

DOI: 10.5846/stxb201802060311

卫芯宇, 杨万勤, 张丽, 谭波, 谌亚, 董玉梁, 吴福忠. 冻融环境下凋落叶添加对亚高山森林土壤腐殖化程度的影响. 生态学报, 2018, 38(18): - .
Wei X Y, Yang W Q, Zhang L, Tan B, Chen Y, Dong Y L, Wu F Z. Effects of litter addition on soil humification during freeze-thaw cycles in a subalpine forest. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(18): - .

冻融环境下凋落叶添加对亚高山森林土壤腐殖化程度的影响

卫芯宇, 杨万勤, 张丽, 谭波, 谌亚, 董玉梁, 吴福忠*

四川农业大学生态林业研究所, 林业生态工程重点实验室, 成都 611130

摘要: 亚高山森林凋落叶与土壤腐殖化的关系是了解森林土壤有机质动态过程的关键内容, 且受到季节性冻融、凋落叶与土壤性质的综合作用, 但缺乏深入认识。因此, 在对亚高山凋落叶腐殖化认识的前期基础上, 以川西亚高山典型的针叶林、针阔混交林以及阔叶林土壤为研究对象, 采用控制冻融环境和凋落叶添加的方法, 通过分析土壤可提取腐殖质的色调系数 ($\Delta\log k$)、光密度值 (E4/E6) 以及 A600/C 值等光学指标, 研究冻融循环与凋落叶添加对土壤腐殖化程度的影响。结果表明: 冻融循环和凋落叶添加及其交互作用均明显影响土壤的腐殖化程度, 但受到凋落叶类型和土壤类型的调控。在冻融循环初期, 添加凋落叶能促进土壤的腐殖化进程, 提高土壤的腐殖化程度; 随着冻融循环次数的增加以及凋落叶的不断分解, 阔叶凋落叶对土壤的腐殖化表现出促进作用, 而针叶凋落叶则对土壤的腐殖化表现出抑制作用。此外, 在冻融循环环境下, 即使土壤的腐殖化程度增加, 但腐殖质仍为相对年轻的 R_p 型, 有利于提高土壤的肥力。这些结果表明, 气候变化情景下高山森林地表冻融循环的改变将显著影响凋落叶与土壤腐殖质的密切关系, 为进一步认识区域森林土壤有机质动态提供了一定的科学依据。

关键词: 冻融循环; 腐殖化程度; 色调系数; 光密度值

Effects of litter addition on soil humification during freeze-thaw cycles in a subalpine forest

WEI Xinyu, YANG Wanqin, ZHANG Li, TAN Bo, CHEN Ya, DONG Yuliang, WU Fuzhong*

Provincial Key Laboratory of Ecological Forestry Engineering, Institute of Ecology and Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

Abstract: Humus is a complex polymer which decomposes and synthesizes animal and plant residues under the action of microorganisms and is the main component of soil organic matter. Litter nutrient input is one of the main sources of soil humus. However, in subalpine forests, frequent freeze-thaw cycles impact the process of soil humification and litter decomposition. The relationship between litter and soil humification in subalpine forests is fundamental to understand the dynamic process of forest soil organic matter, which is affected by seasonal freeze-thaw cycles, litter decomposition processes, and soil properties. However, there is limited information in this regard. Therefore, based on the pre-recognition of sub-alpine litter humification and seasonal freeze-thaw cycles, taking typical coniferous, coniferous-broadleaf, and broadleaf forest soil in the sub-alpine region of western Sichuan, we controlled the freeze-thaw environment and litter addition, and analyzed the tone coefficient ($\Delta\log k$), optical density value (E4/E6), and A600/C value, which can accurately reflect the degree of soil humification by extractable humus color. The results showed that the freeze-thaw cycles, litter additions, and their interactions all significantly affected the soil humification, but were controlled by the

基金项目: 国家重点专项研发计划课题 (2017YFC0505003); 国家自然科学基金项目 (31670526 和 31622018); 霍英东青年教师基金 (161101) 项目

收稿日期: 2018-02-06; 修订日期: 2018-07-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wufzchina@163.com

characteristics of litter and soil types. In the early freeze-thaw environment, the addition of litter can promote soil humification processes and improve soil humification. With prolonged freeze-thaw cycles and the continuous decomposition of litter, the broad-leaf litter can promote soil humification, whereas needle litter inhibits soil humification. Moreover, in freeze-thaw environments, soil humus is still relatively young, even though soil humification is increased, which shows that freeze-thaw cycles can improve soil humus quality to a certain extent and help maintain soil fertility. These results show that changes in freeze-thaw cycles under climate change will significantly affect the relationship between litter and soil humus, which provide a scientific basis for better understanding soil organic matter dynamics in subalpine forests.

Key Words: freeze-thaw cycles; humification; tone coefficient; optical density value

腐殖质作为土壤有机质的主体组分,是动植物残体在微生物作用下分解并合成的一类结构复杂的聚合物^[1-2],其形成过程也是土壤有机质形成的重要内容^[3]。土壤腐殖化程度不仅代表了土壤中有有机碳库的相对稳定性^[4],而且腐殖质可以通过改善土壤物理化学及生物学性质而提高土壤自修复能力及肥力,对土壤养分循环和维持生态系统的稳定平衡具有重要作用^[5-8],也是评价土壤肥力的主要指标^[9]。传统认为,土壤腐殖质的颜色可以很好地表现土壤的腐殖化程度^[10],因此,色调系数($\Delta\log k$)、光密度值(E_4/E_6)以及 A600/C 值等光学指标近年来被广泛用于表征腐殖质分子结构的复杂程度与腐殖化程度^[11]。 $\Delta\log k$ 值越大, E_4/E_6 比值越高,A600/C 值越低,表明腐殖质的光密度愈小,芳香核原子团越少,芳香缩合度低,说明其分子结构越简单^[2]。尽管凋落叶等植物残体的输入是土壤腐殖质的主要来源^[12],但也可以通过“施肥促发效应”促进已有腐殖质的更新^[13],使得植物残体输入与土壤腐殖化程度的关系并不明确。同时,土壤的季节性冻融是全球中、高纬度或高海拔地区生态系统的普遍现象^[14]。已有研究表明,一方面频繁的冻融循环会抑制凋落叶的腐殖化,甚至使前期形成的腐殖质降解^[15],降低土壤腐殖质的积累;另一方面随着冻融循环周期的增加土壤有机质含量也有增加的趋势^[16],可能提高土壤腐殖化程度。可见,季节性冻融、植物残体输入及其综合作用对土壤腐殖化程度的影响并不确定,亟待深入研究。

