

施钼对冬小麦钼高、低效品种氮代谢的影响

武松伟¹ 胡承孝¹ 谭启玲¹ 孙学成¹ 赵小虎¹ 庄光泉² 袁迎春²

1. 华中农业大学新型肥料湖北省工程实验室/微量元素研究中心, 武汉 430070;
2. 湖北省当阳市农业技术推广中心, 当阳 444100

摘要 采用改良霍格兰营养液试验, 研究施钼处理对冬小麦钼高、低效品种氮代谢的影响, 并对冬小麦钼高、低效品种对钼的响应差异进行分析。结果表明, 施钼处理后冬小麦地上部和地下部硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶的活性提高, 硝态氮的含量显著降低, 代谢产物铵态氮含量、游离氨基酸总量、可溶性蛋白含量增加。施钼处理对冬小麦氮代谢具有促进作用。施钼处理对冬小麦钼高、低效品种氮代谢影响差异的原因在于 2 个冬小麦品种的基因型不同。与冬小麦钼高效品种相比, 冬小麦钼低效品种施钼处理后硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶的活性以及地上部硝态氮、游离氨基酸、蛋白质、地下部游离氨基酸含量的变化幅度更大。

关键词 施钼; 冬小麦; 氮代谢; 硝酸还原酶; 谷氨酰胺合成酶

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(2015)05-0052-06

钼是植物必需的微量元素之一。缺钼会抑制光合色素的合成并导致植株叶片黄化, 适量的钼有利于植物的生长, 而钼过量会导致作物减产和农产品品质的下降^[1-3]。钼作为多种含钼酶的组成成分, 可以通过影响酶的活性进而影响植物体内的碳代谢、氮代谢、谷胱甘肽循环、次生代谢和活性氧代谢等生理过程^[4-7]。甘巧巧等^[8]从生理水平研究了钼对冬小麦碳代谢的影响, 结果表明, 施钼促进了冬小麦的光合作用。氮代谢和碳代谢都是植物生长发育过程中重要的生理过程, 氮代谢的状况和水平直接影响植物的产量和品质。硝酸还原酶(NR)和谷氨酰胺合成酶(GS)是植物氮代谢过程中的关键酶^[9], 其中 NR 是一种含钼酶, 是氮素同化过程中的限速酶, 其活性的高低决定了植物对氮的同化能力的高低^[10]。NR 以硝态氮为底物催化其转化为亚硝态氮, 并在亚硝酸还原酶的作用下还原为铵态氮。而 GS 以铵态氮为底物, 参与“GS-GOGAT”铵同化的循环过程, 将铵态氮转化为氨基酸^[11], 进一步合成蛋白质。目前有关施钼处理对作物氮代谢影响的研究多采用土培方法且集中在豆科作物上^[12-14], 主要研究钼对硝酸还原酶活性及硝态氮含量变化的影响, 未涉及施钼对谷氨酰胺合成酶活性、铵态氮、氨基酸和蛋白质含量的影响。本研究采用营养液培养方法, 以前

期筛选出的冬小麦钼高、低效品种^[15]为研究对象, 考察施钼处理对冬小麦钼高、低效品种氮代谢的影响, 并分析冬小麦钼高、低效品种对施钼处理的响应差异, 有利于从氮代谢的角度理解钼营养的机制。

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, 种子由华中农业大学微量元素中心提供。

1.2 试验设计

采用营养液培养, 试验设施钼(+ Mo, 0.18 mg/L)和不施钼(- Mo, 0 mg/L) 2 个处理, 2 个冬小麦品种, 每个处理 4 次重复。营养液试验采用改良霍格兰(Hoagland)营养液, 其配方(mg/L): Ca(NO₃)₂ · 4H₂O 945、KNO₃ 607、NH₄ H₂ PO₄ 115、MgSO₄ · 7H₂O 493、H₃ BO₃ 2.86、MnCl₂ · 4H₂O 1.81、ZnSO₄ · 7H₂O 0.22、CuSO₄ · 5H₂O 0.08、FeSO₄ · 7H₂O 5.57、Na₂ EDTA 7.45。钼以 (NH₄)₆ Mo₇ O₂₄ · 4H₂O 为肥源。试验用具使用前用 2 mol/L 的 HNO₃ 浸泡 48 h, 然后用自来水洗 3 次后再用去离子水清洗 3 次, 备用。挑选均匀饱满的冬小麦种子用 0.5% NaClO 消毒 0.5 h, 再用去离

