

## 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

晏 军, 王伟义, 李 斌, 李亚芳, 蒋润枝, 沈明晨, 王春云, 崔必波\*

(江苏沿海地区农业科学研究所新洋试验站, 江苏 盐城 224049)

**摘 要:** 探究秸秆还田后化肥减施的响应机制, 为苏北地区水稻的科学施肥提供理论依据。采用田间试验方法, 在小麦秸秆全量还田条件下, 以不施肥处理为对照 (CK), 研究了当地常规施肥 (T1, 氮肥的基肥、分蘖肥、穗肥质量比为 7:2:1)、不同类型肥料减量 20% (T2、T3 和 T4, 氮肥的基肥、分蘖肥、穗肥质量比为 5:3:2) 和氮肥不同基追比例对水稻生长、产量、品质、氮素吸收利用及土壤养分的影响, 以期为苏北地区稻麦轮作生产提供合理的施肥技术支撑。结果表明: 秸秆还田下水稻分蘖盛期 T1 处理群体茎蘖数量 ( $486.2 \times 10^4$  个  $\cdot$   $\text{hm}^{-2}$ ) 最高, 且更有利于花前干物质的积累, 积累率达到 68%。化肥减施 20% 下, T4 处理的群体茎蘖数最低, 但是其成穗率最高, 为 86.4%, 显著高于 T1 处理; T2、T3 和 T4 处理的花前干物质积累量、总积累量和花后积累率与 T1 相比均无显著差异, T4 处理更有利于花前干物质的转运, 干物质转运量对籽粒的贡献率高达 42.7% 以上。在产量构成方面, T2、T3 和 T4 处理实际产量均有所增加, T4 处理产量最高, 显著高于 T1 和 T2 处理 12.6% 和 11.2%, 其主要原因在于有效穗数和结实率的提高。从水稻品质来看, CK 显著降低了稻米的整精米率、垩白粒率、垩白度和蛋白质含量, T4 处理精米率和整精米率、垩白粒率和垩白度与 T1 相比无显著差异, 但是各施肥处理间蛋白质含量无显著差异。成熟期各处理水稻植株地上部氮素积累量在籽粒部分占比达到 60% 以上, T3 处理氮素积累量表现为最高, T2 和 T4 处理的籽粒和茎叶氮素积累量相较 T1 处理均无显著差异。T2、T3 和 T4 处理的氮肥利用率、氮肥偏生产力和氮肥农学效率均高于 T1, T4 处理的氮肥农学效率显著高于 T1、T2 和 T3。收获后 T1 处理土壤有机质和全氮量最高, 化肥减施 20% 会减少田间氮素养分残留量。总体而言, 苏北地区稻麦轮作体系中, 小麦秸秆全量还田下化肥减施 20% (氮肥基肥、分蘖肥、穗肥质量比为 5:3:2), 不会影响当季水稻的正常生长和产量, 且 50% 水溶性有机硅缓释肥配施 50% 氮肥有助于增产, 提高氮肥利用率和减少稻田养分残留。

**关键词:** 秸秆还田; 化肥减施; 干物质积累; 产量; 品质; 氮素吸收

水稻和小麦是我国的两大主要粮食作物, 稻麦两熟是我国南方及江苏省的基本种植制度<sup>[1]</sup>。苏北地区是我国大型商品粮基地, 调查数据显示, 2015 年苏北地区水稻种植面积为 128.37 万  $\text{hm}^2$ , 占江苏水稻种植面积的 57.29%<sup>[2]</sup>, 种植主要以中熟中粳水稻品种为主<sup>[3]</sup>。江苏拥有丰富的沿海滩涂及水资源, 在沿海开发已经上升为国家战略, 地区种植业势必要面临更高水平农业集约化<sup>[4]</sup>。因此, 发展绿色农业、减少农业生态环境污染的提质增效农业新

模式对于实现江苏农业可持续发展具有重大意义, 这也是大力发展资源节约型、环境友好型农业的迫切需求。

苏北主体种植模式是稻麦轮作, 其基本特点是投入的生产成本高, 在水稻生产上因生育期长、需肥量大、灌水频繁、用肥次数多且肥料利用率低<sup>[5-6]</sup>, 在浪费资源的同时带来严重的农业面源污染<sup>[7]</sup>, 因此在水稻生育过程中的施肥管理存在着许多值得探讨的问题。在当前轮作制度下, 稻麦秸秆主要是采用全部还田方式, 这有利于提高养分循环效率, 使种地与养地相结合, 从而维持土地的长期生产力<sup>[8]</sup>, 目前, 针对秸秆还田下肥料运筹、水肥耦合等模式对作物生长、产量、土壤肥力及生态环境的影响研究较多<sup>[9-12]</sup>, 但是受地区差别影响, 前人研究结果不尽相同。苏北地区农业种植区由于离海岸的距离远近、开垦利用时期

收稿日期: 2020-05-20; 录用日期: 2020-06-04

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFD0300604-1); 江苏沿海地区农业科学研究所基金 (YHS201808)。

作者简介: 晏军 (1992-), 男, 湖北荆州人, 研究实习员, 硕士研究生, 主要从事作物逆境生理及农业生产的水土环境调控研究。  
E-mail: yj111708@sina.com。

通讯作者: 崔必波, E-mail: cuibibo1971@163.com。

长短、种植制度、管理措施等多方面的不同导致土壤肥力在时空上存在较大差异<sup>[6]</sup>，同时，由于市面上肥料种类凌乱，因地制宜选择肥料显得尤为必要。因此，根据区域特点，探讨适合苏北地区小麦秸秆还田条件下水稻的化肥减施方案及其机理，可为科学、系统地指导苏北地区稻田施肥提供参考，有助于提高水稻养分利用效率并降低环境风险。

