

ISSN 0564-3929

Acta Pedologica Sinica 土壤学报

Turang Xuebao



中国土壤学会
科学出版社

主办
出版

2015

第 52 卷 第 4 期

Vol.52 No.4



土壤学报

(Turang Xuebao)



第 52 卷 第 4 期 2015 年 7 月

目 次

综述与评论

亚硝酸盐型甲烷厌氧氧化微生物生态学研究进展····· 沈李东 (713)

土壤科学与现代农业

近30年江西省耕地土壤全氮含量时空变化特征····· 赵小敏 邵 华 石庆华等 (723)

北京市土壤重金属潜在风险预警管理研究····· 蒋红群 王彬武 刘晓娜等 (731)

秸秆深还对土壤团聚体中胡敏酸结构特征的影响····· 朱 姝 窦 森 陈丽珍 (747)

生物炭添加对酸化土壤中小白菜氮素利用的影响····· 俞映惊 薛利红 杨林章等 (759)

水肥对高产无性系油茶果实产量的影响····· 张文元 郭晓敏 涂淑萍等 (768)

研究论文

基于VRML的土壤电导率三维空间变异性虚拟现实建模研究····· 李洪义 顾呈剑 但承龙等 (776)

不同样点数量对土壤有机质空间变异表达的影响····· 海 南 赵永存 田 康等 (783)

基于稳定同位素的土壤水分运动特征····· 靳宇蓉 鲁克新 李 鹏等 (792)

中国玉米区域氮磷钾肥推荐用量及肥料配方研究····· 吴良泉 武 良 崔振岭等 (802)

不同施肥方式下滩涂围垦农田土壤有机碳及团聚体有机碳的分布····· 候晓静 杨劲松 王相平等 (818)

长期施肥对浙江稻田土壤团聚体及其有机碳分布的影响····· 毛霞丽 陆扣萍 何丽芝等 (828)

不同时期施用生物炭对稻田N₂O和CH₄排放的影响····· 李 露 周自强 潘晓健等 (839)

秸秆生物炭对潮土作物产量和土壤性状的影响····· 刘 园 M. Jamal Khan 靳海洋等 (849)

单一电解质体系下恒电荷土壤胶体扩散双电层中滑动层厚度的计算····· 丁武泉 朱启红 王 磊等 (859)

化工厂遗留地铬污染土壤化学淋洗修复研究····· 李世业 成杰民 (869)

离子型稀土矿尾砂地植被恢复障碍因子研究····· 刘文深 刘 畅 王志威等 (879)

辽东与山东半岛土壤中有机氯农药残留特征研究····· 朱英月 刘全永 李 贺等 (888)

长期冬种绿肥改变红壤稻田土壤微生物生物量特性····· 高嵩涓 曹卫东 白金顺等 (902)

豆科间作对番茄产量、土壤养分及酶活性的影响····· 代会会 胡雪峰 曹明阳等 (911)

研究简报

蚕豆根系分泌物中氨基酸含量与枯萎病的关系····· 董 艳 董 坤 汤 利等 (919)

小麦与蚕豆间作对根际真菌代谢功能多样性的影响····· 胡国彬 董 坤 董 艳等 (926)

不同年限毛竹林土壤固氮菌群落结构和丰度的演变····· 何冬华 沈秋兰 徐秋芳等 (934)

长期不同施肥模式下砂姜黑土的固碳效应分析····· 李 玮 孔令聪 张存岭等 (943)

果园生草对¹⁵N利用及土壤累积的影响····· 彭 玲 文 昭 安 欣等 (950)

封面图片: 离子型稀土矿废弃地全景 (由汤叶涛、刘文深提供)

DOI: 10.11766/trxb201412020611

秸秆生物炭对潮土作物产量和土壤性状的影响*

刘园^{1, 2} M. Jamal Khan^{2, 3} 靳海洋¹ 白雪莹¹ 谢迎新^{1†} 赵旭^{2†}
王慎强² 王晨阳¹

(1 国家小麦工程技术研究中心, 小麦玉米作物学国家重点实验室, 河南粮食作物协同创新中心, 河南农业大学农学院, 郑州 450002)

(2 中国科学院南京土壤研究所, 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 常熟农业生态系统国家野外科学观测研究站, 南京 210008)

(3 Department of Soil and Environmental Sciences, The University of Agriculture, 25000 Peshawar, Pakistan)

摘要 将秸秆转化为高碳含量和稳定性的生物炭施入土壤无疑可提升碳库, 但也会影响土壤性状和作物生长。为评估秸秆生物炭在北方潮土 (pH 8.30) 的应用潜力, 设每季生物炭施用量为 0 (对照)、2.25 (低量)、6.75 (中量) 和 11.3 t hm⁻² (高量) (四季后总施炭量分别为 0、9、27、45.2 t hm⁻²) 4 个处理, 通过 2 年小麦-玉米轮作小区试验, 观测了作物产量、籽粒品质、氮素吸收和土壤矿质氮、pH、容重、水分的变化。结果显示, 中量生物炭处理下第四季玉米产量增加 8.43%; 中、高量生物炭处理下四季作物总产量提高 4.54%~4.92%。生物炭对小麦和玉米籽粒蛋白质、小麦湿面筋含量及容重无负面影响。作物地上部分氮素吸收、土壤矿质氮含量和 pH 各处理间无明显变化。中、高量处理下四季作物后土壤容重降低 2.99%~10.4%, 含水量增加 10.3%~20.2%, 最大持水量提高 14.5%~15.0%。表明中、高量秸秆生物炭每季还田对作物有小幅增产作用, 且不影响籽粒品质。土壤容重、水分、持水量等物理性状的改善可能是作物增产的重要原因。

关键词 秸秆生物炭; 作物产量; 籽粒品质; 矿质氮; 土壤容重; 土壤水分

中图分类号 S158.3 **文献标识码** A

近年来, 生物炭被广泛用于农业固碳和土壤培肥等领域研究^[1-2]。目前国际上对生物炭还田的固碳作用趋于一致, 仅在固碳潜力大小方面存在争议, 这主要与基于不同试验背景下获取的生物炭降解参数各异有关^[3]。热带亚热带酸性土壤上施用生物炭往往对土壤肥力有提升作用^[4], 这是因为生物炭普遍能降低土壤酸度, 增加土壤阳离子交换量, 提高土壤元素有效性^[5-6]等; 但在干旱少雨的温带土壤上生物炭对土壤肥力的影响研究相对不多, 结论也不尽相同, 对作物生长的积极或无作用甚至消极作用均有报道^[6-9], 这可能因生物炭性质、土壤以及试验条件等而各异。

