

# 重金属与营养元素交互作用的植物生理效应

安志装<sup>1,2</sup>, 王校常<sup>1</sup>, 施卫明<sup>1</sup>, 严蔚东<sup>1</sup>, 曹志洪<sup>1</sup>

1: 中国科学院南京土壤研究所植物营养室, 江苏 南京 210008; 2: 中国科学院地理科学与资源研究所环境修复室, 北京 100101

摘要: 综述了镉、铅、镍、汞等重金属元素与植物大量、中量必需营养元素相互作用的生理反应及其机理的研究进展, 非必需微量重金属营养元素的毒害作用, 以及非必需重金属元素对植物吸收运输元素的影响。

关键词: 重金属; 植物营养元素; 相互作用; 生理反应机理

中图分类号: X171.5

文献标识码: A

文章编号: 1008-181X (2002) 04-0392-05

重金属污染常常造成生态破坏和环境质量恶化, 并通过食物链给人类健康带来巨大的危害。植物是食物链中的初级生产者, 而重金属易于被其从污染介质中吸收, 成为植物体内代谢较强的胁迫因子。吸收到植物体内的重金属不仅能诱导其体内产生某些对酶和代谢具有毒害作用和不利影响的物质间接引起植物伤害, 如某些重金属胁迫下植物体内产生的过氧化氢、乙烯等类物质对体内代谢和酶活性具有负效应<sup>[1]</sup>; 而且也能够对其带来直接伤害, 如镉与含巯基氨基酸和蛋白质的结合引起氨基酸蛋白质的失活, 对催化酶的伤害引起酶催化代谢的紊乱<sup>[2]</sup>, 甚至导致植物体死亡。重金属的胁迫也能导致植物矿质营养的缺乏, 引起它们参与代谢和物质组成过程的紊乱失调, 产生缺素症状, 如重金属胁迫引起叶片失绿变紫缺磷的症状<sup>[3]</sup>。许多研究表明, 矿质营养的供应也可以部分的或几乎全部的矫正重金属胁迫毒害作用。重金属与营养元素之间复杂的相互作用关系影响着植物的生长发育。现就近年来这方面的研究进展加以综述。

## 1 重金属与大量营养元素的交互作用

氮、磷、钾是植物必需的大量营养元素, 在体内物质的组成和代谢过程中都有重要的作用, 如它们在植物体内蛋白质、核酸等重要物质的合成和代谢过程中都是必不可少的。体内的缺乏或较低的含量将会导致体内物质组成和代谢的紊乱, 进而引起植物品质和产量的下降。随着重金属污染的日益严重, 重金属的胁迫作用有时会成为植物氮、磷、钾等大量营养元素缺乏或有效性降低的主要原因, 同时, 氮、磷、钾等大量营养的供应也有缓解植物重

金属胁迫的作用。

### 1.1 重金属胁迫作用

重金属的胁迫有时会引起大量营养元素的缺乏。一方面, 介质中较高浓度的重金属能够引起植物对大量营养元素的吸收和转运能力的下降, 导致体内缺乏, 进而引起体内它们参与物质和代谢的紊乱, 外部呈现相应的缺素症状。Dahiya 等<sup>[4]</sup>的研究表明, 土壤较高的镍水平显著地抑制了小麦对氮的吸收; 同样, 外界较高的镉浓度也引起玉米植株磷浓度和吸收量的下降<sup>[5]</sup>。这可能是由于土壤中较高的重金属浓度降低了氮、磷等矿质营养的有效态含量, 从而导致植物体营养元素吸收量的下降。重金属胁迫引起的膜内酶活性降低抑制了与酶相关矿质元素的吸收, 导致植物根系营养吸收能力下降。Asp-H 等用经过钾饥饿处理的白桦(*Betula pendula*) 苗做试验得出, 正常供钾的条件下, 随着时间的延长, 钾内流量增加, 6 h 后达最大。当用 2 或 5  $\mu\text{mol/L}$  的镉处理时, 供钾的 8 h 内, 钾离子内流量没有变化, 根系钾离子浓度没有增加。用钾 2  $\mu\text{mol/L}$  的镉溶液处理时, 直接导致根系钾内流量下降 50%<sup>[6]</sup>。另一方面, 重金属的胁迫引起植物根膜脂过氧化作用, 导致膜透性增加, 小分子物质外泄增加。Gussarsson 等<sup>[7]</sup>的研究指出, 随铜镉浓度的增加, 钾的外流量增加。不同重金属离子具有不同的胁迫效应, 用铜和镉处理 30 min 的小麦切根在  $\text{Na}_2\text{EDTA}$  存在的情况下, 抑制了  $\text{K}^+$  吸收, 而铬、铁、汞处理的小麦切根则对  $\text{K}^+$  的吸收无抑制作用<sup>[8]</sup>。

