

引用格式:

把德功, 周一敏, 李冰玉, 吴家萌, 刘青海, 余耀斌, 宋正国, 邱城, 雷鸣. 砷处理对青稞幼苗生长的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2024, 50(2): 24–29.

BADG, ZHOUYM, LIBY, WUJM, LIUQH, YUYB, SONGZG, QIUC, LEIM. Effects of arsenic treatment on seedling growth of highland barley [J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2024, 50(2): 24–29.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



砷处理对青稞幼苗生长的影响

把德功¹, 周一敏¹, 李冰玉¹, 吴家萌¹, 刘青海², 余耀斌², 宋正国³, 邱城², 雷鸣^{1*}

(1.湖南农业大学环境与生态学院, 湖南 长沙 410128; 2.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; 3.汕头大学化学化工学院, 广东 汕头 515063)

摘要: 通过水培试验, 以不添加 As 处理为对照, 探讨添加了 5.0、15.0、30.0 mg/L As(V) 的培养液对 ZQ5171、ZQ2000、ZQ16 和 ZQ18 等 4 个品种青稞幼苗生长发育的影响及 As 在青稞幼苗体内的积累分布特征。结果表明: As(V) 处理后 ZQ5171 和 ZQ2000 的株高、主根长和生物量受到了抑制, 而 ZQ16 和 ZQ18 的株高、主根长和生物量表现为“低促高抑”的现象; 与对照相比, As 处理后 ZQ18 的株高、主根长和生物量无显著下降, 根冠比变小, 根向茎转移 As 的能力较低, 为耐 As 品种, 而 ZQ5171 和 ZQ2000 生长受到明显毒害, 为 As 敏感品种; 青稞的根、茎、叶中 As 含量依次降低, 分别为 149.84~748.47、1.81~234.71、3.82~141.49 mg/kg; 除 ZQ18 外, 其余品种青稞根中 As 的形态以 As(V) 为主, 而茎和叶中以 As(III) 为主。

关键词: 青稞; 砷; 生长发育; 理化指标

中图分类号: S512.301

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2024)02-0024-06

Effects of arsenic treatment on seedling growth of highland barley

BA Degong¹, ZHOU Yimin¹, LI Bingyu¹, WU Jiameng¹, LIU Qinghai²,

YU Yaobin², SONG Zhengguo³, QIU Cheng², LEI Ming^{1*}

(1.College of Environment & Ecology, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2.Institute of Agricultural Product Quality Standard and Testing Research, Tibet Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Lhasa, Tibet 850032, China; 3.School of Chemistry and Chemical Engineering, Shantou University, Shantou, Guangdong 515063, China)

Abstract: In this study, we applied culture medium supplemented with 5.0, 15.0 and 30.0 mg/L As(V) to grow four highland barley seedlings, ZQ5171, ZQ2000, ZQ16 and ZQ18 and characterized the As accumulation and distribution using hydroponics experiments and the treatment without As as control to investigate the arsenic effects on the plants. The results showed that after As(V) treated the plant height, taproot length and biomass of ZQ5171 and ZQ2000 were inhibited, while the plant height, taproot length and biomass of ZQ16 and ZQ18 showed a phenomenon of “low promotion and high inhibition”. Compared with the control treatment, the plant height, taproot length and biomass of ZQ18 did not decrease significantly after As treated, and the root-shoot ratios were smaller and the ability of root-to-stem transfer of As was lower, suggesting ZQ18 was an As-tolerant variety. Meanwhile the growth of ZQ5171 and ZQ2000 were obviously poisoned, indicating ZQ5171 and ZQ2000 were As-sensitive varieties. The As contents in the roots, stems and leaves of highland barley decreased successively, which were 149.84-748.47, 1.81-234.71, 3.82-141.49 mg/kg, respectively. Except for ZQ18, As(V) was the main form of As in the roots of the others highland barley, while As(III) was the main form in the stems and leaves.

