

桑树的生态应用前景

蒋勇兵 颜新培 黄仁志 蒋诗梦 张俊 秦志雄 李章宝

(湖南省蚕桑科学研究所, 湖南长沙 410127)

摘要 我国是世界上桑树品种最多的国家。种植桑树的主要作用是为家蚕提供饲料。近年来通过对桑树在营养、耐旱、耐涝、耐寒、耐盐碱及抗重金属胁迫等方面的生物学特性研究,桑树的多种优良特性被发掘和利用,桑树资源多元化创新利用正逐渐丰富蚕桑产业的内涵。为进一步提高对桑树资源生态作用的认识,从生态防护林构建、城市绿化带修建、消落带生态恢复、石漠化与荒漠化治理、盐碱地治理和重金属污染土壤生态修复等6个方面阐述了桑树的生态应用现状,展望了桑树生态应用的前景。

关键词 桑树; 生态恢复; 重金属污染; 石漠化; 荒漠化; 富集系数

中图分类号 S888.2 **文献标识码** B **文章编号** 1007-0982(2018)03-0045-07

生态环境是人类社会生存和发展必不可少的自然基础,它不仅反映人与自然的关系,而且体现人与社会的关系。但是,近些年随着工业化、城镇化的不断发展,我国的生态环境面临着严峻考验^[1]。习近平总书记指出:“我国多年快速发展积累的生态环境问题十分突出,不仅影响经济社会的可持续发展,而且严重影响人民群众的健康,必须下大力气解决好”^[2]。湖南省的地形以山地、丘陵为主,有湘江、资水、沅水和澧水等4大水系,水土流失严重;水库总量占全国的14.29%,消落带面积巨大;2014年石漠化面积达1.50万km²,严重程度排全国第4位^[3];尤其是作为“有色金属之乡”,湖南省重金属污染农田生态治理任务艰巨^[4]。近几年,湖南省蚕桑科学研究所“桑树治理重金属污染土壤和石漠化土地”“矿区、尾矿库桑树生态修复与库区避水农业构建”“蚕桑资源开发与多元化蚕业发展”等研究领域进行了一些基础应用研究工作,在此对桑树的生态应用现状进行总结并对其应用前景进行展望,以期桑树资源的多元化创新利用提

供参考。

1 桑树种质资源及应用

桑树(*Morus alba* L.)属于桑科桑属,落叶乔木,广泛分布于我国各地。作为栽桑养蚕的起源地,中国保存的桑树种质资源就有3000多份,并育有近千个桑树栽培品种,是世界上桑树品种最多的国家^[5],同时也是世界上最早栽桑养蚕、缫丝织绸的国家^[6]。

我国先民发明栽桑养蚕,不仅创造了我国灿烂的丝绸文化,而且在促进我国的经济、社会发展以及东西方的文化交流和友好合作等方面均做出了巨大贡献^[7]。自17世纪初兴起,20世纪80年代在珠江三角洲大量发展的独特的生态农业生产方式——“桑基鱼塘”,被联合国教科文组织赞为“世间少有美景,良性循环典范”^[7]。2017年11月23日,“浙江湖州桑基鱼塘系统”通过联合国粮农组织专家评审并获得批准,入选全球重要农业文化遗产保护名录^[8]。

桑树被称为“东方神木”“木之精”。自2006年国家商务部实施“东桑西移”工程以来,中国栽桑养蚕业的重心逐步从东部地区向西部地区转移。作为生态环境十分脆弱的西部地区,应科学合理地利用桑树的生态功能优势,走生态栽培之路^[9]。桑树对空气、光照、温度、土壤、水分等自然环境因素具有广泛的适应性,从高原到盆地,从热带到寒带,气

收稿日期:2018-04-13; 接受日期:2018-07-06

资助项目:现代农业产业技术体系建设专项(编号CARS-18);湖南省国土资源厅科技项目(编号2014-06);蚕桑种质资源多元化应用研发创新团队项目(编号2017XC01)。

第一作者信息:蒋勇兵(1987—),男,湖南东安,硕士,助理研究员。
Tel: 18373189143, E-mail: jiangyongbing000@126.com

