

DOI: 10.5846/stxb202104060884

解婷婷, 单立山, 张鹏. 不同水分条件下杨树-玉米复合系统凋落物分解特性. 生态学报, 2022, 42(19): 8041-8049.

Xie T T, Shan L S, Zhang P. Litter decomposition characteristics of poplar-maize agroforestry system under different water conditions. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(19): 8041-8049.

不同水分条件下杨树-玉米复合系统凋落物分解特性

解婷婷, 单立山*, 张 鹏

甘肃农业大学林学院, 兰州 730070

摘要:为探讨水分变化对农林复合生态系统凋落物分解特性的影响,以河西走廊 杨树(*Populus*)-玉米(*Zea mays*)凋落物为研究对象,设置正常水分(9200 m³/hm²,对照),轻度干旱胁迫(减少 15%, 7800 m³/hm²),中度干旱胁迫(减少 30%, 6400 m³/hm²) 3 种不同水分处理条件,采用分解袋法研究了不同水分条件下杨树叶和玉米秸秆的质量残留率、分解速率和养分含量变化特征。结果表明:(1)随着干旱胁迫的加剧,两种凋落物的质量残留率均增加,而分解速率降低。经过 164 d 的分解后,杨树叶和玉米秸秆的质量残留率分别为 70.43%—77.49%、63.55%—68.29%。分析表明:水分和时间对各类型凋落物的质量残留率均有极显著的影响($P<0.001$),但二者的交互作用不显著($P>0.05$);干旱胁迫显著降低了玉米秸秆的分解速率,但杨树叶的分解速率却只是在中度干旱胁迫下显著降低($P<0.05$)。对于不同类型凋落物而言,分解速率表现为玉米秸秆>杨树叶。(2)两种类型凋落物的氮(N)残留率在分解过程中表现为降低的趋势,但随着干旱程度的加大,N 的残留率增加,表明水分抑制了 N 的释放过程。分解 164d 后,同一类型凋落物不同水分条件下的 N 残留率均存在显著差异。对于同一水分条件下不同凋落物而言,玉米秸秆的 N 残留率最低,而杨树叶最高。总的来说,水分降低对干旱区农林复合系统内凋落物的分解和氮元素含量具有显著的抑制作用。

关键词:农林复合系统;干旱;质量残留率;分解速率;氮残留率

Litter decomposition characteristics of poplar-maize agroforestry system under different water conditions

XIE Tingting, SHAN Lishan*, ZHANG Peng

Forestry College, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

Abstract: Litter decomposition plays an important role in the carbon budget and nutrient cycling in terrestrial ecosystems, but the decomposition process and decomposition rate of litters were affected by environmental factors, especially the water condition. However, little attention has been paid to the effect of changing water condition at litter decomposition for the maize-poplar system in arid regions. Here the litters of poplar leaves and maize straws in the Hexi Corridor were selected as research objects, and there were three water treatments including normal water (9200 m³/hm², CK), mild drought stress (irrigation reduced by 15%, 7800 m³/hm²), moderate drought stress (irrigation reduced by 30%, 6400 m³/hm²), which were designed in our experiment. The mass remaining, decomposition rate and nitrogen content for poplar leaves and maize straws were measured and analyzed under different water conditions using decomposing bag method, meanwhile the effects of water changes on the decomposition characteristics of two litter types were analyzed. The results showed that: (1) the mass remaining for two litter types were increasing with increasing drought stress, but the decomposition rates were decreasing. After 164 days of decomposition, the mass remaining for poplar leaves and maize straws litter were 70.43%—77.49%, 63.

基金项目:国家自然科学基金项目(31960245);甘肃农业大学公招博士科研启动基金项目(GAU-KYQD-2018-07);甘肃农业大学学科建设基金项目(GAU-XKJS-2018-108, GAU-XKJS-2018-104)

收稿日期:2021-04-06; 网络出版日期:2022-05-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shanls@gsau.edu.cn

55%—68.29% under three water conditions, respectively. The analysis indicated that water and time extremely significant affected the mass remaining ($P < 0.001$), but their interactive effects on mass remaining were not significant ($P > 0.05$). Drought stress significantly reduced the decomposition rate of maize straws, but it was only significantly decreased under moderate drought stress for poplar leaves. For the different litter types, the decomposition rate of maize straw was higher than that of poplar leaf. (2) The N remaining of two litter types was decreasing trends in the decomposition process under three water conditions, this showed that the N remaining presented releasing mode in the study period, but the N remaining was increasing with increasing drought stress, it indicated that water reducing significantly inhibited the release process of N for the two litter types. After 164 days of decomposition, the N remaining had significant difference under three water conditions for the same litter, and the decomposition time also extremely significant affected N remaining, but the two interaction has no significant effect on N remaining. For the different litter types, the N remaining for maize straws was minimum and it was maximum for poplar leaves in the same water condition, this showed the N release of poplar leaf was greater than that of maize straw. As a whole, water reducing significantly inhibited the litter decomposition and N release for the two litter types in the agroforestry system in the arid region.

