

3种典型水生生物物质热解特性的对比研究

岳霞^{1,2}, 陈德珍¹, 安青¹, 钦佩³

(1.同济大学 热能与环境工程研究所, 上海 201804; 2.内蒙古工业大学 机械工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051; 3.南京大学 盐生植物实验室, 江苏 南京 210023)

摘要: 文章通过对淡水芦苇、海水芦苇和互花米草的热解特性进行对比研究发现:互花米草的热解温度低于芦苇;互花米草炭和海水芦苇炭的比表面积大于淡水芦苇炭;互花米草炭和海水芦苇炭的灰分含量高,热值低;互花米草热解油的产率和热值均低于两种芦苇热解油,其中不含2~3环芳烃及其衍生物,单环芳烃及其衍生物的含量也较低。3种生物物质热解气中的CO₂含量比较为“互花米草>海水芦苇>淡水芦苇”;与CO₂含量顺序相反,其CO和H₂的含量为“淡水芦苇>海水芦苇>互花米草”。以上3种生物物质的热解特性差异由其“三组分”组成、无机盐含量及种类的差异所决定。

关键词: 芦苇; 互花米草; 无机盐; 热解; 产物特性

中图分类号: TK6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2022)11-1421-07

DOI:10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2022.11.019

0 引言

水生植物是生物质资源的重要组成部分。水生植物利用可有效避免出现生物质资源利用过程中与粮食作物争土地的问题。水生植物是生理上依附于水环境,并且至少部分生殖期处于水中或水体表面的植物,具有生长快、易繁殖、产量高的特点,代表着更为丰富的生物质资源。芦苇和互花米草是水生植物的主要群种,常在我国滨海河口盐沼湿地,与不同的植物群落相伴而生,对河口湿地起到抗风防浪、保滩护岸的重要作用。芦苇作为本土物种,在我国的分布面积约130万hm²,其在生长过程中会吸收并利用水体中的氮、磷等营养元素,因此须定期刈割以改善水体生态环境^[1]。刈割芦苇的同时也给下一轮芦苇的生长让出空间,可以得到更高的固碳量。互花米草作为入侵物种目前在我国的分布面积已经超过5.5万hm²。定期收割互花米草的地上部分加以利用,以阻止其种子的飘落和扩散是发挥互花米草生态和经济效益的有效手段^[2]。

刈割的芦苇和互花米草生物量巨大(5.8~7.6 kg/m²),但大都被废弃或以焚烧方式处理,造成了严重的环境污染和资源浪费。采用热解的方法,既可实现其减量化处理,又可清洁、低成本地

将低能量密度的芦苇和互花米草(干基14~18 MJ/kg)转化为高能量密度的固、液、气体产品,以实现水生生物质资源的回收和利用。

虽然芦苇和互花米草同属禾本科多年水生的草本植物,但二者的组分差异较大。互花米草主要生长于海滨盐沼地区,而芦苇既可在沼泽、湖泊等淡水中生长,也可在河口盐沼等含盐量较高的水体中生长。不同的生长环境会造成芦苇和互花米草无机盐积累量的差别,这些无机盐在原料的热解过程中具有催化作用^[3]。相对于陆生植物的热解研究,水生植物热解特性的研究目前还较缺乏。研究不同生长环境的芦苇和互花米草热解特性的差异,可为这两种水生植物以目标产物为导向的高效热解提供依据,有助于水生生物质资源的高值化利用。

1 原料与方法

1.1 实验原料

实验原料为冬季刈割的芦苇和互花米草秸秆。海水芦苇取自上海市崇明岛东滩的海滨地带;淡水芦苇取自浙江省西塘镇某湿地;互花米草取自江苏省盐城市。原料于阳光房中曝晒一周后机械破碎并过筛,保留粒径小于3cm的颗粒备用。3种生物物质的三组分含量、元素分析和工业分析

收稿日期: 2021-07-06。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0506004)。

作者简介: 岳霞(1989-),女,内蒙古呼和浩特人,博士研究生,研究方向为固体废弃物资源化利用技术。E-mail: yuexia995@126.com

通讯作者: 陈德珍(1969-),女,湖北孝感人,博士,教授,研究方向为固体废弃物资源化利用技术。E-mail: chendezhen@tongji.edu.cn

