

甘肃省兴隆山森林主要树种凋落叶 分解速率与初始质量的关系

魏强¹, 凌雷¹, 王多锋¹, 李国林², 戚建莉¹, 柴春山¹

(1. 甘肃省林业科学研究院, 甘肃 兰州 730020; 2. 甘肃兴隆山国家级自然保护区管理局, 甘肃 兰州 730117)

摘要: [目的] 开展凋落叶分解速率研究, 探讨凋落叶分解速率与初始质量的关系, 为甘肃省兴隆山森林生态系统物质循环研究提供依据。[方法] 采用凋落物分解袋法, 以兴隆山青杆、山杨和白桦 3 种主要树种的凋落叶为研究对象, 进行凋落叶分解速率及凋落叶初始质量的研究, 明确凋落叶分解速率与初始质量的关系。[结果] 青杆中龄林针叶分解速率为 0.16, 95% 分解期为 19.08 a; 青杆近熟林针叶分解速率为 0.13, 95% 分解期为 23.70 a; 山杨和白桦凋落叶分解速率均为 0.11, 95% 分解期分别为 28.57 a 和 27.27 a; 山杨和白桦凋落叶分解速率明显要小于青杆针叶, 这很可能是凋落叶分解主场效应和分解袋孔径较小所致。凋落叶分解速率与氮含量呈显著线性正相关, 与木质素含量、碳/氮值、木质素/氮值和钾含量呈显著线性负相关, 特别是与木质素含量、氮含量和木质素/氮值, 相关系数均达 0.700 0 以上; 钾含量、木质素含量、木质素/氮、碳/磷和纤维素含量是影响兴隆山森林凋落叶分解速率的重要指标。[结论] 木质素/氮值是影响凋落叶分解速率的关键质量指标, 凋落叶初始木质素/氮值越高, 分解速率越低。

关键词: 分解速率; 凋落叶; 初始质量; 木质素/氮值; 兴隆山

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)01-0009-07

中图分类号: S718.52, Q149

文献参数: 魏强, 凌雷, 王多锋, 等. 甘肃省兴隆山森林主要树种凋落叶分解速率与初始质量的关系[J]. 水土保持通报, 2019, 39(1): 9-15. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2019.01.002; Wei Qiang, Ling Lei, Wang Duofeng, et al. Relationships between decomposition rate of leaf litter and initial quality of main tree species in Xinglong mountain of Gansu Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(1): 9-15.

Relationships Between Decomposition Rate of Leaf Litter and Initial Quality of Main Tree Species in Xinglong Mountain of Gansu Province

Wei Qiang¹, Ling Lei¹, Wang Duofeng¹, Li Guolin², Qi Jianli¹, Chai Chunshan¹

(1. Gansu Academy of Forestry, Lanzhou, Gansu 730020, China; 2. Administration Bureau of Xinglong Mountain National Nature Reserve of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730117, China)

Abstract: [Objective] To study the decomposition rate of litter leaf and investigate the relationship between litter decomposition rate and their initial quality in order to provide a scientific basis for forest ecosystem material circulation research in Xinglong Mountain of Gansu Province. [Methods] A field litterbag experiment was conducted in Xinglong Mountain from 2013 to 2016. Litter leaf of three main tree species including *Picea wilsonii*, *Populus davidiana* and *Betula platyphylla* was taken as the research object. Samples of litterbags were retrieved at May, August and November in every year. The litter decomposition rate and their initial quality were studied. The relationship between litter decomposition rate and their initial quality were clarified. [Results] The leaf decomposition rate of *P. wilsonii* in middle aged forest was 0.16, and the 95% decomposition period was 19.08 a. The leaf decomposition rate of *P. wilsonii* in pre-mature forest was 0.13, and the 95% decomposition period was 23.70 a. The decomposition rate of litter leaf for *P. davidiana* and *B. platyphylla* was 0.11, and the 95% decomposition period was 28.57 a and 27.27 a, respectively. The decomposition rate of litter leaves of *P. davidiana* and *B. platyphylla* was significantly lower than that of the needle leaf of *P. wilsonii*, which was probably due to the home-field advantage of litter decomposition and smaller aperture of decomposition

bags. The litter decomposition rate was positively correlated with N content, but negatively correlated with lignin content, C/N value, lignin/N and K content. Especially, for lignin content, N content and lignin/N values, the correlation coefficients were above 0.7 000. K content, content of lignin, lignin/N, C/P and cellulose content were key indicators affecting the decomposition rate of forest litter in Xinglong Mountain. [Conclusion] Lignin/N is a key quality indicator affecting litter decomposition rate. The higher the initial lignin/N value of litter leaves, the lower the decomposition rate.

Keywords: decomposition rate; litter leaf; initial quality; lignin/N value; Xinglong Mountain

森林凋落物是森林植物生长发育过程中新陈代谢的产物,作为连接植物与土壤的“纽带”和养分的基本载体^[1],是森林生态系统自肥的主要补给者,在能量流动和物质循环、维持土壤肥力、改善土壤理化性质、促进森林生态系统生产力、增强森林水源涵养与水土保持功能等方面起着重要作用;同时,凋落物还是森林土壤动物和微生物的能量和物质来源,对促进和维持整个森林生态系统平衡起着重要作用^[2]。因此,森林凋落物是森林生态学、森林土壤学、森林水文学、生物地球化学及环境化学等学科的重要研究内容之一^[3]。

凋落物分解是将生物大分子降解为无机物小分子,大部分转化为 CO₂ 和水的过程,最后只剩下少量的腐殖质进入土壤层,为地上植物生长与发育提供所需养分^[4]。凋落物分解一般包括物理、化学和生物学过程,是在降水淋溶、动物咀嚼和啃食、土壤干湿交替和冻融、生物代谢等相互作用下共同完成的^[5]。凋落物分解是生态系统物质循环和能量流动的重要组成部分,在维持土壤肥力、促进系统物质循环、土壤有机质形成以及群落演替等方面具有不可替代的作用和地位^[6]。

