

苏宁, 谢惠春, 蒋礼玲, 等. 光碳核肥对土壤养分及青稞硒吸收转运的影响[J]. 山西农业科学, 2025, 53(4):64-72.

SU N, XIE H C, JIANG L L, et al. Effects of photocarbon core fertilizer on soil nutrients and selenium absorption and transport of highland barley[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2025, 53(4):64-72.

doi:10.26942/j.cnki.issn.1002-2481.2025.04.08

光碳核肥对土壤养分及青稞硒吸收转运的影响

苏宁¹, 谢惠春², 蒋礼玲¹, 乔枫², 郑万财¹, 李娟¹, 王蓉¹, 耿贵工¹

(1. 青海大学农林科学院, 青海西宁 810016; 2. 青海师范大学生命科学院, 青海西宁 810007)

摘要:为解决施用传统化肥对环境的不利影响及作物硒吸收效率低下的问题,在不添加外源硒的条件下,试验设置6个光碳核肥施用量(0(CK)、600(G1)、750(G2)、900(G3)、1 050(G4)、1 200(G5) kg/hm²)。研究新型有机肥料光碳核肥对天然富硒土壤养分改善及提升青稞硒吸收转运的能力,旨在为高效利用天然富硒资源生产绿色安全的富硒农产品提供帮助。结果表明,施用适量光碳核肥可提高土壤的有机质、全氮、全磷、全钾和速效养分含量,在G3处理下土壤综合肥力指数(IFI)达到最高(1.88),各处理间的土壤pH值无显著差异。施用光碳核肥可显著提高土壤的全硒和有效硒含量,促进土壤硒的活化,有机质、碱解氮含量与有效硒含量间呈极显著正相关。施用光碳核肥能提高青稞各器官的硒含量,大小依次为根>叶>茎>籽粒,籽粒有机硒占比增至67.9%。各器官的硒富集系数大小依次为根>叶>茎>籽粒;转运系数 $TF_{叶/茎}$ 值均大于1,说明硒更容易从作物的茎进入叶,但各处理间的转运系数 $TF_{籽粒/叶}$ 差异不显著,说明光碳核肥对叶向籽粒硒的转运无显著作用。综上,底施900 kg/hm²光碳核肥(G3处理)效果最佳,其可作为在天然富硒土壤下的栽培管理措施。

关键词:光碳核肥;综合肥力指数;有机硒占比;青稞;富集系数

中图分类号:S512.3

文献标识码:A

文章编号:1002-2481(2025)04-0064-09

Effects of Photocarbon Core Fertilizer on Soil Nutrients and Selenium Absorption and Transport of Highland Barley

SU Ning¹, XIE Huichun², JIANG Liling¹, QIAO Feng², ZHENG Wancai¹,

LI Juan¹, WANG Rong¹, GENG Guigong¹

(1. Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Qinghai University, Xining 810016, China;

2. College of Life Sciences, Qinghai Normal University, Xining 810007, China)

Abstract: In order to solve the adverse effects of application of traditional chemical fertilizers on the environment and the low efficiency of selenium absorption in crops, in this study, 6 application rates of photocarbon core fertilizer(0(CK), 600(G1), 750(G2), 900(G3), 1 050(G4), and 1 200(G5) kg/ha) were set in the experiment, the ability of a new organic fertilizer, photocarbon core fertilizer, to improve the nutrients of naturally selenium-rich soil and enhance the absorption and transport of selenium in highland barley was evaluated without the addition of exogenous selenium, so as to provide a theoretical basis for the efficient use of natural selenium-rich resources to produce green and safe selenium-rich agricultural products. The results showed that application of appropriate photocarbon core fertilizer could increase the contents of soil organic matter, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, and available nutrients, the soil integrated fertility index(IFI) under G3 treatment reached the highest value of 1.88, and there was no significant difference in soil pH among all treatments. Application of photocarbon core fertilizer could significantly increase the contents of total selenium and available selenium in soil, and promote the activation of selenium in soil. Organic matter and alkali-hydrolyzed nitrogen were extremely significantly positively correlated with available selenium content. Application of photocarbon core fertilizer could increase the selenium content of

收稿日期:2024-08-26

基金项目:青海“昆仑英才·高端创新创业人才”计划特色人才项目(QHCH-2022-027);青海省中央引导地方科技发展资金(2024ZY020)

作者简介:苏宁,在读硕士,研究方向:硒资源的开发利用,E-mail:2971954759@qq.com

通信作者:耿贵工,副研究员,硕士生导师,主要从事农产品质量安全研究,E-mail:genggg-298@163.com

highland barley organs, the content was in the order of root > leaf > stem > grain, the proportion of organic selenium in grain increased to 67.9%. The bioconcentration factor(BCF) value of selenium in all organs was in the order of root > leaf > stem > grain, and the leaf/stem value of TF was greater than 1, indicating that selenium was more easily transferred from stem to leaf, but there was no significant difference among the treatments, revealing that photocarbon core fertilizer had no significant effect on the transfer of selenium from leaf to grain. In conclusion, the best effect was achieved when the basal application rate of photocarbon core fertilizer was 900 kg/ha(G3), which could be used as a cultivation management measure in naturally selenium-rich soil.

