

张 帅,崔心红,朱 义,等. 稻壳基生物炭对不同营养底泥理化性质、上覆水和植物生长的影响[J]. 江苏农业科学,2017,45(22):308-313. doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.22.080

稻壳基生物炭对不同营养底泥理化性质、上覆水和植物生长的影响

张 帅¹,崔心红^{1,2},朱 义²,何小丽²

(1. 华东理工大学资源与环境工程学院,上海 200237;2. 上海市园林科学规划研究院,上海 200232)

摘要:在完全淹水条件下,利用桶栽试验,研究不同添加量稻壳基生物炭对不同营养水平底泥理化性质、上覆水及千屈菜生长的影响,生物炭用量按质量比设置 T_0 (0%)、 T_1 (2.5%)、 T_2 (5%)、 T_3 (10%)、 T_4 (20%) 等 5 个处理水平。结果表明,除 T_0 处理外,培养初期上覆水总氮 (total nitrogen,简称 TN)、总磷 (total phosphorus,简称 TP) 含量较高,然后逐渐降低,整个培养低营养水平底泥处理组 (LT)、中营养水平底泥处理组 (MT)、高营养水平底泥处理组 (HT) 系列生物炭施入量为 10% 时上覆水 TN 含量平均值最低 (不包括对照组),分别为 0.53、0.88、2.15 mg/L;生物炭施入量 LT 与 HT 组为 5% 时上覆水 TP 去除率最高,分别为 99.27%、92.61%,MT 组为 10% 时上覆水 TP 去除率最高,为 97.65%;稻壳生物炭对不同营养底泥的 pH 值、电导率 (electrical conductivity,简称 EC) 具有一定调节作用,但差异不明显;可显著提高底泥有机质含量,全氮含量虽也有增加,但差异不显著;能显著增加底泥有效磷含量,降低碱解氮的损失;LT 和 MT 系列施入生物炭后对千屈菜生长有一定促进作用,但差异不显著,HT 系列施入生物炭后对千屈菜生长产生明显抑制作用。

关键词:稻壳基生物炭;底泥;千屈菜;理化性质;上覆水;植物生长;影响

中图分类号: X171.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)22-0308-06

生物炭 (biochar) 是指在低氧或厌氧的条件下将含碳量丰富的生物质在相对较低的温度 ($<700\text{ }^{\circ}\text{C}$) 下热解而得到的一种碳质材料^[1-2],具有碱性、微孔结构丰富、比表面积大、吸附力强等特点^[3-5],在土壤改良、受污染环境修复等方面都具有较大潜力,已成为近年来的研究热点^[6-7]。在土壤改良方面,相关学者通过盆栽试验^[8-9]探讨了生物炭对土壤养分状况和作物生长的影响,以期提高土壤养分的有效性,增加植物吸收养分的效率,达到增产的目的。在环境修复方面,由于生物炭有着强大的吸附能力,可有效吸附水体中的氮、磷及有机物,并将其固持于底泥中,因而可将其作为底泥覆盖材料,以达到原位修复富营养水体和污染底泥的目的^[10-11]。然而关于生物炭对不同营养底泥和水生植物生长影响的研究较少。

当前城市化进程的加快导致城市湿地的逐步萎缩以及结构和功能严重破坏,城市湿地的恢复与重建是促进城市环境可持续发展的重要手段^[12],水生植物兼具生态和景观功能,水生植被的恢复往往是城市湿地生态系统恢复的前提,对底泥进行适当改良,营造适宜的环境条件,是生态恢复的必要手段^[13]。本研究通过模拟试验,分析了不同添加量的生物炭对不同营养水平底泥理化性质、上覆水及千屈菜生长的影响,以

期达到促进植物生长、改善底泥营养状况和环境修复的目的,为生物炭在受损湿地的植被恢复与环境修复过程中的使用提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

1.1.1 植物材料 千屈菜 (*Lythrum salicaria*) 因其具有扦插成活率高及易于获得长势状况一致幼苗的特点而被用作本试验的植物材料。试验前从扦插池选取基径、株高等形态特征基本一致的千屈菜幼苗,将其连根挖起,并用自来水冲洗干净,备用。

1.1.2 供试底泥 供试底泥分别为采自上海市园林科学规划研究院水生植物资源圃的底泥和河道的黑臭底泥,将其自然风干后碾碎过 3 目筛。以资源圃底泥为低营养底泥材料;资源圃底泥与黑臭底泥按质量比 1:1 完全混合,配制中营养底泥材料;黑臭底泥为高营养底泥材料。供试底泥与稻壳生物炭的理化性质见表 1。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计 将 3 种不同营养类型底泥以完全混合方式添加稻壳基生物炭,形成生物炭与底泥质量 (干质量) 比分别为 2.5% (T_1)、5.0% (T_2)、10% (T_3)、20% (T_4) 的试验处理,以没有添加生物炭的处理作为试验对照 (T_0 , CK),高营养底泥生物炭基质按生物炭浓度由低到高标记为 (HT_0 、 HT_1 、 HT_2 、 HT_3 、 HT_4),记为 HT 系列,低营养底泥组 (LT) 及中营养底泥组 (MT) 同理。将上述制备的底泥分别铺设在口径为 40 cm 的栽植筒中,铺设厚度 30 cm,加自来水至底泥含水率达到饱和,稳定 1 d 后种植千屈菜幼苗 (3 株/栽植筒),继续

