



土壤不同硒含量对小麦主要产量相关性状和 硒吸收利用的影响

姜宗昊,刘玉秀,张正茂,王文杰

(西北农林科技大学 农学院,陕西杨凌 712100)

摘要 为探究不同土壤硒含量对小麦主要产量相关性状和硒吸收利用的影响,以‘普冰 151’‘西农黑大穗’‘周黑麦 1 号’为试验材料,紫阳高硒矿粉为硒源,采用盆栽试验,设置 5 种不同土壤硒含量, S0(0 添加硒矿粉), S1、S2、S3、S4(土壤硒含量分别为 $4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。结果表明:土壤中施加高硒矿粉对小麦分蘖数和穗长无显著影响;但在土壤硒含量 S2 和 S3 水平下‘西农黑大穗’的株高显著提高。土壤硒含量增加可显著提高小麦穗粒数、千粒质量和产量。随土壤硒含量的增加,小麦旗叶叶绿素含量与净光合速率较 S0 均显著增加,呈先升高后降低的趋势。土壤中施加高硒矿粉显著提高小麦籽粒粗蛋白含量, S2、S3 和 S4 水平之间无显著差异,但显著高于 S1 水平。在土壤硒含量 S1 和 S2 水平下,3 个小麦材料籽粒有机硒含量均达到富硒小麦标准(GB13105-1991), S2 水平为最适宜种植富硒小麦的土壤硒含量。3 个小麦材料的籽粒有机硒含量在 S2 水平下分别为 $0.258 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.288 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.273 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 籽粒硒转化率分别为 82.958%、84.457% 和 82.979%, ‘西农黑大穗’在 3 个材料中表现最高。表明土壤中施加一定量硒能有效提高小麦产量、籽粒粗蛋白含量和硒含量。

关键词 小麦;硒含量;生长发育;硒转化率

中图分类号 S512.1;S311

文献标志码 A

文章编号 1004-1389(2021)01-0041-09

硒是人体必需的微量元素之一,是人体内各种代谢反应和免疫反应的参与者^[1],具有抗氧化、抗衰老、增强免疫力等生物学功能,在防癌、抗肿瘤方面也起到关键的作用^[2]。硒元素摄入不足会影响人们身体健康,严重者可引发一系列疾病^[3-4],如大骨节病、帕金森和癫痫等^[5]。世界卫生组织推荐正常人体每日硒摄入量为 $50 \sim 200 \mu\text{g}$ ^[6],而中国人均摄入量仅为 $30 \mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$ 左右^[7],远低于世界平均水平。现如今世界上大多数地区土壤中缺乏硒,从而导致农产品硒含量过低^[8-9]。

小麦是中国第三大粮食作物^[10],也是聚硒能力最强的谷类作物^[11]。Fox 等^[12]研究发现人体对小麦硒的吸收利用率最高。黑小麦是普通小麦中的一种特殊类型品种,营养成分含量高,被营养学家们称为补钙、富硒、高碘营养麦^[13],是有效的硒积累作物和高硒食物选择^[14]。由于无机硒具有较高的毒性,且不易被人体所吸收,因此经植

物转化形成的有机硒是人体吸收硒元素的主要途径^[15]。目前,国际上富硒农产品的来源主要有两种途径,一种是在富硒地区种植,另一种是种植过程中施加外源硒,因此,研究不同土壤硒含量对小麦主要产量相关性状和硒吸收利用的影响,提高小麦籽粒硒含量和硒转化率,满足人们对硒元素的需求显得尤为重要和迫切^[16]。

硒对农作物的生长发育具有两面性,适量的硒促进作物的生长发育,反之高浓度的硒抑制生长且产生毒害^[17]。目前已有许多通过叶面喷施硒肥提高小麦籽粒硒含量的研究,但施用浓度差别较大,得到的结论也不尽相同。研究土壤硒含量对小麦籽粒硒含量影响的文献较少,小麦品种对硒吸收利用和其生长发育与土壤硒含量的关系也缺乏系统研究,在相同土壤硒含量条件下黑小麦和普通小麦对硒吸收的规律尚不明确。陕西紫阳是中国已发现的第二个高硒地区,当地种植的茶叶中有 70% 达到了富硒水平^[18]。马芳宇^[19]对

收稿日期:2019-12-25 修回日期:2020-04-19

基金项目:西安市科技计划项目(20193043YF031NS031);西北农林科技大学试验示范(基地)科技成果推广项目(TGZX2018-35)。

第一作者:姜宗昊,男,硕士研究生,研究方向为小麦作物遗传改良与种质创新。E-mail:jzh1019425037@163.com

通信作者:张正茂,男,研究员,硕士生导师,主要从事小麦遗传育种与加工研究。E-mail:zhzhm@nwsuaf.edu.cn

汉江平原富硒地区小麦等农作物调查发现,由富硒土壤种植生长的小麦为硒含量适宜的富硒农产品,因此,本研究以紫阳高硒矿粉为硒源,按比例配制不同硒含量梯度的土壤,采用盆栽试验,研究不同土壤硒含量对黑小麦和普通小麦的主要农艺性状、叶绿素含量(SPAD 值)、光合特性以及籽粒硒含量的影响,对有效开发富硒土壤资源和为缺硒地区富硒小麦生产提供技术支持。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

