

施用锌肥对甜瓜产量、品质及锌累积的影响

薛亮¹, 赵安宇², 王智琦¹, 杜少平³, 马忠明¹

(1. 甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所 兰州 730070; 2. 甘肃省农业科学院张掖节水农业试验站 甘肃张掖 734000; 3. 甘肃省农业科学院蔬菜研究所 兰州 730070)

摘要:为探明锌肥供应量对甜瓜产量、品质以及锌累积的影响,于2020年、2021年采用田间试验,研究了6个施锌水平下($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0、15、30、45、60、75 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)甜瓜生长及锌运转过程。结果表明,施锌量为30 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,单瓜质量和商品瓜产量达到最高,可溶性固形物和维生素C含量达到较高水平。甜瓜籽粒的锌含量(w ,后同)最高,叶片、果肉次之,茎秆中最低,其中茎在苗期时最低,为2.88 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,籽粒在成熟期最高,达到63.40 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。施锌量为30 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和45 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,成熟期籽粒的锌含量分别为60.90 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、63.40 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (2020年)和57.32 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、61.03 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (2021年),高于其他施锌水平。甜瓜单株锌累积量为8.27~12.95 mg,籽粒是锌累积的主要器官。施锌量为30 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 条件下,膨果至成熟阶段锌吸收强度最高达到0.37 $\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$ (2020年)、0.32 $\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$ (2021年),锌阶段吸收量达到7.30 mg(2020年)、6.27 mg(2021年),锌累积量达到12.78 mg(2020年)和12.10 mg(2021年),与施锌量为45 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理无显著差异,但高于其他处理。综合考虑产量、品质和锌吸收累积,在河西灌区甜瓜生产中土施锌肥为30 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 是适宜的施用方案。

关键词:甜瓜;绿洲灌区;锌吸收量;锌累积量

中图分类号:S652

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2024)12-066-08

Effects of zinc fertilizer application on yield, quality and zinc accumulation in melon

XUE Liang¹, ZHAO Anyu², WANG Zhiqi¹, DU Shaoping³, MA Zhongming¹

(1. Institute of Soil, Fertilizer and Water-saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Science, Lanzhou 730070, Gansu, China; 2. Zhangye Water-saving Agricultural Experimental Station, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Zhangye 734000, Gansu, China; 3. Institute of Vegetables, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: A field experiment was conducted to investigate the effect of different Zn rate on yield, quality and the principles of assimilation and accumulation of Zn element based on different fertilization. The experiment was conducted in Hexi Corridor from 2020 to 2021. A single factor randomized block design was used with Soil $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ rates of 0, 15, 30, 45, 60, and 75 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. By analyzing yield, quality and Zn concentrations in vegetative tissues of melon, the influences on Zn distribution, and the relative contributions of Zn remobilization and post-anthesis shoot Zn uptake to seeds Zn accumulation were evaluated. Optimal results regarding single fruit mass and commercial fruit yield were obtained with a zinc application rate of 30 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, whereas higher levels for soluble solids content and vitamin C were recorded. The content of zinc in melon seeds was the highest, followed by leaf and pulp, and the lowest in stems. The stems was the lowest at seedling stage (2.88 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), and the seeds was the highest at maturity stage (63.40 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). When the amount of zinc was 30 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, the zinc content of seeds at maturity were 60.90 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (2020) and 57.32 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (2021), and when the amount of zinc was 45 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, the zinc content of seeds were 63.40 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (2020) and 61.03 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (2021), respectively, which was higher than other zinc application levels. These findings indicate that melon plants exhibit their highest zinc absorption intensity during the maturity stage. The total accumulation of zinc of melon during the entire growth period ranged from 8.27 to 12.95 mg, with kernels being the primary site of zinc accumulation. Furthermore, it was significantly promoted zinc absorption and accumulation when the the amount of zinc applied 30 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$.

收稿日期:2024-05-21;修回日期:2024-09-04

基金项目:国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-25);甘肃省现代农业科技支撑体系区域创新中心重点科技项目(2020GAAS02);国家农业环境张掖观测实验站(ZX03S2801)

作者简介:薛亮,男,副研究员,主要从事节水农业研究。E-mail:xuel_3521@163.com

通信作者:马忠明,男,研究员,主要从事节水农业研究。E-mail:mazhming@163.com

The maximum zinc absorption intensity reached $0.37 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$ (2020) and $0.32 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$ (2021), and zinc absorption reached 7.30 mg (2020) and 6.27 mg (2021) at the expansion to maturity stage. Under the same condition, the zinc accumulation reached 12.78 mg (2020) and 12.10 mg (2021). These results were similar to the application rate of $45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, and higher than other treatments. Considering yield, quality, and zinc absorption and accumulation, the soil application of $30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ zinc fertilizer considered as a suitable application scheme.

Key words: Melon; Oasis irrigation area; Zn absorption; Zn accumulation

甜瓜是一种重要的葫芦科植物^[1],在我国消费量非常大,2022年我国甜瓜总产量达到1386.79万t^[2]。锌是植物体内多种酶的有效组分,参与同化物的合成和代谢,有效促进游离氨基酸以及可溶性蛋白合成^[3]。锌具有调控核糖核酸聚合酶、碱性磷酸酶活性,调节人体免疫、消化、代谢等功能,其含量高低直接影响人的智力发育^[4]。人体主要通过食用植物获得锌元素,研究锌在甜瓜体内的累积及分配过程,有助于明确外源锌肥与甜瓜生理生长以及品质形成的关系,为居民合理调配膳食结构提供依据^[5]。

研究发现,缺锌土壤中增施锌肥能够增加作物体内各器官锌含量,并提高作物品质^[6]。施用锌肥显著提高了小白菜中锌含量,同时通过粒子间的拮抗作用降低了小白菜和生菜中的镉含量^[7-8]。有关水稻的研究表明,提高锌肥施用量能够持续增加籽粒中的粗蛋白含量和锌浓度^[9]。合理施用锌肥可以提高日光温室西芹中的维生素C含量和番茄中的番茄红素、总黄酮以及影响风味的芳香物质含量^[10-11]。姜雯^[12]研究了锌在早稻、小麦不同生育期、不同器官间分配和积累的动态变化规律,并建立了锌分配与积累的相关模型。韩金玲等^[13]研究了不同锌水平下小麦生长的状况,发现锌过量和不足都会对干物质积累产生不利影响,并确定了施用锌肥的适宜量。

