

秸秆生物炭的制备及其应用

滕洪辉^{1,2}, 张静¹, 张萌¹, 任楚奇¹, 李昂¹, 戴昕东¹, 李泽慧¹

(1. 吉林师范大学工程学院, 吉林四平136000; 2. 吉林师范大学吉林省高校环境材料与污染控制重点实验室, 吉林四平136000)

摘要: 农作物秸秆作为一种可再生资源, 将其制成各类产品的技术方法研究逐渐增多。其中, 利用热解法、水热法、微波法和气化法等技术, 将各种秸秆制备成生物炭, 代替传统的碳材料用于环境保护、农业生产等领域的研究, 被众多学者所关注。从制备工艺、产率和能耗角度, 对热解法、水热法、微波法和气化法制备生物炭进行了对比分析, 水热法制备工艺条件温和、产率高、产品分散性好, 有望成为秸秆生物炭的优选方法。通过总结生物炭在环境保护、农业生产等方面应用的研究发现, 不同秸秆制备的生物炭主要依靠吸附和还原性能影响重金属的迁移转化, 改变土壤微生物生存环境, 提高土壤持水能力; 秸秆生物炭还可以改善土壤组成, 起到增加有机质固碳增产的作用。但是, 生物炭的循环利用以及对土壤环境的负面影响还需进一步开展系统性的研究, 为秸秆生物炭的规模化应用提供技术保障。

0引言

秸秆是农作物收割后剩下的茎叶, 作为粮食作物副产物其富含植物生长所需的多种营养元素, 储量丰富、分布广泛、开发清洁、成本低廉, 是一种可再生资源。我国作为农业生产大国, 每年都会产生大量秸秆, 但处置方式比较单一, 主要作为燃料[1], 少部分掺入饲料、用于肥料[2-3]、制成生物炭等加以利用。近几年, 我国秸秆资源化利用逐渐增加, 但占比仍然较低, 经济效益不高, 不仅造成资源的浪费还会污染环境, 秸秆焚烧正是诱发 $\text{Pm}_{2.5}$ 污染事件频出的因素之一, 所以秸秆如何高效资源化处置已经成为社会各界关注的热点问题。

生物炭作为一种环保、经济、可持续的材料受到广泛关注, 以秸秆为原料制生物炭及其应用研究的报道逐渐增多。秸秆生物炭具有诸多优异的性能, 例如, 高芳香化和杂环化结构使其具有良好的吸附性能; 比表面上分布的多样微孔结构、富含多种营养元素的基团, 为微生物提供了良好的栖息环境从而显著提升微生物活性[4]。在农业、工业、环境等领域的应用研究进一步表明, 秸秆生物炭可以直接还田或者作为堆肥原料还田, 还可以用于土壤修复、去除重金属、制电极等。可见, 秸秆制生物炭已经成为一种高附加值的秸秆资源化处置方法。本文重点对秸秆制生物炭的制备方法及其在环境保护和农业领域的应用研究进行综述, 为进一步推动秸秆资源化处置利用提供借鉴。

1秸秆生物炭制备方法

1.1热解法

热解法是共价键断裂引发的自由基反应, 反应机理如图1所示, 生物质升温后首先脱水, 大分子碎片变为小分子, 继续升温后自由基重组、挥发, 苯环断裂成芳烃化合物, 最终形成无定形碳。用此法制备的生物炭比表面积大并且表面含有丰富的官能团。根据反应温度以及停留时间的不同, 秸秆热解分为快速、中速、慢速热解。快速热解是秸秆在400~650℃下停留数秒迅速气化制得气态(生物质气)或液态产品(生物油); 中速与快速热解温度相似但停留时间在数秒到数分钟不等, 制得产物为固态(粉末)或液态(生物油); 与之相比慢速热解停留时间大大加长, 一般在400~800℃下保持数分钟到数小时不等, 得到的产物为固态样品, 即生物炭。因此, 秸秆热解制生物炭均为慢速热解法。

