

凋落物处理对不同林型土壤有机碳全氮全磷的影响

李常准, 陈立新[†], 段文标, 李少然, 李亦菲, 于颖颖, 朱佳慧, 赵戈榕
(东北林业大学林学院, 150040, 哈尔滨)

摘要:为探讨凋落物处理(去除和添加)对红松人工林和阔叶红松林2种林型土壤有机碳(活性有机碳、总有机碳)、氮、磷的影响,2018年5月在2种林型的红松林中展开试验。试验以保持原状凋落物为对照,设置去除凋落物和添加凋落物2种处理,每种处理有3个重复。采用单因素方差分析方法,揭示不同凋落物处理对活性有机碳、总有机碳、全氮、全磷的影响。结果表明:1)在红松人工林中,去除凋落物处理对土壤、颗粒有机碳、轻组碳影响显著($P < 0.05$),添加凋落物处理对土壤易氧化有机碳影响不显著,对土壤颗粒有机碳、轻组碳影响显著($P < 0.05$)。2)在阔叶红松林中,虽然去除和添加凋落物处理均对土壤易氧化有机碳影响不显著,但对土壤颗粒有机碳、轻组碳影响显著($P < 0.05$)。尽管去除凋落物处理对2种林型土壤总有机碳影响显著($P < 0.05$),但添加凋落物处理却对其影响不显著;去除和添加凋落物处理对土壤全氮和全磷影响不显著。去除和添加凋落物处理对红松人工林土壤C/N影响不显著;去除凋落物处理对阔叶红松林土壤C/N影响显著($P < 0.05$),添加凋落物处理对其影响不显著。在2种林型中凋落物处理对土壤颗粒有机碳、轻组碳和总有机碳影响显著;凋落物处理对土壤易氧化有机碳、土壤全氮、全磷影响均不显著。

关键词: 红松林; 去除和添加凋落物; 土壤活性有机碳; 土壤养分

中图分类号: S157 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-2673(2020)01-0100-10

DOI: 10.16843/j.sswc.2020.01.012

Effects of litter treatment on soil organic carbon, total nitrogen and total phosphorus in different forest types

LI Changzhun, CHEN Lixin, DUAN Wenbiao, LI Shaoran, LI Yifei, YU Yingying, ZHU Jiahui, ZHAO Gerong
(School of Forestry, Northeast Forestry University, 150040, Harbin, China)

Abstract: [Background] By removing and adding litter, the effects of litter treatment on soil active organic carbon and soil nutrients of *Pinus koraiensis* plantation and broad-leaved *K. koraiensis* forest were explored, which provided scientific basis and practical reference for sustainable management of the two forest types. [Methods] In May 2018, the questions stated above were studied in Liangshui National Nature Reserve of Xiaoxing'an Mountains by setting up test plots, removing and adding litter, collecting and analyzing soil samples and data processing. The experiment was conducted to remove litter, add double litter and keep the original litter unchanged (control). Each treatment has three replicates. In May, August and October 2018, soil samples in 0–20 cm were collected in each test unit. Bring the soil sample back to the laboratory in time for processing. [Results] In *K. koraiensis* plantation, litter removal treatment had significant effects on soil easily oxidized organic carbon, particulate organic carbon and light fraction carbon ($P < 0.05$). Adding litter treatment had no significant effects on soil easily oxidized

收稿日期: 2019-09-09 修回日期: 2019-11-12

项目名称: 国家自然科学基金“阔叶红松林凋落物-氮磷沉降耦合输入对土壤团聚体碳氮激发效应及稳定性影响”(31770656)

第一作者简介: 李常准(1994—),女,硕士研究生。主要研究方向:森林土壤。E-mail:lc20150213@163.com

[†]通信作者简介: 陈立新(1962—),女,博士,教授。主要研究方向:森林土壤学,城市森林土壤。E-mail:lxchen88@163.com

organic carbon, but had significant effects on soil particulate organic carbon and light fraction carbon ($P < 0.05$). Litter treatment had no significant effect on soil easily oxidized organic carbon, but had significant effect on soil particulate organic carbon and light fraction carbon ($P < 0.05$). Adding litter treatment had no significant effect on soil easily oxidized organic carbon, but had significant effect on soil particulate organic carbon and light fraction carbon ($P < 0.05$). The effect of litter removal treatment on soil total organic carbon of two forest types was significant ($P < 0.05$), but the effect of litter addition treatment on soil total organic carbon was not significant; the effect of litter removal and litter addition treatment on soil total nitrogen and total phosphorus was not significant. The effects of litter removal and addition on soil C/N of *K. pine* plantation were not significant; the effects of litter removal on soil C/N of broad-leaved *P. koraiensis* plantation were significant ($P < 0.05$), but the effects of litter addition on soil C/N were not significant. [**Conclusions**] In *P. koraiensis* plantation, adding litter treatment had no significant effect on soil easily oxidized organic carbon, while removing litter treatment had significant effect ($P < 0.05$) on soil easily oxidized organic carbon; in broad-leaved *K. pine* plantation, adding and removing litter treatment had no significant effect on soil easily oxidized organic carbon. In the two types of forest, the removal and addition treatments had significant effects ($P < 0.05$) on soil particulate organic carbon and light fraction carbon. In the two forest types, the effect of litter removal on soil total organic carbon was significant($P < 0.05$), but the effect of litter addition was not significant; the effect of litter removal and litter addition on soil total nitrogen and total phosphorus was not significant.

