

彭友舜,秦兆文,杨敬波. 炭化温度对 3 种果核类生物炭特性的影响[J]. 江苏农业科学,2018,46(23):304-307,317.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.23.076

# 炭化温度对 3 种果核类生物炭特性的影响

彭友舜, 秦兆文, 杨敬波

(河北科技师范学院,河北秦皇岛 06600)

**摘要:**以葡萄籽、山楂籽、樱桃籽为原材料,在氩气保护下,设置不同温度采用程序升温法制备生物炭,并进行理化性质表征及对  $Pb^{2+}$  最大吸附量试验,研究制备温度对 3 种果核类生物炭的理化性质及其特性的影响。结果表明,随着热解温度的升高,3 种果核类生物炭的 pH 值、灰分含量、比表面积及碳含量均逐渐增大,产率及氢、氧、氮含量逐渐减小;在 650、450、350 °C 条件下制备出的葡萄籽、山楂籽、樱桃籽生物炭对  $Pb^{2+}$  吸附效果最佳。随炭化温度升高,生物炭的比表面积逐渐增加,孔隙数量增加,结构发展更完整;脂肪族基团数量逐渐减少,芳香族基团数量逐渐增加,芳香化程度增强。

**关键词:**生物炭;葡萄籽;山楂籽;樱桃籽;果核;炭化温度;特性

**中图分类号:** X712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)23-0304-04

将农产品加工废弃物在限氧热解条件下制备生物炭,对于减少温室气体排放<sup>[1]</sup>、土壤改良<sup>[2-3]</sup>等具有重大意义。不仅如此,越来越多研究表明,生物炭作为一种富碳、细颗粒、多孔材料<sup>[4]</sup>,在吸附水、固定土壤中重金属离子<sup>[5]</sup>、有机污染物<sup>[6]</sup>等方面具有巨大潜力。目前,国内外以农作物秸秆、农业残渣、动物粪便、污泥等为原料,对其制备生物炭的制备方法、条件以及理化特性等均进行了不同程度的研究。周丹丹等以花生壳、松木屑为原料,采用限氧升温炭化法,在 200~500 °C 热裂解制得 8 种生物炭,并对其进行了表征<sup>[7]</sup>。吴诗雪<sup>[8]</sup>等以凤眼莲、稻草、污泥为原料,在 250~550 °C 下热解制备生物炭,并对其形貌特征、元素组成等进行了表征,随着热解温度的升高,生物炭产率下降,碳含量升高,氢、氧比例降低。我国是世界上农业废弃物产出量最大的国家,年排放量达 40 多亿 t。合理利用农业废弃物制备生物炭,是控制农业环境污染的渠道之一。燕山地区盛产水果,加工方式以粗加工为主,其籽粒作为农产品加工的副产物,不仅没有得到充分利用,还在一定程度上对环境造成了污染。本试验在前人研究的基础上,选择葡萄籽、山楂籽、樱桃籽 3 种典型的果核类生物质材料为前体制备生物炭,以期为水果加工副产物的资源化利用,促进农业环保、循环、可持续发展寻求新的途径。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验原料

选用葡萄籽、山楂籽、樱桃籽为试验原料。取材时间为 2016 年 9—11 月,取材地点为河北省昌黎县的河北科技师范学院农场。将葡萄籽、山楂籽、樱桃籽洗净,自然风干,3 d 后于 75 °C 下烘干 24 h,粉碎、过筛(孔径为 0.30 mm)后密封备用。

### 1.2 试验时间及地点

本试验均在河北科技师范学院河北省化学实验教学示范中心进行,试验起始于 2016 年 12 月,终止于 2017 年 5 月。

### 1.3 生物炭的制备

将备用的葡萄籽、山楂籽、樱桃籽置于 50 mL 陶瓷坩埚中,压实置于气氛炉中,全程在氩气氛围下,采用程序升温法进行热解炭化。设置热解升温速度为 10 °C/min,热解温度分别为 350、450、550、650 °C,保留时间为 3 h,冷却至室温后,研磨、过筛(孔径为 0.15 mm),密封、干燥保存,做好标记备用。

