

贵溪冶炼厂周边菜园地土壤—辣椒系统中重金属的迁移特征

江水英¹, 吴声东^{1,2}, 肖化云², 邹江¹

(1. 南昌大学 科学技术学院, 江西 南昌 330029; 2. 南昌大学 环境科学与工程学院, 江西 南昌 330031)

摘要:分析江西贵溪冶炼厂周边农村(苏门村)零散菜地上的辣椒各部位及其根系土壤中的 Cu、Pb、Zn、Cd 含量,并探讨这些重金属在菜园土—辣椒体系中的迁移特征。结果表明,当地蔬菜土壤受到不同程度的 Cu、Zn、Cd 污染,而且这种污染受人为主观因素影响比较大。在土壤—辣椒体系各界面间,重金属元素迁移能力大小顺序发生了变化:在土壤—根部间为 $Cd > Zn > Cu > Pb$;在根部—茎部间为 $Pb > Zn > Cd > Cu$;在茎部—叶部间为 $Cu > Pb > Cd > Zn$;在茎部—果实间为 $Zn > Pb > Cu > Cd$ 。对于 Cu、Pb 元素来说,辣椒根—土界面是重金属进入辣椒果实的主要障碍,其生物富集系数 *BCF* 值分别为 0.50、0.32;而 Zn 和 Cd 的 *BCF* 值却达 2.08 和 3.12,表现为富集作用。所有重金属在辣椒叶部都比茎部含量高,而就茎—叶间的迁移系数来说,都表现为富集,这可能是受到当地大气污染的影响。

关键词:土壤;辣椒;重金属;生物富集系数;迁移系数

中图分类号: S154.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-2286(2010)03-0628-05

Characteristics of Heavy Metal Transportation in Vegetable Soil and Capsicum (*Capsicum annum* L.) System Near the Guixi Copper Smeltery

JIANG Shui-ying¹, WU Sheng-dong^{1,2}, XIAO Hua-yun², ZOU Jiang¹

(1. College of Science and Technology, Nanchang University, Nanchang 330029, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: The contents of Cu, Pb, Zn, Cd in the samples of whole capsicum (*Capsicum annum* L.) plants and root soils collected from the capsicum fields in Sumen area near the Guixi Copper Smeltery in Jiangxi Province were analyzed. And the characteristics of heavy metal transportation in the soil-capsicum system were studied. The results showed that the fields were polluted with Cu, Zn, Cd at varying degrees, and the polluted degrees were affected by human factors. The transportation ability of the measured heavy metals follow a decreasing order of $Cd > Zn > Cu > Pb$ in the soil/root interface, $Pb > Zn > Cd > Cu$ in the stem/root interface, and $Cu > Pb > Cd > Zn$ in the leaf/stem interface, and $Zn > Pb > Cu > Cd$ in the fruit/stem interface. And the soil/root interface was the main barrier for Cu, Pb to enter capsicum fruit, and the average bioconcentration factors (*BCF*) were 0.50, 0.32 respectively. However, Zn and Cd were accumulated in the root, with *BCF* 2.08 and 3.12 respectively. The contents of all the measured heavy metals in leaf were higher than in stem, and the translocation factor in the leaf/stem interface (*TF2*) showed enrichment of all the metals. It maybe resulted by the local air pollution.

Key words: soil; capsicum; heavy metals; bioconcentration factor; translocation factor

收稿日期: 2009-11-07 修回日期: 2010-04-26

基金项目: 江西省科技支撑计划资助项目(2009BSB1000)

作者简介: 江水英(1982-),女,硕士,主要从事环境化学研究, E-mail: yudianlei1982@126.com.

近年来关于农产品污染尤其是因重金属污染而影响人体健康的问题日益引起人们的关注和重视。蔬菜是人们日常生活中必不可少的副食品,也是极易受重金属污染和影响的农产品。目前关于蔬菜重金属污染调查、评价等方面所做的研究比较多^[1-3],而对于蔬菜土—蔬菜体系的重金属迁移特征的研究则比较少。此外重金属由土壤向植物体内的迁移受很多因素的影响,比如土壤中共存重金属的拮抗或协同作用^[4]、土壤类型和性质^[5]、植物的生态型差异^[6]和基因型差异^[7]等等,所以重金属由土壤向蔬菜体内迁移的规律至今没有得到统一。