华北平原多为中碱性或石灰性土壤, 其中以潮

土最具代表性, 约占全区耕地面积的 60%^[10-11]。Zhang 等^[9]曾通过 1 季小区试验报告了施用秸秆生物炭可增加潮土有机碳, 提高玉米产量, 减少温室气体排放, 指出土壤容重降低和氮素利用率提高是作物增产的重要原因。Zhao 等^[12]通过 2 季盆栽试验再次证明了秸秆生物炭每季连续施用对潮土有机碳库的提升和土壤肥力的促进作用, 并指出土壤磷和钾有效性增加也是作物生长促进的主要原因。鉴于本身的高含碳量和稳定性^[13], 秸秆生物炭提升潮土碳库的作用毋庸置疑。尽管两项研究均证明了秸秆生物炭对作物生长的促进作用, 但原因解释却不同。这暗示, 潮土上作物生长对秸秆生物炭施用积极响应的原因不止上述, 需要通过长期定位试验

* 国家自然科学基金项目 (41001147, 41271312)、中国科学院南京土壤研究所知识创新项目 (Y1120000010)、土壤与农业可持续发展国家重点实验室优秀青年人才项目 (Y412010006) 资助

† 通讯作者, 1. E-mail: xieyingxin@henau.edu.cn, 2. E-mail: zhaoxu@issas.ac.cn

作者简介: 刘园 (1989—), 男, 河南内乡人, 硕士研究生, 主要从事秸秆生物炭的农田应用研究。E-mail: liuyuan521168@163.com

收稿日期: 2014-12-02; 收到修改稿日期: 2015-03-10

进一步探究。

中国年产秸秆7亿~8亿t,利用率却不足50%,有超过30%秸秆被丢弃或焚烧,造成资源浪费及环境污染等问题^[12, 14]。若能将每季作物收获时秸秆转化为生物炭再返还土壤,不仅可避免秸秆焚烧,而且可增加土壤固碳量,也为秸秆资源综合利用提供有效途径。鉴于上述,自2011年10月小麦季开始,作者在典型潮土区布置了田间试验以评估秸秆生物炭每季还田对固碳减排和土壤肥力的影响。本文报道了两年四季秸秆生物炭连续还田下小麦/玉米产量和品质、氮素吸收及土壤主要矿质氮(铵态氮和硝态氮)、pH、容重、持水量及水分的变化,以期对秸秆炭化还田在北方旱作区的应用提供部分科学数据。

1 材料与方 法

1.1 供试土壤及生物炭

试验地位于河南省封丘县中国科学院封丘农业生态实验站(35°00' N, 114°24' E)内。该地区毗邻黄河,处于黄淮海平原中部,属暖温带大陆性季风气候,年均气温13.5~14.5℃(最低和最高温度分别出现在1月和7月),无霜期214 d,年均蒸发量为1 860 mm,年均降水量625 mm(降雨量最大月份发生在7、8、9月),为典型的小麦(10月—次年5月)/玉米(6月—9月)轮作区。该地区土壤类型为黄河冲积物发育的砂质潮土,黏粒、粉粒和砂粒分别占22.6%、31.1%和46.3%。土壤pH为8.30,全氮含量0.79 g kg⁻¹,有机质含量11.2 g kg⁻¹,Mehlich III提取有效P、K、Na和Mg含量分别为57.3、92.1、17.8和340 mg kg⁻¹,有效Ca为3.92 g kg⁻¹。

供试生物炭由水稻秸秆通过基于沼气为热解能源的炭化炉在500℃条件下制备^[15],前4季生物炭平均性质如下:其pH为10.5,有机碳和全氮含量为515 g kg⁻¹和10.3 g kg⁻¹,灰分含量为371 g kg⁻¹,全量P、K、Na、Ca和Mg含量分别为4.01、60.4、3.22、10.1和3.82 g kg⁻¹,Mehlich III提取有效P、K、Na、Ca和Mg含量分别为1.71、49.2、2.27、4.19和1.75 g kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验于2011年10月小麦季开始,至2013年9月玉米收获时,已完成2个完整小麦/玉米轮作周

期。设置4个生物炭处理,每季生物炭还田量分别为0(BC0;对照)、2.25(BC2.25;低量)、6.75(BC6.75;中量)和11.3 t hm⁻²(BC11.3;高量)(四季总还田量分别为0、9、27、45.2 t hm⁻²)。各处理重复3次,共12个小区。各小区面积为16 m²,随机排列。每季各小区氮磷钾肥用量及施用方法同当地农民习惯一致,分别为N:240 kg hm⁻²(小麦季)/200 kg hm⁻²(玉米季)、P₂O₅:150 kg hm⁻²、K₂O:90 kg hm⁻²。氮肥两次施入,基追比为6:4。追肥均施于拔节期,麦季为撒施+灌水,玉米季为穴施+灌水。磷钾肥作基肥一次性施入。上季作物收获后移除所有秸秆,将生物炭和基肥均匀撒于已平整的小区,翻入0~20 cm土中后灌水,通过水表计量以确保各小区灌水量一致。四季作物均选用当地当季主推品种:两个小麦季均为新麦26,2012年玉米季为登海605(超级玉米),2013年玉米季改为产量稳定、抗逆性强的郑单958。其他管理措施同当地大田。

1.3 观测指标

每季作物收获时按小区单打单收,称重后通过含水量(80℃下烘干48 h)以及谷草比计算籽粒和秸秆产量,并取样用于室内氮含量及籽粒品质分析。作物籽粒和秸秆全氮含量用H₂SO₄-H₂O₂消煮—凯氏定氮法测定^[16]。小麦和玉米籽粒蛋白质含量按照作物品质通用鉴定方法分别用相应籽粒全氮含量(%)乘以5.7(小麦)或6.25(玉米)得到。小麦湿面筋含量用近红外谷物籽粒分析仪(InfratecTM 1241, FOSS, 瑞士)测定。小麦籽粒容重用容重器(HGT-1000A, 上海东方衡器有限公司, 中国上海)测定。供试土壤和生物炭基本性质指标按Zhao等^[12]方法测定。

在作物生长季一般每两周(施肥或下雨事件加密采样)取各小区土壤用于矿质氮分析(按照五点取样法用土钻取0~20 cm土层土样组成相应各小区混合样)。每次采集鲜土样迅速带回实验室,分成两份,一份用于水分含量(重量法,105℃烘干48 h)测定,另一份用于矿质氮提取(2 mol L⁻¹ KCl; 土水质量体积比1:5;震荡1 h)。提取液采用紫外分光光度法在双波长(220 nm和275 nm)下直接测定硝态氮浓度,采用靛酚蓝比色法(625 nm)测定铵态氮浓度。第四季作物(2013年玉米)收获后用环刀法分别测定各小区耕层土壤容重和田间持水量^[17]。

1.4 数据处理

所有数据采用Microsoft excel 2010软件进行处理, Origin 8.0软件进行绘图, SPSS 19.0软件进行数据统计分析。其中表中数据表示平均值 (AVE) \pm 标准偏差 (SD), 图中误差线表示标准偏差。

2 结 果

2.1 作物籽粒产量和品质

与不施生物炭对照处理 (BC0) 相比, 施用生物炭处理 (BC2.25、BC6.75和BC11.3) 下前三季作物产量 (2011/2012小麦、2012玉米及

