

## 毛白杨良种繁殖技术研究进展

李春兰 (北京市大东流苗圃, 北京 102211)

**摘要** 以毛白杨为研究对象, 指出了无性繁殖生根困难、无性繁殖过程的品种退化是毛白杨良种繁殖技术中应考虑的主要问题, 论述了3种毛白杨良种繁殖技术体系(多圃配套系列育苗技术、毛白杨根孽苗幼化及扦插育苗配套技术、毛白杨离体组织培养快繁技术), 对毛白杨良种繁殖技术进行了展望, 认为将组织培养技术生产的幼化种苗与硬枝扦插技术相结合, 构建组培—硬枝扦插扩繁技术体系, 既能保证苗木质量和繁殖效率, 还能显著地削减育苗成本, 是毛白杨良种繁殖的主要途径。

**关键词** 良种繁殖; 组织培养; 扦插; 毛白杨

中图分类号 S 792.117 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)10-0022-03

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.10.006



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

## Research Progress on Propagation Technology of Improved Varieties of *Populus tomentosa*

LI Chun-lan (Beijing Dadongliu Nursery, Beijing 102211)

**Abstract** Taking *Populus tomentosa* as the object, this article points out that the difficulty of rooting in asexual propagation and the variety degradation in asexual propagation process are two main problems that should be considered in the propagation technology of improved *Populus tomentosa*, and discusses the propagation technology systems of three improved *Populus tomentosa* (multi nursery supporting series seedling technology, *Populus tomentosa* root tiller seedling juvenile and cutting seedling supporting technology, *Populus tomentosa* tissue culture and rapid propagation technology *in vitro*). The propagation technology of improved varieties of *Populus tomentosa* is prospected. It is considered that the main way of improved varieties of *Populus tomentosa* is to combine the young seedlings produced by tissue culture technology with hard branch cutting technology and construct the tissue culture hard branch cutting propagation technology system, which can not only ensure the seedling quality and propagation efficiency, but also significantly reduce the seedling cost.

**Key words** Improved variety reproduction; Tissue culture; Cutting; *Populus tomentosa*

毛白杨(*Populus tomentosa*)是我国特有的白杨派乡土树种, 具有树形挺拔美观、生长迅速、材质优良、适应性强等优点, 一直是黄泛平原区速生用材林、农田林网和城乡绿化建设的主栽树种之一<sup>[1]</sup>。自国家“八五”攻关以来, 学者们在种质资源收集与评价基础上, 通过选择育种、杂交与多倍体育种等途径, 选育了一批表现优良的毛白杨新品种<sup>[1-3]</sup>, 同时, 针对毛白杨无性繁殖困难的问题也开展了大量理论和技术研究, 形成了一系列高效的毛白杨良种繁殖技术<sup>[3]</sup>, 保证了毛白杨良种苗木的规模化生产, 为毛白杨良种的推广应用奠定了基础。

随着我国生态文明建设的不断发展, 对林木良种的需求日益旺盛, 主要树种的林木良种使用率要求也越来越高, 不断加强林木良种的繁殖技术研究意义重大。因此, 该研究对当前主要应用的毛白杨良种无性繁殖技术体系进行整理和综述, 以期引导毛白杨良种繁育技术进步, 推动种苗产业升级, 为我国生态文明建设和林业产业发展提供支撑。

### 1 毛白杨良种繁殖应重点考虑的问题

**1.1 毛白杨无性繁殖生根困难** 毛白杨扦插生根困难, 尤其随着年龄效应的积累, 不定根发生能力显著下降是影响其无性繁殖效率的最重要因素。对白杨三倍体良种“北林雄株2号”不同苗龄硬枝插穗的生根指标进行比较发现, 随着插穗年龄的增大, 不定根的发生速度递减, 1年生插穗的生根率可达96.67%, 显著高于2年生或3年生插穗(生根率76.67%), 而且主根数、主根长等指标也具有显著优势<sup>[4-5]</sup>。进一步对