为此，本研究在苏北典型的稻麦种植区域开展，基于地块土壤性状、当地常规施肥措施以及常见的几种新型肥料等信息，研究了小麦秸秆还田条件下，不同类型肥料减量施用对水稻干物质生产、产量形成与品质、养分吸收与利用及土壤养分的影响，有针对性地提出一套节肥不减产、提高肥料利用效率并为农民所接受的施肥措施，可为苏北地区改善稻田养分管理提供理论和数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于2019年在江苏省盐城市新洋农业试验站的沿海现代农业科技创新与示范基地（34° 28' N，120° 54' E）进行，该基地东临黄海，为沿海滩涂

地，属亚热带季风气候，年平均气温14℃，年降水总量100 cm，年平均日照时数2200 h，无霜期210 d，海拔不足5 m；选用试验地常年进行稻麦轮作，土壤质地为砂壤，五点取样法测得0~20 cm土壤pH值8.2，盐分含量0.35%，有机质21.24 g·kg<sup>-1</sup>，全氮1.05 g·kg<sup>-1</sup>、铵态氮6.17 mg·kg<sup>-1</sup>、硝态氮8.81 mg·kg<sup>-1</sup>、有效磷7.67 mg·kg<sup>-1</sup>、速效钾212.74 mg·kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 试验设计

根据本地实际情况，小麦收获后秸秆直接全部粉碎还田，还田量约为5000 kg·hm<sup>-2</sup>，整地时将麦秆用旋耕机旋入20 cm土层中，移栽前1周上水泡田。依据当地农民常规施肥量设置5种施肥处理：（1）不施肥（CK）；（2）常规施肥，为70%普通复合肥+30%普通氮肥（T1）；（3）施肥量在常规施肥基础上减量20%，为50%复合肥+50%海藻素氮肥（T2）；（4）施肥量在常规施肥基础上减量20%，为50%掺混肥料+50%普通氮肥（T3）；（5）施肥量在常规施肥基础上减量20%，为50%有机硅水溶缓释肥+50%普通氮肥（T4）；其中常规施肥处理的氮肥基肥、分蘖肥、穗肥质量比为7:2:1，化肥减施20%处理的氮肥基肥、分蘖肥、穗肥质量比为5:3:2。

表1 试验施肥方案

(kg·hm<sup>-2</sup>)

| 施肥处理 | 施肥量<br>(N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O) | 氮肥施用比例<br>(基肥:分蘖肥:穗肥) | 基肥  |                               |                  | 分蘖肥 | 穗肥 |
|------|------------------------------------------------------------|-----------------------|-----|-------------------------------|------------------|-----|----|
|      |                                                            |                       | N   | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | K <sub>2</sub> O | N   | N  |
| CK   | 0                                                          | —                     | —   | —                             | —                | —   | —  |
| T1   | 300-210-210                                                | 7:2:1                 | 210 | 210                           | 210              | 60  | 30 |
| T2   | 240-168-168                                                | 5:3:2                 | 120 | 168                           | 168              | 72  | 48 |
| T3   | 240-168-168                                                | 5:3:2                 | 120 | 168                           | 168              | 72  | 48 |
| T4   | 240-168-168                                                | 5:3:2                 | 120 | 168                           | 168              | 72  | 48 |

施肥处理中磷肥和钾肥不足部分用过磷酸钙（P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%）和氯化钾（K<sub>2</sub>O 60%）补充，全部基施，施肥时间结合水稻生育期与灌溉或降雨时机进行。普通复合肥由史丹利农业集团股份有限公司生产，其养分含量为：N 15%，P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 15%，K<sub>2</sub>O 15%；普通氮肥为尿素，其养分含量为N 46%；海藻素氮肥由中国科学院烟台海岸带研究所提供，其养分含量为：N 26%；掺混肥料由汉枫缓释肥料（江苏）有限公司生产，其养分含量为：N 18%，P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 9%，K<sub>2</sub>O 18%；有机硅水溶缓释肥由河北硅谷肥业有限公司生产（硅为水溶态，含量3%左右），其养分

含量为：N 22%，P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 18%，K<sub>2</sub>O 5%。具体施肥方案如表2所示。

试验采用随机区组设计，小区面积20 m<sup>2</sup>（4.0 m×5.0 m），小区间筑埂，上覆塑料薄膜防止串水串肥。区组间留0.5 m宽的沟，各小区设有单独的灌排水管，便于灌水和排水。水稻供试品种为南粳9108，5月16日进行露地湿润育秧，于6月22日人工移栽，每穴1~2株，株行距为15 cm×20 cm。移栽后灌浅水使秧苗返青，分蘖肥在移栽后1周施用，穗肥在晒田复水后施用，其他田间管理与大田一致。

表 2 试验施肥方案

(kg · hm<sup>-2</sup>)

| 施肥处理 | 施肥量<br>(N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O) | 氮肥施用比例<br>(基肥:分蘖肥:穗肥) | 基肥   |        |       |    |      |     | 分蘖肥 |       | 穗肥  |       |
|------|------------------------------------------------------------|-----------------------|------|--------|-------|----|------|-----|-----|-------|-----|-------|
|      |                                                            |                       | 掺混肥料 | 有机硅缓释肥 | 普通复合肥 | 尿素 | 过磷酸钙 | 氯化钾 | 尿素  | 海藻素氮肥 | 尿素  | 海藻素氮肥 |
| CK   | 0                                                          | —                     | —    | —      | —     | —  | —    | —   | —   | —     | —   | —     |
| T1   | 300-210-210                                                | 7:2:1                 | —    | —      | 1400  | —  | —    | —   | 131 | —     | 65  | —     |
| T2   | 240-168-168                                                | 5:3:2                 | —    | —      | 800   | —  | 400  | 80  | —   | 277   | —   | 185   |
| T3   | 240-168-168                                                | 5:3:2                 | 667  | —      | —     | —  | 900  | 80  | 157 | —     | 104 | —     |
| T4   | 240-168-168                                                | 5:3:2                 | —    | 546    | —     | —  | 583  | 235 | 157 | —     | 104 | —     |