Keywords: *Pinus koraiensis* forest; litter removal and addition; soil active organic carbon; soil nutrients

凋落物是植物生长发育过程中新陈代谢的产物,能够促进森林生态系统碳素和养分循环^[1],森林凋落物是生态系统的重要组成部分,会影响土壤有机碳形成和土壤养分运输。凋落物分解释放的有机碳是土壤有机碳的重要来源之一^[2]。凋落物的分解是陆地生态系统物质循环和能量转化的主要途径,凋落物分解能改善土壤质量,其数量和分解速率能够在一定程度上代表土壤营养状况^[3]。

在森林生态系统中,可以通过去除和添加凋落物处理的方式,改变土壤中有机碳及其养分变化。土壤活性有机碳是土壤有机碳的一部分,它包括土壤易氧化有机碳、土壤颗粒有机碳及土壤轻组碳等。土壤活性有机碳对外部环境变化反应敏感,而且能够在不同程度上反映土壤有机碳的有效性和时效性;因此,它可以看作土壤有机碳变化的指示指标。土壤易氧化有机碳是在土壤酶和微生物等作用下被快速氧化分解的那部分碳^[4]。土壤易氧化有机碳可以指示土壤有机质的早期变化^[5]。土壤颗粒有机碳是处于新鲜的动植物残体和腐殖化有机物之间暂时的或过渡的有机碳^[6],对外界因素响应敏感。土壤轻组碳是在动植物残体和腐殖化有机质之间的有机碳,是土壤活性有机碳的重要组成部分^[7]。近年来,大多数去除和添加凋落物处理对土壤活性有机碳影响的研究主

要是通过以土壤微生物碳为活性有机碳指标来分析和探讨^[8-9]。目前,添加凋落物对土壤养分的影响结果也不尽相同。土壤养分包括土壤总有机碳、全氮、全磷等。凋落物的改变会影响土壤碳的输入。凋落物输入对土壤呼吸影响的研究较多,但凋落物输入对土壤有机碳影响的研究相对较少且所得结论存在分歧。有的研究发现,添加凋落物会增加土壤有机碳含量^[10],但也有研究表明,添加凋落物后土壤有机碳并没有发生变化^[11-12]。李佩擎^[13]的研究结果表明,添加凋落物对土壤全氮和全磷没有影响,但也有研究^[8]发现,土壤全氮和碳氮比随着凋落物的添加而增加。当前,国内添加和去除凋落物处理对红松人工林和阔叶红松林土壤影响的研究较少。本研究通过去除和添加凋落物处理,探究其对红松人工林和阔叶红松林 2 种林型土壤活性有机碳和其他土壤主要养分(总有机碳、全氮、全磷)的影响,为这 2 种林型的可持续经营提供科学依据和实践参考。

1 研究区概况

研究区位于黑龙江省伊春市带岭区凉水国家级自然保护区(E 128°53'20",N 47°10'50")。该地的山岭属于小兴安岭南端最大支脉达里带岭的南坡,本区最高峰位于区内北端的岭来东山,海拔为

707.3 m。平均海拔为 409 m,相对海拔80~300 m。该地区属于温带大陆性湿润季风气候,年平均气温-0.3℃,年平均最低气温-6.6℃,年平均最高气温7.5℃,年平均降水量 676.0 mm,年平均无霜期 100~120 d。地带性土壤类型为暗棕壤。

在红松人工林 3 块样地内,主要树种为红松(*Pinus koraiensis*)。由于红松人工林是在原始阔叶红松林采伐迹地上营造的,且其周围均被原始阔叶红松林所环绕;因此,红松人工林内还伴生有少量阔

叶树种的幼树,如黄槲(*Phellodendron amurense*)、白桦(*Betula platyphylla*)、色木槭(*Acer mono*)、青楷槭(*Acer tegmentosum*)、榆树(*Ulmus pumila*)、花楷槭(*Acer ukurunduense*)、枫桦(*Betula costata*)、稠李(*Padus racemosa*)。在阔叶红松林 3 块样地内,主要树种为红松,伴生树种为枫桦、色木槭、稠李、毛赤杨(*Alnus sibirica*)、臭冷杉(*Abies nephrolepis*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、瘤枝卫矛(*Euonymus verrucosus*)。试验样地概况如表 1 所示。

表 1 试验样地基本概况

Tab. 1 Basic situation of experimental sample plot

样地 Sample plot	地形因子 Topographic factors				林分调查因子 Forest survey factor				土壤因子 Soil factors			
	坡向 Slope aspect	坡位 Slope position	坡度 slope/ (°)	海拔 Altitude/ m	平均胸径 Average DBH/ cm	平均树高 Mean height/ m	林分密度 Stand density/ (Trees·hm ⁻²)	郁闭度 Canopy closure	土壤密度 Soil density/ (g·m ⁻³)	全碳 Total carbon/ (g·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen/ (g·kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus/ (g·kg ⁻¹)
红松人工林 1 <i>Pinus koraiensis</i> plantation 1	半阳坡 Half-sunny slope	下坡 Down slope	8	411.8	21.1	18.4	1 475	0.75	0.99	46.08	2.62	0.31
红松人工林 2 <i>Pinus koraiensis</i> plantation 2	半阳坡 Half-sunny slope	下坡 Down slope	9	435	23.5	20.2	1 425	0.8	0.84	46.37	2.53	0.32
红松人工林 3 <i>Pinus koraiensis</i> plantation 3	半阳坡 Half-sunny slope	下坡 Down slope	7	415	21.7	19.1	1 300	0.7	0.82	54.52	3.25	0.29
阔叶红松林 1 Broad-leaved <i>Pinus koraiensis</i> forest 1	半阳坡 Half-sunny slope	上坡 Up slope	15	485	26.4	15.7	1 175	0.7	0.8	47.2	3.02	0.21
阔叶红松林 2 Broad-leaved <i>Pinus koraiensis</i> forest 2	半阳坡 Half-sunny slope	上坡 Up slope	15	499	21.1	15	1 125	0.65	0.92	45.21	2.84	0.26
阔叶红松林 3 Broad-leaved <i>Pinus koraiensis</i> forest 3	半阳坡 Half-sunny slope	上坡 Up slope	15	471	24.4	18.1	825	0.5	0.82	46.94	2.95	0.3

2 材料与方法

2.1 试验设计及处理

在研究区内,2017 年 10 月通过踏查和查阅森林资源档案等手段,在保护区内筛选出 2 个有代表性的林型:红松人工林和阔叶红松林。在每一林型内,各选择 3 块立地条件相似的地块,将其设置为固定试验样地(以下简称样地),共计 6 块样地。为了避免样地之间的相互影响,同一林型的 3 块样地之间至少间隔 20 m。在每块样地中,随机设置 3 个 2 m×2 m 的小样方,2 个林型共计 18 个小样方,作为试验单元。

