

采煤沉陷区沙柳和小叶杨凋落物分解特征比较

王浩¹, 党晓宏^{1,2}, 汪季^{1,2}, 柏胜宏³, 高岩¹, 王言意¹, 张昊¹

(1.内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2.内蒙古杭锦荒漠生态系统国家定位观测研究站, 内蒙古 鄂尔多斯 017400; 3.内蒙古包头市东河区委会党校, 内蒙古 包头 014000)

摘要: [目的] 探究采煤沉陷区生态修复植物凋落物的分解特征及影响因素, 为干旱气候条件下采煤沉陷区的生态修复提供理论依据。[方法] 采用野外分解袋试验的方法, 选取沙柳(*Salix psammophila*)、小叶杨(*Populus simonii*)和沙柳与小叶杨混合凋落物 3 个处理, 研究分析了在风沙土和黄土基质条件下, 3 种类型凋落物分解 1 a 后的残留量、有机碳(OC)、氮(N)、磷(P)、酸性洗涤纤维(ADF)和酸性洗涤木质素(ADL)的含量变化。[结果] ①沙柳凋落物年分解速率比小叶杨和混合凋落物高 10%~15%; 凋落物在黄土上的分解速率比在风沙土上的速率高 13%~23%。②凋落物树种对凋落物 OC, N 和 P 含量有极显著($p < 0.01$)影响, 土壤类型对 OC, N, P, ADF 和 ADL 的含量均有显著($p < 0.05$)或极显著($p < 0.01$)影响, 表明树种和分解土壤基质均是影响凋落物养分转化的重要因素。③不同凋落物处理之间, 沙柳凋落物的 OC, N 含量高于混合和小叶杨, 而沙柳凋落物的 P 含量在分解试验前 4 个月低于小叶杨和混合凋落物, 随后接近该值。[结论] 相比沙柳, 小叶杨凋落物分解较慢, 在土壤上形成覆盖能够保持更长时, 更适合作为内蒙古采煤沉陷区主要的修复植物。

关键词: 凋落物; 风沙土; 黄土; 煤矿沉陷区; 木质素; 内蒙古自治区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)05-0073-07

中图分类号: S157.1, X171.4

文献参数: 王浩, 党晓宏, 汪季, 等. 采煤沉陷区沙柳和小叶杨凋落物分解特征比较[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5): 73-79. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.05.010; Wang Hao, Dang Xiaohong, Wang Ji, et al. Litter decomposition characteristics of *Salix psammophila* and *Populus simonii* in a coal mining subsidence area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 73-79.

Litter Decomposition Characteristics of *Salix Psammophila* and *Populus Simonii* in a Coal Mining Subsidence Area

Wang Hao¹, Dang Xiaohong^{1,2}, Wang Ji^{1,2},

Bai Shenghong³, Gao Yan¹, Wang Yanyi¹, Zhang Hao¹

(1. Desert Science and Engineering College, Inner Mongolia Agriculture University, Hohhot, Inner

Mongolia 010018, China; 2. Inner Mongolia Hangjin Desert Ecological Position Research Station, Ordos,

Inner Mongolia 017400, China; 3. Baotou Donghe District Committee Party School, Baotou, Inner Mongolia 014000, China)

Abstract: [Objective] The decomposition characteristics and influencing factors of plant litter for ecological restoration of a coal mining subsidence area were analyzed in order to provide a theoretical basis for restoration in an arid climate. [Methods] An one-year decomposition experiment that included three litter treatments (*Salix psammophila*; *Populus simonii*; 1 : 5 ratio of *S. psammophila* : *P. simonii*) and two decomposition soils (sandy soil, loess soil) was conducted in a coal mining subsidence area of Inner Mongolia using the field decomposition bag method. The residual dry mass and contents of organic carbon (OC), nitrogen (N), phosphorus (P), acid detergent fiber (ADF), and acid detergent lignin (ADL) of litter samples were determined once every two months. [Results] ① The decomposition rate of *S. psammophila* litter was

收稿日期: 2022-03-07

修回日期: 2022-03-22

资助项目: 内蒙古自治区科技重大专项资金项目“重点区域荒漠化过程与生态修复示范”(zdzx2018058)

第一作者: 王浩(1992—), 男(汉族), 陕西省府谷县人, 硕士研究生, 研究方向为荒漠化防治和生态修复。Email: 540549467@qq.com。

通信作者: 汪季(1957—), 男(汉族), 山东省济南市人, 教授, 博士生导师, 主要从事荒漠化防治研究。Email: wangji1957@163.com。

significantly ($p < 0.05$) greater than the decomposition rates of *P. simonii* and the mixed treatment by 10% ~ 15%. The litter decomposition rates in the loess area were significantly greater than in the sandy area by 13% ~ 23%. ② The litter source had significant ($p < 0.01$) effects on OC, N, and P contents. Soil type had significant ($p < 0.05$ or $p < 0.01$) effects on OC, N, P, ADF, and ADL contents. Both tree species and soil type were important factors affecting the nutrient transformations of the litters. ③ The OC and N contents of *S. psammophila* litter were greater than those of *P. simonii* and the mixed litter. P content of *P. simonii* and the mixed litter were lower than the P content of *S. psammophila* litter during the first four months, and then the P contents of all of the treatments were similar. [Conclusion] *P. simonii* litter decomposed more slowly than *S. psammophila* litter, and therefore, can be maintained for a longer time on the surface of soil. Therefore, *P. simonii* is recommended to be used as a suitable restoration plant in the coal mining subsidence area of Inner Mongolia.

