

秸秆还田下氮肥减量对辽河平原水稻产量及氮素利用的影响

金丹丹 隋世江 陈 玥 李 波 曲 航 宫 亮

(辽宁省农业科学院植物营养与环境资源研究所, 110161, 辽宁沈阳)

摘 要 为实现秸秆养分资源合理及高效利用, 缓解大量秸秆被丢弃、焚烧等现象造成生态环境破坏, 以常规粳稻“盐丰 47”为材料开展田间微区试验, 设 3 种秸秆还田方式 (秸秆翻埋、秸秆覆盖、不还田) 和 2 个施氮水平 (常规: 纯氮 260 kg/hm²; 减氮: 210 kg/hm²), 研究秸秆还田和减氮条件下水稻产量及其构成因素、氮素利用效率的变化特征及其生理生化响应。结果表明, 减氮条件下秸秆翻埋和秸秆覆盖产量分别为 12.94 和 13.43 t/hm², 较常规施氮量不还田相比差异未达显著水平, 秸秆翻埋下有效穗数、每穗实粒数、结实率和千粒重均维持较高水平, 而秸秆覆盖显著降低了结实率, 降幅为 5.76% ($P<0.05$); 减氮条件下秸秆覆盖显著提高了氮肥利用率及氮肥偏生产力, 增幅分别达 52.70% 和 38.28% ($P<0.05$), 而秸秆翻埋对氮肥利用率及偏生产力无显著影响, 但可大幅度提高抽穗期及灌浆期功能叶片谷氨酰胺合成酶活性, 且差异达显著水平 ($P<0.05$), 从而维持水稻旺盛的氮代谢能力。综合考虑经济收益、环境效应及田间可操作性, 秸秆翻埋还田下科学减施氮肥对水稻产量潜力的发挥具有较大优势。

关键词 水稻; 秸秆还田; 减氮; 产量; 氮素利用

辽宁省是东北粳稻主产区之一, 近 20 年该省水稻播种面积由 48.97 万 hm² 增至 52.04 万 hm², 2020 年全省水稻总产和单产分别为 446.50 万 t 和 8.58 t/hm², 主要分布在辽河三角洲、辽东南沿海和辽中北部地区^[1]。辽宁省水稻氮肥施用过量问题较为突出, 折合纯氮用量平均为 229.40 kg/hm², 位居北方地区前列, 尤其是辽河三角洲稻作区氮肥习惯用量高达 260~280 kg/hm², 而氮肥利用率仅在 35% 左右。本课题组在该地区已开展了 8 年 (2011–2018 年) 的氮肥阈值长期定位试验, 研究^[2]发现氮肥具有较大的减施空间, 氮肥减施 19% (施用量 210 kg/hm²) 对水稻无显著影响, 然而, 大多数农户仍在为追求水稻高产而长期过量施用化肥, 造成了黑土地力逐年减退、水土养分流失及稻米品质下降等问题, 限制了稻作产业的可持续发展^[3–6]。水稻秸秆含有丰富的氮、磷、钾养分及多种有机物质, 是一种“用则利、弃则害”的重要有机肥源^[7–8]。我国水稻秸秆产量占三大作物秸秆总产量的 32.30%, 2014–2018 年平均秸秆产量为 21 141.50 万 t, 通过秸秆还田归还养分资源潜力巨大^[9]。2018 年辽宁省稻田秸秆产量达

335 万 t, 水稻秸秆年均氮养分资源量为 4.10 万 t, 秸秆还田当季化学氮肥可替代量达 34.70 kg/hm², 位居东北稻作区首位^[10–11]。因地制宜充分利用秸秆资源是实现化肥替代和减量的重要途径, 可有效缓解秸秆焚烧、丢弃等造成的农田生态环境破坏和农业废弃资源浪费^[12–13]。

秸秆还田对水稻产量形成和土壤培肥发挥重要作用^[14–15]。研究^[16–17]表明, 秸秆还田可提高水稻分蘖数、地上部生物量及耕层土壤全氮和有机质含量。秸秆还田对水稻产量的影响与还田时间/年限有关, 秸秆短期还田对水稻生长发育的作用效果不明显甚至产生不利影响, 如南方双季稻区早稻秸秆快腐还田抑制了晚稻分蘖的发生^[18–19]; 但长期秸秆还田对水稻生长具有明显的促进作用, 蔡影等^[20]在巢湖地区 7 年的秸秆还田定位试验发现水稻产量提高了 6.19%, 李桂花等^[21]通过红壤稻田 4 年的大田定位试验同样发现秸秆还田促进了水稻增产。受气候条件、土壤类型及田间管理等因素的影响, 我国不同生态区秸秆还田技术水平差异明显。辽河平原稻作区秸秆还田较多研究局限于秸秆的还田方式和还田量等, 缺少秸

作者简介: 金丹丹, 主要从事农业资源高效利用研究, E-mail: jdd851228@sina.cn

宫亮为通信作者, 主要从事土壤肥料研究, E-mail: gongliang1900@sina.com

基金项目: 黑土地保护与利用科技创新工程专项 (XDA28090300); 辽宁省农业科学院院长基金项目 (2022QN2305); 辽宁省农业科学院基础性专项项目 (2024JCX0501)

