



伏肖,徐强,黄晓玮,李芷薇,谭天骢,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(09):147-157.

FU Xiao, XU Qiang, HUANG Xiaowei, LI Zhiwei, TAN Tiansu, YI Zili, XUE Shuai. 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(09): 147-157.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.09.13

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

伏肖¹ 徐强¹ 黄晓玮¹ 李芷薇¹ 谭天骢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, 长沙 410128;

2. 湖南农业大学 芒属植物生态应用技术湖南省工程实验室, 长沙 410128;

3. 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)

摘要 为综合评价热裂解温度和原料类型对生物炭品质的影响,选取了3类不同来源的17种生物质原料,分别在600、800、1 000 °C下热裂解为51种生物炭。基于生物炭在重金属污染治理的应用,采用主成分分析法分析热裂解温度和原料类型对生物炭的理化性质的影响,并通过相关性分析筛选出了生物炭的核心指标;基于获得的核心指标,再采用灰色关联度(RI)综合评价这51种生物炭在修复重金属污染方面的综合品质潜力。结果表明与热裂解温度相比,原料类型对生物炭的理化性质影响更大。筛选所选取的9个评价指标,确定出炭率、比表面积、氢碳摩尔数比、酸性官能团含量和灰分含量为生物炭品质评价的核心指标。此外,随着热裂解温度的升高,生物炭的灰色关联度升高,1 000 °C下的高大禾草类生物炭,如竹(RI=0.697)、南荻(RI=0.676)和柳枝稷(RI=0.671)等生物炭的综合评价指数高,说明这3种生物炭具有更大的应用潜力。

关键词 生物质; 农业废弃物; 高大禾草; 灰色关联度; 重金属污染修复

中图分类号 X712

文章编号 1007-4333(2024)09-0147-11

文献标志码 A

Effects of different pyrolysis temperatures and feedstock types on biochar quality based on the application scenario for heavy metal contamination control

FU Xiao¹, XU Qiang¹, HUANG Xiaowei¹, LI Zhiwei¹, TAN Tiansu¹, YI Zili^{1,2,3}, XUE Shuai^{1,2,3*}

(1. College of Bioscience & Biotechnology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China;

2. Hunan Engineering Laboratory of Miscanthus Ecological Applications, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China;

3. Hunan Branch, National Energy R&D Center for Non-Food Biomass, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract This study was designed to comprehensively evaluate the effects of pyrolysis temperatures and feedstock types on the biochar quality from 17 feedstocks under 600 °C, 800 °C and 1 000 °C, respectively. Based on the application potential of biochar in the remediation of heavy metal pollution, the principal component analysis was used to analyze the impact of pyrolysis temperature and feedstock type on the physicochemical properties of biochar. The core indicators of biochar were selected through correlation analysis. Subsequently, the grey relational grade (RI) was utilized to comprehensively evaluate the

收稿日期: 2024-02-20

基金项目: 湖南省农业领域重点研发项目(2019NK2021);国家级大学生创新创业训练计划项目(S202310537019)

第一作者: 伏肖(ORCID:0009-0008-1605-7622),硕士研究生,E-mail:1934465560@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

potential of these 51 biochars in remediating heavy metal pollution. The results showed that the feedstock types were more important on the physicochemical properties of biochar than that of the pyrolysis temperatures. The core indicators comprehensively expressing the biochar quality include biochar yield, specific surface area, H and C molar ratio, acid functional group and ash content. The results of gray relational degree (RI) comprehensive evaluation showed that the heavy metal remediation potential of biochar increased with the increase of pyrolysis temperature. The biochars from tall grass biomass pyrolyzed at 1 000 °C generally showed a good quality as suggested by the high RI of *Bambusoideae* (RI=0.697), *Miscanthus lutarioriparius* (RI=0.676) and *Panicum virgatum* (RI=0.671), respectively.

Keywords biomass; agricultural wastes; tall grass biomass; gray relational analysis; heavy metal remediation

生物炭是一种通过在缺氧或无氧环境中热裂解生物质转化而成的高碳含量材料^[1]。由于其具有丰富的表面官能团、较大的比表面积、较高的pH以及固碳能力强等特点,已被广泛应用于废水处理、土壤修复、减少温室气体排放和能源储存等领域^[2-4]。目前,生物炭的制备原料主要包括秸秆、林业废弃物和畜禽粪便等^[5]。农业废弃物的炭化利用已被农业农村部定义为推动绿色、低碳化农业发展并实现碳中和目标的重大引领技术^[6]。

高品质生物炭的供应对于实现其众多应用潜力至关重要。生物炭的品质受到原料和工艺条件的显著影响。例如,高木质素含量原料制备的炭(如木炭)比低木质素含量原料制备的炭(如草炭)具有更好的品质^[7]。Xu等^[8]的研究表明,通过对生物质原料进行改性处理,可以获得更高品质的生物炭。Yaashikaa等^[9]发现较长的停留时间和较低的温度是获得高生物炭产率的理想条件。高热裂解温度有助于促进生物炭中芳香结构的形成,增大比表面积,并提高其吸附能力^[10]。因此,近年来研究大多数集中在寻找优化热裂解条件以提高制备生物炭的品质^[11-13]。

基于不同指标,国内已有研究评价了生物炭的品质。然而,由于不同研究中选取的理化指标存在差异,导致得到的研究结果也存在较大的差异。如:在评价生物炭作为缓释载体时,邢莉彬等^[14]选取了比表面积、孔容、氢碳摩尔数比、氮元素含量、pH作为评价指标,徐洋等^[15]选取了氢碳原子数比、氧碳原子数比、氮元素含量、灰分作为评价指标,导致其热裂解温度对生物炭用作缓释载体时的趋势存在差异。在现有研究的基础上,选择适当的评价指标,并筛选出生物炭的主要理化性质指标是必要的。以期提供统一的方法来评估生物炭的品质和性能,为生物炭的制备和应用提供科学依据。不同应用场景对相应

生物炭品质的要求也不一致。尽可能低的灰分含量是生物炭作为燃料电池负极材料应用对品质的要求^[16];而生物炭中较高的灰分含量在土壤改良方面有着广阔的应用前景^[17]。由此可见,科学合理评价体系的建立还需要基于特定的应用场景。目前,生物炭用于重金属污染土壤和水体的修复是现阶段生物炭应用领域较为成熟的技术^[18-19]。

