

人工调控措施对马尾松凋落叶分解速率的影响

陆晓辉^{1,3}, 丁贵杰^{1,2*}, 陆德辉¹

(1. 贵州大学 贵州省森林资源与环境研究中心, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州大学 林学院, 贵州 贵阳 550025;
3. 贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550001)

摘 要:基于马尾松凋落叶难于分解的特性,选择菌剂、表面活性剂、不同碳氮营养液和有机肥料 4 种人工调控因素,采用正交试验设计($L_9 3^4$),在马尾松林下开展凋落叶分解定位试验,分析不同调控因素对凋落叶分解速率的影响。结果表明,‘菌剂’对凋落叶失重率和凋落叶分解系数均产生了显著性影响,腐解剂 2 的作用效果较好;‘有机肥料’对凋落叶分解系数影响显著,鸡粪表现较好;‘表面活性剂’可显著影响分解初期的凋落叶失重率,但作用效果有待进一步研究;‘不同形态氮的碳氮营养液’对凋落叶分解影响不显著。根据凋落物特性,选择适宜的多种调控因素联合作用是促进马尾松凋落叶分解的有效途径。

关键词:菌剂;表面活性剂;碳氮营养液;有机肥料;凋落叶分解;马尾松

中图分类号:S718.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2017)01-0025-05

Impact of Different Control Measures on Needle Litter Decomposition Rate under Pure *Pinus massoniana* Forest

LU Xiao-hui^{1,3}, DING Gui-jie^{1,2*}, LU De-hui¹

(1. Institute for Forest Resources & Environment of Guizhou, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China;
2. College of Forestry, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China;
3. School of Geographic and Environmental Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550001, China)

Abstract: *Pinus massoniana* needle litter decomposes slowly. Improving nutrient return rate and maintaining the stability of soil fertility have been key issues in the sustainable forest management. A needle litter decomposition regulation test ($L_9 3^4$) was carried out in *P. massoniana* forest with 4 kinds of regulation measures (applying microbial inoculants, surface active agent, carbon and different forms nitrogen nutrient solution and organic fertilizer). Impacts of different factors on the needle decomposition rates were analyzed. The results implied that ‘microbial inoculants’ exhibited significant impacts on the decomposition rate constant, in which the No. 2 microorganism was the best. ‘Organic fertilizer’ also demonstrated significant impacts on the decomposition rate constant, in which chicken manure showed good performance. ‘Surface active agent’ affected the decomposition rate between 0 and 60 days, and the functions needed to be further studied. The impact of ‘carbon&nitrogen nutrient solution’ was not significant. It was the effective way by adopting integrated measures to accelerate the needle decomposition rate.

Key words: microbial inoculant; surface active agent; carbon and nitrogen nutrient solution; organic fertilizer; leaf litter decomposition; *Pinus massoniana*

收稿日期:2016-03-27 修回日期:2016-05-22
基金项目:国家科技支撑课题(2015BAD09B0102);贵州省科技重大专项(黔科合重大专项字[2012]6001号);贵州省林业重大专项(黔林科合[2010]重大03号)。
作者简介:陆晓辉,女,在读博士,研究方向:森林生态。E-mail:lu_xiaohui@126.com
*通信作者:丁贵杰,男,教授,研究方向:森林培育。E-mail:gjdnggzu@126.com

森林凋落物对森林生态系统物质循环、能量流动和信息传递功能都有重要的作用^[1]。其分解的快慢不仅制约林木的养分供应状况,而且是土壤有机质输入的主要来源^[2]。凋落物分解主要受气候、凋落物性质、微生物和土壤动物的影响^[3]。基于对凋落物分解过程和影响因素的认识,一些研究采用不同的人工调控措施干预凋落物分解,如添加氮、磷进行养分调控^[4-7];接种不同类型的真菌或复合菌剂影响凋落物分解^[8-11];将具有不同基质质量的凋落物混合,改变凋落物的分解进程^[12-13]。以上研究多采用单一调控方法,而采用多因素综合调控的研究尚鲜有报道。

