

# 废物资源化制备生物质炭及其应用的研究进展

王怀臣, 冯雷雨, 陈银广

(同济大学环境学院污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海200092)

**摘要:** 生物质炭作为一种多功能性材料正逐步受到人们的广泛关注。本文综述了以废弃物为原料制备生物质炭, 给出了制备生物质炭的主要工艺, 并对生物质炭的主要物理化学性质如元素组成、碱度、表面特性和孔隙结构进行了介绍。然后对生物质炭在农业和环境领域中的应用做了相应介绍, 例如用作土壤改良剂提高土壤肥力、增加碳固定、减少温室气体排放, 作为一种高效吸附剂同时去处污水中重金属及有机污染物等。最后, 对今后生物质炭的研究方向作出了展望, 指出应继续研究尽快实现生物质炭的大量、高效、廉价生产, 从原料和工艺方面着手进一步提高生物质炭的比表面积, 使其成为活性炭的替代品, 同时进一步研究对土壤的改良和修复、对农作物生长和产量的促进以及对温室气体的减排作用的机理, 并提供大面积的长期的实验数据支持。

## 生物质炭

, 国外将其定义为bioc

har, 是指由富含碳的生物质通过裂解或者不完全燃烧生成的一种生物质<sup>[1-4]</sup>

。它是一种多功能材料, 含有大量的碳和植物营养物质, 可用做土壤改良剂提高土壤肥力, 并可以进一步提高农作物产量。此外, 生物质炭具有较大的比表面积且表面含有较多的含氧活性基团, 可以吸附土壤或污水中的重金属及有机污染物等, 因成本较低, 被许多人认为是未来活性炭的替代品。特别是, 生物质炭是经热解形成的, 其制备原料对碳、氮具有较好的固定作用, 施加于土壤中, 可以减少CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub>等温室气体的排放, 减缓全球变暖<sup>[5-7]</sup>, 它被认为是一种在农业和环境中有广阔应用前景的材料。

尽管含碳基质可用于制备生物质炭, 但是为了减少环境污染及资源化利用有机废物, 近年来文献报道了利用农林废弃物、工业废弃物以及污水厂剩余污泥等城市有机废物制备生物质炭<sup>[5, 8]</sup>

。用这些废弃物生产生物质炭是一种有效的实现固废资源化的途径, 对其作进一步的分析和利用具有极高的研究价值和重要的现实意义。本文作者对废物资源化制备生物质炭及其应用的研究现状进行了综述, 并对未来生物质炭领域的研究方向进行了展望。

## 1 制备生物质炭的原料

理论上讲, 所有富含碳的有机质均可用于制备生物质炭。但用淀粉等有机质生产生物质炭则成本较高, 在全球资源匮乏的今天显然不符合资源最佳利用的原则, 因此利用含碳量高的固体废弃物例如秸秆、稻草、林木采伐废枝、甘蔗渣、污水厂剩余污泥等作为原料制备生物质炭不仅避免了环境污染并可生成新的能源, 是一种废物资源化的良好途径。据报道我国每年秸秆产量约7亿吨, 农林废弃物约3.5亿吨, 并有大量的城市垃圾难以处理, 若将它们用于生产生物质炭无疑是一种变废为宝的方法。

植物类废弃物主要有秸秆、稻草、米壳、树枝, 这些废弃物通常含有丰富的碳。目前, 植物类废弃物主要的处理方法为燃烧, 既污染了环境又浪费了能源, 因此, 可以用其生产生物质炭, 并作进一步利用。例如, Yuan等[5]分别采用菜籽秸秆、大豆秸秆、玉米秸秆和花生秸秆在低氧环境下裂解得到了一系列的生物质炭, 发现不同的原料基质制成的生物质炭的产率和性质差别较大, 其中花生秸秆生物质炭比其余几种生物质炭中碱金属离子和含磷量都高, 这主要是因为花生秸秆中这些成分的含量高于其它几种原料。生物质炭是由基质经过不完全燃烧或裂解生成的, 其主要成分均来自于所用原料, 因此认为原料是影响生物质炭产率和性质的最重要的因素。

轻工业同样会产生大量的固体废弃物, 其中不乏含较多碳的物质。例如, 制糖产业中, 目前主要原料是甘蔗和甜菜

, 在

制糖后会

有大量的甘蔗渣和

甜菜渣产生, 这些废弃物含有大量的

碳, 是制备生物质炭的理想材料。Inyang等<sup>[7]</sup>

用甘蔗渣置于热解炉中, 在低氧环境下裂解得到生物质炭, 实验中其将基质甘蔗渣消化后再裂解生产生物质炭DBC (digested bagasse biochar), 并与新鲜甘蔗渣制成的生物质炭BC (bagasse biochar) 相比, 发现二者产率接近, 但DBC的

性能更好，具体表现在其拥有更高的pH值、更大的比表面积和阴、阳离子交换能力以及更多的表面电荷[7]。这些性

[9]

