

外源锌对谷子锌含量、生物有效性及其产量的影响

曹梦琳¹, 尚品涛², 王宇轩³, 赵智勇¹, 原向阳⁴, 董淑琦⁴, 杜慧玲^{5*}

(1. 山西农业大学棉花研究所, 山西 运城 044000; 2. 清华大学山西清洁能源研究院, 山西 太原 030000; 3. 晋中职业技术学院, 山西 晋中 030600; 4. 山西农业大学农学院, 山西 晋中 030801; 5. 山西农业大学基础部, 山西 晋中 030801)

摘要: 探究孕穗期喷施不同浓度外源锌溶液对谷子各部位锌含量、锌生物有效性、矿质元素含量及产量的影响, 明确谷子外源锌的最佳施用量, 为锌肥在谷子上的合理施用提供理论支持。以杂交谷子品种张杂谷 10 号和常规谷子品种晋谷 21 号为试验材料, 采用大田试验, 在谷子孕穗期喷施等量 0 (CK, 清水)、20 (Zn1)、40 (Zn2)、60 (Zn3)、80 (Zn4)、100 (Zn5) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (以 Zn 计) 硫酸锌 ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 溶液, 研究不同浓度锌溶液对锌含量、锌生物有效性、矿质元素含量及产量的影响。结果表明: 喷施不同浓度锌溶液均可提高植株各部位锌含量, 且随着锌喷施浓度增大, 锌含量持续升高, 在 Zn5 处理时达到最大, 但含量均未超过国家标准食品中锌限量标准 ($<50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); 施用不同浓度外源锌后, 锌在叶片中分配比例最大, 其次为根、茎鞘, 在籽粒中分配比例最小; 随着锌喷施浓度的增大, 籽粒植酸含量及植酸/锌摩尔比均呈先降低后升高的趋势, 均在 Zn 40 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理时降低程度最大, 与 CK 相比, 晋谷 21 号分别降低了 46.06%、54.31%, 张杂谷 10 号分别降低了 35.80%、40.31%; 喷施不同浓度锌溶液后, 籽粒氮、磷、钾及粗蛋白含量随着锌浓度的增大呈先升高后降低的趋势, 在 Zn 40 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时达到最高, 晋谷 21 号较 CK 分别提升了 9.26%、40.79%、9.20%、9.26%, 张杂谷 10 号较 CK 分别提升了 5.36%、17.17%、4.58%、5.36%; 不同品种谷子喷施不同浓度锌, 其穗长、千粒重、穗粒重以及产量与对照相比, 均在 Zn2 处理增加最多, 晋谷 21 号较 CK 分别增加了 7.12%、3.79%、20.69%、21.16%, 张杂谷 10 号较 CK 分别增加了 3.33%、5.16%、14.22%、13.94%。综上所述, 外源锌对谷子各部位锌含量、生物有效性以及改善品质、增加产量均具有重要作用, 高产高效富锌谷子生产锌的最佳喷施时期为孕穗期, 最佳喷施浓度为 40 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 锌溶液。

关键词: 谷子; 锌含量; 植酸; 锌生物有效性; 产量; 品质

近年来, 饮食补锌越来越受到研究者关注, 其中通过禾谷类作物, 尤其是粮食作物对微量元素的生物强化, 提高微量元素含量的食品原料被认为是最有前景的途径^[1-3]。植酸是作物体内一种抗营养因子, 会与锌生成一种难溶的植酸锌螯合物, 影响锌的生物有效性。植酸/锌摩尔比可以作为锌生物有效性的指标^[4-6], 当比值小于 15 时, 锌才会具有较高的生物有效性。谷子富含人体所需的蛋白

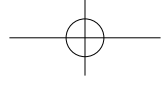
质等营养成分, 越来越受到人们的青睐。因此, 研究喷施外源锌对作物各部位锌含量以及抗营养因子植酸含量的影响, 明确富锌功能性谷子生产外源锌的最佳用量, 为锌在谷子上的科学施用提供技术支撑。外源锌对锌生物有效性及产量的影响在水稻、小麦、大豆等作物以及蔬菜和水果上均有报道^[7-10]。王张民等^[11]研究表明, 对小麦施用 300 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 可以显著提高小麦籽粒锌含量, 植酸/锌摩尔比可下降至 15 以下, 说明外源锌可以显著提高锌的生物有效性。Melash 等^[12]研究表明, 开花期叶面喷施 ZnSO_4 生物强化可提高收获籽粒中锌的含量, 生物强化可能是克服锌缺乏症相关健康问题的最佳方法。王子腾等^[13]论述了使用锌肥对国内外主要粮食作物的影响, 外施锌肥可有效改善主要粮食作物籽粒缺锌状况, 无论是土施还是叶面喷施, 均可提高作物 (小麦、水稻、玉米等) 可食部分的锌含量, 适量的锌可以起到增产效

收稿日期: 2022-10-10; 录用日期: 2022-11-12

基金项目: 山西省重点研发计划项目 (201903D221050); 山西省留学人员科研资助项目 (2020-060); 山西省谷子产业技术体系建设项目; 山西省博士毕业生来晋工作奖励资金科研项目 (SXBYKY2021049); 山西农业大学棉花研究所博士基金项目 (SZJJ2021-03); 山西省高等学校科技创新项目 (2021L173); 运城农业科技攻关项目 (2021YNZD02)。