2012/2013小麦) 仅有增产趋势, 并没有统计学差异 ($p>0.05$); 2013年玉米季, BC6.75处理下籽粒产量有所提高, 增幅为8.43% ($p<0.05$)。BC6.75和BC11.3处理下四季作物总产量与对照相比显著提高了4.54%~4.92% ($p<0.05$) (表1)。因2013年玉米品种为常规品种郑单958, 因此各处理下其产量整体均低于2012年玉米季的超级品种登海605。

除BC11.3处理下2012/2013年小麦籽粒蛋白质含量、BC6.75和BC11.3处理下2011/2012年小麦籽粒容重与对照相比略有提高外 ($p<0.05$), 施加生物炭对小麦和玉米籽粒蛋白质含量 (表2)、小麦湿面筋和容重并无太大影响 (表3)。

表1 生物炭每季连续还田对小麦和玉米籽粒产量的影响

Table 1 Effects of successive biochar application on grain yields of wheat and maize in the two cycles of wheat/maize rotation (t hm^{-2})

处理 Treatments	2011/2012小麦 2011/2012 Wheat	2012玉米 2012 Maize	2012/2013小麦 2012/2013 Wheat	2013玉米 2013 Maize	四季总产量 Total yield
BC0	5.72 \pm 0.17a	10.74 \pm 0.54a	5.78 \pm 0.24a	7.24 \pm 0.33b	29.49 \pm 0.95b
BC2.25	6.00 \pm 0.23a	11.12 \pm 0.23a	5.81 \pm 0.02a	7.72 \pm 0.37ab	30.65 \pm 0.71ab
BC6.75	6.14 \pm 0.26a	10.91 \pm 0.67a	6.04 \pm 0.07a	7.85 \pm 0.28a	30.94 \pm 0.44a
BC11.3	6.01 \pm 0.33a	11.34 \pm 0.18a	5.70 \pm 0.36a	7.79 \pm 0.19ab	30.83 \pm 0.39a

注: 同一列数字后不同字母表示有显著差异 ($p<0.05$), 下同 Note: Values followed by different letters within the same column mean significant difference ($p<0.05$). The same below

表2 生物炭每季连续还田对小麦和玉米籽粒蛋白质含量的影响

Table 2 Effects of successive biochar application on protein content in grains of wheat and maize in the two cycles of wheat/maize rotation (%)

处理 Treatments	2011/2012小麦 2011/2012 Wheat	2012玉米 2012 Maize	2012/2013小麦 2012/2013 Wheat	2013玉米 2013 Maize
BC0	14.61 \pm 0.84a	8.73 \pm 0.41a	16.05 \pm 0.33b	8.51 \pm 0.86a
BC2.25	14.93 \pm 0.30a	8.65 \pm 0.82a	16.09 \pm 0.18b	8.25 \pm 0.30a
BC6.75	14.87 \pm 0.12a	8.60 \pm 0.30a	16.78 \pm 0.71ab	9.18 \pm 2.07a
BC11.3	15.10 \pm 0.24a	8.65 \pm 0.34a	17.16 \pm 0.38a	8.59 \pm 0.53a

表3 生物炭每季连续还田对小麦籽粒湿面筋含量和容重的影响

Table 3 Effects of successive biochar application on wet gluten content and bulk weight of wheat grain

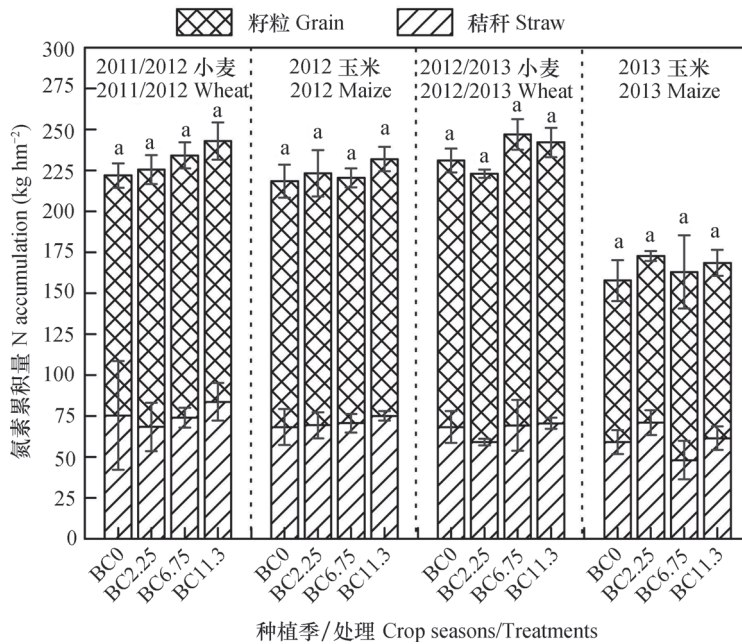
处理 Treatments	2011/2012小麦 2011/2012 Wheat		2012/2013小麦 2012/2013 Wheat	
	湿面筋Wet gluten (%)	容重Bulk weight (g L^{-1})	湿面筋Wet gluten (%)	容重Bulk weight (g L^{-1})
BC0	29.40 \pm 0.44a	792.7 \pm 0.88b	35.10 \pm 0.87a	765.5 \pm 2.35a
BC2.25	29.07 \pm 0.61a	792.6 \pm 1.36b	34.87 \pm 1.30a	770.5 \pm 6.81a
BC6.75	29.73 \pm 1.80a	796.0 \pm 2.19a	34.97 \pm 0.38a	769.4 \pm 5.23a
BC11.3	29.87 \pm 0.81a	796.4 \pm 0.86a	34.93 \pm 0.49a	765.9 \pm 1.73a

2.2 作物氮素吸收和土壤耕层矿质氮

四种生物炭处理下每季作物地上部分(籽粒+秸秆)的氮素吸收累积量在158~247 kg hm⁻²范围:其中,籽粒氮素吸收累积量为99~178 kg hm⁻²,占58.9%~73.5%;秸秆氮素吸收累积量为48~84 kg hm⁻²,占26.5%~41.1%。每季作物氮素累积量各处理间并无统计学差异($p>0.05$) (图1)。四季作物地上部分总氮素吸收累积量在

829~886 kg hm⁻²范围,施生物炭各处理及对照处理间也无明显差异($p>0.05$)。但连续四季BC6.75和BC11.3生物炭处理后四季作物总籽粒氮素累积量与不施生物炭对照处理BC0相比却明显提高6.55%~7.98% ($p<0.05$) (图2)。2013年玉米地上部分氮素吸收累积量低于2012年玉米季,其原因与品种更换有关(图1)。

各处理下四季作物生长期间耕层土壤硝态氮及



注:不同字母表示同一作物季中各处理间的显著差异,下同 Note: Different letters indicate significant difference at $p<0.05$ in the same season. The same below

图1 生物炭处理下每季小麦和玉米地上部分氮素吸收累积量

Fig. 1 Nitrogen accumulation in plant shoots of wheat and maize as affected by biochar application