Keywords: photocarbon core fertilizer; integrated fertility index; proportion of organic selenium; highland barley; concentration factor

硒是人体不可或缺的微量元素之一,是人体内多种酶的组成成分^[1],缺硒容易引发地方性疾病^[2],如克山病、大骨节病等。我国营养学会推荐人体膳食每日硒摄入量为 60~200 μg ^[3],世界卫生组织(WHO)将健康成人硒的推荐摄入量定为 55 $\mu\text{g}/\text{d}$ ^[4]。为保证人体日常所需硒摄入量,可食用富硒农产品来补充硒^[5]。我国 72% 地区都属于低硒区^[6],青海省的硒主要分布在海东市平安区、乐都区,土壤硒含量在 0.23~1.50 mg/kg,平均硒含量为 0.44 mg/kg^[7]。天然富硒农产品是目前认为最安全有效的补硒方式,而农作物吸收富集的硒主要来源于富硒土壤,但它不能吸收全部形态的硒。已有研究表明^[8-10],作物对硒的累积程度取决于硒的含量及其生物有效性。土壤有效硒含量会受到多种因素的影响^[11-12],包括成土母质、土壤质地、土壤理化性质、pH 值、有机质含量以及农作物种类等。因此,如何合理开发和有效利用富硒土壤资源对供给人类所需硒元素有重要的意义。

光碳核肥作为一种新型有机肥料,可将本来不被植物所吸收的 65% 的营养成分转换成被植物能利用的养分,增强根系对氮、磷、钾及微量元素的吸收和运转。其中,含有有效活菌数 ≥ 5.0 亿个/g,有机质 $\geq 50.0\%$ ^[13]。

近年来,研究人员对有机肥在作物产量和土壤肥力方面的研究较多。乔丙颖等^[14]研究发现,适宜比例的有机肥可提高青稞产量和肥料利用率,促进其对土壤养分的吸收利用。罗定祥等^[15]研究发现,有机物料可以提高土壤有效硒和小麦籽粒硒含量,并在一定程度下提高土壤硒的活化率。曹升等^[16]研究表明,增施生物有机肥可改善土壤理化性质、提高食用木薯块根硒含量,促使更多的硒转化为有机硒。

本研究旨在探索在天然富硒土壤条件下,施

用光碳核肥对土壤理化性质和青稞有效硒的影响,以及青稞体内硒吸收转运特征,为高效利用天然富硒资源生产绿色安全的富硒农产品提供技术参考。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

试验区位于青海省海东市平安区洪水泉乡永安村(东经 102°03',北纬 36°48'),该区域属于典型的青藏高原气候,海拔为 2 860 m。日照时间长,太阳辐射强,冬季寒冷漫长,年均每天光照 6.8~7.9 h,年总太阳辐射量在 607~628 kJ/cm²,年总降水量为 350~450 mm,典型雨养农作区,以种植青稞、小麦、春油菜和牧草为主。供试土壤类型为栗钙土,0~20 cm 土层的有机质含量为 9.77 g/kg,全氮含量为 0.71 g/kg,全磷含量为 2.01 g/kg,全钾含量为 21.59 g/kg,碱解氮含量为 77 mg/kg,有效磷含量为 19 mg/kg,速效钾含量为 285 mg/kg,全硒含量为 0.31 mg/kg,pH 值为 8.5。

1.2 试验材料

供试肥料为光碳核肥(有效活菌数 ≥ 5.0 亿个/g,有机质 $\geq 50.0\%$),由北京光碳联盟生物科技有限公司提供。供试化肥为尿素(N 含量 46%)、过磷酸钙(P₂O₅ 含量 12%)和氯化钾(K₂O 含量 60%)。供试青稞品种为柴青 1 号,由当地合作社提供。

1.3 试验设计

2023 年 4 月进行田间施肥播种试验,采用单因素随机区组设计,在常规施肥(N 90 kg/hm²;P₂O₅ 45 kg/hm²;K₂O 90 kg/hm²)的基础上设置 6 个光碳核肥施用水平,分别为 0(CK)、600(G1)、750(G2)、900(G3)、1 050(G4)、1 200 kg/hm²(G5),小区面积为 24 m²(3 m×8 m),中间缓冲带为 0.6 m,每个小区按常规播种量(262 kg/hm²)撒播,有机肥和化肥依照当地青稞施肥习惯作基肥一次性施

入,田间管理按常规方式进行。

1.4 测定项目及方法

在青稞成熟期采用五点取样法采集耕层土壤(0~20 cm)样品,同时分别采集青稞根、茎、叶和籽粒样品,去杂后带回实验室自然风干,土壤样品进行理化性状、全硒和有效硒含量测定,植物样品用于全硒和有机硒含量的测定。

土壤全硒及有效硒参照《土壤中全硒的测定》(NY/T 1104—2006)标准测定,植物全硒含量测定参照《食品安全国家标准食品中硒的测定》(GB 5009.93—2017),作物籽粒有机硒参照《稻米中有机硒和无机硒含量的测定》(DB 3301/T 117—2007),均采用原子荧光光谱法^[17]测定。土壤理化性质测试分别采用凯氏定氮法、HClO₄-H₂SO₄钼锑抗比色法、NH₄OAc火焰光度计法、硫酸钠-纳氏试剂比色法、NH₄OAc火焰光度计法、碳酸氢钠浸

提法、重铬酸钾容量法和土壤原位pH计测定土壤全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)、碱解氮(AN)、速效钾(AK)、有效磷(AP)、有机质(OM)和pH值。

1.4.1 土壤综合肥力指数(IFI) 土壤养分指标以全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾、有机质、土壤pH值为评价因子,采用内梅罗指数法评价青稞各施肥处理的土壤综合肥力。

$$IFI_i = \begin{cases} x/x_a & (x < x_a) \\ 1 + (x - x_a)/(x_c - x_a)(x_a < x < x_c) \\ 2 + (x - x_c)/(x_p - x_c)(x_a < x < x_p) \\ 3 & (x > x_p) \end{cases} \quad (1)$$

式中,IFI_i为分肥力系数,x为各指标测定数值,x_a为分级标准下限值,x_p为分级标准上限值,x_c介于x_a和x_p之间。各分肥力属性值分级标准(x_a、x_p、x_c)参考第2次全国土壤普查标准(表1)。

