

## 紫茎泽兰制备生物炭及其应用研究进展

冯乾伟<sup>1</sup> 陈 森<sup>1,2,4,\*</sup> 李心清<sup>3</sup> 蒋宗宏<sup>1</sup> 马先杰<sup>1</sup> 王 兵<sup>1,2,4,\*</sup>

(1. 贵州大学 资源与环境工程学院 贵阳 550025; 2. 贵州大学 喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室, 贵阳 550025; 3. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室 贵阳 550081; 4. 贵州喀斯特环境生态系统教育部野外科学观测研究站 贵阳 550025)

**摘 要:** 紫茎泽兰作为世界性的有害入侵植物,因其适应能力强、扩散速度快、植株内含有有害物质而对农林牧业乃至人类健康产生不利影响。因此,如何对其有效防控和综合利用已成为国内外关注的热点问题。生物炭是有机物质在低氧或缺氧条件下热解碳化而形成的富碳固体物质,因其独特的性质和潜在的价值而被广泛用于农业土壤改良与环境修复等领域。将紫茎泽兰热解制备生物炭,既降低了生物炭生产成本,还实现了生态系统的保护和废弃物的利用。目前将紫茎泽兰作为原材料制备生物炭虽有一些相关的研究,但报道相对较少,且研究较分散、结论不一。因此,有必要对紫茎泽兰的利用现状和制备生物炭的应用潜力进行综述。本文结合目前紫茎泽兰应用研究现状,分析了紫茎泽兰制备生物炭的应用研究价值,综述了其在环境污染修复、农业土壤改良方面的应用,并在此基础上提出了今后的研究方向与展望,以期今后开展相关研究工作提供参考和借鉴。

**关键词:** 紫茎泽兰; 生物炭; 环境修复; 土壤改良

中图分类号: X70 文献标识码: A 文章编号: 1672-9250(2020)06-0736-11 doi: 10.14050/j.cnki.1672-9250.2020.48.082

紫茎泽兰(*Eupatorium adenophorum*)为菊科类入侵植物,由于其环境适应能力强、繁殖和扩散速度快,不仅对农林牧业的生产造成负面影响,还对人类的健康构成严重威胁<sup>[1-2]</sup>。因此,对紫茎泽兰综合防治和利用技术的研究具有非常重要的意义。目前,紫茎泽兰的防治主要包括人工铲除、化学防治和生物防治<sup>[3-5]</sup>。这些方法虽具有一定的效果,但控制成本较高、速度慢,易造成二次污染,且没有回收价值。因此,迫切需要开发一种经济有效的利用技术来控制紫茎泽兰的生长。目前,紫茎泽兰主要作为活性炭、有机肥料、燃料等的原材料加以利用<sup>[6-8]</sup>。由于这些技术存在运行成本高以及紫茎泽兰本身含有的有害化学物质不利于这些技术的发展,研究人员开始探索可替代的、更经济有效的利用技术<sup>[9]</sup>。其中,将其作为生物质原料制备生物炭则是近年来兴起的一条有效途径<sup>[10]</sup>。生物炭是由农作物秸秆、动物粪便、污泥等有机物质在低氧或缺氧条件下热解碳化而形成的一种高度芳香化、性

质稳定、含碳量高的固体物质,因其独特的性质和潜在的价值而受到越来越多的关注<sup>[11-15]</sup>。生物炭作为一种新型的碳材料,在环境修复和农业土壤改良方面效果显著<sup>[16-19]</sup>。但其性质受碳化条件和生物质类型影响差异较大<sup>[20-22]</sup>。此外,生物炭的生产成本也是限制其大规模推广应用的一个关键性因素。因此,研发低成本、高效率的生物炭材料是未来该研究领域必然的发展趋势。紫茎泽兰作为世界性的强入侵植物,与生物炭其他原料相比,具有廉价、易得、资源量大的特点。因此,将紫茎泽兰作为生物炭原材料不仅解决了生产成本问题,还可以实现生态系统的保护和废弃物的高效利用,具有较好的应用前景。

目前,关于入侵植物制备生物炭的研究已有报道,见诸报道的有凤眼莲(*Eichhornia crassipes*)、互花米草(*Spartina alterniflora*)、刺果瓜(*Sicyos angulatus* L.)等<sup>[23-25]</sup>。研究发现,入侵植物凤眼莲制备的生物炭对水溶液中的Cd(II)有很好的固定效果<sup>[23]</sup>,

收稿日期: 2020-01-09; 改回日期: 2020-04-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0502602); 国家自然科学基金项目(41977297); 贵州省高层次留学人才创新创业择优资助项目(留学人才择优资助合同(2018)08号); 贵州大学自然科学专项(特岗)科研基金项目(贵大特岗合字(2020)01号)。

第一作者简介: 冯乾伟(1994-),女,硕士研究生,主要研究方向为污染控制工程。E-mail: 1968688584@qq.com.

\* 通讯作者: 陈森(1979-),女,博士,副教授,研究方向为固废污染控制及资源化。E-mail: Ahcmiao7879@126.com. <http://www.cnki.net>  
王兵(1982-),男,博士,教授,研究方向为环境地球化学。E-mail: bwang6@gzu.edu.cn.

且经磁改性的凤眼莲生物炭对 As(V) 的去除率可达 90% 以上<sup>[26]</sup>。互花米草和凤眼莲生物炭对 Cu(II) 的吸附能促进 Ca 的释放,在改善土壤结构方面发挥着重要作用<sup>[24]</sup>。刺果瓜在 700 °C 热解制备的生物炭对土壤中的磺胺二甲嘧啶有很高的吸附率<sup>[27]</sup>。因此,将入侵植物作为原材料制备生物炭用于环境中污染物的去除和土壤改良可能成为未来环境科学研究领域很有潜力的发展方向。

紫茎泽兰作为中国首批外来入侵物种,已报道了其作为生物炭的应用潜力和价值<sup>[28-29]</sup>。但其在农业、环境等方面的应用研究报道相对较少,且研究较分散。因此,有必要对紫茎泽兰利用现状和制备生物炭的潜力及其应用前景进行系统综述。本文结合目前国内外研究现状,分析总结了紫茎泽兰的性质、分布、危害及资源化利用现状,并综述了紫茎泽兰生物炭在环境污染修复和农业土壤改良方面的应用潜力和研究价值。并在此基础上,提出了紫茎泽兰生物炭未来的发展方向和建议,为今后开展这方面的研究工作提供参考和借鉴。

## 1 紫茎泽兰的性质、分布及危害

紫茎泽兰是菊科泽兰属多年生草本或半灌木状植物,其根茎粗壮坚挺,常显紫色,故被称为紫茎泽兰。成年植株高 1~2 m,寿命可达 15~20 年,繁殖力强<sup>[30]</sup>。一棵成年紫茎泽兰每年能产出 1 万到 10 万颗种子,由于重量很轻,可以通过风力远距离运输<sup>[31]</sup>。该植物起源于中美洲的墨西哥和哥斯达黎加,目前已入侵了包括中国、印度、泰国、新西兰、澳大利亚和美国等 30 多个国家<sup>[32-33]</sup>。20 世纪 40 年代传入我国云南省,并在西南地区快速蔓延,现已广泛分布在云南、四川、贵州、广西、山西、西藏和海南等省<sup>[34-35]</sup>。

