

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2022.006.004

凋落物和铵态氮添加对亚热带罗浮栲和杉木林土壤碳氮淋溶的影响

王梦思^{1,2,4}, 马红亮^{1,2*}, 官晓辉³, 高人^{1,2}, 尹云锋^{1,2}

(1. 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福建福州 350007; 2. 福建师范大学地理科学学院, 福建福州 350007;
3. 福建省建瓯万木林自然保护区管理站, 福建建瓯 353100; 4. 江苏省木渎高级中学, 江苏苏州 215000)

摘要: [目的] 凋落物是森林土壤碳氮的主要来源, 通过分析凋落物或土壤淋溶碳氮的变化, 揭示凋落物分解通过淋溶对土壤碳氮的影响及氮添加情况下这种影响的变化, 进而探究凋落物分解与土壤碳氮的关系。[方法] 以亚热带天然阔叶林和人工针叶林土壤和凋落物为对象, 设置 6 种处理: 凋落物、土壤、凋落物 + 土壤、凋落物 + 氮、土壤 + 氮和凋落物 + 土壤 + 氮, 每个处理 3 重复。氮添加量 ($\text{NH}_4^+ \cdot \text{N}/\text{土壤}$) 为 $120 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 针、阔叶林凋落物添加量分别为 12.1 、 $19.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 凋落物放置在土壤或石英石表面, 土壤湿度控制在 60% 饱和持水量, 于 25°C 暗培养箱中, 采用氮淋溶模拟氮沉降的方法, 进行室内培养试验。培养期间, 氮溶液分 5 次不等氮量淋溶, 每次 110 mL 溶液 (按照淋溶次数分配依次为 80 、 10 、 10 、 10 、 $10 \text{ mg NH}_4^+ \cdot \text{N}$), 收集淋溶液, 测定其溶解性有机碳 (DOC)、氮 (DON) 和无机氮。[结果] 凋落物淋溶液有较低的无机氮和 DON, 较高的 DOC; 凋落物添加分别降低针阔叶土壤淋溶液中 $\text{NO}_3^- \cdot \text{N}$ 22.6% 和 29.9% 、提高针叶林土壤淋溶液中 DOC 181.4% , 但是降低阔叶林土壤淋溶液中 DON 39.2% 和阔叶林土壤 MBN 53.2% 。氮添加后, 凋落物对添加氮的截留较少, 且阔叶林凋落物截留高于针叶林; 凋落物通过淋溶输入土壤的 DOC 减少, 而 DON 增加。氮添加增加土壤可淋溶的无机氮量和针叶林土壤淋溶液 DON, 但凋落物降低土壤氮淋溶的作用在氮添加情况下没有减弱。[结论] 凋落物具有减缓土壤 $\text{NO}_3^- \cdot \text{N}$ 输出对水环境的负面影响, 氮添加可通过改变针阔叶林凋落物 DOC 和 DON 的输出影响土壤氮变化。

关键词: 凋落物; 针叶林; 阔叶林; 溶解性有机碳氮; 无机氮

中图分类号: S714

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2022)06-0035-09

森林生态系统中植物凋落物是土壤有机质 (SOM) 的主要来源^[1-2], 因此, 凋落物的分解影响土壤氮素动态变化^[3]。凋落物分解释放的溶解性有机碳 (DOC), 可以快速地增加土壤 DOC, 提高土壤养分可用性^[4]; 也可通过激发效应, 加快土壤有机质分解^[1]。森林生态系统土壤溶解性有机氮 (DON) 一般认为主要来自凋落物和土壤腐殖质^[5]。Huang 等^[6]发现, 约 80% 的 DON 产生于新近凋落物层。也有研究发现, DON 大部分产生自

土壤原位 (根系或微生物周转) 而不是凋落物层^[7]。由于 DON 很容易矿化产生无机氮, 因此, DON 能反映土壤有机氮矿化的难易程度^[8]。在凋落物分解过程中, 降雨淋溶可加速凋落物层内有机质降解和碳释放^[9]、凋落物与土壤之间物质流动和相互影响^[10]。可见, 凋落物分解进入土壤的碳氮既可增加其在土壤中的保持^[11], 也可通过激发作用增加碳和养分的淋溶损失^[2,12]。因此, 探究这些过程与土壤碳氮矿化关系是深入理解凋落物的生态地位和环境

效应必不可少的。

氮沉降对凋落物分解的影响因凋落物化学性质的差异而变化^[13], 可促进凋落物分解^[14]、或抑制其分解^[15], 甚至氮沉降可先促进后减缓其分解^[16]。Fang等^[17]的研究也表明, 氮添加可显著提高有丰富凋落物的表层土壤微生物的代谢活动及其对碳基质的利用, 促进土壤DOC形成的同时, 增强微生物对低分子量氨基酸的吸收。由于不同形态沉降氮对微生物、酶及土壤有机质的影响存在差异, 比如有机氮、无机氮, 铵态氮($\text{NH}_4^+ \text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^- \text{-N}$)的影响各不相同^[18-20]。可见, 利用同一形态氮添加可直观揭示研究对象的响应差异, 探究氮沉降对森林土壤碳氮的影响与凋落物或土壤独自响应差异的关系。

凋落物分解输入与土壤淋出碳氮存在差异, 凋落物分解和土壤氮转化受大气沉降氮的影响, 因此, 凋落物和土壤淋溶碳氮对沉降氮响应不同。本研究以亚热带天然阔叶林和人工杉木林土壤和凋落物为对象, 采用氮淋溶模拟氮沉降的方法, 探究凋落物分解与氮沉降对土壤溶解性碳氮的影响, 揭示

