DOI: 10.5846/stxb201908091674

王云霞,刘桂要,邓强,时新荣,袁志友.黄土丘陵区人工林刺槐和油松凋落叶在不同降雨时期的分解特征.生态学报,2020,40(19):6872-6884. Wang Y X, Liu G Y, Deng Q, Shi X R, Yuan Z Y.Leaf-litter decomposition of *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabulaeformis* planted forests at different rainy periods in the loess hilly region.Acta Ecologica Sinica,2020,40(19):6872-6884.

黄土丘陵区人工林刺槐和油松凋落叶在不同降雨时期 的分解特征

王云霞¹,刘桂要³,邓 强^{2,4},时新荣^{1,2},袁志友^{1,2,*}

1 西北农林科技大学,黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,杨凌 712100

2 中国科学院水利部水土保持研究所,杨凌 712100

3 九江学院,鄱阳湖生态经济研究中心,九江 332005

4 中国科学院大学,北京 100049

摘要:调落物分解是维持生态系统养分循环和能量流动的关键过程,但在雨热同期的黄土丘陵区,不同降雨时期凋落物基质质量动态对该区不同树种凋落物分解速率的影响还不清楚。采用凋落物分解袋法,基于野外原位分解实验分析黄土丘陵区主要人工林刺槐(Robinia pseudoacacia Linn.)和油松(Pinus tabulaeformis Carr.)凋落叶在不同降雨时期的分解特征和分解过程中凋落叶基质质量的变化与分解速率之间的关系。研究结果发现:(1)经过 391 d 的分解,刺槐凋落叶的平均质量损失速率为(51.0±8.44) mg/d,显著地高于油松凋落叶(36.7±4.83) mg/d;雨季期间两树种凋落叶的质量损失速率均显著地高于旱季,其中夏季多雨期间凋落叶的质量损失速率最高,冬季微量降雨期间质量损失速率最低。(2)在整个分解过程中两树种凋落叶 C 和 N 含量都表现为净释放且主要发生在雨季,P 含量表现为释放与富集交替进行;刺槐凋落叶 C/N 比、C/P 比和 N/P 比呈波动的趋势,油松凋落叶 C/N 比则显著地增加且在夏季多雨期出现峰值,C/P 比呈波动的状态,N/P 比变化较小。(3)不同降雨时期刺槐凋落叶的质量损失速率与凋落叶 P 含量动态显著正相关,与 C 含量、C/P 比和 N/P 比动态显著负相关。油松凋落叶质量损失速率与凋落叶的质量动态显著正相关,与 C 含量、C/P 比和 N/P 比动态显着负相关。油松凋落叶质量损失速率与 C/N 比动态显著正相关,与 C、N 含量动态显著正相关,与 C 含量、C/P 比和 N/P 比动态显着负相关。油松凋落叶质量损失速率与 N 含量和 N/P 比动态变化的制约,与刺槐凋落叶相比,N 含量与 N/P 比对油松凋落叶的限制作用更强。 关键词:凋落叶分解;凋落叶质量;季节性降水;气候变化;人工林;黄土丘陵区

Leaf-litter decomposition of *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabulaeformis* planted forests at different rainy periods in the loess hilly region

WANG Yunxia¹, LIU Guiyao³, DENG Qiang^{2,4}, SHI Xinrong^{1,2}, YUAN Zhiyou^{1,2,*}

1 Northwest A&F University, State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Yangling 712100, China

2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

3 Jiujiang University, Poyang Lake Eco-ecology Research Center, Jiujiang 332005, China

4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Litter decomposition is a key process to maintain nutrient circulation and energy flow in the ecosystem. However, in the loess hilly region where rain and heat happen in the same period, it remains unclear how the litter quality during different rainfall periods affects litter decomposition rate. In order to better understand the leaf-litter decomposition characteristics during different rainfall periods and the relationships between the dynamic in substrate mass and

基金项目:国家自然科学基金面上项目(31570438);陕西省百人计划(A289021701)

收稿日期:2019-08-09; 网络出版日期:2020-07-31

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zyyuan@ms.iswc.ac.cn

decomposition rate during decomposition, a field litter bag experiment was conducted in two types of planted forest of Robinia pseudoacacia and Pinus tabulaeformis in the loess hilly region. The results revealed that: (1) after 391 days of decomposition, the average leaf-litter mass loss rate of R. pseudoacacia was (51.0 ± 8.44) mg/d, significantly higher than that of P. tabulaeformis (36.7±4.83) mg/d. The leaf-litter mass loss rate of both species during rainy season was significantly higher than those during dry season. (2) During decomposition, C and N content in the leaf-litter of two studied species showed a net release, mainly occurring in the summer rainy season. The dynamic of P content showed a release and enrichment alternately. The leaf-litter C/N, C/P and N/P ratios of R. pseudoacacia showed a fluctuant trend, while the C/N ratio of P. tabulaeformis increased significantly over time and peaked in summer rainy season, the C/P ratio had a trend of fluctuation but the N/P ratio did not significantly change. (3) The leaf-litter mass loss rate of R. pseudoacacia was significantly and positively correlated with leaf-litter P content dynamic, negatively correlated with C content, C/P ratio and N/P ratio. However, the leaf-litter mass loss rate of P. tabulaeformis was positively correlated with C/N ratio and negatively with C and N content and N/P ratio, and showed negative quadratic function with N/P ratio. These results indicated that the leaf-litter decomposition of R. pseudoacacia and P. tabulaeformis in loess hilly region tended to significantly differ in different rainfall periods and mainly occur in rainy season. And the leaf-litter decomposition was mainly restricted by leaf-litter N content and N/P ratio, the leaf-litter decomposition of P. tabulaeformi was more restricted by N content and N/P ratio than that of R. pseudoacacia.