磷、钾是植物体内再利用能力比较强的两种元素, 重金属的胁迫降低了它们再转运分配的能力。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (39700083); 国家基础研究重点发展规划项目 (G1999011808); 中科院土壤圈物质循环开放实验室资助项目  
作者简介: 安志装 (1969 - ), 男, 博士, 从事重金属污染的环境修复和植物营养元素的土壤化学等方面的研究。

收稿日期: 2002-04-08

芬兰西部重金属梯度污染的区域苏格兰松(*Pinus sylvestris*) 针叶中 P 和 K 的再运输效率下降与污染程度明显相关<sup>[9]</sup>。

重金属的胁迫引起植物体对氮、磷、钾等大量营养元素吸收和再运输效率的下降,从而导致它们参与体内物质和代谢的异常。而这种胁迫效应的大小依不同的重金属离子而不同,另外,不同的植物种类也有不同的重金属忍耐能力。

### 1.2 营养对重金属胁迫的缓解作用

重金属胁迫作用可以引起氮、磷、钾等大量营养的缺乏,同时,它们的施用也可以缓解重金属对植物的胁迫毒害作用。

氮具有缓冲重金属引起植物毒害的能力。经铅和锌处理的冬小麦幼苗,叶和根的生长明显受到抑制,营养溶液中的其它重金属离子(铬、铜、镉、镍)对其也有不同程度的毒性抑制作用,而氮肥的施用减轻了以上重金属离子产生的毒性抑制作用。随施氮水平的提高,毒性抑制作用降低<sup>[10]</sup>。叶面喷施磷肥可以纠正由重金属铅毒害作用引起的植物体缺磷症状<sup>[3]</sup>,土壤中磷肥的施用可以降低铅的植物有效性<sup>[11]</sup>,导致体内重金属含量下降。施钾可以明显降低小麦植株锌的浓度<sup>[12]</sup>。田间条件下,营养元素同样具有这种效应。50 kg/hm<sup>2</sup> 磷的施入可以减轻重金属胁迫引起的产量下降,50 kg/hm<sup>2</sup> 氮、100 kg/hm<sup>2</sup> 磷和碳酸钙的施入明显降低了茎秆中重金属的含量,而钾肥的施用对重金属的胁迫作用没有影响<sup>[13]</sup>。

氮、磷、钾等大量营养的施用对重金属毒害的缓解作用一方面可能是由于大量营养元素的施用降低了土壤中重金属的有效性,减少了植物体对它们的吸收,降低了体内的含量,减轻了重金属胁迫的毒害程度;另一方面,也可能由于营养元素与重金属离子的相互作用(如营养元素的吸收稀释效应降低体内重金属的浓度),从而减轻或消除了重金属对植物体的毒害作用。但有时大量营养元素的施用也可能加剧重金属的胁迫作用,如随添加磷浓度的增加,糙米中镉浓度增加<sup>[14]</sup>。

## 2 重金属与钙、镁营养元素的相互作用

钙、镁、硫等作为植物所必需的植物中量营养元素,在植物体内渗透压的调节、代谢平衡的维持、物质的合成中都有着不可或缺的作用,而重金属的胁迫作用常会导致它们参与代谢过程的紊乱,功能的失调,如汞、铜、镉、镍、锌、铅等重金属离子