表1 不同土壤指标分级标准

Tab.1 Classification standards of different soil indexes

土壤属性 Soil attributes	TN/(g/kg)	TP/(g/kg)	TK/(g/kg)	AN/(mg/kg)	AP/(mg/kg)	AK/(mg/kg)	OM/(g/kg)	pH
x _a	0.75	0.7	10	60	5	50	10	4.5
x _c	1.00	1.5	15	120	10	100	20	6.5
x _p	1.50	2.0	20	180	20	150	30	8.5

$$IFI^{[18]} = \sqrt{\frac{IFI_{iave}^2 + IFI_{imin}^2}{2}} \times \frac{n-1}{n} \quad (2)$$

式中,IFI为土壤综合肥力指数,IFI_{iave}为土壤各属性分肥力系数均值,IFI_{imin}为各分肥力系数中最小值,n为评价因子数量。

1.4.2 富集系数(BCF)和转运系数(TF)^[19]

富集系数(BCF)=农作物硒含量/土壤硒含量 (3)

土壤硒的活化率=有效硒含量/全硒含量×100% (4)

TF_{叶/根}=叶硒含量/根系硒含量 (5)

TF_{叶/茎}=叶硒含量/茎硒含量 (6)

TF_{籽粒/叶}=籽粒硒含量/叶硒含量 (7)

1.5 统计分析

采用Excel 2016整理数据;使用SPSS 25.0对土壤和青稞植株数据进行方差分析,并应用Duncan法进行多重比较,P<0.05表示差异显著;利用Origin 2021软件作图。

2 结果与分析

2.1 光碳核肥对土壤肥力指标的影响

2.1.1 土壤理化性质 从表2可以看出,施用光碳核肥可显著增加土壤有机质(P<0.05),G3处理下有机质含量达到峰值,为16.12 g/kg。各施肥处理的土壤有机质含量较CK分别增加8.7%、22.8%、36.8%、29.4%、25.4%。土壤全氮、全磷和全钾含量均随光碳核肥用量的增加呈先增后减的趋势,较CK分别增加3.4%~20.6%、2.8%~16.9%和9.0%~19.8%。G1~G5处理的土壤碱解氮、有效磷和速效钾含量较CK分别显著提高4.6%~24.8%、12.8%~111.7%和6.6%~56.0%(P<0.05),其中在G3处理下碱解氮含量最高,为99.00 mg/kg。G4、G5处理的有效磷含量和G3、G4、G5处理的速效钾含量显著高于其他处理(P<0.05)。土壤pH值在各处理间无显著差异。

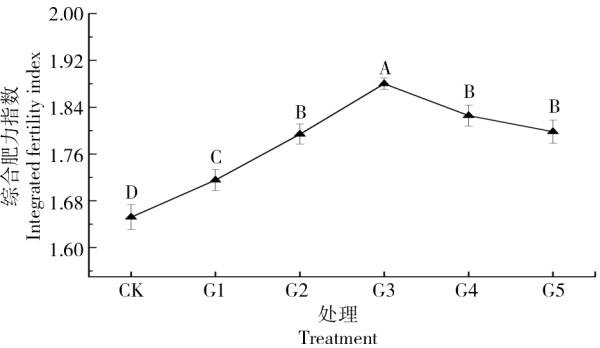
表2 不同光碳核肥施用下土壤理化性质变化

Tab.2 Changes of soil physicochemical properties under different application of photocarbon core fertilizer

处理 Treatment	OM/(g/kg)	pH	TN/(g/kg)	TP/(g/kg)	TK/(g/kg)	AN/(mg/kg)	AP/(mg/kg)	AK/(mg/kg)
CK	11.79±0.33d	8.60±0.11a	0.97±0.04c	2.13±0.16c	20.25±1.72b	79.33±3.21c	21.70±4.60d	327.33±15.95c
G1	12.82±0.47c	8.63±0.02a	1.01±0.03bc	2.19±0.08bc	22.07±2.19ab	83.00±2.00c	24.47±1.42cd	349.00±16.00c
G2	14.47±0.53b	8.64±0.04a	1.05±0.03b	2.19±0.07bc	22.57±0.62ab	93.33±2.08b	29.20±2.00c	382.33±17.95b
G3	16.12±0.20a	8.62±0.08a	1.17±0.03a	2.34±0.07ab	24.26±2.24a	99.00±3.00a	36.90±3.01b	494.00±12.00a
G4	15.25±0.58b	8.66±0.03a	1.14±0.03a	2.49±0.11a	23.32±1.57ab	84.00±2.65c	45.93±3.19a	510.67±11.06a
G5	14.78±0.46b	8.71±0.02a	1.01±0.02bc	2.44±0.08a	23.25±1.18ab	92.00±3.61b	44.90±5.45a	495.67±12.66a

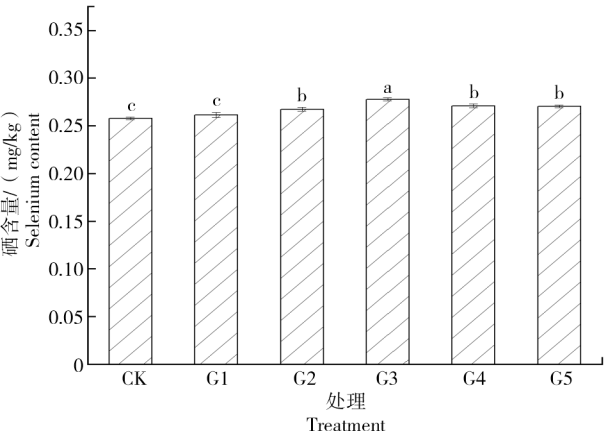
注:不同小写字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)。表3同。
Note: Different lowercase letters indicated significant differences among the treatments($P<0.05$). The same as Tab.3.