通讯作者信息:颜新培(1966—),男,湖南南县,博士,研究员。
Tel: 0731-84690878, E-mail: yanxinpei@sina.com

温-40~40℃,土壤pH值4.5~9.0,桑树都能正常生长发育^[10-11]。桑树的品种繁多,特性各异,根系发达,枝叶繁茂,具有顽强的生命力和广泛的适应性,生命周期长,容易成林,因此根据不同地区的自然特点及利用形式,选择合适的桑树品种,既可用于营造生态防护林、城市绿化带,又可用于库区消落带的生态保护与恢复、石漠化和盐碱地的治理等,同时还能用于重金属污染土壤的修复^[1,11]。

2 桑树的生态应用

2.1 生态防护林构建

桑树是深根性乔木,根系十分发达。张光灿等^[12]研究表明,在山东省栽植的4年生黄鲁桑根系的垂直深度超过80cm,地下部分的生物量占其总生物量的53.10%。还有资料显示,15年生高干桑树根系的垂直深度甚至超过4m^[9]。桑树根系分布近地面部分的水平根与最深能深入土中3~4m的垂直根构成了一个立体交叉的吸水固土网络,可以有效地固持土壤,涵养降雨,表现出良好的水土保持效果。参照经济林指标,桑园单位土地面积的贮水量为1533.40m³/hm²,是无林土地的1.49倍^[9]。同时,桑树繁茂的枝叶可以承接一部分降雨,减少降雨对土壤的直接冲刷,另外延缓雨水的落地时间,降低雨水侵蚀土壤的程度^[13]。

张光灿等^[12]研究表明,与空旷地土壤相比,桑园土壤的总孔隙度、含水量和饱和含水量分别提高8.84%、4.05%和5.44%;桑园土壤的渗透深度、渗透速度和渗透系数分别是空旷地土壤的1.65、1.91和3.07倍;并且桑园土壤中的石砾含量较少,粒径大于1mm的石砾只有52.60%,而空旷地土壤中粒径大于1mm的石砾达到87.00%。表明桑树能有效地防止地表径流,从而减少土壤细土粒的流失,改善土壤的物理结构,使降雨较多地渗入土壤内变为土壤水和地下水,显著提高土壤水源涵养量及土壤持水保水能力。因此,桑树是很好的生态防护林树种,可应用于生态防护林构建(图1)。

2.2 城市绿化带修建

尘埃、煤烟、炭粒、细菌、氮氧化物和花粉等是城市空气的主要污染源,人们长时间吸入带有污染物的空气,易引发多种呼吸道疾病。桑树的滞尘能力很强,对二氧化硫(SO₂)的吸收量大、抗性强,可



图片由湖南省蚕桑科学研究所高级农艺师龙唐忠提供
图1 位于四川省凉山州宁南县的一处桑树生态防护林

以作为城市绿化树种。有研究显示,一般每公顷成林桑树每年可滞留灰尘27.20t^[14],吸收SO₂气体450kg^[15];每天可以吸收二氧化碳(CO₂)100kg,释放氧气(O₂)73kg^[16];而且桑树还有很强的吸氟、抗氟能力,是良好的净化空气树种^[17]。种植在道路两旁的桑树不仅可以防止水土流失、保护公路路基,而且成行的桑树还可以成为城市一道亮丽的风景线(图2)^[18]。另外,桑树树冠丰满,枝叶茂密浓绿,可为城市道路提供绿荫;而且桑树比较耐修剪,栽植在道路边或公园里可以统一修剪,控制树形,达到整齐美观的效果,如九纹龙桑(图3)和垂枝桑(图4)等由于其独特的外形特征很适合用于行道景观树^[19]。但桑树属于花粉源植物,每年4月下旬花粉致敏性开始出现,5月上旬达到最强^[20]。因此在选择桑树品种作为行道用树时,应根据道路特征,合理选择桑树品种以减少花粉污染,如选择雄花少的桑树品种。



图片来源于参考文献[18]
图2 新疆维吾尔自治区克拉玛依市公路两旁的行道桑树



图3 湖南省蚕桑科学研究所所内的九纹龙桑



图片来源于参考文献[19]

图4 栽植在苗圃地里待移栽的垂枝桑

2.3 消落带生态恢复

长江三峡水利枢纽工程是我国实施跨世纪经济发展战略的一个宏大工程,也是我国最大、世界上为数不多的巨型水利枢纽之一。消落带是水生态环境系统和陆地生态环境系统交替出现的不稳定的特殊季节性湿地生态系统,三峡水库消落带植被恢复情况与库区环境卫生、库区稳定、旅游景观和社会稳定密切相关,同时库区移民和生态修复与环境整治还是水库高效安全运行的关键^[21]。

