

# 炭化温度对沙蒿生物炭K、Ca、Mg含量和pH值的影响

侯建伟<sup>1</sup>, 索全义<sup>1</sup>, 刘美英<sup>1</sup>, 赵利梅<sup>1</sup>, 刘新风<sup>2</sup>, 邢海峰<sup>1</sup>, 陈扬<sup>1</sup>

1. 内蒙古农业大学生态环境学院, 呼和浩特 010019
2. 内蒙古农业大学职业技术学院, 包头 014030

**摘要** 以沙蒿 (*Artemisia arenaria*) 为材料, 通过无氧炭化法制取生物炭, 研究炭化温度对沙蒿生物炭全K、全Ca、全Mg元素含量及富集效应和pH值的影响。结果表明, 生物炭中K、Ca、Mg元素含量均随着炭化温度的升高而升高, K含量的升高幅度最大, K、Ca、Mg元素含量在900℃较300℃分别提高了52.47%、25.76%和86.32%, 元素含量的提高与沙蒿生物质中可挥发和分解的组分在不同的炭化温度下逐渐去除有关; 升温炭化过程中对K、Ca、Mg等元素均得到了不同程度的富集 (相对富集系数  $RE > 1$ ), 低温有利于K元素和Ca元素的富集, 中温有利于Mg元素的富集, K、Ca、Mg等元素的  $RE$ 值分别在300、300、500℃时取得最大值, 分别为1.17、1.15和1.22; pH值随炭化温度的升高而增大, 生物炭的碱性与K、Ca、Mg元素的富集及生物炭表面含氧官能团的种类和数量均有关, 与生物炭表面的总碱性官能团有较好的相关性 (相关系数为0.8665)。

**关键词** 沙蒿; 生物炭; 炭化温度

**中图分类号** X71

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.05.014

## Effects of carbonization temperature on the pH and of K, Ca and Mg cocentrations in *Artemisia ordosica* biochar

HOU Jianwei<sup>1</sup>, SUO Quanyi<sup>1</sup>, LIU Meiyang<sup>1</sup>, ZHAO Limei<sup>1</sup>, LIU Xinfeng<sup>2</sup>, XING Haifeng<sup>1</sup>, CHEN Yang<sup>1</sup>

1. College of Ecology and Environmental Science, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China
2. Vocational and Technical College, Inner Mongolia Agricultural University, Baotou 014030, China

**Abstract** *Artemisia ordosica* was used as the experimental material for making biochar in this study. The effects of carbonization temperature on the pH and total K, Ca, and Mg of *Artemisia ordosica* biochar were investigated. The results showed that the concentrations of K, Ca, and Mg in the biochar increased with the increase of carbonization temperature. Compared with those at 300℃, the K, Ca, and Mg concentrations increased by 52.47%, 25.76%, and 86.32% at 900℃, respectively. The increase of element concentration is due to gradual removal of the volatile and decomposable components in *Artemisia ordosica* under different carbonization temperature. The heating process of carbonization enriches K, Ca, Mg, and other elements (relative enrichment coefficient  $RE > 1$ ). Low temperature contributes to the enrichment of K and Ca, while medium temperature is favorable for Mg. The RE of the three elements reached their maximum values at 300, 300 and 500℃, being 1.17, 1.15, and 1.22, respectively. The pH increased with the increase of carbonization temperature. The alkalinity of the biochar was correlated to the enrichment of the three elements, and the number and types of oxygen-containing functional groups at the biochar surface, and it had good correlation with the total alkaline functional groups at the surface of the biochar (with correlation coefficient of 0.8665).

**Keywords** *Artemisia ordosica*; biochar; carbonization temperature

收稿日期: 2014-07-29; 修回日期: 2015-01-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31260502)

作者简介: 侯建伟, 博士研究生, 研究方向为土壤肥力与植物营养, 电子信箱: hjw19860627@126.com; 索全义 (通信作者), 教授, 研究方向为土壤肥力与植物营养, 电子信箱: paul98@sina.com

引用格式: 侯建伟, 索全义, 刘美英, 等. 炭化温度对沙蒿生物炭K、Ca、Mg含量和pH值的影响[J]. 科技导报, 2015, 33(5): 88-92.

