中国农业大学学报 2024,29(4):264-273
Journal of China Agricultural University http://zgnydxxb.ijournals.cn

侯卓男,李欣彤,张新军,马恬恬,李傲,赵金月,王瑞红,魏雨泉. 海拔和坡向对色季拉山高山杜鹃凋落物分解的影响[J]. 中国农业大学学报,2024,29(04):264-273.
HOU Zhuonan, LI Xintong, ZHANG Xinjun, MA Tiantian, LI Ao, ZHAO Jinyue, WANG Ruihong, WEI Yuquan. Effects of elevation and slope orientation on litter decomposition of *Rhododendron simsii* in Mount Segrila[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(04): 264-273.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.04.23

海拔和坡向对色季拉山高山杜鹃凋落物分解的影响

侯卓男[1,2] 李欣彤[2] 张新军[1*] 马恬恬[2] 李 傲[2] 赵金月[2] 王瑞红[1] 魏雨泉[1,2,3]

(1. 西藏农牧学院 高原生态研究所/西藏高原森林生态教育部重点实验室,西藏 林芝 860000;
2. 中国农业大学 资源与环境学院,北京 100193;
3. 中国农业大学 有机循环研究院(苏州),江苏 苏州 215000)

摘 要 为探究高寒森林凋落物在不同海拔和坡向的分解动态,以西藏色季拉山的高山杜鹃(*Rhododendron simsii*)凋落物为研究对象,在色季拉山设置3 500、3 700、3 900、4 100 m等4个梯度海拔以及西北坡(阴坡)和东南坡(阳坡)2个坡向,开展为期2年的凋落物掩埋试验,采用Olson模型明晰凋落物的降解规律,并结合木质纤维素的质量损失和土壤理化性质探究影响凋落物分解的因素。结果表明:不同海拔和坡向凋落物质量残留率均随分解时间增加而下降,分解2年后不同海拔的质量残留率为36.65%~75.99%;凋落物分解速度基本呈阴坡大于阳坡的趋势,其中海拔3 700 m阳坡处分解速度最快、半衰期和周转期最短;木质纤维素的质量损失也基本呈阴坡大于阳坡的趋势,且木质素分解程度最大,对凋落物质量损失的贡献超过50%;土壤中碳氮磷钾营养元素含量主要受坡向和凋落物分解时间的影响,在不同海拔间差异较小;海拔、坡向、分解时间及其交互作用均对凋落物分解有显著影响($P<0.01$),土壤含水率和碳氮比也是影响凋落物分解的重要因素。本研究可为高寒森林凋落物分解规律及影响因素提供理论依据。

关键词 海拔;坡向;凋落物;分解;高寒森林

中图分类号 Q89 **文章编号** 1007-4333(2024)04-0264-10 **文献标志码** A

Effects of elevation and slope orientation on litter decomposition of *Rhododendron simsii* in Mount Segrila

HOU Zhuonan[1,2], LI Xintong[2], ZHANG Xinjun[1], MA Tiantian[2], LI Ao[2], ZHAO Jinyue[2], WANG Ruihong[1], WEI Yuquan[1,2,3]

(1. Institute of Tibet Plateau Ecology, Tibet Agricultural & Animal Husbandry University, Nyingchi 860000, China;
2. College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100193, China;
3. Organic Recycling Research Institute, China Agricultural University, Suzhou 215000, China)

Abstract Litter is an important source of organic matter in forest ecosystems, and its decomposition process is driven by many abiotic factors. In order to investigate the decomposition dynamics of litter at different elevations and slope directions in alpine forest, a two-year litter burial experiment was conducted with *Rhododendron simsii* litter at 4 gradient elevations (3 500, 3 700, 3 900 and 4 100 m) and 2 slope directions of northwestern and southeastern slopes in in Mount Segrila. The Olson model was used to clarify

收稿日期:2023-10-06
基金项目:国家自然科学基金项目(31960013);西藏高原森林生态教育部重点实验室开放课题(XZA-JYBSYS-2020-02);西藏自治区科技创新基地自主研究项目(XZ2022JR0007G)
第一作者:侯卓男(ORCID:0009-0001-5103-1494),硕士研究生,,E-mail:houzhuonan@cau.edu.cn
通讯作者:张新军(ORCID:0000-0002-1309-5139),副教授,主要从事微生物生态及微生物次生代谢研究,E-mail:zxjun_126abc@126.com

the degradation pattern of litter, and the factors affecting the litter decomposition were investigated in the mass loss of lignocellulose and the physicochemical properties of the soil. The results showed that: The mass residual rate of litter at different elevations and slope directions decreased with the increase of decomposition time, ranging from 36.65% to 75.99%. The decomposition speed of litter and lignocellulose were generally greater on negative slopes than that on positive slopes. The degree of lignin decomposition was the highest, contributing more than 50% to the litter mass loss; decomposition rate was the fastest and the half-life and turnover period was the shortest on the positive slope at 3 700 m. The nutrient content of carbon, nitrogen, phosphorus, and potassium in soil was mainly affected by slope direction and litter decomposition time, with relatively small differences among different elevations. Elevation, slope direction, decomposition time, and their interactions all had a significant effect on litter decomposition ($P<0.01$), and the soil moisture and the carbon to nitrogen ratio were also important factors affecting litter decomposition. This study provides a theoretical basis for the decomposition pattern and influencing factors of litter in alpine forests.

Keywords　elevation; aspect of slope; litter; decomposition; apline forest

凋落物在森林生态系统物质循环、能量流动和维持生态系统功能方面具有重要作用[1]。凋落物分解能够为森林提供养分，是土壤有机质形成和有机养分矿化的主要贡献者，其分解速度制约着凋落物养分归还土壤和土壤有机质的形成，对森林生态系统的生产力、物种组成和碳汇动态等具有重要意义[2-3]。更好地了解凋落物分解的过程和驱动因素有利于预测和减缓未来的气候变化[4]。由于高寒森林生态系统作为研究自然生态过程的天然实验室，对全球变暖非常敏感，凋落物的分解速度通常比其他生态系统慢[5]，因此越来越多的研究开始关注高寒森林生态系统凋落物分解的动态[6]。

