

不同雪被处理对川西亚高山森林土壤腐殖质含量的影响

黄雯澜¹ 刘 瑶² 简 毅³ 张琳慧¹ 陈 素¹ 黄路路¹ 俞丽云¹ 李 晗¹
王丽霞¹ 谭 波¹ 张 丽^{1*}

¹长江上游森林资源保育与生态安全国家林业和草原局重点实验室, 长江上游林业生态工程四川省重点实验室, 四川农业大学林学院, 成都 611130; ²泸州市林业科学研究院, 四川泸州, 646000; ³四川林业科学研究院, 成都 610081

摘 要 雪被减少可能通过改变地表水热环境及微生物活性作用于高寒森林有机质周转过程, 进而影响土壤腐殖质合成与分解。该研究以川西亚高山岷江冷杉(*Abies fargesii* var. *faxoniana*)林为研究对象, 借助野外雪被控制实验, 设置对照(自然雪被)、雪被减少(雪被去除50%)和雪被去除(雪被去除100%) 3个雪被水平, 采用野外原位培养的方法, 研究了雪被减少/去除对土壤可提取腐殖质、胡敏酸和富里酸含量及光谱学特性等的影响, 结合动态监测的环境因子和土壤理化性质等, 探讨不同雪被处理与土壤腐殖质的动态关联。结果表明: (1)雪被减少/去除均显著降低了土壤可提取腐殖质、胡敏酸和富里酸含量。(2)土壤腐殖化程度均较低, 3种雪被处理下土壤胡敏酸/富里酸值均小于1, 胡敏酸/可提取腐殖质值均小于0.5。(3)相关性分析表明, 全氮含量与土壤可提取腐殖质、胡敏酸和富里酸含量均呈显著负相关关系。综上所述, 雪被减少/去除均降低了土壤腐殖质的含量和土壤腐殖化程度。

关键词 腐殖质; 胡敏酸; 富里酸; 雪被; 亚高山森林

黄雯澜, 刘瑶, 简毅, 张琳慧, 陈素, 黄路路, 俞丽云, 李晗, 王丽霞, 谭波, 张丽 (2024). 不同雪被处理对川西亚高山森林土壤腐殖质含量的影响. 植物生态学报, 48, 1445-1458. DOI: 10.17521/cjpe.2024.0128

Effects of different snow treatments on soil humus content in subalpine forest soils in western Sichuan, China

HUANG Wen-Lan¹, LIU Yao², JIAN Yi³, ZHANG Lin-Hui¹, CHEN Su¹, HUANG Lu-Lu¹, YU Li-Yun¹, LI Han¹,
WANG Li-Xia¹, TAN Bo¹, and ZHANG Li^{1*}

¹National Forestry and Grassland Administration Key Laboratory of Forest Resources Conservation and Ecological Safety on the Upper Reaches of the Yangtze River, Forestry Ecological Engineering in the Upper Reaches of the Yangtze River Key Laboratory of Sichuan Province, College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; ²Luzhou Forest Scientific Institute, Luzhou, Sichuan 646000, China; and ³Sichuan Academy of Forestry, Chengdu 610081, China

Abstract

Aims The reduction of snow cover may affect the organic matter turnover process in alpine forests by altering the surface hydrothermal environment and microbial activity, thereby affecting the synthesis and decomposition of soil humus.

Methods Focusing on the *Abies fargesii* var. *faxoniana* fir forest in the subalpine region of western Sichuan, three snow cover treatments were set up in field: control (natural snow cover), snow cover reduction (50% snow cover removal), and snow cover removal (100% snow cover removal). The study investigated the effect of snow cover reduction/removal on soil extractable humic substance, humic acid, fulvic acid contents, and spectroscopic characteristics of humic substances. The study further explored the dynamic correlations between different snow cover treatments and soil humus based on dynamic monitoring of environmental factors and soil physicochemical properties.

Important findings The results showed that: (1) The snow cover reduction/removal treatment significantly reduced contents of soil extractable humic substance, humic acid, and fulvic acid. (2) Soil humification was low in all three snow cover treatments, with soil humic/fulvic acid values less than 1 and humic/extractable humic

收稿日期Received: 2024-04-25 接受日期Accepted: 2024-08-23

基金项目: 四川省自然科学基金(2024NSFSC0354)和国家自然科学基金(31700542)。Supported by the Natural Science Foundation of Sichuan Province (2024NSFSC0354) and the National Natural Science Foundation of China (31700542).

* 通信作者Corresponding author (14046@sicau.edu.cn)

substance values less than 0.5. (3) Correlation analysis showed that total nitrogen content was negatively correlated with contents of soil extractable humic substance, humic acid, and fulvic acid. In summary, the snow cover reduction/removal treatments reduced soil humus content and affected the degree of soil humification. These results could facilitate an in-depth understanding of the formation of soil humus and the mechanisms of soil fertility maintenance in subalpine forests.

Key words humus; humic acid; fulvic acid; snow cover; subalpine forest

Huang WL, Liu Y, Jian Y, Zhang LH, Chen S, Huang LL, Yu LY, Li H, Wang LX, Tan B, Zhang L (2024). Effects of different snow treatments on soil humus content in subalpine forest soils in western Sichuan, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 48, 1445-1458. DOI: 10.17521/cjpe.2024.0128

土壤腐殖质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, 是土壤的重要组成部分(卫芯宇等, 2018; 郑延云等, 2019), 在改善土壤团粒结构、维持和提高土壤肥力、环境解毒等方面均有重要作用(Serudo et al., 2007)。森林土壤腐殖化过程中腐殖质的累积是土壤形成和碳吸存的重要途径, 腐殖质在森林养分循环和平衡中具有重要作用(潘根兴等, 2019; 王慧等, 2020)。因此, 了解森林土壤腐殖质的组成及其影响因素, 对调节森林土壤碳平衡、提高土壤肥力等具有重要意义。

全球雪被格局已随着气候变化发生了显著的改变, 北半球的积雪范围和积雪厚度减少更为明显(IPCC, 2021)。雪被的减少和消除可能会改变地表水热环境及分解者活性, 从而影响高寒森林凋落物分解过程及养分周转, 进而影响土壤腐殖质的形成与分解过程(Wu et al., 2010; Berg, 2014)。雪被的变化对土壤温湿度和冻融循环频率有着重要的影响(Isobe et al., 2018)。研究表明去除雪被后土壤温度明显下降且波动较大, 冻融循环更加显著(Tan et al., 2010)。冬季更为频繁的冻融循环易破坏土壤和凋落物中微生物及动植物残体的细胞(邓仁菊等, 2010), 其释放的碳和养分为存活的微生物提供了有效基质, 提高了土壤养分的有效性和微生物活性(卫芯宇等, 2019)。同时, 雪被的减少或消融也会对土壤温湿度等特性造成影响, 长时间强烈的冻融作用也可能抑制腐殖质的积累, 促进已有腐殖质的降解(卫芯宇等, 2018), 甚至使其发生矿化(Wei et al., 2020)。此外, 较厚的雪被还可以影响土壤水分条件, 能为冬季生物的生长过程提供水分和能量(杨玉莲等, 2012), 并对下一阶段微生物活性产生延续的影响(Wipf & Rixen, 2010), 从而影响腐殖质的形成与分解过程。其次, 森林土壤中腐殖质主要来源于凋落叶分解中的难降解物质和微生物残体的腐烂(Zanella et al., 2018), 雪被融化时的淋溶作用能造

成凋落叶中的可溶性物质大量流失从而影响腐殖质的积累与形成。因此, 雪被减少或消除会改变土壤微环境, 使得相关微生物和酶活性发生变化, 土壤腐殖质含量也随着生物与非生物因子的改变而发生变化。

川西亚高山森林在区域气候调节、水土保持以及指示全球气候变化等方面具有不可替代的重要作用(Ni et al., 2015; 谭羽等, 2017), 该地区冬季寒冷漫长, 雪被覆盖期长达5–6个月(徐李亚等, 2014)。频繁的地质灾害和常年低温导致该地区土壤发育缓慢, 森林生产力更加依赖于富含大量腐殖质的土壤有机质层(倪祥银等, 2014a)。因此, 了解亚高山森林雪被减少对土壤腐殖质的影响具有重要意义, 同时也可以为亚高山森林的可持续经营与管理提供一定的参考。本研究以川西亚高山岷江冷杉(*Abies fargesii* var. *faxoniana*)原始林为研究对象, 借助野外雪被控制实验, 设置对照(自然雪被)、雪被减少(雪被去除50%)和雪被去除(雪被去除100%) 3个雪被水平, 研究不同雪被处理对土壤腐殖质的影响, 结合动态监测的环境因子和土壤理化性质, 探讨雪被减少/去除处理与土壤腐殖质的动态关联, 为进一步揭示气候变暖下川西亚高山森林养分循环提供一定的科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区域位于四川省阿坝藏族羌族自治州理县毕棚沟高山森林生态系统定位研究站(31.23° N, 102.88° E, 3 579–3 582 m), 地处四川盆地西缘与青藏高原东缘的过渡带。年平均气温2.7 °C, 年降水量约850 mm。土壤季节性冻融从每年11月开始, 次年4月结束, 降雪从11月下旬开始, 雪被覆盖期从12月下旬延续至次年3月, 直至4月开始融化, 土壤冻结时长约120天(Wu et al., 2010)。同期研究表明, 对

