

周运来, 张振华, 范如芹, 等. 秸秆还田方式对水稻田土壤理化性质及水稻产量的影响[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(4): 786-790.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2016.04.012

秸秆还田方式对水稻田土壤理化性质及水稻产量的影响

周运来^{1,2}, 张振华², 范如芹², 钱晓晴¹, 罗佳², 卢信², 刘宇锋², 刘丽珠²

(1. 扬州大学环境科学与工程学院, 江苏 扬州 225100; 2. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏 南京 210014)

摘要: 为了综合评价不同秸秆还田方式对低产水稻田土壤性质及水稻产量的影响, 研究了秸秆原料生物炭+化肥、发酵床秸秆垫料有机肥和秸秆+猪粪有机肥施用后土壤养分、有机质、易氧化有机碳及水稻生长和产量的变化。与不施肥对照相比, 不同秸秆还田方式下土壤中速效养分含量均有不同程度增加, 但差异均不明显。秸秆生物炭+化肥有利于水稻稳产高产, 产量高达 7.86 t/hm^2 , 比单施化肥和不施肥对照分别增加 9.78% 和 62.4%; 秸秆生物炭施用有利于水稻分蘖期与拔节期生长和吸收养分, 发酵床秸秆垫料有机肥和猪粪秸秆有机肥两种处理的水稻产量及生物量均显著低于单施化肥处理。表明不同秸秆还田方式对水稻田土壤理化性质及产量有着不同的影响, 其中施用秸秆生物炭能提高土壤肥力并显著提高水稻产量。短期来看, 不配施化肥而单施发酵床秸秆垫料有机肥或秸秆猪粪有机肥对水稻生长不利, 长期效果有待观察。

关键词: 秸秆还田; 生物炭; 发酵床秸秆垫料; 有机质; 速效养分; 水稻产量

中图分类号: S141.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2016)04-0786-05

Effects of straw-returning modes on paddy soil properties and rice yield

ZHOU Yun-lai^{1,2}, ZHANG Zhen-hua², FAN Ru-qin², QIAN Xiao-qing¹, LUO Jia², LU Xin², LIU Yu-feng², LIU Li-zhu²

(1. Yangzhou University, Yangzhou 225100, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: To comprehensively evaluate straw returning effects on low-yielding paddy rice yield and soil properties, three kinds of fertilizers, including straw litter in a pig-on-litter system (SP), straw+pig manure (OF) and wheat straw biochar+ chemical fertilizer (BR) were applied, and no fertilization (CK) and chemical fertilizer [$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 + \text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 + \text{KCl}$] (CF) were set as control. Compared with CK, soil available N, P, K and organic matter contents in treatment BR were 6.00%, 36.30%, 1.28%, and 0.88% higher, respectively. BR treatment also had the highest rice yield (7.86 t/hm^2) which was 62.40% and 9.78% higher than those of CK (4.84 t/hm^2) and CF, respectively. BR treatment favored the growth and nutrient uptake of rice in tillering and jointing stages. The growth and yield of rice in SP and OF treatments were lower than that in CF treatments. It can be concluded that different straw utilization methods had distinct effects on soil properties and rice growth. Straw biochar + fertilizer (BR) could increase soil fertility and rice yield.

Key words: straw returning; biochar; straw litter in a pig-on-litter system; soil organic matter; available nutrient; yield

收稿日期: 2016-01-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41401259); 江苏省农业科技自主创新基金项目 [CX(15)1003-5]; 农业部农业环境重点实验室开放基金

作者简介: 周运来 (1990-), 男, 安徽阜南人, 硕士研究生, 研究方向为农田土壤环境与植物营养学。 (E-mail) 1102279384@qq.com。张振华为共同第一作者。

通讯作者: 范如芹, (Tel) 025-84390581; (E-mail) fanruqin2007@126.com

中国年均秸秆生产量为 $7.35 \times 10^8 \text{ t}$, 包括田间秸秆 $6.46 \times 10^8 \text{ t}$ 和加工副产物 $8.9 \times 10^7 \text{ t}^{[1]}$, 其中约 23% 被露天焚烧掉, 排放的污染物如黑碳、挥发性有机物、有机碳、CO、CO₂ 等对全国有害物质总排放量的贡献巨大^[2]。农业秸秆的合理利用成为协调农业资源与

