

不同秸秆还田方式对北方超级稻氮素吸收利用的影响

崔月峰¹ 孙国才¹ 卢铁钢¹ 王桂艳¹ 王健¹ 黄文佳¹ 栾和林²

(¹铁岭市农业科学院, 112616, 辽宁铁岭; ²铁岭市农产品质量安全检验检测中心, 112000, 辽宁铁岭)

摘要 以北方超级稻沈农 265 为试验材料, 研究了秸秆直接还田和秸秆热解成生物炭施入对水稻氮素吸收利用的影响。结果表明: 与常规生产相比, 秸秆直接还田主要提高了水稻生育中期的叶、茎含氮量, 但同时降低了后期穗氮素累积量, 氮素回收率、生理利用率和氮肥农学利用率分别下降 5.28%、11.65% 和 16.19%, 使产量有降低趋势; 少量秸秆生物炭施入有助于提高生育中后期叶、茎含氮量并促进穗氮素累积量增加, 氮素回收率和氮肥农学利用率分别增加 6.02% 和 7.71%, 有增加产量的潜力; 大量秸秆生物炭施入降低了叶、茎和穗含氮量, 氮素回收率负向效应强度高达 34.31%, 但氮素生理利用率增加 45.62%, 不利于产量的提高。秸秆直接还田和大量秸秆生物炭施入对水稻氮素吸收有一定抑制作用且不利于产量的提升, 少量秸秆生物炭施入则能提高水稻氮素利用率并增加产量。

关键词 秸秆还田; 生物炭; 超级稻; 氮素利用率

我国农林废弃物资源数量庞大, 仅农作物秸秆就有约 7 亿 t, 其中 50% 以上被用作薪柴或废弃焚烧, 这不仅造成了资源的浪费, 同时也污染了环境。生物炭是以自然界广泛存在的生物资源为基础, 利用特定的炭化技术, 由生物质在缺氧条件下不完全燃烧所产生的高碳产物^[1]。秸秆生物炭来源于作物秸秆, 较好保留了秸秆的细微组织结构, 并富含多种作物生长所需的营养和微量元素, 施入土壤后能够快速提升土壤稳定性碳库储量, 改善养分利用状况, 培肥土壤肥力, 延缓肥料养分释放, 降低肥料及土壤养分的损失, 提高养分利用率, 促进作物生长, 增加作物产量, 对增强土壤生产能力具有积极的促进作用^[1-4], 但生物炭的增产效果及对氮素利用的影响与其施用量、土壤类型和环境条件等诸多因素有关, 具有较大的不确定性^[5]。因此本试验着重研究秸秆直接还田和秸秆热解成生物炭施入模式对粳稻氮素利用方面的影响, 为辽宁北部稻区提高水稻氮素利用率提供参考。

作者简介: 崔月峰, 副研究员, 主要从事水稻育种和栽培研究
卢铁钢为通信作者, 研究员, 主要从事水稻育种和示范推广

基金项目: 国家现代农业产业技术体系项目 (CARS-01-37); 国家重点研发计划“辽宁半干旱半湿润区雨养玉米、灌溉粳稻规模机械化丰产增效技术集成与示范” (2018YFD0300305-02); 国家重点研发计划“北方粳稻优质高产高效新品种培育” (2017YFD0100502-4); 国家重点研发计划“辽宁春玉米、粳稻密植抗逆丰产增效关键技术研究与示范” (2017YFD0300710-A04)

收稿日期: 2019-01-16; 修回日期: 2019-06-06

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验设在辽宁省铁岭市农业科学院内水稻试验田, 土壤耕层 0~20cm 土层营养成分含量为全氮 1.06 g/kg, 全磷 0.85g/kg, 全钾 17.24g/kg, 速效氮 93.64 mg/kg, 速效磷 38.28mg/kg, 速效钾 75.06mg/kg, 有机碳 10.73g/kg, pH 6.36。

供试品种为北方超级粳稻沈农 265, 主茎叶片数为 15, 具有株型紧凑、分蘖力较强、穗型直立的特性。供试用秸秆粉碎成 0.5~1.0cm 的小段, 秸秆生物炭由辽宁生物炭工程技术研究中心将秸秆在 400℃~500℃缺氧条件下热解生产, 约 1/3 秸秆变成粒径 1.5~2.0mm 的生物炭, 秸秆和生物炭主要理化性质见表 1。