对叶绿素中心镁原子的取代导致光合作用中断<sup>[15]</sup>。

较高浓度的重金属含量有抑制植物体对钙、镁等矿质营养元素的吸收和转运的能力。经过镉处理的小麦幼苗,其茎叶中富集的镉量增加,铁、镁、钙和钾等营养元素的含量下降<sup>[16]</sup>;环境锌浓度的增加,降低了植物钙、镁等离子的浓度<sup>[17]</sup>。根外膜是矿质营养离子跨根势变化的主要因素,重金属离子能够引起跨膜势的下降和 H<sup>+</sup>梯度的降低,对于依靠这种梯度作为动力的养分吸收是不利的。但某些重金属的处理也能提高植物体内钙、镁等矿质营养的含量,镍处理增加了燕麦体内 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>等离子的浓度<sup>[18]</sup>。0.1 mmol/L 镉处理的野生拟南芥体内钙、硫等的含量显著下降,而镁的含量却不受影响<sup>[19]</sup>,因此,不同的植物吸收矿质元素的机理不同。同一植物不同品种之间对重金属处理浓度的反应也不同,较高重金属浓度处理下,大麦 *V. Sativa* 对磷、钙、镁等的吸收下降与 *cv. Moskovskii 121* 相比较显著<sup>[20]</sup>。重金属也影响钙离子在植物体内的分配。Cd、Mn、Mo 降低了牛豆体内钙向地上部运输的能力<sup>[21]</sup>。

钙、镁矿质营养的充足供应也有利于缓解重金属的胁迫毒害作用,这种缓解作用可能是由于钙离子以及其他盐离子与重金属离子竞争吸收运输位点,导致重金属离子吸收的减少所致;另外,钙、镁离子的存在也有利于根系细胞维持正常的渗透系统,保证了矿质营养较少受到重金属的胁迫作用。生育早期的芝麻(*Sesamum indicum cv. PB-1*) 在 1.0 mmol/L 的镉、铅、铜处理下,植株重量显著下降,营养溶液中 10.0 mmol/L 氯化钙的加入抑制了铅、镉、铜等重金属离子在体内的富积,缓解了重金属胁迫症状。氯化钙与重金属的配施也能显著地增加叶片和根中有机氮的含量,减小重金属胁迫导致的根和叶片中硝酸还原酶活性下降的趋势<sup>[22]</sup>。Mg<sup>2+</sup>在 Zn<sup>2+</sup>存在的情况下,根具有维持较高跨膜势的能力,有利于营养的吸收<sup>[23]</sup>。

## 3 重金属与铁营养元素的相互作用

铁是一种需求量较多的植物必需微量营养元素,在植物的许多生理生化过程中都起作用。植物铁营养状况明显受到环境条件的影响,北方大面积的石灰性土壤由于较高的 pH 常会导致铁缺乏现象发生;南方某些较高的铁含量土壤中,在某些(如强还原)条件下,也可能引起铁毒害症状。大多数情况下,铁缺乏症状比较常见。尤其是近年来随重金

属污染的加剧,其它重金属尤其是非必需重金属引起的缺铁失绿现象引起人们的重视。

### 3.1 重金属胁迫作用

作为重金属的铜、锰、锌也是植物必需微量营养元素,但是,由于其需量较少,很少有缺乏症状发生,环境较高的含量常导致植物的毒害胁迫症状,因此,它们有时常被作为重金属来研究。同样,作为重金属,外界过高的含量也会导致铁的缺乏,较高浓度锌处理使大豆(*Glycine max*)出现叶片失绿的毒害症状,导致干物质产量下降,而这些都与过高锌浓度导致的铁缺乏有关<sup>[24]</sup>,即铁供应条件下叶片也不能复绿。不同铁效率基因型植物耐受重金属的能力也不同。铁高效西红柿在分别施用 340、340、480 kg/hm<sup>2</sup>的铜、锌、锰的碱性土壤上仍能保持绿色,而铁低效西红柿植株对它们毒害的耐性最小<sup>[25]</sup>。铁高效基因型植物具有高效吸收运输铁的能力,同时也具有较强的吸收其它必需微量重金属元素的能力,铁高效西红柿(cv. Bonner Beste)突变体 chloronerva 在较高铁浓度下,也能吸收较多的铜、锰、锌<sup>[26]</sup>,因此,其有耐受较高重金属浓度的能力。