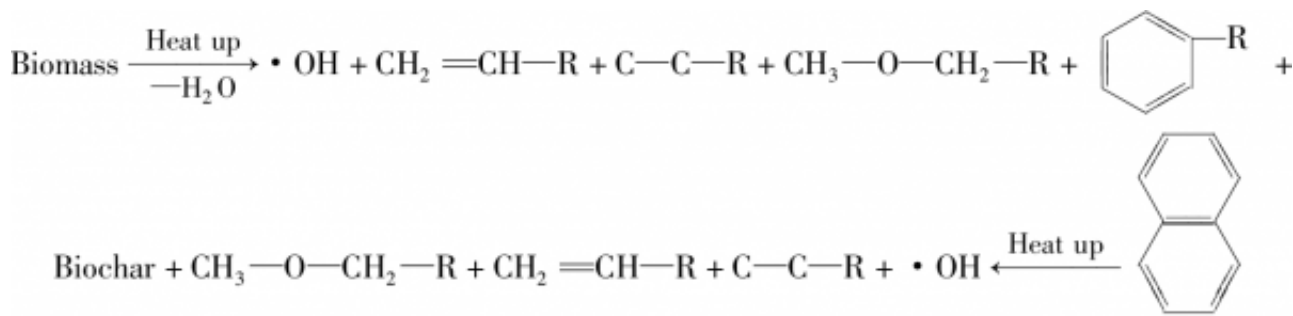


图1 慢速热解反应机理

Fig.1 Mechanism of slow pyrolysis reaction

H.Muhammad等[5]采用热解方法在N₂气氛下, 600 ℃保持3h, 制得生物炭并用于修复镉污染的土壤。X.Tian等[6]以芦苇和稻草为原料, 在N₂

保护下采用控制升温速率(50 ℃/1.5h)的热解法, 从200 ℃升温到450 ℃并保持30min, 制得的生物炭产率达到384.4、365.7、348.3g/kg。H.Gong等[7]不用N₂保护, 采用限氧条件控制升温速率(20 ℃/min)热解法, 以小麦秸秆为原料在马弗炉中制备生物炭, 热解温度300 ℃、700 ℃各反应4h制得生物炭, 然后将生物炭放入改性液中搅拌数分钟、调pH为5, 24h后过滤, 用去离子水清洗后烘干备用。施用土壤中能缓解土壤酸化和板结, 改善土壤生态功能。P.Zhang等[8]用球磨改性后热解制备生物炭, 将10g秸秆粉放入150mL去离子水中搅拌2h, 倒入500mL玛瑙球磨槽中, 用200g玛瑙以300r/min的速度球磨2h, 球磨改性完成后冻干保存, 在N₂保护下, 升温速率为5 ℃/min, 900 ℃保持2h制得生物炭。热解法制备生物炭, 控制热解气氛(氧含量)至关重要, 其次是热解温度和热解时间、升温速率。

1.2水热法

水热法是指在密闭的容器内, 以水为溶剂, 在高温高压条件下的化学反应。S.Ramesh等[9]研究得到水热棕榈壳对质量浓度为25mg/L的铅去除率可达95%, 生物炭与蒸馏水(1g:10mL)在聚四氟乙烯内衬中温度保持在180~220 ℃, 9h制得水热炭并烘干, 烘干后产率可达57.8%。C.Kong等[10]将核桃壳与去离子水以1:10的质量比混合, 在240 ℃下水热反应4h, 用乙醇洗涤至无色, 再用去离子水洗涤至中性后烘干备用, 后续对其做改性处理, 对碱性染料的去除效果甚佳。S.Guo等[11]用类似方法分别在120、160、200、240、280 ℃保温2h, 发现温度越高固定碳含量越高, 在280 ℃时碳化程度最好。

1.3其他方法

除常用的热解法和水热法外, 也有少量学者用微波法或气化法将秸秆资源化处置。微波法主要是利用微波辐射使生物质内的微观粒子相互碰撞而产生热, 从而温度达到反应条件, 发生化学反应。Y.Huang等[1]在缺氧状态下, 研究了微波功率和处理时间的影响, 随着微波功率和处理时间增加, 产率减小但热值增高, 制得的生物炭可替代煤或煤共燃材料, 在250W微波功率作用下处理30min, 热值可到达30MJ/kg。R.K.Liew等[12]在500~700W热解25min, 产率可达38%, 热值可达26MJ/kg, 热解20min后没有热解挥发物的排放, 对亚甲基蓝燃料的吸附效率为48mg/g。许煌等[13]将花生壳用微波法制成生物炭, 应用于对亚甲基蓝染料的吸附, 吸附率最大可达94.2%, 最优条件为微波功率600W、停留时间7.5min、浸渍时间36h。气化法是生物质在缺氧状态下燃烧产生无污染或污染少的可燃气的方法。秸秆气化技术的基本原理包括干燥、裂解、氧化、还原四个阶段生成秸秆燃气[14], 但秸秆气化技术存在非常多的限制性条件, 比如要关注到秸秆燃气热值和清洁度等, 需要在推广秸秆能源化利用的过程中逐步完善、解决。李青霖[15]在水蒸气或氧气单一氛围以及混合氛围下对玉米秸秆炭开展气化实验, 结果表明水蒸气与氧气在不同温度下共气化过程中都存在协同作用, 且在较低温度时, 协同作用更为明显。吴有龙等[16]在800 ℃下, 将空气作为气化剂, 处理1h制得稻壳活性炭, 产率可维持在31.39%~41.73%, 吸附性能良好, 碘吸附值1984.85mg/g、甲基橙饱和吸附量为217.87mg/g。不同生物炭制备方法的反应工艺与产率如表1所示。其中, 微波法和气化法反应时间短, 能耗低, 但是产率低; 热解法产率高, 最容易规模化生产, 虽然其存在反应条件苛刻, 反应时间偏长的缺点, 仍然是生物炭的主要制备方法; 水热法反应时间偏长, 但是反应条件温和、产率高, 而且水热法制得的生物炭分散性好, 缺点是在密闭的容器中进行, 无法观察到反应过程, 反应温度、升温速率及停留时间等都能影响水热反应的效率。

