

廖芬, 杨柳, 李强, 等. 不同生物质来源生物炭品质的因子分析与综合评价 [J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(3): 29-37.
LIAO Fen, YANG Liu, LI Qiang, et al. Factor analysis and comprehensive evaluation for quality of biochar derived from different biomass[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(3): 29-37.

不同生物质来源生物炭品质的因子分析与综合评价

廖 芬¹, 杨 柳¹, 李 强², MUHAMMAD Anas², 薛进军², 黄东亮¹, 李杨瑞¹

(1 广西壮族自治区农业科学院 甘蔗研究所/农业部广西甘蔗生物技术与遗传改良重点实验室/

广西甘蔗遗传改良重点实验室, 广西南宁 530007; 2 广西大学 农学院, 广西南宁 530004)

摘要:【目的】建立一套适合生物炭品质评价的方法, 探求影响生物炭品质的主要影响因子。【方法】选用 8 种不同生物质材料, 在 3 种温度下制备并获得 24 种生物炭材料 (Y1~Y24), 测定 16 项相关品质指标, 采用隶属函数法对各项指标数据进行转化, 采用软件 SPSS19.0 进行因子分析, 采用四次方最大旋转法获得因子载荷矩阵, 计算样品每个公因子分值与相应权重之积的累加和, 得到综合评价分值。对 16 项指标进行相关性分析和因子分析, 建立基于因子分析的生物炭品质的综合评价体系, 并根据综合评价得分对生物炭进行优良度排序。【结果】24 种生物炭 16 个品质指标经因子分析, 提取了 5 个特征根>1 的公因子, 累计方差贡献率达到 77.910%, 第 1 公因子以 C 含量、阳离子交换量 (CEC) 和 pH 贡献率较大, 达到 31.090%, 第 2 公因子以比表面积和孔隙贡献率较大, 达到 19.878%, 第 3 公因子以 H 原子含量贡献率较大, 达到 12.819%, 第 4 公因子以磷、钾含量贡献率较大, 达到 7.479%, 第 5 公因子以 NH₄⁺-N 吸附量贡献率较大, 达到 6.643%。【结论】因子分析方法可以作为评价生物炭品质的方法, 根据因子分析评价方法, 确定影响生物炭品质最关键的因子是化学性质因子 (C 含量、C/N 比、C/H 比、pH、CEC)、物理性质因子 (比表面积和孔隙)、活化能量因子 (H 原子含量)、营养因子 (P 和 K 含量) 和氨态氮吸附能力因子。

关键词: 生物炭; 品质指标; 热解条件; 因子分析; 综合评价
中图分类号: S511; S502 文献标志码: A 文章编号: 1001-411X(2019)03-0029-09

Factor analysis and comprehensive evaluation for quality of biochar derived from different biomass

LIAO Fen¹, YANG Liu¹, LI Qiang², MUHAMMAD Anas², XUE Jinjun², HUANG Dongliang¹, LI Yangrui¹
(1 Sugarcane Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Sugarcane Biotechnology and Genetic Improvement (Guangxi), Ministry of Agriculture, P. R. China/Guangxi Key Laboratory of Sugarcane Genetic Improvement, Nanning 530007, China; 2 College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: 【Objective】To establish a set of method suitable for quality evaluation of biochar and to explore the main factors influencing biochar quality. 【Method】Toally 24 biochars (Y1–Y24) were prepared from eight biomass materials under three different temperatures. Sixteen quality indexes of biochars were measured, and the data were converted using the subordinate function. SPSS 19.0 was used for factor analysis. Factor loading matrix was obtained using the biquadratic maximum rotation method. The comprehensive evaluation scores were calculated. Correlation analysis and factor analysis were performed for the 16 indexes, and the comprehensive evaluation system of biochar quality was established based on factor analysis. The biochars were

收稿日期: 2018-06-22 网络首发时间: 2019-04-16 09:12:00
网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20190412.1740.012.html>
作者简介: 廖 芬 (1978—), 女, 副研究员, 博士, E-mail: chganxi@163.com; 通信作者: 杨 柳 (1983—), 男, 副研究员, 博士, E-mail: yangliutibs@126.com; 李杨瑞 (1957—), 男, 教授, 博士, E-mail: liyr5745@126.com
基金项目: 国家自然科学基金 (31560353, 31601249); 广西八桂学者团队项目 (2013-3); 广西农业科学院基金项目 (GNK2016JZ16); 热带作物生物学与遗传资源利用重点实验室开放课题 1630032017020-7)

ranked using the comprehensive evaluation scores. 【Result】 Through factor analysis of 16 quality indexes of 24 biochars, we extracted five common factors with eigenvalues above one and their cumulative variance contribution was 77.910%. The first common factor consisted of carbon content, cation exchange capacity (CEC) and pH, with variance contribution of 31.090%. The second common factor consisted of specific surface area and pore volume, with variance contribution of 19.878%. The third common factor consisted of hydrogen atom content with variance contribution of 12.819%. The fourth common factor consisted of phosphorus and potassium contents with variance contribution of 7.479%. The fifth common factor consisted of maximum adsorption capacity of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ with variance contribution of 6.643%. 【Conclusion】 Factor analysis is a good statistical method for evaluating biochar quality. The key factors affecting biochar quality include chemical characteristic factors (C content, C/N ratio, C/H ratio, pH and CEC), physical characteristic factors (specific surface area and pore volume), active energy factor (H atom content), nutrition factor (P and K contents) and maximum adsorption capacity of $\text{NH}_4^+\text{-N}$.