收稿日期: 2014-09-30
基金项目: 国家自然科学基金项目(41171240); 国家科技支撑计划课题(2014BAD14B02)
武松伟, 博士研究生, 研究方向: 植物营养机理. E-mail: wusongwei@webmail.hzau.edu.cn
通信作者: 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

子水冲洗干净后播种于医用纱布上,在 25 ℃下催芽 5 d。挑选长势良好、大小一致的幼苗,移栽于盛有 6 L 含营养液的去离子水的塑料盒中培养,先用 1/4 营养液培养 5 d,再用 1/2 营养液培养 5 d,然后转入全量营养液培养。营养液所用试剂均为分析纯,所用水均为去离子水。培养 30 d 后将小麦分地上部和地下部收获,收获的样品均用去离子水洗 3 次。所有样品分 2 部分:一部分样品 105 ℃杀青 30 min,70 ℃下烘干至恒质量,用于常规指标的测定;另一部分存放在超低温冰箱中用于生理指标的测定。

1.3 测定方法

1)各部位干物质质量与钼含量的测定。称量烘干至恒质量的各部位干物质的质量,并记录数据。将烘干后的样品粉碎过筛,样品用硝酸-高氯酸(V/V=4:1)消化至无色透明,按照赵明宇^[16]的方法测定消化液中的钼含量。

2)酶活力的测定。硝酸还原酶活力的测定参考王学奎^[17]的测定方法;谷氨酰胺合成酶的测定参考 Tang 等^[18]的测定方法。

3)代谢产物的测定。铵态氮的测定采用纳氏比色法^[19]。硝态氮的测定参考王学奎^[17]的方法。可溶性蛋白的测定采用考马斯亮蓝 G-250 法^[17]。游离氨基酸总量的测定采用茚三酮比色法^[20]。

1.4 数据处理

所有数据均采用 Excel 和 SPSS 19.0 进行统计分析,交互效应分析采用 *F*-test,应用 Duncan's test($P<0.05$)进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 施钼处理对 2 个冬小麦品种干物质质量和钼含量及钼积累量的影响

由表 1 可知,与不施钼处理相比,施钼处理显著提高冬小麦品种 97014、97003 叶片干物质质量的积累,分别提高 25.97%、26.92%。施钼处理时,冬小麦品种 97003 根中干物质质量的积累较不施钼处理提高 14.28%($P<0.05$),而冬小麦品种 97014 则差异不显著($P>0.05$)。2 个冬小麦品种相同处理间(+Mo/−Mo)干物质质量的积累无显著差异($P>0.05$)。

由表 2 可知,冬小麦品种 97014 和 97003 施钼处理时,叶片钼含量分别较不施钼处理提高 53.85、40.05 倍($P<0.05$),根部钼含量分别较不施钼处理时提高 22.02、20.38 倍($P<0.05$)。2 个钼水平下,

冬小麦品种 97003 的叶片和根部钼含量均高于品种 97014。施钼处理时,2 个冬小麦品种钼含量差异显著($P<0.05$),并且品种与钼互作对叶片钼含量存在极显著的互作效应($P<0.01$)。相同钼水平,冬小麦品种 97003 的钼迁移系数均大于品种 97014,施钼处理使冬小麦品种 97014 和 97003 的钼迁移系数分别提高 1.38 和 0.92 倍,促进了钼从根向叶片的转移。