表 1 秸秆及生物炭主要理化性质
Table 1 Major physical and chemical properties of straw and biochar used in this study

指标 Index	N (%)	P (%)	K (%)	C (%)	pH
秸秆 Straw	0.87	0.45	2.04	50.36	6.93
生物炭 Biochar	1.28	0.73	1.46	63.27	9.02

1.2 试验设计

试验设 5 个处理, 常规生产 (对照): 当地常规施肥 (46% 尿素 456.5kg/hm²、12% 过磷酸钙 875kg/hm² 和 52% 硫酸钾 202kg/hm²), 记作 CK; 秸秆还田: 在 CK 基础上施入秸秆 6t/hm², 记作 S; 少

量生物炭施入: 在 CK 基础上施入生物炭 $2\text{t}/\text{hm}^2$ (按秸秆可以转化为 30% 生物炭计算), 计作 C1; 大量生物炭施入: 在 CK 基础上施入生物炭 $40\text{t}/\text{hm}^2$, 记作 C2; 不施氮肥的空白处理, 用于氮素利用率的计算。

试验采用育苗移栽的种植方式, 2013 年 4 月 18 日播种、5 月 28 日移栽、10 月 8 日收获, 2014 年 4 月 14 日播种、5 月 27 日移栽、10 月 9 日收获, 插秧规格 $30\text{cm} \times 13.3\text{cm}$, 每穴 3 苗, 随机区组排列设计, 每处理重复 3 次, 共计 12 个小区, 小区面积 21m^2 。各小区单独打埂, 均配有上水、排水渠道, 单灌、单排。氮肥分基肥: 蘖肥: 穗肥 = 5: 3: 2 施入, 秸秆和生物炭在水稻移栽前 100% 一次施入, 均匀散施到土壤表面, 然后旋耕混匀, 过磷酸钙作基肥 100% 一次施入, 硫酸钾作基肥和穗肥各施 50%。其他栽培管理措施按常规水稻大田生产规程管理。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 干物质 在水稻分蘖期、拔节期、抽穗期、灌浆期、成熟期 5 个时期, 每小区连续取 5 穴整齐、一致的植株样品。把叶片、茎鞘、穗分开, 烘干 (方法: 在鼓风烘箱中, 105°C 下杀青 30min, 80°C 下烘干, 烘干时间 48h), 称干重。

1.3.2 含氮量 将分蘖期、拔节期、抽穗期、灌浆期和成熟期烘干的叶、茎、穗样品分别粉碎过 80 目筛后采用凯氏定氮法测定氮素含量。

1.3.3 产量 每小区选 6m^2 全部收割, 凉干后脱粒, 按标准含水量 (15.5%) 统计产量。

1.4 有关参数计算方法

1.4.1 氮素利用率 氮素累积量 = 某器官干物重 \times 某器官含氮量; 氮素分配比例表示某器官的氮素累积量占植株总的氮素累积量的比例; 氮素回收率 (nitrogen recovery rate, NRE) = (施氮区植株总吸氮量 - 空白区植株总吸氮量) / 施氮量 $\times 100\%$, 表示被植株吸收的氮占施入土壤的氮肥料的比; 氮素收获指数 (nitrogen harvest index, NHI) = 子粒吸氮量 / 植株总吸氮量; 氮素生理利用率 (nitrogen physiological utilization rate, NPE) = (施氮区产量 - 空白区产量) / (施氮区植株总吸氮量 - 空白区植株总吸氮量), 反映作物将所吸收的氮素肥料转化为经济产量的能力; 氮肥农学利用率 (nitrogen agriculture utilization rate, NAE) = (施氮区产量 - 空白区产量) / 施氮量, 表示施入单位氮肥所能增加的水稻产量; 氮肥偏生产力 (nitrogen partial productivity, NPP) =

稻谷产量 / 施氮量。

1.4.2 效应强度 效应强度 (effect intensity, EI) = (QA - QCK) / QCK $\times 100\%$; 式中 QA 与 QCK 分别代表秸秆或生物炭处理与对照的氮素回收率、氮素收获指数、氮素生理利用率、氮肥农学利用率、氮肥偏生产力。