表1 生物炭制备方法

Tab.1 Biochar preparation method

方法	原料	气氛条件	升温速度/($^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$)	制备温度/ $^{\circ}\text{C}$	停留时间/h	产率/%
热解法	农业废弃物	N_2 保护或缺氧	< 10	300 ~ 800	1 ~ 6	20 ~ 50
水热法	农业废弃物	水蒸气	< 10	180 ~ 240	4 ~ 12	30 ~ 60
微波法	农业废弃物	微波辐射	—	16 ~ 90	< 1	10 ~ 30
气化法	农业废弃物	高温、高压、缺氧	> 100	700 ~ 1 600	< 0.1	< 10

2在环境保护方面的应用

多位学者以小麦、水稻或玉米秸秆为原料，采用热解方法将其制成生物炭，并对其进行适当改性，用于环境领域重金属去除研究（见表2）。结果表明，秸秆制生物炭对铬、铅、镉等重金属展现出良好的吸附性能[17-19]。还有研究者以稻壳和方解石为原料，按照一定的原料比混合，在700 $^{\circ}\text{C}$ 下热解制得改性生物炭，基于生物炭表面官能团和方解石自身矿物特征协同作用，形成多相多层吸附位点，可高效吸附磷酸盐[20]。生物炭多采用热解法制备，降低加热速率、延长炭化时间等可提高生物炭的比表面积、孔径和孔体积[21]，为环境污染物控制和生态修复领域奠定了基础。

表2 重金属去除方面的研究

Tab.2 Research on removal of heavy metals

	原料	生物制备工艺	去除效果	机理	参考文献
铅	稻壳、麦秸、 玉米芯	氮气流速 $2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ ，热解 550°C 、2 h	生物炭稻壳、麦秸和玉米芯对铅的吸附能力分别为 96.41%、95.38%和96.92%	单层吸附	[17]
	水稻秸秆	420°C 热解 MnO_2 改性	水稻秸秆生物炭和被 MnO_2 包裹的水稻秸秆生物炭 对 $\text{Pb}(\text{II})$ 的最大吸附量分别为 $0.5782 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $1.4732 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1}$	物理吸附	[22]
		$400 \sim 700^{\circ}\text{C}$ 热解 1 h，氮气流 速 $0.1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ，升温速 率 $10^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$	热稻秆生物炭对铅的最大吸附量为 $276.3 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ， 厌氧消化残渣生物炭的最大吸附量为 90.5 mg	络合	[23]
镉	稻壳、麦秸、 玉米芯	氮气流速 $2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ ，热解 550°C 、2 h	生物炭稻壳、麦秸和玉米芯对镉的吸附能力为 94.73%、93.68%和95.78%	单层吸附	[17]
	玉米秸秆	500°C 下热解 3 h	生物炭-微生物复合体系对镉去除率高达62%，表现 为协同作用，单一体系对镉的去除率为33%	物理吸附	[19]
铬	麦秸	热解 450°C ，热解 550°C CO_2 、 N_2 混合气的保护， 800°C	Cr 的去除率为97%	络合、离子交换	[18]
	水稻秸秆	热解， $10^{\circ}\text{C} \cdot \text{g}^{-1}$ 加热 1 h 后， 用等体积的过氧化氢 + 硝酸 改性	改性生物炭的吸附量为 $93.2 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ，远高于原生物 炭 $69.3 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$	物理吸附	[24]
钒	玉米秸秆	CsCl 、 $\text{Zn}(\text{II})$ 、 $\text{Zr}(\text{IV})$ 预处理 后，氮气保护下 700°C 快速 热解	Zn-BC、Cs-BC 和 Zr-BC 三种改性生物炭对对钒的最 大吸附量为41.05、28.46、23.84 mg	单层吸附	[25]

