

华西雨屏区常绿阔叶林凋落叶分解过程中 木质素降解对模拟氮、硫沉降的响应

铁烈华, 张仕斌, 熊梓岑, 符 饶, 周世兴, 黄从德*

(四川农业大学林学院, 四川 成都 611130)

摘要: [目的] 探索亚热带常绿阔叶凋落叶分解过程中木质素降解对氮、硫沉降的响应。 [方法] 采用氮、硫双因素 3 水平试验设计方法, 设置对照 (CK)、低氮 (LN, $50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、高氮 (HN, $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、低硫 (LS, $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、高硫 (HS, $400 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、低氮低硫 (LNLS)、高氮低硫 (HNLS)、低氮高硫 (LNHS) 和高氮高硫 (HNHS) 9 个处理, 分析氮、硫沉降对华西雨屏区常绿阔叶林凋落叶分解过程中木质素降解的影响。 [结果] 模拟氮、硫沉降 1 年时间, LN、LNLS 和 HNLS 对木质素残留率、多酚氧化酶和过氧化氢酶活性的影响不显著; LS 显著降低了木质素残留率, 显著增加了凋落叶 C/N、纤维素损失率、多酚氧化酶和过氧化物酶活性; HN、HS、LNHS 和 HNHS 显著增加了木质素残留率, 显著降低了凋落叶 C/N、纤维素损失率、多酚氧化酶和过氧化物酶活性; 氮沉降和硫沉降对木质素降解的交互作用显著。 [结论] 不同氮、硫沉降水平对华西雨屏区常绿阔叶林凋落叶分解过程中木质素降解及相关酶的影响不同, 在氮、硫沉降量持续增加的背景下, 氮、硫沉降相互作用, 共同影响凋落叶分解过程中木质素的降解, 进而影响凋落叶分解过程。

关键词: 华西雨屏区; 常绿阔叶林; 氮沉降; 硫沉降; 木质素降解

中图分类号: S718.55

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2019)02-0025-07

近年来, 由于经济快速发展, 我国已成为全球氮、硫沉降核心区, 我国西南地区酸沉降发生频率有明显升高的趋势^[1]。酸沉降严重影响着森林生态系统碳、氮循环^[2]。上世纪 60 年代以来, 国内外学者就氮沉降对木质素降解进行了系统研究^[3-4]。已有研究表明, 氮沉降对木质素降解的影响有促进、抑制和无显著影响 3 种不同的结果^[5-6]。但鲜有关于硫沉降及氮、硫复合沉降对我国西南地区亚热带常绿阔叶林凋落叶分解过程中木质素降解影响的报道。

华西雨屏区是一个多雨的特殊气候单元, 在太平洋东南季风和青藏高原西风急流南支气流的作用下, 成都平原高浓度的 SO_2 、 NO_x 和 NH_3 随大气运动搬运至此, 并主要以湿沉降的方式沉降于地表^[7]。作为酸沉降核心区, 近年来该区域氮、硫沉降量有逐年增加的趋势^[8]。本研究采用原位分解试验法, 以华西雨屏区常绿阔叶林为研究对象, 通过连续 1 年的模拟氮、硫沉降, 探索该区域常绿阔叶林森林生态

系统凋落叶分解过程中木质素降解对氮、硫沉降的响应。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

试验地设在四川省雅安市雨城区 ($30^{\circ}01' \text{ N}$, $103^{\circ}01' \text{ E}$) 内, 海拔 800 m, 属中亚热带湿润季风气候。年均温 16.1°C , 年均降水 1 732 mm。土壤为黄壤, 土层厚度约 60 cm, pH 为 4.50。试验林主要树种有黑壳楠 (*Lindera megaphylla* Hemsl.)、枹栎 (*Quercus serrata* Thunb.)、南酸枣 (*Choerospondias axillaris* (Roxb.) Burt et Hill.)、柃木 (*Eurya japonica* Thunb.) 等, 郁闭度为 0.6, 林龄为 30 a, 林分密度为 $1\ 350 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$, 优势树种平均胸径为 18 cm, 平均树高为 11 m。

1.2 试验设计

华西雨屏区多年平均氮沉降量为 $95 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$

收稿日期: 2018-04-28 修回日期: 2018-10-28

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2010BAC01A11); 长江上游生态安全协同创新中心开放基金项目

