



陈清健,伏肖,何聪或,李芷薇,易自力,薛帅. 南荻生物炭及根茎生物质在土壤中的降解特征分析[J]. 中国农业大学学报,2025,30(11):115-125.
CHEN Qingjian, FU Xiao, HE Congyu, LI Zhiwei, YI Zili, XUE Shuai. Exploring the degradation characteristics of *Miscanthus lutarioriparius* derived biochar and its underground biomass in soil[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025,30(11):115-125.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.11.09

南荻生物炭及根茎生物质在土壤中的降解特征分析

陈清健¹ 伏肖¹ 何聪或¹ 李芷薇¹ 易自力^{1,2,3} 薛帅^{1,2,3*}

(1. 湖南农业大学 生物科学技术学院/芒属植物生态应用技术湖南省工程实验室,长沙 410128;

2. 湖南农业大学 国家能源非粮生物质原料研发中心湖南分中心,长沙 410128;

3. 岳麓山实验室,长沙 410128)

摘要 为探究南荻生物炭及根茎生物质在土壤中的降解过程特征,从而科学利用南荻资源进行降碳减排。以南荻生物炭及根茎生物质为研究对象,添加到稻田土壤中,进行室内培养,测定不同时期不同培养条件下培养物的碳含量,并采用动力学方程拟合来研究其降解特征。结果表明培养时间对南荻生物炭和根茎生物质碳降解的影响均大于培养条件。其中:根茎生物质在温暖淹水条件下前期降解速度快,而在低温控水条件下则是后期降解快;生物炭在其高施用量下,碳保留率更高;此外,南荻生物炭在模拟稻田土壤条件下的降解半衰期随施用量的增加而延长,以18.0 t/hm²的南荻生物炭添加量处理下降解半衰期最长为44.42年;南荻根茎生物质在土壤温暖淹水与低温控水的模拟条件下降解半衰期分别为2.67和1.45年,综合计算其在自然条件下的降解半衰期为1.76年。综上,本研究可为洞庭湖区域“南荻-生物炭”这一生产利用模式的碳足迹核算积累研究基础,对优化区域碳汇管理具有重要参考价值。

关键词 南荻; 生物质; 生物炭; 碳稳定性; 半衰期

中图分类号 X127

文章编号 1007-4333(2025)11-0115-11

文献标志码 A

Exploring the degradation characteristics of *Miscanthus lutarioriparius* derived biochar and its underground biomass in soil

CHEN Qingjian¹, FU Xiao¹, HE Congyu¹, LI Zhiwei¹, YI Zili^{1,2,3}, XUE Shuai^{1,2,3*}

(1. College of Bioscience & Biotechnology/Hunan Engineering Laboratory of *Miscanthus* Ecological Applications,

Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China;

2. Hunan Branch, National Energy R&D Center for Non-Food Biomass, Hunan Agricultural University,

Changsha 410128, China;

3. Yulushan Laboratory, Changsha 410128, China)

Abstract This study investigated the degradation dynamics of *Miscanthus lutarioriparius* derived biochar and its rhizome biomass in soil. The aim was to enable the scientific utilization of *M. lutarioriparius* resources for carbon reduction and emission mitigation. *M. lutarioriparius* derived biochar and its rhizome biomass were added to the paddy soil for an indoor incubation experiment. The carbon content of *M. lutarioriparius* derived biochar and its rhizome biomass was measured at different time intervals under varying incubation conditions to characterize their degradation. Degradation characteristics were analyzed by fitting the data with kinetic

收稿日期: 2025-04-07

基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2024JJ7225)

第一作者: 陈清健(ORCID:0009-0009-4745-090X),硕士研究生,E-mail:1121534430@qq.com

通讯作者: 薛帅(ORCID:0000-0002-4397-1013),副教授,主要从事芒属植物生态应用技术开发研究,E-mail:xue_shuai@hunau.edu.cn

equations. Results demonstrated that incubation time exerted a greater influence on carbon degradation than incubation conditions for both biochar and rhizome biomass. Specifically, rhizome biomass exhibited rapid early-stage degradation under warm-flooded conditions but accelerated late-stage degradation under low-temperature controlled-water conditions. Biochar demonstrated higher carbon retention rates at elevated application levels. For *M. lutarioriparius* biochar under simulated paddy soil conditions, the degradation half-life increased with higher application rates. The longest half-life (44.42 years) occurred at the biochar application rate of 18.0 t/hm⁻². The degradation half-life of *M. lutarioriparius* rhizome biomass was determined to be 2.67 years under simulated warm-flooded soil conditions and 1.45 years under simulated low-temperature, water-controlled conditions. The comprehensive half-life of rhizome under natural field conditions was calculated as 1.76 years. In conclusion, this study establishes a foundation for carbon footprint accounting of the “*M. lutarioriparius* -Biochar” production and utilization model in the Dongting Lake region. It also provides critical references for optimizing regional carbon sink management strategies.

Keywords *Miscanthus lutarioriparius*; biomass; biochar; carbon stability; degradation half-life

我国作为碳排放大国,现阶段“双碳”工作面临基数大、经济增长与碳排放短时间内难以脱钩等多重压力^[1]。为保证我国“双碳”目标的顺利实现,在促进低碳、零碳生产的同时,开展负碳(即碳封存)技术的创新与应用是必不可缺的途径^[2]。土壤碳库作为陆地生态系统中最大的碳库(占整个陆地生态系统固碳总量的74%),充分发掘其碳封存能力,是负碳技术创制重点发展方向^[3-5]。其中,湿地土壤因其固碳量在所有土壤类型中最大(约占据土壤总固碳潜力的18%)而应给予重点关注^[6]。然而,随着人为干预活动的加剧,湿地土壤固碳功能正在丧失,部分甚至已从“碳汇”变为“碳源”^[7]。因此,如何维持并提升湿地生态系统的碳汇功能是现阶段湿地生态保护及负碳(即碳封存)技术创新应解决的重要问题^[8-9]。

土壤碳库中的碳主要来源于生物质的输入及土壤微生物残体,且输入的生物质只有少部分被转化为土壤有机碳而实现封存,其他大部分被再次分解而重新释放至大气中^[10]。对植物源生物质而言,土壤中的再分解过程一方面造成了植物固碳效率的浪费,另一方面减少了土壤碳封存量。研究表明将光合形成的有机物炭化为热稳定性和抗分解能力强的生物炭并封存入土壤,可实现植物捕捉CO₂的长久固定^[11-12]。因此,将湿地植物吸碳与生物炭固碳联合可实现湿地植物固碳潜力的增加^[13],是一种功能提升的湿地植物保护、恢复模式,具有深入研究的价值。

洞庭湖洲滩湿地作为我国主要的湿地系统之一,其上生长着约8.8万hm²“芦苇荡”^[14],与其他芦苇荡不同的是其种群中绝大部分为我国特有的芒

属植物——南荻(*Miscanthus lutarioriparius* L.)。南荻为多年生高大C₄草本植物,其光补偿点和光饱和点高于常规C₄植物,保证了其在光照不足或光照较强条件下依然可维持着较高的光合速率^[15]。上述特点决定了南荻具有超高的CO₂同化能力。据初步测算,洞庭湖区南荻种群每年可吸收约300万t CO₂^[16]。

