

氮添加对滇中高原森林凋落物养分残留及其持水性的影响

肖文贤¹, 宋娅丽^{1,2}, 王克勤^{1,2}, 安文雄¹, 苏孟白¹

(1.西南林业大学生态与环境学院,昆明 650224;

2.国家林业和草原局云南玉溪森林生态系统国家定位观测研究站,昆明 650224)

摘要:为揭示森林生态系统养分循环和水循环对氮沉降的响应机制,以滇中高原华山松(*Pinus armandii*)和云南松(*Pinus yunnanensis*)为研究对象,开展野外氮添加下凋落叶、枝原位分解研究试验,设置对照[N 0 g/(m²·a),CK]、低氮[N 10 g/(m²·a),LN]、中氮[N 20 g/(m²·a),MN]和高氮[N 25 g/(m²·a),HN]共 4 个处理,利用尼龙网袋法和室内浸泡法,探究凋落叶、枝养分元素残留率、持水量和持水率及吸水速率对氮添加的响应。结果表明:(1)随着分解时间的持续,2 种林分凋落叶、枝碳(C)、氮(N)、磷(P)分别呈释放、富集—释放、富集过程,凋落叶 C、N、P 残留率显著小于凋落枝($p < 0.05$);(2)凋落叶最大持水量和最大吸水速率显著大于凋落枝($p < 0.05$),分解 24 个月时,与 CK 相比,LN 处理下 2 种林分凋落叶、枝 C,华山松凋落叶 N 残留率降低 1.98%~7.27%,10.79%,HN 处理下 2 种林分凋落叶、枝 C,华山松凋落叶、枝和云南松凋落枝 N,华山松凋落枝 P 残留率则增加 4.26%~9.08%,11.94%~44.51%,42.42%;(3)分解 24 个月时,与 CK 相比,LN、MN 和 HN 处理华山松凋落叶、枝和云南松凋落叶最大持水量和最大吸水速率分别降低 11.44%~25.24%,5.81%~32.23%,云南松凋落枝则增加 15.48%~24.26%,17.97%~23.74%。(4)2 种林分凋落叶、枝持水量随浸泡时间延长而增加,而吸水速率则为降低,持水量与浸泡时间的关系均呈对数函数关系($m = a + b \ln t$),吸水速率与浸泡时间的关系呈幂函数关系($v = at^{-b}$)。(5)C 与云南松凋落枝持水性呈正相关关系($p < 0.05$),N 与华山松凋落枝、P 与华山松和云南松凋落叶持水性呈负相关关系($p < 0.05$)。综上,氮添加通过改变凋落物分解过程中 C、N、P 养分元素残留特征进而影响其持水性。

关键词:氮添加;凋落叶;凋落枝;养分残留;持水量;持水率;吸水速率

中图分类号:S715 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2023)03-0319-11

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbxb.2023.03.041

Influence of Nitrogen Addition on Nutrient Residues and Water Holding Capacity of Forest Litter in Central Yunnan Plateau, China

XIAO Wenxian¹, SONG Yali^{1,2}, WANG Kegin^{1,2}, AN Wenxiong¹, SU Mengbai¹

(1.College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224;

2.Yuxi Forestry Ecosystem Research Station of National Forestry and Grassland Administration, Kunming 650224)

Abstract: In order to reveal the response mechanism of nutrient cycling and water cycling to nitrogen deposition in forest ecosystem, we conducted a study on a situ decomposition of leaf and twig litters of *Pinus armandii* forest and *Pinus yunnanensis* forest in the middle Yunnan Plateau. Four treatments were set up: control (N 0 g/(m²·a), CK), low nitrogen (N 10 g/(m²·a), LN), medium nitrogen (N 20 g/(m²·a), MN) and high nitrogen (N 25 g/(m²·a), HN). Nylon mesh bag method and laboratory soaking method were used. The response of nutrient element residual rate, water holding capacity, water holding rate and water absorption rate of leaf and twig litters to nitrogen addition were explored. The results showed that: (1) With the continuation of decomposition time, carbon, nitrogen and phosphorus content of leaf and twig litters in two types of forests showed the trends of release, enrichment-release and enrichment, respectively, and the residue rates of C, N and P in leaf litters were significantly lower than those in twig litters ($p < 0.05$). (2) The

收稿日期:2022-11-16

资助项目:云南省教育厅科学研究基金项目(2022J0510);国家自然科学基金项目(30660037);云南省科技厅“三区”人才支持计划项目(90202101);云南省自然生态监测网络云南玉溪森林生态站运行项目(2022-YN-13);云南玉溪森林生态系统国家长期科研基地项目(2020132550)

第一作者:肖文贤(1991—),女,在读硕士研究生,主要从事森林凋落物对气候变化响应的研究。E-mail:845388187@qq.com

通信作者:王克勤(1964—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事生态修复研究。E-mail:wangkeqin7389@sina.com

maximum water holding capacity and water absorption rate of leaf litters were significantly higher than that of twig litters ($p < 0.05$). After 24 months of decomposition, compared with CK, the C residual rates of leaf and twig litters in two types of forests, and the N residual rate of leaf litters in *P. armandii* forest under LN treatment were reduced by 1.98%~7.27% and 10.79%, respectively. The C residual rates of leaf and twig litters in two types of forests, and the N residual rate of leaf and twig litters in *P. armandii* forest and twig litters in *P. yunnanensis* forest, the P residual rate of twig litters in *P. armandii* forest under HN treatment increased by 4.26%~9.08%, 11.94%~44.51% and 42.42%, respectively. (3) After 24 months of decomposition, compared with CK, the maximum water holding capacity and water absorption rate of leaf and twig litters in *P. armandii* forest and leaf litters in *P. yunnanensis* forest under LN, MN and HN treatments decreased by 11.44%~25.24% and 5.81%~32.23%, respectively; while twig litters in *P. yunnanensis* forest increased by 15.48%~24.26%, 17.97%~23.74%, respectively. (4) The water capacity of leaf and twig litters in two types of forests increased with the extension of soaking time, but the water absorption rate decreased. The relationship between water capacity and soaking time was logarithmic function ($m = a + b \ln t$), and the relationship between water absorption rate and soaking time was power function ($v = at^{-b}$). (5) C content was positively correlated with the water holding capacity of twig litters in *P. yunnanensis* forest ($p < 0.05$), N content was negatively correlated with the water holding capacity of leaf litters in two types of forests ($p < 0.05$). In conclusion, nitrogen addition affects the water holding capacity of litters by changing the residual characteristics of C, N and P nutrient elements during the decomposition process.

Keywords: nitrogen addition; leaf litter; twig litter; nutrient residues; water holding capacity; water holding rate; water absorption rate

氮沉降指大气中的氮元素以 NH_x (包括 NH_3 、 RNH_2 和 NH_4^+) 和 NO_x 的形式, 降落到陆地和水体的过程。在全球氮沉降背景下, 氮沉降分布区域正从欧美等发达国家向发展中国家转移, 并从温带向热带和亚热带扩展, 中国作为全球大气氮沉降量最高的区域之一, 氮沉降对其带来的影响不容小觑^[1]。氮沉降对森林生态系统的养分循环产生不同影响, 其持续增加还引起氮富集、土壤酸化、植物多样性减少, 进而导致森林生态系统功能衰退^[1-2]。

凋落物在森林生态系统养分循环和水土保持中具有重要作用^[3-4]。凋落物分解过程中伴随着养分元素碳(C)、氮(N)、磷(P)的释放, 释放的养分元素入渗进入土壤, 不仅提高微生物活性和多样性, 而且改善土壤结构, 增强土壤蓄水保水功能^[5]。氮沉降作为影响森林生态系统养分循环的驱动因子之一, 其对凋落物分解过程中养分释放的影响尚无统一论, 主要表现为促进或抑制^[6]。张乃木等^[7]研究表明, 氮沉降促进凋落物分解过程中 P 的释放; 而张雨鉴等^[6]研究表明, 氮沉降抑制凋落物分解过程中 C、N、P 的释放; 同时, Zhang 等^[8]研究发现, 氮沉降抑制凋落物 C 和 P 的释放, 并随着氮沉降时间延长而增强。目前, 针对凋落物持水性的研究已取得较多成果, 丁咸庆等^[9]研究发现, 凋落物持水性与凋落物 C、N 存在显著影响; 吴迪等^[10]研究发现, 凋落物最大持水量由其分解率决定; Jourgholami 等^[11]研究发现, 不同种类的凋

