

不同火烧时间对杉木人工林土壤性质的影响

周润青^{1,2}, 刘晓东³, 张思玉^{1,2*}, 李晨韵⁴

(1. 南京森林警察学院 林火研究中心, 江苏 南京 210023; 2. 南京森林警察学院 国家林业局森林防火工程技术研究中心, 江苏 南京 210023;
3. 北京林业大学 省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083; 4. 国家林业局 林产工业规划设计院 城市规划三所, 北京 100010)

摘要:分析不同强度火烧对福建将乐林场杉木人工林土壤理化性质的影响, 对林火管理和火后植被恢复提供参考依据。在福建将乐林场选择3块人工杉木林标准样地, 每间隔60 d实施一次计划烧除, 每次燃烧试验共设置10、30 min与60 min和对照(CK)4个处理, 试验结束后统一进行土样采集和室内分析。火烧10 min和30 min钟后1 d杉木林土壤的容重降低, 之后逐渐增加; 火烧60 min的土壤容重呈现出先增大后降低再增大的变化趋势, 火烧60 d和120 d时的土壤容重均低于火烧前。与火烧前相比, 火烧10、30 min和60 min后土壤总孔隙度和非毛管孔隙度先增加后降低, 且120 d后均降低到火烧前水平以下。火烧10、30 min和60 min后土壤pH值和碱解氮含量均持续增加。火烧10 min和60 min后的土壤有机碳呈持续增加趋势; 火烧30 min后土壤有机碳含量呈先增加后减少再增加的变化趋势, 但均高于火烧前水平。火烧10、30 min和60 min后1 d土壤全氮含量均增加, 之后开始降低。火烧10 min后土壤有效磷含量持续递增; 火烧30 min和60 min的土壤有效磷含量先降低后增加的趋势, 但火烧后120 d仍未恢复到火烧前水平。火烧10 min后1 d的土壤速效钾含量升高, 之后开始下降, 120 d后下降到火烧前水平以下; 火烧30 min后60 d的土壤速效钾含量增加, 之后逐渐降低, 到120 d几乎降低到火烧前水平; 火烧60 min的杉木林土壤速效钾含量持续增加。不超过60 min的低强度计划火烧有利于改善土壤养分。

关键词:杉木人工林; 土壤理化性质; 计划火烧

中图分类号:S791.27 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2016)03-0001-06

The Effects of Burning with Different Intensities on Soil Property
in Chinese Fir Plantations

ZHOU Jian-qing^{1,2}, LIU Xiao-dong³, ZHANG Si-yu^{1,2*}, LI Chen-yun⁴

(1. Forest Fire Research Center, Nanjing Forestry Police College, Nanjing, Jiangsu 210023, China; 2. Engineering Research Center for Forest Fire Prevention and Control of State Forestry Administration, Nanjing Forestry Police College, Nanjing, Jiangsu 210023, China;
3. The Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
4. The Third Section of Urban Planning, Planning and Design Academy of Forest Products Industry, Beijing 100010, China)

Abstract: The effects of burning with different intensities on soil physicochemical properties in Chinese fir plantations at Jiangle Forest Farm, Fujian, were investigated to provide references for forest fire management and post-fire vegetation restoration. In 3 standard sampling plots, prescribed burning was conducted for every two months with four treatments: 10 min, 30 min and 60 min, and control. Soil sample collection and laboratory analysis were carried out after the final burning test. The results showed that soil bulk density decreased firstly and then increased after the burning lasted 10 and 30 min. The soil bulk density in-

收稿日期:2015-07-20 修回日期:2016-02-23

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金项目(LGYB201515);国家自然科学基金青年基金(31500532);江苏省自然科学基金青年项目(BK20151010)。

作者简介:周润青,男,助教,硕士,研究方向:森林防火。E-mail:jq_zhou@yeah.net

*通信作者:张思玉,男,教授,硕士,研究方向:森林防火。E-mail:siyu85878817@163.com

creased firstly and then decreased after 60 min's burning, but the values were lower than the burning before in 60 and 120 days. The total and capillary porosity increased firstly and then decreased after burning, and the values in 120 days were lower than the control. The soil pH value and alkali-hydrolyzable nitrogen increased constantly after three burning durations. The soil organic carbon content increased constantly after the burning lasting 10 min and 60 min. The carbon content increased firstly and then decreased and increased finally, but the value was higher than before burning. The total nitrogen content increased in 1 day after the burning lasted 10, 30 and 60 min, and then decreased. The soil available phosphorus content increased continuously after 10 min's burning, while the content increased firstly and then decreased after the burning lasted 30 min and 60 min. The soil available potassium content in 1 day increased at first, and then quickly declined after 60 min's burning, and the value in 120 days was lower than before burning. The content increased in 60 days and then decreased gradually after 30 min's burning, and the value in 120 days almost reduced to the level before the burning. The potassium content increased continuously after 60 min's burning. It was suggested to conduct prescribed burning with low intensity within 60 min to improve soil nutrients.

