

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.044.

王军, 满秀玲. 去除凋落物和草毡层对寒温带典型森林土壤活性有机碳的短期影响[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1):168-177.

Wang Jun, Man Xiuling. Short Term Effects of Litter and Sod Layer Removal on Soil Active Organic Carbon in Typical Forests in Cold Temperate Zone[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1):168-177.

去除凋落物和草毡层对寒温带典型森林 土壤活性有机碳的短期影响

王军, 满秀玲

(东北林业大学 林学院, 哈尔滨 150040)

摘要: [目的]探究去除凋落物和草毡层对寒温带森林土壤活性有机碳的影响,为我国寒温带森林土壤碳循环的研究提供科学参考。[方法]以大兴安岭北部3种典型森林(白桦林、樟子松林和兴安落叶松林)为研究对象,在3种林型中设置对照、去除凋落物、去除草毡层以及去除凋落物和草毡层4种处理,于2021年9月对各处理不同土层(0—10 cm和10—20 cm)土壤进行取样,研究其土壤活性有机碳组分及其影响因子。[结果]在0—10 cm土层,与对照相比,去除凋落物后土壤可溶性有机碳和易氧化有机碳含量在白桦林和樟子松林中无显著变化,而在兴安落叶松林中显著降低了25.49%和39.40%;土壤微生物量碳含量在白桦林和兴安落叶松林中显著降低了19.26%和18.86%,而在樟子松林中无显著变化。去除草毡层后土壤可溶性有机碳和易氧化有机碳含量在白桦林和樟子松林中显著降低了16.08%, 60.69%和17.38%, 17.33%,而在兴安落叶松林中的变化不显著;土壤微生物量碳含量在3种林型中显著降低了19.47%~42.02%。同时去除凋落物和草毡层后3种林型土壤微生物量碳和易氧化有机碳含量极显著降低了22.03%~27.01%和52.22%~57.01%;土壤可溶性有机碳含量降低了11.25%~22.18%,其中白桦林和樟子松林达显著水平;在10—20 cm土层,不同去除处理对3种林型土壤可溶性有机碳和微生物量碳含量均无显著影响,白桦林和樟子松林土壤易氧化有机碳含量分别在去除草毡层以及同时去除凋落物和草毡层后显著降低,而兴安落叶松林土壤易氧化有机碳含量无明显变化。3种林型土壤活性有机碳各组分与土壤总有机碳、全氮、含水量呈显著正相关,与土壤pH则呈显著负相关。[结论]去除凋落物和草毡层降低了土壤活性有机碳含量,凋落物和草毡层的存在有利于土壤活性有机碳的形成与累积。

关键词: 森林土壤; 去除凋落物; 去除草毡层; 活性有机碳

中图分类号: S714.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)01-0168-10

Short Term Effects of Litter and Sod Layer Removal on Soil Active Organic Carbon in Typical Forests in Cold Temperate Zone

Wang Jun, Man Xiuling

(School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to explore the effects of litter and sod layer removal on soil active organic carbon in cold temperate forests, and to provide scientific reference for the study of soil carbon cycle in cold temperate forests in China. [Methods] Three typical forests (*Betula platyphylla* forest, *Pinus sylvestris* var. *mongolica* forest and *Larix gmelinii* forest) in the northern part of the Greater Khingan Mountains were taken as the research objects. Four treatments were set up in the three forest types, including control, litter removal, sod layer removal and both litter and sod layer removal. Soil samples were collected from different soil layers (0—10 cm and 10—20 cm) of each treatment in September 2021 to study the soil active organic carbon components and their influencing factors. [Results] In the 0—10 cm soil layer,

收稿日期: 2022-11-07

修回日期: 2022-11-20

资助项目: 国家重点研发项目“典型森林生态系统碳汇提升经营技术与增汇潜力”(2021YFD2200405)

第一作者: 王军(1998—), 男, 天津市人, 硕士研究生, 主要从事水土保持研究。E-mail: imauwh@163.com

通信作者: 满秀玲(1964—), 女, 黑龙江省哈尔滨市人, 博士, 教授, 主要从事水土保持研究。E-mail: mannefu@163.com

<http://stbcj.paperonce.org>

compared with the control, there was no significant change in the contents of soil soluble organic carbon and readily oxidizable organic carbon after litter removal in the *Betula platyphylla* forest and *Pinus sylvestris* var. *mongolica* forest, but significantly decreased by 25.49% and 39.40% in the *Larix gmelinii* forest. Soil microbial biomass carbon in *Betula platyphylla* forest and *Larix gmelinii* forest decreased by 19.26% and 18.86%, respectively, but varied slightly in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* forest in litter removal treatment. The contents of soil dissolved organic carbon and readily oxidizable organic carbon decreased significantly by 16.08%, 60.69% and 17.38%, 17.33% in *Betula platyphylla* forest and *Pinus sylvestris* var. *mongolica* forest, respectively, after removing the sod layer, but there was no significant change in *Larix gmelinii* forest. Soil microbial biomass carbon contents were significantly reduced by 19.47%~42.02% in the three forest types. The contents of soil microbial biomass carbon and readily oxidizable organic carbon in the three forest types were significantly reduced by 22.03%~27.01% and 52.22%~57.01%, respectively, after removing litter and sod layer at the same time. The contents of soil dissolved organic carbon decreased by 11.25%~22.18%, among which the *Betula platyphylla* forest and the *Pinus sylvestris* var. *mongolica* forest reached a significant level. In the 10—20 cm soil layer, there were no significant differences in soil dissolved organic carbon and soil microbial biomass carbon among all treatments in three typical forests. Sod layer removal treatment and both litter layer and sod layer removal treatment significantly decreased soil readily oxidized organic carbon in *Betula platyphylla* forest and *Pinus sylvestris* var. *mongolica* forest, respectively. There was no significant differences in soil readily oxidized organic carbon among different treatments in *Larix gmelinii* forest. The components of soil active organic carbon in the three forest types were significantly positively correlated with soil total organic carbon, total nitrogen and water content, and significantly negatively correlated with soil pH. [Conclusion] The removal of litter and sod layer reduced the contents of soil active organic carbon, and the existence of litter and sod layer were beneficial to the formation and accumulation of soil active organic carbon.