桑树曾是三峡水库建设以前广泛种植的特种经济林木之一,也是三峡库区消落带能够存活的极少数木本植物之一,已被推荐作为三峡水库生态屏障区建设的优良树种^[22-23]。调查显示,2006年大旱期间,三峡库区消落带的桑树利用其发达的根系来满足对水分的需求,生长基本良好,没有枯死现象^[21]。而且桑树对涝害也有一定的耐受性,有文献报道^[24],成林的桑树在生长期受淹20d以内都不会死亡;在三峡库区消落带,桑树在超过10m的水

深下被淹6个多月,在消落带露出地面后部分桑树依然能够较好地生长^[23],并且桑树的根茎在库区消落带强烈浪涌冲击侵蚀下保存完好,而同处于消落带内的其它乔木全部死亡^[21]。桑树可广泛用于消落带的生态恢复。

2.4 石漠化、荒漠化治理

2015年,我国约有12.00万 km^2 的石漠化土地和173.00万 km^2 的沙化土地,边治理、边破坏的现象很突出^[25]。尤其是我国西部地区,沙化和水土流失严重,是我国生态环境最脆弱的地区。有调查显示,我国每年因土地沙化造成的直接经济损失达540亿元,并有近4亿人因此受到影响^[26]。

桑树抗逆性强,在中国南北方都能生长(图5),是北方众多省区生态环境建设中的首选树种之一^[27]。并且,桑树有着超强贮水功能的根系网络,在遏制风沙、保持水土方面表现突出。有研究表明,桑树根垂直分布最深可达4m,其地下根系分布的面积常为其树冠投影面积的4~5倍,有的甚至高达7~8倍^[18, 28]。桑树的这些根系网络足以保证桑树在年降水量250~300mm的干燥气候条件下正常生长^[28]。另有调查显示,在中国北方干旱、半干旱地区1年生的桑树定植苗,其根系总长度可达100m,10年生桑树的根系总长度可达10000m,最深的主根系达8m,侧根最长超过9m^[6];沙地1年生定植苗,树冠直径为1m,其根系向四周辐射的圆面积直径超过4m,桑树的根系分布面积为其树冠投影面积的15倍之多^[6];树龄同样为30年,桑树在北纬42°、年降水量300mm的干旱沙地中的生长量是刺槐、榆树的5倍^[6]。桑树生长快,在沙荒地种植,林木覆盖率可快速提高,在自然条件下6个月可以长到120cm以上,能起到降低风速、固定流沙、改变荒漠面貌的作用,而且经济效益好^[29]。



图5 湖南省娄底市石漠化区域桑树的生长情况

2.5 盐碱地治理

土壤盐渍化是世界性的资源问题和生态环境问题。据测算,我国约有 100.00 万 km^2 的盐碱地^[30]。而桑树是改良盐碱地的合适树种,已成为我国脆弱生态区植被恢复和重建工程中重要的先锋树种之一^[31]。桑树耐干旱、耐瘠薄,在酸性、盐碱土中均能正常生长(图 6)。桑树拥有巨大的树冠,有的高度可达 12 m,能蒸发大量的水分,根系像一台抽水机,将地下的水源源不断地向树冠输送,地下水就慢慢地下降,溶解在水中的盐碱也就随着水慢慢地移到土壤的深层,这也是桑树生物排水、降低地下水位的作用^[32]。



图 6 生长在新疆维吾尔自治区克拉玛依市盐碱地上的桑树

在盐碱地种植耐盐碱的桑树,既可以减少地表水分的蒸发、防止土壤表面积盐,又可以降低地下水位和盐分,改良土壤的物理性状,增加有机质和土壤微生物,降低土壤 pH 值,从而改善周围的生态环境。如在黑龙江省肇东市的德昌、四站等地的部分盐碱地种植桑树的实践表明,桑树可以在 pH 值 8.30~9.50 范围内生长,桑树种植 3 年后,土壤体积质量显著下降,土壤砂粒和粘粒含量降低,粉粒含量升高,含水量明显增加,含盐量明显降低,pH 值减小 0.50~1.00;同时,土壤 N、P、K、有机质和腐殖质含量,土壤微生物数量和土壤酶活性均呈增大的趋势^[31]。

