

# 铬超富集植物李氏禾的研究进展

付永臻, 游少鸿\*, 杨笑宇, 杨佳节 (桂林理工大学, 广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 广西桂林 541004)

**摘要** 近年来, 水体与土壤的重金属铬污染日益严重。为了更合理利用湿生铬超富集植物李氏禾进行植物修复, 解决相关实际环境问题, 综述李氏禾对铬的超富集耐性机制、外源物质对李氏禾吸收和转运铬的影响、李氏禾对多种重金属共富集的特性、李氏禾-微生物联合修复重金属铬污染、铬污染修复李氏禾收获物的处置等方面的研究进展, 最后为其后续发展提出展望, 为研究李氏禾修复重金属铬污染与其推广应用提供帮助。

**关键词** 李氏禾; 重金属铬污染; 超富集植物; 植物修复

中图分类号 X173 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2021)02-0012-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.02.004



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

## Research Progress of Cr Hyperaccumulator *Leersia hexandra* Swartz

FU Yong-zhen, YOU Shao-hong, YANG Xiao-yu et al (Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004)

**Abstract** In recent years, water and soil heavy metal chromium pollution is increasingly serious. For rational using of hygrophyte Cr-hyperaccumulator plant *Leersia hexandra* for phytoremediation, and solving practical problems of environment, this paper reviewed the research progress on the mechanism of chromium hyperaccumulation and tolerance of *Leersia hexandra*, the effect of exogenous substances on its absorption and transfer of chromium, characteristics of the accumulation of various heavy metals, *Leersia hexandra*-microbial combined remediation, the disposal of the harvested Cr hyperaccumulator *Leersia hexandra*, and proposed the forecast, so as to provide help for the study of phytoremediation of heavy metal chromium pollution and its promotion and application.

**Key words** *Leersia hexandra* Swartz; Heavy metal chromium pollution; Hyperaccumulator; Phytoremediation

铬是一种危害性极大的环境污染物, 被认为是致畸和致癌物质<sup>[1]</sup>。铬在自然界中主要以铬铁矿形式存在, 以铬铁矿为原料生产的重铬酸钠, 用于制备电镀、冶炼、皮革加工、颜料、纺织等工业所利用的铬化合物, 过程中产生的含铬废水、废气造成水体与土壤的污染。通常, 水体中铬主要以 Cr(VI) 和 Cr(III) 存在。2015 年, 我国工业废水中 Cr(VI) 和总铬排放量分别达 23.5 和 104.4 t<sup>[2]</sup>。随着铬污染物排污、再生灌溉, 重金属铬在土壤中的浓度也随之增加。当灌溉水六价铬浓度为 0.1 mg/L 以下时, 土壤中的铬积累不明显, 大于该浓度时积累则显著上升<sup>[3]</sup>。由于生物放大作用, 铬污染水土对人类健康的威胁形势愈发严峻。

目前, 清除水中铬污染的方法有电解还原法、化学沉淀法、离子交换法等。但是, 这些方法成本较高, 不适合用于修复大面积、低浓度的铬污染水体。人工湿地是一项利用人工构建的湿地系统去除水体中污染物的生态技术<sup>[4]</sup>, 能有效去除水体中重金属<sup>[5]</sup>。而土壤修复耗时长, 过程较水污染处理复杂, 且易产生二次污染。2014 年由我国环境保护部及国土资源部发布的《全国土壤污染状况调查公报》表明全国土壤环境状况总体不容乐观, 铬污染物点位超标率为 1.1%<sup>[6]</sup>。目前土壤重金属污染的主要修复技术有工程修复、物理-化学修复、生物修复及联合修复技术。工程修复虽然可以稳定彻底修复受污土壤, 但工程量大、资金消耗高, 并导致土壤结

构变化, 肥力降低, 污染物有二次扩散的风险等弊端<sup>[7]</sup>; 土壤物理-化学修复技术虽然具有较好的修复效果, 但受到许多因素限制其使用。植物修复技术是利用植物根系的选择性吸收、转运能力, 生物体内积累存储重金属能力和植物本身的降解能力, 将土壤中重金属固定在植物根部或转变成低毒性的代谢产物<sup>[8]</sup>。由于植物修复过程是由太阳能与生物代谢驱动的, 因此植物修复比基于工程的修复方法的成本平均便宜 10 倍<sup>[9]</sup>。

超富集植物可以最大限度地 将污染物转移到植物的地上部分, 通过每次种植去除最大质量的污染物<sup>[10]</sup>, 但绝大多数超富集植物生物量小、生长缓慢, 多为莲座生长, 难以进行机械化作业, 降低了植物修复的效率<sup>[11]</sup>。李氏禾 (*Leersia hexandra* Swartz) 是 Zhang 等<sup>[12]</sup> 在中国发现的首个湿生铬超富集植物。该植物对铬有很强的耐受和吸收能力<sup>[13]</sup>。朱桂才等<sup>[14]</sup> 研究表明高密度生长和单位面积植物量大的特点提高了李氏禾修复重金属污染水土的有效性。李氏禾对水体中 Cr(VI) 有很强的净化功能<sup>[15-16]</sup>, 李氏禾在人工湿地中生长 60 d, 地上部分干物质中的铬含量就可以达到 2 000 mg/kg 以上<sup>[12, 15-17]</sup>。李氏禾在铬污染水体与土壤的植物修复方面表现出巨大的潜力。笔者论述了李氏禾在修复铬污染水土领域的主要研究进展, 以为铬污染治理的理论研究和推广应用提供参考。

