

侧柏与其他树种枯落叶混合分解对养分释放的影响*

张晓曦¹ 刘增文^{1,3†} 祝振华¹ 杜良贞²

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

(2 西北农林科技大学林学院, 陕西杨凌 712100)

(3 农业部黄土高原农业资源与环境修复重点开放实验室, 陕西杨凌 712100)

摘 要 以黄土高原的主要人工林树种侧柏为对象, 通过采集侧柏及其他拟混交的 8 个树种的当年枯落叶, 以无林荒地腐殖质层土壤作为分解介质, 在室内将侧柏与不同树种枯落叶剪碎后以一定比例混合装入尼龙网袋并埋入盛土培养钵中, 进行恒温恒湿下连续 345 d 分解培养试验, 测定分解前后枯落叶质量及养分含量的变化。结果表明: (1) 在枯落叶分解释放养分元素中, K 最活跃而易于释出, P 一般比较迟钝而难以释出, C、N 居中并具有一定的释出同步性, 且各种养分的周转期约为 1~2 a。(2) 与侧柏枯落叶混合分解后, 在对 C 释放的影响中白榆表现为促进作用, 紫穗槐、白桦和辽东栎表现为抑制作用; 在对 N 释放的影响中小叶杨表现为促进作用, 白桦、辽东栎和紫穗槐表现为抑制作用; 在对 P 释放的影响中除小叶杨、白榆不明显之外均表现为抑制作用; 在对 K 释放的影响中白榆表现为促进作用, 紫穗槐表现为抑制作用。(3) 应用主成分分析法分析不同树种枯落叶混合分解对 C、N、P、K 释放的综合影响结果表明, 与侧柏枯落叶混合分解后总体上促进养分释放的树种以白榆、小叶杨最显著, 其次为柠条和辽东栎; 而总体上抑制养分释放的树种以紫穗槐的作用最强, 白桦、沙棘和刺槐的作用较弱。

关键词 侧柏; 枯落叶混合分解; 养分释放**中图分类号** S714.2 **文献标识码** A

侧柏 (*Platycladus orientalis*) 是黄土高原人工林建设的主要树种之一, 其适应性强, 耐干旱瘠薄、抗盐碱, 在保持水土、涵养水源、调节气候和改善生态环境等方面均发挥着极其重要的作用。但是, 由于人工纯林树种组成的单一性, 在长期连续生长或连栽情况下表现出土壤退化、生产力降低、林下植被稀少和群落不稳定等一系列问题^[1-2], 侧柏纯林也不例外。刘增文等^[3] 曾经提出了“土壤极化”理论来解释这一现象并研究了一些主要树种纯林目前的土壤极化程度和发展趋势, 同时指出对纯林进行混交改造是防治土壤极化的根本途径。

种间关系是影响混交造林能否成功的关键。在考察种间关系时, 两个拟混交树种枯落叶的混合分解效应是判断种间关系是否协调的重要依据之一^[4], 如果两个树种的枯落叶混合分解能够促进养

分的释放将有利于混交林的养分循环利用。目前, 关于混交林枯落物分解的研究越来越受到重视, 国外有很多关注枯落物混合分解机理、混合分解比例及其分解过程模拟的研究^[5-6], 并且深入到其对生态系统养分循环与保持、群落演替过程的影响等方面^[7-9], 国内这方面的研究较为薄弱, 仅有部分对南方杉木与其他树种枯落叶混合分解的一些研究^[10-14], 而针对黄土高原混交树种的研究尚少见报道。为促进黄土高原人工纯林的混交改造和混交林植被的建设, 本研究选择了黄土高原具有典型代表性的侧柏及其他 8 个拟混交树种为对象, 通过枯落叶混合分解试验, 探讨枯落叶混合分解对养分释放 (C、N、P、K) 的影响, 以为侧柏与其他树种的种间关系研究奠定一定基础, 并为侧柏人工纯林混交改造提供科学依据。

* 国家自然科学基金项目 (No. 31070630)、西北农林科技大学大学生创新实验计划项目 (2010 年) 资助

† 通讯作者, E-mail: zengwenliu2003@yahoo.com.cn

作者简介: 张晓曦 (1988—), 女, 河北张家口人, 硕士研究生, 主要从事沟灌侵蚀机理研究。Tel: 15942327884, E-mail: yuhan.0302@yahoo.com.cn

收稿日期: 2011-12-23; 收到修改稿日期: 2012-02-27

1 材料与方法

1.1 枯落叶及土壤样品采集

在黄土高原主要乔木树种和灌木树种的人工纯林或天然纯林中,于秋末冬初采集进入速生或成熟生长期的侧柏 *Platycladus orientalis*、小叶杨 *Populus simonii*、刺槐 *Robinia pseudoacacia*、白桦 *Betula platyphylla*、辽东栎 *Quercus liaotungensis*、白榆 *Ulmus pumila*、沙棘 *Hippophae rhamnoides*、柠条 *Caragana microphylla*、紫穗槐 *Amorpha fruticosa* 的当年枯落叶,仔细挑拣剔除病虫害、腐烂叶片,经迅速漂洗、风干后,统一剪成直径 1 cm 大小的碎片或 1 cm 长的短针叶(便于在分解过程中枯落叶之间充分接触)备用。

