

网络出版时间:2016-04-07 09:00

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2016.05.012

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20160407.0900.024.html

秦岭山地主要森林凋落物化学组分

白龙龙^{1a},李 银²,侯 琳^{1a},罗春林^{1a},耿增超^{1b},成鸿飞³

(1 西北农林科技大学 a 林学院,b 资源环境学院,陕西 杨凌 712100;

2 中国科学院 植物研究所,植被与环境变化国家重点实验室,北京 100093;3 陕西省龙草坪林业局,陕西 杨凌 712100)

【摘 要】 【目的】分析秦岭山地主要森林凋落物的化学组分,为应用 Yasso07 土壤碳模型估算和预测秦岭山地森林土壤有机碳变化动态提供必要参数。【方法】利用醇浸提法和酸碱洗涤法,测定生长于秦岭火地塘的华山松(*Pinus armandi*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、云杉(*Picea asperata*)、华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)、锐齿栎(*Quercus aliena* var. *acuteserrata*)和红桦(*Betula albo-sinensis*) 6 个主要树种非木质凋落物、细木质凋落物、粗木质凋落物中的醇溶性(ESC)、水溶性(WSC)、酸溶性(ASC)和不溶性(NSC)4 类化合物的含量。【结果】(1)不同树种凋落物的化学组分含量差异显著($P<0.05$),针叶树种凋落物中 ESC、WSC、ASC 和 NSC 的含量分别为(78.23±39.51)~(102.11±40.48) g/kg、(106.43±36.66)~(144.25±60.02) g/kg、(482.09±73.01)~(507.09±56.58) g/kg 和(277.42±25.13)~(314.03±16.08) g/kg;阔叶树种的凋落物中 ESC、WSC、ASC 和 NSC 的含量则分别为(111.63±68.24)~(129.99±39.10) g/kg、(158.64±70.36)~(184.96±51.20) g/kg、(452.28±51.95)~(489.56±52.39) g/kg 和(232.77±44.44)~(240.17±94.81) g/kg。(2)各树种不同凋落物类型间化学组分含量差异显著($P<0.05$),非木质、细木质和粗木质凋落物中的 ESC、WSC、ASC 和 NSC 的含量分别为(21.27±4.12)~(175.77±24.30) g/kg、(53.30±2.40)~(237.10±29.73) g/kg、(404.23±15.79)~(597.45±4.88) g/kg 和(166.11±69.77)~(327.98±4.91) g/kg。(3)聚类分析结果表明,秦岭山地主要树种凋落物可分为两大类,华山松、油松、华北落叶松和云杉这 4 种针叶树种聚为一类,红桦和锐齿栎这 2 种阔叶树种聚为一类。【结论】在不同区域应用 Yaso07 土壤碳模型时,不宜直接采用模型提供的凋落物 4 类化合物含量参数。

【关键词】 凋落物;化学组分;Yasso07 土壤碳模型;碳释放;秦岭山地

【中图分类号】 S718.51⁺9 【文献标志码】 A 【文章编号】 1671-9387(2016)05-0089-08

Chemical composition of litters from main forests in Qinling Mountains

BAI Long-long^{1a},LI Yin²,HOU Lin^{1a},LUO Chun-lin^{1a},
GENG Zeng-chao^{1b},CHENG Hong-fei³

(1 a College of Forestry,b College of Natural Resources and Environment ,Northwest A&F University ,
Yangling ,Shaanxi 712100,China;2 State Key Laboratory of Vegetation and Environmental
Change,Institute of Botany,Chinese Academy of Sciences ,Beijing 100093,China;
3 Longcaoping Forestry Administration,Yangling ,Shaanxi 712100,China)

Abstract: 【Objective】 The study analyzed chemical composition of litters from main forests in Qinling Mountains to provide necessary parameters for the application of Yasso07 soil carbon model to estimate and predict forest soil organic carbon dynamics. 【Method】 Litters were collected from common forests *Pinus armandi*, *Pinus tabulaeformis*, *Picea asperata*, *Larix principis-rupprechtii*, *Quercus aliena* var. *acuteserrata* and *Betula albo-sinensis* in Qinling Mountains and main chemical components including ethanol soluble

【收稿日期】 2014-09-26

【基金项目】 国家林业公益性行业科研专项(201304307)