结果如表 1 所示。由表 1 可见,芦苇组成以半纤维素和木质素为主,互花米草的组成以纤维素和半纤维素为主。两种芦苇中的 C,H,O 元素的含量

差别不大,海水芦苇的 N 元素含量明显高于淡水芦苇。与芦苇相比,互花米草的 C 元素含量略高,而 O 元素含量较低。

表 1 3 种典型水生生物质的特性
Table 1 Characteristics of the three typical aquatic biomass

生物质原料	三组分含量(干燥基)			元素分析(干燥基)				工业分析(干燥基)		
	纤维素	半纤维素	木质素	C	H	O	N	固定碳	挥发分	灰分
淡水芦苇	16.26	25.00	26.72	40.22	5.64	47.26	0.64	14.45	79.31	6.24
海水芦苇	17.20	21.67	38.15	39.98	5.71	46.43	1.16	16.38	76.90	6.72
互花米草	34.04	29.85	9.73	42.84	5.17	41.66	0.79	18.41	72.05	9.54

3 种生物质的无机元素含量如表 2 所示。盐生环境和互花米草具有的盐腺结构,使 3 种生物质中的碱金属盐含量从高到低为“互花米草>海水芦苇>淡水芦苇”^[4]。当 K^+ , Na^+ 等一价离子存在时,会显著抑制植物对 Ca^{2+} , Mg^{2+} 等二价离子的吸收^[5]。淡水芦苇中碱土金属盐的含量最高,互花米草中碱土金属盐的含量最低。

表 2 3 种典型水生生物质中无机元素的含量
Table 2 Inorganic element content of the three typical aquatic biomass

无机元素	含量		
	淡水芦苇	海水芦苇	互花米草
K_2O	6.56	8.28	5.21
Na_2O	0.71	2.29	10.45
CaO	13.50	7.80	6.52
MgO	1.46	1.24	1.93
Al_2O_3	0.90	0.52	1.13
Fe_2O_3	4.59	2.24	1.49
MnO	0.30	0.57	0.18
ZnO	0.14	0.13	0.47
TiO_2	0.69	0.15	0.78
Cr_2O_3	0.40	—	—
CeO_2	0.42	—	—
P_2O_5	4.97	5.24	1.78
Cl	3.64	6.73	19.99
SO_3	3.97	6.64	5.57
SiO_2	57.75	58.17	44.50
总量	100	100	100

1.2 热解方法

热解实验在固定床反应器上进行,热解终温分别为 500,600,700 $^{\circ}C$ 。热解时以 N_2 为载气,流量为 10 mL/min,升温速率为 10 $^{\circ}C/min$,终温停留时间 1 h。实验结束,待固定床冷却至室温,再收集生物炭。实验过程中,在冰水冷凝浴中收集热解油,用铝箔集气袋收集热解气。

1.3 样品分析方法及仪器

工业分析按照《固体生物质燃料工业分析方法》(GB/T 28731—2012)进行^[6]。采用 Elementer Vario EL III 型元素分析仪进行元素分析,通过差减法计算 O 元素的含量。采用 Axios-Max 型 X 射线荧光光谱仪测定样品中的无机元素含量。采用 D/max2500X 的 X 射线衍射仪生成 XRD 谱图,测试条件:Cu 靶 $K\alpha$ 辐射源, $\lambda=0.154\ 056\ nm$,管电压为 40 kV,管电流为 40 mA,扫描角度(2θ)为 10~90 $^{\circ}$,扫描速度为 0.02 $^{\circ}/s$ 。采用 Discovery SDT 650 热重分析仪分析热重行为。生物炭和热解油的产率通过称重得到。热解气先用铝箔采样袋收集,再通过 BT100-1L 型蠕动泵和 LML-1 型湿式气体流量计测量其体积。生物炭和热解油的热值均采用 XRY-1A 型氧弹式热量计测定。采用式(1)计算气体的热值。

$$HHV_{total} = C_1 HHV_1 + C_2 HHV_2 + \cdots + C_n HHV_n \quad (1)$$

式中: $C_1, C_2, \cdots, C_n$ 为气体中组分 1,2, $\cdots, n$ 的体积分数; $HHV_1, HHV_2, \cdots, HHV_n$ 为对应组分的高位热值。

