

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 19 期 Vol.32 No.19 **2012**

中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 19 期

2012 年 10 月 (半月刊)

目 次

中国野生东北虎数量监测方法有效性评估	张常智, 张明海, 姜广顺 (5943)
城市居民食物氮消费变化及其环境负荷——以厦门市为例	于 洋, 崔胜辉, 赵胜男, 等 (5953)
珠江口水域夏季小型底栖生物群落结构	袁俏君, 苗素英, 李恒翔, 等 (5962)
2010 年夏季雷州半岛海岸带浮游植物群落结构特征及其与主要环境因子的关系 (5972)
阿根廷滑柔鱼两个群体间耳石和角质颞的形态差异	龚玉艳, 张才学, 孙省利, 等 (5972)
黄河三角洲滨海草甸与土壤因子的关系	方 舟, 陈新军, 陆化杰, 等 (5986)
盘锦湿地净初级生产力时空分布特征	谭向峰, 杜 宁, 葛秀丽, 等 (5998)
菜豆根瘤菌对土壤钾的活化作用	王莉雯, 卫亚星 (6006)
花生植株和土壤水浸液自毒作用研究及土壤中自毒物质检测	张 亮, 黄建国, 韩玉竹, 等 (6016)
遮荫对金莲花光合特性和叶片解剖特征的影响	黄玉茜, 韩立思, 杨劲峰, 等 (6023)
火干扰对小兴安岭草丛、灌丛沼泽温室气体短期排放的影响	吕晋慧, 王 玄, 冯雁梦, 等 (6033)
古尔班通古特沙漠南部植物多样性及群落分类	顾 韩, 牟长城, 张博文, 等 (6044)
黄土高原樟子松和落叶松与其他树种枯落叶混合分解对土壤的影响	张 荣, 刘 彤 (6056)
长期集约种植对雷竹林土壤氨氧化古菌群落的影响	李 茜, 刘增文, 米彩红 (6067)
H ₂ O ₂ 参与 AM 真菌与烟草共生过程	秦 华, 刘卜榕, 徐秋芳, 等 (6076)
北京山区防护林优势树种分布与环境的关系	刘洪庆, 车永梅, 赵方贵, 等 (6085)
旱直播条件下弱化感潜力水稻根际微生物的群落结构	邵方丽, 余新晓, 郑江坤, 等 (6092)
不同森林类型根系分布与土壤性质的关系	熊 君, 林辉锋, 李振方, 等 (6100)
臭氧胁迫下硅对大豆抗氧化系统、生物量及产量的影响	黄 林, 王 峰, 周立江, 等 (6110)
垃圾填埋场渗滤液灌溉对土壤理化特征和草本花卉生长的影响	战丽杰, 郭立月, 宁堂原, 等 (6120)
稻麦轮作系统冬小麦农田耕作措施对氧化亚氮排放的影响	王树芹, 赖 娟, 赵秀兰 (6128)
不同施氮措施对旱作玉米地土壤酶活性及 CO ₂ 排放量的影响	郑建初, 张岳芳, 陈留根, 等 (6138)
北方农牧交错区农业生态系统生产力对气候波动的响应——以准格尔旗为例	张俊丽, 高明博, 温晚霞, 等 (6147)
.....	孙特生, 李 波, 张新时 (6155)
辽宁省能源消费和碳排放与经济增长的关系	康文星, 姚利辉, 何介南, 等 (6168)
基于 FARSITE 模型的丰林自然保护区潜在林火行为空间分布特征	吴志伟, 贺红士, 梁 宇, 等 (6176)
不同后作生境对玉米地天敌的冬季保育作用	田耀加, 梁广文, 曾 玲, 等 (6187)
云南紫胶虫种群数量对地表蚂蚁多样性的影响	卢志兴, 陈又清, 李 巧, 等 (6195)
阿波罗绢蝶种群数量和垂直分布变化及其对气候变暖的响应	于 非, 王 吟, 王绍坤, 等 (6203)
专论与综述	
海水养殖生态系统健康综合评价: 方法与模式	蒲新明, 傅明珠, 王宗灵, 等 (6210)
海草场生态系统及其修复研究进展	潘金华, 江 鑫, 赛 珊, 等 (6223)
水华蓝藻对鱼类的营养毒理学效应	董桂芳, 解绶启, 朱晓鸣, 等 (6233)
环境胁迫对海草非结构性碳水化合物储存和转移的影响	江志坚, 黄小平, 张景平 (6242)
生态免疫学研究进展	徐德立, 王德华 (6251)
研究简报	
喀斯特峰丛洼地不同森林表层土壤有机质的空间变异及成因	宋 敏, 彭晚霞, 邹冬生, 等 (6259)
准噶尔盆地东南缘梭梭种子雨特征	吕朝燕, 张希明, 刘国军, 等 (6270)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 336 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 35 * 2012-10



封面图说: 岸边的小白鹭——鹭科白鹭属共有 13 种, 其中有大白鹭、中白鹭、白鹭(小白鹭)、黄嘴白鹭等, 体羽皆是全白, 世通称白鹭。夏季的白鹭成鸟繁殖时枕部着生两条狭长而软的矛状羽, 状若双辫, 肩和胸着生蓑羽, 冬季时蓑羽常全部脱落, 白鹭虹膜黄色, 嘴黑色, 脚部黑色, 趾呈黄绿色。小白鹭常常栖息于稻田、沼泽、池塘水边, 以及海岸浅滩的红树林里。白天觅食, 好食小鱼、蛙、虾及昆虫等。繁殖期 3—7 月。繁殖时成群, 常和其他鹭类在一起, 雌雄均参加营巢, 次年常到旧巢处重新修葺使用。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201106080766

李茜, 刘增文, 米彩红. 黄土高原樟子松和落叶松与其他树种枯落叶混合分解对土壤的影响. 生态学报, 2012, 32(19): 6067-6075.

Li Q, Liu Z W, Mi C H. Effects of mixing leaf litter from *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and *Larix principis-rupprechtii* with that of other trees on soil properties in the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(19): 6067-6075.