然而,由于过去较长一段时间内,南荻地上生物量往往被收割并用于制备纸基产品,造成地上生物量捕捉的碳没有得到固定^[16]。若将南荻地上生物量加工成生物炭可以实现此部分吸收碳的固定。此外,生物炭还可被加工成为土壤调理剂、缓释肥、吸附剂等多种产品,提高经济效益^[17-18];生物炭施入土壤封存后可通过抑制土壤温室气体排放、消除化肥增效减量部分的碳排放等作用实现超越自身固碳能力的超固碳减排效应^[19]。由此可见,“南荻-生物炭”是一种理论上经济上可行的洞庭湖湿地固碳功能提升模式。同时,当地政府为了治理洞庭湖水质污染,近期其周围的造纸产业被全面清退,为“南荻-生物炭”模式在洞庭湖区域的推广与应用提供了机遇^[16]。为了准确评估“南荻-生物炭”模式的开发潜力,需要建立基于全生命周期LCA分析的碳足迹量化分析模型,对整个系统的总固碳减排潜力进行量化评估。

“南荻-生物炭”模式的总固碳潜力由其构成的各单项技术(如田间管理技术、炭制备技术等)的碳减排量决定,而各单项技术减排潜力受到诸如能量投入、化石燃料替代减排效应等多重因素的影响。其中较为重要的因素之一是南荻生物炭封存入土壤后的稳定性。然而,目前关于南荻生物炭在土壤

中的长期稳定性、降解动态等的系统研究尚少。另外,大部分关于植物固碳潜力估算的研究仅考虑了植物地上部的固碳潜能。南荻作为地下根茎系统发达的植物种类,若忽略地下生物物质的固碳潜力将会造成整个系统固碳潜能核算偏差。但是,地下衰老根茎腐解化过程会造成吸附碳的再排放,且腐解化过程还会产生甲烷等非 CO₂ 温室气体,所以不能简单采用去除相应生物物质光合作用吸收的 CO₂ 量的方法计算。因此,为了解南荻生物炭及根茎生物物质被施入土壤后可能发生的变化并量化相关变化过程,本研究拟通过室内模拟试验对南荻生物炭及根茎生物物质在土壤中的降解过程及特征进行分析,并通过动力学方程拟合结果推算其降解半衰期。以期为“南荻-生物炭”模式的 LCA 碳足迹分析进行技术准备,为准确评估“南荻-生物炭”模式的固碳减排潜力提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验样品及室内培养试验所用土壤的理化特征

2021 年生长季末从洞庭湖漉湖芦苇场的南荻集中生长区域(29.0152° N, 112.8572° E)采集南荻根茎。南荻生物炭是将此区域内采集的南荻地上生物物质在热电联产生物炭工厂生产线上于 600 °C 无氧条件下的经热裂解获得。将洗净、风干的南荻根茎(碳含量 38.53%)及制备完成的南荻生物炭(碳含量 84.13%)样品于 -20 °C 条件下保存至培养试验开始。培养土壤采集于湖南农业大学耘园基地的农田中,为常规稻田土,自然风干后过 8 目筛处理并保存至培养试验开始。土壤理化性质如下:容重 1.2 g/cm³;有机质 18.19 g/kg;总氮 1.29 g/kg;总磷 1.15 g/kg;总钾 25.51 g/kg;速效氮 105.1 mg/kg;速效磷 88.9 mg/kg;速效钾 66.9 mg/kg;pH 6.4。

1.2 南荻地下根茎降解盆栽试验设计

地下生物物质的腐解过程主要受土壤微生物的驱动,且不同季节间微生物的活跃程度也不同。根据洞庭湖区的气候与水文特征综合分析,本研究将模拟土壤环境划分为温暖淹水期(主要对应夏季丰水期)和低温控水期(主要对应其他季节)^[20]。为了确保得到的结果更接近实际情况,本研究将土壤温暖淹水期和低温控水期得到的碳排放量的加权值用于表征南荻地下根茎腐解过程的碳排放。基于

此,本研究采用单因素 2 水平的完全随机设计,试验处理包括 2 个培养条件(表征土壤的温暖淹水期与低温控水期)。将处理好的培养土壤(12 kg)装入 12 L 的不漏水塑料桶中,装填后土壤表面积约为 0.031 4 m²(下同)。试验开始前,将南荻地下根茎从冰箱中取出置于纯净水中浸泡 48 h。然后将等质量(96 g,含水量约 60.7%)、等长(约 5 cm)的南荻根茎横埋入塑料桶深 20—25 cm 处(大部分南荻根茎在土壤中的实际分布深度),每个培养处理重复 6 次。加入水分后分别置于温度为白天 30 °C 与夜晚 20 °C(T1 处理)和白天 15 °C 与夜晚 5 °C(T2 处理)人工气候室中开始培养,培养时间为 15 个月。培养期间,T1 处理保持土壤淹水 10 cm(野外条件下此时间段内洞庭湖涨水);T2 处理采用称质量法控制土壤含水量保持在 30%~75% 田间持水量。在培养前及培养时间为 3、6、9、12、15 个月时采集培养物料,洗净后保存在 -20 °C 条件下,后进行碳含量测定。

1.3 南荻生物炭降解盆栽试验设计

由于生物炭稳定性强,降解速度慢,从整个降解周期来看,土壤温度变化对其降解速率的影响可忽略^[21]。因此本研究选择用南荻生物炭在土壤高温期微生物比较活跃条件下的降解过程代替其整体降解特征。另外,尚杰等^[22]和石馨晔等^[23]研究发现不同施用量的生物炭对土壤环境具有显著的影响效应,进而可能影响生物炭的降解过程。因此,本研究设计了不同南荻生物炭施用量处理,并比较和分析不同施用量生物炭在土壤中的降解特征,探究南荻生物炭施用量与其降解过程碳排放的量化关系,为后续构建基于最优炭施用量的“南荻-生物炭”模式提供指导。采用单因素(南荻生物炭)4 个水平(4 种不同施用量)的完全随机设计。4 个施用量分别为 4.5、9.0、13.5 和 18.0 t/hm²,分别用 L1(14.14 g/桶)、L2(28.28 g/桶)、L3(42.42 g/桶)和 L4(56.56 g/桶)表示,每个处理设 4 次重复。按照上述处理设计用炭量将制备的南荻生物炭(长约 2 cm)与培养土壤(12 kg)均匀混合后装入不漏水的塑料桶中培养。培养条件白天 30 °C 和夜晚 20 °C、土壤含水量保持在 75%~100% 田间持水量,采用称质量法控制土壤含水量稳定。在培养时间为 3、6、9、12、15、18 个月时每个盆中用土钻采集培养土壤柱 3 个。将每份采集的土样混合,并进行手工分选,

将其中的炭与土壤分离,生物炭洗净后于-20℃条件下保存,后进行碳含量测定。

1.4 碳含量测定及其降解半衰期的核算分析

将-20℃贮存的根茎培养样品及南荻生物炭样品放在透气性好的铝盒中,在65℃的干燥箱(WGL-230B型电热鼓风干燥箱,天津莱斯特仪器有限公司)中进行48h干燥,后将干燥样品称量研磨,并过60目筛,待测。采用总有机碳分析仪(Therom Scientific vario TOC,美国)的固体TOC测试模式测定样品碳含量。

