

DOI:10.13656/j.cnki.gxkx.20180425.001

陶彦良,周晓果,温远光,等.不同林地清理方式下生物炭和氮添加对桉树红锥混交林土壤养分的影响[J].广西科学,2018,25(2):128-138.

TAO Y L,ZHOU X G,WEN Y G,et al.Effects of biochar and nitrogen addition on soil nutrients under different ground clearance in mixed *Eucalyptus* and *Castanopsis hystrix* plantations[J].Guangxi Sciences,2018,25(2):128-138.

不同林地清理方式下生物炭和氮添加对桉树红锥混交林土壤养分的影响^{*}

Effects of Biochar and Nitrogen Addition on Soil Nutrients under Different Ground Clearance method in Mixed *Eucalyptus* and *Castanopsis hystrix* Plantations

陶彦良¹,周晓果¹,温远光^{1,2,3**},朱宏光^{1,2,3},陆艳仙¹,杜氏清闲¹,赵明威¹,蔡道雄^{3,4},贾宏炎^{3,4},李武志⁴,李晓琼¹

TAO Yanliang¹,ZHOU Xiaoguo¹,WEN Yuanguang^{1,2,3},ZHU Hongguang^{1,2,3},LU Yanxian¹,DO THI Thanh Nhan¹,ZHAO Mingwei¹,CAI Daoxiong^{3,4},JIA Hongyan^{3,4},LI Wuzhi⁴,LI Xiaoqiong¹

(1. 广西大学林学院,广西森林生态与保育重点实验室培育基地,广西南宁 530004;2. 广西大学林学院,广西高校林业科学与工程重点实验室,广西南宁 530004;3. 广西友谊关森林生态系统定位观测研究站,广西凭祥 532600;4. 中国林业科学研究院热带林业实验中心,广西凭祥 532600)

(1. Guangxi Key Laboratory of Forest Ecology and Conservation, Forestry College, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China; 2. Guangxi Colleges and Universities Key Laboratory of Forestry Science and Engineering, Forestry College, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China; 3. Guangxi Youyiguang Forest Ecosystem Research Station, Pingxiang, Guangxi, 532600, China; 4. Experimental Center of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Pingxiang, Guangxi, 532600, China)

摘要:【目的】阐明不同林地清理方式下(火烧清理和人工清理)生物炭和氮添加对桉树红锥混交林土壤养分的影响,为人工林的经营管理提供参考。【方法】在火烧清理和人工清理林地的桉树红锥混交林中,设置生物炭和氮添加的控制实验,研究生物炭和氮添加对土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)、有效磷(AP)和有效钾(AK)含量的影响。【结果】不同林地清理方式下,生物炭和氮添加对林地土壤养分的影响存在差异:与对照相比,人工清理林地时,添加生物炭显著增加了 20~40 cm 土层的 AP 含量;氮添加极显著增加了 0~10 cm 土层的 SOC、TP、AP 含量和 C : N; 10~20 cm 土层的 SOC、AK 含量,20~40 cm 土层的 AP 和 AK 含量也显著增加;而 0~10 cm 土层的 N : P 则极显著降低。林地清理方式为火烧清理时,生物炭添加极显著增加 0~10 cm 土层的 TP 含量,而 0~10 cm、10~20 cm 土层的 SOC 和 AK 含量,0~10 cm 土层的 C : N,10~20 cm 的 AP : TP、C : P 以及 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm 土层的 AK : TK 显著降低,0~10 cm 土层的 AP 含量、AP : TP、C : P 和 N : P 更是极显著降低。氮添加显著降低 10~20 cm 土

收稿日期:2018-01-29

作者简介:陶彦良(1992—),女,硕士研究生,主要从事森林生态学。

* 国家自然科学基金(31460121),广西高等学校重大科研项目(201201ZD001),广西森林生态与保育重点实验室培育基地开放课题(QZKFKT2017-01)和广西林业厅科研项目(桂林科学[2009]第八号)资助。

** 通信作者:温远光(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事森林生态和森林培育学研究,E-mail:wenyg@263.net。

层的 N : P 以及 0~10 cm 土层的 AP : TP, 0~10 cm 土层的 AP 含量以及 10~20 cm 的 TN 含量下降达到极显著水平。【结论】人工清理林地条件下, 实施生物炭和氮添加有利于提高桉树红锥混交林的土壤养分。

关键词: 桉树 红锥 混交林 生物炭 氮添加 土壤养分

中图分类号: S718.5 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2018)02-0128-11

Abstract:【Objective】The purpose of this study was to clarify the effects of biochar and nitrogen addition on soil nutrients under different ground clearance method (fire clearance and manual clearance) in mixed *Eucalyptus* and *Castanopsis hystrix* plantations and provide reference for the management of plantations. **【Methods】**In the mixed *Eucalyptus* and *Castanopsis hystrix* plantations that had been cleaned by fire and cleaned manually, control experiments of biochar and nitrogen addition were set up to study the effects of biochar and nitrogen addition on the content of soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), total potassium (TK), available phosphorus (AP), and available potassium (AK) content. **【Results】**Under different ground clearance methods, there were differences in the effects of biochar and nitrogen addition on soil nutrients. Compared with the control, the addition of biochar significantly increased the AP content in the 20–40 cm soil layer when manually cleaning the woodland. Nitrogen addition significantly increased SOC, TP, AP content and C : N in 0–10 cm soil layer. SOC and AK content in 10–20 cm soil layer, and AP and AK content in 20–40 cm soil layer also increased significantly. And N : P in 0–10 cm soil layer was extremely significantly reduced. When the ground clearance method was fire clearance, the addition of biochar significantly increased the TP content in 0–10 cm soil layer. While the SOC and AK content in 0–10 cm, 10–20 cm soil layers, C : N in 0–10 cm soil layer, AP : TP and C : P in 10–20 cm soil layer, AK : CK in 0–10 cm, 10–20 cm, 20–40 cm soil layers decreased significantly. AP content, AP : TP, C : P, and N : P in 0–10 cm soil layer extremely significantly reduced. Nitrogen addition obviously reduced the N : P in 0–10 cm soil and AP : TP in 10–20 cm soil layer, AP content in 0–10 cm soil layer, and TN content in 10–20 cm soil layer decreased significantly. **【Conclusion】**Under the condition of manually clearance woodland, the implementation of biochar and nitrogen addition will help improve soil nutrients in the mixed *Eucalyptus* and *Castanopsis hystrix* plantations.