Key Words: leaf-litter decomposition; leaf-litter quality; seasonal precipitation; climate change; planted forest; loess hilly region

凋落物是森林生态系统中联系植被一土壤的重要纽带,在物理、化学和生物共同作用下得到分解,维持森林生态系统的养分循环和能量流动,调控森林生态系统的结构和功能^[1-3]。森林凋落物的分解直接影响着陆地生态系统的土壤肥力、植物对养分的再吸收效率甚至全球碳的收支平衡^[4-6]。迄今国内外对凋落物分解开展的大量研究表明,凋落物的分解主要涉及两个同时进行的过程:降水对凋落物产生的机械破坏、养分的淋溶和土壤中的生物对凋落物的降解^[7]。而这两个过程主要受到非生物因素和生物因素的影响,其中非生物因素主要包括气候和植被类型^[8-9]、凋落物质量^[10]等,生物因素如土壤动物和微生物的活性^[3]等。

近年来,全球变暖引起全球和局部降水格局变化,主要表现为降水量和降水频率增加、降水量季节分配不均匀等^[11-12]。降水在干旱半干旱区存在明显的季节性特征,降水量主要集中在雨季,而且降水也是影响该区 生态系统中凋落物分解的重要驱动因素^[13],由季节性降水引起的干湿交替循环可通过加快凋落物的物理破 碎和调控生物分解者的活动等影响凋落物的分解^[14],如图1所示。同种凋落物的分解随雨季降水量的增多 和温度的升高而加快,而在低温少雨的冬季分解很慢^[15-17]。然而也有研究得出相反的结论,如赵红梅等^[18]的 研究发现春季增雪和夏季增雨的处理对凋落物分解速率没有显著的影响,甚至也有研究表明较高的土壤含水 量会降低凋落物的分解速率^[19]。可见,季节性降水对凋落物分解过程的影响还存在争议,因此有必要对不同 降水时期凋落物的分解特征做进一步研究。

此外,尽管大量的研究表明凋落物分解快慢与其初始 N、P 和 K 含量正相关、与 C/N 比负相关^[89,15],然 而凋落物化学性质对分解速率的影响也和分解阶段密切相关。其中在分解前期凋落物分解速率与 N 含量显 著正相关、与 C 含量和 C/N 比显著负相关,在分解后期凋落物 C、N 含量和 C/N 比对分解速率却没有显著的 影响^[14];薛志婧等^[20]对黄土丘陵区草地生态系统典型植物研究发现在整个分解过程中,凋落物的分解速率 随着 N 含量的增加和木质素浓度的减少而增大;也有研究发现凋落物初始 N 含量越高分解越快,而到分解后 期凋落物 N 和 P 含量越高反而分解越慢^[21]。可见不同分解阶段凋落物的基质质量动态对分解速率的影响 还不清晰,而基质质量动态在某种意义上更能真实反映凋落物化学特性与分解速率之间的关系^[22]。

黄土高原地处沿海向内陆、平原向高原的过渡地带,有雨热同期的气候特征。刺槐(Robinia pseudoacacia

Linn.)和油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)分别作为黄土高原主要造林阔叶和针叶树种的代表,有分布广、抗逆 性强、水土保持性能好等特征,研究这两树种凋落叶在不同降雨时期的分解特征对黄土高原生态环境的建设 具有重要的意义。基于此,本研究利用野外分解袋分解实验和室内分析相结合的方式对黄土丘陵区永寿县槐 平林场中的刺槐和油松凋落叶的质量损失速率和养分释放模式进行研究,旨在探究以下三个问题:(1)刺槐 和油松凋落叶在不同降雨时期分解速率的差异;(2)两树种凋落叶在不同降雨时期 C、N、P 含量及其计量比 的变化规律;(3)在不同降雨期间,刺槐和油松凋落叶 C、N、P 含量及其计量比动态与分解速率的关系。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省永寿县槐平林场,地理坐标为 34°49′—34°50′N,108°04′—108°05′E,海拔 1325.9— 1347.6 m;地处渭北黄土高原中部偏西的干旱、半干旱区,属暖温带大陆性季风气候,年平均气温 10.8℃,最高 气温 28.0°C,最低气温-2.90°C,年总日照 2166 h,无霜期 210 d,年平均降水量 661 mm,主要集中在 6—9 月份 (图 2);地形以黄土梁与其相间的沟壑为主,土壤主要为黄绵土,其次也有呈地带性分布的褐土和黑垆土等, 土壤的其他理化性质如表 1 所示;油松和刺槐人工林及林下灌木、草本植物群落为该研究区的主要植被,刺槐 林中乔木层、灌木层和草本层的优势物种分别是刺槐 Robinia pseudoacacia Linn.,茅莓 Rubus parvifolius L.,蒙古 蒿 Artemisia mongolica Fisch. ex Bess.。油松林中乔木层、灌木层和草本层的优势物种分别是油松 Pinus tabuliformis Carr.,胡枝子 Lespedeza bicolor Turcz,大针叶苔草 Carex spachiana Boott III.。



Fig.1 A conceptual diagram of the effects of seasonal precipitation on litter decomposition in forest ecosystem 图中实线箭头表示直接影响,虚线箭头表示间接影响

http://www.ecologica.cn

1.2 实验方法

1.2.1 凋落物的采集

2016年3月在永寿县槐平林场刺槐(40年)和油松(52年)人工林中,选择林相整齐、林龄相近的刺槐和油松群落,为保证实验所用凋落叶有代表性且初始基质质量相同,按照"S"型多点取样法从地面上收集上年凋落的未破碎的、面积大小相似的刺槐和油松叶片。将收集好的凋落叶带回实验室,经自然风干之后,装入尼龙网袋中(网袋大小为200 mm×200 mm,底部孔径为0.50 mm,上部孔径为1.50 mm,网袋重量为1.56 g),每个网袋装入风干凋落叶50.0 g。同时分别称取50.0 g两树种的凋落叶各4份,装入牛皮纸袋并置于恒温干燥箱中,在65℃下烘干至恒重,测定含水量来推算放置在网袋中凋落叶的初始干重,此后将烘干后的凋落叶研磨并过0.5 mm的筛,用于有机碳、全氮和全磷含量的测定。

Table 1	Soil physical and chemical properties of the studie	ed plots	
林分类型	刺槐林	油松林	
Forest type	R. pseudoacacia forest	P. tauliformis forest	
有机碳 Soil organic carbon/(g/kg)	19.000±1.20b	39.000±2.86a	
全氮 Total nitrogen/(g/kg)	$1.210\pm0.027\mathrm{b}$	1.860±0.110a	
硝态氮 Nitrate nitrogen/(mg/kg)	$12.500 \pm 0.645 a$	9.960±3.04a	
铵态氮 Ammonium nitrogen/(mg/kg)	46.600±5.61a	47.500±7.21a	
全磷 Total phosphorus/(g/kg)	0.667 ± 0.018 a	$0.477 \pm 0.027 \mathrm{b}$	
速效磷 Available phosphorus/(mg/kg)	16.100±0.733a	$6.120 \pm 0.617 \mathrm{b}$	
全钾 Total potassium/(g/kg)	24.300±1.30a	22.800±0.170b	
速效钾 Available potassium/(mg/kg)	139.000±8.40a	$108.000 \pm 12.8 \mathrm{b}$	
pH 值 Potential of hydrogen	$8.080 \pm 0.027 a$	$7.450 \pm 0.155 \mathrm{b}$	
含水率 Soil water content/%	0.122±0.010a	0.109±0.010a	