凋落叶分解速率(k)是衡量凋落叶分解快慢和养分循环效率的关键指标,目前主要采用凋落物网袋(litter bag)法进行研究。凋落叶质量可表征凋落叶的相对可分解性^[5],并依赖于其易分解成分(N,P,水溶性糖和氨基酸等)和难分解或较难分解的有机成分(木质素、纤维素、半纤维素和多酚类物质等)的含量及相对比例^[4]。在区域气候尺度上,凋落叶质量是控制凋落叶分解快慢的关键因子^[7]。探讨凋落叶初始质量与分解速率的关系,对于了解不同生态系统的物质循环速率具有重要意义^[4]。

采用初始质量指标预测分解速率是凋落叶分解研究的重要内容。研究表明,凋落叶分解速率与凋落叶初始质量关系密切^[8-9];碳含量及碳/氮是影响分解速率的关键因子,两者均与分解速率呈负相关^[10];Dyer等^[11]和陈法霖等^[12]认为木质素含量是预测凋落叶分解速率的关键指标,且与分解速率呈负相关;也有人认为^[13]分解速率与初始碳含量及碳/氮的关系不大,而木质素/氮是影响分解速率的主要因子;彭少麟等^[14]认为碳/氮比和木质素浓度是制约凋落叶分解速率最为重要的因素。此外,初始磷、半纤维素、

酚类、钙、钾、锰和硅等含量对分解速率的影响也在许多研究中被证实^[15]。可以看出,不同研究区域得到的初始质量指标与凋落叶分解速率的关系差别较大,研究还存在很多不确定性。

兴隆山森林位于黄土高原最西端与祁连山东延余脉的交汇处,是以黄土和石质山地为主要成土母质、在降水量不足条件下发育而成的隐域森林,为半干旱区保留较完整的一块森林,其中有大面积原始青杆(*Picea wilsonii*)林分布,而青杆纯林是该区域森林自然演替过程中的亚顶极群落。兴隆山森林是兰州市天然的生态屏障,对于兰州市及周边地区在保持水土、涵养水源、防风固沙、调节气候、改善空气质量等方面具有不可替代的作用。因此,对该区域森林生态系统的稳定性、生态功能、物质循环与能量流动等方面的研究显得尤为重要。目前,对兴隆山森林凋落物累积量、凋落物凋落量等进行了相关研究^[16-17],但对凋落叶分解的研究还未见报道,特别是主要树种凋落叶分解速率大小及分解速率与凋落叶初始质量的关系如何还不清楚。因此,本文拟采用凋落物分解袋法,以典型山杨(*Populus davidiana*)—白桦(*Betula platyphylla*)—青杆针阔混交林、青杆中龄林和青杆近熟林 3 种森林的青杆、山杨和白桦的凋落叶为研究对象,开展野外和室内试验,测定凋落叶分解速率和叶初始质量,阐明凋落叶各初始质量指标与分解速率的关系,以期对兴隆山森林生态系统物质循环的深入研究提供依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

甘肃兴隆山国家级自然保护区位于兰州市东南约 45 km 处(103°50′—104°10′E,35°38′—35°58′N),属于祁连山的东延余脉,东西长 37 km,南北宽 17 km,总面积 33 301 hm²,海拔 1 800~3 670 m,是黄土高原最西端的一座绿色岩岛。属于温带半湿润半干旱气候类型,在海拔<1 800 m 区域,年均降水量 350 mm;海拔在 1 800~2 600 m 区域,年降水量为 400~600 mm;海拔在 2 600~3 000 m 区域,年降水量为 600~800 mm。地貌以石质山地和山

间谷地为主要特征, 土壤由高山草甸土、亚高山草甸土、灰褐土、栗钙土、黄绵土、新积土组成。保护区内天然林主要有山杨—白桦林、山杨—辽东栎 (*Quercus wutaishanica*) 林、山杨—白桦—青杆林、青杆纯林等^[18]。

山杨—白桦—青杆林分布在阴坡, 建群种为青杆、山杨、白桦和红桦 (*B. albosinensis*), 灌木层树种有陕甘花楸 (*Sorbus koehneana*)、红毛五加 (*Acanthopanax giraldii*)、细枝绣线菊 (*Spiraea myrtilloides*)、藤山柳 (*Clematoclethra lasioclada*)、华西箭竹 (*Fargesia nitida*) 等; 青杆重要值达 53.0%, 成

为群落的主要建群种, 已进入主林冠层; 白桦、红桦等重要值较小^[18]。青杆中龄林分布在阴坡, 建群种为青杆, 乔木层中还混有少量山杨、白桦和皂柳 (*Salix wallichiana*) 等, 灌木层树种有华西箭竹、红毛五加、陕甘花楸、细枝绣线菊和蒙古荚蒾 (*Viburnum mongolicum*) 等; 青杆重要值达 78.2%, 在林冠层中占绝对优势; 山杨、白桦等重要值很小, 趋于消失阶段^[18]。青杆近熟林分布在阴坡, 建群种仅为青杆, 灌木层树种有华西箭竹、红毛五加、陕甘花楸等; 青杆重要值达 100.0%, 初步形成青杆纯林; 灌木层以华西箭竹为主要树种^[18]。林分主要特征见表 1。