凋落物分解对土壤碳氮影响的重要性。

1 材料与方法

1.1 研究区概况和土壤采集

万木林自然保护区位于福建省建瓯市(27°03' N, 118°09' E), 该研究选取天然阔叶罗浮栲(*Castanopsis fabric*, CAF)林和人工针叶杉木(*Cunninghamia lanceolata*, CUL)林^[21]为对象, 于2018年12月在罗浮栲和杉木林样地的上、中、下坡3个位置, 分别按照对角线的方法选择8个点。每个点利用宽5 cm、长25 cm的铁铲采集深度0~20 cm土壤约2 kg, 挑除石头、根系以及凋落物, 充分混匀后, 代表该位置样品; 用自封袋将所需新鲜土壤样品密封于4 °C冰箱保存, 通过10目尼龙网收集新近凋落物(主要是叶和枝)。同时利用环刀采取原状土以测定土壤饱和持水量(WHC)。一部分土壤过2 mm筛, 用于测定基本理化性质; 另一部分土壤用于室内培养试验。土壤和凋落物基本性质见表1。

表1 土壤和凋落物基本性质
Table 1 Basic properties of soil and litter

林分类型 Forest type	样品 Samples	全碳 Total carbon/ (g·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen/ (g·kg ⁻¹)	碳氮比 C/N	铵态氮 $\text{NH}_4^+ \text{-N}/$ (mg·kg ⁻¹)	硝态氮 $\text{NO}_3^- \text{-N}/$ (mg·kg ⁻¹)	溶解性有机氮 DON/ (mg·kg ⁻¹)
针叶林 Coniferous forest	土壤 Soil	27.78 ± 0.13 a	2.12 ± 0.02 a	13.12 ± 0.06 a	15.05 ± 0.46 a	13.55 ± 0.31 a	26.80 ± 0.17 a
	凋落物 Litter	498.32 ± 1.62 A	4.77 ± 0.20 A	106.69 ± 0.62 A	2.16 ± 0.23 A	0.07 ± 0.02 A	20.12 ± 0.17 A
阔叶林 Broad-leaved forest	土壤 Soil	35.44 ± 0.14 b	2.65 ± 0.03 b	13.38 ± 0.16 a	61.25 ± 1.88 b	45.90 ± 2.24 b	53.35 ± 5.77 b
	凋落物 Litter	493.16 ± 0.60 B	9.74 ± 0.32 B	50.66 ± 1.69 B	4.28 ± 0.14 B	0.47 ± 0.02 B	16.19 ± 2.22 B

注: 不同小写字母代表不同林型土壤样品之间差异显著($p < 0.05$), 不同大写字母代表不同林型凋落物样品间差异显著($p < 0.05$)。本文针叶林指杉木林, 阔叶林指罗浮栲林(平均值±标准差, $n = 3$)

Notes: Different lowercase letters represent significant differences between soils and different capital letters represent significant difference between litters ($P < 0.05$). In this study, coniferous forest is *Cunninghamia lanceolata* and broad-leaved forest is *Castanopsis fabric* (mean±SD, $n = 3$)

1.2 试验设计

采用两因素(凋落物和氮)随机区组试验设计, 共计6个处理, 分别为: 凋落物(L)、土壤(S)、凋落物+土壤(LS)、凋落物+N(NL)、土壤+N(NS)、凋落物+土壤+N(NLS), 每个处理3重复。

土壤经去除碎石根系等杂物, 过8 mm筛, 于350 mL注射器中(底面积为19.63 cm², 底部设置防土壤颗粒渗漏而允许液体渗漏装置, 即采用60目尼龙网和玻璃棉铺垫底部), 设置培养土

壤于注射器10 cm高度, 土壤体积为196.35 cm³, 根据土壤密度(针叶林: 1.2 g·cm⁻³; 阔叶林: 1.0 g·cm⁻³), 计算该体积需土壤干质量为针叶林 $196.35 \times 1.2 = 235.62$ g, 阔叶林为 $196.35 \times 1.0 = 196.35$ g。

为了研究凋落物的作用, 特意增加凋落物添加量, 根据野外单位面积年凋落物现存量的3倍来确定凋落物添加量, 凋落物现存量针叶林为4.82 t·hm⁻²·a⁻¹, 阔叶林为6.57 t·hm⁻²·a⁻¹^[21], 计算3倍添加凋落物干质量针叶林为 $4.82 \times 19.63 \times$

$0.01 \times 3 = 2.84$ g, 阔叶林为 $6.57 \times 19.63 \times 0.01 \times 3 = 3.87$ g。凋落物(枝叶)剪碎成约 1 cm^2 左右碎片后, 将土壤水分条件调整到 60% 饱和持水量(60% WHC), 减落物均匀平铺于土壤或石英石表面。在 25°C 培养箱中(25°C 为微生物活动提供较适宜的土壤温度), 开始为期 220 d 的避光培养实验, 培养期间每 3 d 通过称质量法保持土壤水分恒定。

根据样地年平均降雨量(1 673.3 mm)计算淋溶水量、培养时间, 设计每次加水量和加水次数, 每次淋溶之后, 待土壤水分下降至 60% WHC 以下, 再行调整水分。由于减落物分解试验研究时间长短不同(有 69 d 培养试验^[12]、10 个月^[3] 和 1 a^[10] 的野外试验), 且考虑减落物分解的阶段性和淋溶物的差异以及本研究的目的, 本研究选择培养时间在 200 d 左右。

按照 5 次淋溶氮添加总量为每千克土壤添加 120 mg N(按照淋溶次数分配依次为 $80 + 10 + 10 + 10 + 10$ mg), 每次氮添加通过淋溶氮溶液(NH_4Cl) 110 mL 实现。预培养 20 d 后, 开始第 1 次淋溶(第 0 天), 根据降雨氮沉降量前多后少的原则, 设计第 1 次氮添加量为主, 基于试验土壤质量, 分别为针叶林 $80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \times 235.62 \text{ g} = 18.85 \text{ mg}$ 、阔叶林 $80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \times 196.35 \text{ g} = 15.71 \text{ mg}$, 以后 4 次(第 60、120、180、220 d) 淋溶的氮添加量均为针叶林 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \times 235.62 \text{ g} = 2.36 \text{ mg}$ 、阔叶林 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \times 196.35 \text{ g} = 1.96 \text{ mg}$ 。每次及时分析淋溶液样品中的铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、总溶解性氮(TDN)、溶解性有机碳(DOC)。分析第 60 天和第 220 天土壤中的微生物生物量碳(MBC)或微生物生物量氮(MBN)。