沙蒿(*Artemisia arenaria*)是菊科蒿属(*Artemisia*)的一种半灌木植物,是一种典型的沙生植物,具有很强的抗寒、抗旱和耐沙埋等特性,广泛分布在半固定或固定的沙地,是较好的固沙防风植物,在生态保护和恢复中起到重要作用,也是恶劣生境下的重要碳汇植物。沙蒿平茬或刈割可明显促进其生长,增强它的生活能力,平茬或刈割后的沙蒿还可将其转化成为生物炭(biochar),生物炭是生物质在无氧条件下炭化的产物<sup>[12]</sup>。将其归还土壤不仅可快速大幅度扩大土壤有机碳库,也是廉价捕获碳与封存的手段之一<sup>[3]</sup>;还能够改良土壤<sup>[4]</sup>,降低养分流失,提高养分利用效率<sup>[5]</sup>,促进植物生长,提高生物量<sup>[6]</sup>。

生物炭的特性由原料和制备条件所决定。目前研究制备生物炭的原料主要包括阔叶树、牧草、树皮、作物废弃物(如稻草、坚果壳和稻壳)、柳枝梭及其他有机废物,如酒糟、甘蔗渣、橄榄废物、鸡粪、牛粪、剩余污泥和纸浆等<sup>[7]</sup>,而对沙地特殊生境下的沙蒿作为制取生物炭材料的研究尚未见报道。在生物炭生产过程中,热解温度是一个非常关键的因素。通常,热解温度越高,生物质原料的碳回收率越低,生物炭的破裂程度越大,其疏松多孔结构会遭到破坏,但表面积增大<sup>[8]</sup>。吴城等<sup>[9]</sup>在300~700℃热解小麦秸秆24 h,结果表明随着热解温度的升高,C含量增加,O、H含量降低。Bird等<sup>[10]</sup>研究表明,不同种类的海藻在300~500℃下制备的生物炭总体上含C量、表面积及阳离子交换量(CEC)含量低,而pH值、灰分、N及可提取的无机养分P、K、Ca、Mg含量高,不同种类的海藻在不同温度下制备的生物炭其成分有差异。

近年来,中国一些地区由于土壤中K、Ca、Mg养分淋失严重,造成土壤K、Ca、Mg养分缺乏;由于作物高产品种的推广和复种指数的提高,作物从土壤中带走的养分不断增加,致使土壤养分失调,作物营养障碍日益普遍;一些地区在施肥技术上还存在偏施K肥及施用石灰调节土壤酸度的现象,进一步加剧了土壤和植株K、Ca、Mg间的不平衡状况<sup>[11]</sup>。生物炭的成分主要包括C、H、O及K、Ca、Mg等,生物炭挥发分损失减少的同时,P、K、Ca、Mg等矿质元素相对富集<sup>[12,13]</sup>,因此,生物炭既是很好的生物炭基肥料又是酸性土壤的调节剂<sup>[14]</sup>。目前关于沙蒿生物炭K、Ca、Mg元素含量、富集程度及pH值对炭化温度的响应方面缺乏研究。

因此,本实验以沙生植物沙蒿为材料,研究炭化温度对沙蒿生物炭全K、全Ca、全Mg含量及富集效应和pH值的影响,并分析了pH值与生物炭表面含氧官能团种类和数量的关系,为沙蒿生物炭的制取,生物炭作为K、Ca、Mg肥料和改良酸性土壤等方面的应用提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试材料为沙蒿(全K、全Ca和全Mg含量分别为5.70、1.79、0.38 g/kg,pH值为5.50),取自内蒙古呼和浩特市托克托

