

doi:10.11937/bfyy.20200727

木本园林植物对土壤重金属的富集及修复效应研究进展

刘 睿, 聂庆娟, 王 吟

(河北农业大学 园林与旅游学院, 河北 保定 071000)

摘 要:我国城市土壤重金属污染形势严峻,已经严重威胁到人类健康,因此受到普遍关注。木本园林植物是城市绿化、建设的主体,是城市生态系统中富有生命力的单元。植物能绿化、美化环境但不会进入食物链,可以对重金属污染土壤进行持续修复,已成为城市土壤污染植物修复的重要研究领域。该研究综述了近年来用于重金属污染土壤修复的木本园林植物,对其修复土壤的强化措施进行了探讨。重点阐述了木本园林植物对各种重金属的富集效应,对其耐受性和净化土壤重金属污染的应用潜力进行了分析,并对未来的发展方向进行了展望。

关键词:木本园林植物;重金属;植物修复;土壤

中图分类号:X 53 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2021)08-0117-08

随着经济现代化和城市化过程的快速推进,施工场地日益增多,越来越多的城市土壤受到严重污染,使得城市中污染场地修复需求非常迫切;另外,自“退城进园”以及“退二进三”等国家政策实施以来,城市当中出现了大量的遗弃及遗留场地^[1-3]。全国工业企业搬迁遗留的严重污染场地超过 50 万处,这些污染场地以重金属污染为主^[4-6]。根据《中国土壤污染状况调查公报》的内容来看^[7],全国土壤总的点位超标率为 16.1%,工矿企业废弃地问题突出,污染类型以无机型为主,这些无机污染物的超标点位数在全部土壤的超标点位中占 82.8%,主要污染物为 Cd、Hg、As、Cu、Pb、Cr、Zn、Ni。土壤是重金属的储存库和最后的归宿,亟待开展修复治理与风险评估。

第一作者简介:刘睿(1995-),男,硕士研究生,研究方向为风景园林规划设计。E-mail:1184367534@qq.com.

责任作者:聂庆娟(1972-),女,博士,副教授,现主要从事园林规划设计与植物栽培等研究工作。E-mail:nqj72@126.com.

基金项目:河北省人力资源和社会保障厅资助项目(C20190338)。

收稿日期:2020-03-01

植物修复技术以其原位修复、费用低廉、不破坏环境结构以及大规模治污被视为有应用前途的土壤污染修复技术^[8-10]。木本园林植物又以其发达的根干、较大的生物量、强大的抗逆性、大面积的修复区域、更长的生长周期可将重金属长时间稳定在植物体内,而不会沿食物链传递。尤其是在绿化应用方面,近年来备受研究者关注,为修复城市重金属污染土壤开辟了新的发展领域。利用木本园林植物对重金属污染的城市土壤进行修复,可以模拟自然群落,修复被污染的土壤和环境,营造良好的景观效果,满足城市园林绿化的需求,发挥显著的生态效益,达到在修复中利用,在利用中修复的双重效果,充分体现木本园林植物在生态环境修复与重建中的重要作用,满足我国环境友好型社会构建的要求。该研究重点阐述了木本园林植物对重金属的吸收与富集特性,以期为城市土壤重金属污染修复与景观设计的有机结合提供参考依据,为落实污染场地的绿色可持续修复理念提供支撑。

利用木本植物修复重金属污染土壤的研究起步相对较晚,最初的研究主要集中在杨柳科的杨属、柳属和钻天柳属的植物上。研究证明,杨属和

柳属的植物因其丰富的遗传多样性显示出作为污染土壤植物修复木本材料的潜力和优势,目前对杨属和柳属重金属污染土壤的植物修复研究也取得了重大进展^[11-13]。如今,随着研究的深入开展,人们发现了更多重金属的耐性植物。

