

# 黄土高原油松与其他树种枯落叶混合分解对土壤性质的影响\*

李茜<sup>1</sup> 刘增文<sup>2,3†</sup> 米彩红<sup>2</sup> 杜良贞<sup>4</sup>

(1 西北农林科技大学林学院, 陕西杨凌 712100)

(2 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

(3 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西杨凌 712100)

(4 中国石油工程建设公司技术服务分公司, 山东青岛 266071)

**摘要** 通过油松及其他 10 个树种枯落叶单独和混合分解试验, 探讨了油松与其他树种枯落叶混合分解对土壤性质的影响及在对土壤性质影响中是否存在相互促进或抑制作用。结果表明: 11 种枯落叶单独分解均明显提高了土壤脲酶、脱氢酶、磷酸酶活性和有机质、碱解氮含量, 但在对土壤速效磷含量和 CEC 的影响中存在较大差异。油松分别与侧柏、小叶杨、刺槐和白榆枯落叶混合分解对土壤微生物总量的影响存在明显的相互促进作用; 油松与沙棘枯落叶混合分解对土壤磷酸酶活性的影响存在相互促进作用, 而与侧柏、白桦和白榆枯落叶混合分解对土壤磷酸酶活性的影响存在相互抑制作用; 油松与大部分树种枯落叶混合分解对土壤速效钾的影响存在相互促进作用, 而对土壤速效磷的影响存在相互抑制作用; 油松分别与小叶杨、沙棘、紫穗槐枯落叶混合分解对土壤有机质的影响存在相互促进作用。就土壤性质总体而言, 油松与沙棘、刺槐、小叶杨和紫穗槐枯落叶成对混合分解对土壤性质综合表现为相互促进, 而与侧柏、辽东栎、白桦、落叶松和柠条枯落叶成对混合分解对土壤性质综合表现为相互抑制。

**关键词** 油松; 枯落叶; 混合分解; 森林土壤

**中图分类号** S714.2 **文献标识码** A

油松 (*Pinus tabulaeformis*) 是黄土高原重要的造林树种之一, 有耐干旱瘠薄、生长迅速、根系发达、涵养水源、保持水土等优点<sup>[1-2]</sup>。但近年来, 该地区人工油松纯林由于物种组成单一, 层次结构简单而出现林木生长缓慢、更新困难、地力衰退和土壤退化等现象<sup>[3-5]</sup>, 严重影响着当地油松林地生产力和林业的可持续经营。与纯林相比, 混交林可以明显提高土壤养分的有效性, 改善林地养分状况, 从而提高林地生产力和林分稳定性<sup>[6-7]</sup>。因此, 通过选择与油松种间关系协调的树种来营造混交林是解决油松纯林问题的有效途径。而森林枯落物在维持土壤肥力、促进森林生态系统正常物质循环和养分平衡方面起着重要的作用。枯落叶的分解, 影响着林地土壤的生物学和化学性质, 进而影响着林木的种间协调性。因此, 研究不同树种枯落叶混合分解对土壤性质影响及在对土壤性质影响中是否存在相互

作用, 可为林木种间关系的探索和科学营造混交林提供依据。

目前对于枯落叶分解对土壤性质的研究已有相关报道, 国外多集中于枯落叶单独分解或对某类土壤性质的研究<sup>[8-12]</sup>, Mukhopadhyay 等<sup>[8]</sup>研究了印度东部 4 个树种枯落叶对红壤微生物活性和养分状况的影响, 表明铁刀木和印度黄檀枯落叶较粗壮婆罗双和金合欢枯落叶更能改善养分状况并提高微生物活性。Chander 等<sup>[9]</sup>指出桉树枯落叶分解后土壤微生物量碳/有机碳之值较杨树低 2 倍~4 倍, 桉树枯落叶分解过程中产生了抑制土壤微生物生长的有害化感物质, 影响了养分循环和土壤肥力。Castro-Diez 等<sup>[10]</sup>也发现引进的固氮树种银荆和刺槐与伊比亚里半岛本土树种枯落叶混合后产生了次级化合物, 抑制了微生物活性而并未使土壤氮含量增加。因此, 枯落叶分解过程中的次级代谢产物对土壤性质的变化起重要作用。在国内, 徐秋

\* 国家自然科学基金项目(31070630) 资助

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

作者简介: 李茜(1986—), 女, 青海贵德人, 博士研究生, 主要从事森林生态研究。Tel: 15877658624, E-mail: lq8565035@163.com

收稿日期: 2011-07-22; 收到修改稿日期: 2011-11-25

芳<sup>[13]</sup>、胡亚林<sup>[14]</sup>、林开敏<sup>[15]</sup>等研究了南方杉木与其他树种枯落叶混合分解对土壤性质的影响,表明杉-阔混合枯落叶分解对土壤大部分性质的增加效应大于纯杉木枯落叶,但不同类型的枯落叶混合对土壤性质的影响存在差异。而本文针对黄土高原树种油松及其他常见树种,利用土壤微生物、酶活性和化学性质等指标来分析并综合判断油松多种类型枯落叶混合分解对土壤的影响及相互作用。

枯落叶混合分解对土壤性质的作用是一个较为复杂的过程,当两种不同枯落叶与土壤进行混合培养一段时间后,土壤的生物化学性质将发生变化,这种混合分解效应究竟只是原来不同枯落叶对土壤性质作用的简单叠加,还是通过混合对土壤产生了新的促进或抑制作用是需要迫切关心的问题。因此,本文以黄土高原油松为主体,通过室内将油松和其他 10 个针阔乔灌树种枯落叶混合分解培养试验,研究不同树种枯落叶混合分解在对土壤微生物、酶活性和化学性质等指标的影响中是否存在相互作用并判断综合影响效应,从而为黄土高原油松混交林树种的选择和混交林的经营提供指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

在黄土高原油松和其他针叶树种(侧柏 *Platycladus orientalis*、落叶松 *Larix principis-rupprechtii*)、阔叶乔木树种(小叶杨 *Populus simonii*、刺槐 *Robinia pseudoacacia*、白桦 *Betula platyphylla*、辽东栎 *Quercus liaotungensis*、白榆 *Ulmus pumila*)及灌木树种(沙棘 *Hippophae rhamnoides*、柠条 *Caragana microphylla*、紫穗槐 *Amorpha fruticosa*)组成的人工或天然纯林,于秋末冬初采集当年枯落叶,经仔细挑拣(剔除病虫害叶和腐烂叶),用清水漂洗后迅速在 60℃ 下烘干、粉碎过 1 mm 筛备用。