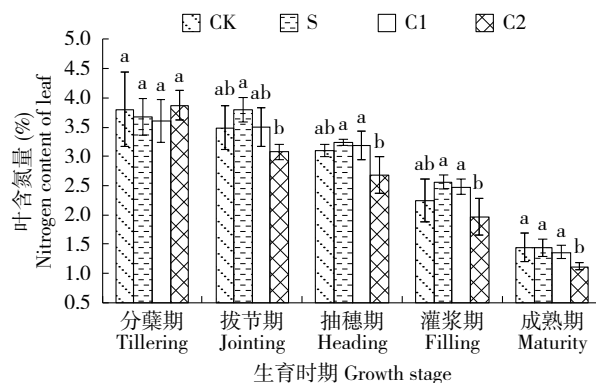
1.5 数据统计与分析

所有试验数据采用 Microsoft Excel 2010 进行整理。采用 DPS 7.05 软件对试验数据进行单因素方差分析, LSD 多重比较判断处理间的差异显著性 ($P=0.05$), 所有测定结果均以平均值 \pm 标准差的形式表达。

2 结果与分析

2.1 植株氮素含量差异

2.1.1 叶含氮量 从图 1 可以看出, 从分蘖到成熟期各处理叶含氮量基本呈直线下降的趋势。在分蘖期, S 和 C1 处理分别较 CK 降低 3.39% 和 5.13%, C2 较 CK 增加 1.91%, 但差异不显著; 到拔节期, S 和 C1 较 CK 分别增加 8.90% 和 0.28%, C2 较 CK 降低 11.88%, S 显著高于 C2, 其他处理间差异均未达到显著水平。在抽穗期, S 和 C1 处理较 CK 分别增加 4.64% 和 2.93%, C2 较 CK 降低 13.49%, S 和 C1 显著高于 C2, 其他处理间差异不显著。在灌浆期, S 和 C1 较 CK 分别增加 13.67% 和 10.29%, C2 较 CK 降低 12.35%, S 和 C1 显著高于 C2, 其他处理间差异均未达到显著水平; 在成熟期, S、C1 和 C2 较 CK 分别降低 0.46%、5.95% 和 22.88%, C2



不同小写字母表示在同一生育时期各处理间存在显著差异 ($P < 0.05$), 下同

Different lowercase letters indicate significant difference between treatments in the same growth stage ($P < 0.05$), the same below

图 1 秸秆还田及生物炭施入对不同生育期叶含氮量的影响
Fig.1 Effects of straw and biochar addition on N content of leaf in different growth stages

与CK、S、C1差异显著,其他处理间差异不显著。可见秸秆还田和少量生物炭施入主要在拔节至灌浆期对叶含氮量有增加的作用,而大量生物炭对叶含氮量的影响从拔节期至成熟期基本是负向的,且在成熟期与CK差异达到显著水平,促进了水稻叶氮的转化,对水稻缩短生育期、加快成熟起到了重要作用。

2.1.2 茎含氮量 从图2可以看出,从分蘖到成熟期各处理茎含氮量呈下降的趋势。在分蘖期, S和C1处理较CK分别降低1.74%和3.54%, C2处理较CK增加6.60%, 差异均未达到显著水平;到拔节期, S较CK增加12.69%, C1和C2较CK分别降低0.30%和13.14%, S显著高于C2, 其他处理间差异不显著;在抽穗期, S和C1较CK分别增加4.03%和2.57%, C2较CK降低22.34%, S显著高于C2, 其他处理间差异不显著;在灌浆期, S和C1较CK分别增加3.77%和5.66%, C2较CK降低19.60%, 各处理间差异均未达到显著水平;到成熟期, S、C1和C2较CK分别降低7.98%、8.01%和27.58%, C2与CK差异显著, 其他处理间差异不显著。秸秆还田和少量生物炭施入主要在拔节至灌浆期对茎含氮量有增加的作用, 在分蘖期和成熟期有降低作用, 而大量生物炭对茎含氮量的影响从拔节到成熟期存在负向作用, 且在成熟期与CK差异达到了显著水平。