测试样品碳含量进行一级动力学方程拟合,以得到降解速率常数 K 。具体拟合方程如下:

$$C_t = C_0 \times e^{-Kt}$$

式中: C_t 为时间 t 时培养物料碳含量,g/kg; C_0 为培养前物料的碳含量,g/kg; K 为得到的降解速率常数; t 为培养时间,月。

然后基于获得的降解速率常数,依据 $T_{\text{half}} = 0.693/K$ 分别计算南荻根茎及生物炭的在不同处理下的降解半衰期(T_{half})^[24-25]。洞庭湖南荻生长区域经历了丰水期A1(6—8月)与平水或枯水期A2(9月—次年5月)2个阶段,与气温条件综合分析后核算为经历约3个月的温暖淹水期及9个月的低温控水期^[26]。因此综合气候条件后将自然条件下南荻根茎的降解半衰期计算公式如下:

$$T_{\text{南荻根茎}} = \frac{1}{4} \times T_{A1} + \frac{3}{4} \times T_{A2}$$

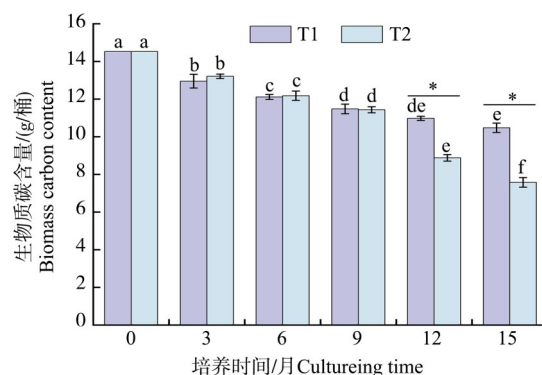
采用IBM SPSS Statistics 26(IBM,美国)对相关碳含量数据进行单因素方差分析及差异显著检验($P < 0.05$)。采用Origin 2024(OriginLab,美国)制作图表。

2 结果与分析

2.1 南荻地下根茎在土壤中的降解特征

图1为南荻根茎生物质在2种不同培养条件下培养物碳含量随时间的变化趋势。可见:培养时间(方差变异来源 $F=402.61, P < 0.01$)对南荻根茎碳降解的影响大于培养条件($F=99.07, P < 0.01$)的作用,且在两者的互作下($F=45.90, P < 0.01$),培养条件对南荻根茎碳降解的影响在不同培养时间呈现出不同趋势;在表征土壤温暖淹水期的T1和低温控水期的T2这2种处理条件下,南荻根茎生物质碳含量随着培养时间增加,呈现递减趋势。此外,在塑料桶(容积约12L,下同)中进行土壤培养

15个月后,T1、T2处理下培养物碳含量比培养前分别下降了27.88%和47.85%。其中,T1处理表现为在培养前期下降更为明显,T2处理在培养后期下降更明显。比如:T1处理下土壤培养3、6、9个月后,南荻根茎生物质的碳含量与培养前相比分别降低了10.83%($P < 0.05$)、16.61%($P < 0.05$)和20.99%($P < 0.05$);培养至第12个月时样品碳含量(10.98 g/桶)比培养至第9个月时的样品(11.48 g/桶)仅降低了3.44%($P > 0.05$);培养15个月后的样品碳含量比培养12个月后的样品(10.48 g/桶)降低了3.45%($P > 0.05$)。在T2培养条件下,培养9个月后样品碳含量比培养前显著($P < 0.05$)下降了21.29%(14.14 g/桶降低至11.43 g/桶);而培养15个月后样品(7.58 g/桶)比培养9个月后样品碳含量(11.43 g/桶)显著($P < 0.05$)下降了26.55%。通过对比T1处理与T2处理在同样培养时间后样品碳含量的差异发现:在培养前期(0~9个月),T2处理下样品碳含量略高于T1处理下的样品(平均值 $12.27 > 12.18$ g/桶),但二者之间差异并不显著($P > 0.05$);然而培养后



T1, 土壤温暖淹水条件;T2, 土壤低温控水条件;不同小写字母表示同一处理条件下的显著差异($P < 0.05$);*表示不同处理间显著差异($P < 0.05$)。下同。

T1, warm flooded soil cubation; T2, low-temperature water-restricted soil cubation; Different lowercase letters indicate significant differences under the same treatment conditions ($P < 0.05$). * denotes significant differences between T1 and T2 ($P < 0.05$). The same below.

图1 南荻根茎生物质碳含量随培养时间的变化

Fig. 1 Dynamics of carbon content in *Miscanthus lutarioriparius* rhizome biomass during incubation

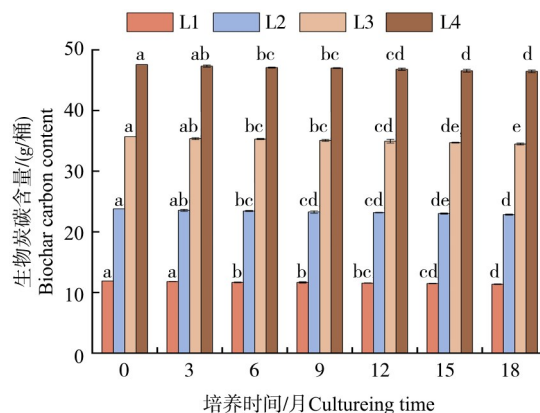
期随着T2处理下样品碳含量的快速下降,二者之间逐渐呈现显著差异趋势。比如,培养结束时(15个月后),T1处理下样品碳含量(10.48 g/桶)是

T2处理的(7.58 g/桶)1.38倍。因此,培养时间对南荻根茎生物质碳降解的影响大于培养条件,且2者的影响存在显著($P<0.01$)交互作用;在温暖淹水条件下碳降解在培养前期快,而低温控水条件后期碳降解更快。

2.2 南荻生物炭在土壤中的降解特征

南荻生物炭在稻田土壤中不同施用量处理下的培养物碳含量随培养时间的变化趋势见图2。通过对方差变异来源 F 值进行比较,发现培养时间($F=60.09, P<0.01$)对南荻生物炭的碳降解影响大于培养条件($F=13.67, P<0.01$)的作用,且不同培养条件与培养时间对南荻生物炭碳降解的影响交互效应($F=1.13, P>0.05$)不显著。由图2可见在不同生物炭施用量培养条件下培养物碳含量随时间变化呈现下降趋势,且随着施炭量的增加,碳损失率也逐渐降低。其中:土壤培养18个月后,表征施用量为4.5、9.0、13.5和18.0 t/hm²的L1、L2、L3和L4处理下培养物碳含量比培养前期分别下降了4.56% ($P<0.05$)、4.01% ($P<0.05$)、3.38% ($P<0.05$)、2.35% ($P<0.05$),说明高施用量条件下培养物碳保留率更高。此外,各处理条件下每3个月碳变化量较小,未呈现连续显著差异情况,大部分需要6个月及以上的培养时间才呈现显著差异;在L1处理下培养3个月后南荻生物炭的碳含量相比培养前仅降低了0.89% ($P>0.05$),而培养至6个月时碳含量才相比培养前显著($P<0.05$)降低了1.99% (11.89 g/桶降低至11.66 g/桶);L2处理下培养3个月后碳含量比培养前仅降低了1.05% ($P>0.05$),而培养至6个月时碳含量才相比培养前显著($P<0.05$)降低了1.50% (23.79 g/桶降低至23.43 g/桶)。最后,通过比较各处理在培养相同时间后的样品碳含量差异发现:至培养中期时(9月后)L2处理下南荻生物炭的碳含量相比培养前降低2.14%,相对于L1处理(2.02%)、L3处理(1.71%)和L4处理(1.22%)降量较多;但随着培养时间的延长低施用量的L1处理下样品碳含量下降趋势增加,逐渐与其他处理间形成显著差异,至培养结束时(18个月后),L1处理下培养物碳含量降低4.56% (11.89 g/桶降低至11.35 g/桶)而施用量最高的L4处理下样品碳降量仅降低2.35% (47.57 g/桶降低至46.45 g/桶),前者约为后者的1.94倍。因此,培养时间对南荻生物炭碳降解的影响明显大于施用

量,且2者的影响交互作用不明显($P>0.05$);生物炭碳损失率随施用量增加而降低。



L1、L2、L3和L4分别表示4.5、9.0、13.5、18.0 t/hm²的生物炭施用处理。下同。

L1, L2, L3, and L4 denote the biochar application rates of 4.5, 9.0, 13.5, and 18.0 t/hm². The same below.

