

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第2期

Vol.38 No.2

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京大气颗粒物和重金属铅干沉降通量及季节变化	姚利, 刘进, 潘月鹏, 田世丽, 王振波, 韦霞, 张国忠, 周保华, 王跃思 (423)
海西城市群 PM _{2.5} 中重金属元素的污染特征及健康风险评价	陈衍婷, 杜文娇, 陈进生, 徐玲玲 (429)
峨边地区大气 PM _{2.5} 中汞形态污染及其与碳组分的关系	程娜, 钱冠磊, 段炼, 赵梦飞, 修光利 (438)
泰山夏季 PM _{2.5} 中二元羧酸类 SOA 的分子组成及来源	孟静静, 侯战方, 刘晓迪, 邢继钊 (445)
南京北郊大气 BTEX 变化特征和健康风险评估	张玉欣, 安俊琳, 王健宇, 王俊秀, 师远哲, 刘静达, 梁静舒 (453)
长株潭城市群人为源 VOCs 排放清单及其对环境的影响	尤翔宇, 罗达通, 刘湛, 苏艳蓉 (461)
南京城市交通甲烷排放特征	张雪, 胡凝, 刘寿东, 王淑敏, 高韵秋, 赵佳玉, 张圳, 胡勇博, 李旭辉, 张国君 (469)
2003~2014 年东北三省气溶胶光学厚度变化分析	张宸赫, 赵天良, 王富, 徐祥德, 苏航, 程兴宏, 谭成好 (476)
基于增强回归树的城市 PM _{2.5} 日均值变化分析: 以常州为例	葛跃, 王明新, 孙向武, 齐今笛 (485)
重庆市燃煤电厂汞排放特征及排放量	张成, 张雅惠, 王永敏, 王定勇, 徐凤, 杨熹, 何秀清 (495)
几种可能来源对广东某地空气中二噁英的影响	付建平, 韩静磊, 于晓巍, 杨艳艳, 尹文华, 冯桂贤, 张素坤, 黄锦琼, 任明忠 (502)
养鸡场空气中抗性基因和条件致病菌污染特征	高敏, 仇天雷, 秦玉成, 王旭明 (510)
百年来滇池沉积物中不同形态氮分布及埋藏特征	吴亚林, 李帅东, 江俊武, 沈胤胤, 黄昌春, 黄涛, 杨浩, 余艳红, 罗玉 (517)
岩溶地下河补给的地表溪流溶解无机碳及其稳定同位素组成的时空变化	李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶 (527)
三峡水库大宁河支流浮游植物演变过程及其驱动因素	张佳磊, 郑丙辉, 刘德富, 王丽婧, 谭纤茹 (535)
分层型水库夏季水质对极端厄尔尼诺事件的响应	邱晓鹏, 黄廷林, 曾明正, 史建超, 曹占辉 (547)
淹水-落干与季节性温度升高耦合过程对消落带沉积物氮矿化影响	林俊杰, 刘丹, 张帅, 于志国, 何立平, 余顺慧 (555)
湖泊水体中铁(III)-草酸络合物驱动有机磷光解释放磷酸根	蒋永参, 彭云霄, 刘广龙, 周易勇, 朱端卫 (563)
高效磷吸附剂 Mg/Al-LDO 的制备及除磷机制	王卫东, 郝瑞霞, 张晓娴, 万京京, 钟丽燕 (572)
改性沸石湿地脱氮除磷效能及机制	吴鹏, 陆爽君, 徐乐中, 梁奇奇, 沈耀良 (580)
几种水陆交错带植物对底质氮磷释放的抑制作用	姚程, 胡小贞, 卢少勇, 耿荣妹 (589)
模拟三峡库区消落带优势植物根系低分子量有机酸对土壤中铅的解吸动力学	何沅洁, 刘江, 江韬, 黄京晶, 成晴, 陈宏 (600)
TiO ₂ /膨润土复合材料对 Hg ²⁺ 的吸附性能研究	唐兴萍, 周雄, 张金洋, 张成, 王定勇 (608)
氨氮及 H ₂ O ₂ 对溴酸盐和消毒副产物控制的影响	王永京, 杜旭, 金萌, 冯思捷, 杨凯, 张明露, 于建伟 (616)
配水管网细菌活性影响因素	王晓丹, 赵新华 (622)
施氏矿物的化学合成及其对含 Cr(VI) 地下水吸附修复	朱立超, 刘元元, 李伟民, 牟海燕, 王婉玉, 石德智, 王涛 (629)
臭氧-混凝耦合工艺污水深度处理特性及其机制	侯瑞, 金鑫, 金鹏康, 王晓昌 (640)
单级和多级 A/O 工艺中氮的去除效果及 N ₂ O 的产生特性	郭昌梓, 张凤燕, 刘富宇, 朱超, 裴立影 (647)
有机碳源作用下厌氧氨氧化系统的脱氮效能	管勇杰, 于德爽, 李津, 齐泮晴, 魏思佳 (654)
完全混合式曝气系统运行特性及微生物群落结构解析	王硕, 徐巧, 张光生, 李激 (665)
颗粒+絮体污泥 CANON 工艺的启动与 SRT 影响研究	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (672)
游离氨调控对污泥高含固厌氧消化反应器性能的影响	戴晓虎, 何进, 严寒, 李宇, 丁月玲, 董滨, 戴翎翎 (679)
利用卷枝毛霉成球特性高效收获微藻	顾琼, 金文标, 陈远清, 郭仕达, 万超凡 (688)
零价铁对污泥高温厌氧消化过程中四环素抗性基因及第一类整合子的消减影响	魏欣, 薛顺利, 杨帆, 李响, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (697)
沈抚新城不同土地利用类型多环芳烃含量、来源及人体健康风险评价	王静, 刘明丽, 张士超, 鲁垠涛, 姚宏 (703)
河南某市驾校地表灰尘多环芳烃组成、来源与健康风险	陈轶楠, 马建华, 段海静, 魏林恒 (711)
外源微生物对植物根系修复十溴联苯醚污染底泥的强化作用	杨雷峰, 尹华, 彭辉, 李跃鹏 (721)
微生物修复油污土壤过程中氮素的变化及菌群生态效应	叶茜琼, 吴蔓莉, 陈凯丽, 李炜, 袁婧 (728)
沼泽红假单胞菌 PSB06 对辣椒根际微生物群落结构的影响	罗路云, 金德才, 左晖, 张卓, 谭新球, 张德咏, 卢向阳, 刘勇 (735)
再生水补水对河道底泥细菌群落组成与功能的影响	邱琰茗, 王广煊, 黄兴如, 郭逍宇 (743)
矿区不同植被复垦模式对土壤细菌群落结构的影响	贺龙, 李艳琴, 李彬春, 李君剑 (752)
稻田土壤固碳功能微生物群落结构和数量特征	刘琼, 魏晓梦, 吴小红, 袁红朝, 王久荣, 李裕元, 葛体达, 吴金水 (760)
不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤腐殖物质组成及性质的影响	赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 杨艳, 张霞, 王旭东, 张阿凤 (769)
复合菌剂秸秆堆肥对土壤碳氮含量和酶活性的影响	聂文翰, 戚志萍, 冯海玮, 孙玉静, 支月娥, 张进忠, 张丹 (783)
秸秆/生物炭施用对关中地区小麦-玉米轮作系统净增温潜势影响的对比分析	成功, 陈静, 刘晶晶, 张阿凤, 王旭东, 冯浩, 赵英 (792)
1 株氨基高效降解菌的分离鉴定及降解特性	叶杰旭, 林彤晖, 骆煜昊, 陈东之, 陈建孟 (802)
1 株异养反硝化硫细菌的分离鉴定及代谢特性	谭文勃, 马晓丹, 黄聪, 陈川, 王爱杰 (809)
连续施用污泥堆肥土壤剖面中重金属积累迁移特征及对小麦吸收重金属的影响	孙娜, 商和平, 茹淑华, 苏德纯 (815)
施氮对小麦(Ⅵ)吸收、转运和分配的影响	陈玉鹏, 彭琴, 梁东丽, 宋卫卫, 雷凌明, 喻大松 (825)
长期暴露下纳米二氧化钛对典型淡水藻体增殖与生物转化的影响	李金丽, 王振红, 严雅萌, 黄兵, 罗专溪 (832)
不同热解温度制备的玉米芯生物炭对对硝基苯酚的吸附作用	马锋锋, 赵保卫 (837)
《环境科学》征稿简则(526) 《环境科学》征订启事(720) 信息(678, 696, 844)	

不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响：对土壤腐殖物质组成及性质的影响

赵世翔¹, 于小玲¹, 李忠徽¹, 杨艳¹, 张霞¹, 王旭东^{1,2*}, 张阿凤^{1*}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100; 2. 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 杨凌 712100)

摘要: 添加生物质炭在增加土壤固碳的同时, 对土壤腐殖物质组成及性质的影响是人们关注的问题。通过室内培养试验对土壤腐殖物质进行提取和分离, 利用分光光度计测定了土壤胡敏酸(HA)及富里酸(FA)的光学性质, 研究了不同热解温度及施用量下生物质炭对土壤腐殖物质组成及结构的影响。结果表明: 生物质炭中的类腐殖酸(LHS)含量随热解温度升高逐渐降低, 但其结构趋向复杂化。与对照相比, 低温($\leq 400^{\circ}\text{C}$)制备的生物质炭在培养期间增加了土壤 HA 含量, 并随着添加比例的增加而增加, 培养 360 d 后, BC300 和 BC400 处理平均分别增加了 69.93% 和 48.75%, 且差异达到显著水平($P < 0.05$); FA 含量在培养前期(240 d)也有所增加, 但后期减少了土壤 FA 含量, 培养 360 d 后, BC300 和 BC400 处理平均分别减少了 1.35% 和 5.19%, 但差异并不显著($P < 0.05$); 高温($> 400^{\circ}\text{C}$)制备的生物质炭在培养过程中主要降低了土壤 HA 和 FA 含量(仅在培养初期阶段引起土壤 HA、FA 含量的短时间增加), 至培养结束时, BC500 处理平均分别减少了 34.38% 和 44.48%, BC600 处理平均分别减少了 42.84% 和 49.27%, 且差异均达到显著水平($P < 0.05$)。生物质炭输入显著增加了土壤胡敏素(Hu)的含量, 其中以 BC500 处理的增加效应最大。生物质炭输入增加了土壤 H/F 比, 提高了土壤 Hu 的相对含量, 增加了土壤中相对稳定性碳的比例。高温制备($> 400^{\circ}\text{C}$)的生物质炭培养结束时显著降低了土壤 HA 及 FA 的色调系数(ΔE)和 E_4/E_6 值, 使土壤腐殖物质的结构复杂化, 而低温制备的则相反。从提升有机碳的稳定性考虑, 在黄土高原壤土地区, 在 500°C 条件下制备生物质炭, 既能保证最大程度的增加土壤稳定性有机碳库, 又提高了土壤腐殖化程度, 从而提高土壤质量。

关键词: 生物质炭; 腐殖物质; 富里酸; 胡敏酸; 胡敏素; 色调系数

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)02-0769-14 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201604059

Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components: Influence on the Composition and Properties of Humic Substances

ZHAO Shi-xiang¹, YU Xiao-ling¹, LI Zhong-hui¹, YANG Yan¹, ZHANG Xia¹, WANG Xu-dong^{1,2*}, ZHANG A-feng^{1*}

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Key Laboratory Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China)

Abstract: Application of biochar (BC) is an important way to increase soil organic carbon sequestration. At the same time, the effect of BC on fractions and properties of soil humic substances is concerned. A laboratory experiment was conducted to study the influences of BC pyrolyzed at different temperatures on the composition and properties of humic substances. The modified method for the extraction and fractionation of humic substances was adopted in this work. The carbon (C) contents of Humin (Hu), Humic acids (HA), Fulvic acids (FA) were analyzed by the thermal oxidation of $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ and TOC analyzer, and the optical properties of HA and FA were measured by using spectrophotometer. The results showed that the increasing temperature (from 300 to 600°C) decreased like-humic substances (LHS) from $10.93 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ to $0.26 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, while the structure of the LHS tended to be complicated. Compared with control treatment (CK), the addition of BC produced under 400°C increased the contents of HA and FA (after 240 d incubation a lower FA content was found in treatments) and increased as BC application rate increased, after 360 d of incubation, BC300 and BC400 significantly increased by 69.93% and 48.75% for HA ($P < 0.05$), while decreased by 1.35% and 5.19% for FA. Higher contents of HA and FA were found in soil samples amended with BC prepared at above 400°C only during the initial period of 3-10 d of incubation and increased as BC application rate increased, at the end of the incubation, the contents of HA and FA significantly decreased by 34.38%, 44.48% in BC500 treatments and 42.84%, 49.27% in the BC600 treatments ($P < 0.05$). During the incubation, the addition of BC significantly increased the contents of Hu ($P < 0.05$), and the treatments amended with BC500 were the highest. The addition of BC decreased the

收稿日期: 2016-04-08; 修订日期: 2016-08-10

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD14B11); 农业部公益性行业科研专项(201503116); 国家自然科学基金项目(41301305); 西北农林科技大学基本科研业务费专项(2014YB062, 2452015355)

作者简介: 赵世翔(1989~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为生物质炭环境效应研究, E-mail: zhaoshixiang1989@126.com

* 通信作者, E-mail: wangxudong01@126.com; zhangafeng@nwsuaf.edu.cn

relative contents of HA and FA, while increased the relative content of Hu, indicating that the proportion of relatively stable organic carbon in the soil was increased. The ratio of HA/FA (H/F) varied between 0.88 and 2.52 and increased with decreasing pyrolysis temperature and increasing BC application. A significantly lower color tonal coefficient ($\Delta\lg K$) and E_4/E_6 values in treatments amended with BC produced at temperatures above 400°C, indicating that higher temperatures derived BC complicated the structure of soil humic substance, while an opposite trend was observed in treatments amended with BC produced at temperatures under 400°C. Considering the improvement of the stability of organic carbon, when the BC products were applied to the Loutu soil, 500°C was the optimal temperature for preparing apple-derived BC not only because it could significantly increase the content of inert soil organic carbon, but also improve the quality of the soil as a result of enhancing the degree of soil humification.