Keywords: litter; sandy soil; loess soil; mining subsidence area; lignin; Inner Mongolia Autonomous Region

内蒙古是中国主要产煤区之一,煤炭业是内蒙古的支柱产业,多年的采煤活动使内蒙古形成了大面积的采煤沉陷区。由于沉陷区植被退化、环境污染、土壤侵蚀严重,加之采矿造成的地质脆弱,矿区生态修复已成为环境治理的难点问题^[1]。植被恢复是矿区生态修复的主要内容,良好的修复植物能够适应矿区特殊的受损环境,保持水土,并形成良好的景观效应,以到达修复土壤和景观的目的。植物凋落物,不但能够覆盖地表、防止侵蚀,其分解还能够增加土壤有机质和矿质养分^[2-3]。在矿区植被重建过程中,植物凋落物生物量和养分元素的变化与矿区土壤的保持和修复密切相关。因此,有必要对这种采煤沉陷区特殊修复环境下修复植物凋落物的分解过程和影响因素进行深入了解。

内蒙古神府—东胜煤田处于荒漠化区域边缘,该区域具有黄土和风沙土两种类型的土壤。当前,内蒙古所处矿区已经进行了大规模的人工林建造,在以采煤业为主要产业的伊金霍洛旗,植被和森林覆盖面积分别达到了 88% 和 36.35%^[4]。相关研究已经对该区域植被修复整体生态效益,以及土壤质量的变化进行了分析^[4],但是目前还没有关于该区域修复植物凋落物的研究。在内蒙古进行的凋落物分解试验大多是针对牧草凋落物的^[5-7],以及少量关于东部大兴安岭天然林凋落物的^[8-9],很少有针对矿区修复植物凋落物的分解试验。前人对凋落物分解的研究,多集中于天然林^[10-11]、一般人工林^[12-13]的凋落物在正常自然环境中的分解过程,鲜有关于修复植物凋落物在矿区特殊修复环境中分解过程的研究。对凋落物分解的研究,通常会关注凋落物的质量、养分及纤维素或木质素的变化^[14],影响因素方面对植物凋落物来源

物种考虑较多^[10,12],但是对不同土壤类型的比较研究较少。尤其是采用凋落物分解袋方法时,由于凋落物处于矿质土壤之外,很少有研究关注底部的土壤类型对上方凋落物分解的影响。

本研究以内蒙古自治区伊金霍洛旗布尔台煤矿采煤沉陷区两种修复植物沙柳(*Salix psammophila*)和小叶杨(*Populus simonii*)的凋落物为研究材料,选择不同土壤开展野外凋落物分解试验,以期通过分析不同月份凋落物分解速率、凋落物有机碳(OC)、氮(N)、磷(P)、酸性洗涤纤维(ADF)及酸性洗涤木质素(ADL)的季节性变化,探究采煤沉陷区生态修复植物凋落物的分解特征及影响因素,为干旱气候下采煤沉陷区的生态修复提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

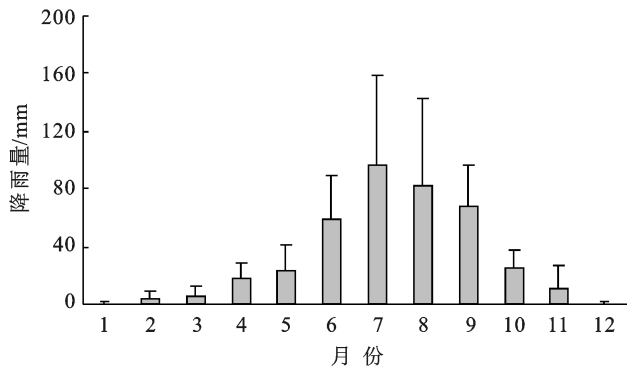
研究区位于内蒙古自治区鄂尔多斯市伊金霍洛旗布尔台煤矿采煤沉陷区内(37°20′—40°16′N, 108°36′—110°40′E)。属半干旱大陆性季风气候,冬春季干冷多风、夏秋季炎热多雨。年均气温 7.3 °C,年极端最高气温 38.9 °C,年极端最低气温 -28.1 °C。年降水量 325~460 mm,由东南向西北递减;降水年际变化与年内分配不均匀,丰水年降水量约为枯水年的 2~4 倍。夏秋两季降水较多,冬春两季分布较少,主要集中于 6—9 月,约占全年 3/4,多年平均月降雨量如图 1 所示。年潜在蒸发量 2 297.4~2 838.7 mm,无霜期 156 d。年平均风速 3.6 m/s,以西北风和偏北风为主,年平均大风日数 42.2 d,大风与沙暴多集中于 3—5 月。研究期间各月的平均气温如表 1 所示。