凋落物的组成部分包括木质素、纤维素等结构性成分和多糖、氨基酸等非结构性成分。在凋落物的分解过程中，可溶性的非结构性成分往往随着降雨、地表径流等途径很快地被冲刷溶解到土壤中，接着纤维素和木质素成为主要分解成分，部分半纤维素与木质素共价结合，其结构复杂因而分解速度较慢[7]。国内外对凋落物分解过程的研究主要有：李慧璇等[8]发现亚热带天然阔叶林凋落物中的活性和惰性碳参与分解的时间不同；郭鑫等[9]发现具有较高含量的易分解可溶物和较低碳氮比的高品质凋落物分解速率较快，且对土壤有机碳固存有较高的贡献；Lin等[10]发现凋落物的输入能够促进黑土地中土壤有机质的分解和激发效应，并与木质纤维素的含量密切相关。凋落物是森林生态系统中关键纽带，探究凋落物分解过程尤其是木质纤维素的分解，对土壤中元素的生物地球化学循环具有十分重要的意义。凋落物分解的过程漫长，影响因素繁多，包括气候条件、凋落物质量、微生物等[9, 11-12]。气候通过温度、湿度和大气组分条件对凋落物分解产生影响；凋落物质量被称为基质质量（Substrate quality），指凋落物中的有机物含量和化学组成，通常用作评估土壤养分循环和生态系统健康状况的指标；微生物群落不仅能通过分解作用促进凋落物降解为自身生长发育繁殖提供营养物质、为植物提供可吸收利用的养分，在维持全球生态系统稳定性上也发挥着十分重要的作用。然而，对于条件更为严苛的高寒森林地区，海拔和坡向也是影响凋落物分解的重要因素，温度、湿度和土壤理化性质等环境因子在空间上存在较大差异[13]，引起全球气候变化的不同响应。Brockett等[14]研究也发现土壤水分、pH和全磷的差异会受空间异质性影响，进而影响凋落物的分解。因此，结合海拔和坡向的变化，可以更好地研究多种因素对凋落物分解的不同影响。

西藏色季拉山位于青藏高原东南部雅鲁藏布江大峡谷的西北侧，植被垂直带谱十分明显，环境因子和生物的分布差异较大[15]。虽然已有研究揭示了高山杜鹃凋落物的分解动态，然而对于不同海拔高山杜鹃凋落物分解的研究尚少。本研究拟以色季拉山3 500～4 100 m的4个海拔梯度处分别选取西北坡（阴坡）、东南坡（阳坡）的典型植被高山杜鹃为研究对象，采用凋落物袋法模拟接近自然状态下的凋落物分解过程，经过4次凋落袋和表层土壤采集回收，探究不同海拔和坡向下高寒森林凋落物的分解动态及影响其分解的土壤理化性质，阐明海拔和坡向对色季拉山高寒森林凋落物分解的影响，以期为高寒森林凋落物分解规律及影响因素提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

研究区域位于西藏自治区林芝地区的色季拉山(29°10′ N～30°15′ N,93°12′ E～95°35′ E),属于念青唐古拉山余脉,整体呈西南—东北走向,主峰海拔高5 200 m,平均海拔超过3 000 m,山脉走向大致为西北—东南,森林覆盖率达55%。色季拉山的植被垂直带谱明显,人为干扰较少,是目前我国保存比较完好的原始森林之一。由于其特殊的地形、地貌、气候等因素的影响和制约使得藏东南色季拉山的森林生态系统具有复杂多变的水热条件、独特的树种组成、丰富的森林植被类型和特殊的分布规律。根据气象资料显示,色季拉山全年平均气温为5 ℃,相对湿度为73%,年降水量为866 mm,降水多集中在4-10月。植被类型丰富,主要有急尖长苞冷杉林(*Abies georgei*)、康定柳(*Salix paraplesia*)、高山杜鹃(*Rhododendron simsii*)和方枝柏(*Juniperus saltuaria*)等,土壤多为黄棕壤和山地棕壤。

2020年8月进行踏勘选点、凋落物取样,收集代表高山杜鹃当年最新的自然凋落叶,进行清洗和烘干处理。准确称取10.00 g烘干凋落物,装入孔径为60目的20 cm×20 cm尼龙网袋中。样地分别设置在色季拉山海拔3 500、3 700、3 900、4 100 m处西北坡(阴坡)、东南坡(阳坡)的杜鹃林下,每个样地设置一个20 m×20 m的样方,每个样方内的高山杜鹃具有相似的林龄、林分密度和郁闭度,具体信息见表1。采用对角线取样法在每个样方内确定三个样点,于2020年8月在每个样点的0～10 cm表层土壤掩埋4个凋落袋,分别于2020年12月(雪被覆盖期)、2021年4月(雪被融化期)、2021年8月(植被生长期)、2022年8月(植被生长期)在每个样方回收3个凋落袋并采集凋落袋处0～10 cm表层土壤,用冷藏箱转移至实验室。

表1 采样位点信息

Table 1 Sampling site information

采样位点 Sampling site	坡向 Slope direction	海拔 Elevation/m	经度(E) Longitude	纬度(N) Latitude
3 500N	西北坡(阴坡)	3 500	94°33′41″	29°33′52″
3 700N	西北坡(阴坡)	3 700	94°33′48″	29°33′39″
3 900N	西北坡(阴坡)	3 900	94°34′56″	29°34′29″
4 100N	西北坡(阴坡)	4 100	94°42′53″	29°38′15″
3 500P	东南坡(阳坡)	3 500	94°43′31″	29°40′52″
3 700P	东南坡(阳坡)	3 700	94°43′23″	29°39′39″
3 900P	东南坡(阳坡)	3 900	94°42′49″	29°39′02″
4 100P	东南坡(阳坡)	4 100	94°42′33″	29°37′52″

1.2 试验方法

1.2.1 凋落物分解测定

凋落袋回收后去除杂质,于65 ℃下烘干至质量不变,计算凋落物残留重量/10.00 g初始重量,即为凋落物质量残留率;凋落物分解周转期及分解系数采用Olson的指数方程来计算[16];木质纤维素的测定采用范式洗涤纤维分析法[17],并结合凋落物质量残留率计算出木质素损失质量,纤维素损失质量,半纤维素损失质量。

1.2.2 土壤理化性质测定

利用烘干法测定土壤含水率,pH计测定土壤酸碱度(pH),元素分析仪测定土壤有机碳(Soil organic carbon,SOC)、全氮(Total nitrogen,TN)并计算土壤碳氮比(Carbon nitrogen ratio,*C*/*N*),碳酸氢钠提取后用抗坏血酸/钼酸盐试剂法测定土壤有效磷(Available phosphorus,AP),乙酸铵萃取-火焰光度法测定土壤速效钾(Available potassium,AK),吸管法测定土壤机械组成中黏粒和粉粒的含量(Clay and silt content, clay+silt)以及砂粒的含量(Sand content, sand)。

