

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

胡铁柱,孙海燕,杨靖,游晴晴,茹振钢

(河南科技学院 小麦中心/现代生物育种协同创新中心 小麦分中心,河南 新乡 453003)

摘要: 为了解铅(Pb)对小麦的毒性效应及 Pb 积累对矿质元素吸收的影响,利用 Hoagland's 营养液水培法,选用 Pb 低积累型小麦品系 CL0442 和高积累型品系 MSK39 分析不同浓度(0、3.86、7.72 mol/L) Pb(NO₃)₂ 对两品系光合特性、根系生长、抗氧化特性及 Ca、Fe、K、Mg 元素积累的影响。结果表明,Pb 对 CL0442 和 MSK39 幼苗光合特性、根系生长、必需矿质元素含量及抗氧化特性等的影响有较大差异。对于 CL0442,低浓度(3.86 mol/L) Pb 条件下其净光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度和蒸腾速率受影响不显著,高浓度(7.72 mol/L) Pb 条件下上述参数则显著下降;Pb 对根系生长表现出抑制作用;根系 POD、CAT 活性和 MDA 含量均高于对照;低浓度 Pb 条件下,Ca、Fe、Mg 含量较对照和高浓度 Pb 处理分别提高 34.39%~39.23% 和 2.99%~31.07%。对于 MSK39,低浓度 Pb 条件下其光合参数均显著增加,根系生长受到促进;高浓度 Pb 条件下光合参数受到抑制,根系生长也受到抑制;2 种 Pb 浓度条件下,植株 Ca、Fe、Mg 含量均较对照降低 11.78%~35.16%。2 个 Pb 浓度下,2 个小麦品系植株 K 含量均较对照显著降低,降幅为 17.10%~29.75%。在高浓度 Pb 条件下,2 种 Pb 积累类型小麦的光合作用和根系生长均受到抑制,在低浓度 Pb 条件下二者表现差异较大;Pb 抑制小麦对 K 的吸收,对 Ca、Fe、Mg 吸收的影响因品种和 Pb 浓度而异。

关键词: 小麦;铅;矿质元素;光合特性;根系;抗氧化特性

中图分类号: S512.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-3268(2018)11-0013-05

Effect of Pb on Physiological and Biochemical Properties and Root Growth of Two Pb Accumulation Types of Wheat Seedlings Treated with Pb

HU Tiezhu, SUN Haiyan, YANG Jing, YOU Qingqing, RU Zhengang

(Wheat Center, Henan Institute of Science and Technology/Sub-center of Wheat Breeding,
Modern Biological Breeding Collaborative Innovation Center, Xinxiang 453003, China)

Abstract: In order to study the toxicity effect of Pb to wheat and the effect of Pb accumulation on the absorption of mineral elements, the wheat lines CL0442 and MSK39 with low and high accumulation of Pb respectively were cultivated in Hoagland's nutrition solution treated with different amounts (0, 3.86, 7.72 mol/L) of Pb(NO₃)₂, and the photosynthetic character, root property, antioxidant property, the contents of Ca, Fe, K, Mg were determined. The results showed that the above parameters had big difference between CL0442 and MSK39 treated with Pb. The net photosynthetic rate, stomatal conductance, intercellular CO₂ concentration and transpiration rate of CL0442 were not significantly affected by low concentration (3.86 mol/L) of Pb, but decreased significantly under high concentration (7.72 mol/L) of Pb condition. The Pb inhabited the root growth of CL0442, and the activities of POD, CAT and MDA content of CL0442 root treated with Pb were higher than those of control without Pb. The contents of Ca, Fe and Mg of CL0442 of 3.86 mol/L Pb treatment increased by 34.39%—39.23% and 2.99%—31.07% com-

pared with 0 mol/L and 7.72 mol/L Pb treatments respectively. The photosynthetic parameters and root growth of MSK39 were promoted by low concentration of Pb, but inhibited by high concentration of Pb, and the contents of Ca, Fe and Mg of MSK39 of 3.86 mol/L and 7.72 mol/L Pb treatments decreased by 11.78%—35.16% compared with control. The K content of CL0442 and MSK39 of 3.86 mol/L and 7.72 mol/L Pb treatments decreased by 17.10%—29.75% compared with control. Both the photosynthesis and root growth of two wheat lines were inhibited by high concentration of Pb, and the influence was different under low concentration of Pb condition. The absorption of K was inhibited in two wheat lines, and amounts of Ca, Fe and Mg absorbed by wheat differed for different Pb concentration and cultivars.