同时,在半湿润黄土残塬沟壑区的淳化县英烈林场选择有代表性的无林荒草地,均匀设置 5 个 1 m × 1 m 大小的小样方,清理地被物层后收集每个样方 0 ~ 10 cm 的腐殖质层土壤(属黄土母质上发育的黄善土,土壤容重 1.261 g cm<sup>-3</sup>,其他性质见表 1),然后将 5 个样方的土壤充分混合后取部分装袋带回室内,除去叶子、根系、石块等杂物后直接以鲜土过孔径 5 mm 的土壤筛备用。

表 1 无林荒草地土壤性质

Table 1 Soil properties of tree-free wasteland

微生物 Microbes (10 <sup>8</sup> cfu g <sup>-1</sup> )	细菌 Bacteria (10 <sup>8</sup> cfu g <sup>-1</sup> )	真菌 Fungi (10 <sup>3</sup> cfu g <sup>-1</sup> )	放线菌 Actinomyces (10 <sup>6</sup> cfu g <sup>-1</sup> )	脲酶 Urease (mg kg <sup>-1</sup> )	蔗糖酶 Saccharase (ml g <sup>-1</sup> )	过氧化氢酶 Catalase (ml g <sup>-1</sup> )	脱氢酶 Dehydrogenase (mg g <sup>-1</sup> )	磷酸酶 Phosphatase (mg kg <sup>-1</sup> )
5.04	4.93	6.30	10.91	18.24	1.23	1.69	0.21	0.82
蛋白酶 Protease (mg kg <sup>-1</sup> )	多酚氧化酶 Polyphenoloxidase (ml g <sup>-1</sup> )	pH	有机质 Organic matter (g kg <sup>-1</sup> )	碱解氮 Alkalytic N (mg kg <sup>-1</sup> )	速效磷 Available P (mg kg <sup>-1</sup> )	速效钾 Available K (mg kg <sup>-1</sup> )	CEC (cmol kg <sup>-1</sup> )	
1.07	6.06	7.80	24.09	51.59	6.73	81.31	15.26	

### 1.2 室内混合分解试验

首先将油松分别与其他树种枯落叶按照 1:1 的干重比例一一混合,再将混合后的枯落叶与准备好的鲜土样按照 2:100 的干重比例充分混合(鲜土以含水率折算成干土),并分别取 2.5 kg 装入不透水塑料培养钵中(钵口直径为 18 cm,钵体高 16 cm)。每个枯落叶混合类型为一个处理,每个处理设置 3 个重复。其中,对照设置分为两种:一种是不加任何枯落叶的原无林荒草地土壤,作为不同枯落叶单独分解后土壤的对照,另

一种是将 11 个树种枯落叶分别与无林荒草地土壤混合,进行单独分解培养作为混合分解的对照。开始培养时,在每个培养钵中加一定量的蒸馏水,调节土壤湿度为田间持水量的 50% (预先测定土壤的田间持水量,通过计算确定应加水量),用塑料薄膜覆盖钵口(保湿),并在薄膜上留 4 个通气孔,然后将培养钵放在室温(20℃ ~ 25℃)进行分解试验培养。在培养过程中,每隔 7 d 称量培养钵重量,根据失水情况,揭开钵口用喷水器均匀补充水分,始终调节土壤湿度不变(培养钵重量保

持恒定)。连续培养 120 d, 直至观察绝大部分枯落叶分解为止。

### 1.3 土壤性质测定

将培养好的土壤全部平摊至干净的磁盘里, 仔细捡去残留的枯落叶碎屑, 充分混合后取部分鲜土测定微生物数量, 其他土样风干后测定其他生物化学性质指标。具体方法如下:

土壤微生物数量<sup>[16]</sup>用稀释平板法(细菌-牛肉膏蛋白胨琼脂培养基; 真菌-马铃薯蔗糖琼脂 PDA 培养基; 放线菌-高氏 1 号培养基)测定。土壤酶活性指标测定<sup>[17]</sup>: 过氧化氢酶用  $\text{KMnO}_4$  滴定法; 脲酶用苯酚钠-次氯酸钠比色法; 蔗糖酶用  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  滴定法; 磷酸酶用磷酸苯二钠比色法(用 pH10 硼酸缓冲液测定碱性磷酸酶); 蛋白酶用茚三酮比色法; 多酚氧化酶用碘量滴定法; 脱氢酶用三苯基四唑氯化物比色法。土壤化学性质的测定<sup>[18]</sup>: 土壤 pH 用 PHS-2 型酸度计中和滴定法(水土比为 2.5:1); 土壤有机质用重铬酸钾容量法; 碱解氮用扩散法; 速效磷  $\text{NaHCO}_3$  浸提钼锑抗比色法; 速效钾用  $\text{NH}_4\text{OAc}$  浸提火焰光度法; 土壤阳离子交换量(CEC)用  $\text{NH}_4\text{Cl}-\text{NH}_4\text{OAc}$  交换法。

### 1.4 数据处理与分析

假定不同树种枯落叶混合分解对土壤性质不存在相互作用的前提下, 混合分解后的土壤性质理论预测值可用公式表示为:  $P_{AB} = a M_A + b M_B$ ; 式中, A、B 代表不同树种的枯落叶;  $M_A$ 、 $M_B$  分别表示纯树种 A 和树种 B 的枯落叶分解后土壤性质实测值;  $P_{AB}$  为混合分解后土壤性质的理论预测值; 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后土壤性质的实测值  $M_{AB}$  与预测值  $P_{AB}$ , 按公式  $\Delta\% = 100 \times (M_{AB} - P_{AB}) / P_{AB}$  计算枯落叶混合分解对土壤性质的提高率( $\Delta\%$ ), 以此判断树种 A 和树种 B 枯落叶混合分解对土壤是否存在相互作用, 即当实测值较预测值有明显提高时表明 A 与 B 混合分解对土壤性质的影响存在相互促进作用; 反之, 则存在相互抑制作用。