表 1 2 个冬小麦品种单株干物质质量¹⁾
Table 1 The dry matter of two winter wheat cultivars g

处理 Treatment	叶 Leaf	根 Root	整株 Total
97014−Mo	0.77±0.03 b	0.21±0.01 b	0.98±0.02 b
97014+Mo	0.97±0.05 a	0.23±0.00 ab	1.20±0.05 a
97003−Mo	0.78±0.05 b	0.21±0.01 b	1.00±0.04 b
97003+Mo	0.99±0.05 a	0.24±0.01 a	1.23±0.05 a
<i>F</i> (Mo)	57.09 **	16.00 *	93.24 **
<i>F</i> (Variety)	0.64	0.44	1.10
<i>F</i> (Variety×Mo)	0.03	0.44	0.12

1) −Mo:不施钼 No appling molybdenum fertilizer; +Mo:施钼 Appling molybdenum fertilizer;不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),* 和 ** 分别表示 *F* 值差异显著($P<0.05$)和差异极显著($P<0.01$)。下同。Values followed by a different letter are significantly different at the 5% probability level. * and ** indicate *F*-test significant at the level $P<0.05$ and $P<0.01$.The same as below.

表 2 2 个冬小麦品种钼含量及钼迁移系数
Table 2 Two winter wheat cultivars Mo concentration and Mo translocation coefficient

处理 Treatment	钼含量/(mg/kg) Mo concentration		钼迁移系数 Mo translocation coefficient
	叶 Leaf	根 Root	
97014−Mo	0.13±0.01 c	0.35±0.10 c	0.37
97014+Mo	7.13±0.38 b	8.06±0.47 b	0.88
97003−Mo	0.21±0.01 c	0.42±0.13 c	0.50
97003+Mo	8.62±0.43 a	8.98±0.60 a	0.96
<i>F</i> (Mo)	2 158.9 **	1 313.06 **	
<i>F</i> (Variety)	22.31 **	4.82	
<i>F</i> (Variety×Mo)	17.98 **	3.58	

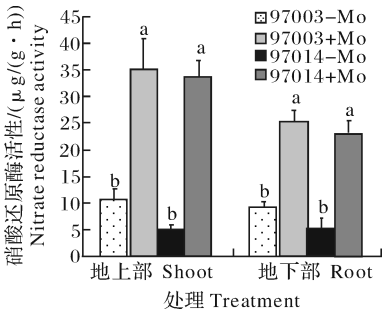
冬小麦品种 97014、97003 施钼处理时,叶片钼积累量分别较不施钼处理提高 68.00、49.24 倍($P<0.05$),根部钼积累量分别较不施钼处理提高 25.29、22.67 倍($P<0.05$),整株钼积累量分别比不施钼处理提高 47.50、41.68 倍($P<0.05$)。相同钼水平,冬小麦品种 97003 各部位钼积累量均大于 97014 的钼积累量。品种与钼互作对根钼积累量表现出显著($P<0.05$)的互作效应,对叶片和整株积累量表现出极显著($P<0.01$)的互作效应(表 3)。

表 3 2 个冬小麦品种单株钼累积量

Table 3 Two winter wheat cultivars molybdenum accumulation μg			
处理 Treatment	叶 Leaf	根 Root	整株 Total
97014-Mo	0.10±0.01 c	0.07±0.02 c	0.18±0.01 c
97014+Mo	6.90±0.15 b	1.84±0.09 b	8.73±0.21 b
97003-Mo	0.17±0.01 c	0.09±0.02 c	0.25±0.08 c
97003+Mo	8.54±0.48 a	2.13±0.16 a	10.67±0.63 a
$F(\text{Mo})$	2 657.36 **	1 257.02 **	2 642.69 **
$F(\text{Variety})$	33.80 **	8.26 *	29.92 **
$F(\text{Variety} \times \text{Mo})$	28.87 **	6.8 *	25.41 **