作者简介: 曹梦琳 (1992-), 助理研究员, 博士, 研究方向为作物化学调控与逆境生理。E-mail: emlin34@163.com。

通讯作者: 杜慧玲, E-mail: duhuiling66@163.com。



果,过量的锌肥则会使农作物减产,且增大土壤遭受锌污染的潜在可能性。Singh等^[14]研究了绿肥和不同锌肥对土壤中有效锌和印度香米(*Basmati Rice*)中锌含量的影响,结果表明,EDTA螯合锌处理显著提高了印度香米各生育期的干物质锌含量和土壤中有效锌含量。Saboor等^[15]研究表明,锌的平衡施用是节约资源、实现作物最佳生长和产量的必要条件,外施锌肥在促进玉米生长、提高产量和平衡锌吸收方面具有重要作用。董明等^[16]研究表明,拔节和花后5 d喷施锌肥,均可显著提升小麦面粉锌含量,籽粒总蛋白、蛋白组分含量,干、湿面筋含量和面筋指数也显著升高,各部位氮含量也显著升高,施用锌肥可以明显改善烘焙品质。高慧雅等^[17]研究叶面喷施锌肥对谷子叶片抗氧化酶活性以及锌在籽粒积累的影响,结果表明:叶面喷施低锌($2.25\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)水平($\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$)有利于提高谷子叶片抗氧化酶活性、籽粒锌含量与产量。已有的研究报道多集中于小麦、玉米、水稻等作物上,谷子施用锌肥的报道很少,不同谷子品种对锌的吸收、转运、分配以及锌的生物有效性、外源锌适宜的浓度等系统研究报道更少。本研究以谷子为材料,探究孕穗期(笔者前期筛选所得喷施效果最佳期^[18])喷施不同浓度外源锌溶液对杂交谷子品种张杂谷10号和常规谷子品种晋谷21号各部位锌含量、锌转运吸收、锌生物有效性及矿质元素含量和产量的影响,为锌肥在谷子上的合理施用提供理论支持,也为生产富锌谷子功能性食品提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试品种为杂交谷子品种张杂谷10号(河北省张家口市农业科学院)和常规谷子品种晋谷21号(山西农业大学谷子研究所)。

外源锌为七水合硫酸锌 $\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (AR)。

1.2 试验设计

试验为田间小区试验,于2017年在山西农业大学申奉试验基地($37^{\circ}42'\text{N}$, $112^{\circ}55'\text{E}$)进行。该地区处于山西省中部晋中盆地,年平均温度一般为 9.9°C 左右,无霜期176 d,年平均降水量在460 mm左右(多分布在6—8月),试验地土壤为石灰性土壤,pH为8.47,有机质含量为 $23.56\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮含量为 $45.15\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效磷含量为20.26

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾含量为 $217.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮含量为 $1.239\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全磷含量为 $1.155\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全钾含量为 $20.68\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,总锌含量为 $87.09\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效锌含量为 $3.433\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

采用随机区组设计,在谷子孕穗期(笔者前期筛选所得喷施效果最佳期^[18])喷施等量0(CK,清水)、20(Zn1)、40(Zn2)、60(Zn3)、80(Zn4)、100(Zn5) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 锌溶液(以Zn计),保证叶片湿润,药液悬而未滴。试验共12个处理,每个处理重复3次,共36个小区,每个小区面积(长 $\times$ 宽为 $3\text{ m}\times 2\text{ m}$) 6 m^2 。

1.3 测定项目

每小区随机选取3株谷子,进行穗长、穗粒重、千粒重的测定。各小区均单打单收,脱粒风干后计产^[19]。

1.4 植物锌含量测定

成熟期收获后,将各部位(叶片、茎鞘、根、籽粒)分开,洗净晾干, 105°C 杀青30 min, 65°C 烘干至恒重,烘干样粉碎,采用ICP-MS(电感耦合等离子体质谱)法^[20]测定锌含量。

1.5 籽粒植酸含量测定

籽粒样品粉碎,采用三氯化铁比色法^[21]测定植酸含量。

1.6 矿质元素及粗蛋白含量测定

脱粒后谷子粉碎用于矿质元素氮、磷、钾以及粗蛋白的测定。氮与粗蛋白含量测定采用半微量凯氏定氮法^[22],磷含量测定采用钒钼黄比色法^[23],钾含量测定采用火焰分光光度法^[23]。

1.7 数据处理

所得数据用Excel 2003整理并作图表,用SPSS 17.0进行方差分析,用Duncan新复极差法进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 外源锌对谷子各部位锌含量的影响

如图1所示,在孕穗期喷施不同浓度锌溶液,植株各部位锌含量均随着锌喷施浓度增大而增加,在Zn5处理时达到最大。除茎鞘Zn1处理,两个品种较CK差异均达到显著水平($P<0.05$)。

在笔者前期研究谷子生长最适浓度Zn2处理^[24]时,晋谷21号籽粒、叶片、茎鞘、根部锌含量分别为30.43、126.04、35.47、52.52 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,较CK提升了18.04%、18.90%、7.10%、19.50%,张杂

谷 10 号籽粒、叶片、茎鞘、根部锌含量分别为 27.59、95.31、43.95、64.13 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，较 CK 提升了 7.56%、8.77%、6.90%、12.40%；在施锌最大的 Zn5 处理时，晋谷 21 号籽粒、叶片、茎鞘、根部锌含量分别为 37.36、140.61、40.09、61.25 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，较 CK 提升了 44.96%、32.64%、21.04%、39.37%，张杂谷 10 号籽粒、叶片、茎鞘、根部锌含量分别为 30.51、107.71、47.12、72.18 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，较 CK 提升了

18.93%、22.92%、14.61%、26.50%。两个品种锌含量的变化均在根部达到最大（除 Zn5 处理时晋谷 21 号籽粒锌含量最高），茎鞘中变化最小。本研究表明，施用外源锌可以达到锌富积的效果，但未超过国家标准要求的锌含量（ $<50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ），结合笔者前期对锌生长最适浓度筛选，生产富锌谷子的最佳喷施时间和最佳喷施浓度为孕穗期喷施 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 锌溶液。