在黄土残塬沟壑区选择具有代表性的无林荒地设置 1 m × 1 m 的小样方 5 个,全部采集其腐殖质层土壤(0 ~ 20 cm)作为分解介质(该土壤属黄土母质上发育的黄善土,土壤容重 1.261 g cm⁻³,1 ~ 5 mm 水稳性团粒含量 42.80%,有机质 21.9 g kg⁻¹,pH 7.8),剔除根系、石块、动物残骸等杂质,充分混合后取足量运回实验室,直接以鲜土过 5 mm 筛,装袋备用。

1.2 室内枯落叶混合分解试验

首先,将枯落叶经过剪碎的碎叶和短针叶试样在 60℃ 下充分烘干,然后按照侧柏叶片 10.00 g,其他树种叶片 5.00 g 的比例称量后两两充分混合(即混合质量比例为 2:1,由于侧柏叶片的密度明显大于其他树种叶片,为了能使两树种叶片充分接触,侧柏叶片的量相应增大),共计 8 个混合处理,同时以每个树种枯落叶单独分解(共计 9 个处理,每个单独分解处理为 15.00 g)作为对照。将称量好的试样装入规格为 14 cm × 20 cm、网眼直径为 0.5 mm 的尼龙网袋中,每个混合类型及对照做 5 个重复,共计 17 个分解类型,85 个分解袋。

其次,分别称取经过充分混合的 4.0 kg 鲜土样,用蒸馏水调节其含水量至田间持水量的 50% (预先测定并计算田间持水量,以确定每个土样应加的蒸馏水量),装入规格为 20 cm × 40 cm × 30 cm 的箱式不透水塑料培养钵中(共 17 个培养钵)。然后再将每类装有枯落叶的 5 个尼龙分解袋竖向斜状间隔排列,埋入装有土壤的培养钵中(保证每个分解袋四周均与土壤充分接触,分解袋之间间隔一定距离),用塑料薄膜覆盖钵口(保湿),并在薄膜上留 4 个直径 1.5 cm 的通气孔,放在室内常温下(20℃ ~ 25℃)进行分解试验培养。每隔 1 周称量

培养钵重量,根据失水情况,揭开钵口用喷雾器均匀补充水分,始终调节土壤湿度不变(培养钵重量保持恒定),连续培养 345 d 终止。

1.3 枯落叶分解量及分解前后养分含量测定

待分解试验结束后取出分解袋,置于网眼直径 0.25 mm 的土壤筛中进行漂洗,将残留物在 60℃ 下烘干,准确测定枯落叶分解后的残留量。同时,以常规方法测定分解前后枯落叶中的 C、N、P 和 K 元素的含量。

1.4 数据处理

根据分解前后枯落叶养分含量的变化,首先应用 Excel 2003 和 SPSS 17.0 软件进行数据处理,用单因素方差分析和 LSD 多重检验法检验不同树种枯落叶单独分解之间的差异显著性。然后根据 Olson 模型 $R = X/X_0 = e^{-kt}$ 对分解过程中的养分释放速率进行拟合^[15],式中, R 为枯落叶分解后的养分残留率; X_0 、 X 分别为初始和分解 t (a) 后枯落叶中的养分含量; k 为模型参数; t 为时间。当 t 取 1 a 时,得平均年养分释放率 $d = 1 - e^{-k}$ 和周转期 $T = 1/d$ 。

关于枯落叶混合分解效应的分析原理如下^[15]:假定不同树种枯落叶混合分解对养分释放不存在相互作用的前提下,混合分解养分释放速率的理论预测值可用公式表示为: $Pd_{AB} = aTd_A + bTd_B$ 。式中, A 、 B 代表不同树种, Td_A 、 Td_B 分别表示纯树种 A 和树种 B 的枯落叶年养分释放率实测值, Pd_{AB} 为混合后年养分释放率的理论预测值, a 、 b 分别表示混合枯落叶中 A 、 B 树种所占的比例。根据对枯落叶混合分解养分释放率的实测值 Td_{AB} 与理论预测值 Pd_{AB} 采用 t 检验进行比较判断,当实测值显著($p < 0.05$)或极显著($p < 0.01$)高于预测值时,表明 A 与 B 混合分解对养分释放存在明显或强烈促进作用;反之,则表明 A 与 B 混合分解对养分释放存在明显或强烈抑制作用。