2.6 重金属污染土壤生态修复

2013 年,媒体披露湖南省稻米镉(Cd)超标事件后,引起社会的广泛关注^[33]。发展一种合理、经济的治理重金属污染土壤的方法成为必需^[34-35]。桑树不仅对重金属具有一定的耐受和富集能力,而且蚕桑模式消除了土壤中重金属通过食物链进入

人体造成累积毒害的危险,有可能成为治理我国农田重金属污染、实现农作物种植结构调整的一种理想树种^[1, 11, 36]。2014 年农业部与财政部联合颁发了《关于〈湖南重金属污染耕地修复及农作物种植结构调整试点 2014 年实施方案〉的意见》,在长(长沙)株(株洲)潭(湘潭)地区启动的 0.95 万 hm^2 Cd 超标农田产业调整中,就有超过一半面积已落实发展蚕桑产业^[4]。

桑树对 Cd 有较强的富集能力,其根、茎、叶、皮等器官都能富集 Cd。有研究表明,桑树从土壤中富集的 Cd 约有 50% 富集在根部,主茎和分枝中各约占 20%,叶子中占 10% 左右,在 Cd 污染区栽桑,耕作层土壤 Cd 含量年均下降 1.33 mg/kg ^[37]。当土壤中的 Cd 浓度小于或等于 40.60 mg/kg 时,桑树地上部分的生物量与对照接近或稍有增加;当土壤中的 Cd 浓度达到 145.00 mg/kg 时,桑树分枝少而纤细,临近死亡^[38]。我们通过盆栽试验发现,桑树品种育 71-1 从土壤中富集的 Cd 有 53%~70% 集中在根部,桑叶中仅占 10% 左右^[39]。在此基础上,我们在岳阳市临湘市的重金属污染区按照 3 种植密度(15 000 株/ hm^2 、30 000 株/ hm^2 和 45 000 株/ hm^2)种植 3 个品种的桑树(粤桑 11 号、农桑 14 号和强桑 1 号),并对桑树植株中 Cd 的含量与分布规律进行了分析,结果显示:不同品种的桑树从土壤中富集的 Cd 有 50%~52% 分布在桑树的根部,其次为分枝(21%~24%)、主茎(12%~16%)和桑叶(7%~13%)^[40];在设置的种植密度下,桑树地上部(茎、枝、叶)Cd 含量随着种植密度的增加而升高,高密度的种植方式能够提高桑树对 Cd 污染土壤的修复效率^[41]。不仅如此,我们还在岳阳市临湘市工矿区,分别于 2014 年的夏季^[42]和秋季^[43],利用生长在重金属污染农田中桑树的桑叶进行家蚕饲养试验,即家蚕 4 龄后按照 3 个桑树品种、3 种植密度、3 个重复分区饲养,对照区用无污染的桑叶饲养,结果表明:各处理间的虫蛹统一生命率、全茧量、茧层率、公斤茧颗数差异不显著,在工矿区 Cd、铅(Pb)超标农田栽植农桑 14 号较好,密度以 15 000~30 000 株/ hm^2 为宜。因此,在湖南省的大部分重金属污染农田,桑树都可以作为替代植物种植。栽桑养蚕不仅可以利用重金属污染农田增加农民的收入,而且蚕桑模式一定程度上消除了土壤的重金属

污染。值得注意的是蚕沙不能随意堆放或丢弃,应统一收集后送至垃圾填埋场安全填埋或交由专业处理机构处理。

桑树除了对重金属 Cd 具有较好的富集和耐受能力外,还对其它一些重金属元素具有较好的吸收

能力(表 1)。如 ZHOU 等^[44]通过盆栽试验研究了农桑 14 号对土壤中 Pb 的富集分配规律,发现桑树从土壤中富集的 Pb 大部分集中在根部,且 Pb 在桑树各部位的含量分布情况为根>茎>叶;其中桑叶中富集的 Pb 有超过 92%集中在细胞壁,减少了其对