川西亚高山森林是受季节性冻融影响的典型生态系统,常年低温及频繁地质灾害,导致土壤发育受阻^[17],土层浅薄,土壤腐殖质形成及其动态对高山森林生态系统生产力的维持与健康具有重要的作用。前期的研究表明,季节性冻融循环可显著抑制凋落叶腐殖质的积累^[15],也可显著影响土壤碳矿化过程^[18]。然而,缺乏对季节性冻融-凋落叶输入及其与土壤腐殖化程度关系的关注。因此,以前期研究为基础,采用室内培养方法,模拟冻融循环过程,深入探究气候变化背景下川西亚高山冻融环境下植物残体养分的输入对土壤腐殖化程度的影响,以期气候变化情况下川西亚高山森林生态系统植物残体与土壤有机质积累间的相互作用提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于四川省西部,绵阳市平武县王朗国家级自然保护区($32^{\circ}49'—33^{\circ}02' N$, $103^{\circ}55'—104^{\circ}10' E$),海拔 2300—4980 m,地处青藏高原—四川盆地的过渡地带,气候属于丹巴—松潘半湿润气候。受季风的影响,该地区干湿季节差异明显,年降水量 801—825 mm,主要集中在 5—8 月。年平均温度为 1.5—2.9℃,7 月平均为 12.7℃,1 月平均为 6.1℃,土壤季节性冻融期长达 5—6 个月。研究区域内优势乔木为岷江冷杉(*Abies faxoniana*)、川西云杉(*Picea balfouriana*)、白桦(*Betula platyphylla*)、红桦(*Betula albo-sinensis*)等,优势灌木为康定柳(*Salix paraplesia*)、高山杜鹃(*Rhododendron lapponicum*)等,土壤为棕壤和暗棕壤。

1.2 样品采集与处理

2017 年 5 月 10 日,在王朗国家级自然保护区的针叶林、针阔混交林以及阔叶林内分别选取 3 个坡向、坡度相似的样地,在每个样地内多点采集去除凋落叶、苔藓等地被物的 0—10 cm 土壤混合均匀,将样品带回实

实验室,剔除根系和杂质,过 2 mm 筛,并取一部分样品用于测定理化性质(表 1)。同时对应收集各样地的凋落叶,风干备用,同时测定凋落叶理化性质(表 2)。

表 1 三种森林类型土壤初始组分含量(平均值±标准偏差, $n=3$)

Table 1 Initial concentrations of organic carbon (OC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), bulk density, C/N and C/P of three forest soil types (mean±SD, $n=3$)

森林类型 Forest type	有机碳 Organic carbon/ (g/kg)	全氮 Total nitrogen/ (g/kg)	全磷 Total phosphorus/ (g/kg)	容重 Bulk density/ (g/cm ³)	C/N	C/P
针叶林 Coniferous forest	57.77±2.63b	3.88±0.16a	1.18±0.04a	0.74±0.11a	14.92±1.23c	48.96±3.70a
针阔混交林 Coniferous-broadleaf forest	36.25±3.95c	1.75±0.07b	0.96±0.01b	0.79±0.13a	20.82±2.69a	37.78±4.00c
阔叶林 Broadleaf forest	62.89±1.63a	3.96±0.08a	1.35±0.01a	0.93±0.15a	15.87±0.23b	46.75±1.61b

同列不同小写字母表示各物种之间差异显著($P<0.05$)

1.3 室内培养

每样地各称取 250 g 过筛新鲜土样,置于 350 mL 培养罐中。为了不受水分条件的限制,土壤的含水量统一调节为 60%田间持水量。为了解凋落叶对土壤腐殖化程度的影响,每一类型土壤设置去除凋落叶和添加凋落叶的不同处理。凋落叶添加量依据课题组前期对该地区各森林类型凋落叶年凋落量的调查研究^[19-20],计算该地区单位面积上的实际凋落叶凋落量,并根据培养罐的横截面积来确定凋落叶的添加量,添加的凋落叶量即为实际凋落量,分别为针叶林土壤添加凋落叶 1.63 g,针阔混交林土壤添加凋落叶 1.24 g,阔叶林土壤添加凋落叶 0.86 g。基于前期 Wu 等人的观测数据和温度动态特征^[21],设置冻融循环、完全不冻结以及完全冻结 3 个温度处理。冻融循环处理为-5℃培养 12 h,5℃培养 12 h;完全不冻结和完全冻结处理分别为 5℃和-5℃恒温培养。将不同样地内的去除以及添加凋落叶土壤分别培养于不同的温度条件下,同时用保鲜膜封住培养罐口防止其他杂质的输入,并在保鲜膜上扎多个小孔,保持培养罐内外空气流通。并分别在培养的第 0、5、10、20、40、80 天取出培养罐测定相关指标。为了避免取样对培养罐内环境的破坏,每次取出的培养罐不再放回继续培养。每个处理设置 3 个重复,共计 324 个培养罐。

1.4 指标测定

取样时,首先将土壤表面的凋落叶完整取出,再将培养罐中的土壤全部取出,风干、粉碎后过 0.25 mm 筛。称取风干样品 0.500 g 置于 150 mL 锥形瓶,加入 0.1 mol/L NaOH+0.1 mol/L Na₄P₂O₇·10 H₂O 混合提取液 100 mL,加塞振荡 10 min,沸水浴 1 h,待冷却后过滤,再过 0.45 μm 滤膜,滤液即为浸提液^[22]。使用紫外可见光谱分析仪(TU-1901, Puxi, Beijing, China)测定其吸光度,并计算色调系数($\Delta\log K$)、光密度值(E4/E6)。使用 TOC (multi N/C 2100, Analytic Jena, Thüringen, Germany)测定浸提液中有机碳含量,计算 A600/C。