在分析不同枯落叶混合分解对土壤性质影响的综合作用时采用主成分分析法, 指标选取用 SPSS 运行后, 通过方差分解主成分提取分析表提取出特征值大于 1 的主成分, 记为  $F_i$ , 同时用载荷矩阵中的数据  $B$  除以主成分相对应的特征值  $\lambda$  开平方根得到主成分表达式中每个指标所对应的系数  $A = B/\sqrt{\lambda}$ , 即每个特征值所对应的特征向量。将特征向量与

标准化后的初始数据相乘, 就可以得到主成分表达式  $F = AX$  及主成分值<sup>[19]</sup>。当  $F > 0$  时, 推断不同枯落叶分解对土壤性质的影响存在相互促进作用, 当  $F < 0$  时则表示存在相互抑制作用。

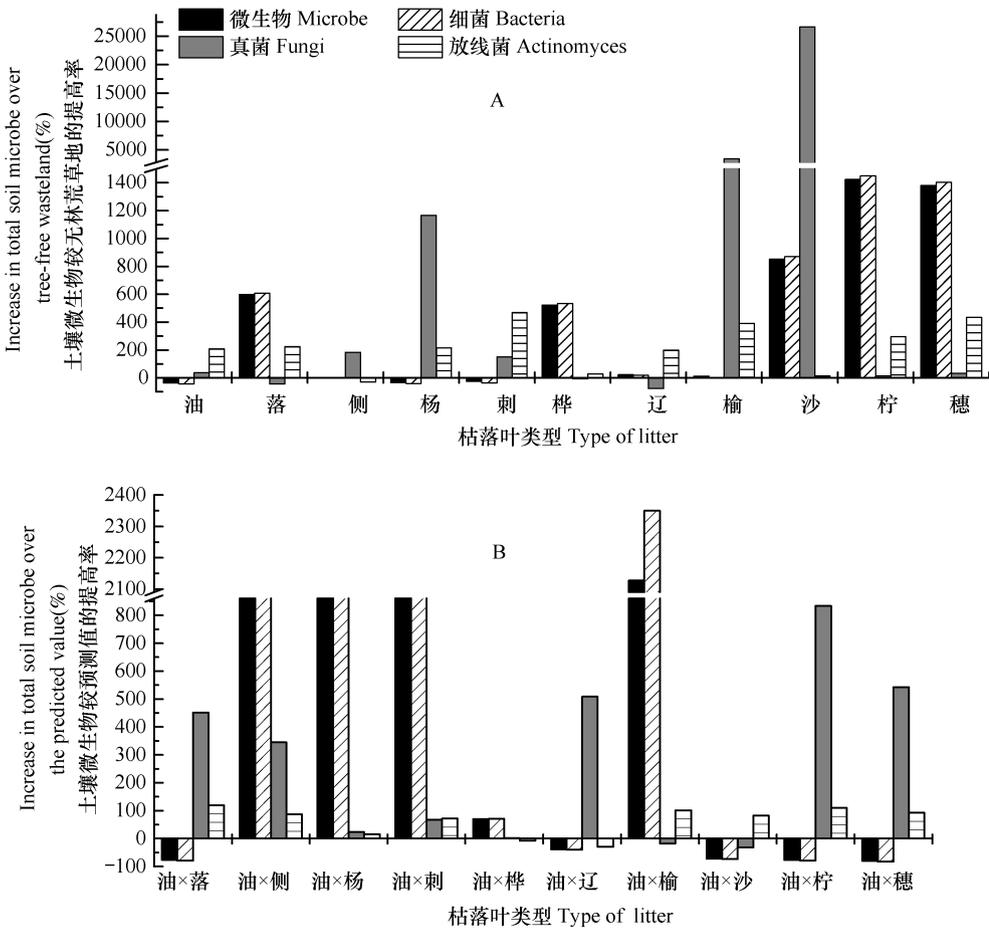
测定结果均采用 3 次重复(误差不超过 5%) 的平均值, 应用 Excel2003、origin8.5 和 SPSS17.0 软件进行数据处理及作图分析, 用单因素方差分析和 LSD 多重检验法检验不同枯落叶分解对土壤性质影响的差异显著性。

## 2 结果与分析

### 2.1 油松与其他树种枯落叶分解对土壤微生物的影响

土壤微生物是土壤中最活跃的部分, 是土壤肥力的重要因素, 因此不同枯落叶单独或混合分解后土壤微生物的变化也最明显。油松等 11 种枯落叶单独分解后土壤微生物较无林荒草地的提高率见图 1A, 落叶松、白桦、沙棘、柠条、紫穗槐枯落叶单独分解后土壤微生物总量均有显著增加( $p < 0.05$ ), 而油松、小叶杨、刺槐枯落叶有所减少, 但差异不显著( $p > 0.05$ ), 其中沙棘、白榆和小叶杨对真菌的增加程度最大, 分别为 26 633%、3 400% 和 1 167%。

油松分别与落叶松、侧柏等 10 种枯落叶混合分解后土壤微生物实测值  $M_{AB}$  与预测值  $P_{AB}$  比较得出提高率  $\Delta\%$ , 见图 1B。油松分别与侧柏、小叶杨、刺槐和白榆枯落叶混合分解后细菌数量较预测值的增加幅度极大, 分别为 1 509%、1 798%、1 093% 和 2 349%, 细菌是土壤微生物的最主要的组成部分, 它的增加导致混合分解后土壤微生物数量也急剧增加(分别为 1 437%、1 610%、951.9% 和 2 127%), 说明油松与这 4 种枯落叶混合分解对土壤细菌和微生物总量的影响存在相互促进作用; 而油松分别与落叶松、辽东栎、柠条、沙棘和紫穗槐枯落叶混合后细菌和微生物总量均明显减少, 则油松与这 5 种枯落叶混合对二者的影响存在相互抑制作用。同时, 除白榆和沙棘之外, 其他枯落叶与油松枯落叶混合分解后土壤真菌数量均有一定的增加, 说明油松与大多树种枯落叶混合分解对土壤真菌的影响存在相互促进作用。油松与不同树种枯落叶混合分解后土壤放线菌较预测值变化相对较小, 表明它们对土壤放线菌的影响无明显相互作用。



