

冬小麦不同钼效率品种钼吸收差异 及其与根系形态特征的关系

赵秋芳 胡承孝 孙学成 谭启玲 张木 朱伟莹

华中农业大学资源与环境学院/微量元素中心, 武汉 430070

摘要 采用水培试验研究冬小麦钼高效品种 97003 和钼低效品种 97014 对钼的吸收累积能力差异及其与根系形态特征的关系, 结果表明: 冬小麦钼高效品种 97003 在缺钼条件下钼累积量高于钼低效品种 97014。冬小麦钼高效品种 97003 向叶片中转移钼的能力高于钼低效品种 97014, 在施钼和不施钼时, 97003 叶片中钼的累积量分别占整株累积量的 86.2% 和 96.3%, 高于 97014 的 78.9% 和 87.2%。同时, 2 个冬小麦品种在根系形态上还存在基因型差异。缺钼条件下, 冬小麦钼高效品种 97003 具有较好的根系形态特征, 根长、根表面积、根体积、平均直径分别是 97014 的 1.16、1.41、1.21、1.73 倍, 在根表面积、根体积、平均直径上差异达显著水平。缺钼时, 97003 的总根长、根系总表面积、根系总体积、平均直径分别为施钼时的 1.13、1.28、1.12、1.44 倍, 且除总根长外, 各参数均达显著水平。无论是否施钼, 97014 的各参数差异不显著。

关键词 冬小麦; 钼高效品种; 钼低效品种; 钼吸收; 根系形态

中图分类号 S 143.7⁺2; S 512.1⁺1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2013)02-0067-05

根系是植物吸收水分和养分的主要部位, 其生长发育状况及其形态直接影响到植物对养分的吸收, 进而影响到整个植物体的生长发育。根系的生长发育不仅受植物自身品种的影响, 而且与外界养分环境息息相关^[1-2]。植物在遭受养分胁迫时可以通过增加根长、提高根系表面积等方式来增加养分的吸收量, 从而增强植物适应逆境的能力, 而且其适应能力存在着品种的差异^[3]。

钼是作物必需营养元素, 缺钼严重影响作物产量和品质。王运华等^[4]发现湖北省武汉市新洲区酸性黄棕壤缺钼时导致冬小麦黄化死苗, 产量大幅降低。研究人员^[5-7]经过筛选试验, 比较了 34 个冬小麦品种的钼效率差异, 最终确定 97003 为钼高效品种, 97014 为钼低效品种, 不施钼时, 钼高效品种 97003 地上部干质量和钼累积量均显著高于钼低效品种 97014, 且 97003 穗和籽粒中的钼含量相对较高, 97003 向繁殖器官运输更多的钼, 2 个冬小麦品种 97014 和 97003 在钼的吸收和分配上均存在显著差异。甘巧巧等^[8]考察了钼对不同钼效率冬小麦叶片呼吸作用相关酶的影响, 结果表明, 在缺钼逆境下

钼高效冬小麦乙醇酸氧化酶活性高于钼低效冬小麦, 有利于高效品种光合效率的提高和碳同化物的累积。研究人员^[9-11]从含钼酶及其调控过程研究低温条件下不同基因型冬小麦抗寒力上的差异及其生理和分子机制, 结果表明, 钼高效品种具有更强的抗寒力, 这可能是造成钼效率差异的一个原因, 但有关 2 个冬小麦品种 97014 和 97003 根系形态的差异及其对钼吸收、累积的影响尚未见报道。本试验采用营养液培养方法, 对 2 个不同钼效率冬小麦品种 97014 和 97003 的钼吸收差异及其与根系形态特征的关系进行考察, 以期明确钼效率与根系形态特征之间的关系, 为进一步揭示冬小麦钼效率差异的机制提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

冬小麦钼高效品种 97003 和钼低效品种 97014 按照养分效率系数(缺钼和钼足量时小麦产量之比(-Mo/+Mo))筛选出的不同钼效率品种, 种子由华中农业大学微量元素中心提供。在缺钼条件下钼