Key Words: agroforestry system; drought; mass remaining; decomposition rate; nitrogen remaining

凋落物是生态系统的重要组成部分,是联系生产者和分解者的纽带。凋落物分解是碳(C)和养分在植物、土壤、大气循环的主要过程之一^[1]。凋落物的分解主要受环境因素、凋落物基质和分解者的组成与活性这三个因素的影响。近年来随着全球气候变化的加剧以及人类活动的增强,研究环境因素变化对凋落物分解的影响已成为近代生态学研究中的热点问题^[2],在这些环境因素中,降水的影响日益引起生态学家的关注^[3-4]。因为,降水变化可显著影响生态系统水热条件以及土壤生物群落^[5-6],进而改变了凋落物的分解速率和分解过程,最终又会影响全球的碳循环和营养转换^[7]。因此,探究水分变化对凋落物分解的影响具有重要意义。

降水及土壤水分是影响陆地生态系统物质周转的重要环境要素,对凋落物分解及相关的植被分布、微生物活性与数量等生物因素起着控制作用。有研究表明在热带及温带的部分生态系统中,生长季降水增加使土壤形成嫌气环境,导致凋落物分解速率降低^[8],而部分生态系统降水增加也可以使微生物丰富度和活性增加,促进凋落物的分解^[9],但干旱生态系统中夏季增雨对短命植物的凋落物分解却无显著影响^[10]。同时 Schuster^[11]的研究发现生长季增加降雨降低了北美小须芒草(*Schizachyrium scoparium*)凋落物的分解速率,但加拿大一枝黄花(*Solidago canadensis*)凋落物的分解速率却增加。总得来说,降水量、降水分配的季节性变化对凋落物不同分解阶段的影响在不同区域、不同生态系统之间存在一定差异,且存在一定的时滞性。

农林复合系统是一个多组成、多功能、多目标的综合性生态体系,其结构对系统的输入、生物群落的组织和活性、养分利用效率、系统养分和能量平衡等有重要影响^[12]。目前,关于农林复合系统的研究主要集中在固碳潜力^[13-14]、作物产量^[15]和土壤蒸发^[16]等方面,但却忽略了农林复合系统内林木在其自身生长过程中,会产生大量的凋落物,而这些凋落物对于加快农林复合系统的物质与能量循环具有重要作用。而绿洲农林复合系统是干旱区一个重要的生态系统,系统中作物的生长主要依赖于灌溉,而水分的多少势必会对农林复合系统中凋落物的分解产生影响。本研究以河西走廊常见的杨树-玉米农林复合系统内凋落物为研究对象,拟回答以下科学问题:(1)不同水分条件对杨树叶和玉米秸秆的质量残留率和养分含量有何影响?(2)不同水分条件下杨树叶和玉米秸秆的分解特性是否一致?研究结果可为干旱区水分管理提供一定的建议,同时也可以为干旱区农林复合系统内的养分循环研究提供一定的基础资料。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黑河中游甘肃省临泽县平川镇境内具有代表性的荒漠绿洲农田,以黑河水为灌溉水源,外围

与巴丹吉林沙漠南部边缘相接,为典型的沙漠绿洲。年均气温 7.6℃,多年平均降水量 116.8 mm,年蒸发量 2390 mm,无霜期 165 d,主风向为西北风,风沙活动主要集中在 3—5 月,属于干旱荒漠气候类型。选择该区域作为研究区的主要原因是该区域农田防护林起步较早,到目前为止,农田林网保存面积 5.16 万公顷,四旁植树 2129 万株,保护着 31 万公顷农田,占河西地区农田灌溉面积 63.3%,基本形成了带、片、网相结合的绿洲灌溉农业防护林体系,为绿洲农业生产提供有力保障。

1.2 试验设计

本试验在研究区内选取面积为 1320 m²的杨树-玉米复合系统(中心点地理位置:39°20'N, 100°07'E),东西两边由株距 2.0 m,南北两边由株距 4.0 m 的 20 年生杨树(二白杨 *Populus gansuensis*)构成的防护林带。杨树平均树高 13 m,平均胸径 0.3 m。试验选择了杨树叶(PL)和玉米秸秆(MS)(包括茎和叶片)2 种不同类型凋落物为分解材料,设置 3 种水分条件,分别是正常水分(9200 m³/hm²),根据调查与统计当地制种玉米一个生长季内的灌水量而制定),轻度干旱胁迫(减少 15%,7800 m³/hm²),中度干旱胁迫(减少 30%,6400 m³/hm²),共 3 个处理,每个处理重复 3 次。在整个试验样地内,随机布置 9 块面积为 7 m×8 m 的小区,将 2 种不同类型凋落物布置在同一小区内,为了消除小区之间的侧向水分渗漏,各小区东西和南北方向设置 3—4 m 走廊。玉米整个生育期灌水次数 8 次,水源为附近井水,首先将井水引入渠道,然后用塑料管及水泵将渠道水灌入田间,用水表进行计量。

