

刘智琛,李启彪,黄刊,等.不同形态钼肥对小白菜产量及品质的影响[J].华中农业大学学报,2022,41(2):30-37.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2022.02.004

不同形态钼肥对小白菜产量及品质的影响

刘智琛,李启彪,黄刊,武松伟,胡承孝,谭启玲,孙学成

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

摘要 为探究不同形态钼肥对小白菜的产量、品质及矿质养分含量的综合影响,以小白菜“上海青”和“矮脚黄”品种为试验对象,采用随机区组试验设计分别进行田间试验与盆栽试验,共设置6个处理:不施肥(CK)、习惯施肥(NPK)、习惯施肥+钼酸钾(K_2MoO_4 ,记为NPK+KMo)、习惯施肥+钼酸铵($H_{32}Mo_7N_6O_{28}$,记为NPK+AMo)、习惯施肥+氧化钼(MoO_3 ,记为NPK+BMo)和习惯施肥+纳米三氧化钼(MoO_3 NPs,记为NPK+NMo),比较施用不同形态钼肥后小白菜的产量、品质及矿质养分含量的差异。结果显示,相比NPK处理,各施钼处理均可显著提高田间小白菜菜心和盆栽小白菜地上部的鲜质量,其中NPK+AMo处理的提升效果更佳,可提高32.3%(田间),NPK+NMo和NPK+AMo处理相比NPK处理分别提高30.8%和30.2%(盆栽);各施钼处理均可提高田间小白菜菜心和盆栽小白菜地上部的可溶性蛋白、维生素C和还原性糖含量,降低硝酸盐含量,显著提高田间小白菜菜心的Cu、Mo和Mg含量,与NPK处理相比,NPK+NMo处理盆栽小白菜地上部的Mg、Mo含量增幅显著,而NPK+AMo处理下Zn含量与NPK处理差异显著。结果表明,在习惯施肥的基础上增施不同形态钼肥均可使田间小白菜菜心、盆栽小白菜地上部的产量、营养品质及矿质养分含量提高,提升其食用价值,降低硝酸盐含量,提高食用安全性,综合来说,在习惯施肥基础上增施NMo效果最佳,AMo次之。

关键词 钼肥;小白菜;产量;营养品质;矿质养分;纳米三氧化钼;纳米级肥料

中图分类号 S143.7⁺2;S634.3 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2022)02-0030-08

小白菜(*Brassica campestris* L.),十字花科蔬菜作物,具有极高的营养价值,是老百姓餐桌上的常见蔬菜之一。近年来人们对小白菜产品的需求日益增长,小白菜的种植面积呈逐年增加的趋势。在产量提高的同时,小白菜的营养品质和食用安全性也越来越受人们关注。

钼作为作物必需微量元素之一,参与了植物中的生物固氮、硝态氮同化、植物激素合成及活性氧代谢等诸多生物过程,在提高作物产量和品质方面具有不可替代的作用。秦世玉等^[1]在钼高低积累品种的甘蓝型油菜大田试验中,研究发现施用钼肥提高了钼高效品种ZS11和钼低效品种L0917甘蓝型油菜的产量;聂兆君等^[2]以小白菜为试验对象,在盆栽试验中施钼肥可增产58%。在提高蔬菜产量的同时,施钼还能显著改善蔬菜品质,如提高小白菜维生素C、可溶性蛋白、游离氨基酸和可溶性糖含量,也有研究表明施钼可降低小白菜和芥菜中的硝酸盐含量^[3],

显著增加油菜籽粒的含油量,并显著降低硬脂酸含量,有效提高作物品质^[4]。钼不仅能提高作物的产量及品质,还能在增强作物抗寒性、抗倒伏性能及提高农艺性状等方面发挥重要作用^[5-7]。综上所述,合理施用钼肥可以改良作物的钼营养状况,促进作物生长发育,从而达到增产提质的效果。

目前已有研究证实纳米级肥料相较传统肥料更适合作为营养补充剂,肥效更佳^[8-9],但关于不同形态的钼化合物尤其是纳米态钼对作物影响的研究,大多都集中在其对植物产生的氧化毒性及负面影响^[10-11],而纳米三氧化钼与常规三氧化钼及离子态的钼酸铵、钼酸钾作为钼肥对蔬菜产量及营养品质强化效应差异的研究却鲜有报道。本研究在习惯施肥的基础上配施纳米三氧化钼、常规三氧化钼、钼酸钾和钼酸铵4种钼肥,以小白菜“上海青”和“矮脚黄”为试验对象,分别进行田间和盆栽试验,通过测定小白菜的产量、品质及矿质元素含量,探究不同形态钼

收稿日期:2021-12-08

基金项目:国家自然科学基金项目(42077095)