* 通讯作者: 黄从德, E-mail: lyxq100@aliyun.com

· a⁻¹, 硫沉降量为 193 kg · hm⁻² · a⁻¹, 并有逐年上升的趋势^[7-8]。参照 Qiao 等^[3]的研究, 结合该区背景大气氮、硫沉降量, 本试验氮源选用 CO(NH₂)₂, 硫源选用 Na₂SO₄。设置氮沉降(0(CK)、50(LN)、150(HN) kg · hm⁻² · a⁻¹)和硫沉降(0(CK)、200(LS)、400(HS) kg · hm⁻² · a⁻¹)双因素 3 水平 9 个处理(表 1)。

2012 年 11 月, 收集试验地内新鲜的凋落叶片, 带回实验室自然风干。将风干后的凋落叶片充分混合, 准确称取 10.0 g 凋落叶片, 装入孔径 0.05 mm 的尼龙网(大小为 20 cm × 20 cm)分解袋中, 共装 491 袋(27 样方 × 6 次采样 × 3 袋 · 次⁻¹ + 5 袋), 然后随机取 5 袋, 测定凋落叶组成为黑壳楠、枹栎、南酸枣和柃木的比例为 5:3:1:1, 并测定凋落叶初始化学性质。凋落叶初始全 C 为 370.01 g · kg⁻¹, 全 N 为 7.71 g · kg⁻¹, 全 P 为 0.33 g · kg⁻¹, 木质素为 94.64 g · kg⁻¹, 纤维素为 184.71 g · kg⁻¹, C/N 为 48.2, C/P 为 147.1, N/P 为 23.4, 木质素/N 为 12.3, 纤维素/N 为 24.0。

2013 年 4 月初, 在试验地选取 27 个 5 m × 5 m 的样方, 将凋落叶分解袋均匀铺设于试验林的地表, 每个样方内铺设 18(6 次采样 × 3 袋 · 次⁻¹)袋。将全年氮、硫沉降量平均分成 24 份, 从 2013 年 4 月初开始每半个月施肥 1 次, 共施肥 24 次。施肥时将氮、硫肥溶于 2 L 水中, 在距地表 50 cm 的高度用喷雾器均匀喷雾, CK 每次喷 2 L 水作为对照。

表 1 试验处理及模拟氮、硫沉降量

Table 1 Experimental treatments and simulated depositing amounts of nitrogen and sulfur

处理 Treatments	氮沉降量 Nitrogen deposition/ (kg · hm ⁻² · a ⁻¹)	硫沉降量 Sulfur deposition/ (kg · hm ⁻² · a ⁻¹)
CK	0	0
LN	50	0
HN	150	0
LS	0	200
HS	0	400
LNLS	50	200
LNHS	50	400
HNLS	150	200
HNHS	150	400

1.3 样品采集与测定

2013 年 6、8、10、12 月和 2014 年 2、4 月月初采集样品。凋落叶分解袋采样时, 随机取 3 袋凋落叶分解袋, 带回实验室。除去尼龙网袋中的泥土、根系等, 于 65℃ 下烘干并称量, 粉碎研磨过筛(60 目)后,

用于木质素含量、纤维素含量和凋落叶 C/N 比的测定。用酸性洗涤纤维法测定木质素含量和纤维素含量^[9]。土壤样品采集时, 去除表层的枯落物、苔藓等, 用直径 5 cm 的土钻随机钻取 3 钻 0~20 cm 土样, 混合后做好标记, 带回实验室。去除土样中的细根、碎石等杂质, 测定土样中多酚氧化酶、过氧化氢酶和过氧化物酶活性。多酚氧化酶和过氧化物酶活性的测定采用邻苯三酚比色法, 过氧化氢酶活性的测定采用 KMnO₄ 滴定法。

1.4 数据处理

凋落叶分解过程中木质素残留率计算公式^[10]:

$$Lt = M_t C_t / M_0 C_0 \times 100\%$$

式中: M_t 表示第 t 次采样时凋落叶质量残留量(g); M_0 表示初始凋落叶质量(g); C_t 表示第 t 次采样时凋落叶中木质素量(g · kg⁻¹); C_0 表示凋落叶中初始木质素量(g · kg⁻¹)。

使用 Excel 2010 进行数据整理。使用 SPSS 20.0 软件进行重复测量方差分析($\alpha = 0.05$), 比较氮、硫沉降对凋落叶分解过程中木质素残留率、凋落叶 C/N、纤维素损失率和土壤酶活性的影响, 及氮、硫沉降的交互作用。使用 SigmaPlot 12.5 软件作图。图表中数据为平均值 ± 标准差。

