

# 玉米秸秆炭还田对黑土土壤肥力特性和氮素农学效应的影响

郭俊梅<sup>1</sup>, 姜慧敏<sup>1</sup>, 张建峰<sup>1</sup>, 李玲玲<sup>1</sup>, 张水勤<sup>1</sup>, 谢义琴<sup>2</sup>,  
李先<sup>3</sup>, 刘晓<sup>1</sup>, 周贵宇<sup>4</sup>, 杨俊诚<sup>1\*</sup>

(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081; 2 四川农业大学资源环境学院, 成都 611130; 3 湖南省核农学与航天育种研究所, 长沙 410125; 4 辽宁大学环境学院, 沈阳 110036)

**摘要:**【目的】探索玉米秸秆炭对东北黑土土壤肥力特性和氮素农学效应的影响, 可为东北玉米集约化生产区秸秆资源利用和培肥土壤提供理论和实际应用基础。【方法】本研究以东北典型黑土区春玉米种植体系为研究对象, 通过连续两年的田间原位试验, 研究了添加 500℃ 厌氧条件热解的玉米秸秆炭对土壤养分含量、微生物和酶活性的影响及玉米秸秆炭对作物产量和氮素农学效应的影响。试验设三个处理: 1) PK + 4 t/hm<sup>2</sup> 秸秆还田 (CK); 2) NPK + 4 t/hm<sup>2</sup> 秸秆还田; 3) NPK + 4 t/hm<sup>2</sup> 秸秆还田 + 2 t/hm<sup>2</sup> 秸秆生产秸秆炭, 在玉米成熟期取 0—20 cm 土壤样品和植株样品, 采用常规方法进行相关项目的测定。【结果】1) 土壤养分分析结果。与秸秆还田相比, 秸秆炭处理在 2013 和 2014 年土壤碱解氮含量 (AN) 分别提高了 10.1% 和 9.7%, 均达到显著水平 ( $P < 0.05$ ); 土壤速效磷含量 (AP) 分别提高了 13.7% 和 27.3%, 在 2014 年达到显著水平 ( $P < 0.05$ ); 土壤微生物量碳含量 (SMBC) 分别提高了 13.5% 和 26.9%, 土壤脲酶活性 (URE) 分别提高了 22.3% 和 31.8%, 2014 年 SMBC 和 URE 升高均达显著 ( $P < 0.05$ )。秸秆炭对土壤有机质 (OM)、全氮 (TN)、速效钾 (AK)、土壤微生物量氮 (SMBN) 和蔗糖酶活性 (SUC) 的提升效果在两年试验中均没有达到显著水平, 2) 氮素农学效应影响结果。与处理 2 相比, 处理 3 肥料氮偏因子生产力 (PFPN) 分别提高了 3.3% 和 9.6%, 肥料氮经济效益 (EBN) 分别提高了 12.9% 和 27.5%, 均在 2014 年表现出显著提高 ( $P < 0.05$ ); 而两年间处理 3 的玉米产量分别提高 3.3% 和 9.5%、肥料氮利用率 (UEN) 分别提高了 3.9% 和 14.0%、肥料氮农学效率 (AEN) 分别提高了 11.6% 和 23.9%, 但均未达显著水平。【结论】2 年试验初步表明施用玉米秸秆炭可以提高土壤微生物活性和土壤酶活性, 调节土壤与作物之间的养分供需, 改善土壤养分状况, 对提升氮素农学效应有作用。因此, 玉米秸秆炭可作为秸秆资源高效利用的有效形式, 其长期效果还需进一步试验。  
**关键词:** 玉米秸秆炭; 土壤肥力; 微生物量碳、氮; 土壤酶活性; 氮素农学效应

中图分类号: S141.4; S153.6<sup>+2</sup> 文献标识码: A 文章编号: 1008-505X(2016)01-0067-09

## Effects of maize straw derived biochar on the soil fertility and nitrogen agronomic responses in black soil

GUO Jun-mei<sup>1</sup>, JIANG Hui-min<sup>1</sup>, ZHANG Jian-feng<sup>1</sup>, LI Ling-ling<sup>1</sup>, ZHANG Shui-qin<sup>1</sup>,  
XIE Yi-qin<sup>2</sup>, LI Xian<sup>3</sup>, LIU Xiao<sup>1</sup>, ZHOU Gui-yu<sup>4</sup>, YANG Jun-cheng<sup>1\*</sup>

(1 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, CAAS, National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Beijing 100081, China; 2 College of Resource and Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 3 Hunan Institute of Nuclear Agronomy and Astronautics Breeding, Changsha 410125, China; 4 College of Environment, Liaoning University, Shenyang 110036, China)

**Abstract:** 【Objectives】To explore the effect of biochar made of maize straw on the soil fertility and nitrogen agronomic responses will provide theoretical and practical support for the straw resources utilization and soil fertility

收稿日期: 2013-12-22 接收日期: 2014-04-03 网络出版日期: 2015-04-21

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973”课题(2013CB127406); 中央级公益性科研院所专项资金资助项目 (IARRP-2015-21); 国家国际科技合作专项(2015DFA20790); 农业部行业专项(201103007); 科技部科研院所技术开发研究专项资金(2012EG134235)。

作者简介: 郭俊梅(1990—), 男, 山西忻州人, 硕士研究生, 主要从事土壤培肥与改良研究。

Tel: 010-82106728, E-mail: gjm19900321@163.com. \* 通信作者 Tel: 010-82106728, E-mail: yangjuncheng@caas.cn