Keywords: highland barley; arsenic; growth and development; physicochemical index

收稿日期: 2023-02-21

修回日期: 2024-04-20

基金项目: 西藏自治区重点科技计划项目(XZ202001ZY0048N); 现代农业产业技术体系专项(CARS-05)

作者简介: 把德功(1993—), 男, 甘肃永登人, 硕士研究生, 主要从事环境污染化学研究, 2434293302@qq.com; *通信作者, 雷鸣, 博士, 教授, 主要从事环境污染化学及污染修复研究, leiming8297@163.com

青藏高原地区蕴藏着丰富的矿产资源,但大规模矿产开采和金属冶炼造成了藏区土壤重金属污染。刘青枰等^[1]对西藏尕尔勤矿床区域的 835 个土壤样品的重金属元素进行分析,发现 As 超标较严重。袁宏等^[2]采用数据统计和 kriging 空间插值法研究了拉萨达孜区沿拉萨河两侧土壤重金属的空间分布特征,发现少数区域的土壤存在 As 污染。藏区土壤的 As 污染逐渐成为不可忽视的环境问题。

As 是作物非必要元素,但环境中的 As 被作物主动或被动吸收,且在农产品中累积,会对人体健康造成严重威胁。袁宏等^[3]还发现拉萨河流域达孜曲水一带蔬菜类样品中存在 As 超标情况,尤其是瓜类和茄果类。《全国土壤污染状况调查公报》(2014 年 4 月 17 日)显示,在中、轻度 As 污染农田中种植作物,可能会导致农产品中 As 超标。研究表明,微量 As 对作物具有一定的生长刺激作用,如微量 As 对水稻^[4]、小麦^[5]等的生长均有刺激作用;但过量 As 会抑制植物的呼吸和光合作用,干扰营养素的摄入,诱发细胞脂质过氧化,抑制作物生长^[6]。

种植 As 低吸收作物在一定程度上会降低农产品中 As 超标的风险,是一种较经济、环保的土壤 As 污染应对策略^[7-8]。青稞(*Hordeum vulgare* var. *coeleste* L.)属大麦种的变种,亦称为元麦、罗米大麦,是青藏高原地区最主要的粮食作物,属于区域性重要作物^[9]。虽然关于 As 对作物生长的影响已有较多报道,但 As 对青稞幼苗生长的影响及其在青稞体内的分布特征尚不明确。本研究中,以藏区广泛种植的 4 个品种青稞(ZQ5171、ZQ2000、ZQ16 和 ZQ18)为研究对象,通过水培试验探究不同浓度 As 对其生长发育的影响,筛选 As 耐性青稞品种,并分析青稞各器官 As 的积累特征及赋存形态,以期对青稞优质安全生产和 As 污染控制提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试青稞(ZQ5171、ZQ2000、ZQ16 和 ZQ18)由西藏自治区农牧科学院提供,其基本特性列于表 1,其中 ZQ2000 和 ZQ5171 是西藏地区的主推品种。

表 1 供试青稞品种及其基本特性

Table 1 The highland barley tested in this study and their basic characteristics

品种	基本特性
ZQ2000	耐寒、耐旱、较强分蘖力、较高成穗率、较抗倒伏、较抗蚜虫、增产增效,是西藏自治区农牧科学院选育的高产、优质品种
ZQ5171	高秆、抗倒伏、高产、成熟度一致、增产明显、适应机械化收获,在抗黑穗病和白粉病方面比 ZQ2000 表现好
ZQ16	抗倒伏、抗病性、耐旱、耐寒、不易落粒、生物量大、秸秆产量高,适宜在青海省东部农业区高位山旱地、环湖农业区和柴达木盆地灌区春播种植
ZQ18	抗寒、抗倒伏、抗条斑病、抗黑穗病、穗粒饱满、中高产、中晚熟、中高秆