紫茎泽兰具有极强的入侵能力,会给予入侵地的生物多样性、生态环境、农牧业发展等带来负面影响<sup>[36-38]</sup>。入侵后的紫茎泽兰会竞争农产品的光照、水分、养分等,从而降低农产品产量,造成严重的经济损失<sup>[39]</sup>。研究表明,在紫茎泽兰的竞争干扰下,小葱每兜分蘖数和分株数降低,当紫茎泽兰密度达 60 株/m<sup>2</sup> 时,产量损失率可达 93.3%<sup>[40]</sup>。方焱等<sup>[41]</sup>研究发现紫茎泽兰对我国花生产业造成的潜在经济损失总值可达 582.39 亿元。紫茎泽兰入侵后很快会成为当地的优势物种,破坏生态系统的稳定,在这一过程中紫茎泽兰极强的化感作用发挥着

重要的作用,它能释放出抑制其他植物种子生长发育的化感物质<sup>[42]</sup>。紫茎泽兰对农产品和周边植物的化感作用主要表现为其提取物能抑制其他植物种子萌发和幼苗的生长,降低叶绿素含量,从而成为优势物种(表 1)<sup>[43-48]</sup>。紫茎泽兰除了具有化感作用,植株内含有的芳香、刺激性的化学物质和尚不清楚的有毒物质会触发人类疾病、皮肤发炎或溃烂,甚至中毒死亡<sup>[49]</sup>。紫茎泽兰带冠毛的种子和花粉通过呼吸可进入到人和动物的鼻腔和肺中,引起头晕、腹泻,甚至组织坏死,过量吸入会引发哮喘病<sup>[50]</sup>。紫茎泽兰给社会、经济、生态都造成了不利的影响,对其综合防控和高效利用尤为重要。

表 1 紫茎泽兰的化感作用

Table 1 Allelopathic effect of *Eupatorium adenophorum*

化感作用的表现形式	物种	参考文献
种子萌发率显著下降	云南松	[43]
抗氧化酶、叶绿素含量下降,丙二醛含量升高	稗草、反枝苋、灰绿藜	[44]
抑制种子萌发和幼苗生长	洋葱、萝卜、黄瓜、水稻	[45]
发芽率、发芽势、发芽指数显著降低;芽长、根长、鲜重显著降低,丙二醛含量显著升高	水稻	[46]
叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素总含量下降	杉木、构树、板栗、火棘	[47]
抑制幼苗生长	刺齿唇柱苣苔、荔波唇柱苣苔、烟叶唇柱苣苔和台闽苣苔	[48]

## 2 紫茎泽兰资源化利用现状

目前对紫茎泽兰的应用主要包括肥料化、燃料化、饲料化、原料化和基料化这几种途径<sup>[8,51]</sup>。本文从这几个方面的内容综述了紫茎泽兰的利用,为其制备成生物炭的可行性和优势提供了理论基础。

### 2.1 紫茎泽兰制备活性炭

活性炭具有巨大的比表面积和孔隙结构,被广泛用于环保、化工、电力等领域<sup>[52-55]</sup>。紫茎泽兰茎秆坚硬、碳含量高、灰分低,是一种很好的制备活性炭的原材料<sup>[9]</sup>。目前,关于紫茎泽兰制备活性炭的相关研究较多,主要探讨在不同工艺条件下制得活性炭的吸附性能和机理。不同活化方式对紫茎泽兰活性炭产率的影响不同,在最佳工艺条件下制得活性炭的量为 H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 活化法>微波辐射-氯化锌法>微波辐射法-氢氧化钾法>微波辐射-碳酸钾法>物理活化法,这几种方式制得的活性炭的碘吸附值、

BET 比表面积、孔容、平均孔径范围分别为 1 002~2 621 mg/g、1 076~3 918 m<sup>2</sup>/g、0.63~2.383 mL/g、2.43~2.63 nm(表 2),表明紫茎泽兰是制备活性炭的一种良好的原材料<sup>[56-59]</sup>。与紫茎泽兰原料相比(图 1a),通过磷酸活化制备的活性炭(图 1b)具有更大的比表面积和更丰富的孔隙结构,能很好的吸附污染物,达到净化环境的目的。目前,紫茎泽兰活性炭主要用于重金属和有机染料等污染物的去除。研究表明,紫茎泽兰活性炭能有效地去除废水中低浓度的 Pb(II),且 Pb(II)的吸附呈 pH 依赖性,在 pH 为 5.0 时达到最大吸附量<sup>[1]</sup>。红外光谱

显示紫茎泽兰活性炭的 C=O 和 P—O—C 基团对水溶液中碱性染料刚果红具有很好的亲和力,其最大吸附量可达 351 mg/g<sup>[60]</sup>。紫茎泽兰可作为制备光催化剂-吸附剂复合材料的原料,该复合材料不仅具有良好的吸附性,还具有光催化降解和磁性等性能,对亚甲基蓝染料具有良好的去除能力<sup>[61]</sup>。紫茎泽兰活性炭用于环境中污染物的去除效果良好,可作为紫茎泽兰的一种利用方式。但是,由于紫茎泽兰制备活性炭的运行成本和再生成本较高、活化后的紫茎泽兰容易造成二次污染、不可生物降解等缺点限制了其大规模使用<sup>[62]</sup>。

表 2 不同工艺条件下紫茎泽兰活性炭表征

Table 2 Characterization of activated carbon of *Eupatorium adenophorum* under different process conditions

活化方式	最佳工艺条件			表征参数					文献
				碘吸附值/ (mg/g)	产率/%	BET 比表面 积/(m <sup>2</sup> /g)	孔容/ (mL/g)	平均孔 径/nm	
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> 活化	活化温度/°C	活化时间/min	磷酸浓度/%	—	59.70	1 346	0.83	2.45	[58]
	400	60	50	—	59.70	1 346	0.83	2.45	[58]
物理活化	活化温度/°C	活化时间/min	CO <sub>2</sub> 流量/ (mL/min)	1 056	40.02	1 767.9	2.267	—	[63]
	980	130	400	1 002	15.79	1 076	0.63	2.63	[57]
微波辐射-氢氧化钾	微波功率/W	辐射时间/min	红外光谱	2 621	28.25	3 918	2.383	2.43	[2]
	700	15	4	2 621	28.25	3 918	2.383	2.43	[2]
微波辐射-氯化锌	微波功率/W	辐射时间/min	ZnCl <sub>2</sub> 浓度/%	1 080.84	33.8	—	—	—	[59]
	800	12	50	1 080.84	33.8	—	—	—	[59]
微波辐射-碳酸钾	微波功率/W	辐射时间/min	剂料比	1 470.27	16.35	1 540.97	0.739 3	—	[56]
	700	12	1.25	1 470.27	16.35	1 540.97	0.739 3	—	[56]

注:—表示无数据。

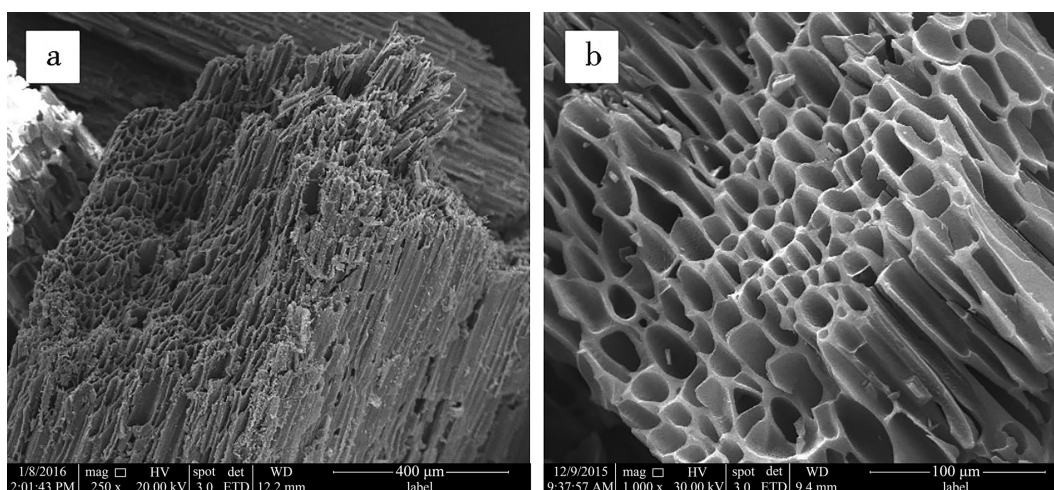


图 1 H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 浸渍过的紫茎泽兰原料(a)和活性炭(b)的扫描电镜图(据文献[58])