表 2 三种类型凋落叶初始组分含量(平均值±标准偏差, $n=3$)

Table 2 Initial concentrations of organic carbon (OC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), bulk density, C/N and C/P of three litter types (mean±SD, $n=3$)

凋落叶类型 Litter type	有机碳 Organic carbon/ (g/kg)	全氮 Total nitrogen/ (g/kg)	全磷 Total phosphorus/ (g/kg)	C/N	C/P
针叶林凋落叶 Needle litter	348.00±6.10a	2.23±0.03c	0.76±0.02c	155.79±5.03a	456.76±14.37a
混交林凋落叶 Mixed leaf litter	342.86±14.35a	3.19±0.14b	1.13±0.11b	107.83±7.49b	306.53±23.36b
阔叶林凋落叶 Broad-leaf litter	452.25±19.01a	4.37±0.04a	1.47±0.02a	103.49±5.12c	307.57±10.41b

同列不同小写字母表示各物种之间差异显著($P<0.05$)

1.5 数据统计与分析

色调系数($\Delta\log K$)、光密度值(E4/E6)以及 A600/C 的计算方法如下^[23]:

$$\Delta\log K = \log(A_{400}/A_{600})$$

$$E4/E6 = A_{465}/A_{665}$$

式中, A_{400} 、 A_{600} 、 A_{465} 、 A_{665} 分别表示在 400、600、465、665 nm 处的吸光度, A600/C 中 C 表示每 1 mL 浸提液中含有多少 mg 有机碳量。

数据采用 SPSS 20.0 (IBM SPSS Statistics, Chicago, IL, USA) 进行方差分析、相关分析, 用 Origin Pro 9.0 (OriginLab, Northampton, MA, USA) 绘图。用最小显著差异法 (Least significant difference, LSD) 检验添加凋落叶对不同培养环境的不同林型土壤的 $\Delta\log K$ 、E4/E6 和 A600/C 值的差异显著性; 用多因素方差分析 (Multi-way ANOVA) 检验不同林型土壤在不同的冻融环境下添加凋落叶对土壤 $\Delta\log K$ 、E4/E6 和 A600/C 值的影响。显著性水平设为 $P=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 $\Delta\log K$

在冻融循环环境下培养 80 d 后, 添加凋落叶显著影响了 3 种林型土壤的 $\Delta\log K$ 值 ($P<0.01$, 表 3)。其中, 相对于完全不冻结环境, 冻融循环和冻结环境下添加凋落叶增加了针叶林土壤 $\Delta\log K$ 值, 且冻结环境下 $\Delta\log K$ 值的增加趋势更加显著 (图 1); 冻融循环环境下添加凋落叶 80 d 后, 针阔混交林土壤的 $\Delta\log K$ 值显著增加, 但不冻结以及冻结环境条件下并无显著变化。与针叶林以及混交林土壤不同, 在冻融循环以及冻结环

表 3 冻融循环、凋落叶处理、林型对土壤 $\Delta\log K$ 、E4/E6 以及 A600/C 值的三因素方差分析

Table 3 Three-factor analysis of variance for the effect of environment, litter addition different soil types and their interactions on $\Delta\log K$, E4/E6 and A600/C value

光学特性 Optical characteristic	因子 Factor	第 0 天 Day 0	第 5 天 Day 5	第 10 天 Day 10	第 20 天 Day 20	第 40 天 Day 40	第 80 天 Day 80
$\Delta\log K$	冻融循环	0.00	1.99	0.48	0.85	3.473 *	1.93
	凋落叶添加	0.00	10.80 **	8.56 **	0.51	1.70	0.94
	林型	2.57	12.07 **	33.77 **	94.15 **	191.06 **	40.45 **
	冻融循环×凋落叶添加	0.00	0.92	1.07	0.66	2.31	0.05
	冻融循环×林型	0.00	2.55	0.75	0.14	0.93	9.66 **
	凋落叶添加×林型	0.00	2.24	0.21	1.44	1.22	28.12 **
	冻融循环×凋落叶添加×林型	0.00	2.02	0.20	1.26	1.84	16.5 **
E4/E6	冻融循环	0.00	0.24	1.17	0.39	1.20	1.86
	凋落叶添加	0.00	9.32 **	6.25 *	0.38	1.72	0.40
	林型	0.13	4.49 *	13.48 **	17.53 **	49.53 **	7.74 **
	冻融循环×凋落叶添加	0.00	0.13	1.79	0.21	0.45	0.60
	冻融循环×林型	0.00	0.39	1.13	0.02	0.43	1.42
	凋落叶添加×林型	0.00	0.79	1.31	1.04	1.53	9.70 **
	冻融循环×凋落叶添加×林型	0.00	0.58	0.47	0.67	1.22	6.76 **
A600/C	冻融循环	0.00	1.84	0.94	0.62	2.02	2.83
	凋落叶添加	0.00	10.58 **	8.18 **	1.25	6.90 *	0.10
	林型	5.94 **	4.94 *	16.75 **	41.67 **	12.28 **	8.01 **
	冻融循环×凋落叶添加	0.00	0.57	0.75	0.70	2.11	2.08
	冻融循环×林型	0.00	1.73	2.77 *	3.75 *	2.71 *	2.20
	凋落叶添加×林型	0.00	3.16	1.04	0.14	1.44	10.09 **
	冻融循环×凋落叶添加×林型	0.00	2.99 *	0.66	2.11	0.84	8.08 **

*, $P<0.05$, **, $P<0.01$. $n=54$.