1.3 凋落物的收集与处理

玉米秸秆在九月下旬玉米收获后收集,同时利用悬挂在杨树-玉米复合系统中的网袋收集杨树的新鲜落叶,然后带回实验室自然风干至恒重后,将杨树叶和玉米秸秆分别切成 3 cm 长的碎片,分别将杨树叶和玉米秸秆各 50 g 装入 20 cm×20 cm 的聚乙烯分解袋(1 m 网目)中。第二年 3 月份在作物开始播种前,将两种凋落物各 7 袋布置在小区内,同时用铁丝固定在土壤表面。

1.4 测定指标及方法

1.4.1 凋落物剩余质量测定

由于玉米收获时停止灌溉,因此,凋落物的取样时间分别是凋落物分解后的 60、80、90、105、120、140、164 d(每次灌水后第 3 天取样),取样时从每个小区内取回两种凋落物各一袋,整个试验期间共收集 3(水分处理)×2(凋落物类型)×3(重复)×7(取样次数)=126 个凋落物袋。每次取样后小心去除凋落物表面的土壤与其他杂物,然后将剩余的凋落物在 70℃ 下烘干 48 h,称量并计算凋落物质量残留率和分解速率。凋落物质量残留率(L_t)的计算公式分别为:

$$L_t = \frac{M_t}{M_0} \times 100\%$$

式中, M_0 为初始凋落物干重, M_t 为 t 时间凋落物袋中凋落物的干重。

同时,利用 Olson^[17]指数衰减模型对凋落物的质量残留率进行拟合,即

$$y = ae^{-kt}$$

式中, y 为质量残留率(%); a 为拟合系数; k 为分解系数; t 为分解时间。

1.4.2 凋落物养分的测定

于凋落物分解 105、140、164 d 后,将每种烘干后的凋落物进行研磨,并过 100 目筛网后进行化学成分的分析,采用凯氏定氮法测定总氮浓度。养分元素残留率(LN)的计算公式分别为:

$$LN = \frac{N_t}{N_0} \times 100\%$$

式中, N_0 为初始养分含量(g), N_t 为 t 时刻的养分含量(g)。

1.4.3 土壤含水量和土壤温度的测定

每次于凋落物取样时(60、80、90、105、120、140、164 d),在每个样地内用内径 5 cm 的土钻,钻取 0—10 cm

的土壤,采用重量法测定土壤含水量。土壤温度由温度传感器(Delta-TDevice, Cambridge, UK)在同一时间进行测量记录。

1.5 数据处理

运用 SPSS 软件中的 T 检验分析了初始养分含量之间的差异显著性,以重复测量方差分析检验分解时间和水分处理及交互效应对质量残留率的显著性影响,运用最小显著性(LSD)法检验凋落物分解过程中不同水分处理间凋落物质量残留率的差异显著性;运用相关性分析方法检验质量残留与氮(N)含量之间的相关性,同时应用指数回归计算凋落物质量残留率与分解时间的回归方程,用 Origin 作图。

2 结果与分析

2.1 不同类型凋落物的初始养分含量

由表 1 可以看出,不同类型凋落物初始化学成分存在显著差异,玉米秸秆的 N、C 和磷(P)的初始含量均显著高于杨树叶($P < 0.05$),分别高出 23.6%、5.9%、58.3%;而杨树叶的 C/N 和 C/P 均显著高于玉米秸秆($P < 0.05$),分别高出 16.6%、72.7%。

表 1 凋落物的初始化学组成(平均值±标准偏差)

Table 1 Initial chemical composition of litters (mean±SD)

| 类型 Litter | 氮 N/(mg/g) | 碳 C/(mg/g) | 磷 P/(mg/g) | 碳/氮 C/N | 碳/磷 C/P |
|------------------|------------|-------------|------------|-------------|--------------|
| 杨树叶 Poplar leaf | 14.4±0.2b | 448.9±1.56b | 2.13±0.23b | 31.17±2.03a | 210.75±2.83a |
| 玉米秸秆 Maize straw | 17.8±0.2a | 475.7±1.31a | 3.47±0.6a | 26.72±1.23b | 121.97±1.45b |

同列不同小写字母表示在 $P = 0.05$ 水平上差异显著

2.2 不同水分条件下的土壤含水量与土壤温度

由图 1 可以看出,正常水分条件下的土壤含水量最高,其均值为 15.4%,中度水分条件下最低,其均值为 12.9%。方差分析表明:不同时期,3 种水分条件下土壤含水量均存在显著差异(除分解 80 d 时正常水分与轻度水分胁迫无差异外)($P < 0.05$)。对于土壤温度而言,中度水分条件下最高,其均值为 22.3 °C,正常水分条件下最低,其均值为 20.6 °C。方差分析表明:除分解 60、90、120 d 时轻度水分胁迫和轻度水分胁迫无差异外($P > 0.05$),其他时间,3 种水分条件下土壤温度均存在显著差异($P < 0.05$)。

