

李俊丽, 钱干, 李海星, 等. 氮锌配施对水稻生长、产量和养分吸收分配的影响[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(3): 159-167.

DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2021.03.018

氮锌配施对水稻生长、产量和养分吸收分配的影响

李俊丽, 钱干, 李海星, 张丽梅, 叶祥盛, 徐芳森, 蔡红梅

华中农业大学资源与环境学院/微量元素研究中心, 武汉 430070

摘要 为研究氮锌配施对水稻生长、产量和养分吸收分配的影响, 采用大田小区试验, 以籼型杂交稻品种广两优 35 和常规粳稻品种日本晴为研究材料, 设置 3 个锌水平和 4 个氮水平的交互处理, 分析了各生育期水稻的生物量, 成熟期产量及构成因素, 各部位氮和锌的含量、累积量和分配比例。结果表明, 氮锌配施对水稻早期的生长和后期的产量形成均具有协同增效效应, 这种效应在不同水稻品种中具有一定的差异性。氮锌配施对水稻每公顷穗数具有极显著的正向交互效应, 每公顷穗数的显著增加是氮锌配施下水稻产量提高的主要原因。氮锌配施不仅提高了水稻植株中的氮和锌含量, 同时还促进了氮和锌向生殖器官(小穗)中分配, 这可能是水稻产量提高的主要生理机制之一。

关键词 水稻; 氮锌配施; 氮锌互作; 精准施肥; 水稻增产; 养分吸收

中图分类号 S 147.34; S 511 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2021)03-0159-09

氮和锌都是植物生长发育的必需营养元素。氮是构成蛋白质和核酸的主要成分, 是影响植物生长和作物产量的主要限制因子之一^[1]。锌是植物体内多种酶的组成成分之一, 参与植物光合作用、呼吸作用、蛋白质代谢和生长素合成等多种生化进程^[1]。

锌与植物体内氮代谢密不可分。锌是影响蛋白质合成最显著的微量元素之一, 缺锌会影响 RNA 代谢和核糖体结构进而影响蛋白质合成, 导致植物体内游离氨基酸累积^[2]。良好的氮营养通过促进植株体内蛋白质以及其他含氮化合物的合成来促进锌在体内的运输^[3]。氮和锌均与植物光合作用密切相关。植物叶片中氮水平和光合作用的相关系数可达 75% 以上, 在光照饱和的情况下, 植物的光合作用主要取决于叶片中氮的浓度^[4]。植物体内 NO_3^- 的还原需要消耗光合电子传递链中的能量, NH_4^+ 的同化需要光合作用和碳代谢提供大量的碳骨架^[4]。而锌是碳酸酐酶的重要组成成分, 植物缺锌不利于光合作用和碳代谢^[1]。氮和锌均与植物生长素紧密联系。氮代谢过程中产生的色氨酸是生长素合成的前体, 外界 NO_3^- 供应水平与植物根中生长素含量存在显著的负相关关系^[5], 并且 NO_3^- 转运蛋白能够促进细胞间生长素的运输^[6]。植物缺锌时生长素合

成受阻, 玉米缺锌后根中的生长素含量降低、分布发生变化, 生长素转运基因的表达受到抑制^[7]。

因此, 无论是在养分的吸收运输还是生命物质的同化代谢方面, 植物体内的氮和锌是相互联系、不可分割的, 氮锌互作在植物的生长发育进程中是一个不容忽视的问题。相关研究表明, 氮是影响小麦籽粒中锌含量的重要因素, 氮锌配合施用能够显著提高小麦地上部生物量和产量, 显著增加小麦植株的锌和氮含量^[8-12]。施氮不仅促进了小麦根系对锌的吸收, 还促进了锌从根向地上部转移以及从叶片到籽粒的再利用^[13-14]。段庆波等^[15]和 Ali 等^[16]在水稻中的研究结果也表明, 氮锌配施会显著提高水稻产量和籽粒品质; 同时, 配施锌肥还提高了水稻籽粒中氮含量和氮的累积量^[17]。但是也有研究显示, 锌肥的施用对水稻产量的增加并不显著, 但施锌能显著提高水稻各部位的锌浓度和籽粒中的锌累积量, 提高施氮量也有利于水稻的增产及对锌的吸收与累积^[18-19]。然而, 不同作物品种之间氮锌互作效应是否存在差异, 其生理机制尚不十分明确。因此, 本研究以籼型杂交水稻品种广两优 35 和常规粳稻品种日本晴为对比研究材料, 分析 12 种不同的氮锌配施处理对水稻生长、产量和养分吸收分配的影响,

收稿日期: 2020-09-08

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0200108)

李俊丽, E-mail: 1904240698@qq.com

通信作者: 蔡红梅, E-mail: caihongmei@mail.hzau.edu.cn

以期探明不同水稻品种中氮锌互作效应的差异及其最佳配比,并阐述其生理机制,为生产实践中合理施用氮肥和锌肥、提高肥料利用率、改善居民锌营养提供理论基础和技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 材料种植

本研究在 2016—2017 年开展了 2 a 的大田小区试验,供试材料为籼型杂交水稻品种广两优 35 和常规粳稻品种日本晴,试验地位于湖北省武汉市华中农业大学试验基地(E 114.3°, N 30.5°)。试验前采集土壤样品,自然风干后过孔径 0.85 mm 筛,测定土壤基本理化性质。试验基地土壤 pH 值为 6.9,有机质含量为 11.26 g/kg,全氮含量为 2.11 g/kg,碱解氮含量为 141.75 mg/kg,速效磷含量为 5.51 mg/kg,速效钾含量为 152.96 mg/kg,有效锌含量为 1.39 mg/kg。