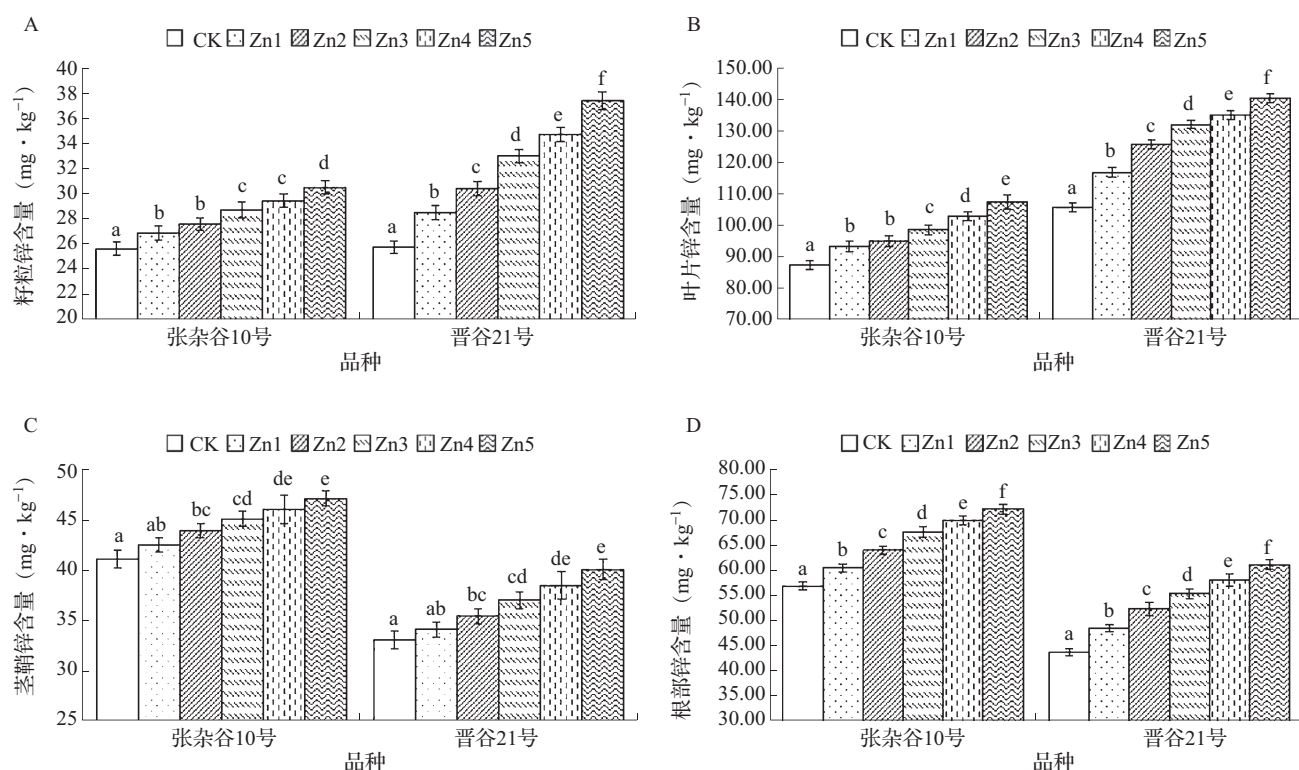


图 1 外源锌对谷子各部位锌含量的影响

注：不同小写字母表示同一品种不同喷锌浓度处理间差异达 5% 显著水平。下同。

2.2 外源锌对谷子各部位锌分配比例的影响

由表 1 可以看出，施用不同浓度外源锌后，锌在谷子不同部位的分配不同，表现为叶 > 根 > 茎鞘 > 籽粒，不同品种中分配变化趋势相似，叶片中晋谷 21 号高于张杂谷 10 号，茎鞘和根中晋谷 21 号低于张杂谷 10 号，两个品种在籽粒中分配比例相近。与 CK 相比，不同品种不同器官差异显著性不同。

张杂谷 10 号籽粒和叶在不同浓度 Zn 处理后差

异均不显著，晋谷 21 号籽粒和叶分别在 Zn 浓度大于 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Zn3) 和 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Zn2) 时达显著性差异；茎鞘和根张杂谷 10 号分别在 $80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Zn4) 和 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Zn2) 以上达差异显著，晋谷 21 号分别在大于 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Zn1) 和 $80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Zn4) 时达显著差异。由此可见，孕穗期喷施浓度高于 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的锌溶液时才会对各部位锌分配产生影响，不同浓度 Zn 处理之间大多没有显著性差异。

表 1 外源锌对各部位谷子锌含量分配比例的影响 (%)

品种	处理	籽粒	叶片	茎鞘	根
张杂谷 10 号	CK	12.13 ± 0.29a	41.44 ± 0.50a	19.44 ± 0.47c	26.98 ± 0.25a
	Zn1	12.02 ± 0.23a	41.86 ± 0.37a	19.03 ± 0.12bc	27.09 ± 0.04a
	Zn2	11.95 ± 0.07a	41.26 ± 0.14a	19.03 ± 0.28bc	27.76 ± 0.20b
	Zn3	11.95 ± 0.23a	41.12 ± 0.77a	18.76 ± 0.29abc	28.17 ± 0.39b
	Zn4	11.85 ± 0.19a	41.47 ± 0.74a	18.51 ± 0.45ab	28.17 ± 0.18b
	Zn5	11.85 ± 0.15a	41.82 ± 0.45a	18.30 ± 0.41a	28.03 ± 0.39b
晋谷 21 号	CK	12.34 ± 0.28a	50.76 ± 0.17ab	15.86 ± 0.43b	21.04 ± 0.19a
	Zn1	12.48 ± 0.16ab	51.25 ± 0.38bc	14.96 ± 0.13a	21.31 ± 0.16ab
	Zn2	12.45 ± 0.25ab	51.56 ± 0.55c	14.51 ± 0.27a	21.48 ± 0.54abc
	Zn3	12.79 ± 0.11bc	51.30 ± 0.03bc	14.38 ± 0.35a	21.52 ± 0.23abc
	Zn4	13.01 ± 0.16c	50.74 ± 0.10ab	14.43 ± 0.56a	21.82 ± 0.33bc
	Zn5	13.38 ± 0.21d	50.34 ± 0.38a	14.35 ± 0.39a	21.93 ± 0.23c

