

李 路, 胡承孝, 谭启玲, 等. 钼污染对冬小麦光合作用特性及产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(4): 620–626.

LI Lu, HU Cheng-xiao, TAN Qi-ling, et al. Effects of Mo pollution on photosynthesis characteristics and yields of winter wheat[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(4): 620–626.

钼污染对冬小麦光合作用特性及产量的影响

李 路^{1,2}, 胡承孝^{1,2}, 谭启玲^{1,2}, 史凯丽^{1,2}, 赵小虎^{1,2}, 孙学成^{1,2*}

(1.华中农业大学资源与环境学院/微量元素研究中心, 武汉 430070; 2.新型肥料湖北省工程实验室, 武汉 430070)

摘 要:采用土壤培养试验研究了不同钼水平对冬小麦光合作用特性及产量的影响。结果表明:适量施钼($0.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)能够增加缺钼土壤上冬小麦的叶绿素含量、净光合速率(P_n)和产量; $0.15 \sim 2000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 条件下, 随钼水平的提高, 冬小麦叶绿素含量、净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和产量呈下降趋势; 随着 P_n 下降, 胞间 CO_2 浓度(C_i)和 G_s 呈下降趋势, 推测气孔限制是导致 P_n 下降的主要因素; 叶绿素 a/b 值呈上升趋势, 表明叶绿素 a 向叶绿素 b 的转化受阻, 从而抑制光合作用。极端钼污染条件下($3000 \sim 4000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)冬小麦不能完成其生命周期。

关键词:钼污染; 冬小麦; 光合作用; 产量

中图分类号: X503.231 文献标志码: A 文章编号: 1672–2043(2016)04–0620–07 doi:10.11654/jaes.2016.04.002

Effects of Mo pollution on photosynthesis characteristics and yields of winter wheat

LI Lu^{1,2}, HU Cheng-xiao^{1,2}, TAN Qi-ling^{1,2}, SHI Kai-li^{1,2}, ZHAO Xiao-hu^{1,2}, SUN Xue-cheng^{1,2*}

(1.College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University/Micro-element Research Center, Wuhan 430070, China; 2.Hubei Provincial Engineering Laboratory for New-Type Fertilizers, Wuhan 430070, China)

Abstract: A pot culture experiment was conducted to investigate the effects of different levels of Mo on photosynthesis characteristics and yields of winter wheat. Results showed that appropriate Mo application ($0.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) increased chlorophyll (Chl) content, photosynthetic rates (P_n) and yields of winter wheat in Mo-deficient soils. The chlorophyll content, photosynthetic rates (P_n), transpiration rates (T_r), stomatal conductance (G_s) and yields of winter wheat were decreased by Mo at $0.15 \sim 2000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. The decline in P_n along with C_i and G_s decreases indicated that stomatal limitation was the main factor for P_n decreases. The Chl a/b decreased with increases in Mo pollution levels, indicating that the transformation from Chl a to Chl b was blocked under Mo pollution conditions. The life cycle of winter wheat was not completed when Mo levels were higher than $3000 \sim 4000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Keywords: molybdenum pollution; winter wheat; photosynthesis; yield

钼不仅是动植物生长所必需的营养元素之一, 同时作为稀有元素, 广泛应用于钢铁、电子、航天等产业, 是非常重要的战略资源^[1]。我国钼储量居世界前列, 辽宁、陕西、山西、河南、福建、江西等省均有钼矿, 且储量大、开发条件好^[2]。钼矿及伴生钼矿开采和选矿

产生的尾矿和采选矿废水可造成严重的水体和土壤钼污染^[3]。自 Ferguson 等^[4]首先报道反刍动物因食用高钼草导致钼中毒开始, 环境的钼污染问题已引起了国内外学者的高度重视。一般认为动物容易产生钼中毒症状, 而植物对钼的抗性较强, 但过量钼污染仍会对植物造成毒害作用。首先过量的钼影响植物正常生长, 如导致鹰嘴豆的根和地上部长度降低, 并改变其叶片、根系和茎的剖面结构, 番茄和花椰菜叶片呈紫色, 豆类作物叶片黄化^[5–7]; 同时钼污染影响植物品质, 如显著降低大豆蛋白质和维生素 C 含量并导致大麦

收稿日期: 2015–11–15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171240); 国家科技支撑计划项目(2014BAD14B02)

作者简介: 李 路(1991—), 女, 河南泌阳人, 硕士研究生, 从事植物营养机理研究。E-mail: lianlude@163.com

* 通信作者: 孙学成 E-mail: sxccn@mail.hzau.edu.cn

中其他微量元素的缺乏^[8-9]。植物光合作用和蒸腾作用受到抑制、活性氧清除系统破坏导致膜脂过氧化严重是过量钼对植物造成毒害的重要机制^[10-11],同时植物产生一系列的生理反应如抗氧化酶系统激活、花青素和脯氨酸等物质综合作用以减轻其毒害作用^[12-14]。