2.2 施钼处理对 2 个冬小麦品种硝酸还原酶活性的影响

从图 1 可知,冬小麦品种 97003 施钼处理时地上部、地下部 NR 活力较不施钼处理分别提高 2.27、1.79 倍($P<0.05$);冬小麦品种 97014 施钼处理时地上部、地下部 NR 活力较不施钼处理分别提高 5.51、3.40 倍($P<0.05$)。相同钼水平,冬小麦品种 97003 各部位 NR 活性都大于品种 97014 各部位 NR 的活性。



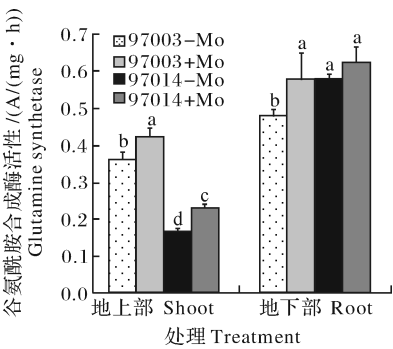
地上部 Shoot: $F(\text{Mo})=188.98^{**}$, $F(\text{Variety})=2.95$, $F(\text{Variety} \times \text{Mo})=1.27$; 地下部 Root: $F(\text{Mo})=226.64^{**}$, $F(\text{Variety})=6.77^{*}$, $F(\text{Mo} \times \text{Variety})=0.54$.

图 1 2 个冬小麦品种硝酸还原酶活性变化

Fig.1 Changes in the nitrate reductase activities of two winter wheat cultivars

2.3 施钼处理对 2 个冬小麦品种谷氨酰胺合成酶活性的影响

从图 2 可以看出,冬小麦品种 97003 施钼处理地上部、地下部 GS 活性较不施钼处理分别提高 17.38%、20.82% ($P<0.05$);冬小麦品种 97014 施钼处理地上部、地下部 GS 活性较不施钼处理分别提高 38.69%、7.54%。相同钼水平,地上部 GS 活性均是 97003 大于 97014,而地下部则相反。



地上部 Shoot: $F(\text{Mo})=38.54^{**}$, $F(\text{Variety})=364.28^{**}$, $F(\text{Variety} \times \text{Mo})=0$; 地下部 Root: $F(\text{Mo})=8.41^{*}$, $F(\text{Variety})=9.16^{*}$, $F(\text{Mo} \times \text{Variety})=1.27$.

图 2 2 个冬小麦品种谷氨酰胺合成酶活性变化

Fig.2 Changes in the glutamine synthetase activities of two winter wheat cultivars

2.4 施钼处理对 2 个冬小麦品种代谢产物含量的影响

由表 4 可知,冬小麦品种 97014、97003 施钼处理时地上部硝态氮含量较不施钼处理分别减少 32.80%、32.35% ($P<0.05$)。相同钼水平,冬小麦钼高效品种 97003 地上部硝态氮含量均低于钼低效品种 97014。施钼处理时冬小麦品种 97014、97003 地上部游离氨基酸含量较不施钼处理分别提高 66.93%、57.55% ($P<0.05$)。施钼使冬小麦品种 97014、97003 地上部可溶性蛋白的含量分别提高 16.04%、15.27% ($P<0.05$)。施钼处理对 2 个冬小麦品种地上部铵态氮的影响差异不显著 ($P>0.05$),但是品种间地上部铵态氮含量差异显著 ($P<0.05$)。

