

# 外源砷对青稞生长和生物有效性的影响

高雪<sup>1,2</sup>, 尼玛扎西<sup>1,2</sup>, 谭海运<sup>2\*</sup>, 刘国一<sup>1,2</sup>, 马瑞萍<sup>1,2</sup>, 李雪<sup>2</sup>, 谢永春<sup>2</sup>, 普布贵吉<sup>2</sup>

(1. 省部共建青稞和牦牛种质资源与遗传改良国家重点实验室, 西藏 拉萨 850002; 2. 西藏自治区农牧科学院农业资源与环境研究所, 西藏 拉萨 850002)

**摘要:**应用盆栽实验的方法,研究了不同浓度的外源添加砷对青稞生长和生物有效性的影响。结果表明,外源添加砷显著抑制了青稞种子的萌发。青稞的生物量、株高、穗长、穗粒数、千粒重和产量随着砷浓度增加呈现先升高后降低的趋势。青稞植株体内砷的含量随着生育期的变化而不同,当土壤砷背景值在  $50\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  以下时,青稞籽粒符合安全标准,可以安全食用。本文对正确评价外源砷进入土壤后的风险、并对降低砷的有效性以及对外源添加砷等重金属开展盆栽试验等提供了有效的参考依据,对于保证青稞安全和促进农业可持续发展起到积极作用。

**关键词:**As(V); 土壤; 青稞; 植物有效性  
**中图分类号:**S521.3      **文献标识码:**A

## Study on Barley Growing and Phytoavailability of Exogenous Arsenic

GAO Xue<sup>1,2</sup>, NIMAZHAXI<sup>1,2</sup>, TAN Hai-yun<sup>2\*</sup>, LIU Guo-yi<sup>1,2</sup>, MA Rui-ping<sup>1,2</sup>, LI Xue<sup>2</sup>, XIE Yong-chun<sup>2</sup>, PUBUGUIJI<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Hulless Barley and Yak Germplasm Resources and Genetic Improvement, Tibet Lhasa 850002, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Environment Research, TAAAS, Tibet Lhasa 850002, China)

**Abstract:** Pot experiments were conducted to study the influence of exogenous Arsenic on the Barley Growing and Phytoavailability. The results indicated that the arsenic significantly inhibited the germination of barley seed. The biomass, plant height, length of spike, spike grain number, weight of 1000 grains and yield of barley showed a trend of first increase and then decrease with the increase of arsenic concentration. The content of arsenic in highland barley plants varies with the growth period. When the soil arsenic background value is below  $50\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , the barley grains meet the safety standard and can be eaten safely. This paper provides an effective reference basis for the correct evaluation of the risk of exogenous arsenic entering the soil and it provides an effective reference for reducing the effectiveness of pot experiment of exogenous heavy metals such as arsenic. It plays a positive role in ensuring the safety of highland barley and promoting the sustainable development of agriculture.

**Key words:** Arsenate; Soil; Barley; Phytoavailability

砷(As)是一种广泛存在于地壳中的有毒类金属元素,自然界中的砷主要以硫化化合物的形态存在,其在地壳中的丰度排在第20位,砷的化合物具有较强的毒性<sup>[1-4]</sup>。西藏近些年来出现了一些关于砷污染的报道,关于饮用水,农田等的标准也在不断探索和严格。根据拉萨市典型区域农田土壤重金属空间分布结果中得知:土壤中6种重金属的潜在生态风

险指数大小顺序为  $\text{As} > \text{Cr} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Ni} > \text{Zn}$ ; 样点土壤中重金属的单项污染指数大小顺序为  $\text{Zn} > \text{As} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{Pb} > \text{Ni}$ ; As 是拉萨土壤重金属风险指数的主要贡献因子,污染分担率为 62.7%<sup>[5]</sup>。青稞(裸大麦)是世界上最古老的作物之一,是西藏第一大粮食作物,也是西藏最具优势的特色作物<sup>[6]</sup>。然而对砷的研究多集中在小麦、水稻、砷超积累植物<sup>[7]</sup>,有关砷对青稞生长影响的研究还不多。本文通过盆栽实验,以西藏主要青稞种植品种藏青2000为研究对象,有针对性地研究 As(V) 对其青稞生物有效性的影响,将对正确评价外源砷进入土壤后的风险、并对降低砷的生物有效性具有重要意义。

