

氮肥分期施用对机插稻产量构成及氮肥利用率的影响

白洁瑞¹, 邱淑芬¹, 李 勇¹, 沈家禾¹, 储亚云¹, 魏广彬², 朱荣松^{1*}

(1. 江苏省金坛区土壤肥料技术指导站, 江苏 金坛 213200;

2. 江苏省金坛区作物栽培技术指导站, 江苏 金坛 213200)

摘要: 通过田间试验, 对分蘖肥、穗肥氮素一次和分次施用时机插水稻的产量构成、氮肥利用效率以及与二者紧密相关的茎蘖动态、高光效叶面积和叶片 SPAD 值进行了研究。结果表明: 分蘖肥氮素分次施用对产量形成无显著影响, 而穗肥氮素分次施用使产量增加 6.1%~6.5%, 氮肥利用率提高 10.0%~11.6%。主要原因在于: 分蘖肥氮素分次施用对水稻生育前期茎蘖动态和叶龄进程基本无影响。但是, 穗肥氮素分次施用显著增加开花时倒一叶和倒二叶叶面积, 较穗肥一次施用分别增长 10.1%~13.7% 和 32.1%~39.9%, 并减缓了开花后 20 d 内倒二叶 SPAD 值降解速率, 为水稻后期光合物质累积提供良好物质基础, 使水稻成穗率提高 5.1%~6.1%, 且大幅提高实粒数。因而, 机插水稻分蘖肥一次施用, 穗肥分次施用有利于增加产量, 提高氮肥利用效率, 同时一定程度降低劳动投入量。

关键词: 机插稻; 氮肥施用次数; 产量结构; 氮肥利用率

中图分类号: S143.1; S511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-6257(2016)05-0045-05

氮肥是水稻增产的主要肥料因子, 在水稻高产和稳产中发挥着巨大作用^[1-2]。然而, 据报道我国稻季氮肥平均用量达 180 kg/hm², 较世界平均水平 102 kg/hm² 高出 75% 左右^[3], 一些高产稻区更是高达 300~350 kg/hm²。另一方面, 我国氮肥利用率却偏低, 平均为 30%~35%, 而欧美一些发达国家的氮肥利用率为 70%^[4-5]。氮肥的长期高投入和低利用率, 已造成农田生态环境恶化, 能源和资源耗竭, 粮食品质下降等一系列问题^[6-7]。研究者普遍认为氮肥用量偏大的根源是利用率低, 朱兆良等指出要站在保证粮食安全的高度提高肥料利用率^[8]。前人根据水稻产量构成特征及产量增长特点, 已对氮肥运筹做了大量研究^[9-12], 形成基蘖肥: 穗肥为 6:4~5:5 的前氮后移、重施穗肥的高产栽培模式^[13-15], 认为少量多次施氮可提高产量和氮肥利用效率^[16]。不同生育时期施肥对产量形成影响不一, 分蘖肥对穗数形成至关重要, 传统经验提倡分蘖肥分两次在栽插后 7 d 和 14 d 施用。施穗肥是巩固穗数、增加颖花、提高粒重的关键措施, 一般推

荐分促花肥和保花肥两次施用^[17]。然而, 机插稻具有秧龄小 (15~18 d) 和农耗长 (7~10 d) 的特点。稻株分蘖前期对养分需求量较小, 如基肥供应充足, 能否通过优化施肥时期减少分蘖肥次数? 同时, 在重施穗肥的策略下, 穗肥能否实现一次施肥? 这在水稻生产从业人员不足, 劳动力成本上升, 老龄化现象日益突出^[18] 的背景下, 发展水稻轻简栽培模式具有重要实践意义。本研究在氮肥高产运筹模式下, 探索水稻不同生育阶段氮肥施用次数对产量结构及氮肥利用率的影响, 以期合理减少水稻施肥次数, 挖掘氮肥增产增效潜能提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验区域概况

试验地点位于江苏省常州市金坛区薛埠镇茅东村, 属太湖稻区, 北亚热带海洋性季风气候, 常年平均气温 15.3℃, 日照时数 2 034 h, 降水量 1 005 mm, 无霜期 250 d。土壤为侧渗型水稻土亚类板浆白土属, 中壤质地, 土壤有机质、全氮、有效磷 (P)、速效钾 (K) 含量分别为 27.5 g/kg、1.6 g/kg、19.2 mg/kg、102 mg/kg, pH 值 6.7。

