

供氮水平对稻株铁、锰、铜、锌含量和稻米品质的影响

郝虎林 魏幼璋* 杨肖娥 冯 英 吴春勇

(浙江大学 环境与资源学院 , 环境修复与生态健康教育部重点实验室 , 浙江 杭州 310029 ; * 通讯联系人 , E-mail : yzwei@zju.edu.cn)

Effects of Different Nitrogen Fertilizer Levels on Concentrations of Fe , Mn , Cu and Zn and Grain Quality in Rice (Oryza sativa)

HAO Hu lin , WEI You zhang* , YANG Xiao e , FENG Ying , WU Chun yong

(Key Laboratory of Environment , Remediation and Ecosystem Health , Ministry of Education , College of Environmental and Resource Sciences , Zhejiang University , Hangzhou 310029 , China ; * Corresponding author , E mail : yzwei@zju.edu.cn)

Abstract : In a pot experiment at greenhouse , effects of N fertilizer on concentrations of Fe , Mn , Cu and Zn in shoot of rice and quality of brown rice were studied . With the increase of N fertilizer application , the concentrations of Fe , Mn , Cu and Zn in shoot increased . Effects of N fertilizer on IR68144 were similar to IR64 , but different in the contents of trace elements in plant , suggesting that characteristic expression of the tested two genotypes is not controlled by the amount of N fertilizer supplied . Concentrations of those microelements in brown rice increased at first and then decreased with the increase of N fertilizer application . Contents of Fe , Mn , Cu and Zn in brown rice of the two varieties reached the highest level at 160 kg/hm² N . Comparing with control , contents of Fe , Mn , Cu and Zn in brown rice of IR64 increased by 28.96% , 41.34% , 58.31% and 16.0% , while those of IR68144 increased by 22.16% , 13.75% , 8.75% and 20.21% , respectively . Meanwhile , N fertilizer promoted the accumulation of protein in grains , decreased the accumulation of amylose , and enhanced gel consistency of brown rice . Those results indicated that appropriate N fertilizer management could increase micronutrient content in grains and improve nutrition quality of rice .

Key words : rice ; nitrogen fertilizer ; trace element ; grain quality

摘 要 : 采用室内盆栽试验 , 研究了不同氮肥施用量对水稻铁、锰、铜、锌含量和稻米品质的影响。随着氮肥使用量的增加 , 与对照相比 , 4 种微量元素在稻株地上部组织中的含量增加。施氮水平对两个品种微量元素含量的总体影响趋势一致 , 只是在稻株中含量不同 , 表明施氮量对品种的特性表达没有影响。糙米中微量元素含量随着施氮量的增加表现出先升高后降低的趋势 , 其中以氮肥使用量在 160 kg/hm² 时增幅最大。此时 , IR64 的糙米中的铁、锰、铜、锌含量分别比对照增加 28.96%、41.34%、58.31% 和 16.0% , 而 IR68144 的糙米铁、锰、铜、锌含量分别比对照增加 22.16%、13.75%、8.75% 和 20.21%。同时 , 随着氮肥使用量的增加 , 籽粒蛋白质含量增加 , 直链淀粉含量降低 , 糙米的胶稠度变大。说明合理的氮肥管理措施可在一定程度上调控籽粒微量元素积累 , 改善稻米营养品质。

关键词 : 水稻 ; 氮肥 ; 微量元素 ; 稻米品质

中图分类号 : Q945 .12 ; S511 .06 文献标识码 : A 文章编号 : 1001-7216(2007)04-0411-06

微量元素 Fe、Mn、Cu、Zn 既是植物生长发育必需的营养元素 , 也是与人体健康密切相关的必需营养元素。人体微量元素缺乏将导致贫血、免疫功能降低、皮肤病变、儿童反应迟钝、智力发育迟缓等一系列严重后果^[1-3]。全世界 1/3 人口正面临着由微量元素铁锌缺乏或维生素 A 缺乏而引起的营养失衡问题^[4] , 特别是在发展中国家更为严重^[5]。传统的食物营养强化或药物治疗只能起到暂时作用 , 而且成本很高 , 不能从根本上解决这一难题。因此 , 主要粮食作物微量元素的生物强化被认为是最有前景的途径^[6]。稻米是我国 60% 以上人口的主要食粮 , 是人体向自然界摄取营养物质和微量元素的重要途径之一 , 提高稻米中的微量元素含量及其生物有效性既经济实惠又可持续解决人体微量营养缺乏的难题 , 因此研究稻米中微量元素的变化及其影响

