



移动扫码阅读

李丹琼, 周来, 张谷春, 等. 生物质灰理化特性及其应用于土壤改良的研究进展, 2020, 34(1): 1-7.

LI Danqiong, ZHOU Lai, ZHANG Guchun, et al. Review on the physicochemical properties of biomass ash and its application in soil amelioration and remediation[J]. Energy Environmental Protection, 2020, 34(1): 1-7.

生物质灰理化特性及其应用于土壤改良的研究进展

李丹琼¹, 周来^{1,*}, 张谷春², 朱雪强¹, 章梅¹, 陈子铃¹

(1. 中国矿业大学 环境与测绘学院, 江苏 徐州 221006; 2. 江苏地质矿产设计研究院, 江苏 徐州 221006)

摘要:为拓展生物质灰在土壤环境修复中的应用, 比较了12种生物质灰的来源与理化特性, 分析了不同熔点下生物质灰中灰粒的微观形态、多孔结构与化学组成异同特征。基于灰分理化特性, 论述了不同类别生物质灰对土壤改良的机理与应用优势。分析认为: 受生物质原料来源多样和燃烧熔点的影响, 生物质灰化学组成和结构呈现多样性; 生物质灰对土壤的改良作用包括土壤物理结构改善、团聚体稳定性增强、酸性土壤性质改善、溶液离子含量提高、土壤重金属钝化和植物生长促进。

关键词: 生物质灰; 理化特性; 联合修复; 土壤污染; 修复剂

中图分类号: X53

文献标识码: A

文章编号: 1006-8759(2020)01-0001-07

Review on the physicochemical properties of biomass ash and its application in soil amelioration and remediation

LI Danqiong¹, ZHOU Lai^{1,*}, ZHANG Guchun², ZHU Xueqiang¹, Zhang Mei¹, CHEN Ziling¹

(1. School of Environment Science and Spatial Informatics,

China University of Mining and Technology, Xuzhou 221006, China;

2. Jiangsu Institute of Geology and Mineral Design, Xuzhou 221006, China)

Abstract: In order to explore the application of biomass ash in soil amelioration and remediation, the sources and physicochemical properties of 12 kinds of biomass ash were compared, and the similarities and differences of microscopic morphology, porous structure and chemical composition of biomass ash particles at different melting point were analyzed. According to the physicochemical properties of ash particles, the mechanism of soil amelioration and the advantages of different kinds of biomass ash were discussed. It was concluded that the chemical composition and porous structure of biomass ash were diverse because of different sources and melting points. Soil amelioration was achieved through improving the physical structure of soil, the stability of soil aggregates, the properties of acid soil and the content of ions, as well as heavy metal passivation and plant growth promotion.

Key Words: Biomass ash; Physicochemical properties; Combined remediation; Soil pollution; Remediation agent

0 引言

生物质灰(Biomass ash)是生物质原料经燃烧等处理后剩余的物质^[1]。受多种燃烧工艺决定,

目前国内对于生物质灰的制取还没有统一对应的标准^[2-3]。当代资源匮乏,环境问题日益严重,生物质灰具有低廉绿色、二次污染小的特点,相比于其他材料更有利于实现废弃物资源化、无害化。

收稿日期: 2019-09-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572218); 国家自然科学基金项目(41002048); 中国煤炭地质总局科技发展专项资金项目(中煤地发科技[2017]487-10)

第一作者简介: 李丹琼(1993-), 女, 安徽安庆人, 硕士研究生, 主要从事土壤与地下水污染等领域的研究工作。Email: Lidq@cumt.edu.cn

通讯作者简介: 周来(1981-), 男, 江苏扬州人, 博士后, 主要从事土壤与地下水污染修复、矿区水环境保护与生态修复等方向的研究。Email: zhoulai99@cumt.edu.cn