1 木本园林植物对重金属的富集研究

1.1 木本园林植物对 Cd 的积累

在所有的重金属污染中,Cd 以移动性大、毒性高成为最受关注的元素^[14-15],大量研究表明,木本植物对 Cd 具有较强的耐性,表现出较高的吸收积累效率。

盆栽试验中在含有 $0.6 \sim 60.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd 的土壤中种植杨树和柳树无性系,发现柳树无性系积累的 Cd 含量显著高于杨树无性系 Cd 的积累量^[16]。健杨幼林、加杨以及北京杨的根系能够十分显著的吸收并积累土壤中的 Cd,3 种植物吸收土壤中所含有的 Cd 含量约为 $0.6 \sim 1.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[17]。FELIX^[18]经过严密的计算得出,如果蒿柳混种在 Cd 含量 $6.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的土壤当中, 1 hm^2 的柳树,每年可以吸收 0.222 kg Cd,经过 77 年后,所混种的柳树可使土壤中 Cd 含量降到 $0.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。梁景森等^[19]研究发现阔叶树能够较好的吸收并累积 Cd,相比于阔叶灌木,阔叶乔木吸收并累积 Cd 的效果更佳。有研究者发现桑树鲜叶富集 Cd 的能力较强,含量达到 $1.66 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[20]。有研究者证实治理土壤中的 Cd 污染,选取的最佳树种为臭椿、馒头柳、国槐、垂柳及毛白杨等;深入研究发现法国冬青叶片及刺槐根对 Cd 有非常强的富集能力,最适于作为重金属污染厂区的生态防护绿化的主要树种^[21]。杨卫东等^[22]通过水培试验也证明了垂柳对低浓度 Cd($10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)胁迫有较强的吸收和忍耐能力,具有一定的修复潜力。在温室条件下,曾鹏等^[23]发现夹竹桃、圆柏以及珊瑚树等能更好的修复 Cd 污染之后的土壤,同时美化自然景观,而金边黄杨、四季桂、金叶女贞、红花檵木、侧柏以及樟树能够用于 Cd 重污染土壤中 Cd 的稳定,与方晰等^[24]对樟树的研究观点一致。解检清^[25]通过水培试验也证明了红花檵木对 Cd 的耐性较强,同样还有冬青卫矛和栀子对 Cd 具有较

强的耐性,3 种植物 Cd 的积累均是根部大于地上部。唐敏等^[26]研究后认为对 Cd 富集力强的植物为金叶女贞。王广林等^[27]得出雪松、南天竹、杜鹃、黑松、国槐、栾树和宽叶十大功劳等绿色园林植物能够很好的富集土壤中的 Cd,可修复被 Cd 污染之后的土壤。对海桐的研究表明其对 Cd 的吸收量与土壤中 Cd 的含量呈正相关。因此认为,在修复 Cd 污染的土壤时,海桐可作为一项备选植物^[28]。刘周莉等^[29-30]在试验过程中使用土培与水培相结合的方法,探究了木本植物忍冬对 Cd 的积累特性以及生长响应特性,发现水培营养液中 Cd 处理浓度为 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,忍冬地上部中 Cd 含量接近 $300.00 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$;土培时土壤中 Cd 浓度为 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,地上部分富集 Cd 超过 $100 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,耐性系数超过 0.8,富集系数 BF(水培 BF>19;土培 BF 8 左右)远超过 1,认为忍冬具备了 Cd 超富集植物的特征,是 1 种新发现的 Cd 超富集植物。地中海荚蒾及珊瑚树在一定程度上能够富集土壤中的 Cd,2 种植物地下部分的富集能力均高于地上部,但 2 种植物的响应机制表现出差异。前者是通过茎部以及叶部具备有较强的耐受性,而后者则是通过拒吸表现出很强的适应能力^[31]。傅阳等^[32]的盆栽试验显示土壤中较高浓度的 Cd 会抑制马缨丹的生长,只有当土壤中 Cd 含量为 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,马缨丹的地上部位才能够很好的吸收并累积土壤中的 Cd。但是接种 GI 后,马缨丹却能在富含高 Cd 的土壤中顽强生长,表明马缨丹在修复 Cd 污染土壤方面具有应用潜力。周杰良等^[33]在湖南省的试验发现蔓长春花不仅具备较强的 Cd 污染耐性,同时其 BF 以及转运系数(TF)均大于 1,因此认为是 1 种新的镉超富集植物;蛇葡萄被认为具备有较强的修复潜力;而风龙和茅莓是 Cd 污染耐性较强的植物。用不同浓度 $10、20、30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cd}^{2+}$ 胁迫海滨木槿,幼苗根 Cd 含量最高达 $4780 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,能够很好的吸收并积累 Cd,表现出根部富集特征^[34]。在滇中地区对 Cd 富集能力最好的树种是云南金叶子和茶条木,飞蛾槭对 Cd 也表现出一定的富集特性^[35]。康薇等^[36]对湖北省铜绿山古铜矿遗址区木本植物对重金属富集能力进行研究,认为法国冬青、梧桐、刺槐和苦楝等木本植物可栽植在 Cd 污染区域。李彩霞等^[37]

的研究除了支持上述观点外,还发现桂花也具备此能力,同时证明了上述4种植物对Cd的BF>1而且法国梧桐对土壤中Cd的TF最高,其次为刺槐、桂花和构树。甘龙等^[38]发现三峡库区植物中华蚊母的根、茎、叶具备最大的镉BF值,而谈及Cd的TF值时,中华蚊母的茎部以及叶部最大,中华蚊母可以作为Cd污染土壤的潜能树种。

综上所述,为筛选到更为理想的Cd超富集木本园林植物,众多研究者从不同学科角度研究了其对Cd的吸收积累及在不同组织、器官中的富集规律,到目前为止,发现了高耐Cd型植物马缨丹^[32];Cd超富集型植物忍冬^[29-30]、蔓长春花^[33]和海滨木槿^[34]3种木本植物;其余均为富集型植物。中国拥有丰富的园林植物种质资源,随着深入的研究,相信会寻找到更多用于Cd污染土壤修复的园林植物。