因素具有重要意义。

稻米中的微量元素含量存在很大差异 , 目前 , 在国内也有富铁、富锌种质资源筛选的报道^[7]。而国际水稻研究所的研究表明 , 富铁、富锌水稻在籽粒中的表达不受土壤水分、酸碱度和氮肥使用量的影响 , 主要受基因调控。然而 , 环境条件对稻米微量元素含量有重要影响^[8]。由此可见 , 通过合理的水肥管理措施有可能增加微量元素在籽粒中的积累 , 如适量增施氮肥能够增加稻米或小麦籽粒中铁、锰、铜、锌的含量^[9-10]。但是氮肥施用量对水稻全株微量

收稿日期 : 2006-12-12 ; 修改稿收到日期 : 2007-03-15。
基金项目 : Harvestplus China 资助项目 (2005HP03) ; 教育部长江学者奖励计划资助项目 (200307-MOE-YRPG)。
第一作者简介 : 郝虎林 (1972-) , 男 , 博士研究生。

元素的分布以及籽粒微量元素积累和品质影响的基因型差异尚不明确。因此,本研究以两种铁富集能力不同的水稻品种为材料,比较了氮肥施用水平对铁、铜、锰、锌在植株不同部位的含量以及对籽粒品质的影响,以期为通过农业措施调控重要微量元素在稻米中的积累,改善稻米品质,从而增进人类健康提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

籽粒铁富集水稻 IR68144 由国际水稻研究所 Glenn Gregorio 博士提供。在国际水稻研究所筛选的 939 份水稻种质材料中,籽粒铁含量为 7.5 ~ 24.4 mg/kg,IR68144 籽粒的铁含量为 20.4 mg/kg 左右,而且遗传性状稳定,不受土壤水分、酸碱度和氮肥使用量的影响^[8,11];对照品种 IR64 的籽粒铁含量仅为 11.2 mg/kg 左右,属于当地主栽品种。

1.2 试验地点及条件

实验于 2005 年 4 月 - 10 月在浙江大学华家池校区网室进行。供试土壤是小粉土。土壤基本理化性质为 pH 5.4,土壤有机质 19.9 g/kg,全氮 1.8 g/kg,碱解氮 87.6 mg/kg,全磷 0.68 g/kg,速效磷 21.8 mg/kg,全钾 20.8 g/kg,速效钾 65.6 mg/kg,阳离子交换量 (CEC) 14.59 cmol/kg,铁、锌、锰、铜的全量分别是 29347.15、209.45、416.55、36.45 mg/kg,铁、锌、锰、铜的有效含量分别是 7.85、1.68、82.15、1.39 mg/kg。

1.3 试验方法

采用盆栽试验,在 10 L 的塑料桶中盛 7.5 kg 风干土。氮肥用尿素,磷肥采用磷酸氢二钠,钾肥用氯化钾。设 4 个氮肥水平 (按纯氮计),分别为 0、80、160、320 kg/hm² (分别用对照、低氮、中氮和高氮表示),所有处理均施磷肥 (P₂O₅) 120 kg/hm²,钾肥 (K₂O) 240 kg/hm²。氮肥按 7:3 的比例分别在移栽前与土壤混匀施入和在分蘖期追施,磷肥和钾肥在水稻移栽前与土壤混匀一次施入。

1.4 主要栽培措施及样品采集

水稻种子经过精选后育苗,在 5 叶期选择大小一致的苗移栽,每桶 3 穴,每穴 3 株,栽培管理参照水稻大田管理措施。移栽前土壤先淹水 2 d。设 3 次重复,处理间随机排列。在水稻完熟期用不锈钢剪刀把水稻的地上部分完全剪下来,先用自来水冲洗掉茎叶上的灰尘和污物,再用去离子水冲洗茎叶,同时把地上部分为茎、非剑叶、剑叶、枝梗、颖壳和糙

米等 6 个部分。

1.5 样品处理及分析

所有样品在 105℃ 下杀青 30 min,然后在 70℃ 下烘干至恒重,称量后用 DFT-50 型不锈钢磨样机 (温岭市大德中药机械有限公司) 进行粉碎备用;籽粒用 JLGJ 45 型糙米机 (台州市振国粮用器材厂) 出糙,并用 MM301 型玛瑙磨样机 (德国 Retsch 公司) 粉碎备用。在分析元素含量之前,样品在 70℃ 下再烘干一次,烘干后保存在干燥器中,等待称样分析。所有样品首先在电热板上 200℃ 条件下完全碳化,然后在 550℃ 左右的马弗炉中灰化 6 h,冷却后用 5 mL 体积比为 1:1 优级纯盐酸溶解灰分,并用超纯水定量到 50 g 左右,最后用 ICP-MS (Agilent 7500a) 测定 Fe、Mn、Cu、Zn 含量。糙米的品质测定参照吴建国等^[12]的方法。