Key words: Chinese fir plantation; soil physical and chemical property; prescribed burning

林火是森林生态系统常见的干扰类型之一,火干扰通过改变群落的结构、外貌和物种组成,从而改变森林生态系统的格局与过程^[1]。不同强度的林火因燃烧时达到的最高温度及持续时间的不同,对土壤的影响也不同^[2]。随着火烧迹地植被的恢复,土壤性质也在时间序列上发生一定的变化^[3]。林火对土壤性质的影响具有两重性,林火通过加热、氧化等作用改变了土壤性质和生物环境,释放储存于生物量中的养分且促进其循环,进一步引起土壤微生物活动、水分等土壤特性的变化^[4-5]。同时,林火还在维持植物区系组成和促进林木更新等方面具有重要意义^[2]。高强度的火干扰则会改变土壤结构,引起土壤养分流失,加速土壤侵蚀,导致土壤退化^[6-7]。

目前,国内外关于野火对土壤性质影响的研究较多,主要涉及火干扰对土壤理化性质、土壤微生物和土壤养分循环的影响^[8-16],以及森林火灾后土壤有机质含量变化、土壤碳、氮、磷的流失状况等,而以人类活动造成的火干扰为研究对象的研究尚处于起步阶段^[17]。杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是我国南方亚热带地区特有的优良速生乡土用材树种^[18],也是我国退耕还林的主要树种之一,在维护生态平衡方面发挥着重要的作用^[19]。本研究以福建将乐林场杉木人工林地为研究对象,通过小范围

堆烧试验分析不同火烧持续时间及火烧后不同时间土壤pH值、有机碳、全氮、碱解氮、速效钾、有效磷含量的变化规律,为生产实践中营林用火方式的科学选择和火烧迹地的植被恢复提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于福建省三明市将乐林场(26°26'—27°04'N, 117°05'—117°40'E),属中亚热带季风气候,兼具海洋性和大陆性气候特点,年均温18.5℃,年降水量1705.1 mm,无霜期为298 d。平均海拔400~800 m之间,该区属褶皱山地地貌,山势狭长,山矮坡陡。土壤类型为以红壤为主,质地为沙壤土或轻壤土^[20-21]。该区森林覆盖率高达94.7%,植被类型多样。杉木人工林主要分布在海拔800 m以下,林下植被主要有黄瑞木(*Adinandra millettii*)、狗脊蕨(*Woodwardia japonica*)、杜茎山(*Maesa japonica*)、菝葜(*Smilax china*)、櫟木(*Loropetalum chinense*)、芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)等。

1.2 样地设置

根据立地条件等基本一致的前提选择具有代表性的杉木人工林,设置3处面积为20 m×20 m样地(表1)。

表1 样地基本情况

Table 1 General situation of different forest stands

样地	林龄/a	海拔/m	土壤类型	坡向	坡度/(°)	平均胸径/cm	平均树高/m	郁闭度	林下植被盖度/%
1	27	274	红壤	东	30	16	17	0.4	80
2	26	280	红壤	东	30	18	18	0.5	85
3	29	300	红壤	东	28	21	19	0.5	90

1.3 计划火烧

1.3.1 试验设计 分别于2014年3月、5月、7月选择阴凉天气,在每个样地内按S型布点方法,分3次,每次选取5个样点(5 m×5 m),分别进行10、30 min和60 min 3个不同燃烧时间的堆烧试验,烧完之后及时在堆烧位置做好标记。堆烧后隔1 d,在每个堆烧处理的样点中央进行统一取样,并采集对照(CK)样品。堆烧时间至取样时间之间的时间间隔期则表示不同的恢复期,3月、5月和7月进行的堆烧分别代表恢复期为120、60 d和1 d。