Key words: *Eucalyptus*, *Castanopsis hystrix*, mixed plantation, biochar, nitrogen addition, soil nutrient

0 引言

【研究意义】中国桉树人工林面积 4.5×10^6 hm², 占中国林地面积的 1.4%, 年产木材超过 3.0×10^7 m³, 占全国年木材产量的 26.9%^[1], 桉树在保障国家木材安全方面发挥了重要作用。然而桉树种植面临土壤养分持续下降问题^[2-4], 开展桉树人工林土壤改良和地力修复的研究迫在眉睫。近年来, 生物炭作为土壤改良剂的相关应用已被世界广泛关注^[5]。同时, 由于氮循环的全球性和氮沉降的普遍性, 氮添加对生态系统的影响备受关注^[6-7]。**【前人研究进展】**早在 1992 年, Sombroek^[8]在亚马逊河流域开展的生物炭的研究报道引起了学者们的关注。近年的研究发现, 生物炭的添加能够显著增加酸性土壤的 pH 值^[9], 对土壤中的氮素具有缓慢释放作用^[10], 能够显著提高土壤的碳氮比^[11], 显著增加土壤有机碳、全氮、有效磷和有效钾^[12]。Chintala 等^[13]研究发现, 在酸性土壤中施用生物炭能够提高有效磷的含量, 在碱性土壤中施用生物炭则降低有效磷含量。此外, 生物炭的添加还能显著增加菜豆、玉米、水稻等农作物的产量^[14-17]。生物炭在林业上的应用研究^[5]报道不多。

广西科学 2018 年 4 月 第 25 卷第 2 期

施氮在林业生产中已相当普遍^[18-21], 但针对氮添加对人工林土壤养分的影响^[22]却鲜有报道。**【本研究切入点】**火烧和人工清理林地是人工造林常用的方法, 然而, 在不同林地清理方式下生物炭和氮添加对土壤肥力的影响还知之甚少, 特别是在全球二氧化碳倍增和氮沉降加剧的背景下更需要了解这种影响, 以便采取科学的应对措施。**【拟解决的关键问题】**探讨不同林地清理方式下桉树红锥混交林生物炭和氮添加对土壤养分的影响, 拟为全球变化背景下桉树红锥混交林的科学经营提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于广西壮族自治区凭祥市中国林业科学研究院热带林业试验中心青山实验场(21°57′~22°19′N, 106°39′~106°59′E)。该中心属南亚热带季风性气候区, 年均气温 19.5~21.4℃, 1 月(最冷月)均温 11.4~13.5℃, 7 月(最热月)均温 25.7~27.7℃; 年均降水量为 1 300~1 500 mm, 雨季为 4—9 月, 占年降雨量的 80%。土壤主要以砖红壤和红壤为主, 局部区域为紫色土、石灰土和黄壤。地带性植

被为热带季雨林、雨林,受人类活动的长期影响,地带性植被已转变为各种人工林或次生林^[23]。

1.2 试验林的营造与样地设置

2011年11月对青山实验场67林班(42 hm²)35年生马尾松人工林进行采伐,对部分(约20 hm²)采伐迹地进行火烧清理,其余部分(约22 hm²)采用人工方式将采伐剩余物全部清出林地。经人工带状整地(带宽为1 m,深20 cm,长度沿等高线延伸)后人工挖穴(50 cm×50 cm×30 cm)。2012年春季采用“双龙出海”模式造林,即两列桉树套种一列红锥,桉树株行距为2 m×2 m,红锥株行距为2 m×7 m,混交比例为2:1,桉树造林密度1 428株/hm²,红锥密度为714株/hm²。定植时,每穴施200 g氮磷钾复合肥作基肥。

2013年4月,在对火烧、人工清理的林地进行本底调查的基础上,选择土壤理化性质和地形相对一致

表1 样地概况

Table 1 General situation of sample plots

林地清理方式 Ground clearance method	处理 Treatment	海拔 Altitude (m)	坡向 Aspect	坡度 Slope (°)	坡位 Slope position	土壤 类型 Soil type	郁闭度 Canopy density (%)	林下植被盖度 Understory vegetation coverage (%)
人工清理 Manual ground clearance	CK1	215	东南 Southeast	21	下坡 Downslope	砖红壤 Latosol	42	85
	CK2	230	东北 Northeast	19	下坡 Downslope	砖红壤 Latosol	42	83
	CK3	257	西北 Northwest	23	中坡 Midslope	砖红壤 Latosol	40	80
	生物炭添加1 Biochar addiction 1	263	西南 Southwest	26	上坡 Upslope	砖红壤 Latosol	45	100
	生物炭添加2 Biochar addiction 2	255	东北 Northeast	20	中坡 Midslope	砖红壤 Latosol	43	94
	生物炭添加3 Biochar addiction 3	250	西北 Northwest	18	下坡 Downslope	砖红壤 Latosol	43	88
	氮添加1 Nitrogen addiction 1	267	西南 Southwest	27	上坡 Upslope	砖红壤 Latosol	43	90
	氮添加2 Nitrogen addiction 2	254	东北 Northeast	24	中坡 Midslope	砖红壤 Latosol	42	84
	氮添加3 Nitrogen addiction 3	242	东北 Northeast	21	下坡 Downslope	砖红壤 Latosol	40	95
火烧清理 Fire ground clearance	CK1	237	西南 Southwest	17	下坡 Downslope	砖红壤 Latosol	43	100
	CK2	250	东北 Northeast	19	下坡 Downslope	砖红壤 Latosol	43	78
	CK3	241	东北 Northeast	22	中坡 Midslope	砖红壤 Latosol	42	87
	生物炭添加1 Biochar addiction 1	262	西南 Southwest	24	上坡 Upslope	砖红壤 Latosol	45	98
	生物炭添加2 Biochar addiction 2	260	东北 Northeast	24	上坡 Upslope	砖红壤 Latosol	45	95
	生物炭添加3 Biochar addiction 3	236	东北 Northeast	20	下坡 Downslope	砖红壤 Latosol	43	100
	氮添加1 Nitrogen addiction 1	263	西南 Southwest	25	上坡 Upslope	砖红壤 Latosol	45	98
	氮添加2 Nitrogen addiction 2	255	东北 Northeast	22	中坡 Midslope	砖红壤 Latosol	45	95
	氮添加3 Nitrogen addiction 3	236	东北 Northeast	20	下坡 Downslope	砖红壤 Latosol	45	95

的地块,采用完全随机区组实验设计,分别设置3个区组,每个区组包含3个20 m×30 m的样方,随机布设施加生物炭(C)处理、施加氮(N)处理及对照(CK)。施加生物炭(C)处理为每株桉树加施500 g以毛竹为原料生产的生物炭,施加氮(N)处理为每株桉树加施尿素100 g。施加生物炭及尿素时,在距离桉树植株50 cm处沿等高线开挖30 cm长、20 cm深的沟,均匀撒施肥料后覆土。火烧清理和人工清理林地均设置不施任何肥料的对照样地。每区组样方间设置10 m缓冲区以避免处理间肥料样方的相互影响。区组间相距500 m以上。样地概况见表1。

1.3 土壤样品采集与分析

2016年1月在各样地中,按“米”字型设置9个采样点,即在样地中心以及距离样地中心9~10 m处,每隔45°设置一个采样点,采样点距离施肥沟30 cm以上。在各采样点用内径为8.5 cm的不锈钢土

钻采集 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 土层的土样,去除植物根系及石砾,制成混合土样过 2 mm 孔径筛后自然风干,用于分析土壤的养分指标,包括土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)、有效磷(AP)、有效钾(AK)。SOC 采用重铬酸钾氧化-外加热法,TN 采用凯氏定氮法,TP 采用氢氧化钠碱熔-钼锑抗比色法,TK 采用氢氧化钠碱熔-火焰光度计法,AK 采用乙酸铵浸提-火焰光度计法,AP 采用双酸浸提-钼锑抗比色法^[24]测定。