	表 1	研究区土壤的理化性质
Table 1	Soil physical a	and chemical properties of the studied plo

表中所给数据为平均值±标准误差(mean±SE,n=4),同列不同小写字母表示油松和刺槐人工林土壤理化性质之间的差异显著(P<0.05)

1.2.2 实验设计

2016年4月在刺槐和油松人工林中,分别选择林相整齐、林分均匀的4个大小为5m×5m的样地,样地间距为10—15m。然后在每个5m×5m的样方内随机选择3个大小为60cm×60cm的小样方,在四角钉上地钉,然后清空小样方地表的凋落物及杂草。接着在每个60cm×60cm的小样方中分别放置5个装有凋落叶的网袋,对刺槐和油松凋落叶均采用原位分解的方法,即刺槐林中的每个60cm×60cm小样方放置装有刺槐凋落叶的网袋,油松林中的每个60cm×60cm小样方放置装有油松凋落叶的网袋,最后在离地面30cm高度处覆盖尼龙网罩,阻止新凋落的凋落物与地面接触。样品布设好后,利用之前在样地安装的自动气象站,记录实验期间研究区的降水量和温度,测定结果如图2所示。

1.2.3 样品采集

根据黄土丘陵区降水特征和实验期间的降水情况,将实验时间划分为五个阶段:雨季前期(2016年4月—6月)、夏季多雨期(6月—9月)、雨季后期(9月—11月)、冬季微量降雨期(2016年11月—2017年2月)、春季少雨期(2月—5月),分别于2016年6月23日、9月2日、11月23日、2017年2月27日和5月13日分阶段对凋落叶和凋落叶网袋下的土壤样品进行采集,每次从每个5m×5m样方内分别采集油松和刺槐凋落叶网袋各3袋,刺槐和油松分别采集12袋,小心去除袋上的泥土等后装入信封带回实验室并清洗干净,用于化学性质的测定。然后用直径为6 cm的土钻采集对应凋落叶网袋下0—20 cm深度的土壤,将采集的土壤样品进行充分混合后,装入塑料自封袋,同时用铝盒收集0—20 cm 剖面土来测定土壤的含水率。

1.2.4 样品处理与测定

将采集的凋落叶在 65℃下烘干至恒重用来计算凋落叶质量损失,随后将烘干的凋落叶粉碎过 0.5 mm 筛,测定凋落叶中有机碳、全氮和全磷含量,其中有机碳用浓 H₂SO₄—K₂CrO₄外加热法测定;全氮和全磷用浓





H₂SO₄—H₂O₂进行消解制备好待测液后,全氮用高分辨率元素自动分析仪测定,全磷用钼锑抗比色法测定^[23];将采集的土壤样品在自然状态下风干,然后过1 mm 和 0.15 mm 的筛,1 mm 的用于土壤 pH 值、硝态 氮、铵态氮、速效磷和速效钾的测定,0.15 mm 的用于土壤有机碳、全氮、全磷和全钾的测定。其中 pH 值采用 水土比 5:1 的玻璃电极法测定;土壤硝态氮和铵态氮用 1 mol/L 的 KCl 溶液浸提后用流动分析仪测定;速效 磷用 0.50 mol/L 的 NaHCO₃浸提后用钼锑抗比色法测定;速效钾用 NH₄OAc 溶液浸提之后用火焰分光光度法 测定;有机碳的测定采用浓 H₂SO₄—K₂CrO₄外加热法;全氮采用凯氏定氮法测定;全磷用 NaOH 熔融消解—钼 锑抗比色法测定;全钾用 NaOH 熔融消解后用火焰分光光度法测定^[23],结果见表 1。

1.3 数据处理

1.3.1 数据计算

凋落叶质量损失速率(R)^[14]:

$$R = (M_{\iota-1} - M_{\iota})/(\Delta t) \times 100$$

C、N、P 释放率(C):

$$C = (M_{i-1} C_{i-1} - M_i C_i) / M_0 C_0 \times 100$$

式中, M_0 为放置凋落物袋时袋中凋落叶的干质量, $M_t = M_{t-1}$ 分别为t和t-1采样时期凋落叶袋中凋落叶的干质量, Δt 为相邻两次采样的间隔天数, C_0 为放置凋落物袋时,袋中凋落叶 C、N和P含量, C_{t-1} 和 C_t 为t-1和t采样时网袋中凋落叶 C、N和P含量。C表示元素的释放率,当C>0时,表示该元素表现为净释放,当C<0时,表示该元素表现为净富集。

1.3.2 数据统计分析

用R3.4.2 对数据进行统计分析。在进行分析之前,先用 stats 包中的 shapiro.test 和 bartlett.test 函数对数据进行正态分布和方差齐性检验,再用 mauchly.test 函数对数据进行球形检验,对不符合正态分布的数据采用 Box -Cox 转换。用重复测量单因素方差分析方法分别比较刺槐和油松凋落叶在不同分解时期 C、N、P 含量及 其计量比、C、N 和 P 释放率之间的差异是否显著;用重复测量双因素方差分析方法检验分解时间、凋落叶类型及其交互作用对凋落叶质量损失速率的影响,并运用最小显著性差异法(LSD)进行多重比较,显著性水平α=0.05。用 T 检验分析刺槐和油松林下土壤理化性质,凋落叶在不同分解时期的质量损失速率,C、N、P 含量及其计量比,C、N 和 P 的释放率之间的差异是否显著。在检验的过程中,对转换后仍不符合方差齐性的数据采用 Wilcoxon 秩和检验。运用回归分析确定凋落叶的质量损失速率与降水量和月平均温度之间的关系以及凋落叶的质量损失速率与 C、N、P 含量及其计量比动态之间的关系。

2 结果

2.1 不同降雨时期凋落叶的质量损失速率

表 2 表明:在 391 d 的分解过程中,分解时间对刺 槐和油松凋落叶的质量损失速率具有显著的影响(P< 0.001)。在雨季期间(雨季前期、夏季多雨期和雨季后 期)两树种凋落叶的质量损失速率均显著地高于旱季 (冬季微量降雨期和春季少雨期)(P<0.05)。其中夏季 多雨期间刺槐和油松凋落叶的质量损失速率最高,分别 为(120±3.54) mg/d和(74.4±2.11) mg/d,冬季微量降 雨期间质量损失速率最低,分别为(14.4±1.46) mg/d 和(11.7±0.880) mg/d。质量损失速率在不同分解阶段 表现为:夏季多雨期>雨季前期>雨季后期>春季少雨期 >冬季微量降雨期。此外,凋落叶类型对于凋落叶的质 量损失速率也有极显著的影响(P<0.001):刺槐凋落叶 的平均质量损失速率为(51.0±8.44) mg/d,显著地高于 油松凋落叶((36.7±4.83) mg/d);在分解过程中除雨 季后期和冬季微量降雨期外,实验期间其余分解时期刺 槐凋落叶的质量损失速率均显著地高于油松(P<0.05) (图3)。