Key words: biochar; quality index; pyrolysis condition; factor analysis; comprehensive evaluation

生物炭是一种由生物残体在高温 ($\leq 700\text{ }^\circ\text{C}$) 少氧或绝氧热解条件下生成的含碳固态物质^[1]。生物炭已被证明可以改善土壤理化特性^[2-3], 减少土壤酸化, 增加土壤有效养分, 保持土壤水分^[4-5], 提高土壤中的碳 (C) 汇存, 减少土壤 N_2O 的排放^[6-7]。研究表明, 生物炭还有提高作物产量的效应^[8-9]。生物炭由于具有碳含量高且稳定、高 pH、较大的比表面积等特性, 在土壤改良、温室气体减排等方面受到国内外越来越广泛的关注。

前人在生物炭的热解条件及制备条件对品质影响方面已进行了很多研究^[10], Singh 等^[11] 研究发现, 木质或草类制备的生物炭比禽畜粪便生物炭含有更多的氮。Xie 等^[12] 研究表明, 生物炭的比表面积与热解温度高度相关, 热解温度越高生物炭比表面积越大, 高温也会减少生物炭酸性功能团的数量密度^[13]。也有文献指出, 生物炭对作物的效应与生物炭的原料来源和热解温度有关^[14], 草类或粪便生物炭可以增加作物地上部生物量, 热解温度较高时所制备的生物炭更容易促进作物产量提高^[15-16]。Xin 等^[17] 研究发现, 小麦和水稻秸秆热解制备的生物炭对除草剂的吸附效果比土壤高出 2 500 倍。但是这些文献中并没有明确指出生物炭的各个品质性状中哪些性状是生物炭的关键品质指标。因此, 有必要引入生物炭品质评价的方法, 综合评价生物炭的品质性状。

本研究拟引入因子分析方法对生物炭各理化指标进行分析评价, 为进一步挖掘影响生物炭品质的关键指标、评价不同原料及热解温度条件下制备所得生物炭的品质提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 生物炭来源

生物炭的原材料有香蕉叶、香蕉叶柄、香蕉茎、甘蔗叶、甘蔗梢、木薯杆、桑枝和桉树枝, 来源于广西大学农学院农场和广西农业科学院武鸣里建种植基地。香蕉叶、叶柄和茎为香蕉果实采收结束后采集; 甘蔗叶和甘蔗梢为甘蔗成熟期采集; 木薯杆为木薯种茎采收后采集; 桑枝为桑叶采收结束后采集; 桉树枝为桉树林的林间枯枝。所有原材料收集后, 先粉碎成 2~5 mm 大小, 然后在 60~70 $^\circ\text{C}$ 条件下烘至恒质量, 待制备生物炭用。

1.2 生物炭制备方法

生物炭制备参照 Abdullah 等^[18] 方法, 将烘干的原材料放在一密闭铁盒中, 装满, 放置在马福炉中, 按试验温度设计要求, 分别在 350、500 和 650 $^\circ\text{C}$ 条件下保持 2 h, 取出, 立即用氮气冷却到 90 $^\circ\text{C}$, 待温度降至室温后取出, 即得到制备好的生物炭。各生物炭原料来源及制备温度详见表 1。

1.3 生物炭理化指标测定

1.3.1 生物炭得率 生物炭得率 (Y) 为最终制备所得生物炭的质量 ($m_{\text{生物炭}}$) 占原材料干质量 ($m_{\text{原料}}$) 的比例, 即 $Y=(m_{\text{生物炭}}/m_{\text{原料}})\times 100\%$ 。生物炭及原材料干质量使用电子称称量 (上海昆山钰恒电子平衡量器有限公司, LIGHTEVER/英恒 LBC 600, 最大量程 600 g, 精度 0.01 g)。

1.3.2 生物炭比表面积、孔容和孔径测定 采用 BET 法, 测定仪器为 3H-2000PS 型比表面积孔结构分析仪 (北京贝士德科技有限公司), 计算并记录生物炭的比表面积、孔容和孔径数据。

表 1 各生物炭的生物质来源

Table 1 Raw materials of different biochars			
编号 Number	生物质来源 Raw material	$\theta_{\text{热解}}/^\circ\text{C}$ Pyrolysis temperature	简写 Shorthand
Y1	香蕉叶 Banana leaf	350	BL350
Y2	香蕉叶 Banana leaf	500	BL500
Y3	香蕉叶 Banana leaf	650	BL650
Y4	香蕉茎 Banana stalk	350	BS350
Y5	香蕉茎 Banana stalk	500	BS500
Y6	香蕉茎 Banana stalk	650	BS650
Y7	香蕉叶柄 Banana pseudo stem	350	BP350
Y8	香蕉叶柄 Banana pseudo stem	500	BP500
Y9	香蕉叶柄 Banana pseudo stem	650	BP650
Y10	甘蔗叶 Sugarcane leaf	350	SL350
Y11	甘蔗叶 Sugarcane leaf	500	SL500
Y12	甘蔗叶 Sugarcane leaf	650	SL650
Y13	甘蔗梢 Sugarcane stalk	350	SS350
Y14	甘蔗梢 Sugarcane stalk	500	SS500
Y15	甘蔗梢 Sugarcane stalk	650	SS650
Y16	木薯茎秆 Cassava stem	350	CS350
Y17	木薯茎秆 Cassava stem	500	CS500
Y18	木薯茎秆 Cassava stem	650	CS650
Y19	桑枝 Mulberry stalk	350	MS350
Y20	桑枝 Mulberry stalk	500	MS500
Y21	桑枝 Mulberry stalk	650	MS650
Y22	桉树枝 Eucalyptus branch	350	EB350
Y23	桉树枝 Eucalyptus branch	500	EB500
Y24	桉树枝 Eucalyptus branch	650	EB650