收稿日期: 2023-12-20; 修回日期: 2024-05-08; 网络出版日期: 2024-10-29

秸秆还田与水肥管理等农作方式有机结合的系统研究。本研究探讨秸秆还田方式与氮肥减量对水稻产量及氮素利用的作用效果，为辽河平原地区水稻稳产、秸秆资源高效利用、养分优化管理提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本研究在辽宁省农业科学院水稻氮磷阈值长期定位试验基地开展，位于辽宁省盘山县坝墙子镇姜家村（122°14'1" E，41°9'31" N），地处辽河三角洲中心地带，属温带半湿润季风气候类型，年降水

量 650 mm，年均气温 8~9℃，无霜期 165~170 d，地势平坦，温光资源较充足，土壤类型为滨海盐渍型水稻土，耕层土壤（0~20 cm）理化性质如表 1 所示。试验区种植面积为 1081 万 hm²，产量为 106.4 万 t，占辽宁省水稻总产的 23.82%，单产达 9.58 t/hm²（2020 年数据），而化学氮肥投入量高达 260~300 kg/hm²，是辽河平原水稻主产区和高肥区。该地区水稻秸秆资源年产量达 5 万 t，秸秆养分含量为全氮 5.16 g/kg、全磷 0.29 g/kg、全钾 7.90 g/kg、全碳 44.13%、总有机酸 0.67%。试验区气候低温冷凉、土壤封冻时间较长等因素降低了秸秆腐解速率，秸秆中丰富的养分未得到充分利用，

表 1 2019 和 2020 年试验区耕层土壤（0~20 cm）理化性质
Table 1 Physicochemical properties of topsoil (0-20 cm) of experimental area in 2019 and 2020

年份 Year	pH	有机质 Organic matter (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	速效氮 Rapidly available N (mg/kg)	全磷 Total P (g/kg)	有效磷 Available P (mg/kg)	全钾 Total K (g/kg)	有效钾 Available K (mg/kg)
2019	7.43	23.62	1.46	115.33	1.22	38.86	24.00	239.00
2020	7.41	23.35	1.42	114.43	1.18	43.89	27.34	228.33

是开展本项研究的理想区域。

1.2 试验设计

以辽河三角洲稻作区主栽品种“盐丰 47”（中晚熟粳稻）为供试材料，于 2019 和 2020 年 4~10 月开展田间微区试验。参照课题组 2011~2019 年长期定位试验结果，减氮 19% 对水稻产量影响不显著，因此本研究在当地常规施氮（纯氮 260 kg/hm²）和减氮 19%（纯氮 210 kg/hm²）2 种氮肥水平下设秸秆翻埋（M）、秸秆覆盖（G）、不还田（N）3 种还田方式，由此形成 N260-N、N260-M、N260-G、N210-N、N210-M 及 N210-G 共 6 个处理组合，另设空白对照组（不施氮肥+不还田，仅用于计算氮素利用率，CK），磷肥（P₂O₅）和钾肥（K₂O）用量均为 90 kg/hm²；随机区组排列，各处理之间用 PVC 塑料板筑埂分隔，小区面积为 15 m²（5 m×3 m），单排单灌，每种处理 3 个重复。所有秸秆还田处理均在秋季还田，即收获后将秸秆粉碎至 1~2 cm 小段后全量（10 500 kg/hm²）还田，秸秆翻埋的深度距地表 15 cm，秸秆覆盖为地表撒施后加盖无纺布以防秸秆随风飘走；氮肥分基肥、蘖肥和穗肥 3 次施入（6:3:1），磷肥作为基肥一次性全量施入，钾肥分基肥和穗肥 2 次等量施入；供试肥料为 46.4% 尿素、12% 过磷酸钙和 60% 氯

化钾。2019 年试验于 4 月 18 日育苗，5 月 26 日移栽，10 月 9 日收获；2020 年试验于 4 月 7 日育苗，5 月 25 日移栽，10 月 11 日收获。采用人工插秧，插秧苗龄为 4 叶 1 心期，行穴距为 30.0 cm×16.7 cm，田间管理与当地生产一致。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 茎蘖动态 每个小区定点选取有代表性的植株 5 穴，自移栽后 20 d 开始，每隔 7 d 调查 1 次茎蘖数，直到茎蘖数不再变化为止。

1.3.2 地上部生物量 分别在拔节期、抽穗期和成熟期取样，每个小区选取长势均匀的 5 穴植株，拔节期采集植株叶片和茎鞘，抽穗期和成熟期采集植株叶片、茎鞘和穗，105℃下杀青 40 min，再置于 80℃下烘干至恒重后称重。

