环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2020
Vol.41 No.9
第41卷 第9期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第41卷 第9期
2020年9月15日

目 次

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第41卷第9期 2020年9月
Vol.41, No.9 Sep., 2020

桉树枝条生物炭输入对桂北桉树人工林酸化土壤的作用效果

段春燕[1,2,3], 沈育伊[4], 徐广平[2,3*], 滕秋梅[2], 张德楠[2], 何成新[2,3], 张中峰[2], 周龙武[2], 孙英杰[2]
(1. 广西师范大学珍稀濒危动植物生态与环境保护教育部重点实验室, 桂林 541006; 2. 广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所, 广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室, 桂林 541006; 3. 广西师范大学生命科学学院, 桂林 541006; 4. 广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所, 广西植物功能物质研究与利用重点实验室, 桂林 541006)

摘要: 探讨桉树枝条生物炭对桂北桉树人工林土壤理化性质的影响及其不同施用量的应用效果,为桉树人工林枝条等林业废弃物资源的合理利用以及土壤改良提供科学依据. 选择广西北部低山丘陵地区 4 a 生桉树人工林土壤为研究对象,通过桉树枝条废弃物 500℃厌氧制备生物炭,基于小区定位试验,分别输入质量分数为 0(CK)、0.5%(T1)、1.0%(T2)、2%(T3)、4%(T4)和 6%(T5)这 6 个比例的桉树枝条生物炭,输入 1 a 后对不同处理下桉树人工林土壤理化性质进行测定. 结果表明,相对于对照 0~30cm 土层,随着桉树枝条生物炭输入量的增加,降低了土壤容重,平均降幅为 3.82%~33.55%; 增加了土壤自然含水量、毛管孔隙度和总毛管孔隙含量,增幅分别为 7.67%~31.75%、8.95%~33.19% 和 9.28%~35.86%,不同处理间差异显著. 生物炭显著降低了土壤交换性酸、交换性铝、交换性氢和交换性钠含量,降幅分别为 8.28%~70.03%、5.55%~70.34%、5.10%~21.78% 和 12.81%~49.27%; 增加了土壤阳离子交换量、电导率、交换性钙和交换性镁含量,增幅分别为 27.08%~160.39%、117.00%~546.64%、17.10%~66.14% 和 17.38%~71.38%; 提高了土壤 pH 值,增加了 0.17~1.29 个单位. 桉树枝条生物炭输入林地土壤后,显著增加了土壤有机碳、全磷、全钾、速效磷、速效钾和速效氮含量,增幅分别为 10.94%~51.37%、14.29%~59.45%、6.48%~59.57%、6.28%~29.41%、4.79%~19.81% 和 7.72%~75.87%. 土壤主要物理因子之间、化学因子之间、土壤理化指标两两之间绝大部分存在正相关关系,相互影响. 总体上,桉树枝条生物炭短期内有利于缓解桉树人工林地土壤的酸化趋势,对改善土壤理化性质和提高养分含量有积极的正效应和调控作用,促进了土壤的保水保肥能力. 综合考虑, 4%~6% 的生物炭输入量是提高土壤肥力水平的最优处理,研究结果对土壤改良、林地生态环境改善以及桉树人工林可持续经营具有重要的实践意义.

关键词: 生物炭; 桉树人工林; 土壤物理性质; 土壤化学性质; 土壤改良
中图分类号: X171 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2020)09-4234-12 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202002180

Effects of *Eucalyptus* Branches Biochar Application on Soil Physicochemical Properties of Acidified Soil in a *Eucalyptus* plantation in Northern Guangxi

DAUN Chun-yan[1,2,3], SHEN Yu-yi[4], XU Guang-ping[2,3*], TENG Qiu-mei[2], ZHANG De-nan[2], HE Cheng-xin[2,3], ZHANG Zhong-feng[2], ZHOU Long-wu[2], SUN Ying-jie[2]
(1. Key Laboratory of Ecology of Rare and Endangered Species and Environmental Protection, Ministry of Education, Guangxi Normal University, Guilin 541006, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Plant Conservation and Restoration Ecology in Karst Terrain, Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences, Guilin 541006, China; 3. College of Life Sciences, Guangxi Normal University, Guilin 541006, China; 4. Guangxi Key Laboratory of Functional Phytochemicals Research and Utilization, Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences, Guilin 541006, China)

Abstract: This study aims to explore the effects of different biochar applications on soil physical and chemical properties in a *Eucalyptus* plantation in Northern Guangxi, find the best biochar application amount, and provide scientific guidance for the efficient utilization of forest residue and soil improvement. The soil of a four-year *Eucalyptus* plantation at the Huangmian forest farm in Northern Guangxi was selected as the study area, and six treatments including 0 (CK), 0.5% (T1), 1.0% (T2), 2% (T3), 4% (T4), and 6% (T5) were set through a field-positioning experiment to analyze the changes in soil physical and chemical properties under different application rates. Compared with the 0-30 cm soil layer of the control treatment, biochar application decreased the mean soil bulk by 3.82%-33.55%, while it increased the soil natural water content, capillary porosity, and total capillary porosity by 7.67%-31.75%, 8.95%-33.19%, and 9.28%-35.86%, respectively. The contents of exchangeable acid, exchangeable aluminum,

收稿日期: 2020-02-25; **修订日期**: 2020-04-03
基金项目: 国家自然科学基金项目(31760162, 41361057); 广西自然科学基金项目(2018GXNSFAA050069); 广西岩溶动力学重大科技创新基地开放课题资助项目(KDL&Guangxi202004); 广西科技重大专项(桂科 AA18118028); 国家科技支撑计划项目(2012BAC16B01); 广西植物研究所基本业务费项目(桂植业 17012)
作者简介: 段春燕(1992~),女,硕士研究生,主要研究方向为森林生态学,E-mail: duancysx@163.com
* 通信作者,E-mail: xugpgx@163.com

exchangeable hydrogen, and exchangeable sodium in the soil decreased by 8.28%-70.03%, 5.55%-70.34%, 5.10%-21.78%, and 12.81%-49.27%. Biochar application increased the cation exchange capacity, electrical conductivity, exchangeable magnesium, and exchangeable calcium by 27.08%-160.39%, 117.00%-546.64%, 17.10%-66.14%, and 17.38%-71.38%, respectively. Soil pH increased by 0.17-1.29 after biochar addition. Similarly, the contents of soil organic carbon, total phosphorus, total potassium, available nitrogen, available phosphorus, and available potassium increased by 10.94%-51.37%, 14.29%-59.45%, 6.48%-59.57%, 6.28%-29.41%, 4.79%-19.81%, and 7.72%-75.87%. There was a positive correlation among the main physical and chemical factors. The physical and chemical properties reached their maximum values in the T4 or T5 treatment (4% or 6%). Biochar application provided considerable relief from soil acidification in the *Eucalyptus* plantation and had a positive effect on soil physicochemical properties. The addition 4%-6% of ripe *Eucalyptus* biochar produced the optimum results. The results show that biochar can improve the physical and chemical properties of soil, increase soil fertility, and enhance the soil's ability to retain water and fertilizer after twelve months. The findings of this study can be used as a reference in practical applications for soil improvement and sustainable management of *Eucalyptus* plantations.

Key words: biochar; *Eucalyptus* plantations; soil physical properties; soil chemistry; soil improvement

生物炭(biochar)通常被认为是植物或动物等废弃物,经高温厌氧裂解制备而成的含碳量丰富、性质稳定的一种固态物质[1]. 生物炭含有碳、氢、氧、氮、硫等以及一些微量元素,不仅具有较大的比表面积,还有大量高电荷密度,使其具备了良好的稳定性和一定的吸附性[2]. 生物炭含碳量高,将农业废弃物转化为生物炭,并投入到土壤中可作为碳储存载体[3]. 近年来,向土壤中添加生物炭变为一种农业增汇减排技术[4],也被视为有效的土壤改良剂[5].

前人研究表明,生物炭能够增加土壤孔隙度,且与输入量呈正相关[6],也有报道认为适量施用生物炭降低了土壤孔隙度,在高施用量下才增加土壤孔隙度[7]. Novak 等[8]的研究表明,当生物炭用量相同时,400℃制备的花生壳生物炭和 200℃、500℃制备的柳枝稷生物炭可以显著增加土壤含水量,而其它原料制备的生物炭对土壤含水量影响不显著. Gul 等[9]的研究结果表明,生物炭可以显著提高有机质含量较低的酸性土壤的酸碱度,其他研究则认为随生物炭施用量的增加未必能相应地增加土壤 pH 值[10],加入到碱性土壤中对 pH 值效果不明显[11]. 有研究表明,玉米秸秆生物炭能增加草甸黑土的有机碳及其土壤有效养分[12],相反,在砂浆水稻土施用秸秆生物炭,pH 值和有效磷没有明显差异[13]. 输入生物炭能增加土壤阳离子交换量(CEC)[14],相反,有其它研究认为生物炭输入对土壤 CEC 无显著影响[15]. 有关生物炭对土壤电导率(EC)影响的研究还较少[16]. 综上看出,由于生物炭和土壤类型以及其它环境因素的不同,生物炭施入对土壤理化性质影响的结果还不尽相同[17],其作用效果还有待进一步拓展和探究.