油: 油松 *Pinus tabulaeformis*, 落: 落叶松 *Larix principis-rupprechtii*, 侧: 侧柏 *Platycladus orientalis*, 杨: 小叶杨 *Populus simonii*, 刺: 刺槐 *Robinia pseudoacacia*, 桦: 白桦 *Betula platyphylla*, 辽: 辽东栎 *Quercus liaotungensis*, 榆: 白榆 *Ulmus pumila*, 沙: 沙棘 *Hippophae rhamnoides*, 柠: 柠条 *Caragana microphylla*, 穗: 紫穗槐 *Amorpha fruticosa*.下同 *The same below*

图1 油松与其他树种枯落叶分解对土壤微生物的影响:(A) 枯落叶单独分解后土壤微生物  $M_A$  较无林荒地土壤的提高率(%);(B) 枯落叶混合分解后土壤微生物实测值  $M_{AB}$  较预测值  $P_{AB}$  提高率( $\Delta\%$ )

Fig. 1 Effects of decomposition of leaf litter from *Pinus tabulaeformis* and other trees on soil microbes: (A) Increase in total soil microbe in plots treated with different leaf litters, separately, after decomposition of the litter as compared with that in tree-free wasteland (%); (B) Difference in total soil microbe between measured and predicted values in plots treated with mixed leaf litter ( $\Delta\%$ )

### 2.2 油松与其他树种枯落叶分解对土壤酶活性的影响

不同树种枯落叶单独分解后(较无林荒地)均明显提高了土壤脲酶(54.28%~109.8%)、脱氢酶(91.64%~287.6%)和磷酸酶(80.53%~300.6%)活性,差异均达到显著水平( $p < 0.05$ ),其中柠条枯落叶单独分解对土壤脲酶、磷酸酶、碱解氮的提高程度最大,见图2A。落叶松、侧柏、沙棘枯落叶单独分解后土壤多酚氧化酶活性均有显著提高,白桦枯落叶单独分解后过氧化氢酶活性显著降低(-40.75%),其他无明显变化。

油松与其他树种枯落叶混合分解后土壤酶活性测定值  $M_{AB}$  与预测值  $P_{AB}$  比较后得出提高率  $\Delta\%$  (图2B)。不同枯落叶混合分解在对7种土壤酶活

性的影响中,磷酸酶活性的变化最明显,油松与沙棘枯落叶混合后磷酸酶较预测值提高了49.63%,说明二者混合对土壤磷酸酶活性的影响存在相互促进作用,而油松与侧柏、白桦和白榆枯落叶混合后磷酸酶活性降低,则油松与这3种枯落叶混合分解对磷酸酶的影响存在相互抑制作用。同时分析得出,油松与紫穗槐枯落叶混合分解对土壤脲酶活性的影响存在相互促进作用,而与白桦、辽东栎和柠条枯落叶混合分解则存在相互抑制作用;油松与白桦枯落叶混合分解对过氧化氢酶活性的影响存在相互促进作用,而与落叶松、侧柏和辽东栎枯落叶混合分解存在相互抑制作用;油松与刺槐、白桦和柠条枯落叶混合分解对脱氢酶活性的影响存在相互促进作用,而与落叶松、小叶杨和沙棘枯落叶混

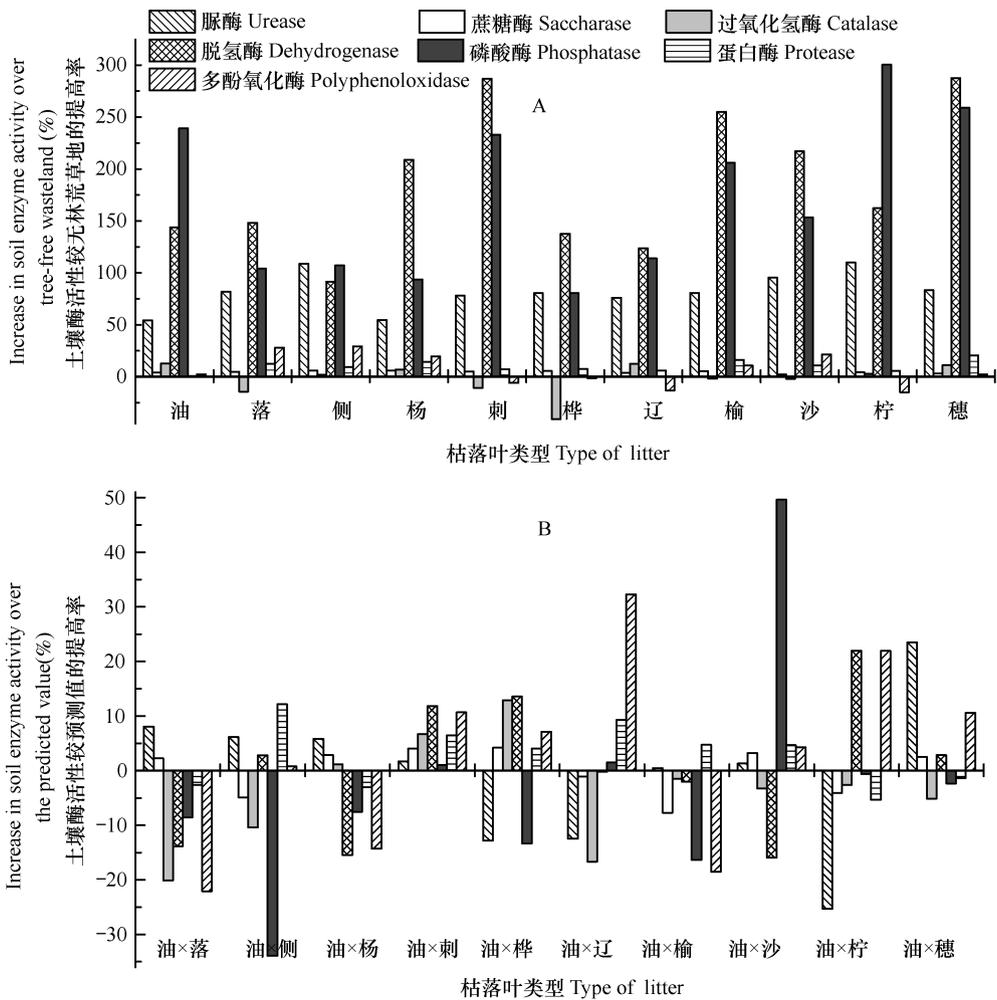


图2 油松与其他树种枯落叶分解对土壤酶活性的影响:(A) 枯落叶单独分解后土壤酶活性  $M_A$  较无林荒草地土壤的提高率(%);(B) 枯落叶混合分解后土壤酶活性实测值  $M_{AB}$  较预测值  $P_{AB}$  提高率( $\Delta$ )