环境及可持续发展的挑战。同时中国化肥投入量不断增加,长期过量的化肥施用引起的土壤质量退化问题成为制约中国农业发展的严峻问题^[3]。另外,施肥及畜禽养殖等引发的农业面源污染已经远远超过了点源污染,成为世界范围内水资源污染的重要原因^[4-5]。有机肥不但可以提高土壤中有机质的含量,还可以改善其质量,因此土壤有机培肥是农业生产中维持和提高土壤肥力的一项重要措施。

近年来,有关秸秆还田在培肥土壤,提高土壤质量,提高水稻产量,土壤固碳,减少化肥、农药施用的作用日益显现,其中将农业秸秆无氧低温热裂解制成的生物炭,不仅可提供作物生长需要的氮、磷、钾、钙、镁等营养元素^[6-11],还可增加土壤碳库储量、养分循环与固持,提高作物产量^[12-14]。生物炭在农业领域的应用研究逐渐成为农业增产和固碳减排的新途径^[15]。将农业生物质废弃物作为发酵床垫料的研究也取得一些研究进展^[16-18]。胡海燕等^[19]测定了中国山东、吉林两省5个养猪场发酵床废弃垫料的基本理化性状,结果表明发酵床废弃垫料具有有机肥料的基本性质。在不同秸秆还田中不论生物炭还是发酵床垫料有机肥在发挥新生态功能的同时,都必须保证农田土壤健康和提高作物产量^[19-20]。因此,本研究通过田间试验分析比较不同秸秆还田方式对土壤肥力特性以及水稻植株生长、产量的影响,以期为中国秸秆资源化循环利用,提高土壤生产力,农田低碳生产,促进中国农业的可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于2015年6—10月在江苏省农业科学院六合基地试验田进行(32°29'N, 118°37'E),该地区处江淮分水岭,属亚热带季风气候区,降水量为979.5 mm,平均气温15.5℃,无霜期229 d,年日照时数2 199.5 h,四季分明,雨热同季。

前茬为水稻,供试土壤类型为黄棕壤,容重1.30 g/cm³,全氮0.67 g/kg,碱解氮83.20 mg/kg,有效磷1.36 mg/kg,速效钾108.25 mg/kg, pH 7.17(土水比1:5),属生产力较低的中低产田。生物炭是小麦秸秆在600℃下无氧热裂解制成。发酵床秸秆垫料有机肥(SP)、猪粪秸秆有机肥(OF)均为江苏省农科院六合现代循环农业基地有机肥厂提供。试验共设5个处理:发酵床秸秆垫料有机肥(SP)、秸秆+

猪粪直接发酵有机肥(OF)、化肥[(NH₄)₂SO₄+Ca(H₂PO₄)₂+KCl](CF)、秸秆生物炭+化肥(BR)及不施肥对照(CK)。

各施肥处理施用同等氮量(3.38 t/hm²),其中处理OF施用猪粪秸秆有机肥5.21 t/hm²,处理SP施用发酵秸秆床垫料7.29 t/hm²,化肥小区(CF)施用复合肥[(NH₄)₂SO₄+Ca(H₂PO₄)₂+KCl]1.50 t/hm²,处理BR施用生物炭1.458 t/hm²和上述复合肥1.41 t/hm²。供试土壤及肥料基本理化性状见表1。供试肥料及生物炭在水稻播种前撒施到相应田块表面,翻耕使之与土壤充分混合,翻耕深度为20 cm,然后耙平。试验田各小区具有独立灌排水系统,面积为96 m²(8 m×12 m)。试验小区采用单因素裂区、随机区组排列,每个处理4个重复。试验选用水稻品种为南粳9108,种植密度为1 hm²2.49×10⁵株,行距20 cm,2015年6月播种,2015年10月20日收获。全生育期田间管理一致,稻季按照淹水—烤田—复水—落干的模式管理。

