

doi:10.3969/j.issn.1001-3776.2017.05.002

模拟酸雨对大兴安岭 3 个树种凋落叶分解速率和溶解有机碳的影响

赵晶晶¹, 杜其霖², 国润才¹, 刘志强³, 程宇琪¹, 王雨晴¹, 杜浩¹, 张成福¹

(1. 内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010010; 2. 内蒙古自治区水利科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010051;
3. 内蒙古自治区大兴安岭林管局营林处, 内蒙古 呼伦贝尔 021000)

摘要: 利用室内分解袋法研究模拟酸雨对大兴安岭根河地区白桦 *Betula platyphylla*, 杜香 *Ledum palustre*, 兴安杜鹃 *Rhododendron dauricum* 凋落叶分解速率及分解释放溶解有机碳的影响, 分别设置 pH3.5, 5.0 和 7.0 三个梯度。结果表明, 分解过程中 3 个树种凋落叶在 pH 3.5 的质量损失最少, 其次是 pH 5.0 和 7.0; 不同树种对酸雨胁迫的影响具有一定的差异; 3 个树种凋落叶的失重率为: 杜香 > 白桦 > 兴安杜鹃; 3 个树种凋落叶的失重率和分解速率均与凋落叶初始 C 浓度、木质素浓度、C/N 比和木质素/N 呈显著负相关, 与 N, P 和纤维素浓度呈显著正相关; 3 个树种凋落叶分解释放溶解有机碳都是先增加后减少, 后趋于动态平衡减少状态。

关键词: 模拟酸雨; 凋落叶分解; 溶解有机碳; 分解速率

中图分类号: S714 文献标识码: A 文章编号: 1001-3776 (2017) 05-0010-06

Effect of Simulated Acid Rain on Decomposition Rate and Dissolved Organic Carbon of Leaf Litter of Three Tree Species in Genhe

ZHAO Jing-jing¹, DU Qi-lin², GUO Run-cai¹, LIU Zhi-qiang³, CHENH Yu-qi¹, WANG Yu-qing¹, DU Hao¹, ZHANG Cheng-fu¹

(1. College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010010, China; 2. Hydraulic Research Institution of Inner Mongol Autonomous Region, Hohhot 010051, China; 3. Daxing'anling Forestry Bureau of Inner Mongolia Autonomous Region, Hulun Buir 021000, China)

Abstract: Experiments were conducted by litter bag technique on effect of simulated acid rain on decomposition rate and content of dissolved organic carbon (DOC) from leaf litter of *Betula platyphylla*, *Ledum palustre* and *Rhododendron dauricum* treated with pH 3.5, 5.0 and 7.0 in Genhe, Inner Mongolia Autonomous Region. The results showed that leaf litter mass of 3 species reduced the less under treatment of pH 3.5, and then under pH 5.0 and pH 7.0. The mass loss rate of three species litter leaf was ordered by *L. palustre* > *B. platyphylla* > *R. dauricum*. The experiment resulted that leaf litter decomposition rate and mass loss rate had a significant negative correlation with the content of C, lignin, C/N, lignin/N, but had remarkable positive correlation with the content of N, P and cellulose. Decomposition and release of DOC from different litters had the same tendency, increased first and then decreased, and then decreased slowly.

Key words: simulated acid rain; leaf litter decomposition; DOC; decomposition rate

酸雨或酸沉降 (Acid rain, acid precipitation) 是指 pH 值小于 5.6 的酸性降水 (雨、雪、雾等形式), 包括湿沉降 (如酸雨、酸雾、酸霜、酸雪等) 和干沉降 (如 NO_x, SO₂, HCL 等气体酸性物)^[1]。随着城市化进程

收稿日期: 2017-09-07; 修回日期: 2017-11-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.41461106); 内蒙古农业大学引进人才科研启动项目 (No.YJ2014-1)

作者简介: 赵晶晶, 硕士, 从事水土保持与荒漠化防治研究; E-mail: 923843551@qq.com。通信作者: 张成福, 博士; E-mail: ch893169@dal.ca。

