中国生态农业学报 2011 年 11 月 第 19 卷 第 6 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Nov. 2011, 19(6): 1272−1276

DOI: 10.3724/SP.J.1011.2011.01272

不同氮源对三倍体毛白杨落叶分解的影响*

宋曰钦[1] 翟明普[2**] 贾黎明[2] 代红杰[2]

(1. 黄山学院 黄山 245041; 2. 北京林业大学 北京 100083)

摘 要 为探索加快毛白杨落叶分解的途径, 采取室内培养的方法研究了添加铵态氮、硝态氮及混合氮对三倍体毛白杨落叶分解速度和主要营养元素释放的影响。结果表明, 添加氮源对三倍体毛白杨落叶分解有一定的促进作用, 不同氮源之间差异显著。140 d 后, 施加铵态氮、混合氮和硝态氮的落叶分解率分别为 46.0%、30.0%和 28.8%, 而对照为 27.4%, 处理间差异显著; Olson 指数方程拟合结果表明, 施加铵态氮、混合氮和硝态氮后落叶分解 50%和 95%所需时间分别为 175 d、316 d、301 d 和 781 d、1 238 d、1 627 d, 比对照分别缩短 49.7%、9.2%、13.5%和 52.0%、23.9%、14.1%。同时, 添加氮源后对落叶中 N、P、K 元素的释放影响有所不同, 其中对 K 元素的释放基本没有产生影响, 随着分解的进行, 不同处理落叶中 K 元素浓度逐渐降低。但添加氮源对 N、P 元素的释放产生了显著影响, 与对照相比, 添加氮源缩短了 N、P 释放的富集时间, 降低了富集的幅度; N、P 的富集时间均从对照的 21 d 缩短到处理的 7 d; N 的富集幅度从对照为初始浓度的 1.94 倍降低到处理为初始浓度的 1.32~1.56 倍, P 的富集幅度从对照为初始浓度的 2.98 倍降低到处理为初始浓度的 1.70~2.26 倍。因此添加氮源加快了落叶的分解速度, 促进了落叶中 N、P 的释放, 有利于加快养分循环, 提高立地生产力。

关键词 三倍体毛白杨 落叶分解 铵态氮 硝态氮 养分释放 立地生产力

中图分类号: S715.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2011)06-1272-05

Influence of exogenous N resource on triploid *Populus tomentosa* leaf decomposition

SONG Yue-Qin [1], ZHAI Ming-Pu[2], JIA Li-Ming[2], DAI Hong-Jie[2]

(1. Huangshan University, Huangshan 245041, China; 2. Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract Litter decomposition is important for nutrient cycle in terrestrial ecosystems. Released nutrients by litter decomposition are critical for particularly fast-growing and high-yield pulp forests. Delays in on-site nutrient release could limit forest productivity. It is therefore vital to accelerate the decomposition of leaf litter for the rapid release of needed nutrients in forest plantations. To determine ways of rapid litter decomposition and nutrient release, the effects of exogenous ammonium nitrogen, nitrate nitrogen and mixed nitrogen on triploid *P. tomentosa* leaf decomposition were determined in a laboratory study. The results showed significant differences in the rates of decomposition of triploid *P. tomentosa* leaf under the different nitrogen resources. Leaf decomposition significantly accelerated under exogenous ammonium nitrogen. Compared with the control (27.4%), leaf decomposed rates under exogenous ammonium nitrogen, mixed nitrogen and nitrate nitrogen resources were 46.0%, 30.0% and 28.8%, respectively, after 140 d decomposition. The fitting results with Olson exponential equation showed that the times for 50% and 95% leaf decomposition under exogenous ammonium nitrogen, mixed nitrogen and nitrate nitrogen resources were 175 d, 316 d, 301 d and 781 d, 1 238 d, 1 627 d, which were shortened by 49.7%, 9.2%, 13.5% and 52.0%, 23.9%, 14.1%, compared with the control, respectively. There remarkable differences in released main nutrients of litter decomposition under exogenous ammonium nitrogen, mixed nitrogen and nitrate nitrogen resources. K content decreased with increasing degree of decomposition, and was not influenced by exogenous nitrogen resource. However, N and P release was influenced by exogenous nitrogen resource. While the accumulation time of N and P shortened from 21 to 7 days, the degree of N accumulation dropped from 1.94 (under the control) to 1.44 (under exogenous nitrogen) times of initial N concentration. The degree of P accumulation also dropped from 2.98 (under the control) to 1.98 (under exogenous