毛白杨扦插生根过程进行生理生化分析发现, 扦插过程中, 插穗皮部吲哚乙酸(IAA)和赤霉素(GA)等内源激素含量以及过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)等抗氧化酶活性均随着插穗年龄的增加而降低, 而总酚、丙二醛、超氧阴离子等抑制物质的含量逐渐增加, 吲哚乙酸氧化酶(IAAO)酶活性随插穗年龄增大而增强, 导致插穗内源IAA被分解, 致使生根缓慢<sup>[6]</sup>。在分子层面, 通过对毛白杨生根调控相关基因的表达分析也发现, *PtANT1*、*PtAIL7*、*PtPLT1.1*等基因的表达量随着插穗年龄的增大而显著降低; 不定根发生初期的插穗基部转录组分析显示, 1年生插穗的基因表达模式发生较大变化, 2、3年生插穗的基因表达模式变化较小, 而随着插穗年龄的增加, 苯丙烷类物质、氧化磷酸化相关基因显著富集, 从而大大影响了不定根的发生<sup>[5-6]</sup>。显然, 毛白杨良种的无性繁殖首先要解决生根困难的问题, 尤其要避免或减小年龄效应对不定根产生的影响。

**1.2 无性繁殖过程的品种退化** 无性繁殖过程由于存在年龄效应、位置效应等影响, 往往导致无性系品种退化。几乎所有树种的无性繁殖能力都会随着个体发育的老化而下降<sup>[7]</sup>, 在北美落叶松(*Larix laricina*)、青海云杉(*Picea crassifolia*)等针叶树以及银杏(*Ginkgo biloba*)、北美悬铃木(*Platanus occidentalis*)、马占相思(*Acacia mangium*)等阔叶树种中均发现无性繁殖受年龄效应和位置效应影响, 无性系分株生根能力下降, 扦插成活后可能很快失去速生性而由营养生长转变为生殖生长, 开始生成花芽<sup>[8-13]</sup>。分别以毛白杨优树根出条和花枝为无性繁殖材料, 发现根出条扦插苗能保持良好的速生性, 而以花枝进行嫁接的苗木则次年开始陆续开花<sup>[14]</sup>。200年生成熟毛白杨比30年生毛白杨根萌条外植体组培继

基金项目 2018 北京市财政项目(PXM2020\_154303\_000007)。

作者简介 李春兰(1970—), 女, 北京人, 工程师, 从事园林苗木繁育研究工作。

收稿日期 2021-07-01

代成活率低 29%, 生长周期延长 40 d, 茎高生长量  $\geq 3$  cm 苗的数量降低 13%<sup>[15]</sup>。郭长花<sup>[16]</sup>对三倍体毛白杨不同部位繁殖材料的嫁接苗进行研究, 随着繁殖材料在母树上的高度增加, 分株的株高、地径、节间长度、叶面积、叶柄长等性状均呈减小趋势, 并且来源于基部当年生萌条和根部的繁殖材料的分株内源 IAA/ABA (脱落酸) 比值高于来源于中部或冠部繁殖材料的分株, 并认为内源 IAA 与 ABA 含量的消长变化可能是繁殖材料位置效应的直接反应。因此, 毛白杨无性繁殖过程中, 要注意消除年龄效应和位置效应的影响, 将幼化复壮措施贯穿始终。

## 2 毛白杨良种繁殖技术体系

作为我国北方地区重要的造林树种, 毛白杨的无性繁殖技术一直在被不断探索。为避免成熟效应的影响, 早期毛白杨的繁殖多采取断根促进根蘖分株繁殖的方法, 但繁殖系数低、苗木一致性差。埋条法繁殖、嫁接繁殖等方法虽然显著提高了繁殖效率, 但均存在品种老化等问题<sup>[1]</sup>。近年来, 通过不断的技术创新和集成, 综合提高繁殖效率, 保证幼化复壮, 已发展出多套较为成熟的毛白杨良种繁殖技术体系。

**2.1 多圃配套系列育苗技术** 为有效解决毛白杨繁殖系数不大、苗木质量不高的问题, 朱之梯<sup>[17]</sup>综合根萌复幼、多圃连续育苗、免耕法育苗思路, 提出了毛白杨多圃配套系列育苗技术。多圃配套系列育苗技术由 4 圃组成, 分别为采穗圃、砧木圃、根繁圃、繁殖圃。其中, 采穗圃主要提供毛白杨良种的优质无性繁殖材料, 实际生产中可通过留根苗、根芽平茬、插根建圃等方式建立采穗圃。砧木圃是培育毛白杨芽接砧木的苗圃。毛白杨嫁接繁殖的砧木应选择群众杨 (*P. popularis*)、大青杨 (*P. ussuriensis*)、大官杨 (*P. × dakuanensis*) 或北京杨 (*P. × beijingensis*), 它们与毛白杨嫁接具有很高的亲和力, 嫁接方式主要采用“炮捻”枝接、“一条鞭”芽接等。繁殖圃是正式生产商品苗苗圃, “炮捻”和“一条鞭”插条的育苗工作均在繁殖圃完成。苗木在繁殖圃内生长过程中非常关键的一步是培土换根, 以促进毛白杨自生根的生长, 形成 2 层根系, 保证苗木健壮生长, 而且造林时可去除砧木, 以具有根系的毛白杨完整苗木造林。根繁圃是由采穗圃复幼过渡转化而形成的苗圃, 也是提供生产带根小苗进行二次育苗的苗圃, 主要起到对采穗圃毛白杨良种繁殖材料进行幼化复壮的作用。