1.3 统计分析

使用Microsoft Excel 2019初步整理数据,使用SPSS 22.0进行单因素方差(ANOVA)分析土壤理化性质在不同海拔和坡向的差异性,使用SPSS 22.0

进行重复测量方差（Multi-way ANOVA）分析不同时期、海拔、坡向对凋落物分解的影响，使用Canoco 5进行冗余分析（RDA）解析影响凋落物分解的土壤理化性质，在Origin 2023中绘制折线图和箱线图，使用R 4.0.2中“pheatmap”包绘制相关性热图。

2　结果与分析

2.1　凋落物质量残留特征和分解周期

对不同分解时间的凋落物残留质量进行测量，在不同海拔和坡向的凋落物质量残留率如图1所示。可知：凋落物在阴坡分解了4、8、12、24个月后，其质量残留率均表现为海拔3 900>3 500>4 100>3 700 m；在阳坡分解了4、8、12个月后，各海拔的凋落物质量残留率相差不大，分解了24个月后，海拔3 900和4 100 m处凋落物分解速度最快，其次是海拔3 700和3 500 m处，且各海拔的凋落物质量残留率均高于50%。凋落物经过24个月的分解后，海拔3 500、3 700、4 100 m处阴坡的凋落物质量损失大于阳坡，海拔3 900 m处相反。凋落物的半衰期和周转期如表2所示。可知：海拔3 700 m阴坡处凋落物分解50%所需时间（1.520 a）和分解95%所需时间（6.570 a）最短，海拔3 900 m阴坡处凋落物分解50%所需时间（3.648 a）和分解95%所需时间（15.767 a）最长；不同海拔和坡向的凋落物分解95%所需时间为分解50%所需时间的4.322～4.323倍。

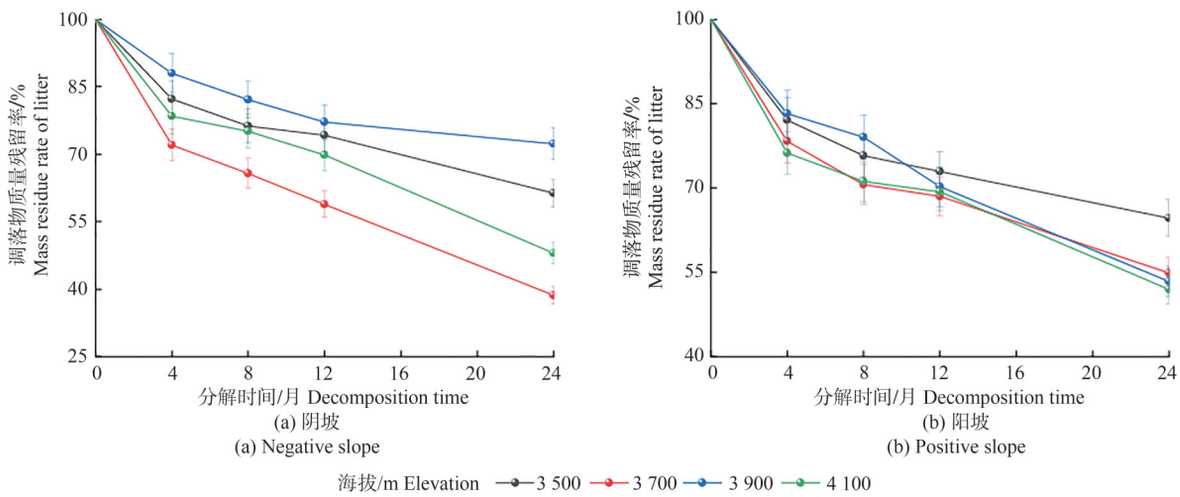


图1　不同海拔和坡向的凋落物质量变化

Fig. 1　Variation of litter mass at different elevations and slope directions

表2　凋落物分解残留率的Olson模型

Table 2　Olson model of litterfall decomposition residual rate

采样位点 Sampling site	回归方程 Regression equation	相关系数 Correlation efficiency	分解系数 Decomposition rate	$t_{0.5}$/a	$t_{0.95}$/a
3 500N	$y=93.488e^{-0.257t}$	$R^2=0.924$	0.257	2.697	11.656
3 700N	$y=92.021e^{-0.456t}$	$R^2=0.958$	0.456	1.520	6.570
3 900N	$y=94.570e^{-0.190t}$	$R^2=0.898$	0.190	3.648	15.767
4 100N	$y=95.740e^{-0.375t}$	$R^2=0.966$	0.375	1.848	7.989
3 500P	$y=90.131e^{-0.192t}$	$R^2=0.709$	0.192	3.610	15.603
3 700P	$y=90.463e^{-0.272t}$	$R^2=0.866$	0.272	2.548	11.014
3 900P	$y=96.103e^{-0.320t}$	$R^2=0.978$	0.320	2.166	9.362
4 100P	$y=91.550e^{-0.302t}$	$R^2=0.908$	0.302	2.295	9.920