### 1.3 测定项目与分析方法

#### 1.3.1 茎蘖数

避开小区边缘,每个小区随机固定标记10株水稻,从分蘖初期开始3~5 d观测1次茎蘖数量,直到分蘖结束,成熟期再统计一次有效穗数。

#### 1.3.2 干物质积累量测定

分别于开花期和成熟期每小区随机选取5株具有代表性的水稻植株,整株全部带回实验室,去除地下部后按茎、叶、穗分装,经105℃杀青、80℃烘干、称量。干物质积累量为茎、叶、穗干物质量之和。

#### 1.3.3 水稻植株样采集及测定

测定样品为1.3.2中水稻植株,直接粉碎。全氮量采用浓H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>消煮-凯氏定氮法<sup>[13]</sup>测定。

#### 1.3.4 拷种与测产

成熟期取回1.3.1中水稻植株,地上部分全部带回实验室用于考种,测定每株总粒数、结实率和千粒质量。用1 m<sup>2</sup>正方形木框在每个小区统计每平方米有效穗数,各小区全部实收测产。

#### 1.3.5 品质指标测定

取实割称重的稻谷5 kg,自然风干3个月,参照《米质测定方法》(NY/T 83—2017)测定糙米率、精米率、整精米率、垩白米率、垩白度等;使用近红外谷物品质分析仪(型号:Foss Infratec 1241)测定稻米品质。每小区称取适量的稻谷放进进样卡槽中,各重复3次,记录蛋白质、直链淀粉和水分含量。

#### 1.3.6 土壤采集与指标测定

于试验开始前采集基础土样,于收获后利用土钻采集土壤耕层样品,各小区样品按“五点取样

法”采集,采样深度为20 cm。测定方法为:全氮采用浓H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>消煮-凯氏定氮法,有机质采用重铬酸钾容量法<sup>[13]</sup>。

#### 1.4 数据分析

应用DPS 15.10高级版进行方差分析,LSD法进行处理间多重比较,利用Excel 2016作图。相关指标计算方法<sup>[14-15]</sup>如下:

成穗率 = 成熟期的有效穗数 / 分蘖盛期茎蘖数;

花前干物质积累量(kg · hm<sup>-2</sup>) = 开花期干物质积累量;

花后干物质积累量(kg · hm<sup>-2</sup>) = 成熟期干物质积累量 - 开花期干物质积累量;

花前干物质积累率(%) = 开花期干物质积累量 / 成熟期干物质积累量 × 100;

花后干物质积累率(%) = 花后干物质积累量 / 成熟期干物质积累量 × 100;

营养器官干物质转运量(kg · hm<sup>-2</sup>) = 开花期干物质积累量 - 成熟期营养器官干物质积累量;

营养器官干物质转运率(%) = 营养器官干物质转运量 / 开花期干物质积累量 × 100;

营养器官干物质转运量对籽粒贡献率(%) = 营养器官干物质转运量 / 成熟期籽粒干重 × 100;

花后干物质积累量对籽粒贡献率(%) = 花后干物质积累量 / 成熟期籽粒干重 × 100;

氮肥利用率(NUE, %) = (施氮区氮素积累量 - 不施氮区氮素积累量) / 施氮量 × 100

氮肥偏生产力(NPFP, kg · kg<sup>-1</sup>) = 施氮区单位面积稻谷产量 / 单位面积施氮量;

氮肥农学效率(NAE, %) = (施氮区籽粒产量 - 不施氮区籽粒产量) / 施氮量 × 100;

氮素收获指数(NHI, %) = 成熟期植株穗部氮积累量 / 植株氮素积累总量 × 100;

氮素籽粒生产效率 (NGPE,  $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) = 单位面积水稻籽粒产量 / 单位面积植株 N 积累量。

## 2 结果与分析

### 2.1 秸秆还田下化肥减施对水稻株高和分蘖的影响

秸秆还田下化肥减施对水稻茎蘖数和成穗率的影响如图 1 所示。各施肥处理分蘖盛期茎蘖数量均高于 CK 处理, 其中 T1 处理群体茎蘖数量最高,

为  $486.2 \times 10^4$  个  $\cdot \text{hm}^{-2}$ , 较 CK 显著增加 74.9%; 而 T2、T3 和 T4 处理均显著低于 T1, 分别降低 11.4%、19.2% 和 27.7%; 但是 T3 和 T4 处理间群体茎蘖数量差异不显著。从成穗率来看, T3 和 T4 处理相对较高, 分别为 85.9% 和 86.4%, 均显著高于 T1 和 T2; T1 和 T2 处理的成穗率均低于 CK, 但差异不显著, 相较 T4 分别显著降低 15.6% 和 12.7%。说明施用普通复合肥养分释放快, 水稻营养生长期养分供应充足使群体分蘖数量大, 但不利于后期有效穗形成。

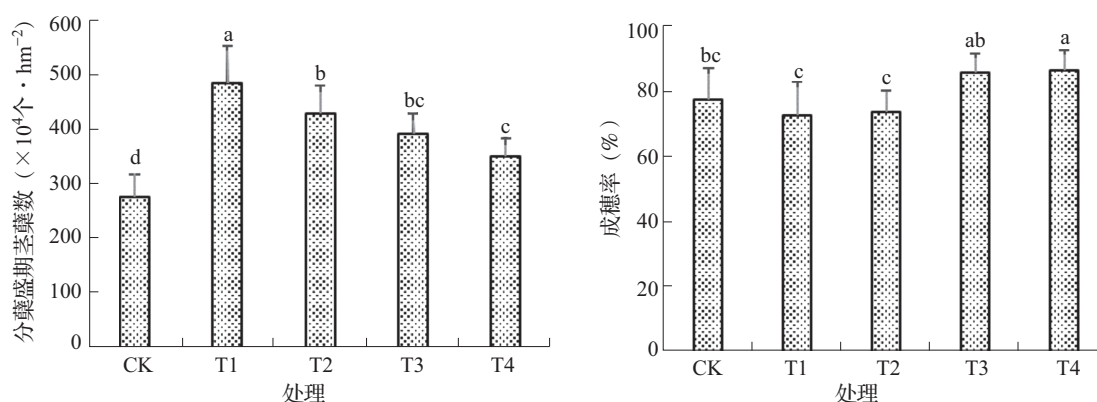


图 1 化肥减施对茎蘖数和成穗率的影响

注: 小写字母不同表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。

### 2.2 秸秆还田下化肥减施对水稻干物质积累和转运的影响

秸秆还田下化肥减施对水稻干物质积累和转运的影响不同 (表 3)。从干物质积累量和积累率来看, T1 处理更有利于花前干物质的积累, 积累率达到 68%; T3 处理则更有利于花后干物质的积累, 积累率达到 41%, 其积累量显著高于 T2 和 T4 处理; 而 T1、T2、T3 和 T4 的花前干物质积累量、总积累量和花后积累率在处理间均无显著差异。从营养器官干物质转运量和对籽粒的贡