马尾松(*Pinus massoniana*)是我国亚热带地区重要的造林树种之一,具有分布广、速生、丰产、综合利用程度高等特点。马尾松针叶多为厚革质,角质层发达,含有较多的木质素、纤维素、单宁等物质,阻碍了微生物对物质的分解,也不利于淋溶作用和土壤动物的机械破坏^[14],所以松针分解缓慢。本研究针对马尾松凋落叶难于分解的特性,选择不同的调控因素(菌剂、表面活性剂、碳氮营养液和有机肥料),在马尾松林下开展凋落叶分解定位试验,分析不同调控措施对凋落叶分解速率的影响,旨在探寻加速马尾松凋落叶分解的有效措施和方法,为马尾松人工林的可持续经营和管理提供技术支持。

1 试验地概况

试验地位于贵州大学南校区松林坡马尾松林内(26°34'N,106°42'E,海拔 1 110 m),属于亚热带季

风湿润气候,年均气温 15℃,年均降水量 1 178.1 mm,年均日照 1 354 h,无霜期 270 d 左右。土壤为第四纪红色黏土发育的黄壤。

试验地林龄 50 a,林分密度 600 株·hm⁻²,平均胸径 42.3 cm,平均高 31.6 m。灌木层主要有油茶(*Camellia oleifera*)、绒毛山胡椒(*Lindera nacusua*)、南方荚蒾(*Viburnum fordiae*)、海桐(*Pittosporum tobira*)、杜鹃(*Rhododendron simsii*)、中型冬青(*Ilex intermedia*)等,草本主要有红盖鳞毛蕨(*Dryopteris erythrosora*)、寒莓(*Rubus buergeri*)、苔草属某种(*Carex* sp.)、小果葡萄(*Vitis balansana*)、三穗薹草(*Carex tristachya*)、沿阶草(*Ophiopogon bodinieri*)等。

2 材料与方法

2.1 试验材料

试验所用松针为当年凋落,2012 年 12 月收集于贵州龙里林场同一片马尾松中龄林。将收集的原状松针带回实验室,剔除树枝、树皮、灌木叶片等杂物,保留外形完整未分解状态的松针。将松针用自来水快速冲洗,沥水后置于 50℃烘箱内烘干,密封保存备用。

2.2 试验设计及方法

针对影响和限制马尾松凋落叶分解的主要因素,采用 L₉(3⁴)正交设计,选择菌剂(A)、表面活性剂(B)、碳氮营养液(C)和有机肥料(D)4 个调控因素,每个因素设 3 个水平,正交试验设计见表 1。

表 1 凋落叶分解正交试验设计

Table 1 Orthogonal test design of needle litter decomposition

试验号	菌剂(A)	表面活性剂(B)	碳氮营养液(C)	有机肥料(D)	试验组合
1	1(菌 1)	1(未处理)	1(NaNO ₃)	1(未添加)	A ₁ B ₁ C ₁ D ₁
2	1(菌 1)	2(Tween 80)	2(尿素)	2(鸡粪)	A ₁ B ₂ C ₂ D ₂
3	1(菌 1)	3(OP-10)	3(NH ₄ Cl)	3(油枯)	A ₁ B ₃ C ₃ D ₃
4	2(腐解剂 1)	1(未处理)	2(尿素)	3(油枯)	A ₂ B ₁ C ₂ D ₃
5	2(腐解剂 1)	2(Tween 80)	3(NH ₄ Cl)	1(未添加)	A ₂ B ₂ C ₃ D ₁
6	2(腐解剂 1)	3(OP-10)	1(NaNO ₃)	2(鸡粪)	A ₂ B ₃ C ₁ D ₂
7	3(腐解剂 2)	1(未处理)	3(NH ₄ Cl)	2(鸡粪)	A ₃ B ₁ C ₃ D ₂
8	3(腐解剂 2)	2(Tween 80)	1(NaNO ₃)	3(油枯)	A ₃ B ₂ C ₁ D ₃
9	3(腐解剂 2)	3(OP-10)	2(尿素)	1(未添加)	A ₃ B ₃ C ₂ D ₁

4 种调控因素的选择原因、基本情况及处理计量如下:微生物是凋落物分解的主要参与者,本研究接种不同种类的功能型菌剂(菌 1 为淡紫紫霉 *Purpureocillium lilacinum*),分离纯化于马尾松林下枯枝落叶层;腐解剂 1 为广州微元生物科技有限公司生产的‘粗纤维降解菌’,腐解剂 2 为北京正农农业科技有限公司出品的‘有机栽培基质发酵菌种’,以