表 1 甘肃兴隆山自然保护区林分概况

森林类型	胸径/ cm	高度/ m	林龄/ a	林分组成	密度/ (株·hm ⁻²)	郁闭度	坡度/ (°)	海拔/m	土壤类型
山杨—白桦—青杆林	10.0~14.0	8.0~10	50~80	5 青杆+3 山杨+1 白桦+1 红桦	1 300~2 000	0.6~0.8	30~44	2 200~2 700	淋溶灰褐土
青杆中龄林	10.0~18.0	8.3~12.5	50~85	9 青杆+0.5 山杨+0.5 白桦	1 065~2 133	0.6~0.8	22~41	2 300~2 700	淋溶灰褐土
青杆近熟林	32.8~37.5	23.6~25.1	110~150	10 青杆	350~550	0.6~0.7	35~36	2 300~2 700	淋溶灰褐土

注: 林分组成中各树种前数字表示株数所占成数。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设计 在山杨—白桦—青杆针阔混交林、青杆中龄林和青杆近熟林 3 种森林中, 选择固定样地, 总共样地 11 个。山杨—白桦—青杆林 4 块样地, 分别位于海拔 2 400, 2 450, 2 500, 2 500 m 处; 青杆中龄林 4 块样地, 分别位于海拔 2 400, 2 450, 2 500, 2 550 m; 青杆近熟林 3 块样地, 分别位于海拔 2 300, 2 400, 2 500 m。样地均分布在阴坡, 大小为 30 m×30 m 的正方形。2012 年 6 月, 在每个样地各安放 5 个长宽高 1.00 m×1.00 m×0.20 m 的凋落物收集器, 用于凋落物年凋落量的动态研究和凋落叶分解试验研究。

1.2.2 试验设计 2013 年 9 至 10 月, 在兴隆山森林凋落物凋落的高峰期, 收集各样地凋落物收集器内的凋落物, 带回实验室, 挑选分离出青杆针叶、山杨叶和白桦叶可作为凋落叶分解试验的材料。其中, 白桦叶在山杨—白桦—青杆林海拔 2 400, 2 450 m 样地内收集, 山杨叶在山杨—白桦—青杆林海拔 2 500, 2 550 m 样地内收集。将各样地所挑选分离的青杆中龄林针叶、青杆近熟林针叶、山杨叶和白桦叶分别进行均匀混合, 等样品自然风干后, 每种凋落叶分别称取 5 份, 每份 10 g, 于 65℃ 烘箱烘干至恒重, 测定各凋落叶中的含水量, 由此推算各凋落叶样品的含水率及初始干重。

采用尼龙网制成大小 20 cm×20 cm、网孔大小为 0.15 mm(100 目) 的凋落袋, 进行凋落叶分解试验研究。称取自然风干凋落叶, 每种凋落叶每袋称取相当于烘干重的 10 g 左右, 青杆中龄林针叶 108 袋, 青杆

近熟林针叶 36 袋, 山杨叶 36 袋, 白桦叶 36 袋, 总共 216 袋。2013 年 11 月 5 日, 将青杆中龄林针叶、青杆近熟林针叶、山杨叶和白桦叶放置在位于海拔 2 450 m 的青杆中龄林中, 用于研究不同森林主要树种凋落叶在同一立地条件下的分解速率, 每种凋落叶各放 36 袋; 将其余青杆中龄林针叶放置在位于海拔 2 550 m 和 2 650 m 的青杆中龄林中, 用于研究同一森林类型青杆针叶在不同海拔梯度下的分解速率, 每种凋落叶各放 36 袋。凋落物分解袋平铺于林地土壤层表面, 使其紧贴土壤层, 各凋落袋间隔 >5 cm。分别于 2014 年、2015 年、2016 年的 5 月 5 日、8 月 5 日和 11 月 5 日采回凋落叶分解袋, 每次每种凋落叶每个试验点各采集 4 袋, 采集时去除凋落物袋表面的土块、碎石和琐屑等杂物; 带回实验室, 用水冲洗, 去除表面杂质和土壤以及袋内由降水冲刷而进入的土壤, 65℃ 下烘至恒量, 测定凋落叶残留率, 用 3 a 的凋落叶分解观测数据来计算各树种凋落叶的分解速率。

1.2.3 测定项目与方法 将烘干的凋落叶样品研磨, 分析其全碳、全氮、全磷、全钾、木质素和综纤维素含量。全碳含量采用红外吸收光谱测定, 仪器为 CS2008 碳硫分析仪 (北京纳克公司); 全氮含量采用半微量凯氏定氮法测定, 仪器为 K9860 凯氏定氮仪; 全磷含量采用硫酸—高氯酸消煮—钼锑抗分光光度法, 仪器为紫外可见分光光度计; 全钾含量采用硫酸—高氯酸消煮—原子吸收光谱法测定, 仪器为 M6 原子吸收光谱仪 (美国热电公司); 木质素含量采用索氏提取器法测定; 综纤维素含量采用索氏提取器法测定。

1.3 数据处理与分析

凋落叶残留率计算公式为:

$$y = W_t / W_0 \times 100\%^{[4,19]}$$

式中: y ——凋落叶经时间 t 后的残留率(%); W_0 ——凋落叶初始干质量(g); W_t ——凋落叶经时间 t 后的残留干物质(g)。

采用修正的 Olson 指数衰减模型^[20]模拟凋落叶分解过程,计算凋落叶分解速率(k)和半分解期($t_{0.5}$)及分解 95%所需时间($t_{0.95}$): $y = ae^{-kt}$

式中: a ——修正系数; t ——分解时间(a)。凋落叶 50%的分解期(50%分解)计算式为 $t_{0.5} = \ln(0.5/a)/(-k)$;凋落叶 95%的分解期(95%分解)计算式为 $t_{0.95} = \ln(0.05/a)/(-k)$ 。