* “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAD3202-2)和黄山学院启动项目(2009xkjq003)资助

** 通讯作者: 翟明普(1942~), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为森林培育。E-mail: zhaimp@bjfu.edu.cn
宋曰钦(1967~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为森林培育。E-mail: hssongyuets@hsu.edu.cn

收稿日期: 2011−03−10 接受日期: 2011−04−29

nitrogen) times of initial exogenous P concentration. This suggested that exogenous nitrogen improved on-site productivity via accelerated leaf litter decomposition and N, P release, which in turn shortened the decomposition cycle of triploid *P. tomentosa* leaf litter.

Key words　Triploid *Populus tomentosa*, Leaf litter decomposition, Ammonium nitrogen, Nitrate nitrogen, Nutrient release, On-site productivity

(Received Mar. 10, 2011; accepted Apr. 29, 2011)

森林凋落物是森林生态系统的重要组成部分, 在恢复和增加土壤肥力[1]、改善树木营养和提高森林生产力方面起到十分重要的作用, 因此森林凋落物历来是森林生态学、生物地球化学和森林土壤学的重要研究内容。目前国内外在凋落物的总量、组成、动态变化、养分分解动态及凋落物能量的归还等方面开展了大量研究[2−5]。研究表明, 凋落物分解速率与其初始氮含量和木质素含量存在较好的相关性[6], 初始氮含量高, 分解速度较快, 木质素含量高则分解速度慢, 同时 C/N 比和木质素/N 比也是反映和预测分解速率的较好指标[7]; 人为将含氮量高的落叶进行混合[8]或直接添加氮素都可以促进含氮量低的落叶的分解[9−10], 从而加快落叶中养分元素的释放, 这对维护和提高人工林林地长期立地生产力、实现人工林可持续高产具有十分重要的作用。

三倍体毛白杨是朱之悌等[11]采用细胞染色体部分替换和染色体加倍等技术, 对毛白杨施加遗传改良而获得, 具有速生、优质、抗病等优点, 尤其是优良的材性非常适合制浆造纸的需要, 因而在我国林纸一体化工程发展中得到广泛栽植。由于纸浆林采取“高密度、短轮伐期、全树利用”的经营理念, 极易导致林地养分减少, 立地生产力降低, 而落叶在归还养分方面具有十分重要的作用[12], 因此研究加快三倍体毛白杨落叶分解, 提高林地养分的循环速度, 充分发挥落叶在林地自肥过程中的作用, 对维持林地生产力、确保我国纸浆林的快速健康发展具有十分重要的作用。目前对三倍体毛白杨的研究主要集中在育种技术及其形成机理[13]、材质及制浆造纸工艺[14]、造林技术及病虫害防治[15−16]等方面, 但对加快三倍体毛白杨落叶分解, 特别是人为添加氮源对三倍体毛白杨的落叶分解速度、营养元素释放等的影响尚少见报道。为此, 本研究以硝酸钠、氯化铵和硝酸铵分别代表硝态氮、铵态氮和混合氮, 添加到三倍体毛白杨落叶中, 在室内控制的条件下进行分解试验, 探讨人为添加不同氮源对三倍体毛白杨落叶分解速度、主要营养元素的释放等的影响规律, 为三倍体毛白杨纸浆林生产中制定加快落叶分解、促进养分循环的综合措施提供依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

于 2007 年 11 月在山东省泉林生态公司三倍体毛白杨纸浆林 5 年生林分中收集落叶, 并采集 0~20 cm 的表层土壤带回室内。经测定, 落叶中的 C 含量为 492.3 $g\cdot kg^{-1}$, N 含量为 12.3 $g\cdot kg^{-1}$, P 含量为 8.2 $g\cdot kg^{-1}$, C/N 比为 40.0, C/P 比为 60.3。土壤有机碳含量为 3.9 $g\cdot kg^{-1}$, 全氮为 0.13 $g\cdot kg^{-1}$, C/N 比为 30.0。

