

藏东南高山松林凋落物特征研究¹

张新生^{1,2,3}, 张铎^{1,2,3}, 卢杰^{1,2,3*}, 姚慧芳^{1, 2, 3}

(1. 西藏农牧学院高原生态研究所, 西藏 林芝 860000; 2. 青藏高原森林生态教育部重点实验室, 西藏 林芝 860000; 3. 西藏林芝高山森林生态系统国家野外科学观测研究站, 西藏 林芝 860000)

摘要: [目的]通过探究藏东南高山松林凋落物特征, 为揭示该区凋落物特征形成原因以及发挥青藏高原生态安全屏障作用提供理论依据。[方法]以藏东南针叶林优势种群高山松林作为研究对象, 在藏东南地区选取 5 个典型样点, 测定凋落物特征变化情况。[结果]五个样点高山松林凋落物平均厚度为 10.98 ± 1.01 cm, LL、BK、DZ 和 BB 样点凋落物厚度不同层次排序均为: 未分解层 > 半分解层 > 腐烂层, 而 DD 样点凋落物则相反; 五个样点凋落物平均鲜重为 7075.73 ± 938.51 g, 总体上不同层次凋落物鲜重排序为: 腐烂层 > 半分解层 > 未分解层; 五个样点总体上含水率排序是半分解层 ($64.00 \pm 6.12\%$) > 腐烂层 ($52.65 \pm 5.08\%$) > 未分解层 ($50.81 \pm 4.88\%$); 高山松林凋落物各组分所占百分比排序为: 叶 > 果 > 枝 > 其他。[结论]藏东南高山松林凋落物主要体现为凋落物层较厚、现存量较大、含水率相对较低、针叶所占百分比大的特征; 在 5 个样点和 ZT 之间, 不同凋落物层在厚度、鲜重以及含水率的差异性较大, 但在凋落物组分上差异性特征相似; 藏东南高山松林凋落物特征与国内针叶林凋落物特征相似, 与全球地区森林凋落物特征有所差异。

关键词: 凋落物; 高山松林; 厚度; 鲜重; 含水率; 组分; 藏东南

中图分类号: S714.2 文献标识码: A 文章编号:

Litter characteristics of *Pinus densata* forest in Southeast Tibet

ZHANG Xin-Sheng^{1,2,3}, ZHANG Duo^{1,2,3}, LU Jie^{1,2,3*}, YAO Hui-Fang^{1,2,3}

(1. Institute of Tibet Plateau Ecology, Tibet Agriculture & Animal Husbandry University, Nyingchi, Tibet 860000, China; 2. Key Laboratory of Forest Ecology in Tibet Plateau(Tibet Agriculture & Animal Husbandry University), Ministry of Education, Nyingchi, Tibet 860000, China; 3. Linzhi National Forest Ecosystem Observation & Research Station of Tibet, Nyingchi, Tibet 860000, China)

Abstract: Objective: To explore the characteristics of litters in alpine forest in southeast Tibet, and to provide theoretical basis for revealing the formation reasons of the characteristics of litters in this area and playing the role of ecological security barrier of Qinghai-Tibet Plateau. METHODS: Taking alpine pine forest, the dominant population of coniferous forest in southeast Tibet as the research object, 5 typical sample points were selected in southeast Tibet to measure the change of characteristics of litters. Results: The average thickness of alpine pine litter at five sample sites was 10.98 ± 1.01 cm. The order of different layers of litter thickness at LL, BK, DZ

收稿日期: 修订日期:

基金项目: 科技部国家野外科学观测站(生态系统)运行补助项目(2015-2020); 青藏高原森林生态教育部重点实验室研究生创新计划项目(XZA-JYBSYS-2021-Y13)。

第一作者简介: 张新生(1998-), 男, 山东临沂人, 在读硕士, 主要从事森林生态学方面的研究工作, (电话)17362046599(电子信箱)739584818@qq.com。

*通讯作者: 卢杰(1973-), 男, 四川安岳人, 教授, 主要从事森林生态学的研究与教学工作, (电话)13908940826(电子信箱)tibetlj@163.com。

and BB samples was as follows: undecomposed layer > semi-decomposed layer > decomposed layer, while that at DD sample sites was the opposite. The average fresh weight of litters in the five samples was 7075.73 ± 938.51 g. In general, the order of fresh weight of litters in different layers was as follows: decomposed layer > semi-decomposed layer > undecomposed layer; The total water content of the five samples was in the order of semi-decomposed layer ($64.00 \pm 6.12\%$) > rotten layer ($52.65 \pm 5.08\%$) and undecomposed > layer ($50.81 \pm 4.88\%$). The order of litter percentage of each group in alpine forest was: leaf BBB 0 fruit BBB 1 branch BBB 2 other. Conclusion: The litters of alpine pine forest in southeast Tibet are mainly characterized by thick litters, large inventory, relatively low moisture content and large percentage of needles. Its characteristics are similar to those of domestic coniferous forest litter, but different from those of global forest litter.

Keywords: Litter; *Pinus densata* forest; Thickness; Fresh weight; Moisture content; Component; Tibetan southeastern

森林凋落物是森林从幼苗走向成熟过程中产生的代谢物质，其作为陆地生态系统中植物—土壤养分和能量循环的关键环节，将在平衡与维持生态系统结构稳定和提高群落生产力中发挥着关键作用 (Handa *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2017)。森林凋落物作为碳和营养元素从植物转移到土壤的主要途径，近年来相关研究工作得到了非常深入和广泛的开展，且主要集中在以下几个方面：凋落物分解速率(范琳杰等, 2021)、凋落物生态化学计量特征(李素新等, 2021)、凋落物养分释放(潘禹等, 2021)、凋落物季节动态变化及其凋落物水文效应(宫雨薇等, 2021; 王金悦等, 2020)等。在高山松 (*Pinus densata*) 方面的研究上，其作为松科松属，主要分布在海拔 1500~4500m 的河谷、山地、和高原，常成纯林或与云南松、华山松形成混交林，并且高山松林作为藏东南针叶林的优势种群，对雅鲁藏布江下游流域与尼洋河流域将发挥着重要的水源涵养作用(考洪娜等, 2012)。现阶段对高山松的研究多集中在空间分布(刘蓉姣等, 2021)、生物量(胥喆等, 2017)、群落结构(喻武等, 2019)、土壤种子库与天然更新以及生态位特化与环境胁迫(高郟等, 2021; Mao *et al.*, 2011)等方面，而对高山松凋落物研究的方面较少，并且在高山松凋落物方面的研究主要是关于凋落物持水特性以及凋落物碳储量(李菊等, 2014; 杨阳等, 2016)。