2.1.2 土壤综合肥力评价 光碳核肥施用下土壤综合肥力指数的变化如图1所示。



不同大写字母表示各处理间差异极显著($P<0.01$)
Different capital letters indicated significant differences among the treatments($P<0.01$)

图1 光碳核肥施用下土壤综合肥力指数的变化
Fig.1 Changes of soil integrated fertility index under application of photocarbon core fertilizer



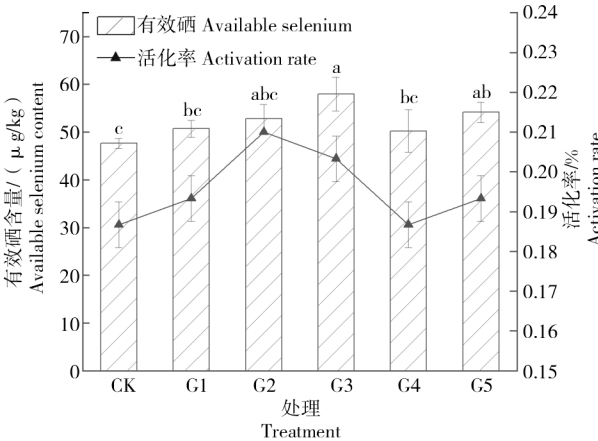
不同小写字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)。图4同
Different lowercase letters indicated significant differences between treatments($P<0.05$). The same as Fig.4

图2 施用光碳核肥对青稞土壤全硒和有效硒的作用
Fig.2 Effect of application of photocarbon core fertilizer on total selenium and available selenium in highland barley soil

土壤肥力作为生产的基础,供给植物所需养分和生物物质,其高低可反映土壤肥沃程度,土壤肥力质量综合指数可客观表征土壤肥力质量^[20]。施用光碳核肥可极显著提高土壤综合肥力指数($P<0.01$),相较于CK,增加了4.2%~14.0%。各施肥处理的土壤综合肥力指数(IFI)介于1.72~1.88,在G3处理下达到最高,为1.88(图1)。

2.2 光碳核肥对土壤硒及其有效性的影响

2.2.1 土壤全硒和有效硒含量 由图2可知,施用光碳核肥可以显著提高土壤全硒含量($P<0.05$),G1~G5处理较CK增加了1.4%~7.8%,最高达到0.277 mg/kg。在G3处理下青稞土壤有效硒含量为57.94 $\mu\text{g/kg}$,达到峰值,较CK提升了21.7%。土壤硒活化率可直观反映土壤中硒的有效硒程度和土壤供硒潜力,施肥处理硒活化率呈先升后降的趋势,最高达到了20.3%。



2.2.2 土壤有效硒与土壤理化性质之间的相关性 土壤有效硒是决定农产品中硒含量高低的关键要素。图3结果显示,土壤理化性质与土壤有效硒呈正相关,其中,与有机质和碱解氮的相关系数分别为0.62和0.80,达到极显著水平($P<0.01$)。表明土壤中有机质与碱解氮含量的增加能有效提高青稞土壤的有效硒含量,实现对土壤硒的高效利用。

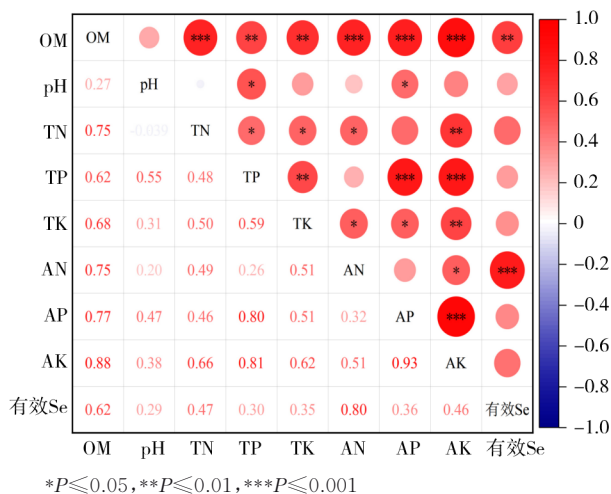


图3 土壤有效硒与土壤理化性质的相关性

Fig.3 Correlation between soil available selenium and soil physicochemical properties

2.3 青稞各器官的硒吸收转运作用

2.3.1 青稞根、茎、叶、籽粒的硒含量 施用光碳核肥对青稞各器官硒含量的作用如图4所示。

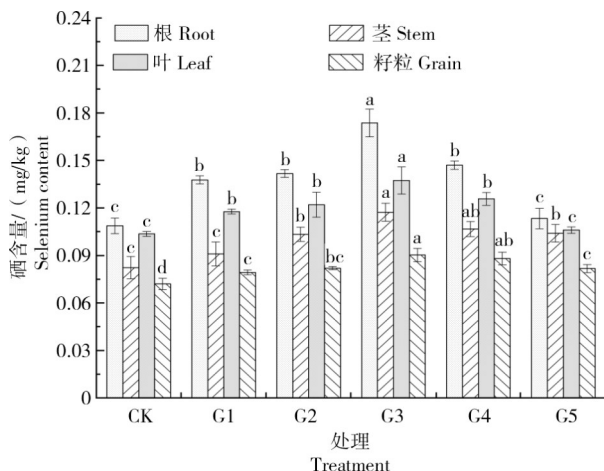


图4 施用光碳核肥对青稞各器官硒含量的作用

Fig.4 Comprison of selenium contents in organs of highland barley after application of photocarbon core fertilizer

从图4可以看出,施用光碳核肥后青稞成熟期各器官硒含量均有变化,各施肥处理较CK呈先增后降的趋势,不同处理间达到显著水平($P<0.05$)。青稞根、茎、叶、籽粒的硒含量各施肥处理较CK分别提高了4.2%~59.9%、10.6%~42.5%、2.3%~32.5%、10.1%~25.4%,同一处理下青稞各器官硒含量大小表现为根>叶>茎>籽粒。天然富硒土壤下青稞籽粒硒含量为0.07 mg/kg,达到足硒水平,G1~G5处理青稞的籽粒达到富硒标准^[21],最高达0.09 mg/kg。

