

DOI: 10.5846/stxb201906171275

李娜, 赵传燕, 郝虎, 臧飞, 常亚鹏, 汪红, 杨建红. 海拔和郁闭度对祁连山青海云杉林叶凋落物分解的影响. 生态学报, 2021, 41(11): 4493-4502.

Li N, Zhao C Y, Hao H, Zang F, Chang Y P, Wang H, Yang J H. Decomposition and its nutrients dynamic of Qinghai spruce leaf litter with elevation gradient in Qilian Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(11): 4493-4502.

海拔和郁闭度对祁连山青海云杉林叶凋落物分解的影响

李 娜¹, 赵传燕^{1,*}, 郝 虎², 臧 飞¹, 常亚鹏¹, 汪 红¹, 杨建红¹

1 兰州大学草地农业生态系统国家重点实验室, 兰州大学草地农业科技学院, 兰州 730020

2 甘肃祁连山国家级自然保护区管理局, 张掖 734000

摘要: 为了探究海拔和郁闭度对青海云杉林叶凋落物分解的影响, 本文选择海拔为 2850 m, 3050 m, 3250 m 和 3450 m 四个梯度和高、中、低三个林分郁闭度, 采用分解网袋法, 研究青海云杉叶凋落物分解速率及分解过程中 N、P 元素变化。结果表明, 质量损失率随时间在波动增大。分解速率先减小后增大, 不同海拔下分解速率为 $K_{3450} > K_{3050} > K_{3250} > K_{2850}$, 不同郁闭度下分解速率为 $K_{低} > K_{中} > K_{高}$, 青海云杉叶凋落物分解 50% 和 95% 所需时间约为 5.3 a 和 22.7 a。凋落物分解过程中, N、P 含量和累积系数在不同海拔和郁闭度下的变化不同, 与季节变化有关。研究结果为祁连山森林生态系统地球化学循环奠定基础。

关键词: 祁连山; 青海云杉林; 海拔; 郁闭度; 凋落物分解; N; P

Decomposition and its nutrients dynamic of Qinghai spruce leaf litter with elevation gradient in Qilian Mountains

LI Na¹, ZHAO Chanyan^{1,*}, HAO Hu², ZANG Fei¹, CHANG Yapeng¹, WANG Hong¹, YANG Jianhong¹

1 State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystems, Lanzhou University, College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China

2 Management Bureau of Qilian Mountains Nature Reserve in Gansu, Zhangye 734000, China

Abstract: In order to explore the effects of different altitudes and canopy closures on the decomposition of leaf litter of Qinghai spruce (*Picea crassifolia*), four altitudes (i.e. 2850 m, 3050 m, 3250 m, and 3450 m) and three kinds of canopy closure (high, medium, and low) were selected in this study. Field decomposition net bags were used to study the litter decomposition rate (K), nitrogen (N), and phosphorus (P) content changes of leaf litter during decomposition. The results showed that the rate of mass loss increased with time. The decomposition rate decreased first and then increased with time. The sequence of decomposition rate at different altitudes was $K_{3450} > K_{3050} > K_{3250} > K_{2850}$, and the order of decomposition rate at different canopy closure was $K_{low} > K_{medium} > K_{high}$. Qinghai spruce leaf litter decomposition time needed for 50% and 95% mass loss was about 5.3 year and 22.7 year. During the decomposition of the leaf litter, the changes of N and P content and accumulation coefficient at different altitudes and canopy closure were different, and were related to seasonal changes. Results obtained in the study would lay the foundation for geochemical cycle in the forest ecosystem of Qilian Mountains.

Key Words: Qilian Mountains; Qinghai spruce forests; canopy closure; altitude; litter; N; P

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (31901130, 41571051); 中国博士后科学基金资助项目 (2020M673532); 甘肃省自然科学基金 (20JR5RA277)

收稿日期: 2019-06-17; **网络出版日期:** 2021-04-06

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: nanzhr@lzb.ac.cn

森林生态系统是最大的营养物质循环库,拥有最大的生物量,枯落物是森林生态系统生物量的重要组成物质^[1]。枯落物分解是养分循环和能量流动的重要途径^[2]。枯落物分解涉及到复杂的物理化学过程,影响枯落物分解因素众多,包括枯落物本身的性质、气候和土壤(动物和微生物)等,对于环境因素,气候是主导因素^[3]。对于生物因素,土壤动物能够物理破碎枯落物,加快分解^[4],微生物在枯落物分解后期对难分解物质的降解起到重要作用^[5]。近年来,用于枯落物分解的研究植被多集中在杉木、人工林、混交林和马尾松等方面^[6],而对青海云杉植被枯落物分解及养分释放方面的研究较少。

祁连山作为我国西北地区高大山系,对河西地区水资源的供给具有重要的贡献。青海云杉(*Picea crassifolia*)是祁连山山地森林主要乔木优势物种^[7],青海云杉叶枯落物分解是祁连山森林生态系统物质循环的重要过程,由于青海云杉林叶分解慢且受多种复杂因素控制,对该重要过程研究较少。地形导致水热组合不同,使得枯落物分解过程随海拔而不同。海拔梯度影响着枯落物分解影响因素,海拔升高,气温降低,湿度降低,辐射增强,这些环境因素使不同海拔梯度下的枯落物分解有差异^[8-9]。海拔梯度的不同还影响着枯落物分解的生物因素,如海拔影响土壤 pH, pH 又是影响微生物群落的关键因子,土壤动物群落及其多样性随着海拔高度的增加而减小^[10-11],从而影响枯落物分解。森林郁闭度能改变林下微环境,郁闭度反映森林环境和结构,也反映林冠的郁闭程度^[12]。郁闭度影响着林下水热条件,郁闭度的高低影响林下光照、空气温湿度和土壤状况(土壤动物、微生物和水分等),如郁闭度越大,透光率变小,气温降低,湿度增加,土壤含水量增大,也影响着枯落物的分解过程^[13-15]。目前,在祁连山海拔和郁闭度对枯落物分解影响的研究鲜见。