青藏高原地区不仅是我国的生态安全屏障，还被国际生物圈(IBP)所重视，并把它列为全球气候变化的敏感区，而藏东南森林生态系统具有全球较高水平的森林碳储量和碳密度，其凋落物作为植物与土壤之间碳转移的枢纽，对全球陆地生态系统的碳收支平衡将有着举足轻重的作用(周晨霓等, 2015)。目前，针对藏东南地区森林凋落物方面的研究虽然有一些报道，但有关该区于凋落物特征尤其凋落物厚度、鲜重、含水率、组分等少见报道。鉴于此，本研究在藏东南地区，以优势种群——高山松为研究对象，设置 5 个样点，探索高山松林在藏东南地区的凋落物特征，分析藏东南地区凋落物特征与国内以及全球地区凋落物特征的区别，以期揭示该区凋落物特征的形成原因，并为探讨青藏高原地区发挥全球生态安全屏障作用提供一定的理论基础。

1 研究区概况

藏东南地区属于湿润山地暖温带和半湿润山地温带气候，干湿季分明。年平均气温 -0.73 °C，最高月

(7月)平均气温 9.23 °C, 最低月(1月)平均气温-13.98 °C。年均降水量 1134 mm, 6~9月为雨季, 占全年降水的 80%左右, 年均相对湿度 78.8%, 全年日照时数为 1151 h (李永霞等, 2018)。高山松林下灌木主要有川滇高山栎(*Quercus aquifolioides*)、川西栎(*Q. gilliana*)、灰背栎(*Q. senescens*)、山生柳(*Salix oritrepha*)、铜钱叶白珠(*Gaultheria nummularioides*)、三桠乌药(*Lindera obtusiloba*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、牛奶子(*Elaeagnus umbellata*)、刺毛果忍冬(*Lonicera hispida* var. *chaetocarp*)、多蕊金丝桃(*Hypericum hookerianum*)、刺茶藨子(*Ribes alpestre*)、劲直菝契(*Smilax rigida*)、甘青锦鸡儿(*Caragana tangutica*)、金腊梅(*Potentilla fruticosa*)等。草本植物层主要有匍匐悬钩子(*Rubus* sp.)、猪殃殃(*Galium aparine*)、抱茎柴胡(*Bupleurum longicaule* var. *amplexicaule*)、林地早熟禾(*Poa* sp.)、多刺绿绒蒿(*Meconopsis horridula*)、旱茅(*Eremopogon delavayi*)、甘西鼠尾草(*Salvia przewalskii*)、沿阶草(*Ophiopogon bodinieri*)等。

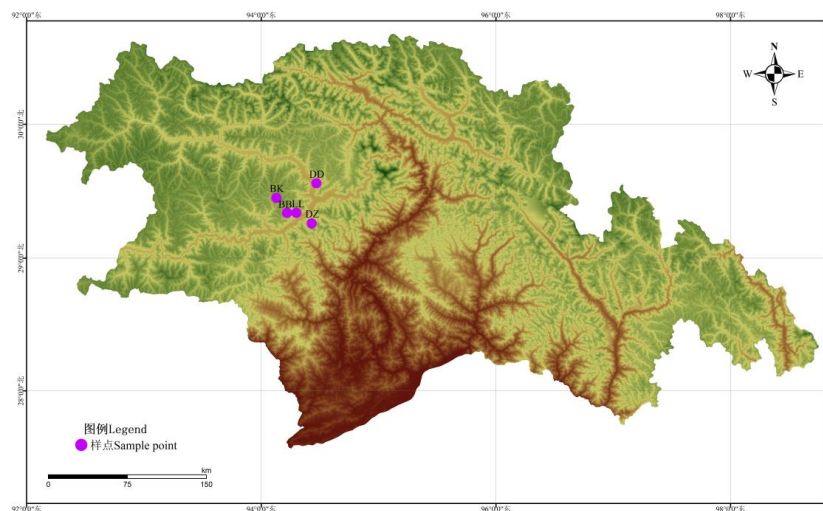


图 1 样点分布图

Figure 1. The sample point distribution diagram

由图 1 所示, 在藏东南地区选择 5 个典型高山松林采集凋落物。5 个采样点基本情况如下: 东久乡东久沟样点 (DD) (94°49'14.38"E, 29°57'20.70"N), 海拔 2600 m, 坡度约 33°, 为高山松纯林, 林内有大量的幼苗和幼树。林芝镇林芝桥样 (LL) (94°30'32.11"E, 29°34'02.50"N), 海拔 3250m, 坡度约 32°, 川滇高山栎高山松林, 林内有少量的幼苗。巴宜区比日神山样点 (BB) (94°22'23.48"E, 29°34'15.91"N), 海拔 3150m, 坡度约 22°, 高山松与川滇高山栎混交林, 因处于景区内周围环境保护好, 高山松生长环境人为干扰少, 但林内少见幼苗和幼树。巴宜区卡定沟样点 (BK) (94°9'53.02"E, 29°44'53.31"N), 海拔 3100m, 平地, 川滇高山栎高山松林, 其中川滇高山栎较多, 凋落物也多为高山栎树枝, 林内有少量的幼树。丹娘乡中心小学样点 (DZ) (94°43'19.68"E, 29°26'35.52"N), 海拔 3000m, 平地, 高山松纯林, 凋落物较少, 有较多的幼苗和幼树。文中 ZT 表示总体情况。