Fig. 2 Effects of decomposition of leaf litter from *Pinus tabulaeformis* and other trees on soil enzyme activity: (A) Increase in soil enzyme activity in plots treated with different leaf litters, separately, after decomposition of the litter as compared with tree-free wasteland (%); (B) Difference between measured and the predicted soil enzymes activity in plots treated with mixed litter ( $\Delta$ )

合分解存在相互抑制作用;油松与刺槐、辽东栎、柠条和紫穗槐枯落叶混合分解对多酚氧化酶活性的影响存在相互促进作用,而与落叶松、小叶杨和白榆枯落叶混合分解存在相互抑制作用。不同树种枯落叶混合分解对土壤蔗糖酶和蛋白酶活性的影响无明显相互作用。

### 2.3 油松与其他树种枯落叶分解对土壤化学性质的影响

油松等树种单独分解后(较无林荒草地)均明显增加了土壤有机质(29.06%~54.91%)和碱解氮(14.71%~49.43%)含量,见图3A。油松、刺槐、白桦、辽东栎、白榆、柠条、紫穗槐枯落叶单独分解后土壤速效磷含量均有显著增加,而落叶松、侧柏、小叶杨、沙棘均显著减少( $p < 0.05$ )。除了油松枯落叶单

独分解后土壤速效钾含量变化较小外,其他枯落叶均使速效钾含量明显增加。除小叶杨和辽东栎之外,各个树种枯落叶单独分解均使土壤CEC显著减少。

油松分别与不同树种枯落叶混合分解后土壤化学性质实测值较预测值的提高率见图3B。不同树种枯落叶混合分解对土壤速效磷和速效钾的影响作用最明显,油松除了与沙棘枯落叶混合分解后使土壤速效磷明显增加(56.66%)外,与其他枯落叶混合分解速效磷含量均明显减少;而油松除了与白榆枯落叶混合分解后土壤速效钾减少(-21.15%)外,与大部分枯落叶混合分解均使其含量明显增加,说明油松与多数枯落叶混合分解对土壤速效磷的影响存在相互抑制作用,而对速效钾的影响存在相互促进作用。油松与小叶杨、沙棘、紫穗槐枯落叶

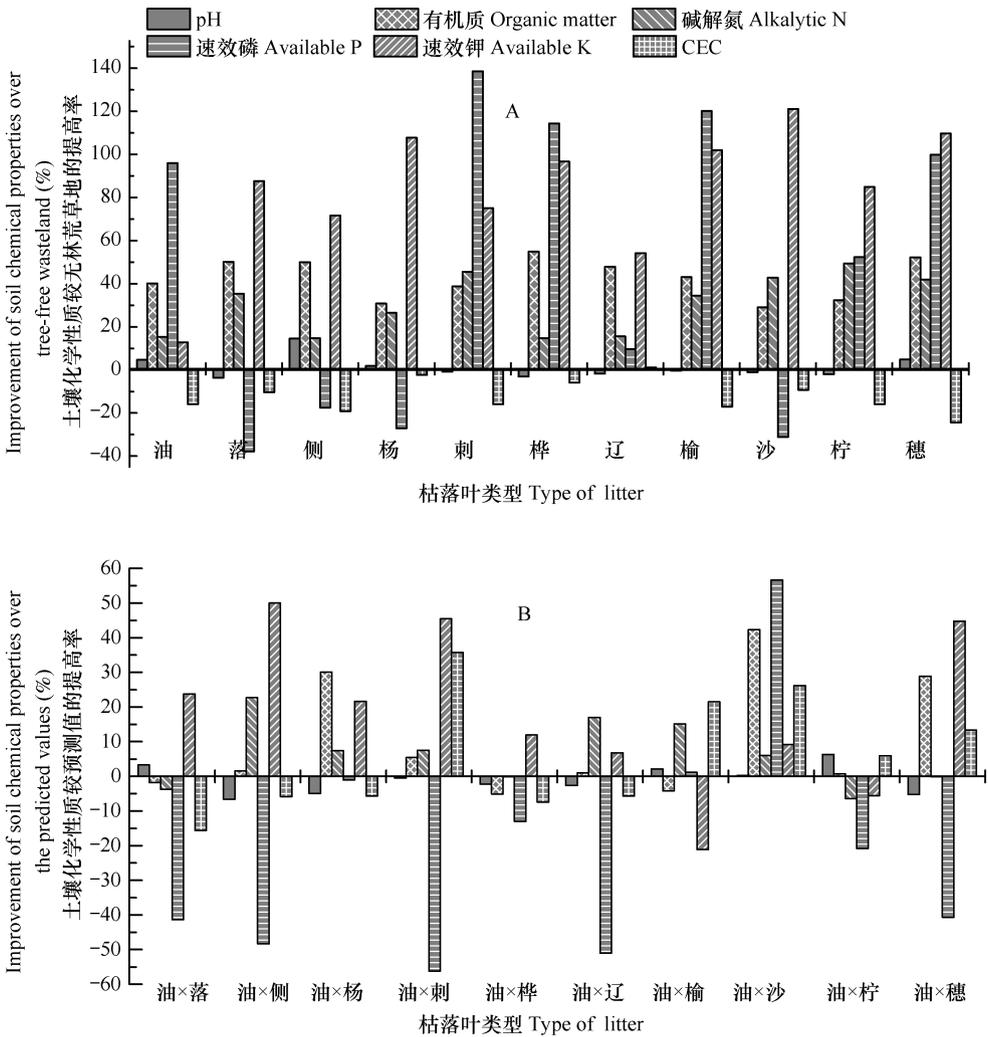


图3 油松与其他树种枯落叶分解对土壤化学性质的影响:(A) 枯落叶单独分解后土壤化学性质  $M_A$  较无林荒地土壤提高率(%) ;(B) 枯落叶混合分解后土壤化学性质实测值  $M_{AB}$  较预测值  $P_{AB}$  提高率( $\Delta\%$ )

