

不同炭化温度下玉米秸秆和沙蒿生物炭的结构特征及化学特性^①

梁 桓, 索全义*, 侯建伟, 刘长涛

(内蒙古农业大学生态环境学院, 呼和浩特 010018)

摘要: 掌握不同生物炭材料的结构特征和化学特性是合理利用生物炭的基础。通过无氧炭化法制备了不同炭化温度下的玉米秸秆生物炭和沙蒿生物炭, 对比了不同材料和不同炭化温度下生物炭性质的差异。结果表明: 炭化温度低于 400℃ 时, 两种材料生物炭的孔隙结构保存完整, 600℃ 以上时, 两种材料生物炭的蜂窝状结构均遭到破坏, 玉米秸秆生物炭被破坏得更严重; 同一炭化温度下, 玉米秸秆生物炭的比表面积及总孔容和平均孔径均大于沙蒿生物炭, 两种生物炭的比表面积随炭化温度的升高均增大, 总孔容呈“V”形变化; 两种材料的生物炭均呈碱性, 炭化温度越高, pH 越大, 400℃ ~ 800℃, 每升高 10℃, 玉米秸秆生物炭和沙蒿生物炭的 pH 均以 0.02 的幅度增加, 同一温度下, 玉米秸秆生物炭的 pH 大于沙蒿生物炭, 在 400℃、600℃ 和 800℃ 下分别比沙蒿生物炭高 0.31、0.35 和 0.29 单位; 随炭化温度的升高, 玉米秸秆生物炭和沙蒿生物炭的 C、P、K 和灰分含量增加, 400℃ ~ 800℃, 玉米秸秆生物炭的 C、P、K 含量以炭化温度每升高 10℃ 分别增加 2.94、0.11、0.20 g/kg 的幅度变化, 沙蒿生物炭也以 4.35、0.07、0.24 g/kg 的幅度增加, 与此同时, 玉米秸秆生物炭的 N、H 含量以每升高 10℃ 分别以 0.13 g/kg 和 0.86 g/kg 的幅度降低, 沙蒿生物炭的 N、H 含量分别以 0.04 g/kg 和 0.82 g/kg 的幅度下降, S 含量无明显变化, C/N 和 C/H 增大, 且不同材料生物炭的元素含量差异显著; 两种材料生物炭的 N、P、K 有效性随炭化温度的升高均下降, 400℃ ~ 600℃, 玉米秸秆生物炭和沙蒿生物炭的速效 N 含量分别下降了 57.89% 和 19.05%, 800℃ 时两种生物炭的速效 N 均接近 0 mg/kg, 400℃ ~ 800℃ 玉米秸秆生物炭和沙蒿生物炭的速效 P 含量分别降低了 67.41% 和 52.36%, 此时速效 K 含量也分别降低了 45.62% 和 90.16%。总之, 不同材料和炭化温度对生物炭的物理特征和化学特性都有较大影响。

关键词: 生物炭; 沙蒿; 玉米秸秆; 孔隙度; 比表面积

中图分类号: S158.5

目前, 生物炭还没有明确的定义, 一般认为在低氧或缺氧的环境中, 高温处理有机生物物质, 使生物物质中的油和气都被燃烧掉, 剩下的部分就是生物炭^[1-2]。生物炭主要是由芳香烃和单质炭或具石墨结构的碳组成, 含有 60% 以上的碳元素, 施入土壤后不仅可以提高土壤的有机碳含量, 还可以提高土壤对养分的吸持量^[3]。生物炭自身的一些矿质元素如 H、O、N、S 及少量的微量元素, 也可为贫瘠的土壤提供部分养分^[4-5]。

生物炭的元素组成与炭化温度密切相关, 具体表现为, 碳和灰分的含量随炭化温度升高而增加, H、O 量则在减少^[6-7]。还有报道称, 生物炭多呈碱性, 且裂解温度越高, pH 越高。利用这一特性, 生物炭