刘智琛,E-mail:liuzhichen1996@163.com

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

肥对小白菜综合影响的差异,以期纳米三氧化钼作为肥料在农业生产中的施用提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验所需“上海青”和“矮脚黄”小白菜种子购于武汉市华中农业大学附近农资市场;纳米三氧化钼(MoO_3 NPs)购自中澳纳米材料技术有限公司,纳米颗粒粒径范围60~80 nm,纯度为99.9%;钼酸钾、钼酸铵、三氧化钼、其他化学肥料及化学试剂均为实验室用分析纯。

田间试验位于华中农业大学校内柑橘生态园(30°28'N, 114°21'E),该区域为北亚热带季风性湿润气候,年平均气温为15.8~17.5℃,年降雨量约1269 mm。土壤类型为黄棕壤,试验所用土壤基础理化性质如下:pH 6.06,有机质21.36 g/kg,碱解氮42.64 mg/kg,速效磷19.20 mg/kg,速效钾53.26 mg/kg,有效钼0.15 mg/kg。

盆栽试验所用土壤为缺钼土,取自湖北省武汉市新洲区的黄棕壤,基础理化性质如下:pH 6.19,有机质15.2 g/kg,碱解氮48.92 mg/kg,速效磷5.42 mg/kg,速效钾59.47 mg/kg,有效钼0.09 mg/kg。

1.2 田间试验设计

田间试验小白菜品种为“上海青”,设计6组处理,分别为:不施肥(CK)、习惯施肥(NPK)、习惯施肥+钼酸钾(NPK+KMo)、习惯施肥+钼酸铵(NPK+AMo)、习惯施肥+三氧化钼(NPK+BMo)和习惯施肥+纳米三氧化钼(NPK+NMo)。每组处理4个重复。大量元素N、 P_2O_5 、 K_2O 用量分别为180、90和90 kg/hm²,Mo用量为0.75 kg/hm²,肥源分别为尿素、聚磷酸铵和氯化钾,基肥施用25%,随水施入,之后每隔7 d追肥1次,随水施入,每次追肥25%,共追肥3次。需要注意的是,常规条件下三氧化钼和纳米三氧化钼不溶于水,每次施用时需将预先配制的纳米/常规三氧化钼与去离子水混合的悬浊液充分振荡,迅速使用移液枪抽取。

每个小区大小为1 m×2 m,株距20 cm,行距20 cm。将肥料溶于水后均匀撒施在土壤上,翻土后撒播小白菜种子。种子发芽后,田间管理一致,10 d后开始间苗,留取长势一致的小白菜幼苗。

1.3 盆栽试验设计

盆栽试验采用内附聚乙烯塑料薄膜的聚乙烯塑料盆,试验小白菜品种为“矮脚黄”。1 kg土壤中N、

P_2O_5 、 K_2O 用量分别为0.2、0.2、0.15 g,Mo用量为0.3 mg。每盆土壤2 kg,试验处理与本文“1.2”中处理一致,每个处理设4个重复,肥源相同。将准备好的肥料用白色塑料瓶装置,并用800 mL去离子水将小瓶内肥料多次溶解、冲洗,直接浇灌在盆栽土壤表面,之后在土壤表面撒上20粒小白菜种子,再覆上一层薄薄的干土,生长期水分管理一致,第10天每盆留取长势一致的小白菜幼苗定植至6株。

1.4 土壤基本性质的测定

试验处理前采用5点取样法,取0~20 cm土层土样,自然风干、研磨、过筛、装袋,备用。pH值采用电位法测定,有机质采用重铬酸钾容量法测定,碱解氮采用碱解扩散法测定,速效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定,速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度法测定^[12]。

土壤有效钼含量测定:称取1 g土壤样品于聚乙烯塑料瓶中,加入10 mL草酸-草酸铵浸提剂(称取24.9 g草酸铵和12.6 g草酸溶于水,定容至1 L),瓶塞盖紧,在振荡器上恒温(25℃)震荡0.5 h(振荡器震荡180次/min),用6 mol/L盐酸处理过的中速滤纸过滤,过滤时弃去最初的部分滤液。收集剩余滤液于25 mL试管中,如滤液浑浊则使用0.45 μm滤头再次过滤,同时制备空白样品。待样品澄清后用移液枪吸取2.50 mL滤液至25 mL试管中并用水定容至刻度,最后使用ICP-MS对溶液钼含量进行测定。试管中,如样液浑浊,经0.45 μm微孔滤膜再过滤。

1.5 小白菜采样方法及产量的测定

1)盆栽小白菜。植物样品收获后,测定植物样品鲜质量。取一部分植物样品放入液氮中猝灭,-80℃保存,用于测定相关品质指标。另一部分将根和叶片用自来水、2%硝酸洗净后,用去离子水冲洗,擦干,再放入恒温烘箱,105℃杀青30 min后在55℃下烘至恒质量,测定相关指标。盆栽小白菜于2020年11月9日播种,2020年12月19日采样收获。