县沙地,该沙地是库布齐沙地的东缘,分布在托克托县的西南。将取回的沙蒿平铺于室外干燥后粉碎混匀,在干燥箱中60℃烘至恒重(约24 h)后制取生物炭。

### 1.2 生物炭的制备

炭化设备选用人工智能箱式电阻炉(SGM.VB 8/10,洛阳市西格马仪器制造有限公司),该设备可进行炭化温度的调控。称取烘干沙蒿25.0 g,放置于坩埚中,通过抽气创造低氧环境,分别在300、400、500、600、700、800、900℃7个温度梯度下制取生物炭(3次重复),制取生物炭的炭化时间和升温速率相同,其中炭化时间为1 h,升温速率为150℃/h。炭化结束后放入干燥器冷却后称重,计算生物炭产率,并留样备用。

### 1.3 测试项目与方法

全K采用H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>消煮-火焰光度计法<sup>[15]</sup>;全Ca、全Mg采用灰化-原子吸收分光光度法<sup>[15]</sup>;pH值采用复合电极电位法进行测试,m(炭):V(水)=1:10;元素相对富集系数(RE)按以下公式计算<sup>[16]</sup>:

$$RE = \frac{\text{生物炭中元素含量}(\%)}{\text{生物质中元素含量}(\%)} \times \text{生物炭产率}(\%)$$

式中,生物炭产率(%) =  $\frac{\text{生物炭质量}(g)}{\text{沙蒿干基质量}(g)} \times 100\%$

本实验设计的300~900℃7个温度梯度下生物炭产率分别为44.57%、33.79%、30.84%、29.33%、27.92%、27.21%、25.40%。热重分析采用热重分析仪(STA409pc德国耐驰公司),称取过10目筛的沙蒿样品10.0 mg,放入仪器内,通入N<sub>2</sub>(流量为120 mL/min)创造无氧环境,以2.5℃/min的升温速率由33℃升至1000℃,根据样品质量随温度的升高而变化的规律绘制热重曲线(TG)。

酸性官能团(羧基、内酯基、酚羟基)测定采用Boehm法<sup>[17]</sup>。

总酸性官能团 = 羧基数量 + 内酯基数量 + 酚羟基数量。

总碱性官能团的测定:将HCl溶液溶液与生物炭样品混合振荡1 h,室温静置24 h,过滤,用NaOH溶液滴定浸泡前后HCl溶液的变化,测定出样品吸附HCl溶液的量,可作为生物炭表面碱性官能团的数量<sup>[18,19]</sup>。

### 1.4 数据分析

利用SAS 9.0进行方差分析(ANOVA)和相关性分析(CORR),Excel计算数据置信区间及绘制图表,Origin 8.0绘制热重分析图。

## 2 结果与分析

### 2.1 炭化温度对沙蒿生物炭全K、全Ca、全Mg含量的影响

多重均值检验结果表明(表1),炭化时间和升温速率不变,不同温度处理间,K元素含量均达到显著差异水平( $P < 0.05$ );Ca元素含量除500℃与600℃、600℃与700℃、700℃与800℃及800℃与900℃间没有显著差异外,其他各处理间均达显著差异水平( $P < 0.05$ );Mg元素含量除500、600、700、800℃各处理间没有显著差异外,其他各处理间差异均显著( $P <$

0.05)。说明炭化温度是影响沙蒿生物炭全K、全Ca、全Mg含量的重要因素,不同元素对炭化温度的响应有差别。沙蒿生物炭全K、全Ca、全Mg含量与炭化温度相关性分析表明,3元素含量与炭化温度均呈现极显著正相关关系,相关系数分别为0.7749、0.9123、0.9043,说明在一定的炭化温度范围内,随炭化温度的提高,全K、全Ca、全Mg含量增加。

表1 炭化温度对沙蒿生物炭的全K、全Ca、全Mg含量的影响  
Table 1 Effects of carbonization temperature on the total K, Ca, Mg concentrations of *Artemisia ordosica* biochar