试验采用 3 因素随机区组设计,试验设 3 个因子,即 2 个水稻品种、3 个锌水平、4 个氮水平。锌肥施用量($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$)为 0、15、30 kg/hm²,氮肥施用量(N)为 0、80、160、240 kg/hm²,共 12 组氮与锌的交互处理。试验小区面积为 50 m²,3 个生物学重复,株行距为 20 cm × 25 cm,单株种植。试验田种植外围设 1 m 保护行。供试氮肥为尿素(含 N 46.4%),磷肥为过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%),钾肥为氯化钾(含 K₂O 60%),锌肥为硫酸锌($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$)。氮肥按基施-蘖-穗肥质量比为 4:3:3 施用,磷肥、钾肥和锌肥均在基肥一次施用,磷肥施用量(P₂O₅)为 80 kg/hm²,钾肥施用量(K₂O)为 120 kg/hm²。在水稻移栽前 3 d,分别将基施氮肥、磷肥、钾肥和锌肥均匀撒施于稻田后进行翻耕、灌水、打田。待水稻生长至分蘖期和抽穗期,对氮肥进行均匀撒施追肥。

1.2 指标测定

分别在苗期、分蘖期、抽穗期和成熟期选取长势较一致的水稻植株,每个小区取 12 穴植株,随机将每 4 穴植株混合作为 1 份测定样品,分为 3 个重复,70 °C 烘干至恒质量后称质量。在成熟期将植株主分蘖分为新叶、老叶、叶鞘、茎、穗 5 个部位,烘干、称质量后测定氮和锌的含量,并收获水稻种子,考察产量、有效穗数、每穗粒数、千粒重及结实率。

氮含量和锌含量的测定参照文献[20]中植物样品氮含量和微量元素的测定方法。氮累积量=氮含量×干物质量,氮分配比例=各部位氮累积

量/植株主分蘖氮累积量;锌累积量=锌含量×干物质量,锌分配比例=各部位锌累积量/植株主分蘖锌累积量。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 软件和 SPSS PASW Statistics 18.0 数据处理系统进行数据统计分析与作图,采用 Duncan's 新复极差法进行处理间差异性检验。

2 结果与分析

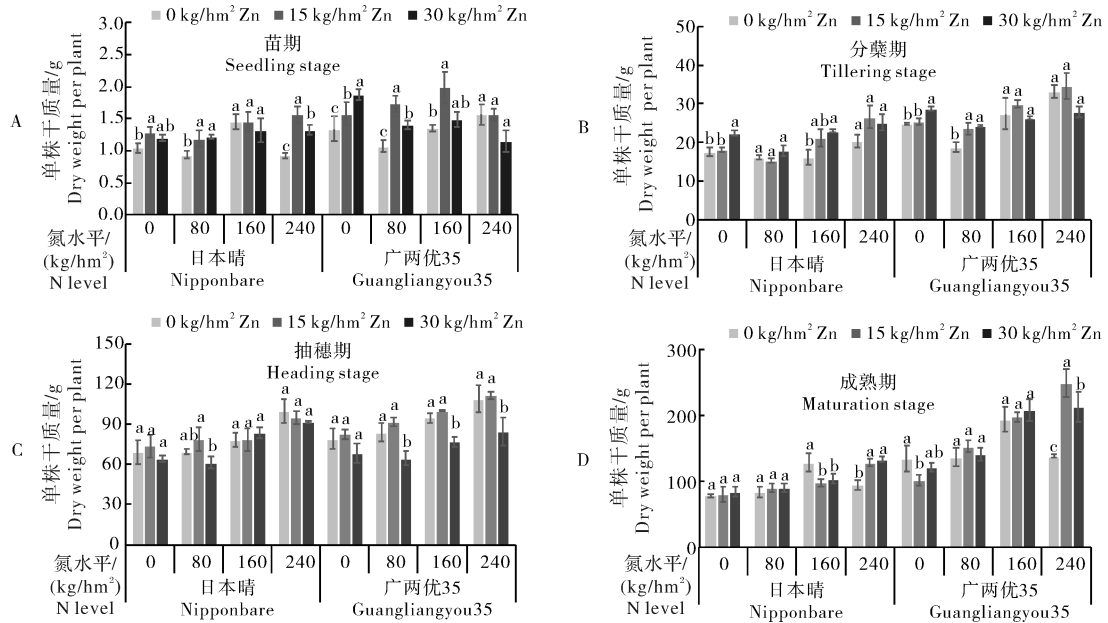
2.1 氮锌配施对水稻生长的影响

如图 1 所示,不同氮水平下,施锌均能够显著提高苗期日本晴和广两优 35 的生物量,15 kg/hm² 的施锌量对其生长最为适宜;但是,在日本晴施氮 160 kg/hm² 或是广两优 35 施氮 240 kg/hm² 的条件下,施锌对水稻生物量没有显著影响。随着水稻的生长发育,施锌对日本晴和广两优 35 生物量的促进效应逐渐降低,甚至出现对生长的抑制效应,施锌 30 kg/hm² 显著降低了广两优 35 在分蘖期和抽穗期的生物量。在成熟期,高氮(240 kg/hm²)和高锌(30 kg/hm²)的配比施用又显著提高了日本晴和广两优 35 的生物量。

2.2 氮锌配施对水稻产量的影响

如表 1 所示,不同氮锌配比处理对日本晴每公顷穗数具有极显著影响。增加锌肥用量,显著提高了日本晴的穗数;且在不施氮和低氮(80 kg/hm²)条件下,施用锌肥显著增加了日本晴的理论产量。在不施氮的条件下,与不施锌相比,施用 30 kg/hm² 锌肥使日本晴的理论产量提高了 58%;在低氮(80 kg/hm²)条件下,与不施锌相比,施用 15、30 kg/hm² 锌肥使日本晴的理论产量分别提高了 32% 和 42%;在中氮(160 kg/hm²)条件下,与不施锌相比,施用锌肥使日本晴的理论产量提高了 2%~5%;在高氮(240 kg/hm²)条件下,与不施锌相比,施用 15、30 kg/hm² 的锌肥使日本晴的理论产量分别提高了 7% 和 29%。

不同氮锌配比处理对广两优 35 每公顷穗数和结实率均具有显著影响。随着施锌量的增加,广两优 35 的理论产量呈增加趋势。不施氮条件下,与不施锌相比,施用 15、30 kg/hm² 锌肥使广两优 35 的理论产量分别提高了 20% 和 28%;在低氮(80 kg/hm²)条件下,与不施锌相比,施用 15、30 kg/hm² 锌肥使广两优 35 的理论产量分别提高了 15%



不同字母表示相同氮水平内不同锌处理下相比达到显著差异 ($P < 0.05$)。Different letters indicated the significant difference ($P < 0.05$) under different zinc treatments at the same nitrogen level.