小麦是我国第二大粮食作物,种植面积较广,已有部分小麦产区土壤钼污染的报道^[15-19],然而土壤钼污染对小麦生长的影响及其机制尚不清楚。本文以冬小麦为试验材料,研究不同土壤钼污染水平对其光合特性和产量的影响,为进一步探明小麦对钼污染的响应机制提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤为酸性黄棕壤,采自湖北省武汉市新洲区,其基本理化性状:pH 5.51,有机质 14.1 g·kg⁻¹,碱解氮 33.92 mg·kg⁻¹,速效磷(Olsen-P)12.51 mg·kg⁻¹,速效钾 80.57 mg·kg⁻¹,有效钼 0.114 mg·kg⁻¹。

冬小麦品种 97003,为华中农业大学微量元素研究中心自繁留种^[20]。

1.2 试验设计与方法

试验采用 22 cm×21 cm(直径×深度)陶瓷钵,每钵装风干后过 20 目筛的土壤样品 5 kg。试验设 8 个钼处理水平:0(对照)、0.15、100、500、1000、2000、3000、4000 mg Mo·kg⁻¹ 土,以钼酸铵(NH₄)₆Mo₇O₂₄·4H₂O 和钼酸钠 Na₂MoO₄·2H₂O 为肥源,每个处理设 4 次重复,随机排列。

播种前每千克土中施入 N 0.25 g、P₂O₅ 0.15 g、K₂O 0.20 g,分别以(NH₄)₆Mo₇O₂₄·4H₂O 和(NH₄)₂SO₄、KH₂PO₄、KCl 为肥源;另外以 1 mL·kg⁻¹ 土的量加入无钼 Arnon 营养液(每升无钼 Arnon 营养液组成为 2.86 g H₃BO₃、1.81 g MnCl₂·4H₂O、0.22 g ZnSO₄·7H₂O、0.08 g CuSO₄·5H₂O、18.35 g FeNa-EDTA),所有肥料配成溶液于播种前一次性施入。所用试剂均为分析纯(AR)。在小麦的整个生育期以去离子水定时定量浇灌,培养试验于湖北武汉华中农业大学微量元素研究中心盆栽场进行,盆栽场设有玻璃钢网防雨棚。

冬小麦于 2014 年 10 月 30 日播种,每钵播种 15 株,播种后两周定苗至每钵 7 株。于苗期(2014 年 12 月 19 日,50 d)随机取 2 株测定倒数第一片完全展开叶叶绿素含量;于灌浆期(2015 年 4 月 12 日,164 d)对旗叶进行光合参数的测定;于 2015 年 5 月 12 日(194 d)收获成熟期小麦样品。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 叶绿素的测定

参照王学奎等^[21]方法进行测定:称取去掉主叶脉的剪碎的小麦叶片 0.2 g 于比色管,加入 95%的乙醇 25 mL,黑暗处静置 12 h 后于波长 470、649、665 nm 下测定吸光度(95%乙醇作为空白调零)。

1.3.2 光合参数的测定

在有效光合辐射(PAR)为 1000 μmol·m⁻²·s⁻¹ 条件下,采用美国 LI-COR 公司生产的 LI-6400XT 便携式光合测定系统,测定各处理的净光合速率(P_n)、胞间 CO₂ 浓度(C_i)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)。

1.3.3 干物质的测定

收获后的小麦样品按叶、茎+鞘、穗轴+颖壳、籽粒进行分离,105 ℃杀青 30 min,65 ℃烘干至恒重,称其干重。

1.3.4 产量及其构成因子

测定成熟期小麦单株有效穗数、穗粒数、千粒重,其中穗粒数=每盆籽粒总数/每盆有效穗数,千粒重以 200 粒重进行换算。

1.4 数据处理

使用 Microsoft Excel 2003 进行相关数据计算, Sigmaplot 10.0 绘图, SPSS 20.0 进行方差分析。各处理平均值的多重比较采用 Duncan-test($P<0.05$)法。

