

黄河三角洲地区刺槐白蜡人工混交林枯落物分解的林龄差异

敬如岩, 黄雅丽, 丁新景, 陈博杰, 马风云

(山东农业大学林学院, 山东农业大学生态与环境重点实验室, 山东 泰安 271018)

摘要: 为研究黄河三角洲不同林龄刺槐白蜡混交林枯落物分解, 选取 7, 12, 21, 30 年生的刺槐白蜡人工混交林, 采用分解袋法研究了为期 2 年的枯落物分解。结果表明: (1) 混交林枯落物分解系数为 0.44~0.60, 大小顺序为 30 a>21 a>12 a>7 a; 半分解周期为 1.15~1.58 年, 分解周期为 4.96~6.83 年, 两者大小顺序为 7 a>12 a>21 a>30 a。 (2) 枯落物分解速率与初始 N 含量显著正相关, 与初始 C/N 值显著负相关; 4 个林龄混交林枯落物初始 N 含量之间差异显著, 12, 21 年生混交林枯落物初始 C/N 值差异不显著, 但它们与 7, 30 年生混交林枯落物初始 C/N 值差异显著 ($P<0.05$)。 (3) 枯落物分解速率与土壤有机质含量呈显著正相关, 与土壤碱解氮含量呈显著正相关; 4 个林龄混交林土壤有机质、碱解氮含量差异显著 ($P<0.05$)。 综上, 随着林龄的增加, 枯落物初始 N 含量升高, 初始 C/N 值降低, 混交林枯落物分解速度加快。

关键词: 黄河三角洲; 林龄; 刺槐; 白蜡; 混交林; 枯落物分解; 土壤理化性质

中图分类号: Q948.1; S792.27; S792.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2017)06-0333-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2017.06.052

Difference of Litter Decomposition in *Robinia pseudocacia* and *Fraxinus velutina* Mixed Forests with Different Ages in Yellow River Delta

JING Ruyan, HUANG Yali, DING Xinjing, CHEN Bojie, MA Fengyun

(Key Laboratory of Ecology and Environment, Forestry College, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018)

Abstract: In order to study litter decomposition in *Robinia pseudoacacia* and *Fraxinus velutina* mixed forests with different ages in the Yellow River Delta, we selected 7 a, 12 a, 21 a and 30 a mixed forests to investigate litter decomposition characteristics by litter bag technique during two years. The results showed as following: (1) The decomposition coefficients of all mixed forests ranged from 0.44 to 0.60, and it followed the order of 30 a>21 a>12 a>7 a; the half decomposition periods were 1.15~1.58 years and the decomposition periods were 4.96~6.83 years, and they followed the order of 7 a>12 a>21 a>30 a; (2) Litter decomposition rate was significantly positively correlated with nitrogen content of litter, but negatively correlated with C/N ratio; there were significant differences in nitrogen content of litter among four mixed forests, and there was no significant difference in C/N ratio of litter between 12 and 21-year-old mixed forests, but the difference in this parameter between 7 and 30-year-old mixed forest was significant ($P<0.05$); (3) Decomposition rate of litter was significantly positively correlated with soil organic matter and soil alkaline hydrolyzable nitrogen; there were significant differences in soil organic matter and alkaline hydrolyzable nitrogen among four mixed forests ($P<0.05$). These results suggested that with the increasing of forest age, the nitrogen content of litter increased, the C/N ratio decreased, and the litter decomposition rate accelerated.

Keywords: Yellow River Delta; age; *Robinia pseudoacacia*; *Fraxinus velutina*; mixed forest; litter decomposition; soil physicochemical properties

森林枯落物是生态系统养分归还的主要形式^[1], 在维持土壤肥力、促进养分平衡方面发挥着重要作用^[2]。枯落物分解是森林系统重要的生态过程, 是物质周转与能量流动的关键环节, 受环境因子、枯落物性质及土壤生物等因素的综合调控^[3-4]。生态系统中植物所

吸收的养分, 90%以上的氮、磷和 60%以上的矿质元素来自枯落物分解^[5]。由此可见, 枯落物使植物与土壤养分循环的“纽带”, 枯落物的快速分解可以迅速改良土壤, 从而为植物提供正常生长所需要的营养成分^[6]。

