

DOI:10.12403/j.1001-1498.20220226

长白山针阔混交林凋落物-土壤 生态化学计量特征

崔雪, 王海燕*, 邹佳何, 秦倩倩, 杜雪,
李翔, 张美娜, 耿琦

(北京林业大学林学院, 森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: [目的] 研究林分尺度下调落物-土壤生态化学计量特征, 阐明森林生态系统凋落物和土壤养分的变化规律以及二者的相互关系, 为天然针阔混交林的经营和管理提供科学依据。[方法] 以长白山北坡 4 块面积 1 hm² 的云冷杉-阔叶混交林样地为研究对象, 采集 0~20、20~40 cm 土样, 收集半分解层 (F 层) 和完全分解层 (H 层) 凋落物, 测定凋落物碳、氮、磷与土壤 pH、有机质、全氮、全磷、有效磷和速效钾, 并计算凋落物现存量及凋落物-土壤化学计量比。采用相关性分析和冗余分析等方法研究云冷杉-阔叶混交林凋落物特征与土壤养分及化学计量比的关系。[结果] 凋落物现存量与 0~20 cm 土壤碳氮比呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。凋落物碳、碳磷比和氮磷比均随凋落物分解程度加深显著降低 ($P < 0.05$)。冗余分析结果表明, F 层凋落物现存量与 F 层凋落物碳、碳磷比和 H 层凋落物磷具有较强的正效应。凋落物与土壤养分化学计量比均表现为碳磷比 > 碳氮比 > 氮磷比。[结论] 完全分解层凋落物氮是影响云冷杉-阔叶混交林 0~20 cm 土壤 pH、有机质、全磷、速效钾和土壤碳磷比的关键因子; 凋落物氮为 20~40 cm 土壤全氮的主要来源。因此, 凋落物氮可能是驱动研究区土壤养分变化的重要因素。

关键词: 云冷杉-阔叶混交林; 凋落物; 土壤; 化学计量特征

中图分类号: S718.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2023)03-0091-09

土壤养分状况受凋落物质量及其化学组成的直接影响, 土壤中绝大部分的养分元素来自凋落物分解、养分的释放和淋溶过程^[1]。凋落物的生成和分解与植物群落息息相关, 植物体内约 90% 的氮 (N)、磷 (P)、钾 (K) 来源于凋落物的养分再循环^[2]。因此, 凋落物分解是植物向土壤输送养分的重要环节, 其在植物更新、提供土壤肥力、维持生物多样性以及保证生态系统碳库稳定性方面都发挥了重要作用^[3-5]。

生态化学计量比能表征森林生态系统内土壤、植物叶片和凋落物等有机体内部的养分水平, 有机体内部养分元素组成比例与外部环境元素供应是否

稳定, 是生态化学计量学的研究前提^[6]。森林土壤碳 (C)、N、P 元素存在相对稳定的化学计量比, 受气候、地形和植被等环境因素的影响, 其比值会在一定范围内发生改变^[7-8]。凋落物作为向土壤供应养分的主要对象, 其养分含量和现存量对土壤养分变化具有显著影响^[9]。因树种、林分起源和环境条件等因素发生变化, 凋落物现存量及其养分特征在不同森林生态系统中具有异质性^[10-11]。分解者通过控制微生物的 N、P 循环过程, 改变凋落物的 C/N 和 C/P 进而影响土壤养分水平^[12]。凋落物 C/N < 40, 开始出现凋落物矿化分解净氮释放^[13]。Zhou 等^[14] 通过研究 2 600 个中国森林生态系统的

收稿日期: 2022-05-04 修回日期: 2022-08-19

基金项目: 国家重点研发计划重点专项课题: 天然林生态系统土壤功能退化机制和演变规律 (2017YFC0504002)

* 通讯作者: 王海燕, 博士, 教授。主要研究方向: 土壤学、植物营养学。电话: 13691211692。Email: haiyanwang72@aliyun.com

样地数据发现, 较低的凋落物 C/N 和较高的湿度指数是提高土壤有机质积累的重要因素; 赵畅等^[15]研究发现, 茂兰喀斯特森林凋落物现存量随土壤密度和全磷含量的减少而增加。因此, 研究凋落物特征及其对土壤养分的影响对理解林分尺度下生态系统的养分循环及衡量地下生态系统稳定性具有重要意义。

云冷杉-阔叶混交林是由红皮云杉 (*Picea koraiensis* Nakai)、臭冷杉 (*Abies nephrolepis* (Trautv.) Maxim.) 针叶树种与白桦 (*Betula platyphylla* Suk.)、水曲柳 (*Fraxinus mandshurica* Rupr.) 和山杨 (*Populus davidiana* Dode) 等落叶乔木树种组成的温带常绿针阔混交林, 在我国环境保护和生态平衡进程中具有不可替代的功能和价值^[16]。目前, 国内外关于云冷杉林的研究主要集中在土壤肥力质量综合评价^[17]和森林凋落物养分空间变异^[11]等方面, 而关于“凋落物-土壤”养分周转及其相关性研究较少。因此, 本文以云冷杉-阔叶混交林为研究对象, 分析不同深度 (0~20、20~40 cm) 土壤养分和化学计量比对不同分解程度 (半分解 F 层和完全分解 H 层) 凋落物 C、N、