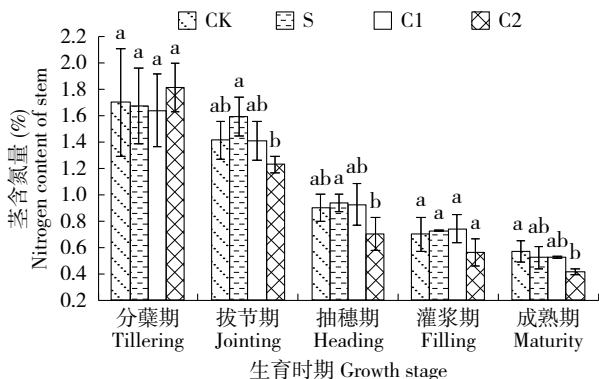


图2 秸秆还田及生物炭施入对不同生育期茎含氮量的影响
Fig.2 Effects of straw and biochar addition on N content of stem in different growth stages

2.1.3 穗含氮量 从抽穗期到成熟期各处理穗含氮量呈下降趋势(图3)。在抽穗期, S处理的穗含氮量较CK增加3.90%, C1和C2较CK分别降低1.51%和7.75%, S显著高于C2, 其他处理间差异不显著;在灌浆期, S和C1较CK分别增加2.22%和2.78%, C2较CK降低7.80%, 各处理间差异均

不显著;到成熟期, S、C1和C2较CK分别降低1.17%、1.46%和9.65%, C2与CK差异显著, 其他处理间差异均未达到显著水平。秸秆和少量生物炭对穗含氮量影响不大, 而大量生物炭使穗含氮量有降低趋势, 且在成熟期时越发明显。

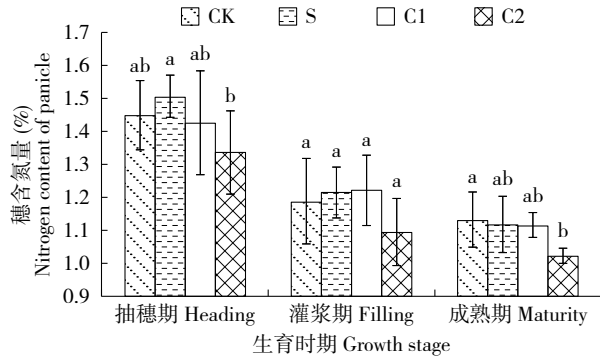


图3 秸秆还田及生物炭施入对不同生育期穗含氮量的影响
Fig.3 Effects of straw and biochar addition on N content of panicle in different growth stages

2.2 植株氮素累积量差异

2.2.1 叶氮素累积量 从图4可以看出,随着生育进程的推进,植株的叶氮素累积量呈先升后降的趋势,而且从分蘖至拔节期的上升速率较快,从拔节期至灌浆期下降较为平缓,灌浆期至成熟期呈急速下降趋势。在分蘖期, S、C1和C2较CK分别降低30.52%、2.46%和14.28%, S和CK差异显著;到拔节期, S和C1较CK分别增加19.28%和19.57%, C2较CK降低7.01%, S和C1显著高于C2, 其他处理间差异不显著;在抽穗期, S和C1较CK分别增加9.30%和18.15%, C2较CK降低9.02%, C1显著高于C2, 其他处理间差异不显著;在灌浆期, S和C1较CK分别增加2.19%和14.27%, C2较CK降低20.17%, C1显著高于C2,

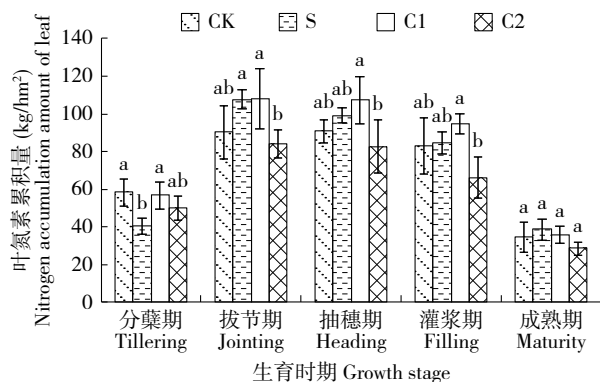


图4 秸秆还田及生物炭施入对不同生育期叶氮素累积量的影响
Fig.4 Effects of straw and biochar addition on N accumulation amount of leaf in different growth stages

其他处理间差异不显著；到成熟期，S 和 C1 较 CK 分别增加 12.08% 和 4.02%，C2 较 CK 降低 17.17%，各处理间差异均未达到显著水平。可见秸秆还田和少量生物炭施入在分蘖期对叶氮素累积量有降低的作用，在中后期则有增加作用，而大量生物炭施入在水稻整个生育期对叶氮素累积量的影响都存在负向作用，但与 CK 的差异均未达到显著水平。