1.3.2 样品采集 在每个样地,取样前先将堆烧点的灰烬及枯落物等清理干净,利用S型取样法(共5点)采取0~10 cm表层土壤。用消毒的土钻按照火烧持续时间长短和火烧日期顺序采用“十字梅花形”进行取样,按照在每个堆烧点取5个土样,再将3个样地内燃烧处理相同的土样混合均匀,用四分法取其中500 g放入塑料袋中带回实验室,在相邻未烧地用同样的方法取空白对照。根据《森林土壤分析法》进行风干过筛处理,供土壤化学性质测定^[22]。同时采集环刀样品,测定土壤容重和孔隙度等土壤物理性质。

1.3.3 土壤性质测定 根据中华人民共和国林业行业标准—森林土壤分析法^[22],采用环刀法测定土壤容重、非毛管孔隙度以及总孔隙度;采用pH计测定土壤pH值;采用K₂Cr₂O₇外加热法测定土壤有机碳;采用KDY-9830凯氏定N仪法测定土壤全氮含量;采用扩散法测定土壤碱解氮含量;采用0.03 mol·L⁻¹ NH₄F-0.025 mol·L⁻¹ HCl浸提后钼锑抗比色法测定土壤有效磷含量;采用中性NH₄AC浸提-火焰光度法测定土壤速效钾含量。

2 结果与分析

2.1 土壤物理性质变化

火烧直接或间接地影响了土壤物理性质。火烧10 min和30 min后1 d杉木林的土壤容重分别比火烧前降低5%和9%;火烧60 min后1 d土壤容重则大于火烧前水平。随着时间的推移,土壤容重一直增加,火烧10 min后60 d和120 d均大于火烧前;火烧30 min和60 min后60 d的土壤容重下降,均小于火烧前,之后再逐渐增大(图1)。

与火烧前相比,火烧10、30 min和60 min后1 d杉木林土壤总孔隙度分别升高了6%、7%和2%。随着时间的推移,不同火烧处理的土壤总孔隙度均逐渐降低,且120 d后均低于火烧前水平(图2)。

与总孔隙度类似,火烧10、30 min和60 min后1 d的土壤非毛管孔隙度均大于火烧前,之后又逐

渐减低,但降低的幅度高于总孔隙度,60 d和120 d后的土壤非毛管孔隙度均低于火烧前水平(图3)。

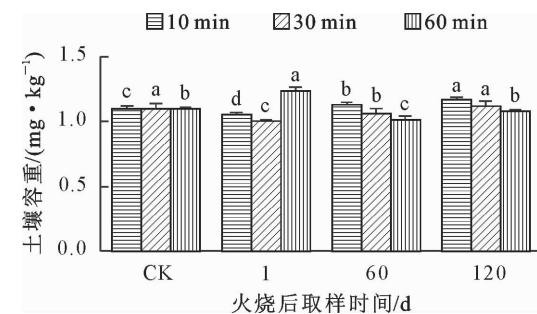


图1 火烧对土壤容重的影响

Fig. 1 Burning effect on soil bulk density

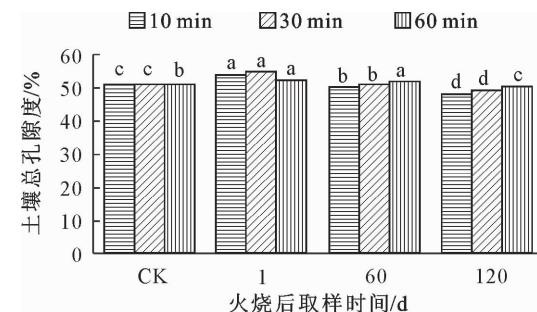


图2 火烧对土壤总孔隙度的影响

Fig. 2 Burning effect on soil porosity

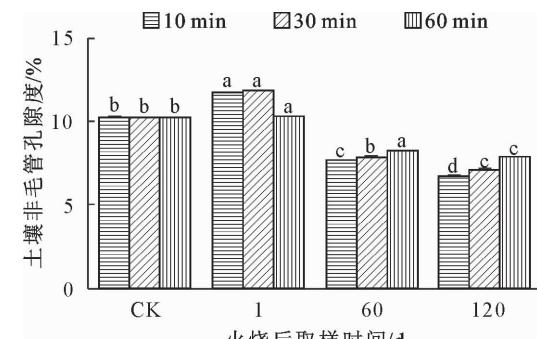


图3 火烧对土壤非毛管孔隙度的影响

Fig. 3 Burning effect on soil non-capillary porosity

2.2 土壤化学性质变化

2.2.1 土壤pH值变化 不同持续时间火烧后杉木人工林土壤pH值均有所增加,但增加的幅度不同。火烧10、30 min和60 min后1 d土壤pH值分别增加3%、2%和1%;60 d后,土壤pH值继续增加,尤以火烧30 min土壤pH值的增加幅度最大。到120 d时火烧10 min和60 min的火烧迹地土壤pH值略有增加,而火烧30 min的土壤pH值下降,但仍高于烧前水平。这表明火烧30 min和60 min的迹地土壤pH值变化幅度基本持平,但均高于火烧10 min的迹地,且随着火烧时间的延长,火后土壤pH值增加越多,可能是由于长时间的火烧产生了更多的阳离子造成的。火烧60 min呈持续增加