1.4 数据处理与统计分析

采用单因素方差分析检验火烧和人工清理条件下生物炭和氮添加对土壤养分的影响,采用 *t*-test 检验不同林地清理方式下同一添加处理的差异性;分析在 SPSS 19.0 完成,显著性水平设 $P < 0.05$ 。采用 SigmaPlot 10.0 进行绘图。

2 结果与分析

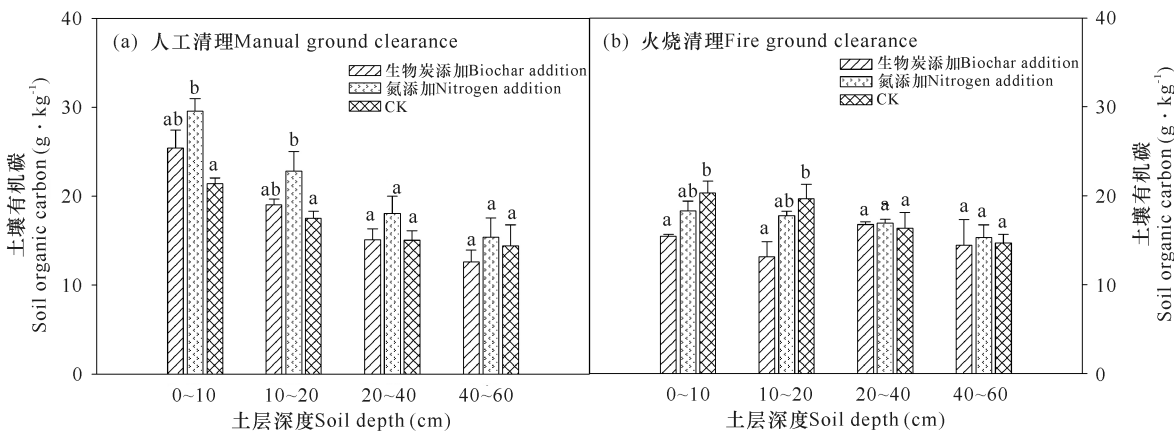
2.1 生物炭和氮添加对土壤有机碳的影响

人工清理林地条件下,施氮处理样地 SOC 含量

为 $(15.40 \pm 2.16) \sim (29.57 \pm 1.39) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,与对照相比,施氮处理均能提高各土层土壤 SOC 含量,其中 0~10 cm 及 10~20 cm 土层的 SOC 含量显著高于对照(图 1a);施加生物炭后,0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm 土层的 SOC 含量均高于对照,40~60 cm 土层的 SOC 含量低于对照,但差异不显著($P > 0.05$)。

火烧清理条件下,施加生物炭及施氮样地 0~10 cm、10~20 cm 土层 SOC 含量均低于对照,施加生物炭显著降低了这 2 个土层的 SOC 含量(图 1b)。20~40 cm 及 40~60 cm 土层的 SOC 含量在各处理及对对照间均无显著差异($P > 0.05$)。

与人工清理林地相比,火烧清理极显著地降低了施加生物炭及施氮处理 0~10 cm、10~20 cm 土层的 SOC 含量($P < 0.01$),而对照 4 个土层的 SOC 含量无显著变化($P > 0.05$)。在 2 种林地清理方式下,施加生物炭处理 4 个土层的 SOC 含量均小于施氮处理,不同处理的 SOC 含量均表现为随土壤层次的加深而降低(图 1)。



不同小写字母表示不同处理间差异显著

Different lowercase indicates significant difference among treatments

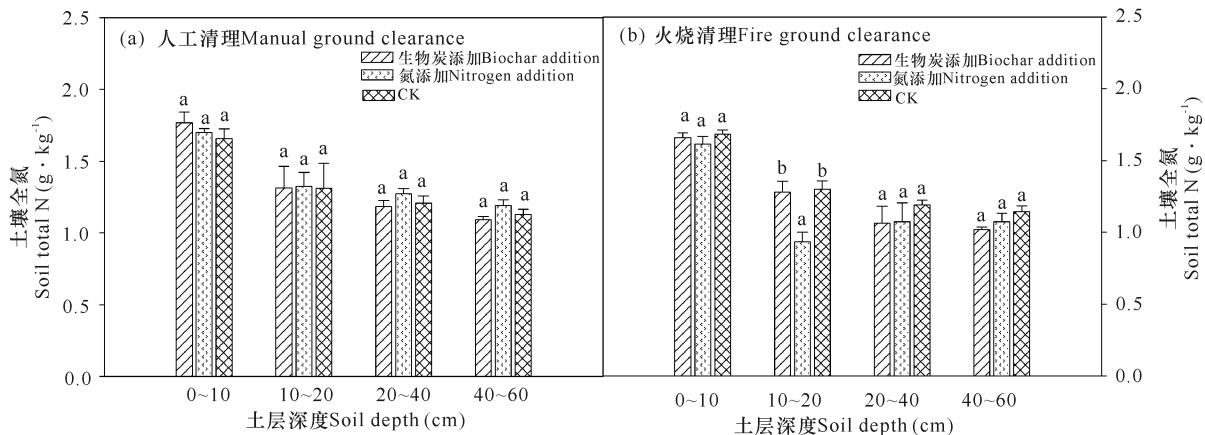
图 1 不同处理的土壤有机碳

Fig. 1 Soil organic carbon in different treatments

2.2 生物炭和氮添加对土壤全氮的影响

人工清理林地时,施加生物炭及施氮处理均能提高 0~10 cm 土层的 TN 含量,但与对照的差异未达到显著水平($P > 0.05$)(图 2a)。施加生物炭处理 0~10 cm 土层 TN 含量最高,为 $(1.77 \pm 0.07) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,其次为施氮处理 $(1.70 \pm 0.03) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,对照样地 TN 含量最小,为 $(1.66 \pm 0.07) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在 10~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 土层中,施氮处理的 TN 含量均为 3 种处理中最大,但与对照相比均无显著差异($P > 0.05$)。

火烧清理条件下,施加生物炭、施氮及对照的 TN 含量分别为 $(1.02 \pm 0.0) \sim (1.66 \pm 0.03) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $(1.08 \pm 0.06) \sim (1.62 \pm 0.05) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $(1.14 \pm 0.04) \sim (1.68 \pm 0.03) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,施氮处理极显著降低了 10~20 cm 土层的 TN 含量($P < 0.01$),其余土层各处理 TN 含量无显著差异($P > 0.05$)(图 2b)。通过对比 2 种林地清理方式发现,火烧清理使生物炭和氮添加处理的土壤 TN 含量均降低,且施氮处理 10~20 cm 土层 TN 含量存在极显著差异($P < 0.01$)。