improvement in the maize belt in the Northeast China. **【Methods】** Field experiment was conducted with maize straw and maize straw derived biochar (fast pyrolysis at 500°C under low oxygen) in the black soil region in Northeast China. Three treatments were designed: 1) PK + maize straw; 2) NPK + 4 t/hm<sup>2</sup> maize straw; 3) NPK + 2 t/hm<sup>2</sup> maize straw + biochar from 2 t/hm<sup>2</sup> maize straw. The plant and soil samples (0–20 cm) were collected at harvest, the relative items were analyzed with regular methods. **【Results】** 1) Compared with treatment 2 in 2013 and 2014, the soil available N in treatment 3 was significantly increased by 10.1% and 9.7% ( $P < 0.05$ ), the soil available P by 13.7% and 27.3% with a significant improvement at 2014 ( $P < 0.05$ ), the soil microbial biomass carbon (SMBC) by 13.5% and 26.9%, the soil urease activity by 22.3% and 31.8% respectively. The SMBC and the soil urease activity significantly improved in 2014 ( $P < 0.05$ ). The soil organic matter, soil total N, available K, SMBN and soil sucrase activity were not improved significantly. 2) Analysis of nitrogen agronomic responses showed that the N partial factor productivity in treatment 3 was enhanced by 3.3% in 2013 and significantly by 9.6% in 2014 ( $P < 0.05$ ); the benefit of economy of applied N (EBN) was increased by 12.9% in 2013 and significantly by 27.5% in 2014 ( $P < 0.05$ ); while the yield, the N fertilizer use efficiency (UEN) and the agronomic efficiency didn't show significant increase. **【Conclusions】** Biochar are more effective to improve the activities of soil microbe and the soil enzymes, and so to enhance the soil nutrient supply for maize. The nitrogen agronomy effect will be improved as a result. The application of maize straw as biochar is an effective way for straw efficient utilization in Northeast China.

**Key words:** maize straw-derived biochar; soil fertility; soil microbial biomass C and N; soil enzyme activities; nitrogen agronomy effect

东北是我国玉米主产区之一,拥有极其丰富的玉米秸秆资源<sup>[1]</sup>。玉米秸秆中富含碳源及氮、磷、钾等养分,如果能有效还田利用,在维持东北黑土区土壤肥力方面将发挥重要的作用<sup>[2]</sup>。但由于东北地区冬春低温、秸秆自然腐解速度慢和缺乏切实可行的利用技术等因素,玉米秸秆有效还田率低(仅为19.8%)且效果不明显<sup>[3]</sup>,大量玉米秸秆得不到有效利用,为不影响下茬种植而被直接焚烧,不仅造成秸秆资源的巨大浪费,还对大气和环境造成了严重污染<sup>[4]</sup>。基于此,探讨玉米秸秆炭化还田的理论与方法,突破制约秸秆有效还田的技术瓶颈,是提高东北玉米集约化生产区秸秆资源利用效率和培肥土壤的迫切需求。

秸秆炭是生物炭的一种,是作物秸秆在无氧条件下炭化的产物,具有改善土壤物理性状<sup>[5-7]</sup>,增加土壤对养分的吸附、减少养分淋失<sup>[8,9]</sup>,促进微生物活性<sup>[10]</sup>,提高作物生产力,增加产量等的作用或潜在功效<sup>[11,12]</sup>。目前秸秆炭已成为当今世界资源环境领域的研究热点之一,国内外关于秸秆炭对土壤肥力、微生物学性状、酶活性和产量的影响均作了一定的研究,并取得了许多成果。

土壤微生物是土壤中对环境变化最为敏感的部分,土壤微生物量既是土壤有机质和养分转化与循环的动力,又可作为植物有效养分的储备库<sup>[13]</sup>,

Liang 等<sup>[14]</sup>对亚马逊流域黑土研究认为生物炭可提高土壤微生物活性达125%。在土壤酶中,脲酶主要作用是催化土壤中尿素的水解,其活性可以用来表示土壤氮素状况<sup>[15]</sup>。蔗糖酶活性可以反映对土壤中易溶性物质的利用,反映了土壤有机碳的积累和分解转化规律<sup>[15]</sup>。冯爱青等<sup>[16]</sup>研究结果表明冬小麦炭化施入土壤可显著提高土壤脲酶活性。而张玉兰等<sup>[17]</sup>研究认为玉米秸秆炭施入黑土对土壤蔗糖酶活性没有显著影响。由于研究的土壤基础肥力、秸秆炭种类、施用量和作物品种等不同,关于秸秆炭对作物产量的影响有不同的报道,Liang 等<sup>[18]</sup>的研究认为与不施用秸秆炭处理相比,施用秸秆炭处理后,玉米产量有大幅增加。而高海英等<sup>[19]</sup>研究认为生物炭单施在不同土壤上均会导致小麦和糜子增产效果不明显甚至减产。Lehmann 等<sup>[20]</sup>研究认为秸秆炭施入土壤可减少土壤氮素淋失,提高氮肥利用率。

鉴于我国对秸秆炭的研究结果多数是基于热带地区肥力贫瘠的土壤,且多是室内模拟试验条件下的结果,而关于秸秆炭对东北冷凉地区高肥力土壤的实际田间情况下土壤养分、微生物和酶活性及氮素农学效应的影响尚不清楚。本研究针对玉米秸秆炭对东北春玉米种植区土壤肥力和氮素农学效应的影响这一问题,采用连续两年的田间原位试验,研究

玉米秸秆炭对东北黑土土壤肥力效应和氮素农学效应的影响,旨在为提高我国东北玉米集约化生产区秸秆资源利用效率和土壤肥力提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验区概况

试验点位于黑龙江省哈尔滨市民主乡黑龙江省农业科学院现代农业科技示范园区,地理坐标为东经  $126^{\circ}48'55.64'' \sim 126^{\circ}51'26.50''$ ,北纬  $45^{\circ}49'44.33'' \sim 45^{\circ}51'01.60''$ ,海拔  $130 \sim 150$  m,属于寒温带大陆季风气候,年平均气温  $3.6^{\circ}\text{C}$ ,年降水量为  $486.4 \sim 543.6$  mm;年不低于  $10^{\circ}\text{C}$  积温为  $2600 \sim 2800^{\circ}\text{C}$ ,全年无霜期 135 天;年平均风速  $4.1$  m/s,最大风速  $18.9$  m/s。土壤类型为黑土,质地为砂砾 13%、粉粒 63%、粘粒 24%,黑土层厚度为  $25 \sim 40$  cm,粘土层厚度为  $30 \sim 35$  m,其下沙层含有丰富地下水。采用土壤农化分析常规方法<sup>[21]</sup>测定试验前土壤耕层(0—20 cm)的基本理化性质:有机质  $28.70$  g/kg、全氮  $1.14$  g/kg、全磷  $0.39$  g/kg、全钾  $2.95$  g/kg、碱解氮  $85.19$  mg/kg、速效磷  $30.00$  mg/kg、速效钾  $185.98$  mg/kg、pH 6.85。