基于筛选得到的核心评价指标对生物炭综合品质的评价是一个多准则决策的过程,为了更准确地反映所有指标的信息,并进一步确定不同生物炭类型在重金属污染修复领域应用的综合品质潜力,需要采用生物炭核心理化指标进行综合评价。灰色关联度是一种用于描述变量之间关联关系的方法,在数据分析和决策支持领域具有广泛应用。该方法通过对数据序列进行灰色系统建模,以序列的趋势和变异性为基础,评估变量之间的关联程度^[20]。

综上所述,本研究拟选取3类不同来源的17种生物质原料,分别在600、800、1 000 °C下热裂解为51种生物炭,通过主成分分析法探究热裂解温度和原料类型对生物炭品质的影响;采用相关性分析法对影响生物炭用于重金属污染修复的品质指标进行分析和筛选,从而找到其核心评价指标;基于挑选的生物炭品质核心评价指标,对不同类型的生物炭进行灰色关联度综合分析,构建生物炭核心评价指标的综合评价,从而挑选出可用于重金属污染修复领域的高品质生物炭。为生物质大规模炭化利用和大批量生产提供参考,为促进生物炭生产和利用具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 生物质原料选择

选取用于制炭的原料包括具有快速生长、高产

量、可再生性、发展利用前景优的高大禾草类生物质及目前生物炭制备常用的原料农作物秸秆与农业加工副产物。其中:高大禾草包括南荻(*Miscanthus lutarioriparius*)、奇岗(*Miscanthus×Giganteus*)、芦竹(*Arundo donax*)、竹(*Bambusoideae*)、河八王(*Saccharum narenga*)、五节芒(*Miscanthus floridulus*)、柳枝稷(*Panicum virgatum*)、芒(*Miscanthus sinensis*)、狼尾草(*Pennisetum alopecuroides*);农作物秸秆包括玉米秆、油菜秆、烟草秆、木薯秆、稻秆;农业加工副产物包括玉米芯、油茶壳、稻壳。本研究选取的原料类型均具有资源丰富、容易获取的特征,以保证筛选得到的优秀原料类型在实际生产也具有应用价值。比如:南荻作为我国特有的高大禾草,在洞庭湖区就有88 000 hm²的分布面积,可年产生物质约100万t^[21-22]。Wang等^[23]对我国秸秆资源及农业加工副产物资源的初步核算结果显示,我国每年可产生相应的生物质7.6亿t;所选取的芦竹、狼尾草、柳枝稷等原料虽然现阶段没有规模化的生产,但是其较强的适应性和环境胁迫的耐受能力,后续可利用我国广大的边际地资源,实现这些原料的规模化供应^[24]。

1.2 生物炭的制备方法

称取烘干后的生物质材料于燃烧舟,放置于氮气氛围下的管式炉GSL-1 700X(合肥科晶材料技术有限公司,中国)中,升温速率为5℃/min,目标温度分别控制在600、800、1 000℃,在目标温度下保温2 h,自然冷却。

1.3 生物炭综合评价体系构建

1.3.1 用于评价生物炭在重金属污染修复领域应用潜力的核心指标筛选

本试验选取了包括出炭率、灰分、pH、电导率、氢碳摩尔数比、比表面积、阳离子交换量、酸性官能团、碱性官能团等9个理化指标作为表征生物炭品质的指标库;并基于在600、800、1 000℃下烧制的51种生物炭,测定理化指标,采用IBM SPSS Statistics 26进行皮尔逊相关性分析,筛选出重叠信息较少的指标作为评价生物炭品质的核心指标。

1.3.2 生物炭理化指标的测定方法

出炭率(Biochar Yield, BY):生物炭得率为最终制备所得生物炭与原材料干质量分数;

灰分含量(Ash Content, AC):分别用电子天平称取0.500 g生物炭于坩埚中,敞口放入马弗炉中

800℃热裂解,保温2 h,自然冷却后,根据式(1)取出计算灰分含量;

$$AC = (G_2 - G_1) / G \times 100\% \quad (1)$$

式中:G为热裂解前生物炭质量,g;G₁为空坩埚的质量,g;G₂为坩埚和灰分的质量,g。

pH、电导率(Electric Conductivity, EC):配置生物炭悬浮液(m(生物炭):m(蒸馏水)=1:10),使用pH计、电导率仪测量;

氢碳摩尔数比(M(H)/M(C)):采用元素分析仪UNICUBE(Elementar,德国)测定碳元素(C)、氢元素(H)含量,通过计算摩尔比得出比例;

比表面积(Specific surface area, Ssa):采用比表面积孔径分析仪Autosorb NOVA 2 200e(Quantachrome,美国)测定;

阳离子交换量(Cation Exchange Capacity, CEC):参考Kloss^[25]方法,使用原子吸收分光光度计AA-7 000(岛津,日本)测定钾(K⁺)、钙(Ca²⁺)、钠(Na⁺)、镁(Mg²⁺)离子含量;

酸性官能团(Acid functional group, Aci)、碱性官能团(Alkaline functional group, Alk)含量:参考Boehm^[26]滴定法测定。

1.4 数据统计及分析

1.4.1 不同热裂解温度和原料类型对生物炭品质的影响

使用Origin 2023b软件进行主成分分析,通过观察主成分分析结果中的重叠区域明确热裂解温度和原料类型对生物炭品质的影响。

1.4.2 基于灰色关联度的不同生物炭类型用于治理重金属污染用的综合潜力评价

为评价不同生物炭类型的综合品质潜力,本试验采用灰色关联度法进行综合评价,影响生物炭综合品质评价的核心品质定义见表1。

基于灰色关联度对51种生物炭的核心品质指标进行排序,具体步骤如下:

首先,无量纲化数据,计算公式如下:

$$Y_i(j) = (x_i(j) - \min x(j)) / (\max x(j) - \min x(j)) \quad (2)$$

$$Y_i(j) = (\max x(j) - x_i(j)) / (\max x(j) - \min x(j)) \quad (3)$$

式中:Y_i(j)为第i种生物炭第j个指标标准化后值,x_i(j)为第i种生物炭第j个指标的理化性质测量值,

表 1 不同生物炭核心指标归一化处理
Table 1 Normalization of core indicators for different biochar types