已有的研究较多地集中在花生壳、稻秆、玉米秆、麦秆和猪粪等材料制备而成的生物炭[18,19],这些研究大部分为室内培养[20],但对于林木枝条制成的生物炭研究相对较少,在大田原位施用生物炭的报道不多. 而且,在围绕农田土壤生物炭添加等方面的研究居多,应用于林地的较少[21],这在一定程度上限制了生物炭在林业生态环境保护中的应用. 桉树(*Eucalyptus* spp.)在我国广西、海南和广东等南方各省份人工种植的面积较大,给人们带来巨大经济效益的同时,一些生态环境问题也日益突出,如影响土壤的物理和化学性质[22]、土壤肥力下降和地力衰退等[23],加之化肥施用量的增加,桉树人工林土壤 pH 值趋于下降和加重了土壤酸化程度[24],笔者前期研究表明桂北桉树人工林土壤呈现酸化的趋势[25]. 广西北部(桂北)低山丘陵地区是桉树人工林的重要种植基地,一般在 4~5 a 林龄就开始采伐,每年产生大量的桉树废弃物枝条,是较理想的生物炭材料,在短的轮伐期后,若将这部分枝条制备成生物炭就地返还林地土壤,可能是桉树枝条废弃物资源化利用的途径之一,但目前桉树枝条制备生物炭及其对桉树人工林土壤理化性质的影响还不清楚.

本研究提出以下科学问题:桉树枝条生物炭输入桉树林地土壤后,对土壤理化性质的影响是怎样的? 如果有正效应,建议最佳的生物炭施用量是多少? 鉴于此,选择桂北地区典型 4 年生桉树人工林土壤为研究对象,开展施用生物炭试验(500℃,桉树枝条废弃物厌氧制备),在输入生物炭 1 a 后,探讨施用生物炭及不同施用量(炭土质量比 0、0.5%、1.0%、2%、4% 和 6%)对桉树人工林酸化土壤的作用效果,旨在为生物炭在南方桉树人工林土壤的改良及其绿色可持续发展提供理论依据.

1　材料与方法

1.1　研究区概况

试验区位于广西黄冕林场,地处广西北部(桂北),地理坐标为北纬 24°37′25″~24°52′11″,东经 109°43′46″~109°58′18″. 为典型的低山丘陵地貌,中亚热带气候,年均气温 19℃,年均降雨量1 750~2 000 mm,样地土壤主要分布有红壤、山地黄红壤等,详细信息见文献[25].

1.2 试验方法

1.2.1 生物炭输入小区试验

2016 年 11 月,收集黄冕林场试验地及周边区域内桉树林废弃物枝条为原料,经过高温(500℃)无氧条件下裂解,由济宁德汉齐机械工程科技有限公司制备生物炭,炭化时间为 2 h,生物炭研磨后过 2 mm 筛. 生物炭基本性质:比表面积 43.21 $m^2 \cdot g^{-1}$,电导率 692.82 $\mu S \cdot cm^{-1}$,阳离子交换量 51.48 $cmol \cdot kg^{-1}$,灰分 41.05%,pH 值 9.52,碳含量 55.86%,氢含量 3.13%,氧含量 23.70%,氮含量 1.36%,硫含量 0.46%,磷含量 5.46 $mg \cdot g^{-1}$,钾含量 32.48 $mg \cdot g^{-1}$,钙含量 14.03 $mg \cdot g^{-1}$,镁含量 11.15 $mg \cdot g^{-1}$,铁含量 7.20 $mg \cdot g^{-1}$,铜含量 3.12 $mg \cdot g^{-1}$,锰含量 1.34 $mg \cdot g^{-1}$,锌含量 1.53 $mg \cdot g^{-1}$.

选择桂北地区成土母质一致、海拔和坡度接近、地势相对缓和平坦、具有代表性的一代 4 年林龄桉树人工林作为试验样地,林分密度为1 250株$\cdot hm^{-2}$、坑规格 50 cm×50 cm×30 cm,窄行的株行距为 2 m×3 m,宽行间距为 5 m, 2 a 前基肥施用量为 750 $kg \cdot hm^{-2}$,长沙达君肥业生产的达君复合肥,总养分≥25%,有效氮含量≥13%,有效磷含量≥5% 和有效钾含量≥7%. 生物炭输入试验期间,不再施用其它追肥等. 本试验于 2017 年春季(3 月)布置生物炭施用量定位小区试验,以桉树人工林土壤作为研究对象,生物炭输入比例参考生物炭与土壤的质量百分比进行控制[26],设置 CK(0 $t \cdot hm^{-2}$,无生物炭添加,0%)、T1(5 $t \cdot hm^{-2}$生物炭,相当于原土 0~30 cm 土层重的 0.5%)、T2(10 $t \cdot hm^{-2}$生物炭,相当于原土 0~30 cm 土层重的 1.0%)、T3(20 $t \cdot hm^{-2}$生物炭,相当于原土 0~30 cm 土层重的 2%)、T4(40 $t \cdot hm^{-2}$生物炭,相当于原土 0~30 cm 土层重的 4%)和 T5(60 $t \cdot hm^{-2}$生物炭,相当于原土 0~30 cm 土层重的 6%)这 6 个处理,每个处理设 3 个重复,采用完全随机区组设计,共设 18 个试验小区,每个小区规格为 8 m×8 m,小区间设 1 m 缓冲带. 生物炭施用结合林场所采用的施肥方式,参考郭艳亮等[26]采用的完全混合方法,采用农耕工具分别将各小区内表层 30 cm 深的土壤均匀翻耕,将生物炭一次性按照设定的比例与翻耕的土壤充分混合,然后将混合后的土壤回填并轻微压实复原土位. 考虑到翻耕对地表植物可能的扰动,对照样采用同样的翻耕等处理.

1.2.2 土壤取样与试验方法

输入生物炭 1 a 后采集土壤样品,参照典型 S 型 5 点取样方法,以 0~10 cm 为间隔,分 3 层,用土壤采集器取土至 30 cm 深,相同土层混匀后作为一个样品. 采集的土壤用自封袋送回实验室. 样品风干后作常规处理,用于土壤理化性质分析.

土壤容重用环刀法,土壤含水量采用烘干法进行测定,土壤孔隙度由公式"孔隙度 = 1 - (容重/密度)"计算得到; 土壤 pH 值、有机碳(SOC)、全磷(TP)、全钾(TK)、速效氮(AN)、速效磷(AP)和速效钾(AK)的分析方法详见文献[25]. 使用电导率仪(DDS-307A,水土为 5∶1)测定土壤电导率,通过 1 $mol \cdot L^{-1}$乙酸铵交换法分析土壤阳离子交换量. 土壤交换性酸、交换性铝和交换性氢用 1 $mol \cdot L^{-1}$ KCl 提取,0.02 $mol \cdot L^{-1}$ NaOH 滴定法[27]. 交换性钠(M_3-Na)、土壤交换性钙(M_3-Ca)和交换性镁(M_3-Mg)采用 Mehlich 3 浸提剂浸提法[28],水土比 10∶1混合振荡,滤液稀释 5 倍,用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP,美国 PE optima5300DV)测定.

1.3 数据处理与统计分析

通过 Excel 2010 进行图表的制作, SPSS 23.0 进行数据的统计分析.

