

# 土壤理化及生物特性和作物产量对生物炭的响应

聂新星<sup>1, 2</sup> 李志国<sup>1</sup>

(1. 中国科学院武汉植物园, 中国科学院水生植物与流域生态重点实验室, 武汉 430074; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 生物炭作为一种新型的土壤改良剂在农业上的应用已展现巨大的前景。为促进生物炭在江汉平原灰潮土上的科学应用, 作者采用田间试验, 以冬小麦鄂麦 596 为供试作物, 研究了灰潮土土壤理化性质、微生物数量和冬小麦产量对施用生物炭、化肥及生物炭与化肥配施的响应。结果表明: 单施生物炭与空白对照相比, 以及生物炭化肥配施与单施化肥处理相比, 施用生物炭能显著提高土壤有机碳和速效钾含量, 分别增加了 69.9% 和 21.5% 以及 47.1% 和 59.7%, 但短期内对土壤容重、pH、碱解氮、速效磷的影响不显著, 其中土壤 pH 和速效磷含量呈增加趋势, 而土壤容重和碱解氮含量呈降低趋势。施用生物炭还提高了冬小麦越冬期、抽穗期和成熟期土壤中的细菌和放线菌数量且在越冬期达到显著差异水平, 同时对三个时期内土壤中的真菌数量均表现出一定的抑制作用。单施生物炭与空白对照相比, 秸秆和籽粒干重分别增加 6.8% 和 4.2%; 生物炭与化肥配施与单施化肥相比, 秸秆和籽粒干重分别提高 4.4% 和 16.5%; 且生物炭与化肥配施的秸秆和籽粒干重高于二者单施。总的来看, 施用生物炭能有效改善灰潮土理化性质和养分状况, 提高土壤细菌和放线菌数量, 在一定程度上促进了冬小麦产量的增加。

**关键词:** 冬小麦; 生物炭; 化肥; 土壤微生物

## 引言

生物炭 (Biochar) 是指生物质等在完全或部分缺氧条件下缓慢热解 (通常小于 700℃) 得到的一类高度芳香化、富含碳的固态物质<sup>[1]</sup>。生物炭作为一种有效的土壤改良剂, 受到国内外学者的广泛关注, 并取得大量研究进展<sup>[2]</sup>。通常来说, 生物炭呈碱性, 能提高土壤特别是酸性土壤的 pH 值<sup>[3]</sup>; 具有发达的孔隙结构及大量羟基、羧基基团<sup>[4]</sup>, 可以降低土壤容重<sup>[5]</sup>, 提高土壤的持水能力<sup>[6]</sup>和阳离子交换量 (CEC)<sup>[7]</sup>; 富含有机碳且含有一定的矿质养分, 能提高土壤有机碳含量<sup>[8]</sup>以及矿质养分的有效性<sup>[9-10]</sup>等。因此, 生物炭施入土壤可以有效改善土壤供应与协调水肥气热的能力, 促进作物生长和产量的增加<sup>[11]</sup>, 尤其是与矿质肥料配施增产效果更显著<sup>[12]</sup>, 但也有作物无增产甚至减产的研究报道。如 Kloss<sup>[9]</sup> 等研究了 3 种热解原料 (小麦秸秆、木屑、葡萄枝) 在不同温度下热解得到的生物炭施用到不同温带土壤中对轮作作物芥菜、大麦、红三叶草产量的影响, 结果表明: 添加生物炭造成了前两季作物减产, 最高可达 68%; 而对第三季红三叶草的产量无显著影响, 甚至增产 6%。Van Zwieten<sup>[13]</sup> 等则将造纸污泥热解得到 2 种生物炭单施或与化肥配施在

红壤和钙质土上, 结果表明: 红壤上单施生物炭对小麦生物量无显著影响, 与化肥配施则显著提高小麦生物量; 而钙质土中, 生物炭 1 无论单施还是与化肥配施均显著降低小麦生物量, 而生物炭 2 对小麦生物量则无显著影响。这是因为生物炭对作物的增产效应受到土壤性质、生物炭特性与用量以及作物类型、气候区域等多方面的影响<sup>[14]</sup>。因此, 为了加强生物炭在农业生产中的有效利用, 有必要开展不同气候区、不同土壤类型、不同作物类型等条件下生物炭对土壤的改良作用和作物学效应的研究。