Key words: biochar; humic substances; fulvic acids; humic acids; humin; color tonal coefficient

土壤腐殖质是有机碳中较为稳定的部分,从化学本质上可将土壤腐殖质分为腐殖物质和非腐殖物质,其中腐殖物质是土壤腐殖质的主体,约占土壤有机质的 60%~80%。腐殖物质根据在酸碱溶液中溶解性分为 3 个组分即胡敏酸(HA,溶于碱而不溶于酸)、富里酸(FA,既溶于酸也溶于碱)和胡敏素(Hu,不溶于酸也不溶于碱)^[1,2]。腐殖物质在土壤中大多与矿质颗粒结合在一起形成有机无机复合胶体,可以增加土壤碳的稳定性^[3]。一般认为,富里酸、胡敏酸在土壤中的存留时间分别可达 0~500 a 和 1 000~2 500 a。

近年来,向土壤中添加生物质炭变为一种农业增汇减排技术,已成为人类应对全球气候变化的一条重要措施^[4]。生物质炭是由植物生物质在完全或部分缺氧情况下经热解炭化产生的一类高度芳香化的固态物质^[5],施用生物质炭不仅可以增加土壤有机碳含量^[6]、改善土壤结构和性质^[7]、促进植物生长^[8]、调节微生物活动^[9],而且在全球碳循环、减少温室气体排放中发挥重要作用^[10,11],农田施用生物质炭作为一种有效的碳封存技术更是得到广泛应用。生物质炭除了稳定的芳香化结构,还包含许多具有异质化学特性的脂肪族和氧化态碳结构物质,输入到土壤中可以为某些微生物提供其生存的碳源及能源^[12],并将生物质炭的脂肪族碳转化为有机碳库中的 HA 等物质^[13]。这说明生物质炭可以在微生物的作用下转变成土壤腐殖物质^[14],Haumaier 等^[15]利用核磁共振波谱法(nuclear magnetic resonance spectroscopy, NMR)发现生物质炭和土壤 HA 的波谱特征具有明显的相似性也证实了生物质炭可能成为土壤腐殖物质中高度芳香化组分的来源。此外,生物质在热解过程中可生成类腐殖酸(LHS)等有机物,可吸附到生物质炭表面,随着生物质炭进入土壤^[16,17],可直接影响土壤腐殖物质的数量及结构。生物质炭因结构、理化性质及本身含有的 LHS 不同而对土壤腐殖物质的组成和结构的影响而有较大的差异。有研究证实,热解温度不仅可

以直接决定生物质炭结构及理化性质^[18,19],还直接影响到其在热解过程中生成的 LHS 的含量及结构^[17]。一般而言,热解温度升高,制备的生物质炭芳香族碳比例越低^[20],其本身含有的 LHS 含量降低,且含有更多的芳香化组分。目前,已有不少学者对不同生物质材料在不同热解条件下生物质炭结构、理化性质及其本身含有的 LHS 展开了一系列研究^[20,21],同时,研究者们也发现在堆肥过程中加入生物质炭可以提高堆肥的腐殖化程度,提高堆肥 HA 及 FA 中芳香碳及羧基碳的比例,最终提高堆肥的品质^[22,23]。但生物质炭输入土壤中是否可以同样增加土壤腐殖化程度、土壤 HA 及 FA 的数量及结构又会如何变化需要深入研究。为此,本研究利用苹果枝条在 300~600°C 下制备生物质炭,通过室内培养试验研究了生物质炭的热解温度及施用量对土壤腐殖物质组成及性质的影响。

1 材料与方法

1.1 生物质炭的制备

在黄土高原南部的礼泉县收集苹果园树枝,洗净、晾干后磨细过 2 mm 筛。在马弗炉中(日本, Yamato FO410C)采用间歇式热裂解工艺,升温速率为 10 °C·min⁻¹,目标温度分别为 300、400、500、600°C,加热前用 N₂ 气驱赶炉内的空气,形成氮气环境,在升温至目标温度后,仍热解 2 h 10 min,热解时间结束后,裂解炉自动停止加热,温度随之下降,降至室温后,取出热裂解产物即得到不同温度下制备的生物质炭,分别标记为 BC300、BC400、BC500 和 BC600。

1.2 试验设计

1.2.1 供试土样

采用杨凌的壤土(土垫旱耕人为土)作为试验土壤,土壤质地为重壤,显微碱性(pH 为 7.85)。土壤有机碳含量为 7.24 g·kg⁻¹,全氮 0.81 g·kg⁻¹,全磷 0.79 g·kg⁻¹,碱解氮 0.61 g·kg⁻¹,速效磷 0.15 g·kg⁻¹,速效钾 0.20 g·kg⁻¹。

1.2.2 试验设计

生物质炭输入土壤后培养试验: 取 1 L 的塑料瓶, 装相当于烘干土重 1.2 kg 的风干土, 添加 4 个温度生物质炭的处理, 生物质炭/土壤质量比分别为 0、0.5%、1%、2% 和 3%, 每个处理设 3 个重复. 土壤与生物质炭充分混匀, 调节水分使达到田间持水量的 75%, 25℃ 下在培养箱中进行密闭培养(培养期间, 塑料瓶敞口放置于培养箱中). 培养 1、3、6、10、20、40、60、90、120、180、240、300 和 360 d 时采集土壤样品, 为了最大限度的减少对土壤样品的扰动, 采集表层土壤 100 g 左右进行分析测定, 同时测定土壤含水量并通过称重法补充剩余土壤样品水分含量使剩余土壤水分含量达到田间持水量的 75% (培养期间每 5 d 补充一次水分, 不足 5 d, 以采样时间补充土壤水分).

1.3 分析方法

生物质炭类腐殖物质和土壤腐殖物质各组分的提取和分离: 采用腐殖物质组成修改法^[24]对生物质炭类腐殖物质和土壤腐殖物质各组分进行提取和分离, 分别称取过 60 目筛的生物质炭和风干土样 5.00 g 于离心管, 加入蒸馏水, 在恒温振荡条件下 (70℃ ± 2℃) 提取 1 h, 离心后弃掉水溶性杂质及非有机质组分, 加入 0.1 mol · L⁻¹ NaOH + Na₄P₂O₄ 混合液, 在 70℃ 恒温振荡条件下提取 1 h, 离心, 土壤样品所得沉淀即为胡敏素 (Hu). 生物质炭样品及土壤样品所得溶液分别用 0.5 mol · L⁻¹ 的 H₂SO₄ 调节 pH 为 1.0 ~ 1.5, 溶液分别为类富里酸 (LHA) 和富里酸 (FA), 沉淀分别为类胡敏酸 (LHA) 和胡敏酸 (HA), 用 0.05 mol · L⁻¹ H₂SO₄ 洗涤沉淀 3 次, 每次用 5 ~ 8 mL, 弃去洗液, 最后用 60℃ 的 0.05 mol · L⁻¹ NaOH 溶液将 LHA 和 HA 沉淀溶解于 50 mL 容量瓶中, 定容. 根据 Thurman 等^[25] 以及 Vergnoux 等^[26] 的方法, 利用离子交换性树脂 (XAD-8) 对 LFA 和 FA 进行提纯. LFA、FA 及 LHA、HA

碳含量采用 TOC 分析仪进行分析测定, Hu 碳含量采用重铬酸钾外加热法进行分析测定. 同时计算 HA、FA 及 Hu 碳的相对含量及土壤 HA/FA (H/F) 比值. 土壤 HA、FA 及 Hu 相对含量分别为 HA、FA 及 Hu 碳含量占 SOC 的比例, 即:

$$HA = HA/SOC \times 100\% \quad (1)$$

$$FA = FA/SOC \times 100\% \quad (2)$$

$$Hu = Hu/SOC \times 100\% \quad (3)$$

式中, HA 指胡敏酸碳含量 (g · kg⁻¹), FA 指富里酸碳含量 (g · kg⁻¹), Hu 指胡敏素碳含量 (g · kg⁻¹), SOC 指土壤有机碳含量 (g · kg⁻¹).

腐殖物质光学性质的测定: 生物质炭 LHA, LFA 和土壤 HA, FA 色调系数 (ΔlgK) 和 E₄/E₆ 值采用 Kumada 等^[27] 方法进行测定及计算:

$$\Delta \lg K = \lg K_{400} - \lg K_{600} \quad (4)$$

$$E_4/E_6 = K_{465}/K_{665} \quad (5)$$

式中, K₄₀₀、K₆₀₀、K₄₆₅ 及 K₆₆₅ 分别为土壤 HA 及 FA 在 400、600、465、665 nm 处光密度值 (采用 723 W 分光光度计进行测定).

1.4 数据处理与分析

所有数据经 Excel 2010 进行预整理, 然后利用 SAS 9.1.2 进行单因素方差分析 (LSD-t 检验, P = 0.05), 不同字母代表差异显著, Origin 软件作图.

2 结果与分析

2.1 热解温度对生物质炭类腐殖物质的影响
热解温度对生物质炭类腐殖酸 (LHS) 数量及结构均有不同程度的影响 (表 1). 温度从 300℃ 增加到 600℃ 时, 生物质炭 LHA、LFA 及 LHA + LFA 含量分别下降了 97.69%、97.48% 以及 97.62%. 光学分析表明, 生物质炭 LHA 的 ΔlgK 及 E₄/E₆ 值均随着温度升高而有下降的趋势, 而 LFA 的 ΔlgK 及 E₄/E₆ 值随着温度表现为先降低后升高的趋势, 500℃ 制备的生物质炭 LFA 的 ΔlgK 及 E₄/E₆ 值最低.

表 1 不同温度制备的生物质炭类腐殖物质含量及其光学性质¹⁾

Table 1 The content and optical properties of humic-like substances extracted from biochars produced at different temperatures

项目	BC300	BC400	BC500	BC600
LHA/g · kg ⁻¹	7.48 ± 0.21a	4.98 ± 0.17b	0.40 ± 0.01c	0.17 ± 0.00c
LFA/g · kg ⁻¹	3.45 ± 0.14a	2.43 ± 0.11b	0.22 ± 0.00c	0.09 ± 0.00c
(LHA + LFA)/g · kg ⁻¹	10.93 ± 0.26a	7.40 ± 0.27b	0.62 ± 0.01c	0.26 ± 0.00c
LHA ΔlgK	0.89 ± 0.01a	0.74 ± 0.03b	0.24 ± 0.01c	0.22 ± 0.00d
LHA E ₄ /E ₆	7.11 ± 0.20a	5.48 ± 0.07b	1.44 ± 0.01c	1.43 ± 0.03d
LFA ΔlgK	1.44 ± 0.05a	1.00 ± 0.02b	0.42 ± 0.01c	0.37 ± 0.01c
LFA E ₄ /E ₆	7.39 ± 0.20a	5.83 ± 0.13b	2.68 ± 0.09c	1.68 ± 0.03c

1) 表中同行不同小写字母表示差异显著 (P < 0.05)

2.2 生物质炭输入对土壤胡敏酸(HA)含量的影响

图1为培养期间土壤HA含量的变化趋势。从中可以看出,随着培养时间的进行,土壤HA的含量均表现出先升高而后降低的趋势,培养40~60 d左右土壤HA含量达到最大值。与对照相比,低温($\leq 400^{\circ}\text{C}$)制备的生物质炭在培养期间显著增加了土壤HA含量,至培养结束时,BC300和BC400处理

HA平均含量比CK增加了69.93%和48.75%;高温($>400^{\circ}\text{C}$)制备的生物质炭输入只有在培养前6~10 d增加了土壤HA含量,至培养结束时,BC500和BC600处理HA平均含量比CK减少了34.38%和44.48%。不同温度制备的生物质炭输入总体上降低了土壤HA的相对含量(表2),且随着添加比例的增加及热解温度的升高而降低。

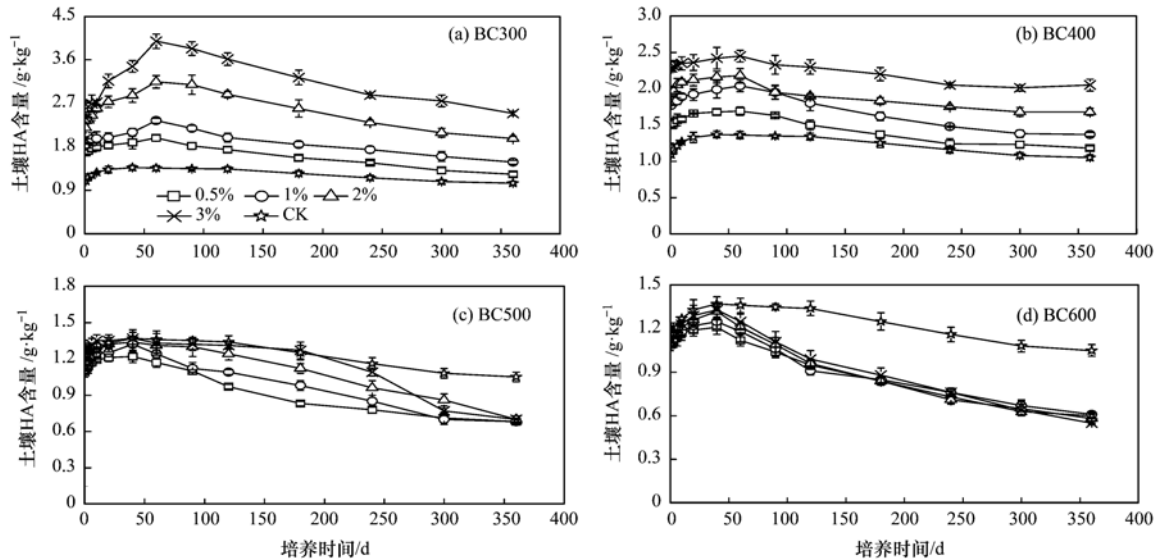


图1 生物质炭输入对土壤胡敏酸(HA)含量的影响

Fig. 1 Effect of biochar addition on the content of soil humic acids (HA)

2.3 生物质炭输入对土壤富里酸(FA)含量的影响

图2为培养期间土壤FA含量的变化趋势。从中可以看出,随着培养时间的进行,土壤FA的含量均表现出先升高而后降低的趋势,在培养20 d左右土壤FA含量达到最大值。与对照相比,低温($\leq 400^{\circ}\text{C}$)制备的生物质炭在培养前240 d增加了土壤FA的含量,且随着添加比例的增加而增加,培

养360 d后,BC300和BC400处理FA平均含量比CK降低了1.35%和5.19%;高温($>400^{\circ}\text{C}$)制备的生物质炭仅在培养前3~6 d增加了土壤FA的含量,培养360 d后,BC500和BC600处理FA平均含量比CK降低了42.84%和49.27%。与HA类似,生物质炭输入降低了土壤FA的相对含量(表3),且随着添加比例的增加及热解温度的升高而降低。