不同小写字母表示不同处理间差异显著

Different lowercase indicates significant difference among treatments

图2 不同处理的土壤全氮含量

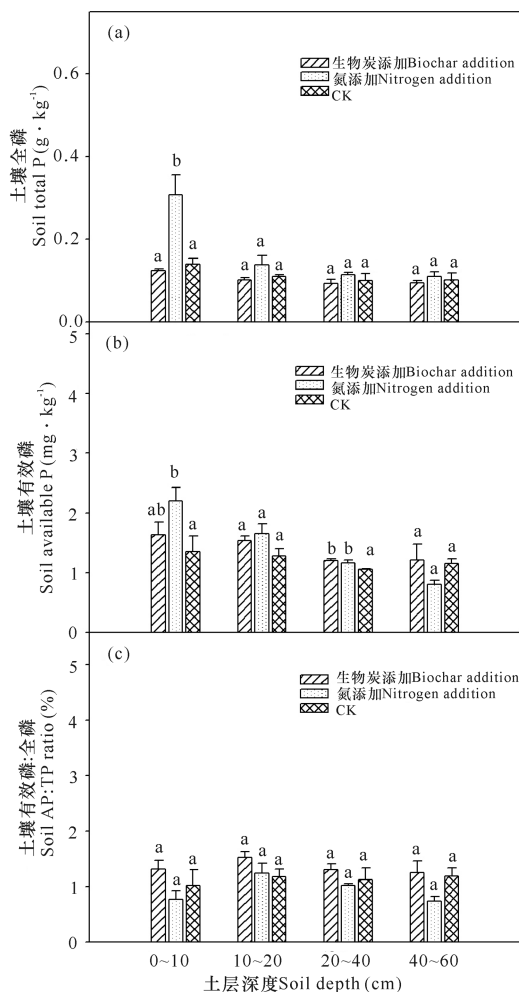
Fig. 2 Soil total N in different treatments

2.3 生物炭和氮添加对土壤磷的影响

人工清理林地条件下,各土层 TP 含量均表现为施氮处理>对照>施加生物炭处理,施氮处理极显著提高 0~10 cm 土层的 TP 含量 ($P < 0.01$),其余土层各处理间均无显著差异 ($P > 0.05$) (图 3a)。在火烧清理条件下,施加生物炭显著提高了 0~10 cm 土层的 TP 含量 ($P < 0.01$),其余土层各处理间也均无显著差异 ($P > 0.05$) (图 4a)。

人工清理林地条件下,与对照相比,生物炭和氮添加均能提高 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm 土层的 AP 含量,其中氮添加处理样地 0~10 cm 土层的 AP 含量 (2.20 ± 0.22) $g \cdot kg^{-1}$ 显著高于对照 (1.35 ± 0.27) $g \cdot kg^{-1}$,2 种处理 20~40 cm 土层的 AP 含量均显著高于对照 (图 3b)。但火烧清理条件下,生物炭和氮添加均显著降低 0~10 cm 及 10~20 cm 土层的 AP 含量,氮添加后 0~10 cm 土层 AP 含量的降低最为明显 (图 4b);各处理间其余土层的 AP 含量无显著差异 (图 4b)。火烧清理后,对照处理 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm 土层的 AP 含量均极显著高于人工清理 ($P < 0.01$),氮添加处理 20~40 cm 土层的 AP 含量显著高于人工清理 ($P < 0.05$),添加生物炭处理无明显的变化 ($P > 0.05$)。

人工清理时,生物炭添加均能提高 4 个土层的 AP:TP 比值;而氮添加却使除 10~20 cm 土层外的其余 3 个土层的 AP:TP 比值降低,但与对照相比均无显著差异 (图 3c)。火烧清理条件下,除生物炭添加处理极显著降低 0~10 cm 土层的 AP:TP 外 ($P < 0.01$),生物炭和氮添加 2 种处理 0~10 cm 和 10~20 cm 土层的 AP:TP 均显著低于对照 ($P < 0.05$) (图 4c)。火烧清理使氮添加处理 0~10 cm 土