青海云杉林在祁连山分布的海拔跨度较大(2500—3600 m),由于海拔跨度大,青海云杉林在低海拔受水分胁迫,在高海拔受温度胁迫,生境差异导致郁闭度不同^[16],本研究采用野外枯落物自然分解试验,模拟不同海拔和郁闭度下青海云杉林叶凋落物的分解过程,探究叶凋落物分解速率以及 N、P 元素含量的动态变化,青海云杉叶凋落物分解速率随海拔的变化如何,不同的郁闭度下叶凋落物分解如何变化,是理解祁连山区森林生态系统地球化学循环空间异质性要回答的科学问题。揭示气候因子对叶凋落物分解的影响,丰富研究区枯落物分解的理论实践,为物质循环的研究提供数据支撑和理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于祁连山黑河上游的天涝池流域(38°20′—38°30′ N, 99°44′—99°59′ E),海拔 2600—4450 m。年均气温-0.6—2.0 °C,年降水量 400—500 mm,属于典型的大陆性高寒半湿润山地气候。青海云杉林主要为藓类青海云杉林,林下发育苔藓层,苔藓层与枯落物组成厚度较大的地被物层,是祁连山青海云杉林生态系统的典型特征^[17-18]。

1.2 样地选择和样品制备与采集

在海拔高度为 2850 m、3050 m、3250 m 和 3450 m 的青海云杉林中设置固定样地,在海拔 2850 m 的固定样地中,以样地中心为起点,向东南西北四个方向上分别选择郁闭度为高、中和低(80%、73%和 67%)的样点。2015 年 8 月底,在每个固定样地的枯落物收集框中收集青海云杉林凋落物,去除枝条和球果,将剩下的叶子装入自封袋带回实验室处理。将采集的凋落叶用去离子水洗净,65 °C 烘干至恒重,少许凋落物用于初始化学成分(N、P)的测定,大部装入分解网袋。分解网袋大小为 10 cm×8 cm,网袋孔径为 1 mm,每个分解网袋中装入 5 g 凋落叶,将装入凋落叶的分解网袋放在四个海拔梯度的固定样地中及 2850 m 不同郁闭度样点上。放置前清除地表杂物,凋落物袋与土壤充分接触,放置时间为 2015 年 9 月 30 日,于 2015 年 12 月 25 日、2016 年 4 月 30 日、6 月 18 日、8 月 16 日和 11 月 18 日取样,每次每样点取 3 袋,每次共取样 48 袋(即四个海拔处共取样 12 袋,东南西北四个方向上高中低郁闭度下共取样 36 袋),共取 5 次样,取样总计 240 袋。在每个固定样地布设自动气象站(HOBO U30 Station, USA),用于观测大气温度、降雨等要素,每 30 min 记录数据一次。

1.3 实验室分析

每次取样后,分解袋中的枯落物用去离子水洗净,65 °C 烘干至恒重,天平(感量为 0.001 g)称重,记录。

然后将其粉碎过 100 目筛,用于 N、P 元素测定分析。首先消煮,称粉碎枯落物样品 0.100 g 于消化管,加入加速剂(硫酸钾:硫酸铜=10:1)1.65 g,再加 5 mL 浓硫酸,将消化管连同支架放在消化炉(温度为 420 ℃)上消化,待溶液为兰绿色,继续煮 30 min,消化完成后冷却至室温,然后稀释至 50 mL,最后用流动注射分析仪(FIAstar5000 Analyzer, FOSS, Denmark)测定 N、P。

1.4 数据处理与分析

根据连续取样的重量,计算枯落物质量残留率($D, \%$)^[19],公式如下:

$$D = \frac{W_0 - W_t}{W_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: W_t 为时间 t 取样的重量(g), W_0 为初始时间样品的重量(5 g)。根据以下公式是计算分解速率($K, \text{g/d}$)^[20]:

$$K = \frac{W_0 - W_t}{T} \quad (2)$$

式中: W_t , W_0 含义同公式(1), T 为取样与放样的时间间隔。凋落物的分解是一个动态过程,利用 Olson 指数衰减模型^[21]拟合凋落物分解的时间动态,公式表示如下:

$$\ln\left(\frac{W_t}{W_0}\right) = -Kt \quad (3)$$

式中: W_t , W_0 含义同公式(1), t 是凋落物降解时间, K 同公式(2)。凋落物在分解过程中,凋落物的 N、P 含量将发生变化,或者累积或释放,用累积系数(NAI)^[22]表示:

$$\text{NAI} = \frac{(W_t \times X_t)}{(W_0 \times X_0)} \times 100\% \quad (4)$$

式中: W_t , W_0 含义同公式(1), X_t 为 t 时间取样的枯落物 N 或者 P 元素的浓度(g/kg), X_0 为初始放样时间的枯落物 N 或者 P 元素的浓度(g/kg)。用来判断养分 N 或者 P 在分解过程中的积累与释放。当 $\text{NAI} > 100\%$, 养分净累积;当 $\text{NAI} < 100\%$, 养分净释放; $\text{NAI} = 100\%$, 既不累积,也不释放。运用 Excel 对数据进行作图,运用 SPSS 23 软件对不同海拔和郁闭度下质量损失率、分解速率、N 和 P 含量及养分累积系数进行单因素 ANOVA 方差分析,并且再利用多重比较(Duncan 法)进行显著分析(显著水平 $\alpha = 0.05$),大写字母表示相同分解时间不同海拔(郁闭度)间的显著性,小写字母表示同一海拔(郁闭度)不同分解时间之间的显著性。

将 30 min 的气象要素(温度和降雨)平均或加和获得小时尺度上的数据,同样获得日尺度上的数据,再获得月尺度上数据,利用 Excel 对数据进行分析并作图。

2 结果与分析

2.1 枯落物分解期间气温和降雨量的变化

气温和降雨的变化如图 1 所示,从 2015 年 11 月到 2016 年 2 月,气温均为负值,气温随时间先下降后上升,在 1 月降到最低,不同海拔下气温由高到低依次是海拔 2850 m、3450 m、3050 m 和 3450 m。2016 年 4 月—10 月,气温均为正值,气温随时间先上升后下降,在 7 月达到最高值,不同海拔下气温由高到低依次是海拔 2850 m、3050 m、3450 m 和 3250 m。