【作者简介】 白龙龙(1988—),男,陕西延安人,在读硕士,主要从事森林生态系统碳释放研究。E-mail:blyrly@163.com

【通信作者】 侯 琳(1969—),男,陕西武功人,副研究员,主要从事森林生态系统碳循环研究。E-mail:houlin1969@163.com

compounds (ESC), water soluble compounds (WSC), acid soluble compounds (ASC) and non-soluble compounds (NSC) were detected by alcohol extraction method as well as acid and alkali washing method. 【Result】 (1) Compounds of litters from different forests had significant differences ($P < 0.05$). The concentrations of compounds in coniferous litter were $(78.23 \pm 39.51) - (102.11 \pm 40.48)$ g/kg (ESC), $(106.43 \pm 36.66) - (144.25 \pm 60.02)$ g/kg (WSC), $(482.09 \pm 73.01) - (507.09 \pm 56.58)$ g/kg (ASC), and $(277.42 \pm 25.13) - (314.03 \pm 16.08)$ g/kg (NSC), while those in broad-leaf litters were $(111.63 \pm 68.24) - (129.99 \pm 39.10)$ g/kg (ESC), $(158.64 \pm 70.36) - (184.96 \pm 51.20)$ g/kg (WSC), $(452.28 \pm 51.95) - (489.56 \pm 52.39)$ g/kg (ASC), and $(232.77 \pm 44.44) - (240.17 \pm 94.81)$ g/kg (NSC), respectively. (2) Concentrations of compounds among litter types differed significantly. The concentrations of compounds in non-woody, fine and coarse woody litters were $(21.27 \pm 4.12) - (175.77 \pm 24.30)$ g/kg (ESC), $(53.30 \pm 2.40) - (237.10 \pm 29.73)$ g/kg (WSC), $(404.23 \pm 15.79) - (597.45 \pm 4.88)$ g/kg (ASC), and $(166.11 \pm 69.77) - (327.98 \pm 4.91)$ g/kg (NSC), respectively. (3) Clustering analysis showed that the litters of main forests in Qinling Mountains can be divided into two main categories, one with *P. armandi*, *P. tabulaeformis*, *P. asperata* and *L. principis-rupprechtii* while one with *Q. aliena* var. *acuteserrata* and *B. albo-sinensis*. 【Conclusion】 Parameters in Yasso07 manual cannot be used directly when the model is applied in different forest areas.

Key words: litter; chemical component; Yasso07 soil carbon model; carbon emission; Qinling Mountains

土壤有机碳储量占全球土壤碳储量的 62%, 其波动对全球气候变化和食物安全有重要影响^[1]。土壤有机碳的变化主要是由来自活体植物凋落物的输入和分解引起的, 因此凋落物分解在全球碳循环中发挥着重要作用^[2]。不同植物凋落物的化学组成不同, 从而影响其分解速率^[3]。凋落物的分解速率还与土壤中 N、P 的矿化和固定速率相联系^[4]。林地土壤碳动态通常可通过加密采样样点数、提高采样频率和长期定位观测来进行研究^[5]。但由于林地土壤的空间异质性和无干扰情况下林地土壤碳较强的稳定性^[6], 导致上述经验方法在研究林地土壤有机碳动态中耗财耗时, 且研究结果精度较差^[7]。Yasso07 林地土壤碳分解模型在估算不同植物种间凋落物分解及林地土壤 C 释放动态中结果可靠, 已在欧美许多国家得到了广泛应用^[2]。作者测定了秦岭山地主要森林凋落物中醇溶性、水溶性、酸溶性和不溶性 4 类化合物的含量, 为应用 Yasso07 土壤碳模型估算和预测秦岭山地森林林地土壤有机碳变化动态提供了必要参数。该模型基于林地土壤碳变化是由凋落物中 4 类有机化合物(酒精溶解性物质 Ethanol soluble compound, ESC, 主要是可溶性脂肪、色素和油; 水溶性化合物 Water soluble compound, WSC, 主要是单糖和水溶性酚类物质; 酸溶性化合物 Acid soluble compound, ASC, 主要是纤维素和半纤维素; 不溶性化合物 Non-soluble compound, NSC, 主要是木质素)在不同库间转化的假设来进行

模拟的。该模型所需凋落物的各化学组分的参数是由 4 类化合物的含量来确定的。

国外有关凋落物化学组成的研究已有较多报道^[2,4-9]。近年来, 国内有关凋落物的研究主要集中于凋落物的分解特性和养分归还特征^[10-14]、凋落叶的分解速率及其对土壤理化性质的影响^[15-17]、凋落物的持水特性^[18-19]、凋落物分解对氮沉降的响应^[20-23]等方面, 但有关 Yasso07 模型在林地土壤碳动态估算与预测中的应用及凋落物中 4 类化学成分的研究尚不多见。欧美的主要森林树种与中国秦岭林区差异较大, 其凋落物化学组分的参数能否在秦岭山地森林林地土壤 C 释放动态研究中直接应用尚无依据。为此, 本研究对秦岭山地主要森林凋落物化学组分进行了分析, 旨在为 Yasso07 模型在本区的应用提供必要参数。

1 研究区概况

研究区位于陕西省宁陕县境内, 地理坐标为 $33^{\circ}18' \sim 33^{\circ}28' \text{ N}$, $108^{\circ}20' \sim 108^{\circ}29' \text{ E}$, 地处北亚热带北缘, 海拔 1 450~2 500 m, 年均气温 $8 \sim 10^{\circ} \text{ C}$, 年降水量 900~1 200 mm, 蒸发量 800~950 mm。土壤为山地棕壤, 土层厚 30~50 cm。研究区森林面积的 93% 为天然次生林, 人工林面积较小。主要森林树种有华山松 (*Pinus armandi*)、油松 (*Pinus tabulaeformis*)、锐齿栎 (*Quercus aliena* var. *acuteserrata*)、红桦 (*Betula albo-sinensis*)、云杉

(*Picea asperata*),人工造林树种主要为华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*),试验地位于陕西秦岭森林生态系统国家野外科学研究所林分固定观测样地内。

2 材料与方法

2.1 样品采集与处理

森林凋落物分为非木质凋落物(叶和直径 ≤ 2 mm的细根)、细木质凋落物(枝和直径 > 2 mm的粗根)及粗木质凋落物(树干、伐桩)3类^[2]。2013年9月下旬,分别在油松、锐齿栎、华山松、红桦、云杉和华北落叶松固定观测样地内布设的凋落物收集框中收集叶和枝条样品,同时采集样地内的伐桩及新风倒木的树干、粗根和细根分类保存。采集油松、锐齿栎、华山松、红桦、云杉和华北落叶松的叶、细根、枝、粗根、树干、伐桩样品各30个,每个样品采集量100 g。将样品在70℃下烘至恒质量,然后分类粉碎并过直径为0.25 mm的筛,编号后装入样品瓶待分析。