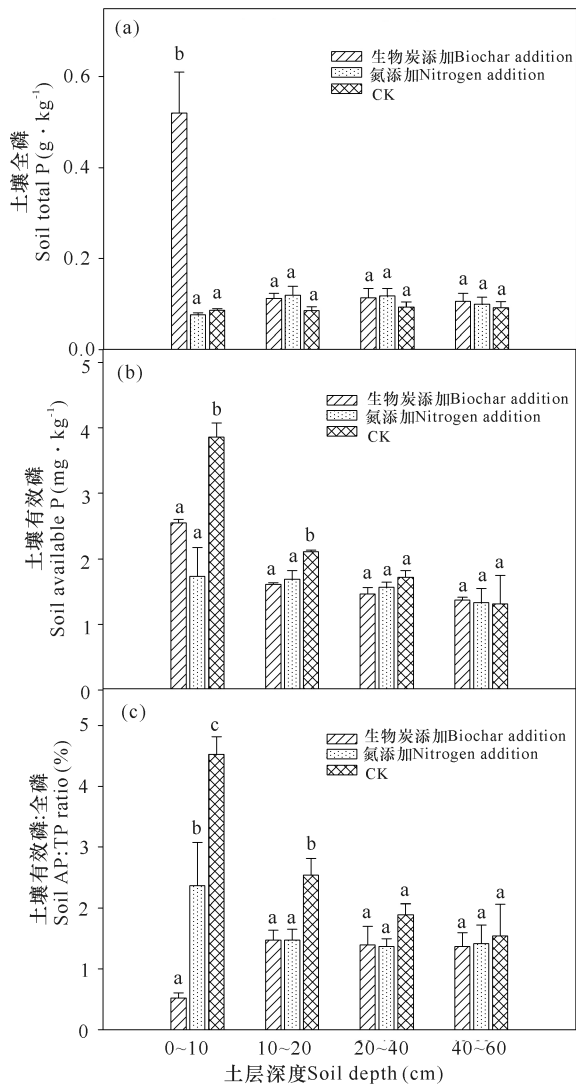


不同小写字母表示不同处理间差异显著

Different lowercase indicates significant difference among treatments

图3 人工清理下的土壤全磷和有效磷含量

Fig. 3 Soil total P and available P in plantations with manual ground clearance



不同小写字母表示不同处理间差异显著

Different lowercase indicates significant difference among treatments

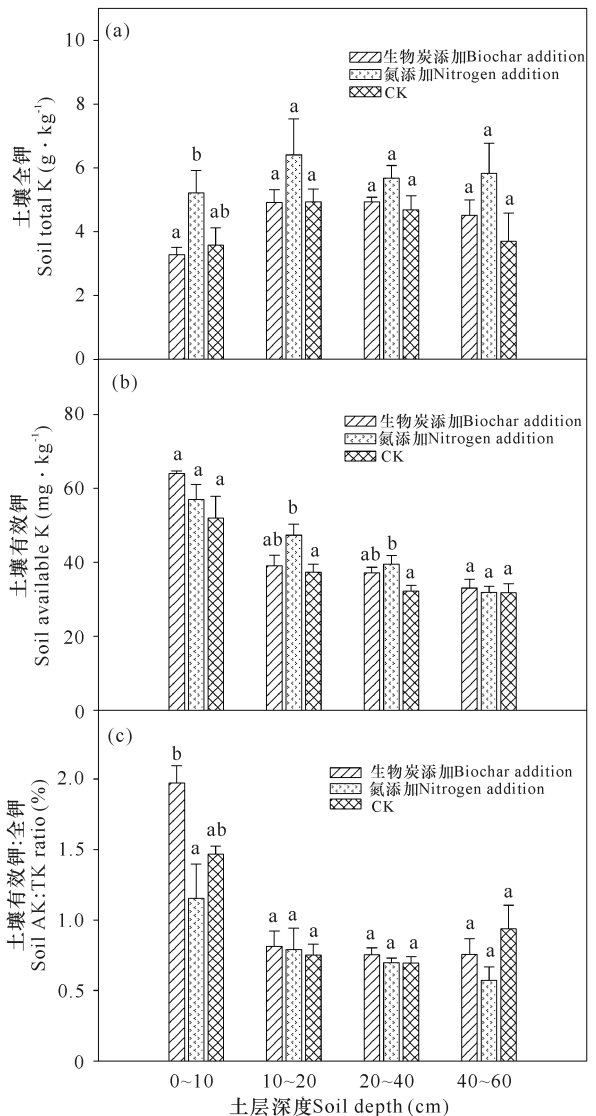
图4 火烧清理下的土壤全磷和有效磷含量

Fig. 4 Soil total P and available P in plantations with fire ground clearance method

层以及对照前3个土层的 AP:TP 极显著高于人工清理 ($P < 0.01$)。

2.4 生物炭和氮添加对土壤钾的影响

在人工清理条件下,4个土层的 TK 含量均为氮添加 > 生物炭添加,但与对照相比,2种处理对4个土层的 TK 含量均无显著影响 ($P > 0.05$) (图 5a)。在火烧清理条件下,2种处理不同土层的 TK 含量表现不一,但与对照相比,均无显著差异 ($P > 0.05$) (图 6a)。无论是哪种处理,火烧清理均极显著提高了 0~10 cm 土层的 TK 含量 ($P < 0.01$)。此外,与人工清理相比,火烧清理显著降低了氮添加处理 40~60 cm 土层的 TK 含量 ($P < 0.05$)。



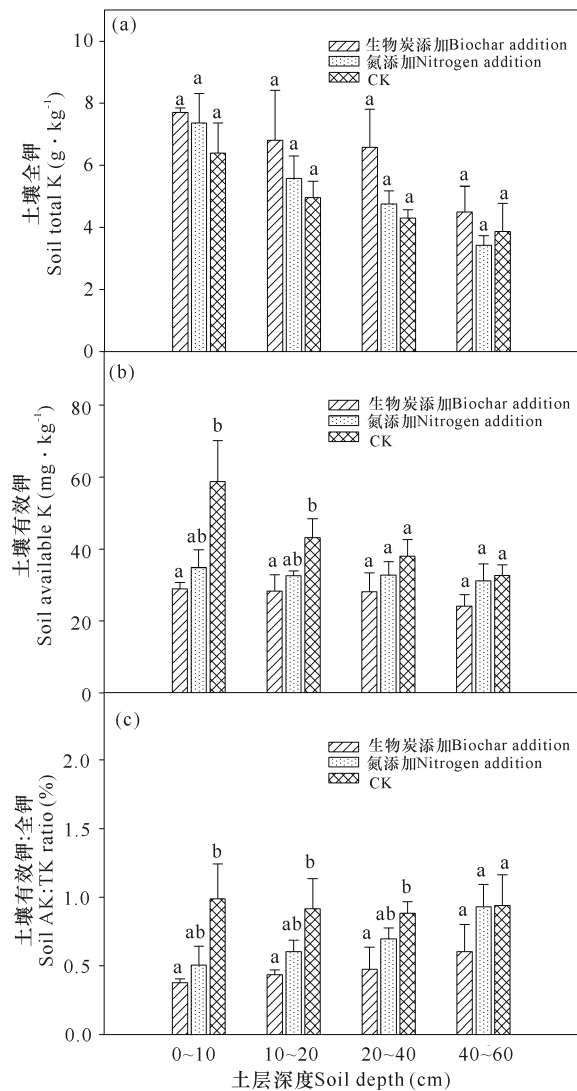
不同小写字母表示不同处理间差异显著

Different lowercase indicates significant difference among treatments

图5 人工清理下的土壤全钾和有效钾含量

Fig. 5 Soil total K and available K in plantations with manual ground clearance

人工清理时,生物炭及氮添加处理均提高了4个土层的土壤 AK 含量,且氮添加处理 10~20 cm、20~40 cm 土层的 AK 含量显著高于对照 ($P < 0.05$) (图 5b)。在火烧清理条件下,生物炭及氮添加处理均降低了4个土层的 AK 含量,且生物炭添加处理 0~10 cm 和 10~20 cm 土层的 AK 含量显著低于对照 ($P < 0.05$) (图 6b)。对比2种林地清理方式发现,生物炭及氮添加处理 0~10 cm 土层的 AK 含量均表现为火烧清理 < 人工清理,且均存在极显著差异 ($P < 0.01$)。此外,与人工清理相比,火烧清理还显著降低了生物炭添加处理 40~60 cm 土层和氮添加处理 10~20 cm 土层的 AK 含量 ($P < 0.05$)。



不同小写字母表示不同处理间差异显著

Different lowercase indicates significant difference among treatments

图6 火烧清理下的土壤全钾和有效钾含量

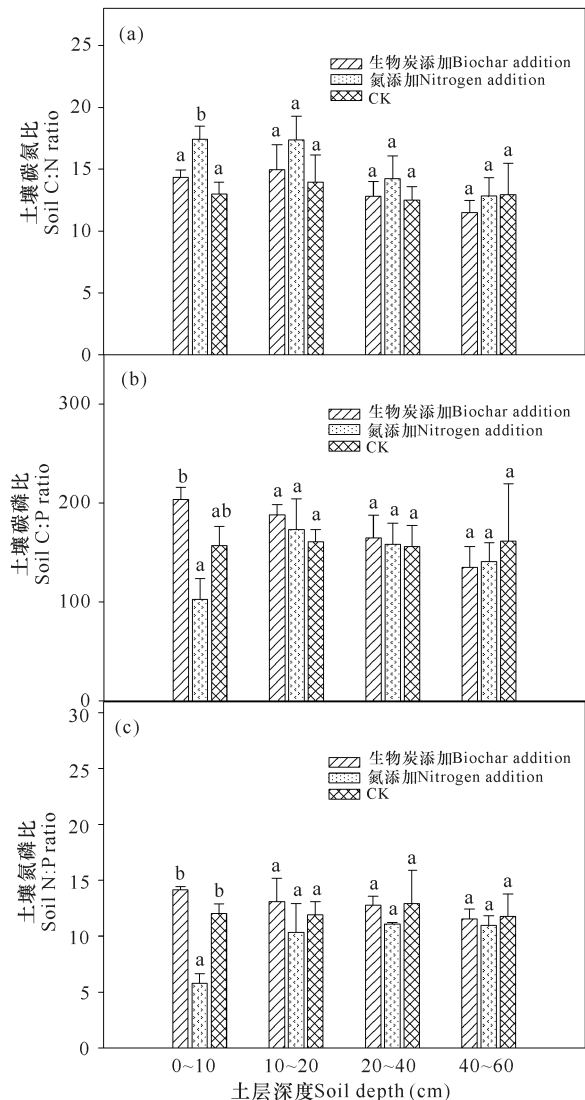
Fig. 6 Soil total K and available K in plantations with fire ground clearance method