趋势,而 30 min 的火烧时间对森林土壤 pH 值的影响不稳定(图 4)。

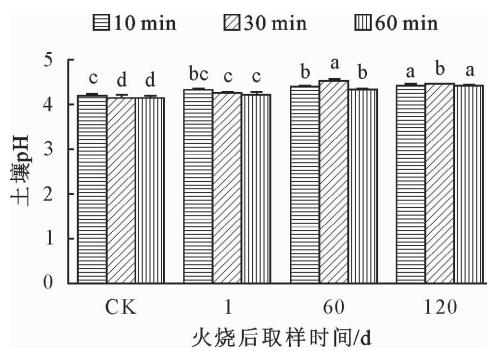


图 4 火烧对土壤 pH 值的影响

Fig. 4 Burning effect on soil pH

2.2.2 土壤有机碳含量 通过对不同处理杉木林土壤有机碳含量的变化分析发现,森林土壤有机碳含量均有所增加。在火烧 10 min 和 60 min 后的 120 d 内,随时间增加土壤有机碳呈明显的增加趋势;火烧 30 min 后的土壤有机碳含量呈先增加后减少再增加的变化趋势,但均高于火烧前水平(图 5)。

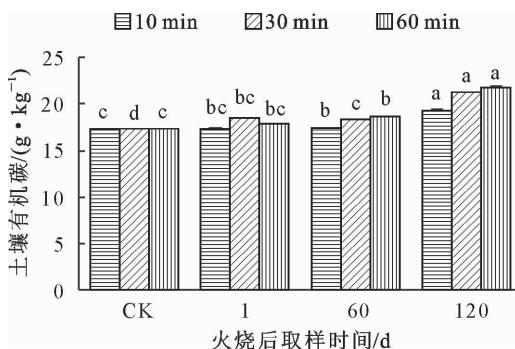


图 5 火烧对土壤有机碳含量的影响

Fig. 5 Burning effect on soil organic carbon

2.2.3 土壤氮含量 火烧 10、30 min 与 60 min 后 1 d 土壤全氮含量分别增加 16%、21% 和 17%。不同火烧强度和持续时间,进入土壤的氮的数量也有所不同。之后不同火烧持续时间下,土壤全氮含量随着时间间隔的增加出现不同程度的降低,其中火烧 10 min 和 60 min 土壤全氮含量减少的幅度均大于火烧 30 min(图 6)。

火烧后土壤碱解氮含量随时间增加(图 7)。火烧 10、30 min 和 60 min 的土壤碱解氮含量在火烧后 60 d 增加缓慢,比火烧前只增加了 7~16 mg · kg⁻¹,在火烧后 120 d 时增加迅猛,分别比 CK 增加了 48.25、44.11 mg · kg⁻¹ 和 46.18 mg · kg⁻¹。从整体来看,火烧 10 min 和 60 min 迹地的土壤碱解氮含量略高于 30 min 的火烧迹地。

2.2.4 土壤有效磷 火烧 10 min 后土壤有效磷含量明显增加。与火烧前相比,火烧后 1、60 d 和 120

d 分别增加了 7.04、13.10 mg · kg⁻¹ 和 17.23 mg · kg⁻¹,呈持续递增趋势(图 8)。火烧 30 min 和 60 min 的土壤有效磷含量存在不同程度的下降,火烧 1 d 后分别下降了 5% 和 12%,之后开始慢慢恢复,但火烧后 120 d 仍未恢复到火烧前水平。