1.2 供试材料

供试水稻品种为武运粳 23 号, 2013 年 6 月 1

收稿日期: 2015-08-14; 最后修订日期: 2015-10-10

作者简介: 白洁瑞 (1981-), 女, 山西临汾人, 硕士, 农艺师, 主要从事土壤肥料技术指导及农村能源管理工作。E-mail: 981259119@qq.com。

通讯作者: 朱荣松, E-mail: hji0414@163.com。

日播种, 6月19日插秧机移栽, 秧龄为3.5叶, 株行距为11.7 cm × 30 cm, 每公顷栽25万穴, 基本苗75~100万株/hm²。配方肥(N:P₂O₅:K₂O) 18-7-10、15-5-15分别为基肥和穗肥配方, 为当地水稻测土配方推荐肥料。

1.3 试验设计

设4个处理, 处理1为不施肥处理; 处理2为3次施肥, 分蘖肥、穗肥氮素均作一次施入; 处理3为4次施肥, 穗肥氮素分促花肥和保花肥两次施用; 处理4为5次施肥, 分蘖肥、穗肥氮素均分两次施用, 具体施肥方案见表1。N、P₂O₅、K₂O总投入分别为270、37.5、71.3 kg/hm²。每处理重复3次, 随机排列, 小区面积66 m² (10 m × 6.6 m), 小区间筑埂并用塑料薄膜覆盖, 隔水隔肥。

表1 不同施肥处理设计

处理	肥料运筹
不施肥	不施任何化肥
3次施肥 (CK)	基肥: 配方肥(18-7-10) 375 kg/hm ² 分蘖肥: 尿素 180 kg/hm ² 穗肥: 配方肥(15-5-15) 225 kg/hm ² + 尿素 180 kg/hm ²
4次施肥 (穗肥分次施用)	基肥: 配方肥(18-7-10) 375 kg/hm ² 分蘖肥: 尿素 180 kg/hm ² 促花肥: 配方肥(15-5-15) 225 kg/hm ² + 尿素 105 kg/hm ² 保花肥: 尿素 75 kg/hm ²
5次施肥 (分蘖肥、穗肥分次施用)	基肥: 配方肥(18-7-10) 375 kg/hm ² 第1次分蘖肥: 尿素 90 kg/hm ² 第2次分蘖肥: 尿素 90 kg/hm ² 促花肥: 配方肥(15-5-15) 225 kg/hm ² + 尿素 105 kg/hm ² 保花肥: 尿素 75 kg/hm ²

注: 基肥在插秧前施; 分蘖肥作一次施用时在插秧后10 d施, 作两次施用时分别在插秧后7和14 d施; 穗肥作一次施用时在倒三叶(插秧后50 d)施, 作促花肥、保花肥两次施肥时分别在倒四叶(插秧后40 d)和倒二叶(插秧后57 d)施。

表2 不同处理水稻产量结构

处理	高峰苗 (万株/hm ²)	成穗率 (%)	有效穗 (万穗/hm ²)	总粒数 (个/穗)	结实率 (%)	实粒数 (个/穗)	千粒重 (g)	理论产量 (kg/hm ²)	实产 (kg/hm ²)
不施肥	331.5 b	74.2 c	246.0 c	97.0 c	95.6 a	92.7 c	27.2 a	6 203 c	4 800 c
3次施肥	376.5 a	84.8 b	319.3 b	132.0 b	92.3 b	121.9 b	26.2 b	10 198 b	9 561 b
4次施肥	377.9 a	90.9 a	343.7 a	148.8 a	90.4 b	134.5 a	24.0 c	11 094 a	10 179 a
5次施肥	384.0 a	89.9 a	345.3 a	150.5 a	90.8 b	136.7 a	23.4 c	11 045 a	10 145 a

注: 同列数据不同字母表示差异达0.05显著水平, 下同。

1.4 分析和计算方法

茎蘖动态与叶龄测定: 每小区定位3个苗情点, 每点定10穴, 于插秧后10 d到高峰苗每5 d查一次水稻茎蘖数与叶龄。

SPAD值、叶面积测定: 水稻开花期、开花后20 d每小区按苗情点每穴平均苗数, 选取3穴水稻, 用以测定冠层顶部3张叶片的SPAD值、叶面积。SPAD值用SPAD-502叶绿素仪在叶片中部测定, 叶面积(cm²)按叶片长(cm) × 宽(cm) × 0.7计。

