG Yi-min<sup>2</sup>, LI Yang<sup>2</sup>

(1.Chengdu Hydrogeological and Engineering Geological Team, Chengdu 610072, China; 2.State Key Laboratory of Environment Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guiyang 550002, China; 3.China Metallurgical Geology Bureau Kunming Institute Survey, Kunming 650203, China)

**Abstract** Feedstock characteristics strongly influence the physicochemical characteristics of pyrolyzed biochars, thus affecting the effects of biochars. In this research, the physicochemical characteristics of biochars pyrolyzed under the same pyrolysis condition(550 °C) from nine feedstocks(four arbors :oak, mulberry, camphor tree and pine tree; three shrubs :phragmites, artemisia and fern; two crop straws :rape stalks and corn stalks) were examined. Soluble Cl<sup>-</sup> and K<sup>+</sup>, available phosphorus, EC, and CEC were generally higher in the straw-derived biochars than in the arbor- and shrub-derived biochars. However, there was no significant difference in soluble Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, pH, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N among the three categories of biochars. From the perspective of the improvements of soil nutrients, CEC, and acidity, straw biochar is preferable over arbor and shrub biochars.

**Keywords** biochar; feedstock; physicochemical characteristics; soil amendment

中国生物质资源量巨大, 约有 7 亿 t 标准煤可作为能源利用。其中, 农作物秸秆年产量约 6 亿 t, 而林

业生物质资源每年可用于能源用途约 3 亿 t<sup>[1]</sup>。虽然目前发展了一些诸如沼气产业、生物液体燃料产业、生物质发电产业和生物质固体成型燃料等的生物质利用技术<sup>[1]</sup>, 但由于技术不成熟等原因, 整体的利用率偏低。特别在农村, 由于生物质较为分散, 主要的利用途径是利用率较低的焚烧。有统计显示我国秸秆的年焚烧量达到了 1.4 亿 t<sup>[2]</sup>, 大面积的焚烧不仅造成了环境污染等问题, 也是对生物质资源的极大浪费<sup>[3]</sup>。因此, 如何高效利用中国巨大的生物质资源成为有意义的研究课题, 而生物炭技术似乎提供了一条有效的途

收稿日期: 2015-04-13

基金项目: 中国科学院战略性科技先导专项(XDA05070400); 贵州省农业攻关计划项目(黔科合 NY 字[2011]3079 号); 中科院院地合作和科技支疆项目, 国家重大科学研究计划(2013CB956700-2); 贵州省国际科技合作计划项目(黔科合外 G 字[2012]7050 号); 中国科学院“西部之光”人才培养计划“西部博士资助项目”

作者简介: 杨放(1987—), 男, 博士, 研究方向: 生物炭技术的应用。  
E-mail: sunerpi@126.com

\* 通信作者: 李心清 E-mail: Lee@mails.gyig.ac.cn

径。生物炭技术是将作物秸秆或林业废弃物等生物质材料或其衍生物进行碳化,然后以适当方式和标准施用于土壤以获得相应经济、生态和环境效益的科学和技术理念<sup>[4-5]</sup>。

由于在固碳和改良土壤等方面强大的应用潜力,生物炭技术受到了国内外的普遍关注<sup>[6-9]</sup>。很多研究已经证明将生物炭施用于土壤能够改善土壤的水肥气和微生物状况<sup>[10-15]</sup>,从而实现减少土壤 N<sub>2</sub>O 的释放并取得增加作物产量的效果<sup>[7-8,16-22]</sup>,但是另外的某些研究却没有发现类似积极的效果<sup>[23-25]</sup>。这种不一致的结果可能是因为生物炭的性质差异所造成的。有研究已经发现生物炭的理化性质不仅与热解条件有关,并且与热解所用的生物质原料有关<sup>[26-30]</sup>。Uras 等对比了葡萄树枝生物炭、黑荆树枝生物炭和甘蔗渣生物炭之间的性质差异,发现甘蔗渣生物炭具有较高的表面酸度、阳离子交换量和 C/N 以及较低的电导和可溶性阴阳离子,更适合作为土壤改良剂<sup>[31-32]</sup>。虽然已有较多关于生物质类型影响生物炭性质的研究,但是将热解生物质分类对比其生物炭性质的相关研究还鲜有报道。本文对四种乔木,三种草本植物和两种作物秸秆在相同热解条件下所制成的生物炭的理化性质进行了研究,以期认识不同种类生物炭在理化性质方面的差异提供一定的理论参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 生物炭的制备