献率来看, CK、T4 处理更有利于花前干物质的转运, 干物质转运量对籽粒的贡献率高达 42.7% 以上, T3 处理的转运量显著低于 T1 和 T4 处理, 对籽粒的贡献率仅为 26.7%, 其花后干物质积累量对籽粒的贡献率高达 73.3%, 但相较 T1、T2 和 T4 处理差异并不显著。各处理花后干物质积累量对籽粒贡献率 (52.2% ~ 73.3%) 均高于干物质转运量对籽粒贡献率 (26.7% ~ 47.8%), 花后干物质积累量对提高水稻产量更为重要。

表 3 化肥减施下水稻干物质积累、转运及对籽粒的贡献率

| 处<br>理 | 干物质积累量 ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) |                   |                   | 积累率 (%)          |                  | 转运量<br>( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) | 转运率<br>(%)       | 对籽粒贡献率 (%)       |                   |
|--------|---------------------------------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|---------------------------------------------|------------------|------------------|-------------------|
|        | 花前                                          | 花后                | 总积累量              | 花前               | 花后               |                                             |                  | 转运量              | 花后积累量             |
| CK     | 9601 $\pm$ 769b                             | 4223 $\pm$ 484c   | 13824 $\pm$ 484b  | 70.1 $\pm$ 5.0a  | 29.9 $\pm$ 3.5a  | 3848 $\pm$ 489ab                            | 40.1 $\pm$ 5.2a  | 47.8 $\pm$ 6.2b  | 52.2 $\pm$ 5.9a   |
| T1     | 14356 $\pm$ 1510a                           | 6983 $\pm$ 1743ab | 21339 $\pm$ 1743a | 68.2 $\pm$ 8.6a  | 31.8 $\pm$ 8.2ab | 4612 $\pm$ 1173a                            | 32.1 $\pm$ 8.2ab | 40.5 $\pm$ 10.4b | 59.5 $\pm$ 12.6ab |
| T2     | 12780 $\pm$ 1468a                           | 6655 $\pm$ 933bc  | 19435 $\pm$ 933a  | 65.5 $\pm$ 7.2a  | 34.5 $\pm$ 4.8ab | 4591 $\pm$ 366ab                            | 36.0 $\pm$ 2.9ab | 40.8 $\pm$ 3.3b  | 59.2 $\pm$ 5.7ab  |
| T3     | 12127 $\pm$ 285ab                           | 9511 $\pm$ 2558a  | 21638 $\pm$ 2558a | 59.0 $\pm$ 6.3a  | 41.0 $\pm$ 11.8b | 3218 $\pm$ 1031b                            | 26.5 $\pm$ 8.5b  | 26.7 $\pm$ 8.6a  | 73.3 $\pm$ 10.6b  |
| T4     | 13829 $\pm$ 2913a                           | 6293 $\pm$ 400bc  | 20121 $\pm$ 400a  | 68.3 $\pm$ 15.0a | 31.7 $\pm$ 2.0ab | 4685 $\pm$ 290a                             | 33.9 $\pm$ 2.1ab | 42.7 $\pm$ 2.6b  | 57.3 $\pm$ 3.5ab  |

注: 同列数据后不同小写字母表示差异在 0.05 水平上显著。下同。

### 2.3 秸秆还田下化肥减施对水稻产量和品质的影响

秸秆还田下化肥减施对水稻的产量及品质的影响见表4、表5。T1、T2、T3和T4处理的每平方米有效穗数、每株总粒数和实际产量均显著高于CK，各处理间千粒质量无显著差异；各处理的实际产量表现为T4 > T3 > T2 > T1 > CK，T4处理实际产量分别显著高于T1和T2处理12.6%和11.2%，T4处理结实率显著高于T1处理，与T3处理无显著差异，表明结实率是影响产量构成的最主要方面。由表5可知，CK处理的整精米率、垩白粒率、垩白度和蛋白质含量均显著低于其他处理；T1和T4处理的精米率和整精米率相对较高，T1处理相较T2和T3处理达到显著水平，且T1和T4处

理的垩白粒率和垩白度均显著低于T2和T3处理，但各施肥处理间蛋白质含量无显著差异；T3处理的直链淀粉含量最低，相较T4处理差异达到显著水平。

表4 化肥减施对水稻产量及构成因素的影响

| 处<br>理 | 每平方米<br>有效穗数 | 每株总<br>粒数   | 结实率<br>(%)    | 千粒质量<br>(g) | 实际产量<br>(kg·hm <sup>-2</sup> ) |
|--------|--------------|-------------|---------------|-------------|--------------------------------|
| CK     | 216 ± 32c    | 1148 ± 102b | 90.6 ± 2.1a   | 27.9 ± 0.3a | 6253 ± 866c                    |
| T1     | 354 ± 49a    | 1690 ± 348a | 84.1 ± 4.7c   | 28.6 ± 0.9a | 8493 ± 141b                    |
| T2     | 304 ± 28b    | 1777 ± 115a | 84.1 ± 4.6bc  | 28.3 ± 0.7a | 8596 ± 232b                    |
| T3     | 337 ± 32ab   | 1703 ± 387a | 86.8 ± 5.4abc | 27.7 ± 0.8a | 8900 ± 183ab                   |
| T4     | 317 ± 38b    | 2046 ± 384a | 90.0 ± 4.7ab  | 28.0 ± 1.1a | 9560 ± 421a                    |