收稿日期:2018-09-12

基金项目:西藏自治区自然科学基金项目(XZ2017ZRG-43); 西藏重大科技专项(XZ201801NA01)

作者简介:高雪,女,助理研究员,硕士,从事土壤肥料与修复等方面的研究, E-mail: gaoxue365@163.com; \* 为通讯作者:谭海运,男,副研究员,本科,从事农业资源方面的研究, E-mail: loveyunzi@163.com。

表 1 供试土壤的理化性质

Table 1 The experimental soils physicochemical properties

全氮 (%)	水解性氮 (mg·kg <sup>-1</sup> )	全磷 (%)	有效磷 (mg·kg <sup>-1</sup> )	全钾 (%)	速效钾 (mg·kg <sup>-1</sup> )	有机质 (%)	酸碱度 pH
0.039	104	0.075	30.9	1.59	49	1.494	8.6

1 材料与方法

1.1 供试土壤

本试验在西藏自治区农牧科学院四号试验地进行,试验地地理坐标为: 91°2'31"E, 91°2'31"N,海拔高度约为 3662 m。该地区年平均温度为 7.4 ℃,年平均降雨量 200 ~ 510 mm,集中在 6 ~ 9 月,无霜期 100 ~ 120 d,全年日照时数 3000 h,属高原温带半干旱季风气候。供试土壤为其试验地内 0 ~ 20 cm 土层,土壤质地为砂壤土,肥力中等偏下,供试土壤的基本理化性质如表 1。

1.2 供试作物

青稞,品种为藏青 2000。

1.3 试验设计

试验选用 Na<sub>3</sub>AsO<sub>4</sub> · 12H<sub>2</sub>O [ As ( V ) ] 作为处理,处理设置 3 个水平即: 0,低浓度:背景值 + 二级标准 \* 1 倍、高浓度:背景值 + 二级标准 \* 2 倍,具体处理见表 2,试验为完全随机区组试验,设置 3 次重复,本试验不考虑土壤本底砷浓度对青稞生长的影响。土壤经过风干过 1 mm 尼龙筛后每盆装入 4 kg,以 N: P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: K<sub>2</sub>O = 0. 15: 0. 18: 0. 12 g/kg 土用量施入氯化铵、磷酸二氢钾、硫酸钾肥料,将肥料溶于水中,然后按照土壤 70 % 最大田间持水量加入盆栽所用土壤。加入砷老化 10 d 后,每盆均匀撒饱满的 15 颗青稞种子,覆盖 1 ~ 2 cm 的土,喷洒一定量蒸馏水,使表层土壤湿润。1 个月后间苗至 12 株,最后定株至 8 株。整个生育期,青稞生长在透光遮雨的棚子中,每天对青稞进行补水,使土壤含水量保持在最大田间持水量的 70 %。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 测定项目 播种后记录青稞的生育期,青稞成熟后,测定青稞的株高、穗长、穗粒数、地上部和地

下部生物量、产量;青稞籽粒磨细过筛、进行砷含量的分析;将收获青稞后的土壤充分混匀,经过风干、磨细过筛进行总砷和有效砷的测定。

1.4.2 测定方法 青稞籽粒砷含量的测定:采用 GB/T 5009. 11-2003 方法测定青稞籽粒砷含量<sup>[8]</sup>。称取已烘干的青稞样 0. 5000 g,置于消煮管中,用 1 mL 超纯水湿润,然后加入 8 mL HNO<sub>3</sub>, 2 mL HClO<sub>4</sub> 和 1 mL H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>,再在消煮管上放上小漏斗,放置过夜。第 2 天,将消煮炉设定温度为 150 ℃,加热直至黄棕色烟雾消失,清洗小漏斗外壁,拿掉小漏斗。再升高温度至 180 ℃,加热至消煮管内剩余 1 ~ 2 mL 液体为止。然后停止加热,取出冷却至室温,用超纯水定容至 50 mL,过滤待测。