AV,平均值,Average value;ERS:雨季前期,Early rainy season;SRS: 夏季多雨期,Summer rainy season;LRS:雨季后期,Later rainy season;WMRS:冬季微量降雨期,Winter micro-rain season;SLRS: 春季少雨期,Spring little rainy season;不同大写字母表示相同分解 时期刺槐和油松凋落叶分解速率之间的差异显著;不同小写字母 表示相同树种凋落叶在不同分解时期的分解速率之间的差异显 著(P<0.05)

2.2 不同降雨时期凋落叶的养分动态

2.2.1 凋落叶 C、N、P 含量及其计量比的变化

如表 3 所示,刺槐凋落叶的初始 C 和 P 含量显著地低于油松,而 N 含量显著地高于油松(P<0.05)。在 391 天的分解过程中,刺槐和油松凋落叶 C 含量整体上都呈下降的趋势,且在夏季多雨期间最低,但各分解时 期两树种凋落叶 C 含量变化均不显著。刺槐和油松凋落叶 N 含量与初始值相比均显著地减少,从开始分解 到春季少雨期分别降低了 10.2%和 13.1%。两树种凋落叶 P 含量随着分解具有不同的变化趋势,刺槐凋落叶 P 含量除冬季微量降雨期之外,其余分解时期均显著地高于初始值,并且在夏季多雨期出现峰值。而油松凋 落叶 P 含量随着分解整体上表现为下降的趋势,其中在冬季微量降雨期下降至最低,不同分解时期之间的差 异不显著(P>0.05)。

在分解初期,刺槐凋落叶 C/N 和 C/P 比均显著地高于油松,而 N/P 比则显著地低于油松。在分解过程中,刺槐凋落叶 C/N 比先升高后降低,油松凋落叶 C/N 比总体上呈大幅度升高的趋势,在夏季多雨期出现峰值。刺槐凋落叶 C/P 比整体上表现为波动的状态,具体呈下降(雨季前期和夏季多雨期)—缓慢升高(雨季后期和冬季微量降雨期)—降低(春季少雨期)。刺槐凋落叶 N/P 比动态与其 C/P 比一致,其中在夏季多雨期 最低,各分解时期的 N/P 比均显著低于初始值(P<0.05)。而油松凋落叶 C/P 比呈波动的趋势,但与 N/P 比 一样,在整个分解过程中的变化均不显著(P>0.05)。

表 2	分解时期 凋落叶类型及其交	与作用对凋落叶质量损失速率暑	影响的重复测量双因麦方差。	分析结果
1X #	刀斛的动动的石可天主及共义。	工作力 机角度 贝里贝人 些牛家	2 門 们 主 之 伪 主 从 臼 永 刀 左	ハルヨホ

Table 2 The results of repeated ANOVA for the effects of time, litter type and their interactions on mass loss rates during leaflitter decomposition

因素 Factor	平方和 Sum of squares	自由度 df	均方 Mean square	F	Р
分解时间 Decomposition time	32915	1.00	32915	505	< 0.001
凋落叶类型 Litter type	2040	1.00	2040	207	< 0.001
分解时间×凋落叶类型 Decomposition×Litter type	2591	1.00	2591	39.8	< 0.01

2.2.2 凋落叶 C、N、P 释放与富集率动态

由图 4 知,刺槐和油松凋落叶在整个分解中 C 均表现为净释放的状态,经过 391 天分解 C 净释放率分别为 45.6%±4.87%和 29.8%±7.44%,其中在雨季前期和夏季多雨期两树种凋落叶 C 净释放率均显著地高于旱季,在夏季多雨期释放最多。从凋落叶类型来看,雨季前期和夏季多雨期刺槐 C 净释放率显著地高于油松, 而旱季期间 C 净释放率在两树种凋落叶之间没有显著的差异(P>0.05)。



图 4 不同分解时期刺槐和油松凋落叶碳、氮、磷的释放/富集率

Fig.4 Release/enrichment rate of carbon, nitrogen and phosphorus of leaf-litter of *R. pseudoacacia* and *P. tauliformis* at different decomposition stages

不同大写字母表示相同分解时期不同树种凋落叶碳、氮、磷释放/富集率之间的差异显著;不同小写字母表示相同树种凋落叶在不同分解时 期碳、氮、磷释放/富集率之间的差异显著(P<0.05)

凋落叶 N 随着分解的释放与富集动态在两树种间稍有不同,刺槐凋落叶 N 在整个分解过程中均表现为 净释放,总释放率为44.5%±7.67%,在雨季期间 N 的净释放率显著地高于旱季(P<0.05);而油松凋落叶除雨 季后期出现短暂的 N 富集外,其余降雨时期 N 均表现为净释放,总释放率为37.4%±6.13%,其中在雨季前期 N 的净释放率(24.8%±2.04%)显著地高于刺槐(16.9%±1.03%),而雨季后期和夏季多雨期间均显著地低于 刺槐凋落叶,在旱季期间两树种凋落叶 N 释放率之间的差异不显著。

在整个分解过程中,两树种凋落叶 P 均表现为释放与富集交替进行。在雨季前期和春季少雨期间刺槐 凋落叶富集 P,总富集率为 43.6% ±6.35%,其余时期释放 P,截至分解实验结束时对 P 净释放了 12.4% ± 10.1%,且不同分解时期 P 的富集/释放率之间的差异显著(P<0.05)。而油松凋落叶在雨季后期和春季少雨 期间对 P 进行富集,总富集率为 7.02% ±1.82%,其余时期释放 P,总释放率达到 41.8% ±14.2%,故整个分解过 程中对 P 净释放了 34.8%±12.3%。从凋落叶类型来看,除夏季多雨期和冬季微量降雨期外,其余分解时期 P 的富集/释放率在两树种凋落叶之间均具有显著的差异(P<0.05)。

总体来说,在 391 天的分解过程中刺槐凋落叶 C 释放率最高,达到 45.6%±4.87%,N 释放率次之,P 释放 率最低但富集率最高;油松凋落叶 N 释放率最大,P、C 释放率次之,N、P、C 释放率分别为:37.4%±6.13%、 34.8%±12.3%和 29.8%±7.44%。