随着甜瓜产业的不断发展,市场对甜瓜品质的要求越来越高,要保持甜瓜高产优质的水平,从平衡施肥的角度出发,需要考虑包括锌肥在内的微量元素的作用,但对锌肥在甜瓜体内运转和分配的研究尚未见报道。因此,笔者通过大田试验分析甜瓜锌含量和锌肥有效性对不同施锌水平的响应,探索在我国北方缺锌地区提高甜瓜果实锌含量的方法,为提高甜瓜品质提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验于2020—2021年在甘肃省民勤县进行,试验区位于石羊河流域东端,年均降水量110mm,年可能蒸发量1265mm,年均气温7.4℃,年日照时数2832h,年有效积温($\geq 10^\circ\text{C}$)3194℃。试验地为

砂壤土,有机质含量(w ,下同)6.73 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮含量0.51 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷含量27.61 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾含量136.00 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效锌(DTPA-Zn)含量0.71 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH为8.34,全盐含量为0.07%。

1.2 材料与设 计

供试材料为杨凌秦瑞农业开发有限公司生产的厚皮甜瓜银帝3号(中熟品种),试验锌肥为硫酸锌($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, Zn含量23%),氮肥为尿素(N含量46%),磷肥为过磷酸钙(P_2O_5 含量18%),钾肥为硫酸钾(K_2O 含量50%)。试验设6个Zn水平($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$):施 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0 (Zn_0)、15 (Zn_{15})、30 (Zn_{30})、45 (Zn_{45})、60 (Zn_{60})、75 (Zn_{75}),采用随机区组设计,3次重复,18个小区,小区面积24 m^2 (6 $\text{m} \times 4 \text{ m}$)。甜瓜种植采用垄膜沟灌的模式,移栽前开“V”形沟,沟深30cm,上部宽70cm,垄宽130cm。甜瓜移植在沟两侧,种植带距沟中心45cm,行距2m,株距0.4m。磷肥(P_2O_5 135 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)和钾肥(K_2O 75 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)做基肥于移栽前一次性施入,氮肥分4次施入,基肥、苗肥、蔓肥、果肥比例为5:1:2:2。锌肥与适量沙土混匀,与基肥条施在种植带,施肥深度15cm。追肥用穴施法,在灌水沟侧边距种植点10cm处挖深10cm的小穴,施入后灌水。伸蔓期、开花坐果期分别灌水1次,定果后灌水5次至成熟,每次灌水量为灌水定额的1/8。甜瓜育苗25d后移栽,种植密度20010株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 。2020年5月1日移栽,8月13日收获;2021年5月7日移栽,8月16日收获。

1.3 样品采集与测定方法

1.3.1 土壤养分状况测定 甜瓜移栽前采用点状取样法采集小区0~20cm土壤样品测定基础养分。采用外加热法测定土壤有机质含量,采用半微量凯氏法测定土壤全氮含量,采用0.15 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaHCO_3 浸提—钼蓝比色法测定速效磷含量,采用 NH_4OAc 浸提—火焰光度法测定速效钾含量,采用环刀法测定土壤容重,采用酸度计测定土壤pH,采用DTPA溶液提取后用AA320 CRT型原子吸收分光光度计测定土壤DTPA-Zn含量^[14]。

1.3.2 植株样品采集及指标测定 在甜瓜苗期、伸

蔓期、开花期、膨果期和成熟期采集地上部植株,每小区随机选择5株长势均匀的植株,分为茎、叶(包括叶柄)、果肉(坐果后采集)和籽粒4部分,105℃杀青30min后,烘干至恒质量,在干燥箱内冷却20min后使用万分之一天平称质量,测定地上部干物质质量,之后粉碎并测定植株Zn含量。收获后每小区随机取11个果实进行产量和品质测定。

植株样品中Zn含量的测定:称取0.5g左右粉碎样品于550℃的马弗炉中灰化6h,用5mL体积比为1:1的HNO₃溶解灰分,再用原子吸收分光光度计测定^[4]。用手持式折光仪(PLA-1)测定果实可溶性固形物含量,采用2,6-二氯酚钠比色法测定果实维生素C含量,采用滴定法测定(换算系数0.067)果酸含量。

1.3.3 计算方法 植株锌累积量的计算公式如下:

锌累积量=植株干物质质量×植株锌含量×1000;

锌阶段吸收量=该阶段各器官锌累积量的总和;

锌吸收强度=锌累积量/该阶段生育期持续时间。

1.4 数据处理与分析方法

数据采用WPS Office 12进行统计,采用SAS 9.0对数据进行ANOVA方差分析,采用DUNCAN新复极差法进行差异性分析。

2 结果与分析

2.1 甜瓜的产量和品质

由表1可知,与不施锌肥相比,一定水平的施

锌处理提高了甜瓜单瓜质量和商品瓜产量,Zn₃₀处理单瓜质量和商品瓜产量均最高,单瓜质量达到2.11kg(2020年)、2.14kg(2021年),商品瓜产量达2459.20kg·667m²(2020年)、2483.60kg·667m²(2021年)。Zn₃₀处理的单瓜质量较Zn₀、Zn₁₅、Zn₄₅、Zn₆₀和Zn₇₅相比分别显著提高7.11%、6.57%、9.33%、7.11%、10.47%(2020年)和13.23%、6.47%、0.94%、15.68%、27.38%(2021年);Zn₃₀处理的商品瓜产量较Zn₀、Zn₁₅、Zn₄₅、Zn₆₀和Zn₇₅相比分别提高9.92%、9.75%、3.52%、12.53%、18.86%(2020年)和8.99%、5.87%、2.12%、16.07%、31.93%(2021年)。施锌量由0递增至30kg·hm²时甜瓜产量随之显著提升并达到最高值,超过30kg·hm²后出现降低趋势,达到60、75kg·hm²时产量显著降低,甚至低于不施锌处理。

