

外源钙离子对铅胁迫下小麦膜脂过氧化和根系活力的影响

赵腾飞, 刘颖, 王尔美, 王晴晴, 代莉, 张云华*

(安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036)

摘要: 为明确外源添加钙离子对铅污染区域小麦膜脂过氧化和根系活力的影响机理, 利用 1/2 Hoagland 营养液培养新麦 26, 研究外源添加不同浓度钙离子对铅胁迫下小麦幼苗叶绿素、抗氧化酶活性、丙二醛含量、细胞膜透性及根系活力造成的影响。结果表明, 外源钙的添加较有效地缓解铅胁迫对小麦的毒害, 与 Pb 处理相比, 外源钙离子处理叶绿素含量明显升高, Ca3 处理升高最多, 达到 77.3%; MDA 含量和细胞膜透性显著降低, Ca3 处理分别下降 29.9%、24.5%; 抗氧化酶活性表现存在差异, Ca3 处理 SOD、CAT 活性分别升高 48.5%、85.6%, 而 POD 活性降低 26.9%; Ca3 处理显著恢复了小麦根系活力, 恢复率为 56.2%。因此, 试验表明以氧化钙调节 pH 环境并混合氯化钙的方法能一定程度缓解铅对小麦的毒害作用。

关键词: 小麦; 铅胁迫; 外源钙; 膜脂过氧化; 根系活力

中图分类号: S512.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2017)03-0508-05

Effects of exogenous Ca^{2+} on membrane lipid peroxidation and root activity of wheat under lead stress

ZHAO Tengfei, LIU Ying, WANG Ermei, WANG Qingqing, DAI Li, ZHANG Yunhua

(School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036)

Abstract: In order to clarify mechanisms of exogenous Ca^{2+} on membrane lipid peroxidation and root activity of wheat under Pb stress, effects of exogenous different concentrations Ca^{2+} on chlorophyll content, antioxidant enzyme activity, MDA content, cell membrane permeability and root activity in Xinmai 26 (grow in 1/2 Hoagland) seedling under Pb stress were studied. Results showed that the addition of exogenous calcium could alleviate the toxicity of lead stress on wheat more effectively. Compared with Pb treatment, the chlorophyll content increased significantly by the addition of exogenous calcium and it was raised by 77.3% in the Ca3 treatment; the MDA content and the level of membrane lipid peroxidation decreased obviously and they were decreased by 29.9% and 24.5% respectively in the Ca3 treatment; the antioxidant enzyme activities showed different situations, the activities of the SOD and CAT increased by 48.5% and 85.6% respectively, while the POD activity decreased by 26.9% in the Ca3 treatment; the root activity of wheat was restored and the recovery rate was 56.2% in the Ca3 treatment. Therefore, the toxicity of lead on Wheat could be alleviated using the CaO (regulate pH) and appropriate CaCl_2 .

Key words: wheat; lead stress; exogenous calcium; membrane lipid peroxidation; root activity

铅在矿产开采、冶炼加工、消费和再生产等过程中, 以铅离子形式通过大气沉降、污水排放等方式造成土壤污染^[1]。铅作为生物体非必需元素, 难以被降解, 易在植物体中富集, 对植物的生长产生一定的伤害^[2]。在铅胁迫下, 植物表现出明显的中毒症状, 例如生长缓慢, 叶片褪绿等表形损伤, 以及膜透性的改变、酶活性的扰乱和 DNA 损伤等其他生理

过程的改变^[3]。同时它还可以通过植物根系在植物体内积累, 并通过食物链进入人体, 对骨髓造血系统和神经系统造成损害, 直接危害人体健康^[4]。

钙是植物生长发育过程中必要的营养元素, 参与调节植物体内许多生理生化过程^[5]。钙同时还是调节多种细胞功能的第二信使, 在植物抗逆过程中具有重要的作用, 对植物生长具有很重要的意义^[6]。