图 1 氮锌配施下苗期(A)、分蘖期(B)、抽穗期(C)、成熟期(D)日本晴和广两优 35 地上部生物量

Fig.1 Shoot dry weight of Nipponbare and Gaungliangyou 35 at seedling stage (A), tillering stage (B), heading stage (C) and maturation stage (D) under combined application of nitrogen and zinc

表 1 氮锌配施下水稻产量及其构成因素

Table 1 Yield and its components of rice under combined application of nitrogen and zinc

品种 Varieties	氮水平/ (kg/hm ²) N level	锌水平/ (kg/hm ²) Zn level	穗数/ (×10 ⁴ /hm ²) Panicle number	每穗粒数 Spikelet number per panicle	单株产量/ (g/株) Plant yield	理论产量/ (kg/hm ²) Theoretical yield
日本晴 Nipponbare	0	0	250.00±29.99b	91.00±11.28a	23.32±6.32b	3 358.32±909.87b
		15	307.00±8.32a	75.00±30.02a	23.36±8.67b	3 363.92±1 247.86b
		30	322.00±8.32a	104.00±9.64a	36.79±3.59a	5 297.76±516.74a
	80	0	274.00±14.41c	105.00±20.85a	28.26±3.51b	4 069.12±505.47b
		15	327.00±8.32b	117.00±10.38a	37.41±1.09a	5 386.96±157.43a
		30	360.00±14.41a	107.00±17.52a	40.09±1.71a	5 773.52±246.89a
	160	0	370.00±8.32a	108.00±5.04b	38.33±7.82a	5 519.44±1 126.56a
		15	394.00±8.32a	98.00±9.40b	39.07±3.96a	5 626.40±570.93a
		30	375.00±14.41a	125.00±4.81a	40.40±2.78a	5 818.08±399.92a
	240	0	307.00±16.64b	134.00±18.06a	37.82±2.75a	5 445.76±396.27a
		15	437.00±58.23a	122.00±14.96a	40.40±9.94a	5 817.84±1 431.22a
		30	451.00±8.32a	120.00±6.29a	48.61±5.09a	6 999.44±732.42a
广两优 35 Guangliangyou 35	0	0	154.00±8.32a	154.00±44.09a	32.60±13.37a	4 693.84±1 925.94a
		15	173.00±28.81a	155.00±8.49a	36.44±4.62a	5 607.12±235.92a
		30	154.00±8.32a	162.00±22.00a	37.92±7.58a	6 028.44±473.88a
	80	0	173.00±38.12a	206.00±33.92a	38.95±3.07a	5 609.16±312.36a
		15	168.00±8.32a	176.00±35.81a	44.59±9.85a	6 420.32±1 418.73a
		30	197.00±29.99a	138.00±29.96a	46.55±13.78a	6 703.56±1 402.68a
	160	0	221.00±22.01b	195.00±18.38a	59.85±3.04a	8 618.16±309.36a
		15	226.00±16.64b	194.00±21.82a	63.02±14.57a	9 074.96±2 097.66a
		30	259.00±14.41a	163.00±9.51a	63.71±18.72a	9 173.92±2 695.29a
	240	0	178.00±8.32c	152.00±31.03a	42.49±7.57b	6 118.00±1 089.58b
		15	259.00±14.41b	186.00±12.58a	70.82±10.76ab	10 881.48±997.32a
		30	293.00±16.64a	183.00±26.54a	79.44±12.74a	11 438.72±1 834.34a

注:不同字母表示相同氮水平内不同锌处理下相比达到显著差异 ($P < 0.05$)。下同。Note: Different letters indicated the significant difference ($P < 0.05$) under different zinc treatments at the same nitrogen level. The same as below.

和 28%；在中氮(160 kg/hm²)条件下,与不施锌相比,施用锌肥使广两优 35 的理论产量提高了 5%~6%；在高氮(240 kg/hm²)条件下,施用 15、30 kg/hm² 锌肥使广两优 35 的理论产量分别提高了 78%和 87%。

综上所述表明:与不施锌相比,施用 15、30 kg/hm² 锌肥均提高了日本晴和广两优 35 的理论产量,与施用 15 kg/hm² 锌肥相比,施用 30 kg/hm² 锌肥下,水稻理论产量的增加幅度更大;并且,无论是日本晴还是广两优 35,在低氮(≤80 kg/hm²)或高氮(240 kg/hm²)条件下,施用锌肥对水稻理论产量的促进效应更大;对推广品种广两优 35 而言,高氮高锌配施对产量的促进效应

最大。

2.3 氮锌配施对水稻氮吸收分配的影响

如表 2 所示,氮锌互作处理对日本晴新叶、老叶和茎中的氮含量均具有显著影响,对广两优 35 新叶、老叶、茎和叶鞘中的氮含量均具有显著影响。缺氮和低氮(80 kg/hm²)条件下,施锌显著降低了日本晴新叶和老叶中的氮含量;中氮(160 kg/hm²)和高氮(240 kg/hm²)条件下,施锌显著提高了日本晴新叶中的氮含量。与日本晴不同的是,施用氮肥≤160 kg/hm²的条件下,施用锌肥显著提高了广两优 35 叶片中的氮含量;而在高氮(240 kg/hm²)条件下,施用锌肥反而降低了广两优 35 叶片中的氮含量。