江汉平原是我国重要的冬小麦主产区, 灰潮土是其主要的耕作土壤类型之一<sup>[15]</sup>。灰潮土砂粒含量较高, 易漏水漏肥, 保水保肥能力较差<sup>[16]</sup>, 施用生物炭能否有效改善灰潮土的理化性质, 促进作物增产, 还缺乏相关的研究报道。因此, 本研究拟通过田间试验探究生物炭及其与化肥配施对灰潮土土壤理化性质、微生物数量以及小麦产量等的影响, 以为生物炭在江汉平原灰潮土上的推广应用提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验于 2014 年 10 月 25 日至 2015 年 5 月 21 日在湖

表1 供试生物炭基本化学性质和元素含量

生物炭	pH	全氮	全磷	全钾	C	Ca	Mg	Zn
	(H <sub>2</sub> O)	(%)						
	9.48	0.22	0.14	1.88	79.8	0.28	0.17	0.007

北省武汉市农科院武湖试验基地进行。供试灰潮土的基本理化性质为：pH 值 7.81，有机质含量 13.74 克 / 公斤，全氮含量 1.05 克 / 公斤，速效磷含量 24.50 毫克 / 公斤，速效钾含量 117.11 毫克 / 公斤。生物炭为竹炭，由上海时科生物科技有限公司生产，基本理化性质如表 1。供试小麦品种为鄂麦 596。

## 1.2 试验设计

田间试验共设 4 个处理：空白对照 (CK)；单施生物炭 (B)；单施化肥 (F)；生物炭与化肥配施 (BF)，每个处理设 3 次重复，共计 12 小区，小区面积为 10 平方米，随机区组排列。生物炭施用量根据前人研究结果设置为 1333 公斤 / 亩<sup>[17]</sup>。化肥用量分别为 N : 12 公斤 / 亩；P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> : 6 公斤 / 亩；K<sub>2</sub>O : 8 公斤 / 亩，肥料品种分别为尿素、过磷酸钙、氯化钾。除氮肥用量的 50% 于拔节期追施外，其余均为基施。小麦采用撒播播种，播种量为 12 kg / 亩。分别于 2014 年 12 月 16 日 (越冬期)、2015 年 3 月 25 日 (抽穗期)、2015 年 5 月 21 日 (成熟期) 每小区按 S 型取样法布 5 点采集 0-10 厘米混合土样，4℃ 保存用于微生物数量的测定。收获时采取小区单打单收，取样烘干计算每小区的秸秆和籽粒干重。收获后取 0-15 厘米混合土样风干过筛，用于土壤基本理化性质分析。

## 1.3 测定项目与方法

土壤微生物数量采用涂抹平板计数法<sup>[18]</sup>，分别用 LB 培养基、马丁氏培养基、高泽氏一号培养基进行涂布培养，细菌 30℃ 下培养 1-2 天，真菌 28℃ 下培养 3-4 天，放线菌 28℃ 下培养 5-7 天，对其进行菌落计数。

土壤容重采用环刀法测定。土壤样品的测定均参照鲍士旦《土壤农化分析》<sup>[19]</sup> 的测定方法。土壤 pH 值按土水比 1 : 2.5 测定，土壤碱解氮采用碱解扩散法测定，速效磷采用碳酸氢钠-钼锑抗比色法，速效钾采用乙酸铵提取-火焰光度计法测定，土壤有机碳采用重铬酸钾氧化-外加加热法测定。

## 1.4 数据处理

采用 Excel 2010 进行数据的计算与处理，采用 SPASS 16.0 软件对数据进行方差分析，LSD 法进行多重比较，并用 Origin 8.6 作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 生物炭配施化肥对土壤理化性质和养分含量的影响

