胡丽萍,周国兴,金丽华,等. 复合改良剂对铅污染土壤中小白菜品质的影响[J]. 江苏农业科学,2016,44(10):261 - 265.
doi:10.15889/j.issn.1002 - 1302.2016.10.072

复合改良剂对铅污染土壤中小白菜品质的影响

胡丽萍[1], 周国兴[2], 金丽华[3], 刘光敏[1], 王一茜[1], 何洪巨[1]

(1. 北京市农林科学院蔬菜研究中心/农业部华北地区园艺作物生物学与种质创制重点实验室、农业部都市农业(北京)重点实验室,北京 100097; 2. 北京恒源嘉达科技有限公司,北京 100080; 3. 北京市通州区农业技术推广站,北京 101101)

摘要:采用盆栽试验,以小白菜为试验材料,种植在人工配制的不同污染程度(800、1 200、1 600、2 000 mg/kg)的铅污染土壤中,研究不同浓度复合改良剂(0、600、900、1 200 mg/kg)对土壤有机质、pH 值、小白菜可食部位铅含量和营养品质的影响。结果表明,施用 900 mg/kg 复合改良剂可使镉污染土壤有机质含量提高 24.19% ~60.00%,但对土壤 pH 值无显著影响。施用复合改良剂可明显提高小白菜安全性和营养品质,4 个铅处理小白菜可食部位铅含量降低 19.11% ~35.72%,维生素 C 含量增加 13.27% ~69.30%,可溶性糖含量提高 54.17% ~87.50%,干物质量提高 28.36% ~33.39%,粗纤维含量降低 20.83% ~31.03%。因此,复合改良剂能够用于重金属铅污染土壤的原位修复,推荐其适宜用量为 900 mg/kg。

关键词:小白菜;铅;重金属;复合改良剂;品质

中图分类号: S634.304;S156.2　　**文献标志码:** A　　**文章编号:**1002 - 1302(2016)10 - 0261 - 04

据估计,我国有 10% 以上的耕地受到重金属污染[1],铅是重金属污染最为突出的元素之一[2-4]。土壤中的重金属被农作物吸收,降低农作物的产量和品质,并可通过食物链进入人体,危害人体健康[5]。铅一旦进入人体,通过血液干扰神经细胞,破坏血红素的生存和脑微血管的渗透性,对人体神经系统、血液系统、心血管系统、骨骼系统产生严重危害,并可导致儿童大脑发育迟缓,最终影响人的智力[6]。因此,开展铅污染土壤的治理和修复研究,是十分紧迫和必要的。

目前,多种技术被应用到土壤重金属污染治理中来,如生物法、物理化学法等都能有效降低重金属的污染风险。但是,这些技术通常耗费大、成本高,还会破坏土壤肥力和土壤结构[7]。原位化学修复法是一种通过增加重金属的吸附,降低其在土壤中的溶解度和生物有效性,从而减少污染物从土壤进入农作物的方法。原位修复法成本低,对土壤的影响和破坏小[8-9],适合大范围操作,符合我国农业可持续发展的要求,引起了人们的广泛关注。

本试验所采用的复合改良剂由四川大学化学工程学院提供。该改良剂由正铵盐、磷矿粉、腐殖酸、有机质、微生物生长所需营养元素及参与重金属离子反应的多种活性金属离子配制而成。前期试验结果表明,复合改良剂可以显著降低重金属污染土壤中水溶态 Cd 和 Pb 的含量[10],但该改良剂对农作物体内重金属含量和营养指标影响的系统性研究尚未见报道。蔬菜是人们日常生活中必不可少的食物,而叶菜是最易受重金属污染和毒害的蔬菜[11-12]。因此,本试验通过盆栽试验,以代表性叶类蔬菜小白菜(*Brassica rapa* L. *chinensis* group.)为对象,研究施用不同浓度复合改良剂对 Pb 污染土壤有机质、pH 值、小白菜营养品质和 Pb 含量的影响,以期阐明复合改良剂缓解 Pb 毒害的机理,找到适宜的改良剂用量,为重金属污染土壤改良技术和小白菜安全生产提供依据。

1　材料与方法

1.1　供试土壤和材料

供试土壤采自北京夏至农业科技有限公司日光温室。取 0 ~20 cm 表层土壤,风干、去沙石和植物残体,过 20 目筛。土壤理化性质及 Pb 含量见表 1。供试作物为小白菜,种子购于北京京研益农科技发展中心。