落物具有多种水文功能和持水能力。但是, 以上关于凋落物持水性的研究多倾向于不同分解程度、不同林分对凋落物持水性的影响, 而针对氮沉降对凋落物持水性影响的研究则鲜有报道。鉴于此, 拟通过研究氮添加对滇中高原森林凋落物养分残留及其持水性的影响, 探讨氮添加下调落物养分残留及其持水性的关系, 为分析氮沉降对森林生态系统养分循环和水土保持功能的影响提供科学参考。

磨盘山位于云贵高原、横断山地和青藏高原的接合部, 除自然地理环境独特、生物多样性丰富外, 其森林生态系统在水土流失防治和水源涵养方面还具有显著作用。华山松(*Pinus armandii*)作为该区域的主要成林树种, 平均林龄为 20 年, 正处于生长高峰期, 其凋落叶、枝的科研价值较高; 此外, 华山松林生态系统碳储量(503.5 t/hm^2)是我国森林生态系统平均值(258.8 t/hm^2)的 1.9 倍^[12], 具有较强的固碳能力。云南松(*Pinus yunnanensis*)作为滇中高原现有面积较大的森林类型之一, 具有更新能力强、生长快速、耐干旱等优质特性, 属于滇中高原森林群落中的优势造林树种, 云南松林在乔木层植物碳储量约占针叶林碳储量 69.9%^[13]。因此, 以华山松和云南松凋落叶、枝为研究对象, 采用凋落物原位分解法, 研究氮添加对林下凋落叶、枝分解过程中养分残留和持水性能的影响, 探讨在氮添加下不同处理 2 种林分凋落叶、枝的 C、N、P 残留率、持水量和持水率及吸

水速率的变化特征,为理解和揭示氮沉降对磨盘山森林生态系统养分循环和水文生态功能的影响提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于云南玉溪森林生态系统国家定位观测研究站(23°46′18″—23°54′34″N,101°16′06″—101°16′12″E),是云南亚热带北部与亚热带南部气候过渡带,属中亚热带半湿润凉冬高原季风气候。年均气温为 14~16℃,降水集中在 5—10 月,年均降水量为 1 000~1 100 mm,海拔为 1 260.0~2 614.4 m。主要土壤类型有山原红壤和红壤性土,高海拔区域分布有黄红壤,土壤厚度以中厚土壤层为主,局部为薄土层。森林覆盖率达 86%,植被类型分布随海拔高度增大显现出明显垂直分布特征,其主要分布的森林

植被类型有亚热带暖性常绿阔叶林、亚热带中山针阔混交林、针叶林和高山矮林等。优势树种以云南常见树种华山松(*Pinus armandii*)、云南松(*Pinus yunnanensis*)、云南油杉(*Keteleeria evelyniana* Mast)、油杉(*Keteleeria fortunei*)等为主。

1.2 试验方法

1.2.1 试验准备与样地设计 2018 年 10—12 月,收取观测站中华山松林(纯林)和云南松林(纯林)内未分解的凋落叶、凋落枝(在自然状态下,收集不同大小、不同直径的凋落枝,其中,3~5 mm 的凋落枝占比较大),密封带回实验室,并在 65℃烘箱内烘干,烘干后分别称取凋落叶、枝各 10.0 g 装入分解袋(规格为 20 cm×20 cm,表面孔洞直径为 1 mm),装袋时确保凋落叶、枝能均匀平整填满分解袋平面。凋落叶、枝基础化学元素含量见表 1。

表 1 2 种林分凋落叶和凋落枝初始基础化学元素含量

林分类型	凋落物组分	碳/(mg·g ⁻¹)	氮/(mg·g ⁻¹)	磷/(mg·g ⁻¹)	碳氮比
华山松	凋落叶	522.36±1.30a	12.94±0.27c	1.21±0.02d	40.37±0.12b
	凋落枝	520.45±1.50a	7.37±0.09c	0.86±0.02d	70.63±0.16b
云南松	凋落叶	554.88±1.60a	6.86±0.12c	1.33±0.03d	80.85±0.30b
	凋落枝	574.40±1.10a	4.35±0.04c	1.15±0.04d	132.07±0.72b

注:表中数据为平均值±标准差;同行不同字母表示同一组分不同基础化学元素间差异显著($p<0.05$)。下同。

2019 年 1 月,在研究区内的华山松林和云南松林中各选取 3 块 20 m×20 m 的标准样地(表 2),在每个标准样地中随机布设 4 个 3 m×3 m 的小样方

(间距>10 m),用来放置凋落叶、枝分解袋(各 288 袋,4 个处理×24 个月×3 个重复),并进行施氮处理。

表 2 2 种林分标准样地概况

林分类型	海拔/m	林龄/a	平均树高/m	平均胸径/cm	郁闭度	坡度/(°)	坡向/(°)	土壤类型
华山松	2151.00±24.30	18.70±0.50	10.47±1.31	19.97±3.40	0.70±0.10	19.00±0.80	东北方向 9	山地红壤
云南松	2195.70±31.90	22.70±0.90	9.57±1.36	11.23±1.17	0.80±0.10	13.30±3.30	西北方向 57	山地红壤

1.2.2 氮添加处理 在参考张晓曦等^[14]、张雨鉴等^[6]和周世兴等^[15]的研究基础上,依据研究区年氮沉降量[3.84 g/(m²·a)],考虑未来大气氮沉降量增加趋势可能性,设置对照[N 0 g/(m²·a),CK]、低氮[N 10 g/(m²·a),LN]、中氮[N 20 g/(m²·a),MN]和高氮[N 25 g/(m²·a),HN]共 4 个处理。氮添加的氮源为尿素 CO(NH₂)₂溶液,采用背式电动喷雾器在小样方内人工均匀喷洒装有凋落物的分解袋。按上述操作人工进行喷施氮处理,固定每月中旬 1 次,第 1 年喷施氮时间为 2019 年 1—12 月,因新冠疫情影响,导致喷施氮处理未能连续进行,故第 2 年喷施氮时间为 2020 年 6 月至 2021 年 5 月,合计共喷洒 24 次,除 CK 喷洒相同量清水外,其他处理管控方法均相同。

1.2.3 样品回收与处理 第 1 年采样时间为 2019 年 2 月至 2020 年 1 月中旬,共已完成取样 12 次。回收

的所有样品均来自试验的第 2 年,即 2020 年 7 月—2021 年 6 月中旬(由于新冠疫情的影响,第 2 年采样工作于 2020 年 7 月开始),分别收取华山松林和云南松林每种处理凋落叶、枝分解袋各 3 袋,共取样 12 次。将收集的凋落物分解袋密封保存并带回实验室,取出分解袋内的凋落叶、枝,清除附着在其表面的多余杂物,置于 65℃烘箱烘干至质量恒定。

将烘干的凋落叶、枝粉碎、过筛(规格为 0.150 mm),用于测定凋落叶、枝 C、N、P 含量,其中,不同分解时间凋落叶、枝的 C、N、P 含量分别用重铬酸钾—外加热硫酸氧化法(LY/T 1237—1999)、半微量凯氏定氮法(LY/T 1269—1999)和钼锑抗比色法^[7](LY/T 1270—1999)测定。

称取烘干的凋落叶、枝各 5 g(m_0)分别装入规格为 8 cm×10 cm 的茶叶过滤网袋,浸入装有纯净水的烧杯中,烧杯水面要略高于过滤网袋顶部,参照丁

咸庆等^[9]、蒲嘉霖等^[16]和王忠禹等^[17]的研究,浸泡时长设置在第 0.5,1,2,4,6,8,10,12,24 h 后,取出过滤网袋,并静止 10 min 直至不滴水后,称其质量,每种处理 3 个重复,计算凋落叶、枝在不同浸泡时间的持水量、持水率和吸水速率。