黄土高原樟子松和落叶松与其他树种枯落叶 混合分解对土壤的影响

李 茜¹, 刘增文^{2,3,*}, 米彩红²

(1. 西北农林科技大学林学院, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100;

3. 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 杨凌 712100)

摘要:通过采集树木枯落叶与土壤进行室内混合分解培养试验,研究了黄土高原常见的樟子松和落叶松与其他树种枯落叶混合分解对土壤性质的影响及存在的相互作用,从而为不同树木种间关系的探索和该地区人工纯林的混交改造提供科学指导。结果表明:12种枯落叶单一分解均明显提高了土壤脲酶(54%—110%)、脱氢酶(85%—288%)和磷酸酶(81%—301%)活性以及有机质(29%—55%)和碱解N(12%—49%)含量,但对土壤速效P含量和CEC的影响存在较大差异。综合而言,樟子松分别与白桦、刺槐、白榆、柠条和落叶松枯落叶混合分解在对土壤性质的影响中存在相互促进作用,而分别与小叶杨、沙棘、紫穗槐、侧柏和辽东栎枯落叶混合分解在对土壤性质的影响中存在相互抑制作用;落叶松分别与刺槐、白桦、小叶杨和紫穗槐枯落叶混合分解在对土壤性质的影响中存在相互促进作用,而分别与柠条、侧柏、辽东栎、沙棘、油松和白榆枯落叶混合分解在对土壤性质的影响中存在相互抑制作用。

关键词:樟子松;落叶松;枯落叶;混合分解;森林土壤

Effects of mixing leaf litter from *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and *Larix principis-rupprechtii* with that of other trees on soil properties in the Loess Plateau

LI Qian¹, LIU Zengwen^{2,3,*}, MI Caihong²

1 College of Forestry, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

2 College of Resources and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

3 Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China

Abstract: *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and *Larix principis-rupprechtii* are fast growing tree species and are resistant to both cold and drought. Both species are commonly used for the afforesting of the Loess Plateau. As pure plantations of *P. sylvestris* var. *mongolica* and *L. principis-rupprechtii* age, soil fertility declines, tree growth slows, and natural regeneration ceases. These changes affect the productivity and sustainable management of local forests. Mixed-species plantations may be an effective strategy for overcoming these problems. Knowledge about mixed-species leaf litter decomposition and its effect on soil properties is important for evaluating interspecific relationships and compatibility in mixed forests. In this laboratory study, leaf litter from *P. sylvestris* var. *mongolica* or *L. principis-rupprechtii* was mixed with leaf litter from other tree species after grinding and then put into soil from an unvegetated area, incubated them to decompose for 120 days, after that to determinate the number of soil microbes, activities of soil enzymes and nutrient content of soil, to analyze the effects of leaf litter from different tree species decomposition on soil properties and the interaction (interactive promotion or inhibitory

基金项目:国家自然科学基金项目(31070630)

收稿日期:2011-06-08; 修订日期:2012-05-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zengwenliu2003@yahoo.com.cn

effect) between the litters decomposition. This laboratory study consisted of two parts. In the first part, leaf litter from 12 tree species (including *P. sylvestris* var. *mongolica* or *L. principis-rupprechtii*) was separately mixed into unvegetated soil to decompose. The results showed that single-species leaf litter increased urease activity by 54%—110%, dehydrogenase activity by 85%—288%, phosphatase activity by 81%—301%, soil organic matter by 29%—55%, and available N by 12%—49%. Single-species leaf litter had mixed effects on available P and cation exchange capacity (CEC). In the second part of the study, leaf litter from 10 or 11 tree species was separately mixed with leaf litter from either *P. sylvestris* var. *mongolica* or *L. principis-rupprechtii* and then added to the soil. Principal component analysis indicated that *P. sylvestris* var. *mongolica* leaf litter was mixed with that of *Betula platyphylla*, *Robinia pseudoacacia*, *Ulmus pumila*, *Caragana microphylla*, or *L. principis-rupprechtii* separately showed interactive promotion effects on soil, but *P. sylvestris* var. *mongolica* leaf litter was mixed with that of *Populus simonii*, *Hippophae rhamnoides*, *Amorpha fruticosa*, *Platycladus orientalis*, or *Quercus liaotungensis* separately showed interactive inhibitory effects. All the same, *L. principis-rupprechtii* leaf litter was mixed with that of *R. pseudoacacia*, *B. platyphylla*, *P. simonii*, or *A. fruticosa* separately showed interactive promotion effects on soil, whereas *L. principis-rupprechtii* leaf litter was mixed with that of *C. microphylla*, *P. orientalis*, *Q. liaotungensis*, *H. rhamnoides*, *Pinus tabulaeformis*, or *U. pumila* separately showed interactive inhibitory effects.

Key Words: *Pinus sylvestris* var. *mongolica*; *Larix principis-rupprechtii*; leaf litter; mixed litter decomposition; forest soil

在森林生态系统中,枯落物作为养分的基本载体,是物质和能量从植物到土壤的运转站,在维持土壤肥力、促进系统正常物质循环和养分平衡方面起着重要的作用^[1-3]。枯落物的分解,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^[4-5]。樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)和华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)因其抗旱、耐寒、耐瘠薄,根系发达的优点,成为黄土高原地区重要的造林树种,在防止土地沙化,保护当地生态环境中起着不可替代的作用。但近年来,在许多引种栽植这些针叶树种的人工纯林出现了林木早衰、更新困难、地力衰退和土壤退化等现象^[6-10],严重影响着当地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^[11-12]。所以,选择种间关系协调的树种来营造混交林是解决针叶人工纯林问题的有效途径,而研究不同树种枯落叶混合分解对土壤性质影响以及在对土壤性质影响中存在的相互作用,可以为林木种间关系的探索和科学营造混交林提供依据。因此,本文以黄土高原樟子松和落叶松为对象,通过室内将这两针叶树种分别与其他针阔乔灌木树种枯落叶混合,再与无林荒草地土壤进行分解培养,研究樟子松和落叶松与其他树种枯落叶混合分解在对土壤性质影响中存在的相互作用,从而为黄土高原樟子松和落叶松混交林树种选择和混交林经营提供指导。

1 材料与方法

1.1 供试材料

在黄土高原樟子松和华北落叶松以及其他针、阔叶乔灌木树种(如:油松 *Pinus tabulaeformis*、侧柏 *Platycladus orientalis*、小叶杨 *Populus simonii*、辽东栎 *Quercus liaotungensis*、白桦 *Betula platyphylla*、刺槐 *Robinia pseudoacacia*、白榆 *Ulmus pumila*、沙棘 *Hippophae rhamnoides*、柠条 *Caragana microphylla*、紫穗槐 *Amorpha fruticosa*)组成的人工纯林,于秋末冬初采集当年枯落叶,经过仔细挑拣(剔除病虫害叶、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陕西省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/cm³,有机质 24.09 g/kg, pH 值 7.8),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。

1.2 室内混合分解试验

首先将樟子松和落叶松分别与其他树种枯落叶按照 1:1 的干重比例混合,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 12 个树种枯落叶分别与无林荒草地土壤混合,进行单一分解培养,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(培养钵质量保持恒定)。连续培养 120 d,直到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到干净的磁盘里,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针。具体方法如下:

(1) 土壤微生物数量^[13] 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。

(2) 土壤酶活性指标测定^[14] 过氧化氢酶采用 KMnO_4 滴定法;脲酶采用苯酚钠-次氯酸钠比色法;蔗糖酶采用 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 滴定法;磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法(用 pH 值 10 硼酸缓冲液测定碱性磷酸酶);蛋白酶采用茚三酮比色法;多酚氧化酶采用碘量滴定法;脱氢酶采用三苯基四唑氯化物比色法。