1.3.3 产量 于成熟期（2020 年 10 月 11 日）进行取样，每个小区收获 5 m²（去除边行），脱粒后按照标准含水量 14.5% 计算产量。

1.3.4 产量构成 于成熟期每个小区选取长势均匀的 5 穴植株（3 次重复），按照标准含水量 14.5% 分别调查有效穗数、每穗实粒数、结实率和千粒重。

1.3.5 植株全氮含量 将成熟期的水稻秸秆和籽粒烘干后粉碎，采用浓 H₂SO₄ 碳化，H₂O₂ 高温消

煮,以半微量凯氏定氮法测定植株含氮率。

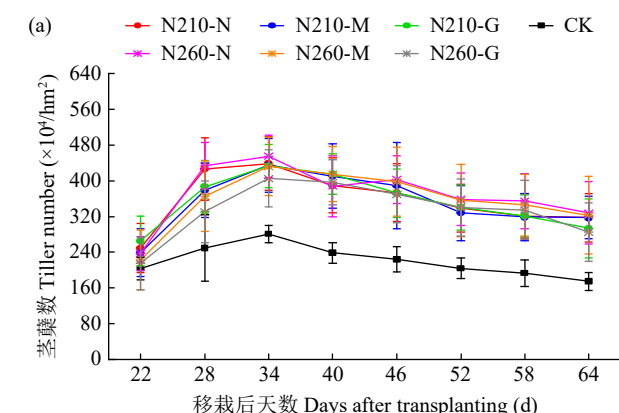
1.3.6 可溶性蛋白含量 分别在抽穗期和灌浆期采集水稻新鲜剑叶(每个处理 3 次重复),液氮固定后置于 -80°C 超低温冰箱中保存待测,用 Modified Bradford 蛋白质浓度试剂盒测定可溶性蛋白含量,操作步骤参照 Liu 等^[22]方法。

1.3.7 氮代谢关键酶活性 分别在抽穗期和灌浆期采集新鲜水稻剑叶(每种处理 3 次重复),液氮固定后置于超低温冰箱(-80°C)中保存待测,参照赵子靖等^[23]和孙志祥等^[24]的离体法测定硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶活性,采用生化试剂盒测定亚硝酸还原酶和谷氨酸合成酶活性,试剂盒购自苏州科铭生物技术有限公司。

1.4 数据处理

1.4.1 数据计算 氮素积累量(kg/hm^2)=该时期地上部生物量 \times 含氮率;氮肥利用率(%)=(施氮区水稻氮素积累量-空白区水稻氮素积累量)/施氮量 $\times 100$;氮肥偏生产力(kg/kg)=施氮区籽粒产量/施氮量;氮素收获指数(%)=成熟期籽粒含氮量/成熟期植株地上部氮素积累量 $\times 100$ 。

1.4.2 统计分析 运用 Microsoft excel 2010 进行



不同小写字母表示各处理在 $P < 0.05$ 水平上差异显著。下同。

Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments at $P < 0.05$ level. The same below.

图 1 秸秆还田耦合减量施氮对水稻茎蘖动态的影响

Fig.1 Effects of straw returning with nitrogen application reduction on the number of tillers on rice

2.2 秸秆还田耦合减量施氮对水稻地上部生物量的影响

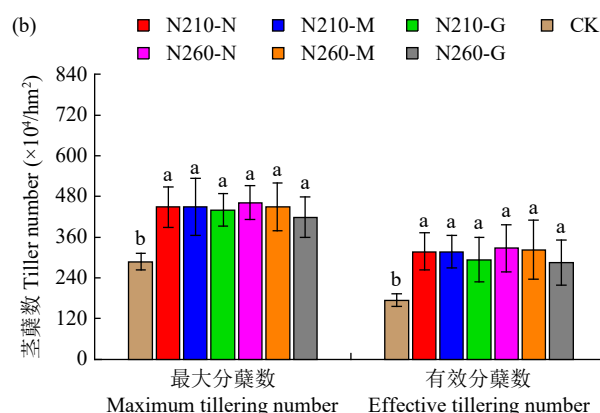
从表 2 可以看出,各施氮水平下秸秆还田均促进了水稻地上部干物质的积累,秸秆翻埋较不还田显著增加了拔节期叶片+茎鞘和抽穗期穗部生物量,增幅分别为 35.61%~46.33%和 22.54%~26.32% ($P < 0.05$); N210-G 处理成熟期穗部生物量较 N210-N 增加了 24%,差异达显著水平 ($P < 0.05$),

数据整理及图表制作,采用 SPSS 21.0 软件进行方差分析及显著性检验,使用 Origin 8.0 软件进行绘图。2 个生长季水稻生长及产量表现趋势基本一致且无显著差异,因此本文为 2020 年数据。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田耦合减量施氮对水稻茎蘖动态的影响

从茎蘖动态变化来看,随着生育进程的推进,水稻茎蘖数均呈先增加后减少的单峰曲线趋势,在移栽后 22~34 d 达峰值,此阶段秸秆还田(N210-M、N210-G、N260-M、N260-G)与不还田处理(N210-N、N260-N)相比茎蘖数加速更快,随后逐渐下降,直到齐穗期(移栽后 58 d)趋于平缓(图 1a);从茎蘖数来看,所有处理最大分蘖数和有效分蘖数分别在 $418.88 \times 10^4 \sim 461.56 \times 10^4/\text{hm}^2$ 和 $285.48 \times 10^4 \sim 328.16 \times 10^4/\text{hm}^2$,显著高于 CK ($P < 0.05$),但各处理之间的差异未达显著水平(图 1b)。总体来看,秸秆还田条件下适量减施化学氮肥可维持较高水平的最大分蘖数和有效分蘖数,兼具促蘖和保蘖的作用。



而 N260-G 处理地上部生物量未明显提高;另外, N210-N 处理显著降低了穗部生物量 ($P < 0.05$)。以上表明,秸秆还田耦合减氮 19% (N210-M、N210-G) 保证了水稻较高的地上部生物量。