2 结果与分析

2.1 不同树种枯落叶单独分解时养分释放特征比较

在侧柏及其他受试树种枯落叶分解前的初始养分含量(表 1)中,碳(C)含量以白桦和侧柏最为丰富(259.2 ~ 266.6 g kg⁻¹),紫穗槐、柠条和辽东栎次之(247.1 ~ 250.7 g kg⁻¹),刺槐和沙棘(232.6 ~ 236.1 g kg⁻¹)再次,而白榆和小叶杨最低(210.9 ~ 223.7 g kg⁻¹);氮(N)含量以紫穗槐最为

丰富(43.48 g kg⁻¹), 柠条、沙棘和白榆次之(30.45 ~ 36.75 g kg⁻¹), 侧柏、白桦、刺槐、小叶杨和辽东栎较低(21.23 ~ 28.00 g kg⁻¹); 磷(P)含量以紫穗槐、白桦和辽东栎最为丰富(2.41 ~ 2.61 g kg⁻¹), 侧柏次之(1.96 g kg⁻¹), 而小叶杨、沙棘、柠条、刺

槐和白榆较低(1.08 ~ 1.45 g kg⁻¹); 钾(K)含量以白榆和紫穗槐最为丰富(1.435 ~ 1.520 g kg⁻¹), 柠条和白桦次之(1.281 ~ 1.321 g kg⁻¹), 而小叶杨、辽东栎、侧柏、沙棘和刺槐较低(0.403 ~ 0.932 g kg⁻¹)。

表 1 侧柏及其他树种枯落叶初始养分含量

Table 1 Initial nutrient contents in leaf litter of *P. orientalis* and other trees (g kg⁻¹)

枯落叶类型 Leaf litter	初始养分含量 Initial nutrient content			
	C	N	P	K
侧柏 <i>P. orientalis</i>	259.2	28.00	1.96	0.709
小叶杨 <i>P. simonii</i>	210.9	23.64	1.41	0.932
刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>	236.1	24.03	1.08	0.403
白桦 <i>B. platyphylla</i>	266.6	27.32	2.45	1.281
辽东栎 <i>Q. liaotungensis</i>	250.7	21.23	2.41	0.877
白榆 <i>U. pumila</i>	223.7	30.45	1.45	1.520
沙棘 <i>H. rhamnoides</i>	232.6	31.87	1.19	0.589
柠条 <i>C. microphylla</i>	247.1	36.75	1.11	1.321
紫穗槐 <i>A. fruticosa</i>	249.1	43.48	2.61	1.435

根据侧柏及其他树种枯落叶单独分解试验结果(表 2), K 的年释放速率均大于 C、N、P 的年释放速率, 表现出 K 活跃而易于释出的特性; P 的年释放速率除了白桦、刺槐、辽东栎和紫穗槐枯落叶外, 在侧柏、小叶杨、白榆、沙棘、柠条枯落叶分解中均小于 C、N、K 的年释放速率, 表现出 P 迟钝而难以释出的特性; C、N 的年释放速率一般居中且相近, 表现出二者在枯落叶分解释放中具有一定的同步性。

从不同树种枯落叶分解的差异来看, C 的释放以白榆、沙棘、柠条、侧柏、小叶杨最快(年释放率 0.904 2 ~ 0.967 5, 周转期略大于 1 a), 其次为白桦、辽东栎和紫穗槐(年释放率 0.721 1 ~ 0.768 3, 周转

期约 1.3 a), 刺槐的释放速率最慢(年释放率 0.643 3, 周转期近 1.6 a); N 的释放以侧柏、小叶杨、白榆、沙棘、柠条、白桦最快(年释放率 0.847 7 ~ 0.972 0, 周转期略大于 1 a), 其次为紫穗槐、辽东栎(年释放率 0.670 2 ~ 0.712 5, 周转期约 1.5 a), 刺槐最慢(年释放率 0.520 3, 周转期约 2 a); P 的释放以侧柏、小叶杨、白桦、白榆、沙棘、柠条最快(年释放率 0.817 5 ~ 0.899 1, 周转期略大于 1 a), 其次为紫穗槐和辽东栎(年释放率 0.790 9 ~ 0.719 3, 周转期近 1.5 a), 同样以刺槐最慢(年释放率 0.566 7, 周转期近 2 a); K 的释放在各树种之间的差别不大, 年释放率 0.937 1 ~ 0.994 5, 周转期 1 a 左右。

表 2 侧柏及其他树种枯落叶单独分解时的养分释放速率

Table 2 Nutrient release rates of litters from *P. orientalis* and the other trees under decomposition separately