2.1土壤修复

土壤中的重金属具有难降解性、迁移性和毒害性，长期在土壤中积累可通过食物链进入动植物体内，给人类带来健康风险。生物炭良好的吸附性能降低重金属在土壤中的浸出能力，减少在生物体内的积累。J.Jiang等[26]通过研究发现秸秆生物炭可以通过给电子还原和吸附作用降低重金属砷的迁移性和生物毒性，秸秆生物炭的微观结构具有良好的重金属修复性能，应用秸秆生物炭使土壤中酸溶性砷降低80%，效果显著。对比H.Muhammad等[5]对土壤微生物改性小麦秸秆和生物炭降低镉浸出潜力和生物有效性进行研究发现秸秆体系显著提高了木质纤维素的降解，对土壤中重金属的吸附较强，改善了土壤的生态功能。实验表明，生物炭和水管理对土壤的Eh、pH、DOC等因素有显著影响，从而影响铬的形态转化和在农作物中的积累，所以生物炭和水管理的结合缓解了土壤中的铬污染[27]。另外，可以在磁场的作用下将磁性生物炭与土壤中的重金属一起去除，达到土壤中重金属修复的作用，分别用300 $^{\circ}\text{C}$ 和700 $^{\circ}\text{C}$ 热解的麦草秸秆进行对比，发现这两种麦草秸秆生物炭对重金属铅的去除效率无明显差异，未来还可以进一步对磁性生物炭

性能优化或者再生利用等[7]。

J.Guo等[28]利用玉米秸秆生物炭活化过硫酸盐溶液降解土壤中的苯并芘,发现比 H_2O_2 的去除效果好,因此生物炭活化过硫酸盐氧化是极具潜力的土壤修复技术,而且在一定程度上能缓解土壤酸化和板结,改善土壤的营养组成,应用前景良好。F.Ronss等[29]通过慢速热解制备生物炭研究发现向土壤中添加生物炭最初降低了碳矿化速率,对此可能的解释是土壤微生物群落需要适应新的条件。不稳定碳和稳定碳的存在很大程度上取决于热解过程的强度,包括停留时间和处理温度。生物炭的性质因其生产原料和生产方法而异,所以研究结果存在差异。针对不同污染类型,需要深入研究生物炭的生产方法、经济效益和环境风险,提高环境修复效率。

2.2 废水处理

由于“三废”污染环境水体,使水体中的有害金属逐年增加。重金属进入人体后会使得某些酶失活,从而出现中毒症状,威胁人体健康。重金属毒性与金属种类、形态、浓度和价态密切相关。S.Ali等[18]将小麦秸秆生物炭用于去除水体中重金属研究,在相对酸性条件下,小麦秸秆生物炭对六价铬去除率可达97%,压泥生物炭去除率为91%,六价铬吸附后被还原为三价铬,毒性降低,在吸附过程中主要是羟基自由基的作用,不会产生有毒的二次废物。此外,J.Ding等[19]将生物炭与枯草芽孢杆菌耦合,对比生物炭单一作用去除水中的镉,耦合后去除率提高近30%。生物炭与枯草芽孢杆菌去除镉的第一阶段是以生物炭为主的吸附阶段,第二阶段以枯草芽孢杆菌的吸附为主,第三阶段是复合体系形成生物膜去除镉的阶段。对秸秆生物炭进行适合的改性可以进一步提高吸附能力,H.Zhang等[24]用等体积的硝

2+

的吸附量从69.3mg/L提高到93.2mg/L,特别是对污水中高浓度的镉的去除效果显著增强。也有学者用氧化物改性生物炭,G.Tan等[22]用 $KMnO_4$ 溶液改性制备了 MnO_x

包覆的水稻秸秆生物炭,对比水

稻秸秆生物炭和 MnO_x 包覆的水稻秸秆生物炭吸附 Pb^{2+}

,发现后者吸附容量优于前者。碳酸盐和羧酸盐有助于稻秆生物炭对铅的吸附。厌氧消化生物炭对铅的吸附主要是通过形成磷酸盐、硅酸盐沉淀和与羧酸盐基团络合来实现的[23]。可见,改性水稻秸秆生物炭是提高吸附能力的简单有效方法,在实际废水处理中具有良好的应用前景。

此外,R.Meng等[25]以玉米秸秆为原料然后经过氯化铯、锌、铅进行改性得到三种生物炭用于可渗透的反应屏障去除水中的钒,结果表明改性后的生物炭在吸附过程中没有重金属的浸出,且锌-活性炭对水中钒的去除可达到100%。P.Zhang等[8]以报纸和玉米秸秆为原料,利用球磨和连续氧化改性的技术打开了玉米秸秆多孔的立体结构,极大地增加了比表面积,比表面积达到 $1065m^2/g$,且有优异的再生性能,制成超强吸附剂,有效的去除了水环境中农药和抗生素的污染,吸附效率可达85%以上。当热解温度不同时,秸秆生物炭的理化性质和吸附能力大不相同,W.Guo等[30]研究不同热解温度下玉米秸秆生物炭在全氟辛酸磺酸中的吸附作用,结果表明,随着温度的升高吸附量增加,700时吸附量最大为169.3mg/g,但随着pH增加吸附能力减弱,高温热解制成的生物炭可作为一种吸附剂去除废水中的污染物。

