

锌离子活度对水稻幼苗锌吸收分配的影响 及基因型差异

陈光才¹, 王人民², 李迎春³, 杨肖娥⁴

(1 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江富阳 311400; 2 浙江大学农学系, 浙江杭州 310029;

3 贵州大学, 贵州贵阳 550025; 4 浙江大学资源科学系, 浙江杭州 310029)

摘要: 采用 HEDTA 螯合缓冲营养液, 在 4 个锌水平(pZn^{2+} 即 $-\log[Zn^{2+}]$) 分别为 11.4、11.0、10.3 和 9.7 下对锌营养效率不同的 4 个水稻基因型[IR8192、IR26、BY(碧玉早糯)、Z921(浙农 921)] 进行营养液培养试验, 研究水稻幼苗对 Zn 吸收、转运和利用规律。结果表明, 随着锌离子活度下降, 各水稻基因型的锌累积量下降, 锌从地下部向地上部的转运率提高, 锌利用效率提高, 且各基因型间差异显著。在锌离子活度较低时, 耐低锌基因型(IR8192) 锌养分利用效率和提高养分利用率的能力要远远高于锌敏感基因型 IR26 和子粒富锌基因型 BY; 在锌离子活度较高时, 水稻子粒富锌基因型 BY 有较强的锌富集能力, 具有较高的秧苗锌累积量, 这可能是其子粒富锌的主要机理之一; 利用苗期营养性状筛选子粒富锌水稻基因型效果可能较好。

关键词: 水稻基因型; 锌离子活度; 耐低锌; 子粒富锌

中图分类号: S511.02; Q945.12

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2004)05-0526-05

Genotypic difference in Zn-uptake and translocation at rice seedlings under different Zn^{2+} activity

CHEN Guang-cai¹, WANG Ren-min², LI Ying-chun³, YANG Xiao-e⁴

(1 Research Inst. of Sub-tropical Forestry, the Chinese Acad. of forestry, Fuyang 311400, China;

2 Dept. of Agron., Zhejiang Univ., Hangzhou 310029, China; 3 Guizhou Univ., Guiyang 550025, China;

4 Dept. of Resour. Sci., Zhejiang Univ., Hangzhou 310029, China)

Abstract: Four genotypes of rice (IR8192, IR26, BY and Z921) with different Zn-efficiency were cultivated in chelator buffered nutrient solution at four Zn levels (pZn^{2+} i. e. $-\log[Zn^{2+}]$) was 11.4, 11.0, 10.3, 9.7, respectively to study the regulation of absorption, translocation and utilization of Zn at rice seedlings. As Zn^{2+} activity decreased, the amount of Zn uptake by rice seedlings decreased, while translocation rate of Zn from root to shoot, Zn utilization efficiency increased in all genotypes. There was obvious genotypic difference on changing range among four genotypes. At low Zn^{2+} activity, Zn-efficient rice genotype(IR8192) was stronger in utilization efficiency of Zn and promoting the efficiency than Zn-inefficient(IR26) and Zn-dense in grain rice genotype (BY). At high Zn^{2+} activity, Zn-dense in grain genotype was stronger in Zn-uptake and accumulation in rice plant, maybe was one of the mechanisms of Zn-dense in grain genotype. It also could be concluded that nutrient traits of rice seedlings, such as total Zn uptake and accumulation in rice plant and could be used in screening Zn-dense in grain genotypes.

Key words: Genotype of rice; Zn^{2+} activity; Zn-efficient; Zn-dense in grain

收稿日期: 2003-10-08 修改稿收到日期: 2003-12-11

基金项目: 国家杰出青年基金项目(39925024)资助。

作者简介: 陈光才(1978-)男, 山东高密人, 硕士, 主要从事植物逆境生物学与分子调控、生物多样性等研究。

全世界约有 50% 的稻田缺锌^[1-2],我国大约有 40% 的土壤缺锌^[3],缺锌已经成为水稻生产中最严重的土壤限制因子之一。缺锌不仅影响水稻生长发育,也会影响锌在稻米中的积累,继而影响到人类尤其是幼儿、青少年和孕妇健康。目前国内外对于水稻耐低锌的基因型差异及水稻锌高效机理的研究较多^[4-9],对水稻子粒富锌种质也有研究^[10-11],但对水稻子粒富锌的机理、水稻子粒富锌与耐低锌胁迫的关系则少有报道。水稻子粒富锌与耐低锌胁迫的关系、水稻子粒富锌的机制研究,对于通过栽培、育种措施调节锌在水稻子粒中的积累以及选育锌高效水稻基因型,从而解决土壤和水稻缺锌,改善人类健康等都有重要的现实意义。为此,本试验从水稻基因型对锌的吸收、转运和利用的差异入手,探讨对水稻子粒富锌的机理以及耐低锌与子粒富锌机理的差异,以期选育耐低锌胁迫且子粒富锌的水稻基因型提供一点理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