研究表明，与空白对照 (CK) 相比，单施生物炭 (B) 能显著提高土壤有机碳和速效钾含量，分别提高了 69.9% 和 21.5%，土壤容重、pH 值和碱解氮、速效磷含量则无显著差异，其中 pH 值和速效磷含量分别提高了 0.03 和 12.6%，而土壤容重和碱解氮含量则分别降低了 2.0% 和 5.4% (表 2)。与施肥对照 (F) 相比，生物炭与肥料配施 (BF) 得到的结果与前述结果变化趋势基本一致，土壤有机碳和速效钾含量显著提高，分别提高了 47.1% 和 59.7%，土壤容重、pH 值和碱解氮、速效磷含量则无显著差异，其中 pH 值和速效磷含量分别提高了 0.04 和 32.1%，而土壤容重和碱解氮含量则分别降低了 2.0% 和 2.5%。

表2 生物炭对土壤理化性质和养分含量的影响

处理	容重	pH	有机碳	碱解氮	速效磷	速效钾
	(克 / 厘米 <sup>3</sup> )	(H <sub>2</sub> O)	(克 / 公斤)	(毫克 / 公斤)		
CK	1.48 ± 0.01a	8.11 ± 0.03ab	7.44 ± 0.27b	51.57 ± 0.62ab	16.88 ± 2.07b	119.08 ± 4.51c
B	1.45 ± 0.01ab	8.14 ± 0.01a	12.64 ± 0.85a	48.77 ± 3.27b	19.00 ± 0.43b	144.71 ± 6.89b
F	1.47 ± 0.02ab	8.09 ± 0.02b	7.92 ± 0.39b	56.23 ± 1.68a	22.18 ± 3.39ab	124.99 ± 3.92c
BF	1.44 ± 0.01b	8.13 ± 0.01ab	11.65 ± 0.59a	54.83 ± 1.63ab	29.31 ± 2.55a	199.63 ± 6.31a

注：同一列的不同小写字母表示不同处理之间的差异显著 (LSD 检验, p < 0.05)。下同。

表3 生物炭对土壤细菌和放线菌数量的影响

处理	越冬期		抽穗期		成熟期	
	细菌	放线菌	细菌	放线菌	细菌	放线菌
	(10 <sup>5</sup> cfu/g)		(10 <sup>5</sup> cfu/g)		(10 <sup>5</sup> cfu/g)	
CK	26.2 ± 3.50c	35.23 ± 2.23c	142.70 ± 4.64a	62.18 ± 3.25a	84.50 ± 2.77b	42.43 ± 3.31b
B	44.00 ± 4.04b	57.23 ± 1.35a	155.14 ± 3.20a	67.21 ± 2.44a	109.10 ± 4.53a	46.97 ± 2.11ab
F	42.63 ± 2.54b	44.43 ± 3.31b	145.32 ± 7.01a	67.33 ± 5.72a	93.00 ± 4.45ab	46.67 ± 3.38ab
BF	63.48 ± 3.00a	54.47 ± 2.26a	147.00 ± 4.64a	73.78 ± 3.89a	100.00 ± 7.70ab	56.47 ± 2.66a

## 2.2 生物炭配施化肥对土壤微生物数量的影响

### 2.2.1 生物炭配施化肥对土壤细菌和放线菌数量的影响

试验结果表明(表3),土壤细菌和放线菌数量在冬小麦越冬期、抽穗期和成熟期总体呈先增加后降低的趋势,表现为抽穗期土壤细菌和放线菌数量最高,成熟期次之,越冬期最少。与CK相比,B处理土壤中的细菌和放线菌数量在小麦越冬期、抽穗期和成熟期分别提高了67.9%和62.4%、8.7%和8.1%、29.1%和10.7%,其中越冬期的细菌和放线菌数以及成熟期的细菌数均达到显著差异水平。与F处理相比,BF处理土壤中的细菌和放线菌数量在小麦越冬期、抽穗期和成熟期也呈增加趋势,分别提高了48.9%和22.6%、1.2%和9.6%、7.5%和21.0%,其中越冬期的细菌和放线菌数显著提高。说明施用生物炭能促进灰潮土中细菌和放线菌数量的增加,且在越冬期作用效果更好。