1.6 统计方法

采用 Excel 2000 软件制图,并用 SPSS 10 进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同氮肥水平对水稻组织中锰含量的影响

在品种 IR64 中,施用氮肥后 Mn 的含量趋势基本为非剑叶 > 剑叶 > 颖壳 > 枝梗 > 茎 > 糙米,而在品种 IR68144 中,除施用低氮肥处理下非剑叶中 Mn 含量较高外,其余均为剑叶中含量最高,基本趋势为剑叶 > 非剑叶 > 颖壳 > 茎 > 枝梗 > 糙米。而且 IR68144 的剑叶和非剑叶 Mn 含量显著高于 IR64。对于两个品种糙米中 Mn 含量变化而言,都是随着施氮量增加,Mn 含量呈现先上升后下降的趋势,其中以中氮量施肥处理为最高,即适量施肥可以增加糙米中 Mn 元素含量。与对照相比,中氮量施肥处理条件下 IR64 和 IR68144 的 Mn 含量分别增加了 22.16% 和 13.75% (图 1)。

2.2 不同氮肥水平对水稻组织中铁含量的影响

由图 2 可以看出,不同氮肥施用量对 Fe 元素在两个品种各部位中分布的影响不同。在品种 IR64 中,施氮肥增加了非剑叶、枝梗、颖壳、糙米中 Fe 含量,且随着施氮量的增加,非剑叶、颖壳、糙米中 Fe 含量呈现先上升后下降的趋势,且均以中量氮肥处理为最高,分别比对照增加 85.5%、30.93%、28.96%,而枝梗中随着施氮量的增加 Fe 含量逐渐增加,施氮肥对茎、剑叶中 Fe 含量影响不一致。在品种 IR68144 中,与对照相比,低氮量施肥处理降低了茎中 Fe 含量,其余施肥处理均增加了水稻各

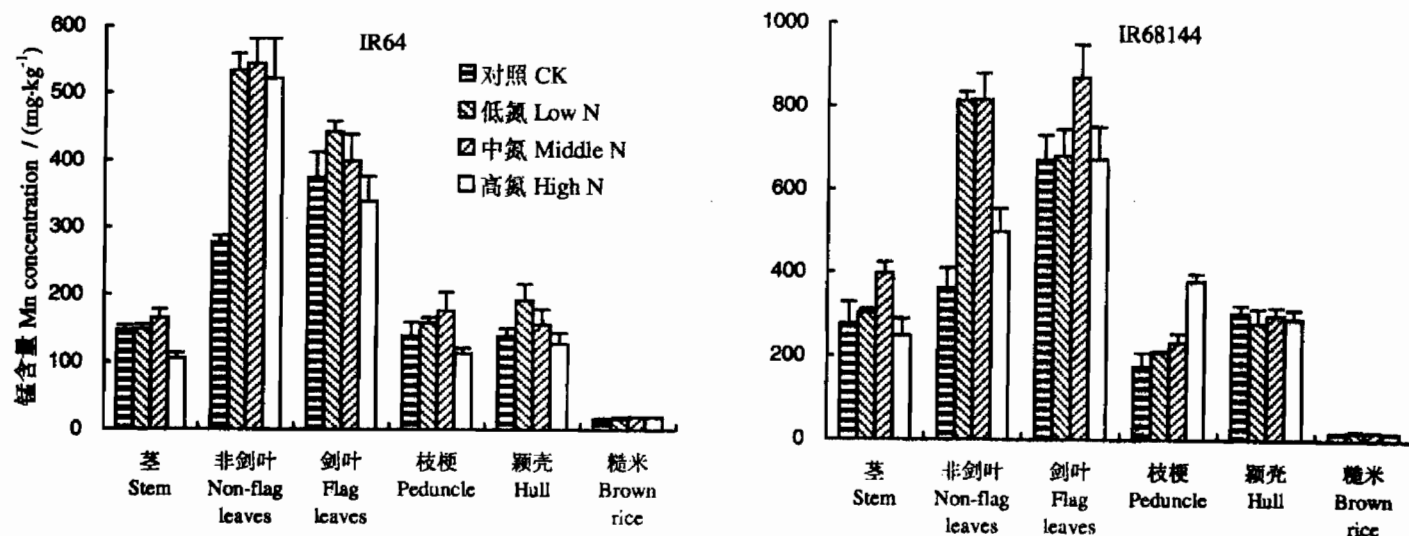


图1 氮肥施用量对水稻植株各组织部位中锰含量的影响

Fig. 1. Effect of N fertilizer level on Mn concentration in different parts of rice plant.