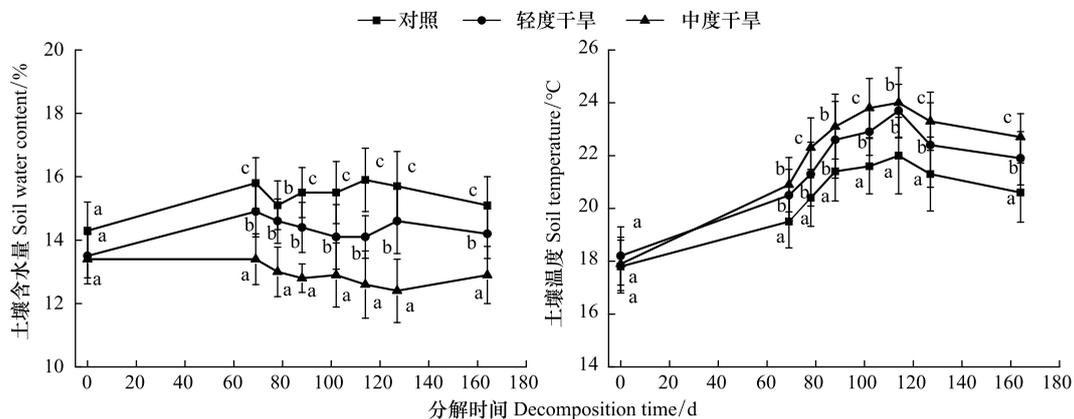


图 1 不同水分条件下土壤含水量和土壤温度的变化

Fig.1 Changes in soil water content and soil temperature under different water conditions

同一分解时间段不同小写字母表示不同水分处理间具有显著差异($P < 0.05$)

2.3 不同水分条件下凋落物的质量残留率

由表 2 可以看出,水分和时间对各类型凋落物的质量残留率均有极显著的影响($P < 0.001$),但二者的交

互影响不显著($P>0.05$)。不同分解时期,两种类型凋落物的质量残留率均随着水分的降低而增加,经过 164 d 分解后,3 种水分条件下杨树叶凋落物的质量残留率分别为 70.43%、73.87% 和 77.49%;玉米的分别为 63.55%、66.35% 和 68.29% (图 2),方差分析表明:3 种水分条件下,杨树叶的质量残留率均存在显著差异($P<0.05$),而玉米秸秆轻度干旱胁迫和 中度干旱胁迫不存在显著差异($P>0.05$)。对于同一水分条件不同凋落物而言,质量残留率表现为:杨树叶凋落物>玉米秸秆凋落物。

表 2 凋落物质量残留率的 ANOVA 结果

Table 2 ANOVA results of mass remaining in litters

| 凋落物类型 Litter types | 因变量 Dependent variable | III 类平方和 Class III sum of squares | df | 均方 Mean square | F | P |
|-----------------------|---------------------------|--------------------------------------|----|-------------------|--------|--------|
| 玉米秸秆 Maize straw | 时间 | 940.167 | 6 | 156.695 | 61.533 | <0.001 |
| | 处理 | 50.413 | 2 | 25.207 | 9.899 | <0.001 |
| | 时间×处理 | 4.875 | 12 | 0.406 | 0.16 | 0.999 |
| 杨树叶 Poplar leaf | 时间 | 1328.944 | 6 | 221.491 | 90.075 | 0.000 |
| | 处理 | 63.207 | 2 | 31.603 | 12.852 | <0.001 |
| | 时间×处理 | 4.299 | 12 | 0.358 | 0.146 | >0.999 |