2.3 不同降雨时期凋落叶质量损失速率与降水量、温度及分解过程中养分动态之间的关系

2.3.1 不同降雨时期凋落叶质量损失速率与降水量、温度之间关系

由图 5 知, 凋落叶在分解过程中质量损失速率与月降水量和平均温度之间均存在极显著的正相关关系 (P<0.001)。刺槐和油松凋落叶质量损失速率与降水量的回归系数 R²分别为 0.697 和 0.777, 与月平均温度 的回归系数 R²分别为 0.672 和 0.760, 即当降水量和月平均温度在 7 月份达到最高时, 刺槐和油松凋落叶的质 量损失速率也达到最大值。



图 5 各分解时期凋落叶质量损失速率与分解实验期间月降水量和温度之间的关系



Table 3 Dynamic of carbon, nitrogen, phosphorus content and C/N, C/P, N/P ratio during leaf-litter decomposition 有机碳 全氮 全磷 分解阶段 林型 碳氮比 碳磷比 氮磷比 Organic Total Total Decomposition Forest type carbon/ phosphorus/ C/N ratio C/P ratio N/P ratio nitrogen/ stage (g/kg) (g/kg) (g/kg) 刺槐 初始值 IV 410±0.177Ba 24.6±0.128Aa $2.27{\pm}0.050{\rm Bc}$ 16.7 ± 0.088 Ba 181.0±4.07Ba 10.8±0.237Aa R.pseudoacacia 雨季前期 ERS 370±4.61Ba 22.2±0.205Ab 3.24 ± 0.088 Aab 16.7±0.230Ba $115.0{\pm}4.13{\rm Bb}$ $6.86{\pm}0.173{\rm Ac}$ 夏季多雨期 SRS 356±4.62Ba 22.0±0.646Ab 3.69±0.027Aa 16.2±0.453Ba $96.6{\pm}1.89{\rm Bb}$ 5.97±0.171Ac 雨季后期 LRS 361±3.53Ba 21.5±0.422Ab $2.98 \pm 0.186 \mathrm{Abc}$ 16.8±0.384Ba 122.0±6.49Bab $7.30 \pm 0.492 \mathrm{Abc}$ 冬季微量降雨期 WMRS 362±5.16Ba 21.7±0.306Ab $2.60{\pm}0.086{\rm Ac}$ 16.7±0.432Ba $140.0{\pm}5.86{\rm Bab}$ 8.39±0.192Ab 春季少雨期 SLRS 362±6.15Ba 22.1±0.358Ab 3.23±0.125Ab 16.3±0.196Ba $113.0 \pm 5.63 Bab$ 6.88±0.279Ac 油松 初始值 IV 526±15.3Aa 9.09±0.180Ba 2.88±0.353Aa 58.0±2.85Ac 190.0±23.1Aa 3.27±0.322Ba 雨季前期 ERS P. tauliformis 518±4.42Aa 7.25±0.0748Bb 2.63±0.207Aa 71.6±0.615Aa 200.0±14.9Aa 2.80±0.216Ba 夏季多雨期 SRS 494±4.11Aa 7.27±0.0891Bb 2.54±0.010Ba 68.0±0.987Ab 195.0±1.79Aa 2.87±0.034Ba 雨季后期 LBS 509±2.09Aa 7.91±0.076Bab 2.80±0.010Aa 64.3±0.645Ac 181.0±0.914Aa 2.82±0.021Ba 冬季微量降雨期 WMRS 509+9.25Aa 7 63+0 167Bb 2 31+0 058Ba 66 8+0 972Ab 221 0+9 14Aa 3 32+0 150Ba 春季少雨期 SLRS 511±7.87Aa 7.88±0.231Bab 2.61±0.078Ba 65.1±2.35Abc 196.0±2.30Ba 3.03±0.145Ba

表 3 凋落叶中碳、氮、磷含量及碳氮比、碳磷比和氮磷比在分解过程中的动态变化

IV:初始值,Initial value;表中所给数据均为平均值±标准误差(mean ±SE,n=4),同列不同小写字母分别表示同一树种凋落叶碳、氮、磷含量及其计量比在不同 分解时期之间的差异显著,不同大写字母表示刺槐和油松凋落叶中碳、氮、磷含量及其计量比在同一分解时期之间差异显著(P<0.05)

2.3.2 不同降雨时期凋落叶质量损失速率与分解过程中养分动态之间的关系

图 6 是分别将刺槐和油松凋落叶分解过程中的质量损失速率与 C、N、P 含量及计量比动态进行回归分析的结果。两树种凋落叶在分解过程中的质量损失速率与各自 C 含量动态均显著地负相关(*P*<0.05),而与 N、P 含量及其化学计量比动态之间的关系不一致。刺槐凋落叶的质量损失速率与 P 含量动态显著地正相关,与 C/P 比、N/P 比动态显著地负相关,与 N 含量和 C/N 比动态没有显著的相关性。而油松凋落叶质量损失速率 与 C/N 比动态显著地正相关,与 N 动态显著地负相关,与 N/P 比呈二次函数的关系,与 P 含量、C/P 比之间 没有显著的相关关系。



R²表示刺槐和油松凋落叶的质量损失速率与碳、氮、磷、碳氮比、碳磷比和氮磷比动态之间的拟合系数,***、**和*分别表示 P<0.001, P<0.01和P<0.05

6880

3 讨论与结论

3.1 不同降雨时期刺槐和油松凋落叶质量损失速率存在差异的原因

在整个分解过程中,雨季期间刺槐和油松凋落叶质量损失速率均显著地高于旱季,其中在夏季多雨期分 解最快,在冬季微量降雨期分解最慢,这与已有的研究结果一致^[14, 24]。分析其原因可能有:(1)本次实验的 布设时间是4月份,凋落叶从自然凋落到对其进行收集之前,经历了冬季低温干旱(月平均温度<0℃,伴有少 量降雨和积雪)和早春干旱阶段(降雨量<10.0 mm,月平均温度为3—10℃)(图2),凋落叶物理结构遭到了由 降水变化引起的土壤干湿交替循环的破坏,而且在早春旱季期间凋落叶的初步分解积累了大量可溶性糖类物 质^[18, 25-26],因此进入雨季(4月中旬到11月中下旬),已受到轻微机械损伤的凋落叶在强降水的冲击下进一步 遭到破坏,可溶性糖类等化学物质被大量淋溶加快了其分解(图4)。(2)除降水外,温度也是影响凋落叶分 解的重要因子之一^[15, 27-28],一方面由于本研究区具有雨热同期的气候特征,温度随降水量的增加而升高,影 响了凋落物所在微环境的水热状况,丰富了土壤和凋落叶中细菌和真菌的多样性及种群结构进而促进了凋落 物的分解^[29-30];另一方面由于凋落物的生物分解本质上是特定微生物参与下的一系列酶促反应的过程^[31],酶 活性随着温度的降低而降低^[13],故在冬季微量降雨期间凋落叶质量损失速率达到最低,这与郝江勃等^[32]对 于阔叶林土壤有机碳季节性变化的研究结果一致。