采用 BSD-BET400 型全自动快速比表面积及孔径检测仪测试生物炭的比表面积和孔结构。采用 Brunauer, Emmett 和 Teller 模型(BET)计算比表面积。采用 Barrett-Joyner-Halenda (BJH)法计算孔容和平均孔径。采用 QP2010 型气相色谱-质谱联用仪测定热解油中用二氯甲烷萃取的有机组分。采用 7820 型气相色谱仪测定气体样品中的 $H_2, CO, CO_2, CH_4, C_2H_6, C_2H_4$ 和 C_3H_6 的含量。

2 结果与讨论

2.1 3 种典型水生生物质的热重分析

3 种生物质的热重(TG)和微分热重(DTG)曲

线如图 1 所示。热解过程呈现 3 个失重峰：小于 100 ℃ 的第一个失重峰因失水导致；200~400 ℃ 的第二个失重峰对应生物质中的半纤维素和纤维素的热解；大于 400 ℃ 的第三个失重峰对应木质素的热解^[7]。与淡水芦苇相比，海水芦苇和互花米草在热解的第二阶段均出现了一个肩峰，且互花米草的肩峰对应温度更低，说明互花米草的热解温度低于淡水和海水芦苇。这是由于海水芦苇、互花米草中高含量的碱金属盐对半纤维素和纤维素热

解的催化作用和淡水芦苇中的碱土金属盐对纤维素热解的抑制作用共同导致的^[8]。由于海水芦苇的木质素含量最高，且碱金属盐对木质素热解的催化作用有限，因此在热解高温段（400~800 ℃），海水芦苇的热失重峰比淡水芦苇和互花米草更宽，且最大热失重峰对应的温度（527.5 ℃）也滞后于淡水芦苇（515.9 ℃）和互花米草（489.3 ℃）^[9]。热重分析结果表明，互花米草热解时可选择比芦苇更低的热解温度。

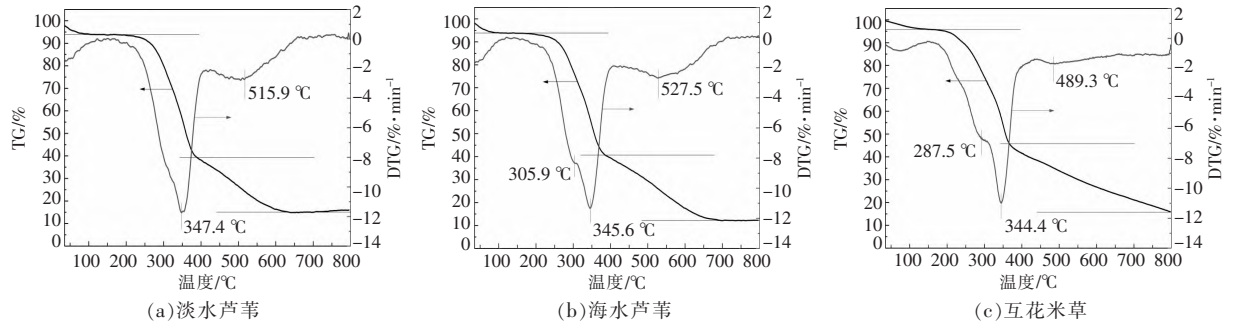


图 1 3 种典型水生生物质的 TG/DTG 曲线
Fig.1 TG-DTG curves of the three typical aquatic biomass

2.2 3 种典型水生生物质热解产物产率对比

三相热解产物的产率如图 2 所示，在相同热解条件下，互花米草炭的产率最高，海水芦苇炭和淡水芦苇炭的产率相近；热解油的产率从高到低

为“淡水芦苇>海水芦苇>互花米草”；热解气的产量从高到低为“互花米草>海水芦苇>淡水芦苇”。这说明生物质中无机盐的含量越高，对气体的生成越有利，这与前人的研究结论一致。