Fig.1 Scanning electron micrographs of H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> impregnated *Eupatorium adenophorum* (a) and the prepared activated carbon (b) (from ref. [58])

## 2.2 紫茎泽兰制备有机肥

紫茎泽兰含有丰富的微量元素、有机质和大量的常量元素,满足二级有机肥的标准,经脱毒处理后可作为有机肥利用<sup>[64]</sup>。紫茎泽兰生物堆肥质量优于自然堆肥,对土壤有机质、氮、微生物生物量及土壤酶活性的影响与普通有机肥相当<sup>[65]</sup>。紫茎泽兰与化肥配施处理能促进玉米和大麦对养分的吸收,大麦产量显著高于单独施用紫茎泽兰有机肥或化肥的处理,但与普通有机肥配施化肥处理的产量无明显差异,说明紫茎泽兰有机肥与普通有机肥的肥效相似<sup>[66]</sup>。因此,紫茎泽兰在重金属较低的土壤环境中可以替代其他的昂贵材料推广应用。但是,在重金属污染的土壤中,紫茎泽兰对Pb、Zn、Cd和Cu表现出较强的富集特性<sup>[67-68]</sup>,若将富集了重金属的紫茎泽兰作为有机肥施用于土壤可能会存在污染的风险。

## 2.3 紫茎泽兰制备农药和抑菌剂

紫茎泽兰植株内含有的苯丙素酚类、黄酮类和三萜类等生物活性物质有抑菌的作用,从植株内提取的9-羰基-10,11-去氢泽兰酮能显著抑制蚜虫的产生<sup>[69-70]</sup>。紫茎泽兰提取物在48 h内对致倦库蚊的3龄幼虫致死率可达77%~100%,当紫茎泽兰提取物质量浓度为1.5 kg/L时,在6 h内对长角血蜱幼虫和蛹致死率达到了100%<sup>[71-72]</sup>。紫茎泽兰不同器官乙醇提取物均具有抗烟草疫霉菌活性<sup>[73]</sup>,叶提取物对烟草花叶病毒表现出较强的抗毒活性<sup>[74]</sup>。因此,紫茎泽兰各提取物作为植物源性农药,杀虫抑菌效果良好,将其开发利用后可成为一种宝贵的资源。但是,紫茎泽兰药用价值的研发在一些核心技术问题上还存在一些挑战<sup>[75]</sup>。此外,紫茎泽兰本身含有的一些活性物质可能对人的健康有不利影响,在开发利用时应特别注意其负面效果。

## 2.4 紫茎泽兰的其他应用

紫茎泽兰含有粗蛋白、粗脂肪、粗纤维等营养成分,并含有16种氨基酸和多种矿物质及微量元素,经过脱毒处理后可作为牲畜饲料<sup>[76]</sup>。唐晓萍等<sup>[77]</sup>也证明了紫茎泽兰脱毒后作为饲料的可行性。但紫茎泽兰含有较多的单宁类、香豆素类、挥发油类成分,这些物质会对动物肝、肾和脾等器官造成不同程度的损伤,从而限制了紫茎泽兰的饲料化利用<sup>[3]</sup>。

紫茎泽兰含有较高的纤维素和较低的木质素,

经3~4周的总固体含量达519 mL/g,说明紫茎泽兰是生产沼气的理想原料<sup>[7]</sup>。陈金发等<sup>[78]</sup>研究了温度对紫茎泽兰茎厌氧发酵产沼气的影 响,结果表明中温条件最适合沼气发酵,原料在30℃时TS与VS产气率与产甲烷效率分别为152.8 L/kg、74.3 L/kg。利用紫茎泽兰产沼气也存在一定的缺陷,紫茎泽兰杆进行厌氧发酵时会产生具有抑菌和消毒等功能的活性物质,这些物质可能会损坏微生物细胞结构,从而影响发酵过程的正常运行。发酵过程还会产生厌氧消化产物,如果不对其进行合理地处置则可能会给环境造成不利影响。

## 3 紫茎泽兰生物炭的特性

紫茎泽兰资源量大、可再生、环保,是制备生物炭的理想材料<sup>[79]</sup>。生物炭在制备过程中,原材料和碳化条件的不同会使生物炭的孔隙结构、灰分含量、阳离子交换量、pH和元素组成等理化性质存在很大的差异,从而影响生物炭的吸附能力<sup>[80]</sup>。热解温度是影响生物炭理化性质的关键因素<sup>[81]</sup>。Fan等<sup>[29]</sup>研究了紫茎泽兰在不同热解温度(300~600℃)下制得的生物炭的性能,发现热解温度越高,生物炭产率越低,而灰分和pH越高,碘吸附值呈现先上升后降低的趋势,在400℃时最大(表3);同时还发现,较低热解温度制备的生物炭的比表面积和水溶性钙、镁、氮、磷含量更大,而较高热解温度制备的生物炭的碱度和芳香度更高、稳定性更好,且水溶性钾含量和重金属去除活性更高。生物炭的含碳量也是影响其吸附性能的重要因素,其含碳量与吸附性能呈正相关关系<sup>[82]</sup>。Li等<sup>[83]</sup>比较了不同原料(紫茎泽兰、木屑、稻壳)制备的生物炭的理化性质的影响,发现紫茎泽兰生物炭含碳量明显高于其余两种生物炭。与蘑菇渣、桉树皮、香蕉茎、水稻杆制备的生物炭相比,紫茎泽兰的含碳量也偏高<sup>[84]</sup>。不同窑烧制紫茎泽兰制备的生物炭对其性

表3 不同热解温度下紫茎泽兰生物炭的性质<sup>[29]</sup>

Table 3 Properties of *Eupatorium adenophorum* biochar at different pyrolysis temperatures<sup>[29]</sup>