### 1.4 生物炭特性的表征方法

**1.4.1 产率** 称取一定量的备用原料置于 50 mL 坩埚中,在氩气氛炉中热解炭化,冷却至室温后取出,称量。前后质量比即为产率。

**1.4.2 pH 值** 按照 GB/T 12496.7—1999《木质活性炭试验方法 pH 值的测定》测定生物炭的 pH 值。

**1.4.3 灰分** 将 10 mL 坩埚在 800 °C 马弗炉中灼烧至恒质量,冷却至室温称量。取 1 g 生物炭置于已灼烧至恒质量的坩埚中,称量。将坩埚置于马弗炉中,逐渐升温至 800 °C,灰化 1 h,冷却后称量。计算灰分含量。

**1.4.4 样品形貌特征的测定** 利用扫描电子显微镜(KYKY2800,北京中科科仪计算技术有限责任公司)观测样品形貌及表面特征。选取生物炭样品放置于黑色背景的胶板上,调整视野的清晰程度,选择结构清晰并且完整的部位进行拍照,保存图片备用。

**1.4.5 生物炭的元素含量测定** 利用元素分析仪(NCHS-O,意大利欧维特公司)测定生物炭样品中 C、H、N 等元素的含量。测试条件:炉温设置为 1 200 °C,氮氢混合气体中 95% 为氮气、5% 为氢气,压力为 0.2 MPa,每个样品平行测定 2 次,取其平均值。

**1.4.6 生物炭红外光谱测定** 利用傅立叶变换红外光谱仪(IRTTracer-100,日本岛津公司)测定生物炭的红外光谱。将生物炭烘干、研磨过筛(孔径为 0.15 mm),按 1:1 500 比例与溴化钾(KBr)混合,置于玛瑙研钵中磨匀,压片,测试。

收稿日期:2018-01-15

基金项目:河北省省级科技计划工作类项目(编号:17227307D)。

作者简介:彭友舜(1966—),男,河北昌黎人,教授,主要从事天然产物化学研究。Tel:(0335)2039148;E-mail:qhdpys@163.com。

1.4.7 生物炭比表面积测定 按照 GB/T 19587—2004《气体吸附 BET 法测定固态物质比表面积》,利用高速自动比表面与孔隙度分析仪 (NOVA-2200E, 美国康塔公司) 测定生物炭比表面积。测试条件:将样品缓慢升温至 300 ℃,真空脱气 4 h,回填氮气。在液氮 (−196.15 ℃) 条件下进行等温吸附-脱附测定,  $P/P_0$  取值范围为 0.05~0.35 ( $P$  为氮气的分压;  $P_0$  为液氮温度下,氮气的饱和蒸气压)。

#### 1.5 生物炭对 $Pb^{2+}$ 的最大吸附量测定

按照 GB/T 13025.9—2012《制盐工业通用试验方法 铅的测定》方法,利用原子吸收分光光度计 (TAS-990, 北京普析通用仪器有限责任公司) 测定  $Pb^{2+}$  浓度。

## 2 结果与分析

### 2.1 产率分析

从表 1 可以看出,随热解温度升高,生物炭产率下降。热解温度从 350 ℃ 升到 650 ℃,葡萄籽生物炭产率从 48.89% 下降到 30.80%;山楂籽生物炭产率从 33.84% 下降到 25.54%;樱桃籽生物炭产率从 38.80% 下降到 23.73%。当温度从 350 上升到 450 ℃ 内时,产率下降明显,分别降低了 13.13、4.63、11.01 百分点,随后产率变化缓慢。李飞跃等用核桃壳制备不同温度的生物炭,结果表明,在 200~500 ℃ 阶段产率下降 52.6%<sup>[9]</sup>。

表 1 同一保留时间、不同热解温度下生物炭率的比较

温度 (℃)	产率 (%)		
	葡萄籽	山楂籽	樱桃籽
350	48.89	33.84	38.80
450	35.76	29.21	27.79
550	33.01	26.85	25.44
650	30.80	25.54	23.73