注：同列不同小写字母表示相同品种不同喷锌浓度处理之间在 $P<0.05$ 水平差异显著。下同。

2.3 外源锌对谷子籽粒植酸含量及植酸 / 锌摩尔比的影响

由图 2 可见，随着锌喷施浓度增大，籽粒植酸含量及植酸 / 锌摩尔比均呈先降低后升高的趋势，与 CK 相比均显著降低。同一浓度锌处理不同品种谷子籽粒植酸含量和植酸 / 锌摩尔比不同，晋谷 21 号的影响明显大于张杂谷 10 号。

从图 2A 可以看出，不同浓度锌处理后，晋谷 21 号植酸含量分别为 3.106、2.114、2.511、2.877、3.215 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ，较 CK (3.919 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) 降低 20.75%、46.06%、35.92%、26.60%、17.96%；张杂谷 10 号植酸含量分别为 3.738、2.765、3.125、

3.402、4.005 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ，较 CK (4.306 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) 降低 13.19%、35.80%、27.43%、20.99%、7.00%。

由图 2B 可以看出，不同浓度锌处理，晋谷 21 号植酸 / 锌摩尔比分别为 10.90、6.95、7.61、8.29、8.61，较 CK (15.21) 降低 28.34%、54.31%、49.94%、45.50%、43.41%，张杂谷 10 号植酸 / 锌摩尔比分别为 13.91、10.02、10.88、11.55、13.13，较 CK (16.79) 降低 17.15%、40.31%、35.18%、31.20%、21.80%。可见，不同品种谷子籽粒植酸含量及植酸 / 锌摩尔比均在 40 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理时降低程度最大，即孕穗期对谷子喷施 40 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 锌溶液的锌生物有效性最大。

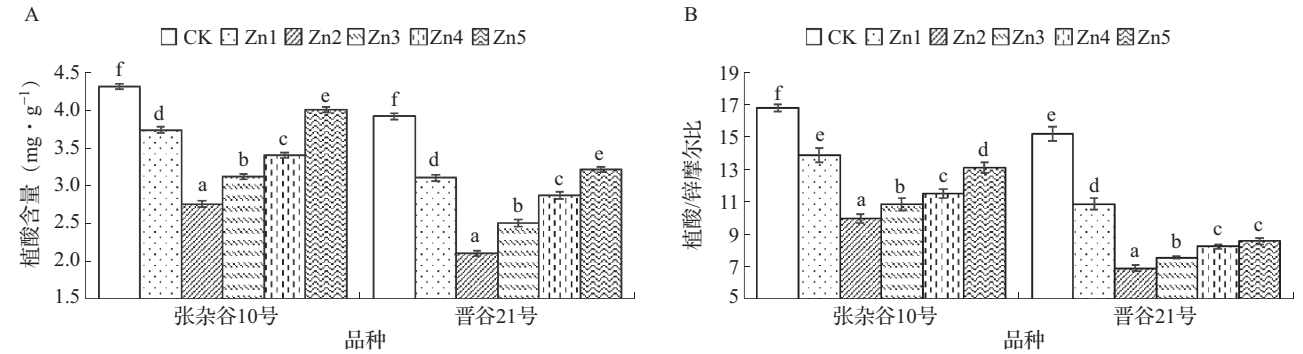


图 2 外源锌对谷子籽粒植酸含量和植酸 / 锌摩尔比的影响

2.4 外源锌对谷子籽粒氮、磷、钾及粗蛋白含量的影响

由图3可以看出,在孕穗期喷施不同浓度锌溶液,籽粒氮、磷、钾及粗蛋白含量随着锌浓度的增大呈先升高后降低的趋势,在 $40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理(Zn_2)时达到最大。除钾含量外,其余指标含量均在锌浓度大于 $80\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理(Zn_4 、 Zn_5)后显著低于对照,晋谷21号变化程度明显大于张杂谷10号。

在 Zn_2 处理时,晋谷21号氮、磷、钾、粗蛋白含量分别为 21.67 、 0.56 、 2.75 、 $13.54\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,较CK提升了 9.26% 、 40.79% 、 9.20% 、 9.26% ,张杂谷10号氮、磷、钾、粗蛋白含量分别为 17.11 、 0.48 、 3.38 、 $10.70\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,较CK提升了 5.36% 、 17.17% 、 4.58% 、 5.36% ;在施锌最大的 Zn_5 处理时,晋谷21号氮、磷、钾、粗蛋白含量分别为 17.93 、 0.30 、 2.34 、 $11.20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,较CK降低了 9.61% 、 25.42% 、 7.02% 、 9.61% ,张杂谷10号氮、磷、钾、粗蛋白含量分别为 15.66 、 0.37 、 3.07 、 $9.79\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,较CK降低了 3.55% 、 8.56% 、 4.88% 、 3.55% 。

研究表明,籽粒营养物质含量在 $40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理时提升程度最为明显,其中对磷元素影响最大,但大于 $80\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时就出现营养损失的现象,