2)田间小白菜。用锋利的刀片取下菜心,留下上部幼嫩的茎叶、花蕾和2片嫩叶,放入保温盒的液氮中冷冻,带回实验室-80℃保存,测定相关指标。另取完整的小白菜,测定植物样品鲜质量,测定后用锋利的刀片取下菜心,同时将根、地上部及菜心用自来水、2%硝酸和去离子水洗净后,再放入恒温烘箱,105℃杀青30 min后在55℃下烘干至恒质量,测定相关指标。田间小白菜于2020年11月6日播种,2021年1月23日采样收获。

1.6 小白菜营养品质及矿质养分含量测定

取盆栽小白菜地上部及田间小白菜菜心测定各项品质指标。维生素C总量用2,4-二硝基苯肼比色法^[12]测定;还原型维生素C含量采用2,6-二氯酚酚滴定法^[13]测定;可溶性糖含量用蒽酮比色法^[13]测定;可溶性蛋白质含量用考马斯亮蓝G-250染色法^[13]测定;硝酸盐含量用水杨酸比色法^[12]测定;矿质养分含量采用硝化法上ICP-AES进行测定^[14]。

1.7 数据处理

试验中所测定数据用Excel 2010软件进行处理,SPSS 25.0软件进行统计分析,并对各处理组小白菜指标进行显著性检验($\alpha=0.05$),采用Origin 2018软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 小白菜产量

如表1所示,各施肥处理相比CK处理均显著提高了田间小白菜的鲜质量、干质量及根鲜质量;相比NPK处理,各施钼处理均可显著提高菜心的产量,但各处理间对提升田间小白菜菜心鲜质量的提升效果有所差异,其中以NPK+AMo处理的提升效果更佳,相比NPK处理提高了32.3%,且相比NPK+BMo处理显著提高了小白菜的菜心鲜质量。如表2所示,相比CK,施肥各处理组均显著提高了盆栽小白菜的地上部鲜、干质量及根质量。其中NPK+NMo和NPK+AMo处理相比NPK处理显著提高了鲜质量,分别提升30.8%和30.2%,同时NPK+NMo也显著提升了小白菜的地上部干质量。

表1 不同形态钼肥对田间小白菜单株质量及根质量的影响

处理 Treatments	地上部鲜质量 Shoot fresh matter	地上部干质量 Shoot dry matter	根干质量 Root dry matter	菜心鲜质量 Fresh matter of flowering cabbage	菜心干质量 Dry matter of flowering cabbage
CK	38.95±2.91b	3.35±0.07b	3.19±0.13b	6.40±0.49d	0.63±0.04b
NPK	174.16±9.10a	10.75±0.28a	6.86±0.78a	18.07±0.49c	2.22±0.07a
NPK+KMo	185.41±10.81a	12.13±1.57a	8.00±0.94a	22.65±0.34ab	2.38±0.05a
NPK+AMo	181.25±8.61a	12.58±2.06a	8.67±1.45a	23.91±0.78a	2.40±0.06a
NPK+NMo	195.62±28.83a	12.82±0.77a	10.32±0.66a	23.42±0.58ab	2.30±0.12a
NPK+BMo	180.50±10.93a	12.06±1.34a	9.15±0.90a	21.29±0.59b	2.28±0.15a

注:表中同列不同字母代表差异显著($P<0.05$)。下同。Note: In the table, different letters in the same column represent significant difference($P<0.05$). The same as below.