2.3 秸秆还田耦合减量施氮对水稻产量及其构成因子的影响

由表 3 可知,秸秆还田、秸秆还田与减氮互作显著影响水稻产量及其构成因子 ($P < 0.05$)。2 种

表 2 秸秆还田耦合减量施氮对水稻地上部生物量的影响
Table 2 Effect of straw returning with nitrogen application reduction on aboveground biomass in rice t/hm²

处理 Treatment	拔节期 Jointing stage		抽穗期 Heading stage		成熟期 Maturing stage	
	叶片+茎鞘 Leaf+stem-sheath	叶片+茎鞘 Leaf+stem-sheath	穗 Panicle	叶片+茎鞘 Leaf+stem-sheath	穗 Panicle	
CK	1.41±0.09c	2.91±0.67c	0.71±0.04d	3.14±0.30b	6.23±0.33c	
N210-N	2.78±0.40b	5.18±0.90b	1.33±0.08c	5.12±0.63a	10.75±0.49b	
N210-M	3.77±0.19a	6.37±0.39ab	1.68±0.11a	5.15±0.92a	11.46±1.41ab	
N210-G	3.00±0.14ab	6.29±0.38ab	1.53±0.04abc	5.82±0.44a	13.33±0.81a	
N260-N	2.59±0.51b	6.76±0.23ab	1.42±0.16bc	6.40±0.96a	11.16±0.50ab	
N260-M	3.79±0.59a	7.58±0.57a	1.74±0.14a	5.36±0.54a	11.70±0.09ab	
N260-G	3.28±0.70ab	7.54±1.70a	1.65±0.20ab	5.08±0.64a	12.26±2.03ab	

不同小写字母表示各处理在 $P < 0.05$ 水平上差异显著。下同。

Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments at $P < 0.05$ level. The same below.

施氮水平下水稻产量及其构成因子均无显著差异，而秸秆还田显著提高了水稻产量，增幅达 11.74%~17.35% ($P < 0.05$)；从秸秆还田与施氮量耦合角度分析，与常规不还田 (N260-N) 相比，秸秆还田搭配减氮 19% (N210-M、N210-G) 产量无显著差异，即 2 种组合在实现化肥减施的同时保证了稻谷稳产，其中，N210-M 处理下有效穗数、每穗实粒数、结实率和千粒重均维持较高水

平，而 N210-G 处理结实率降低 5.76% ($P < 0.05$)；另外，N260-G 处理增产 17.31%，差异达显著水平 ($P < 0.05$)，该组合虽实现了增产和秸秆资源利用的目标，但却以过量施肥为代价。综合考虑经济收益、环境效应及田间可操作性，秸秆翻埋还田条件下适量减施化学氮肥对水稻产量潜力的发挥具有较大优势，并推测减施比例超过 19% 时可能存在减产风险。

表 3 秸秆还田耦合减量施氮对水稻产量及其构成因子的影响
Table 3 Effects of straw returning with nitrogen application reduction on rice yield and its components

因素 Factor	处理 Treatment	有效穗数 Number of efficient panicles ($\times 10^4$ /hm ²)	每穗实粒数 Grain number per panicle	结实率 Seed-setting rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Yield (t/hm ²)
施氮量 N level (kg/hm ²)	N210	311.27±69.91	114.20±12.06	94.50±2.48	26.19±1.10b	12.60±1.22
	N260	310.38±62.93	115.59±12.08	94.76±2.40	25.51±0.68b	13.57±1.26
	F 值	0.00ns	0.05ns	0.04ns	2.49ns	2.75ns
还田方式 Straw returning method	N	317.49±50.33	116.60±15.07	95.98±1.85	26.47±0.53a	11.93±1.05
	M	310.82±68.66	111.14±11.73	94.38±2.87	25.81±1.24ab	13.33±0.91*
	G	304.15±78.01	117.00±10.60	93.26±1.80	25.28±0.66b	14.00±1.07*
	F 值	0.30ns	0.36ns	2.13ns	2.84ns	6.52*
施氮量× 还田方式 N level×straw returning method	N210-N	317.49±54.47	107.00±11.17	94.86±2.13*	26.92±0.16a	11.44±0.59
	N210-M	317.49±47.75	105.95±13.22	96.15±1.93*	26.51±1.33ab	12.94±0.91
	N210-G	293.48±65.79	124.50±2.78	91.51±0.54	25.15±0.70b	13.43±1.25
	N260-N	328.16±69.23	126.20±13.72	97.10±0.48*	26.02±0.26ab	12.42±1.31
	N260-M	322.83±86.85	114.60±11.95	91.74±1.48	25.11±0.77b	13.72±0.88
	N260-G	285.48±65.70	109.50±10.22	94.42±1.13	25.41±0.75b	14.57±0.54*
	F 值	1.01ns	1.63ns	5.61*	2.93ns	3.84*

*: $P < 0.05$, ns: 无显著差异。

*: $P < 0.05$, ns: no significant difference.

