

# 外源铅胁迫对青稞生长及铅积累的影响

刘青海

(西藏自治区农牧科学院农业质量标准与检测研究所,西藏 拉萨 850032)

**摘要:**采用盆栽试验研究外源铅对青稞生长的影响及青稞不同部位铅积累富集规律。结果表明:随外源铅浓度的增加,青稞株高、茎粗、穗长、穗粒数、千粒重、生物量都呈下降趋势,青稞可以耐受 400 mg/kg 以下铅胁迫产量及产量构成因素不减少,铅处理水平超过 800 mg/kg 时,青稞地上生物量较对照处理显著下降 14.1 %;不同铅处理水平下青稞各器官铅含量为根>茎>叶>籽粒,随土壤铅浓度升高,青稞根、茎、叶、籽粒中的铅含量显著升高。当外源铅浓度超过 400 mg/kg 时,青稞的生长发育受到显著抑制;通过青稞籽粒铅含量与土壤铅含量回归方程,计算出土壤铅毒性临界值为 346.17 mg/kg;青稞根富集系数大于 1,青稞籽粒、茎、叶铅富集系数均小于 1。

**关键词:**青稞;铅胁迫;铅毒性临界值;富集系数

**中图分类号:**S513

**文献标识码:**A

## Effects of Barley Growth and Lead Accumulation by Stress Lead

LIU Qing-hai

(Institute of Agricultural Product Quality Standard and Testing Research, Tibet Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Tibet Lhasa 850032, China)

**Abstract:** Pot experiment was used to study the effect of exogenous lead on the growth of highland barley and the change of lead accumulation and enrichment rules in different parts of highland barley. The results showed that with the increase of exogenous lead concentration, the highland barley plant height, stem diameter, spike length, spike grain number, thousand kernel weight and biomass all showed a downward trend. The highland barley could withstand the lead stress under 400 mg/kg and its yield and yield components did not decrease. When the lead treatment level exceeded 800 mg/kg, the abodes biomass of highland barley significantly decreased by 14.1 % compared with the control treatment. The lead content in all organs of highland barley at different lead treatment levels is > root > leaf > grain. With the increase of soil lead concentration, the lead content in the roots, stems, leaves and grains of highland barley significantly increases. The growth and development of highland barley is significantly inhibited when the exogenous lead concentration exceeds 400 mg/kg. Based on the regression equation of barley seed lead content and soil lead content, the critical value of soil lead toxicity was calculated as 346.17 mg/kg. The enrichment coefficient of highland barley root is greater than 1. The lead enrichment coefficients of barley grains, stems and leaves were all less than 1.

**Key words:** Highland barley; Stress lead; Lead toxicity threshold; Bio-concentration factor

土壤是植物吸收铅的主要来源。当土壤被铅污染时,农作物吸收的铅可能性更高,甚至超过累积吸收<sup>[1]</sup>。农作物吸收的铅通过食物链进入人体,对人体健康构成潜在危害。研究表明,人体中大约 80 % 的铅来自于饮食吸收,过量的铅对许多器官有毒,如

中枢神经系统,红细胞,肾脏,心血管以及男性和女性生殖系统<sup>[2-3]</sup>。植物利用根吸收土壤中的铅,吸收的铅很难以运输到植株上部。超过 90 % 的铅保留在根系中,只有 3 % 的铅才能被运输到植株的地上部分,根系固定或“拦截”铅的能力对地上部分(可食用部分)中铅的积累有很大影响,铅在植物根内的迁移主要发生在质外体中,因此向地上部分的迁移受到内皮细胞中凯氏定氮带的限制,因此根部吸收的铅很难转移到地上部分(可食用部分)<sup>[4]</sup>。青稞主要种植在青藏高原,它不仅是藏族人民重要

收稿日期:2019-03-19

基金项目:西藏自治区自然科学基金项目(XZ2017ZR-42)