(3) 土壤化学性质的测定^[15] 土壤 pH 值采用 PHS-2 型酸度计中和滴定法(水土比为 2.5:1);土壤有机质采用重铬酸钾容量法;碱解 N 采用扩散法;速效 P 采用 NaHCO_3 浸提钼锑抗比色法;速效 K 采用 NH_4Ac 浸提火焰光度法;土壤阳离子交换量(CEC) 采用 $\text{NH}_4\text{Cl}-\text{NH}_4\text{Ac}$ 交换法。

1.4 数据处理

樟子松和落叶松分别与其他树种枯落叶混合分解对土壤性质影响作用分析原理如下: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: $P_{AB} = aT_A + bT_B$,式中 A、B 代表不同树种的枯落叶; T_A 、 T_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^[16-17]。根据对枯落叶混合分解后土壤性质的实测值 T_{AB} 与理论预测值 P_{AB} ,按公式 $\Delta\% = 100 \times (T_{AB} - P_{AB}) / P_{AB}$ 可计算枯落叶混合分解对土壤性质的提高率($\Delta\%$)当实测值较预测值有明显提高时,表明 A 与 B 混合分解在对土壤性质的影响中存在相互促进作用;反之,则表明 A 与 B 混合分解在对土壤性质的影响中存在相互抑制作用^[18]。

在分析不同树种枯落叶混合分解在对土壤性质的影响中存在的相互作用时,由于指标多,对各指标进行单一分析很难说明其综合效应,所以采用主成分分析法。选取除细菌、真菌、放线菌和 pH 值以外的 13 个指标(用土壤微生物总量代替细菌、真菌和放线菌数量,土壤 pH 值的提高或降低不能表示对土壤性质的改善或恶化作用),将各个树种枯落叶混合分解后土壤性质测定值较预测值的提高率,用 SPSS 软件进行主成分分析,得到综合主成分函数和综合主成分值 $F^{[19]}$,当 F 为正时,判断不同枯落叶分解在对土壤性质的影响中存在相互促进作用,反之当 F 为负时则存在相互抑制作用。

土壤性质指标测定结果均采用 3 次重复(误差不超过 5%)的平均值,并应用 Excel2003 和 SPSS17.0 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类型的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 不同树种单一枯落叶分解对土壤性质的影响

将樟子松等 12 个树种的枯落叶单一与原无林荒草地土壤混合后进行分解,结果见表 1。由表可见,不同树种枯落叶单独分解后土壤脲酶(54.3%—109.8%)、脱氢酶(84.8%—287.6%)和磷酸酶(80.5%—300.5%)活性提高,有机质(29.1%—54.9%)和碱解 N(11.5%—49.4%)含量增加,且差异均达到显著水平($P<0.05$),其中柠条枯落叶分解对土壤脲酶、蛋白酶和碱解 N 的提高幅度最大。同时,这 12 种枯落叶单独分解后,土壤蔗糖酶、蛋白酶活性和速效 K 含量也有一定程度的提高。

此外,落叶松、白桦、沙棘、柠条和紫穗槐枯落叶单独分解后土壤微生物数量显著增加。落叶松、侧柏、沙棘枯落叶单独分解后土壤多酚氧化酶活性显著提高,其他则无明显变化。而白桦枯落叶单独分解后土壤过氧化氢酶活性有显著降低,其他差异不显著。同时,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 P 含量均有显著增加,而小叶杨、落叶松、侧柏、沙棘均显著减少。除小叶杨和辽东栎外,各个树种枯落叶单独分解均使土壤 CEC 显著减少。可见,不同树种枯落叶单独分解使大多数土壤生物化学性质得到改善,而对土壤速效 P 和 CEC 的影响差异较大。

表 1 不同树种单一枯落叶分解对土壤性质的影响

土壤性质 Character of soil	无林地 土壤 Unvegetated soil	不同树种单一枯落叶分解后土壤性质测定值(T_A) The value of soil properties after single leaf litter decomposition											
		樟子松	落叶松	油松	侧柏	小叶杨	刺槐	白桦	辽东栎	白榆	沙棘	柠条	紫穗槐
		<i>P. s. m.</i>	<i>L. p.</i>	<i>P. t.</i>	<i>P. o.</i>	<i>P. s.</i>	<i>R. p.</i>	<i>B. p.</i>	<i>Q. l.</i>	<i>U. p.</i>	<i>H. r.</i>	<i>C. m.</i>	<i>A. f.</i>
微生物 ^① /(10^8 cfu/g)	5.04d	10.31d	35.19bc	3.17d	5.07d	3.28d	3.77d	31.41c	6.20d	5.64d	47.99b	76.83a	74.67a
细菌 ^② /(10^8 cfu/g)	4.93d	10.07d	34.84bc	2.83d	5.00d	2.94d	3.15d	31.27c	5.88d	5.10d	47.85b	76.40a	74.09a
真菌 ^③ /(10^3 cfu/g)	6.30c	11.96c	3.57c	8.61c	17.84c	79.76c	15.74c	5.88c	1.47c	220.38b	1683.26a	7.14c	8.40c
放线菌 ^④ /(10^6 cfu/g)	10.91c	23.30c	35.26bc	33.58bc	7.56c	34.42bc	62.13a	14.06c	32.53bc	53.52ab	12.38c	43.24b	58.35ab
脲酶 ^⑤ /(mg/kg)	18.24d	29.99bc	33.18b	28.14c	38.09a	28.23c	32.51b	32.91b	32.15bc	32.96b	35.66ab	38.27a	33.45b
蔗糖酶 ^⑥ /(mL/g)	1.23e	1.23e	1.29b	1.28bc	1.30a	1.30a	1.29ab	1.29ab	1.27c	1.29ab	1.25d	1.28bc	1.26cd
过氧化氢酶 ^⑦ /(mL/g)	1.69ab	1.56b	1.44b	1.90a	1.72ab	1.80ab	1.51b	1.0c	1.90a	1.66b	1.65b	1.73ab	1.88ab
脱氢酶 ^⑧ /(mg/g)	0.21e	0.39d	0.52c	0.51c	0.40d	0.65bc	0.82a	0.50c	0.47c	0.75a	0.67b	0.55c	0.82a
磷酸酶 ^⑨ /(mg/kg)	0.82g	1.78e	1.67ef	2.78b	1.70ef	1.59ef	2.73b	1.48f	1.75ef	2.51c	2.08d	3.28a	2.94b
蛋白酶 ^⑩ /(mg/kg)	1.07e	1.10e	1.20c	1.08e	1.17cd	1.22bc	1.15d	1.15d	1.13de	1.24b	1.19cd	1.13de	1.29a
多酚氧化酶 ^⑪ /(mL/g)	6.06b	6.21b	7.77a	6.21b	7.84a	7.26ab	5.70b	5.99b	5.26b	6.72ab	7.37a	5.16b	6.21b
pH	7.80d	8.08b	7.52f	8.16b	8.94a	7.95c	7.74de	7.56e	7.66e	7.78d	7.71de	7.64e	8.18b
有机质 ^⑫ /(g/kg)	24.09d	35.04b	36.16ab	33.77b	36.14ab	31.53c	33.44bc	37.32a	35.62ab	34.47b	31.09c	31.87c	36.69ab
碱解 N ^⑬ /(mg/kg)	51.59e	57.79d	70.18b	59.81d	59.45d	65.53c	75.42a	59.45d	59.93d	69.70bc	73.99ab	77.44a	73.51ab
速效 P ^⑭ /(mg/kg)	6.73f	6.53f	4.18i	13.18c	5.55g	4.90h	16.05a	14.42b	7.38e	14.81b	4.64hi	10.25d	13.44c
速效 K ^⑮ /(mg/kg)	81.31c	145.34b	152.53ab	91.64c	139.53b	168.86ab	142.37b	159.92ab	125.40b	164.27ab	179.79a	150.34ab	170.49ab
CEC/(cmol/kg)	15.08a	13.01c	13.52c	12.68c	12.20cd	14.73ab	12.68c	14.20b	15.26a	12.52c	13.69c	12.68c	11.40d