Keywords: forest soil; remove litter; remove sod layer; activated organic carbon

森林生态系统是陆地生态系统中最大的碳库,在全球碳循环以及气候变化中发挥着关键作用^[1-2]。Cai 等的研究表明,森林生态系统 55%~70% 的碳是以有机碳的形式储存于森林土壤中^[3],土壤有机碳储量的微小变化都会对森林碳循环产生深远影响^[4]。活性有机碳是土壤有机碳的重要组成部分,虽然只在土壤碳库中占很小的一部分,但因其活性高、周转快以及对土壤有机质变化的高敏感性,常常被作为衡量土壤有机碳变化的早期预测指标^[5]。

在森林生态系统中,土壤活性有机碳的主要来源是植物残体分解、微生物代谢以及根系分泌物等^[6]。其中森林凋落物是土壤活性有机碳的重要来源之一,凋落物的分解淋溶会促进土壤微生物和酶的活性,增加土壤养分含量,利于林木的生长发育^[7]。而去除凋落物会通过减少凋落物层数量对土壤碳库组成以及活性有机碳含量造成影响^[6,8]。但目前去除凋落物对土壤活性有机碳的影响结果并不一致,例如张磊等^[9]在亚热带天然米槠林中去掉凋落物后土壤活性有机碳组分含量显著降低。李常准等^[10]在温带阔叶红松林中的试验中发现去除凋落物对土壤颗粒有机

碳和轻组有机碳影响显著但对易氧化有机碳的影响并不显著。而在亚热带杉木人工林中,去除凋落物后土壤可溶性有机碳含量无显著变化,但微生物量碳含量显著升高^[11]。因此,去除凋落物对土壤活性有机碳的影响会因森林系统类型以及凋落物质量的不同而表现出差异。草毡层是普遍存在于我国高寒地区土壤中的特殊层次,由于常年处于低温寒冷的环境,植物残体不能充分分解,多以原状或半分解形态存在于土壤中,具有较高的有机质含量^[12],对土壤养分有着重要影响。草毡层主要分布于我国的高山带或山地寒温带^[13],有研究表明,在青藏高原地区的高寒草甸中,草毡层是土壤碳重要的储存场所,其固碳能力反映着高寒生态系统的固碳能力^[14]。在人为和自然因素共同影响下会造成草毡层的消亡,草毡层的消失会使土壤有机碳加速流失^[15-16],而土壤有机碳的流失又会对生态系统碳循环产生影响。因此,草毡层的存在对于土壤有机碳的固定与储存具有重要意义。大兴安岭北部是我国唯一的高纬度寒温带地区,草毡层广泛分布于森林凋落物层之下,但草毡层对于本地区森林土壤碳库有何影响目前还不清楚,因此探究草毡

层在寒温带森林土壤碳循环中的作用也具有较为重要的意义。

大兴安岭北部林区地处寒温带,是我国重要的林业生产基地,在国家生态功能区中发挥着重要的碳平衡功能^[17]。随着全球气候变暖趋势的加剧,可能会对凋落物输入量和草毡层固碳能力产生正面或负面的影响,进而对土壤有机碳产生影响。然而,大兴安岭地区去除凋落物和草毡层对土壤活性机碳影响的研究却鲜为报道。因此,本研究以分布于大兴安岭北部的白桦(*Betula platyphylla*)林、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)林和兴安落叶松(*Larix gmelinii*)林 3 种典型森林为研究对象,探究凋落物和草毡层去除对土壤活性有机碳的影响,以期为寒温带森林土壤碳循环的研究提供科学参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于黑龙江漠河森林生态系统国家定位研究站(122°06′—122°27′E,53°17′—53°30′N)北段,本区属寒温带大陆性季风气候,季节分明,冬季酷寒漫长,夏季温热潮湿。区内最低气温达-52℃,年平均气温为-4.9℃,年均降水量为 450 mm,主要集中在 7—8 月。该地区为我国的多年冻土分布区,地带性植被为兴安落叶松林,是我国唯一的大面积兴安落叶松原始林分布区。此外,还分布有樟子松林、白桦林、山杨(*Populus davidiana*)林等森林群落。林下植被主要有越桔(*Vaccinium vitis-idaea*)、兴安杜鹃(*Rhododendron dauricum*)和杜香(*Ledum palustre*)等。地带性土壤为棕色针叶林土,局部地段分布有沼泽土、草甸土等土壤类型。

1.2 样地设置及样品采集

经过踏查后,于 2021 年 5 月选取白桦林、樟子松

林和兴安落叶松林为研究对象,3 种林型样地基本情况见表 1。在每种林型内各设置 3 块规格为 20 m×30 m 的样地,3 种林型共计 9 块样地。在每块样地内随机设置 4 个 4 m×1.5 m 的试验小区,做如下处理,(1) 对照,保留凋落物和草毡层;(2) 去除凋落物,将小区内的凋落物全部去除,并用尼龙网覆盖,防止当年的凋落物落入;(3) 去除草毡层,先将小区内的凋落物按未分解层及半分解层分层收集,之后将草毡层去除,最后将凋落物按半分解层和未分解层的顺序均匀地铺回小区内;(4) 去除凋落物和草毡层,将小区内的凋落物和草毡层全部去除后,用尼龙网覆盖。共计设置 36 个试验小区。于 2021 年 9 月进行采样,在每一样地内随机设置 3 个 50 cm×50 cm 的凋落物样方,测定凋落物层厚度并收集样方内的全部凋落物样品。之后在样方外侧挖取侧剖面,测定草毡层厚度,用土刀将草毡层与土壤层分离(草毡层与土壤层具有较为明显的分界线且较易分离),在分离后的草毡层上割取规格为 10 cm×10 cm 的试验样品用于基本性质的测定。凋落物和草毡层样品采集完毕后,在每个试验小区内分别采集 0—10 cm 和 10—20 cm 土层土壤样品,同时使用规格为 100 cm³ 的环刀采集各层原状土。将采集的凋落物、草毡层和土壤样品分别装入密封袋内带回实验室。凋落物和草毡层样品称取鲜重后放入烘箱 80°烘干至质量恒定测定自然含水量并计算储量,之后将烘干后的凋落物和草毡层样品研磨过 0.149 mm 钢筛后装入密封袋中用于碳氮含量的测定。土壤样品挑出植物根系、石块等杂物后过 2 mm 钢筛。取部分鲜土用于土壤含水量、可溶性有机碳和微生物量碳等指标的测定,另取部分土样于阴凉干燥处自然风干,研磨后分别过 2 mm 和 0.149 mm 钢筛后储存在密封袋内用于土壤 pH、总有机碳、全氮和易氧化有机碳含量的测定。

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic information of the sample plots

林型	海拔/m	坡向	坡度/(°)	林龄/a	树种组成	平均树高/m	平均胸径/cm	郁闭度
白桦林	390	东北	6	43	10 白	11.10	9.50	0.9
樟子松林	427	东北	10	63	7 樟 3 落	22.37	21.36	0.6
兴安落叶松林	311	东北	6	52	10 落	11.64	13.27	0.8