1.3 测定方法

(1)凋落叶、枝 C、N、P 残留率计算公式^[7]为:

$$R = \frac{C_t \times M_t}{C_0 \times M_0} \times 100\%$$

式中: C_t 为分解 t 时间烘干的凋落物 C、N、P 含量(mg/g); C_0 为凋落物初始 C、N、P 含量(mg/g); M_t 为分解 t 时间烘干的凋落物残留质量(g); M_0 为凋落物初始干质量 10.0 g。

(2)凋落叶、枝持水量计算公式^[18]为:

$$M = m_t - m_0$$

式中: M 为凋落叶、枝持水量(g/g); m_t 为凋落叶、枝浸泡 t 时间后的湿重(g); m_0 为凋落叶、枝初始质量(5.00 g)。

(3)凋落叶、枝持水率计算公式^[5]为:

$$L = \frac{m_t - m_0}{m_0} \times 100\%$$

式中: L 为凋落叶、枝持水率(%); m_t 为凋落叶、枝浸泡 t 时间后的湿重(g); m_0 为凋落叶、枝初始质量(5.00 g)。

(4)凋落叶、枝吸水速率计算公式^[5]为:

$$V = \frac{m_t - m_0}{t}$$

式中: V 为凋落叶、枝吸水速率[g/(g·h)]; m_t 为凋落叶、枝浸泡 t 时间后的湿重(g); m_0 为凋落叶、枝初始质量(5.00 g); t 为凋落叶、枝浸泡时间(h)。

1.4 数据处理

采用 Excel 2019、SPSS 22.0 和 Origin 2021 软件进行数据整理分析及相关图表绘制。采用重复测量方差分析分解时间和氮处理及其二者交互作用对凋落叶、枝 C、N、P 残留率及持水量持水率和吸水速率的影响;采用单因素方差法和最小显著差异法分析不同处理凋落叶、枝的 C、N、P 残留率及最大持水量和最大吸水速率的差异性;采用 RDA 分析 2 种林分凋落叶、枝 C、N、P 养分残留率与最大持水量、最大持水率和最大吸水速率的相关关系。

2 结果与分析

2.1 氮添加下 2 种林分凋落叶、枝 C、N、P 残留率变化特征

由图 1~图 3 可知,分解 13~24 个月,重复测量方差分析表明,分解时间、氮处理及其二者交互作用对 2 种林分凋落叶、枝 C、N、P 残留率均有极显著影响($p < 0.001$);单因素方差分析表明,氮处理下 2 种林分

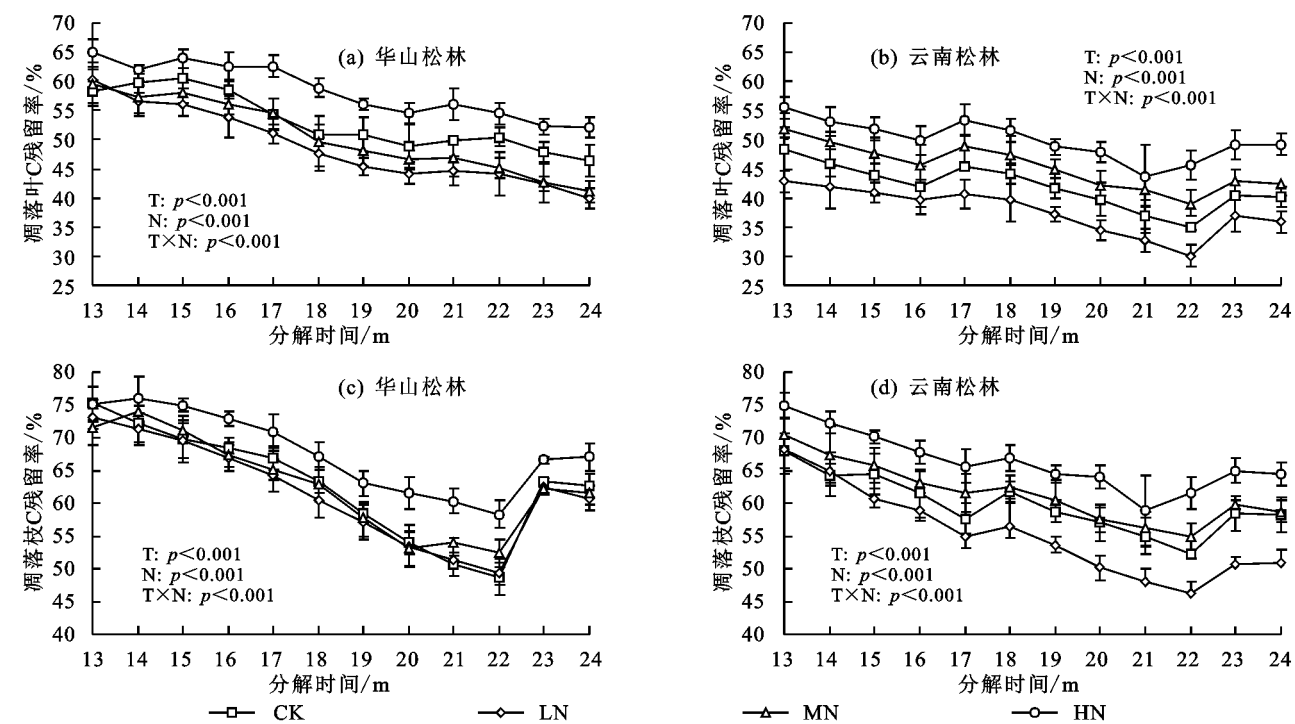
凋落叶、枝 C、N 残留率均与 CK 有显著差异($p < 0.05$)。

独立样本 T 检验表明,各处理下同一种林分凋落叶与凋落枝间 C、N、P 残留率均有显著差异($p < 0.05$),即同一种林分凋落叶 C、N、P 残留率较凋落枝小;2 种林分凋落叶 C、P 残留率有显著差异($p < 0.05$),即云南松凋落叶 C、P 残留率较华山松小;2 种林分凋落枝间 C、P 残留率差异不显著($p > 0.05$);2 种林分凋落叶、枝 N 残留率有显著差异($p < 0.05$),即华山松凋落叶、枝 N 残留率较云南松小。

2.1.1 C 残留率随分解时间的变化特征 由图 1 可知,华山松凋落叶分解过程中 C 残留率随分解时间持续进行释放,华山松凋落枝和云南松林凋落叶、枝分解过程中 C 残留率在分解第 13~22 个月呈释放,在分解第 23~24 个月呈富集。分解 24 个月时,LN 和 MN 处理华山松凋落叶、枝 C 残留率较 CK(46.38%, 62.75%)分别减少 6.53%和 5.34%,1.98%和 1.19%($p < 0.05$),HN 处理则分别增加 5.69%,4.26%($p < 0.05$);LN 处理的云南松凋落叶、枝 C 残留率较 CK(40.13%, 58.20%)分别减少 4.29%,7.27%($p < 0.05$),HN 处理则分别增加 9.08%,6.24%($p < 0.05$)。

2.1.2 N 残留率随分解时间的变化特征 由图 2 可知,华山松凋落叶、枝和云南松凋落叶分解过程中 N 残留率随分解时间持续进行呈富集—释放,云南松凋落枝则呈富集。分解 24 个月时,LN 处理华山松凋落叶 N 残留率较 CK(38.93%)减少 10.79%($p < 0.05$),HN 处理则增加 11.94%($p < 0.05$),LN 和 HN 处理华山松凋落枝 N 残留率较 CK(56.87%)均分别增加 8.80%和 28.32%($p < 0.05$);各氮处理的云南松凋落叶 N 残留率与 CK 相比差异不显著($p > 0.05$),HN 处理云南松凋落枝 N 残留率较 CK(205.84%)增加 44.51%($p < 0.05$)。