由表 5 可知,施钼处理时 2 个冬小麦品种 97014、97003 地下部硝态氮含量分别降低 11.66%、12.28%。相同钼水平,冬小麦品种 97003 地下部硝态氮含量均低于品种 97014,但差异不显著。施钼处理时 2 个冬小麦品种 97014、97003 地下部铵态氮的含量分别降低 35.59%、39.77% ($P<0.05$)。相同钼水平,冬小麦品种 97003 地下部铵态氮含量高于品种 97014;施钼处理时 2 个冬小麦品种 97014、97003 地下部游离氨基酸总量分别提高 53.45%、40.65% ($P<0.05$),并且品种与钼互作对游离氨基酸总量表现出显著 ($P<0.05$) 的互作效应。施钼提高了冬小麦品种 97014、97003 地下部可溶性蛋白的含量,且品种 97003 提高了 6.44% ($P<0.05$)。相同钼水平,冬小麦品种 97003 地下部可溶性蛋白含量高于品种 97014,差异均显著 ($P<0.05$)。

表 4 2 个冬小麦品种地上部硝态氮、铵态氮、游离氨基酸和可溶性蛋白含量

Table 4 Two winter wheat cultivars shoot soluble protein,nitrate,free amino acids and ammonium nitrogen content

处理 Treatment	硝态氮/(μg/g) Nitrate nitrogen	铵态氮/(μg/g) Ammonium nitrogen	游离氨基酸总量/(μg/g) Free amino acids	可溶性蛋白/(mg/g) Soluble protein
97014－Mo	113.87±28.45 a	24.55±1.75 b	244.02±33.30 b	14.03±1.76 c
97014＋Mo	76.52±3.75 b	25.20±1.30 b	407.35±37.49 a	16.28±0.93 ab
97003－Mo	111.94±10.77 a	31.81±1.62 a	246.52±10.21 b	14.80±0.59 bc
97003＋Mo	75.72±5.76 b	30.63±2.50 a	388.40±10.43 a	17.06±0.72 a
F(Mo)	16.69 **	0.16	102.21 **	12.66 *
F(Variety)	0.02	58.82 **	1.00	1.50
F(Variety×Mo)	0.00	0.10	0.03	0.00

表 5 2 个冬小麦品种地下部硝态氮、铵态氮、游离氨基酸和可溶性蛋白含量

Table 5 Two winter wheat cultivars root soluble protein,nitrate,free amino acids and ammonium nitrogen content

处理 Treatment	硝态氮/(μg/g) Nitrate nitrogen	铵态氮/(μg/g) Ammonium nitrogen	游离氨基酸总量/(μg/g) Free amino acids	可溶性蛋白/(mg/g) Soluble protein
97014－Mo	90.81±8.99 a	14.78±0.35 b	389.33±9.45 c	6.74±0.16 c
97014＋Mo	80.22±3.65 ab	9.52±0.05 c	597.42±11.55 a	6.82±0.23 c
97003－Mo	80.54±4.00 ab	17.79±1.57 a	349.62±14.88 d	7.61±0.07 b
97003＋Mo	70.65±6.14 b	10.72±1.11 c	491.75±31.08 b	8.10±0.21 a
F(Mo)	8.50 *	120.22 **	261.00 **	0.09
F(Variety)	7.97 *	14.00 **	44.98 **	9.71 *
F(Variety×Mo)	0.01	2.59	9.26 *	0.00

3 讨 论

本试验结果表明,施钼处理提高了 2 个冬小麦品种干物质质量的积累(表 1),这与在油菜上的研究结果一致^[21]。施钼处理提高干物质质量的积累与光合作用的强弱有关。研究表明,施钼可以提高冬小麦光合作用的强度^[3]。钼是叶绿体结构必不可少的元素,缺钼会导致植物叶绿素含量减少,导致植物光合强度的降低^[22]。冬小麦品种 97003 的干物质质量的增加较品种 97014 干物质质量的增加明显,这可能是由于 97003 钼高效的原因。在较低钼浓度(<1 μmol/L)范围内,冬小麦品种 97003 具有较强的钼吸收能力^[23],因此,相同钼水平下,冬小麦品种 97003 钼含量及钼累积量均高于品种 97014;同时冬小麦品种 97003 的钼迁移系数大于 97014,说明品种 97003 具有较强的钼分配能力。因此,2 个冬小麦品种对钼的吸收和分配存在差异,较强的钼吸收和分配能力可能是冬小麦品种 97003 钼高效的原因。