生物质原料包括四种乔木树枝(橡树、桑树、樟树和松树)、三种草本植物(芦苇、蒿和蕨类)和两种作物秸秆(玉米秆和油菜秆)。乔木和草本植物均采自贵州省贵阳市森林公园,均为纯自然生长而成,乔木的树龄约为 10 年,草本植物则为 1 年。秸秆采自贵阳市开阳县南龙乡,为当地传统耕作条件下生长而成。每个生物质样品取样量约为 10 kg。在室内将生物质粉碎至长度和直径分别小于 2 cm 和 5 mm,在 105 °C 下干燥 24 h 待用。分别取 5 kg 干燥后的生物质加入自制的搅拌式生物炭生产设备,热解温度为 550 °C,停留时间为 20 min。生物炭制成后磨细过 100 目筛,待用。

### 1.2 生物炭理化性质的测定

#### 1.2.1 pH 和电导(EC)

称取 2.0 g 的生物炭样品,加入 40.00 g 去离子水,振荡 1 h,静置 10 min 后,测定其 pH 值<sup>[31]</sup>(PHS-3CT,上海伟业);之后用滤纸过滤,用电导仪(HANNA HI9033)测定滤液的 EC 值<sup>[27]</sup>。

#### 1.2.2 灰分(Ash)和元素分析

分别取约 2.0 g 的生物炭样品,在 105 °C 下烘干,称重,将烘干后的样品放入马弗炉,在 750 °C 下灼烧 6 h,待马弗炉冷却至 300 °C 左右时,取出样品置于干燥器中,冷却后称重。重复以上步骤直至样品重量变化小于 0.000 5 g,根据重量的变化计算生物炭的灰分含量(ASTM D1762-84)<sup>[31]</sup>。

生物炭的 C、N、H 和 S 含量采用元素分析仪(vario Macro CNS; Elementar, Germany)测定。生物炭 O 含量则通过以下公式计算求得<sup>[26]</sup>:

$$O(\%W/W) = 100 - \text{Ash}(\%W/W) - C(\%W/W) - N(\%W/W) - H(\%W/W) - S(\%W/W)$$

#### 1.2.3 阳离子交换量(CEC)

取 2.0 g 的生物炭样品于 50 mL 的离心管中,加入 10 mL 饱和溶液(0.4 mol·L<sup>-1</sup> NaOAc~0.1 mol·L<sup>-1</sup> NaCl),振荡 1 h 后,离心 20 min(4200 r·min<sup>-1</sup>),移除上层清液。此过程重复三次,以保证阳离子交换位完全被 Na<sup>+</sup> 充满。之后加入 10 mL 提取液 Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>(0.25 mol·L<sup>-1</sup>),振荡 1 h 后,离心 20 min(4200 r·min<sup>-1</sup>),收集上层清液。此过程重复三次,使生物炭中的 Na<sup>+</sup> 完全被 Mg<sup>2+</sup> 置换出来。用去离子水将收集的液体定容至 50 mL,用离子色谱测定溶液中 Na<sup>+</sup> 和 Cl<sup>-</sup> 含量,并计算生物炭的 CEC(cmol·kg<sup>-1</sup>),计算方法见文献<sup>[31]</sup>。

#### 1.2.4 铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)和硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)

分别称取约 2.0 g 的生物炭样品,加入 2 mol·L<sup>-1</sup> 的 KCl 溶液 40 mL。振荡 1 h,过滤。滤液中的铵态氮用靛酚蓝比色分光光度法测定,硝态氮用离子色谱法(DIONEX ICS-90)测定<sup>[7]</sup>。

#### 1.2.5 水溶性离子

分别称取约 2.0 g 的生物炭样品,加入去离子水 40 mL。振荡 1 h,过滤。用原子吸收分光光度计测定滤液中的阳离子(K<sup>+</sup>和 Na<sup>+</sup>)含量;用离子色谱(DIONEX ICS-90)测定滤液的阴离子(Cl<sup>-</sup>和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)含量。

#### 1.2.6 有效磷(A-P)

生物炭的 A-P 的测定采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗分光光度法。称取 2.0 g 的生物炭样品,加入 50 mL 碳酸氢钠浸提液,振荡 30 min 后过滤,用钼锑抗分光光度法测定浸提液中的 A-P 含量<sup>[27]</sup>。