成熟期考种: 成熟期每处理调查3个点, 每点10穴, 考察有效穗、每穗总粒数、空秕粒数, 并于成穗期前1 d采集3穴水稻, 用于测定籽粒与秸秆氮素含量。水稻收获时, 每小区单打单收, 记载稻谷与稻草重量, 并测定千粒重。

氮肥利用率如下式:

氮肥吸收利用率(%) = (施氮区植株总吸氮量 - 未施氮区植株总吸氮量) / 施肥量 × 100

氮肥农学利用率(kg/kg) = (施氮区籽粒产量 - 未施氮区籽粒产量) / 氮肥施用量

氮肥生理利用率(kg/kg) = (施氮区籽粒产量 - 未施氮区籽粒产量) / (施氮区植株总吸氮量 - 未施氮区植株总吸氮量)

1.5 统计分析

采用Excel 2003和SPSS 11.0软件处理数据, 并利用LSD法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同施肥次数对水稻产量结构的影响

表2可见, 3个施肥处理较不施肥处理平均增产1.1倍。4次施肥处理和5次施肥处理分别比3次施肥处理增产6.5%和6.1%, 达差异显著水平。从产量结构来看, 4次施肥处理和5次施肥处理水稻成穗率比3次施肥分别提高6.1%和5.1%, 增加了有效穗数。另外, 4次施肥处理和

5次施肥处理水稻实粒数较3次施肥处理分别提高10.3%和12.1%，尽管千粒重有所下降。表明分蘖肥分次施用对产量无明显影响，但穗肥分促花肥和保花肥施用能够提高成穗率，增加实粒数，提高产量。

2.2 不同施肥次数对水稻氮素利用率的影响

表3可见，4次施肥处理和5次施肥处理氮肥吸收利用率或农学利用率均无显著差异，但均显著高于3次施肥，说明分蘖肥分次施用对氮肥利用率无影响，而穗肥分次施用能够促进水稻对氮素的吸收。由于本研究中氮肥利用率的计算是以无肥区代替无氮区，未考虑磷、钾肥对氮素吸收的促进作用，因此结果较实际利用率偏高。

表3 不同处理氮肥利用率

处理	吸收利用率 (%)	农学利用率 (kg/kg)	生理利用率 (kg/kg)
3次施肥	37.3 b	14.7 b	39.3 a
4次施肥	47.3 a	17.7 a	37.3 a
5次施肥	48.9 a	18.1 a	36.9 a

2.3 不同施肥次数水稻茎蘖数和叶龄动态变化

施肥显著增加了水稻茎蘖数（图1），3个施肥处理较不施肥处理同期增加15.8%~29.6%，但同期3个施肥处理茎蘖数一致，说明分蘖肥分次施用对茎蘖数变化无影响。各处理同一时期的叶龄间无显著差异（图2），表明施肥对叶龄进程无影响。

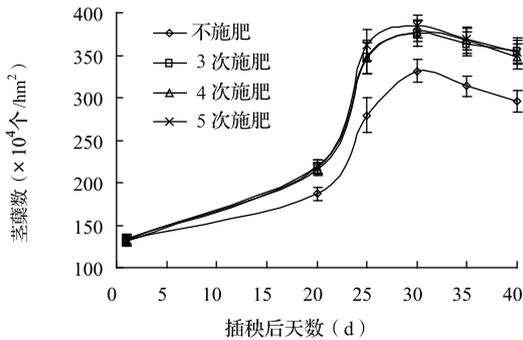


图1 不同处理水稻茎蘖动态

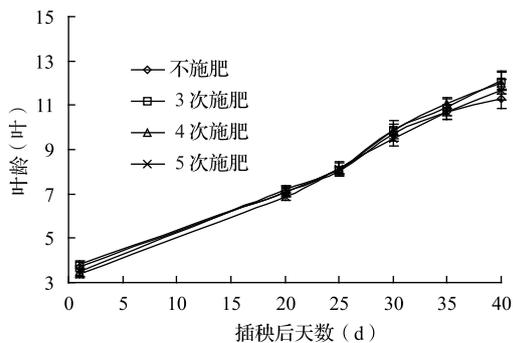


图2 不同处理水稻叶龄动态

2.4 不同施肥次数对水稻开花期倒3张叶面积的影响

施肥显著影响冠层叶面积（图3），同一叶位不施肥处理叶面积最小。3个施肥处理，倒三叶叶面积无显著差异，4次施肥处理和5次施肥处理叶面积亦无显著差异，但4次施肥处理和5次施肥处理较3次施肥处理倒一叶叶面积分别增加10.1%和13.7%，倒二叶增幅更大，分别为32.1%和39.9%。可见，分蘖肥分次施用对开花时顶部3张叶片叶面积无影响，而穗肥分促花肥和保花肥两次施用有利于增加倒一叶和倒二叶叶面积。