与不施锌肥相比,一定水平施锌处理提高了甜瓜可溶性固性物、维生素C含量,但对果酸含量影响较小。施锌量为45kg·hm²(Zn₄₅)时,可溶性固性物和维生素C含量均最高,可溶性固性物含量达到11.19%(2020年)和12.23%(2021年),维生素C含量达到3.87mg·100g⁻¹(2020年)和3.77mg·100g⁻¹(2021年)。相对于Zn₀,Zn₄₅处理的可溶性固性物含量提高了0.15(2020年)和0.47(2021年)个百分点,维生素C含量提高了27.30%(2020年)和9.91%(2021年)。随着施锌量继续提高,甜瓜品质显著下降,至施锌量为75kg·hm²时,可溶性固性物含量较Zn₄₅处理降低了2.98(2020年)和4.21(2021年)个百分点,维生素C含量降低了32.82%(2020

表1 不同供锌水平对甜瓜产量和品质的影响

Table 1 Effects of different zinc concentration on yield and quality of melon

年份 Year	处理 Treatment	单瓜质量 Average fruit mass/kg	商品瓜产量 Yield/(kg·667m ²)	w(可溶性固形物) SSC/%	w(维生素C) Vitamin C content/ (mg·100g ⁻¹)	w(果酸) Tartaric acid content (mg·100g ⁻¹)
2020	Zn ₀	1.97±0.06 b	2 237.27±43.60 b	11.04±0.48 ab	3.04±0.28 b	0.78±0.09 a
	Zn ₁₅	1.98±0.15 b	2 240.67±66.53 b	11.00±0.31 ab	3.11±0.35 b	0.88±0.12 a
	Zn ₃₀	2.11±0.15 a	2 459.20±96.67 a	11.11±1.33 ab	3.77±0.51 a	0.78±0.02 a
	Zn ₄₅	1.93±0.24 b	2 375.53±54.67 a	11.19±0.28 a	3.87±0.83 a	0.83±0.17 a
	Zn ₆₀	1.97±0.19 b	2 185.40±40.80 b	10.15±0.82 b	2.84±0.55 c	0.78±0.13 a
	Zn ₇₅	1.91±0.07 b	2 069.07±58.73 c	8.21±0.72 c	2.60±0.06 d	0.80±0.07 a
2021	Zn ₀	1.89±0.12 b	2 278.67±116.20 b	11.76±0.62 ab	3.43±0.15 ab	0.87±0.13 a
	Zn ₁₅	2.01±0.04 ab	2 345.80±46.47 ab	11.70±0.70 ab	3.48±0.29 ab	0.79±0.10 ab
	Zn ₃₀	2.14±0.04 a	2 483.60±71.80 a	12.19±0.95 a	3.68±0.30 a	0.82±0.07 ab
	Zn ₄₅	2.12±0.16 a	2 432.13±97.00 ab	12.23±0.73 a	3.77±0.17 a	0.77±0.12 ab
	Zn ₆₀	1.85±0.13 bc	2 139.73±94.60 c	10.08±0.98 b	2.65±0.42 c	0.65±0.11 b
	Zn ₇₅	1.68±0.13 c	1 882.53±55.67 d	8.02±0.33 c	2.95±0.55 b	0.71±0.10 ab

注:同列数字后不同小写字母表示在0.05水平差异显著。下同。

Note: Different small letters in the same column are significant among different treatments at 0.05 level. The same below.

年)和 21.75%(2021 年)。整体上,在本试验条件下,施锌量由 0 增至 $30.45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,产量和品质指标提高或显著提高,施锌量继续增加至 $75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,产量和品质指标大幅下降。

2.2 地上部各器官中锌含量

由表 2 可知,甜瓜地上部各器官中锌含量在不同阶段有所不同,整个生育期锌含量在 $2.88 \sim 63.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,成熟期籽粒中的锌含量最高,苗期茎、叶中锌含量较低。不同时期比较发现,苗期至伸蔓期茎、叶中的锌含量急剧上升,增长幅度分别在 $660.50\% \sim 942.51\%$ 和 $721.78\% \sim 1006.11\%$,伸蔓期叶中的锌含量略高于茎。开花期后茎、叶中的锌含量持续降低,至成熟期较伸蔓期分别降低了 $57.67\% \sim 68.11\%$ 和 $44.39\% \sim 57.15\%$ 。在膨果期,籽粒中的锌含量最高,茎中锌含量最低。在成熟期,果肉中的锌含量较膨果期降低了 $15.73\% \sim 34.05\%$,而籽粒中的锌含量升高了 $78.18\% \sim 112.20\%$,锌含量表现为籽粒中最高,茎中最低。

甜瓜各器官不同时期的锌含量受锌肥施用量影响较大,相对于 Zn_0 ,施锌后甜瓜茎、叶、果肉和籽粒分别提升了 $-11.75\% \sim 53.82\%$ 、 $-4.38\% \sim 37.30\%$ 、 $12.50\% \sim 50.15\%$ 和 $4.15\% \sim 30.88\%$,果肉和籽粒中的锌含量有明显的提高。籽粒中锌含量在 Zn_{30} 、 Zn_{45} 处理中最高,继续增施锌肥到较高水平(Zn_{60} 、 Zn_{75}),锌含量出现降低趋势。

2.3 不同生育期甜瓜各器官中锌的累积量

由表 3 可知,在本试验条件下,甜瓜成熟期全株锌累积量为 $8.43 \sim 12.95 \text{ mg} \cdot \text{株}^{-1}$ (2020 年)和 $8.27 \sim 12.10 \text{ mg} \cdot \text{株}^{-1}$ (2021 年);锌累积量最高的是籽粒,其次为叶片、果肉和茎,2 a(年)平均累积量分别为 8.69 、 1.30 、 0.61 和 $0.24 \text{ mg} \cdot \text{株}^{-1}$,分别占植株总累积量的 80.12% 、 11.98% 、 5.67% 和 2.23% ,这一趋势与各器官锌含量的变化规律一致。不同器官间的比较发现,茎、叶在苗期至伸蔓期处于锌元素急速累积过程,伸蔓期茎中锌累积量是苗期的 $20.00 \sim 30.00$ 倍(2020 年、2021 年),叶中是 $9.23 \sim 15.56$ 倍(2020 年)和 $10.83 \sim 15.00$ 倍(2021 年),茎中锌累积量增加幅度更大;茎中锌累积量占全株累积量的比例从苗期的 $4.70\% \sim 5.83\%$ (2020 年)和 $4.33\% \sim 6.37\%$ (2021 年)增加到伸蔓期的 $7.91\% \sim 10.60\%$ (2020 年)和 $12.03\% \sim 16.95\%$ (2021 年)。进入成熟期,茎中的锌累积量开始降低,成熟期较膨果期平均降低了 15.91% (2020 年)和 16.36% (2021 年),而叶、果肉和籽粒中的锌累积量有所增加,尤其是籽