2.3.2 籽粒有机硒占比 我国人群摄入膳食硒的主要来源以禾谷类食物为主,食物来源的硒划分为有机硒和无机硒^[22]。有机硒是指含有碳-硒键的化合物,常见的有机硒包括硒蛋白、硒多糖和硒代氨基酸等^[23],与无机硒相比较,有机硒具有更高的生物活性以及更低的毒性,因此,有机硒更易被生物体吸收利用^[24]。从图5可以看出,施肥处理青稞籽粒有机硒占比比较CK有所提升,介于64.3%~67.9%,最高达到67.9%。因此,在天然富硒土壤上施用光碳核肥可提高青稞籽粒有机硒的占比,促进作物籽粒硒的生物强化作用。

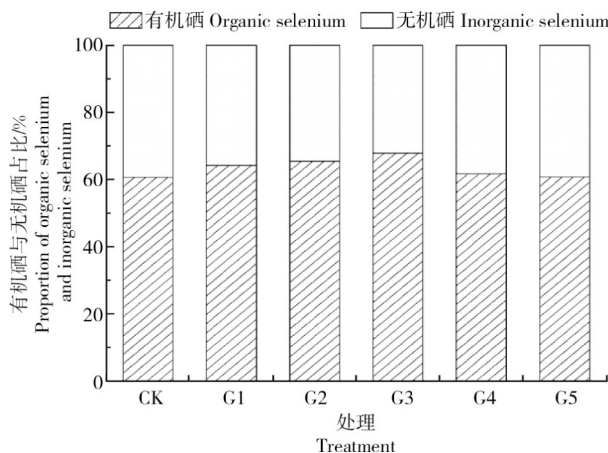


图5 光碳核肥施用下籽粒有机硒与无机硒占比

Fig.5 Proportion of organic selenium and inorganic selenium in grain under application of photocarbon kernel fertilizer

2.3.3 各器官对硒的富集和转运作用 由表3可知,施用光碳核肥能有效提高青稞各器官硒的富集系数,不同处理下青稞各器官中硒BCF值大小依次为根>叶>茎>籽粒,各器官施肥处理BCF与CK间均达到显著差异($P<0.05$),其中,G3处理BCF值最高,体现在根、茎、叶3种器官上,籽粒

BCF 值在各施肥处理间无显著差异,G1~G5处理均显著高于CK($P<0.05$)。

表 3 光碳核肥对青稞硒富集和转运的作用
Tab.3 Effects of photocarbon core fertilizer on selenium enrichment and transfer in highland barley

处理 Treatment	BCF				TF		
	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	籽粒 Grain	叶/根 Leaf/Root	叶/茎 Leaf/Stem	籽粒/叶 Grain/Leaf
CK	0.42±0.02c	0.32±0.03c	0.40±0.01c	0.28±0.01c	0.95±0.05a	1.26±0.12a	0.70±0.05ab
G1	0.53±0.01b	0.35±0.03bc	0.45±0.00b	0.30±0.00ab	0.86±0.02b	1.30±0.10a	0.67±0.02b
G2	0.53±0.01b	0.39±0.02ab	0.46±0.03ab	0.31±0.01ab	0.86±0.04b	1.18±0.04a	0.67±0.05b
G3	0.63±0.03a	0.42±0.02a	0.49±0.03a	0.33±0.02a	0.79±0.01c	1.17±0.02a	0.66±0.07b
G4	0.54±0.01b	0.39±0.02a	0.46±0.02ab	0.32±0.02a	0.85±0.01bc	1.18±0.01a	0.70±0.03ab
G5	0.42±0.02c	0.39±0.02ab	0.39±0.01c	0.30±0.01b	0.94±0.04a	1.02±0.03b	0.77±0.02a

在施用光碳核肥后,青稞 TF_{叶/根}介于 0.79~0.95,且 G3、G4 处理值显著低于其他处理($P<0.05$),较 CK 分别降低了 16.8% 和 10.1%,表明 G1~G5 处理会降低硒从根向叶转运的能力。TF_{叶/茎}在 1.02~1.30,均大于 1,因此,硒更容易从作物的茎进入叶,对于 TF_{籽粒/叶}各处理间差异不显著,说明施肥处理对叶向籽粒硒的转运无明显作用。

3 结论与讨论

3.1 光碳核肥对土壤肥力指标的影响

土壤有机质是评价土壤肥力和持续利用能力的重要指标,农田施用有机肥有利于改善土壤结构,影响土壤的生物学特性,促进微生物活性^[25]。本研究表明,施用光碳核肥可显著提高青稞土壤有机质含量,这可能与肥料中富含大量活性有机物质有关。李文等^[26]研究表明,化肥减施配合有机肥可显著提高高寒区燕麦 0~10 cm 土层土壤的有机质、全氮、全磷、速效氮、速效磷和速效钾含量,且有机质在单施生物有机肥处理中最高。

土壤中速效养分是能被当季作物直接吸收利用的养分,其含量高低是表征土壤养分供给能力的强弱程度,是植物生长所需必要营养元素的来源^[18]。土壤中的碱解氮、有效磷和速效钾直接影响着作物的生长速度、产量和品质。裴雪霞等^[27]研究认为,有机肥替代化肥可以增加作物氮磷钾的积累量,提高养分利用效率。本研究中光碳核肥可提高土壤碱解氮、有效磷和速效钾含量,这与前人研究结果相一致^[28-29]。其中有效磷含量增幅最大,较 CK 提高了 12.8%~111.7%。与普通有机肥相

比,光碳核肥含有硅酸盐细菌、溶磷菌、光合细菌和假单胞菌等一些有益菌,这些微生物可以产生大量活性物质,具有溶磷、解钾的能力,通过降低土壤对磷的固定来提高土壤有效磷的含量。光碳核肥能补充土壤有机质含量,有机质经微生物分解后,可缩合成新的腐殖质,与土壤中其他物质结合,形成有机无机复合体,促进土壤中微团粒结构的形成,从而可以协调土壤中水、肥、气、热的矛盾,改善土壤结构,使土壤疏松,提高耕性。