孕穗期对谷子喷施 $40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 锌溶液谷子营养价值最佳。

2.5 外源锌对谷子产量及其构成要素的影响

如表2所示,随着喷施锌浓度的升高,谷子穗长、千粒重、穗粒重以及产量均呈先升高后降低的趋势,在 $40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理时达到最大。除晋谷21号 Zn_5 处理外,千粒重在不同浓度锌处理后均显著大于CK;穗长以及穗粒重在 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理时低于CK,但穗长降低不显著;产量在大于 $80\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理后表现出显著降低趋势。

在 Zn_2 处理时,晋谷21号穗长、千粒重、穗粒重及产量较CK分别提升了 7.12% 、 3.79% 、 20.69% 、 21.16% ,张杂谷10号穗长、千粒重、穗粒重及产量较CK分别提升了 3.33% 、 5.16% 、 14.22% 、 13.94% ; Zn_5 处理时,晋谷21号穗长、穗粒重及产量较CK分别降低了 1.78% 、 16.23% 、 19.57% ,张杂谷10号穗长、穗粒重及产量较CK分别降低了 0.69% 、 11.97% 、 12.86% ,而晋谷21号和张杂谷10号千粒重分别上升了 4.44% 、 1.57% 。

可见,穗长、千粒重、穗粒重及产量在 $40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理时达到最大,其中对穗粒重及产量的影响最明显,孕穗期对谷子喷施 $40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 锌溶液可达到高产高效。

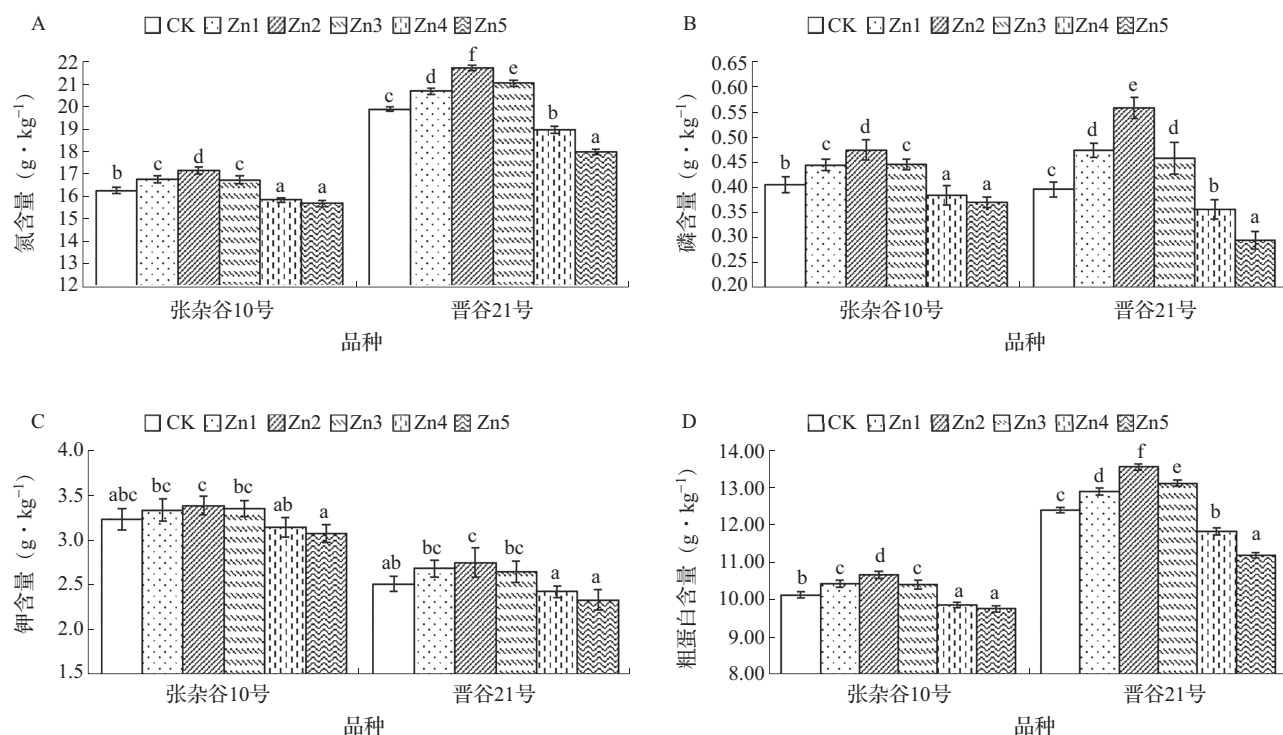


图3 外源锌对谷子籽粒氮、磷、钾及粗蛋白含量的影响



表 2 外源锌对谷子产量及其构成要素的影响

品种	处理	穗长 (cm)	千粒重 (g)	穗粒重 (g)	产量 (kg · hm ⁻²)
张杂谷 10 号	CK	29.03 ± 0.40ab	2.983 ± 0.011a	24.55 ± 0.37b	5265.97 ± 124.29b
	Zn1	29.57 ± 0.31bc	3.075 ± 0.012cd	26.80 ± 0.52c	5739.54 ± 160.50c
	Zn2	30.00 ± 0.40c	3.137 ± 0.012e	28.04 ± 0.46d	5999.67 ± 122.26d
	Zn3	29.70 ± 0.36bc	3.087 ± 0.010d	27.12 ± 0.46cd	5642.82 ± 160.08c
	Zn4	29.37 ± 0.31abc	3.054 ± 0.016c	26.56 ± 0.46c	4759.05 ± 153.16a
	Zn5	28.83 ± 0.35a	3.030 ± 0.013b	21.61 ± 0.75a	4588.96 ± 156.39a
晋谷 21 号	CK	26.20 ± 0.56ab	2.853 ± 0.010a	17.64 ± 0.36b	4192.10 ± 131.21c
	Zn1	27.17 ± 0.55c	2.927 ± 0.039bc	20.07 ± 0.38c	4875.77 ± 125.10d
	Zn2	28.07 ± 0.45d	2.961 ± 0.028c	21.29 ± 0.38d	5079.21 ± 132.10d
	Zn3	27.57 ± 0.32cd	2.931 ± 0.012bc	20.78 ± 0.28d	4825.75 ± 162.97d
	Zn4	26.87 ± 0.32bc	2.905 ± 0.026b	19.70 ± 0.31c	3651.83 ± 151.40b
	Zn5	25.73 ± 0.35a	2.898 ± 0.033ab	14.78 ± 0.40a	3371.69 ± 141.85a