表 2 氮锌配施下水稻成熟期各组织部位的氮含量

品种 Varieties	氮水平/(kg/hm ²) N level	锌水平/ (kg/hm ²) Zn level	新叶 New leaves	老叶 Old leaves	茎 Stems	叶鞘 Sheaths	穗 Spikelets
日本晴 Nipponbare	0	0	19.09±0.03a	17.31±0.11a	6.81±0.61a	7.5±0.41a	12.99±0.92a
		15	15.37±0.09b	14.93±0.44b	5.54±1.00a	5.75±0.35b	12.17±0.10a
		30	10.81±0.76c	13.02±0.58c	6.36±1.43a	7.63±0.79a	13.12±0.95a
	80	0	16.36±1.60a	15.63±1.40a	5.77±0.86a	6.20±0.40a	13.04±1.53a
		15	13.09±2.91a	11.3±1.70b	4.48±0.62a	6.38±0.55a	11.31±0.28a
		30	11.22±2.29a	9.21±0.58b	5.81±0.61a	6.46±0.84a	12.74±1.84a
	160	0	14.48±0.73b	13.88±2.16a	4.17±0.20b	6.53±0.81a	11.85±0.50a
		15	17.27±0.16a	9.23±1.43a	5.79±0.71a	5.93±0.16a	13.03±0.46a
		30	17.40±0.95a	13.79±0.99a	3.93±0.36b	6.83±0.39a	11.87±0.66a
	240	0	9.75±1.54b	9.82±0.42b	7.74±1.76a	7.03±0.60a	13.59±2.14a
		15	14.08±0.91a	8.41±1.10b	4.40±0.37b	4.48±1.16b	10.15±0.41b
		30	12.87±1.96ab	15.55±0.80a	5.79±0.79ab	6.15±0.47ab	12.66±0.48ab
广两优 35 Guangliangyou 35	0	0	8.31±0.40a	5.39±0.57b	4.51±0.70a	4.37±0.29a	12.01±0.33a
		15	10.19±2.55a	7.02±0.87b	5.31±0.37a	5.24±0.65a	11.28±0.47a
		30	12.22±1.71a	10.03±0.97a	4.61±0.10a	4.70±0.31a	11.42±0.85a
	80	0	8.73±0.09ab	4.06±0.12b	4.33±0.24a	4.31±0.83a	10.98±0.53a
		15	6.87±0.32b	5.62±0.32b	6.07±0.74a	5.17±0.05a	10.72±0.96a
		30	11.27±1.66a	9.09±1.35a	4.63±0.75a	5.63±1.15a	11.71±0.98a
	160	0	8.27±1.26a	7.15±0.53a	4.84±0.41a	5.45±0.02ab	12.89±2.73a
		15	10.71±0.03a	5.60±1.09a	3.93±0.21a	4.66±0.73b	10.28±0.88a
		30	12.36±2.40a	5.91±0.58a	5.21±0.73a	7.10±0.53a	13.16±1.14a
	240	0	14.42±0.66a	8.00±0.91a	4.85±0.33a	5.52±0.63a	11.83±0.03a
		15	8.56±1.40b	4.88±0.51a	4.42±0.65a	4.62±0.42a	12.64±0.61a
		30	7.09±0.32b	5.56±0.80ab	5.17±0.61a	4.03±0.97a	11.49±0.63a

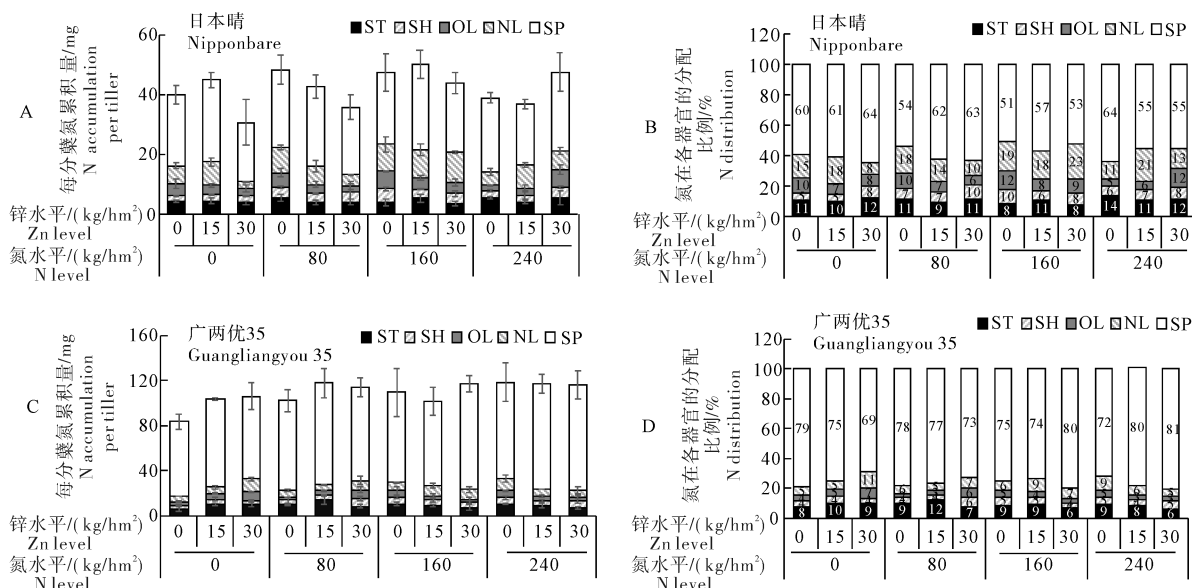
在施用氮肥≤80 kg/hm²的条件下,施锌反而降低了日本晴植株中的氮累积量;但在高氮(240 kg/hm²)条件下,施用 30 kg/hm² 锌肥仍能显著提高日本晴植株中的氮累积量(图 2A)。对广两优 35