3.2 光碳核肥对土壤硒有效性的影响

本研究表明,施用适量的光碳核肥可显著提高土壤全硒和有效硒含量,且土壤硒活化率随光碳核肥用量的提高呈先升后降的态势,这与已有的研究结果相似。曹升等^[16]研究认为,在不施用外源硒的条件下,土壤有效硒含量及活化率随着生物有机肥浓度的增加而增加。杨旒等^[30]在研究生物有机肥与 3 种碱性改良剂配施对茶园土壤有效硒的作用时发现,不添加外源硒条件下,通过内源调控可以有效提高土壤硒的有效性。马迅^[31]也研究认为,不同内源调控措施能在不同程度提高酸性富硒土壤中硒的有效性,从而提高水稻籽粒硒含量,最高可达到 0.093 mg/kg,满足我国富硒大米标准。可见,在无外源硒补充条件下,单施有机肥可以有效促进土壤硒的活化,从而提高土壤有效硒含量及其利用率。究其原因,这可能与施用光碳核肥后土壤的理化指标的变化相关。

本研究中,青稞土壤有效硒与有机质和碱解氮相关性极显著。陈雪龙等^[32]研究认为,土壤中全硒、有效硒含量受土壤理化性质的影响,以有机质影响最为显著,且均与土壤有机质呈极显著正相

关。相关研究亦表明^[33-34],有机质与有效硒呈极显著正相关,这可能因为有机质含有大量官能团(酚羟基、羧基、醚基等)和巨大的表面积,在植物腐殖化过程和微生物共同作用下,通过络合、螯合等作用影响硒元素生物有效性。潘丽萍等^[35]研究发现,在砂页岩母质土壤中,速效氮对 EX-Se 的影响大于 pH 和全磷。陈玉真等^[36]研究表明,土壤可交换态及碳酸盐结合态硒与土壤碱解氮和铵态氮之间呈显著正相关。这可能因为氮和硫元素相关,而硫硒为同族元素,其转运通道相同。因此,氮含量的增加有利于载体蛋白的合成,从而促进其与硒结合进入植物体内。

3.3 光碳核肥对作物硒吸收转运的影响

本研究发现,施用光碳核肥在一定程度上影响着青稞对硒的吸收和转运作用。同一处理下各器官硒含量大小表现为根>叶>茎>籽粒,表明在青稞成熟期中硒元素主要积累在根部和叶部,籽粒分配的硒最少,这与宋晓珂等^[8]的研究结果相一致。王敏^[37]在研究不同施硒方式对小麦硒吸收、转运及分配的影响时发现,无论叶面喷施的时期、外源硒浓度和外源硒种类如何,叶面喷施外源硒对 $TF_{\text{籽粒/叶片}}$ 无显著影响。本研究亦表明, $TF_{\text{叶/茎}}$ 和 $TF_{\text{籽粒/叶}}$ 各处理间差异不显著,说明施肥处理对茎向叶片和叶向籽粒硒的转运无影响。

青稞作为藏区人民饮食结构中占据重要地位的作物,籽粒硒生物强化为安全有效的食物补硒措施。相关研究表明^[15],施用不同有机物料鸡粪有机肥和矿源腐殖酸小麦籽粒硒含量,较未添加处理分别提高 34.5%、27.6%,并显著提高了籽粒硒的富集系数。冯时钦等^[38]在研究增施有机肥对水稻生长及硒、镉富集的影响时发现,增施有机肥后水稻籽粒硒含量各处理间差异显著,较 CK 增幅在 19.4%~122.6%,富集系数较 CK 增加 10.1%~108.7%。这与本研究结果相一致,施用适宜用量光碳核肥后,青稞籽粒硒含量显著增加,同时提高了青稞对硒的富集能力。可能因为光碳核肥通过改善土壤理化性质,提高了土壤硒的生物有效性,进而促进了水稻对土壤硒的吸收。

施用光碳核肥可以显著提高青稞田土壤养分,提升土壤肥力水平;促进土壤硒的活化,进而提高了土壤硒含量及其生物有效性。光碳核肥可提高青稞各器官对硒的富集系数,其大小表现为根>叶>茎>籽粒,但硒从根向叶片的转运能力显著

降低,硒更容易从作物的茎进入叶,叶向籽粒硒的转运无显著差异。综上,青稞在施用 900 kg/hm² 光碳核肥(G3 处理)下效果最佳,可作为在天然富硒土壤下的栽培管理措施来改善土壤理化性质,提高硒的生物有效性,促进作物对硒的吸收。

参考文献:

- [1] NATASHA, SHAHID M, NIAZI N K, et al. A critical review of selenium biogeochemical behavior in soil-plant system with an inference to human health[J]. Environmental Pollution, 2018, 234: 915-934.
- [2] 王凯, 卢维宏, 张乃明, 等. 土壤作物系统中的硒与人体健康[J]. 肥料与健康, 2020, 47(1): 5-10.
WANG K, LU W H, ZHANG N M, et al. Selenium in soil crop system and human health[J]. Fertilizer & Health, 2020, 47(1): 5-10.
- [3] 张亚峰, 马强, 姚振, 等. 西宁盆地天然富硒作物的筛选与评价[J]. 山西农业科学, 2023, 51(7): 764-770.
ZAHNG Y F, MA Q, YAO Z, et al. Screening and evaluation of natural selenium-rich crops in Xining Basin[J]. Shanxi Agricultural Sciences, 2023, 51(7): 764-770.
- [4] 胡彩霞. 磷硒配施对冬小麦硒吸收及土壤硒利用机制研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2023.
HU C X. Study on the mechanism of combined application of phosphorus and selenium uptake winter wheat and selenium utilization in soil[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2023.
- [5] ZHANG L Q, SONG H X, GUO Y B, et al. Benefit - risk assessment of dietary selenium and its associated metals intake in China (2017-2019): Is current selenium-rich agro-food safe enough?[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 398: 123224.
- [6] 许凌凌, 许月明. 微量元素硒与人体健康研究[J]. 农技服务, 2016, 33(6): 85-86.
XU L L, XU Y M. Study on trace element selenium and human health[J]. Agricultural Technology Service, 2016, 33(6): 85-86.
- [7] 刘超, 王晋民, 魏廷珍, 等. 青海乐都富硒区 6 种主要蔬菜富硒能力研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(5): 157-161.
LIU C, WANG J M, WEI T Z, et al. Selenium enrichment capacities of six major vegetables in selenium-rich region of Ledou, Qinghai province[J]. Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition), 2014, 42(5): 157-161.
- [8] 宋晓珂, 王金贵, 李宗仁, 等. 青海省富硒土壤中硒的形态和价态分析[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(16): 272-275.
SONG X K, WANG J G, LI Z R, et al. Speciation and valence analysis of selenium in selenium-enriched soil in Qinghai province[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(16): 272-275.
- [9] 王锐, 邓海, 贾中民, 等. 硒在土壤-农作物系统中的分布特征及富硒土壤阈值[J]. 环境科学, 2020, 41(12): 5571-5578.
WANG R, DENG H, JIA Z M, et al. Distribution characteristics of selenium in a soil-crop system and the threshold of selenium-rich soils[J]. Environmental Science, 2020, 41(12):

- 5571-5578.
- [10] 周亚龙, 敏敏, 杨志斌, 等. 典型地质高背景区土壤硒-镉迁移累积特征及其生物有效性[J]. 环境科学, 2024, 45(8): 4860-4869.
ZHOU Y L, PENG M, YANG Z B, et al. Characteristics of soil selenium-cadmium migration and accumulation and its bioeffectiveness in typical geological high background area[J]. Environmental Science, 2024, 45(8): 4860-4869.
- [11] 周刊, 周建川, 王喜宽, 等. 河南洛阳农田土壤中硒锌的有效态与形态关系及影响因素[J]. 岩矿测试, 2024, 43(2): 315-329.
ZHOU K, ZHOU J C, WANG X K, et al. Relationship between available state and forms of selenium and zinc in farmland soil of Luoyang city and its influencing factors[J]. Rock and Mineral Analysis, 2024, 43(2): 315-329.
- [12] 李永春, 刘玖芬, 李雪珍, 等. 河套平原腹地土壤硒的赋存形态特征及生物有效性[J]. 环境科学, 2024, 45(11): 6734-6744.
LI Y C, LIU J F, LI X Z, et al. Selenium occurrence characteristics and bioavailability of soil in the hinterland of the Hetao Plain[J]. Environmental Science, 2024, 45(11): 6734-6744.
- [13] 刘玉兰, 汪勇, 范文忠, 等. 叶面喷施光碳核肥对水稻产量和品质的影响[J]. 河南农业科学, 2020, 49(10): 20-25.
LIU Y L, WANG Y, FAN W Z, et al. The effect of foliar spraying of light carbon core fertilizer on rice yield and quality [J]. Henan Agricultural Sciences, 2020, 49(10): 20-25.
- [14] 乔丙颖, 胥婷婷, 张洋, 等. 不同有机肥替代比例对青稞产量、养分利用和土壤性质的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(5): 1062-1070.
QIAO B Y, XU T T, ZHANG Y, et al. Effects of different organic fertilizer substitution ratios on yield, nutrient utilization, and soil properties of highland barley[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2024, 41(5): 1062-1070.
- [15] 罗定祥, 冶军, 侯振安, 等. 不同有机物料对土壤硒形态及小麦硒吸收的影响[J]. 新疆农业科学, 2018, 55(2): 328-336.
LUO D X, YE J, HOU Z A, et al. Effects of different organic materials on the forms of selenium and the absorption of selenium in wheat[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2018, 55(2): 328-336.
- [16] 曹升, 陈会鲜, 严华兵, 等. 增施生物有机肥对食用木薯吸收利用土壤中硒的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(2): 116-122.
CAO S, CHEN H X, YAN H B, et al. Effect of adding bio-organic fertilizer on selenium absorption and utilization efficiency of edible cassava[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2021(2): 116-122.
- [17] 王伟, 韩博, 史言, 等. 硒营养的研究状况、检测方法及应用前景[J]. 饲料博览, 1998(5): 8-9.
WANG W, HAN B, SHI Y, et al. Research status, detection methods and application prospect of selenium nutrition[J]. Feed Review, 1998(5): 8-9.
- [18] 陈娟, 郭宁, 王艳平, 等. 有机肥对复垦新增耕地土壤综合肥力及麦玉周年产量的影响[J]. 华北农学报, 2024, 39(S1): 195-202.
CHEN J, GUO N, WANG Y P, et al. The effect of organic fertilizer on the comprehensive fertility of newly reclaimed farmland soil and the annual yield of wheat and corn[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2024, 39(S1): 195-202.
- [19] 张亚峰, 姚振, 马强, 等. 青海碱性土壤区天然富硒大蒜硒积累规律[J]. 山西农业科学, 2024, 52(1): 101-106.
ZAHNG Y F, YAO Z, MA Q, et al. The accumulation pattern of selenium in natural selenium-rich garlic in alkaline soil areas of Qinghai[J]. Shanxi Agricultural Sciences, 2024, 52(1): 101-106.
- [20] 张文学, 王少先, 刘增兵, 等. 基于土壤肥力质量综合指数评价化肥与有机肥配施对红壤稻田肥力的提升作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(5): 777-790.
ZHANG W X, WANG S X, LIU Z B, et al. Evaluating soil fertility improvement effects of chemical fertilizer combined with organic fertilizers in a red paddy soil using the soil fertility index[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021, 27(5): 777-790.
- [21] 张荣. 东部农业区农畜产品硒含量分类标准[S]. 青海省: 青海省农林科学院, 2012-10-14.
ZHANG R. Standard for classification of selenium content of agricultural and livestock products in Eastern Agricultural area [S]. Qinghai Province, Qinghai Academy of Agriculture and Forestry Sciences, 2012-10-14.
- [22] 黄峙. 食品硒源的生物学研究进展[J]. 食品科学, 2001, 22(5): 90-94.
HUANG S. Biological study and progress on dietary Se sources[J]. Food Science, 2001, 22(5): 90-94.
- [23] 樊军. 富硒食品的研究进展[J]. 中国食品工业, 2023(22): 86-89.
FAN J. Research progress of selenium-enriched food[J]. China Food Industry, 2023(22): 86-89.
- [24] 王裔娜, 魏新娜, 吴国良, 等. 农作物和园艺作物富硒效应研究进展[J]. 河南农业科学, 2015, 44(5): 7-12.
WANG Y N, WEI X N, WU G L, et al. Research progress on the selenium-enriched effects of crops and horticultural crops [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2015, 44(5): 7-12.
- [25] SONG Z W, ZHU P, GAO H J, et al. Effects of long-term fertilization on soil organic carbon content and aggregate composition under continuous maize cropping in Northeast China[J]. The Journal of Agricultural Science, 2015, 153(2): 236-244.
- [26] 李文, 魏廷虎, 阿保地, 等. 化肥减施配合有机肥对高寒区燕麦营养品质和土壤养分的影响[J]. 草地学报, 2021, 29(12): 2878-2886.
LI W, WEI T H, A B D, et al. Effects of reduction of chemical fertilizer and organic manure supplement on oat nutrient quality and soil nutrient in alpine cold region[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(12): 2878-2886.
- [27] 裴雪霞, 党建友, 张定一, 等. 化肥减施下有机替代对小麦产量和养分吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(10): 1768-1781.
PEI X X, DANG J Y, ZHANG D Y, et al. Effects of organic substitution on the yield and nutrient absorption and utilization of wheat under chemical fertilizer reduction[J]. Journal of

- Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(10):1768-1781.
- [28] LU W D, HAO Z Q, MA X L, et al. Effects of different proportions of organic fertilizer replacing chemical fertilizer on soil nutrients and fertilizer utilization in gray desert soil[J]. Agronomy, 2024, 14(1):228.
- [29] LI Y, WEI J L, MA L, et al. Enhancing wheat yield through microbial organic fertilizer substitution for partial chemical fertilization: regulation of nitrogen conversion and utilization[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2024, 24(1): 935-943.
- [30] 杨旒, 宗良纲, 严佳, 等. 改良剂与生物有机肥配施方式对强酸性高硒茶园土壤硒有效性的影响[J]. 土壤, 2014, 46(6): 1069-1075.
- YANG N, ZONG L G, YAN J, et al. Effects of applying modes of bio-organic fertilizer and conditioners on selenium bioavailability of highly acidid Se-rich soil in tea gardens[J]. Soils, 2014, 46(6): 1069-1075.
- [31] 马迅. 不同内源调控措施对江西丰城土壤中硒有效性的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2017.
- MA X. Selenium availability and its regulation in acidic selenium-rich soil[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017.
- [32] 陈雪龙, 王晓龙, 齐艳萍. 大庆龙凤湿地土壤理化性质与硒元素分布关系研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(4):159-162.
- CHEN X L, WANG X L, QI Y P. Correlation between soil properties and distribution of selenium in soil in Longfeng wetland of Daqing[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(4):159-162.
- [33] 马迅, 宗良纲, 诸旭东, 等. 江西丰城生态硒谷土壤硒有效性及其影响因素[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(4):1588-1593.
- MA X, ZONG L G, ZHU X D, et al. Effectiveness and influential factors of soil selenium in selenium valley, Fengcheng, Jiangxi[J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17(4): 1588-1593.
- [34] 刘瑶, 胡百顺, 杜兴媛, 等. 鸡粪生物炭的制备及其对硒镉伴生酸性土壤的改良效果研究[J]. 中国土壤与肥料, 2024(4): 214-221.
- LIU Y, HU B S, DU X Y, et al. Preparation of chicken litter biochar and its improvement of selenium-cadmium associated acidic soil[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2024(4): 214-221.
- [35] 潘丽萍, 江泽普, 廖青, 等. 南方红壤区典型母质发育土壤硒素特征及影响因素[J]. 土壤, 2024, 56(3):495-502.
- PAN L P, JIANG Z P, LIAO Q, et al. Characteristics and influencing factors of selenium (Se) in red soils derived from typical parent materials in Southern China[J]. Soils, 2024, 56(3):495-502.
- [36] 陈玉真, 王峰, 单睿阳, 等. 闽北地区不同类型茶园土壤硒赋存形态特征及影响因素分析[J]. 茶叶学报, 2022, 63(4): 243-250.
- CHEN Y Z, WANG F, SHAN R Y, et al. Selenium contents and forms in soils at tea plantations of different soil types in northern Fujian[J]. Acta Tea Sinica, 2022, 63(4):243-250.
- [37] 王敏. 施硒方式对小麦硒吸收、转运和形态分布的影响及机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- WANG M. Effect of selenium application methods on selenium uptake, transport and speciation in wheat (*Triticum aestivum* L.) and its mechanism[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2021.
- [38] 冯时钦, 韦鸿雁, 黄业葵, 等. 增施有机肥对水稻生长及硒、镉富集的影响[J]. 南方农业, 2023, 17(9):42-45.
- FENG S Q, WEI H Y, HUANG Y K, et al. Effects of organic fertilizer on rice growth and selenium and cadmium enrichment[J]. South China Agriculture, 2023, 17(9):42-45.