### 1.2 试验设计

试验区种植制度为一年一熟春玉米,供试作物为当地主栽品种龙单 42 号,试验从 2013 年 5 月开始,到 2014 年 10 月已连续种植了两季春玉米。供试玉米秸秆炭由黑龙江省农业科学院提供,玉米秸秆炭是由玉米秸秆在  $500^{\circ}\text{C}$  厌氧条件下热解而成的高度芳香化产物,其性质较为稳定,且含有一定的养分,其基本理化性质:全氮  $6.10$  g/kg、全磷  $5.17$  g/kg、全钾  $22.8$  g/kg、CEC  $9.98$  cmol/kg、pH 9.07、固定碳 77.1%、灰分 13.3%。玉米秸秆炭全氮、全磷、全钾、CEC 及 pH 含量测定方法参照《土壤农化分析》<sup>[21]</sup>,固定碳和灰分含量参照国家标准 GB/T 17664-1999《木炭和木炭试验方法》测定。

试验设为 3 个处理,分别为:(1)PK+秸秆还田(CK),(2)NPK+秸秆还田(C1);(3)NPK+秸秆还田+玉米秸秆炭(C2)。C1 处理秸秆还田量为  $4$  t/hm<sup>2</sup>,C2 处理秸秆还田量为  $2$  t/hm<sup>2</sup>,生物碳添加量由  $2$  t/hm<sup>2</sup> 玉米秸秆生产,供试氮肥按 60% 速效氮+20% 有机肥氮+20% 缓释肥氮的比例添加,速效氮肥为尿素,含 N 量为 46%,商品有机肥 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 含量分别为 1.86%、3.11% 和 0.85%,由南京农业大学资源环境学院提供;缓释氮肥为缓释尿素,含 N 量为 41.8%,由中国科学院南京土壤

研究所提供。氮肥施用量为  $N 165$  kg/hm<sup>2</sup>,其中速效氮按照基肥、大喇叭期和抽雄期追肥比例 1:1:1 施入,有机肥和缓释肥全部基施;磷肥为磷酸二铵(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%),钾肥为氯化钾(K<sub>2</sub>O 60%),磷肥施用量为 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>  $60$  kg/hm<sup>2</sup>,钾肥用量为 K<sub>2</sub>O  $75$  kg/hm<sup>2</sup>,磷钾肥全部基施;秸秆还田量为  $4$  t/hm<sup>2</sup>,平均 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 含量分别为 0.70%、0.11% 和 1.42%。每个处理重复 4 次,区组随机排列,小区面积为  $60$  m<sup>2</sup>。

### 1.3 样品采集与测试

成熟期采集 0—20 cm 耕层土壤样品,每个小区采五个点将土壤混合,按四分法分取两份,一份取回风干研磨,分别过 2 mm 和 0.15 mm 筛测定土壤养分含量;另一份用白色棉布袋装取,放入  $4^{\circ}\text{C}$  冰箱保存,用于测定土壤微生物量碳氮及酶活性。成熟期测产并采集植株样品,于离地 2 cm 处收获,秸秆与籽粒单独采收。

土壤有机质、全氮、碱解氮、速效磷和速效钾等养分含量采用土壤农化分析常规方法测定<sup>[21]</sup>,土壤脲酶活性(URE)采用苯酚钠—次氯酸钠比色法<sup>[15]</sup>进行测定,土壤蔗糖酶活性(SUC)采用 3,5-二硝基水杨酸比色法<sup>[20]</sup>进行测定,土壤微生物量碳含量(SMBC)和微生物量氮含量(SMBN)用氯仿熏蒸培养法<sup>[22]</sup>测定,植物氮含量按照 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮法测定<sup>[21]</sup>。

### 1.4 数据统计分析

用 Excel 软件进行数据相关计算,试验结果采用 SAS 9.1 统计分析软件进行方差分析和相关分析,不同处理间采用最小显著差数法(LSD 法)进行差异显著性检验( $P < 0.05$ ),用 Originpro 8.6 软件进行作图。

氮素农学效应主要考虑肥料氮利用率、肥料氮偏生产力、肥料氮农学效率和肥料氮经济效益,计算公式分别如下:

肥料氮利用率(utilization efficiency of applied N, UEN) = (收获期施氮区地上部总吸氮量-收获期不施氮区地上部总吸氮量)/肥料氮施用量  $\times 100\%$

肥料氮偏生产力(partial factor productivity from applied N, PFPN) = 施氮区产量/肥料氮施用量

肥料氮农学效率(agronomic efficiency of applied N, AEN) = (施氮区籽粒产量-不施氮区籽粒产量)/肥料氮施用量

肥料氮经济效益(economic benefits of applied

N, EBN) = 施氮区净收益 - 不施氮区净收益

## 2 结果与分析

### 2.1 玉米秸秆炭对土壤肥力的影响

2.1.1 对土壤养分的影响 由图 1 可以看出, 经过连续两年添加玉米秸秆炭后, 在 2014 年成熟期, C2 处理土壤有机质和全氮含量与 2013 年基本持平, 土壤全氮、速效磷和速效钾含量较上一年分别提高 7.5%、12.0% 和 5.3%, 均没有显著差异。对不同处理间土壤养分状况进行分析表明, 与 C1 处理相比较, 两年试验中 C2 处理土壤有机质含量分别提高 2.3% 和 3.0%、土壤全氮含量分别提高 1.3% 和 1.9%、土壤碱解氮含量分别提高了 10.1% 和 9.7%、土壤速效磷分别提高了 13.7% 和 27.3%、土壤速效钾分别提高了 9.9% 和 3.1%, 其中土壤碱解氮含量在两年中差异均达到了显著 ( $P < 0.05$ ), 土壤速效磷含量在 2014 年表现出显著差异 ( $P < 0.05$ )。