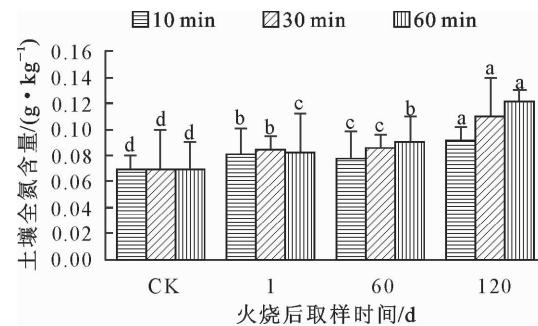


图 6 火烧对土壤全氮含量的影响

Fig. 6 Burning effect on soil total nitrogen

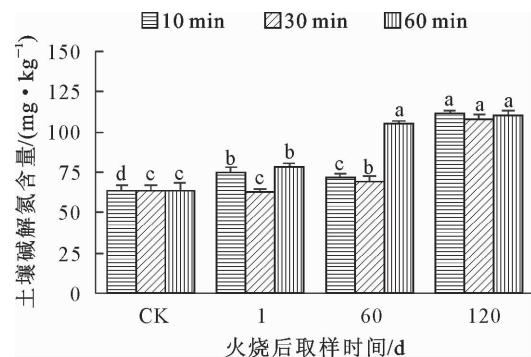


图 7 火烧对土壤碱解氮含量的影响

Fig. 7 Burning effect on soil available nitrogen

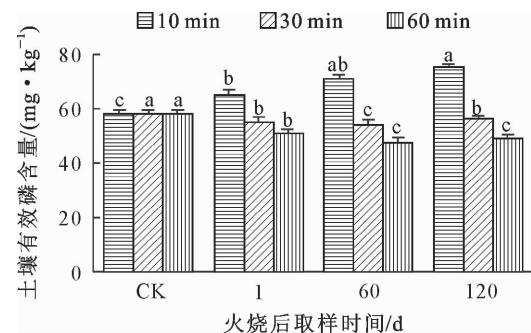


图 8 火烧对土壤有效磷含量的影响

Fig. 8 Burning effect on soil available phosphorus

2.2.5 土壤速效钾 受火烧的影响土壤速效钾含量也表现出不同程度的变化。火烧 10 min 1 d 后土壤速效钾含量升高,之后开始迅速下降,120 d 后下降到火烧前水平以下。火烧 30 min 后 60 d 的土壤速效钾含量增加,之后逐渐降低,到 120 d 几乎降低到火烧前水平。火烧 60 min 的杉木林土壤速效钾含量持续增加,火烧后 120 d 增加量达到了 21.12 mg · kg⁻¹(图 9)。

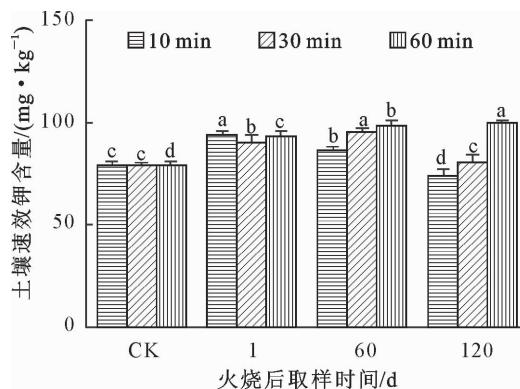


图9 火烧对土壤速效钾含量的影响

Fig. 9 Burning effect on soil available potassium

3 结论与讨论

不同火烧持续时间杉木林土壤物理、化学性质差别较大;火烧后时间间隔对不同火烧持续时间土壤性质的影响也不一样。火烧 10 min 和 30 min 后 1 d 杉木林土壤的容重下降,之后逐渐增加;火烧 60 min 的土壤容重呈现出先增大后降低再增大的变化趋势,火烧 60 d 和 120 d 时均低于火烧前。究其原因,可能是枯枝落叶火烧后的灰分颗粒充填到土壤孔隙间,增加了土壤容重,经雨水冲刷使土壤坚实度增加,甚至发生板结。土壤容重不同还会影响土壤水分、空气的通透性,土壤孔隙度变化与土壤容重呈负相关^[20],与火烧前相比,火烧 10、30 min 和 60 min 后土壤总孔隙度和非毛管孔隙度先增加后降低,且 120 d 后均降低到火烧前水平以下。火烧使沙质粘壤大孔隙度减小了 26%^[23]。其原因可能一方面是火烧后的灰分颗粒填充到土壤空隙中,导致土壤容重增加,土壤孔隙度下降;另一方面火烧后迹地经雨水冲刷,裸露土壤容易发生板结。这与其他研究结果一致。杉木林火烧后 5 d 土壤总孔隙度和非毛管孔隙度均增大,但随后逐渐降低,且尤土壤非毛管孔隙度降低最为显著^[21]。这可能是由于火烧后几天,由于地表枯枝落叶层减少,降低了土壤容重,提高了土壤孔隙度,但是随着时间的推移,在降雨直接打击下,易造成大孔隙的堵塞,土壤水分入渗性能降低,从而增大了土壤侵蚀潜能^[24]。