2.1.3 P 残留率随分解时间的变化特征 由图 3 可知,2 种林分凋落叶、枝分解过程中 P 残留率随分解时间持续进行整体呈波动变化。其中,华山松凋落叶呈释放—富集,即在分解第 13~18 个月呈释放、分解第 18~24 个月呈富集;华山松凋落枝呈富集—释放—富集,即在分解第 13~17 个月呈富集、分解第 17~19 个月呈释放、分解第 19~24 个月呈富集;云南松凋落叶呈缓慢释放;云南松凋落枝呈释放—富集—释放,即在分解第 13~19 个月呈释放、分解第 19~22 个月呈富集、分解第 22~24 个月呈释放。分解 24 个月时,各氮处理的华山松凋落叶和云南松凋落叶、枝 P 残留率与 CK 相比差异不显著($p > 0.05$),HN 处理华山松凋落枝 P 残留率较 CK(118.69%)增加 42.42%($p < 0.05$)。



注: T 为时间; N 为氮处理; × 表示其交互作用。下同。

图 1 2 种林分不同氮处理凋落叶、枝分解过程中 C 残留率变化特征

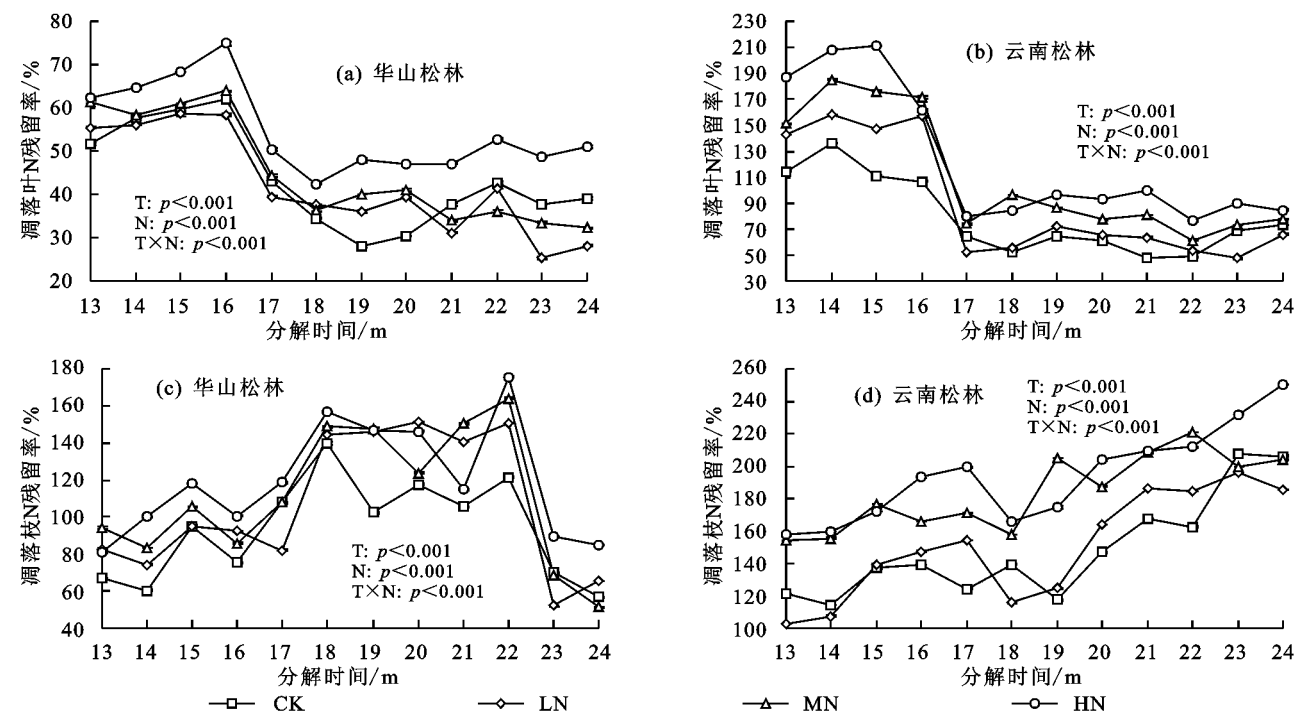


图 2 2 种林分不同氮处理凋落叶、枝分解过程中 N 残留率变化特征

2.2 分解时间和氮添加对 2 种林分凋落叶、枝持水量、持水率和吸水速率的重复测量方差分析

分别对 2 种林分凋落叶、枝分解过程中持水量、持水率和吸水速率进行重复测量方差分析(表 3),分解时间(T)和氮处理(N)及其二者交互作用对 2 种林分凋落叶、枝持水量、持水率和吸水速率均有极显著影响($p < 0.001$)。

2.3 氮添加下 2 种林分凋落叶、枝持水能力变化特征

2.3.1 最大持水量变化特征 一般来说,最大持水量

指凋落物浸入水中 24 h 后的持水量。由表 4 可知,相同处理 2 种林分凋落叶最大持水量显著大于凋落枝($p < 0.05$);不同处理 2 种林分凋落叶、枝最大持水量差异显著($p < 0.05$),具体为华山松凋落叶 CK>MN>LN>HN,凋落枝 CK>MN>HN>LN;云南松凋落叶 CK>MN>LN>HN,凋落枝 MN>LN>HN>CK。

分解 24 个月时,LN、MN 和 HN 处理华山松凋落叶、枝最大持水量较 CK(18.97, 12.64 g/g)分别减少 16.82%,16.34%和 23.56%,23.10%,14.48%和 16.22%

($p < 0.05$); LN、MN 和 HN 处理下, 云南松凋落叶最大持水量较 CK (17.94 g/g) 分别减少 15.01%, 11.44% 和

25.24% ($p < 0.05$), 而凋落枝较 CK (9.15 g/g) 则分别增加 19.78%, 24.26% 和 15.48% ($p < 0.05$)。