表 1 桑树吸收富集重金属的有关文献报道

重金属	桑树品种*	培养方式	栽植状态	持续时间	考查的主要参数	试验方式	参考文献来源
Pb	农桑 14 号	土壤培养	1 年生	90 d	金属硫蛋白,转移系数(TF),Pb 在桑叶细胞壁、细胞质、细胞器中的分布规律等	盆栽试验	[44]
Cu、Pb、Zn、Cd	湖桑 1 号	土壤培养		1.5 年	重金属在桑树根、茎、叶、皮等器官中的分布规律,富集系数(BCF),转移系数(TF),修复年限	野外试验	[45]
Cd、Cu		土壤培养	枝条扦插	95 d	转移系数、富集系数等	盆栽试验	[46]
Cd	MR-2	土壤培养	枝条扦插	95 d	桑叶成分、桑树生长指标等	盆栽试验	[47]
Cd	湖桑 197 号	土壤培养	嫁接苗	7 年	Cd 在根、茎、枝、叶中的分布规律	微区试验	[48]
Cd	Husang 197	土壤培养	1 年生嫁接苗	3 年	桑叶产量,叶绿素含量,Cd 在根、茎、叶中的分布,蚕体摄入率及消化率等	微区试验	[49]
Cu	Kanva-2	溶液培养	枝条扦插	25 d	干物质产量、水势、抗氧化酶活性等	盆栽试验	[50]
Zn	Kanva-2	溶液培养	枝条扦插	40 d	干物质产量、水势、叶绿素含量、H ₂ O ₂ 酶、类胡萝卜素等	盆栽试验	[51]
Pb	桑特优 2 号	溶液培养	实生苗	30 d	Pb 在桑树体内的含量、迁移率	盆栽试验	[52]
Co		土壤培养		75 d	Co 含量、蚕体体长与体质量、家蚕死亡率等	微区试验	[53]
Cu、Cd、Pb、Zn		土壤培养			桑树中重金属含量、富集转运系数等	野外试验	[54]
Cd	农桑 14 号、强桑 1 号、粤桑 11 号	土壤培养	1 年生,粤桑 11 号为实生苗,其它为嫁接苗	240 d	桑树根、茎、枝、叶中重金属含量,富集系数(BCF),转移系数(TF)	野外试验	[41]
Pb		土壤培养		75 d	Pb 在桑叶、蚕体、蚕沙中的含量,蚕体体长、体质量及死亡率等	微区试验	[55]
Cd、Cr(III)、Ni		土壤培养	1 年生	21 d	富集系数(BCF),转移系数(TF),重金属在根、茎、叶中的含量	盆栽试验	[56]
Cr(III)		土壤培养		75 d	Cr(III)在桑叶、蚕体及蚕沙中的含量,家蚕体长、体质量及死亡率等	微区试验	[57]
Mn	Kanva-2	溶液培养	枝条扦插	75 d	桑叶的干物质产量、相对水势、叶绿素含量、H ₂ O ₂ 酶等	盆栽试验	[58]
Cd、Cr、Pb		土壤培养	4 年生	20 d	重金属在桑树根、茎、叶中的含量分布,富集系数(BCF)	野外试验	[59]
Cr(VI)		土壤培养		90 d	Cr(VI)在桑叶、家蚕、蚕沙及丝腺中的富集规律,家蚕蚕体长度及质量等	野外试验	[60]
Cd、Pb	湘 7920、农桑 14 号、湘桑 6 号、粤桑 11 号	土壤培养	1 年生,粤桑 11 号为实生苗,其它为嫁接苗	240 d	株高、叶面积、叶绿素、抗氧化酶(CAT、POD、SOD 和 MDA)	盆栽试验	[61]
Cd	农桑 14 号、强桑 1 号、粤桑 11 号	土壤培养	1 年生,粤桑 11 号为实生苗,其它为嫁接苗	2 年	桑树根、茎、枝、叶中重金属含量,富集系数(BCF),转移系数(TF)	野外试验	[40]
Cd	育 71-1	土壤培养	枝条扦插	90 d	桑树根、茎、枝、叶中重金属含量,富集规律,亚细胞分布,Cd 的化学形态	盆栽试验	[39]

*—桑树品种为空白的表示该试验研究未提到桑树品种名。

细胞器的损害。而张兴等^[45]则通过野外试验研究了湖桑1号对矿区农田土壤中Cd、Pb、铜(Cu)、锌(Zn)这4种重金属的原位去除效应,结果显示这4种重金属在桑树各部位的含量趋势为根>叶>皮>骨;在栽植密度为16 650株/hm²的条件下,每平方米耕作层土壤上桑树每年对Cd、Pb、Cu和Zn的迁移总量分别为2 056.40、7 409.83、12 116.10和254 532.80 mg,表明桑树可以较好较快地修复矿区受重金属污染的土壤,同时可获得较好的经济效益和社会效益。