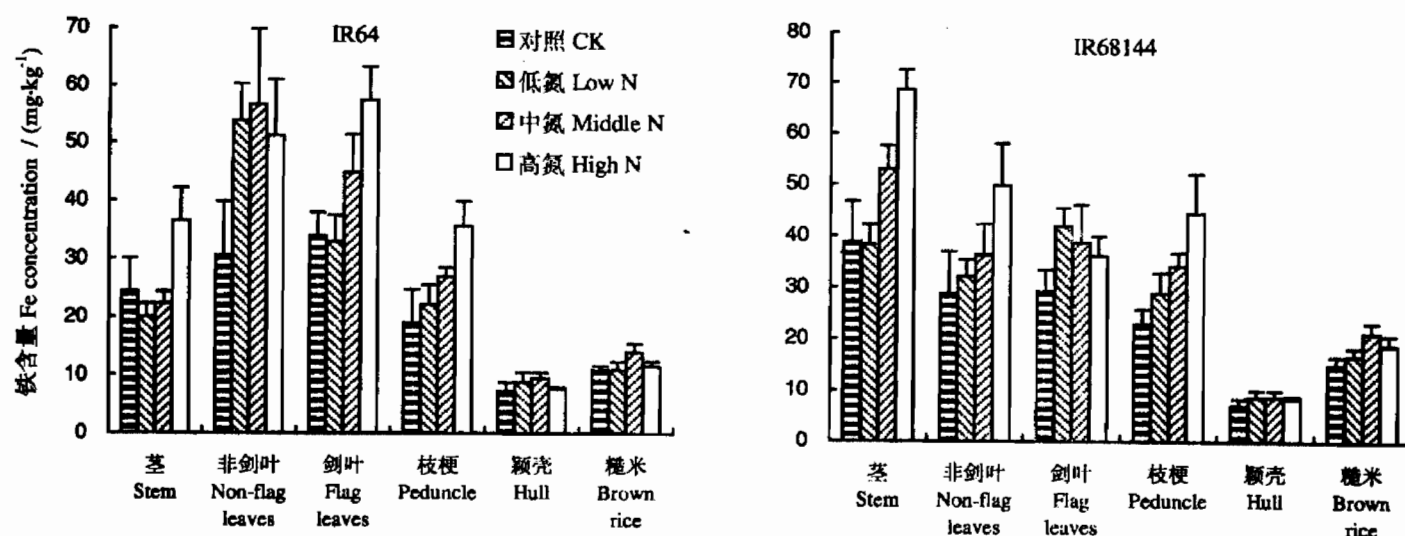


图2 氮肥施用量对水稻植株各组织部位中铁含量的影响

Fig. 2. Effect of N fertilizer level on Fe concentration in different parts of rice plant.

器官中的 Fe 含量。其中在糙米中,随着施氮量的增加,Fe 含量先上升后下降,以中氮量施肥处理增加最多,比对照增加了 41.34%。也就是说适量施肥可以增加糙米中 Fe 含量,而且品种 IR68144 比 IR64 增加幅度更大,这也充分说明了 IR68144 有更强的籽粒 Fe 富集能力。

2.3 不同氮肥水平对水稻组织中铜含量的影响

图 3 表明,施氮肥处理后,IR64 各部位中 Cu 含量表现不一致。与对照相比,施氮肥增加了茎、非剑叶、枝梗、颖壳、糙米中 Cu 浓度,且随着施氮量的增加,均表现为先上升后下降的趋势。其中,茎、非剑叶、枝梗中以低氮肥处理为最大,分别比对照增加了 53.94%、49.85%、43.89%,而在颖壳、糙米中则以中氮量处理为最大,分别比对照增加了 159.75%和 58.31%。施氮肥处理降低了剑叶中 Cu 浓度,以中氮肥处理降低最多,比对照降低了 53.91%。在 IR68144 中,施氮增加了非剑叶、枝梗、颖壳、糙米中