粒,成熟期较膨果期平均提高了 195.58% (2020 年)和 155.45% (2021 年),达到 $6.50 \sim 10.59 \text{ mg} \cdot \text{株}^{-1}$,占全株累积量的 $78.15\% \sim 82.86\%$ 。

锌肥施用量对锌元素在甜瓜体内的累积有一定影响,在成熟期,全株锌累积量在处理 Zn_{15} 、 Zn_{30} 、 Zn_{45} 、 Zn_{60} 中显著高于 Zn_0 ,处理 Zn_{60} 、 Zn_{75} 较 Zn_{45} 有明显降低趋势,2021 年 Zn_{75} 甚至低于 Zn_0 。苗期至伸蔓期,茎、叶中的锌累积量受施锌量的增加变化幅度较小,但在叶中处理 Zn_{15} 、 Zn_{30} 、 Zn_{45} 和 Zn_{60} 锌累积量仍明显高于 Zn_0 ;施锌量达到 $75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 水平后(Zn_{75}),与处理 Zn_{45} 相比,锌累积量有降低的趋势。在成熟期锌累积量受施锌影响变化更为明显,茎、叶中锌累积量在 Zn_{45} 达到最高,处理 Zn_{60} 、 Zn_{75} 中锌累积量有所下降;果肉中 Zn_{60} 的锌累积量最高,但继续提高施锌水平累积量明显下降;不同于其他器官;籽粒中的锌累积量在施锌量为 $30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时(Zn_{30})已明显高于其他处理;全株锌累积量在膨果期受施锌量影响较大,在处理 Zn_{30} 、 Zn_{45} 中达到最高累积量,显著高于处理 Zn_{60} 、 Zn_{75} 。

2.4 不同生育阶段锌的吸收量和吸收强度

由表 4 可知,甜瓜中锌的阶段吸收量随着生育进程逐渐增大,移栽后到伸蔓期阶段吸收量在 $0.12 \sim 0.16 \text{ mg}$,伸蔓期至开花期在 $0.42 \sim 0.51 \text{ mg}$,开花结果后吸收量急剧上升,开花期至膨果期在 $3.46 \sim 5.19 \text{ mg}$,膨果期到成熟期是吸收高峰,锌吸收量在 $4.10 \sim 7.30 \text{ mg}$,远高于其他阶段。锌肥施用量对锌阶段吸收量的影响主要体现在生殖生长阶段,处理 Zn_{15} 、 Zn_{30} 、 Zn_{45} 和 Zn_{60} 显著高于 Zn_0 ,在施锌量为 $30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 或 $45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 得到最大值,在施锌量达到 $60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 后有降低趋势,施锌量为 $75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时持续降低且与 Zn_0 处理无显著差异。

锌的吸收强度在生育后期较高,达到 $0.15 \sim 0.37 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$ (2020 年)和 $0.16 \sim 0.32 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$ (2021 年),高于生育前期 $0.01 \sim 0.06 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$ (2020 年、2021 年)的变化范围。不同施锌量对锌吸收强度的影响在生殖生长阶段较为明显,开花至膨果期最高锌吸收强度为 $0.21 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$ (2020 年, Zn_{45}) 和 $0.24 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$ (2021 年, Zn_{30}),较不施锌处理高 40.00% (2020 年)、 41.18% (2021 年),处理 Zn_{60} 和 Zn_{75} 的吸收强度降低,甚至低于 Zn_0 ;膨果期至成熟期处理 Zn_{30} 的锌吸收强度最高,达到 $0.37 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$ (2020 年)和 $0.32 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$ (2021 年),与 Zn_{15} 、 Zn_{45} 、 Zn_{60} 差异不显著,但显著高于 Zn_0 、 Zn_{75} 。