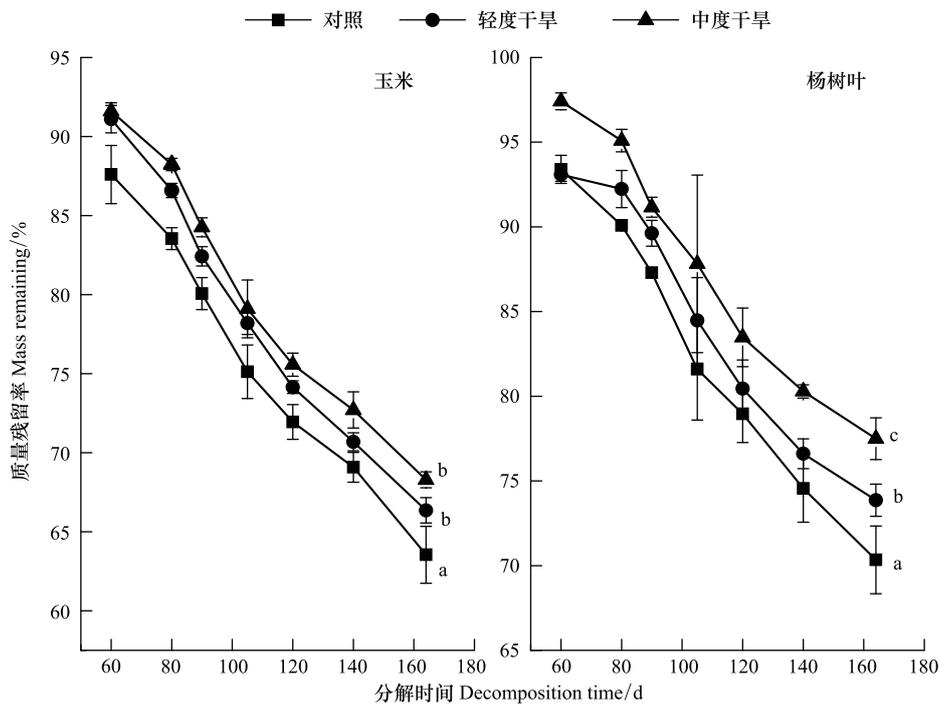


图 2 不同水分条件下凋落物质量残留率的变化

Fig.2 Changes in litter mass residual rate under different moisture conditions

从表 3 可以看出,随着水分的减少,同一凋落物的分解速率也降低,日平均损失量也表现出同等差异性。方差分析表明:对于玉米秸秆而言,3 种水分条件下的分解速率存在显著差异($P<0.05$),而杨树叶在中度干旱胁迫下分解速率显著降低($P<0.05$),轻度干旱胁迫下的分解速率与对照差异不显著($P>0.05$)。同一水分条件下,玉米秸秆的分解速率大于杨树叶的分解速率;且负指数方程能较好的拟合不同凋落物的质量残留率,其决定系数 R^2 均在 0.90 以上(表 3)。

表 3 凋落物质量残留率的负指数方程

Table 3 Negative exponential equations of mass remaining of litters

| 凋落物类型 Litter type | 处理 Treatment | 分解速率 k Decomposition rate | 日平均损失量 Daily average loss | 负指数衰减模型 Negative exponential decomposition model | 决定系数 R^2 Determination coefficient |
|----------------------|-----------------|------------------------------|------------------------------|---|---|
| 玉米秸秆 Maize straw | 对照 | $8.55 \times 10^{-2} a$ | 0.1111 | $y = 95.206e^{-0.085x}$ | 0.9869 |
| | 轻度干旱 | $7.44 \times 10^{-2} b$ | 0.1026 | $y = 96.983e^{-0.074x}$ | 0.9728 |
| | 中度干旱 | $6.73 \times 10^{-2} c$ | 0.0967 | $y = 100.21e^{-0.067x}$ | 0.9685 |
| 杨树叶 Poplar leaf | 对照 | $6.86 \times 10^{-2} a$ | 0.0904 | $y = 99.082e^{-0.068x}$ | 0.9602 |
| | 轻度干旱 | $6.30 \times 10^{-2} a$ | 0.0797 | $y = 99.36e^{-0.063x}$ | 0.9267 |
| | 中度干旱 | $5.23 \times 10^{-2} b$ | 0.0686 | $y = 102.29e^{-0.052x}$ | 0.9443 |

2.4 不同水分条件下凋落物的氮残留率变化

从表 4 可以看出,分解时间与水分处理对玉米秸秆和杨树叶凋落物 N 的残留率影响极显著 ($P < 0.001$), 但二者交互作用对两种类型的凋落物 N 残留率均无显著影响 ($P > 0.05$)。从图 3 可以看出,随着分解时间的增加,不同水分条件下两种类型凋落物的 N 残留率均逐渐减少,这说明在分解的这段时间内两种凋落物的 N 含量均表现为释放状态。经过 164 d 的分解,玉米秸秆凋落物 N 残留率最小,说明玉米秸秆在分解过程中 N 的释放量大于杨树叶;同时,在同一分解时间点,随水分的减少,两种凋落物的 N 残留率呈增加趋势,这说明水分的减少限制了两种凋落物 N 的释放。方差分析表明:在经过 164 d 分解后,不同水分条件下同一凋落物的 N 残留率存在显著差异 ($P < 0.05$)。相关分析表明,不同水分处理两种凋落物的质量残留率与 N 残留率显著正相关(图 4)。

表 4 凋落物 N 残留率的 ANOVA 结果

Table 4 ANOVA results of N residual rate

| 凋落物类型 Litter types | 因变量 Dependent variable | 类平方和 Sum of squares | df | 均方 Mean square | F | P |
|-----------------------|---------------------------|------------------------|----|-------------------|---------|--------|
| 玉米秸秆 Maize straw | 时间 | 41.545 | 2 | 20.772 | 54.668 | <0.001 |
| | 处理 | 41.517 | 1 | 41.517 | 109.264 | <0.001 |
| | 时间×处理 | 0.027 | 1 | 0.027 | 0.072 | 0.791 |
| 杨树叶 Poplar leaf | 时间 | 33.892 | 2 | 16.946 | 62.305 | <0.001 |
| | 处理 | 32.74 | 1 | 32.74 | 120.374 | <0.001 |
| | 时间×处理 | 1.152 | 1 | 1.152 | 4.236 | 0.051 |

3 讨论

3.1 水分变化对不同类型凋落物质量残留率的影响

在干旱和半干旱区,气候因子通过影响分解者的活性和新陈代谢,对凋落物的分解产生显著影响^[18-19]。其中水分和温度条件是影响凋落物分解过程的重要气候因子^[20-21],有研究学者在奇瓦瓦沙漠进行水分的去除和添加实验发现,只有干旱处理影响了凋落物的分解速率,而水分添加对凋落物分解的影响却不显著^[22-23],这就表明干旱区水分亏缺对凋落物的分解有显著影响。但李雪峰等^[24]的研究发现,降水减少的情况下,蒙古栎叶凋落物的分解速率增大,原因是降水量减少使得蒙古栎叶凋落物的初始 N、P、钾(K)浓度显著升高,初始木质素浓度显著降低,进而导致分解速率的增大。本研究发现干旱胁迫显著降低了两种凋落物的质量损失率和分解速率,原因可能是在干旱胁迫条件下,土壤含水量显著降低,土壤温度显著提高,这使得干旱区微生物活动受到了抑制,从而两种凋落物的分解速率减慢,这与 Fioretto 等^[25]和叶贺等^[26]研究结果一致。