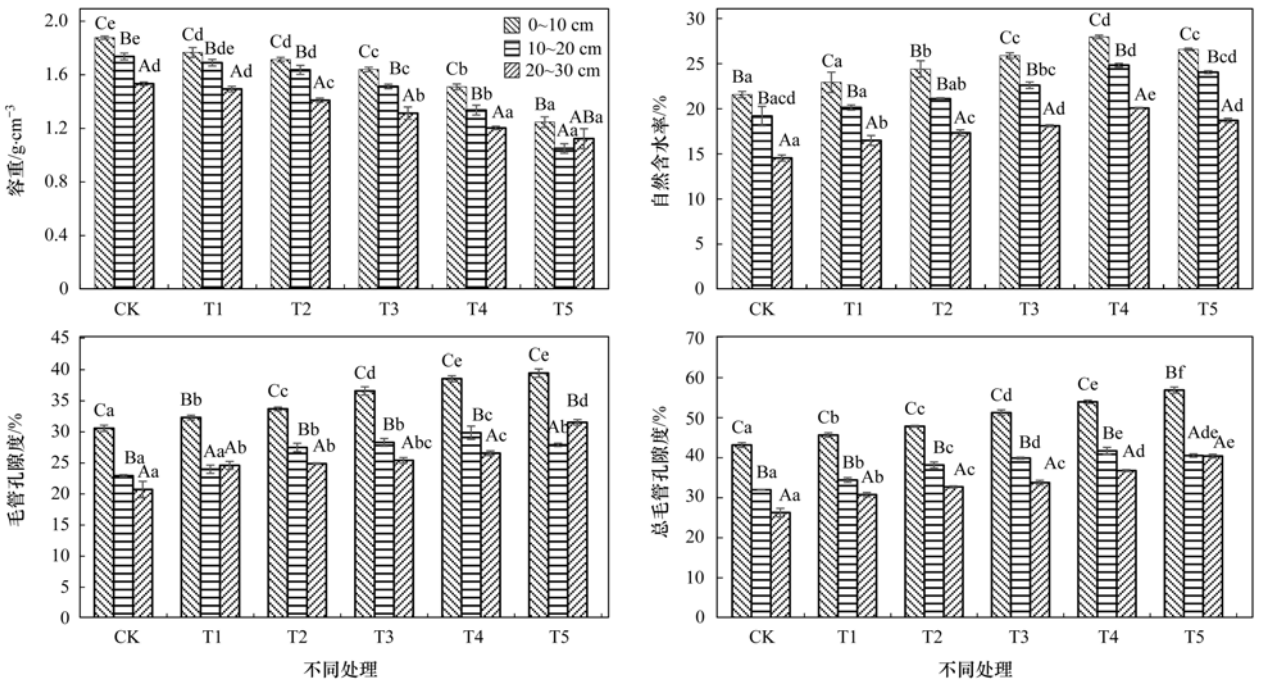
2 结果与分析

2.1 施用生物炭对桉树人工林土壤物理性质的影响

由图 1 可知,随着生物炭输入量的增加,在 0~30 cm 土层,容重趋于降低,大小表现为 CK > T1 > T2 > T3 > T4 > T5. 土壤含水量是植物吸收水分的主要来源,各处理的土壤含水量随着生物炭输入量的增大而升高,相对于 CK,T4 处理含水量最大,T5 处理略小于 T4,大小关系依次为 CK < T1 < T2 < T3 < T5 < T4. 土壤孔隙度是指单位体积内土壤孔隙所占的百分比,整体而言,毛管孔隙度和总毛管孔隙度均随生物炭输入量的增加而增大. 相似的是,土壤容重、含水量、毛管孔隙度和总毛管孔隙度除了个别在 20~30 cm 土层略有增大外,基本呈现随土层深度的加深而降低的趋势,不同土层间大部分差异显著. 总体上,桉树枝条生物炭输入显著降低了土壤容重,增加了土壤含水量、毛管孔隙度和土壤总孔隙度含量,有利于改善桉树林土壤结构和土壤水分状况,随生物炭输入量的增加而作用效果增强.

2.2 施用生物炭桉树人工林土壤化学性质的变化

如表 1 所示,除了交换性酸在 10~30 cm 土层 T3 > T2,交换性铝在 20~30 cm 土层 T4 > T3 之外,交换性酸和交换性铝含量在各处理的变化趋势一致,均表现为随生物炭施用量的增多而减少. 桉树枝条生物炭降低了交换性氢含量,在 0~10 cm 土层表现为 CK > T1 > T2 > T3 > T5 > T4,在 10~20 cm 土层为 CK > T1 > T2 = T5 > T3 > T4,在 20~30 cm 土层表现为 CK > T1 > T4 > T5 > T2 > T3. 桉树枝条生



图中数据为平均值 ± 标准误，不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著（$P < 0.05$），不同大写字母表示同一处理不同土层间差异显著（$P < 0.05$），下同

图 1　不同生物炭处理桉树人工林土壤物理性质的变化

Fig. 1　Changes in soil physical properties of *Eucalyptus* plantation in different biochar treatments

物炭降低了交换性钠含量，在 0 ~ 20 cm 土层大小顺序为 CK > T1 > T2 > T3 > T5 > T4，在 20 ~ 30 cm 土层则表现为 CK > T1 > T4 > T2 > T3 > T5.

相对于对照，交换性钙随生物炭施用量的增加而呈现增大的趋势. 0 ~ 20 cm 土层交换性钙含量大小顺序为 CK < T1 < T2 < T3 < T5 < T4，20 ~ 30 cm 土层交换性钙含量为 CK < T1 < T3 < T2 < T5 < T4，均在 T4 处理最大. 生物炭施用增加了土壤交换性镁含量，在各处理不同土层间变化规律不完全一致，在 0 ~ 10 cm 土层，交换性镁大小顺序为 CK < T1 < T2 < T3 < T5 < T4，在 10 ~ 20 cm 土层表现为 T1 < CK < T2 < T3 < T5 < T4，在 20 ~ 30 cm 土层大小为 CK < T2 < T3 < T5 < T1 = T4，但都在 T4 处理较高.

土壤阳离子交换量是评价土壤肥力的一个指标. 本研究中，阳离子交换量随生物炭输入量的增加而升高（$P < 0.05$），0 ~ 20 cm 土层中，在 T4 处理最高，20 ~ 30 cm 土层则在 T5 处理最高. 对于土壤电导率，亦随生物炭输入量的增加而增大（$P < 0.05$），0 ~ 20 cm 土层中，在 T5 处理最高，20 ~ 30 cm 土层则在 T4 处理最高. 随着桉树枝条生物炭输入量的增加，显著提高了土壤 pH 值（$P < 0.05$），0 ~ 30 cm 土层 pH 值一致表现为 CK < T1 < T2 < T3 < T4 < T5，在 T5 处理最高.

与土壤物理因子相似的是，交换性酸、交换性铝、交换性氢、交换性钠、交换性钙、交换性镁、阳离子交换量、电导率和 pH 值，除了个别在 20 ~ 30 cm 土层略有所增大外，基本呈现出随着土层深度的增加而减小的趋势，有明显的垂直分布特征. 可见，随着桉树枝条生物炭输入量的增加，降低了土壤交换性酸、交换性铝、交换性氢和交换性钠含量，增加了土壤阳离子交换量、电导率、交换性钙和交换性镁含量，提高了土壤 pH 值，这有利于缓解桉树人工林地土壤的酸化趋势，T4 和 T5 处理（4% 和 6%）的影响较显著.

2.3　施用生物炭桉树人工林土壤养分含量的变化

土壤养分是衡量土壤肥力的重要指标. 由表 2 可知，土壤有机碳随生物炭施用量的增加而升高，除了在 10 ~ 20 cm 土层 T1 < CK 之外，其它各土层有机碳一致表现为 CK < T1 < T2 < T3 < T4 < T5，在 T5 处理最高，同一处理不同土层间差异显著（$P < 0.05$）. 全磷在 0 ~ 10 cm 土层中，大小为 CK < T1 < T2 < T5 < T3 < T4；在 10 ~ 20 cm 土层表现为 T2 < CK < T1 < T5 < T3 < T4；在 20 ~ 30 cm 土层，大小关系为 CK < T1 < T5 < T3 < T2 = T4，均在 T4 处理全磷含量最高. 在 0 ~ 10 cm 土层全钾的大小顺序为 CK < T1 < T2 < T3 < T5 < T4；在 10 ~ 20 cm 土层，大小关系为 CK < T1 < T2 < T3 < T4 < T5；在 20 ~ 30 cm 土层，大小顺序为 CK < T1 < T3 < T2 < T5 < T4，在 T4 和 T5 处理最高，同一处理不同土层间差异性显著（$P < 0.05$）.

表 1 生物炭处理桉树人工林土壤化学性质的变化[1)]（平均值 ± 标准误）

Table 1 Changes in soil chemical characters of *Eucalyptus* plantation under biochar treatments (mean ± SE)