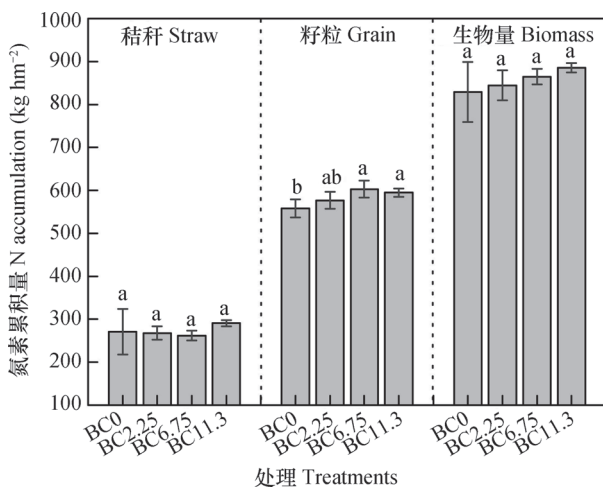


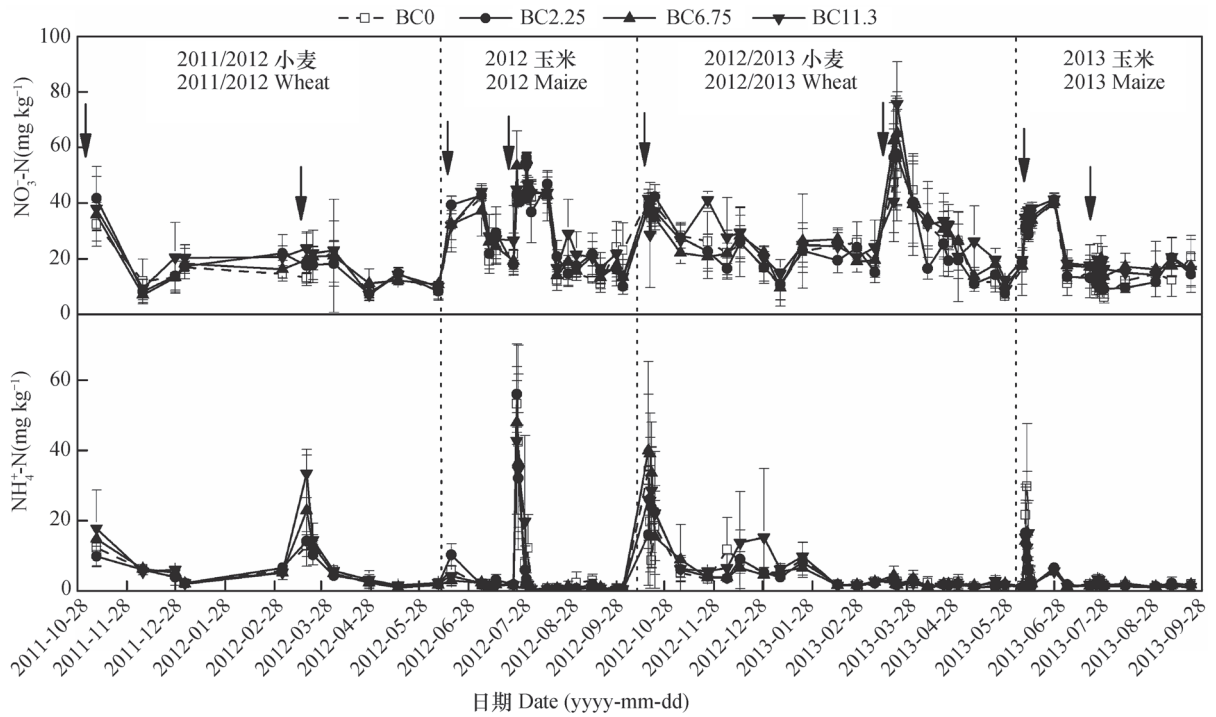
图2 生物炭处理下四季作物地上部分氮素总累积量

Fig. 2 Total nitrogen uptake by plant shoots over four crop seasons as affected by biochar application

铵态氮动态变化趋势一致,含量在6.22~75.7 mg kg⁻¹和0.29~52.0 mg kg⁻¹范围。施生物炭处理与对照相比无明显差异($p>0.05$) (图3)。为了进一步确定生物炭施加是否对土壤矿质氮有影响,通过时间加权平均方法计算了各作物季平均硝态氮和铵态氮含量(图4),但结果表明四个生物炭处理间仍无统计学差异($p>0.05$)。各处理下土壤矿质氮均以硝态氮为主,在施肥后数量进一步增加;铵态氮则仅在施肥后出现短暂较高峰值,大部分时间均保持在5.00 mg kg⁻¹以下(图3)。

2.3 土壤pH、容重、水分含量和田间持水量

尽管所用秸秆生物炭的pH(10.5)高于石灰性潮土本身(pH 8.30),但生物炭施加并未明显提高耕层土壤pH,即使是高量生物炭(BC11.3)



箭头指示各作物季氮肥施用时间 The arrows indicate N fertilization

图3 生物炭处理下四季作物生育期耕层土壤硝态氮和铵态氮的时间变化

Fig. 3 Effects of successive biochar application on soil $\text{NO}_3^- \text{N}$ and $\text{NH}_4^+ \text{N}$ concentrations (0 ~ 20 cm soil) during the 2 cycles of wheat/maize rotation