数据统计与分析采用 SAS 9.0 和 Excel 2007 软件进行。

表 2 兴隆山森林 3 种主要树种凋落叶初始值

植被类型	物种	碳含量/ (g·kg ⁻¹)	氮含量/ (g·kg ⁻¹)	磷含量/ (g·kg ⁻¹)	钾含量/ (g·kg ⁻¹)	纤维素含量/ (g·kg ⁻¹)	木质素含量/ (g·kg ⁻¹)	碳/氮值	木质素/氮值	碳/磷值
青杆中龄林	青杆针叶	407.000±5.657	10.500±0.707	0.810±0.014	2.050±0.071	546.230±2.206	388.430±0.467	38.850±2.181	37.077±2.039	502.546±9.157
青杆近熟林	青杆针叶	362.000±4.243	10.000±0.210	0.805±0.007	2.450±0.071	566.335±4.391	404.820±4.483	36.200±0.346	40.482±0.366	449.707±5.378
山杨—白桦—青杆林	山杨叶	504.000±5.657	9.600±0.141	1.250±0.071	3.800±0.141	516.950±0.028	420.715±3.005	52.506±0.794	43.829±0.586	403.846±19.017
山杨—白桦—青杆林	白桦叶	498.000±1.414	9.650±0.071	0.740±0.014	2.650±0.071	577.225±3.783	416.845±4.759	51.608±0.331	43.198±0.479	673.096±10.618

2.2 凋落叶分解速率

由表 3 可以看出,在相同条件下(即凋落叶分解所处立地条件和林分因子、凋落物分解袋网孔大小均一致),兴隆山森林 3 种主要树种的凋落叶分解速率(k),50%分解时间($t_{0.5}$)和 95%分解时间($t_{0.95}$)差异比较明显。青杆中龄林针叶、青杆近熟林针叶、山杨叶和白桦叶分解系数 k 值变化范围为 0.11~0.16,其中最低的是山杨叶(0.11)和白桦叶(0.11),其次是青杆近熟林针叶(0.13), k 值最高的是青杆中龄林针叶(0.16)。研究表明,在凋落叶分解相同条件下,阔叶分解速率均较慢,青杆针叶分解快于阔叶,特别是青杆中龄林针叶明显要快于青杆近熟林针叶。说明同一树种林龄不同,凋落叶分解速率也不相同,龄林较小的针叶分解速率较快。3 种树种凋落叶 $t_{0.5}$ 为

2 结果与分析

2.1 凋落叶初始质量

甘肃省兴隆山 3 种乔木树种凋落叶初始质量差异较大(表 2),碳、氮、磷、钾含量分别为 362.000~504.000 g/kg,9.600~10.500 g/kg,0.740~1.250 g/kg,2.050~3.800 g/kg,纤维素含量为 516.950~577.225 g/kg,木质素含量为 388.430~420.715 g/kg;碳/氮为 38.850~52.506,木质素/氮为 37.077~43.829,碳/磷为 403.846~673.096。对于碳、钾、碳/氮含量来说,阔叶明显高于针叶;对于氮、磷、纤维素、木质素、木质素/氮、碳/磷含量,针叶和阔叶差别不明显,无明显变化规律。对于青杆树种来说,不同龄林间除了氮和磷之外,其他成分含量差别较大。

4.45~6.71 a, $t_{0.95}$ 为 19.08~28.57 a。在甘肃兴隆山林区,在分解袋网孔大小为 0.15 mm 的条件下,青杆针叶分解速率明显要快于山杨和白桦,凋落叶全部分解至少需要 19~24 a 以上的时间;山杨和白桦叶全部分解所需时间更长,可达 29 a 以上,这一结论与目前研究结果不相吻合。按目前研究结果来看,阔叶分解速率明显要快于针叶,产生这一结果的原因很可能是凋落叶分解主场效应和分解袋孔径较小所致。对于青杆中龄林针叶来说,海拔 2 450 m 处 k 值为 0.16,而 2 550,2 650 m 处 k 值均为 0.15; $t_{0.5}$ 为 4.45~4.65 a, $t_{0.95}$ 为 19.08~19.98 a。3 种海拔梯度间青杆针叶分解速率差别不明显,说明在 100 m 海拔梯度下,海拔因子对青杆中龄林针叶分解速率影响不明显。

表 3 兴隆山森林 3 种主要树种凋落叶分解的指数模型及参数

因子	植被类型	样本	海拔/ m	回归方程	分解速 率 k	半分解时 间 $t_{0.5}/a$	95%分解时 间 $t_{0.95}/a$	p	R^2
相同立地条 件不同树种	青杆中龄林	青杆针叶	2 450	$y = 1.01 e^{-0.16t}$	0.16	4.45	19.08	0.000 3	0.999 7
	青杆近熟林	青杆针叶	2 450	$y = 1.01 e^{-0.13t}$	0.13	5.54	23.70	0.000 3	0.999 7
	山杨—白桦—青杆林	山杨叶	2 450	$y = 1.01 e^{-0.11t}$	0.11	6.71	28.57	0.000 3	0.999 7
	山杨—白桦—青杆林	白桦叶	2 450	$y = 1.02 e^{-0.11t}$	0.11	6.41	27.27	0.000 4	0.999 6
同一树种不 同海拔高度	青杆中龄林	青杆针叶	2 450	$y = 1.01 e^{-0.16t}$	0.16	4.45	19.08	0.000 3	0.999 7
	青杆中龄林	青杆针叶	2 550	$y = 1.01 e^{-0.15t}$	0.15	4.65	19.98	0.000 2	0.999 8
	青杆中龄林	青杆针叶	2 600	$y = 1.01 e^{-0.15t}$	0.15	4.61	19.75	0.000 3	0.999 7

总体看来,在分解网孔大小为 0.15 mm 分解袋所处林分和立地因子(即 3 种树种凋落叶均放置在青杆中龄林中进行试验)均为一致条件下,针叶分解速率明显要快于阔叶,如青杆中龄林针叶较快,青杆近熟林针叶此之,而山杨—白桦—青杆林的山杨和白桦叶最慢。