目前,生物质灰在土壤中的应用主要可以作为土壤改良剂、肥料等。生物质种类广泛,不同生物质燃烧所得生物质灰的特性有所差别。因不同来源和特定燃烧工艺形成的生物质灰具有特殊的理化性质,并表现一定的修复功能性,故可以应用到土壤改良与修复中。本文在总结 12 种生物质灰的理化特性的基础上,对生物质灰在土壤改良与修复中的应用研究进行了述评,为拓展生物质灰在环境修复中应用提供基础信息。

1 常见生物质灰组成与理化特性

1.1 来源与组成

因生物质燃料种类繁多,其形成的生物质灰呈现特性多样。从表 1 可以看出,各种生物质灰

主要由 SiO_2 、 CaO 、 K_2O 、 P_2O_5 、 Na_2O 等氧化物组成,不同的生物质灰中各种氧化物的含量存在较大差别^[4-6]。随着灰化温度的升高,灰分含量直线下降,特别是在较高温度下(例如 1 000 °C), K_2O 、 Na_2O 、Cl 的相对含量也有所下降,这表明灰分的重量损失可能是因为氯化物形式的 K 和 Na 的挥发^[7-8]。灰化温度为 450 ~ 815 °C 时, MgO 、 CaO 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 和非金属元素 S、P 和 Si 的氧化物的含量由于灰分含量降低而呈现增加的趋势,表明由此类元素组成的化合物较稳定或不易挥发,即碱含量越高,灰分含量的变化越大。例如,由于非挥发性 SiO_2 是主要的灰分含量,稻壳的灰分含量随温度的变化较小,而含 K 含量较高的玉米秸秆灰分从 11.1% 降至 6.7%。

表 1 常见生物质灰在不同灰化温度下的灰分化学组成^[4-6]

种类	灰化温度(°C)	灰分	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	SO_3	K_2O	CaO	Fe_2O_3	Cl	%
玉米秸秆	450	11.10	0.40	2.20	1.60	36.30	4.30	3.70	29.40	6.10	0.80	15.00	
	600	9.30	0.70	3.60	1.80	41.00	5.80	3.70	25.10	6.50	0.60	11.20	
	815	8.80	0.60	3.70	2.80	45.20	8.50	4.60	21.40	9.60	0.90	2.00	
	1 000	6.70	0.60	2.40	2.00	45.80	4.30	9.20	17.70	14.70	0.80	2.30	
稻草	450	14.60	1.10	3.50	1.10	42.80	3.10	7.90	19.50	8.00	0.50	10.90	
	600	12.70	1.00	2.30	0.90	52.00	2.50	6.50	17.80	7.70	0.80	7.10	
	815	11.10	0.90	3.90	1.60	51.30	5.10	10.30	13.50	9.60	0.80	1.30	
	1 000	10.90	0.40	3.60	2.00	57.10	4.10	7.20	12.00	10.00	1.10	0.80	
麦秸	450	14.10	0.70	0.80	1.30	62.50	1.40	2.70	17.60	2.80	0.40	9.40	
	600	12.90	1.10	1.00	1.50	53.80	2.80	3.70	21.30	4.20	0.60	10.10	
	815	12.10	1.00	0.70	1.40	66.20	2.70	4.50	15.30	4.10	0.70	3.40	
	1 000	9.30	1.50	1.40	1.70	67.20	3.20	4.80	12.90	5.50	0.80	0.80	
杨树	450	2.90	0.80	3.40	5.40	38.20	5.70	5.80	10.50	26.10	2.90	0.60	
	600	2.60	0.70	4.10	6.90	26.80	7.00	5.50	8.20	34.80	3.80	1.50	
	815	2.20	0.70	5.20	5.10	29.20	9.00	8.70	9.20	27.40	3.00	1.10	
	1 000	2.00	0.80	3.40	7.10	29.60	6.50	10.00	5.70	32.30	3.10	0.60	
棉秆	600	2.90	2.40	6.40	5.80	18.20	7.10	9.50	17.10	26.10	3.80	2.80	
	815	2.00	2.10	7.70	5.50	19.60	7.60	8.70	14.40	29.20	4.10	0.50	
油菜秸秆	600	7.70	1.10	0.40	0.20	4.10	2.70	21.20	35.40	25.70	0.70	8.20	
	815	6.20	0.90	1.50	1.20	3.30	2.30	25.20	32.40	25.20	0.70	6.90	
松木	600	1.70	12.80	5.60	6.50	16.50	2.40	7.60	7.80	24.90	4.60	8.80	
	815	1.40	12.60	7.70	6.30	17.20	2.70	10.30	5.50	26.60	3.30	4.90	
竹子	600	0.90	—	4.50	—	19.20	5.30	8.20	49.20	6.00	3.10	1.10	
	815	0.80	—	4.70	2.80	25.60	6.40	7.20	43.70	5.80	2.00	0.80	
花生壳	600	—	0.99	5.46	3.13	24.25	5.69	9.60	18.60	19.70	5.18	3.30	
	815	—	0.82	6.27	7.26	27.80	3.72	8.40	15.50	20.30	8.48	0.09	