## 1.3 数据分析

除了元素分析和阴离子含量之外,所有的测量报告结果都以平均值与标准误差(N=3)表示。试验数据采用 Origin 8.0 和 SPSS 17.0 软件进行统计分析。各处

理之间的显著性差异采用单因素方差分析法(One-way ANOVA, Tukey) 显著性水平为 0.05。

## 2 结果与讨论

### 2.1 灰分和元素含量

元素分析结果显示(表 1) 9 种生物炭的 C、N、H、S、O、C/N<sub>molar</sub>、O/C<sub>molar</sub>、H/C<sub>molar</sub> 和灰分(Ash)含量分别介于 68.58%~79.51%、0.60%~1.73%、2.53%~3.93%、0.17%~3.09%、7.21%~17.59%、42.09%~121.12%、0.09%~0.23%、0.03%~0.05%和 7.21%~17.59%之间。对比乔木、草本和秸秆三类生物炭的元素和灰分含量发现, 秸秆生物炭的 S 含量显著高于乔木和草本生物炭 ( $P<0.01$ ), 可能是由于秸秆在生长过程中吸收了相对较多的 S, 这部分 S 可能主要来自含 S 化肥(如硫酸铵)的施用, 而草本和乔木是在纯自然环境中生长, 土壤中含 S 量相对较低。其他指标在三类生物炭之间则无显著差异, 说明生物炭的这些指标不受生物质种类的影响。

值得注意的是, 当土壤的 C/N 为 20 时, 对微生物

活动较为有利<sup>[33]</sup>, 但本试验中所有生物炭的 C/N 均大于 20, 因此这些生物炭单独施入土壤可能会降低土壤 N 的可利用度从而致使土壤中 N 对作物的供给受限<sup>[29, 34]</sup>。然而, 也有研究认为这个标准不一定适合生物炭, 因为生物炭所含的 C 主要是以抗化学和生物分解的芳香态存在, 很难被土壤中的微生物分解<sup>[35]</sup>, 所以理论上将生物炭施入土壤并不会限制土壤中 N 的可利用度<sup>[31]</sup>。但是目前已有研究证明, 在土壤中施用生物炭之后, 作物对 N 的吸收明显降低<sup>[36-38]</sup>。其中的原因可能在于新鲜生物炭内只含有一小部分易矿化的 C, 剩余的 C 则是很难被矿化的<sup>[29]</sup>。因此在生物炭施用初期, 建议配合施用一定量的 N 肥以防止作物对 N 的吸收降低。

### 2.2 阳离子交换量(CEC)

CEC 是指示生物炭吸附能力的重要指标, 具有高 CEC 值的生物炭施入土壤能够增加土壤对营养元素离子的吸附从而增强土壤的保肥能力<sup>[39]</sup>。生物炭表面带负电的官能团(如羧基和酚羟基)能够吸附并固持

表 1 生物炭的灰分和元素含量

Table 1 Content of ash and elements of biochars

分类	生物炭	C/%	N/%	H/%	S/%	O/%	Ash/%	C/N <sub>molar</sub>	O/C <sub>molar</sub>	H/C <sub>molar</sub>
乔木	桑树	71.12	0.79	2.53	0.17	13.95	11.61	90.26	0.20	0.04
	樟树	74.26	1.07	2.60	0.17	15.75	6.32	69.27	0.21	0.03
	橡树	79.51	1.13	3.52	0.22	7.21	8.63	70.36	0.09	0.04
	松树	75.88	0.81	3.93	0.21	17.59	1.79	93.68	0.23	0.05
草本	蒿	72.67	0.60	3.83	0.20	16.75	6.15	121.12	0.23	0.05
	蕨类	72.81	1.73	3.65	0.32	9.02	12.80	42.09	0.12	0.05
	芦苇	72.65	1.11	3.30	0.28	7.91	15.03	65.45	0.11	0.05
秸秆	玉米秆	68.58	0.92	3.33	3.09	13.30	13.86	74.62	0.19	0.05
	油菜秆	74.96	0.74	3.20	2.76	13.76	7.34	101.17	0.18	0.04

注: 除 S 含量之外的所有指标在三类生物炭之间均无显著差异; 三组平均值之间乔木与草本差异显著 ( $P<0.05$ ), 乔木与秸秆差异显著 ( $P<0.05$ ), 草本与秸秆差异不显著。