①Microbes, ②Bacteria, ③Epiphyte, ④Actinomycetes, ⑤Urease, ⑥Saccharase, ⑦Catalase, ⑧Dehydrogenase, ⑨Phosphatase, ⑩Protease, ⑪Polyphenoloxidase, ⑫Organic matter, ⑬Alkalynic N, ⑭Available P, ⑮Available K.

P. s. m.: *Pinus sylvestris* var. *Mongolica*, *L. p.*: *Larix principis-rupprechtii*, *P. t.*: *Pinus tabulaeformis*, *P. o.*: *Platycladus orientalis*, *P. s.*: *Populus simonii*, *R. p.*: *Robinia pseudoacacia*, *B. p.*: *Betula platyphylla*, *Q. l.*: *Quercus liaotungensis*, *U. p.*: *Ulmus pumila*, *H. r.*: *Hippophae rhamnoides*, *C. m.*: *Caragana microphylla*, *A. f.*: *Amorpha fruticosa*;同行不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)

2.2 樟子松与其他树种枯落叶混合分解对土壤性质的影响

樟子松分别与落叶松等 10 个树种枯落叶混合分解后土壤性质的实测值 T_{AB} 较理论预测值 P_{AB} 的提高率($\Delta\%$)见表 2。由表 2 可见,樟子松分别与侧柏、刺槐和柠条枯落叶混合分解后土壤微生物数量较预测值明显增加,而与落叶松、小叶杨、白桦、辽东栎、白榆、沙棘、紫穗槐枯落叶混合分解后土壤微生物数量明显降低,说

明樟子松分别与侧柏等 3 个树种枯落叶混合分解在对土壤微生物的影响中存在相互促进作用,而分别与落叶松等 7 种枯落叶混合分解在对微生物的影响中存在相互抑制作用。

分析得出,樟子松分别与 10 种枯落叶混合分解在对土壤脲酶、蔗糖酶、蛋白酶和多酚氧化酶(除柠条 18.21% 和紫穗槐-15.79% 外)活性的影响中相互作用不明显。而樟子松分别与落叶松、侧柏、白桦和柠条枯落叶混合分解在对土壤过氧化氢酶活性的影响中,以及樟子松分别与落叶松、侧柏、刺槐、白桦、白榆、沙棘和紫穗槐枯落叶混合分解在对土壤脱氢酶活性的影响中均存在相互促进作用,其他作用不明显。樟子松分别与刺槐、辽东栎、白榆和紫穗槐在对土壤磷酸酶活性的影响中存在相互促进作用,而与沙棘枯落叶混合分解在对磷酸酶活性的影响中存在相互抑制作用。

樟子松与不同类型枯落叶混合分解在对土壤 pH 值、有机质和碱解氮(白桦 42.68% 除外)的影响中无明显相互作用。但樟子松分别与落叶松、刺槐、白榆枯落叶混合分解在对土壤速效 P 的影响中存在相互促进作用,而与白桦、柠条和紫穗槐枯落叶混合分解在对土壤速效 P 的影响中存在相互抑制作用。樟子松分别与刺槐和紫穗槐枯落叶混合分解在对土壤速效 K 的影响中存在相互促进作用,而与白桦枯落叶混合分解在对速效 K 的影响中则存在相互抑制作用。樟子松分别与落叶松、侧柏和白榆枯落叶混合分解在对土壤 CEC 的影响中存在相互促进作用,而与白桦枯落叶混合分解则存在相互抑制作用。

表 2 樟子松与其他树种枯落叶混合分解后土壤性质实测值(T)较预测值(P)的提高率 $\Delta\%$

Table 2 Increment ratio of the true value (T) compare to the predicted value (P) of soil properties after *Pinus sylvestris* var. *mongolica* with other species litter mixed decomposition (%)

土壤性质 Character of soil	与樟子松混合的枯落叶类型 The litter types of mixing with <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i>									
	落叶松 <i>L. p.</i>	侧柏 <i>P. o.</i>	小叶杨 <i>P. s.</i>	刺槐 <i>R. p.</i>	白桦 <i>B. p.</i>	辽东栎 <i>Q. l.</i>	白榆 <i>U. p.</i>	沙棘 <i>H. r.</i>	柠条 <i>C. m.</i>	紫穗槐 <i>A. f.</i>
微生物/(10^8 cfu/g)	-77.35	143.19	-30.26	454.07	-48.22	-53.88	-42.74	-34.09	203.36	-80.13
细菌/(10^8 cfu/g)	-79.16	147.91	-32.26	484.13	-49.24	-52.63	-45.50	-34.78	203.88	-81.05
真菌/(10^3 cfu/g)	-43.24	407.04	-80.32	-22.73	215.29	-71.88	-85.91	-52.95	2119.78	217.53
放线菌/(10^6 cfu/g)	61.29	-87.76	14.91	-11.06	64.04	-89.47	12.02	80.00	134.70	14.65
脲酶/(mg/kg)	-7.05	-8.99	-8.58	-2.16	14.24	-12.75	7.01	-1.99	4.75	8.73
蔗糖酶/(mL/g)	-2.90	-1.16	-1.11	-0.83	-1.44	2.68	6.10	1.13	6.99	0.02
过氧化氢酶/(mL/g)	30.96	15.26	0.99	8.39	37.86	5.26	0.67	0.99	21.81	5.78
脱氢酶/(mg/g)	20.58	37.68	-2.14	30.45	41.64	9.82	39.96	22.72	11.29	25.96
磷酸酶/(mg/kg)	11.26	-5.48	-8.97	52.57	5.76	22.20	28.06	-16.38	1.24	18.63
蛋白酶/(mg/kg)	-1.47	2.44	-5.67	-5.42	3.11	9.82	1.03	-1.93	-1.58	-10.42
多酚氧化酶/(mL/g)	-12.73	-11.63	-6.20	4.27	11.31	4.43	1.12	-9.09	18.21	-15.79
pH	4.15	-9.13	0.44	-0.97	-1.24	3.34	-0.80	2.13	-2.31	-3.67
有机质/(g/kg)	4.38	0.60	-1.28	8.98	3.67	-5.94	-0.69	-0.83	-2.47	-6.18
碱解 N/(mg/kg)	10.34	-3.05	-2.42	5.72	42.68	4.66	14.21	-1.54	-0.26	5.90
速效 P/(mg/kg)	152.06	-14.56	13.11	30.60	-42.63	-7.97	25.96	-6.42	-19.04	-55.48
速效 K/(mg/kg)	-4.41	11.18	8.36	21.65	-16.00	-3.23	12.89	13.18	4.27	15.58
CEC/(cmol/kg)	20.56	16.83	-1.33	6.52	-17.32	-11.45	22.45	-4.98	-2.55	-0.12
综合主成分值 F Principal component value F	0.027	-0.209	0.44	0.788	1.081	-0.197	0.538	-0.683	0.294	-0.634