1.3.3 生物炭各化学指标测定 pH 的测定方法参考 Nelson 等^[19], 称取生物炭 5.00 g, 加入 1 mol/L 的 KCl 溶液 25 mL, 25 ℃ 条件下震荡器震荡 5 min, 然后静置 30 min, pH 计 (上海雷磁自动电位滴定仪 ZDJ-5B) 测定 pH。

阳离子交换量 (Cation exchange capacity, CEC) 的测定参考 Kloss 等^[20] 的方法, C、N、H 元素含量的测定参考 Singh 等^[11] 的方法。总磷 (TP) 的测定参考 HClO₄-H₂SO₄ 法, 总钾 (TK) 测定参照 NaOH 熔融法-火焰光度法。有机质 (OM) 含量采用重铬酸钾容量法-稀释热法测定^[21]。

硝态氮和铵态氮最大吸附量测定参考 Kameyama 等^[22] 和 Ding 等^[23] 的方法。

所有指标测定设 3~6 个重复。

1.4 数据统计与分析

用 SPSS 19.0 对数据进行各个指标之间的相关性分析和因子分析, 最后根据因子分析结果对不同生物炭进行品质综合评价。

数据标准化处理: 因子分析前, 对原始数据进行均衡归一化 (标准化) 和纯量处理, 将数据规范至 [0, 1], 其中各隶属函数值 (U) 正相关指标依据公式 (1) 计算, 负相关指标依据公式 (2) 计算, 使用 SPSS19.0 软件进行因子分析, 得到各样品的公因子分值 (F), 综合分值 (D_n) 的计算以相应公因子的贡献率 (E_j) 为权重, 通过公式 (3) 得到^[24-26]。

$$U_{in} = \frac{X_{in} - X_{i\min}}{X_{i\max} - x_{i\min}}, \tag{1}$$

$$U'_{in} = 1 - \frac{X_{in} - X_{i\min}}{X_{i\max} - x_{i\min}} = 1 - U_{in}, \tag{2}$$

$$D_n = \sum_{j=1}^m F_{jn} E_j, \tag{3}$$

式中, U_{in} 和 U'_{in} 分别指第 n 个样品第 i 个指标的原始数据及经转化后的隶属函数值; X_{in} 指第 n 个样品第 i 个指标的原始测定结果; $X_{i\max}$ 和 $X_{i\min}$ 分别指样品组中第 i 个指标最大和最小值; D_n 为因子分析法得到的各样品果实的综合分值; F_{jn} 为第 n 个样品第 j 个特征根 > 1 的公因子的分值; m 为特征根 > 1 的公因子的个数; E_j 为第 j 个公因子的方差贡献率。

2 结果与分析

2.1 生物炭品质指标分析

对 24 份生物炭进行物理和化学性质的 16 个指标的测定, 结果 (表 2) 发现, 16 个指标均存在不同程度的变异现象, 若以某一品质指标进行排序, 不同指标中生物炭的排列顺序不尽相同, 说明 24 份生物炭在各单一品质指标中, 优良排序不同。要筛选出优良的生物炭材料, 必须依据样品在 16 项品质指标中的综合表现而定。由于生物炭的品质特性和选优目标不同, 在生物炭选择时对各品质指标的衡量标准也不同: 生物炭的化学成分以碳含量和得率越高越好, 营养成分 (N、P、K、有机质) 越多越好, 生物炭的物理品质 (比表面积、孔容) 越大越好, 生物炭对不同氮源最大吸附率越大越好。另外, 不同指标的计量单位不同, 数据量纲也不一致, 不便于进行数据的分析, 因此, 在使用因子分析进行综合评价时需对原始数据进行转化。