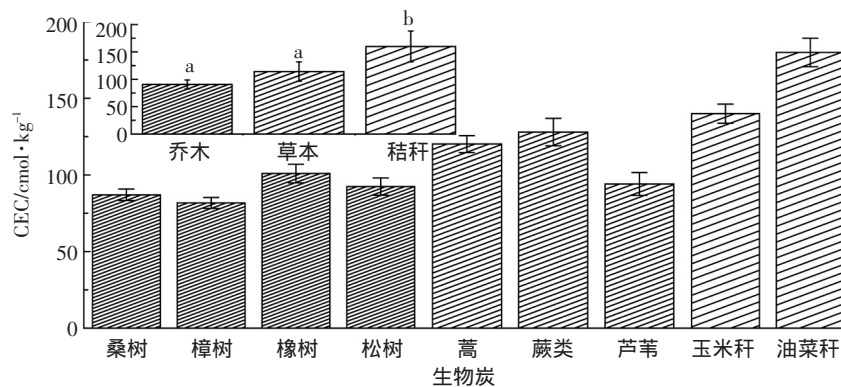


图 1 生物炭的 CEC 值(字母不同代表差异显著)

Figure 1 CEC values of biochars(bars with the same letter are not significantly different at  $P<0.05$ )



土壤溶液中的阳离子,从而减少其随水淋失<sup>[32,40]</sup>。图1显示,本研究中9种生物炭的CEC值介于81.74~179.91 cmol·kg<sup>-1</sup>之间,均值为104.42 cmol·kg<sup>-1</sup>,其中乔木、草本和秸秆三类生物炭的CEC均值分别为90.52、114.05、154.57 cmol·kg<sup>-1</sup>,且乔木和草本生物炭与秸秆生物炭之间达到了显著差异(P<0.01)。本研究中乔木的CEC值与Singh等<sup>[27]</sup>的研究结果相似,他曾报道桉树(*Eucalyptus saligna*)在550℃下热解而成的生物炭的CEC值为91.2 cmol·kg<sup>-1</sup>,而秸秆生物炭的CEC值却低于某研究中的四种作物秸秆生物炭(油菜秆、玉米秆、花生壳和大豆秆)的CEC值(210~304 cmol·kg<sup>-1</sup>)<sup>[41]</sup>。本研究结果说明,作物秸秆生物炭较乔木和草本等硬木生物炭能够更强地吸附土壤溶液中的离子,防止其随水淋失。

### 2.3 电导(EC)和阴阳离子含量

本研究中,生物炭EC值介于0.06~2.67 dS·m<sup>-1</sup>之间,均值为0.76 dS·m<sup>-1</sup>,乔木、草本和秸秆生物炭的均值分别为0.25、0.43、2.26 dS·m<sup>-1</sup>(图2),且秸秆生物炭与乔木和草本生物炭之间达到了显著性差异(P<0.01)。生物炭的EC值可以指示生物炭中所含的水溶性离子的总含量,也是生物炭含盐量的一个综合性指标。本研究中秸秆生物炭的EC值较高,可能

是因为秸秆是生长于营养元素较多的土壤介质当中,所以其制成的生物炭也含有较多的离子。

在阴离子方面,生物炭的Cl<sup>-</sup>含量介于0.04~4.80 mg·g<sup>-1</sup>之间,均值为1.01 mg·g<sup>-1</sup>,乔木、草本和秸秆生物炭的Cl<sup>-</sup>含量均值分别为0.05、0.21、4.12 mg·g<sup>-1</sup>(图2),与EC值一样,秸秆生物炭与乔木和草本生物炭之间达到了显著性差异(P<0.01)。生物炭的SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>含量介于0.04~0.32 mg·g<sup>-1</sup>之间,均值为0.18 mg·g<sup>-1</sup>且在三类生物炭之间无显著性差异(图2)。在阳离子方面,生物炭的Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>和Mg<sup>2+</sup>含量分别介于0.02~0.06、0.38~8.96、0.01~0.53 mg·g<sup>-1</sup>之间,均值分别为0.04、2.99、0.28 mg·g<sup>-1</sup>,且在三类生物炭之间无明显差别(图3)。三种生物炭生长介质中这三种元素的人为输入较少,因此造成了这三种元素在三类生物炭之间无显著性差异。生物炭的K<sup>+</sup>含量介于0.15~28.8 mg·g<sup>-1</sup>之间,均值为6.91 mg·g<sup>-1</sup>,乔木、草本和秸秆三类生物炭的均值分别为2.00、3.40、21.97 mg·g<sup>-1</sup>(图3),且秸秆生物炭与乔木和草本生物炭之间达到了显著性差异(P<0.01)。与前三种阳离子不同的是,K<sup>+</sup>是作物生长的必需元素,化肥的施入必会增加农田中K<sup>+</sup>的含量,也就造成了秸秆生物炭的K<sup>+</sup>含量明显高于纯自然生长的乔木和草本生物炭。结合Cl<sup>-</sup>含量的