3 展望

由于城镇化进程加快、农村劳动力转移及环境污染加重等多种自然因素和社会因素的影响,传统的蚕桑产业面临许多发展问题。但近些年来,随着人们对桑树资源调查研究的不断深入,桑树的多种生态功能被发掘,桑树栽培的目的也不再仅仅是单一的养蚕收茧,而是呈现出多元化创新利用的趋势,如桑树已经在我国的一些地方用于生态防护林构建、石漠化治理、盐碱地治理等。为了能充分发挥桑树的生态功能优势,相关科研院所应加强合作、资源共享、优势互补、协作创新,从众多的桑树品种资源中筛选出能适应不同外部环境胁迫(盐碱、高温、干旱、重金属等)的优良桑树品种,并对相应的耐受机理进行深度剖析,同时强化桑树生态产业系统的开发研究及配套技术体系的构建,以最大限度地利用桑树资源,走生态发展之路。另外,要将蚕桑产业的发展和生态环境保护结合起来,最大限度地利用蚕桑资源的同时减少环境污染,实现蚕桑产业的可持续发展。

参考文献

- [1] JIANG Y B, HUANG R Z, YAN X P, et al. Mulberry for environmental protection[J]. Pak J Bot, 2017, 49(2): 781-788.
- [2] 方世南. 以更高站位推进生态文明建设[N]. 新华日报, 2018-06-05(11).
- [3] 佚名. 湖南将加快石漠化综合治理步伐[J]. 林业与生态, 2014(6): 46.
- [4] 艾均文, 龚昕, 肖建中, 等. 基于可持续发展要求对湖南打造生态高效蚕业的探讨[J]. 湖南农业科学, 2015(2): 62-66.
- [5] 苏超, 焦锋. 桑树的遗传变异特点及在品种选育中的应用[J]. 蚕业科学, 2011, 37(6): 1 089-1 092.
- [6] 戴玉伟, 朱弘, 杜宏志, 等. 论桑树资源经济价值和生态功能[J]. 防护林科技, 2009(1): 78-80.
- [7] 向仲怀, 顾国达, 李建琴, 等. 中国蚕业可持续发展战略研究[C]//中国蚕学会, 国家蚕桑产业技术体系, 蚕桑体系产业经济研究室, 等. 中国蚕业经济管理学术研讨会论文集. 杭州: 浙江大学经济学院, 2012: 1-84.
- [8] 施雯. 湖州桑基鱼塘获批全球农业文化遗产[N]. 钱江晚报, 2017-11-28(A5).
- [9] 韩世玉. 桑树的生态价值及其在贵州“东桑西移”中的生态栽培[J]. 贵州农业科学, 2007, 35(5): 140-142.
- [10] 杜周和, 刘俊凤, 左艳春, 等. 桑叶的营养特性及其饲料开发利用价值[J]. 草业学报, 2011, 20(5): 192-200.
- [11] 颜新培, 龚昕, 唐汇清, 等. 镉超标土壤桑树修复研究进展[J]. 广东蚕业, 2014, 48(2): 20-24.
- [12] 张光灿, 杨吉华, 赵新明, 等. 桑树根系分布及水土保持特性的研究[J]. 蚕业科学, 1997, 23(1): 59-60.
- [13] 谈承院, 冯永德, 龙惠. 桑树在我国低碳与生态经济中重要作用的思考[J]. 四川蚕业, 2010, 38(1): 12-15.
- [14] 黄先敏, 陈顺芳, 凌英, 等. 桑蚕与天麻产业相结合的效益分析[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(8): 3 685-3 686.
- [15] 芮娜娜, 倪春霄, 鲁华云, 等. 杭州蚕桑生态循环经济模式探讨[J]. 蚕桑通报, 2010, 41(3): 49-51.
- [16] 王宏恩, 孟宝奎, 韩红发. 对桑树作为造林绿化树种的探讨[J]. 北方蚕业, 2010, 31(1): 45-47.
- [17] 鲁敏, 李英杰. 部分园林植物对大气污染物吸收净化能力的研究[J]. 山东建筑工程学院学报, 2002, 17(2): 45-49.
- [18] 秦俭, 何宁佳, 黄先智, 等. 桑树生态产业与蚕业的发展[J]. 蚕业科学, 2010, 26(6): 984-989.
- [19] 黄传书, 雷霆, 刘文波, 等. 行道景观垂枝桑繁育及养型技术要点[J]. 中国蚕业, 2014, 35(2): 61-63.
- [20] 王成. 城市花粉、飞絮飞毛等植源性污染特征及其防治[J]. 中国城市林业, 2018, 16(1): 1-6.
- [21] 贺秀斌, 谢宗强, 南宏伟, 等. 三峡库区消落带植被修复与蚕桑生态经济发展模式[J]. 科技导报, 2007, 25(23): 59-63.
- [22] 黄先智, 沈以红, 蒋贵兵, 等. 三峡库区消落带桑树种植及资源利用调查[J]. 蚕业科学, 2013, 39(6): 1 193-1 197.
- [23] LIU Y, WILLISON J H. Prospects for cultivating white mulberry (*Morus alba*) in the drawdown zone of the three gorges reservoir, China[J]. Environ Sci Pollut Res, 2013, 20(10): 7 142-7 151.
- [24] 姚芳, 倪吾钟, 杨肖娥. 桑树的种质资源、生态适应性及其应用前景[J]. 科技通报, 2004, 20(4): 289-292.
- [25] 佚名. 《全国国土规划纲要(2016—2030年)》印发[J]. 环境保护与循环经济, 2017, 37(2): 72.
- [26] 易凌. 中国荒漠化和沙化土地面积建国以来首次缩小[J]. 草业科学, 2005, 22(7): 115.
- [27] 黄先智. 我国蚕桑产业转型问题研究[D]. 重庆: 西南大学, 2013.
- [28] 韩世玉. 桑树资源概况及其多元化利用[J]. 贵州农业科学, 2006, 34(3): 118-121.
- [29] 买买提依明, 徐立, 夏庆友, 等. 新疆维吾尔自治区桑树自然分