生物质中纤维素、半纤维素、木质素具有不同的分解温度<sup>[10]</sup>。在较低的热解温度下,果核中的纤维素、半纤维素开始大量分解,生物炭产率急剧下降;随着温度升高,原材料热解趋于完全,产率变化趋于平缓。

### 2.2 温度对生物炭 pH 值和灰分含量的影响

由表 2 可知,3 种生物炭的 pH 值均大于 8,随热解温度的升高,生物炭的 pH 值逐渐增大。当温度在 450~550 ℃ 的范围内时,葡萄籽、山楂籽生物炭 pH 值明显增加,分别上升了 0.38、0.34;当温度在 350~450 ℃ 的范围内时,樱桃籽生物炭上升明显,pH 值增加 0.64。生物炭热解过程中会形成一些酸性物质残留在生物炭中,随着热解温度的升高,这些物质逐渐挥发,因而高温生物炭中的酸性物质含量较少,pH 值相应增加<sup>[10]</sup>。

表 2 不同温度生物炭的灰分含量和 pH 值

温度 (℃)	灰分含量 (%)			pH 值		
	葡萄籽	山楂籽	樱桃籽	葡萄籽	山楂籽	樱桃籽
350	6.82	2.69	3.63	9.04	8.46	8.16
450	9.43	3.27	6.43	9.18	8.67	8.80
550	9.81	9.91	8.00	9.56	9.01	8.92
650	9.97	9.98	9.01	9.57	9.24	9.16

灰分是生物炭在氧气充分的条件下高温燃烧产生的无机物质。当温度由 350 ℃ 上升到 650 ℃ 时,葡萄籽生物炭的灰

分含量由 6.82% 增加到 9.97%,山楂籽生物炭的灰分含量由 2.69% 增加到 9.98%,樱桃籽生物炭的灰分含量由 3.63% 增加到 9.01%。

对 3 种生物炭的制备温度与灰分含量、pH 值进行相关性 ( $P < 0.05$ ) 分析,温度对 pH 值的相关系数  $r$  分别为 0.811 5、0.995 9、0.943 1,温度对灰分含量的相关系数  $r$  分别为 0.859 9、0.913 7、0.974 7,除葡萄籽生物炭达到正高度相关外,其余 2 种均达到正显著相关水平。在果核类生物炭制备过程中,随温度升高、有机物减少,硅 (Si)、钙 (Ca)、镁 (Mg) 等无机离子烧结、融合,形成了无机矿物质,碱金属析出量增加,灰分含量及 pH 值均呈增加趋势。Yuan 等研究不同温度下作物生物炭中的碱金属形态,结果证实,随热解温度升高,碱金属析出量增加<sup>[11]</sup>。

### 2.3 扫描电镜分析

3 种果核类生物炭扫描电镜图如图 1 所示,350 ℃ 山楂籽生物炭表面有少量褶皱及少量微孔;温度升至 450 ℃ 后,生物炭表面的孔径增大,孔壁变光滑,出现清晰的碳架结构,微孔数量增多;温度升至 550 ℃ 后,生物炭表面的孔径变大,孔壁烧蚀坍塌,出现层状结构,微孔数量明显增多;温度升至 650 ℃ 后,生物炭表面孔径进一步增大,层状结构越来越规则有序,且层层之间出现断裂,微孔数量有所减少。

350 ℃ 樱桃籽生物炭出现少量的褶皱,没有微孔出现;温度升至 450 ℃ 后出现层状结构,排列紧密有规则;温度升至 550 ℃ 后,樱桃籽生物炭表面微孔数量明显增多,出现了类似蜂窝状、孔径大小不一的孔隙结构;温度升至 650 ℃ 后,樱桃籽生物炭部分紧密有规则排列的孔隙结构坍塌,表面粗糙程度加剧。