照、雪被减少和雪被去除处理下冬季冻融循环次数分别为1.33、9.50和32.33次·d⁻¹; 雪被形成前期的土壤表层温度分别为-0.24、-1.12和-1.03 °C (Yang et al., 2021)。森林植被主要乔木有岷江冷杉(*Abies fargesii* var. *faxoniana*)、方枝柏(*Juniperus saltuaria*)、四川红杉(*Larix mastersiana*)等, 林下灌木主要有康定柳(*Salix paraplesia*)、高山杜鹃(*Rhododendron lapponicum*)等, 草本植物主要有蟹甲草(*Parasenecio forrestii*)和高山冷蕨(*Cystopteris montana*)等, 土壤为雏形土(Yang et al., 2021)。

1.2 样地设置

2018年9月, 在海拔3 579 m的120–150年成熟原始岷江冷杉林内随机选取5个20 m × 20 m地势平坦(坡度<5°), 冠层和郁闭度相似的样地, 作为重复, 样地间距大于100 m。每个样地内设置3个4 m × 4 m的样方, 分别为对照、雪被减少和雪被去除, 样方间距大于10 m, 共15个样方。通过搭建梯形遮雪棚(底面积2 m × 2 m, 一边高1.5 m, 另一边高2 m), 在雪棚的顶部按南北方向安装垂直切割的PVC管进行雪被减少和雪被去除处理。其中, 在雪被去除样方内的雪棚顶部用PVC管全部平铺进行遮盖, 以去除100%降雪; 雪被减少样方的雪棚顶部用PVC管间隔平铺进行遮盖, 以减少50%降雪(Yang et al., 2021; Du et al., 2024)。PVC管在每年的冬季初期安装, 在生长季初期撤除, 以允许生长季的降水 and 新鲜凋落物进入样方(Yang et al., 2021)。在每种雪被处理下随机放置3枚纽扣式温度传感器(iButton DS1921G, Maxim/Dallas Semiconductor, Sunnyvale, USA), 连续监测土壤温度, 每1 h记录一次。由此计算3种雪被处理下土壤温度、冻融循环次数(温度高于或低于0 °C持续3 h及以上直至其低于或高于0 °C记为1次冻融循环) (Konestabo et al., 2007; 倪祥银等, 2014b)。

每个样方内再设置1个1 m × 1 m的小样方进行土柱原位培养。为了保持土柱中土壤的均匀性, 将15个样地中有机质层(约10 cm)和矿物质层(约10 cm)土壤取出后分别混合, 再将矿物质层土和有机质层土依次装入PVC管(长30 cm, 直径10 cm)中, 装入时尽可能保持原样, 不进行人工压实。同时, 将之前从各小样方内移除的新鲜凋落物(按面积换算)平铺于PVC管土壤表面。所有PVC管底部和顶部用0.05 mm尼龙网包裹, 以保护土壤不从土芯中漏掉,

又能保证PVC管中渗滤液流过土壤。每根PVC管的管壁留有小孔(孔径为2 mm, 数量为100孔), 允许外界的根、中小型土壤动物和微生物等进入。将PVC管置于小样方正中, 以减少冬季降雪随风等外力因素进入小样方内, PVC管顶部与地面齐平, 间距约10 cm。各小样方至实验开始前保持不动, 使其尽可能恢复自然状态(Yang et al., 2021)。此次实验涉及30根PVC管(2次/年×1年×15个小样方)。

1.3 样品采集与处理

于2022年4月(雪被融化期, snow cover melting stage)和10月(雪被形成前期, early stage of snow cover)进行样品采集(倪祥银等, 2014a)。值得注意的是, 在雪被融化期采样结束后, 对照和雪被减少处理中冬季积雪并未完全融化, 仍存在雪被覆盖情况。在生长季节, 各样方均无雪被覆盖。每次采集对照、雪被减少和雪被去除样地内完整的PVC管各1个, 共计15个(3处理×5重复)土壤样品。将收集的土壤样品用冰盒保存并立即带回实验室。剔除土壤中的碎石、植物根和凋落物后, 过2 mm的筛, 一部分放4 °C的冰箱用于新鲜样品指标的测定; 一部分土壤样品用真空冷冻干燥机(LC-10N-50B, 上海力辰邦西仪器科技有限公司, 上海)制成冻干土, 研磨, 过0.25 mm筛, 用于测定土壤腐殖质含量、光谱学特性及土壤有机碳、全氮、全磷含量等; 称取部分冻干土, 用于测定土壤样品的含水量: 称取冻干土壤样品(0.50 ± 0.01) g于铝盒中, 烘箱105 °C烘48 h, 测定烘干后的土壤质量。所有数值均以冻干样品的干质量计算。

1.4 指标测定

pH采用电位法(水土体积比2.5:1)测定, 土壤有机碳含量采用重铬酸钾外加热法测定; 土壤全氮含量采用凯氏定氮法测定, 土壤全磷含量采用钼锑抗比色法测定, 700 nm波长测定吸光值(鲁如坤, 1999; 贾培龙等, 2020)。

土壤可提取腐殖质和胡敏酸的提取和分离参考《中华人民共和国林业行业标准 LY/T1238–1999》。称取处理后的冻干土壤样品0.50 g于150 mL锥形瓶中, 加入100 mL 0.1 mol·L⁻¹ NaOH和Na₄P₂O₇·10 H₂O混合提取液, 将锥形瓶密封振荡10 min, 沸水浴1 h, 待冷却后过滤, 再过0.45 μm滤膜, 滤液即为待测液。取待测液20 mL于试管中, 用H₂SO₄分离, 得到的胡敏酸沉淀用热NaOH溶液洗

涤溶解, 滤液用于测定胡敏酸含量(卫芯宇等, 2019)。采用TOC分析仪(Multi N/C 2100, Analytik Jena AG, Jena, Germany)测定待测液中有机碳含量, 用于计算 A_{600}/C 值, 其中的 A_{600} 为600 nm处吸光值, C 表示每1 mL待测液中有机碳的含量。使用公式(1)和(2)计算可提取腐殖质和胡敏酸含量(Gigliotti et al., 1999)。以每次测定可提取腐殖质、胡敏酸浓度与稀释倍数以及测定时土壤用量的比值表示土壤中真实的可提取腐殖质及胡敏酸含量。富里酸含量采用公式(3)计算。胡敏酸/富里酸表示胡敏酸和富里酸累积的相对快慢程度, 胡敏酸/可提取腐殖质表示腐殖质的腐殖化程度和腐殖品质, 分别采用公式(4)和(5)计算。待测液使用紫外可见光谱分析仪(TU-1901, 普析, 北京)测定特定波长吸光值, 使用公式(6)和(7)计算色调系数和光密度值(Abakumov et al., 2013; 刘谣等, 2022), 并采用Ikeya改良的kumada分类方法对土壤腐殖质进行分类(Ikeya & Watanabe, 2003)。

$$C_{HS} (g \cdot kg^{-1}) = (NPOC \times 0.1 \times \text{稀释倍数}) / (m \times k) \quad (1)$$

$$C_{HA} (g \cdot kg^{-1}) = (NPOC \times 0.1 \times \text{稀释倍数} \times \text{分取倍数}) / (m \times k) \quad (2)$$

$$C_{FA} (g \cdot kg^{-1}) = C_{HS} - C_{HA} \quad (3)$$

$$HA/FA = C_{HA}/C_{FA} \quad (4)$$

$$PQ = C_{HA}/C_{HS} \quad (5)$$

$$\Delta \log K = \log (A_{400}/A_{600}) \quad (6)$$

$$E_4/E_6 = A_{465}/A_{665} \quad (7)$$

式中, C_{HS} 、 C_{HA} 、 C_{FA} 分别为可提取腐殖质、胡敏酸和富里酸的含量。NPOC为TOC分析仪测出的浓度值, 0.1为浸提液体积, m 为称取样品的干质量, k 为水分转化系数。HA/FA为胡敏酸/富里酸。PQ为胡敏酸/可提取腐殖质。 $\Delta \log K$ 为色调系数, E_4/E_6 为光密度值。 A_{400} 、 A_{600} 、 A_{465} 和 A_{665} 分别为400、600、465和665 nm处吸光值。

色调系数、光密度值以及 A_{600}/C 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(Ikeya & Watanabe, 2003)。色调系数值越大, 光密度值越高, A_{600}/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, 腐殖化程度越低。

1.5 数据统计与分析

采用双因素重复测量方差分析检验土壤层次、采

样时间和雪被处理对土壤环境因子、土壤理化性质、腐殖质含量和光谱学特性等指标的影响。当交互作用显著时, 进一步采用简单效应分析同一土层同一时间不同处理或同一土层同一处理不同时间或同一时间同一处理不同土层之间的差异。当交互作用不显著时, 采用主效应分析。主效应之间的差异使用最小显著差异(LSD)法进行多重比较, $p < 0.05$ 为差异具有统计学意义。采用Pearson相关性分析研究环境因子、土壤理化性质与腐殖质含量和光谱学特性之间的相关关系。数据分析均在SPSS 27.0和R 4.2.2软件中进行, 使用R 4.2.2进行图形绘制。

2 结果

2.1 不同雪被处理对土壤理化性质的影响

不同处理和土层间土壤含水率变化幅度在15.13%–73.11%之间(图1A)。双因素重复测量方差结果显示, 土壤含水率受土层、时间、处理以及土层和时间、土层和处理交互作用的影响(表1)。与矿物质层相比, 有机质层的土壤含水率更高(表1; 图1A)。在有机质层中, 雪被去除处理显著降低了土壤含水率; 而雪被融化期的土壤含水率显著高于雪被形成前期(表1; 图1A)。不同处理和土层间pH变化幅度在3.89–5.59之间(图1B)。土壤有机质层的pH低于矿物质层, 表现出更强的酸性(图1B)。pH受土层、时间和处理交互作用的影响(表1)。简单效应分析显示, 雪被去除显著增加了矿物质层土壤的pH, 雪被减少和雪被去除处理显著降低了两个土层雪被形成前期的pH(图1B)。