对凋落叶类型来说,刺槐凋落叶的质量损失速率显著地高于油松凋落叶,主要原因是一方面在相同的局部气候区域上,与树种相关的凋落物基质质量是调控凋落物分解快慢的主要因子^[3,33],一般来说高质量的凋落物往往具有较高的N浓度、较低木质素浓度和C/N比,分解速率也高于低质量的凋落物^[15,33-34]。本研究中相比油松凋落叶,刺槐凋落叶N含量高、C/N低(表3),在一定程度上促进了细菌中变形菌门生长而加快了高质量刺槐凋落叶的分解和C、N循环速率^[35-36]。另一方面与树种的叶片习性有关,针叶树种油松叶片角质层发达,叶片中的木质素、单宁等难分解的物质较多,不利于降水的淋溶和土壤微生物的定居和繁衍,而阔叶树种刺槐凋落叶有较大的比表面积和N含量,可以为生物(尤其微生物)提供更广阔的定居场所和食物^[9]。 3.2 不同降雨时期刺槐和油松凋落叶养分动态变化存在差异的原因

在整个分解过程中,刺槐和油松凋落叶 C 含量逐渐下降均表现为净释放,与林成芳等^[37]的研究结果一致。在雨季期间 C 释放率显著地高于旱季,主要原因可能是降水的淋溶作用使凋落物中可溶性有机物、非木质素等碳水化合物大量损失所致^[38]。

氮是微生物生长和繁殖不可缺少的营养元素,氮含量高低会影响微生物的群落组成和代谢活性,相反微生物群落组成和代谢活性的变化也会调控凋落叶的分解^[39-40]。凋落物在分解中 N 的释放与富集主要取决于分解初期 N 含量能否维持微生物活动的需求^[41],刺槐和油松凋落叶的初始 N 含量分别为 2.46%±0.013%和 0.909%±0.018%,自开始分解至夏季多雨期,N 均表现为净释放,这与 Berg 和 Staaf^[42]的研究结果(当 0.6% <N <2.8%时,发生 N 的释放)相符合。刺槐和油松凋落物在雨季期间 N 的释放率均显著地高于旱季,与本研究中凋落叶在不同降雨时期的质量损失度速率变化一致(图 3),但是在整个分解中两树种凋落叶 N 的释放模式 不同:刺槐一直进行 N 的净释放,油松则表现为 N 释放与富集交替进行(雨季后期出现短暂的氮富集),这是 因为油松凋落叶初始 N 含量较低,而且经过夏季多雨期降雨的淋溶和微生物的大量繁殖分解后,在雨季后期 油松凋落叶初始 N 含量较低,而且经过夏季多雨期降雨的淋溶和微生物的大量繁殖分解后,在雨季后期 油松凋落叶 N 的富集与释放,当 C/N 比高于 5—15 时一直发生 N 富集,低于 5—15 时对 N 释放^[44],而本研究中刺槐 和油松凋落叶在实验期间 C/N 比均高于 15,除了油松凋落叶在雨季后期短暂富集 N 外,其余时期两树种凋落叶都没有发生 N 的富集,说明凋落物分解过程中 N 的释放也与凋落物基质质量、分解环境有关。

刺槐凋落叶在不同降雨期间 P 含量表现为富集—释放—富集的模式,而油松凋落叶 P 含量动态与刺槐相反且对 P 的释放大于富集,因为凋落物类型是决定 P 动态的重要因素,在分解过程中 P 的释放模式与凋落物初始 P 浓度之间存在很强的相关性,初始 P 浓度高的凋落物释放 P,初始 P 浓度低的凋落物富集 P^[45],本

研究中刺槐初始 P 浓度为(2.27±0.050) g/kg,显著地低于油松((2.88±0.353) g/kg),故在分解初期刺槐凋落 叶对 P 进行富集,而油松则释放 P。也有研究表明 P 的释放与凋落物 C/P 比也有关,如 Cromack 等^[46]和 Lousier 等^[47]的研究分别把 240 和 230 作为临界值,本研究中刺槐和油松凋落叶在整个分解中 C/P 比均低于 此值,但是两树种凋落叶分解中对 P 的富集与释放交替进行,并没有一直富集 P,因为 P 含量动态也与凋落物 分解所在的土壤环境有关^[45,48]。

3.3 不同降雨时期刺槐和油松凋落叶质量损失速率与养分动态之间的关系存在差异的原因

凋落物 C、N、P 等物质组成和化学计量比对凋落物的分解起着决定性的作用^[20]。本研究中,刺槐和油松 凋落叶在分解过程中的质量损失速率均与各自的 C 含量动态成反比,这与已有的研究结果一致^[22]。刺槐凋 落叶因初始 N 含量比油松高而分解较快,与马志良等^[14]对亚热带常绿阔叶林 6 种常见树种凋落叶在雨季期 间凋落物质量损失速率与初始 N 含量显著正相关的研究结果一致。而在整个分解过程中,刺槐凋落叶 N 含 量与分解速率之间没有显著的相关关系,油松凋落叶的分解速率与其 N 含量动态显著地负相关,这与薛志婧 等^[20]对于草本植物凋落叶的研究结果相反,分析原因是凋落物初始 N 含量只是分解初期影响凋落物分解速 率的主要因素,在分解过程中 N/P 比以及土壤中 N 的有效性也会对其产生影响^[20,49-50]。此外 Smith 等^[51]的 综述研究提出凋落叶分解速率与 P 浓度之间的关系也受到 N/P 比值大小的影响:若凋落物 N/P<9 时,凋落 物的分解速率与 P 含量无关,本研究中油松凋落叶在整个实验期间 N/P<9(表 3),故不受 P 含量的影响,而 受到 N 含量的影响。但刺槐凋落叶在分解初期富集 P,N/P>9,其余时期 N/P<9,因而本研究中刺槐凋落叶分 解中 P 含量动态与其分解速率之间的关系与学者葛晓改等^[22]对三峡 3 种林型凋落物分解的研究结果不一 致,这也印证了植被和物种组成通过影响凋落物化学组成和土壤化学性质而间接对凋落物的分解速率产生影 响这一结论^[13,52]。