2.2　木质纤维素质量损失特征

在凋落物分解过程中，木质素、纤维素、半纤维素损失质量如图2所示。可知：木质纤维素的质量损失均随分解时间增加而增大，且在前12个月内分

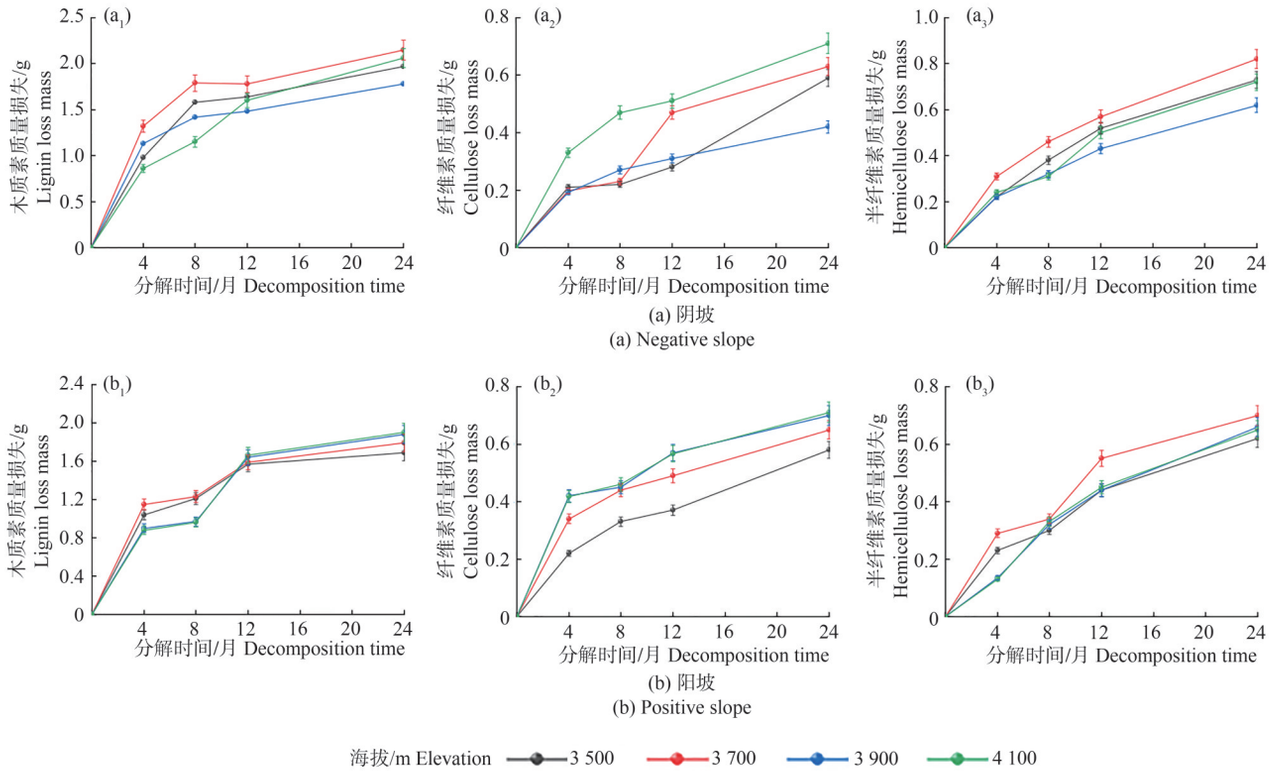


图 2 不同海拔和坡向的木质纤维素质量变化

Fig. 2 Variation of lignocellulose mass at different elevations and slope directions

解速率大于后12个月。木质素损失质量较纤维素、半纤维素更大，对凋落物的质量损失具有重要贡献，海拔3 700 m阴坡处木质素质量损失最大；纤维素质量损失在阴、阳坡的4 100 m海拔处均最大，半纤维素质量损失在阴、阳坡的3 700 m海拔处均最大；阳坡3 900和4 100 m海拔处的木质纤维素损失质量基本一致，且二者的凋落物总质量损失在分解24个月后也基本一致。

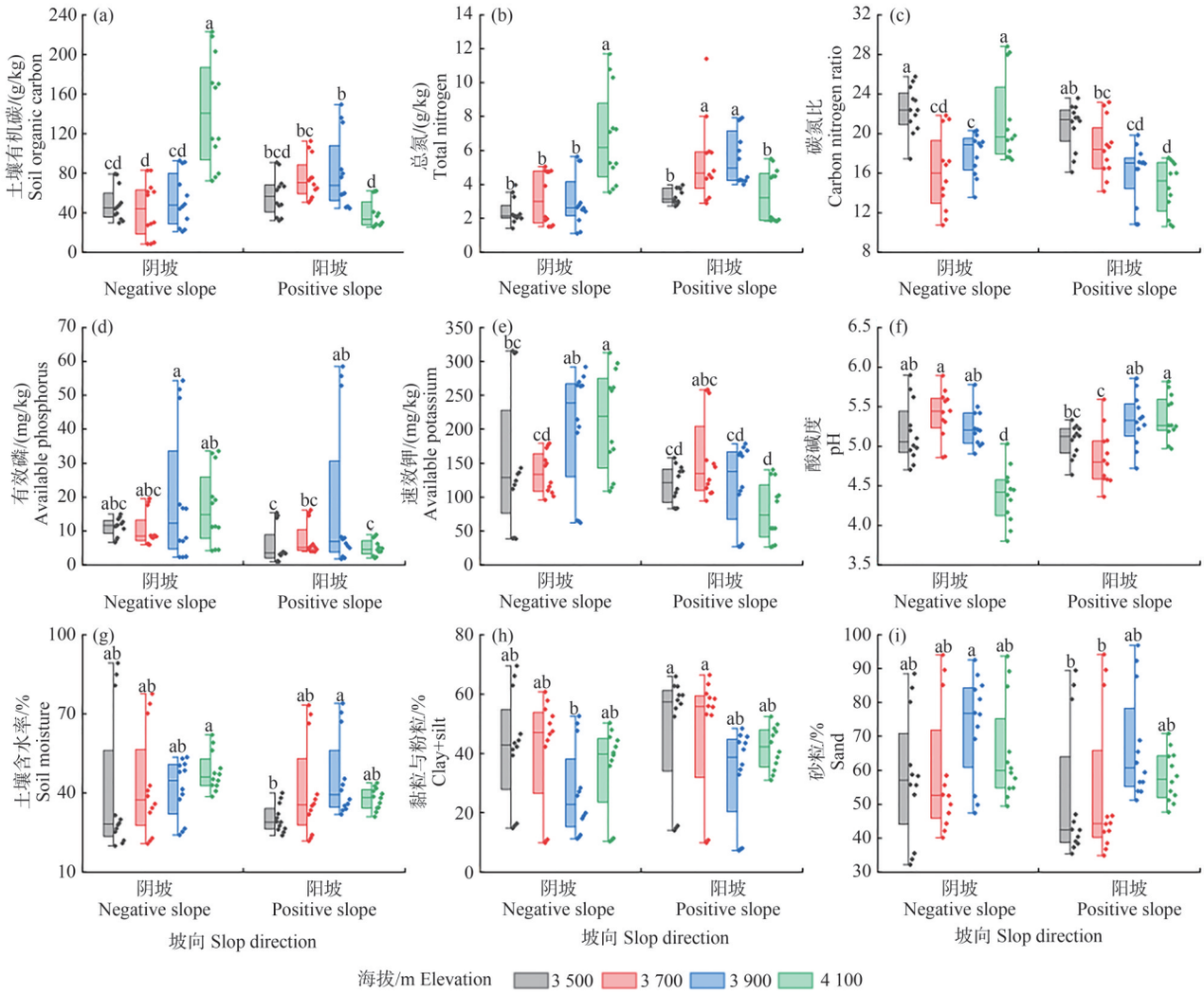
2.3 土壤理化性质特征

对不同海拔和坡向的土壤理化性质进行测定，结果如图3所示。可知：土壤有机碳和总氮在海拔3 700、3 900、4 100 m处阴坡显著高于阳坡（$P<0.05$）；碳氮比、有效磷、速效钾在海拔4 100 m处阴坡显著高于阳坡（$P<0.05$），酸碱度在海拔4 100 m处阳坡显著高于阴坡（$P<0.05$）；土壤含水率在阴坡各海拔处无显著差异，在阳坡的海拔3 900 m显著高于3 500 m（$P<0.05$）；不同海拔的阴阳坡处黏粒和粉粒含量、砂粒含量均无显著差异，而不同分解时间的含量差异较大。土壤理化指标的差异主要出现在不同的坡向和分解时间内，在不同海拔间差异较小。