3 在农业上的应用

生物炭在农业生态系统可持续性上发挥不可忽视的作用。生物炭应用于土壤时,可增强土壤碳固存,提升土壤生产力,如降低容重、增强持水能力和养分保持力、稳定土壤有机质、提高微生物活性和重金属固存[31]。生物炭目前主要基于实验室和温室条件下的有限小规模研究。向土壤中添加生物炭并不会增加凋落物或者对土壤有机质的降解造成不利影响,而且随着生物炭施用量增加,矿化反而越慢[32]。P.Yin等[33]利用高粱秸秆制备出的生物炭与铁镍杂化,作为环境友好型生物炭复合材料有优良的低频电磁吸收性能,且在农业上达到了回收利用的效果。

3.1 秸秆/秸秆生物炭还田

秸秆还田能够起到保温缓冲、促进氮化的作用,提高氮肥利用率,改良弱碱性农田土壤,提高土壤环境质量(见表3),使农业可持续发展更进一步[34]。J.Zhang等[35]通过实验发现施用玉米秸秆生物炭可以增加团聚体比例,提高土壤团聚体稳定性和团聚体相关有机碳和腐殖质炭的浓度从而起到改善土壤质量和缓解气候变化的作用。施用生物炭后土壤的持水能力、总有机碳、阳离子交换能力增加,土

壤 CO_2

排放减少,改善了土壤肥力。由于生物炭在土壤中保持稳定,实现了更长期的碳封存,因此实现了碳减排[36]。Y.Cui

等[37]对华北冷涝稻田添加秸秆和生物炭发现，在不影响超级稻产量的情况下，秸秆和生物炭的添加提高了土壤的总氮和有机碳含量，不仅保持了超级稻产量的稳定，还显著降低了 CH_4 、 N_2O 和一些温室气体排放量，也降低了全球变暖潜力。D.Song等[38]研究了施用玉米秸秆生物炭对石灰性土壤养分和微生物活性的影响，得出结论，玉米秸秆生物炭施用在石灰性的土壤中对改良土壤具有非常好的效果，促进了碳氮循环，对酶活性和营养物质具有较为显著的影响。

表3 秸秆还田的表现形式和作用
Tab.3 Expression form and function of straw returning to field

制备原料	表现形式	作用	参考文献
芦苇秸秆	EOC 低, TC 高, 难以被微生物利用	土壤微生物活性和 SR 降低	[6]
水稻秸秆	增加了矿化能力较差或腐殖化能力较强的细菌的丰度	总氮含量和土壤微生物含量显著提高, 改善土壤微生物群落结构	
玉米秸秆	土壤无机氮和溶解性有机碳含量低; 活性氮含量高; 缓解了秸秆诱导的 N_2O 排放	促进土壤有机碳固存, 提高土壤质量指数, 提高土壤生物生产力	[28]
玉米秸秆	提高了土壤团聚体稳定性, 增大了有机碳和腐殖质炭浓度	促进碳固存, 缓解气候变化, 改善土壤质量	[35]
水稻稻壳、玉米秸秆	生物炭具有良好的亲水性; 保持碳固存, 实现碳减排	改善土壤肥力、固碳、增加作物产量, 土壤的持水能力、TOC、阳离子交换能力均有所提高	[36]
玉米秸秆	提高土壤硝态氮含量和 C/N, 促进土壤固碳	提高土壤 TN 和 TOC 含量, 降低了 N_2O 排放	[37]
玉米秸秆	土壤有机碳、溶解有机碳、总溶解氮含量增大, 微生物群落丰度增加	促进了土壤碳氮循环酶活性, 改善土壤养分	[38]
玉米秸秆	作物根系长且细, 根尖多且表面积大	有助于调节根系, 改善土壤肥力	[40]
水稻秸秆	阴离子通过配体交换、络合、沉淀、静电吸引作用; 阳离子通过表面官能团作用	保持养分, 阶段性地释放养分	[41]
水稻秸秆	细菌和真菌多样性增大	加速甲烷的生成	[42]

另外, X.Tian等[6]研究了秸秆与秸秆炭结合对土壤微生物群落结构和活性的影响, 得出结论, 秸秆的加入可以促进土壤呼吸, 而生物炭的掺入使有机碳含量增大, 虽然考虑到生物炭生产过程中碳的损失, 但是生物炭仍然可以作为一种低碳方法。不仅可以影响土壤微生物的多样性, 而且影响微生物的活动。N.Li等[39]用类似方法得到与上述一致的结果, 不仅减轻 N_2O

O 的排放, 而且提高了产量, 优化了土壤质量指数。秸秆分解可以提供有利于有机碳形成的颗粒或胶体, 有利于提高土壤肥力和结构, 修改土壤微环境。C.Sun等[40]比较秸秆生物炭与切碎的玉米秸秆两种还田掺入方法, 得知生物炭掺入后玉米的根系更长、更细、根尖更多、根表面积更大, 而秸秆切碎掺入导致玉米根系由伸长向增粗转变。说明不同方法处理秸秆, 作物根系分泌物的形态和组成各不相同, 其变化在一定程度上与根系分泌物相关基因的表达水平有关。