Fig. 3 Effects of decomposition of leaf litter from *Pinus tabulaeformis* and other trees on soil chemical properties: (A) Improvement in soil chemical properties over tree-free wasteland in plots treated with different leaf litters, separately (%); (B) Difference between measured and predicted values of soil chemical properties in plots treated with mixed litter ( $\Delta\%$ )

混合分解后土壤有机质明显增加(30.08%、42.31%、28.88%),表明油松与这3种枯落叶混合分解对土壤有机质的影响存在相互促进作用。同理,油松与侧柏、辽东栎和白榆枯落叶混合分解对土壤碱解氮的影响存在相互促进作用;油松与刺槐、白榆、沙棘和紫穗槐枯落叶混合分解对CEC的影响存在相互促进作用,而与落叶松枯落叶混合分解却存在相互抑制作用。不同树种枯落叶混合分解对土壤pH的影响无明显相互作用。

2.4 油松与不同树种枯落叶混合分解对土壤性质影响的综合效应分析

应用主成分分析法判断油松与其他树种枯落叶混合分解对土壤性质影响的综合效应。由于土

壤的细菌、真菌和放线菌数量用微生物总量来代替,且土壤pH的提高或降低不能表示对土壤性质的改善或恶化作用,因此选取除细菌、真菌、放线菌和pH外的13个指标,将各枯落叶混合分解后土壤性质的实测值较预测值的提高率进行主成分分析,得出综合主成分函数:

$$F = 0.256F_1 + 0.209F_2 + 0.164F_3 + 0.144F_4 + 0.114F_5$$

根据上式得出不同枯落叶混合分解对土壤性质影响的综合主成分值(见表2)。由此综合比较,油松与沙棘、刺槐、小叶杨、紫穗槐枯落叶混合分解对土壤性质的影响存在相互促进作用,而与侧柏、辽东栎、白桦、落叶松、柠条枯落叶混合分解则存在相互抑制作用。油松与白榆、小叶杨枯落叶混合分

表 2 不同树种枯落叶混合分解后对土壤性质影响的综合主成分值

Table 2 Principal component values of the effects of the decomposition of different mixtures of leaf litter on soil properties

枯落叶混合类型 Type of litter mixture	综合主成分值 $F$ Principal component value $F$	枯落叶混合类型 Type of litter mixture	综合主成分值 $F$ Principal component value $F$
油松 × 落叶松 <i>P. tabulaeformis</i> × <i>L. principis-rupprechtii</i>	-0.759	油松 × 辽东栎 <i>P. tabulaeformis</i> × <i>Q. liaotungensis</i>	-0.406
油松 × 侧柏 <i>P. tabulaeformis</i> × <i>P. orientalis</i>	-0.221	油松 × 白榆 <i>P. tabulaeformis</i> × <i>U. pumila</i>	0.070
油松 × 小叶杨 <i>P. tabulaeformis</i> × <i>P. simonii</i>	0.388	油松 × 沙棘 <i>P. tabulaeformis</i> × <i>H. rhamnoides</i>	1.556
油松 × 刺槐 <i>P. tabulaeformis</i> × <i>R. pseudoacacia</i>	0.482	油松 × 柠条 <i>P. tabulaeformis</i> × <i>C. microphylla</i>	-0.938
油松 × 白桦 <i>P. tabulaeformis</i> × <i>B. platyphylla</i>	-0.477	油松 × 紫穗槐 <i>P. tabulaeformis</i> × <i>A. fruticosa</i>	0.306

解对土壤性质影响的相互作用不明显。

### 3 结论与讨论

在本研究中, 11 种枯落叶单独分解后土壤性质的测定值  $M_A$  是作为油松与其他树种枯落叶混合分解后土壤性质理论预测值  $P_{AB}$  的基础值而存在的, 分析不同类型油松枯落叶混合分解是以这个理论预测值进行比较的, 目的是研究不同枯落叶混合分解对土壤性质产生的相互作用。同时, 单独分解是在同一基质(无林荒草地)土壤中添加各个枯落叶进行的, 为了研究添加单一枯落叶对土壤性质产生的影响, 将单独分解后土壤性质与无林荒草地土壤进行了比较。结果显示, 11 种枯落叶单独分解均明显提高了土壤脲酶、脱氢酶、磷酸酶活性和有机质、碱解氮含量, 使其其他多数土壤性质得到改善。可能是由于各枯落叶的分解一方面通过释放脲酶、脱氢酶和磷酸酶以及 C、N 进入土壤中, 使土壤相关指标升高; 另一方面通过分解使微生物数量和活性提升, 从而提高土壤酶活性, 而酶活性升高有利于枯落物和土壤有机物质的分解, 转换并使 C、N 养分元素释放<sup>[20]</sup>。

枯落叶混合分解后土壤微生物的变化直接影响着土壤养分元素的形成和植物营养物质的转化。研究表明, 油松分别与侧柏、小叶杨、刺槐和白榆枯落叶混合分解后土壤微生物总量较预测值有明显提高, 这与贺敏等<sup>[21]</sup>研究的油松林地引入小叶杨、刺槐和白榆枯落叶可明显提高微生物数量的结果相类似, 可能是由于这些树种枯落叶与油松枯落叶混合后为分解过程中的微生物提供了所需的养分,

为分解者提供更为有利的微环境, 使得微生物数量、活性和群落结构更加完善。Blair 等<sup>[22]</sup>也指出混合种类凋落物增加了资源的异质性, 改变了分解者有机体的丰富度。无论是单一枯落叶还是混合枯落叶分解, 其分解后土壤细菌数量总是占微生物总量的主导地位(83.7%~99.4%), 其次是放线菌和真菌, 这一结果也支持林开敏<sup>[15]</sup>和王健<sup>[23]</sup>等的研究。

不同树种枯落叶混合分解在对土壤 7 种酶活性的影响中, 土壤磷酸酶活性的变化最明显, 油松与沙棘枯落叶混合分解对磷酸酶活性的影响存在相互促进作用, 而与侧柏、白桦和白榆枯落叶混合分解则存在相互抑制作用。磷酸酶能酶促土壤中有有机磷化合物水解, 生成能为植物所利用的无机态磷, 其活性是判断土壤磷素生物转化强度和有效含量的可靠指标<sup>[20]</sup>。上述结论说明油松与沙棘枯落叶混合加速土壤缓效磷转化为速效磷, 提高了土壤供磷能力, 改善了土壤磷素养分状况, 而与侧柏、白桦和白榆 3 种枯落叶混合则呈现相反的状况。