表2 不同生育时期甜瓜地上部不同器官锌含量

器官 Organ	处理 Treatment	Table 2 Zn concentration in dry matter of different organs of melon in different growth stage (mg·kg ⁻¹)														
		苗期 Seedling stage			伸蔓期 Extension stage			开花期 Flowering stage			膨果期 Expansion stage			成熟期 Maturing stage		
		2020	2021	2020	2021	2020	2021	2020	2021	2020	2021	2020	2021			
茎 Stem	Zn ₀	3.23±0.24 b	2.88±0.23 d	27.47±2.50 b	26.84±3.34 b	20.40±0.22 bc	17.83±2.39 ab	15.45±1.18 a	12.75±1.29 b	10.50±1.31 b	9.76±1.09 b					
	Zn ₁₅	4.15±0.19 a	3.64±0.30 c	32.00±2.25 ab	27.88±2.77 ab	26.00±2.94 a	20.08±0.49 ab	19.15±2.80 a	15.43±2.74 ab	12.30±1.11 ab	8.89±1.55 c					
	Zn ₃₀	3.34±0.16 b	3.79±0.18 b	34.82±1.70 a	31.44±1.69 ab	22.90±1.88 b	21.46±3.29 a	17.55±3.00 a	15.98±0.91 a	12.20±1.32 ab	11.49±0.21 ab					
	Zn ₄₅	4.15±0.06 a	4.12±0.24 ab	35.09±0.89 a	32.75±3.57 ab	18.00±0.55 c	19.03±0.92 ab	15.60±1.09 a	14.44±1.46 ab	13.20±0.82 a	12.07±1.22 a					
	Zn ₆₀	4.23±0.29 a	4.43±0.22 a	33.87±2.70 a	33.69±2.30 a	21.60±0.53 bc	18.75±1.62 ab	16.45±0.41 a	15.25±0.88 ab	11.30±1.50 ab	11.66±1.05 ab					
	Zn ₇₅	3.13±0.19 b	3.58±0.21 c	27.65±4.78 b	32.26±4.56 ab	19.80±1.01 c	17.32±1.71 b	15.75±3.06 a	14.76±1.59 ab	11.70±1.64 ab	11.47±1.07 ab					
叶 Leaf	Zn ₀	3.01±0.05 c	3.11±0.10 c	31.04±1.06 b	34.40±2.14 a	20.90±2.27 a	20.32±0.25 a	17.95±0.67 b	15.76±0.49 b	15.00±1.56 c	14.75±2.11 b					
	Zn ₁₅	3.59±0.05 ab	3.60±0.12 b	35.06±3.91 a	37.85±2.54 a	25.01±3.03 a	22.06±0.83 a	22.25±0.77 a	19.08±1.07 ab	19.50±1.91 a	18.53±2.14 a					
	Zn ₃₀	3.68±0.18 ab	3.43±0.24 bc	36.63±3.89 a	36.23±5.04 a	22.14±3.35 a	20.01±2.21 a	19.80±1.62 ab	21.00±2.06 a	17.50±1.28 ab	17.53±1.15 ab					
	Zn ₄₅	3.77±0.15 a	4.27±0.23 a	35.66±3.98 a	35.09±0.13 a	23.92±2.54 a	20.68±0.94 a	21.53±0.55 a	21.54±0.67 a	19.15±1.67 ab	18.64±1.48 a					
	Zn ₆₀	3.71±0.22 ab	4.06±0.43 ab	34.88±4.27 a	36.22±5.14 a	23.22±2.78 a	19.43±3.09 a	19.80±1.02 ab	18.09±3.31 ab	16.40±0.16 b	18.43±1.70 a					
	Zn ₇₅	3.40±0.28 b	3.77±0.21 b	36.23±4.61 a	34.08±1.80 a	26.04±1.26 a	19.98±2.28 a	21.15±2.43 a	19.81±2.46 a	16.30±2.09 b	15.75±0.89 ab					
果肉 Fruit	Zn ₀							17.00±2.27 c	16.49±0.17 c	13.60±1.24 b	12.83±1.09 b					
	Zn ₁₅							20.13±1.02 ab	18.56±0.84 b	16.10±1.14 ab	15.64±0.51 ab					
	Zn ₃₀							19.13±1.17 b	19.54±1.51 b	15.30±1.77 ab	15.36±1.24 ab					
	Zn ₄₅							19.13±1.96 b	19.86±2.16 b	15.30±0.81 ab	16.07±2.12 ab					
	Zn ₆₀							22.88±2.47 a	21.76±2.14 ab	18.30±1.56 a	17.43±3.05 a					
	Zn ₇₅							22.25±1.66 ab	24.76±3.88 a	17.80±2.50 a	16.33±0.94 a					
籽粒 Seed	Zn ₀							26.77±1.65 b	24.58±3.38 b	50.90±4.70 b	49.81±1.42 c					
	Zn ₁₅							28.54±1.78 ab	29.36±2.34 ab	59.90±6.61 a	54.88±3.47 b					
	Zn ₃₀							30.25±1.90 ab	32.17±1.59 a	60.90±2.10 a	57.32±1.48 ab					
	Zn ₄₅							31.57±3.94 a	28.76±2.35 ab	63.40±2.84 a	61.03±3.50 a					
	Zn ₆₀							30.01±1.38 ab	29.03±3.87 ab	57.60±1.87 ab	56.97±1.81 ab					
	Zn ₇₅							27.88±2.40 ab	27.71±1.80 ab	57.80±1.67 ab	54.05±2.78 b					

表3 不同生育时期各器官中单株锌的累积量

Table 3 Accumulation amount of zinc in different organs of melon at various growing stages in single melon