1.2 样品采集与测定方法

水稻生长期间田间测定株高、有效分蘖数,用SPAD502叶绿素含量测定仪测水稻叶绿素含量。水稻收获时每个小区采5株植株,自然风干测生物量。水稻测产方法为每小区随机划定2 m²水稻进行收获,脱粒,自然风干测产量。同时采集0~10 cm土壤样品,土壤pH、土壤容重、碱解氮、速效钾和速效磷的测定参考文献[21],土壤有机质用烧失法^[22]测量。

易氧化有机碳测定:易氧化有机碳的测定采用333 mmol/L的高锰酸钾氧化法^[23-24]。具体方法为:将1.5 g土壤样品放入100 ml塑料瓶内,加333 mmol/L高锰酸钾液25 ml,密封瓶口,转速25 r/min振荡1 h,2 000 r/min离心5 min,上清液用去离子水按1:250稀释后在565 nm分光光度计上比色。

1.3 数据分析

采用SPSS 19.0进行数据处理与统计分析,采用最小显著差数法(LSD)进行不同处理间差异显著性检验分析。

2 结果与分析

2.1 不同秸秆还田方式对农田土壤理化性质的影响

由表2可知,与CK处理相比,不同秸秆还田方

表 1 供试土壤、有机肥及生物炭基本性质

Table 1 Basic properties of the tested soil, composts and biochar in the study

材料	含水量 (%)	容重 (g/cm^3)	pH	EC (dS/m)	全碳 (g/kg)	全氮 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
猪粪秸秆有机肥	23.8	0.15	7.16	6.07	351.00	42.10	2 792	2 066	15 440
发酵床秸秆垫料	21.7	0.27	6.89	6.89	301.00	38.80	2 572	1 412	5 910
秸秆生物炭	11.2	0.31	9.96	1.03	793.00	9.70	16.940	1 302	8 883
土壤	—	1.30	7.17	1.01	7.35	0.67	83.200	1.360	108

式下土壤中速效养分含量均有不同程度增加,但差异均不显著。不同处理土壤碱解氮增加量大小关系为:OF (10.22%) > CF (8.98%) > BR (6.00%) > SP (2.22%);有效磷增加量大小关系为:BR>OF>CF>SP;各处理土壤速效钾增加量不明显,其中 OF 增加量最多,比 CK 高 5.75 mg/kg;土壤有机质增加量大小关系为:OF(2.87%)>SP(0.61%)>CF(0.33%)>

BR(0.18%)。各处理土壤易氧化有机碳含量均有不同程度的降低,减小幅度最大的为 BR(19.88%),减小幅度最小的为 SP(6.17%),OF 减少 9.51%,CF 减少 7.04%。不同处理土壤 pH 均有所降低,土壤容重无明显变化。以上结果表明,水稻收获时 OF 相对于 CF 有更好的土壤养分条件。

表 2 不同处理土壤速效养分及理化性状

Table 2 The physical and chemical properties of soil treated with different straw-returning modes

处理	容重 (g/cm^3)	pH	有机质 (g/kg)	易氧化有机碳 (mg/kg)	碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
OF	$1.32 \pm 0.05\text{a}$	$6.98 \pm 0.13\text{a}$	$40.49 \pm 3.23\text{a}$	$7.33 \pm 2.82\text{a}$	$91.70 \pm 10.15\text{a}$	$1.53 \pm 0.61\text{a}$	$114.00 \pm 0.35\text{a}$
SP	$1.30 \pm 0.03\text{a}$	$7.02 \pm 0.08\text{a}$	$39.60 \pm 2.41\text{a}$	$7.60 \pm 2.08\text{a}$	$85.05 \pm 16.29\text{a}$	$1.42 \pm 0.08\text{a}$	$112.38 \pm 7.09\text{a}$
CF	$1.30 \pm 0.04\text{a}$	$7.00 \pm 0.11\text{a}$	$39.49 \pm 2.75\text{a}$	$7.53 \pm 0.92\text{a}$	$90.67 \pm 13.09\text{a}$	$1.47 \pm 0.11\text{a}$	$112.13 \pm 3.07\text{a}$
BR	$1.35 \pm 0.04\text{a}$	$7.04 \pm 0.09\text{a}$	$39.43 \pm 2.99\text{a}$	$6.49 \pm 1.67\text{a}$	$88.19 \pm 9.33\text{a}$	$1.85 \pm 0.44\text{a}$	$109.63 \pm 8.43\text{a}$
CK	$1.30 \pm 0.04\text{a}$	$7.17 \pm 0.36\text{a}$	$39.36 \pm 2.87\text{a}$	$8.10 \pm 0.45\text{a}$	$83.20 \pm 2.25\text{a}$	$1.36 \pm 0.18\text{a}$	$108.25 \pm 5.69\text{a}$