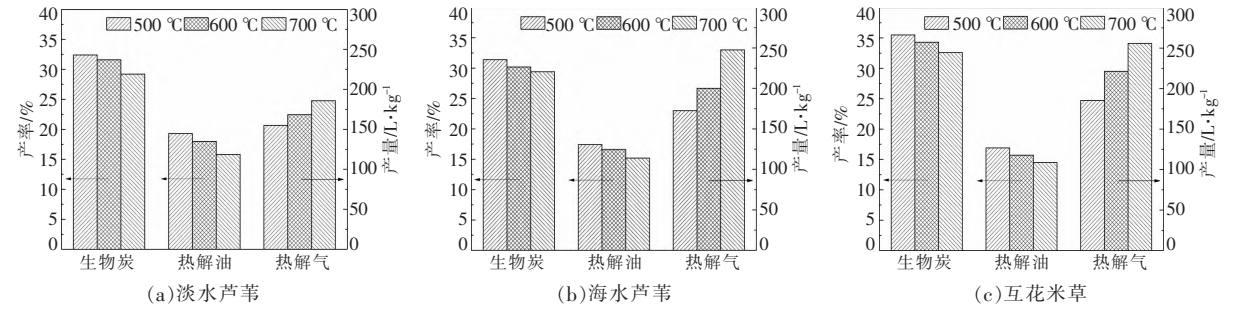


图 2 3 种典型水生生物质热解三相产物的产率
Fig.2 Pyrolysis products yields of the three typical aquatic biomass

2.3 3 种典型水生生物质热解炭特性对比

3 种典型水生生物质热解炭的特性如表 3 所示。随着热解温度的升高，生物炭的脱氢脱氧反应进行得更彻底，碳化程度增加。因此，生

物炭的固定碳含量随热解温度的升高而增加，挥发分含量随热解温度的升高而降低，灰分含量随热解温度的升高呈现先升高后降低的趋势。

表 3 3 种典型水生生物质热解炭的特性
Table 3 Characteristics of the biochars

生物质材料	热解温度/℃	固定碳/%	挥发分/%	灰分/%	热值/MJ·kg ⁻¹	比表面积/m ² ·g ⁻¹	孔容/cm ³ ·g ⁻¹	平均孔径/nm
淡水芦苇炭 (干燥基)/%	500	62.63	22.38	14.99	16.65	20.37	0.05	8.96
	600	71.46	11.82	16.72	19.34	52.64	0.08	6.27
	700	75.80	9.82	14.83	23.94	4.22	0.02	15.15

续表 3

生物质材料	热解温度/℃	固定碳/%	挥发分/%	灰分/%	热值/MJ·kg ⁻¹	比表面积/m ² ·g ⁻¹	孔容/cm ³ ·g ⁻¹	平均孔径/nm
海水芦苇炭 (干燥基)/%	500	57.83	23.47	18.70	16.32	61.67	0.06	3.94
	600	66.11	12.93	20.96	17.73	126.50	0.09	2.79
	700	69.73	11.54	18.73	20.86	107.11	0.10	3.62
互花米草炭 (干燥基)/%	500	53.39	19.95	26.66	14.93	83.41	0.04	3.38
	600	56.99	13.61	29.40	16.44	129.70	0.06	2.34
	700	65.56	7.34	27.10	18.12	113.84	0.09	3.59

相同热解条件下,生物炭的灰分含量从高到低为“互花米草炭>海水芦苇炭>淡水芦苇炭”,而生物炭中固定碳含量高低顺序则与之相反。生物炭的灰分中除部分 SiO₂ 外,主要为碱金属和碱土金属盐。图 3 显示,互花米草炭中含有的无机盐主要为 NaCl;海水芦苇炭中的无机盐主要为 NaCl 和 KCl,还有少量的 CaCO₃ 和 CaSO₄;低温热解获得的淡水芦苇炭中的无机盐主要为 KCl 和 CaCO₃,而 700 ℃的淡水芦苇炭中只检测到 SiO₂,其他无机盐均分解或挥发。生物炭的热值受其固定碳含量的影响,因此 3 种生物炭的热值的顺序

与其固定碳含量的顺序一致(表 3)。相同热解条件下,生物炭的比表面积从大到小为“互花米草炭>海水芦苇炭>淡水芦苇炭”,这是由于互花米草和海水芦苇中含量较高的碱金属盐在热解过程中挥发对生物炭的造孔作用,以及碱金属盐对焦油的催化裂解作用避免了焦油在炭中沉积而堵塞孔^[10]。后续可考虑淡水芦苇炭、海水芦苇炭和互花米草炭作为功能炭材料利用,如吸附剂或催化剂载体等。海水芦苇炭和互花米草炭中无机盐的含量较高,因此在其利用过程中须特别注意无机盐的影响。