## 1 李氏禾对铬富集耐性机制研究

自 Zhang 等<sup>[12]</sup> 发现湿生铬超富集植物李氏禾以来, 人们对该植物的关注着重于其去除水土中重金属铬污染的效果, 而研究李氏禾对铬富集及耐受的机制相对较少。目前关于李氏禾对铬富集耐性机制的探索主要有以下方面。

### 1.1 李氏禾细胞结构及植株结构变化以适应铬胁迫 超富

**基金项目** 国家重点研发计划(2018YFD0800704); 国家自然科学基金项目(51868010); 广西自然科学基金项目(2018GXNSFAA138202); 桂林市科学研究与技术开发计划课题(20190219-3)。

**作者简介** 付永臻(1996—), 男, 福建宁德人, 硕士研究生, 研究方向: 土壤修复。\*通信作者, 教授, 博士生导师, 从事重金属污染植物修复研究。

**收稿日期** 2020-07-07

集植物超量吸收、富集重金属与其根部细胞具有较多重金属结合位点有关,而植物的重金属耐性与重金属在植物细胞中分布的区域化有关<sup>[18]</sup>。李氏禾根部细胞壁的钝化作用和叶部液泡的区隔作用是李氏禾对铬富集解毒的重要生理机制<sup>[19]</sup>。罗亚平等<sup>[20]</sup>研究表明铬胁迫诱导李氏禾导管收缩,从而减少铬向地上部分运输,保护地上部分免受高浓度铬的伤害,保证李氏禾在高铬浓度环境中正常生长。此外,李建平等<sup>[21]</sup>从化学角度研究铬离子在李氏禾中可能存在的物理化学反应,试验表明李氏禾的非活性细胞对 Cr(VI) 吸附主要由静电吸附和配位吸附 2 种作用共同组成,并通过红外光谱表征发现李氏禾叶部细胞干粉表面存在能够直接原位还原 Cr(VI) 的官能团。

**1.2 李氏禾体内草酸等有机酸络合作用缓解铬毒害** 前人研究表明,植物体受逆境胁迫时,植物体会产生草酸等有机酸来提高植株的抗逆性<sup>[22-23]</sup>。Zhang 等<sup>[24]</sup>通过对李氏禾的水培试验,结果表明李氏禾根系可以积累大量 Cr,限制其向茎叶的转运,提出了铬与草酸结合可能是李氏禾对铬耐受和积累的重要机制。王文萍等<sup>[25]</sup>研究表明增加  $\text{Ca}^{2+}$  浓度能显著缓解一定浓度的  $\text{Cr}^{3+}$  对植物组织的毒害,促进李氏禾体内不溶性草酸合成,增强植株的铬富集能力与耐受性。伍清新等<sup>[26]</sup>研究发现在湿地系统中,李氏禾的存在增加了有机质含量,提出李氏禾叶片中的 Cr(III) 以有机酸络合物的形式螯合成毒性较低的稳定物质储存于细胞非功能区,从而减少游离的 Cr(III) 对植株叶片部分的毒害。

**1.3 通过根部细胞离子通道吸收铬** 自然环境中 Cr(III) 和 Cr(VI) 2 种形态的 Cr 离子在生物和毒性行为上存在显著差别,二者的吸收机制也有所不同。李氏禾根对 Cr(III) 的吸收是需要消耗能量的主动过程,并且与三价铁吸收体系有关<sup>[27]</sup>。卢媛媛等<sup>[28]</sup>研究表明李氏禾根中可能存在对 Cr(VI) 主动吸收的机制,李氏禾根部对 Cr(VI) 的吸收可能与硫酸根吸收体系有关。有研究表明,六价铬在水中呈  $\text{Cr}_2\text{O}_6^{2-}$  阴离子状态,且能够借助于具有类似四面体阴离子结构的细胞膜通道进入细胞内<sup>[29]</sup>。胡澄<sup>[19]</sup>研究发现李氏禾吸收铬可能通过其根部细胞的钙离子通道进行。

## 2 外源物质对李氏禾吸收、转运铬的影响

在实际应用超富集植物修复重金属污染水土时,单凭自身特性较难达到理论预期的修复效果,因而作为辅助的外源物质添加就受到了广泛的关注。添加外源物质可辅助超富集植物对土壤中重金属的富集,提高植物修复的效率<sup>[30-33]</sup>。

闫研等<sup>[34]</sup>通过水培试验研究了 EDTA、CTAB、SA 3 种外源物质对李氏禾富集 Cr 及生理特性的不同影响,结果表明,EDTA 促进植株体内总铬含量增加,提高李氏禾对  $\text{Cr}^{6+}$  的吸收能力并促进  $\text{Cr}^{6+}$  向地上部分转移;CTAB 促进李氏禾根部对铬的吸收和富集,但使得叶绿素含量急剧下降,酶活性比值增大;SA 对李氏禾吸收与转运铬的影响不明显。王文萍等<sup>[35]</sup>研究表明外源物质乙醛酸可缓解铬对李氏禾幼苗的生长抑制,能够有效缓解铬对李氏禾组织的毒害,促进叶部草酸合成并提高李氏禾叶部铬富集能力。程志刚等<sup>[36]</sup>研究了