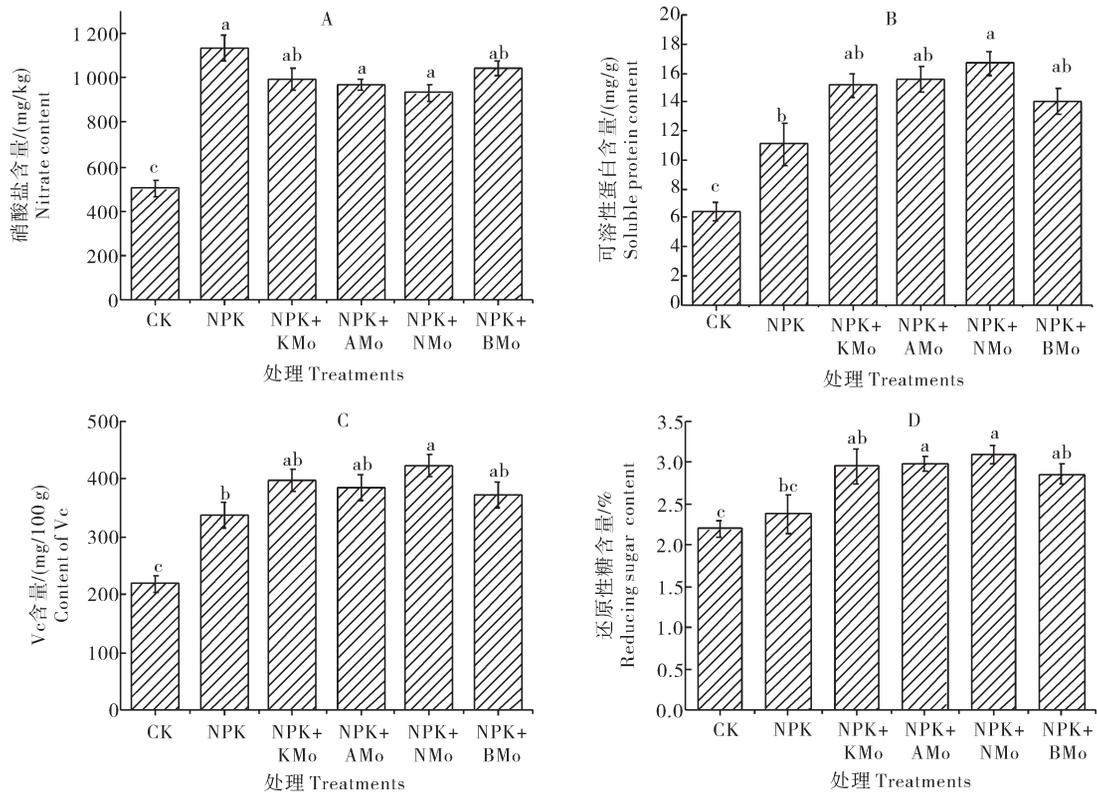
表2 不同形态钼肥对盆栽小白菜单株质量及根质量的影响

处理 Treatments	地上部鲜质量 Shoot fresh matter	地上部干质量 Shoot dry matter	根干质量 Root dry matter
CK	0.91±0.15c	0.09±0.01c	0.14±0.07b
NPK	12.42±0.20b	0.85±0.04b	1.42±0.31a
NPK+KMo	15.89±1.51ab	1.02±0.09ab	1.94±0.12a
NPK+AMo	16.19±0.93a	1.06±0.06ab	1.42±0.08a
NPK+NMo	16.26±0.26a	1.23±0.10a	2.17±0.13a
NPK+BMo	14.85±0.80ab	1.04±0.057ab	1.68±0.21a

2.2 小白菜品质及硝酸盐含量

如图1所示,各施钼处理均可提高小白菜菜心的可溶性蛋白、维生素C和还原性糖含量,并降低硝酸盐含量。如图1A所示,NPK+AMo和NPK+NMo处理相比NPK处理显著降低了小白菜菜心的硝酸盐含量,降低幅度分别为18.9%和14.9%;如图1B、C所示,相比CK处理,各施肥处理均可显著提高小白

菜菜心的可溶性蛋白和维生素C含量,相比NPK处理,NPK+NMo处理显著提高了可溶性蛋白和维生素C含量,分别提高了25.8%和50.2%,而其他3个施钼处理均未达显著性差异;如图1D所示,各施钼处理相比CK和NPK处理均显著提高了小白菜菜心的还原性糖含量,其中NPK+AMo和NPK+NMo相比NPK处理可显著提高还原性糖的含量,分别提



不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。下同。Different letters represent significant difference ($P < 0.05$). The same as below.

图1 不同形态钼肥对田间小白菜菜心硝酸盐含量(A)及品质(B,C,D)的影响

Fig 1 Effects of different forms of molybdenum fertilizer on the nitrate content (A) and quality (B, C, D) of flowering cabbage in the field

高了23.8%和30.2%。

如图2所示,各施钼处理均提高了小白菜地上部的可溶性蛋白、维生素C和还原性糖含量,降低了硝酸盐含量。NPK+AMo和NPK+NMo处理相比NPK处理显著降低了小白菜地上部的硝酸盐含量,分别降低了27.8%和29.4%(图2A);相比CK处理,各施肥处理均可显著提高小白菜地上部的可溶性蛋白、维生素C及还原性糖含量,相比NPK处理,NPK+NMo处理可显著提高可溶性蛋白、维生素C和还原性糖含量,分别提高了86.5%、64.0%和22.2%,而其他3个施钼处理均未达显著性差异(图2B、C、D)。

2.3 矿质养分

如表3所示,相较于CK,各施肥处理均可增加田间小白菜菜心Cu、Mg、Mo、Zn元素的含量。与NPK处理相比,各施钼处理均增加了小白菜菜心Cu、Mg、Mo和Zn含量,其中Cu、Mo含量增幅显著,相较于NPK处理,NPK+NMo处理下小白菜菜心Mg和Mo含量提升效果更好,达到显著水平,分别提高了