收稿日期: 2012-04-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171240)和中央高校基本科研业务费专项(2010QC037, 2011PY150)

赵秋芳, 硕士, 研究方向: 植物营养机理. E-mail: qiufangzhao@163.com

通讯作者: 孙学成, 博士, 副教授. 研究方向: 植物微量元素机理. E-mail: sxccn@mail.hzau.edu.cn

高效品种 97003 产量能达到施钼处理的 90%，而钼低效品种 97014 产量仅为施钼处理的 50% 左右^[5]。

1.2 试验设计

水培试验采用改良霍格兰 (Hoagland) 液, 其配方为 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 1 180 mg/L; KNO_3 505 mg/L; K_2HPO_4 136 mg/L; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 493 mg/L; H_3BO_3 2.86 mg/L; $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 1.81 mg/L; $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.22 mg/L; $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0.08 mg/L; $\text{Na}_2\text{-EDTA}$ 7.46 mg/L, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 5.56 mg/L。试验设置不施钼 (-Mo), 施钼 (+Mo, 0.01 mg/kg) 2 个处理; 以 $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 为肥源, 4 次重复。

试验用具用 2 mol/L HCl 浸泡 48 h, 再用去离子水冲洗干净后使用。选取均匀饱满的冬小麦种子用 0.5% NaClO 消毒 0.5 h, 用去离子水冲洗干净后播在医用纱布上, 在 30 °C 恒温催芽 5 d, 挑选大小一致的幼苗移至装有 1.5 L 营养液的塑料盆中培养, 先用 1/4 营养液培养 1 周, 后转入 1/2 营养液培养 1 周, 继而转入全量营养液培养, 所用试剂均为分析纯, 为尽量避免试验中钼的污染, 营养液均采用去离子水配制。培养 30 d 后将冬小麦分地上部和地下部收获, 用去离子水洗净, 105 °C 杀青 30 min, 70 °C 下烘干至恒质量, 记录地上部和地下部干物质质量。样品粉碎过筛, 测定 Mo 养分含量。

1.3 测定方法

1) 各器官干物质质量及钼含量测定。培养 30 d 后将冬小麦叶、根分开收获, 用去离子水洗净, 105 °C 杀青 30 min, 70 °C 下烘干, 称质量。其中根系经扫描后烘干处理, 磨碎备用。样品粉碎后经低温干燥灰化后, 移入马弗炉, 525 °C 灰化 8 h 后, 用示波极谱仪测定^[12]。

2) 根系形态测定。采用根系扫描分析仪 (Win-RHIZO2009) 进行扫描, 获取分析图像。

1.4 数据处理

单株钼积累量 = 钼含量 × 单株干质量; 养分迁移系数 = 地上部养分含量 / 地下部养分含量。

用 Excel 2007 进行数据处理, SPSS17.0 进行方差分析。

2 结果分析

2.1 97014 和 97003 钼含量、钼积累量及其分布的差异

施钼能提高 97014 和 97003 植株中钼含量 (表 1)。施钼时 97014、97003 叶片钼含量分别较不

施钼处理提高 8.94、6.58 倍, 差异显著; 根部钼含量分别较不施钼处理提高 4.77、0.90 倍。2 个钼水平下 97003 叶片钼含量均高于 97014, 而根部钼含量则低于 97014。

表 1 97014 和 97003 钼含量以及钼迁移系数的差异¹⁾

Table 1 Differences of Mo concentration and Mo translocation coefficient between 97014 and 97003

品种 Cultivar	处理 Treatment	钼含量/(mg/kg) Mo concentration		钼迁移系数 Mo translocation coefficient
		叶 Leaf	根 Root	
97014	-Mo	0.218±0.050 b	0.302±0.070 b	0.72
	+Mo	2.171±0.370 a	1.743±0.320 a	1.25
97003	-Mo	0.301±0.030 b	0.257±0.050 b	1.17
	+Mo	2.284±0.220 a	0.488±0.050 b	4.68

1) -Mo: 不施钼 No applying molybdenum fertilizer; +Mo: 施钼 Applying molybdenum fertilizer; 不同小写字母表示在 5% 水平差异显著, 下同。Values followed by a different letter are significantly different at the 5% probability level. The same as below.