1.2 试验设计

水培试验在湖南农业大学环境科学与工程基地温室内进行。选取大粒饱满的青稞种子,用超纯水洗净后置于紫外灯下杀菌 4 h,随后将种子装入垫有双层吸水纱布的培养皿中,并置于 17~19 °C(模拟西藏地区青稞生长温度)培养箱中培养。待青稞生长到两叶一心时,选取长势一致的幼苗转移至水培盒(PP 材质,14.7 cm×9.3 cm×5.5 cm)中,每盒 12 株,并置于恒温培养室(19 °C,光照度 2 000 lx,每日光照 13 h)培养 32 d。先后用 1/3、1/2 和全营养液分别培养 5、5、15 d,每 5 d 换 1 次培养液。营养液参考文献^[10]配制。25 d 后向全营养液中添加 Na₃AsO₄·12H₂O,使得培养液中的 As 质量浓度分别为 0.0、5.0、15.0、30.0 mg/L,分别为对照、低浓度、中浓度、高浓度处理,处理 7 d 后收获。每个

处理 3 个重复,共 48 个处理。

1.3 样品采集与分析

1.3.1 As 处理后培养液中 pH 的测定

培养结束后,采用多参数测定仪(SevenCompact S220, Mettler Toledo)测定培养液的 pH。

1.3.2 青稞生理指标的测定

培养结束后,收集所有青稞植株,用 CaSO₄ 和 EDTA 冲洗掉附着在植物体表上的重金属,再用吸水纸吸干青稞表面水分;每个水培盒随机挑选 4 株青稞,用电子分析天平称量青稞鲜质量,用电子游标卡尺测定青稞的主根长及地上部长度。

1.3.3 青稞中 As 的总量和形态的测定

每个水培盒随机挑选 4 株青稞混成 1 个样品,

并将其分成根、茎、叶,各器官的样品再分为2部分:一部分鲜样样品保存于冰箱,用于As形态的测定;另一部分置于烘箱,105℃杀青1h,75℃烘至恒重,用于As总量的测定。烘干后的样品粉碎后采用体积比为4:1的HNO₃-HClO₄对其进行湿法消解(质控样品为灌木枝叶GBW 07603,其回收率为90.3%~100.0%),使用电感耦合等离子体质谱仪(NexION 300X ICP-MS, Perkinelmer)测定消解液中的As含量。新鲜样品经剪碎后采用磷酸盐缓冲液^[11]提取其As(III)和As(V)形态,使用液相色谱-原子荧光联用仪(AFS9530,北京海光仪器有限公司)测定提取液中的As(III)和As(V)含量。

1.4 数据处理

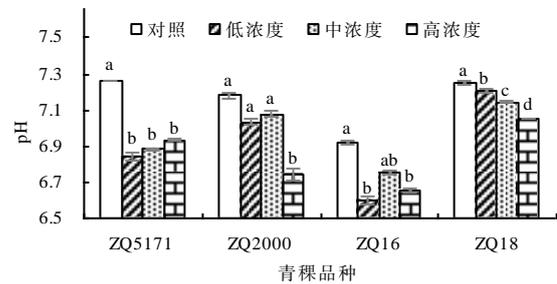
根据地上部分和根的鲜质量计算根冠比(R/S);根据各器官As含量计算根向茎的转运系数($T_{根-茎}$)、和茎向叶的转运系数($T_{茎-叶}$)。运用Microsoft Excel 2010进行数据整理和绘图;运用SPSS 24.0进行单因素方差分析,选用LSD进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 As处理后培养液pH的变化

As处理后培养液pH变化如图1所示。所有处理培养液pH与初始pH(6.5)相比均有所上升,可能是青稞的根系分泌物导致培养液呈碱性,使pH升高;As处理后,除低、中浓度处理的ZQ2000和中