55.7%和79.2%。

如表4所示,相较于CK,各施肥处理均可增加盆栽小白菜地上部的Cu、Mg、Mo、Zn元素的含量,其中Mg含量增加显著。与NPK处理相比,NPK+NMo处理下,小白菜Mg、Mo含量增幅显著,分别为74.31%和96.88%,而NPK+AMo处理下Zn含量与NPK处理呈显著差异,提高了52.2%。以上结果表明在习惯施肥的基础上增施不同形态的钼肥,均可提高小白菜镁、钼和锌元素的含量。

3 讨论

近年来的研究发现纳米级肥料相比常规肥料的增产能力更强^[8,15-16]。本研究结果表明,在习惯施肥的基础上增施不同形态的钼肥,均提高了小白菜及其菜心的产量,产量提高能力从高到低依次为:NMo、AMo、KMo、BMo,证明了纳米态钼肥相比常规钼肥对作物的提产效果最佳。但本研究中田间及盆栽小白菜生物量差异较大,分析其原因如下:一是品种差异;二是生长周期不同,盆栽小白菜生

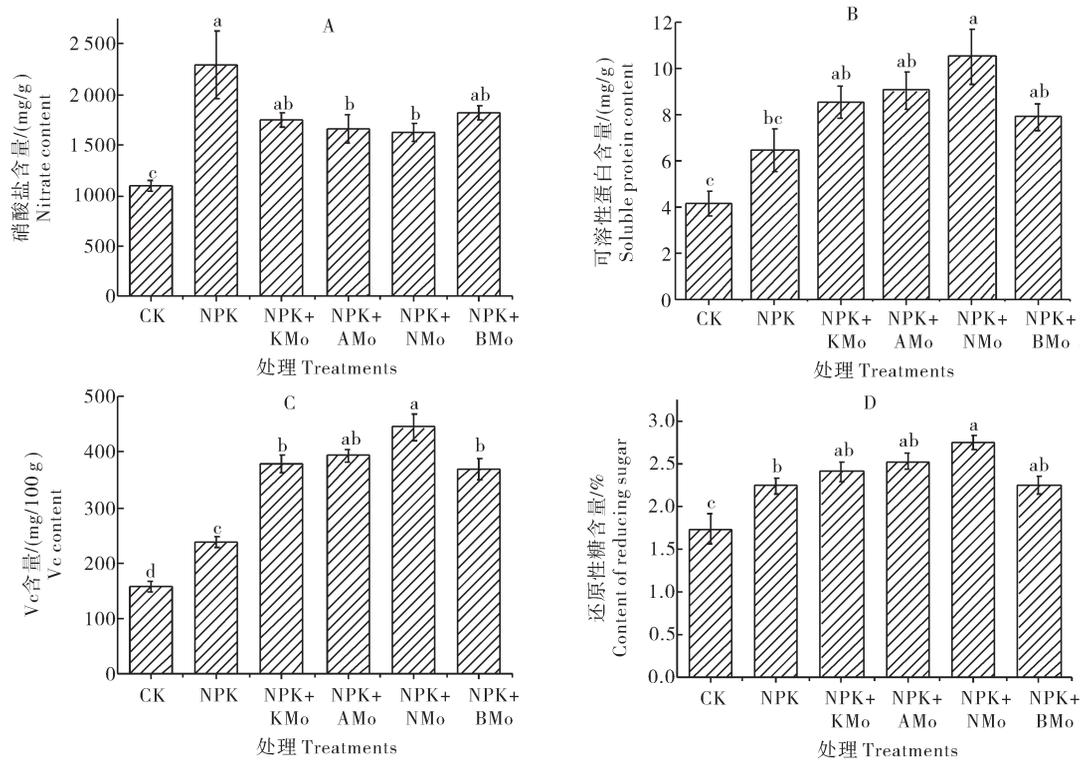


图2 不同形态钼肥对盆栽小白菜地上部硝酸盐含量(A)及品质(B,C,D)的影响

Fig.2 Effects of different forms of molybdenum fertilizer on shoot nitrate content (A) and quality (B,C,D) of potted Chinese cabbage

表3 不同形态钼肥对田间小白菜菜心矿质元素含量的影响

Table 3 Effect of different molybdenum fertilizer on metal elements content in flowering cabbage in the field

处理 Treatments	铜 Cu	镁 Mg	钼 Mo	锌 Zn
CK	1.20±0.12b	154.42±15.63c	0.48±0.16b	3.88±0.513a
NPK	1.24±0.13b	170.84±27.58bc	0.48±0.04b	5.44±0.79a
NPK+KMo	1.59±0.09a	259.54±19.57ab	0.72±0.042a	4.91±0.76a
NPK+AMo	1.61±0.08a	261.18±20.20ab	0.69±0.14a	5.04±0.45a
NPK+NMo	1.63±0.16a	266.08±25.57a	0.86±0.11a	5.69±1.12a
NPK+BMo	1.50±0.049a	261.74±7.69ab	0.65±0.042a	4.99±0.48a