以上分析表明,高温条件下热解得到的生物炭的炭结构排列越来越有规则,孔隙结构也越来越丰富,升高热解温度可促进生物炭形成孔隙结构。

### 2.4 元素分析

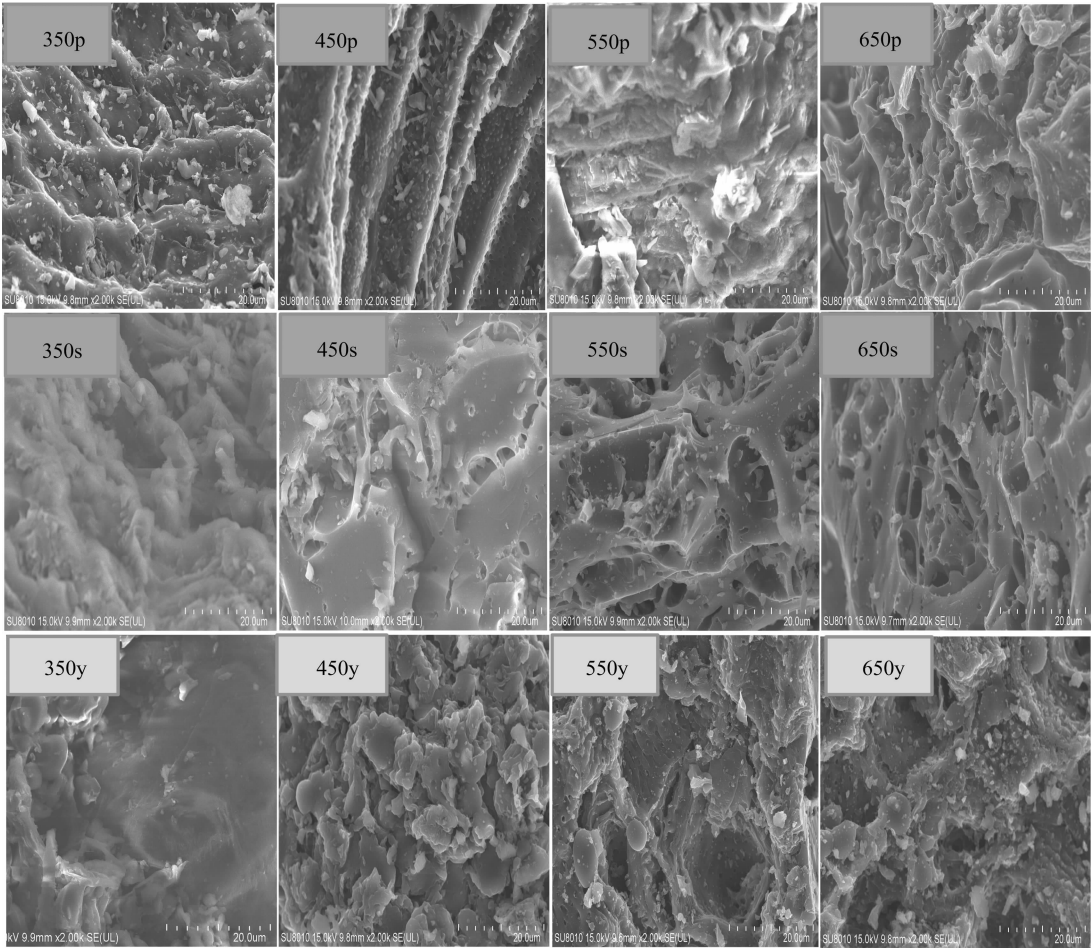
葡萄籽、山楂籽、樱桃籽生物炭的元素分析结果如表 3、表 4、表 5 所示。不同热解温度下 3 种生物炭中元素含量从大到小大致为  $C > O > H > N$ 。生物炭各元素含量随热解温度升高而发生改变,具体表现为: C 含量增大, H、O、N 含量均减小,这与 Sinha 等在亚麻籽生物炭的研究试验的元素分析结果<sup>[12]</sup>一致。

随着热解温度的上升,  $H/C$ 、 $O/C$ 、 $(O+N)/C$  均呈下降趋势,表明随着热解温度的升高,3 种生物炭的芳香性增强,亲水性、极性均减弱。这与孙克静等研究不同生物质原料水热生物炭特性的结果<sup>[13]</sup>一致。