指标 Index	定义 Definition	与重金属污染修复潜力的关系 Relationship with the potential for heavy metal pollution remediation
生物炭产率 Biochar yield	生物炭重量占生物质原材料干重比例	越大越好
比表面积 Specific surface area	指单位重量或单位体积的吸附材料的表面积	越大越好
氢碳摩尔数比 $M(H)/M(C)$	氢碳摩尔数之比	越小越好
酸性官能团 Acid functional group	表面化学官能团中带有酸性性质的基团	越小越好
灰分 Ash content	灰分占样品干重质量比	越小越好

$\max x(j)$ 和 $\min x(j)$ 分别为 $x_i(j)$ 的最大值和最小值。当指标越大越好时,原始数据标准化利用式(2)计算;当指标越小越好时,原始数据标准化利用式(3)计算。

然后,计算关联系数 $W(j)$,具体计算公式如下:

$$W(j)=\left(\min_i \min_j \Delta_i(j) + \rho \max_i \max_j \Delta_i(j)\right) / \left(\Delta_i(j) + \rho \max_i \max_j \Delta_i(j)\right) \quad (4)$$

式中: $W(j)$ 为关联系数; $\Delta_i(j)$ 表示第*i*个样品与理想样品在第*j*个指标无量纲数据的绝对差值; $\min_i \min_j \Delta_i(j)$ 与 $\max_i \max_j \Delta_i(j)$ 分别表示 $\Delta_i(j)$ 的二级最小值与最大值; ρ 为分辨系数,一般取0.5。

最后,运用独立性权系数法计算出权重,得出综合得分。具体计算公式如下:

$$RI(j)=\sum_{j=1}^n W(j) \times B(j) \quad (5)$$

式中:RI为加权关联度得分; $B(j)$ 为第*j*个指标的权重;*n*为评价指标个数。

2 结果与分析

2.1 不同热裂解温度和原料类型对生物炭品质的综合影响

不同生物炭类型理化指标的主成分分析见图1。可见不同生物质类型和热裂解温度的第一主成分PC 1和第二主成分PC 2分别解释了总方差的

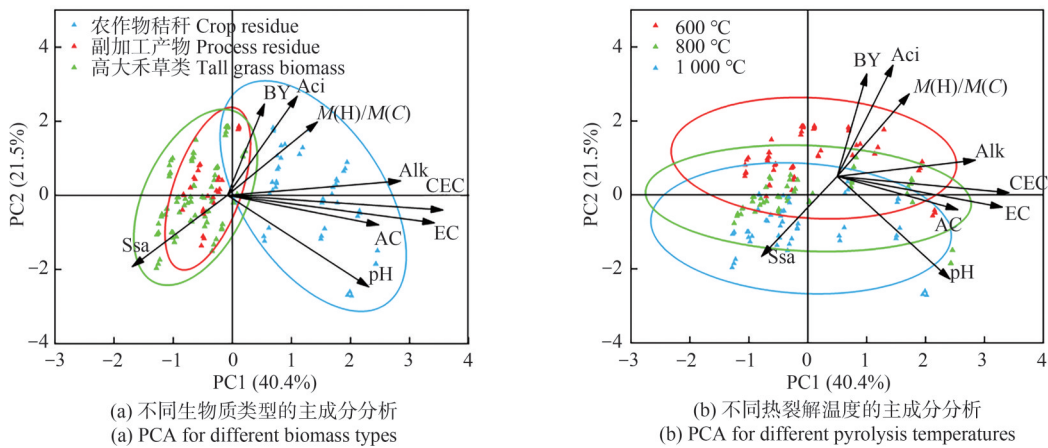
40.4%和21.5%,总和达61.9%。表明2个主成分较好地代表了所测试的生物炭的9个理化性质,反映了原始数据中的大部分信息。

由图1可见,不同热裂解温度下的生物炭类型在主成分分析中呈现一定的重叠现象,表明在特定理化性质上,不同热裂解温度下的生物炭可能具有相似的特征。然而,不同生物质类型在主成分分析图中的重叠区域较少,表明与热裂解温度相比较,不同生物质类型对生物炭的理化性质具有明显的影响。由图1(a)可知:农作物秸秆生物炭在主成分分析中显示较高的BY、Aci、 $M(H)/M(C)$ 、AC、CEC、EC、Alk和pH含量;农业加工副产物和高大禾草类生物炭则表现出更大的Ssa。此外,由图1(b)可知:热裂解温度对生物炭的理化性质的影响整体表现为,热裂解温度为600℃时,生物炭的BY、Aci和 $M(H)/M(C)$ 含量较高;而在热裂解温度为800和1 000℃时,生物炭的AC、CEC、EC、Alk、pH含量较高,且Ssa更大。

2.2 评价生物炭在重金属污染修复领域应用潜力的核心指标筛选

按照生物炭某个指标与其他理化指标无显著相关性达到总指标数量的1/3时,直接筛选为生物炭核心品质指标,其他指标按照显著性强弱筛选为核心品质指标的原则进行生物炭品质评价核心指标的筛选。

由表2可知:BY与EC(0.007)、CEC(0.033)、Alk(0.008)不存在显著相关性; $M(H)/M(C)$ 与AC



BY 为出炭率;Aci 为酸性官能团含量; $M(H)/M(C)$ 为氢碳摩尔数比;Alk 为碱性官能团含量;CEC 为阳离子交换量;EC 为电导率;AC 为灰分;pH 为酸碱度;Ssa 为比表面积。

BY represents biochar yield; Aci represents acid functional group content; $M(H)/M(C)$ represents molar ratio of hydrogen to carbon; Alk represents alkaline functional group content; CEC represents cation exchange capacity; EC represents electrical conductivity; AC represents ash content; pH represents acidity or alkalinity; Ssa represents specific surface area.

