DOI: 10.20103/j.stxb.202505271322

刘美君, 罗伶书, 常乐, 李国庆, 杜盛.模拟减雨处理和细根移除对半湿润区刺槐林凋落叶分解的影响.生态学报,2026,46(8): - .

Liu M J, Luo L S, Chang L, Li G Q, Du S.Effects of rainfall reduction and fine root exclusion on leaf litter decomposition in a *Robinia pseudoacacia* plantation in sub-humid region.Acta Ecologica Sinica,2026,46(8): - .

# 模拟减雨处理和细根移除对半湿润区刺槐林凋落叶分解的影响

刘美君[1,2], 罗伶书[1,2], 常 乐[1,2], 李国庆[2,3], 杜 盛[2,3,*]

1 西北农林科技大学林学院,杨凌 712100

2 西北农林科技大学水土保持与荒漠化整治全国重点实验室,杨凌 712100

3 中国科学院水利部水土保持研究所,杨凌 712100

**摘要**:凋落物分解是植被生态系统物质循环的关键过程之一,这一过程受凋落物本身特性和生物与非生物环境因子的协同调控,探究相关影响机制是解析生态系统功能的重要内容。以黄土高原半湿润区刺槐人工林为对象,分别在自然降水(对照)和减雨 30%处理样地(已持续处理 4 年),设置去除和未去除细根处理小区,开展了为期 1 年的凋落叶分解袋原位分解实验。结果表明:减雨处理显著降低了凋落叶分解速率,而细根移除的影响未达到显著水平,经一个生长季后减雨样地有细根区的凋落叶质量损失率(39.3%)和分解常数(0.67)均显著低于对照样地(43.6%和 0.78)($P$<0.05)。对分解袋附近土壤中 5 种酶活性测定显示其呈现季节性变化,多数表现出前期(5—8 月)高于后期(11 月)的趋势,但多数样品组的结果显示减雨处理样地的酶活性低于对照样地。减雨处理区蔗糖酶和过氧化氢酶的活性显著降低,多酚氧化酶的活性较高($P$<0.05),碱性磷酸酶活性的差异不显著。去除细根显著降低了蔗糖酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶的活性,而多酚氧化酶活性有所升高($P$<0.05)。凋落叶分解速率与土壤酶活性和主要土壤养分指标无显著相关关系。本研究明确了减雨处理及土壤水分条件对于凋落叶分解的重要作用,同时也支持细根在凋落叶分解中的潜在作用,土壤水分和细根可能通过影响根系分泌物和土壤微生物活动进而影响凋落物分解过程及林地养分循环。

**关键词**:凋落叶分解; 减雨处理; 细根移除; 土壤酶活性

# Effects of rainfall reduction and fine root exclusion on leaf litter decomposition in a *Robinia pseudoacacia* plantation in sub-humid region

LIU Meijun[1,2], LUO Lingshu[1,2], CHANG Le[1,2], LI Guoqing[2,3], DU Sheng[2,3,*]

1 *College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling* 712100, *China*

2 *State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, Northwest A&F University, Yangling*, 712100, *China*

3 *Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling* 712100, *China*

**Abstract**: Litter decomposition, a key process in material cycling of vegetation ecosystems, is regulated by both litter characteristics and biotic/abiotic environmental factors. Investigation of these mechanisms is crucial for understanding ecosystem functions. This study conducted a 1-year in situ litterbag decomposition experiment in a *Robinia pseudoacacia* plantation in sub-humid region of Loess Plateau, comparing plots with natural precipitation (control) and 30% precipitation reduction (treated for 4 years), and subplots with and without fine roots exclusion. The results showed that rainfall exclusion significantly decreased decomposition rate of leaf litter, while the effect of fine root exclusion was not significant.

**基金项目**:国家重点研发计划项目(2017YFC0504601)

**收稿日期**:2025-05-27; **网络出版日期**:2026-00-00

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: shengdu@ ms.iswc.ac.cn

After one growing season, mass loss rate of the leaf litter (39.3%) and decomposition coefficient (0.67) in treatment plot with fine roots were significantly lower than those in control plot (43.6% and 0.78, respectively) ($P<0.05$). The activity of five enzymes in the soil near decomposition bags showed seasonal variation, with higher levels in the early period (May—August) than in the later period (November). However, most sample groups showed lower enzyme activity in treatment plot than in control plot. Sucrase and catalase activities in treatment plot were significantly lower, while polyphenol oxidase activity was higher ($P<0.05$). The effect of rainfall reduction on alkaline phosphatase activity was not significant. Fine root exclusion significantly decreased sucrase, alkaline phosphatase, and catalase activities, but increased polyphenol oxidase activity ($P<0.05$). No significant correlation was observed between decomposition rate and soil enzyme activities and major soil nutrient indicators. This study clarified the important role of rainfall reduction and soil moisture conditions in litter decomposition, and supported the potential role of fine roots in litter decomposition. Both soil moisture and fine roots may regulate litter decomposition and nutrient cycling in forests by affecting root exudates and soil microbial activity.

