Cd 胁迫和增强 UV-B 辐射对大豆根系分泌物的影响

强维亚¹ 陈拓² 汤红官¹ 冯虎元¹ 安黎哲^{1 2} 王勋陵^{1 *}

(1 兰州大学生命科学学院, 干旱农业生态国家重点实验室, 兰州 730000)

(2 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

摘要 镉(Cd)污染和增强紫外线-B(UV-B)辐射对大豆(*Glycine max*)根系分泌物变化的研究表明, Cd污染促进了大豆根系有机化合物(如有机酸、氨基酸、多肽和酰胺等)的分泌, 但该分泌作用受增强UV-B辐射的抑制。根系有机硫分泌只受较强胁迫条件促进。较高浓度Cd和较强的UV-B辐射对大豆根系有机硫分泌有协同促进作用。氮素含量主要受Cd胁迫影响, 其变化可能有两方面原因: 1) Cd胁迫下根系对有机含氮化合物, 主要是多肽、氨基酸和酰胺的分泌增加; 2) Cd胁迫减少了根系对氮素的吸收, 引起根际环境中残留氮素的升高。增强UV-B辐射对根际环境中氮素有一定影响, 但不显著。研究结果表明了增强UV-B辐射在一定程度上影响Cd胁迫下大豆根系有机化合物的分泌作用, 而且可能与大豆根系对重金属毒害的抗性有关。

关键词 大豆 UV-B辐射 镉污染 有机碳 有机硫 根分泌物

EFFECT OF CADMIUM AND ENHANCED UV-B RADIATION ON SOYBEAN ROOT EXCRETION

QIANG Wei-Ya¹ CHEN Tuo² TANG Hong-Guan¹ FENG Hu-Yuan¹ AN Li-Zhe^{1 2} and WANG Xun-Ling^{1 *}

(1 School of Life Science, State Key Laboratory of Arid Agroecology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

(2 Cold and Arid Region Environmental and Engineering Research Institute, the Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract An increase in ultraviolet-B (UV-B, 280-315 nm) radiation reaching the earth's surface due to depletion of the stratospheric ozone layer and heavy metal pollution due to industrial waste have become serious concerns. In order to understand the influence of enhanced UV-B radiation and heavy metal pollution on plant root growth, physiological metabolism, and tolerance to heavy metals, the effect of cadmium (Cd) associated with enhanced UV-B radiation on the excretion activity of soybean root was investigated. The full amounts of nitrogen, organic carbon, and sulfur excreted by soybean (*Glycine max*) root exposed to Cd²⁺ pollution, enhanced UV-B radiation and both in combination were measured using the Kjeldahl method and a CS-344 carbon and sulfur system (LECO USA). The results showed that Cd²⁺ could enhance root excretion of organic carbon, but the excretion was inhibited by enhanced UV-B radiation. Excretion of organic sulfur compounds was only accelerated by severe stress, that is a combination of higher Cd²⁺ concentration and stronger UV-B radiation had a synergistic effect on excretion. Nitrogen content was mainly affected by Cd²⁺. The possible reasons were: 1) Cd²⁺ pollution promoted roots to excrete more organic nitrogen compounds, such as amino acids and polypeptides; 2) Cd²⁺ decreased absorption ability of roots, and nitrogen uptake from rhizosphere was reduced, thereby resulting in an increase in nitrogen content in the environment of the root. Nitrogen content in the environment could also be affected by enhanced UV-B radiation, but this effect was insignificant. The results indicated that UV-B radiation could alter the composition and proportion of root excretions, and, perhaps, affect plant tolerance to Cd²⁺ stress.