图2 南荻生物炭碳含量随培养时间的变化

Fig. 2 Dynamics of carbon content in *M. lutarioriparius* derived biochar during incubation

2.3 南荻生物炭与地下根茎的模拟降解半衰期

洞庭湖南荻地下根茎进行自然条件降解模拟试验拟合降解动力学方程结果见图3。结果显示T1处理下南荻地下根茎碳降解动力学拟合方程为: $y=100 \times e^{-0.0216x}$ ($R^2=0.9511$),核算碳降解半衰期约为32.08个月($T_{A1}=2.67$ 年);T2处理下南荻地下根茎碳降解动力学方程拟合为: $y=100 \times e^{-0.0398x}$ ($R^2=0.9315$)核算碳降解半衰期约为17.41个月($T_{A2}=1.45$ 年)。结果表明南荻地下茎碳降解半衰期在不同的处理条件下呈现显著差异,T2条件下样品碳降解半衰期约是T1条件下的1.84倍。综合计算表明在考虑每年气候条件影响后,洞庭湖野生状态下的南荻地下茎降解半衰期约为1.76年。

南荻生物炭碳降解的一级动力学方程拟合结果见图4。可见:L1处理下南荻生物炭碳降解动力学拟合方程为: $y=100 \times e^{-0.0025x}$ ($R^2=0.9759$),核算半衰期约为277.20个月(23.10年);L2处理下南荻生物炭碳降解动力学拟合方程为: $y=100 \times e^{-0.0021x}$ ($R^2=0.9879$),核算半衰期约为330.00个月(27.50年),约为处理1的1.19倍;L3处理下南荻生物炭碳降解动力学拟合方程为: $y=100 \times e^{-0.0018x}$ ($R^2=0.9815$),核算半衰期约为385.00个月(32.08年),约为处理2的1.17倍;L4处理下南荻生

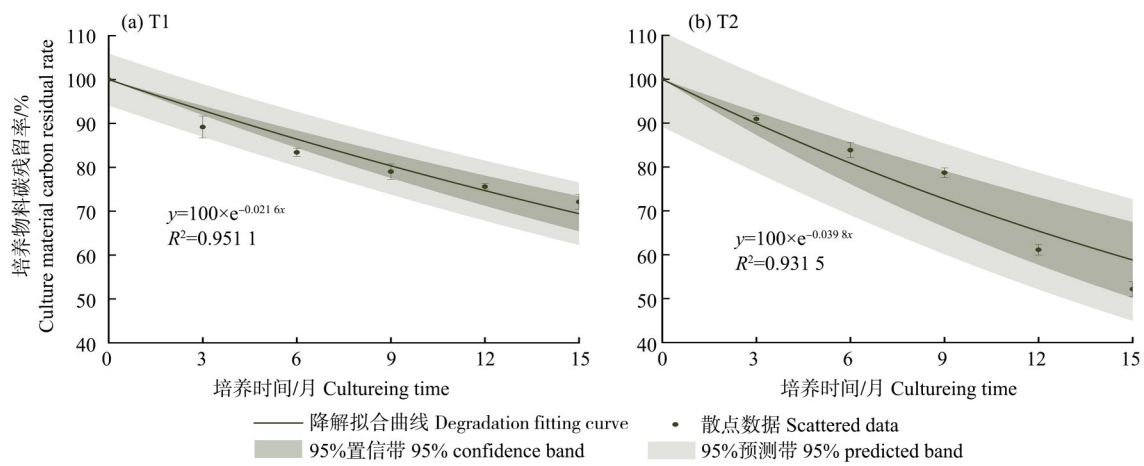


图3 南荻地下根茎在T1(a)和T2(b)处理下碳降解曲线模拟结果

Fig. 3 Simulation results of carbon degradation curves for *M. lutarioriparius* rhizome under T1 (a) and T2 (b) treatments

物炭碳降解动力学拟合方程为： $y=100 \times e^{-0.0013x}$ ($R^2=0.9843$), 核算半衰期约为533.08个月(44.42年), 约为处理3的1.39倍。结果表明随南荻生物炭施用量的增加, 其在模拟稻田土壤条件下的碳降解半衰期也相应延长。4个不同处理的生物炭

施用量的增加梯度虽然都为4.5 t/hm², 但是处理L3~L4(延长1.39倍)其降解半衰期的延长相对处理L1~L2(延长1.19倍)、L2~L3(延长1.17倍)更为显著。因此, 南荻生物炭的碳降解半衰期随施用量的增加而延长, 且在高施用量的条件下延长幅度更明显。