收稿日期:2016-06-08

基金项目:上海市科学技术委员会科技创新行动计划 (编号:14DZ1206002);上海市理化和市容管理局科技基金 (编号:B150204);上海市质量技术监督局科技基金 (编号:B150204)。

作者简介:张 帅 (1988—),男,湖北宜城人,硕士研究生,主要从事环境生态修复研究。E-mail:474535267@qq.com。

通信作者:崔心红,博士,教授级高级工程师,博士生导师,主要从事水生植被与湿地生态研究。E-mail:kysxin hongcui@163.com。

表 1 底泥及稻壳基生物炭特征

基质	pH 值	电导率 (mS/cm)	有机质含量 (g/kg)	碱解氮含量 (mg/kg)	全氮含量 (g/kg)	有效磷含量 (mg/kg)	全磷含量 (g/kg)
低营养底泥	8.00	0.40	14.05	115.50	0.776	43.43	0.633
中营养底泥	7.95	0.46	30.97	218.75	1.57	110.57	0.862
高营养底泥	7.79	1.10	40.32	302.75	2.00	232.90	1.062
稻壳生物炭	10.32	0.94	146.37	5.25	5.92	215.00	2.218

稳定 1 d,加自来水至底泥以上 5 cm 处,试验期间维持该水位,每个试验处理设置 3 个重复。

试验在塑料大棚内进行,于 2015 年 10 月下旬开始至 2016 年 3 月上旬结束,共计 140 d,试验后 15、30、45 d 测定千屈菜株高,120 d 测定萌芽数及地下部分生物干质量;20、40、60、90、120 d 用 100 mL 玻璃注射器采集栽植桶内水样,测定其化学需氧量(chemical oxygen demand,简称 COD)及 TN、TP 含量等指标;试验后 0、60、120 d 用口径为 40 mm 的 PVC 管采集底泥样品,经风干处理后测定其理化指标。

1.2.2 分析测试方法 水样及底泥样品的测定均按照国家或行业标准^[14-15]进行;测定稻壳基生物炭 pH 值时,水炭质量比为 5:1;测定电导率(EC)时,水炭质量比为 10:1,其他指标测定方法参考底泥样品的测定方法。

1.3 数据处理

试验数据处理、分析及作图主要用 SPSS 19.0 进行独立样本 *t* 检验(samples *t* test)分析和各单因素方差分析(One - Way ANOVA),多重比较采用最小显著差异法(LSD),用 Excle 2010 作图,以“平均值±标准差”表示测量结果。

2 结果与分析

2.1 不同营养底泥上覆水营养盐变化

稻壳基生物炭对不同营养底泥上覆水营养盐含量的影响不同,在整个培养期间上覆水 COD 及 TN、TP 含量变化情况见图 1。上覆水 COD 的变化随稻壳生物炭施入量的增加变化规律不明显;TP 含量整体上随稻壳生物炭施入量的增加而增加,这与稻壳基生物炭自身磷的释放有关。试验培养期间,上覆水 COD 波动较大,无明显规律,LT 系列(LT₀~LT₄)上覆水 COD 的平均值分别为 18.87、22.94、23.89、25.46、17.63 mg/L;MT 系列(MT₀~MT₄)上覆水 COD 含量的平均值分别为 36.79、53.55、36.32、33.01、37.45 mg/L;HT 系列(HT₀~HT₄)上覆水 COD 含量的平均值分别为 68.06、62.39、57.49、58.39、66.32 mg/L,与空白组比,在一定范围内,随着底泥营养水平的提高,施入稻壳生物炭对底泥有机质污染物释放的抑制效果越来越明显,而低营养底泥施入生物炭以后 COD 增加,可能是由于稻壳生物炭自身营养物质的释放。随培养时间的延长,TN 含量(除 LT 处理外)总体呈下降趋势,而 LT 系列生物炭处理组在 120 d 时突然升高,可能是由于温度升高致使底泥微生物活性增强,促进底泥氮素的释放。LT 系列(LT₀~LT₄)上覆水 TN 含量的平均值分别为 0.49、0.80、0.64、0.53、0.61 mg/L;MT 系列(MT₀~MT₄)上覆水 TN 含量的平均值分别为 0.97、0.95、1.22、0.88、1.18 mg/L;HT 系列(HT₀~HT₄)上覆水 TN 含量的平均值分别为 2.91、2.64、2.33、2.15、2.74 mg/L,可见 TN 含量、COD 有着相似的变化特征,一定范围内,随着底泥营养水平的提高,施入稻壳生物

炭对底泥氮素释放的抑制效果越来越明显,其中施入比例为 10% 的 T₃ 组 TN 含量最低,可能是稻壳生物炭与底泥混合的最佳比例。随培养时间的延长 TP 的含量总体上呈降低趋势,试验后 20~120 d,LT 系列(LT₀~LT₄)TP 含量的减少率分别为 100%、92.87%、99.27%、69.72%、45.08%;MT 系列(MT₀~MT₄)TP 含量的减少率分别为 85.03%、84.94%、95.61%、97.65%、83.09%;HT 系列(HT₀~HT₄)TP 含量的降低率分别为 77.47%、91.25%、92.61%、90.05%、69.73%;与空白组相比,稻壳生物炭的施入能促进底泥对上覆水 TP 的吸附,当 LT 和 HT 组施入比例为 5%、MT 组施入比例为 10% 时吸附效果最好。