境下培养 80 d 后,添加凋落叶降低了阔叶林土壤的 $\Delta\log K$ 值,且在冻结环境下培养的阔叶林土壤 $\Delta\log K$ 值的下降趋势更加显著(图 1)。在培养的第 5 天和第 10 天,添加凋落叶对 3 种林型土壤 $\Delta\log K$ 值的影响均为极显著($P<0.01$,表 3),同时由图 1 可知,在培养的第 5—10 天,不同培养环境下的土壤 $\Delta\log K$ 值出现下降趋势,而添加凋落叶则使得这一变化趋势提前到培养的第 0—5 天。

2.2 E4/E6

与 $\Delta\log K$ 值相同,在冻融循环环境下培养 80 d 后,添加凋落叶对 3 种林型土壤的 E4/E6 值均有极显著的影响($P<0.01$,表 3)。相对于完全不冻结环境,冻融循环以及冻结环境下添加凋落叶培养 80 d 后,显著增加了针叶林土壤的 E4/E6 值,且冻结环境下 E4/E6 值的增加趋势更加显著(表 3);相对于完全不冻结和冻结环境,冻融循环环境下添加凋落叶使得针阔混交林土壤 E4/E6 值上升;不同于针叶林和针阔混交林土壤,冻融循环环境下添加凋落叶培养 80 d 后,阔叶林土壤 E4/E6 值降低(表 2)。与 $\Delta\log K$ 值相同,在培养的第 5 天和第 10 天,添加凋落叶对土壤的 E4/E6 产生极显著($P<0.01$,表 3)或显著($P<0.05$,表 3)影响,同时由图 2 可知,培养的第 5—10 天,不同培养环境下的土壤 E4/E6 值出现下降趋势,而添加凋落叶则使得土壤 E4/E6 值下降趋势提前。

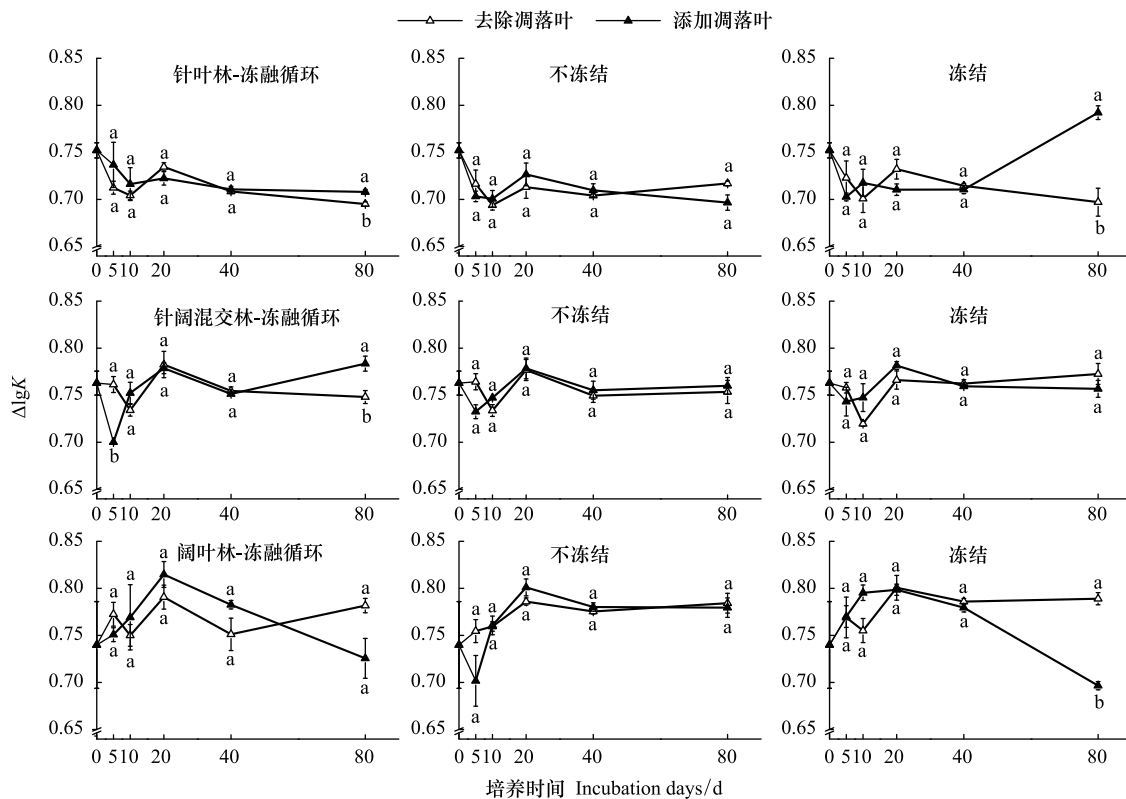


图 1 不同冻融环境下添加/去除凋落叶的三种林型土壤 $\Delta\log K$ 值

Fig.1 $\Delta\log K$ values of three kinds of forest soil with litters added/removed with different environments

不同小写字母表示土壤腐殖化程度在添加/去除凋落叶处理之间的差异显著($P<0.05$);图中数据为平均值 \pm 标准偏差($n=3$)

2.3 A600/C

不同的冻融环境、是否添加凋落叶对 3 种林型土壤的 A600/C 值有显著($P<0.01$,表 3)或极显著影响($P<0.01$,表 3)。对于针叶林土壤,相对于不冻结和冻结环境,在冻融循环环境下培养的第 40—80 天,添加凋落叶抑制了土壤 A600/C 值的下降,使得添加凋落叶的针叶林土壤 A600/C 值仍保持较高的水平。相对于不冻结和冻结环境,在冻融循环环境下培养 80 d 后的添加凋落叶混交林土壤 A600/C 值显著下降。对于完全不冻结环境,添加凋落叶的阔叶林土壤在冻融循环以及冻结环境下培养 40 d 后,其 A600/C 值显著上升,且在冻结环