收稿日期: 2016-11-09

基金项目: 安徽农业大学 2014 年度生理生态学科骨干培育 (2014XKPY-40) 资助。

作者简介: 赵腾飞, 硕士研究生。E-mail: 1160037901@qq.com

* 通信作者: 张云华, 博士, 副教授。E-mail: yunhua9681@163.com

国内外大量的研究表明,钙离子在植物处于盐胁迫、重金属胁迫和干旱胁迫等逆境条件下发挥重要的积极作用^[7-9]。利用钙化合物进行土壤重金属污染修复已经成为一种常见手段^[10]。当植物处于重金属胁迫时,施加钙元素的原理主要是通过离子间的拮抗作用来降低植物对污染物的吸收^[11]。有研究表明 Ca^{2+} 能减轻水稻和番茄受铜、铅、镉、锌及镍等重金属的毒害^[12]。王芳等^[13]研究认为,外源氯化钙对玉米幼苗铅胁迫的缓解具有一定作用,增强了玉米幼苗对重金属铅的抗性。陈远其等^[14]在总结近年来钙化合物石灰对土壤重金属污染修复时明确,石灰类物质能显著提升土壤 pH,降低 Pb 等重金属生物有效性,同时提出应根据不同土壤类型及污染物确定石灰物质最佳用量。

小麦作为我国主要的粮食作物,其安全品质越来越受到广泛重视。目前我国小麦受铅污染呈分布区域广、危害性大的现象,情况不容乐观^[15]。受铅污染的小麦集中分布于道路、污灌区及工矿冶炼区域及周边^[16-17]。铅污染严重影响小麦安全品质,杨军等^[18]对北京市凉风灌区小麦重金属含量的研究发现小麦籽粒中的 Pb 超标率为 28.6%。铅污染同样影响小麦正常生长发育。谢影等^[19]在研究了 Pb 对小麦萌发及生物量的影响时发现,高浓度铅处理对小麦萌发与生长具有显著的抑制作用,且随浓度增大抑制进一步增强。本试验以新麦 26 为试验材料,研究在重金属铅胁迫下外源钙对小麦萌生长期中的缓解作用,旨在为小麦抗铅研究提供理论和实践依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

以新麦 26 为试验材料,小麦种子由安徽省农科院作物所提供。

1.2 试验方法

选取健康饱满籽粒,经表面消毒,去离子水冲洗干净,均匀播于铺有滤纸的培养皿中,每皿 30 粒。溶液浸润参试籽粒,放于培养箱中,各处理重复 3 次。温度 25℃,无光照培养 5 d。5 d 后将萌发情况一致的小麦进行各浓度水培转移。水培供试溶液设置:以 1/2Hoagland 营养液为水培营养液,因钙是植物生长必需元素,故本试验营养液中钙离子浓度不计入外源钙添加浓度。根据魏学玲等人的研究,调整后以重度铅污染为试验浓度即加入 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ (以 Pb^{2+} 计) $800 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[20]。有研究认为小麦适宜生长的 pH 值为 6~7^[21]。在水培溶液中添加 $810 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{CaO}$,调节水培溶液 pH 值,稳定到 6~7,

后添加不同浓度 CaCl_2 (以 Ca^{2+} 计)。

试验共设 6 个处理:1.CK(对照,只加营养液); 2.Pb ($800 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{Pb}^{2+}$); 3.Ca1 ($800 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{Pb}^{2+} + 810 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{CaO}$); 4.Ca2 ($800 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{Pb}^{2+} + 810 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{CaO} + 1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{CaCl}_2$); 5.Ca3 ($800 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{Pb}^{2+} + 810 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{CaO} + 5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{CaCl}_2$); 6.Ca4 ($800 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{Pb}^{2+} + 810 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{CaO} + 10 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{CaCl}_2$)。设定温度与时间:25℃光照 16 h,16℃黑暗 8 h,培养 15 d。幼苗水培期间定期观察、补水,防止因水分蒸发使水培溶液浓度发生改变,每 5 d 更换 1 次水培溶液。