2.2 不同营养底泥理化性质变化

2.2.1 不同营养底泥 pH 值和 EC 的变化 由图 2 可知,LT 系列的 pH 值整体上呈先升高后降低趋势,MT、HT 系列整体上呈下降趋势;LT、MT、HT 系列 EC 的变化,总体表现为培养后 0~60 d 迅速降低,之后逐渐趋于稳定,表明稻壳生物炭对不同营养底泥 pH 值的影响不同,但对 EC 的影响基本相同。不同营养底泥 pH 值和 EC 随稻壳生物炭施入量的增加呈无规律性变化,培养后 60、120 d,中营养组(MT 组)和高营养组(H 组)营养底泥中施入稻壳生物炭的试验组 pH 值整体上低于空白组,EC 值高于空白组,但低营养组(LT 组)EC 值和 pH 值未表现出规律性变化,说明经过一段时间的培养,稻壳生物炭施入营养较高的底泥后,能降低底泥的 pH 值、提高底泥的 EC 值,对低营养底泥 EC 值和 pH 值调节作用的规律不明显。

2.2.2 不同底泥有机质含量的变化 由表 2 可知,培养期间 LT 系列的 T₀~T₂ 处理不同营养底泥有机质含量总体随时间的延长呈上升趋势,MT 系列的 T₀~T₂ 处理整体上呈先快速下降后趋于平稳的趋势,但 LT、MT 系列在稻壳生物炭施入量达 10% 后,有机质含量呈先下降后上升的变化趋势,HT 系列的 T₀~T₃ 处理呈先升高后降低的变化趋势。在 T₁~T₄ 处理间随稻壳生物炭施入量的增加,底泥有机质的含量明显升高,且部分处理间具有显著性差异,表明生物炭可以提高底泥有机质含量。从表 3 可以看出,除对照外,底泥营养水平越高、稻壳生物炭施入量越高,则底泥有机质流失量总体上越大。

2.2.3 不同营养底泥速效养分变化 如图 3 所示,不同营养底泥有效磷含量在培养后 0~60 d,有效磷含量迅速减少,培养后 60~120 d 有效磷含量又逐步升高;随稻壳基生物炭施入量的增加,底泥有效磷含量升高,但经过一段时间的稳定后各试验组间没有明显差异,说明稻壳基生物炭中有效磷流失比较严重。底泥碱解氮含量随时间的延长不断减少,底泥营养水平越高,减少得越明显,碱解氮含量不随稻壳生物炭的施入比例呈规律性变化。从表 4、表 5 可以看出,LT(除 LT₂、LT₃ 外)、MT、HT 系列底泥碱解氮释放速率与空白组相比存在显著性差异,MT 与 HT 组的稻壳基生物炭施入量为 20%、LT 组