2.3 凋落叶初始质量与分解速率的关系

2.3.1 凋落叶初始质量与分解速率的回归分析 由图 1 可以看出,凋落叶年分解速率(k)与凋落叶初始氮含量呈显著线性正相关,而与木质素含量、碳/氮值、木质素/氮值和钾含量呈显著线性负相关,特别是与木质素含量、氮含量和木质素/氮值,相关系数较

高,均达 0.700 0 以上,说明木质素含量、氮含量和木质素/氮值对兴隆山 3 种树种凋落叶分解速率影响较大,在一定程度上决定着凋落叶的分解速率。凋落叶年分解速率(k)与凋落叶初始纤维素含量、磷含量和碳/磷值线性回归方程不显著,说明纤维素含量、磷含量和碳/磷对兴隆山 3 种主要树种凋落叶分解速率影响不明显。

由此看出,凋落叶初始质量在一定程度上决定着凋落叶的分解速率,凋落叶初始氮含量越高,分解速率越高;木质素含量越高,分解速率越低;木质素/氮比值越高,凋落叶分解速率越快;另外,钾含量也是影响凋叶分解速率的一个因素。

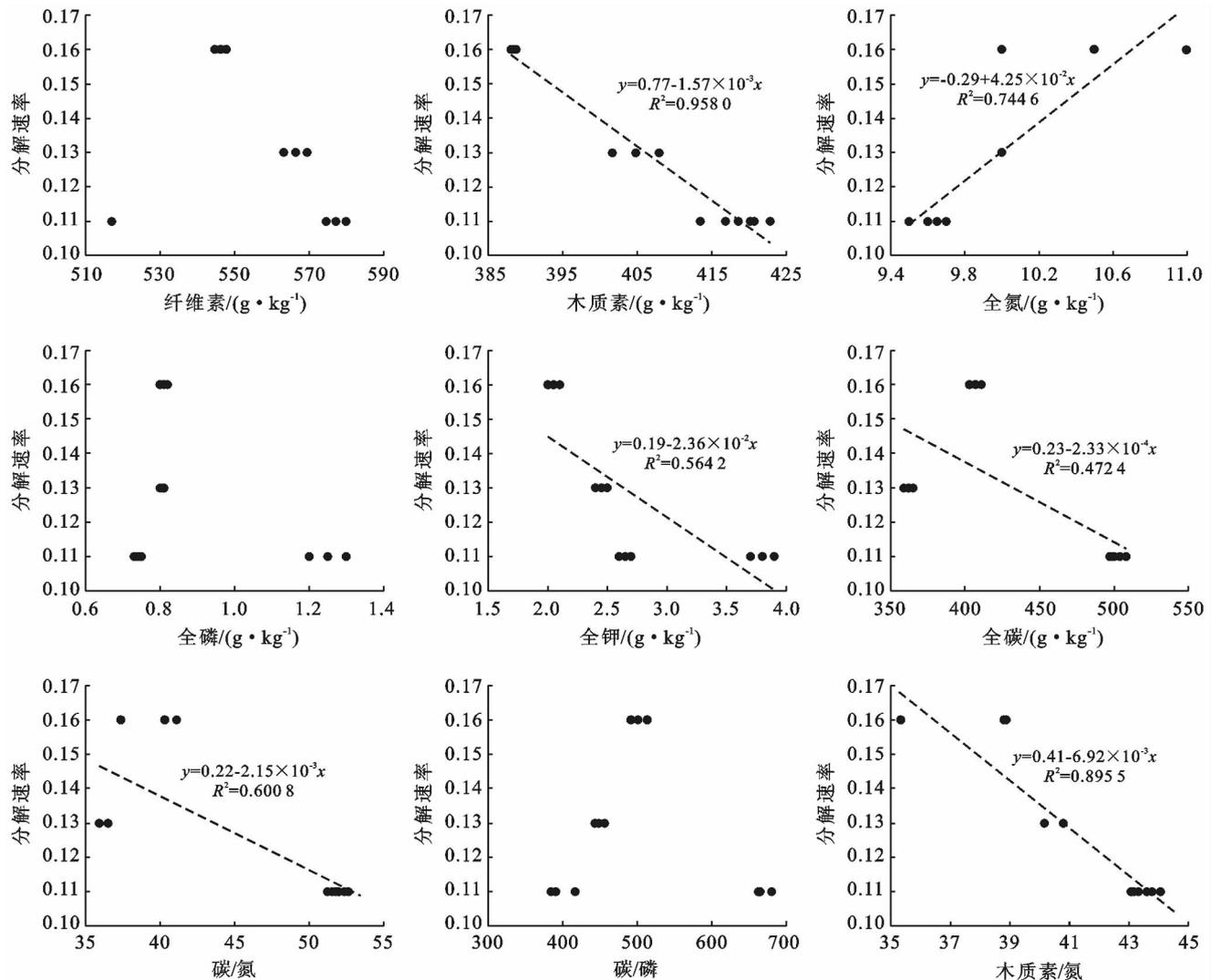


图 1 兴隆山森林 3 种主要树种凋落叶分解速率与凋落叶初始质量的线性回归分析

2.3.2 凋落叶初始质量各组分对分解速率的相对贡献 对兴隆山 3 种主要树种凋落叶分解速率与凋落叶初始质量影响因子(木质素含量、全氮、全磷、全钾、全碳、碳/氮、碳/磷和木质素/氮)进行主成分分析,结果

见表 4。由表 4 看出,第 1 主成分的特征根为 5.481 5,方差贡献率为 60.91%,在主成分函数表达式中全钾含量、木质素含量、木质素/氮值对主成分有较大的权重贡献,特别是全钾贡献最大。第 2 主成分的特征根