1.2　研究方法

研究按张鼎华等[17]的方法进行, 但有所改动。在实验室称取土样 100 g, 另称取落叶 10 g, 精确到 0.001 g, 置于 1 000 mL 广口瓶内, 分别配置含 0.41 g $NaNO_3$、0.26 g NH_4Cl 及 0.19 g NH_4NO_3 的溶液 5 mL, 用注射器均匀喷洒到每个广口瓶内的落叶上(研究[15]认为当 C/N 比在 20~30 之间最有利于落叶中 N 的矿化, 本研究确定以 C/N 比 25, 根据落叶中 C、N 含量计算得到上述添加量), 作为添加硝态氮、铵态氮、混合氮的 3 组处理, 另设 1 组只加落叶而不添加氮源作为对照, 观察不同氮源对落叶分解速率的影响, 每组处理重复 30 次。同时以 3 个不加落叶的 100 g 土壤在相同条件下进行培养以计算土壤有机质产生的 CO_2 量。吸取 25 mL 浓度为 0.3 $mol\cdot L^{-1}$NaOH 置于 50 mL 烧杯内作为 CO_2 的吸收杯, 将吸收杯挂在广口瓶内塑料盖的下方, 再将吸收杯连同塑料盖悬挂于瓶内落叶的上端。于 28 ℃、70%田间持水量条件下在恒温培养箱内进行培养, 培养过程中通过定期称重以蒸馏水补充水分, 整个试验共进行 140 d。

分别于 7 d、14 d、21 d、35 d、49 d、63 d、84 d、105 d、126 d、140 d 将不同处理中 3 个样品的小烧杯及广口瓶内的叶片取出, 取出的叶片用蒸馏水漂洗除去粘附的泥土后在 80 ℃烘干至恒重, 称重、粉碎过筛后以微量凯氏定氮法测定 N, 以氢氧化钠–钼锑抗比色法测定 P, 以原子吸收光谱法测定 K; 烧杯中的碱液以 N mol 的盐酸进行中和滴定, 确定消耗盐酸的毫升数(V)。

所有数据均为 3 个重复的平均值, 枯落物分解速率(Rd)为:

$$Rd=\frac{(Vi-V_0)\times N\times 0.006}{W_0}\times 100\% \qquad (1)$$

式中, V_0 为没有落叶的处理盐酸滴定量(mL), V_i 为各处理盐酸滴定量(mL), N 为盐酸的摩尔数, W_0 为各处理样品有机碳总量(g), 0.006 为相当于 1 mmol 盐酸溶液 C 的克数。分别统计得到 7 d、14 d、21 d、35 d、49 d、63 d、84 d、105 d、126 d、140 d 的分解率, 残留率为 1–Rd。

2 结果与分析

2.1 不同氮源处理对落叶分解率的影响

从图 1 可以看出, 不同氮源对落叶分解速度的影响存在差异。分解进行到 21 d 前, 对照处理(未添加氮)的落叶分解速度高于添加氮处理, 添加氮处理表现出分解早期的滞后现象; 分解进行 21 d 后, 添加铵态氮处理落叶分解速度高于其他处理; 49 d 后添加硝态氮处理落叶分解速度高于对照, 而添加混合氮处理落叶分解速度在 126 d 以前一直低于对照, 到 140 d 时分解速度才高于对照。到 140 d 培养结束时, 添加铵态氮处理的落叶质量损失率达 46%, 比对照增加 70.40%, 明显高于其他处理, 添加硝态氮和混合态氮处理的落叶分解速度稍高于对照, 其中添加混合氮处理比对照分解速度增加 11.1%, 添加硝态氮处理比对照分解速度增加 7%。方差分析表明, 不同处理之间差异均达到显著性水平(P=0.004)。添加铵态氮对三倍体毛白杨落叶的分解有明显促进作用。

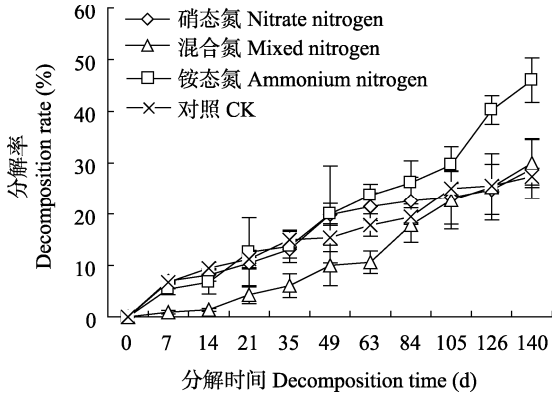


图 1 不同氮源对三倍体毛白杨落叶分解速率的影响
Fig. 1 Influence of different N resources on leaf decomposition rate of triploid *P. tomentosa*