土壤相关理化性质的测定:土壤 pH、土壤有机质、土壤有效磷、土壤全磷、土壤的全钾、土壤的速效钾、土壤的全氮和土壤的水解性氮用国标方法测定<sup>[9]</sup>。

1.5 数据处理

本研究采用 Microsoft Excel 2013 处理所有试验数据,用 IMB SPSS 22 软件进行统计分析、Duncan 新复极差法进行多重比较 ( P < 0.05 )。

2 结果与分析

2.1 不同砷浓度对青稞种子发芽的影响

不同浓度 As ( V ) 对青稞种子发芽率的影响见表 3。从表 3 可以看出,砷浓度越高,发芽率越低,砷浓度与发芽率之间呈显著负相关 ( P < 0.05 )。不加砷的处理,青稞种子发芽率为 100 % ,添加 As ( V ) 浓度为 25 mg · kg<sup>-1</sup> 时,青稞种子发芽率为 72. 8 % 。添加 As ( V ) 浓度为 50 mg · kg<sup>-1</sup> 的处理,

表 3 不同浓度 As ( V ) 对青稞种子发芽率的影响

Table 3 Influence of highland barley seed germination different rate on As ( V ) concentrations

砷处理浓度 (mg · kg <sup>-1</sup> )	发芽率 (%)
0	100.0 a
25	72.8 b
50	46.7 c

注:不同小写字母表示添加蔡十八菌不同处理之间差异显著 ( P < 0.05 )。下同。

表 4 不同浓度 As( V ) 对青稞株高、生物量的影响

Table 4 Growth and biomass of barley in response to increasing arsenic concentration

砷处理浓度 (mg · kg <sup>-1</sup> )	生物量 (g · pot <sup>-1</sup> )	株高 (cm)
0	64.2 b	64.7 b
25	69.5a	68.9 a
50	57.4 c	59.6 c

青稞种子发芽率为 46.7 %。由此可见,砷对青稞种子发芽率的影响显著,砷对青稞的种子萌发起抑制作用。

2.2 不同砷浓度对青稞生长的影响

从表 4 结果看出,青稞的生物量、株高随着砷浓度的增加,呈先升高后降低的变化规律,均达到了显著性差异( $P<0.05$ )。在 0 ~ 25 mg · kg<sup>-1</sup> 砷浓度范围内,从长势来看,青稞发育良好,青稞的生物量从 64.2 g 升高到 69.5 g,提高了 8.2 %;青稞的株高从 64.7 cm 升高到 68.9 cm,提高了 6.5 %。当土壤砷浓度在 25 ~ 50 mg · kg<sup>-1</sup> 范围内,青稞植株有枯萎现象,青稞的生物量和株高有下降的趋势,青稞的生物量且低于对照。与对照相比,青稞的生物量减少了 10.5 %;青稞的株高降低了 7.9 %。由此可见,青稞的生物量和株高随着土壤砷浓度的变化遵循先升高后降低的趋势,As( V ) 对青稞先产生刺激效应,促进青稞的生长,后来高砷处理又显著抑制了青稞的生长。

2.3 不同砷浓度对青稞产量及其构成因素的影响

表 5 表明,不同砷浓度处理对青稞穗长、穗粒数、千粒重和产量影响趋势一致,呈现先增加后减少的趋势。在 0 ~ 25 mg · kg<sup>-1</sup> 处理范围内,砷对青稞穗长影响不显著,当土壤砷浓度 > 25 mg · kg<sup>-1</sup> 时,砷显著抑制了青稞穗子的生长。青稞每盆的产量和千粒重呈相同的变化趋势,在砷浓度为 0 ~ 25 mg · kg<sup>-1</sup> 时,青稞的产量和千粒重较对照分别增加了 15.2 % 和 11.3 %。当土壤砷处理为 50 mg · kg<sup>-1</sup> 时,青稞籽粒不饱满,穗头干瘪,青稞的产量和千粒重较对照分别减少了 41.2 % 和 15.2 %。结果表明,青稞产量和千粒重是受砷污染影响最大的因子,这与刘全吉<sup>[10]</sup> 研究结果一致。