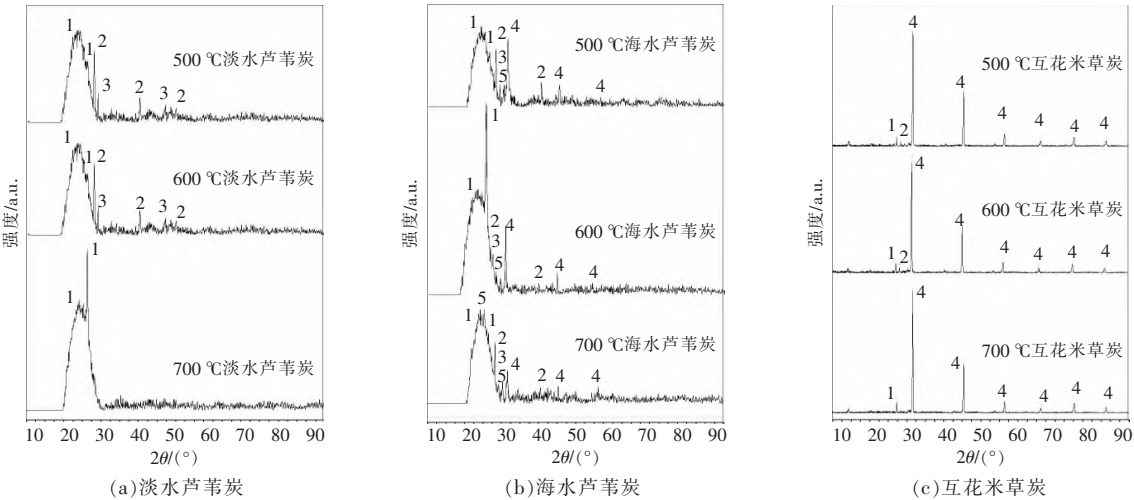
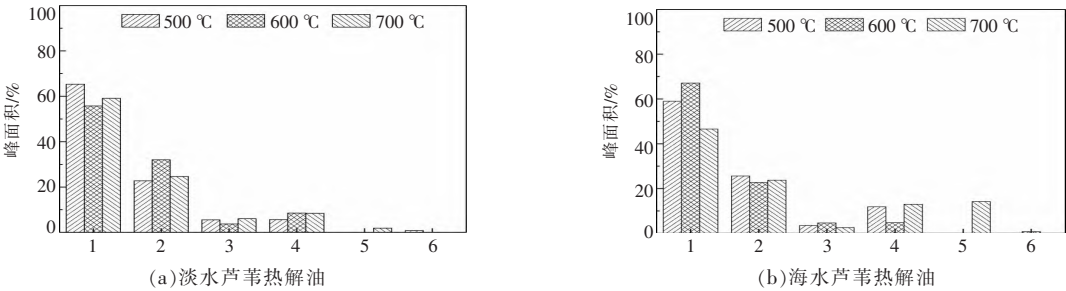


图 3 3 种典型水生生物质热解炭的 XRD 谱图
Fig.3 XRD diffraction patterns of the biochars
1-SiO₂;2-KCl;3-CaCO₃;4-NaCl;5-CaSO₄