不同处理和土层间土壤有机碳含量变化幅度为23.79–133.00 $g \cdot kg^{-1}$; 全氮含量变化幅度为1.41–7.10 $g \cdot kg^{-1}$; 全磷含量变化幅度为0.34–0.81 $g \cdot kg^{-1}$ (图1C–1E)。有机碳、全氮和全磷含量受到土层主效应的影响, 在有机质层中均显著高于矿物质层(表1; 图1C–1E)。另外, 有机碳含量还受处理、土层和时间、土层和处理交互作用的影响, 全氮含量受时间、处理以及土层和时间、土层和处理交互作用的影响, 全磷含量受时间以及土层和时间交互作用的影响(表1)。有机质层土壤的有机碳、全氮和全磷的含量受时间的主效应影响, 主要表现为在雪被融化期的含量显著高于雪被形成前期; 有机碳和全氮含量受处理的主效应影响, 雪被减少显著增加了有机碳含量, 而雪被去除则显著降低了全氮的含量(图1C–1E)。

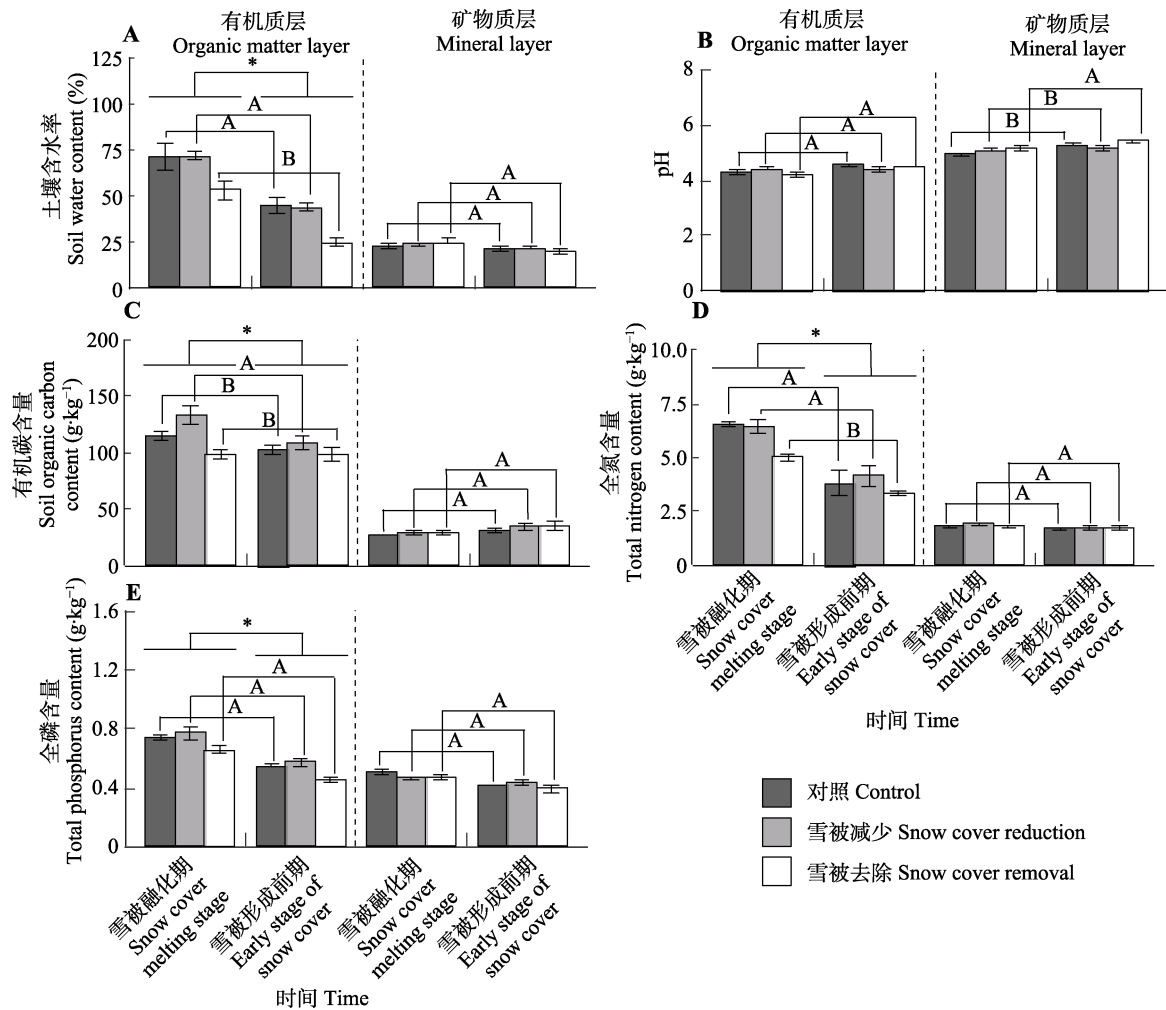


图1 不同雪被处理对川西亚高山森林土壤含水率(A)、pH(B)、土壤有机碳(C)、全氮(D)和全磷(E)含量的影响(平均值±标准差, $n = 5$)。*表示在同一土层中不同时间主效应差异显著($p < 0.05$)。不同大写字母表示同一土层不同处理间主效应差异显著($p < 0.05$)。
Fig. 1 Effects of different snow treatments on soil moisture content (A), pH (B), soil organic carbon (C), total nitrogen (D), and soil total phosphorus (E) contents in subalpine forests in western Sichuan (mean \pm SD, $n = 5$). * indicate significant differences in main effects at different times in the same soil layer ($p < 0.05$). Different uppercase letters indicate significant differences in main effects between treatments at the same soil layer ($p < 0.05$).

2.2 不同雪被处理对土壤腐殖质含量和稳定性的影响

结果表明, 土壤可提取腐殖质、胡敏酸和富里酸含量均受土层的主效应影响, 表现为有机质层显著高于矿物质层(表1; 图2A–2C)。另外, 土壤可提取腐殖质和富里酸含量还受时间、处理以及土层和时间、土层和处理交互作用的影响, 而胡敏酸含量受土层、时间和处理三者交互作用的影响(表1)。在有机质层中, 可提取腐殖质和富里酸含量在雪被融化期显著高于雪被形成前期, 且雪被去除显著降低了两者含量(图2A、2C)。简单效应分析显示, 胡敏酸含量在两个土层中均表现为雪被融化期显著高于雪被形成期。在有机质层中, 雪被去除和雪被减少显著降低了雪被融化期的胡敏酸含量; 在雪被形成

前期, 雪被减少显著增加了胡敏酸含量而雪被去除则显著降低了胡敏酸含量(图2B)。

胡敏酸/富里酸受土层、时间、处理以及土层和时间、土层和处理、时间和处理交互作用的影响(表1)。在有机质层中, 雪被融化期的胡敏酸/富里酸显著低于雪被形成前期。在两个土层, 雪被去除均降低了胡敏酸/富里酸(图2D)。胡敏酸/可提取腐殖质受土层、处理以及土层和时间交互作用的影响(表1)。在有机质层中, 胡敏酸/可提取腐殖质在雪被融化期显著低于雪被形成前期(图2E)。

色调系数、光密度值和 A_{600}/C 均受时间以及土层和时间交互作用的影响, 此外, 色调系数和 A_{600}/C 还受到土层的影响(表1)。有机质层的色调系数和 A_{600}/C 均表现为雪被融化期显著高于雪被形成前期,

表1 土层和雪被处理对不同采样时间土壤理化性质、腐殖质和光学特性的影响
Table 1 Effects of soil layer and snow treatment on soil physicochemical properties, humic substances, and optical properties at different sampling times

方差来源 Source of variance	df	F											
		土壤含水率 Soil water content	pH	有机碳含量 Soil organic carbon content	全氮含量 Total nitrogen content	全磷含量 Total phosphorus content	可提取腐殖质含量 Extractable humus content	胡敏酸 Humic acid content	富里酸 Fulvic acid content	胡敏酸/富里酸 Humic acid/fulvic acid	胡敏酸/可提取腐殖质 Humic acid/extractable humus	色调系数 Hue coefficient	光密度值 Optical density value
土层 Soil	1	330.1***	ns	10.2**	8.0**	69.6***	1 681.1***	1 003.7***	14.7***	44.3***	11.1***	35.8***	ns
时间 Time	1	57.0***	ns	ns	43.2***	244.3***	20.2***	ns	26.6***	6.4*	ns	26.1***	19.9***
处理 Treat	2	15.0***	4.6*	1 536.5***	585.2***	ns	36.6***	44.0***	1 098.1***	228.8***	67.1***	ns	ns
土层×时间 Soil × time	1	37.5***	5.1*	8.5**	36.6***	43.2***	7.2*	ns	12.5**	29.2***	9.9*	31.9***	5.1*
土层×处理 Soil × treat	2	14.9***	4.6*	10.8***	7.7**	ns	27.2***	30.1***	11.5***	10.1**	ns	ns	ns
时间×处理 Time × treat	2	ns	ns	ns	ns	ns	ns	5.9*	ns	6.9*	ns	ns	ns
土层×时间×处理 Soil × time × treat	2	ns	399.3***	ns	ns	ns	3.4*	5.2*	ns	ns	ns	ns	ns

ns, $p > 0.05$; *, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$; ***, $p < 0.001$.