S.Chandra等[41]将铁钾水稻生物炭和原始水稻生物炭进行对比后得出结论, 铁钾水稻生物炭对营养物的吸附能力更强, 改性后的生物炭复合材料可使养分在土壤表面并且可以分阶段释放养分, 提高了养分的有效性和土壤肥力。S.Martin等[42]对比稻草、堆肥、生物炭保留农田中的营养物和农药残留, 从而减少对周边地区地表水以及地下水的污染。稻草优化了土壤结构, 加速了农药的降解, 有一定的保水能力; 堆肥可以促进农药和微生物的降解; 生物炭同时兼具稻草和堆肥的优点, 它的影响对土壤来说有益且持久, 但它的潜在环境风险不容忽视。由于秸秆、生物炭、改性秸秆生物炭制备工艺不同、种类繁多、性质不同, 所以研究结果存在差异性。

3.2 秸秆堆肥还田

将秸秆直接复施和生物炭复施进行试验, 发现秸秆和生物炭复施都对改良土壤有一定作用, 生物炭的众多官能团中酚基团起主导作用, 秸秆热解的生物炭复施与土壤中的重金属有一定的结合能力, 造成二次污染, 存在潜在的风险[43]。新施用的生物炭使营养物增加, 老化的生物炭减弱了甲烷养菌的促进作用[44]。秸秆生物炭和有机肥掺杂可进一步提高堆肥效率, H.Li等[2]用猪粪和玉米秸秆共堆肥时添加磷酸盐和生物炭可以加速温度的升高, 缩短了高温相, 嗜

热期在20d左右,最高温度可达70℃,且发芽指数高达150%~180%,促进了堆肥成熟,所以磷酸盐和生物炭在此共堆肥的试验中都是一种有效的添加剂。J.Zhang等[3]用类似方法将由麦秸制成的生物炭添加到有机肥猪粪中堆肥化42d,生物炭质量配比10%~15%(w/w),该堆肥化可以降低pH,提高营养物质的含量和电导率。X.He等[45]在好氧堆肥中添加了秸秆生物炭加速了甲烷的生成,且使细菌真菌的多样性增加,而且秸秆生物炭的粒径小,利于甲烷的产生,在未来的试验中还可以对生物炭的粒径进一步优化,改善好氧堆肥条件,使其有更优异的堆肥效率。不仅如此,在化肥中添加一些生物炭也可以将其转化为缓释肥,提供持续的、充足的营养物质。此外,生物炭和纳米炭结合可以提高微生物活性,改善代谢功能和酶活性,极大地提高了堆肥效率[4]。

4结论与展望

秸秆资源化处理不仅解决了秸秆燃烧带来的环境污染和覆盖在土地上的土地占用问题,还可以作为一种清洁高效的吸附剂去除土壤或水体中的重金属;或是秸秆还田从而改善土壤环境质量,作为堆肥化过程中的添加剂加速腐熟,改良堆肥进程,种种应用表明秸秆的合理利用是至关重要的。生物炭不仅在农业和环境领域的应用受到广泛关注,也具有巨大的潜力去取代昂贵的商业活性炭。

秸秆生物炭对重金属的吸附作用现阶段仍停留在实验阶段,未来应探索在实际生活及生产当中的吸附效果,另一方面生物炭用于土壤环境修复时虽然稳定性高、时效长,但是对土壤环境微生物的改变是不定向性的,存在环境风险。

相关研究也表明,生物炭的性质因其生产原料和生产方法而异,原料来源、工程化应用的经济效益和环境风险等仍有待深入研究。

参 考 文 献

- [1] HUANG Y, CHENG P, CHIUH P, et al. Microwave torrefaction of leucaena to produce biochar with high fuel ratio and energy return on investment [J]. Energy Proc, 2017, 105:35-40.
- [2] LI H, ZHANG T, TSANG D, et al. Effects of external additives: Biochar, bentonite, phosphate, on co-composting for swine manure and corn straw [J]. Chemosphere, 2020, 248:125927-1-125927-10.
- [3] ZHANG J, CHEN G, SUN H, et al. Straw biochar hastens organic matter degradation and produces nutrient-rich compost. [J]. Bioresour tech, 2016, 200:876-883.
- [4] CAO Y, TIAN Y, WU Q, et al. Vermicomposting of livestock manure as affected by carbon-rich additives (straw, biochar and nanocarbon): A comprehensive evaluation of earthworm performance, microbial activities, metabolic functions and vermicompost quality [J]. Bioresour Tech, 2020, 320:124404-1-124404-10.