- 布区域的地理生态环境及桑树形态特征[J].蚕业科学,2008,34(2):294-297.
- [30] 周伟,许梦婷.青岛海水稻研究发展中心:“海水稻”今年将在全国五大类型盐碱地试种[N].青岛日报,2018-04-19(3).
- [31] 高清,韩伟.黑龙江省种植桑树改良开发盐碱地的思考[J].农业开发与装备,2013(5):6.
- [32] 朱虹,祖元刚,王文杰,等.盐碱地的植被恢复与盐碱地改良方法的评述[J].吉林林业科技,2007,36(5):14-21.
- [33] 中国农业信息杂志社.让老百姓吃上放心粮——2014年国家启动重金属污染耕地修复治理[J].中国农业信息,2014(10):64.
- [34] 蒋勇兵.低浓度鼠李糖脂作用下铜绿假单胞杆菌在玻璃珠介质中的吸附和传输[D].长沙:湖南大学,2014.
- [35] ZHONG H,JIANG Y B,ZENG G M, et al.Effect of low-concentration rhamnolipid on adsorption of *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 9027 on hydrophilic and hydrophobic surfaces[J].J Hazard Mater, 2015(285):383-388.
- [36] JIANG Y B, HUANG R Z, JIANG S M, et al. Adsorption of Cd(II) by rhizosphere and non-rhizosphere soil originating from mulberry field under laboratory condition[J]. Int J Phytorem, 2018,20(4):401-406.
- [37] 王凯荣,陈朝明,龚惠群,等.镉污染农田农业生态整治与安全高效利用模式[J].中国环境科学,1998,18(2):97-101.
- [38] 陈朝明,龚惠群,王凯荣,等.桑-蚕系统中镉的吸收、累积与迁移[J].生态学报,1999,19(5):76-81.
- [39] HUANG R Z,JIANG Y B,JIA C H, et al.Subcellular distribution and chemical forms of cadmium in *Morus alba* L.[J].Int J Phytorem,2018,20(5):460-465.
- [40] 蒋诗梦,颜新培,龚昕,等.桑树品种间重金属镉的分布与富集规律研究[J].中国农学通报,2016,32(22):76-83.
- [41] 潘雨齐,黄仁志,雷鸣,等.镉在桑树体内的迁移与分布特征研究[J].农业环境科学学报,2016,35(8):1480-1487.
- [42] 颜新培,龚昕,黄仁志,等.镉铅超标农田养蚕试验分析[J].湖南农业科学,2014(22):34-36.
- [43] 蒋诗梦,颜新培,龚昕,等.镉铅超标农田秋季养蚕试验分析[J].北方蚕业,2015,36(1):15-17.
- [44] ZHOU L,ZHAO Y,WANG S, et al.Lead in the soil-mulberry (*Morus alba* L.)-silkworm (*Bombyx mori*) food chain: translocation and detoxification[J].Chemosphere, 2015(128):171-177.
- [45] 张兴,王治,揭雨成,等.桑树对矿区土壤中重金属的原位去除效应研究[J].中国农学通报,2012,28(7):59-63.
- [46] PRINCE S P, SENTHILKUMAR P, SUBBURAM V. Mulberry-silkworm food chain—A template to assess heavy metal mobility in terrestrial ecosystems [J]. Environ Monit Assess, 2001, 69 (3): 231-238.
- [47] PRINCE W S, KUMAR P S, DOBERSCHUTZ K D, et al. Cadmium toxicity in mulberry plants with special reference to the nutritional quality of leaves[J]. J Plant Nutr, 2002, 25(4):689-700.
- [48] WANG K R. Tolerance of cultivated plants to cadmium and their utilization in polluted farmland soils [J]. Eng in Life Sci, 2002, 22 (1-2):189-198.