2 研究方法

2020年11月，在5个样点分别对高山松林凋落物进行收集，每个样点设置3个100cm×100cm样方。每个样方中把凋落物划分为未分解层、半分解层和腐烂层，进行取样并记录每层厚度。凋落物采集工作设置在高山松树冠阴影面积内，将凋落物的腐烂等级分为三类，即表层未分解层、中层半分解层以及底层腐烂层，按照这三个层次分别采集凋落物装入自封袋内。对取回的凋落物样品进行称重（鲜重），之后置于烘箱中，以80℃的温度烘干样品至恒重，并再次进行称重（干生物量）。根据两次称重结果，计算各层凋落物的含水率（含水率=含水量/鲜重×100%）。同时，对未分解层凋落物按枝、叶、果、其它进行分类，并称取每类重量，算出各类所占百分比。本研究通过Excel 2010软件整理数据，并采用SPSS 23.0数据分析软件进行分析以及使用Origin 2019软件进行绘图。

3 结果与分析

3.1 凋落物厚度

不同样点高山松林凋落物厚度各异（图2）。总体上看，5个样点凋落物平均厚度为10.98±1.01cm，LL和BK样点凋落物厚度较高，分别是12.63±5.76cm和12.30±1.31cm，其次是DD样点为11.30±1.14cm，BB和DZ样点凋落物厚度较低，分别是6.90±1.14cm和6.17±1.18cm。

在5个样点和ZT上，未分解层LL与BK差异不明显，但这两个样点与DD、DZ、BB三个样点差异显著，且与ZT也有所差异；半分解层LL与BK之间、DD、BB、ZT之间差异不明显，但LL、BK与DZ、BB、ZT差异较显著，显著性更大的则是LL、BK、DD、BB、ZT与DZ之间的差异；腐烂层DD与LL、BK、ZT差异较显著，且与DZ、BB样点差异显著性更大，而LL、BK、ZT之间、DZ与BB之间差异不明显。在LL、DD、BK、BB样点内，不同凋落物层的差异性主要为未分解层与半分解层差异不显著，未分解层、半分解层与腐烂层差异显著，而ZT的不同凋落物层差异性不显著。

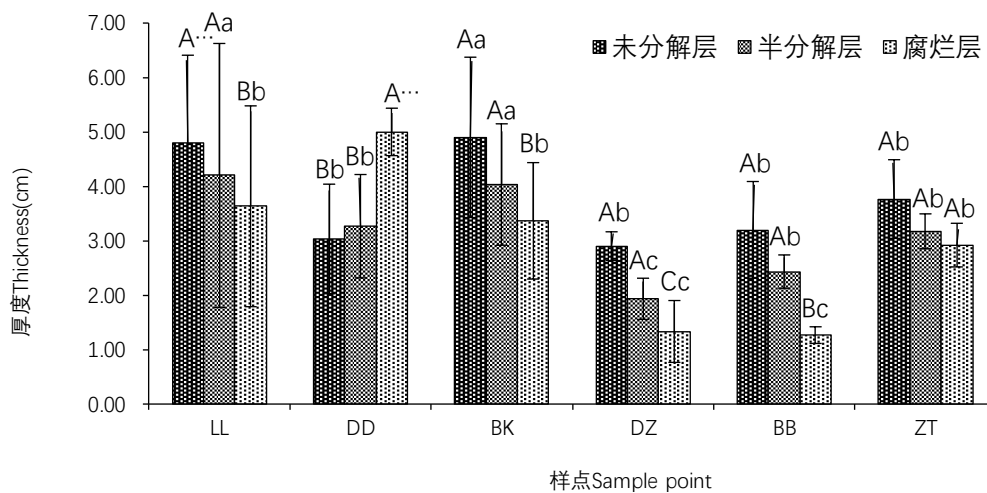


图2 凋落物厚度情况

Figure 2 Thickness of Falling litter

(组间差异性*: 同一小写字母代表差异不显著，不同小写字母代表差异显著。组内差异性*: 同一大写字母代表差异不

显著，不同大写字母代表差异显著。下同)

(Inter-group difference *: The same lower case letter represents insignificant difference, and different lower case letters represent a significant difference. Differin group *: The difference of the same capital letters is not significant, and different capital letters. The same below)

LL、BK、DZ 和 BB 样点凋落物厚度不同层次排序均为：未分解层 > 半分解层 > 腐烂层，而 DD 样点凋落物则相反，5 个样点凋落物的未分解层、半分解层和腐烂层厚度分别为：3.77±0.72cm、3.17±0.32cm 和 2.92±0.40cm。各样点未分解层厚度大小排序及数值是：BK (4.90±1.47cm) > LL (4.80±1.61cm) > BB (3.20±0.89cm) > DD (3.03±1.01cm) > DZ (2.90±0.26cm)，半分解层排序是 LL (4.20±2.42cm) > BK (4.03±1.12cm) > DD (3.27±0.95cm) > BB (2.43±0.31cm) > DZ (1.93±0.38cm)，而腐烂层排序是 DD (5.00±0.44cm) > LL (3.63±1.84cm) > BK (3.37±1.07cm) > DZ (1.33±0.57cm) > BB (1.27±0.15cm)。

3.2 凋落物重量

不同样点高山松林凋落物不同层次现存量鲜重情况见图 3。5 个样点凋落物平均鲜重为 7075.73±938.51g，DD 样点凋落物鲜重最重，为 10406.33±3924.74g，其次是 BK 和 LL 样点，分别为 8053.33±1081.60g 和 7330.33±2965.85g，再次是 BB 样点有 5052.00±1123.39g，DZ 样点凋落物鲜重最轻，为 4536.33±188.76g。

在 5 个样点和 ZT 上，未分解层 LL、BK、DZ、BB、ZT 差异不明显，但与 DD 样点差异显著；半分解层 LL 与 BK 之间、BB 与 ZT 之间、DD 与 DZ 之间差异不明显，LL、BK 与 BB、ZT 之间差异较明显，但 LL、BK 与 DD、DZ 之间显著性差异更大；腐烂层 DD 与 LL、BK、ZT 差异较显著，但与 DZ、BB 样点之间的差异显著性更大，而 LL、BK、ZT 之间、DZ 与 BB 之间差异不明显。在 LL、BK、BB 样点内，不同凋落物层的差异性主要为半分解层与腐烂层差异不显著，半分解层、腐烂层与未分解层差异显著；在 DD、ZT 之间腐烂层与未分解层、半分解层差异显著，未分解层与半分解层差异不显著；而在 DZ 样点上，不同凋落物层差异性不显著。