枯落叶类型 Leaf litter	年释放速率 Annual release rate $d = 1 - e^{-k}$				周转期 Turnover period (a) $T = 1/d$			
	C	N	P	K	C	N	P	K
侧柏 <i>P. orientalis</i>	0.904 2d	0.921 2e	0.967 5d	0.967 5d	1.11	1.09	1.11	1.03
小叶杨 <i>P. simonii</i>	0.951 1c	0.939 4d	0.817 1e	0.990 4c	1.05	1.06	1.22	1.01
刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>	0.643 3h	0.520 3i	0.566 7h	0.940 8f	1.55	1.92	1.76	1.06
白桦 <i>B. platyphylla</i>	0.849 4e	0.847 7f	0.856 0d	0.992 8b	1.18	1.18	1.17	1.01
辽东栎 <i>Q. liaotungensis</i>	0.721 1g	0.670 2 h	0.719 3g	0.937 1g	1.39	1.49	1.39	1.07
白榆 <i>U. pumila</i>	0.967 5a	0.972 0a	0.896 4b	0.990 2c	1.03	1.03	1.12	1.01
沙棘 <i>H. rhamnoides</i>	0.966 5a	0.947 5c	0.817 5e	0.991 8b	1.03	1.06	1.22	1.01
柠条 <i>C. microphylla</i>	0.959 4b	0.963 7b	0.889 2c	0.994 5a	1.04	1.04	1.12	1.01
紫穗槐 <i>A. fruticosa</i>	0.768 3f	0.712 5g	0.790 9f	0.949 1e	1.30	1.40	1.26	1.05

2.2 侧柏与其他树种枯落叶混合分解对 C 释放的影响

根据侧柏与其他树种枯落叶混合分解对 C 释放的影响结果(表 3)。侧柏与白榆枯落叶混合分解对 C 的释放存在明显促进作用;侧柏分别与白桦、

辽东栎和紫穗槐的枯落叶混合分解对 C 的释放存在明显的抑制作用,其中与紫穗槐枯落叶混合表现出强烈抑制作用;而侧柏分别与小叶杨、刺槐、沙棘和柠条的枯落叶混合分解对 C 释放的影响不明显。

表 3 侧柏与其他树种枯落叶混合分解对 C 释放的影响

Table 3 Effects of mixture of leaf litter from *P. orientalis* with that from other trees on C release in decomposition

混合枯落叶类型 Mixed leaf litter	C 释放模型 C Release model $\ln R = -kt$	年 C 释放率 Annual C release rate <i>d</i>		
		实测值 True value T_{AB}	理论值 Predicted value P_{AB}	提高率 Increment ratio ($\Delta\%$)
小叶杨 <i>P. simonii</i>	$\ln R = -2.7624t$	0.9265	0.9198	0.72
刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>	$\ln R = -1.7162t$	0.8025	0.8172	-1.80
白桦 <i>B. platyphylla</i>	$\ln R = -2.1063t$	0.8634*	0.8859	-2.54
辽东栎 <i>Q. liaotungensis</i>	$\ln R = -1.8199t$	0.8210*	0.8432	-2.63
白榆 <i>U. pumila</i>	$\ln R = -3.0979t$	0.9465*	0.9253	2.29
沙棘 <i>H. rhamnoides</i>	$\ln R = -2.5239t$	0.9080	0.9250	-1.83
柠条 <i>C. microphylla</i>	$\ln R = -2.8205t$	0.9305	0.9226	0.86
紫穗槐 <i>A. fruticosa</i>	$\ln R = -1.3804t$	0.7288**	0.8589	-15.15

注: *, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$,下同 Note: *, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$. The same below

2.3 侧柏与其他树种枯落叶混合分解对 N 释放的影响

侧柏与其他树种枯落叶混合分解对 N 释放的影响见表 4。由表可知,侧柏与小叶杨枯落叶混合分解对 N 的释放表现为明显的促进作用;侧柏分

别与白桦、辽东栎和紫穗槐枯落叶混合分解对 N 的释放表现为明显的抑制作用,其中与紫穗槐混合分解表现为强烈抑制作用;而侧柏分别于刺槐、白榆、沙棘和柠条的混合分解对 N 释放的影响不明显。

表 4 侧柏与其他树种枯落叶混合分解对 N 释放的影响

Table 4 Effects of mixture of leaf litter from *P. orientalis* with that from other trees on N release in decomposition

混合枯落叶类型 Mixed leaf litter	N 释放模型 N Release model $\ln R = -kt$	年 N 释放率 Annual N release rate <i>d</i>		
		实测值 True value T_{AB}	理论值 Predicted value P_{AB}	提高率 Increment ratio ($\Delta\%$)
小叶杨 <i>P. simonii</i>	$\ln R = -3.8380t$	0.9507*	0.9273	2.53
刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>	$\ln R = -1.6864t$	0.7969	0.7876	1.19
白桦 <i>B. platyphylla</i>	$\ln R = -2.0161t$	0.8513*	0.8967	-5.06
辽东栎 <i>Q. liaotungensis</i>	$\ln R = -1.7531t$	0.8093*	0.8375	-3.37
白榆 <i>U. pumila</i>	$\ln R = -3.3077t$	0.9561	0.9381	1.92
沙棘 <i>H. rhamnoides</i>	$\ln R = -2.7292t$	0.9242	0.9300	-0.63
柠条 <i>C. microphylla</i>	$\ln R = -2.7874t$	0.9283	0.9354	-0.76
紫穗槐 <i>A. fruticosa</i>	$\ln R = -0.7985t$	0.5299**	0.8516	-37.78