冬季(2015 年 12 月—2 月),降雨量最小,从 2016 年 3 月—11 月,降雨量先增大后减小,在 7 月和 8 月降雨量最多,春季(3 月—5 月),海拔 3050 m、3250 m 下降雨量最大,夏季(6 月—8 月),不同海拔下降雨量由高到低依次是海拔 3050 m、3450 m、2850 m 和 3250 m,秋季(9 月—11 月),海拔 3050 m、3250 m 下降雨量最大。

2.2 青海云杉枯落物质量损失率的变化

2.2.1 不同海拔下青海云杉枯落物质量损失率的变化

随着分解时间的延长,不同海拔下枯落物的质量损失率在增大(图 2)。在第 415 天,海拔 2850 m、3050 m、3250 m 和 3450 m 下的枯落物质量分别损失了 14.89%、16.18%、13.42% 和 19.67%。分解后期 321—

415 d 的枯落物损失率显著高于分解前期 86—262 d ($P<0.05$)。

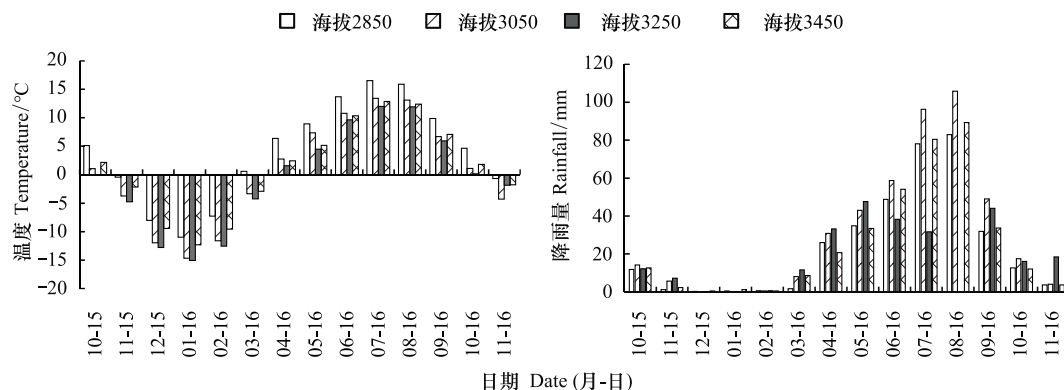


图1 枯落物分解时间内不同海拔下温度和降雨量的月变化图

Fig.1 Monthly changes of temperature and rainfall at different altitudes during the decomposition period of litter

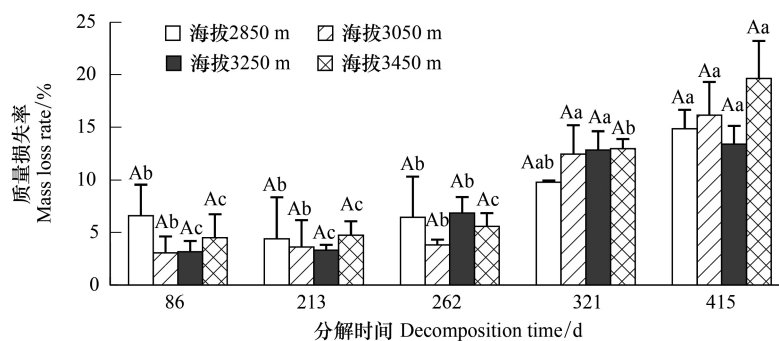


图2 不同海拔下枯落物质量损失率的时间变化

Fig.2 Variation of mass loss rate of leaf litter with time at different altitude

大写字母表示不同海拔之间的显著性,小写字母表示同一海拔不同分解时间之间的显著性 ($P<0.05$)

2.2.2 不同郁闭度下青海云杉枯落物质量损失率的变化

在三种郁闭度下,质量损失率随时间在波动增大(图3)。分解后期 321—415 d 的枯落物损失率显著高于分解前期 86—262 d ($P<0.05$)。分解 415 d 时,在高、中和低郁闭度下质量损失率分别是 10.73%、13.68% 和 14.88%。

2.3 青海云杉枯落物的分解速率

2.3.1 不同海拔下青海云杉枯落物的分解速率

在观测期间(放置时间为 2015 年 9 月 30 日,于 2015 年 12 月 25 日、2016 年 4 月 30 日、6 月 18 日、8 月 16 日和 11 月 18 日取样),不同海拔下枯落物分解速率整体上呈先减少后增大的趋势,海拔梯度上差异不显著(图4)。在 86—213 d 时段分解速率达到最低。

根据叶枯落物残留率 $y(1-D)$ 随时间 t 的指数回归方程,估算枯落物分解一半(50%)所需要的时间 $t_{0.5}$ 和分解 95% 所需要的时间 $t_{0.95}$ (表1)。从表1可以看出,指数回归方程拟合效果较好, R^2 介于 0.7872—0.8916 之间。在海拔 2850 m、3050 m、3250 m 和 3450 m 的 K 值分别是 0.127、0.146、0.132 和 0.171,分解速率从大到小为 $K_{3450} > K_{3050} > K_{3250} > K_{2850}$,分解一半所需时间($t_{0.5}$)从海拔由低到高依次为 5.5、4.8、5.3、4.1 a,分解 95% 所

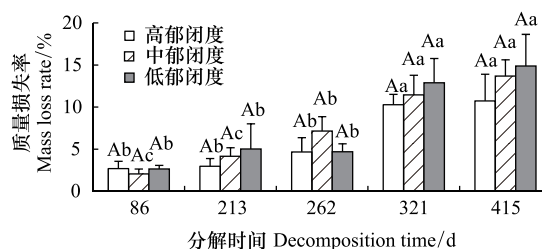


图3 不同郁闭度下质量损失率的时间变化

Fig.3 Variation of mass loss rate of leaf litter with time under different canopy closures