**Key Words**: leaf litter decomposition; rainfall reduction; fine root exclusion; soil enzyme activity

凋落物分解是生态系统物质循环的关键过程,在促进土壤有机质的形成、维持土壤微生物活性及优化群落结构方面具有重要作用[1—2]。气候等非生物环境因子、凋落物性质以及植物根际生物因子是影响凋落物分解速率的主要因素,这些因子通过单独或交互作用对凋落物分解过程中养分释放过程产生重要影响[3]。

降雨因素可能通过影响土壤水分进而影响凋落物分解速率,且不同树种凋落物对水分因子的敏感性存在差异[4—5]。从宏观格局看,热带地区具有较高的降水量,加之气温较高,通常具有较高的分解速率;然而,在极端多雨环境中,降水的淋溶作用可能导致凋落物表面微生物、半分解有机物及各类分泌物被洗脱,加之温度相对偏低,生物化学过程减弱,使分解速率反而下降[6]。对于降雨量的变化,在不同区域的响应存在显著变异。在内蒙古草原的研究发现,4 种优势植物的凋落物分解速率与温度、降水均呈显著正相关[7]。相反,在南亚热带马尾松人工林中的研究显示,降雨量减少未显著改变凋落叶分解速率及养分释放模式[8]。这种差异表明森林生态系统凋落物分解速率与降水的关系受到多因素协同作用驱动。基于野外定位实验分析凋落物分解过程对降雨量变化的响应特征,对于探明降雨格局变化对物质循环过程的潜在影响具有重要意义。

土壤水分变化可能影响细根活动、土壤微生物群落结构和土壤酶活性,进而影响土壤表层的凋落物分解。在内蒙古荒漠草原和西南常绿阔叶林开展的研究表明,增雨处理促进了凋落物分解,而减雨处理则表现出显著的抑制作用[9—10];另有研究认为,降水变化对凋落物分解速率的影响与当前水分条件有关,如果当前水分条件对凋落物分解处于良好状态,增加或减少降水量均会抑制凋落物分解[11]。土壤水分含量过高或过低均会限制土壤微生物的活动,影响凋落物的分解[12—14]。在土壤微生物代谢过程中,各类胞外酶也参与待分解物质的降解和转化[15]。因此,水分变化通过调节酶活性、种类和含量,可对凋落物分解产生多层次影响。土壤水分变化不仅影响凋落物自身分解,还可能通过调控细根动态(如细根生长与周转介导的有机质输入与微生物活动)间接重塑分解路径[16]。细根通过持续更新和周转向土壤表层输入有机质,并与共生真菌协同作用,改变土壤养分有效性[17]。生长进入凋落物层的细根通过根际激发效应、养分吸收以及共生真菌等作用,综合影响凋落物的分解过程[18]。此外,凋落物分解产物与根系分泌物共同调节有机质稳定性,从而影响微生物群落结构及凋落物分解[16,19]。叶片以凋落物的形式将养分归还至土壤中,而细根则从土壤中吸收养分并将其运输到叶片。叶片光合作用生产的营养物质再部分用于细根的生长,从而实现养分在生态系统不同组分间的流动[20]。在降雨格局改变的情况下,林木生长及光合产物分配均会发生不同程度的变化,细根的变化可能会改变植物与土壤微生物之间对养分的竞争,导致根际生物环境和土壤酶活性的变化,并影响凋落物分解等养分循环过程[21]。然而,关于降雨和细根变化对凋落物分解及相关机制影响的实证数据仍欠丰富,特别是通过排除降雨和细根等控制实验的定位研究仍较少见。