不同浓度水平亚硫酸钠与腐殖酸对李氏禾生长和铬积累量的影响,结果表明亚硫酸钠可促进铬在植株体内的转运能力,提高李氏禾各部分的铬含量与积累量。游少鸿等<sup>[37]</sup>研究表明外源草酸加入可改变 CAT 的活性,降低可溶性糖的质量浓度,增强李氏禾对重金属铬的解毒能力。有研究表明,腐殖酸在 Cr 污染土壤下促进了李氏禾生长,根、茎、叶的干质量以及叶绿素含量随着腐殖酸浓度的增大而升高<sup>[38]</sup>。张学洪等<sup>[39]</sup>分析不同形式氮肥对李氏禾生长及富集 Cr 的影响,结果发现施加氮肥能提高李氏禾吸附 Cr 的能力,其增加的效果程度为  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 > \text{NH}_4\text{NO}_3 > \text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 。伍婵翠等<sup>[40]</sup>研究发现  $\text{NO}_3^-$  与  $\text{SO}_4^{2-}$  都对李氏禾吸附 Cr(VI) 存在竞争性抑制作用,而加入  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  有利于李氏禾富集 Cr(VI)<sup>[41]</sup>。

## 3 李氏禾对多种重金属共富集的特性

李氏禾是一种多金属富集植物,它对 Ni、Cu 也具有相应的耐性与富集能力<sup>[42-43]</sup>。研究李氏禾对 Cr 与其他重金属的共富集作用,可提高李氏禾吸附 Cr 的能力。

**3.1 李氏禾对 Ni 的富集** 张学洪等<sup>[43]</sup>经野外调查及温室水培研究李氏禾对 Ni 的富集能力,结果发现在野外生长条件下李氏禾能将淤泥和水体中的 Ni 富集,其中叶部平均 Ni 含量为 1 001.0 mg/kg;在温室水培试验中,培养液中 Ni 含量  $\geq 20$  mg/L 时,李氏禾茎、叶中的 Ni 含量均高于 1 000 mg/kg,调查与试验的结果均显示李氏禾对 Ni 具有很强的富集能力。

**3.2 李氏禾对 Cu 的富集** 李氏禾虽不是典型的 Cu 超富集植物,但却对高浓度的 Cu 污染水体有较好的富集效果。张学洪等<sup>[42]</sup>研究了李氏禾对 Cu 的富集特征,试验结果显示在电镀废水污染中李氏禾叶片中 Cu 含量为 1 717.85 mg/kg;在水培试验中,当培养液中 Cu 含量为 40 mg/L 时,李氏禾叶片中 Cu 含量达 2 357.26 mg/kg,说明李氏禾具有较强的吸附 Cu 的能力。此外,土壤培养条件下,李氏禾各部分含铜量都很高,但均未达到 Reeves 等<sup>[44]</sup>提出的  $S/R > 1$  的超富集定义标准。田静等<sup>[45]</sup>研究了李氏禾根系对 Cu 的吸收机理,结果表明李氏禾吸收 Cu 与钙离子通道相关,并存在主动吸收机制。梁亮等<sup>[46]</sup>测定了李氏禾各部位的 Cu 含量以及化学形态,发现李氏禾富集 Cu 主要积累于根部,最高滞留率达 93.5%。满向甜等<sup>[47]</sup>研究指出重金属 Cu 对李氏禾的生长产生明显的抑制作用,在低浓度 Cu ( $\leq 0.3$  mmol/L) 胁迫下,抗氧化酶系统能缓解 Cu 对李氏禾的氧化性伤害、膜脂过氧化;李氏禾叶片金属硫蛋白(MT)随 Cu 浓度的增加产生了先升后降的趋势,MT 被用以螯合  $\text{Cu}^{2+}$ ,降低 Cu 对李氏禾的毒害,李氏禾表现出一定程度的重金属 Cu 耐受性。

**3.3 李氏禾对 Cr、Cu、Ni 的共富集** 陈俊等<sup>[48]</sup>研究了李氏禾对水中 Cr、Cu、Ni 的去除效果,结果显示该试验期间李氏禾对水中 Cr 的去除率接近 100%,对水中 Cu、Ni 的最高去除率分别达 93.8% 和 89.3%,说明李氏禾能大量富集水体中的 Cr、Cu、Ni。陶笈汛等<sup>[49]</sup>研究表明李氏禾对 Cr 的富集能力强于 Cu 和 Ni。游少鸿等<sup>[50]</sup>研究表明李氏禾对 3 种金属的去除率大小顺序为  $\text{Cu} > \text{Cr} > \text{Ni}$ ,富集系数大小顺序为  $\text{Ni} > \text{Cr} > \text{Cu}$ ,转运系数大小顺序为  $\text{Cu} \approx \text{Ni} > \text{Cr}$ ,对电镀废水有较好的