而矿物质层的光密度值则表现为雪被融化期显著低于雪被形成前期(图2F–2H)。有机质层和矿物质层土壤中腐殖质类型均为年轻的Rp型(不稳定),雪被处理对土壤中腐殖质的类型无显著影响(图3)。

2.3 不同雪被处理下土壤腐殖质与理化性质的相关性

在雪被融化期,有机质层的可提取腐殖质和富里酸含量与土壤有机碳和全氮含量显著正相关,与冻融循环次数显著负相关。胡敏酸含量、胡敏酸/富里酸和胡敏酸/可提取腐殖质与全氮含量、全磷含量、pH和土壤温度显著正相关,与冻融循环次数显著负相关;而光密度值则表现出相反的趋势(图4A)。A₆₀₀/C与全氮和全磷含量显著正相关(图4A)。在矿物质层中,胡敏酸含量、胡敏酸/富里酸和胡敏酸/可提取腐殖质也与冻融循环次数显著负相关(图4B)。

在雪被形成前期,有机质层的胡敏酸含量和胡敏酸/富里酸均与全磷含量和pH显著正相关,而与土壤温度显著负相关;胡敏酸/可提取腐殖质也与全磷含量显著正相关。可提取腐殖质含量和富里酸含量与全氮含量和pH显著正相关,与土壤温度显著负相关。色调系数与土壤有机碳和全氮含量显著正相关,A₆₀₀/C与全氮含量显著正相关而与土壤含水量显著负相关(图4C)。在矿物质层,可提取腐殖质、胡敏酸和富里酸含量均与全氮含量和pH显著正相关。另外,A₆₀₀/C与全氮含量显著正相关(图4D)。

3 讨论

3.1 不同雪被处理对土壤腐殖质含量的影响

全球气候变化引起的冬季变暖和极端气候事件正在改变冬季积雪格局,预计到21世纪末积雪将减少25%(IPCC, 2021)。这种减少通过影响土壤微生物含量、温度、含水量、凋落叶分解等影响腐殖质分解与合成(倪祥银等, 2014b)。本研究发现,雪被形成前期的土壤可提取腐殖质含量显著低于雪被融化期(图2A)。这可能是由于生长季新鲜凋落物的输入为微生物提供了良好的底物有效性,在一定程度上加剧土壤腐殖质的矿化作用(卫芯宇等, 2021; 刘瑶等, 2022)。另外,生长季节的生物化学过程也会受季节性雪被的介导。研究表明,生长季初期的积雪融化增加了土壤的湿度,融雪水的淋溶作用也使得

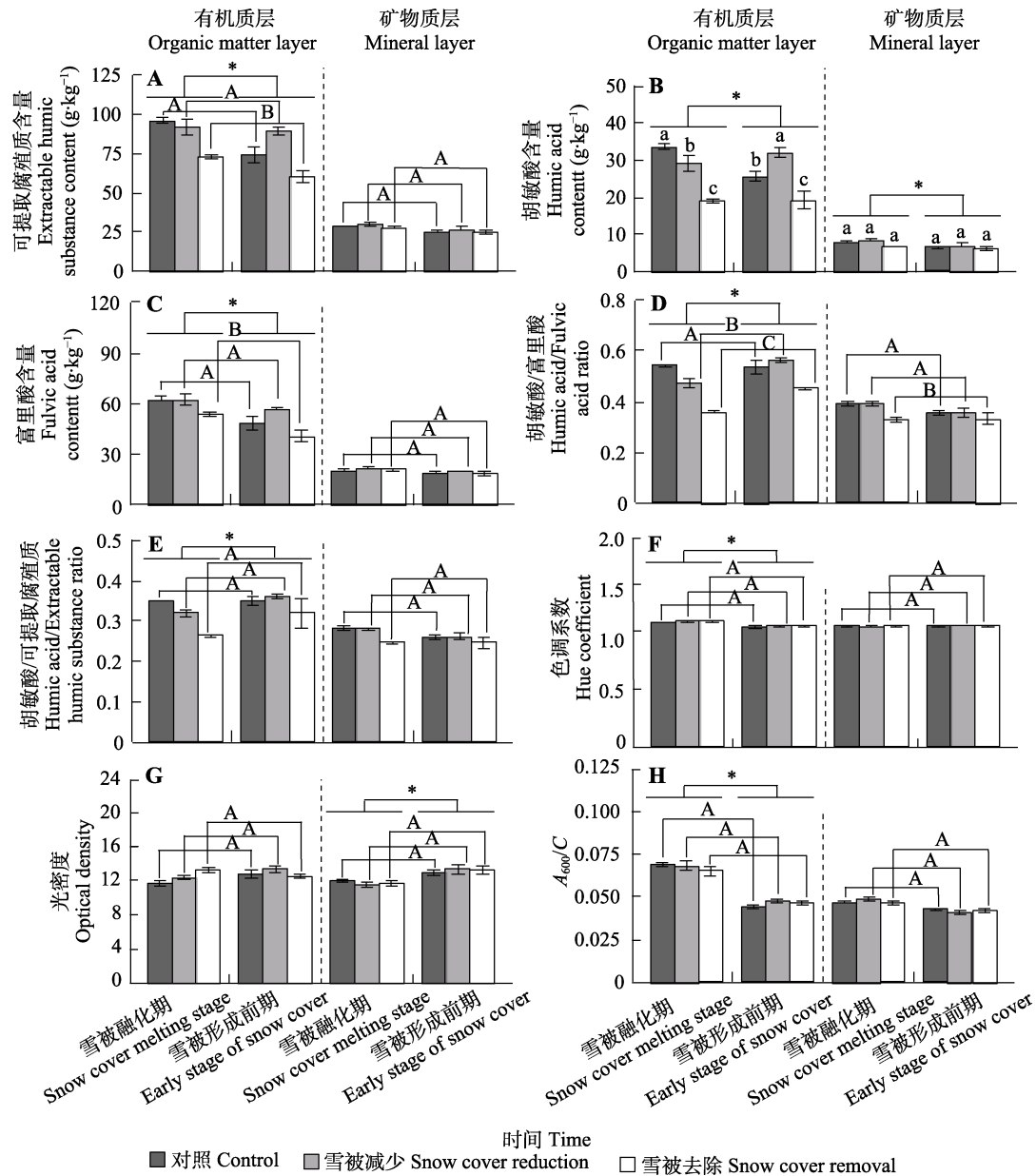


图2 不同雪被处理对川西亚高山森林土壤可提取腐殖质含量(A)、胡敏酸含量(B)、富里酸含量(C)、胡敏酸/富里酸(D)、胡敏酸/可提取腐殖质(E)、色调系数(F)、光密度值(G)和 A_{600}/C (H)的影响(平均值 \pm 标准差, $n = 5$)。*表示在同一土层中不同时间主效应之间的差异显著($p < 0.05$)。不同大写字母表示同一土层不同处理间主效应差异显著($p < 0.05$)。不同小写字母表示同一土层相同时间下不同处理间简单效应差异显著($p < 0.05$)。

Fig. 2 Effects of different snow treatments on soil extractable humus content (A), humic acid content (B), fulvic acid content (C), humic acid/fulvic acid (D), humic acid/extractable humus (E), hue coefficient (F), optical density value (G), and A_{600}/C (H) in subalpine forest soils in western Sichuan (mean \pm SD, $n = 5$). * indicating significant differences in main effects at different times in the same soil layer ($p < 0.05$). Different uppercase letters indicate significant differences in main effects between treatments at the same soil layer ($p < 0.05$). Different lowercase letters indicate significant differences in simple effects between treatments at the same time and soil layer ($p < 0.05$).

凋落叶中的可溶性物质大量流失, 从而增加微生物活性并促进凋落物分解(Brooks et al., 1996; Li et al., 2016)。由于针叶凋落物含有较多的萜类化合物和酚类物质, 容易形成酸性物质(Shen & Bartha, 1997; Kreyling et al., 2013), 这不仅不利于微生物途径的

腐殖质合成, 还刺激了土壤中原来的土壤腐殖质的分解或矿化(Kuzyakov, 2010; Cotrufo et al., 2013)。相关研究也表明土壤腐殖质质量损失可能发生在春季融化期, 而不是冬季(Venn & Thomas, 2021)。同时, 生长季气温回暖可能使土壤微生物变

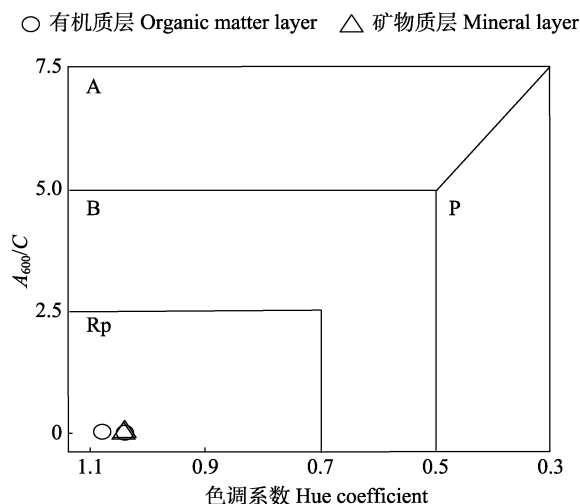


图3 川西亚高山森林不同土层的腐殖质类型。腐殖质稳定性: $A > B > P > R_p$ 。数值为各采样日期平均值。

Fig. 3 Kumuda type of humic substances in different soil layers in subalpine forest in western Sichuan. Stability of humic substances: $A > B > P > R_p$. Values are averaged across sampling dates.