图 1 51 种生物炭品质的主成分分析

Fig.1 Principal component analysis of physicochemical indicators for the study produced 51 biochar types

表 2 51 种生物炭理化指标相关性分析

Table 2 Correlation analysis of the physicochemical indicators of 51 kinds of biochar

理化指标 Physi- chemical indicator	出炭率 BY	pH	电导率 EC	阳离子交换量 CEC	氢碳摩尔数比 $M(H)/M(C)$	灰分 AC	碱性官能团 Alk	酸性官能团 Aci	比表面积 Ssa
BY	1	-0.193*	0.007	0.033	0.334**	0.253**	0.008	0.349**	-0.233**
pH		1	0.698**	0.589**	0.072	0.505**	0.272**	-0.372**	-0.038
EC			1	0.913**	0.409**	0.527**	0.576**	0.053	-0.319**
CEC				1	0.266**	0.587**	0.776**	0.282**	-0.292**
$M(H)/M(C)$					1	-0.053	0.095	0.181*	-0.546**
AC						1	0.424**	0.123	-0.055
Alk							1	0.564**	-0.204*
Aci								1	-0.204*
Ssa									1

注: *和**分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平显著相关。
Note: * and ** indicate significant correlation at the $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively.

(-0.053)、pH(0.072)、Alk(0.095)不存在显著相关性;AC 与 $M(H)/M(C)$ (-0.053)、Aci(0.123)、Ssa(-0.055)不存在显著相关性;因此可直接将 BY、 $M(H)/M(C)$ 、AC 作为生物炭核心指标。由于 CEC 与其他 8 个理化指标之间只与 BY 不存在显著相关,因此可以直接将 CEC 剔除。同时,通过比较 pH、EC、Alk、Aci、Ssa 与 pH、EC、CEC、AC 之间的相关性强弱发现:pH 与 EC(0.698)、CEC(0.589)、AC(0.505)之间存在极显著正相关($P<0.01$);EC 与 CEC(0.913)、pH(0.698)、AC(0.527)之间存在极显著正相关($P<0.01$);Alk 与 CEC(0.776)、EC(0.576)、AC(0.424)、pH(0.272)之间存在极显著正相关($P<0.01$);Aci 与 CEC(0.282)之间存在极显著正相关($P<0.01$),与 pH

(−0.372)之间存在极显著负相关($P<0.01$);Ssa与EC(−0.319)、CEC(−0.292)存在极显著负相关($P<0.01$);可筛选出Aci和Ssa作为生物炭的核心指标。

综上,筛选BY、Ssa、 $M(H)/M(C)$ 、Aci、AC5个指标作为重金属污染修复用的生物炭品质评价的

核心理化指标。

2.3 不同类型生物炭在重金属污染修复领域应用潜力的综合品质评价

3种不同热裂解温度下17种生物质获得的51种生物炭的综合评价结果见表3。可见:51种不同类型生物炭的灰色关联系数为0.419~0.697。在

表3 不同热裂解温度下51种生物炭综合品质的评价结果

Table 3 Evaluation results of comprehensive quality of 51 biochars at different pyrolysis temperatures

生物炭类型 Bichar types	600 ℃		800 ℃		1 000 ℃	
	关联度 RI	排序 Order	关联度 RI	排序 Order	关联度 RI	排序 Order
奇岗 <i>Miscanthus×giganteus</i>	0.510	34	0.532	29	0.583	12
芦竹 <i>Arundo donax</i>	0.502	35	0.556	23	0.608	8
南荻 <i>Miscanthus lutarioriparius</i>	0.584	11	0.622	7	0.676	2
竹 <i>Bambusoideae</i>	0.627	6	0.641	5	0.697	1
河八王 <i>Saccharum narenga</i>	0.489	37	0.546	26	0.578	14
五节芒 <i>Miscanthus floridulus</i>	0.556	24	0.545	27	0.571	18
芒 <i>Miscanthus sinensis</i>	0.492	36	0.530	30	0.547	25
柳枝稷 <i>Panicum virgatum</i>	0.598	9	0.653	4	0.671	3
狼尾草 <i>Pennisetum alopecuroides</i>	0.466	44	0.488	38	0.535	28
玉米秆 Corn stalk	0.472	41	0.462	46	0.445	48
油菜秆 Rape stalk	0.447	47	0.419	51	0.466	45
烟草秆 Tobacco stalk	0.467	42	0.518	32	0.572	15
木薯秆 Cassava stalk	0.479	39	0.473	40	0.571	17
稻秆 Rice stalk	0.431	50	0.440	49	0.467	43
玉米芯 Corncob	0.572	16	0.564	19	0.589	10
油茶壳 Camellia shell	0.516	33	0.580	13	0.559	21
稻壳 Rice husk	0.521	31	0.556	22	0.559	20
总平均关联度 Total average RI	0.513	3	0.537	2	0.570	1

1 000 ℃下竹、南荻、柳枝稷、芦竹制备的生物炭品质最优,其综合评价指数(RI)分别为 0.697、0.676、0.671、0.608,均超过了 0.600。

3 类生物炭的平均综合评价结果见表 4。可见:无论温度如何变化,高大禾草类生物炭的灰色关联度综合评价指数平均值(RI=0.570)均优于农业加工副产物(RI=0.557)和农作物秸秆(RI=0.475)。随着热裂解温度的升高,生物炭的灰色关联度综合评价指数升高。具体而言,热裂解温度为 1 000 ℃时的总平均关联度(RI=0.570)优于 800 ℃(RI=0.537)和 600 ℃(RI=0.513),尤其在热裂解温度为 1 000 ℃时,奇岗(RI=0.583)、烟草秆(RI=0.572)、木薯秆炭(RI=0.571)的关联度远高于 800 和 600 ℃。

根据高大禾草类生物炭的核心品质指标与关

联度的相关性分析结果。可见:造成高大禾草类生物炭的综合评价指数较高的原因主要是高大禾草类生物炭拥有较低的 Aci(Aci 与关联度 RI 存在极显著负相关,其相关系数 $r=-0.666, P<0.01$)、AC ($r=-0.571, P<0.01$)、 $M(H)/M(C)$ ($r=-0.477, P<0.05$)和较高的 Ssa($r=0.552, P<0.01$)。具体来看,高大禾草类生物炭的 Aci 值为 0.536 mmol/g、AC 值为 10.537%、 $M(H)/M(C)$ 为 0.215、Ssa 值为 52.104 m²/g 相较于农业加工副产物,其 AC 值低了 39.818%, $M(H)/M(C)$ 比值低了 36.744%。高大禾草类生物炭相较于农作物秸秆,其 Aci 值低了 28.918%,AC 值低了 94.110%, $M(H)/M(C)$ 比值低了 46.512%,Ssa 值高出 92.806%。因此高大禾草类生物炭的综合评价指数较高。