处理效果。

朱昱豪等<sup>[51]</sup>研究了不同浓度腐殖酸对李氏禾吸收 Cu、Ni 的影响,结果表明低浓度腐殖酸可促进李氏禾对 Cu、Ni 的吸收,而高浓度腐殖酸处理则反之,而且在共富集 Cu 与 Ni 情况下,李氏禾主要吸收 Cu。其中关于腐殖酸浓度增大而抑制了李氏禾吸收 Cu、Ni 的能力,其原因可能是腐殖酸本身对 Cu 极高的吸附作用,导致植株本体吸收 Cu 减少,且腐殖酸对这 2 种离子存在竞争性吸附,吸附大小顺序为 Cu>Ni<sup>[52-54]</sup>。低浓度腐殖酸处理时,腐殖酸促进李氏禾生长、生物量增加,由于腐殖酸对 Cu、Ni 的竞争性吸附主要吸附 Cu;随着腐殖酸浓度升高,腐殖酸对 Ni 的吸附作用也增强,致使抑制李氏禾吸附 Ni 的现象产生。

#### 4 李氏禾-微生物联合修复重金属铬污染

近年来,李氏禾-微生物联合修复重金属铬污染成为新的研究方向。研究表明,一些植物的内生细菌、根际细菌具有对重金属的高耐性,提升植物对重金属的吸附及向地上部分转移的能力<sup>[55]</sup>。张森<sup>[56]</sup>研究了内生菌、根际菌对李氏禾修复铬污染土壤的促进作用,联合盆栽试验发现,接入单一的菌种和混菌均可增强李氏禾的铬富集能力;接种混菌的李氏禾的吸附能力比仅接种单菌的李氏禾更强。韩文等<sup>[57]</sup>从李氏禾中分离出的内生细菌 *E.cloacae* G04 菌株在最佳反应条件下对 Cr(VI) 的去除率为 84%,主要是将 Cr(VI) 进行还原达到去除效果。林华等<sup>[58]</sup>研究表明李氏禾根系分泌物与蜡状芽孢杆菌联合作用对水体中 Cr<sup>6+</sup> 的还原率高达 99%,且李氏禾在受到 Cr<sup>6+</sup> 胁迫后,酰胺类物质的含量变化可能是植物为适应重金属铬环境变化的一种解毒机制。

#### 5 铬污染修复李氏禾收获物的处置

由于铬是不可降解的金属元素,收获李氏禾就成为铬从系统中移除的重要途径。这些高含铬李氏禾收获物如果处置不当,可能重新释放到环境中,形成“二次污染”。

**5.1 酸浸提法** 文先彬<sup>[59]</sup>以硝酸、盐酸、硫酸分别浸提李氏禾中的重金属铬,结果表明 3 种酸浸提率大小顺序为 HNO<sub>3</sub>>HCl>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>,在最佳浸提条件下(硝酸浓度 5 mol/L、温度 90℃、时间 1 h、固液比 1:50)硝酸的浸提率达 94.7%,加入 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 并将浸提渣 2 次连续水洗后,浸提率进一步上升至 98.9%。

**5.2 热处理法** Koppolu 等<sup>[60-61]</sup>对超积累植物的热解试验发现,氮气浓度在 19%~21% 条件下,大约 99% 的重金属被吸附在生物炭中;Keller 等<sup>[62]</sup>对超积累植物 *Salix viminalis* 进行了热解与焚烧试验,发现 Cd 和 Zn 在热解处理后的回收率高于焚烧处理。Boominathan 等<sup>[63]</sup>将镍超富集植物 *Berkheya coddii* 干燥后进行焚烧以回收 Ni。文先彬等<sup>[64]</sup>进一步研究以减量化与底灰铬回收率 2 个指标衡量焚烧法和热解法处置积累 Cr 李氏禾的效果,结果表明,在减量化方面焚烧法优于热解法;在底灰铬回收率方面,二者相近,但在添加沸石条件下,利用焚烧法处理的植物底灰铬回收率为 93.3%,高于热解法的 91.9%。

#### 6 展望

铬超富集植物李氏禾因其耐淹、耐旱以及其富集多元重

金属的特性愈发受到重金属治理及环境修复工程应用方面的重视。基于目前李氏禾修复重金属铬污染水土的现状,今后可加强在以下几个方面深入研究:

(1) 添加外源螯合剂、表面活性剂、多胺对植物体内重金属的累积和分布有一定的调控作用,在重金属污染的植物修复应用中,添加相应的外源物质可以提高植物修复效率,对外源物质的筛选不能只看处理目标污染物为单一指标,应考虑其可能存在的二次污染风险。可进一步筛选或开发能加强李氏禾耐受、富集能力的新型外源物质。

(2) 热处理技术虽然能有效减少李氏禾收获物的体积和质量,但加热过程中同时伴随铬的释放、迁移和转化,而热处理产物中铬的分布和形态是决定收获物资源化和无害化处置的关键因素。不同气氛、反应温度、停留时间、升温速率和添加剂等因素,将直接影响铬的分布及形态<sup>[65-69]</sup>。优化现有处置回收技术的工艺,通过调控不同处理条件,提高铬回收率及减小残渣量。研发经济而有效的新型产后处置和重金属回收技术,实现超富集植物收获物的资源化,重金属和能量的资源回收再利用。