以甜菜渣为原料也得到了相似的结果。另外，通过对原材料进行一定的预处理，可以使制得的生物质炭呈现出某些特殊的性质。例如Chen等<sup>[1]</sup>

以桔子皮为基质制备生物质炭，但在裂解前将原料于FeCl<sub>2</sub>、FeCl<sub>3</sub>

(摩尔比=1:1)混合液中先采用共沉法进行预处理，使制得的生物质炭具有磁性，并发现氧化铁的加入使生物质炭固定原始有机物的能力显著增强，而且磁性生物质炭和氧化铁颗粒呈有序的晶格分布，而普通的生物质炭则呈无定形态。

通过N<sub>2</sub>

吸附和BET分析发现，加入铁之后虽然生物质炭的总表面积减小，但同时也使更多的微孔分布在纳米级别，从而使其对磷酸盐等污染物的去除能力得到加强。最重要的是，粉末状的生物质炭或者活性炭投加到水中吸附完污染物后不容易分离，而磁性生物质炭因为本身具有磁性则可以利用电磁原理将其分离回收，这比膜分离成本更低，效率更高。

自19世纪活性污泥法处理污水诞生以来，因其成本低，效果好，已成为最普遍的城市污水处理方法。但是，在此过程中，剩余污泥是不可避免的副产物，每年产生大量的污泥难以处置。目前，污泥的主要处理方法是填埋和焚烧，填埋占用大片土地资源并有可能污染地下水，焚烧则会产生空气污染并造成能源浪费。而污泥中含有大量的C以及N、P等营养物质，是制备生物质炭的优质原料。

Hossain等<sup>[10]</sup>

以剩余污泥为原料裂解制成生物质炭，产率最高可达72.3%，并且其营养物质含量很高，适合于施入土壤中促进植物的生长。因此，用剩余污泥制备生物质炭的前景非常可观。同样，家禽、家畜的粪便也富含很多营养物质，在我国农村常被施加于土壤中用以提高土壤肥力，增加农作物产量。

但畜禽粪便也是有机质，含有大量的碳

，亦可用于制备生物质炭。Cao等<sup>[6, 11]</sup>

以奶牛厂粪便为原料制备的生物质炭不但具有提高土壤肥力的作用，还可以吸附受污染土壤中的Pb等重金属以及阿特拉津等农药类有机污染物，可用于受污染土壤的修复，其效果远大于粪便本身。

另外，我国的湖泊水体富营养化非常严重，例如2007年太湖的蓝藻爆发给我国造成了不可估量的损失，藻类污染已成为人们不得不认真面对的严峻问题。藻类分为大分子藻类和微藻类，大分子藻类常见于湖泊中，而微藻个体极小，悬浮生长于水中。藻类主要由碳水化合物、蛋白质和脂类构成，微藻类脂类含量较高，适合于生产生物燃料，而大分子藻类脂类含量较低，且繁殖速度非常快，

可用来制备生物质炭。Bird等<sup>[12]</sup>

用分别来自淡水和海水的8种藻类裂解制得了一系列生物质炭，与用家禽粪便等有机废物制成的生物质炭类似，其中P、K、Ca、Mg等营养物质的含量非常丰富，适宜用做土壤改良剂提高土壤肥力。

综上所述可以看出，目前的研究均以富含碳的物质，如秸秆、稻草、树枝、草、藻类等植物类废弃物，粪便、剩余污泥等有机质废弃物，以及甘蔗渣、甜菜渣等工业废弃物为基质，在低氧环境下低温裂解后得到生物质炭。以上富含碳的物质基本都是废弃物，很大程度上避免了能源浪费，在当今能源危机的背景下变得非常有意义。

## 2 生物质炭的制备方法

生物质通过热化学过程转变成生物燃料或其它生物产物要经过3个阶段：裂解过程、碳化过程和气化过程。生物质炭是通过将生物质在缺氧环境下，于300~700℃下裂解得到。裂解条件不同，得到的产物产率和性质均有较大差异。基于不同的裂解条件，裂解可分成3种基本形式：慢速裂解、中速裂解以及快速裂解，各方式具体参数和特点见表1。反应所需的能量有4种不同的途径提供：由反应自身放热提供；通过直接燃烧反应副产物或基质提供；燃气燃烧加热反应器间接提供；由其它含热物质间接提供。

在慢速裂解过程中，蒸气停留时间较长（约>10s），反应温度在450~650℃间，大气压下慢速升温（0.01~2.0℃/s），这一裂解环境使得液态产物减少，而固态产物（生物质炭）产率增加。慢速裂解速度较慢，促进了大量的生物质颗粒内以及混合蒸气相中的二级反应<sup>[13]</sup>

，同时，高浓度的蒸气和较大的固液接触面，也促进了副反应，并进一步提高生物质炭的产率。

由表1可以看出，慢速裂解和中速裂解均有较高的生物质炭产率，而快速裂解则得到的液态产物较多。因此，为了得到较多的生物质炭，慢速和中速裂解过程更为适合

。Duku等<sup>[13]</sup>

总结了制备生物质炭的最佳条件为：木质素、灰分和氮含量高的生物质为基质；较低的裂解温度（<400℃）；较高的压力；较长的蒸气停留时间（>10s）；较大的气固接触面；较低的升温速率（0.01~2.0℃/s）；较大的生物质颗粒。