指标	土层/cm	处理					
		CK	T1	T2	T3	T4	T5
交换性酸/cmol·kg^{-1}	0 ~ 10	6.67 ± 0.25Ce	6.08 ± 0.12Cd	5.52 ± 0.17Cc	5.09 ± 0.08Cc	3.68 ± 0.35Cb	2.50 ± 0.32Ba
	10 ~ 20	5.45 ± 0.40Bcd	5.00 ± 0.15Bd	4.06 ± 0.07Bc	4.17 ± 0.11Bc	3.02 ± 0.10Bb	1.39 ± 0.12Aa
	20 ~ 30	4.43 ± 0.14Af	4.10 ± 0.10Ae	2.26 ± 0.12Ac	3.10 ± 0.04Ad	1.87 ± 0.16Ab	1.06 ± 0.05Aa
交换性铝/cmol·kg^{-1}	0 ~ 10	10.58 ± 0.55Ce	10.07 ± 0.31Ce	7.63 ± 0.37Cd	5.67 ± 0.20Bc	4.08 ± 0.17Cb	2.76 ± 0.43Ba
	10 ~ 20	6.22 ± 0.27Bd	6.34 ± 0.73Bd	4.87 ± 0.27Bc	3.48 ± 0.38Ab	2.88 ± 0.11Bb	1.86 ± 0.30Aa
	20 ~ 30	3.98 ± 0.18Ac	3.21 ± 0.04Abc	3.12 ± 0.10Abc	2.06 ± 0.03Aa	2.15 ± 0.03Aa	1.55 ± 0.31Aab
交换性氢/cmol·kg^{-1}	0 ~ 10	1.71 ± 0.01Be	1.66 ± 0.05Cde	1.62 ± 0.03Ccd	1.57 ± 0.04Cbc	1.39 ± 0.03Ca	1.53 ± 0.03Cb
	10 ~ 20	1.52 ± 0.07Ac	1.44 ± 0.06Bc	1.30 ± 0.03Bb	1.27 ± 0.08Bb	1.06 ± 0.05Aa	1.30 ± 0.04Bb
	20 ~ 30	1.41 ± 0.06Ac	1.30 ± 0.03Ac	1.14 ± 0.04Aab	1.06 ± 0.06Aa	1.18 ± 0.04Bb	1.16 ± 0.05Aab
交换性钠/g·kg^{-1}	0 ~ 10	73.22 ± 2.67Cf	68.37 ± 1.53Ce	59.81 ± 1.17Cd	53.03 ± 0.96Cc	42.03 ± 0.76Ca	47.60 ± 1.00Cb
	10 ~ 20	49.05 ± 0.52Bd	42.08 ± 1.02Bc	35.6 ± 2.31Bbcd	31.83 ± 1.04Bb	13.57 ± 1.11Aa	29.62 ± 0.47Bb
	20 ~ 30	30.76 ± 0.42Ad	22.97 ± 0.77Ac	20.34 ± 0.49Ab	18.97 ± 0.47Ab	22.04 ± 0.90Bc	16.53 ± 1.03Aa
交换性钙/g·kg^{-1}	0 ~ 10	2.21 ± 0.05Ca	2.76 ± 0.07Cb	2.97 ± 0.13Bc	3.21 ± 0.05Cd	4.11 ± 0.10Cf	3.69 ± 0.07Ce
	10 ~ 20	1.98 ± 0.03Ba	2.20 ± 0.05Bb	2.34 ± 0.05Ab	2.57 ± 0.07Bc	2.98 ± 0.10Bd	2.91 ± 0.15Bd
	20 ~ 30	1.68 ± 0.02Aa	1.91 ± 0.06Ab	2.23 ± 0.07Ac	2.11 ± 0.04Ac	2.66 ± 0.13Ae	2.49 ± 0.04Ad
交换性镁/g·kg^{-1}	0 ~ 10	0.31 ± 0.01Ca	0.36 ± 0.01Cb	0.38 ± 0.01Cb	0.42 ± 0.02Cc	0.50 ± 0.01Ce	0.46 ± 0.02Cd
	10 ~ 20	0.22 ± 0.01Bb	0.14 ± 0.01Aa	0.28 ± 0.01Bc	0.30 ± 0.01Bc	0.36 ± 0.02Be	0.33 ± 0.02Bd
	20 ~ 30	0.12 ± 0.01Aa	0.25 ± 0.01Bd	0.17 ± 0.01Ab	0.19 ± 0.004Ab	0.25 ± 0.01Acd	0.22 ± 0.02Ac
阳离子交换量/cmol·kg^{-1}	0 ~ 10	9.90 ± 0.33Ca	12.67 ± 0.57Cb	17.34 ± 0.68Cc	19.45 ± 0.61Cd	22.91 ± 0.16Cf	21.36 ± 0.32Ce
	10 ~ 20	6.98 ± 0.81Ba	8.61 ± 1.26Bb	12.76 ± 0.37Bc	15.92 ± 0.62Bd	18.65 ± 0.42Be	17.30 ± 0.54Bde
	20 ~ 30	3.98 ± 0.18Aa	5.24 ± 0.69Aa	7.20 ± 0.91Ab	10.06 ± 0.88Ac	12.77 ± 1.08Ad	13.62 ± 0.43Ad
电导率/μS·cm^{-1}	0 ~ 10	46.41 ± 2.91Ca	90.38 ± 0.69Cb	144.12 ± 5.24Cc	190.90 ± 1.71Cd	236.97 ± 11.49Bd	295.47 ± 7.87Ce
	10 ~ 20	32.76 ± 1.88Ba	70.49 ± 1.42Bb	108.21 ± 3.18Bc	150.43 ± 7.08Bd	175.82 ± 5.18Ade	203.67 ± 10.64Be
	20 ~ 30	15.91 ± 1.12Aa	45.46 ± 0.94Ab	65.40 ± 6.34Abc	87.86 ± 5.80Ac	166.74 ± 9.06Ae	115.69 ± 4.47Ad
pH	0 ~ 10	5.22 ± 0.02Aa	5.59 ± 0.04Cb	6.12 ± 0.08Cc	6.39 ± 0.12Bd	6.78 ± 0.16Ce	7.07 ± 0.07Cf
	10 ~ 20	5.34 ± 0.01Ba	5.44 ± 0.02Ba	5.75 ± 0.08Ba	5.97 ± 0.22Aab	6.27 ± 0.05Bb	6.61 ± 0.13Bb
	20 ~ 30	5.33 ± 0.05Ba	5.38 ± 0.005Aa	5.49 ± 0.04Aab	5.67 ± 0.15Ab	5.92 ± 0.10Ac	6.08 ± 0.09Ac

1)表中数据为平均值 ± 标准误，不同处理在同一土层间的显著性水平用小写字母表示（$P < 0.05$），不同土层在同一处理间的显著性水平用大写字母表示（$P < 0.05$），下同

表 2 不同生物炭处理桉树人工林土壤养分含量的变化

Table 2 Changes in soil nutrient contents of *Eucalyptus* plantation in different biochar treatments

元素	土层/cm	处理					
		CK	T1	T2	T3	T4	T5
有机碳/g·kg^{-1}	0 ~ 10	7.34 ± 0.11Ca	7.89 ± 0.10Cb	8.38 ± 0.14Cc	8.97 ± 0.18Cd	9.65 ± 0.30Ce	10.97 ± 0.33Cf
	10 ~ 20	6.00 ± 0.13Ba	5.89 ± 0.39Babd	6.33 ± 0.03Babc	6.66 ± 0.11Bbc	7.83 ± 0.24Bce	8.01 ± 0.10Bde
	20 ~ 30	3.24 ± 0.02Aa	4.61 ± 0.20Ab	4.97 ± 0.06Ab	5.12 ± 0.07Ab	5.33 ± 0.18Abc	6.11 ± 0.16Ac
全磷/g·kg^{-1}	0 ~ 10	0.35 ± 0.01Ca	0.39 ± 0.02Cb	0.41 ± 0.02Cb	0.47 ± 0.01Cc	0.50 ± 0.02Cc	0.42 ± 0.02Cb
	10 ~ 20	0.23 ± 0.01Bb	0.27 ± 0.01Bc	0.21 ± 0.01Aa	0.33 ± 0.005Bd	0.37 ± 0.01Be	0.31 ± 0.01Bd
	20 ~ 30	0.15 ± 0.005Aa	0.17 ± 0.005Ab	0.29 ± 0.01Bd	0.25 ± 0.005Ac	0.29 ± 0.01Ad	0.24 ± 0.005Ac
全钾/g·kg^{-1}	0 ~ 10	6.56 ± 0.14Ca	6.95 ± 0.07Ca	8.89 ± 0.26Cb	9.28 ± 0.12Cb	10.74 ± 0.24Cd	9.71 ± 0.24Cc
	10 ~ 20	4.72 ± 0.31Ba	5.17 ± 0.08Bb	5.95 ± 0.21Bc	6.27 ± 0.08Bc	7.10 ± 0.12Bd	7.32 ± 0.26Bd
	20 ~ 30	3.13 ± 0.10Aa	3.23 ± 0.24Aa	4.74 ± 0.12Abc	4.47 ± 0.20Ab	5.16 ± 0.22Ad	5.10 ± 0.17Acd
速效磷/mg·kg^{-1}	0 ~ 10	1.44 ± 0.04Ca	1.41 ± 0.05Ca	1.54 ± 0.02Cb	1.64 ± 0.04Bc	1.83 ± 0.06Cd	1.92 ± 0.03Ce
	10 ~ 20	1.26 ± 0.005Ba	1.23 ± 0.01Ba	1.33 ± 0.02Bb	1.41 ± 0.02Ac	1.56 ± 0.03Bd	1.62 ± 0.02Be
	20 ~ 30	1.17 ± 0.02Ab	1.03 ± 0.04Aa	1.25 ± 0.04Ac	1.38 ± 0.01Ad	1.34 ± 0.02Ad	1.48 ± 0.03Ae
速效钾/mg·kg^{-1}	0 ~ 10	38.33 ± 1.32Ca	39.39 ± 0.65Ca	39.88 ± 0.10Ca	41.44 ± 0.43Cb	43.86 ± 0.65Cc	42.08 ± 0.41Cb
	10 ~ 20	29.2 ± 1.13Babcd	30.69 ± 0.33Ba	33.13 ± 0.12Bb	31.94 ± 0.67Babcd	36.21 ± 0.06Bd	34.10 ± 0.15Bc
	20 ~ 30	20.08 ± 0.17Aa	21.79 ± 0.30Ab	22.58 ± 0.33Ac	23.43 ± 0.37Ad	24.96 ± 0.42Ae	23.77 ± 0.46Ad
速效氮/mg·kg^{-1}	0 ~ 10	69.91 ± 1.87Ca	74.10 ± 2.38Ba	89.57 ± 3.19Cb	96.94 ± 1.58Cb	112.64 ± 6.91Cc	128.37 ± 4.12Cd
	10 ~ 20	50.67 ± 0.77Ba	49.15 ± 0.68Aa	61.11 ± 3.62Bb	66.68 ± 3.54Bb	82.39 ± 4.86Bc	90.11 ± 1.89Bd
	20 ~ 30	45.04 ± 1.61Aa	55.1 ± 4.11Abc	50.48 ± 0.52Ab	57.52 ± 1.87Acd	62.00 ± 3.08Ad	72.78 ± 1.69Ae

土壤速效磷除了在 T1 处理小于 CK 之外，随生物炭输入量的增加而趋于升高，0 ~ 20 cm 土层中，速效磷含量大小依次为 T1 < CK < T2 < T3 < T4 < T5，20 ~ 30 cm 土层中的速效磷含量表现为 T1 < CK < T2 < T4 < T3 < T5，均在 T5 处理最高. 土壤速效钾含虽有不同程度的增加，但增加的幅度相对较小，一致表现为在 T4 处理最高. 生物炭的输入提高了速效氮的含量，在 0 ~ 10 cm 土层中，大小顺序为 CK < T1 < T2 < T3 < T4 < T5；在 10 ~ 20 cm 土层，大小关系表现为 T1 < CK < T2 < T3 < T4 < T5；在 20 ~ 30 cm 土层，表现为 CK < T2 < T1 < T3 < T4 < T5，均在 T5 处理最高.

与土壤物理和化学性质相近，在不同土层中，土壤有机碳、全磷、全钾、速效磷、速效钾和速效氮，除了个别处理在 20 ~ 30 cm 土层的含量略大于 10 ~ 20 cm 土层之外，其它处理均表现为随着土层深度的增加而降低. 总之，桉树枝条生物炭输入桉树林土壤后，提高了土壤有机碳、全磷、全钾、速效磷、速效钾和速效氮等养分含量，T4 和 T5 处理（4% 和 6%）的作用效果较明显.