树木年龄是林分构成的重要指标, 对枯落物分

收稿日期: 2017-05-16

资助项目: 世界银行贷款项目“黄河三角洲滨海盐碱地生态造林模型研究”(SEAP-KY-2); 国家自然科学基金项目“黄河三角洲天然湿地稳定性研究”(30970499)

第一作者: 敬如岩(1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事植被恢复与生态重建研究。E-mail: 773185382@qq.com

通信作者: 马风云(1965—), 男, 博士, 副教授, 主要从事生态恢复和重建研究。E-mail: sdmfy@sdau.edu.cn

解、产量、基质质量及养分特征等方面有重要影响。葛晓改等^[7]研究发现不同林龄马尾松枯落物养分释放快慢与 C、C/N 比、C/P 比、木质素/N 比紧密相关,且随林龄增加,枯落物分解变慢,向土壤输送养分速率降低;张慧等^[8]研究表明,随着日本落叶松人工林年龄增加,枯落物分解加快;不同林龄油松人工林土壤与枯落物 C、N、P 含量均随林龄增加而升高,表明土壤与枯落物有着密切关系^[9]。

黄河三角洲地区为黄河泥沙沉积形成的冲积平原,是目前世界上造陆最快的河口三角洲^[10-11]。该地区土壤盐碱含量高,不利于植物的生长。为了改善当地生态环境,20 世纪 80 年代营建了很多人工混交林,以刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、绒毛白蜡(*Fraxinus velutina*)等耐盐碱树种为主^[10]。混交林具有防风固沙、保持水土、改良环境、防止土地盐碱化等重要作用^[11]。目前已经对黄河三角洲混交林进行了多方面的研究,但不同林龄混交林枯落物分解特性研究较少。本文对黄河三角洲 4 个林龄的刺槐白蜡混交林

枯落物进行了为期 24 个月的试验,研究该地区刺槐白蜡人工混交林枯落物分解的林龄差异,为该地区盐碱化治理和人工林建设提供一些理论依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于山东省东营市东北部河口区孤岛镇(118°39′—119°8′E,37°47′—37°84′N),该区气候四季分明,属暖温带季风性气候,年均气温 12.1℃,最高气温在 7 月,最低气温在 1 月,≥10℃的积温约 4 200℃;年均降水量 640 mm,降雨多集中在夏季;年均潜在蒸发量 1 942.6 mm,春季蒸发量占全年的 51.7%;年光照 2 600~2 800 h,无霜期 142~201 d^[10-12]。土壤以盐化潮土和滨海盐土为主,上层为现代新成土母质;下层为海相沉积盐渍母质,土壤盐分组成以氯化物为主,占可溶性盐总量的 80%以上^[10-11]。研究区内混交林为行状刺槐白蜡混交林,一行刺槐,一行白蜡,4 个林龄刺槐白蜡混交林分别在 2008,2003,1994,1985 年人工种植。林分基本情况见表 1。

表 1 林分基本情况

林分	树种	林龄/ a	树高/ m	胸径/ cm	株行距/ m×m	郁闭度	主要林下草本植物
CB(7)	绒毛白蜡	7	6.01	7.03	3×3	0.60	芦苇(<i>Phragmites australis</i>)、白茅(<i>Imperata cylindrical</i>)、苦麦菜(<i>Lxeris chinense</i>)、碱蓬(<i>Suaeda heteroptera kitagawa</i>)为主
	刺槐	7	6.67	6.89			
CB(12)	绒毛白蜡	12	10.34	9.21	3×3	0.75	白茅(<i>Imperata cylindrical</i>)、苦麦菜(<i>Lxeris chinense</i>)、茜草(<i>Rubia cordi folia</i>)、碱蓬(<i>Suaeda heteroptera kitagawa</i>)为主
	刺槐	12	9.61	9.65			
CB(21)	绒毛白蜡	21	12.25	11.36	3×3	0.85	鹅绒藤(<i>Cynanchum chinense</i>)、苦麦菜(<i>Lxeris chinense</i>)、茜草(<i>Rubia cordi folia</i>)、碱蓬(<i>Suaeda heteroptera kitagawa</i>)为主
	刺槐	21	12.84	10.97			
CB(30)	绒毛白蜡	30	15.12	16.25	3×3	0.80	芦苇(<i>Phragmites australis</i>)、碱蓬(<i>Suaeda heteroptera kitagawa</i>)、苦麦菜(<i>Lxeris chinense</i>)、茵陈蒿(<i>Artemisia capillaries</i>)为主
	刺槐	30	14.65	14.06			