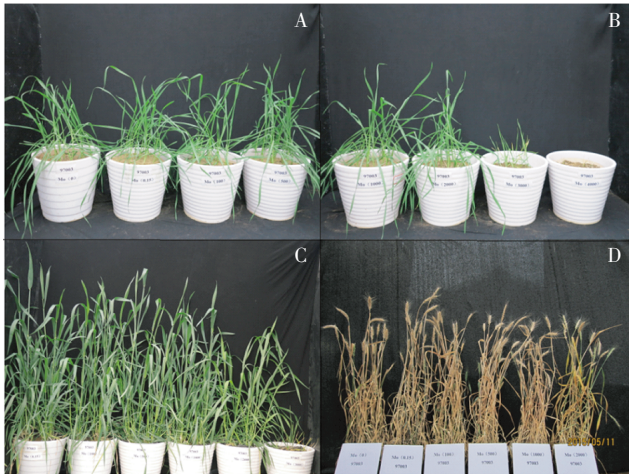
2 结果分析

2.1 土壤钼污染对冬小麦长势的影响

与对照相比,适量施钼(0.15 mg·kg⁻¹)对冬小麦的长势没有显著的影响,但用量增大会影响冬小麦生长发育。在苗期,0.15~1000 mg·kg⁻¹ 条件下各处理间没有显著差异,2000、3000 mg·kg⁻¹ 条件下冬小麦生物量显著下降,老叶叶尖黄化,4000 mg·kg⁻¹ 条件下冬小麦出苗迟缓,生长约 30 d 后死亡(图 1A 和图 1B)。在拔节期,2000 mg·kg⁻¹ 条件下冬小麦叶片黄化严重,分蘖迟缓,分蘖期老叶叶片呈现紫红色,茎秆下部呈现紫色,生物量显著下降;3000 mg·kg⁻¹ 条件下随生育期的推进冬小麦生物量几乎没有变化,在灌浆期死亡(图 1C)。在收获期,2000 mg·kg⁻¹ 条件下冬小麦贪青晚熟,生物量显著下降,分蘖较少(图 1D)。

2.2 土壤钼污染对冬小麦叶绿素含量的影响

与对照相比,适量施钼(0.15 mg·kg⁻¹)能够增加冬小麦叶绿素 a 含量。在 0.15~500 mg·kg⁻¹ 条件下叶绿素 a 含量无显著变化,在 1000~2000 mg·kg⁻¹ 条件下叶绿素 a 急速下降,且在 2000 mg·kg⁻¹ 条件下与



A: 苗期 Seedling stage(0, 0.15, 100, 500 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$);
B: 苗期 Seedling stage(1000, 2000, 3000, 4000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$);
C: 拔节期 Jointing stage(0.15, 100, 500, 1000, 2000, 3000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$);
D: 成熟期 Mature stage(0, 0.15, 100, 500, 1000, 2000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

图1 不同钼污染水平对冬小麦长势的影响

Figure 1 Effects of different levels of Mo on growth of winter wheat

0.15 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理相比差异显著(图 2A)。叶绿素 b、叶绿素总量与叶绿素 a 含量变化趋势基本一致(图 2B、图 2C)。随钼污染水平的提高,叶绿素 a/b 值呈上升的趋势。

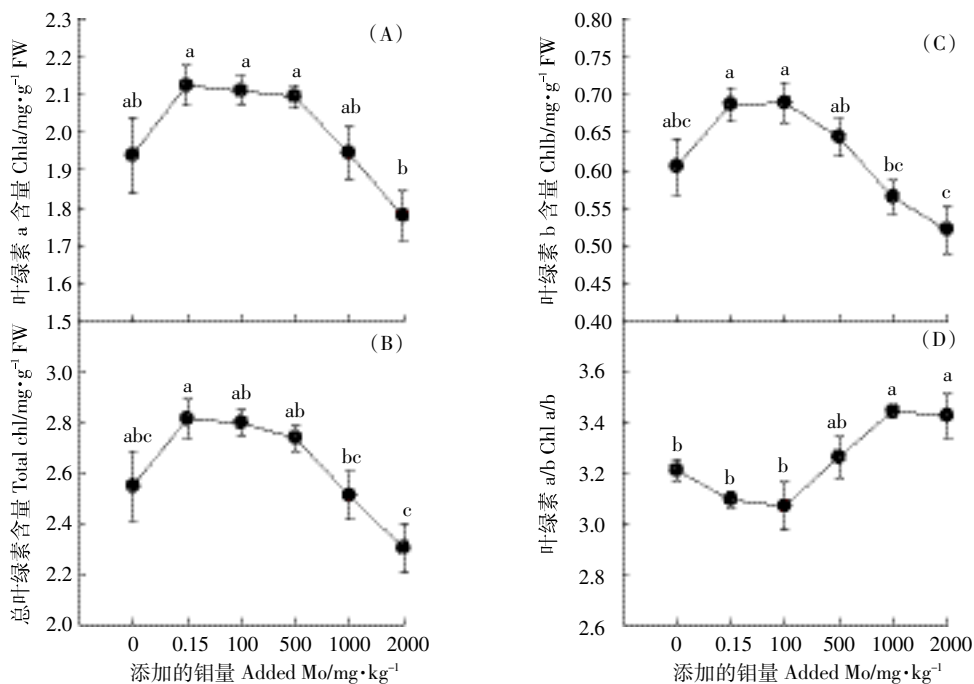


图2 不同钼污染水平对冬小麦叶绿素含量的影响

Figure 2 Effects of different levels of Mo on chlorophyll content of winter wheat