表1 试验期间伊金霍洛旗各月平均气温

℃

时间	2020年		2021年										
	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月
平均气温	0	-9.5	-7.5	0	5.5	8.5	15.5	21	24	20	17.5	8	0

注:数据来源于中国气象局官网(<http://data.cma.cn/>)。



注:数据来源于中国气象局官网(<http://data.cma.cn/>)。

图1 伊金霍洛旗 2010—2019年各月平均降雨量

1.2 凋落物分解试验材料及试验设计

2020年10月,采集沉陷区人工恢复林地地表当年枯落的叶片凋落物,样品取回后清洗干净,去除凋落物中的杂质,将处理好的凋落物在65℃烘箱中烘至恒重。将两种凋落物及混合凋落物取出一部分测定初始化学性质。沙柳凋落物OC,N和P的初始含量分别为:489.50,6.51,0.57 g/kg,小叶杨凋落物OC,N和P的初始含量分别为:443.12,4.63,0.87 g/kg。

凋落物分解采用分解袋法,分解袋网孔直径为2 mm。设置3个凋落物处理,分别为:沙柳凋落物、小叶杨凋落物及沙柳:小叶杨质量比为1:5(人工恢复林地沙柳和小叶杨地上生物量比例)的混合凋落物(以下简称混合凋落物)。每个凋落物处理设置36个分解袋。于2020年11月24日(秋冬交接的时间,树冠凋落物基本完全掉落),选择位置相邻地形和光照条件相同的风沙土和黄土样地开展试验,每种土壤人工去除样地原凋落物及草本植物,使地表露出腐殖质层,设置长4 m,宽1.5 m的长方形样地。每种土壤放置54个分解袋,按照随机区组试验设计,随机铺设3个处理的凋落物,开始野外模拟。

1.3 采样及测定指标与方法

对于每个处理,每两个月在各个样地中取出3袋进行测定,试验共进行12个月,各月温度状况见表1。样品采集后,在65℃烘干至恒重,称重后粉碎通过0.18 mm筛储存,以备测定凋落物养分含量。凋落物OC,N,P的含量均采用土壤理化分析的常规方法测定。酸性洗涤纤维(ADF)和酸性洗涤木质素(ADL)均采用ANKOM 200 i 半自动纤维分析仪测定,洗

涤溶液为十六烷三甲基溴化胺(CTAB)—硫酸溶液^[10,15]。

1.4 凋落物分解指标的计算

年分解率(decomposition rate after 1 year, Pd)的计算:

$$P_d = (1 - M_e/M_0) \times 100\% \quad (1)$$

式中: M_0 指初始干重(g); M_e 为分解试验结束时的剩余干重(g)。

分解系数(decomposition coefficient, k)用Olson衰减指数模型^[16]计算:

$$M_t = M_0 e^{-kt} \quad (2)$$

式中: M_0 指初始干重(g); M_t 为分解 t 时间后的剩余干重(g); t 是分解时间(天),进行计算时每月按照30 d计; k 表示凋落物分解系数; k 值越大分解速度越快。

1.5 数理统计方法

采用Excel 2019和R语言软件对测定数据进行整理和分析。采用单因素方差分析比较不同处理和土壤类型之间分解系数 k 与年分解率 P_d 的差异显著性,Duncan方法用于两两比较;采用非线性回归进行参数拟合;采用多因素方差分析检验处理、土壤类型及其交互作用对凋落物OC,N,P,ADF和ADL含量的影响;采用主成分分析法分析凋落物OC,N,P,ADF和ADL含量之间的关系。采用Excel 2019绘图。本文中所有误差形式均代表标准差。

2 结果与分析

2.1 凋落物分解特征分析

模拟分解期间,不同处理的凋落物质量变化如图2所示。不同处理凋落物在风沙土和黄土上的分解规律基本一致,但不同处理之间的分解曲线并不相同,沙柳的分级速率明显高于小叶杨和混合凋落物。沙柳、混合和小叶杨3个处理的凋落物经过1 a的分解后分别在风沙土和黄土上分别残留54.1%~67.5%和48.3%~60%。小叶杨凋落物的残留量明显少于沙柳和混合处理的凋落物,相同处理在黄土上的残留量均低于风沙土。