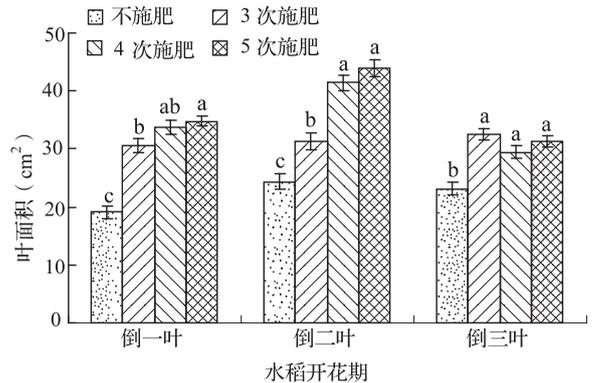


图3 不同处理开花期倒3张叶叶面积

2.5 不同施肥次数水稻倒3张叶片SPAD值

图4显示，开花期和开花后20d施肥处理顶三叶同一叶位SPAD值均高于不施肥处理。3个施肥处理间，开花期同一叶位SPAD值无显著差异，开花后20d仅倒二叶SPAD值有显著差异，4次施肥处理和5次施肥处理倒二叶叶面积分别比3次施肥处理高31.5%和39.9%，4次施肥处理和5次施肥处理则无明显差异。开花到开花后20d同一叶位SPAD值均有不同程度下降，施肥处理间倒一叶和倒二叶降幅差异较大，3次施肥处理倒一叶、倒二

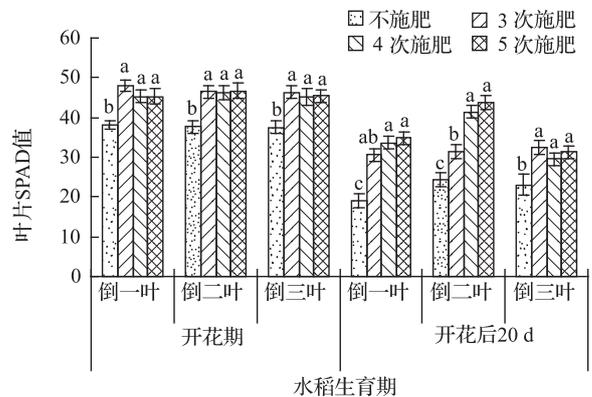


图4 开花期与花后20d倒3张叶叶绿素含量

叶分别下降 36.1% 和 32.4%，4 次施肥处理分别下降 25.6% 和 10.4%，5 次施肥处理分别下降 23.2% 和 6.1%。可见，穗肥分促花肥和保花肥两次施用减缓了开花后倒一叶，特别是倒二叶叶绿素降解速度。

3 结论与讨论

研究表明，高产水稻籽粒产量的 80%~90% 来源于抽穗后叶片制造的光合产物，比例越高，产量越高^[14,17]。叶片是光合作用的主要部位，叶面积与叶绿素直接关系光合效率和光合产物的累积^[19]。水稻开花后，由营养生长转变为生殖生长，叶片逐渐衰老，成为限制水稻高产最重要的因素之一^[20]。因而，开花前形成较大高光效叶面积，并延缓开花后叶绿素降解，有助于提高光合效率和增加光合产物累积，为水稻高产奠定物质基础^[3]。同时，众多研究表明，增加追肥比例或少量多次施肥，可显著延缓叶绿素降解，提高中、后期水稻光合能力^[9-11]。本研究表明，水稻穗肥分促花、保花两次施用较一次施用显著增加了开花期倒一、二叶叶面积，并减缓了开花后 20 d 内 SPAD 值降解速率，这可能受肥料作用时间和施用数量共同影响。氮肥作用期发生于施肥后的第 1、2 乃至第 3 个叶位^[17]。分蘖肥因施用时期早而对开花时顶部 3 张叶片叶面积无影响，穗肥分次施用则提早了施肥时期，延长了养分有效供应时间，满足了最后 3 张叶片伸长所需养分，进而增加叶面积，减缓叶绿素降解。