试验选用由西北农林科技大学农学院张正茂研究员课题组选育的小麦品种(系)‘普冰 151’和‘西农黑大穗’,周口市农业科学院提供的‘周黑麦 1 号’为试验材料。

采用盆栽的种植方式,花盆高 29 cm,最大内径 44 cm。所用土壤类型为壤土,取 0~20 cm 土层土壤将其风干、过筛。土壤有机质、全氮、速效磷、速效钾和硒含量分别为 $9.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $1.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $10.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $250.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH 为 8.2。土壤装盆前加入复合肥(N 102 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 P_2O_5 132 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 K_2O 36 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

硒源为紫阳高硒矿粉(硒含量 513.4 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。通过混入不同量的硒矿粉设置 5 个土壤硒浓度梯度:0 添加硒矿粉(对照,S0)、土壤硒含量 4 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (S1)、土壤硒含量 8 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (S2)、土壤硒含量 12 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (S3)和土壤硒含量 16 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (S4)。本试验共 15 个处理,每个处理 6 次重复,播种方式为穴播,每盆种植 15 穴,每穴种植 2 粒小麦,三叶期定苗至 12 株,试验期间统一管理。

1.2 测定项目及方法

农艺性状的调查:于分蘖期每个处理随机选取 12 株小麦调查其分蘖数,取其平均值。于成熟期每个处理随机选取 10 株小麦测定其株高、穗长和穗粒数,取其平均值。收取每个处理 3 盆成熟期小麦测其单株产量和千粒质量,重复 3 次,取平均值^[20]。

旗叶叶绿素值测定:每个处理于开花期标记 12 株小麦主茎,用叶绿素仪(SPAD-502puls,柯尼卡-美能达)每隔 5 d 测定旗叶 SPAD 值,并取平均值^[21]。

灌浆阶段光合特性测定:灌浆期于晴朗无风

的上午每个处理选取 12 株具有代表性的小麦,用美国 COR 公司生产的 Li-6400 型便携式光合测定仪测定旗叶净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间 CO_2 浓度^[22]。

小麦籽粒粗蛋白质含量测定:称取全麦粉 0.5 g(精确到 0.000 1 g)于消化管中,加入催化剂(硫酸钾与硫酸铜 10:1 混合)2.0 g,加入 H_2SO_4 10 mL,用消煮炉(晟声公司 X20A 型)在 400 $^\circ\text{C}$ 下消化 1 h,冷却后用自动凯氏定氮仪(海能仪器 K9840)测定,测定结果乘以 5.7,即为籽粒粗蛋白含量^[23]。

籽粒全硒含量的测定:准确称取 0.5 g(精确到 0.000 1 g)样品于锥形瓶中,加入硝酸+高氯酸 4:1 混合液 10 mL,摇匀,在瓶口加盖塞有玻璃棉的小长颈漏斗,于低温电热板上加热分解,至高氯酸冒烟,小长颈漏斗取下,加入 5 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的盐酸 10 mL,再加热 5 min,使其溶解,同时能保证 Se^{6+} 还原为 Se^{4+} ,取下冷却,定容至 25 mL,摇匀并倒入 10 mL 离心管中,用液相色谱原子荧光联用仪(LC-AFS9780)测定^[24]。

籽粒无机硒含量的测定:用电子天平准确称取 1 g(精确到 0.000 1 g)样品于有塞刻度试管中,加体积分数 50% 盐酸溶液 10 mL,超声波混匀 30 min 后,沸水浴 30 min,冷却后用脱脂棉过滤,留其滤液待用。样品消解及测定同上,测定其无机硒的含量^[25]。

1.3 计算公式

参照张妮^[26]计算公式:

籽粒硒转化率 = 籽粒有机硒含量/籽粒全硒含量 $\times 100\%$

籽粒硒利用率 = (施硒处理籽粒硒含量 - 不施硒处理籽粒硒含量)/施硒量 $\times 100\%$

籽粒有机硒含量 = 籽粒全硒含量 - 籽粒无机硒含量

1.4 统计分析

采用 Excel 2016 处理数据、图表,采用 SPSS (Statistical Product and Service Solutions) 20.0 数据处理软件进行数据统计分析,采用新复极差法进行差异显著性分析。