生物质炭的制备方式通常可分为批式制备和连续制备。生物质炭传统的制备方式是批式制备，例如利用地窖、砖窑等将生物质堆埋，裂解制备生物质炭[图1(a)]。这些方式设备一般比较简单，易于实施，并且成本较低，但产率较低，且无热量回收等。今天，随着科技进步和自动化程度的提高，现代化的连续制备方式已较为成熟，较常见的设备有：鼓式裂解仪、螺杆式裂解仪和回转窑裂解仪等[如图1(b)]。显然，可用于工业热裂解的连续式制备方式将是未来生物质炭生产的主流方式。两种制备方式，产率不同，各有优缺点，详见表2。

表1 不同裂解方式下典型产物的产率<sup>[13-14]</sup>

裂解方式	过程参数	液态产物（生物油）	固态产物（生物质炭）	气态产物（混合气）
慢速裂解	中低温（450~650℃）、低加热速率、蒸气停留时间（5~30 min）	30%（70%水）	35%	35%
中速裂解	中低温（400~550℃）、中等加热速率、蒸气停留时间（10~20 s）	50%（50%水）	25%	25%
快速裂解	中温（约500℃）、快速加热速率、（1000℃/s）蒸气停留时间（<2 s）	75%（25%水）	12%	13%
气化	高温（>800℃）、蒸气停留时间（5~30 min）	5%（55%水）	10%	85%



图1 传统的制备方式和当今现代化的生产设备<sup>[15]</sup>

表2 制备生物质炭的两类设备特点对比<sup>[13]</sup>

制备方式	典型反应器类型	生物质炭产率	优点	缺点
批式制备	地窖、砖窑等	10%~30%	设备简单、成本低廉	产率较低、无能量回收、裂解气排入大气污染环境
连续制备	回转窑、螺杆式裂解仪等	25%~40%	产率更高、原料更灵活、副产物的能量可回收用于反应本身、操作更简单、产物更清洁、可连续生产	设备复杂、成本较高

### 3 生物质炭的性质

一般而言，应用不同基质在不同条件下得到的生物质炭，其物理化学性质有所不同，但同时也拥有很多共同的特性。有报道指出实验室条件下制备生物质炭的产率从24%~72.3%不等，如能选择合适基质并于适当条件下热解，产率可达50%<sup>[5, 10]</sup>。

#### 3.1 生物质炭的成分和元素分析

对生物质炭进行化学成分分析发现，灰分含量较多，约占总含量的10%~58%。生物质炭中灰分含量主要与所用基质的种类有关，而且随着裂解温度的升高灰分含量有所升高，这是因为温度越高，挥发性组分损失越多，导致灰分含量越高。表3给出了几种实验室制备的生物质炭的元素含量，可以发现生物质炭中主要含有C、H、O、N等元素，另外还含有P、S、K、Ca、Mg等植物营养元素，其中C的含量最高，能达到38%~76%，而且由于热解过程中某些养分被浓缩和富集，与基质相比，生物质炭中的C含量有所增加，例如甘蔗渣生物质炭BC中的C含量比原料中的提高了65.9%，是一种碳固定的良好途径<sup>[1, 8, 11-12, 16-17]</sup>，并且P、K、Ca、Mg的含量也高于其制备原料，使其应用价值远远高于原材料本身。

前面提到，原料的化学组成对生物质炭的元素组成和含量有重要影响，不同原料制成的生物质炭成分含量差别很明显，研究发现生物质炭中营养元素的含量和其来源物料中元素的含量呈直线相关。

而且，生物质炭中各元素的含量与制备过程中的裂解温度有关。Hossain等<sup>[10]</sup>发现随温度升高，生物质炭产率有所下降，挥发性物质含量减少，N含量下降，从300~700 °C下降了55%，可能是裂解过程中氮的挥发造成的。同时P的含量也有所下降，但微量有机物的含量有所提高。

**表3 几种生物质炭及其基质的主要元素含量<sup>[7, 18]</sup>**

元素	松树枝	P300	稻壳	R300	甘蔗渣	BC	DBC
C	49.25	61.60	38.04	51.62	46.08	76.45	73.55
H	6.18	3.42	4.85	2.08	6.88	2.93	2.41
N	0.30	0.16	1.75	0.11	0.74	0.79	—
O	44.27	34.82	48.46	23.82	46.30	19.83	24.04

注：P300 为松树枝在 300 °C 下裂解生成的生物质炭；R300 为稻壳在 300 °C 下裂解生成的生物质炭；BC 为甘蔗渣裂解生成的生物质炭；DBC 为消化后的甘蔗渣裂解生成的生物质炭。