2.4 3 种典型水生生物质热解油特性对比
淡水芦苇、海水芦苇和互花米草 3 种生物质

热解获得的 9 种热解油的有机组分和热值如图 4 所示。



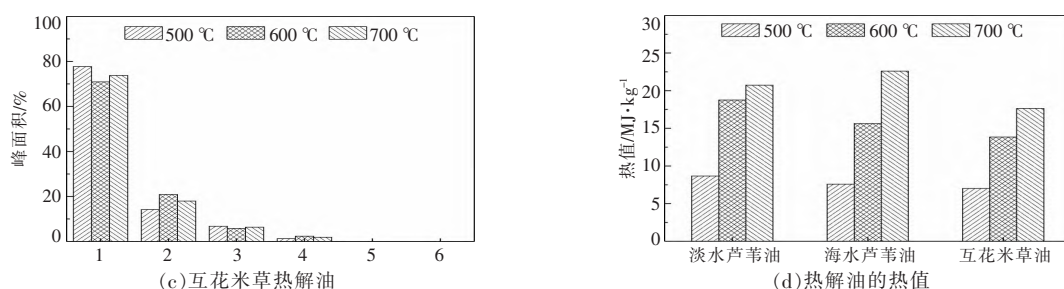


图 4 3 种典型水生生物质热解油的有机组分和热值

Fig.4 Organic components and calorific values of the pyrolysis oils

1-含氧小分子化合物;2-酚类;3-脂肪族化合物;4-单环芳烃及其衍生物;5-2~3 环芳烃及其衍生物;6-其他

淡水芦苇、海水芦苇热解油中的有机组分由含氧小分子化合物、酚类化合物、脂肪族化合物、单环芳烃及其衍生物和 2~3 环芳烃及其衍生物组成。互花米草热解油的组分中未检测到 2~3 环芳烃及其衍生物,且单环芳烃及其衍生物的含量也明显少于两种芦苇。相同热解条件下,热解油的热值从高到低为“淡水芦苇>海水芦苇>互花米草”。热解油的热值与其有机组分密切相关,互花米草热解油中含氧小分子化合物的含量最高,故其热值最低。700 °C 热解得到的海水芦苇热解油的热值高于淡水芦苇热解油,这与 700 °C 海水芦苇热解油中芳烃的含量较高有关。

热解油的有机组分与生物质“三组分”的含量有关。半纤维素的热解产物主要为乙酸、羟基丙酮、糠醛、呋喃类化合物以及少量未热解完全的脱水糖酮类物质;纤维素的热解产物主要为乙酸、醇类、酮类为代表的含氧小分子化合物和脱水糖苷分解得到的呋喃类化合物;木质素热解产物主要包括酚类化合物、二氢苯并呋喃等杂环化合物以

及苯、甲苯和乙苯等物质^[11]。热解油的有机组分也会受到生物质中无机盐含量和种类的影响。在热解过程中,碱金属可催化热解挥发分中的焦油裂解为小分子化合物^[9]。互花米草的纤维素和半纤维素含量高,木质素含量低,且碱金属盐含量高,因此其含氧小分子化合物的含量明显偏高,但不易生成芳烃类物质。芦苇热解油的产率高、热值高,可考虑采用催化裂解、催化酯化或乳化等手段加以利用,制备高品质的液体燃料。互花米草热解油产率低、热值低,含氧小分子化合物含量高,可考虑直接气化,以获取高附加值的气体产物。

2.5 3 种典型水生生物质热解气特性对比

3 种生物质热解所获得的热解气组分和热值如表 4 所示。热解过程释放的气体产物主要由生物质的一次裂解反应、挥发分中大分子的二次裂解反应以及挥发分与生成焦炭的二次反应综合作用而形成。3 种生物质热解气的主要组分均为 CO_2 , CO , H_2 , CH_4 以及少量的 C_2H_6 , C_2H_4 , C_3H_8 , C_3H_6 , 热解气的热值为 11.18~13.61 MJ/m^3 。

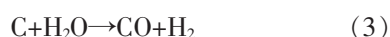
表 4 3 种典型水生生物质热解气的体积组分和热值
Table 4 Components and calorific values of the pyrolysis gases

原料	热解温度/°C	组分/%										HHV/ $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}$
		CH_4	C_2H_6	C_2H_4	C_2H_2	C_3H_8	C_3H_6	C_3H_4	H_2	CO	CO_2	
淡水芦苇	500	13.67	1.21	0.73	0.02	0.18	0.49	0.03	11.58	29.53	42.57	12.61
	600	14.19	1.03	0.75	0.01	0.14	0.46	0.04	15.81	30.23	37.33	13.27
	700	13.24	0.94	0.75	0.01	0.12	0.45	—	21.61	30.79	32.08	13.61
海水芦苇	500	11.36	1.45	0.61	0.03	0.27	0.45	—	6.40	29.42	50.01	11.18
	600	14.31	1.26	0.62	0.02	0.21	0.44	0.01	11.26	28.35	43.52	12.63
	700	14.61	1.13	0.62	0.02	0.18	0.42	0.02	17.58	28.00	37.43	13.37
互花米草	500	13.57	1.89	0.78	0.03	0.42	0.58	0.12	10.86	21.02	50.73	12.25
	600	13.83	1.81	0.71	0.02	0.40	0.48	0.12	12.46	21.86	48.31	12.45
	700	14.05	1.77	0.62	0.19	0.40	0.45	0.11	13.17	21.42	47.82	12.55