表 2 24 种生物炭的 16 个品质指标
Table 2 Sixteen quality indexes of 24 biochars

生物炭 材料编号 Biochar number (Y)	比表面积/ (cm ² ·g ⁻¹) Specific surface area	孔容/ (mL·g ⁻¹) Pore volume	孔径/nm Pore diameter	得率/% Yield	阳离子交换量/ (cmol·kg ⁻¹) Cation exchange capacity	pH	w(C)/%	w(有机质)/ (g·kg ⁻¹) Organic material content	质量比				最大吸附量/(mg·kg ⁻¹)			
									w/%		Mass ratio		w/(g·kg ⁻¹)		adsorption capacity	
									N	H	C/H	C/N	P	K	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N
Y1	27.16	0.06	9.00	34.30	6.05	8.34	42.93	747.94	1.81	2.60	24.01	16.53	3.75	24.28	1 053.02	911.13
Y2	28.96	0.06	8.32	29.74	3.46	9.27	50.22	734.44	1.58	2.04	31.89	24.82	5.11	193.95	1 483.24	951.40
Y3	234.02	0.16	2.84	25.79	5.45	10.03	62.20	638.39	0.83	1.95	76.07	32.85	4.79	23.76	1 629.52	1 273.87
Y4	7.20	0.01	25.59	37.62	6.46	9.90	34.28	773.98	1.26	1.90	27.59	18.73	2.45	18.71	1 751.63	599.27
Y5	2.88	0.02	20.54	38.90	8.31	9.83	62.25	779.95	0.76	2.42	83.01	25.81	5.25	45.26	1 668.11	526.13
Y6	29.03	0.05	6.22	34.67	13.79	9.99	68.07	725.21	1.10	1.78	63.09	38.53	3.57	16.33	2 040.40	491.33
Y7	2.58	0.02	26.32	41.21	6.83	9.17	36.69	807.07	1.58	2.14	23.30	17.34	2.54	20.48	1 860.03	2 342.27
Y8	4.58	0.04	27.28	38.91	4.73	9.39	60.15	749.00	0.58	1.72	105.65	35.44	4.72	20.44	1 150.33	1 504.53
Y9	5.33	0.04	24.63	37.67	10.48	9.39	65.70	698.22	0.41	1.75	164.89	37.81	5.97	44.13	735.29	1 441.73
Y10	8.27	0.03	23.58	33.81	6.34	9.01	54.07	746.85	1.61	3.99	33.72	13.57	4.15	107.64	1 490.62	153.07
Y11	6.98	0.01	8.23	27.40	7.11	9.72	66.25	769.47	0.56	2.40	117.64	27.64	5.22	48.10	1 468.59	228.13
Y12	71.28	0.02	17.17	25.96	12.71	9.74	63.48	762.74	0.57	2.76	113.38	23.08	5.43	27.21	735.39	419.33
Y13	1.22	0.01	23.46	30.47	7.34	9.56	59.46	786.74	1.51	3.40	39.93	17.53	7.04	84.23	649.35	147.33
Y14	3.05	0.01	14.90	28.58	6.49	9.40	55.99	698.36	0.71	2.24	79.10	25.00	4.52	35.68	1 421.36	260.13
Y15	3.89	0.01	12.17	26.97	12.66	9.47	69.00	661.37	0.65	2.07	106.17	33.59	6.18	45.91	978.79	320.27
Y16	9.42	0.02	23.48	31.30	7.38	9.01	36.38	761.69	1.79	2.41	20.33	15.16	4.82	41.31	1 054.83	153.07
Y17	48.92	0.05	4.64	30.89	9.38	9.85	62.85	780.64	0.64	2.44	98.28	26.05	6.16	76.96	1 157.37	260.13
Y18	43.59	0.05	4.52	27.43	8.28	9.87	72.75	690.66	0.80	2.18	93.01	33.42	3.53	13.40	1 115.44	147.33
Y19	22.62	0.02	4.84	29.61	6.21	8.80	34.86	728.52	1.62	2.27	21.54	15.33	4.57	130.30	609.60	221.20
Y20	222.77	0.12	2.25	26.94	9.61	9.44	62.02	730.92	0.94	2.09	66.31	29.65	7.26	81.13	767.97	525.27
Y21	276.15	0.17	2.41	24.74	11.08	9.33	65.92	686.24	0.81	2.05	82.03	32.22	1.82	11.87	675.32	338.60
Y22	292.60	0.17	2.60	60.50	6.22	8.91	37.81	668.25	1.85	2.91	20.55	13.02	6.18	120.64	1 606.06	160.67
Y23	261.55	0.16	2.41	57.58	9.12	9.54	68.29	666.97	1.05	2.53	65.33	27.03	3.68	17.29	544.01	108.47
Y24	388.77	0.19	1.90	54.24	9.63	9.63	72.15	668.64	0.74	1.99	99.47	36.41	3.48	10.27	1 812.41	111.33
$\bar{x}$	83.45	0.06	12.47	34.80	8.13	9.44	56.82	727.59	1.07	2.33	69.01	25.69	4.68	52.47	1 227.45	566.50
SD	120.02	0.06	9.48	9.96	2.63	0.42	12.77	46.99	0.47	0.53	39.26	8.24	1.41	46.50	453.80	567.50
CV/%	1 007.75	304.42	30.29	89.14	166.03	101.56	109.34	92.98	144.10	73.72	76.01	149.27	67.93	36.08	122.32	93.39

2.2 生物炭品质的相关分析

16 个指标的相关系数矩阵见表 3, 相关系数较高的指标变量多会进入同一个主成分, 从表 3 可以看出, 不同热解温度条件下的不同生物质材料对生物炭品质指标的相关系数, 除了 CEC、pH 及 N、H、P、K 含量和 NH₄⁺-N 最大吸附量与比

表面积、孔容和孔径之间不存在显著相关外, 其他大部分指标的相关系数均达到显著水平, 如: 比表面积与孔容呈显著正相关关系 ($r^2=0.963$), 比表面积与孔径、生物炭得率、碳含量、有机质含量均呈显著正相关关系。

表 3 24 种生物炭 16 个品质指标的相关系数矩阵¹⁾
Table 3 Correlation coefficients matrix of 16 quality indexes of 24 biochars

指标 Index	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	X15	X16
X1	1	0.963**	-0.666**	0.465**	0.146	0.057	0.246*	-0.622**	-0.067	-0.079	0.031	0.212	-0.100	-0.122	-0.020	-0.224
X2		1	-0.690**	0.448**	0.038	0.002	0.215	-0.663**	-0.001	-0.108	-0.015	0.224	-0.125	-0.063	0.007	-0.122
X3			1	-0.060	-0.184	-0.068	-0.319**	0.585**	0.079	0.151	-0.031	-0.257*	0.000	-0.102	0.075	0.408**
X4				1	-0.090	-0.139	-0.135	-0.217	0.223	0.057	-0.157	-0.096	-0.087	-0.053	0.237*	-0.007
X5					1	0.337**	0.550**	-0.165	-0.457**	-0.148	0.486**	0.456**	0.037	-0.419**	-0.181	-0.251*
X6						1	0.561**	-0.065	-0.604**	-0.271*	0.457**	0.522**	0.024	-0.332**	0.259*	-0.091
X7							1	-0.364**	-0.757**	-0.148	0.759**	0.782**	0.121	-0.346**	-0.140	-0.212
X8								1	0.216	0.242*	-0.233*	-0.425**	0.045	0.109	0.078	0.201
X9									1	0.411**	-0.922**	-0.745**	-0.098	0.453**	0.109	-0.019
X10										1	-0.332**	-0.688**	0.178	0.334**	-0.159	-0.405**
X11											1	0.719**	0.188	-0.373**	-0.190	0.043
X12												1	-0.016	-0.418**	0.047	0.131
X13													1	0.416**	-0.256*	-0.152
X14														1	-0.074	-0.146
X15															1	0.220
X16																1