2.4 侧柏与其他树种枯落叶混合分解对 P 释放的影响

侧柏与其他树种枯落叶混合分解对 P 释放的影响见表 5。由表可知,侧柏与所研究的 8 个拟混交树种枯落叶混合分解对 P 释放均不存在促进作

用。除侧柏分别与小叶杨、白榆枯落叶混合分解对 P 释放的影响不明显外,侧柏分别与刺槐、白桦和紫穗槐枯落叶混合分解对 P 的释放均表现出强烈抑制作用,侧柏分别与辽东栎、沙棘和柠条枯落叶混合分解对 P 释放均表现出明显抑制作用。

表 5 侧柏与其他树种枯落叶混合分解对 P 释放的影响

Table 5 Effects of mixture of leaf litter from *P. orientalis* with that from other trees on P release in decomposition

混合枯落叶类型 Mixed leaf litter	P 释放模型 P Release model $\ln R = -kt$	年 P 释放率 Annual P release rate d		
		实测值 True value T_{AB}	理论值 Predicted value P_{AB}	提高率 Increment ratio ($\Delta\%$)
小叶杨 <i>P. simonii</i>	$\ln R = -2.2559t$	0.8814	0.8718	1.11
刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>	$\ln R = -1.1918t$	0.6758**	0.7883	-14.27
白桦 <i>B. platyphylla</i>	$\ln R = -1.4675t$	0.7502**	0.8847	-15.21
辽东栎 <i>Q. liaotungensis</i>	$\ln R = -1.7488t$	0.8085*	0.8392	-3.65
白榆 <i>U. pumila</i>	$\ln R = -2.3912t$	0.8957	0.8982	-0.28
沙棘 <i>H. rhamnoides</i>	$\ln R = -1.6987t$	0.7993*	0.8719	-8.33
柠条 <i>C. microphylla</i>	$\ln R = -2.0542t$	0.8565	0.8958	-4.39
紫穗槐 <i>A. fruticosa</i>	$\ln R = -1.2410t$	0.6906**	0.8630	-19.98

2.5 侧柏与其他树种枯落叶混合分解对 K 释放的影响

侧柏与其他树种枯落叶混合分解对 K 释放的影响见表 6。由表可知,除了侧柏与白榆枯落叶混

合分解对 K 的释放表现为明显促进作用,侧柏与紫穗槐的枯落叶混合分解对 K 的释放表现为明显抑制作用之外,侧柏与其他树种枯落叶混合分解对 K 释放的影响均不明显。

表 6 侧柏与其他树种枯落叶混合分解对 K 释放的影响

Table 6 Effects of mixture of leaf litter from *P. orientalis* with that from other trees on K release in decomposition

枯落叶类型 Leaf litter	K 释放模型 K Release model $\ln R = -kt$	年 K 释放率 Annual K release rate d		
		实测值 True value T_{AB}	理论值 Predicted value P_{AB}	提高率 Increment ratio ($\Delta\%$)
小叶杨 <i>P. simonii</i>	$\ln R = -4.7316t$	0.9886	0.9751	1.38
刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>	$\ln R = -3.2571t$	0.9540	0.9586	-0.48
白桦 <i>B. platyphylla</i>	$\ln R = -3.9337t$	0.9757	0.9759	-0.02
辽东栎 <i>Q. liaotungensis</i>	$\ln R = -3.7061t$	0.9699	0.9574	1.31
白榆 <i>U. pumila</i>	$\ln R = -5.8983t$	0.9962*	0.9751	2.17
沙棘 <i>H. rhamnoides</i>	$\ln R = -3.3385t$	0.9574	0.9756	-1.87
柠条 <i>C. microphylla</i>	$\ln R = -4.6211t$	0.9873	0.9765	1.11
紫穗槐 <i>A. fruticosa</i>	$\ln R = -2.8740t$	0.9339*	0.9614	-2.86

2.6 侧柏与其他树种枯落叶混合分解对养分释放影响的综合评价

为了综合评价侧柏与其他树种枯落叶混合分解对养分释放的影响,采用主成分分析法,即将侧柏与其他树种枯落叶混合分解后 C、N、P、K 养分释放速率的实测值较预测值的提高率 $\Delta\%$ 用 SPSS 17.0 软件进行主成分分析,通过方差分析,提取特征值大于 1 的主成分,共 4 个,记为 F_i ,综合主成分函数为:

$$F = 0.5250F_1 + 0.4990F_2 + 0.4854F_3 + 0.4903F_4$$

根据公式得出侧柏与各个树种枯落叶混合分

解对养分释放影响的综合主成分值: F (侧柏 \times 白榆)为 1.8124, F (侧柏 \times 小叶杨)为 1.5497, F (侧柏 \times 柠条)为 1.0159, F (侧柏 \times 辽东栎)为 0.6837, F (侧柏 \times 刺槐)为 -0.2422, F (侧柏 \times 沙棘)为 -0.3256, F (侧柏 \times 白桦)为 -0.4773, F (侧柏 \times 紫穗槐)为 -4.0166。可见,从不同树种枯落叶混合分解对 C、N、P、K 释放影响的角度来看,与侧柏枯落叶混合分解后总体上促进养分释放的树种以白榆、小叶杨最显著,其次为柠条和辽东栎;与侧柏枯落叶混合分解总体上抑制养分释放的树种以紫穗槐的作用最强,而白桦、沙棘和刺槐的抑制