刺槐凋落叶分解过程中分解速率与 C/N 比动态没有显著的相关关系,而油松凋落叶分解速率与 C/N 比动态显著地正相关,这是由于刺槐凋落叶 C/N 比动态随着分解没有发生显著的变化,而油松凋落叶分解过程中 C/N 比动态与质量损失速率变化趋势相似(表3),均为雨季高于旱季(图2)。刺槐凋落叶在分解过程中的分解速率与 C/P 比动态显著地正相关,与李雪峰等^[53]对长白山次生针阔混交林凋落叶中有机物分解与碳、氮和磷释放关系的研究结果一致。不同分解时期刺槐凋落叶分解速率与 N/P 比的动态变化负相关,因为刺槐凋落叶分解中 P 的富集率高于释放率,这与潘复静等^[54]的研究结果一致,而油松凋落叶分解速率与 N/P 比的动态呈二次函数的关系,说明除了受到 N 的制约外, N/P 比也是影响刺槐和油松凋落叶分解的重要因素^[22]。

综上所述,黄土丘陵区刺槐和油松凋落叶的分解均主要集中在雨季,不同降水期间降水量和温度的变化 对凋落叶的分解具有显著的影响。在整个分解过程中,C、N和P释放率因凋落叶类型和降雨时期不同而存 在显著的差异。阔叶树种刺槐凋落叶起始N含量较高、C/N比较低是它比针叶树种油松凋落叶分解较快的 原因之一;凋落叶在不同降雨期间发生N释放及阶段性P富集,导致凋落叶分解主要受到N和N/P比动态 变化的制约,与刺槐凋落叶相比,油松凋落叶受到的限制作用更强。因此该研究进一步揭示了全球气候变化 引起降水格局改变(夏秋季降水量增多和降水期的延长)的背景下^[11-12],黄土丘陵区人工林刺槐和油松凋落 叶在不同降雨时期C、N、P含量及其计量比动态与分解速率之间的关系,丰富了该区养分循环机制的研究,可 为黄土丘陵区植被的建设提供一定的理论依据。

参考文献(References):

- [1] 程志辉, 李法云, 李海燕, 张营, 李霞, 林力涛, 孙学凯. 辽东山地水源涵养林典型植被凋落物 C、N、P 溶出特征及其影响因素. 生态学杂志, 2019, 38(4): 1031-1040.
- [2] van der Putten W H, Bardgett R D, Bever J D, Bezemer T M, Casper B B, Fukami T, Kardol P, Klironomos J N, Kulmatiski A, Schweitzer J A, Suding K N, Van de Voorde T F J, Wardle D A. Plant-soil feedbacks: the past, the present and future challenges. Journal of Ecology, 2013, 101 (2): 265-276.

[3]	Aerts R. Climate, leaf litter chemistry and leaf litter decomposition in terrestrial ecosystems: a triangular relationship. Oikos, 1997, 79(3):
	439-449.
[4]	Yuan Z Y, Chen H Y H. Negative effects of fertilization on plant nutrient resorption. Ecology, 2015, 96(2): 373-380.
[5]	Berg B, McClaugherty C. Nitrogen and phosphorus release from decomposing litter in relation to the disappearance of lignin. Canadian Journal of
	Botany, 1989, 67(4): 1148-1156.

- [6] Currie W S, Harmon M E, Burke I C, Hart S C, Parton W J, Silver W. Cross biome transplants of plant litter show decomposition models extend to a broader climatic range but lose predictability at the decadal time scale. Global Change Biology, 2010, 16(6): 1744-1761.
- [7] Coûteaux M M, Bottner P, Berg B. Litter decomposition, climate and liter quality. Trends in Ecology and Evolution, 1995, 10(2): 63-66.
- [8] Zhang D Q, Hui D F, Luo Y Q, Zhou G Y. Rates of litter decomposition in terrestrial ecosystems: global patterns and controlling factors. Journal of Plant Ecology, 2008, 1(2): 85-93.
- [9] 唐仕姗,杨万勤,殷睿,熊莉,王海鹏,王滨,张艳,彭艳君,陈青松,徐振锋.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.植物生态学报,2014,38(6):529-539.
- [10] Berg B, Johansson M B, Meentemeyer V. Litter decomposition in a transect of Norway spruce forests: substrate quality and climate control. Canadian Journal of Forest Research, 2000, 30(7): 1136-1147.
- [11] Dai A G, Meehl G A, Washington W M, Wigley T M L, Arblaster J M. Ensemble simulation of twenty-first century climate changes: Business-asusual versus CO₂ stabilization. Bulletin of the American Meteorological Society, 2001, 82(11): 2377-2388.
- [12] Yuan Z Y, Chen H Y H. Global-scale patterns of nutrient resorption associated with latitude, temperature and precipitation. Global Ecology and Biogeography, 2009, 18(1): 11-18.
- [13] 王新源,赵学勇,李玉霖,连杰,曲浩,岳祥飞.环境因素对干旱半干旱区凋落物分解的影响研究进展.应用生态学报,2013,24(11): 3300-3310.
- [14] 马志良,高顺,杨万勤,吴福忠,谭波,张玺涛.亚热带常绿阔叶林6个常见树种凋落叶在不同降雨期的分解特征.生态学报,2015,35 (22):7553-7561.
- [15] 彭少麟, 刘强. 森林凋落物动态及其对全球变暖的响应. 生态学报, 2002, 22(9): 1534-1544.
- [16] Austin A T, Vivanco L. Plant litter decomposition in a semi-arid ecosystem controlled by photodegradation. Nature, 2006, 442(7102): 555-558.
- [17] Saura-Mas S, Estiarte M, Peñuelas J, Lloret F. Effects of climate change on leaf litter decomposition across post-fire plant regenerative groups. Environmental and Experimental Botany, 2012, 77: 274-282.
- [18] 赵红梅,黄刚,马健,李彦,周丽.荒漠区地表凋落物分解对季节性降水增加的响应.植物生态学报,2012,36(6):471-482.
- [19] Garcia-Pausas J, Casals P, Romanyà J. Litter decomposition and faunal activity in Mediterranean forest soils: effects of N content and the moss layer. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36(6): 989-997.
- [20] 薛志婧.黄土丘陵区草地生态系统典型植物枯落物分解特征研究[D].杨凌:西北农林科技大学, 2015.
- [21] Li L J, Zeng D H, Yu Z Y, Fan Z P, Yang D, Liu Y X. Impact of litter quality and soil nutrient availability on leaf decomposition rate in a semiarid grassland of Northeast China. Journal of Arid Environments, 2011, 75(9): 787-792.
- [22] 葛晓改,曾立雄,肖文发,黄志霖,周本智.三峡库区森林凋落叶化学计量学性状变化及与分解速率的关系.生态学报,2015,35(3): 779-787.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京:中国农业出版社, 2000.
- [24] Anaya C A, Jaramillo V J, Martínez-Yrízar A, García-Oliva F. Large rainfall pulses control litter decomposition in a tropical dry forest: evidence from an 8-year study. Ecosystems, 2012, 15(4): 652-663.
- [25] Withington C L, Sanford Jr R L. Decomposition rates of buried substrates increase with altitude in the forest-alpine tundra ecotone. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39(1): 68-75.
- [26] 邓仁菊,杨万勤,冯瑞芳,胡建利,秦嘉励,熊雪晶.季节性冻融期间亚高山森林凋落物的质量损失及元素释放.生态学报,2009,29 (10):5730-5735.
- [27] Chapin III F S, Shaver G R. Physiological and growth responses of arctic plants to a field experiment simulating climatic change. Ecology, 1996, 77 (3): 822-840.
- [28] Osanai Y, Janes J K, Newton P C D, Hovenden M J. Warming and elevated CO₂ combine to increase microbial mineralisation of soil organic matter. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 85: 110-118.
- [29] 谭雪莲, 阚蕾, 张璐, 郑嘉仪. 城市森林土壤微生物群落结构的季节变化. 生态学杂志, 2019, 38(11): 3306-3312.
- [30] Klimek B, Chodak M, Jaźwa M, Niklińska M. Functional diversity of soil microbial communities in boreal and temperate Scots pine forests. European Journal of Forest Research, 2016, 135(4): 731-742.
- [31] 严海元, 辜夕容, 申鸿. 森林凋落物的微生物分解. 生态学杂志, 2010, 29(9): 1827-1835.