### 2.5 红外分析

波数为 3 438  $cm^{-1}$  附近的峰是酚羟基或醇羟基振动产生的吸收峰<sup>[14]</sup>, 2 927、2 851  $cm^{-1}$  附近分别是脂肪性— $CH_2$  的不对称和对称 C—H 伸缩振动峰;波数为 1 600~1 450  $cm^{-1}$  附近的峰是芳环骨架振动产生的吸收峰, 880~680  $cm^{-1}$  附近的峰是苯环面外弯曲振动产生的吸收峰<sup>[15]</sup>。

由图 2、图 3、图 4 可知,不同热解温度条件下制备的果核类生物炭在 2 927、3 438、2 851、1 457、881  $cm^{-1}$  处出现吸收峰。随着热解温度的升高,在 3 438  $cm^{-1}$  附近的酚羟基或醇羟基振动吸收峰逐渐减弱,—OH 基团有所减少;在 2 927、



数字代表温度(℃), p、s、y 分别代表葡萄籽、山楂籽、樱桃籽生物炭  
图1 不同温度下生物炭扫描电镜图(2 000 ×)

表 3 不同温度下制备的葡萄籽生物炭的元素分析结果

温度(℃)	N 含量(%)	C 含量(%)	H 含量(%)	O 含量(%)	H/C 原子摩尔比	O/C 原子摩尔比	(O + N)/C 原子摩尔比
350	2.420	66.37	5.467	25.743	0.99	0.29	0.32
450	2.398	67.06	4.934	25.608	0.83	0.28	0.31
550	1.838	71.04	4.623	22.499	0.78	0.24	0.26
650	1.652	73.51	3.456	21.382	0.56	0.22	0.24

表 4 不同温度下制备的山楂籽生物炭的元素分析结果

温度(℃)	N 含量(%)	C 含量(%)	H 含量(%)	O 含量(%)	H/C 原子摩尔比	O/C 原子摩尔比	(O + N)/C 原子摩尔比
350	0.862	74.530	3.698	20.910	0.60	0.21	0.22
450	0.843	76.287	3.665	19.205	0.53	0.19	0.20
550	0.740	77.890	3.374	17.996	0.52	0.17	0.18
650	0.677	82.840	0.112	16.371	0.02	0.15	0.16

表 5 不同温度下制备的樱桃籽生物炭的元素分析结果

温度(℃)	N 含量(%)	C 含量(%)	H 含量(%)	O 含量(%)	H/C 原子摩尔比	O/C 原子摩尔比	(O + N)/C 原子摩尔比
350	2.107	56.18	5.052	36.661	1.08	0.49	0.52
450	1.908	68.90	4.578	24.614	0.80	0.27	0.29
550	1.805	78.38	3.905	15.910	0.60	0.15	0.17
650	1.518	82.45	0.132	15.900	0.02	0.14	0.16

2 851 cm<sup>-1</sup> 附件的振动吸收峰逐渐减弱直至消失,—CH<sub>2</sub>、—CH 基团减少直至消失;在 1 457 ~ 1 600 cm<sup>-1</sup> 范围内芳环骨架振动产生的吸收峰及 875 cm<sup>-1</sup> 处苯环面外弯曲振动吸收峰逐渐增强,表明随制备温度升高生物炭芳香性增强,极性

减弱,稳定性增强。  
2.6 比表面积分析  
由表 6 可知,在 350 ~ 450 ℃ 区间内,3 种生物炭的比表面积增加缓慢,450 ~ 650 ℃ 的区间内急剧增加,分别从