1.3 测定和计算方法

土壤质量含水量用烘干法测定, 土壤饱和持水量用环刀法测定。土壤全碳、全氮用碳氮元素分析仪(Elementar vario MAX CN, 德国)测定。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TDN 浓度使用连续流动分析仪(SKALAR SAN⁺⁺, 荷兰)测定。DOC 使用岛津 TOC-V_{CPH}/TN 分析仪测定。土壤 MBC 和 MBN 采用改进的氯仿熏蒸— $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ K_2SO_4 溶液浸提法^[22]。

淋溶液中 DOC、TDN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 均为 5 次淋溶液累积量/mg=($c_0 + c_{60} + c_{120} + c_{180} + c_{220}$)

c_{220})

式中: c_0 、 c_{60} 、 c_{120} 、 c_{180} 、 c_{220} 分别为第 0、60、120、180、220 天各指标淋溶量/mg。

$$\text{DON}/\text{mg} = \text{TDN}(\text{NH}_4^+ - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N})$$

式中: DON 为溶解性有机氮累积量/mg, TDN 为总溶解性氮累积量/mg, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为铵态氮累积量/mg, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 为硝态氮累积量/mg。

土壤微生物量碳氮:

$$\text{MBC} = \Delta E_C / K_C; \quad \text{MBN} = \Delta E_N / K_N$$

式中: ΔE_C 为熏蒸与未熏蒸土壤 DOC 含量的差值, ΔE_N 为熏蒸与未熏蒸土壤 TDN 含量的差值; K_C 为 0.45; K_N 为 0.54。

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 和 Origin 9.0 软件对数据进行处理和作图, 运用 SPSS 20.0 中单因素方差分析(One way ANOVA)和 S-N-K 检验法分析各处理间 DOC、DON、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的差异显著性($\alpha=0.05$), 运用双因素方差分析(Two way ANOVA)统计氮添加、减落物及二者交互作用对土壤碳、氮的影响, 运用皮尔逊(Pearson)相关系数分析各指标之间的相关性。数据符合正态分布(Q-Q 图检验), 所有数据均为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 减落物和氮添加对淋溶液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的影响

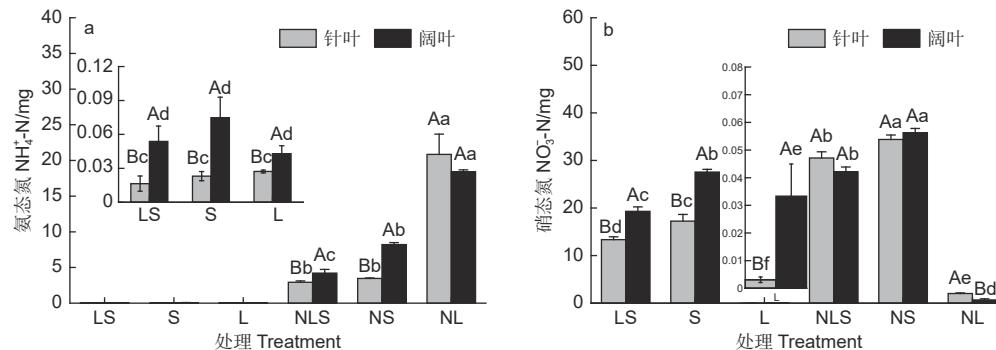
方差分析(表 2)显示: 减落物添加对淋溶液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的影响不显著, 但显著降低淋溶液 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 。LS 处理的淋溶液 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 较 S 处理分别降低了 22.6%(针叶林)和 29.9%(阔叶林)(图 1b)。氮添加后, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 淋出显著增加(表 2 和图 1a), 且 NL 处理远高于 NLS 和 NS 处理; 除 NL 处理, 阔叶林淋溶液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 显著高于针叶林 43.9%~227.0%, 且 NS 处理的淋溶液中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 高于 NLS 处理。针叶林和阔叶林淋溶液中的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$, 在氮添加的 NL 处理较 L 处理分别升 64 873.1% 和 1 920%; 与 LS 和 S 处理比较, 氮添加(NLS、NS、NL)使淋溶液中的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 升高了 30.0%~128.6%; 但 NLS 处理较 NS 处理分别降低了 11.4% 和 23.0%。未添加氮处理(LS、S、L)的阔叶林淋溶液中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 显著高于针叶林 44.7%~975.2%, 但在 NL 处理显著低于针叶林 66.6%。

表2 氮添加和凋落物对针、阔叶林淋溶中铵态氮和硝态氮影响的方差分析(p 值)Table 2 Variance analysis of the influence of nitrogen addition and litter on NH_4^+ -N and NO_3^- -N in the leaching of coniferous and broad-leaved forests (p value)

因素 Factors	针叶林 Coniferous forest		阔叶林 Broad-leaved forest	
	铵态氮 NH_4^+ -N	硝态氮 NO_3^- -N	铵态氮 NH_4^+ -N	硝态氮 NO_3^- -N
氮添加 N	0.022	0.021	0.001	ns
凋落物 L	ns	0.015	ns	0.003
氮添加 \times 凋落物 N \times L	ns	ns	ns	ns

注: $p < 0.05$ 表示因素对不同溶解性碳氮的影响显著; ns表示因素对不同溶解性碳氮的影响不显著($p > 0.05$), $n = 3$

Notes: $p < 0.05$ indicate the significant effects and ns indicate the non-significant effects of factors on soluble carbon or nitrogen ($p > 0.05$), $n = 3$



注: LS: 凋落物 + 土壤; S: 土壤; L: 凋落物; NLS: 凋落物 + 土壤 + N; NS: 土壤 + N; NL: 凋落物 + N。不同大写字母代表同一处理中不同林型间差异显著($p < 0.05$); 不同小写字母代表同一林型中不同处理之间差异显著($p < 0.05$)。下同