提高分解者的数量和质量。菌 1 按松针重 100%添加,腐解剂 1 和腐解剂 2 按松针重 50%添加。松针角质层发达,表面活性剂具有软化蜡质的功效,采用表面活性剂(Tween 80 和 OP-10)预处理凋落叶,以期破坏其蜡质层;处理方法是 将 2 种表面活性剂配制成浓度为 4 g·L⁻¹的溶液,将松针浸泡其中,24 h 后取出,用自来水反复快速冲洗,沥水后置于 50℃

烘箱内烘干,密封保存备用。为保障添加菌剂的生长繁殖,每月每袋喷施不同形态氮的碳氮营养液 30 mL,同时也可比较不同形态氮的作用差异;碳氮营养液以溶液中葡萄糖浓度 20 g · L⁻¹ 为标准,选择 NaNO₃、尿素和 NH₄Cl 3 种 N 素,与葡萄糖配制成 C/N 为 20 的碳氮营养液。松针 C/N 高(C/N 为 85.37),添加鸡粪(C/N 为 6.25)和油枯(C/N 为 7.13)2 种有机肥料,以降低松针 C/N 比;2 种有机肥料均购买自贵阳市花鸟市场,按有机肥料和松针混合 C/N 为 20 添加。

选取规格 25 cm×15 cm、孔径 1 mm 分解袋,装入 20 g 烘干松针,平铺开,扎好袋口。按试验设计安排试验,分别将各个试验组 12 个分解袋集中平铺于试验地半分解层上,相邻分解袋间隔 2~3 cm,处理间隔 1 m 以上。同时设置对照(CK),不添加任何物料,每月在分解袋上喷洒 30 mL 的水。每月采样 1 次,每次每个试验组收集 2 袋,共收集 6 次。采集后立即用自封袋封装,带回实验室,去除袋外杂质和袋内添加物料,剩余松针置于 50℃ 烘箱中烘干,称重,备用。

2.3 数据处理与统计分析

采用差量法计算凋落物失重率^[15]:

表 2 不同试验组凋落叶失重率

Table 2 Litter mass loss rate on different trial groups

时间	试验组									
	CK	1	2	3	4	5	6	7	8	9
30	15.80	22.25	14.80	13.35	17.65	11.95	13.35	19.10	17.95	15.05
60	13.55	12.35	10.35	18.35	8.80	1.35	7.00	6.95	6.65	9.95
90	5.35	6.15	10.65	0.50	4.50	10.95	0.55	1.60	3.60	3.85
120	1.25	2.55	3.50	5.15	7.25	7.15	10.45	13.75	9.90	5.95
150	7.75	0.20	3.35	0.50	1.15	1.65	5.70	7.10	4.85	6.60
180	0.35	3.30	1.30	0.45	0.70	4.85	7.80	4.30	0.40	6.00
合计	44.05	46.80	43.95	38.30	40.05	37.90	44.85	52.80	43.35	47.40

对各试验组不同分解时段凋落叶失重率进行正交试验设计方差分析和直观分析(表 3),结果如下:分解 30 d,A(菌剂)和 B(表面活性剂)对凋落叶失重率影响显著;因失重率越大越好,故‘菌剂’的第 3 水平(腐解剂 2)和‘表面活性剂’的第 1 水平(未处理)是该阶段的优水平。分解 60 d,‘菌剂’和‘表面活性剂’仍对凋落叶分解产生显著影响,二者分别以第 1 水平(菌 1)和第 3 水平(OP-10)水平最佳。分解 90 d,4 个调控因素对凋落叶失重率影响均不显著。分解 120 d 和 150 d,‘菌剂’对凋落叶分解影响显著,优水平为第 3 水平(腐解剂 2)。分解 180 d,4 个因素对失重率的影响均不显著。

$$L_i/\% = 100 \times (M_{i-1} - M_i) / M_0 \tag{1}$$

式中, L_i 为凋落物失重率, M_0 为凋落物初始重(g), M_i 为不同时间点采样的瞬时残留量(g)。

凋落物分解模型及分解系数^[16],采用改进的 Olson 经典指数模型:

$$y = ae^{-kt} \tag{2}$$

式中, y 为凋落物残留率(%); k 为分解系数(g · g⁻¹ · a⁻¹); t 为时间(a); a 为拟合参数; e 为自然对数底。

运用 Excel2010 进行正交试验设计的方差分析和直观分析,探讨不同人工调控措施对马尾松凋落叶失重率和分解系数的影响。

3 结果与分析

3.1 凋落叶失重率分析

比较试验组马尾松凋落叶失重率差异(表 2)可知,各组(除第 3 组外)凋落叶的最大失重率均出现在分解的第 30 天,之后各处理失重率总体呈下降趋势,过程中略有起伏。分解 180 d 后,各组的累积失重率大小顺序为:7>9>1>6>CK>2>8>4>3>5。其中,第 7、9、1、6 组的凋落叶累积失重率均高于 CK;处理 7 的累积失重率最大 52.8%,较 CK 增加 19.86%。

3.2 凋落叶分解模型及分解系数估算

采用 Olson 经典分解模型,拟合不同试验组凋落叶的分解过程(表 4),分解方程的相关系数 R 均达到显著或极显著水平。各组分解系数大小顺序为:7>9>6>2>8>CK>5>1>4>3。50% 分解时间上,第 1、2、7、9 组用时低于 CK;95% 分解时间上,则为第 2、6、7、8、9 组用时低于 CK;半分解和 95% 分解用时最短的均为第 7 组,分别为 0.46 a 和 2.14 a,所用时间比 CK 分别缩短了 0.12 a 和 0.88 a。

各组凋落叶分解系数正交试验设计方差分析和直观分析见表 5。‘菌剂’和‘有机肥料’对凋落叶分解系数影响显著;直观分析,‘菌剂’和‘有机肥料’分别以第 3 水平(腐解剂 2)和第 2 水平(鸡粪)为最佳。

表 3 凋落叶失重率方差分析与直观分析
Table 3 Variance analysis and direct analysis of
needle litter mass loss rate

时间/d	统计值	因素				优 水平
		A	B	C	D	
30	<i>F</i> 值	20.36 *	73.17 *	18.62	1.00	A ₃ B ₁
	<i>K</i> ₁	50.40	59.00	53.55	49.25	
	<i>K</i> ₂	42.95	44.70	47.50	47.25	
	<i>K</i> ₃	52.10	41.75	44.40	48.95	
60	<i>F</i> 值	57.28 *	27.08 *	1.00	12.08	A ₁ B ₃
	<i>K</i> ₁	41.05	28.10	26.00	23.65	
	<i>K</i> ₂	17.15	18.35	29.10	24.30	
	<i>K</i> ₃	23.55	35.30	26.65	33.80	
90	<i>F</i> 值	1.00	5.37	1.01	2.00	—
	<i>K</i> ₁	17.30	12.25	10.30	20.95	
	<i>K</i> ₂	16.00	25.20	19.00	12.80	
	<i>K</i> ₃	9.05	4.90	13.05	8.60	
120	<i>F</i> 值	39.10 *	1.00	9.70	15.61	A ₃
	<i>K</i> ₁	11.20	23.55	22.90	15.65	
	<i>K</i> ₂	24.85	20.55	16.70	27.70	
	<i>K</i> ₃	29.60	21.55	26.05	22.30	
150	<i>F</i> 值	57.13 *	5.11	1.00	5.33	A ₃
	<i>K</i> ₁	4.05	8.45	10.75	8.45	
	<i>K</i> ₂	8.50	9.85	11.10	16.15	
	<i>K</i> ₃	18.55	12.80	9.25	6.50	
180	<i>F</i> 值	2.69	4.13	1.00	5.33	—
	<i>K</i> ₁	5.05	8.30	11.50	25.55	
	<i>K</i> ₂	13.35	6.55	19.40	13.40	
	<i>K</i> ₃	22.10	25.65	9.60	1.55	

注： $F_{0.05}(2,2)=19.00$ ， $F_{0.01}(2,2)=99.00$ ； K_i 表示水平号为 i 的对应试验结果之和。表 5 同。

表 4 不同试验组凋落物 Olson 指数模型及分解参数

Table 4 Olson equation and coefficients of needle litter
decomposition on different trial groups