境下培养的阔叶林土壤 A600/C 值的上升趋势更加显著。在培养的第 5 天和第 10 天,添加凋落叶对土壤的 A600/C 值有显著影响 ($P < 0.01$, 表 3), 土壤 A600/C 值在培养的第 5—10 天出现上升趋势, 且添加凋落叶使得土壤 A600/C 值的上升趋势提前。

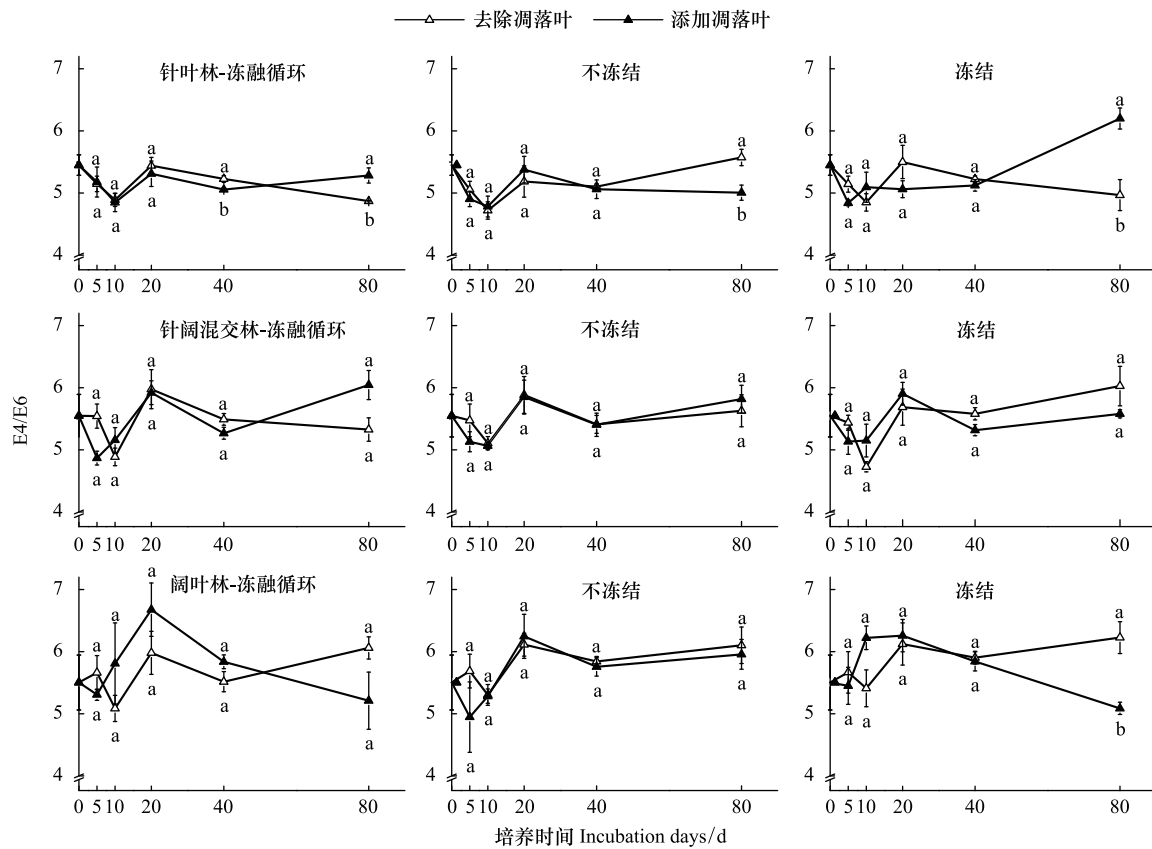


图 2 不同冻融环境下添加/去除凋落叶的三种林型土壤 E4/E6 值

Fig. 2 E4/E6 values of three kinds of forest soil with litters added/removed with different environments

不同小写字母表示土壤腐殖化程度在添加/去除凋落叶处理之间的差异显著 ($P < 0.05$)。图中数据为平均值 \pm 标准偏差 ($n = 3$)

3 讨论与结论

腐殖物质的光密度值在一定程度上反映了其分子的复杂程度^[23], 即 $\Delta \log K$ 越低, 说明腐殖质中芳香核原子团越多, 脂肪侧键越少, 其分子结构越复杂^[9, 24], 从而间接表明土壤的腐殖化程度越高^[2, 25], 同时, $\Delta \log K$ 值与 E4/E6 值正相关, 而与 A600/C 值呈负相关关系^[26]。本研究结果表明, 即使在频繁的冻融循环环境下, 土壤的腐殖化过程一直处于动态的变化中, 但不同林型的土壤之间存在显著的差异。冻融循环前期, 添加凋落叶促进了 3 种林型土壤腐殖质的积累和快速的腐殖化。冻融循环后期, 添加凋落叶对阔叶林土壤的腐殖化有促进作用, 而对针叶林以及针阔混交林土壤的腐殖化过程有抑制作用。

培养初期, 受凋落叶中碳源输入的影响, 添加凋落叶提高土壤的腐殖化程度。去除凋落叶土壤的 $\Delta \log K$ 和 E4/E6 值在培养第 5—10 天下降, A600/C 值上升, 说明在这期间土壤的腐殖化程度提高。而添加凋落叶使得土壤的腐殖化程度在培养第 0—5 天便开始提高。这表明在培养初期, 凋落叶中的糖类、淀粉等易分解物质的快速分解^[27], 为土壤中的微生物提供了大量的养分, 使得微生物的活性增加, 同时凋落叶的添加也使得土壤中的微生物群落结构变得更加丰富^[28], 而腐殖物质的形成主要依靠的就是微生物的聚合作用^[27], 所以微生物合成腐殖质的能力增强。这也说明即使频繁的冻融循环也并没有抑制微生物的活性, 与 morley 和 schadt 等的研究结果一致^[29-30]。凋落叶中易分解的有机物质在 5 d 内分解完成, 随着易分解组分的消耗殆