和工业化进程的快速推进, 能源被消耗的同时并大量污染物被排放出, 解决酸雨问题变得越来越迫切。酸雨会在不同尺度上导致森林的变化^[2-4], 酸雨造成的酸沉降引起森林木材储蓄量减少以及农作物减产等^[5-6]。大兴安岭根河地区也受到了酸雨的影响。有数据记录以来, 该地区降水酸度一直呈现上升趋势, 且酸沉降造成大兴安岭森林生态系统的退化, 它不仅直接损伤植物, 而且会降低土壤的缓冲能力以及供给植物生长的有效成分^[7-8]。随着酸沉降造成的影响越来越受到关注, 研究林区酸度变化对森林凋落叶分解释放溶解有机碳的影响对于大气碳循环很有必要^[9]。20 世纪 70 年代以来, 国内外关于酸雨对森林生态系统的影响研究主要集中在酸雨对植物生理生化性质和形态结构的影响^[10-14], 而在酸雨对凋落物分解过程方面的影响关注还不多。

溶解有机碳 (Dissolved organic carbon, DOC) 的分布、迁移和转化对碳循环具有很重要的意义^[15]。森林凋落叶分解释放 DOC 是森林生态系统碳循环中很重要的一部分。森林有机碳库储量的微小变化, 都可能显著影响大气 CO₂ 浓度的变化^[16]。大兴安岭是中国主要的林业基地之一。白桦 *Betula platyphylla*, 杜香 *Ledum palustre*, 兴安杜鹃 *Rhododendron dauricum* 是大兴安岭 3 种广泛分布的天然林树种, 其生长、死亡以及残体分解对森林生态系统营养碳循环有着重要的作用。本研究以白桦、杜香和兴安杜鹃作为研究对象, 通过室内模拟酸雨试验方法, 研究其对凋落叶分解速率及分解过程中释放 DOC 的影响, 以期能提高人们对酸雨对于森林生态系统物质循环和能量流动影响的认识^[17], 能更好地预测森林生态系统对酸雨胁迫的响应, 为我国森林资源保护和环境管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 样本采集及处理

样品采集于大兴安岭北部, 内蒙古自治区呼伦贝尔根河林业局境内, 50°05'01" ~ 53°33'25" N, 121°11'02" ~ 127°01'17" E。海拔 700 ~ 1 530 m。寒温带湿润季风性气候区, 年降水量 400 ~ 500 mm, 土壤类型主要有棕色针叶林土、灰色森林土、河滩森林土、草甸土等。

2016 年 8 月, 于内蒙古根河市上央格气林场收集适量的白桦、杜香、兴安杜鹃刚凋落的新鲜叶, 带回实验室用蒸馏水冲洗去杂物及泥沙, 室内风干, 用于分解试验。分解试验采用尼龙网袋法, 尼龙袋孔径 0.5 mm, 大小 15 cm × 10 cm。称取每树种凋落叶干样约 8 g, 装入尼龙网袋, 做 2 个重复, 凋落物干样共 54 袋, 放入温度 (12℃) 和湿度相同 (60%) 的 2 个培养箱中。将原状凋落叶按其自然存在状态放置于尼龙网袋内, 做好标签。于 2016 年 10 月 26 日将网袋放入培养箱, 每隔 15 d 取出 1 次, 用模拟酸雨 (pH 3.5, pH 5.0 和 pH 7.0) 的硫酸溶液浸泡 1 h 后, 测定溶液的溶解有机碳浓度。模拟使用的酸雨是利用 98% 的浓硫酸溶液与蒸馏水按照比例混合稀释配置。模拟酸溶液与凋落物的比为 125:1 (体积: 质量)。实验结束时将凋落叶取出放回培养箱。试验周期为 165 d。