为 2.551 9, 方差累积贡献率达 89.26%, 在主成分函数表达式中碳/磷值、纤维素含量和全磷含量对主成分有较大的权重贡献, 特别是碳/磷贡献最大。第 3 主成分的特征根为 0.767 3, 方差累积贡献率达 97.79%, 在主成分函数表达式中全碳含量、氮含量、碳/氮值对主成分有较大的权重贡献, 特别是全磷含量贡献最大。由主成分分析可以看出, 全钾含量、木质素含量、木质素/氮、碳/磷、纤维素含量是影响兴隆山青杆、山杨和白桦凋落叶分解速率的重要指标。

表 4 兴隆山森林 3 种主要树种凋落叶初始质量主成分分析

参数	主成分				
	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
综合纤维素含量	-0.203 2	0.515 4	-0.311 6	0.296 5	0.351 6
木素含量	0.384 9	0.158 6	-0.278 1	0.611 1	-0.512 5
全氮	-0.358 1	-0.196 5	0.415 4	0.633 7	0.384 0
全磷	0.314 8	-0.419 7	0.066 9	0.078 9	0.127 9
全钾	0.401 3	-0.189 9	-0.083 3	0.309 5	0.196 0
全碳	0.362 4	0.167 5	0.520 4	0.004 6	0.065 8
碳/氮	0.378 5	0.187 4	0.399 5	-0.101 3	0.053 3
碳/磷	-0.051 4	0.592 1	0.340 7	0.029 6	-0.144 4
木质素/氮	0.380 8	0.211 4	-0.308 4	-0.154 6	0.619 3
特征值	5.481 5	2.551 9	0.767 3	0.150 8	0.023 5
贡献率	0.609 1	0.283 5	0.085 3	0.016 8	0.002 6
累积贡献率	0.609 1	0.892 6	0.977 9	0.994 6	0.997 2

3 讨论

3.1 兴隆山森林主要树种凋落叶的分解速率

Olson 模型拟合凋落叶失重过程得到的分解速率(k)是一个恒值, 可以揭示凋落叶分解过程的基本特征^[4]。本研究发现兴隆山森林 3 种主要树种凋落叶的分解速率, 其中青杆 k 值较低, 仅为 0.13~0.16, 这一结果与川西亚高山岷江冷杉 k 相当^[4]; 山杨、白桦 k 值更低, 仅为 0.11, 远低于其他研究区的的结果, 如长白山山杨 k 值为 0.34~0.48, 白桦 k 值为 0.41~0.44^[13, 21]。对于山杨、白桦凋落叶来说, 分解速率很低, 其原因之一可能是凋落物分解袋网孔太小所致。本研究中所采用尼龙网孔大小为 0.15 mm, 并且表面和贴地面大小一致, 均为 0.15 mm, 而李雪峰等研究所用网孔大小为贴地面 0.5 mm、表面为 1.0 mm^[13, 21]。其二可能是凋落物所处林分环境不同所致, 即凋落物分解存在主场效应^[22], 凋落物具有在其生长的栖息地(主场)比在别的生境(客场)分解更快的特征。本研究是将山杨—白桦—青杆林的山杨和白桦叶、青杆近熟林的青杆针叶、青杆中龄林的青杆针叶均放入青杆中龄林内, 进行山杨、白桦、青杆中龄

林针叶和青杆近熟林针叶 4 种凋落叶在相同条件下分解速率的研究, 青杆中龄林和山杨—白桦—青杆林由于林下光照条件及地表凋落物的不同, 造成了 2 种森林类型土壤化学特性和土壤微生物的不同, 进而影响到地表凋落物分解速率的不同, 由此造成了山杨、白桦叶分解速率较慢这一结果。李雪峰等^[13, 21]是将山杨和白桦叶放在山杨—白桦林内进行其分解速率的研究, 他们的研究结果反映了山杨、白桦叶在其自身森林中的分解速率。另外, 青杆中龄林的针叶分解速率高于青杆近熟林的针叶, 这有可能也是凋落物分解存在主场效应原因所致。因此, 凋落物分解袋孔径大小、凋落物分解所处林分环境状况(如土壤微生物和光照等)将很可能影响到凋落叶的分解速率, 具体如何影响还有待于进一步深入研究。

3.2 凋落叶初始质量与分解速率的关系

兴隆山森林主要树种凋落叶初始质量在一定程度上决定了凋落叶的分解速率, 凋落叶分解速率随初始氮含量增高而增大, 随凋落叶初始木质素含量、木质素/氮、全钾含量增高而减小, 其余指标对凋落叶分解速率无显著作用。凋落叶分解速率随氮含量增高而增大, 这与唐仕珊等^[9]、Zhang 等^[8]和杨林等^[4]对国内外森林凋落叶分解研究结果相一致。氮的有效量常被作为确定分解速率的控制因子, 因为氮决定微生物生物量的增长和微生物矿化的有机碳周转^[4]。在本研究中, 凋落叶分解速率随初始木质素含量增高而减小, 符合凋落叶分解的一般理论^[11], 因木质素结构复杂, 它是凋落叶中难分解的主要成分。

目前普遍认为碳/氮值和木质素/氮值最能反映凋落叶的分解速率^[23], 也有研究发现初始碳含量及碳/氮是影响分解速率的关键因子^[10]。还有研究发现, 碳/氮与分解速率关系不大, 木质素/氮才是影响凋落叶分解速率的主要因子^[13]。可见, 不同研究区域相同树种或同一研究区域不同树种凋落叶各初始质量指标与分解速率的关系不尽相同。在本研究中, 木质素含量、木质素/氮、碳/磷、纤维素含量、钾含量是影响兴隆山森林主要树种凋落叶分解速率的重要指标, 而木质素含量、木质素/氮是控制兴隆山青杆、山杨和白桦凋落叶分解速率的关键因子, 凋落叶初始木质素/氮越高, 分解速率越低。这一结果与 Constantinides 等^[24]、Scott 等^[25]和李雪峰等^[13]的研究相一致。本研究也发现, 除了木质素含量和木质素/氮外, 钾含量也是影响凋落叶分解速率的一个主要因子, 这与唐仕珊等^[9]研究结果相似。