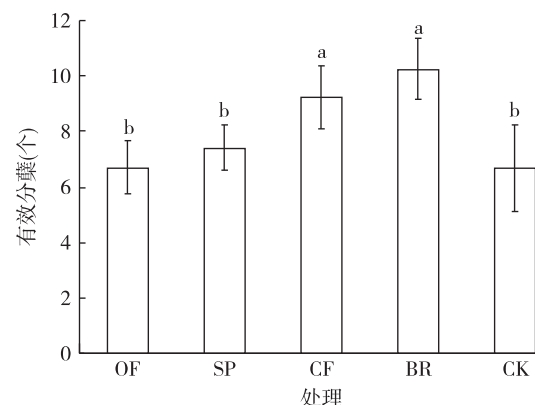
OF 为秸秆+猪粪直接发酵有机肥处理;SP 为发酵床秸秆垫料有机肥处理;CF 为化肥 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 + \text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 + \text{KCl}$ 处理;BR 为秸秆生物炭+化肥处理;CK 为不施肥对照。同一列数据后相同小写字母表示处理之间差异不显著 ($P>0.05$)。

2.2 不同秸秆还田方式对水稻生长的影响

与 CK 相比,不同秸秆还田方式下水稻有效分蘖数均有所增加(图 1),其中 BR 与 CF 处理的有效分蘖数分别比 CK 多 51.13%、39.10% ($P<0.05$),SP 和 OF 比 CK 略高,但无显著差异。可见,BR 促进水稻有效分蘖与 CF 相当,由于两者肥效较快,水稻生长前期营养充足,能显著增加水稻有效分蘖数量。SP 促进水稻有效分蘖与 OF、CK 相当,由于肥效持续缓慢,水稻生长前期营养相对缺乏,水稻有效分蘖数量增加不明显。

如图 2 所示,在水稻生育期内,BR 的水稻株高与 CF 持平,明显高于其他处理。分蘖期两者比其他处理高 9.55cm,进入生殖生长期 BR 与 CF 比其他处理高 19.76 cm。SP 的长势与 OF、CK 基本一致。

由图 3 可知,各处理水稻分蘖期与拔节期叶片的叶绿素含量与有效分蘖数的趋势相同,即 BR 与 CF 的叶绿素含量接近且显著高于其他处理,而 SP 与 OF、CK 无显著差异。到孕穗期各处理水稻叶片

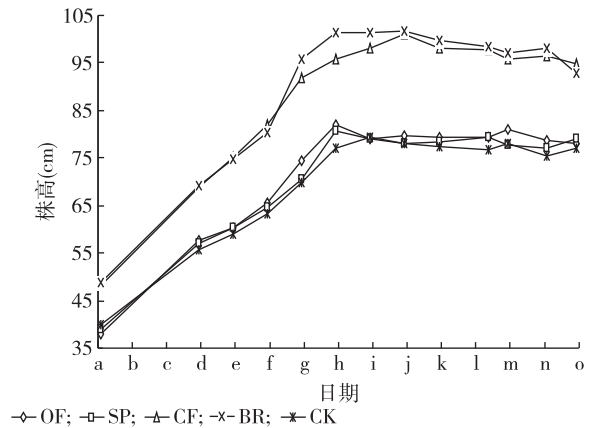


OF 为秸秆+猪粪直接发酵有机肥处理;SP 为发酵床秸秆垫料有机肥处理;CF 为化肥 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 + \text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 + \text{KCl}$ 处理;BR 为秸秆生物炭+化肥处理;CK 为不施肥对照。不同小写字母表示处理之间差异显著 ($P<0.05$)。