器官 Organ	处理 Treatment	苗期 Seedling stage		伸蔓期 Extension stage		开花期 Flowering stage		膨果期 Expansion stage		成熟期 Maturing stage		mg
		2020	2021	2020	2021	2020	2021	2020	2021	2020	2021	
茎 Stem	Zn ₀	0.001±0.000 1 a	0.001±0.000 1 a	0.02±0.002 b	0.02±0.002 b	0.13±0.01 cd	0.14±0.02 b	0.26±0.02 c	0.24±0.02 bc	0.21±0.03 c	0.22±0.02 bc	
	Zn ₁₅	0.001±0.000 1 a	0.001±0.000 1 a	0.03±0.002 a	0.02±0.002 b	0.17±0.01 a	0.16±0.01 ab	0.35±0.05 a	0.30±0.05 ab	0.28±0.03 ab	0.20±0.03 c	
	Zn ₃₀	0.001±0.000 1 a	0.001±0.000 1 a	0.03±0.002 a	0.02±0.001 b	0.15±0.01 b	0.18±0.03 a	0.34±0.06 ab	0.33±0.02 a	0.24±0.03 bc	0.25±0.01 b	
	Zn ₄₅	0.001±0.000 1 a	0.001±0.000 1 a	0.03±0.001 a	0.03±0.003 a	0.12±0.01 d	0.16±0.01 ab	0.28±0.02 abc	0.28±0.03 abc	0.32±0.02 a	0.30±0.03 a	
	Zn ₆₀	0.001±0.000 1 a	0.001±0.000 1 a	0.03±0.002 a	0.02±0.002 b	0.14±0.01 bc	0.15±0.01 ab	0.27±0.01 bc	0.28±0.02 abc	0.22±0.03 c	0.22±0.02 bc	
	Zn ₇₅	0.001±0.000 1 a	0.001±0.000 1 a	0.02±0.004 b	0.03±0.004 a	0.14±0.01 bc	0.14±0.01 b	0.26±0.05 c	0.22±0.02 c	0.21±0.03 c	0.19±0.02 c	
叶 Leaf	Zn ₀	0.010±0.000 9 b	0.008±0.001 2 c	0.10±0.004 b	0.12±0.008 a	0.40±0.04 a	0.45±0.01 a	0.92±0.03 c	0.87±0.03 c	1.07±0.11 c	1.11±0.16 b	
	Zn ₁₅	0.013±0.001 0 a	0.011±0.001 4 ab	0.12±0.013 ab	0.14±0.009 a	0.48±0.06 a	0.50±0.02 a	1.12±0.04 ab	1.09±0.06 ab	1.39±0.14 ab	1.45±0.17 a	
	Zn ₃₀	0.010±0.000 9 b	0.010±0.000 8 b	0.13±0.014 ab	0.13±0.019 a	0.44±0.07 a	0.47±0.05 a	1.05±0.09 bc	1.21±0.12 a	1.28±0.09 bc	1.41±0.09 a	
	Zn ₄₅	0.013±0.001 2 a	0.012±0.000 9 a	0.14±0.015 a	0.13±0.001 a	0.47±0.05 a	0.48±0.02 a	1.25±0.03 a	1.18±0.04 a	1.54±0.13 a	1.51±0.12 a	
	Zn ₆₀	0.013±0.001 0 a	0.010±0.000 8 b	0.13±0.015 ab	0.14±0.020 a	0.45±0.05 a	0.44±0.07 a	1.00±0.05 bc	0.97±0.18 bc	1.26±0.01 bc	1.38±0.13 a	
	Zn ₇₅	0.009±0.001 0 b	0.011±0.000 3 ab	0.14±0.017 a	0.12±0.007 a	0.50±0.02 a	0.46±0.05 a	1.12±0.13 ab	1.07±0.13 ab	1.11±0.14 c	1.09±0.06 b	
果肉 Fruit	Zn ₀							0.40±0.09 a	0.45±0.01 b	0.52±0.12 b	0.50±0.04 b	
	Zn ₁₅							0.55±0.14 a	0.52±0.01 ab	0.62±0.05 ab	0.63±0.11 ab	
	Zn ₃₀							0.59±0.13 a	0.57±0.07 ab	0.67±0.14 ab	0.66±0.05 a	
	Zn ₄₅							0.58±0.07 a	0.63±0.02 a	0.63±0.12 ab	0.62±0.10 ab	
	Zn ₆₀							0.59±0.04 a	0.62±0.14 a	0.76±0.09 a	0.70±0.11 a	
	Zn ₇₅							0.52±0.09 a	0.50±0.08 ab	0.59±0.10 ab	0.49±0.06 b	
籽粒 Seed	Zn ₀							2.73±0.14 b	2.71±0.11 c	6.63±0.46 b	6.54±0.47 c	
	Zn ₁₅							2.95±0.07 b	3.31±0.13 b	9.32±0.25 a	8.86±0.54 b	
	Zn ₃₀							3.51±0.09 a	3.73±0.12 a	10.59±1.20 a	9.78±0.43 a	
	Zn ₄₅							3.63±0.20 a	3.34±0.08 b	10.47±0.81 a	9.37±0.54 ab	
	Zn ₆₀							2.92±0.33 b	3.29±0.15 b	9.54±0.57 a	9.12±0.07 ab	
	Zn ₇₅							2.59±0.27 b	2.26±0.16 d	7.63±0.33 b	6.50±0.48 c	
全株 Whole plant	Zn ₀	0.010±0.001 b	0.009±0.001 c	0.13±0.003 b	0.14±0.006 a	0.54±0.05 a	0.59±0.02 a	4.31±0.08 d	4.27±0.10 d	8.43±0.50 c	8.37±0.34 c	
	Zn ₁₅	0.014±0.001 a	0.012±0.001 ab	0.15±0.013 ab	0.16±0.011 a	0.64±0.08 a	0.66±0.02 a	4.97±0.09 b	5.22±0.14 c	11.62±0.40 b	11.14±0.57 b	
	Zn ₃₀	0.011±0.001 b	0.011±0.001 b	0.16±0.014 a	0.15±0.019 a	0.59±0.07 a	0.64±0.07 a	5.48±0.28 a	5.83±0.07 a	12.78±1.08 ab	12.10±0.34 a	
	Zn ₄₅	0.014±0.001 a	0.013±0.001 a	0.17±0.016 a	0.15±0.002 a	0.60±0.05 a	0.64±0.03 a	5.74±0.26 a	5.43±0.10 b	12.95±0.93 a	11.81±0.64 ab	
	Zn ₆₀	0.013±0.001 a	0.011±0.001 b	0.16±0.017 ab	0.16±0.020 a	0.59±0.05 a	0.59±0.08 a	4.79±0.32 bc	5.15±0.02 c	11.77±0.56 ab	11.41±0.10 ab	
	Zn ₇₅	0.010±0.001 b	0.011±0.001 b	0.16±0.019 ab	0.15±0.009 a	0.63±0.02 a	0.60±0.06 a	4.48±0.11 cd	4.06±0.10 e	9.53±0.25 c	8.27±0.49 c	

表4 不同处理单株锌的阶段吸收量和吸收强度

Table 4 Absorption amount and intensify of zinc during different treatments of single melon

指标 Index	处理 Treatment	移栽-伸蔓 Transplanting to extension		伸蔓-开花 Extension to flowering		开花-膨果 Flowering to expansion		膨果-成熟 Expansion to maturity	
		2020	2021	2020	2021	2020	2021	2020	2021
		阶段吸收量 Absorption in stage/mg	Zn ₀	0.12±0.01 b	0.14±0.01 a	0.42±0.04 a	0.46±0.02 a	3.77±0.08 c	3.68±0.10 c
	Zn ₁₅	0.13±0.01 ab	0.16±0.01 a	0.51±0.08 a	0.50±0.03 a	4.33±0.07 b	4.56±0.15 b	6.65±0.42 a	5.93±0.44 a
	Zn ₃₀	0.15±0.01 a	0.15±0.02 a	0.44±0.08 a	0.49±0.09 a	4.89±0.26 a	5.19±0.12 a	7.30±0.82 a	6.27±0.41 a
	Zn ₄₅	0.15±0.02 a	0.15±0.01 a	0.44±0.04 a	0.49±0.02 a	5.14±0.22 a	4.79±0.12 b	7.22±0.73 a	6.38±0.55 a
	Zn ₆₀	0.14±0.02 ab	0.16±0.02 a	0.45±0.07 a	0.43±0.10 a	4.20±0.28 b	4.56±0.06 b	6.98±0.26 a	6.26±0.11 a
	Zn ₇₅	0.15±0.02 a	0.15±0.01 a	0.48±0.02 a	0.45±0.07 a	3.85±0.10 c	3.46±0.17 c	5.05±0.32 b	4.21±0.56 b
吸收强度 Absorption intensity/ (mg·d ⁻¹)	Zn ₀	0.01±0.001 a	0.01±0.001 a	0.05±0.005 a	0.06±0.003 a	0.15±0.02 a	0.17±0.03 b	0.21±0.02 b	0.21±0.02 b
	Zn ₁₅	0.01±0.001 a	0.01±0.001 a	0.06±0.010 a	0.06±0.003 a	0.17±0.04 a	0.21±0.01 a	0.33±0.02 a	0.30±0.02 a
	Zn ₃₀	0.01±0.001 a	0.01±0.001 a	0.06±0.009 a	0.06±0.011 a	0.20±0.01 a	0.24±0.04 a	0.37±0.04 a	0.32±0.02 a
	Zn ₄₅	0.01±0.001 a	0.01±0.001 a	0.06±0.005 a	0.06±0.003 a	0.21±0.06 a	0.22±0.01 a	0.36±0.04 a	0.32±0.03 a
	Zn ₆₀	0.01±0.001 a	0.01±0.001 a	0.06±0.008 a	0.05±0.012 a	0.17±0.01 a	0.21±0.01 a	0.35±0.01 a	0.31±0.01 a
	Zn ₇₅	0.01±0.001 a	0.01±0.001 a	0.06±0.003 a	0.06±0.009 a	0.15±0.04 a	0.16±0.01 b	0.25±0.02 b	0.21±0.03 b