穗数、粒数和粒重是水稻产量构成三要素。一般而言，早施分蘖肥有利于促进分蘖早发，增加茎蘖数。本试验条件下，分蘖肥氮素分次施用对水稻生育前期茎蘖动态无显著影响。这可能与基肥供应充足，插秧时秧龄较小 (3.5 叶)，农耗较长 (7~10 d)，对氮素需求量小有关。另外，分蘖肥分一次和两次施用氮素总量一致，且距基肥时间接近，可能满足了分蘖所需氮素。商庆银等^[21]在机插晚稻上研究发现，分蘖肥在栽插后 7、10 和 13 d 施用对有效穗数均无显著影响。水稻进入穗分化阶段，生物量快速增加，是氮素吸收的高峰阶段。本研究中穗肥分两次施用，促花肥较穗肥一次性施用时间提早 10 d，促进了水稻分蘖成穗，提高了水稻成穗率。粒数跟穗肥用量、施用时间密切相关。凌启鸿等^[17]认为，促花肥应在倒四叶期施用，以促进颖花分化，保花肥则在倒二叶期施用，以防止颖花

退化。受肥料作用时间和水稻生育进程双重影响，本试验促花肥于倒四叶期施用，为倒三和二叶期枝梗和颖花分化养分需求提供了保障。因此，穗肥分两次施用较倒三叶期穗肥一次性施用时水稻总粒数增加 12.7%~14.1%。虽然，穗肥分两次施用，结实率和千粒重有一定程度下降，但实粒数增加弥补了两者下降对产量形成的影响。

氮肥利用率常用吸收利用率、农学利用率和生理利用率表达，前两个指标直接与氮肥施用量相关，而氮肥生理利用率是植物体内养分利用效率，不是肥料增产效应，应用范围相对有限^[22]。本试验表明，分蘖肥分次施用对氮肥吸收利用率和农学利用率无显著影响，而穗肥分两次施用则显著提高了氮肥利用率。一般而言，氮肥施用量一致时，产量增加能够提高氮肥利用率。另外，周伟等^[23]利用¹⁵N 研究发现，穗肥氮挥发损失较分蘖肥低，且氮易于向籽粒转移，使穗肥氮肥利用率高于分蘖肥。

因此，穗肥分促花肥和保花肥两次施用，能够提高水稻成穗率，增加颖花数，促进开花时倒一叶和倒二叶叶面积，延缓倒二叶叶绿素降解，为水稻后期维持高光合效率奠定基础，增加水稻产量，提高氮肥利用率。另外，分蘖肥一次施用可有效减缓劳动力紧张压力，降低用工成本。

参考文献:

- [1] 王伟妮, 鲁剑巍, 鲁明星, 等. 湖北省早、中、晚稻施氮增产效应及氮肥利用率研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17 (3): 545-553.
- [2] 郭汝礼, 杨林章, 沈明星, 等. 太湖地区黄泥土水稻适宜施氮量研究-长期定位试验 [J]. 土壤, 2006, 38 (4): 379-383.
- [3] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略 [J]. 中国农业科学, 2002, 35 (9): 1095-1103.
- [4] Liu J G, You L Z, Amini M, et al. A high-resolution assessment on global nitrogen flows in cropland [J]. Proc Natl Acad Sci, 2010, 107: 8035-8040.
- [5] Peng S B, Buresh R J, Huang J L, et al. Improving nitrogen fertilization in rice by site-specific N management [J]. A review. Agron. Sustain. Dev., 2010, 30: 649-656.
- [6] 金继运, 李家康, 李书田. 化肥与粮食安全 [J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12 (5): 601-609.
- [7] 张永春, 汪吉东, 沈明星, 等. 长期不同施肥对太湖地区典型土壤酸化的影响 [J]. 土壤学报, 2010, 47 (3): 465-471.
- [8] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题 [J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19 (2): 259-273.