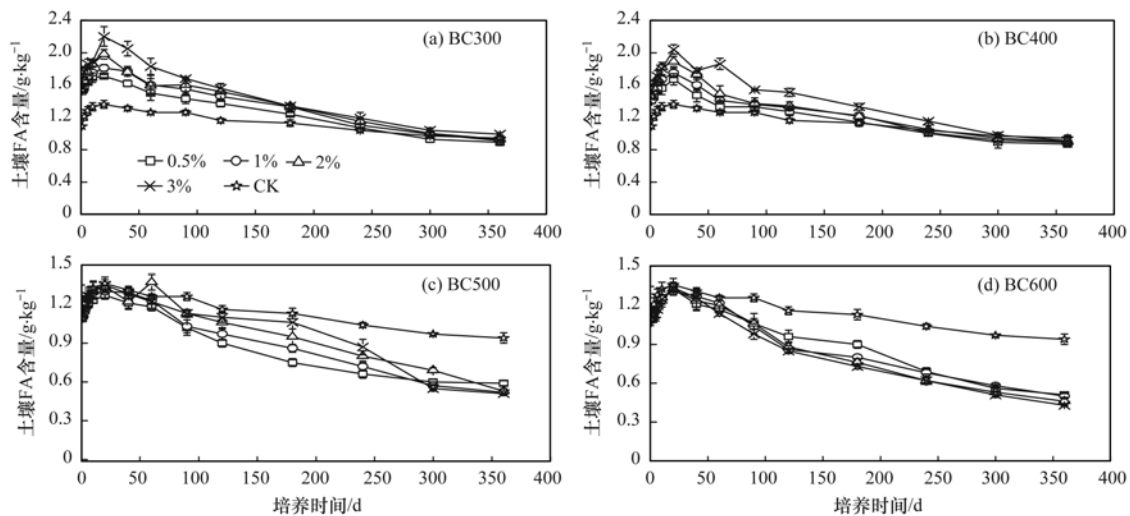


图2 生物质炭输入对土壤富里酸(FA)含量的影响

Fig. 2 Effect of biochar addition on the content of soil fulvic acids (FA)

表 2 生物质炭输入对土壤胡敏酸(HA)相对含量的影响¹⁾/ %
Table 2 Effect of biochar addition on the relative content of humic acids (HA)/ %

添加比例/ %		培养时间/ d						
		1	3	6	10	20	40	60
BC300	0.5	14.85 ± 0.91a	17.12 ± 1.23a	18.90 ± 0.52a	20.32 ± 0.17a	21.52 ± 1.26a	22.64 ± 2.51a	23.90 ± 0.36a
	1	13.25 ± 1.13b	15.46 ± 0.84c	16.77 ± 1.19b	17.64 ± 1.43c	18.41 ± 0.70c	19.71 ± 1.24b	22.21 ± 0.96b
	2	10.26 ± 0.51d	11.87 ± 0.19e	13.01 ± 0.57d	14.19 ± 0.47e	15.42 ± 0.94d	16.34 ± 1.27c	18.03 ± 0.77cd
	3	8.56 ± 0.32ef	10.07 ± 0.79f	10.70 ± 0.38e	11.17 ± 0.36f	13.27 ± 0.38e	14.70 ± 0.94c	17.10 ± 1.60de
BC400	0.5	13.46 ± 0.76b	14.61 ± 0.71bc	15.76 ± 0.95c	16.36 ± 0.34d	17.63 ± 0.30c	18.12 ± 1.19b	18.33 ± 0.47c
	1	11.77 ± 0.66c	12.99 ± 0.30d	13.58 ± 0.29d	14.48 ± 1.07e	15.13 ± 0.97d	15.80 ± 0.85c	16.32 ± 0.84e
	2	8.30 ± 0.48fg	8.95 ± 0.22g	9.67 ± 0.55f	10.17 ± 0.90g	10.56 ± 0.89g	10.87 ± 0.66de	11.05 ± 0.66f
	3	7.60 ± 0.41fgh	8.00 ± 0.40gh	8.25 ± 0.15g	8.55 ± 0.62h	8.72 ± 0.34h	9.07 ± 0.79f	9.22 ± 0.31g
BC500	0.5	9.38 ± 1.03e	10.24 ± 0.84f	10.86 ± 0.34e	11.30 ± 0.21f	11.82 ± 0.36f	11.99 ± 0.61d	11.57 ± 0.50f
	1	7.14 ± 0.34h	7.56 ± 0.24h	8.18 ± 0.20g	8.70 ± 0.44h	8.88 ± 0.37h	9.42 ± 0.58ef	8.95 ± 0.29g
	2	4.69 ± 0.19ij	5.10 ± 0.16ij	5.36 ± 0.41hi	5.61 ± 0.19ij	5.77 ± 0.16ij	5.91 ± 0.15gh	5.81 ± 0.44hi
	3	4.02 ± 0.10j	4.30 ± 0.21j	4.53 ± 0.45ij	4.69 ± 0.34jk	4.78 ± 0.23k	4.86 ± 0.02h	4.77 ± 0.52ij
BC600	0.5	9.83 ± 0.97ed	10.57 ± 0.63f	11.29 ± 0.49e	11.75 ± 0.20f	12.17 ± 0.42f	12.52 ± 0.72d	11.58 ± 0.34f
	1	7.26 ± 0.33gh	7.69 ± 0.19h	8.13 ± 1.08g	8.38 ± 0.21h	8.80 ± 0.34h	9.09 ± 0.46f	8.61 ± 0.77g
	2	5.48 ± 0.35g	5.52 ± 0.11i	5.84 ± 0.35i	6.03 ± 0.31h	6.37 ± 0.09i	6.70 ± 0.14i	6.17 ± 0.17h
	3	4.19 ± 0.21j	4.16 ± 0.27j	4.34 ± 0.25j	4.61 ± 0.23k	4.91 ± 0.30jk	5.10 ± 0.22gh	4.84 ± 0.53i
CK		14.19 ± 0.59ab	16.37 ± 1.64ab	17.67 ± 0.34b	19.16 ± 0.51b	20.51 ± 0.20b	21.54 ± 1.67a	21.32 ± 0.51b

添加比例/ %		培养时间/ d					
		90	120	180	240	300	360
BC300	0.5	22.39 ± 0.83a	21.90 ± 1.56a	20.49 ± 0.82a	20.01 ± 1.12a	18.15 ± 0.72a	17.22 ± 0.33a
	1	21.02 ± 1.18b	19.52 ± 0.32b	18.78 ± 0.74b	18.29 ± 1.18b	17.20 ± 1.57b	16.03 ± 0.30b
	2	17.95 ± 1.67c	16.97 ± 1.03c	15.64 ± 1.44c	14.20 ± 0.67cd	13.05 ± 0.62d	12.38 ± 0.39d
	3	16.57 ± 0.12d	15.81 ± 0.55d	14.48 ± 0.86cd	13.13 ± 0.48de	12.76 ± 0.62de	11.67 ± 1.05d
BC400	0.5	17.86 ± 0.35c	16.70 ± 1.38c	15.53 ± 0.22c	14.48 ± 1.74c	14.49 ± 0.41c	13.90 ± 0.43c
	1	15.84 ± 0.50d	14.84 ± 1.41d	13.67 ± 0.90d	12.77 ± 0.51e	12.08 ± 0.64e	12.07 ± 0.64d
	2	9.99 ± 0.65ef	9.87 ± 0.25e	9.78 ± 0.49e	9.53 ± 0.32f	9.28 ± 0.17f	9.33 ± 0.20
	3	8.86 ± 0.06fg	8.81 ± 0.04ef	8.63 ± 0.17ef	8.21 ± 0.16g	8.14 ± 0.51g	8.34 ± 0.47f
BC500	0.5	10.93 ± 0.20e	9.75 ± 0.56e	8.51 ± 0.35ef	8.03 ± 0.26g	7.44 ± 0.50gh	7.12 ± 0.39g
	1	8.15 ± 0.77g	8.00 ± 0.51fg	7.34 ± 0.59fg	6.40 ± 0.48h	5.37 ± 0.13i	5.23 ± 0.36h
	2	5.79 ± 0.45h	5.58 ± 0.31hi	5.12 ± 0.30hi	4.47 ± 0.40i	4.04 ± 0.06j	3.32 ± 0.04i
	3	4.78 ± 0.35hi	4.79 ± 0.30ij	4.72 ± 0.15ij	4.14 ± 0.17ij	2.94 ± 0.06k	2.72 ± 0.05ij
BC600	0.5	10.82 ± 0.31e	9.94 ± 0.21e	8.91 ± 0.29e	7.82 ± 0.39g	6.81 ± 0.47h	6.49 ± 0.38g
	1	7.76 ± 0.27g	6.69 ± 0.24gh	6.33 ± 0.15gh	5.71 ± 0.27h	5.09 ± 0.28i	4.65 ± 0.37h
	2	5.60 ± 0.39h	4.96 ± 0.20ij	4.39 ± 0.33ij	3.72 ± 0.19ij	3.45 ± 0.31jk	3.08 ± 0.05i
	3	4.31 ± 0.41i	3.88 ± 0.42j	3.48 ± 0.02j	3.03 ± 0.11j	2.59 ± 0.15k	2.23 ± 0.05j
CK		21.39 ± 1.32ab	21.45 ± 1.53a	20.37 ± 2.10a	19.15 ± 1.00ab	18.04 ± 0.13ab	17.73 ± 0.56a

1) 表中同列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同

2.4 生物质炭输入对土壤胡敏素(Hu)含量的影响
生物质炭输入对土壤 Hu 的影响如图 3 所示。从中可以看出,生物质炭输入可以显著增加土壤 Hu 的含量,尤其是 BC500 处理,且随着生物质炭添加量的增加而显著增加。从培养时间来看,土壤 Hu 随着培养时间的进行均表现出先降低而后升高的趋势,在培养 60 d 左右土壤 Hu 含量最低。培养 360 d 后,BC300、BC400、BC500 和 BC600 其 Hu 含量平均比 CK ($2.40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 增加了 220.83%、338.30%、470.76% 和 411.45%。与 HA 及 FA 不同,生物质炭输入显著增加了土壤 Hu 的相对含量

(表 4),且随着热解温度和添加比例的增加而增加,并且随着培养时间的进行,土壤 Hu 的相对含量呈现不断上升的趋势。

2.5 生物质炭输入对土壤 H/F 的影响

土壤 H/F 为土壤 HA 与 FA 的比值,可在一定程度上反映土壤有机质腐殖化程度。总体而言,随着培养时间的进行,土壤 H/F 表现出先降低而后波动升高的趋势,在培养 20 d 左右土壤 H/F 降至最低值(表 5)。与 CK 相比,低温 ($\leq 400^\circ\text{C}$) 制备的生物质炭在整个培养周期内均显著地增加了土壤 H/F 比,随着添加比例的增加表现为增加的趋势,至培养

表 3 生物质炭输入对土壤富里酸 (FA) 相对含量的影响/%

Table 3 Effect of biochar addition on the relative content of fulvic acids (FA)/%

添加比例/%		培养时间/d						
		1	3	6	10	20	40	60
BC300	0.5	13.40 ± 0.37b	15.72 ± 1.02b	17.51 ± 0.22b	19.10 ± 0.69b	20.04 ± 1.27a	19.39 ± 1.16b	18.07 ± 0.72b
	1	11.14 ± 0.25d	13.27 ± 1.53c	14.62 ± 0.74c	15.66 ± 1.10c	16.77 ± 0.56b	16.62 ± 0.80c	15.21 ± 1.82c
	2	7.18 ± 0.28f	8.36 ± 0.25e	9.33 ± 0.89e	10.22 ± 0.55f	11.17 ± 0.53e	10.02 ± 0.29e	9.14 ± 0.83e
	3	5.62 ± 0.07gh	6.75 ± 0.47gh	7.40 ± 0.25gh	7.76 ± 0.28h	9.26 ± 0.55f	8.69 ± 0.08f	7.86 ± 0.90efg
BC400	0.5	12.57 ± 0.72c	13.97 ± 0.70c	15.50 ± 0.46c	16.20 ± 0.78c	17.75 ± 0.95b	15.80 ± 0.32c	14.42 ± 1.32c
	1	9.39 ± 0.82e	10.79 ± 0.73d	11.55 ± 0.65d	12.75 ± 0.21d	13.77 ± 0.90c	12.69 ± 0.61d	11.32 ± 0.34d
	2	6.22 ± 0.15g	7.11 ± 0.30fg	7.91 ± 0.26fg	8.85 ± 0.69g	9.41 ± 0.75f	8.72 ± 0.41f	7.56 ± 0.69fg
	3	4.97 ± 0.19ij	5.64 ± 0.18h	6.08 ± 0.31h	6.56 ± 0.37i	7.55 ± 0.13g	6.64 ± 0.24g	7.00 ± 0.43gh
BC500	0.5	9.26 ± 0.74e	10.33 ± 0.46d	11.12 ± 0.18d	11.71 ± 0.16e	12.37 ± 0.40d	11.91 ± 0.79d	11.72 ± 0.90d
	1	6.92 ± 0.23f	7.56 ± 0.28efg	8.36 ± 0.49f	8.96 ± 0.53g	9.24 ± 0.19f	9.22 ± 0.12ef	8.86 ± 0.33ef
	2	4.35 ± 0.40jk	4.88 ± 0.32hi	5.27 ± 0.21hu	5.56 ± 0.12jk	5.84 ± 0.06hi	5.36 ± 0.13hi	6.05 ± 0.30h
	3	3.58 ± 0.30l	3.96 ± 0.32i	4.23 ± 0.08j	4.55 ± 0.08l	4.78 ± 0.22i	4.56 ± 0.24i	4.36 ± 0.20i
BC600	0.5	9.88 ± 0.13e	10.93 ± 0.60d	11.88 ± 0.70d	12.65 ± 0.13d	13.59 ± 0.57c	12.46 ± 0.24d	12.10 ± 0.52d
	1	7.12 ± 0.16f	7.75 ± 0.15ef	8.47 ± 0.87ef	8.95 ± 0.03g	9.47 ± 0.36f	9.20 ± 0.43ef	8.87 ± 0.74ef
	2	5.15 ± 0.16hi	5.38 ± 0.24h	5.83 ± 0.13h	6.28 ± 0.43ij	6.75 ± 0.36gh	6.34 ± 0.57gh	6.12 ± 0.27h
	3	3.84 ± 0.04lk	4.02 ± 0.26i	4.33 ± 0.44ij	4.70 ± 0.35kl	5.11 ± 0.13i	4.83 ± 0.45i	4.39 ± 0.37i
CK		14.18 ± 0.37a	16.92 ± 0.19a	18.71 ± 1.25a	20.07 ± 1.07a	21.03 ± 1.62a	20.58 ± 2.04a	19.91 ± 1.36a