2 结果与分析

2.1 模拟氮沉降对凋落叶分解过程中木质素降解的影响

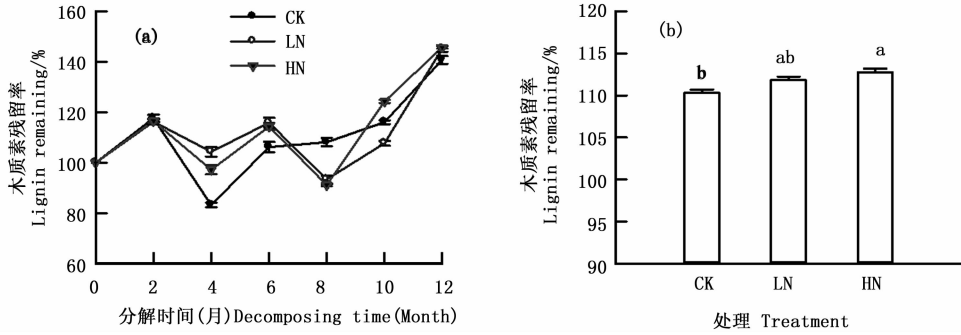
如图 1(a), 模拟氮沉降各处理木质素残留率总体呈升高趋势。图 1(b)表明, 重复测量方差分析表明各处理木质素残留率大小排序为 HN(112.7%) > LN(111.8%) > CK(110.3%), 且 LN 与 CK 差异不显著($P > 0.05$), HN 与 CK 差异显著($P < 0.05$)。

2.2 模拟硫沉降对凋落叶分解过程中木质素降解的影响

从图 2(a)可知, LS 处理的木质素残留率总体呈下降趋势, HS 处理的木质素残留率总体呈升高趋势。图 2(b)表明, 重复测量方差分析表明各处理木质素残留率大小排序为 HS(117.2%) > CK(110.3%) > LS(97.1%), 且 HS 和 LS 与 CK 差异显著($P < 0.05$)。

2.3 模拟氮、硫复合沉降对凋落叶分解过程中木质素降解的影响

由图 3(a)可知, 氮、硫复合沉降各处理木质素残留率总体呈上升趋势。图 3(b)表明, 重复测量方



注:不同字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$),下同。

Note: different letters indicated significant difference among different treatments at 0.05 level. The same below.

图1 模拟氮沉降下调落叶分解过程中木质素残留率的变化

Fig. 1 Dynamics of lignin remaining percentage during litter decomposition in simulated nitrogen deposition

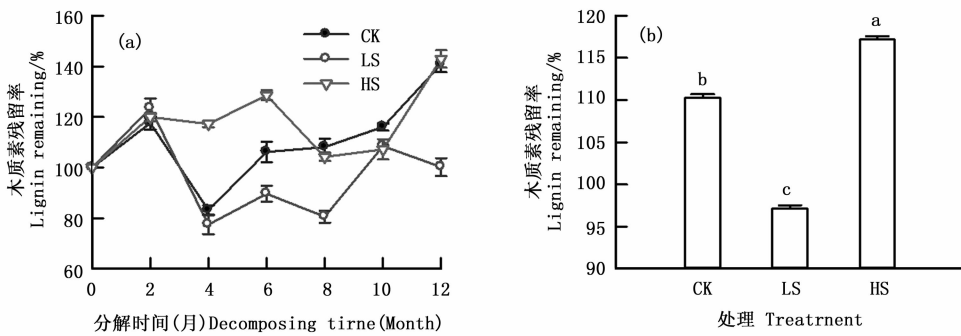


图2 模拟硫沉降下调落叶分解过程中木质素残留率的变化

Fig. 2 Dynamics of lignin remaining percentage during foliar litter decomposition in simulated sulfur deposition

差分析表明各处理木质素残留率大小排序为 HNHS (119.3%) > LNHS (117.8%) > HNLS (110.4%) > CK (110.3%) > LNLS (109.2%), 且 HNLS 和 LNLS