养分迁移系数是指源器官中养分含量与库器官中养分含量之比, 表示的是养分在植物体中的迁移分配能力。比较 97014 和 97003 的钼迁移系数可知, 施钼提高了 97014 和 97003 钼迁移系数, 促进钼从根部向地上部的转移; 且在相同钼水平下, 97003 钼迁移系数高于 97014, 且在施钼条件下增加更明显。施钼同时增加 97014 和 97003 植株中钼积累量 (表 2)。97014、97003 施钼时叶片钼积累量分别较不施钼处理增加 8.57、4.78 倍, 差异均达显著水平; 97003 根部钼积累量增加 0.38 倍, 差异不显著; 97014 根部钼积累量增加 4.25 倍, 差异显著; 整株钼积累量分别较不施钼增加 7.66、4.17 倍。施钼和不施钼时, 97003 叶片钼积累量高于 97014, 而根部积累量均低于 97014, 且在施钼条件下, 差异达显著水平。缺钼条件下, 冬小麦钼高效品种 97003 整株钼积累量高于冬小麦钼低效品种 97014。在 2 个钼水平下, 97003 叶片钼积累量占整株钼积累量的比例为 86.2% 和 96.3%, 高于 97014 的 78.9% 和 87.2%, 而根部钼积累量占整株钼积累量的比例低于 97014。缺钼时, 冬小麦钼高效品种 97003 积累更多的钼; 施钼和不施钼时, 冬小麦钼高效品种 97003 钼迁移系数、钼积累量以及地上部占整株钼积累量的比例均高于 97014。97003 吸收的钼更多向地上部位运输, 以维持钼参与的碳、氮等代谢活动的正常进行, 这可能是 97003 钼吸收效率高的一个重要原因。

表 2 97014 和 97003 钼积累量的差异

Table 2 Differences of Mo accumulations between 97014 and 97003

品种 Cultivar	处理 Treatment	钼积累量/($\mu\text{g}/\text{株}$) Mo accumulation		
		叶 Leaf	根 Root	整株 Total
97014	-Mo	0.100 \pm 0.017 b	0.027 \pm 0.006 b	0.127 \pm 0.022 b
	+Mo	0.957 \pm 0.264 a	0.140 \pm 0.036 a	1.097 \pm 0.279 a
97003	-Mo	0.167 \pm 0.015 b	0.027 \pm 0.012 b	0.193 \pm 0.018 b
	+Mo	0.963 \pm 0.096 a	0.037 \pm 0.006 b	1.000 \pm 0.103 a

2.2 97014 和 97003 根系形态参数的差异

97014 和 97003 根系形态参数存在差异(表 3)。在 2 个钼水平下,97003 的总根长、根系总表面积、根系总体积、平均直径均高于 97014;缺钼时,97003

总根长、根系总表面积、根系总体积、平均直径分别为 97014 的 1.16、1.41、1.21、1.73 倍,除总根长外,其余根系参数显著高于 97014。施钼时,97003 的总根长、根系总表面积、根系总体积、平均直径分别为 97014 的 1.10、1.19、1.11、1.29,根系总体积差异达显著水平。

缺钼时,97003 的总根长、根系总表面积、根系总体积、平均直径分别为施钼时的 1.13、1.28、1.12、1.44 倍,且根系总表面积、根系总体积、平均直径的差异达到显著水平;钼低效品种 97014 各根系参数分别是施钼时的 1.08、1.08、1.03、1.07 倍,略有增加,但差异均不显著。

表 3 97014 和 97003 根系形态参数的差异

Table 3 Differences of root parameters of 97014 and 97003

品种 Cultivar	处理 Treatment	总根长/cm Total root length	根系总表面积/cm ² Total root surface area	根系总体积/cm ³ Total root volume	平均直径/cm Average root diameter
97014	-Mo	1 056.20 a	123.50 b	0.38 b	1.15 bc
	+Mo	981.10 a	114.80 b	0.37 b	1.07 c
97003	-Mo	1 221.40 a	174.13 a	0.46 a	1.99 a
	+Mo	1 076.55 a	136.30 b	0.41 b	1.38 b