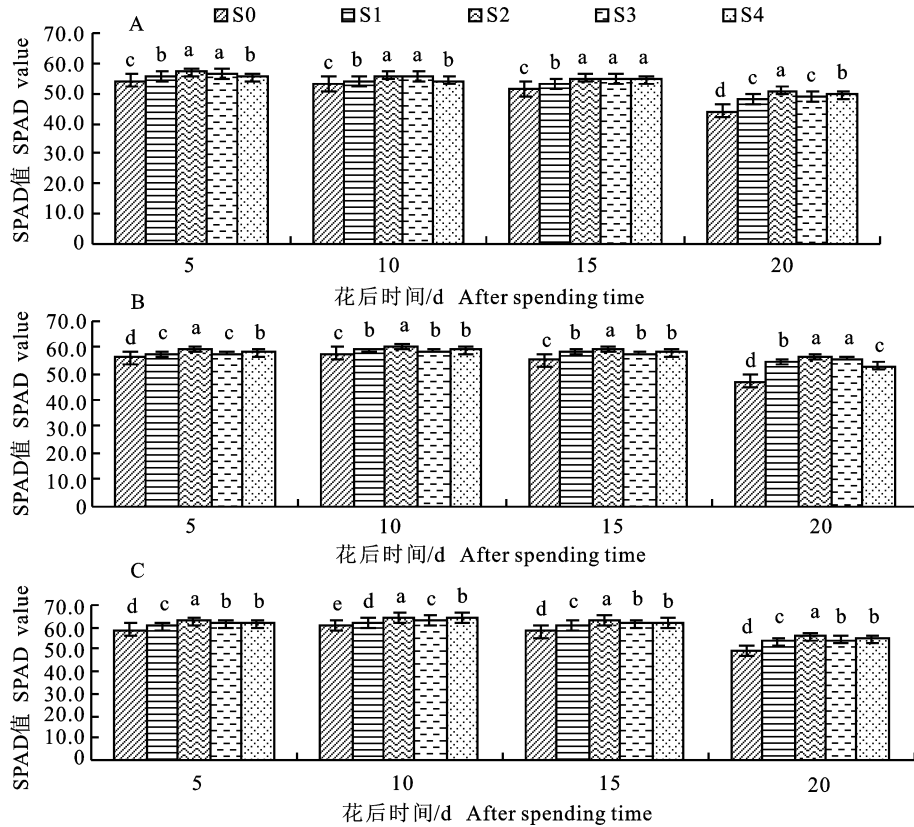
2 结果与分析

2.1 不同土壤硒含量条件对小麦旗叶 SPAD 值的影响

SPAD 值即叶绿素的相对含量,是反应植物

光合能力的重要参数。由图 1 可知,土壤中施加高硒矿粉后,3 个小麦材料旗叶 SPAD 值在花后 5 d、10 d、15 d 和 20 d 较 S0 均显著增加($P < 0.05$),其中‘普冰 151’在花后 5 d 达到最大值,

‘西农黑大穗’和‘周黑麦 1 号’在花后 10 d 达到最大值。土壤中施加高硒矿粉使小麦旗叶在花后 20 d 仍维持较高的叶绿素含量,有效延缓小麦衰老。



A. 普冰 151; B. 西农黑大穗; C. 周黑麦 1。图中不同小写字母表示处理间差异达显著性水平($P < 0.05$),下同

A. Pubing 151; B. Xinongheidsui; C. Zhouheimai 1. Different lowercase letters indicate significance between treatments ($P < 0.05$), the same below

图 1 不同土壤硒含量条件下小麦旗叶 SPAD 值

Fig. 1 SPAD value of wheat flag leaves under different soil selenium contents

2.2 不同土壤硒含量对小麦旗叶光合特性的影响

由表 1 可知,与 S0 相比,土壤中施加高硒矿粉显著提高 3 个小麦材料旗叶净光合速率(P_n) ($P < 0.05$), P_n 在 S2 水平下显著高于其他水平 ($P < 0.05$), S1、S3、S4 水平之间无显著差异,随土壤硒含量的升高,呈先升高后降低的趋势。气孔导度表示气孔开放程度,与小麦光合、呼吸和蒸腾有密切的关联。与 S0 相比,土壤硒含量对小麦旗叶气孔导度与蒸腾速率均无显著影响,但数值变化呈现出与旗叶净光合速率一致的规律(表 1)。CO₂ 通过气孔进入叶片,扩散到细胞间隙参与光合作用,小麦旗叶光合作用越强,消耗的 CO₂ 越多。由表 1 可知,3 个小麦材料旗叶胞间 CO₂ 浓度随硒含量的增加呈先降低后升高的趋势,与旗叶净光合速率规律相反。

2.3 不同土壤硒含量对小麦农艺性状的影响

由表 2 可知,与 S0 相比,土壤硒含量对 3 个小麦材料分蘖数和穗长无显著影响,对‘普冰 151’和‘周黑麦 1 号’的株高无显著影响, S2 和 S3 水平下,显著提高‘西农黑大穗’的株高 ($P < 0.05$)。在不同土壤硒含量条件下,3 个小麦材料单株产量较 S0 均显著增加 ($P < 0.05$), ‘普冰 151’和‘西农黑大穗’在 S2 水平达到最大值, ‘周黑麦 1 号’在 S3 水平达到最大值,三者最大产量较 S0 分别增产 23.66%、25.89% 和 26.42%。施硒条件下 3 个小麦材料穗粒数和千粒质量较 S0 均显著增加 ($P < 0.05$)。可见,土壤中施加高硒矿粉提高小麦的穗粒数和千粒质量,从而达到增产效果,表明土壤中施加一定量的硒能有效提高小麦产量。

表 1 不同土壤硒含量下小麦灌浆期旗叶光合特性

Table 1 Flag leaf photosynthetic characteristics of wheat during grain filling stage under different soil selenium contents