P 含量、现存量及其化学计量比的响应, 以期阐明长白山北坡云冷杉-阔叶混交林凋落物特征及其对土壤养分的影响。

1 研究区概况

研究区位于吉林省汪清林业局金沟岭林场 (43°17'~43°25'N, 129°25'~130°20'E), 海拔 300~1 200 m, 坡度 5°~25°。该区属季风气候, 低山丘陵地貌, 土壤类型主要为暗棕壤, 其母质为花岗岩、玄武岩及片麻岩的残积物和堆积物, 土层厚度 40 cm 左右。主要树种包括红皮云杉、臭冷杉、红松 (*Pinus koraiensis* Siebold. et Zuccarini)、白桦、水曲柳和山杨^[11]。

2 研究方法

2.1 样地设置及采样

2013 年 7 月, 在研究区内设置了 12 块面积 1 hm²、立地条件相似的云冷杉-阔叶混交中龄林样地。2017 年 8 月, 为了保证样本的代表性且减少误差, 在 12 块样地中随机选取 4 块样地, 样地基本情况见表 1。

表 1 样地基本情况

Table 1 Characteristics of sample plots

样地 Plot	海拔 Altitude/m	坡度 Slope/(°)	坡向 Aspect	平均树高 Mean height/m	平均胸径 Mean DBH/cm	林分密度 Stand density/ (株·hm ⁻²)	郁闭度 Canopy density	针叶树株数比例 Proportion of coniferous stem/%
I	742	3	东北NE	13.9	14.5	934	0.74	47.8
II	732	5	东北NE	11.4	12.3	1 167	0.76	55.6
III	769	5	东北NE	13.6	13.7	1 301	0.78	54.7
IV	773	3	东北NE	15.1	14.0	1 437	0.81	52.1

注: DBH为胸径。
Note: DBH is the abbreviation of diameter at breast height.

在随机选取的 4 块样地中, 各设置 100 个 10 m × 10 m 的样方, 在各样方中心 0.5 m × 0.5 m 方形区域内, 拣出最上层肉眼可识的新鲜凋落物, 然后采集其下方 F 层 (叶片外观轮廓不完整, 大多数凋落物成褐色碎末状) 和最底层 H 层 (颜色发黑, 达到腐朽状态) 的凋落物样品装入自封袋中标记好, 共计 800 个并称质量^[11]。采用“S”形取样法, 在各样方随机选取 5 个采样点, 用土钻分别取 0~20 cm 和 20~40 cm 的土样, 将 5 个采样点同一土层的土壤放在塑料薄膜上去除石块和植物

残茬等, 混合均匀后用四分法取 1 kg 左右装入贴有标签的自封袋中, 共计 800 个。土样经风干、磨细后, 过 2 mm 筛用于土壤 pH、有效磷 (AP) 和速效钾 (AK) 的测定; 过 0.25 mm 筛用于土壤有机质 (SOM)、全氮 (TN) 和全磷 (TP) 的测定。

2.2 样品测定

土壤 pH、SOM、TN、TP、AP、AK 及凋落物 C、N、P 测定方法均参考《土壤农化分析》^[18]。

2.3 数据处理与统计分析

采用 SPSS 22.0 对 4 块样地 F 层和 H 层凋落

物现存量^[19]、养分含量、化学计量比和土壤养分指标等数据进行 *t* 检验和皮尔森相关分析。采用 R 4.0.3 对凋落物现存量、养分含量和化学计量比与土壤养分含量及其化学计量比的关系进行冗余分析 (RDA)。表 2、3 中数据均为均值±标准差。

3 结果与分析

3.1 凋落物养分特征

表 2 表明: 4 块样地 F 层凋落物 C 较 H 层显著增大, 而 F 层凋落物 P 较 H 层显著减小 ($P < 0.05$); F 层凋落物 N 含量, 样地 IV 中最高, 样地

III 次之, 二者显著高于样地 I 和 II; H 层凋落物 N 含量, 样地 IV 中最高, 显著高于其它 3 块样地 ($P < 0.05$)。各分解阶段凋落物化学计量比均为 $C/P > C/N > N/P$; 各样地 F 层凋落物 C/P 和 N/P 显著高于 H 层, 样地 I、II 和 IV 中 F 层凋落物 C/N 较 H 层显著增大 ($P < 0.05$); F 层凋落物 C/P 和 N/P 均表现为样地 IV > III > I > II, 样地 IV 中 C/P 显著高于其它样地, 而 N/P 和样地 III 无显著差异, 但均显著高于样地 I 和 II。H 层中, 样地 II 中凋落物 C/N、C/P 和 N/P 均显著高于其它 3 块样地。

表 2 云冷杉-阔叶混交林各分解层凋落物养分特征

Table 2 Litter nutrient characteristics of decomposed horizons in spruce-fir broad-leaved mixed forest