2.3 97014 和 97003 不同直径范围内的根系参数差异

为进一步分析钼对 97014 和 97003 根系形态的影响,将根系划分成细根(0~1.0 mm)和粗根(>1.0 mm)2 类(表 4)。不施钼处理的 97003 细根的根长、根表面积、根体积分别比施钼时增加了 7.8%、11.8%、17.0%,差异不显著;粗根各根系参数也高于施钼处理,分别增加 42.6%、49.9%、63.8%,差异显著。97014 不施钼时细根、粗根的各根系参数均略高于施钼处理,但差异均未达到显著

水平。不施钼处理时,97003 细根的根长、根系表面积、根系体积均大于 97014,分别是 97014 的 1.07、1.20 和 1.38 倍,根系体积差异显著;粗根的各根系形态参数分别为 97014 的 1.57、1.71 和 1.73,差异均达到显著水平。施钼时,97003 细根和粗根的各根系形态参数大于 97014,差异不显著。施钼处理时,97003 细根的根长、根表面积、根体积也高于 97014,分别为 97014 的 1.09、1.16、1.24 倍,但差异均不显著,粗根各根系形态参数高于 97014,且根系体积显著高于 97014。

表 4 97014 和 97003 不同直径范围内的根系参数差异

Table 4 Differences of distribution of root length, surface area, and volume among 97014 and 97003 with different root diameter ranges

品种 Cultivar	处理 Treatment	根长/cm Root length		根系表面积/cm ² Root surface area		根系体积/cm ³ Root volume	
		0~1.0 mm	>1.0 mm	0~1.0 mm	>1.0 mm	0~1.0 mm	>1.0 mm
97014	-Mo	832.0 a	224.0 b	62.90 ab	45.73 b	0.40 b	1.10 bc
	+Mo	760.2 a	220.7 b	58.28 b	42.30 b	0.38 b	0.77 c
97003	-Mo	893.5 a	352.7 a	75.48 a	78.08 a	0.55 a	1.90 a
	+Mo	829.0 a	247.4 b	67.50 ab	52.08 b	0.47 ab	1.16 b

2.4 97014 和 97003 根系形态参数与钼吸收的关系

为进一步了解冬小麦各根系参数与钼吸收累积的关系,用钼积累量与各个根系参数做相关性分析,结果见表 5。在缺钼条件下,钼积累量与各根系参

数均呈正相关关系,与根系总表面积相关系数 0.819,显著相关;与平均直径和根系总体积均为极显著正相关,相关系数分别为 0.851 和 0.893。而在施钼条件下,钼积累量与各根系参数均呈负相关,但均没有显著相关性。

表 5 钼累积量与根系参数相关性¹⁾

Table 5 Correlation between molybdenum accumulated

处理 Treatment	总根长/cm Total root length	根系总表面积/cm ² Total root surface area	平均直径/cm Average root diameter	根系总体积/cm ³ Total root volume
-Mo	0.608	0.819*	0.851**	0.893**
+Mo	-0.503	-0.602	-0.315	-0.579

1) * 表示显著相关($P < 0.05$), ** 表示极显著相关($P < 0.01$)。* correlation is significant at the 0.05 level, ** correlation is significant at the 0.01 level.