注:白代表白桦;樟代表樟子松;落代表兴安落叶松。

1.3 样品指标测定方法

土壤含水量采用铝盒烘干法(105℃,24 h)测定,土壤 pH 采用 pH 计法测定,土壤容重采用环刀法测定。凋落物、草毡层以及土壤总有机碳、全氮含量分别使用总有机碳分析仪固体模块(MultiN/C2100, Germany)和 AA3 连续流动分析仪(Seal Analytical,

Germany)测定。土壤可溶性有机碳以 0.5 mol/L 的硫酸钾溶液浸提^[18](水土比 2 : 1),土壤微生物量碳采用氯仿熏蒸—硫酸钾溶液浸提^[19],两者所得提取液过 0.45 μm 滤膜后使用总有机碳分析仪液体模块测定。易氧化有机碳采用高锰酸钾—氧化法^[20]提取后用分光光度计测定。

表 2 凋落物和草毡层基本特征

Table 2 Basic characteristics of litter and sod layers

层次	指标	白桦林	樟子松林	兴安落叶松林
凋落物	厚度/cm	5.00±0.0Aa	4.67±0.47Aa	4.67±0.47Aa
	含水率/%	45.66±1.64Ba	47.66±6.96Ba	67.68±2.57Aa
	储量/(t·hm ⁻²)	5.99±0.16Ba	7.17±0.88ABa	7.80±0.27Aa
	有机碳/(g·kg ⁻¹)	458.17±3.70Aa	450.00±2.25Aa	440.87±12.85Aa
	全氮/(g·kg ⁻¹)	18.51±1.10Aa	14.57±0.27Ba	19.59±0.82Aa
	碳氮比值	24.83±1.34Ba	30.90±0.75Aa	22.55±1.23Ba
草毡层	厚度/cm	4.67±0.47Aa	2.33±0.47Bb	5.33±0.47Aa
	含水率/%	67.80±0.49Ab	55.77±4.34Ba	67.21±5.14Aa
	储量/(t·hm ⁻²)	35.21±3.69Ab	26.67±1.02Bb	29.39±2.57ABb
	有机碳/(g·kg ⁻¹)	441.67±3.86Ab	288.67±2.87Bb	395.33±2.87Ab
	全氮/(g·kg ⁻¹)	26.91±2.85Ab	12.00±0.97Bb	18.12±2.83Ca
	碳氮比值	16.66±1.80Bb	24.23±2.11Ab	22.33±3.27ABa

注:表中数据表示为平均值±标准误,下同。不同大写字母表示林型间差异显著($p<0.05$),不同小写字母代表层次间差异($p<0.05$)。

1.4 数据处理与分析

数据统计分析由 Excel 2019 和 SPSS 25.0 完成。采用单因素分析法(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较不同林型、处理指标的差异,独立样本 t 检验比较不同层次指标的差异。土壤活性有机碳与理化性质的相关性采用皮尔逊(Pearson)相关分析法。图表的绘制由 OriginPro 2021 和 Word 2019 完成。

2 结果与分析

2.1 不同处理对 3 种林型土壤理化性质的影响

由表 3 可知,3 种林型在经过不同去除处理后土壤理化性质相较对照发生了较为明显的变化。在 0—10 cm 土层,白桦林中,RL 处理对土壤含水量、容重、pH 值、总有机碳和全氮含量无显著影响,RS 和 RR 处理显著降低了土壤有机碳和全氮含量,而对土壤含水量、容重和 pH 值无显著影响。在樟子松林中,RL 和 RS 处理显著提高了土壤 pH 值,RR 处理显著提高土壤 pH 值,而土壤总有机碳和全氮含量显著降低。在兴安落叶松林中,RL 处理显著提高了土壤 pH 值,而土壤总有机碳含量显著降低,RS 处理显著降低了土壤含水量,RR 处理显著降低了土壤含水量、总有机碳和全氮含量,而土壤 pH 值显著升高。在 10—20 cm 土层,白桦林中,RL 和 RS 处理后土壤 pH 值和总有机碳含量显著降低,RR 处理后土壤总有机碳含量显著降低。在樟子松林中,RL 处理后土壤各理化性质指标与 CK 相比无显著变化,RS 处理后土壤总有机碳含量显著降低,RR 处理后土壤 pH 值显著升高,而总有机碳含量显著降低。在兴安落叶松林中,RL 处理后土壤总有机碳含量显著降低,RS 处理后土壤含水量和总有机碳含量显著降低,RR 处理后土壤含水量和总有机碳含量显著降低,而土壤容重和 pH 值显著升高。

2.2 不同处理对 3 种林型土壤可溶性有机碳含量的影响

由图 1 可知,在 0—10 cm 土层,白桦林不同处理土壤可溶性有机碳含量表现为:CK(134.44 mg/kg)>RL(121.97 mg/kg)>RS(112.82 mg/kg)>RR(104.62 mg/kg),其中 RS 和 RR 处理土壤可溶性有机碳含量显著低于 CK,与 CK 相比分别降低了 16.08%和 22.18%,而 RL 处理与 CK 土壤可溶性有机碳含量无显著差异。在樟子松林中,与 CK(69.63 mg/kg)相比,RS 和 RR 处理后土壤可溶性有机碳含量显著降低,降幅分别为 17.38%和 21.14%,而 RL 处理后土壤可溶性有机碳含量降低了9.92%,未达显著水平。在兴安落叶松林中,与 CK(90.54 mg/kg)相比,土壤可溶性有机碳含量在 RL, RS 和 RR 处理后分别降低了 25.49%,12.82%和 11.25%,其中仅在 RL 处理下达显著水平。由此表明去除凋落物对兴安落叶松林表层土壤可溶性有机碳含量的影响较大。而在 10—20 cm 土层,3 种林型经过不同去除处理后土壤可溶性有机碳含量均无显著变化,因此说明去除凋落物和草毡层对 10—20 cm 土层可溶性有机碳含量的影响较小。

2.3 不同处理对 3 种林型土壤微生物量碳含量的影响

由图 2 可知,3 种林型不同处理土壤微生物量碳具有明显的表聚性,表层(0—10 cm)土壤微生物量碳含量要极显著高于 10—20 cm 土层($p<0.01$)。分析各林型经过不同处理后土壤微生物量碳含量的变化可知:在 0—10 cm 土层,白桦林经过不同处理后土壤微生物量碳含量极显著降低($p<0.01$),RL,RS 和 RR 处理的微生物量碳含量相比 CK(731.40 mg/kg)分别降低了 19.26%, 42.02%和 22.03%。从图中还可看出,RS 处理土壤微生物量碳含量最低且显著低于 RL 和 RR 处理,因此可知去除草毡层对白桦林土壤微生物量碳含量的影响最为