以上结果表明, 与不添加秸秆炭处理相比, 添加玉米秸秆炭对土壤碱解氮和速效磷含量均有显著提升作用, 而对土壤有机质含量、土壤全氮含量和速效钾含量虽表现出了一定的提高但差异未达显著水平, 这可能是由于受秸秆炭施用年限短的限制。

2.1.2 对土壤微生物量碳、氮含量及土壤酶活性的影响 由图 2 可知, 经过连续两年添加玉米秸秆炭后, 2014 年 C2 处理的土壤微生物量碳、氮含量和土壤脲酶、蔗糖酶活性与 2013 年均没有显著变化。两年试验中 C2 处理土壤微生物量碳含量均显著高于 CK 处理 ( $P < 0.05$ ), 且与 C1 处理相比分别提高了 13.5% 和 26.9%, 其中在 2014 年达到显著水平 ( $P < 0.05$ ); 与 C1 相比, C2 处理土壤微生物量氮含量两年分别提高了 1.1% 和 1.4%, 在统计学上未达显著水平; 土壤脲酶活性两年均显著高于 CK 处理 ( $P < 0.05$ ), 且较 C1 处理分别提高了 22.3% 和 31.8%, 在 2014 年差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ ); 土壤蔗糖酶活性两年均显著高于 CK 处理 ( $P < 0.05$ ), 且较 C1 处理分别提高 10.1% 和 1.1%, 但在统计学上均不显著。

由此可知, 经过连续两年添加玉米秸秆炭后, 在 2014 年成熟期 C2 处理对土壤微生物量碳含量及土壤脲酶活性表现出显著提升效应, 而对土壤微生物量氮含量和土壤蔗糖酶活性的影响在两年试验中没有表现出显著作用。

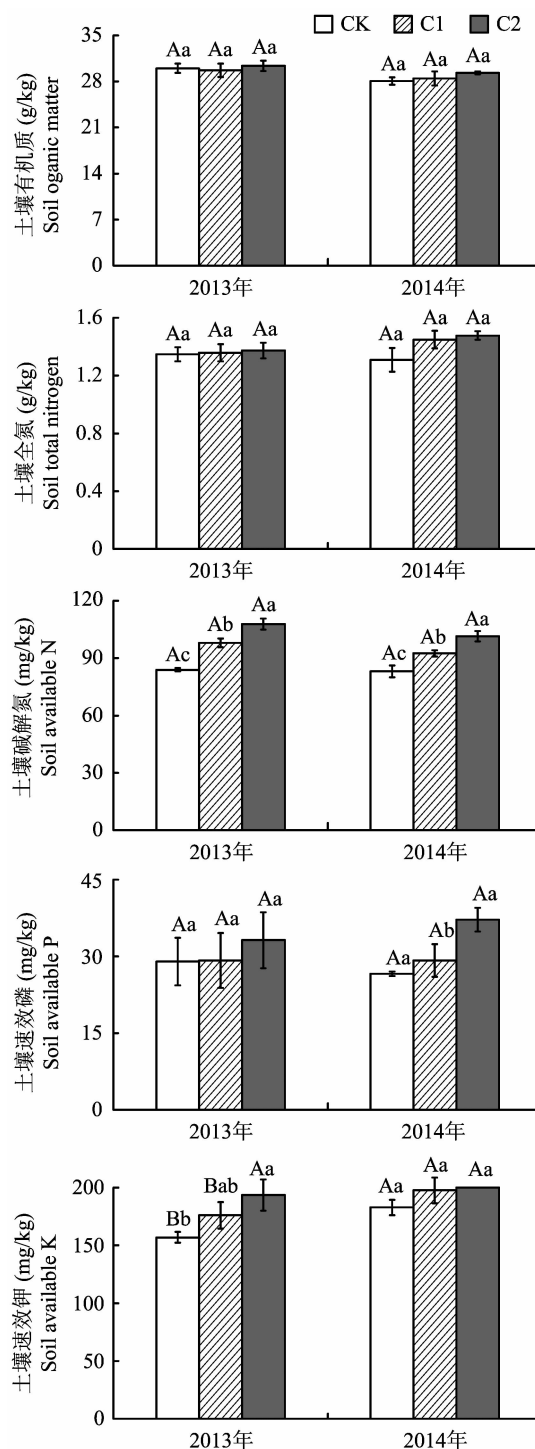


图 1 秸秆炭对黑土土壤养分含量的影响  
Fig. 1 Effect of biochar on soil nutrient content of black soil

[注 (Note): 柱上不同大写字母表示年际间差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ ), 不同小写字母表示处理间差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ ), 竖线为平均值的标准误 Capital letters mean significant differences at 5% level between the two years, and lowercase letters mean significant differences at 5% level between different treatments, the bar means the standard error of mean value. ]