2.4 凋落物分解的影响因素

对凋落物质量残留率、木质素损失质量、纤维素损失质量、半纤维素损失质量进行重复测量方差分析，结果如表3所示。可知：海拔、坡向、分解时间均对上述指标具有显著影响（$P<0.05$），凋落物在阴坡的分解速度较阳坡更快，在阳坡处凋落物的分解程度随海拔升高而增大。坡向对木质纤维素的影响较凋落物质量变化更为显著，海拔、坡向、分解时间之间的交互作用均对凋落物分解具有显著影响（$P<0.01$）。

将土壤理化性质与凋落物分解特征进行Person相关性分析，结果如图4所示。可知：碳氮比和土壤含水率对凋落物分解具有显著影响。其中碳氮比与木质素、纤维素的质量损失具有显著负相关关系（$P<0.05$），与凋落物质量残留具有显著正相关关系（$P<0.05$）；土壤含水率与凋落物质量残留具有显著负相关关系（$P<0.01$），与木质纤维素的质量损失具有显著正相关关系（$P<0.01$）。进一步以凋落物分解特征为响应变量，土壤理化性质为解释变量进行RDA分析，如图5所示。可知：RDA1和RDA2的分别解释了凋落物分解特征的55.29%和



不含有相同的字母标识，代表具有显著差异（$P<0.05$）。

There ware no identical letter identifiers, indicating significant differences（$P<0.05$）.

图 3　不同海拔和坡向的土壤理化性质变化

Fig. 3　Variation of soil physicochemical properties at different elevations and slope directions

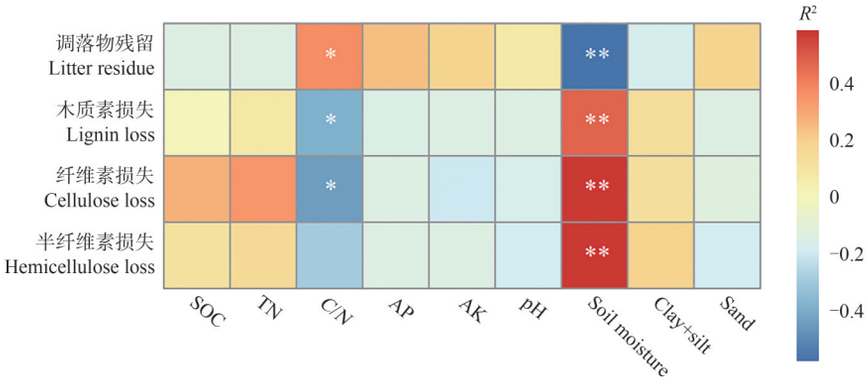
表 3　不同时期、海拔和坡向对凋落物分解的重复测量方差分析

Table 3　Repeated measures ANOVA results of litter decomposition at different time, elevation and slope direction

因子 Factor	自由度 df	凋落物质量残余 F_1	木质素损失 F_2	纤维素损失 F_3	半纤维素损失 F_4
海拔 Elevation	3	209.026 ***	35.411 ***	186.863 ***	67.062 ***
坡向 Slope direction	1	5.693 *	164.854 ***	403.412 ***	134.026 ***
时期 Time	3	1122.271 ***	595.979 ***	800.637 ***	1605.792 ***
海拔×坡向 Elevation×Slope direction	3	96.130 ***	15.918 ***	83.934 ***	7.886 ***
时期×海拔 Time×Elevation	9	12.960 ***	7.398 ***	12.350 ***	3.077 **
时期×坡向 Time×Slope direction	3	9.996 ***	29.204 ***	22.670 ***	4.497 **
时期×海拔×坡向 Time×Elevation×Slope direction	9	15.542 ***	3.940 ***	16.080 ***	7.491 ***

注：*、**和***表示在 $P<0.05$、$P<0.01$ 和 $P<0.001$ 显著相关。

Note: *, ** and *** indicate significant correlations at the $P<0.05$, $P<0.01$ and $P<0.001$ levels, respectively.



SOC，土壤有机碳；TN，总氮；C/N，碳氮比；AP，有效磷；AK，速效钾；pH，酸碱度；Soil moisture，土壤含水率；Clay＋silt，黏粒加粉粒的质量；Sand，砂粒的质量。

图 4 土壤理化性质与凋落物分解特征的 Person 相关性分析

Fig. 4 Pearson's Correlation analysis of soil physicochemical properties and litter decomposition characteristics

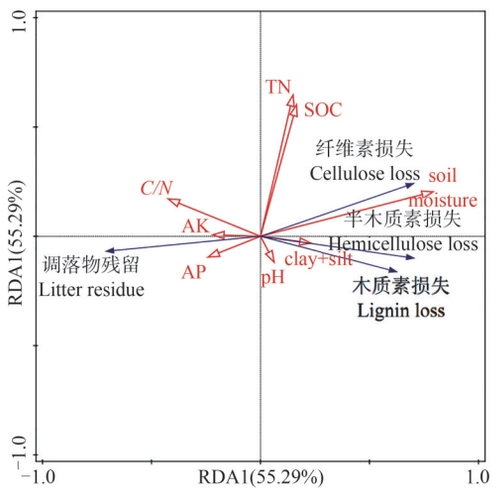


图 5 土壤理化性质与凋落物分解特征的 RDA 分析

Fig. 5 RDA analysis of soil physicochemical properties and litter decomposition characteristics