1) X1: 比表面积; X2: 孔容; X3: 孔径; X4: 得率; X5: 阳离子交换量; X6: pH; X7: C 含量; X8: 有机质含量; X9: N 含量; X10: H 含量; X11: C/H 质量比; X12: C/N 质量比; X13: P 含量; X14: K 含量; X15: NH₄⁺-N 最大吸附量; X16: NO₃⁻-N 最大吸附量; “*” 和 “**” 分别表示在 0.05 和 0.01 水平显著相关

1) X1: Specific surface area; X2: Pore volume; X3: Pore diameter; X4: Yield; X5: Cation exchange capacity; X6: pH; X7: C content; X8: Organic material content; X9: N content; X10: H content; X11: C/H mass ratio; X12: C/N mass ratio; X13: P content; X14: K content; X15: Maximum adsorption capacity of NH₄⁺-N; X16: Maximum adsorption capacity of NO₃⁻-N; “*” and “**” indicate significant correlation at 0.05 and 0.01 levels, respectively

2.3 生物炭品质的因子分析

为更准确理解各指标间的信息, 对 16 个数据指标进行因子分析。经隶属函数法转化后, 采用四次方最大旋转法, 获得因子载荷矩阵 (表 4)。由表 4 可以看出, 前 5 个公因子的累计贡献率高达 77.910%, 说明前 5 个公因子可以代表 16 项指标的基本信息。数据经旋转后各因子的载荷值趋于两极化, 说明各因子具有较明显的生物学意义。由表 4 可知, 公因子 1 在 C 含量、C/N 质量比、C/H 质量比、pH 和 CEC 上的荷载较重, 这类因子主要代表的是生物炭的化学性质, 归为化学品质因子, 方差

贡献率为 31.090%; 公因子 2 在比表面积和孔容上荷载较重, 这类因子主要与生物炭的物理性质相关, 归为物理品质因子, 方差贡献率为 19.878%; 公因子 3 主要在 H 原子含量上荷载较重, 这类因子主要与生物炭的活化能量有关, 归为活化能量因子, 方差贡献率为 12.819%; 公因子 4 主要在 K 和 P 含量上荷载较重, 这类因子主要与生物炭的营养品质相关, 归为营养因子, 方差贡献率为 7.479%; 公因子 5 在 NH₄⁺-N 最大吸附能力上荷载较重, 这类因子主要与生物炭的铵态氮吸附相关, 归为铵态氮吸附能力因子, 方差贡献率为 6.643%。

表 4 24 种生物炭 16 个品质指标的因子载荷

Table 4 Factor loadings of 16 quality indexes of 24 biochars

特征指标 Specific index	因子 1 Factor 1	因子 2 Factor 2	因子 3 Factor 3	因子 4 Factor 4	因子 5 Factor 5
比表面积 Surface area	0.051	0.926	0.088	-0.126	0.050
孔容 Pore volume	-0.015	0.951	-0.026	-0.081	0.052
孔径 Pore diameter	-0.149	-0.798	-0.138	-0.158	0.068
得率 Yield	-0.273	0.463	0.047	-0.209	0.350
阳离子交换量 Cation exchange capacity	0.644	0.068	0.299	-0.301	-0.203
酸碱度 pH	0.724	-0.046	0.090	0.002	0.503
C 含量 C content	0.878	0.229	0.130	0.023	-0.046
有机质含量 Organic material content	-0.235	-0.785	0.103	-0.007	0.116
N 含量 N content	-0.915	0.005	0.159	0.019	0.053
H 含量 H content	-0.376	-0.155	0.760	0.131	-0.070
C/N 质量比 C/N ratio	0.877	-0.010	-0.155	0.037	-0.165
C/H 质量比 C/H ratio	0.820	0.255	-0.398	-0.051	0.040
P 含量 P content	0.162	-0.076	0.143	0.802	-0.135
K 含量 K content	-0.455	0.014	0.105	0.779	-0.021
NH ₄ ⁺ -N 最大吸附量 Maximum adsorption capacity of NH ₄ ⁺ -N	-0.082	-0.028	-0.163	-0.108	0.902
NO ₃ ⁻ -N 最大吸附量 Maximum adsorption capacity of NO ₃ ⁻ -N	-0.118	-0.249	-0.824	-0.127	0.084
特征值 Eigenvalue	4.974	3.181	2.051	1.197	1.063
方差贡献率/% Variance contribution	31.090	19.878	12.819	7.479	6.643
累积方差贡献率/% Commulative variance contribution	31.090	50.968	63.787	71.267	77.910

2.4 生物炭品质的评价结果

根据公式 (3) 计算各样品 5 个公因子的得分 (F) 和综合得分 (D_n)(表 5), 根据表 5 的结果, 划分因子得分 $F \geq 1$ 的生物炭品质最优, 因子得分 $0.5 < F \leq 1$ 的为优良, 因子得分 $0 < F \leq 0.5$ 为中等, 因子得分 $F \leq 0$ 为差。

从表 5 可以看出, 按第 1 公因子 (化学品质因子) 排序, 以 Y9、Y15、Y12、Y6 和 Y18 品质最优, 这几个材料的化学品质如 C 含量 (w) 在 63.48%~72.75%, pH 在 9.39~9.90, CEC 在 8.28~13.79 $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$; 其次是 Y11、Y17、Y24 和 Y21 品质优良, 这几个材料的化学品质如 C 含量 (w) 在 62.85%~72.15%、pH 在 9.33~9.85、CEC 在 7.11~11.08 $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