2.4 秸秆还田耦合减量施氮对水稻氮素吸收及利用的影响

如图 2 所示，秸秆还田对 2 种施氮水平下水稻氮素吸收与利用的作用效果不同，常规施氮水平下秸秆还田 (N260-M、N260-G) 可有效增加植株氮素积累量、氮肥利用率及氮肥偏生产力，尤其是秸

秆覆盖效果达显著水平 ($P < 0.05$)，但对氮素收获指数无显著的调节作用，减氮条件下秸秆还田 (N210-M、N210-G) 对氮素积累量、氮肥利用率、氮肥偏生产力及氮素收获指数均无显著影响；从秸秆还田耦合氮肥用量的角度分析，减氮搭配秸秆还田对水稻氮素的吸收与利用无显著影响甚至发挥

积极的作用，主要表现为 N210-M 与 N260-N 处理相比，植株氮素积累量、氮肥利用率、氮肥偏生产力及氮素收获指数均无显著差异；N210-G 处理显著提高了氮肥利用率及氮肥偏生产力，增幅分别为 52.70%和 38.28%（ $P<0.05$ ），对氮素积累量和氮素收获指数的影响差异未达显著水平。据此推测，秸秆还田释放的养分可在一定程度上替代外施化学氮肥，能满足水稻生长发育及籽粒灌浆的需求，

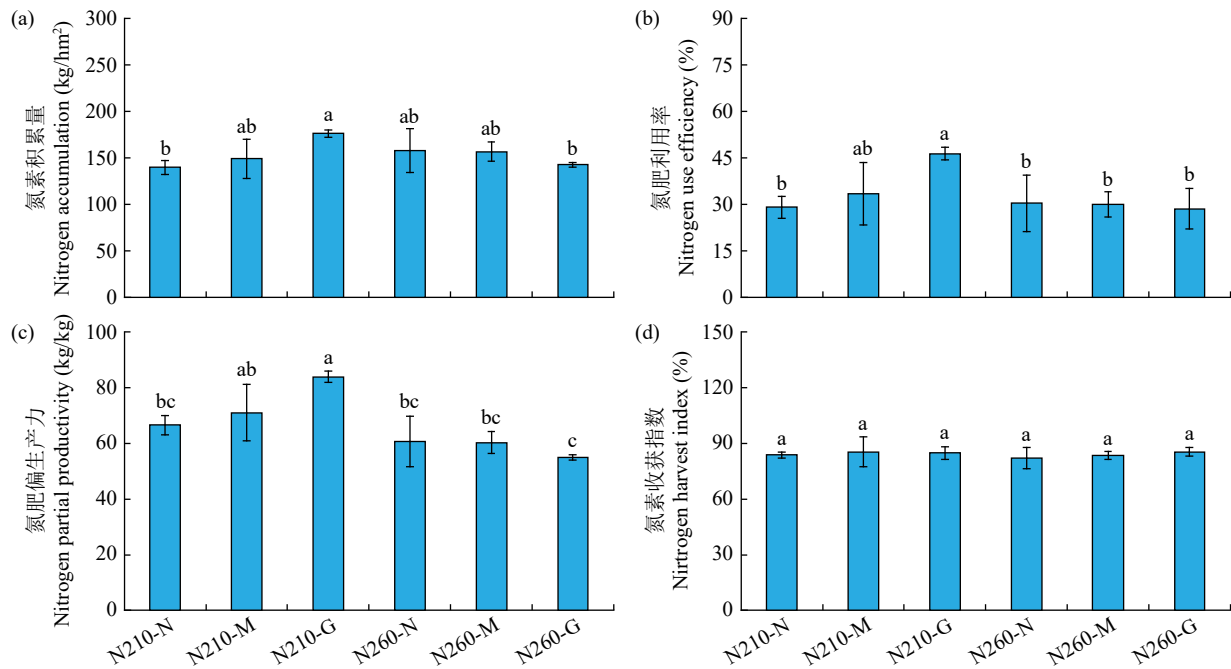


图 2 秸秆还田耦合减量施氮对水稻氮素吸收利用的影响
Fig.2 Effects of straw returning with nitrogen application reduction on the nitrogen uptake and utilization of rice

保证了较高水平的氮素吸收与分配利用。

2.5 秸秆还田耦合减量施氮对水稻氮代谢关键酶活性的影响

如表 4 所示，秸秆还田耦合减氮对水稻生殖生长期功能叶片氮代谢关键酶活性及可溶性蛋白含量有显著影响。与 N260-N 处理相比，N210-M 处理显著提高了抽穗期和灌浆期谷氨酰胺合成酶活性，增幅分别为 25.99%和 27.46%，同时抽穗期可

表 4 秸秆还田耦合减量施氮对水稻生殖生长期叶片氮代谢关键酶活性的影响
Table 4 Effects of straw returning with nitrogen application reduction on key enzyme activities of nitrogen metabolism in leaves of rice at reproductive growth stages