与 CK 差异不显著 ($P > 0.05$), HNHS 和 LNHS 与 CK 差异显著 ($P < 0.05$)。

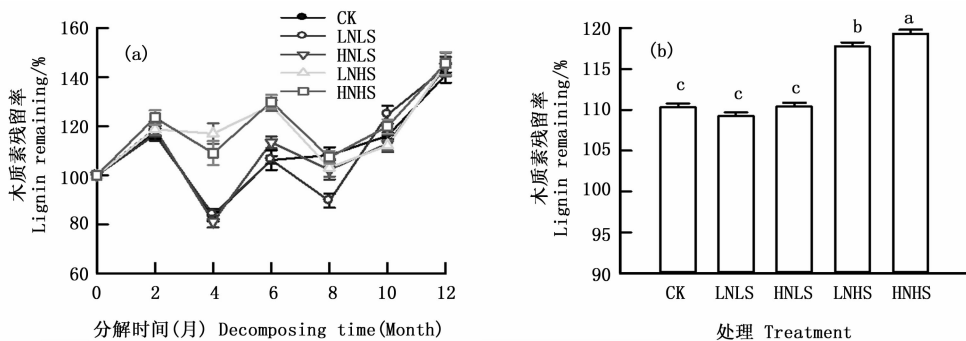


图3 模拟氮、硫复合沉降下调落叶分解过程中木质素残留率的变化

Fig. 3 Dynamics of lignin remaining percentage during foliar litter decomposition in simulated nitrogen and sulfur deposition

2.4 模拟氮、硫沉降对凋落叶分解过程中木质素降解的交互作用

由表2可知,氮沉降和硫沉降均显著影响了凋

落叶分解过程中木质素的降解 ($P < 0.05$), 且氮、硫复合沉降对木质素残留率的交互作用显著 ($P < 0.05$)。如图1(b)、2(b)、3(b), 氮和低硫复合沉降

各处理的木质素残留率大小排序为 HN(112.7%) > LN(111.8%) > HNLS(110.4%) > CK(110.3%) > LNLS(109.2%) > LS(97.1%), 这表明氮沉降削弱了低硫沉降对木质素降解的促进作用; 氮与高硫复合沉降各处理的木质素残留率大小排序为 HNHS(119.3%) > LNHS(117.8%) > HS(117.2%) > HN(112.7%) > LN(111.8%) > CK(110.3%), 这表明氮沉降加剧了高硫沉降对木质素降解的抑制作用。

表2 凋落叶分解过程中木质素残留率重复双因素方差分析

Table 2 Two-ways variance analysis of lignin remaining percentage during foliar litter decomposition

处理 Treatments	自由度 Degree of freedom	F 值 F value	P
N	2	548.963	0.00
S	2	138.959	0.00
N × S	4	63.352	0.00

表3 各处理的凋落叶 C/N、纤维素损失率和土壤酶活性的方差分析

Table 3 Variance analysis of litter C/N ratio, cellulose loss rate and soil enzyme activity in different nitrogen and sulfur deposition

处理 Treatments	碳:氮 C/N	纤维素损失率 Cellulose loss rate/%	多酚氧化酶 Polyphenol oxidase/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	过氧化氢酶 Catalase/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	过氧化物酶 Peroxidase/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)
CK	29.87 ± 0.59 a	12.17 ± 0.70 a	7.60 ± 0.55 a	0.30 ± 0.02 a	37.28 ± 0.92 a
LN	29.70 ± 0.40 a	11.86 ± 0.82 ab	7.48 ± 0.45 a	0.31 ± 0.03 a	35.92 ± 1.02 b
HN	26.13 ± 0.36 b	11.46 ± 0.18 b	7.27 ± 0.34 b	0.30 ± 0.01 a	35.61 ± 1.34 b
CK	29.87 ± 0.59 b	12.17 ± 0.70 b	7.60 ± 0.55 b	0.30 ± 0.02 a	37.28 ± 0.92 b
LS	31.67 ± 0.45 a	13.42 ± 0.66 a	7.76 ± 0.44 a	0.31 ± 0.01 a	38.43 ± 1.17 a
HS	30.44 ± 0.38 b	11.49 ± 0.64 c	7.35 ± 0.28 c	0.28 ± 0.03 a	35.49 ± 0.94 c
CK	29.87 ± 0.59 b	12.17 ± 0.70 a	7.60 ± 0.55 a	0.30 ± 0.02 ab	37.28 ± 0.92 a
LNLS	31.59 ± 0.44 a	11.97 ± 0.46 a	7.57 ± 0.53 a	0.31 ± 0.01 a	36.82 ± 0.79 ab
HNLS	29.76 ± 0.50 bc	11.64 ± 0.24 b	7.40 ± 0.61 ab	0.32 ± 0.01 a	35.47 ± 1.03 c
LNHS	29.17 ± 0.59 c	11.11 ± 0.60 c	7.19 ± 0.47 b	0.29 ± 0.01 b	35.73 ± 0.84 bc
HNHS	26.47 ± 0.42 d	10.81 ± 0.79 d	6.95 ± 0.39 c	0.27 ± 0.01 c	35.39 ± 0.96 c