作用较弱。

3 讨 论

根据廖利平^[10-11]、Becky^[16]、Gartner^[17]和 Kominoski^[18]等关于枯落叶混合分解的试验研究表明,混合分解对养分释放的影响均表现出一种“非加性(non-additive)”的特点,即存在一定的促进或抑制作用(其中促进约占到67%)。尤其是 Kominoski 针对北美植被中的优势树种红枫(*Acer rubrum*)、鹅掌楸(*Liriodendron tulipifera*)、栗栎(*Quercus prinus*)和山杜鹃(*Rhododendron maximum*)等,经过15种枯落叶混合组合类型(不同物种丰富度和组成比例)的分解试验,研究了枯落物物种多样性对分解速率、分解过程中的化学组成、微生物和无脊椎动物生物量等的变化的影响,充分证明了这一事实^[18]。从本研究的结果来看,与侧柏枯落叶混合分解后,在对C释放的影响中白榆表现为促进作用,紫穗槐、白桦和辽东栎表现为抑制作用;在对N释放的影响中小叶杨表现为促进作用,白桦、辽东栎和紫穗槐表现为抑制作用;在对P释放的影响中除了小叶杨、白榆不明显之外均表现为抑制作用;在对K释放的影响中白榆表现为促进作用,紫穗槐表现为抑制作用。可见,“非加性”是不同树种枯落叶混合分解中存在的普遍现象。

关于枯落叶混合分解模型, Ostrofsky^[19]提出,目前应用 Olson 模型 $R = X/X_0 = e^{-kt}$ 对分解过程拟合出的曲线斜率会受到试验历时的影响,所以会使得研究结果因试验历时不同而产生差异。同时, Hui 等^[20]对按照公式 $Pd_{AB} = aTd_A + bTd_B$ 计算混合分解速率的理论预测值也提出质疑,认为枯落叶分解属于指数衰减曲线关系,而不能以线性关系的方法简单处理,并提出了如何区分枯落叶混合分解中各个树种的贡献大小和判断混合分解为“加性”还是“非加性”效应的改进方法。但在本研究中,为了便于简单比较,仍然沿用线性关系式来计算混合分解速率的理论预测值。

根据廖利平^[10-11]、Ball^[16]和 Kaneko^[21]等的研究,不同枯落叶的混合比例、分解的时间以及枯落叶的N初始含量,对混合分解试验的结果均有一定的影响,认为N在枯落叶中的初始含量越多,促进分解和养分释放的作用也相应越明显,这与N在枯落叶分解中为微生物提供N源有关。但据本研究发现,初始含N最丰富的紫穗槐枯落叶(见表1)在

混合分解中对养分释放反而起到了最明显的抑制作用,而初始含N相对贫乏的辽东栎和小叶杨起到了比较明显的促进作用,这与 Kwabiah^[22]、Wedderburn^[23]和 Berg^[24]等的研究结果相似,出现这种差异的原因可能是N在不同树种枯落叶中存在的状态不同所致^[25]。根据 Hattenschwiler 等^[26]的研究,枯落叶C的存在状态(是否易于分解)也会显著地影响分解过程中的养分动态,由于本文未涉及N和C存在形式的检测,关于此现象的产生原因有待今后更深入的探讨。此外,根据廖利平等^[10-11]的研究表明,在室内进行的不同树种枯落叶混合分解试验与在室外的同类试验结果可能存在一定的差异,主要原因是在室内分解过程中产生的不利分解的物质不像在野外可以得到“稀释”,这有待于室内分解试验时通过增加土壤介质和通气性等来克服。考虑到室内控制试验可以有效排除其他干扰因素的影响,所得到的研究结果仍然具有一定的参考价值。

不同树种枯落叶混合分解是一个非常复杂的问题,本试验仅就侧柏与其他树种之间枯落叶混合分解对主要养分释放的影响效应进行了简单的检测,其目的在于从不同树种对枯落叶混合分解过程影响的角度分析侧柏适合与哪些常用造林树种混交造林。结果表明,仅从促进养分释放角度考虑,侧柏分别与白榆、小叶杨、柠条和辽东栎枯落叶混合分解后总体上促进养分释放,适宜进行混交;而侧柏与紫穗槐、白桦、沙棘和刺槐枯落叶混合分解总体上抑制养分释放,不适宜进行混交。至于在混合分解过程中促进或抑制养分释放作用的机理、混合比例是否对检测结果存在影响等有待今后更深入细致的研究予以完善和补充。