1.2 木本园林植物对Pb的积累

在生物界当中,因为铅的负电性较高,容易同铝的氧化物、铁的氧化物、碳酸以及有机质等发生反应生成共价化合物,因此其很难被绿色植物所吸收^[39]。但是,研究过程中发现一些绿化植物具有较强的Pb富集能力。有研究者建议在Pb污染区域可考虑栽植二球悬铃木和构树^[36]。刘仁林等^[40]认为夹竹桃与大青相比,夹竹桃因其特殊的无节乳汁管等解剖构造而表现为更强的抗Pb性。此外,红叶树、苦楮也具有较强的耐Pb性。何新华等^[41]在水培条件下发现杨梅叶片干质量中铅含量即使高达1 107.9 mg·kg⁻¹仍可生长正常,认为杨梅是一种Pb超积累植物,可用于铅污染土壤的修复。李一伟^[42]深入研究证实Pb在杨梅体内分布的规律是:根>茎>叶,地上部铅含量最高值可达1 119.65 mg·kg⁻¹,与何新华等^[41]的研究结果一致。对于侧柏和油松,重金属Pb的含量和BF大小在根和叶均以侧柏最高,在茎则以油松最高^[43]。王广林等^[27]的研究显示南天竹、桂花、红花檵木、侧柏、法国冬青和杜鹃对Pb污染土壤有较强的修复能力。拐枣和樟树以其更大的重金属吸收能力可以作为广西矿区Pb污染土壤修复的优选树种^[44]。毕波等^[35]研究发现对Pb富集能力较好的树种是鳞斑莢蒾、茶条木和云南卫矛。

近年来的研究表明,许多具有较强观赏性的

木本园林植物表现出较好的抗性及能够很好的净化环境能力,同时在修复被污染之后的土壤中也具备较强的积极作用,因此发现具备更大生物量,同时具有独特地域特点的耐Pb植物有助于丰富Pb污染治理的园林植物种类。

1.3 木本园林植物对Hg的积累

Hg因其毒性强以及极易通过生物积累进入到生态系统中而备受关注^[45]。当前,对土壤中Hg的积累效应研究多集中于木本植物中的红树、杨树、旱柳、榆树、矮杨梅、冬青、黄杨等。毕波等^[35]指出红果树、云南泡花树和云南木樨榄等植物对Hg有较好的富集能力。为了解红树植物对Hg的富集能力和影响因素,丁振华等^[46]测定出红树植物的Hg总含量范围为817.5~3 197.6 ng·g⁻¹,具有明显的种间差异和器官差异,对Hg吸收能力最强的植物依次是无瓣海桑、木榄、白骨壤、桐花树、海漆、红海榄、秋茄、老鼠簕。陈菲烟^[47]研究发现Hg在矮杨梅体内分布、积累规律为叶>茎>果>根,积累汞的器官主要是叶。林治庆等^[48]运用土培与水培相结合的模拟试验,研究木本植物对Hg的耐受性,表现为加拿大杨>晚花杨>早柳>辽杨,其中加拿大杨、晚花杨、早柳对Hg的耐性基本处于同一水平并明显高于辽杨。张磊等^[49]的研究显示冬青和黄杨对Hg的累积能力较高,表现为树叶>树茎。李志博等^[50]认为榆树吸收Hg的能力最强,毛白杨、垂柳和油松对Hg的吸收能力较弱。

目前,尽管很多城市开展了土壤汞污染的研究,但关于木本园林植物的Hg污染研究相对较少。研究园林植物Hg的污染特征,找寻城市中Hg的污染来源,筛选富集型高耐Hg型木本园林植物将有助于提高和强化治理城市土壤Hg污染的功能。

1.4 木本园林植物对As的积累

近年来,由于As污染危害严重,引发的环境问题较多,已经引起了世界各国的重视,尤其As污染的植物修复方法得到了特别的关注^[51]。目前在国内已发现的As富集木本园林植物基本集中于杨柳科的杨属和柳属。邹小丽等^[52]通过模拟湿地生态环境,发现“一支笔”“苏柳172”沙柳和旱柳均对水淹土壤中的As污染具备良好的

耐受能力以及抗性,同时这4个品种的柳树的地上部以及根等部位都能够很好的吸收并积累固定量的As,尤以根系吸收积累为主,同时在柳树修复之后的土壤中检测到As的含量明显降低,4种柳树都可以用作湿地土壤As污染的修复。杨树中的“中林2025杨”能有效吸收富集As,并对As表现出一定的耐性,最适合用于土壤As污染的修复。此外丹红杨、常绿杨较适合用于修复As污染土壤^[53]。

不同植物对As的富集能力差异显著,目前发现的As超量积累植物仍以草本植物为主^[53],而木本园林植物生长迅速、生物量大,积累重金属的能力远大于草本植物,对城市重金属污染土壤的修复生态意义重大。