表4 不同形态钼肥对盆栽小白菜地上部矿质元素含量的影响

Table 4 Effect of different molybdenum fertilizer on metal elements content in shoot of potted Chinese cabbage

处理 Treatments	铜 Cu	镁 Mg	钼 Mo	锌 Zn
CK	0.71±0.01a	129.25±5.20b	0.29±0.03b	1.41±0.10b
NPK	1.23±0.12a	293.44±34.49ab	0.36±0.03b	2.51±0.27ab
NPK+KMo	2.68±0.78a	358.17±21.96ab	0.84±0.05ab	3.15±0.13ab
NPK+AMo	2.30±0.56a	397.84±25.37ab	0.87±0.17ab	3.82±1.46a
NPK+NMo	3.27±1.11a	511.09±31.62a	1.03±0.07a	3.54±0.47ab
NPK+BMo	2.24±0.61a	366.27±32.50ab	0.53±0.03bc	3.13±0.45ab

长期为40 d,而田间小白菜生长期为77 d;三是盆栽小白菜始终在温室中生长,生长环境稳定,而在室外,气温较往年过高,导致提前抽苔,生物量增加。

还原性糖不仅是小白菜的品质指标之一,也是反映叶片光合能力的重要指标;还原性糖、可溶性蛋白和维生素C不仅是保护细胞、生物膜的重要物质,还是评价蔬菜品质的重要指标,同时蔬菜中硝酸盐含量过高还会影响人体健康,且人体摄入的绝大部分的硝酸盐都来自于蔬菜,故在蔬菜品质评价中需将硝酸盐含量作为一项重要的安全质量指标。多项研究表明,施钼可有效提高作物品质及提高食用安全性^[1,4,6,17-18],施钼提升蔬菜品质的机制实际上是钼参与植物体内的碳氮代谢、维生素C的氧化还原及再生过程^[19],促使植物体内蛋白质、碳水化合物和脂质形成和积累,促进碳向糖的转化^[17],但过量施钼会促进TCA循环和氨基酸代谢,使氨基酸、有机酸与过量的钼络合^[20]。本研究结果表明,施钼处理在显著增加小白菜还原性糖、可溶性蛋白及维生素C含量的同时,还显著降低了硝酸盐含量,其中施NMo的效果更佳,这可能是NMo具有纳米材料的特性,在土壤中的迁移性较小,同时更小颗粒的纳米Mo直接进入植物根部被吸收利用,土壤Mo的有效性提高,从而增加了小白菜Mo含量。因此,施用NMo作为钼肥提高小白菜品质指标与食用安全性效果更好。

本研究结果表明,在习惯施肥的基础上增施不同形态的钼肥,均可提高小白菜镁、钼和锌元素的含量,其原因可能是土壤有效镁和有效锌含量增加后,促进了小白菜对镁、锌营养的吸收,表明钼和锌、镁具有协同效应,这也与前人研究施钼可增加作物体内多种矿质元素含量^[21-23]的结果一致,而提高小白菜镁、钼和锌元素含量效果更佳的钼肥为NMo和AMo,多种矿质养分参与作物体内各种化合物的合成和生理代谢过程,以维持小白菜的生长发育。