的 Cu 含量,随着施肥量的增加,非剑叶、糙米中的 Cu 含量呈现先上升后下降的趋势。非剑叶中以低氮量施肥最高,比对照增加了 173.35%,糙米中以中氮量处理最高,比对照增加了 8.75%,而枝梗和颖壳 Cu 含量随着施氮量增加呈现逐渐上升趋势,以高氮量处理最高,分别比对照增加 28.91%和 61.91%,茎和剑叶中 Cu 含量随着施氮量的增加表现不一致。两个品种糙米中 Cu 的浓度均随着施氮量的增加而呈现先增加后降低的趋势,且以中量施肥处理为最高,可见,适量施氮肥可以提高水稻籽粒中的 Cu 含量。

2.4 不同氮肥水平对水稻组织中锌含量的影响

试验结果表明(图 4),不同施肥处理对不同水稻品种各部位 Zn 浓度影响不同。品种 IR64 中,与对照相比,施氮肥处理增加了茎、枝梗、糙米中 Zn 浓度,而且随着施氮量的增加,茎中 Zn 浓度逐渐增加,以高氮肥处理最大,比对照增加了 220.51%,枝

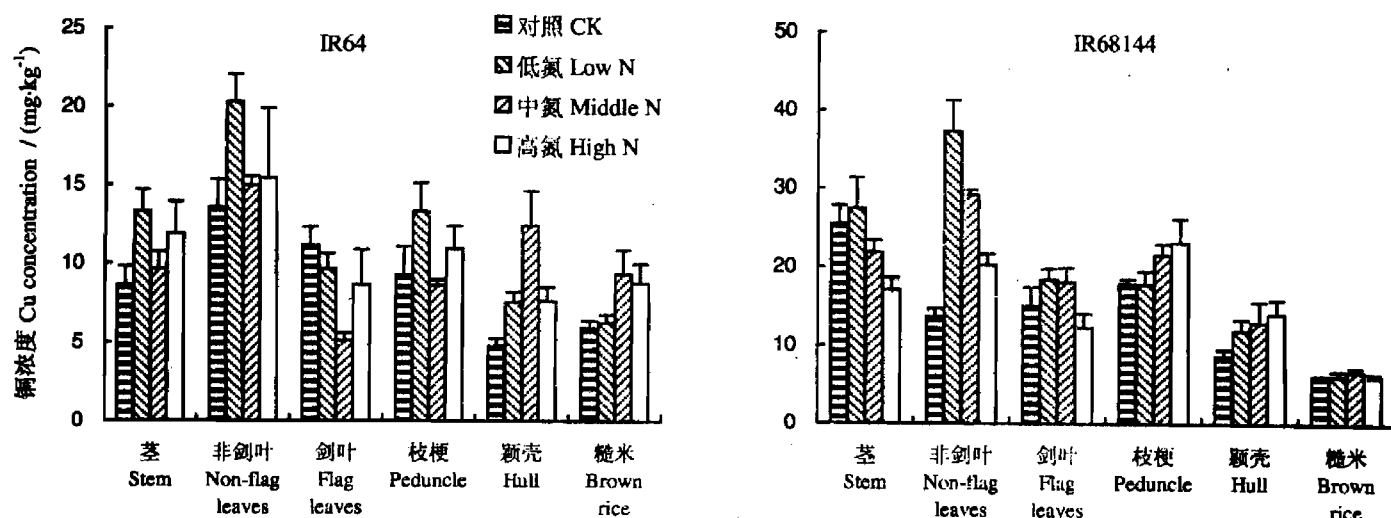


图3 氮肥施用量对水稻各组织部位铜含量的影响

Fig. 3. Effect of N fertilizer level on Cu concentration in different parts of rice.