表5 化肥减施对水稻品质的影响

(%)

| 处理 | 糙米率          | 精米率         | 整精米率         | 垩白粒率        | 垩白度         | 蛋白质含量      | 直链淀粉含量       |
|----|--------------|-------------|--------------|-------------|-------------|------------|--------------|
| CK | 83.4 ± 0.3b  | 78.9 ± 0.7c | 72.1 ± 0.7c  | 25.8 ± 0.5a | 21.1 ± 0.6a | 5.6 ± 0.3b | 16.3 ± 0.5ab |
| T1 | 85.5 ± 1.2a  | 83.4 ± 1.0a | 76.8 ± 0.8a  | 17.7 ± 0.8c | 12.2 ± 0.5c | 6.4 ± 0.1a | 16.4 ± 0.6ab |
| T2 | 84.8 ± 0.5ab | 80.3 ± 0.9b | 75.1 ± 0.8b  | 21.4 ± 1.2b | 16.4 ± 1.0b | 0.6 ± 0.2a | 16.2 ± 0.9ab |
| T3 | 84.7 ± 1.7ab | 78.7 ± 0.5c | 74.4 ± 1.0b  | 21.6 ± 0.9b | 15.6 ± 1.2b | 6.6 ± 0.2a | 15.7 ± 0.4b  |
| T4 | 84.3 ± 1.4ab | 81.0 ± 0.6b | 75.6 ± 0.6ab | 16.1 ± 0.8d | 13.4 ± 0.7c | 6.4 ± 0.2a | 16.9 ± 0.3a  |

### 2.4 秸秆还田下化肥减施对水稻地上部氮素吸收、利用及土壤养分的影响

秸秆还田下化肥减施对水稻成熟期氮吸收量和氮素利用效率的影响如图2和表6所示。成熟期各处理水稻植株地上部氮素积累量在籽粒部分占比达到60%以上，CK处理达到78.4%，相较T1、T2、T3和T4处理分别高出8.0%、7.9%、11.2%和

9.1%，表明施肥会影响营养器官养分向籽粒转移的量；T3处理水稻地上部的氮素积累量表现为最高，达到201.7 kg·hm<sup>-2</sup>，其籽粒氮素积累量显著高于CK和T4处理，茎叶氮素积累量显著高于其他所有处理；T2和T4处理的籽粒和茎叶氮素积累量相较无显著差异，同时相较T1处理也均无显著差异。在氮素利用效率方面，T2、T3和T4处理的氮肥

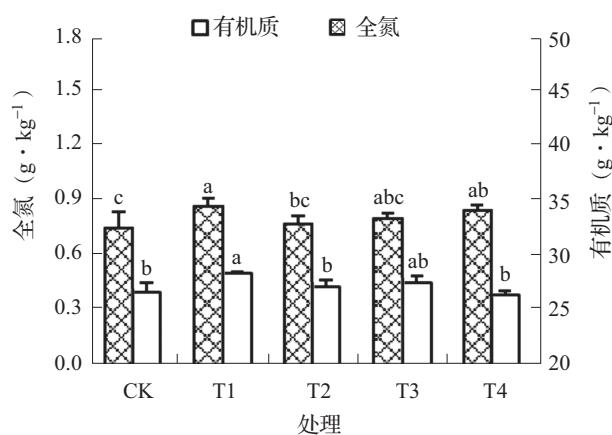
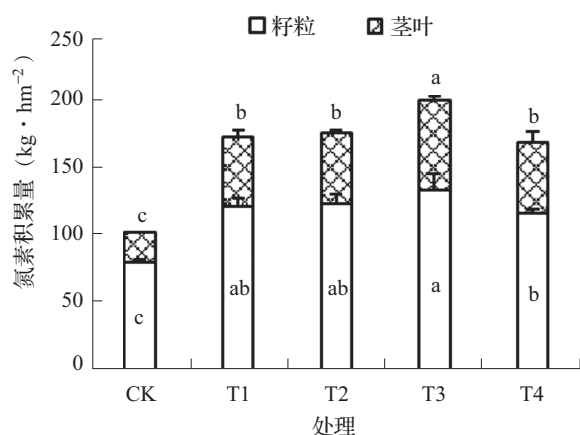


图2 化肥减施对水稻地上部氮素积累量和有机质的影响

表 6 化肥减施对水稻氮素利用效率的影响

| 处<br>理 | 氮肥利用率<br>(%)   | 氮肥偏生产力<br>(kg · kg <sup>-1</sup> ) | 氮肥农学效率<br>(%) | 氮素籽粒生产<br>效率 (kg · kg <sup>-1</sup> ) |
|--------|----------------|------------------------------------|---------------|---------------------------------------|
| T1     | 23.69 ± 2.27c  | 28.31 ± 0.47c                      | 7.47 ± 0.47c  | 70.39 ± 3.47a                         |
| T2     | 30.73 ± 2.73b  | 35.81 ± 0.97b                      | 9.76 ± 0.97b  | 70.48 ± 4.03a                         |
| T3     | 40.91 ± 6.08a  | 37.08 ± 0.76b                      | 11.03 ± 0.76b | 67.08 ± 5.84a                         |
| T4     | 27.67 ± 2.20bc | 39.83 ± 7.76a                      | 13.78 ± 1.76a | 69.32 ± 1.67a                         |

利用率、氮肥偏生产力和氮肥农学效率均高于 T1 处理, T3 处理的氮肥利用率最高, 显著高于 T1 和 T4 处理, 但是氮肥偏生产力显著低于 T4 处理; T4 处理的氮肥农学效率最高, 显著高于 T1、T2 和 T3; T1、T2、T3 和 T4 处理间氮素籽粒生产效率无显著差异。水稻收获后对稻田全氮和有机质的影响如图 2 所示, T1 处理土壤有机质和全氮最高, 显著高于 CK 和 T2 处理, T2、T3 和 4 处理间均无显著差异, 表明减量施肥会减少田间氮素养分残留量。