试验号	分解方程	相关系数	显著性 <i>P</i>	分解系数 <i>k</i>	50% 分解 /a	95% 分解 /a
CK	$y=86.059e^{-0.94t}$	0.963	0.022	0.940	0.58	3.03
1	$y=77.283e^{-0.813t}$	0.926	0.008	0.813	0.54	3.37
2	$y=88.019e^{-1.007t}$	0.959	0.002	1.007	0.56	2.85
3	$y=83.205e^{-0.706t}$	0.859	0.028	0.706	0.72	3.98
4	$y=84.574e^{-0.777t}$	0.958	0.003	0.777	0.68	3.64
5	$y=96.033e^{-0.891t}$	0.976	0.001	0.891	0.73	3.32
6	$y=96.967e^{-1.06t}$	0.978	0.001	1.060	0.62	2.80
7	$y=93.486e^{-1.361t}$	0.980	0.001	1.361	0.46	2.15
8	$y=88.596e^{-0.968t}$	0.979	0.001	0.968	0.59	2.97
9	$y=92.49e^{-1.101t}$	0.996	0.000	1.101	0.56	2.65

注：显著性水平 $P=0.05$ 。

4 结论与讨论

微生物将复杂有机物转化为简单无机物的过程是凋落物分解过程的重要环节^[3]，自然条件下分解

表 5 不同试验组凋落叶分解系数方差分析与直观分析
Table 5 Variance analysis and direct analysis of decomposition
constant on different control measures

指标	统计值	因素				优 水平
		A	B	C	D	
分解系数	<i>F</i> 值	75.00 *	1.00	1.00	81.50 *	A ₃ D ₂
<i>K</i> ₁	2.53	2.95	2.84	2.81		
<i>K</i> ₂	2.73	2.87	2.89	3.43		
<i>K</i> ₃	3.43	2.87	2.96	2.45		

者的数量和种类决定着枯落物的分解速率^[17]。研究表明,人为添加具有一定腐解功能的微生物能够促进凋落物分解,如:速腐增效剂处理显著提高了新疆杨凋落叶分解率^[10];添加微生物菌剂加快了堆腐凋落物的腐熟速度,提高了堆腐凋落物养分浓度^[11]。本研究中‘菌剂’对马尾松凋落叶失重率和分解系数均影响显著,再次证明添加功能型微生物是影响凋落物分解的有效途径之一。由于不同菌剂具有不同的微生物种类、代谢性能和环境适应性等,所以其对凋落叶分解的作用效果存在差异。本研究中,‘腐解剂 2’是影响凋落叶失重率第 30、120、150 天的优水平,同时也是影响分解系数的优水平,说明其对马尾松凋落叶分解作用表现良好,并且启动快,持续时间长;‘菌 1’是影响凋落叶失重率第 60 天的优水平,在分解 30 d 内表现只是稍逊于腐解剂 2,说明‘菌 1’也明显促进了分解前期马尾松凋落叶的分解。综上,凋落叶分解调控中,选择适宜的复合菌剂将表现出更好的环境适应性和更强的分解能力。在分解的第 90 天和 180 天‘菌剂’对凋落叶失重率的影响不显著。这可能与气候有关,分解 90 d 时在 7—8 月间,气温较高;分解 180 d 时在 10—11 月间,气温逐渐降低,降雨逐渐减少,2 个时段微生物活动受到温度和湿度的抑制,影响分解。也说明采用菌剂调控凋落物分解,需考虑气候因素的影响。

植物叶面覆盖着角质膜,它们由角质聚合物和表皮蜡质组成^[18]。叶片较厚,角质类物质多,不利于降雨淋溶、土壤动物的机械破碎,也不利于菌丝的入侵^[19]。表面活性剂具有软化蜡质的功效,使植物茎叶表面的第一道屏障得以不同程度的改变^[20]。本研究尝试使用表面活性剂破坏马尾松凋落叶表面蜡质,结果表明‘表面活性剂’在分解 0~60 d 对凋落叶失重率影响显著,第 30 天优水平为‘未处理’,第 60 天优水平为‘OP-10’。说明调控因素‘表面活性剂’可以影响分解初期凋落叶的分解速率,但是促进分解,还是阻碍分解,仍有待进一步研究。