Key words: Wheat; Lead; Mineral element; Photosynthetic characters; Root system; Antioxidant property

重金属污染已成为当前生态健康关注的热点问题。据估测,我国受重金属污染的耕地面积超过 2 000 万 hm^2 , 每年因此造成的粮食减产达 1 000 万 t, 重金属污染的粮食达 1 200 万 t, 合计农业损失 200 亿元以上^[1-4]。随着采矿业、冶炼工业的发展和含铅(Pb)涂料、纸张、汽油、炸药等的生产使用及城市污水的排放等, Pb 已成为土壤污染中主要的重金属元素之一^[5-6]。大量的 Pb 进入土壤后, 受其毒害严重的作物不能正常生长, 影响作物产量和质量, 更严重的会进一步通过食物链影响人体健康^[7-9]。因此, 深入研究 Pb 对作物的危害显得尤为紧迫和重要, 一方面, 明晰 Pb 对农作物的危害机制, 采取适当措施, 降低其危害; 另一方面, 培育和应用某些 Pb 低富集作物品种, 降低粮食和蔬菜的 Pb 积累, 对提高作物食用安全有重要意义^[10-11]。

Pb 能扰乱植物对矿质营养元素的吸收, 对植物光合作用也会产生严重的负面影响^[12-14]。小麦(*Triticum aestivum*)是我国重要的粮食作物。目前, 关于重金属对小麦的影响研究主要集中在小麦种子或幼苗的生理指标、生物学性状以及抗氧化酶活性等方面^[8, 15-18], 而对小麦幼苗必需矿质元素积累以及光合作用的影响研究尚未见报道。小麦幼苗是其成株期性状表现的基础, 钙(Ca)、铁(Fe)、钾(K)和镁(Mg)等矿质元素既是其生长所必需元素, 也是人类日常饮食的重要组成部分^[19]。为此, 以 Pb 高积累和低积累型小麦幼苗为材料, 研究 Pb 对小麦光合特性、根系生长、抗氧化特性及 Ca、Fe、K、Mg 积累的影响, 为了解 Pb 的毒性效应及 Pb 积累对矿质元素吸收的影响提供参考。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试材料为从 200 多份材料中筛选出的苗期 Pb 低积累型小麦品系 CL0442 和高积累型品系 MSK39, 均由河南科技学院小麦中心提供。

1.2 小麦培养和 Pb 处理

试验在河南科技学院小麦中心实验室进行。将小麦种子于室温发芽, 7 d 后挑选长势一致的幼苗移栽至装有 Hoagland's 营养液的塑料盒(29.2 cm × 22.4 cm × 8.9 cm)中, 用打孔泡沫板固定幼苗。参考生态环境部农用地土壤污染风险管控标准(GB 15618—2018), 向营养液中添加 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, 使其终浓度分别为 0(对照)、3.86(处理 1)、7.72(处理 2) mol/L。每个处理 48 株, 每 14 d 换一次营养液。培养 49 d 后进行光合特性、酶活性、根系生长特性及 Pb、Ca、Fe、K、Mg 含量测定。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 光合特性 采用 LI-6400XT 便携式光合作用测量系统测定小麦第 3 片叶净光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度和蒸腾速率等。测定光为自然光, 每处理 3 次重复, 每重复测定 3 次。

1.3.2 抗氧化特性 取小麦叶片和根系, 分别采用相应试剂盒(苏州科铭生物技术有限公司生产)测定过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性及丙二醛(MDA)含量。

1.3.3 Ca、Fe、K、Mg 含量 取小麦幼苗植株, 置烘箱中 70 ℃ 烘干至恒质量, 用千分之一电子天平分别称量 0.500 g 地上部分干燥样品, 在 40 mL 四氟坩埚中加入 12 mL 硝酸: 高氯酸 = 3:1 混合液消解 12 h; 在电热板(不超过 170 ℃)上加热约 4 h, 冷却后用 3% 的硝酸定容至 25 mL, 摇匀待用。用美国 PE 公司生产的 Optima 2100DV 电感耦合等离子体发射光谱仪测定 Pb、Ca、Fe、K、Mg 含量。

1.3.4 根系生长特性 取长势一致的小麦幼苗 10 株, 用 EPSON PERFECTION 4990 PHOTO 扫描根系, 用 WinRHIZO Pro 2007d 软件分析总根长及根平均直径、总表面积、总体积。