作者简介:刘青海(1985-),男,助理研究员,硕士,主要从事农业环境方面的研究,E-mail:17199551@qq.com。

表 1 试验土壤的基本理化性质

Table 1 The basic physical and chemical properties of tested soil

土壤类型	pH	有机质含量 (g · kg <sup>-1</sup> )	全铅含量 (mg · kg <sup>-1</sup> )	有效铅含量 (mg · kg <sup>-1</sup> )	阳离子交换量 (cmolg · kg <sup>-1</sup> )	交换性酸(H <sup>+</sup> ) (mmol · kg <sup>-1</sup> )
潮土	8.0	25.2	9.26	0.62	15.48	0.12

的粮食作物,也是维护和保障藏族人民健康的保健作物,其产业的发展对青藏地区的粮食安全和社会稳定具有重要意义。本试验选择西藏地区代表性作物青稞,通过盆栽试验,向土壤中加入外源铅,分析青稞植株中铅的积累及种植青稞后土壤铅的变化,进一步阐明青稞不同部位对铅富集的差异性,得出青稞籽粒受铅污染土壤临界值,从而为农产品安全评价提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤采自拉萨河边西藏农科院 3 号实验地潮土(半水成土,中国系统分类)。取表层 0~20 cm 土壤,土样经风干、去杂,磨细过 5 mm 筛后用于盆栽试验,过 2 mm 尼龙筛装瓶待用。试验土壤基本理化性质见表 1。

1.2 试验设计

1.2.1 盆栽试验设计 盆栽试验土壤添加铅化合物为硝酸铅,添加浓度(以 Pb<sup>2+</sup> 计)分别为 0、60、120、200、400、800 mg · kg<sup>-1</sup>。计算好每个添加浓度硝酸铅溶液用量,用喷雾法将硝酸铅溶液与土壤逐步混匀,并调节水分含量至田间最大持水量的 50%~60%,将混合土壤放入塑料花盆中,底部有孔,用于通气。花盆底部用纱布覆盖,以防止土壤渗漏,塑料花盆的直径为 60 cm,高约 30 cm,每盆供试土壤 10 kg。覆盖保鲜膜以保持土壤含水量,并定期补充水分,以保持土壤含水量在田间最大持水量的 50%左右。每个处理重复 10 次。在温室中培养 1 个月,

土壤中的铅含量达到平衡。

盆栽试验所选用的青稞为藏青 2000,按照当地播种时间在花盆种植青稞,每盆 20 粒,出苗后进行适当间苗,保证每盆有 10~15 株青稞苗,施肥量为尿素 18 kg/667 m<sup>2</sup>(N=46.4%)(每盆 30 g),磷酸二铵 10 kg/667m<sup>2</sup>(每盆 17 g),青稞于 4 月 22 日种植,8 月 30 日收获,青稞收获后,取土,风干,磨细装袋后备用,再将青稞根洗出。同时,收集青稞植株样品清洗,风干,磨细装袋后备用。

1.2.2 测定方法 测定青稞考种数据(株高、穗长、千粒重等);采用湿法消解-原子吸收分光光度法测定青稞植株(根、茎、叶片、籽粒)全铅含量。土壤全铅测定采用 HF-HClO<sub>4</sub>-HNO<sub>3</sub> 消煮-原子吸收分光光度法<sup>[5]</sup>。

1.3 数据处理

试验数据用 Excel 和 SPSS 软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 不同水平铅胁迫对青稞生长及产量构成因素的影响

表 2 可知,铅胁迫对青稞生长发育产生重要影响,青稞株高、主茎粗随铅胁迫浓度增加而降低。当铅处理水平超过 120 mg/kg 时,青稞株高较对照下降显著;当铅处理水平超过 800 mg/kg 时,青稞茎粗较对照下降显著;其地上部干质量随铅胁迫浓度增加而降低,铅处理水平超过 800 mg/kg 时,青稞地上生物量较对照处理显著下降 14.1%,中、轻度铅胁迫条件下,青稞的总生物量变化不大。

表 2 不同水平铅处理对青稞生长的影响

Table 2 Effects of different levels of lead on the growth of highland barley

Pb <sup>2+</sup> 浓度/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	株高 (cm)	茎粗 (cm)	地上部生物量 (干物质,g/株)	地下部生物量 (干物质,g/株)	根冠比	总生物量 (干物质,g/株)
CK	54.3a	0.426a	4.52a	0.28a	0.065a	4.60a
60	49.4b	0.418a	4.28a	0.27a	0.063a	4.55ab
120	46.3b	0.421a	4.16ab	0.27a	0.065a	4.43ab
200	44.9b	0.396a	4.08b	0.26a	0.064a	4.34ab
400	41.9bc	0.388a	4.05b	0.25a	0.062a	4.30ab
800	38.3c	0.366b	3.71b	0.22b	0.059b	3.93b