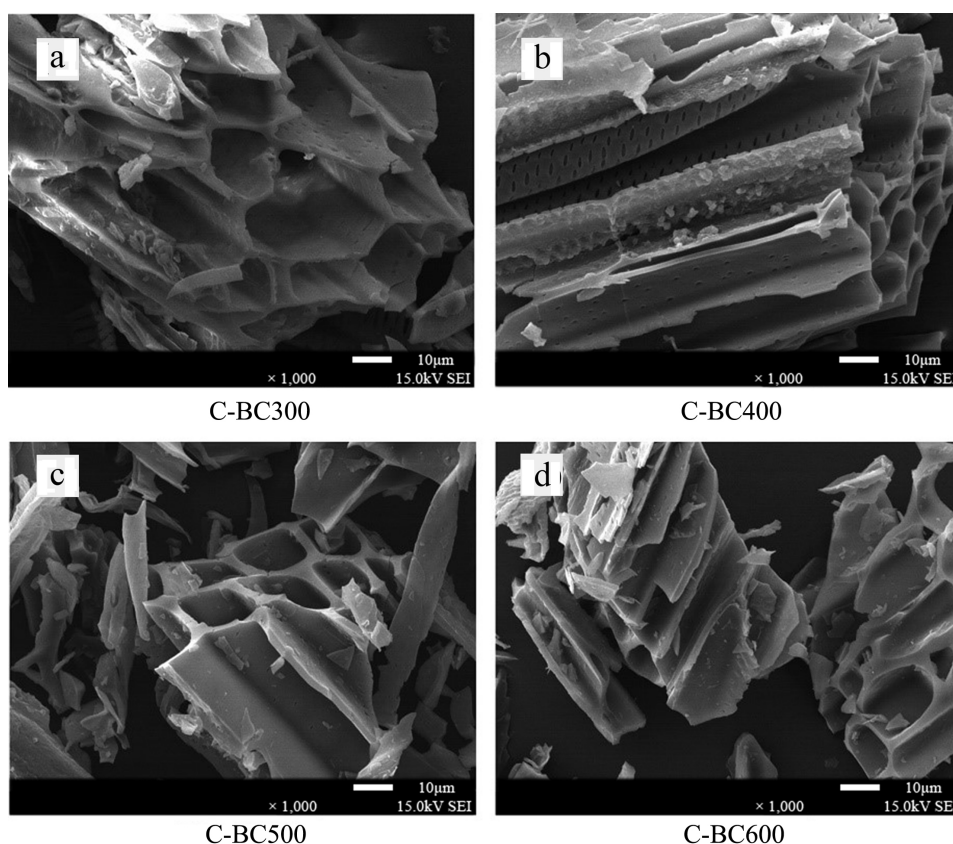
热解温度/℃	产率/%	灰分/%	pH	碘吸附值/(mg/g)
300	44.43 ± 1.09	9.73 ± 0.24	7.25 ± 0.05	230.40 ± 5.46
400	33.37 ± 0.51	13.53 ± 0.33	9.97 ± 0.01	299.54 ± 5.45
500	30.69 ± 0.79	14.03 ± 0.09	10.20 ± 0.01	243.46 ± 15.02
600	29.10 ± 0.74	14.77 ± 0.21	10.34 ± 0.04	223.49 ± 4.61

质也有影响,制得的生物炭 pH 达  $9.1 \pm 0.3$ 、阳离子交换能力达  $133 \pm 37 \text{ cmol}_c/\text{kg}$ 、有机碳含量达  $73.9\% \pm 6.4\%$ 、比表面积达  $35 \sim 215 \text{ m}^2/\text{g}$  [85]。

生物炭孔隙结构和丰富度对其吸附性能有一定的影响 [86]。紫茎泽兰经不同热解温度制备的生物炭均具有细小的孔隙结构,且分布均匀、致密,在  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  热解制备的生物炭保持了相对完整的管状结构,这种结构在更高热解温度下逐渐被破坏,破坏程度随温度的升高而增加(图2)。将具有一定孔隙结构的紫茎泽兰生物炭用于环境修复和土壤改良,可为污染物提供丰富的吸附位点,降低土壤容重、提高土壤持水能力 [87]。此外,这些孔隙结构还可以为微生物提供良好的生存环境,从而增加微生物的数量和活性,既增强了生物炭的吸附能力,还为微生物降解环境中的污染物提供了可能的空间。因此,紫茎泽兰制备的生物炭比表面积大、稳定性好、孔隙和表面官能团丰富,可作为吸附剂和土壤改良剂用于环境污染修复和农业土壤改良。

#### 4 紫茎泽兰生物炭在环境修复方面的应用

近年来,随着矿业、化工、涂料、电镀、制革和陶瓷玻璃等行业的快速发展,产生了大量高浓度的重金属和有机废水,使得水体和土壤环境受到严重的污染。由于重金属的高毒性、流动性和累积性,不仅对环境造成了不利的影响,还危及人类健康。因此,重金属污染已成为各种环境污染中最受关注的问题之一 [88]。传统的去除重金属的方法包括离子交换、膜过滤、电渗析和反渗透等,存在成本高、有沉淀污泥或废物产生、不能彻底去除污染物的缺陷 [89-91]。因此,研究低成本、高效率的修复技术尤为重要。吸附法去除污染物的效果良好,已广泛应用于大气、水和土壤环境中重金属、有机染料等污染物的去除。生物炭因孔隙结构丰富、比表面积大、稳定性好,是目前常用于去除污染物的良好型吸附剂。紫茎泽兰作为一种优良的生物质原材料,制备生物炭的成本低、吸附效果好且无二次污染物



C-BC 代表紫茎泽兰生物炭,数字代表热解温度( $^\circ\text{C}$ )

图2 不同热解温度下制备的紫茎泽兰生物炭扫描电镜图(据文献 [29])

产生,已受到越来越多学者的关注。

目前,紫茎泽兰生物炭在环境修复方面已用于重金属和有机污染物的去除,其吸附性能在不同的工艺条件下存在差异(表4)。研究发现,紫茎泽兰生物炭对环境中的重金属具有一定的修复效果,600℃热解制得的生物炭对水溶液中Pb(II)、Cd(II)的去除率达到了99.39%和97.49%<sup>[29]</sup>,这与玉米秸秆制得的生物炭对Pb(II)、Cd(II)的吸附效果相当<sup>[92]</sup>。Chen等<sup>[28]</sup>首次报道了低成本吸附剂-紫茎泽兰生物炭对Cu(II)-Cr(VI)二元混合物的吸附机理,结果表明该吸附剂对Cu(II)-Cr(VI)的吸附主要以物理吸附为主,在pH为5、生物炭剂量为0.1g、Cu(II)和Cr(VI)的浓度为50mg/L、吸附时间为30min、温度为25℃、转速为150r/min的反应体系下,对Cu(II)、Cr(VI)的吸附量分别为27.62mg/g和9.68mg/g。将紫茎泽兰生物炭用于电镀废水的治理,结果显示其对废水中Pb(II)、Cd(II)和Zn(II)的去除效果较好,且经改性后的紫茎泽兰生物炭对Cd(II)的吸附性能增强,治理后这三种重金属离子浓度均符合相关标准<sup>[93]</sup>。紫茎泽兰与荞麦秸秆混合制备的生物炭对Cu(II)的吸附效果显著,对Cu(II)的去除率随碳化温度的升高而升高,在最佳工艺条件下对Cu(II)的最大吸附量为56.62mg/g<sup>[94]</sup>,大于玉米、油菜、花生壳、稻壳、木屑、牛粪、污泥等常规原料制得的生物炭的吸附量<sup>[95]</sup>。碳化后的紫茎泽兰还能有效去除废水中的COD<sup>[96]</sup>。研究发现生物炭对氯酚有较好的吸附能力<sup>[97]</sup>。与纯生物炭相比,紫茎泽兰生物炭负载的纳米铁/镍双金属对水中2,4,6-三氯酚的去除能力明显提升,在不同条件下降解率可提高39.7%~71.6%,其去除效果主要是由于改性的紫茎泽兰生物炭具有良好的吸附性能和还原作用<sup>[79]</sup>。综上,