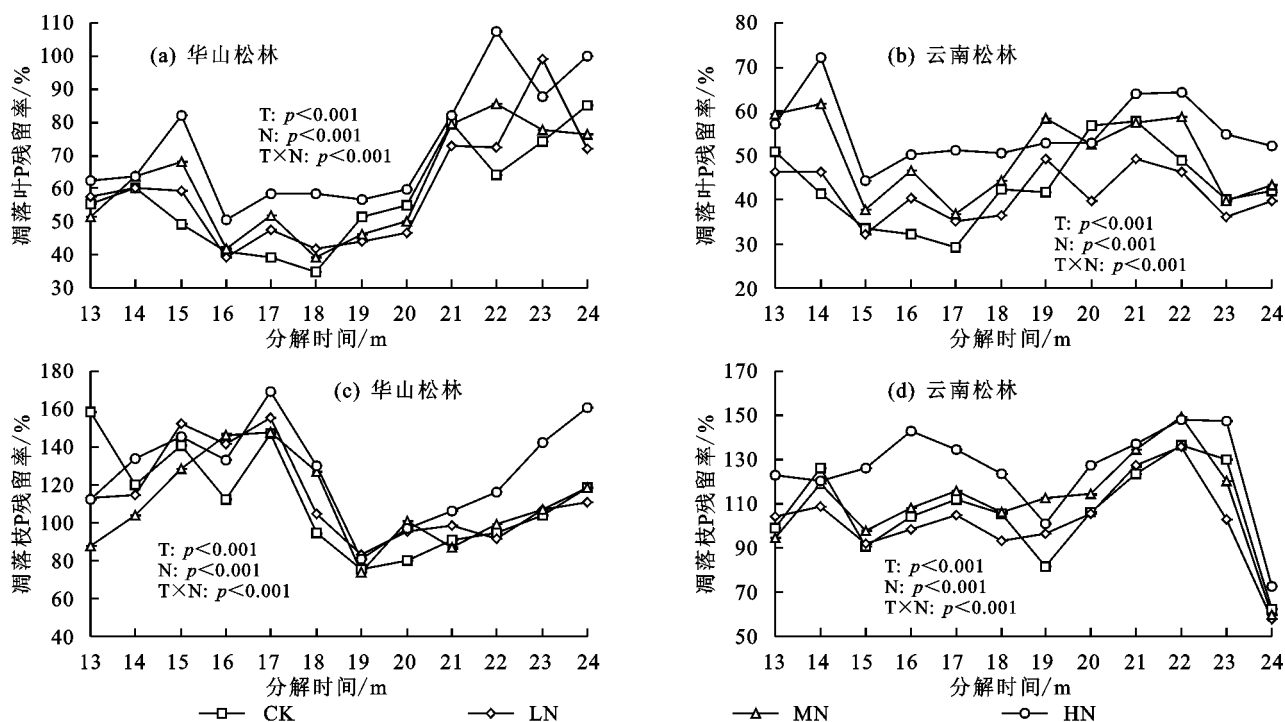


图 3 2 种林分不同氮处理凋落叶、枝分解过程中 P 残留率变化特征

表 3 分解时间和氮添加对 2 种林分凋落叶、枝持水量、持水率和吸水速率的重复测量方差分析

林分类型	影响因子	持水量/(g·g ⁻¹)				持水率/%				吸水速率/(g·g ⁻¹ ·h ⁻¹)			
		凋落叶		凋落枝		凋落叶		凋落枝		凋落叶		凋落枝	
		F	p	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p
华山松	T	947.767	<0.001	400.270	<0.001	946.599	<0.001	402.718	<0.001	6.544	<0.001	16.279	<0.001
	N	8350.922	<0.001	2372.602	<0.001	8347.000	<0.001	2372.731	<0.001	21.199	<0.001	22.588	<0.001
	T×N	20.902	<0.001	6.835	<0.001	20.878	<0.001	6.828	<0.001	4.797	<0.001	2.834	<0.001
云南松	T	104.232	<0.001	339.839	<0.001	104.250	<0.001	339.792	<0.001	27.133	<0.001	7.826	<0.001
	N	4055.749	<0.001	1544.117	<0.001	4055.724	<0.001	1544.118	<0.001	21.775	<0.001	26.980	<0.001
	T×N	9.178	<0.001	7.250	<0.001	9.177	<0.001	7.251	<0.001	2.743	<0.001	2.837	<0.001

表 4 2 种林分不同氮处理凋落叶、枝分解 24 个月时的最大持水量单因素方差分析

林分类型	凋落物组分	最大持水量/(g·g ⁻¹)				F	p
		CK	LN	MN	HN		
华山松	凋落叶	18.97±0.71	15.78±0.60	15.87±0.42	14.50±1.13	18.693	0.001**
	凋落枝	12.64±0.71	9.72±0.60	10.81±0.42	10.59±1.13	7.803	0.009**
云南松	凋落叶	17.94±1.79	15.25±2.15	15.89±0.89	13.41±1.45	3.906	0.050*
	凋落枝	9.15±0.56	10.96±0.31	11.37±0.61	10.57±0.19	13.553	0.002**
	F	56.308	20.293	61.110	10.234		
	p	0**	0**	0**	0.004**		

注: ** 表示 $p < 0.01$; * 表示 $p < 0.05$ 。下同。

2.3.2 最大吸水速率变化特征 一般来说, 凋落物浸入水中 0.5 h 内的吸水速率最快, 此时的吸水速率可称为该凋落物的最大吸水速率。由表 5 可知, 相同处理 2 种林分凋落叶最大吸水速率显著大于凋落枝 ($p < 0.05$); 不同处理 2 种林分凋落叶、枝最大吸水速率差异显著 ($p < 0.05$), 具体为华山松凋落叶 CK > LN > MN > HN, 凋落枝 CK > MN > LN > HN; 云南

松凋落叶 CK > MN > LN > HN, 凋落枝 MN > HN > LN > CK。

分解 24 个月时, LN、MN 和 HN 处理华山松凋落叶、枝最大吸水速率较 CK [33.11, 15.25 g/(g·h)] 分别减少 14.64%, 18.30% 和 26.82%, 23.83%, 21.34% 和 32.23% ($p < 0.05$); LN、MN 和 HN 处理下, 云南松凋落叶最大持水量较 CK [29.60 g/(g·h)] 减少 12.97%, 5.81% 和

22.14%($p<0.05$),而凋落枝较 CK[11.54 g/(g·h)]则分别 增加 17.97%,24.26%和 23.74%($p<0.05$)。

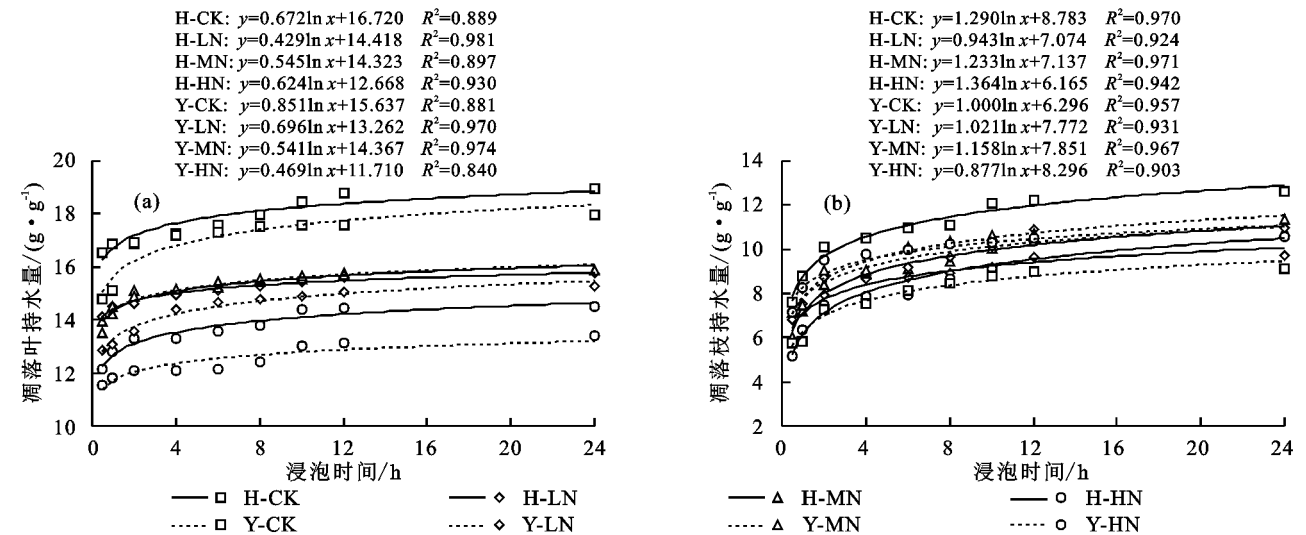
表 5 2 种林分不同氮处理凋落叶、枝分解 24 个月时的最大吸水速率单因素方差分析(平均值±标准差)

林分 类型	凋落物 组分	最大吸水速率/(g·g ⁻¹ ·h ⁻¹)				F	p
		CK	LN	MN	HN		
华山松	凋落叶	33.11±1.42	28.27±1.42	27.05±1.03	24.23±2.58	14.001	0.002**
	凋落枝	15.25±1.25	11.61±2.14	11.99±0.68	10.33±1.93	5.092	0.029*
云南松	凋落叶	29.61±1.05	25.75±0.75	27.89±0.64	23.04±0.12	45.863	0**
	凋落枝	11.54±0.58	13.61±0.60	14.34±0.87	14.28±1.09	7.778	0.009**
	F	266.080	113.170	309.103	47.320		
	p	0**	0**	0**	0**		

2.4 氮添加下 2 种林分凋落叶、枝持水过程变化特征

2.4.1 持水量随浸泡时间的变化特征 由图 4 可知,不同处理下分解 24 个月时,2 种林分凋落叶、枝持水量随浸泡时间的变化规律大体相同,均呈对数函数关系:

$m=a+b\ln t$ (m 为凋落叶、枝的持水量; a 为常数; b 为系数; t 为浸泡时间),既 2 种林分凋落叶、枝持水量在浸泡 0~4 h 内快速上升,在 4~12 h 内上升趋势逐渐减缓,在 12~24 h 内变化趋势较小,基本呈稳定状态。



注: H-CK、H-LN、H-MN、H-HN 分别为华山松 CK、华山松 LN、华山松 MN、华山松 HN 处理; Y-CK、Y-LN、Y-MN、Y-HN 分别为云南松 CK、云南松 LN、云南松 MN、云南松 HN 处理。下同。