参 考 文 献

- [1] 李裕元, 郑纪勇, 邵明安. 子午岭天然林与人工林群落特征比较研究. 西北植物学报, 2005, 25(12): 2 447—2 456. Li YY, Zheng J Y, Shao M A. Comparison of the attributes of natural forests and plantations in Ziwouling Mountain (In Chinese). Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2005, 25(12): 2 447—2 456
- [2] 秦娟, 王凯博, 上官周平. 子午岭林区山杨林、辽东栎林及其混交林植物多样性的变化. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2007, 35(5): 131—140. Qin J, Wang K B, Shang-guan Z P. Change of plant diversity of *Populus davidiana*, *Quercus liaotungensis* and their mixed forest in Ziwouling area of Loess Plateau (In Chinese). Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition, 2007, 35(5): 131—140
- [3] 刘增文, 段而军, 付刚, 等. 一个新概念: 人工纯林土壤性质

- 的极化. 土壤学报, 2007, 44(6): 119—126. Liu Z W, Duan E J, Fu G, et al. A new concept: Soil polarization in planted pure forest (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(6): 119—126
- [4] 蒋三乃, 翟明普, 贾黎明. 混交林种间养分关系研究进展. 北京林业大学学报, 2001, 23(2): 72—77. Jiang S N, Zhai M P, Jia L M. Advances on the research of interspecific nutrient interaction in mixed forest ecosystems (In Chinese). Journal of Beijing Forestry University, 2001, 23(2): 72—77
- [5] Gnankambary Z, Bayala J, Malmer A, et al. Decomposition and nutrient release from mixed plant litters of contrasting quality in an agroforestry parkland in the south-Sudanese zone of West Africa. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2008, 82(1): 1—13
- [6] Bonanomi G, Incerti G, Antignani V, et al. Decomposition and nutrient dynamics in mixed litter of Mediterranean species. Plant and Soil, 2010, 331(1/2): 481—496
- [7] Ball B A, Hunter M D, Kominoski J S, et al. Consequences of non-random species loss for decomposition dynamics: Experimental evidence for additive and non-additive effects. Journal of Ecology, 2008, 96(2): 303—313
- [8] Gross K, Cardinale B J. The functional consequences of random vs. ordered species extinctions. Ecology Letters, 2005, 8(4): 409—418
- [9] Schlapfer F, Pfisterer A B, Schmid B. Non-random species extinction and plant production: Implications for ecosystem functioning. Journal of Applied Ecology, 2005, 42(1): 13—24
- [10] 廖利平, Lindley D K, 杨永辉. 森林叶凋落物混合分解的研究 I. 缩微 (Microcosm) 实验. 应用生态学报, 1997, 8(5): 459—464. Liao L P, Lindley D, Yang Y H. Decomposition of mixed foliar litter I. A microcosm study (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 1997, 8(5): 459—464
- [11] 廖利平, 马越强, 汪思龙, 等. 杉木与主要造林阔叶树种叶凋落物的混合分解. 植物生态学报, 2000, 24(1): 27—33. Liao L P, Ma Y Q, Wang S L, et al. Decompositions of leaf litter of Chinese fir in mixture with major associated broad-leaved plantation species (In Chinese). Acta Phytoecologica Sinica, 2000, 24(1): 27—33
- [12] 林开敏, 章志琴, 叶发茂, 等. 杉木人工林下杉木楠木和木荷叶凋落物分解特征及营养元素含量变化的动态分析. 植物资源与环境学报, 2010, 19(2): 34—39. Lin K M, Zhang Z Q, Ye F M, et al. Dynamic analysis of decomposition characteristics and content change of nutrient elements of leaf litter of *Cunninghamia lanceolata*, *Phoebe bournei* and *Schima superba* under *C. lanceolata* artificial forest (In Chinese). Journal of Plant Resources and Environment, 2010, 19(2): 34—39
- [13] 林开敏, 洪伟, 俞新妥, 等. 杉木与伴生植物凋落物混合分解的相互作用研究. 应用生态学报, 2001, 12(3): 321—325. Lin K M, Hong W, Yu X T, et al. Decomposition interaction of mixed litter between Chinese fir and various accompanying plant species (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(3): 321—325
- [14] 王谨, 黄建辉. 暖温带地区主要树种叶片凋落物分解过程中主要元素释放的比较. 植物生态学报, 2001, 25(3): 375—380. Wang J, Huang J H. Comparison of major nutrient release patterns in leaf litter decomposition in warm temperate zone of China (In Chinese). Acta Phytoecologica Sinica, 2001, 25(3): 375—380
- [15] 张丽萍, 刘增文, 高祥斌, 等. 不同森林凋落叶混合分解试验研究. 西北林学院学报, 2006, 21(2): 57—60. Zhang L P, Liu Z W, Gao X B, et al. Study on decomposition of different mixed leaf litter (In Chinese). Journal of Northwest Forestry University, 2006, 21(2): 57—60
- [16] Ball B A, Bradford M A, Hunter M D. Nitrogen and phosphorus release from mixed litter layers is lower than predicted from single species decay. Ecosystems, 2009, 12(1): 87—100
- [17] Tracy B G, Zoe G C. Decomposition dynamics in mixed-species leaf litter. Oikos, 2004, 104(2): 230—246
- [18] Kominoski J S, Pringle C M, Ball B A, et al. No additive effects of leaf litter species diversity on breakdown dynamics in a detritus-based stream. Ecology, 2007, 88: 1167—1176
- [19] Ostrofsky M L. A comment on the use of exponential decay models to test non-additive processing hypotheses in multi-species mixtures of litter. Journal of the North American Benthological Society, 2007, 23: 23—27
- [20] Hui D, Jackson R B. Assessing interactive responses in litter decomposition in mixed species litter. Plant and Soil, 2009, 314: 263—271
- [21] Kaneko N, Salamanca E F. Mixed leaf litter effects on decomposition rates and soil microarthropod communities in an oak-pine stand in Japan. Ecological Research, 1999, 14(2): 131—138
- [22] Kwabiah A B, Voroney R P, Palm C A, et al. Inorganic fertilizer enrichment of soil: Effect on decomposition of plant litter under subhumid tropical conditions. Biology and Fertility of Soils, 1999, 30(3): 224—231
- [23] Wedderburn M E, Carter J. Litter decomposition by four functional tree types for use in silvopastoral systems. Soil Biology and Biochemistry, 1999, 31(3): 455—461
- [24] Berg B. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soil. Forest Ecology and Management, 2000, 133: 13—22
- [25] Salamanca E F, Kaneko N, Katagiri S. Effects of leaf litter mixtures on the decomposition of *Quercus serrata* and *Pinus densiflora* using field and laboratory microcosm methods. Ecological Engineering, 1998, 10(1): 53—73
- [26] Hattenschwiler S, Jorgensen H B. Carbon quality rather than stoichiometry controls litter decomposition in a tropical rain forest. Journal of Ecology, 2010, 98(4): 754—763