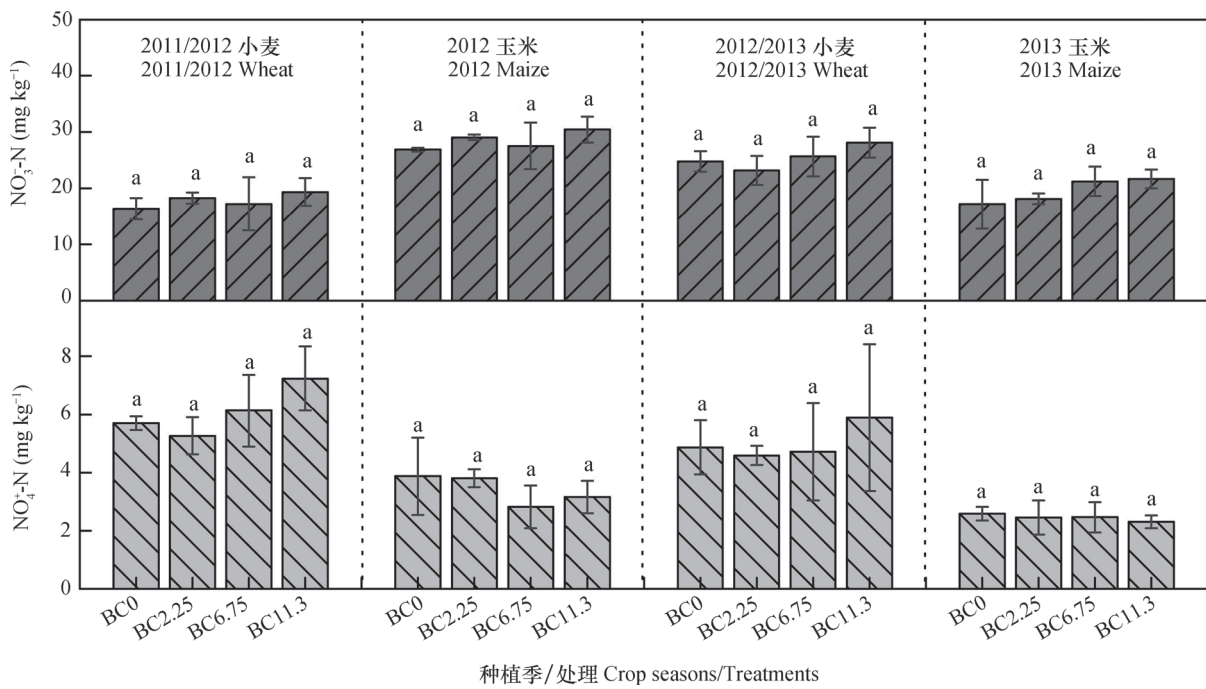


图4 生物炭处理下各季作物生育期间耕层土壤平均硝态氮和铵态氮含量

Fig. 4 Average concentrations of $\text{NO}_3^- \text{N}$ and $\text{NH}_4^+ \text{N}$ in the topsoil (0 ~ 20 cm) during each crop season as affected by biochar application

连续施加四季（总生物炭施入量达 45.2 t hm^{-2} ）下，土壤pH仍无明显增加。相反，由于本身较低的容重和大孔隙，生物炭施入导致土壤容重逐步降低。BC11.3处理下连续种植四季后，土壤容重较不施生物炭对照显著降低了10.4% ($p < 0.05$)（表4）。

基于各季作物生育期土壤水分观测数据的时间加权平均水分含量可看出（图5），前两季各处理间并没有明显差别；但至第三季（2012/2013小

麦），高量生物炭（BC11.3）处理土壤水分含量明显增加 ($p < 0.05$)；至第四季（2013玉米），各生物炭处理（BC2.25、BC6.75和BC11.3）土壤水分含量均显著高于不施生物炭处理 ($p < 0.05$)，增幅分别为5.16%、10.3%和20.2%。四季作物结束后土壤田间持水量也随生物炭施入量增加而增加（表4）。BC6.75和BC11.3处理下其土壤田间持水量与对照相比显著提高了14.5%和15.0% ($p < 0.05$)。

表4 每季生物炭连续还田对四季后耕层土壤pH、土壤容重和田间持水量的影响

Table 4 Effects of successive biochar application on pH, soil bulk density and water holding capacity of topsoil (0~20 cm)

处理 Treatments	土壤pH Soil pH	土壤容重 Soil bulk density (g cm^{-3})	田间持水量 Water holding capacity (g kg^{-1})
BC0	$8.32 \pm 0.06\text{a}$	$1.34 \pm 0.05\text{a}$	$160.4 \pm 1.8\text{b}$
BC2.25	$8.31 \pm 0.06\text{a}$	$1.33 \pm 0.07\text{a}$	$161.5 \pm 9.0\text{b}$
BC6.75	$8.34 \pm 0.06\text{a}$	$1.30 \pm 0.07\text{ab}$	$183.6 \pm 16.1\text{a}$
BC11.3	$8.41 \pm 0.06\text{a}$	$1.20 \pm 0.05\text{b}$	$184.5 \pm 2.7\text{a}$

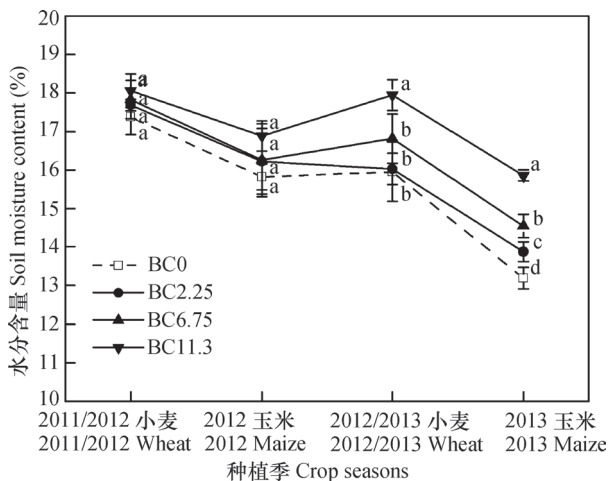


图5 生物炭处理下作物生长季土壤耕层平均水分含量变化

Fig. 5 Effects of successive biochar application on moisture content in topsoil (0~20 cm) during the 2 cycles of wheat/maize rotation

3 讨论

生物炭具有独特的理化性质，在其施入土壤后提升稳定性碳库的同时，也会明显改变土壤其他理化生物学性质进而对植物生长产生影响^[3, 18]。生物炭应用于酸性红壤不仅可迅速提升土壤碳库，也能较为全面改善土壤养分状况，消除障碍因子从而提高生产力。然而在较为肥沃的温带农业土壤上，

由于土壤pH和养分含量相对较高，施用生物炭对作物生长的影响程度要弱于热带亚热带酸性土壤，甚至会出现生物炭导致土壤pH过高从而使土壤养分有效性降低^[19]、引入较高浓度多环芳香烃等有机污染物和铜锌铬等重金属产生毒害^[20]以及带入易分解有机碳组分而引起土壤微生物固氮^[21]等现象，可能对作物生长产生消极影响。然而，本研究中我们在华北平原潮土（pH 8.30）上并未发现上述生物炭抑制作物生长的现象（表1）。这一不同结果可能源于生物炭材料和土壤条件的差异^[6]。本研究中所采用的石灰性潮土本身缓冲性能较强，生物炭（pH 10.5）施入对土壤pH并无明显影响（表4）。此外，来自于农田秸秆制备的生物炭其有机或重金属污染物浓度要低于其他有机废弃物生物炭^[12, 22-23]，且秸秆生物炭具有很高的稳定性^[13, 18]，不易被微生物降解。因此，上述因生物炭施入引起土壤pH过高、污染物毒害或微生物争氮等对作物生长的抑制现象并未在本研究中出现。相反，当每季生物炭用量增加至 $6.75 \sim 11.3 \text{ t hm}^{-2}$ （四季总施入量： $27.0 \sim 45.2 \text{ t hm}^{-2}$ ）时，潮土上四季作物总产量较不施生物炭对照处理提高了4.54%~4.92% ($p < 0.05$)（表1）。尽管这一积极作用远低于生物炭对亚热带红壤上作物产量的促进程度^[6, 12]，但也说明生物炭对肥力较高的石灰性

潮土上作物生长仍有一定提升作用。我们的结果显示生物炭处理下每个作物生育期间土壤矿质氮（铵态氮和硝态氮）含量变化动态及四个作物季平均氮浓度与对照相比并无显著差别（图3，图4），相应作物地上部分氮素吸收累积量也未有明显增加（图2）。这表明，生物炭并未提高潮土上氮素的有效供应和吸收利用。Wang等^[7]曾在盆栽中发现20~50 t hm⁻²稻壳源生物炭处理下黄棕壤（pH 7.8）上硝态氮含量（小麦收获后）与对照（1.88 mg kg⁻¹）相比高出0.8~1.14 mg kg⁻¹，实际增加量并不大。这暗示，在外源氮素供应充足（本研究各处理均采用传统施氮量：小麦季240 kg hm⁻²，玉米季200 kg hm⁻²）和土壤矿质氮水平较高（图3）条件下，生物炭对土壤氮素的保持作用并不是潮土作物产量小幅增加的原因。