2.2 样品采集

本试验设置为去除凋落物处理、添加 1 倍凋落物处理(以下简称“添加凋落物处理”)、保持原状凋落物不变处理(对照)共 3 种凋落物处理方式,每种处理设置 3 个重复;其中去除凋落物处理的小样方

将未分解层、半分解层、分解层 3 层凋落物全部有序转移到添加凋落物处理的小样方。2018 年 5 月将红松人工林和阔叶红松林 18 个小样方中的 6 个设置为去除凋落物处理,6 个设置为添加凋落物处理、6 个设置为凋落物原状不变处理。2018 年 5、8 和 10 月在每个试验单元内,采集 0~20 cm 土壤样品。把土样及时带回实验室,剔除植物根系和>2 mm 的石块等,置于阴凉通风处,自然风干后,研磨过筛,于塑封袋中密封保存在实验室备用。

2.3 土壤样品测定方法

土壤全氮和全磷测定采用流动注射分析仪(SEAL Auto Analyzer 3, Germany)^[14-15];土壤有机碳测定采用碳氮分析仪(Elementar, Vario EL cube, Germany)^[16];土壤易氧化有机碳测定采用 333 mmol/L KMnO₄ 氧化-比色法^[17](333 mmol/L KMnO₄ 氧化的有机碳变化最大,因此选用 333 mmol/L KMnO₄);土壤颗粒有机碳采用 5 g/L 六偏磷酸钠

分散法^[18]后,用碳氮分析仪测定;土壤轻组碳采用相对密度分组法^[19]后,用碳氮分析仪测定。

2.4 数据处理

使用 Excel 2010 对数据进行初步整理,利用 SPSS 23 中的单因素方差分析($\alpha = 0.05$),研究添加和去除凋落物处理对土壤易氧化有机碳、土壤颗粒有机碳、土壤轻组碳、土壤有机碳、土壤全氮、土壤全磷、C/N 的影响;利用 SigmaPlot 10.0 绘制在 5、8、10 月份去除和添加凋落物处理后土壤易氧化有机碳、土壤颗粒有机碳、土壤轻组碳含量变化的图。

3 结果与分析

3.1 不同凋落物处理对土壤易氧化有机碳的影响

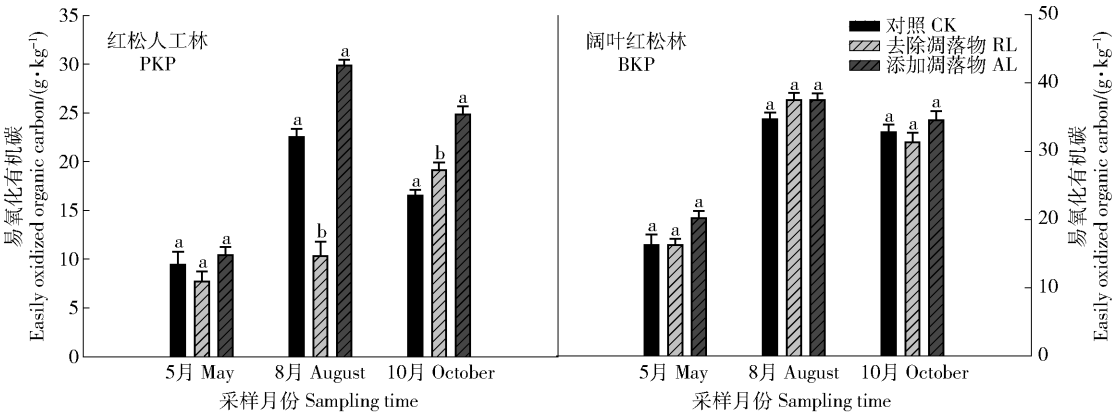
由图 1 可见:添加和去除凋落物对 5 月份红松人工林土壤易氧化有机碳影响不显著;添加凋落物

8、10 月的土壤易氧化有机含量与对照相比,分别增加 32.68%、50.03%,8 月去除凋落物显著降低土壤易氧化有机碳含量,比对照降低 54.21%;10 月去除凋落物土壤易氧化有机碳含量增加,比对照增加 15.41%。添加和去除凋落物对阔叶红松林 5、8、10 月的土壤易氧化有机碳影响均不显著。

由图 1 可见:在 2 种林型中添加凋落物处理对土壤易氧化有机碳影响均不显著;红松人工林 8 月去除凋落物处理对土壤易氧化有机碳影响显著,阔叶红松林去除凋落物处理对其影响不显著。

3.2 不同凋落物处理对土壤颗粒有机碳的影响

由图 2 可见:2 种林型 5 月添加凋落物对土壤颗粒有机碳含量影响不显著,与对照相比,分别增加了 7.26%、14.59%;去除凋落物显著降低土壤颗粒有机碳含量,比对照分别减少 55.85%、40.59%。红松人工林 8 月添加凋落物土壤颗粒有机碳含量显



不同小写字母表示不同处理差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters indicate significant difference among different treatments ($P < 0.05$). CK:保持原凋落物不变 Keep litter unchanged. AL: Added litter. RL: Removed litter. PKP: *Pinus koraiensis* plantation. BKP: Broad-leaved *Pinus koraiensis* forest. 下同 The same below.

