

前氮后移对寒地水稻根系吸收能力的影响^①

郁 燕, 彭显龙*, 刘元英, 张 慧, 陈丽楠

(东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030)

摘 要: 采用田间小区试验方法, 在高氮 (135 kg/hm²) 和中氮 (105 kg/hm²) 水平下, 研究了穗肥比例对寒地水稻根系吸收能力的影响。试验结果表明: 高氮水平下, 穗肥比例为 15% 的处理各个时期伤流量和根系含糖量均最低, 中氮水平下穗肥比例为 35% 的处理伤流量和根系含糖量均最高。相同氮量条件下, 随着穗肥比例增加根系伤流量增加, 幼穗分化期增加均达到了 5% 的显著水平; 中氮条件下, 前氮后移使幼穗分化期和抽穗后 20 天的根系含糖量显著提高了 14.0% 和 35.1% ($p < 0.05$)。穗肥比例由 15% 增加到 35%, 水稻吸氮量增加了 11.1%~15.6%, 氮肥吸收利用率提高了 20%~43%, 农学利用率提高了 37.5%~38.5%, 氮肥偏生产力提高了 12.6%~20.8%, 水稻产量提高了 12.3%~12.7%, 且均达到了 5% 的显著水平。以上结果表明, 前氮后移促进了水稻碳氮代谢的协调, 增加了根系可溶性糖含量, 提高了水稻根系吸氮能力, 增加了氮素积累量, 因此提高了氮肥利用率和产量。

关键词: 水稻; 伤流量; 可溶性糖; 氮素吸收; 氮肥利用率

中图分类号: S158.3

黑龙江省是我国优质粳稻的主产区, 水稻栽培面积超过 270 万 hm², 稻米商品率高, 在维持国家粮食安全中发挥十分重要的作用。传统观念认为, 黑龙江省是高纬度寒地稻区, 土壤肥沃, 生育中后期气温升高, 土壤养分有效性增加, 一般不需要后期施肥, 造成农民前期 N 肥施用量过高, N 肥施用时期不合理的问题^[1]。因此, 在寒地近 60% 的稻田在水稻生育前期 N 素用量过高, 使水稻无效分蘖增多, 群体质量下降, 水稻倒伏和病害发生严重, 特别是结实率降低, 这已成为严重影响寒地水稻高产的关键问题^[2]。为了解决黑龙江水稻生产中的问题, 提高水稻产量, 刘元英等^[3]提出了以前 N 后移为核心的养分综合管理技术。在寒地, 应用该技术可改善水稻群体质量, 使水稻产量增加 10% 以上, 并能显著提高 N 素利用率^[4-6]。但是, 前 N 后移提高 N 肥利用率的机制还不清楚。

水稻 N 效率的提高与根系活力密不可分, 植物根系伤流量可作为根系活力的指标, 能比较准确地反映根系活性的变化^[7-8]。N 素管理与水稻根系伤流量的关系我国南方稻区研究较多, 寒地稻田研究较少, 而有关 N 肥后移对水稻根系伤流量的影响在寒地未见报道。为此采用田间小区试验的方法, 在高 N 和中 N 施

肥量的条件下, 进行前 N 后移的对比试验, 研究前 N 后移对水稻根系吸收 N 素能力的影响, 明确寒地水稻 N 素吸收利用与根系活力的关系, 揭示前 N 后移提高寒地水稻 N 效率的机制, 为寒地水稻 N 肥的合理施用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试品种: 绿洲 3 号。

供试肥料: 尿素 (含 N 460 g/kg)、硫酸铵 (含 N 210 g/kg)、三料磷肥 (含 P₂O₅ 460 g/kg)、硫酸钾 (含 K₂O 500 g/kg)。

供试土壤: 白浆土型水稻土。基础肥力为有机质 51.2 g/kg, 全 N 2.09 g/kg, 全 P 0.84 g/kg, 速效 N 147 mg/kg, 速效 P (P₂O₅) 26.0 mg/kg, 速效 K (K₂O) 156 mg/kg, pH 5.81。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计 试验设在庆安县和平水利灌溉站。在高 N (135 kg/hm²) 和中 N (105 kg/hm²) 条件下, 设置 2 种 N 肥管理方式, 穗肥比例为 15% 的习惯施肥模式 (farmers' fertilization practice, FFP), 基肥:

①基金项目: 公益性行业科研专项 (200803030) 和东北农业大学创新团队项目资助。

* 通讯作者 (pxl0508@163.com)

作者简介: 郁燕 (1982—), 女, 山东济南人, 硕士研究生, 主要从事土壤肥力研究。E-mail: yuyan122714@163.com

蘖肥:调节肥:穗肥比例为 5:2.5:1.0:1.5; 穗肥比例为 35% 的 N 肥管理模式(integrated nitrogen management, INM), 穗肥分两次施入, 一次促花肥, 一次保花肥, 基肥:蘖肥:促花肥:保花肥比例为 4.5:2.0:1.5:2.0。为了计算 N 肥利用率, 设置不施 N 肥处理(N0)。共 5 个处理。各处理均施 P_2O_5 45 kg/hm², K_2O 80 kg/hm²。P 肥作基肥一次施用, K 肥分基肥和 8.5 叶龄(幼穗分

化期)两次施用, 前后比例为 1:1。分蘖期所用 N 肥为尿素和硫酸铵, 按 N 各占 50% 的比例混合, N 肥用量和施用时期见表 1。

水稻 4 月 15 日育苗, 5 月 23 日移栽(3 叶 1 心), 插秧密度 30 cm × 13.2 cm, 各处理单排单灌, 其他管理措施相同, 9 月 20 日收获。小区面积 100 m², 重复 3 次。

表 1 各处理施 N 量和施 N 时期 (kg/hm²)

Table 1 Timing and amount of N fertilizer applied

处理	基肥比例 (%)	第一次追肥		第二次追肥		第三次追肥		总 N 量
		叶龄	比例(%)	叶龄	比例(%)	叶龄	比例(%)	
N0								0
FFP1	50	4.0	25	7.0	10	10.5	15	105
FFP2	50	4.0	25	7.0	10	10.5	15	135
INM1	45	4.0	20	8.5	15	11.0	20	105
INM2	45	4.0	20	8.5	15	11.0	20	135

1.2.2 取样时期和测试方法 土壤基础肥力分析:

采用常规分析方法。
在幼穗分化期、抽穗期、抽穗后 10 天和抽穗后 20 天查 30 穴分蘖, 按平均分蘖取 4 穴, 在根部挖土(15 cm 宽、30 cm 长、20 cm 深), 放入尼龙网袋, 冲洗, 然后将水稻根系洗净后, 按地上部和根系分开。置于烘箱中, 105℃杀青 30 min 后, 再调至 75℃烘干至恒重, 称重。地上部粉碎后按凯氏定氮法测全 N 含量, 根系粉碎后用蒽酮比色法^[9]测定可溶性糖的含量。再选择具有平均分蘖的稻株量 2 穴, 按赵全志等^[10]介绍的方法在上午 6:00—9:00 收集伤流液, 密封后带回实验室称重, 计算伤流量。

成熟期考种测产: 每个小区数相连 30 穴的有效穗数, 取接近该平均有效穗数的 5 穴植株, 考查穗粒数、结实率和千粒重等, 根据各产量构成要素计算小区理论产量, 并在每个小区收 2 m²测实产。

2 结果分析

2.1 前氮后移对寒地水稻根系伤流量的影响

从图 1 可以看出, 随着生育期的进行, 水稻根系伤流量上升, 抽穗期达到高峰, 然后又下降。中 N 施肥时, 穗肥比例由 15% 提高到 35%, 根系伤流量增加, 幼穗分化期增加了 27.9%, 差异显著 ($p < 0.05$); 高 N 条件下, N 肥后移显著提高了幼穗分化期根系伤流量。N 肥用量对根系伤流量影响不显著。在各个时期, 高 N 下穗肥比例低的 FFP2 处理伤流量最低, 而中 N 下

穗肥比例高的 INM1 处理伤流量均最高, 差异显著 ($p < 0.05$)。对抽穗后 20 天的伤流量和产量作相关性分析, 相关方程为 $y = 21.8x + 4.1041$ ($r = 0.590 > r_{0.05} = 0.514$, $n = 14$), 达到了 5% 的显著水平。以上结果表明, 适宜 N 肥用量下, N 肥后移能增加根系伤流量, 提高水稻根系活力。