温度/°C	元素含量/(g·kg <sup>-1</sup> )		
	K	Ca	Mg
300	15.00±0.08 <sup>e</sup>	4.62±0.23 <sup>f</sup>	0.95±0.11 <sup>d</sup>
400	18.50±0.40 <sup>f</sup>	5.81±0.26 <sup>e</sup>	1.30±0.27 <sup>c</sup>
500	19.16±0.18 <sup>e</sup>	6.52±0.23 <sup>d</sup>	1.50±0.31 <sup>b</sup>
600	20.04±0.17 <sup>d</sup>	6.73±0.28 <sup>de</sup>	1.51±0.21 <sup>b</sup>
700	20.87±0.06 <sup>e</sup>	7.03±0.37 <sup>bc</sup>	1.58±0.32 <sup>b</sup>
800	21.30±1.00 <sup>b</sup>	7.23±0.25 <sup>ab</sup>	1.59±0.11 <sup>b</sup>
900	22.87±0.40 <sup>a</sup>	7.41±0.55 <sup>a</sup>	1.77±0.21 <sup>a</sup>

注:不同字母表示达到差异显著水平( $P < 0.05$ ),下同。

生物炭全K、全Ca和全Mg含量均高于沙蒿原样,且无论沙蒿生物质还是各个炭化温度的生物炭,其元素含量均表现为全K>全Ca>全Mg。对K元素含量而言,300°C生物炭的全K含量显著低于其他温度处理,炭化温度由300°C升高到900°C时,全K含量由(15.00±0.08) g/kg提高到(22.87±0.40) g/kg,较300°C时提高了52.47%;对Ca元素含量而言,炭化温度为400、500、600、700、800、900°C时,全Ca含量较300°C分别提高了25.76%、30.55%、45.67%、52.16%、56.71%、60.39%,说明高温有利于提高生物炭的全Ca含量,且700°C以上的温度处理对全Ca含量的升幅相对较小;对Mg元素含量而言,500~800°C的炭化温度对生物炭的全Mg含量影响相对较小,变化范围仅为(1.50±0.31)~(1.59±0.11) g/kg,而900°C较300°C和800°C全Mg含量分别增加了86.32%和11.32%,说明低温(300°C和400°C)和高温(900°C)对沙蒿生物炭的全Mg含量影响相对较大,而中温及中温偏高的炭化温度(500~800°C)对生物炭全Mg含量的影响相对较小。从沙蒿生物炭全K、全Ca、全Mg含量对温度的响应可得知,高温(900°C)更有利于提高沙蒿生物炭K、Ca和Mg元素的含量,因此,若单纯考虑元素含量,900°C的炭化温度可作为生物炭提高土壤K、Ca和Mg元素的参考温度

进一步由沙蒿生物质热重分析结果(图1)可知,生物炭全K、全Ca、全Mg含量随炭化温度的升高而增大,与炭化过程中温度升高可挥发分和可分解组分气化损失导致全K、全Ca、全Mg在生物炭中的相对浓缩有关。炭化温度由33°C升

高至500°C,相继导致沙蒿样品失水、半纤维素(最大分解速率对应的裂解温度300°C)和纤维素(最大分解速率对应的裂解温度355°C)分解,沙蒿失重明显,所含元素浓缩程度较大;500°C以后主要是生物质木质素组分分解对其内部元素进一步浓缩。此失重规律与表1中生物炭全K、全Ca、全Mg含量的变化规律相一致。

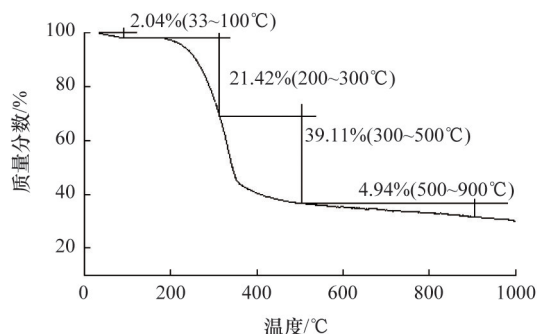


图1 N<sub>2</sub>氛围下沙蒿生物质的热重分析

Fig. 1 Thermo gravimetric analysis (TG) of the *Artemisia ordosica* biomass under N<sub>2</sub> atmosphere