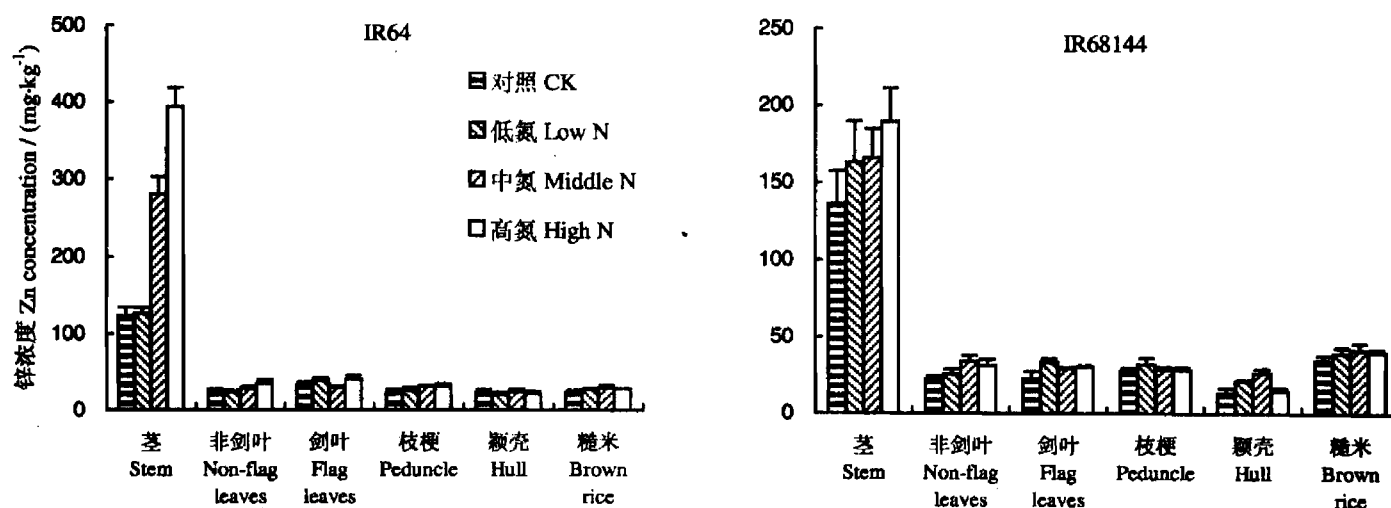


图4 氮肥施用量对水稻各组织部位的锌含量影响

Fig. 4. Effect of N fertilizer level on Zn concentration in different parts of rice.

梗和糙米中 Zn 浓度是先增加后降低,均以中氮量施肥处理增加最多,分别比对照增加 38.59% 和 16.0%;施氮肥处理后非剑叶、剑叶、颖壳中 Zn 浓度因不同的施肥量表现不一致。与对照相比,在中、低氮量处理下非剑叶中 Zn 浓度降低,而中氮、高氮量处理下 Zn 浓度则增加。剑叶中的锌浓度在中氮量处理下降低,在低氮、高氮量处理下增加。而颖壳中的 Zn 浓度在氮肥处理后有下降趋势。施氮处理后品种 IR68144 各部位 Zn 浓度均有不同程度的增加,非剑叶、剑叶、枝梗、颖壳、糙米中 Zn 浓度随着施氮量的增加呈现先增加后降低的趋势,其中非剑叶、颖壳、糙米中 Zn 浓度均以中氮量施肥增加最多,分别较对照增加 54.28%、99.03%、20.21%,而在剑叶、枝梗中以低氮量处理的增加最多,分别较对照增加 107.11% 和 15.58%。茎中 Zn 浓度随着施氮量的增加而呈现上升趋势,以高氮量施肥增加最多,比对照增加了 39.2%。两个品种糙米中 Zn 浓

度均随着施氮量的增加而呈现先增加后降低的趋势,且以中氮施肥处理为最高。可见,适量施氮肥可以提高糙米中的 Zn 含量,而且中氮量施肥条件下籽粒 Fe 富集型品种 IR68144 中 Zn 的含量要高于对照品种 IR64。

2.5 不同氮肥水平对糙米品质的影响

两个水稻品种的糙米蛋白质含量随着施氮量的增加而增加。在 IR68144 中,3 种氮肥处理后蛋白质含量分别比对照增加了 0.23、0.63、1.17 个百分点,其中,中氮、高氮处理增加达到了显著水平,而在 IR64 上仅高氮处理明显增加了蛋白质含量,增加幅度为 1.73 个百分点。在两个水稻品种中,直链淀粉含量随着施氮量的增加呈现递减趋势。在 IR68144 中,3 种氮肥处理下直链淀粉含量分别较对照降低了 2.37、2.88、3.94 个百分点,均达到显著水平;而 IR64 中,中氮和高氮处理下直链淀粉含量明显下降。而且,不同氮肥水平对两品种糙米胶稠度影响

表 1 不同氮肥水平对稻米的品质的影响

Table 1 . Effect of N fertilizer levels on rice grain qualities .

处理 Treatment	蛋白质含量 Protein content/ %		直链淀粉含量 Amylose content / %		胶稠度 Gel consistency/mm	
	IR68144	IR64	IR68144	IR64	IR68144	IR64
对照 CK	7 .15 a	8 .27 a	27 .65 a	20 .08 a	37 .31 a	50 .36 a
低氮 Low N	7 .38 ab	8 .40 a	25 .28 b	19 .55 ab	44 .65 b	57 .35 b
中氮 Middle N	7 .78 bc	9 .08 a	24 .77 b	18 .16 bc	47 .35 b	57 .25 b
高氮 High N	8 .32 c	10 .00 b	23 .71 b	17 .60 c	45 .72 b	62 .08 b

数据后跟相同字母者表示差异未达 5 %显著水平 (LSR 法)。
Values followed by the same lowercase within a column indicate no significant difference at $P < 0 .05$ by LSR .