显著。樟子松林不同处理土壤微生物量碳含量表现为: CK(336.18 mg/kg)>RL(311.57 mg/kg)>RS(270.73 mg/kg)>RR(267.19 mg/kg),其中 RS 和 RR 土壤微生物量碳含量极显著低于 CK($p<0.01$),与 CK 相比分别降低了 19.47%和 20.52%,而 RL 与 CK 间的差异不显著。在兴安落叶松林中,RL,RS 和 RR 处理后土壤微生物量碳含量显著低于 CK(580.66 mg/kg),与 CK 相比分别降低了 18.86%,23.49%和 27.01%。虽

然 3 种去除处理土壤微生物量碳含量均显著低于对照,但它们相互并无显著差异,这说明无论是凋落物还是草毡层抑或是两者的共同作用均对兴安落叶松林土壤微生物量碳含量有着重要影响。在 10—20 cm 土层,3 种林型在经过不同去除处理后,土壤微生物量碳含量有小幅降低但并未达显著水平,因此说明 10—20 cm 土层土壤微生物量碳对凋落物和草毡层去除处理的响应较弱。

表 3 3 种林型不同处理土壤理化性质变化特征

Table 3 Three forest types under different treatments of soil physical and chemical properties change characteristics

林型	土层/cm	处理	土壤含水量/%	容重/ (g·cm ⁻³)	pH 值	总有机碳/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)
白桦林	0—10	CK	35.67±6.33Aa	0.55±0.05Aa	4.69±0.05Aa	33.20±0.85Aa	1.60±0.12Aa
		RL	33.68±1.74Aa	0.56±0.06Aa	4.75±0.04Aa	32.53±0.54Aa	1.39±0.11ABa
		RS	34.61±3.15Aa	0.67±0.12Aa	4.77±0.05Aa	19.30±0.08Ca	0.94±0.14Ca
		RR	33.53±3.28Aa	0.64±0.08Aa	4.79±0.02Aa	22.63±0.17Ba	1.24±0.06Ba
	10—20	CK	25.83±0.14Aa	1.20±0.14Ab	5.31±0.05Ab	14.00±0.37Ab	0.75±0.10Ab
		RL	25.04±2.85Ab	1.21±0.07Ab	5.20±0.03BCb	12.87±0.62Bb	0.78±0.09Ab
		RS	24.37±0.48Ab	1.16±0.02Ab	5.18±0.03Cb	11.13±0.21Cb	0.66±0.06Aa
		RR	25.27±2.84Aa	1.20±0.07Ab	5.27±0.01ABb	10.97±0.45Cb	0.69±0.04Ab
樟子松林	0—10	CK	39.14±6.69Aa	1.37±0.16Aa	5.18±0.10Ca	26.43±2.03Aa	1.44±0.13Aa
		RL	37.39±0.35Aa	1.35±0.21Aa	5.65±0.04Aa	25.60±1.26Aa	1.42±0.05Aa
		RS	39.15±0.21Aa	1.31±0.08Aa	5.50±0.02Ba	24.77±0.45Aa	1.42±0.03Aa
		RR	38.48±0.17Aa	1.31±0.14Aa	5.41±0.02Ba	19.43±0.17Ba	1.10±0.03Ba
	10—20	CK	28.32±1.76Aa	1.48±0.03Aa	5.64±0.02Ab	13.50±12.60Ab	0.84±0.04Ab
		RL	27.61±0.37Ab	1.46±0.13Aa	5.68±0.00Aa	12.60±0.24ABb	0.79±0.10Ab
		RS	28.44±0.10Ab	1.47±0.07Aa	5.69±0.03Ab	11.90±0.24Bb	0.91±0.04Ab
		RR	28.09±1.63Ab	1.37±0.13Aa	5.76±0.04Bb	9.27±0.27Cb	0.87±0.06Ab
兴安落叶松林	0—10	CK	57.14±0.52Aa	1.69±0.06Aa	5.11±0.01Ba	34.13±0.34Aa	1.91±0.18Aa
		RL	52.48±3.18Aa	1.66±0.12Aa	5.39±0.10Aa	27.97±0.50Ba	1.77±0.03Aa
		RS	44.17±2.44Ba	1.56±0.24Aa	5.06±0.01Ba	33.03±0.33Aa	1.71±0.06Aa
		RR	41.47±1.87Ba	1.76±0.22Aa	5.29±0.02Aa	25.17±0.57Ca	1.43±0.03Ba
	10—20	CK	39.69±3.50Ab	1.77±0.02Ba	5.48±0.06Bb	16.87±0.33Ab	0.87±0.08Ab
		RL	36.83±0.94ABb	1.70±0.04Ba	5.53±0.01Ba	15.07±0.45Bb	0.84±0.02Ab
		RS	32.93±1.83BCb	1.72±0.04Ba	5.47±0.02Bb	15.13±0.12Bb	0.79±0.03Ab
		RR	27.14±2.97Cb	1.89±0.02Aa	5.65±0.02Ab	12.97±0.45Cb	0.74±0.02Ab

注:CK:对照,RL:去除凋落物,RS:去除草毡层,RR:去除凋落物和草毡层。图中不同大写字母表示同一土层不同处理间差异显著($p<0.05$);不同小写字母表示同一处理不同土层间差异显著($p<0.05$)。下同。

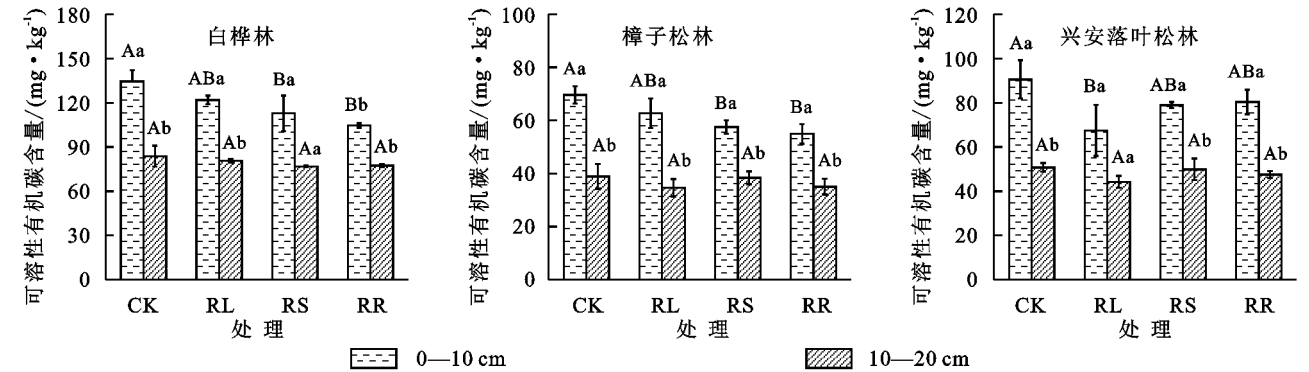


图 1 3 种林型不同处理土壤可溶性有机碳含量特征

Fig. 1 Characteristics of soil soluble organic carbon contents in different treatments of three forest types