凋落物层 Litter horizon	样地 Plot	碳C/ (g·kg ⁻¹)	氮N/ (g·kg ⁻¹)	磷P/ (g·kg ⁻¹)	碳/氮 C/N	碳/磷 C/P	氮/磷 N/P
半分解层 (F层) Semi-decomposed horizon	I	419.90 ± 60.90 bA	16.45 ± 4.71 cB	1.30 ± 0.21 bB	27.55 ± 8.40 aA	332.66 ± 73.47 bA	12.93 ± 4.32 bA
	II	436.03 ± 66.60 abA	17.21 ± 2.64 cA	1.49 ± 0.40 aB	25.85 ± 5.54 aA	314.07 ± 108.25 bA	12.45 ± 4.48 bA
	III	377.58 ± 77.67 cA	20.02 ± 2.19 bA	1.12 ± 0.21 cB	19.01 ± 4.13 bA	349.70 ± 96.30 bA	18.44 ± 3.57 aA
	IV	453.22 ± 93.73 aA	21.76 ± 3.01 aA	1.12 ± 0.22 cB	21.31 ± 6.07 bA	417.03 ± 110.11 aA	19.93 ± 4.03 aA
完全分解层 (H层) Completely decomposed horizon	I	354.22 ± 81.90 aB	17.71 ± 3.07 bA	2.73 ± 0.70 bA	20.32 ± 4.78 bB	135.32 ± 39.80 bB	6.80 ± 1.86 bB
	II	368.90 ± 76.73 aB	16.70 ± 2.75 cA	2.14 ± 0.48 cA	22.60 ± 5.75 aB	181.39 ± 58.60 aB	8.09 ± 2.06 aB
	III	321.32 ± 80.40 bB	17.54 ± 3.00 bB	2.64 ± 0.82 bA	18.60 ± 5.13 bA	132.57 ± 51.26 bB	7.24 ± 2.41 bB
	IV	358.70 ± 108.30 aB	19.30 ± 2.70 aB	3.18 ± 0.82 aA	19.00 ± 6.78 bB	120.81 ± 54.00 bB	6.48 ± 2.00 bB

注: 同列不同小写字母表示样地间差异显著 ($P < 0.05$); 同列不同大写字母表示凋落物层间差异显著 ($P < 0.05$)。

Notes: Means that in the same column do not share the same lowercase letters are significantly different at 0.05 level between the sample plots and that do not share the same capital letters are significantly different at 0.05 level between litter horizons.

3.2 土壤养分特征

由表 3 可知: 研究区土壤整体呈弱酸性; 土壤养分含量均随土壤深度增加而显著减小 ($P < 0.05$)。0~20 cm 土层, 样地 I 和 III 中 TP 较高, 显著高于其他 2 块样地; 样地 III 中 AK 显著低于其它样地 ($P < 0.05$)。20~40 cm 土层, 样地 II 中 SOM 和 TN 均显著低于其它样地 ($P < 0.05$), AP 在不同样地间差异显著 ($P < 0.05$)。土壤 C/P 和 N/P 均随土壤深度增加而显著减小 ($P < 0.05$)。0~20 cm 土层, 不同样地土壤 C/N 差异不显著 ($P > 0.05$), 样地 I 和 IV 中土壤 N/P 显著高于其他样地 ($P < 0.05$)。20~40 cm 土层, 土壤 N/P 样地 IV 中最大, 样地 I 次之, 二者均显著高于样地 II 和 III ($P < 0.05$)。样地 II 中 20~40 cm 土层土壤 C/N 显著高于 0~20 cm 土层 ($P < 0.05$), 0~20 cm 和 20~40 cm

土层土壤 C/P 均是样地 IV 中最大。

3.3 凋落物特征对土壤养分含量和化学计量比的影响

研究区凋落物现存量 and 养分指标与不同土层土壤养分指标的相关性存在差异 (表 4)。

0~20 cm 土层, F 层和 H 层凋落物现存量 (FLSC&HLSC) 均与土壤 C/N 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 且 HLSC ($r = 0.184$) 较 FLSC ($r = 0.131$) 与土壤 C/N 相关系数大, 相关性更强。F 层凋落物碳 (FLC) 仅与土壤 AK 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 而 H 层凋落物碳 (HLC) 与土壤 TP 和 AK 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与 SOM 呈显著正相关 ($P < 0.05$)。F 和 H 层凋落物磷 (FLP&HLP) 与 SOM 均呈极显著相关 ($P < 0.01$), 相关系数分别为 -0.170 和 0.212。F 层凋落物碳氮比 (FLCN) 与土壤 C/N 呈显著负相关

表3 云冷杉-阔叶混交林土壤化学性质指标描述统计分析

Table 3 Descriptive statistics of soil chemical indicators in spruce-fir broad-leaved mixed forest

土壤深度 Soil depth/ cm	样地 Plot	pH	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen/ (g·kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus/ (g·kg ⁻¹)	有效磷 Available phosphorus/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Readily available potassium/ (mg·kg ⁻¹)	碳/氮 C/N	碳/磷 C/P	氮/磷 N/P
0~20	I	5.49 ± 0.25 aB	155.41 ± 96.81 aA	5.83 ± 3.18 aA	0.88 ± 0.31 aA	7.31 ± 4.89 bA	128.86 ± 54.27 aA	30.68 ± 22.60 aA	176.45 ± 87.07 bcA	6.84 ± 3.24 aA
	II	4.76 ± 0.18 dB	121.59 ± 36.21 bA	4.39 ± 2.07 bA	0.75 ± 0.17 cA	10.48 ± 3.82 aA	122.68 ± 39.29 aA	30.07 ± 7.90 aB	163.67 ± 38.91 cA	5.84 ± 2.45 bA
	III	4.99 ± 0.24 cB	144.78 ± 40.77 aA	4.51 ± 1.41 bA	0.81 ± 0.19 bA	10.80 ± 3.69 aA	93.31 ± 36.84 bA	33.14 ± 7.37 aA	180.90 ± 45.41 bA	5.57 ± 1.27 bA
	IV	5.21 ± 0.23 bA	153.14 ± 63.53 aA	4.82 ± 2.03 bA	0.75 ± 0.22 cA	5.06 ± 2.01 cA	114.65 ± 76.91 aA	32.34 ± 7.03 aA	205.43 ± 64.94 aA	6.47 ± 2.31 aA
20~40	I	5.62 ± 0.37 aA	76.13 ± 45.89 aB	2.51 ± 1.63 abB	0.61 ± 0.17 bB	4.00 ± 1.94 cB	73.20 ± 29.94 bB	31.10 ± 8.16 bA	121.87 ± 52.24 bB	4.08 ± 2.17 aB
	II	4.94 ± 0.44 cA	60.79 ± 23.87 bB	1.70 ± 0.92 cB	0.57 ± 0.13 bB	7.63 ± 2.14 aB	53.50 ± 17.16 cB	42.65 ± 22.00 aA	107.20 ± 35.10 cB	2.91 ± 1.20 cB
	III	5.11 ± 0.41 bA	77.67 ± 22.89 aB	2.33 ± 0.99 bB	0.67 ± 0.19 aB	6.49 ± 2.14 bB	77.23 ± 24.32 bB	38.93 ± 32.50 aA	117.71 ± 28.72 bcB	3.50 ± 1.20 bB
	IV	5.18 ± 0.36 bA	83.50 ± 30.30 aB	2.71 ± 1.03 aB	0.63 ± 0.18 abB	3.15 ± 1.46 dB	102.68 ± 50.80 aB	31.43 ± 6.21 bA	137.87 ± 46.90 aB	4.43 ± 1.41 aB