混合凋落物对土壤生物活性的改善进而使得不同凋落物处理土壤化学性状发生改变<sup>[14]</sup>。不同树种枯落叶混合分解在对土壤化学性质的影响中, 土壤速效钾和速效磷的变化最突出, 油松与大部分树种枯落叶混合分解对土壤速效钾的影响在相互促进作用(与白榆除外), 而对土壤速效磷的影响存在相互抑制作用(与沙棘除外)。钾是极易迁移的元素, 油松与这些树种枯落叶混合加速了钾素的释放, 促进钾素迁移至土壤。同时, 枯落叶分解的中间产物有机酸酐及由其释放的  $\text{CO}_2$  所形成的  $\text{H}_2\text{CO}_3$  能加速土壤钾矿物分解而释放钾, 从而提高土壤速效钾的水平<sup>[24]</sup>。而这

里土壤速效磷的变化和磷酸酶的变化基本一致,说明土壤磷酸酶活性与土壤速效磷相关性较好。

在分析不同树种枯落叶混合分解对土壤总体性质影响作用时,由于指标较多,对各项指标进行单一分析很难说明对土壤总体性质影响的综合效应,所以本文采用主成分分析法。从土壤总体性质而言,油松与沙棘、刺槐、小叶杨、紫穗槐枯落叶混合分解对土壤性质的影响存在相互促进作用,而与侧柏、辽东栎、白桦、落叶松、柠条枯落叶混合分解则存在相互抑制作用。廖立平<sup>[25]</sup>曾指出对树种凋落物混合分解及树种间存在的相互作用进行研究,才能保证所要营造的人工混交林成功。因此,从本文的结果可推测油松与沙棘、刺槐、小叶杨和紫穗槐树种间协调性较好,培育油松混交林时可优先选择这些树种。而在现实中油松和沙棘、刺槐进行混交效果较好<sup>[7,23-24]</sup>,这也证明了本文结论的合理性,但油松与其他几个树种在实际中究竟是否适合混交还有待研究和实践。

需要指出的是,本研究采用粉碎后的枯落叶与土壤混合进行室内混合分解试验,目的是使枯落叶能与土壤充分混合,加速分解,且保证了相同的分解环境条件,得出不同树种枯落叶混合分解在对土壤影响中存在相互作用的最终规律,这可能与现实中枯落叶的自然分解状况有差异,但对理论与实践仍有一定的参考价值。此外,由于枯落叶分解对土壤性质的影响作用可能还会因林地环境(气候、温度、水分、地形等)条件的差异而发生变化,因此,尚需要通过野外的长期试验予以补充研究,从而深入探讨不同树种枯落叶分解对土壤性质的影响机制及相互作用,进一步为黄土高原油松混交林的改造提供树种选择的合理依据。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 徐化成. 油松. 北京: 中国林业出版社,1993: 79—87. Xu H C. *Pinus tabulaeformis* ( In Chinese ). Beijing: China Forestry Publishing House,1993: 79—87
- [ 2 ] 郭永盛,白育英,周心澄. 大青山油松人工林生态效应研究. 水土保持研究,2008,15(3): 204—206. Guo Y S, Bai Y Y, Zhou X C. Study on the ecological benefits of *Pinus tabulaeformis* plantation in Daqing mountain of Inner Mongolia ( In Chinese ). Research of Soil and Water Conservation,2008,15(3): 204—206
- [ 3 ] 张希彪,上官周平. 人为干扰对黄土高原子午岭油松人工林土壤物理性质的影响. 生态学报,2006,26(11): 3 685—3 695. Zhang X B, Shang Guan Z P. Effect of Human-induced disturbance on physical properties of soil in artificial *Pinus tabulaeformis* Carr. forests of the Loess Plateau ( In Chinese ). Acta Ecologica Sinica,2006,26(11): 3 685—3 695
- [ 4 ] 曹云,杨勃,宋炳煜,等. 人工抚育措施对油松林生长及结构特征的影响. 应用生态学报,2005,16(3): 397—402. Cao Y, Yang J, Song B Y, et al. Effects of artificial tending on *Pinus tabulaeformis* forest growth and its structural characteristics ( In Chinese ). Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16 ( 3 ): 397—402
- [ 5 ] 刘增文,段而军,刘卓玛姐,等. 黄土高原半干旱丘陵区不同树种纯林土壤性质极化研究. 土壤学报,2009,46(6): 1 110—1 120. Liu Z W, Duan E J, Liu Zhuo M J, et al. Soil polarization under pure stands of different tree varieties in semi-arid hilly areas of the Loess Plateau ( In Chinese ). Acta Pedologica Sinica,2009,46(6): 1 110—1 120
- [ 6 ] 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
- [ 7 ] 白岗栓,侯喜录,张占雄. 油松-沙棘混交模式对生境和油松生长的影响. 林业科学,2006,42(8): 37—43. Bai G S, Hou X L, Zhang Z X. Influence of different mixed patterns of seabuckthorn and Chinese pine on habitat and Chinese pine's growth ( In Chinese ). Scientia Silvae Sinicae,2006,42(8): 37—43
- [ 8 ] Mukhopadhyay S, Joy V C. Influence of leaf litter types on microbial functions and nutrient status of soil: Ecological suitability of forest trees for afforestation in tropical laterite wastelands. Soil Biology and Biochemistry,2010,42(12): 2 306—2 315
- [ 9 ] Chander K, Goyal S, Kapoor K K. Microbial biomass dynamics during the decomposition of leaf litter of poplar and eucalyptus in a sandy loam. Biology and Fertility of Soils,1995,19(4): 357—362
- [ 10 ] Castro-Diez P, Fierro-Brunnenmeister N, Gonzalez-Munoz N, et al. Effects of exotic and native tree leaf litter on soil properties of two contrasting sites in the Iberian Peninsula. Plant and Soil, 2012,350(1/2): 179—191
- [ 11 ] Lorena C A, Noe V D, Victoria C M, et al. Soil nitrogen in relation to quality and decomposability of plant litter in the Patagonian Monte, Argentina. Plant Ecology,2005,181(1): 139—151
- [ 12 ] Barbhuiya A R, Arunachalam A, Nath P C, et al. Leaf litter decomposition of dominant tree species of Namdapha National Park, Arunachal Pradesh, northeast India. Journal of Forest Research, 2008,13(1): 25—34
- [ 13 ] 徐秋芳,钱新标,桂祖云. 不同林木凋落物分解对土壤性质的影响. 浙江林学院学报,1998,15(1): 27—31. Xu Q F, Qian X B, Gui Z Y. Effects of litter decomposition of different stands on soil properties ( In Chinese ). Journal of Zhejiang Forestry College,1998,15(1): 27—31
- [ 14 ] 胡亚林,汪思龙,黄宇,等. 凋落物化学组成对土壤微生物学性状及土壤酶活性的影响. 生态学报,2005,25(10): 2 662—2 668. Hu Y L, Wang S L, Huang Y, et al. Effects of litter chemistry on soil biological property and enzymatic activity ( In Chinese ). Acta Ecologica Sinica,2005,25(10): 2 662—2 668
- [ 15 ] 林开敏,章志琴,邹双全,等. 杉木与阔叶树叶凋落物混合分解对土壤性质的影响. 土壤通报,2006,37(4): 258—262. Lin K M, Zhang Z Q, Zou S Q, et al. The influence of Chi-