续表

种类	灰化温度(℃)	灰分	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	Cl
稻壳	600	18.20	0.39	0.55	0.36	94.79	—	0.09	1.86	0.75	0.86	0.18
	815	18.20	0.12	0.43	0.32	95.98	—	0.07	1.72	0.77	0.35	0.03
烟草茎	600	17.30	0.40	5.90	—	0.10	4.10	8.00	21.20	31.40	0.10	28.20
	815	12.70	0.90	8.00	0.90	0.50	3.70	11.40	23.00	40.90	0.10	9.90
玉米芯灰	600	9.51	7.29	5.18	2.68	25.60	—	4.63	29.70	6.65	0.96	13.30
	815	7.94	6.43	6.74	2.56	25.90	—	4.79	23.30	6.32	0.79	10.90

1.2 生物质灰理化特性

1.2.1 生物质灰物理特性

不同的生物质灰微观形貌可以表现出块状(如酒糟灰)、沟壑状(如木屑灰)、团状(如谷壳灰)、条状(如稻秸灰)等不规则粒子的形状^[9-10]。有学者通过对815℃和600℃的秸秆灰渣进行对比,发现815℃的稻草灰和树叶灰结合的更为紧密,同时815℃的木屑灰比600℃的木屑灰结晶颗粒大^[11],表明即使同一种生物质在不同温度下的生物质灰其结晶颗粒大小也会呈现差异性。灰粒形态粗细不一、疏密不均的多样性,反映出各无机元素在生物质中存在形式的不同与复杂性。

1.2.2 生物质灰化学特性

生物灰一般呈碱性,由于不同的生物质灰组成差异,其熔点也有较大差别^[12-14]。如表2所示,由于不同种类生物质灰和同一类生物质灰在不同温度下化学组成差别较大,因此灰熔点变化范围也较大^[4,11,15]。同时,生物质灰的软化温度都相当低,通常在1000℃左右就开始融化,这主要是由于其中含有高浓度Si、K、Na可能会形成低熔点化合物,很容易在锅炉内沉积结渣,而在实际燃烧过程中,生物质的实际结渣程度远低于实际软化温度。有学者对四种常见的生物质灰进行了研究,发现在气化过程中甘蔗渣和松木屑的积灰、结渣倾向严重,花生壳次之,谷壳相对轻微^[16]。生物质灰在升温过程中的质量变化规律表现出不同灰化温度下的生物质灰的烧结和结渣程度不同^[17]。有学者研究五种生物质灰渣特性,结果表明甘蔗渣和高硅含量稻壳适合于陶瓷制品,甘蔗渣中的未燃碳具有被分离并用于活性炭或其他应用的潜力,腰果壳灰中钾、磷含量高,适宜土壤改良^[18]。