表 3 不同水平铅胁迫对青稞产量构成因素的影响

Table 3 Effects of different levels of lead stress on barley yield and its components

Pb <sup>2+</sup> 浓度 (mg · kg <sup>-1</sup> )	穗长 (cm)	总穗数 (个 · 株 <sup>-1</sup> )	有效穗数 (个 · 株 <sup>-1</sup> )	穗粒数(粒)	千粒重 (g)	产量 (g · 株 <sup>-1</sup> )
CK	5.16a	3.2a	1.5a	39.6a	64.7a	3.84a
60	4.65b	3.3a	1.6a	38.2a	63.6a	3.89a
120	4.65b	3.5a	1.5a	38.4a	62.2a	3.58a
200	4.52b	3.4a	1.5a	36.2ab	61.6ab	3.34a
400	4.24b	3.1a	1.3a	30.1b	58.6b	2.29b
800	3.89c	2.5b	1.4a	27.4b	56.5b	2.17b

不同浓度铅胁迫条件下,藏青 2000 的产量表现为 60 mg/kg 处理 > CK 处理 > 120 mg/kg 处理 > 200 mg/kg 处理 > 400 mg/kg 处理 > 800 mg/kg 处理(表 3);青稞穗粒数随铅处理浓度升高而明显下降,严重影响青稞产量的形成;青稞千粒重随铅处理浓度升高而下降,在 400 和 800 mg/kg 铅处理下,青稞千粒重较对照处理分别下降 9.43 %、12.67 %,说明铅处理水平超过 400 mg/kg 时,青稞减产严重;铅胁迫为 400 mg/kg 时,青稞单株产量较对照处理显著下降,下降幅度为 40.36 %,轻度铅胁迫(60 ~ 200 mg/kg)和中度铅胁迫(200 ~ 400 mg/kg)下青稞藏青 2000 较对照处理没有减产,说明轻度铅胁迫和中度铅胁迫对产量及产量构成因素没有影响,说明藏青 2000 品种青稞可以耐受 400 mg/kg 以下铅胁迫。

2.2 土壤添加铅处理对青稞各器官铅含量的影响

不同铅处理水平青稞各器官铅含量为根 > 茎 > 叶 > 籽粒,随土壤铅浓度升高,青稞根、茎、叶、籽粒中的铅含量显著升高( $P < 0.05$ ),低浓度(60 mg/

kg)外源铅对青稞各器官铅含量影响不显著,高浓度(400、800 mg/kg)外源铅对青稞各器官铅含量影响显著;当外源铅浓度为 60 mg/kg 时,青稞根的铅含量为 343.8 mg/kg;青稞可食用部分(籽粒)在外源铅浓度为 120 mg/kg 时铅含量为 0.33 mg/kg,超过食品中谷物铅限量标准<sup>[6]</sup>0.2 mg/kg;当土壤铅处理水平大于 120 mg/kg,外源铅更容易向青稞地上部分转移(表 4)。

2.3 土壤铅含量与青稞不同部位铅含量的相关性

对不同铅处理下土壤铅含量和青稞不同部位铅含量进行相关性分析,表 5 表明,青稞籽粒、茎、叶、根中铅含量与土壤铅含量呈极显著相关,相关系数分别为 0.961、0.901、0.846、0.962;我国食品中污染物限量标准<sup>[6]</sup>中谷物铅限量指标为 <0.2 mg/kg,通过青稞籽粒铅含量与土壤铅含量回归方程( $Y = 2.681X + 345.633$ ),以青稞籽粒铅含量不超过食品中污染物限量标准为最大允许量,计算土壤铅毒性临界值为 346.17 mg/kg。

表 4 铅在青稞各器官中的含量

Table 4 Lead content in highland barley organs

(mg/kg)