江西贵溪冶炼厂周边地区的土壤重金属污染已经十分严重^[8-9],虽然当地已经停止了水稻的种植,但是蔬菜仍然种植广泛。辣椒(*Capsicum annuum* L.)是研究区域农民种植最多的蔬菜之一,而且深受当地人们的喜爱。本文选择贵溪冶炼厂周边地区的苏门村作为研究区域,以辣椒为研究对象,考察了当地零散菜园土—辣椒体系中重金属迁移特征,为当地植物重金属污染的防治提供依据。

1 研究方法

1.1 样品采集制备

辣椒成熟时期,在苏门村每个零散蔬菜地随机采集整株辣椒及其根系土壤各 6 份,土壤采样深度为 0~15 cm。每个零散蔬菜地的 3 个随机样品组成 1 个混合样品,共采集 8 个混合样品。土壤风干后磨碎,过 20 目塑料筛,然后用四分法取部分土样进一步用玛瑙研钵研磨,过 100 目塑料筛,并用聚乙烯袋保存备用。辣椒用自来水反复冲洗,洗去泥沙后,用去离子水冲洗 2 遍。每株辣椒分为根、茎、叶以及辣椒果实,分别放入纸袋中,在 70℃ 烘箱中烘干后,用植物粉碎机粉碎,过 100 目塑料筛,并用聚乙烯袋密封保存。

1.2 测试方法

土壤样品采用 HF-HClO₄-HNO₃ 密闭消解;植株样品采用 HNO₃-HF-H₂O₂ 于 MDS-2002A 微波消解仪中进行消解;消解液中 Cu、Pb、Zn、Cd 重金属元素的含量采用 ICP-OES (Optima 2100DV) 进行测定;样品的元素分析质量分别以分析方法的全程空白值、平行样、质控样(土壤 GBW-07406,灌木枝叶 GBW-07603),加标回收等进行控制。

2 结果与分析

2.1 菜地土壤重金属含量的分布特征

表 1 土壤重金属含量 (n=8)

Tab 1 The total concentration of heavy metals in soils		mg/kg			
	Cu	Pb	Zn	Cd	
范围 Rang	300.80~865.00	18.04~81.76	52.20~463.80	1.98~8.90	
均值 Average value	632.86	38.47	266.37	4.27	
变异系数 Coefficient of variation	0.42	0.51	0.61	0.53	
土壤背景值 ^a Background value of soil	12.13	25.63	38.19		
土壤二级标准值 (pH 6.5) Secondary standard value of soil	50	250	200	0.3	

a 引自北京师范大学环境科学研究所,《江西铜业公司贵溪冶炼厂环境影响报告书》(1984年)。

a Quoted from Beijing Normal University Institute of Environmental Science, 《Environmental Impact Report of Jiangxi Copper Company Guixi smelter》(in 1984).

由表 1 可知,当地菜园土壤中,重金属的平均含量为: Cu > Zn > Pb > Cd。而且不同采样点土壤中重金属含量变化很大,最高值约为最低值的 2.9~8.9 倍;从变异系数来看,除 Cu 元素的变异系数相对较小外,其它重金属元素均在 50% 以上。重金属含量在土样之间存在较大的变异性,这说明人为活动已对土壤的重金属污染产生了明显的影响,不同地点的重金属污染有较大的差异。这种差异与菜园地距

离冶炼厂的远近没有很大的关系,但和当地废渣的乱堆乱放有很大的关系。例如,某一零散菜地离冶炼厂相对较远,但因为在菜地周边堆放了一些废渣,且有农民将菜地灌溉水用来淘洗铜渣,因此这个菜地的土壤重金属含量很高,尤其是 Cu 的含量特别高,高达 865.00 mg/kg。

将 8 个土壤样本重金属测定结果对比于国家土壤环境质量二级标准值 (pH 6.5),可以发现所有土壤样点都受到了不同程度的 Cu、Zn、Cd 的污染,平均分别超标 12 倍、1 倍、14 倍以上; Pb 在所有样点都没有超过国家二级标准值的 (250 mg/kg),属于尚适应农业活动的范围内。而对比于本研究区未建厂之前的土壤背景值而言,土壤中各重金属的含量都有所增加,而其中 Cu、Zn、Cd 的增幅最大。