火烧 10、30 min 和 60 min 后杉木人工林土壤 pH 值均持续增加,这与其他研究结果一致^[25-27],主要原因可能是由于火烧使土壤温度升高,促进土壤有机碳分解,其次火烧过程中释放出的大量阳离子,导致土壤 pH 值增加。目前有关火烧对土壤有机碳含量影响的结论不一,有正影响、也有负影响、甚至还有无影响的报道^[28-29]。其中,氮素挥发温度较低,受火烧影响较大,低强度火烧也能导致 54%~75%

的氮损失,但不同研究氮损失量不同^[30-31]。火烧对土壤有机碳、全氮含量的影响与火烧持续时间和火烧强度等有关。火烧 10 min 和 60 min 后的土壤有机碳呈持续增加趋势;火烧 30 min 后土壤有机碳含量呈先增加后减少再增加的变化趋势,但均高于火烧前水平。这主要是由于:一方面堆烧产生的熏土效应在一定程度上增加了土壤活性碳含量^[32];另一方面枯枝落叶火烧后其体内的养分被释放,地上生物量增加,将更多的凋落物分解转化成土壤有机质,使土壤有机碳含量逐渐上升。火烧 10、30 min 与 60 min 后 1 d 土壤全氮含量均增加,这可能是由于堆烧时可燃物中部分氮通过高温烟熏作用进入土壤中,使土壤全氮含量增加。之后开始降低,可能是由于计划火烧后,地上生物量增加,分解吸收土壤中的氮增加,再加上长时间火烧使土壤表层受到雨水侵蚀较严重,从而导致土壤全氮含量的逐渐降低。火烧 10、30 min 和 60 min 的土壤碱解氮含量在火烧后 60 d 增加缓慢,在火烧后 120 d 时增加迅猛,且从整体来看火烧 10 min 和 60 min 迹地的土壤碱解氮含量略高于 30 min 火烧迹地。其原因是由于火烧过程中部分氮通过烟熏作用进入土壤;其次火烧增加了土壤 pH 值,提高了土壤固氮能力,从而使土壤碱解氮含量明显增加。可燃物燃烧时释放出自身的磷元素和钾元素,会使土壤速效磷和速效钾含量升高。主要由于火烧后土壤 pH 值升高有利于无机磷的释放,其次土温升高促进微生物的活性,提高了有机磷矿化速度。但是较长时火烧迹地上的土壤速效磷却有略微的下降。本研究表明,火烧 10 min 后土壤有效磷含量持续递增;火烧 30 min 和 60 min 的土壤有效磷含量存在不同程度的下降,火烧 1 d 后下降,之后开始慢慢恢复,但火烧后 120 d 仍未恢复到火烧前水平。这可能是由于较长时间火烧对土壤破坏程度较大,使有效磷转化为慢效磷。

火烧 10 min 1 d 后土壤速效钾含量升高,之后迅速开始下降,120 d 后下降到火烧前水平以下,这是因为火烧时产生大量灰分,灰分中的钾离子进入到土壤中,使土壤中的钾含量出现上升,但是随着时间的推移,经过雨水的冲刷和淋洗作用,钾离子消耗殆尽,所以土壤中速效钾含量又开始下降;火烧 30 min 后 60 d 的土壤速效钾含量增加,之后逐渐降低,到 120 d 几乎降低到火烧前水平;火烧 60 min 的杉木林土壤速效钾含量持续增加,可能由于与 10 min 和 30 min 相比,长时间火烧产生的灰分较多,灰分中的钾离子能够不断地补充到土壤中。研究表明,由于火烧对土壤破坏严重,使土壤有效磷和速效钾流失。杉木林火烧后 1 a 因水流失造成土壤钾

和磷的损失^[33-34]。

通过火烧前后土壤理化性质变化的对比,表明火烧对土壤有重要影响。今后还应进一步深入研究植被类型、地表可燃物负荷量、火烧强度等对土壤性质的影响,尤其是火烧后不同时期土壤微生物的动态变化以及次生植被的演替动态。

参考文献:

- [1] BARNES B V,ZAK D R,DENTON S R,*et al.* Forest Ecology [M]. 4th edition. New York:John Wiley & Sons,1998.
- [2] CERYINI G. Effects of fire on properties of forest soils:a review [J]. Oecologia,2005,143(1):1-10.
- [3] CASTALDI S,DE GRANDCOURT A,RASILE A,*et al.* CO₂, CH₄ and N₂O fluxes from soil of a burned grassland in Central Africa [J]. Biogeosciences,2010,7(11):3459-3471.
- [4] HART S C,DELUCA T H,NEWMAN G S,*et al.* Post-fire vegetative dynamics as drivers of microbial community structure and function in forest soils[J]. Forest Ecology and Management,2005,220(1):166-184.
- [5] 陈忠.火对森林主要生态系统过程的影响[J].应用生态学报,2006,17(9):1726-1732.
- CHEN Z. Influence of fire on main processes of forest ecology system [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2006,17(9):1726-1732. (in Chinese)
- [6] HATTEN J A,ZABOWSKI D,OGDEN A,*et al.* Soil organic matter in a ponderosa pine forest with varying seasons and intervals of prescribed burn [J]. Forest Ecology and Management,2008,255(7):2555-2565.
- [7] INBAR A,LADO M,STERNBERG M,*et al.* Forest fire effects on soil chemical and physicochemical properties,infiltration,runoff, and erosion in a semiarid Mediterranean region [J]. Geoderma,2014,221:131-138.
- [8] NEARY D G,RYAN K C,DEBANO L F. Wildland fire in ecosystems:effects of soil and water [R]. General Technical Report,2005.
- [9] DEBANO L F,NEARY D G,FFOLLIOTT P F. Fire's effects on ecosystems [M]. New York:Wiley,1998.
- [10] NEARY D G,KLOPATEK C C,DEBANO L F,*et al.* Fire effects on belowground sustainability:a review and synthesis [J]. Forest Ecology and Management,1999,122(1/2):51-71.
- [11] ROBICHAUD P R. Fire effects on infiltration rates after prescribed fire in Northern Rocky Mountain forests,USA [J]. Journal of Hydrology,2000(231/232):220-229.
- [12] BANNING N C,MURPHY D V. Effect of heat-induced disturbance on microbial biomass and activity in forest soil and the relationship between disturbance effects and microbial community structure [J]. Applied Soil Ecology,2008,40(1):109-119.
- [13] 孔健健,杨健.火烧对中国东北部兴安落叶松林土壤性质和营养元素有效性的影响[J].生态学杂志,2013,32(11):2837-2843.
- KONG J J,YANG J. Effects of fire on soil properties and nutrient availability in a Dahurian larch forest in Great Xing'an Mountains of Northeast China [J]. Chinese Journal of Ecology,2013,32(11):2837-2843. (in Chinese)
- [14] 姜海燕,闫伟,李晓彤,*等*.兴安落叶松林土壤真菌的群落结构及物种多样性[J].西北林学院学报,2010,25(2):100-103.
- JIANG H Y,YAN W,LI X T,*et al.* Diversity and community structure of soil fungi in *Larix gmelinii* forest [J]. Journal of Northwest Forestry University,2010, 25 (2): 100-103. (in Chinese)
- [15] 刘发林,张思玉.火干扰下马尾松林物种多样性和土壤养分特征[J].西北林学院学报,2009,24(5):36-40.
- LIU F L,ZHANG S Y. Characters of species diversity and soil nutrition of *Pinus massoniana* forest under fire disturbance [J]. Journal of Northwest Forestry University,2009,24 (5):36-40. (in Chinese)
- [16] 赵凤君,王立中,舒立福.火烧对寒温带湿地生态系统的影响 [J].西北林学院学报,2013,28(2):136-142.
- ZHAO F J,WANG L Z,SHU L F. Influences of fire on ecosystem of the wetlands in cold temperate area [J]. Journal of Northwest Forestry University,2013, 28 (2): 136-142. (in Chinese)
- [17] OLIVER A K,CALLAHAM M A,JUMPPONEN A. Soil fungal communities respond compositionally to recurring frequent prescribed burning in a managed southeastern US forest ecosystem [J]. Forest Ecology and Management,2015,345:1-9.
- [18] 方晰.杉木人工林生态系统碳贮量与碳平衡的研究[D].长沙:中南林学院,2004.
- [19] BI J,BLANCO J A,SEELY B,*et al.* Yield decline in Chinese fir plantation:a simulation investigation with implications for model complexity [J]. Canadian Journal of Forest Research,2007,37 (9):1615-1630.
- [20] 倪炳卿,伍启忠,张观胜,*等*.将乐县自然资源与发展草食动物 [J].水土保持通报,2000,20(2):47-50.
- NI B Q,WU Q Z,ZHANG G S,*et al.* Natural resources and development of plant-eating animals in Jiangle County [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2000,20(2):47-50. (in Chinese)
- [21] 林志磊.将乐县自然资源特点及开发利用[J].福建地理,2001 (3):5-8.
- [22] GB7830-7892-87.森林土壤分析法[S].北京:中国标准出版社,2000.
- [23] LINDEBURGH S B. Effects of prescribed fire on site productivity:a literature review [R]. Land Management Report NUMBER 66, The Research Branch, Ministry of Forests, Victoria, B. C,1990.
- [24] DEBYLE N V. Clearcutting and fire in the larch/Douglas-fir forests of western montana:a multifaceted research summary [R]. General Technical Report, Intermountain Forest and Range Experiment Station,USDA Forest Service,1981 (INT-99).
- [25] GIOVANNINI G. The effect of fire on soil quality[M]// SALAM M,RUBIO J L. Soil erosion as a consequence of forest fires. Logrono:Geoforma Ediciones,1994:15-27.