大写字母表示不同郁闭度之间的显著性,小写字母表示同一郁闭度不同分解时间之间的显著性 ($P<0.05$)

需时间($t_{0.95}$)从海拔由低到高依次为 23.6、20.5、22.7、17.5 a。

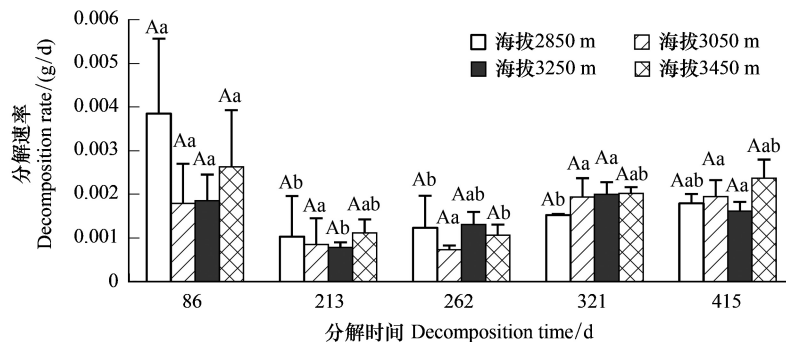


图 4 不同海拔下枯落物分解速率的时间变化

Fig.4 Variation of litter decomposition rate with time at different altitude

大写字母表示不同海拔之间的显著性,小写字母表示同一海拔不同分解时间之间的显著性 ($P < 0.05$)

表 1 不同海拔青海云杉叶凋落物分解模型

Table 1 The model of leaf litter decomposition at the different altitude

海拔 Altitude/m	回归方程 Regression equation	相关系数(R^2) Correlation coefficient	分解速率(K) Decomposing rate	$t_{0.5}/a$	$t_{0.95}/a$
2850	$y = 1.0057e^{-0.127t}$	0.8916	0.127	5.5	23.6
3050	$y = 1.0173e^{-0.146t}$	0.7878	0.146	4.8	20.5
3250	$y = 1.0082e^{-0.132t}$	0.8584	0.132	5.3	22.7
3450	$y = 1.0164e^{-0.171t}$	0.8092	0.171	4.1	17.5

2.3.2 不同郁闭度下青海云杉枯落物分解速率

在观测期间(放置时间为 2015 年 9 月 30 日,于 2015 年 12 月 25 日、2016 年 4 月 30 日、6 月 18 日、8 月 16 日和 11 月 18 日取样),不同郁闭度下分解速率整体上随时间先减小后增大(图 5)。在 86—213 d 期间,分解速率达到最小,在高郁闭度下差异显著($P < 0.05$)。同一分解时间下不同郁闭度间的分解速率差异不显著。

根据叶枯落物残留率 $y(1-D)$ 随时间的指数回归方程,估算不同郁闭度下枯落物分解一半(50%)所需要的时间 $t_{0.5}$ 和分解 95% 时所需要的时间 $t_{0.95}$ (表 2)。从表 2 可以看出,指数回归方程拟合效果较好, R^2 介于 0.8358—0.9341 之间。高、中和低郁闭度的 K 值分别是 0.101、0.134 和 0.141,分解速率从大到小为 $K_{低} > K_{中} > K_{高}$,分解一半所需时间($t_{0.5}$)由低郁闭度到高郁闭度依次为 6.9、5.2 和 4.8 a,分解 95% 所需时间($t_{0.95}$)低郁闭度到高郁闭度依次为 29.7、22.4、和 21.2 a。

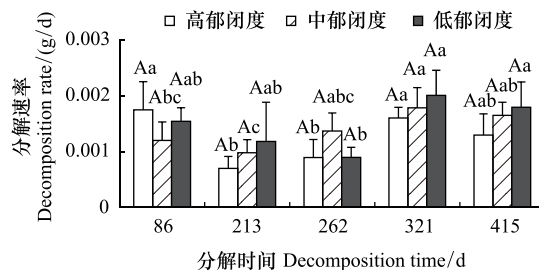


图 5 不同郁闭度下枯落物分解速率的时间变化

Fig.5 Variation of litter decomposition rate under different canopy closure

大写字母表示不同郁闭度之间的显著性,小写字母表示同一郁闭度不同分解时间之间的显著性 ($P < 0.05$)

表 2 不同郁闭度下青海云杉叶凋落物分解模型

Table 2 The model of leaf litter decomposition at the different canopy closure

郁闭度 Canopy closure	回归方程 Regression equation	相关系数(R^2) Correlation coefficient	分解指数(K) Decomposing index	$t_{0.5}/a$	$t_{0.95}/a$
高 High	$y = 1.0046e^{-0.101t}$	0.8358	0.101	6.9	29.7
中 Medium	$y = 1.0115e^{-0.134t}$	0.9341	0.134	5.2	22.4
低 Low	$y = 1.0129e^{-0.141t}$	0.8506	0.141	4.9	21.2

2.4 枯落物分解过程中 N 和 P 的含量变化

2.4.1 不同海拔下枯落物分解过程中 N、P 含量变化

不同海拔下枯落物 N、P 含量变化不同(图 6)。分解 0—213—262 d, N 含量在海拔 3050 先升高后降低, 在 213 d, 海拔 2850 m 和 3050 m 的 N 含量高于海拔 3250 m 和 3450 m, 在海拔 3050 m 处显著($P<0.05$); P 含量在海拔 3050 m 下先降低后升高, 在其余三个海拔下一直在降低, 分解 213 d, P 含量在 3050 m 含量低于其余三个海拔, 在海拔 3250 m 下显著($P<0.05$)。分解 262—321—415 d, N 含量先降低后升高, 且 N 含量在海拔 2850 m 处最大, 依次是海拔 3250 m、3050 m 和 3450 m, 在 321 d 最为显著($P<0.05$); P 含量在海拔 3050 m 和 3450 m 下先升高后降低, 在海拔 2850 m 和 3250 m 下一直在升高, 在 321 d, 海拔 2850 m 和 3250 m 的 P 含量显著低于海拔 3450 m 和 3050 m($P<0.05$), 在 415 d, 海拔 2850 m 和 3250 m 的 P 含量显著高于海拔 3450 m 和 3050 m 的含量($P<0.05$)。