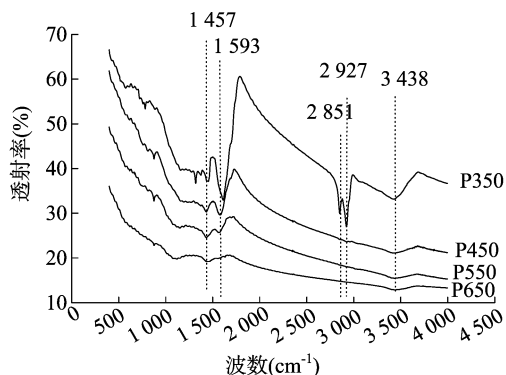


图2 不同热解温度葡萄籽生物炭的红外光谱

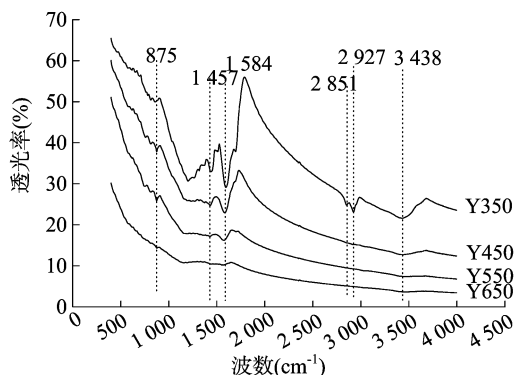


图4 不同热解温度樱桃生物炭的红外光谱

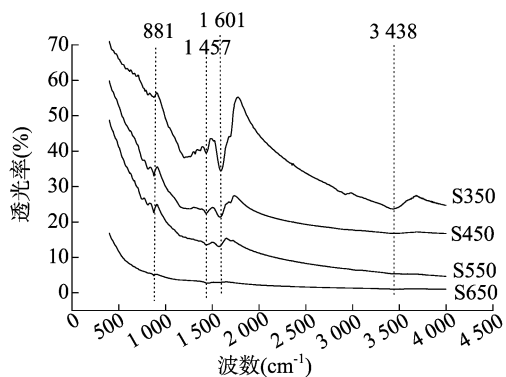


图3 不同热解温度山楂籽生物炭的红外光谱

表 6 不同热解温度葡萄籽、山楂籽生物炭的比表面积(3 h)

温度 (℃)	比表面积(m <sup>2</sup> /g)		
	葡萄籽	山楂籽	樱桃籽
350	0.041 1	0.102 4	0.076 8
450	0.202 3	0.254 4	0.092 2
550	2.061 0	15.360 0	13.880 0
650	5.230 0	18.030 0	14.100 0

量分解,气体产物及挥发性物质的快速释放引起小孔大量开放,比表面积急剧增加。

2.7 制备温度与生物炭基本特性的相关性分析

采用 OrjinPro 8 软件对生物炭制备温度和特性进行相关性分析,结果如表 7 所示,在 0.05 水平上均呈显著性相关或高度相关。

表 7 生物炭特性和热解温度的相关性分析

温度	与温度的相关系数									
	产率	灰分含量	pH 值	N 含量	C 含量	H 含量	O 含量	H/C	O/C	(O + N)/C
葡萄籽	-0.907 90	0.859 90	0.811 46	-0.946	0.971 2	-0.962 78	-0.948 11	-0.974 19	-0.976 83	-0.969 36
山楂籽	-0.964 0	0.913 69	0.995 88	-0.972	0.957 9	-0.819 97	-0.998 04	-0.844 96	-1.000 00	-1.000 00
樱桃籽	-0.905 5	0.974 74	0.943 12	-0.984	0.976 6	-0.889 53	-0.932 73	-0.972 24	-0.928 02	-0.925 27

注:|r|≥0.9 为显著相关,0.8≤|r|<0.9 为高度相关。

2.8 对 Pb<sup>2+</sup> 的最大吸附量

在 25℃下,在 0~100 ng/mL 浓度范围内,铅离子浓度与吸光度呈线性关系,吸附标准曲线方程为  $y = 0.003\ 91x - 0.004\ 96$ ,  $r^2 = 0.999\ 3$ 。

由表 8 可知,650℃葡萄籽生物炭对 Pb<sup>2+</sup> 吸附量最大,达 25.58 mg/g;450℃山楂籽生物炭对 Pb<sup>2+</sup> 的吸附量最大,达 42.51 mg/g;350℃樱桃籽生物炭对 Pb<sup>2+</sup> 的吸附量最大,为 24.56 mg/g。

表 8 不同炭化温度葡萄籽和山楂籽生物炭批量吸附

温度 (℃)	生物炭对 Pb <sup>2+</sup> 的吸附量(mg/g)		
	葡萄籽	山楂籽	樱桃籽
350	14.84	23.72	24.56
450	18.07	42.51	14.33
550	22.26	37.58	13.82
650	25.58	34.21	5.38