1.5 木本园林植物对其它重金属的积累

很多木本园林植物对重金属有一定的耐性,可以有效修复重金属污染的危害。对广西平乐锰矿土壤的生态修复研究中发现山茶科植物木荷对Mn的BF达到2.3,初步表现出对Mn的超富集能力,是一种用于Mn污染土壤的治理和锰矿区废弃地生态恢复的优良材料^[54]。金文芬等^[55]研究发现杜鹃花、桂花、栀子花均表现出对Mn的富集能力强,而且杜鹃花对Mn元素显示出超富集植物的特征。BACCIO等^[56]发现美洲黑杨可以提取重金属污染土壤中的Zn,可以在农场大范围种植。另有研究证实紫丁香及法国冬青对Zn富集力强,杨树、榆树、桑树、英桐、珍珠梅等植物对Cu富集力强^[18,26,57]。杨亚琴^[58]研究发现乔木(香樟、桂花)与灌木(女贞、黄杨)均对Cd和Ni的富集能力强,对Mn、Zn、Cu的富集能力较弱;灌木对Ni的吸收富集能力大于乔木。毕波等^[35]认为云南泡花树对Cr的富集能力较好。

1.6 木本园林植物对复合重金属的积累

城市土壤重金属污染通常以多种金属元素共存的复合污染为主,因此选择正确的园林耐性植物非常必要。盐柳根部、拐枣和樟树叶部对重金属有强富集能力,适合栽植在Cd-Zn-Pb-As复合污染的区域^[59-61]。对中欧奥地利、斯洛文尼亚、捷克的Cd-Zn金属矿厂研究后发现,黄华柳能积累大量的重金属Cd和Zn^[62],对西班牙西北部铅锌尾矿库修复时发现桦木(*Betula celtiberica*)也

能富集重金属Cd和Zn^[63];国内的研究证明宽叶十大功劳、栎树、杜英、大叶桉也具备此特性^[21,64]。Mn-Cu-Pb-Ni复合污染区的先锋植物是油松、云杉、珍珠梅和玫瑰^[65]。而法国冬青、苦楝、女贞、梧桐、桂花和刺槐等树种可以栽植在Cu-Cd-Pb复合污染区域^[35]。光皮树、鳶尾栲、楠木、杜鹃可作为修复Pb-Zn污染土壤的潜力树种^[43]。臭椿、榆树、构树、垂柳可以作为Cu-Zn-Cr单污染或复合污染的优选木本植物;花椒、杠柳可修复Cu-Cr污染土壤^[57]。对西班牙西南部矿区土壤修复时发现白花泡桐叶中Cu、Zn含量分别超过35、160 mg·kg⁻¹,适宜Cu-Zn污染土壤的治理^[66]。

2 重金属污染土壤木本植物修复技术的强化措施

木本园林植物中的超量积累植物及耐性植物在城市土壤污染修复与景观建设中发挥着重要作用。但是一旦土壤中重金属浓度超过一定范围,达到植物忍耐的阈值,植物将受到毒害而影响其修复和美化效果。因此,在实际修复应用过程中,木本植物修复常通过施用螯合剂(或活化剂)、添加改良剂、微生物强化、基因工程及其它物理修复方法或农艺措施等手段联合进行修复,保障植物的生物量和生长速度,强化植物对土壤中重金属的积累和富集,提高修复效率。目前,EDTA被证明是活化土壤中重金属Pb最有效的螯合剂^[67]。如投加EDTA螯合剂后,会显著增加杨树^[67-68]和小叶榕^[69]对重金属的吸收富集效率,提高杨树体内Pb的转移速率^[67];施加改良剂可以促进夹竹桃和白花泡桐对Mn、Pb、Zn、Cu 4种重金属累积量的增加^[70],提高夹竹桃、栎树、泡桐对Pb、Zn的转移能力和富集能力^[71]。EDTA螯合剂的加入也能显著促进柳树无性系对Cd的吸收,研究者认为试验结果如能在田间应用,柳树可以清除100多年来由化肥引起的牧场Cd的污染^[16]。WANG等^[72]研究发现美洲黑杨接种微生物菌体后,根茎叶中的浓度均相应增加,尤其是叶片中As浓度提高了290.7%,增强了砷污染土壤的修复效率。BISSONNETTE等^[73]早在2010年就发现GI可显著抑制Cu、Cd向蒿柳以及杨树地上部分进行转移,使树木表现出更高的重金属耐性;后来的研究证明马缨丹接种GI后可以显著

提高对 Cd 的耐性^[32]。随着研究的进一步深入,研究者发现利用基因技术可以显著提高木本园林植物的修复效应。RUGH 等^[74]将汞-抗性细菌表达 MERA 基因改造后转入鹅掌楸体内,促使 Hg^{2+} 转变为毒性较低的 HgO ,降解速度是未转入基因植物的 12 倍。TURCHI 等^[75]证实表达了 *PsMTA1* 基因的白杨在重金属胁迫下表现出更强的 Zn、Cu 转运和积累能力,*PsMTA1* 在清除活性氧过程中发挥一定的作用,提高了根和叶的金属耐受性,增加了锌和铜的固存。