来说,只有在不施氮肥的条件下,施锌能够提高植株中的氮累积量(图 2C)。

施锌对氮在日本晴和广两优 35 各部位的分配比例具有显著影响,并且在两品种之间存在一定的

差异。在施用氮肥 $\leq 160 \text{ kg/hm}^2$ 的条件下,施用锌肥促进了氮向日本晴小穗中的分配;但是在高氮(240 kg/hm^2)条件下,施锌反而抑制了氮向日本晴小穗中的分配(图 2B)。对于广两优 35 而言,在低氮($\leq 80 \text{ kg/hm}^2$)条件下,施锌抑制了氮向小穗中

的分配;而在中、高氮($\geq 160 \text{ kg/hm}^2$)条件下,施用锌肥促进了氮向广两优 35 小穗中的分配(图 2D)。由此可见,对于不同的水稻品种,适宜的氮锌配比能够促进水稻中氮从营养器官向生殖器官中分配,进而促进产量和籽粒蛋白质含量提高。



ST:茎;SH:叶鞘;OL:老叶;NL:新叶;SP:穗。下同。ST:Stems;SH:Sheaths;OL:Old leaves;NL:New leaves;SP:Spikelets. The same as below.

图 2 氮锌配施下成熟期日本晴和广两优 35 的氮积累量(A,C)以及氮在各部位的分配比例(B,D)

Fig.2 N accumulation (A,C) and distribution (B,D) of Nipponbare and Guangliangyou 35 at maturation stage under combined application of nitrogen and zinc

2.4 氮锌配施对水稻锌吸收分配的影响

如表 3 所示,氮锌互作对日本晴各部位的锌含量均有极显著影响,但仅对广两优 35 新叶和小穗中的锌含量具有极显著影响。对于日本晴,适宜施用氮肥能够提高各部位的锌含量。对于广两优 35,不同的氮锌配比施用表现出不同的结果。在不施锌条件下,施用氮肥能够提高茎和小穗中的锌含量,而降低叶鞘中的锌含量;在施用锌肥的条件下,施氮显著提高新叶中的锌含量,而降低老叶中的锌含量。

当锌肥施用量为 0 kg/hm^2 或 15 kg/hm^2 时,随着施氮量的增加,日本晴植株中的锌积累量呈先上升后下降的趋势,在氮肥处理为 80 kg/hm^2 时,锌积累量达到最高;当锌肥施用量为 30 kg/hm^2 时,日本晴植株中的锌积累量随供氮水平的增加而升高

(图 3A)。施用氮肥对广两优 35 植株中的锌积累量影响并不大,仅在不施锌条件下,施氮能够提高锌在广两优 35 植株中的积累量(图 3C)。

适宜的氮锌配比施用也能够促进锌从水稻茎向小穗中分配。在施用 15 kg/hm^2 锌肥的条件下,施用 160 kg/hm^2 氮肥降低了锌在日本晴和广两优 35 茎中的分配比例(分别为 17% 、 3%),提高了锌在日本晴和广两优 35 小穗中的分配比例(分别为 9% 、 4%)。在 30 kg/hm^2 的施锌条件下,施用 80 kg/hm^2 的氮肥提高了锌在日本晴穗中的分配比例(5%);施用 160 kg/hm^2 的氮肥提高了锌在广两优 35 穗中的分配比例(6%)(图 3B、3D)。由此可见,适宜的氮锌配比同样能够促进锌向水稻生殖器官分配,进而促进产量和籽粒微量元素含量提高。

表 3 氮锌配施下水稻成熟期各组织部位的锌含量

Table 3 Zn concentration in different tissues of rice at mature stage under combined application of nitrogen and zinc $\mu\text{g/g}$

品种 Varieties	锌水平/ (kg/hm^2) Zn level	氮水平/ (kg/hm^2) N level	新叶 New leaves	老叶 Old leaves	茎 Stems	叶鞘 Sheaths	穗 Spikelets
日本晴 Nipponbare	0	0	16.85±1.25b	16.25±1.44ab	28.86±0.64c	19.67±0.34a	28.14±1.01b
		80	14.03±1.53b	13.64±0.68b	44.46±1.75a	19.96±0.82a	37.10±0.85a
		160	17.54±1.01ab	19.14±3.85ab	37.35±1.04b	12.03±5.34b	37.44±2.78a
		240	21.41±2.94a	19.72±1.09a	45.54±1.95a	21.00±0.64a	34.56±1.29a
	15	0	16.95±1.81ab	32.27±1.64a	52.95±0.89a	17.01±0.76b	28.46±1.98c
		80	15.60±1.46ab	18.92±2.79b	56.60±5.97a	36.03±8.37a	33.73±1.10b
		160	18.73±3.04a	30.72±1.47a	22.90±2.72c	30.80±1.19a	38.78±2.02a
		240	13.15±1.51b	31.36±1.09a	38.39±1.72b	25.68±3.61ab	29.54±0.78c
	30	0	14.38±1.30b	24.34±1.01b	44.83±4.96ab	21.56±0.93bc	33.9±0.32a
		80	16.62±0.73ab	23.49±0.61b	33.51±4.50c	20.30±2.11b	30.63±1.76b
		160	13.85±1.57b	22.87±0.21b	36.83±0.48bc	25.48±2.10ab	34.82±0.13a
		240	19.26±0.20a	26.26±0.63a	47.56±2.57a	27.34±1.66a	30.79±0.00b
广两优 35 Guangliangyou 35	0	0	21.08±2.42a	18.24±2.30a	30.62±0.30b	24.99±2.35a	20.15±1.03b
		80	18.76±1.77a	15.78±2.13a	35.09±4.69ab	14.43±1.62c	20.45±2.45b
		160	20.60±0.57a	19.27±2.44a	42.49±5.18a	18.98±1.65b	22.77±0.01ab
		240	18.20±0.12a	18.67±1.05a	33.49±1.72ab	18.39±0.65b	24.47±1.57a
	15	0	17.12±0.62b	22.70±0.92a	27.94±0.64a	19.58±1.51a	19.99±1.86bc
		80	22.10±0.80a	21.65±0.35a	30.96±7.89a	16.91±1.26a	22.04±0.40b
		160	19.18±0.53ab	25.87±3.29a	27.23±2.45a	18.36±11.13a	24.55±0.22a
		240	21.99±2.58a	12.07±2.43b	26.23±6.39a	17.31±3.01a	19.16±0.37c
	30	0	15.21±1.75c	33.66±10.82a	30.34±2.09a	20.03±2.58a	21.67±0.89a
		80	21.69±1.19ab	25.56±2.20a	32.21±4.80a	24.23±4.60a	21.49±0.62a
		160	19.63±0.88b	25.29±8.68a	27.08±0.23a	22.31±4.23a	21.40±0.95a
		240	23.33±1.71a	21.48±1.97a	31.95±14.81a	26.27±4.06a	21.12±0.32a