### 3.2 生物质炭的碱性和表面特性

热解法得到的生物质炭一般呈碱性，文献中报道其pH值为5~12<sup>[5, 7, 10]</sup>

。Yuan等[5]对几种秸秆制成的生物质炭进行了XRD（X射线衍射）分析，发现生物质炭表现为碱性主要是由于其中有碳酸盐晶体形成，而且，红外光谱分析（FTIR）发现生物质炭表面含有大量—COOH和—OH等含氧活性基团，这些基团在pH值较高时以阴离子状态存在，可吸收H<sup>+</sup>，表现为碱性。同时，这些含氧基团使得生物质炭表现出疏水性且具有一定的酸碱缓冲能力。另外，含氧活性基团使得生物质炭表面带有负电荷，使其具有较高的阳离子交换能力（CEC）。

CEC是衡量土壤质量的一个重要指标，高的CEC可以是土壤的淋溶性低，对养分的固定能力强，对植物生长十分有利。世界约30%的土地为酸性，不利于植物生长，因此可将生物质炭作为一种土壤改良剂，提高土壤pH值，能加土壤的阳离子交换能力

。有学者发现，将生物质炭施加入土壤中，使其阳离子交换能力进一步增强<sup>[19]</sup>

，这主要是因为其表面基团会发生了氧化，形成了—COOH等氧化基团，但同时也由于失去了许多表面负电荷从而降低了阳离子交换能力<sup>[17, 19-20]</sup>。Silber等<sup>[19]</sup>

还发现，裂解得到的生物质炭经盐酸浸泡后表面积大幅增加，由 $3.0\text{m}^2/\text{g}$ 增加到了 $23.4\text{m}^2/\text{g}$ ，可能的原因为生物质炭表面变成了亚微米结构。

与此同时，有研究发现生物质炭的碱度和pH值随温度的升高而升高，原因可能是在高温下形成更多的 $\text{CO}_3^{2-}$ ，使其具有较强的缓冲能力<sup>[5, 10]</sup>。另有学者还发现随温度的升高，生物质炭的阳离子交换能力下降，这主要是因为温度升高过程中失去了许多官能团<sup>[16, 19]</sup>。

### 3.3 生物质炭的孔隙结构

因为生物质炭是在蒸气存在条件下裂解生成的，因此必然会生成大量的孔隙结构。图2给出了一种生物质炭的微观结构。可以发现，生物质炭就有非常复杂的孔隙结构，孔隙大小不一。按生物质炭孔径的大小，可将孔隙分为小孔隙（ $<0.9\text{nm}$ ）、微孔隙（ $<2\text{nm}$ ）和大孔隙（ $>50\text{nm}$ ）。大孔隙可以增加土壤的透气性和持水率，同时也为微生物提供了生存和繁殖的场所；小孔隙则可以影响生物质炭对分子的吸附和转移<sup>[21]</sup>。

生物质炭的表面积通常由其孔隙率决定，有些甚至含有纳米微孔结构，这显然会使其具有较强的图2生物质炭的微观结构<sup>[13]</sup>吸附能力。因此，生物质炭也可用做环境中有毒有害物质的吸附剂。而且，施加入土壤中后，其丰富的孔隙结构会使土壤中水分渗滤路径和速度改变，使得土壤的田间持水率显著提高，从而改善了土壤对养分的固定能力。