刺槐(*Robinia pseudoacacia*)具有生长迅速、耐旱耐贫瘠等特点,是黄土高原地区生态恢复的主要造林树

种[22]。刺槐林对土壤水分敏感,在半湿润地区生长发育良好,而在半干旱区多出现因土壤水分亏缺而导致的生产力低和早期衰退等问题[23]。受全球气候变化影响,降水格局正在发生变化,未来干旱发生的频率和强度均有增加的趋势,干旱半干旱区范围存在扩张的风险[24—25]。有研究表明黄土高原等北方大部分地区在 20 世纪末期出现干燥化趋势[26],这些变化对现有生态系统的功能也必然产生强烈影响。降雨排除处理是一种有效的水分控制原位实验,能够在湿润或亚湿润地区模拟半干旱甚至干旱等不同的降雨量情景及土壤水分梯度。近年来,已有大量研究通过建立模拟降雨减少的控制样地,探究持续降雨减少对森林蒸腾耗水[27—28]、光合特征[29]、土壤水分时空变化[30]以及土壤微生物群落特征[31]等影响,关于降雨减少背景下凋落物分解如何变化则鲜有报道,特别是与其它因素叠加处理的协同效应的研究仍然较少。此外,细根作为根系分泌物的来源和根际生物环境的载体,可能间接影响凋落物分解,在减雨处理条件下细根移除对凋落物分解的影响与正常水分条件下的差异及可能存在的交互作用尚不明确。本研究通过在黄土高原半湿润区设置模拟减雨实验和细根移除处理,探究其是否对刺槐人工林凋落叶分解产生影响及交互作用。研究结果不仅揭示影响该林分凋落叶分解的主要生物和环境因素,也可为气候变化背景下人工林养分循环与碳固存管理提供理论依据。

## 1　材料与方法

### 1.1　研究区概况

实验样地位于陕西省永寿县槐平林场(34°48′ N,107°58′ E),海拔约 1430 m。该区域属于暖温带半湿润大陆性季风气候区,年平均气温 10.8 ℃,多年平均降雨量 617.3 mm(1996—2005 年),其中 7—9 月降雨量约占全年总量的 50%。土壤类型主要为黑垆土。实验样地位于缓坡(<10°)的上部,比附近的山谷高出约 150 m,自然降水是土壤水分的唯一补给来源,生态系统不存在与地下水的交互作用。试验地为人工刺槐(*Robinia pseudoacacia*)纯林,林龄约为 20 年(2022 年),林分密度 1600 株/ha;林内有零星灌木木姜子(*Litsea pungens*),草本植物包括艾草(*Artemisia argyi*)、葎草(*Humulus scandens*),牛蒡(*Humulus scandens*)等。

### 1.2　减雨处理实验布设

用于多目的研究的长期固定样地(20 m×50 m)于 2018 年设置,并将其分割为减雨处理和对照两个样地(10 m×50 m)。在减雨处理样地的样树行间安装约 1.5 m 高度的支架,布设了宽为 0.5 m 的透明遮雨板将截留的降水引流到样地外。遮雨板间距约为 1 m,根据遮雨板覆盖样地面积的比例,排除了约 30%的穿透雨,该处理强度相当于模拟该区域演变为半干旱区的降雨水平。为防止减雨区内外的地表径流和土壤水分交换,在处理样地周围垂直插入了 PVC 隔雨板(插入地下 80 cm,地面以上 20 cm),隔离了根系的集中分布区。定期清扫遮雨板,将落在面板上的落叶转移回土壤表面,以尽量减少除降雨排除以外的因素的影响[30]。

### 1.3　微生态系统布设

在处理和对照样地内各选 3 处具有代表性的位置(距离树干≥1 m 但需避开林冠间隙正下方)设定为一个小区布设本实验,每处又分别设置 8 组移除细根区和未移除(对照)区。在实验前(2021 年 10 月)采用孔径为 50 μm 的尼龙网布缝制直径 23 cm 高 23 cm 的尼龙网框(共计 48 个),将体积略小于网框(直径 20 cm 深 20 cm)的原状土取出,将尼龙网框放置于坑内,网框上沿略高于地面,随后将原状土回填原位,由此阻隔外部细根生长进入该区域内,作为细根移除的微生态系统[32]。由此形成减雨处理样地细根移除区(PT-NR)、减雨处理样地细根未移除区(PT-WR)、对照样地细根移除区(PC-NR)以及对照样地细根未移除区(PC-WR)共 4 种处理/对照模式。

### 1.4　凋落叶分解袋布设

实验前,使用孔径为 2 mm 的尼龙网布缝制 15 cm×15 cm 的凋落叶分解袋;于 2021 年秋季分别在减雨处理和对照样地收集足量的新鲜凋落叶混匀后在 60 ℃充分干燥,在每个分解袋装入 8 g 凋落叶,共制备 96 袋,按照不同处理区对分解袋进行编号,每种处理 24 袋。野外分解袋放置于 2021 年 11 月进行,移除土壤表层的腐殖质等枯落物后,按照编号顺序在每个小区放置 8 个装有样品的分解袋;对于细根移除小区(PT-NR 和 PC-