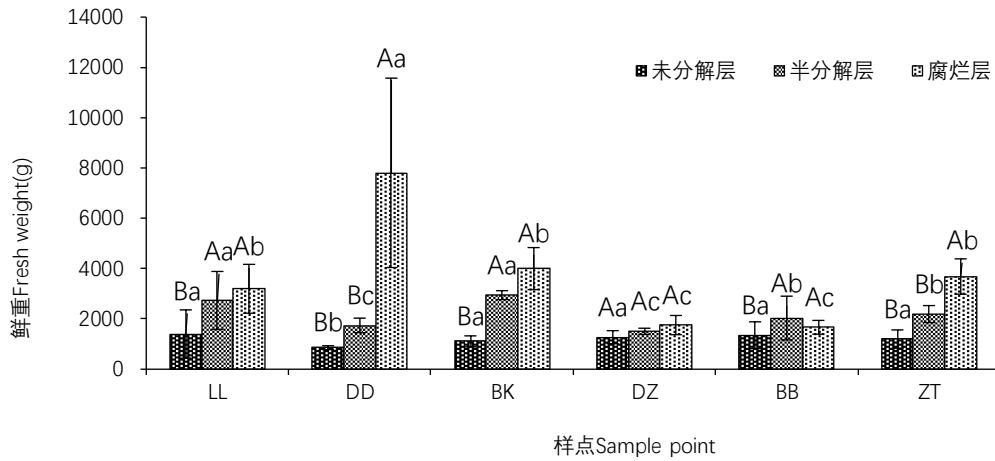


图3 凋落物鲜重情况

Figure 3 Fresh weight of the litter

总体上不同层次凋落物鲜重排序为：腐烂层>半分解层>未分解层，分别为 3699.00±687.07g、2132.53±186.27g 和 1272.93±257.78g。LL、DD、BK 和 DZ 样点的排序也与总体一样，而 BB 样点的排序则是：半分解层>腐烂层>未分解层。各样点未分解层鲜重大小排序及数值是：LL (1398.00±959.10g) > BB (1351.67±531.34g) > DZ (1273.33±259.40g) > BK (1107.33±216.78g) > DD (855.00±78.35g), 半分解层排序是 BK(2945.33±176.82g) > LL(2734.67±1152.60g) > BB(2033.67±870.67g) > DD(1743.00±288.51g) > DZ (1507.67±122.28g)，而腐烂层排序是 DD (7808.33±3765.85g) > BK (4000.67±835.38g) > LL (3197.67±971.35g) > DZ (1755.33±380.94g) > BB (1667.00±274.09g)。

3.3 凋落物含水率

高山松林凋落物未分解层、半分解层和腐烂层的含水率情况见图 4。从图中可知，五个样点总体上含水率排序是半分解层 (64.00±6.12%) > 腐烂层 (52.65±5.08%) > 未分解层 (50.81±4.88%)。所有样点凋落物半分解层的含水率最大，DD、BK 和 BB 样点凋落物腐烂层含水率次之，未分解层最小，而 LL 和 DZ 样点凋落物未分解层次之，腐烂层最小。

在 5 个样点和 ZT 上，未分解层 LL、BK、BB、ZT 之间差异不明显，但与 DD、DZ 两个样点之间差异显著；半分解层 LL、DD、BK、BB、ZT 之间差异不明显，但与 DZ 样点有所差异；腐烂层 LL、BK、BB 之间差异不显著，但与 DD、DZ、ZT 之间的差异显著。在 5 个样点和 ZT 内，不同凋落物层的差异性主要为半分解层与未分解层、腐烂层之间差异显著，未分解层与腐烂层差异不显著。

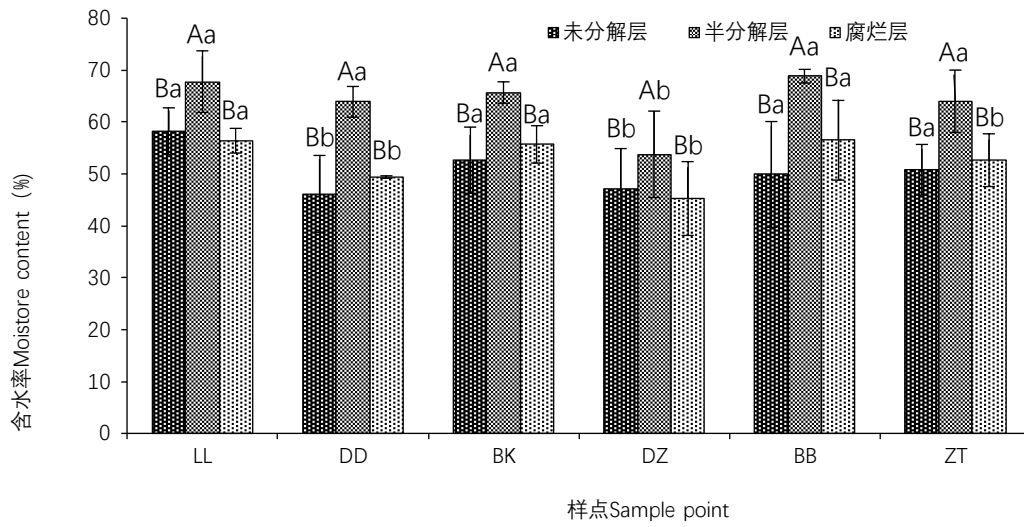


图4 凋落物含水率情况

Figure 4 Water content of the litter

五个样点凋落物不同层次的含水率存在较大差异，同时不同样点的同一层含水率也存在较大差异。各样点未分解层含水率排序是：LL (68.26±4.47%) > BK (52.65±6.38%) > BB (49.90±10.19%) > DZ (47.08±7.80%) > DD (46.16±7.40%)，半分层含水率排序为：BB (68.83±1.32%) > LL (67.78±5.93%) > BK (65.69±2.06%) > DD (63.89±2.94%) > DZ (53.78±8.32%)，而腐烂层含水率排序则是：BB (56.49±7.68%) > LL (56.40±2.37%) > BK (55.69±3.60%) > DD (49.39±0.24%) > DZ (45.26±7.11%)。