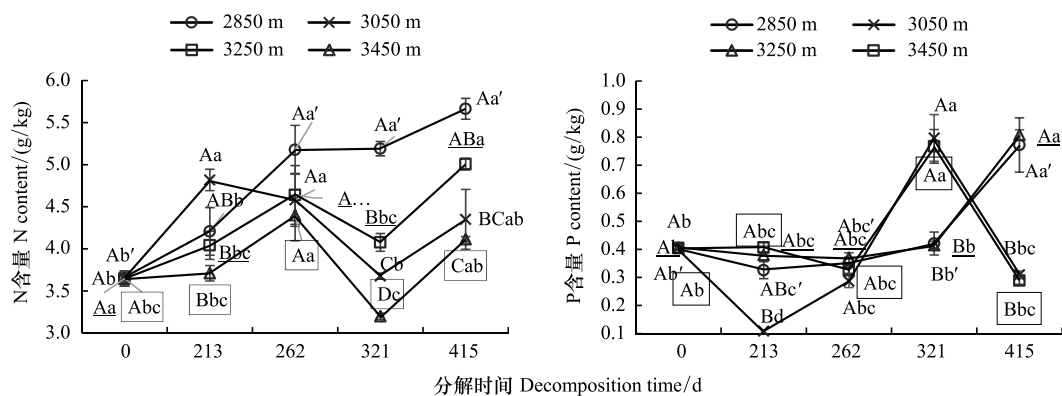


图 6 不同海拔下枯落物分解过程中 N、P 含量的时间变化

Fig. 6 Changes of N and P contents during litter decomposition at different altitude

用 x 代表图中显著性字母, x', x₁, x₂, x₃ 符号分别表示海拔 2850 m、3050 m、3250 m 和 3450 m 的显著性字母标记; 大写字母表示不同海拔之间的显著性, 小写字母表示同一海拔不同分解时间之间的显著性 ($P<0.05$)

从养分累积系数来看(表 3 和表 4), 在海拔 2850 m 处, N 一直处于不同程度的积累状态, 在 213—321 d, P 在释放, 在 415 d, P 在积累。在海拔 3050 m, 分解 321 d, N 在释放, P 在累积, 其余分解时间下 N 在累积, P 在释放。在海拔 3250 m, N 一直处于积累状态, 在 213—321 d, P 在释放, 在 415 d, P 在积累。在海拔 3450 m, 在 262 d 和 415 d, N 累积, 在 213 d 和 321 d, N 在释放, 在 321 d, P 在累积, 其余分解时间下 P 在释放。

表 3 不同海拔下 N 的养分累积系数 (NAI)/(mean ± SE) %

Table 3 Nutrient accumulation coefficient (NAI) of N at different altitude

分解时间 Decomposition time/d	海拔 2850 m Altitude 2850 m	海拔 3050 m Altitude 3050 m	海拔 3250 m Altitude 3250 m	海拔 3450 m Altitude 3450 m
213	111.4±6.8 a	127.4±2.0 a	107.7±4.4 a	97.4±3.3 a
262	135.2±1.7 ab	121.0±4.3 ab	122.6±3.8 a	114.4±2.6 ab
321	136.6±4.2 ab	97.2±0.6 ab	108.5±3.2 a	83.8±1.9 b
415	149.2±5.1 b	115.4±6.1 b	133.7±3.0 a	107.7±1.7 b

小写字母表示同一海拔不同分解时间之间的显著性 ($P<0.05$)

表 4 不同海拔下 P 的养分累积系数 (NAI)/(mean ± SE) %

Table 4 Nutrient accumulation coefficient (NAI) of P at different altitude

分解时间 Decomposition time/d	海拔 2850 m Altitude 2850 m	海拔 3050 m Altitude 3050 m	海拔 3250 m Altitude 3250 m	海拔 3450 m Altitude 3450 m
213	77.4±9.2 a	25.9±4.2 a	90.8±1.3 a	95.5±2.0 b
262	83.8±11.5 a	68.1±5.2 b	88.4±1.7 a	76.6±3.4 ab
321	98.7±7.6 a	189.6±19.4 c	99.1±2.9 b	179.7±10.5 c
415	182.9±25.4 b	73.7±3.5 b	192.8±1.3 c	67.7±1.7 a

小写字母表示同一海拔不同分解时间之间的显著性 ($P<0.05$)

2.4.2 不同郁闭度下枯落物分解过程中 N、P 含量变化

不同郁闭度下 N、P 含量和养分累积系数变化不同(图 7 和表 5)。在 0—213—262 d, N 含量在高和中郁闭度下升高, N 在累积, 在低郁闭度下先降低后升高, N 先释放后累积; P 含量在中郁闭度下降低, 在高和低郁闭度下先降低后升高, 不同郁闭度下 P 都在释放。在 262—321—415 d, N 含量先降低后升高, 除了在 321 d, N 在中郁闭度下释放, 其余情况下 N 都在累积; P 含量在高郁闭度下升高, P 在累积, 在中郁闭度下先升高后降低, P 先累积后释放。在低郁闭度下 P 含量变化不大, P 在释放。相同分解时间不同郁闭度间 N 含量差异不显著, 在分解 213 d, 中郁闭度下 P 含量显著高于高郁闭度 ($P<0.05$), 其余分解时间下差异不显著。