在多圃配套运营过程中, 4 圃之间应有机结合、相互转换、配套联动 (图 1)。采穗圃经营 2~3 年后必须挖根重建, 幼化复壮, 形成根繁圃, 根繁圃的萌出条通过密度优化, 一方面作转换为采穗圃使用, 另一方面也可产出少量带根小苗进行二次育苗。根繁圃如不转换为采穗圃时, 部分苗圃可直接起苗用于造林。繁殖圃起苗后通过松土露根促萌, 也可转换为根繁圃。砧木圃砧木基部可接根芽, 次年可培育成大苗。

多圃配套系列育苗技术的应用既能防止毛白杨良种无性繁殖过程的品种退化, 又能提高繁殖效率, 保证良种优良性状的继承, 出圃苗木质量高、规格一致, 育苗周期缩短一年, 当年出圃苗木地径可达 3 cm, 苗高可达 3.5~4.0 m, 苗圃

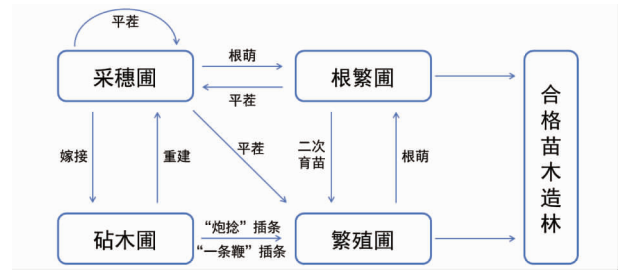


图 1 毛白杨多圃配套系列育苗技术流程

Fig.1 Technical process of supporting series seedling raising of *Populus tomentosa* in multi nursery

经营效益显著<sup>[18]</sup>, 至今仍在我国白杨良种大规模无性繁殖中广泛应用。

**2.2 毛白杨根蘖苗幼化及扦插育苗配套技术** 扦插仍然是最为便捷、易于操作的无性繁殖手段。尽管毛白杨普遍存在扦插生根困难的问题, 但是通过选用幼化材料作为插穗, 配以适宜的扦插条件, 也可在一定程度上实现种苗的扩繁。范国梁<sup>[19]</sup>对毛白杨嫩枝扦插育苗技术进行了研究, 以根萌条剪取插穗, 辅以 500 mg/L 萘乙酸 (NAA) 沾根后扦插, 在不低于 95% 的高湿度条件下进行培养, 可保证较高的生根存活率。此外, 对雄性毛白杨于 5 月下旬至 7 月下旬采集当年生半木质化嫩枝插穗, 用 200 mg/kg 的 ABT1 生根剂处理 10 s, 扦插后保持空气湿度 85% 以上, 能够获得 85.8%~95.2% 的成活率<sup>[20]</sup>。然而, 嫩枝扦插管理过程较为精细、复杂, 当年难以出圃, 不符合毛白杨适生区的育苗和造林习惯。硬枝扦插育苗更加符合当前毛白杨种苗生产简单、实用且低成本要求。