- [5] MUHAMMAD H, WEI T, CAO G, et al. Study of soil microorganisms modified wheat straw and biochar for reducing cadmium leaching potential and bioavailability [J]. *Chemosphere*, 2021, 273:129644-1-129644-10.
- [6] TIAN X, WANG L, HOU Y, et al. Responses of soil microbial community structure and activity to incorporation of straws and straw biochars and their effects on soil respiration and soil organic carbon turnover [J]. *Pedosphere*, 2019, 29 (4):492-503.
- [7] GONG H, CHI J, DING Z, et al. Removal of lead from two polluted soils by magnetic wheat straw biochars [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2020, 205:111132-1-111132-8.
- [8] ZHANG P, WANG X, XUE B, et al. Preparation of graphite-like biochars derived from straw and newspaper based on ball-milling and TEMPO-mediated oxidation and their supersorption performances to imidacloprid and sulfadiazine [J]. *Chem Eng J*, 2021, 411:128502-1-128502-10.
- [9] RAMESH S, SUNDARARAJU P, BANU K, et al. Hydrothermal carbonization of arecanut husk biomass: fuel properties and sorption of metals [J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2018, 3888:8-48.
- [10] KANG C, ZHU L, WANG Y, et al. Adsorption of basic dyes using walnut shell-based biochar produced by hydrothermal carbonization [J]. *Chem Res Chin Univ*, 2018, 34 (4):622-627.
- [11] GUO S, GAO Y, WANG Y, et al. Urea/ZnCl₂ in situ hydrothermal carbonization of camellia sinensis waste to prepare N-doped biochar for heavy metal removal [J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2019, 26 (29):30365-30373.
- [12] LIEW R K, NAM W, CHONG M, et al. Oil palm waste: An abundant and promising feedstock for microwave pyrolysis conversion into good quality biochar with potential multi-applications [J]. *Trans Chem Eng Process Saf Environ Protect*, 2018, 115:57-69.
- [13] 许煌, 朱俊杰, 张铭. 微波法制备花生壳活性炭的研究 [J]. *山东化工*, 2021, 50 (4):25-27.
- [14] 李爱芹. 秸秆气化技术对秸秆能源化利用的有效提高分析 [J]. *农业与技术*, 2021, 41 (18):75-77.
- [15] 李青霖. 玉米秸秆炭 H₂O-O₂ 气氛下气化反应性研究 [J]. *吉林: 东北电力大学*, 2022.
- [16] 吴有龙, 徐嘉龙, 马中青, 等. KOH 活化法制备气化稻壳活性炭及其吸附性能 [J]. *生物质化学工程*, 2021, 55 (1):31-38.
- [17] AMEN R, YASEEN M, MUKHTAR A, et al. Lead and cadmium removal from wastewater using eco-friendly biochar adsorbent derived from rice husk, wheat straw, and corn cob [J]. *Cle Eng Tech*, 2020, 1:100006-1-100006-11.
- [18] ALI S, NOUREEN S, SHAKOOR M, et al. Comparative evaluation of wheat straw and press mud biochars for Cr(VI) elimination from contaminated aqueous solution [J]. *Environ Tech Innovat*, 2020, 19 (14):101017-1-101017-12.
- [19] DING J, CHEN W, ZHANG Z, et al. Enhanced removal of cadmium from wastewater with coupled biochar and bacillus subtilis [J]. *Water Sci Tech*, 2021, 83 (9):2075-2086.
- [20] RAMOLA S, BELWAL T, LI C, et al. Preparation and application of novel rice husk biochar-calcite composites for phosphate removal from aqueous medium [J]. *J Cle Product*, 2021, 299 (12):126802-1-126802-12.
- [21] WANG H, XU J, SHENG L. Preparation of straw biochar and application of constructed wetland in China: A review [J]. *J Cle Product*, 2020, 273:123131-1-123131-20.
- [22] TAN G, YU W, YONG L, et al. Removal of Pb(II) ions from aqueous solution by manganese oxide coated rice straw biochar: A low-cost and highly effective sorbent [J]. *J Chem Eng*, 2018, 84:85-92.
- [23] LI J, SHEN F, YANG G, et al. Valorizing rice straw and its anaerobically digested residues for biochar to remove Pb(II) from aqueous solution [J]. *J Ploym Sci*, 2018:1-11.
- [24] ZHANG H, YUE X, LI F, et al. Preparation of rice straw-derived biochar for efficient cadmium removal by modification of oxygen-containing functional groups [J]. *Sci Total Environ*, 2018, 631-632:795-802.
- [25] MENG R, TAN C, ZHANG Y, et al. Development, modification, and application of low-cost and available biochar derived from corn straw for the removal of vanadium(V) from aqueous solution and real contaminated groundwater [J]. *RSC Adv*, 2018, 8:21480-21494.
- [26] JIANG J, YUAN X, YE L, et al. Characteristics of straw biochar and its influence on the forms of arsenic in heavy metal polluted soil [J]. *Appl Mech Mat*, 2013, 409-410:133-138.
- [27] XIAO W, YE X, ZHU Z, et al. Combined effects of rice straw-derived biochar and water management on transformation of chromium and its uptake by rice in contaminated soils [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2021, 208:111506-1-111506-7.
- [28] GUO J, WEN X, YANG J, et al. Removal of benzo(a) pyrene in polluted aqueous solution and soil using persulfate activated by corn straw biochar [J]. *J Environ Manage*, 2020, 272:111058-1-111058-10.
- [29] RONSSE F, HECKE S, DICKINSON D, et al. Production and characterization of slow pyrolysis biochar: influence of feedstock type and pyrolysis conditions [J]. *Glo Change Biol Bioene*, 2013, 5 (2):104-115.
- [30] GUO W, HUO S, FENG J, et al. Adsorption of perfluorooctane sulfonate (PFOS) on corn straw-derived biochar prepared at different pyrolytic temperatures [J]. *J Chem Eng*, 2017, 78:265-271.
- [31] NAIR V, NAIR R, DARI B, et al. Biochar in the agroecosystem-climate-change-sustainability nexus [J]. *Front Plant Sci*, 2017, 8:2051-2059.
- [32] RONSSE F, VAN HECKE S, DICKINSON D, et al. Production and characterization of slow pyrolysis biochar: Influence of feedstock type and pyrolysis conditions [J]. *Glo Change Biol Bioene*, 2013, 5 (2):665-671.
- [33] YIN P, ZHANG L, JIANG Y, et al. Recycling of waste straw in sorghum for preparation of biochar/(Fe, Ni) hybrid aimed at significant electromagnetic absorbing of low-frequency band [J]. *J Mat Res Tech*, 2020, 9 (6):14212-14222.
- [34] FENG W, YANG F, CEN R, et al. Effects of straw biochar application on soil temperature, available nitrogen and growth of corn [J]. *J Environ*