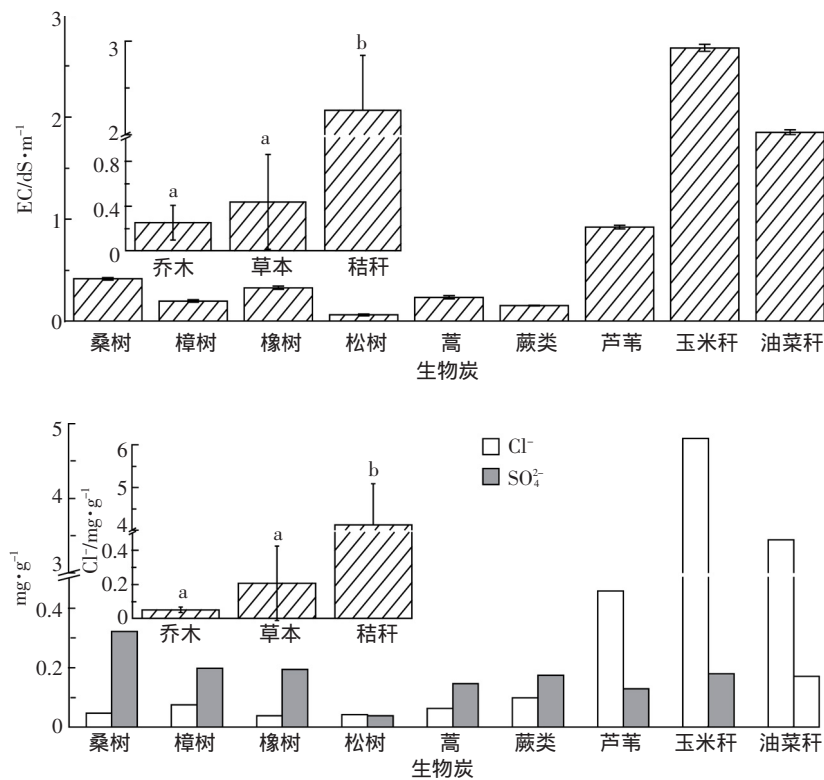
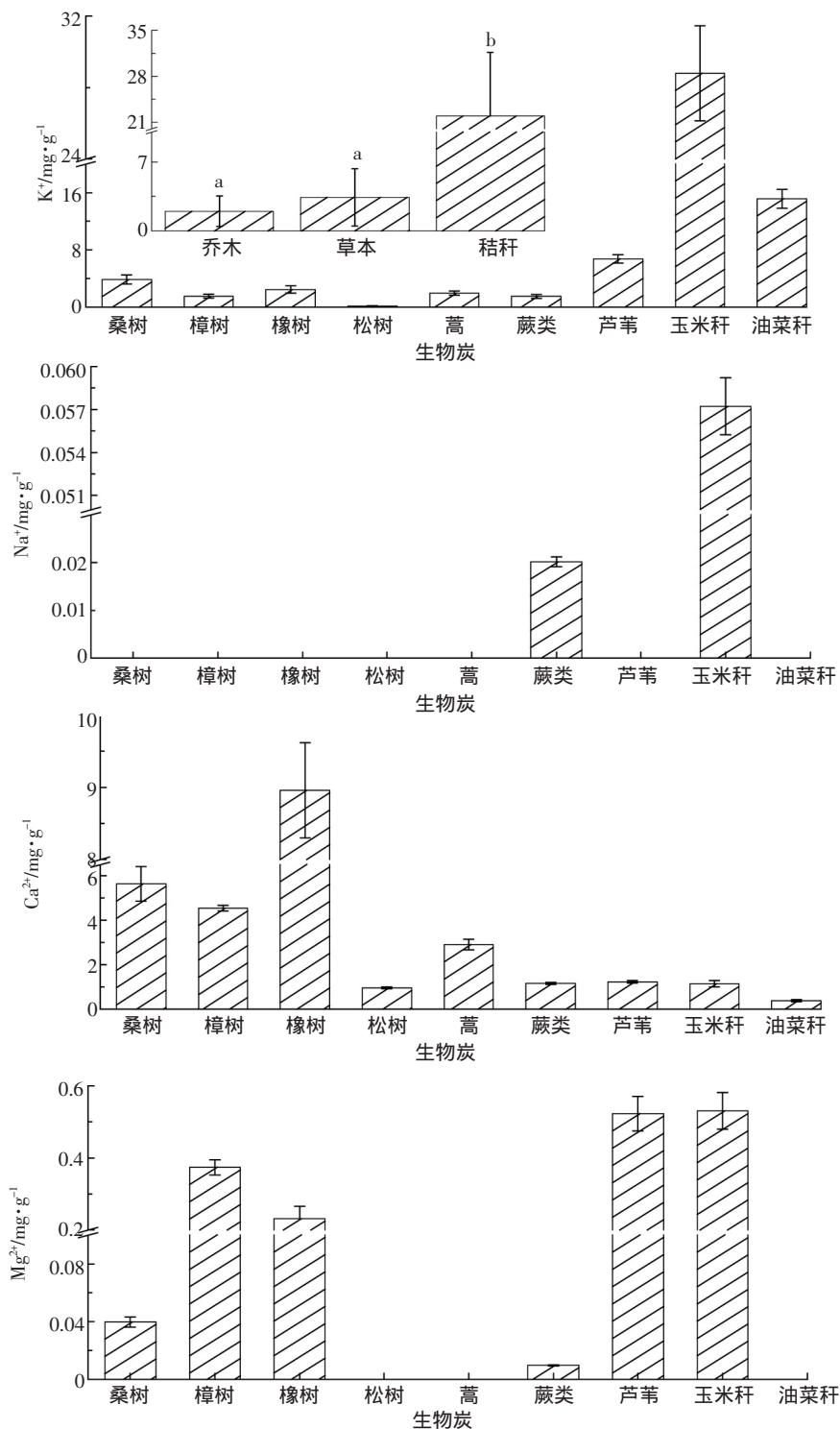