紫茎泽兰生物炭修复环境中有机和无机污染物时效果显著,具有很好的应用前景。

## 5 紫茎泽兰生物炭在农业土壤改良方面的应用

生物炭因具有比表面积大、孔隙多、质轻、带有大量的负电荷、吸附能力强以及在自然条件下通常呈碱性的特点,是一种新型土壤改良剂。生物炭对土壤的改良效果主要是通过影响土壤物理、化学性质和微生物活性来改善土壤环境<sup>[98]</sup>。研究表明,添加生物炭能提高土壤持水能力、孔隙度、植物有效水分、pH和CEC等,从而提高土壤肥力<sup>[99-100]</sup>。紫茎泽兰已被证明是制备生物炭的优质原料<sup>[101]</sup>。

酸性土不适宜于农作物的生长,土壤中pH低通常与溶解的铝离子有关<sup>[102]</sup>,在土壤中添加紫茎泽兰生物炭作为石灰化剂,可以大幅度降低铝的浓度<sup>[100]</sup>。Pandit等<sup>[87]</sup>研究了不同浓度紫茎泽兰生物炭与4种不同剂量的氮磷钾肥料、水和石灰联合施用对玉米产量的影响,结果表明生物炭的添加增加了土壤水分、CEC、钾和植物有效磷,提高了土壤pH,对玉米生长有一定的促进作用,且添加生物炭的玉米产量显著高于营养充足条件下的产量。与未改良土相比,1%和4%剂量的紫茎泽兰生物炭能显著提高CEC、OC,降低铝/钙比值;生物炭在冷却前和营养液混合与冷却后混合相比,添加1%生物炭后玉米产量增加了153%,与单独添加的生物炭相比增加了209%,与单独施用生物炭和肥料相比,生物炭的液体养分增强,肥料的有效性提高<sup>[85]</sup>。由于重黏土排水能力不良和土壤通透性差限制了其在农业上的应用<sup>[103]</sup>。研究表明生物炭能增加黏土的孔隙度<sup>[104]</sup>。在田间试验中,紫茎泽兰生物炭改

表4 紫茎泽兰生物炭的吸附特性

Table 4 Adsorption characteristics of *Eupatorium adenophorum* biochar

污染物	工艺条件			pH	吸附剂用量/g	去除率/%	吸附量/(mg/g)	文献
	初始污染物浓度/(mg/L)	反应温度/K	接触时间/h					
Pb(II)	10	299	2	5.0	1.0	90.45	—	[1]
	30					85.03		
	50					84.16		
Pb(II)	50	—	24	5.0	0.1	99.39	—	[29]
Cd(II)	50	—	24	5.0	0.1	97.49	—	[29]
Cu(II)	50	298	0.5	5.0	0.1	—	27.62	[28]
Cr(VI)	50	298	0.5	5.0	0.1	—	9.68	
Cu(II)	—	298	2	3.0	0.25	—	56.62	[94]
COD	1,000	293	2	—	0.05	—	62.90	[96]

注:—表示无数据。



良后的重黏土与对照组相比,通透性增强、容重下降、有效水容量增加;生物炭改良后玉米产量增加,部分原因是由于生物炭降低了土壤容重,而在2.5%和5%紫茎泽兰处理之间的产量没有显著差异<sup>[10]</sup>。紫茎泽兰生物炭与牛的粪便混合并施于南瓜根部,与不与牛粪便混合和加生物炭相比南瓜产量明显提升<sup>[105]</sup>。

生物炭不仅能提高土壤肥力,还能降低污染土壤中农药等有害化学污染物的生物利用度,减少植物对污染物的吸收<sup>[106]</sup>。在生物炭存在下,中国红豆杉和胡萝卜根中多氯联苯的浓度分别降低了61.5%~93.7%、12.7%~62.4%<sup>[107]</sup>。Li等<sup>[83]</sup>研究了紫茎泽兰生物炭对除草剂乙草胺吸附性能的影响,以玉米幼苗为受体植物,探讨了不同龄期生物炭处理后玉米幼苗对乙草胺积累的影响,结果显示在土壤中添加紫茎泽兰秸秆生物炭10天后,玉米幼苗对乙草胺的生物积累降低,但是,在添加生物炭20天后,玉米植株内的乙草胺浓度显著高于没有添加生物炭和添加生物炭10天的浓度。

综上,紫茎泽兰热解制备的生物炭对土壤具有很好的改良效果,是一种优良的土壤改良剂。与单独施用于土壤相比,紫茎泽兰生物炭与肥料或其他废弃物混合堆肥的改良效果更佳。此外,添加适量的紫茎泽兰生物炭于栽种农作物的土壤中,可降低农产品对污染物的富集,从而降低人类通过食物链摄食有害物质的风险。因此,将紫茎泽兰热解制备生物炭用于农业土壤改良,是其资源化利用的一条

有效途径<sup>[105]</sup>。

## 6 前景与展望

紫茎泽兰是世界性的入侵杂草,将其资源化利用已成为控制和管理紫茎泽兰的有效策略。作为一种经济、环保、资源量大的生物质,将其制备成生物炭是未来环境科学领域极具发展潜力的研究方向。目前,紫茎泽兰已被证明是制备生物炭的优质原料<sup>[101]</sup>,在环境修复和土壤改良方面将会受到更多学者的关注。但是,紫茎泽兰生物炭作为一种新制备的碳材料,在大规模推广应用之前还存在如下一些问题:

1) 紫茎泽兰生物炭的吸附能力较活性炭相比相对有限。因此,对于污染物浓度相对较高的水体或土壤环境,可以考虑通过不同的改性方法将其改性处理以提高其吸附性能<sup>[108]</sup>,或与其他修复技术联合使用,从而提高紫茎泽兰生物炭的利用率和有效性。

2) 不同碳化条件下制备的紫茎泽兰生物炭对不同污染物的去除与钝化机制差异较大,因此,通过研究其对污染水体和土壤中不同类型污染物吸附去除机理,从而筛选出最佳的生物炭制备方法和吸附工艺条件将是未来研究的重点。

3) 在使用过程中,紫茎泽兰生物炭对环境可能产生的潜在风险及其对土壤动物、微生物及水生生物的影响也是未来研究工作中需要引起关注和待解决的问题。

## 参 考 文 献

- [1] Guo S H, Li W, Zhang L B, et al. Kinetics and equilibrium adsorption study of lead( II) onto the low cost adsorbent-*Eupatorium adenophorum* spreng[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2009, 87( 5): 343-351.
- [2] Cheng S, Zhang S Z, Zhang L B, et al. Microwave-assisted preparation of activated carbon from *Eupatorium adenophorum*: Effects of preparation parameters[J]. High Temperature Materials and Processes, 2017, 36( 8): 805-814.
- [3] 刘伦辉, 谢寿昌, 张建华. 紫茎泽兰在我国的分布、危害与防除途径的探讨[J]. 生态学报, 1985, 5( 1): 3-8.
- [4] Auld B A. Chemical control of *Eupatorium adenophorum*, crofton weed[J]. Tropical Grasslands, 1972, 6: 55-60.
- [5] Wan F H, Huang W K, Jiang Z L, et al. Invasive mechanism and control strategy of *Ageratina adenophora* ( sprengel) [J]. Science China Life Sciences, 2010, 53( 11): 1291-1298.
- [6] Zheng Z Q, Xia H Y, Srinivasakannan C, et al. Utilization of crofton weed for preparation of activated carbon by microwave induced CO<sub>2</sub> activation[J]. Chemical Engineering and Processing, 2014, 82( 8): 1-8.
- [7] Madan M, Patrabansh S. An alternative resource for biogas production[J]. Energy Sources, 2000, 22( 8): 713-721.
- [8] Sahoo A, Singh B, Sharma O P. Evaluation of feeding value of *Eupatorium adenophorum* in combination with mulberry leaves[J]. Livestock Science, 2011, 136( 2-3): 175-183.
- [9] 李小艳, 王思芦. 紫茎泽兰的化学成分及应用研究进展[J]. 广州化工, 2013, 41( 18): 38-39.
- [10] Alfred O, Jan M, Elizabeth H S, et al. The potential of biochar in improving drainage, aeration and maize yields in heavy clay soils[J]. PLoS One, 2018, 13( 5): e0196794.