2.4　土壤物理性质与化学性质之间的相关性

由表 3 可知，pH 值、阳离子交换量和电导率两两间正相关且分别与交换性钙、交换性镁、自然含水量、毛管孔隙度、总毛管孔隙度之间均有极显著正相关（$P < 0.01$），pH 值和电导率两者分别与交换性酸、交换性铝、容重之间均有显著或极显著负相关关系（$P < 0.05$，$P < 0.01$）. 交换性酸和交换性铝两者正相关且分别与交换性氢、交换性钠、容重之间均有极显著正相关性（$P < 0.01$）. 交换性钙和交换性镁两两间正相关且分别与自然含水量、毛管孔隙度和总毛管孔隙度之间均有极显著正相关关系（$P < 0.01$）.

土壤有机碳、全磷和全钾两两间正相关且分别与 pH 值、阳离子交换量、电导率、交换性氢、交换性钠、交换性钙、交换性镁、自然含水量、毛管孔隙度、总毛管孔隙度、速效磷、速效钾、速效氮之间均有极

表 3　土壤各理化性质指标之间的 Pearson 相关性分析[1)]

Table 3　Pearson correlation analysis between the physical and chemical properties of soils

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9
X2	0.907**	1.000							
X3	0.959**	0.926**	1.000						
X4	−0.460**	−0.211	−0.414**	1.000					
X5	−0.388**	−0.117	−0.336*	0.894**	1.000				
X6	−0.052	0.081	−0.031	0.726**	0.796**	1.000			
X7	−0.058	0.144	−0.014	0.787**	0.892**	0.933**	1.000		
X8	0.886**	0.934**	0.910**	−0.186	−0.077	0.160	0.203	1.000	
X9	0.757**	0.873**	0.789**	0.087	0.162	0.350**	0.413**	0.889**	1.000
X10	−0.502**	−0.253	−0.467**	0.950**	0.880**	0.675**	0.742**	−0.213	0.018
X11	0.781**	0.928**	0.828**	0.054	0.155	0.322*	0.399**	0.902**	0.913**
X12	0.760**	0.860**	0.781**	0.003	0.135	0.345*	0.405**	0.888**	0.899**
X13	0.770**	0.887**	0.809**	0.054	0.193	0.402**	0.475**	0.906**	0.919**
X14	0.785**	0.883**	0.813**	0.063	0.193	0.414**	0.478**	0.884**	0.915**
X15	0.651**	0.820**	0.709**	0.144	0.260	0.361**	0.464**	0.863**	0.846**
X16	0.790**	0.907**	0.814**	0.073	0.183	0.390**	0.456**	0.928**	0.916**
X17	0.877**	0.916**	0.879**	−0.197	−0.066	0.192	0.252	0.907**	0.829**
X18	0.586**	0.783**	0.635**	0.360**	0.462**	0.571**	0.665**	0.785**	0.884**
X19	0.888**	0.893**	0.886**	−0.155	−0.053	0.275*	0.285*	0.917**	0.899**

	X10	X11	X12	X13	X14	X15	X16	X17	X18
X10	1.000								
X11	0.012	1.000							
X12	−0.030	0.853**	1.000						
X13	0.012	0.912**	0.983**	1.000					
X14	0.008	0.945**	0.907**	0.957**	1.000				
X15	0.105	0.885**	0.860**	0.897**	0.869**	1.000			
X16	0.044	0.954**	0.912**	0.953**	0.947**	0.921**	1.000		
X17	−0.252	0.870**	0.877**	0.902**	0.902**	0.806**	0.901**	1.000	
X18	0.308*	0.924**	0.821**	0.892**	0.925**	0.867**	0.921**	0.779**	1.000
X19	−0.219	0.872**	0.919**	0.930**	0.920**	0.797**	0.911**	0.937**	0.788**

1）X1：pH；X2：阳离子交换量；X3：电导率；X4：交换性酸；X5：交换性铝；X6：交换性氢；X7：交换性钠；X8：交换性钙；X9：交换性镁；X10：容重；X11：自然含水量；X12：毛管孔隙度；X13：总毛管孔隙度；X14：有机碳；X15：全磷；X16：全钾；X17：速效磷；X18：速效钾；X19：速效氮；“*”和“**”分别表示在 0.05 和 0.01 水平上达显著水平

显著正相关关系($P<0.01$).速效钾分别与不同理化性质指标之间均有显著正相关关系($P<0.05$,$P<0.01$).速效磷和速效氮两两间正相关且分别与pH值、阳离子交换量、电导率、交换性钙、交换性镁、自然含水量、毛管孔隙度、总毛管孔隙度之间呈现极显著的正相关关系($P<0.01$).说明土壤各物理因子之间、各化学因子之间以及理化指标两两之间绝大多数存在正相关关系,相互影响,关系密切,桉树枝条生物炭对改善土壤理化性质和提高土壤养分含量有积极的正效应和一定的调控作用.

3 讨论

3.1 生物炭输入对桉树人工林土壤物理性质的效果

一般施用生物炭会通过增加土壤有机质的输入,有利于土壤营养元素的补充和土壤孔隙度的改善,对土壤团聚体的形成有促进作用,并提供了一定的养分给土壤微生物[17].土壤容重含量的减小,会促进土壤养分的保留并降低土壤板结程度.本研究中,与对照0~30 cm土层相比,施用桉树枝条生物炭1年后,降低了土壤容重含量,平均降幅为3.82%~33.55%,其中T5处理最小(1.14 g·cm^{-3}),表明生物炭输入量越大,对容重的降低作用越明显.生物炭处理增加了土壤自然含水量,平均增幅为7.67%~31.75%,在T4处理最大(24.29%),略高于T5处理(23.12%).尽管各生物炭处理的20~30 cm土层含水量数值最低,但其增幅较高(T1:13.31%、T2:19.13%、T3:24.54%、T4:38.05%和T5:28.64%),而0~10 cm土层含水量数值虽最高,其增幅相应为T1:6.31%、T2:13.17%、T3:20.03%、T4:29.62%和T5:23.36%.生物炭处理亦增加了毛管孔隙度和总毛管孔隙度,平均增幅分别为8.95%~33.19%和9.28%~35.86%,毛管孔隙度和总毛管孔隙度均在T5处理最大(32.97%和45.95%).类似含水量,与0~20 cm土层相比,20~30 cm土层各生物炭处理的总毛管孔隙度增幅较高(17.08%~53.78%),这说明生物炭对20~30 cm土层土壤的改善作用没有减弱.可见,桉树枝条生物炭表现出有利于改善土壤结构和土壤水分状况的正效应,施用量越高,其效应越显著,且不同输入量间有显著差异,这与其他学者[1,29]的研究结果相似.

在一、二和三代的杉木人工林,添加杉木皮生物炭,降低了土壤容重,降幅分别为12.50%、19.08%和19.67%[30].由于生物炭的粒径小和质地疏松,体积密度相对不大,通过土壤松紧度的改善,可以影响容重含量[31].一般生物炭具有多孔结构且密度较低和容重小于土壤容重等特征,这可能对容重有一定的稀释效果[32],同时还可能通过提高土壤含水量和养分,土壤结构的改善,有利于土壤微生物数量和活性的升高,增加了矿物质颗粒与菌体间的耦合作用,从而降低土壤容重[33].有研究表明,随着生物炭施入量的增加,土壤含水量增加10%~35%[34],由于生物炭自身具有多孔性并有较大的比表面积,且有一定数量的亲水性官能团会附着于其表面[35],促进了其持水性能,加快生物炭对水分吸附力的提升,从而使田间持水量增加[36].不同生物炭孔隙特性对不同质地土壤空隙的影响是不同的,孔隙较大的生物炭适用于黏土,有利于土壤的导水性,孔隙较小的生物炭类型适用于沙土,有利于提高土壤的保水性[37].

姜志翔等[38]的研究认为,生物炭一般能够有效改善土壤通透性、阳离子交换量和持水能力等理化性质,从而有利于土壤中营养元素的保持,与其结果类似,桂北桉树人工林种植地区属于亚热带地区,雨热同期,温度较高,降雨量大,且水土流失较严重,合理施用桉树枝条生物炭有助于提高土壤的持水能力.因此,在桉树人工林,尤其在4~5 a短的轮伐期后,收集废弃桉树枝条制备为生物炭并返还和输入土壤,随着桉树枝条生物炭施用量的增加,对土壤物理性质有积极的作用效果,可使土壤容重趋于减小,有利于土质的疏松和透气性,并且提高了土壤毛管孔隙度和总毛管孔隙度,促进了土壤含水量的增加,促进了土壤结构的改善,这将有利于一代或二代桉树林根系及地上植株的生长.

3.2 桉树人工林土壤化学性质对生物炭输入的响应

本文研究结果表明,桉树枝条生物炭施用1 a后,土壤pH值、阳离子交换量均随着生物炭输入量的增加而呈现增加的趋势,相对于对照0~30 cm土层,pH值平均增加了0.17~1.29个单位,在T5处理最大(6.58),pH值在0~10 cm土层的增幅相对最高(7.22%~35.59%).电导率的平均增幅为117.00%~546.64%,各生物炭处理是对照的2.17(T1)、3.34(T2)、4.51(T3)、6.10(T4)和6.47(T5)倍,在T5处理最大(204.94 μS·cm^{-1}).阳离子交换量平均增幅为27.08%~160.39%,各生物炭处理分别为对照的1.27(T1)、1.79(T2)、2.18(T3)、2.60(T4)和2.51(T5)倍,在T4处理最大(18.11 cmol·kg^{-1}),与0~20 cm土层相比,20~30 cm土层各生物炭处理阳离子交换量和电导率的增幅均较高(31.46%~242.01%和185.77%~627.28%).桉树枝条生物炭的输入对桂北桉树人工林酸化土壤有积极的改良效果,改善了土壤酸化情况,这与其它研究结果相似[9,14,29].