注:CB(7)、CB(12)、CB(21)、CB(30)指 7,12,21,30 年生刺槐白蜡混交林。下同。

1.2 研究方法

1.2.1 枯落物的采集 枯落物研究采用分解袋法^[13]。2014 年 11 月初在研究地收集 7,12,21,30 年生刺槐白蜡混交林的枯落物带回实验室,于 80℃烘箱烘干至恒重。以枯落物原有组成比例称取 10 g 放入网袋中(网眼直径 0.5 mm×0.5 mm,规格 20 cm×20 cm)。11 月初在 4 个试验地中各设 3 个标准地(标准地大小为 10 m×10 m),每个标准地放置 36 个枯落物袋,4 个试验地共 12 个标准地、432 个枯落物袋。随机均匀摆放枯落物袋,摆放时清除林地上层枯落物,使之与腐殖质层充分接触,并用草皮钉固定。自 2014 年 11 月放置起,2015 年 1 月、3 月、5 月、7 月、9 月、11 月,2016 年 1 月、3 月、5 月、7 月、9 月、11 月的月初在每个标准地随机取回 3 个枯落物袋,清除枯落物袋表面的杂物,测定不同林龄刺槐白蜡混交林的枯落物的干质量,用于计算枯落物的分解速率。

1.2.2 枯落物初始化学成份测定 将 2014 年 11 月

采集的枯落物烘干后,用粉碎机粉碎后,一部分用于枯落物初始化学成分的测定:C 含量采用重铬酸钾氧化—外加加热法测定;N 含量采用凯氏定氮法测定;P 含量采用氢氧化钠熔融—钼锑抗比色法测定;K 含量采用氢氧化钠熔融—火焰光度计法测定;木质素和纤维素含量采用硫酸法^[14]测定。以上枯落物样品均 3 次重复,结果取其平均值。

1.2.3 土壤样品指标测定 2014 年 11 月初采集 4 个林龄混交林 0—20 cm 土层土壤,用于土壤样品的指标测定。土壤理化性质:pH 值采用电位法(水:土=5:1)测定;土壤总孔隙度采用环刀法测定;有机质含量采用重铬酸钾法测定;全氮含量采用半微量凯氏定氮法测定;全磷含量采用酸溶—钼锑抗比色法测定;碱解氮含量采用碱解扩散法测定;速效磷含量采用氟化铵盐酸浸提—钼锑抗比色法^[15-16]测定。各试验均 3 次重复,结果取其平均值。

1.2.4 计算方法 混交林枯落物干质量损失率

(Lr)计算公式为:

$$Lr=\frac{M_0-M_t}{M_0}\times 100\%$$

式中: M_0 为混交林初始枯落物干质量(g); M_t 为分解第 t 月时枯落物剩余的干质量(g)^[17]。

利用 Olson^[18] 指数衰减模型描述混交林枯落物的分解速率:

$$\frac{M_t}{M_0}=ae^{-kt}$$

式中: a 为修正参数; t 为混交林枯落物分解时间(年); k 为混交林枯落物的分解系数,其值越大表明枯落物分解越快^[19]。

1.2.5 统计分析 利用 SPSS 21.0 系统软件对试验数据进行单因素方差分析(one-way ANOVA),以 Duncan 法检测差异显著性;运用简单相关分析,研究各成分间的相关关系。使用 Excel 软件绘制图表,数据的变异性可以用标准偏差(SD)来反应。

2 结果与分析

2.1 不同林龄混交林的枯落物分解动态

由图 1 可看出,枯落物干质量损失率在前 12 个月较高,7,12,21,30 年生混交林分别为 33.9%,39.4%,43.1%,49.7%;在后 12 个月较低,7,12,21,30 年生混交林分别为 23.2%,20.3%,21.7%,17.6%;前 12 个月干质量损失率分别为后 12 个月的 1.46,1.94,1.98,2.82 倍。经过 24 个月,7,12,21,30 年生混交林枯落物干质量损失率为 57.1%,59.7%,64.8%,67.3%。