得更加活跃, 并进一步促进凋落物分解加快(Brooks et al., 1996; Li et al., 2016)。综上所述, 经过生长季土壤腐殖质的分解过程, 雪被形成前期的土壤腐殖质含量显著低于雪被融化期。

腐殖质的形成和降解主要取决于微生物的活动(Cotrufo et al., 2013), 不同雪被处理下土壤微生物群落的活性和生态功能存在差异, 这可能会影响土壤腐殖质的合成与降解。不同厚度的雪被对土壤理化性质和微生物底物特性(Wipf & Rixen, 2010)产生的影响具有明显的季节遗留效应(Haei et al., 2013; Ladwig et al., 2016), 并对下一阶段微生物活性产生延续的影响, 从而影响生长季的森林生态系统过程(Withington & Sanford Jr, 2007)。本研究发现, 雪被去除处理降低了有机质层的可提取腐殖质含量, 雪被形成前期的对照、雪被减少和雪被去除处理的可提取腐殖质含量较雪被融化期分别降低了22.74%、0.49%和17.34% (图2A)。一方面, 厚雪被强烈的淋溶作用促使对照组腐殖质分解量最高, 而雪被减少处理下调落叶受淋溶作用较弱从而残留更多的溶解性组分, 增加了微生物底物有效性(Stevenson, 1995), 因此微生物可络合更多的难降解物质为腐殖质高聚合物(Ponge, 2013)。相关性分析(图4C)表明, 可提取腐殖质含量与土壤温度负相关, 而雪被减少处理下雪被形成前期的土壤平均温度低于其他处理, 所以雪被减少处理下腐殖质含量变化较小。另一方面,

雪被的减少会增加土壤冻融循环的次数, 从而引起雪被融化后生长季的地表和土壤中动植物残体的机械破碎和微生物残体细胞释放养分, 为存活的微生物在生长季提供了有效基质(王程栋等, 2019; 陈子豪等, 2020)。同时, 雪被减少使土壤温度下降, 导致了冬季大量微生物死亡, 细胞破裂释放的营养物质可促进生长季微生物的生长(邓仁菊等, 2010)。而厚雪被覆盖在土壤表面具有维持凋落叶分解和腐殖化微环境的相对稳定性作用, 促进了土壤动物的取食和微生物活性(谭波等, 2012; 谭羽等, 2017), 为维持相对较高的土壤酶活性创造了有利条件, 有利于腐殖质的积累(Venn & Thomas, 2021)。另外, 雪被去除也增加了土壤冻融循环的次数, 强烈的冻融循环可能破坏新形成的腐殖质结构并导致其降解(卫芯宇等, 2018), 可能导致已形成的腐殖质发生矿化(Wei et al., 2020), 相关性分析也表明土壤可提取腐殖质含量与冻融循环次数显著负相关(图4A)。同时, 雪被去除处理导致的雪被融化时间提前也加快了微生物对底物的消耗, 而复苏植物与微生物的竞争作用也可能限制了微生物的生长和繁衍(牛佳等, 2011), 从而导致土壤的微生物生物量降低(杨玉莲等, 2012), 不利于腐殖质的积累。

胡敏酸和富里酸是土壤腐殖质的重要组成部分(党亚爱等, 2012; 王维等, 2017)。在本研究中, 富里酸含量高于胡敏酸含量(图2B、2C), 与Ni等(2016)的研究相同。这可能与胡敏酸和富里酸的转化或腐殖质合成中富里酸的优先合成有关(窦森等, 2016)。已有研究表明低温会限制微生物活性, 导致土壤中难降解物质增加, 有利于富里酸的形成(刘育红和裴海昆, 2004; Wang et al., 2019)。亚高山森林全年温度较低, 冬季漫长, 其特殊的气候为富里酸的形成创造了有利的条件。因此, 本研究中富里酸是土壤腐殖质的主要成分, 3种雪被处理均表现为富里酸型土壤。另外, 与土壤可提取腐殖质含量的变化趋势类似, 雪被去除显著降低了有机质层富里酸和胡敏酸的量(图2C)。可能是由于雪被去除使得土壤温度波动较大, 长时间的低温降低了微生物活性, 甚至加速了微生物死亡(Comerford et al., 2013; Tan et al., 2019), 导致土壤胡敏酸和富里酸合成下降。其次, 强烈的冻融循环可能破坏新形成的腐殖质结构并导致其降解(窦森等, 2010), 而且雪被去除下已经形成的腐殖质也可能发生矿化(Zeng et al., 2010; Shibata

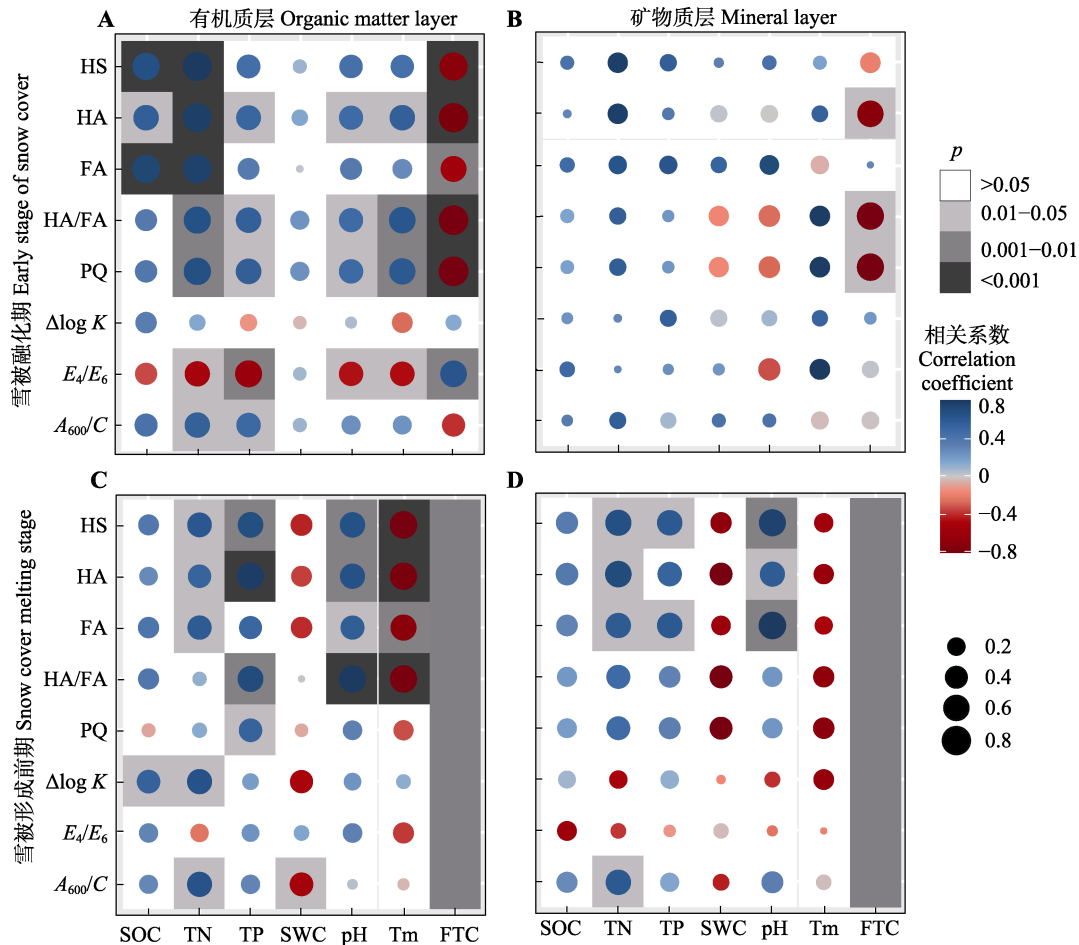


图4 川西亚高山森林土壤腐殖质在雪被融化期(A、B)、雪被形成前期(C、D)分别与理化性质的相关关系。圆形点的大小展示相关系数的大小, 颜色用来表示相关系数的正负, 正方形的色块用来表示相关性检验的 p 值。 E_4/E_6 , 光密度值; FA, 富里酸含量; FTC, 冻融循环次数; HA, 胡敏酸含量; HA/FA, 胡敏酸/富里酸; HS, 可提取腐殖质含量; PQ, 胡敏酸/可提取腐殖质; SOC, 土壤有机碳含量; SWC, 土壤含水率; Tm, 温度; TN, 全氮含量; TP, 全磷含量; $\Delta\log K$, 色调系数。

Fig. 4 Soil humus was correlated with physical and chemical properties during the snow melting period (A, B) and early snow formation period (C, D) in subalpine forests in western Sichuan. The size of the circular dot is used to show the strength of the correlation, color is used to represent the positive and negative correlation coefficients, and the color block of the square is used to represent the p -value of the correlation test. E_4/E_6 , optical density value; FA, fulvic acid content; FTC, freeze-thaw cycle; HA, humic acid content; HA/FA, humic acid /fulvic acid; HS, extractable humic substance content; PQ, humic acid/extractable humic substance; SOC, soil organic carbon content; SWC, soil water content; Tm, temperature; TN, total nitrogen content; TP, total phosphorus content; $\Delta\log K$, hue coefficient.

et al., 2013), 因此导致胡敏酸、富里酸降解量增加。从时间上来看, 雪被形成前期的富里酸含量在减少, 对照、雪被减少和雪被去除处理下分别减少了22.19%、6.60%和23.73%。而胡敏酸含量则不同, 除对照组较雪被形成前期减少了23.69%, 雪被减少和雪被去除组都分别增加了12.90%和0.11% (图2B、2C)。相关性分析表明, 胡敏酸含量在雪被融化期与土壤温度显著正相关, 在雪被形成前期显著负相关 (图4A、4C)。生长季期间更有利于胡敏酸的合成和富里酸的分解。其中, 对照组的富里酸分解最多, 与倪祥银等(2014a)的研究相似, 温度回暖的雪被融化