3.4 凋落物组分

高山松林凋落物各组分所占百分比情况见表 1，从表中可知，五个样点总体上叶占百分比最大、为 70.19±5.61%，其次是果、为 17.20±3.52%，枝较小、占 9.47±2.55%，其他最小、仅占 3.15±0.53%，不同样点凋落物组分均呈现此规律，即：叶 > 果 > 枝 > 其他。叶在各样点所占百分比排序为：LL > BB > DZ > DD > BK，所占百分比差异不明显；果在各样点所占百分比排序是：DZ > BK > DD > BB > LL，差异也不明显；而枝在各样点所占百分比排序则是：DD > BK > DZ > LL > BB，前三个样点与后两个样点差异显著；其他的百分比排序为：DZ > LL > DD > BK > BB，差异也不明显。在 5 个样点和 ZT 内，枝与果之间差异不显著，但枝、果与叶之间存在差异，且组分内的其它成分与叶之间差异性更高。

表 1 凋落物组分情况 (%)

Table 1 Falling ent component (%)

样点 Sample Point	枝 Branch	叶 Leaves	果 Fruit	其他 Other
LL	9.47 ± 2.55	70.19 ± 5.61	17.20 ± 3.52	3.15 ± 0.53
DD	17.20 ± 3.52	63.89 ± 2.94	17.20 ± 3.52	3.15 ± 0.53
BK	9.47 ± 2.55	65.69 ± 2.06	17.20 ± 3.52	3.15 ± 0.53
DZ	9.47 ± 2.55	53.78 ± 8.32	17.20 ± 3.52	3.15 ± 0.53
BB	9.47 ± 2.55	68.83 ± 1.32	17.20 ± 3.52	3.15 ± 0.53
ZT	9.47 ± 2.55	63.50 ± 3.50	17.20 ± 3.52	3.15 ± 0.53

LL	6.66±2.08 Bb	79.67±12.58 Aa	10.33±10.02 Ba	3.34±1.53 Ca
DD	12.33±8.39 Ba	65.98±29.13 Aa	18.65±20.72 Ba	3.03±1.76 Ca
BK	12.00±9.64 Ba	65.67±12.86 Aa	19.33±4.04 Ba	3.00±1.00 Ca
DZ	10.00±3.61 Ba	66.00±7.00 Aa	20.00±9.54 Ba	4.00±1.00 Ca
BB	6.33±2.08 Bb	73.62±1.47 Aa	17.67±1.53 Ba	2.38±0.54 Ca
ZT	9.47±2.55 Bb	70.19±5.61 Aa	17.20±3.52 Ba	3.15±0.53 Ca

注：表中数据为平均值±SD。

4 讨论

4.1 藏东南高山松林凋落物特征

森林凋落物的厚度、重量、含水量以及组分特征会因环境条件和森林特征而异（黄彩凤等，2021）。本文所调查 5 个样点的高山松林凋落物特征主要受藏东南地区环境因素的影响。不同样点的凋落物特征虽略显差异，但在整体上体现出了藏东南凋落物特征情况。

凋落物厚度方面，高山松林凋落物厚度总体偏厚。据国内相关研究，人工林不同林型凋落物最大厚度为 5.81cm，厚度较小主要是人为因素所导致的（彭玉华等，2015）。与国内研究相比，藏东南高山松林凋落物厚度为 10.98±1.01cm，凋落物厚度较厚。分析藏东南高山松林凋落物厚度较高的原因：藏东南位于青藏高原东南部，而青藏高原作为我国的生态屏障，生态安全与保护极其重要，并且藏东南是青藏高原森林面积最多的一个区域。因此，国家颁布法律对藏东南森林环境进行保护。在缺乏人为因素的干扰下，高山松林处于自然演替状态，藏东南凋落物厚度自然厚于人工林内的凋落物厚度。

凋落物重量与含水率方面，凋落物总体鲜重重量偏重，其中厚度较厚是鲜重重量偏重的一个原因。另一个就是含水率。藏东南地区属于湿润和半湿润气候，年均降水量超过 1000 mm，而藏东南的高山松林属于自然林，生长状况良好，未受到破坏，林冠截留与森林蓄水能力较强，并且凋落物厚度较厚，易于保留水分进行吸收。因此，藏东南高山松林凋落物不仅鲜重重量偏重，而且含水率也较高。

凋落物组分方面，不同样点凋落物组分主要以针叶为主。国内相关研究表明，常绿阔叶林凋落物的叶

片是森林群落中凋落物组分的主要成分,枝、果、其它所占总量的比例较少(袁位高等,2009)。在本研究中,针叶为藏东南高山松林凋落物的主要组分,与他人研究一致,说明藏东南高山松林凋落节律正常。

目前,我国对森林凋落物特征的研究以亚热带地区为主,在温带地区中对森林凋落物特征研究较少(何帆等,2008;郑路等,2012)。因此,要加强藏东南地区森林凋落物特征的研究,提高藏东南地区森林生态系统的研究水平,为揭示该区凋落物特征形成原因提供相关依据,并为探讨青藏高原地区发挥全球生态安全屏障作用提供一定的理论基础。

4.2 藏东南与国内森林凋落物特征的差异

凋落物现存量是森林凋落物分解与输入后所得到的净累计值。国内相关研究表明,全国范围内的森林凋落物现存量平均约为 466.52g/m^2 ,最大为 5947g/m^2 ,最小为 2.8g/m^2 (温丁等,2016)。在东南地区,高山松林凋落物现存量平均值为 3113.32g/m^2 ,其远大于全国范围内的森林凋落物现存量平均值。这主要原因在于全国范围内的森林所生长的年均温与土壤粒级不同,藏东南地区年均温较高,土壤粉粒较小,其凋落物现存量远远高于全国凋落物现存量平均值。