将樟子松与其他树种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:

$$F=0.263F_1+0.209F_2+0.172F_3+0.126F_4+0.091F_5 \quad (1)$$

根据公式(1)得出樟子松与各个树种枯落叶混合分解对土壤性质影响的综合主成分值 F (表 2)。由此可见,综合而言,樟子松分别与白桦、刺槐、白榆、柠条和落叶松枯落叶混合分解在对土壤性质的影响中存在相互

促进作用,而与小叶杨、沙棘、紫穗槐、侧柏和辽东栎枯落叶混合分解在对土壤性质的影响中存在相互抑制作用。

2.3 落叶松与其他树种枯落叶混合分解对土壤性质的影响

落叶松与其他树种枯落叶混合分解后土壤性质的实测值较预测值的提高率($\Delta\%$)见表3,由表可见,落叶松除与刺槐枯落叶混合分解后土壤微生物数量明显增加外,分别与其他枯落叶混合分解后土壤微生物数量均明显降低,说明落叶松与不同树种枯落叶混合分解在对土壤微生物的影响中存在相互抑制作用。

同样,落叶松分别与小叶杨、刺槐和白桦枯落叶混合分解在对土壤脲酶活性的影响中存在相互促进作用,而与柠条枯落叶混合分解存在相互抑制作用。落叶松与不同树种枯落叶混合分解在对土壤蔗糖酶和蛋白酶活性的影响中无明显相互作用。落叶松与分别小叶杨、刺槐、白桦和紫穗槐在对土壤过氧化氢酶活性的影响中,且落叶松与大多树种(油松 17.38% 除外)枯落叶混合分解在对土壤脱氢酶活性的影响中,以及落叶松分别与侧柏、刺槐、辽东栎、白榆和紫穗槐在对土壤磷酸酶活性的影响中均存在相互促进作用,其他作用不明显。落叶松与刺槐枯落叶混合分解在对土壤多酚氧化酶活性的影响中存在相互促进作用,而分别与油松和侧柏枯落叶分解在对土壤多酚氧化酶的影响中存在相互抑制作用。

不同类型落叶松枯落叶混合分解后土壤 pH 值较预测值无明显变化。落叶松分别与小叶杨和白桦枯落叶混合分解在对土壤有机质的影响中,且落叶松与白榆枯落叶混合分解在对碱解 N 的影响中,以及落叶松分别与油松和沙棘枯落叶混合分解在对土壤速效 K 的影响中均存在相互促进作用,其他作用不明显。此外,落叶松分别与侧柏、小叶杨、辽东栎、沙棘、柠条和紫穗槐枯落叶分解在对土壤速效 P 的影响中存在相互促进作用,而与油松、刺槐和辽东栎存在相互抑制作用。落叶松与油松枯落叶分解在对土壤 CEC 的影响中存在相互抑制作用,其他无明显作用。

表3 落叶松与其他树种枯落叶混合分解后土壤性质实测值(T)较预测值(P)的提高率 $\Delta\%$

Table 3 Increment ratio of the true value (T) compare to the predicted value (P) of soil properties after *Larix principis-rupprechtii* with other species litter mixed decomposition (%)

土壤性质 Character of soil	与落叶松混合的枯落叶类型 The litter types of mixing with <i>Larix principis-rupprechtii</i>									
	油松 <i>P. t.</i>	侧柏 <i>P. o.</i>	小叶杨 <i>P. s.</i>	刺槐 <i>R. p.</i>	白桦 <i>B. p.</i>	辽东栎 <i>Q. l.</i>	白榆 <i>U. p.</i>	沙棘 <i>H. r.</i>	柠条 <i>C. m.</i>	紫穗槐 <i>A. f.</i>
微生物/(10^8 cfu/g)	-75.95	-94.28	-78.92	81.70	-53.17	-84.22	-83.03	-9.95	-75.43	-89.52
细菌/(10^8 cfu/g)	-79.5	-96.00	-81.56	83.43	-53.65	-85.15	-85.50	-10.66	-76.60	-90.44
真菌/(10^3 cfu/g)	451.72	115.69	-78.34	8.70	153.33	-16.67	-95.69	-76.11	103.92	107.02
放线菌/(10^6 cfu/g)	118.29	65.69	63.86	14.22	11.49	-28.17	28.13	114.98	91.44	17.49
脲酶/(mg/kg)	8.07	8.40	16.63	42.96	19.88	2.69	8.78	-9.22	-18.20	4.73
蔗糖酶/(mL/g)	2.28	-1.18	3.55	2.10	-0.29	2.03	-5.47	2.44	-6.02	2.33
过氧化氢酶/(mL/g)	-14.74	9.85	18.34	22.22	61.09	-7.88	-1.72	-14.42	6.56	15.26
脱氢酶/(mg/g)	-17.38	30.12	18.05	41.16	45.99	10.92	12.88	21.21	31.38	26.32
磷酸酶/(mg/kg)	-8.59	23.22	10.98	33.10	0.34	22.55	23.76	3.37	3.54	51.76
蛋白酶/(mg/kg)	-2.65	-9.85	-9.37	6.24	4.22	0.30	-0.80	-12.10	-11.19	0.72
多酚氧化酶/(mL/g)	-22.08	-18.60	-10.63	18.60	6.07	-6.96	2.76	7.91	-10.11	14.81
pH	3.27	-3.44	4.51	1.57	3.54	12.87	1.48	-1.29	2.84	-3.46
有机质/(g/kg)	-1.81	1.81	19.47	3.27	22.48	0.37	12.29	-0.42	11.93	5.57
碱解 N/(mg/kg)	-3.76	-0.18	-0.79	4.09	2.57	7.69	20.10	-12.98	-4.92	7.96
速效 P/(mg/kg)	-41.29	150.60	71.02	-66.36	4.55	19.73	-29.17	253.31	107.04	49.56
速效 K/(mg/kg)	23.75	-3.43	13.47	12.44	-2.31	-1.54	-6.48	17.25	-2.14	-0.13
CEC/(cmol/kg)	-15.3	9.12	-6.68	0.61	-1.25	2.35	1.24	4.42	7.10	5.77
综合主成分值 F Principal component value F	-0.371	-0.719	0.193	1.772	1.095	-0.415	-0.354	-0.414	-0.931	0.143