可以改善酸性土壤, 提高部分养分的有效性^[5]。不同的材料及炭化温度对生物炭的比表面积的影响很大, 一般来说炭化温度越高, 比表面积就越大^[8]。孔容孔径受炭化温度的影响也很大, 李力等人^[9]的研究表明, 当裂解温度由 350℃ 升高到 700℃ 时, 玉米秸秆生物炭的孔容增加了 15 倍, 孔径也有所增加。生物炭的多孔特性, 为土壤微生物提供了良好的栖息环境^[10]。

制备生物炭的材料来源广泛, 可以是禽兽粪便、动物骨骼、木材木屑, 也可以是农作物秸秆、种壳等^[11]。沙蒿是菊科蒿属的半灌木, 是荒漠植被中的重要建群种和优势种, 玉米是禾本科玉米属草本植物, 是广泛种植的农田作物。二者的植物学特性和

基金项目: 内蒙古自然科学基金项目(2015MS0309)和国家自然科学基金项目(31260502)资助。

* 通讯作者(paul98@sina.com)

作者简介: 梁桓(1989—), 女, 内蒙古呼和浩特人, 硕士研究生, 主要从事优质高产农作物的营养与施肥研究。E-mail: 1062757170@qq.com

生长环境均有较大差别,研究其不同炭化温度下生物炭性质的差异,可为该类生物炭在农业领域的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试材料为沙蒿和玉米秸秆。材料取回后,平铺于室外阳光下晒干、粉碎,放入烘箱中 65℃ 烘至恒重,然后放入干燥器中以备制取生物炭。

1.2 生物炭制取

将烘干的沙蒿、玉米秸秆原料置于炭化炉(SGM.VB8/10 人工智能箱式电阻炉)内进行炭化。设置炭化温度 400℃、600℃、800℃。沙蒿和玉米秸秆放入炭化炉后,以 150℃/h 的升温速度加热,达到设定温度后炭化 90 min 后开始自然降温。待降到室温,取出炭化好的生物炭,装入塑封袋备用。每个处理 3 次重复。

1.3 测试项目及方法

元素分析:全 C、N、H 和 S 采用元素分析仪(德国 elementar, Vario Macro) 测定^[12];全 P 和全 K 通过 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮后,分别采用钒钼黄比色法和火焰光度计法测定;灰分采用直接灰化法测定。

速效养分:速效 N 采用碱解扩散法;速效 P 采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提,分光光度计法;速效 K 采用 NH₄OAc 浸提,火焰光度计法。

生物炭的形貌结构特征:采用 S-530 型扫描电镜在 200 倍下进行扫描观察。

pH: pH 计测定, $v_{\text{水}}: m_{\text{炭}} = 25: 1$ 。

比表面积和孔径孔径:由 ASAP2020 全自动快速比表面积及介孔/微孔分析仪进行测定,根据 BET 吸附方程求得结果^[13]。

1.4 数据分析

数据处理利用 SAS9.0 进行方差分析(ANOVA)。

2 结果与分析

2.1 不同炭化温度下生物炭的结构特征

2.1.1 炭化温度对生物炭形貌结构的影响 由图 1 可以看出,未经炭化的玉米秸秆和沙蒿的孔隙结构都比较整齐,但均为非均质物质,有致密区也有疏松区,呈蜂窝状多孔体。相同的观察条件下,玉米秸秆的孔隙孔径更大,沙蒿的孔隙孔径小且排列密集。经过炭化后两种材料的形态结构出现极为相似的变化。具体表现为,400℃ 时,两种生物炭只有少量的维管束遭到破坏,大部分孔隙结构保存完整,清晰可见;当温度升高到 600℃ 时,玉米秸秆生物炭的维管束结构的破坏程度较大,大部分细胞解体,有碎屑脱落,而沙蒿生物炭的大部分维管束结构保存完好;800℃ 时,两种生物炭的形貌结构均遭到严重的破坏,基本无法识别出其完整孔隙结构。