1.3 测定项目与方法

水培 15 d 后,测定小麦叶片生理指标。叶绿素含量采用的丙酮乙醇混合液法^[22]。超氧化物歧化酶(SOD)活性测定采用氮蓝四唑光化还原法;过氧化氢酶(CAT)活性测定采用紫外吸收法;过氧化物酶(POD)活性测定采用愈疮木酚法^[23]。细胞膜透性(CMP)采用外渗电导法^[24],丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法^[25],根系活力采用 α -萘胺法^[26]。

1.4 数据处理与分析

数据采用 SPSS19.0 分析软件和 EXCEL2003 进行计算与分析。

2 结果与分析

2.1 铅胁迫下外源钙对小麦叶绿素含量变化影响

从表 1 中可以看出,Pb 处理小麦的叶绿素含量显著低于 CK,Pb 处理小麦的叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素 a+b 含量较 CK 分别下降 47.1%、54.5%和 49.7%。Ca1 处理中单纯施加氧化钙以改变水培溶液 pH 具有一定缓解铅毒害作用。与 Ca1 处理相比较,Ca2 处理提高了小麦叶绿素含量,但差异并不显著。随着氯化钙添加量的增加,小麦幼苗叶绿素含量在 Ca3 处理时达到最高,与 Pb 处理相比较,叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 a+b 含量分别升高 73.5%、90.3%和 77.3%。随着氯化钙添加量的继续增加,在 Ca4 处理时小麦叶绿素含量与 Ca3 处理相比有所下降。

2.2 外源钙对铅胁迫下小麦幼苗丙二醛、细胞膜透性的影响

如图 1 所示,当铅在 Pb 处理时,小麦幼苗 MDA 含量显著高于空白对照(CK 处理),使其含量升高 96.9%。在外源钙添加后,其 MDA 含量都有所下降,在 Ca3 处理时达到相对最低值,相比 Pb 处理 MDA 含量下降 29.9%。在 Ca1 和 Ca2 处理下,小麦幼苗 MDA 含量有所下降但其作用显著小于 Ca3 和 Ca4

处理。细胞膜透性在各浓度处理所反映的信息趋同于 MDA 含量的表达。高浓度铅胁迫使细胞膜透性显著增加，外源钙的添加使膜透性相对于单纯铅胁迫

有所降低。说明高浓度铅胁迫损伤小麦幼苗细胞，外源钙在一定程度上缓解了铅对小麦细胞的伤害。

表 1 铅胁迫下外源钙离子对小麦幼苗叶绿素的影响

处理 Treatment	叶绿素 a Chla	叶绿素 b Chlb	叶绿素 a+b Chl(a+b)
CK	1.759±0.045 ^a	0.596±0.034 ^a	2.356±0.079 ^a
Pb	0.931±0.071 ^e	0.277±0.042 ^d	1.209±0.049 ^e
Ca1	1.013±0.046 ^e	0.366±0.034 ^c	1.421±0.081 ^d
Ca2	1.159±0.017 ^d	0.408±0.017 ^c	1.527±0.034 ^d
Ca3	1.615±0.058 ^b	0.527±0.005 ^{ab}	2.144±0.052 ^b
Ca4	1.313±0.041 ^c	0.506±0.051 ^b	1.821±0.091 ^c

注：不同小写字母表示某指标差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Note: Different small letters denote that the difference of treatments is significant ($P < 0.05$). The same below.