3.3 凋落叶分解速率与分解袋孔径大小的关系

在凋落物分解速率研究中, 除了凋落叶自身质量

因素外,凋落物分解袋网孔大小对凋落叶分解速率有着重要影响。本研究发现,山杨、白桦凋落叶分解速率较慢, k 值仅为 0.11,并且低于青杆针叶。在正常情况下,阔叶分解速率远大于针叶,因阔叶中难分解物质较少,但本研究结果却低于其他相同类型区山杨、白桦凋落叶的分解速率^[13,21]。笔者认为,导致山杨、白桦叶分解速率低的一个主要原因是凋落叶分解袋网孔较小所致。本研究所用尼龙网孔径为 0.15 mm,而其他地区为 0.5 mm 或 1.0 mm^[13,21]。李艳红等^[26]采用不同孔径凋落袋(6 目、30 目和 260 目)对四川省乐山市苏稽镇不同比例巨桉(*Eucalyptus grandis*)与台湾栲木(*Alnus formosana*)混合凋落物分解过程进行了研究,结果表明孔径 6 目的分解速率最大,30 目的次之,260 目的最小。当网孔大小为 6 目时可允许各种土壤动物的作用;网孔 30 目时则基本排除了大型土壤动物的影响,允许中小型土壤动物自由出入;网孔 260 目时则尽可能排除土壤动物的作用^[26]。从以上分析看出,由于凋落物袋网孔大小的不同,将直接影响土壤动物能否参与分解袋中凋落物的分解,进而影响到凋落物分解速率的大小。因此,在凋落物分解研究过程中,凋落物分解袋网孔大小对研究结果影响较大,不同树种凋落物分解袋网孔大小应不尽相同。

4 结论

研究表明,甘肃兴隆山青杆凋落叶分解较慢,分解速率为 0.15~0.16,半分解期为 4.45~4.65 a,95%分解期为 19.08~19.98 a,一个完整的分解周期至少要 20 a 以上的时间,该地区海拔较高,全年温度偏低,分解者活性不高可能是其重要原因。线性回归和主成分分析表明,木质素含量、氮含量、木质素/氮、全钾含量是控制兴隆山森林乔木树种凋落叶分解速率的关键因子,凋落叶初始木质素/氮越高,分解速率越低。除了凋落叶基质质量之外,凋落物分解主场效应和分解袋孔径大小也是影响凋落叶分解速率快慢的重要因子,而这两个因子是不能被忽略的。

[参 考 文 献]

[1] 马玉珠,程栋梁,钟全林,等. 中国森林凋落物不同组分异速比例关系[J]. 植物生态学报,2013,37(12):1071-1079.

[2] 杨万勤,邓仁菊,张健. 森林凋落物分解及其对全球气候变化的响应[J]. 应用生态学报,2007,18(12):2889-2895.

[3] Cheng Yi, Wang Jing, Liu Yang, et al. Litter decomposition reduces either N₂O or NO production in strongly

acidic coniferous and broad-leaved forest soils under anaerobic conditions[J]. Journal of Soils and Sediments, 2014,14(3):549-557.

- [4] 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.
- [5] Swift M J, Heal O W, Anderson J M. Decomposition in Terrestrial Ecosystems[M]. California: University of California Press, 1979,1-10.
- [6] Berg B, McLaugherty C. Plant litter: Decomposition, Humus Formation, Carbon Sequestration [M]. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014.
- [7] Cornwell W K, Cornelissen J H, Amatangelo K, et al. Plant species traits are the predominant control on litter decomposition rates within biomes worldwide[J]. Ecology Letters, 2008,11(10):1065-1071.
- [8] Zhang Deqiang, Hui Dafeng, Luo Yiqi, et al. Rates of litter decomposition in terrestrial ecosystems: Global patterns and controlling factors[J]. Journal of Plant Ecology, 2008,1(2):85-93.
- [9] 唐仕姗,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,2014,38(6):529-539.
- [10] Berg B, Ekbohm G. Litter mass-loss rates and decomposition patterns in some needle and leaf litter types (VII): Long-term decomposition in a Scots pine forest [J]. Canadian Journal of Botany, 1991,69(7):1449-1456.
- [11] Dyer M L, Meentemeyer V, Berg B. Apparent controls of mass loss rate of leaf litter on a regional scale [J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 1990,5(1):311-323.
- [12] 陈法霖,江波,张凯,等. 退化红壤丘陵区森林凋落物初始化学组成与分解速率的关系[J]. 应用生态学报,2011,22(3):565-570.
- [13] 李雪峰,张岩,牛丽君,等. 长白山白桦(*Betula platyphylloides*)纯林和白桦山杨(*Populus davidiana*)混交林凋落物的分解[J]. 生态学报,2007,27(5):1782-1790.
- [14] 彭少麟,刘强. 森林凋落物动态及其对全球变暖的响应[J]. 生态学报,2002,22(9):1532-1544.
- [15] Berg B, Steffen K T, McLaugherty C. Litter decomposition rate is dependent on litter Mn concentrations [J]. Biogeochemistry, 2007,82:29-39.
- [16] 魏强,凌雷,王多锋,等. 甘肃兴隆山主要森林类型凋落物累积量及其影响因子[J]. 林业科学研究,2015,28(6):818-825.
- [17] 魏强,凌雷,柴春山,等. 甘肃兴隆山不同演替阶段典型森林群落的凋落物动态[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2017,41(5):27-34.