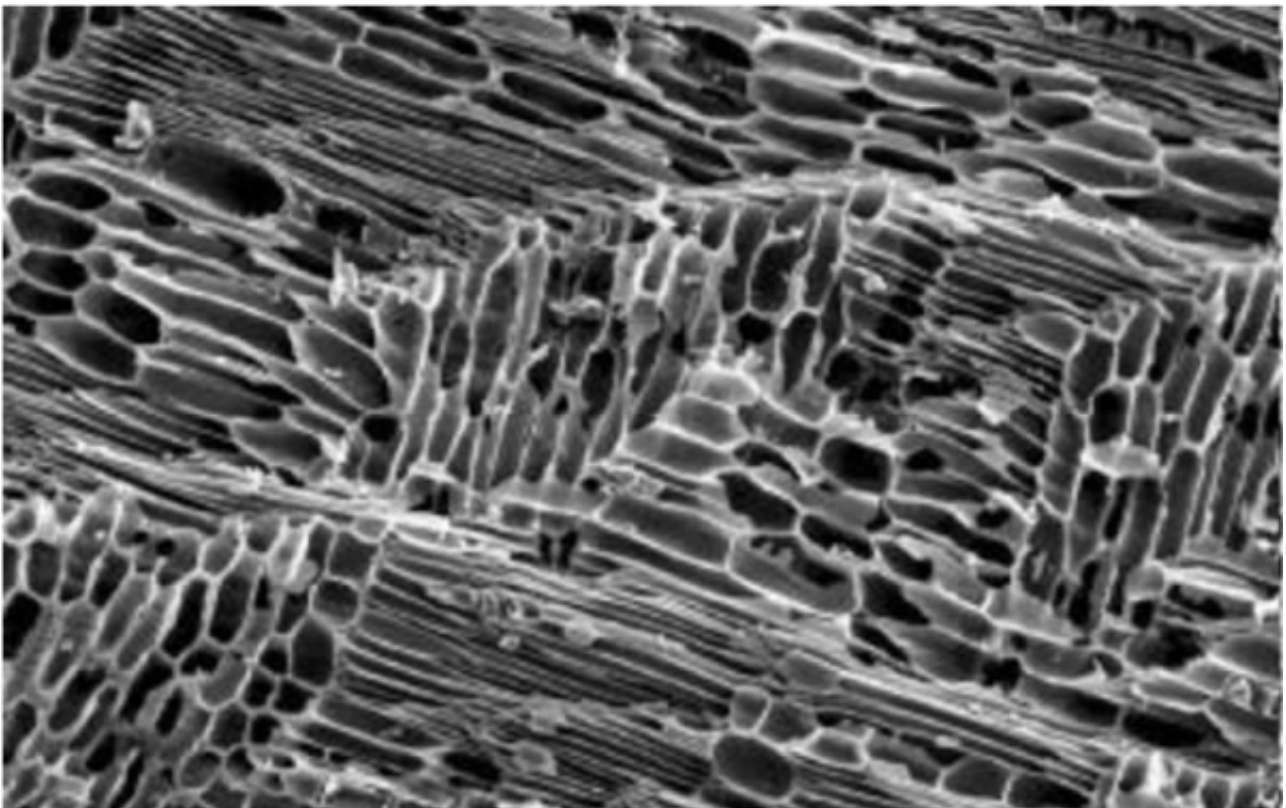


图 2 生物质炭的微观结构<sup>[13]</sup>

### 4 生物质炭的应用

前面提到生物质炭有很多特性，是一种多功能性的材料，很多学者都在研究其在各领域的应用。从研究成果来看，生物质炭应用主要集中于农业和环境领域。

## 4.1在农业领域中的应用

目前,全球土地酸化严重,土壤有机碳大量流失,土壤肥力较差,亟需一些合适的物质施入土壤中来改善土壤环境。生物质炭因其具有较高的pH值和阳离子交换能力,同时含有植物所需的营养物质,被认为是一种潜在的优质土壤改良剂。早在2500年前,亚马逊流域的印第安土著居民就已将这种黑炭加入到土壤中,大大提高了土壤肥力,土壤呈黑色,经测定其含碳量可高达9%,是周边其它土壤的约20倍,同时,N、P含量是其它土壤的3倍,农作物产量可提高一倍。经分析发现,这种黑土就是施加了生物质炭后形成的一种肥沃土壤<sup>[21-22]</sup>。

已有报道将生物质炭成功作为土壤改良剂添加到土壤中,从而提高了土壤肥力,增加了营养物质的植物可利用性,进一步提高了农作物产量<sup>[23-27]</sup>。

表4给出了几种不同的生物质炭施用对作物产量的影响。可以看出,施加生物质炭后(或与无机肥料混合施用)可明显促进作物的生长,提高作物产量,其具体机理尚不完全清楚,可能的原因有以下几种。

表4 施加生物质炭后作物产量的变化<sup>[13]</sup>

生物质炭种类	施用量/t·hm <sup>-2</sup>	作物种类	效果
树枝生物质炭	0.5	大豆	单位面积生物量提高 51%
次生森林木生物质炭	11	大米	只施加生物质炭无明显效果,但与无机肥料一起施用则产率提高 880%
米壳生物质炭	10	玉米、大豆	产率增加 10%~40%
造纸厂污泥生物质炭	10	小麦	在酸性土壤中小麦产量提高 30%~40%

(1) 直接原因 生物质炭中含有大量的C、N、P以及一些有机的营养成分,可以直接提高土壤肥力,促进了植物生长。

(2) 间接原因 生物质炭的施用能够延长营养物质的保留时间,减少养分流失。提高了土壤pH值。一般来说,近中性环境更有利作物生长,而生物质炭一般呈碱性,施加入土壤中可提高土壤pH值[28]。有学者将甘蔗渣制备的生物质炭施加入土壤中,使得土壤pH值由4.0~4.5提高到6.0~6.5,效果非常显著。提高土壤含水率和孔隙率。土壤的含水率和有效性是衡量土壤生产力的重要指标。生物质炭孔隙率很大,施加入土壤中,可大大增加土壤的透气性和孔隙率,使水分子存储于小空隙中从而提高了土壤含水率<sup>[29]</sup>,并进一步促进了土壤中有机成分的分解和微生物的生长,这尤其适合沙土的改良。增加阳离子交换能力。

前面提到,生物质炭表面含有大量的含氧活性基团,阳离子交换能力较高,施加入土壤中可以提高土壤的阳离子交换能力,固定某些植物所必须的金属元素<sup>[19]</sup>。