3 讨论

3.1 外源锌对谷子各部位锌含量及转运的影响

锌是作物的一种必需微量元素^[25]，前人研究表明，作物外施锌肥后，可以增加作物各部位锌含量，但是不同的作物、不同的施锌方式、不同的锌源效果不同^[26-27]。本研究结果表明，外源锌可以有效增加不同品种谷子各部位锌含量，根部锌含量变化最大（除 Zn5 处理时晋谷 21 号籽粒锌含量最高外），茎鞘中变化最小，且晋谷 21 号在各处理间变化程度大于张杂谷 10 号。从各部位锌分配比例分析，与晋谷 21 号相比，张杂谷 10 号锌在茎鞘和根部分配比例较大，在叶片中分配比例较小，二者在籽粒中分配比例差异不明显。说明喷施锌溶液后，晋谷 21 号叶片吸收锌后不易向各个部位转移，而张杂谷 10 号叶片锌多转移至根部和茎鞘中，转移至籽粒中的比例较小，但仍可达到谷子籽粒富锌的效果，这与 Liu 等^[28]、邵运辉等^[29]、陈娟等^[30]在小麦上的研究结果一致。

由上述分析可知，谷子品种不同，对锌的吸收转运能力有差别，锌在谷子不同器官的分布、转移与不同品种内在生理学特点有关。与张杂谷 10 号相比，晋谷 21 号更容易富锌。

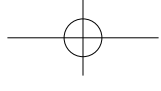
3.2 外源锌对谷子植酸含量及植酸 / 锌摩尔比的影响

植酸被认为是一种抗营养因子，其会显著降

低作物籽粒及面粉中锌生物有效性。植酸 / 锌摩尔比可作为判定食品中锌生物有效性的指标，中国营养学会认为当植酸 / 锌摩尔比低于 15 时，粮食中锌才会具有较高的生物有效性。本研究表明，不同谷子品种，随着锌喷施浓度的增大，籽粒植酸含量及植酸 / 锌摩尔比均呈先降低后升高的趋势。CK 处理的植酸 / 锌摩尔比分别为 15.21 和 16.79，都大于 15；除 CK 外，晋谷 21 号植酸 / 锌摩尔比为 10.90 ~ 6.95，张杂 10 号植酸 / 锌摩尔比为 13.91 ~ 10.02，均小于 15，说明孕穗期喷施锌肥可以提高谷子籽粒锌生物有效性。这可能是由于施加锌肥后，作物体内的植酸酶被激活，使植酸分解速度变快，这一结论与 Chen 等^[31]、Saha 等^[32]在小麦、水稻上的研究结果相似。

3.3 外源锌对谷子矿质元素及粗蛋白的影响

本研究在孕穗期对谷子喷施不同浓度锌溶液后，籽粒氮、磷、钾及粗蛋白含量随着锌浓度的增大呈先升高后降低的趋势，说明适量锌溶液可以改善谷子营养品质，促进矿质元素及粗蛋白含量的提升，高浓度锌则会造成营养品质降低。籽粒锌含量与氮、磷含量均呈显著正相关，虽有报道称锌含量与磷含量呈负相关，但本研究结果却与之相反，这可能与磷的施用方式及施用量有关，有研究发现，锌与磷之间的拮抗作用并不是绝对的，两者相适宜时，锌与磷之间也可以呈正相关，而施用外源锌对钾元素含量影响不大^[33-35]。适量外源锌还会增



加粗蛋白含量,这可能一方面是由于锌作为与蛋白质合成密切相关的聚合酶、碱性磷酸酶、羧肽酶等的组成成分,催化蛋白质的合成;另一方面由于蛋白质成分会受到锌和半胱氨酸的影响,而半胱氨酸是一种脱氧剂,可以改变促进面筋形成的蛋白质分子之间和分子内部的两个硫键,富含半胱氨酸的结合蛋白相对分子质量低,能够以高亲和力与锌结合^[36]。适量锌可以改善作物品质,但是在不同品种上表现力不同,是否对所有的谷子品种都有增加营养品质的效果,这需要后续进行更多的工作进一步验证。

3.4 外源锌对谷子产量及其构成要素的影响

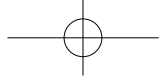
喷施不同浓度外源锌后,谷子穗长、千粒重、穗粒重以及产量均表现出低浓度促进生长而高浓度抑制生长的现象。喷施 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 浓度在小于 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时促进谷子生长,提升产量,但喷锌浓度大于 $80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时就可能产生毒害作用,造成谷子减产。此研究结果与报道的锌对小麦产量及构成要素有提高作用^[37-39]相一致。

4 结论

本研究中,外源锌对不同品种谷子各部位锌含量、生物有效性以及品质改善、产量增加均具有重要作用。孕穗期喷施 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 锌溶液可以提升各部位锌含量,籽粒锌的生物有效性达到最大,对有效改善谷子品质、提高产量的效果最优。因此,孕穗期喷施 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 锌溶液为高产优质富锌功能性谷子生产的最佳喷施时期和喷施浓度。

参考文献:

- [1] Goloran J B, Johnson S E, Morete M J, et al. Grain Zn concentrations and yield of Zn-biofortified versus Zn-efficient rice genotypes under contrasting growth conditions [J]. Field Crops Research, 2019, 234: 26-32.
- [2] Stanton C, Sanders D, Kramer U, et al. Zinc in plants: Integrating homeostasis and biofortification [J]. Molecular Plant, 2022, 15 (1): 65-85.
- [3] 李雅菲, 师江澜, 吴天琪, 等. 锌与吡虫啉配合喷施对小麦籽粒富锌效果及蛋白质组分的影响 [J]. 中国农业科学, 2022, 55 (3): 514-528.
- [4] Ibrahim S, Saleem B, Rehman N, et al. CRISPR/Cas9 mediated disruption of Inositol Pentakisphosphate 2-Kinase 1 (TaIPK1) reduces phytic acid and improves iron and zinc accumulation in wheat grains [J]. Journal of Advanced Research, 2022, 37: 33-41.
- [5] Gallego S, Taleon V, Talsma E F, et al. Effect of maize processing methods on the retention of minerals, phytic acid and amino acids when using high kernel-zinc maize [J]. Current Research in Food Science, 2021, 4: 279-286.
- [6] 苏达, 颜晓军, 蔡远扬, 等. 磷肥对甜玉米籽粒植酸和锌有效性的影响 [J]. 作物学报, 2022, 48 (1): 203-214.
- [7] Awan S, Shahzadi K, Javad S, et al. A preliminary study of influence of zinc oxide nanoparticles on growth parameters of Brassica oleracea var italic [J]. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2021, 20 (1): 18-24.
- [8] Zhang P P, Chen Y L, Wang C Y, et al. Distribution and accumulation of zinc and nitrogen in wheat grain pearling fractions in response to foliar zinc and soil nitrogen applications [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2021, 20 (12): 3277-3288.
- [9] 税杨, 夏清, 陈杰, 等. 叶面锌肥对紫粒小麦产量及品质的影响 [J]. 麦类作物学报, 2022, 42 (4): 1-8.
- [10] Yaghoobian I, Ghassemi S, Nazari M, et al. Response of physiological traits, antioxidant enzymes and nutrient uptake of soybean to Azotobacter Chroococcum and zinc sulfate under salinity [J]. South African Journal of Botany, 2021, 143: 42-51.
- [11] 王张民, 潘斐, 刘琦, 等. 拔节期土壤施锌对小麦籽粒中锌生物有效性影响评估 [J]. 土壤, 2018, 50 (6): 1222-1228.
- [12] Melash A A, Mengistu D K, Abera D A, et al. The influence of seeding rate and micronutrients foliar application on grain yield and quality traits and micronutrients of durum wheat [J]. Journal of Cereal Science, 2019, 85: 221-227.
- [13] 王子腾, 耿元波. 国内外主要粮食作物对施用锌肥响应的研究进展 [J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24 (3): 805-816.
- [14] Singh A, Shivay Y S. Effects of green manures and zinc fertilizer sources on DTPA-extractable zinc in soil and zinc content in Basmati rice plants at different growth stages [J]. Pedosphere, 2019, 29 (4): 504-515.
- [15] Saboor A, Ali M A, Hussain S, et al. Zinc nutrition and arbuscular mycorrhizal symbiosis effects on maize (*Zea mays* L.) growth and productivity [J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2021, 28: 6339-6351.
- [16] 董明, 王琪, 周琴, 等. 花后5天喷施锌肥有效提高小麦籽粒营养和加工品质 [J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24 (1): 63-70.
- [17] 高慧雅, 张爱军, 赵丽. 叶面喷施锌硒肥对谷子抗氧化酶活性及籽粒锌硒含量的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26 (9): 1724-1731.
- [18] Cao M L, Li Y X, Du H L. Effects of spraying zinc fertilizer on the physiological and photosynthetic characteristics of millet plants (*Setaria italica* L.) at different growth stages [J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2019, 17 (4): 8121-8138.
- [19] 李永虎, 曹梦琳, 杜慧玲, 等. 基于杂交谷子产量及其构成