2.3 土壤钼污染对冬小麦光合作用参数的影响

与对照相比,适量施钼(0.15 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)显著提高了冬小麦旗叶的 P_n ,随钼污染水平的提高,冬小麦 P_n 呈现下降趋势(图 3);冬小麦的 C_i 随着钼水平的提高呈现先升高(0.15~500 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)而后显著下降(500~1000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的趋势;随钼水平的提高(0~1000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), G_s 呈现显著下降趋势。不同钼水平下冬小麦 T_r 变化趋势与 G_s 基本保持一致。

2.4 土壤钼污染对冬小麦产量及其构成因子的影响

与对照相比,适量施钼(0.15 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)增加了冬小麦生物学产量,显著增加了籽粒产量和收获指数,增长幅度分别为 9.18%、20.98%和 10.40%(表 1)。随钼污染水平的提高,冬小麦生物学产量呈现下降趋势,并在 2000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 条件下达显著性差异,与适量施钼(0.15 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)相比,降幅分别为 1.90%、1.47%、9.5%、19.26%。随着钼污染水平提高小麦籽粒产量整体呈现下降趋势,在 2000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时降幅达 33.58%。钼污染条件下收获指数与其籽粒产量的变化趋势一致,均在 500 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 条件下达最大值。

随着钼水平的提高,单株有效穗数呈现先升高(0~500 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)后下降(500~2000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的趋势;钼污染条件(100~2000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)下冬小麦穗粒数在 500 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时达到最大值,随后呈现下降趋势;而千

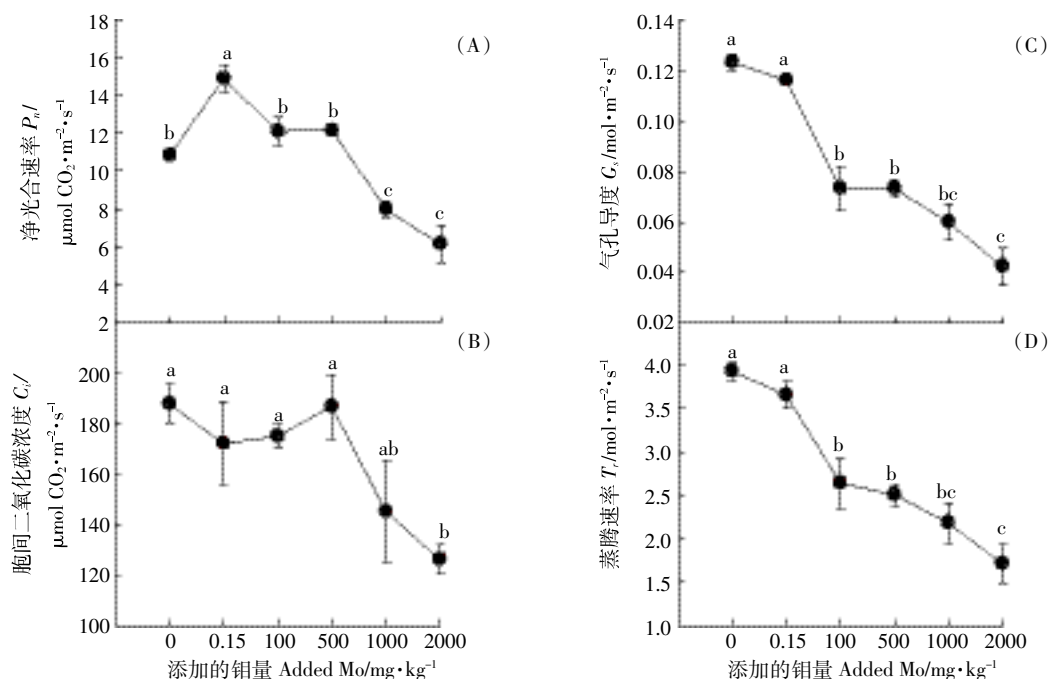


图 3 不同钼污染水平对冬小麦光合作用参数的影响

Figure 3 Effects of different levels of Mo on photosynthetic parameters of winter wheat

粒重随钼水平的提高整体呈现下降趋势,各处理间差异不显著(表 2)。

3 讨论

钼是植物必需的微量元素,缺钼条件下植株生长矮小,生长迟缓并出现叶片失绿甚至焦枯死亡等症状^[22-23],适量施钼可影响冬小麦叶绿体的超微结构,促进叶绿素的合成^[24],同时也可以影响酶活性促进冬小麦的碳氮代谢^[25-26]。本试验的结果再次证明,合