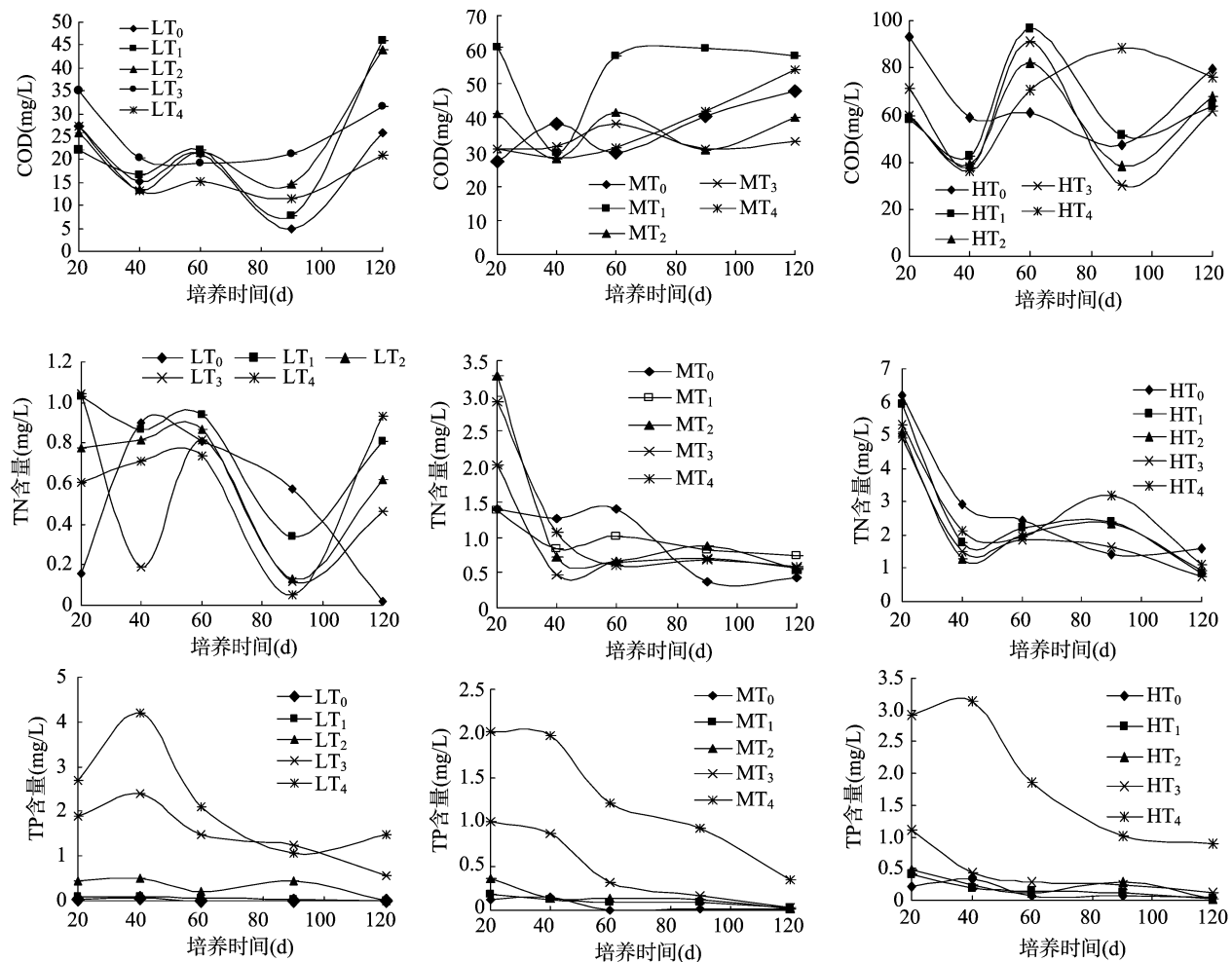


图1 不同底泥上覆水营养盐变化

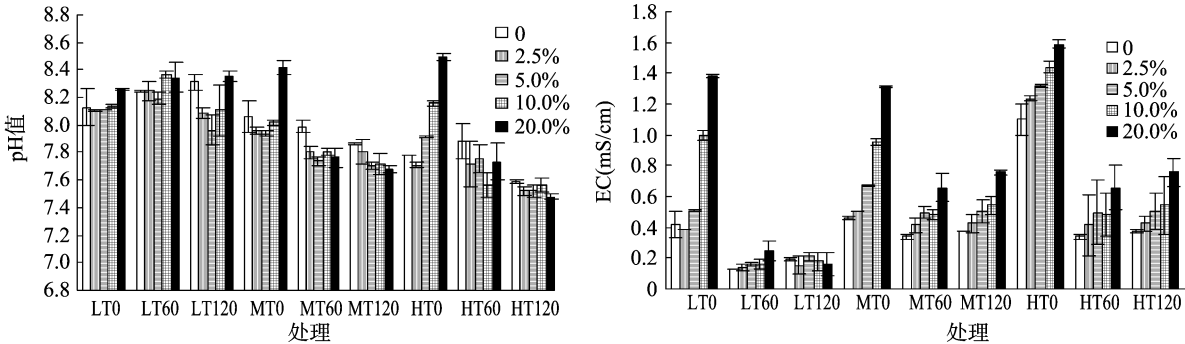


图2 生物炭对不同底泥 pH 值和 EC 的影响

表 2 生物炭对不同底泥有机质含量的影响

生物炭浓度 (%)	低营养组有机质含量(g/kg)			中营养组有机质含量(g/kg)			高营养组有机质含量(g/kg)		
	0 d	60 d	120 d	0 d	60 d	120 d	0 d	60 d	120 d
0	14.05	15.44 ± 0.32	17.42 ± 2.03	30.97	29.08 ± 0.15	28.69 ± 0.59	40.33	60.70 ± 1.14	46.65 ± 1.16
2.5	17.11	18.62 ± 0.74c	23.03 ± 1.16c	34.13	34.30 ± 1.94c	34.33 ± 1.75bc	56.47	62.77 ± 3.45b	46.08 ± 1.52cb
5.0	21.56	21.12 ± 0.86c	24.77 ± 0.74c	42.66	38.92 ± 2.33b	39.08 ± 3.08b	57.03	61.74 ± 3.07b	50.44 ± 2.49b
10.0	33.80	26.39 ± 0.07b	29.24 ± 0.65b	48.04	41.27 ± 1.31b	44.02 ± 2.48b	69.83	88.69 ± 18.69a	57.94 ± 8.39b
20.0	45.21	34.06 ± 2.61a	36.09 ± 1.59a	83.49	50.54 ± 0.51a	60.00 ± 5.59a	113.50	103.89 ± 1.70a	75.48 ± 4.63a

注:除 T₀ 处理外,同列数据后的不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。表 3、表 6、表 7 同。

为 2.5% 时释放速率最慢,但施入量的不同比例之间没有显著性差异,表明添加稻壳生物炭以后能有效降低底泥碱解氮释放速率;培养后 60 ~ 120 d 有效磷累积速率除 LT₁、LT₂ 和 HT₁ 外均与空白组存在显著性差异,稻壳生物炭施入比例越