表 1　供试土壤基本性质

全氮 (g/kg)	有机质 (g/kg)	全盐 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	pH 值	Pb 含量 (mg/kg)
0.69	11.70	0.48	87.90	8.20	105.00	8.12	10.63

1.2　盆钵试验方法

在供试土壤的基础上添加 $Pb(NO_3)_2$,设置 800、1 200、1 600、2 000 mg/kg 4 个浓度,加水充分搅拌混匀,平衡 2 周以上。待土壤平衡后,施入复合改良剂,施用量为 0、600、900、1 200 mg/kg,与 Pb 污染土壤充分搅拌混匀。每盆钵中装入 3 kg 土壤,播种小白菜。每个处理 3 次重复,常规栽培管理。

1.3　样品采集及预处理

植株样品:在小白菜收获期,去除老叶后取可食用部分。

土壤样品:在小白菜收获后,用土钻取 0 ~20 cm 表层土壤,去除根系等杂物、风干、粉碎、过筛后用于土壤有机质含量和 pH 值的测定。

收稿日期:2015 - 08 - 26
基金项目:北京市叶类蔬菜创新团队项目(编号:blvt18);北京市农委项目(编号:20120129)
作者简介:胡丽萍(1981—),女,四川眉山人,博士,助理研究员,主要从事蔬菜营养品质研究。E - mail:huliping@ nercv. org。
通信作者:何洪巨,博士,研究员,主要从事蔬菜营养品质研究。E - mail:hehongju@ nercv. org。

1.4　测定项目与方法

土壤有机质和 pH 值测定[13]：采用重铬酸钾法测定土壤有机质含量；采用 pH SJ－3F 型酸度计电位法测定土壤 pH 值。

Pb 测定：采用 HNO_3－HClO 方法消煮，石墨炉－原子吸收光谱法测定小白菜中 Pb 含量[14]。

小白菜营养品质测定：采用 2,6－二氯靛酚滴定法测定维生素 C 含量、蒽酮比色法测定可溶性糖含量、碱滴定法测定可滴定酸含量、质量法测定粗纤维含量和干物质量、凯氏定氮法测定蛋白质含量[15]。