3 讨 论

本试验中,施钼同时提高了 2 个冬小麦植物体中钼含量和钼累积量,但二者在钼吸收、分配上存在差异。缺钼条件下,钼高效品种 97003 全株钼累积量高于钼低效品种 97014,说明在缺钼条件下,97003 能吸收累积更多的钼,从而更好地适应缺钼环境。钼的移动性与供钼水平及植物体内钼含量密切相关。黑绿豆钼在韧皮部的移动性随供钼水平而变化,供钼水平低时,钼在韧皮部难移动,而供钼水平高时,钼在韧皮部的移动和再利用能力增强^[13]。本试验中施钼提高了 2 个冬小麦品种钼迁移系数,表明施钼促进钼高效品种和钼低效品种冬小麦钼从根部向地上部的移动,这与喻敏^[14]的研究结果相符。在施钼和不施钼时,97003 钼的迁移系数均高于 97014,且在钼水平较低条件下,高效品种 97003 叶片钼累积量及其占整株钼累积量的比例均高于 97014,说明缺钼条件下,97003 根部吸收的钼能够更多的向地上部转移。植物所需的钼除由种子供给外,绝大部分来自土壤,而根系是植物从土壤中获取钼的主要途径。因此,根系的发育状况及其获取钼的能力在一定程度上影响着植物的钼营养状况。植物根系作为养分和水分的直接利用者,当外界养分缺乏时,植物通过改变根系形态来获取所需养分^[15]。本试验结果表明,在缺钼环境中,2 个冬小麦品种根系根长、根表面积、根体积均增大,这与李锋等^[16]在水稻缺磷上的研究结果类似。

根系形态是影响养分吸收效率的一个重要因素^[17]。小麦高效吸收钾的品种具有根系长、根表面积大、半径小等根系形态特征^[18]。本试验结果表明,钼高效品种 97003 的根长、根系体积、根系总表面积均较钼低效品种高,说明钼高效品种 97003 具有较好的根系形态特征,有利于从介质中吸收矿质养分;缺钼条件下,97003 的各根系参数均高于其施钼处理,而低效品种 97014 钼处理间差异不大,表明低钼胁迫刺激 97003 根系生长,使其更好地适应缺

钼的生长环境,低效品种适应能力较差,这与孙海国等^[19]在小麦缺磷上的研究结果类似。对不同直径范围内根系参数的分析表明,不同钼营养条件下,高效品种 97003 细根和粗根的根系参数均高于钼低效品种,进一步说明高效品种 97003 具有较好的根系形态特征。分析根系形态参数与钼累积量的相关性可知,在缺钼条件下,冬小麦可以通过增加根长、根系表面积、根系体积以及根系直径来增加对钼的吸收累积,从而适应胁迫环境。97003 在缺钼条件下具备良好的根系形态,更有利于钼的吸收累积,从而更好地适应缺钼环境,这可能是 97003 钼高效的主要原因。冬小麦钼高效品种 97003 吸收累积钼以及转移钼的能力均高于钼低效品种 97014,且钼高效品种 97003 耐低钼胁迫能力强,钼高效品种 97003 具有较好的根系形态特征以及对钼缺乏表现出较好的适应性,这可能是其钼吸收效率高的主要原因。

参 考 文 献

- [1] WAISEL Y, ESHEL A, KAFKAFI U. Plant roots[M]. New York: Marcel Dekker, Inc, 1991.
- [2] ZHANG H, JENNINGS A, BARLOW P W, et al. Dual pathways for regulation of root branching by nitrate[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1999, 96(11): 6529.
- [3] 郝艳淑, 姜存仓, 王晓丽, 等. 不同棉花基因型钾效率特征及其根系形态的差异[J]. 作物学报, 2011, 37(11): 2094-2098.
- [4] 王运华, 魏文学, 谭启玲, 等. 湖北省黄棕壤冬小麦缺钼和施钼研究[J]. 土壤肥料, 1995(3): 24-28.
- [5] 喻敏, 胡承孝, 王运华. 冬小麦缺钼反应的基因型筛选[J]. 华中农业大学学报, 2003, 22(4): 360-364.
- [6] 喻敏, 胡承孝, 王运华. 不同钼效率冬小麦品种钼的吸收和分配[J]. 中国农业科学, 2004(11): 1749-1753.
- [7] YU M, HU C, WANG Y. Molybdenum efficiency in winter wheat cultivars as related to molybdenum uptake and distribution[J]. Plant and Soil, 2002, 245(2): 287.
- [8] 甘巧巧, 孙学成, 胡承孝, 等. 施钼对不同钼效率冬小麦叶片呼吸作用相关酶的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007(1): 113-117.
- [9] 孙学成, 谭启玲, 胡承孝, 等. 低温胁迫下钼对冬小麦抗氧化酶活性的影响[J]. 中国农业科学, 2006(5): 952-959.