近年来, 康向阳等<sup>[21]</sup>提出了“白杨根蘖与容器硬枝扦插配套育苗方法”。该方法将白杨硬枝扦插容器育苗技术和根蘖育苗技术进行了有效集成, 实现了毛白杨硬枝扦插的高效繁殖 (图 2)。如果待繁殖的白杨品种为 1 年生苗木, 则直接采用幼态的 1 年生苗木硬枝进行容器硬枝扦插育苗, 得到容器苗; 如果待繁殖的白杨品种为成年树木, 则挖掘白杨成年树木根系, 将根系剪成插条进行容器根插育苗, 得到容器苗, 待地温和气温升高、稳定后, 将扦插生根的容器苗移栽到大田育苗。大田苗木当年落叶或次年春起苗后合格苗用于造林, 起苗后的圃地留根转化为根蘖苗圃地。根蘖苗出土后及时除草, 进行正常的圃地管理, 根蘖苗出苗后不要过早定苗, 通过推迟定苗时间等技术措施, 可有效克服白杨根蘖苗生长不整齐等问题, 从而提高合格苗的比例。根蘖育苗除提供大量合格且幼化的白杨苗木用于造林外, 其少量不能出圃造林的等外苗可作为新建根蘖育苗圃地的“原始材料”, 用于容器硬枝扦插育苗采穗, 从而形成循环配套。该育苗方法无须嫁接操作, 以容器硬枝扦插育苗取代了“毛白杨多圃配套系列育苗新技术”的砧木圃, 而根蘖育苗除了繁殖造林苗木外, 还兼有采穗圃功能, 简化了技术环节, 大幅降低大田育苗成本; 整个循环过程利用幼化的根蘖条进行扦插, 避免了年龄效应和位置效应的影响, 防止了苗木老化问题, 苗木成活率高, 品质优良。



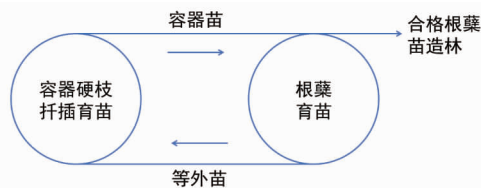


图2 白杨根蘖与容器硬枝扦插配套育苗流程

Fig.2 Supporting seedling raising process of poplar root tiller and container hardwood cutting

**2.3 毛白杨离体组织培养快繁技术** 随着我国农村经济的快速发展、农村劳动力转移以及苗圃用地成本的逐年上升,传统的育苗技术体系逐渐难以适应现代林木良种工程育苗的时代发展需求。以组织培养为核心的集约型育苗技术展现了强大的发展潜力。植物组织培养技术是以植物细胞全能性为理论,将植物的离体器官、组织或原生质体作为外植体培养在无菌条件下,置于人工培养基上,在适宜的培养条件下,经脱分化诱导产生愈伤组织,再分化形成不定芽;或不经愈伤组织,直接由外植体分化出不定芽,最后经过不定根诱导,发育形成完整植株的过程<sup>[22-23]</sup>。尽管组织培养繁殖体系的建立需要经历一定的技术研发,以明确外植体消毒、启动培养、继代培养、不定芽诱导、生根培养、移栽等一系列技术条件,但与传统繁殖方法相比,一旦建立可靠的组培繁殖体系,就可以突破外界环境限制,经脱分化和再分化过程实现返幼复壮,适用于传统繁殖难生根树种,集约化程度高,成苗率高,满足大规模、高标准苗木的生产需求,优势明显<sup>[24-25]</sup>。

对毛白杨良种“毅杨1号”“毅杨2号”和“毅杨3号”的组培繁殖体系进行研究,发现75%乙醇处理30 s、联合2%次氯酸钠处理5 min是3个良种外植体的最佳消毒方法。适用于“毅杨1号”和“毅杨2号”的茎段增殖培养基为MS+0.3 mg/L 6-BA+0.1 mg/L NAA,适用于“毅杨3号”的茎段增殖培养基则为MS+0.5 mg/L 6-BA+0.1 mg/L NAA;适用于“毅杨1号”和“毅杨3号”的叶片不定芽诱导培养基为MS+1.0 mg/L 6-BA+0.1 mg/L NAA,生根诱导培养基为MS+0.5 mg/L IBA;适用于“毅杨2号”的叶片不定芽诱导培养基为MS+0.7 mg/L 6-BA+0.1 mg/L NAA,生根诱导培养基为MS+0.3 mg/L IBA<sup>[26]</sup>,相关研究为这3个毛白杨良种的快速繁殖以及基因工程等研究奠定了基础。