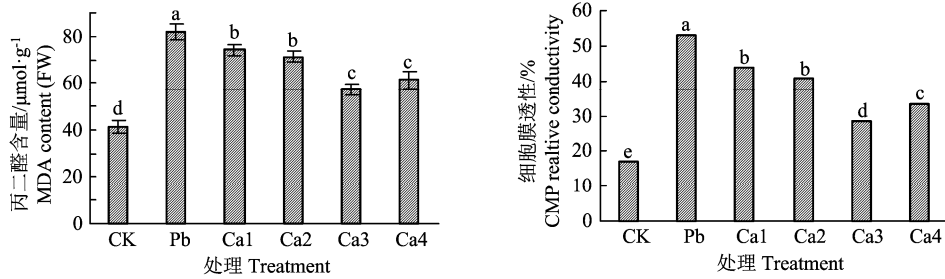


图 1 外源钙对铅胁迫下小麦幼苗丙二醛、细胞膜透性的影响

Figure 1 Effects of exogenous calcium on malondialdehyde and cell membrane permeability of wheat seedlings under Pb stress

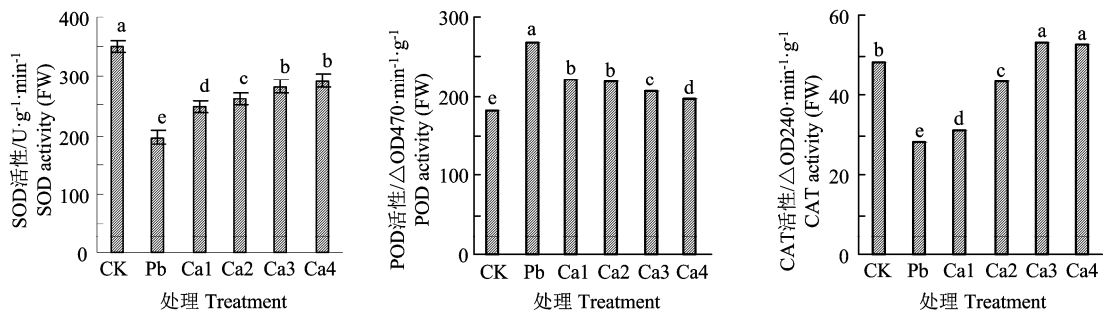


图 2 外源钙对铅胁迫下小麦幼苗抗氧化酶活性影响

Figure 2 Effects of exogenous calcium on antioxidant enzyme activities of wheat seedlings under Pb stress

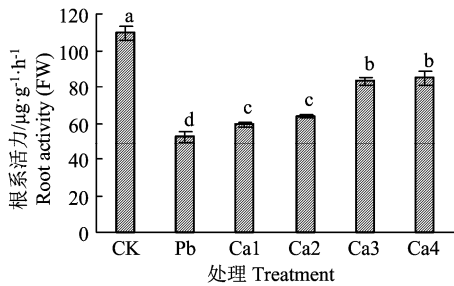


图 3 外源钙对铅胁迫下小麦幼苗根系活力的影响

Figure 3 Effect of exogenous calcium on the root activity of wheat seedlings under Pb stress

2.3 外源钙对铅胁迫下小麦抗氧化酶活性的影响

在此试验条件下，高浓度铅胁迫 (Pb 处理) 抑制小麦幼苗 SOD 活性与 CAT 活性 (见图 2)，抑制率达 43.9% 和 41.6%，而外源钙的添加则对高浓度铅抑制 SOD 活性和 CAT 活性起到缓解作用。其中 Ca1 处理时已表现出缓解趋势，但其作用小于其他 3 个加钙处理。Ca3 与 Ca4 处理对于铅胁迫下稳定酶活性的作用显著，且 CAT 活性在这 2 个处理时有高于对照 (CK 处理) 的趋势，说明此时钙处理能够促使过氧化氢酶发挥作用。Pb 处理促使小麦幼苗

POD 活性的升高, 为 CK 处理的 147.1% (图 2)。在外源钙的作用下, 小麦幼苗 POD 活性趋于正常, 且在 Ca3 与 Ca4 处理时表现较好。铅胁迫使小麦幼苗氧化酶发生紊乱, 外源钙的添加使这一现象得到一定好转。