硝酸还原酶是含钼酶,施钼时硝酸还原酶活性提高(图 1),在相关研究上也得到了证实^[24]。硝酸还原酶是氮代谢链中第一个酶,它以硝态氮为底物,使其还原为亚硝态氮。因此,施钼处理降低了 2 个冬小麦品种硝态氮的含量(表 4,表 5),促进了无机

氮向有机氮的转化,为后续代谢链中物质的合成提供更多的氮源,同时还可以避免因积累过多的硝态氮对植物可能造成毒害。施钼处理降低硝态氮的含量在小白菜上也得到了证实^[25]。谷氨酰胺合成酶(GS)是铵同化的关键酶,施钼处理提高了 2 个冬小麦品种 GS 活性(图 2),这与在甘蔗上的研究结果相似^[26]。因此,施钼处理降低了 2 个冬小麦品种铵态氮的含量(表 5),促进了无机氮向有机氮的转化,对硝态氮的代谢具有重要作用,同时铵态氮积累的减少,降低植物被毒害的风险。施钼处理提高了 2 个冬小麦品种游离氨基酸和蛋白质的含量(表 4,表 5),这也与较多的铵态氮被同化有关。游离氨基酸含量的提高为蛋白质的合成提供充足的原料,这可能是施钼导致蛋白含量提高的原因。综上所述,施钼处理促进冬小麦氮代谢的进行,其机制可能是钼通过诱导氮代谢过程中的关键酶 NR 和 GS 酶活性,从而增强氮代谢过程中物质的还原和同化能力。

施钼处理对 2 个冬小麦品种氮代谢的影响存在基因型差异。在相同钼水平下均是冬小麦钼高效品种 97003 的 NR 活性、GS 活性(地上部)、可溶性蛋白和铵态氮含量高于钼低效品种 97014 的,这与冬小麦钼高效品种 97003 具有较高的钼含量和钼累积量的结果相一致,并且无论施钼与否,冬小麦品种

97003 的硝态氮含量都比品种 97014 的含量低,这可能是由于在相同钼水平下,冬小麦钼高效品种 97003 具有较高的 NR 活性。因此,我们推测冬小麦钼高效品种 97003 可能具有较强的氮代谢能力。同时,我们还发现冬小麦品种 97003 施钼处理时地上部、地下部 NR 活力较不施钼处理分别提高 2.27、1.79 倍,而冬小麦品种 97014 施钼处理时较不施钼处理分别提高 5.51、3.40 倍(图 1)。冬小麦品种 97003 施钼处理时地上部、地下部 GS 活性分别较不施钼处理提高 17.38%、20.82%,而冬小麦品种 97014 施钼处理时较不施钼处理分别提高 38.69%、7.54%(图 2)。冬小麦品种 97014、97003 施钼处理时地上部硝态氮含量较不施钼处理分别减少 32.80%、32.35%,地上部游离氨基酸含量施钼处理时较不施钼处理分别提高 66.93%、57.55%(表 4),地下部游离氨基酸总量分别提高 53.45%、40.65%(表 5),地上部可溶性蛋白含量分别提高 16.04%、15.27%(表 4),表明施钼对冬小麦钼低效品种 97014 的影响更大。但是也有例外,如施钼处理时冬小麦品种 97014、97003 地下部铵态氮的含量分别降低 35.59%、39.77%(表 5),这可能是由于地下部受更多因素的影响。总的来说,施钼处理对冬小麦品种 97014 氮代谢的影响大于品种 97003 的,且 2 个冬小麦品种间性状差异最大的是游离氨基酸含量,导致 2 个冬小麦品种间氮代谢差异可能是由于 2 个冬小麦品种对钼的吸收利用能力不同:在缺钼条件下,冬小麦钼高效品种 97003 对钼的吸收和分配能力较强,钼的累积量及钼的迁移系数均高于钼低效品种 97014,导致缺钼和施钼条件下冬小麦品种 97003 的钼营养的差异较小,而钼低效品种 97014 对钼的吸收和分配能力较弱,钼的累积量及钼的迁移系数均低于钼高效品种 97003,导致缺钼和施钼条件下品种 97014 钼营养的差异较大。本试验中,施钼处理导致冬小麦品种 97014 和 97003 叶片钼含量较不施钼分别提高 53.85、40.05 倍(表 2),这与施钼处理导致对冬小麦品种 97014 氮代谢的影响较大相吻合。研究表明,施钼导致叶片光合速率、抗氧化酶活性、ABA 含量、bZIP 转录因子及 ABA 依赖型基因表达量的增加比率均是品种 97014 大于品种 97003^[3,27],这些结果都揭示了 2 个冬小麦品种对钼的响应存在基因型差异。综上所述,施钼处理对 2 个冬小麦品种氮代谢的影响存在基因型差异,且以对钼低效品种 97014 的影响较大。