表 2 不同水平的钼对冬小麦产量构成因子的影响

Table 2 Effects of different levels of Mo on yield components of winter wheat

添加的钼量 Added Mo/ mg·kg ⁻¹	有效穗数 Effective panicle/ plant	穗粒数 Grain per spike	千粒重 1000-grain weight/g
0	3.35±0.29ab	24.14±1.37a	38.75±1.44a
0.15	3.32±0.12ab	27.21±2.16a	41.42±0.62a
100	3.70±0.13a	23.66±0.38a	39.24±2.43a
500	3.75±0.21a	28.06±2.06a	38.06±0.92a
1000	3.30±0.10ab	26.74±3.21a	39.69±1.86a
2000	3.04±0.15b	22.16±1.09a	37.03±1.20a

表 1 不同水平的钼对冬小麦产量的影响

Table 1 Effects of different levels of Mo on yields of winter wheat

添加的钼量 Added Mo/ mg·kg ⁻¹	生物学产量 Biomass/ g·pot ⁻¹	籽粒产量 Grain yield/ g·pot ⁻¹	收获指数 Harvest index/ %·pot ⁻¹
0	47.01±1.49a	15.24±1.10bc	32.45±2.38bc
0.15	51.32±1.28a	18.43±1.11ab	35.83±1.45ab
100	50.34±0.45a	16.67±1.08ab	33.07±1.96bc
500	50.57±0.41a	19.75±0.13a	39.07±0.30a
1000	46.44±3.12ab	17.42±1.82ab	37.21±1.79ab
2000	41.43±2.01b	12.24±0.83c	29.48±0.94c

注:生物学产量为茎、叶片、颖壳、籽粒重量之和。收获指数为籽粒产量与生物学产量之比的百分数。

Note: Biomass means the sum of stem, leaf, glum and grain weights. Harvest index means the ratio of grain yield to biomass.

理施用钼肥(0.15 mg·kg⁻¹)可以有效提高冬小麦叶绿素含量、净光合速率和产量。

虽然植物对钼缺乏的临界值较低,但对高钼的忍耐能力较强。在土壤钼含量大于 100 mg·kg⁻¹ 时,多数植物并无不良反应,有些植物甚至能吸收相当多的钼,而且长势良好^[27]。研究表明,大豆、棉花和萝卜叶片钼含量分别达 80、1585、1800 mg·kg⁻¹ 时,其生长仍未有异常^[28]。高钼(200 mg·kg⁻¹)对灯心草生长有明显的抑制作用^[10]。但是,关于冬小麦对土壤钼污染的响应我们依然知之甚少。本研究表明,与适量施钼(0.15 mg·kg⁻¹)相比,土壤钼污染高达 1000 mg·kg⁻¹ 时,冬小

麦长势并无显著差异; 钼水平达 $2000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 冬小麦长势较差, 生物量显著下降, 叶片呈现褪绿和黄化的现象, 可能与过量的钼导致铁的代谢受阻有关^[29], 茎组织呈紫色则可能是由于液泡中形成了钼儿茶酚复合体^[30]; 极端钼污染 ($3000 \sim 4000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 条件下, 冬小麦不能完成其生长周期甚至死亡, 与 Mcgrath 等^[31]的研究一致。

叶绿素是光合作用的物质基础, 其含量高低将直接影响光合作用的强弱及物质合成^[32]。研究表明, 重金属污染后植物的叶绿体受到严重破坏, 进而抑制植物光合作用, 重金属对植物的毒害作用与其胁迫程度有关^[33]。随钼水平的提高, 冬小麦叶绿素含量整体呈现下降趋势, 且在 $1000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 及 $2000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 条件下与适量施钼 ($0.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 处理相比, 差异显著 (图 2)。这可能是因为钼浓度超过一定范围时容易造成铁缺乏, 进而间接影响叶绿素合成, 引起叶绿素变小或解体^[10, 34]。叶绿素 a/b 值对于叶绿体的光合活性具有十分重要的意义, 钼污染条件下冬小麦叶绿素 a/b 值随钼水平的提高呈现上升趋势 (图 2D), 表明叶绿素 a 向叶绿素 b 的转化速率下降, 导致叶绿素 b 含量相对减少, 进而抑制光合作用^[35]。

P_n 是衡量植物光合作用能力强弱的重要指标^[36]。本试验结果表明, 钼污染条件下, 冬小麦 P_n 整体呈现下降趋势 (图 3A)。研究发现, P_n 的降低主要有两方面原因: 气孔限制和非气孔限制^[37]。Farquhar 等^[38]提出以 C_i 值的大小评判气孔限制和非气孔限制: 若 C_i 和 G_s 同时下降, 则说明光合作用能力下降的原因是气孔限制; 若 P_n 下降的同时 C_i 上升, 则说明是非气孔限制导致光合作用能力下降^[39]。本试验中, 钼污染条件下 P_n 下降的同时伴随 C_i 和 G_s 的显著下降 (图 3A、3B、3C), 说明其主要因子是气孔限制; 同时叶绿素呈现下降趋势 (图 2), 也是 P_n 下降的一个重要原因。