浓度处理的ZQ16外,其他处理的pH均显著低于对照组的,可能是As处理抑制了青稞根系分泌物质的产生。



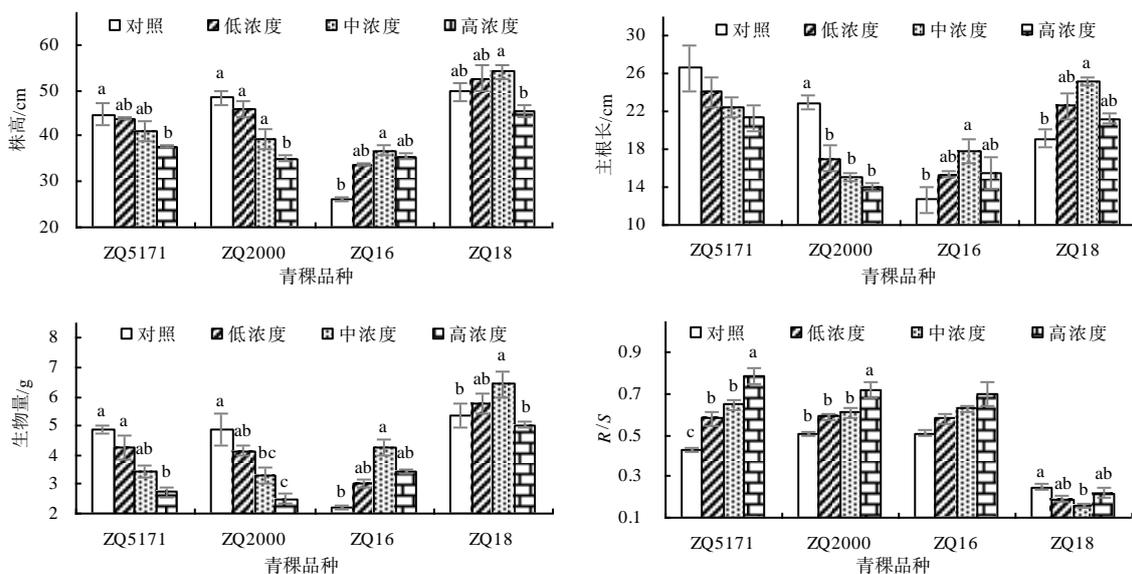
图柱上不同字母示同一品种处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

图1 As处理后青稞幼苗培养液的pH

Fig.1 pH of the culture medium of highland barley seedlings after As treatment

2.2 As处理对青稞幼苗生长的影响

由图2可知:随着As处理浓度的增加,ZQ5171和ZQ2000的株高、主根长和生物量逐渐减小,与对照组相比,高浓度处理下,ZQ5171、ZQ2000的株高和生物量及ZQ2000的主根长均显著低于对照组的,表明这2个品种青稞在As处理下生长受到了抑制;随着As处理浓度的增加,ZQ16和ZQ18的株高、主根长和生物量均先增加,在中浓度处理下达到最大值,高浓度时,它们又均下降,表明在As处理下这2个品种青稞的生长存在“低促高抑”的现象;As处理的ZQ5171、ZQ2000和ZQ16的



图柱上不同字母示同一品种处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

图2 As处理后青稞幼苗的生长指标

Fig.2 Growth indexes of highland barley seedlings after As treated

R/S 均高于对照组的,且随着 As 处理浓度的增加而增加,这表明 As 对这 3 个品种青稞地上部生长的抑制作用强于地下部的,而 ZQ18 的 R/S 均低于对照组的,且随着 As 浓度的增加先下降,中浓度处理的 R/S 最小,随后高浓度处理的又有所增大,这说明 As 处理下 ZQ18 的地下部受抑制作用较地上部更严重。此外,ZQ18 的生长受 As 毒害小,其 R/S 值低于其他 3 个品种青稞的,表明 ZQ18 对 As 处理有较强的耐性。

2.3 不同品种青稞各器官 As 含量差异性分析

从表 2 可知,As 处理下,不同品种青稞的根、

茎、叶中 As 含量整体上依次降低;青稞各器官中 As 含量在不同品种间存在较大差异,说明基因型影响青稞对 As 的吸收;As 处理下,青稞根中 As 含量为 149.84~748.47 mg/kg,其中,ZQ5171、ZQ16 和 ZQ18 根中 As 含量随着 As 处理浓度的增加而增加,而 ZQ2000 根中 As 含量在低浓度处理下最大(542.56 mg/kg),且显著高于中、高浓度的;青稞茎和叶中 As 含量分别为 1.81~234.71 mg/kg 和 3.82~141.49 mg/kg,其中,ZQ2000 茎、叶中 As 含量最低,除 ZQ2000 的叶外,各品种青稞茎、叶中 As 含量均随着 As 处理浓度的增加而显著增加。