2.2 重金属在辣椒各器官中的分布

从图 1 可以看出,同一重金属在辣椒各部位中的含量顺序为: Cu、Zn、Cd 为根 > 叶 > 茎 > 果, Pb 为叶 > 根 > 茎 > 果。大部分重金属在辣椒根部位的含量最高,很多学者都得到这种结论^[10-11]。那是因为根细胞壁中存在大量交换位点,能将重金属离子固定在这些位点上,从而阻止重金属离子进一步向地上部分转移^[12-14]。但此次研究结果中 Pb 却是辣椒叶中的含量最高,这和黎佳佳^[10]的结论不同,可能是

因为他们的结果是在实验条件下获得的,和自然条件下多种重金属复合污染的情况不同,而且当地的空气污染也较为严重,尤其是大气粉尘颗粒物污染较重。有学者表明,空气、雨中的铅及气溶胶状态的铅均可通过叶面吸收^[15]。当地含 Pb 的粉尘颗粒物滞留在叶片表面,并溶解于雨水中,然后被辣椒叶片所吸收,因此出现了辣椒叶中的 Pb 含量比根部都高。

在辣椒同一部位中, Cu 和 Zn 的含量都占绝对优势,除根部含量为 Zn > Cu > Cd > Pb 之外,其余各部位都为 Zn > Cu > Pb > Cd,这和土壤中重金属含量 Cu > Zn > Pb > Cd 的排列顺序有所不同。辣椒中 Zn 的含量大于 Cu,可能是因为 Zn 是植物生长的常量元素而 Cu 是微量元素的关系。而非植物必需元素 Pb、Cd 在土壤和植物根中的分布不一致则有可能是因为土壤中 Cd 的有效态含量较大,有利于辣椒吸收。

2.3 重金属在菜园土—辣椒体系中的迁移能力

植物对重金属的迁移吸收是有选择性的,对不同重金属的吸收能力也是不一致的,因此可以用植物对土壤重金属的富集

系数 BCF (蔬菜根中重金属含量/土壤中重金属含量)来表示重金属在土壤—辣椒根系间的迁移性能(图 2)。BCF 值越大,说明重金属由土壤向辣椒根部迁移吸收的能力越强。用迁移系数 TF1 (辣椒茎中重金属含量/根部重金属含量)、TF2 (辣椒叶中重金属含量/茎中重金属含量)、TF3 (辣椒果实中重金属含量/茎中重金属含量)分别表示重金属在根—茎、叶—茎、茎—果实间的迁移能力。用累计富集系数 ($=BCF \times TF1 \times TF3$,即辣椒果实中重金属含量/土壤中重金属含量)表示辣椒果实中重金属相对于土壤的富集系数。

由图 2 可见,辣椒根部对重金属的富集能力为 Cd > Zn > Cu > Pb,与李非里等^[16]的报道结论很相似。本研究中,辣椒根对 Cd 的富集能力最强,其 BCF 平均为 3.12;其次为 Zn、Cu,其 BCF 值分别为 2.08、0.50; Pb 的富集能力最弱,其 BCF 值平均为 0.32。在辣椒根部和茎间,重金属的迁移能力是 Pb > Zn >

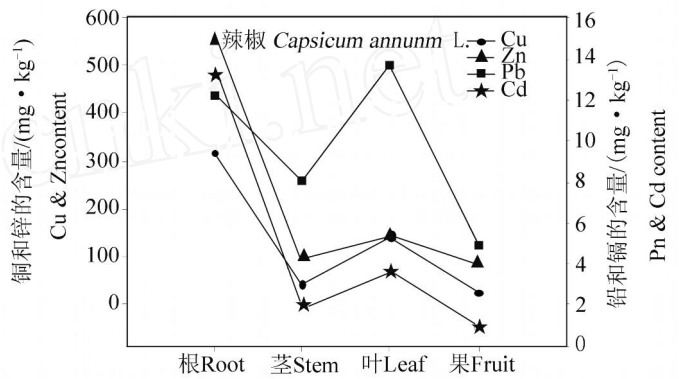


图 1 辣椒各器官中的重金属含量 (干重)

Fig 1 The contents of heavy metals in *Capsicum annuum* L.