按第 2 公因子 (物理品质因子) 排序, 以 Y24、Y22、Y23、Y3 和 Y21 品质最优, 这几个材料的物理品质如比表面积在 222.77~388.77 $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, 孔容在 0.16~0.19 $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$; 其次是 Y20、Y2、Y18 和 Y19, 这几个材料的物理品质如比表面积在 22.62~

222.77 $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, 孔容在 0.06~0.12 $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

按公因子 3(能量因子) 排序, 以 Y10、Y13、Y12 品质最优, 这几个材料的能量因子 H 含量 (w) 在 2.00%~3.99%; 其次是 Y23、Y17、Y22, 这几个材料的能量因子 H 含量 (w) 在 2.40%~2.53%。

按公因子 4(营养因子) 排序, 以 Y2、Y20、Y17 最优, 这几个材料的 P 含量 (w) 在 5.11~7.04 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, K 含量 (w) 在 79.96~193.95 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 其次是 Y13、Y22、Y19、Y11 和 Y3, 这几个材料的 P 含量 (w) 在 2.45~3.57 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, K 含量 (w) 在 10.27~45.26 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

按公因子 5(铵态氮吸附因子) 排序, 以 Y6、Y4、Y5 和 Y24 品质最优, 这几个材料的铵态氮吸附能力在 1 668.11~2 040.40 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 其次是 Y22、Y7、Y3、Y2 和 Y11, 这几个材料的铵态氮吸附能力在 1 468.59~1 860.03 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

按综合因子得分排序, 以 Y24 品质较优, 其次是 Y6、Y23、Y17、Y18、Y15、Y3、Y20、Y11、Y21、Y12、Y5、Y9 和 Y22, 品质良好。

表 5 24 种生物炭的综合得分及排名
Table 5 Comprehensive scores and ranking of 24 biochars

排名 Ranking	因子1		因子2		因子3		因子4		因子5		综合得分		生物炭 材料编号
	得分 Score (F)	生物炭材料编号 Biochar number	得分 Score (F)	生物炭材料编号 Biochar number	得分 Score (F)	生物炭材料编号 Biochar number	得分 Score (F)	生物炭材料编号 Biochar number	得分 Score (F)	生物炭材料编号 Biochar number	得分 Score (F)	生物炭材料编号 Biochar number	
1	1.30	Y9	2.13	Y24	1.72	Y10	2.28	Y2	1.44	Y6	0.69	Y24	Y24
2	1.24	Y15	2.04	Y22	1.60	Y13	1.31	Y20	1.44	Y4	0.37	Y6	Y6
3	1.03	Y12	1.72	Y23	1.16	Y12	1.02	Y17	1.29	Y5	0.36	Y23	Y23
4	1.02	Y6	1.31	Y3	0.85	Y23	0.92	Y13	1.24	Y24	0.36	Y17	Y17
5	1.00	Y18	1.27	Y21	0.71	Y17	0.89	Y22	0.83	Y22	0.34	Y18	Y18
6	0.87	Y11	0.79	Y20	0.61	Y22	0.75	Y19	0.82	Y7	0.33	Y15	Y15
7	0.75	Y17	0.17	Y2	0.42	Y16	0.66	Y11	0.80	Y3	0.32	Y3	Y3
8	0.70	Y24	0.10	Y18	0.42	Y5	0.52	Y3	0.58	Y2	0.30	Y20	Y20
9	0.55	Y21	0.02	Y19	0.41	Y11	0.45	Y15	0.57	Y11	0.27	Y11	Y11
10	0.49	Y5	-0.03	Y1	0.33	Y18	0.35	Y9	0.36	Y10	0.21	Y21	Y21
11	0.47	Y3	-0.06	Y6	0.26	Y6	0.14	Y5	0.34	Y17	0.21	Y12	Y12
12	0.43	Y8	-0.23	Y15	0.23	Y24	0.12	Y10	0.06	Y14	0.12	Y5	Y5
13	0.37	Y20	-0.33	Y17	0.13	Y15	0.08	Y14	-0.06	Y18	0.05	Y9	Y9
14	0.24	Y14	-0.44	Y14	0.03	Y21	-0.05	Y8	-0.07	Y8	0.04	Y22	Y22
15	0.08	Y23	-0.52	Y9	-0.07	Y14	-0.34	Y12	-0.35	Y13	-0.01	Y14	Y14
16	-0.37	Y13	-0.70	Y10	-0.13	Y19	-0.35	Y18	-0.56	Y23	-0.09	Y13	Y13
17	-0.68	Y4	-0.71	Y11	-0.14	Y20	-0.57	Y16	-0.59	Y16	-0.25	Y10	Y10
18	-1.04	Y2	-0.73	Y8	-0.21	Y4	-0.87	Y6	-0.82	Y20	-0.25	Y2	Y2
19	-1.15	Y10	-0.77	Y16	-0.44	Y1	-0.87	Y24	-0.83	Y12	-0.27	Y8	Y8
20	-1.18	Y16	-0.90	Y12	-1.30	Y2	-0.96	Y1	-0.93	Y15	-0.44	Y4	Y4
21	-1.34	Y7	-0.92	Y5	-1.38	Y3	-1.03	Y23	-1.17	Y9	-0.49	Y19	Y19
22	-1.39	Y19	-0.97	Y4	-1.58	Y9	-1.33	Y4	-1.36	Y1	-0.55	Y16	Y16
23	-1.54	Y1	-1.11	Y13	-1.68	Y7	-1.53	Y21	-1.47	Y19	-0.70	Y1	Y1
24	-1.83	Y22	-1.12	Y7	-1.97	Y8	-1.59	Y7	-1.55	Y21	-0.92	Y7	Y7