表 2 As 处理后青稞各器官的 As 含量

Table 2 As contents in different organs of highland barley after As treated

器官	As 添加量/ (mg L ⁻¹)	As 质量分数/(mg kg ⁻¹)			
		ZQ5171	ZQ2000	ZQ16	ZQ18
根	5.0	(149.84±1.43)b	(542.56±43.34)a	(197.63±62.84)b	(222.97±45.40)b
	15.0	(336.75±71.69)a	(410.53±59.33)b	(362.83±21.47)a	(746.93±11.32)a
	30.0	(363.73±8.12)a	(299.70±9.34)c	(396.09±28.74)a	(748.47±24.47)a
茎	5.0	(3.71±0.13)c	(1.81±0.46)c	(9.16±0.84)c	(11.16±1.99)c
	15.0	(22.65±2.33)b	(19.43±0.83)b	(108.63±64.66)b	(149.28±4.26)b
	30.0	(124.56±3.35)a	(41.09±0.05)a	(234.71±2.07)a	(164.05±3.31)a
叶	5.0	(3.82±0.15)c	(18.65±1.29)b	(4.18±0.05)c	(39.53±4.57)c
	15.0	(31.77±2.55)b	(19.50±3.27)b	(84.96±1.27)b	(81.33±3.73)b
	30.0	(93.33±2.63)a	(38.54±4.78)a	(141.49±15.81)a	(119.02±1.62)a

同列不同字母示同一器官处理间的差异有统计学意义(P<0.05)。

2.4 不同品种青稞 As 转移系数的比较

从图 3 可知,4 种青稞的 $T_{根-茎}$ 和 $T_{茎-叶}$ 均随培养液中 As 含量的增加而增加,各处理下 $T_{茎-叶}$ 均高于 $T_{根-茎}$,说明青稞根系吸收 As 后向地上部分转运;

不同品种青稞 As 转运系数也存在较大差异,其中 ZQ16 的 $T_{根-茎}$ 最大,说明其根系向茎运输 As 的能力强,根部 As 更多地被转移到地上部,ZQ2000 的 $T_{根-茎}$ 最小,表明 As 在根部累积,抑制了根的生长。

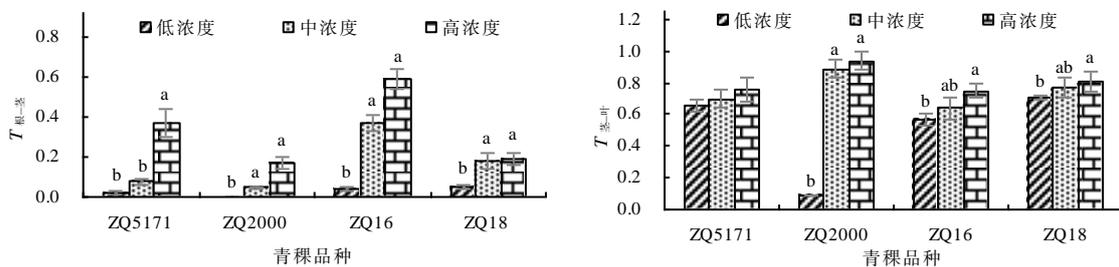


图 3 As 处理下青稞的转移系数

Fig.3 Transfer coefficients of highland barley with As treated

2.5 青稞幼苗各器官中 As 的形态分布

在各浓度 As 处理下,4 个品种青稞体内均检测到 As(III)和 As(V),各器官提取的 As 总量占总 As 的 72.45%~92.28%。从表 3 可知,青稞根中以 As(V)

为主,占总提取 As 的比例为 33.8%~88.4%,平均为 60.1%;ZQ2000 和 ZQ16 根中 As(V)占比均在中浓度时最大,而 ZQ5171 和 ZQ18 根中 As(V)占比则在中浓度时最小。As(III)是存在于 ZQ5171 和 ZQ16 茎中的主要形态,占总提取 As 比例的 29.1%~61.7%

和 53.5%~67.9%，而 ZQ2000 和 ZQ18 茎中 As 主要形态为 As(V)，占总提取 As 比例分别为 59.1%~62.7%和 46.8%~55.6%；随着 As 处理浓度的增加，ZQ5171、ZQ2000 和 ZQ18 茎中 As(III)占比逐渐增加，而 ZQ16 茎中 As(III)占比逐渐减少。As(III)是存在于 ZQ5171 和 ZQ2000 叶中的主要形态，占总