有研究报道指出，在酸性土壤输入生物质炭，可以提高土壤 pH 值，并且与生物炭的施用量呈正相关关系[9,39]. 生物炭对土壤酸度的改良效果主要决定于生物质炭本身所含碱量，对土壤 pH 值的提高，可能也与生物炭中碳酸盐的总量和结晶态碳酸盐的含量均随其制备温度的升高而增加有关[40]，由于其自身有较大的比表面积和孔隙度[41]，而且也有大量的羟基、羰基和羧基等含氧官能团，通过对土壤中 H^+ 产生的吸附效应，增加了土壤的 pH 值[42]. 此外，这些大量官能团的存在，也可以增加土壤的电荷总量，导致土壤阳离子交换量的增加[43]. 同时，生物炭自身有较高的阳离子交换量，这可以使土壤 pH 值升高，增加了土壤的可变负电荷数量，进而促进土壤阳离子交换量的提高[14]. 究其原因，既有生物炭的孔隙对矿质营养元素的截留作用[40]，也有生物炭含有丰富的醌基、酚基和羰基等官能团对阳离子的吸附作用[16,44]. 本研究结果表明，桉树枝条生物炭施用 1 a 后，提高了电导率含量，一方面，可能是生物炭灰分中有一定数量的 K、P 和 Mg 等矿质元素，在土壤水中呈现为可溶性离子态，使土壤可溶性盐含量增加，提高了土壤的电导率；另一方面，生物炭添加可以提高土壤的含水量，增加了土壤中的可溶性离子含量，进而使土壤电导率增加[44].

本研究中，随着桉树枝条生物炭施用量的增加，降低了土壤交换性酸、交换性铝、交换性氢和交换性钠含量，增加了土壤交换性钙和交换性镁含量. 与对照 0 ~ 30 cm 土层比较，土壤交换性酸和交换性铝含量的平均降幅分别为 8.28% ~ 70.03% 和 5.55% ~ 70.34%，均在 T5 处理最小（1.65 $cmol \cdot kg^{-1}$ 和 2.05 $cmol \cdot kg^{-1}$）. 土壤交换性氢和交换性钠含量的平均降幅分别为 5.10% ~ 21.78%、12.81% ~ 49.27%，均在 T4 处理最小（1.21 $cmol \cdot kg^{-1}$ 和 25.88 $g \cdot kg^{-1}$）. 土壤交换性钙和交换性镁含量的平均增幅分别为 17.10% ~ 66.14% 和 17.38% ~ 71.38%，均表现为在 T4 处理最大（3.25 $g \cdot kg^{-1}$ 和 0.37 $g \cdot kg^{-1}$）. 与 0 ~ 20 cm 土层相比，20 ~ 30 cm 土层各生物炭处理交换性镁含量的增幅较高（39.83% ~ 114.41%），交换性钙含量的增幅在土层间无明显规律.

桂北桉树人工林种植区土壤以红壤、山地黄红壤为主，笔者前期研究也表明土壤呈现酸化趋势[25]，由于桉树枝条生物炭自身呈碱性，pH 值为 9.52，表 1 结果表明，生物炭施用提高了土壤 pH 值、阳离子交换量、电导率、交换性钙和交换性镁含量，降低了土壤交换性酸、交换性铝、交换性氢和交换性钠含量，这对土壤缓冲能力的提升和土壤酸度的降低都是有利的，并且对于减缓桉树林土壤酸化具有正效应. 施用桉树枝条生物炭 1 a 后，一方面桉树枝条生物炭中的碱性物质可能中和了土壤的酸性物质，另一方面，尽管土壤中有含量较高的致酸离子 H^+、Al^{3+}，但桉树枝条生物炭含有很多 Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^+ 和 Na^+ 等盐基离子，与 H^+ 和 Al^{3+} 间的交换作用，从而提高了土壤的 pH 值，降低了土壤的交换性氢和交换性铝对土壤的毒害. 有研究表明，由于生物炭具有一定的吸附作用，也有类似的石灰效应，因而在缓解土壤铝毒方面，表现出有一定的作用效果[45]. 另外，生物炭含有较多的碳酸盐，也有大量的—COO—等有机官能团，经过其与土壤中 H^+ 的生物作用，也能使土壤中铝离子含量降低[46].

朱盼等[47]的研究也表明生物炭处理的土壤交换性钙和交换性镁含量高于对照组，同时也降低土壤交换性铝含量；而王义祥等[48]的研究表明，土壤交换性钙呈现先增加后减少的趋势，交换性钠是整体增加的趋势. 桉树枝条生物炭含有大量的灰分元素，例如可溶态的 K、Ca 和 Mg 等，既可以吸附土壤中的养分含量，自身又可以释放出大量的矿质营养，使土壤交换性镁和交换性钙含量得到提高，这均有利于土壤胶体有较强的黏结力，可能阻止了土壤胶体的扩散，间接提高了土壤的团聚性结构，促进了土壤导水、导气的能力. 土壤交换性钠一般可以指示土壤的碱化程度，其含量较高表示土壤可能会出现膨胀或发生板结现象. 由于桉树枝条生物炭有一定的吸附性，降低了土壤交换性钠含量，这对减缓桉树人工林土壤在湿时膨胀、干时板结有一定的积极作用. 不同的是，在滨海盐渍土中，生物炭的添加并未对土壤中交换性钠有显著的影响[49]. 管恩娜[50]的研究表明，生物炭添加在棕壤中，交换性钙的含量增加，对交换性镁含量的影响不大，交换性钠为先上升后下降的趋势. 以上相关结论不一致的原因，可能与不同地区土壤中各元素的含量、土壤中元素的交换能力差异等有关，而且不同土壤类型、不同的生物炭材料和施用量，对交换性离子的作用效果会有所差异.

3.3　桉树人工林土壤养分含量对生物炭输入的响应

有研究表明，生物炭输入对土壤结构和理化性质有一定的改善作用[5,29]，也促进了土壤有机碳含量的增加[3,51]. 在黄土高原塿土地区，在 500℃ 条件下制备苹果园树枝生物炭，既能保证最大程度地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[52]. 本文结果说明，在桂北桉树人工林输入桉树枝条生物炭，可以提高土壤有机碳、全磷、全钾、速效氮、速效磷和速效钾等养分含量. 相对于对照 0 ~ 30cm 土层，有机碳、速效磷和速效氮含量的平均增幅分别为 10.94% ~ 51.37%、6.28%

~29.41%和7.72%~75.87%,均表现为在T5处理最大(8.37 g·kg^{-1}、1.67 mg·kg^{-1}和97.09 mg·kg^{-1}).全磷、全钾和速效钾含量的平均增幅分别为14.29%~59.45%、6.48%~59.57%和4.79%~19.81%,均表现为在T4处理最大(0.38 g·kg^{-1}、7.67 g·kg^{-1}和35.01 mg·kg^{-1}).相对于0~20cm土层,在20~30cm土层各生物炭处理的土壤有机碳、全磷和速效钾含量的增幅较高(42.28%~88.68%、18.18%~65.91%和12.45%~18.38%).以上表明,桉树枝条生物炭输入促进了土壤培肥效应,提高了土壤质量,这与张祥等[53]添加花生壳生物炭对红壤和黄棕壤影响的结论类似,其生物炭施用红壤后,明显提高了红壤的速效磷、速效钾和速效氮等养分含量.生物炭对土壤养分含量的提高作用,一方面,是因为生物炭本身就含有N、P、K、Ca、Mg和S等矿质营养元素,输入和返还到土壤后,可以增加土壤营养元素含量,另一方面,生物炭亦有利于土壤有效养分的提高,降低养分的淋溶损失[42].王耀锋等[54]的研究表明,由于大量可溶性钾和可溶性磷存在于生物炭中,生物炭可通过自身可溶性磷的迟缓释放作用,促使了土壤中有效磷的增加,而其可溶性钾含量则在较短时间内能呈现出有效释放的状态[55].生物炭能通过改善土壤的理化性质,提高土壤中营养元素吸收效率[38],桉树枝条生物炭输入土壤后,表现出有利于土壤有机碳积累的趋势,可促进土壤固碳,这类似于其它研究结果[3~5,51,56].