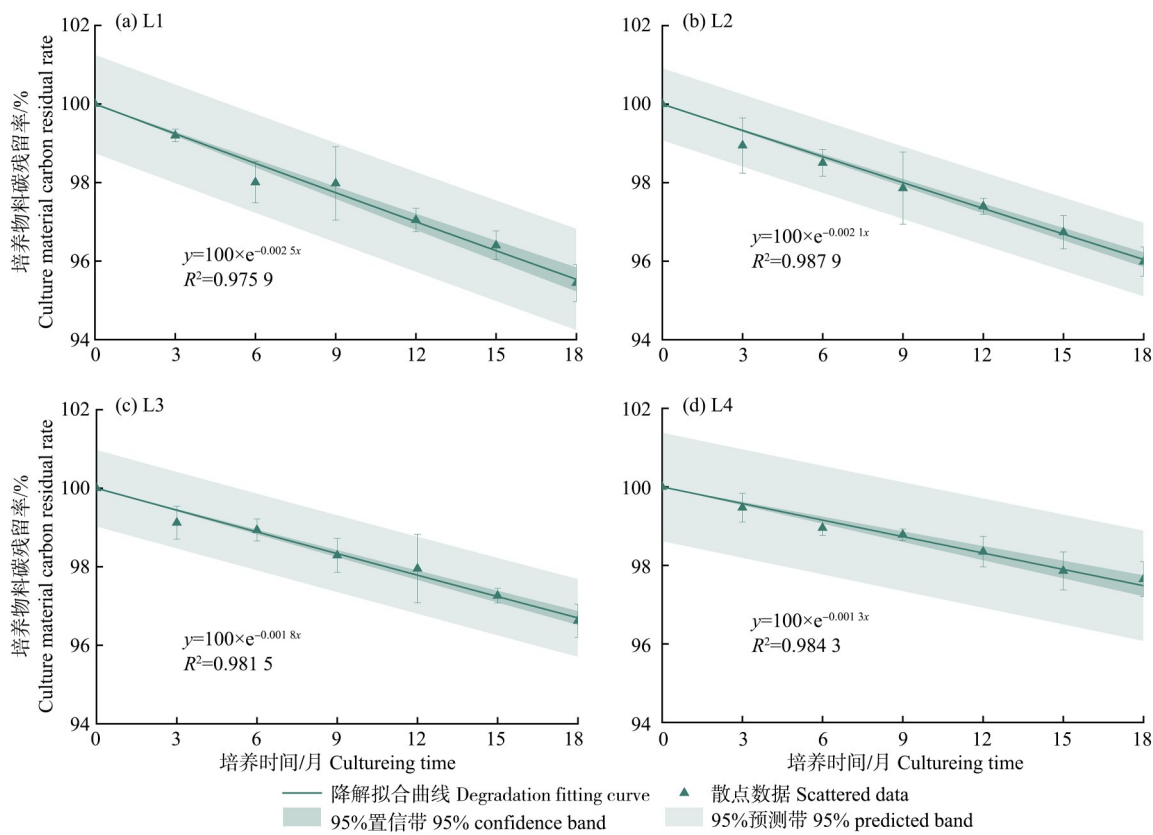


图4 南荻生物炭在L1(a)、L2(b)、L3(c)和L4(d)处理下碳降解曲线模拟结果

Fig. 4 Simulation results of carbon degradation curves for *M. lutarioriparius* derived biochar under L1 (a), L2 (b), L3 (c), and L4 (d) treatments

3 讨 论

3.1 模拟土壤温暖淹水期及低温控水期条件对南荻地下茎降解的影响

用于模拟试验的土壤为稻田土壤,稻田土壤环境中多见纤维素分解性细菌^[27-29]。本研究最初设置 T1(温暖淹水期)和 T2(低温控水期)2 个处理,旨在表征不同微生物活性对生物质腐解过程的影响。然而,研究结果显示在高土壤含水量的 T1 处理下后期的降解速率反而低于低含水量 T2 处理,表明在本试验条件下土壤含水量对微生物的影响比温度更为显著。究其原因可能是较高的温度会加速微生物的代谢活动^[30],从而促进有机物的分解。然而,温度的作用也受到其他环境因素的制约,特别是含水量^[31]。在 T1 处理下,虽然温度较高,但过高的含水量会限制微生物的生长和活动^[32],导致降解效率下降。水分是微生物代谢活动的基础,适宜的含水量能够维持微生物的生理活性^[33],以保证相关酶促反应的顺利进行^[31]。在 T2 处理下,较适宜的含水量为微生物提供了更适宜的环境,使其在相对较低温度下仍能保持较高的分解效率。相比之下, T1 处理虽然温度较高,但过高的含水量可能限制了微生物的活动,导致降解速率下降。同时含水量还间接影响土壤中的氧气供应水平,因此对好氧微生物的活动也会产生影响^[34]。在 T2 处理下,含水量适中,可以保证氧气供应,支持了好氧微生物的活性,进而促进了纤维素的分解。南荻生物质主要由纤维素、半纤维素、木质素组成,有关研究也表明好氧环境更有利于此类木质纤维素成分的分解^[35-36]。本研究的模拟结果也显示, T1 处理下南荻地下茎的降解半衰期显著低于 T2 处理。一方面在有氧条件下好氧微生物能够高效利用氧气进行呼吸作用,从而加速纤维素分解^[37-38];另一方面在低氧环境下,好氧微生物活动受到抑制,虽然厌氧微生物仍能进行木质纤维素分解,但其分解效率较低^[39]。因此,尽管 T1 处理的温度条件更适宜微生物处于活跃状态,但由于土壤含水量过高,最终其降解半衰期显著低于 T2 处理。通过本研究得出的南荻地下根茎碳降解 50%,需要约 1.76 年的时间,比王延鹏等、曹莹菲等和代文才等已有研究结果中玉米、油菜、小麦、大豆等常见秸秆在土壤中碳降解 50%,需要约 2~7 个月长很多^[40-42],说明南荻地下部分对碳的固

持作用优于其他类型秸秆生物质。

3.2 模拟稻田土壤条件下不同炭施用量对南荻生物炭降解速率的影响

生物炭在土壤中的降解受到多种因素综合影响,包括土壤微生物活动、土壤理化性质、气候条件、生物炭本身性质、施用方式等^[43-45]。本研究主要探究南荻生物炭的不同施用量对其在稻田土壤中的降解速率的影响。结果显示随南荻生物炭施用量的增加,其在稻田土壤中的降解半衰期随之延长。同时在 L1 处理(4.5 t/hm²)至 L3 处理(13.5 t/hm²)的梯度施用量变化下,南荻生物炭的降解半衰期基本呈均匀增长,在 L4 处理(18.0 t/hm²)的施用量下其降解半衰期相对 L3 处理条件增长趋势更明显。究其原因可能是随着生物炭施用量的增加,虽然土壤中的微生物更容易与其接触,增加了生物炭被降解的机会^[46-47]。但随着生物炭施用量的提高,也会对微生物形成屏障作用,通过限制微生物接触或限制微生物代谢等进而减缓其降解速率^[48-49]。这表明在模拟农田土壤进行南荻生物炭降解时,高施用量下其降解半衰期更长这一现象产生的原因可能是:更高施用量的生物炭对土壤中进行生物炭降解的微生物活性造成了抑制。因此在利用农田土壤进行南荻生物炭的碳封存时,在考虑经济效益的同时推荐使用更高的炭施用量。通过本研究得出南荻生物炭在 18.0 t/hm²的施用处理下碳降解 50% 需要约 44.42 年,明显高于邢存芳等^[50]关于秸秆炭降解研究指出的油菜、玉米、水稻等常见秸秆炭碳降解 50% 仅需 3.9~8.2 年,这凸显了利用南荻生物炭进行碳封存的优势。

3.3 “南荻-生物炭”模式的应用潜力评估

基于半衰期的理论估算,显示南荻生物炭需要约 60~90 年的时间才能够被完全降解。研究结果表明了通过将洞庭湖区生长的南荻生物质利用热裂解技术炭化后还田可实现生态、安全、高效、低成本的 CO₂ 捕捉和长效封存,是一种具有潜力的湿地管理及恢复负碳技术。根据 Lehmann^[51]提出的生物炭固碳原理概念模型,南荻通过光合作用吸收 CO₂ 总量的 50% 经呼吸消耗而重新返回大气中,另外 50% 以有机物形式存储在生物质中。将生物质热裂解为生物炭后,其中又有一半的碳(吸收总量的 25%)被转化为生物能(生物油、生物气)可实现替代减排,另外一半的碳被转化为生物炭而实现固

定。因此,综合来看,“南荻-生物炭”模式可实现其植株CO₂总吸收量一半的减排。

以南荻为代表的芒属植物有较强的环境胁迫耐受能力与CO₂同化能力,在盐碱地、重金属污染地、贫瘠红壤等边际土地上均表现出了较强的适应能力^[52-54]。据统计分析,我国有约770万hm²的边际地可用于种植芒属植物并推广此模式^[55]。边际地种植芒属植物后可以通过改善土壤质地、土壤微生物群落结构、污染物的形态等方式对边际地土壤产生改良效应^[56-57],增加后备耕地资源,可为国家“藏粮于地”战略的实施提供途径^[58]。从社会层面来看,利用边际地种植芒属植物,获得的生物质销售收益可以激活农村经济,推进乡村振兴。由此可见,芒属植物的边际土地修复与炭化利用耦合系统为“双碳”战略为主的多项国家战略的实施提供了一套耦合解决方案,其实施推广具有广阔前景及深远社会意义。