1.2 测定指标及方法

DOC 经 0.2 μm 滤纸过滤, 采用日本岛津溶解有机碳分析仪 TOC-L 测定。全碳采用重铬酸钾法-外加热法测定。全氮测定采用凯氏定氮法。全磷测定: 凋落叶样本用硫酸-过氧化氢消化, 使各种形态磷转变成磷酸盐, 正磷酸盐与钼锑抗显色剂反应, 生产磷钼蓝, 蓝色溶液的吸光度与含磷量呈正比例关系, 用酶标仪测定。木质素测定: 木质素是由聚合的芳香醇构成的一类物质, 存在于木质组织中, 位于纤维素纤维之间, 木质素中的酚羟基发生乙酰化后在 280 nm 处有特征吸收峰, 280 nm 的吸光值高低与木质素浓度正相关, 从而测得木质素含量。纤维素测定: 纤维素为 β-葡萄糖残基组成的多糖, 在酸性条件下加热能分解成 β-葡萄糖。β-葡萄糖在强酸作用下, 可脱水生成 β-糠醛类化合物。β-糠醛类化合物与蒽酮脱水缩合, 生成糠醛衍生物。颜色的深浅可间接定量测定纤维素浓度。

1.3 数据处理

运用 Excel 2010 整理后, 应用 SPSS 20.0 统计分析软件中单因素方差分析对不同浓度酸浸泡的凋落叶分解速率及释放的 DOC 进行差异性检验。采用 R 软件对 3 个树种凋落叶初始成分与分解速率、最高 DOC 浓度进行

相关矩阵运算。主要指标计算方法如下：

失重率 (P_w) 计算：

$$P_w = (W_0 - W_t) / W_0 \times 100\%$$

式中， W_t 为分解 t 时间后枯落物的残留量 (g)， W_0 为枯落物的初始重量 (g)， t 为分解时间 (d)。

分解速率：根据 Olson^[18]指数衰减模型 $W_t/W_0 = e^{-kt}$ ，对分解残留率数据进行自然对数转换后，线性拟合得到分解速率常数 k 值。

2 结果与分析

2.1 3 个树种凋落叶初始成分

3 树种凋落叶的初始主要化学成分 C，N，P 浓度和 C/N 比差异显著 (表 1)。杜香凋落叶碳浓度比白桦碳浓度低 9.04%，比兴安杜鹃低 12.59%，但杜香凋落叶氮浓度比白桦凋落叶氮浓度高 34.23%，比兴安杜鹃高 50.70%；同时，杜香凋落叶磷浓度比白桦磷浓度高 34.23%，比兴安杜鹃磷浓度高 40.27%。杜香凋落叶木质素浓度比白桦低 26.82%，比兴安杜鹃低 41.14%。兴安杜鹃、白桦和杜香凋落叶的 C/N 比分别为 4.46，3.80 和 1.92。兴安杜鹃具有较高的 C/N 比和木质素/N，以及较低的纤维素浓度。

表 1 初始凋落叶样品化学成分及 C/N 比及木质素/N 比
Table 1 The chemical composition, ratio of C/N and lignin/N in leaves before test

凋落叶	C/ (g·kg ⁻¹)	N/ (g·kg ⁻¹)	P/ (g·kg ⁻¹)	木质素/(g·kg ⁻¹)	纤维素/(g·kg ⁻¹)	C/N 比	木质素/N
杜香	2.73±0.04	1.42±0.04	1.49±0.07	124.73±4.05	221.63±7.81	1.92±0.02	87.84±0.37
白桦	3.00±0.05	0.79±0.03	0.98±0.05	170.45±4.78	176.83±5.18	3.80±0.08	215.76±2.06
兴安杜鹃	3.12±0.03	0.70±0.01	0.89±0.02	211.90±6.24	150.51±9.02	4.46±0.02	302.7±4.54