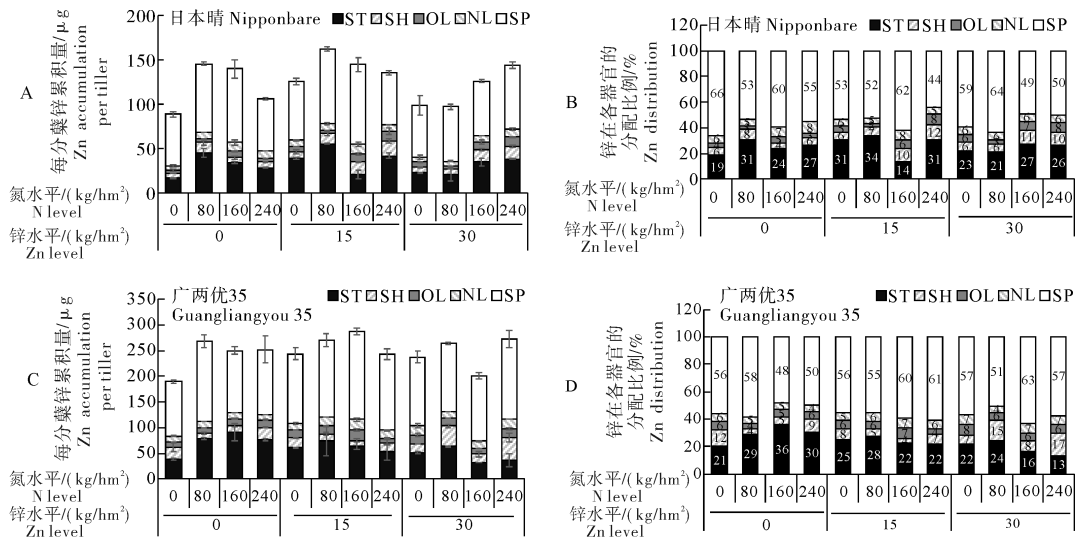


图 3 氮锌配施下成熟期日本晴和广两优 35 的锌累积量(A、C)以及锌在各部位的分配比例(B、D)

Fig.3 Zn accumulation (A,C) and distribution (B,D) of Nipponbare and Guangliangyou 35 at maturation stage under combined application of nitrogen and zinc

3 讨 论

本研究分析了12组不同氮锌配比处理下籼型杂交水稻品种广两优35和常规粳稻品种日本晴的生物量和产量以及对氮、锌的吸收分配的影响,结果表明氮锌配施对水稻早期的生长和后期的产量形成均具有协同增效效应。

本研究结果还显示,氮和锌的协同增效效应在不同水稻品种中具有一定的差异性。虽然与不施锌相比,施用锌肥(15 kg/hm²和30 kg/hm²)均提高了日本晴和广两优35的籽粒产量,但是对日本晴而言,低氮高锌配施对产量的促进效应最大,而对推广品种广两优35而言,高氮高锌配施对产量的促进效应最大。在日本晴中,中、低氮条件下,配施锌肥更加有利于氮向小穗中分配;而在广两优35中,中、高氮条件下,配施锌肥更加有利于氮向小穗中分配。因此,对于不同水稻品种而言,只有适宜的氮锌配比施用才能达到最佳的协同增效效应,使作物充分利用养分,获得最高的生物量和产量。赵鹏等^[21]在冬小麦中研究发现,中氮高锌配施能显著提高冬小麦氮素利用效率。通过优化土壤氮水平和叶面锌处理,结合适宜的品种,在低氮投入下也可以提高小麦锌浓度并保持小麦高产^[22]。扶海超等^[23]在玉米中研究发现,氮锌互作对其生长、养分含量方面并不表现出持续促进或持续抑制,而是在适宜的氮浓度范围内,施锌才能促进植株对氮的吸收。可见,在生产实践中,需要根据不同的作物品种与土壤肥力水平,选择适宜的氮肥与锌肥配比施用,才能发挥氮与锌最佳的协同增效效应。

综上,本研究结果表明,氮锌配施提高了植株中的氮和锌含量,促进氮和锌向生殖器官(小穗)中分配是提高产量的主要生理机制。氮和锌的协同增效效应在不同水稻品种中具有一定的差异性,针对不同的水稻品种需要使用不同的氮锌配比才能达到最佳的协同增效效应。

磷是植物生长发育所必需的大量营养元素之一,也是肥料三要素之一,在农业生产中具有十分重要的作用。土壤中磷与锌之间存在着强烈的拮抗作用,称之为“磷诱导的锌缺乏”;同时,磷与锌在植物根部也存在明显的交互作用,锌缺乏可导致植物出现磷中毒现象,磷缺乏则会使植物体内的锌含量上升^[24-28]。有研究表明,不同的磷锌配比对水稻的生长和产量等有不同的影响,或是协同增效或是拮抗