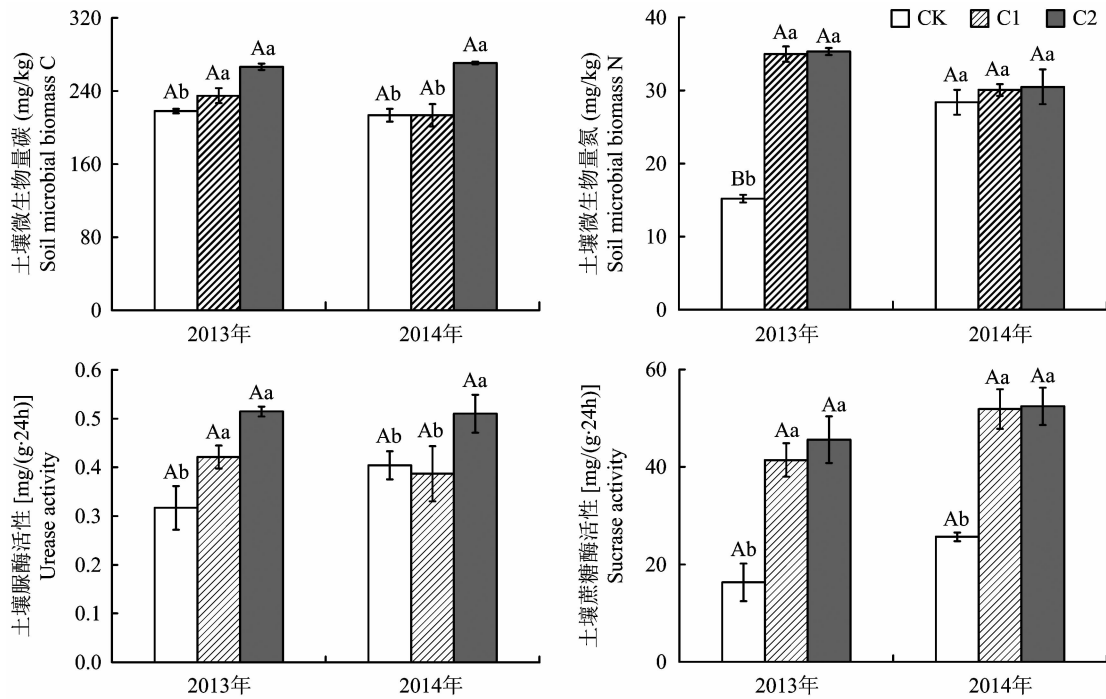


图2 秸秆炭对土壤微生物量碳、氮含量和土壤脲酶、蔗糖酶活性的影响

Fig. 2 Effect of biochar on SMBC, SMBN and soil urease and sucrase activities

## 2.2 土壤肥力构成因素相关性分析

通过连续两年田间定位试验,对2014年土壤肥力构成因素和产量差异(Yield)进行相关分析(表1),结果表明,土壤有机质和土壤全氮含量之间具有极显著正相关性( $r=0.762, P<0.01, n=12$ );土壤全氮含量与土壤碱解氮含量之间具有显著正相关( $r=0.625, P<0.05, n=12$ )。土壤碱解氮含量与土壤微生物量碳含量为显著相关( $r=0.659, P<0.05, n=12$ ),与微生物量氮含量和土壤蔗糖酶活性之间均表现出极显著相关性( $r=0.778, 0.709, P<0.01, n=12$ ),与产量之间也表现出极显著正相关( $r=0.956, P<0.01, n=12$ )。土壤微生物量碳含量与土壤微生物量氮含量( $r=0.673$ )和土壤蔗糖酶活性( $r=0.679$ )之间均为显著相关关系( $P<0.05, n=12$ ),与土壤脲酶活性表现为极显著相关关系( $r=0.779, P<0.01, n=12$ )。土壤微生物量氮含量与土壤碱解氮( $r=0.778$ )和土壤蔗糖酶活性( $r=0.878$ )间均为极显著相关性( $P<0.01, n=12$ ),与土壤脲酶活性也表现为显著相关关系( $r=0.621, P<0.05, n=12$ )。作物产量与土壤碱解氮( $r=0.886$ )、土壤微生物量氮含量( $r=0.956$ )和土壤蔗糖酶活性( $r=0.874$ )之间均具有极显著相关性( $P<0.01, n=12$ ),与土壤脲酶活性间也表现出显著相关性( $r=0.635, P<0.05, n=12$ ),而与土壤有

机质、全氮含量和土壤速效磷、速效钾含量的相关性则不显著。

上述相关性分析结果表明,土壤碱解氮含量与土壤微生物量碳、氮含量和土壤脲酶、蔗糖酶活性之间具有同步性,对产量也表现出有显著的促进效应,这说明在两年试验中土壤碱解氮含量、微生物量碳氮含量、土壤脲酶和蔗糖酶活性是影响土壤肥力的关键因子。

## 2.3 玉米秸秆炭对氮素农学效应的影响

由表2可知,在两年田间试验中,C1与C2两处理产量均显著高于CK处理( $P<0.05$ ),且与C1处理相比,C2处理产量分别提高了3.3%和9.5%;对C1和C2两处理的肥料氮利用率(UEN)、肥料氮偏因子生产力(PFPN)、肥料氮农学效率(AEN)和肥料氮经济效益(EBN)的t检验分析结果比较表明,C2处理的肥料氮利用率(UEN)较C1处理分别提高了3.9%和14.0%,肥料氮偏因子生产力(PFPN)分别提高了3.3%和9.6%,肥料氮农学效率(AEN)分别提高了11.6%和23.9%,肥料氮经济效益(EBN)分别提高了12.9%和27.5%,其中PFPN和EBN在2014年均达到显著水平( $P<0.05$ )。说明经过连续两年添加玉米秸秆炭后,肥料偏因子生产力(PFPN)和肥料氮经济效益(EBN)均有显著提高。

表 1 土壤肥力构成因素相关性分析

Table 1 Correlation analysis of soil fertility factors

项目 Item	OM	TN	AN	AP	AK	SMBC	SMBN	URE	SUC	Yield
OM	1.000									
TN	0.762**	1.000								
Avail. N	0.426	0.625*	1.000							
Avail. P	0.195	0.474	0.519	1.000						
Avail. K	0.542	0.498	0.695*	0.355	1.000					
SMBC	0.398	0.354	0.659*	0.277	0.279	1.000				
SMBN	0.294	0.535	0.778**	0.234	0.498	0.673*	1.000			
URE	0.552	0.438	0.473	0.048	0.218	0.779**	0.621*	1.000		
SUC	0.424	0.510	0.709**	0.471	0.589*	0.679*	0.878**	0.369	1.000	
Yield	0.322	0.459	0.886**	0.424	0.527	0.557	0.956**	0.635*	0.874**	1.000

注( Note): OM—土壤有机质 Soil organic matter; TN—全氮 Total N; AN—碱解氮 Alkali-hydr. N; AP—速效磷 Available P; AK—速效钾 Available K. \*—表示显著( $P < 0.05$ ) Means significant level ( $P < 0.05$ ); \*\*—表示极显著( $P < 0.01$ ) Means very significant level ( $P < 0.01$ ).