不同样地各处理的凋落物分解系数 k 和年分解率 P_d 见表2。不同凋落物处理之间, k 和 P_d 在小叶

杨凋落物与混合凋落物之间无显著差异,沙柳凋落物的 k 和 P_d 显著 ($p < 0.05$) 高于小叶杨凋落物和混合凋落物,说明沙柳凋落物相比其他两个处理分解速

率较快。两种土壤之间,从总体来看,黄土处理的 k 和 P_d 显著高于风沙土处理,说明黄土比风沙土更有利于凋落物分解。

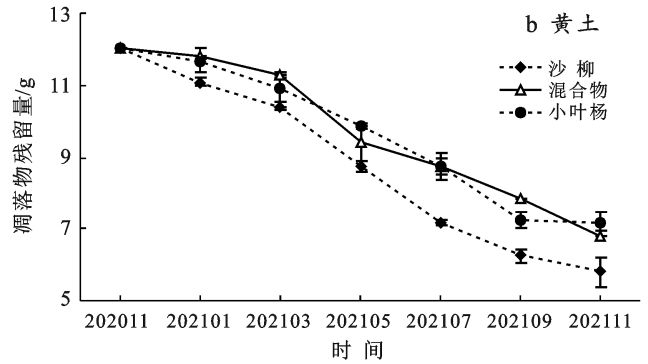
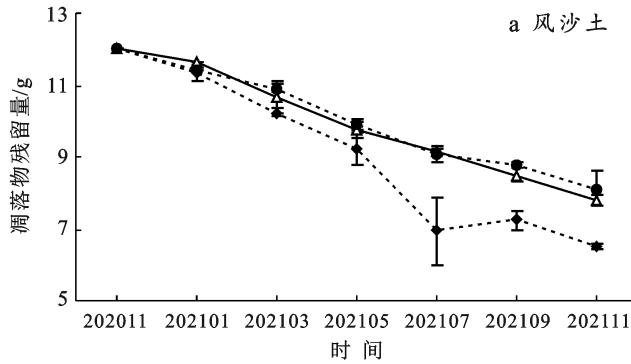


图 2 3 种凋落物处理在不同时间的凋落物残留量(干质量)

表 2 风沙土和黄土 3 种凋落物的分解系数 k 和年分解率 P_d

项目	风沙土	黄土
分解系数 $k/10^{-3}$	沙柳	1.73 ± 0.16^{Aa}
	混合物	1.14 ± 0.05^{Ab}
	小叶杨	1.06 ± 0.04^{Ab}
	平均	1.31 ± 0.34^A
年分解率 $P_d/\%$	沙柳	45.79 ± 0.40^{Aa}
	混合物	35.27 ± 1.20^{Ab}
	小叶杨	32.39 ± 4.03^{Ab}
	平均	37.82 ± 6.59^A

注:每列不同小写字母表示在不同凋落物处理之间存在 $p < 0.05$ 的显著差异;不同大写字母表示在不同土壤之间存在 $p < 0.05$ 的显著差异。

2.2 凋落物分解过程中 OC, N, P, ADF 及 ADL 含量的变化

如表 3 所示,方差分析表明凋落物来源和土壤类型对凋落物干重、OC、N 和 P 含量均有极显著 ($p < 0.01$) 的影响;土壤类型对 ADF 和 ADL 有显著 ($p < 0.05$) 影响,但是对 OC、N 和 P 含量影响不显著。但凋落物来源和土壤类型的交互作用仅对凋落物氮含量有

极显著 ($p < 0.01$) 影响,对其他指标的影响不显著。

凋落物分解过程中 OC、N、P 含量的变化见图 3。凋落物 OC 含量的变化范围在 370~505 g/kg 之间;风沙土和黄土上 3 种凋落物的 OC 含量在 5—7 月均有明显的降低;除了在黄土区 2021 年 11 月的时候 3 种处理凋落物的碳含量接近外,沙柳凋落物的 OC 含量在不同时期均高于小叶杨和混合凋落物(图 3a 和 3b)。3 种凋落物的 N 含量在总体上呈上升趋势,在 5—9 月增长明显较快,分解试验结束时凋落物的 N 含量是初始 N 含量的 1.6~2 倍;沙柳凋落物的 N 含量在两种土壤各个时间均高于混合和小叶杨凋落物(图 3c 和 3d)。凋落物 P 含量在不同处理之间具有不同的变化趋势,分解试验的前 4 个月(至 2021 年 3 月),两种土壤类型上,小叶杨和混合凋落物的 P 含量高于沙柳凋落物;在 3—5 月期间,小叶杨和混合凋落物的 P 含量发生明显的降低,使不同处理凋落物的 P 含量接近;从 5 月到试验结束,3 种凋落物的 P 含量最终在 0.6~0.7 g/kg 之间保持相对稳定(图 3e 和 3f)。

表 3 凋落物来源、土壤类型及其交互作用对 OC、N、P、ADF 及 ADL 含量影响的显著性

项目	OC	N	P	ADF	ADL
凋落物来源	<0.01	<0.01	<0.01	0.65	0.33
土壤类型	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	0.01
凋落物来源 * 土壤类型	0.64	<0.01	0.54	0.80	0.90