2.2 不同氮源处理对落叶分解主要参数的影响

各氮源处理三倍体毛白杨叶片的分解过程均表现为先快后慢的趋势, 即在 63 d 前分解速度较快, 而后分解速度降低, 这种先快后慢的过程可以采用 Olson 指数方程拟合。根据落叶残留率, 按修正后的 Olson 指数方程 $1-Rd=ae^{-kt}$ 进行拟合, 得到添加不同氮源时三倍体毛白杨落叶分解的各主要参数如表 1。

表 1 不同氮源处理三倍体毛白杨落叶分解拟合方程的主要参数
Table 1 Main parameters of leaf decomposition of triploid *P. tomentosa* influenced by added different N resources

氮源 N resource	方程 Equation	R^2	分解 50%所需时间($t_{0.5}$) Half life time (d)	分解 95%所需时间($t_{0.05}$) Time for 95% leaf decomposed (d)	1 年分解率 Decomposition rate after one year (%)
铵态氮 Ammonium nitrogen	Y=0.970 8e$^{-0.003\ 8t}$	0.952 0	175	781	75.28
混合氮 Mixed nitrogen	Y=1.101 6e$^{-0.002\ 5t}$	0.987 2	316	1 238	55.24
硝态氮 Nitrate nitrogen	Y=0.939 3e$^{-0.002\ 1t}$	0.895 3	301	1 397	55.90
对照 CK	Y=0.934 0e$^{-0.001\ 8t}$	0.879 4	348	1 627	51.14

从表 1 拟合结果看, 所有拟合方程的 R^2 均达到 0.87 以上(P＜0.01), 说明用 Olson 方程可以较好地拟合三倍体毛白杨落叶分解的过程。同时, 由各分解参数可知, 铵态氮对落叶分解具有明显促进作用, 添加铵态氮后落叶分解 50%所需时间为 175 d, 只有对照 348 d 的 50.3%, 缩短近一半时间; 添加硝态氮和混合氮后落叶分解 50%所需时间分别为 301 d 和 316 d, 是对照的 86.9%和 90.8%, 稍有缩短。添加铵态氮落叶分解 95%所需天数为 781 d, 是对照的 48.0%; 添加硝态氮和混合氮所需的时间分别为 1 397 d 和 1 238 d, 为对照的 85.9%、76.1%。而从 1 年的落叶分解率看, 添加铵态氮为 75.28%, 比对照高 47.2%; 添加硝态氮为 55.90%, 比对照高 9.30%, 添加混合氮为 55.24%, 比对照高 8.00%。因此无论从分解时间、分解率来看, 添加氮都促进了落叶的分解, 且以添加铵态氮的促进效果更为明显。

2.3 不同氮源处理对落叶主要养分元素释放的影响

2.3.1 添加氮源对落叶中 N 浓度的影响

由图 2 可知, 三倍体毛白杨落叶分解过程中 N 元素存在一个富集阶段。在分解初期叶片中 N 浓度明显高于初始浓度, 但不同处理富集持续的时间和富集的幅度有所不同。与对照相比, 外加不同氮源时落叶中 N 的富集时间有所缩短, 从富集高峰出现的时间来看, 添加氮源的处理富集高峰出现的时间为 7 d, 而对照则为 21 d, 是添加氮处理的 3 倍; 从

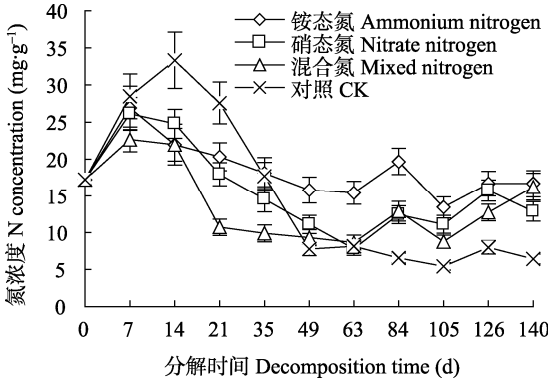


图 2 添加不同氮源时落叶中 N 的浓度变化
Fig. 2 Dynamics of N concentration at different stages of leaf decomposition of triploid *P. tomentosa*