由于本研究中田间和盆栽试验所用小白菜非同一品种,本试验未能分析施肥次数及不同生育期Mo肥对小白菜的影响,后续需要进一步研究。

参考文献References

- [1] 秦世玉,孙学成,胡承孝,等.钼肥对甘蓝型油菜薹期碳氮代谢的影响[J].华北农学报,2016,31(4):227-232.QIN S Y, SUN X C, HU C X, et al. Molybdenum effect on photosynthetic carbon and nitrogen metabolism of *Brassica napus* at bolting stage [J]. Journal of North China agriculture, 2016, 31(4): 227-232 (in Chinese with English abstract).
- [2] 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.NIE Z J, HU C X, SUN X C, et al. Effects of molybdenum on leaf color, nutritional quality and nitrate content of Chinese Cabbage [J]. Chinese vegetable, 2008 (8) : 7-10 (in Chinese with English abstract).
- [3] 李洪波,马绿巧,王廷芹,等.钼肥对苋菜生长及品质、产量的影响[J].广东农业科学,2012,39(4):50-52.LI H B, MA L Q, WANG T Q, et al. Effect of molybdenum on the growth, quality and yield of amaranth [J]. Guangdong agricultural sciences, 2012, 39(4): 50-52 (in Chinese with English abstract).
- [4] 刘红恩,胡承孝,聂兆君,等.钼磷配合施用对甘蓝型油菜产量和籽粒品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2012,18(3):678-688.LIU H E, HU C X, NIE Z J, et al. Effects of combined application of molybdenum and phosphorus on yield and grain quality of *Brassica napus* [J]. Journal of plant nutrition and fertilizer, 2012, 18(3): 678-688 (in Chinese with English abstract).
- [5] 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,2006.SUN X C. Study on physiological basis and molecular mechanism of cold resistance enhanced by molybdenum application in winter wheat [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2006 (in Chinese with English abstract).
- [6] 刘智琛,何灵芝,王鹏,等.钼氮配施对冬小麦倒伏指数及茎秆力学指标的影响[J].华中农业大学学报,2021,40(3):168-176.LIU Z C, HE L Z, WANG P, et al. Effects of combined application of molybdenum and nitrogen on lodging index and stalk mechanics indexes of winter wheat [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40 (3) : 168-176 (in Chinese with English abstract).
- [7] 赵艳红,陈怀珠,杨守臻,等.钼营养拌种处理对大豆主要农艺性状的影响[J].大豆科学,2010,29(5):894-896.ZHAO Y H, CHEN H Z, YANG S Z, et al. Effect of molybdenum seed coating on main agronomic characters of soybean [J]. Soybean science, 2010, 29(5): 894-896 (in Chinese with English abstract).
- [8] 孙宏达,钟民正,张腾,等.黄土高原潜在缺锌区施用纳米氧化锌(ZnO NPs)对冬小麦生长及籽粒品质的影响[J].农业环境科学学报,2019,38(9):2041-2048.SUN H D, ZHONG M Z, ZHANG T, et al. Effects of ZnO NPs application on winter wheat growth and grain quality in a potentially zinc-deficient ar-

- ea of the Loess Plateau, China[J]. Journal of agro-environment science, 2019, 38(9): 2041-2048 (in Chinese with English abstract).
- [9] 朱磊. 纳米硒在金荞麦中富集及其产量与活性物质的影响[D]. 吉首: 吉首大学, 2019. ZHU L. Enrichment of nano-selenium in *Fagopyrum dibotrys* and its effects on the yield and active substances[D]. Jishou: Jishou University, 2019 (in Chinese with English abstract).
- [10] AVILA-ARIAS H, NIES L F, GRAY M B, et al. Impacts of molybdenum-, nickel-, and lithium- oxide nanomaterials on soil activity and microbial community structure[J]. Science of the total environment, 2019, 652: 202-211.
- [11] SHCHERBAKOVA E N, SHCHERBAKOV A V, ANDRONOV E E, et al. Combined pre-seed treatment with microbial inoculants and Mo nanoparticles changes composition of root exudates and rhizosphere microbiome structure of chickpea (*Cicer arietinum* L.) plants[J]. Symbiosis, 2017, 73(1): 57-69.
- [12] 鲍士旦. 土壤农业化学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 22-100. BAO S D. Soil agrochemistry[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000: 22-100 (in Chinese).
- [13] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. LI H S. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000 (in Chinese).
- [14] 寿凯玲. 纳米氧化钼制备及其对大豆产量品质的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019. SHOU K L. Preparation of nano molybdenum oxide and its effect on yield and quality of soybean[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019 (in Chinese with English abstract).
- [15] 李止正, 安林昇. 钼和6-BA对缺钼番茄叶片中硝酸还原酶活性恢复的影响[J]. 植物生理学通讯, 1982, 18(6): 31-34, 40. LI Z Z, AN L S. Effects of molybdenum and 6-BA on the recovery of nitrate reductase activity in molybdenum deficient tomato leaves[J]. Plant physiology communications, 1982, 18(6): 31-34, 40 (in Chinese).
- [16] 罗伟君, 唐琳, 周佳丽, 等. 纳米锌肥对番茄果实锌含量与品质的强化[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(1): 184-188. LUO W J, TANG L, ZHOU J L, et al. Improvement of zinc concentration and quality of tomato fruit by nano zinc fertilizer [J] Jiangsu journal of agricultural sciences, 2016, 32(1): 184-188 (in Chinese with English abstract)
- [17] COSTA SAPUCAY M J LDA, VIEIRA R F, DE SOUZA CARNEIRO J E, et al. Is it possible to attain high-yielding common bean using molybdenum fertilizer instead of side-dressed nitrogen? [J]. Journal of plant nutrition, 2016, 39(11): 1644-1653.
- [18] 赵静, 白清云, 帕尼古丽, 等. 钼对降低蔬菜硝酸盐积累的效应研究[J]. 农业环境保护, 2001, 20(4): 238-239. ZHAO J, BAI Q Y, PA N, et al. Alleviation of nitrate accumulation in vegetables by application of molybdenum[J]. Agro-environmental protection, 2001, 20(4): 238-239 (in Chinese with English abstract).
- [19] KEVRESAN S, PETROVIC N, POPOVIC M, et al. Nitrogen and protein metabolism in young pea plants as affected by different concentrations of nickel, cadmium, lead, and molybdenum [J]. Journal of plant nutrition, 2001, 24(10): 1633-1644.
- [20] 李启彪, 李路, 谭启玲, 等. 冬小麦对过量钼胁迫的代谢响应与耐钼机制[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(5): 54-61. LI Q B, LI L, TAN Q L, et al. Metabolic response and molybdenum tolerance mechanism of winter wheat to excess molybdenum stress[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(5): 54-61 (in Chinese with English abstract).
- [21] 王建伟, 王朝辉, 毛晖, 等. 硒钼对黄土高原马铃薯和小白菜产量及营养元素与硒镉含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(11): 2114-2120. WANG J W, WANG Z H, MAO H, et al. Effect of Se, Zn and Mo on yield and contents of nutrient elements and selenium and cadmium of potato and cabbage on the loess plateau[J]. Journal of agro-environment science, 2012, 31(11): 2114-2120 (in Chinese with English abstract).
- [22] 李芳亭, 鲁强, 王世国, 等. 黄土丘陵区土壤钼锌含量及农作物对钼锌的反应[J]. 农业环境科学学报, 2002, 21(6): 559-561. LI F T, LU Q, WANG S G, et al. Concentration of molybdenum and zinc in soil of upland of loess and response of crops[J]. Journal of agro-environmental science, 2002, 21(6): 559-561 (in Chinese with English abstract).
- [23] 毛小涛. 连续施肥对旱作苜蓿产量品质及土壤养分的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017. MAO X T. Effects of continuous fertilization on yield and quality of alfalfa and soil mineral nutrients under non-irrigated conditions [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2017 (in Chinese with English abstract).