由于我国森林所分布的气候带主要为热带、亚热带、温带,所以国内学者对森林凋落物的研究主要围绕这三个气候带。这三个气候带所包含的森林类型为雨林、常绿阔叶林、针阔混交林、落叶阔叶林、针叶林。藏东南高山松林属于天然针叶林,凋落量特征为凋落物层较厚、现存量较大、含水率相对较低、针叶所占百分比大。根据国内学者对雨林、常绿阔叶林、针阔混交林、落叶阔叶林、针叶林等天然林凋落物特征的研究,藏东南高山松林凋落物特征与国内天然针叶林凋落物特征相似(熊壮等,2018;王希华等,2008;吴金卓等,2016;陈国平等,2016;常雅军等,2011)。

在国内学者对5种天然林类型凋落物组分特征的研究中,可以发现叶是所有森林类型凋落物组分中的主要成分(袁方等,2018)。在藏东南高山松林凋落物组分特征中,叶也是组分中的主要成分,这与国内学者调查的研究结果一致。与国内针叶林组分进行对比,藏东南高山松林凋落物组分中的叶成分与针叶林相差不大,但在枝、繁殖体以及其他组分方面有所偏差。

总体而言,藏东南高山松林凋落物特征与国内针叶林凋落物特征区别不大,但与雨林、常绿阔叶林、针阔混交林以及落叶阔叶林的凋落物特征有所区别。对此,可以分析藏东南地区的针叶林生境与国内针叶林生境相差不大,能够引进国内针叶林树种完善藏东南地区生物多样性,更好的发挥青藏高原生态安全屏障的作用。

4.3 藏东南与全球森林凋落物特征的差异

不同生境条件下森林凋落物特征是不同的。因此,有必要分析藏东南高山松林凋落物特征与全球森林凋落物特征的区别。由于全球所包含的范围甚广,所以在除去南极洲的另外六个大洲选择典型地区进行凋落物特征对比分析。

我国属于亚洲地区国家,藏东南地区又属于高海拔地区。因此,在亚洲与藏东南地区相似为印度喜马拉雅山脉地区。在喜马拉雅山脉,本地落叶松(*Larix gmelinii*)林凋落物特征主要为植物凋落叶分解速率和养分释放速率较低,凋落量较少,组分主要以针叶为主(Mukesh *et al.*, 2021);在欧洲地区,意大利山

区森林中的欧洲山毛榉(*Fagus sylvatica*)、道格拉斯冷杉(*Abies fabri*)和土耳其橡树(*Quercus palustris*)其凋落物特征主要表现为凋落量大,组分复杂,并且在研究中发现林分类型会对凋落量与组分产生影响(Roberta *et al.*, 2021);在北美洲地区,凋落物质量和凋落物组分的分布在林分间差异很大,强烈影响凋落物中微量营养元素和微量金属的输入(Ott *et al.*, 2021);在南美洲地区,巴西学者研究桉树(*Eucalyptus robusta*)凋落物特征,发现桉树凋落物的养分循环效率较低,凋落量较少,组分以桉树叶为主(Ferreira *et al.*, 2021);在西非的苏丹地区,学者们对3种农林复合树种凋落叶分解及养分释放进行研究,发现混配不同质量的凋落物可促进质量差的纯凋落物的分解速率,其凋落物特征主要体现为凋落量大,组分以叶枯落物为主(Cissé *et al.*, 2021);在大洋洲的典型代表就是澳大利亚昆士兰布里斯班地区,研究人员发现桉树凋落物总量、叶凋落物总量、年平均累积凋落物生物量、凋落物C浓度和经叶凋落物的含碳量均较低(Bushra *et al.*, 2020)。

综上,藏东南高山松林凋落物特征与全球森林凋落物特征有所差异。原因主要有两个方面:一是全球地区的森林与藏东南地区的高山松林只有部分地区处于同一纬度带,森林生境不同,凋落物特征自然会有所差异;二是全球地区的代表性树种与藏东南地区的代表性树种不同,藏东南地区主要以高山松林为主,为针叶林,而全球地区的代表性树种繁多,其凋落物特征必然有所差异。

5 结论

本实验表明:一方面,不同组分和生境条件对藏东南高山松凋落物特征均有不同程度的影响,其中在5个样点和ZT之间不同凋落物层在厚度、鲜重以及含水率的差异性较大,在凋落物组分上差异性特征相似,但在整体上藏东南高山松林凋落物主要表现为厚度较厚、重量较重、含水率较高以及组分以叶为主的特征。另一方面,藏东南高山松林凋落物特征与国内针叶林凋落物特征差异不显著,但与全球森林凋落物特征差异明显。这说明生长环境条件的差异显著地影响着凋落物的特征,凋落物与生境紧密联系,其与凋落物特征之间的相互作用的复杂性使得生境的作用效应亦变得更加复杂。因此,今后还需进一步探究藏东南地区凋落物特征规律,对凋落物厚度、重量、含水率以及组分等特征进行研究,深入了解藏东南地区凋落物特征,为揭示该区凋落物特征形成原因以及发挥青藏高原生态安全屏障作用提供理论依据。

参考文献

- 陈国平, 俎丽红, 高张莹, 等. 2016. 八仙山不同立地落叶阔叶林凋落物养分特征及土壤肥力评价研究. 植物研究, 36(06): 878-885.
- (Chen G P, Qu L H, Gao Z Y, et al. 2016. Litter nutrient characteristics and soil fertility evaluation of deciduous broad-leaved forest at different sites in Baxian Mountain. Plant research. 36(06): 878-885. [in Chinese])
- 常雅军, 陈琦, 曹靖, 等. 2011. 甘肃小陇山不同针叶林凋落物量、养分储量及持水特性[J]. 生态学报, 31(9): 2392-2400.
- (Chang Y J, Chen Q, Cao J, et al. 2011. Litter quantity, nutrient storage and water holding capacity of different coniferous forests in Xiaolongshan, Gansu Province. Acta ecologica sinica. 31(9): 2392-2400. [in Chinese])

范琳杰, 李成道, 李向义, 等. 2021. 极端干旱区沙土掩埋对凋落物分解速率及盐分含量动态的影响[J/OL]. 植物生态学报: 1-10[2021-06-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3397.q.20210527.0936.004.html>.