3 讨论

3.1 模拟氮沉降对华西雨屏区常绿阔叶林凋落叶分解过程中木质素降解的影响

木质素降解是一个复杂的过程,其降解受到生物和非生物因子的综合影响^[11]。本研究表明,低氮沉降对木质素降解的影响不显著。这与莫江明等^[12]的研究结果相似。一方面天然凋落叶中木质素常与纤维素、半纤维素、果胶等形成聚合物,木质素的降解受纤维素、半纤维素、果胶等含量的影响^[13]。低氮沉降对纤维素损失率的影响不显著(表

2.5 模拟氮、硫沉降对凋落叶 C/N、纤维素损失率和土壤酶活性的影响

表3表明,HN、LNHS和HNHS显著降低了凋落叶 C/N($P < 0.05$),LS和LNLS显著增加了凋落叶 C/N($P < 0.05$),其余处理对凋落叶 C/N的影响不显著($P > 0.05$)。LN和LNLS对纤维素损失率的影响不显著($P > 0.05$),LS显著增加了纤维素损失率($P < 0.05$),其余处理显著降低了纤维素损失率($P < 0.05$)。LN、LNLS和HNLS对多酚氧化酶活性的影响不显著($P > 0.05$),LS显著提高了多酚氧化酶活性($P < 0.05$),其余处理显著降低了多酚氧化酶活性($P < 0.05$)。HNHS显著降低了过氧化氢活性($P < 0.05$),其余对过氧化氢酶活性的影响不显著($P > 0.05$)。LNLS对过氧化物酶活性的影响不显著($P > 0.05$),LS显著提高了过氧化物酶活性($P < 0.05$),其余处理显著降低了过氧化物酶活性($P < 0.05$)。

3),纤维素和木质素形成的聚合物不易受外界环境的影响^[14],进而导致低氮沉降对木质素降解的影响不显著。另一方面,多酚氧化酶、过氧化氢酶和过氧化物酶是分解木质素的主要酶类^[15]。本研究中,低氮沉降对多酚氧化酶和过氧化氢酶活性的影响不显著(表3),从而导致低氮沉降对木质素降解的影响不显著。本研究还发现,高氮沉降显著抑制了木质素的降解。这与周世兴等^[16]的研究结果相同。一是高氮沉降显著降低了凋落叶分解过程中凋落叶的 C/N(表3),影响微生物的碳降解过程^[17],从而抑制了凋落叶分解过程中木质素的降解。二是高氮沉降

显著降低了多酚氧化酶和过氧化物酶活性(表3),导致木质素的降解受到抑制。但涂利华等^[18]对同区域撑绿杂交竹研究发现,模拟氮沉降抑制了凋落叶分解过程中木质素降解。一方面木质素降解对不同氮源类型的响应不同^[19],涂利华等^[18]的氮源为无机氮(NH_4NO_3),本研究为有机氮($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$)。另一方面凋落叶初始木质素/N的比值是衡量凋落叶分解快慢的重要指标^[20]。本研究木质素/N的比值(12.3)是涂利华等^[18](8.5)的近1.5倍。此外,氮沉降对木质素降解的影响与处理时间有关^[21]。涂利华等^[18]模拟氮沉降的时间为2年,本研究为1年。但本研究中,低氮沉降的木质素残留率在分解后期有大于对照的趋势。这表明,虽然低氮处理1年时间对木质素降解的影响不显著,但是当处理时间延长,也可能抑制木质素的降解。

但Waldrop等^[22]对北方温带森林的研究发现,模拟氮沉降促进了糖槭(*Acer saccharum* Marsh.)与椴木(*Tilia tuan* Szyszyl.)混交林和糖槭与槲栎(*Quercus rubra* Marsh.)混交林土壤多酚氧化酶和过氧化物酶活性,进而促进了木质素的降解。氮沉降对凋落叶分解过程中木质素降解的影响与生态系统植被特征、群落结构等有关^[23]。本研究的气候条件、林分结构、凋落叶组成等与Waldrop等^[22]不同,从而导致模拟氮沉降对凋落叶分解过程中木质素降解的影响结果不同。