Effects of different forms of molybdenum fertilizer on yield and quality of Chinese cabbage

LIU Zhichen, LI Qibiao, HUANG Kan, WU Songwei, HU Chengxiao, TAN Qiling, SUN Xuecheng

Hubei Province Engineering Laboratory for New-Type Fertilizer/

Microelement Research Center, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract In order to explore the comprehensive effects of different forms of molybdenum (Mo) fertilizer on the yield, quality and mineral nutrient content of Chinese cabbage, the varieties of "Shanghaiqing" and "Aijiaohuang" of Chinese cabbage were selected as the experimental materials, the random block experimental design was used to carry out both in field experiment and pot experiment respectively. A total of 6 treatments were set up: no fertilization (CK), habitual fertilization (NPK), habitual fertilization+ potassium molybdate (NPK+ KMo), habitual fertilization+ ammonium molybdate (NPK+ AMo), habitual fertilization+ molybdenum oxide (NPK+ BMO) and habitual fertilization+ nano molybdenum oxide (NPK+ NMo). The different effects in yield, quality and mineral nutrient content of Chinese cabbage were compared and analyzed. Compared with NPK treatment, each Mo application treatment could significantly improve the fresh matter of field flowering cabbage and potted Chinese cabbage shoot. Among them, NPK+ AMo treatment had the best effect, which increased 32.3% (field cabbage), NPK+ NMo and NPK+ AMo treatment could increase 30.8% and 30.2% (potted cabbage) compared with NPK treatment, respectively; the contents of soluble protein, vitamin C and reducing sugar of Chinese cabbage were increased, while the content of nitrate was reduced under Mo application. Compared with NPK treatment, NPK+ AMo and NPK+ NMo treatments significantly reduced the nitrate content of Chinese cabbage by 18.9% and 14.9%, increased the reducing sugar content by 23.8% and 30.2%, respectively, NPK+ NMo treatment could significantly increase the contents of soluble protein and ascorbic acid by 25.8% and 50.2%, respectively; besides, NPK+ AMo and NPK+ NMo treatments significantly reduced the nitrate content in the shoot of potted Chinese cabbage by 27.8% and 29.4%, respectively. In addition, NPK+ NMo treatment significantly increased the contents of soluble protein, ascorbic acid and reducing sugar by 86.5%, 64.0% and 22.2%, respectively; meanwhile, each Mo application treatment could significantly increase the contents of Mo and Mg in Chinese cabbage. NPK+ NMo treatment had the greatest effect, increasing 79.2% and 55.7% respectively; the content of Mg and Mo in the shoot of potted Chinese cabbage in NPK+ NMo treatment increased 74.31% and 96.88% compared with NPK treatment, respectively, while the content of Zn in NPK+ AMo treatment was different from that in NPK treatment, increased by 52.2%. On the basis of habitual fertilization, increasing the application of different forms of Mo fertilizer could improve the yield, nutritional quality and mineral nutrient content of Chinese cabbage, improve the edible value, reduce the nitrate content and improve the edible safety. In general, the effect of increasing the application of NMo was the best, followed by AMo.

Keywords molybdenum fertilizer; Chinese cabbage; yield; nutritional quality; mineral nutrient; MoO₃ NPs; nanograde fertilizer

(责任编辑:赵琳琳)