值得指出的是，我们通过对两年中每季作物全生育期土壤水分含量以及种植四季作物后土壤持水量的观测发现，相同灌溉和气候条件下每季2.25~11.3 t hm⁻²生物炭处理下土壤季节平均含水量与对照相比有所提高，且随作物季延续和生物炭用量增加其增幅越来越明显，至2014年玉米季可增加5.16%~20.2%（图5）；在6.75~11.3 t hm⁻²生物炭处理下田间持水量也提高了14.5%~15.0%（表4）。这一结果可能与生物炭本身孔隙度较高^[24]，具有较强的吸水能力（本研究所用秸秆生物炭饱和吸水量可达695%；未发表资料），施入土壤中增加了土壤孔隙度^[3]，从而有效调控土壤水毛细管运移和提高土壤水分保持能力有关。国外若干研究也曾在不同土壤上发现生物炭能够增加土壤水分保持能力从而促进作物生长。例如，Uzama等^[25]发现15~20 t hm⁻²奶牛粪生物炭施入沙质旱地土中，盆栽作物水分利用率显著提高了91%~139%，主要原因是生物炭明显减少了土壤水分渗漏损失；Herath等^[26]曾通过295 d的培养试验发现在淋溶土和火山灰土上施入7.18 t hm⁻²（以碳计）玉米秸秆生物炭后土壤体积含水量明显增加，且土壤有效含水量增加了19%~33%，并认为生物炭增加了土壤孔隙度从而提高土壤水分含量。众所周知，干旱缺水是限制华北平原农业生产的关键因子，灌溉是提高养分利用效率和促进作物增产的主要措施。因此潮土水分保持能力的提高可能是本研究中生物炭促进作物生长和小幅增产的主要原因。此外，生物炭施入后土壤结构的改善（如降低

土壤容重，增加通气性；表4）也可能为功能微生物繁荣提供相对较好的栖息环境，提高了土壤养分周转和供应能力，进而促进作物生长^[27]。

两个小麦/玉米轮作周期内，每季11.3 t hm⁻²秸秆生物炭连续施入并未造成作物减产，反而能通过改善土壤水分和结构状况等进而提升土壤肥力，小幅提升作物生长及产量，同时对作物籽粒品质没有副作用。按照已发表资料秸秆生物炭的产出比30%^[15]计算，每季11.3 t hm⁻²秸秆生物炭施用相当于消纳了37.7 t hm⁻²（约每亩2 500 kg）秸秆还田量。显然，生产实践中在旱地土壤上如此高的秸秆量直接还田是不可能实现的。相反，将秸秆炭化后还田却仍有一定积极效应。这暗示，除土壤固碳和肥力提升外，秸秆炭化连续还田措施可能也为秸秆资源优化管理和多元化综合利用提供潜在有效途径。尽管如此，该措施在华北平原土壤长期应用的综合农学和环境效应（如产量经济效益、固碳减排作用、养分利用损失等）仍待通过长期定位观测进一步科学评估。

4 结 论

2年4季的小麦/玉米轮作田间小区试验结果显示，6.75~11.3 t hm⁻²秸秆生物炭每季连续还田下，石灰性潮土上作物仍有小幅增产，且籽粒品质不受影响。在传统一致水肥管理条件下，生物炭相应施加量并未提高耕层土壤矿质氮含量和作物地上部分氮素累积量。相反，6.75~11.3 t hm⁻²生物炭连续施用四季后耕层土壤容重有所降低，土壤水分含量和田间持水量显著增加，间接表明施用生物炭后土壤通气条件和水分状况的改善可能是生物炭促进潮土上作物生长的重要原因。因此，下一步将基于本研究设置的秸秆炭化还田长期试验，深入探究石灰性潮土秸秆生物炭每季连续还田条件下土壤水分、养分运移特征及其他理化性状与作物生长之间的关系，从生物炭影响土壤肥力角度为评估秸秆炭化还田应用于华北平原农田固碳减排提供部分理论依据。

参 考 文 献

- [1] Schimmelpfennig S, Müller C, Grünhage L, et al. Biochar, hydrochar and uncarbonized feedstock application to permanent grassland-Effects