Notes: LS indicate treatment with litter added on soil. S indicate treatment with soil alone. L indicate treatment with litter alone. NLS indicate treatment with nitrogen and litter added on soil. NS indicate treatment with nitrogen added on soil. NL indicate treatment with nitrogen added on litter. Different capital letters represent significant difference between different stands in the same treatment ($p < 0.05$). Different lowercase letters represent significant differences between different treatments in the same stand ($p < 0.05$). The same below

图1 针叶林和阔叶林淋溶液 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 的变化Fig. 1 Changes of NH_4^+ -N and NO_3^- -N in leaching solution for the coniferous forest and broad-leaved forest

2.2 凋落物和氮添加对淋溶液中 DON 和 DOC 的影响

方差分析(表3)显示: 凋落物对淋溶液中的 DON 和 DOC 有显著影响。针叶林 LS 处理的 DON 较 S 处理的高, 而阔叶林 LS 处理的 DON 较 S 处

理的降低了 39.2% (图 2a)。L 处理凋落物淋溶液中的 DOC 最高, 且针叶林和阔叶林 LS 处理的 DOC 较 S 处理的分别升高了 181.4% 和 74.6% (图 2b)。

表3 氮添加和凋落物对针、阔叶林淋溶中 DON 和 DOC 影响的方差分析(p 值)Table 3 Variance analysis of the influence of nitrogen addition and litter on DON and DOC in the leaching of coniferous and broad-leaved forests (p value)

因素 Factors	针叶林 Coniferous forest		阔叶林 Broad-leaved forest	
	溶解性有机氮 DON	溶解性有机碳 DOC	溶解性有机氮 DON	溶解性有机碳 DOC
氮添加 N	0.000	ns	ns	ns
凋落物 L	0.001	0.014	0.000	0.033
氮添加 \times 凋落物 N \times L	0.002	ns	ns	ns

注: $p < 0.05$ 表示因素对不同溶解性碳氮的影响显著; ns 表示因素对不同溶解性碳氮的影响不显著($p > 0.05$), $n = 3$

Notes: $p < 0.05$ indicate the significant effects and ns indicate the non-significant effects of factors on soluble carbon or nitrogen ($p > 0.05$), $n = 3$.

方差分析(表3)显示: 氮添加、凋落物及二者交互作用对针叶林淋溶液中的 DON 有显著影响。氮添加后, NL 处理针叶林淋溶液中的 DON

较 L 处理升高了 972.6%; 与 LS 和 S 处理比较, NLS 和 NS 处理使淋溶液中的 DON 分别升高了 80.9% 和 415.4%, 但 NLS 处理较 NS 处理降低了

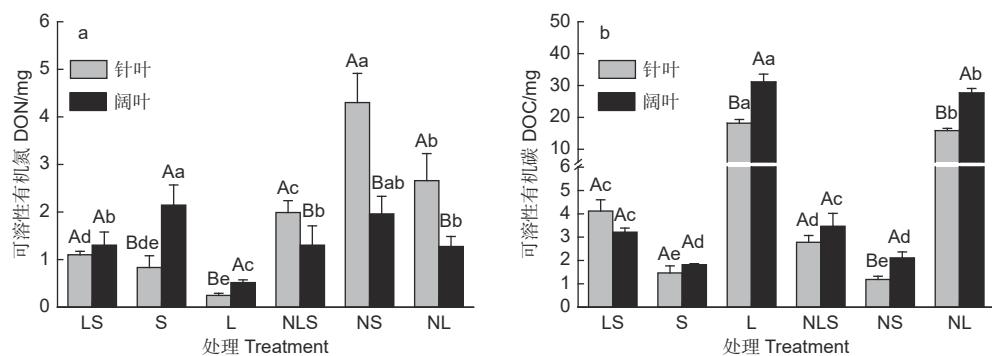
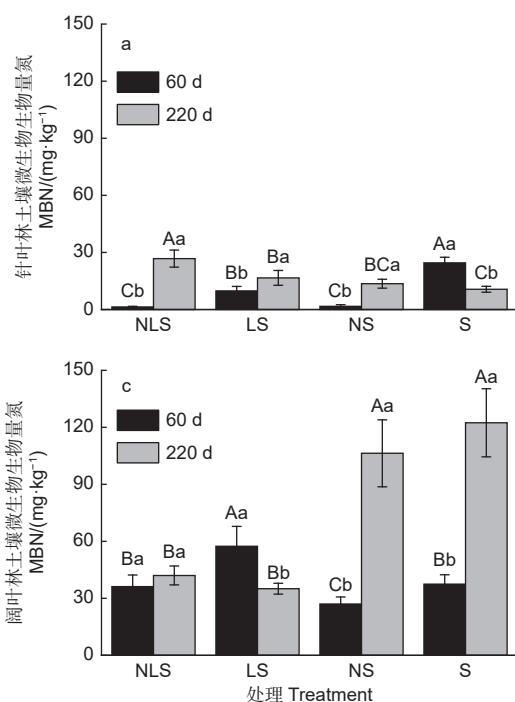


图 2 针叶林和阔叶林淋溶液 DON 和 DOC 的变化

Fig. 2 Changes of DON and DOC in leaching solution for the coniferous forest and broad-leaved forest

53.7%。阔叶林仅 NL 处理的 DON 较 L 处理升高了 147.4%; S 和 L 处理阔叶林淋溶液中的 DON 分别显著高于针叶林 157.0% 和 108.0%, 但在氮添加处理显著低于针叶林 34.5%~54.4% (图 2a)。在针叶林和阔叶林淋溶液中, NL 处理较 L 处理的 DOC 分别降低了 12.8% 和 11.1%; 在针叶林 NLS 处理较 LS 处理降低了 32.5%, 而在阔叶林 NLS 处理较 NS 处理升高 64.3%。L、NS 和 NL 处理阔叶林淋溶液中的 DOC 分别显著高于针叶林 70.9%、78.3% 和 74.2% (图 2b)。



注: 不同大写字母代表同一时间不同处理间差异显著 ($p<0.05$), 不同小写字母代表同一处理中不同时间之间差异显著 ($p<0.05$)