2.2 样品分析

凋落物化学组分由ESC、WSC、ASC和NSC4类化合物构成^[6],分析流程如下^[4]:

(1)取1 g经烘干、粉碎后的凋落物样品,装入滤纸折成的圆筒内,将滤纸筒放入索氏提取器的回流管中。另取100 mL苯-醇混合(体积比1:1)溶液,移入已知质量的脂蜡瓶中。连结脂蜡瓶、回流管和冷管,将脂蜡瓶置入80℃恒温水浴中连续加热20 h,直至回流管内的苯醇溶液变为无色为止。从回流管中取出滤纸筒,置入通风橱内,待苯醇挥发干净后得残渣1。将残渣1放入50℃烘箱中干燥并称质量,得残渣1质量。样品质量与残渣1质量之差为ESC质量。

(2)将残渣1放入250 mL烧杯中,加入150 mL蒸馏水并用玻璃棒将样品搅碎。在烧杯上盖表面皿后,置于单层水解锅中的蒸屉上,于100℃下连续加热3 h后,用G3砂芯漏斗抽滤,并用热水洗残渣,直至洗出液无色为止。合并滤液和洗出液,定容至200 mL并将G3砂芯漏斗中的残渣移入烧杯中。将残渣放入50℃烘箱中干燥,称质量即得残渣2质量。残渣1与残渣2质量之差,为WSC质量。

(3)在装有残渣2的烧杯内加入质量分数为2%的盐酸溶液150 mL,用玻璃棒将残渣2搅碎。将烧杯置于水解锅中,于100℃下连续加热3 h后,用G3砂芯漏斗抽滤,并用热水洗残渣,直至加入质

量分数1%硝酸银溶液无沉淀出现为止。合并滤液和洗出液,定容至250 mL。将G3砂芯漏斗中的残渣移入烧杯中,放入50℃烘箱中干燥。在残渣中加入质量分数为80%的硫酸溶液20 mL,置于室温下水解2.5 h后,加入蒸馏水300 mL。在单层水解锅内水解5 h后,用G3砂芯漏斗抽滤。将抽滤后的残渣吸入坩埚内,并用热水洗残渣,直至滴入质量分数5%氯化钡溶液无沉淀出现为止。将所得的残渣置入烘箱中在105℃下烘干,得残渣3质量。残渣2与残渣3质量之差为ASC质量。

(4)将残渣3置入瓷坩埚,于电炉上低温碳化3 h后,再放入高温电炉中。在450℃下灼烧8 h后,冷却并称质量,得残渣4(灰分)质量。残渣3与残渣4质量之差为NSC质量。

2.3 数据处理

不同凋落物化学组分含量,按其质量占样品无灰分干质量的百分比计算,凋落物化学组分含量采用“均值(Mean)±标准差(SE)”的形式表示。

不同树种、不同类型凋落物化学组分含量间的差异,采用SPSS 20.0 (SPSS Inc., USA)软件中的One-way ANOVA进行分析。对各树种凋落物化学组分的分类采用SPSS 20.0 (SPSS Inc., USA)中的欧氏距离法进行系统聚类分析。对同一树种不同类型凋落物同一化学组分含量求平均值,得不同树种4类化合物含量。

3 结果与分析

3.1 秦岭山地主要树种非木质凋落物的化学组分

对不同树种非木质凋落物的化学组分进行分析,结果(表1)表明,在叶凋落物中,各树种的NSC含量差异显著($P < 0.05$);除华北落叶松与锐齿栎的ASC含量差异不显著($P > 0.05$)外,其余4个树种间ASC含量差异显著($P < 0.05$);红桦与锐齿栎间WSC含量差异不显著($P > 0.05$),但其余3类化合物含量存在显著差异($P < 0.05$);红桦、锐齿栎中的ESC和WSC含量显著($P < 0.05$)高于华山松、油松、云杉、华北落叶松。在细根中,油松与华山松间4类化合物含量差异均不显著($P > 0.05$);红桦、锐齿栎与华山松、油松、华北落叶松中的ESC和WSC含量差异显著($P < 0.05$);锐齿栎与红桦间WSC含量差异显著($P < 0.05$),其余3类化合物含量无显著差异($P > 0.05$)。无论是叶还是细根中,红桦、锐齿栎的ESC和WSC含量显著高于4个针叶树种,而ASC和NSC含量则普遍低于后者。

表 1 秦岭山地 6 个主要树种非木质凋落物的化学组分

Table 1 Chemical components of non-woody litters of six main species in Qinling Mountains				g/kg
树种 Tree species	醇溶性 ESC		水溶性 WSC	
	叶 Leaf	细根 Fine root	叶 Leaf	细根 Fine root
华山松 <i>P. armandi</i>	124.96±4.09 a	120.27±4.57 a	153.09±6.44 a	141.70±2.35 b
油松 <i>P. tabulaeformis</i>	122.23±5.48 a	118.73±1.52 a	150.70±6.23 a	129.50±2.10 a
云杉 <i>P. asperata</i>	160.23±5.51 b	122.70±2.16 ab	228.93±3.94 b	136.97±5.36 b
华北落叶松 <i>L. principis</i>	152.97±2.64 b	118.87±6.72 a	153.77±5.99 a	157.70±7.31 b
红桦 <i>B. albo-sinensis</i>	182.31±11.95 c	143.97±7.76 bc	252.40±10.34 c	211.93±10.54 d
锐齿栎 <i>Q. aliena</i> var. <i>acuteserrata</i>	198.88±3.96 d	153.97±2.86 c	252.21±4.20 c	187.40±8.54 c