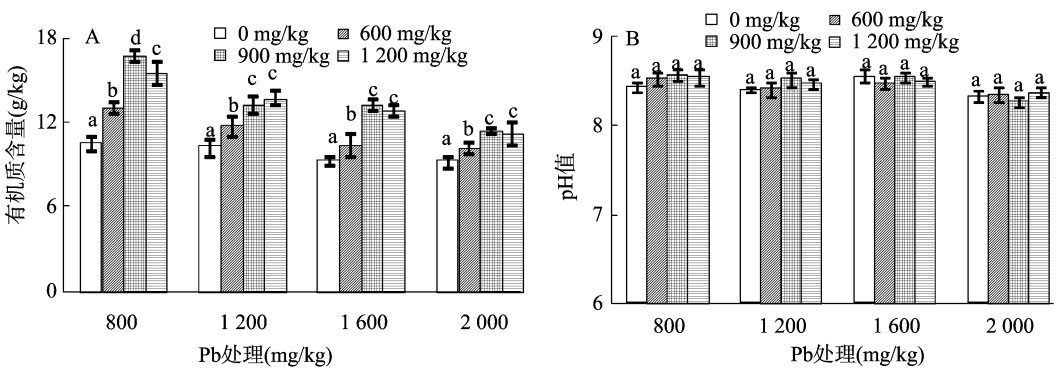
1.5　数据处理

采用 Microsoft Excel 进行数据的基本处理和绘图，SPSS 20.0 统计分析软件进行差异显著性检验。

2　结果与分析

2.1　复合改良剂对 Pb 污染小白菜土壤有机质含量和 pH 值的影响

由图 1－A 可知，施用复合改良剂对不同浓度 Pb 处理污染土壤有机质含量具有明显提升作用。随着复合改良剂施用量的增加，4 个不同浓度 Pb 污染土壤有机质含量均逐渐增加，其中 800、1 600、2 000 mg/kg 3 个浓度 Pb 污染土壤有机质含量均在施用 900 mg/kg 复合改良剂时达到最大值，继续增加改良剂施用量为 1 200 mg/kg 时，其有机质含量反而有所降低（图 1－A）。与 800、1 600、2 000 mg/kg 3 个浓度 Pb 污染土壤不同，1 200 mg/kg 浓度 Pb 污染土壤有机质含量在施用 1 200 mg/kg 改良剂时最高，但与施用 900 mg/kg 复合改良剂无显著差异（图 1－A）。与不施用复合改良剂相比，往 800、1 200、1 600、2 000 mg/kg 浓度 Pb 污染土壤中施用 900 mg/kg 复合改良剂后，土壤有机质含量分别增加 60.00%、30.10%、41.34% 和 24.19%（图 1－A）。由图 1－B 可知，施用复合改良剂对 4 个浓度 Pb 污染土壤 pH 值均无显著影响。



不同小写字母表示同一铅浓度下，不同用量复合改良剂间差异显著($P<0.05$)。图2至图4同。

图1　复合改良剂对 Pb 污染土壤有机质和 pH 值的影响

2.2　复合改良剂对 Pb 污染土壤小白菜 Pb 含量的影响

由图 2 可见，小白菜可食部位 Pb 含量随土壤 Pb 浓度的增加而增加，这与前人的研究结果[11,16－18]相符。与不施用复合改良剂相比，当复合改良剂施用量为 900 mg/kg 或者 1 200 mg/kg 时，4 个不同浓度 Pb 污染土壤小白菜 Cd 含量显著降低（图 2）。但是，与施用 900 mg/kg 复合改良剂相比，改良剂施用量增加到 1 200 mg/kg 时，4 个不同浓度 Pb 污染土壤小白菜可食部位 Pb 含量无显著差异（图 2）。与不施用复合改良剂相比，往 800、1 200、1 600、2 000 mg/kg 4 个浓度 Pb 污染土壤中施用 900 mg/kg 复合改良剂后，小白菜可食部位 Pb 含量分别降低 35.72%、25.53%、28.84% 和 19.11%（图 2）。

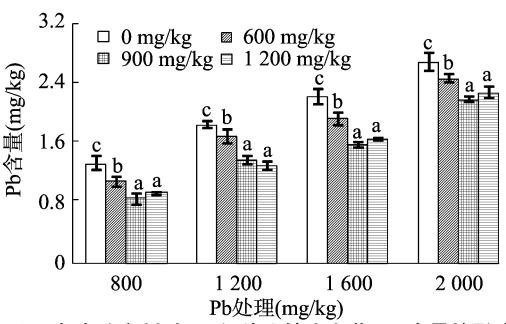


图2　复合改良剂对 Pb 污染土壤小白菜 Pb 含量的影响

2.3　复合改良剂对 Pb 污染土壤小白菜营养品质的影响

蔬菜受体内重金属的影响，其维生素、糖分和其他物质含量都相应有所变化，从而影响蔬菜的品质[19]。由图 3－A 和 3－B 可见，随着土壤中添加 Pb 浓度的增加，小白菜可食部位维生素 C 和可溶性糖含量呈逐渐下降之势，这与前人的研究结果[20]一致。其原因可能是高浓度重金属 Pb 会抑制小白菜合成维生素 C 和可溶性糖相关酶的活性，从而导致其含量降低[19,21]。随着复合改良剂施用量的增加，小白菜维生素 C 和可溶性糖含量逐渐增加，当复合改良剂施用量为 900 mg/kg 时 4 个不同浓度 Pb 处理小白菜维生素 C 和可溶性糖含量均显著高于不施用改良剂对照（图 3－A 和 3－B）。与不施用复合改良剂相比，往 800、1 200、1 600、2 000 mg/kg 4 个浓度 Pb 污染土壤中施用 900 mg/kg 复合改良剂后，小白菜可食部位维生素 C 含量分别增加了 69.30%、49.73%、49.55%、13.27%（图 3－A），可溶性糖含量分别增加了 68.09%、87.50%、54.84%、54.17%（图 3－B）。与施用 900 mg/kg 复合改良剂相比，改良剂施用量增加到 1 200 mg/kg 并不能进一步显著提升小白菜维生素 C 和可溶性糖含量，甚至导致其含量有所降低（图 3－A 和 3－B）。这些结果说明，施用 900 mg/kg 复合改良剂可有效缓解重金属 Pb 对维生素 C 和可溶性糖相关合成酶活性的抑制作用。