生育期 Growth period	处理 Treatment	硝酸还原酶 Nitrate reductase [μmol/(h·g FW)]	谷氨酰胺合成酶 Glutamine synthetase [μmol/(h·g FW)]	亚硝酸还原酶 Nitrite reductase [μmol/(h·g FW)]	谷氨酸合成酶 Glutamate synthase [nmol/(h·g FW)]	可溶性蛋白 Soluble protein (mg/g FW)
抽穗期 Heading stage	CK	10.85±0.62bc	15.73±1.90c	16.01±0.89c	33.26±1.10d	47.31±3.43c
	N210-N	9.35±0.42c	16.22±1.70c	17.98±1.81bc	53.74±0.80a	50.75±2.27abc
	N210-M	16.13±0.96a	20.75±2.17ab	18.17±1.05abc	42.25±1.97b	54.62±3.03a
	N210-G	15.76±2.45a	17.71±3.05bc	19.96±1.02ab	41.77±0.88b	46.47±2.51c
	N260-N	12.99±0.00ab	16.47±1.43c	19.42±0.71ab	50.28±0.40a	48.60±2.88bc
	N260-M	14.06±0.85a	16.66±1.69c	20.48±1.41a	37.45±3.01c	53.45±3.94ab
灌浆期 Filling stage	N260-G	16.12±2.68a	22.02±0.79a	17.69±1.53bc	33.81±0.98d	52.09±1.91abc
	CK	11.36±0.64a	7.61±0.72d	16.89±0.70a	18.55±0.63e	83.58±2.96cd
	N210-N	12.06±0.08a	8.81±0.84cd	16.95±0.81a	20.42±0.64de	84.60±3.53bcd
	N210-M	12.43±1.25a	12.30±0.37a	14.33±0.72cd	26.81±1.33d	89.98±3.98b
	N210-G	12.07±0.29a	10.71±0.90ab	14.59±0.66c	29.38±0.42c	87.89±0.83bc
	N260-N	11.72±0.46a	9.65±1.64bc	16.53±0.23ab	22.93±1.25d	87.72±0.10bc
	N260-M	11.78±0.07a	12.45±0.80a	15.44±0.27bc	53.60±3.45a	97.27±2.35a
	N260-G	12.25±0.37a	11.96±0.59a	13.21±0.81d	48.23±1.31b	80.31±1.30d

溶性蛋白含量增加了 12.39%，差异达显著水平 ($P<0.05$)，但谷氨酸合成酶活性表现为抽穗期显著降低 15.97%，灌浆期趋于稳定；N210-G 处理显著降低了灌浆期亚硝酸还原酶活性，降幅为 11.74%，该处理下谷氨酸合成酶活性呈抽穗期降低、灌浆期增加的趋势；减氮 19% 搭配秸秆还田对硝酸还原酶活性无显著影响。由此看来，秸秆还田耦合减氮对水稻氮素吸收利用的影响与生育后期氮代谢活动密切相关，并通过调节氮代谢关键酶活性的强弱及可溶性蛋白含量发挥作用，并且抽穗期的作用效果强于灌浆期。

3 讨论

国内外诸多研究^[22-23]对秸秆还田部分替代化肥及其对水稻维持产量的促进作用已达成广泛共识。孙志祥等^[24]通过 2 年大田定位试验发现，秸秆还田与化肥共同作用并未造成双季稻显著减产，且还田 2 年后早稻、晚稻产量分别增加了 10.11% 和 9.81%；Zhang 等^[25]连续 9 年开展大田试验发现，秸秆还田结合氮肥优化管理可有效提高稻麦系统水稻产量的稳定性，增幅可达 12.80%；姚莉等^[26]研究表明，秸秆还田 3 年搭配适量减施化肥也可实现水稻增产 16.93%；本研究与上述研究^[24-26]结果相类似，但未见明显的增产效果，即秸秆还田耦合适量减氮对水稻产量无显著影响，但减氮超过 19% 时可能存在减产风险，该处理稳产主要归因于较高水平的产量构成因子，未实现增产的因素可能有 3 个：其一，秸秆还田后养分释放高峰期与水稻分蘖快速增长期重叠，该时期恰逢土壤微生物活动较为旺盛的阶段，造成根系与土壤竞争营养元素，抑制有效分蘖形成；其二，秸秆养分完全释放是漫长的过程且受气候条件的影响，辽河平原稻作区低温冷凉的特性尤其是生育后期气温骤降一定程度上减缓了秸秆养分释放速率，导致籽粒灌浆不充分，千粒重增加趋势不明显甚至呈降低趋势；其三，秸秆还田年份较短，未到显著增产的时期，相关研究工作有待进一步开展。以上表明，综合考虑辽河平原稻作区施肥现状、经济收益及田间操作难易度等问题，秸秆翻埋还田搭配化学氮肥减施 19% 更符合水稻生产实际，可维持有效穗数、穗粒数、结实率和千粒

重协调发展，从而保证稳产。

水稻氮代谢决定了氮素的吸收、转运和同化，最终影响产量形成；水稻对氮素的吸收和转化主要受硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶等氮代谢酶活性的调控，二者分别是植物硝态氮同化过程中的调节酶和限速酶^[27-28]。秸秆还田方式、施氮量及其交互作用显著影响水稻氮素吸收及利用效率，在常规施氮量减氮 20% 条件下秸秆全量还田可实现水稻稳产，提高氮素利用率及氮肥农学利用率^[29]；秸秆还田可显著提高水稻根系硝酸还原酶或谷氨酰胺合成酶活性，促进植株对氮素的吸收和利用^[30]；晏军等^[31]在苏北地区开展田间定位试验，发现秸秆全量还田下化肥减施 20% 可有效提高水稻氮肥利用率、氮肥偏生产力及氮肥农学效率，减少田间氮素养分残留量。本试验结果与上述研究相似，即减氮 19% 搭配秸秆翻埋还田对水稻氮素的吸收与利用并无显著的抑制作用，反而植株氮素总积累量、氮肥利用率、氮肥偏生产力及氮素收获指数均维持较高水平，主要归因于生育后期旺盛的氮代谢活动，其中抽穗期和灌浆期谷氨酰胺合成酶活性分别提高 25.99% 和 27.46%，同时可溶性蛋白含量增加了 12.39%，且该处理可维持较高的硝酸还原酶活性。据此推测，辽河平原稻作区秸秆翻埋全量还田结合氮肥减施 19% 可通过改善植株氮代谢能力提高氮素吸收利用，从而维持水稻产量稳定并有效缓解稻田养分过度积累。