凋落物分解过程中 ADF(图 4a 和 4b)和 ADL(图 4c 和 4d)含量的变化见图 4。风沙土(图 4a 和 4c)和黄土(图 4b 和 4d)上 3 种凋落物处理的 ADF 和 ADL 均在 2021 年 5 月达到最高,5 月至 7 月,各处理 ADF 和 ADL 含量明显降低;5 月至 7 月,不同凋落物

处理 ADF 在风沙土和黄土上分别减少了 17%~25%和 27%~33%,ADL 在风沙土和黄土上分别减少了 18%~32%和 26%~48%,黄土的变化幅度大于风沙土。但不同凋落物处理之间,ADF、ADL 含量相近。

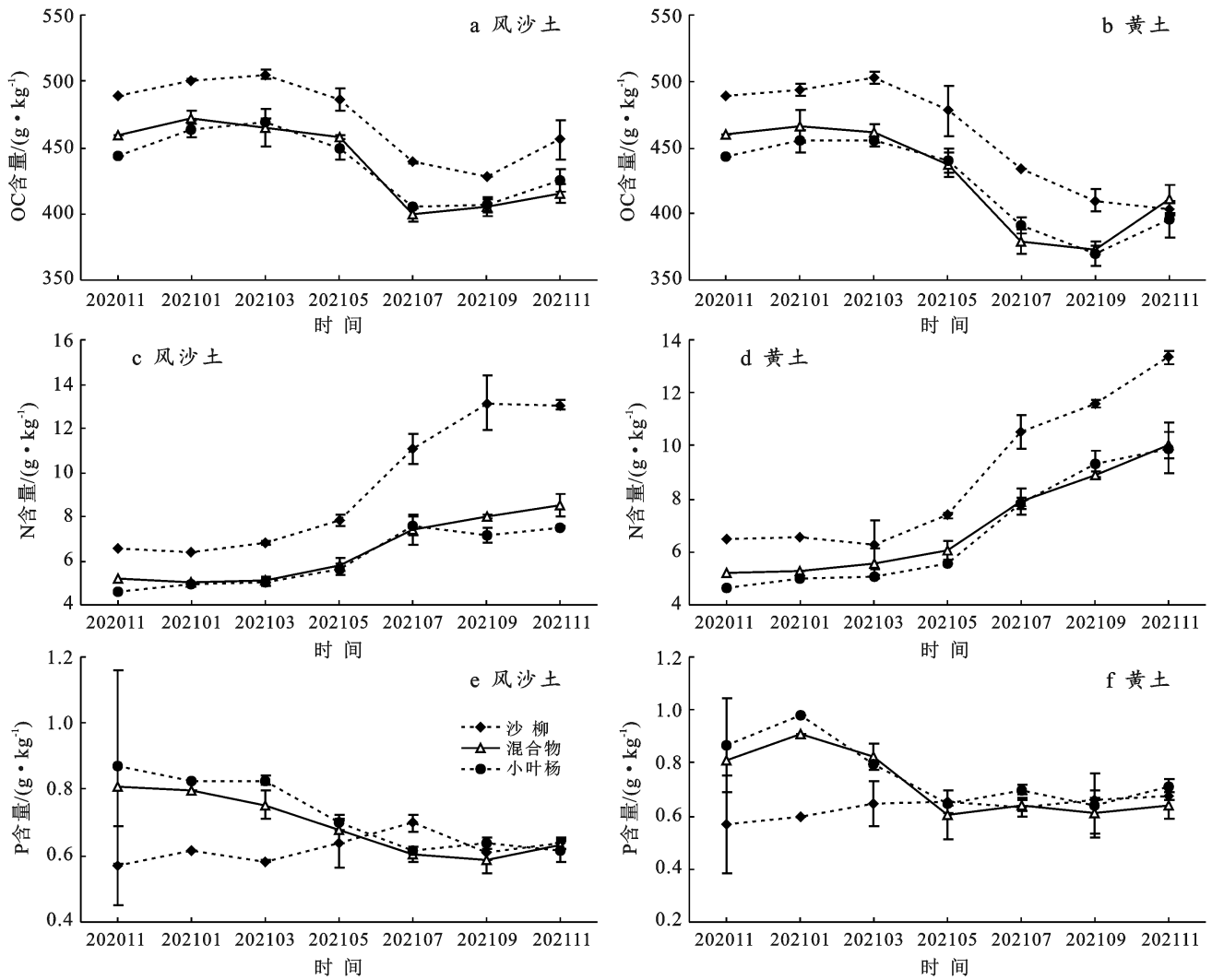


图 3 3 种凋落物分解过程中的 OC 和 N,P 的含量