(3) 李氏禾-微生物联合修复的体系目前研究多为处理 Cr(VI),机理为耐受的内生菌或接种菌对 Cr(VI) 的还原作用,对李氏禾体内总铬的去除效果尚未明晰。李氏禾根际土壤和植物本体中筛选出的高耐铬微生物的种类及它们对李氏禾富集能力的增益还可以深入研究。

(4) 关于李氏禾的实际工程应用案例较少,以铬超富集植物李氏禾构建人工湿地系统以净化生活污水、电镀废水、Cr(VI) 污染水体具有一定的应用价值<sup>[26,50,70-71]</sup>。将人工湿地基质变换或将李氏禾与其他人工湿地植物混合种植,以提高人工湿地系统修复效率,增加李氏禾在实际工程中的应用。

#### 参考文献

- [1] BROADWAY A, CAVE M R, WRAGG J, et al. Determination of the bioaccessibility of chromium in Glasgow soil and the implications for human health risk assessment[J]. *The science of the total environment*, 2010, 409(2): 267-277.
- [2] 中国环境保护部. 2015 年环境统计年报[EB/OL]. [2020-03-21]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/sthjtnb/201702/P020170223595802837498.pdf>.
- [3] 中国农业部环科所. 农业环境保护研究资料[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001.
- [4] REZANIA S, PONRAJ M, TALAIEKHOZANI A, et al. Perspectives of phytoremediation using water hyacinth for removal of heavy metals, organic and inorganic pollutants in wastewater[J]. *Journal of environmental management*, 2015, 163: 125-133.
- [5] BABATUNDE A O, ZHAO Y Q, O'NEILL M, et al. Constructed wetlands for environmental pollution control: A review of developments, research and practice in Ireland[J]. *Environment international*, 2008, 34(1): 116-126.
- [6] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报(2014 年 4 月 17 日)[J]. *环境教育*, 2014(6): 8-10.
- [7] 池道杰. 我国污染土壤修复技术及产业现状研究[J]. *中国资源综合利用*, 2018, 36(5): 126-128.
- [8] HINCHMAN R R, NEGRI M C, GATLIFF E G. Phytoremediation: Using green plants to clean up contaminated soil, groundwater, and wastewater[C]. // *Proceedings of the international topical meeting on nuclear and hazardous waste management*. Seattle, WA, USA: American Nuclear Society, 1996.
- [9] MARQUES A P G C, RANGEL A O S S, CASTRO P M L. Remediation of heavy metal contaminated soils: Phytoremediation as a potentially promis-