试验于 2002 年 9 月至 10 月在浙江大学华家池校区温室进行。供试水稻为耐低锌基因型 IR8192、锌敏感基因型 IR26、子粒富锌基因型碧玉早糯(BY)、子粒低锌基因型浙农 921(Z921)。

试验采用螯合剂缓冲营养液培养法^[12],但不使用 Ferrozine 试剂,其不含锌的基本培养液配方如下: NH_4NO_3 1.43、 CaCl_2 1.00、 MgSO_4 1.64、 NaH_2PO_4 0.32、 K_2SO_4 1.32 mmol/L 和 MnCl_2 9.50、 CuSO_4 2.0、 $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$ 0.075、 H_3BO_3 1.90、 FeCl_3 35.6 $\mu\text{mol/L}$,增加 CuSO_4 浓度是为了维持一定的铜离子浓度,因为培养液要加 HEDTA 螯合剂。

锌处理是在 HEDTA 螯合缓冲培养液中各加入 ZnSO_4 0.5、2、10 和 40 $\mu\text{mol/L}$,HEDTA 浓度为 Cu、Fe、Mn 和 Zn 的浓度总和再过量 50 $\mu\text{mol/L}$ 。锌离子活度计算采用 GEOCHEM-PC2.0 版^[13],经计算 0.5、2、10 和 40 $\mu\text{mol/L}$ Zn-HEDTA 的锌离子活度 pZn^{2+} ($-\log[\text{Zn}^{2+}]$)分别为 11.4、11.0、10.3 和 9.7 (锌离子有效浓度升高则锌离子活度 pZn^{2+} 数值下降)。

锌营养采用锌离子活度表示^[14-15]是因为植物对锌的吸收主要依赖于 Zn^{2+} 的自由活度,锌离子活度又随培养液组成及溶液 pH 不同而不同,采用锌

离子活度能更精确地反应植物对锌的实际需要,而采用螯合剂缓冲能控制 Zn^{2+} 自由活度以保持营养液培养不同缺锌程度植株。

1.2 培养方法

选取大小、形态一致的种子浸种、催芽后播种于 63 cm×42 cm×14 cm 的塑料槽中尼龙网上的 PVC 板孔穴中(直径为 1cm),每穴播 1 颗,每槽播 300 颗,先用蒸馏水培养至 3 叶期(期间换水 1 次),再用 1/2 浓度的不含锌的营养液培养 4d,然后进行无锌全营养液培养至秧龄 20d 时处理,移栽到塑料桶中,每桶 18 株,加营养液 6L,pH 控制在 6.5 ± 0.1 ,每 1d 调节 1 次,营养液每隔 5d 换一次,秧苗共培养 43d。采用裂区设计,锌离子活度为主区,基因型为副区,3 次重复。

1.3 取样和测定

秧苗培养至 43d 时,各处理分别取 18 株秧苗,把秧苗分为地上部和地下部后,先用自来水冲洗 3 遍,然后用蒸馏水冲洗 2 遍,在 75℃ 下烘干。粉碎后采用 550℃ 的高温灰化 8h 后,用 1:1 盐酸溶解并定容,用 AA-6800 型原子吸收分光光度仪(SHIMADZU 生产)测定锌浓度。试验数据用 DPS 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同锌离子活度下各水稻基因型秧苗地上部和根部含锌量

不同锌离子活度下水稻秧苗地上部的含锌量(表 1)看出,水稻秧苗地上部含锌量随着锌离子活度的降低而降低,并且各水稻基因型的地上部含锌量在不同锌离子活度下呈现显著性差异。在相同锌离子活度下,各基因型间含锌量也有明显差异,在锌离子活度 pZn^{2+} 9.7 时,地上部含锌量以 IR8192 为最高,达到 85.35 mg/kg,Z921 最低为 66.35 mg/kg,两者相差 22.27%;当锌离子活度达到 pZn^{2+} 11.0 时,IR8192 地上部含锌量为 52.03 mg/kg,IR26 为 43.95 mg/kg,前者比后者高出 19.00%,锌离子活度进一步下降达到 pZn^{2+} 11.4 时,IR8192 最高为 46.72 mg/kg,Z921 最低是 37.64 mg/kg。