(Fan L J, Li C D, Li X Y, *et al.* 2021. Effects of sand burial on litter decomposition rate and salt content dynamics in extreme arid area. *Chinese Journal of Plant Ecology*: 1-10[2021-06-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3397.q.20210527.0936.004.html>. [in Chinese])

宫雨薇, 王璐, 谭颖, 等. 2021. 长白山源头溪流河床凋落物的分布特征及季节动态[J]. 生态科学, 40(02): 74-81.

(Gong Y W, Wang L, Tan Y, *et al.* 2021. Distribution characteristics and seasonal dynamics of streambed litter in headstream of Changbai Mountain. *Ecological science*. 40(02): 74-81. [in Chinese])

高郟, 李照青, 卢杰, 等. 2021. 西藏工布自然保护区高山松林土壤种子库空间分布动态特征[J]. 林业科学研究, 34(02): 158-165.

(Gao T, Li Z Q, Lu J, *et al.* 2021. Spatial distribution dynamics of soil seed banks in alpine pine forests in Gongbu Nature Reserve, Tibet. *Forestry scientific research*. 34(02): 158-165. [in Chinese])

黄彩凤, 梁晶晶, 张燕林, 等. 2021. 森林凋落物特性及对土壤生态功能影响研究进展[J/OL]. 世界林业研究: 1-9[2021-05-31]. <https://doi.org/10.13348/j.cnki.sjlyyj.2020.0134.y>.

(Huang C F, Liang J J, Zhang Y L, *et al.* 2021. Research progress on characteristics of forest litter and its effects on soil ecological function. *World Forestry Research*: 1-9[2021-05-31]. <https://doi.org/10.13348/j.cnki.sjlyyj.2020.0134.y>. [in Chinese])

何帆, 王得祥, 雷瑞德, 等. 2008. 秦岭林区主要树种叶片凋落物性质的研究[J]. 西北林学院学报, 23(4): 30-33.

(He F, Wang D X, Lei R D, *et al.* 2008. Study on the properties of leaf litter of main tree species in Qinling forest region. *Journal of Northwest Forestry University*. 23(4): 30-33. [in Chinese])

李素新, 张芸香, 郭晋平. 2021. 模拟氮沉降对华北落叶松林凋落叶生态化学计量特征的影响[J]. 中国水土保持科学(中英文), 19(02): 12-18.

(Li S X, Zhang X X, Guo J P. 2021. Effects of simulated nitrogen deposition on ecological stoichiometric characteristics of deciduous leaf litter in a larch forestland. *Chinese Science of Soil and Water Conservation*. 19(02): 12-18. [in Chinese])

刘蓉姣, 张加龙, 陈培高. 2021. 基于混合像元分解的香格里拉市高山松空间分布变化研究[J]. 西北林学院学报, 36(01): 9-17.

(Liu R J, Zhang J L, Chen P G. 2021. Spatial distribution variation of *Pinus alpine* in Shangri-La city based on mixed pixel decomposition. *Journal of Northwest Forestry University*. 36(01): 9-17. [in Chinese])

李菊, 卢杰. 2014. 色季拉山针叶林凋落物持水特性研究[J]. 林业资源管理, (04): 98-102.

(Li J, Lu J. 2014. Water retention characteristics of coniferous forest litter in Sejila Mountain. *Forestry resource management*. (04): 98-102. [in Chinese])

李永霞, 索郎拉措, 杨小林. 2018. 急尖长苞冷杉叶片结构和光合特性对海拔高度的响应[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 57(4): 503-509.

(Li Y X, Suo Lang L C, Yang X L. 2018. Responses of leaf structure and photosynthetic characteristics of *Abies* spp. to altitude. *Journal of Xiamen University (Natural Science Edition)*. 57(4): 503-509. [in Chinese])

考洪娜, 兰婷, 王晓茹, 等. 2012. 高山松及其亲本种油松和云南松 DHAR 基因的功能分化[J]. 植物学报, 47(1): 1-10.

(Kao H N, Lan T, Wang X R, *et al.* 2012. Functional differentiation of DHAR gene from *Pinus tabulaeformis* and *Pinus yunnanensis*, its parent species. *Journal of plant*. 47(1): 1-10. [in Chinese])

潘禹, 王克勤, 宋娅丽, 等. 2021. 华山松林凋落物养分释放及土壤生态化学计量特征对模拟氮沉降的短期响应[J]. 生态环境学报, 30(03): 492-502.

(Pan Y, Wang K Q, Song Y L, *et al.* 2021. Short-term responses of nutrient release from litter and soil ecological stoichiometry to simulated nitrogen deposition in pine forest of Huashan Mountain. *Journal of Ecology and Environment*. 30(03): 492-502. [in Chinese])

彭玉华, 黄小荣, 申文辉, 等. 2015. 老虎岭库区不同林型凋落物特征[J]. 中国水土保持, (06): 56-59, 77.

(Peng Y H, Huang X R, Chen W H, *et al.* 2015. Characteristics of litterfall of different forest types in Laohuling reservoir area. *Soil and Water Conservation in China*. (06): 56-59, 77. [in Chinese])

王金悦, 邓羽松, 林立文, 等. 2020. 南亚热带 5 种典型人工林凋落物水文效应[J]. 水土保持学报, 34(05): 169-175.

(Wang J Y, Deng Y S, Lin L W, *et al.* 2020. Hydrological effects of litter in five typical plantations in the south subtropical region. *Journal of Soil and Water Conservation*. 34(05): 169-175. [in Chinese])

温丁, 何念鹏. 2016. 中国森林和草地凋落物现存量的空间分布格局及其控制因素[J]. 生态学报, 36(10): 2876-2884.

(Wen D, He N P. 2016. Spatial distribution patterns and controlling factors of litter stock in forests and grasslands in China. *Acta ecologica sinica*. 36(10): 2876-2884. [in Chinese])

王希华, 阎恩荣, 周武. 2008. 天童常绿阔叶林不同退化群落的凋落物特征及与土壤养分动态的关系[J]. 植物生态学报, 32(1): 1-12.