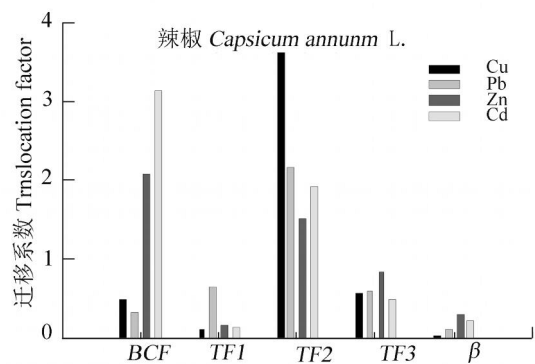


图 2 重金属在菜园土—辣椒体系中的迁移情况

Fig 2 Translocation of heavy metals in the soil - capsicum system

Cd > Cu, 其 $TF1$ 值分别为 0.65, 0.17, 0.14, 0.12; 在辣椒茎与叶间, 重金属的迁移能力是 $Cu > Pb > Cd > Zn$, 其 $TF2$ 值分别为 3.62, 2.15, 1.91, 1.50; 在辣椒茎与果实间, 重金属的迁移能力是 $Zn > Pb > Cu > Cd$, 其值 $TF3$ 分别为 0.85, 0.60, 0.57, 0.50; 在土壤与辣椒果实间, 重金属的累计富集系数为: $Zn > Cd > Pb > Cu$, 其平均值分别为 0.31, 0.22, 0.12, 0.03, 即辣椒果实对 Cu 的吸收较其他重金属弱得多。

本研究所各重金属在辣椒各部位的迁移能力普遍比李非里等^[16]所研究的结果高, 这有可能是各自研究土壤所受污染程度不同造成的。黎佳佳等^[10]研究认为复合污染中 Pb 、 Cd 相互促进, 增加了植株各部对 Pb 、 Cd 的吸收率。

从图 2 还可以看出, 各重金属的迁移能力在茎至叶间最大, 全部重金属的迁移系数都大于 1, 尤其是 Cu , 高达 3.62。这可能是叶中的这些重金属并非是由植物根部从土壤里吸收并向上迁移的那部分重金属, 而是直接由叶片吸收而来。崔海丽等^[16]用无铅水培体系及在叶面浸渍可溶性铅的方法试验得出, 芹菜叶面不仅可吸收 Pb , 而且还会顺着浓度梯度向叶柄、茎部和根部迁移。从这个结论可以设想, 如果在污染区域进行大棚蔬菜种植, 可适当减少植物中重金属的污染。关于这方面的研究还未见报道, 值得进一步研究证实。

2.4 重金属在菜园土—辣椒体系中的迁移特征

Cu 是植物生长的必需元素, 其在菜园土—辣椒体系中的分布特征为: 菜园土 > 根部 > 叶部 > 茎部 > 果实。辣椒根中 Cu 的富集系数 BCF 平均仅有 0.5, 说明土壤中大部分的 Cu 被滞留在辣椒根系土壤里。而根—茎间的迁移系数 $TF1$ 值为 0.12, 表明辣椒根有效地防止了 Cu 向地上部位迁移。所以虽然研究地土壤中的 Cu 污染比较严重, 但是迁移吸收到果实中的 Cu 含量还是很少。

一般认为 Pb 是植物生长的有害元素, 其在菜园土—辣椒体系中的分布特征为: 菜园土 > 叶部 > 根部 > 茎部 > 果实。辣椒根对 Pb 富集系数 BCF 平均仅为 0.32, $TF1$ 值为 0.65, $TF3$ 值为 0.60, 说明重金属 Pb 从土壤到进入植物根部以及在植物体内向上迁移的过程中受到层层阻碍, 到达果实中的含量也只为土壤中的 0.12 倍。

Zn 也是植物生长的必需元素, 其在菜园土—辣椒体系中的分布特征为: 根部 > 菜园土 > 叶部 > 茎部 > 果实。辣椒根部有效地吸收富集了土壤中的 Zn , 使得根部的 Zn 含量是土壤中的 2 倍多, 而 $TF1$ 为 0.17, 所以阻止土壤中 Zn 向果实部位迁移的主要场所就发生在茎—根界面上了。而 Zn 一旦突破根的禁锢之后, 其在植株体内的传输则比较畅通, 果实中的 Zn 含量基本接近茎中的含量。