- on greenhouse gas emissions and plant growth. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 191: 39—52
- [2] Lehmann J, Joseph S. Biochar for environmental management: An introduction//Lehmann J, Joseph S. Biochar for environmental management: Science and technology. London: Earthscan, 2009: 1—12
- [3] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal-A review. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35 (4) : 219—230
- [4] Jeffery S, Verheijen F G A, van der Velde M, et al. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 144 (1) : 175—187
- [5] Haeefe S M, Konboon Y, Wongboon W, et al. Effects and fate of biochar from rice residues in rice-based systems. *Field Crops Research*, 2011, 121 (3) : 430—440
- [6] van Zwieten L, Kimber S, Morris S, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant and Soil*, 2010, 327 (1/2) : 235—246
- [7] 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. *Plant and Soil*, 2012, 360 (1/2) : 287—298
- [8] 张晗芝, 黄云, 刘钢, 等. 生物炭对玉米苗期生长、养分吸收及土壤化学性状的影响. *生态环境学报*, 2010, 19 (11) : 2713—2717. Zhang H Z, Huang Y, Liu G, et al. Effects of biochar on corn growth, nutrient uptake and soil chemical properties in seeding stage (In Chinese). *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19 (11) : 2713—2717
- [9] 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. *Plant and Soil*, 2012, 351 (1/2) : 263—275
- [10] 刘东海. 县域尺度农田养分空间变异与肥力综合评价——以深圳市为例. 北京: 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 2011. Liu D H. Study on spatial variability of farmland nutrient and comprehensive evaluation of soil fertility at county-Scale case study in Shenzhen County (In Chinese). Beijing: Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2011
- [11] 朱安宁, 张佳宝, 杨劲松, 等. 集约化种植条件下典型潮土区土壤氮素的演变特征. *土壤*, 2009, 41 (5) : 709—714. Zhu A N, Zhang J B, Yang J S, et al. Changes of soil nitrogen under intensive crop production in typical fluvo-aquic soil regions (In Chinese). *Soils*, 2009, 41 (5) : 709—714
- [12] 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. *Soil Use and Management*, 2014, 30 (3) : 311—319
- [13] Wang Y, Hu Y T, Zhao X, et al. Comparisons of biochar properties from wood material and crop residues at different temperatures and residence times. *Energy & Fuels*, 2013, 27 (10) : 5890—5899
- [14] Zeng X Y, Ma Y T, Ma L R. Utilization of straw in biomass energy in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2007, 11 (5) : 976—987
- [15] Wang S Q, Zhao X, Xing G X, et al. Large-scale biochar production from crop residue: A new idea and the biogas-energy pyrolysis system. *BioResources*, 2013, 8 (1) : 8—11
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [17] 中华人民共和国农业部. 土壤检测—第22部分: 土壤田间持水量的测定—环刀法. 北京. 中国农业出版社, 2010: 1—2. Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Soil testing-part 22: Cutting ring method for determination of field water holding capacity in soil (NY/T 1121.22-2010) (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2010: 1—2
- [18] Peng X, Ye L L, Wang C H, et al. Temperature- and duration-dependent rice straw-derived biochar: Characteristics and its effects on soil properties of an Ultisol in southern China. *Soil and Tillage Research*, 2011, 112 (2) : 159—166
- [19] Zheng R L, Cai C, Liang J H, et al. The effects of biochars from rice residue on the formation of iron plaque and the accumulation of Cd, Zn, Pb, As in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings. *Chemosphere*, 2012, 89 (7) : 856—862
- [20] 仓龙, 朱向东, 汪玉, 等. 生物质炭中的污染物含量及其田间施用的环境风险预测. *农业工程学报*, 2012, 28 (15) : 163—167. Cang L, Zhu X D, Wang Y, et al. Pollutant contents in biochar and their potential environmental risks for field application (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28 (15) : 163—167
- [21] 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. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13 (3): 525—532
- [22] Hossain M K, Strezov V, Nelson P F. Thermal characterisation of the products of wastewater sludge pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2009, 85 (1/2): 442—446
- [23] Park J H, Lamb D, Paneerselvam P, et al. Role of organic amendments on enhanced bioremediation of heavy metal (loid) contaminated soils. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 185 (2/3): 549—574
- [24] Downie A, Crosky A, Munroe P. Physical properties of biochar//Lehmann J, Joseph S. *Biochar for environmental management: Science and technology*. London: Earthscan, 2009: 13—32
- [25] Uzoma K C, Inoue M, Andry H, et al. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition. *Soil Use and Management*, 2011, 27 (2): 205—212
- [26] Herath H, Camps-Arbestain M, Hedley M. Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: An Alfisol and an Andisol. *Geoderma*, 2013, 209/210: 188—197
- [27] 窦森, 周桂玉, 杨翔宇, 等. 生物质炭及其与土壤腐殖质碳的关系. *土壤学报*, 2012, 49 (4): 796—802. Dou S, Zhou G Y, Yang X Y, et al. Biochar and its relation to humus carbon in soil: A short review (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49 (4): 796—802

EFFECTS OF SUCCESSIVE APPLICATION OF CROP-STRAW BIOCHAR ON CROP YIELD AND SOIL PROPERTIES IN CAMBOSOLS

Liu Yuan^{1, 2} M. Jamal Khan^{2, 3} Jin Haiyang¹ Bai Xueying¹ Xie Yingxin^{1†} Zhao Xu^{2†}
Wang Shenqiang² Wang Chenyang¹

(1 National Engineering Research Center for Wheat, State Key Laboratory of Wheat and Maize Crop Science, Collaborative Innovation Center of Henan Grain Crops, College of Agronomy, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

(2 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Changshu National Agro-Ecosystem Observation and Research Station, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(3 Department of Soil and Environmental Sciences, The University of Agriculture, Peshawar 25000, Pakistan)

Abstract Annually about 0.6 ~ 0.7 billion tons of crop straw is produced in China, however nearly half failed reasonable use, causing a series of problems such as resource waste and environmental pollution. Biochar, a pyrolyzed biomass high in carbon concentration and stable C, can improve soil carbon pool rapidly when applied to soil. The application of crop-straw derived biochar does not only increase carbon sequestration, reduce emission of greenhouse gases and improve soil quality, but also serve as an effective way to realize diversified comprehensive utilization of straw resource. Nevertheless, owing to its unique physico-chemical properties, biochar, once applied as a soil conditioner, would certainly alter soil property and then influence crop growth. In order to assess the potential of biochar in application to farmland of cambosols (pH 8.30) in North China Plain, a two-year field experiment (4 croppings or two cycles of wheat and maize crop rotation beginning in fall of 2011), was conducted in the Fengqiu Agro-ecological Experiment Station, Chinese Academy of Sciences, Fengqiu, Henan Province. The experiment was designed to have four treatments in biochar application rate, i.e. Treatment BC0 (0 t hm⁻²; as control or CK), Treatment BC2.25 (2.25 t hm⁻²; low level), Treatment BC6.75 (6.75 t hm⁻²; medium level) and Treatment BC11.3 (11.3 t hm⁻²; high level). The total biochar application rate of the 4 croppings was 0, 9, 27 and 45.2 t hm⁻², respectively. Each treatment had three replicates and the plots of the treatments were laid out in randomized complete block design (RCBD), 16 m² each in area. For wheat N 240 kg hm⁻² (urea), P₂O₅ 150 kg hm⁻² (triple superphosphate) and K₂O 90 kg hm⁻² (potassium sulfate) was applied, while

for maize N 200 kg hm⁻² and the same rate of P and K as for wheat were. P and K fertilizers were applied all at once as basal dressing, while N fertilizer was applied in split dosing, i.e. 60% as basal and the remaining 40% as side dressing at the jointing stage. The fertilizers were broadcast into the wheat fields, and applied in pits in the maize. The crops were irrigated after fertilizer application, and their subsequent water demand was met by rainfall. Crop yield, grain quality, N uptake, mineral N (NO₃⁻-N and NH₄⁺-N) in soil, pH, soil bulk density, water content and water holding capacity were monitored for all the plots. Results show that for the first three crops (wheat-maize-wheat) no statistically significant difference ($p>0.05$) in yield was found between CK and the other three treatments. When it came to the fourth cropping, the crop of maize increased its yield by 8.43% in Treatment BC6.75. The yield of the four crops were also increased by 4.92% and 4.54% in Treatments BC6.75 and BC11.3, respectively. Biochar application had no negative effects on protein content in wheat and maize grains or bulk density of and wet gluten content in wheat grain, however Treatment BC11.3 was found to have increased bulk density of and protein content in wheat grain. Although no significant effect of biochar addition was observed on nitrogen uptake and accumulation by shoots of the crops and soil mineral nitrogen and soil pH, nitrogen uptake and accumulation of the grains of the 4 crops increased by 6.55% ~ 7.98%, soil water content in the plough layer by 10.3% ~ 20.2%, and soil water holding capacity by 14.5% ~ 15.0%, yet, soil bulk density decreased by 2.99% ~ 10.4% in Treatments BC6.75 and BC11.3. All the findings suggest that successive application of crop straw derived biochar does have some positive effects on crop yield and no negative influence on grain quality, and that biochar has no significant effects on mineral nitrogen content in the topsoil or N uptake and utilization by crops. The beneficial effects of biochar of improving soil physical properties, like in bulk density, soil water content, and water holding capacity may be the major cause to yield increase after the application of biochar in cambosols. It is necessary to do some further in-depth studies on effect of long-term biochar application on soil water and nutrient dynamic and some other physico-chemical properties of cambosols and nutrient translocation in plant in the hope that the study may provide some scientific data to support extrapolation of the application of crop straw derived biochar in upland of North China.