Key words Soybean (*Glycine max*), Ultraviolet-B (UV-B), Cadmium (Cd), Organic carbon, Organic sulfur, Root secretions

增强的紫外线-B(UV-B)辐射和土壤的重金属污染都是倍受关注的环境问题, 二者对植物的生长、

发育都会产生较大的影响。重金属镉(Cd)是一种植物非营养元素, 但由于大量工业废弃物长期排放,

收稿日期: 2002-02-08 接受日期: 2002-11-16

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-10-02) 国家自然科学基金项目(30170186) 中国科学院冰芯与寒区环境开放实验室知识创新工程项目(210506)

* 通讯作者 Author for correspondence E-mail: qiangwy@lanzhou.cnbg.com

在一些地区引起了严重的环境污染(Koeppe ,1977)。土壤中和水体中富集的大量 Cd^{2+} ,破坏了细胞膜的结构和功能(陈国祥等 ,1999 ;杨居荣等 ,1995 ;彭鸣等 ,1991 Sanita di Toppi & Gabbrielli ,1999)抑制了植物多种酶的活性(Van Assche & Clijsters ,1990) ,从而明显影响植物的正常生长和发育(吴燕玉等 ,1997)。有研究表明 ,当植物遇到有害重金属毒害时 ,就会调整体内的多种代谢过程 ,如通过对金属离子的区隔化作用、金属结合蛋白或植物络合素缔合有毒金属离子或代谢性排除等机制降低金属毒性(Brooks *et al.* ,1981)。同时植物对重金属毒害能主动建立体外抗性机制。受到重金属毒害时 ,植物根系分泌有机酸、氨基酸、酰胺和多肽等螯合物到根际环境中 ,降低金属离子活度 ,由于植物对金属离子的吸收与其在溶液中的活度有关(Chaney *et al.* ,1988) ,因此根系分泌物增加在一定程度上将减少植物对重金属的吸收。同时 ,大气臭氧层减薄引起 UV-B 辐射增强也是目前严重影响植物正常生长和生态系统的重要环境因素之一。已有相当多的研究表明 ,增强 UV-B 辐射已严重影响了陆地植物的正常生长代谢 ,甚至也会影响植物根系活动(Caldwell *et al.* ,1998 ; Klironomos & Allen ,1995)。因此 ,当增强 UV-B 辐射通过影响地上部代谢而影响植物根系代谢活动时 ,则有可能改变根系分泌活动 ,对重金属毒害作用产生一定影响。

关于重金属 Cd 与增强 UV-B 辐射复合作用对高等植物影响的研究报道较少。Dubé 和 Bornman (1992) 与 Larsson 等(1998)对复合胁迫下云杉(*Picea abies*) 和油菜(*Brassica napus* L. cv. Paroll)的光合作用、叶绿素荧光特性、根重、叶面积变化以及元素的分布和积累特性作了研究报道。本文以栽培大豆品种(*Glycine max*)为材料 ,探讨 Cd^{2+} 胁迫复合增强 UV-B 辐射对大豆根系分泌的影响 ,阐明二者在大豆根系分泌中的作用及其相互关系。

1 材料和方法

1.1 材料

实验材料大豆(*Glycine max*)陇豆一号 购自甘肃省农业科学院经济作物研究所。

将精心挑选的种子经 5% 次氯酸钠浸泡 5 min ,消毒后 ,均匀种植在盛有蛭石($10 \text{ kg} \cdot \text{桶}^{-1}$,预先经 $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温培烧 2 h ,除去其中有机物)的塑料桶(直径为 50 cm)中 ,每桶中种 24 株 ,1/2 Hoagland 营养液培养 ,出苗整齐后疏苗 ,每桶保留生长一致的幼苗

12 株。

1.2 材料处理及指标测定

实验在兰州大学生物园中进行。Cd 污染处理经预备实验筛选出两个剂量和一个对照 :含 $0.6 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CdCl}_2$ (C_1) ; $1.2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CdCl}_2$ (C_2) 和不含 CdCl_2 (C_0) 的 1/2 营养液。第一组三出复叶完全展开后进行处理 , C_1 和 C_2 分别浇含 $0.6 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1.2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CdCl}_2$ 的 1/2 Hoagland 营养液 $3\ 000 \text{ ml} \cdot \text{桶}^{-1}$,两周后 ,每周浇不含 CdCl_2 的 1/2 营养液 $1\ 000 \text{ ml} \cdot \text{桶}^{-1}$ 。