参 考 文 献

- [1] YU M, WANG Y H. Effects of molybdenum on the precursors of chlorophyll biosynthesis in winter wheat cultivars under low temperature[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(4): 702-708.
- [2] NAUTIYAL N, CHATTERJEE C. Molybdenum stress-induced changes in growth and yield of chickpea[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2004, 27(1): 173-181.
- [3] WU S W, HU C X, TAN Q L, et al. Effects of molybdenum on water utilization, antioxidative defense system and osmotic-adjustment ability in winter wheat (*Triticum aestivum*) under drought stress[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2014, 83: 365-374.
- [4] MENDEL R R, HANSCH R. Molybdoenzymes and molybdenum cofactor in plants[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2002, 53(375): 1689-1698.
- [5] NIE Z J, HU C X, SUN X C, et al. Effects of molybdenum on ascorbate-glutathione cycle metabolism in Chinese cabbage (*Brassica campestris* L. ssp. *pekinensis*) [J]. *Plant and Soil*, 2007, 295(1/2): 13-21.
- [6] AGUEY-ZINSOU K F O, BERNHARDT P V, LEIMKHLER S. Protein film voltammetry of *Rhodobacter capsulatus* xanthine dehydrogenase[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2003, 125(50): 15352-15358.
- [7] WANG D, PANG Y, WANG W, et al. Effect of molybdenum on secondary metabolic process of glycyrrhizic acid in *Glycyrrhiza uralensis* Fisch[J]. *Biochemical Systematics and Ecology*, 2013, 50(7): 93-100.
- [8] 甘巧巧. 施钼对冬小麦钼酶、碳代谢相关酶类及细胞壁组分的影响[D]. 武汉: 华中农业大学图书馆, 2005.
- [9] 胡润芳, 张广庆, 滕振勇, 等. 不同形态氮素对大豆硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶活性及蛋白质含量的影响[J]. *东北农业大学学报*, 2012, 43(1): 31-35.
- [10] DELGADO M J, BONNARD N, TRESIERRA-AYALA A, et al. The *Bradyrhizobium japonicum* napEDABC genes encoding the periplasmic nitrate reductase are essential for nitrate respiration[J]. *Microbiology*, 2003, 149(12): 3395-3403.
- [11] 陈煜, 朱保葛, 张敬, 等. 不同氮源对大豆硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶活性及蛋白质含量的影响[J]. *大豆科学*, 2004, 23(2): 143-146.
- [12] 蔡妙珍, 刘鹏, 徐根娣, 等. 钼、锰营养对大豆碳氮代谢的影响[J]. *土壤学报*, 2008, 45(1): 180-183.
- [13] 刘鹏, 杨玉爱. 钼、硼对大豆氮代谢的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 1999, 5(4): 347-351.
- [14] 杜应琼, 廖新荣. 钼、钼对花生氮代谢的影响[J]. *作物学报*, 2001, 27(5): 612-616.
- [15] YU M, HU C X, WANG Y H. Molybdenum efficiency in winter wheat cultivars as related to molybdenum uptake and distribu-

tion[J].Plant and Soil,2002,245(2):287-293.