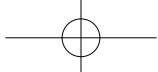


- 因素的最优养分用量和施肥位置研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(9): 1532-1541.
- [20] 何霜, 李姗, 王志雄, 等. 基于微波消解的 ICP-OES/ICP-MS 法测定茶叶中 30 种矿质元素[J]. 食品工业科技, 2017, 38(12): 1-6, 16.
- [21] 傅启高, 李慧荃. 三氯化铁比色法测定植酸含量的研究[J]. 营养学报, 1997, 19(2): 216-220.
- [22] 中华人民共和国卫生部. 谷物和豆类氮含量测定和粗蛋白质含量计算凯氏法: GB/T 5511-2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 1999: 263-294.
- [24] Cao M L, Li Y X, Du H L. Effects of exogenous zinc on the photosynthesis and carbonic anhydrase activity of millet (*Setaria italica* L.) [J]. Photosynthetica, 2020, 58(3): 712-719.
- [25] Silva V M, Nardeli A J, Mendes N A D C, et al. Agronomic biofortification of cowpea with zinc: Variation in primary metabolism responses and grain nutritional quality among 29 diverse genotypes [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2021, 162: 378-387.
- [26] 李广鑫, 赵鹏, 睢福庆, 等. 螯合-缓冲营养液培养条件下添加外源锌对小麦幼苗生长和 TaZIPs 基因表达的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(3): 470-481.
- [27] Fan Y J, Jiang T, Chun Z, et al. Zinc affects the physiology and medicinal components of *Dendrobium nobile* Lindl [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2021, 162: 656-666.
- [28] Liu Y M, Liu D Y, Zhao Q Y, et al. Zinc fractions in soils and uptake in winter wheat as affected by repeated applications of zinc fertilizer [J]. Soil & Tillage Research, 2020, 200: 104612. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104612>.
- [29] 邵运辉, 张盼盼, 马耕, 等. 氮锌肥配施对小麦籽粒不同类型混合粉锌营养品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2020, 40(12): 1533-1543.
- [30] 陈娟, 王少霞, 田霄鸿, 等. 锌与农药配合喷施对小麦锌累积分配及转移的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(3): 67-76.
- [31] Chen Y L, Shi J L, Dong J J, et al. Synergistic improvement of soil organic carbon storage and wheat grain zinc bioavailability by straw return in combination with Zn application on the Loess Plateau of China [J]. Catena, 2021, 197: 104920.
- [32] Saha S, Chakraborty M, Padhan D, et al. Agronomic biofortification of zinc in rice: Influence of cultivars and zinc application methods on grain yield and zinc bioavailability [J]. Field Crops Research, 2017, 210: 52-60.
- [33] 李莎莎, 王朝辉, 刁超朋, 等. 旱地高产小麦品种籽粒锌含量差异与氮磷钾吸收利用的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(2): 167-175.
- [34] El-sobky E E A, Taha A E, El-sharnouby M, et al. Zinc-biochemical co-fertilization improves rice performance and reduces nutrient surplus under semi-arid environmental conditions [J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2022, 29(3): 1653-1667.
- [35] 梁振凯, 郭聪颖, 王彩芝, 等. 氮锌配施促进小麦根系形态建成及其生理活性提高[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(5): 826-839.
- [36] Tao Z Q, Wang D M, Chang X H, et al. Effects of zinc fertilizer and short-term high temperature stress on wheat grain production and wheat flour proteins [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2018, 17(9): 1979-1990.
- [37] Sattar A, Wang X K, Ul-allan S, et al. Foliar application of zinc improves morpho-physiological and antioxidant defense mechanisms, and agronomic grain biofortification of wheat (*Triticum aestivum* L.) under water stress [J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2022, 29(3): 1679-1706.
- [38] 袁慢慢, 郭刚, 耿维, 等. 配方肥配施锌肥和硫肥对小麦的提质增效作用[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(4): 518-526.
- [39] Rehman A, Farooq M, Naveed M, et al. Seed priming of Zn with endophytic bacteria improves the productivity and grain biofortification of bread wheat [J]. European Journal of Agronomy, 2018, 94: 98-107.

Effects of exogenous zinc on the zinc content, bioavailability, yield and quality of foxtail millet

CAO Meng-lin¹, SHANG Jing-tao², WANG Yu-xuan³, ZHAO Zhi-yong¹, YUAN Xiang-yang⁴, DONG Shu-qi⁴, DU Hui-ling^{5*} (1. Institute of Cotton Research, Shanxi Agricultural University, Yuncheng Shanxi 044000; 2. Shanxi Research Institute for Clean Energy, Tsinghua University, Taiyuan Shanxi 030000; 3. Jinzhong Vocational and Technical College, Jinzhong Shanxi 030600; 4. College of Agriculture, Shanxi Agricultural University, Jinzhong Shanxi 030801; 5. Basic Department of Shanxi Agricultural University, Jinzhong Shanxi 030801)

Abstract: The research was aimed to explore the effects of spraying different concentrations of exogenous zinc on the zinc content, zinc bioavailability, mineral element content and yield of millet during the booting stage, and to clarify the optimal application amount of exogenous zinc, and provide theoretical support for the rational application of zinc fertilizer in millet production. Jingu 21 (conventional cultivar) and Zhangzagu 10 (hybrids) were used as test materials, and same amount of 0 (CK, clear water), 20 (Zn1), 40 (Zn2), 60 (Zn3), 80 (Zn4), 100 (Zn5) mg · kg⁻¹ zinc sulfate (ZnSO₄ · 7H₂O) were sprayed at the booting stage of millet. The effects of different concentrations of zinc on the zinc content in different parts of plants, zinc bioavailability, yield and quality of millet in booting stage were studied. The result showed



that exogenous zinc significantly increased the zinc content of various parts of the plant, and with the increase of zinc spraying concentration, the zinc content continued to increase, and reached the maximum in the Zn5 treatment, and the content didn't exceed the national standard zinc content ($<50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). After applying different concentrations of exogenous zinc, the distribution ratio of zinc in leaves was the largest, followed by roots and stem sheaths, in grains it was the smallest. With the increase of zinc concentration, the phytic acid (PA) content and PA/Zn molar ratio of millet seeds decreased first and then gradually increased, and the decrease was the largest at $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ treatment. Compared with the control, the PA content and PA/Zn molar ratio of millet seeds of Jingu 21 decreased by 46.06% and 54.31% respectively, and those of Zhangzagu 10 decreased by 35.80% and 40.31%, respectively. After spraying with different zinc solutions, the contents of grain nitrogen, phosphorus, potassium and crude protein increased first and then decreased, and reached the highest level at $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Compared with CK, the contents of grain nitrogen, phosphorus, potassium and crude protein increased by 9.26%, 40.79%, 9.20%, 9.26% for Jingu 21, and increased by 5.36%, 17.17%, 4.58%, 5.36% for Zhangzagu 10, respectively. Compared with CK, the panicle length, 1000-grain weight, grain weight per ear and yield of millet with different Zn spraying concentrations and different cultivars were increased the most in Zn2 treatment, and they increased by 7.12%, 3.79%, 20.69%, 21.16% for Jingu 21, and increased by 3.33%, 5.16%, 14.22%, 13.94% for Zhangzagu 10, respectively. In conclusion, exogenous zinc plays an important role in the zinc content, bioavailability, quality improvement and yield increase of millet. We suggest that spraying $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ zinc solution at the booting stage is the most reasonable for zinc-rich millet production and can achieve high yield and high efficiency.

Key words: foxtail millet; zinc content; phytic acid; zinc bioavailability; yield; quality