## 2.2 炭化温度对沙蒿生物炭全K、全Ca、全Mg元素的富集效应

相对富集系数能确定元素在生物炭中的富集程度,以表示某种元素的挥发性。 $RE > 1$ 则表示该元素在生物炭中存在较大的富集,反之, $RE < 1$ 则表示该元素的挥发性大于整个生物炭的挥发性。

炭化温度对生物炭K、Ca、Mg元素的RE值均有不同程度的影响,K、Ca、Mg的RE值达到最大值的炭化温度分别为300、300、500°C(表2),说明不同元素的富集效应对温度的响应不同。

表2 不同炭化温度下沙蒿生物炭K、Ca、Mg元素RE值  
Table 2 RE values of K, Ca and Mg in *Artemisia ordosica* biochar under different carbonization temperatures

温度/°C	RE值		
	K	Ca	Mg
300	1.17 <sup>a</sup>	1.15 <sup>a</sup>	1.10 <sup>f</sup>
400	1.10 <sup>b</sup>	1.10 <sup>b</sup>	1.16 <sup>c</sup>
500	1.04 <sup>c</sup>	1.12 <sup>b</sup>	1.22 <sup>a</sup>
600	1.03 <sup>d</sup>	1.10 <sup>b</sup>	1.15 <sup>d</sup>
700	1.02 <sup>e</sup>	1.10 <sup>b</sup>	1.15 <sup>d</sup>
800	1.02 <sup>e</sup>	1.10 <sup>b</sup>	1.14 <sup>c</sup>
900	1.02 <sup>e</sup>	1.05 <sup>c</sup>	1.18 <sup>b</sup>

多重均值检验结果表明,对K元素的RE值来说,只有700、800、900°C间无显著差异,其他各处理间均达到显著差异水平( $P < 0.05$ ),说明低温(300、400°C)和中温(500、600°C)对K元素的富集影响较大;对Ca元素的RE值来说,400、500、

600、700、800℃之间差异均不显著,说明400~800℃间的炭化温度对Ca元素的富集影响较小,而300℃与其他处理及900℃与其他处理均达到差异显著水平( $P<0.05$ ),但高温不利于对Ca元素的富集,而低温(300℃)能够更大程度的富集Ca元素;对Mg元素的RE值来说,只有600℃与700℃之间未达到差异显著水平,炭化温度为500℃和900℃时对Mg元素的富集程度较大,RE值分别为1.22和1.18,说明中温和高温更有利于对Mg元素的富集。

表2中K、Ca、Mg的RE值均大于1,也进一步说明沙蒿炭化过程中这3种元素在生物炭中具有浓缩效应,这与肖瑞瑞等<sup>[20]</sup>以稻草为实验材料的研究结果是一致的,这可能与K、Ca、Mg化合物具有较好的热稳定性,在炭化过程中元素得到了保留,而炭化材料不断失重引起含量提高有关。

### 2.3 炭化温度对沙蒿生物炭pH值的影响

沙蒿的pH值为 $5.50\pm 0.12$ ,沙蒿生物炭的pH值在炭化温度为300、400、500、600、700、800和900℃下,分别为 $8.75\pm 0.01$ 、 $9.22\pm 0.04$ 、 $9.84\pm 0.01$ 、 $9.85\pm 0.02$ 、 $9.89\pm 0.06$ 、 $9.92\pm 0.01$ 和 $10.19\pm 0.01$ 。沙蒿生物炭的pH值随着炭化温度的升高而增大,沙蒿样品本身呈酸性( $pH=5.50$ ),而各炭化温度处理后的生物炭均呈碱性。300℃和400℃间pH值相差较小,500℃时明显提高,比300℃和400℃分别高出0.99和0.82;500~800℃之间pH值维持相对稳定,变化范围为 $9.84\pm 0.01\sim 9.92\pm 0.01$ ;900℃时pH值又有明显提高,达10.19。