由表 2 可知,4 个林龄混交林枯落物分解系数为 0.44~0.60,拟合系数为 0.97~0.99。30 年生混交林枯落物分解速率最大,半分解周期 $t_{0.5}$ 和分解周期 $t_{0.95}$ 最短,分别为 1.15 年和 4.96 年;7 年生混交林枯落物分解速率最小,半分解周期 $t_{0.5}$ 和分解周期 $t_{0.95}$

最长,分别为 1.58 年和 6.83 年。

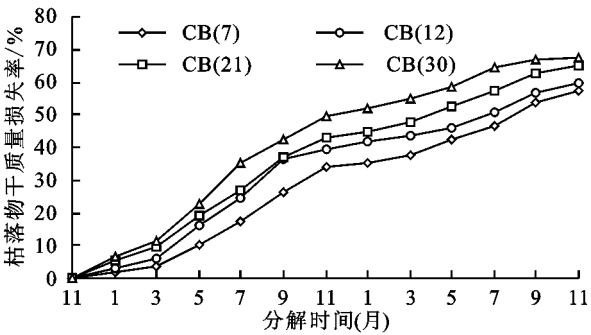


图 1 不同林龄刺槐白蜡混交林枯落物的干质量损失率

表 2 不同林龄刺槐白蜡混交林枯落物分解

Olson 指数模型和分解系数					
林分	Olson 指数模型	K	$T_{50\%}/a$	$T_{95\%}/a$	R^2
CB(7)	$y=1.15e^{-0.073x}$	0.44	1.58	6.83	0.98
CB(12)	$y=1.10e^{-0.077x}$	0.46	1.50	6.47	0.97
CB(21)	$y=1.14e^{-0.090x}$	0.54	1.28	5.52	0.99
CB(30)	$y=1.11e^{-0.101x}$	0.60	1.15	4.96	0.98

2.2 不同林龄混交林的枯落物基质质量

4 个林龄混交林枯落物基质质量不同。由表 3 可知,30,21 年生混交林枯落物初始 C 含量分别为 432.83,429.16 mg/g,显著高于 7,12 年生混交林。30 年生混交林枯落物初始 N 含量最高,而 7 年生混交林枯落物初始 N 含量最低,4 个林龄混交林之间差异显著。30 年生混交林枯落物初始 P 含量显著高于 7,12,21 年生混交林,而 7 年生混交林初始枯落物 P 含量最低。30 年生混交林枯落物初始 K 含量显著高于其他 3 个混交林,7,12,21 年生混交林三者之间差异不显著。12,21 年生混交林枯落物初始 C/N 值差异不显著,但它们与 7,30 年生混交林枯落物初始 C/N 值差异显著。7 年生混交林枯落物初始木质素、纤维素含量、C/P 和木质素/N 值最高,分别为 304.81 mg/g,230.57 mg/g,907.01 和 17.11。

表 3 不同林龄混交林枯落物基质质量

林分	C/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	N/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	P/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	K/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	木质素/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	纤维素/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	C/P	C/N	木质素/N
CB(7)	402.47±4.42c	17.84±0.85d	0.45±0.07c	9.41±0.05b	304.81±5.15a	230.57±4.23a	907.01±121.78a	22.59±0.83a	17.11±0.62a
CB(12)	416.38±7.38b	19.98±0.51c	0.93±0.08b	9.49±0.21b	282.38±2.76b	210.46±2.33b	449.49±30.86b	20.85±0.59b	14.14±0.31b
CB(21)	429.16±4.12a	21.92±1.26b	0.98±0.12b	10.57±0.10b	279.93±3.09b	205.21±2.80b	442.05±51.72b	19.61±0.95b	12.79±0.60c
CB(30)	432.83±5.88a	24.14±0.47a	1.25±0.13a	14.83±1.54a	265.54±5.15c	191.82±5.13c	348.34±31.33b	17.93±0.39c	11.01±0.20d

注:表中数据为平均值±标准偏差;同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

2.3 枯落物分解速率与基质质量相关性

表 4 为枯落物分解速率与基质质量之间的相关性。枯落物分解速率与初始 N 含量呈显著正相关,相关系数为 0.98;与 C/N 值呈显著负相关,相关系数为 -0.98。枯落物分解速率与初始 C、P、K 含量均呈正相关,相关系数分别为 0.94,0.89 和 0.91;与初始木质素含量、纤维素含量、C/P 值和木质素/N 值均呈负相关,相关系数为 -0.90,-0.93,-0.77 和 -0.95。