树种 Tree species	酸溶性 ASC		不溶性 NSC	
	叶 Leaf	细根 Fine root	叶 Leaf	细根 Fine root
华山松 <i>P. armandi</i>	433.36±3.20 d	477.37±2.91 cd	288.60±6.28 e	260.67±7.07 b
油松 <i>P. tabulaeformis</i>	417.82±4.94 c	475.70±2.05 cd	309.24±10.78 f	276.07±3.16 b
云杉 <i>P. asperata</i>	378.16±7.29 a	483.50±7.41 e	232.68±1.54 c	256.07±3.93 b
华北落叶松 <i>L. principis</i>	448.33±4.56 e	451.57±9.98 bc	244.93±6.39 d	271.87±13.15 b
红桦 <i>B. albo-sinensis</i>	387.36±7.56 b	414.40±16.53 a	177.93±12.43 b	229.70±9.20 a
锐齿栎 <i>Q. aliena</i> var. <i>acuteserrata</i>	444.86±5.05 e	429.40±8.55 ab	104.06±1.90 a	229.23±14.67 a

注:表中数据为“平均值±标准差”,同列数据后标不同小写字母者表示差异显著($P<0.05$)。下表同。
Note: The date in table are “mean±standard derivation (SD)”. Different lowercase letters indicate significant difference between treatments at $P<0.05$ level by LSD. The same below.

3.2 秦岭山地主要树种细木质凋落物的化学组分

不同树种的细木质凋落物中,化学组分含量表现出较复杂的变化趋势。由表 2 可知,在枝中,红桦的 ESC、云杉的 WSC、锐齿栎的 ASC 含量显著($P<0.05$)高于其他树种;粗根中,锐齿栎的 ESC 和 WSC、华北落叶松的 ASC、油松的 NSC 含量最高。

表 2 秦岭山地 6 个主要树种细木质凋落物的化学组分

Table 2 Chemical components of fine woody litters of six main species in Qinling Mountains				g/kg
树种 Tree species	醇溶性 ESC		水溶性 WSC	
	枝 Branch	粗根 Coarse root	枝 Branch	粗根 Coarse root
华山松 <i>P. armandi</i>	86.91±4.03 d	73.00±2.26 b	87.51±3.61 b	91.00±3.01 a
油松 <i>P. tabulaeformis</i>	60.87±5.56 c	71.97±3.50 b	96.93±5.27 c	85.30±4.12 a
云杉 <i>P. asperata</i>	50.54±4.38 b	63.70±0.78 a	115.76±3.01 d	127.20±0.66 bc
华北落叶松 <i>L. principis</i>	90.19±2.70 d	87.30±1.59 c	92.56±2.33 bc	75.63±5.14 a
红桦 <i>B. albo-sinensis</i>	109.84±5.54 e	108.43±0.64 d	92.61±2.81 bc	118.27±5.23 b
锐齿栎 <i>Q. aliena</i> var. <i>acuteserrata</i>	37.84±2.44 a	110.90±3.04 d	80.66±8.19 a	138.53±13.09 c

树种 Tree species	酸溶性 ASC		不溶性 NSC	
	枝 Branch	粗根 Coarse root	枝 Branch	粗根 Coarse root
华山松 <i>P. armandi</i>	524.91±2.71 b	530.40±1.87 bc	300.67±5.49 b	305.60±4.16 ab
油松 <i>P. tabulaeformis</i>	522.82±4.87 b	523.97±4.04 bc	320.58±5.06 c	318.77±5.99 b
云杉 <i>P. asperata</i>	525.57±4.12 b	503.10±0.80 ab	308.13±5.05 b	306.00±0.96 ab
华北落叶松 <i>L. principis</i>	510.77±3.22 c	554.40±1.57 c	306.49±3.39 b	282.67±2.11 ab
红桦 <i>B. albo-sinensis</i>	485.71±16.60 c	481.83±35.67 a	242.53±17.68 a	291.47±3.70 ab
锐齿栎 <i>Q. aliena</i> var. <i>acuteserrata</i>	561.82±5.07 a	472.67±7.05 a	319.68±9.93 c	277.90±6.69 a

3.3 秦岭山地主要树种粗木质凋落物的化学组分

由表 3 可知,红桦和锐齿栎粗木质凋落物中,ESC、WSC 含量明显($P<0.05$)高于华山松、油松、云杉和华北落叶松,而华山松、油松、云杉、华北落叶松粗木质凋落物中 ASC 的含量则显著($P<0.05$)

高于红桦和锐齿栎。红桦树干和锐齿栎树桩中的 ESC、WSC,华山松树干和油松树桩中的 ASC,油松树干和华山松树桩中的 NSC 含量最高;锐齿栎粗木质凋落物中的 NSC、树桩中的 ESC 和 WSC 含量高于($P<0.05$)红桦,而红桦树干中的 ESC 和 WSC、