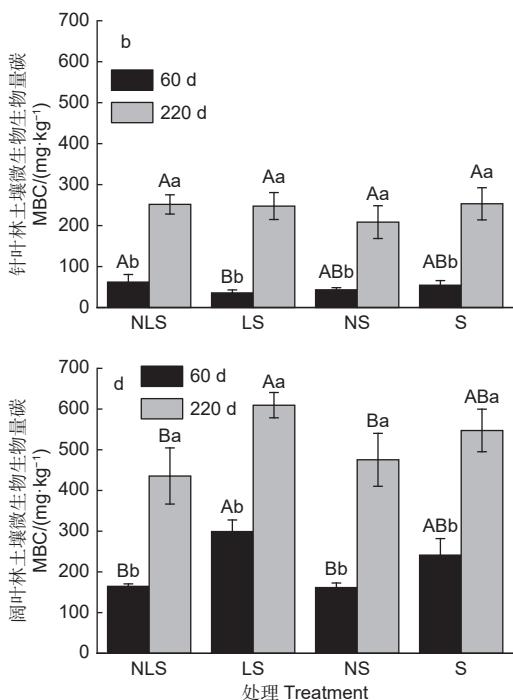
Notes: Different capital letters represent significant difference between different treatments in the same time ($p<0.05$). Different lowercase letters represent significant differences between different time in the same treatments ($p<0.05$)

图 3 针叶林土壤和阔叶林土壤 MBN、MBC 的变化

Fig. 3 Changes of soil MBN and MBC in the coniferous forest and the broad-leaved forest

2.3 调落物和氮添加对针、阔叶林土壤 MBN 和 MBC 的影响

在第 60 天, LS 处理针叶林土壤 MBN 较 S 处理降低了 60.1% (图 3a), 而阔叶林土壤较 S 处理升高了 53.2% (图 3c); 在针叶林和阔叶林, 与 LS 和 S 处理比较, 氮添加使土壤的 MBN 显著降低 27.8%~93.0%; 阔叶林 NLS 处理较 NS 处理显著升高了 33.8%。与第 60 d 相比, 220 d 后, 针叶林 NLS、LS 和 NS 处理土壤 MBN 分别显著增加 1 850.0%、70.2% 和 690.0%, S 处理显著降



低 56.6%；阔叶林 LS 处理显著降低 38.9%，NS 和 S 处理分别显著增加 293.2% 和 226.8%。可见，随着培养针叶林土壤 MBN 有所降低，当凋落物存在情况下则有所增加，且氮添加使 MBN 增加更多。

在第 60 天，土壤 MBC 在针叶林仅 NLS 处理较 LS 处理显著升高了 74.4%（图 3b），而在阔叶林土壤仅 NLS 处理较 LS 处理显著降低了 45.0%（图 3d）。与第 60 天相比，220 d 后，NLS、LS、NS 和 S 处理针叶林和阔叶林土壤 MBC 分别显著增加 305.1%~595.1% 和 103.7%~194.2%。阔叶林中土壤 MBN 和 MBC 均显著高于针叶林土壤。

2.4 各化学指标之间的相关分析

针叶林淋溶液中 NO_3^- -N 与 DOC 呈极显著的负相关，而与 DON 呈显著正相关（表 4）；阔叶林中淋溶的 DOC 与 DON 和 NO_3^- -N 呈极显著负相关， NO_3^- -N 与 DON 呈极显著正相关。

表 4 针叶林和阔叶林淋溶液中各指标的相关分析

Table 4 Correlation analysis of each index in leaching for coniferous forest and broad-leaved forest

林分类型 Forest type	指标 Indicators	铵态氮 NH_4^+ -N	硝态氮 NO_3^- -N	溶解性有机氮 DON
针叶林 Coniferous forest	溶解性有机碳 DOC	ns	-0.861**	ns
	铵态氮 NH_4^+ -N		ns	ns
	硝态氮 NO_3^- -N			0.574*
阔叶林 Broad-leaved forest	溶解性有机碳 DOC	ns	-0.939**	-0.665**
	铵态氮 NH_4^+ -N		ns	ns
	硝态氮 NO_3^- -N			0.715**

注：ns，相关性不显著($p>0.05$)；*和**，相关性显著水平 $p<0.05$ 和 $p<0.01$

Notes: ns indicate the non-significant ($p>0.05$), * and ** indicate the significant correlation between indexes at $p<0.05$ and $p<0.01$ level, respectively

在并没有增加土壤淋溶液中溶解性氮，与 S 处理比较，LS 处理则降低土壤淋溶液中 NO_3^- -N，表明土壤表面凋落物的存在可以降低土壤氮淋溶损失，有利于氮的保持和环境友好，这对生态系统而言，意义远大于对凋落物或土壤的单独研究。

凋落物中可淋溶的 DOC 高于土壤，因此，将提高土壤 DOC 和影响土壤氮转化，尤其是土壤淋溶液中的 NO_3^- -N，其与 DOC 是负相关关系（表 4），可能 DOC 有利于微生物对氮的保持^[26-27]，这与 Ma 等^[28]和 Cheng 等^[29]的研究结论类似。Ma 等^[28]研究表明，溶解性碳输入对土壤氮降低的影响程度与输入碳的量有关，且降低程度在阔叶林大于针叶林。阔叶林凋落物质量（C/N 比为 50.7）显著高于针叶林（C/N 比为 106.7）（表 1），有机碳氮易于分解、矿化，阔叶林凋落物比针叶林有较多的 DOC 淋溶（图 2），因此， NO_3^- -N 降低的量也远高于针叶林土壤（图 1）。在针叶林土壤，与 S 处理比较，LS 处理增加第 220 天土壤 MBN；而来自阔叶林凋落物的 DOC 进入土壤后较针叶林被更多地利用，阔叶林土壤淋溶液 DOC 降低（图 2b），且释放更多的 CO_2 ^[30]，碳损失加快^[25]，导致 MBN 并未增加。凋落物的存在提高针叶林土壤 DOC 和 DON，而降低阔叶林土壤淋溶液 DON 和 MBN，也可能因阔叶林凋落物和土壤有较高的单宁含量^[31]，阔叶林凋落物添加通过非微生物保持^[32]，在单宁的作用下^[33]降低土壤无机氮。