作用^[29]。磷与氮之间的相互作用则更加倾向为协同效应。在缺磷条件下,施氮显著提高磷缺乏响应基因及磷转运基因的表达水平,从而增强植物根系对磷的吸收;同样,缺磷会显著降低硝酸根转运基因的表达水平,从而抑制植物根系对氮的吸收^[30]。此外,缺磷会显著影响植物根系的生长,从而影响植物根系对氮、锌及其他营养元素的吸收^[31]。在本研究供试土壤的基础理化指标的测定结果中可以发现其土壤速效磷含量较低,仅5.51 mg/kg,为磷缺乏土壤。磷与氮和锌之间又存在着明显不同的交互作用,土壤中不同水平的磷含量必然会对水稻吸收氮和锌造成一定的影响。本研究结果是在磷相对缺乏的条件下获得的,因此,后期针对不同磷水平下开展氮锌互作的研究结果更能为“精准农业、精准施肥”提供更高价值的理论参考。

参考文献 References

- [1] MARSCHNER P. Marschner's mineral nutrition of higher plants[M].3rd ed.San Diego:Academic Press,2012.
- [2] NAVARRO-LEÓN E,BARRAMEDA-MEDINA Y,LENTINI M,et al. Comparative study of Zn deficiency in *L. sativa* and *B. oleracea* plants: NH₄⁺ assimilation and nitrogen derived protective compounds [J]. Plant science,2016,248:8-16.
- [3] CURIE C,CASSIN G,COUCH D,et al.Metal movement within the plant:contribution of nicotianamine and yellow stripe 1-like transporters[J].Annals of botany,2009,103(1):1-11.
- [4] TINGEY D T,MCKANE R B,OLSZYK D M,et al. Elevated CO₂ and temperature alter nitrogen allocation in Douglas-fir [J]. Global change biology,2003,9:1038-1050.
- [5] TIAN Q Y,CHEN F J,LIU J X,et al.Inhibition of maize root growth by high nitrate supply is correlated with reduced IAA levels in roots[J].Journal of plant physiology,2008,165(9):942-951.
- [6] KROUK G,LACOMBE B,BIELACH A,et al. Nitrate-regulated auxin transport by NRT1.1 defines a mechanism for nutrient sensing in plants [J]. Developmental cell,2010,18:927-937.
- [7] 周斌,张金尧,乙引,等.缺锌对玉米根系发育、生长素含量及生长素转运基因表达的影响[J].植物营养与肥料学报,2017,23(5):1352-1358.ZHOU B,ZHANG J Y,YI Y,et al.Effects of zinc deficiency on root growth, endogenous auxin content and key auxin transport genes expressions in maize roots[J].Plant nutrition and fertilizer science,2017,23(5):1352-1358(in Chinese with English abstract).
- [8] 陆欣春,田霄鸿,杨习文,等.氮锌配施对不同冬小麦品种产量及锌营养的影响[J].中国生态农业学报,2010,18(5):923-928.LU X C,TIAN X H,YANG X W,et al.Effect of combina-