3 小结与展望

工业化和城市化导致我国城市土壤重金属污染加重,运用林业生态工程手段并在风景园林理论和方法指导下,选择耐性及观赏性较强的木本园林植物,富集土壤中的重金属,恢复土壤的生态服务功能,营造丰富的城市景观,建立稳定的城市生态系统,是一种具有广阔应用前景的原位绿色修复技术,是修复城市重金属污染土壤的新模式,可以实现重金属污染土壤的生态修复和景观营建。同时木本植物相对于草本植物,其生物产量高,木本植物具有巨大的根、茎及叶面积,有利于污染物在植物体内的积累和长期储存。建立起将木本园林植物作为主体的生态系统,从而更好的治理以及改造土壤中的重金属污染,同时还能使园林具备良好的生态以及经济效益。

木本园林植物修复法具有绿色、廉价、美观等传统方法难以比拟的优势,是一项极有应用潜力的技术,但仍因其修复效率不高而阻碍了规模化的应用。在未来的研究中,应重点突破以下几个方面的问题。

1)超富集木本园林植物的筛选。土壤重金属污染植物修复的核心是寻找超富集植物,能够在重金属污染区域正常生长的园林植物不多,可以优先选择生活在污染区域的先锋植物,从中进一步筛选超富集植物;此外,利用育种手段或转基因技术培育超量积累植物,建立种质资源库,储备超富集植物。

2)多金属富集木本园林植物的筛选。城市土壤的污染往往表现为多种重金属的复合污染而非单一重金属的污染,对多种重金属同时具有富集能力的木本园林植物的发现值得深入研究。

3)木本园林植物修复重金属污染土壤的强化措施研究。第一,微生物协同木本植物修复技术的研发,筛选特异性微生物;第二,加强基因工程强化木本植物修复重金属的研究,通过基因工程改善植物的性状,改变重金属的吸收、运输及积累特性从而提高植物对重金属的耐受性和吸收效率。

4)目前的研究大多集中于木本园林植物对土壤重金属的富集特性方面,研究以实验室成果为主,真正应用到修复生产实践中的木本园林植物较少,缺乏城市土壤修复工程的成功案例,如何把具有富集特性的木本绿化植物协同多项强化措施应用到城市土壤的修复及景观建设中,探索城市重金属污染土壤的生态恢复和景观营建技术,是科研工作者重点考虑的问题。

参考文献

- [1] YANG H, HUANG X J, THOMPSON J R, et al. China's soil pollution: Urban brownfields[J]. Science, 2014, 344(6185): 691-692.
- [2] 谢辉,胡清,张鹤清,等.中国污染场地修复发展回顾建议与美国经验借鉴[J].环境影响评价,2015,37(1):19-23.
- [3] 张雅贤,方战强.重金属污染场地修复技术的专利计量分析[J].环境工程学报,2019,13(12):3019-3026.
- [4] 郭力方.土壤修复产业化渐入正轨[N].中国证券报,2014-10-25(A10).
- [5] 宋昕,林娜,殷鹏华.中国污染场地修复现状及产业前景分析[J].土壤,2015(1):1-7.
- [6] 王晓庆.我国污染场地土壤修复法律制度研究[D].青岛:中国石油大学,2016.
- [7] 环境保护部,国土资源部.全国土壤污染状况调查公报[J].中国环保产业,2014,19(5):10-11.
- [8] 刘丽,阿丽亚·拜都热拉.绿化树种重金属富集效能及影响因素研究进展[J].北方园艺,2019(22):148-154.
- [9] YANG S X, DENG H, LI M S. Manganese uptake and accumulation in a woody hyperaccumulator, *Schima superba* [J]. Plant Soil and Environment, 2008, 54(10): 441-446.
- [10] SHI X, ZHANG X L, CHEN G C, et al. Seedling growth and metal accumulation of selected woody species in copper and lead/zinc mine tailings [J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, 23(2): 266-274.
- [11] LARSSON S. Commercial varieties from the Swedish willow breeding program [J]. Aspects of Applied Biology, 2001, 65: 193-198.
- [12] LINDEGAARD K N, PARFITT R I, DONALDSON G, et al. Comparative trials of elite Swedish and UK biomass willow varieties [J]. Aspects of Applied Biology, 2001, 65: 183-192.