非必需重金属元素对铁营养的影响作用较为明显。镉作为毒性最强的重金属元素之一,在铁素营养正常和过量水平处理下都能引起菜豆(*Phaseolus vulgaris* cv. Slowianka)根和初生叶片中铁含量下降<sup>[27]</sup>,进而影响到铁参与的生理过程。铁是叶绿素和细胞色素蛋白主要的组分之一,在光合作用电子传递链中起着不可或缺的作用。因此,重金属胁迫引起铁营养缺乏,常会导致叶绿素含量和光合效率的下降。铁缺乏以及镉胁迫诱导的铁缺乏都使菜豆(*Phaseolus vulgaris* cv. Slowianka)叶绿素含量下降高达 55%;镉与铁的交互作用引起 PSII 电子传递水平下降,进而导致叶绿素捕获光能转化为电能和化学能的比例下降,而以热能散失的比例增加,Stern-Volmer 的计算数据表明,镉以及较高铁浓度处理都显著增加叶绿体 PSII 热能的散失,PSII 的活性与铁的含量水平显著相关<sup>[28]</sup>。铁供应水平增加,也能显著降低镉在叶片中的积累<sup>[28]</sup>。

### 3.2 吸收和运输的相互作用

重金属处理引起植物铁含量的下降或缺乏,导致铁参与生理过程的异常,呈现铁缺乏症状;另一个方面,铁营养状况也影响重金属的吸收和运输。

重金属胁迫降低了根系铁还原酶的活性,由于

二价铁是植物根系吸收的主要形态,根系还原酶活性的降低也就减少了植物根系对铁的吸收,但不同的重金属对铁还原酶活性的影响程度不同。Alcantara 等用不同的重金属(锰、铅、锌、钼、镍、铜、镉)处理黄瓜(*Cucumis sativus* L.)幼苗的试验表明,20 μmol/L 的镍,5 μmol/L 的铜和镉严重地抑制了根系 Fe(III)还原酶的活性,而锰、铅、锌和钼甚至在处理浓度大于 20 μmol/L 时,对其活性几乎没影响<sup>[29]</sup>。

铁供应状况也影响重金属的吸收运输过程。Cohen 等利用示踪技术研究了豌豆(*Pisum sativum* cv. Sparkle)在铁缺乏和充足供应条件下的镉吸收动力学,结果表明,两者有相似的  $K_m$  值,分别为 1.5 和 0.6,但它们的吸收速率不同。铁缺乏条件下镉最大初始吸收速率为充足条件下的近 7 倍<sup>[30]</sup>。镉在不同铁营养状况下的吸收差异可能与 IRT1 转运子基因的表达有关,IRT1 是从拟南芥中克隆的铁转运子基因,铁缺乏能够诱导其表达,促进二价铁离子的吸收转运;同时,也有利于二价重金属阳离子如镉、锌的吸收转运,铁缺乏条件下铁转运子基因的表达也促进了镉的吸收转运。因此,有较大的镉初始吸收速率。而在铁充足供应下,铁转运子基因关闭,铁吸收增加,镉的被动吸收量下降,随铁含量的增加,叶片镉富集量显著降低(高达 50%)<sup>[28]</sup>。铁缺乏条件下镉吸收速率的增大也可能与诱导质膜 H<sup>+</sup>-ATPase 的激活有关。