2.4 不同砷浓度对青稞砷含量的影响

从表 6 结果得出,不同生育期青稞茎叶中砷含量不同,随着砷浓度的增加,青稞体内砷的含量也增加。在分蘖期,土壤中砷的加入提高了青稞体内砷的含量,在 0 ~ 25 mg · kg<sup>-1</sup> 处理范围内,砷浓度对

表 5 不同浓度 As( V ) 对青稞产量及其构成因子的影响

Table 5 Effects of different arsenic levels on the yield and its components of barley

砷处理浓度 (mg · kg <sup>-1</sup> )	穗长 (cm)	穗粒数 (个/pot)	千粒重 (g/pot)	产量 (g/pot)
0	5.9 a	54 a	47.8 a	34.6 a
25	6.2 a	60 a	53.2 a	39.8 a
50	3.4 b	30 b	42.6 b	20.1 b

表 6 不同浓度 As( V ) 对青稞不同生育期砷含量的影响

Table 6 Effects of different arsenic levels on As concentration in the shoots of barley at different growth stages

砷处理浓度 (mg · kg <sup>-1</sup> )	分蘖期砷含量 (茎叶)	灌浆期砷含量 (茎叶)	种子砷含量
0	1.54 a	2.67 a	0.012 a
25	2.33 b	3.91 b	0.022 b
50	2.43 b	6.72 c	0.041 c

青稞体内砷含量影响呈现显著正相关;在 25 ~ 50 mg · kg<sup>-1</sup> 处理范围内,砷浓度对青稞体内砷含量影响不显著,茎叶中的砷浓度为 2.33 ~ 2.43 mg · kg<sup>-1</sup>。灌浆期是青稞营养物质积累的关键时期,体内的砷含量与分蘖期相比,显著提高,茎叶砷浓度为 2.67 ~ 6.72 mg · kg<sup>-1</sup>,处理间达到了显著性差异( $P<0.05$ )。青稞体内随着砷处理浓度的升高有所提高,但是其绝对含量都比较低,没有超出国家粮食安全的标准(0.5 mg · kg<sup>-1</sup>)。综上所述,砷在青稞体内的累积是随着生育期的推进而不断增加,但均未超出国家标准。

3 讨论

3.1 砷对青稞发芽的影响以及可能机制

本研究发现,砷浓度越高,发芽率越低,砷浓度与发芽率之间呈显著负相关( $P<0.05$ )。据肖玲等<sup>[11]</sup> 研究砷对小麦萌发的影响看,随着砷浓度的升高,根系变得短粗而且弯曲,侧根丛生,呈现畸形,这主要是因为主根生长点细胞容易受毒物伤害,细胞分裂增殖被抑制。砷对青稞种子萌发的影响机理可能主要是砷对其生理生化特性的影响,即对酶系统活性和呼吸强度的抑制所致<sup>[12]</sup>。

3.2 砷对青稞发芽、生长的影响以及可能机制

本研究发现,青稞的生物量、株高、穗长、穗粒数、千粒重和产量等指标会随着砷浓度的增加,呈先升高后降低的变化规律。实验结果与陈愚<sup>[13]</sup>、廖宝凉<sup>[14]</sup> 等研究结果一致。

这表明,砷并不是植物所必须的元素,但是微量

的砷能够对植物产生刺激效应,促进植物的生长。陈同斌<sup>[15]</sup>研究认为,低含量的砷合理地抑制作物的光呼吸,因而减少了光合产物的消耗。廖宝凉<sup>[14]</sup>研究发现,微量砷可以提高作物叶片叶绿素的含量。Bolan 等<sup>[16]</sup>研究发现,当溶液中砷浓度为  $1 \sim 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,砷显著提高了马铃薯的干物质重。本实验中,当砷浓度较低时,出现了出现刺激效应。赵玉杰<sup>[17]</sup>研究认为,砷的毒害作用主要表现在对作物水分代谢、呼吸作用、光合作用以及相关酶活性的抑制。砷对作物水分代谢的毒害是引起叶面蒸腾下降,阻碍作物中水分输送,从根部向地上部的水分供给受到抑制。本实验当砷浓度为  $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,对青稞的生物量、株高、穗长、穗粒数、千粒重和产量等指标产生负作用,抑制青稞的生长。