水稻秧苗地上部含锌量随着外界锌离子活度的下降而降低,都是在锌离子活度 pZn^{2+} 9.7 时达到最高,在锌离子活度 pZn^{2+} 11.4 时达到最低,各基因型的下降幅度差异显著。锌离子活度从 pZn^{2+} 9.7 下降到 pZn^{2+} 10.3,IR8192 下降了 31.61%,下降最小的是 BY,降低了 14.8%;进一步下降 pZn^{2+} 到 11.4

时, IR8192 下降幅度最大, 达 45.26%, BY 最小, 下降了 25.72%, IR26 和 Z921 分别下降 42.48 和 43.27%。随着锌离子活度 (pZn^{2+}) 下降, 各水稻基因型地上部含锌量都急剧下降, 但 BY 的下降幅度一直是最小, 在一定程度上说明子粒富锌基因型 BY 在各种锌环境里能够维持较强的锌吸收、富集能力。

表 1 还看出, 各水稻基因型地下部含锌量随外界锌离子活度的降低而迅速下降, 地下部含锌量在

各基因型间也存在差异。各基因型的地下部含锌量在锌离子活度 pZn^{2+} 9.7 时达到最高, pZn^{2+} 11.4 时最低, 降低幅度以 IR8192 最大为 66.22%, BY 最小为 54.26%。在相同锌离子活度下, 各基因型含锌量有差别, 在 pZn^{2+} 9.7 时, IR8192 的含锌量远远高于其它 3 个基因型, 为 192.28mg/kg, 在 pZn^{2+} 11.4 时, Z921 最低为 55.20 mg/kg, 其余 3 个基因型地下部含锌量相近。说明 BY 对锌的吸收利用能力较强, 这也可能是 BY 子粒富锌的一个原因。

表 1 不同锌离子活度下水稻秧苗地上部和根部含锌量 (mg/kg)

Table 1 Zn content in shoot and root of rice seedlings under different Zn^{2+} activity

基因型 Genotype	pZn^{2+}							
	9.7		10.3		11.0		11.4	
	地上部 Shoot	根 Root	地上部 Shoot	根 Root	地上部 Shoot	根 Root	地上部 Shoot	根 Root
IR26	71.84 aA	160.61 aA	55.93 bB	91.79 bB	43.95 cBC	63.96 cC	41.32 cC	62.23 cC
IR8192	85.35 aA	192.28 aA	58.37 bB	88.16 bB	52.03 cbBC	74.14 cC	46.72 cC	64.96 dD
BY	70.94 aA	145.27 aA	60.44 bB	110.78 bB	51.88 cC	78.62 cC	45.59 dC	66.44 dD
Z921	66.35 aA	148.44 aA	49.82 bB	89.02 bB	45.97 bBC	70.79 cC	37.64 cC	55.20 dD

注: 不同大、小写字母表示差异达 1%、5% 显著水平, 下同。

Note: Different capital and small letters mean significant at $p < 0.01$ and $p < 0.05$ levels, respectively, same as follows.

2.2 不同锌离子活度下各水稻基因型地上部和地下部锌浓度比

不同水稻基因型地上部和地下部含锌量比值 (表 2) 看出, 各水稻基因型的地上部和地下部含锌量之比在锌离子活度 pZn^{2+} 9.7 时最低, 并随着外界锌离子活度的降低而增加, 不同水稻基因型的增加幅度有明显差异。当锌离子活度下降到 pZn^{2+} 10.3 时, 地上部和地下部含锌量比值增加, 增加幅度以 IR8192 最大, BY 最小。当锌离子活度下降到

pZn^{2+} 11.4 时, 除了 IR26 较 pZn^{2+} 11.0 略有下降外, 其余的 3 个基因型均达到各自的最大值。地上部和地下部含锌量比值随着外界锌离子活度的降低而增加, 表明各水稻基因型在外界锌离子活度较低的情况下, 能够把更多的锌从地下部向地上部转运, 以保证地上部的正常生长。但是, 耐低锌基因型 IR8192 从地下部向地上部转运锌的能力要比锌敏感基因型 IR26 和子粒富锌基因型 BY 高。

表 2 不同锌离子活度下各水稻基因型地上部和地下部锌浓度比

Table 2 The ratio of Zn content of shoot to root in rice seedlings under different Zn^{2+} activity