3.2 模拟硫沉降对华西雨屏区常绿阔叶林凋落叶分解过程中木质素降解的影响

本研究表明,低硫沉降显著促进了木质素的降解。这与Wang等^[24]的研究结果相似。一是木质素是凋落叶中最难分解的物质,其降解需要多种微生物和酶的共同作用^[25]。白腐真菌是已知的高效降解木质素的微生物,少量的硫添加提高了凋落叶C/N(表3),丰富微生物食物来源,白腐真菌快速生长繁殖,其分泌的木质素降解酶数量随之增加,从而提高了凋落叶分解过程中木质素的降解率。二是少量的外源硫添加维持了土壤养分平衡^[26],土壤多酚氧化酶和过氧化物酶活性增强(表3),加快了木质素的降解。三是低硫沉降加快了纤维素的降解,纤维素对木质素的保护作用降低,从而导致木质素的降解速率加快。

但是,高硫沉降显著抑制了木质素的降解。这与肖胜生等^[27]的研究结果相似。这可能是因为,高硫沉降抑制了多酚氧化酶和过氧化物酶活性(表

3),进而抑制了木质素的降解。但包和林等^[28]研究表明硫沉降促进了福建省邓恩桉(*Eucalyptus dunnii* Maiden.)幼龄林(造林2年,土壤为红壤)凋落叶分解过程中木质素的降解。凋落叶分解过程中木质素的降解与土壤微生物群落结构有关^[29],本研究以亚热带常绿阔叶林为研究对象,林分年龄和结构与包和林等^[29]不同,同时土壤类型(黄壤)也与包和林等^[29](红壤)不同,两个生态系统的土壤微生物群落结构可能不同,从而导致硫沉降对木质素降解的影响结果不同。

3.3 模拟氮、硫复合沉降对华西雨屏区常绿阔叶林凋落叶分解过程中木质素降解的影响

本研究表明,氮沉降和硫沉降对木质素降解的交互作用显著。这与黄婷等^[30]的研究结果相似。氮和硫都是土壤大量元素,外源氮和硫的同时添加共同影响着土壤阳离子平衡,微生物的生长繁殖和土壤酶活性也因此受到影响(表3),从而导致氮和硫对木质素降解的交互作用显著。本研究中,氮沉降削弱了低硫沉降对木质素降解的促进作用。低硫沉降显著增加了多酚氧化酶和过氧化物酶活性,相较于低硫沉降,低氮低硫和高氮低硫沉降显著降低了多酚氧化酶和过氧化物酶活性(表3),从而导致氮沉降削弱了低硫沉降对木质素降解的促进作用。但是,氮沉降加剧了高硫沉降对木质素降解的抑制作用。这可能是因为,木质素受到纤维素的保护,凋落叶分解过程中木质素的降解与纤维素含量有关^[13]。铁烈华等^[14]之前的研究发现,氮沉降加剧了高硫沉降对纤维素降解的抑制作用,从而可能影响了木质素的降解。

本研究中,低氮低硫和高氮低硫对木质素降解的影响不显著。这与郭平等^[31]的研究结果相似。一方面低氮低硫沉降对纤维素损失率影响不显著(表3),纤维素和木质素聚合体的存在使得木质素处于较稳定的状态,因此低氮低硫沉降的木质素残留率较对照无显著改变。另一方面,低氮低硫和高氮低硫对多酚氧化酶和过氧化氢酶活性的影响不显著(表3),从而导致低氮低硫沉降对木质素降解的影响不显著。但低氮高硫和高氮高硫显著抑制了木质素的降解。这与洪江华等^[32]的研究结果相似。氮和硫是形成酸雨的主要物质,高浓度的硫与氮复合沉降引起土壤酸化,土壤酶活性受到影响(表3),同时木质素-氮络合物的形成使微生物对木质素的降解作用降低^[12],从而抑制了木质素的降解。

4 结论

(1) 低氮、低氮低硫和高氮低硫对木质素降解的影响不显著, 低硫显著促进了木质素降解, 高氮、高硫、低氮高硫和高氮高硫显著抑制了木质素降解。

(2) 低氮、低氮低硫和高氮低硫对多酚氧化酶和过氧化氢酶活性的影响不显著, 低硫显著增加了凋落叶 C/N、纤维素损失率、多酚氧化酶和过氧化物酶活性, 高氮、高硫、低氮高硫和高氮高硫显著降低了凋落叶 C/N、纤维素损失率、多酚氧化酶和过氧化物酶活性。

(3) 氮沉降和硫沉降对木质素降解的交互作用显著。

综上所述, 不同氮、硫沉降水平对华西雨屏区常绿阔叶林凋落叶分解过程中木质素降解及相关酶的影响不同, 氮、硫沉降互相作用, 共同影响着该区域常绿阔叶林凋落叶分解过程中木质素的降解。

参考文献:

[1] 解淑艳, 王瑞斌, 郑皓皓. 2005—2011 年全国酸雨状况分析[J]. 环境监测与预警, 2012, 4(5): 33—37.