表 4 不同热裂解温度下 3 类生物炭的平均综合评价结果
Table 4 Average comprehensive evaluation results of 3 types of biochar at different pyrolysis temperatures

类型 Type	600 ℃		800 ℃		1 000 ℃	
	关联度 RI	排序 Order	关联度 RI	排序 Order	关联度 RI	排序 Order
高大禾草类 Tall grass biomass	0.536	3	0.568	2	0.607	1
农作物秸秆 Crop residue	0.459	3	0.462	2	0.504	1
副加工产物 Process residue	0.536	3	0.567	2	0.569	1

根据 1 000 ℃下生物炭的核心品质指标与关联度的相关性分析结果。可见造成 1 000 ℃下生物炭的综合评价指数较高的原因主要是 1 000 ℃下生物炭拥有较低的 Aci(Aci 与关联度 RI 存在显著负相关,其相关系数 $r=-0.577, P<0.05$)、较高的 Ssa ($r=0.489, P<0.05$)。1 000 ℃下生物炭的 Aci 值为 0.494 mmol/g、Ssa 为 76.888 m²/g 相较于 600 ℃,其 Aci 值低 40.688%,Ssa 值是 600 ℃生物炭的 4.264 倍。1 000 ℃下的生物炭相较于 800 ℃,其 Aci 值低 11.134%,Ssa 值是 800 ℃生物炭的 1.809 倍。虽然 1 000 ℃的 AC 值要高于 600 ℃和 800 ℃,但 1 000 ℃的 Aci 和 Ssa 拥有更大优势,因此 1 000 ℃下生物炭的综合评价指数较高。

综上,随着热裂解温度升高,生物炭吸附重金属能力的综合品质潜力升高。热裂解温度为 1

000 ℃的高大禾草类生物炭,如竹、柳枝稷、南荻等生物炭的灰色关联度综合评价指数高,显示出更大的应用潜力。

3 讨 论

生物炭的理化性质受原料类型、制备方法、改性方法、热裂解条件(升温速率、热裂解温度和停留时间)等多个因素影响^[27]。本研究结果表明,热裂解温度和原料类型对生物炭的理化性质有重要影响,而不同的生物质类型对其理化性质的影响更显著。这与原料中的木质纤维素在不同温度的热裂解过程有关。纤维素在 200~400 ℃发生分解和聚合反应,形成低分子化合物。半纤维素具有带有短支链的线状结构,其热分解较容易,在 220~315 ℃进行。而木质素作为一类芳香族化合物,其热分解

温度通常在280~500℃发生^[28-29]。由此可知,温度对生物炭品质的影响主要是通过对不同组分的裂解过程实现的,而不同原料对组分的影响更加显著。因此,原料对生物炭的品质有着较为明显的影响,这与黄玉威^[30]的研究结果一致。

在对生物炭进行多项理化指标的研究时,需要注意指标之间可能存在信息的重叠。如pH与AC存在极显著正相关,是因为随温度升高,有机物减少,无机离子融合,形成无机矿物质,导致pH与灰分含量增加^[31],而碳酸盐是导致生物炭pH增加的主要成分。此外,CEC与Alk、Aci存在极显著正相关,这与Lee等^[32]的研究结果一致,CEC与生物炭的表面含氧官能团呈正相关。因此进行相关性分析可以帮助筛选出具有代表性的指标,作为生物炭核心理化指标,为后续研究生物炭提供理论基础。本结果显示在测得的生物炭9个品质指标中,多项指标存在显著相关性,通过筛选最终确定BY、Ssa、M(H)/M(C)、Aci、AC5个指标为核心品质评价指标。生物炭的出炭率越高,其产生的经济效益更高,能实现资源的高效利用。比表面积越大,孔隙结构越发达,能为重金属吸附提供更多活性位点^[33]。氢碳摩尔数比低表示其芳香结构化程度高,能提高生物炭对重金属离子的吸附性能^[34],同时有利于土壤碳固存,对农业发展具有积极意义^[35]。表面官能团能够通过络合作用、阳离子- π 作用等吸附重金属^[36]。在偏酸性环境中,高浓度的 H^+ 会与土壤中的重金属离子竞争吸附,从而降低生物炭对重金属的钝化效率^[37]。生物炭碱性的提升有利于增大其比表面积,并引入含氧官能团^[38]。此外,本研究发现,Aci含量与pH呈现出极显著的负相关,因此为了提高生物炭对重金属的钝化效果,应该控制Aci含量在较低水平。灰分中的一些元素能与重金属产生共沉淀,从而使土壤重金属从有效态转变为残渣态^[39]。本研究中,生物炭的灰分含量为4.854%~29.736%。如水稻、油菜等农作物秸秆中含有较高的灰分含量,可能是因其含有较高的 SiO_2 ^[40]。李佳瑛等^[41]等的研究表明 SiO_2 作为一种惰性矿物,并不能参与到离子交换或其他重金属吸附方式中。灰分越低表明生物炭质量越好,能减少碳骨架中的残渣颗粒,暴露更多的有效吸附位点^[42]。因此本研究考虑成本与资源利用更大化,将灰分含量控制在较低范围。

本研究选取了51份生物炭样品进行灰色关联度评价,结果表明随着热裂解温度升高,生物炭在重金属污染修复领域应用潜力的综合品质潜力升高。其中,热裂解温度为1000℃条件下制备的高大禾草类生物炭(如竹、柳枝稷、南荻)的灰色关联度综合评价指数较高。越高的热裂解温度预示着较高的能耗与投入,进而会对实际的推广应用产生负面影响。经过比较发现,生物炭理化性质在800℃以后变化不大,通过统筹考虑生产成本等方面的问题,在实际推广应用过程中可以适当降低热裂解的温度。这可能是生物炭应用研究多将热裂解温度设定为600~800℃的主要原因。另外,本研究还发现热裂解温度对不同品质指标具有不同的影响效果。因此,后续在决定热裂解温度时还可通过生物炭最终用途对某一指标的特殊需求来决定。比如,若需要具有更高的BY、Aci、M(H)/M(C)生物炭,则可考虑降低温度在600℃下生产。反之,若需要更高的Ssa、更低的Aci、M(H)/M(C)生物炭,则可考虑在1000℃下制备生物炭。