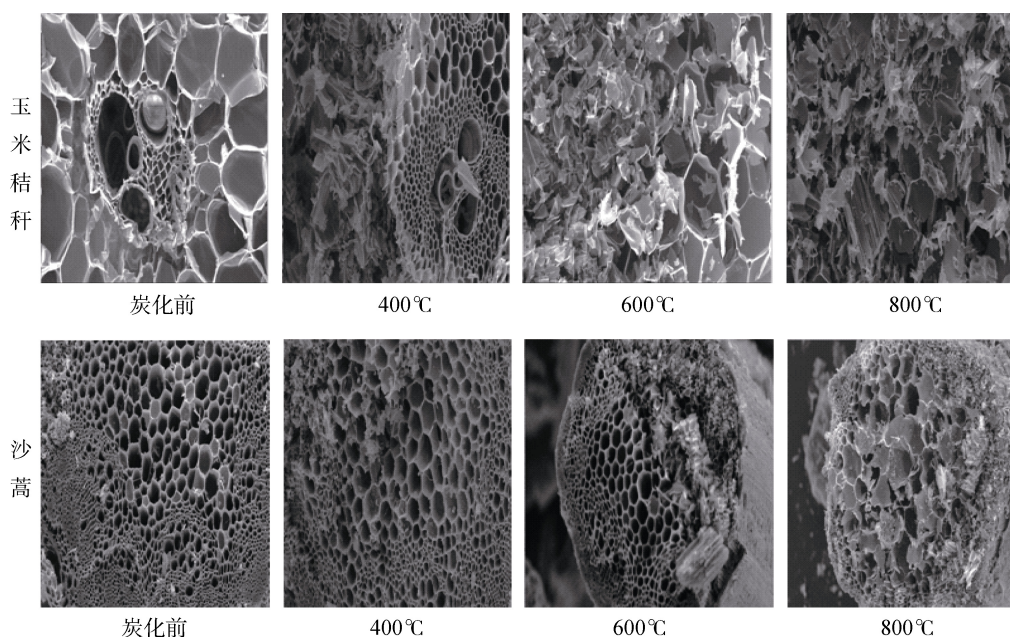


图 1 不同炭化温度下玉米秸秆生物炭和沙蒿生物炭的形貌特征

Fig. 1 The morphology characteristics of maize straw biochar and *Artemisia ordosica* biochar prepared at different carbonization temperatures

2.1.2 炭化温度对生物炭比表面积的影响 不同材料对生物炭比表面积的影响很大^[14],由表 1 可知,同一炭化温度下玉米秸秆生物炭的比表面积比沙蒿生物炭的比表面积大,且差异显著。两种材料生物炭的比表面积均随炭化温度的升高而增大,差异达到显著水平。当炭化温度在 400℃ ~ 600℃ 时,每升高 10℃,玉米秸秆生物炭的比表面积增加 0.08 m²/g,沙蒿生物炭增加 0.01 m²/g; 600℃ ~ 800℃ 时,每升

表 1 不同炭化温度下玉米秸秆生物炭和沙蒿生物炭的比表面积(m²/g)

Table 1 Specific surface areas of maize straw biochar and *Artemisia ordosica* biochar prepared at different carbonization temperatures

材料	炭化前	炭化温度(℃)		
		400	600	800
玉米秸秆	2.05 ± 0.03 Ac	1.31 ± 0.01 Ad	2.97 ± 0.01 Ab	23.56 ± 0.68 Aa
沙蒿	0.22 ± 0.01 Bc	0.79 ± 0.01 Bb	0.99 ± 0.24 Bb	1.37 ± 0.09 Ba

注:同行小写字母不同表示同一材料不同炭化温度间的显著性差异($P < 0.05$); 同列大写字母不同表示同一炭化温度下不同材料间的显著性差异($P < 0.05$); 下同。

表 2 不同炭化温度下玉米秸秆生物炭和沙蒿生物炭的孔容孔径

Table 2 The total pore volume and average pore diameter of maize straw biochar and *Artemisia ordosica* biochar prepared at different carbonization temperatures