期, 对照组厚雪被强烈的淋溶作用可能促进新形成的酸溶性富里酸的流失(Adani et al., 2007)。

3.2 不同雪被处理对土壤腐殖质稳定性的影响

胡敏酸/可提取腐殖质以及胡敏酸/富里酸是表征土壤腐殖化程度的基本指标, 也是衡量土壤腐殖质稳定程度的重要参数(褚慧等, 2013)。一般认为胡敏酸/富里酸和胡敏酸/可提取腐殖质越大, 腐殖质的品质就越好, 土壤腐殖化程度则越高(张日升等, 2020)。本研究中胡敏酸/富里酸比值均小于1, 胡敏酸/可提取腐殖质均小于0.5, 说明该区域土壤腐殖化程度较低。同时, 土壤腐殖质的类型始终是最为

活跃的Rp型(图3), 说明土壤腐殖质是处于动态变化的过程, 一直处于较为活跃的状态。此外, 本研究表明雪被形成前期的土壤胡敏酸/富里酸和胡敏酸/可提取腐殖质比值显著高于雪被融化期(图2D、2E)。同时, 雪被去除降低了胡敏酸/可提取腐殖质比值, 可能因为雪被去除处理显著降低了土壤可提取腐殖质和富里酸的含量, 而胡敏酸含量变化较小(图2A–2C)。一方面雪被去除导致频繁冻融使得腐殖质结构破坏更利于腐殖质的分解, 所以土壤冻融循环越频繁越不利于土壤腐殖质的累积(Zeng et al., 2010; Wei et al., 2020)。相关分析也表明冻融循环次数与土壤可提取腐殖质、富里酸、胡敏酸以及胡敏酸/富里酸和胡敏酸/可提取腐殖质显著负相关(图4)。另一方面可能是因为针叶林凋落物含有较多油脂、木质素、酚类等难分解物质(贾树海等, 2017), 易在分解中引起土壤酸化, 酸性环境更有利于富里酸的合成(窦森等, 2010), 所以土壤中胡敏酸/富里酸值较低。另一方面, 冬季寒冷环境会降低微生物活性, 进而影响土壤腐殖质的积累(Comerford et al., 2013; Tan et al., 2019)。再者, 生长季的高温有利于胡敏酸的形成(窦森等, 2010), 不利于富里酸的形成。而土壤胡敏酸的分子结构较富里酸更稳定(窦森等, 2010), 随着生长季土壤有机物质的不断分解, 稳定性组分只有在不稳定组分被土壤微生物消耗完时才有可能被微生物利用(潘根兴等, 2019)。生长季利于胡敏酸的形成和富里酸的消耗, 与前文胡敏酸/富里酸的变化过程相似。所以雪被形成前期的胡敏酸/富里酸和胡敏酸/可提取腐殖质比值要高于雪被融化期。

腐殖质的光密度值在一定程度上反映了其分子的复杂程度, 色调系数越大, 光密度值越高, A_{600}/C 越低, 光密度愈小, 芳香缩合度低, 说明其分子结构越简单(Richard et al., 2008)。在有机质层中色调系数在雪被融化期显著高于雪被形成前期, 而光密度值则相反(图2F、2H), 说明经过一个生长季的分解, 雪被形成前期的腐殖质结构比雪被融化期简单, 低温潮湿的环境在一定程度上促进了土壤腐殖化程度的增加。另外, 与前人的研究(谭羽等, 2017)一致, 冻融循环次数增加也在一定程度上促进了腐殖化程度的降低(图4A、4B)。

3.3 不同雪被处理对腐殖质调控因子的影响

土壤腐殖质的组成和性质随生物气候环境条件

的不同有所不同, 至今关于森林土壤腐殖质的研究已全面开展, 多集中于森林类型、地形因子、土壤类型等对腐殖质组成影响等方面, 其中土壤腐殖质的特征与其他生化特性密切相关(Bokhorst et al., 2012; Zhao et al., 2016; 王慧等, 2020)。本研究发现土壤基质质量是影响土壤腐殖质合成的主要因素, 其中pH、土壤有机碳、全氮和全磷含量的增加促进了土壤腐殖质的积累(图4)。雪被去除降低了土壤全氮和腐殖质的含量, 同时相关性分析表明全氮含量的增加促进了土壤腐殖质的积累(图4)。这可能因为全氮含量较高的腐殖质有利于提高土壤氮含量, 从而促进微生物活性, 加速微生物对土壤腐殖质的合成, 同时也为腐殖质合成提供了氮源(林春英等, 2022)。同时, 温度是影响土壤微生物活性的重要因素(Bokhorst et al., 2012; Zhao et al., 2016), 主导胡敏酸和富里酸合成的微生物不同, 对温度的敏感性也不同(Lipson et al., 2000)。温度升高时, 更有利于胡敏酸的合成, 而低温更有利于富里酸的累积。雪被厚度变化对土壤温度、湿度和冻融循环频率有着重要影响。雪被的减少或者消除会降低土壤温度, 无雪被覆盖下土壤温度波动也较大, 使得土壤微生物在低温下大量死亡, 从而影响腐殖质的合成, 使得腐殖质含量下降(邓仁菊等, 2010)。研究表明, 雪被减少导致频繁的冻融循环可能破坏土壤腐殖质结构(Zeng et al., 2010; Wei et al., 2020), 造成腐殖质的降解, 所以土壤冻融循环越频繁越不利于冬季的土壤腐殖质的累积。频繁的冻融循环破坏了凋落物物理结构, 凋落物输入土壤后, 导致土壤性质和养分的可利用性发生改变(王程栋等, 2019; 史丽娟等, 2020), 从而改变微生物活性, 进而影响土壤腐殖质的合成(Cotrufo et al., 2013)。另外, 凋落物或其他动植物残体以有机质的形式进入土壤, 而有机质在低温、潮湿的环境下易腐殖化, 在一定程度上促进腐殖质合成, 平衡腐殖质的分解(张健瑜等, 2019), 所以腐殖质在冬季累积。

4 结论

本研究发现川西亚高山针叶林中土壤腐殖质一直处于较为活跃的状态, 土壤腐殖质类型为较年轻的Rp型结构。腐殖质主要在生长季降解, 雪被减少/去除均会降低土壤腐殖质含量和土壤腐殖化程度, 雪被处理对腐殖质的影响还会跨越整个生长季延续

到下一个阶段, 且不同雪被处理对腐殖质含量造成的延续性影响不同。这个过程主要受到环境因子、土壤基质质量等直接或间接的影响。另外, 短期的雪被减少/去除会降低土壤腐殖质含量和土壤腐殖化程度, 但雪被减少对雪被融化期的腐殖质影响在历经了整个生长季后才显著表现出来。研究结果为认识高寒森林土壤腐殖化过程提供了一定的基础数据。但土壤腐殖质的积累与周转是一个长期的动态过程, 雪被减少对土壤腐殖质动态的影响需要更加长期的全面关注。

参考文献

- Abakumov EV, Cajthaml T, Brus J, Frouz J (2013). Humus accumulation, humification, and humic acid composition in soils of two post-mining chronosequences after coal mining. *Journal of Soils and Sediments*, 13, 491-500.
- Adani F, Spagnol M, Nierop KGJ (2007). Biochemical origin and refractory properties of humic acid extracted from maize plants: the contribution of lignin. *Biogeochemistry*, 82, 55-65.
- Berg B (2014). Decomposition patterns for foliar litter—A theory for influencing factors. *Soil Biology & Biochemistry*, 78, 222-232.
- Bokhorst S, Phoenix GK, Bjerke JW, Callaghan TV, Huyer-Brugman F, Berg MP (2012). Extreme winter warming events more negatively impact small rather than large soil fauna: shift in community composition explained by traits not taxa. *Global Change Biology*, 18, 1152-1162.
- Brooks PD, Williams MW, Schmidt SK (1996). Microbial activity under alpine snowpacks, Niwot Ridge, Colorado. *Biogeochemistry*, 32, 93-113.
- Chen ZH, Zhang XR, Tan B, Wei XY, Chen Y, Yang YL, Wu QG, Zhang L (2020). Effects of the freeze-thaw cycle on soil enzyme activities in a sub-alpine forest in western Sichuan. *Acta Ecologica Sinica*, 40, 2662-2669. [陈子豪, 张晓蓉, 谭波, 卫芯宇, 湛亚, 杨玉莲, 吴庆贵, 张丽 (2020). 冻融循环对川西亚高山森林土壤酶活性的影响. *生态学报*, 40, 2662-2669.]
- Chu H, Zong LG, Wang ZY, Xie SH, Yang N, Luo M (2013). Dynamic changes in humus composition in vegetable soils different in cultivation mode. *Acta Pedologica Sinica*, 50, 931-939. [褚慧, 宗良纲, 汪张懿, 谢少华, 杨旒, 罗敏 (2013). 不同种植模式下菜地土壤腐殖质组分特性的动态变化. *土壤学报*, 50, 931-939.]
- Comerford DP, Schaberg PG, Templer PH, Soggi AM, Campbell JL, Wallin KF (2013). Influence of experimental snow removal on root and canopy physiology of sugar maple trees in a northern hardwood forest. *Oecologia*, 171, 261-269.
- Cotrufo MF, Wallenstein MD, Boot CM, Denef K, Paul E (2013). The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: Do labile plant inputs form stable soil organic matter? *Global Change Biology*, 19, 988-995.
- Dang YA, Li SQ, Wang GD (2012). Distribution characteristics of humus fraction in soil profile for the typical regions in the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 32, 1820-1829. [党亚爱, 李世清, 王国栋 (2012). 黄土高原典型区域土壤腐殖酸组分割面分布特征. *生态学报*, 32, 1820-1829.]
- Deng RJ, Yang WQ, Zhang J, Wu FZ (2010). Changes in litter quality of subalpine forests during one freeze-thaw season. *Acta Ecologica Sinica*, 30, 830-835. [邓仁菊, 杨万勤, 张健, 吴福忠 (2010). 季节性冻融期间亚高山森林凋落物的质量变化. *生态学报*, 30, 830-835.]
- Dou S, Li Y, Guan S, Guo D, Zhang MY, Jin L (2016). The structural distinctiveness of humic substances and its formation mechanism in simulated incubation. *Acta Pedologica Sinica*, 53, 821-831. [窦森, 李艳, 关松, 郭聃, 张明阳, 金良 (2016). 腐殖物质特异性及其产生机制. *土壤学报*, 53, 821-831.]
- Dou S, Tardy Y, Zhang JJ, Li K, Yu SQ, Ping LF, Guan S, Hou SY, Lin XW, Gao X (2010). Thermodynamic stability of humic acid and fulvic acid in soil and its driving factors. *Acta Pedologica Sinica*, 47, 71-76. [窦森, Yves Tardy, 张晋京, 李凯, 于水强, 平立凤, 关松, 侯素艳, 林学巍, 高娴 (2010). 土壤胡敏酸与富里酸热力学稳定性及其驱动因素初步研究. *土壤学报*, 47, 71-76.]
- Du T, Zhang L, Chen YL, Zhang Y, Zhu HM, Xu ZF, Tan B, You CM, Liu Y, Wang LX, Liu SN, Xu HW, Xu L, Li H (2024). Decreased snow depth inhibits litter decomposition via changes in litter microbial biomass and enzyme activity. *Science of the Total Environment*, 921, 171078. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171078.
- Gigliotti G, Businelli D, Giusquiani PL (1999). Composition changes of soil humus after massive application of urban waste compost: a comparison between FT-IR spectroscopy and humification parameters. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 55, 23-28.
- Haei M, Öquist MG, Kreyling J, Ilstedt U, Laudon H (2013). Winter climate controls soil carbon dynamics during summer in boreal forests. *Environmental Research Letters*, 8, 024017. DOI: 10.1088/1748-9326/8/2/024017.
- Ikeya K, Watanabe A (2003). Direct expression of an index for the degree of humification of humic acids using organic carbon concentration. *Soil Science and Plant Nutrition*, 49, 47-53.
- IPCC (2021). *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