5 结论

热解温度不同,葡萄籽、山楂籽、樱桃籽生物炭表现出的理

化性质也有所不同。随热解温度升高,生物炭的产率逐渐减小,pH 值、灰分含量则逐渐增加,在 350~550℃范围内变化显著。

升高热解温度能促进生物炭孔隙结构的发展以及微孔的生成。随着热解温度的上升,生物炭的比表面积呈上升趋势,炭结构排列规则性增强,孔隙数量增加,孔结构发展更完整。随热解温度升高,3 种生物炭中 C 含量加大,H、O、N 含量和 H/C、O/C、(O + N)/C 的比值均减小,生物炭的亲水性和极性减弱,芳香性加强。随热解温度升高,3 种生物炭中脂肪族基团数量逐渐减少,芳香族基团数量逐渐增加,芳香化程度变强。650℃葡萄籽生物炭、450℃山楂籽生物炭、350℃樱桃籽生物炭对 Pb<sup>2+</sup> 的吸附效果最佳。

参考文献:

[1]陈温福,张伟明,孟 军. 农用生物炭研究进展与前景[J]. 中国农业科学,2013,46(16):3324-3333.  
[2]孟 军,张伟明,王绍斌,等. 农林废弃物炭化还田技术的应用与前景[J]. 沈阳农业大学学报,2011,42(4):387-392.

(下转第 317 页)

策前瞻性研究。

### 3.4 优化养殖污染防治财政投入,推动畜禽养殖绿色发展

整合中央财政农村环境连片整治、污染物总量减排、规模化养殖场标准化改扩建、大中型沼气工程等财政扶持资金,设立畜禽养殖污染治理专项资金,并采取贷款贴息等方式支持养殖场建设治污设施,降低养殖场治污投入成本,提高养殖户开展污染防治的积极性。完善财税、信贷等经济激励政策,扶持养殖场建设沼气发酵工程、生物垫床、有机肥生产线等设施,开展畜禽粪便的资源化利用研究。注重对畜禽粪便综合利用的终端产品予以补贴,继续实施对使用畜禽养殖粪便和废水生产有机肥企业的政府补贴,适度提高畜禽粪便收集、运输成本和有机肥销售价格补贴水平,加大对畜禽养殖废水资源化利用等新型实用技术研发与产业化的补贴力度,提高有机肥生产企业市场竞争力。

### 参考文献:

- [1]江苏省统计局. 江苏统计年鉴 2016[M]. 北京:中国统计出版社,2016.
- [2]陈振翔,李小路,徐静婧. 高邮湖水环境污染防治对策研究[J]. 污染防治技术,2012(3):70-73.
- [3]Teiraesmatges M R, Flotats X. A method for livestock waste management planning in NE Spain. [J]. Waste Management,2003, 23(10):917-932.
- [4]杨飞,杨世琦,诸云强,等. 中国近 30 年畜禽养殖量及其耕地氮污染负荷分析[J]. 农业工程学报,2013,29(5):1-11.
- [5]耿维,胡林,崔建宇,等. 中国区域畜禽粪便能源潜力及总量控制研究[J]. 农业工程学报,2013,29(1):171-179,295.
- [6]阎波杰,潘瑜春,闫静杰. 安徽省县域耕地畜禽养殖废弃物养分负荷时空演变特征[J]. 生态与农村环境学报,2016,32(3):466-472.

(上接第 307 页)

- [3]李冬,陈蕾,夏阳,等. 生物炭改良剂对小白菜生长及低质土壤氮磷利用的影响[J]. 环境科学学报,2014,34(9):2384-2391.
- [4]黄华,王雅雄,唐景,等. 不同烧制温度下玉米秸秆生物炭的性质及对萘的吸附性能[J]. 环境科学,2014,35(5):1884-1890.
- [5]Uchimiya M, Chang S, Klasson K T. Screening biochars for heavy metal retention in soil:role of oxygen functional groups[J]. Journal of Hazardous Materials,2011,190(1/2/3):432-441.
- [6]Beesley L, Marmiroli M. The immobilisation and retention of soluble arsenic, cadmium and zinc by biochar[J]. Environmental Pollution, 2011,159(2):474-480.
- [7]周丹丹,吴文卫,赵婧,等. 花生壳和松林屑制备的生物炭对  $\text{Cu}^{2+}$  的吸附研究[J]. 生态环境学报,2016,25(3):523-530.
- [8]吴诗雪,王欣,陈灿,等. 凤眼莲、稻草和污泥制备生物炭的特征表征及环境影响解析[J]. 环境科学学报,2015,35(12):