指标	材料	炭化前	炭化温度(℃)		
			400	600	800
总孔容 (cm ³ /kg)	玉米秸秆	3.8 ± 0.1 Abc	5.8 ± 0.6 Ab	1.9 ± 0.1 Ac	22.5 ± 3.2 Aa
	沙蒿	1.5 ± 0.4 Bb	1.9 ± 0.3 Bb	0.5 ± 0.1 Bc	3.5 ± 0.3 Ba
平均孔径 (nm)	玉米秸秆	13.89 ± 2.10 Ac	19.13 ± 0.82 Bb	44.91 ± 1.08 Aa	8.09 ± 0.06 Bd
	沙蒿	3.29 ± 0.05 Bc	35.72 ± 1.26 Aa	35.98 ± 0.02 Ba	11.85 ± 0.96 Ab

2.2 不同炭化温度下生物炭的化学特性

2.2.1 炭化温度对生物炭 pH 的影响 结果显示,两种材料的生物炭均呈碱性,且二者的 pH 均随炭化温度的升高而提高,在 400℃ ~ 800℃ 区间,炭化

高 10℃,玉米秸秆生物炭的比表面积增加 1.03 m²/g,沙蒿生物炭增加 0.02 m²/g。400℃ ~ 800℃ 时,每升高 10℃,玉米秸秆生物炭和沙蒿生物炭的比表面积分别增加 0.56、0.02 m²/g。

2.1.3 炭化温度对生物炭孔容孔径的影响 由表 2 可以看出,同一炭化温度下,玉米秸秆的总孔容比沙蒿的要大,而且当炭化温度升高时,二者的总孔容整体呈“V”形变化。具体表现为:400℃ ~ 600℃ 时,每升高 10℃,玉米秸秆生物炭和沙蒿生物炭的总孔容分别以 0.19 cm³/kg 和 0.07 cm³/kg 的幅度降低,而 600℃ ~ 800℃ 时又分别以 1.03 cm³/kg 和 0.15 cm³/kg 的幅度增加。每个温度下沙蒿生物炭与玉米秸秆生物炭的平均孔径差异性显著,且当炭化温度由 400℃ 升高到 600℃ 时两种生物炭的平均孔径均增大,且每升高 10℃,玉米秸秆生物炭与沙蒿生物炭分别增加 1.29 nm 和 0.01 nm,差异显著,温度达到 800℃ 时反而减小,这可能是因为炭化温度升高到 800℃ 时,生物炭的孔隙结构遭到严重的破坏,大部分维管束破裂,细胞解体,从而使其平均孔径变小。

温度每升高 10℃,玉米秸秆生物炭的 pH 增加 0.02 单位,此时沙蒿生物炭的 pH 也以相同的幅度增加,且差异达到显著水平。相同炭化温度下,玉米秸秆生物炭的 pH 更高,差异显著(表 3)。

表 3 不同炭化温度下玉米秸秆生物炭和沙蒿生物炭的 pH

Table 3 The pH of maize straw biochar and *Artemisia ordosica* biochar prepared at different carbonization temperatures

材料	炭化前	炭化温度(℃)		
		400	600	800
玉米秸秆	6.36 ± 0.01 Ad	9.79 ± 0.01 Ac	10.26 ± 0.00 Ab	10.47 ± 0.01 Aa
沙蒿	5.58 ± 0.01 Bc	9.48 ± 0.18 Ab	9.91 ± 0.07 Ba	10.18 ± 0.00 Ba

生物炭之所以呈碱性,是因为其灰分中的一些元素如 Na、K、Mg 等都以氧化物、碳酸盐的形式存在,溶于水后呈碱性。炭化温度越高,灰分含量越大,灰分中矿质元素含量越高,生物炭的 pH 也越高。

2.2.2 炭化温度对生物炭元素含量的影响 从表 4 可以看出,未经炭化的沙蒿 C、N 含量高于玉米秸

秆,其他元素如 P、K、H 和 S 的含量两种植物原样相差不大。与植物原样相比,两种材料的生物炭的 C 含量明显提高,含量范围在 600 ~ 900 g/kg,沙蒿生物炭的 C 含量更高,800℃ 时其 C 含量高达 887.07 g/kg。两种材料的生物炭 C 含量均随炭化温度的升高呈现增加趋势,在 400℃ ~ 600℃ 间,玉米秸秆生物炭和