- 期凋萎系数的测定和研究[J]. 河北林果研究, 1998, 13(1): 152-153.
- [31] 张占雄, 王延平. 陕北黄土区陡坡柠条林地雨水转化及土壤水分承载力[J]. 水土保持研究, 2010, 17(5): 80-85.
ZHANG Z X, WANG Y P. Rain transformation and soil water carrying capacity of *Caragana microphylla* forest in steep slope on loess region in northern Shaanxi Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(5): 80-85. (in Chinese)
- [32] 郭忠升, 邵明安. 土壤水分植被承载力研究成果在实践中的应用[J]. 自然资源学报, 2009, 24(12): 2187-2193.
- GUO Z S, SHAO M A. Use of the theory of soil water carrying capacity for vegetation in practice [J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(12): 2187-2193. (in Chinese)
- [33] 王树森, 余新晓, 刘凤芹, 等. 华北土石山区天然森林植被种间联结和生态位的研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(4): 170-172.
WANG S S, YU X X, LIU F Q, et al. Interspecific association and niche research of forest vegetation in rocky mountain area of north of China [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(4): 170-172. (in Chinese)

(上接第 6 页)

- [26] 唐季林, 欧国菁. 林火对云南松林土壤性质的影响[J]. 北京林业大学学报, 1995, 17(2): 44-49.
TANG J L, OU G J. The effect of forest fire on soil property of *Pinus yunnanensis* forests [J]. Journal of Beijing Forestry University, 1995, 17(2): 44-49. (in Chinese)
- [27] BINKLEY D, FISHER R. Ecology and management of forest soils [M]. 4th. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2012.
- [28] UHL C, JORDAN C F. Succession and nutrient dynamics following forest cutting and burning in Amazonia [J]. Ecology, 1984, 65(5): 1476-1490.
- [29] 张立存, 孙科辉, 钟安建, 等. 计划烧除对针阔混交林地土壤化学性质的影响[J]. 江西农业大学学报, 2014, 36(3): 587-593.
ZHANG L C, SUN K H, ZHONG A J, et al. The effect of prescribed burning on the chemical property of mixed coniferous and broad-leaved forest soil [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2014, 36(3): 587-593. (in Chinese)
- [30] GONZÁLEZ-PÉREZ J A, GONZÁLEZ-VILA F J, ALMENDROS G, et al. The effect of fire on soil organic matter: a review [J]. Environment international, 2004, 30(6): 855-870.
- [31] 谷会岩, 金靖博, 陈祥伟, 等. 不同火烧强度林火对大兴安岭北坡兴安落叶松林土壤化学性质的长期影响[J]. 自然资源学报, 2010, 25(7): 1114-1121.
GU H Y, JIN J B, CHEN X W, et al. The long-term effects of different burn intensity on soil property of *Larix gmelinii* forest on north slope of Daxing'an Mountains [J]. Journal of Nature Resources, 2010, 25(7): 1114-1121. (in Chinese)
- [32] 陆昕, 胡海清, 孙龙, 等. 火干扰对兴安落叶松林土壤轻组有机碳的影响[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(29): 11709-11713.
LU X, HU H Q, SUN L, et al. Effects of fire disturbance on soil light fraction organic carbon of *Larix gmelinii* forest [J]. Journal of Anhui Agri. Sci., 2013, 41(29): 11709-11713. (in Chinese)
- [33] 杨玉盛. 杉木林可持续经营的研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 1998.
- [34] 郭剑芬. 皆伐火烧对杉木林和栲树林碳、氮动态的影响[D]. 厦门: 厦门大学, 2006.