添加比例/%		培养时间/d					
		90	120	180	240	300	360
BC300	0.5	17.57 ± 0.63b	17.24 ± 1.04b	16.14 ± 0.54b	14.48 ± 0.59b	12.97 ± 0.06b	12.45 ± 0.84b
	1	14.97 ± 1.00c	14.39 ± 0.81c	13.56 ± 0.56c	11.60 ± 1.09c	10.65 ± 0.77c	9.85 ± 0.23c
	2	9.29 ± 0.74e	8.93 ± 0.21e	8.07 ± 0.34e	7.06 ± 0.10e	6.29 ± 0.45e	5.82 ± 0.28e
	3	7.29 ± 0.35f	6.86 ± 0.18f	6.00 ± 0.14fg	5.44 ± 0.57f	4.82 ± 0.16fg	4.64 ± 0.40gh
BC400	0.5	14.56 ± 0.58c	14.11 ± 1.06c	12.94 ± 0.60c	11.63 ± 1.09c	10.39 ± 0.59c	10.30 ± 0.81c
	1	11.05 ± 0.84d	10.81 ± 0.36d	10.28 ± 0.46d	8.74 ± 0.15d	8.07 ± 0.35d	7.85 ± 0.25d
	2	7.03 ± 0.08f	6.95 ± 0.23f	6.47 ± 0.44f	5.75 ± 0.33f	5.20 ± 0.03f	5.02 ± 0.54fg
	3	5.84 ± 0.27g	5.80 ± 0.41g	5.22 ± 0.15gh	4.60 ± 0.19g	3.99 ± 0.18h	3.68 ± 0.19i
BC500	0.5	10.19 ± 0.33de	9.02 ± 0.14e	7.67 ± 0.38e	6.80 ± 0.41e	6.25 ± 0.15e	6.18 ± 0.24e
	1	7.49 ± 0.13f	7.13 ± 0.19f	6.42 ± 0.42f	5.42 ± 0.21f	4.36 ± 0.35gh	3.98 ± 0.21hi
	2	5.04 ± 0.29gh	4.79 ± 0.08h	4.36 ± 0.26hi	3.74 ± 0.27h	3.25 ± 0.29i	2.53 ± 0.03j
	3	4.11 ± 0.29hi	4.02 ± 0.20hi	3.96 ± 0.39i	3.28 ± 0.02h	2.13 ± 0.09j	1.95 ± 0.09jk
BC600	0.5	11.03 ± 0.96d	10.05 ± 0.65d	9.56 ± 0.62d	7.45 ± 0.43e	6.07 ± 0.03e	5.57 ± 0.23ef
	1	7.59 ± 0.36f	6.31 ± 0.49fg	5.92 ± 0.25fg	5.09 ± 0.19fg	4.35 ± 0.18gh	3.78 ± 0.18i
	2	5.43 ± 0.32g	4.54 ± 0.06h	3.96 ± 0.35i	3.30 ± 0.19h	2.82 ± 0.19i	2.46 ± 0.16jk
	3	3.79 ± 0.03i	3.32 ± 0.09i	2.88 ± 0.21j	2.48 ± 0.14i	2.07 ± 0.05j	1.76 ± 0.08k
CK		20.04 ± 1.67a	18.55 ± 0.75a	18.40 ± 1.40a	17.31 ± 0.27a	16.30 ± 0.70a	15.83 ± 1.03a

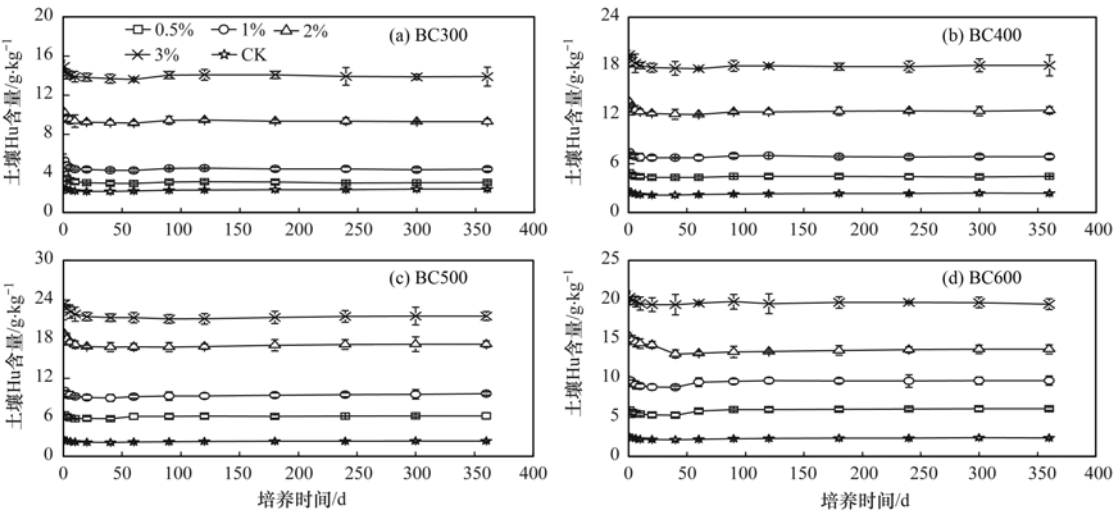


图 3 生物质炭输入对土壤胡敏素 (Hu) 含量的影响

Fig. 3 Effect of biochar addition on the content of soil humin (Hu)

表 4 生物质炭输入对土壤胡敏素 (Hu) 相对含量的影响/%
Table 4 Effect of biochar addition on the relative content of humin (Hu)/%

添加比例/%		培养时间/d						
		1	3	6	10	20	40	60
BC300	0.5	34.41 ± 0.29hi	35.11 ± 4.05h	35.27 ± 1.53h	35.61 ± 0.68fg	35.91 ± 3.12hi	35.83 ± 0.49hi	36.01 ± 0.52h
	1	38.45 ± 2.63h	39.05 ± 4.01gh	39.23 ± 1.65gh	39.68 ± 1.46f	40.83 ± 1.36h	40.92 ± 2.53gh	40.98 ± 2.97g
	2	48.05 ± 0.59f	48.67 ± 1.69ef	50.31 ± 1.99ef	51.39 ± 4.55de	52.18 ± 2.08f	52.46 ± 0.40ef	52.62 ± 1.21e
	3	53.43 ± 0.69de	54.23 ± 0.84cd	56.13 ± 3.57de	57.06 ± 3.31cd	58.21 ± 3.26de	58.23 ± 0.82cde	58.48 ± 4.42cd
BC400	0.5	43.80 ± 0.76g	44.18 ± 1.21fg	44.65 ± 1.81fg	45.75 ± 1.89e	46.09 ± 2.67g	46.61 ± 3.10fg	46.96 ± 0.35f
	1	49.49 ± 3.51ef	49.85 ± 1.66de	51.16 ± 1.30ef	52.22 ± 6.08d	52.89 ± 2.75f	53.53 ± 0.81e	53.90 ± 2.94de
	2	58.35 ± 2.05c	59.32 ± 1.57bc	59.55 ± 4.05cd	60.20 ± 3.47bc	60.45 ± 1.96cd	60.74 ± 4.35bcd	61.18 ± 1.91c
	3	64.31 ± 2.53b	64.50 ± 4.74b	65.19 ± 1.54bc	65.62 ± 1.41b	65.86 ± 3.90b	66.26 ± 4.79b	66.42 ± 1.62b
BC500	0.5	54.28 ± 5.49cd	54.47 ± 4.39cd	55.04 ± 2.01de	55.24 ± 2.43cd	56.86 ± 3.93def	57.19 ± 1.70de	60.79 ± 0.65c
	1	62.89 ± 2.64b	63.38 ± 3.68b	64.09 ± 5.00c	64.34 ± 3.80b	64.41 ± 4.93bc	64.37 ± 4.07b	66.20 ± 4.00b
	2	72.98 ± 3.23a	73.11 ± 3.03a	73.21 ± 1.62a	73.29 ± 1.74a	73.48 ± 2.88a	73.80 ± 4.84a	74.31 ± 3.06a
	3	74.98 ± 2.79a	75.54 ± 3.50a	75.98 ± 8.75a	75.75 ± 4.26a	75.83 ± 4.19a	75.92 ± 2.84a	76.31 ± 0.68a
BC600	0.5	53.84 ± 4.16d	53.77 ± 1.97de	54.12 ± 2.29de	54.46 ± 2.00cd	54.48 ± 2.90ef	54.71 ± 1.43de	60.27 ± 3.42c
	1	63.66 ± 0.35b	63.87 ± 4.14b	64.23 ± 7.93c	64.03 ± 3.33b	64.14 ± 4.12bc	64.26 ± 1.19bc	69.26 ± 5.95b
	2	71.01 ± 1.51a	71.51 ± 2.23a	71.75 ± 4.45ab	71.94 ± 3.20a	72.16 ± 1.65a	66.70 ± 3.30b	67.32 ± 1.48b
	3	71.12 ± 0.63a	72.16 ± 4.75a	73.38 ± 5.92a	73.65 ± 7.54a	73.87 ± 2.65a	74.67 ± 8.63a	75.74 ± 5.12a
CK		32.51 ± 1.51i	34.04 ± 0.81h	34.07 ± 1.50h	33.63 ± 0.90g	33.78 ± 1.83i	34.22 ± 5.52i	34.90 ± 0.82h

添加比例/%		培养时间/d						
		90	120	180	240	300	360	
BC300	0.5	38.67 ± 2.02mn	39.67 ± 0.02jk	40.83 ± 1.56ij	41.19 ± 0.78gh	42.45 ± 2.76gh	43.19 ± 3.00i	
	1	43.59 ± 2.21lm	44.66 ± 2.10ij	45.35 ± 0.97hi	46.87 ± 3.64fg	47.30 ± 0.92fg	48.12 ± 2.28hi	
	2	54.94 ± 2.21jk	55.74 ± 2.55h	56.38 ± 2.28fg	57.76 ± 3.02e	58.34 ± 2.25e	58.56 ± 0.88fg	
	3	60.91 ± 2.37hij	61.85 ± 2.09fg	63.12 ± 2.63de	63.99 ± 6.91cd	64.49 ± 1.60cd	65.44 ± 10.40ef	
BC400	0.5	48.80 ± 0.72kl	49.42 ± 3.57i	50.73 ± 3.37gh	51.36 ± 6.18f	51.74 ± 3.26f	52.82 ± 2.32gh	
	1	56.61 ± 0.34ij	57.63 ± 2.41gh	58.05 ± 3.11ef	59.08 ± 2.18de	60.27 ± 2.84de	60.64 ± 0.53fg	
	2	63.51 ± 2.15efgh	64.19 ± 1.11def	66.32 ± 2.54bcd	68.10 ± 1.50bc	68.89 ± 0.60bc	69.88 ± 0.95de	
	3	68.59 ± 5.69def	69.18 ± 2.96cd	70.18 ± 1.67bc	71.66 ± 5.13b	73.30 ± 6.31b	73.65 ± 7.80bcde	
BC500	0.5	61.53 ± 4.80ghi	62.04 ± 1.78fg	62.77 ± 2.49de	64.09 ± 1.11cd	65.32 ± 2.15cd	65.76 ± 6.72def	
	1	67.58 ± 8.04defg	68.17 ± 4.91cde	70.11 ± 5.16bc	71.56 ± 2.69b	72.67 ± 2.86b	73.93 ± 3.39bcd	
	2	74.91 ± 5.75abc	75.82 ± 1.19ab	78.14 ± 3.27a	80.09 ± 5.24a	81.12 ± 0.70a	81.61 ± 5.43ab	
	3	76.51 ± 5.94ab	77.29 ± 6.12a	79.51 ± 3.58a	81.55 ± 2.25a	82.59 ± 5.12a	83.07 ± 4.83a	
BC600	0.5	62.44 ± 1.61fghi	62.98 ± 2.52efg	64.31 ± 5.23cd	65.32 ± 3.62c	65.85 ± 1.48c	66.26 ± 4.38def	
	1	70.36 ± 0.50bcd	71.54 ± 1.80bc	72.09 ± 5.34b	72.56 ± 2.63b	73.27 ± 5.32b	73.77 ± 8.61bcd	
	2	68.76 ± 4.63cde	69.38 ± 2.20cde	71.02 ± 7.08b	71.96 ± 2.77b	72.73 ± 3.04b	72.91 ± 3.07cde	
	3	76.71 ± 1.19a	76.48 ± 8.04ab	78.02 ± 2.82a	78.97 ± 2.68a	79.54 ± 3.64a	78.99 ± 4.33abc	
CK		36.42 ± 1.83n	37.26 ± 1.62k	38.48 ± 0.67j	38.93 ± 1.64h	40.35 ± 3.36h	40.27 ± 1.43i	

结束时,BC300 和 BC400 处理土壤 H/F 相对对照而言增加了 70.53% 和 56.43%。高温 (>400℃) 制备的生物质炭在培养前期增加了土壤 H/F,随着培养时间的进行,土壤 H/F 逐渐降低,并逐渐低于 CK,在培养 20 d 后,土壤 H/F 又逐渐升高,至培养结束时,土壤 H/F 已经高于对照,BC500 和 BC600 处理土壤 H/F 相对对照而言增加了 15.09% 和 9.54%。总体而言,生物质炭输入增加了土壤 H/F 比,提高了土壤有机碳的腐殖化程度。

2.6 生物质炭输入对胡敏酸结构的影响

图 4 和表 6 分别为土壤 HA 的 ΔlgK 和 E₄/E₆ 值,从中可以看出,随着培养时间的进行,土壤 HA 的 ΔlgK 和 E₄/E₆ 值均表现出先升高而后波动降低的趋势,在培养第 40 ~ 60 d 左右土壤 HA 的 ΔlgK 和 E₄/E₆ 值达到峰值,之后表现为波动下降的趋势。BC300 和 BC400 处理在培养期间增加了土壤 HA 的 ΔlgK 和 E₄/E₆ 值,且随着添加比例的增加而增加;高温 (>400℃) 制备的生物质炭输入培养后期降低了 HA 的 ΔlgK 和 E₄/E₆ 值,且不同温度之间表现为 BC500 > BC600。