注：同列不同小写字母表示同一土壤深度各样地间差异显著 ($P < 0.05$)；同列不同大写字母表示同一样地不同土壤深度间差异显著 ($P < 0.05$)。

Notes: Means that in the same column do not share the same lowercase letters are significantly different at 0.05 level among different plots at the same soil depth and that do not share the same capital letters are significantly different at 0.05 level between different soil depths in the same plot.

($P < 0.05$)，与土壤 C/P 呈极显著负相关 ($P < 0.01$)，而 H 层凋落物碳氮比 (HLCN) 与土壤 C、N、P 化学计量比无显著相关性 ($P > 0.05$)。

20~40 cm 土层，HLC 与土壤 TP 呈极显著正相关 ($P < 0.01$)，与土壤 AK 呈显著负相关 ($P < 0.05$)，而 FLC 与土壤养分指标无显著相关性 ($P > 0.05$)。FLCN 与 SOM、AK、TN、TP 和土壤 C/P 呈极显著负相关 ($P < 0.01$)，而 HLCN 仅与 AP 和 AK 呈极显著相关 ($P < 0.01$)。FLSC 与土壤 pH 呈显著正相关 ($P < 0.05$)，HLP、H 层凋落物碳磷比 (HLCP) 和凋落物氮磷比 (HLNP) 均与土壤 pH 呈极显著相关，且 HLP 与土壤 pH 相关性最强 ($r=0.246$, $P < 0.01$)。

3.4 凋落物特征与土壤养分及化学计量比的冗余分析

RDA 分析 (图 1) 表明：0~20 cm 和 20~40 cm 土层前 2 轴凋落物因子对土壤养分含量及其化学计量比的累积解释量分别达 72.60% 和 82.41%。FLN、HLP、HLNP 和 HLCP 对排序结果的贡献率较大。FLSC 与 FLC、FLCP 和 HLP 具有较强的正效应。FLSC、FLN、FLNP 和 HLP 与 0~20 cm 土壤碳氮比 (SCN1) 呈正相关，其中，FLN 与 SCN1 呈较强的正效应。HLSC 与 0~20 cm 土层全氮 (TN1) 和土壤氮磷比

(SNP1) 呈较强负相关，与 20~40 cm 土壤碳磷比 (SCP2) 和土壤有机质 (SOM2) 呈较强正相关，但其对排序模型的贡献率一般。HLN 与 0~20 cm 土壤 pH1、有机质 (SOM1)、碳磷比 (SCP1)、全磷 (TP1) 和速效钾 (AK1) 以及 20~40 cm 土壤全氮 (TN2) 呈较强的正效应，对 TN1 的正效应较弱，说明 HLN 是影响 pH1、SOM1、SCP1、TP1、AK1 和 TN2 的关键因子，而 TN1 受多个因子的叠加影响。

4 讨论

4.1 云冷杉-阔叶混交林凋落物养分及其化学计量比

凋落物养分含量一方面取决于生物因素 (植被特性对养分的吸收能力)，另一方面来自非生物因素 (气温和降水等环境因子) [20]。研究区凋落物 C 平均含量为 386.23 g·kg⁻¹，高于滇中亚高山 5 种典型林分凋落物平均 C 含量 (368.01 g·kg⁻¹)，低于黄土高原子午岭地区油松林凋落物 C 含量 (501.02 g·kg⁻¹) [21-22]。研究区属于温带季风气候区，碳贮存能力较强，但样地中针叶树种比例高，较多的难分解物质降低了凋落物分解速率，减弱了碳归还能力 [4, 23]。研究区凋落物平均 N、P 含量 (18.34、1.97 g·kg⁻¹) 高于落叶阔叶混交林 (12.23、0.46 g·kg⁻¹) [24]。我国植被叶片 N、P 含量随纬度