3 讨论

3.1 甜瓜产量、品质与施锌的关系

锌在植物同化物运转代谢过程中起重要作用,在一定用量范围内能够提高作物产量和品质^[15],尤其在普遍缺锌的北方地区土壤中的作用更为明显^[16-17]。锌对产量和品质的促进作用在于确保植物核糖体的稳定性,提高硝酸还原酶活性,从而增加可溶性蛋白含量和氨基酸含量,促进同化物生成^[18-19]。本试验中施锌量从0提高到30 kg·hm⁻²,甜瓜单瓜质量提高了0.51%~13.23%,商品瓜产量提高了0.15%~9.92%;施锌量提高到45 kg·hm⁻²,2020、2021年甜瓜可溶性固形物含量分别提高0.15、0.47个百分点,维生素C含量分别提高27.30%、9.91%。前人关于该区域制种玉米的研究也有类似的结果,采用基施ZnSO₄ 30 kg·hm⁻²的方法,产量增加了9.20%^[20],而滴灌冲施结合叶面喷施ZnSO₄ 15 kg·hm⁻²可增产16.38%^[21]。

锌肥施用过量会影响作物生长^[22],锌过量时会破坏细胞结构,影响叶绿体发育,同时取代Fe-EDTA中的铁,造成作物缺铁,进而抑制光合作用中电子传递与光合磷酸化,导致生长减缓^[23-24]。本试验中施锌量为75 kg·hm⁻²的处理,2020、2021年单瓜质量分别较对照下降了2.61%、11.29%,产量分别较对照下降了7.52%、17.38%,可溶性固形物含量分别降低了2.83、3.74个百分点,维生素C含量分别降低了14.47%、13.99%,表明在本试验条件下,75 kg·hm⁻²的施锌水平已经与产量、品质具有负相关关系。在小麦、玉米和水稻中的研究均明确

了产量、品质与施锌量的关系,土施锌肥的合适用量分别为15~45 kg·hm⁻²、20~30 kg·hm⁻²和20~30 kg·hm⁻²^[25-26],本研究中甜瓜产量和品质分别在施锌量30和45 kg·hm⁻²时表现最好,综合考虑产量和品质相关指标的变化趋势,河西灌区甜瓜种植中施锌量30 kg·hm⁻²为较适宜用量,这一水平与周争名等^[27]在设施西瓜中的研究结果相近,略高于砂田栽培中土施20 kg·hm⁻²并喷施0.2 g·L⁻¹的用量^[28]。

3.2 甜瓜中锌的累积与施锌的关系

锌在甜瓜籽粒中的累积量高于其他器官,成熟期单株籽粒的锌累积量为6.50~10.59 mg,占全株比例为78.15%~82.86%。锌在作物生长中心的累积一方面通过根系直接吸收,同时也存在营养器官的累积再分配过程^[29]。在锌肥充足的条件下,籽粒中的锌大部分依靠根系吸收,这一过程中器官锌含量与累积量有较强的相关性^[30]。试验结果显示,甜瓜结果后籽粒中的锌含量远高于其他器官,在膨果期和成熟期分别为24.58~32.17 mg·kg⁻¹和49.81~63.40 mg·kg⁻¹,这一阶段是锌吸收最快的时期。同时,从膨果期至成熟期,茎、叶中的锌含量有所降低,茎中的锌累积量降低了15.91%~16.24%,叶和果肉中的锌累积量分别增加了18.32%~24.54%和10.74%~17.49%,对照籽粒中锌累积量增加了169.20%~194.95%,说明锌在生殖生长阶段存在由茎或者叶和果肉向籽粒转移的过程。这与杨习文等^[31]在小麦中的研究一致,说明在花后加强锌肥的管理对甜瓜中锌的累积和再分配有重要作用。

植物对土壤中锌的吸收有忍耐临界值,过量施锌不仅会影响植物的正常代谢,也会影响包括锌在

内的营养元素的吸收^[32]。在本研究中,施锌量为30或45 kg·hm⁻²时,成熟期甜瓜各器官中的锌含量均已达到最高值,但继续提高施锌水平,各器官锌含量、吸收强度以及锌累积量均出现下降现象。廖自基^[33]认为,植物锌过量的临界浓度为100 mg·kg⁻¹,达到400 mg·kg⁻¹时会有毒害作用。由于土壤类型、作物品种等差异,植株中锌吸收的临界值有所不同^[34]。本试验所在区域甜瓜籽粒中的锌含量最高达到63.40 mg·kg⁻¹,这一水平是否是甜瓜籽粒中的毒害临界值需要进一步研究,但是施锌量超过45 kg·hm⁻²时已经引起甜瓜产量、品质的下降。基于多种因素的综合考量,在河西灌区甜瓜生产中土施锌肥为30 kg·hm⁻²时能够对甜瓜各器官锌含量不产生毒害作用,也能够促进锌从营养器官向生殖中心转移分配,并能获得较高的产量和品质,可以作为本区域甜瓜生产中锌肥的管理方案进行推荐。