富集持续的时间来看, 以添加混合氮源时富集的时间最短, 到 21 d 时 N 浓度低于初始叶片的浓度, 其余氮源及对照处理均在 35 d 时浓度才低于叶片中 N 的初始浓度, 但此后, 对照处理 N 浓度迅速下降, 在 49 d 后低于添加氮处理, 一直持续到培养结束; 从富集幅度看, 对照在富集高峰时的 N 浓度是初始浓度的 1.94 倍, 而添加铵态氮、硝态氮、混合氮以后富集高峰时的 N 浓度分别是初始浓度的 1.56 倍、1.51 倍和 1.32 倍, 以添加混合态氮富集的幅度最小。

2.3.2　添加氮源对落叶中 **P** 浓度的影响

由图 3 可知, 叶片中的 P 浓度在分解初期也有一个富集过程, 在 63 d 之前 P 浓度一直高于叶片的初始浓度, 尤其在前 21 d 富集现象十分明显。从不同处理看, 对照处理 P 的富集时间长、幅度大, 而添加不同氮源后富集的时间、幅度均有所下降。从时间来看, 一直到培养的 126 d, 对照处理的 P 浓度仍高于初始浓度, 是初始浓度的 1.11 倍, 而添加氮源处理后 P 的浓度低于初始浓度, 添加铵态氮处理的 P 浓度是初始浓度的 0.65 倍, 添加硝态氮、混合氮的 P 浓度分别是初始浓度的 0.75 倍和 0.79 倍, 但不同氮源之间差异较小。从富集的幅度来看, 在富集的最高峰时, 对照处理的 P 浓度是初始浓度的 2.89 倍, 添加铵态氮、硝态氮和混合氮的 P 浓度分别是初始浓度的 1.76 倍、1.70 倍和 2.26 倍, 经方差分析可知, 不同处理之间差异达到显著性水平(P=0.007)。

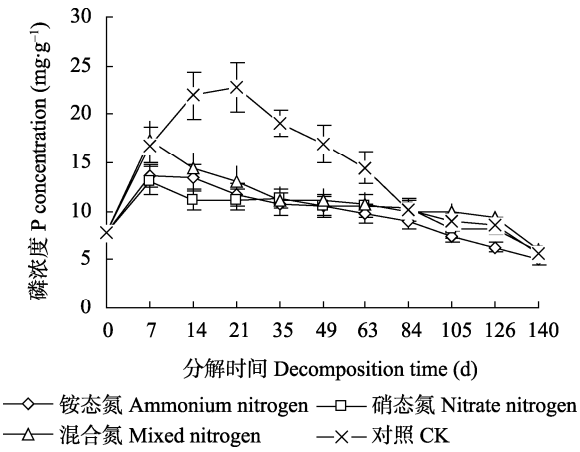


图 3　添加不同氮源时落叶中 **P** 的浓度变化

Fig. 3　Dynamics of P concentration at different stages of leaf decomposition of triploid *P. tomentosa*

2.3.3　添加氮源对落叶中 **K** 浓度的影响

由图 4 可知, 随着分解的进行, 无论是否添加氮, 叶片中 K 含量都在持续降低, 从分解开始的 1.13 g·kg^{-1} 降低到分解末期的 0.365 g·kg^{-1} (铵态氮)、0.336 g·kg^{-1} (硝态氮)、0.392 g·kg^{-1} (混合氮)和 0.386 g·kg^{-1} (对照), 经方差分析可知, 不同处理之间差异未达显著水平(P=0.61)。

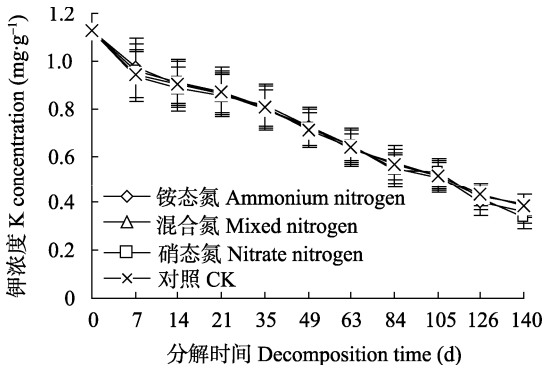


图 4　添加不同氮源时叶片中 **K** 的浓度变化

Fig. 4　Dynamics of K concentration at different stages of leaf decomposition of triploid *P. tomentosa*