Cd 是公认的对生物体有害元素, 其在菜园土—辣椒体系中的分布特征为: 菜园土 > 根部 > 叶部 > 茎部 > 果实。辣椒根部 Cd 含量平均为菜园土中的 3.12 倍, 表现为明显的富集作用, 这可能与当地强酸性土壤特质有关系。 Cd 进入辣椒植株体内后, 其在茎—根间的阻碍最大, 而且果实—茎界面也能有效阻止 Cd 进入果实中去, 果实中 Cd 含量仅为茎的 0.50。

在本研究中, 辣椒叶中的重金属都比较高, 茎—叶间的迁移系数都超过了 1, 这极有可能和当地的大气污染有关系, 而不是单纯从根部吸收而来。

3 结 论

(1) 当地菜园地土壤已经受到重金属 Cu 、 Cd 、 Zn 不同程度的污染, 各零散菜园地之间的重金属含量变异性很大, 且这种变异受人为因素影响很大。

(2) 大部分重金属在辣椒根部的含量比其他部位高, 但是 Pb 却是辣椒叶片中的含量高于根部, 这可能是叶片吸收了大量大气中重金属 Pb 所致。

(3) 在土壤—辣椒体系各界面间, 重金属元素迁移能力大小顺序发生了变化: 在土壤—根部间为 $Cd > Zn > Cu > Pb$; 在根部—茎部间为 $Pb > Zn > Cd > Cu$; 在茎部—叶部间为 $Cu > Pb > Cd > Zn$; 在茎部—果实间为 $Zn > Pb > Cu > Cd$ 。对于 Cu 、 Pb 元素来说, 辣椒根—土界面是重金属进入辣椒果实的主要障碍, 而 Zn 和 Cd 在辣椒根—土界面却表现为富集作用。所有重金属在辣椒叶部都比茎部含量高, 而就茎—叶间的迁移系数来说, 都表现为富集, 这说明当地受到严重的大气污染。

参考文献:

- [1] 李学德, 花日茂, 岳永德, 等. 合肥市蔬菜中铬、铅、镉和铜污染现状评价 [J]. 安徽农业大学学报, 2004, 31(2): 143 - 147.

- [2] 朱美英, 罗运阔, 赵小敏, 等. 南昌市近郊蔬菜基地土壤和蔬菜中重金属污染状况调查与评价 [J]. 江西农业大学学报, 2005, 27(5): 781 - 784.
- [3] 丁爱芳, 潘根兴. 南京城郊零散菜地土壤与蔬菜重金属含量及健康风险分析 [J]. 生态环境, 2003, 12(4): 409 - 411.
- [4] 黄益宗. 镉与磷、锌、铁、钙等元素的交互作用及其生态学效应 [J]. 生态学杂志, 2004, 23(2): 92 - 97.
- [5] Moreno D A, Villora G, Ruiz J M, et al. Growth conditions, elemental accumulation and induced physiological changes in Chinese [J]. Chemosphere, 2003, 52(6): 1031 - 1040.
- [6] 韩志萍, 王趁义. 不同生态型芦竹对 Cd, Hg, Pb, Cu 的富集与分布 [J]. 生态环境, 2007, 16(4): 1092 - 1097.
- [7] 冯文强, 涂仕华, 秦鱼生, 等. 水稻不同基因型对铅镉吸收能力差异的研究 [J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2): 447 - 451.
- [8] 庞安华, 刘建军, 倪才英, 等. 贵溪冶炼厂周边农田土壤重金属污染特性及评价 [J]. 土壤通报, 2006, 37(6): 1212 - 1217.
- [9] 胡宁静, 李泽琴, 黄朋, 等. 江西贵溪冶炼厂重金属环境污染特征及生态风险评价 [J]. 地球科学进展, 2004, 19(6): 467 - 471.
- [10] 黎佳佳, 付庆灵, 吕意, 等. 辣椒对灰潮土重金属 Cd Pb 污染的反应与矿质元素吸收 [J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2): 236 - 241.
- [11] 刘景春, 李裕红, 晋宏. 铜污染对辣椒产量、铜累积及叶片膜保护酶活性的影响 [J]. 福建农业学报, 2003, 18(4): 254 - 257.
- [12] Allan D L, Jarrell W M. Proton and copper absorption by maize and soybean root cell - walls [J]. Plant Physiology, 1989, 89(3): 823 - 832.
- [13] Choudhary M, Bailey L D, Grant C A, et al. Effect of Zn on the concentration of Cd and Zn in plant tissue of two durum - wheat lines [J]. Canadian Journal of Plant Science, 1995, 75(2): 445 - 448.
- [14] Branquinho C, Brown D H, Catarino F. The cellular location of Cu in lichens and its effects on membrane integrity and chlorophyll fluorescence [J]. Environmental and Experimental Botany, 1997, 38(2): 165 - 179.
- [15] 董力诚, 夏春镗, 沈昕妍. 芹菜叶对铅的吸收及其迁移规律初探 [J]. 同济大学学报: 医学版, 2005, 26(5): 79 - 81, 85.
- [16] 李非里, 刘从强, 杨元根, 等. 贵阳市郊菜园土—辣椒体系中重金属的迁移特征 [J]. 生态与农村环境学报, 2007, 23(4): 52 - 56.
- [17] 崔海丽, 夏春镗. 芹菜叶对铅的吸收和迁移规律 [J]. 同济大学学报: 医学版, 2006, 27(5): 17 - 20.