重金属胁迫对铁营养状况的影响与重金属对铁的吸收运输的影响有关,铁营养也影响植物对重金属的吸收运输。一般情况下,充足的铁素营养植物体中其它重金属如锰、铜、锌、镉含量下降,而在铁缺乏状况下,植物体有较高的锰、铜、锌、镉浓度,这可能与铁转运子基因的表达有关。但是,这无法解释铁供应情况下重金属引起的铁缺乏现象,这可能是由于重金属与铁竞争根系吸收运输位点所致。重金属胁迫与铁营养之间相互作用机理有待于进一步的深入研究。

## 4 微量重金属植物营养与毒害作用

铜、锌、锰等作为植物的微量营养元素在体内物质的代谢过程中起作用,它们不仅是植物体内某些物质的组分(如 Cu, Zn-SOD),而且也在某些生理过程中起催化作用。同时作为一种重金属元素,它们在植物体内过量的积累则会引起物质和代谢过程不同程度的伤害作用,如过量铜离子有与膜蛋

白巯基相结合的特性,引起质膜受到伤害;过量铜离子引起膜脂过氧化作用导致细胞质膜选择吸收特性的消失。过量的微量重金属如铜、锌、锰也对体内酶和蛋白质具有毒害作用,导致其参与生理过程的异常变化,不同程度地抑制了植物体的生长。如铜、锌与南瓜(*Cucurbita maxima*)子叶中NADH:硝酸氧化还原酶的亲和导致其失活<sup>[31]</sup>;较高浓度的铜、锌显著降低了向日葵 cv. NS-H-26-RM 的蒸腾作用,叶片中游离脯氨酸浓度显著增加<sup>[32]</sup>;菜豆(*Phaseolus vulgaris*)叶片中超过毒性阈值的锌含量抑制了地上部分的生长,导致叶片中葡糖-6-磷酸脱氢酶、异柠檬酸脱氢酶、苹果酸酶、谷氨酸-草酰乙酸转氨酶、过氧化物酶含量的增加<sup>[33]</sup>。

外界较高的微量重金属离子浓度促进了植物体的吸收,增加了体内的含量。植物对它们的吸收受到其它条件的影响而表现出不同的吸收特点,重金属作为一种重要的胁迫因子也对植物对微量重金属元素的吸收运输产生作用。0.1 mmol/L 镉处理显著降低了野生拟南芥中的锰含量,而铜、锌、钼等的含量则很少受到影响;经 10  $\mu\text{mol/L}$  镉、50  $\mu\text{mol/L}$  锌处理的菜豆(*Phaseolus vulgaris* cv. Morgan)幼苗增加了镉的地上部运输,而锌的地上部运输则降低<sup>[34]</sup>。从以上可以看出,非必需重金属离子对不同植物、不同微量金属元素的影响不同。这可能与不同植物对不同营养元素的吸收机制不同有关,另一方面也可能与非必需重金属离子与不同微量营养元素之间的相互作用关系有关,这些都有待于进一步的深入研究。

重金属与植物营养元素之间的作用关系是十分复杂的,由于人们的研究条件、方法以及所用材料的不同,结论不尽相同,甚至有时是相互矛盾的;在这方面还缺乏深入系统的研究,尤其是其相互作用机理的研究。随着重金属污染的日益加剧,重金属与矿质营养元素之间交互作用关系的植物效应及其机理的深入研究有助于人们通过调控食物链减少重金属对人类健康的直接威胁,为人类利用生物修复技术治理重金属污染土壤提供一定的理论基础。