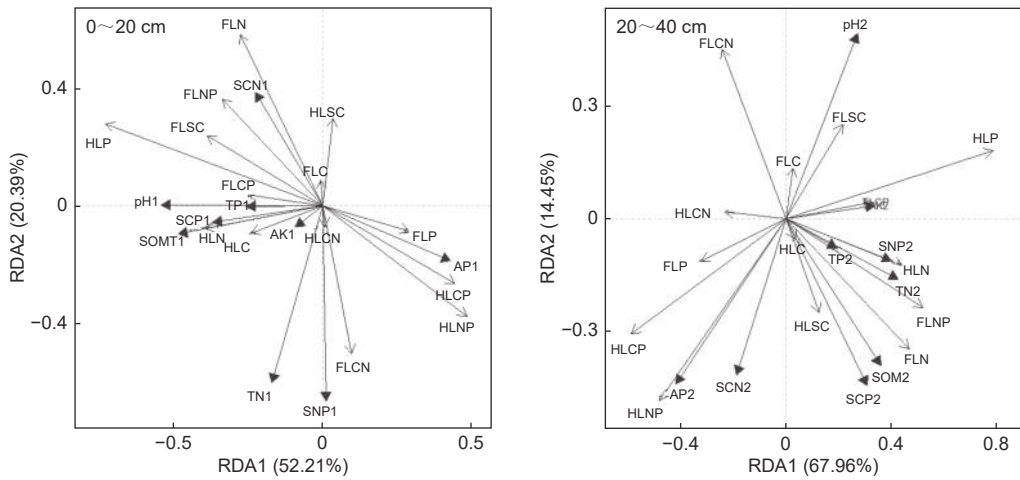
表4 凋落物指标与不同土层土壤养分指标的相关性分析

Table 4 Correlation analysis between litter indicators and soil nutrients at varied depths

土壤深度 Soil depth/cm	指标 Indicator	土壤 pH	有机质 Organic matter	全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus	有效磷 Available phosphorus	速效钾 Readily available potassium	碳/氮 C/N	碳/磷 C/P	氮/磷 N/P
0~20	FLSC	0.160**	0.103*	-0.032	0.061	-0.093	0.003	0.131**	0.056	-0.088
	FLC	-0.006	-0.041	-0.049	-0.091	-0.080	0.151**	0.006	0.015	0.003
	FLN	0.029	0.179**	-0.056	0.049	-0.156**	-0.048	0.261**	0.169**	-0.069
	FLP	-0.092	-0.170**	-0.072	-0.049	0.061	0.176**	-0.115*	-0.198**	-0.091
	FLCN	-0.001	-0.162**	0.017	-0.099*	0.021	0.145**	-0.222*	-0.130**	0.075
	FLCP	0.081	0.101*	0.008	-0.041	-0.143**	-0.070	0.116*	0.149**	0.045
	FLNP	0.051	0.219**	0.017	0.043	-0.115*	-0.178**	0.243**	0.226**	0.006
	HLSC	-0.025	0.131**	-0.029	0.060	0.042	-0.132**	0.184**	0.101*	-0.068
	HLC	0.051	0.116*	0.067	0.138**	0.016	0.169**	0.045	0.029	-0.025
	HLN	0.174**	0.098	0.095	0.021	-0.240**	-0.001	-0.013	0.139**	0.162**
	HLP	0.261**	0.212**	0.018	0.169**	-0.286**	-0.010	0.219**	0.113*	-0.068
	HLCN	-0.050	0.020	-0.008	0.091	0.123*	0.183**	0.022	-0.042	-0.093
	HLCP	-0.189**	-0.078	0.042	-0.023	0.253**	0.117*	-0.151**	-0.065	0.055
	HLNP	-0.173**	-0.131**	0.050	-0.132**	0.170**	-0.022	-0.232**	-0.044	0.160**
20~40	FLSC	0.119*	0.061	0.084	0.041	-0.136**	0.006	-0.053	0.051	0.097
	FLC	-0.008	-0.030	-0.002	-0.086	-0.042	0.063	-0.027	0.026	0.076
	FLN	0.012	0.218**	0.196**	0.095	-0.122*	0.267**	-0.036	0.197**	0.201**
	FLP	-0.047	-0.161**	-0.139**	-0.096	0.181**	-0.204**	0.009	-0.147**	-0.107*
	FLCN	0.034	-0.199**	-0.147**	-0.144**	0.038	-0.167**	-0.013	-0.143**	-0.089
	FLCP	0.044	0.133**	0.131**	0.014	-0.192**	0.234**	-0.037	0.139**	0.142**
	FLNP	0.015	0.255**	0.206**	0.125*	-0.180*	0.318**	0.001	0.212**	0.176**
	HLSC	0.013	0.143**	0.043	0.096	-0.060	0.251**	0.075	0.099*	0.019
	HLC	0.053	0.048	0.069	0.140**	0.081	-0.102*	-0.06	-0.044	0.001
	HLN	0.056	0.164**	0.207**	0.097	-0.148**	0.172**	-0.103*	0.107*	0.159**
	HLP	0.246**	0.194**	0.305**	0.140**	-0.294**	0.224**	0.103*	-0.107*	-0.159**
	HLCN	0.023	-0.070	-0.056	0.054	0.158**	-0.227**	0.016	-0.092	-0.089
	HLCP	-0.151**	-0.115*	-0.170**	-0.025	0.314**	-0.264**	0.130**	-0.121*	-0.215**
	HLNP	-0.213**	-0.085	-0.153**	-0.082	0.230**	-0.112*	0.129**	-0.066	-0.175**

注: FLSC: F层凋落物现存量; FLC: F层凋落物碳含量; FLN: F层凋落物氮含量; FLP: F层凋落物磷含量; FLCN: F层凋落物碳氮比; FLCP: F层凋落物碳磷比; FLNP: F层凋落物氮磷比; HLSC: H层凋落物现存量; HLC: H层凋落物碳含量; HLN: H层凋落物氮含量; HLP: H层凋落物磷含量; HLCN: H层凋落物碳氮比; HLCP: H层凋落物碳磷比; HLNP: H层凋落物氮磷比(下同); **表示在 $P < 0.01$ 水平极显著相关; *表示在 $P < 0.05$ 水平显著相关。