图 4 2 种林分不同氮处理凋落叶、枝的持水量随浸泡时间的变化特征

2.4.2 吸水速率随浸泡时间的变化特征 由图 5 可知,不同处理下分解 24 个月时,2 种林分凋落叶、枝吸水速率随浸泡时间的变化规律大体相同,均呈幂函数关系: $v=at^{-b}$ (v 为凋落叶、枝的吸水速率; a 为系

数; b 为常数; t 为浸泡时间),即 2 种林分凋落叶、枝吸水速率在浸泡 0.5 h 时达峰值,随后的 0.5~4 h 内迅速下降,在 4~12 h 内下降趋势较缓慢,直至浸泡 24 h 时基本趋近于 0。

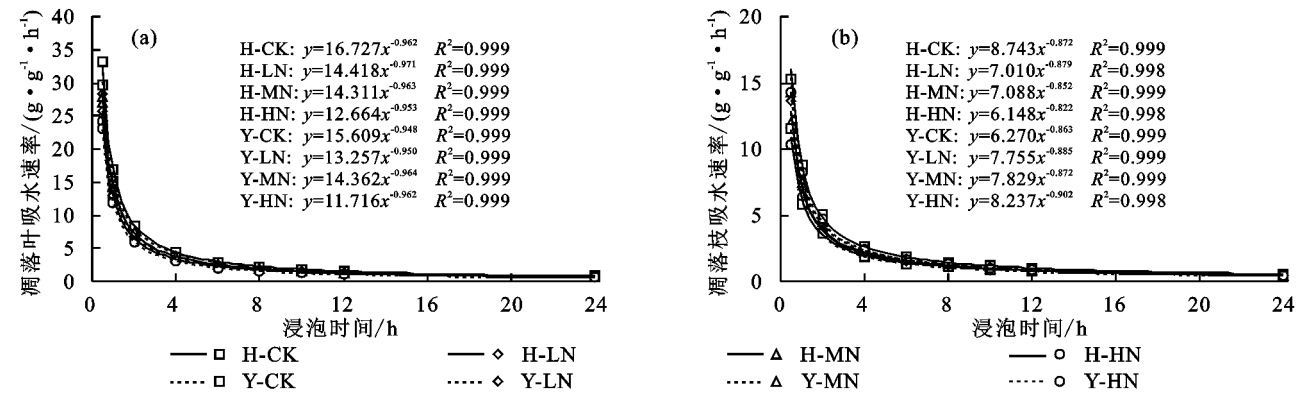


图 5 2 种林分不同氮处理凋落叶、枝的吸水速率随浸泡时间的变化特征

2.5 氮添加下调落叶、枝 C、N、P 残留率与其最大持水量、最大持水率和最大吸水速率 RDA 分析 2 种林分凋落叶、枝持水性 RDA 分析见图 6,以

2 种林分凋落叶、枝 C、N、P 养分残留率作为解释变量,探讨其与持水性(最大持水量、最大持水率和最大吸水速率)的关系(表 6)。由图 6 可知,Axis 1 和

Axis 2 分别解释 34.12%, 0.73% 和 12.99%, 0.41% 的变量, 其中, P 对华山松(贡献率 67.7%, $p=0.002$)和云南松(贡献率 69.5%, $p=0.030$)凋落叶持水性的影响较大, 分别解释其持水性变化的 23.6% 和 9.3%, 最大持水量、最大持水率和最大吸水速率与 P 的夹角均呈钝角, 且方向相反, 呈负相关关系。Axis 1 和 Axis 2 分别解释 17.58% 和 1.14% 的变量, 其中, N 对华山松凋落枝持水性的影响较大(贡献率 53.2%,

$p=0.020$), 解释其持水性变化的 10.0%, 最大持水量、最大持水率和最大吸水速率与 N 的夹角均呈钝角, 且方向相反, 呈负相关关系。Axis 1 和 Axis 2 分别解释 27.22%, 0.07% 的变量, 其中, C 对云南松凋落枝持水性的影响较大(贡献率 52.3%, $p=0.004$), 解释其持水性变化的 14.3%, 最大持水量、最大持水率和最大吸水速率与 C 的夹角均呈锐角, 且方向相同, 呈正相关关系。

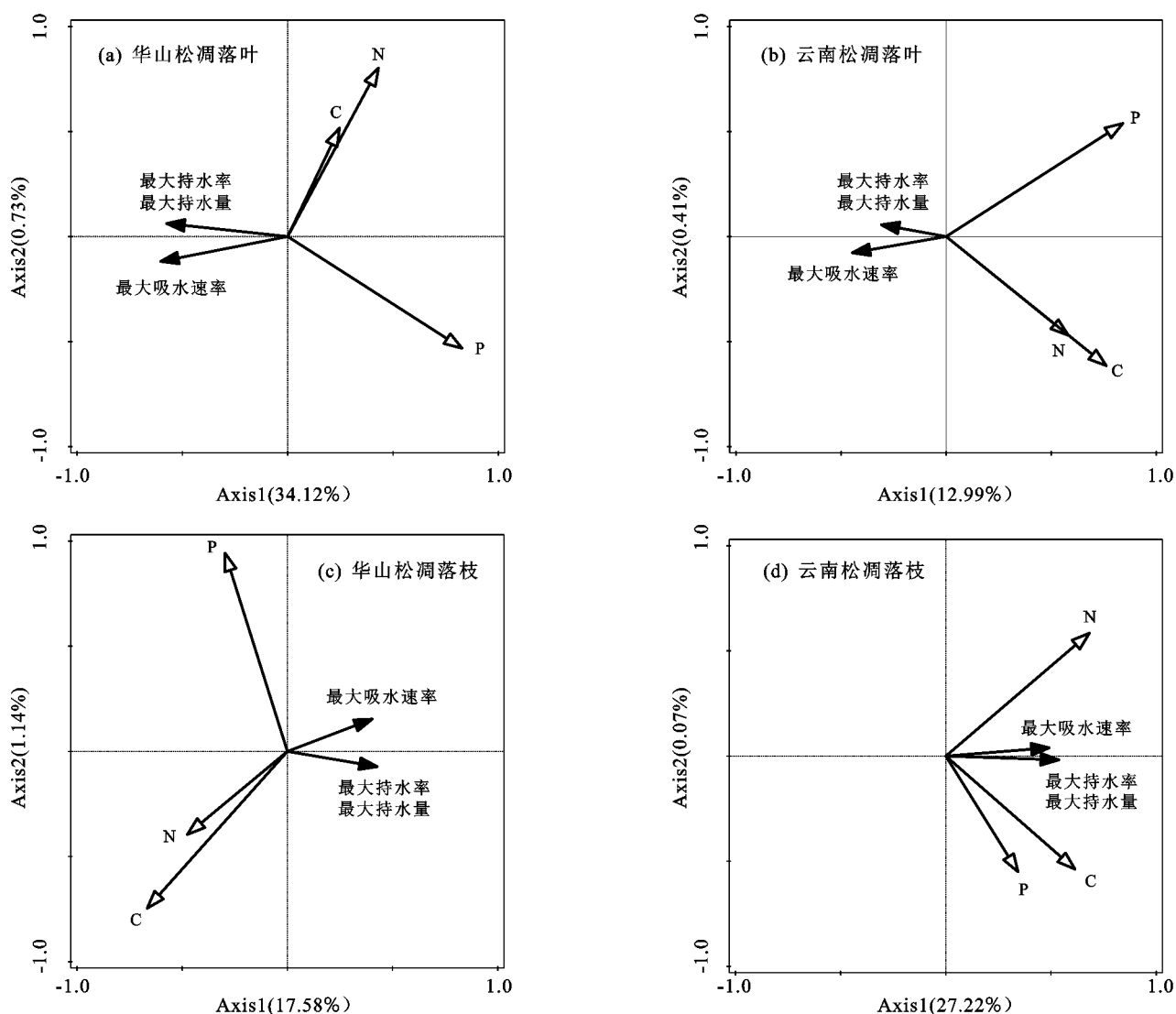


图 6 2 种林分凋落叶、枝 C、N、P 残留率和持水性 RDA 分析

3 讨论

3.1 2 种林分凋落叶、枝 C、N、P 养分残留特征对氮添加的响应

本研究中, 随分解时间持续进行, 华山松凋落叶 C 残留率表现为释放, 华山松凋落枝和云南松林凋落叶、枝表现为释放—富集; 华山松凋落叶、枝和云南松凋落叶 N 残留率表现为富集—释放, 云南松凋落枝则表现为富集; 华山松凋落叶 P 残留率表现为释放—富集, 华山松凋落枝表现为富集—释放—富集, 云南松凋落叶表现