### 3.3 青稞不同生育期积累砷的特点及安全评价

试验结果表明,青稞植株体内砷的含量随着生育期的变化而不同。在分蘖期,青稞对砷的吸收累积比较少,随着生育期的推进而不断增加。灌浆期是青稞对元素吸收利用最大的时期,对砷的吸收也在这个时期达到了最大值。砷在青稞体内有较高的累积,这可能是青稞植株对砷敏感,砷容易被小麦吸收和累积。但是,在实验砷浓度国家二级标准 ( $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 时,青稞籽粒中砷的含量没有超过国家粮食安全的控制标准  $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[18]</sup>。因此,当土壤砷背景值在  $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  以下时,青稞籽粒符合安全标准,可以食用。本试验地的砷土壤背景值为  $21.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,在此试验地条件下生产的青稞籽粒符合安全标准,可以食用。

## 4 结 论

(1) 试验研究发现,砷对青稞种子发芽率的影响显著,砷对青稞的种子萌发起到抑制作用。

(2) 低浓度的砷促进青稞的生物量、株高、穗长、穗粒数、千粒重和产量的增加;高浓度的砷抑制青稞的生物量、株高、穗长、穗粒数、千粒重和产量的增加。

(3) 青稞植株体内砷的含量随着生育期的变化

而不同,当土壤砷背景值在  $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  以下时,青稞籽粒符合安全标准,可以食用。

### 参考文献:

- [1] 王亚男, 曾希柏, 白玲玉, 等. 外源砷在土壤中的老化及环境条件的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018(7).
- [2] Chen H, Teng Y, Lu S, et al. Contamination features and health risk of soil heavy metals in China[J]. Science of the Total Environment, 2015: 143–153, 512–513.
- [3] 张国祥, 华路. 土壤环境中的砷及其生态效应[J]. 土壤, 1996, 28(2): 64–68.
- [4] 林志灵, 张杨珠, 曾希柏, 等. 土壤中砷的植物有效性研究进展[J]. 湖南农业科学, 2011(3): 52–56.
- [5] 孙全平. 拉萨市典型区域农田土壤重金属空间分布及生态安全研究报告[R]. 2017.
- [6] 刘翠花, 朱永官. 西藏青稞主产区土壤肥力现状与施肥对策[J]. 土壤肥料, 2005, 1(3): 23–25.
- [7] 陈同斌, 韦朝阳, 黄泽春, 等. 砷超富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特征[J]. 科学通报, 2002, 47(11): 902–915.
- [8] 中华人民共和国卫生部. GB/T 5009.11-2003 食品中总砷及无机砷的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [9] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [10] 刘全吉. 冬小麦、油菜对砷污染反应的比较研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008.
- [11] 肖玲, 梁国社, 王清华. 砷对小麦种子萌发影响的探讨[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 1998(6): 56–60.
- [12] 刘全吉, 孙学成, 胡承孝, 等. 砷对小麦生长和光合作用特性的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(2): 854–859.
- [13] 陈愚, 任久长, 蔡晓明. 镉对沉水生物硝酸还原酶和超氧化物歧化酶活性的影响[J]. 环境科学学报, 1998, 18(3): 313–317.
- [14] 廖宝凉, 徐辉碧, 花蓓. 砷、硒在水稻体内的相互作用及其自由基机理的研究[J]. 广东微量元素科学, 1996, 3(4): 55–58.
- [15] 陈同斌, 宋波, 郑袁明, 等. 北京市蔬菜和菜地土壤砷含量及其健康风险分析[J]. 地理学报, 2006(3): 297–310.
- [16] Bolan N, Mahimairaja S, Kunhikrishnan A, et al. Phosphorus-arsenic interactions in variable-charge soils in relation to arsenic mobility and bioavailability[J]. Science of the Total Environment, 2013, 463: 1154–1162.
- [17] 赵玉杰, 师荣光, 白志鹏. 淄博优势玉米监测区土壤砷元素空间变异性研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(s): 187–191.
- [18] 中华人民共和国农业部. NY/T 1121.11-2006 土壤总砷的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.