2.2.2 茎氮素累积量 从图 5 可以看出，茎氮素累积量随生育进程呈现先增后减的趋势。在分蘖期，S 处理较 CK 降低 16.61%，C1 和 C2 较 CK 分别增加 4.07% 和 16.12%，差异均未达到显著水平；到拔节期，S 和 C1 较 CK 分别增加 25.76% 和 31.19%，C2 较 CK 降低 4.72%，C1 显著高于 C2，其他处理间差异不显著；在抽穗期，S 和 C1 较 CK 分别增加 1.14% 和 7.25%，C2 较 CK 降低 17.84%，各处理间差异均未达到显著水平；在灌浆期，S 和 C2 较 CK 分别降低 4.39% 和 25.00%，C1 较 CK 增加 10.82%，C1 显著高于 C2，其他处理间差异不显著；到成熟期，S、C1 和 C2 较 CK 分别降低 11.36%、3.09% 和 22.04%，CK 和 C1 显著高于 C2，其他处理间差异均未达到显著水平。就茎氮素累积量而言，秸秆还田在分蘖期、灌浆期和成熟期有降低作用，少量生物炭施入在分蘖期至灌浆期基本具有促进作用，在

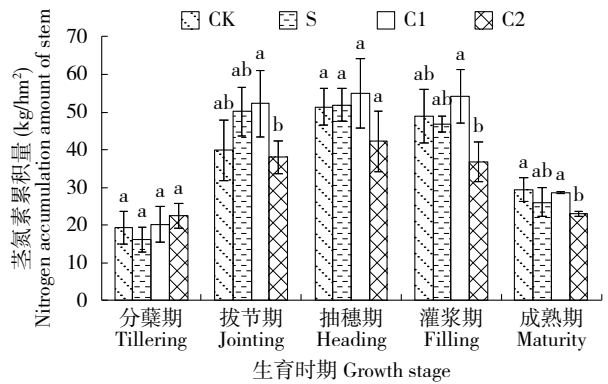


图 5 秸秆还田及生物炭施入对不同生育期茎氮素累积量的影响

Fig.5 Effects of straw and biochar addition on N accumulation amount of stem in different growth stages

拔节期尤为明显，而大量生物炭还田除在分蘖期有增加作用外，在其他生育期则有降低效应，尤其在成熟期越发明显。

2.2.3 穗氮素累积量 从抽穗到成熟期各处理穗氮素累积量随生育进程呈直线上升趋势（图 6）。在抽穗期，S、C1 和 C2 较 CK 分别增加 12.80%、8.72% 和 8.60%，各处理间差异均未达到显著水平；在灌浆期，S 和 C2 较 CK 分别显著降低 10.74% 和 12.59%，C1 较 CK 增加 2.67%，差异不显著；在成熟期，S 和 C2 较 CK 分别降低 6.27% 和 12.96%，C1 较 CK 增加 2.18%，其中 C2 和 CK 差异显著，S 和 C1 与 CK 差异均未达到显著水平。可见秸秆还田和大量生物炭施入处理在抽穗期的穗氮素累积量占有优势，在灌浆期和成熟期则具有明显的降低作用，而少量生物炭施入处理在抽穗至成熟期都出现正向效应，但与 CK 差异均未达到显著水平。

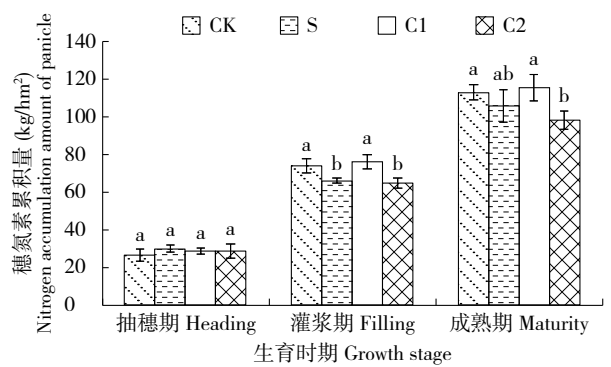


图 6 秸秆还田及生物炭施入对不同生育期穗氮素累积量的影响

Fig.6 Effects of straw and biochar addition on N accumulation amount of panicle in different growth stages