人工清理条件下,生物炭及氮添加处理对土壤的AK:TK均为无显著影响($P < 0.05$)(图5c)。火烧清理条件下,生物炭及氮添加处理0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm土层的AK:TK均表现为低于对照,但只有生物炭添加处理的前3个土层达到了显著水平($P < 0.05$)(图6c)。与人工清理对比,火烧清理均导致生物炭添加处理0~10 cm、10~20 cm以及氮添加和对照处理0~10 cm土层的AK:TK显著降低($P < 0.05$)。

2.5 生物炭和氮添加对碳、氮、磷比值的影响

在人工清理条件下,与对照相比,生物炭添加处理对土壤的C:N、C:P、N:P均无显著影响($P > 0.05$)(图7)。氮添加处理显著提高了0~10 cm土层的C:N($P < 0.05$),同时极显著降低0~10 cm

土层的N:P($P < 0.01$),C:P则无明显变化(图7)。在火烧清理林地时,生物炭添加处理均显著降低了0~10 cm土层的C:N和10~20 cm土层的C:P,0~10 cm土层的C:P和N:P甚至达到了极显著差异($P < 0.01$)。氮添加处理除10~20 cm土层的N:P显著低于对照外($P < 0.05$),土壤C:N、C:P这2个指标在4个土层中的差异均未达到显著水平($P > 0.05$)(图8)。与人工清理相比,火烧清理使生物炭添加处理0~10 cm土层的C:N、C:P、N:P及氮添加处理0~10 cm土层的C:N极显著降低,却极显著提高了0~10 cm土层的C:P、N:P($P < 0.01$)。此外,火烧清理还使对照处理10~20 cm土层的C:P显著提高($P < 0.05$)。

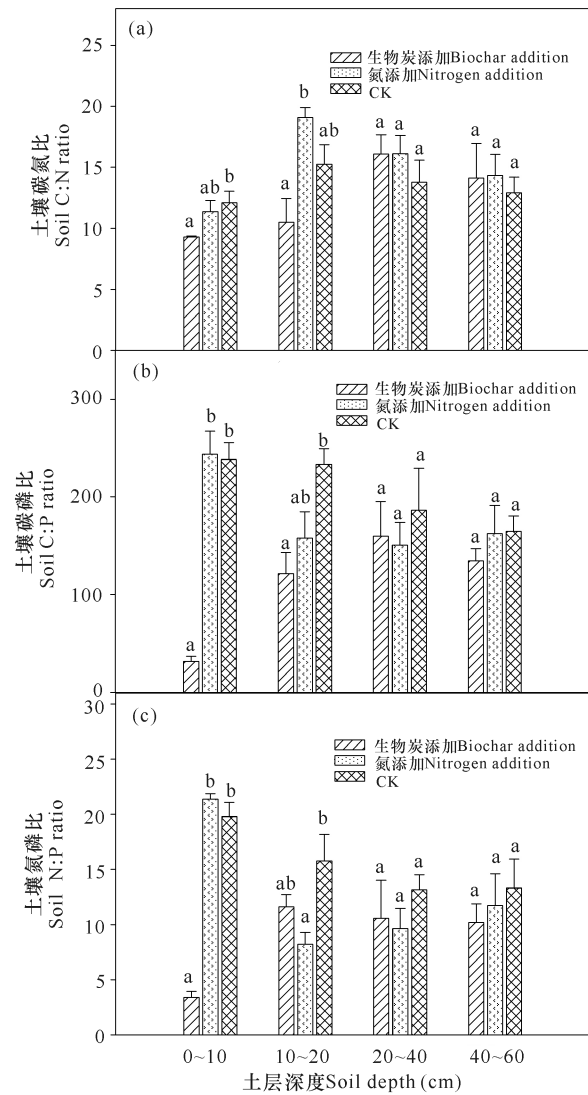


不同小写字母表示不同处理间差异显著

Different lowercase indicates significant difference among treatments

图7 人工清理下的土壤碳氮磷比值

Fig. 7 Ratio of soil C:N:P in plantations with manual ground clearance



不同小写字母表示不同处理间差异显著

Different lowercase indicates significant difference among treatments

图8 火烧清理下的土壤碳氮磷比值

Fig.8 Ratio of soil C : N : P with fire ground clearance method

3 讨论

3.1 生物炭添加对土壤养分的影响

生物炭的使用对土壤养分有着不同的影响。生物炭本身含有大量的碳,将其加入土壤中可以增加土壤的有机碳含量,但提高的幅度取决于生物炭的用量及稳定性。同时,生物炭也含有大量的钾及有效性较高的磷,施入土壤后会降低土壤吸附磷的能力,从而增加 AP 和 AK 的含量^[25]。我们的研究发现,在人工清理林地条件下,生物炭添加可以提高 4 个土层的 AP、SOC 含量和 AP : TP、AK : TK、C : N、C : P、N : P 比值,与前人研究^[26-32]一致。本研究中生物炭添加处理的 AP : TP 是 3 种处理中最高的,说明生

物炭添加处理能提高土壤 AP 的百分比,使进入土壤的有效养分百分比增加,减少了土壤中被固定的有效态磷。土壤碳氮磷比是土壤有机质组成和质量高低的一个重要指标^[33]。有研究表明,当 C : N 小于 15 时,在其矿化作用一开始,它所提供的有效氮量就会超过微生物同化量,使植物能够从有机质矿化过程中获得有效氮^[34]。提高土壤的 C : N,可对微生物活性产生一定的限制作用,促使有机质和有机氮的分解,矿化速度减慢,提高土壤固定有机碳的能力。本研究表明,生物炭添加处理土壤的 C : N 小于 15,且在前三层高于对照,说明桉树红锥混交林土壤有机质在矿化过程中不会发生微生物与林木等植物争夺氮素的现象,可能是土壤“氮饱和”所致。有研究发现,当 C : P < 200 时,将会出现土壤微生物碳的短暂增加和有机磷的净矿化;当 C : P > 300 时,微生物碳大幅增加,微生物竞争土壤中的有效磷,出现有机磷的净固持现象^[35]。本研究中,生物炭添加处理土壤的 C : P 小于 200,说明土壤微生物碳处于短暂增加阶段。可见,人工清理条件下施加生物炭对桉树红锥混交林的土壤养分有一定的促进效果。在火烧清理条件下,生物炭添加极显著增加了 0~10 cm 的 TP 含量 ($P < 0.01$),TK 含量也有所增加,这与其他学者的研究结论^[30,36]一致;而 0~10 cm 或 10~20 cm 土层的 AK、SOC、AP : TP、AK : TK、C : N、C : P、N : P 却显著降低。出现这个结果的原因可能是在火烧清理条件下大量的植物及枯落物被烧掉,损失了大量的有机碳,虽然生物炭中含有一定量的有机碳,但可能含量不及枯落物的丰富,因此导致了表层 SOC 的降低。表层 SOC 的显著降低和 TP 的显著提高使得土壤的 C : N、C : P、N : P 出现了降低。此外,火烧清理林地后植物灰分来不及进入土壤也会导致土壤有效养分的降低^[37]。对比 2 种林地清理方式,火烧清理导致了土壤表层 SOC、AK、AK : TK、C : N、C : P、N : P 显著或极显著降低,而 TP 和 TK 的含量极显著增加。