在不施用改良剂的情况下，1 200、1 600、2 000 mg/kg 3 个浓度 Pb 污染土壤小白菜可滴定酸含量均低于 800 mg/kg 浓度 Pb 污染土壤。由此可见，高浓度 Pb 处理会降低小白菜可食部位可滴定酸含量。施用复合改良剂可在一定程度上提

高小白菜可滴定酸含量，可使 1 200、1 600、2 000 mg/kg 3 个浓度 Pb 污染土壤小白菜可滴定酸含量提高 12.5% 左右，但对 800 mg/kg 浓度 Pb 污染土壤小白菜可滴定酸含量的提升作用不显著（图 3－C）。

随着土壤中添加 Pb 浓度的增加，小白菜可食部位粗纤维含量逐渐增加，其原因可能是土壤受到 Pb 污染使小白菜茎叶木质化和纤维化所致。小白菜粗纤维含量过高，将导致其口感硬且粗糙，品质变差。施用复合改良剂可以降低 Pb 污染土壤小白菜可食部位粗纤维含量，提升其口感和品质。随着复合改良剂施用量的增加，小白菜粗纤维含量逐渐降低，当复合改良剂施用量为 900 mg/kg 时 4 个不同浓度 Pb 处理小白菜粗纤维含量均显著低于不施用改良剂对照。与不施用复合改良剂相比，往 800、1 200、1 600、2 000 mg/kg 4 个浓度 Pb 污染土壤中施用 900 mg/kg 复合改良剂后，小白菜可食部位粗纤维含量分别降低 24.66%、22.47%、20.83% 和 31.03%，增加改良剂施用量到 1 200 mg/kg 并不能进一步显著降低小白菜可食部位粗纤维含量（图 3－D）。