2.3 植株氮素利用率及产量差异

2.3.1 氮素利用率及产量 从表 2 可以看出，S 处理氮素回收率、生理利用率和氮肥农学利用率、偏生产力分别较 CK 显著下降 5.28%、11.65%、16.19% 和 4.29%，氮素收获指数较 CK 下降 2.40%，差异不显著；C1 处理氮素回收率、收获指数、生理利用率和氮肥农学利用率、偏生产力较 CK 分别增加

表 2 秸秆还田及生物炭施入处理氮素利用率及产量的变化						
Table 2 Changes in nitrogen use efficiency and yield under straw and biochar addition						
处理 Treatment	氮素回收率 NRE (%)	氮素收获指数 NHI (kg/kg)	氮素生理利用率 NPE (kg/kg)	氮肥农学利用率 NAE (kg/kg)	氮肥偏生产力 NPP (kg/kg)	子粒产量 Grain yield (kg/hm ²)
CK	36.63 ± 0.62b	64.10 ± 1.15ab	30.62 ± 0.81b	11.20 ± 0.46a	39.62 ± 0.37a	8 318.33 ± 134.28ab
S	34.70 ± 0.42c	62.56 ± 1.41b	27.05 ± 1.39c	9.39 ± 0.46b	37.77 ± 0.35b	7 933.13 ± 126.93c
C1	38.84 ± 0.43a	64.31 ± 0.67ab	31.05 ± 0.88b	12.06 ± 0.30a	40.45 ± 0.52a	8 494.87 ± 191.88a
C2	24.06 ± 0.23d	65.74 ± 0.39a	44.58 ± 0.48a	10.72 ± 0.21ab	39.14 ± 0.31ab	8 216.10 ± 105.96b

注：同列不同小写字母表示各处理间存在显著差异 ($P<0.05$)，下同

Note: Different lowercase letters in same column indicate significant difference between treatments ($P<0.05$), the same below

6.02%、0.33%、1.40%、7.71% 和 2.09%，其中氮素回收率与 CK 差异显著，其他指标与 CK 差异未达到显著水平；C2 处理的氮素回收率、氮肥农学利用率和偏生产力较 CK 分别降低 34.31%、4.29% 和 1.22%，氮素收获指数和生理利用率较 CK 分别增加 2.56%、45.62%，其中氮素回收率、生理利用率与 CK 差异显著。可见秸秆还田对水稻氮素利用率具有显著降低效应，少量生物炭施入则对氮素利用率有一定程度的提高，大量生物炭施入显著降低了氮素回收率，提高了氮素转化为经济产量的能力。从产量来看，总体表现为 C1>CK>C2>S，C1 较 CK 增加 2.12%，C2 和 S 较 CK 分别降低 1.23% 和 4.63%，且 C1 显著高于 C2 和 S，可见秸秆还田和

大量生物炭施入对产量有降低趋势，而少量生物炭施入则有增产作用。

2.3.2 氮素利用率的效应强度 从氮素利用率的效应强度（表 3）来看，秸秆还田氮素回收率、收获指数、生理利用率和氮肥农学利用率、偏生产力都呈现负向效应，尤其氮素生理利用率和氮肥农学利用率负向效应更强，而少量生物炭施入各氮素利用指标都呈现正向效应，尤其氮素回收率和氮肥农学利用率正向效应较高；大量生物炭施入氮素收获指数和生理利用率呈正向效应，尤其氮素生理利用率效应强度明显更高，而氮素回收率和氮肥农学利用率、偏生产力呈负向效应，尤其氮素回收率负向效应强度更为明显。

表 3 秸秆还田及生物炭施入处理氮素利用率的效应强度变化
Table 3 Changes of effect intensity in nitrogen use efficiency under straw and biochar addition %

处理 Treatment	氮素回收率 NRE	氮素收获指数 NHI	氮素生理利用率 NPE	氮肥农学利用率 NAE	氮肥偏生产力 NPP
S	-5.28 ± 2.51b	-2.40 ± 3.51b	-11.65 ± 1.78b	-16.19 ± 6.05b	-4.29 ± 1.78b
C1	6.02 ± 1.41a	0.33 ± 2.65a	1.40 ± 1.91b	7.71 ± 6.83a	2.09 ± 1.91a
C2	-34.31 ± 2.69c	2.56 ± 3.04a	45.62 ± 0.66a	-4.29 ± 2.11ab	-1.22 ± 0.66ab