UV-B 辐射处理与 Cd 污染处理同期进行 ,设置两个辐射强度和一个对照 ,辐射采用 30 W 紫外线灯管(南京紫光灯具厂)提供 ,发射的紫外线用 0.08 mm 乙酰纤维素膜过滤 ,以消除 UV-C 的影响。灯管分别悬挂于处理大豆上方两个不同的高度 ,每日 10 :00 ~ 16 :00 进行 UV-B 辐射处理。辐射强度用紫外线辐照计(北京师范大学生产)测定 ,根据 Caldwell (1971) 方法计算每日生物有效辐射(UV-B_{BE})总量分别为 $8.46 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (U_1) $12.62 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (U_2) 和对照(U_0)。两种胁迫复合后共 9 个处理组合 : U_0C_0 、 U_0C_1 、 U_0C_2 、 U_1C_0 、 U_1C_1 、 U_1C_2 、 U_2C_0 、 U_2C_1 、 U_2C_2 。每一处理组合重复 3 桶。

54 d 后将各处理大豆分别连根部完整收集 ,常规方法测量根长度和重量。取各处理蛭石过 70 目筛除去残根 , $55 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干 24 h ,过 100 目筛。参照朴春河等(2001)的方法 ,用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐酸浸泡过夜 3 次 ,然后用蒸馏水冲洗 ,再于 $55 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干 72 h。处理后的蛭石样品在中国科学院兰州分析测试中心用 CS-344 碳硫分析仪(LECO USA)测定有机碳、有机硫含量 ,测定重复 3 次 ,取平均值。

蛭石全氮含量在兰州大学干旱农业国家重点实验室测定。用凯氏定氮法重复测定 3 次 ,取平均值。

2 实验结果

2.1 有机碳含量变化

图 1 数据表明 ,增强 UV-B 辐射对蛭石中有机碳含量无明显影响(图 1b)。在同等辐射强度下 ,随着 Cd 污染剂量的增大 ,蛭石中有机碳含量显著升高(图 1a、c、e) ,最大升幅达 168% ;而在相同剂量 Cd 污染下 ,随着 UV-B 辐射增强 ,蛭石有机碳含量显著降低(图 1d、f) ,最大降幅为 23.7%。

2.2 有机硫含量变化

图 2 数据表明 ,单一的 Cd^{2+} 或 UV-B 辐射对蛭

图 1 不同处理下蛭石中有机碳含量

Fig.1 Content of organic carbon in vermiculite under different treatments

U₀ 增强 UV-B 辐射的对照 U₁ 低剂量(8.46 kJ·m⁻²·d⁻¹)增强 UV-B 辐射 U₂ 高剂量(12.62 kJ·m⁻²·d⁻¹)增强 UV-B 辐射 C₀ Cd²⁺ 污染处理的对照 C₁ 低浓度(0.6 mmol·L⁻¹ CdCl₂) Cd²⁺ 污染 C₂ 高浓度(1.2 mmol·L⁻¹ CdCl₂) Cd²⁺ 污染 a、c、e 分别在 U₀、U₁ 和 U₂ 水平下随 Cd²⁺ 浓度增加对大豆根系生长和分泌特性的影响 b、d、f 分别在 C₀、C₁ 和 C₂ 水平下随 UV-B 辐射增强对大豆根系生长和分泌特性的影响

U₀ :Control of UV-B radiation treatment U₁ :Low dose of UV-B radiation (8.46 kJ·m⁻²·d⁻¹) U₂ :High dose of UV-B radiation (12.62 kJ·m⁻²·d⁻¹)