1.4 数据处理

试验数据用 Excel 2013 和 SAS 8.01 进行处理和分析。

2 结果与分析

2.1 Pb 对不同 Pb 积累型小麦幼苗光合特性的影响

从表 1 可以看出,Pb 对 Pb 低积累型小麦品系 CL0442 和高积累型小麦品系 MSK39 幼苗光合特性的影响不同。对于 Pb 低积累型小麦品系 CL0442,与对照相比,处理 1 净光合速率、气孔导度、胞间

CO₂ 浓度和蒸腾速率变化不显著,处理 2 显著下降,且处理 2 显著低于处理 1,表明 3.86 mol/L 的 Pb 对 CL0442 的光合作用没有明显抑制作用,当浓度达 7.72 mol/L 时则显著抑制其光合作用;对于 Pb 高积累型小麦品系 MSK39,对照和处理 2 净光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率均显著低于处理 1,表明 3.86 mol/L 的 Pb 不会对其光合作用造成胁迫,反而有促进作用。

表 1 不同 Pb 处理小麦幼苗光合特性

品系	处理	净光合速率/ [μmol/(m ² · s)]	气孔导度/ [(mol / (m ² · s)]	胞间 CO ₂ 浓度/ (μmol/mol)	蒸腾速率/ [mmol/(m ² · s)]
CL0442	对照	8.370 ± 0.376a	0.231 ± 0.033a	396.605 ± 9.767a	3.841 ± 0.462a
	1	9.013 ± 0.650a	0.217 ± 0.036a	388.072 ± 6.510a	3.671 ± 0.445a
	2	4.873 ± 0.465b	0.035 ± 0.003b	245.911 ± 7.277b	0.805 ± 0.063b
MSK39	对照	4.301 ± 1.058b	0.044 ± 0.014b	268.226 ± 12.491b	0.979 ± 0.301b
	1	6.640 ± 0.481a	0.110 ± 0.022a	313.639 ± 27.479a	2.128 ± 0.402a
	2	3.730 ± 0.735b	0.022 ± 0.004b	206.020 ± 30.105b	0.487 ± 0.082b

注:不同小写字母表示同一品系不同处理之间差异显著(P<0.05),下同。

2.2 Pb 对不同 Pb 积累型小麦幼苗根系生长的影响

由表 2 可知,与对照相比,营养液中添加 Pb(NO₃)₂后,Pb 低积累型小麦品系 CL0442 的总根长及根总表面积、总体积均呈降低趋势,处理 1、2 均

显著低于对照,而平均直径变化不显著;Pb 高积累型小麦品系 MSK39 的根总表面积、总体积、平均直径均以处理 1 最大,显著高于对照和处理 2(平均直径除外),总根长表现为处理 1 显著高于处理 2,但与对照间的差异不显著。

表 2 不同 Pb 处理小麦幼苗根系性状

品系	处理	总根长/cm	总表面积/cm ²	平均直径/mm	总体积/cm ³
CL0442	对照	1 637.2 ± 214.5a	188.5 ± 30.2a	0.36 ± 0.02a	1.74 ± 0.34a
	1	1 372.4 ± 213.1b	145.9 ± 26.1b	0.33 ± 0.01a	1.24 ± 0.25b
	2	1 273.7 ± 191.5b	138.1 ± 21.4b	0.35 ± 0.04a	1.23 ± 0.25b
MSK39	对照	1 260.3 ± 216.5a	129.4 ± 29.1b	0.32 ± 0.02b	1.07 ± 0.30b
	1	1 213.9 ± 151.2a	151.5 ± 11.6a	0.41 ± 0.04a	1.55 ± 0.16a
	2	1 052.2 ± 46.7b	116.7 ± 4.8b	0.35 ± 0.01ab	1.03 ± 0.05b

2.3 Pb 对不同 Pb 积累型小麦幼苗抗氧化特性的影响

如表 3 所示,对于 Pb 低积累型小麦品系 CL0442,处理 1 和处理 2 幼苗根的 POD、CAT 活性和 MDA 含量均显著高于对照(POD 活性除外),叶片中 POD 活性随 Pb 浓度的增加而增加,CAT 活性和 MDA 含量随 Pb 浓度的增加总体呈降低趋势。

对于 Pb 高积累型小麦品系 MSK39,其叶片和根 POD、CAT 活性和 MDA 含量在 3 个处理下均无规律性变化。叶片和根 POD 活性均表现为处理 1 显著低于对照和处理 2,对照和处理 2 间差异均不显著。叶片和根 CAT 活性均表现为处理 1 高于对照和处理 2,处理 2 低于对照。叶片 MDA 含量表现为处理 1 高于对照和处理 2,处理 2 与对照间差异不显著;