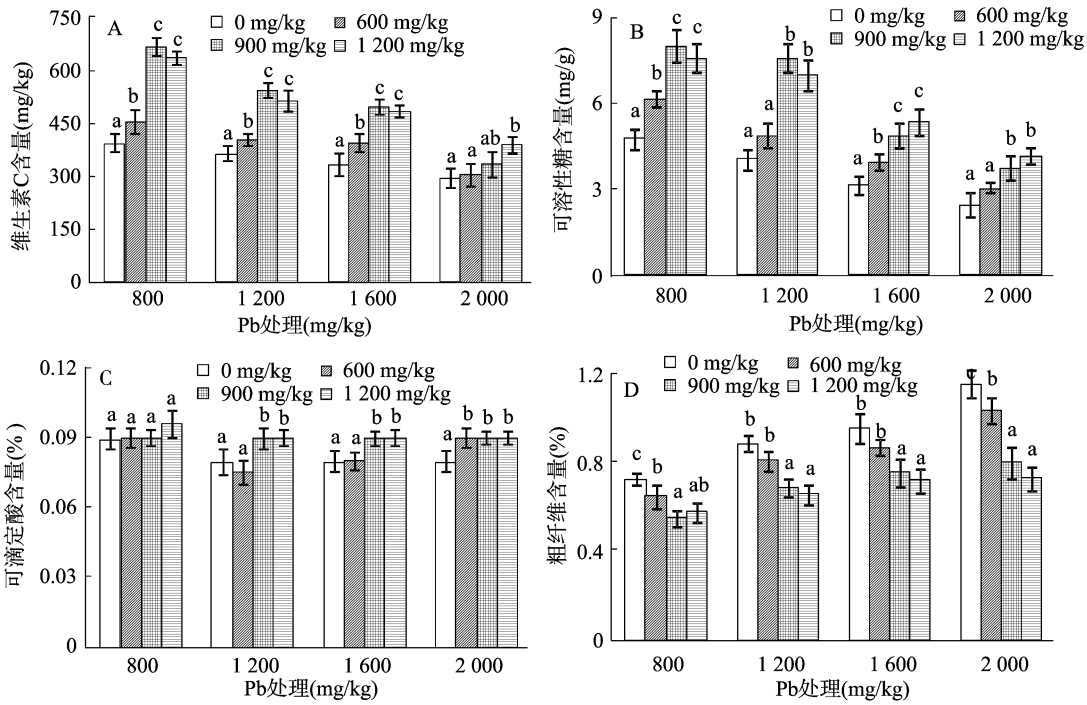


图3　复合改良剂对Pb污染土壤小白菜维生素C、可溶性糖、可滴定酸和粗纤维含量的影响

在不施用复合改良剂的情况下，800、1 200、1 600 mg/kg 3 个 Pb 污染土壤小白菜蛋白含量无明显差异。同时，施用复合改良剂对这 3 个 Pb 污染土壤小白菜蛋白含量无显著影响。但是，当土壤中 Pb 添加量增加到 2 000 mg/kg 时，小白菜蛋白含量显著增加，其原因可能是小白菜体内积累 Pb 的量越来越大，一部分蛋白质被 Pb 沉淀失活保存在小白菜体内，这些失活的蛋白质在测定过程中又被释放出来，从而提高其含量值。随着复合改良剂施用量的增加，2 000 mg/kg Pb 污染土壤小白菜蛋白含量逐渐降低，在施用 900 mg/kg 复合改良剂时降到最低值，与不施用改良剂对照相比降低了 21.83%（图 4－A）。

随着土壤中添加 Pb 浓度的增加，小白菜可食部位干物质量逐渐降低。施用复合改良剂可显著提高 Pb 污染土壤小白菜干物质量。随着复合改良剂施用量的增加，800、1 200、1 600、2 000 mg/kg 4 个 Pb 污染土壤小白菜干物质量均逐渐增加，在改良剂施用量为 900 mg/kg 或 1 200 mg/kg 时达到最大值。但是，与施用 900 mg/kg 复合改良剂相比，改良剂施用量增加到 1 200 mg/kg 时，4 个不同浓度 Pb 污染土壤小白菜可食部位干物质量均无显著差异。与不施用复合改良剂相比，往 800、1 200、1 600、2 000 mg/kg 4 个浓度 Pb 污染土壤中施用 900 mg/kg 复合改良剂后，小白菜可食部位干物质量分别增加了 33.39%、31.38%、28.36%、29.40%（图 4－B）。

3　讨论与结论

当前我国菜田重金属污染呈现加重趋势，随之带来的“菜篮子”产品品质安全问题令人担忧。在从菜田到餐桌的整个食物流通链中，在“菜篮子”产品产地源头进行重金属污染土壤修复，是保证蔬菜品质安全和人体健康的重要措施。鉴于农作物只吸收土壤中的有效态重金属而非重金属全量[22]，而重金属有效性主要受土壤有机质含量和 pH 值的影响[8,23]，因此目前的重金属原位化学修复法主要是围绕调节重金属污染土壤的有机质含量和 pH 值而展开的。已有的研究表明，土壤中的有机质可络合 Pb^{2+}、Cd^{2+} 等重金属离子，如果降低 Pb^{2+}、Cd^{2+} 等重金属离子的有效性，便可增大其从土壤迁移到作物体内的难度[24-25]。因此，提高重金属污染土壤的有机质含量可降低重金属的有效性，从而减少农作物对其的吸收。本试验结果表明，施用 900 mg/kg 复合改良剂可使 Pb 污染土壤有机质含量提高 24.19% ~60.00%。

影响重金属有效性的另一个关键因子是土壤 pH 值。土壤 pH 值提高可促使土壤中 Cd、Pb 等重金属离子形成氢氧化物或碳酸盐结合态沉淀，降低重金属迁移性和生物有效性，减少植物对重金属的吸收[8,26]。与之相反，土壤 pH 值降低可导致氢氧化物或碳酸盐结合态重金属的溶解、释放，也可增加