- Isobe K, Oka H, Watanabe T, Tateno R, Urakawa R, Liang C, Senoo K, Shibata H (2018). High soil microbial activity in the winter season enhances nitrogen cycling in a cool-temperate deciduous forest. *Soil Biology & Biochemistry*, 124, 90-100.
- Jia PL, An SS, Li CC, Zeng QC, Wang BR, Bai XJ (2020). Dynamics of soil nutrients and their ecological stoichiometry characteristics under different longitudes in the east-west forest belt of the Loess Plateau. *Journal of Soil and Water Conservation*, 34(1), 315-321. [贾培龙, 安韶山, 李程程, 曾全超, 王宝荣, 白雪娟 (2020). 黄土高原森林带土壤养分和微生物量及其生态化学计量变化特征. 水土保持学报, 34(1), 315-321.]
- Jia SH, Wang WW, Zhang RS (2017). Distribution characteristics of soil organic carbon and humus composition in different forest types. *Journal of Soil and Water Conservation*, 31(6), 189-195. [贾树海, 王薇薇, 张日升 (2017). 不同林型土壤有机碳及腐殖质组成的分布特征. 水土保持学报, 31(6), 189-195.]
- Konestabo HS, Michelsen A, Holmstrup M (2007). Responses of springtail and mite populations to prolonged periods of soil freeze-thaw cycles in a sub-arctic ecosystem. *Applied Soil Ecology*, 36, 136-146.
- Kreyling J, Haei M, Laudon H (2013). Snow removal reduces annual cellulose decomposition in a riparian boreal forest. *Canadian Journal of Soil Science*, 93, 427-433.
- Kuzyakov Y (2010). Priming effects: interactions between living and dead organic matter. *Soil Biology & Biochemistry*, 42, 1363-1371.
- Ladwig LM, Ratajczak ZR, Ocheltree TW, Hafich KA, Churchill AC, Frey SJK, Fuss CB, Kazanski CE, Muñoz JD, Petrie MD, Reinmann AB, Smith JG (2016). Beyond Arctic and alpine: the influence of winter climate on temperate ecosystems. *Ecology*, 97, 372-382.
- Li H, Wu FZ, Yang WQ, Xu LY, Ni XY, He J, Tan B, Hu Y (2016). Effects of forest gaps on litter lignin and cellulose dynamics vary seasonally in an alpine forest. *Forests*, 7, 27. DOI: 10.3390/f7020027.
- Lin CY, Li XL, Zhang J, Sun HS, Sun HF, Ma CB, Li CY (2022). Study on the characteristics of soil humus change during the degradation process of alpine marshland. *Acta Agrestia Sinica*, 30, 1027-1036. [林春英, 李希来, 张静, 孙海松, 孙华方, 马程彪, 李成一 (2022). 高寒沼泽湿地退化过程中土壤腐殖质变化特征的研究. 草地学报, 30, 1027-1036.]
- Lipson DA, Schmidt SK, Monson RK (2000). Carbon availability and temperature control the post-snowmelt decline in alpine soil microbial biomass. *Soil Biology & Biochemistry*, 32, 441-448.
- Liu Y, Jiao ZB, Tan B, Li H, Wang LX, Liu SN, You CM, Xu ZF, Zhang L (2022). Litter removal effects on dynamics of soil humic substances in subalpine forests of western Sichuan, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 46, 330-339. [刘瑶, 焦泽彬, 谭波, 李晗, 王丽霞, 刘思凝, 游成铭, 徐振锋, 张丽 (2022). 川西亚高山森林凋落物去除对土壤腐殖质动态的影响. 植物生态学报, 46, 330-339.]
- Liu YH, Pei HK (2004). Study on composition and characteristics of soil humus under alpine-arctic meadow vegetation. *Chinese Journal of Soil Science*, 35, 562-565. [刘育红, 裴海昆 (2004). 高寒草甸植被土壤腐殖质组成及性质的研究. 土壤通报, 35, 562-565.]
- Lu RK (1999). *Methods for Agricultural Chemical Analysis of Soil*. China Agricultural Science and Technology Press, Beijing. [鲁如坤 (1999). 土壤农业化学分析方法. 中国农业科学技术出版社, 北京.]
- Ni XY, Yang WQ, Li H, Xu LY, He J, Wu FZ (2014a). Effects of snowpack on early foliar litter humification during winter in a subalpine forest of western Sichuan. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 38, 540-549. [倪祥银, 杨万勤, 李晗, 徐李亚, 何洁, 吴福忠 (2014a). 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, 38, 540-549.]
- Ni XY, Yang WQ, Tan B, He J, Xu LY, Li H, Wu FZ (2015). Accelerated foliar litter humification in forest gaps: dual feedbacks of carbon sequestration during winter and the growing season in an alpine forest. *Geoderma*, 241-242, 136-144.
- Ni XY, Yang WQ, Tan B, Li H, He J, Xu LY, Wu FZ (2016). Forest gaps slow the sequestration of soil organic matter: a humification experiment with six foliar litters in an alpine forest. *Scientific Reports*, 6, 19744. DOI: 10.1038/srep19744.
- Ni XY, Yang WQ, Xu LY, He J, Li H, Wu FZ (2014b). The effect of snow patches on the accumulation of humic acid and fulvic acid during the humification process of fallen leaves in alpine forests. *Acta Pedologica Sinica*, 51, 1138-1152. [倪祥银, 杨万勤, 徐李亚, 何洁, 李晗, 吴福忠 (2014b). 雪被斑块对高山森林凋落叶腐殖化过程中胡敏酸和富里酸累积的影响. 土壤学报, 51, 1138-1152.]
- Niu J, Zhou XQ, Jiang N, Wang YF (2011). Characteristics of soil microbial communities under dry and wet condition in Zoige alpine wetland. *Acta Ecologica Sinica*, 31, 474-482. [牛佳, 周小奇, 蒋娜, 王艳芬 (2011). 若尔盖高寒湿地干湿土壤条件下微生物群落结构特征. 生态学报, 31, 474-482.]
- Pan GX, Ding YJ, Chen ST, Sun JL, Feng X, Zhang C, Doross M, Zheng JF, Zhang XH, Cheng K, Liu XY, Bian RJ, Li LQ (2019). Exploring the nature of soil organic matter from humic substances isolation to SOMics of molecular assemblage. *Advances in Earth Science*, 34, 451-470. [潘根兴, 丁元君, 陈硕桐, 孙景玲, 冯潇, 张晨, Marios Doross, 郑聚锋, 张旭辉, 程琨, 刘晓雨, 卞荣军, 李恋卿 (2019). 从土壤腐殖质分组到分子有机质组学认识土壤有机质本质. 地球科学进展, 34, 451-470.]