生物炭施用可以促进土壤肥力的提高,提升土壤质量,有利于农田土壤的增汇减排效应,是一种较好的土壤改良剂,在实践应用中选择优良的生物炭及其最佳输入量也很关键[4,17]. Van Zwieten等[46]在土壤中施入10 t·hm^{-2}生物炭可以显著提高土壤pH.李倩倩等[57]的研究表明,废弃果树树干、枝条(450℃、限氧条件下)制备生物炭,从经济效益和改善效果综合考虑,在陕西关中平原耕层土壤施入40~60 t·hm^{-2}的生物炭最合适.也有研究表明[58],在兼顾砂壤土的改良和促进作物产量的提高等方面,当生物炭施用量为40 t·hm^{-2}时效果较好.段春燕等[25]在桂北桉树人工林的研究表明,由于粗放型的营林措施,桉树人工林地表的植物凋落物积累量较小,加之在3~4 a,或4~5 a短的轮伐期的影响下,导致桉树林土壤有机碳输入量的减小.本文研究结果表明,桉树枝条生物炭具有较大的比表面积和孔隙度,桉树枝条生物炭输入1 a后对桉树林酸化土壤的物理和化学性质具有明显的改良作用,是酸性土壤一种理想的改良剂,并能够增加土壤有机碳,对于土壤固碳具有一定的潜力,这可以减缓轮伐期土壤地力的下降,有利于土壤养分的保持.在亚热带地区,由于大多数土壤是酸性的原因,其降低了土壤磷的有效性,而施用桉树枝条生物炭有利于提高土壤有效磷的含量,这间接说明,在实践中通过桉树枝条废弃物制备生物炭并输入土壤,则可能有利于酸性土壤有效磷的调控.

本研究结果显示,桉树枝条生物炭输入后,显著影响了桉树人工林酸化土壤的理化性质,使土壤肥力水平都有不同程度的提升,在桉树人工林0~30 cm土层施用4%~6%(40~60 t·hm^{-2})的输入量时,对培肥土壤综合效果表现较优,对桉树林土壤改良具有一定的应用价值.秸秆废弃物转化生物炭还田,提升土壤肥力和改良酸性土壤,一直以来都是备受关注的焦点问题[3~5,16,21].由于不同特性、不同量的生物炭应用于不同类型和不同区域的农业土壤因其条件的复杂性而发生不同的作用效果[16],如将生物炭大量应用于农田等的实践中,同时还要考虑开展生物炭土壤环境效应的相关研究[59].将桉树人工林采伐废弃物枝条制成生物炭,并将其就地返还土壤,既可以减少水肥流失等问题,也有助于改善土壤的肥力.阎海涛等[60]的研究表明,生物炭施用3 a后对土壤理化特性有显著的影响.桉树林土壤输入桉树枝条生物炭后,对土壤团聚体结构、土壤微生物、土壤氮组分、磷组分以及养分循环等的影响,将在后续定位试验中进一步地跟踪监测.

4 结论

(1)桂北桉树人工林输入生物炭(桉树枝条,500℃厌氧制备)1 a后,对土壤理化特性有显著的影响,主要降低了土壤容重,提高了土壤含水量,增加了土壤毛管孔隙度和总毛管孔隙度;提高了土壤pH值、电导率、阳离子交换量、交换性镁和交换性钙;降低了土壤交换性酸、交换性铝、交换性氢和交换性钠.土壤理化性质的作用效果与生物炭输入量间呈正相关.

(2)土壤有机碳、全磷、全钾、速效氮、速效磷和速效钾均随桉树枝条生物炭输入量的增加而呈现增大的趋势,绝大部分理化因子之间具有显著的正相关性.桉树枝条生物炭可以缓解桉树人工林土壤酸化的趋势,对酸化土壤有积极的正效应和一定的改良效果,有利于土壤质量的提升.综合考虑,在桉树人工林0~30cm土层,生物炭输入量提高到4%~6%(40~60 t·hm^{-2})时,对土壤的培肥作用效果最好.本研究结果可为桉树人工林废弃物枝条的资源化利用、生物炭制备就地归还桉树人工林土壤、林业生态环境建设以及桉树人工林的可持续经营等方面

提供理论依据与实践参考.

致谢：感谢刘建春、于倩倩和程桂霞等在试验样品分析方面提供的帮助！

参考文献：

[1] 田冬，高明，黄容，等. 油菜/玉米轮作农田土壤呼吸和异养呼吸对秸秆与生物炭还田的响应[J]. 环境科学，2017，**38**(7)：2988-2999.
Tian D，Gao M，Huang R，*et al*. Response of soil respiration and heterotrophic respiration to returning of straw and biochar in rape-maize rotation systems[J]. Environmental Science，2017，**38**(7)：2988-2999.

[2] 王红，夏雯，卢平，等. 生物炭对土壤中重金属铅和锌的吸附特性[J]. 环境科学，2017，**38**(9)：3944-3952.
Wang H，Xia W，Lu P，*et al*. Adsorption characteristics of biochar on heavy metals (Pb and Zn) in soil[J]. Environmental Science，2017，**38**(9)：3944-3952.

[3] 柯跃进，胡学玉，易卿，等. 水稻秸秆生物炭对耕地土壤有机碳及其 CO_2 释放的影响[J]. 环境科学，2014，**35**(1)：93-99.
Ke Y J，Hu X Y，Yi Q，*et al*. Impacts of rice straw biochar on organic carbon and CO_2 release in arable soil[J]. Environmental Science，2014，**35**(1)：93-99.

[4] 张婷，王旭东，逄萌雯，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] 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.

[6] Burrell L D，Zehetner F，Rampazzo N，*et al*. Long-term effects of biochar on soil physical properties[J]. Geoderma，2016，**282**：96-102.

[7] Devereux R C，Sturrock C J，Mooney S J. The effects of biochar on soil physical properties and winter wheat growth[J]. Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh，2012，**103**(1)：13-18.

[8] Novak J M，Busscher W J，Laird D L，*et al*. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil[J]. Soil Science，2009，**174**(2)：105-112.

[9] Gul S，Whalen J K，Thomas B W，*et al*. Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils：mechanisms and future directions[J]. Agriculture，Ecosystems & Environment，2015，**206**：46-59.

[10] 王磊. 茶园土壤改良剂的筛选及其酸度调控机制[D]. 北京：中国科学院研究生院，2012.

[11] Chintala R，Schumacher T E，McDonald L M，*et al*. Phosphorus sorption and availability from biochars and soil/biochar mixtures[J]. Clean-Soil，Air，Water，2014，**42**(5)：626-634.

[12] 周桂玉，窦森，刘世杰. 生物质炭结构性质及其对土壤有效养分和腐殖质组成的影响[J]. 农业环境科学学报，2011，**30**(10)：2075-2080.
Zhou G Y，Dou S，Liu S J. The structural characteristics of biochar and its effects on soil available nutrients and humus composition[J]. Journal of Agro-Environment Science，2011，**30**(10)：2075-2080.

[13] 张晗芝，黄云，刘钢，等. 生物炭对玉米苗期生长、养分吸收及土壤化学性状的影响[J]. 生态环境学报，2010，**19**(11)：2713-2717.
Zhang H Z，Huang Y，Liu G，*et al*. Effects of biochar on corn growth，nutrient uptake and soil chemical properties in seeding stage[J]. Ecology and Environment，2010，**19**(11)：2713-2717.

[14] Wan Q，Yuan J H，Xu R K，*et al*. Pyrolysis temperature influences ameliorating effects of biochars on acidic soil[J]. Environmental Science and Pollution Research，2014，**21**(4)：2486-2495.

[15] Basso A S，Miguez F E，Laird D A，*et al*. Assessing potential of biochar for increasing water-holding capacity of sandy soils[J]. GCB Bioenergy，2013，**5**(2)：132-143.

[16] 王湛，李银坤，徐志刚，等. 生物质炭对土壤理化性状及氮素转化影响的研究进展[J]. 土壤，2019，**51**(5)：835-842.
Wang Z，Li Y K，Xu Z G，*et al*. Research progresses in effects of biochar on soil physiochemical properties and nitrogen transformation[J]. Soils，2019，**51**(5)：835-842.

[17] 王月玲，耿增超，王强，等. 生物炭对塿土土壤温室气体及土壤理化性质的影响[J]. 环境科学，2016，**37**(9)：3634-364.
Wang Y L，Geng Z C，Wang Q，*et al*. Influence of biochar on greenhouse gases emissions and physico-chemical properties of loess soil[J]. Environmental Science，2016，**37**(9)：3634-3641.

[18] 韦思业. 不同生物质原料和制备温度对生物炭物理化学特征的影响[D]. 北京：中国科学院大学，2017.
Wei S Y. Influence of biomass feed stocks and pyrolysis temperatures on physical and chemical properties of biochar[D]. Beijing：University of Chinese Academy of Sciences，2017.

[19] Li B，Fan C H，Zhang H，*et al*. Combined effects of nitrogen fertilization and biochar on the net global warming potential，greenhouse gas intensity and net ecosystem economic budget in intensive vegetable agriculture in southeastern China[J]. Atmospheric Environment，2015，**100**：10-19.

[20] Subedi R，Taupe N，Pelissetti S，*et al*. Greenhouse gas emissions and soil properties following amendment with manure-derived biochars：influence of pyrolysis temperature and feedstock type[J]. Journal of Environmental Management，2016，**166**：73-83.

[21] 殷丹阳，罗洁文，邱云霄，等. 生物炭改良林地土壤研究进展[J]. 世界林业研究，2016，**29**(6)：23-28.
Yin D Y，Luo J W，Qiu Y X，*et al*. Research advance on biochar in soil improvement[J]. World Forestry Research，2016，**29**(6)：23-28.

[22] 温远光，郑羡，李明臣，等. 广西桉树林取代马尾松林对土壤理化性质的影响[J]. 北京林业大学学报，2009，**31**(6)：145-148.
Wen Y G，Zheng X，Li M C，*et al*. Effects of *Eucalypt* plantation replacing *Masson pine* forest on soil physiochemical properties in Guangxi，southern China[J]. Journal of Beijing Forestry University，2009，**31**(6)：145-148.

[23] Lynch H B，Epps K Y，Fukami T，*et al*. Introduced canopy tree species effect on the soil microbial community in a montane tropical forest[J]. Pacific Science，2012，**66**(2)：141-150.