2.22%，说明 RDA 结果较为可靠。土壤含水率、黏粒和粉粒含量与木质纤维素的质量损失呈正相关关系，与凋落物的质量残留呈负相关关系；碳氮比、有效磷、速效钾与凋落物的质量残留呈正相关关系，与木质纤维素的质量损失呈负相关关系。由表 4 可知，土壤理化性质对凋落物分解影响的重要性表现为：土壤含水率＞碳氮比＞有效磷＞酸碱度＞总氮＞黏粒与粉粒＞土壤有机碳＞速效钾，其中土壤含水率、碳氮比对凋落物分解具有显著影响（$P<0.01$），其贡献率分别为 52.5%、22.5%，且分别解释 31.7%、13.6% 的变异，而其他土壤理化性质对凋落物分解的影响并未达到显著水平，土壤含水率和碳氮比是影响凋落物分解的重要土壤理化性质。

表 4 土壤理化性质对凋落物分解重要性排序

Table 4 Importance ranking table of soil physicochemical properties to litter decomposition

土壤理化性质 Soil physicochemical character	解释率/% Explain rate	贡献率/% Contribution rate	观测值 Observation value	显著性 P
土壤含水率 Soil moisture	31.7	52.5	13.9	**
碳氮比 C/N	13.6	22.5	7.2	**
有效磷 AP	1.8	3.0	1.0	0.358
pH	1.8	2.9	0.9	0.424
总氮 TN	4.9	8.1	2.8	0.064
黏粒与粉粒 clay＋silt	3.3	5.5	2	0.130
土壤有机碳 SOC	2.2	3.7	1.3	0.268

3 讨　论

凋落物分解是生态系统物质循环的重要过程，高山杜鹃是色季拉山主要的森林优势种，受海拔和坡向影响较大，其凋落物分解动态易受环境条件影响而呈现独特的规律。凋落物分解初期，由于土壤中水分的浸出、微生物代谢活动和土壤动物的破碎作用，易溶解化合物如淀粉、氨基酸等迅速流失，因此木质纤维素在分解中后期才会成为凋落物中的主要分解物。与凋落物分解前期相比，此阶段的特点是分解较慢，与李娜等[18]研究结果一致。在凋落物分解的前4个月，质量损失较快，基本等同于后20个月的质量损失，这种分解规律在不同海拔和坡向均存在。此外，在分解前期正处在色季拉山的季节性冻融期内，水分会在凋落物内形成冰晶，这些冰晶会扩大凋落物的孔隙和裂缝，一方面对凋落物有破碎作用，另一方面增大了反应的表面积，并且使得微生物和酶更容易进入凋落物内部进行分解[19]。由于高山杜鹃是一种革质含量丰富的植物，其自然凋落的叶片相对于其他树种的凋落叶更难降解，分解速度在后期更慢[20]。除海拔 3 700 和 4 100 m 阴坡处，其余各位点在两年内的凋落物质量损失均不足 50%，分解系数 0.190～0.320，未达到温带凋落物平均分解系数 0.38[21]，与高山林线交错带高山杜鹃的凋落物分解系数较为接近[22]。凋落物残留率在阳坡基本大于阴坡，且阳坡的凋落物残留率呈现出随海拔升高而下降的趋势。由此可见，阴坡和海拔高更利于凋落物分解，这与李娜等[18]的研究结果相似，海拔和坡向都会影响温湿度、郁闭度、光辐射等条件，进而影响凋落物的分解。

木质纤维素质量损失与凋落物分解具有类似的规律，其中木质素质量损失最大，较纤维素和半纤维素质量损失之和更大，是凋落物分解的主要贡献者。尽管在凋落物分解初期，水溶性物质和容易分解的碳水化合物最先快速降解，使凋落物分解速度逐渐变慢[23]，但在我们的研究中发现木质纤维素在降解初期也表现出较高的分解速率，在后期分解速度变慢。此外，木质素、纤维素、半纤维素在阴坡的整体质量损失较阳坡更高，说明坡向较海拔对木质纤维素分解的影响更大，阴坡由于受到的太阳辐射小、空气湿度高，有利于微生物的分解作用和腐生作用进而加速凋落物分解。木质素分解在不同海拔间无明显规律，纤维素在 4 100 m 的较高海拔处质量损失较大，半纤维素在 3 700 m 的较低海拔处质量损失较大，在祁连山海拔和木质纤维素分解动态的研究中发现木质素随海拔升高无规律性变化[24]，与本研究结果不尽相同。木质素作为结构复杂的芳香类聚合物，其分解需要微生物、土壤动物、酶等因素的共同作用，这些因素不仅受海拔影响，其他环境因素如降水的差异也会进一步影响木质纤维素的分解；纤维素由于结构较为复杂，其分解受酶的影响较大，其中纤维素酶和蔗糖酶的活性在高海拔处较高[25]，因此纤维素在海拔较高的 4 100 m 处质量损失最大；半纤维素的分解受温度影响较大[26]，而温度会随海拔升高而降低，海拔较低的 3 700 m 处温度条件更适宜半纤维素分解。明确木质纤维素在不同海拔和坡向的分解动态，有助于深入了解色季拉山高山杜鹃凋落物分解的规律和内在驱动因素。

高寒森林所分布的海拔跨度和坡向差异较大，温度、湿度和土壤理化性质均会受到影响[27-28]。同时，色季拉山由于地处青藏高原东南部，存在季节性冻融现象，进而破坏凋落物的结构，影响凋落物的分解[29]。本研究也发现海拔、坡向、取样时期及其交互作用均对凋落物分解特征具有显著影响（$P<0.01$）。土壤理化性质也在不同海拔和坡向表现出显著差异，如土壤有机碳和总氮在海拔 3 700、3 900、4 100 m 处阴坡显著高于阳坡（$P<0.05$），碳氮比在海拔 4 100 m 处阴坡显著高于阳坡（$P<0.05$）；土壤含水率在阴坡各海拔处无显著差异，而在阳坡的海拔 3 900 m 显著高于 3 500 m（$P<0.05$）。不同海拔和坡向可以通过影响土壤理化性质进而间接影响凋落物分解特征。丰富的土壤水分促进凋落物中可溶性物质的浸出，有利于微生物的生长和繁殖，也会影响到凋落物碳氮元素等养分的释放[30]。由 RDA 分析可知，土壤理化性质对凋落物分解影响的重要性表现为：土壤含水率＞碳氮比＞有效磷＞酸碱度＞总氮＞黏粒与粉粒＞土壤有机碳＞速效钾，其中土壤含水率、碳氮比对凋落物分解具有显著影响（$P<0.01$）。土壤含水率与木质纤维素的质量损失成正相关关系，与凋落物质量残留成负相关关系；碳氮比与木质素和纤维素的质量损失成负相关关系，与凋落物质量残留成正相关关系，说明低碳氮比和高含水率均能促进凋落物分解过程，Sorensen 等[31]认为这种条件更适宜微生物