3 结论与讨论

有研究表明，中国稻田氮肥吸收利用率大多在 30%~40%，较发达国家低 10%~15%，在较好的氮肥管理水平下，氮肥的吸收利用率可上升到 50% 左右^[6-7]。因此如何合理改进栽培技术，从而提高氮肥利用率、增加产量、实现水稻多目标协调发展是一个值得深入研究的课题，而通过有机物质还田增加水稻光合积累将成为提高水稻氮利用效率的一条新的调控途径。提高氮素利用率一方面表现在不同水稻品种在全生育期中从土壤吸收的氮素多；另一方面是成熟时氮素最大限度地存留在干物质中，并且生理活性强^[8]。秸秆还田对作物吸收氮素起着积极作用，能够减少氮素淋洗损失，提高氮素有效性，秸秆配施化肥可提高氮肥利用率 0.1%~3.4%^[9-10]，许有尊^[11]研究发现，秸秆还田显著提高了水稻氮肥生理利用率 4.30%~36.30%、农学利用率 14.8%~20.6% 和偏生产力 1.90%~8.40%，但孙会峰等^[12]研究表明秸秆与化肥配施对氮素吸收利用率没有显著影响。本试验结果表明秸秆还田（6t/hm²）主要提高了水稻生育中期的叶、茎含氮量，但同时降低了后期穗氮素累积量，后期氮素没有转化为子粒生产优势，使产量降低 4.63%，营养器官氮素的转运能力降低，氮素回收率、生理利用率和氮肥农学利用率分别下降 5.28%、11.65% 和 16.19%，与 Eagle 等^[13]的研究结果一致，而与其他研究结果不

同的原因可能与气候特征、土壤性质、秸秆类型、秸秆还田量以及施肥量等因素有关。

Lehmann 等^[14]研究认为，生物炭表面含有丰富的官能团和巨大的比表面积，能够提高土壤阳离子交换量，对养分离子的交换吸附和缓慢释放起到一定作用，从而提高土壤肥力和肥料利用效率。曲晶晶等^[15]研究发现生物炭施入稻田能显著提高水稻氮肥吸收利用率 20% 左右；张爱平等^[16]研究表明，生物炭和氮肥配施时氮肥利用率提高了 22.09%，氮肥农学效率提高 10.87kg/kg。本研究表明，少量生物炭施入（2t/hm²）有助于提高生育中后期叶、茎含氮量并促进穗氮素累积量增加，氮素回收率和氮肥农学利用率分别增加 6.02% 和 7.71%，说明摄取的氮素不会过多存留在植株体内，协调了氮素营养的体内流转利用，从而提高氮素生产干物质的效率，强化了氮素转化为经济产量的能力，有增加产量的潜力；大量生物炭施入（40t/hm²）降低了叶、茎和穗含氮量，后期穗氮素累积量下降，氮素回收率负向效应强度高达 34.31%，这可能是因为生物炭的碳含量较高，高碳量施入会导致碳氮比失衡，固持土壤大量氮素，进而降低水稻对氮素的吸收利用^[17]，但大量生物炭施入条件下，水稻吸收的氮素转化为经济产量的能力在加强，使得氮素生理利用率效应强度高达 45.62%，然而实际产量仍然出现了降低的趋势，可见氮素利用率的高低与产谷的多

少不完全一致, 高产栽培要尽量减少无效、低效生长量, 提高单位氮素的产谷效率, 同时也要考虑到氮素的经济利用率, 即氮素向穗的运转率^[18]。本试验在少量生物炭施入处理, 水稻所表现出的高效氮素回收率和均衡的吸氮量与较高的产量水平达到了优化平衡, 因此, 在秸秆生物炭应用生产中, 要因地制宜, 选择最佳施用量, 使水稻高产群体以优化的氮素吸收利用体系去匹配优化的产量结构, 充分发挥生物炭对作物的正向作用, 实现水稻高产、高效、环境友好的生产和发展。