4 结 论

本研究探究了南荻生物炭及根茎生物质在稻田土壤中的降解特征,采用动力学方程对不同培养时期培养物的碳含量变化进行了拟合,模拟核算了南荻生物炭及根茎生物质在不同培养条件下的降解半衰期。主要结论如下:

1)培养时间对南荻生物炭及根茎生物质碳降解的影响均大于培养条件。二者的交互效应对南荻生物炭的碳降解影响不显著,对根茎生物质的碳降解影响显著;

2)南荻地下茎在温暖淹水期与低温控水期的土壤条件下降解半衰期分别为2.67和1.45年。综合计算后其在野外条件下的降解半衰期约为1.76年;

3)南荻生物炭在模拟稻田土壤条件下的降解半衰期随施用量的增加而延长,其中以18.0 t/hm²的施用处理下降解半衰期最长为44.42年。

综上,培养时间是影响南荻生物炭及根茎生物质碳降解的主要因素;南荻根茎在野外条件下的降解半衰期约为1.76年;在利用稻田土壤进行南荻生物炭的碳封存时使用高施用量处理最合适。

参考文献 References

[1] 庄贵阳. 我国实现“双碳”目标面临的挑战及对策[J]. 人民论坛, 2021, 18:

50-53

Zhuang G Y. Challenges and countermeasures for China in achieving its: Dual Carbon goals[J]. *People's Tribune*, 2021, 18: 50-53 (in Chinese)

[2] Mallapaty S. How China could be carbon neutral by mid-century[J]. *Nature*, 2020, 586:482-483

[3] Hepburn C, Adlen E, Beddington J, Carter E A, Fuss S, Mac D N, Minx J C, Smith P, Williams C K. The technological and economic prospects for CO₂ utilization and removal[J]. *Nature*, 2019, 575: 87-97

[4] 周璞, 侯华丽, 张惠, 柳晓娟, 谭文兵. 碳中和背景下提升土壤碳汇能力的前景与实施建议[J]. 环境保护, 2021, 49(16): 63-67

Zhou P, Hou H L, Zhang H, Liu X J, Tan W B. The Development prospects and implementation suggestions of increasing soil carbon storage in the context of carbon neutrality[J]. *Environmental Protection*, 2021, 49(16): 63-67 (in Chinese)

[5] 腾云, 孙铭遥, 孙雨薇, 徐卉, 黄润, 闫甜磊, 芦梓健. 东北三省黑土地碳排放时序特征及减排空间分析[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(3): 232-244
Teng Y, Sun M Y, Sun Y W, Xu H, Huang R, Yan T L, Lu Z J. Temporal characterization of carbon emissions and spatial analysis of emission reduction of black soil in northeast China [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(3): 232-244 (in Chinese)

[6] Lal R, Smith P, Jungkunst H F, Mitsch W J, Lehmann J, Nair P R, Mcbratney A B, De M S J C, Schneider J, Zinn Y L. The carbon sequestration potential of terrestrial ecosystems[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 73(6): 145A-152A

[7] 孟伟庆, 吴统蕾, 王中良. 湿地生态系统碳汇与碳源过程的控制因子和临界条件[J]. 生态环境学报, 2011, 20(8-9): 1359-1366

Meng W Q, Wu Z L, Wang Z L. Control factors and critical conditions between carbon sinking and sourcing of wetland ecosystem[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(8-9): 1359-1366 (in Chinese)

[8] Moomaw W R, Chmura G, Davies G T, Finlayson C, Middleton B A, Natali S M, Perry J, Roulet N, Sutton-Grier A E. Wetlands in a changing climate: Science, policy and management[J]. *Wetlands*, 2018, 38: 183-205

[9] 姜明, 邹元春, 章光新, 佟守正, 武海涛, 刘晓辉, 张仲胜, 薛振山, 吕宪国. 中国湿地科学研究进展与展望: 纪念中国科学院东北地理与农业生态研究所建所60周年[J]. 湿地科学, 2018, 16(3): 279-287

Jiang M, Zou Y C, Zhang G X, Tong S Z, Wu H T, Liu X H, Zhang Z S, Xue Z S, Lv X G Progress and prospects of wetland science in China: Commemoration on the 60th anniversary of the founding of Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences[J]. *Wetland Science*, 2018, 16(3): 279-287 (in Chinese)

[10] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change[J]. *Geoderma*, 2004, 123(1-2): 1-22

[11] 伏肖, 徐强, 黄晓玮, 李芷薇, 谭天驷, 易自力, 薛帅. 热裂解温度和原料类型对生物炭品质影响的评价: 基于修复重金属污染的应用潜力[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(9): 147-157

Fu X, Xu Q, Huang X W, Li Z W, Tan T S, Yi Z L, Xue S. Effects of different pyrolysis temperatures and feedstock types on biochar quality based on the application scenario for heavy metal contamination control[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(9): 147-157 (in Chinese)

[12] Stewart C, Hessami M A. A study of methods of carbon dioxide capture and sequestration-the sustainability of a photosynthetic bioreactor approach[J].