- ing clean-up technology[J]. Critical reviews in environmental science and technology, 2009, 39(8): 622-654.
- [10] EBBS S D, KOCHIAN L V. Phytoextraction of zinc by oat (*Avena sativa*), barley (*Hordeum vulgare*), and Indian mustard (*Brassica juncea*) [J]. Environmental science & technology, 1998, 32(6): 802-806.
- [11] 赵金艳, 李莹, 李珊珊, 等. 我国污染土壤修复技术及产业现状 [J]. 中国环保产业, 2013(3): 53-57.
- [12] ZHANG X H, LIU J, HUANG H T, et al. Chromium accumulation by the hyperaccumulator plant *Leersia hexandra* Swartz [J]. Chemosphere, 2007, 67(6): 1138-1143.
- [13] LIU J, DUAN C Q, ZHANG X H, et al. Potential of *Leersia hexandra* Swartz for phytoextraction of Cr from soil [J]. Journal of hazardous materials, 2011, 188(1): 85-91.
- [14] 朱桂才, 张响银, 杨中艺. 耐铬性植物李氏禾繁殖特性的研究 [J]. 山东农业科学, 2009, 41(9): 26-29.
- [15] LIU J, ZHANG X H, YOU S H, et al. Function of *Leersia hexandra* Swartz in constructed wetlands for Cr(VI) decontamination: A comparative study of planted and unplanted mesocosms [J]. Ecological engineering, 2015, 81: 70-75.
- [16] YOU S H, ZHANG X H, LIU J, et al. Feasibility of constructed wetland planted with *Leersia hexandra* Swartz for removing Cr, Cu and Ni from electroplating wastewater [J]. Environmental technology, 2014, 35(2): 187-194.
- [17] 张学洪, 刘杰, 朱义年. 一种铬污染水体的生物修复方法: CN 200810073629.3 [P]. 2008-10-29.
- [18] 中国科学院植物研究所. 中国高等植物图鉴: 第 5 册 [M]. 北京: 科学出版社, 1976.
- [19] 胡澄. 李氏禾对铬的富集解毒机制研究 [D]. 桂林: 桂林工学院, 2008.
- [20] 罗亚平, 刘杰, 张学洪, 等. 铬胁迫下李氏禾显微结构的变化 [J]. 安徽农业科学, 2009, 37(19): 8931-8934.
- [21] 李建平, 林庆宇, 闫研. 超积累植物李氏禾叶细胞干粉对 Cr(VI) 的吸附特性研究 [J]. 化学学报, 2008, 66(23): 2646-2652.
- [22] MA J F, ZHENG S J, MATSUMOTO H, et al. Detoxifying aluminium with buckwheat [J]. Nature, 1997, 390(6660): 569-570.
- [23] 刘拥海, 俞乐, 陈秀云, 等. 外源草酸对水稻幼苗铝毒害的缓解作用 [J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2008, 34(3): 281-283, 340.
- [24] ZHANG X H, LIU J, WANG D Q, et al. Bioaccumulation and chemical form of chromium in *Leersia hexandra* Swartz [J]. Bulletin of environmental contamination and toxicology, 2009, 82(3): 358-362.
- [25] 王文萍, 张慧, 刘杰, 等. 钙对李氏禾富集和耐受铬的调控作用 [J]. 环境工程学报, 2013, 7(12): 5012-5018.
- [26] 伍清新, 刘杰, 游少鸿, 等. 李氏禾湿地系统净化 Cr(VI) 污染水体的机理研究 [J]. 环境科学学报, 2014, 34(9): 2306-2312.
- [27] LIU J, DUAN C Q, ZHANG X H, et al. Characteristics of chromium (III) uptake in hyperaccumulator *Leersia hexandra* Swartz [J]. Environmental and experimental botany, 2011, 74: 122-126.
- [28] 卢媛媛, 张学洪, 刘杰, 等. 超富集植物李氏禾根系对 Cr(VI) 吸收机制的研究 [J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(11): 2140-2144.
- [29] JENNETTE K W. Chromate metabolism in liver microsomes [J]. Biological trace element research, 1979, 1(1): 55-62.
- [30] DUO L A, LIAN F, ZHAO S L. Enhanced uptake of heavy metals in municipal solid waste compost by turfgrass following the application of EDTA [J]. Environmental monitoring and assessment, 2010, 165(1/2/3/4): 377-387.
- [31] 陈玉成, 熊双莲, 熊治廷. 基于表面活性剂的重金属去除技术 [J]. 环境科学与技术, 2004, 27(S1): 162-165.
- [32] 孙和和, 刘鹏, 蔡妙珍, 等. 外源有机酸对美人蕉耐性和 Cr 吸收、迁移的影响 [J]. 水土保持学报, 2008, 22(2): 75-78, 154.
- [33] 刘杰, 孙家君, 王敦球, 等. 有机酸对铬超富集植物李氏禾吸收 Cu 的影响 [J]. 生态环境, 2008, 17(2): 641-645.
- [34] 闫研, 李建平, 林庆宇. 外源物质对李氏禾超富集铬的作用 [J]. 环境科学与技术, 2009, 32(7): 22-27.
- [35] 王文萍, 张慧, 刘杰, 等. 乙醛酸对李氏禾铬耐受和富集作用的影响试验 [J]. 安全与环境工程, 2014, 21(1): 12-16.
- [36] 程志刚, 张学洪, 张杏锋, 等. 亚硫酸钠和腐植酸对李氏禾生长和铬积累的影响 [J]. 环境工程学报, 2015, 9(12): 5788-5794.
- [37] 游少鸿, 赵永臣, 张庆军, 等. 草酸对 Cr 胁迫下李氏禾解毒性能的影响 [J]. 工业安全与环保, 2015, 41(2): 29-31.
- [38] 王建生, 张杏锋, 张学洪, 等. 土壤铬污染和腐植酸对李氏禾生长和光合生理的影响 [J]. 江苏农业科学, 2019, 47(5): 263-267.