表 3 底泥有机质累积速率

生物炭浓度 (%)	有机质累积速率[g/(kg·d)]		
	LT 系列	MT 系列	HT 系列
0	0.06	-0.04	0.11
2.5	0.10a	0.003a	-0.17 * a
5.0	0.05b	-0.06ab	-0.11a
10.0	-0.08 * c	-0.07b	-0.20 * a
20.0	-0.15 * d	-0.39 * c	-0.63 * b
P 值	0	0	0

注：“*”表示生物炭试验组与空白组间有显著性差异；P 值 < 0.05 表示生物炭处理组间存在显著差异。表 4、表 5、表 7、表 8 同。

高累积速率越明显，部分处理间存在显著性差异，表明施入稻壳生物炭能提高有效磷的累积速率，且施入量越多，效果越明显。

2.2.4 底泥全氮和全磷含量变化特征分析 从图 4 可以看出，培养期间不同营养水平底泥的全氮含量随着时间的延长总体呈现先升高后降低的变化趋势；全磷含量随时间变化总体呈现先快速降低然后逐渐稳定的趋势；底泥全氮、全磷含量随

稻壳生物炭施入量的增加总体呈上升趋势，但没有明显差异。与培养开始时相比，培养结束时底泥全氮含量增加（除 LT₀ 处理外）、全磷含量降低。从表 6、表 7 可以看出，在 LT 系列中 LT₃ 处理全氮的平均累积速率最快，为 4.77 mg/(kg·d)；在 MT 系列中 MT₂ 处理全氮的平均累积速率最快，为 5.86 mg/(kg·d)；在 HT 系列中 HT₁ 处理全氮的平均累积速率最快，为 4.22 mg/(kg·d)。不同营养水平底泥中随稻壳生物炭的施入，底泥全磷的释放速率总体上呈加快趋势，LT 系列中 LT₂、LT₃、LT₄ 处理与空白组（LT₀）相比存在显著性差异；MT 系列中 MT₄ 处理与空白组（MT₀）相比存在显著性差异；HT 系列中各底泥生物炭处理组与空白组均不存在显著性差异。单因素方差（One - Way ANONA）分析显示，LT 系列生物炭处理组中 LT₁ 处理与其他试验组间存在显著性差异，MT 系列与 HT 系列各生物炭处理组间不存在显著性差异，表明稻壳生物炭对高营养底泥中磷的流失可能有一定的抑制效果，但有待进一步研究。

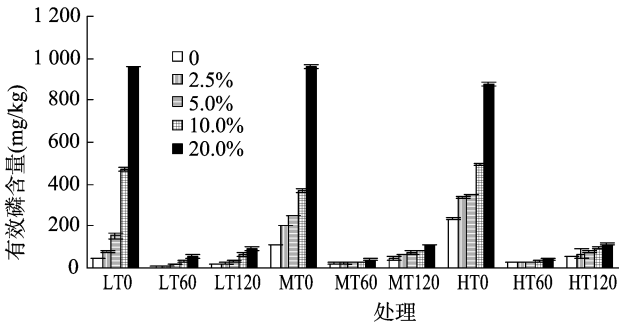


图3 生物炭对不同底泥速效养分含量的影响

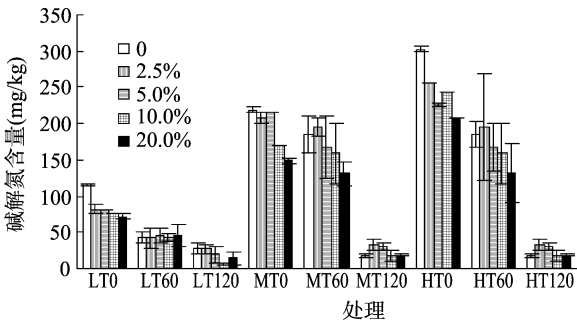


表 4 底泥碱解氮释放速率

生物炭浓度 (%)	碱解氮释放速率[mg/(kg·d)]		
	LT 系列	MT 系列	HT 系列
0	0.73	1.68	2.06
2.5	0.46 *	1.45 *	1.85 *
5.0	0.53	1.54 *	1.58 *
10.0	0.58	1.25 *	1.81 *
20.0	0.48 *	1.08 *	1.40 *
P 值	0.232	0.24	0.647

表 5 底泥有效磷累积速率

生物炭浓度 (%)	有效磷释放速率[mg/(kg·d)]		
	LT 系列	MT 系列	HT 系列
0	0.2	0.42	0.52
2.5	0.22b	0.67 * c	0.69b
5.0	0.31b	0.80 * b	0.79 * b
10.0	0.56 * a	0.85 * b	1.01 * ab
20.0	0.62 * a	1.18 * a	1.17 * a
P 值	0	0.014	0.033

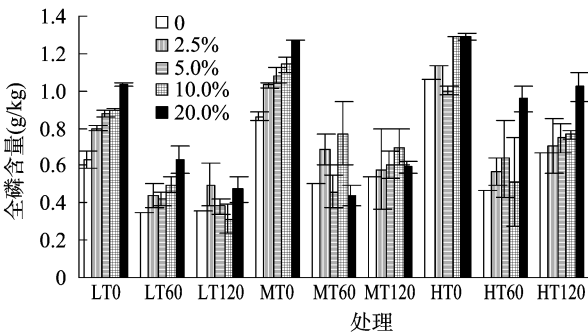
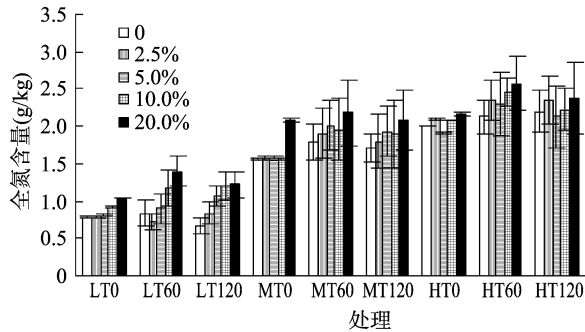