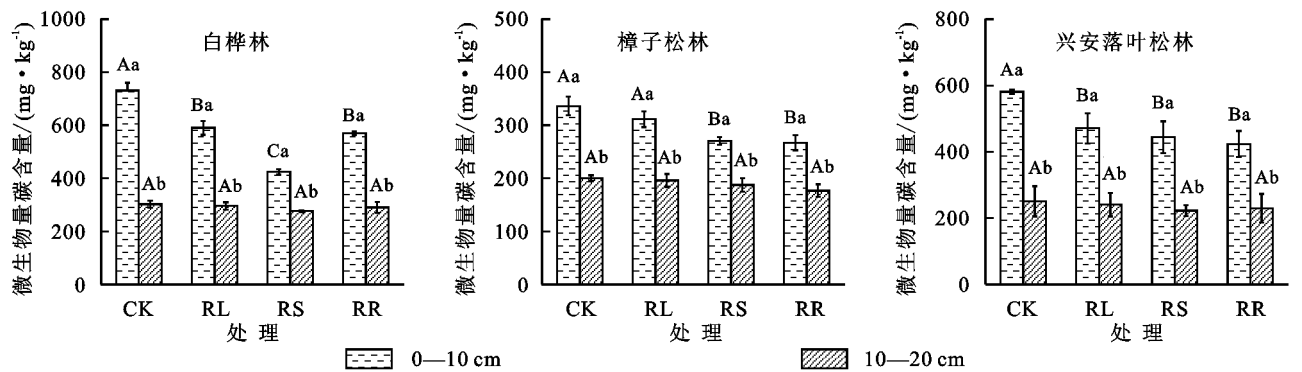


图 2 3 种林型不同处理土壤微生物量碳含量特征

Fig. 2 Characteristics of soil microbial biomass carbon contents in different treatments of three forest types

2.4 不同处理对 3 种林型土壤易氧化有机碳含量的影响

由图 3 可知,在白桦林中,与 CK(5.47 g/kg)相比,RS 和 RR 处理后土壤易氧化有机碳含量极显著降低($p<0.01$),降幅分别为 60.69%和 56.31%,而 RL 与 CK 相比降低了 4.57%,未达到显著水平。RS 处理土壤易氧化有机碳含量极显著低于 RL($p<0.01$),说明去除草毡层对白桦林土壤易氧化有机碳含量的影响较大。在樟子松林中,RL 处理土壤易氧化有机碳含量与 CK(4.27 g/kg)相比无显著差异,而 RS 和 RR 处理土壤易氧化有机碳含量显著低于 CK,降幅分别为 17.33%和 52.22%。RR 处理土壤易氧化有机碳含量极显著低于 RL 和 RS 处理($p<0.01$),因此可知,凋落物和草毡层对

樟子松林土壤易氧化有机碳的共同作用要明显大于凋落物或草毡层的单独作用。兴安落叶松林土壤易氧化有机碳含量在 RL,RS 和 RR 处理后相较 CK(10.05 g/kg)分别降低了 39.40%,4.88%和 57.01%,其中 RL 和 RR 处理土壤易氧化有机碳含量极显著低于 CK($p<0.01$),而 RS 与 CK 土壤易氧化有机碳含量无显著差异。RS 处理土壤易氧化有机碳含量显著高于 RL,说明草毡层对兴安落叶松土壤易氧化有机碳的影响较小,凋落物对土壤易氧化有机碳的贡献更大。在 10—20 cm 土层,白桦林和樟子松林土壤易氧化有机碳含量在不同去除处理后的变化趋势与表层土壤基本一致。而兴安落叶松林经过不同去除处理后,土壤易氧化有机碳含量与对照相比未发生显著变化。

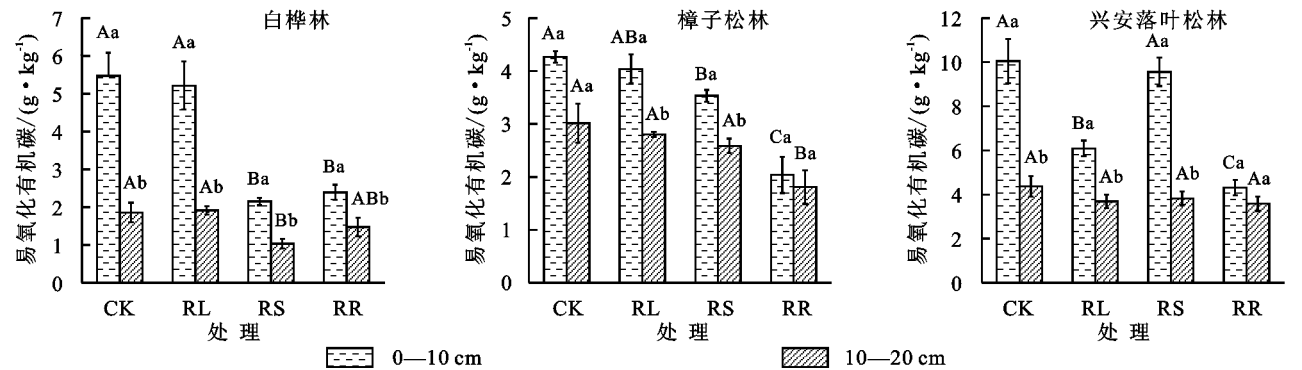


图 3 3 种林型不同处理土壤易氧化有机碳含量特征

Fig. 3 Characteristics of soil easily oxidized organic carbon contents in different treatments of three forest types

2.5 土壤活性有机碳组分影响因子分析

采用 Pearson 相关性法对 3 种林型土壤活性有机碳组分与影响因子进行相关性分析。由表 4 可知,3 种林型不同活性有机碳组分间呈极显著的正相关关系。3 种林型活性有机碳各组分与土壤总有机碳、全氮和含水量呈显著或极显著的正相关,而与土壤 pH 值呈显著或极显著的负相关。与土壤容重呈负相关,但仅在白桦林中达显著水平。

3 讨论

凋落物是森林土壤碳库的重要来源^[8],而活性有

机碳又是土壤碳库中易流动、易分解的组分^[21],因此研究凋落物与土壤活性有机碳的关系对于进一步了解森林生态系统碳循环的运转具有重要意义^[6]。有研究表明,新鲜凋落物有机层的渗透液和分解产物为土壤提供了活性有机碳的输入,去除凋落物会降低土壤活性有机碳含量并对土壤微环境产生影响^[22-23]。本研究中去除凋落物后 3 种林型表层土壤可溶性有机碳含量降低了 9.32%~25.49%,低于亚热带滨海沙地防护林的 30.6%~52.9%^[19]和米槠次生林的 39.43%^[24]。这可能是因为寒温带平均气温较低,凋落物分解缓慢^[17],因而去除凋落物对土壤可溶性有