凋落物的分解与凋落物的养分含量(比如: N 含量、C/N)、木质素含量、木质素/N 密切相关^[27-29]。众多

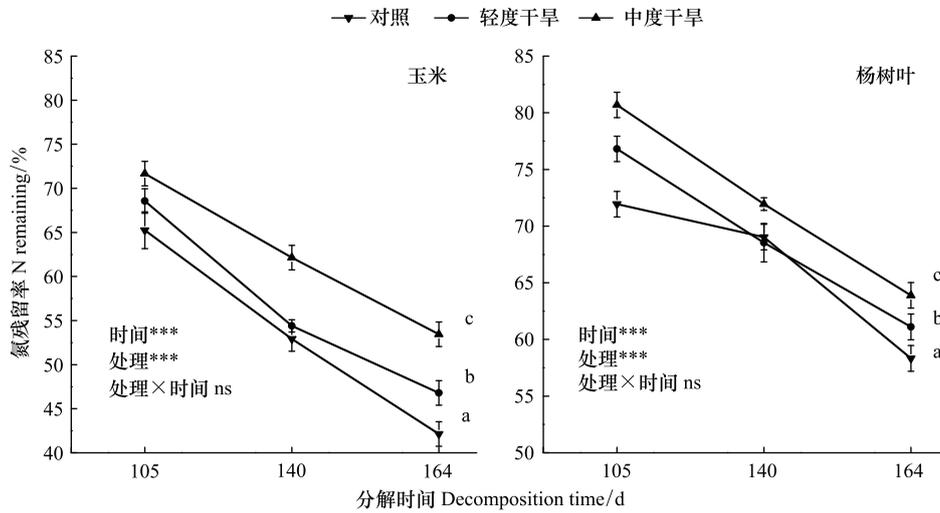


图 3 不同水分处理下凋落物氮(N)的残留率

Fig.3 The residual rate of litter N under different water treatments

*** 表示 $P < 0.001$; ns 表示 $P > 0.05$

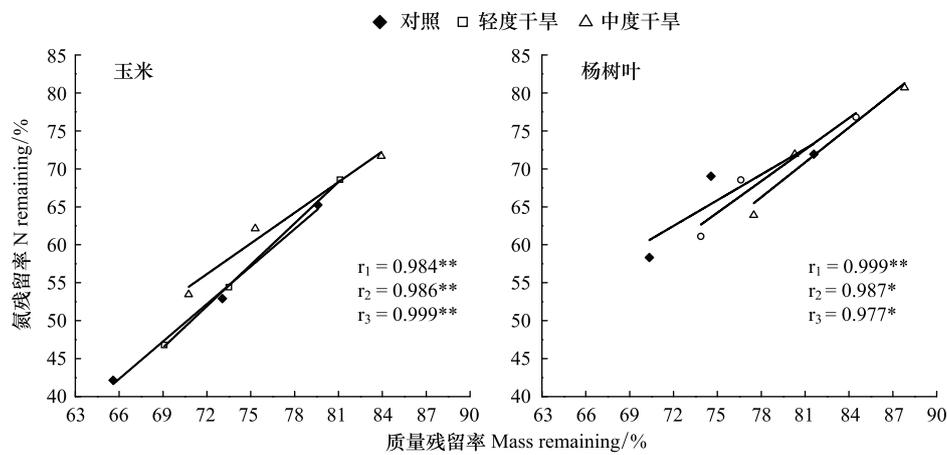


图 4 不同处理下凋落物质量残留率与 N 残留率的关系

Fig.4 The relationship between the residual rate of litter mass and the residual rate of N under different treatments

r_1 、 r_2 和 r_3 分别表示对照、轻度干旱和中度干旱处理下线性回归拟合结果的相关系数 (* 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$)

研究发现^[30],凋落物中各种营养元素的初始含量差异显著,其中,叶和茎的分解速率与凋落物初始 N 和 P 含量呈显著正相关关系,与 K 含量以及 C/N 呈显著负相关关系。林开敏等^[31]研究发现,杉木、楠木和木荷叶三种凋落物中,木荷叶凋落物的分解速率最快,是因为木荷叶凋落物的初始 N 含量较高,但其 C/N 比则远低于楠木和杉木叶。本研究发现不同类型凋落物在同一水分处理下的分解速率各异,表现为玉米秸秆大于杨树叶,这可能与玉米秸秆凋落物的初始 N 含量较高,但 C/N 比则低于杨树叶凋落物有关,这一结果也印证了之前诸多研究的结果^[32]。

3.2 水分变化对凋落物养分含量的影响

凋落物分解过程中不同养分的释放主要存在直接释放、淋溶-释放、淋溶-释放-富集、富集-释放等模式^[33],且各化学元素的含量变化及释放特征,会因凋落物质量、气候地理条件的不同而呈现出较大的差异^[34]。在众多影响因子中水分条件起着关键作用,其变化会影响植物的生理代谢过程导致凋落物内化学物