提取 As 比例分别为 43.6%~67.4%和 50.9%~59.2%，而 ZQ16 和 ZQ18 叶中 As 主要形态为 As(V)，占总提取 As 的比例分别为 40.8%~69.2%和 49.4%~62.6%；随着 As 处理浓度的增加，4 个品种青稞叶中 As(V)占比的变化趋势各不相同。

表 3 As 处理下青稞各器官中 As 的形态占比

Table 3 Proportion of As morphology in each organ of highland barley with As treated

器官	As 添加量/ (mg L ⁻¹)	As(III)占比				As(V)占比				%
		ZQ5171	ZQ2000	ZQ16	ZQ18	ZQ5171	ZQ2000	ZQ16	ZQ18	
根	5.0	(38.9±5.0)b	(40.2±6.1)a	(20.8±3.2)a	(56.5±12.0)b	(61.1±17.3)a	(59.8±10.6)b	(79.2±19.0)b	(43.5±5.5)a	
	15.0	(50.7±7.4)a	(35.1±5.5)c	(11.6±2.3)c	(66.2±15.7)a	(49.3±9.9)b	(64.9±13.7)a	(88.4±1.4)a	(33.8±7.4)b	
	30.0	(36.1±5.8)b	(48.2±8.6)b	(15.9±3.5)b	(58.5±12.8)b	(63.9±13.4)a	(51.8±8.4)b	(84.1±1.6)a	(41.5±3.6)a	
茎	5.0	(29.1±4.3)b	(37.3±7.6)b	(67.9±8.3)a	(44.4±1.0)b	(70.9±0.9)a	(62.7±16.5)a	(32.1±6.3)b	(55.6±13.5)a	
	15.0	(58.7±8.7)a	(37.9±8.1)b	(64.1±4.7)a	(46.2±9.5)b	(41.3±1.1)b	(62.1±12.6)a	(35.9±5.5)b	(53.8±13.8)a	
	30.0	(61.7±17.0)a	(40.9±9.2)a	(53.5±10.0)b	(53.2±13.2)a	(38.3±5.8)b	(59.1±10.9)b	(46.5±6.7)a	(46.8±10.7)b	
叶	5.0	(43.6±6.3)c	(59.2±12.1)a	(30.8±8.3)c	(40.7±8.5)b	(56.4±1.4)a	(40.8±10.9)b	(69.2±15.9)a	(59.3±12.2)b	
	15.0	(67.4±15.6)a	(52.5±12.5)b	(45.3±7.7)b	(37.4±9.7)b	(32.6±7.9)c	(47.5±9.4)a	(54.7±14.7)b	(62.6±13.4)a	
	30.0	(51.5±11.5)b	(50.9±10.4)b	(59.2±10.7)a	(50.6±11.5)a	(48.5±12.7)b	(49.1±11.2)a	(40.8±10.8)c	(49.4±9.8)c	

同列不同字母示同一器官处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

3 结论与讨论

本研究中，ZQ5171 和 ZQ2000 的生长在 As 处理下受到了抑制，ZQ16 和 ZQ18 的生长则在 As 处理下存在“低促高抑”的现象。As 处理下各品种青稞幼苗生长受到负面影响，具体表现为下调了青稞根系分泌物质的能力，影响青稞幼苗生长，且 As 对青稞的毒性大小取决于培养液中 As 的浓度。这可能是 As 通过影响植物水分代谢、光合作用和抗氧化系统等来影响其生长^[12-13]。有研究^[14]表明，随着 As 剂量的增加，As 引起 2 种大麦根系脂质过氧化，抑制大麦根系生长，植株的干质量、湿质量明显下降。