- Energy Conversion and Management*, 2005, 46(3): 403-420
- [13] Cui X, Hao H, He Z, Stoffella P J, Yang X. Pyrolysis of wetland biomass waste: Potential for carbon sequestration and water remediation[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 173: 95-104
- [14] 张琨, 易自力, 薛帅, 李有志, 邓正苗, 牛艳东, 杨塞, 肖亮, 刘志杰, 胡文, 覃静萍, 廖倩滢. 洞庭湖南荻生态价值评价与种质资源保护[M]. 北京: 中国农业出版社, 2025
- Zhang J, Yi Z L, Xue S, Li Y Z, Deng Z M, Niu Y D, Yang S, Xiao L, Liu Z J, Hu W, Qin J P, Liao Q Y. *Evaluation of Ecological Value and Conservation of Germplasm Resources of Miscanthus Lutarioriparius in Dongting Lake*[M]. Beijing: China Agricultural Publishing House, 2025 (in Chinese)
- [15] Jiao X, Kørup K, Andersen M N, Sacks E J, Zhu X G, Lærke P E, Jørgensen U. Can miscanthus C₄ photosynthesis compete with festulolium C₃ photosynthesis in a temperate climate? [J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2017, 9(1): 18-30
- [16] 薛帅, 易自力, 黄红梅, 杨塞. 洞庭湖“芦苇”产业发展面临的困境及对策分析[J]. *环境生态学*, 2022, 4(4): 33-38
- Xue S, Yi Z L, Huang H M, Yang S. Development of the Dongting Lake grown *Miscanthus Lutarioriparius* derived bio-industries: Problems and solutions[J]. *Environmental Ecology*, 2022, 4(4): 33-38 (in Chinese)
- [17] 廖雄辉, 龙琴, 王惠群, 易自力, 薛帅. 南荻炭与镉钝化剂互作对水稻镉含量和产量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(9): 1818-1826
- Liao X H, Long Q, Wang H Q, Yi Z L, Xue S. Interaction effects of *Miscanthus lutarioriparius*-derived biochar and cadmium passivators on rice cadmium content and yield[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(9): 1818-1826 (in Chinese)
- [18] 廖雄辉, 周晓淑, 蔡丹, 王惠群, 易自力, 薛帅. 南荻炭基土壤调理剂施用对水稻光合特性及产量的影响[J]. *中国农业科技导报*, 2019, 21(8): 132-139
- Liao X H, Zhou X Z, Cai D, Wang H Q, Yi Z L, Xue S. Effects of application of *Miscanthus lutarioriparius*-derived biochar based-soil conditioner on photosynthetic characteristics and yield of rice: *Oryza sativa* L.[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2019, 21(8): 132-139 (in Chinese)
- [19] 沈芳芳, 罗昌泰, 廖迎春, 房焕英, 周际海, 沈发兴, 袁颖红. 生物炭减缓农业生态系统土壤 N₂O 排放的研究进展[J]. *中国农业大学学报*, 2022, 27(2): 202-213
- Shen F F, Luo C T, Liao Y C, Fang H Y, Zhou J H, Shen F X, Yuan Y H. Review on biochar mitigating the soil N₂O emission from agro-ecosystems[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(2): 202-213 (in Chinese)
- [20] 肖潇, 毛北平, 吴时强. 近 100 年来长江与洞庭湖汇流河段水文特征演变[J]. *湖泊科学*, 2021, 33(1): 266-276
- Xiao X, Mao B P, Wu S Q. Dynamics of hydrological characteristics in Changjiang river and Lake Dongting confluence reach in the past 100 years [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33(1): 266-276 (in Chinese)
- [21] Ameloot N., Graber E R., Verheijen F G A, Deneve S. Interactions between biochar stability and soil organisms: Review and research needs[J]. *European Journal of Soil Science*, 2013, 64(4): 379-390
- [22] 尚杰, 耿增超, 王月玲, 陈心想, 赵军. 施用生物炭对(土蚕)土微生物量碳、氮及酶活性的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(6): 1142-1151
- Shang J, Geng Z C, Wang Y L, Chen X X, Zhao J. Effect of biochar amendment on soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activity in tier soils[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(6): 1142-1151 (in Chinese)
- [23] 石馨晔, 霍静, 陈冲, 商建英, 刘桢, 黄元仿, 汤怀志. 生物炭粒径和用量对砂姜黑土强度的影响[J]. *农业工程学报*, 2024, 41(1): 128-134
- Shi X Y, Huo J, Chen C, Shang J Y, Liu Z, Huang Y F, Tang H Z. Effects of biochar particle size and dosage on the strength of vertisols [J]. *Agricultural Engineering*, 2024, 41(1): 128-134 (in Chinese)
- [24] 章明奎, 顾国平, 王阳. 生物质炭在土壤中的降解特征[J]. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2012, 38(3): 329-335
- Zhang M K, Gu G P, Wang Y. Degradation characteristic of different biochar materials in soil environments [J]. *Journal of Zhejiang University: Agriculture and Life Sciences*, 2012, 38(3): 329-335 (in Chinese)
- [25] Zimmerman A R. Abiotic and microbial oxidation of laboratory-produced black carbon: Biochar[J]. *Environmental science & technology*, 2010, 44(4): 1295-1301
- [26] 肖焯, 黄志刚, 肖茵曦, 李友凤, 彭晚霞. 不同水位时期东洞庭湖湿地土壤微生物生物量碳氮和酶活性变化[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(8): 2958-2966
- Xiao Y, Huang Z G, Xiao H X, Li Y F, Peng W X. Changes of soil microbial biomass carbon, nitrogen, and enzyme activities in east Dongting Lake wetlands at different water levels[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(8): 2958-2966 (in Chinese)
- [27] 郭琪, 刘瑞, 徐刚, 曹颖, 胡尚连, 赵博. 1 株水稻秸秆降解菌的筛选及其降解效果研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2025, 3: 1-11
- Guo Q, Liu R, Xu G, Cao Y, Hu S L, Zhao B. Screening of a rice straw degrading bacteria strain and its degradation effect[J]. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*, 2025, 3: 1-11 (in Chinese)
- [28] Tang H, Shi L, Wen L, Cheng K, Li C, Li W, Xiao X. Effects of tillage practice on fungal and actinobacterial cellulolytic community with different humified particle-size fractions in a double-cropping paddy field[J]. *Land Degradation & Development*, 2023, 34(13): 3943-3952
- [29] 江高飞, 暴彦灼, 杨天杰, 郑海平, 梅新兰, 韦中, 徐阳春, 沈其荣. 高温秸秆降解菌的筛选及其纤维素酶活性研究[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(10): 2465-2472
- Jiang G F, Bao Y Z, Yang T J, Zheng H P, Mei X L, Wei Z, Xu Y C, Shen Q R. Screening of thermophilic cellulolytic bacteria and investigation of cellulase thermostability[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(10): 2465-2472 (in Chinese)
- [30] 万忠梅, 吴景贵. 土壤酶活性影响因子研究进展[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2005, 6: 87-92
- Wan Z M, Wu J G. Study progress on factors affecting soil enzyme activity [J]. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*, 2005, 6: 87-92 (in Chinese)
- [31] Gomez E J, Delgado J A, Gonzalez J M. Influence of water availability and temperature on estimates of microbial extracellular enzyme activity [J]. *PeerJ*, 2021, 9: e10994
- [32] Uhlířová E, Elhottová D, Tríska J, Šantrůčková H. Physiology and microbial community structure in soil at extreme water content [J]. *Folia Microbiologica*, 2005, 50(2): 161-166
- [33] Hallsworth J E. Water is a preservative of microbes [J]. *Microbial Biotechnology*, 2022, 15(1): 191-214