C₀ :Control of Cd²⁺ pollution treatment C₁ :Low concentration of Cd²⁺ pollution (0.6 mmol·L⁻¹ CdCl₂) C₂ :High concentration of Cd²⁺ (1.2 mmol·L⁻¹ Cd-Cl₂) a c e :Effect of increase in Cd²⁺ concentration under condition of U₀ , U₁ and U₂ , respectively , on root growth and its excretion characteristics b d f :Effect of increase in UV-B radiation under condition of C₀ , C₁ and C₂ , respectively , on root growth and its excretion characteristics

图 2 不同处理下蛭石中有机硫含量

Fig.2 Content of organic sulfur in vermiculite under different treatments

U₀ U₁ U₂ C₀ C₁ C₂ a b c d e f : 同图 1 See Fig.1

石中的有机硫含量无明显影响。UV-B 辐射仅在 U₂ 强度时或 Cd²⁺ 在 C₂ 剂量作用下 ,蛭石中有机硫含量略有升高(图 2a、b、c、d)而在 U₂ 强度的辐射复合 Cd 污染时 ,随着 Cd²⁺ 浓度的增大 ,或在 C₂ 剂量 Cd 污染下 ,随着 UV-B 辐射强度增大 ,蛭石中有机硫含量明显升高(图 2e、f)。

2.3 全氮含量变化

图 3 数据显示 ,蛭石中全氮含量变化受到 Cd 污染剂量的影响。在同等强度 UV-B 辐射下 ,随着 Cd²⁺ 浓度增大 ,氮素含量明显升高(图 3a、c、e);但在单纯 UV-B 辐射下(图 3 b)或在相同 Cd²⁺ 浓度复合 U₁ 强度 UV-B 辐射下(图 3d、f),蛭石中氮素含量相对较低;而在 U₂ 强度辐射下 ,蛭石中氮素含量有所升高(图 3b、d、f)。

2.4 根系生长的变化

图 4 数据显示 ,大豆根系生长受到 Cd 胁迫的抑制。随着 Cd²⁺ 浓度增大 ,根系长度和干重均明显下降 (图 4a、c、e) ;在复合增强 UV-B 辐射下 ,根系长度和干重的下降较单一 Cd 胁迫更为显著 (图 4a、c、e) ;而单一 UV-B 辐射对大豆根系生长的影响不明显 (图 4b、d、f)。

3 讨 论

在重金属胁迫下 ,植物根系可分泌一些有机物质如有机酸、氨基酸、多肽、酰胺和多糖等 ,并且根系有机分泌物种类和数量与植物对金属毒害的抗性有

关 (北京农业大学编译室 ,1996 ;常学秀等 ,2000 ;Mench & Martin , 1991) 。根系分泌的一些有机物质可与重金属离子发生络合反应或形成配位化合物 ,降低植物根际环境中有效态重金属离子含量和活度 (Mench *et al.* , 1988 ;Chaney *et al.* , 1988) 。本研究中 ,Cd²⁺ 引起了蛭石中有机碳、硫及全氮含量变化 ,这可能与它刺激大豆根系加强了有机酸、氨基酸、多肽和酰胺等有机物质的分泌有关。这些有机物质分泌的增加促进了对 Cd²⁺ 的络合作用 ,加强了植物主动抵御 Cd²⁺ 毒害的能力。Ryan 等 (1995) 认为植物对金属的抗性与该金属诱导根系分泌的有机酸如苹果酸、柠檬酸有极显著的相关性。

图 3 不同处理下蛭石中全氮含量
Fig.3 Content of nitrogen in vermiculite under different treatments
U₀ U₁ U₂ C₀ C₁ C₂ a b c d e f : 同图 1 See Fig.1

图 4 不同处理组合条件下大豆根系长度和干重
Fig.4 Root length and dry weight under different treatments
U₀ U₁ U₂ C₀ C₁ C₂ a b c d e f : 同图 1 See Fig.1