- [13] 戴前莉. 杨树和柳树不同品种对 Cd 胁迫及增施 Fe 的生理响应[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.
- [14] SIMON L. Cadmium accumulation and distribution in sunflower plant[J]. Journal of Plant Nutrition, 1998, 21(2): 341-352.
- [15] MORENO-CASELLES J, MORAL R, PEREZ-ESPINOS A, et al. Cadmium accumulation and distribution in cumuber plant[J]. Journal of Plant Nutrition, 2000, 23(2): 243-250.
- [16] BRETT H R, TESSA M M, DANIEL P, et al. Natural and induced cadmium-accumulation in poplar and willow: Implications for phytoremediation[J]. Plant and Soil, 2000, 227: 301-306.
- [17] 黄会一. 沈阳镉土地区食物生物治理的研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1986.
- [18] FELIX H. Field trials for in situ decontamination of heavy metal polluted soils using crops of metal-accumulating plants[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 1997, 160(4): 525-529.
- [19] 梁景森, 尚鹤. 北京市房山区绿化树种对 Cd(镉)的吸收作用[J]. 林业科学研究, 1998, 11(2): 142-146.
- [20] WANG K R, GONG H, WANG Y, et al. Toxic effects of cadmium on *Morus alba* L. and *Bombyx mori* L. [J]. Plant and Soil, 2004, 261: 171-180.
- [21] 杨学军, 唐东芹, 许东新, 等. 上海地区绿化树种重金属污染防治特性的研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(4): 687-690.
- [22] 杨卫东, 陈益泰. 垂柳对镉吸收、积累与耐性的特点分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2009, 33(5): 17-20.
- [23] 曾鹏, 曹霞, 郭朝晖, 等. Cd 污染土壤景观修复植物筛选研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(4): 691-698.
- [24] 方晰, 田大伦, 陈骏超, 等. 重金属元素在樟树人工林中的累积与迁移[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(1): 64-68.
- [25] 解检清. 六种园林植物及其组合吸收水体中 Cd 的效应研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2018.
- [26] 唐敏, 张欣, 王美仙. 北京 37 种园林植物对 4 种重金属的富集力及其分级评价研究[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(5): 263-268.
- [27] 王广林, 张金池, 庄家尧, 等. 31 种园林植物对重金属的富集研究[J]. 皖西学院学报, 2011, 27(5): 83-87.
- [28] 曹霞, 郭朝晖, 肖细元, 等. 海桐(*Pittosporum tobira*)对污染土壤中镉的耐受和吸收特征[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(4): 627-632.
- [29] 刘周莉, 何兴元, 陈玮, 等. 镉胁迫下金银花的生长反应及积累特性[J]. 生态学杂志, 2009, 28(8): 1579-1583.
- [30] 刘周莉, 何兴元, 陈玮. 忍冬: 一种新发现的镉超富集植物[J]. 生态环境学报, 2013, 22(4): 666-670.
- [31] 杜晓, 申晓辉. 镉胁迫对珊瑚树和地中海荚蒾生理生化指标的影响[J]. 生态学杂志, 2010, 29(5): 899-904.
- [32] 傅阳, 凡玲, 黄雪莹. 马缨丹对镉的耐性及 *Glomus intraradices* 对镉吸收转运的影响[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2017, 49(2): 122-128.
- [33] 周杰良, 葛大兵, 李树战, 等. 藤本植物中具镉超积累特征植物的筛选[J]. 林业科学研究, 2016, 29(4): 515-520.
- [34] 王小雪. 海滨木槿不同家系对重金属 Cd 胁迫的响应[D]. 重庆: 西南大学, 2012.
- [35] 毕波, 刘云彩, 陈强, 等. 10 个常绿树种对砷汞铅镉铬的富集能力研究[J]. 西部林业科学, 2012, 41(4): 79-83.
- [36] 康薇, 鲍建国, 郑进, 等. 湖北铜绿山古铜矿遗址区木本植物对重金属富集能力的分析[J]. 植物资源与环境学报, 2014, 23(1): 78-84.
- [37] 李彩霞, 朱国强, 彭坤. 绿化带土壤重金属污染特征及植物富集研究: 以长沙市为例[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(10): 101-107.
- [38] 甘龙, 罗玉红, 戴泽龙, 等. 镉污染环境中华蚊母树的镉积累与生长及叶绿素荧光动力学响应[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(7): 665-672.
- [39] 聂亚平, 王晓维, 万进荣, 等. 几种重金属(Pb、Zn、Cd、Cu)的超富集植物种类及增强植物修复措施研究进展[J]. 生态科学, 2016, 35(2): 174-182.
- [40] 刘仁林, 叶晓燕, 朱艳. 大青、夹竹桃抗铅污染以及污染区植物种类的变化[J]. 江西科学, 2006, 24(4): 175-178.
- [41] 何新华, 陈力耕, 何冰, 等. 铅对杨梅幼苗生长的影响[J]. 果树学报, 2004, 21(1): 29-32.
- [42] 李一伟. 铅在杨梅体内的分布规律及其弗兰克氏菌与铅相互作用的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2009.
- [43] 刘彦辉. 侧柏和油松对重金属铅的分布与富集的特征研究[J]. 绿色科技, 2016(11): 47, 49.
- [44] 邱媛, 何际泽, 杨汉彬, 等. 矿区常见乔木叶片重金属特征及其修复应用[J]. 生态环境学报, 2013, 22(1): 151-158.
- [45] BARGHIGIANI C, RISTORI T, BAULEO R. Pinus as an atmospheric Hg biomonitor[J]. Environment Technology, 1991(12): 1175-1181.
- [46] 丁振华, 刘金铃, 李柳强, 等. 中国主要红树植物中汞含量特征与沉积物汞形态之间的关系[J]. 环境科学, 2010, 31(9): 2234-2239.
- [47] 陈非烟. 汞在矮杨梅各器官内的分布和积累规律研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2006.
- [48] 林治庆, 黄会一. 木本植物对汞的耐性研究[J]. 生态学报, 1989, 9(4): 315-319.
- [49] 张磊, 张磊, 周震峰. 青岛市不同功能区常见绿化植物及土壤汞污染特征[J]. 生态环境, 2008, 17(2): 802-806.
- [50] 李志博, 王起超. 长春市主要木本植物汞的污染特征[J]. 中国科学院研究生院学报, 2003(4): 477-491.
- [51] 肖艳平. 砷污染土壤植物修复的强化技术研究[D]. 重庆: 西南大学, 2010.
- [52] 邹小丽, 周源. 柳树对砷的吸收和运转及对砷污染土壤修复效果研究[J]. 江西理工大学学报, 2014, 35(3): 7-12.
- [53] 吴凤霞. 砷耐型和敏感型杨树材料的筛选[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.
- [54] 杨胜香, 李明顺, 李艺, 等. 广西平乐锰矿区土壤、植物重金属污染状况与生态恢复研究[J]. 矿业安全与环保, 2006, 33(1): 21-23.
- [55] 金文芬, 方晰, 唐志娟. 3 种园林植物对土壤重金属的吸收