Notes: FLSC: litter standing crop in the semi-decomposed horizon; FLC: litter carbon concentration in the semi-decomposed horizon; FLN: litter nitrogen concentration in the semi-decomposed horizon; FLP: litter phosphorus concentration in the semi-decomposed horizon; FLCN: litter C/N ratio in the semi-decomposed horizon; FLCP: litter C/P ratio in the semi-decomposed horizon; FLNP: litter N/P ratio in the semi-decomposed horizon; HLSC: litter standing crop in the completely decomposed horizon; HLC: litter carbon concentration in the completely decomposed horizon; HLN: litter nitrogen concentration in the completely decomposed horizon; HLP: litter phosphorus concentration in the completely decomposed horizon; HLCN: litter C/N ratio in the completely decomposed horizon; HLCP: litter C/P ratio in the completely decomposed horizon; HLNP: litter N/P ratio in the completely decomposed horizon (the same below); ** meant a very significant correlation at 0.01 level; * meant a significant correlation at 0.05 level.



注: SCN: 土壤碳氮比; SCP: 土壤碳磷比; SNP: 土壤氮磷比; 1代表 0~20 cm 土层; 2代表 20~40 cm 土层。

Notes: SCN: soil carbon to nitrogen ratio; SCP: soil carbon to phosphorus ratio; SNP: soil nitrogen to phosphorus ratio; 1: 0-20 cm soil depth; 2: 20-40 cm soil depth.

图 1 凋落物特征与土壤养分含量及其化学计量比的冗余分析

Fig. 1 Redundancy analysis of litter characteristics and soil nutrient indicators and their stoichiometric ratios

增加呈线性递增关系, 且针、阔叶混合型凋落物较落叶阔叶凋落物具有更大的固氮潜力^[25-27]。

化学计量比较单一的 C、N、P 养分更能够反映凋落物养分贮存和归还能力。研究区凋落物 C/N、C/P 和 N/P 随凋落物分解加剧呈降低趋势, 与前人研究结果一致^[28], 这主要是由于凋落物中 N、P 养分的释放稍缓于质量损失^[27]。与东北地区落叶松人工林凋落物相比^[29], 云冷杉-阔叶混交林凋落物 C/N 和 C/P 较低, 而 N/P 较高, 这是由于落叶松人工林凋落物样品较新鲜, 养分含量仅取决于树种因素, 而研究区凋落物样品来源于样地的 F 层和 H 层, 养分含量除受针阔树种比例影响外, 还与样地微环境以及元素自身所发生的迁移、淋溶和固定作用有关。

4.2 云冷杉-阔叶混交林土壤养分及其化学计量比

云冷杉-阔叶混交林作为长白山北坡典型的天然林分, 其土壤肥力水平较高, SOM、TN 和 TP 含量均值分别为 109.13、3.60、0.71 g·kg⁻¹, 高于全国平均水平 (19.17、1.06、0.65 g·kg⁻¹)^[30]。本研究中, SOM、TN、TP、AP 和 AK 具有明显的表聚现象, 树种混交使大量凋落物在地表积聚, 且表层土壤植物根系富集, 微生物活跃, 有利于凋落物分解和养分回归^[31]。

土壤养分化学计量比能够反映养分有效性并用来分析元素在不同生态系统之间的动态变化。云冷杉-阔叶混交林土壤 C/N 和 C/P 均值 (33.80 和

151.39) 高于全国土壤水平 (11.90 和 61.00), 而 N/P (4.96) 略低于全国土壤水平 (5.20)^[30], 说明样地土壤 P 的有效性较高。研究区土壤 C/P 和 N/P 随土壤深度增加而降低, 说明在深层土壤中 P 的有效性更高, 这与 Qi 等^[32]的研究结果一致。当土壤 C/P 低于 200 时, 微生物体内碳素的增加幅度小, 同时有机磷的净矿化作用加强, 导致土壤中磷含量增加^[33]。因此, 研究区土壤磷含量较为充足。此外, 土壤 C/N 随有机质矿化程度加深而降低, 研究区土壤的高 C/N 可能会减弱有机质的矿化速率, 阻碍 N 素在生态系统内的循环, 植物生长可能受到 N 限制。

4.3 云冷杉-阔叶混交林凋落物特征与土壤养分及计量比关系

相关分析和 RDA 结果表明: 云冷杉-阔叶混交林凋落物现存量主要影响土壤 pH、有机质、有效磷、土壤 C/N 和凋落物氮磷。由于凋落物分解过程中需要消耗 C、N 源等养分以维持分解作用, 改变植物叶片、凋落物和土壤中的 C、N、P 水平会影响凋落物分解速率和程度, 进而影响凋落物现存量^[34]。研究区凋落物 C/P 和 N/P 均高于土壤, 这是因为云、冷杉针叶质地较硬, 较阔叶有更多的难分解物质, 导致凋落物分解速率减慢, 现存量较多, 凋落物磷的归还量较大。因此, 土壤养分化学计量比低于凋落物^[10]; 而 C/N 表现为凋落物 < 土壤, 这与刘璐等^[24]的研究结果不符。研究区凋落