将落叶松与其他树种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:

$$F=0.322F_1+0.239F_2+0.168F_3+0.139F_4 \quad (2)$$

根据公式(2)得出落叶松与各个树种枯落叶混合分解对土壤性质影响的综合主成分值(表3)。由此可见,综合而言,落叶松分别与刺槐、白桦、小叶杨和紫穗槐枯落叶混合分解在对土壤性质的影响中存在相互促进作用,而与柠条、侧柏、辽东栎、沙棘、油松和白榆枯落叶混合分解在对土壤性质的影响中存在相互抑制作用。

3 讨论

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混合培养后,土壤的生物化学性质会发生重大改变,而这种混合分解效应并非单一枯落叶对土壤性质作用的简单叠加,而是经过复杂变化过程产生了新的促进或抑制作用。张晓鹏等^[20]指出枯落叶对土壤可溶性有机碳的影响效应包括促进、抑制和没有显著影响,这种效应与枯落叶质量及养分释放过程有关。本文结果显示樟子松分别与其他树种枯落叶混合分解在对土壤有机质的影响中无明显作用;落叶松分别与小叶杨和白桦枯落叶混合分解在对土壤有机质的影响中存在相互促进作用,但与其他枯落叶作用不明显。枯落物是土壤有机质主要来源,但添加枯落物也能促进土壤有机质分解。因此,添加枯落物并不总是增加土壤有机质,而是否增加土壤有机质取决于枯落物分解和土壤碳矿化平衡^[20-21]。

本研究表明,樟子松分别与白桦、刺槐、白榆、柠条和落叶松枯落叶混合分解在对土壤性质的影响中存在相互促进作用,而樟子松分别与小叶杨、沙棘、紫穗槐、侧柏和辽东栎枯落叶混合分解在对土壤性质影响中存在相互抑制作用。出现这种现象可能是因为当不同的枯落叶混合在一起时,由于各自叶片所含营养成分、含量的互补性,为不同营养需求的微生物创造了有利的环境,使得微生物数量、活性和群落结构更加完善,而良好的微生物系统又加速了凋落物的分解^[22],并将养分含量和各种营养元素释放出来,促进了土壤性质的改善,反之则出现相反的效果。在现有研究领域关于樟子松和其他树种枯落叶混合分解的研究少见,但有研究表明,樟子松与刺槐、白榆等阔叶树种进行混交后土壤肥力改善明显^[23-24];樟落混交林土壤含水率高,涵养水源的能力强,从而改善土壤环境^[25],这些与本文结果相近。此外,焦树仁^[26,7]等指出杨树能改善樟子松林腐植酸的含量与组成,有利于土壤肥力恢复。但本文得出樟子松与小叶杨枯落叶混合分解在对土壤性质的影响中存在相互抑制作用,可能是因为本文从樟杨枯落叶混合分解及土壤性质相互作用出发,且研究地域与杨树类型不同造成的。

落叶松与不同树种枯落叶混合分解研究结果表明,落叶松分别与刺槐、白桦、小叶杨和紫穗槐枯落叶混合分解在对土壤性质的影响中存在相互促进作用,而分别与柠条、侧柏、辽东栎、沙棘、油松和白榆枯落叶混合分解在对土壤性质的影响中存在相互抑制作用。刺槐与紫穗槐都是固氮树种,针叶与固氮树种枯落叶混合后,其分解和养分释放速度加快,增加土壤中养分库容量,为有效养分提供充足的来源^[9]。于洋等^[27]研究表明,落叶松白桦混交林的土壤养分质量分数和微生物数量均高于其他落叶松纯林和落叶松油松混交林。陈立新等^[8]指出,诱导阔叶树种进入落叶松林分后,枯落物的组成结构发生变化,枯落物层年平均分解率逐年提高,加快了枯落物中营养元素的释放和归还,是土壤肥力得以提高的前提和条件。因此本文建议对落叶松人工纯林进行人工诱导阔叶树种(刺槐、白桦、小叶杨和紫穗槐)进入林分,改善枯落物的组成结构,促进营养物质的良性循环,避免落叶松人工林的地力衰退。

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,这虽然与现实中枯落叶的自然分解状况有所差异,但并不影响研究结果的重要参考价值。此外,由于枯落叶分解对土壤性质的影响及树种间的相互作用可能还会因林地环境(包括气候、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,进一步为黄土高原樟子松和落叶松混交林的改造提供树种选择的合理依据。

References:

- [1] Lin B, Liu Q, Wu Y, Pang X Y, He H. Effect of forest litters on soil physical and chemical properties in subalpine coniferous forests of western Sichuan. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2003, 9(4): 346-351.
- [2] Polyakova O, Billor N. Impact of deciduous tree species on litterfall quality, decomposition rates and nutrient circulation in pine stands. *Forest Ecology and Management*, 2007, 253(1/3): 11-18.
- [3] Sayed W F, El-Sharouny H M, Zahran H H, Ali W M. Composition of *Casuarina* leaf litter and its influence on *Frankia-Casuarina* symbiosis in soil. *Folia Microbiologica*, 2002, 47(4): 429-434.
- [4] 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.
- [5] Hobbie S E. Interactions between litter lignin and soil nitrogen availability during leaf litter decomposition in a Hawaiian Montane forest. *Ecosystems*, 2000, 3(5): 484-494.
- [6] Kang H Z, Zhu J J, Xu M L. Silviculture of Mongolian pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) plantations on sandy land. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(7): 799-806.
- [7] Zen D H, You W Z, Fan Z P, Liu M G. Natural regeneration of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation on sandy land. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(1): 1-5.
- [8] Chen L X, Chen X W, Duan W B. Larch litter and soil fertility. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998, 9(6): 581-586.
- [9] Yang K, Zhu J J, Zhang J X, Yan Q L. Seasonal dynamics of soil microbial biomass C and N in two larch plantation forests with different ages in Northeastern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(10): 5500-5507.
- [10] Liu Z W, Duan E J, Liuzhuo M J, Feng S Y. Soil polarization under pure stands of different tree varieties in semi-arid hilly areas of the Loess Plateau. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(6): 1110-1120.
- [11] Jiang S N, Zhai M P, Jia L M. Advances on the research of interspecific nutrient interaction in mixed forest ecosystems. *Journal of Beijing Forestry University*, 2001, 23(2): 72-77.
- [12] Miyamoto T, Hiura T. Decomposition and nitrogen release from the foliage litter of fir (*Abies sachalinensis*) and oak (*Quercus crispula*) under different forest canopies in Hokkaido, Japan. *Ecological Research*, 2008, 23(4): 673-680.
- [13] Cheng L J, Xue Q H. *Microbiology Experiment Technology*. Beijing: The World Publish Press Company, 2000.
- [14] Guan S Y. *Soil Enzyme and Its Research Methods*. Beijing: Agriculture Press, 1986.
- [15] Bao S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis*. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [16] Liu Z W, Gao W J, Pan K W, Zhang L P, Du H X, Gao X B. Influences of soil mixing of different forests on the biochemical characteristics and litter decomposition on upper reach of Minjiang River. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(10): 4149-4156.
- [17] Liu Z W, Gao W J, Pan K W, Zhang L P, Du H X, Gao X B. Effects of soil mix-incubation of 4 species artificial forests with litters on the biochemical characteristics. *Journal of Northwest A and F University: Natural Science Edition*, 2007, 35(7): 48-54.
- [18] Liu Z W, Duan E J, Fu G, Cui F F. Effects of fumus soil mixing in typical planted forests in Qinling Mountains of Shaanxi province. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(3): 101-105.
- [19] Lin H M, Zhang W L. The relationship between principal component analysis and factor analysis and SPSS software—to discuss with comrade Liu Yumei, Lu Wendai etc. *Statistical Research*, 2005, (3): 65-69.
- [20] Zhang X P, Pan K W, Wang J C, Chen Q B. Effects of decomposition of mixed leaf litters of the *Castanopsis platyacantha-Schima sinensis* forest on soil organic carbon. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(6): 1582-1593.
- [21] Mungai N W, Motavalli P P. Litter quality effects on soil carbon and nitrogen dynamics in temperate alley cropping systems. *Applied Soil Ecology*, 2006, 31(1/2): 32-42.
- [22] Yang Y H, Zheng L, Duan Y Z. Leaf litter decomposition and nutrient release of different stand types in a shelter belt in Xinjiang arid area. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(6): 1389-1394.
- [23] Wu X G, Song X D, Wang E L, Li Y H, Tai X W, Liu C Q, Hao C Y. Thoughts on structure regulating and renewal of *Pinus sylvestris* var. *Mongolica* plantation in sandy area. *Protection Forest Science and Technology*, 2002, 12(4): 82-83.
- [24] Su F L, Liu M G, Han H. Differences in sand soil between different forest types of *Pinus sylvestris* var. *mongolica*. *Journal of Northeast Forestry University*, 2006, 34(6): 26-28.
- [25] Zou L, Tang Q M, Wang Y. Ecological distribution of soil microorganism in pure and mixed forests of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and *Larix gmelini*. *Journal of Northeast Forestry University*, 2010, 38(11): 63-64, 79-79.

- [26] Jiao S R. Report on the causes of the early decline of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* shelterbelt and its preventative and control measures in Zhang gutai of Liaoning province. *Scientia Silvae Sinicae*, 2001, 37(2): 131-138.
- [27] Yu Y, Wang H Y, Ding G D, Ren L N, Sun J, Fan M R. Quantitative characteristics of soil microbe and its relationship with soil properties in *Larix principis-rupprechtii* plantations. *Journal of Northeast Forestry University*, 2011, 39(3): 76-80.

参考文献:

- [1] 林波, 刘庆, 吴彦, 庞学勇, 何海. 川西亚高山针叶林凋落物对土壤理化性质的影响. *应用与环境生物学报*, 2003, 9(4): 346-351.
- [6] 康宏樟, 朱教君, 许美玲. 沙地樟子松人工林营林技术研究进展. *生态学杂志*, 2005, 24(7): 799-806.
- [7] 曾德慧, 尤文忠, 范志平, 刘明国. 樟子松人工固沙林天然更新特征. *应用生态学报*, 2002, 13(1): 1-5.
- [8] 陈立新, 陈祥伟, 段文标. 落叶松人工林凋落物与土壤肥力变化的研究. *应用生态学报*, 1998, 9(6): 581-586.
- [9] 杨凯, 朱教君, 张金鑫, 闫巧玲. 不同林龄落叶松人工林土壤微生物生物量碳氮的季节变化. *生态学报*, 2009, 29(10): 5500-5507.
- [10] 刘增文, 段而军, 刘卓玛姐, 冯顺煜. 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): 1110-1120.
- [11] 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.
- [13] 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.
- [14] 关松荫. 土壤酶及其研究方法. 北京: 农业出版社, 1986.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [16] 刘增文, 高文俊, 潘开文, 张丽萍, 杜红霞, 高祥斌. 岷江上游不同树种林地客土混合对土壤生物化学性质和枯落叶分解的影响. *生态学报*, 2007, 27(10): 4149-4156.
- [17] 刘增文, 高文俊, 潘开文, 张丽萍, 杜红霞, 高祥斌. 4种人工纯林土壤及其凋落叶混合培养对土壤生物化学性质的影响. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2007, 35(7): 48-54.
- [18] 刘增文, 段而军, 付刚, 崔芳芳. 陕西秦岭山区典型人工林地腐殖质层土壤客土混合效应研究. *水土保持学报*, 2008, 22(3): 101-105.
- [19] 林海明, 张文霖. 主成分分析与因子分析的异同和 SPSS 软件——兼与刘玉玫、卢纹岱等同志商榷. *统计研究*, 2005, (3): 65-69.
- [20] 张晓鹏, 潘开文, 王进闯, 陈其兵. 栲-木荷林凋落叶混合分解对土壤有机碳的影响. *生态学报*, 2011, 31(6): 1582-1593.
- [22] 杨玉海, 郑路, 段永照. 干旱区人工防护林带不同林分凋落叶分解及养分释放. *应用生态学报*, 2011, 22(6): 1389-1394.
- [23] 吴锈钢, 宋小东, 王恩利, 李玉航, 邵宪武, 刘长全, 郝春英. 沙地樟子松人工林结构调整及更新改造技术措施. *防护林科技*, 2002, 12(4): 82-83.
- [24] 苏芳莉, 刘明国, 韩辉. 樟子松不同林型沙地土壤肥力的差异. *东北林业大学学报* 2006, 34(6): 26-28.
- [25] 邹莉, 唐庆明, 王轶. 落叶松、樟子松纯林及混交林土壤微生物的群落分布特征. *东北林业大学学报*, 2010, 38(11): 63-64, 79-79.
- [26] 焦树仁. 辽宁省章古台樟子松固沙林提早衰弱的原因与防治措施. *林业科学*, 2001, 37(2): 131-138.
- [27] 于洋, 王海燕, 丁国栋, 任丽娜, 孙嘉, 范敏锐. 华北落叶松人工林土壤微生物数量特征及其与土壤性质的关系. *东北林业大学学报*, 2011, 39(3): 76-80.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 19 October, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Assessment of monitoring methods for population abundance of Amur tiger in Northeast China	5943
..... ZHANG Changzhi, ZHANG Minghai, JIANG Guangshun (5943)	
Changes of residents nitrogen consumption and its environmental loading from food in Xiamen	5953
..... YU Yang, CUI Shenghui, ZHAO Shengnan, et al (5953)	
Analysis of the meiobenthic community in the Pearl River Estuary in summer	5962
..... YUAN Qiaojun, MIAO Suying, LI Hengxiang, et al (5962)	
Community characteristics of phytoplankton in the coastal area of Leizhou Peninsula and their relationships with primary environmental factors in the summer of 2010	5972
..... GONG Yuyan, ZHANG Caixue, SUN Xingli, et al (5972)	
Morphological differences in statolith and beak between two spawning stocks for <i>Illex argentinus</i>	5986
..... FANG Zhou, CHEN Xinjun, LU Huajie, et al (5986)	
Relationships between coastal meadow distribution and soil characteristics in the Yellow River Delta	5998
..... TAN Xiangfeng, DU Ning, GE Xiuli, et al (5998)	
Variation analysis about net primary productivity of the wetland in Panjin region	6006
..... WANG Liwen, WEI Yaxing (6006)	
Mobilization of potassium from Soils by <i>rhizobium phaseoli</i>	6016
..... ZHANG Liang, HUANG Jianguo, HAN Yuzhu, et al (6016)	
Autotoxicity of aqueous extracts from plant, soil of peanut and identification of autotoxic substances in rhizospheric soil	6023
..... HUANG Yuqian, HAN Lisi, YANG Jinfeng, et al (6023)	
Effects of shading on the photosynthetic characteristics and anatomical structure of <i>Trollius chinensis</i> Bunge	6033
..... LV Jinhui, WANG Xuan, FENG Yanmeng, et al (6033)	
Short-term effects of fire disturbance on greenhouse gases emission from sedge and shrubs forested wetland in Lesser Xing'an Mountains, Northeast China	6044
..... GU Han, MU Changcheng, ZHANG Bowen, et al (6044)	
Plant species diversity and community classification in the southern Gurbantunggut Desert	6056
..... ZHANG Rong, LIU Tong (6056)	
Effects of mixing leaf litter from <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> and <i>Larix principis-rupprechtii</i> with that of other trees on soil properties in the Loess Plateau	6067
..... LI Qian, LIU Zengwen, MI Caihong (6067)	
Effects of long-term intensive management on soil ammonia oxidizing archaea community under <i>Phyllostachys praecox</i> stands	6076
..... QIN Hua, LIU Borong, XU Qiufang, et al (6076)	
Hydrogen peroxide participates symbiosis between AM fungi and tobacco plants	6085
..... LIU Hongqing, CHE Yongmei, ZHAO Fanggui, et al (6085)	
Relationships between dominant arbor species distribution and environmental factors of shelter forests in the Beijing mountain area	6092
..... SHAO Fangli, YU Xinxiao, ZHENG Jiangkun, et al (6092)	
Analysis of rhizosphere microbial community structure of weak and strong allelopathic rice varieties under dry paddy field	6100
..... XIONG Jun, LIN Huifeng, LI Zhenfang, et al (6100)	
Root distribution in the different forest types and their relationship to soil properties	6110
..... HUANG Lin, WANG Feng, ZHOU Lijiang, et al (6110)	
Effect of silicon application on antioxidant system, biomass and yield of soybean under ozone pollution	6120
..... ZHAN Lijie, GUO Liyue, NING Tangyuan, et al (6120)	
Effect of landfill leachate irrigation on soil physiochemical properties and the growth of two herbaceous flowers	6128
..... WANG Shuqin, LAI Juan, ZHAO Xiulan (6128)	
Nitrous oxide emissions affected by tillage measures in winter wheat under a rice-wheat rotation system	6138
..... ZHENG Jianchu, ZHANG Yuefang, CHEN Liugen, et al (6138)	
Effects of different fertilizers on soil enzyme activities and CO ₂ emission in dry-land of maize	6147
..... ZHANG Junli, GAO Mingbo, WEN Xiaoxia, et al (6147)	
The response of agro-ecosystem productivity to climatic fluctuations in the farming-pastoral ecotone of northern China: a case study in Zhunger County	6155
..... SUN Tesheng, LI Bo, ZHANG Xinshi (6155)	
The relationship between energy consumption and carbon emission with economic growth in Liaoning Province	6168
..... KANG Wenxing, YAO Lihui, HE Jienan, et al (6168)	
Spatial distribution characteristics of potential fire behavior in Fenglin Nature Reserve based on FARSITE Model	6176
..... WU Zhiwei, HE Hongshi, LIANG Yu, et al (6176)	
Chill conservation of natural enemies in maize field with different post-crop habitats	6187
..... TIAN Yaojia, LIANG Guangwen, ZENG Ling, et al (6187)	
Effect of population of <i>Kerria yunnanensis</i> on diversity of ground-dwelling ant	6195
..... LU Zhixing, CHEN Youqing, LI Qiao, et al (6195)	
Response of <i>Parnassius apollo</i> population and vertical distribution to climate warming	6203
..... YU Fei, WANG Han, WANG Shaokun, et al (6203)	
Review and Monograph	
Integrated assessment of marine aquaculture ecosystem health: framework and method	6210
..... PU Xinming, FU Mingzhu, WANG Zongling, et al (6210)	
Seagrass meadow ecosystem and its restoration: a review	6223
..... PAN Jinhua, JIANG Xin, SAI Shan, et al (6223)	
Nutri-toxicological effects of cyanobacteria on fish	6233
..... DONG Guifang, XIE Shouqi, ZHU Xiaoming, et al (6233)	
Effect of environmental stress on non-structural carbohydrates reserves and transfer in seagrasses	6242
..... JIANG Zhijian, HUANG Xiaoping, ZHANG Jingping (6242)	
Advances in ecological immunology	6251
..... XU Deli, WANG Dehua (6251)	
Scientific Note	
The causes of spatial variability of surface soil organic matter in different forests in depressions between karst hills	6259
..... SONG Min, PENG Wanxia, ZOU Dongsheng, et al (6259)	
Characteristics of seed rain of <i>Haloxylon ammodendron</i> in southeastern edge of Junggar Basin	6270
..... LÜ Chaoyan, ZHANG Ximing, LIU Guojun, et al (6270)	

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 19 期 (2012 年 10 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 19 (October, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元