图4 生物炭对底泥全氮和全磷含量的影响

2.3 不同营养水平底泥千屈菜生长特征变化

由表 8 可以看出，LT 系列各底泥处理千屈菜的各项生长指标与空白组 LT₀ 相比，除 LT₃ 的株高增长量、LT₂ 的萌芽数与空白组 LT₀ 存在显著性差异外，其他均不存在显著性差异；

各生物炭处理组间的萌芽数除 LT₂ 与其他处理组间有显著性差异外，其他各组间均没有显著差异。地下部分生物干质量随稻壳生物炭施入量的增加整体上呈上升趋势。MT 系列千屈菜各项生长指标与空白组 MT₀ 相比，均没有显著性差异，且

表 6 底泥全氮累积速率

生物炭浓度 (%)	全氮累积速率[mg/(kg · d)]		
	LT 系列	MT 系列	HT 系列
0	-1.73	2.40	3.22
2.5	0.96	3.77	4.22
5.0	4.22	5.86	3.55
10.0	4.77	5.69	2.24
20.0	3.00	0.11	3.32

表 7 底泥全磷释放速率

生物炭浓度 (%)	全磷累积速率[mg/(kg · d)]		
	LT 系列	MT 系列	HT 系列
0	4.57	5.41	6.63
2.5	5.04b	7.50a	4.21a
5.0	8.30 * a	8.00a	8.74a
10.0	9.75 * a	7.34a	4.50a
20.0	9.34 * a	11.40 * a	2.90a
P 值	0.01	0.13	0.11

表 8 千屈菜生长特征变化

基质	ΔH_1 (cm)	ΔH_2 (cm)	ΔH_3 (cm)	萌芽数 (个)	地下部分生物干质量 (g)
LT ₀	6.47	1.03	7.50	3	1.17
LT ₁	8.42 ± 5.49	0.3 ± 2.52	8.72 ± 8.00	4 ± 2.36b	1.48 ± 0.76
LT ₂	3.62 ± 4.88	2.02 ± 1.16	5.64 ± 5.31	7 ± 1.50a *	1.10 ± 0.23
LT ₃	2.25 ± 0.32 *	0.45 ± 0.45	2.70 ± 0.13 *	4 ± 0.69b	1.59 ± 0.28
LT ₄	3.89 ± 3.94	-0.9 ± 1.89	2.99 ± 2.14	4 ± 1.33b	1.73 ± 0.27
P 值	0.446	0.269	0.818	0.035	0.383
MT ₀	8.87	1.23	10.1	7	1.93
MT ₁	7.20 ± 5.11	2.13 ± 8.88	9.33 ± 6.2	5 ± 2.08	1.70 ± 0.55
MT ₂	7.73 ± 2.11	2.60 ± 4.99	10.33 ± 2.89	7 ± 3.06	1.26 ± 0.47
MT ₃	6.11 ± 2.27	-0.70 ± 3.29	5.41 ± 4.35	6 ± 2.41	1.40 ± 0.44
MT ₄	8.38 ± 2.9	1.00 ± 0.59	9.38 ± 3.25	7 ± 2.27	2.11 ± 0.67
P 值	0.716	0.808	0.398	0.938	0.237
HT ₀	10.47	-2.10	8.37	9	2.50
HT ₁	6.21 ± 0.86 *	0.82 ± 0.33 *	7.03 ± 0.68	3 ± 1.45 *	1.01 ± 0.25 *
HT ₂	6.67 ± 3.67	0.23 ± 0.32 *	6.90 ± 3.97	2 ± 1.45 *	1.19 ± 0.30 *
HT ₃	6.80 ± 3.67	0.46 ± 1.74	7.26 ± 5.32	3 ± 1.86 *	1.29 ± 0.53
HT ₄	10.10 ± 2.63	0.98 ± 0.08 *	11.08 ± 2.71	2 ± 1.20 *	1.28 ± 0.34 *
P 值	0.649	0.576	0.622	0.914	0.917

注: $\Delta H_1 = H_2 - H_1$ (千屈菜第 2 次与第 1 次测量的高度差), $\Delta H_2 = H_3 - H_2$ (千屈菜第 3 次与第 2 次测量的高度差), $\Delta H_3 = \Delta H_1 + \Delta H_2$ (试验结束千屈菜株高的增长量)。

各生物炭处理间也不存在显著性差异。HT 系列千屈菜各项生长指标与空白组 HT₀ 相比显示,株高增长量随稻壳生物炭施入的增加整体上呈上升趋势;萌芽数与对照组相比存在显著性差异,但各生物炭处理组间差异不明显,表明生物炭的施入可能抑制了千屈菜萌发;地下部分生物干质量与空白组相比不存在显著性差异,但低于空白组,各生物炭处理组间不存在显著性差异,表明 HT 系列施入稻壳生物炭以后对千屈菜的生长有抑制作用。