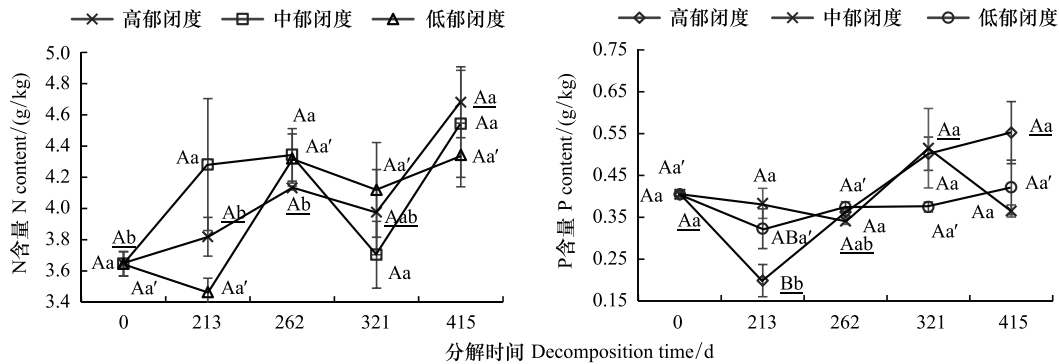


图 7 不同郁闭度下 N、P 含量的时间变化

Fig.7 Changes of N and P contents under different canopy closure degrees with time

用 x 代表图中显著性字母, x、x、x' 符号分别表示高郁闭度、中郁闭度和低郁闭度的显著性字母标记;大写字母表示不同郁闭度之间的显著性,小写字母表示同一郁闭度不同分解时间之间的显著性 ($P<0.05$)

表 5 不同郁闭度下 N、P 养分累积系数 (NAI)/(mean $\pm$ SE) %

Table 5 Nutrient accumulation coefficient (NAI) of N and P under different canopy closure

分解时间 Decomposition time/d	高郁闭度 High canopy closure		中郁闭度 Medium canopy closure		低郁闭度 Low canopy closure	
	N	P	N	P	N	P
213	101.7 $\pm$ 4.3 a	29.7 $\pm$ 16.6 a	112.4 $\pm$ 12.4 a	90.8 $\pm$ 9.9 a	90.2 $\pm$ 3.3 a	76.4 $\pm$ 13.8 a
262	110.0 $\pm$ 0.6 ab	86.9 $\pm$ 2.7 b	114.2 $\pm$ 5.0 a	80.7 $\pm$ 2.3 a	112.7 $\pm$ 6.0 a	88.0 $\pm$ 4.9 a
321	105.9 $\pm$ 8.8 ab	120.2 $\pm$ 10.4 b	97.4 $\pm$ 6.9 a	122.1 $\pm$ 26.5 a	107.5 $\pm$ 10.1 a	87.9 $\pm$ 3.5 a
415	124.7 $\pm$ 7.2 b	132.6 $\pm$ 20.9 b	119.5 $\pm$ 11.0 a	86.4 $\pm$ 3.5 a	113.4 $\pm$ 7.8 a	99.2 $\pm$ 18.6 a

小写字母表示同一郁闭度不同分解时间之间的显著性 ($P<0.05$)

3 讨论

3.1 不同海拔和郁闭度下青海云杉枯落物的分解速率

本研究中,质量损失率是一个累积值,分解时间越长,枯落物损失量越多,损失率自然增大。不同郁闭度和海拔下的分解速率都随时间呈先减小后增大的趋势。与吴艳芹等^[23]对一年内草地枯落物的分解速率的研究结果一致。一是由于分解初期,枯落物中大量可溶性成分大量淋失,导致一个较高的分解速率,随后,难分解的物质相对增加,分解速率受微生物控制^[24]。二是受季节因素影响,在 86—213 d,即取样时间为 12 月和 4 月,分解速率减小,是因为经历了冬季,温度较低,微生物活性低。在 213—321 d(4 月—8 月),经历了春季和夏季,温度升高和降雨量的增加,微生物活性增加,增大枯落物的分解速率。在 415 d(11 月),从夏季过渡到秋季,气温降低,微生物活性受到影响,分解速率增加缓慢。

不同海拔下枯落物分解速率 K 在海拔 3450 m 最大,依次是 K_{3050} 、 K_{3250} 和 K_{2850} 。与郭忠玲等^[25]对长白山各树种凋落物分解和代力民等^[26]对红松针叶凋落物分解的研究结果不尽相同,他们的结果是随着海拔的升

高分解速率在减慢。而本研究中没有出现这样的变化规律,主要由于分解网袋所放置的环境(如温湿度、郁闭度、光辐射、坡度、动物和微生物等综合因素)对分解都有一定的影响,研究发现,升温显著增加了凋落物分解^[27],湿度适中会加速分解^[28],光降解作用能改变枯落物性质,加速分解^[29],坡度越大,会延缓分解速率^[30],随海拔升高,林分冠幅直径增加,林分密度呈"单峰"变化,对分解有影响^[31]。海拔不同,环境因素也不同,环境会影响动物和微生物的分布^[32],不同海拔下枯落物分解同时受到非生物因素和生物因素等多种综合因素的影响,同时分解网袋法有局限性,只能反映局部范围内枯落物的分解速率^[33]。

不同郁闭度下枯落物分解速率在低郁闭度下最大,依次为中郁闭度和高郁闭度。郁闭度高低由冠层决定,冠层会改变林内微环境,进而影响枯落物的分解^[34]。在冠层覆盖对半干旱非洲大草原凋落物分解的影响研究中发现冠层覆盖率越大,枯落物损失率越低,冠层覆盖率小的区域,枯落物暴露于太阳辐射的机率越多,导致地表温度高于高冠层覆盖区,低覆盖形成的相对高辐射和高温将加速枯落物的分解^[35]。