表2 不同温度下生物质灰的灰熔点^[4,11,15] ℃

灰样种类	灰化温度	DT	ST	HT	FT
玉米秸秆	450	800	1 098	1 218	1 236
	600	784	1 080	1 156	1 270
	815	904	1 100	1 222	1 274
	1 000	995	1 102	1 242	1 276
麦秸	450	766	1 168	1 278	1 320
	600	770	1 170	1 272	1 314
	815	806	1 162	1 260	1 326
	1 000	1 006	1 192	1 226	1 300
稻草	450	742	1 132	1 254	1 322
	600	748	1 100	1 200	1 226
	815	876	1 130	1 184	1 224
	1 000	1 020	1 140	1 196	1 246
杨树	450	1 040	1 184	1 200	1 224
	600	1 088	1 184	1 194	1 206
	815	1 114	1 182	1 188	1 204
	1 000	1 138	1 198	1 204	1 224
木屑	600	1 232	1 288	1 296	1 313
	815	1 279	1 302	1 304	1 316
树叶	600	1 112	1 228	1 234	1 244
	815	1 126	1 292	1 294	1 295

2 生物质灰对土壤理化特性的改良机理

2.1 生物质灰对土壤物理性质改良

生物质灰对土壤物理性质改良的机理主要在于生物质灰质轻细小、疏松多孔的物理特性,施用后对土壤的团粒结构以及透气保湿性有一定的影响。研究表明,在土壤中添加生物质灰可能影响到土壤结构、土壤水分等物理性质,主要表现为:(1)生物质灰通常呈很细的粉末状,在施用后可能改变土壤毛管土壤空隙和非毛管空隙的比例,从而促进土壤团粒结构形成,协调土壤水分和空气,

提高耕层土壤接纳和储存水分的能力^[19-20]; (2) 配施生物质灰能够增加大团聚体的数量, 同时能增加了土壤 SOM、AK 和 pH 值的含量, 明显提高土壤团聚体结构的稳定性, 以抵抗强烈降雨和灌

溉干扰的外部驱动力, 防控土壤物理结构的退化^[21,23]。生物质灰对不同土壤在物理性质方面的改良效果详见表 3。

表 3 不同生物质灰对不同土壤物理性质改良

类别	改良土壤	改良效果	参考文献
秸秆灰渣	沙质土壤	促进土壤团粒结构形成, 提高耕层土壤接纳和储存水分的能力	[19]
化肥+生物质灰渣	黄壤退化土壤	土壤孔隙度增加, 透气保水性增强	[20]
生物质灰渣	柑橘园土壤	增加大团聚体的数量, 提高土壤团聚体稳定性及土壤有机碳水平	[21]
生物质灰	寒武土(粘土壤土)	对土壤团聚体的稳定性有明显的改善作用, 提高了土壤中 SOM、AK、pH 值的含量	[22]
石灰+玉米秸秆	退化黄壤	有效提高退化黄壤的保水能力, 提高土壤团聚体水稳定性	[23]

2.2 生物质灰对土壤化学性质改良

生物质灰对土壤化学性质改良的机理主要在于生物质灰呈碱性的化学特性, 施用于酸化严重的土壤中, 可有效改善土壤的 pH, 提高土壤溶液离子含量, 例如水稻灰呈强碱性, 施入土壤后, 提高了退化黄壤 pH, 改善了土壤酸化情况, 而且随着水稻灰施用量的增加效果越明显^[23-26]。同时, 生物质灰中的一些无机物质颗粒遇水之后膨胀, 可以某种程度上增加土壤的蓄水能力, 且随着灰施用量增加, 使土壤溶液导电性增加, 进一步提高土壤溶液离子含量。一些学者也考虑了土壤单一施用生物质灰影响土壤原生化学性质与理化结

构, 考虑了与其他改性材料进行复配, 混合施用实验。梁胜男^[25]等通过施加不同比的灰渣量在土壤中, 使其 pH 提高, 并且随着灰渣的施加量越多, 越可以有效增加土壤的 pH 值。Quirantes^[26]等通过研究三种不同类型的生物质灰施加于微酸性土壤中, 结果表明生物质灰的应用显著提高了土壤的酸碱度和土壤溶液离子含量。Shi^[27]等研究表明施用生物质灰混合骨粉、碱渣比单独施用生物质灰、骨粉和碱渣能更好地改善土壤酸度, 降低酸性土壤中的有毒铝, 改善土壤 P、Ca 和 Mg 营养水平。生物质灰对不同土壤化学性质的改良效果详见表 4。