[24] 覃延南. 广西沿海地区桉树林地土壤养分现状与评价[J]. 广西林业科学，2008，**37**(2)：88-91.
Qin Y N. The present situation and evaluation of the *Eucalyptus* forest land soil along the coastal area of Guangxi[J[. Guangxi Forestry Science，2008，**37**(2)：88-91.

[25] 段春燕，何成新，徐广平，等. 桂北不同林龄桉树人工林土

壤养分及生物学特性[J]. 热带作物学报, 2019, **40**(6): 1213-1222.
Duan C Y, He C X, Xu G P, *et al*. Soil nutrients and biological characteristics in *Eucalyptus* plantations of different planting ages at North Guangxi[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2019, **40**(6): 1213-1222.

[26] 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, 2015, **36**(9): 3393-3400.

[27] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.

[28] 马立峰, 杨亦杨, 石元值, 等. Mehlich 3 浸提剂在茶园土壤养分分析中的应用[J]. 土壤通报, 2007, **38**(4): 745-748.
Ma L F, Yang Y Y, Shi Y Z, *et al*. Applications of an universal soil extractant of Mehlich 3 to nutrient analysis of tea garden soil [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007, **38**(4): 745-748.

[29] 卢再亮, 李九玉, 姜军, 等. 生活污水污泥制备的生物质炭对红壤酸度的改良效果及其环境风险[J]. 环境科学, 2012, **33**(10): 3585-3591.
Lu Z L, Li J Y, Jiang J, *et al*. Amelioration effects of wastewater sludge biochars on red soil acidity and their environmental risk [J]. Environmental Science, 2012, **33**(10): 3585-3591.

[30] 孟李群. 施用生物炭对杉木人工林生态系统的影响研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2014.
Meng L Q. Effect of biochar application on Chinese fir plantation ecosystem [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2014.

[31] Herath H M S K, Camps-Arbestain M, Hedley M. Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: an Alfisol and an Andisol[J]. Geoderma, 2013, **209-210**: 188-197.

[32] Burrell L D, Zehetner F, Rampazzo N, *et al*. Long-term effects of biochar on soil physical properties[J]. Geoderma, 2016, **282**: 96-102.

[33] Lei O Y, Zhang R D. Effects of biochars derived from different feedstocks and pyrolysis temperatures on soil physical and hydraulic properties[J]. Journal of Soils and Sediments, 2013, **13**(9): 1561-1572.

[34] Oguntunde P G, Abiodun B J, Ajayi A E, *et al*. Effects of charcoal production on soil physical properties in Ghana[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2008, **171**(4): 591-596.

[35] Tian D, Qu Z Y, Gou M M, *et al*. Experimental study of influence of biochar on different texture soil hydraulic characteristic parameters and moisture holding properties[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2015, **24**(3): 1435-1442.

[36] Rajapaksha A U, Chen S S, Tsang D C W, *et al*. Engineered/designer biochar for contaminant removal/immobilization from soil and water: potential and implication of biochar modification[J]. Chemosphere, 2016, **148**: 276-291.

[37] 张峥嵘. 生物炭改良土壤物理性质的初步研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014
Zhang Z R. A preliminary study on the effect of biochar on soil physical properties[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.

[38] 姜志翔, 郑浩, 李锋民, 等. 生物炭碳封存技术研究进展[J]. 环境科学, 2013, **34**(8): 3327-3333.
Jiang Z X, Zheng H, Li F M, *et al*. Research progress on biochar carbon sequestration technology [J]. Environmental Science, 2013, **34**(8): 3327-3333.

[39] Laird D, Fleming P, Wang B Q, *et al*. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil [J]. Geoderma, 2010, **158**(3-4): 436-442.

[40] 袁金华, 徐仁扣. 生物质炭对酸性土壤改良作用的研究进展[J]. 土壤, 2012, **44**(4): 541-547.
Yuan J H, Xu R K. Research progress of amelioration effects of biochars on acid soils[J]. Soils, 2012, **44**(4): 541-547.

[41] 李坤权, 李烨, 郑正, 等. 高比表面生物质炭的制备、表征及吸附性能[J]. 环境科学, 2013, **34**(1): 328-335.
Li K Q, Li Y, Zheng Z, *et al*. Preparation, characterization and adsorption performance of high surface area biomass-based activated carbons[J]. Environmental Science, 2013, **34**(1): 328-335.

[42] Yuan J H, Xu R K, Zhang H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(3): 3488-3497.

[43] Wu H P, Lai C, Zeng G M, *et al*. The interactions of composting and biochar and their implications for soil amendment and pollution remediation: a review [J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2017, **37**(6): 754-764.

[44] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal-a review[J]. Biology and Fertility of Soils, 2002, **35**(4): 219-230.

[45] Qian L B, Chen B L, Hu D F. Effective alleviation of aluminum phytotoxicity by manure-derived biochar [J]. Environmental Science & Technology, 2013, **47**(6): 2737-2745.

[46] Van Zwieten L, Kimber S, Morris S, *et al*. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility[J]. Plant and Soil, 2010, **327**(1-2): 235-246.

[47] 朱盼, 应介官, 彭抒昂, 等. 生物炭和石灰对红壤理化性质及烟草苗期生长影响的差异[J]. 农业资源与环境学报, 2015, **32**(6): 590-595.
Zhu P, Ying J G, Peng S A, *et al*. Effects of biochar and Lime on soil physicochemical properties and tobacco seedling growth in red soil[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2015, **32**(6): 590-595.

[48] 王义祥, 辛思洁, 叶菁, 等. 生物炭对强酸性茶园土壤酸度的改良效果研究[J]. 中国农学通报, 2018, **34**(12): 108-111.
Wang Y X, Xin S J, Ye J, *et al*. Improvement effect of biochar on soil acidity in strong acidity tea garden [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, **34**(12): 108-111.

[49] 赵铁民, 李渊博, 陈为峰, 等. 生物炭对滨海盐渍土理化性质及玉米幼苗抗氧化系统的影响[J]. 水土保持学报, 2019, **33**(2): 196-200.
Zhao T M, Li Y B, Chen W F, *et al*. Effect of biochar on the physicochemical properties of coastal saline soil and the antioxidation system activity in maize seedlings[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, **33**(2): 196-200.

[50] 管恩娜. 生物质炭对土壤理化性质、烤烟生长及烟草黑胫病的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
Guan E N. Effect of biochar on soil physicochemical properties, tobacco growth and tobacco black shank[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016.

[51] 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, **36**(7): 2655-2661.

[52] 赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 等. 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[J]. 环境科学, 2017, **38**(2): 769-782.
Zhao S X, Yu X L, Li Z H, *et al*. Effects of biochae pyeolyzed at vaeying tempeeatuees on soil oeganic caebon and its components: influence on the composition and peopeeties of humic substances[J]. Environmental Science, 2017, **38**(2): 769-782.

[53] 张祥, 王典, 姜存仓, 等. 生物炭对我国南方红壤和黄棕壤理化性质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, **21**(8): 979-984.
Zhang X, Wang D, Jiang C C, *et al*. Effect of biochar on physicochemical properties of red and yellow brown soils in the south China region[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, **21**(8): 979-984.

[54] 王耀锋, 刘玉学, 吕豪豪, 等. 水洗生物炭配施化肥对水稻产量及养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, **21**(4): 1049-1055.
Wang Y F, Liu Y X, Lü H H, *et al*. Effect of washing biochar and chemical fertilizers on rice yield and nutrient uptake[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, **21**(4): 1049-1055.

[55] Angst T E, Sohi S P. Establishing release dynamics for plant nutrients from biochar[J]. GCB Bioenergy, 2013, **5**(2): 221-226.

[56] 徐国鑫, 王子芳, 高明, 等. 秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(1): 355-362.
Xu G X, Wang Z F, Gao M, *et al*. Effects of straw and biochar return in soil on soil aggregate and carbon sequestration[J]. Environmental Science, 2018, **39**(1): 355-362.

[57] 李倩倩, 许晨阳, 耿增超, 等. 生物炭对塿土土壤容重和团聚体的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(7): 3388-3396.
Li Q Q, Xu C Y, Geng Z C, *et al*. Impact of biochar on soil bulk density and aggregates of Lou soil[J]. Environmental Science, 2019, **40**(7): 3388-3396.

[58] 李昌见, 屈忠义, 勾芒芒, 等. 生物炭对土壤水肥利用效率与番茄生长影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, **33**(11): 2187-2193.
Li C J, Qu Z Y, Gou M M, *et al*. Effects of biochar amendment on soil water and nutrient utilization efficiencies and tomato growth[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, **33**(11): 2187-2193.

[59] 张阳阳, 胡学玉, 邹娟, 等. 生物炭输入对城郊农业区农田地表反照率及土壤呼吸的影响[J]. 环境科学, 2017, **38**(4): 1622-1632.
Zhang Y Y, Hu X Y, Zou J, *et al*. Effects of biochar on surface albedo and soil respiration in suburban agricultural soil[J]. Environmental Science, 2017, **38**(4): 1622-1632.

[60] 阎海涛, 殷全玉, 丁松爽, 等. 生物炭对褐土理化特性及真菌群落结构的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(5): 2412-2419.
Yan H T, Yin Q Y, Ding S S, *et al*. Effect of biochar amendment on physicochemical properties and fungal community structures of cinnamon soil[J]. Environmental Science, 2018, **39**(5): 2412-2419.

HUANJING KEXUE Vol. 41 No. 9
Environmental Science (monthly) Sep. 15, 2020

CONTENTS