表 2 添加玉米秸秆炭对肥料氮素农学效应的影响

Table 2 Effect of biochar application on fertilizer nitrogen agronomy effect

处理 Treatment	产量(kg/hm <sup>2</sup> ) Yield	利用率% UEN	偏因子生产力 PFPN(kg/kg)	农学效率 AEN(kg/kg)	经济效益 EBN(yuan/hm <sup>2</sup> )
2013 年					
CK	8456.5 ± 228.3 b	—	—	—	—
C1	11809.7 ± 411.6 a	48.8 ± 0.2 a	89.5 ± 3.1 a	25.4 ± 3.6 a	5410.3 ± 864.4 a
C2	12197.9 ± 187.3 a	50.7 ± 0.1 a	92.4 ± 1.4 a	28.3 ± 3.1 a	6105.6 ± 393.3 a
2014 年					
CK	6006.8 ± 573.3 b	—	—	—	—
C1	10048.7 ± 220.7 a	47.0 ± 0.2 a	76.1 ± 1.7 b	30.6 ± 5.3 a	6856.6 ± 1455.5 b
C2	11003.7 ± 305.2 a	53.6 ± 0.2 a	83.4 ± 2.3 a	37.9 ± 3.0 a	8742.0 ± 827.3 a

注( Note): UEN—N use efficiency; PFPN—Partial productivity efficiency of N; AEN—Agronomic efficiency; EBN—Economic benefit of N; 数值后不同字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ ) Values followed by different letters at the same stage mean significant at 5% level.

### 3 讨论

#### 3.1 添加玉米秸秆炭对土壤肥力效应的影响分析

许多学者曾就秸秆炭对土壤有机质的影响做过研究,得出不同的结论。Zwieten 等<sup>[23]</sup>研究认为秸秆炭可提高土壤有机碳的含量,而章明奎等<sup>[24]</sup>对小麦秸秆生物炭的研究结果表明长期单一施用生物炭会导致土壤水溶性有机质的下降,与有机肥配合施用则可提高土壤水溶性有机质的含量。本研究用重铬酸钾容量法测定土壤有机质含量,结果表明,经过两年定位试验,添加玉米秸秆炭处理土壤有机质含量与秸秆直接还田处理相比略有提高,但没有显著差异,其原因可能是,一方面传统重铬酸钾容量法难

以直接测定秸秆炭,而秸秆炭是高度稳定的有机物质,短时间内转化成的土壤有机质较少,而东北地区土壤有机质本底值较高,添加玉米秸秆炭来增加土壤有机碳储备是一个长期的作用过程;另一方面本研究为田间试验,为考虑生产实际,玉米秸秆炭添加量较低,仅相当于单位面积 50% 的秸秆量,因此短期内对土壤有机质的影响不显著,而一些试验秸秆炭添加量相对于本试验要高出数倍甚至数十倍<sup>[25]</sup>,因此可在短期内得出较显著的结果,但在生产中的实践意义值得商榷。可见秸秆炭对土壤有机质的提升潜力需要在一个长期的尺度上进一步研究探索。

土壤全氮含量是衡量土壤肥力的重要指标,通常用于指导施肥,本研究结果表明,添加玉米秸秆炭

处理土壤全氮含量略有提高,但不显著,这与张晗芝等<sup>[25]</sup>研究结果一致。土壤碱解氮是植物可直接吸收利用的氮素,反映了土壤短期内的氮素供应状况。研究表明,添加玉米秸秆炭对土壤碱解氮的影响较土壤全氮更加明显,在两年试验中均显著提高了土壤碱解氮含量( $P < 0.05$ ),曾爱等<sup>[26]</sup>通过田间试验研究生物炭对壤土土壤碱解氮的影响,认为低量生物炭显著提高土壤碱解氮含量达 11.2%,这与本研究结果一致,陈心想等<sup>[27]</sup>在壤土和新积土上的试验也得出了类似结果。其原因一方面秸秆炭本身含有少量氮素且秸秆炭具有较大比表面积和多种官能团,可吸附土壤溶液中的硝态氮和铵态氮以减少其淋失<sup>[26,28]</sup>;另一方面秸秆炭的添加可提高土壤碳氮比<sup>[29]</sup>,促进了土壤微生物的活性,加速了土壤有机氮的矿化速率,从而提高了土壤速效氮含量。因此玉米秸秆炭在短期内对土壤碱解氮提升效应较土壤全氮更为显著。

土壤速效磷和速效钾是可供植物直接吸收利用的磷、钾养分,本研究通过对土壤速效磷、钾的分析,结果表明,在两年试验中添加玉米秸秆炭均提高了土壤速效磷和速效钾的含量,尤其土壤速效磷在 2014 年显著增加( $P < 0.05$ )。这与曾爱等<sup>[26]</sup>研究结果一致,其原因玉米秸秆炭吸持土壤溶液中的磷酸根以减少其淋溶并且减少土壤中铁铝氧化物胶体对磷的固定<sup>[11]</sup>,同时秸秆炭可促进土壤有机磷的矿化<sup>[25]</sup>。

经过连续两年添加玉米秸秆炭试验对微生物量碳含量影响的研究结果表明,添加玉米秸秆炭在 2104 年成熟期显著提高了土壤微生物量碳含量( $P < 0.05$ )。这是因为一方面秸秆炭本身高芳香烃的结构和其孔隙结构为微生物生长提供了栖息点和繁衍空间<sup>[31-33]</sup>;另一方面秸秆炭对土壤理化性质的改变,如促进土壤团聚体的形成、提高了土壤 C/N 比<sup>[29]</sup>、提高土壤养分有效性和提供微生物生长所需的养分等,从而提高土壤微生物活性<sup>[34-36]</sup>。何莉莉等<sup>[23]</sup>研究得出生物炭适合作为微生物的载体,并提供碳源,有利于提高土壤微生物量及其活性,与本研究结果一致。而土壤微生物量氮含量的提高则在两年试验中均没有达到显著水平,可能是由于秸秆炭的投入提供了碳源,提高了土壤 C/N 比<sup>[29]</sup>,导致微生物可利用的氮源减少。可见添加秸秆炭对土壤微生物活性具有一定的促进效应。