IMPACTS OF DECOMPOSITION OF MIXTURE OF LEAF LITTERS FROM *PLATYCLADUS ORIENTALIS* AND OTHER TREES ON NUTRIENT RELEASE

Zhang Xiaoxi¹ Liu Zengwen^{1,3†} Zhu Zhenhua¹ Du Liangzhen²

(1 College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(3 Key Lab for Agricultural Resources and Environmental Remediation in Loess Plateau of Agriculture Ministry of China, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract For this study, *Platycladus orientalis*, a major tree species used in afforestation in the Loess Plateau, was chosen. Leaf litters of the current year were gathered from *P. orientalis* and 8 other tree species that were planned to be planted in mixed forests, and soil from the humus layer (0 ~ 20 cm) of a tract of tree-free waste grassland was used as medium, in which litters were to be decomposed. Mixtures of litter from *P. orientalis* with others were shredded and packed into nylon mesh bags according to a set ratio, separately. Then the bags were buried into the soil contained in pots for incubation under a constant temperature and humidity for 345 days on end. The litters were analyzed for quality and nutrient contents before and after the incubation. Results show that 1) among the nutrients released during decomposition of the leaf litters, K was the most active and easy to get released, while P was generally dull and difficult to get released, and C and N was moderate and often synchronous in releasing, and the recycle period of these nutrients was 1 ~ 2 a; 2) leaf litter of *Ulmus pumila* in the mixture acted positively, while that of *Amorpha fruticosa*, *Betula platyphylla* and *Quercus liaotungensis* negatively on C release; leaf litter of *Populus simonii* did positively, while that of *B. platyphylla*, *Q. liaotungensis* and *A. fruticosa* negatively on N release; litters of *P. simonii* and *U. pumila* did positively, while litters from all the other trees negatively on P release; and litter of *U. pumila* did positively, while that of *A. fruticosa* did negatively on K release; 3) the Principal Component Analysis of comprehensive effects of decomposition of various mixtures of leaf litters on releasing of C, N, P and K revealed that leaf letter of *U. Pumila* and *P. simonii* in the mixture was the most significant in promoting nutrient release, and litters from *Caragana microphylla* and *Q. liaotungensis* followed, Litter from *A. fruticosa*, followed by litter from *B. platyphylla*, *H. rhamnoides* and *R. Pseudoacacia*, showed obvious inhibitive effects on nutrient release.

Key words *Platycladus orientalis*; Decomposition of litter mixture; Nutrient release

(责任编辑: 卢 萍)