2.4 外源钙对铅胁迫下小麦幼苗根系活力的影响

从图 3 可以看出, Pb 处理显著的抑制了根系活力, 抑制率达 55.9%。4 个加钙处理下小麦根系活力对照 Pb 处理分别升高 13.2%、21.5%、54.8% 和 60.2%, 但以最高恢复率的 Ca4 处理与 CK 处理相比较, 其抑制率也相对较高, 达 27.9%。Ca3 和 Ca4 处理与 Ca1 和 Ca2 处理相比较, 说明以氧化钙调节 pH, 添加较大浓度的氯化钙对缓解小麦铅胁迫具有一定的现实意义。而 Ca3 和 Ca4 处理与 CK 相比, 反映出试验中外源钙的添加对小麦铅胁迫下根系活力的恢复效果与正常生长的小麦之间仍有一定差距。整体上, 外源钙对于恢复铅胁迫下小麦幼苗根系活力的损伤具有积极意义。

3 讨论与结论

光合作用是植物生长的重要能量来源和物质基础, 叶绿素作为植物进行光合作用的主要色素, 其含量的多少对光合速率有直接的影响, 是反映植物叶片光合能力的一个重要指标^[27]。本试验结果表明, 高浓度铅使小麦幼苗叶绿素含量急剧降低, 极大的影响了小麦幼苗的光合作用, 使叶片褪绿枯黄、生长萎缩。外源钙的添加使小麦叶片叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素 a+b 均高于 Pb 对照。但各浓度处理差别也较为明显, 在 Ca3 处理时叶绿素含量达到最大值, Ca4 处理时又有所下降。

丙二醛是膜脂氧化的主要产物, 其量的变化在一定程度上反映了逆境胁迫对植物伤害程度^[28]。细胞质膜是一种选择透性膜, 它能控制和调节细胞内外物质的运输与交换, 其透性是评定植物对污染反应的指标之一^[29]。试验结果反映高浓度铅胁迫不可避免地使小麦幼苗细胞膜造成不可逆的伤害。在 Pb 处理时, 小麦丙二醛含量及细胞膜透性均极显著大于 CK 处理。但在钙添加处理时, 膜脂过氧化程度表现出不同程度的减轻, 表明外源钙有效降低铅对于小麦细胞的毒害。

SOD、CAT 和 POD 是植物体内保护酶系统系统中重要的 3 种抗氧化保护酶, 其主要作用是当植物处于逆境条件下, 清除活性氧自由基, 防止其过度积累造成细胞膜损伤^[30]。其中 SOD 可以把有害的超氧自由基转化为过氧化氢, 是植物机体内天然

存在的超氧自由基清除因子; CAT 是植物体内最有效的抗氧化酶之一, 它与 SOD 协同作用能将超氧物自由基和 H₂O₂ 转化为 H₂O 和 O₂, 可以有效减轻细胞受到的伤害^[31]。POD 是抗氧化酶系统中活性较高的一种酶, 广泛参与植物的呼吸作用, 光合作用及生长素的氧化等^[32]。在试验中, 高浓度铅在胁迫小麦生长过程中抑制了 SOD 活性, 使其清除自由基能力大大降低。李妍^[33]研究认为, 在铅胁迫时 SOD 活性急剧上升会显著高于空白对照。庞欣等^[34]研究确认为铅胁迫在 12 d 时, 小麦幼苗 SOD 活性会急剧下降呈现低于对照的趋势。这是由于胁迫浓度及时间差异所致, 高浓度铅在长时间胁迫小麦生长会抑制氧化酶清除自由基功能, 从而使小麦生长缓慢甚至致死。试验中 POD 活性被激发, 起到保护细胞膜的作用。而外源钙的添加使 SOD、CAT 活性得到有效恢复, 同时使 POD 活性也明显降低, 说明外源钙对缓解小麦在铅胁迫的逆境条件下具有一定的作用, 有利于小麦正常生长。植物的根是植物重要的吸收营养的器官, 根系活力是植物根部生理活动的重要生理指标^[35]。试验中小麦幼苗根系在高度铅胁迫下其活力急剧降低, 外源对根系活力的恢复具有积极作用。