3.2 氮添加对土壤养分的影响

彭丽媛等^[38]的研究表明,加施尿素会显著增加土壤的 TN、TP、TK、AP、AK 含量。刘冲等^[39]的研究也发现施加氮肥能增加土壤有机质、TN、TP、TK 含量。本研究中,人工清理林地条件下,氮添加极显著增加了 0~10 cm 土层的 SOC、TP 含量,显著增加了 0~10 cm 土层的 AP 含量和 C : N、10~20 cm 土层的 AK、SOC 含量以及 20~40 cm 土层的 AP 和 AK 含量,同时 TN、TK 含量均有一定提高,与上述研究结论^[38-39]基本一致。氮素的施入给土壤微生物

提供了氮源,可以增加微生物的活性,加速有机质的分解,进而提高土壤有效养分含量^[40]。本研究中,添加处理的 C:P<200,会出现土壤微生物碳的短暂增加和有机磷的净矿化,从而使土壤的磷含量增加, N:P在添加处理中表现出极显著下降,这与表层土壤全磷含量极显著升高有关。但也有研究发现,施加氮肥会导致土壤 TP 的降低^[41],与本研究的不一致,究其原因可能是所研究的树种、地理条件、气候因素等差异所致。可见,采用人工清理林地并实施氮添加能提高桉树红锥混交林的土壤养分含量。相反,火烧清理条件下,氮添加使 0~10 cm、10~20 cm 土层土壤的 AP 含量和 10~20 cm 土层的 TN 含量极显著降低,0~10 cm 的 AP:TP 以及 10~20 cm 的 AP:TP 和 N:P 显著降低,TN、SOC 含量和 AK:TK 也有降低趋势。

4 结论

不同林地清理方式下生物炭和氮添加对林地土壤肥力的影响存在差异。在人工清理林地条件下,施加生物炭能提高桉树红锥混交林 4 个土层的 AP、SOC 含量和 AP:TP、AK:TK、C:N、C:P、N:P 比值;氮添加则显著增加了 0~10 cm 土层的 SOC、TP、AP 含量,显著增加 10~20 cm 土层的 AK、SOC 含量以及 20~40 cm 土层的 AP 和 AK 含量,同时 TN、TK 含量均有一定提高。可见,在人工清理林地条件下,实施生物炭和氮添加能提高桉树红锥混交林的土壤养分含量。

参考文献:

[1] 中国林学会. 桉树科学发展问题调研报告[M]. 北京:中国林业出版社,2016.
Chinese Society of Forestry. Research report on *Eucalyptus* scientific development [M]. Beijing: China Forestry Publishing House,2016.

[2] 叶绍明,温远光,杨梅,等. 连栽桉树人工林植物多样性与土壤理化性质的关联分析[J]. 水土保持学报,2010,24(4):246-250,256.
YE S M, WEN Y G, YANG M, et al. Correlation analysis on biodiversity and soil physical & chemical properties of *Eucalyptus* spp. plantations under successive rotation[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2010,24(4):246-250,256.

[3] 邓富春,覃其云,颜权,等. 桉树人工林土壤肥力变化及其综合评价[J]. 广西林业科学,2013,42(2):148-152.
DENG F C, QIN Q Y, YAN Q, et al. Variation of soil fertility in *Eucalyptus* plantation and its soil fertility comprehensive evaluation[J]. Guangxi Forestry Science,

2013,42(2):148-152.

[4] 李国平,张卫强,张卫华,等. 桉树林和针阔混交林对土壤理化性质的影响比较[J]. 广东农业科学,2014(20):67-74.
LI G P, ZHANG W Q, ZHANG W H, et al. Physical and chemical characteristics of soil in *Eucalypt* plantation and conifer-broadleaved forest[J]. Guangdong Agricultural Sciences,2014(20):67-74.

[5] 曹焯. 生物炭添加对亚热带森林土壤特性及植物养分和生长的影响[D]. 上海:华东师范大学,2016.
CAO Y. Impact of biochar application on soil nutrient, plant nutrient and plant growth in a subtropical forest [D]. Shanghai:East China Normal University,2016.

[6] 苏渝钦,刘何铭,郑泽梅,等. 氮磷添加对中亚热带常绿阔叶林土壤有效氮和 pH 值的影响[J]. 生态学杂志,2016,35(9):2279-2285.
SU Y Q, LIU H M, ZHENG Z M, et al. Effects of N and P addition on soil available nitrogen and pH in a subtropical forest[J]. Chinese Journal of Ecology,2016,35(9):2279-2285.

[7] GALLOWAY J N, TOWNSEND A R, ERISMAN J W, et al. Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions[J]. Science,2008,320:889-892.

[8] SOMBROEK W G. Biomass and carbon storage in the Amazon ecosystem[J]. Interciencia,1992,17(5):269-272.

[9] NOVAK J M, BUSSCHER W J, LAIRD D L, et al. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plant soil[J]. Soil Science,2009,174(2):105-112.

[10] MAGRINI-BAIR K A, CZERNIK S, PILATH H M, et al. Biomass derived, carbon sequestering, designed fertilizers[J]. Annals of Environmental Science,2009(3):217-225.

[11] 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 Environmental Sciences,2010,19(11):2713-2717.

[12] LAIRD D A, FLEMING P, DAVIS D D, et al. Impact of biochar amendments on the quality of a typical mid-western agricultural soil[J]. Geoderma,2010,158(3/4):443-449.