高大禾草类物质制备的生物炭具有较大的比表面积,有利于重金属的吸附,较低的灰分含量、酸性官能团含量和氢碳摩尔数比值有助于保持吸附过程的稳定性和提高重金属的钝化效率。在本研究中稻秆(27.537%)、烟草秆(24.375%)、油菜秆(18.688%)等生物炭灰分远高于其他类型生物炭,这可能是因为这些农作物秸秆生物炭中二氧化硅的累积较高^[43]。此外,生物质中的无机组分与生物炭的比表面积呈负相关关系^[44]。比表面积较低可能是由于无机材料堵塞了微孔。例如,在1000℃下,南荻炭的比表面积是稻秆炭的5.779倍,是油茶壳炭的1.866倍。这也是为什么高大禾草类生物炭具有较高比表面积的原因之一。氢碳摩尔数比作为高分子聚合物分析的重要指标可用于判断高分子聚合物的芳香结构,与生物质原材料的木质纤维素含量有关^[45],随热裂解温度升高,生物炭的氢碳摩尔数比降低,表明其稳定性更好。随热裂解温度升高,生物炭Aci和BY降低,这与Weber等^[46]研究结果相符。生物炭具有优异的吸附重金属能力,将这些高大禾草类生物炭应用于土壤中将有有效吸附和去除土壤中的重金属污染物。这对于土壤修复和环境保护具有重要意义,并为进一步的应用研究提供了有价值的指导。然而,不同生物炭

与重金属的作用机理存在差异,如竹炭在 800 °C 时对 Hg^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cr^{6+} 吸附效果较好,但在 1 000 °C 时对 Cd^{2+} 吸附效果较好^[47],因此,在制备生物炭用于修复重金属污染土壤时,应综合考虑生物炭的物理化学特性、重金属的类型和浓度、土壤环境条件等因素,以制取性能最佳的生物炭修复剂。

4 结 论

本研究探究了不同生物炭类型与热裂解温度对生物炭品质的影响,筛选了生物炭的核心品质评价指标,并基于灰色关联度对不同生物炭类型用于治理重金属污染的综合潜力进行评价。主要结论如下:

1) 不同生物炭类型比热裂解温度对生物炭理化性质影响更大。农作物秸秆有较高的出炭率、酸性官能团、氢碳摩尔数比、灰分、阳离子交换量、电导率、碱性官能团、pH, 农业加工副产物和高大禾草类生物炭比表面积更大;

2) 筛选出出炭率、比表面积、氢碳摩尔数比、酸性官能团、灰分含量 5 个指标作为生物炭的核心品质评价指标;

3) 随热裂解温度升高,生物炭的综合品质评价指标升高。与农业加工副产物和农作物秸秆相比,高大禾草类生物炭,如竹、柳枝稷、南荻等生物炭的灰色关联度综合评价指数高,显示出更大的应用潜力。

参考文献 References

- [1] Tomezyk A, Sokołowska Z, Boguta P. Biochar physicochemical properties: Pyrolysis temperature and feedstock kind effects[J]. *Reviews in Environmental Science and Bio-Technology*, 2020, 19(1): 191-215
- [2] 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 N_2O 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 N_2O emission from agro-ecosystems[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(2): 202-213 (in Chinese)
- [3] 王义祥, 叶菁, 林怡, 刘岑薇, 李艳春. 花生壳生物炭用量对猪粪堆肥温室气体和 NH_3 排放的影响[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(6): 114-125
Wang Y X, Ye J, Lin Y, Liu C W, Li Y C. Effects of peanut shell biochar on greenhouse gas and NH_3 emissions during swine manure composting[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(6): 114-125 (in Chinese)
- [4] Zhou Y C, Li D Y, Li Z L, Guo S B, Chen Z M, Wu L L, Zhao Y. Greenhouse gas emissions from soils amended with cornstalk biochar at different addition ratios [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023, 20(2): 927
- [5] 陈乔, 任心豪, 贺飞, 杨淑媛, 郭军康. 定量分析秸秆和猪粪生物炭对镉的吸附作用[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(3): 668-676
Chen Q, Ren X H, He F, Yang S Y, Guo J K. Quantitative analysis of the adsorption of cadmium on wheat straw and pig manure biochar[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(3): 668-676 (in Chinese)
- [6] 夏龙龙, 逄超普, 朱春梧, 张广斌, 魏志军, 颜晓元. 中国粮食生产的温室气体减排策略以及碳中和实现路径[J]. 土壤学报, 2023, 60(5): 1277-1288
Xia L L, Ti C P, Zhu C W, Zhang G B, Wei Z J, Yan X Y. Mitigation strategies of greenhouse gas emissions from crop production in China and the pathways to agricultural carbon neutrality [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(5): 1277-1288 (in Chinese)
- [7] 李艳梅, 孙焱鑫, 廖上强, 杨俊刚, 孙娜. 不同原料与温度制备生物炭的性质及其农用潜力分析[J]. 环境工程, 2019, 37: 722-727
Li Y M, Sun Y X, Liao S Q, Yang J G, Sun N. Effects of feedstock sources and pyrolysis temperature on biochar's property and their resulting agronomic effects [J]. *Environmental Engineering*, 2019, 37: 722-727 (in Chinese)
- [8] Xu Y, Wu S L, Huang F G, Huang H M, Yi Z L, Xue S. Biomodification of feedstock for quality-improved biochar: A green method to enhance the Cd sorption capacity of *Miscanthus lutarioriparius*-derived biochar [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 350: 131241
- [9] Yaashikaa P R, Senthil Kumar P, Varjani S J, Saravanan A. Advances in production and application of biochar from lignocellulosic feedstocks for remediation of environmental pollutants [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 292: 122030
- [10] Sánchez M E, Lindao E, Margaleff D, Martínez, O, Morán, A. Pyrolysis of agricultural residues from rape and sunflowers: Production and characterization of bio-fuels and biochar soil management [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2009, 85(1-2): 142-144
- [11] Nkomo N, Odindo A O, Musazura W, Missengue R. Optimising pyrolysis conditions for high-quality biochar production using black soldier fly larvae faecal-derived residue as feedstock [J]. *Heliyon*, 2021, 7(5): e07025
- [12] 肖妮, 朱小涵, 王小凤, 陈金毅. 热解工艺条件对生物炭活化过硫酸盐性能的影响[J]. 武汉工程大学学报, 2024, 46(02): 130-136
Xiao N, Zhu X H, Wang X F, Chen J Y. Influence of pyrolysis process on persulfate activation on biochar [J]. *Journal of Wuhan Institute of Technology*, 2024, 46(02): 130-136 (in Chinese)
- [13] 蔡国飞, 李斌. 热解温度对原状茶渣生物炭理化性质影响[J]. 山东化工, 2024, 53(5): 51-53, 56
Cai G F, Li B. Effect of pyrolysis temperature on physicochemical properties of pristine tea waste biochar [J]. *Shandong Chemical Industry*, 2024, 53(5): 51-53, 56 (in Chinese)
- [14] 邢莉彬, 成洁, 耿增超, 张宏伟, 梁宏旭, 王强, 孙倩倩, 李艳. 不同原料生物炭的理化特性及其作发基肥缓释载体的潜力评价[J]. 环境科学, 2022, 43(5): 2770-2778
Xing L B, Cheng J, Geng Z C, Zhang H W, Liang H X, Wang Q, Sun Q Q, Li Y. Physicochemical properties of biochars prepared from different feedstocks and evaluation of its potential as A slow-release carriers for biochar-based fertilizers [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(5): 2770-2778 (in Chinese)