高浓度铅胁迫对小麦幼苗造成严重伤害。小麦根系活力降低, 阻碍了小麦对营养元素的吸收, 同时植物体内积累过量活性氧, 造成其细胞损伤、氧化酶活性紊乱和叶绿体损伤等。外源钙的添加使这一现象得到好转, 钙离子拮抗作用产生, 一定程度恢复小麦根系活力, 使进入小麦体内的铅离子有所减少。细胞膜透性降低, 氧化酶活性也趋于正常, 对叶绿体伤害有所减少, 说明铅离子对于细胞的伤害减小, 且试验反映出铅对细胞伤害与外源钙浓度基本呈负相关, 铅离子小麦逆境胁迫程度减轻。综上所述, 在铅胁迫下, 外源钙的添加对小麦铅胁迫下生存具有一定积极意义。以氧化钙来调节小麦生长的 pH 环境, 同时配合一定的氯化钙添加能有效降低铅对小麦的毒害。同时许多研究也发现, 有机肥、煤基材料等多种改良剂能够有效的缓解重金属对作物的毒害, 减少作物果实中重金属元素的积累^[36-37]。或许改良剂合理混合使用能起到更好的缓解重金属毒害效果, 当然这还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 张正洁, 李东红, 许增贵. 我国铅污染现状、原因及对策[J]. 环境保护科学, 2005, 31(4): 41-42.
- [2] NYITRAI P, BÓKA K, GÁSPÁR L, et al. Characterization of the stimulating effect of low-dose stressors in