图 1 不同凋落物处理下土壤易氧化有机碳的变化

Fig. 1 Changes of soil easily oxidized organic carbon under different litter treatments

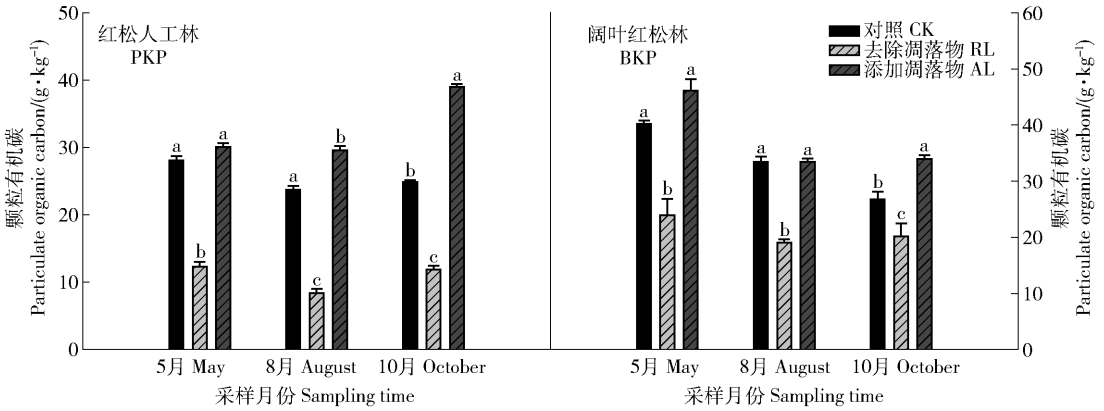


图 2 不同凋落物处理下土壤颗粒有机碳的变化

Fig. 2 Changes of soil particulate organic carbon under different litter treatments

著增加了 24.66%；去除凋落物土壤颗粒有机碳含量显著降低 64.83%；阔叶红松林 8 月添加凋落物对土壤颗粒有机碳含量无显著影响，去除凋落物显著降低了 42.89%。2 种林型中 10 月添加凋落物土壤颗粒有机碳含量显著增加，分别增加 56.98%、26.94%，去除凋落物能显著降低土壤颗粒有机碳含量，分别减少 51.79%、24.80%。

3.3 不同凋落物处理对土壤轻组碳的影响

由图 3 可以看出：2 种林型 5、8、10 月添加凋落

物显著提高红松人工林土壤轻组碳含量；红松人工林 5、8、10 月去除凋落物显著降低了土壤轻组碳含量，5 月阔叶人工林去除凋落物对土壤轻组碳影响不显著，8、10 月去除凋落物对土壤轻组碳影响显著。

由图 2、3 可见，2 种林型去除和添加凋落物处理对土壤颗粒有机碳及轻组碳含量影响趋势基本一致。去除和添加凋落物对土壤轻组碳影响显著，这可能与土壤轻组碳主要来源是植物凋落物及根系有关。

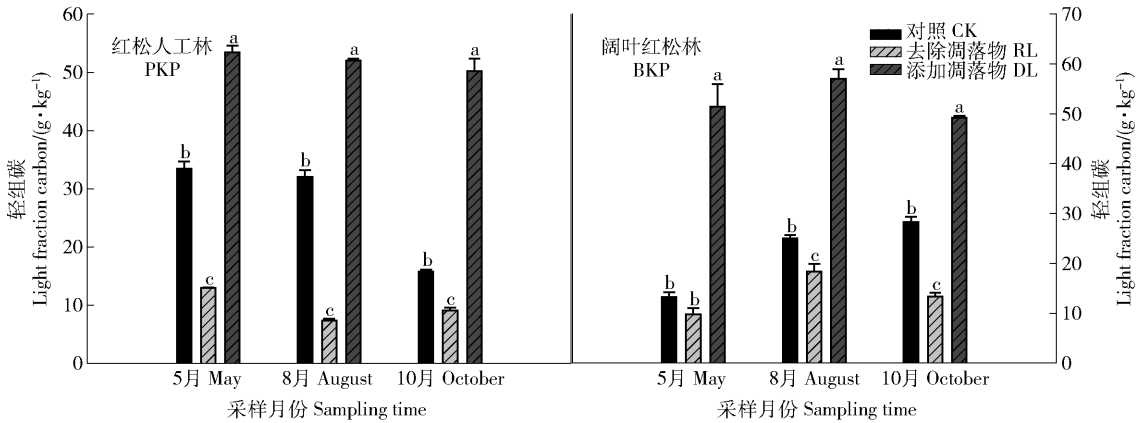


图 3 不同凋落物处理下土壤轻组碳的变化

Fig. 3 Changes of soil light fraction organic carbon under different litter treatment

3.4 不同凋落物处理对土壤碳氮磷的影响

由表 2 可见，2 种林型 5、8、10 月添加凋落物土壤有机碳含量影响不显著，去除凋落物土壤有机碳含量显著降低。

从表 3 看出，2 种林型 5、8、10 月添加凋落物后，添加和去除凋落物处理均对土壤全氮影响不显著 ($P>0.05$)。

由表 4 可见：5、8、10 月红松人工林添加凋落物

表 2 不同凋落物处理下土壤总有机碳的变化

Tab. 2 Changes of soil total organic carbon under different litter treatments

采样月份 Sampling time	红松人工林 PKP			阔叶红松林 BPK		
	对照 CK	去除凋落物 RL	添加凋落物 AL	对照 CK	去除凋落物 RL	添加凋落物 AL
5 月 May	75.48 ± 1.11a	53.97 ± 0.89b	65.20 ± 0.38a	101.51 ± 1.24a	56.57 ± 0.53b	101.99 ± 0.82a
8 月 August	98.44 ± 0.30a	63.98 ± 0.37b	97.44 ± 0.86a	109.46 ± 0.53a	53.87 ± 1.27b	114.36 ± 0.85a
10 月 October	75.39 ± 0.43a	56.71 ± 0.84b	74.99 ± 1.10a	117.88 ± 1.38a	81.59 ± 1.05b	132.59 ± 1.10a

注：不同小写字母表示同一行之间差异显著 ($P<0.05$)。Different small letters indicate significant difference among the same line ($P<0.0$)。下同 the same below.