As 对植物毒性的大小因植物种类不同存在较大差异，一般来说，麦、玉米、蔬菜、大豆、水稻的相对耐 As 性能依次减弱^[15]。同种作物不同品种耐 As 能力也各不相同，植物体内的小分子酸、细胞壁、螯合肽等可以与 As 结合而限制其吸收和运输，同时也会通过液泡阻隔的方式，降低细胞质中游离 As 来进行解毒^[16-17]。此外，植物还可激活抗氧化酶抵抗重金属引起的植物氧化应激^[18]。由于植物种类和种间基因型不同，其拥有的解毒机制和能力存在差异，因而产生不同的耐受性^[19]。本研究中，ZQ18 在 As 处理下各生长指标与对照的相比无显著降低， R/S 和 $T_{根-茎}$ 较小，为耐 As 品种；ZQ2000

和 ZQ5171 的生长受到明显毒害，为 As 敏感品种。各品种青稞根、茎、叶中 As 含量依次降低，分别为 149.84~748.47、1.81~234.71、3.82~141.49 mg/kg。

本研究中，随着培养液中 As 浓度的增加，青稞体内 As 的积累量和迁移量相应增加。研究^[20]表明，植物暴露于 As 中时，As(V)会通过根系中的磷酸盐转运体(PHTs)进入细胞。As 进入大麦细胞的可能途径是通过 p 型 ATP 酶泵入，如大麦中 HvHMA1 转运蛋白在根系吸收重金属方面发挥重要作用^[21]。进入根系的 As(V)在细胞体内被砷酸盐还原酶迅速还原为毒性更强的 As(III)，进而引起细胞氧化应激反应^[22-23]，随后通过磷酸盐转运体(PHO)装载到木质部，向地上部运输^[24]。青稞根中 As 含量远高于茎和叶，非 As 超累积植物对 As 胁迫的缓解策略之一是限制根系 As 的转移^[25]，本研究得出了类似结果。青稞根中 As 积累以 As(V)为主(33.8%~88.4%)，这可能是由于添加至培养液中的 As 为 As(V)，而 As(V)渗入或被吸收到青稞根系中所导致。ZQ5171、ZQ16 茎中和 ZQ5171、ZQ2000 叶中主要以 As(III)为主，其中，ZQ18 茎、叶中 As(III)含量较低。相比于根，As(III)在茎、叶中的积累量更大，说明 As(III)比 As(V)更容易从根部运输至茎和叶。As(III)比 As(V)更具有溶解性和毒性，由于 As(III)与植物生理过程重要酶的巯基结合，影响酶的结构和活性，进而对植物造成毒害^[26]。本研究中，ZQ18 的茎和

叶中 As(III)含量较低,这可能也是 ZQ18 对 As 具有较高耐性的原因。

参考文献:

- [1] 刘青枰, 邓时强, 赵元艺, 等. 西藏尕尔勒矿床区域性土壤重金属元素地球化学特征及来源解析[J]. 地球学报, 2018, 39(4): 481–490.
- [2] 袁宏, 赵利, 王茂丽, 等. 西藏拉萨达孜区沿拉萨河两侧农用地土壤重金属空间分布与土壤环境质量评价[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(28): 117–120.
- [3] 袁宏, 薛勇, 王茂丽, 等. 拉萨河流域达孜曲水一带农作物品质与优势分析[J]. 高原农业, 2019, 3(5): 500–505.
- [4] 杜心, 朱永官, 刘文菊, 等. 汞、砷复合污染对水稻生长及吸收汞、砷的影响[J]. 生态毒理学报, 2006, 1(2): 160–164.
- [5] 邵云, 姜丽娜, 李万昌, 等. 砷、铅胁迫对小麦幼苗毒害效应及叶片下表皮扫描电镜观察[J]. 西北农业学报, 2009, 18(1): 133–138.
- [6] GARG N, SINGLA P. Arsenic toxicity in crop plants: physiological effects and tolerance mechanisms[J]. Environmental Chemistry Letters, 2011, 9(3): 303–321.
- [7] 曾希柏, 苏世鸣, 吴翠霞, 等. 农田土壤中砷的来源及调控研究与展望[J]. 中国农业科技导报, 2014, 16(2): 85–91.
- [8] 刘维涛, 周启星. 重金属污染预防品种的筛选与培育[J]. 生态环境学报, 2010, 19(6): 1452–1458.
- [9] 赵增跃. 青海省青稞产业现状及发展趋势分析[J]. 农业工程技术, 2018, 38(32): 11–12.
- [10] 叶芝兰. 大麦响应低钾胁迫的基因型差异及其耐性机制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [11] BATISTA B L, SOUZA J M O, DE SOUZA S S, et al. Speciation of arsenic in rice and estimation of daily intake of different arsenic species by Brazilians through rice consumption[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 191(1/2/3): 342–348.
- [12] AHMAD ANJUM S, TANVEER M, HUSSAIN S, et al. Alteration in growth, leaf gas exchange, and photosynthetic pigments of maize plants under combined cadmium and arsenic stress[J]. Water Air & Soil Pollution, 2016, 228(1): 13.
- [13] PENG Y, LIAO L L, LIU S, et al. Magnesium deficiency triggers SGR-mediated chlorophyll degradation for magnesium remobilization[J]. Plant Physiology, 2019, 181(1): 262–275.
- [14] SHAI BUR M R, KITAJIMA N, SUGAWARA R, et al. Physiological and mineralogical properties of arsenic-induced chlorosis in barley seedlings grown hydroponically[J]. Journal of Plant Nutrition, 2008, 31(2): 333–353.
- [15] 李应学, 何宗兰, 霍文瑞, 等. 农田施用污泥中砷的控制标准研究[J]. 农业环境科学学报, 1984, 3(4): 1–6.
- [16] LESLIE E M, HAIMEUR A, WAALKES M P. Arsenic transport by the human multidrug resistance protein 1(mrp1/abcc1) evidence that a tri-glutathione conjugate is required[J]. Journal of Biological Chemistry, 2004, 279(31): 32700–32708.
- [17] SONG W Y, MENDOZA-CÓZATL D G, LEE Y, et al. Phytochelatin-metal(loid) transport into vacuoles shows different substrate preferences in barley and *Arabidopsis*[J]. Plant, Cell & Environment, 2014, 37(5): 1192–1201.
- [18] 何玉君, 孙梦荷, 沈亚婷, 等. 超富集植物与重金属相互作用机制及应用研究进展[J]. 岩矿测试, 2020, 39(5): 639–657.
- [19] ABBAS G, MURTAZA B, BIBI I, et al. Arsenic uptake, toxicity, detoxification, and speciation in plants: physiological, biochemical, and molecular aspects[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(1): 59.
- [20] WANG J R, ZHAO F J, MEHARG A A, et al. Mechanisms of arsenic hyperaccumulation in *Pteris vittata*: uptake kinetics, interactions with phosphate, and arsenic speciation[J]. Plant Physiology, 2002, 130(3): 1552–1561.
- [21] MIKKELSEN M D, PEDAS P, SCHILLER M, et al. Barley HvHMA1 is a heavy metal pump involved in mobilizing organellar Zn and Cu and plays a role in metal loading into grains[J]. PLoS One, 2012, 7(11): e49027.
- [22] HUANG T L, NGUYEN Q T T, FU S F, et al. Transcriptomic changes and signalling pathways induced by arsenic stress in rice roots[J]. Plant Molecular Biology, 2012, 80(6): 587–608.
- [23] SHI G L, LI D J, WANG Y F, et al. Accumulation and distribution of arsenic and cadmium in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) at different developmental stages[J]. Science of the Total Environment, 2019, 667: 532–539.
- [24] SECCO D, WANG C, ARPAT B A, et al. The emerging importance of the SPX domain-containing proteins in phosphate homeostasis[J]. New Phytologist, 2012, 193(4): 842–851.
- [25] ZVOBGO G, HU H L, SHANG S H, et al. The effects of phosphate on arsenic uptake and toxicity alleviation in tobacco genotypes with differing arsenic tolerances[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2015, 34(1): 45–52.
- [26] FAROOQ M A, ISLAM F, ALI B, et al. Arsenic toxicity in plants: cellular and molecular mechanisms of its transport and metabolism[J]. Environmental and Experimental Botany, 2016, 132: 42–52.

责任编辑: 邹慧玲

英文编辑: 柳正