多重均值检验结果表明,除500℃与600℃,600℃与700℃,700℃与800℃间无显著差异外,其他处理间均达到差异显著水平( $P<0.05$ ),说明低温和高温对沙蒿生物炭pH值的影响相对较大,且高温能够更大程度的提高沙蒿生物炭的pH值。因此,若以改良酸性土壤的酸碱度为目的,900℃的炭化温度制取的生物炭可能更有利。

pH值与不同炭化温度的生物炭表面官能团的种类和数量有关(表3)。炭化过程中炭化温度由300℃升高至900℃时总酸性官能团数量呈先增大后减少趋势,900℃时总酸性官能团几乎全部消失,但炭化温度越高生物炭表面的总碱性官能团数量越多(表3),pH值与其具有较好的相关性(相关系数

为0.8665<sup>\*\*</sup>,代表极显著),且整个炭化过程中始终不存在羧基(羧基热稳定性较差,受热后易产生化学反应变成水和气体)。这些含氧官能团在不同温度下的变化与生物炭pH值的改变是紧密相关的。

### 3 讨论

无氧炭化是一个极其复杂的热化学过程,主要有脱水、裂解和炭化3个反应阶段。一般说来,炭化温度是炭化反应最重要的因素,不仅决定生物炭产率,而且还与生物质炭特性密切相关。本研究结果显示,炭化温度的差异决定了沙蒿生物炭的元素含量、富集和pH值。

本研究中沙蒿生物炭中K、Ca、Mg元素含量均随着炭化温度的升高而增大,且有不同程度的富集( $RE>1$ ),低温(300℃)有利于K和Ca元素的富集而中温(500℃)有利于Mg元素的富集。据Demirbas报道的生物炭元素的组成范围,此研究与其他类型生物炭的研究结果基本一致。但在相近温度下沙蒿生物炭K、Ca、Mg的富集程度低于谢祖彬等<sup>[21]</sup>、罗焯<sup>[22]</sup>和Silber等<sup>[23]</sup>分别以木材、芦竹和玉米秸秆为实验材料的研究结果,一方面,可能是由于实验材料不同(包含生物质种类、分子结构、颗粒度及形状等特性不同)导致生物质热解行为和产物组成的差异,另一方面,沙蒿生物炭的H/C比(0.25~0.68)与农作物秸秆和草本植物<sup>[24]</sup>制取的生物炭相比相对较低,热解中不利于气态烷烃或轻质芳烃的生成,导致气态挥发物相对较少也是引起生物炭中K、Ca、Mg元素富集程度较小(RE值低)的原因之一。虽然沙蒿生物炭中K、Ca、Mg元素的富集程度相对较小,但从不同炭化温度来看,炭化温度越高,K、Ca、Mg元素含量越高,因此,900℃的炭化温度制取的沙蒿生物炭的施用能够更大程度的提高土壤中的K、Ca、Mg元素含量。至于继续升高炭化温度,生物炭的K、Ca、Mg元素含量是继续升高,还是在某一炭化温度下达到峰值还需进一步研究。

沙蒿生物炭显碱性,pH值随着炭化温度的升高而增大,低温和高温对其影响相对较大,炭化温度对pH值的影响与沙蒿生物炭总酸性官能团数量及总碱性官能团数量的变化有直接关系,其中pH值与总碱性官能团数量有较好的相关性(相关系数为0.8665)。沙蒿生物炭呈现碱性的特性与王鹤等<sup>[25]</sup>以松木作为实验材料与张伟明等<sup>[26]</sup>以秸秆废弃物作为实验材料的研究结果一致,因此,可说明无论以何种生物质制取生物炭最终呈现碱性的规律是一致的;但高海英等<sup>[27]</sup>在以苹果枝木屑作为生物炭制取材料研究中认为生物炭pH值随温度的升高有波动。另外,本研究中的pH值高于陈温福等<sup>[28]</sup>提到的蘑菇盘、花生壳和稻壳生物炭的pH值,说明生物炭的pH值除与炭化温度有关外还与生物质材料有关。至于生物炭的pH值与炭化时间和炭化时升温速率的关系还需进一步研究。沙蒿生物炭的pH值随炭化温度的升高而增大,因此,若以改良酸性土壤为目的,可以根据土壤的具体酸碱度来选择合理的炭化温度或范围。