尽,而难分解物质又分解缓慢,土壤中腐殖物质的合成速率开始小于其分解速率,土壤的腐殖化程度开始降低并趋于稳定。

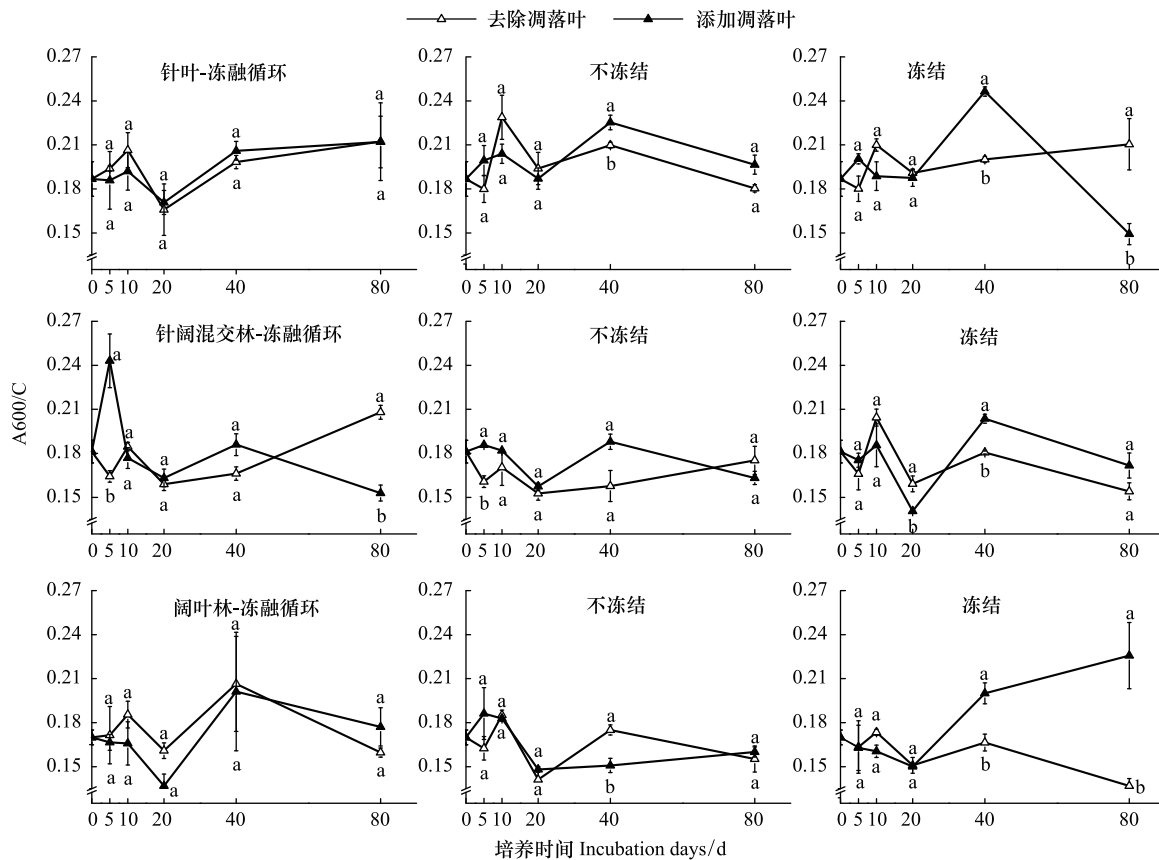


图 3 不同冻融环境下添加/去除凋落叶的三种林型土壤 A600/C 值

Fig.3 A600/C values of three kinds of forest soil with litters added/removed with different environments

不同小写字母表示土壤腐殖化程度在添加/去除凋落叶处理之间的差异显著 ($P < 0.05$); 图中数据为平均值 \pm 标准偏差 ($n = 3$)

随着培养时间的延长,同时在频繁的冻融循环以及强烈的冻结作用下,凋落叶中木质素等难分解物质的结构被破坏^[31-32],可分解性提高^[33],凋落叶在培养后期对土壤的腐殖化程度产生显著影响。通过对 3 种林型土壤 $\Delta \log K$ 、E4/E6 以及 A600/C 值的分析,结果表明,冻融循环处理 80 d 后,添加凋落叶使得阔叶林土壤腐殖化程度增加,而针叶林和混交林土壤腐殖化程度降低,这说明不同种类的凋落叶会对土壤的腐殖化程度产生不同的影响。针叶林以及针阔混交林土壤腐殖化程度降低,一方面是由于其添加的凋落叶中 C/N 含量较高,全 N 含量较低(表 2),木质素含量更多,导致分解速度较阔叶树种凋落叶慢;同时针叶树种凋落叶中萜类物质和酚类物质含量较高,易形成酸性腐殖质^[34],不利于土壤生物群落的生长和繁衍,从而抑制土壤的腐殖化过程;另一方面,频繁的冻融循环可能破坏前期新形成的不稳定的腐殖质结构^[10],最终导致针叶林和针阔混交林土壤腐殖化程度的降低。与针叶树种凋落叶不同,阔叶树种凋落叶中的 N 含量最高,C/N 最低,所以阔叶树种凋落叶的分解速度更快^[34],转化为土壤腐殖质的过程更强烈,所以冻融循环环境下添加凋落叶的阔叶林土壤在培养末期有较去除凋落叶土壤更高的腐殖化程度。同时,用 Ikeya 所改良的 kumada 分类方法对阔叶林土壤腐殖质进行分类^[26],我们发现,虽然阔叶林土壤的腐殖化程度增加,但其腐殖质类型均为较年轻的 Rp 型(图 4),说明冻融循环能将土壤中的腐殖质大团聚体破碎成小团聚体^[35],更有利于改善腐殖质质量,提高土壤肥力。本研究还发现,相对于冻融循环环境,添加凋落叶对完全冻结环境下培养的土壤的腐殖化程度的影响更加显著。这可能是由于不同的微生物群落对冻融循环以及冻结条件的响应机制存在很大的差异,这种差异也可能是亚高山森林生态系统维持的重要机制,有待更进一步的研究。