土壤是凋落物分解产物的汇，土壤和凋落物长期相互作用，因土壤微生物代谢活性的差异，针叶林土壤 (DOC) 和 (DON) 普遍低于阔叶林^[34]。由于来自凋落物淋溶液中的溶解性有机物 (DOC 和 DON) 远高于无机物 (NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N)，因此，在野外实际降雨条件下，森林地表可移动 DOM 的持续供给^[35]，凋落物层相互影响^[9,36]，进而影响土壤，使阔叶林土壤保持更多碳氮^[37]。

3.2 氮添加对土壤碳氮的影响

氮添加可促进凋落物分解^[38]，加快物质淋溶损失。研究显示，欧洲赤松叶有很高的 NH_4^+ -N 淋溶损失^[39]。添加 NH_4Cl 后，凋落物淋溶液回收大量的 NH_4^+ -N，说明凋落物只能截留少量的 NH_4^+ -N，而大部分 NH_4^+ -N 进入土壤参与土壤氮转化。研究表明，氮沉降因是否凋落物存在而对土壤氮汇产生不同的影响^[40]。Xiong 等^[41]研究发现，外施氮的 9.8%~13.6% 保留在森林凋落物中，森林凋落物在调控施氮对森林生态系统的影响方面作用显著。

3 讨论

3.1 凋落物对土壤碳氮的影响

凋落物 (L) 淋溶液的无机氮量远低于土壤 (S)（图 1），说明凋落物中溶解性氮较少，野外氮素的淋溶损失风险主要源自土壤。土壤淋溶液中存在大量的 NO_3^- -N 和少量的 DON，且淋溶液中 NO_3^- -N 与 DON 正相关关系（表 4），说明不但无机氮是氮淋溶损失的主要形态^[23]，水溶性的有机氮也存在淋溶风险，甚至有研究显示 DON 是主要的淋溶损失氮形态^[24]。凋落物分解是土壤碳氮的主要来源^[1-2]，且凋落物与土壤一起培养时其分解速率高于其单独培养^[25]，但本研究发现凋落物的存

被截留的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 通过硝化作用提高了氮添加处理调落物淋溶液的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$, 说明调落物保持 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的能力有限。氮添加增加了淋溶液中氮量, 这与已有研究^[39]一致, 但与 NS 比较, NLS 处理显著降低阔叶林土壤淋溶液中的无机氮 (图 1), 且 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 降低量更多。究其原因, 在土壤 pH 较低、碳含量较高的情况下, 土壤以异养硝化为主^[26], 在酸性针叶林土壤异养硝化是 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 产生的主要机理, 而阔叶林不是^[42], 阔叶林在保留调落物情况下, 土壤有较高的硝化潜势^[43]。因此, 添加 NH_4Cl 后, 一方面阔叶林土壤硝化作用高于针叶林, 可能与阔叶林土壤自养硝化增加有关, 第二, 阔叶林调落物促进土壤硝化作用, 增加了土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的淋溶; 同时, 土壤淋溶液 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 在 NLS 处理低于 NS 处理, 表明在氮沉降条件下, 调落物仍具有降低土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 淋出的作用, 从而减缓对水环境的负面影响。可见, 有关降雨淋溶在土壤溶解性 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 产生机理、调落物促进硝化与增加 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 固定方面的研究, 还有待深入。

在调落物通过淋溶输入土壤 DOC 的同时, 无机氮添加通过消耗 DOC 促进土壤或调落物有机氮的矿化, 增加土壤或调落物淋溶液 DON^[11]。本研究显示, 氮添加增加了针叶林淋溶液 DON (图 2), 可能与针叶林土壤氨化作用受到抑制有一定关系^[44], 表明铵态氮沉降有促进针叶林 DON 淋溶损失的可能。可见, 类似氮添加和调落物特性对调落物分解和土壤有机质影响不同的研究^[20,38]、调落物各分层生态化学计量特征差异和对氮沉降响应的不同^[9,36]。在不同森林类型, 土壤 DON 参与淋溶和氮转化的差异及驱动机理, 亟待进一步探究。

4 结论

调落物的存在显著降低土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 淋溶 22.6% (针叶林) 和 29.9% (阔叶林); 即使在氮添加情况下, 调落物也降低土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 淋溶 11.4% (针叶林) 和 23.0% (阔叶林), 表明调落物有利于土壤氮的保持。

调落物可淋溶的 DOC 是 DON 的 73 倍 (针叶林) 和 60 倍 (阔叶林), 表明 DOC 是调落物影响土壤的主要调节物质。

氮添加可改变针阔叶林调落物 DOC 和 DON 输出的变化, 进而影响土壤; 降雨导致的溶解性碳氮自调落物层向下进入土壤的淋溶过程, 是建立起

调落物与土壤间碳氮关系必不可少的外部条件。

参考文献:

- [1] Pisani O, Lin L H, Lun O O Y, et al. Long-term doubling of litter inputs accelerates soil organic matter degradation and reduces soil carbon stocks[J]. Biogeochemistry, 2016, 127(1): 1-14.
- [2] Miao R, Ma J, Liu Y, et al. Variability of aboveground litter inputs alters soil carbon and nitrogen in a coniferous-broadleaf mixed forest of central China[J]. Forests, 2019, 10(2): 188.
- [3] Zhou W J, Sha L Q, Schaefer D A, et al. Direct effects of litter decomposition on soil dissolved organic carbon and nitrogen in a tropical rainforest[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 81(6): 255-258.
- [4] Mastný J, Kaštvorská E, Bártá J, et al. Quality of DOC produced during litter decomposition of peatland plant dominants[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018, 121: 221-230.
- [5] Balestrini R, Delconte C A, Buffagni A, et al. Dynamic of nitrogen and dissolved organic carbon in an alpine forested catchment: Atmospheric deposition and soil solution trends[J]. Nature Conservation, 2019, 34: 41-66.
- [6] Huang W Z, Schoenau J J. Fluxes of water-soluble nitrogen and phosphorous in the forest floor and surface mineral soil of a boreal aspen stand[J]. Geoderma, 1998, 81(3-4): 251-264.
- [7] Jones D L, Hughes L T, Murphy D V, et al. Dissolved organic carbon and nitrogen dynamics in temperate coniferous forest plantations[J]. European Journal of Soil Science, 2008, 59(6): 1038-1048.
- [8] Yang K, Zhu J J, Yan Q L, et al. Soil enzyme activities as potential indicators of soluble organic nitrogen pools in forest ecosystems of Northeast China[J]. Annals of Forest Science, 2012, 69(7): 795-803.
- [9] 郭绮雯, 段文标, 刘玉萍, 等. 调落物添加和模拟氮磷沉降对红松调落物木质素降解和碳释放的影响 [J]. 生态学报, 2021, 41 (16): 6621-6632.
- [10] Zukswert J M, Prescott C E. Relationships among leaf functional traits, litter traits, and mass loss during early phases of leaf litter decomposition in 12 woody plant species[J]. Oecologia, 2017, 185(2): 305-316.
- [11] Sayer E J, Baxendale C, Birkett A J, et al. Altered litter inputs modify carbon and nitrogen storage in soil organic matter in a lowland tropical forest[J]. Biogeochemistry, 2021, 156: 115-130.
- [12] Franklin H M, Chen C, Carroll A R, et al. Leaf litter of two riparian tree species has contrasting effects on nutrients leaching from soil during large rainfall events[J]. Plant and Soil, 2020, 457: 389-406.
- [13] Wang Q, Kwak J H, Choi W J, et al. Long-term N and S addition and changed litter chemistry do not affect trembling aspen leaf litter decomposition, elemental composition and enzyme

- activity in a boreal forest[J]. Environmental Pollution, 2019, 250: 143-154.
- [14] Yu Z P, Huang Z Q, Wang M H, et al. Nitrogen addition enhances home-field advantage during litter decomposition in subtropical forest plantations[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 90: 188-196.
- [15] Huang X L, Chen J Z, Wang D, et al. Simulated atmospheric nitrogen deposition inhibited the leaf litter decomposition of *Cinnamomum migao* H. W. Li in Southwest China[J]. Scientific Reports, 2021, 11: 1748.
- [16] Gill A L, Schilling J, Hobbie S E. Experimental nitrogen fertilisation globally accelerates, then slows decomposition of leaf litter[J]. Ecology Letters., 2021, 24(4): 802-811.
- [17] Fang H J, Cheng S L, Yu G R, et al. Experimental nitrogen deposition alters the quantity and quality of soil dissolved organic carbon in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Applied Soil Ecology, 2014, 81: 1-11.
- [18] Li S S, Du Y H, Guo P, et al. Effects of different types of N deposition on the fungal decomposition activities of temperate forest soils[J]. Science of the Total Environment, 2014, 497-498: 91-96.
- [19] Zhang C, Zhang X Y, Zou H T, et al. Contrasting effects of ammonium and nitrate additions on the biomass of soil microbial communities and enzyme activities in subtropical China[J]. Biogeosciences, 2017, 14(20): 4815-4827.
- [20] Geng J, Fang H, Cheng S, et al. Effects of N deposition on the quality and quantity of soil organic matter in a boreal forest: Contrasting roles of ammonium and nitrate[J]. Catena, 2020, 198: 104996.
- [21] 马书国, 杨玉盛, 谢锦升, 等. 亚热带6种老龄天然林及杉木人工林的枯落物持水性能[J]. 亚热带资源与环境学报, 2010, 5 (2): 31-38.
- [22] Edwards K A, Mcculloch J, Kershaw G P, et al. Soil microbial and nutrient dynamics in a wet Arctic sedge meadow in late winter and early spring[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(9): 2843-2851.
- [23] Huygens D, Boeckx P, Templer P, et al. Mechanisms for retention of bioavailable nitrogen in volcanic rainforest soils[J]. Nature Geoscience, 2008, 1: 543-548.
- [24] Yu Z, Zhang Q, Kraus T E C, et al. Contribution of amino compounds to dissolved organic nitrogen in forest soils[J]. Biogeochemistry, 2002, 61: 173-198.
- [25] Xiong Y M, Zeng H, Xia H P, et al. Interactions between leaf litter and soil organic matter on carbon and nitrogen mineralization in six forest litter-soil systems[J]. Plant and Soil, 2014, 379: 217-229.
- [26] Zhu T, Meng T, Zhang J, et al. Nitrogen mineralization, immobilization turnover, heterotrophic nitrification, and microbial groups in acid forest soils of subtropical China[J]. Biology and Fertility of Soils, 2013, 49(3): 323-331.
- [27] 董冬玉, 王丹婷, 马红亮, 等. 添加葡萄糖对中亚热带阔叶林土壤氮转化的影响[J]. 土壤, 2019, 51 (1): 19-24.
- [28] Ma H L, Yin Y F, Gao R, et al. Response of nitrogen transformation to glucose additions in soils at two subtropical forest types subjected to simulated nitrogen deposition[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(5): 2166-2175.
- [29] Cheng J, Chen Y, He T, et al. Soil nitrogen leaching decreases as biogas slurry DOC/N ratio increases[J]. Applied Soil Ecology, 2016, 111: 105-113.
- [30] 张德强, 孙晓敏, 周国逸, 等. 南亚热带森林土壤CO₂排放的季节动态及其对环境变化的响应 [J]. 中国科学(D辑), 2006, 36 (A01): 130-138.
- [31] 高艳, 马红亮, 高人, 等. 模拟氮沉降对森林土壤酚类物质和可溶性糖含量的影响[J]. 土壤, 2014, 46 (1): 41-46.
- [32] Sotta E D, Corre M D, Veldkamp E. Differing N status and N retention processes of soils under old-growth lowland forest in Eastern Amazonia, Caxiuanã, Brazil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(3): 740-750.
- [33] 马红亮, 刘维丽, 高人, 等. 调落物与单宁酸对森林土壤无机氮的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22 (1): 61-65.
- [34] Xing S H, Chen C R, Zhou B Q, et al. Soil soluble organic nitrogen and active microbial characteristics under adjacent coniferous and broadleaf plantation forests[J]. Journal of Soils and Sediments, 2010, 10(4): 748-757.
- [35] Lee M H, Park J H, Matzner E. Sustained production of dissolved organic carbon and nitrogen in forest floors during continuous leaching[J]. Geoderma, 2018, 310: 163-169.
- [36] 郭绮雯, 段文标, 陈立新, 等. 模拟凋落物添加与氮磷沉降对红松凋落物生态化学计量特征的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27 (7): 1222-1233.
- [37] Cyle K T, Hill N, Young K, et al. Substrate quality influences organic matter accumulation in the soil silt and clay fraction[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, 103: 138-148.
- [38] Jiang X, Cao L, Zhang R, et al. Effects of nitrogen addition and litter properties on litter decomposition and enzyme activities of individual fungi[J]. Applied Soil Ecology, 2014, 80: 108-115.
- [39] Vestgarden L S. Carbon and nitrogen turnover in the early stage of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) needle litter decomposition: effects of internal and external nitrogen[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, 33(3-4): 465-474.
- [40] Ma H L, Lin W, Gao R, et al. Nitrogen addition change soil N pools with litter removal or not in subtropical forest[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2020, 66(3): 421-428.
- [41] Xiong Y M, Xu X L, Zeng H, et al. Low nitrogen retention in soil and litter under conditions without plants in a subtropical pine plantation[J]. Forests, 2015, 6(7): 2387-2404.
- [42] Zhang J, Müller C, Zhu T, et al. Heterotrophic nitrification is the predominant NO₃⁻ production mechanism in coniferous but not broad-leaf acid forest soil in subtropical China[J]. Biology and Fertility of Soils, 2011, 47(5): 533-542.
- [43] 陈灿灿, 马红亮, 高人, 等. 施氮与凋落物去除影响下中亚热带阔叶林土壤氮素矿化潜势和硝化潜势研究[J]. 生态环境学报, 2021, 30 (3): 503-511.