注：表中的数据为平均值和标准差，下同。

2.2 不同 pH 梯度 3 个树种凋落叶分解速率的变化特征

由表 2 可知，杜香、兴安杜鹃和白桦凋落叶在分解过程中，杜香凋落叶的平均失重率和平均分解速率高于白桦和兴安杜鹃凋落叶。在 pH 3.5，pH 5.0 和 pH 7.0 酸溶液处理下，经过 165 d 的分解，杜香凋落叶失重率分别为 39.86%，40.61%和 54.16%，分解速率分别为 0.003 0 d⁻¹，0.003 2 d⁻¹和 0.004 7 d⁻¹。杜香、兴安杜鹃和白桦凋落叶失重率和分解速率总体表现为随着 pH 浓度的升高而增高。

表 2 模拟酸雨处理对凋落叶失重率及分解速率的影响
Table 2 Effect of simulated acid rain treatment on weight loss rate and decomposition rate of leaves of different tree species

模拟酸雨处理 pH	凋落叶树种	失重率/%	分解速率
3.5	白桦	29.9 8±1.68	0.002 2±0.000 1
	杜香	39.8 6±1.09	0.003 0±0.000 2
	兴安杜鹃	29.0 9±3.29	0.002 1±0.000 3
5.0	白桦	37.8 6±2.32	0.002 9±0.000 2
	杜香	40.6 1±2.01	0.003 2±0.000 2
	兴安杜鹃	35.6 5±0.96	0.002 7±0.000 1
7.0	白桦	52.7 0±2.32	0.004 5±0.000 1
	杜香	54.1 6±1.29	0.004 7±0.000 2
	兴安杜鹃	48.4 9±1.23	0.004 2±0.000 3

2.3 不同浓度 pH 对 3 个树种凋落叶分解释放 DOC 的影响

杜香、兴安杜鹃和白桦凋落叶分解过程中，兴安杜鹃分解释放 DOC 均高于杜香和白桦 (图 1)。在 pH 3.5，pH 5.0 和 pH 7.0 处理下，3 个树种凋落叶分解释放 DOC 均随时间的推移而先增加后减少，初期分解释放较多，到第 30 天呈现先快后缓慢的下降趋势，到第 75 天趋于平稳下降状态。3 个树种凋落叶在 pH 3.5，pH 5.0 和 pH 7.0 酸淋溶下释放 DOC 具有显著差异 ($P<0.01$)，pH 5.0 酸淋溶时，3 个树种凋落叶分解释放 DOC 均高于 pH 3.5 和 pH 7.0。方差齐性检验表明，在 0.05 的显著水平下可认为每种凋落叶分解产生的 DOC 无显著差异，但在 0.01 的显著水平下，凋落叶产生的 DOC 有差异。