### 2.2.2 生物炭配施化肥对土壤真菌数量的影响

由表4看出,土壤中的真菌数量在冬小麦越冬期、抽穗期和成熟期也呈先增加后降低的趋势,表现为抽穗期最高,成熟期次之,越冬期最少。与CK相比,B处理的土壤真菌数在小麦越冬期、抽穗期和成熟期均呈降低趋势,分别降低了7.2%、8.2%和9.4%,但差异均未达到显著水平;与F相比,BF处理的土壤真菌数在三个时期内也未显著变化,除抽穗期真菌数有所增加外,越冬期和成熟期也表现出降低趋势,分别降低了3.2%和8.1%。说明施用生物炭对灰潮土真菌数量有一定的抑制作用。

表4 生物炭配施化肥对土壤真菌数量的影响

处理	真菌(10 <sup>3</sup> cfu/g)		
	越冬期	抽穗期	成熟期
	CK	43.83 ± 4.71bc	79.00 ± 5.65a
B	40.67 ± 5.40c	72.53 ± 4.00ab	57.89 ± 5.59a
F	60.23 ± 3.68a	60.80 ± 2.02b	59.11 ± 3.10a
BF	58.33 ± 4.24ab	67.18 ± 0.48ab	54.33 ± 4.19a

## 2.3 生物炭配施化肥对冬小麦秸秆和籽粒干重的影响

与CK相比,B处理的秸秆和籽粒干重分别增加6.8%和4.2%;而BF处理较F相比秸秆和籽粒干重也分别提高4.4%和16.5%。说明施用生物炭当季也能在一定程度上促进冬小麦秸秆和籽粒干重的提高,但差异未达到显著水平。此外,BF处理的秸秆和籽粒干重高于B或F处理,表明生物炭与化肥配施具有正的交互作用。

## 3 结论与讨论

生物炭富含有机碳且呈碱性,容重值远低于矿质土壤<sup>[20]</sup>,因此施用生物炭通常会提高酸性土壤的pH值、有机碳含量,土壤容重值则相应降低<sup>[6]</sup>。本研究表明,施用生物炭能显著提高灰潮土的有机碳含量,同时降低了土壤容重值,但对pH值则无显著影响。这与陈心想<sup>[21]</sup>和Zhao<sup>[22]</sup>等的研究结果较为一致。这可能与灰潮土本身偏碱性,盐基饱和度较高,生物炭中可溶性的K、Ca、Na、Mg等盐基离子不能显著提高灰潮土的盐基饱和度有关。

生物炭具有发达的孔隙结构以及较大的比表面积,且含有一定的K、Ca、Mg等矿质元素。因此,生物炭既能通过直接添加作用,也能通过提高土壤CEC来减少养分淋溶损失<sup>[23]</sup>,从而提高土壤中养分的有效性。本试验结果表明,施加生物炭对土壤碱解氮含量无显著影响,且碱解氮含量呈一定的下降趋势,郭伟<sup>[24]</sup>等也得到了相同的研究结果。其原因可能是:一方面,作为生物炭生产原料的有机质在热解过程中形成作物不能有效利用的杂环氮结构<sup>[20]</sup>,生物炭对土壤矿质态氮的添加作用有限<sup>[25]</sup>,且生物炭含碳量高,能显著提高土壤C/N值,降低了土壤微生物对有机氮矿化速率<sup>[24]</sup>,最终导致土壤碱解氮的来源减少;另一方面,施入生物炭后土壤容重值降低,土壤通气性得到改善,且碱性灰潮土的pH值也有升高趋势,从而加速了土壤中氨的挥发<sup>[24]</sup>。此外,单施生物炭或与化

肥配施均能提高作物籽粒干重,作物对氮素的吸收增加,最终导致土壤碱解氮的去向增加。Angst 等<sup>[26]</sup>研究发现,生物质中的 P 和 K 在热解过程中绝大部分被保留到生物炭中,且其有效性高。因此,生物炭施入土壤可以提高土壤速效磷、速效钾含量<sup>[6]</sup>。本研究也得到了较为一致的结果,土壤的速效磷、速效钾含量均呈增加趋势,且土壤速效钾含量显著提高。这除了生物炭自身含钾量较高(1.88%)外,还可能与生物炭提高土壤 CEC,减少钾的淋溶损失,以及生物炭对土壤中矿物钾的释放有促进作用等因素有关。