表 3 不同 Pb 处理小麦幼苗抗氧化特性

品系	处理	POD 活性/(U/mg)		CAT 活性/(nmol/g)		MDA 含量/(nmol/g)	
		叶	根	叶	根	叶	根
CL0442	对照	25 132.93 ± 5 144.89b	28 769.76 ± 3 495.49b	1 066.72 ± 37.49a	155.94 ± 23.09b	51.85 ± 11.79a	28.63 ± 0.91b
	1	34 334.50 ± 3 626.46a	35 141.91 ± 1 940.53ab	980.84 ± 53.72a	296.06 ± 45.07a	48.16 ± 4.55b	37.32 ± 1.01a
	2	39 564.37 ± 4 457.85a	37 115.37 ± 844.32a	777.44 ± 52.42b	293.81 ± 23.91a	48.59 ± 2.06b	37.41 ± 4.65a
MSK39	对照	39 849.69 ± 2 334.84a	33 810.42 ± 5 863.54a	650.88 ± 44.86b	359.34 ± 28.23ab	48.62 ± 6.46b	41.79 ± 6.21a
	1	34 405.84 ± 2 750.39b	21 494.10 ± 4 253.03b	2 332.32 ± 97.81a	433.92 ± 41.42a	73.13 ± 15.58a	36.03 ± 2.45b
	2	39 397.93 ± 5 684.41a	29 566.28 ± 3 816.15a	390.98 ± 45.11c	280.24 ± 18.49b	54.78 ± 5.52b	33.28 ± 1.64b

根 MDA 含量表现为对照高于处理 1、2,处理 1、2 间差异不显著。表明不同 Pb 积累型小麦幼苗对 Pb 的响应不同,具有不同的保护系统。

2.4 Pb 对不同 Pb 积累型小麦幼苗植株 Ca、Fe、K、Mg 积累的影响

如表 4 所示,对于 Pb 低积累型小麦品系 CL0442,处理 1 植株 Ca、Fe、Mg 含量最高,较对照和处理 2 分别提高 34.39% ~ 39.23% 和 2.99% ~ 31.07%;处理 1、2 的 K 含量分别较对照降低 27.02%、

20.79%,但处理 1 和处理 2 间的差异不显著。对于 Pb 高积累型小麦品系 MSK39,对照 Ca、Fe、K、Mg 含量最高,随着营养液中 Pb 浓度增加,4 种元素含量均呈降低趋势,处理 1、2 较对照降低 11.78% ~ 35.16%,表明 Pb 抑制了小麦对这些元素的吸收。无论是 Pb 低积累型小麦品系 CL0442 还是高积累型小麦品系 MSK39,在处理 1、2 条件下 K 含量均较对照显著降低,降幅为 17.10% ~ 29.75%,说明 Pb 抑制小麦对 K 元素的吸收。

表 4 不同 Pb 处理小麦幼苗植株 Ca、Fe、K、Mg 含量 μg/g

品系	处理	Pb	Ca	Fe	K	Mg
CL0442	对照		5 179.44 ± 48.09b	124.38 ± 0.24b	26 228.76 ± 134.91a	2 998.51 ± 26.11b
	1	19.08 ± 0.05b	7 211.22 ± 17.47a	167.16 ± 0.55a	19 141.71 ± 72.09b	4 048.28 ± 49.16a
	2	40.26 ± 0.19a	5 002.67 ± 49.13b	162.16 ± 2.26a	20 776.36 ± 79.32b	2 790.32 ± 20.99b
MSK39	对照		5 480.50 ± 58.16a	184.10 ± 0.91a	34 450.81 ± 92.55a	2 992.32 ± 18.21a
	1	54.74 ± 0.04b	4 095.38 ± 14.44b	162.42 ± 11.83a	28 559.49 ± 771.12b	2 560.46 ± 34.92b
	2	67.92 ± 1.84a	3 553.61 ± 43.27b	158.92 ± 1.83b	24 200.23 ± 26.44b	2 463.19 ± 22.19b