沙蒿生物炭的 C 含量以炭化温度每升高 10℃ 分别增加 5.01 g/kg 和 3.21 g/kg 的幅度变化，玉米秸秆生物炭 C 含量增加幅度更大；而在 600℃ ~ 800℃ 时，又分别以 0.88 g/kg 和 5.48 g/kg 的幅度增加，以沙蒿生物炭 C 含量增加幅度更为明显。多重均值检验结果表明，玉米秸秆生物炭的 C 含量除了 600℃ 和 800℃ 间无明显差异外，其他温度间均有显著差异，而沙蒿生物炭 C 含量各温度间差异均达到显著水平。N 和 H 的含量随炭化温度的升高而减少，炭化温度由 400℃ 升高到 800℃，每升高 10℃，玉米秸秆生物炭的 N

含量就减少 0.13 g/kg，差异显著，沙蒿生物炭的 N 含量就减少 0.04 g/kg，差异不显著。与此同时，二者 H 含量也分别以 0.86 g/kg 和 0.82 g/kg 的幅度逐渐减少，且差异显著。这说明生物质在无氧炭化过程中有机组分的组织形式发生了变化。S 元素的含量随炭化温度的升高变化不明显。P、K 的含量随炭化温度的升高有所富集，400℃ ~ 800℃ 每升高 10℃，玉米秸秆生物炭的 P、K 含量分别增加 0.11 g/kg 和 0.20 g/kg，沙蒿生物炭分别增加了 0.07 g/kg 和 0.24 g/kg。灰分也随炭化温度的升高而增加，差异显著。

表 4 不同炭化温度下玉米秸秆生物炭和沙蒿生物炭的元素含量(g/kg)

Table 4 Element contents of maize straw biochar and *Artemisia ordosica* biochar prepared at different carbonization temperatures

指标	材料	炭化前	炭化温度(℃)		
			400	600	800
N	玉米秸秆	5.57 ± 0.08 Bd	12.51 ± 0.10 Aa	9.97 ± 0.23 Ab	7.31 ± 0.01 Bc
	沙蒿	8.56 ± 0.17 Aa	10.83 ± 0.41 Aa	9.45 ± 0.64 Aa	9.25 ± 0.37 Aa
P	玉米秸秆	4.16 ± 0.43 Ad	7.01 ± 0.65 Ac	9.79 ± 0.16 Ab	11.29 ± 0.07 Aa
	沙蒿	5.28 ± 0.56 Ad	5.90 ± 0.10 Bc	8.12 ± 0.20 Bb	8.71 ± 0.10 Ba
K	玉米秸秆	13.86 ± 1.63 Ac	21.34 ± 2.65 Ab	26.26 ± 2.29 Aab	29.49 ± 3.96 Aa
	沙蒿	13.52 ± 0.03 Ac	20.08 ± 1.30 Ab	26.51 ± 2.57 Aa	29.55 ± 6.08 Aa
C	玉米秸秆	437.93 ± 3.04 Ac	635.33 ± 5.45 Bb	735.43 ± 5.55 Ba	752.93 ± 3.15 Ba
	沙蒿	463.73 ± 1.97 Ad	713.10 ± 5.63 Ac	777.43 ± 6.67 Ab	887.07 ± 4.04 Aa
H	玉米秸秆	49.07 ± 0.15 Aa	42.53 ± 1.05 Ab	18.70 ± 0.10 Bc	8.20 ± 0.10 Bd
	沙蒿	48.60 ± 1.06 Aa	43.51 ± 0.10 Ab	20.83 ± 0.10 Ac	10.84 ± 0.09 Ad
S	玉米秸秆	1.01 ± 0.19 Aa	1.09 ± 0.09 Aa	0.90 ± 0.03 Ba	0.59 ± 0.03 Ab
	沙蒿	1.30 ± 0.02 Aa	1.01 ± 0.11 Ab	1.42 ± 0.04 Aa	0.71 ± 0.01 Adc
C/N	玉米秸秆	78.92	50.78	73.76	103.00
	沙蒿	54.17	65.84	82.27	95.90
C/H	玉米秸秆	8.92	14.94	39.33	91.82
	沙蒿	9.54	16.39	37.32	81.83
灰分	玉米秸秆	72.51 ± 0.13 Ad	190.13 ± 0.34 Ac	331.08 ± 0.04 Ab	350.53 ± 0.52 Aa
	沙蒿	41.81 ± 0.46 Bd	112.34 ± 0.09 Bc	275.42 ± 1.02 Bb	346.12 ± 2.01 Aa