- [15] 徐洋, 任奕林, 王浩杰, 黄秋航, 邢博源, 曹红亮. 不同制备条件下油菜秸秆生物炭用作缓释载体的综合评价[J]. 浙江农业学报, 2023, 35(4): 893-902
- Xu Y, Ren Y L, Wang H J, Huang Q H, Xing B Y, Cao H L. Comprehensive evaluation of rape straw biochar as slow-release carrier under different preparation conditions[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2023, 35(4): 893-902 (in Chinese)
- [16] Ahn S Y, Eom S Y, Rhie Y H, Sung Y M, Moon C E, Choi G M, Kim D J. Utilization of wood biomass char in a direct carbon fuel cell (DCFC) system[J]. *Applied Energy*, 2013, 105: 207-216.
- [17] 何宜璇, 刘克思. 生物炭对草地盐碱土盐碱化特征和土壤养分的影响[J]. 乡村科技, 2023, 14(13): 126-130
- He Y X, Liu K S. Effects of biochar on salinization characteristics and soil nutrients in grassland saline-alkali soil[J]. *Rural Science and Technology*, 2023, 14(13): 126-130 (in Chinese)
- [18] 彭程, 徐漪琳, 石钰婧, 张玫, 李宇涛, 王皓冉, 张卫, 占绣萍. 生物炭改性及其对除草剂污染水体和土壤修复的研究进展[J]. 化工进展, 2024, 43(2): 1069-1081
- Peng C, Xu Y L, Shi Y J, Zhang W, Li Y T, Wang H R, Zhang W, Zhan X P. Research progress on the biochar modification and its remediation of herbicide-contaminated water and soil [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2024, 43 (2): 1069-1081 (in Chinese)
- [19] 王丽, 蔡景行, 邵代兴, 范洪黎, 王娅娟, 秦松, 范成五. 改性生物炭对重金属污染修复研究进展及其机制分析[J]. 中国土壤与肥料, 2023(6): 232-238
- Wang L, Cai J H, Shao D X, Fan H L, Wang Y J, Qin S, Fan C W. Research progress and mechanism analysis of modified biochar for heavy metal pollution remediation [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023(6): 232-238 (in Chinese)
- [20] 邓聚龙. 灰色系统理论教程[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990
- Deng J L. *Course of grey system theory* [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1990 (in Chinese)
- [21] 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)
- [22] Xu Q, Wu S L, Fu T C, Xu Y, Yang S, Li M, Yi Z L, Xue S. Unlocking the potential of Dongting Lake-grown *Miscanthus lutarioriparius* biomass: A comprehensive quality analysis and bioproduct application study[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 896: 165276
- [23] Wang X Y, Han L P, Yang L, Liu Q Q, Devlet A, Xie G H. The spatiotemporal availability of crop residue for biofuel feedstock in East and Central-South China[J]. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 2022, 16(1): 303-318
- [24] 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)
- [25] Kloss S, Zehetner F, Dellantonio A, Hamid R, Ottner F, Liedtke V, Schwanninger M, Gerzabek M H, Soja G. Characterization of slow pyrolysis biochars: Effects of feedstocks and pyrolysis temperature on biochar properties[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, 41(4): 990-1000
- [26] Boehm H P. Some aspects of the surface chemistry of carbon blacks and other carbons[J]. *Carbon*, 1994, 32(5): 759-769
- [27] Hassan M, Liu Y J, Naidu R, Parikh S J, Du J H, Qi F J, Willett I R. Influences of feedstock sources and pyrolysis temperature on the properties of biochar and functionality as adsorbents: A meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 744: 140714
- [28] Zheng M, Wang Z, Li X X, Qiao X J, Song W L, Guo L. Initial reaction mechanisms of cellulose pyrolysis revealed by ReaxFF molecular dynamics[J]. *Fuel*, 2016, 177: 130-141
- [29] K N Y, Poornima Devi T, Sivashanmugam P, Kavitha S, Yukesh Kannah R, Varjani S, AdishKumar S, Kumar G, Rajesh Banu J. Lignocellulosic biomass-based pyrolysis: A comprehensive review [J]. *Chemosphere*, 2022, 286: 131824
- [30] 黄玉威. 生物炭微观解剖结构表征及理化性质研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019
- Huang Y W. Microstructure characterization and physicochemical properties of biochar[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019 (in Chinese)
- [31] 彭友舜, 秦兆文, 杨敬波. 炭化温度对3种果核类生物炭特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(23): 304-307, 317
- Peng Y S, Qin Z W, Yang J B. Influence of carbonized temperature on bio-carbon properties prepared from three kinds of fruit seeds [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(23): 304-307, 317 (in Chinese)
- [32] Lee J W, Kidder M, Evans B R, Paik S, Buchanan A C 3rd, Garten C T, Brown R C. Characterization of biochars produced from cornstovers for soil amendment [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(20): 7970-7974
- [33] Zhao Y L, Zhang R Y, Liu H B, Li M X, Chen T H, Chen D, Zou X H, Frost R L. Green preparation of magnetic biochar for the effective accumulation of Pb (II): Performance and mechanism [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 375: 122011
- [34] 张文轩, 陈协, 梁靖仪, 陈伟波, 肖更生, 刁增辉. 生物炭吸附去除水中重金属的研究进展[J]. 水处理技术, 2024, 50(4): 26-31
- Zhang W X, Chen X, Liang J Y, Chen W B, Xiao G S, Diao Z H. Research progress in the removal of heavy metals by biochar from water [J]. *Technology of Water Treatment*, 2024, 50(4): 26-31 (in Chinese)
- [35] 韩莹莹, 方乐, 孙宇晴, 刘新会. 污泥共热解制备污泥基生物炭及其在土壤回用中的改良效益[J]. 环境化学, 2024, 43(5): 1670-1683
- Han Y Y, Fang L, Sun Y Q, Liu X H. Directional pyrolysis of sludge to prepare sludge-based biochar with soil improvement function [J]. *Environmental Chemistry*, 2024, 43(5): 1670-1683 (in Chinese)
- [36] 黄钊波, 钟玥珩, 何素飞, 李琬欣, 潘一茜, 邓玉. 定量分析稻壳生物炭不同组分对水体中铅和镉的吸附贡献[J/OL]. 水处理技术, 2024, 50(4): 1-6
- Huang C B, Zhong Y H, He S F, Li W X, Pan Y Q, Deng Y. Quantitative analysis of the component in rice husk biochar for adsorbing cadmium and lead in aqueous system [J/OL]. *Technology of Water Treatment*, 2024, 50(4): 1-6 (in Chinese)
- [37] 刘振刚, 夏宇, 孟芋含, 孙御婷, 李凯, 邓心怡. 生物质炭材料修复重金属污染土壤的研究进展: 修复机理及研究热点分析[J]. 环境工程学报, 2021, 15(4): 1140-1148
- Liu Z G, Xia Y, Meng Y H, Sun Y T, Li K, Deng X Y. Research advances in biomass-based carbon materials for remediation of heavy