值得注意的是，2 种施氮水平下水稻产量均表现为秸秆覆盖还田高于秸秆翻埋，而在拔节期和孕穗期，秸秆翻埋下水稻地上部生物量高于秸秆覆盖，且 2 种还田方式的氮素积累量和利用率表现趋势不一致，初步推测可能与秸秆还田的年限有关，如短期覆盖还田对水稻增产发挥积极作用，长期覆盖还田则促进水稻对氮素的吸收与利用。另外，本研究结果显示“减氮 19%+不还田”存在减产风险，秸秆翻埋和秸秆覆盖后产量表现较优，与常规施肥量相比无显著差异，说明 2 种还田方式均可达到部分替代化学氮肥的效果，并确保稳产高产，“减氮 19%+秸秆翻埋”并未显著降低植株氮素积累量和氮肥利用率，而“减氮 19%+秸秆覆盖”显著增加了水稻氮肥利用率，由此可见，

秸秆还田可释放充足的养分并在一定程度上补偿甚至替代了化学氮肥的作用,但 2 种还田方式下秸秆替代的效应机制尚不清楚,今后研究应重点关注减氮条件下秸秆还田方式、还田年限及其互作的稳产效应机制,为稻作农田节肥增效及资源有效利用提供理论依据。

4 结论

秸秆还田耦合减施氮肥可有效保证水稻产量稳定,不同还田方式作用效果存在一定差异,总体表现为较高水平的有效穗数、穗粒数及千粒重;值得注意的是,减氮比例超过 19%可能存在减产风险。综合考虑经济效益、环境效应、田间操作难易程度和农户认可情况,秸秆翻埋还田条件下适量减施氮肥是辽河平原稻作区稳产增效和农业废弃资源高效利用的有效栽培调控措施,符合区域气候特征、土壤类型及农作制度。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴, 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [2] 李波, 宫亮, 曲航, 等. 辽河三角洲稻区两种合理氮肥推荐阈值的方法研究. 农业资源与环境学报, 2020, 37(2): 179-185.
- [3] 宫亮, 金丹丹, 牛世伟, 等. 辽宁省水稻主产区化肥减施潜力分析. 中国农业科学, 2021, 54(9): 1926-1936.
- [4] 金丹丹, 宫亮, 李波, 等. 2 种缓/控释肥对滨海盐碱地区水稻产量及氮代谢的影响. 水土保持学报, 2020, 34(4): 334-339.
- [5] 赵士茹. 秸秆还田和穗肥等处理对不同水稻品种籽粒灌浆动态及稻米品质的影响. 扬州: 扬州大学, 2022.
- [6] 李波, 宫亮, 曲航, 等. 辽河三角洲稻区施氮水平对水稻生长发育及产量的影响. 作物杂志, 2020(1): 173-178.
- [7] 李一, 王秋兵. 我国秸秆资源养分还田利用潜力及技术分析. 中国土壤与肥料, 2020(1): 119-126.
- [8] 刘淑军, 李冬初, 黄晶, 等. 1988-2018 年中国水稻秸秆资源时空分布特征及还田替代化肥潜力. 农业工程学报, 2021, 37(11): 151-161.
- [9] 李廷亮, 王宇峰, 王嘉豪, 等. 我国主要粮食作物秸秆还田养分资源量及其对小麦化肥减施的启示. 中国农业科学, 2020, 53(23): 4835-4854.
- [10] 柴如山, 黄晶, 罗来超, 等. 我国水稻秸秆磷分布及其还田对土壤磷输入的贡献. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(6): 1095-1104.
- [11] 柴如山, 王擎运, 叶新新, 等. 我国主要粮食作物秸秆还田替代化学氮肥潜力. 农业环境科学学报, 2019, 38(11): 2583-2593.
- [12] 杭维琦, 陈建江. 野外燃烧秸秆对环境的影响与防治. 环境监测管理与技术, 2000(2): 36-37.
- [13] 汪海波, 秦元萍, 余康. 我国农作物秸秆资源的分布、利用与开发策略. 国土与自然资源研究, 2008(2): 92-93.
- [14] 王国骄, 宋鹏, 杨振中, 等. 秸秆还田对水稻光合物质生产特征、稻米品质和土壤养分的影响. 作物杂志, 2021(4): 67-72.
- [15] Han X, Xu C, Dungait J A, et al. Straw incorporation increases crop yield and soil organic carbon sequestration but varies under different natural conditions and farming practices in China: a system analysis. Biogeosciences, 2018, 15: 1933-1946.
- [16] 韩新忠, 朱利群, 杨敏芳, 等. 不同小麦秸秆还田量对水稻生长、土壤微生物量及酶活性的影响. 农业环境科学学报, 2012, 31(11): 2192-2199.
- [17] 廖萍, 刘磊, 何宇轩, 等. 施石灰和秸秆还田对双季稻产量和氮素吸收的互作效应. 作物学报, 2020, 46(1): 84-92.
- [18] Liao P, Huang S, Van Gestel N, et al. Liming and straw retention interact to increase nitrogen uptake and grain yield in a double rice-cropping systems. Field Crops Research, 2018, 216: 217-224.
- [19] Pan F F, Yu W T, Ma Q, et al. Influence of 15 N-labeled ammonium sulfate and straw on nitrogen retention and supply in different fertility soil. Biology and Fertility of Soils, 2017, 53: 303-313.
- [20] 蔡影, 付思伟, 张博睿, 等. 秸秆连续还田配施化肥对稻-油轮作土壤碳库及作物产量的影响. 环境科学, 2022, 43(10): 4716-4724.
- [21] 李桂花, 张雪凌, 周吉祥, 等. 长期秸秆还田下有机无机配施及微量元素和缓释肥的施用对双季稻产量和肥料利用率的影响. 中国土壤与肥料, 2021(6): 149-155.
- [22] Liu Z, Liu W T, Liu H T, et al. Capture of soil respiration for higher photosynthesis with lower CO₂ emission. Journal of Cleaner Production, 2020, 246(10): 119029.
- [23] 赵子靖, 孙建平, 戴相林, 等. 秸秆还田结合减量施肥对水稻产量和土壤养分的影响. 江苏农业科学, 2022, 50(10): 66-71.
- [24] 孙志祥, 李敏, 韩上, 等. 有机肥部分替代化肥和秸秆还田对双季稻产量、养分吸收及土壤肥力的影响. 安徽农业大学学报, 2020, 47(6): 1012-1016.
- [25] Zhang J W, Wang J D, Zhou Y, et al. Reduced basal and increased topdressing fertilizer rate combined with straw incorporation improves rice yield stability and soil organic carbon sequestration in a rice-wheat system. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 964957.
- [26] 姚莉, 王宏, 张奇, 等. 持续秸秆还田减施化肥对水稻产量和氮磷流失的影响. 水土保持通报, 2022, 42(4): 18-24.
- [27] 金丹丹, 陈玥, 战萃晔, 等. 水稻氮素吸收利用及水杨酸的调节效应. 东北农业科学, 2021, 46(41): 38-42.
- [28] 熊淑萍, 吴克远, 王小纯, 等. 不同氮效率小麦品种苗期根系氮代谢及其吸收能力差异分析. 麦类作物学报, 2016, 36(3): 325-331.
- [29] 戴相林, 刘雅辉, 孙建平, 等. 秸秆还田和氮肥减施对滨海盐渍水稻田温室气体排放及氮肥利用率的影响. 应用与环境生物学报, 2023, 29(4): 994-1005.
- [30] 冯珺珩, 黄金凤, 刘天奇, 等. 耕作与秸秆还田方式对稻田 N₂O 排放、水稻氮吸收及产量的影响. 作物学报, 2019, 45(8): 1250-1259.
- [31] 晏军, 王伟义, 李斌, 等. 秸秆还田下化肥减施对苏北地区水稻产量与氮素吸收利用的影响. 中国土壤与肥料, 2021(5): 74-82.