基因型 Genotype	pZn^{2+}							
	9.7		10.3		11.0		11.4	
	比值 Ratio	(%)	比值 Ratio	(%)	比值 Ratio	(%)	比值 Ratio	(%)
IR26	0.447	100.00	0.609	136.31	0.687	153.74	0.664	148.55
IR8192	0.444	100.00	0.662	149.13	0.702	158.10	0.719	162.02
BY	0.488	100.00	0.546	111.73	0.660	135.12	0.686	140.51
Z921	0.447	100.00	0.560	125.21	0.649	144.72	0.682	152.55

2.3 不同锌离子活度下各水稻基因型的锌累积量

表 3 表明, 各水稻基因型锌累积量随外界锌离子活度的降低而减少, 在相同锌离子活度下, 各水稻基因型秧苗锌累积量有差异。在锌离子活度 pZn^{2+}

9.7 时, 各水稻基因型秧苗锌累积量达到最大, 其中 BY 最高, IR26 最低。各水稻基因型锌累积量均随着锌离子活度下降而降低, 当锌离子活度下降到 pZn^{2+} 10.3 时, 各水稻基因型单株锌累积量均急剧

下降, BY 下降 49.65%, IR26 下降 69.17%, IR8192 和 Z921 处于前两者之间。在锌离子活度达到 pZn^{2+} 11.4 时, IR8192、BY、Z921 和 IR26 锌累积量分别为 5.38、5.13、4.13、3.28 $\mu\text{g}/\text{plant}$ 。

表 3 不同锌离子活度下各水稻基因型秧苗的锌累积量(43d)
Table 3 The amount of zinc uptake of rice seedling at different Zn^{2+} activity

基因型 Genotype	pZn^{2+}							
	9.7		10.3		11.0		11.4	
	($\mu\text{g}/\text{plant}$)	(%)	($\mu\text{g}/\text{plant}$)	(%)	($\mu\text{g}/\text{plant}$)	(%)	($\mu\text{g}/\text{plant}$)	(%)
IR26	32.23	100.00	9.97	30.93	7.57	23.49	3.28	10.18
IR8192	40.45	100.00	19.22	47.52	9.93	24.55	5.38	13.30
BY	45.86	100.00	23.09	50.35	11.85	25.84	5.13	11.19
Z921	44.12	100.00	20.42	46.28	6.76	15.32	4.13	9.36

2.4 不同锌离子活度下各水稻基因型的锌养分利用效率

不同水稻基因型的锌利用效率随锌离子活度的降低而增加,各水稻基因型的增加幅度存在极显著差异(表 4)。锌离子活度为 pZn^{2+} 9.7 时,各水稻基因型的锌利用效率以 Z921 最高, IR8192 最低。当锌离子活度下降到 pZn^{2+} 10.3 时,各水稻基因型的锌利用效率都大幅度提高, IR8192 的锌利用效率增

幅为 53.68%, BY 锌利用效率增幅仅为 15.28%。当锌离子活度进一步下降到 pZn^{2+} 11.4 时, IR8192 的锌利用效率增幅为 188.30%, Z921 增幅为 73.75%。表明在低锌离子活度下,各个水稻基因型都能够提高锌利用效率,耐低锌基因型提高锌利用效率的能力要远远高于锌敏感基因型和子粒富锌基因型。

表 4 不同锌离子活度下各水稻基因型的锌养分利用效率(kg/g, DW)
Table 4 Zn utilization rate of rice under different Zn^{2+} activity

基因型 Genotype	pZn^{2+}							
	9.7		10.3		11.0		11.4	
	UR	(%)	UR	(%)	UR	(%)	UR	(%)
IR26	11.34	100.00	15.76	138.98	17.70	156.08	22.90	201.94
IR8192	10.34	100.00	15.89	153.68	19.09	184.62	29.81	288.30
BY	12.37	100.00	14.26	115.28	18.09	146.24	21.98	177.69
Z921	12.61	100.00	17.65	139.97	15.61	123.79	21.91	173.75

注(Notes): UR 表示利用率。UR means utilization rate.