机碳含量的影响相对于热带或亚热带等地区要小。去除凋落物后白桦林和兴安落叶松林土壤微生物量碳含量显著降低,这与多数研究结果一致^[19,23-24]。有研究表明凋落物中含有的易变性有机碳是土壤微生物的重要碳源^[22],去除凋落物后微生物可利用的碳源减少,因而土壤微生物量碳含量显著降低^[24]。樟子松林在去除凋落物后土壤微生物量碳含量变化不显著,这可能是因为樟子松林凋落物质量较低(表

2),不易被微生物分解利用,因此短期的去除处理并没有产生较为显著的变化。去除凋落物后白桦林和樟子松林土壤易氧化有机碳含量无显著变化,而兴安落叶松降低了 39.40%,这与李常准等^[10]在温带红松人工林中去除凋落物后的结果相似,这可能是因为去除凋落物后土壤微生物量的降低使得土壤有机质向易氧化有机碳的转化受到抑制,因此土壤易氧化有机碳含量显著降低。

表 4 3 种林型土壤活性有机碳组分与影响因子的相关性系数

Table 4 Correlation coefficients between soil active organic carbon components and influencing factors in three forest types									
林型	指标	DOC	MBC	ROC	TOC	TN	SWC	SBD	pH
白桦林	DOC	1	0.908**	0.826**	0.920**	0.912**	0.813**	-0.922**	-0.916**
	MBC		1	0.854**	0.952**	0.960**	0.758**	-0.884**	-0.892**
	ROC			1	0.943**	0.847**	0.546**	-0.723**	-0.720**
樟子松林	DOC	1	0.911**	0.678**	0.917**	0.911**	0.855**	-0.223	-0.725**
	MBC		1	0.712**	0.937**	0.862**	0.803**	-0.328	-0.775**
	ROC			1	0.767**	0.712**	0.480*	-0.137	-0.462*
兴安落叶松林	DOC	1	0.833**	0.729**	0.894**	0.866**	0.725**	-0.176	-0.831**
	MBC		1	0.806**	0.922**	0.929**	0.826**	-0.266	-0.771**
	ROC			1	0.896**	0.797**	0.713**	-0.316	-0.861**

注: * 表示显著($p<0.05$), ** 表示极显著($p<0.01$)。DOC 为可溶性有机碳;MBC 为微生物量碳;ROC 为易氧化有机碳;TOC 为总有机碳;TN 为全氮;SWC 为土壤含水量;SBD 为土壤容重;pH 为酸碱度。

草毡层是分布于高寒地区土壤中的特殊有机质层,由于气温低,干冷季漫长,土壤长期冻结,微生物活动较弱,以致死亡的根系和枯枝落叶难以分解,而以有机残体或腐殖质的形态积累于土壤或地表中,形成草根盘结的毡状表层^[12-13]。有研究表明虽然草毡层聚集了较高含量的有机质,但由于分布区内土温较低,土壤动物少且不活跃,因此作为土壤有机物补给源的作用大幅降低^[25]。而有些学者的研究结果则表明草毡层在高寒生态系统中具有极好的固碳能力^[14],草毡层的存在避免了土壤表层有机质随土壤侵蚀的流失,而草毡层的消失会增加土壤有机碳的流失^[15-16]。本研究中去除草毡层后 3 种林型土壤可溶性有机碳和微生物量碳含量发生不同程度的降低,这可能是因为去除草毡层减少了土壤微生物可获取的碳源,因而造成微生物量的降低,而微生物量的减少又会使凋落物的分解速率减缓,因此土壤可溶性有机碳含量也出现降低。去除草毡层对土壤易氧化有机碳含量的影响在不同林型中表现出明显的差异,去除草毡层后白桦林和樟子松林土壤易氧化有机碳含量分别降低了 60.69%和 17.33%,要明显高于去除凋落物后的 4.57%和 5.39%,这可能是因为白桦林和樟子松林草毡层 C/N 值要显著低于凋落物,草毡层相较凋落物更

易被微生物分解转化为土壤易氧化有机碳,因此去除草毡层后土壤易氧化有机碳含量的降幅相较去除凋落物后要更大。而兴安落叶松林在去除凋落物后土壤易氧化有机碳含量降低了 39.40%,去除草毡层后降幅仅为 4.88%,其变化规律与白桦林和樟子松林相反。有研究表明凋落物分解速率会随着 C/N 值的增大而减小,C/N 值越大凋落物质量越低,其养分归还到土壤的速率越慢^[26]。而在本研究中兴安落叶松凋落物 C/N 值要低于白桦林和樟子松林,说明兴安落叶松林凋落物质量要高于白桦林和樟子松林,Xiong 等^[27]的研究也表明高质量凋落物的分解产物向土壤中转移的比例更高,这可能是去除凋落物对兴安落叶松林土壤易氧化有机碳含量的影响比其他林型显著的主要原因。

同时去除凋落物和草毡层后,3 种林型土壤活性有机碳含量与对照相比都发生了不同程度的降低,这可能是因为去除凋落物和草毡层后地表土壤会受到光照或降雨等因素的直接影响,土壤理化性质的改变可能会恶化土壤微生物的生存环境^[28],降低其活性及数量,进而降低了土壤活性有机碳含量。但同时去除凋落物和草毡层后土壤活性有机碳含量的降低趋势与单独去除凋落物或草毡层相似但又因林型的不

同而表现出差异。在白桦林中,与对照相比,同时去除凋落物和草毡层后土壤可溶性有机碳含量降幅最大,但与其他去除处理的差异并不显著,而土壤微生物量碳和易氧化有机碳含量的降幅则是在去除草毡层后最大,并且去除草毡层后土壤微生物量碳含量的降幅要明显高于去除凋落物以及同时去除凋落物和草毡层处理。在樟子松林中,同时去除凋落物和草毡层后的各活性有机碳组分含量均为最低,尤其是土壤微生物量碳含量要显著低于其他去除处理。在兴安落叶松林中,同时去除凋落物和草毡层对土壤可溶性有机碳含量的影响要略低于单独去除凋落物,对土壤微生物量碳含量的影响则稍大于单独去除凋落物和单独去除草毡层处理,而对土壤易氧化有机碳含量的影响则是显著高于单独去除凋落物或草毡层。由此可知,同时去除凋落物和草毡层对土壤活性有机碳含量的影响是一个比较复杂的过程,且影响程度并不总是大于单独去除凋落物或草毡层。