- [34] Ghezzehei T A, Sulman B, Arnold C L, Bogie N A, Berhe A A. On the role of soil water retention characteristic on aerobic microbial respiration[J]. *Biogeosciences*, 2019, 16(6): 1187-1209
- [35] Li F, Zhang J, Ma F, Chen Q, Xiao Q, Zhang X, Xie S, Yu H. Lytic polysaccharide monooxygenases promote oxidative cleavage of lignin and lignin: Carbohydrate complexes during fungal degradation of lignocellulose[J]. *Environmental Microbiology*, 2021, 23(8): 4547-4560
- [36] Fang L, Li J, Chen X. How lignocellulose degradation can promote the quality and function of dietary fiber from bamboo shoot residue by inonotus obliquus fermentation[J]. *Food Chemistry*, 2024, 451: 139479
- [37] 张秧, 艾为党, 冯海艳, 靳向丹, 陈艳武, 张良长. 小麦秸秆好氧堆肥过程中微生物多样性与优势菌群分析[J]. 农业工程学报. 2021, 37(11): 206-212
- Zhang Y, Ai W D, Feng H Y, Jin X D, Chen Y W, Zhang L C. Microbial diversity and dominant microbial communities in wheat straw aerobic composting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2021, 37(11): 206-212 (in Chinese)
- [38] Salgado J F M, Hervé V, Vera M A, Tokuda G, Brune A. Unveiling lignocellulolytic potential: A genomic exploration of bacterial lineages within the termite gut[J]. *Microbiome*, 2024, 12(1): 201
- [39] Kainthola J, Kalamdhad A S, Goud V V. A review on enhanced biogas production from anaerobic digestion of lignocellulosic biomass by different enhancement techniques[J]. *Process Biochemistry*, 2019, 84: 81-90
- [40] 王延鹏, 汪小昆, 施印炎, 魏天翔, 杨四军, 丁启翔. 不同耕作方式下水稻田麦秸降解效果[J]. 农业工程学报, 2021, 37(15): 239-247
- Wang Y P, Wang X Y, Shi Y Y, Wei T X, Yang S J, Ding Q S. Decomposition of wheat stalk under different tillages in rice field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(15): 239-247 (in Chinese)
- [41] 曹莹菲, 张红, 刘克, 吕家珑. 不同处理方式的作物秸秆田间腐解特性研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 212-219
- Cao Y F, Zhang H, Liu K, Lv J L. Decomposition characteristics of crop residues among different agricultural treatments[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(9): 212-219 (in Chinese)
- [42] 代文才, 高明, 兰木羚, 黄容, 王金柱, 王子芳, 韩晓飞. 不同作物秸秆在旱地和水田中的腐解特性及养分释放规律[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(2): 188-199
- Dai W C, Gao M, Lan M L, Huang R, Wang J Z, Wang Z F, Han X F. Nutrient release patterns and decomposition characteristics of different crop straws in drylands and paddy fields[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(2): 188-199 (in Chinese)
- [43] 周之栋, 卜晓莉, 吴永波, 薛建辉. 生物炭对土壤微生物特性影响的研究进展[J]. 南京林业大学学报:自然科学版, 2016, 40(6): 1-8
- Zhou Z D, Bu X L, Wu Y B, Xue J H. Research advances in biochar effects on soil microbial properties[J]. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2016, 40(6): 1-8 (in Chinese)
- [44] Luo X, Chen L, Zheng H, Chang J, Wang H, Wang Z, Xing B. Carbon sequestration strategies in soil using biochar: Advances, challenges, and opportunities[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(31): 11357-11372
- [45] Zhou Y, Zhao Z, Li D, Wu L, Chen Z, An N, Yang J, Wang Y. Effects of combined biochar and maize straw applications on soil greenhouse gas emissions[J]. *Applied Soil Ecology*, 2024, 202: 105540
- [46] 盖霞普, 翟丽梅, 王洪媛, 刘宏斌, 任天志, 雷秋良, 武淑霞. 生物炭对土壤微生物量及其群落结构的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2017, 48(4): 399-410
- Gai X P, Zhai L M, Wang H Y, Liu H B, Ren T Z, Lei Q L, Wu S X. Impacts of biochar on soil microbial biomass and community structure[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2017, 48(4): 399-410 (in Chinese)
- [47] Han G, Lan J, Chen Q, Yu C, Bie S. Response of soil microbial community to application of biochar in cotton soils with different continuous cropping years[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1-11
- [48] 匡崇婷, 江春玉, 李忠佩, 胡锋. 添加生物质炭对红壤水稻土有机碳矿化和微生物生物量的影响[J]. 土壤, 2012, 44(4): 570-575
- Kuang C T, Jiang C Y, Li Z P, Hu F. Effects of biochar amendments on soil organic carbon mineralization and microbial biomass in red paddy soils[J]. *Soils*, 2012, 44(4): 570-575 (in Chinese)
- [49] 王强, 耿增超, 许晨阳, 郭靖宇, 李倩倩, 刘莉丽, 赵汉红, 杜旭光. 施用生物炭对壤土土壤微生物代谢养分限制和碳利用效率的影响[J]. 环境科学, 2020, 41(5): 2425-2433
- Wang Q, Geng Z C, Xu C Y, Guo J Y, Li Q Q, Liu L L, Zhao H H, Du X G. Effects of biochar application on soil microbial nutrient limitations and carbon use efficiency in loess soil[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(5): 2425-2433 (in Chinese)
- [50] 邢存芳, 侯建伟, 杨莉琳. 不同秸秆炭在黄壤中降解特征的比较研究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2023, 48(6): 81-87
- Xing C F, Hou J W, Yang L L. Comparative study on degradation characteristics of different straw biochar in yellow soil[J]. *Journal of Southwest Normal University: Natural Science Edition*, 2023, 48(6): 81-87 (in Chinese)
- [51] Lehmann J. A handful of carbon[J]. *Nature*, 2007, 447(7141): 143-144
- [52] Zheng C, Xiao L, Iqbal Y, Sun G, Feng H, Liu F, Duan M, Yi Z. Miscanthus interspecific hybrids exceed the biomass yield and quality of their parents in the saline-alkaline Yellow River delta[J]. *Food and Energy Security*, 2022, 11(1): e347
- [53] Peroni P, Liu Q, Lizarazu W Z, Xue S, Yi Z, Von C M, Mastroberardino R, Papazoglou E G, Monti A, Iqbal Y. Biostimulant and arbuscular mycorrhizae application on four major biomass crops as the base of phytomanagement strategies in metal-contaminated soils[J]. *Plants*, 2024, 13(13): 1866
- [54] 伍旖旎, 许依, 傅童成, 易自力, 薛帅. 施氮对贫瘠红壤定植芒草根际土有机碳矿化过程的影响[J]. 草地学报, 2022, 30(4): 801-809
- Wu Y L, Xu Y, Fu T C, Yi Z L, Xue S. Effects of nitrogen application on organic carbon mineralization in rhizosphere soil of *Miscanthus* spp in the barren red soil[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(4): 801-809 (in Chinese)
- [55] Xue S, Lewandowski I, Wang X. Assessment of the production potentials of *Miscanthus* on marginal land in China[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 54: 932-943
- [56] Xu Y, Zheng C, Liang L, Yi Z, Xue S. Quantitative assessment of the potential for soil improvement by planting *Miscanthus* on saline-alkaline soil and the underlying microbial mechanism[J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2021, 13(7): 1191-1205

- [57] Wagner M, Mangold A, Lask J, Kiesel A, Lewandowski I. Economic and environmental performance of miscanthus cultivated on marginal land for biogas production[J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2019, 11(1): 34-49
- [58] 曹晓风, 孙波, 陈化榜, 周俭民, 宋显伟, 刘小京, 邓向东, 李秀军, 赵玉国, 张佳宝, 李家洋. 我国边际土地产能扩增和生态效益提升的途径与研究进展[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(3): 336-348

Cao X F, Sun B, Chen H B, Zhou J M, Song X W, Liu X J, Deng X D, Li X J, Zhao Y G, Zhang J B, Li J Y. Approaches and research progresses of marginal land productivity expansion and ecological benefit improvement in China[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36(3): 336-348 (in Chinese)

责任编辑: 杨爱东



第一作者简介: 陈清健, 湖南农业大学生物科学技术学院生物技术与工程专业硕士研究生。本科毕业于湖南农业大学东方科技学院生物技术专业。研究生期间获B类学业奖学金。



通讯作者简介: 薛帅, 博士, 副教授, 博士生导师, 湖南农业大学生物科学技术学院生物技术系主任。湖南省“青年百人计划”专家、“湖湘高层次创新创业人才”获得者, 兼任湖南省植物学会理事及青年学术委员会委员, 国际知名期刊 *Global Change Biology Bioenergy* 主题编辑。主要研究领域为遗传资源学和生态遗传学, 围绕高大禾草类植物生态效应评价及其生态产品研制开展研究。近年来, 主持或参与欧盟第七框架项目、国家自然科学基金项目、湖南省重点研发计划等科研项目6项。已在国内外本领域主流期刊发表论文50余篇, 其中发表SCI论文累计影响因子达70; 申请并授权国家发明专利5项, 转化3项; 制定行业标准4项, 软件著作权2项。