品种 Variety	处理 Treatment	$P_n/$ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	$G_s/$ ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	$C_i/$ ($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)	$T_r/$ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
普冰 151	S0	16.15 c	0.22 a	181.19 a	2.97 a
Pubing 151	S1	17.37 b	0.24 a	166.62 b	3.27 a
	S2	18.40 a	0.27 a	145.53 c	3.56 a
	S3	17.23 b	0.25 a	164.09 b	3.25 a
	S4	17.21 b	0.23 a	165.14 b	2.85 ab
西农黑大穗	S0	18.26 c	0.33 a	241.27 a	4.13 a
Xinongheidasui	S1	19.52 b	0.34 a	231.53 ab	4.42 a
	S2	20.75 a	0.37 a	210.03 c	4.87 a
	S3	19.46 b	0.31 a	209.06 c	4.80 a
	S4	19.51 b	0.38 a	220.74 bc	4.33 a
周黑麦 1 号	S0	15.70 c	0.28 a	214.06 a	3.36 a
Zhouheimai 1	S1	16.93 b	0.24 a	212.26 a	3.42 a
	S2	17.97 a	0.28 a	201.14 b	3.93 a
	S3	16.94 b	0.26 a	187.65 c	3.42 a
	S4	16.87 b	0.27 a	213.69 a	3.26 a

注:同列不同小写字母表示处理间显著性水平($P < 0.05$),下同。

Note: Lowercase letters indicate significance between treatments ($P < 0.05$), the same below.

表 2 不同土壤硒含量下小麦农艺性状

Table 2 Agronomic traits of wheat under different selenium contents in soil

品种 Variety	处理 Treatment	单株分蘖数 Number of tillers per plant	穗长/cm Spike length	株高/cm Plant height	每盆穗数 Number of spikes per pot	穗粒数 Grains per spike	千粒质量/g 1 000-grain quality	单株产量/g Yield per plant
普冰 151	S0	12.8 a	9.5 a	74.4 a	57.10 a	45.28 c	42.90 c	8.07 c
Pubing 151	S1	12.9 a	9.4 a	74.5 a	57.41 a	46.48 b	43.21 b	8.87 b
	S2	12.9 a	9.6 a	74.6 a	57.51 a	46.72 b	44.06 a	9.98 a
	S3	12.9 a	9.4 a	74.8 a	57.35 a	47.86 a	43.77 b	9.12 b
	S4	12.8 a	9.4 a	74.5 a	57.31 a	46.53 b	43.94 b	9.15 b
西农黑大穗	S0	8.5 a	13.7 a	71.3 b	40.71 a	66.24 c	41.28 c	8.15 c
Xinongheidasui	S1	8.5 a	13.8 a	71.8 ab	40.75 a	69.15 b	42.10 b	8.99 b
	S2	8.7 a	13.9 a	72.3 a	40.89 a	71.25 a	43.04 a	10.26 a
	S3	8.6 a	13.7 a	72.4 a	40.78 a	69.25 b	41.50 b	9.23 b
	S4	8.5 a	13.7 a	71.9 ab	40.71 a	66.90 c	41.88 b	9.20 b
周黑麦 1 号	S0	10.6 a	9.4 a	69.5 a	50.55 a	46.65 d	39.59 c	7.53 c
Zhouheimai 1	S1	10.8 a	9.5 a	69.6 a	50.81 a	48.40 b	40.18 b	8.31 b
	S2	10.9 a	9.5 a	69.9 a	50.91 a	49.55 a	40.60 b	8.43 b
	S3	10.9 a	9.4 a	69.7 a	50.75 a	48.60 b	42.31 a	9.52 a
	S4	10.8 a	9.3 a	69.7 a	50.68 a	47.45 c	41.39 b	8.47 b

2.4 不同土壤硒含量对小麦籽粒粗蛋白含量的影响

由图 2 可知,与 S0 相比,土壤中施加高硒矿粉显著提高小麦籽粒粗蛋白含量($P < 0.05$)。3 个小麦材料籽粒粗蛋白含量在 S2、S3 和 S4 水平无显著差异,但均显著高于 S0 和 S1 水平($P <$

0.05),表明土壤中施加一定量的硒可以有效改善小麦籽粒粗蛋白含量。

2.5 不同土壤施硒量对小麦籽粒硒利用及含量的影响

由表 3 可知,与 S0 相比,土壤中施加高硒矿粉显著提高小麦籽粒硒含量和有机硒含量($P <$

0.05)。3 个小麦材料籽粒硒含量和有机硒含量随施硒量增加而增加,均在 S4 水平达到最大值。土壤中添加高硒矿粉条件下(S1、S2、S3、S4),3 个小麦材料籽粒硒转化率均显著高于 S0 ($P < 0.05$),呈先增加后降低的趋势,均在 S2 水平达到最大值;在施硒条件下 3 个小麦材料的籽粒硒利用率均无显著差异,呈随施硒量增加而减少的趋

势。小麦面粉的国家富硒标准为 $0.15 \sim 0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,3 个小麦材料籽粒有机硒含量在 S1 和 S2 水平下为 $0.163 \sim 0.288 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,均达到富硒标准(GB13105-1991)。表明土壤中施加一定量的硒可有效提高小麦籽粒硒含量和有机硒含量,使其达到富硒标准。