3 结论

敏感基因型的锌营养大多依赖于土壤中的水溶态锌和交换态锌,耐低锌基因型在缺锌的条件下能够吸收大量的化合态锌和有机态锌,耐性基因型和敏感基因型锌吸收量的差异在缺锌条件下要比施锌条件下大得多^[16]。在本试验中,锌主要以水溶态或交换态存在,所以在锌离子活度 pZn^{2+} 11.4 时,不同耐性基因型的地上部、地下部含锌量有明显差异,下降幅度以耐低锌基因型 IR8192 最大,子粒富锌基因型 BY 最小,地上部和地下部含锌量之比,增幅最大的耐低锌基因型 IR8192 为 162.02%,增幅最小的是富锌基因型 BY 为 140.51%。各水稻基因型锌

累积量在锌离子活度 pZn^{2+} 11.4 时,耐低锌基因型 IR8192 最大,富锌基因型 BY 次之,敏感基因型 IR26 最小,在其它锌离子浓度下,都以富锌基因型 BY 最大。锌利用效率以 IR8192 最高, Z921 最低。

在锌离子活度较低的情况下,各水稻基因型,能够把更多的锌从地下部向地上部转运,但是耐低锌基因型 IR8192 养分运转率要比锌敏感基因型 IR26 和 BY 提高得快,耐低锌基因型锌养分利用效率和提高养分利用率的能力要远远高于锌敏感基因型和子粒富锌基因型,这也是 IR8192 等的耐低锌机理之一。

从本试验结果看,在供锌充足的条件下,水稻子粒富锌基因型(BY)有较强的锌富集能力,具有较高

的秧苗累积吸锌量,这可能是其子粒富锌的主要机理之一。利用苗期营养性状筛选子粒富锌水稻基因型效果可能较好。

参考文献:

- [1] Sillanpaa M. Micronutrients assessment at the country level: An international study[R]. FAO Soils Bulletin 63, Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1990.
- [2] White J G, Zasoski R J. Mapping soil micronutrients[J]. Field Crops Res, 1999, 60: 11-24.
- [3] 刘铮. 中国土壤中锌含量和分布规律[J]. 中国农业科学, 1994, 27(1): 30-37.
- [4] Quijano-Cuerta C, Kirk C J D, Portugal A M *et al.* Tolerance of rice germplasm to zinc deficiency[J]. Field Crops Research, 2002, 76: 123-130.
- [5] Graham R E, Ascher J S, Hynes S C. Selecting zinc-efficient cereal genotypes for soils of low zinc status[J]. Plant and Soil, 1992, 146: 241-250.
- [6] 陈光财, 王人民, 张永鑫, 等. 水稻锌营养高效基因型的生理特性[J]. 中国水稻科学, 2003, 17(2): 161-165.
- [7] 王人民, 杨肖娥, 杨玉爱. 水稻耐低锌基因型的生长发育和若干生理特性研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(3): 284-293.
- [8] 王人民, 张永鑫, 杨肖娥, 等. 水稻锌高效营养特性的遗传分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(2): 196-202.
- [9] 王人民, 杨肖娥, 何慈信. 不同锌离子活度下水稻锌高效基因型农艺特性的遗传分析[J]. 作物学报, 2003, 29(2): 181-187.
- [10] Yang X, Ye Z Q, Shi C H *et al.* Genotypic differences in concentrations of iron, manganese, copper, and zinc in polished rice grains[J]. J. Plant Nutri., 1998, 21(7): 1453-1462.
- [11] 郑小林, 彭克勤, 胡笃敬. 水稻子粒富锌和子粒低锌基因型营养特性比较[J]. 植物资源与环境学报, 2000, 9(3): 26-29.
- [12] Yang X, Romheld V, Marschner H *et al.* Application of chelator buffered nutrient solution technique in studies on zinc nutrition in rice plant (*Oryza Sativa* L.)[J]. Plant and Soil, 1994, 163(1): 85-94.
- [13] Parker D R, Norvell W A, Chaney R L. GEOCHEM-PC: A chemical speciation program for IBM and compatible personal computers[A]. Loepper. RH, Schwab AP, Goldberg S(eds). Chemical equilibrium and reaction models[C]. SSSA Spec. Pub. No. 42. Madison, WI, USA: Soil Sci. Soc. of Am., 1995. 253-269
- [14] Bell P F, Chaney R L, Angle R S *et al.* Free metal activity and total metal concentration as indices of metal availability to barley (*Hordeum vulgare* cv. *Klages*)[J]. Plant and Soil, 1991, 130: 51-62.
- [15] Chaney R L. Metal speciation and interaction among elements affect trace element transfer in agricultural and environment food-chains[A]. Kremerr R, Allen H E(eds.). Metal speciation: theory, analysis, and application[C]. Chelsea: Lewis Publishers, Inc., MI, 1988. 219-260.
- [16] Sakal R, Verma M K, Singh A P. Relative susceptibility of selected rice varieties to zinc deficiency in relation to utilization of different pools of soil zinc from calcareous soil[J]. Ann. of Agric. Res., 1989, 10(3): 243-248.