[13] CHINTALA R, SCHUMACHER T E, MCDONALD L M, et al. Phosphorus sorption and availability from biochars and soil/biochar mixtures[J]. Clean-Soil, Air, Guangxi Sciences, Vol. 25 No. 2, April 2018

- Water, 2014, 42(5): 626-634.
- [14] ASAI H, SAMSON B K, STEPHAN H M, et al. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield[J]. Field Crops Research, 2009, 111(S 1/2): 81-84.
- [15] JEFFERY S, VERHEIJEN F G A, VELDE M V D, et al. A quantitative review of the effects of biochar application to soil on crop productivity using meta-analysis[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2011, 144(1): 175-187.
- [16] KIMETU J M, LEHMANN J, NGOZE S O, et al. Reversibility of soil productivity decline with organic matter of differing quality along a degradation gradient[J]. Ecosystem, 2008, 11(5): 726-739.
- [17] YAN G Z, SHIMA K, FUJIWARA S, et al. The effects of bamboo charcoal and phosphorus fertilization on mixed planting with grasses and soil improving species under the nutrients poor condition[J]. Journal of the Japanese Society of Revegetation Technology, 2004, 30(1): 33-38.
- [18] 王方超. 施氮磷肥对杉木林林下植物多样性与养分动态的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2015.
WANG F C. Effects of nitrogen and phosphorus additions on understory plant biodiversity and nutrients dynamics in Chinese fir plantation[D]. Nanchang: Nanchang University, 2015.
- [19] 宇万太, 周桦, 徐永刚, 等. 追施氮肥当年与翌年对桉树生长及各部位氮贮量的影响[J]. 生态学杂志, 2010, 29(9): 1703-1708.
YU W T, ZHOU H, XU Y G, et al. Eucalypt growth and nitrogen storage in the current year and next year of nitrogen topdressing[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(9): 1703-1708.
- [20] 尉建埔, 张洁, 王文娜, 等. 施氮肥对东北帽儿山云杉人工林土壤微生物生物量和群落结构的影响[J]. 东北林业大学学报, 2016, 44(5): 52-56.
WEI J B, ZHANG J, WANG W N, et al. Effect of nitrogen fertilization on soil microbial biomass and community structure of *Picea koraiensis* plantation in Maershan Mountains of Northeastern China[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2016, 44(5): 52-56.
- [21] 刘琦蕊, 漆良华, 胡璇, 等. 氮肥对毛竹林土壤硝化和反硝化作用的影响[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2017, 41(1): 82-88.
LIU Q R, QI L H, HU X, et al. Effects of nitrogen fertilization on nitrification and denitrification in *Phyllostachys edulis* forest[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2017, 41(1): 82-88.
- [22] 蔡乾坤. 长期施用氮肥对杉木人工林土壤 C、N、P 的影响[D]. 南昌: 南昌工程学院, 2015.
CAI Q K. Impacts of long-term nitrogen fertilization on soil C, N and P in a Chinese fir plantation[D]. Nanchang: Nanchang Institute of Technology, 2015.
- [23] 明安刚, 刘世荣, 农友, 等. 南亚热带 3 种阔叶树种人工幼龄纯林及其混交林碳贮量比较[J]. 生态学报, 2015, 35(1): 180-188.
MING A G, LIU S R, NONG Y, et al. Comparison of carbon storage in juvenile monoculture and mixed plantation stands of three common broadleaved tree species in subtropical China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(1): 180-188.
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO S D. Soil agro-chemical analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [25] MORALES M M, COMERFORD N, GUERRINI I A, et al. Sorption and desorption of phosphate on biochar and biochar-soil mixtures[J]. Soil Use and Management, 2014, 29(3): 306-314.
- [26] 潘丽冰, 徐凡珍, 沙丽清. 生物炭对土壤理化性质及橡胶幼苗生物量的影响[J]. 山地学报, 2015, 33(4): 449-456.
PAN L B, XU F Z, SHA L Q. Effect of biochar on soil properties and Rubber (*Hevea brasiliensis*) seedling biomass[J]. Mountain Research, 2015, 33(4): 449-456.
- [27] ENDERS A, HANLEY K, WHITMAN T, et al. Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance [J]. Bioresource Technology, 2012, 114: 644-653.
- [28] GASKIN J W, STEINER C, HARRIS K, et al. Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use[J]. Transactions of the Asabe, 2008, 51(6): 2061-2069.
- [29] 傅秋华, 张文标, 钟泰林, 等. 竹炭对土壤性质和高羊茅生长的影响[J]. 浙江林学院学报, 2004, 21(2): 159-163.
FU Q H, ZHANG W B, ZHONG T L, et al. Bamboo charcoal's effect on the soil characteristics and *Fescue arundinacea* growth[J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2004, 21(2): 159-163.
- [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] 卜巧珍. 生物炭对石灰土理化性质和作物生长的影响

- [D]. 桂林:广西师范大学,2014.
- BO Q Z. The impacts of biochar on the physical and chemical properties of limestone soil and crop growth [D]. Guilin:Guangxi Normal University,2014.
- [32] 赵殿峰,徐静,罗璇,等. 生物炭对土壤养分、烤烟生长以及烟叶化学成分的影响[J]. 西北农业学报,2014,23(3):85-92.
- ZHAO D F, XU J, LUO X, et al. Effect of biochar on soil nutrients, growth and chemical composition of tobacco[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2014, 23(3):85-92.
- [33] 王绍强,于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报,2008,28(8):3937-3947.
- WANG S Q, YU G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8):3937-3947.
- [34] 王纪杰. 桉树人工林土壤质量变化特征[D]. 南京:南京林业大学,2011.
- WANG J J. Variation characteristics of soil quality in *Eucalyptus* plantations[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2011.
- [35] 舒凡. 连栽桉树人工林林下植物和土壤碳氮磷生态化学计量学研究[D]. 南宁:广西大学,2016.
- SHU F. The study of ecological stoichiometry of understory plants and soil in continuous planting of *Eucalyptus* plantation[D]. Nanning:Guangxi University, 2016.
- [36] 花莉. 城市污泥堆肥资源化过程与污染物控制机理研究[D]. 杭州:浙江大学,2008.
- HUA L. Research on mechanism of sludge reclamation and pollution control[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [37] 刘正刚,尹武君. 炼山对巨桉林地土壤全磷和有效磷含量的影响[J]. 湖北农业科学,2011,50(14):2838-2840.
- LIU Z G, YIN W J. Effect of burning on soil's total and available phosphorus contents in the *Eucalyptus grandis* plantation [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2011, 50(14):2838-2840.
- [38] 彭丽媛,熊兴政,欧阳,等. 套种大豆和单施尿素对油桐生长和土壤理化性质的影响[J]. 重庆师范大学学报:自然科学版,2017,34(1):100-107.
- PENG L Y, XIONG X Z, OU Y, et al. Effects of soybean intercropping and single application of urea on *Vernicia fordii* growth and soil physicochemical properties [J]. Journal of Chongqing Normal University: Natural Science, 2017, 34(1):100-107.
- [39] 刘冲,王茂文,邢锦城,等. 沿海滩涂增施氮肥对马齿苋生长发育及土壤微生物环境的影响[J]. 江苏农业科学,2017,45(19):208-210.
- LIU C, WANG M W, XING J C, et al. Effects of nitrogen fertilizer application on the *Portulaca oleracea* L. growth and soil microbial environment along beach [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(19):208-210.
- [40] 滕维超. 油茶-农作物间作系统生理生态及经济效益评价[D]. 南京:南京林业大学,2013.
- TENG W C. Physiological, ecological effects and economic benefits evaluation of *Camellia oleifera* - crop intercropping system [D]. Nanjing: Nanjing Forest University, 2013.
- [41] 杨兆顺,吴俊强,钱芳,等. 不同施肥制度对土壤肥力及玉米产量的影响[J]. 华北农学报,2010,25(1):208-219.
- YANG Z S, WU J Q, QIAN F, et al. Effects of different fertilizer treatments on soil fertility and maize yield [J]. Acta Agriculture Boreali-Sinica, 2010, 25(1):208-219.

(责任编辑:陆 雁)