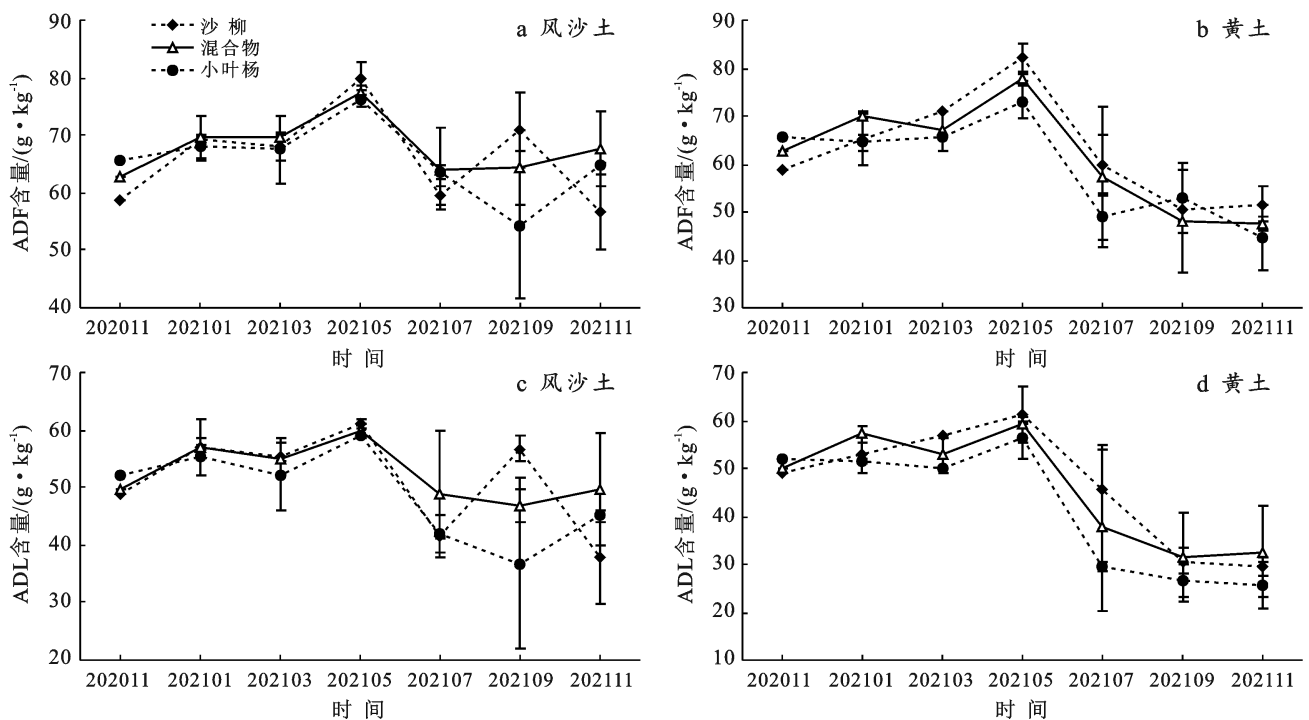


图 4 3 种凋落物分解过程中纤维素 (ADF) 和木质素 (ADL) 的含量

2.3 养分元素、ADL 及 ADF 含量与凋落物质量之间的关系分析

如图 5 所示,第一和第二主成分能够解释原变量 81.7% 的方差,因此可以将凋落物分解特征总结为两个方面,OC,ADF,ADL 含量和凋落物残留量在第一主成分有较大正荷载,说明与碳相关的有机物分解是影响凋落物质量变化的主要方面;P 在第二主成分有较大荷载,说明凋落物中与磷相关的成分变化是影响凋落物质量变化的次要方面。ADF,ADL 与 OC 的向量夹角较小,说明纤维素和木质素的变化与凋落物 OC 含量变化密切相关,N 在第一、第二主成分上均有负荷载,说明 N 的增加会导致凋落物的分解。