Pb <sup>2+</sup> 浓度(mg · kg <sup>-1</sup> )	籽粒	根	茎	叶
CK	0.10 ± 0.02f	13.35 ± 2.05f	5.94 ± 3.09f	3.93 ± 1.14c
60	0.19 ± 0.06fd	343.8 ± 12.6fd	18.7 ± 4.8f	2.06 ± 0.70c
120	0.33 ± 0.04d	592.2 ± 62.13dc	83.9 ± 8.8d	6.33 ± 1.49c
200	0.56 ± 0.10c	876.4 ± 59.1c	185.4 ± 10.9c	5.74 ± 0.50c
400	1.32 ± 0.18b	3032.4 ± 349.8b	213.5 ± 21.5b	82.9 ± 45.4b
800	2.21 ± 0.21a	5402.8 ± 584.9a	299.6 ± 16.8a	330.1 ± 7.8a

表 5 青稞籽粒、茎、叶、根中铅含量与土壤铅的相关性

Table 5 Correlation between lead content in barley seeds, stems, leaves and roots and soil lead

因变量	自变量(青稞部位)	回归方程	R <sup>2</sup>	F 值
土壤	籽粒	$Y = 2.681X + 345.633$	0.961 **	397.51
	茎	$Y = -40.666X + 2.354$	0.901 **	145.46
	叶	$Y = 128.035X + 2.059$	0.846 **	88.01
	根	$Y = 44.558X + 0.135$	0.962 **	410.18

表 6 铅在青稞不同部位的富集系数

Table 6 Bio-concentration factor(BCF) of lead in different parts of highland barley

不同铅处理	富集系数			
	籽粒	根	茎	叶
CK	0.0108a	1.4420c	0.6413a	0.4248a
60	0.0042bc	6.6321a	0.3609b	0.0397c
120	0.0028c	5.0504a	0.7156a	0.0540c
200	0.0023c	3.5041ab	0.7413a	0.0230c
400	0.0029c	6.7047a	0.4722ab	0.1833b
800	0.0029c	7.1208a	0.3949ab	0.4350a

2.4 不同铅处理下青稞的富集系数

表 6 可知,不同铅处理下,青稞地上部分籽粒、茎、叶对重金属铅的富集系数均小于 1,说明青稞地上部分重金属铅富集能力较弱。青稞籽粒铅富集系数随外源铅浓度的增加而降低,除 CK 外,不同铅处理下籽粒铅富集系数差异不显著( $P < 0.05$ ),表明青稞籽粒对铅的富集能力与外源铅浓度关系不大;青稞根铅富集系数最大,均大于 1,根是植物吸收富集重金属的主要器官,在外源铅浓度为 800 mg/kg 时,根的铅浓度是土壤铅浓度的 7 倍;青稞不同部位铅富集能力强弱顺序是:根 > 茎 > 叶 > 籽粒。

3 讨论与结论

本试验中不同外源铅处理对青稞的生长有一定影响,随外源铅浓度的增加,青稞株高、茎粗、穗长、穗粒数、千粒重、生物量都呈下降趋势,藏青 2000 品种青稞可以耐受 400 mg/kg 以下铅胁迫产量及产量构成因素不减少,可以耐受 800 mg/kg 以下铅胁迫而地上生物量不减少;杨生龙<sup>[7]</sup>研究发现,铅胁迫可以在一定程度上抑制小麦的生长发育,在低浓度铅(小于 200 mg/kg)处理下,2 小麦品种的鲜重和干重随外源铅含量的增加呈上升趋势,然而,当铅浓度超过 200 mg/kg 时,小麦品种的鲜重和干重总体上呈下降趋势。GU 等<sup>[8]</sup>的研究结果表明:当土壤铅含量为 1000 mg/kg 时,水稻干物质比对照降低了 11.5 %。胡铁柱等<sup>[9]</sup>研究发现高浓度铅对小麦根系生长表现出抑制作用;郑春荣等人<sup>[10]</sup>发现当农田土壤受高浓度铅污染时,水稻的干重和株高均低于对照。本研究与这些研究较为类似,低浓度铅对青稞生长影响较小,高浓度铅抑制青稞生长,青稞减产严重。