- nese fir mixed with broad-leaf litter decomposition on character of forest soil (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(4): 258—262
- [16] 程丽娟, 薛泉宏. 微生物学实验技术. 北京: 世界图书出版公司, 2000: 63—67, 80—83. Cheng L J, Xue Q H. Microbiology experiment technology (In Chinese). Beijing: World Publishing Corporation, 2000: 63—67, 80—83
- [17] 关松荫. 土壤酶及其研究方法. 北京: 农业出版社, 1986: 294—329. Guan S Y. Soil Enzyme and Its Research Methods (In Chinese). Beijing: Agriculture Press, 1986: 294—329
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000. Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2000
- [19] 李小胜, 陈珍珍. 如何正确应用 SPSS 软件做主成分分析. 统计研究, 2010, 27(8): 105—108. Li X S, Chen Z Z. Correctly using SPSS software for principal components analysis (In Chinese). Statistical Research, 2010, 27(8): 105—108
- [20] 杨万勤, 王开运. 森林土壤酶的研究进展. 林业科学, 2004, 40(2): 152—159. Yang W Q, Wang K Y. Advances in forest soil enzymology (In Chinese). Scientia Silvae Sinicae, 2004, 40(2): 152—159
- [21] 贺敏, 刘增文, 李亮, 等. 陕北地区阔叶树种枯落叶对针叶林土壤微生物的影响. 西北林学院学报, 2010, 25(3): 7—11. He M, Liu Z W, Li L, et al. Impact on soil microbial of coniferous pure forests by different leaves litter of broad-leaved trees in northern Shaanxi (In Chinese). Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(3): 7—11
- [22] Blair J M, Parmelee R W, Beare M H. Decay rates, nitrogen fluxes, and decomposer communities of single and mixed species foliar litter. Ecology, 1990, 71(5): 1 976—1 985
- [23] 王健, 刘作新. 油松刺槐混交林土壤生物学特性研究. 干旱区研究, 2004, 21(4): 348—352. Wang J, Liu Z X. Study on the biological properties of soil under the mixed forests of *Pinus tabulaeformis* Carr. and *Robinia pseudoacacia* L. (In Chinese). Arid Zone Research, 2004, 21(4): 348—352
- [24] 薛泉宏, 李瑞雪, 冯立效, 等. 黄土高原油松刺槐人工林对土壤肥力影响的研究. 陕西林业科技, 1995(2): 21—25, 15. Xue Q H, Li R X, Feng L X, et al. The improvement of the *Pinus tabulaeformis* and *Robinia pseudoacacia* plantation to the soil fertility on the Loess Plateau (In Chinese). Shanxi Forest Science and Technology, 1995(2): 21—25, 15
- [25] 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 K, Yang Y H. Decomposition of mixed foliar litter I. A microcosm study (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 1997, 8(5): 459—464

## EFFECTS OF DECOMPOSITION OF LEAF LITTERS FROM *PINUS TABULAEFORMIS* AND OTHER TREES ON SOIL PROPERTIES IN THE LOESS PLATEAU

Li Qian<sup>1</sup> Liu Zengwen<sup>2,3†</sup> Mi Caihong<sup>2</sup> Du Liangzhen<sup>4</sup>

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

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

(3 Key Laboratory of plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(4 Technology Services Branch, China Petroleum Engineering & Construction Corporation, Qingdao, Shandong 266071, China)

**Abstract** An indoor experiment was carried out of having leaf litters from *Pinus tabulaeformis* and from other 10 species of trees decomposed, separately or mixedly to explore effects of the decomposition on soil properties and any synergic or offsetting actions between the two in mixture. It was found that decomposition of the leaf litters separately significantly increased the activities of soil enzymes, like urease, dehydrogenase and phosphatase, and contents of organic matter and available N, but varied sharply in the effect on available P and CEC in the soil. The decomposition of leaf litter from *P. tabulaeformis* mixed with that from *Platycladus orientalis*, *Populus simonii*, *Robinia pseudoacacia*, or *Ulmus pumila*, separately showed obvious synergic effects on total soil microbe. In decomposition, its mixture with that from *Hippophae rhamnoides* affected activity of the soil enzyme of phosphatase, synergically, but its mixture with the leaf letter from *P. orientalis*, *Betula platyphylla* or *U. pumila*, separately, did reversely. Its mixture with leaf litters from most of the trees, separately, showed a synergic effect on soil available K content, but, reversely on soil available P content. Its mixture with that from *P. simonii*, *H. rhamnoides* or *Amorpha fruticosa*, separately, displayed a synergic effect on soil organic matter content. In terms of soil properties as a whole in their effects, its mixture with leaf litter from *H. rhamnoides*, *R. pseudoacacia*, *P. simonii* or *A. fruticosa*, separately, all acted synergically, whereas its mixture with that from *P. orientalis*, *Quercus liaotungensis*, *B. platyphylla*, *Larix principis-rupprechtii*, or *Caragana microphylla*, separately, did reversely.

**Key words** *Pinus tabulaeformis*; Leaf litter; Mixed litter decomposition; Forest soil