质浓度发生变化,然后改变生态系统中养分释放和分解者吸收之间的平衡^[30]。罗雪萍^[35]研究得出,高寒草甸植物群落凋落物的总碳含量总体表现为释放,其残留率随着分解时间而明显降低,但减雨 90%处理能一定程度抑制凋落物总碳的释放。Wang 等^[36]研究发现,降雨增加促进冰草和克氏针茅凋落物中氮的释放;但也有研究^[11]发现,降雨增加却促进了北美小须芒草(*Schizachyrium scoparium*)凋落物中氮的固定。本研究得出,不同水分条件下,两种凋落物的 N 含量均呈现释放特征,并且初始氮含量较高的玉米秸秆凋落物,其 N 残留率越低,这与 Ball 等^[37]的研究结果相一致。且随着水分的减少,两种凋落物的 N 残留率均增加,这说明水分限制凋落物中氮素的释放,这一研究结果与凋落物的分解速率相一致,这主要是因为水分减少能改变凋落物中微生物的活性和数量,进而降低了凋落物的分解速率和养分释放^[38],所以对氮元素的分解产生了抑制作用。

4 结论

本研究发现,随着干旱胁迫的加剧,两种凋落物的质量残留率均增加,而分解速率降低;对于不同凋落物而言,同一水分条件下玉米秸秆的分解速率显著高于杨树叶的分解速率。不同水分条件下,玉米秸秆和杨树叶的 N 均呈现为释放模式,并且随着水分的降低,N 的残留率增加,这说明干旱限制了两种凋落物的 N 释放;同时初始养分含量较高的玉米秸秆凋落物的 N 残留率低于杨树叶。但关于干旱胁迫下农林复合系统内凋落物分解速率降低的机理仍有待深入的研究。

参考文献(References):

- [1] Bornman J F, Barnes P W, Robinson S A, Ballaré C L, Flint S D, Caldwell M M. Solar ultraviolet radiation and ozone depletion-driven climate change: effects on terrestrial ecosystems. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 2015, 14(1): 88-107.
- [2] 王新源, 赵学勇, 李玉霖, 连杰, 曲浩, 岳祥飞. 环境因素对于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.
- [3] Santonja M, Fernandez C, Proffit M, Gers C, Gauquelin T, Reiter I M, Cramer W, Baldy V. Plant litter mixture partly mitigates the negative effects of extended drought on soil biota and litter decomposition in a Mediterranean oak forest. *Journal of Ecology*, 2017, 105(3): 801-815.
- [4] Campos X, Germino M J, Graaff M A. Enhanced precipitation promotes decomposition and soil C stabilization in semiarid ecosystems, but seasonal timing of wetting matters. *Plant and Soil*, 2017, 416(1-2): 427-436.
- [5] Blankinship J C, Niklaus P A, Hungate B A. A meta-analysis of responses of soil biota to global change. *Oecologia*, 2011, 165(3): 553-565.
- [6] Liu T, Xu Z Z, Hou Y H, Zhou G S. Effects of warming and changing precipitation rates on soil respiration over two years in a desert steppe of Northern China. *Plant and Soil*, 2016, 400(1-2): 15-27.
- [7] Anaya C A, Jaramillo V J, Martínez-Yrizar 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.
- [8] Vitousek P M. Beyond global warming: ecology and global change. *Ecology*, 1994, 75(7): 1861-1876.
- [9] Kemp P R, Reynolds J F, Virginia R A, Whitford W G. Decomposition of leaf and root litter of Chihuahuan desert shrubs: effects of three years of summer drought. *Journal of Arid Environments*, 2003, 53(1): 21-39.
- [10] 赵红梅, 黄刚, 马健, 李彦, 范连连, 周丽. 典型荒漠植物凋落物分解及养分动态研究. *干旱区研究*, 2012, 29(4): 628-634.
- [11] Schuster M J. Increased rainfall variability and N addition accelerate litter decomposition in a restored prairie. *Oecologia*, 2016, 180(3): 645-655.
- [12] Usuga J C L, Toro J A R, Alzate M V R, de Jesús Lema Tapias Á. Estimation of biomass and carbon stocks in plants, soil and forest floor in different tropical forests. *Forest Ecology and Management*, 2010, 260(10): 1906-1913.
- [13] 平晓燕, 王铁梅, 卢欣石. 农林复合系统固碳潜力研究进展. *植物生态学报*, 2013, 37(1): 80-92.
- [14] Xie T T, Su P X, An L Z, Shi R, Zhou Z J. Carbon stocks and biomass production of three different agroforestry systems in the temperate desert region of northwestern China. *Agroforestry Systems*, 2017, 91(2): 239-247.
- [15] Ding S S, Su P X. Effects of tree shading on maize crop within a Poplar-maize compound system in Hexi Corridor oasis, northwestern China. *Agroforestry Systems*, 2010, 80(1): 117-129.
- [16] Wang Z K, Wu Y H, Cao Q, Shen Y Y, Zhang B Q. Modeling the coupling processes of evapotranspiration and soil water balance in agroforestry systems. *Agricultural Water Management*, 2021, 250: 106839.