2.4 土壤理化性质及与枯落物分解速率的相关性

30,21,12 年生混交林土壤总孔隙度差异不显著,但显著高于 7 年生混交林。30 年生混交林土壤有机质和碱解氮含量显著高于其他 3 种混交林,4 个林龄之间差异显著,7 年生混交林土壤有机质和碱解氮含量最低。30 年生混交林土壤全氮含量最高,4 个林龄之间差异显著,7 年生混交林土壤全氮含量最低。30,21 年生混交林土壤速效磷含量差异不显著,

但显著高于 12,7 年生混交林土壤速效磷含量。4 个林龄混交林土壤 pH 值范围是 8.14~8.67,全磷含量范围是 0.58~0.69。

枯落物分解速率与土壤理化性质间的相关性见

表 4 混交林枯落物分解速率与基质质量的相关关系

指标	C	N	P	K	木质素	纤维素	C/P	C/N	木质素/N
相关系数	0.94	0.98*	0.89	0.91	-0.90	-0.93	-0.77	-0.98*	-0.95

注：*表示显著相关($P<0.5$)。

表 5 土壤理化性质与枯落物分解速率相关性

林分	pH	总孔隙度/%	有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	碱解氮/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全磷/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效磷/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
CB(7)	8.30±0.07b	38.18±2.03b	3.87±0.16d	0.18±0.02d	5.24±0.47d	0.60±0.032b	1.93±0.18b
CB(12)	8.67±0.22a	43.86±3.15a	6.06±0.21c	0.28±0.02b	15.49±0.21c	0.58±0.035b	2.29±0.12b
CB(21)	8.14±0.29b	45.05±2.50a	9.24±0.14b	0.23±0.04c	21.01±0.13b	0.59±0.051b	2.75±0.22a
CB(30)	8.23±0.10b	47.81±2.67a	10.84±0.32a	0.38±0.01a	35.18±0.40a	0.69±0.055a	2.68±0.24a
相关系数	-0.54	0.90	0.98*	0.78	0.97*	0.77	0.89

注：表中数据为平均值±标准偏差；同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)；*表示显著($P<0.05$)相关。

3 讨论

3.1 枯落物的分解系数

本研究中前 12 个月的枯落物干质量损失率比后 12 个月的的干质量损失率大,这与 Casas 等^[20]和郭忠玲等^[21]的研究趋势相似。原因是分解初期即营养控制阶段中,枯落物中水溶性物质及易分解碳水化合物等含量较高,水溶性物质与碳水化合物等快速降解及受淋洗影响,枯落物分解速率较快^[17,22];在分解后期即纤维素控制阶段,随着水溶性物质及碳水化合物等含量降低,纤维素、木质素等不易分解物质的积累,分解速率减慢^[22-23]。

4 个林龄混交林枯落物的分解速率随林龄增加而升高,逯军峰等^[24]研究也发现油松人工林枯落物分解速率随着林龄增长而升高。这可能是因为林龄越小,其群落结构与组成较简单,物种多样性低,土壤生物种类和数量少,不利于枯落物分解。随着林龄增长,混交林群落结构趋于复杂,物种多样性增加,生境条件优化,枯落物分解者种类和数量变多,进而促进枯落物分解^[25]。森林枯落物分解系数 k 值变化范围亚热带为 0.78~1.30^[26],暖温带为 0.30~0.43^[27],本文研究结果(0.44~0.60)介入两者之间,符合分解速率大小顺序为亚热带>暖温带>温带的气候地带性规律^[28]。

3.2 基质质量对枯落物分解影响

在相同环境范围内,基质质量是影响枯落物分解的主要因子^[29]。很多研究表明,枯落物分解速率与初始 C/N 值呈显著负相关,与初始 N 含量呈显著正相关^[13,30-31]。本文研究结果也呈现出上述研究规律,这说明黄河三角洲刺槐白蜡混交林枯落物分解速率在很大程度上受枯落物质量控制,原因可能是在枯落

表 5。枯落物分解速率与土壤有机质、碱解氮含量呈显著正相关,相关系数分别为 0.98 和 0.97。枯落物分解速率与土壤总孔隙度、含水量、全氮、全磷和速效磷含量呈正相关,与土壤 pH 值呈负相关。