物 C/N 均值达到 20, 当凋落物 C/N 为 12~20 时, 分解者不受氮限制, 无机氮向土壤中净释放^[25], 植物与凋落物化学计量比具有协同性^[8]。本研究中, HLP 与土壤 pH 呈极显著正相关, 说明在酸性土壤中, 植物磷素利用效率下降, 这与 Tong 等^[35]的研究结果一致。研究区 SOM 与 F 层凋落物 N 呈极显著正相关, 与 F 层凋落物 C/N 呈极显著负相关, 当外源碳充足时, 较高的凋落物 C/N 会刺激微生物分解更多的土壤腐殖质获得充足的氮, 满足自身营养需求, 从而发生正向“激发效应”。相反, 基质中较低的 C/N 容易引起负向“激发效应”, 进而削弱有机质的分解^[36-37]。因此, 研究区凋落物氮是影响 SOM 的重要因素。

5 结论

云冷杉-阔叶混交林 H 层较 F 层凋落物 C、C/P 和 N/P 显著降低, 而凋落物 N 随凋落物分解程度变化规律不一, 说明研究区凋落物碳归还能力较高。与东北地区落叶松人工纯林相比, 云冷杉-阔叶混交林具有较大的固氮潜力。云冷杉-阔叶混交林土壤整体呈弱酸性, 土壤有机质、全氮和全磷含量均值高于全国平均水平。随土壤深度增加, 土壤养分含量显著降低, 土壤 C/N 无显著变化, 而 C/P 和 N/P 显著减小, 说明研究区土壤磷含量较为充足。相关分析结果表明, 云冷杉-阔叶混交林 F 层凋落物现存量与土壤 pH 相关性显著, H 层凋落物现存量与土壤有机质、速效钾和 C/P 达到显著相关。RDA 结果显示, F 层凋落物 N、H 层凋落物 P、N/P 和 C/P 对排序结果的贡献率较大。凋落物氮为 20~40 cm 土层 TN 的主要来源, 其可能是影响研究区土壤养分的重要因素。

参考文献:

- [1] AZEEZ J O. Recycling organic waste in managed tropical forest ecosystems: effects of arboreal litter types on soil chemical properties in Abeokuta, southwestern Nigeria[J]. *Journal of Forestry Research*, 2019, 30(5): 1903-1911.
- [2] 田慧敏, 刘彦春, 刘世荣. 暖温带麻栎林凋落物调节土壤碳排放通量对降雨脉冲的响应[J]. *生态学报*, 2022, 42(10): 3889-3896.
- [3] 苏卓侠, 苏冰倩, 上官周平. 植物凋落物分解对土壤有机碳稳定性影响的研究进展[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(2): 406-413.
- [4] 卫志宇, 倪祥银, 谌亚, 等. 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[J]. *生态学报*, 2021, 41(20): 8266-8275.
- [5] DAVID B, ALBERTO R, ANTONIO G, *et al.* The influence of elevation on soil properties and forest litter in the Siliceous Moncayo Massif, SW Europe[J]. *Journal of Mountain Science*, 2016, 13(12): 2155-2169.
- [6] 俞月凤, 何铁光, 曾成城, 等. 喀斯特区不同退化程度植被群落植物-凋落物-土壤-微生物生态化学计量特征[J]. *生态学报*, 2022, 42(3): 935-946.
- [7] 崔高阳, 曹扬, 陈云明. 陕西省森林各生态系统组分氮磷化学计量特征[J]. *植物生态学报*, 2015, 39(12): 1146-1155.
- [8] 孙思怡, 卢胜旭, 陆宇明, 等. 杉木林下套种阔叶树对土壤酶活性及其化学计量比的影响[J]. *林业科学研究*, 2021, 34(1): 106-113.
- [9] 郝清玉, 杨彬, 周玉萍. 木麻黄凋落物现存量的数量特征及影响因素[J]. *森林与环境学报*, 2020, 40(4): 356-362.
- [10] 秦倩倩, 王海燕, 李翔, 等. 东北天然针阔混交林凋落物磷素空间异质性及其影响因素[J]. *生态学报*, 2019, 39(12): 4519-4529.
- [11] ROSTAMIZAD P, HOSSEINI V, SAMANI K M. Effects of Persian turpentine tree litter and slope aspect on soil chemical properties in a Zagros forest, Iran[J]. *Journal of Forestry Research*, 2020, 31(5): 1583-1588.
- [12] MARIA M, WOLFGANG W, JÖRG S, *et al.* Stoichiometric controls of nitrogen and phosphorus cycling in decomposing beech leaf litter[J]. *Ecology*, 2012, 93(4): 770-782.
- [13] PARTON W, SILVER W L, BURKE I C, *et al.* Global-scale similarities in nitrogen release patterns during long-term decomposition[J]. *Science*, 2007, 315(5810): 361-364.
- [14] ZHOU G Y, XU S, CIAIS P, *et al.* Climate and litter C/N ratio constrain soil organic carbon accumulation[J]. *National Science Review*, 2019, 6(4): 746-757.
- [15] 赵畅, 龙健, 李娟, 等. 茂兰喀斯特原生林不同坡向及分解层的凋落物现存量和养分特征[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(2): 295-303.
- [16] 赵金龙, 王烁鑫, 韩海荣, 等. 森林生态系统服务功能价值评估研究进展与趋势[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(8): 2229-2237.
- [17] 王璐, 王海燕, 何丽鸿, 等. 基于GIS的土壤肥力质量综合评价——以天然云冷杉针阔混交林为例[J]. *土壤通报*, 2016, 47(5): 1223-1230.
- [18] 鲍士旦. 土壤化学分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 14-111.
- [19] 李翔, 王海燕, 秦倩倩, 等. 采伐对天然云冷杉针阔混交林半分解层凋落物现存量、含水率及林分郁闭度空间异质性的影响[J]. *林业科学研究*, 2018, 31(6): 114-120.
- [20] GE J L, XIE Z Q. Leaf litter carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometric patterns as related to climatic factors and leaf habits across Chinese broad-leaved tree species[J]. *Plant Ecology*, 2017, 218(9): 1063-1076.
- [21] 张乃木, 王克勤, 宋娅丽, 等. 滇中亚高山森林林下植被和凋落物