- [49] WANG K R, GONG H, WANG Y, et al. Toxic effects of cadmium on *Morus alba* L. and *Bombyx mori* L. [J]. Plant Soil, 2004, 261 (1):171-180.
- [50] TEWARI R K, KUMAR P, SHARMA P N. Antioxidant responses to enhanced generation of superoxide anion radical and hydrogen peroxide in the copper-stressed mulberry plants [J]. Planta, 2006, 223 (6):145-153.
- [51] TEWARI R K, KUMAR P, SHARMA P N. Morphology and physiology of zinc-stressed mulberry plants [J]. J Plant Nutr Soil Sci, 2008(171):286-294.
- [52] 覃勇荣,覃艳花,严军,等.EDTA对桑树和任豆幼苗吸收重金属Pb的影响[J].南方农业学报,2011,42(2):168-172.
- [53] ASHFAQ M, ALI S, HANIF M A. Bioaccumulation of cobalt in silkworm (*Bombyx mori* L.) in relation to mulberry, soil and wastewater metal concentrations [J]. Process Bioche, 2009, 44 (10):179-184.
- [54] 张丽,彭重华,王莹雪,等.14种植物对土壤重金属的分布、富集及转运特性[J].草业科学,2014,31(5):833-838.
- [55] ASHFAQ M, KHAN M I, HANIF M A. Use of *Morus alba*—*Bombyx mori* as a useful template to assess Pb entrance in the food chain from wastewater [J]. Environ Entomol, 2009, 38(4):1276-1282.
- [56] RAFATI M, KHORASANI N, MOATTAR F, et al. Phytoremediation potential of *Populus alba* and *Morus alba* for cadmium, chromium and nickel absorption from polluted soil [J]. Int J Environ Res, 2011, 5(4):961-970.
- [57] ASHFAQ M, AHMAD S, SAGHEER M, et al. Bioaccumulation of chromium(III) in silkworm (*Bombyx mori* L.) in relation to mulberry, soil and wastewater metal concentrations [J]. J Anim Plant Sci, 2012, 22(3):627-634.
- [58] TEWARI R K, KUMAR P, SHARMA P N. Oxidative stress and antioxidant responses of mulberry (*Morus alba*) plants subjected to deficiency and excess of manganese [J]. Acta Physiol Plant, 2013, 35(12):3345-3356.
- [59] ZHAO S L, SHANG X J, LI A. Accumulation and spatial distribution of Cd, Cr, and Pb in mulberry from municipal solid waste compost following application of EDTA and (NH₄)₂SO₄ [J]. Environ Sci Pollut Res, 2013, 20(2):967-975.
- [60] SHOUKAT M A, ASHRAF S, ALI M, et al. The effect of Cr(VI) on silkworm (*Bombyx mori*) fed on in vitro accumulated mulberry leaves [J]. Asian J Agri Biol, 2014, 2(2):119-128.
- [61] 蒋诗梦,黄仁志,龚昕,等.镉、铅复合胁迫对不同桑品种幼苗生长及部分生理性状的影响[J].蚕业科学,2015,41(5):801-806.