- [9] 贺帆, 黄见良, 崔克辉, 等. 实时实地氮肥管理对水稻产量和稻米品质的影响 [J]. 中国农业科学, 2007, 40 (1): 123-132.
- [10] 杨建昌, 杜永, 刘辉. 长江下游稻麦周年超高产栽培途径与技术 [J]. 中国农业科学, 2008, 41 (6): 1611-1621.
- [11] 张军, 张洪程, 段样茂, 等. 地力与施氮量对超级稻产量、品质及氮素利用率的影响 [J]. 作物学报, 2011, 37 (11): 2020-2029.
- [12] 陈刚, 吴文革, 孙如银. 氮肥追施方式对机插杂交中籼稻群体质量及产量形成的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2015, (2): 78-82.
- [13] 凌启鸿, 张洪程, 戴其根, 等. 水稻精确定量施氮研究 [J]. 中国农业科学, 2005, 38 (12): 2457-2467.
- [14] 张洪程, 吴桂成, 戴其根, 等. 水稻氮肥精确后移及其机理 [J]. 作物学报, 2011, 37 (10): 1-15.
- [15] 胡雅杰, 朱大伟, 邢志鹏, 等. 改进施氮运筹对水稻产量和氮素吸收利用的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21 (1): 12-22.
- [16] 谢芳, 韩晓日, 杨劲峰, 等. 不同施氮处理对水稻氮素吸收及产量的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2010, (4): 24-26.
- [17] 凌启鸿, 张洪程, 丁艳锋, 等. 水稻高产精确定量栽培 [J]. 北方水稻, 2007, 2: 1-9.
- [18] 何福平. 农村劳动力老龄化对我国粮食安全的影响 [J]. 求索, 2011, 11: 73-75.
- [19] 龚金龙, 张洪程, 李杰, 等. 水稻超高产栽培模式及系统理论的研究进展 [J]. 中国水稻科学, 2010, 24 (4): 417-424.
- [20] 聂军, 郑圣先, 戴平安, 等. 控释氮肥调控水稻光合功能和叶片衰老的生理基础 [J]. 中国水稻科学, 2005, 19 (3): 255-261.
- [21] 商庆银, 吕伟生, 曾勇军, 等. 分蘖肥不同施用时期对机插双季稻产量和群体发育的影响 [J]. 江西农业大学学报, 2015, 37 (1): 42-47.
- [22] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径 [J]. 土壤学报, 2008, 45 (5): 915-924.
- [23] 周伟, 田玉华, 尹斌. 太湖地区水稻追肥的氮挥发损失和氮素平衡 [J]. 中国生态农业学报, 2011, 19 (1): 32-36.

Effects of N fertilizer application times on yield formation and N use efficiency of machine-transplanted rice

BAI Jie-rui¹, QIU Shu-fen¹, LI Yong¹, SHEN Jia-he¹, CHU Ya-yun¹, WEI Guang-bin², ZHU Rong-song^{1*} (1. Soil and Fertilizer Technical Guidance Station of Jintan City, Jintan Jiangsu 213200; 2. Culturing Technical Guidance Station of Jintan City, Jintan Jiangsu 213200)

Abstract: A field experiment was conducted to determine the effects of single N application and split N application as tiller fertilization and earing fertilization on rice yield and composition, N fertilizer use efficiency, as well as tiller dynamic, leaf areas of high photosynthetic efficiency and SPAD value of machine-transplanted rice, which were closely related to the yield and N fertilizer use efficiency in the mode of rice transplanting with machine. The results showed split N application as tiller fertilization had little effect on yield development. However, split N application as earing fertilization increased rice yield by 6.1% ~ 6.5%, and enhanced N fertilizer use efficiency by 10.0% ~ 11.6%. The main reasons were split N applications as tiller fertilization had no effect on tiller dynamic and leaf age. But, split N applications as earing fertilization increased leaves' areas of top first leaf and top second leaf by 10.1% ~ 13.7% and 32.1% ~ 39.9%, respectively, which reached significant levels. Meanwhile, chlorophyll degradation rate within 20 days after flower was retarded under treatment of split N applications as earing fertilization, which laid a good foundation for photosynthetic material accumulation during late growth stage, and then led to 5.1% ~ 6.1% of increase in spike rate, and greatly improved the filled grain number. In sum, single N application of tiller fertilization and split N applications of earing fertilization on rice transplanting with machine increased yield, raised N fertilizer use efficiency and slowed down labor shortage.

Key words: machine-transplanted rice; N fertilizer application times; yield composition; N fertilizer use efficiency