- 生态化学计量特征[J]. 林业科学研究, 2020, 33(4): 127-134.
- [22] BAI X J, WANG B R, AN S S, *et al.* Response of forest species to C:N:P in the plant-litter-soil system and stoichiometric homeostasis of plant tissues during afforestation on the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2019, 183(1): 104186.
- [23] 秦江环, 张春雨, 赵秀海. 温带针阔混交林基于植物-土壤反馈的Janzen-Connell假说检验[J]. 植物生态学报, 2022, 46(6): 624-631.
- [24] 刘 璐, 葛结林, 舒化伟, 等. 神农架常绿落叶阔叶混交林碳氮磷化学计量比[J]. 植物生态学报, 2019, 43(6): 482-489.
- [25] VITOUSEK P. Nutrient cycling and nutrient use efficiency[J]. *American Naturalist*, 1982, 119(4): 553-572.
- [26] CHAPMAN K, WHITTAKER J B, HEAL O W. Metabolic and faunal activity in litters of tree mixtures compared with pure stands[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1988, 24(1-3): 33-40.
- [27] HAN W X, FANG J Y, GUO D L, *et al.* Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. *New phytologist*, 2005, 168(2): 377-385.
- [28] 杜雨潭, 陈金磊, 李雷达, 等. 亚热带不同植被恢复林地凋落物层碳、氮、磷化学计量特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(2): 108-119.
- [29] 李汶倬, 高 扬, 杨 柳, 等. 东北地区落叶松新鲜针叶凋落物碳氮磷化学计量特征对环境变化的响应[J]. 生态学杂志, 2020, 39(9): 2832-2841.
- [30] TIAN H Q, CHEN G S, ZHANG C, *et al.* Pattern and variation of C: N: P ratios in China's soils: a synthesis of observational data[J]. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1-3): 139-151.
- [31] 倪惠菁, 苏文会, 范少辉, 等. 养分输入方式对森林生态系统土壤养分循环的影响研究进展[J]. 生态学杂志, 2019, 38(3): 863-872.
- [32] QI K B, PANG X Y, YANG B. Soil carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometry shifts with tree species in sub-alpine plantations[J]. *PeerJ*, 2020, 8: e9702.
- [33] 秦 娟, 孔海燕, 刘 华. 马尾松不同林型土壤C、N、P、K的化学计量特征[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(2): 68-76,82.
- [34] HÄTTENSCHWILER S, JØRGENSEN H B. Carbon quality rather than stoichiometry controls litter decomposition in a tropical rain forest[J]. *Journal of Ecology*, 2010, 98(4): 754-763.
- [35] TONG R, ZHOU BZ, JIANG LN, *et al.* Leaf litter carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) across China[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2021, 27: e01542.
- [36] THIESSEN S, GLEIXNER G, WUTZLER T, *et al.* Both priming and temperature sensitivity of soil organic matter decomposition depend on microbial biomass: An incubation study[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 57: 739-748.
- [37] YU G G, ZHAO H B, CHEN J, *et al.* Soil microbial community dynamics mediate the priming effects caused by in situ decomposition of fresh plant residues[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 737: 139708.

Eco-stoichiometry Characteristics of Litter-Soil in Coniferous and Broad-leaved Mixed Forest of Changbai Mountains

CUI Xue, WANG Hai-yan, ZOU Jia-he, QIN Qian-qian, DU Xue,
LI Xiang, ZHANG Mei-na, GENG Qi

(College of Forestry, The Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] The ecological stoichiometry of litter-soil at the stand scale was studied to clarify the changes of litter and soil nutrients and their relationship in forest ecosystem, and to provide a scientific basis for the operation and management of natural coniferous and broad-leaved mixed forest. [Method] Based on the four plots of spruce-fir broad-leaved mixed forest with an area of 1 ha on North slope of Changbai Mountains, soil samples of 0–20 and 20–40 cm and litter samples of the semi-decomposed horizon (F) and completely decomposed horizon (H) were collected. Soil pH, soil organic matter, total nitrogen, total phosphorus, available phosphorus and readily available potassium were determined, and litter standing crop and litter-soil stoichiometric ratios were calculated. The correlation analysis and redundancy analysis were used to study the litter characteristics and their effects on soil nutrients and the stoichiometric ratios in spruce-fir broad-leaved mixed forest. [Result] The results showed that litter standing crop had a very significant and strong correlation with soil C/N at depth of 0–20 cm ($P < 0.01$). Litter C, C/P and N/P decreased significantly with increasing litter decomposition degree ($P < 0.05$). The redundancy analysis results showed that litter standing crop had a strong positive effect on the litter carbon and C/P in F horizon and litter phosphorus in H horizon. The stoichiometric ratios of litter nutrients and soil nutrients were $C/P > C/N > N/P$. [Conclusion] Litter nitrogen in the H horizon is the critical factor affecting soil pH, soil organic matter, total phosphorus, readily available potassium and C/P ratio in 0–20 cm soil. Litter nitrogen is the main source of total nitrogen in 20–40 cm soil. Therefore, litter nitrogen may be an important factor driving soil nutrient changes in the study area.

Keywords: spruce-fir broad-leaved mixed forest; litter; soil; stoichiometric characteristics

(责任编辑: 徐玉秀)