[2] Bowden R D, Davidson E, Savage K, *et al.* Chronic nitrogen additions reduce total soil respiration and microbial respiration in temperate forest soils at the Harvard Forest [J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, 196: 43—56.

[3] Qiao X, Du J, Kota S H, *et al.* Wet deposition of sulfur and nitrogen in Jiuzhaigou National Nature Reserve, Sichuan, China during 2015—2016: Possible effects from regional emission reduction and local tourist activities [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 233: 267—277.

[4] Marco A D, Spaccini R, Vittozzi P, *et al.* Decomposition of black locust and black pine leaf litter in two coeval forest stands on Mount Vesuvius and dynamics of organic components assessed through proximate analysis and NMR spectroscopy [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 51(4): 1—15.

[5] 郭春兰, 方向民, 李佩擎, 等. 毛竹原状和粉状叶片分解特征对施氮和温度的响应[J]. 林业科学研究, 2016, 29(5): 719—725.

[6] 余汉基, 蔡金恒, 薛立, 等. 模拟外源性氮磷对马占相思凋落叶分解及土壤生化特性的影响[J]. 林业科学研究, 2018, 31(2): 107—113.

[7] 涂利华, 陈刚, 彭勇, 等. 华西雨屏区苦竹细根分解对模拟氮沉降的响应[J]. 应用生态学报, 2014, 25(8): 2176—2182.

[8] 周世兴, 邹秤, 肖永翔, 等. 模拟氮沉降对华西雨屏区天然常绿阔叶林土壤微生物生物量碳和氮的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(1): 12—18.

[9] Klotzbücher T, Kaiser K, Guggenberger G, *et al.* A new conceptual model for the fate of lignin in decomposing plant litter[J]. *Ecology*,

2011, 92(5): 1052—1062.

[10] 彭艳, 杨万勤, 薛樵, 等. 季节性冻融期间土壤动物对高山草甸两种凋落叶木质素降解的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2016, 22(2): 300—306.

[11] 李正才, 徐德应, 杨校生, 等. 北亚热带 6 种森林类型凋落物分解过程中有机碳动态变化[J]. 林业科学研究, 2008, 21(5): 675—680.

[12] 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.

[13] Herman J, Moorhead D, Berg B. The relationship between rates of lignin and cellulose decay in aboveground forest litter [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(10): 2620—2626.

[14] 铁烈华, 符饶, 张仕斌, 等. 华西雨屏区常绿阔叶林凋落叶分解过程中纤维素降解对模拟氮、硫沉降的响应[J]. 应用与环境生物学报, 中国知网网络首发: DOI: 10.19675/j.cnki.1006-687x.2018.03014.

[15] 王晖, 莫江明, 薛璟华, 等. 氮沉降增加对森林凋落物分解酶活性的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2006, 14(6): 539—546.

[16] 周世兴, 黄从德, 向元彬, 等. 模拟氮沉降对华西雨屏区天然常绿阔叶林凋落物木质素和纤维素降解的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1368—1374.

[17] Allison S D, Hanson C A, Treseder K K. Nitrogen fertilization reduces diversity and alters community structure of active fungi in boreal ecosystems [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(8): 1878—1887.

[18] 涂利华, 戴洪忠, 胡庭兴, 等. 模拟氮沉降对华西雨屏区撑绿杂交竹林凋落物分解的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(5): 1277—1284.

[19] 陶宝先, 陈永金. 不同形态氮输入对湿地生态系统碳循环影响的研究进展[J]. 生态环境学报, 2016, 25(1): 162—167.

[20] Zhou S X, Huang C D, Han B H, *et al.* Simulated nitrogen deposition significantly suppresses the decomposition of forest litter in a natural evergreen broad-leaved forest in the Rainy Area of Western China [J]. *Plant and Soil*, 2017, 420(1—2): 135—145.

[21] Stevens C J. How long do ecosystems take to recover from atmospheric nitrogen deposition [J]. *Biological Conservation*, 2016, 200: 160—167.