3 结论与讨论

研究表明,一定量的 Pb 胁迫会导致植物中营养元素浓度及比例发生改变,如可以显著降低黄瓜 (*Cucumis sativus*) 种苗对 K、Ca、Fe、Mg 的吸收,也可以明显抑制玉米 (*Zea mays*) 对 K、Ca、Mg、P 的吸收^[20]。本研究结果发现,Pb 高积累型小麦品系 MSK39 对 Ca、Fe、Mg 的吸收受 Pb 抑制;而对于 Pb 低积累型小麦品系 CL0442,Pb 对小麦吸收 3 种元素的影响表现为低浓度促进、高浓度抑制。说明小麦同其他植物一样,较高浓度的 Pb 抑制其对必需矿质元素的吸收,但在低浓度时所受影响不同,可能主要是因为其基因型不同。在 Pb 存在的情况下,2 种 Pb 积累型小麦幼苗中 K 含量均低于对照,这与用 8 个不同基因型成株期小麦分析的 Pb 对矿质元素积累影响的结果一致^[17]。这可能是因为植株中二者存在某种竞争关系,Pb 的存在使 K 只能在叶片中少量积累,其机制需进一步研究。

Pb 会对植物造成氧化胁迫,产生大量活性氧,严重影响植物膜系统的功能^[12],植物通常利用包括 POD 和 CAT 在内的复杂的抗氧化系统限制活性氧对细胞的损害。一定浓度下 Pb 胁迫能诱导植物组织中 POD 活性升高^[21],CAT 活性受 Pb 毒害会有所降低^[12]。MDA 为植物体内膜脂过氧化的直接产物^[22],其含量水平通常可反映植株遭受逆境伤害的程度。本研究结果表明,Pb 处理条件下 Pb 低积累型小麦品系 CL0442 幼苗根的 POD、CAT 活性和 MDA 含量均高于对照,叶中 POD 活性随 Pb 浓度增

加而增加,CAT 活性和 MDA 含量却总体呈降低趋势。Pb 高积累型小麦品系 MSK39 叶片和根 POD、CAT 活性及 MDA 含量在 3 个处理下均无规律性变化。李妍^[15]研究 Pb 对小麦品种德抗 961 幼苗的影响发现,小麦芽长和根长均随 Pb 质量浓度的增加而降低;在 500 mg/L Pb 胁迫下,小麦根和芽 POD 活性比对照增加了 2.62 倍和 2.58 倍,CAT 活性则随 Pb 质量浓度的增加而下降,根的下降趋势比芽明显,MDA 含量均随 Pb 质量浓度的增加而增加。这与本研究结果不完全相同,一方面可能是因为不同小麦品种对 Pb 表现出不同的生态效应,另一方面也可能是因为试验条件不同,这反映了小麦对 Pb 反应的复杂性。

乔莎莎等^[16]研究发现,无 Pb 胁迫与轻度及重度 Pb 胁迫的小麦总根长在各生育时期均达到显著差异,在轻度 Pb 胁迫下,苗期总根长下降最明显,降幅为 15.9%。本研究发现,Pb 低积累型小麦品系 CL0442 有类似表现。营养液中 Pb 浓度为 3.86 mol/L 和 7.72 mol/L 时,其总根长及根总表面积、总体积均显著低于对照,根生长受到抑制。而对于 Pb 高积累型小麦品系 MSK39,在较低 Pb 浓度(3.86 mol/L)条件下,根总表面积、平均直径、总体积均高于对照,根系生长受到促进;在较高浓度(7.72 mol/L)条件下,总根长及根总表面积、总体积均低于对照和处理 1,光合参数也最低,根系生长受到抑制。这说明对于不同类型小麦,Pb 的影响并不相同。其他植物也存在类似情况^[23],只有 Pb 达到一定浓度才可导致植物的形态、生长、光合作用、酶活性受到抑制,扰乱植

物对矿质营养元素的吸收^[24-27]。这意味着不能仅根据小麦外表形态及生长状况或某单一指标的变化来判断小麦是否受到 Pb 污染,如果种植区域存在可能的 Pb 污染源,一定要加强对食用部位 Pb 含量的检测,确保食品安全。

自然条件下,土壤污染危害具有显著的场地差别性特点,不具备均一性。为了便于结果比较,试验采取营养液水培的方式以控制试验条件的一致性。另外,本研究只是分析了营养液条件下 Pb 对 2 种类型小麦幼苗 4 种必需矿质元素积累的影响,对于大田种植条件下以及成株期的情况则需要进一步研究。

参考文献:

- [1] 宋伟,陈百明,刘琳. 中国耕地土壤重金属污染概况[J]. 水土保持研究,2013,20(2):293-298.
- [2] 龚继明. 重金属污染的缓与急[J]. 植物生理学报,2014,50(5):567-568.
- [3] 段德超,于明革,施积炎. 植物对铅的吸收、转运、累积和解毒机制研究进展[J]. 应用生态学报,2014,25(1):287-296.
- [4] 胡鹏杰,李柱,钟道旭,等. 我国土壤重金属污染植物吸取修复研究进展[J]. 植物生理学报,2014,50(5):577-584.
- [5] 李红霞,赵新华,马伟芳,等. 河道污染沉积物中 Pb, Cd - 有机物的植物修复作用[J]. 华北农学报,2008,23(1):186-188.
- [6] Lei L M, Liang D L, Yu D S, et al. Human health risk assessment of heavy metals in the irrigated area of Jinghui, Shaanxi, China, in terms of wheat flour consumption[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2015, 187(10): 647.
- [7] SharmA P, Dubey R S. Lead toxicity in plants[J]. Brazilian Journal of Plant Physiology, 2005, 17(1): 35-52.
- [8] 王丽燕,郑世英. 镉、铅及其复合污染对小麦种子萌发的影响[J]. 麦类作物学报,2009,29(1):146-148.
- [9] Gall J E, Boyd R S, Rajakaruna N. Transfer of heavy metals through terrestrial food webs; A review [J]. Environ Monit Assess, 2015, 187(4): 201.
- [10] 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.
- [11] Liu W T, Liang L C, Zhang X, et al. Cultivar variations in cadmium and lead accumulation and distribution among 30 wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(11): 8432-8441.
- [12] 黄化刚,李廷轩,杨肖娥,等. 植物对铅胁迫的耐性及其解毒机制研究进展[J]. 应用生态学报,2009,20(3):696-704.
- [13] 陈明君,傅杨武,陈书鸿,等. Pb 胁迫对双穗雀稗生长、抗氧化酶活性及 Pb 富集的影响[J]. 河南农业科学,2015,44(7):73-77.
- [14] 邹继颖,刘辉. Cr⁶⁺、Pb²⁺ 污染对水稻幼苗生长发育的影响[J]. 河南农业科学,2014,43(2):31-34.
- [15] 李妍. 铅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.
- [16] 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.
- [17] 胡铁柱,李小军,丁卫华,等. 不同基因型小麦的 Pb 积累特性及 Pb 对矿质元素积累的影响[J]. 河南农业科学,2017,46(5):15-19,26.
- [18] 张红岩,马丽,张伯阳,等. Fe²⁺、Cd²⁺ 互作对小麦幼苗生长发育的影响[J]. 河南农业科学,2014,43(8):20-24.
- [19] Harmankaya M, Ozcan M M, Gezgin S. Variation of heavy metal and micro and macro element concentrations of bread and durum wheats and their relationship in grain of Turkish wheat cultivars[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2012, 184(9):5511-5521.
- [20] 柳丹,潘凡,杨肖娥. 铅富集植物对铅的吸收及其耐性生理机制进展研究[J]. 池州学院学报,2007,21(5):88-91.
- [21] Mishra S, Srivastava S, Tripathi R D, et al. lead detoxification by coontail (*Ceratophyllum demersum* L.) involves induction of phytochelatins and antioxidant system in response to its accumulation[J]. Chemosphere, 2006, 65(6):1027-1039.
- [22] 孔繁翔,桑伟莲. 小麦铝抗性和敏感品系对铝胁迫的生理生化反应[J]. 应用与环境生物学报,2004,10(5):88-91.
- [23] Wierzbicka M. How lead loses its toxicity to plants[J]. Acta Societatis Botanicorum Poloniae, 1995, 64(1):81-90.
- [24] Van Assche F, Clijsters H. Effects of metals on enzyme activity in plants[J]. Plant Cell & Environment, 1990, 13(3):195-206.
- [25] Singh R P, Tripathi R D, Sinha S K, et al. Response of higher plants to lead contaminated environment[J]. Chemosphere, 1997, 34(11):2467-2493.
- [26] Reddy A M, Kumar S G, Jyothsnakumari G, et al. Lead induced changes in antioxidant metabolism of horsegram (*Macrotyloma uniflorum* (Lam.) Verdc.) and bengalgram (*Cicer arietinum* L.) [J]. Chemosphere, 2005, 60(1):97-104.
- [27] Liu D, Li T Q, Jin X F, et al. Lead induced changes in the growth and antioxidant metabolism of the lead accumulating and non-accumulating ecotypes of *Sedum alfredii* [J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2008, 50(2):129-140.