表 3 不同凋落物处理下土壤全氮变化

Tab. 3 Changes of soil total nitrogen under different litter treatments

采样月份 Sampling time	红松人工林 PKP			阔叶红松林 BPK		
	对照 CK	去除凋落物 RL	添加凋落物 AL	对照 CK	去除凋落物 RL	添加凋落物 AL
5 月 May	2.77 ± 0.72a	2.92 ± 0.52a	3.09 ± 0.37a	2.68 ± 0.46a	3.37 ± 0.63a	3.16 ± 0.089a
8 月 August	4.49 ± 1.69a	2.99 ± 0.29a	3.37 ± 0.39a	2.97 ± 0.56a	3.66 ± 0.98a	2.76 ± 0.64a
10 月 October	2.83 ± 0.74a	1.95 ± 0.47a	3.16 ± 0.42a	3.34 ± 0.96a	3.71 ± 1.11a	3.19 ± 0.79a

物土壤全磷含量分别为 0.59 g/kg、0.75 g/kg、0.70 g/kg,去除凋落物后分别为 0.58 g/kg、0.74 g/kg、0.40 g/kg。5、8、10 月阔叶红松林添加凋落物土壤全磷含量分别为 0.60 g/kg、0.61 g/kg、0.46 g/kg,去除凋落物后分别为 0.52 g/kg、0.72 g/kg、0.47 g/kg。

添加和去除凋落物对 2 种林型的土壤全磷影响均不显著($P>0.05$)。

表 4 不同处理下土壤全磷变化

Tab.4 Changes of soil total phosphorus under different treatments

采样月份 Sampling time	红松人工林 PKP			阔叶红松林 BKP		
	对照 CK	去除凋落物 RL	添加凋落物 AL	对照 CK	去除凋落物 RL	添加凋落物 AL
5 月 May	0.69 ± 0.22a	0.58 ± 0.43a	0.59 ± 0.08a	0.58 ± 0.11a	0.52 ± 0.06a	0.60 ± 0.03a
8 月 August	0.87 ± 0.11a	0.74 ± 0.13a	0.75 ± 0.10a	0.62 ± 0.19a	0.72 ± 0.09a	0.61 ± 0.08a
10 月 October	0.42 ± 0.23a	0.40 ± 0.03a	0.70 ± 0.21a	0.57 ± 0.05a	0.47 ± 0.10a	0.46 ± 0.19a

从表 5 看出,添加凋落物后红松人工林 5、8、10 月份的土壤 C/N 分别为 21、24、23,去除凋落物后的土壤 C/N 分别为 19、19、31,添加和去除凋落物对土壤 C/N 均无显著影响($P>0.05$)。

表 5 不同凋落物处理下土壤 C/N 的变化

Tab.5 Changes of soil C/N under different litter treatments

采样月份 Sampling time	红松人工林 PKP			阔叶红松林 BKP		
	对照 CK	去除凋落物 RL	添加凋落物 AL	对照 CK	去除凋落物 RL	添加凋落物 AL
5 月 May	29 ± 0.80a	19 ± 0.80a	21 ± 1.36a	36 ± 0.57a	17 ± 0.93b	37 ± 0.80a
8 月 August	22 ± 1.19a	19 ± 1.18a	24 ± 0.56a	23 ± 1.31b	31 ± 1.13ab	42 ± 1.24a
10 月 October	25 ± 0.82a	31 ± 1.19a	23 ± 1.39a	38 ± 3.05a	24 ± 3.36a	43 ± 5.62a

添加凋落物后阔叶红松林 5、8 月份的土壤 C/N 分别为 38、42,去除凋落物土壤 C/N 分别为 17、31,添加凋落物对土壤 C/N 影响不显著($P>0.05$),但去除凋落物对土壤 C/N 却影响显著;添加和去除凋落物后 10 月份的土壤 C/N 分别为 43、24,添加和去除凋落物对土壤 C/N 均无显著影响($P>0.05$)。

红松人工林去除和添加凋落物对土壤 C/N 影响不显著,阔叶红松林 5、8 月去除和添加凋落物对土壤 C/N 影响显著。2 种林型土壤 C/N 对凋落物处理反应不一致。

4 讨论

4.1 不同凋落物处理对土壤活性有机碳的影响

本研究发现:在 2 种林型中添加凋落物对土壤易氧化有机碳影响不显著(图 1);在红松人工林 5 月、阔叶红松林 5、8 月添加凋落物处理对土壤颗粒有机碳影响也不显著(图 2);在红松人工林 8、10 月及阔叶红松林 10 月添加凋落物处理对土壤颗粒有机碳影响显著(图 2)。这与洪祖荣^[20]研究结果不同,在其研究中增加凋落物后引起土壤易氧化有机碳含量显著增加。在张岩等^[21]研究中发现秸秆增

加会增加土壤易氧化有机碳的含量,因此,本研究中土壤易氧化有机碳含量并没有随凋落物增加而增加。原因之一可能是增加凋落物处理中凋落物是红松林中同一类型的凋落物,并不能通过增加有机体的丰富度促进土壤有机碳含量的增加从而增加土壤易氧化有机碳含量;原因之二可能是本试验中添加的凋落物大多数为针叶,分解速率慢^[22],尽管添加凋落物会增强微生物活性^[9]和其他土壤生物活性^[6],但针叶凋落物不易分解,因此添加凋落物对土壤易氧化有机碳及颗粒有机碳影响不显著。本研究发现:在红松人工林中去除凋落物处理对土壤易氧化有机碳、颗粒有机碳含量显著降低;在阔叶红松林中,去除凋落物对土壤易氧化有机碳与颗粒有机碳影响不显著。出现这种情况可能是红松人工林中去除凋落物后,土壤微生物量降低^[9],且去除凋落物后不利于土壤微生物的繁殖^[23],土壤微生物的变化导致转化为土壤易氧化有机碳和颗粒有机碳能力下降,以至于红松人工林中土壤易氧化有机碳和颗粒有机碳含量显著下降。也可能是由于阔叶红松林为原始林,几乎没有人为的破坏和干扰,即使去除凋落物处理后引起土壤微生物发生变化,但由于其自