图2 生物炭的EC、Cl<sup>-</sup>和SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>含量

Figure 2 Electrical conductivity(EC) and Cl<sup>-</sup> and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> content of biochars

图3 生物炭的 K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>和 Mg<sup>2+</sup>含量Figure 3 Content of K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, and Mg<sup>2+</sup> in biochars

趋势认为 秸秆样品取样地的钾肥主要成分可能是氯化钾。

2.4 pH、铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)和有效磷(A-P)

本研究结果显示(表2),所有生物炭均呈碱性,

pH值介于8.55~9.94之间,均值为9.49,在三类生物炭之间无显著性差异。这与其他研究结果一致<sup>[41,20]</sup>,生物炭的这种性质对于调节酸性土壤的酸碱性有较好的效果。生物炭中NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N的含量较低,范围分别为0.04~0.33 mg·kg<sup>-1</sup>和0.14~0.33 mg·kg<sup>-1</sup>,均

表2 生物炭的pH值、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N和A-P含量Table 2 pH value, and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N and A-P content in biochars

生物炭	pH	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/mg·kg <sup>-1</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N/mg·kg <sup>-1</sup>	A-P/mg·kg <sup>-1</sup>
桑树	9.71±0.15	0.33±0.02	0.33±0.23	106.64±8.88
香樟	9.64±0.17	n.d.	n.d.	122.03±4.05
橡树	9.74±0.94	n.d.	n.d.	31.45±3.45
松树	8.55±0.52	n.d.	0.14±0.15	26.56±2.58
蒿	9.15±0.26	n.d.	0.24±0.01	96.68±4.84
蕨类	8.93±0.81	0.28±0.01	0.22±0.04	123.32±5.43
芦苇	9.93±0.11	0.04±0.05	0.28±0.20	123.93±9.27
玉米秆	9.94±0.21	0.24±0.22	n.d.	173.81±3.21
油菜秆	9.79±0.18	n.d.	n.d.	135.34±1.18

注 n.d. 未检出。

Note: n.d. not detectable.