- [44] Fujii K, Yamada T, Hayakawa C, et al. Decoupling of protein depolymerization and ammonification in nitrogen mineralization of acidic forest soils[J]. Applied Soil Ecology, 2020, 153: 103572.

Effects of Litter and Nitrogen Addition on Carbon and Nitrogen in Soil Leaching Solution of Subtropical *Castanopsis fabric* and *Cunninghamia lanceolata* Forest

WANG Meng-si^{1,2,4}, MA Hong-liang^{1,2}, GUAN Xiao-hui³, GAO Ren^{1,2}, YIN Yun-feng^{1,2}

(1. State Key Laboratory for Subtropical Mountain Ecology of the Ministry of Science and Technology and Fujian Province, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, Fujian, China; 2. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, Fujian, China; 3. Wanmulin Nature Reserve Management Station of Fujian Province, Jianou 353100, Fujian, China; 4. Jiangsu Mudu Senior High School, Suzhou 215000, Jiangsu, China)

Abstract: [Objective] Litter is the main source of carbon and nitrogen in forest soils. The effect of litter decomposition on soil carbon and nitrogen by leaching was studied through analyzing the changes of dissolved carbon and nitrogen in litter or soil leaching solution, for exploring the relationship between litter decomposition and soil carbon and nitrogen. [Method] Soil and litter in broad-leaved and coniferous forests were collected from subtropical forests. Six treatments were set, including litter, soil, litter + soil, nitrogen + litter, nitrogen + soil, and litter + soil + nitrogen. Three replicates were set for each treatment. The nitrogen addition amount was $120\text{mg NH}_4^+ \cdot \text{N} \cdot \text{kg}^{-1}$ soil. The amount of litter added in coniferous and broad-leaved forests was $12.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $19.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. The litter was placed on the surface of soil or quartzite, and the soil moisture was controlled at 60% water-holding capacity. An incubation experiment was carried out with nitrogen addition by leaching to simulate nitrogen deposition in a dark incubator at 25°C for 220 days. During the incubation period, the nitrogen solution leached in 5 times with different nitrogen amounts, each with 110 mL of solution (80, 10, 10, 10, 10 mg $\text{NH}_4^+ \cdot \text{N}$ in sequence according to the number of leaching times), and the leaching solution was collected and measured.. In addition, the dissolved organic carbon (DOC) and nitrogen (DON), and $\text{NH}_4^+ \cdot \text{N}$ and $\text{NO}_3^- \cdot \text{N}$ in the leaching solution were also measured. [Result] The results showed that the litter leaching solution had lower inorganic nitrogen and DON, and higher DOC. Litter addition significantly reduced the $\text{NO}_3^- \cdot \text{N}$ by 22.6% and 29.9% in the coniferous forest and broad-leaved forest soil leaching solution, respectively and increased the DOC by 181.4% in the coniferous forest soil leaching solution. However, litter addition significantly decreased the DON by 39.2% in the broad-leaved forest soil leaching solution and MBN by 53.2% in the broad-leaved forest soil. Under nitrogen addition, the interception of added nitrogen by litter was less, and the interception of litter in broad-leaved forest litter was higher than that in coniferous forest. Litter input to soil by leaching decreased DOC, while DON increased. Nitrogen addition increased soil leaching inorganic nitrogen and coniferous forest soil leaching solution DON, but the effect of litter on reducing soil nitrogen leaching was not weakened by nitrogen addition. [Conclusion] The litter slows down the negative impact of soil $\text{NO}_3^- \cdot \text{N}$ output on water environment. Nitrogen addition can affect soil nitrogen changes by altering the output of DOC and DON in broad-leaved and coniferous forest litters.

Keywords: litter; coniferous forest; broad-leaved forest; dissolved organic carbon and nitrogen; inorganic nitrogen