- tion use of Zn and N fertilizers on yield and Zn content in winter wheat[J]. Chinese journal of eco-agriculture, 2010, 18(5): 923-928 (in Chinese with English abstract).
- [9] SHI R L, ZHANG Y Q, CHEN X P, et al. Influence of long-term nitrogen fertilization on micronutrient density in grain of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Journal of cereal science, 2010, 51: 165-170.
- [10] 郭九信, 廖文强, 凌宁, 等. 氮锌配施对小麦产量及氮锌含量的影响[J]. 南京农业大学学报, 2013, 36(2): 77-82. GUO J X, LIAO W Q, LING N, et al. Effects of combination use of N and Zn fertilizers on the yield and N, Zn concentrations in wheat [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2013, 36(2): 77-82 (in Chinese with English abstract).
- [11] 赵蓉蓉. 氮素供应及衰老对小麦铁锌转移及其在籽粒中累积的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2014. ZHAO R R. Effects of nitrogen supply and senescence on iron and zinc translocation and accumulation in grain of winter wheat[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014 (in Chinese with English abstract).
- [12] 李宏云, 王少霞, 李萌, 等. 锌与氮磷肥配合喷施对冬小麦锌累积及锌肥利用率的影响[J]. 西北农林科技大学学报, 2015, 43(9): 139-149. LI H Y, WANG S X, LI M, et al. Effect of combined application of zinc and nitrogen and phosphorus fertilizers on zinc accumulation and zinc use efficiency in winter wheat [J]. Journal of Northwest A & F University, 2015, 43(9): 139-149 (in Chinese with English abstract).
- [13] CAKMAK I, PFEIFFER W H, MC CLAFFERTY B. Biofortification of durum wheat with zinc and iron [J]. Cereal chemistry, 2010, 87: 10-20.
- [14] ERENOGLU E B, KUTMAN U B, CEYLAN Y, et al. Improved nitrogen nutrition enhances root uptake, root-to-shoot translocation and remobilization of zinc (^{65}Zn) in wheat [J]. New phytologist, 2011, 189: 438-448.
- [15] 段庆波, 宁大伟, 邢颖, 等. 氮磷锌配施对水稻产量和稻米品质的影响[J]. 湖北农业科学, 2010, 49(S1): 70-73. DUAN Q B, NING D W, XING Y, et al. Effect of combined application of nitrogen, phosphorus and zinc on yield and quality in rice [J]. Hubei agricultural sciences, 2010, 49(S1): 70-73 (in Chinese with English abstract).
- [16] ALI H, HASNAIN Z, SHAHZAD A N, et al. Nitrogen and zinc interaction improves yield and quality of submerged basmati rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Notulae botanicae horti agrobotanici cluj-Napoca, 2014, 42(2): 372-379.
- [17] POONIYA V, SHIVAY Y S. Enrichment of basmati rice grain and straw with zinc and nitrogen through fert-fortification and summer green manuring under indo-gangetic plains of India [J]. Journal of plant nutrition, 2013, 36: 91-117.
- [18] 郭九信, 廖文强, 孙玉明, 等. 锌肥施用方法对水稻产量及籽粒氮锌含量的影响[J]. 中国水稻科学, 2014, 28(2): 185-192. GUO J X, LIAO W Q, SUN Y M, et al. Effects of Zn fertilizer application methods on yield and contents of N and Zn in grains of rice [J]. Chinese journal of rice science, 2014, 28(2): 185-192 (in Chinese with English abstract).
- [19] 郭九信, 隋标, 商庆银, 等. 氮锌互作对水稻产量及籽粒氮、锌含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(6): 1336-1342. GUO J X, SUI B, SHANG Q Y, et al. Effects of N and Zn interaction on yield and contents of N and Zn in grains of rice [J]. Plant nutrition and fertilizer science, 2012, 18(6): 1336-1342 (in Chinese with English abstract).
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000. BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. 3rd ed. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2000 (in Chinese).
- [21] 赵鹏, 杨帆, 睢福庆, 等. 氮锌配施对冬小麦氮利用、产量及籽粒蛋白质含量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2013, 18(3): 28-33. ZHAO P, YANG F, SUI F Q, et al. Effect of combined application of Zn and N fertilizers on nitrogen use, grain yield and protein content in winter wheat [J]. Journal of China Agricultural University, 2013, 18(3): 28-33 (in Chinese with English abstract).
- [22] XIA H Y, XUE Y F, LIU D Y, et al. Rational application of fertilizer nitrogen to soil in combination with foliar Zn spraying improved Zn nutritional quality of wheat grains [J/OL]. Frontiers in plant science, 2018, 9: 677 [2020-09-08]. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00677>.
- [23] 扶海超, 陈晓, 聂兆君, 等. 氮锌配施对玉米生长及氮素吸收的影响[J]. 河南农业大学学报, 2017, 51(3): 293-300. FU H C, CHEN X, NIE Z J, et al. Effect of combined application of Zn and N fertilizers on maize seedlings growth and nitrogen absorption [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2017, 51(3): 293-300 (in Chinese with English abstract).
- [24] LONERAGAN J F, GRUNES D L, WELCH R M, et al. Phosphorus accumulation and toxicity in leaves in relation to zinc supply [J]. Soil science society of America journal, 1982, 46(2): 345-352.
- [25] CAKMAK I, MARSCHNER H. Mechanism of phosphorus-induced zinc deficiency in cotton. I. Zinc deficiency-enhanced uptake rate of phosphorus [J]. Physiologia plantarum, 1986, 68(3): 483-490.
- [26] HUANG C Y, BARKER S J, LANGRIDGE P, et al. Zinc deficiency up-regulates expression of high-affinity phosphate transporter genes in both phosphate-sufficient and -deficient barley roots [J]. Plant physiology, 2000, 124(1): 415-422.
- [27] BRIAT J F, ROUACHED H, TISSOT N, et al. Integration of P, S, Fe, and Zn nutrition signals in *Arabidopsis thaliana*: potential involvement of PHOSPHATE STARVATION RESPONSE 1 (PHR1) [J/OL]. Frontiers in plant science, 2015, 6: 290 [2020-09-08]. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00290>.
- [28] PONGRAC P, MCNICOL J W, LILLY A, et al. Mineral element composition of cabbage as affected by soil type and phosphorus and zinc fertilisation [J]. Plant and soil, 2019, 434(1/2): 151-165.
- [29] 刘露, 杨新鑫, 张丽梅, 等. 磷锌配施对水稻生长、产量和养分吸

- 收分配的影响[J].华中农业大学学报,2021,40(2):156-165.
- LIU L, YANG X X, ZHANG L M, et al. Effects of combined application of phosphorus and zinc fertilizer on growth, yield, nutrient absorption and distribution of rice[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(2): 156-165 (in Chinese with English abstract).
- [30] MEDICI A, SZPONARSKI W, DANGEVILLE P, et al. Identification of molecular integrators shows that nitrogen actively controls the phosphate starvation response in plants[J]. The plant cell, 2019, 31(5): 1171-1184.
- [31] KELLERMEIER F, ARMENGAUD P, SEDITAS T J, et al. Analysis of the root system architecture of *Arabidopsis* provides a quantitative readout of crosstalk between nutritional signals [J]. The plant cell, 2014, 26(4): 1480-1496.

Effects of combined application of nitrogen and zinc on growth, yield, nutrient absorption and distribution of rice

LI Junli, QIAN Gan, LI Haixing, ZHANG Limei, YE Xiangsheng, XU Fangsen, CAI Hongmei

Center of Microelement Research/College of Resources and Environment,
Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract In order to investigate the effect of the combined application of N and Zn fertilizers on the growth, yield, nutrient absorption and distribution of rice, the *indica* hybrid rice variety Guangliangyou 35 and conventional *japonica* rice cultivar Nipponbare were treated with combined application of three Zn levels and four N levels in field experiment. We analyzed the shoot dry weight at different growth stages, the yield and its components at mature stage as well as the concentrations, accumulations and distributions of N and Zn in different organs and tissues. Results showed that the combined application of N and Zn fertilizers had synergistic effect on the rice biomass at the early growth stage and the yield at the mature stage. The combined application of N and Zn fertilizers had significant synergistic effect on rice panicle numbers. The significantly increased panicle numbers determined the increase of yield under the combined application of N and Zn fertilizers. The combined application of N and Zn fertilizers increased the concentrations of N and Zn in rice plant, and promoted the distribution of N and Zn to the reproductive organ (spikelet), which is one of the main physiological mechanisms of increasing yield under the combined application of N and Zn fertilizers.

Keywords rice; combined application of nitrogen and zinc; nitrogen-zinc interaction; precise fertilization; rice production increasing; nutrient absorption

(责任编辑:赵琳琳)