### 3 讨论

水稻的分蘖与成穗率既受自身遗传特性调控, 又易受外界环境的影响<sup>[16]</sup>, 外界因素中水肥管理是关键。李思平等<sup>[9]</sup>研究表明秸秆还田导致水稻前期生长缓慢, 分蘖能力下降, 且在化肥减施处理下尤为明显, 但能够在水稻生长中后期显著提高水稻生长指标, 这与本研究结果相似, 在水稻分蘖盛期常规施肥处理群体茎蘖数量最高, 为  $486.2 \times 10^4$  个 · hm<sup>-2</sup>, 而化肥减施 20% 后 3 个处理均显著低于 T1, 分别降低 11.4%、19.2% 和 27.7%, 其中有机硅水溶缓释肥最低, 可能原因是秸秆还田后的腐解过程影响对水稻的养分吸收, 从而不利于水稻前期的生长发育<sup>[17]</sup>, 本研究显示在施用缓释肥情况下表现更明显。成穗率是表征群体质量的重要指标<sup>[18]</sup>, 群体茎蘖成穗率越高, 作物群体产量也越高<sup>[19]</sup>, 研究表明化肥减施 20% 情况下, T4 处理 (有机硅水溶缓释肥) 成穗率最高, 为 86.4%, 显著高于常规施肥处理。说明施用普通复合肥养分释放快, 水稻营养生长期养分供应充足使群体分蘖数量大, 但不利于后期有效穗形成, 表明后期养分持续供应是高成穗率的重要因素, 秸秆还田下后期秸秆养分逐渐腐解释放, 而缓释肥也具有这一特点, 从而促进有效穗的形成。

植株地上部分干重反映植株干物质积累和生长

状况, 且单株地上部干重为干物质向籽粒运转提供能源物质<sup>[15]</sup>。郑浣彤等<sup>[20]</sup>研究表明秸秆还田下基肥、分蘖肥、穗肥质量比为 7:2:1 能够有效地平衡水稻前期与后期的整体发育, 提高水稻中后期的群体干物质积累量, 为高产稳产提供保证。本研究表明秸秆还田下常规习惯施肥处理 (氮肥基肥、分蘖肥、穗肥质量比为 7:2:1) 更有利于花前干物质的积累, 积累率达到 68%, 这与前人的研究结果基本一致; 而 T1、T2、T3 和 T4 处理的花前干物质积累量、总积累量和花后积累率在处理间均无显著差异, 由此可以看出, 秸秆还田下化肥减施适当降低基肥施用比例 (氮肥基肥、分蘖肥、穗肥质量比为 5:3:2), 并不会显著影响干物质积累总量的形成。籽粒灌浆物质主要来源于花后光合同化产物积累和营养器官的转运<sup>[21]</sup>, 研究表明, CK、T4 处理更有利于花前干物质的转运, 干物质转运量对籽粒的贡献率高达 42.7% 以上, 说明常规施肥下花前干物质积累量可持续向籽粒运转提供能源物质, 但是在减量施肥条件下, 缓释肥可使养分持续供应, 干物质增长持续时间较长, 因而更有利于增加花后干物质积累及其向籽粒的转运。本研究也表明各处理花后干物质积累量对籽粒贡献率 (52.2% ~ 73.3%) 均高于干物质转运量对籽粒贡献率 (26.7% ~ 47.8%), 花后干物质积累量对提高水稻产量更为重要, 这与前人<sup>[15, 22]</sup>研究结果相一致。

在水稻产量方面, 丁文金等<sup>[23]</sup>研究表明, 秸秆还田氮肥减量处理对双季稻总产量不会产生明显的负面影响, 本研究表明秸秆还田下化肥减施 20%, 增加生育中后期氮肥追施比例 (基肥、分蘖肥、穗肥质量比为 5:3:2), 各处理产量均有所增加, 其中 T4 处理产量最高, 显著高于 T1 和 T2 处理 12.6% 和 11.2%, 这与黄容等<sup>[24]</sup>研究结果相一致, 其主要原因在于有效穗和结实率的提高, 可能原因是生育中后期秸秆充分腐解和缓释肥持续养分供给。从水稻品质来看, 不施肥显著降低了稻米的整精米率、垩白粒率、垩白度和蛋白质含量, 化肥减施 20% 下 T4 处理精米率和整精米率、垩白粒率和垩白度与普通施肥无显著差异, 但是各施肥处理间蛋白质含量无显著差异。但刘世平等<sup>[25]</sup>研究结果表明, 秸秆还田下有助于增加蛋白质含量, 与本研究结果不一致。

因地制宜的施肥管理能改善水稻生长发育, 提

高水稻对养分的吸收利用, 本研究表明成熟期各处理水稻植株地上部氮素积累量在籽粒部分占比达到 60% 以上, 说明营养生长期是植株氮素吸收和转移的关键时期, 本研究中化肥减施 20%, T3 处理氮素积累量表现为最高, T2 和 T4 处理的籽粒和茎叶氮素积累量相较常规施肥处理也均无显著差异, 表明秸秆还田下化肥减施, 适当增加生育中后期氮肥追施比例 (氮肥基肥、分蘖肥、穗肥质量比为 5:3:2) 有助于氮素的吸收与累积。肥料类型及运筹模式对水稻氮素利用影响显著, 已有研究报告, 前氮后移在低施氮量下能够提高氮肥的利用效率, 而在高施氮量下反而使氮肥的利用受到限制<sup>[26-28]</sup>, 本研究中化肥减施 20% 处理的氮肥利用率、氮肥偏生产力和氮肥农学效率均高于普通施肥处理, T4 处理的氮肥农学效率显著高于 T1、T2 和 T3, 表明秸秆还田下化肥减施 20%, 适当调整基蘖肥与穗肥比例, 能为水稻整个生育期提供比较平衡的氮素供应, 可促进氮素吸收, 提高氮肥利用效率。相关研究<sup>[29]</sup>表明, 施用控释氮肥下加入 30% 速效常规氮肥有助于水稻的氮素吸收, 尽管缓释氮肥比常规氮肥具有更长的使用寿命, 但单用缓释氮肥可能无法满足作物生长初期对氮素的需求, 本研究提升为 50% 速效氮肥比例, 在分蘖期和幼穗分化期施用。研究表明, 秸秆还田与氮肥配合施用, 能有效提高土壤全氮含量, 提高氮肥利用率<sup>[30]</sup>, 本研究表明秸秆还田下常规施肥处理土壤有机质和全氮量最高, 显著高于 CK 和 T2 处理, 这与张华艳等<sup>[31]</sup>研究结果相一致, T2、T3 和 4 处理间均无显著差异, 表明秸秆还田下化肥减施 20% 会减少田间氮素养分残留量, 可降低水稻收割后养分过度积累影响环境的风险。