表 5 生物质炭输入对土壤 HA/FA (H/F) 影响

Table 5 Effect of biochar addition on the ratio of HA/FA (H/F)

添加比例/%		培养时间/d						
		1	3	6	10	20	40	60
BC300	0.5	1.11 ± 0.06efg	1.09 ± 0.03cd	1.08 ± 0.02cd	1.06 ± 0.03de	1.07 ± 0.05bc	1.17 ± 0.07cde	1.32 ± 0.04def
	1	1.19 ± 0.09de	1.17 ± 0.09bc	1.15 ± 0.13bc	1.13 ± 0.05cd	1.10 ± 0.08b	1.19 ± 0.08cd	1.47 ± 0.14c
	2	1.43 ± 0.08ab	1.42 ± 0.02a	1.40 ± 0.12a	1.39 ± 0.06a	1.38 ± 0.02a	1.63 ± 0.10a	1.98 ± 0.20b
	3	1.52 ± 0.07a	1.49 ± 0.05a	1.45 ± 0.06a	1.44 ± 0.03a	1.44 ± 0.06a	1.69 ± 0.11a	2.18 ± 0.04a
BC400	0.5	1.07 ± 0.06efg	1.05 ± 0.07de	1.02 ± 0.09de	1.01 ± 0.07efg	1.00 ± 0.05cd	1.15 ± 0.07cde	1.28 ± 0.11f
	1	1.26 ± 0.04cd	1.21 ± 0.06b	1.18 ± 0.04bc	1.13 ± 0.07cd	1.10 ± 0.08b	1.25 ± 0.10bc	1.44 ± 0.08cde
	2	1.34 ± 0.11bc	1.26 ± 0.05b	1.22 ± 0.04b	1.15 ± 0.04c	1.12 ± 0.03b	1.25 ± 0.06bc	1.47 ± 0.12cd
	3	1.53 ± 0.05a	1.42 ± 0.06a	1.36 ± 0.05a	1.30 ± 0.10b	1.16 ± 0.06b	1.36 ± 0.07b	1.32 ± 0.07ef
BC500	0.5	1.01 ± 0.05fg	0.99 ± 0.08e	0.98 ± 0.03de	0.97 ± 0.00fgh	0.96 ± 0.04de	1.01 ± 0.03f	0.99 ± 0.04gh
	1	1.03 ± 0.04fg	1.00 ± 0.02de	0.98 ± 0.08de	0.97 ± 0.01fgh	0.96 ± 0.05de	1.02 ± 0.08f	1.01 ± 0.01gh
	2	1.08 ± 0.12efg	1.05 ± 0.09de	1.02 ± 0.04de	1.01 ± 0.01efg	0.99 ± 0.03cde	1.10 ± 0.04def	0.96 ± 0.07gh
	3	1.13 ± 0.08ef	1.09 ± 0.05cd	1.07 ± 0.09cd	1.03 ± 0.08ef	1.00 ± 0.04cd	1.07 ± 0.06def	1.09 ± 0.10gh
BC600	0.5	0.99 ± 0.09g	0.97 ± 0.05e	0.95 ± 0.02e	0.93 ± 0.01h	0.90 ± 0.07e	1.00 ± 0.05f	0.96 ± 0.06h
	1	1.02 ± 0.04fg	0.99 ± 0.01e	0.96 ± 0.04e	0.94 ± 0.03gh	0.93 ± 0.04de	0.99 ± 0.05f	0.97 ± 0.02gh
	2	1.06 ± 0.05fg	1.03 ± 0.05de	1.00 ± 0.07de	0.96 ± 0.02fgh	0.94 ± 0.04de	1.06 ± 0.11ef	1.01 ± 0.07gh
	3	1.09 ± 0.05efg	1.04 ± 0.02de	1.01 ± 0.04de	0.98 ± 0.04fgh	0.96 ± 0.07de	1.06 ± 0.10ef	1.10 ± 0.03g
CK		1.00 ± 0.02g	0.97 ± 0.09e	0.95 ± 0.06e	0.96 ± 0.03fgh	0.98 ± 0.09cde	1.05 ± 0.06ef	1.07 ± 0.05gh

添加比例/%		培养时间/d					
		90	120	180	240	300	360
BC300	0.5	1.28 ± 0.09de	1.27 ± 0.07ef	1.27 ± 0.07efg	1.38 ± 0.05fg	1.40 ± 0.06ef	1.39 ± 0.09e
	1	1.40 ± 0.02cd	1.36 ± 0.06de	1.39 ± 0.06e	1.58 ± 0.17de	1.61 ± 0.06d	1.63 ± 0.07d
	2	1.93 ± 0.03b	1.90 ± 0.16b	1.94 ± 0.10b	2.01 ± 0.09b	2.08 ± 0.18b	2.13 ± 0.04b
	3	2.28 ± 0.09a	2.31 ± 0.04a	2.42 ± 0.17a	2.43 ± 0.19a	2.65 ± 0.18a	2.52 ± 0.10a
BC400	0.5	1.23 ± 0.06ef	1.18 ± 0.01fgh	1.20 ± 0.07gh	1.24 ± 0.04gh	1.40 ± 0.10ef	1.35 ± 0.08ef
	1	1.44 ± 0.16c	1.37 ± 0.09de	1.33 ± 0.03ef	1.46 ± 0.03ef	1.50 ± 0.02de	1.54 ± 0.05d
	2	1.42 ± 0.09c	1.42 ± 0.07cd	1.51 ± 0.03d	1.66 ± 0.10cd	1.78 ± 0.04c	1.87 ± 0.19c
	3	1.52 ± 0.08c	1.53 ± 0.10c	1.65 ± 0.02c	1.78 ± 0.04c	2.04 ± 0.06b	2.27 ± 0.02b
BC500	0.5	1.07 ± 0.05ghi	1.08 ± 0.06ghi	1.11 ± 0.02hi	1.18 ± 0.09hi	1.19 ± 0.11g	1.15 ± 0.09gh
	1	1.09 ± 0.10ghi	1.12 ± 0.05gh	1.14 ± 0.02ghu	1.18 ± 0.12hi	1.24 ± 0.10fg	1.31 ± 0.03ef
	2	1.15 ± 0.08efgh	1.17 ± 0.05fgh	1.18 ± 0.07ghi	1.19 ± 0.03hi	1.25 ± 0.11fg	1.32 ± 0.03ef
	3	1.17 ± 0.02efg	1.19 ± 0.07fg	1.20 ± 0.13gh	1.26 ± 0.05gh	1.39 ± 0.08ef	1.39 ± 0.06e
BC600	0.5	0.98 ± 0.06i	0.99 ± 0.08i	0.93 ± 0.04j	1.05 ± 0.09i	1.12 ± 0.08g	1.16 ± 0.03gh
	1	1.02 ± 0.07hi	1.06 ± 0.06hi	1.07 ± 0.02i	1.12 ± 0.06hi	1.17 ± 0.05g	1.23 ± 0.05fgh
	2	1.03 ± 0.09hi	1.09 ± 0.05ghi	1.11 ± 0.05hi	1.13 ± 0.04hi	1.22 ± 0.03g	1.26 ± 0.10efgh
	3	1.14 ± 0.12fgh	1.16 ± 0.10fgh	1.21 ± 0.09fgh	1.23 ± 0.10gh	1.25 ± 0.08fg	1.27 ± 0.04efg
CK		1.07 ± 0.03ghi	1.16 ± 0.04fgh	1.11 ± 0.03hi	1.11 ± 0.07hi	1.11 ± 0.05g	1.12 ± 0.09h

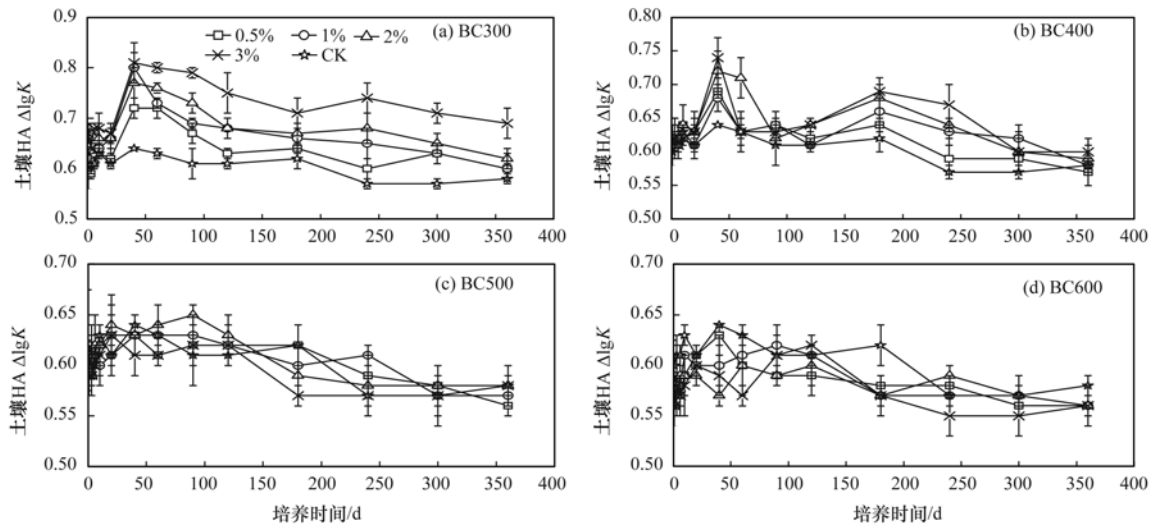


图 4 生物质炭输入对土壤胡敏酸 (HA) 色调系数 (ΔlgK) 的影响

Fig. 4 Effect of biochar addition on the color tonal coefficient (ΔlgK) of soil humic acids (HA)

表 6 生物质炭输入对土壤胡敏酸 (HA) E_4/E_6 值的影响
Table 6 Effect of biochar addition on the E_4/E_6 value of soil humic acids (HA)

添加比例/%		培养时间/d						
		1	3	6	10	20	40	60
BC300	0.5	4.46 ± 0.14bc	4.78 ± 0.12b	4.87 ± 0.15b	4.78 ± 0.21c	4.88 ± 0.04cd	4.88 ± 0.05d	5.14 ± 0.07d
	1	4.49 ± 0.07bc	4.56 ± 0.12c	4.83 ± 0.17b	5.01 ± 0.24bc	5.04 ± 0.11bc	5.49 ± 0.11c	5.39 ± 0.03c
	2	4.99 ± 0.07a	5.11 ± 0.09a	5.22 ± 0.18a	5.39 ± 0.02a	5.31 ± 0.10a	5.90 ± 0.20b	5.66 ± 0.02b
	3	5.00 ± 0.15a	5.24 ± 0.28a	5.16 ± 0.11a	5.28 ± 0.06a	5.18 ± 0.21ab	6.34 ± 0.13a	6.12 ± 0.05a
BC400	0.5	4.34 ± 0.13cd	4.48 ± 0.08c	4.48 ± 0.06cd	4.57 ± 0.12d	4.45 ± 0.04hg	4.80 ± 0.19f	4.72 ± 0.18f
	1	4.35 ± 0.08bcd	4.43 ± 0.22c	4.60 ± 0.15c	4.57 ± 0.08d	4.47 ± 0.04hg	4.96 ± 0.26de	4.71 ± 0.07fg
	2	4.54 ± 0.04b	4.52 ± 0.04c	4.50 ± 0.11cd	4.44 ± 0.18def	4.59 ± 0.19fg	5.11 ± 0.21d	5.00 ± 0.09de
	3	4.36 ± 0.11bcd	4.48 ± 0.15c	4.59 ± 0.18c	4.49 ± 0.14def	4.50 ± 0.05hg	5.04 ± 0.12de	4.74 ± 0.16fg
BC500	0.5	4.09 ± 0.08ef	4.12 ± 0.06d	4.21 ± 0.08ef	4.45 ± 0.11de	4.82 ± 0.13dce	4.59 ± 0.21fg	4.62 ± 0.14hg
	1	3.94 ± 0.18fgh	4.09 ± 0.15d	4.05 ± 0.16fg	4.03 ± 0.05hi	4.51 ± 0.05g	4.55 ± 0.06hfg	4.67 ± 0.03hfg
	2	3.87 ± 0.07igh	3.98 ± 0.07df	4.02 ± 0.07fgh	4.20 ± 0.15ghi	4.15 ± 0.07i	4.53 ± 0.13gh	4.33 ± 0.17ij
	3	3.80 ± 0.07ih	3.74 ± 0.11f	3.91 ± 0.09gh	4.23 ± 0.03ghf	4.27 ± 0.21hi	4.54 ± 0.11hgf	4.51 ± 0.11hi
BC600	0.5	4.01 ± 0.16fg	3.87 ± 0.02ef	4.03 ± 0.04fgh	4.05 ± 0.20hi	4.60 ± 0.11efg	4.40 ± 0.18hg	4.31 ± 0.17j
	1	3.98 ± 0.16fgh	4.11 ± 0.11d	4.08 ± 0.05fg	4.18 ± 0.12ghi	4.60 ± 0.13gfe	4.32 ± 0.10h	4.31 ± 0.15j
	2	3.84 ± 0.09igh	3.92 ± 0.06edf	3.98 ± 0.19gh	4.00 ± 0.09i	4.65 ± 0.19gfe	4.38 ± 0.17hg	3.79 ± 0.09k
	3	3.71 ± 0.10i	3.78 ± 0.09ef	3.81 ± 0.13h	4.14 ± 0.06ghi	4.75 ± 0.16dfe	4.32 ± 0.15h	4.17 ± 0.07j
CK		4.25 ± 0.16ed	4.37 ± 0.07c	4.32 ± 0.13de	4.31 ± 0.06gef	4.46 ± 0.23hg	4.57 ± 0.15hfg	4.83 ± 0.13fe