图 1 不同处理水稻有效分蘖数

Fig.1 The effective tillering number of rice in different rice straw-returning treatments

叶绿素含量无显著差异。以上结果表明,BR 与 CF

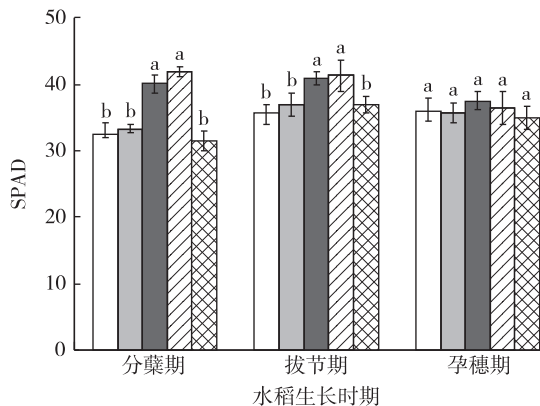


OF 为秸秆+猪粪直接发酵有机肥处理; SP 为发酵床秸秆垫料有机肥处理; CF 为化肥 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 + \text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 + \text{KCl}$ 处理; BR 为秸秆生物炭+化肥处理; CK 为不施肥对照。a: 2015-07-09; b: 2015-07-16; c: 2015-07-23; d: 2015-07-30; e: 2015-08-06; f: 2015-08-13; g: 2015-08-20; h: 2015-08-27; i: 2015-09-03; j: 2015-09-10; k: 2015-09-17; l: 2015-09-24; m: 2015-10-01; n: 2015-10-08; o: 2015-10-15。不同小写字母表示处理之间差异显著 ($P < 0.05$)。

图2 不同秸秆还田处理水稻生育期株高变化

Fig.2 The rice plant heights in different rice straw-returning treatments during rice growth

一样在水稻分蘖期与拔节期能较好提供养分, 水稻叶片氮含量相对丰富。而 SP 与 OF、CK 土壤氮素供应相对缺乏。



□ 为秸秆+猪粪直接发酵有机肥处理; ▨ 为发酵床秸秆垫料有机肥处理; ■ 为化肥 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 + \text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 + \text{KCl}$ 处理; ▨ BR 为秸秆生物炭+化肥处理; ▨ CK 为不施肥对照。不同小写字母表示处理之间差异显著 ($P < 0.05$)。

图3 不同生长时期各处理水稻叶片 SPAD 值变化

Fig.3 The SPAD values of rice leaves in different rice straw-returning treatments at different growth periods

2.3 不同秸秆还田方式对水稻生物量和产量的影响

由表 3 可知, 与不施肥对照 (CK) 相比, 施肥处

理水稻的生物量和产量均有不同程度增加, 其中 BR 同 CF 的生物量和产量显著 ($P < 0.05$) 高于 CK, SP 与 OF、CK 无显著差异。BR 处理水稻产量略高于 CF, OF、SP 产量分别比 CK 高 18.18%、5.99%, 但明显低于化肥处理。各处理间谷草比无显著差异。

表 3 不同秸秆还田处理水稻生物量和产量

Table 3 The biomass and yield of rice in different rice straw-returning treatments

处理	根质量 (t/hm ²)	秸秆质量 (t/hm ²)	产量 (t/hm ²)	谷草比
OF	2.13 ± 0.70b	6.66 ± 0.85b	5.72 ± 0.76b	0.87 ± 0.12a
SP	2.18 ± 0.43b	7.09 ± 1.75b	5.13 ± 0.85b	0.73 ± 0.05a
CF	4.10 ± 0.75a	10.47 ± 2.90a	7.16 ± 0.88a	0.72 ± 0.21a
BR	3.82 ± 0.90a	10.19 ± 1.42a	7.86 ± 0.94a	0.79 ± 0.15a
CK	2.38 ± 0.83b	6.95 ± 1.49b	4.84 ± 0.65b	0.71 ± 0.12a