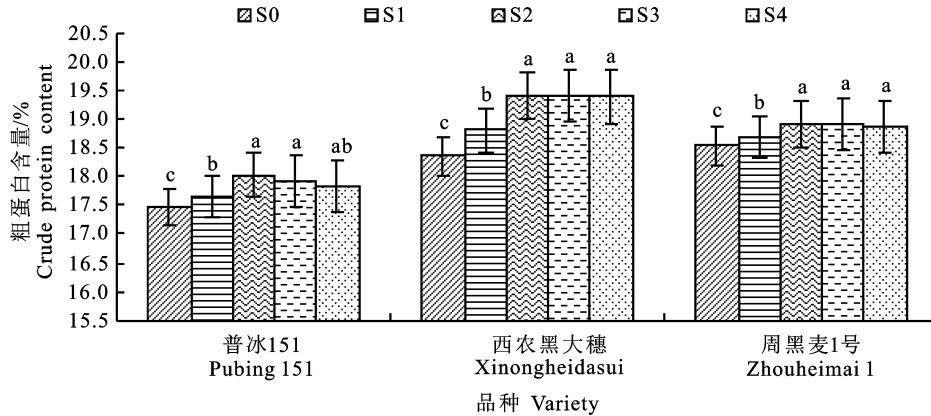


图 2 不同土壤硒含量下小麦籽粒粗蛋白含量

Fig. 2 Content of crude protein in wheat grains under different selenium contents in soil

表 3 不同土壤施硒量下小麦籽粒硒利用及含量

Table 3 Wheat selenium utilization and content under different selenium application rates

品种 Variety	处理 Treatment	有机硒/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) Organic selenium	硒/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) Selenium	籽粒硒转化率/% Selenium conversion rate	籽粒硒利用率/% Selenium utilization rate
普冰 151	S0	0.057 e	0.072 e	79.167 d	0.000 c
Pubing 151	S1	0.163 d	0.201 d	81.095 c	3.225 a
	S2	0.258 c	0.311 c	82.958 a	2.788 ab
	S3	0.347 b	0.423 b	82.130 b	2.625 ab
	S4	0.430 a	0.531 a	80.979 c	2.469 b
	西农黑大穗	S0	0.067 e	0.083 e	80.723 d
Xinongheidasui	S1	0.18 d	0.217 d	82.949 c	3.350 a
	S2	0.288 c	0.341 c	84.457 a	3.025 a
	S3	0.386 b	0.462 b	83.550 b	2.858 a
	S4	0.478 a	0.578 a	82.698 c	2.594 ab
	周黑麦 1 号	S0	0.062 e	0.081 e	77.500 e
Zhouheimai 1	S1	0.169 d	0.210 d	80.476 d	3.250 a
	S2	0.273 c	0.329 c	82.979 a	3.013 a
	S3	0.370 b	0.452 b	81.858 c	2.730 a
	S4	0.464 a	0.561 a	82.209 b	2.416 ab

3 讨论

目前有通过硒包衣剂及土壤中直接施硒等方法对小麦产量及相关性状进行研究。杨峰等^[20]研究发现硒包衣剂处理小麦籽粒能显著提高黑小

麦株高,株高随包衣剂浓度的增加而增加;对黑小麦穗长有一定影响,呈现随处理浓度先升高后下降的趋势。本研究中发现随土壤硒含量的增加,3 个小麦材料穗长较 S0 无显著差异;与 S0 相比, S2 和 S3 水平显著提高‘西农黑大穗’的株高。李

鸣凤等^[24]研究发现土壤中施加硒矿粉后,小麦穗粒数较 S0 显著增加,成穗数与千粒质量略有增加但无显著差异。李韬等^[27]通过对土壤中施加纳米硒肥发现低浓度的硒肥可显著提高小麦的百粒质量,但随施硒量升高百粒质量又会出现下降的趋势。本研究发现土壤中施加高硒矿粉可提高小麦的穗粒数和千粒质量,从而增加小麦产量。与杨峰等^[20]关于穗长的结论,以及与李鸣凤等^[24]和李韬等^[27]的产量相关性结论有所差异,可能是由于硒源、施硒浓度和品种的不同造成的,具体原因还需要进一步试验和探讨。

叶绿素虽然不含硒,但是以硒-氨基酸的形式参与叶绿素前体物的合成,因此外施硒能对小麦叶绿素含量产生影响^[28]。王海红^[29]在孕穗期对小麦喷施硒肥的研究中发现喷硒的 4 个处理 SPAD 值较清水对照均显著提高,并经过硒处理的小麦植株在生理后期旗叶 SPAD 值下降缓慢,延缓小麦的衰老。本研究通过土壤施硒试验方法得出的结论与王海红^[29]一致,适量的外源硒可有效促进小麦旗叶 SPAD 值的增加,并延缓小麦的衰老。繆树寅^[30]通过在土壤中混入亚硒酸盐种植小麦发现外源 Se₄ 能显著提高部分品种的旗叶净光合速率,施用外源 Se₆ 对小麦旗叶净光合速率无显著影响,部分品种的旗叶净光合速率甚至降低,胞间 CO₂ 浓度与净光合速率呈现相反的趋势,蒸腾速率与净光合速率趋势基本相同。本研究结论与繆树寅^[30]所得结论一致,土壤中施加适量的硒对小麦旗叶净光合速率起到促进作用。