- [17] Olson J S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology*, 1963, 44(2): 322-331.
- [18] Austin A T, Vivanco L. Plant litter decomposition in a semi-arid ecosystem controlled by photodegradation. *Nature*, 2006, 442(7102): 555-558.
- [19] Austin A T, Ballaré C L. Dual role of lignin in plant litter decomposition in terrestrial ecosystems. *PNAS*, 2010, 107(10): 4618-4622.
- [20] Brandt L A, King J Y, Milchunas D G. Effects of ultraviolet radiation on litter decomposition depend on precipitation and litter chemistry in a shortgrass steppe ecosystem. *Global Change Biology*, 2007, 13(10): 2193-2205.
- [21] 阿旺, 吕汪汪, 周阳, 孙建平, 张苏人, 夏露, 李博文, 刘培培, 洪欢, 王奇, 张立荣, 苏爱玲, 姜丽丽, 斯确多吉, 张振华, 罗彩云, 汪诗平. 温度和湿度对高寒草甸凋落物分解的影响. *生态学报*, 2021, 41(17): 6846-6853.
- [22] Whitford W G, Martinez-Turanzas G, Martinez-Meza E. Persistence of desertified ecosystems: Explanations and implications. *Environmental Monitoring and Assessment*, 1995, 37(1/2/3): 319-332.
- [23] Epstein HE, Burke IC, Lauenroth WK. Regional patterns of decomposition and primary production rates in the U.S. great plains: regional ecological analysis. *Ecology*, 2002, 83(2): 320-327.
- [24] 李雪峰, 韩士杰, 张岩. 降水量变化对蒙古栎落叶分解过程的间接影响. *应用生态学报*, 2007, 18(2): 261-266.
- [25] Fioretto A, Papa S, Curcio E, Sorrentino G, Fuggi A. Enzyme dynamics on decomposing leaf litter of *Cistus incanus* and *Myrtus communis* in a Mediterranean ecosystem. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(13): 1847-1855.
- [26] 叶贺, 红梅, 梁志伟, 图纳热, 武振丹, 王力群, 包明哲, 赵巴音那木拉. 降水变化和氮沉降对荒漠草原两种多年生禾草凋落物分解的影响. *生态学报*, 2022, 42(7)
- [27] 范晓慧, 马勇, 冯家豪, 党倩楠, 钱嘉鑫, 刘增文. 北方城市 10 种常见树木凋落叶的分解及养分释放特征. *西北林学院学报*, 2020, 35(6): 25-31.
- [28] Martínez-Yrizar A, Núñez S, Búrquez A. Leaf litter decomposition in a southern Sonoran Desert ecosystem, northwestern Mexico: effects of habitat and litter quality. *Acta Oecologica*, 2007, 32(3): 291-300.
- [29] 宋新章, 江洪, 马元丹, 余树全, 周国模, 彭少麟, 窦荣鹏, 郭培培. 中国东部气候带凋落物分解特征—气候和基质质量的综合影响. *生态学报*, 2009, 29(10): 5219-5226.
- [30] 张浩, 庄雪影. 华南 4 种乡土阔叶树种枯落叶分解能力. *生态学报*, 2008, 28(5): 2395-2403.
- [31] 林开敏, 章志琴, 叶发茂, 林艳, 李卿叁. 杉木人工林下杉木、楠木和木荷叶凋落物分解特征及营养元素含量变化的动态分析. *植物资源与环境学报*, 2010, 19(2): 34-39.
- [32] 舒韦维, 陈琳, 刘世荣, 曾冀, 李华, 郑路, 陈文军. 减雨对南亚热带马尾松人工林凋落物分解的影响. *生态学报*, 2020, 40(13): 4538-4545.
- [33] 李仁洪, 胡庭兴, 涂利华, 等. 华西南屏区慈竹林凋落叶分解过程养分释放对模拟氮沉降的响应. *林业科学*, 2010, 46(08): 8-14.
- [34] 王振海, 殷秀琴, 张成蒙. 土壤动物在长白山臭冷杉凋落物分解中的作用. *林业科学*, 2016, 52(7): 59-67.
- [35] 罗雪萍. 降雨变化对高寒草甸植物群落及凋落物分解的影响[D]. 成都: 西南民族大学, 2019.
- [36] Wang X, Xu Z W, Lü X, Wang R Z, Cai J P, Yang S, Li M H, Jiang Y. Responses of litter decomposition and nutrient release rate to water and nitrogen addition differed among three plant species dominated in a semi-arid grassland. *Plant and Soil*, 2017, 418(1-2): 241-253.
- [37] Ball B A, Bradford M A, Hunter M D. Nitrogen and phosphorus release from mixed litter layers is lower than predicted from single species decay. *Ecosystems*, 2009, 12(1): 87-100.
- [38] Mondini C, Contini M, Leita L, De Nobile M. Response of microbial biomass to air-drying and rewetting in soils and compost. *Geoderma*, 2002, 105(1-2): 111-124.