表3 不同炭化温度下沙蒿生物炭不同官能团数量

Table 3 Different functional groups of *Artemisia ordosica* biochar under different carbonization temperatures

温度/℃	官能团含量/(mmol·g <sup>-1</sup> )				
	羧基	内酯基	酚羟基	酸性官能团	碱性官能团
300	—	—	0.592	0.592	1.320
400	—	—	0.623	0.623	3.285
500	—	0.630	0.302	0.932	3.431
600	—	0.421	0.537	0.958	4.482
700	—	—	0.945	0.945	4.490
800	—	—	0.007	0.007	4.511
900	—	—	0.002	0.002	4.525

参考文献 (References)

- [1] Hayes M H B. Biochar and biofuels for a brighter future[J]. *Nature*, 2006, 443(7108): 144-148.
- [2] Lehmann J. A handful of carbon[J]. *Nature*, 2007, 447(7141): 143-144.
- [3] Mathews J A. Carbon-negative biofuels[J]. *Energy Policy*, 2008, 36(3): 940-945.
- [4] 何绪生, 耿增超, 余雕, 等. 生物炭生产与农用的意义及国内外动态[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(2): 1-7.  
He Xusheng, Geng Zengchao, She Diao, et al. Implications of production and agricultural utilization of biochar and its international dynamics[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(2): 1-7.
- [5] 潘根兴, 林振衡, 李恋卿, 等. 试论我国农业和农村有机废弃物生物质炭产业化[J]. *中国农业科技导报*, 2010, 13(1): 75-82.  
Pan Genxing, Lin Zhenheng, Li Lianqing, et al. Perspective on biomass carbon industrialization of organic waste from agriculture and rural areas in china[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2010, 13(1): 75-82.
- [6] Asai H, Benjamin K, Samson H, et al. Biochar amendment techniques for upland rice production in northern laos[J]. *Field Crops Research*, 2009, 111(1/2): 81-84.
- [7] Wang H C, Feng L Y, Cheng Y G. Advances in biochar production from wastes and its applications[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2012, 31(4): 907-914.
- [8] 林晓芬, 张军, 尹燕山, 等. 生物质碳孔隙分形特征研究[J]. *生物质化学工程*, 2009, 43(3): 9-21  
Lin Xiaofen, Zhang Jun, Yin Yanshan, et al. Study on fractal characteristics of biomass chars[J]. *Biomass Chemical Engineering*, 2009, 43(3): 9-21.
- [9] 吴城, 张晓丽, 李关宾. 黑碳制备的不同热解温度对其吸附菲的影响[J]. *中国环境科学*, 2007, 27(1): 125-128  
Wu Cheng, Zhang Xiaoli, Li Guanbin. Effects of pyrolytic temperature of phenanthrene on its adsorption to black carbon[J]. *China Environmental Science*, 2007, 27(1): 125-128.
- [10] Bird M I, Wurster C M, de Paula Silva P H, et al. Algal biochar-production and properties[J]. *Bioresour Technology*, 2010, 102(2): 1186-1189.
- [11] 刘玉学, 刘微, 吴伟祥, 等. 土壤生物质炭环境行为与环境效应[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(4): 977-982.  
Liu Yuxue, Liu Wei, Wu Weixiang, et al. Effect of biochar on the characteristic of nitrogen loss and greenhouse gas emission from soil [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(4): 977-982.
- [12] Yuan J H, Xu R K, Zhang H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures[J]. *Bioresour Technology*, 2011, 102(3): 3488-3497.
- [13] Cao X, Harris W. Properties of dairy-manure-derived biochar pertinent to its potential use in remediation[J]. *Bioresour Technology*, 2010, 101(14): 5222-5228.
- [14] 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 Wenfu, Zhang Weiming, Meng Jun, et al. Researches on biochar application technology[J]. *Engineering Sciences*, 2011, 13(2): 83-89.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1981.  