#### 4 结论

秸秆还田下水稻分蘖盛期 T1 处理 (氮肥基肥、分蘖肥、穗肥质量比为 7:2:1) 群体茎蘖数量 ( $486.2 \times 10^4$  个  $\cdot$   $\text{hm}^{-2}$ ) 最高, 且更有利于花前干物质的积累, 积累率达到 68%。

化肥减施 20% (氮肥基肥、分蘖肥、穗肥质量比为 5:3:2), T4 处理的群体茎蘖数最低, 但是其成穗率最高, 为 86.4%, 显著高于 T1 处理; T2、T3 和 T4 处理的花前干物质积累量、总积累量和花后积累率与 T1 相比均无显著差异, T4 处理更有利

于花前干物质的转运, 干物质转运量对籽粒的贡献率高达 42.7% 以上。

化肥减施 20% 下, T2、T3 和 T4 处理产量均有所增加, T4 处理产量最高, 显著高于 T1 和 T2 处理 12.6% 和 11.2%, 其主要原因在于结实率的提高。从水稻品质来看, 不施肥显著降低了稻米的整精米率、垩白粒率、垩白度和蛋白质含量, 化肥减施 20% 下 T4 处理精米率和整精米率、垩白粒率和垩白度与 T1 相比无显著差异, 但是各施肥处理间蛋白质含量无显著差异。

成熟期各处理水稻植株地上部氮素积累量在籽粒部分占比达到 60% 以上, T3 处理氮素积累量最高, T2 和 T4 处理的籽粒和茎叶氮素积累量相较 T1 处理均无显著差异。T2、T3 和 T4 处理的氮肥利用率、氮肥偏生产力和氮肥农学效率均高于常规施肥处理, T4 处理的氮肥农学效率显著高于 T1、T2 和 T3 处理。收获后 T1 处理土壤有机质和全氮量最高, 化肥减施 20% 会减少田间氮素养分残留量。

#### 参考文献:

- [1] 王先如. 江苏沿海垦区稻麦周年优质高产高效技术研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2018.
- [2] 宋蝶, 陈新兵, 董洋阳, 等. 养分专家系统推荐施肥对苏北地区水稻产量和肥料利用率的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2020, 28 (1): 68-75.
- [3] 张斯梅, 顾克军, 顾东祥, 等. 江苏淮北地区粳稻产量与干物质生产特征研究 [J]. 中国农学通报, 2018, 34 (9): 1-7.
- [4] 万欣, 江浩, 王磊, 等. 江苏沿海滩涂土壤改良技术研究进展 [J]. 江苏林业科技, 2017, 44 (5): 43-47.
- [5] Zhang J H, Liu J L, Zhang J B, et al. Effects of nitrogen application rates on translocation of dry matter and nitrogen utilization in rice and wheat [J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36 (10): 1736-1742.
- [6] 王远玲. 江苏沿海地区稻麦优化施肥研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2014.
- [7] 剧成欣, 季红娟, 张春梅, 等. 中国水稻生产“双减”的目的意义与途径方法 [J]. 中国农学通报, 2018, 34 (23): 12-18.
- [8] Zegada-Lizarazu W, Monti A. Energy crops in rotation: a review [J]. Biomass Bioenergy, 2011, 35: 12-25.
- [9] 李思平, 丁效东, 曾路生, 等. 秸秆还田与化肥减施对水稻生长指标及光合参数的影响 [J]. 水土保持学报, 2020, 34 (2): 208-215.
- [10] 张忠学, 韩羽, 齐智娟, 等. 秸秆还田下水氮耦合对黑土稻田  $\text{CH}_4$  排放与产量的影响 [J]. 农业机械学报, 2020, 51