参考文献

- [1]陈温福, 张伟明, 孟军, 等. 生物炭应用技术研究. 中国工程科学, 2011, 13(2): 83–89.
- [2]刘玉学, 刘微, 吴伟祥, 等. 土壤生物炭环境行为与环境效应. 应用生态学报, 2009, 20(4): 977–982.
- [3]Schmidt M W I, Noack A G. Black carbon in soils and sediments: Analysis distribution, implication, and current challenges. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(3): 777–794.
- [4]Zwieten L V, 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.
- [5]Verheijen F, Jeffery S, Bastos A C, et al. Biochar application to soils: A critical scientific review of effects on soil properties, processes and functions. Luxembourg: Office for the Official Publications of the European Communities, 2010: 91–98.
- [6]朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策. 土壤与环境, 2000, 9(1): 1–6.
- [7]江立庚, 曹卫星, 甘秀芹, 等. 不同施氮水平对南方早稻氮素吸收利用及其产量和品质的影响. 中国农业科学, 2004, 37(4): 490–496.
- [8]丁艳锋, 刘胜环, 王绍华, 等. 氮素基、粪肥用量对水稻氮素吸收与利用的影响. 作物学报, 2004, 30(8): 762–767.
- [9]黄琴. 作物秸秆还田对土壤养分含量的影响. 石河子大学学报, 2006, 24(3): 277–299.
- [10]Watanabe T, Man L H, Vien D M, et al. Effects of continuous rice straw compost application on rice yield and soil properties in the Mekong Delta. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2009, 55(6): 754–763.
- [11]许有尊. 秸秆还田及有机肥对水稻生长和氮肥利用率影响的研究. 武汉: 华中农业大学, 2009.
- [12]孙会峰, 周胜, 付子轼, 等. 秸秆与缓释肥配施对水稻产量及氮素吸收利用率的影响. 中国稻米, 2015, 21(4): 95–98.
- [13]Eagle A J, Bird J A, Horwath W R, et al. Rice yield and nitrogen utilization efficiency under alternative straw management practices. *Agronomy Journal*, 2000, 92(6): 1096–1103.
- [14]Lehmann J, 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. *Plant and Soil*, 2003, 249(2): 343–357.
- [15]曲晶晶, 郑金伟, 郑聚峰, 等. 小麦秸秆生物炭对水稻产量及晚稻氮素利用率的影响. 生态与农村环境学报, 2012, 28(3): 288–293.
- [16]张爱平, 刘汝亮, 高霁, 等. 生物炭对宁夏引黄灌区水稻产量及氮素利用率的影响. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(5): 1352–1360.
- [17]Novak J M, Busscher W J, Laird D L, et al. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern Coastal Plain soil. *Soil Science*, 2009, 174(2): 105–112.
- [18]苏祖芳, 周培南, 许乃霞, 等. 密肥条件对水稻氮素吸收和产量形成的影响. 中国水稻科学, 2001, 15(5): 281–286.

Effects of Different Straw Return Modes on Nitrogen Absorption and Utilization of Super Rice in Northern China

Cui Yuefeng¹, Sun Guocai¹, Lu Tiegang¹, Wang Guiyan¹,
Wang Jian¹, Huang Wenjia¹, Luan Helin²

(¹Tieling Academy of Agricultural Sciences, Tieling 112616, Liaoning, China; ²Tieling Inspection Center of Agricultural Product Quality and Safety, Tieling 112000, Liaoning, China)

Abstract The super rice in Northern China ‘Shennong 265’ was used to study the N use efficiency under straw and biochar addition on soil. The results showed that: straw application improved the nitrogen content of leaf and stem in mid-growing stage, reduced nitrogen accumulation of panicle, decreased nitrogen recovery efficiency, physiological efficiency and agronomic efficiency by 5.28%, 11.65% and 16.19%, respectively, thereby reduced the yield. A small amount of biochar addition was helpful to improve the nitrogen content of leaf and stem, and nitrogen accumulation of panicle in the late growth stage, increased nitrogen recovery efficiency and agronomic efficiency by 6.02% and 7.71%, respectively, and had a positive effect on yield. A large amount of biochar decreased nitrogen content of leaf, stem and panicle, reduced nitrogen recovery efficiency by 34.31%, but increased the nitrogen physiological efficiency by 45.62%, and had a negative effect on yield. Straw and large amount of biochar can inhibit the absorption of nitrogen and have a negative effect on yield of rice, however a small amount of biochar can improve the utilization rate of nitrogen and yield.

Key words Straw return to soil; Biochar; Super rice; Nitrogen utilization rate