叶面喷硒与土壤施硒是前人研究硒对小麦籽粒硒含量影响常用的方法,且结果都表明施用外源硒能显著增加小麦籽粒硒含量。刘庆等^[31]通过在不同时期对小麦叶面喷施硒肥发现喷施一定浓度的亚硝酸硒能有效提高小麦籽粒粗蛋白含量。蒋方山等^[32]通过对小麦叶面喷施亚硒酸钠同样表明喷施硒肥能显著提高小麦籽粒粗蛋白含量。本研究通过土壤中施加高硒矿粉的试验方法同样发现适量的硒对小麦籽粒粗蛋白含量有显著提高作用。本研究采用土施高硒矿粉的方法,所得到的结论与前人一致,3 个小麦材料在 S1、S2、S3 和 S4 水平下籽粒硒含量和有机硒含量较 S0 均显著增加,S1 和 S2 水平下籽粒有机硒含量达到国家富硒标准(GB13105-1991)。人体对小麦有机硒吸收利用最高,转化率是衡量小麦籽粒有机硒含量的重要指标,转化率越高则籽粒有机硒

含量越高。张妮^[26]在研究中发现施用外源硒显著提高小麦籽粒硒转化率,硒利用率则随施硒量的增加而降低。樊俊等^[33]研究表明小麦对有机硒的转化能力有限,施硒过多可能会导致硒的转化率下降。本研究发现与 S0 相比,土壤中施加高硒矿粉显著提高小麦籽粒硒转化率,呈先增加后降低的趋势;小麦籽粒硒利用率随土壤硒含量的增加而降低,与张妮^[26]研究结论一致。

4 结论

本研究得出以下结论:(1)土壤中施加高硒矿粉显著提高小麦旗叶叶绿素含量和净光合速率,有效延缓小麦的衰老。(2)土壤中施加高硒矿粉显著提高小麦穗粒数、千粒质量和产量。(3)土壤中施加高硒矿粉显著提高小麦籽粒粗蛋白含量。(4)土壤中施加高硒矿粉可显著提高小麦籽粒硒含量和有机硒含量,3 个小麦材料在 S1 和 S2 水平籽粒有机硒含量均达到富硒小麦标准,S2 水平是最适宜种植富硒小麦的土壤硒浓度。‘西农黑大穗’在 3 个材料中表现最好,适宜在紫阳县等高硒地区种植。

参考文献 Reference:

- [1] YADAV S K, SINGH I, SINGH D, *et al.* Selenium status in soils of northern districts of india[J]. *Journal of Environmental Management*, 2005, 75: 129-132.
- [2] 杨海滨, 徐 泽, 盛忠雷, 等. 硒对不同品种茶树土壤酶活性及硒含量的影响[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(11): 56-61. YANG H B, XU Z, SHENG ZH L, *et al.* Effects of selenium on soil enzyme activity and selenium content in different tea varieties[J]. *Journal of Ecology and Environment*, 2017, 26(11): 56-61.
- [3] 张 睿, 刘曼双, 王荣成, 等. 叶面喷施富硒植物营养素对小麦产量及品质的效应[J]. *麦类作物学报*, 2015, 35(6): 856-859. ZHANG R, LIU M SH, WANG R CH, *et al.* Effect of foliar spraying of plant se-nutrients on wheat yield and quality [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2015, 35(6): 856-859.
- [4] BAUELOS G S, LIN Z Q, BROADLEY M. Selenium Bio fortification [J]. *Selenium in Plants*, 2017, 11: 231-255.
- [5] 吕瑶瑶, 余 涛, 杨忠芳, 等. 大骨节病区硒元素分布的调控机理研究: 以四川省阿坝地区为例[J]. *环境化学*, 2012, 31(7): 935-944. LÜ Y Y, YU T, YANG ZH F, *et al.* Study on the regulation mechanism of selenium distribution in Kaschin-Beck disease area: a case study in Aba area, Sichuan province[J]. *Environmental Chemistry*, 2012, 31(7): 935-944.
- [6] GUERREROB, LLUGANY M, PALACIOS O, *et al.* Dual