3 讨论与结论

不同生物质材料,不同制备条件获得的生物炭品质性状包括化学特性、物理特性、吸附特性等各方面,涉及的性状指标很多,生物炭的许多性状与其品质密切相关,这些性状之间既相互独立,又有一定的相关性,公因子分析法可以在最大程度保留原有信息的情况下,利用数目较少且相互独立的指标去代表数目较多且彼此相关的指标^[27-28]。

本试验通过因子分析发现,对生物炭品质影响最大的因子是化学性质因子,其关键指标为 C 含量、C/N 比、C/H 比、pH 和 CEC,这些指标对生物炭品质的影响贡献率达到 31.090%。Novotny 等^[29]的研究结果也表明,C 含量是生物炭最主要的品质指标。其次是物理性质因子,其关键指标为比表面积和孔容,这些指标对生物炭品质的影响贡献率达到 19.878%,Yang 等^[30]的研究表明,比表面积和孔容与生物炭的吸附能力有非常密切的关系。第 3 是活化能量因子,其关键指标是 H 含量,H 原子被认为与生物炭的活化能量有关^[14, 31]。最后是营养因子和铵态氮吸附能力因子,其对生物炭总的贡献率较小。生物炭的化学品质因子和物理品质因子的权重占到了总权重的 50% 以上,是其他性状指标的 5~10 倍,可见 C 含量、C/N 比、C/H、pH、CEC、比表面积和孔容是影响生物炭品质最关键的因子指标,其次是 H 原子的含量、P 和 K 的含量以及 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 最大吸附量。

根据各关键因子指标对 24 种生物炭材料进行排名后发现,品质最优的生物炭材料,其关键因子所指向的各关键指标的数值在 24 种生物炭材料中亦是最高或次高的,因子分析的结果与试验实测值非常符合,说明因子分析确实可以有助于从大量的性状指标中,找出影响生物炭品质的最关键最重要的指标,可以作为评价生物炭综合品质的方法。

根据因子分析结果的排序发现,如根据生物炭的化学品质因子划分,最优的生物炭材料有 Y9 (BP650)、Y15 (SS650)、Y12 (SL650)、Y6 (BS650) 和 Y18 (CS650),最差的有 Y22 (EB350)、Y1 (BL350)、Y19 (MS350)、Y7 (BP350) 和 Y16 (CS350),可见温度越高越容易得到化学品质优良的生物炭,与 Singh 等^[11]的研究结果相似,本试验发现草本类的材料如香蕉和甘蔗生物炭也具有较好的化学品质。根据物理品质因子划分,最优的生物炭材料有 Y24 (EB650)、Y22 (EB350)、Y23 (EB500)、Y3 (BL650) 和 Y21 (MS650),最差的有 Y7

(BP350)、Y13 (SS350)、Y4 (BS350)、Y5 (BS500) 和 Y12 (SL650),说明木质化程度高的材料比草本类材料有更优越的物理性质,研究结果与 Demirbas 等^[32]的研究结果相似。按综合因子评分划分,最优的生物炭材料有 Y24 (EB650)、Y6 (BS650)、Y17 (CC500) 和 Y18(CC650),最差的有 Y7 (BP350)、Y1 (BL350)、Y16 (CS350)、Y19 (MS350) 和 Y22 (EB350),表明在较高温度下,木质化程度高的材料制备的生物炭的综合性质优于大部分的草本类生物炭,但也发现香蕉茎生物炭 Y6 (BS650) 综合品质也达到优良等级。可见,通过因子分析法对生物炭的品质进行评价后,可以更深入地挖掘更多的信息,揭示温度和生物质原料对生物炭品质的影响,并有助于挑选出品质优良的生物炭材料,以备用于生产实际需要。在本试验中,生物炭的制备温度以 500~650 °C 最好,木质材料生物炭的综合品质较佳,但草本类材料生物炭化学品质更优。

本研究结果表明,因子分析方法可以作为评价生物炭品质的方法。根据因子分析评价方法,确定影响生物炭品质最关键的因子是化学性质因子(C 含量、C/N 比、C/H、pH 和 CEC)、物理性质因子(比表面积和孔容)、活化能量因子(H 原子的含量)、营养因子(P 和 K 的含量)和铵态氮吸附能力因子,24 份生物炭材料的的综合评价排序为 Y24、Y6、Y23、Y17、Y18、Y15、Y3、Y20、Y11、Y21、Y12、Y5、Y9、Y22、Y14、Y13、Y10、Y2、Y8、Y4、Y19、Y16、Y1 和 Y7。

参考文献:

[1] LEHMANN J, JOSEPH S. Biochar for environmental management: Science and technology[M]. London: Earthscan, 2009: 1

[2] CHAN K Y, ZWIETEN L V, MESZARPS I, et al. Agromonic values of greenwastebiochar as a soil amendment[J]. *Aust J Soil Res*, 2007, 45(8): 629-634.

[3] ATHINSON C J, FITZGERALD J D, HIPPS N A. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: A review[J]. *Plant Soil*, 2010, 337(1/2): 1-18.

[4] HIDETOSHI A, BENJAMINK S, HAEFELEM S, et al. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos: 1: Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield[J]. *Field Crops Res*, 2009, 111(1): 81-84.

[5] SHAFIE T S, SALLEH M A M, LAU L H, et al. Effect of pyrolysis temperature on the biochar nutrient and water retention capacity[J]. *J Purity Util React Environ*, 2012, 1(6): 293-307.