为解决白杨三倍体良种“北林雄株1号”和“北林雄株2号”无性繁殖困难问题,王沛琦等<sup>[27-28]</sup>对其外植体消毒、不定芽诱导及生根培养等条件进行了筛选,发现20%的84消毒液处理半木质化嫩枝20 min的消毒效果最好,“北林雄株1号”的茎段增殖培养基为MS+0.3 mg/L 6-BA+0.05 mg/L NAA,叶片不定芽分化培养基为MS+0.2 mg/L 6-BA+0.1 mg/L NAA+0.005 mg/L TDZ,生根培养基为1/2MS+0.6 mg/L IBA;“北林雄株2号”的茎段增殖培养基为MS+0.4 mg/L 6-BA+0.05 mg/L NAA,叶片不定芽分化培养基为MS+1.0 mg/L 6-BA+0.05 mg/L NAA+1.2 mg/L ZT,生根培养基为1/2MS+0.5 mg/L IBA。组培再生体系的建立对于“北

林雄株1号”和“北林雄株2号”新品种推广应用具有重要意义。目前,已在河北威县国家杨树良种基地、山东冠县杨树国家良种基地、北京市黄垓苗圃等建立了多条“北林雄株1号”和“北林雄株2号”良种组培快繁生产线。

### 3 展望

习近平总书记在气候雄心峰会上宣布,到2030年,中国森林蓄积量将比2005年增加60亿m<sup>3</sup>,为我国林业发展提出了新的目标。显然,提高林木良种使用率、提升森林质量是实现我国林业高质量发展的重要途径。毛白杨作为我国黄泛平原区速生用材林、农田林网和城乡绿化建设的主栽树种之一,加强新品种尤其是雌株新品种选育和繁殖技术研发,对于加速品种推广与应用,促进苗木产业升级至关重要。

随着现代林木种苗事业的不断发展,对良种高品质苗木的需求越来越旺盛,但是对种苗企业而言,必须重视育苗成本、繁苗效率与企业效益的平衡。毛白杨良种繁殖应在坚持传统以采穗圃为核心的育苗体系的基础上,继续加强组织培养等良种快繁新技术研发及技术集成,以适应农村经济发展所引起的土地、劳动力、熟练嫁接工人等成本上升的现状。尽管现阶段组织培养仍然具有研发难度大、生产成本较高等不足,但是将组织培养技术生产的幼化种苗与硬枝扦插技术相结合,构建组培—硬枝扦插扩繁技术体系,在保证苗木质量和繁殖效率的同时,还可显著地削减育苗成本,在有条件的国家良种基地、育苗企业有望成为毛白杨良种繁殖的主要途径<sup>[1]</sup>。

### 参考文献

- [1] 康向阳.新一轮毛白杨遗传改良策略的思考和实践[J].北京林业大学学报,2016,38(7):1-8.
- [2] 朱之梯.全国毛白杨优树资源收集、保存和利用的研究[J].北京林业大学学报,1992,14(S3):1-25.
- [3] 朱之梯.毛白杨遗传改良[M].北京:中国林业出版社,2006.
- [4] 洪汉辉,康向阳,汪晓峰.年龄效应对白杨硬枝扦插苗生长及其茎皮部解剖结构和叶片生化指标的影响[J].西北植物学报,2018,38(2):274-281.
- [5] 田知秋.母株年龄对白杨插条不定根生根影响的转录组分析[D].北京:北京林业大学,2019.
- [6] 洪汉辉.插穗年龄对白杨生根过程生化特征及新生苗生长的影响[D].北京:北京林业大学,2018.
- [7] 朱之梯,盛莹萍.论树木的老化——幼年性、成年性、相互关系及其利用[J].北京林业大学学报,1992,14(S3):92-104.
- [8] GREENWOOD M S, HOPPER C A, HUTCHISON K W. Maturation in larch. I. Effect of age on shoot growth, foliar characteristics, and DNA methylation [J]. Plant physiology, 1989, 90(2):406-412.
- [9] 王军辉, 张建国, 张守攻, 等. 青海云杉硬枝扦插的激素、年龄和位置效应研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(7):65-71.
- [10] MONTEUUIS O. In vitro micropropagation and rooting of *Acacia mangium* microshoots from juvenile and mature origins [J]. In vitro cellular & developmental biology-plant, 2004, 40(1):102-107.
- [11] 陈晨. 北美悬铃木无性系插条部位及生根性状的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2011.
- [12] 陈颖, 曹福亮, 徐彩平, 等. 不同部位银杏茎段培养及位置效应的研究[J]. 浙江林业科技, 2010, 30(1):28-31.
- [13] 吴孝红, 任重, 汪贵斌, 等. 不同类型接穗银杏苗生长和光合特性的比较研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(9):41-48, 103.
- [14] 朱之梯, 张志毅, 赵勇刚. 毛白杨优树快速繁殖方法的研究[J]. 北京林业大学学报, 1986, 8(4):1-17.
- [15] 张劲, 刘勇, 薛敦孟, 等. 毛白杨无性繁殖材料老化与复壮研究[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(4):87-91, 171.
- [16] 郭长花. 白杨年龄与位置效应的生理生化机制研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2008.