增加和优选土壤中微生物的种类和活性<sup>[19, 30]</sup>

。有学者认为生物质炭作为土壤改良剂可以增加土壤对碳的固定,主要是因为基质中的碳由光合作用固定,通过裂解可提高碳的稳定性,施加入土壤中可以使碳保留几百年<sup>[31-32]</sup>。Silber等<sup>[19]</sup>

还发现,生物质炭具有快速且稳定的磷释放能力,具有替代磷肥的潜力,而且K<sup>+</sup>可以较迅速地释放,但持续时间不长,可替代钾肥用于短周期的植物。另外,土壤中加入生物质炭后,因其较大的孔隙率使得土壤表层容重减小,有利于植物根系生长。

综上,影响生物质炭作为土壤改良剂质量的物化因素包括:表面电荷、pH值、比表面积、孔隙率、阴阳离子交换能力以及营养成分等。此外,生物质炭对土壤的改良也受到土壤环境的影响,例如生物质炭的阳离子交换能力随环境pH值的升高而线性增加。因此,可以根据生物质炭的性质和土壤性质来选择合适的生物质炭作为土壤改良剂,从而达到促进植物生长,增加农作物产量的目的。

## 4.2在环境领域中的应用

### 4.2.1对有毒有害物质的吸附作用

前面提到,生物质炭具有非常复杂的微孔结构,比表面积很大,性质比较稳定,且表面含有很多活性基团,非常适合作为吸附剂应用于环境保护中。许多研究已经表明,生物质炭是一种低成本的、高效吸附剂,用于吸收多种污染物。Chen等<sup>[33]</sup>

发现松树枝生成的生物质

炭可以有效去除萘、硝基苯以及间二硝基苯等环境

污染物。Qiu等<sup>[34]</sup>

认为以稻草为基质的生物质炭可以代替活性炭去除水中的孔雀蓝等染料; 某些生物质炭还可以同时吸附邻苯二酚和腐植酸<sup>[35]</sup>。Cao等<sup>[6, 11]</sup>

发现用奶牛场粪便生成的生物质炭可以同时去除污水中的Pb和有机农药, 对Pb的去除率最高可达89%, 同时还可去除77%的阿特拉津农药。另有文

献报道, 磁性的生物质炭可同时去除有机污染物和磷酸盐<sup>[1]</sup>

。虽然不如活性炭的吸附容量高, 但是其生产成本低, 而且其表面含有较多活性基团, 除了吸附作用, 还可以利用静电作用和化学沉淀作用将多种污染物同时去除。例如, 生物质炭表面含有大量的含氧基团, 可通过结合沉淀将Pb以 $Pb_5(PO_4)_3$

(OH)的形式去除, 同

时又可利用微孔结构将阿特拉津等有机物吸

附, 且二者并不存在竞争关系<sup>[11]</sup>

; 而活性炭则对二者均依靠表面吸附作用去处, 总容量有限, 并且对比发现活性炭对Pb的去处效果较差。实际环境中经常同时存在多种污染成分, 因此生物质炭作为吸附剂优点是明显的。

因此, 可以将生物质炭施入受污染的土壤中, 吸附有毒物质, 进行土壤修复。有报道指出生物质炭对杀虫剂的吸附能力约是土壤本身的2000倍, 在土壤中施入少量的生物质炭即可有效降低有机污染物对植物的毒害作用, 减少在植物中的累积<sup>[36]</sup>。

Beesley等<sup>[37]</sup>

发现生物质炭的加入可以使土壤中的多环芳烃(PAH)浓度降低约50%。生物质炭对有机污染物的去除机理主要有:

生物质炭具有丰富的孔隙结构, 可以固定污染物; 生物质炭具有巨大的比表面积, 可以有效地吸附污染物质; 高温条件下制备的生物质炭极性较强, 对有机物质的亲和能力强, 因此能更有效地去除有机污染物; 生物质炭增强了土壤中微生物的活性, 使其对污染物的降解能力增强<sup>[21]</sup>

。可见, 选择合适生物质炭施加于受污染土壤中是一种良好的土壤修复的方法。

#### 4.2.2对温室气体的减排作用

碳固定是指将碳捕获后转变成一种固定态的形式, 避免其回到大气中。环境中的碳循环是指大气中的CO<sub>2</sub>被植物通过光合作用吸收, 固定于生物质内, 其分解或燃烧

可再转变成CO<sub>2</sub>

重新释放到大气环境中。而如果将植物基质裂解转变成生物质炭, 生物质炭中的碳以苯环等较复杂的形式存在, 非常稳定, 这就造成了环境中的碳循环被分离出来一部分, 被称为“碳负”过程。生物质炭对碳的固定比其它固碳方式, 如植树造林, 能更长时间地对碳进行固定。

众所周知, 耕地和牧场是温室气体的重要产生源, 如何减少其温室气体的排放是人们所迫切关注的。将生物质炭施加于土壤中增强了碳的固定, 可以减少CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>等温室气体的排放<sup>[29]</sup>。Zhang等<sup>[38]</sup>