富集特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2009, 29(3): 21-25.

[56] BACCIO D D, TOGNETTI R, SEBASTIANI L, et al. Responses of *Populus deltoides* × *Populus nigra* (*Populus* × *euramericana*) clone I-214 to high zinc concentrations[J]. New Phytologist, 2003, 159(2): 443-452.

[57] 杨永红. 煤矸山周边重金属污染及耐性植物筛选[D]. 郑州: 河南农业大学, 2016.

[58] 杨亚琴. 不同园林绿化植物对土壤重金属的吸收富集研究[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(3): 364-368.

[59] VYSLOUZILOVA M, TLUSTOS P, SZAKOVA J. Cadmium and zinc phytoextraction potential of seven clones of *Sailx* spp. planted on heavy metal contaminated soils[J]. Plant Soil and Environment, 2003, 49(12): 542-547.

[60] VYSLOUZILOVA M, TLUSTOS P, SZAKOVA J, et al. As, Cd, Pb and Zn uptake by *Sailx* spp. clones grown in soils enriched by high loads of these elements[J]. Plant, Soils and Environment, 2003, 49(5): 191-196.

[61] 邱媛, 何际泽, 杨汉彬, 等. 矿区常见乔木叶片重金属特征及其修复应用[J]. 生态环境学报, 2013, 22(1): 151-158.

[62] UTERBRUNNER R, PUSCHENREITER M, SOMMER P, et al. Heavy metal accumulation in trees growing on contaminated sites in Central Europe[J]. Environmental Pollution, 2007, 148(1): 107-114.

[63] BECERRA-CASTRO C, MONTERROSO C, PRIETO-FENÁNDEZ A, et al. Pseudometallophytes colonizing Pb/Zn mine tailings: A description of the plant-microorganism-rhizosphere soil system and isolation of metal-tolerant bacteria[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 217: 350-359.

[64] YANG S X, LIAO B, LI J T, et al. Aycidification, heavy melt mobility and nutrient accumulation in the soil-plant system of a revegetated acid mine wasteland [J]. Chemosphere, 2010, 80(8): 852-859.

[65] 张红红. 包头市土壤重金属污染状况及园林绿化树种抗重金属污染调查研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2010.

[66] MADEJÓN P, XIONG J, CABRERA F, et al. Quality of

trace element contaminated soils amended with compost under fast growing tree *Paulownia fortunei* plantation[J]. Journal of Environmental Management, 2014, 144: 176-185.

[67] SCHMIDT U. Enhancing phytoextraction: The effect of chemical soil manipulation on mobility, plant accumulation, and leaching of heavy metals[J]. Journal of Environmental Quality, 2003, 32: 1939-1954.

[68] KOMÁREK M, TLUSTOS P, SZÁKOVÁ J, et al. The use of maize and poplar in chelant-enhanced phytoextraction of lead from contaminated agricultural soils[J]. Chemosphere, 2007, 67(4): 640-651.

[69] 鲍根莲, 邓欢欢, 李少君, 等. 生物表面活性剂和化学整合剂强化无柄小叶榕修复 Cd、Cu 重金属污染盐碱地[J]. 环境化学, 2019, 38(7): 1497-1506.

[70] 吴瑾. 锰矿渣的改良剂筛选与改良效果研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2019.

[71] 陈永华, 张富运, 吴晓芙, 等. 改良剂对4种木本植物的铅锌耐性、亚细胞分布和化学形态的影响[J]. 环境科学, 2015, 36(10): 3852-3859.

[72] WANG Q, XIONG D, ZHAO P, et al. Effect of applying an arsenic-resistant and plant growth-promoting rhizobacterium to enhance soil arsenic phytoremediation by *Populus deltoides* LH05[J]. Journal of Applied Microbiology, 2011, 111(5): 1065-1074.

[73] BISSONNETTE L S T, ARNAUD M, LABRECQUE M. Phytoextraction of heavy metals by two Salicaceae clones in symbiosis with arbuscular mycorrhizal fungi during the second year of a fiels trial [J]. Plant and Soil, 2010, 332: 55-67.