土壤钼污染显著降低冬小麦蒸腾速率 (图 3D), 即蒸腾能力下降, 与练建军等^[11]的研究一致。叶片气孔是控制 CO_2 由大气进入叶肉组织以及水分从叶子内部湿润大表面扩散到周围的空气中的闸口^[40]。 G_s 和 T_r 同时下降说明高浓度的钼抑制了冬小麦对水分的吸收并阻碍了水分的疏导, 进而使植物体内水分平衡失调, 最终影响植物正常的水分代谢^[41], 同时说明水分因子可能是影响叶片 G_s 下降的主要原因, 此外也可能是由于钼污染引起叶片 ABA 水平增加而导致气孔关闭^[42]。

土壤钼污染条件下, 冬小麦产量及其构成因子呈

现先上升后下降的趋势 (表 1), 说明一定程度的钼污染能够增加冬小麦产量, 但极端钼污染显著抑制产量的形成。产量构成因子中仅单株有效穗数在各处理间差异显著, 且与产量变化趋势一致 (表 2), 说明钼污染条件下产量的主要影响因素可能是单株有效穗数。分蘖减少和幼穗分化受阻都可能是土壤钼污染条件下冬小麦单株有效穗数减少的诱导因素^[43]。

4 结论

土壤钼污染水平达 $1000 \sim 2000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时冬小麦生长受到显著的抑制作用, 更高水平的土壤钼污染 ($3000 \sim 4000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 将使冬小麦不能完成其生命周期甚至死亡。土壤钼污染条件下, 冬小麦叶绿素含量下降, 气孔限制导致光合速率下降, 进而影响其光合作用能力, 并最终导致生物学产量的显著降低。一定程度的钼污染 ($0.15 \sim 500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 对冬小麦产量有一定的促进作用, 极端钼污染 ($>500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 显著抑制产量的形成, 影响产量的主要因素为单株有效穗数。

此外, 本研究仅从光合作用特性和产量方面阐述了土壤钼污染对冬小麦的影响, 污染条件下冬小麦籽粒钼含量对人体的安全是否构成威胁, 则需要后期的试验进行进一步的验证。关于冬小麦对土壤钼污染的生理及分子响应机制尚需要更多更深入的研究。

参考文献:

- [1] Namasivayam C, Sureshkumar M V. Removal and recovery of molybdenum from aqueous solutions by adsorption onto surfactant-modified coir pith, a lignocellulosic polymer[J]. *Clean Soil, Air, Water*, 2009, 37(1): 60-66.
- [2] 林 强, 徐 彬. 钼及伴生矿开采洗选项目环境辐射污染防治分析[J]. 资源节约与环保, 2014(10): 174-175.
LIN Qiang, XU Bin. Molybdenum and associated ore mining washing and environmental radiation pollution prevention project analysis[J]. *Energy-Saving and Environmental Protection*, 2014(10): 174-175.
- [3] 于常武, 许士国, 陈国伟, 等. 水体中钼污染物的迁移转化研究进展[J]. 环境污染与防治, 2008, 30(9): 70-74.
YU Chang-wu, XU Shi-guo, CHEN Guo-wei, et al. Literature review of aqueous phase migration and transformation of Mo pollutants[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2008, 30(9): 70-74.
- [4] Ferguson W S, Lewis A H, Watson S J. The teart pastures of somerset: I. The cause and cure of teartness[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 1943, 33(1): 44-51.
- [5] Gupta U C. Symptoms of molybdenum deficiency and toxicity in crops [M]//Molybdenum in Agriculture. New York: Cambridge University Press, 1997: 160-170.
- [6] Datta J K, Kundu A, Hossein S D, et al. Studies on the Impact of Micronutrient (Molybdenum) on germination, seedling growth and physiol-