添加比例/%		培养时间/d					
		90	120	180	240	300	360
BC300	0.5	4.81 ± 0.19bc	4.89 ± 0.10bc	4.70 ± 0.06cd	4.47 ± 0.05e	4.49 ± 0.12cd	4.28 ± 0.19cd
	1	5.05 ± 0.13b	5.17 ± 0.15ab	5.27 ± 0.21b	5.31 ± 0.18b	4.67 ± 0.16bc	4.48 ± 0.22bc
	2	5.52 ± 0.25a	5.09 ± 0.14ab	5.24 ± 0.15b	5.00 ± 0.11c	4.77 ± 0.06ab	4.72 ± 0.07ab
	3	5.72 ± 0.20a	5.30 ± 0.16a	5.56 ± 0.16a	5.57 ± 0.02a	4.95 ± 0.18a	4.87 ± 0.12a
BC400	0.5	4.62 ± 0.06cde	4.65 ± 0.08de	4.55 ± 0.15de	4.36 ± 0.08ef	4.19 ± 0.15gf	4.07 ± 0.19defg
	1	4.68 ± 0.15cd	4.63 ± 0.16de	4.66 ± 0.06cd	4.44 ± 0.07e	4.26 ± 0.06ef	4.12 ± 0.12def
	2	4.59 ± 0.18cde	4.52 ± 0.20def	4.85 ± 0.19c	4.53 ± 0.08de	4.29 ± 0.11def	4.16 ± 0.12de
	3	4.56 ± 0.08cde	4.73 ± 0.12cd	4.75 ± 0.11cd	4.69 ± 0.09de	4.29 ± 0.13def	4.27 ± 0.19cd
BC500	0.5	4.55 ± 0.16cde	4.22 ± 0.08ghij	4.21 ± 0.19fg	4.37 ± 0.12ef	3.97 ± 0.13hgi	3.87 ± 0.17ghi
	1	4.39 ± 0.21fe	4.27 ± 0.11ghij	4.34 ± 0.17fe	3.96 ± 0.12jk	3.80 ± 0.18ji	3.80 ± 0.08hi
	2	4.41 ± 0.20fde	4.43 ± 0.08efg	4.35 ± 0.00fe	3.98 ± 0.14ijk	3.96 ± 0.05hgi	3.98 ± 0.16efgh
	3	4.57 ± 0.05cde	4.30 ± 0.18gihf	4.30 ± 0.05f	3.91 ± 0.07k	4.10 ± 0.11gf	3.75 ± 0.15hi
BC600	0.5	4.24 ± 0.19fg	4.07 ± 0.08j	4.08 ± 0.07g	4.23 ± 0.07fg	3.88 ± 0.13hij	3.88 ± 0.04gghi
	1	3.98 ± 0.13gh	4.25 ± 0.09gihj	4.21 ± 0.11fg	4.15 ± 0.14igh	3.94 ± 0.03hgi	3.74 ± 0.14hi
	2	3.85 ± 0.08h	4.19 ± 0.18ijh	4.17 ± 0.11fg	4.03 ± 0.11jhk	3.68 ± 0.06j	3.68 ± 0.17i
	3	3.86 ± 0.18h	4.14 ± 0.12ij	4.21 ± 0.13fg	4.11 ± 0.06ighj	4.36 ± 0.20de	3.75 ± 0.18hi
CK		4.48 ± 0.07fde	4.40 ± 0.19ghf	4.33 ± 0.14fe	4.17 ± 0.18hg	4.11 ± 0.15gf	4.08 ± 0.20de

2.7 生物质炭输入对土壤富里酸结构的影响

图 5 和表 7 分别为土壤 FA 的 $\Delta\lg K$ 和 E_4/E_6 值,从中可以看出,随着培养时间的进行,土壤 HA 的 $\Delta\lg K$ 和 E_4/E_6 值均表现出在培养前 20 d 急速增加而后波动升高的趋势. 低温 ($\leq 400^{\circ}\text{C}$) 制备的生物质炭增加了土壤 FA 的 $\Delta\lg K$ 和 E_4/E_6 值,且随着添加比例的增加而增加,与对照相比,至培养结束

时,BC300 依然可以显著增加土壤 FA 的 $\Delta\lg K$ 和 E_4/E_6 值,而 BC400 土壤 FA 的 $\Delta\lg K$ 和 E_4/E_6 值已和 CK 无明显差异; 高温 ($> 400^{\circ}\text{C}$) 制备的生物质炭输入降低了 FA 的 $\Delta\lg K$ 和 E_4/E_6 值,至培养结束时,BC500 高施用量以及 BC600 处理已显著低于 CK,不同温度之间则表现为 BC500 > BC600,且随着添加比例的增加而降低.

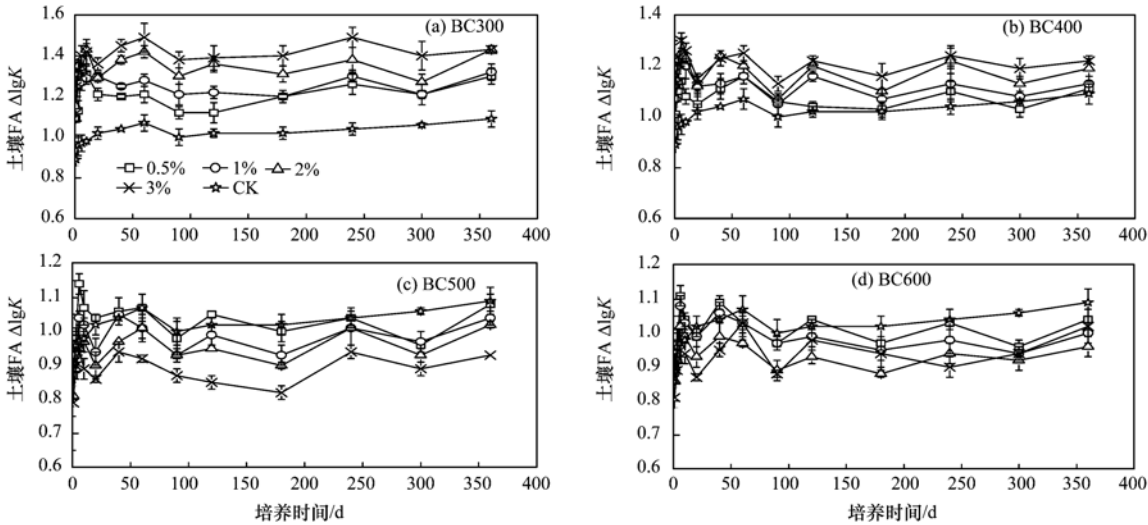


图 5 生物质炭输入对土壤富里酸 (FA) 色调系数 ($\Delta\lg K$) 的影响
Fig. 5 Effect of biochar addition on the tonal coefficient ($\Delta\lg K$) of soil fulvic acids (FA)

表 7 生物质炭输入对土壤富里酸 (FA) E_4/E_6 的影响

Table 7 Effect of biochar addition on the E_4/E_6 value of soil fulvic acids (FA)

添加比例/%		培养时间/d						
		1	3	6	10	20	40	60
BC300	0.5	6.94 ± 0.11cd	6.96 ± 0.24cd	8.08 ± 0.39b	8.68 ± 0.24c	9.16 ± 0.36c	8.32 ± 0.36e	8.94 ± 0.03c
	1	7.23 ± 0.33bc	7.82 ± 0.10a	7.87 ± 0.30b	8.56 ± 0.32cd	9.79 ± 0.17b	8.85 ± 0.28c	8.95 ± 0.14c
	2	7.27 ± 0.37bc	8.02 ± 0.24a	8.50 ± 0.17a	9.09 ± 0.12b	10.22 ± 0.23a	9.83 ± 0.31b	9.86 ± 0.22b
	3	7.64 ± 0.27a	8.12 ± 0.39a	8.72 ± 0.10a	9.69 ± 0.27a	10.52 ± 0.11a	10.61 ± 0.52a	10.39 ± 0.25a
BC400	0.5	6.50 ± 0.12e	6.67 ± 0.27d	6.95 ± 0.23c	7.51 ± 0.08f	7.87 ± 0.30f	8.06 ± 0.33ef	8.07 ± 0.24d
	1	6.78 ± 0.08de	6.84 ± 0.16d	7.75 ± 0.07b	7.98 ± 0.24e	8.06 ± 0.25fe	8.37 ± 0.25de	8.03 ± 0.22d
	2	7.32 ± 0.06ab	7.28 ± 0.08bc	7.77 ± 0.38b	8.23 ± 0.12de	8.30 ± 0.07e	8.43 ± 0.04ede	8.78 ± 0.33c
	3	7.17 ± 0.32bc	7.49 ± 0.29b	8.06 ± 0.15b	8.28 ± 0.36de	8.74 ± 0.27d	8.81 ± 0.38cd	9.06 ± 0.35c
BC500	0.5	5.68 ± 0.21fg	6.24 ± 0.28e	6.93 ± 0.18c	7.27 ± 0.19f	7.75 ± 0.15f	7.77 ± 0.28fg	7.63 ± 0.07ef
	1	5.64 ± 0.14fg	5.83 ± 0.03fg	5.98 ± 0.10ef	6.80 ± 0.29g	7.20 ± 0.16gh	7.46 ± 0.32gh	7.39 ± 0.12efg
	2	5.43 ± 0.10gh	5.56 ± 0.09fgh	5.94 ± 0.20ef	6.39 ± 0.28h	6.86 ± 0.17hij	6.67 ± 0.09j	7.47 ± 0.16ef
	3	5.17 ± 0.11h	5.47 ± 0.14h	5.76 ± 0.22f	5.96 ± 0.06i	6.72 ± 0.03j	6.96 ± 0.29ij	6.54 ± 0.23h
BC600	0.5	5.68 ± 0.21fg	5.53 ± 0.08hg	7.02 ± 0.32c	7.26 ± 0.30f	7.33 ± 0.15g	7.76 ± 0.17fg	7.50 ± 0.35ef
	1	5.43 ± 0.20gh	5.87 ± 0.09f	6.51 ± 0.24d	6.87 ± 0.15g	7.10 ± 0.22ghi	7.40 ± 0.26ghi	7.33 ± 0.16fg
	2	5.37 ± 0.03gh	5.47 ± 0.11h	6.29 ± 0.15de	6.38 ± 0.18h	6.82 ± 0.34ij	7.25 ± 0.21hi	7.12 ± 0.04g
	3	5.24 ± 0.23h	5.46 ± 0.11h	5.68 ± 0.04f	6.59 ± 0.11gh	6.76 ± 0.12ij	6.59 ± 0.12j	7.48 ± 0.13ef
CK		5.89 ± 0.02f	5.83 ± 0.19fg	5.87 ± 0.15f	6.39 ± 0.09h	7.77 ± 0.29f	7.43 ± 0.23gh	7.74 ± 0.21de
添加比例/%		培养时间/d						
		90	120	180	240	300	360	
BC300	0.5	8.59 ± 0.06c	8.24 ± 0.19cd	9.24 ± 0.13b	9.06 ± 0.34c	9.19 ± 0.38c	9.68 ± 0.46b	
	1	9.81 ± 0.19b	8.91 ± 0.46b	9.52 ± 0.30b	9.72 ± 0.31b	9.26 ± 0.40c	9.84 ± 0.16b	
	2	9.96 ± 0.18b	10.13 ± 0.40a	10.59 ± 0.06a	9.74 ± 0.08b	9.99 ± 0.35b	10.51 ± 0.47a	
	3	10.71 ± 0.51a	10.34 ± 0.28a	10.62 ± 0.22a	10.71 ± 0.13a	10.53 ± 0.39a	10.87 ± 0.35a	
BC400	0.5	8.03 ± 0.35d	7.80 ± 0.33ef	7.77 ± 0.15ef	7.87 ± 0.18e	8.12 ± 0.17de	8.17 ± 0.28de	
	1	8.07 ± 0.29d	8.08 ± 0.16de	8.21 ± 0.41d	8.41 ± 0.24d	8.27 ± 0.37d	8.44 ± 0.21d	
	2	8.14 ± 0.09d	8.60 ± 0.27bc	8.74 ± 0.29c	8.93 ± 0.12c	8.52 ± 0.09d	8.93 ± 0.37c	
	3	8.93 ± 0.38c	8.91 ± 0.35b	9.20 ± 0.23b	8.88 ± 0.40c	9.17 ± 0.16c	9.09 ± 0.24c	
BC500	0.5	7.90 ± 0.12de	7.88 ± 0.19de	7.46 ± 0.11fgh	7.70 ± 0.28ef	7.72 ± 0.22ef	7.90 ± 0.36ef	
	1	7.34 ± 0.14fg	7.32 ± 0.03ghi	7.14 ± 0.14gh	7.63 ± 0.14ef	7.47 ± 0.30fg	7.66 ± 0.35fg	
	2	7.26 ± 0.27fg	7.23 ± 0.23hi	7.11 ± 0.29h	7.07 ± 0.13g	7.36 ± 0.15fg	7.46 ± 0.15fgh	
	3	7.07 ± 0.21g	6.61 ± 0.09j	6.52 ± 0.28i	6.53 ± 0.11h	6.71 ± 0.26h	7.16 ± 0.29h	
BC600	0.5	7.31 ± 0.25fg	7.72 ± 0.34efg	7.62 ± 0.24f	7.48 ± 0.32f	7.25 ± 0.07g	7.56 ± 0.20fgh	
	1	7.54 ± 0.29ef	7.43 ± 0.18fghi	7.51 ± 0.11fg	7.07 ± 0.19g	7.23 ± 0.36g	7.51 ± 0.17fgh	
	2	6.94 ± 0.29g	7.05 ± 0.18i	7.18 ± 0.14gh	6.81 ± 0.17gh	7.02 ± 0.04gh	7.29 ± 0.16gh	
	3	6.52 ± 0.07h	7.65 ± 0.13efgh	7.47 ± 0.18fgh	6.80 ± 0.20gh	7.14 ± 0.24gh	7.56 ± 0.19fgh	
CK		7.92 ± 0.09de	7.71 ± 0.14efg	8.13 ± 0.30de	7.68 ± 0.23ef	8.26 ± 0.35d	8.29 ± 0.25de	