2.2 前氮后移对寒地水稻根系含糖量的影响

图 2 为前 N 后移对寒地水稻根系含糖量的影响。各处理根系的可溶性糖含量均随着生育进程而降低。中 N 条件下, N 肥后移使幼穗分化期和抽穗后 20 天的根系含糖量提高了 14.0% 和 35.1%, 差异显著 ($p < 0.05$)。高 N 条件下, 前 N 后移显著提高了幼穗分化期根系含糖量。幼穗分化期到抽穗后 10 天, N 肥用量对根系含糖量无影响, 抽穗后 20 天高 N 处理显著降低了根系含糖量。抽穗后 20 天含糖量和产量的相关方程为 $y = 0.0037x + 0.0155$ ($r = 0.98 > r_{0.01} = 0.684$, $n = 12$), 达到了 1% 的显著相关水平。

2.3 前氮后移对寒地水稻根干重的影响

从图 3 可以看出, 从幼穗分化期到抽穗期, 水稻根干重先增加后降低, 抽穗期达到最高值, 抽穗期以后逐渐降低。幼穗分化期到抽穗后 10 天, 前 N 后移处理的根干重较习惯施肥处理高 9.4%~20.4%, 其中抽穗后 10 天 INM2 处理和 FFP2 处理间差异达到了 5% 的显著水平。抽穗后 20 天, 高 N 处理根干重较高, 其他时期 N 肥用量对根干重没有显著影响。

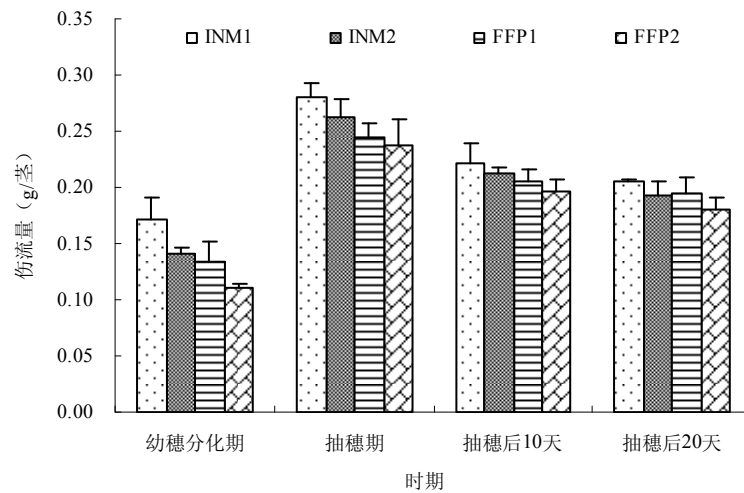


图 1 前 N 后移对水稻伤流量的影响 (图中的误差线为标准误差, 下同)

Fig. 1 Effect of N application at later stage on bleeding of rice root

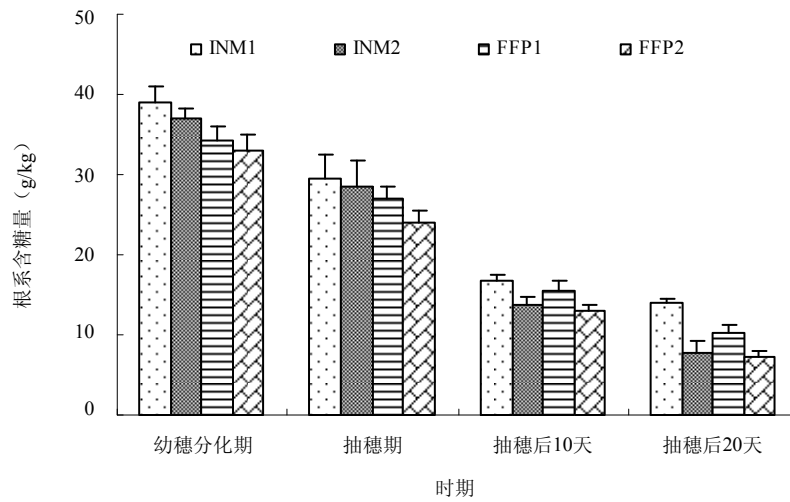


图 2 前 N 后移对寒地水稻根系含糖量的影响

Fig. 2 Effect of N application at later stage on soluble sugar content of rice root