向养分含量相对不足的凋落物中添加外源营养物质,可提高其初始化学质量,有效补充微生物生长

繁殖的营养需求,理论上将有助于凋落物分解。外源物质添加多集中于氮和磷,其对分解速率的影响因凋落物种类、环境条件和处理方式等不同表现各异。如,外加适量氮源能提高杉木凋落物底物质量,促进凋落物分解和养分释放^[21];外加氮促进了北美白桦凋落物分解^[22];氮处理促进了马尾松松针的分解^[23];磷添加可以加快凋落物 C 的释放^[24]。本研究中,尝试使用富含有机物质和各种营养元素的有机肥料调节马尾松凋落叶化学质量,‘有机肥料’对凋落叶分解系数影响显著,‘鸡粪’的作用效果较好,说明有机肥料同以往添加的外源营养物质一样,能够改善凋落叶质量,影响其分解速度。

以往多采用单因素调控措施影响凋落物分解,本研究是多个因素共同作用凋落物分解的尝试。研究发现,第 7 试验组累积失重率(52.8%)、分解系数(1.361)、半分解和 95%分解用时(0.46、2.15 a)等参数均明显优于 CK 和其他调控组,这是因为该试验组包含了‘腐解剂 2’和‘鸡粪’2 个显著影响凋落叶分解速率调控优水平。一方面‘鸡粪’的添加弥补了凋落叶养分的亏缺,提高了凋落叶化学质量,能够满足微生物生长的繁殖营养需求;另一方面‘腐解剂 2’的加入丰富了有效分解者的种类和数量,二者综合作用更好地促进了凋落叶分解。说明根据凋落物特性,选择多种调控手段协同作用是加速马尾松林下凋落物分解转化的有效途径。

综上所述,不同人工调控措施对马尾松凋落叶分解速率的影响存在差异性。适宜的功能型复合菌剂对马尾松凋落叶分解起到了积极的促进作用,是重要的人工调控措施,使用时应考虑作用时效和气候条件的影响;有机肥料可以调节凋落物化学质量,进而影响凋落物分解;表面活性剂可影响分解初期的分解速率,作用效果有待深入研究;碳氮营养液的添加是菌剂施用的前提,不同形态氮的碳氮营养液对凋落叶分解的影响差异不显著。根据凋落物特性,选择适宜的多因素综合作用更有利于促进马尾松凋落叶的分解。以上研究结果可为人为干预马尾松林地凋落物分解提供一定的技术支持。

参考文献:

[1] 郑路,卢立华.我国森林地表凋落物现存量及养分特征[J].西北林学院学报,2012,27(1):63-69.
ZHENG L,LU L H. Standing crop and nutrient characteristics of forest floor litter in China [J]. Journal of Northwest Forestry University,2012,27(1):63-69. (in Chinese)

[2] 张超,闫文德,郑威,等.凋落物对樟树和马尾松混交林土壤呼吸的影响[J].西北林学院学报,2013,28(3):22-27.
ZHANG C,YAN W D,ZHENG W,et al. Influence of litter on

soil respiration in camphor tree-masson pine mixed forest [J]. Journal of Northwest Forestry University,2013,28(3):22-27. (in Chinese)

[3] 郭剑芬,杨玉盛,陈光水,等.森林凋落物分解研究进展[J].林业科学,2006,42(4):93-100.
GUO J F,YANG Y S,CHEN G S,et al. A review on litter decomposition in forest ecosystem [J]. Scientia Silvae Sinicae,2006,42(4):93-100. (in Chinese)

[4] 美丽班·马木提.氮磷添加对天童木荷凋落叶分解的影响[D].上海:华东师范大学,2014.

[5] 于雯超,宋晓龙,修伟明,等.氮素添加对贝加尔针茅草原凋落物分解的影响[J].草业学报,2014,23(5):49-60.
YU W C,SONG X L,XIU W M,et al. Effects of additional nitrogen on litter decomposition in *Stipa baicalensis* grassland [J]. Acta Prataculturae Sinica,2014,23(5):49-60. (in Chinese)

[6] 弓晓静.中亚热带四种树种凋落叶分解对碳氮磷调控的响应[D].南昌:南昌大学,2011.