[16] 赵明宇.应用石墨炉原子吸收分光光度法检测水中钼[J].内蒙古科技与经济,2011(9):97-98.

[17] 王学奎.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2006: 122-190.

[18] TANG Y F,SUN X C,HU C X,et al.Genotypic differences in nitrate uptake, translocation and assimilation of two Chinese cabbage cultivars [*Brassica campestris* L.ssp.*Chinensis* (L.)][J].Plant Physiology and Biochemistry,2013,70(1):14-20.

[19] 蔡红梅,肖景华,张启发,等.抑制表达谷氨酰胺合成酶基因对水稻氮代谢和生长发育的影响[J].科学通报,2010(10):875-886.

[20] 王文平.植物样品中游离氨基酸总量测定方法的改进[J].北京农学院学报,1998,13(3):9-13.

[21] 刘红恩,胡承孝,聂兆君,等.酸性黄棕壤中钼磷配施对甘蓝型油菜苗期碳氮代谢的影响[J].中国油料作物学报,2012,34(1):62-68.

[22] SUN X C,TAN Q L,NIE Z J,et al.Differential expression of proteins in response to molybdenum deficiency in winter wheat leaves under low-temperature stress[J].Plant Molecular Biology Reporter,2014,32(5):1057-1069.

[23] NIE Z J,HU C X,LIU H,et al.Differential expression of molybdenum transport and assimilation genes between two winter wheat cultivars(*Triticum aestivum*)[J].Plant Physiology Biochemistry,2014,82:27-33.

[24] 孙学成.钼提高冬小麦抗寒力的生理基础及分子机制[D].武汉:华中农业大学图书馆,2007.

[25] 聂兆君,胡承孝,孙学成,等.钼对小白菜叶色、营养品质及硝酸盐含量的影响[J].中国蔬菜,2008(8):7-10.

[26] WEI L,LI Y,YANG L.Effects of molybdenum on nitrogen metabolism of sugarcane[J].Sugar Tech,2007,9(1):36-42.

[27] SUN X C,HU C X,TAN Q L,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.

Effects of Mo on nitrogen metabolism and the differential analyses of Mo-efficient and Mo-inefficient winter wheat cultivars

WU Song-wei¹ HU Cheng-xiao¹ TAN Qi-ling¹ SUN Xue-cheng¹
ZHAO Xiao-hu¹ ZHUANG Guang-quan² YUAN Ying-chun²

1.Hubei Provincial Engineering Laboratory for New-Type Fertilizer/Micro-element Research Center, Huazhong Agricultural University,Wuhan 430070,China ;
2.Dangyang Agricultural Technology Promotion Center ,Hubei Province ,Dangyang 444100,China

Abstract A modified Hoagland solution culture experiment was conducted to study the effects of Mo on nitrogen metabolism and the difference of Mo-efficient and Mo -inefficient winter wheat cultivars. The results showed that application of Mo significantly increased the activities of nitrate reductase and glutamine synthetase,decreased the content of nitrate.The contents of ammonium,total free amino acids and soluble protein were improved,indicating that the nitrogen metabolism of winter wheat was promoted by applying Mo.Genotypic differences in response of molybdenum on nitrogen metabolism were found between Mo-efficient and Mo-inefficient winter wheat cultivars.The changing rates of nitrate reductase and glutamine synthetase,the contents of nitrate,free amino acids and soluble protein in shoot and free amino acids in root of Mo-inefficient cv.97014 under Mo application were higher than those of Mo-efficient cv.97003.

Key words Mo application; winter wheat cultivars; nitrogen metabolism; nitrate reductase; glutamine synthetase

(责任编辑:陆文昌)