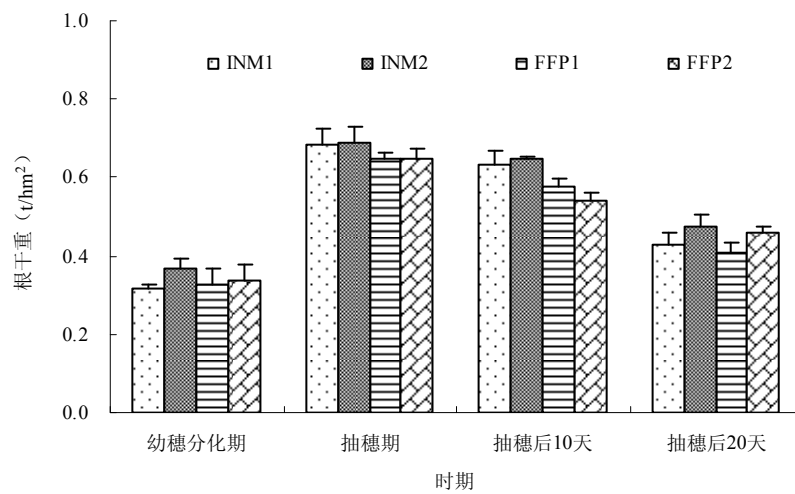


图 3 前 N 后移对水稻根干重的影响

Fig. 3 Effect of N application at later stage on dry weight of rice root

2.4 前氮后移对寒地水稻氮素吸收和产量的影响

从表 2 可以看出,随着生育期的进行,水稻吸 N 量显著提高。幼穗分化期,中 N 条件下的 N 肥后移处理 N 素积累量显著低于其他处理,其他处理间无差异;抽穗期,高 N 处理 N 素吸收量显著高于中 N 处理;抽穗后 20 天,高 N 条件下, N 肥后移处理的吸 N 量显著高于其他处理。随着 N 肥用量增加,抽穗后 20 天吸

N 量显著提高,但收获期吸 N 量差异不显著,主要原因在于高 N 处理出现了倒伏,造成总吸 N 量和产量降低。在 N 肥用量相同的条件下,成熟期前 N 后移处理较习惯施肥处理吸 N 量提高了 11.1%~15.6%,产量增加了 12.3%~12.7%,方差分析表明差异达到了 5% 的显著水平。以上结果表明,前 N 后移满足了生育后期水稻对 N 素的需要,提高了水稻产量。

表 2 前 N 后移对寒地水稻 N 素总吸收量和产量的影响

Table 2 Effect of N application at later stages on N accumulation and yield of rice

处理	N 素总吸收量 (kg/hm ²)				产量 (t/hm ²)
	幼穗分化期	抽穗期	抽穗后 20 天	成熟期	
INM1	19.87 ± 0.53 b	73.59 ± 1.49 b	87.07 ± 0.67 b	113.20 ± 1.80 a	9.74 a
INM2	25.00 ± 0.46 a	96.82 ± 0.86 a	102.72 ± 1.16 a	114.33 ± 3.17 a	9.77 a
FFP1	23.57 ± 0.79 a	71.75 ± 3.24 b	82.13 ± 2.40 c	97.91 ± 2.13 b	8.67 b
FFP2	25.64 ± 1.87 a	89.19 ± 3.01 a	93.34 ± 0.74 b	102.9 ± 2.75 b	8.67 b

注:表中数据为 3 次重复平均值 ± 标准误差,同列不同字母表示差异达 $p < 0.05$ 显著水平,下同。

2.5 前氮后移对寒地水稻氮肥利用率的影响

表 3 是前 N 后移对寒地水稻 N 肥利用率的影响。从表 3 中可以看出,施肥时期相同,随着 N 肥用量的增加其利用率降低。在中 N (105 kg/hm²) 条件下,前 N 后移处理 N 肥吸收利用率较习惯施肥提高了 43%,农学利用率提高了 37.5%,偏生产力提高了 20.8%,差异均达到了 5% 的显著水平;在高 N (135 kg/hm²) 条件下,前 N 后移处理的 N 肥吸收利用率较习惯施肥提高了 20%,农学利用率提高了 38.6%,差异均达到了 1% 的显著水平; N 肥偏生产力提高了 12.6%,差异达到了 5% 的显著水平。结果表明,前 N 后移能显著提高水稻 N 肥利用率。