- effects of different selenium species on wheat [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2014, 83:300-307.
- [7] 宁婵娟, 吴国良. 微量元素硒与人体健康及我国富硒食品的开发状况[J]. 山西农业科学, 2009, 37(5): 90-92.
NING CH J, WU G L. Trace element selenium and human health and the development of selenium-enriched food in China[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2009, 37(5): 90-92.
- [8] TINGGI U. Essentiality and toxicity of selenium and its status in Australia - a review[J]. *Toxicology Letters*, 2003, 137(1/2): 103-110.
- [9] LENZ M, LENS P N L. The essential toxin: the changing perception of selenium in environmental sciences[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(12): 3620-3633.
- [10] 何中虎, 庄巧生, 程顺和, 等. 中国小麦产业发展与科技进步[J]. 农学学报, 2018, 83(1): 105-112.
HE ZH H, ZHUANG Q SH, CHENG SH H, et al. China's wheat industry development and scientific and technological progress [J]. *Journal of Agronomy*, 2018, 83(1): 105-112.
- [11] LYONS G, STANGOULIS J, GRAHAM R. High-selenium wheat: biofortification for better health[J]. *Nutrition Research Reviews*, 2003, 16(1): 45.
- [12] FOX T E, ATHERTON C, DAINTY J R, et al. Absorption of selenium from wheat, garlic, and Cod intrinsically labeled with Se77 and Se82 stable isotopes[J]. *International Journal for Vitamin and Nutrition Research*, 2005, 75(3): 179-186.
- [13] 张耀文, 赵雪英. 山西省绿豆生产现状及发展方向[J]. 山西农业科学, 2005, 33(2): 14-16.
ZHANG Y W, ZHAO X Y. Current status and development direction of mung bean production in Shanxi province [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2005, 33(2): 14-16.
- [14] 赵雪英, 张春明, 闫虎斌, 等. 绿豆机械化栽培技术集成及适宜品种筛选[J]. 山西农业科学, 2014, 42(10): 1095-1097.
ZHAO X Y, ZHANG CH M, YAN H B, et al. Mung bean mechanized cultivation technology integration and suitable variety screening [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2014, 42(10): 1095-1097.
- [15] 李升和, 靳二辉, 周金星, 等. 有机硒在人和动物应用方面的研究进展[J]. 安徽科技学院学报, 2013(1): 7-11.
LI SH H, JIN E H, ZHOU J X, et al. Research progress of organic selenium in human and animal applications [J]. *Journal of Anhui Science and Technology University*, 2013(1): 7-11.
- [16] ZHANG M, TANG S, HUANG X, et al. Selenium uptake, dynamic changes in selenium content and its influence on photosynthesis and chlorophyll fluorescence in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2014, 107: 39-45.
- [17] 翟红强, 赵会杰. 硒对花生抗氧化作用的初步研究[J]. 中国油料作物学报, 2007(1): 59.
ZHAI H Q, ZHAO H J. Preliminary study on antioxidation of peanuts affected by selenium [J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2007(1): 59.
- [18] 程良斌, 梅紫青, 黄隆富. 紫阳茶含硒量的调查研究[J]. 茶叶科学, 1991(1): 63-66.
CHENG L B, MEI Z Q, HUANG L F. Investigation on the selenium content of Ziyang tea [J]. *Tea Science*, 1991(1): 63-66.
- [19] 马芳宇. 江汉平原富硒土壤与农产品质量初探[J]. 资源环境与工程, 2012(2): 102-108.
MA F Y. Preliminary study on selenium-enriched soil and agricultural product quality in Jiangnan Plain [J]. *Resource Environment and Engineering*, 2012(2): 102-108.
- [20] 杨 峰, 闫秋艳, 鲁晋秀, 等. 硒包衣剂对黑小麦生长及养分吸收的影响[J]. 山西农业科学, 2017(5): 707-709, 714.
YANG F, YAN Q Y, LU J X, et al. Effect of selenium coating on growth and nutrient absorption of black wheat [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2017(5): 707-709, 714.
- [21] 李毅博, 白月梅, 石华荣, 等. 干旱条件下非顺序衰老小麦顶二叶叶绿素及抗氧化酶活性的变化[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(2): 63-70.
LI Y B, BAI Y M, SHI H R, et al. Changes of chlorophyll and antioxidant enzyme activities in the apical leaf of non-sequential senescent wheat under drought conditions [J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2017, 45(2): 63-70.
- [22] 刘玉秀, 张正茂, 熊建云, 等. 超高压诱导小麦突变株系的光合特性及农艺性状[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(4): 86-92.
LIU Y X, ZHANG ZH M, XIONG J Y, et al. Photosynthetic characteristics and agronomic traits of mutated wheat strains induced by ultra-high-pressure treatment [J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2013, 41(4): 86-92.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2005.
BAO SH D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2005.
- [24] 李鸣凤, 邓小芳, 付小丽, 等. 不同硒源对小麦生长、硒吸收利用以及玉米后效的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(1): 1-7.
LI M F, DENG X F, FU X L, et al. Effects of different selenium sources on wheat growth, selenium uptake and utilization and the after effects on maize [J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2017, 36(1): 1-7.
- [25] 罗定祥, 冶 军, 侯镇安, 等. 不同有机物料对土壤硒形态及小麦硒吸收的影响[J]. 新疆农业学报, 2018, 55(2): 328-336.
LUO D X, YE J, HOU ZH A, et al. Effects of different or-