3.2 不同海拔和郁闭度间 N、P 含量变化

淋溶和微生物降解是影响枯落物分解过程中养分变化的主要过程,淋溶是造成养分流失的关键过程^[36],微生物降解过程中,会固定氮,氮大多以蛋白质形式存在,从而引起氮累积^[37]。温度和水分影响微生物群落,高温促进微生物生物量增加,水分降低,微生物活性也会降低^[38-39]。微生物活性的增加和降低影响养分浓度变化^[40]。本研究中,在 0—213 d(4 月),N 含量增大,海拔 2850 m、3050 m 处的 N 含量一直高于海拔 3250 m、3450 m,经历了冬季,温度是主要限制因子,低海拔相对高海拔温度高,微生物量和活性增多,氮绝对量增加^[37]。在 262—321—415 d(6 月—8 月—11 月),N 含量先减小后增大,是因为经历了多雨的夏季,温度和降雨的双重作用使 N 大量释放,且在海拔 2850 m 处最大,在 3450 m 最小,海拔 3250 m、3050 m 居中,与温度密切相关。从 N 的累积系数来看,N 大多数情况下处于净累积状态,个别情况,如分解 213 d,海拔 3450 m 处 N 处于净释放,受低温影响,微生物量少,固氮量少。分解 321 d,海拔 3050 m、3450 m 处 N 在净释放,正值夏季,降雨的影响较大,分解 0—321d,海拔 3050 m、3450 m 处的累积降雨量最大,分别为 295.8 mm 和 231.6 mm(表 6)。

不同郁闭度下 N 含量变化主要受土壤温度、湿度和光照的影响。郁闭度低,光照充足,土温高,微生物活性强^[41]。在 213 d 和 415 d,即一年中的 4 月和 11 月,中高郁闭度下 N 含量高于低郁闭度,由于祁连山春季和秋季温度较低,低郁闭度下土温降低更快,微生物数量减少,N 的绝对含量减少。在 262 d 和 321 d,正是一年中的夏季,即 6 月和 8 月,降水较多,低郁闭度下温度较高,水分多,微生物量增多,所以低郁闭度下 N 含量高于中高郁闭度。不同郁闭度下 N 大多都在净积累,但在 213 d,N 在低郁闭度下净释放,在 321 d,N 在中郁闭度下净释放,这与温度和降水有关。

表 6 不同海拔下枯落物不同分解时间的降雨量

Table 6 Rainfall during different decomposition tie at different altitude

分解时间/d	R_{2850}/mm	R_{3050}/mm	R_{3250}/mm	R_{3450}/mm
0—86	13.6	20.0	19.4	15.2
0—213	34.2	59.2	64.8	30.8
0—262	86.6	126.0	142.2	84.6
0—321	226.0	295.8	210	231.6
0—415	327.2	433.2	272.2	336.2

R 为降雨量,0—d 表示枯落物分解时间,即从分解开始到取样这段时间

枯落物分解初期,P 以可溶性形态存在,最易大量淋失^[42]。所以在分解初期 213—262 d,不同海拔和郁闭度下 P 都在净释放。在 213 d,海拔 2850 m、3050 m 处的 P 含量高于海拔 3250 m、3450 m,中低郁闭度下 P 含量高于高郁闭度,与微生物活性有关,微生物在降解时,磷的供给限制微生物营养需要时,磷就会释放^[22],高海拔和高郁闭下温度相对较低,微生物量少,磷可供微生物营养需要,多余的磷就会释放。在 321 d,P 含量在海拔 3250 m、2850 m 低于在海拔 3050 m、3450 m,且前者在净释放,后者在净累积,P 含量在中高郁闭度下

高于低郁闭度,且在中、高郁闭度下净累积,在低郁闭度下净释放。与降水有关,分解 321 d(8 月),多雨季节,海拔 3050 m、3450 m 的累积降水量较多,中高郁闭度下的湿度相对较大,微生物活性大,当微生物对 P 的营养需要不足时,会出现累积。在 415 d,即一年中的 11 月,P 在不同海拔和郁闭度下的规律正好与分解 321 d 的相反,经历了秋季,温度是主要的限制因子。

4 结论

通过研究,得出以下结论:

(1)质量损失率随分解时间的延长呈增大趋势,分解时间越长,质量分解率随时间的差异就越显著。

(2)不同海拔和郁闭度下枯落物分解速率整体上呈先减小后增大的趋势。青海云杉林叶凋落物的半衰期为 5 a,分解 95%所需时间为 22.5 a。

(3)不同海拔和郁闭度下枯落物 N、P 含量在分解过程中的变化不同,或积累或释放,与季节(环境条件和微生物活性)的影响密切相关。

参考文献(References):