随着热解温度的升高,生物质热解气中 CO_2 的比例逐渐降低, CO 比例逐渐升高,其原因如

下:① CO_2 由羰基($\text{C}=\text{O}$)和羧基($-\text{COOH}$)分解而形成。这两种基团的热稳定性差,在低于 500 °C 时

就已分解完全^[12]。热解温度升高后,CO₂的生成量基本不变,而其他气体的生成量增多;②热解温度升高有利于CO₂和新生焦炭发生如式(2)的还原反应。H₂,CH₄,C₂H₆,C₂H₄,C₃H₈,C₃H₆主要由挥发的二次裂解反应生成,因此它们在热解气中的含量相对较低。热解气中H₂的比例随着热解温度的升高而增大,这是因为高温下有利于发生式(3)和式(4)的反应。



在相同热解条件下,3种热解气中CO₂的含量从高到低为“互花米草>海水芦苇>淡水芦苇”,而CO和H₂的含量顺序与CO₂的含量恰好相反。这同样与3种生物质的“三组分”含量和无机盐含量的差异有关。文献[13]的研究表明,CO₂主要来自于纤维素的热解。文献[14]的研究表明,NaCl会促进生物质热解产生CO₂。另外,一次热解产生的CO与热解过程中产生的H₂O会发生如式(4)的

水煤气反应,而碱金属盐对水煤气反应具有催化作用^[12]。淡水芦苇热解气中H₂的含量较高,与其原料中的Ca含量较高有关^[15]。Ca盐在热解过程中可与CO₂结合,间接提高了热解气中H₂的比例。

在实际生产过程中,热解气中还伴有部分焦油。焦油的沉积会造成燃料管道的堵塞和腐蚀,威胁系统的安全运行。以合成气或氢气为目标的催化裂解、CO₂催化重整或水蒸气催化重整是热解气常用的提质方法。针对芦苇和互花米草类分散性高、季节性刈割的水生生物质,使用小规模、移动式的热解设备是较经济的选择。在此种模式下,热解气提质后直接燃烧为系统供能较为合理。合成气和氢气的热值较低,其燃烧过程又不易控制;而甲烷无毒、热值高、燃烧稳定,作为目标产物比合成气和氢气更为理想。

表5对3种生物质及其对应热解产物的性质进行了总结,可为其以目标产物为导向的高效热解提供依据。

表5 3种典型水生生物质及其热解产物的性质对比

Table 5 Properties comparison of the three typical aquatic biomass and their corresponding pyrolysis products

项目	性质	淡水芦苇	海水芦苇	互花米草
原料成分	三组分含量	木质素和半纤维素为主	木质素为主	纤维素为主
	无机盐含量	低	中	高
	碱金属含量	低	中	高
	碱土金属含量	高	中	低
生物炭	产率	互花米草>海水芦苇≈淡水芦苇		
	比表面积	小	中	大
	无机盐含量	低	中	高
	无机盐种类	碱金属氯化盐 碱土金属碳酸盐	碱金属氯化盐(主) 碱土金属碳酸盐和硫酸盐(次)	碱金属氯化盐
	固定碳含量	高	中	低
	热值	高	中	低
热解油	产率	高	中	低
	热值	高	中(700℃热解油高于淡水芦苇)	
	含氧小分子化合物含量	低	中	高
	芳烃及其衍生物含量	中	高	低
热解气	产量	低	中	高
	热值	高	中	低
	CO ₂ 含量	低	中	高
	CO含量	高	中	低
	H ₂ 含量	高	中	低

3 结论

互花米草和海水芦苇的无机盐含量较高,且以碱金属盐为主;淡水芦苇的无机盐含量较低,以碱土金属盐为主。对互花米草进行热解处理时,可选择比芦苇低的热解温度。

海水芦苇炭和互花米草炭的比表面积大于淡水芦苇炭,可作为功能炭材料加以利用,但应注意其中无机盐的影响。

芦苇热解油的产率高、热值高,可考虑作为高品质液体燃料;互花米草热解油的产率低、热值

低、含氧小分子化合物含量高,可考虑将其直接气化以获得高附加值的气体产物。

互花米草和海水芦苇热解气中 CO_2 的含量高, CO 和 H_2 的含量低,故热值较低。对于水生生物质的小规模热解系统,以甲烷作为热解气提质的目标产物更为合理。