Key words Straw-derived biochar; Crop yield; Grain quality; Mineral nitrogen; Soil bulk density; Soil moisture

(责任编辑: 汪枫生)

CONTENTS

Reviews and Comments

A review of study on microbial ecology of nitrite-dependent anaerobic methane oxidation Shen Lidong (721)

Soil Science and Modern Agriculture

- Spatio-temporal variation of total N content in farmland soil of Jiangxi Province in the past 30 years Zhao Xiaomin, Shao Hua, Shi Qinghua, et al. (730)
- Early warning of heavy metals potential risk governance in Beijing Jiang Hongqun, Wang Binwu, Liu Xiaona, et al. (745)
- Effect of deep application of straw on composition of humic acid in soil aggregates Zhu Shu, Dou Sen, Chen Lizhen (758)
- Effect of biochar application on pakchoi (*Brassica chinensis* L.) utilizing nitrogen in acid soil Yu Yingliang, Xue Lihong, Yang Linzhang, et al. (766)
- Effects of water and fertilizer on fruit yield of high-yielding clonal *Camellia oleifera* Abel Zhang Wenyuan, Guo Xiaomin, Tu Shuping, et al. (774)

Research Articles

- VRML-based virtual reality modeling of three dimensional variation of soil electrical conductivity Li Hongyi, Gu Chengjian, Dan Chenglong, et al. (781)
- Effect of number of sampling sites on characterization of spatial variability of soil organic matter Hai Nan, Zhao Yongcun, Tian Kang, et al. (790)
- Research on soil water movement based on stable isotopes Jin Yurong, Lu Kexin, Li Peng, et al. (800)
- Basic NPK fertilizer recommendation and fertilizer formula for maize production regions in China Wu Liangquan, Wu Liang, Cui Zhenling, et al. (816)
- Effects of fertilization on soil organic carbon and distribution of SOC in aggregates in tidal flat polders Hou Xiaojing, Yang Jingsong, Wang Xiangping, et al. (827)
- Effect of long-term fertilizer application on distribution of aggregates and aggregate-associated organic carbon in paddy soil Mao Xiali, Lu Kouping, He Lizhi, et al. (837)
- Effects of biochar on N₂O and CH₄ emissions from paddy field under rice-wheat rotation during rice and wheat growing seasons relative to timing of amendment Li Lu, Zhou Ziqiang, Pan Xiaojian, et al. (847)
- Effects of successive application of crop-straw biochar on crop yield and soil properties in cambosols Liu Yuan, M. Jamal Khan, Jin Haiyang, et al. (857)
- Calculation of thickness of shear plane in diffuse double layer of constant charge soil colloid in single electrolyte system Ding Wuqun, Zhu Qihong, Wang Lei, et al. (867)
- Effect of chemical leaching remedying chromium contaminated soil in deserted chemical plant site Li Shiye, Cheng Jiemin (877)
- Limiting factors for restoration of dumping sites of ionic rare earth mine tailings Liu Wenshen, Liu Chang, Wang Zhiwei, et al. (887)
- Residues of organochlorine pesticides in soils of Liaodong and Shandong Peninsulas Zhu Yingyue, Liu Quanyong, Li He, et al. (900)
- Long-term application of winter green manures changed the soil microbial biomass properties in red paddy soil Gao Songjuan, Cao Weidong, Bai Jinshun, et al. (909)
- Effects of intercropping with leguminous crops on tomato yield, soil nutrients and enzyme activity Dai Huihui, Hu Xuefeng, Cao Mingyang, et al. (917)

Research Notes

- Relationship of free amino acids in root exudates with wilt disease (*Fusarium oxysporum*) of faba bean Dong yan, Dong Kun, Tang Li, et al. (924)
- Effects of intercropping of wheat and faba bean on diversity of metabolic function of rhizosphere fungal community Hu Guobin, Dong Kun, Dong Yan, et al. (933)
- Evolvement of structure and abundance of soil nitrogen-fixing bacterial community in *Phyllostachys edulis* plantations with age of time He Donghua, Shen Qiulan, Xu Qiufang, et al. (941)
- Effect of long-term fertilization on carbon sequestration in lime concretion black soil relative to fertilization pattern Li Wei, Kong Lingcong, Zhang Cunling, et al. (949)
- Effects of interplanting grass on utilization, loss and accumulation of ¹⁵N in apple orchard Peng Ling, Wen Zhao, An Xin, et al. (955)

Cover Picture: Full view of ionic rare earth mine desert (by Tang Yetao, Liu Wenshen)

《土壤学报》编辑委员会

主 编: 史学正

执行编委: (按姓氏笔画为序)

丁维新	巨晓棠	王敬国	王朝辉	史 舟	宇万太	朱永官
李永涛	李芳柏	李保国	李 航	吴金水	沈其荣	张玉龙
张甘霖	张福锁	陈德明	邵明安	杨劲松	杨明义	杨林章
林先贵	依艳丽	周东美	周健民	金继运	逢焕成	胡 锋
施卫明	骆永明	赵小敏	贾仲君	徐国华	徐明岗	徐建明
崔中利	常志州	黄巧云	章明奎	蒋 新	彭新华	雷 梅
窦 森	廖宗文	蔡祖聪	蔡崇法	潘根兴	魏朝富	

编辑部主任: 陈德明

责任编辑: 汪枳生 卢 萍 檀满枝

土 壤 学 报

Turang Xuebao

(双月刊, 1948年创刊)

第 52 卷 第 4 期 2015 年 7 月

ACTA PEDOLOGICA SINICA

(Bimonthly, Started in 1948)

Vol. 52 No. 4 July, 2015

编 辑 《土壤学报》编辑委员会
地址: 南京市北京东路 71 号 邮政编码: 210008
电话: 025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

Edited by Editorial Board of Acta Pedologica Sinica
Add: 71 East Beijing Road, Nanjing 210008, China
Tel: 025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

主 编 史 学 正
主 管 中 国 科 学 院
主 办 中 国 土 壤 学 会
承 办 中国科学院南京土壤研究所

Editor-in-Chief Shi Xuezheng
Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Soil Science Society of China
Undertaken by Institute of Soil Science,
Chinese Academy of Sciences

出 版 科 学 出 版 社
地址: 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

印刷装订 北京中科印刷有限公司
总发行 科 学 出 版 社
地址: 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717
电话: 010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

Printed by Beijing Zhongke Printing Limited Company
Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China
Tel: 010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址: 北京 399 信箱 邮政编码: 100044

Foreign China International Book Trading Corporation
Add: P. O. Box 399, Beijing 100044, China

国内统一刊号: CN 32-1119/P

国内邮发代号: 2-560

国外发行代号: BM45

定价: 60.00 元

国 内 外 公 开 发 行



ISSN 0564-3929