我调节和恢复能力要强于红松人工林;因此,短时间的去除凋落物处理对土壤易氧化有机碳和颗粒有机碳影响不显著。

在 2 种林型中,去除凋落物处理显著降低了土壤轻组碳的含量(图 3),这与王合云等^[24]研究结果一致。土壤轻组碳组分是促使物质循环的腐生生物的有效能量来源,比周转速率慢的组分更有助于营养物质的循环,其含量的多少取决于有机物的输入和分解^[25],其主要是源于部分分解的动植物残体^[26],并随土壤动植物残体量的变化而变化^[27]。去除凋落物处理后,土壤轻组碳显著降低的原因之一可能是土壤轻组碳来源于动植物残体(凋落物属于植物残体),去除凋落物轻组碳来源减少;原因之二可能是去除凋落物后不利于微生物繁殖^[23],微生物代谢产物减少,而微生物代谢产物也同样是土壤轻组碳的重要组成部分^[28]。在 2 种林型中,添加凋落物处理后土壤轻组碳显著增加(图 3)。这与 Bonne 认为凋落物是土壤轻组碳主要来源的研究结果一致^[28-29]。添加凋落物土壤轻组碳显著增加的原因,可能是添加凋落物处理土壤轻组碳来源增加,二可能是添加凋落物处理后微生物活性增强。

4.2 不同凋落物处理对土壤碳氮磷的影响

本研究发现,在 2 种林型中,去除凋落物导致土壤总有机碳含量减少(表 2),这与李佩擎^[13]的研究结果不同。原因有:可能是去除凋落物后土壤养分减少,凋落物涵养水源的能力降低,增加的地表径流可能会带走一小部分土壤养分,因此导致土壤总有机碳含量减少;去除凋落物处理会使土壤有机碳输入量和化学质量受到影响,进而影响总有机碳在土壤中的积累^[30-31]。添加凋落物对 2 种林型中土壤总有机碳含量增加但影响不显著,这与李佩擎研究结果一致^[13]。可能原因:一是由于凋落物能够促进土壤团聚体的形成来增加土壤总有机碳,添加凋落物还能够引起“激发效应”而改变土壤碳的周转速率,从而促进土壤中碳含量的增加^[8];二是添加凋落物后对微生物有暂时的促进作用而导致土壤总有机碳含量增加。

去除和添加凋落物对两种林型中土壤全氮、全磷影响均不显著。这与 Bowden 等^[32]和陈玉平等^[33]的研究结果“凋落物处理对土壤全氮没有影响”一致。凋落物处理对土壤全氮没有显著影响可能是与本地区两种林型的土壤氮库储量大而实施去除和添加凋落物处理时间相对较短,从而部分遮盖了凋落物处理造成的实质影响^[34-35],另一个原因可

能是由于大气氮沉降的缘故导致凋落物处理对土壤全氮影响不显著^[33-36]。本研究与王丹等^[37]研究的凋落物增加对土壤全磷影响不显著的结果一致。可能是凋落物本身中含磷较少,因此,添加凋落物处理后对土壤全磷含量影响不明显。在森林土壤中的磷没有人为的输入,只通过大气沉降,其含量主要由成土母质中磷的含量所决定。刘倩等^[38]研究发现凋落物全磷与土壤全磷关系不显著,凋落物全磷与土壤有效磷关系极显著。这也是凋落物处理后对土壤全磷影响不显著的一个原因。

在红松人工林中,去除和添加凋落物处理对土壤 C/N 影响不显著。在阔叶红松林中,添加凋落物对 5、8 月土壤 C/N 影响显著,去除和添加凋落物对 10 月土壤 C/N 影响不显著。去除和添加凋落物处理土壤 C/N 值在 15~43 之间,因此,土壤有机质供肥情况良好。土壤 C/N 是体现土壤有机物分解速率的指标,高的 C/N 值能够加速凋落物的分解^[39]。本研究发现,在阔叶红松林中,凋落物分解速度较快。土壤 C/N 是可以表征土壤氮矿化能力的指标^[40-41]。通常认为土壤 C/N 在 30 以下时会出现净矿化^[42],C/N 在 30 以上发生微生物固持,不利于养分释放^[41]。本研究中,红松人工林中 C/N 在 30 以下适合微生物的矿化,有利于养分释放;在阔叶红松林中 C/N 在 30 以上发生微生物固持,不利于养分释放。

5 结论

1)在 2 种林型中添加凋落物处理对土壤易氧化有机碳影响不显著;去除凋落物处理对红松人工林中土壤易氧化有机碳影响显著,对阔叶红松林土壤易氧化有机碳影响不显著;2 种林型中,去除凋落物处理对土壤颗粒有机碳、轻组碳影响显著;添加凋落物处理对土壤轻组碳影响显著,对红松人工林中 8、10 月及阔叶红松林中 10 月土壤颗粒有机碳影响显著($P < 0.05$)。

2)在 2 种林型中去除凋落物处理对土壤有机碳影响显著($P < 0.05$),对土壤全氮和全磷影响不显著;添加凋落物处理对土壤有机碳、全氮和全磷影响均不显著。

6 参考文献

- [1] LISKI J, NISSINEN A, ERHARD M, et al. Climatic effects on litter decomposition from Arctic tundra to tropical rainforest [J]. *Global Change Biology*, 2010, 9(4):