- [32] 郝江勃, 乔枫, 蔡子良. 亚热带常绿阔叶林土壤活性有机碳组分季节动态特征. 生态环境学报, 2019, 28(2): 245-251.
- [33] Hobbie S E, Reich P B, Oleksyn J, Ogdahl M, Zytkowiak R, Hale C, Karolewski P. Tree species effects on decomposition and forest floor dynamics in a common garden. Ecology, 2006, 87(9): 2288-2297.
- [34] Pérez-Harguindeguy N, Díaz S, Cornelissen J H C, Vendramini F, Cabido M, Castellanos A. Chemistry and toughness predict leaf litter decomposition rates over a wide spectrum of functional types and taxa in central Argentina. Plant and Soil, 2000, 218(1/2): 21-30.
- [35] Sauvadet M, Chauvat M, Cluzeau D, Maron P A, Villenave C, Bertrand I. The dynamics of soil micro-food web structure and functions vary according to litter quality. Soil Biology and Biochemistry, 2016, 95: 262-274.
- [36] Kersters K, De Vos P, Gillis M, Swings J, Vandamme P, Stackebrandt E. Introduction to the Proteobacteria//Dworkin M, Falkow S, Rosenberg E, Schleifer K H, Stackebrandt E, eds. The Prokaryotes. New York: Springer, 2006: 3-37.
- [37] 林成芳,彭建勤,洪慧滨,杨智杰,杨玉盛.氮、磷养分有效性对森林凋落物分解的影响研究进展.生态学报,2017,37(1):54-62.
- [38] 侯贯云, 翟水晶, 高会, 乐晓青. 盐度对互花米草枯落物分解释放硅、碳、氮元素的影响. 生态学报, 2017, 37(1): 184-191.
- [39] Polyakova O, Billor N. Impact of deciduous tree species on litterfall quality, decomposition rates and nutrient circulation in pine stands. Forest Ecology and Management, 2007, 253(1/3): 11-18.
- [40] 刘桂要,陈莉莉,袁志友.氮添加对黄土丘陵区油松人工林根际土壤微生物群落结构的影响.应用生态学报,2019,30(1):117-126.
- [41] Parton W, Silver W L, Burke I C, Grassens L, Harmon M E, Currie W S, King J Y, Adair E C, Brandt L A, Hart S C, Fasth B. Global-scale similarities in nitrogen release patterns during long-term decomposition. Science, 2007, 315(5810): 361-364.
- [42] Berg B, Staaf H. Leaching, accumulation and release of nitrogen in decomposing forest litter//Clark F E, Rosswall T, eds. Terrestrial Nitrogen Cycles. Stockholm: Swedish Natural Science Research Council, 1981: 163-178.
- [43] 安然,龚吉蕊,尤鑫,葛之葳,段庆伟,晏欣.不同龄级速生杨人工林土壤微生物数量与养分动态变化.植物生态学报,2011,35(4): 389-401.
- [44] Manzoni S, Jackson R B, Trofymow J A, Porporato A. The global stoichiometry of litter nitrogen mineralization. Science, 2008, 321 (5889): 684-686.
- [45] Moore T R, Trofymow J A, Prescott C E, Fyles J, Titus B D, CIDET Working Group. Patterns of carbon, nitrogen and phosphorus dynamics in decomposing foliar litter in Canadian forests. Ecosystems, 2006, 9:46-62.
- [46] Cromack Jr K, Monk C D. Litter production, decomposition, and nutrient cycling in a mixed hardwood watershed and a white pine watershed// Gentry J B, Smith H M, eds. Mineral Cycling in Southeastern Ecosystems. Washington DC: US Energy Research Development Admin, 1975.
- [47] Lousier J D, Parkinson D. Chemical element dynamics in decomposing leaf litter. Canadian Journal of Botany, 1978, 56(21): 2795-2812.
- [48] 马志良,高顺,杨万勤,吴福忠.亚热带常绿阔叶林凋落叶分解过程中氮和磷在不同雨热季节的释放动态.应用与环境生物学报,2015, 21(02):308-315.
- [49] Hobbie S E, Chapin III F S. Winter regulation of tundra litter carbon and nitrogen dynamics. Biogeochemistry, 1996, 35(2): 327-338.
- [50] Güsewell S, Verhoeven J T A. Litter N: P ratios indicate whether N or P limits the decomposability of graminoid leaf litter. Plant and Soil, 2006, 287(1/2): 131-143.
- [51] Smith V H. Effects of resource supplies on the structure and function of microbial communities. Antonie van Leeuwenhoek, 2002, 81(1/4): 99-106.
- [52] Remy E, Wuyts K, Van Nevel L, De Smedt P, Boeckx P, Verheyen K. Driving factors behind litter decomposition and nutrient release at temperate forest edges. Ecosystems, 2018, 21(4): 755-771.
- [53] 李雪峰,韩士杰,胡艳玲,赵玉涛.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.应用生态学报,2008,19 (2):245-251.
- [54] 潘复静,张伟,王克林,何寻阳,梁士楚,韦国富.典型喀斯特峰丛洼地植被群落凋落物 C:N:P 生态化学计量特征.生态学报,2011,31 (2):335-343.