#### 参考文献:

- [1] VANGRONSVELD I, WECKX J, KUBACKA Z M, et al. Heavy metal induction of ethylene production and stress enzymes: II. Is ethylene involved in the signal transduction from stress perception to stress responses?[A]. In: DORDRECHT, ed. Proceedings of the International Symposium on Cellular and Molecular Aspects of Biosynthesis and Action of the Plant Hormone Ethylene, Current Plant Science and Biotechnology in Agriculture[C]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1993, 16: 240-246.
- [2] STIBOROVA M. Effect of heavy metal ions on growth and biochemical characteristics of photosynthesis of barley and maize seedlings[J]. *Biologia Plantarum*, 1987, 29(6): 453-467.
- [3] BEGONIA G B, DAVIS C D, BEGONIA M F, et al. Growth responses of Indian mustard (*Brassica juncea* (L.) Czern.) and its phytoextraction of lead from a contaminated soil[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 1998, 61(1): 38-43.
- [4] DAHIYA D J. Nitrogen uptake in wheat as influenced by the presence of nickel[J]. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 1994, 8: 51-58.
- [5] NARWAL R P. Cadmium-zinc interaction in maize grown on sewer water irrigated soil[J]. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 1993, 7: 125-131.
- [6] ASP-H, GUSSARSSON M, Adalsteinsson S, et al. Control of potassium influx in roots of birch (*Betula pendula*) seedlings exposed to cadmium[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1994, 45: 1 823-1 827.
- [7] GUSSARSSON M, JENSEN P. Effects of copper and cadmium on uptake and leakage of K<sup>+</sup> in birch (*Betula pendula*) roots[J]. *Tree Physiology*, 1992, 11(3): 305-313.
- [8] BUJTAS C, CSEH E. Inhibition of K<sup>+</sup> absorption by heavy metal ions[J]. *Acta Biochemica et Biophysica Academiae Scientiarum Hungaricae*, 1981, 16(3-4): 253.
- [9] NIEMINEN T, HELMISAARI H S L. Nutrient retranslocation in the foliage of *Pinus sylvestris* L. growing along a heavy metal pollution gradient[J]. *Tree Physiology*, 1996, 16(10): 825-831.
- [10] FABIAN G, DEZSI D M. Ecophysiological studies of the relationship between heavy metal toxicity and nitrogen nutrition in the early development stage of winter wheat[J]. *Acta Botanica Hungarica*, 1987, 33(3-4): 219-234.
- [11] BASSUK N L. Reducing lead uptake in lettuce[J]. *Hortscience*, 1986, 21: 993-995.
- [12] SINGH V. K-Zn relationship in wheat[J]. *Journal of Indian Society Soil Science*, 1993, 41: 789-790.
- [13] MCNEILLY T, JOHNSON M S. Mineral nutrition of copper-tolerant browntop on metal-contaminated mine spoil[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1978, 7(4): 483-486.
- [14] 陈怀满. 土壤中 Cd、P、Zn 含量对水稻产量和植株中矿物浓度的影响[J]. *土壤学报*, 1985, 22(1): 85-92.
- [15] KUPPER H, KUPPER F, SPILLER M. In situ detection of heavy metal substituted chlorophylls in water plants[J]. *Photosynthesis Research*, 1998, 58(2): 123-133.
- [16] OUZOUNIDOU G, MOUSTAKAS M, Eleftheriou EP. Physiological and ultrastructural effects of cadmium on wheat (*Triticum aestivum* L.) leaves[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 1997, 32(2): 154-160.
- [17] KALYANARAMAN S B. Effect of zinc on some important macro- and micro-elements in blackgram leaves[J]. *Communication Soil Sci-*