- [11] Sohi S P. Carbon Storage with Benefits[J]. *Science*, 2012, 338( 6110): 1034–1035.
- [12] Wang B, Gao B, Zimmerman A R, et al. Novel biochar-impregnated calcium alginate beads with improved water holding and nutrient retention properties[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 209: 105–111.
- [13] Wang Q, Wang B, Lee X, et al. Sorption and desorption of Pb( II) to biochar as affected by oxidation and pH[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 634: 188–194.
- [14] Zheng Y L, Wang B, Gao B, et al. Reclaiming phosphorus from secondary treated municipal wastewater with engineered biochar[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 362: 460–468.
- [15] 杨放, 李心清, 王兵, 等. 生物炭在农业增产和污染治理中的应用[J]. *地球与环境*, 2012, 40( 1): 100–107.
- [16] Wang B, Lee X, Theng B K G, et al. Biochar addition can reduce NO<sub>x</sub> gas emissions from a calcareous soil[J]. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, 2019, 31( 1): 38–48.
- [17] 吴维, 李心清, 周运超, 等. 玉米秸秆生物炭对贵州黄壤持水能力的影响[J]. *地球与环境*, 2017, 45( 6): 675–680.
- [18] 严云, 余晓燕, 刘洪, 等. 一种鱼腥草生物炭对水中 Cr( VI) 吸附性能研究[J]. *地球与环境*, 2018, 46( 4): 396–402.
- [19] Lee D J, Cheng Y L, Wong R J, et al. Adsorption removal of natural organic matters in waters using biochar[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 260: 413–416.
- [20] Sun Y, Gao B, Yao Y, et al. Effects of feedstock type, production method, and pyrolysis temperature on biochar and hydrochar properties[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, 240: 574–578.
- [21] Wang B, Lehmann J, Hanley K, et al. Ammonium retention by oxidized biochars produced at different pyrolysis temperatures and residence times[J]. *Rsc Advances*, 2016, 6( 48): 41907–41913.
- [22] 杨放, 李心清, 王兵, 等. 热解材料对生物炭理化性质的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34( 9): 1822–1828.
- [23] Zhang F, Wang X, Yin D X, et al. Efficiency and mechanisms of Cd removal from aqueous solution by biochar derived from water hyacinth (*Eichornia crassipes*) [J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 153: 68–73.
- [24] Li M, Lou Z J, Wang Y, et al. Alkali and alkaline earth metallic ( AAEM) species leaching and Cu( II) sorption by biochar[J]. *Chemosphere*, 2015, 119: 778–785.
- [25] Vithanage M, Rajapaksha A U, Tang X Y, et al. Sorption and transport of sulfamethazine in agricultural soils amended with invasive-plant-derived biochar[J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, 141: 95–103.
- [26] Zhang F, Wang X, Ji X H, et al. Efficient arsenate removal by magnetite-modified water hyacinth biochar[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 216: 575–583.
- [27] Vithanage M, Rajapaksha A U, Zhang M, et al. Acid-activated biochar increased sulfamethazine retention in soils[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 22( 3): 2175–2186.
- [28] Chen J F, Song D G, Yang P. Study on adsorption of Cu( II) -Cr( VI) binary system by carbonized *Eupatorium adenophorum* [J]. *Separation Science and Technology*, 2016, 51( 5): 749–758.
- [29] Fan L Q, Zhou X, Liu Q, et al. Properties of *Eupatorium adenophora* spreng ( crofton weed) biochar produced at different pyrolysis temperatures[J]. *Environmental Engineering Science*, 2019, 36( 8): 937–946.
- [30] 朱先洲. 入侵植物紫茎泽兰资源化利用研究进展[J]. *湖北农业科学*, 2012, 51( 14): 2905–2907+2917.
- [31] 刘伦辉, 刘文耀, 郑征, 等. 紫茎泽兰个体生物及生态学特性研究[J]. *生态学报*, 1989( 1): 66–70.
- [32] Sang W G, Zhu L, Axmacher J C. Invasion pattern of *Eupatorium adenophorum* spreng in southern China[J]. *Biological Invasions*, 2010, 12( 6): 1721–1730.
- [33] Zhu L, Sun O J, Sang W G, et al. Predicting the spatial distribution of an invasive plant species (*Eupatorium adenophorum*) in China[J]. *Landscape Ecology*, 2007, 22( 8): 1143–1154.
- [34] Yan X, Yu L Z, Gregg W P, et al. Invasive species in China—An overview[J]. *Biodiversity and Conservation*, 2001, 10( 8): 1317–1341.
- [35] Lu P, Sang W G, Ma K P. Progress and prospects in research of an exotic invasive species, *Eupatorium adenophorum* [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29( 6): 1029–1037.
- [36] 刘潮, 韩利红, 施晓东. 外来入侵植物紫茎泽兰的研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2008( 30): 13345–13346.
- [37] Lu Z J, Ma K P. Spread of the exotic crofton weed (*Eupatorium adenophorum*) across southwest China along roads and streams[J]. *Weed Science*, 2006, 54( 6): 1068–1072.
- [38] 丁辉, 徐海根, 刘志磊. 外来入侵植物紫茎泽兰对植物多样性的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2007, 23( 2): 29–32.
- [39] Belnap J, Phillips S L. Soil biota in an ungrazed grassland: Response to annual grass (*bromus tectorum*) invasion[J]. *Ecological Applications*, 2001, 11( 5): 1261–1275.
- [40] 曹勋程, 颜冬冬, 朱文达, 等. 紫茎泽兰对小葱生长的影响及其经济阈值[J]. *山西农业大学学报( 自然科学版)*, 2018, 38( 2): 47–52.
- [41] 方焱, 秦萌, 李志红, 等. 紫茎泽兰对我国花生产业造成的潜在经济损失评估[J]. *中国农业大学学报*, 2015, 20( 6): 146–151.
- [42] 曹子林, 王晓丽, 张权新, 等. 紫茎泽兰入侵的云南松林种群结构及其土壤种子库特征[J]. *云南大学学报( 自然科学版)*, 2016, 38( 6): 958–964.