- 度的相互影响[J]. 第四纪研究, 2014, 34(5): 1013-1022.
- [8] 满苏尔·沙比提, 胡江玲. 新疆渭干河—库车河三角洲绿洲地下水特征对天然植被的影响分析[J]. 冰川冻土, 2010, 32(2): 422-428.
- [9] Kennedy M P, Milne J M, Murphy K J. Experimental growth response stoground water level variation and competition in five British wetland plants pecies [J]. *Wetlands Ecology & Management*, 2003, 11(6): 383-396.
- [10] 张天曾. 中国干旱区水资源利用和生态环境[J]. 自然资源, 1981(1): 62-67.
- [11] 孙丽, 刘廷玺, 段利民, 等. 科尔沁沙丘—草甸相间地区表土饱和和导水率的土壤传递函数研究[J]. 土壤学报, 2015, 52(1): 68-76.
- [12] Huo Siyuan, Jin Menggui, Liang Xing, et al. Changes of vertical groundwater recharge with increase in thickness of Vadose zone simulated by one-dimensional variably saturated flow model[J]. *Journal of Earth Science*, 2014, 25(6): 1043-1050.
- [13] 蒙仲举, 王猛, 高永, 等. 基于土壤粒度参数的荒漠草原地表粗粒化过程[J]. 水土保持研究, 2017, 24(6): 22-28.
- [14] 张惜伟, 汪季, 高永, 等. 呼伦贝尔沙质草原风蚀坑表层土壤粒度特征[J]. 干旱区研究, 2017, 34(2): 293-299.
- [15] 苏永中, 赵哈林. 科尔沁沙地农田沙漠化演变中土壤颗粒分形特征[J]. 生态学报, 2004, 24(1): 71-74.
- [16] 王琴, 蒙仲举, 汪季, 等. 希拉穆仁草原近自然恢复状态下植被—土壤响应特征[J]. 生态学报, 2017, 37(4): 1159-1167.
- [17] 张佳瑞, 王金满, 祝宇成, 等. 分形理论在土壤学应用中的研究进展[J]. 土壤通报, 2017, 48(1): 221-228.
- [18] 白晓慧, 白文明. 内蒙古通辽市近 30 年降水变化分析[J]. 畜牧与饲料科学, 2016, 37(9): 67-69.
- [19] 马克平. 生物群落多样性的测度方法(I): α 多样性的测度方法(上)[J]. 生物多样性, 1994, 3(3): 162-168.
- [20] 郭鑫, 赵全升, 张建伟, 等. 大沽河下游地区地下水及地表植被对截渗墙响应[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(1): 142-147.
- [21] 丁延龙, 高永, 蒙仲举, 等. 希拉穆仁荒漠草原风蚀地表颗粒粒度特征[J]. 土壤, 2016, 48(4): 803-812.
- [22] 李惠娣, 杨琦, 聂振龙, 等. 土壤结构变化对包气带土壤水分参数的影响及环境效应[J]. 水土保持学报, 2002, 16(6): 100-102.
- [23] 朱永华, 张生, 孙标, 等. 科尔沁沙地典型区地下水、降水变化特征分析[J]. 干旱区地理, 2017, 40(4): 718-728.
- [24] 魏彬, 海米提·依米提, 王庆峰, 等. 克里雅绿洲地下水埋深与土壤含水量的相关性[J]. 中国沙漠, 2013, 33(4): 1110-1116.
- [25] 胡晓蕾, 张富仓, 赵旭. 杨凌包气带深层黄土颗粒分形特性的实验研究[J]. 节水灌溉, 2009(3): 1-4.
- [26] 龚晨, 安萍莉, 琪赫, 等. 阴山北麓地区农作制度演变历程及演变规律研究[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(2): 66-70.
- [27] 刘秀花, 王蕊, 胡安焱, 等. 颗粒组成对包气带水分运动参数的通径分析[J]. 沈阳农业大学学报, 2016, 47(3): 320-326.

(上接第 15 页)

- [18] 魏强, 凌雷, 张广忠, 等. 兴隆山森林群落不同演替阶段的结构特征[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2015, 39(5): 59-66.
- [19] 吕瑞恒, 李国雷, 刘勇, 等. 不同立地条件下华北落叶松凋落物的分解特性[J]. 林业科学, 2012, 48(2): 31-37.
- [20] 武启骞, 吴福忠, 杨万勤, 等. 季节性雪被对高山森林凋落物分解的影响[J]. 植物生态学报, 2013, 37(4): 296-305.
- [21] 李雪峰, 韩士杰, 胡艳玲, 等. 长白山次生针阔混交林叶凋落物中有机物分解与碳、氮和磷释放的关系[J]. 应用生态学报, 2008, 19(2): 245-251.
- [22] 查同刚, 张志强, 孙阁, 等. 凋落物分解主场效应及其土壤生物驱动[J]. 生态学报, 2012, 32(24): 7991-8000.
- [23] Taylor B R, Parkinson D, Parsons W F. Nitrogen and lignin content as predictors of litter decay rates: A microcosm test[J]. *Ecology*, 1989, 70(1): 97-104.
- [24] Constantinides M, Fownes J H. Nitrogen mineralization from leaves and litter of tropical plants: Relationship to nitrogen, lignin and soluble polyphenol concentrations[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26(1): 49-55.
- [25] Scott N A, Binkley D. Foliage litter quality and annual net N mineralization: Comparison across North American forest sites[J]. *Oecologia*, 1997, 111(2): 151-159.
- [26] 李艳红, 罗承德, 杨万勤, 等. 桉—椴混合凋落物分解及其土壤动物群落动态[J]. 应用生态学报, 2011, 22(4): 851-856.