对土壤脲酶和蔗糖酶活性的影响研究结果表明,添加玉米秸秆炭土壤脲酶活性两年均有所提高,

且在 2014 年达到显著水平( $P < 0.05$ ),这与陈心想等<sup>[37]</sup>在壤土上对小麦-玉米轮作系统研究和黄剑等<sup>[38]</sup>在砂姜黑土上对小麦-玉米轮作系统的研究结果一致,其原因可能为秸秆炭对施入土壤中的尿素的吸附作用为脲酶反应提供了底物,且秸秆炭自身多孔性和高 pH 值可改善土壤物理性质,为脲酶反应提供了适合的环境。而添加玉米秸秆炭在两年试验中对土壤蔗糖酶的活性的提升作用均没有达到显著水平,这可能是由于秸秆炭吸附固定土壤中可溶性有机质,使蔗糖酶反应底物减少导致的,这与张玉兰等<sup>[17]</sup>和陈心想等<sup>[37]</sup>研究结果一致。因此添加秸秆炭对土壤脲酶活性的影响更显著,而对土壤蔗糖酶活性的影响尚需进一步研究。

本文就添加玉米秸秆炭对土壤肥力效应的影响进行了方差分析,同时对不同处理土壤肥力构成因素之间相关性进行了相关分析,结果表明,添加玉米秸秆炭处理在提高土壤氮、磷等养分方面具有一定的优势,尤其是对土壤速效氮影响更为明显,且添加秸秆炭更显著提高了土壤微生物量碳含量和土壤脲酶活性。同时土壤碱解氮、微生物量氮含量、脲酶及蔗糖酶活性等因素之间均为显著相关,且与产量之间均为显著相关关系,说明添加玉米秸秆炭在短时间内不会对土壤有机质、全氮和速效钾等养分产生直接的影响,而是通过激发土壤微生物活性从而提高土壤酶活性,并以此来间接调节土壤与作物之间的养分供需,促进土壤养分的循环,而对于产量的贡献也是通过影响土壤微生物活性和土壤酶活性来间接作用的。

### 3.2 添加玉米秸秆炭对氮素农学效应的影响分析

对作物产量的研究结果表明,添加玉米秸秆炭对作物产量的提高作用在两年内均没有达到显著水平,这与 Uzoma 等<sup>[39]</sup>的研究结果不一致,Uzoma 研究认为施用生物炭达到  $15 \sim 20 \text{ t/hm}^2$  时,玉米增产达 150%~98%。其原因可能为本研究为切合生产实际,秸秆炭添加量为  $2 \text{ t/hm}^2$ ,低添加量和施用年限较短导致其对产量的提升效应尚未达到显著水平。

对氮素利用效率研究结果表明,经过两年连续田间试验,添加秸秆炭对肥料氮的偏因子生产力(PFPN)和肥料氮经济效益(EBN)在 2014 年均有显著提高( $P < 0.05$ ),这可能是由于生物炭具有巨大比表面积和含有多种官能团,促进团粒结构的形成,且可以提高土壤阳离子交换量,吸附投入土壤中未被作物吸收的氮素以减少其淋失。而添加秸秆炭对

肥料氮肥料氮利用率 (UEN) 和肥料氮农学效率 (AEN) 虽有提高作用, 但两年间均没有达到显著水平, 而曲晶晶等<sup>[40]</sup> 研究认为小麦秸秆炭添加量为 20 t/hm<sup>2</sup> 时显著提高了肥料氮利用率和肥料氮农学效率, 与本文的研究结果不一致, 可能是由于本研究秸秆炭添加量较低且施用年限较短, 导致其对肥料氮利用率和农学效率的提高作用尚未达显著水平。

## 4 结论

将玉米秸秆制成生物炭后施于土壤, 比直接还田可更有效地提高土壤碱解氮、土壤微生物量碳含量及脲酶活性, 促进土壤养分供应与作物需求协调, 连续两年添加玉米秸秆炭效果好于一年, 需要进行田间试验以观测长期添加玉米秸秆炭对土壤肥力和肥料氮农学效率持续提高的影响。

### 参考文献:

- [1] 农业部科技教育司. 全国农作物秸秆资源调查与评价报告 [R]. 北京: 农业部科技教育司, 2010.  
Ministry of Agriculture of China. Survey and appraisal report of national crop straw resources [R]. Beijing: Ministry of Agriculture of China, 2010.
- [2] 王雪莹. 东北地区土壤有机质含量分布情况分析[J]. 现代农业科学, 2008, 15(12): 36-40.  
Wang X Y. Analysis on the content of soil organic matter of the northeast plain [J]. Modern Agricultural Sciences, 2008, 15(12): 36-40.
- [3] 张建峰. 东北地区秸秆降解工程菌的选育及速腐菌剂的研制 [D]. 吉林: 吉林农业大学博士学位论文, 2012.  
Zhang J F. Breeding of engineering bacteria and developing of speed rot agents using for straw degradation in Northeast China [D]. Jilin: PhD dissertation of Jilin Agricultural University, 2011.
- [4] 倪进. 焚烧秸秆对城市空气质量的影响及对策[J]. 污染防治技术, 2007, 20(3): 74-75.  
Ni J. Influence of straw burning on urban air quality and its countermeasures [J]. Pollution Control Technology, 2007, 20(3): 74-75.
- [5] 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 X S, Geng Z C, She D, et al. Implications of production and agricultural utilization of biochar and its international dynamics [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(2): 1-7.
- [6] 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.  
Guo W, Chen H X, Zhang Q Z, et al. Effects of biochar application on total nitrogen and alkali-hydrolyzable nitrogen content in the topsoil of the high-yield cropland in north China Plain [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(3): 425-428.
- [7] Piccolo A, Pietramellara G, Mbagwu J S C. Effects of coal derived humic substances on water retention and structural stability of Mediterranean soils [J]. Soil Use and Management, 1996, 12(4): 209-213.
- [8] 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(1-2): 275-290.
- [9] 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.  
He X S, Zhang S Q, She D, et al. Effects of biochar on soil and fertilizer and future research [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(15): 16-25.
- [10] Chan K Y, 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): 629-634.
- [11] Yamato M, Okimori Y, Wibowo I F, et al. Effects of the application of charred bark of Acacia mangium on the yield of maize, cowpea and peanut, and soil chemical properties in South Sumatra, Indonesia [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2006, 52(4): 489-495.
- [12] Lehmann J. Bio-energy in the black [J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2007, 5(7): 381-387.
- [13] 王晓龙, 胡峰, 李辉信, 等. 红壤小流域不同土地利用方式对土壤微生物量碳氮的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(1): 143-147.  
Wang X L, Hu F, Li H X, et al. Effects of different land used patterns on soil microbial biomass carbon and nitrogen in small red soil watershed [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(1): 143-147.
- [14] Liang B, Lehmann J, Sohi S P, et al. Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil [J]. Organic Geochemistry, 2010, 41(2): 206-213.
- [15] 关松荫. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.  
Guan S Y. Soil enzyme and research methods [M]. Beijing: Agriculture Press, 1986.
- [16] 冯爱青, 张民, 李成亮, 等. 秸秆及秸秆黑炭对小麦养分吸收及棕壤酶活性的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(15): 1-12.
- [17] Feng A Q, Zhang M, Li C L, et al. Effects of straw and straw biochar on wheat nutrient uptake and enzyme activities in brown soil [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(15): 1-12.
- [18] 张玉兰, 陈利军, 段争虎, 等. 荧光光谱法测定生物炭/秸秆输入土壤后酶活性的变化[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(2): 455-459.  
Zhang Y L, Chen L J, Duan Z H, et al. Change in soil enzymes activities after adding biochar or straw by fluorescent microplate method [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(2): 455-459.
- [19] Liang B, Lehmann J, Solomon D, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70: 1719-1730.
- [19] 高海英, 何绪生, 陈心想, 等. 生物炭及炭基硝酸铵肥料对土壤化学性质及作物产量的影响[J]. 农业环境科学学报,