经过不同去除处理后土壤理化性质相比对照也发生了不同程度的变化,而从相关性分析可知(表4),土壤总有机碳、全氮、含水量和pH值等理化性质与土壤活性有机碳具有显著的相关性,这与张磊等^[11]的研究结果相似,由此我们可以推测去除凋落物和草毡层后土壤理化性质的变化可能是引起活性有机碳产生变化的重要原因。

总体而言,去除凋落物和草毡层在短期内对寒温带3种典型森林土壤活性有机碳产生了一定的影响,但影响程度在不同林型中表现出差异,这可能因为受到凋落物和草毡层储量、质量以及土壤理化性质等因素综合影响的结果^[19,24]。除了林型外,去除凋落物和草毡层后土壤活性有机碳的变化还受到土层的影响。10—20 cm 土层活性有机碳含量在去除凋落物和草毡层后的变化幅度要低于0—10 cm 土层,这可能是因为深层土壤对有机质输入量的变化具有滞后性。

有研究表明,控制有机质输入对土壤可溶性有机质和微生物特性的影响会因处理时间长短而异^[29],短期的处理对于土壤可溶性碳氮以及微生物碳氮的影响具有变异性且会在不同森林生态系统中表现出不同的结果^[19],因此开展长时间的监测与分析对于更加深刻地理解凋落物和草毡层在寒温带森林土壤碳循环中所发挥的作用具有重要意义。此外,凋落物和草毡层的分解其实是一个比较漫长的过程,随着处理时间的增加,凋落物和草毡层的分解不再受到限制,对土壤活性有机碳的影响也许会更显著,但森林

生态系统都具有一定的自我调节与恢复能力^[10],当土壤微生物群落逐渐适应了没有凋落物和草毡层存在的环境后,不同去除处理对于土壤活性有机碳的影响或许会变得越来越小,与对照的差异也会逐渐缩小,但长期效应是一个比较复杂的过程,因此今后应多注重长时间以及多次土壤样本的监测与分析。

4 结 论

(1) 凋落物和草毡层的存在与否对寒温带森林土壤活性有机碳具有重要影响,但影响程度因林型和土层的不同而异

(2) 在0—10 cm 土层,去除凋落物处理显著降低兴安落叶松林土壤可溶性有机碳和易氧化有机碳含量,去除草毡层处理显著降低白桦林和樟子松林土壤可溶性有机碳和易氧化有机碳含量,同时去除凋落物和草毡层后,除兴安落叶松林土壤可溶性有机碳含量没有显著变化外,其他林型土壤可溶性有机碳和易氧化有机碳含量均显著降低。除樟子松林在去除凋落物后土壤微生物量碳含量无显著变化外,不同去除处理均使3种林型土壤微生物量碳含量显著降低。在10—20 cm 土层,除白桦林和樟子松林土壤易氧化有机碳含量在去除草毡层和同时去除凋落物和草毡层处理后显著降低外,其他林型各去除处理土壤活性有机碳组分含量与对照相比无显著变化。

(3) 土壤总有机碳、全氮、含水量以及pH是活性有机碳含量的重要影响因子。

参考文献:

- [1] 周国逸,陈文静,李琳.成熟森林生态系统土壤有机碳积累:实现碳中和目标的一条重要途径[J].大气科学学报,2022,45(3):345-356.
Zhou G Y, Chen W J, Li L. Soil organic carbon accumulation in mature forest ecosystems: an important way to achieve the goal of carbon neutral[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2022,45(3):345-356.
- [2] Xiao S, Zhang J, Duan J, et al. Soil organic carbon sequestration and active carbon component changes following different vegetation restoration ages on severely eroded red soils in subtropical China[J]. Forests, 2020, 11(12):1304.
- [3] Cai H, Di X, Chang S X, et al. Carbon storage, net primary production, and net ecosystem production in four major temperate forest types in northeastern China[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2016,46(2):143-151.
- [4] Evans L R, Pierson D, Lajtha K. Dissolved organic carbon production and flux under long-term litter manipulations in a Pacific Northwest old-growth forest[J]. Bio-

- geochemistry, 2020, 149(1):75-86.
- [5] Zhao S, Ta N, Li Z, et al. Varying pyrolysis temperature impacts application effects of biochar on soil labile organic carbon and humic fractions[J]. *Applied Soil Ecology*, 2018, 123:484-493.
 - [6] 陈子豪, 焦泽彬, 刘谣, 等. 凋落物季节性输入对川西亚高山森林土壤活性有机碳的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2021, 27(3):594-600.
Chen Z H, Jiao Z B, Liu Y, et al. Influences of seasonal litter input on soil active organic carbon in subalpine forests in western Sichuan[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2021, 27(3):594-600.
 - [7] 郑卫国, 薛立, 许鹏波, 等. 加勒比松林地土壤对凋落物的响应[J]. *华南农业大学学报*, 2011, 32(1):120-123.
Zheng W G, Xue L, Xu P B, et al. Soil response to litter in a *Pinus caribaea* woodland[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2011, 32(1):120-123.
 - [8] 王清奎. 碳输入方式对森林土壤碳库和碳循环的影响研究进展[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(4):1075-1081.
Wang Q K. Responses of forest soil carbon pool and carbon cycle to the changes of carbon input[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(4):1075-1081.
 - [9] 张磊, 贾淑娴, 李啸灵, 等. 凋落物和根系输入对亚热带米槠天然林土壤有机碳组分的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(3):244-251.
Zhang L, Jia S X, Li X L, et al. Effects of litter and root inputs on soil organic carbon fractions in a subtropical natural forest of *Castanopsis carlesii*[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(3):244-251.
 - [10] 李常准, 陈立新, 段文标, 等. 凋落物处理对不同林型土壤有机碳全氮全磷的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2020, 18(1):100-109.
Li C Z, Chen L X, Duan W B, et al. Effects of litter treatment on soil organic carbon, total nitrogen and total phosphorus in different forest types[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2020, 18(1):100-109.
 - [11] 阮超越, 刘小飞, 吕茂奎, 等. 杉木人工林凋落物添加与去除对土壤碳氮及酶活性的影响[J]. *土壤学报*, 2020, 57(4):954-962.
Ruan C Y, Liu X F, Lv M K, et al. Effects of litter carbon, nitrogen and enzyme activity in soil under Chinese fir[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(4):954-962.
 - [12] Zhi J, Zhang G, Yang F, et al. Predicting mattic epipedons in the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau using Random Forest[J]. *Geoderma Regional*, 2017, 10:1-10.
 - [13] 龚子同. 中国土壤系统分类: 理论、方法、实践[M]. 北京: 科学出版社, 1999:614-615.
Gong Z T. *Chinese Soil Taxonomy: Theory, Method, Practice*[M]. Beijing: Science Press, 1999:614-615.
 - [14] 苏培玺, 周紫鹃, 侍瑞, 等. 高寒草毡层基本属性与固碳能力沿水分和海拔梯度的变化[J]. *生态学报*, 2018, 38(3):1040-1052.
Su P X, Zhou Z J, Shi R, et al. Variation in basic properties and carbon sequestration capacity of an alpine sod layer along moisture and elevation gradients[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(3):1040-1052.
 - [15] 尤全刚, 薛炯, 彭飞, 等. 高寒草甸草地退化对土壤水热性质的影响及其环境效应[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(5):1183-1192.
You Q G, Xue X, Peng F et al. Alpine meadow degradation effect on soil thermal and hydraulic properties and its environmental impacts[J]. *Journal of Desert Research*, 2015, 35(5):1183-1192.
 - [16] 杨永胜, 张莉, 未亚西, 等. 退化程度对三江源泽库高寒草甸土壤理化性质及持水能力的影响[J]. *中国草地学报*, 2017, 39(5):54-61.
Yang Y S, Zhang L, Wei Y X, et al. Effects of degradation degree on soil physicochemical properties and soil water-holding capacity in zeku alpine meadow in the headwater region of three rivers in China[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2017, 39(5):54-61.
 - [17] 高明磊, 满秀玲, 段北星. 林下植被和凋落物对我国寒温带天然林土壤 CO₂ 通量的短期影响[J]. *北京林业大学学报*, 2021, 43(3):55-65.
Gao M L, Man X L, Duan B X. Short-term effects of understory vegetation and litter on soil CO₂ flux of natural forests in cold temperate zone of China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2021, 43(3):55-65.
 - [18] 刘明慧, 孙雪, 于文杰, 等. 长白山不同海拔原始红松林土壤活性有机碳含量的生长季动态[J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2018, 42(2):67-74.
Liu M H, Sun X, Yu W J, et al. Seasonal dynamics of soil active organic carbon content in the original *Pinus koraiensis* forest in Changbai Mountains, China[J]. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2018, 42(2):67-74.
 - [19] 林宝平, 何宗明, 郜士垒, 等. 去除根系和凋落物对滨海沙地 3 种防护林土壤碳氮库的短期影响[J]. *生态学报*, 2017, 37(12):4061-4071.
Lin B P, He Z M, Gao S L, et al. Short-term effects of root exclusion and litter removal on sandy soil carbon and nitrogen pools in three coastal plantation forests[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(12):4061-4071.
 - [20] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems [J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46(7):1459-1466.