值分别为 0.22、0.24 mg·kg<sup>-1</sup>，且某些生物炭的含量低于仪器的检出限。生物炭的溶解性无机氮含量较低也说明生物炭所含的 N 主要存在于高浓缩的杂环结构内部<sup>[42]</sup>，这部分 N 不易被分解，因此不能被作物利用<sup>[43]</sup>。生物炭的 A-P 含量介于 26.56~173.81 mg·kg<sup>-1</sup> 之间，均值为 104.42 mg·kg<sup>-1</sup>，乔木、草本和秸秆三类生物炭的 A-P 含量依次增加，均值分别为 71.67、114.64、154.57 mg·kg<sup>-1</sup>，但三者之间无显著性差异。

### 3 结论

热解材料是影响其生物炭理化性质的重要因素。结果显示，秸秆生物炭的可溶性 Cl<sup>-</sup> 和 K<sup>+</sup> 含量、EC 和 CEC 均显著高于乔木和草本生物炭，A-P 也有类似的规律，而可溶性 Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup> 和 Mg<sup>2+</sup> 含量以及 pH、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、无机氮等指标则无类似规律。乔木生物炭和草本生物炭在各个指标上均无显著差异。从营养元素、CEC 和改良酸性土壤的角度来看，秸秆生物炭比乔木和草本生物炭更适合作为土壤改良剂。

#### 参考文献：

- [1] 王久臣, 戴林, 田宜水, 等. 中国生物质能产业发展现状及趋势分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 276-282.  
WANG Jiu-chen, DAI Lin, TIAN Yi-shui, et al. Analysis of the development status and trends of biomass energy industry in China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(9): 276-282.
- [2] 曹国良, 张小曳, 王亚强, 等. 中国区域农田秸秆露天焚烧排放量的估算[J]. 科学通报, 2007, 52(15): 1826-1831.  
CAO Guo-liang, ZHANG Xiao-ye, WANG Ya-qiang, et al. Experimental investigation on emission factors of particulate matter and gaseous pollutants from crop residues burning[J]. *J Environ Sci*, 2007, 52(15): 1826-1831.

- [3] 陈温福, 张伟明, 孟军, 等. 生物炭应用技术研究[J]. 中国工程科学, 2011, 13(2): 83-89.  
CHEN Wen-fu, ZHANG Wei-ming, MENG Jun, et al. Researches on biochar application technology[J]. *Engineering Sciences*, 2011, 13(2): 83-89.
- [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] 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): 403-427.
- [6] Ameloot N, Neve S, Jegajevagan K, et al. Short-term CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emissions and microbial properties of biochar amended sandy loam soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2013, 57: 401-410.
- [7] Wang J Y, Zhang M, Xiong Z Q, et al. Effects of biochar addition on N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> emissions from two paddy soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, 47(8): 887-896.
- [8] Nelissen V, Rutting T, Huygens D, et al. Maize biochars accelerate short-term soil nitrogen dynamics in a loamy sand soil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 55: 20-27.
- [9] Biederman L A, Harpole W S. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2013, 5(2): 202-214.
- [10] Blackwell P, Krull E, Butler G, et al. Effect of banded biochar on dry-land wheat production and fertiliser use in south-western Australia: An agronomic and economic perspective[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2010, 48(6-7): 531-545.
- [11] Chen Y, Shinogi Y, Taira M. Influence of biochar use on sugarcane growth, soil parameters, and groundwater quality[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2010, 48(6-7): 526-530.
- [12] Laird D, Fleming P, Wang B Q, et al. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil[J]. *Geoderma*, 2010, 158(3-4): 436-442.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 杨放, 李心清, 邢英, 等. 生物炭对盐碱土氮淋溶的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(5): 972-977.  
YANG Fang, LI Xin-qing, XING Ying, et al. Effect of biochar amendment on nitrogen leaching in saline soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(5): 972-977.
- [16] Mukome F N D, Six J, Parikh S J. The effects of walnut shell and wood feedstock biochar amendments on greenhouse gas emissions from a fertile soil[J]. *Geoderma*, 2013, 200: 90-98.
- [17] Knoblauch C, Maarifat A A, Pfeiffer E M, et al. Degradability of black carbon and its impact on trace gas fluxes and carbon turnover in paddy soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43(9): 1768-1778.
- [18] Zhang L, Song L, Zhang L, et al. Diurnal dynamics of CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O fluxes in the saline-alkaline soils of the Yellow River Delta, China[J].