各元素原子数之比可以粗略反映有机元素的组织形式，如 C/N 可以反映物质的稳定性。由表 4 可以看出，随着炭化温度的升高，两种生物炭的 C/N 均增大，这说明炭化温度越高，产出的生物炭越稳定，不容易被矿化分解，利于长期保存。C/H 更多地说明物质的芳香性，当炭化温度由 400℃ 变为 800℃ 时，两种生物炭的 C/H 均增大，说明植物中糖类、碳水化合物等易水解或被微生物分解的不饱和 C 转变为生物炭中芳香度高、相对稳定的 C，是一个“软质炭”向“硬质炭”转变的过程^[11]。

2.2.3 炭化温度对生物炭有效养分的影响 两种材料生物炭的速效 N 含量均很低，且其含量随炭化温度升高有所降低。当炭化温度由 400℃ 变为 600℃

时，玉米秸秆生物炭的速效 N 含量由 0.019 mg/kg 降到 0.008 mg/kg，800℃ 时几乎为 0；沙蒿生物炭呈现与玉米秸秆生物炭同样的规律，400℃ 时速效 N 含量为 0.021 mg/kg，600℃ 时降到 0.017 mg/kg，800℃ 时几乎不存在。这可能是由于生物炭中的 N 在炭化过程中随温度升高而形成稳定的 C-N 杂环，使其有效性降低^[15-16]。两种生物炭的速效 P 和速效 K 含量均有降低。P 的有效性降低可能与生物炭的 pH 随炭化温度的变化有关^[14-16]。据测定，随炭化温度的逐渐升高，两种生物炭的 pH 均升高，与此同时 P 的有效性降低。400℃ 时玉米秸秆生物炭和沙蒿生物炭的速效 P 含量分别是 288.22 mg/kg 和 107.50 mg/kg，800℃ 分别降为 93.94 mg/kg 和 51.22 mg/kg。此时，

速效 K 含量也从 400℃ 的 13.02 g/kg 和 8.84 g/kg 降到了 800℃ 的 7.08 g/kg 和 0.87 g/kg。Chen 等^[17]研究发现,生物炭中低价金属离子如 K、Na 的有效性要高于高价金属离子。

3 讨论

生物质炭的理化性质受到多种因素的影响,本研究以沙地沙蒿和农田玉米秸秆为原料,对比分析了不同生境下两种植物基生物炭的物理特征和化学特性。结果发现,沙地沙蒿生物炭的 C 含量在每个炭化温度下都高于农田玉米秸秆,随着炭化温度的升高,其石墨化、芳香化程度更强。但沙蒿生物炭的孔容孔径及比表面积却不及玉米秸秆生物炭。所以原材料不同,制得的生物炭的理化特性也存在差异。此结论在诸多研究中得到证实,刘玉学^[18]选择了具有典型性和代表性的生物炭(竹炭和秸秆炭)作为对象,研究了不同生物炭的形貌特征、元素组成等,结果发现竹炭和秸秆炭都具有发达的孔隙结构,竹炭的 BET 比表面积和总孔容均大于秸秆炭,石墨化程度比秸秆炭更高,芳香化更强,但是秸秆炭的 pH 大于竹炭。王群等人^[13]对比分析了植物基(玉米秸秆、小麦秸秆和青草)生物炭和固废基(猪粪、蛋壳和污泥)生物炭结构性性质差异,结果表明两类生物炭的 pH 相近,均在 8.0 ~ 10.0,植物基生物炭的 C 含量(56.8% ~ 60.0%)远高于固废基生物炭(13.4% ~ 39.1%),灰分含量却低于固废基生物炭。郑扬清等^[19]以沼渣为原料制备生物炭,发现其 C 含量为 27.6%。生物炭的理化性质还会受到炭化温度的影响。罗焯^[20]对芦竹生物炭的研究表明,随着炭化温度的升高,生物炭的灰分含量和 pH 均提高,C 含量增加,而 H 和 O 含量减少,微孔面积孔容增大。李力等人^[9]对 350℃ 和 700℃ 炭化的玉米秸秆生物炭的研究表明,700℃ 下制得的生物炭芳香化程度更高,比表面积及孔容孔径更大。诸多研究都表明,炭化温度对生物炭的理化性质产生影响^[8,21]。本研究中,随着炭化温度的升高,两种生物炭 N、P、K 的有效性都降低,生物炭的组织形式也发生了很大变化。