的水稻天优 390 糙米 Cd 含量为 0.13~0.30 mg/kg,且超标率达到了 80%。因此,说明东莞偏中性的 Cd 单一轻度污染土壤存在着很高的水稻安全风险,需要进行修复后才能实现种植水稻的安全利用。

#### 4 结论

(1) 根据《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018)中农用地土壤污染风险筛选值(基本项),对于水旱轮作地,采用其中较严格的风险筛选值。该农用地属于水旱轮作地,农田土壤 pH 平均值为 6.93,采集的 100 个土壤样品中,除了 Cd 含量高于对应的农用地土壤污染风险筛选值,且超过风险筛选值达到了 100%,对农产品质量安全、农作物生长或土壤生态环境可能存在风险。

(2) 试验区水稻天优 390 安全风险评估试验研究表明,水稻糙米 Cd 含量只有田块 4(0.13 mg/kg) 低于食品安全国家标准(0.2 mg/kg);其他 4 个田块中水稻糙米 Cd 含量达 0.21~0.30 mg/kg,超过了食品安全国家标准,超标率达到了 80%。

(3) 水稻糙米 Cr 含量为 0.25~0.38 mg/kg,低于食品安全国家标准(1.0 mg/kg),但是谷壳 Cr 含量达 15.48~26.06 mg/kg,高于国家饲料卫生标准(5.0 mg/kg)。

(4) 在试验区内,水稻糙米对 Cd 的富集能力最强,富集系数平均值为 0.348,其次是 Zn 和 Cu,富集系数平均值分别为 0.179、0.165。

#### 参考文献

[1] 肖明,杨文君,张泽,等.柴达木农田土壤 Cd 的积累及风险预测[J].植物营养与肥料学报,2014,20(5):1271-1279.

[2] RACHWAŁ M, KARDEL K, MAGIERA T, et al. Application of magnetic susceptibility in assessment of heavy metal contamination of Saxonian soil (Germany) caused by industrial dust deposition[J]. Geoderma, 2017, 295: 10-21.

[3] 陈卫平,杨阳,谢天,等.中国农田土壤重金属污染防治挑战与对策[J].土壤学报,2018,55(2):261-272.

[4] 万凯,王富华,张冲,等.东莞农田土壤重金属污染调查分析[J].广东农业科学,2010,37(6):198-199,220.

[5] 吴鹏举,林贵茂,陈华文.东莞市不同产业类型城镇周边菜地土壤重金属污染研究[J].环境科学与管理,2009,34(2):161-164.

[6] AKUTSU M, DIKIC I, BREMM A. Ubiquitin chain diversity at a glance[J]. Journal of cell science, 2016, 129(5):875-880.

[7] CHANEY R L, REEVES P G, RYAN J A, et al. An improved understanding of soil Cd risk to humans and low cost methods to phytoextract Cd from contaminated soils to prevent soil Cd risks[J]. Biometals, 2004, 17(5):549

-553.

[8] LI Z W, LI L Q, PAN G X, et al. Bioavailability of Cd in a soil-rice system in China: Soil type versus genotype effects[J]. Plant and soil, 2005, 271(1/2):165-173.

[9] 龚伟群,李恋卿,潘根兴. 杂交水稻对 Cd 的吸收与籽粒积累:土壤和品种的交互影响[J]. 环境科学, 2006, 27(8):1647-1653.

[10] 刘佳凤,田娜娜,赵玉杰,等. 基于 Cubist 多元混合回归的稻米富集 Cd 模型构建研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(6):1059-1065.

[11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社, 2000.

[12] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理局. 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行):GB 15618—2018[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2018.

[13] 杨维,高雅玲,康志勇,等. 毗邻铁矿的景区土壤重金属形态及生物有效性[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(11):82-86.

[14] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理局. 食品安全国家标准食品中污染物限量:GB 2762—2017[S]. 北京:中国标准出版社, 2017.