为缓慢释放; 云南松凋落枝表现为释放—富集—释放, 与王书丽等^[19]研究结果一致。在广泛空间和长时间尺度下, 凋落物分解过程中 N 残留特征取决于凋落物基质 C/N 以及环境中氮的可用性^[6], Parton 等^[20]连续 10 年的凋落物分解研究表明, 当凋落物平均 C/N 高于 40 时, 凋落物分解过程中 N 开始富集, 而 Moore 等^[21]进行 6 年的凋落物分解研究表明, 该值为 55。本研究中, 2 种林分凋落叶、枝分解过程中 N 的残留特征同样符合该规律, 在凋落物叶、枝分解过程中, 当 C/N 较高(高于阈

值 55)时,N 残留率表现为富集,可能由于 N 含量较低时,微生物新陈代谢及构成胞外酶所需的 N 需要通过外源 N 获取^[22],进而导致 N 富集;当 C/N 较低(低于阈值 55)时,N 残留率表现为释放,可能与适宜的温度和湿度利于分解微生物的繁殖和生长,凋落物

自身氮能满足分解微生物对 N 的需求有关^[20-21]。凋落物分解过程中 P 残留特征同时受到生物(主导有机质腐烂)、物理(淋溶和大气沉降)和化学因素(金属离子对腐殖质的固定作用)的影响,其中,受生物因素影响作用较为显著。

表 6 2 种林分凋落叶、枝 C、N、P 残留率对其持水性的贡献率分析和显著性检验结果

凋落物组分	林分类型	化学元素	解释量/%	贡献率/%	<i>F</i>	<i>p</i>
凋落叶	华山松	P	23.6	67.7	14.2	0.002
		N	10.9	31.4	7.5	0.006
		C	0.3	1.0	0.2	0.722
	云南松	P	9.3	69.5	4.7	0.030
		C	3.8	28.4	2.0	0.152
		N	0.3	2.1	0.1	0.804
凋落枝	华山松	N	10.0	53.2	5.5	0.020
		C	8.4	45.1	4.2	0.046
		P	0.3	1.7	0.2	0.754
	云南松	C	14.3	52.3	8.8	0.004
		N	12.7	46.5	6.7	0.010
		P	0.3	1.2	0.2	0.768

本研究中,氮处理对 2 种林分凋落叶、枝 C、N、P 释放均有极显著影响($p<0.001$),LN 处理显著降低 2 种林分凋落叶、枝分解过程中 C 残留率和华山松凋落叶分解过程中 N 残留率,HN 处理则显著增加 2 种林分凋落叶、枝分解过程中 C、N、P 残留率。大量研究^[6,15,19,23]发现,凋落物养分残留与凋落物分解密切相关,模拟氮沉降下调落物分解过程中的养分元素含量和凋落物残留量变化表现为降低、增加或无明显变化,低水平氮通过促进分解微生物新陈代谢进而加快凋落物分解,而高水平氮致使分解微生物的分解作用向低效能转变,从而使凋落物分解减缓^[15],可以解释本研究中 LN 处理促进 2 种林分凋落叶、枝养分释放,而 HN 处理则表现为抑制,甚至出现养分元素富集现象。HN 处理抑制 2 种林分凋落叶、枝分解过程中 C、N、P 释放的主要原因可能为:首先,HN 处理可能改变土壤 pH,使土壤 C/N 降低,减少真菌多样性,造成微生物群落主体结构由真菌逐渐转为细菌,使凋落物的分解效能降低,进一步加剧微生物降解 C 的限制作用,从而抑制凋落物分解过程中 C 养分元素的释放^[6];其次,潘禹等^[24]对该研究区的前期研究发现,HN 处理 $[30\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})]$ 显著抑制华山松林和云南松林土壤微生物量碳,而土壤微生物量碳的降低表明土壤微生物的活性减弱;郑兴蕊等^[25]在该研究区的研究中还发现,HN 处理 $[30\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})]$ 抑制华山松林土壤过氧化氢酶活性和土壤多酚氧化酶活性,表

明 HN 处理使得华山松林和云南松林土壤微生物量碳及土壤酶活性降低,导致凋落物中高碳结构物质降解受阻,进而抑制凋落物分解过程中 C、N 养分元素释放^[26];此外,有研究^[27]发现,氮沉降可以减少凋落物中氮元素的再分配,也可能是造成氮沉降抑制凋落物分解过程中养分元素释放的重要原因。

3.2 2 种林分凋落叶、枝持水性特征对氮添加的响应

凋落物持水性是影响森林生态系统水文效益发挥的关键因子,凋落物持水性强弱与其持水能力和持水过程密切相关^[5,9]。大量研究表明,凋落物持水性受林分类型及树种组成^[9]、凋落物类型及其分解程度^[10]、研究区域^[9,17]、立地条件和外部干扰^[5]等多种因素综合影响。本研究发现,分解 13~24 个月,各处理下华山松和云南松凋落叶与凋落枝间最大持水量和最大吸水速率均有显著差异($p<0.05$),具体表现为 2 种林分凋落枝最大持水量和最大吸水速率均小于凋落叶,说明华山松和云南松凋落枝持水性较凋落叶差,与王忠禹等^[17]研究结果一致。可能与凋落枝结构特征较凋落叶硬且厚实、比表面积较凋落叶小导致其最大持水量较凋落叶小有关;此外,分解程度也可能是导致华山松和云南松凋落枝持水能力较凋落叶差的原因之一,蒲嘉霖等^[16]研究表明,凋落物持水率与其分解残留率呈正相关关系($p<0.05$),即凋落物持水率随凋落物分解呈下降趋势;张雨鉴等^[26]对该研究区的前期研究发现,华山松和云南松凋落枝

质量残留率较凋落叶大,分解速率较凋落叶慢,因此,凋落枝持水率较凋落叶小。此外,Pereira 等^[28]和 Santos 等^[29]研究发现,凋落枝的木质性使其亲水性变差,不利于水分吸收,且吸水速率变慢。

本研究中,分解时间、氮处理及其二者交互作用对 2 种林分凋落叶、枝最大持水量、最大持水率及最大吸水速率均有极显著影响($p < 0.001$);分解 24 个月时,氮处理下 2 种林分凋落叶、枝最大持水量和最大吸水速率均与 CK 有显著差异($p < 0.05$),各氮处理(LN、MN 和 HN 处理)均不同程度地降低华山松凋落叶、枝和云南松凋落叶的最大持水量和最大吸水速率,而云南松凋落枝则表现为上升,说明氮沉降处理对华山松凋落叶、枝和云南松凋落叶持水性有抑制作用,而对云南松凋落枝则有促进作用。刘小娥等^[30]研究表明,针叶林凋落物因表面含有大量油脂物质不易分解而吸水困难,而大量的疏水性芳香族化合物和较高的 C/N 则进一步造成其最大吸水速率变低;丁咸庆等^[9]研究表明,凋落物 N 含量越高、C/N 越低则更容易持水。本研究中,氮添加处理作用下,云南松凋落叶、枝的 C 养分元素含量在其分解过程中逐渐减少,而 N 养分元素含量则出现增加现象,使得云南松凋落叶、枝 C/N 降低,从而为持水能力提升创造条件。本研究中 RDA 分析结果表明,C 对云南松凋落枝持水性的影响较大,其最大持水量、最大持水率和最大吸水速率与 C 呈正相关关系($p < 0.05$);N 对华山松凋落枝持水性的影响较大,其最大持水量、最大持水率和最大吸水速率与 N 呈负相关关系($p < 0.05$);P 对华山松和云南松凋落叶持水性的影响较大,其最大持水量、最大持水率和最大吸水速率与 P 呈负相关关系($p < 0.05$)。说明氮沉降通过改变凋落物分解过程中 C、N、P 等养分元素残留特征进而影响其持水性,具体表现为 LN 处理促进华山松凋落叶、枝和云南松凋落叶 C、N、P 释放,而抑制其持水性;HN 处理抑制华山松凋落叶、枝和云南松凋落叶 C、N、P 释放和持水性;LN 处理促进云南松凋落枝 C 释放和持水性;HN 处理抑制云南松凋落枝 C、N 释放,而促进其持水性。本研究结果表明,氮沉降通过影响凋落物养分残留率进而对凋落物持水性产生不同影响,从侧面揭示氮沉降在抑制凋落物养分释放的同时相应增强其持水能力,关于氮沉降对凋落物持水性影响的更深层次原因有待进一步研究。