3 讨论

3.1 生物质炭输入对土壤腐殖物质含量的影响

土壤腐殖物质作为特有的一类高分子化合物,是经过腐殖化次生合成的物质。腐殖物质在土壤中的分解和积累很大程度上关系着土壤肥力,因而它是评价土壤肥力水平的重要指标。生物质炭输入土壤后,会通过和矿物、微生物等发生相互作用而不断发生物理化学特性的变化,并通过本身含有的芳香基团、羰基等,影响土壤腐殖物质的组成和结构变化。本研究发现,在培养前期(0~60 d)生物质炭输入增加了土壤腐殖物质的含量,且随着添加比例的增加而增加,随热解温度升高而降低(BC500 处理 Hu 含量最高,见图 1~3)。这和 Jamieson 等^[20]的研究结果类似。这一方面是由于在生物质热解过程中产生了数量不等的 LHA 和 LFA^[28],且生成的 LHS 在高温条件下经过二次化学反应(分解、冷凝和聚合等)而导致 LHA 及 LFA 含量降低^[29](见表 1)。另一方面,生物质炭不仅含有一定数量的脂肪族和氧化态碳,能够为微生物提供碳源和能源,生物质炭输入还可以改善土壤微生物的生存环境,促进了微生物的侵染能力,提高微生物的数量及活性^[30],微生物活动的增加又反过来促进生物质炭向腐殖质碳的转换^[13]。已有研究证实,生物质炭脂肪族和氧化态碳随着热解温度升高而降低,因此这可能也是导致培养初期土壤 HA 和 FA 随着热解温度升高及添加比例的增加而降低的原因之一。本研究中,在培养 20 d 左右土壤 FA 含量达到峰值,且该段时间内土壤 H/F 呈现降低的趋势,表明土壤 FA 的形成速度大于 HA,而土壤 HA 的含量在 40~60 d 左右达到最大值,该段时间内 HA 含量增加而 FA 含量减少,导致 H/F 呈增加趋势。这从一定程度上证明了腐殖质形成学说中多元酚理论,即,土壤微生物利用不同来源的碳源,先形成 FA,再进一步聚合形成 HA(也存在着直接形成 HA 的可能性)^[31]。在培养前期,土壤 Hu 含量(0~60 d)呈现不同程度的降低(见图 3),这和 Hua 等^[32]的研究结果类似。这可能是由于生物质炭中复杂的苯环环状结构在微生物及其酶的作用下发生裂解形成小分子的化合物^[33]。此外,虽然 Hu 是土壤中惰性物质,但是其也含有一定数量的脂肪类及其他碳水化合物类物质,在培养期间可被微生物分解利用,从而导致土壤 Hu 含量的降低^[34]。随着培养时间的进行,由于易矿化碳源的减少,土壤微生物由于碳源的匮乏而利用部分腐

殖物质碳,HA 及 FA 在微生物的作用下分解转化,因此土壤 HA 及 FA 含量呈现波动下降的趋势(见图 1 和图 2),而 Hu 含量则小幅度地上升(见图 3),这可能是部分 HA 或者 FA 在微生物的作用下聚合而成。至培养结束时,与 CK 相比,低温($\leq 400^{\circ}\text{C}$)制备的生物质炭在培养结束时 HA 含量依然高于 CK,且随着添加比例的增加而增加;而高温($> 400^{\circ}\text{C}$)制备的生物质炭则降低了土壤 HA 含量,且随着添加比例的增加而降低。这和王英惠等^[35]的研究结果类似,这可能是由于低温($\leq 400^{\circ}\text{C}$)制备的生物质炭残留有机质较多,脂肪族碳含量相对较高,生物质炭的脂肪族碳结构极易通过矿化分解等方式,转变为土壤中的 HA^[13];高温($> 400^{\circ}\text{C}$)制备的生物质炭则由于其芳香化结构和致密性加强,且具有发达的孔隙结构和巨大的比表面积对土壤 HA 具有一定的聚合和吸附作用^[15]。而生物质炭输入和对照相比均降低了土壤 FA 的含量,且随着热解温度的增加而降低。这和孟凡荣等^[36]的研究结果类似,这一方面可能是在微生物的作用下土壤 FA 矿化分解或者聚合形成 HA^[37],另一方面可能是相对于 HA 而言,FA 的分子量更小^[34],生物质炭在土壤中优先吸附小分子有机物导致 FA 提取率降低^[38],而相对较高的施用量,为生物质炭和土壤中 FA 提供了更大的接触面积,从而导致随着添加比例的增加而降低。该阶段土壤 H/F 波动上升也表明土壤 FA 的下降幅度大于 HA,说明生物质炭促进 FA 分解和转化的同时却相对抑制了 HA 的分解和转化。生物质炭输入可显著降低土壤 HA 及 FA 的相对含量(见表 2 和表 3),且随着热解温度和添加比例的增加而降低,但提高了土壤 Hu 的相对含量,且随着热解温度和添加比例的增加而增加(BC500 处理 Hu 的相对含量最高)。这和黄超等^[39]的研究结果类似,这也说明了施用生物质炭对土壤有机质的提高主要表现为增加土壤 Hu 的含量,增加了土壤有机碳的稳定性,这对土壤有机质的保存具有重要意义。

3.2 生物质炭输入对土壤腐殖物质结构的影响

色调系数($\Delta\lg K$)和 E_4/E_6 值是表征腐殖酸光学性质的重要参数。一般情况下 $\Delta\lg K$ 和 E_4/E_6 值越高,说明它们的分子结构越简单,平均分子量越小^[31]。本研究发现生物质炭输入增加了土壤 HA 和 FA 的 $\Delta\lg K$ 和 E_4/E_6 值(培养第 1 d),且随着热解温度的增加而降低,随着添加比例的增加而增加(见图 4 和图 5)。这是由于生物质热解过程中产生

的 LHS 在高温条件下经历二次化学反应导致其含有更多的芳香化组分^[29]。而随着培养时间的进行,土壤 HA 及 FA 的 $\Delta\lg K$ 和 E_4/E_6 值在培养前 60 d 急速增加,刘艳丽^[40]的研究表明外源有机碳的输入可以促进土壤腐殖物质结构向简单化的方向发展,这和本研究的结果类似。这可能是由于生物质炭输入提高了微生物的活性和数量^[41],微生物活动的增强反过来促进了 HA 及 FA 的形成。新形成的 HA 及 FA 因含有较多的脂族结构等使其分子结构简单化^[32]。培养后期(60~360 d)土壤 HA 的 $\Delta\lg K$ 和 E_4/E_6 值呈波动下降的趋势,而土壤 FA 的 $\Delta\lg K$ 和 E_4/E_6 值则呈现波动上升的趋势。这可能是由于在微生物的作用下,小分子腐殖物质发生降解以及腐殖物质分子之间的相互缩聚、或通过氢键等相互聚合,使得土壤 HA 的缩合度增加、结构变复杂,而对于 FA 而言,由于其分子结构相对简单,分子量较小^[34],更容易被微生物分解利用,因此导致其分子结构向简单化方向发展。刘艳丽^[40]研究添加外源有机碳后土壤微生物对土壤腐殖物质含量及结构的影响也发现,在培养后期微生物增加了 HA 的缩合度而降低了 FA 的缩合度,而这和本研究的结果相一致。与对照相比,培养结束时,低温($\leq 400^\circ\text{C}$)制备的生物质炭在后期与 CK 相比依然增加了土壤 HA 及 FA 的 $\Delta\lg K$ 和 E_4/E_6 值,且随着添加比例的增加而增加,高温($> 400^\circ\text{C}$)制备的生物质炭则表现为相反的趋势。这和王英惠等^[35]的研究结果类似。这可能是由于低温制备的生物质炭残留有机质较多,进入土壤后这部分有机碳参与到土壤的腐殖化过程,进而使土壤的腐殖化程度降低;而高温($> 400^\circ\text{C}$)制备的生物质炭脂肪族碳较少,可能导致生物质炭中相对稳定的组分分解,重新组成形成腐殖物质中的链状结构,其结构中稳定的 $\text{C}=\text{C}$ 双键得以保留,从而增加了腐殖物质结构的稳定性^[42]。此外,高温制备的生物质炭具有巨大的比表面积,可以从土壤中吸附土壤腐殖物质,降低腐殖物质中小分子的提取率^[38],从而表征为土壤腐殖物质缩合度增加,结构变复杂。当然,关于生物质炭输入对土壤腐殖物质结构需要结合红外光谱和核磁共振技术进一步研究。

4 结论

(1)由苹果树枝条制备生物质炭,随着热解温度的升高,生物质炭 LHS 的含量呈降低的趋势,但使生物枝炭 LHS 的结构趋向复杂化。

(2)与对照相比,低温($\leq 400^\circ\text{C}$)制备的生物质炭在培养期间增加了土壤 HA 及 FA 含量(240 d 后减少了土壤 FA 含量),并且随着热解温度的升高而降低;高温($> 400^\circ\text{C}$)制备的生物质炭仅在培养前 3~10 d 增加了土壤 HA 及 FA 含量;生物质炭输入均显著降低了土壤 HA 及 FA 的相对含量,且随着热解温度的升高及添加比例的增加而降低。

(3)不同温度制备的生物质炭均可显著增加土壤 Hu 的含量,且随着添加比例的增加而增加,BC500 对 Hu 含量的增加效应最为明显;同时,生物质炭输入提高了土壤 Hu 的相对含量,增加了土壤中相对稳定性碳的比例。

(4)生物质炭输入增加了土壤 H/F 比,提高了土壤腐殖化程度。低温制备的生物质炭增加了土壤 HA 及 FA 的 $\Delta\lg K$ 和 E_4/E_6 值,而高温制备的则相反,说明高温制备的生物质炭使土壤腐殖物质碳的结构复杂化,这对有机质保存具有重要的意义。

参考文献:

- [1] 简燕,曾冠军,周萍,等. 自养微生物同化碳在土壤腐殖质组分及团聚体中的分配[J]. 环境科学研究, 2014, 27(12): 1499-1504.
Jian Y, Zeng G J, Zhou P, *et al.* Input and distribution of autotrophic microbe-assimilated carbon in humus and aggregate fractions of soils [J]. Research of Environmental Sciences, 2014, 27(12): 1499-1504.
- [2] Zhou Y, Selvam A, Wong J W C. Evaluation of humic substances during co-composting of food waste, sawdust and Chinese medicinal herbal residues[J]. Bioresource Technology, 2014, 168: 229-234.
- [3] Rodríguez F J, Schlenger P, García-Valverde M. Monitoring changes in the structure and properties of humic substances following ozonation using UV-Vis, FTIR and ^1H NMR techniques [J]. Science of the Total Environment, 2016, 541: 623-637.
- [4] 张婷,王旭东,逢萌雯,等. 生物质炭和秸秆配合施用对土壤有机碳转化的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(6): 2298-2303.
Zhang T, Wang X D, Pang M W, *et al.* Impacts of biochar and straw application on soil organic carbon transformation [J]. Environmental Science, 2016, 37(6): 2298-2303.
- [5] Ghosh S, Ow L F, Wilson B. Influence of biochar and compost on soil properties and tree growth in a tropical urban environment [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2015, 12(4): 1303-1310.
- [6] 侯亚红,王磊,付小花,等. 土壤碳收支对秸秆与秸秆生物炭还田的响应及其机制[J]. 环境科学, 2015, 36(7): 2655-2661.
Hou Y H, Wang L, Fu X H, *et al.* Response of straw and straw biochar returning to soil carbon budget and its mechanism [J]. Environmental Science, 2015, 37(7): 2655-2661.
- [7] 安艳,姬强,赵世翔,等. 生物质炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(1): 293-300.
An Y, Ji Q, Zhao S X, *et al.* Effect of biochar application on

- soil aggregates distribution and moisture retention in orchard soil [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(1): 293-300.
- [8] Agegnehu G, Bass A M, Nelson P N, *et al.* Benefits of biochar, compost and biochar-compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **543**: 295-306.
- [9] Shen G Q, Ashworth D J, Gan J, *et al.* Biochar amendment to the soil surface reduces fumigant emissions and enhances soil microorganism recovery [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(3): 1182-1189.
- [10] 赵世翔, 姬强, 李忠徽, 等. 热解温度对生物质炭性质及其在土壤中矿化的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, **46**(6): 183-192, 200.
- Zhao S X, Ji Q, Li Z H, *et al.* Characteristics and mineralization in soil of apple-derived biochar produced at different temperatures [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, **46**(6): 183-192, 200.
- [11] 郭艳亮, 王丹丹, 郑纪勇, 等. 生物炭添加对半干旱地区土壤温室气体排放的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(9): 3393-3400.
- Guo Y L, Wang D D, Zheng J Y, *et al.* Effect of biochar on soil greenhouse gas emissions in semi-arid region[J]. *Environmental Science*, 2016, **36**(9): 3393-3400.
- [12] Gwenzi W, Chaukura N, Mukome F N D, *et al.* Biochar production and applications in sub-Saharan Africa: opportunities, constraints, risks and uncertainties[J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, **150**: 250-261.
- [13] Cheng C H, Lehmann J, Thies J E, *et al.* Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes [J]. *Organic Geochemistry*, 2006, **37**(11): 1477-1488.
- [14] Kwapinski W, Byrne C M P, Kryachko E, *et al.* Biochar from Biomass and Waste[J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2010, **1**(2): 177-189.
- [15] Haumaier L, Zech W. Black carbon—possible source of highly aromatic components of soil humic acids [J]. *Organic Geochemistry*, 1995, **23**(3): 191-196.
- [16] Uchimiya M, Ohno T, He Z Q. Pyrolysis temperature-dependent release of dissolved organic carbon from plant, manure, and biorefinery wastes [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2013, **104**: 84-94.
- [17] Lin Y, Munroe P, Joseph S, *et al.* Water extractable organic carbon in untreated and chemical treated biochars [J]. *Chemosphere*, 2012, **87**(2): 151-157.
- [18] Xiao X, Chen B L, Zhu L Z. Transformation, morphology, and dissolution of silicon and carbon in rice straw-derived biochars under different pyrolytic temperatures[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(6): 3411-3419.
- [19] Luo L, Xu C, Chen Z E, *et al.* Properties of biomass-derived biochars: combined effects of operating conditions and biomass types[J]. *Bioresource Technology*, 2015, **192**: 83-89.
- [20] Jamieson T, Sager E, Guéguen C. Characterization of biochar-derived dissolved organic matter using UV-visible absorption and excitation-emission fluorescence spectroscopies [J]. *Chemosphere*, 2014, **103**: 197-204.
- [21] Qu X L, Fu H Y, Mao J D, *et al.* Chemical and structural properties of dissolved black carbon released from biochars[J]. *Carbon*, 2016, **96**: 759-767.
- [22] Zhang J N, Lü F, Luo C H, *et al.* Humification characterization of biochar and its potential as a composting amendment [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, **26**(2): 390-397.
- [23] Jindo K, Sonoki T, Matsumoto K, *et al.* Influence of biochar addition on the humic substances of composting manures [J]. *Waste Management*, 2016, **49**: 545-552.
- [24] 马连刚, 肖保华. 土壤腐殖质提取和分组综述[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2011, **30**(4): 465-471.
- Ma L G, Xiao B H. Review on extraction and fractionation of humic substances from soils [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2011, **30**(4): 465-471.
- [25] Thurman E M, Malcolm R L. Preparative isolation of aquatic humic substances [J]. *Environmental Science & Technology*, 1981, **15**(4): 463-466.
- [26] Vergnoux A, Guiliano M, Di Rocco R, *et al.* Quantitative and mid-infrared changes of humic substances from burned soils[J]. *Environmental Research*, 2011, **111**(2): 205-214.
- [27] Kumada K, Sato O, Ohsumi Y, *et al.* Humus composition of mountain soils in Central Japan with special reference to the distribution of P type humic acid [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1967, **13**(5): 151-158.
- [28] Smith C R, Sleighter R L, Hatcher P G, *et al.* Molecular characterization of inhibiting biochar water-extractable substances using electrospray ionization fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(23): 13294-13302.
- [29] Demirbaş A. Mechanisms of liquefaction and pyrolysis reactions of biomass[J]. *Energy Conversion and Management*, 2000, **41**(6): 633-646.
- [30] Tian J, Wang J Y, Dippold M, *et al.* Biochar affects soil organic matter cycling and microbial functions but does not alter microbial community structure in a paddy soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **556**: 89-97.
- [31] 刘鑫, 窦森, 李长龙, 等. 开垦年限对稻田土壤腐殖质组成和胡敏酸结构特征的影响[J]. *土壤学报*, 2016, **53**(1): 137-145.
- Liu X, Dou S, Li C L, *et al.* Composition of humus and structure of humic acid as a function of age of paddy field [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, **53**(1): 137-145.
- [32] Hua L, Wang Y T, Wang T P, *et al.* Effect of biochar on organic matter conservation and metabolic quotient of soil [J]. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2015, **34**(5): 1467-1472.
- [33] Placido J, Capareda S, Karthikeyan R. Production of humic substances from cotton stalks biochar by fungal treatment with *Ceriporiopsis subvermispota* [J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2016, **13**: 31-37.
- [34] 刘德富, 陈环宇, 程广焕, 等. 堆肥过程中胡敏素的变化及其对五氯苯酚 (PCP) 吸附能力的影响 [J]. *浙江大学学报 (理学版)*, 2014, **41**(5): 545-552.
- Liu D F, Chen H Y, Cheng G H, *et al.* The change of humin in sewage sludge composting and its influence on the adsorption of pentachlorophenol (PCP) [J]. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*, 2014, **41**(5): 545-552.
- [35] 王英惠, 杨旻, 胡林潮, 等. 不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳矿化及腐殖质组成的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2013, **32**(8): 1585-1591.