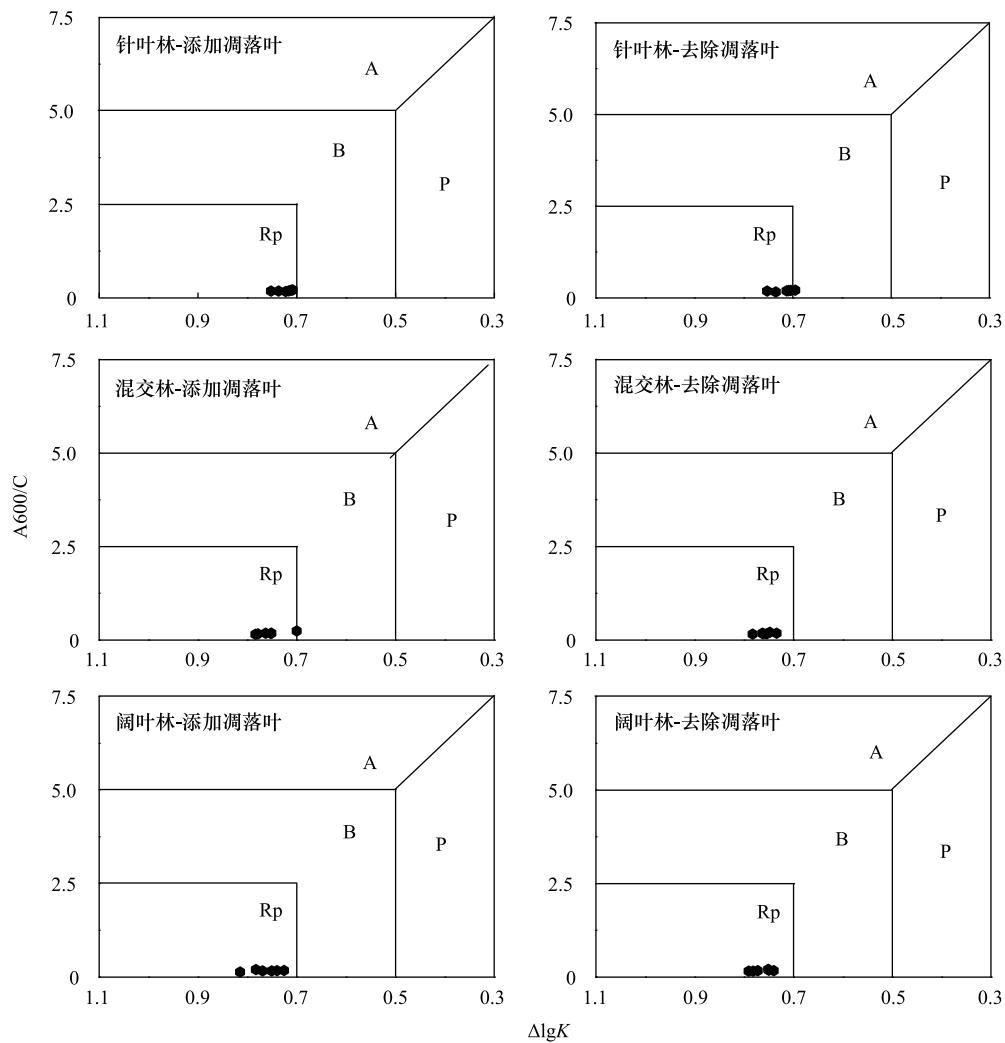


图 4 三种林型土壤在冻融循环环境下新形成腐殖质的类型

Fig.4 The types of accumulative humic substances in three kinds of forest during freeze - thaw cycles based on a modified Kumada classification

综上所述,在频繁的冻融循环环境下,添加凋落叶在初期能促进土壤的腐殖化,增强土壤的肥力。随冻融循环次数的增加,不同林型凋落叶对土壤腐殖化程度的影响存在显著差异,其中,阔叶树种凋落叶增加了土壤的腐殖化程度,而针叶树种凋落叶则抑制了土壤的腐殖化。同时,冻融循环能一定程度上能改善土壤腐殖质的质量,提高土壤腐殖化程度。总之,土壤的腐殖化程度受到凋落叶添加以及环境因素的调控,不同环境条件下不同的凋落叶类型对土壤的腐殖化程度有不同的影响。这些结果为深入研究季节性冻融环境下,亚高山森林植物残体与土壤有机质积累的关系提供了一定的基础数据。

参考文献 (References):

- [1] 武天云, Schoenau J J, 李凤民, 钱佩源, 张树清, Malhi S S, 王方. 土壤有机质概念和分组技术研究进展. 应用生态学报, 2004, 15(4): 717-722.
- [2] 张晋京, 窦森, 李翠兰, 王淑华. 土壤腐殖质分组研究. 土壤通报, 2004, 35(6): 706-709.
- [3] Ono K, Hiradate S, Morita S, Ohse K, Hirai K. Humification processes of needle litters on forest floors in Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) and Hinoki cypress (*Chamaecyparis obtusa*) plantations in Japan. Plant and Soil, 2011, 338(1/2): 171-181.
- [4] Sollins P, Homann P, Caldwell B A. Stabilization and destabilization of soil organic matter; mechanisms and controls. Geoderma, 1996, 74(1-2): 65-105.
- [5] Bollag J M, Loll M J. Incorporation of xenobiotics into soil humus. Experientia, 1983, 39(11): 1221-1231.