- ogy of bengal grain (*Cicer arietinum*) under laboratory condition[J]. *Asian Journal of Crop Science*, 2011, 3(2):55-67.
- [7] Bergmann W. Nutritional disorders of plants—development, visual and analytical diagnosis[M]. Jena:Gustav Fischer Verlag, 1992.
- [8] Brune A, Dietz K J. A comparative analysis of element composition of roots and leaves of barley seedlings grown in the presence of toxic cadmium, molybdenum, nickel, and zinc concentrations[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1995, 18(4):853-868.
- [9] 刘 鹏, 杨玉爱. 钼和硼污染对大豆品质的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2003, 9(6):594-597.
- LIU Peng, YANG Yu-ai. Effects of molybdenum and boron pollution on the quality of soybean[J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2003, 9(6):594-597.
- [10] 赵 婷. 灯心草对土壤重金属钒、钛、钼、镍、锰污染的抗性研究[D]. 长沙:湖南农业大学, 2007.
- ZHAO Ting. Study on the Resistance of *Juncus effuses* to heavy metal of V, Ti, Mo, Ni and Mn[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2007.
- [11] 练建军, 许士国, 韩成伟. 芦苇和香蒲对重金属钼的吸收特性研究[J]. 环境科学, 2011, 32(11):3335-3340.
- LIAN Jian-jun, XU Shi-guo, HAN Cheng-wei. Absorption characteristics of molybdenum by reed and cattail[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(11):3335-3340.
- [12] Rout G R, Das P. Rapid hydroponic screening for molybdenum tolerance in rice through morphological and biochemical analysis[J]. *Ros-tlinna Vyroba*, 2002, 48(11):505-512.
- [13] Kumchai J, Huang J Z, Lee C Y, et al. Proline partially overcomes excess molybdenum toxicity in cabbage seedlings grown in vitro[J]. *Genetics & Molecular Research Gmr*, 2013, 12(4):5589-5601.
- [14] Stroud J L, Zhao F J, Buchner P, et al. Impacts of sulphur nutrition on selenium and molybdenum concentrations in wheat grain[J]. *Journal of Cereal Science*, 2010, 52(1):111-113.
- [15] 贾 婷, 贾洋洋, 余淑娟, 等. 闽东某钼矿周边农田土壤钼和重金属的污染状况[J]. 中国环境监测, 2015, 31(1):45-49.
- JIA Ting, JIA Yang-yang, YU Shu-juan, et al. Pollution of molybdenum and heavy metals of the soils and rice near a molybdenum mining site in Eastern Fujian[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2015, 31(1):45-49.
- [16] 赵云霞. 豫西地区环境及食物链中重金属含量的背景值分析[D]. 洛阳:河南科技大学, 2012.
- ZHAO Yun-xia. The background values of heavy metals in the environment and food chain in western Henan Province[D]. Luoyang: Henan Science and Technology University, 2012.
- [17] 冯 婧. 钼矿区农业土壤重金属污染调查与评价[J]. 内蒙古环境科学, 2009, 21(4):45-47.
- FENG Jing. The heavy metal pollution investigation and evaluation of agricultural soil in molybdenum mining area[J]. *Inner Mongolia Environmental Science*, 2009, 21(4):45-47.
- [18] 肖振林, 丛 俏, 曲 蛟. 钼矿区周边果园土壤重金属污染评价及对水果品质的影响[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(23):5831-5834.
- XIAO Zhen-lin, CONG Qiao, QU Jiao. Assessment of heavy metal pollution in orchard soil and its effects to fruit quality around molybdenum mining area[J]. *Science Technology and Engineering*, 2010, 10(23):5831-5834.
- [19] 石 平, 张广新, 付艳华, 等. 葫芦岛市工业废弃地中植物对重金属的利用程度研究[J]. 北方园艺, 2013(9):196-200.
- SHI Ping, ZHANG Guang-xin, FU Yan-hua, et al. Research on effects of plants on the heavy metal bioavailability in urban derelict land of Huludao City[J]. *Northern Horticulture*, 2013(9):196-200.
- [20] 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.
- YU Min, HU Cheng-xiao, WANG Yun-hua. Response of different winter wheat cultivars to Mo deficiency[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2003, 22(4):360-364.
- [21] 王学奎. 植物生理生化试验原理与技术[M]. 北京:高等教育出版社, 2006.
- WANG Xue-kui. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M]. Beijing: Higher Education, 2006.
- [22] Kaiser B N, Gridley K L, Brady J N, et al. The role of molybdenum in agricultural plant production[J]. *Annals of Botany*, 2005, 96(5):745-754.
- [23] 刘红恩, 胡承孝, 孙学成, 等. 钼对油菜生长发育的影响[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(7):1305-1308.
- LIU Hong-en, HU Cheng-xiao, SUN Xue-cheng, et al. Effects of molybdenum on growth and development of rape[J]. *Hubei Agricultural Science*, 2011, 50(7):1305-1308.
- [24] 喻 敏, 王运华. 冬小麦不同基因型的钼效率及其生理基础[D]. 武汉:华中农业大学, 2000.
- YU Min, WANG Yun-hua. Molybdenum efficiency of winter wheat genotypes and its physiological bases[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2000.
- [25] 武松伟, 胡承孝, 谭启玲, 等. 施钼对冬小麦钼高、低效品种氮代谢的影响[J]. 华中农业大学学报, 2015, 34(5):52-57.
- WU Song-wei, HU Cheng-xiao, TAN Qi-ling, et al. Effects of Mo on nitrogen metabolism and the differential analyses of Mo-efficient and Mo-inefficient winter wheat cultivars[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2015, 34(5):52-57.
- [26] 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, 2005.
- GAN Qiao-qiao. Effects of molybdenum application on Mo-enzymes, enzymes relating with carbon metabolism and the constituents of cell wall of winter wheat[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2005.
- [27] 陆景陵. 植物营养学[M]. 北京:中国农业大学出版社, 2003.
- LU Jing-ling. Plant nutrition[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2003.
- [28] Adriano D C. Trace elements in the terrestrial environment[M]. New York:Spring-Verlag, 1986.
- [29] Warrington K. The influence of high concentrations of ammonium and sodium molybdenum on flax, soybean and peas grown in nutrient solutions containing deficient or excess iron[J]. *Annals of Applied Biology*, 1955, 43(4):709-719.