- [39] 张学洪, 蔡湘文, 李恺, 等. 氮肥形态对李氏禾富集铬的影响及其生化学分析 [J]. 桂林理工大学学报, 2011, 31(3): 399-403.
- [40] 伍婵翠, 刘杰, 梁英, 等. 氮、磷、硫对铬超富集植物李氏禾吸收 Cr(VI) 的影响 [J]. 江苏农业科学, 2019, 47(14): 316-320.
- [41] 赵晶, 冯文强, 秦鱼生, 等. 不同氮磷钾肥对土壤 pH 和镉有效性的影响 [J]. 土壤学报, 2010, 47(5): 953-961.
- [42] 张学洪, 陈俊, 李海翔, 等. 铬超富集植物李氏禾对铜的富集特征研究 [J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2): 521-524.
- [43] 张学洪, 陈俊, 王敦球, 等. 李氏禾对镍的富集特征 [J]. 桂林工学院学报, 2008, 28(1): 98-101.
- [44] REEVES R D, BAKER A J M. Metal-accumulating plants [M] // RASKIN I, ENSLEY B D. Phytoremediation of toxic metals: Using plants to clean up the environment. New York: Wiley, 2000.
- [45] 田静, 张学洪, 陈俊, 等. 多金属富集植物李氏禾根系对铜吸收机理的研究 [J]. 生态环境学报, 2014, 23(7): 1217-1221.
- [46] 梁亮, 林华, 田静, 等. 多金属富集植物李氏禾体内铜的化学形态研究 [J]. 工业安全与环保, 2016, 42(3): 4-6, 46.
- [47] 满向甜, 林华, 林志毅, 等. 李氏禾耐铜胁迫的积累特征及生理响应 [J]. 环境工程, 2019, 37(9): 97-102.
- [48] 陈俊, 王敦球, 张学洪, 等. 李氏禾修复重金属 (Cr Cu Ni) 污染水体的潜力研究 [J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1514-1518.
- [49] 陶发汛, 张学洪, 罗昊, 等. 李氏禾对电镀污泥污染土壤中铬铜镍的吸收和积累 [J]. 桂林理工大学学报, 2010, 30(1): 144-147.
- [50] 游少鸿, 张学洪, 刘杰, 等. 李氏禾人工湿地对电镀废水的净化研究 [J]. 工业水处理, 2014, 34(7): 23-26.
- [51] 朱昱豪, 张学洪, 张杏锋. 腐植酸对李氏禾累积铜和镍的影响 [J]. 环境工程, 2017, 35(6): 25-28, 33.
- [52] 陈晓, 郝兆亮, 吴金广, 等. 溶液中腐植酸对钢渣吸附重金属离子的影响 [J]. 腐植酸, 2016(4): 40.
- [53] 罗道成, 刘俊峰. 腐植酸树脂处理含  $Pb^{2+}$ 、 $Cu^{2+}$ 、 $Ni^{2+}$  废水的研究 [J]. 环境污染治理技术与设备, 2005, 6(10): 73-76.
- [54] 张彩凤, 王金玲, 白英奇. 腐植酸对  $Pb^{2+}$ 、 $Ni^{2+}$ 、 $Cr^{6+}$  吸附性能的研究 [J]. 腐植酸, 2010(5): 18-23.
- [55] SESSITSCH A, KUFFNER M, KIDD P, et al. The role of plant-associated bacteria in the mobilization and phytoextraction of trace elements in contaminated soils [J]. Soil biology and biochemistry, 2013, 60(100): 182-194.
- [56] 张森. 内生菌及根际菌对植物修复铬污染土壤促进作用的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [57] 韩文, 陈海珊, 袁治豪, 等. 一株李氏禾内生细菌去除 Cr(VI) 的特性 [J]. 广西植物, 2019, 39(6): 729-736.
- [58] 林华, 林志毅, 满向甜, 等. 蜡状芽孢杆菌协同李氏禾根系分泌物去除水体  $Cr^{6+}$  的效应及机制 [J]. 生态环境学报, 2020, 29(2): 353-359.
- [59] 文先彬. 铬污染植物修复收获物减量化和资源化方法研究 [D]. 桂林: 桂林理工大学, 2017.
- [60] KOPPOLU L, AGBLEVOR F A, CLEMENTS L D. Pyrolysis as a technique for separating heavy metals from hyperaccumulators. Part II: Lab-scale pyrolysis of synthetic hyperaccumulator biomass [J]. Biomass and bioenergy, 2003, 25(6): 651-663.
- [61] KOPPOLU L, PRASAD R, CLEMENTS L D. Pyrolysis as a technique for separating heavy metals from hyperaccumulators. Part III: Pilot-scale pyrolysis of synthetic hyperaccumulator biomass [J]. Biomass and bioenergy, 2004, 26(5): 463-472.
- [62] KELLER C, LUDWIG C, DAVOLI F, et al. Thermal treatment of metal-enriched biomass produced from heavy metal phytoextraction [J]. Environmental science & technology, 2005, 39(9): 3359-3367.
- [63] BOOMINATHAN R, SAHA-CHAUDHURY N M, SAHAJWALLA V, et al. Production of nickel bio-ore from hyperaccumulator plant biomass: Applications in phytomining [J]. Biotechnology and bioengineering, 2004, 86(3): 243-250.
- [64] 文先彬, 张学洪, 刘杰. 焚烧法和热解法处置 Cr 超富集植物李氏禾收获物的比较研究 [J]. 工业安全与环保, 2018, 44(3): 73-77.
- [65] DEMIRBAS A. Effect of initial moisture content on the yields of oily products from pyrolysis of biomass [J]. Journal of analytical and applied pyrolysis, 2004, 71(2): 803-815.
- [66] MINKOVA V, RAZVIGOROVA M, BJORNBOOM E, et al. Effect of water vapour and biomass nature on the yield and quality of the pyrolysis products from biomass [J]. Fuel processing technology, 2001, 70(1): 53-61.
- [67] WILLIAMS P T, NUGRANAD N. Comparison of products from the pyrolysis and catalytic pyrolysis of rice husks [J]. Energy, 2000, 25(6): 493-513.