4 结论

生物炭的性质受材料类型和炭化温度的影响。随炭化温度的升高,玉米秸秆生物炭和沙蒿生物炭的微观结构均遭到破坏,C、P、K 和灰分含量增加,N、H 含量降低,pH 提高,比表面积增大,速效 N、P、K 含量降低。在同一炭化温度下,两种生物炭各元素的含量及孔隙结构等理化性质有明显差异。玉米秸秆

生物炭微孔结构更易被高温破坏,其比表面积及总孔容和平均孔径均大于沙蒿生物炭,pH 也高于沙蒿生物炭,但 C 含量低于沙蒿生物炭。这使得沙蒿生物炭与玉米秸秆生物炭在固碳、土壤改良等方面发挥的作用不同,应用效果也会有差异。

参考文献:

- [1] Antal MJ, Gronli M. The art science and technology of charcoal production[J]. *Industrial and Engineering Chemistry*, 2003, 42: 1 619-1 640
- [2] 高海英,陈心想,张雯,何绪生,耿增超,余雕,郭永利. 生物质炭及炭基硝酸铵肥料理化性质研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2012, 30(2): 14-20
- [3] Van Zwieten L, Kimber S, Morris S, Chan KY, Downie A, Rust J, Joseph S, Cowie A. Effect of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility[J]. *Plant and Soil*, 2010, 327(1/2): 235-246
- [4] Schmidt MWI, Noack AG. Black carbon in soils and sediments: Analysis distribution, implications, and current Challenges[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(3): 777-794
- [5] Novak JM, Busscher WJ, Laird DL. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil[J]. *Soil Science*, 2009, 174(2): 105-112
- [6] Keilweit M, Nico PS, Johnson MG, Kleber M. Dynamic molecular structure of plant biomass derived black carbon (Biochar)[J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, 44(4): 1 247-1 253
- [7] 刘玉学,刘微,吴伟祥,钟哲科,陈英旭. 土壤生物炭环境行为与环境效应[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(4): 977-982
- [8] 谢祖彬,刘琦,许燕萍,朱春悟. 生物炭的研究进展及其研究方向[J]. *土壤*, 2011, 43(6): 857-861
- [9] 李力,陆宇超,刘娅,孙红文,梁中耀. 玉米秸秆生物炭对 Cd()的吸附机理研究[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(11): 2 277-2 283
- [10] Ogawa M. Symbiosis of people and nature in the trapics[J]. *Farming Japan*, 1994, 28(5): 10-34
- [11] 唐行灿,张民. 生物炭修复污染土壤的研究进展[J]. *环境科学导刊*, 2014, 33(1): 17-26
- [12] 陈静文,张迪,吴敏,王朋. 两类生物炭的元素组分分析及其热稳性[J]. *环境化学*, 2014, 33(3): 417-422
- [13] 王群,李飞跃,曹心德,赵玲. 植物基与固废基生物炭的结构性性质差异[J]. *环境科学与技术*, 2013, 36(8): 1-5
- [14] Michael IB, Christopher MW. Algal biochar-production and properties[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102: 1 886-1 891
- [15] Asai H, Samson BK. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield[J]. *Field Crops Research*, 2009, 111: 81-84