- 2012, 31(10): 1948–1955.
- Gao H Y, He X S, Chen X X, *et al.* Effect of biochar and biochar – based ammonium nitrate fertilizers on soil chemical properties and crop yield [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(10): 1948–1955.
- [20] Lehmann J, da Silva J P, Steiner C, *et al.* Nutrient availability and leaching in an archaeological anthrosol and a ferralsol of the Central Amazon basin: Fertilizer, manure and charcoal amendments [J]. *Plant and Soil*, 2003, 249(2): 343–357.
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- Lu R C. Soil agricultural chemical analysis method [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [22] 吴金水, 林启美. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- Wu J S, Lin Q M. Soil microbial biomass-methods and application [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006.
- [23] Zwieten L V, 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.
- [24] 章明奎, Walelign D Bayou, 唐红娟. 生物质炭对土壤有机质活性的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(2): 127–131.
- Zhang M K, Walelign D Bayou, Tang H J. Effect of biochar's application on active organic carbon fractions in soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(2): 127–131.
- [25] 张晗芝. 生物炭对土壤肥力、作物生长及养分吸收的影响[D]. 重庆: 西南大学硕士学位论文, 2011.
- Zhang H Z. Effects of biochar amendment on soil fertility, crop growth and nutrient uptake [D]. Chongqing: MS thesis of Southwest University, 2011.
- [26] 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.
- Zeng A, Liao Y C, Zhang J L, *et al.* Effects of biochar on soil moisture, organic carbon and available nutrient contents in Manural Loessial Soils [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(5): 1009–1015.
- [27] 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.
- Chen X X, He X S, Geng Z C, *et al.* Effects of biochar on selected soil chemical properties and on wheat and millet yield [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(20): 6534–6542.
- [28] 高德才, 张蕾, 刘强, 等. 旱地土壤施用生物炭减少土壤氮损失及提高氮素利用率[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(6): 54–61.
- Gao D C, Zhang L, Liu Q, *et al.* Application of biochar in dryland soil decreasing loss of nitrogen and improving nitrogen using rate [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(6): 54–61.
- [29] 陈红霞, 杜章留, 郭伟, 等. 华北集约农田施用生物质炭对土壤容重, 阳离子交换量和颗粒有机质含量的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(11): 2930–2934.
- Chen H X, Du Z L, Guo Wei, *et al.* Effects of biochar amendment on cropland soil bulk density, cation exchange capacity and particulate organic matter content in the North China Plain[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(11): 2930–2934.
- [30] Lehmann J, Joseph S. Biochar for environmental management: science and technology[M]. London, UK: Earthscan Ltd, 2009.
- [31] Knicker H. How does fire affect the nature and stability of soil organic nitrogen and carbon? A review [J]. *Biogeochemistry*, 2007, 85: 91–118.
- [32] Kolb S E, Fermanich K J, Dornbush M, *et al.* Effect of charcoal quantity on microbial biomass and activity in temperate soils [J]. *Soil Science Society of American Journal*, 2009, 73(4): 1173–1181.
- [33] Kolton M, Harel Y M, Pasternak Z, *et al.* Impact of biochar application to soil on the root – associated bacterial community structure of fully developed greenhouse pepper plants [J]. *Applied Environment Microbiology*, 2011, 77(14): 4924–4930.
- [34] Lehmann J, Rillig M C, Thies J, *et al.* Biochar effects on soil biota – A review [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43: 1812–1836.
- [35] Topoliantz S, Ponge J F, Ballof S. Manioc peel and charcoal: a potential organic amendment for sustainable soil fertility in the tropics [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2005, 41(1): 15–21.
- [36] Singh B P, Hatton B J, Singh B, *et al.* Influence of biochars on nitrous oxide emission and nitrogen leaching from two contrasting soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39: 1224–1235.
- [37] 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.
- Chen X X, Geng Z C, Wang S, *et al.* Effects of biochar amendment on microbial biomass and enzyme activities in loess soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(4): 751–758.
- [38] 黄剑. 生物炭对土壤微生物量及土壤酶活性的影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院硕士学位论文, 2012.
- Huang J. The effect of biochar application on soil microbial biomass and soil enzymes [D]. Beijing: MS thesis of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012.
- [39] 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(2): 205–212.
- [40] 曲晶晶, 郑金伟, 郑聚锋, 等. 小麦秸秆生物质炭对水稻产量及晚稻氮素利用率的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2012, 28(3): 288–293.
- Qu J J, Zheng J W, Zheng J F, *et al.* Effects of wheat – straw – based biochar on yield of rice and nitrogen use efficiency of late rice [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2012, 28(3): 288–293.