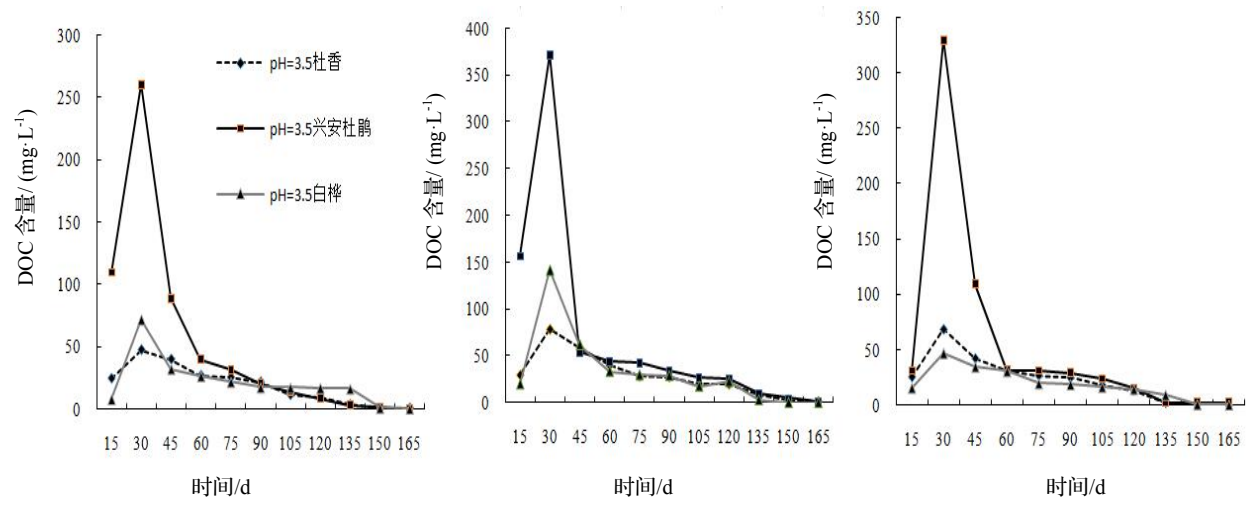


图 1 相同 pH 值条件下 3 个树种凋落叶所释放 DOC 浓度的比较

Figure 1 DOC released fromleaves of 3 tree species under same pH treatment

3 讨论

3.1 凋落叶初始成分对凋落叶失重率和分解速率的影响

Olson 衰减指数模型拟合凋落叶失重过程中得到的分解速率 (k) 是一个恒值, 可以反映凋落叶分解过程的特征。有研究发现, 在外界环境条件一致下, 不同种类的植物凋落叶在分解过程中失重率和分解速率有很大不同, 且初始成分是影响凋落叶分解速率的主要因素^[19]。在某些范围内, 凋落叶化学特性是影响凋落叶分解的主要因子^[20]。本研究发现, 凋落叶的分解速率与凋落叶初始 C 含量、木质素含量、C/N 比及木质素/N 呈负相关, 与凋落叶初始 N, P 呈正相关 (表 3)。这与杨林等^[21]通过对川西高山林线交错带 14 种代表性植物凋落叶分解速率的研究结果一致, 即凋落叶初始 N 浓度越高, 分解速率越高; 凋落叶初始 C/N 比越高, 分解速率越低; 凋落叶初始 P 浓度越高, 分解速率越快; 凋落叶初始木质素浓度越高, 分解速率越低; 凋落叶初始木质素/N 越高, 分解速率越低。唐仕珊等^[22]和 Zhang^[23]等对国内外森林凋落叶研究的分析结果相同。

木质素和纤维素含量在凋落叶中占有很大比例, 两者的浓度尤其是木质素的浓度会影响自身的分解速率乃至整个凋落叶的分解速率^[24]。本研究 3 个树种凋落叶木质素和纤维素浓度的不同也引起了分解速率以及失重率的不同。

表 3 凋落叶分解参数与原始成分之间的关系
Table 3 The relationship between decomposition parameters before and after treatment

	C	N	P	木质素	C/N	木质素/N	纤维素	k	DOC3.5	DOC5.0	DOC7.0
C	1										
N	-0.996 8	1									
P	-0.998 5	0.999 7	1								
木质素	0.955 2	-0.928 5	-0.937 4	1							
C/N	0.999 5	-0.993 9	-0.996 3	0.963 7	1						
木质素/N	0.976 1	-0.955 6	-0.962 6			1					
纤维素	-0.193 8	0.114 7	0.139 1	-0.475 3	-0.223 2	-0.402 2	1				
k	-0.995 6	0.999 9	0.999 3	-0.923 5			0.101 4				
DOC3.5	0.421 1	-0.492 2	-0.470 7	0.133 9	0.393 5	0.214 1	0.808 3	-0.503 9	1		
DOC5.0	0.509 7	-0.576 8	-0.556 6	0.232 4	0.483 5	0.310 7	0.745 3	-0.587 8	0.994 9	1	
DOC7.0	0.255 9	-0.332 4	-0.309 1	-0.041 5	0.226 7		0.898 8	-0.344 9	0.984 6	0.962 1	1