表 4 不同生物质灰对不同土壤化学性质改良

生物质灰	灰投加量	土壤类型	生物质灰 pH	土壤 pH	改良后土壤 pH	改良效果	参考文献
水稻灰	0 g/kg	黄壤	10.10	4.90	4.84	提高土壤的 pH	[23]
	10 g/kg				5.06		
	25 g/kg				5.58		
	50 g/kg				6.20		
	100 g/kg				7.13		
	250 g/kg				8.32		
杨树皮、稻草、小麦秸秆混合燃烧的灰渣	8 g/kg	红壤	12.28	4.90	4.20	显著提高酸性红壤 pH	[24]
		红壤			4.23		
		红壤			4.52		
		赤红壤			4.56		
江苏省某发电厂燃烧灰渣	0	红壤	9.63	4.80	4.80	可提高土壤 pH	[25]
	3%				4.82		
	5%				5.40		
	10%				6.40		
橄榄灰	25 mg/ha	砂质壤	10.70	6.40	10.40	提高土壤酸碱度及土壤溶液离子含量	[26]

3 生物质灰土壤改良剂开发与应用

3.1 生物质灰土壤改良剂的优势比较

相比石灰、钙镁磷肥、泥碳、堆肥、粉煤灰、膨润土等改良材料,生物质灰具有特定的优势。在重金属污染的土壤中,石灰、钙镁磷肥等均可以抑制重金属毒性。然而,石灰、钙镁磷肥中存在一些潜在的其他金属离子(如 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 等)会对作物存在毒害风险^[28-29]。泥碳、堆肥等具有有机肥的特性,初始施用阶段,可以增加对重金属的吸附和固定,降低其有效性,但有可能随着有机物质的矿化分解,导致被吸附的重金属离子重新释放,增加植物的吸收^[30-31]。粉煤灰可以用作不同类型土壤的改良剂,起到土壤改良与修复的作用,但是粉煤灰施用量的控制问题及重金属对土壤的污染问题亟待解决^[32]。膨润土作为土壤改良剂可以针对不同的土壤状况达到不同的改良效果,但是具体的改良机理还不是很完善^[33]。生物质灰中含有的多种营养元素,可以作为土壤改良剂来改善土壤性质,从而提高作物产量。实践研究均表明生物质灰可以作为土壤改良剂来修复土壤^[34-44]。综上,相比其他土壤改良剂,生物质灰低廉易得、二次污染小,因此生物质灰将作为土壤改良剂开发并广泛应用。

3.2 生物质在土壤改良与修复应用

不同类别的土壤施用生物质灰后均能达到土壤改良与修复的作用。在酸性土壤中,Arshad^[45]等研究结果表明木屑灰可以改善酸性土壤的理化性质,增加作物产量。在污染严重的砂壤土中,Pukalchik^[46]等研究了木材生物炭、木灰和腐殖质单独或在混合物中对土壤进行改良,研究结果表明木灰和木灰+腐殖质可以降低土壤中移动镉和锌的浓度,修复重度污染的砂壤土。在北方土壤的应用中,宋乐^[47]等通过对生物质电厂灰改性制成重金属钝化剂,不但对北方土壤中的 Cd 有明显的钝化效果,而且使农作物增产明显。在重金属污染土壤中,段丽娟^[48]等研究两种修复剂的土壤修复效果,结果表明电厂生物质灰对重金属的固定作用要优于膨润土。

添加生物质灰可以促进植物的生长以及产量的增加。罗云霞^[49]等的研究表明,生物质灰可以促进烟株的生长发育。李晶^[50]等的盆栽试验表明生物质灰渣含有的养分可以替代部分化肥,并且与氮肥配施时有利于小白菜的生长,改善小