生存,能够维持微生物群落的活性,进而促进凋落物分解。在色季拉山高山杜鹃林中,从不同海拔和坡向来探究凋落物分解的影响因素,能够更全面的解释凋落物分解过程中的动态变化。

4 结 论

本研究明确了西藏色季拉山高山杜鹃凋落物在不同海拔和坡向的分解规律,通过木质纤维素质量变化为凋落物分解提供依据,主要结论如下:

1)凋落物经过2年的分解后,海拔3 500、3 700、4 100 m处阴坡的凋落物质量损失大于阳坡,海拔3 900 m处相反,不同海拔和坡向掉落分解50%和分解95%所需的平均时间为2.542和10.985 a。木质素是凋落物质量损失的主要来源,海拔3 700 m阴坡处质量损失最大;纤维素和半纤维素的质量损失分别在海拔4 100 m和3 700 m处最大。

2)结合取样时间、海拔、坡向及土壤理化性质来探究影响凋落物分解动态的因素,发现土壤含水率、碳氮比均对凋落物的分解具有显著影响($P<0.01$),海拔、坡向也是影响高寒森林凋落物分解的重要因素。

然而,本研究仅从环境因素进行探究和讨论,缺乏对微生物群落的测定,后续研究可将环境因素与微生物因素相结合进行深入研究。

参考文献 References

[1] 李艳晖,王瑜,李砧,郝磊,刘茜. 白蜡凋落叶在水体中的分解及对水质的影响[J]. 东北林业大学学报,2020,48(12):38-40,51
Li Y H, Wang Y, Li Z, Hao L, Liu Q. Decomposition of *Fraxinus chinensis* leaf litters and their effects on the water quality[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2020, 48(12): 38-40, 51 (in Chinese)

[2] Krishna M P, Mohan M. Litter decomposition in forest ecosystems: A review[J]. *Energy, Ecology and Environment*, 2017, 2(4): 236-249

[3] Jiang Y F, Yin X Q, Wang F B. The influence of litter mixing on decomposition and soil fauna assemblages in a *Pinus koraiensis* mixed broad-leaved forest of the Changbai Mountains, China[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2013, 55: 28-39

[4] Liu X Z, Huang Z, Havrilla C A, Liu Y, Wu G L. Plant litter crust role in nutrients cycling potentials by bacterial communities in a sandy land ecosystem[J]. *Land Degradation & Development*, 2021, 32(11): 3194-3203

[5] Siles J A, Margesin R. Seasonal soil microbial responses are limited to changes in functionality at two Alpine forest sites differing in altitude and vegetation[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 2204

[6] Gavazov K S. Dynamics of alpine plant litter decomposition in a changing climate[J]. *Plant and Soil*, 2010, 337(1): 19-32

[7] Purahong W, Kapturska D, Pecyna M J, Schulz E, Schloter M, Buscot F, Hofrichter M, Krüger D. Influence of different forest system management practices on leaf litter decomposition rates, nutrient dynamics and the activity of ligninolytic enzymes: A case study from central European forests[J]. *PLoS One*, 2014, 9(4): e93700

[8] 李慧璇,马红亮,尹云锋,高人. 亚热带天然阔叶林凋落物分解过程中活性、惰性碳氮的动态特征[J]. 植物生态学报,2023,47(5):618-628
Li H X, Ma H L, Yin Y F, Gao R. Dynamic of labile, recalcitrant carbon and nitrogen during the litter decomposition in a subtropical natural broadleaf forest[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2023, 47(5): 618-628 (in Chinese)

[9] 郭鑫,罗欢,许雪梅,马爱霞,尚振艳,韩天虎,牛得草,文海燕,李旭东. 不同品质凋落物分解对黄土高原草地土壤有机碳及其稳定性的影响[J]. 草业学报,2023,32(5):83-93
Guo X, Luo H, Xu X M, Ma A X, Shang Z Y, Han T H, Niu D C, Wen H Y, Li X D. Effects of litter decomposition with different qualities on soil organic carbon content and its stability in grassland on the Loess Plateau[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(5): 83-93 (in Chinese)

[10] Chao L, Liu Y Y, Freschet G T, Zhang W D, Yu X, Zheng W H, Guan X, Yang Q P, Chen L C, Dijkstra F, Wang S L. Litter carbon and nutrient chemistry control the magnitude of soil priming effect[J]. *Functional Ecology*, 2019, 33(5): 876-888

[11] Jansson J K, Hofmockel K S. Soil microbiomes and climate change[J]. *Nature Reviews. Microbiology*, 2020, 18(1): 35-46

[12] Liu C J, Westman C, Berg B, Kutsch W, Wang G, Man R Z, Ilvesniemi H. Variation in litterfall-climate relationships between coniferous and broadleaf forests in Eurasia: Litterfall and climate in Eurasia[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2004, 13: 105-114

[13] Schall P, Ammer C. How to quantify forest management intensity in Central European forests[J]. *European Journal of Forest Research*, 2013, 132(2): 379-396

[14] Brockett B F T, Prescott C E, Grayston S J. Soil moisture is the major factor influencing microbial community structure and enzyme activities across seven biogeoclimatic zones in western Canada[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 44(1): 9-20

[15] 樊志颖,陈康,李江荣,汪汉驹,潘开文. 藏东南色季拉山急尖长苞冷杉非结构性碳水化合物时空动态特征[J]. 林业科学研究,2022,35(5):123-133
Fan Z Y, Chen K, Li J R, Wang H J, Pan K W. Spatiotemporal dynamic characteristics of non-structural carbohydrates of *Abies georgei* var *smithii* in Sygera Mountain[J]. *Forest Research*, 2022, 35(5): 123-133 (in Chinese)

[16] Olson J S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems[J]. *Ecology*, 1963, 44(2): 322-331

[17] Van Soest P J, Robertson J B, Lewis B A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition[J]. *Journal of Dairy Science*, 1991, 74(10): 3583-3597

[18] 李娜,赵传燕,郝虎,臧飞,常亚鹏,汪红,杨建红. 海拔和郁闭度对祁连山青海云杉林叶凋落物分解的影响[J]. 生态学报,2021,41(11):4493-4502
Li N, Zhao C Y, Hao H, Zang F, Chang Y P, Wang H, Yang J H. Decomposition and its nutrients dynamic of Qinghai spruce leaf litter with elevation gradient in Qilian Mountains[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(11): 4493-4502 (in Chinese)