不同。对于 IR68144 ,随着氮肥水平的增加 ,胶稠度先增加后降低 ,以中氮水平为最高 ,较对照增加了 10 .04 mm ,达到了显著水平(低、高氮水平下也达到了显著水平) ;至于 IR64 ,胶稠度基本呈增加趋势 ,以高氮肥处理为最高 ,其次为低氮、中氮处理 ,分别较对照增加了 11 .72、6 .99 和 6 .89 mm ,均达显著水平。总体来讲 ,品种 IR64 中的蛋白质含量、直链淀粉含量、胶稠度都要比品种 IR68144 高 ,这可能与品种特性有关。

3 讨论

植物体内的铁、锰、铜、锌主要来源于土壤 ,而且微量元素在籽粒中的积累主要受植物根细胞的吸收能力、根向地上部的转运能力以及从叶组织经由韧皮部向发育的籽粒和种子的装载能力等因素影响^[13 14]。近年来 ,这些方面的研究主要集中在基因控制和金属转运蛋白功能的分子研究^[15 18] ,关于养分管理和养分调控方面 ,特别是无机肥料对微量元素在籽粒中的富集的影响方面报道不多。本研究中 ,在施氮量增加的情况下 ,水稻地上部分的微量元素的积累都有增加趋势 ,锰在叶片中含量最高(图 1) ,而且在两个品种之间增加趋势基本一致 ,说明施氮量对两个品种根细胞吸收锰的能力和地上部的转运能力的影响是一致的。铁在 IR68144 的茎和枝梗中含量最高 ,而在品种 IR64 的茎和非剑叶中含量最高(图 2) ,但是在各个处理间稻株铁含量的增幅基本一致。铜在茎和非剑叶中含量较多(图 3) ,锌则在茎中较多。此外 ,4 种微量元素在两个水稻品种之间的积累趋势不一致 ,但总体上由于施氮量的增加 ,与对照相比 ,具有明显增加的趋势。这些结果表明随着氮肥施用量的增加 ,可能在一定程度上改善了水稻根系吸收微量元素并向地上部转运的能力。氮肥效应对两个品种的总体影响趋势一致 ,但在稻株中含量不同 ,表明施氮量只能影响稻株中微

量元素含量 ,品种的特性表达不受影响 ,这与 Gregorio 等^[11]研究环境条件对不同基因型铁含量的影响时所得结果一致。富铁品种 IR68144 茎中的铁含量明显高于 IR64 ,可能由于木质部铁的通量高于 IR64 ,这一点暗示着 IR68144 根向地上部转运铁的能力高于 IR64。在穗的各个组织部分也是 IR68144 中的铁含量明显高于 IR64 ,同样暗示 IR68144 的叶组织经由韧皮部向发育的籽粒和种子的装载能力强于 IR64 ,具体的原因有待于下一步的实验进行证明。在籽粒方面 ,不论是铁富集水稻 IR68144 还是对照品种 IR64 ,4 种微量元素的积累都是随氮肥施用量增加表现出先升高后降低的趋势 ,这一结果与俄胜哲等^[9]和程素贞等^[10]的研究结果较为一致。说明小粉土在氮肥施用量为 160 kg/hm² 左右时 ,会使水稻籽粒的铁、锰、铜、锌的积累达到较高水平 ,同时也说明氮肥可以在一定程度上调控水稻籽粒微量元素的积累 ,通过控制施氮量完全可以促使籽粒微量元素的增加 ,达到籽粒微量元素生物强化的目的 ,进而解决人体微量营养缺乏带来的问题。

关于施氮量对不同作物籽粒品质影响的研究已有很多报道 ,其共同的结果都是籽粒的蛋白质含量随着施氮水平的提高而增加^[19 21]。我们的研究也证明了氮肥对籽粒蛋白质的积累有促进作用 ,但是对直链淀粉的积累有明显的抑制作用 ,而且导致胶稠度变软。研究表明 ,直链淀粉含量和胶稠度的变化受灌浆期环境温度和基因互作控制^[22]。朱昌兰等^[23]已经对水稻中的直链淀粉含量和胶稠度的控制基因进行了 QTL 定位分析^[23]。我们的研究发现不同施氮量对水稻的直链淀粉含量和胶稠度都有显著影响 ,原因可能有两种 :一是直链淀粉含量和胶稠度也受供氮水平调控 ;二是随着供应氮肥水平的提高 ,水稻生育期明显延长 ,营养生长旺盛 ,导致灌浆期环境温度与对照相比 ,要低一些 ,可能正是由于

改变了灌浆期环境温度 ,从而影响了稻米的直链淀粉含量和胶稠度。

谢辞 :感谢国际水稻研究所 Glenn Gregorio 博士提供了良好的水稻研究材料。

参考文献 :

[1] 单振芬 . 微量元素与人体健康 . 微量元素与健康研究 , 2006 , 23(3) : 66-67 .