Effects of Straw Returning with Nitrogen Application Reduction on Yield and Nitrogen Utilization of Rice in Liaohe Plain

Jin Dandan, Sui Shijiang, Chen Yue, Li Bo, Qu Hang, Gong Liang

(Plant Nutrition and Environmental Resources Research Institute, Liaoning
Academy of Agricultural Sciences, Shenyang 110161, Liaoning, China)

Abstract In order to realize the rational and efficient utilization of straw nutrient resources and alleviate the ecological environment damage caused by a large number of straw discarded and incinerated, a field micro-plot experiment was carried out with conventional *japonica* rice “Yanfeng 47” as the material. Three straw returning methods (straw incorporation, straw mulching, no returning) and two nitrogen application levels (conventional: 260 kg/ha of pure nitrogen; nitrogen reduction: 210 kg/ha) was used to study the changes of rice yield, its components, nitrogen use efficiency and physiological and biochemical responses under straw returning and nitrogen reduction. The results showed that, under nitrogen reduction conditions, the yields of straw incorporation and straw mulching were 12.94 and 13.43 t/ha, respectively, which were not significantly different from those of conventional nitrogen application without returning to the field. The effective panicle number, grain number per panicle, seed-setting rate and 1000-grain weight under straw incorporation remained at a higher level, while the seed-setting rate was significantly decreased by 5.76% under straw mulching ($P < 0.05$). Under nitrogen reduction conditions, straw mulching significantly increased nitrogen utilization rate and nitrogen partial productivity by 52.70% and 38.28%, respectively ($P < 0.05$). Straw incorporation had no significant effects on nitrogen utilization rate and nitrogen partial productivity, but could significantly increase the glutamine synthetase activity of functional leaves at heading and filling stages, and the difference was significant ($P < 0.05$), so as to maintained the vigorous nitrogen metabolism capacity of rice. Considering the economic benefits, environmental effects and field operability, the scientific reduction of nitrogen fertilizer under straw incorporation has a great advantage in the utilization of rice yield potential.

Key words Rice; Straw returning; Nitrogen fertilizer reduction; Yield; Nitrogen utilization