[15] 杨子杰,宋波,王佛鹏,等. 广西西江流域土壤 Sb 含量特征分布与污染评价[J]. 环境污染与防治, 2018, 40(12):1436-1442, 1448.

[16] 于洋,宋波,陈同斌,等. 西江流域土壤镍含量特征及风险评估[J]. 环境污染与防治, 2018, 40(6):698-703, 709.

[17] ASAMI T. Pollution of soils by cadmium[M]//NRIAGU J O. Changing metal cycles and human health. Berlin, Germany:Springer Verlag, 1984:95-111.

[18] 成杭新,杨晓波,李括,等. 辽河流域土壤酸化与作物籽实镉生物效应的地球化学预警[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(6):1889-1895.

[19] ZHOU Z Q, CHEN Z Z, PAN H J, et al. Cadmium contamination in soils and crops in four mining areas, China[J]. Journal of geochemical exploration, 2018, 192:72-84.

[20] KHALIQ M A, JAMES B, CHEN Y H, et al. Uptake, translocation, and accumulation of Cd and its interaction with mineral nutrients (Fe, Zn, Ni, Ca, Mg) in upland rice[J]. Chemosphere, 2019, 215:916-924.

[21] 王亚婷,党媛,杜焰玲,等. 成都平原典型稻作土壤重金属镉有效性及主要驱动机制[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(1):225-231.

[22] 吴玉俊,周航,朱维,等. 碳酸钙和海泡石组配对水稻中 Pb 和 Cd 迁移转运的影响[J]. 环境工程学报, 2015, 9(8):4047-4054.

[23] 辜娇峰,周航,吴玉俊,等. 复合改良剂对稻田 Cd、As 活性与累积的协同调控[J]. 中国环境科学, 2016, 36(1):206-214.

[24] 普锦成,符娟林,章明奎. 土壤性质对水稻土中外源镉与铅生物有效性的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(6):2253-2258.

[25] 张良运. 稻田土壤重金属污染和稻米 Cd 安全分析及控制技术探讨[D]. 南京:南京农业大学, 2009.

[26] 张季惠,王黎虹,张建奎. 土壤中镉的形态转化、影响因素及生物有效性研究进展[J]. 广东农业科学, 2013, 40(6):169-171.

[27] KITAGISHI K, YAMANE I. Heavy metal pollution in soils of Japan[M]. Tokyo: Japan Scientific Societies Press, 1981.

[28] KABATA-PENDIAS A, PENDIAS H. Trace elements in soils and plants[M]. 3rd edition. Boca Raton, FL: CRC Press, 2000:164-166.

[29] 潘杨,赵玉杰,周其文,等. 南方稻区土壤 pH 变化对稻米吸收镉的影响[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(16):235-238.

(上接第 24 页)

[17] 朱之梯. 毛白杨多圃配套系列育苗新技术研究[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(S1):4-44.

[18] 赵勇刚,高克姝. 毛白杨多圃系列育苗新技术[J]. 山西林业科技, 1993, 22(4):5-9, 16.

[19] 范国梁. 毛白杨嫩枝扦插育苗技术[J]. 山西林业, 2013(6):34-35.

[20] 王浩,李迎春,霍占儒. 雄性毛白杨扦插繁殖技术研究[J]. 湖北农业科学, 2017, 56(21):4072-4075.

[21] 康向阳,张平冬,胡晓丽,等. 白杨根蘖与容器硬枝扦插配套育苗方法:CN201010100819.7[P]. 2011-09-28.

[22] 胡选萍. 我国植物组织培养研究进展[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(10):4095-4097.

[23] 韩磊,汪旭东,吴先军,等. 植物组织培养技术及其应用研究进展[J]. 种子, 2005, 24(1):38-43.

[24] 李柳青,庞跃刚. 毛白杨主要造林技术[J]. 现代农村科技, 2017(12):33.

[25] 黄烈健,王鸿. 林木植物组织培养及存在问题的研究进展[J]. 林业科学研究, 2016, 29(3):464-471.

[26] 宋跃朋,陈盼飞,卜琛峰,等. 高产优质毛白杨良种组培繁育体系构建[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(7):121-127.

[27] 王沛琦,张平冬,李媛,等. “北林雄株 1 号”和“北林雄株 2 号”叶片再生体系的建立[J]. 中国农学通报, 2014, 30(7):11-16.

[28] 王沛琦. 白杨杂种三倍体离体快繁与六倍体诱导[D]. 北京:北京林业大学, 2014.