树干和树桩中的 ASC 含量则高于 ($P<0.05$) 锐齿栎 的差异较明显 ($P<0.05$)。
栎;不同树种粗木质凋落物中 4 类化学组分含量间

表 3 秦岭山地 6 个主要树种粗木质凋落物的化学组分

Table 3 Chemical components of coarse woody litters of six main species in Qinling Mountains g/kg				
树种 Tree species	醇溶性 ESC		水溶性 WSC	
	树干 Stem	树桩 Stump	树干 Stem	树桩 Stump
华山松 <i>P. armandi</i>	26.43±2.21 a	28.87±1.20 a	49.5±2.43 a	66.03±3.09 b
油松 <i>P. tabulaeformis</i>	18.67±1.10 a	23.87±4.57 a	51.33±1.12 a	55.27±1.25 a
云杉 <i>P. asperata</i>	40.77±2.23 b	56.77±5.13 b	68.13±4.60 b	76.17±2.91 b
华北落叶松 <i>L. principis</i>	39.43±0.55 b	46.00±2.57 b	86.33±2.71 c	75.17±4.50 b
红桦 <i>B. albo-sinensis</i>	86.33±1.81 d	84.67±8.89 c	144.67±10.01 e	131.80±4.61 c
锐齿栎 <i>Q. aliena</i> var. <i>acuteserrata</i>	53.67±7.46 c	87.60±1.90 c	123.03±8.13 d	138.87±5.25 c

树种 Tree species	酸溶性 ASC		不溶性 NSC	
	树干 Stem	树桩 Stump	树干 Stem	树桩 Stump
华山松 <i>P. armandi</i>	603.00±0.66 c	571.60±2.43 c	321.07±0.57 c	333.50±3.73 d
油松 <i>P. tabulaeformis</i>	600.13±5.61 c	594.77±2.49 d	329.87±0.57 c	326.10±4.92 d
云杉 <i>P. asperata</i>	568.23±6.01 b	554.93±7.02 c	322.87±4.48 c	312.13±1.34 c
华北落叶松 <i>L. principis</i>	593.37±4.82 c	594.27±3.53 d	280.87±3.35 b	284.57±4.91 a
红桦 <i>B. albo-sinensis</i>	519.13±6.93 a	488.27±10.18 b	249.87±10.42 a	295.27±1.96 b
锐齿栎 <i>Q. aliena</i> var. <i>acuteserrata</i>	504.43±7.65 a	469.03±10.12 a	318.87±2.91 c	304.50±4.31 bc

3.4 秦岭山地主要树种不同类型凋落物中化学组分的差异

对各树种不同类型凋落物中同类化学组分的含量差异进行分析,结果(表 4)表明,凋落物类型对凋落物中化学组分含量有显著影响。华山松的凋落物除细木质与粗木质间 ASC 含量差异不显著 ($P>0.05$)外,其余 3 种类型凋落物中 4 类化合物含量差异均显著 ($P<0.05$);油松的 3 种凋落物类型中 4 类化合物含量差异均显著 ($P<0.05$);云杉凋落物除细木质与粗木质间 ESC 含量差异不显著 ($P>$

0.05)外,其余 3 种类型凋落物中 4 类化合物含量差异均显著 ($P<0.05$);华北落叶松的 3 种凋落物类型中 ESC、WSC 和 ASC 含量差异均显著 ($P<0.05$),只有细木质与粗木质间 NSC 含量差异不显著 ($P>0.05$);红桦的 3 种凋落物类型中 ESC、ASC 含量差异显著 ($P<0.05$),细木质与粗木质间 WSC、NSC 含量差异不显著 ($P>0.05$);锐齿栎细木质与粗木质间 ESC、WSC、NSC 含量差异均不显著 ($P>0.05$),只有 ASC 含量在 3 种凋落物类型间差异显著 ($P<0.05$)。

表 4 秦岭山地 6 个主要树种不同类型凋落物的化学组分

Table 4 Chemical component in different litters of six main species in Qinling Mountains g/kg					
树种 Tree species	凋落物类型 Litter types	醇溶性 ESC	水溶性 WSC	酸溶性 ASC	不溶性 NSC
华山松 <i>P. armandi</i>	非木质 Non-woody litter	123.20±4.79 c	143.42±2.91 c	456.08±23.68 a	277.30±19.28 a
	细木质 Fine woody litter	80.25±8.07 b	90.38±2.20 b	527.72±3.51 b	301.65±5.36 b
	粗木质 Coarse woody litter	27.65±2.08 a	57.77±9.39 a	587.30±17.27 b	327.28±7.22 c
油松 <i>P. tabulaeformis</i>	非木质 Non-woody litter	119.92±4.49 c	137.72±9.45 c	448.02±30.70 a	294.35±20.14 a
	细木质 Fine woody litter	68.20±6.13 b	91.10±6.99 b	523.95±2.75 b	316.75±4.82 b
	粗木质 Coarse woody litter	21.27±4.12 a	53.30±2.40 a	597.45±4.88 c	327.98±4.91 c
云杉 <i>P. asperata</i>	非木质 Non-woody litter	140.93±20.17 b	182.25±49.73 c	432.68±55.96 a	244.13±14.13 a
	细木质 Fine woody litter	58.68±6.38 a	123.07±4.66 b	512.85±11.38 b	305.40±2.07 b
	粗木质 Coarse woody litter	48.77±9.45 a	72.15±5.59 a	561.58±9.34 c	317.50±6.58 c
华北落叶松 <i>L. principis</i>	非木质 Non-woody litter	135.27±18.51 c	154.35±7.81 c	450.07±7.76 a	260.32±16.31 a
	细木质 Fine woody litter	87.80±1.19 b	84.98±10.81 b	532.57±23.95 b	294.65±13.22 b
	粗木质 Coarse woody litter	42.72±3.97 a	80.75±6.96 a	593.82±3.81 c	282.72±4.27 b
红桦 <i>B. albo-sinensis</i>	非木质 Non-woody litter	158.58±22.01 c	237.10±29.73 b	404.23±15.79 a	200.08±33.78 a
	细木质 Fine woody litter	110.13±3.07 b	138.90±22.85 a	478.70±26.23 b	272.27±33.36 b
	粗木质 Coarse woody litter	85.50±5.81 a	138.23±9.92 a	503.70±18.61 c	272.57±25.76 b
锐齿栎 <i>Q. aliena</i> var. <i>acuteserrata</i>	非木质 Non-woody litter	175.77±24.30 b	220.10±36.47 b	438.02±11.16 a	166.11±69.77 a
	细木质 Fine woody litter	73.58±40.95 a	110.42±32.84 a	515.30±47.00 c	300.70±25.67 b
	粗木质 Coarse woody litter	70.63±19.21 a	130.95±10.62 a	486.73±20.99 b	311.68±8.53 b