- ganic materials on selenium forms in soil and selenium absorption by wheat[J]. *Xinjiang Agricultural Journal*, 2018, 55(2): 328-336.
- [26] 张妮. 不同价态外源硒对小麦硒吸收与转运的影响[D]. 新疆石河子: 石河子大学, 2016.
- ZHANG N. Effects of exogenous selenium in different valences on selenium absorption and translocation in wheat [D]. Shihezi Xinjiang: Shihezi University, 2016.
- [27] 李韬, 孙发宇, 龚盼, 等. 施纳米硒对小麦籽粒硒含量及其品质性状的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(2): 427-433.
- LI T, SUN F Y, GONG P, *et al.* Effects of nano-selenium fertilization on selenium concentration of wheat grains and quality-related traits[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(2): 427-433.
- [28] CAKMAK I, MARCHNER H. Magnesium deficiency and high light intensity enhance activities of superoxide dismutase, ascorbate peroxidase and glu2 tathione reductase in bean leaves[J]. *Plant Physiol*, 1991, 98: 1222-1227.
- [29] 王海红. 叶面喷硒对冬小麦氧化衰老、籽粒硒含量及产量影响的研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2007.
- WANG H H. Effects of foliar application of selenium on oxidative senescence, selenium content and yield of winter wheat [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2007.
- [30] 缪树寅. 不同品种小麦硒的耐受性差异及其动态吸收、转运规律研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- LIAO SH Y. Study on tolerance difference and dynamic absorption and translocation of selenium in different wheat varieties[D]. Yangling Shaanxi: Northwest A&F University, 2013.
- [31] 刘庆, 田侠, 史衍玺. 施硒对小麦籽粒硒富集、转化及蛋白质与矿质元素含量的影响[J]. *作物学报*, 2016, 42(5): 156-161.
- LIU Q, TIAN X, SHI Y X. Effects of selenium application on selenium enrichment, transformation and protein and mineral element content in wheat grains[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2016, 42(5): 156-161.
- [32] 蒋方山, 张海军, 吕连杰, 等. 叶面喷施亚硒酸钠对黑粒小麦籽粒硒含量、产量及品质的影响[J]. *麦类作物学报*, 2018, 38(12): 110-117.
- JIANG F SH, ZHANG H J, LÜ L J, *et al.* Effects of foliar application of sodium selenite on selenium content, yield and quality of black grain wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2018, 38(12): 110-117.
- [33] 樊俊, 王瑞, 向必坤, 等. 不同硒源对茎叶碎米茅吸收、转化硒的效应研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2014(1): 63-68.
- FAN J, WANG R, XIANG B K, *et al.* Effects of different selenium sources on absorption and selenium conversion of loquat rice [J]. *Chinese Soil and Fertilizer*, 2014(1): 63-68.

Effects of Different Selenium Contents in Soil on Main Traits Related to Yield of Wheat and Selenium Absorption

JIANG Zonghao, LIU Yuxiu, ZHANG Zhengmao and WANG Wenjie

(College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling Shaanxi 712100, China)

Abstract In order to explore the effects of different selenium contents in soil on the main traits related to yield of wheat and its selenium absorption and utilization, ‘Pubing 151’, ‘Xinongheidasui’ and ‘Zhouheimai 1’ were used as the test materials, and Ziyang high selenium ore powder was used as selenium source, using pot experiment, 5 kinds of soil selenium contents were set, it included S0 (0 added selenium mineral powder), S1, S2, S3, S4 (soil selenium content are $4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). The results showed that: mineral soil applied high selenium had no significant effect on the panicle length and the numbers of tillering wheat; but under the soil selenium contents of S2 and S3, the plant height of ‘Xinongheidasui’ increased significantly. Increase of soil selenium content could significantly increase wheat grain numbers of per thousand grain mass and yield. With the increase of soil selenium content, the chlorophyll content and net photosynthetic rate of wheat flag leaves increased significantly compared with S0, and it showed a trend of first increase and then decrease. The application of high selenium mineral powder in the soil significantly increased the crude protein content of wheat grains. There was no significant difference between S2, S3 and S4 levels, but it was significantly higher than the S1 level. Under the soil selenium contents of S1 and S2 levels, the organic selenium content in the grains of the three wheat materials reached the standard of selenium-enriched wheat (GB13105-1991). At the S2 level, the soil selenium content was the most suitable for selenium-enriched wheat. The contents of organic selenium in the grains of the three wheat materials were $0.258 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $0.288 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, and $0.273 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ at S2 levels, and the selenium conversion rates were 82.958%, 84.457%, and 82.979%, respectively. ‘Xinongheidasui’ performed best among the three materials. In conclusion, applying a certain amount of selenium to the soil can effectively improve wheat yield, crude protein content and selenium content in grains.

Key words Wheat; Selenium content; Growth and development; Selenium conversion rate

Received 2019-12-25

Returned 2020-04-19

Foundation item Xi’an Science and Technology Plan Project(No. 20193043YF031NS031); Project of Promotion, Experiment and Demonstration (Base) for Scientific and Technological Achievements of Northwest A&F University(No. TGZX2018-35).

First author JIANG Zonghao, male, master student. Research area: wheat crop genetic improvement and germplasm innovation. E-mail: jzh1019425037@163.com

Corresponding author ZHANG Zhengmao, male, research fellow, master supervisor. Research area: genetic breeding and wheat processing. E-mail: zhzhm@nwsuaf.edu.cn

(责任编辑:潘学燕 **Responsible editor: PAN Xueyan**)