- [30] 刘 鹏. 钼胁迫对植物的影响及钼与其他元素相互作用的研究进展[J]. 农业环境保护, 2002, 21(3):276-278.
- LIU Peng. Effects of stress of molybdenum on plants and interaction between molybdenum and other elements[J]. *Agro-environmental Protection*, 2002, 21(3):276-278.
- [31] McGrath S P, Micó C, Zhao F J, et al. Predicting molybdenum toxicity to higher plants; Estimation of toxicity threshold values[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(10):3085-3094.
- [32] 李裕红, 黄小瑜. 重金属污染对植物光合作用的影响[J]. 引进与咨询, 2006(6):23-24.
- LI Yu-hong, HUANG Xiao-yu. Effects of heavy metal pollution on photosynthesis characteristics[J]. *Introduction and Consulting*, 2006(6):23-24.
- [33] 江行玉, 赵可夫. 植物重金属伤害及其抗性机理[J]. 应用与环境生物学报, 2001, 7(1):92-99.
- JIANG Xing-yu, ZHAO Ke-fu. Mechanism of heavy metal injury and resistance of plants[J]. *Application and Environmental Science*, 2001, 7(1):92-99.
- [34] 邹邦基. 微量元素与微肥施用[M]. 北京:农业出版社, 1989.
- ZOU Bang-ji. Trace elements and micronutrient fertilizer application [M]. Beijing: Agriculture Press, 1989.
- [35] 李合生. 植物生理学[J]. 北京:高等教育出版社, 2002.
- LI He-sheng. Plant physiology[J]. Beijing: Higher Education Press, 2002.
- [36] 刘全吉, 孙学成, 胡承孝, 等. 砷对小麦生长和光合作用特性的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(2):854-859.
- LIU Quan-ji, SUN Xue-cheng, HU Cheng-xiao, et al. Growth and photosynthesis characteristics of wheat (*Triticum aestivum* L.) under arsenic stress condition[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(2):854-859.
- [37] Mediavilla S, Santiago H, Escudero A. Stomatal and mesophyll limitations to photosynthesis in one evergreen and one deciduous Mediterranean oak species[J]. *Photosynthetica*, 2002, 40(4):553-559.
- [38] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis [J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1982, 33(1):317-345.
- [39] 鲁 艳, 李新荣, 何明珠, 等. 重金属对盐生草光合生理生长特性的影响[J]. 西北植物学报, 2011, 31(2):370-376.
- LU Yan, LI Xin-rong, HE Ming-zhu, et al. Photosynthesis and physiological characteristics in halogeton glomeratus with heavy metal treatments[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2011, 31(2):370-376.
- [40] 周朝彬, 胡庭兴, 胥晓刚, 等. 铅胁迫对草木樨叶中叶绿素含量和几种光合特性的影响[J]. 四川农业大学学报, 2005, 23(4):432-435.
- ZHOU Chao-bin, HU Ting-xing, XU Xiao-gang, et al. Effect of lead stress on chlorophyll content and photo-synthetic characters in leaf of *Melilotus suaveana*[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2005, 23(4):432-435.
- [41] 王 新, 梁仁禄, 周启星. 土壤外源汞污染对大豆幼苗生长的影响研究[J]. 农业环境保护, 2001, 20(2):72-77.
- WANG Xin, LIANG Ren-lu, ZHOU Qi-xing. Effects of mercury on soybean seeding growth[J]. *Agro-environmental Protection*, 2001, 20(2):72-77.
- [42] 曲木子, 谢会成, 李际红. 窄冠黑青杨对重金属复合胁迫的生理响应[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(5):8-12.
- QU Mu-zi, XIE Hui-cheng, LI Ji-hong. Physiological and ecological response of narrow crown black-cathay poplar to stress of mixed heavy metals[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2013, 28(5):8-12.
- [43] 韩金玲, 杨 晴, 王文颇, 等. 播期对冬小麦茎蘖幼穗分化及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2011, 31(2):303-307.
- HAN Jin-ling, YANG Qing, WANG Wen-po, et al. Effects of sowing date on the caulis and tillers differentiation of young spike and yield in winter wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2011, 31(2):303-307.