白菜的品质。陈龙等^[51]通过土培和盆栽试验,研究结果也表明了生物质灰渣在土壤改良方面有一定的成果,并且按照灰渣与化肥的合理配施,可以促进土壤-植物系统中营养元素的转化迁移,同时促进油菜苗期的生长。Peltoniemi^[52]等将木灰作为肥料使用,施加于北方排泥泥炭地土壤中,从而促进植物的生长植物产量提高。以上研究均表明添加生物质灰可以促进植物的生长进而使产量增加。

4 结论与建议

生物质已经成为越来越受欢迎的一种能源,然而对生物灰的研究相对滞后。因此,对于生物质灰的研究需要得到更多的支持与关注。本文通过对生物质灰的来源及理化特性的分析,得出以下结论,希望可以为更多的研究者提供思路。

(1) 生物质灰受生物质原料来源多样和燃烧熔点不同,所形成的生物质灰化学组成和结构呈现多样性。生物质灰组分差异较大, K、Na、Cl 等元素的氧化物随温度增加易挥发,其他元素的氧化物含量比例相对增加。生物质灰在微观尺度观察发现其形态各异、粗细不一、疏密不均等。生物质灰总体表现非均质的特性。

(2) 施加生物质灰可改善土壤物理结构、增强团聚体稳定性,可改善酸性土壤性质、提高溶液离子含量、钝化土壤重金属,且对植物生长有促进作用,目前已成为开发热点的土壤改良与修复剂。

(3) 由于生物质灰的种类繁多,目前仍需加强土壤复合污染下单种或多种生物质灰联合作用的机理和效果,拓展其应用范围,同时应对生物质灰施加于土壤的长期效果及风险进一步研究评估,为其工业化生产及市场化应用提供理论依据。

参考文献

- [1] 孙勇慧, 刘忠, FATEHI, 等. 生物质灰渗出金属离子在 TMP 废水处理的作用 [J]. 林产化学与工业, 2018, 38 (2): 39-45.
- [2] 别如山, 王庆功, 修太春. 生物质燃烧发电过程中若干问题的探讨 [J]. 工业锅炉, 2009 (6): 6-10.
- [3] 陈汉平, 李斌, 杨海平, 等. 生物质燃烧技术现状与展望 [J]. 工业锅炉, 2009 (5): 1-7.
- [4] Du S, Yang H, Qian K, et al. Fusion and transformation properties of the inorganic components in biomass ash [J]. Fuel, 2014, 117: 1281-1287.
- [5] 姚锡文, 许开立, 王文菁, 等. 玉米芯生物质灰的物理化学特性 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2016, 37