- metal-contaminated soil: immobilization mechanism and analysis of related studies [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, 15(4): 1140-1148 (in Chinese)
- [38] 黄风光. 南荻炭生物-化学改性技术的筛选及其对Cd的吸附性能研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2023
- Huang F G. Screening of Bio-chemical modification Techniques of *Miscanthus lutarioriparius* biomass for biochar and Assessment the related Cd Sorption potential [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2023 (in Chinese)
- [39] 艾艳梅, 汪洋, 李佳琪, 张辰阳, 徐晓阳, 冯今萍, 周际海. 生物炭对铜矿区污染土壤微生物活性及香根草富集铜、镉、铅的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(6): 402-409
- Ai Y M, Wang Y, Li J Q, Zhang C Y, Xu X Y, Feng J P, Zhou J H. Effects of soil microbial activity and Cu, Cd, Pb enrichment of *Vetiveria zizanioides* to biochar addition in contaminated soil in copper mining area [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(6): 402-409 (in Chinese)
- [40] Mu B S, Wang H G, Hao X L, Wang Q W. Morphology, mechanical properties and dimensional stability of biomass particles/high density polyethylene composites: Effect of species and composition [J]. *Polymers*, 2018, 10(3): 308.
- [41] 李佳瑛. 山地城市污泥生物炭对Cu(II)的吸附特性及其固碳作用[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023
- Li J Y. Adsorption characteristics and carbon fixation of Cu (II) by biochar from mountain city sludge[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2023 (in Chinese)
- [42] 安舒玉, 韩枫, 刘蕾, 武西社, 王辉. 膨润土和硫铝酸盐水泥改性生物炭对铅的吸附[J]. 化学工程, 2022, 50(10): 19-24
- An S Y, Han F, Liu L, Wu X S, Wang Y. Adsorption of Pb (II) on biochar modified by bentonite and sulphoaluminate cement[J]. *Chemical Engineering (China)*, 2022, 50(10): 19-24 (in Chinese)
- [43] 简敏菲, 高凯芳, 余厚平. 不同裂解温度对水稻秸秆制备生物炭及其特性的影响[J]. 环境科学学报, 2016, 36(5): 1757-1765
- Jian M F, Gao, K F, Yu H P. Effects of different pyrolysis temperatures on the preparation and characteristics of bio-char from rice straw [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(5): 1757-1765 (in Chinese)
- [44] Ronse F, van Hecke S, Dickinson D, Prins W. Production and characterization of slow pyrolysis biochar: Influence of feedstock type and pyrolysis conditions[J]. *GCB Bioenergy*, 2013, 5(2): 104-115
- [45] 陆海楠, 胡学玉, 刘红伟. 不同裂解条件对生物炭稳定性的影响[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(8): 11-14
- Lu H N, Hu X Y, Liu H W. Influence of pyrolysis conditions on stability of biochar[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 36(8): 11-14 (in Chinese)
- [46] Weber K, Quicker P. Properties of biochar [J]. *Fuel*, 2018, 217: 240-261
- [47] 张文标, 钱新标, 马灵飞. 不同炭化温度的竹炭对重金属离子的吸附性能[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2009, 33(6): 20-24
- Zhang W B, Qian X B, Ma L F. Adsorption properties of bamboo charcoal under different carbonized temperatures for heavy metal ions [J]. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2009, 33(6): 20-24 (in Chinese)

责任编辑: 杨爱东



第一作者简介: 伏肖, 湖南农业大学生物科学技术学院生物学(遗传学)专业硕士研究生。本科毕业于怀化学院生物科学(师范)专业。本科期间获得乙等奖学金, 读研期间分别获得A类、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“百人计划”、“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, 主持与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, 其中发表的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。