3 讨论

3.1 采煤沉陷区凋落物分解特征及影响因素

本研究凋落物分解系数 k 在 1.06~1.96 之间,年分解率 Pd 在 32.39~51.68 之间,与柳鑫^[16]对贵州天然草地凋落物的分解试验结果接近,分解速度高于张雨鉴等^[10]对滇中亚高山人工林凋落物的研究结果,低于张晓曦等^[13]对延安人工刺槐林的研究结果。结果表明,凋落物来源及土壤类型是凋落物的分解的极显著影响因素。凋落物来源能够影响凋落物自身的化学组成,前人研究表明 C/N 比较小的凋落物较容易被微生物利用,分解速度更快^[17]。本研究中沙柳凋落物的初始 C/N 为 75.19,低于小叶杨的 C/N (95.71),而沙柳凋落物的分解显著比小叶杨快,说明本研究的结果与前人的结论一致。沙柳比小叶杨分解得快,还有可能是因为小叶杨表层有一层蜡质,其亲水性较差,不易分解。本研究结果还发现,黄土比风沙土更有利于分解袋中的凋落物的分解。风沙土与黄土最大的区别在于土壤质地的不同。而土壤质地能够通过影响土壤水分和养分的有效性、土壤孔隙、颗粒表面积等因素进而影响凋落物的分解^[18]。多数土壤质地对凋落物分解影响的研究^[19-21],均是将凋落物施加到土壤中或者直接覆盖在土壤上,并不采用分解袋,因为分解袋在一定程度上隔离了土壤和凋落物。这些研究所模拟的状况并不能解释本研究的结果,因为凋落物所处的位置能够显著影响凋落物的分解^[19]。凋落物在土壤表面和内部的分解机理与限制因素截然不同;土壤中的凋落物分解受到土壤保护作用的限制^[20],而表层的凋落物分解更多是受气候和凋落物本身化学抗性的影响^[21]。而本研究区域位于半干旱区,水分是限制凋落物分解的主要因素^[22],黄土的土壤保水性优于风沙土,因此凋落物在黄土上具有更高的分解速率。

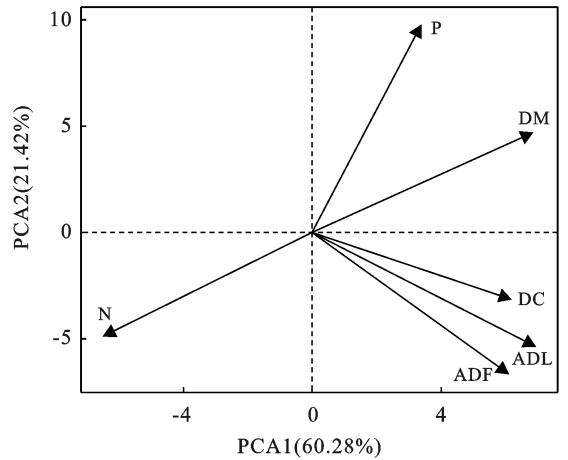


图 5 凋落物中 OC, N, P, ADF, ADL 的含量与凋落物残留量(DM)的主成分分析

3.2 凋落物分解期间不同成分含量的变化机理及影响因素

本研究发现,沙柳凋落物的 OC 含量显著高于小叶杨,但是所有凋落物的 OC 含量均在 5—7 月有明显的降低;ADF 和 ADL 的含量也在 5—7 月有明显的降低。因此,OC 的变化可能是由于木质素和纤维素的分解特征造成的。前人研究表明,木质素是凋落物中的难分解成分,并且能够抑制纤维素的分解^[14];因为木质素类的分解酶具有较高的活化能,因此木质素和纤维素构成的凋落物结构性成分易在较高温度下分解^[23-24];而研究结果也表明 7 月该地区温度和降雨较大,使木质素和纤维素的分解速率提高;由于纤维素和木质素的碳含量较高,它们的分解比例增多导致了凋落物 OC 含量的降低。同时,OC, ADF 和 ADL 的含量变化也解释了凋落物残留量为何在 5—7 月降低较快。

本研究结果表明采煤沉陷区不同凋落物 N 含量在 1 a 间增加了 62.5%~114.2%,使分解试验结束时 N 的总量高于初始凋落物中所含有的 N 素总量。杨晶晶^[25]在研究新疆极端干旱区的凋落物分解时也发现凋落物中有外源 N 素的积累。这可能是全球氮沉降的背景原因造成的。因此,在氮沉降背景下,如果不采用同位素标记等特殊手段,将无法确定凋落物分解实际释放的 N。在此情况下,C/N 会随着分解时间不断降低,将不适宜用于作为监测凋落物质量变化的指标。此外,研究结果还表明,伊金霍洛旗采煤沉陷区不同凋落物的 P 含量会在分解初期逐渐变化,到 5 月之后在 0.6~0.7 g/kg 之间保持相对稳定。以往研究结果均未报道凋落物 P 具有类似的变化特征^[13,16],因此还需要进一步的研究来揭示采煤沉陷区修复植物凋落物 P 的变化机理。笔者推测,分解试验时间为 1 a,这 1 a 内凋落物分解处于凋落物完全分解

过程中的前期和中期阶段,前期主要为可溶性有机物的分解。因此,凋落物 P 含量在 5 月之后保持相对稳定是因为 5 月温度升高、降雨增加使凋落物中的非结构成分被淋溶和分解,剩下的结构性物质如纤维素和木质素的成分相对均匀。

4 结论

(1) 不同凋落物处理之间比较,沙柳凋落物分解速率显著高于小叶杨和混合凋落物 10%~15%;分解试验期间,沙柳凋落物的 OC,N 含量高于混合和小叶杨处理,而沙柳凋落物的 P 含量在分解试验前 4 个月低于小叶杨和混合凋落物处理,在后 8 个月不同处理之间的 P 含量接近;ADF 和 ADL 含量在不同处理之间差异不显著。