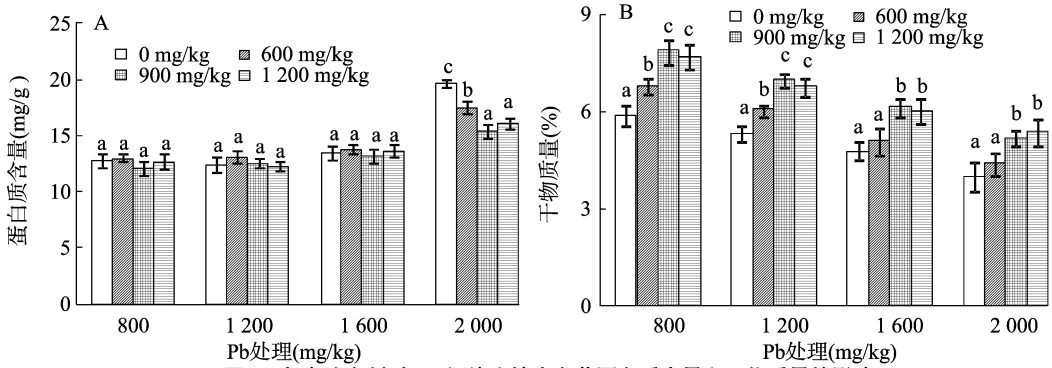


图4　复合改良剂对 Pb 污染土壤小白菜蛋白质含量和干物质量的影响

吸附态重金属的释放,从而增加了植物对重金属的吸收[27]。由此可见,提高土壤 pH 值有助于降低植物中 Cd、Pb 等重金属含量[18]。但本试验土壤为碱性(表 1),进一步显著提升土壤 pH 值将不利于小白菜生长。本试验结果表明,施用复合改良剂并不能显著提高 Pb 污染土壤 pH 值。由结果可知:本试验所采用的复合改良剂主要是通过提高土壤有机质含量来降低土壤 Pb 有效性的。在本试验中,施用 900 mg/kg 复合改良剂可使小白菜可食部位 Pb 含量降低 19.11% ~35.72%,下降幅度显著。

蔬菜受到重金属污染,不仅会表现出外在的受害特征,如生长缓慢、失绿、矮小、减产等,而且还会进一步影响到营养品质指标,如维生素 C、粗纤维、可溶性糖、蛋白、硝酸盐等含量的高低[20-21,28-30]。因此,在重金属污染土壤的改良治理中,改良剂对植物体营养品质的影响也是非常重要的研究内容。在本试验中发现,施用复合改良剂对 Pb 污染土壤小白菜营养品质具有一定的提升作用,尤其是对提高小白菜维生素 C、可溶性糖含量和干物质量,同时降低其体内粗纤维含量效果显著。施用 900 mg/kg 复合改良剂可使小白菜可食部位维生素 C 含量提高 13.27% ~69.30%,可溶性糖含量提高 54.17% ~87.50%,干物质量提高 28.36% ~33.39%,粗纤维含量降低 20.83% ~31.03%。

综上所述,复合改良剂可通过提高 Pb 污染土壤有机质含量来降低 Pb^{2+} 有效性,从而显著降低小白菜可食部位对 Pb^{2+} 的积累,并可显著增加小白菜体内维生素 C、可溶性糖含量和干物质量,降低其粗纤维含量,提升 Pb 污染土壤小白菜的营养品质。因此,复合改良剂能够用于重金属 Pb 污染土壤的原位修复,推荐其适宜用量为 900 mg/kg。

参考文献:

[1]曾希柏,徐建明,黄巧云,等. 中国农田重金属问题的若干思考[J]. 土壤学报,2013,50(1):186-194.

[2]付　华,吴雁华,魏立华. 北京南部地区农业土壤重金属分布特征与评价[J]. 农业环境科学学报,2006,25(1):182-185.

[3]陈同斌,宋　波,郑袁明,等. 北京市菜地土壤和蔬菜铅含量及其健康风险评估[J]. 中国农业科学,2006,39(8):1589-1597.

[4]胡　文,王海燕,查同刚,等. 北京市凉水河污灌区土壤重金属累积和形态分析[J]. 生态环境,2008,17(4):1491-1497.

[5]Cai Q,Long M L,Zhu M,et al. Food chain transfer of cadmium and lead to cattle in a lead - zinc smelter in Guizhou, China [J]. Environmental Pollution,2009,157:3078-3082.

[6]Goyer R A. Lead toxicity: current Concerns [J]. Environmental Health Perspectives,1993,100:177-187.

[7]Mignardi S,Corami A,Ferrini V. Evaluation of the effectiveness of phosphate treatment for the remediation of mine waste soils contaminated with Cd,Cu,Pb,and Zn [J]. Chemosphere,2012,86:354-360.

[8]Brown S,Christensen B,Lombi E,et al. An inter-1aboratory study to test the ability of amendments to reduce the availability of Cd,Pb, and Zn *in situ* [J]. Environmental Pollution,2005,138:34-45.

[9]Carrillo Zenteno M D,de Freitas R C A,Femandes R B A,et al. Sorption of cadmium in some soil amendments for *in situ* recovery of contaminated soils [J]. Water,Air and Soil Pollution,2013,224:1418-1426.