[19] Yang K, Wang C H. Water storage effect of soil freeze-thaw process and its impacts on soil hydro-thermal regime variations[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 265: 280-294

[20] 王利峰,和润莲,杨林,陈亚梅,刘洋,张健. 川西高山林线交错带土壤动物对岷江冷杉和高山杜鹃凋落物分解的贡献[J]. 应用生态学报,2016,27(11):3689-3697

Wang L F, He R L, Yang L, Chen Y M, Liu Y, Zhang J. Contribution of soil fauna to litter decomposition of *Abies faxoniana* and *Rhododendron lapponicum* across an alpine timberline ecotone in Western Sichuan, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(11): 3689-3697 (in Chinese)

[21] 刘文耀，刘伦辉，荆桂芬，和爱军．云南松林与常绿阔叶林中枯落叶分解研究[J]．云南植物研究，2000，22(3)：298-306，316
Liu W Y, Liu L H, Jing G F, He A J. Decomposition of leaf litter in *Pinus yunnanensis* forest and evergreen broad—leaved forest in central Yunnan[J]. *Acta Botanica Yunnanica*, 2000, 22(3): 298-306, 316 (in Chinese)

[22] 邓长春，蒋先敏，刘洋，张健，陈亚梅，和润莲．高山林线交错带高山杜鹃的凋落物分解[J]．生态学报，2015，35(6)：1769-1778
Deng C C, Jiang X M, Liu Y, Zhang J, Chen Y M, He R L. Litter decomposition of *Rhododendron lapponicum* in alpine timberline ecotone [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(6): 1769-1778(in Chinese)

[23] 宋梅玲，王玉琴，王宏生，鲍根生．内生真菌对高寒草地紫花针茅凋落物分解的影响[J]．草业学报，2021，30(9)：150-158
Song M L, Wang Y Q, Wang H S, Bao G S. Effect of Epichloë endophyte on the litter decomposition of *Stipa purpurea* in alpine grassland [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30 (9): 150-158 (in Chinese)

[24] 李娜，赵传燕，臧飞，杨建红，郝虎，安金玲，张茂军．祁连山青海云杉叶枯落物木质纤维素的降解动态[J]．兰州大学学报：自然科学版，2021，57(4)：483-490
Li N, Zhao C Y, Zang F, Yang J H, Hao H, An J L, Zhang M J. Degradation dynamics of lignocellulose in the litterfall of *Picea crassifolia* in the Qilian Mountains [J]. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 2021, 57(4): 483-490 (in Chinese)

[25] 赵盼盼，周嘉聪，林开淼，林伟盛，袁萍，曾晓敏，苏莹，徐建国，陈岳民，杨玉盛．不同海拔对福建戴云山黄山松林土壤微生物生物量和土壤酶活性的影响[J]．生态学报，2019，39(8)：2676-2686
Zhao P P, Zhou J C, Lin K M, Lin W S, Yuan P, Zeng X M, Su Y, Xu J G, Chen Y M, Yang Y S. Effects of different altitudes on soil microbial biomass and enzyme activities in *Pinus taiwanensis* forests on Daiyun Mountain, Fujian Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39 (8): 2676-2686 (in Chinese)

[26] 李晗，吴福忠，杨万勤，徐李亚，倪祥银，何洁，胡义．亚高山森林林窗对凋落物分解过程中半纤维素动态的影响[J]．植物生态学报，2015，39(3)：229-238
Li H, Wu F Z, Yang W Q, Xu L Y, Ni X Y, He J, Hu Y. Effects of forest gap on hemicellulose dynamics during foliar litter decomposition in an subalpine forest[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(3): 229-238 (in Chinese)

[27] 吕宸，龚伟，车明轩，康成芳，许蔓菁，吴强，宫渊波．海拔和坡向对高寒灌丛草甸凋落物水源涵养功能的影响[J]．水土保持学报，2020，34(6)：219-225，243
Lü C, Gong W, Che M X, Kang C F, Xu M J, Wu Q, Gong Y B. Effects of altitude and slope direction on water conservation function of litter in alpine shrub meadow [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(6): 219-225, 243 (in Chinese)

[28] 周泓杨，张健，张丹桔，张捷，魏大平，赵燕波，赵波，李川北．不同郁闭度控制下马尾松(*Pinus massoniana*)人工林土壤动物群落特征[J]．生态学报，2017，37(6)：1939-1955
Zhou H Y, Zhang J, Zhang D J, Zhang J, Wei D P, Zhao Y B, Zhao B, Li C B. Community characteristics of soil fauna for different canopy density of a *Pinus massoniana* plantation [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(6): 1939-1955 (in Chinese)

[29] 张悦，张艺凡，马怡波，刘嫦娥，段昌群，字玉奋，唐彬程，张维兰．森林生态系统凋落物分解影响因素研究进展[J]．环境生态学，2023，5(4)：45-56
Zhang Y, Zhang Y F, Ma Y B, Liu C E, Duan C Q, Zi Y F, Tang B C, Zhang W L. Research progress on influencing factors of litter decomposition in forest ecosystem [J]. *Environmental Ecology*, 2023, 5(4): 45-56 (in Chinese)

[30] Chen Y C, Ma S Q, Jiang H M, Hu Y, Lu X Y. Influences of litter diversity and soil moisture on soil microbial communities in decomposing mixed litter of alpine steppe species[J]. *Geoderma*, 2020, 377: 114577

[31] Sorensen P O, Finzi A C, Giasson M A, Reinmann A B, Sanders-DeMott R, Templer P H. Winter soil freeze-thaw cycles lead to reductions in soil microbial biomass and activity not compensated for by soil warming[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 116: 39-47

责任编辑：杨爱东

第一作者简介：侯卓男，中国农业大学资源与环境学院生态学专业硕士研究生。本科毕业于中国海洋大学，期间获学校二等奖学金、创新创业奖学金。研究方向为土壤微生物生态、土壤碳素循环，先后参与西藏高寒森林生态教育部重点实验室开放课题(XZA-JYBSYS-2020-02)、西藏自治区科技创新基地自主研究项目(XZ2022JR0007G)、中国农业大学资源与环境学院“探索计划”资助项目。

通讯作者简介：张新军，西藏农牧学院高原生态研究所副教授。研究方向为微生物天然产物、微生物生态，曾主持国家自然科学基金项目、西藏自治区自然科学基金项目、西藏教育厅基金项目等8项，发表论文18余篇，以第一作者和通讯作者发表SCI论文8篇，申请专利5项(已授权1项)。