4 结 论

在西北绿洲灌区甜瓜种植中,增施锌肥具有显著增产和提高品质的作用,施锌量为30 kg·hm⁻²时,甜瓜单瓜质量和商品瓜产量最高,可溶性固形物和维生素C含量较高,锌吸收强度和吸收量在膨果至成熟阶段达到最高水平。甜瓜茎叶中的锌含量和累积量在移栽后持续增加,结果后降低并向籽粒转移,各处理不同时期的锌含量多表现为籽粒>叶片>果肉>茎秆。多因素综合考虑,在河西灌区甜瓜生产中锌肥作为基肥土施30 kg·hm⁻²时能够促进锌从营养器官向生殖器官转移,籽粒中锌累积量较高,产量达到最高水平,并有较优品质,是适宜的施用方案。

参考文献

- [1] TANAKA K, AKASHI Y, FUKUNAGA K, et al. Diversification and genetic differentiation of cultivated melon inferred from sequence polymorphism in the chloroplast genome in the chloroplast genome[J]. *Breeding Science*, 2013, 63(2): 183-196.
- [2] 国家统计局. 国家数据[DB/OL]. (2024-02-22)[2024-10-31]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.html>.
- [3] 苗妍秀, 梁祎, 杨家勤, 等. 铁锌配施对黄瓜生长、光合特性和果实品质的影响[J]. *西北农业学报*, 2021, 30(4): 555-562.
- [4] 黄作明, 黄珣. 微量元素与人体健康[J]. *微量元素与健康研究*, 2010, 27(6): 58-62.
- [5] 詹行天. 健康中国视角下的植物性营养与肥料[J]. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(4): 824-834.
- [6] 魏孝荣, 郝明德, 张春霞. 黄土高原地区连续施锌条件下土壤锌的形态及有效性[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(7): 1386-1393.
- [7] 王建伟, 王朝辉, 毛晖, 等. 硒锌钼对黄土高原马铃薯和小白菜产量及营养元素与硒钼含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(11): 2114-2120.
- [8] 吕选忠, 宫象雷, 唐勇. 叶面喷施锌或硒对生菜吸收镉的拮抗作用研究[J]. *土壤学报*, 2006, 43(5): 868-870.
- [9] 郭九信, 隋标, 商庆银, 等. 氮锌互作对水稻产量及籽粒氮、锌含量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(6): 1336-1342.
- [10] 王艳, 王景华, 许福明. 锌肥对日光温室西芹硝酸盐及营养物质研究[J]. *生态学报*, 2001, 21(4): 681-683.
- [11] 侯雷平, 吴俊华, 李梅兰, 等. 供锌水平对番茄果实抗氧化性及风味品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(3): 763-767.
- [12] 姜雯. 早稻锌吸收分配与积累及其模型的构建[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
- [13] 韩金玲, 杨晴, 周印富, 等. 旱地施用锌肥对冬小麦干物质积累和产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2010, 30(2): 358-361.
- [14] 鲍士旦. 土壤化学分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [15] RENGEL Z, BATTEN G D, CROWLEY D E. Agronomic approaches for improving the micronutrient density in edible portions of field crops[J]. *Field Crops Research*, 1999, 60: 27-40.
- [16] 褚宏欣, 党海燕, 王涛, 等. 我国主要麦区土壤有效铁锰铜锌丰缺状况评价及影响因素[J]. *土壤学报*, 2024, 61(1): 129-139.
- [17] 陆欣春, 田霄鸿, 杨习文, 等. 氮锌配施对石灰性土壤锌形态及肥效的影响[J]. *土壤学报*, 2010, 47(6): 1202-1213.
- [18] 王晓云, 程炳嵩, 张国珍. 不同锌水平对姜苗氮代谢的影响[J]. *山东农业大学学报*, 1993, 24(2): 207-210.
- [19] 唐梦珊, 吕志远, 赵晓涵, 等. 喷锌对黄土高原小麦籽粒营养品质及锌分布的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2023, 42(1): 27-36.
- [20] 薛勇, 侯德明, 吴平江. 锌肥不同施用方式对张掖市杂交制种玉米产量的影响[J]. *农业科技与信息*, 2017(4): 82-83.
- [21] 陈涛, 张恒嘉, 潘小番, 等. 锌肥不同施用方式对河西绿洲制种玉米生长及产量的影响[J]. *玉米科学*, 2023, 31(5): 136-142.
- [22] 汪邓民, 周翼衡, 朱显灵, 等. 磷钙锌对烟草生长、抗逆性保护酶及渗透物的影响[J]. *土壤*, 2000, 32(1): 34-37.
- [23] 孙桂芳, 杨光穗. 土壤-植物系统中锌的研究进展[J]. *华南热带农业大学学报*, 2002, 8(2): 22-30.
- [24] 沈振国. 超量积累植物对锌的吸收和铅锌污染土壤的植物修复[D]. 南京: 中国科学院南京土壤研究所, 2000.
- [25] 王孝忠, 田娣, 邹春琴. 锌肥不同施用方式及施用量对我国主要粮食作物增产效果的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(4): 998-1004.
- [26] 颜为, 孙金鞭, 吕洪国, 等. 不同锌源叶面喷施对冬小麦和夏玉米产量及籽粒营养品质的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2024, 43(3): 504-515.
- [27] 周争明, 黄萍, 宋晶, 等. 锌对西瓜幼苗生长及产量与品质的影响[J]. *湖北农业科学*, 2013, 52(3): 593-594.
- [28] 崔昭昭. 施用锌硒钙对网纹甜瓜产量和品质的影响与施肥建议[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
- [29] LONNERDAL B. Dietary factors influencing zinc absorption[J]. *Journal of Nutrition*, 2000, 130(5): 1378-1385.
- [30] 李宏云, 王少霞, 李萌, 等. 锌与氮磷肥配合喷施对冬小麦锌累积及锌肥利用率的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(9): 139-149.
- [31] 杨习文, 宋淼, 李秋杰, 等. 氮锌配施对小麦锌转运、分配与累积的影响[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(1): 148-156.
- [32] 陈玉真. 土壤锌对植物的毒害效应及临界值研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2011.
- [33] 廖自基. 微量元素的环境化学及生物效应[M]. 北京: 环境科学出版社, 1992.
- [34] 孟凡乔, 史雅娟, 吴文良. 我国无污染农产品重(类)金属元素土壤环境质量的制定与研究进展[J]. *农业环境保护*, 2000, 19(6): 356-359.