3　讨论与结论

从以往报道来看, 外加氮源都在一定程度上促进了落叶分解, 如在杉木落叶的分解研究中外加氮源与林下植物叶混合后, 凋落物 N 的含量增加 0.6~1.6 倍, C/N 比下降 0.4~0.6 倍, 凋落物底物质量提高, 分解速率增大[9]。在杉木落叶添加不同氮源的研究中发现, 外加不同氮源对分解速度的影响存在差异, 施加硝态氮可在一定程度上促进杉木枯落物的分解, 年质量损失率为 46.0%, 比未施加氮肥处理(对照)增加 13.3%, 而施加铵态氮仅为 40.7%, 施加硝态氮后, 明显加快了落叶分解的速度[10]。本试验结果也表明, 添加氮加快了三倍体毛白杨落叶分解速度和落叶中 N、P 营养元素的释放。但不同的是, 本试验中以铵态氮促进落叶分解的效果最好。分析其原因, 可能是由于试验点的土壤条件不同, 微生物种群存在差异所致。据报道, 微生物在分解植物残体时通常以植物残体为营养, 每同化 4~5 份 C, 就需要 1 份 N[18]。C/N 比大的有机物分解时, 由于 N 含量缺乏, 微生物发育受到限制, 有机质分解缓慢, 因此外加氮源的目的在于提供微生物活动所需的 N, 以促进其生命活动, 加快对落叶的分解, 不同微生物利用的氮源是不同的。研究认为[19], 在北半球温带和寒温带森林土壤中, 有机氮和铵态氮较高, 而硝态氮较低, 长期生长在这种土壤条件下的真菌逐渐丧失或减弱了其还原硝态氮的能力, 从而不能很好地利用硝态氮, 而对铵态氮的利用更有效, 因此添加铵态氮能更好地促进微生物的活动, 加快了落叶的分解。

大量研究表明, 落叶分解过程中营养元素的释放过程存在不同的行为, 其中 K 元素为易淋洗而表现为逐步释放的过程, 而 N、P 并非简单地随着分解的进行而逐步释放, 而是存在先富集、再释放的过程[8,20–21]。本研究结果也再次证明了这一点。三倍体毛白杨落叶在添加氮源的条件下, K 元素浓度随分

解的进行而逐渐降低，而 N、P 也都存在明显的富集过程。一般认为导致 N、P 浓度上升有以下几个方面的原因，首先，在分解初期，落叶最容易失去的物质主要是可溶性糖类及其他易淋洗的矿质元素，这会造成 N、P 的相对增加；其次，落叶分解的过程需要有微生物参与，微生物进入凋落物碎屑内定居、繁殖，也会增加落叶的 N、P 含量[21]。同时，从本次试验结果也可以看出，添加氮以后，N、P 的富集幅度显著降低、富集时间明显缩短，因此，可以推断人为添加氮可以加快落叶中 N、P 的释放，促进林地 N、P 养分循环，从而对长期立地生产力的维持起到促进作用。尽管室内试验可以消除大气氮沉降对添加氮源的影响，但大田环境条件与实验室存在差异，因此今后应开展田间试验，确定生产中如施肥等管理措施对落叶分解及林地养分循环的影响，实现林地养分的综合、科学管理。

添加氮源对三倍体毛白杨落叶分解有一定的促进作用，到试验结束时(140 d)，施加铵态氮的落叶分解率为 46.0%±4.3%，添加混合氮的落叶分解率为 30.0%±4.7%，添加硝态氮的落叶分解率为 28.8%±5.7%，而对照为 27.4%±1.6%，不同氮源之间落叶分解率差异显著。根据 Olson 方程推算得到不同处理落叶分解的主要参数差异明显，添加铵态氮时，落叶分解 50%的时间为 175 d，而对照需要 348 d，只有对照的 50.3%，添加硝态氮和混合氮的天数分别为 301 d 和 316 d，分别为对照的 86.5%和 90.8%；添加铵态氮后落叶分解 95%的天数为 781 d，对照需要 1 627 d，而添加硝态氮和混合氮的天数分别为 1 397 d 和 1 238 d；添加铵态氮的落叶年分解率为 75.28%，对照为 51.14%，添加硝态氮和混合氮的年分解率分别为 55.90%和 55.14%。