- [16] Cao XD, Harris W. Properties of dairy-manure-derived biochar pertinent to its potential use in remediation[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101: 5 222–5 228
- [17] Chen KY, Zwieten LV, Meszaros Z, Downie A, Joseph S. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment[J]. *Australian Journal of soil Research*, 2007, 45: 629–634
- [18] 刘玉学. 生物质炭的输入对土壤氮素流失及温室气体排放特性的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2011
- [19] 郑杨清, 郁强强, 王海涛, 王远鹏, 何宁, 沈亮, 李清彪. 沼渣制备生物炭吸附沼液中的氨氮[J]. *化工学报*, 2014, 65: 1 856–1 861
- [20] 罗焯. 芦竹制备生物炭的特性表征及对土壤 N₂O 排放的抑制[D]. 山东青岛: 中国海洋大学, 2012
- [21] Chun Y, Sheng GY, Gary TC, Xing BS. Compositions and sorptive properties of crop residue-derived chars[J]. *Environmental Science and Technology*, 2004, 38: 4 649–4 655

The Structure Characteristics and Chemical Properties of Maize Straw Biochar and *Artemisia ordosica* Biochar Prepared at Different Carbonization Temperatures

LIANG Huan, SUO Quan-yi*, HOU Jian-wei, LIU Chang-tao

(College of Ecology and Environmental Science, Inner Mongolia Agriculture University, Hohhot 010018, China)

Abstract: The structural characteristics and chemical properties of biochars generated from various materials were the basis for the rational utilization of the biochars in agriculture and environment. In this paper, maize straw biochar and *Artemisia ordosica* biochar were prepared through anaerobic carbonization method at different carbonization temperatures, and their chemical properties were measured. Results showed that the pore structure of the biochars from the two materials was intact below 400 °C, while the honeycomb structures of the biochars were destroyed above 600 °C. The honeycomb structures of maize straw biochar was destroyed more seriously compared with *Artemisia ordosica* biochar. The specific surface area, total pore volume and average pore diameter of maize straw biochar were greater than *Artemisia ordosica* biochar at the same carbonization temperature. The specific surface areas of the two kinds of biochars were increased with the increasing carbonization temperature. The total pore volume of the biochars changed with carbonization temperature as “V” type. The biochars are alkaline, and the higher carbonization temperature led to greater biochar pH. The pH of the biochars was increased by 0.02 units/10 °C in the range from 400 °C – 800 °C. The pH of maize straw biochar was higher than the *Artemisia ordosica* biochar at the same temperature, and at 400 °C, 600 °C and 800 °C, the pH of maize straw biochar higher than the *Artemisia ordosica* biochar by 0.31, 0.35 and 0.29, respectively. C, P, K and ash contents of the biochars increased with the increasing carbonization temperature. The rise of each 10 °C led to the increase in the contents of C, P, and K of maize straw biochar by 2.94 g/kg, 0.11 g/kg, 0.20 g/kg, respectively, and the corresponding data were 4.35 g/kg, 0.07 g/kg, and 0.24 g/kg for *Artemisia ordosica* biochar. However, the rise of each 10 °C led to the decrease in contents of N and H by 0.13 g/kg and 0.86 g/kg for maize straw biochar, and 0.04 g/kg and 0.82 g/kg for *Artemisia ordosica* biochar. Therefore, C/N and C/H ratios of the biochars increased with rising temperature. S contents of the biochars did not change with temperature obviously. The difference of element contents between maize straw biochar and *Artemisia ordosica* biochar was significant. Available contents of N, P, and K in the biochars decreased with the increasing carbonization temperature. When temperature was increased from 400 °C to 600 °C, the available N contents of maize straw biochar and *Artemisia ordosica* biochar were decreased by 57.89% and 19.05%, respectively. When temperature was increased to 800 °C, the available N contents in both maize straw biochar and *Artemisia ordosica* biochar decreased to 0 mg/kg. When temperature was increased from 400 °C to 800 °C, available P contents of maize straw biochar and *Artemisia ordosica* biochar were reduced by 67.41% and 52.36%, respectively, and available K contents decreased by 45.62% and 90.16%, respectively. Therefore, different materials and carbonization temperature affected physicochemical characteristics and chemical properties of biochars.

Key words: Biochar; *Artemisia ordosica*; Corn straw; Porosity; Specific surface area