- [6] Nichols K A, Wright S F. Carbon and nitrogen in operationally defined soil organic matter pools. *Biology and Fertility of Soils*, 2006, 43(2): 215-220.
- [7] 王晶, 何忠俊, 王立东, 龙兴智, 和顺荣, 王建忠, 郭琳娜, 洪常青. 高黎贡山土壤腐殖质特性与团聚体数量特征研究. *土壤学报*, 2010, 47(4): 723-733.
- [8] 党亚爱, 李世清, 王国栋. 黄土高原典型区域土壤腐殖酸组分剖面分布特征. *生态学报*, 2012, 32(6): 1820-1829.
- [9] 史吉平, 张夫道, 林葆. 长期定位施肥对土壤腐殖质理化性质的影响. *中国农业科学*, 2002, 35(2): 174-180.
- [10] 窦森. 土壤有机质. 北京: 科学出版社, 2010: 71-72.
- [11] Richard G, Guyot G, Aguer J P, Ter Helle A, Trubetskaya O E, Trubetskoi O A. Role of fractionation in studying the photochemical properties of humic substances. *Russian Journal of General Chemistry*, 2008, 78(11): 2265-2272.
- [12] 宋新章, 江洪, 张慧玲, 余树全, 周国模, 马元丹, Chang S X. 全球环境变化对森林凋落物分解的影响. *生态学报*, 2008, 28(9): 4414-4423.
- [13] 王薇, 李絮花, 章燕平, 林治安, 赵朋. 长期定位施肥对盐化潮土土壤腐殖质组分的影响. *山东农业科学*, 2008, (3): 65-67.
- [14] 孙辉, 秦纪洪, 吴杨. 土壤冻融交替生态效应研究进展. *土壤*, 2008, 40(4): 505-509.
- [15] 倪祥银, 杨万勤, 李晗, 徐李亚, 何洁, 吴福忠. 雪被斑块对川西亚高山森林 6 种凋落叶冬季腐殖化的影响. *植物生态学报*, 2014, 38(6): 540-549.
- [16] 张海欧, 解建仓, 南海鹏, 韩霁昌, 汪妮, 张扬, 王欢元. 冻融交替对复配土壤团粒结构和有机质的交互作用. *水土保持学报*, 2016, 30(3): 273-278.
- [17] Yang W Q, Wang K Y, Kellomäki S, Gong H D. Litter dynamics of three subalpine forests in Western Sichuan. *PEDOSPHERE*, 2005, 15(5): 653-659.
- [18] 杨开军, 杨万勤, 贺若阳, 庄丽燕, 李志杰, 聂富育, 王壮, 徐振锋. 川西亚高山 3 种典型森林土壤碳矿化特征. *应用与环境生物学报*, 2017, 23(5): 851-856.
- [19] Yang W Q, Wang K Y, Kellomäki S, Zhang J. Annual and monthly variations in litter macronutrients of three subalpine forests in western China. *PEDOSPHERE*, 2006, 16(6): 788-798.
- [20] Fu C K, Yang W Q, Tan B, Xu Z F, Zhang Y, Yang J P, Ni X Y, Wu F Z. Seasonal Dynamics of Litterfall in a Sub-Alpine Spruce-Fir Forest on the Eastern Tibetan Plateau: Allometric Scaling Relationships Based on One Year of Observations. *Forests*, 2017, 8(9): 314-314.
- [21] Wu F Z, Yang W Q, Zhang J, Deng R J. Litter decomposition in two subalpine forests during the freeze-thaw season. *Acta Oecologica*, 2010, 36(1): 135-140.
- [22] Wang H, Hong Y T, Lin Q H, Hong B, Zhu Y X, Wang Y, Xu H. Response of humification degree to monsoon climate during the Holocene from the Hongyuan peat bog, eastern Tibetan Plateau. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 286(3/4): 171-177.
- [23] 彭福泉, 高坤林, 车玉萍. 我国几种土壤中腐殖质性质的研究. *土壤学报*, 1985, 22(1): 64-74.
- [24] 张晋京, 李翠兰, 窦森. 几种有机物料中类胡敏酸性质的比较. *吉林农业大学学报*, 2002, 24(6): 58-61.
- [25] Ikeya K, Watanabe A. Direct expression of an index for the degree of humification of humic acids using organic carbon concentration. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2003, 49(1): 47-53.
- [26] Kumada K, Sato O, Ohsuni Y, Ohta S. Humus composition of mountain soils in Central Japan with special reference to the distribution of P type humic acid. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1967, 13(5): 151-158.
- [27] 张晓鹏, 潘开文, 王进闯, 陈其兵. 栲-木荷林凋落叶混合分解对土壤有机碳的影响. *生态学报*, 2011, 31(6): 1582-1593.
- [28] 李晓杰, 刘小飞, 熊德成, 林伟盛, 林延武, 施友文, 谢锦升, 杨玉盛. 中亚热带杉木人工林和米楮次生林凋落物添加与去除对土壤呼吸的影响. *植物生态学报*, 2016, 40(5): 447-457.
- [29] Morley C R, Trofymow J A, Coleman D C, Cambardella C. Effects of freeze-thaw stress on bacterial populations in soil microcosms. *Microbial Ecology*, 1983, 9(4): 329-340.
- [30] Schadt C W, Martin A P, Lipson D A, Schmidt S K. Seasonal dynamics of previously unknown fungal lineages in tundra soils. *Science*, 2003, 301(5638): 1359-1361.
- [31] 彭艳, 杨万勤, 薛樵, 李俊, 王滨, 谭波, 吴福忠. 季节性冻融期间土壤动物对高山草甸两种凋落叶木质素降解的影响. *应用与环境生物学报*, 2016, 22(2): 300-306.
- [32] 邓仁菊, 杨万勤, 张健, 吴福忠. 季节性冻融期间亚高山森林凋落物的质量变化. *生态学报*, 2010, 30(3): 830-835.
- [33] Lemma B, Nilsson I, Kleja D B, Olsson M, Knicker H. Decomposition and substrate quality of leaf litters and fine roots from three exotic plantations and a native forest in the southwestern highlands of Ethiopia. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(9): 2317-2328.
- [34] 杨万勤, 邓仁菊, 张健. 森林凋落物分解及其对全球气候变化的响应. *应用生态学报*, 2007, 18(12): 2889-2895.
- [35] 李琳慧, 李旭, 许梦, 王观竹, 于济通, 郭平. 冻融温度对东北黑土理化性质及土壤酶活性的影响. *江苏农业科学*, 2015, 43(4): 318-320.