[2] 王 夔 . 生命科学中的微量元素 . 北京 : 中国计量出版社 , 1991 : 115-120 .

[3] 苗 健 . 微量元素与相关疾病 . 郑州 : 河南医科大学出版社 , 1997 : 34-35 .

[4] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) : Preventing Micronutrient Malnutrition . A Guide to Food Based Approaches . Washington DC : International Life Science Institute , 1997 : 105 .

[5] Mifflin B J . Crop biotechnology . Where now ? *Plant Physiol* , 2000 , 123 : 17-28 .

[6] Welch R M , Graham R D . Breeding for micronutrients in staple food crops from a human nutrition perspective . *J Exp Bot* , 2004 , 55(396) : 353-364 .

[7] Yang X E , Ye Z Q , Shi C H , et al . Genotypic differences in concentrations of iron , manganese , copper , and zinc in polished rice grains . *J Plant Nutr* , 1998 , 21(7) : 1453-1462 .

[8] Graham R D , Senadhira D , Beebe S , et al . Breeding for micronutrient density in edible portions of staple food crops : Conventional approaches . *Field Crops Res* , 1999 , 60 : 57-80 .

[9] 俄胜哲 , 袁继超 , 丁志勇 , 等 . 氮磷钾肥对稻米铁、锌、铜、锰、镁、钙含量和产量的影响 . 中国水稻科学 , 2005 , 19(5) : 434-440 .

[10] 程素贞 , 解淑云 . 氮肥对啤酒大麦 Zn、Mn、Fe、Mg 营养效应的研究 . 土壤通报 , 1995 , 30(2) : 71-73 .

[11] Gregorio G B , Senadhira D , Htut H , Graham R D . Breeding

for trace mineral density in rice . *Food Nutr Bull* , 2000 , 21 : 382-386 .

[12] Wu J G , Shi C H . Prediction of grain weight , brown rice weight and amylose content in single rice grains using near infrared reflectance spectroscopy . *Field Crops Res* , 2004 , 87 : 13-21 .

[13] Welch R M . Effects of nutrient deficiencies on seed production and quality . *Adv Plant Nutr* , 1986 , 2 : 205-247 .

[14] Welch R M . Micronutrient nutrition of plants . *Crit Rev Plant Sci* , 1995 , 14 : 49-82 .

[15] Grotz N , Guerinot M L . Molecular aspects of Cu , Fe and Zn homeostasis in plants . *Biochim Biophys Acta* , 2006 , 1763 : 595-608 .

[16] DellaPenna D . Nutritional genomics : Manipulating plant micronutrients to improve human health . *Science* , 2001 , 285 : 375-379 .

[17] Goto F , Yoshihara T , Shigemoto N , et al . Iron fortification of rice seed by the soybean ferritin gene . *Nat Biotech* , 1999 , 17 : 282-286 .

[18] Goto F , Yoshihara T , Saiki H . Iron accumulation and enhanced growth in transgenic lettuce plants expressing the iron binding protein ferritin . *Theor Appl Genet* , 2000 , 100 : 658-664 .

[19] 苗艳芳 , 常爱芬 , 张会民 . 氮肥分配比例对小麦产量及群体质量的影响 . 麦类作物 , 1999(4) : 43-45 .

[20] 王立秋 , 靳占忠 , 曹敬山 . 氮不同追肥比例和时期对春小麦籽粒产量和品质的影响 . 麦类作物 , 1996(6) : 45-48 .

[21] 曹承富 , 孔令聪 , 汪建来 , 等 . 氮素营养水平对不同小麦品种品质性状的影响 . 麦类作物学报 , 2004 , 24(1) : 47-50 .

[22] 孟亚利 , 周治国 . 结实期温度对稻米品质的影响 . 中国水稻科学 , 1997 , 11(1) : 51-54 .

[23] 朱昌兰 , 江 玲 , 张文伟 , 等 . 稻米直链淀粉含量和胶稠度对高温耐性的 QTL 分析 . 中国水稻科学 , 2006 , 20(3) : 248-252 .