- [43] Cao Z L, Wang X L, Li G Q, et al. Allelopathy of gaseous volatiles adenophorum on seed germination and seedling growth of *Pinus yunnanensis* [J]. *Plant Diseases and Pests*, 2013, 4(4): 1-4.
- [44] Ma J H, Xing G F, Yang W X, et al. Inhibitory effects of leachate from *Eupatorium adenophorum* on germination and growth of *Amaranthus retroflexus* and *Chenopodium glaucum* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(1): 50-56.
- [45] Baruah N C. Seed germination and growth inhibitory cadinenes from *Eupatorium adenophorum* spreng [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1994, 20(8): 1885-1892.
- [46] 袁驰, 陈勇, 梁永霞, 等. 紫茎泽兰水浸提液对不同基因型水稻种子萌发及幼苗生长的影响 [J]. *种子*, 2018, 37(5): 81-84.
- [47] 刘济明, 陈敬忠, 孙运刚, 等. 紫茎泽兰叶水浸液对七种乡土植物幼苗生长和叶绿素的化感影响 [J]. *广西植物*, 2019, 39(1): 83-90.
- [48] 徐晗, 石雷, 李振宇, 等. 紫茎泽兰对五种苦苣苔科植物化感作用的初步研究 [J]. *生物多样性*, 2007, 15(5): 486-491.
- [49] 于兴军, 于丹, 马克平. 不同生境条件下紫茎泽兰化感作用的变化与入侵力关系的研究 [J]. *植物生态学报*, 2004(6): 42-49.
- [50] 洪勇. 安顺市紫茎泽兰的发生特点与防控措施 [J]. *现代农业科技*, 2016(21): 101+103.
- [51] Tang S C, Pan Y M, Wei C Q, et al. Testing of an integrated regime for effective and sustainable control of invasive crofton weed (*Ageratina adenophora*) comprising the use of natural inhibitor species, activated charcoal, and fungicide [J]. *Weed Biology and Management*, 2019, 19(1): 9-18.
- [52] Wang J W, Zhang W K, Jiao C, et al. Activated carbon based supercapacitors with a reduced graphene oxide additive: Preparation and properties [J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2020, 20(7): 4073-4083.
- [53] Son B C, Park C H, Kim C S. Fabrication of antimicrobial nanofiber air filter using activated carbon and cinnamon essential oil [J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2020, 20(7): 4376-4380.
- [54] Choi W S, Hwang M J, Kwon Y J, et al. Radio-frequency thermal plasma treated activated carbon impregnated with Mn and Ag for volatile organic compounds adsorption [J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2020, 20(7): 4423-4427.
- [55] Kim J K, Jiang T, Li Z, et al. Degradation of metaldehyde in aqueous solution by nano-sized photocatalysts and granular activated carbon [J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2020, 20(7): 4505-4508.
- [56] 王超. 微波辐射制备紫茎泽兰优质活性炭及机理分析 [J]. *技术与市场*, 2016, 23(7): 86-88.
- [57] 郑照强, 夏洪应, 彭金辉, 等. 紫茎泽兰同时制备活性炭及高热值燃气实验研究 [J]. *材料导报*, 2014, 28(14): 39-43.
- [58] 李春阳, 张利波, 夏洪应, 等.  $H_3PO_4$  活化紫茎泽兰制备活性炭及其性能研究 [J]. *材料导报*, 2016, 30(14): 49-52.
- [59] 吴春华, 秦永剑, 张加研, 等. 微波辐射紫茎泽兰秆制取活性炭 [J]. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 2009, 38(4): 428-430.
- [60] Li C Y, Zhang L B, Xia H Y, et al. Kinetics and isotherms studies for congo red adsorption on mesoporous *Eupatorium adenophorum*-based activated carbon via microwave-induced  $H_3PO_4$  activation [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2016, 224: 737-744.
- [61] Cheng S, Hu W H, Srinivasakannan C, et al. Catalytic pyrolysis of the *Eupatorium adenophorum* to prepare photocatalyst-adsorbent composite for dye removal [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 222: 710-721.
- [62] Manikandakumar M, Ananthakumar K. Kinetics, equilibrium and thermodynamic studies on the removal of brilliant green by *Ulva lactuca* algae [J]. *Indian Journal of Environmental Protection*, 2015, 35(4): 335-347.
- [63] 孙康, 蒋剑春, 李静, 等. 紫茎泽兰制备活性炭及其性质 [J]. *林业科学*, 2010, 46(3): 178-182.
- [64] 罗瑛, 刘壮, 高玲, 等. 紫茎泽兰的有机肥品质评价 [J]. *中国农学通报*, 2009, 25(7): 179-182.
- [65] 隋宗明, 殷洁, 李轩, 等. 紫茎泽兰堆肥的质量及对土壤有机质、养分和微生物的影响 [J]. *土壤*, 2017, 49(3): 527-533.
- [66] 贾瑞莲. 施肥对玉米、大麦和烤烟产量及土壤的影响 [D]. 重庆: 西南大学, 2016.
- [67] 赵小英. 紫茎泽兰在 Cd、Zn、Pb 和 Cu 胁迫下的耐性和富集特征研究 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2013.
- [68] 刘小文, 齐成媚, 欧阳灿斌, 等. Pb、Cd 及其复合污染对紫茎泽兰生长及吸收富集特征的影响 [J]. *生态环境学报*, 2014, 23(5): 876-883.
- [69] 闫乾胜, 杨婕, 李华民, 等. 入侵物种紫茎泽兰化学成分及生物活性研究进展 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2006(1): 70-73.
- [70] Xiang N, Chen F Z, Yang Y J, et al. Aphicidal activity of an ageraphorone extract from *Eupatorium adenophorum* against *pseudoregma bambucicola* (Homoptera: Aphididae, Takahashi) [J]. *Journal of Insect Science*, 2015(1): 81.
- [71] Samuel L, Lalroluanga, Muthukumar R B, et al. Larvicidal activity of *Ipomoea cairica* (L.) sweet and *Ageratina adenophora* (spreng.) King & H. Rob. plant extracts against arboviral and filarial vector, *Culex quinquefasciatus* say (Diptera: Culicidae) [J]. *Experimental Parasitology*, 2014, 141: 112-121.
- [72] Nong X, Tan Y J, Wang J H, et al. Evaluation acaricidal efficacy of botanical extract from *Eupatorium adenophorum* against the hard tick *Haemaphysalis longicornis* (Acari: Ixodidae) [J]. *Experimental Parasitology*, 2013, 135(3): 558-563.
- [73] 戴美玲, 李强, 解燕, 等. 紫茎泽兰提取物对烟草疫霉菌的抑制作用研究 [J]. *中国烟草学报*, 2018, 24(6): 130-137.
- [74] Jin Y, Hou L Y, Zhang M Z, et al. Antiviral activity of *Eupatorium adenophorum* leaf extract against tobacco mosaic virus [J]. *Crop Protection*, 2014, 60: 28-33.
- [75] Balunas M J, Kinghorn A D. Drug discovery from medicinal plants [J]. *Life Science*, 2005, 78(5): 431-441.
- [76] 刘辉, 宋章会, 冯杰. 紫茎泽兰脱毒饲料的研究进展 [J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2012(11): 37-39.