比较 3 种不同底泥千屈菜的各项指标,MT 系列千屈菜生长状况最好。LT 系列施入稻壳生物炭以后促进了千屈菜生

长,HT 系列施入稻壳生物炭以后抑制了千屈菜的生长。

3 讨论与结论

3.1 生物炭对不同底泥上覆水营养盐含量的影响

生物炭的多孔结构及大的比表面积,使其具有强的吸附能力和大的吸附量的同时,可以明显改变底泥质地;一方面在一定程度上促使底泥营养元素释放,另一方面对上覆水中的营养盐具有吸附作用,因此,试验初期上覆水 TN 含量总体呈下降趋势、TP 含量总体呈先升高后降低的趋势。关于生物炭对上覆水的影响,研究较多的是生物炭覆盖对底泥污染物释放的抑制效果^[11,16],结果表明,生物炭对污染底泥总有机物及氮磷的抑制效果是明显的,但因生物炭制备材料的不同而有所差异,这与本试验的部分研究结果相似。究其机理,生物炭对上覆水 COD、TN 的吸附,可能主要依赖于较强的吸附能力和大的吸附容量^[11,17],其次生物炭大的比表面积丰富了底泥中微生物的多样性^[18],促进了硝化、反硝化反应,使上覆水中氨态氮转化为氮气,因此 TN 含量降低^[15];对上覆水 TP 的吸附机理是生物炭表面的官能团与磷酸盐的结合强化了吸附作用,同时生物炭本身的静电作用也会对带负电的磷酸根产生吸附作用,使其对磷酸盐具有较好的吸附效果^[11,19]。

3.2 生物炭对不同底泥理化性质的影响

研究指出,生物炭可提高土壤的 pH 值,因此可作酸性土壤的改良剂^[20-21]。本试验所用底泥均为碱性,培养后 60 ~ 120 d,中高营养组施入生物炭以后底泥 pH 值不仅没有提高,反而有降低趋势,可能是稻壳生物炭富含有机质,培养期间有机质在微生物分解作用下生成各种有机酸,中和了生物炭及底泥的碱度。底泥 pH 值越低,在培养后 60 d 后底泥 EC 随生物炭的施入量增加,上升得越明显,其原因可能是生物炭本身所含有的 Ca²⁺、Mg²⁺ 等盐基离子^[22-23]与碱性底泥中的 OH⁻ 结合生成沉淀,从而降低了底泥中可溶性盐的含量。

研究表明,使用生物炭可以促进土壤有机质水平的提高^[4-5],这与本试验部分研究结果相同,由于本试验在完全淹水条件下进行,底泥有机质含量随营养水平和生物炭施入量的升高,流失速率加快,一方面由于有机质含量因过剩而释放,另一方面是有机质的分解,但其分解机理目前还存在不同看法^[24],可能是高营养底泥的速效养分促进了微生物的活动、增加了微生物的活性,从而提高了对有机质的分解速率。

生物炭具有大的比表面积,施入底泥后可以吸附多种离子,从而提高其对速效养分的固持能力^[25],培养后 0 ~ 60 d,有效磷含量迅速降低,其主要是稻壳生物炭中磷的流失;培养后 60 ~ 120 d,有效磷含量随稻壳生物炭施入量的增加而增加;而碱解氮含量随时间的延长一直减少,这一研究结果与惠锦卓等的结论^[26]一致,原因可能是生物炭对养分的固持具有一定的选择性,其表面不仅可以带正电荷而且可以带负电荷^[25],本研究中碱解氮的减少可能与这种吸附特性有关,虽然生物炭不能减少碱解氮的流失,但随生物炭施入量的增加可以明显降低碱解氮的流失速率,同时也能显著提高有效磷的吸附速率,可能与生物炭较强的吸附能力和大的吸附容量有关。

生物炭的施入总体上提高了底泥中的全氮含量,这一结果与前人室内栽培试验结果^[8]一致;由于稻壳生物炭磷含量

较高,稻壳生物炭本身磷的流失占主导,对不同营养水平底泥中全磷释放速率进行比较发现,整体上表现为营养水平越高磷的流失速率越慢,其可能原因是生物炭对底泥中磷的流失具有抑制效果,但仍须要进一步研究。

由于本试验在完全淹水的条件下进行,与作物盆栽试验相比^[8-9],生物炭对底泥和土壤理化性质的影响有所差异,淹水条件下,底泥养分流失比较严重,生物炭的施入量对底泥理化性质的影响规律不明显;而未淹水条件下,生物炭施入量对土壤理化性质的影响呈现一定的规律性。