- [1] (澳)P·M·阿狄威尔,(澳)G·W·李波尔.森林土壤及养分循环.陈洪,于卫,译.沈阳:辽宁大学出版社,1988:156-156.
- [2] 葛晓敏,吴麟,唐罗忠.森林凋落物分解与酶的相互关系研究进展.世界林业研究,2013,26(1):43-47.
- [3] Coûteaux M M, Bottner P, Berg B. Litter decomposition, climate and litter quality. Trends in Ecology & Evolution, 1995, 10(2): 63-66.
- [4] 杨曾奖,曾杰,徐大平,李尚均,卢建.森林枯枝落叶分解及其影响因素.生态环境,2007,16(2):649-654.
- [5] Hobara S, Osono T, Hirose D, Noro K, Hirota M, Benner R. The roles of microorganisms in litter decomposition and soil formation. Biogeochemistry, 2014, 118(1/3): 471-486.
- [6] 张俊,张华,常畅,孙翠洋,王效苇,苑知言.基于文献计量的凋落物研究现状及热点分析.生态学报,2020,40(6):2166-2173.
- [7] 王金叶,张学龙,张虎,王艺林,金铭.祁连山水源涵养林组成结构及生长状况.西北林学院学报,2001,16(S1):4-7.
- [8] Turgut E T, Usanmaz Ö. An analysis of altitude wind and humidity based on long-term Radiosonde data. Sciences and Engineering, 2016, 17(4): 830-844.
- [9] 毋洁,余琴,梁德飞,张晶然,李淳,张世挺.光辐射对青藏高原高寒草甸凋落物分解的影响.生态学杂志,2015,34(11):2990-2994.
- [10] 曾沙,胡霞.海拔梯度对土壤动物的影响.江西农业,2016,9(3):22-23.
- [11] 厉桂香,马克明.土壤微生物多样性海拔格局研究进展.生态学报,2018,38(5):1521-1529.
- [12] 朱教君,康宏樟,胡理乐.应用全天空照片估计林分透光孔隙度(郁闭度).生态学杂志,2005,24(10):1234-1240.
- [13] 严羽,王永众,杨来邦,楼雄伟.基于分水岭算法的阔叶林郁闭度提取方法的研究.浙江林业科技,2019,39(6):53-62.
- [14] 周泓杨,张健,张丹桔,张捷,魏大平,赵燕波,赵波,李川北.不同郁闭度控制下马尾松(*Pinus massoniana*)人工林土壤动物群落特征.生态学报,2017,37(6):1939-1955.
- [15] 张洪亮,朱建雯,张新平,张毓涛,郝帅.天山中部不同郁闭度天然云杉林立地土壤养分的比较研究.新疆农业大学学报,2010,33(1):15-18.
- [16] 赵传燕,别强,彭焕华.祁连山北坡青海云杉林生境特征分析.地理学报,2010,65(1):113-121.
- [17] 解欢欢.祁连山天涝池流域亚高山草地土壤呼吸对放牧的响应[D].兰州:兰州大学,2017.
- [18] 解欢欢,马文瑛,赵传燕,高云飞,王清涛,葛红元,林梅,黄晖云.苔藓和凋落物对祁连山青海云杉林土壤呼吸的影响.生态学报,2017,37(5):1379-1390.
- [19] 李海涛,于贵瑞,李家永,梁涛,陈永瑞.井冈山森林凋落物分解动态及磷、钾释放速率.应用生态学报,2007,18(2):233-240.
- [20] 张建利,张文,毕玉芬.山地草地凋落物分解与凋落物水文功能.生态环境,2008,17(5):1986-1990.
- [21] 刘增文,潘开文. Olson 枯落物分解模型存在的问题与修正.西北农林科技大学学报:自然科学版,2005,33(1):69-70.
- [22] 陈婷,郝敏,孔范龙,李悦,庞立华.枯落物分解及其影响因素.生态学杂志,2016,35(7):1927-1935.
- [23] 吴艳芹,程积民,白于,朱仁斌,陈奥,魏琳.坡向对云雾山典型草原枯落物分解特性的影响.草地学报,2013,21(3):460-466.
- [24] 秦胜金,刘景双,周旺明,程莉.三江平原小叶章湿地枯落物初期分解动态.应用生态学报,2008,19(6):1217-1222.
- [25] 郭忠玲,郑金萍,马元丹,李庆康,于贵瑞,韩士杰,范春楠,刘万德.长白山各植被带主要树种凋落物分解速率及模型模拟的试验研究.生态学报,2006,26(4):1037-1046.
- [26] 代力民,徐振邦,张扬建,陈华.红松针叶的凋落及其分解速率研究.生态学报,2001,21(8):1296-1300.

- [27] Hobbie S E. Temperature and plant species control over litter decomposition in Alaskan tundra. *Ecological Monographs*, 1996, 66(4): 503-522.
- [28] Riutta T, Slade E M, Bebbler D P, Taylor M E, Malhi Y, Riordan P, Macdonald D W, Morecroft M D. Experimental evidence for the interacting effects of forest edge, moisture and soil macrofauna on leaf litter decomposition. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 49: 124-131.
- [29] 周丽, 李彦, 唐立松, 黄刚. 光降解在凋落物分解中的作用. *生态学杂志*, 2011, 30(9): 2045-2052.
- [30] 薛欣欣, 吴小平, 王文斌, 罗雪华, 张永发, 王大鹏, 赵春梅. 坡度和埋深对橡胶林凋落叶分解及红外光谱特征的影响. *生态学报*, 2019, 39(3): 874-883.
- [31] 张雷. 祁连山青海云杉林结构和树木生长随海拔的变化[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2015.
- [32] 刘双双. 草丘微地貌对苔草泥炭沼泽枯落物分解的影响机制研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2018.
- [33] 韩家永, 李芝茹. 森林生态系统中枯落物分解实验方法的评析. *森林工程*, 2012, 28(1): 6-9, 13-13.
- [34] Prescott C E. The influence of the forest canopy on nutrient cycling. *Tree Physiology*, 2002, 22(15/16): 1193-1200.
- [35] Mlambo D, Mwenje E. Influence of *Colophospermum mopane* canopy cover on litter decomposition and nutrient dynamics in a semi - arid African savannah. *African Journal of Ecology*, 2010, 48(4): 1021-1029.
- [36] Wu H T, Lu X G, Yang Q, Jiang M, Tong S Z. Early-stage litter decomposition and its influencing factors in the wetland of the Sanjiang Plain, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(10): 4027-4035.
- [37] 赵盼盼, 周嘉聪, 林开森, 张秋芳, 袁萍, 曾晓敏, 苏莹, 徐建国, 陈岳民, 杨玉盛. 海拔梯度变化对中亚热带黄山松土壤微生物生物量和群落结构的影响. *生态学报*, 2019, 39(6): 2215-2225.
- [38] Aber J D, Melillo J M. Litter decomposition: measuring relative contributions of organic matter and nitrogen to forest soils. *Canadian Journal of Botany*, 1980, 58(4): 416-421.
- [39] van der Valk A G, Rhymer J M, Murkin H R. Flooding and the decomposition of litter of four emergent plant species in a prairie wetland. *Wetlands*, 1991, 11(1): 1-16.
- [40] Kurzatkowski D, Martius C, Höfer H, Garcia M, Förster B, Beck L, Vlek P. Litter decomposition, microbial biomass and activity of soil organisms in three agroforestry sites in central Amazonia. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2004, 69(3): 257-267.
- [41] 魏大平, 张健, 张丹桔, 李川北, 赵燕波, 张捷, 周泓杨. 不同林冠郁闭度马尾松(*Pinus massoniana*)叶片养分再吸收率及其化学计量特征. *应用与环境生物学报*, 2017, 23(3): 560-569.
- [42] 温达志, 魏平, 张佑昌, 孔国辉. 鼎湖山南亚热带森林细根分解干物质损失和元素动态. *生态学杂志*, 1998, 17(2): 1-6.