- Ponge JF (2013). Plant-soil feedbacks mediated by humus forms: a review. *Soil Biology & Biochemistry*, 57, 1048-1060.
- Richard G, Guyot G, Aguer JP, Ter Halle A, Trubetskaya OE, Trubetskoi OA (2008). Role of fractionation in studying the photochemical properties of humic substances. *Russian Journal of General Chemistry*, 78, 2265-2272.
- Serudo RL, de Oliveira LC, Rocha JC, Paterlini WC, Rosa AH, da Silva HC, Botero WG (2007). Reduction capability of soil humic substances from the Rio Negro Basin, Brazil, towards Hg(II) studied by a multimethod approach and principal component analysis (PCA). *Geoderma*, 138, 229-236.
- Shen J, Bartha R (1997). Priming effect of glucose polymers in soil-based biodegradation tests. *Soil Biology & Biochemistry*, 29, 1195-1198.
- Shi LJ, Wang HM, Fu XL, Kou L, Meng SW, Dai XQ (2020). Soil enzyme activities and their stoichiometry of typical plantations in mid-subtropical China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 31, 1980-1988. [史丽娟, 王辉民, 付晓莉, 寇亮, 孟盛旺, 戴晓琴 (2020). 中亚热带典型人工林土壤酶活性及其化学计量特征. 应用生态学报, 31, 1980-1988.]
- Shibata H, Hasegawa Y, Watanabe T, Fukuzawa K (2013). Impact of snowpack decrease on net nitrogen mineralization and nitrification in forest soil of northern Japan. *Biogeochemistry*, 116, 69-82.
- Stevenson FJ (1995). *Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions*. 2nd ed. John Wiley & Sons, New York.
- Tan B, Wu FZ, Yang WQ, Liu L, Yu S (2010). Characteristics of soil animal community in the subalpine/alpine forests of western Sichuan during onset of freezing. *Acta Ecologica Sinica*, 30, 93-99.
- Tan B, Wu FZ, Yang WQ, Yu S, Liu L, Wang A, Yang YL (2012). Activities of soil oxidoreductase and their response to seasonal freeze-thaw in the subalpine/alpine forests of western Sichuan. *Acta Ecologica Sinica*, 32, 6670-6678. [谭波, 吴福忠, 杨万勤, 余胜, 刘利, 王奥, 杨玉莲 (2012). 川西亚高山/高山森林土壤氧化还原酶活性及其对季节性冻融的响应. 生态学报, 32, 6670-6678.]
- Tan Y, Yang WQ, Liao S, Peng Y, Li J, Wu FZ (2017). Effects of soil fauna on winter litter humification along an altitudinal gradient in cold ecosystems in western Sichuan. *Acta Ecologica Sinica*, 37, 1595-1602. [谭羽, 杨万勤, 廖姝, 彭艳, 李俊, 吴福忠 (2017). 川西高寒生态系统不同海拔土壤动物对冬季凋落叶腐殖化过程的影响. 生态学报, 37, 1595-1602.]
- Tan Y, Yang WQ, Ni XY, Tan B, Yue K, Cao R, Liao S, Wu FZ (2019). Soil fauna affects the optical properties in alkaline solutions extracted (humic acid-like) from forest litters during different phenological periods. *Canadian Journal of Soil Science*, 99, 195-207.
- Venn SE, Thomas HJD (2021). Snowmelt timing affects short-term decomposition rates in an alpine snowbed. *Ecosphere*, 12, e03393. DOI: 10.1002/ecs2.3393.
- Wang CD, Xu YM, Ma XH, Liu GL, Qu XL, Li DY, Zeng QB, Wang SS (2019). Humus composition of topsoil in quality flue-cured tobacco producing region in China. *Acta Pedologica Sinica*, 56, 919-928. [王程栋, 徐宜民, 马兴华, 刘光亮, 曲潇玲, 李东阳, 曾庆宾, 王树声 (2019). 中国优质烤烟产区耕层土壤腐殖质组分特征. 土壤学报, 56, 919-928.]
- Wang H, Liang WJ, Nan HW (2020). Relationship between nutrients in different soil layers and topographic factors of natural pine forest *Pinus tabulaeformis* Garr. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 40(2), 120-128. [王慧, 梁文俊, 南宏伟 (2020). 油松天然林不同土壤层养分及其与地形因子的关系. 山西农业大学学报(自然科学版), 40(2), 120-128.]
- Wang HC, Tian GL, Chen CP, Chang EH, Chou CY, Chiou CR, Chiu CY (2019). Response of humic acids and soil organic matter to vegetation replacement in subtropical high mountain forests. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 124, 3727-3736.
- Wang W, Wu JG, Li YH, Li JM, Zhao XY, Qu XJ, Hu J (2017). Effects of organic materials on the composition and structure of humic substance in the rhizosphere soil of different crops. *Journal of Soil and Water Conservation*, 31(2), 215-220. [王维, 吴景贵, 李蕴慧, 李建明, 赵欣宇, 曲晓晶, 胡娟 (2017). 有机物料对不同作物根系土壤腐殖质组成和结构的影响. 水土保持学报, 31(2), 215-220.]
- Wei XY, Ni XY, Shen Y, Chen ZH, Yang YL, Wu FZ (2021). Effects of litterfall on soil humification in three subalpine forests. *Acta Ecologica Sinica*, 41, 8266-8275. [卫芯宇, 倪祥银, 湛亚, 陈子豪, 杨玉莲, 吴福忠 (2021). 三种不同类型亚高山森林凋落物输入对土壤腐殖化的影响. 生态学报, 41, 8266-8275.]
- Wei XY, Yang WQ, Zhang L, Tan B, Shen Y, Dong YL, Wu FZ (2018). Effects of litter addition on soil humification during freeze-thaw cycles in a subalpine forest. *Acta Ecologica Sinica*, 38, 6521-6529. [卫芯宇, 杨万勤, 张丽, 谭波, 湛亚, 董玉梁, 吴福忠 (2018). 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, 38, 6521-6529.]
- Wei XY, Yang YL, Shen Y, Chen ZH, Dong YL, Wu FZ, Zhang L (2020). Effects of litterfall on the accumulation of extracted soil humic substances in subalpine forests. *Frontiers in Plant Science*, 11, 254. DOI: 10.3389/fpls.2020.00254.
- Wei XY, Yang YL, Wu FZ, Chen ZH, Shen Y, Dong YL, Zhang L (2019). Effects of litter addition on the dynamics of soil humic substances during freeze-thaw events in a subalpine forest. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 30,

- 2257-2266. [卫芯宇, 杨玉莲, 吴福忠, 陈子豪, 谌亚, 董玉梁, 张丽 (2019). 冻融环境下亚高山森林凋落叶添加对土壤腐殖质动态的影响. *应用生态学报*, 30, 2257-2266.]
- Wipf S, Rixen C (2010). A review of snow manipulation experiments in Arctic and alpine tundra ecosystems. *Polar Research*, 29, 95-109.
- Withington CL, Sanford Jr RL (2007). Decomposition rates of buried substrates increase with altitude in the forest-alpine tundra ecotone. *Soil Biology & Biochemistry*, 39, 68-75.
- Wu FZ, Yang WQ, Zhang J, Deng RJ (2010). Litter decomposition in two subalpine forests during the freeze-thaw season. *Acta Oecologica*, 36, 135-140.
- Xu LY, Yang WQ, Li H, Ni XY, He J, Wu FZ (2014). Effects of snow cover on water soluble and organic solvent soluble components during foliar litter decomposition in an alpine forest. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 25, 3067-3075. [徐李亚, 杨万勤, 李晗, 倪祥银, 何洁, 吴福忠 (2014). 雪被覆盖对高山森林凋落物分解过程中水溶性和有机溶性组分含量的影响. *应用生态学报*, 25, 3067-3075.]
- Yang F, Ni XY, Zeng X, Li H, Tan B, Liang ZY, Liu BW, Xu ZF, Zhang J (2021). Short-term winter snow reduction stimulates soil nutrient leaching without changing the microbial biomass in an alpine fir forest. *Global Ecology and Conservation*, 25, e01434. DOI: 10.1016/j.gecco.2020.e01434.
- Yang YL, Wu FZ, He ZH, Xu ZF, Liu Y, Yang WQ, Tan B (2012). Effects of snow pack removal on soil microbial biomass carbon and nitrogen and the number of soil culturable microorganisms during wintertime in alpine *Abies faxoniana* forest of western Sichuan, Southwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 23, 1809-1816. [杨玉莲, 吴福忠, 何振华, 徐振锋, 刘洋, 杨万勤, 谭波 (2012). 雪被去除对川西高山冷杉林冬季土壤微生物生物量碳氮和可培养微生物数量的影响. *应用生态学报*, 23, 1809-1816.]
- Zanella A, Ponge JF, Matteodo M (2018). Humusica 1, article 7: Terrestrial humus systems and forms—Field practice and sampling problems. *Applied Soil Ecology*, 122, 92-102.
- Zeng DH, Mao R, Chang SX, Li LJ, Yang D (2010). Carbon mineralization of tree leaf litter and crop residues from poplar-based agroforestry systems in Northeast China: a laboratory study. *Applied Soil Ecology*, 44, 133-137.
- Zhang JY, Li C, Zeng HP, Hu ML, Dong DC (2019). Distribution characteristics of humus in purple soil profile under different vegetation types. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 39, 85-91. [张健瑜, 李灿, 曾和平, 胡梦凌, 董达诚 (2019). 不同植被类型紫色土腐殖质的剖面分布特征. *水土保持通报*, 39, 85-91.]
- Zhang RS, Jia SH, Wang WW (2020). Variation characteristics of the composition of soil organic carbon and humus carbon in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations. *Liaoning Agricultural Sciences*, (4), 1-6. [张日升, 贾树海, 王薇薇 (2020). 樟子松人工林土壤有机碳及腐殖质碳组成的变化特征. *辽宁农业科学*, (4), 1-6.]
- Zhao YY, Wu FZ, Yang WQ, Tan B, He W (2016). Variations in bacterial communities during foliar litter decomposition in the winter and growing seasons in an alpine forest of the eastern Tibetan Plateau. *Canadian Journal of Microbiology*, 62, 35-48.
- Zheng YY, Zhang JB, Tan J, Zhang CZ, Yu ZH (2019). Study on chemical composition and structural characteristics of humus from different sources. *Acta Pedologica Sinica*, 56, 386-397. [郑延云, 张佳宝, 谭钧, 张丛志, 余正洪 (2019). 不同来源腐殖质的化学组成与结构特征研究. *土壤学报*, 56, 386-397.]

责任编辑: 陈蕾伊 责任编辑: 乔鲜果