3.3 生物炭对植物生长特征的影响

据报道,生物炭对植物生长的影响不仅取决于土壤的肥力及性质,而且还取决于植物的种类和生物炭的特性^[23]。不同营养水平的底泥添加不同量的生物炭后,对千屈菜的生长并没有明显的影响,可能与生物炭的特性和植物的种类有关。Haefele 等研究了稻壳基生物炭施入 3 种本底肥力悬殊的土壤后对作物产量的影响,研究发现,在肥沃的土壤中施入稻壳生物炭以后,不仅没有实现增产的目的,甚至还出现了减产的现象^[27],可能是因为大量施入生物炭后促进土壤肥力大幅提升,从而抑制了植物的生长^[28],对肥力较低的土壤,稻壳生物炭的添加促进了作物的增产,但效果并不显著,这与本试验的研究结果一致。同样有研究表明,底泥中适宜的营养水平对水生植物的生长才是有利的^[29],从本试验结果来看,MT 系列因营养适中最利于千屈菜生长,可能与该机理有关。生物炭对植物生长影响的研究并没有统一结论^[8],可能与植物种类、生物炭类型、底泥特征等众多因素有关,具有较大的不确定性。因此,在利用生物炭进行底泥改良时,须要首先分析其主要障碍因子,选择合适的生物炭种类,从而达到促进植物生长的目的。

参考文献:

- [1] Antal M J, Grønli M. The art, science, and technology of charcoal production[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2003, 42(8): 1619–1640.
- [2] Xu G, Lv Y C, Sun J N, et al. Recent advances in biochar applications in agricultural soils: benefits and environmental implications[J]. Clean – Soil Air Water, 2012, 40(10, SI): 1093–1098.
- [3] 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.
- [4] Kimetu J M, Lehmann J. Stability and stabilisation of biochar and green manure in soil with different organic carbon contents[J]. Australian Journal of Soil Research, 2010, 48(6/7): 577–585.
- [5] Steiner C, Glaser B, Teixeira W G, et al. Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2008, 171(6): 893–899.
- [6] 李 力, 刘 娅, 陆宇超, 等. 生物炭的环境效应及其应用的研究进展[J]. 环境化学, 2011, 30(8): 1411–1421.
- [7] Cornelissen G, Gustafsson O, Bucheli T D, et al. Extensive sorption of organic compounds to black carbon, coal, and kerogen in sediments and soils: mechanisms and consequences for distribution, bioaccumulation, and biodegradation[J]. Environmental Science &

- Technology, 2005, 39(18): 6881–6895.
- [8] 陈心想, 何绪生, 耿增超, 等. 生物炭对不同土壤化学性质、小麦和糜子产量的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(20): 6534–6542.
- [9] 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.
- [10] 李 扬, 李锋民, 张修稳, 等. 生物炭覆盖对底泥污染物释放的影响[J]. 环境科学, 2013, 34(8): 3071–3078.
- [11] 曹 群, 李炳堂, 朱双燕, 等. 生物炭原位修复富营养化水体的试验研究[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(7): 92–96.
- [12] 于敬磊, 鞠美庭, 邵超峰. 城市湿地管理与恢复[J]. 湿地科学与管理, 2007, 3(1): 36–39.
- [13] 岑慧贤, 王树功. 生态恢复与重建[J]. 环境科学进展, 1999, 7(6): 110–115.
- [14] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [15] 国家林业局. 森林土壤分析方法: LY/T 1210~1275—1999[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [16] 杨海燕, 师路远, 卢少勇, 等. 不同覆盖材料对沉积物 P、N 释放的抑制效果[J]. 环境工程学报, 2015, 9(5): 2084–2090.
- [17] 陈宝梁, 周丹丹, 朱利中, 等. 生物炭质吸附剂对水中有机污染物的吸附作用及机理[J]. 中国科学(B 辑: 化学), 2008, 38(6): 530–537.
- [18] 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.
- [19] Bektas N, Akbulut H, Inan H, et al. Removal of phosphate from aqueous solutions by electro – coagulation[J]. Journal of Hazardous Materials, 2004, 106(2/3): 101–105.
- [20] 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.
- [21] Chan K Y, van Zwieten L, Meszaros I, et al. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment[J]. Australian Journal of Soil Research, 2007, 45(8): 629–634.
- [22] 袁金华, 徐仁扣. 稻壳制备的生物炭对红壤和黄棕壤酸度的改良效果[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(5): 472–476.
- [23] 卜晓莉, 薛建辉. 生物炭对土壤生境及植物生长影响的研究进展[J]. 生态环境学报, 2014(3): 535–540.
- [24] 章明奎, Waleign D B, 唐红娟. 生物质炭对土壤有机质活性的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(2): 127–131, 137.
- [25] Kolb S E, Fermanich K J, Dornbush M E. Effect of charcoal quantity on microbial biomass and activity in temperate soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2009, 73(4): 1173–1181.
- [26] 惠锦卓, 张爱平, 刘汝亮, 等. 添加生物炭对灌淤土壤养分含量和氮素淋失的影响[J]. 中国农业气象, 2014, 35(2): 156–161.
- [27] Haefele S M, Konboon Y, Wongboon W, et al. Effects and fate of biochar from rice residues in rice – based systems[J]. Field Crops Research, 2011, 121(3): 430–440.
- [28] Kamman C I, Linsel S, Goessling J W, et al. Influence of biochar on drought tolerance of *Chenopodium quinoa* Willd and on soil – plant relations[J]. Plant and Soil, 2011, 345(1/2): 195–210.
- [29] 胡小贞, 许秋瑾, 金相灿, 等. 湖泊底质与水生植物相互作用综述[J]. 生物学杂志, 2011, 28(2): 73–76.