[7] ZHU X M,CHEN H,ZHANG W,et al. Effects of nitrogen addition on litter decomposition and nutrient release in two tropical plantations with N₂-fixing vs. non-N₂-fixing tree species [J]. Plant Soil,2016,399(1):61-74.

[8] 陈晏,戴传超,王兴祥,等.施加内生真菌拟茎点霉(*Phomopsis* sp.)对茅苍术凋落物降解及土壤降解酶活性的影响[J].土壤学报,2010,47(3):537-544.
CHEN Y,DAI C C,WANG X X,et al. Effects of endophytic fungus (*Phomopsis* sp.) on decomposition of plant (*Atractylodes lancea* (Thunb) DC) litter and activity of degrading enzymes in soil[J]. Acta Pedologica Sinica,2010,47(3):537-544. (in Chinese)

[9] 郝杰杰,宋福强,田兴军,等.几株半知菌对马尾松落叶的分解-木质纤维素酶的活性动力学[J].林业科学,2006,42(11):69-75.
HAO J J,SONG F Q,TIAN X J,et al. Decomposition of *Pinus massoniana* needle driven by deuteromycetes dynamics of lignocellulolytic enzymes [J]. Scientia Silvae Sinicae,2006,42(11):69-75. (in Chinese)

[10] 王雷涛,郑路,尹林克,等.覆土及微生物菌剂对荒漠区人工林凋落叶分解及养分动态的影响[J].干旱区研究,2010,27(5):726-733.
WANG L T,ZHENG L,YIN L K,et al. Effects of covering soil and microbial inoculum on decomposition and available nutrients of plantation leaf litters in desert region [J]. Arid Zone Research,2010,27(5):726-733. (in Chinese)

[11] 郑路,尹林克,姜逢清,等.微生物菌剂对干旱区城市防护绿地凋落物分解的影响[J].应用生态学报,2010,21(9):2267-2272.
ZHENG L,YIN L K,JIANG F Q,et al. Effects of microbial agents on litter decomposition in urban protective greenbelts of arid zone[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2010,21(9):2267-2272. (in Chinese)

[12] SHI L,FAN S H,JIANG Z H,et al. Mixed leaf litter decomposition and N, P release with a focus on *Phyllostachys edulis* (Carrière) J. Houz. forest in subtropical southeastern China[J]. Acta Societatis Botanicorum Poloniae,2015,84(2):207-214.

水文特性[J]. 水土保持通报,2014,34(34):65-69,75.

YU X W, SONG X S, KAN F F, *et al.* Litter hydrological characteristics of typical forest communities in Liaoheyuan Nature Reserve [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014,34(34):65-69,75. (in Chinese)

[14] 魏强,凌雷,张广忠,等. 甘肃兴隆山主要森林类型凋落物累积量及持水特性[J]. 应用生态学报,2011,22(10):2589-2598.

WEI Q, LING L, ZHANG G Z, *et al.* Water-holding characteristics and accumulation amount of the litters under main forest types in Xinglong Mountain of Gansu,northwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2011,22(10):2589-2598. (in Chinese)

[15] 王忠诚,华华,王淮永,等. 八大公山国家级自然保护区林地水源涵养功能研究[J]. 中南林业科技大学学报,2014,34(2):95-101.

WANG Z C, HUA H, WANG H Y, *et al.* Research on forest-land water conservation function of Badagong Mountain nature reserve [J]. Journal of Central South University of Forest & Technology,2014,34(2):95-101. (in Chinese)

[16] 谭长强,彭玉华,申文辉,等. 珠江中上游都安地区不同森林类型林下水源涵养能力比较[J]. 广西林业科学,2015,44(4):346-351.

[17] 孟玉珂,刘小林,袁一超,等. 小陇山林区主要林分凋落物水文效应[J]. 西北林学院学报,2012,27(6):48-51.

MENG Y K, LIU X L, YUAN Y C, *et al.* Hydrological effect of litter layers of the main forest types in Xiaolongshan forest region [J]. Journal of Northwest Forestry University,2012,27(6):48-51. (in Chinese)

[18] 常雅军,陈琦,曹靖,等. 甘肃小陇山不同针叶林凋落物量、养分储量及持水特性[J]. 生态学报,2011,31(9):2392-2400.