(上接第 600 页)

- [11] 陈学军, 陈劲枫, 耿红, 等. 辣椒属 5 个栽培种部分种质亲缘关系的 RAPD 分析 [J]. 园艺学报, 2006, 33(4): 751 - 756.
- [12] 陈学军, 程志芳, 陈劲枫, 等. 辣椒种质遗传多样性的 RAPD 和 ISSR 及其表型数据分析 [J]. 西北植物学报, 2007, 27(4): 662 - 670.
- [13] 杜晓华, 巩振辉, 王得元, 等. 辣椒优良自交系间遗传差异的分子分析 [J]. 西北植物学报, 2006, 26(12): 2445 - 2452.
- [14] 任羽, 王得元. 辣椒 SRAP - PCR 反应体系的建立与优化 [J]. 分子植物育种, 2004, 2(5): 689 - 693.
- [15] Murry H G, Thompon W F. Rapid isolation of higher weight DNA [J]. Nucleic Acid Res, 1980, 8: 4321.
- [16] 盖钧镒. 试验统计方法 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 383.
- [17] 许绍斌, 陶玉芬, 杨昭庆, 等. 简单快速的 DNA 银染和胶保存方法 [J]. 遗传, 2002, 24(3): 335 - 336.
- [18] 何正文, 刘运生, 陈立华, 等. 正交设计直观分析法优化 PCR 条件 [J]. 湖南医科大学学报, 1998, 23(4): 403 - 404.
- [19] 穆立蕾, 刘赢男, 冯富娟, 等. 紫椴 ISSR - PCR 反应体系的建立与优化 [J]. 林业科学, 2006, 42(6): 26 - 31.
- [20] 刘立军, 蒙祖庆, 邢秀龙, 等. 苕麻基因组 SRAP 扩增体系的优化研究 [J]. 分子植物育种, 2006, 4(5): 726 - 730.
- [21] 张飞, 陈发棣, 房伟民, 等. 菊花 SRAP - PCR 反应体系的优化与确立 [J]. 植物资源与环境学报, 2009, 18(3): 44 - 49.
- [22] 楚爱香, 汤庚国. 观赏海棠 SRAP - PCR 反应体系优化及引物筛选 [J]. 湖北农业科学, 2008, 47(12): 1394 - 1397.
- [23] 袁菊红, 权俊萍, 胡绵好, 等. 石蒜 SRAP - PCR 扩增体系的建立与优化 [J]. 植物资源与环境学报, 2007, 16(4): 1 - 6.
- [24] 姜维华, 陶俊, 冯立国, 等. 利用正交设计优化一品红 SRAP 反应体系 [J]. 苏州科技学院学报: 自然科学版, 2009, 26(1): 48 - 52.
- [25] 庄振国, 张海英, 于广建, 等. 黄瓜 SRAP 反应体系的正交设计优化 [J]. 华北农学报, 2007, 22(4): 112.
- [26] 吴红, 林清, 雷开荣, 等. 丝瓜 SRAP - CR 体系建立与优化 [J]. 中国农学通报, 2009, 5(4): 30 - 34.