[10]楚秀梅,赵展恒,余兆婧,等. 重金属 Pb 和 Cd 在不同修复材料中的迁移机制[J]. 徐州工程学院学报:自然科学版,2014,29(1):42-48.

[11]杜应琼,何江华,陈俊坚,等. 铅、镉和铬在叶类蔬菜中的累积及对其生长的影响[J]. 园艺学报,2003,30(1):51-55.

[12]韩承华,江解增. 重金属污染对蔬菜生产的危害以及缓解重金属污染措施的研究进展[J]. 中国蔬菜,2014(4):7-13.

[13]鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2001.

[14]陆安祥,孙　江,王纪华,等. 北京农田土壤重金属年际变化及其特征分析[J]. 中国农业科学,2011,44(18):3778-3789.

[15]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.

[16]罗小玲,李淑仪,蓝佩玲,等. 抑制剂对铬铅复合污染小白菜氧化代谢及根组织结构的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2009,15(4):890-897.

[17]付婷婷,伍　钧,黄永川,等. 不同形态氮肥对铅污染土壤的调节[J]. 中国土壤与肥料,2014(1):24-28.

[18]江海燕,王志国,赵秋香,等. 胡敏酸改性膨润土钝化污染土壤 Pb&Cd 及机理[J]. 环境保护科学,2014,40(1):46-50.

[19]胡　超,付庆超. 土壤重金属污染对蔬菜发育及品质的影响之研究进展[J]. 中国农学通报,2007,23(6):519-523.

[20]谢建治,刘树庆,刘玉柱,等. 保定市郊土壤重金属污染对蔬菜营养品质的影响[J]. 农业环境保护,2002,21(4):325-327.

[21]谢建治,张书廷,刘树庆,等. 潮褐土重金属 Cd 污染对小白菜营养品质指标的影响[J]. 农业环境科学学报,2004,23(4):678-682.

[22]Wallace A,Berry W L. Dose - response curves for zinc,cadmium and nickel in combination of one,two,or three? [J]. Soil Science,1989,147(6):401-410.

[23]Kirkham M B. Cadmium in plants on polluted soils: effects of soil

韩　磊,孙兆军,焦炳忠. 水分胁迫下柠条叶片气孔导度对环境因子的响应[J]. 江苏农业科学,2016,44(10):265 - 268.
doi:10.15889/j.issn.1002 - 1302.2016.10.073

水分胁迫下柠条叶片气孔导度对环境因子的响应

韩　磊[1], 孙兆军[1], 焦炳忠[2]
(1. 宁夏大学环境工程研究院,宁夏银川 750021; 2. 宁夏大学土木与水利工程学院,宁夏银川 750021)

摘要:以宁夏河东沙地沙生灌木柠条为试验材料,研究不同水分条件下柠条叶片气孔导度对环境主要驱动因子的响应及敏感性。结果表明:随着水分胁迫程度的增强,柠条叶片气孔导度明显降低,其过程与蒸腾速率的变化一致但不同步;在柠条叶片气孔导度对光合有效辐射的响应方面,随着土壤含水量的降低,气孔启动速度下降,但轻度水分胁迫下该响应过程的敏感性较高;充分供水、轻度水分胁迫、中度水分胁迫条件下,柠条叶片气孔导度的主导因素为气温;对于重度水分胁迫(田间最大持水量的 20% ~40%),柠条叶片气孔导度对温度的敏感性降低,重度胁迫下水汽压饱和亏缺成为影响柠条气孔导度的主要因素,其贡献率为 76.6% ($P<0.01$)。

关键词:柠条;气孔导度;水分胁迫;环境因子;响应机制;河东沙地
中图分类号: S184;S157　　**文献标志码:** A　　**文章编号:**1002 - 1302(2016)10 - 0265 - 04