- 575.
- [2] 彭琳,王晓君,黄从德,等. 凋落物输入改变对慈竹林土壤有机碳的影响[J]. 水土保持通报, 2014, 34(1): 129.
- PENG Lin, WANG Xiaojun, HUANG Congde, et al. Effects of litter input change on soil organic carbon in *Dendrocalamus affinis* forest [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(1): 129.
- [3] WANG G G, KLINKA K. White spruce foliar nutrient concentrations in relation to tree growth and soil nutrient amounts [J]. Forest Ecology & Management, 1997, 98(1): 89.
- [4] 兰常军. 华西雨屏区不同植被类型表层土壤有机碳组分特征[D]. 成都:四川农业大学, 2013:23.
- LANG Changjun. The characteristic of surface soil organic carbon of different vegetation types in rainy area of West China[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2013:11.
- [5] 沈宏,曹志洪,胡正义. 土壤活性有机碳的表征及其生态效应[J]. 生态学杂志, 1999(3): 33.
- SHEN Hong, CAO Zhihong, HU Zhengyi. Characteristics and ecological effects of the active organic carbon in soil [J]. Chinese Journal of Ecology, 1999(3): 33.
- [6] 王玲莉,杨劲峰,战秀梅,等. 长期施肥对土壤颗粒有机碳和酶活性的影响[J]. 土壤通报, 2008(2): 266.
- WANG Lingli, YANG Jinfeng, ZHAN Xiumei, et al. Effect of long-term fertilizations on particulate organic carbon and enzyme activities in a brown earth [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008(2): 266.
- [7] 盛卫星,吴家森,徐建春,等. 不同经营年限对山核桃林地土壤轻重组有机碳的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2015, 32(5): 803.
- SHENG Weixing, WU Jiasen, XU Jianchun, et al. Years of cultivation along with light and high fractions of soil organic carbon in a *Carya cathayensis* forest [J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2015, 32(5): 803.
- [8] 陈平,赵博,杨璐,等. 接种蚯蚓和添加凋落物对油松人工林土壤养分和微生物量及活性的影响[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(6): 63.
- CHEN Ping, ZHAO Bo, YANG Lu, et al. Effects of earthworm and litter application on soil nutrients and soil microbial biomass and activities in *Pinus tabulaeformis* plantation [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40(6): 63.
- [9] 卢晓蓉,尹艳,冯竞仙,等. 不同添加量凋落物及生物质炭对土壤微生物群落结构的影响[J]. 环境科学学报, 2019, 39(9): 3090.
- LU Xiaorong, YIN Yan, FENG Jingxian, et al. Effects of Chinese fir litter and its biochar amendment on soil microbial community structure [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(9): 3090.
- [10] 汪思龙,于小军,张剑,等. 杉木与阔叶树叶凋落物混合分解对土壤活性有机质的影响[J]. 应用生态学报, 2007(6): 1203.
- WANG Silong, YU Xiaojun, ZHANG Jian, et al. Effects of *Cunninghamia lanceolata*-broadleaved tree species mixed leaf litters on active soil organic matter [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007(6): 1203.
- [11] CHARLES H W. FOSTER. Forests in time; the environmental consequences of 1,000 years of change in New England [J]. Journal of Interdisciplinary History, 2005, 36(2): 270.
- [12] CROW S E, LAJTHA K, FILLEY T R, et al. Sources of plant-derived carbon and stability of organic matter in soil: Implications for global change [J]. Global Change Biology, 2010, 15(8): 2003.
- [13] 李佩擎. 林下植被去除和凋落物添加对杉木林土壤关键生态过程的影响[D]. 南昌:江西农业大学, 2017:31.
- LI Peiqing. Effects of understory removal and litter addition on the key soil ecological processes in *Cunninghamia lanceolata* plantation [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2017:31.
- [14] 侯顺婷. AA3 连续流动注射法和钼酸铵分光光度法测地表水总磷方法比较[J]. 环境与可持续发展, 2017, 42(3): 125.
- HOU Shunting. The comparison of AA3 continuous flow injection method and ammonium molybdate spectrophotometric method for the determination of total phosphorus in surface water [J]. Environment and Sustainable Development, 2017, 42(3): 125.
- [15] 张英利,许安民,尚浩博,等. AA3 型连续流动分析仪测定土壤和植物全氮的方法研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006(10): 128.
- ZHANG Yingli, XU Anmin, SHANG Haobo, et al. Determination study of total nitrogen in soil and plant by continuous flow analytical system [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2006(10): 128.
- [16] 杨新芳,鲍雪莲,胡国庆,等. 大兴安岭不同火烧年限森林凋落物和土壤 C、N、P 化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1359.
- YANG Xinfang, BAO Xuelian, HU Guoqing, et al. C: N: P stoichiometry characteristics of litter and soil of forests in Great Xing'an Mountains with different fire years [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27