[6] WOOLF D, AMONETTE J E, STREET-PERROTT F A, et al. Sustainable biochar to mitigate global climate

- change[J]. *Nat Commun*, 2010, 1(5): 56.
- [7] CASE S D C, MCNAMARA N P, REAY D S, et al. Biochar suppresses N₂O emissions while maintaining N availability in a sandy loam soil[J]. *Soil Biol Biochem*, 2015, 81(1): 178-185.
- [8] EMMA M M. Black is the new green[J]. *Nature*, 2006, 442(93): 624-626.
- [9] ZHANG A, BIAN R, PAN G, et al. Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: A field study of 2 consecutive rice growing cycles[J]. *Field Crops Res*, 2012, 127(127): 153-160.
- [10] WANG B, LEHMANN J, HANLEY K, et al. Ammonium retention by oxidized biochars produced at different pyrolysis temperatures and residence times[J]. *Rsc Advances*, 2016, 6(48): 41907-41913.
- [11] SINGH B, SINGH B P, COWIE AL. Characterisation and evaluation of biochars for their application as a soil amendment[J]. *Aust J Soil Res*, 2010, 48(7): 516-525.
- [12] XIE Z B, LIU Q, YAN P X, et al. Advances and perspectives of biochar research[J]. *Soils*, 2011, 43(6): 857-861.
- [13] CHUN Y, SHENG G, CHIOU C T, et al. Compositions and sorptive properties of crop residue-derived chars[J]. *Environ Sci Technol*, 2004, 38(17): 4649-4655.
- [14] SINGH B P, COWIE A, GILKES R J, et al. The mean turnover time of biochar in soil varies depending on biomass source and pyrolysis temperature[C]// *Proceedings of the 19th World Congress of Soil Science: Soil solutions for a changing world*, Brisbane, Australia, 2010: 1-6.
- [15] XU G, SUN J N, SHAO H B, et al. Biochar had effects on phosphorus sorption and desorption in three soils with differing acidity[J]. *Eco Eng*, 2014, 62(1): 54-60.
- [16] BIEDERMAN L A, HARPOLE W S. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: A meta-analysis[J]. *GCB Bioenergy*, 2014, 6(3): 172-175.
- [17] XIN X, CHEN Z, CHEN B. H/C atomic ratio as a smart linkage between pyrolytic temperatures, aromatic clusters and sorption properties of biochars derived from diverse precursory materials[J]. *Sci Rep*, 2016, 6: 22644.
- [18] ABDULLAH H, WU H. Biochar as a fuel: 1: properties and grindability of biochars produced from the pyrolysis of mallee wood under slow-heating conditions[J]. *Energy Fuel*, 2009, 23(8): 4174-4181.
- [19] NELSON N O, AGUDELO S C, YUAN W Q, et al. Nitrogen and phosphorus availability in biochar-amended soils[J]. *Soil Sci*, 2011, 176(5): 218-226.
- [20] KLOS S S, ZEHETNER F, DELLANTONIO A, et al. Characterization of slow pyrolysis biochars: Effects of feedstocks and pyrolysis temperature on biochar properties[J]. *J Environ Qual*, 2012, 41(4): 990-1000.
- [21] 乔胜英. 土壤理化性质实验指导 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2012: 42-69.
- [22] KAMEYAMA K, MIYAMOTO T, SHIONG T, et al. Influence of sugarcane bagasse-derived biochar application on nitrate leaching in calcareous dark red soil[J]. *J Environ Qual*, 2012, 41(4): 1131-1137.
- [23] DING Y, LIU Y X, WU W X, et al. Evaluation of biochar effects on nitrogen retention and leaching in multi-layered soil columns[J]. *Water Air Soil Pollution*, 2010, 213(1/2/3/4): 47-55.
- [24] SZABÓ N P. Hydraulic conductivity explored by factor analysis of borehole geophysical data[J]. *Hydrogeol J*, 2015, 23(5): 1-14.
- [25] 谭荣波. SPSS 统计分析实用教程 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 192-203.
- [26] 张力. SPSS 在生物统计中的应用 [M]. 厦门: 厦门大学出版社, 2008: 152-163.
- [27] 孟庆峰, 张娟, 李欣伦, 等. 长期施用牛粪对松嫩平原盐渍化土壤质量的影响 [J]. *农业工程学报*, 2017, 33(6): 84-91.
- [28] BASTO M, PEREIRA J M, LEEUW J D, et al. An SPSS R-menu for ordinal factor analysis[J]. *J Stat Softw*, 2012, 46(4): 1-29.
- [29] NOVOTNY E H, MAIA C M B D F, CARVALHO M T D M, et al. Biochar: Pyrogenic carbon for agricultural use - a critical review[J]. *Rev Bras Sci Sol*, 2015, 39(2): 321-344.
- [30] YANG Y, SHENG G. Enhanced pesticide sorption by soils containing particulate matter from crop residue burns[J]. *Environ Sci Technol*, 2003, 37(16): 3635-3639.
- [31] YU L P, YUAN Y, TANG J, et al. Biochar as an electron shuttle for reductive dechlorination of pentachlorophenol by *Geobacter sulfurreducens*[J/OL]. *Sci Rep*, 2015, 5: 16221. [2018-06-22]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4655402/pdf/srep16221.pdf>. doi: 10.1038/srep16221.
- [32] DEMIRBAS A. Effects of temperature and particle size on biochar yield from pyrolysis of agricultural residues[J]. *J Anal Appl Pyrol*, 2004, 72(2): 243-248.

【责任编辑 李晓卉】