柠条(*Caragana korshinskii* Kom.)作为治理水土流失和退化沙化草场的先锋植物,具有广泛的适应性和很强的抗逆性。处于干旱、半干旱农牧交错带的宁夏河东沙区,长期以来大面积种植柠条人工林用于防风固沙和草地生态系统的恢复。但是由于该地区降水量稀少且无效蒸发量大,人工林的营造将改变沙地水分的再分配。近年来,随着全球气温升高,该地区降水量以 20 ~40 mm/10 年的速度逐渐减少[1],气候总体上呈现干化趋势[2-3]。植物叶片对气温升高、降水减少的响应比较明显,植物气孔影响蒸腾、光合等生理机能,且随着所处的环境状况而时刻发生变化,在植物中起平衡调节作用[4],气孔特性的具体变化则随物种、干旱程度而呈现不同的特点。如干旱环境使大多数植物气孔密度增大,气孔相对开度变小[5-6];在干旱条件下,柠条受到明显的水分胁迫,表现出明显的光抑制现象[7]。诸多研究表明,植物叶片气孔特性的异质性使其对胁迫环境响应也有很大差异[8],因此,研究不同水分条件下柠条叶片气孔导度对环境主要驱动因子响应的敏感性,在全球变暖加速地球系统水循环的背景下,对于分析干旱胁迫下环境因子对河东沙地林木水分利用的影响机制尤为重要。

收稿日期:2016 - 04 - 14
基金项目:宁夏自然科学基金(编号:NZ13025)。
作者简介:韩　磊(1985—),男,宁夏石嘴山人,博士,副研究员,主要从事水土保持、生态修复研究。E - mail:layhan@163.com。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

试验地点位于宁夏河东沙地南缘的同心县,地理坐标为 36°52′06″N,105°59′7″E,海拔 1 568 m,在气候区上属于温带大陆性气候,年平均气温为 8.7 ℃,极端最高气温为 38.5 ℃,极端最低气温为 - 27.3 ℃,≥10 ℃年平均积温为 2 963.1 ℃,无霜期为 165 ~183 d;雨热同季,多年平均降水量为 251 mm,降水多集中在 7—9 月,占年降水量的 72.4%;多年平均蒸发量为 2 340 mm;年日照时间多年平均值为 2 900 ~3 055 h。试验区土壤类型为灰钙土区的沙化土壤,田间最大持水量为 21.3%,表层土壤平均容重为 1.47 g/cm^3。

1.2　试验方法

在试验区选取 3 年生柠条植株,于 2014 年 4 月植入试验花盆(高 33 cm,上口径 35 cm,下口径 29 cm),试验盆内土壤与试验区大田土壤一致,栽植后将其置于试验地的温室内并充分补水,使其成活并正常生长。7 月分别人工控制土壤水分含量(SWC)为田间最大持水量(w)的 80% ~100%(T_1 处理:充分供水)、60% ~80%(T_2 处理:轻度水分胁迫)、40% ~60%(T_3 处理:中度水分胁迫)、20% ~40%(T_4 处理:重度水分胁迫),即各处理土壤水分含量:T_1 处理,17.0% ~21.3%;T_2 处理,12.8% ~17.0%;T_3 处理,8.5% ~12.8%;T_4 处理,4.3% ~8.5%。以上区间均含下不含上。每个处理 3 次重复,待长势稳定后,于 2014 年 8 月开始观测不同水分梯度下

factors, hyperaccumulation, and amendments [J]. Geoderma, 2006, 137:19 - 32.
[24]张亚丽,沈其荣,谢学俭,等. 猪粪和稻草对镉污染黄泥土生物活性的影响 [J]. 应用生态学报,2003,14(11):1997 - 2000.
[25]李雪芳,王林权,尚浩博,等. 小白菜和小青菜对镉、汞、砷的富集效应及影响因素[J]. 北方园艺,2014(01):16 - 21.
[26]杜彩艳,祖艳群,李　元. pH 和有机质对土壤中镉和锌生物有效性影响研究[J]. 云南农业大学学报,2005,20(4):539 - 543.
[27]Vangronsveld J, Colpaert J V, van Tichelen K K. Reclamation of a bare industrial area contaminated by non - ferrous metals: physico - chemical and biological evaluation of the durability of soil treatment and revegetation [J]. Environmental Pollution, 1996, 94(2):131 - 140.
[28]谢建治,李博文,刘树庆. Cd、Zn 污染对小白菜营养品质的影响 [J]. 华南农业大学学报,2005,26(1):42 - 45.
[29]吕金印,张　微,柳　玲. Cd^{2+} 处理对几种叶菜可食部分 Cd 含量及品质的影响 [J]. 核农学报,2010,24(4):856 - 862.
[30]李廷亮,谢英荷,刘子娇. Cd、Cr、Pb 对几种叶类蔬菜生长状况及品质的影响 [J]. 山西农业科学,2008,36(4):20 - 22.