- [77] 唐晓萍,段纲,李晓惠,等. 紫茎泽兰的生物学特点及其在畜牧生产中的应用[J]. 动物医学进展, 2019, 40(2): 120-123.
- [78] 陈金发,廖茂芪,周家兴,等. 紫茎泽兰茎秆厌氧发酵产甲烷[J]. 环境工程, 2014, 32(4): 153-157.
- [79] Liu G, Tang H R, Fan J J, et al. Removal of 2,4,6-trichlorophenol from water by *Eupatorium adenophorum* biochar-loaded nano-iron/nickel[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 289: 121734.
- [80] Chan K Y, Xu Z. Biochar: Nutrient properties and their enhancement. *Biochar for environmental management* [J]. *Science and Technology*, 2009: 67-81.
- [81] Harvey O R, Herbert B E, Kuo L J, et al. Generalized two-dimensional perturbation correlation infrared spectroscopy reveals mechanisms for the development of surface charge and recalcitrance in plant-derived biochars [J]. *Environmental Science and Technology*, 2012, 46(19): 10641-10650.
- [82] Kolodyńska D, Wntrzak R, Leahy J J, et al. Kinetic and adsorptive characterization of biochar in metal ions removal [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, 197: 295-305.
- [83] Li Y, Liu X, Wu X, et al. Effects of biochars on the fate of acetochlor in soil and on its uptake in maize seedling [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 241: 710-719.
- [84] 邹刚华,戴敏洁,赵凤亮,等. 海南典型农林废弃物生物炭特性分析[J/OL]. 热带作物学报( <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1019.S.20200302.1206.042.html> ).
- [85] Pandit N R, Mulder J, Hale S E, et al. Biochar from "Kon Tiki" flame curtain and other kilns: Effects of nutrient enrichment and kiln type on crop yield and soil chemistry [J]. *PLoS One*, 2017, 12(4): e0176378.
- [86] Gámiz B, Velarde P, Spokas K A, et al. Biochar soil additions affect herbicide fate: Importance of application timing and feedstock species [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, 65(15): 3109-3117.
- [87] Pandit N R, Mulder J, Hale S E, et al. Biochar improves maize growth by alleviation of nutrient stress in a moderately acidic low-input Nepalese soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 625: 1380-1389.
- [88] Qin F, Wen B, Shan X Q, et al. Mechanisms of competitive adsorption of Pb, Cu, and Cd on peat [J]. *Environmental Pollution*, 2006, 144(2): 669-680.
- [89] 付永胜,赵君凤,王群,等. 木质素离子交换树脂对重金属离子的吸附效能[J]. 环境工程学报, 2016, 10(8): 4314-4318.
- [90] Zhang H L, Cai H Q, Xia Y, et al. An L-cystine/L-cysteine impregnated nanofiltration membrane with the superior performance of an anchoring heavy metal in wastewater [J]. *Rsc Advances*, 2020, 10(6): 3438-3449.
- [91] Vaneekhaute C, Darveau O, Meers E. Fate of micronutrients and heavy metals in digestate processing using vibrating reversed osmosis as resource recovery technology [J]. *Separation and Purification Technology*, 2019, 223: 81-87.
- [92] Chi T, Zuo J, Liu F. Performance and mechanism for cadmium and lead adsorption from water and soil by corn straw biochar [J]. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 2017, 11(2): 15.
- [93] 杨凯钧. 紫茎泽兰 (*Eupatorium coelestinum* L.) 对废水中  $Cd^{2+}$  的吸附特性研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2015.
- [94] Chen J F, Ping Y. Equilibrium kinetics studies on the biosorption of Cu(II) from aqueous solutions by a new adsorbent from a *Eupatorium adenophorum* speng/buckwheat straw mixture [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2015, 53(3): 778-784.
- [95] 李飞跃,许吉宏,周亚林,等. 不同温度下制备的生物炭对水相  $Cu^{2+}$  的吸附表现 [J/OL]. 生态与农村环境学报 ( <https://doi.org/10.19741/j.issn.1673-4831.2019.0335> ).
- [96] 陈金发,宋大刚,杨沙,等. 炭化紫茎泽兰吸附生活污水中的有机物[J]. 环境工程学报, 2013, 7(6): 2197-2202.
- [97] Lang Y H, Wei L, Hui W. Adsorption efficiencies of pentachlorophenol from aqueous solution onto biochars [J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(8): 2017-2023.
- [98] Cornelissen G, Martinsen V, Shitumbanuma V, et al. Biochar effect on maize yield and soil characteristics in five conservation farming sites in Zambia [J]. *Agronomy*, 2013, 3(2): 256-274.
- [99] Bruun E W, Petersen C T, Hansen E, et al. Biochar amendment to coarse sandy subsoil improves root growth and increases water retention [J]. *Soil Use and Management*, 2014, 30(1): 109-118.
- [100] Martinsen V, Alling V, Nurida N L, et al. pH effects of the addition of three biochars to acidic Indonesian mineral soils [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2015, 61(5): 821-834.
- [101] Gerard C, Raj P N, Paul T, et al. Emissions and char quality of flame-curtain "Kon Tiki" kilns for farmer-scale charcoal/biochar production [J]. *PLoS One*, 2016, 11(5): e0154617.
- [102] Gruba P, Mulder J. Relationship between aluminum in soils and soil water in mineral horizons of a range of acid forest soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(4): 1150-1157.
- [103] Coulombe C E, Wilding L P, Dixon J B. Overview of vertisols: Characteristics and impacts on society [J]. *Advances in Agronomy*, 1996, 57(8): 289-375.
- [104] Sun F F, Lu S G. Biochars improve aggregate stability, water retention, and pore-space properties of clayey soil [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2014, 177(1): 26-33.

- [105] Hans S , Bishnu P , Vegard M , et al. Fourfold increase in pumpkin yield in response to low-dosage root zone application of urine-enhanced biochar to a fertile tropical soil [J]. *Agriculture* , 2015 , 5( 3) : 723–741.
- [106] Liu Y , Linson L , Kaur B S , et al. Impact of biochar amendment in agricultural soils on the sorption , desorption , and degradation of pesticides: A review [J]. *Science of the Total Environment* , 2018 , 645: 60–70.
- [107] Wang Y , Wang Y J , Wang L , et al. Reducing the bioavailability of PCBs in soil to plant by biochars assessed with triolein-embedded cellulose acetate membrane technique [J]. *Environmental Pollution* , 2013 , 174( 5) : 250–256.
- [108] Wang B , Gao B , Fang J. Recent advances in engineered biochar productions and applications [J]. *Critical Reviews in Environment Science and Technology* , 2017 , 47( 22) : 2158–2207.

## Advances in Preparation of Biochar from *Eupatorium Adenophorum* and Its Application

FENG Qianwei<sup>1</sup> , CHEN Miao<sup>1 2 4</sup> , LEE Xinqing<sup>3</sup> , JIANG Zonghong<sup>1</sup> ,  
MA Xianjie<sup>1</sup> , WANG Bing<sup>1 2 4</sup>

( 1.College of Resources and Environmental Engineering , Guizhou University , Guiyang 550025 , China; 2. Key Laboratory of Karst Georesources and Environment , Ministry of Education , Guizhou University , Guiyang 550025 , China; 3. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry , Institute of Geochemistry Chinese Academy of Sciences , Guiyang 550081 , China; 4. Guizhou Karst Environmental Ecosystems Observation and Research Station , Ministry of Education , Guiyang 550025 , China)

**Abstract:** As a worldwide harmful invasive plant , *Eupatorium adenophorum* has an adverse effects on agriculture , forestry , husbandry and even human health because of its strong adaptability , rapid diffusing speed and harmful substances. Therefore , how to effectively prevent , control and comprehensively utilize *Eupatorium adenophorum* has become a hot issue. Biochar is a carbon-rich solid material formed by pyrolysis and carbonization of organic substances under low or limited oxygen conditions. Due to its unique properties and potential value , it is widely used in agricultural soil amendment , environmental remediation and other fields. The pyrolysis of *Eupatorium adenophorum* to produce biochar not only reduces the production cost of biochar , but also protects the ecosystem and re-uses the waste efficiently. At present , although there are some studies on the preparation of biochar from *Eupatorium adenophorum* , the reports are relatively few , and the researches are scattered and conclusions are different from one to others. Therefore , it is necessary to review the current utilization status of *Eupatorium adenophorum* and the application potential of biochar. Based on the current research status of *Eupatorium adenophorum* in application , this paper analyzes the research value of the preparation of biochar from *Eupatorium adenophorum* and summarizes its application in environmental remediation and agricultural soil amendment , then puts forward the future research direction and prospect , with a aim to provide a reference for the coming researches.

**Key words:** *Eupatorium adenophorum*; biochar; environmental remediation; soil amendment