表 3 前 N 后移对寒地水稻 N 肥利用率的影响

Table 3 Effect of N application at later stages on fertilizer-N use efficiency

处理	吸收利用率(%)	农学利用率 (kg/kg)	偏生产力 (kg/kg)
INM1	48.43 ± 3.27 a	37.27 ± 3.07 a	92.77 ± 3.20 a
INM2	38.51 ± 2.77 b	29.19 ± 4.03 ab	72.35 ± 2.51 c
FFP1	33.87 ± 5.70 bc	27.10 ± 1.41 b	82.61 ± 4.90 b
FFP2	30.04 ± 2.12 c	21.06 ± 2.93 c	64.23 ± 0.85 d

3 讨论

根系干重是衡量根系活力的重要指标之一,通常根系干重大,根系活力强^[11]。但是,本研究中抽穗后

20 天高 N 处理根系干重较高,根系活力却较低。根系维持生长和呼吸要消耗大量的能量,这些能量主要来自地上部光合产物,其中根系呼吸要消耗 60% 以上^[12]。高 N 处理后根量大,消耗的能量多,因此根系含糖量显著降低。根系光合产物不足可能是高 N 处理根系活力下降的主要原因。

伤流量的多少反映了植物主动吸收水分能力的强弱,从一定意义上讲,植物伤流的数量代表了根系生理活动的强弱^[13]。已有研究表明,稻株伤流量能反映根系对养分主动吸收的能力,是衡量根系活力的综合指标,能比较准确地反映根系活性的变化。杨照昌^[14]认为,根系含糖量越高,根系氧化力越高,两者密切相关。本研究中根系含糖量高的处理根系伤流量也较高,抽穗后 20 天伤流量与产量呈显著正相关关系。中等 N 肥用量条件下,前 N 后移提高了穗分化期根系含糖量,主要因为前 N 后移协调了水稻碳氮代谢,穗分化期水稻明显落黄,水稻代谢以碳代谢为主,促进了地上部叶片光合产生的可溶性糖向根系的运输,提高了根系吸收能力。抽穗期以后,前 N 后移保证了水稻生育后期对 N 素营养的需求,抽穗后叶片含 N 量较高,在一定范围内叶片含 N 量和光合作用成正相关,因此抽穗后叶片含 N 量高能够保持较高的光合能力^[15],不但能够满足水稻灌浆的需要,还能向根系提供足够的光合产物,提高根系吸收能力。随着 N 肥用量增加,抽穗后 20 天吸 N 量显著提高,但收获期吸

N 量差异不显著。首先,抽穗后 20 天中 N 处理根系含糖量较高,可能增加了此后该处理的养分吸收能力。同时,高 N 处理由于根系冗余生长,消耗了过多的碳水化合物,根系含糖量低,因此不利于抽穗 20 天以后维持高的根系活力;其次,高 N 处理出现了倒伏,也限制了养分吸收,造成总吸 N 量和产量降低。本研究结果表明,寒地水稻大量施用基肥是不科学的,适宜 N 肥用量下 (105 kg/hm^2),穗肥比例增加到 35%,提高了生育后期水稻的根系活力,增加了 N 素总吸收量,从而提高水稻产量。因此,寒地水稻生产中,应降低前期基肥用量,适当增加水稻后期施肥量。

由于 N 肥用量高,中国水稻 N 肥农学利用率只有 $10 \text{ kg/kg}^{[16]}$,显著低于世界平均水平。应用良好的养分管理技术可以使 N 肥农学利用增加到 $25 \text{ kg/kg}^{[17]}$ 。而在寒地 N 肥农学利用率可以达到 30 kg/kg 以上,本试验 N 肥农学效率达到了 37.27 kg/kg 。可见,N 肥农学利用率高是寒地稻田的主要特征。

4 结论

N 肥用量高,抽穗后根系含糖量不足,虽然根干重较高,但是根系吸收能力不高,因此高条件下水稻吸 N 总量并未显著提高。适宜的 N 肥用量条件下,N 肥后移能够协调水稻碳氮代谢,增加抽穗后根系可溶性糖含量,提高水稻根系伤流量,增加水稻吸 N 能力,满足高产水稻对 N 素的需求,从而提高水稻产量,增加 N 素利用效率。

参考文献:

- [1] 孙淑红. 黑龙江省水稻生产与科研现状. 中国农学通报, 2004, 20(1): 233-235
- [2] 刘玲玲, 彭显龙, 刘元英, 王诺. 不同氮肥管理条件下钾对寒地水稻抗病性及产量的影响. 中国农业科学, 2008, 41(8): 2 258-2 262
- [3] 刘元英, 彭显龙, 罗盛国. 寒地水稻氮肥后移优化施肥技术: 中国, CN1759651. 2006-04-19
- [4] Norman RJ, Guindo D, Wells BR, Wilson Jr CE. Seasonal accumulation and partitioning of nitrogen-15 in rice. Soil Sci. Soc. Am. J., 1992, 56: 1 521-1 527
- [5] 彭显龙, 刘元英, 罗盛国, 范立春, 宋添星, 郭艳文. 实地氮肥管理对寒地水稻干物质积累和产量的影响. 中国农业科学, 2006, 39(11): 2 286-2 293
- [6] 范立春, 彭显龙, 刘元英, 宋添星. 寒地水稻实地氮肥管理的研究与应用. 中国农业科学, 2005, 38(9): 1 761-1 766
- [7] 梁建生, 曹显祖. 杂交水稻叶片的若干生理指标与根系伤流强度关系. 江苏农学院学报, 1993, 14(4): 25-30
- [8] 沈波, 王熹. 籼粳亚种间杂交稻根系伤流强度的变化规律及其与叶片生理状况的相互关系. 中国水稻科学, 2000, 14(2): 122-124
- [9] 熊庆娥. 植物生理学实验教程. 成都: 四川科学技术出版社, 2003: 51-52
- [10] 赵全志, 高尔明, 黄丕生. 水稻穗颈节与基部节间伤流的比较及其 N 素调控研究. 作物学报, 2001, 27(1): 103-109
- [11] 程建峰, 戴廷波, 荆奇. 不同水稻基因型的根系形态生理特性与高效氮素吸收. 2007, 44(2): 266-271
- [12] Ekblad A, Högberg P. Nature abundance of ^{13}C in CO_2 respired from forest soils reveals speed of link between tree photosynthesis and root respiration. Oecologia, 2001, 127: 305-308
- [13] 常江, 张自立, 郇红建. 外源稀土对水稻伤流组分的影响. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(5): 522-525
- [14] 杨照昌. 水稻根系氧化力变化规律初探. 贵州农业科学, 1984(6): 7-10
- [15] 凌启鸿, 张洪程, 苏祖芳. 水稻高产群体质量及其优化控制技术探讨. 中国农业科学, 1993, 26(6): 1-12
- [16] 张福所, 王激清. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-923
- [17] 范立春, 彭显龙, 刘元英, 宋添星. 寒地水稻实地氮肥管理的研究与应用. 中国农业科学, 2005, 38(9): 1 761-1 766

Effects of N Application at Later Stage on Absorbability of Rice Root in Cold Area

YU Yan, PENG Xian-long, LIU Yuan-ying, ZHANG Hui, CHEN Li-nan

(College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: A plot experiment with different N rates (135 kg/hm^2 and 105 kg/hm^2) was designed to study the effects of panicle N fertilizer ratio on absorbability of rice root in cold area. The results showed that the root bleeding and soluble sugar content of root in the 15% panicle N under high N level (135 kg/hm^2) was lower and in the treatment of 35% under middle N level (105 kg/hm^2) was higher at each period. Under the same N level, compared with 15% panicle fertilizer, the root bleeding of 35% panicle fertilizer were significantly increased at panicle initiation. At the same time, the soluble sugar content of rice root at panicle initiation stage and 20 days after heading were improved by 14.0% and 35.1% ($p < 0.05$) respectively. Compared with 15% panicle fertilizer treatment, 35% panicle fertilizer treatment significantly increased total N uptake rate, N recovery efficiency, agronomic efficiency and partial factor productivity by 11.1% - 15.6%, 20% - 43%, 37.5% - 38.5% and 12.6% - 20.8% ($p < 0.05$), respectively, and increased average yield by 12.3% - 12.7% ($p < 0.05$) as well. The results suggested that the increase of soluble sugar rate of rice root and root bleeding improved N uptake and N use efficiency by improving the concert of rice root C and N metabolism.

Key words: Rice, Root bleeding, Soluble sugar content, N uptake, Fertilizer-N use efficiency