添加氮源对三倍体毛白杨落叶中 N、P、K 释放的影响不同，添加氮对 K 元素的释放基本没有产生影响，随着分解的进行，残余落叶中 K 浓度不断降低。但添加氮以后，落叶中 N、P 富集的幅度和富集时间均降低，其中 N 富集的幅度从对照的 1.94 倍降低到 1.32~1.56 倍，富集的时间从对照 21 d 缩短到 7 d；P 富集的幅度和富集时间均降低，富集的幅度从对照的 2.98 倍降低到 1.70~2.26 倍，富集的时间从对照的 21 d 缩短到 7 d，不同处理之间 P 的浓度差异显著。

参考文献

[1] 肖红生，王勇，骆世明. 农林生态系统保护土壤肥力的功能及其核算方法[J]. 中国生态农业学报，2008，16(5): 1225–1229

[2] Isaac S R, Nair M A. Litter dynamics of six multipurpose trees in a homegarden in southern Kerala, India[J]. Agroforestry Systems, 2006, 67(3): 203–213

[3] 吴起明. 闽粤栲群落凋落物持水量及其与群落结构的相关性研究[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(1): 152–154

[4] 丁印龙，向平，谭中奇，等. 榕树叶片分解过程物质与能量动态变化研究[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(1): 53–56

[5] 黄钰辉，官丽莉，周国逸，等. 西双版纳热带季节雨林和哀牢山中山湿性常绿阔叶林优势植物及地表凋落物层的热值[J]. 植物生态学报, 2007, 31(3): 457–463

[6] Huang Y, Shen Y, Zhou M, et al. Decomposition of plant residue as influenced by its lignin and nitrogen[J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2003, 27(2): 183–188

[7] Taylor B R, Parkinson D, Parsons E F J. Nitrogen and lignin content as predictors of litter decay rates: A microcosm test[J]. Ecology, 1989, 70(1): 97–104

[8] 贾黎明，方陆明，胡延杰. 杨树刺槐混交林及纯林枯落叶分解[J]. 应用生态学报, 1998, 9(5): 463–467

[9] 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

[10] 章志琴，林开敏，邹双全，等. 不同调控措施对杉木枯落物分解的影响[J]. 浙江林学院学报, 2006, 23(1): 65–69

[11] 朱之悌，林惠斌，康向阳. 毛白杨异源三倍体 B301 等无性系选育的研究[J]. 林业科学, 1995, 31(6): 499–505

[12] 宋曰钦，翟名普，贾黎明. 三倍体毛白杨地上凋落物对林龄的响应[J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(3): 17–19

[13] 康向阳，张平东，高鹏，等. 秋水仙碱诱导白杨三倍体新途径的发现[J]. 北京林业大学学报, 2004, 26(1): 5–8

[14] 蒲俊文，宋君龙，姚春丽. 三倍体毛白杨纤维形态变异的研究[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(2): 68–72

[15] 薛睿，贺斌，薛文瑞. 甘肃干旱荒漠区纸浆林三倍体毛白杨营建试验[J]. 陕西林业科技, 2006(2): 12–16, 36

[16] 林仲桂，张仁福，钟福生，等. 危害三倍体毛白杨的害虫种类、发生与防治研究[J]. 湖南环境生物职业技术学院学报, 2006, 12(1): 1–4

[17] 张鼎华，翟明普，林平，等. 杨树刺槐混交林枯落物分解速率的研究[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(3): 24–26

[18] 郭继勋，祝廷成. 羊草草原枯枝落叶分解的研究——主要优势植物的分解速率和损失率[J]. 生态学报，1992，12(4): 295–301

[19] 廖晓初. 氮源对外生菌根生长、氮吸收和硝酸还原酶活性的影响[D]. 重庆：西南大学, 2006: 28

[20] Moro M J, Domingo F. Litter decomposition in four woody species in a Mediterranean climate: Weight loss, N and P dynamics[J]. Annals of Botany, 2000, 86(6): 1065–1071

[21] 肖慈英，黄青春，阮宏华. 松、栎纯林及混交林凋落物分解特性研究[J]. 土壤学报, 2002, 39(5): 763–767