3.2 模拟不同 pH 酸雨对凋落叶失重率和分解速率的影响

Berg^[25]等对欧洲赤松凋落叶分解过程分为 3 个阶段: 凋落叶分解早期 (early stage)、凋落叶分解后期 (late

stage)、近腐殖质阶段(humus-near stage),每个阶段凋落叶质量都会发生不同变化。酸度是影响凋落叶分解的主要环境因子之一,本研究发现杜香、兴安杜鹃和白桦 3 个树种森林凋落叶的失重率和分解速率均随着 pH 浓度的增加而增加。Throop 等^[26]研究也发现,外界因素会导致凋落叶本身理化性质的改变,使得雨水淋溶过程及基质底物的可降解性增强,从而进一步加速凋落叶的分解。这种作用在凋落叶分解前期更为明显。在 pH 3.5 时失重率最低,这说明增大溶液酸性会使凋落叶质量损失减少,酸雨对森林凋落物的分解起到抑制作用。由于本研究做的是室内模拟实验,所以酸影响效果更加持续,造成的伤害也越大。这与程煜等^[27]的研究结果一致,即酸雨对凋落叶的影响因物种和酸处理程度而异。

3.3 模拟不同 pH 的酸雨对凋落叶分解释放 DOC 的影响

DOC 是森林生态系统碳循环的重要组成部分^[28]。凋落叶分解过程中释放的水溶性组分和有机溶性组分在全球陆地生态系统的物质循环和收支平衡中具有重要的作用^[29-31]。在分解初期阶段,可溶性组分和有机溶性组分快速淋溶^[32],不断释放可溶性碳等物质^[33]。在分解后期,凋落叶剩下的主要是难分解的物质,因而导致分解中期可溶性组分减少,至后期趋于平衡。这与本研究中分解初期淋溶液中 DOC 浓度快速升高后下降到最后趋于平稳状态的结果一致。凋落叶的分解过程中养分释放主要包括淋溶-富集-释放和直接释放等模式^[34],吴川福^[35]研究发现,固体样品有机碳溶解的量会随着 pH 的降低而升高,该研究的 pH 范围在 7~9,本研究中杜香和兴安杜鹃凋落叶分解释放 DOC 浓度在 pH 5.0 达到最高,其次是 pH 7.0, pH 3.5,说明该研究结果在一定 pH 范围内有效,当 pH 过高或者过低时,结果会有所不同。白桦凋落叶分解释放 DOC 浓度在 pH 5.0 达到最高,其次是 pH 3.5, pH 7.0。说明白桦凋落叶中含有更多的酸溶性物质以及耐酸性。

杜香、白桦和兴安杜鹃 3 个树种凋落叶分解释放 DOC 浓度都是先上升再下降,这与李忠佩等^[36]的研究类似。在本研究的分解初期,兴安杜鹃凋落叶释放 DOC 高于白桦和杜香凋落叶。这可能与兴安杜鹃凋落叶初始 C 浓度较高有关。之后随着淋溶的次数增加,DOC 的浓度都有所下降。凋落叶在分解的过程中,有一部分 C 转化成了 CO₂。样品在不同分解阶段释放 DOC 浓度可大致反映该凋落叶释放 DOC 的能力。3 个树种凋落叶均在 pH 5.0 时释放 DOC 最高,说明适度的酸对凋落叶分解释放 DOC 具有促进作用;其次,杜香和兴安杜鹃凋落叶分解释放 DOC 浓度在 pH 3.5 最低,说明高浓度的酸抑制微生物和酶的作用,从而抑制凋落叶分解释放 DOC。白桦凋落叶分解释放 DOC 浓度在 pH 3.5 最低,可能与其耐酸性及凋落叶表面微生物种类有关。

4 结论

(1) 杜香、白桦和兴安杜鹃 3 个树种凋落叶的失重率和分解速率均与凋落叶初始 C 浓度、木质素浓度、C/N 比和木质素/N 呈显著负相关,与 N、P 和纤维素浓度呈显著正相关。

(2) 酸雨对森林凋落叶的分解具有抑制作用,且随着酸度的增加,抑制越明显。在 pH 3.5, pH 5.0 和 pH 7.0 的酸淋溶液处理下,杜香、白桦和兴安杜鹃 3 个树种凋落叶的失重率和分解速率总体表现为: pH 3.5 < pH 5.0 < pH 7.0。