土壤微生物是土壤有机物和矿物质的主要分解者,在土壤 N、P 等养分转化和循环方面扮演重要角色<sup>[20]</sup>,是构成土壤肥力的重要因素。有关生物炭与土壤微生物的研究很多,结果普遍表明:生物炭的多孔性可为微生物的生长与繁殖提供良好的栖息环境<sup>[27]</sup>,且生物炭能有效改善土壤水分、养分、温度等影响微生物生长的因子,从而显著提高土壤微生物的活性和数量<sup>[28-29]</sup>。本研究表明,施用生物炭后土壤中的细菌和放线菌数量增加,且在小麦越冬期均达到显著水平,原因可能是越冬期土壤温度较低,但施用生物炭能降低土壤表面反射率,提高土壤温度<sup>[30]</sup>,从而使生物炭对土壤微生物数量的影响更加显著。生物

炭处理对各时期的土壤真菌数量的影响则不显著,且表现出轻微的抑制作用,这在一定程度上可减少小麦真菌类病害的发生。顾美英等<sup>[31]</sup>在新疆灰漠土上研究生物炭对土壤微生物数量的影响也得到了相似的结果。这可能与土壤 pH 值有关<sup>[32]</sup>,真菌最适宜生长在酸性土壤中,灰潮土偏碱性,生物炭的添加对土壤 pH 值还有一定的提升作用。

生物炭施入土壤对上述土壤或生物因子的改善,往往会最终促进作物产量的增加。Uzoma<sup>[33]</sup>等将牛粪生物炭施用在砂质土上,结果表明,土壤养分有效性增加,玉米产量随生物炭施用量的增加而增加,并在 1000 公斤/亩时达到最大。王耀锋<sup>[34]</sup>的研究结果也表明,单施生物炭或与肥料配施均可提高土壤养分状况,显著促进水稻产量增加。本试验中,施用生物炭能有效改善土壤理化性质和养分状况,提高土壤细菌和放线菌数量,促进冬小麦秸秆和籽粒干重的增加。尽管施用生物炭后,冬小麦秸秆和籽粒干重在当季未见显著提高,但有研究指出,生物炭的性质会随着施入土壤时间的延长而改变<sup>[35]</sup>,对作物的增产效应也会随之变化<sup>[36]</sup>,表现出一定的后效作用。因此,为促进生物炭在灰潮土上更科学、合理的施用,还有待进一步开展生物炭对灰潮土土壤性质改良以及作物学效应的田间长期定位研究。

## 参考文献

- [1] Lehmann J. Bio-energy in the black [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2007, 5(7):381-387.
- [2] 何绪生,张树清,余雕,等. 生物炭对土壤肥料的作用及未来研究 [J]. *中国农学通报*, 2011, 27(15):16-25.
- [3] Smider B, Singh B. Agronomic performance of a high ash biochar in two contrasting soils [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 191:99-107.
- [4] Joseph S D, Camps-Arbestain M, Lin Y, et al. An investigation into the reactions of biochar in soil [J]. *Aust J Soil Res.*, 2010, 48:501-515.
- [5] Liang F, Li G T, Lin Q M, et al. Crop Yield and Soil Properties in the First 3 Years After Biochar Application to a Calcareous Soil [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13:525-532.
- [6] Laird D A, Fleming P, Davis D D, et al. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil [J]. *Geoderma*, 2010, 158:443-449.
- [7] Liang B, Lehmann J, Solomon D, et al. Black Carbon Increases Cation Exchange Capacity in Soils [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2006, 70:1719-1730.
- [8] Glaser B, Haumaier L, Guggenberger G, et al. The 'Terra Preta' phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics [J]. *Naturwissenschaften*, 2001, 88:37-41.
- [9] Kloss S, Zehetner F, Wimmer B, et al. Biochar application to temperate soils: Effects on soil fertility and crop growth under greenhouse conditions [J]. *J Plant Nutr Soil Sci.*, 2014, 177:3-15.
- [10] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal - a review [J]. *Biol Fertil Soils*, 2002, 35:219-230.
- [11] Steiner C, Teixeira W G, Lehmann J, et al. Long term

- effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil [J]. *Plant and Soil*, 2007, 291:275–290.
- [12] 金梁, 魏丹, 郭文义, 等. 化肥单施及生物炭与化肥配施对土壤物理性质、大豆形态学指标及产量影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2015, (2):29–32.
- [13] 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, 327:235–246.
- [14] 卜晓莉, 薛建辉. 生物炭对土壤生境及植物生长影响的研究进展 [J]. *生态环境学报*, 2014, 23(3):535–540.
- [15] 朱应远. 江汉平原灰潮土几种旱作物锰肥效应研究 [J]. *华中农业大学学报*, 1999, 18(5):448–451.
- [16] 吴明来. 不同施肥方式对改良沿江灰潮土类耕地的效果分析 [J]. *现代农业科技*, 2012, 20:251–252+255.
- [17] 曾爱, 廖允成, 张俊丽, 等. 生物炭对壤土土壤含水量、有机碳及速效养分含量的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(5):1009–1015.
- [18] 程丽娟, 薛泉宏. 微生物学实验技术 [M]. 西安: 世界图书出版公司, 2000:63–83.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2008: 25–114.
- [20] 武玉, 徐刚, 吕迎春, 等. 生物炭对土壤理化性质影响的研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2014, 29(1):68–79.
- [21] 陈心想, 何绪生, 耿增超, 等. 生物炭对不同土壤化学性质、小麦和糜子产量的影响 [J]. *生态学报*, 2013, 33(20):6534–6542.
- [22] Zhao X, Wang J W, Xu H J, et al. Effects of crop–straw biochar on crop growth and soil fertility over a wheat–millet rotation in soils of China [J]. *Soil Use and Management*, 2014, 30:311–319.
- [23] Laird D, Fleming P, Wang B Q, et al. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil [J]. *Geoderma*, 2010, 158:436–442
- [24] 郭伟, 陈红霞, 张庆忠, 等. 华北高产农田施用生物质炭对耕层土壤总氮和碱解氮含量的影响 [J]. *生态环境学报*, 2011, 20(3):425–428.
- [25] Bridle T R, Pritchard D. Energy and nutrient recovery from sewage sludge via pyrolysis [J]. *Water Sci. Technol.*, 2004, 50:169–175.
- [26] Angst T E, Sohi S P. Establishing release dynamics for plant nutrients from biochar [J]. *GCB Bioenergy*, 2013, 5:221–226.
- [27] Warnock D D, Mummey D L, McBride B, et al. Influences of non–herbaceous biochar on arbuscular mycorrhizal fungal abundances in roots and soils: Results from growth–chamber and field experiments [J]. *Appl Soil Ecol*, 2010, 46:450–456.
- [28] Kolb S E, Fermanich K J, Dornbush M E. Effect of Charcoal Quantity on Microbial Biomass and Activity in Temperate Soils [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2009, 73:1173–1181.
- [29] 陈心想, 耿增超, 王森, 等. 施用生物炭后壤土土壤微生物及酶活性变化特征 [J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(4):751–758.
- [30] Oguntunde P G, Abiodun B J, Ajayi A E, et al. Effects of charcoal production on soil physical properties in Ghana [J]. *J Plant Nutr Soil Sci*, 2008, 171:591–596.
- [31] 顾美英, 徐万里, 唐光木, 等. 生物炭对灰漠土和风沙土土壤微生物多样性及与氮素相关微生物功能的影响 [J]. *新疆农业科学*, 2014, 51(5):926–934.
- [32] Rousk J, Brookes P C, Baath E. Contrasting soil pH effects on fungal and bacterial growth suggest functional redundancy in carbon mineralization [J]. *Appl Environ Microbiol*, 2009, 75:1589–1596.
- [33] Uzoma K C, Inoue M, Andry H, et al. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition [J]. *Soil Use and Management*, 2011, 27:205–212.
- [34] 王耀锋, 刘玉学, 吕豪豪, 等. 水洗生物炭配施化肥对水稻产量及养分吸收的影响 [J]. *植物营养与肥料学报* (出版中).
- [35] Cheng C H, Lehmann J. Ageing of black carbon along a temperature gradient [J]. *Chemosphere*, 2009, 75:1021–1027.
- [36] Liang F, Li G T, Lin Q M, et al. Crop Yield and Soil Properties in the First 3 Years After Biochar Application to a Calcareous Soil [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13:525–532.