- (1): 100-104.
- [6] 姚锡文, 许开立, 徐晓虎. 灰化温度对生物质灰特性与沾污结渣的影响 [J]. 农业机械学报, 2016, 47 (1): 182-189.
- [7] 夏许宁. 生物质成型燃料链条锅炉结渣特性的试验研究 [D]. 郑州: 河南农业大学, 2016; 10-13.
- [8] Wei X, Schnell U, Hein K R G, et al. Behaviour of gaseous chlorine and alkali metals during biomass thermal utilisation [J]. Fuel, 2005, 84 (7): 841-848.
- [9] 张浩. 基于灰成分的生物质结渣特性研究 [D]. 济南: 山东大学, 2010; 20-23.
- [10] 叶贻杰. 生物质灰特性及其结渣机理的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2007; 25-27.
- [11] 肖瑞瑞, 陈雪莉, 王辅臣, 等. 不同生物质灰的理化特性 [J]. 太阳能学报, 2011, 32 (3): 364-369.
- [12] Magdziarz A, Dalai A K, Koziński, et al. Chemical composition, character and reactivity of renewable fuel ashes [J]. Fuel, 2016, 176: 135-145.
- [13] Yeboah N N N, Shearer C R, Burns S E, et al. Characterization of biomass and high carbon content coal ash for productive reuse applications [J]. Fuel, 2014, 116 (1): 438-447.
- [14] 张正仁. O₂/CO₂气氛劣质烟煤及其与生物质混烧灰烧结与熔融特性研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2015; 41-42.
- [15] 廖翠萍, 吴创之, 颜涌捷. 生物质及热解气化过程中碱金属和重金属元素的分布规律和迁移行为的研究 [C]. 北京: 中国生物质能技术研讨会, 2003; 106-115.
- [16] 米铁, 陈汉平, 吴正舜, 等. 生物质灰化学特性的研究 [J]. 太阳能学报, 2004, 25 (2): 236-241.
- [17] Szmemeveisz K, I. Szücs, Á. B. Palotás, et al. Examination of the combustion conditions of herbaceous biomass [J]. Fuel Processing Technology, 2009, 90 (6): 839-847.
- [18] Umamaheswaran K, Batra V S. Physico-chemical characterization of Indian biomass ashes [J]. Fuel, 2008, 87 (6): 628-638.
- [19] 廖艳妮. 生物质灰渣的农业化学行为研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2013; 20-22.
- [20] 黄容. 生物质灰渣对退化土壤修复作用研究 [D]. 重庆: 西南大学; 2015; 7-8.
- [21] 代文才, 钱盛, 高明, 等. 施用生物质灰渣对柑橘园土壤团聚体及有机碳分布的影响 [J]. 水土保持学报, 2016, 30 (2): 260-265+271.
- [22] Huang R, Gao M, Liu J. Effects of soil conditioners on aggregate stability in a clay loam soil: A comparison study of biomass ash with other four conditioners [J]. Communications in Soil Science & Plant Analysis, 2017: 1-20.
- [23] 叶夏伊, 高明, 黄容, 等. 不同施用水量水稻灰对作物及退化黄壤理化性质的影响 [J]. 水土保持学报, 2016, 30 (2): 219-224.
- [24] 时仁勇, 李九玉, 徐仁扣, 等. 生物质灰对红壤酸度的改良效果 [J]. 土壤学报, 2015, 52 (5): 1088-1095.
- [25] 梁胜男, 赵玲, 董元华, 等. 生物质灰渣对红壤中 Cd 含量及其生物有效性的影响 [J]. 江苏农业科学, 2016, 44 (5): 451-453.
- [26] Quirantes M, Calvo F, Romero E, et al. Soil-nutrient availability affected by different biomass-ash applications [J]. Journal of Soil Science & Plant Nutrition, 2016, 16 (1): 161-162.
- [27] Shi R, Li J, Ni N, et al. Effects of biomass ash, bone meal, and alkaline slag applied alone and combined on soil acidity and wheat growth [J]. Journal of Soils & Sediments, 2017: 1-11.
- [28] 敖俊华, 黄振瑞, 江永, 等. 石灰施用对酸性土壤养分状况和甘蔗生长的影响 [J]. 中国农学通报, 2010, 26 (15): 266-269.
- [29] 陈晓婷, 王果, 梁志超, 等. 钙镁磷肥和硅肥对 Cd、Pb、Zn 污染土壤上小白菜生长和元素吸收的影响 [J]. 福建农林大学学报 (自然版), 2002, 31 (1): 109-112.
- [30] 方丽婷, 张一扬, 黄崇俊, 等. 泥炭和褐煤对土壤有机碳和腐殖物质组成的影响 [J]. 土壤通报, 2017 (5): 131-135.
- [31] R. Vaca-Paulín, Esteller-Alberich M V, Fuente L D L, et al. Effect of sewage sludge or compost on the sorption and distribution of copper and cadmium in soil [J]. Waste Management, 2006, 26 (1): 71-81.
- [32] 马守臣. 粉煤灰和菌渣配施对矿井水污染土壤微生物学特性和小麦生长的影响 [J]. 煤炭学报, 2012, 37 (S1): 207-211.
- [33] 徐奕, 赵丹, 徐应明, 等. 膨润土对轻度镉污染土壤钝化修复效应研究 [J]. 农业资源与环境学报, 2016, 34 (1): 38-46.
- [34] Riding M. J., Herbert B. M. J., Ricketts L., et al. Harmonising conflicts between science, regulation, perception and environmental impact: The case of soil conditioners from bioenergy [J]. Environment International, 2015, 75: 52-67.
- [35] Maschowski C, Zangna M C, Trouvé, et al. Bottom ash of trees from Cameroon as fertilizer [J]. Applied Geochemistry, 2016, 72: 88-96.
- [36] Li X, Rubæk G H, Sørensen P. High plant availability of phosphorus and low availability of cadmium in four biomass combustion ashes [J]. Science of the Total Environment, 2016, 557-558: 851-860.
- [37] Pasquali M, Zanoletti A, Benassi L, et al. Stabilized biomass ash as a sustainable substitute for commercial P - fertilizers [J]. Land Degradation & Development, 2018, 27 (7): 2199-2207.
- [38] 张振, 韩宗娜, 盛昌栋. 生物质电厂飞灰用作肥料的可行性评价 [J]. 农业工程学报, 2016, 32 (7): 200-205.
- [39] 谷健云, 崔键, 周静, 等. 生物质灰渣等对红壤性状的影响 [J]. 安徽农业大学学报, 2016, 43 (2): 258-265.
- [40] 易珊. 生物质灰渣的资源化利用研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014; 31-39.
- [41] 宋乐, 韩占涛, 张威, 等. 改性生物质电厂灰钝化修复南方镉污染土壤及其长效性研究 [J]. 中国环境科学,