4 结 论

华山松和云南松凋落叶、枝分解第 13~24 个月过

程中,2 种林分凋落叶、枝 C、N、P 残留率分别表现为释放和富集—释放、富集—释放和富集、释放—富集、富集—释放—富集和释放以及释放—富集—释放。与 CK 相比,LN 降低 2 种林分凋落叶、枝 C 残留率和华山松凋落叶 N 残留率,而增加华山松凋落枝 N 残留率;MN 降低华山松凋落叶 C 残留率;HN 增加 2 种林分凋落叶、枝 C 残留率和华山松凋落叶、枝及云南松凋落枝 N 残留率,而降低云南松凋落枝 P 残留率。

华山松凋落叶、枝持水性与云南松差异不显著($p > 0.05$),其中,2 种林分凋落叶持水能力较凋落枝好($p < 0.05$)。LN、MN 和 HN 均抑制华山松凋落叶、枝和云南松凋落叶的持水能力,其中,HN 抑制作用最强;LN、MN 和 HN 均促进云南松凋落枝持水能力,HN 促进作用最强,MN 次之。通过对 2 种林分凋落叶、枝 C、N、P 残留率与其最大持水量、最大持水率和最大吸水速率 RDA 分析表明,氮添加可通过影响凋落物养分残留率间接影响其持水性。

参考文献:

- [1] Kwon T O, Shibata H, Kepfer-Rojas S, et al. Effects of climate and atmospheric nitrogen deposition on early to mid-term stage litter decomposition across biomes [J]. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2021, 90: e678480.
- [2] Du E, Feng M E, De V W, et al. Atmospheric nitrogen deposition to global forests: Status, impacts and management options [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 250: 1044-1048.
- [3] Dong C G, Qiao Y N, Cao Y, et al. Seasonal variations in carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry of a robinia pseudoacacia plantation on the Loess Hilly region, China [J]. *Forests*, 2021, 12(2): e214.
- [4] Yue K, Fornara D A, Yang W, et al. Effects of three global change drivers on terrestrial C : N : P stoichiometry: A global synthesis [J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(6): 2450-2463.
- [5] 王东丽,郝可欣,梁潇洒,等.干扰对固沙樟子松林凋落物特征及持水性的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2019, 36(6): 1125-1133.
- [6] 张雨鉴,宋娅丽,王克勤,等.模拟氮沉降对滇中高山栎林凋落物碳氮磷释放和生态化学计量特征的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(11): 70-92.
- [7] 张乃木,宋娅丽,王克勤,等.模拟氮沉降下滇中亚高山森林凋落物养分元素释放特征[J]. *生态环境学报*, 2021, 30(5): 920-928.
- [8] Zhang T A, Luo Y Q, Chen H Y H, et al. Responses

- of litter decomposition and nutrient release to N addition: A meta-analysis of terrestrial ecosystems[J]. *Applied Soil Ecology*, 2018, 128: 35-42.
- [9] 丁咸庆, 常月, 柏菁, 等. 亚热带不同次生林地凋落物持水特性及季节变化[J]. *生态学报*, 2021, 41(8): 3190-3200.
- [10] 吴迪, 韩振诚, 李苇洁, 等. 马缨杜鹃不同花叶比例凋落物的分解程度和持水性能研究[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(5): 186-191.
- [11] Jourgholami M, Sohrabi H, Venanzi R, et al. Hydrologic responses of undecomposed litter mulch on compacted soil: Litter water holding capacity, runoff, and sediment[J]. *Catena*, 2022, 210: e05875.
- [12] 侯芳, 王克勤, 宋娅丽, 等. 滇中亚高山典型森林生态系统碳储量及其分配特征[J]. *生态环境学报*, 2018, 27(10): 1825-1835.
- [13] 侯芳, 王克勤, 宋娅丽, 等. 滇中亚高山 5 种典型森林乔木层生物量及碳储量分配格局[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(6): 29-35.
- [14] 张晓曦, 王丽洁, 纪永康. 模拟氮沉降对刺槐及沙棘凋落叶分解的影响[J]. *植物科学学报*, 2021, 39(4): 398-406.
- [15] 周世兴, 肖永翔, 向元彬, 等. 模拟氮沉降对华西雨屏区天然常绿阔叶林凋落叶分解过程中基质质量的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(22): 7428-7435.
- [16] 蒲嘉霖, 刘亮. 亚热带森林凋落物分解特征及水文效应[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(6): 165-170.
- [17] 王忠禹, 刘国彬, 王兵, 等. 黄土丘陵区典型植物枯落物凋落动态及其持水性[J]. *生态学报*, 2019, 39(7): 2416-2425.
- [18] 李素丽, 徐佳文, 丁翊东, 等. 赣江中游水源涵养林乔木和蕨类植物凋落物持水和失水特征[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(3): 170-176.
- [19] 王书丽, 黄立君, 袁希, 等. 氮添加和升温对杉木林凋落物分解及碳氮磷化学计量特征的影响[J]. *生态学报*, 2020, 39(9): 2842-2850.
- [20] Parton W, Silver W L, Burke I C, et al. Global-scale similarities in nitrogen release patterns during long-term decomposition[J]. *Science*, 2007, 315(5810): 361-364.
- [21] Moore T R, Trofymow J A, Prescott C E, et al. Patterns of carbon, nitrogen and phosphorus dynamics in decomposing foliar litter in Canadian forests[J]. *Ecosystems*, 2006, 9(1): 46-62.
- [22] Osono T. Ecology of ligninolytic fungi associated with leaf litter decomposition[J]. *Ecological Research*, 2007, 22(6): 955-974.
- [23] 潘禹, 王克勤, 宋娅丽, 等. 华山松林凋落物养分释放及土壤生态化学计量特征对模拟氮沉降的短期响应[J]. *生态环境学报*, 2021, 30(3): 492-502.
- [24] 潘禹, 宋娅丽, 王克勤, 等. 模拟 N 沉降对滇中亚高山典型森林凋落物分解及土壤微生物的影响[J]. *林业科学研究*, 2021, 34(3): 88-97.
- [25] 郑兴蕊, 王克勤, 宋娅丽, 等. 滇中亚高山不同森林土壤酶活性对模拟 N 沉降的响应[J]. *林业科学研究*, 2021, 34(2): 50-62.
- [26] 张雨鉴, 宋娅丽, 王克勤, 等. 滇中亚高山人工林凋落物分解对模拟氮沉降的响应[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(8): 2523-2532.
- [27] 肖银龙, 涂利华, 胡庭兴, 等. 模拟氮沉降对华西雨屏区苦竹林凋落物养分输入量的早期影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(23): 7355-7363.
- [28] Pereira L C, Balbinot L, Lima M T, et al. Aspects of forest restoration and hydrology: The hydrological function of litter[J]. *Journal of Forestry Research*, 2022, 33(2): 543-552.
- [29] Anne F A S, Antonio C P C, Diego T M, et al. Capacidade de retenção hídrica do estoque de serapilheira de eucalipto [J]. *Floresta e Ambiente*, 2017, 24: e20150303.
- [30] 刘小娥, 苏世平. 兰州市南北两山 5 种典型人工林凋落物的水文功能[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(8): 2574-2582.