参考文献:

- [1] 张旭,孙娇,范赢,等.芦苇秆热解特性及动力学分析[J].生物质化学工程,2019,53:9-17.
- [2] 钦佩.互花米草生态效应两面观[J].中国环境报,2016(3):1-3.
- [3] 韩晓峰,李文涛,高丽娟,等.钾盐催化核桃壳热解特性的研究[J].可再生能源,2021,39(3):300-306.
- [4] 王卿.长江口盐沼植物群落分布动态及互花米草入侵的影响[D].上海:复旦大学,2007.
- [5] 韩志平,郭世荣,郑瑞娜,等.盐胁迫对小型西瓜幼苗体内离子分布的影响[J].植物营养与肥料学报,2013,19:908-917.
- [6] GB/T28731-2012,固体生物质燃料工业分析方法[S].
- [7] 朱正祥,马欢欢,陈宇,等.松塔热解特性及热解过程气体产物分析[J].可再生能源,2021,39(8):1001-1006.
- [8] 崔泽苹,李志合,李宁,等.水洗预处理对花生壳热解特性及产物的影响[J].可再生能源,2018,36:1431-1436.
- [9] 杨海平,陈汉平,杜胜磊,等.碱金属盐对生物质三组分热解的影响[J].中国电机工程学报,2009,29:70-75.
- [10] Gao Y, Sun R, Li A. In-situ self-activation strategy toward highly porous biochar for supercapacitors: Direct carbonization of marine algae [J]. J Electroanal Chem, 2021, 882: 114986.
- [11] 杨义.生物质催化热解和定向调控制取高品位液体燃料的研究[D].杭州:浙江大学,2019.
- [12] 江龙.生物质热解气化过程中内在碱金属、碱土金属的迁移及催化特性研究[D].武汉:华中科技大学,2013.
- [13] Li S, Lyons Hart J, Banyasz J. Real-time evolved gas analysis by FTIR method: an experimental study of cellulose pyrolysis [J]. Fuel, 2001, 80: 1809-1817.
- [14] Yang W, Hao W, Zsuzsa S. Release and transformation of chlorine and potassium during pyrolysis of KCl doped biomass [J]. Fuel, 2017, 197: 422-432.
- [15] Zhenya W, Fu W, Jianqin C. Pyrolysis of pine wood in a slowly heating fixed-bed reactor: potassium carbonate versus calcium hydroxide as a catalyst [J]. Fuel Process Technol, 2010, 91: 942-950.

Comparison of pyrolysis characteristics of three typical aquatic biomass

Yue Xia^{1,2}, Chen Dezhen¹, An Qing¹, Qin Pei³

(1. Thermal & Environmental Engineering Institute, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 3. Halophyte Research Lab, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Pyrolysis characteristics of three typical aquatic biomass including *Phragmites australis* (reed) from freshwater/seawater and *Sporobolus alterniflora* were compared in this paper. The results showed that pyrolysis temperature required for *Sporobolus alterniflora* which had higher salt content was lower than those of the seawater/freshwater *Phragmites australis*; and that the specific surface areas of *Sporobolus alterniflora* and seawater *Phragmites australis* biochars were larger than that of freshwater *Phragmites australis* biochar. However, the former two had higher ash contents and lower calorific values. The yield and calorific value of *Sporobolus alterniflora* oil were lower than those of the two reed pyrolysis oils; and heavy compounds with 2-3 benzene rings were not detected in its pyrolysis oil. The ascending order of CO_2 contents in the pyrolysis gases is *Sporobolus alterniflora* > seawater *Phragmites australis* > freshwater *Phragmites australis*; and the order of CO and H_2 contents in the pyrolysis gases was opposite to that of the CO_2 content. The differences in three components' content and inorganic salts of the three typical aquatic biomass resulted in the differences in their pyrolysis characteristics. These findings will help to achieve the efficient utilization of aquatic biomass resources.

Key words: *phragmites australis*; *sporobolus alterniflora*; inorganic salt; pyrolysis; product characteristics