- 2019, 39 (1): 228-236.
- [42] 祝振球, 周静, 徐磊, 等. 不同重金属钝化材料对土壤胶体的影响 [J]. 生态与农村环境学报, 2017 (2): 95-99.
- [43] 刀靖东, 况帅, 李军, 等. 生物质灰分还田对烟田土壤理化性质及烟叶质量的影响 [J]. 现代农业科技, 2018, 734 (24): 19-21.
- [44] Wenwen JI, Jingyi LI, Zhongbo S, et al. The Progress on the comprehensive utilization of biomass ash [J]. Journal of Henan University, 2017, 47 (4): 455-456.
- [45] Arshad M A, Soon Y K, Azooz R H, et al. Soil and crop response to wood ash and lime application in acidic soils [J]. Agronomy Journal, 2012, 104 (3): 715-721.
- [46] Pukalchik M, Mercl F, Panova M, et al. The improvement of multi-contaminated sandy loam soil chemical and biological properties by the biochar, wood ash, and humic substances amendments [J]. Environmental Pollution, 2017, 229: 516-524.
- [47] 宋乐, 韩占涛, 吕晓立, 等. 利用改性生物质电厂灰钝化修复北方 Cd 污染土壤的试验研究 [J]. 农业环境科学学报, 2018, 37 (7): 1484-1494.
- [48] 段丽娟. 农田污灌土壤重金属铜、镉污染的修复研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2012: 28-39.
- [49] 罗云霞, 苏家恩, 王德勋. 烟秆生物质燃灰替代硫酸钾的研究 [J]. 安徽农业科学, 2015, 43 (13): 108-110.
- [50] 李晶, 杨海征, 胡红青, 等. 生物灰渣对小白菜生长的影响及对酸性土壤的改良 [J]. 湖北农业科学, 2010, 49 (4): 822-825.
- [51] 陈龙, 王敏, 王硕, 等. 生物质灰渣与化肥配施对土壤性质及油菜生长的影响 [J]. 华中农业大学学报, 2011, 30 (6): 727-733.
- [52] Peltoniemi K, Pyrhönen M, Laiho R, et al. Microbial communities after wood ash fertilization in a boreal drained peatland forest [J]. European Journal of Soil Biology, 2016, 76: 95-102.