图5 根系长度和干重与蛭石中有机碳含量的关系
Fig.5 Relationship between root length , dry weight and organic carbon concentration in vermiculite

根系分泌物中,酚酸类物质如苯甲酸、苯乙酸、肉桂酸和对羟基苯甲酸等,既具有降低根系吸收离子的作用,同时,对根系生长又有抑制作用(Mench *et al.* , 1988)。这可能是 Cd 污染导致根系生长下降的重要原因之一。Einhellig (1995) 研究认为,酚酸类物质对作物生长发育的典型影响之一是破坏植物根系和其它分生组织。大豆根长度和重量与蛭石中有机碳含量负相关(图 5),表明 Cd^{2+} 胁迫下大豆根系分泌物中可能含有较多的酚酸类物质,抑制了根系生长(图 4a、c、e)。许多学者认为酚酸是作物生长的抑制剂(Kuiters , 1986 ; Patterson , 1981), Perez (1991) 研究结果显示,根系分泌物中的酚酸(如对羟基苯甲酸、香草酸、香豆素等) 对春小麦胚根有明显的抑制作用。增强 UV-B 辐射本身对根系有机物质分泌的影响不明显(图 1b)。但复合情况下,增强 UV-B 辐射却明显抑制 Cd^{2+} 胁迫下根系有机物质的分泌(图 1d、f)。可能是增强 UV-B 辐射也影响到了根系的代谢活动,引起碳、氮代谢和酸碱调节的变化(Mepsted *et al.* , 1996 ; Scheible *et al.* , 1997)。

硫化物是金属难溶物质的主要形态,有很强的沉淀重金属离子的能力(陈能场等, 1993)。在较强的胁迫条件下(U_2 或 C_2),蛭石中有机硫含量明显增加。 U_2 强度的 UV-B 辐射复合不同剂量 Cd^{2+} 或 C_2 复合不同强度 UV-B 辐射都显示对大豆根系含硫化物分泌有协同促进作用(图 2e、f)。硫化物的增加也增强了对 Cd^{2+} 离子的沉淀作用,减少了植物的吸收。

蛭石中的氮素变化主要受 Cd 污染的影响,随着 Cd^{2+} 污染浓度的增加,蛭石中的氮素含量也增加

(图 3a、c、e),这可能有两方面的因素: 1) Cd^{2+} 影响根系含氮有机物的分泌,主要是氨基酸和多肽的分泌。随着 Cd^{2+} 浓度升高,促进了大豆根系含氮化合物的分泌(赵大君等, 1996 ; Baus *et al.* , 1994 ; Larsen *et al.* , 1998 ; Zheng *et al.* , 1998) ; 2) Cd^{2+} 使根系吸收能力下降,影响根系对氮素营养的吸收,引起环境中残留氮素含量的变化。陈愚等(1998) 研究显示, Cd^{2+} 对硝酸还原酶中的巯基有很高的亲和性,可导致植物体内硝酸还原酶活性下降而影响氮素的吸收。与增强 UV-B 辐射复合作用时, Cd^{2+} 仍是影响大豆根际环境中氮素变化的主要因素。增强 UV-B 辐射通过改变植物根系对环境氮素的吸收和利用可能对根际环境中氮素含量有一定影响(Mepsed *et al.* , 1996 ; Scheible *et al.* , 1997)。但不同强度的辐射与根际环境中氮素含量变化的关系较复杂(图 3b、d、f),需要进一步深入研究。

以上结果说明增强 UV-B 辐射会影响植物根系有机物分泌的数量和组成,这也许与植物根系对重金属污染的抗性有关。

参 考 文 献

Baus, U., D. Godbold & G. J. Taylor. 1994. Aluminum resistance in *Triticum aestivum* associated with enhanced exudation of malate. *Journal of Plant Physiology*, **144**: 747 ~ 753.