物分解过程中微生物对 N 等养分有很高需求,枯落物 N 含量低时会限制微生物群落活动强度,导致枯落物分解慢,而枯落物 N 含量高时促进微生物群落活动强度提高从而加快枯落物分解^[6,32]。黄河三角洲 4 个混交林枯落物 N、P 含量差异显著,随着林龄的增加,N、P 含量升高;木质素含量、C/N 和木质素/N 值的差异显著,随着林龄的增加,木质素含量、C/N 和木质素/N 值降低。本研究结果印证了吕瑞恒等^[33]的研究,认为在相同环境范围内,林龄对枯落物分解影响可能是因为基质质量的差异。

3.3 土壤理化性质对枯落物分解影响

黄河三角洲混交林土壤有机质和碱解氮含量随林龄增加呈递增趋势,不仅与枯落物分解速率度变化趋势一致,而且与枯落物分解速率显著正相关,这表明土壤有机质和碱解氮是影响不同林龄刺槐白蜡混交林凋落物分解的重要因子。混交林土壤有机质含量随林龄增加而升高,与枯落物分解速率显著正相关。原因可能是:(1)枯落物木质素含量和初始 C/N 越高,不利于土壤有机质积累^[7],土壤有机质含量越低,枯落物分解减慢^[34];(2)枯落物分解越慢,其大量养分元素累积在枯落物层,不能及时进入土壤,不利于有机质积累,土壤有机质的含量影响了土壤动物及微生物的数量^[35]。枯落物分解速率与土壤碱解氮含量呈显著正相关,这与丁新景等^[36]关于不同人工刺槐混交林枯落物分解研究结果相反。这可能是因为林龄越小,其分解速率越小,枯落物 C/N 比值越大,驱使微生物从土壤中吸取氮素用于自身生长^[16]。

参考文献:

[1] 曾锋,邱治军,许秀玉. 森林凋落物分解研究进展[J]. 生态环境学报,2010,19(1):239-243.