(3) 杜香、白桦和兴安杜鹃 3 个树种凋落叶分解释放 DOC 浓度均在前期(前 30 d)先升高,再下降,最后趋于平稳下降状态。

(4) 不同树种的凋落叶对酸雨胁迫的响应不一致。在 pH 3.5, pH 5.0 和 pH 7.0 的酸淋溶液处理下,杜香和兴安杜鹃凋落叶分解释放 DOC 浓度在 pH 5.0 达到最高,其次是 pH 7.0, pH 3.5。白桦凋落叶分解释放 DOC 浓度在 pH 5.0 时达到最高,其次是 pH 3.5, pH 7.0。

参考文献:

- [1] 冯宗炜. 中国酸雨对陆地生态系统的影响和防治对策[J]. 中国工程科学, 2000, 2(9): 5-11.
- [2] Foley J A, Kutzbach J E, Coe M T, *et al.* Feedbacks between climate and boreal forests during the Holocene epoch[J]. Nature, 1994, 371: 52-54.

- [3] Mouillot F, Ramba IS, Joffre R. Simulating climate change impacts on fire frequency and vegetation dynamics in a Mediterranean-type ecosystem[J]. *Glob Chang Biol*, 2002, 8: 423–437.
- [4] Tian W J, Wang L J, Li D, *et al.* Leachability of Phenanthrene From Soil Under Acid Rain and Its Relationship with Dissolved Organic Matter[J]. *Environm Earth Sci*, 2015, 73 (7): 3675–3681.
- [5] 刘滔, 尹光彩, 刘菊秀, 等. 酸沉降对亚热带森林土壤主要元素的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2013, 19 (2): 255–261.
- [6] 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.
- [7] Scheu S, Wolters V. Influence of fragmentation and bioturbation on the decomposition of ¹⁴C-Labelled beech leaf litter[J]. *Soil BiolBiochem*, 1991, 23 (11): 1029–1034.
- [8] 唐黎, 林永慧, 何兴兵. 杉木和香樟酸雨酸解底物的分解格局[J]. *生态学报*, 2017, 37 (18): 1–16.
- [9] 武晓磊. 根河林区的气候变化特征分析[J]. *中国农学通报*, 2015, (23): 210–214.
- [10] Suomela J, Neuvonen S. Effects of long-term simulated acid rain on suitability of mountain birch for *Epirrita autumnata* (Geometridae) [J]. *Can J For Res*, 1997, 27 (2): 248–256.
- [11] Thirukkumaran C M, Morrison IK. Impact of simulated acid rain on microbial respiration, biomass, and metabolic quotient in a mature sugarmaple (*Acer saccharum*) forest floor[J]. *Can J For Res*, 1996, 26 (8): 1446–1453.
- [12] MENON M, HERMLES, GUNTARDT-GOERG M S, *et al.* Effects of heavy metal soil pollution and acid rain on growth and water use efficiency of a young model forest ecosystem [J]. *Plant Soil*, 2007, 297 (1–2): 171–183.
- [13] LIKENSG E, DRISCOLLCT, BUSO D C. Long-term effects of acid rain: Response and recover of a forest ecosystem [J]. *Science*, 1996, 272 (5259): 244–246.
- [14] 马元丹, 江洪, 余树全, 等. 模拟酸雨对毛竹凋落物分解的影响[J]. *中山大学学报 (自然科学版)*, 2010, 49 (02): 95–99.
- [15] Moore T R, Souza W D, Koprivnjak J F. Controls on the sorption of dissolved organic carbon by soils[J]. *Soil Sci*, 1992, 2: 120–129.
- [16] Dixon R K, Brown S, Houghton R A, *et al.* Carbon pools and flux of global forest ecosystems[J]. *Science*, 1994, 263: 185–190.