Beijing Agricultural University Compiling (北京农业大学编译室). 1996. Advance in plant rhizosphere ecology and bio-prevention for root disease. Beijing: People University Press of China. 44 ~ 94. (in Chinese)

Brooks, R. R., S. Shaw & A. A. Marfil. 1981. The chemical form and physiological function of nickel in some *Zlerian alyssum* species. *Physiologia Plantarum*, **51**: 167 ~ 170.

Caldwell, M. M. 1971. Solar ultraviolet radiation and the growth and development of higher plant. In: Giese, A. C. ed. *Photo-physiology*. New York: Academic Press. 131 ~ 177.

Caldwell, M. M., L. O. Björn, J. F. Bornman, S. D. Bornman, S. D. Flint, G. Kulandaivelu, A. H. Teramura & M. Tevini. 1998. Effects of increased solar ultraviolet radiation on terrestrial ecosystems. *Journal of Photochemistry and Photobiology*, **46**: 40 ~ 52.

Chang, X. X. (常学秀), C. Q. Duan (段昌群) & H. X. Wang (王焕校). 2000. Root excretion and plant resistance to metal toxicity. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, **11**: 315 ~ 320. (in Chinese with English abstract)

Chaney, R. L., P. F. Bell & I. F. S. Melo. 1988. Activity of microelement cation required by plants in DTPA-buffered nutrient solutions. In: *Agronomy Abstract Madison WI: American Society Agronomy*, 232.

Chen, G. X. (陈国祥), G. X. Shi (施国新), B. He (何兵), K. B. Xie (解凯彬), C. M. Lu (陆长梅), F. C. Chang (常福辰) & J. C. Wei (魏锦城). 1999. Effect of mercury and cadmium on photochemical activity and polypeptide compositions of photosynthetic membranes from winter bud of *Brasenia schreberi*. *Acta Scientiae Circumstantiae (环境科学学报)*, **19**: 521 ~ 525. (in