[74] RUGH C L, SENECCOFF J F, MEAGHER R B, et al. Development of transgenic yellow poplar for mercury phytoremediation[J]. Nature Biotechnology, 1998(16): 925-928.

[75] TURCHI A, TAMANTINI I, CAMUSSI A M, et al. Expression of a metallothionein A1 gene of *Pisum sativum* in white poplar enhances tolerance and accumulation of zinc and copper[J]. Plant Science, 2012, 183(1): 50-56.

Research Progress on Accumulation and Phytoremediation of Heavy Metal Contaminated Soil by Woody Garden Plants

LIU Rui, NIE Qingjuan, WANG Han

(College of Landscape and Tourism, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071000)

Abstract: The situation of heavy metal pollution in urban soil in China is severe, which has seriously threatened human health, so it has been widely concerned. Woody garden plants have become an important research field of phytoremediation because of continuous remediation of heavy metal contaminated soil. Moreover, woody garden plants are the main body of urban greening construction, the vital unit of urban ecosystem, greening and beautifying the environment, especially will enter

doi:10.11937/bfyy.20200520

桑科植物叶绿体基因组研究进展

王继玥^{1,2}, 白禹^{1,3}, 石登红^{1,2}, 刘燕^{1,2}

(1. 贵州省山地珍稀动物与经济昆虫重点实验室, 贵州 贵阳 550005; 2. 贵阳学院 生物与环境工程学院, 贵州 贵阳 550005; 3. 贵阳学院 数学与信息工程学院, 贵州 贵阳 550005)

摘要: 叶绿体基因组具有半自主性和母性遗传特征, 揭示其功能对于研究植物起源、系统进化及物种鉴定、分类具有十分重要的作用。桑科植物具有食用、药用、生态修复及作为工业原料等多种用途。其叶绿体基因组为双链环状结构, 由 4 个部分组成, 即 1 个大的单拷贝区域 (large single-copy, LSC)、1 个小的单拷贝区域 (small single-copy, SSC)、2 个反向重复区域 (inverted repeat, IRs)。基因组大小约 160 kb, 编码 110~130 个基因, 包括蛋白质编码基因、tRNA、rRNA、ncRNA 等。桑科植物叶绿体基因组上存在 SSR 和 SNP 位点, 同时还发现有密码子使用偏好性。该研究对近年来桑科植物叶绿体基因组的研究现状、应用以及发展趋势进行了综述, 为进一步理解桑科植物叶绿体的功能机制提供参考依据。

关键词: 桑科植物; 叶绿体基因组; 系统进化

中图分类号: S 389 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0009(2021)02-0124-07

桑科 (Moraceae) 植物大约 1 400 种, 多分布于热带和亚热带以及部分温带地区^[1]。根据吴征镒

等^[2]提出的“多系-多期-多域”新分类系统, 目前将桑科植物分为 12 属。其中榕属 (*Ficus*) 在中国有 98 个种, 是桑科种类最多的属, 主要分布于甘肃东南部、贵州东北部、云南南部、广西西南部、台湾南部和海南西部^[3]。桑科植物具有多种重要的应用价值, 如波罗蜜 (*Artocarpus heterophyllus*)、面包树 (*Artocarpus incisa*) 和无花果 (*Ficus carica*) 的果实具有食用和药用价值; 而印度榕 (*Ficus elastica*)、米扬噎 (*Streblus tonkinensis*) 可以产橡胶; 桑属 (*Morus*) 及构属 (*Broussonetia*) 的树皮可以用于造纸; 大麻 (*Cannabis sativa*) 的茎皮纤维是重要的纺织原料; 桑属 (*Morus*) 和拓属 (*Cudrania*) 的嫩叶可以养蚕等^[4]。

叶绿体基因 (chloroplast genome, cp genome)

第一作者简介: 王继玥 (1984-), 男, 博士, 副教授, 现主要从事植物分子育种等研究工作。E-mail: acute2803764@126.com.

基金项目: 国家级大学生创新创业训练资助项目 (2018109760007, 2018109760008); 贵州省区域内一流培育建设学科生态学资助项目 (黔教科研发 [2017] 85 号); 贵州省科技计划资助项目 (黔科合基础 [2017] 1004); 生态学省级重点学科资助项目 (黔学位合字 ZDXK [2013] 08); 贵州省大学生创新训练资助项目 (2018520777, 2018520778, 2018520831, 2018520861); 贵阳市财政支持贵阳学院学科建设与研究生教育资助项目 (SH-2020)。

收稿日期: 2020-02-15

the food chain. In this study, the wood gardening plants used for remediation of heavy metal contaminated soil were reviewed, and the strengthening measures for remediation were discussed. This study focused on the enrichment effect of woody garden plants on various heavy metals, analyzed their tolerance and application potential of purifying soil heavy metal pollution, and forecasts the future development direction.

Keywords: woody garden plants; heavy metal; phytoremediation; soil