3.5 秦岭山地主要树种凋落物的化学组分

对秦岭火地塘林区同一树种不同类型凋落物同一化学组分含量求平均值,得不同树种 4 类化合物的含量(表 5)。从表 5 可以看出,红桦凋落物中 ESC 和 WSC 含量在 6 个树种中最高,分别为 (129.99 ± 39.10) g/kg 和 (184.96 ± 51.20) g/kg,而 ASC 和 NSC 含量最低,分别为 (452.28 ± 51.95) g/kg 和 (232.77 ± 44.44) g/kg;华北落叶松凋落物中 ASC 含量在 6 个树种中最高,为 (507.09 ± 56.58) g/kg;油松凋落物中 NSC 含量在 6 个树种中最高,为 (314.03 ± 16.08) g/kg,而 ESC 含量最

低,为 (78.23 ± 39.51) g/kg。其中,红桦凋落物中 ESC 含量分别为华山松、油松、云杉、华北落叶松和锐齿栎凋落物的 1.47 倍、1.66 倍、1.42 倍、1.27 倍和 1.16 倍;红桦凋落物中 WSC 含量分别为华山松、油松、云杉、华北落叶松和锐齿栎凋落物的 1.73 倍、1.74 倍、1.28 倍、1.63 倍和 1.17 倍;华北落叶松凋落物中 ASC 含量分别为华山松、油松、云杉、红桦和锐齿栎凋落物的 1.00 倍、1.01 倍、1.05 倍、1.21 倍和 1.04 倍;油松凋落物中 NSC 含量分别为华山松、云杉、华北落叶松、红桦和锐齿栎凋落物的 1.05 倍、1.11 倍、1.31 倍、1.35 倍和 1.31 倍。

表 5 秦岭山地主要树种凋落物的化学组分

Table 5 Chemical components in litters of main species in Qinling Mountains				g/kg
树种 Tree species	醇溶性 ESC	水溶性 WSC	酸溶性 ASC	不溶性 NSC
华山松 <i>P. armandi</i>	88.42±36.33	107.00±38.22	505.72±57.62	298.86±19.73
油松 <i>P. tabulaeformis</i>	78.23±39.51	106.43±36.66	501.65±66.02	314.03±16.08
云杉 <i>P. asperata</i>	91.63±50.74	144.25±60.02	482.09±73.01	282.03±37.00
华北落叶松 <i>L. principis</i>	102.11±40.48	113.38±35.17	507.09±56.58	277.42±25.13
红桦 <i>B. albo-sinensis</i>	129.99±39.10	184.96±51.20	452.28±51.95	232.77±44.44
锐齿栎 <i>Q. aliena</i> var. <i>acuteserrata</i>	111.63±68.24	158.64±70.36	489.56±52.39	240.17±94.81

3.6 秦岭山地主要树种凋落物化学组分的聚类分析

为方便以后对秦岭山地主要树种凋落物化学组分进行分类研究,运用 SPSS 20.0 软件,采用欧式距离法对其进行系统聚类分析。结果(图 1)表明,秦岭山地主要树种凋落物可分为两大类:华山松、油松、华北落叶松和云杉这 4 种针叶树种聚为一类,红

桦和锐齿栎这 2 种阔叶树种聚为一类。在第一大类中,华山松、油松和华北落叶松为一类,云杉单独为一类;在华山松、油松和华北落叶松中,华山松和油松为一类,华北落叶松单独为一类。此结果说明越是近缘的种,其凋落物化学组分越相似,这可能与树种的生物学习性相关。

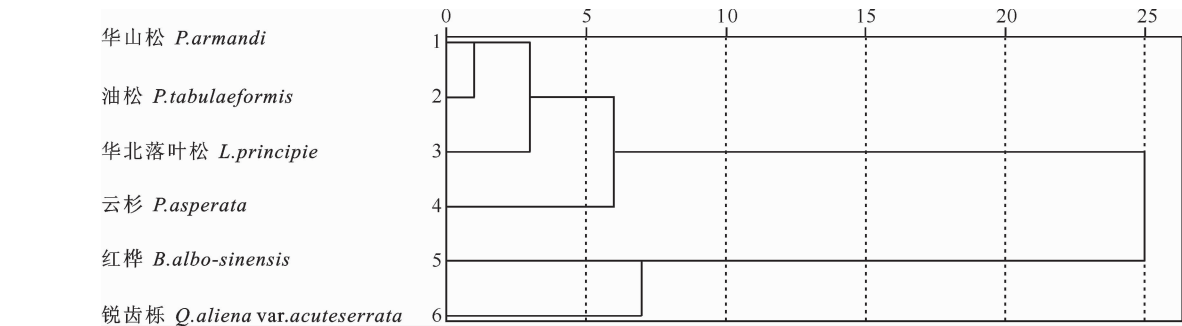


图 1 秦岭山地 6 个主要树种凋落物化学组分的聚类结果

Fig. 1 Clustering analysis results of litters of six main tree species in Qinling Mountains