(Wang X H, Yan E R, Zhou W. 2008. Characteristics of litter and its relationship with soil nutrient dynamics in different degraded evergreen broad-leaved forest in Tiantong, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*. 32(1): 1-12. [in Chinese])

吴金卓, 孔琳琳, 王娇娇, 等. 2016. 吉林蛟河不同演替阶段针阔混交林凋落物持水特性研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 40(02): 113-120.

(Wu J Z, Kong L L, Wang J J, *et al.* 2016. Water retention characteristics of litters in coniferous and broadleaf mixed forests at different succession stages in Jiaohe River, Jilin Province. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*. 40(02): 113-120. [in Chinese])

胥喆, 舒清态, 杨凯博, 等. 2017. 基于非线性混合效应的高山松林生物量模型研究[J]. 江西农业大学学报, 39(01): 101-110.

- (Xu Z, Shu Q T, Yang K B, *et al.* 2017. Biomass model of alpine forest based on nonlinear mixing effect. *Journal of Jiangxi Agricultural University*. 39(01): 101-110. [in Chinese])
- 熊壮, 叶文, 张树斌, 等. 2018. 西双版纳热带季节雨林与橡胶林凋落物的持水特性[J]. *浙江农林大学学报*, 35(06): 1054-1061.
- (Xiong Z, Ye W, Zhang S B, *et al.* 2018. Water holding characteristics of litter in tropical seasonal rain forest and rubber forest in Xishuangbanna, China. *Journal of Zhejiang A&F University*. 35(06): 1054-1061. [in Chinese])
- 喻武, 梁博, 万丹, 等. 2019. 波密县通麦-八盖公路沿线植物群落结构特征及其保护对策[J]. *高原农业*, 2019, 3(03): 239-248, 254.
- (Yu W, Liang B, Wan D, *et al.* 2019. Plant community structure along the Tongmai-Badai Highway in Bomi County and its protection strategies. *Plateau agriculture*. 3(03): 239-248, 254. [in Chinese])
- 杨阳, 王根绪, 冉飞, 等. 2016. 青藏高原主要森林类型凋落物碳储量及空间分布格局[J]. *生态学杂志*, 35(03): 559-566.
- (Yang A, Wang G X, Ran F, *et al.* 2016. Carbon storage and spatial distribution pattern of litter in main forest types on the Tibetan Plateau. *Journal of Ecology*. 35(03): 559-566. [in Chinese])
- 袁位高, 沈爱华, 江波, 等. 2009. 浙江省常绿阔叶林凋落物特征研究[J]. *浙江林业科技*, 29(03): 1-4.
- (Yuan W G, Shen A H, Jiang B, *et al.* 2009. Characteristics of litter in evergreen broad-leaved forest in Zhejiang Province. *Zhejiang Forestry Science and Technology*. 29(03): 1-4. [in Chinese])
- 袁方, 黄力, 魏玉洁, 等. 2018. 中国天然林凋落物量特征及其与气候因子的关系[J]. *生态学杂志*, 37(10): 3038-3046.
- (Yuan F, Huang L, Wei Y J, *et al.* 2018. Characteristics of natural forest litter and its relationship with climatic factors in China. *Journal of Ecology*. 37(10): 3038-3046. [in Chinese])
- 周晨霓, 马和平, 郭其强. 2015. 西藏色季拉山天然林分土壤呼吸组分量化分离及季节变化特征[J]. *生态科学*, 34(04): 57-63, 157.
- (Zhou C N, Ma H P, Guo Q Q. 2015. Quantitative separation and seasonal variation of soil respiration components in natural stands in Sejila Mountain, Tibet. *Ecological science*. 34(04): 57-63, 157. [in Chinese])
- 郑路, 卢立华. 2012. 我国森林地表凋落物现存量及养分特征[J]. *西北林学院学报*, 27(1): 63-69.
- (Zheng L, Lu L H. 2012. Characteristics of forest litter inventory and nutrients in China. *Journal of Northwest Forestry University*. 27(1): 63-69. [in Chinese])
- Bushra M, Tom L. Temporal variations in litterfall biomass input and nutrient return under long-term prescribed burning in a wet sclerophyll forest, Queensland, Australia[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 706, doi:10.1016/j.scitotenv.2019.136035.
- Cissé M, Traoré S, Bationo B. A. Decomposition and nutrient release from the mixed leaf litter of three agroforestry species in the Sudanian zone of West Africa[J]. *SN Applied Sciences*, 2021, 3(2), doi:10.1007/S42452-021-04242-Y.
- Ferreira M L, Barbosa M F, Gomes E P C, *et al.* Ecological implications of twentieth century reforestation programs for the urban forests of São Paulo, Brazil: a study based on litterfall and nutrient cycling[J]. *Ecological Processes*, 2021, 10(1), doi: 10.1186/ S13717-021- 00292- 7.

- Handa I T, Aerts R, Berendse F, et al. Consequences of biodiversity loss for litter decomposition across biomes [J]. *Nature*, 2014, 509(7499):218-221.
- Mao J F, Wang X R. Distinct niche divergence characterizes the homoploid hybrid speciation of *Pinus densata* on the Tibetan Plateau [J]. *Am Nat*, 2011, 177(4): 424-439.
- Mukesh K, Satish C G. Functional traits, growth patterns, and litter dynamics of invasive alien and co-occurring native shrub species of chir pine forest in the central Himalaya, India[J]. *Plant Ecology*, 2021, 222: 723-735.
- Ott Neil F J, Watmough S A. Contrasting Litter Nutrient and Metal Inputs and Soil Chemistry among Five Common Eastern North American Tree Species[J]. *Forests*, 2021, 12(5): 613.
- Roberta P, Virginia C, Claudia F, et al. Litter decomposition: little evidence of the “home-field advantage” in a mountain forest in Italy[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108300.
- Wang X, Xu Z W, Lü X T, Wang R Z, et al. Responses of litter decomposition and nutrient release rate to water and nitrogen addition differed among three plant species dominated in a semi-arid grassland [J]. *Plant Soil*, 2017, 418(1-2):241-253.