- [7]马永喜,王颖. 规模化畜牧养殖废弃物处理的环境经济优化研究——基于生态经济模型的分析[J]. 农业现代化研究,2014,35(3):340-344.
- [8]黄治平,郝利,高尚宾,等. 西柏店村级养殖种植园区氮素流和能量流分析[J]. 农业环境科学学报,2011,30(2):395-403.
- [9]侯勇,高志岭,马文奇,等. 京郊典型集约化“农田-畜牧”生产系统氮素流动特征[J]. 生态学报,2012,32(4):1028-1036.
- [10]Asai M, Langer V. Collaborative partnerships between organic farmers in livestock-intensive areas of Denmark [J]. Organic Agriculture,2014,4(1):63-77.
- [11]Andersson H, Larsé K, Lagerkvist C J, et al. Farm cooperation to improve sustainability[J]. Ambio,2005,34(4):383-387.
- [12]杨飞,杨世琦,诸云强,等. 中国近 30 年畜禽养殖量及其耕地氮污染负荷分析[J]. 农业工程学报,2013,29(5):1-11.
- [13]王方浩,马文奇,窦争霞,等. 中国畜禽粪便产生量估算及环境效应[J]. 中国环境科学,2006,26(5):614-617.
- [14]陈敏鹏,陈吉宁. 中国区域土壤表观氮磷平衡清单及政策建议[J]. 环境科学,2007,28(6):1305-1310.
- [15]胡浩,郭利京. 农区畜牧业发展的环境制约及评价——基于江苏省的实证分析[J]. 农业技术经济,2011(6):36-42.
- [16]李飞,董锁成. 西部地区畜禽养殖污染负荷与资源化路径研究[J]. 资源科学,2011,33(11):2204-2211.
- [17]沈其荣. 土壤肥科学通论[M]. 北京:高等教育出版社,2001.
- [18]Dinda S. Environmental kuznets curve hypothesis: a survey [J]. Ecological Economics,2004,49(4):431-455.
- [19]孟祥海,周海川,张俊飏. 中国畜禽污染时空特征分析与环境库兹涅茨曲线验证[J]. 干旱区资源与环境,2015,29(11):104-108.
- [20]李飞,董锁成. 西部地区畜禽养殖污染负荷与资源化路径研究[J]. 资源科学,2011,33(11):2204-2211.
- [21]张晖,胡浩. 农业面源污染的环境库兹涅茨曲线验证——基于江苏省时序数据的分析[J]. 中国农村经济,2009(4):48-53.

4011-4032.

- [9]李飞跃,汪建飞,谢越,等. 热解温度对生物质炭碳保留量及稳定性的影响[J]. 农业工程学报,2015,31(4):266-271.
- [10]罗烨. 芦竹制备生物炭的特性表征及对土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放的抑制[D]. 青岛:中国海洋大学,2012:22-23.
- [11]Yuan J H, Xu R K, Zhang H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures [J]. Bioresource Technology,2011,102(3):3488-3497.
- [12]Sinha R, Kumar S, Singh R K. Production of biofuel and biochar by thermal pyrolysis of linseed seed [J]. Biomass Conversion and Biorefinery,2013,3(4):327-335.
- [13]孙克静,张海荣,唐景春. 不同生物质原料水热生物炭特性的研究[J]. 农业环境科学学报,2014,33(11):2260-2265.
- [14]陆海楠,胡学玉,刘红伟. 不同裂解条件对生物炭稳定性的影响[J]. 环境科学与技术,2013,36(8):11-14.
- [15]李瑞月,陈德,李恋卿,等. 不同作物秸秆生物炭对溶液中  $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$  的吸附[J]. 农业环境科学学报,2015,34(5):1001-1008.