CHANG Y J, CHEN Q, CAO J, *et al.* Litter amount and its nutrient storage and water holding characteristics under different coniferous forest types in Xiaolong Mountain, Gansu Province [J]. Acta Ecologica Sinica,2011,31(9):2392-2400. (in Chinese)

[19] 杨光,戴丽,李小英. 昆明市松华坝水源区不同森林类型的水源涵养功能研究[J]. 环境科学导报,2014,33(2):25-30.

YANG G, DAI L, LI X Y. Research on water conservation in different forest types in Kunming Songhuaba eater resource protection area [J]. Environmental Science Survey,2014,33(2):25-30. (in Chinese)

[20] 孟庆旭,张胜利,李侃,等. 秦岭华山松林间伐强度对其水源涵养功能的影响[J]. 西北林学院学报,2016,31(2):1-7.

MENG Q X, ZHANG S L, LI K, *et al.* Effect of intensity on water conservation capacity of *Pinus armandii* forest in Qinling Mountains [J]. Journal of Northwest Forestry University,2016,31(2):1-7. (in Chinese)

(上接第 29 页)

[13] ZHANG X, LIU Z, ZHU B, *et al.* Impacts of mixed litter decomposition from *Robinia pseudoacacia* and other tree species on C loss and nutrient release in the Loess Plateau of China [J]. Journal of Forestry Research,2016,27(3):525-532.

[14] 王意锟,方升佐,曲宏辉,等. 森林凋落物分解的影响因素[J]. 林业科技开发,2012,26(1):5-9.

[15] 邓长春. 高山林线交错带高山杜鹃凋落物分解研究[J]. 生态学报,2015,35(6):1769-1778.

DENG C C. Litter decomposition of *Rhododendron lapponicum* in alpine timberline ecotone[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015,35(6):1769-1778. (in Chinese)

[16] OLSON J S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems[J]. Ecology,1963,44(2):322-331.

[17] GESSNER M O, SWAN C M, DANG C K, *et al.* Diversity meets decomposition[J]. Trends in Ecology and Evolution, 2010,25(6):372-380.

[18] HOLLOWAY P J. Chemistry and morphology of plant epicuticular waxes[M]. London:Academic Press,1982:1- 32.

[19] 严海元,辜夕容,申鸿. 森林凋落物的微生物分解[J]. 生态学杂志,2010,29(9):1827-1835.

YAN H Y, GU X R, SHEN H. Microbial decomposition of forest litter;a review[J]. Chinese Journal of Ecology,2010,29(9):1827-1835. (in Chinese)

[20] 李晓莉,岳彩鹏,王冰,等. 表面活性剂对大豆和花生茎叶吸硼量的影响[J]. 贵州农业科学,2011,39(7):107-111.

LI X L, YU C P, WANG B, *et al.* Effect of surfactant on boron absorption of soybean and peanut plants[J]. Guizhou Agricultural Sciences,2011,39(7):107-111. (in Chinese)

[21] 项文化,闫文德,田大伦,等. 外加氮源及与林下植物叶混合对杉木林针叶分解和养分释放的影响[J]. 林业科学,2005,41(6):1-6.

XIANG W H, YAN W D, TIAN D L, *et al.* Effects of nitrogen addition and mixture with understorey plant leaves on decomposition and Nitrogen releases of Chinese fir needle litter [J]. Scientia Silvae Sinicae,2005,41(6):1-6. (in Chinese)

[22] HOBBI E S E, GOUGH L. Litter decomposition in moist acidic and non-acidic tundra with different glacial histories [J]. Oecologia,2004,140(1):113-124.

[23] 莫江明,薛璟花,方运霆. 鼎湖山主要森林植物凋落物分解及其对 N 沉降的响应[J]. 生态学报,2004,24(7):1413-1420.

MO J M, XUE J H, FANG Y T. Litter decomposition and its responses to simulated N deposition for the major plants of Dinghushan forest in subtropical China [J]. Acta Ecologica Sinica,2004,24(7):1413-1420. (in Chinese)

[24] QUALLS R G, RICHARDSON C J. Phosphorus enrichment affects litter decomposition, immobilization, and soil microbial phosphorus in wetland mesocosms [J]. Soil Science Society of America Journal,2000,64(2):799- 80.