- Chinese with English abstract)
- Chen, N. C. (陈能场) & H. M. Chen (陈怀满). 1993. The chemical behavior of heavy metals in rhizosphere. Progress in Soil Science (土壤学进展), **21**: 9 ~ 14. (in Chinese)
- Chen, Y. (陈愚), J. C. Ren (任久长) & X. M. Cai (蔡晓明). 1998. Effects of cadmium on nitrate reductase and speroxide dismutase of submerged macrophytes. Acta Scientiae Circumstantiae (环境科学学报), **18**: 313 ~ 317. (in Chinese with English abstract)
- Dubé, S. L. & J. F. Bormman. 1992. Response of spruce seedlings to simultaneous exposure to ultraviolet-B radiation and cadmium. Plant Physiology, **30**: 761 ~ 767.
- Einhellig, F. A. 1995. Mechanism of action of allelochemicals in allelopathy. Allelopathy, **1**: 97 ~ 115.
- Klironomos, J. N. & M. F. Allen. 1995. UV-B mediated changes in belowground communities associated with the roots of *Acer saccharum*. Functional Ecology, **9**: 923 ~ 930.
- Koeppel, D. E. 1977. The uptake, distribution, and effect of cadmium and lead in plants. Science of the Total Environment, **7**: 197 ~ 206.
- Kuiters, A. T. 1986. Leaching of phenolic compounds from leaf and needle litter of several deciduous and coniferous trees. Soil Biology and Biochemistry, **18**: 475 ~ 480.
- Larsen, P. B., J. Degenhardt, C. Y. Tai, L. M. Stenzler, S. H. Howell & L. V. Kochina. 1998. Aluminum-resistant *Arabidopsis* mutants that exhibit altered patterns of aluminum accumulation and organic acid release from roots. Plant Physiology, **117**: 9 ~ 18.
- Larsson, E. H., J. F. Bormman & H. Asp. 1998. Influence of UV-B radiation and Cd²⁺ on chlorophyll fluorescence, growth and nutrient content in *Brassica napus*. Journal of Experimental Botany, **49**: 1031 ~ 1039.
- Mench, M., J. L. Morel & A. Guckert. 1988. Metal binding with root exudates of low molecular weight. Journal of Soil Science, **39**: 521 ~ 527.
- Mench, M. & E. Martin. 1991. Mobilization of cadmium and other metals from two soils by root exudates of *Zea mays* L., *Nicotiana tabacum* L., and *Nicotiana rustica* L. Plant Soil, **132**: 187 ~ 196.
- Mepsted, R., N. D. Paul, J. L. Stephen, C. Corlett, S. Nogues, N. R. Baker, H. G. Jones & P. G. Ayres. 1996. Effects of enhanced UV-B radiation on pea (*Pisum sativum* L.) grown under field conditions in the UK. Global Change Biology, **2**: 325 ~ 334.
- Patterson, D. T. 1981. Effects of allelopathic chemical on growth and physiological response of soybean (*Glycine max*). Weed Science, **29**: 53 ~ 58.
- Peng, M. (彭鸣), H. X. Wang (王焕校) & Y. S. Wu (吴玉树). 1991. Ultrastructural changes induced by cadmium and lead in corn seedling cell. China Environmental Science (中国环境科学), **11**: 426 ~ 431. (in Chinese with English abstract)
- Perez, P. J. 1991. Root exudates of wild oats: allelopathic effect on spring wheat. Phytochemistry, **30**: 2199 ~ 2202.
- Piao, C. H. (朴春河), Q. M. Liu (刘启明), J. H. Guo (郭景恒), D. L. Yu (余登利) & J. C. Ran (冉景丞). 2001. Origins of soil organic carbon with the method of natural ¹³C abundance in maize fields. Acta Ecologica Sinica (生态学报), **21**: 434 ~ 439. (in Chinese with English abstract)
- Ryan, P. R., E. Delhaize & P. J. Randall. 1995. Malate efflux from root apices: evidence for a general mechanism of Al-tolerance in wheat. Australian Journal of Plant Physiology, **22**: 531 ~ 536.
- Sanita di Toppi, L. & R. Gabbriellini. 1999. Response to cadmium in higher plants. Environmental and Experimental Botany, **41**: 105 ~ 130.
- Scheible, W. R., M. Laner, E.-D. Schulze, M. Cabbehe & M. Still. 1997. Accumulation of nitrate in the shoot acts as signal to regulate shoot-root allocation in tobacco. The Plant Journal, **11**: 671 ~ 691.
- van Assche, F. & H. Clijsters. 1990. Effects of metal on enzyme activity in plants. Plant, Cell and Environment, **13**: 195 ~ 206.
- Wu, Y. Y. (吴燕玉), X. Wang (王新), R. L. Liang (梁仁禄) & T. Z. Wu (吴铁铮). 1997. Ecological effect of compound pollution of heavy metals in soil-plant system II. Effect on element uptake by crops, alfalfa and tree. Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报), **8**: 545 ~ 522. (in Chinese with English abstract)
- Yang, J. R. (杨居荣), J. X. He (贺建新) & W. R. Jiang (蒋婉茹). 1995. Effect of Cd pollution on the physiology and biochemistry of plant. Agro-Environmental Protection (农业环境保护), **14**(5): 193 ~ 197. (in Chinese)
- Zhao, D. J. (赵大君) & S. Z. Zheng (郑师章). 1996. Chemotaxis of amino acids in root exudates from *Eichhornia crassipes* to its rhizospheric *Enterobacter* sp. F₂. Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报), **7**: 207 ~ 212. (in Chinese with English abstract)
- Zheng, S. J., J. F. Ma & H. Matsumoto. 1998. High aluminum resistance in buckwheat. I. Al-induced specific secretion of oxalic acid from root tips. Plant Physiology, **117**: 745 ~ 751.