研究还发现, 在稻田中施加生物质炭可以使N<sub>2</sub>

O溢出量减少40%

~50%。以20g/kg的标准将生物质炭

添加入牧草地和大豆地中, 发现两种土壤中N<sub>2</sub>

O的溢出量分别减少了80%和50%, 同时CH<sub>4</sub>的产生也受到明显的抑制<sup>[4]</sup>

。目前还缺乏足够的的数据, 其机理也还没有完全弄清, 可能是因为加入生物质炭之后土壤的孔隙率增大, 透气性增强, CH<sub>4</sub>被氧化的量增多, 而CH<sub>4</sub>

的排放量是产生量和氧化量的共同结果, 所

以净排放减少。同样, 由于N<sub>2</sub>

O的产生是与土壤环境密切相关的, 加入生物质炭后可以提高土壤pH值, 同时因为透气性增强, 使得反硝化菌的活性受到抑制, 所以N<sub>2</sub>O的溢出量会大量减少。

N<sub>2</sub>O和CH<sub>4</sub>的温室效应分别是CO<sub>2</sub>的290倍和25倍, 因此, 施加生物质炭到耕地和牧场中可以大大降低温室效应。

总之, 生物质炭既可以用做吸附剂去处环境中的重金属及有机污染物, 可以用于土壤修复, 施加于土壤中又可以增加碳固定, 减少温室气体排放, 而且生物质炭可以加工成各种形状, 非常便于运输, 在环境保护领域是一种非常有应用前景的物质。

## 5 结语及展望

生物质炭拥有成本低、多功能性等优点，正越来越受到人们的强烈关注。用含碳废弃物来制备生物质炭是一种资源再利用的良好途径。生产出来的生物质炭既可作为一种高效多能吸附剂以取代活性炭，又可用于改良土壤环境，增加作物产量。然而，目前对于生物质炭的认识和研究还比较浅显，相关机理还不清楚，因此，今后可着重对以下几个方面继续探索和研究。

(1) 目前报道中实验室条件下制备的生物质炭产率较高，而大型的工业生产还未完善和普及，且效率较低，所以应继续研究，尽快实现生物质炭的大量、高效、廉价生产。

(2) 目前，生物质炭的比表面积仍远远小于活性炭，吸附容量有限，所以应从原料和工艺方面着手，进一步提高生物质炭的比表面积，使其成为活性炭的替代品。

(3) 对土壤的改良和修复、对农作物生长和产量的促进以及对温室气体的减排作用的机理尚不完全清楚，且缺乏大面积的长期的实验数据支持，仍有待于做进一步的研究。

## 参考文献

[1]Chen B L , Chen Z M , Lv S F.A novel magnetic biochar efficiently sorbs organic pollutants and phosphate [J].Bioresource Technology , 2011 , 102 ( 2 ) : 716-723..

[2]Chen N L , Zhou D D , Zhu L Z.Transitional adsorption and partition of nonpolar and polar aromatic contaminants by biochars of pine needles with different pyrolytic temperatures[J].Environ.Sci.&Technol. , 2008 , 42 ( 14 ) : 5137-5143.

[3]Yang Y N , Sheng G Y.Enhanced pesticide sorption by soils containing particulate matter from crop residue burns [J].Environ.Sci.& Technol. , 2003 , 37 ( 16 ) : 3635-3639.

[4]陈温福，张伟明，孟军，等.生物炭应用技术研究[J].中国工程科学，2011，13（2）：83-89.

[5]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.

[6]Cao X D , Ma L N , Liang Y , et al.Simultaneous immobilization of lead and atrazine in contaminated soils using dairy-manure biochar[J].Environ.Sci.& Technol. , 2011 , 45 ( 11 ) : 4884-4889.

[7]Inyang M , Gao B , Pullammanappallil P , et al.Biochar from anaerobically digested sugarcane bagasse[J]. Bioresource Technology , 2010 , 101 ( 22 ) : 8868-8872.

[8]Sohi S P , Krull E , Lopez-Capel E , et al.A review of biochar and its use and function in soil[J].Advances in Agronomy , 2010 , 105 : 47-82.

[9]Yao Y , Gao B , Inyang M , et al.Biochar derived from anaerobically digested sugar beet tailings : Characterization and phosphate removal potential [J].Bioresource Technology , 2011 , 102 ( 10 ) : 6273-6278.

[10]Hossain M K , Strezov V , Chan K Y , et al.Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar [J].Journal of Environmental Management , 2011 , 92 ( 1 ) : 223-228.

[11]Cao X D , Ma L N , Gao B , et al.Dairy-manure derived biochar effectively sorbs lead and atrazine [J].Environ.Sci.& Technol. , 2009 , 43 ( 9 ) : 3285-3291.

[12]Bird M I , Wurster C M , de Paula Silva P H , et al.Algal biochar-production and properties [J].Bioresource Technology , 2011 , 102 ( 2 ) : 1886-1891.