[22] Waldrop M P, Zak D R, Sinsabaugh R L, *et al.* Nitrogen deposition modifies soil carbon storage through changes in microbial enzymatic activity [J]. *Ecological Applications*, 2004, 14(4): 1172—1177.

[23] 铁烈华, 符饶, 张仕斌, 等. 模拟氮、硫沉降对华西雨屏区常绿阔叶林凋落叶分解速率的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(7): 2243—2250.

[24] Wang Q, Kwaka J H, Choib W J, *et al.* Decomposition of trembling aspen leaf litter under long-term nitrogen and sulfur deposition: Effects of litter chemistry and forest floor microbial properties [J]. *Forest Ecology and Management*, 2018, 412: 53—61.

[25] 周晓庆, 吴福忠, 杨万勤, 等. 高山森林凋落物分解过程中的微生物生物量动态[J]. 生态学报, 2011, 31(14): 4144

-4152.

- [26] 刘可慧, 彭少麟, 莫江明, 等. 酸沉降对森林植物影响过程和机理[J]. 生态环境, 2005, 14(6): 953-960.
- [27] 肖胜生, 胡建民, 贺月玲, 等. 森林土壤呼吸对氮硫沉降的响应及机制[J]. 生态学杂志, 2014, 33(2): 495-501.
- [28] 包和林, 张艳荷, 侯丹, 等. 氮、硫沉降下调落物分解失重规律[J]. 中南林业科技大学学报, 2009, 29(5): 77-81.
- [29] 刘彩霞, 焦如珍, 董玉红, 等. 杉木林土壤微生物区系对短期模拟氮沉降的响应[J]. 林业科学研究, 2015, 28(2): 271-276.
- [30] 黄婷, 包和林, 吴承祯, 等. 模拟氮硫沉降对邓恩桉人工林凋落物 C、N 含量的影响[J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2014, 45(2): 187-192.
- [31] 郭平, 王云琦, 王玉杰, 等. 酸雨背景下缙云山典型林分凋落物量和营养元素含量及其释放特征[J]. 生态学杂志, 2013, 32(9): 2339-2346.
- [32] 洪江华, 江洪, 马元丹, 等. 模拟酸雨对亚热带典型树种叶凋落物分解的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(10): 5246-5251.

Effects of Simulated Nitrogen and Sulfur Deposition on Lignin Degradation During Foliar Litter Decomposition in Evergreen Broad-leaved Forest in the Rainy Area of West China

TIE Lie-hua, ZHANG Shi-bin, XIONG Zi-cen, FU Rao, ZHOU Shi-xing, HUANG Cong-de

(College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, Sichuan, China)

Abstract: [Objective] To understand the effects of nitrogen and sulfur deposition on the degradation of lignin during the litter decomposition in evergreen broad-leaved forest in subtropical area. [Method] A one-year field experiment of simulating nitrogen and sulfur deposition was conducted in the rainy area of west China. Three nitrogen and three sulfur levels resulting nine treatments were investigated, including the control (CK), low nitrogen (LN, $50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), high nitrogen (HN, $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), low sulfur (LS, $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), high sulfur (HS, $400 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), low nitrogen and low sulfur deposition (LNLS), high nitrogen and low sulfur deposition (HLSL), low nitrogen and high sulfur deposition (LNHS), and high nitrogen and high sulfur deposition (HNHS). [Result] After one-year's simulation of nitrogen and sulfur deposition, the LN, LNLS and HNLS showed no significant effects on lignin remaining rate, the activity of polyphenol oxidase and catalase, while the LS treatment significantly reduced the lignin remaining rate and significantly enhanced the leaf litter C/N, cellulose loss rate, polyphenol oxidase and peroxidase activity. However, the HN, HS, LNHS and HNHS treatments improved significantly the lignin remaining rate, significantly decreased leaf litter C/N, cellulose loss rate, polyphenol oxidase and peroxidase activity. Furthermore, the simulated nitrogen and sulfur deposition interacted with each other, which affected the rate together. [Conclusion] The effects of nitrogen and sulfur deposition levels on lignin degradation and related enzymes are different during litter decomposition in evergreen broad-leaved forest in rainy area of west China. With the increase of atmospheric deposition, the lignin degradation of the evergreen broad-leaved forest has potentially been affected by nitrogen and sulfur deposition. The foliar litter decomposition process may be affected by atmospheric nitrogen and sulfur deposition in the forest.

Keywords: rainy area of west China; evergreen broad-leaved forest; nitrogen deposition; sulfur deposition; lignin degradation

(责任编辑:彭南轩)