- Plant Biosystems: An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, 2014(ahead-of-print) :1-9.
- [19] Prendergast-Miller M T, Duvall M, Sohi S P. Localisation of nitrate in the rhizosphere of biochar-amended soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43(11) :2243-2246.
- [20] Major J, Rondon M, Molina D, et al. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol[J]. *Plant and Soil*, 2010, 333(1) :117-128.
- [21] Wang J Y, Pan X J, Liu Y L, et al. Effects of biochar amendment in two soils on greenhouse gas emissions and crop production[J]. *Plant and Soil*, 2012, 360(1-2) :287-298.
- [22] Zhang A F, Liu Y M, Pan G X, et al. Effect of biochar amendment on maize yield and greenhouse gas emissions from a soil organic carbon poor calcareous loamy soil from Central China Plain[J]. *Plant and Soil*, 2012, 351(1-2) :263-275.
- [23] Deenik J L, McClellan T, Uehara G, et al. Charcoal volatile matter content influences plant growth and soil nitrogen transformations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(4) :1259-1270.
- [24] Gaskin J W, Speir R A, Harris K, et al. Effect of peanut hull and pine chip biochar on soil nutrients, corn nutrient status, and yield[J]. *Agronomy Journal*, 2010, 102(2) :623-633.
- [25] Van Zwieten L, Kimber S, Morris S, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility[J]. *Plant and Soil*, 2010, 327(1-2) :235-246.
- [26] Enders A, Hanley K, Whitman T, et al. Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 114 :644-653.
- [27] Singh B, Singh B P, Cowie A L. Characterisation and evaluation of biochars for their application as a soil amendment[J]. *Soil Research*, 2010, 48(7) :516-525.
- [28] Chan K Y, Van Zwieten L, Meszaros I, et al. Agronomic values of green-waste biochar as a soil amendment[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2007, 45(8) :629.
- [29] Chan K Y, Xu Z. Biochar :Nutrient properties and their enhancement [M]. *Biochar for Environmental Management Science and Technology*. Earthscan, London, 2009 :67-84.
- [30] Gaskin J W, Steiner C, Harris K, et al. Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use[J]. *Transactions of the Asabe*, 2008, 51(6) :2061-2069.
- [31] Carrier M, Hardie A G, Uras Ü, et al. Production of char from vacuum pyrolysis of South-African sugar cane bagasse and its characterization as activated carbon and biochar[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2010, 96 :24-32.
- [32] Uras U, Carrier M, Hardie A G, et al. Physico-chemical characterization of biochars from vacuum pyrolysis of South African agricultural wastes for application as soil amendments[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2012, 98 :207-213.
- [33] Leeper G W, Uren N C. Soil science :An introduction[M]. Melbourne University Press, 1993.
- [34] Stevenson F J. Humus chemistry :genesis, composition, reactions[M]. John Wiley & Sons, 1994.
- [35] Forbes M S, Raison R J, Skjemstad J O. Formation, transformation and transport of black carbon(charcoal) in terrestrial and aquatic ecosystems[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 370(1) :190-206.
- [36] Rondon M A, Lehmann J, Ramirez J, et al. Biological nitrogen fixation by common beans(*Phaseolus vulgaris* L.) increases with bio-char additions[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, 43(6) :699-708.
- [37] Asai H, Samson B K, Stephan H M, et al. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos[J]. *Field Crops Research*, 2009, 111(1-2) :81-84.
- [38] Santalla M, Omil B, Rodríguez-Soalleiro R, et al. Effectiveness of wood ash containing charcoal as a fertilizer for a forest plantation in a temperate region[J]. *Plant and Soil*, 2011, 346(1/2) :63-78.
- [39] Brewer C E, Unger R, Schmidt-Rohr K, et al. Criteria to select biochars for field studies based on biochar chemical properties[J]. *BioEnergy Research*, 2011, 4(4) :312-323.
- [40] Page A L. Methods of soil analysis Part 2. Chemical and microbiological properties[M]. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1982.
- [41] Yuan J H, Xu R K, Zhang H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(3) :3488-3497.
- [42] Koutcheiko S, Monreal C M, Kodama H, et al. Preparation and characterization of activated carbon derived from the thermo-chemical conversion of chicken manure[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(13) :2459-2464.
- [43] Brewer C E, Schmidt-Rohr K, Satrio J A, et al. Characterization of biochar from fast pyrolysis and gasification systems[J]. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2009, 28(3) :386-396.