- (5): 1359.
- [17] BLAIR G J. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems [J]. *Crop and Pasture Science*, 1995, 46(7): 1459.
- [18] CAMBARDELLA C A. Participate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence [J]. *Soil Science Society of America*, 1992, 56(3): 1214.
- [19] 向成华, 栾军伟, 骆宗诗, 等. 川西沿海拔梯度典型植被类型土壤活性有机碳分布 [J]. *生态学报*, 2010, 30(4): 1025.
- XIANG Chenghua, RUAN Junwei, LUO Zongshi, et al. Labile soil organic carbon distribution on influenced by vegetation types along an elevation gradient in west Sichuan, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(4): 1025.
- [20] 洪祖荣. 模拟氮沉降和凋落物组成对柳杉人工林表层土壤有机碳的影响 [D]. 成都: 四川农业大学, 2013: 31.
- HONG Zurong. Response of topsoil organic carbon to simulated nitrogen deposition and litter composition in *Cryptomeria fortune* plantation [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2013: 31.
- [21] 张岩, 张令珍, 徐美丽, 等. 太岳山油松林土壤活性碳和微生物特性随外源有机物的变化规律 [J]. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 2017, 46(3): 284.
- ZHANG Yan, ZHANG Lingzhen, XU Meili, et al. Variations in labile soil carbon and microbial activity by organic matter input in *Pinus* forest in Taiyue mountain [J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University(Natural Science Edition)*, 2017, 46(3): 284.
- [22] 张琴, 林天喜, 王贵春, 等. 红松、蒙古栎和色木槭凋落物混合分解研究 [J]. *北京林业大学学报*, 2014, 36(6): 106.
- ZHANG Qin, LIN Tianxi, WANG Guichun, et al. Decomposition of mixed litter of *Pinus koraiensis*, *Quercus mongolica* and *Acer mono* [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2014, 36(6): 106.
- [23] GUDE A, KANDELER E, GLEIXNER G. Input related microbial carbon dynamic of soil organic matter in particle size fractions [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 47(2): 209.
- [24] 王合云, 董智, 郭建英, 等. 不同放牧强度对大针茅草原土壤全土及轻组碳氮储量的影响 [J]. *水土保持学报*, 2015, 29(6): 101.
- WANG Heyun, DONG Zhi, GUO Jianying, et al. Effects of different grazing intensities on total and light fraction organic carbon and nitrogen storages of soil in *Stipa grandis* steppe [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(6): 101.
- [25] 王清奎, 汪思龙, 冯宗炜, 等. 土壤活性有机质及其与土壤质量的关系 [J]. *生态学报*, 2005, 25(3): 513.
- WANG Qingkui, WANG Silong, FENG Zongwei, et al. Active soil organic matter and its relationship with soil quality [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3): 513.
- [26] 曾宏达, 杜紫贤, 杨玉盛, 等. 城市沿江土地覆被变化对土壤有机碳和轻组有机碳的影响 [J]. *应用生态学报*, 2010, 21(3): 701.
- ZENG Hongda, DU Zixian, YANG Yusheng, et al. Effects of land cover change on soil organic carbon and light fraction organic carbon at river banks of Fuzhou urban area [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(3): 701.
- [27] 武天云, J. Schoenau J., 李凤民, 等. 耕作对黄土高原和北美大草原三种典型农业土壤有机碳的影响 [J]. *应用生态学报*, 2003(12): 2213.
- WU Tianyun, J. SCHOENAU J. LI Fengmin, et al. Influence of cultivation on organic carbon in three typical soils of China Loess Plateau and Canada Prairies [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003(12): 2213.
- [28] 谢锦升, 杨玉盛, 解明曙, 等. 土壤轻组有机质研究进展 [J]. *福建林学院学报*, 2006(3): 281.
- XIE Jinsheng, YANG Yusheng, XIE Mingzhu, et al. Advance of research on light fraction organic matter in soil [J]. *Journal of Forest and Environment*, 2006(3): 281.
- [29] BOONE R D. Light-fraction soil organic matter: origin and contribution to net nitrogen mineralization [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1994, 26(11): 1459.
- [30] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2005(1): 99.
- ZHOU Li, LI Baoguo, ZHOU Guangsheng. Advances in controlling factors of soil organic carbon [J]. *Advances in Earth Science*, 2005(1): 99.
- [31] 周广胜, 王玉辉, 蒋延玲, 等. 陆地生态系统类型转变与碳循环 [J]. *植物生态学报*, 2002(2): 250.
- ZHOU Guangsheng, WANG Yuhui, JIANG Yanling, et al. Conversion of terrestrial ecosystems and carbon cycling [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2002(2): 250.
- [32] BOWDEN R D, DEEM L, PLANTE A F et al. Litter input controls on soil carbon in a temperate deciduous forest [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, 78(S1): S66.
- [33] 陈玉平, 吴佳斌, 张曼, 等. 枯落物处理对森林土壤碳氮转化过程影响研究综述 [J]. *亚热带资源与环境*

学报, 2012, 7(2): 84.

CHEN Yuping, WU Jiabin, ZHANG Man, et al. Research advances of effects of detritus input and removal on dynamics of carbon and nitrogen in forest soils [J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2012, 7(2): 84.

[34] FISK M C, FAHEY T J. Microbial biomass and nitrogen cycling responses to fertilization and litter removal in young northern hardwood forests [J]. Biogeochemistry, 2001, 53(2): 201.

[35] HOLUB, SCOTT M, LAJTHA et al. Organic matter manipulations have little effect on gross and net nitrogen transformations in two temperate forest mineral soils in the USA and central Europe [J]. Forest Ecology & Management, 2005, 214(1): 320.

[36] FAHEY TJ, BATTLES J J, WILSON G F. Responses of early successional northern hardwood forests to changes in nutrient availability [J]. Ecological Monographs, 1998, 68(2): 183.

[37] 王丹, 马元丹, 郭慧媛, 等. 模拟酸雨胁迫与柳杉凋落物对土壤养分及微生物的影响 [J]. 浙江农林大学学报, 2015, 32(2): 195.

WANG Dan, MA Yuandan, GUO Huiyuan, et al. Soil nutrients and microorganisms with simulated acid rain stress and *Cryptomeria fortunei* litter [J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2015, 32(2): 195.

[38] 刘倩, 郑翔, 邓邦良, 等. 武功山草甸不同海拔对土壤和植物凋落物磷含量的影响 [J]. 草业科学, 2017, 34(11): 2183.

LIU Qian, ZHENG Xiang, DENG Bangliang, et al. Effect of altitude on the phosphorus contents of soil and plant litter deposits in a Wugong Mountain meadow [J]. Pratacultural Science, 2017, 34(11): 2183.

[39] 段文标, 曲美学, 陈立新, 等. 云冷杉林林隙内倒木腐烂等级及其形成的微立地类型对土壤理化性质的影响 [J]. 应用生态学报, 2018, 29(12): 3977.

DUAN Wenbiao, QU Meixue, CHEN Lixin, et al. Effects of decay level of fallen trees and their formed microsite types on soil physicochemical properties in a spruce-fir forest [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(12): 3977.

[40] PARTON W J, STEWART J W B, COLE C V. Dynamics of C, N, P and S in grassland soils: a model [J]. Biogeochemistry, 1988, 5(1): 109.

[41] 吴启华, 李红琴, 张法伟, 等. 短期牧压梯度下高寒杂草类草甸植被/土壤碳氮分布特征 [J]. 生态学杂志, 2013, 32(11): 2857.

WU Qihua, LI Hongqin, ZHANG Fawei, et al. Distribution patterns of vegetation-and soil carbon and nitrogen density in an alpine forb meadow under short-term grazing gradient [J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(11): 2857.

[42] PRESCOTT C E, CHAPPELL H N, VESTERDAL L. Nitrogen turnover in forest floors of coastal Douglas-fir at sites differing in soil nitrogen capital [J]. Ecology, 2000, 81(7): 1878.