Manage, 2020, 277:111331-4-11331-41.

- [35] ZHANG J, WEI Y, LIU J, et al. Effects of maize straw and its biochar application on organic and humic carbon in water-stable aggregates of a mollisol in northeast China: A five-year field experiment [J]. Soil Till Res, 2019, 190:1-9.
- [36] MOHAN D, ABHISHEK K, SARSWAT A, et al. Biochar production and applications in soil fertility and carbon sequestration-a sustainable solution to crop-residue burning in India [J]. RSC Adv, 2018, 8(1):508-520.
- [37] CUI Y, MENG J, WANG Q, et al. Effects of straw and biochar addition on soil nitrogen, carbon, and super rice yield in cold waterlogged paddy soils of North China. [J]. J Integr Agr, 2017, 16(5):1064-1074.
- [38] SONG D, XI X, ZHENG Q, et al. Soil nutrient and microbial activity responses to two years after maize straw biochar application in a calcareous soil [J]. Ecotoxicol and Environ Saf, 2019, 180:348-356.
- [39] LI N, WEN S, WEI S, et al. Straw incorporation plus biochar addition improved the soil quality index focused on enhancing crop yield and alleviating global warming potential [J]. Environ Tech Innov, 2020, 21(1/2):101316-4-101316-14.
- [40] SUN C, WANG D, SHEN X, et al. Effects of biochar, compost and straw input on root exudation of maize (Zea mays L.): From function to morphology [J]. Agri Ecosyst Environ, 2020, 297:106952-4-106952-12.
- [41] CHANDRA S, MEDHA I, BHATTACHARYA J. Potassium-iron rice straw biochar composite for sorption of nitrate, phosphate, and ammonium in soil for timely and controlled release [J]. Sci Total Environ, 2020, 712:136337-4-136337-15.
- [42] SIEDT M, SCHAFFER A, SMITH K, et al. Comparing straw, compost, and biochar regarding their suitability as agricultural soil amendments to affect soil structure, nutrient leaching, microbial communities, and the fate of pesticides [J]. Sci Total Environ, 2020, 751:141607-4-141607-19.
- [43] HUANG M, LI Z, CHEN M, et al. Dissolved organic matter released from rice straw and straw biochar: Contrasting molecular composition and lead binding behaviors [J]. Sci Total Environ, 2020, 739:140378-4-140378-8.
- [44] NAN Q, WANG C, WANG H, et al. Mitigating methane emission via annual biochar amendment pyrolyzed with rice straw from the same paddy field [J]. Sci Total Environ, 2020, 746:141351-4-141351-9.
- [45] HE X, HAN L, FU B, et al. Effect and microbial reaction mechanism of rice straw biochar on pore methane production during mainstream large-scale aerobic composting in China [J]. J Clean Prod, 2019, 215:1223-1232.

原文地址: <http://www.china-nengyuan.com/tech/215878.html>