4 讨论

4.1 不同地区树种凋落物化学组分的差异

森林凋落物的分解是凋落物中 4 类有机化合物在不同库间转化的结果^[6],但由于输入凋落物的树种生物学特性不同,导致凋落物的化学组分含量不同^[8]。Yasso07 模型操作手册附录中列出了部分欧

美树种凋落物化学组分的含量,不同树种凋落物中的 4 类化合物含量差异较大,即使是同一个属的树种,其凋落物化学组分含量也明显不同。以叶凋落物为例,欧洲赤松(*Pinus sylvestris*)ESC 的含量(最高)分别为海岸松(*Pinus pinaster*)的 10.79 倍、意大利伞松(*Pinus pinea*)的 8.56 倍、斑克松(*Pinus banksiana*)的 7.24 倍、欧洲黑松(*Pinus nigra*)的

6.34倍、脂松(*Pinus resinosa*)的3.38倍、湿地松(*Pinus elliottii*)的2.99倍和北美乔松(*Pinus strobus*)的2.76倍;黑云杉(*Picea mariana*)叶凋落物中ESC的含量为欧洲云杉(*Picea abies*)的1.73倍;纸皮桦(*Betula papyrifera*)叶凋落物中ESC的含量为黄桦(*Betula lutea*)的2.01倍^[24]。

Sariyildiz等^[8]和Valachovic等^[9]分别研究了分布于土耳其东北部的欧洲栎(*Quercus robur*)和美国俄勒冈西部的俄州栎(*Quercus garryana*)的凋落物化学组分,结果表明俄州栎凋落物中ASC含量为欧洲栎的1.54倍,而欧洲栎凋落物中的NSC含量为俄州栎的5.41倍,本研究中的锐齿栎凋落物中ESC含量为俄州栎的2.6倍,其研究结果与Yasso07模型操作手册中岩石栎的化合物含量也不同。可见,位于不同地区的同属树种,其凋落物中4类化合物的含量明显不同。

4.2 凋落物类型对凋落物化学组分的影响

同一树种不同类型的凋落物中4类化合物含量明显不同。以欧洲赤松为例,其树干(粗木质凋落物)中ESC含量为枝(细木质凋落物)的8.56倍;叶(非木质凋落物)中WSC的含量为树干(粗木质凋落物)的7.88倍;枝(细木质凋落物)中ASC的含量为树干(粗木质凋落物)的63.29倍,NSC含量为叶(非木质凋落物)的1.99倍^[24]。

以本研究中的华山松为例,其叶(非木质凋落物)中ESC含量为粗根(细木质凋落物)的1.71倍,为树干(粗木质凋落物)的4.73倍;叶中WSC含量为粗根的1.68倍,为树干的3.09倍;树干中ASC含量为叶的1.39倍,为枝(细木质凋落物)的1.15倍;树桩(粗木质凋落物)中NSC含量为细根(非木质凋落物)的1.28倍,为枝的1.11倍。本研究结果与上述研究相似。

5 结 论

同一树种的不同凋落物类型中4类化合物的含量差异显著;属于同属的树种,其凋落物中化学组分含量差异明显;阔叶树种与针叶树种凋落物中化学组分含量差异显著,且阔叶树种凋落物中ESC和WSC含量均高于针叶树种,而针叶树种凋落物中ASC和NSC含量则大多高于阔叶树种;在不同区域应用Yasso07土壤碳模型时,不能直接采用模型提供的凋落物4类化合物含量参数,应根据当地情况分树种和凋落物类型,测定其4类化合物的含量。

[参考文献]

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. Science, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [2] Tuomi M, Thum T, Järvinen H, et al. Leaf litter decomposition: estimates of global variability based on Yasso07 model [J]. Ecological Modelling, 2009, 220(23): 3362-3371.
- [3] 王相娥, 薛立, 谢腾芳. 凋落物的分解研究综述 [J]. 土壤通报, 2009, 40(6): 1473-1478.
Wang X E, Xue L, Xie T F. A review on litter decomposition [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(6): 1473-1478. (in Chinese)
- [4] Ryan M G, Melillo J M, Ricca A. A comparison of methods for determining proximate carbon fractions of forest litter [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1990, 20(2): 166-171.
- [5] Lindner M, Karjalainen T. Carbon inventory methods and carbon mitigation potentials of forests in Europe: A short review of recent progress [J]. European Journal of Forest Research, 2007, 126(2): 149-156.
- [6] Liski J, Palosuo T, Peltoniemi M, et al. Carbon and decomposition model Yasso for forest soils [J]. Ecological Modelling, 2005, 189(12): 168-182.
- [7] Repo A, Känkänen R, Tuovinen J P, et al. Forest bioenergy climate impact can be improved by allocating forest residue removal [J]. Global Change Biology Bioenergy, 2012, 4(2): 202-212.
- [8] Sariyildiz T, Anderson J M, Kucuk M. Effects of tree species and topography on soil chemistry, litter quality, and decomposition in Northeast Turkey [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(9): 1695-1706.
- [9] Valachovic Y S, Caldwell B A, Cromack K J, et al. Leaf litter chemistry controls on decomposition of Pacific Northwest trees and woody shrubs [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2004, 34(10): 2131-2147.
- [10] 窦荣鹏, 江洪, 余树全, 等. 热带尖峰岭和亚热带千岛湖六种凋落叶的分解特征 [J]. 生态学报, 2010, 30(16): 4521-4528.
Dou R P, Jiang H, Yu S Q, et al. Leaf litter decomposition of six trees in mid-subtropical and tropical China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(16): 4521-4528. (in Chinese)
- [11] 何帆, 王得祥, 雷瑞德. 秦岭火地塘林区4种主要树种凋落叶分解动态研究 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2009, 37(6): 181-186.
He F, Wang D X, Lei R D, et al. Dynamic research on four main tree species decomposition of weathered leaves from Huoditang area in Qinling mountains [J]. Journal of Northwest A&F University (Nat Sci Ed), 2009, 37(6): 181-186. (in Chinese)
- [12] 吕瑞恒, 李国雷, 刘勇, 等. 不同立地条件下华北落叶松叶凋落物的分解特性 [J]. 林业科学, 2012, 48(2): 31-37.
Lü R H, Li G L, Liu Y, et al. Decomposition characteristics of coniferous litter under different site conditions in a *Larix principis-rupprechtii* plantation [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(2): 31-37. (in Chinese)