- [21] Pang D, Cui M, Liu Y, et al. Responses of soil labile organic carbon fractions and stocks to different vegetation restoration strategies in degraded karst ecosystems of south-west China[J]. *Ecological Engineering*, 2019,138:391-402.
- [22] García F, Sveshtarova B, Oliva M. Seasonal effects on soil organic carbon dynamics in a tropical deciduous forest ecosystem in western Mexico [J]. *Journal of Tropical Ecology*, 2003,19(2):179-188.
- [23] Feng W, Zou X, Schaefer D. Above-and belowground carbon inputs affect seasonal variations of soil microbial biomass in a subtropical monsoon forest of south-west China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(5):978-983.
- [24] 魏翠翠,刘小飞,林成芳,等.凋落物输入改变对亚热带两种米槠次生林土壤酶活性的影响[J].*植物生态学报*,2018,42(6):692-702.
- Wei C C, Liu X F, Lin C F, et al. Response of soil enzyme activities to litter input changes in two secondary *Castanopsis carlessii* forests in subtropical China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2018,42(6):692-702.
- [25] 李英年,王勤学,杜明远,等.草毡寒冻锥形土有机质补给、分解及大气 CO₂ 通量交换[J].*草地学报*,2006,14(2):165-169.
- Li Y N, Wang Q X, Du M Y, et al. A study on replenishment and decomposition of organic matter in and mat-cryic cambisols CO₂ flux between vegetation and atmosphere[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2006,14(2):165-169.
- [26] 唐仕姗,杨万勤,殷睿,等.中国森林生态系统凋落叶分解速率的分布特征及其控制因子[J].*植物生态学报*, 2014,38(6):529-539.
- Tang S S, Yang W Q, Yin R, et al. Spatial characteristics in decomposition rate of foliar litter and controlling factors in Chinese forest ecosystems[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014,38(6):529-539.
- [27] Xiong X, Zhou G, Zhang D. Soil organic carbon accumulation modes between pioneer and old-growth forest ecosystems[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2020, 57(12):2419-2428.
- [28] 梁艺凡,万晓华,桑昌鹏,等.滨海防护林土壤氮组分对凋落物和根系去除的响应[J].*森林与环境学报*,2019, 39(2):127-134.
- Liang Y F, Wan X H, Sang C P, et al. Response of soil nitrogen pool to litter and root exclusion in costal protection forest[J]. *Journal of Forest and Environment*, 2019,39(2):127-134.
- [29] 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):84-94.
- Chen Y P, Wu J B, Zhang M, 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):84-94.
- ~~~~~
- (上接第 167 页)
- [20] 刘旻霞,王刚.高寒草甸植物群落多样性及土壤因子对坡向的响应[J].*生态学杂志*,2013,32(2):259-265.
- Liu M X, Wang G. Responses of plant community diversity and soil factors to slope aspect in alpine meadow[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013,32(2):259-265.
- [21] 高雪松,邓良基,张世熔.不同利用方式与坡位土壤物理性质及养分特征分析[J].*水土保持学报*,2005,19(2):53-56.
- Gao X S, Deng L J, Zhang S R, et al. Soil physical properties and nutrient properties under different utilization styles and slope position[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005,19(2):53-56.
- [22] 高露,张圣微,赵鸿彬,等.退化草原土壤理化性质空间异质性及其对土壤水分的影响[J].*干旱区研究*,2020, 37(3):607-617.
- Gao L, Zhang S W, Zhao H B, et al. Spatial heterogeneity of soil physical and chemical properties in degraded grassland and their effect on soil moisture[J]. *Arid Zone Research*, 2020,37(3):607-617.
- [23] 赵海鹏,吕明侠,王一博,等.青藏高原风火山流域坡面尺度活动层土壤水热时空变化特征[J].*冰川冻土*, 2020,42(4):1158-1168.
- Zhao H P, Lü M X, Wang Y B, et al. Spatiotemporal variation characteristics of soil water content and temperature within active layer at slope scale in the Fenghuoshan basin, Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020,42(4):1158-1168.
- [24] 胡健,吕一河,张琨,等.祁连山排露沟流域典型植被类型的水源涵养功能差异[J].*生态学报*,2016,36(11): 3338-3349.
- Hu J, Lü H, Zhang K, et al. The differences of water conservation function under typical vegetation types in the Pailugou catchment, Qilian Mountain, northwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016,36(11):3338-3349.