[13]Duku M H , Gu S , and Hagan E B.Biochar production potential in Ghana——A review [J].Renewable and Sustainable Energy Reviews , 2011 , 15 ( 8 ) : 3539-3551.



- [14]何绪生, 耿增超, 余雕, 等.生物炭生产与农用的意义及国内外动态[J].农业工程学报, 2011, 27(2): 1-7.
- [15]Renner R.Rethinking biochar [J].*Environ.Sci.& Technol.*, 2007, 41(17): 5932-5933.
- [16]Lehmann J.Bio-energy in the black [J].*Frontiers in Ecology and the Environment*, 2007, 5(7): 381-387.
- [17]Cheng C H, Lehmann J, Thies J E, et al.Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes [J].*Organic Geochemistry*, 2006, 37(11): 1477-1488.
- [18]Liu Z G, Zhang F S.Removal of lead from water using biochars prepared from hydrothermal liquefaction of biomass [J].*Journal of Hazardous Materials*, 2009, 167(1-3): 933-939.
- [19]Silber A, Levkovitch I, Graber E R.pH-dependent mineral release and surface properties of cornstraw biochar : Agronomic implications[J].*Environ.Sci.& Technol.*, 2010, 44(24): 9318-9323.
- [20]Cheng C H, Lehmann J.Ageing of black carbon along a temperature gradient [J].*Chemosphere*, 2009, 75(8): 1021-1027.
- [21]袁金华, 徐仁扣.生物质炭的性质及其对土壤环境功能影响的研究进展[J].*生态环境学报*, 2011, 20(4): 779-785.
- [22]Marris E.Putting the carbon back : Black is the new green [J].*Nature*, 2006, 442: 624-626.
- [23]Bar-Yosef B.Advances in Fertigation [J].*Advances in Agronomy*, 1999, 65: 1-77.
- [24]Chan K Y, Van Z L, Meszaros I, et al.Using poultry litter biochars as soil amendments [J].*Australian Journal of Soil Research*, 2008, 46(5): 437-444.
- [25]Glaser B, Lehmann J, Zech W.Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal-A review [J].*Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(4): 219-230.
- [26]Graber E R, Meller-Harel Y, Kolton M, et al.Biochar impact on development and productivity of pepper and tomato grown in fertigated soilless media [J].*Plant and Soil*, 2010, 337(1-2): 481-496.
- [27]Lehmann J, Da Silva J P, Steiner C, et al.Nutrient availability and leaching in an archaeological anthrosol and a ferralsol of the central amazon basin : Fertilizer, manure and charcoal amendments [J].*Plant and Soil*, 2003, 249(2): 343-357.
- [28]Rondon M A, Lehmann J, Ramirez J, et al.Biological nitrogen fixation by common beans ( *Phaseolus vulgaris* L. ) increases with bio-char additions [J].*Biology and Fertility of Soils*, 2007, 43(6): 699-708.
- [29]Karhu K, Mattila T, Bergström I, et al.Biochar addition to agricultural soil increased CH<sub>4</sub> uptake and water holding capacity—Results from a short-term pilot field study [J].*Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 140(1-2): 309-313.
- [30]Pietikainen J, Kiiikkila O, Fritze H.Charcoal as a habitat for microbes and its effect on the microbial community of the underlying humus [J].*Oikos*, 2000, 89(2): 231-242.
- [31]Lehmann J.A handful of carbon [J].*Nature*, 2007, 443: 143-144
- [32]Woolf D, Amonette J E, Street-Perrott F A, et al.Sustainable biochar to mitigate global climate change [J].*Nature Communications*, 2010, 1: 1-9.
- [33]Chen B, Chen Z.Sorption of naphthalene and 1-naphthol by biochars of orange peels with different pyrolytic temperatures [J].*Chemosphere*, 2009, 76(1): 127-133.

[34]Qiu Y , Zheng Z , Zhou Z , et al.Effectiveness and mechanisms of dye adsorption on a straw-based biochar [J].Bioresource Technology , 2009 , 100 ( 21 ) : 5348-5351.

[35]Kaszi G N , Zimmerman A R , Nkedi-Kizza P , et al.Catechol and humic acid sorption onto a range of laboratory-produced black carbons ( biochars ) [J].Environ.Sci.& Technol. , 2010 , 44 ( 16 ) : 6189-6195.

[36]Kookana R S.The role of biochar in modifying the environmental fate , bioavailability , and efficacy of pesticides in soils : A review[J].Australian Journal of Soil Research , 2010 , 48 ( 6-7 ) : 627-637.

[37]Beesley L , Moreno-Jim é nez E, Gomez-Eyles J L.Effects of biochar and greenwaste compost amendments on mobility , bioavailability and toxicity of inorganic and organic contaminants in a multi-element polluted soil [J].Environmental Pollution , 2010 , 158 ( 6 ) : 2282-2287.

[38]Zhang A F , Cui L Q , Pan G X , et al.Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain , China [J].Agriculture , Ecosystems & Environment , 2010 , 139 ( 4 ) : 469-475.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/112623.html>