- [10] SUN X, HU C, TAN Q, et al. Effects of molybdenum on antioxidative defense system and membrane lipid peroxidation in winter wheat under low temperature stress [J]. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 2006, 32(2): 175.
- [11] SUN X, HU C, TAN Q, et al. Effects of molybdenum on expression of cold-responsive genes in abscisic acid (ABA)-dependent and ABA-independent pathways in winter wheat under low-temperature stress [J]. *Annals of Botany*, 2009, 104(2): 345-356.
- [12] 万耀星, 刘雄德, 李正艳. 土壤有效钼及植物全钼的示波极谱测定 [J]. *土壤通报*, 1988, 19(1): 43-46.
- [13] JONGRUAYSUP S, DELL B, BELL R W. Distribution and redistribution of molybdenum in black gram (*Vigna mungo* L. Hepper) in relation to molybdenum supply [J]. *Annals of Botany*, 1994, 73(2): 161-167.
- [14] 喻敏. 冬小麦钼营养基因型差异及其生理基础 [D]. 武汉: 华中农业大学图书馆, 2000.
- [15] 李锋, 潘晓华. 植物适应缺磷胁迫的根系形态及生理特征研究进展 [J]. *中国农学通报*, 2002, 18(5): 65-69.
- [16] 李锋, 潘晓华, 刘水英, 等. 低磷胁迫对不同水稻品种根系形态和养分吸收的影响 [J]. *作物学报*, 2004, 30(5): 438-442.
- [17] 贾彦博, 杨肖娥, 刘建祥. 植物根系对养分缺乏和毒害的适应及其与养分吸收效率的关系 [J]. *土壤通报*, 2005, 36(4): 610-616.
- [18] 邹春琴, 李振声, 李继云. 小麦对钾高效吸收的根系形态学和生理学特征 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2001, 7(1): 36-43.
- [19] 孙海国, 张福锁. 缺磷胁迫下的小麦根系形态特征研究 [J]. *应用生态学报*, 2002, 13(3): 295-299.

Differences of molybdenum absorption and its relationship with root morphology between two winter wheat cultivars with different Mo-efficiency

ZHAO Qiu-fang HU Cheng-xiao SUN Xue-cheng TAN Qi-ling ZHANG Mu ZHU Wei-kun

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

Abstract The differences of Mo absorption and its relationship with root morphology between Mo-efficient winter wheat cultivar 97003 and Mo-inefficient winter wheat cultivar 97014 were studied with nutrient solution culture. The results showed that the accumulation of Mo at shoots of cultivar 97003 was higher than that of cultivar 97014 under Mo deficiency. In addition cultivar 97003 had higher ability of transferring Mo to leaves than that of cultivar 97014. Under two Mo levels, Mo accumulation in leaves and the whole plant of cultivar 97003 was 86.2% and 96.3%, higher than that of cultivar 97014, which was 78.9% and 87.2%. The root morphology of two winter wheat cultivars under Mo deficiency were different, cultivar 97003 had good root morphology. The root length, surface area, volume and average root diameter of cultivar 97003 were 1.16, 1.41, 1.21, 1.73 times higher than those of 97014, surface area, volume and average root diameter were all significantly higher than those of 97014. The root length, surface area, volume and average root diameter of cultivar 97003 were 1.13, 1.28, 1.12, 1.44 times higher under Mo deficiency than those in providing Mo treatment. Expected root length, surface area, volume and average root diameter were all significantly higher than those in providing Mo treatment. In contrast, root length, surface area, volume and average root diameter of cultivar 97014 had no significant difference whether providing Mo or not.

Key words winter wheat; Mo-efficient cultivar; Mo-inefficient cultivar; molybdenum absorption; root morphology