- maize and bean seedlings[J]. *J Plant Physiol*, 2003, 160(10): 1175-1183.
- [3] SHARMA P, DUBEY R S. Lead toxicity in plants[J]. *Brazil J Plant Physiol*, 2005, 17(1): 35-52.
- [4] 程新伟. 土壤铅污染研究进展[J]. *地下水*, 2011, 33(1): 65-68.
- [5] 关昕昕, 严重玲, 刘景春, 等. 钙对镉胁迫下小白菜生理特性的影响[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2011, 50(1): 132-137.
- [6] GONG M, CHEN S N, SONG Y Q, et al. Effect of calcium and calmodulin on intrinsic heat tolerance in relation to antioxidant systems in maize seedlings[J]. *Functional Plant Biology*, 1997, 24(3): 371-379.
- [7] 徐芬芬. CaCl_2 对盐胁迫下小白菜生长和相关生理特性的影响[J]. *热带作物学报*, 2012, 33(4): 642-645.
- [8] 林啸, 高素萍, 雷霆, 等. 镉胁迫下外源钙对白菜氧化应激和 NO 含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(9): 1699-1705.
- [9] JALEEL C A, MANIVANNAN P, SANKAR B, et al. Water deficit stress mitigation by calcium chloride in *Catharanthus roseus*: Effects on oxidative stress, proline metabolism and indole alkaloid accumulation[J]. *Colloid Surface B*, 2007, 60(1): 110-116.
- [10] 任露陆, 吴文成, 陈显斌, 等. 碳酸钙与氢氧化钙修复重金属污染土壤效果差异研究[J]. *环境科学与技术*, 2016, 39(5): 22-27.
- [11] 贺迪. 重金属污染土壤的植物修复及钙离子的调节作用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2007.
- [12] HOSONO M, RII P, TACHIBANA Y, et al. Effect of calcium in alleviating heavy metal toxicities in crop plants. I. Effects of calcium concentration in nutrient solutions on the retarded growth of rice and tomato plants[J]. *J sci soil manure, Jpn*, 1979, 50(4): 353-360.
- [13] 王芳, 李永生, 王汉宁, 等. 钙对铅胁迫下玉米幼苗生长及生理特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(3): 202-207.
- [14] 陈远其, 张煜, 陈国梁. 石灰对土壤重金属污染修复研究进展[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(8): 1419-1424.
- [15] 魏文忠, 梁艳红, 马红峰, 等. 小麦中铅污染现状及其检测技术研究进展[J]. *粮油食品科技*, 2012, 20(4): 35-38.
- [16] 李剑, 马建华, 宋博. 郑汴路路旁土壤-小麦系统重金属积累及其健康风险评价[J]. *植物生态学报*, 2009, 33(3): 624-628.
- [17] 赵多勇, 魏益民, 魏帅, 等. 小麦籽粒铅污染来源的同位素解析研究[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(8): 258-262.
- [18] 杨军, 陈同斌, 郑袁明, 等. 北京市凉水灌区小麦重金属含量的动态变化及健康风险分析[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(12): 1661-1668.
- [19] 谢影, 鲁先文, 卜利波. 重金属 Pb、Cr 对小麦种子萌发和幼苗生物量的影响[J]. *天津农业科学*, 2009, 15(1): 22-24.
- [20] 魏学玲, 史如霞, 杨颖丽, 等. Pb^{2+} 胁迫对两种小麦幼苗生理特性影响的研究[J]. *植物研究*, 2009, 29(6): 714-720.
- [21] 李清芳, 辛天蓉, 马成仓, 等. pH 值对小麦种子萌发和幼苗生长代谢的影响[J]. *安徽农业科学*, 2003, 31(2): 185-187.
- [22] 张宪政, 陈玉凤, 王荣富. *植物生理学实验技术*[M]. 辽宁: 辽宁科学技术出版社, 1994.
- [23] 赵海泉. *基础生物学实验指导: 植物生理学分册*[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2008.
- [24] 李合生, 孙群, 赵世杰, 等. *植物生理生化实验原理和技术*[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [25] 赵世杰, 刘华门, 董新纯. *植物生理学实验指导*[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1998.
- [26] 张志良. *植物生理学实验指导*[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990.
- [27] 俞世雄, 李芬, 李绍林, 等. 水分胁迫对小麦新品系叶绿素含量的影响[J]. *云南农业大学学报(自然科学版)*, 2014, 29(3): 353-358.
- [28] 杨文玲, 巩涛, 刘莹莹, 等. 铅铬胁迫对小麦幼苗抗氧化酶活性和丙二醛含量的影响[J]. *中国农学通报*, 2015, 31(6): 45-50.
- [29] 郑世英, 王丽燕. 铅、镉及其复合污染对小麦生理生化特性的影响[J]. *信阳师范学院学报(自然科学版)*, 2009, 22(1): 60-62.
- [30] 李合生. *现代植物生理学*[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2012.
- [31] BOWLER C, MONTAGU M, INZE D. Superoxide dismutase and stress tolerance[J]. *Annu Rev Plant Biol*, 1992, 43(1): 83-116.
- [32] 李冬香, 李光德, 张华, 等. 硅作用下镉对小麦幼苗生理生化指标的影响研究[J]. *中国农学通报*, 2013, 29(36): 84-90.
- [33] 李妍. 铅镉胁迫对小麦幼苗抗氧化酶活性及丙二醛含量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2009, 29(3): 514-517.
- [34] 庞欣, 王东红, 彭安. 铅胁迫对小麦幼苗抗氧化酶活性的影响[J]. *环境科学*, 2001, 22(5): 108-111.
- [35] 张黛静, 马建辉, 杨淑芳, 等. 硅对铜胁迫下小麦幼根细胞超微结构的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(8): 2385-2389.
- [36] 乔莎莎, 张永清, 杨丽雯, 等. 有机肥对铅胁迫下小麦生长的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(4): 1094-1100.
- [37] 黄震, 黄占斌, 孙朋成, 等. 环境材料对作物吸收重金属 Pb、Cd 及土壤特性研究[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(10): 2490-2499.