- (7): 254–262.
- [11] 周胜, 张鲜鲜, 王从, 等. 水分和秸秆管理减排稻田温室气体研究与展望 [J]. 农业环境科学学报, 2020, 39 (4): 852–862.
- [12] 王金山, 刘小利, 刘佩, 等. 秸秆还田条件下减施氮肥对旱地冬小麦水氮利用、光合及产量的影响 [J]. 麦类作物学报, 2020 (2): 1–10.
- [13] 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.
- [14] 李录久, 王家嘉, 吴萍萍, 等. 秸秆还田下氮肥运筹对白土田水稻产量和氮吸收利用的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22 (1): 254–262.
- [15] 刘彦伶, 李渝, 白怡婧, 等. 长期不同施肥对水稻干物质和磷素积累与转运的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25 (7): 1146–1156.
- [16] Huang M, Yang C L, Ji Q M, et al. Tillering responses of rice to plant density and nitrogen rate in a subtropical environment of southern China [J]. Field Crops Research, 2013, 149: 187–192.
- [17] Eagle A J, Bird J, Horwath W R, et al. Rice yield and nitrogen utilization efficiency under alternative straw management practices [J]. Agronomy Journal, 2000, 92 (6): 1096–1103.
- [18] 韦还和, 葛佳琳, 张徐彬, 等. 盐胁迫下梗稻品种南梗 9108 分蘖特性及其与群体生产力的关系 [J]. 作物学报, 2020, 46 (8): 1238–1247.
- [19] 钟旭华, 彭少兵, John E S, 等. 水稻群体成穗率与干物质积累动态关系的模拟研究 [J]. 中国水稻科学, 2001, 15 (2): 28–33.
- [20] 郑浣彤, 邵玺文, 耿艳秋, 等. 秸秆还田与氮肥运筹对水稻产量及氮素利用的影响 [J]. 灌溉排水学报, 2019, 38 (12): 29–36.
- [21] Ning P, Li S, Yu P, et al. Post-silking accumulation and partitioning of dry matter, nitrogen, phosphorus and potassium in maize varieties differing in leaf longevity [J]. Field Crops Research, 2013, 144: 19–27.
- [22] 姜佰文, 李贺, 王春宏, 等. 有机无机肥料配合施用对水稻干物质积累及运转的影响 [J]. 东北农业大学学报, 2013, 44 (5): 10–13.
- [23] 丁文金, 马友华, 胡宏祥, 等. 秸秆还田与减量施肥对双季稻产量及土壤酶活性的影响 [J]. 农业环境与发展, 2013, 30 (4): 72–77.
- [24] 黄容, 高明, 万毅林, 等. 秸秆还田与化肥减量配施对稻-菜轮作下土壤养分及酶活性的影响 [J]. 环境科学, 2016, 37 (11): 4446–4453.
- [25] 刘世平, 聂新涛, 戴其根, 等. 免耕套种与秸秆还田对水稻生长和稻米品质的影响 [J]. 中国水稻科学, 2007, 21 (1): 71–76.
- [26] 李珣, 苗立新, 孙杰, 等. 氮肥运筹对北方超级稻水稻氮素利用率的影响 [J]. 北方水稻, 2014, 44 (5): 15–18.
- [27] 卢铁钢, 崔月峰, 孙国才, 等. 氮肥运筹对水稻产量及氮素利用率的影响 [J]. 作物研究, 2012, 26 (4): 320–323.
- [28] 吴文革, 张四海, 赵决建, 等. 氮肥运筹模式对双季稻北缘水稻氮素吸收利用及产量的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13 (5): 757–764.
- [29] Ding W C, Xu X P, He P, et al. Improving yield and nitrogen use efficiency through alternative fertilization options for rice in China: a meta-analysis [J]. Field Crops Research, 2018, 227: 11–18.
- [30] Xie W J, Wu L F, Zhang Y P, et al. Effects of straw application on coastal saline topsoil salinity and wheat yield trend [J]. Soil and Tillage Research, 2017, 169: 1–6.
- [31] 张华艳, 牛灵安, 郝晋珉, 等. 秸秆还田配施缓控释肥对土壤养分和作物产量的影响 [J]. 土壤通报, 2018, 49 (1): 140–149.

### Effects of straw returning and fertilizer reduction on rice yield, nitrogen uptake and utilization in northern Jiangsu

YAN Jun, WANG Wei-yi, LI Bin, LI Ya-fang, JIANG Run-zhi, SHEN Ming-chen, WANG Chun-yun, CUI Bi-bo\* (Xinyang Experimental Station of Jiangsu Institute of Agricultural Sciences in Coastal Areas, Yancheng Jiangsu 224049)

**Abstract:** To explore the response mechanism of chemical fertilizer reduction under straw returning to the field, and to provide a theoretical basis for the scientific fertilization of rice in northern Jiangsu, field experiment was carried out to study the effects of local customary fertilization (T1, the ratio of basal, tiller and panicle of nitrogen fertilizer was 7 : 2 : 1), different types of fertilizers reduced by 20% (T2, T3 and T4, the ratio of basal, tiller and panicle of nitrogen fertilizer was 5 : 3 : 2) and different ratios of nitrogen fertilizer topdressing on rice growth, yield, quality, nitrogen absorption and utilization and soil nutrients under the full return of wheat straw to the field, with no fertilizer treatment as control (CK). This study could provide reasonable fertilization technical support for local rice-wheat rotation. The results showed that the number of tillers ( $486.2 \times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$ ) in the T1 at the tillering stage of rice was the highest under straw returning, and it was more conducive to the accumulation of dry matter before flowering, and the accumulation rate reached 68%. At 20% reduction in fertilizer application, the number of tillers in the T4 was the lowest, but the ear formation rate was the highest at 86.4%,

which was significantly higher than that in the T1; T2, T3 and T4 had no significant difference in dry matter accumulation before flowering, total accumulation and post-flowering accumulation rate, compared with T1. T4 was more conducive to the transport of dry matter before flowering, and the contribution rate of dry matter transfer to grain was as high as 42.7%. In terms of yield composition, T2, T3 and T4 increased the actual yield, and the yield of T4 was the highest, which was significantly higher than that of T1 and T2 treatments by 12.6% and 11.2%. The main reason was the increase of effective ears and seed setting rate. In terms of rice quality, CK significantly reduced the polished rice rate, chalky grain rate, chalkiness and protein content of rice. The polished rice rate and whole polished rice rate, chalky grain rate and chalkiness of T4 was not significantly different compared with T1, but there was no significant difference in protein content between the fertilization treatments. At the mature stage, nitrogen accumulation in the upper part of the rice plant in each treatment accounted for more than 60% of the grain portion, nitrogen accumulation of T3 was the highest, and nitrogen accumulation in grain and stem leaves of T2 and T4 was not significantly different compared with T1. T2, T3 and T4 had higher nitrogen utilization efficiency, partial nitrogen productivity and nitrogen fertilizer agronomic efficiency than T1, and the agronomic efficiency of nitrogen fertilizer of T4 was significantly higher than that of T1, T2 and T3. After harvest, the soil organic matter and total nitrogen content of T1 was the highest, and 20% reduction of chemical fertilizer reduced the residual nitrogen content in the field. In general, fertilizer application with 20% reduction under the full return of wheat straw to the field (the ratio of basal, tiller and panicle of nitrogen fertilizer was 5 : 3 : 2) won't affect the normal growth and yield of rice, and the application of 50% water-soluble organ siloxane slow release fertilizer with 50% nitrogen fertilizer can increase yield, improve nitrogen fertilizer utilization rate and reduce paddy field nutrient residual in the rice-wheat rotation system of northern Jiangsu.

**Key words:** straw returning; fertilizer application reduction; dry matter accumulation; yield; quality; nitrogen absorption