- [17] 季晓燕, 江洪, 洪江华, 等. 模拟酸雨对亚热带三个树种凋落叶分解速率及分解酶活性的影响[J]. *环境科学学报*, 2013, 33 (07): 2027–2035.
- [18] Olson J S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems[J]. *Ecology*, 1963, 44 (2): 322–331.
- [19] Lin Y H, He X B, Ma T W, *et al.* Priority colonization of cinnamomum camphora litter by endophytes affects decomposition rate, fungal community and microbial activities under field conditions[J]. *Pedobiologia*, 2015, 58 (5/6): 177–185.
- [20] 王新源, 赵学勇, 李玉霖, 等. 环境因素对于干旱半干旱区凋落叶分解的影响研究进展[J]. *应用生态学报* 2013, 24 (11): 3300–3310.
- [21] 杨林, 邓长春, 陈亚梅, 等. 川西高山林线交错带凋落叶分解速率与初始质量的关系[J]. *应用生态学报*, 2015, 26 (12): 3602–3610.
- [22] 唐仕珊, 杨万勤, 殷睿, 等. 中国森林生态系统凋落叶分解速率的分布特征及其控制因子[J]. *植物生态学报*, 2014, (06): 529–539.
- [23] Zhang D, Hui D, Luo Y, *et al.* Rates of litter decomposition in terrestrial ecosystem: global patterns and controlling factors[J]. *J Plant Ecol*, 2008, 1: 85–93.
- [24] Berg B, McClaugherty C. Plant Litter decomposition, humus formation, carbon Sequestration, 2nd ed[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2008: 77–78.
- [25] Berg B, McClaugherty C. Plant litter decomposition, humus formation, carbon sequestration, 3rd ed[M]. Berlin: Springer, 2014.
- [26] Throop H L, Archer S R. Resolving the dryland decomposition conundrum: some new perspectives on potential drivers[J]. *Prog Bot*, 2009, 70: 171–194.
- [27] 程煜, 陈灿, 洪伟, 等. 模拟酸雨及降水量对木荷、马尾松叶凋落叶分解的影响[J]. *福建农林大学学报 (自然科学版)*, 2009, (06): 595–599.
- [28] Zech W, Guggenberger G, Schulten H R. Budgets and chemistry of dissolved organic carbon in forest soils: effects of anthropogenic soil acidification[J]. *Sci Total Environ*, 1994, 152: 49–62.
- [29] 王清奎, 汪思龙, 冯宗炜. 杉木人工林土壤可溶性有机质及其与土壤养分的关系[J]. *生态学报*, 2005, 25 (6): 1299–1305.
- [30] 杜春艳, 曾光明. 韶山针阔叶混交林凋落叶层的淋溶及缓冲作用[J]. *生态学报*, 2008, 28 (2): 508–516.
- [31] 谌贤, 刘洋, 唐实玉, 等. 川西亚高山森林凋落叶不同分解阶段基质质量特征[J]. *西北植物学报*, 2017, 37 (3): 0586–0594.
- [32] Berg B. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils[J]. *For EcolManag*, 2003, 133 (1–2): 13–22.
- [33] Almendros G, Dorado J, Gonzalezvila F J *et al.* ¹³C NMR assessment of decomposition patterns during composting of forest and shrub biomass[J]. *Soil BiolBiochem*, 2000, 32 (6): 793–804.
- [34] 张东来, 毛子军, 张玲, 等. 森林凋落叶分解过程中酶活性研究进展[J]. *林业科学*, 2006, 42 (1): 105–109.
- [35] 吴川福, 岛冈隆行, 小宫哲平, 等. 温度、pH 值对城市垃圾中有机碳溶解及其降解特性的影响[J]. *中国环境科学*, 2014, 34 (4): 976–982.
- [36] 李忠佩, 张桃林, 陈碧云. 可溶性有机碳的浓度动态及其与土壤有机碳矿化的关系[J]. *土壤学报*, 2004, 41 (4): 544–552.