- ence Plant Anal, 1994, 25: 2 247-2 259.
- [18] HUNTER J G. Trace element toxicity in oat plants[J]. Annals of Applied Biology, 1953, 40: 761-777.
- [19] YONG LIANG ZHU, ELIZABETH A H P S, ALICE S T, *et al.* Cadmium Tolerance and Accumulation in Indian Mustard Is Enhanced by Overexpressing Glutamylcysteine Synthetase[J]. Plant Physiology, 1999, 121(12): 1 169-1 177.
- [20] CHERNYKH-N A. Alteration of the concentrations of certain elements in plants by heavy metals in the soil[J]. Soviet Soil Science, 1991, 23(6): 45-53.
- [21] WALLACE A Excess trace metal effects on calcium distribution in plants[J]. Commun Soil Science and Plant Anal, 1979, 10: 473-479.
- [22] NISHI B, SINGH R P, SINHA S K.. Effect of calcium chloride on heavy metal induced alteration in growth and nitrate assimilation of *Sesamum indicum* seedlings[J]. Phytochemistry, 1996, 41(1): 105-109.
- [23] KENNEDY C D, GONSALVES F A N. The action of divalent zinc, cadmium, mercury, copper and lead on the trans-root potential and H<sup>+</sup> efflux of excised roots[J]. Journal of Experimental Botany, 1987, 38(190): 800-817.
- [24] FONTES R L F, COX F R. Iron deficiency and zinc toxicity in soybean grown in nutrient solution with different levels of sulfur[J]. Journal of Plant Nutrition, 1998, 21(8): 1 715-1 722.
- [25] BROWN J C, JONES W E. Heavy-metal toxicity in plants: I. A crisis in embryo[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1975, 6(4): 421-438.
- [26] STEPHAN U W, GRUN M. Physiological disorders of the nicotianamine-auxotroph tomato mutant chloronerva at different levels of iron nutrition: II. Iron deficiency response and heavy metal metabolism[J]. Biochemie und Physiologie der Pflanzen, 1989, 185(3-4): 189-200.
- [27] SIEDLECKA A, KRUPA Z Interaction between cadmium and iron. Accumulation and distribution of metals and changes in growth parameters of *Phaseolus vulgaris* L. seedlings[J]. Acta Societatis Botanicorum Poloniae, 1996, 65(3-4): 277-282.
- [28] KRUPA-Z, SIEDLECKA A, MATHIS P Cd/Fe interaction and its effects on photosynthetic capacity of primary bean leaves[A]. In: Proceedings of the Xth International Photosynthesis Congress[C]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1995, 4: 621-624.
- [29] ALCANTARA E, ROMERA F J, CANETE M, *et al.* Effects of heavy metals on both induction and function of root Fe(III) reductase in Fe-deficient cucumber (*Cucumis sativus* L.) plants[J]. Journal of Experimental Botany, 1994, 45: 1 893-1 898.
- [30] COHEN C K, FOX T C, GARVIN D F, *et al.* The role of iron-deficiency stress responses in stimulating heavy-metal transport in plants[J]. Plant Physiology, 1998, 116: 1 063-1 072.
- [31] SMARRELLI J J, CAMPBELL W H. Heavy metal inactivation and chelator stimulation of higher plant nitrate reductase[J]. Biochimica et Biophysica Acta P, 1983, 742: 435-445.
- [32] KASTORI R, PETROVIC M, PETROVIC N. Effect of excess lead, cadmium, copper, and zinc on water relations in sunflower[J] Journal of Plant Nutrition, 1992, 15: 2 427-2 439.
- [33] ASSCHE F V, CARDINAELS C, CLIJSTERS H, *et al.* Induction of enzyme capacity in plants as a result of heavy metal toxicity: dose response relations in *Phaseolus vulgaris* L., treated with zinc and cadmium[J]. Environmental Pollution, 1988, 52(2): 103-115.
- [34] CHAOUI A, GHORBAL M H, EL-FERJANI E. Effects of cadmium-zinc interactions on hydroponically grown bean (*Phaseolus vulgaris* L.) [J]. Plant Science Limerick, 1997, 126(1): 21-28.

## Plant physiological responses to the interactions between heavy metal and nutrients

AN Zhi-zhuang<sup>1,2</sup>, WANG Xiao-chang<sup>1</sup>, SHI Wei-ming<sup>1</sup>, YAN Wei-dong<sup>1</sup>, CAO Zhi-hong<sup>1</sup>

1: Lab of Material Cycling in Pedosphere, Nanjing Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

2: Institute of Geography Science and Natural Resource Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

**Abstract:** This review is concerned with mechanisms of plant physiological response to the interactions between heavy metal such as cadmium, lead, nickel, mercury, and macronutrients, medium nutrients, and iron; intoxication in excess of microelements, and influences of heavy metals on the uptake to micronutrients.

**Key words:** heavy metal; plant nutrients; interaction; physiological response mechanism