- Wang Y H, Yang M, Hu L C, *et al.* Effects of biochar amendments synthesized at varying temperatures on soil organic carbon mineralization and humus composition [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, **32**(8): 1585-1591.
- [36] 孟凡荣, 窦森, 尹显宝, 等. 施用玉米秸秆生物质炭对黑土腐殖质组成和胡敏酸结构特征的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2016, **35**(1): 122-128.
- Meng F R, Dou S, Yin X B, *et al.* Effects of maize stalk biochar on humus composition and humic acid structure in black soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, **35**(1): 122-128.
- [37] 黄红丽. 堆肥中木质素的生物降解及其与腐殖质形成关系的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2006.
- Huang H L. Lignin biodegradation and its relationship with humus formation in composting [D]. Changsha: Hunan University, 2006.
- [38] Kramer R W, Kujawinski E B, Hatcher P G. Identification of black carbon derived structures in a volcanic ash soil humic acid by fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, **38**(12): 3387-3395.
- [39] 黄超, 刘丽君, 章明奎. 生物质炭对红壤性质和黑麦草生长的影响[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2011, **37**(4): 439-445.
- Huang C, Liu L J, Zhang M K. Effects of biochar on properties of red soil and ryegrass growth[J]. *Journal of Zhejiang University (Agricultural & Life science)*, 2011, **37**(4): 439-445.
- [40] 刘艳丽. 添加有机物料后不同微生物对土壤腐殖质形成的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2011.
- Liu Y L. Effect of different microbial upon the formation of soil humus after application organic materials[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2011.
- [41] Ippolito J A, Stromberger M E, Lentz R D, *et al.* Hardwood biochar and manure co-application to a calcareous soil [J]. *Chemosphere*, 2016, **142**: 84-91.
- [42] Pessenda L C R, Ledru M P, Gouveia S E M N, *et al.* Holocene palaeoenvironmental reconstruction in northeastern Brazil inferred from pollen, charcoal and carbon isotope records [J]. *The Holocene*, 2005, **15**(6): 812-820.

CONTENTS

Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Particulate Matter and Lead in Urban Beijing	YAO Li, LIU Jin, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> (423)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in PM _{2.5} and Their Human Health Risks Among the Coastal City Group Along Western Taiwan Straits Region, China	CHEN Yan-ting, DU Wen-jiao, CHEN Jin-sheng, <i>et al.</i> (429)
Correlation of Speciated Mercury with Carbonaceous Components in Atmospheric PM _{2.5} in Shengsi Region	CHENG Na, QIAN Guan-lei, DUAN Lian, <i>et al.</i> (438)
Compositions and Sources of Summertime Dicarboxylic Acids and Related SOA in PM _{2.5} from Mt. Taishan	MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, LIU Xiao-di, <i>et al.</i> (445)
Variation Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Atmosphere of Northern Suburb of Nanjing	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jian-yu, <i>et al.</i> (453)
Inventory and Environmental Impact of VOCs Emission from Anthropogenic Source in Chang-Zhu-Tan Region	YOU Xiang-yu, LUO Da-tong, LIU Zhan, <i>et al.</i> (461)
Characteristics of Methane Emission from Urban Traffic in Nanjing	ZHANG Xue, HU Ning, LIU Shou-dong, <i>et al.</i> (469)
Variations in Aerosol Optical Depth over Three Northeastern Provinces of China, in 2003-2014	ZHANG Chen-he, ZHAO Tian-liang, WANG Fu, <i>et al.</i> (476)
Variation Analysis of Daily PM _{2.5} Concentrations Based on Boosted Regression Tree: A Case Study in Changzhou	GE Yue, WANG Ming-xin, SUN Xiang-wu, <i>et al.</i> (485)
Characteristics of Mercury Emissions from Coal-fired Power Plants in Chongqing	ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (495)
Possible Sources of PCDD/Fs in Atmosphere of a Certain District in Guangdong	FU Jian-ping, HAN Jing-lei, YU Xiao-wei, <i>et al.</i> (502)
Sources and Pollution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Conditional Pathogenic Bacteria in Concentrated Poultry Feeding Operations	GAO Min, QIU Tian-lei, QIN Yu-cheng, <i>et al.</i> (510)
Distribution and Burial Characteristics of Nitrogen Forms in Sediment of Dianchi Lake During Last Century	WU Ya-lin, LI Shuai-dong, JIANG Jun-wu, <i>et al.</i> (517)
Temporal and Spatial Variations of Dissolved Inorganic Carbon and Its Stable Isotopic Composition in the Surface Stream of Karst Groundwater Recharge	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (527)
Succession Pattern of Phytoplankton of Daning River in the Three Gorges Reservoir and Its Driving Factors	ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU De-fu, <i>et al.</i> (535)
Response of the Water Quality of a Stratified Reservoir to an Extreme El Niño Event During Summer	QIU Xiao-peng, HUANG Ting-lin, ZENG Ming-zheng, <i>et al.</i> (547)
Effect of Coupling Process of Wetting-Drying Cycles and Seasonal Temperature Increasing on Sediment Nitrogen Minerization in the Water Level Fluctuating Zone	LIN Jun-jie, LIU Dan, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (555)
Photo-induced Phosphate Release from Organic Phosphorus Decomposition Driven by Fe(III)-oxalate Complex in Lake Water	JIANG Yong-can, PENG Yun-xiao, LIU Guang-long, <i>et al.</i> (563)
Preparation and Phosphorus Removal Mechanism of Highly Efficient Phosphorus Adsorbent Mg/Al-LDO	WANG Wei-dong, HAO Rui-xia, ZHANG Xiao-xian, <i>et al.</i> (572)
Efficiency and Mechanism of Nitrogen and Phosphorus Removal in Modified Zeolite Wetland	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Le-zhong, <i>et al.</i> (580)
Repression of Nitrogen and Phosphorus Release from Lakeshore Sediment by Five Littoral-zone Plants	YAO Cheng, HU Xiao-zhen, LU Shao-yong, <i>et al.</i> (589)
Simulated Desorption Kinetics of Lead by the Dominant Plant Roots Released Low Molecular Weight Organic Acids from the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	HE Yuan-jie, LIU Jiang, JIANG Tao, <i>et al.</i> (600)
Experimental Research of Hg ²⁺ Removal by TiO ₂ /Bentonite Composite	TANG Xing-ping, ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, <i>et al.</i> (608)
Impact of Ammonia and H ₂ O ₂ on Bromate and Disinfection By-products Control	WANG Yong-jing, DU Xu, JIN Meng, <i>et al.</i> (616)
Influencing Factors of Bacterial Activity in Water Distribution Networks	WANG Xiao-dan, ZHAO Xin-hua, <i>et al.</i> (622)
Adsorptive Remediation of Cr(VI) Contaminated Groundwater with Chemically Synthesized Schwertmannite	ZHU Li-chao, LIU Yuan-yuan, LI Wei-min, <i>et al.</i> (629)
Characteristics and Mechanism of Hybrid Ozonation-Coagulation Process in Wastewater Reclamation	HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, <i>et al.</i> (640)
Nitrogen Removal Effect and Conversion Characteristics of Nitrous Oxide in Single-stage and Multi-stage A/O Processes	GUO Chang-zi, ZHANG Feng-yan, LIU Fu-yu, <i>et al.</i> (647)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX with Different Organic Carbon Sources	GUAN Yong-jie, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (654)
Operational Performance and Microbial Community Structure in a Completely Mixed Aeration System	WANG Shuo, XU Qiao, ZHANG Guang-sheng, <i>et al.</i> (665)
Start-up of Combined Floc-granule CANON Process and the Effects of SRT on Reactor Performance	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (672)
Effects of Free Ammonia Regulation on the Performance of High Solid Anaerobic Digesters with Dewatered Sludge	DAI Xiao-hu, HE Jin, YAN Han, <i>et al.</i> (679)
Highly Efficient Bioflocculation of Microalgae Using <i>Mucor circinelloides</i>	GU Qiong, JIN Wen-biao, CHEN Yuan-qing, <i>et al.</i> (688)
Effect of Zero Valent Iron on the Decline of Tetracycline Resistance Genes and Class 1 Integrons During Thermophilic Anaerobic Digestion of Sludge	WEI Xin, XUE Shun-li, YANG Fan, <i>et al.</i> (697)
Concentration, Sources and Ecological Risks of PAHs of Different Land Use Types in Shenfu New City	WANG Jing, LIU Ming-li, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (703)
Compositions, Sources and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dusts from Driving-schools in a City of Henan Province, China	CHEN Yi-nan, MA Jian-hua, DUAN Hai-jing, <i>et al.</i> (711)
Remediation of Decabromodiphenyl Ether Contaminated Sediment Through Plant Roots Enhanced by Exogenous Microbes	YANG Lei-feng, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (721)
Impacts of Bioremediation on Microbial Communities and Different Forms of Nitrogen in Petroleum Contaminated Soil	YE Xi-qiong, WU Man-li, CHEN Kai-li, <i>et al.</i> (728)
Effects of <i>Rhodopseudomonas palustris</i> PSB06 on Pepper Rhizosphere Microbial Community Structure	LUO Lu-yun, JIN De-cai, ZUO Hui, <i>et al.</i> (735)
Effect of Reclaimed Water on Bacterial Community Composition and Function in Urban River Sediment	DI Yan-ming, WANG Guang-xuan, HUANG Xing-ru, <i>et al.</i> (743)
Effects of Different Vegetation Types and Reclamation Years on Soil Bacterial Community Structure in Reclaimed Mine Areas	HE Long, LI Yan-qin, LI Bin-chun, <i>et al.</i> (752)
Characteristic of Abundances and Diversity of Carbon Dioxide Fixation Microbes in Paddy Soils	LIU Qiong, WEI Xiao-meng, WU Xiao-hong, <i>et al.</i> (760)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components: Influence on the Composition and Properties of Humic Substances	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (769)
Straw Composts with Composite Inoculants and Their Effects on Soil Carbon and Nitrogen Contents and Enzyme Activity	NIE Wen-han, QI Zhi-ping, FENG Hai-wei, <i>et al.</i> (783)
Comparative Analysis on Effect of Wheat Straw and Its Biochar Amendment on Net Global Warming Potential Under Wheat-Maize Rotation Ecosystem in the Guanzhong Plain	CHENG Gong, CHEN Jing, LIU Jing-jing, <i>et al.</i> (792)
Isolation and Identification of a Chlorobenzene-degrading Bacterium and Its Degradation Characteristics	YE Jie-xu, LIN Tong-hui, LUO Yu-hao, <i>et al.</i> (802)
Isolation, Identification and Metabolic Characteristics of a Heterotrophic Denitrifying Sulfur Bacterial Strain	TAN Wen-bo, MA Xiao-dan, HUANG Cong, <i>et al.</i> (809)
Effects of Continuous Application of Sewage Sludge Compost on Heavy Metals Accumulation and Mobility Characteristics in Soil Profile and on Heavy Metals Uptake of Wheat	SUN Na, SHANG He-ping, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (815)
Effects of Nitrogen Application on Selenium Uptake, Translocation and Distribution in Winter Wheat	CHEN Yu-peng, PENG Qin, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (825)
Accumulation and Biotransformation in Typical Freshwater Algae Species Influenced by Titanium Dioxide Nanoparticles Under Long-term Exposure	LI Jin-li, WANG Zhen-hong, YAN Ya-meng, <i>et al.</i> (832)
Sorption of <i>p</i> -Nitrophenol by Biochars of Corn cob Prepared at Different Pyrolysis Temperatures	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei, <i>et al.</i> (837)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2017年2月15日 第38卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 2 Feb. 15, 2017

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科学出版社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印刷装订	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
发 行	科学出版社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人

ISSN 0250-3301



9 770250 330172