(2) 不同土壤类型之间比较,凋落物在黄土上的分解速率显著高于在风沙土上的速率约 13%~23%;凋落物 OC,N,P,ADF 和 ADL 的含量,在风沙土和黄土上具有相近的变化趋势。

[参 考 文 献]

- [1] 胡炳南,郭文砚.我国采煤沉陷区现状、综合治理模式及治理建议[J].煤矿开采,2018,23(2):1-4.
- [2] 李爽.水库周边保护林凋落物对地表径流和氮磷养分流失的影响[D].浙江 杭州:浙江大学,2016.
- [3] Soong J L, Vandegehuchte M L, Horton A J, et al. Soil microarthropods support ecosystem productivity and soil C accrual: Evidence from a litter decomposition study in the tallgrass prairie [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016,92:230-238.
- [4] 蒋丽伟,卢泽洋,官殷婷,等.内蒙古伊金霍洛旗植被恢复生态效益研究[J].林业资源管理,2019(1):38-43.
- [5] 乌云毕力格.兴安落叶松林凋落物动态对模拟氮沉降的响应分析[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学,2012.
- [6] 单玉梅,温超,杨勇,等.内蒙古典型草原凋落物分解对不同草地利用方式的响应[J].生态环境学报,2016,25(3):377-384.
- [7] 母悦,耿元波.内蒙古羊草草原凋落物分解过程中营养元素的动态[J].生态环境学报,2016,25(7):1154-1163.
- [8] 于雯超,赵建宁,李刚,等.内蒙古贝加尔针茅草原 3 种主要植物凋落物分解特征[J].草地学报,2014,22(3):502-510.
- [9] 陈莎莎,刘鸿雁,郭大立.内蒙古东部天然白桦林的凋落物性质和储量及其随温度和降水梯度的变化格局[J].植物生态学报,2010,34(9):1007-1015.
- [10] 张雨鉴,王克勤,宋娅丽,等.滇中亚高山地带性植被凋落物分解对模拟氮沉降的响应[J].生态学报,2020,40(22):8274-8286.
- [11] 薛飞,龙翠玲,廖全兰,等.喀斯特森林不同地形凋落物现存量及养分特征[J].西北林学院学报,2021,36(5):28-35.
- [12] 范晓慧,马勇,冯家豪,等.北方城市 10 种常见树木凋落物的分解及养分释放特征[J].西北林学院学报,2020,35(6):25-31.
- [13] 张晓曦,胡嘉伟,王丽洁,等.不同林龄刺槐林地凋落物分解及养分释放对氮沉降的响应差异[J].植物资源与环境学报,2021,30(6):10-18.
- [14] Fioretto A, di Nardo C, Papa S, et al. Lignin and cellulose degradation and nitrogen dynamics during decomposition of three leaf litter species in a Mediterranean ecosystem [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005,37(6):1083-1091.
- [15] Rowland A P, Roberts J D. Lignin and cellulose fractionation in decomposition studies using acid-detergent fibre methods [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1994,25(3/4):269-277.
- [16] 柳鑫.贵州喀斯特地区不同天然草地凋落物养分释放动态研究[D].贵州 贵阳:贵州大学,2018.
- [17] Cepáková S, Frouz J. Changes in chemical composition of litter during decomposition: A review of published ¹³C NMR spectra [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2015, 15(3):805-815.
- [18] Scott N A, Cole C V, Elliott E T, et al. Soil textural control on decomposition and soil organic matter dynamics [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1996,60(4):1102-1109.
- [19] Fissore C, Jurgensen M F, Pickens J, et al. Role of soil texture, clay mineralogy, location, and temperature in coarse wood decomposition—a mesocosm experiment [J]. *Ecosphere*, 2016,7(11):e01605.
- [20] Lützw M V, Kögel-Knabner I, Ekschmitt K, et al. Stabilization of organic matter in temperate soils: Mechanisms and their relevance under different soil conditions—a review [J]. *European Journal of Soil Science*, 2006,57(4):426-445.
- [21] Angst G, Pokorný J, Mueller C W, et al. Soil texture affects the coupling of litter decomposition and soil organic matter formation [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021,159:108302.
- [22] 纪仁展,潘萍,饶金凤,等.飞播马尾松林土壤水分垂直变化特征及其影响因素[J].东北林业大学学报,2021,49(10):88-95.
- [23] Tan Xiangping, Machmuller M B, Huang Feng, et al. Temperature sensitivity of ecoenzyme kinetics driving litter decomposition: The effects of nitrogen enrichment, litter chemistry, and decomposer community [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020,148:107878.
- [24] Wang Gangsheng, Post W M, Mayes M A, et al. Parameter estimation for models of ligninolytic and cellulolytic enzyme kinetics [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012,48:28-38.
- [25] 杨晶晶.极端干旱区不同生境下凋落物分解特征研究[D].新疆 阿拉尔:塔里木大学,2020.