OF 为秸秆+猪粪直接发酵有机肥处理; SP 为发酵床秸秆垫料有机肥处理; CF 为化肥 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 + \text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 + \text{KCl}$ 处理; BR 为秸秆生物炭+化肥处理; CK 为不施肥对照。同一列数据后不同小写字母表示处理之间差异显著 ($P < 0.05$)。

3 讨论

在不同秸秆还田方式下, 施入等量氮 (3.375 t/hm²) 的秸秆生物炭与化肥配施方式促进了土壤肥力提高和水稻生长。刘祖香^[25]发现土壤施用生物炭可促进土壤速效养分含量以及土壤有机质含量的升高。本研究结果也表明 BR 处理的土壤速效养分含量以及土壤有机质含量增加。本试验土壤养分含量的升高相对于 CK 不显著, 可能与种植年限短 (仅一季) 有关。另外, 处理 BR、OF、CF、SP 土壤易氧化有机碳比 CK 均有不同程度降低, 其中 BR 比 CK 降低了 19.88%。杨金钰等^[26]分析了不同施肥处理下灰漠土时隔 24 年的土壤易氧化有机碳认为: 长期化肥配施有机肥有利于土壤有机碳的积累。在本试验只种一季水稻的情况下, 不同施肥处理易氧化有机碳略有下降, 但差异不显著, 可能是由于单季施肥提高土壤微生物活性从而加速土壤易氧化有机碳的分解而引起的。

与 CF 相比, BR 处理水稻产量略有提高。SP、OF 由于其氮素释放延后, 可能造成水稻前期缺氮, 后期氮素供应过量, 易引起贪青晚熟, 不利于水稻增产^[27]。本试验研究结果表明, BR 与 CF 处理下水稻生长前期的有效分蘖数、叶绿素含量都显著高于 SP、OF、CK, 连同株高优势一直保持到水稻收获。徐明岗等^[27]研究发现, 在施用等量磷、钾和每季施氮 2.25 t/hm² 的条件下, 化肥有机肥配施水稻产量比单施有机肥高 5.07%。张伟明等^[28]的盆栽试验研究结果表

明,生物炭能提高水稻根系生理活性如根系伤流速率、氧化力等,同时维持了较为适宜的根冠比,最终产量也得到了明显提高。本研究中产量与有效分蘖数、株高、分蘖期叶绿素含量、拔节期叶绿素含量的相关系数(R^2)分别为0.502、0.657、0.717、0.517,说明在水稻生长前期,养分的有效供应对水稻后期生长至关重要。这一点在水稻生物量上也有所反映,BR、CF处理显著高于SP、OF、CK处理。夏文斌等^[29]比较了不施肥无秸秆还田、无秸秆还田、秸秆直接还田、秸秆原位焚烧、生物质炭还田对土壤温室气体排放和作物(玉米)产量的影响,结果表明秸秆以生物炭方式还田具有显著综合减排效应,是一种低碳的生产途径。

综上所述,不同秸秆还田方式中发酵床秸秆垫料有机肥(SP)与猪粪秸秆有机肥(OF)对水稻田土壤养分和产量作用结果差异不大,对水稻生长无不良影响。秸秆生物炭+化肥(BR)在减少化肥施用的条件下能提高水稻产量,培肥土壤,是水稻田低碳生产型施肥措施。

参考文献:

- [1] 韦茂贵,王晓玉,谢光辉.中国各省大田作物田间秸秆资源量及其时间分布[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(6): 32-44.
- [2] 曹国良,张小曳,王亚强,等.中国区域农田秸秆露天焚烧排放量的估算[J]. 科学通报, 2007, 52(15): 1826-1831.
- [3] 张福锁,崔振岭,王激清,等.中国土壤和植物养分管理现状与改进策略[J]. 植物学通报, 2007, 24(6): 687-694.
- [4] KRONVANG B, GRASBOLL P, LARSEN S E, et al. Diffuse nutrient losses in Denmark [J]. Water Science and Technology, 1996, 33(4): 81-88.
- [5] 张维理,武淑霞,冀宏杰,等.中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7): 1008-1033.
- [6] 常志州,王德建,杨四军,等.对稻麦秸秆还田问题的思考[J]. 江苏农业学报, 2014, 30(2): 304-309.
- [7] 潘根兴,张阿凤,邹建文,等.农业废弃物生物黑炭转化还田作为低碳农业途径的探讨[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(4): 394-400.
- [8] 金亚征,忻龙祚,王建民,等.华北平原小麦、玉米一年两作区长期秸秆全量还田对夏玉米产量的影响[J]. 江苏农业学报, 2014, 30(3): 527-533.
- [9] GASKIN J W, STEINER C, HARRIS K, et al. Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use [J]. Trans Asabe, 2008, 51(6): 2061-2069.
- [10] 刘冲,王茂文,刘兴华,等.苏北沿海滩涂秸秆还田对大麦生长及土壤质量的影响[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(7): 414-415, 425.
- [11] NOVAK J M, BUSSCHER W J, LAIRD D L, et al. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil [J]. Soil Science, 2009, 174(2): 105-112.
- [12] 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.
- [13] MCCONNELL J R, EDWARDS R, KOK G L, et al. 20th-century industrial black carbon emissions altered arctic climate forcing [J]. Science, 2007, 317(5843): 1381-1384.
- [14] 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 [J]. Plant and Soil, 2012, 360(1-2): 287-298.
- [15] LEHMANN J. A handful of carbon [J]. Nature, 2007, 447(7141): 143-144.
- [16] 王亚犁,朱彤,陈宁兰.用麦秸部分替代木锯末作发酵床养猪垫料的效果试验[J]. 饲料与畜牧: 规模养猪, 2013(5): 24-25.
- [17] 高金波,牛星,牛钟相.不同垫料发酵床养猪效果研究[J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2012, 43(1): 79-83.
- [18] 刘宇峰,罗佳,严少华,等.发酵床垫料特性与资源化利用研究进展[J]. 江苏农业学报, 2015, 31(3): 700-707.
- [19] 胡海燕,于勇,张玉静,等.发酵床养猪废弃垫料的资源化利用评价[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(1): 261-267.
- [20] LONE A H, NAJAR G R, GANIE M A, et al. Biochar for sustainable soil health: a review of prospects and concerns [J]. Pedosphere, 2015, 25(5): 639-653.
- [21] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社, 2000.
- [22] 张文河,穆桂金.烧失法测定有机质和碳酸盐的精度控制[J]. 干旱区地理, 2007, 30(3): 455-459.
- [23] LEFROY R D B, BLAIR G J, STRONG W M. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and ^{13}C natural isotope abundance [J]. Plant and Soil, 1993, 155-156(1): 399-402.
- [24] 陈小梅,刘菊秀,邓琦,等.降水变率对森林土壤有机碳组分与分布格局的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(5): 1210-1216.
- [25] 刘祖香.生物黑炭与氮肥配施对典型旱地红壤地力提升效果的初步研究[D]. 南京:南京农业大学, 2013: 62.
- [26] 杨金钰,刘骅,王西和,等.长期施肥下灰漠土易氧化有机碳的变化特征研究[J]. 新疆农业大学学报, 2014, 37(3): 240-245.
- [27] 徐明岗,李冬初,李菊梅,等.化肥有机肥配施对水稻养分吸收和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(10): 3133-3139.
- [28] 张伟明,孟军,王嘉宇,等.生物炭对水稻根系形态与生理特性及产量的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(8): 1445-1451.
- [29] 夏文斌,张旭辉,刘铭龙,等.麦秆还田方式对旱地土壤综合温室效应的影响[J]. 土壤, 2014, 46(6): 1010-1016.

(责任编辑:陈海霞)