- [13] 李忠文, 闫文德, 郑 威, 等. 亚热带樟树-马尾松混交林凋落物量及养分动态特征 [J]. 生态学报, 2013, 33(24): 7707-7714.
Li Z W, Yan W D, Zheng W, et al. Litter fall production and nutrient dynamic of *Cinnamomum camphora* and *Pinus massoniana* mixed forests in subtropics China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(24): 7707-7714. (in Chinese)
- [14] 杨玉盛, 林 鹏, 郭剑芬, 等. 格氏栲天然林与人工林凋落物数量、养分归还及凋落叶分解 [J]. 生态学报, 2003, 23(7): 1287-1289.
Yang Y S, Lin P, Guo J F, et al. Litter production, nutrient return and leaf-litter decomposition in natural and monoculture plantation forests of *Castanopsis kawamii* in subtropical China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(7): 1287-1289. (in Chinese)
- [15] 何 帆, 王得祥, 雷瑞德. 秦岭火地塘林区四种主要树种凋落叶分解速率 [J]. 生态学报, 2011, 30(3): 521-526.
He F, Wang D X, Lei R D. Decomposition rate of four dominant tree species leaf litters in Qinling Huoditang forests [J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(3): 521-526. (in Chinese)
- [16] 逯军峰, 王 辉, 曹 婧, 等. 油松人工林凋落物对土壤理化性质的影响 [J]. 西北林学院学报, 2007, 22(3): 25-28.
Lu J F, Wang H, Cao J, et al. Effect of forest litters on soil physical and chemical properties in *Pinus tabulaeformis* plantation [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2007, 22(3): 25-28. (in Chinese)
- [17] 张丽萍, 张兴昌, 刘增文, 等. 人工林凋落叶分解对土壤性质的影响 [J]. 西北农林科技大学(自然科学版), 2008, 36(9): 87-92.
Zhang L P, Zhang X C, Liu Z W, et al. Effect of plantation litter decomposition on soil properties [J]. Journal of Northwest A&F University(Nat Sci Ed), 2008, 36(9): 87-92. (in Chinese)
- [18] 刘效东, 乔玉娜, 周国逸, 等. 鼎湖山 3 种不同演替阶段森林凋落物的持水特性 [J]. 林业科学, 2013, 49(9): 8-15.
Liu X D, Qiao Y N, Zhou G Y, et al. Water-holding characteristics of litters in three forests at different successional stages in Dinghushan [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, 49(9): 8-15. (in Chinese)
- [19] 时忠杰, 张宁南, 何常清, 等. 桉树人工林冠层、凋落物及土壤水文生态效应 [J]. 生态学报, 2010, 30(7): 1932-1939.
Shi Z J, Zhang N N, He C Q, et al. Eco-hydrological effect of the canopy, litter and soil of a *Eucalyptus* plantation in South China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(7): 1932-1939. (in Chinese)
- [20] 李仁洪, 胡庭兴, 涂利华, 等. 华西雨屏区慈竹林凋落叶分解过程养分释放对模拟氮沉降的响应 [J]. 林业科学, 2010, 46(8): 8-14.
Li R H, Hu T X, Tu L H, et al. Nutrient release in decomposition of leaf litter in neosinocalamus affinis stands in response to simulated nitrogen deposition in rainy area of Western China [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(8): 8-14. (in Chinese)
- [21] 肖银龙, 涂利华, 胡庭兴, 等. 模拟氮沉降对华西雨屏区苦竹林凋落物养分输入量的早期影响 [J]. 生态学报, 2013, 33(23): 7355-7363.
Xiao Y L, Tu L H, Hu T X, et al. Early effects of simulated nitrogen deposition on annual nutrient input from litterfall in a *Pleioblastus amarus* plantation in rainy area of west China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(23): 7355-7363. (in Chinese)
- [22] 涂利华, 胡庭兴, 张 健, 等. 模拟氮沉降对两种竹林不同凋落物组分分解过程养分释放的影响 [J]. 生态学报, 2011, 31(6): 1547-1557.
Tu L H, Hu T X, Zhang J, et al. Effect of simulated nitrogen deposition on nutrient release in decomposition of several litter fractions of two bamboo species [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(6): 1547-1557. (in Chinese)
- [23] 刘文飞, 樊后保. 杉木人工林凋落物 C, N, P 归还量对氮沉降的响应 [J]. 林业科学, 2011, 47(3): 89-95.
Liu W F, Fan H B. Impacts of nitrogen deposition on C, N, and P fluxes in the litterfall of Chinese fir plantation [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(3): 89-95. (in Chinese)
- [24] Erkki O. Estimation of net ecosystem exchange [EB/OL]. (2012-12-10) [2014-08-21]. <http://www.environment.fi/syke/yasso.html>.