- [2] Zhou Y, Clark M, Su J, et al. Litter decomposition and soil microbial community composition in three Korean pine (*Pinus koraiensis*) forests along an altitudinal gradient[J]. *Plant and Soil*, 2015, 386(1): 171-183.
- [3] 王新源, 赵学勇, 李玉霖, 等. 环境因素对干旱半干旱区凋落物分解的影响研究进展[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(11): 3300-3310.
- [4] Robinson C H. Controls on decomposition and soil nitrogen availability at high latitudes[J]. *Plant and Soil*, 2002, 242(1): 65-81.
- [5] Chapin F S, Matson P A, Mooney H A. Terrestrial decomposition[M]. USA: Springer New York, 2002: 151-175.
- [6] 曲浩, 赵学勇, 赵哈林, 等. 陆地生态系统凋落物分解研究进展[J]. *草业科学*, 2010, 27(8): 44-51.
- [7] 葛晓改, 肖文发, 曾立雄, 等. 不同林龄马尾松凋落物基质量与土壤养分的关系[J]. *生态学报*, 2012, 32(3): 852-862.
- [8] 张慧, 孙栋元. 不同林龄日本落叶松人工林对凋落物与土壤理化性质的影响[J]. *中国农学通报*, 2016, 32(1): 12-16.
- [9] 姜沛沛, 曹扬, 陈云明, 等. 不同林龄油松(*Pinus tabulaeformis*)人工林植物、凋落物与土壤 C、N、P 化学计量特征[J]. *生态学报*, 2016, 36(19): 6188-6197.
- [10] 王月海, 许景伟, 韩友吉, 等. 黄河三角洲 5 个耐盐树种苗木根系形态结构特征[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(1): 261-266.
- [11] 夏江宝, 许景伟, 李传荣, 等. 黄河三角洲退化刺槐林地的土壤水分生态特征[J]. *水土保持通报*, 2010, 30(6): 75-80.
- [12] 穆从如, 杨林生, 王景华, 等. 黄河三角洲湿地生态系统的形成及其保护[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(1): 123-126.
- [13] 马元丹, 江洪, 余树全, 等. 不同起源时间的植物叶凋落物在中亚热带的分解特性[J]. *生态学报*, 2009, 29(10): 5237-5245.
- [14] 李学斌, 陈林, 吴秀玲, 等. 荒漠草原 4 种典型植物群落枯落物分解速率及影响因素[J]. *生态学报*, 2015, 35(12): 4105-4114.
- [15] 景宜然, 邓湘雯, 邓东华, 等. 湘西南不同石漠化程度土壤理化性质及相关性分析[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(1): 189-195.
- [16] 刘姝媛, 胡浪云, 储双双, 等. 3 种林木凋落物分解特征及其对赤红壤酸度及养分含量的影响[J]. *植物资源与环境学报*, 2013, 22(3): 11-17.
- [17] 胡霞, 吴宁, 吴彦, 等. 川西高原季节性雪被覆盖对窄叶鲜卑花凋落物分解和养分动态的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(5): 1226-1232.
- [18] Olson J S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems[J]. *Ecology*, 1963, 44(2): 322-331.
- [19] 郭绪虎, 肖德荣, 田昆, 等. 滇西北高原纳帕海湿地湖滨带优势植物生物量及其凋落物分解[J]. *生态学报*, 2013, 33(5): 1425-1432.
- [20] Casas J J, Gessner M O. Leaf litter breakdown in a Mediterranean stream characterised by travertine precipitation[J]. *Freshwater Biology*, 1999, 41(4): 781-793.
- [21] 郭忠玲, 郑金萍, 马元丹, 等. 长白山各植被带主要树种凋落物分解速率及模型模拟的试验研究[J]. *生态学报*, 2006, 26(4): 1037-1046.
- [22] Aerts R, Caluwe H D. Nutritional and plant-mediated controls on leaf litter decomposition of *Carex* species[J]. *Ecology*, 1997, 78(1): 244-260.
- [23] 曹富强, 刘朝晖, 刘敏, 等. 森林凋落物及其分解过程的研究进展[J]. *南方农业学报*, 2010, 41(7): 693-697.
- [24] 逯军峰, 王辉, 曹靖, 等. 油松人工林凋落物对土壤理化性质的影响[J]. *西北林学院学报*, 2007, (03): 25-28.
- [25] 侯玲玲, 孙涛, 毛子军, 等. 小兴安岭不同林龄天然次生白桦林凋落物分解及养分变化[J]. *植物研究*, 2012, 32(4): 492-496.
- [26] 李荣华, 邓琦, 周国逸, 等. 起始时间对亚热带森林凋落物分解速率的影响[J]. *植物生态学报*, 2011, 35(7): 699-706.
- [27] 郭晋平, 丁颖秀, 张芸香. 关帝山华北落叶松林凋落物分解过程及其养分动态[J]. *生态学报*, 2009, 29(10): 5684-5695.
- [28] 王健健, 王永吉, 来利明, 等. 我国中东部不同气候带成熟林凋落物生产和分解及其与环境因子的关系[J]. *生态学报*, 2013, 33(15): 4818-4825.
- [29] Cornwell W, Cornelissen J, Amatangelo K, et al. Plant traits are the predominant control on litter decomposition rates within biomes worldwide[J]. *Ecology Letters*, 2008, 11(10): 1065-1071.
- [30] 窦荣鹏, 江洪, 余树全, 等. 柳杉凋落物在中国亚热带和热带的分解[J]. *生态学报*, 2010, 30(7): 1758-1763.
- [31] 李雪峰, 韩士杰, 胡艳玲, 等. 长白山次生针阔混交林叶凋落物中有机物分解与碳、氮和磷释放的关系[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(2): 245-251.
- [32] 李志安, 邹碧, 丁永祯, 等. 森林凋落物分解重要影响因素及其研究进展[J]. *生态学杂志*, 2004, 23(6): 77-83.
- [33] 吕瑞恒, 李国雷, 刘勇, 等. 不同林龄油松针叶凋落物初期分解特性比较[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2013, 37(2): 39-44.
- [34] Gregorich E G, Anderson D W. Effects of cultivation and erosion on soils of four top sequences in the Canadian prairies[J]. *Geoderma*, 1985, 36(3/4): 343-354.
- [35] 林波, 刘庆, 吴彦, 等. 川西亚高山针叶林凋落物对土壤理化性质的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2003, 9(4): 346-351.
- [36] 丁新景, 解国磊, 敬如岩, 等. 黄河三角洲不同人工刺槐混交林凋落物分解特性[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(4): 249-253.