要作用。

### 3 展望

玉米耐热性是一个极其复杂的性状,其耐热表现会受高温发生强度、持续时间、发生时期以及目标性状等多因素综合影响。现阶段,对于玉米高温热害的研究多集中于产量品质和生理生化指标,对玉米耐热基因的研究及应用还需进一步深入。笔者对玉米耐热性评价作一综述,希望通过新的技术手段,找到更加准确、科学、高效的耐热性评价指标,为玉米耐热性研究提供更好支撑,为玉米耐热基因型品种选育、玉米产业发展提供可靠助力。

### 参考文献

- [1] 王忠孝.山东玉米[M].北京:中国农业出版社,1999.
- [2] 于康珂,刘源,李亚明,等.玉米花期耐高温品种的筛选与综合评价[J].玉米科学,2016,24(2):62-71.
- [3] 赵龙飞,李潮海,刘天学,等.玉米花期高温响应的基因型差异及其生理机制[J].作物学报,2012,38(5):857-864.
- [4] 马晓娣,彭惠茹,汪矛,等.作物耐热性的评价[J].植物学通报,2004,39(4):411-418.
- [5] 李淑君,张丕辉,付忠军,等.玉米花期不同种质资源耐热性鉴定与分析[J].玉米科学,2019,27(4):22-31.
- [6] 李长建,张素娟,王海军,等.玉米不同日龄花丝活性研究[J].农学学报,2017,7(9):1-5.
- [7] 赵丽晓,雷鸣,王璞,等.花期高温对玉米子粒发育和产量的影响[J].作物杂志,2014(4):6-9.
- [8] 张保仁,董树亭,胡昌浩,等.高温对玉米籽粒淀粉合成及产量的影响[J].作物学报,2007,33(1):38-42.
- [9] 李德,孙义,孙有丰.淮北平原夏玉米花期高温热害综合气候指标研究[J].中国生态农业学报,2015,23(8):1035-1044.
- [10] 王安乐,陈朝辉,赵德法.玉米自交系材料耐高温特性鉴定筛选初报[J].玉米科学,2004,12(4):29-30.
- [11] 文章,王芳,谢刘勇,等.玉米自交系花期耐热能力的评价[J].玉米科学,2019,27(6):31-38.

- [12] 牛丽,刘源,于康珂,等.玉米杂交种苗期耐热性评价[J].玉米科学,2015,23(1):107-114.
- [13] 郭海鳌,孟儒学,阎家利,等.田间条件下玉米花粉生活力、花丝受精能力的研究[J].延边农学院学报,1990,12(2):17-20.
- [14] 赵龙飞.玉米花期高温响应的基因型差异及其生理机制研究[D].郑州:河南农业大学,2012.
- [15] 李川,乔江方,朱卫红,等.玉米自交系响应花期高温胁迫差异表达基因的分析[J].华北农学报,2019,34(1):1-11.
- [16] 陈朝辉,王安乐,董喜才.高温条件下玉米自交系材料雄花育性的观察分析[J].玉米科学,2005,13(4):34-35,39.
- [17] 付景,孙宁宁,刘天学,等.高温胁迫对玉米形态、叶片结构及其产量的影响[J].玉米科学,2019,27(1):46-53.
- [18] 孙宁宁.玉米叶、粒对高温胁迫的响应[D].郑州:河南农业大学,2017.
- [19] 赵霞,穆心愿,马智艳,等.不同玉米杂交种对花期高温、干旱复合胁迫的响应[J].河南农业科学,2017,46(8):32-37.
- [20] SHAO G Q, LI Z J, NING T Y, et al. Responses of photosynthesis, chlorophyll fluorescence, and grain yield of maize to controlled-release urea and irrigation after anthesis[J]. Journal of plant nutrition and soil science, 2013, 176(4): 595-602.
- [21] LI G, ZHANG Z S, GAO H Y, et al. Effects of nitrogen on photosynthetic characteristics of leaves from two different stay-green corn (*Zea mays* L.) varieties at the grain-filling stage[J]. Canadian journal of plant science, 2012, 92(4): 671-680.
- [22] WU W M, LI J C, CHEN H J, et al. Effects of nitrogen fertilization on chlorophyll fluorescence change in maize (*Zea mays* L.) under waterlogging at seedling stage[J]. Journal of food agriculture & environment, 2013, 11(1): 545-552.
- [23] 陈范骏,春亮,鲍娟,等.不同氮效率玉米杂交种的营养生长及光合特征[J].玉米科学,2006,14(6):127-130.
- [24] 陈范骏,春亮,鲍娟,等.不同氮效率玉米杂交种的营养生长及光合特征[J].玉米科学,2006,14(6):127-130.
- [25] 任寒,刘鹏,董树亭,等.高温胁迫影响玉米生长发育的生理机制研究进展[J].玉米科学,2019,27(5):109-115.
- [26] 芮鹏环,韩坤龙,王长进,等.灌浆期高温对玉米叶片抗氧化酶活性及渗透调节物质的影响[J].江苏农业科学,2018,46(24):82-84.
- [27] 徐如强,孙其信,张树榛.小麦耐热性研究现状与展望(综述)[J].中国农业大学学报,1998,3(3):33-40.

(上接第15页)

- [68] CHEN G, ANDRIES J, LUO Z, et al. Biomass pyrolysis/gasification for product gas production: The overall investigation of parametric effects[J]. Energy conversion and management, 2003, 44(11): 1875-1884.
- [69] HAYKIRI-ACMA H, YAMAN S, KUCUKBAYRAK S. Effect of heating

- rate on the pyrolysis yields of rapeseed[J]. Renewable energy, 2006, 31(6): 803-810.
- [70] 卜永辉,刘杰,游少鸿,等.六种基质的李氏禾湿地系统对Cr(VI)净化效果的差异[J].工业安全与环保,2017,43(4):64-67,106.
- [71] 李恺,顾晨,刘杰,等.李氏禾净化含重金属生活污水的实验[J].环境科学与技术,2014,37(11):151-155.