Bao Shidan. The soil agro-chemistry analysis[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1981.
- [16] 程国淡, 黄青, 张凯松. 热解温度和时间对污泥生物炭理化性质的影响[J]. *环境工程学报*, 2012, 6(11): 4209-4214.  
Cheng Guodan, Huang Qing, Zhang Kaisong. Effect of pyrolysis temperature and duration on production and nutrient properties of sludge biochar[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, 6(11): 4209-4214.
- [17] Boehm H P. Some aspects of the surface chemistry of carbon blacks and other carbon[J]. *Carbon*, 1994, 32(5): 759-769.
- [18] 范延臻, 王宝贞, 王琳, 等. 改性活性炭的表面特性及其对金属离子的吸附性能[J]. *环境化学*, 2001, 20(5): 437-443.  
Fan Yanzhen, Wang Baozhen, Wang ling, et al. Surface characteristics of modified activated carbons and its adsorption performance of heavy metal ions[J]. *Environmental Chemistry*, 2001, 20(5): 437-443.
- [19] Barton S S, Evans M J B, Halliop E, et al. Acidic and basic site on the surface porous carbon[J]. *Carbon*, 1997, 35(9): 1364-1366.
- [20] 肖瑞瑞, 陈雪莉, 周志杰, 等. 温度对生物质热解产物有机结构的影响[J]. *太阳能学报*, 2010, 31(4): 491-496.  
Xiao Ruirui, Chen Xueli, Zhou Zhijie, et al. Effect of temperature on organic structure of biomass pyrolysis products[J]. *Acta Energian Solaris Sinica*, 2010, 31(4): 491-496.
- [21] 谢祖彬, 刘琦, 许燕萍, 等. 生物炭研究进展及其研究方向[J]. *土壤*, 2011, 43(6): 857-861.  
Xie Zubin, Liu Qi, Xu Yanping, et al. Advances and perspectives of biochar research [J]. *Soil*, 2011, 43(6): 857-861.
- [22] 罗焯. 芦竹制备生物炭的特性表征及对土壤 N<sub>2</sub>O 排放的抑制[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.  
Luo Ye. Production and characterization of giant reed (arundo donax linn.) biochars for inhibiting N<sub>2</sub>O emission from soil[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.
- [23] Silber A, Levkovitch I, Graber E R. pH-dependent mineral release and surface properties of cornstrow biochar: Agronomic implications [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(24): 9318-9323.
- [24] 陈再明, 陈宝梁, 周丹丹. 水稻秸秆生物炭的结构特征及其对有机污染物的吸附性能[J]. *环境科学学报*, 2013, 33(1): 9-19.  
Cheng Zaiming, Chen Baoliang, Zhou Dandan. Composition and sorption properties of rice-straw derived biochars[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(1): 9-19.
- [25] 王鹤. 生物炭催化过硫酸盐降解偶氮染料废水[D]. 吉林: 吉林大学, 2013.  
Wang He. Biochar catalyzed persulfate oxidation of azodye wastewater [D]. Jilin: Jilin University, 2013.
- [26] 张伟明. 生物炭的理化性质及其在作物生产上的应用[D]. 辽宁: 沈阳农业大学, 2012.  
Zhang Weiming. Physical and chemical properties of biochar and Its application in crop production[D]. Liaoning: Shenyang Agricultural University, 2012.
- [27] 高海英. 一种生物炭基氮肥的特征及其对土壤作物的效应研究[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2012.  
Gao Haiying. Research on characteristics of a biochar-based nitrogenous fertilizer ang its effects on soils and crops[D]. Xi'an: Northwest Agriculture and Forestry University of Science and Technology, 2012.
- [28] 陈温福, 张伟明, 孟军. 农用生物炭研究进展与前景[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(16): 3324-3333.  
Chen WenFu, Zhang Weiming, Meng Jun. Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(16): 3324-3333.

(编辑 田恬)