本研究发现不同水平铅处理的各器官铅含量均为根 > 茎 > 叶 > 籽粒,当土壤铅污染严重时,尽管铅的移动性很小,青稞籽粒中的铅含量仍然显着增加,

并且大部分铅积累在青稞的根部,难以转移到地上部分,根是青稞吸收富集重金属的主要器官;任秀娟等<sup>[11]</sup>研究发现玉米各部位铅分配的规律为根系 > 茎叶 > 穗轴 > 籽粒,玉米各部位对铅的吸收随土壤铅浓度的增加呈增加趋势。杨素琴等<sup>[12]</sup>研究发现重金属铅在小麦不同器官中的分布差异显着。各品种小麦不同器官的铅含量从从高到低排顺序为根、茎、叶、籽粒,根系中铅含量超过籽粒中铅含 100 mg/kg 以上;与本实验结果较为一致。夏雪姣<sup>[13]</sup>在研究铅胁迫对小麦生长发育影响时发现当土壤中铅含量小于 500 mg/kg 时,小麦籽粒中的铅含量未超过国家食品安全限量(0.2 mg/kg),在高浓度(1000 mg/kg)处理下,只有中国春小麦籽粒中的铅积累超标,表明小麦中铅的富集程度较低。本研究发现在外源铅浓度为 120 mg/kg 时青稞可食用部分(籽粒)铅含量为 0.33 mg/kg,已经超过食品中谷物铅限量标准,与夏雪姣的研究有一定差异。

我国食品中污染物限量标准中谷物铅限量指标为 <0.2 mg/kg,通过青稞籽粒铅含量与土壤铅含量回归方程,计算土壤铅毒性临界值为 346.17 mg/kg。土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准规定土壤铅污染风险筛选值为 170 mg/kg,土壤铅污染风险管控值 1000 mg/kg,通过本实验回归方程计算出来的铅毒性临界值介于土壤铅污染风险筛选值和风险管控值之间,较为合理,为以后青稞种植地区土壤重金属污染风险筛选值奠定基础。

参考文献:

[1] 柯庆明,梁康迳,郑履端,等. 福建省水稻重金属污染的对对应分析[J]. 应用生态学报,2005,16(10):1918-1923.

[2] ARVIK J H, ZIMDAH J. The influence of temperature, pH, and metabolic inhibitors on uptake of lead by plant roots[J]. Environ, 1974,3 (3):369-376.

[3] CHEN HENG YU, ZHENG WEN, TANG WEN HAO. The effectiveness of amendment of Pb form and bioavailability in Pb contaminated soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(1):

170 - 173.

- [4] JONES L H P, JARVIS S C, COWLING D W. Lead uptake from soil by perennial ryegrass and 1ts regrass and its relation to the supply of an essential element[J]. Plant and Soil, 1993, 38: 605 - 619.
- [5] 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.
- [6] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. GB 2762 - 2017 食品安全国家标准食品中污染物限量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [7] 杨生龙, 康建宏, 吴宏亮. 铅胁迫对小麦生长发育的影响[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(36): 20576 - 20578.
- [8] GU S H, ZHU J Z, GU Z L, et al. Study on the critical lead content of red paddy soil[J]. Agro-environ, Protect, 1989, 8(6): 17 - 22.
- [9] 胡铁柱, 孙海燕, 杨靖, 等. 铅对不同铅积累类型小麦幼苗生理生化特性和根系生长的影响[J]. 河南农业科学, 2018, 47(11): 13 - 17.
- [10] 郑春荣, 孙兆海, 周东美, 等. 土壤 Pb Cd 污染的植物效应( I )——Pb 污染对水稻生长和 Pb 含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(3): 417 - 421.
- [11] 任秀娟, 朱东海, 吴海卿, 等. 镉铅单一及复合胁迫对玉米干物质及镉铅吸收的影响[J]. 河南农业科学, 2012, 41(12): 29 - 32.
- [12] 杨素勤, 程海宽, 张彪, 等. 不同品种小麦 Pb 积累差异性研究[J]. 生态与农村环境学报, 2014, 30(5): 646 - 651.
- [13] 夏雪姣. 镉、铅胁迫对小麦形态发育和生理代谢的影响及富集特性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018: 32 - 38.