NR),每个样品袋对应放置在 1 个微生态系统的土壤表层。将样品袋用铁丝插入土壤进行固定,以防被风吹走。

**1.5** 分解袋回收与分析

样品袋放置之后研究区即进入冬季,土壤表层大多处于冻结状态,经检查 2022 年 3 月 1 日回收的样品,叶片表面在外观上无分解迹象,干燥重量减少可忽略不计,因此认定为未发生分解,并将该日期重新定义为分解初始日,计划此后每月从每个小区各取回 1 个分解袋样品(每个处理 3 袋)。此外,在生长季起算分解初始日还有利于提高方程模拟分解进程的客观性。由于天气和交通等原因影响,实际回收时间为 4 月 20 日(50 d)至 11 月 14 日(255 d)共 6 次。取回的样品先用毛刷和镊子去除泥土等杂质,必要时用清水冲洗沥干,在 65 ℃下烘干至恒重,称重计算凋落叶分解残重率。

**1.6** 土壤养分及酶活性测定

为探究凋落叶分解与土壤养分、酶活性的关联性,在实验开始时采集各处理区 0—10 cm 土壤样品测定主要养分指标,分别于第 90 天、150 天和 255 天对样品袋回收的同时,采集样品袋附近 0—10 cm 土壤样品,分装于塑封袋并立即放置于冷藏箱保存用于酶活性测定。用于测定养分的样品常温保存带回实验室,去除杂质后风干、研磨,过 0.25 mm 筛,封装备用。土壤有机碳含量采用重铬酸钾-硫酸氧化法测定,全氮含量采用凯氏定氮法测定,全磷含量采用钼锑抗比色法测定。对于酶活性测定的样品,带回实验室后在 24 h 内去除杂质,测定 3 种水解酶(蔗糖酶、碱性磷酸酶和脲酶)和 2 种氧化酶(过氧化氢酶和多酚氧化酶)的活性。酶活性测定参考 Saiya-Cork 等[33]的方法。

**1.7** 土壤水分和温度监测

分别在对照和处理样地中选取典型区域安装土壤水分自动监测系统,用于监测土壤水分动态。分别在 10 cm 和 30 cm 深度设置 5TM 和 EC5 土壤水分探头(Onset, Bourne, USA),用于连续监测土壤含水量(SWC, $m^3/m^3$)和土壤温度(仅 10 cm 处),每小时记录一次数据于 EM60 数据采集器(Decagon Device, Pullman, WA, USA)。

**1.8** 数据分析与处理

凋落叶分解残重率(%)的计算公式如下:

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

式中,$D$ 为凋落叶分解残重率,$M_0$为凋落叶初始重量,$M_t$为分解 $t$ 时间时凋落叶残余重量。

凋落物分解 Olson 指数衰减模型依据 Olson[34]计算如下:

$$y=a\times e^{-kt}$$

式中,$y$ 为凋落叶分解残重率(%),$t$ 为分解时间(年);$a$ 和 $k$ 为拟合参数。

为了评估两样地土壤表层温度和土壤水分的差异,考虑到数据不具有正态性,我们采用非参数检验的方法(Mann-Whitney U 检验或称 Wilcoxon 秩和检验)来分析其差异显著性($P<0.05$)。对凋落物分解系数 k,使用 *Wald* 检验评估不同处理间显著性($P<0.05$)。此外,通过最小显著差异法(LSD)分析土壤酶活性在整个分解过程中的差异显著性($P<0.05$)。为了考查各处理之间凋落叶分解速率差异是否通过土壤养分或酶活性介导,利用 Pearson 相关系数法分析凋落叶累积分解率与土壤养分含量(以实验初期采样为代表)以及土壤酶活性(以生长季中期样品为代表)的相关性。所有数据的分析使用 R 4.4.3,作图使用 Origin 2021。图表中显示的数据为平均值±标准差。

## 2 结果与分析

**2.1** 林地表层土壤温度及土壤含水量的动态变化

两样地的土壤表层温度在 2022 年 3 月之前基本处于 0 ℃左右,自 3 月上旬开始上升并迅速升至 5 ℃以

上;之后呈现波动式上升,于 8 月中旬达到全年峰值,随后逐渐下降,至本实验结束时约在 5 ℃左右(图 1)。对照样地和减雨处理样地保持相同变化趋势,数值上无明显差异,统计检验也未达到显著水平。

两样地土壤含水量变化趋势也基本一致,从 2021 年 11 月至 2022 年 3 月,土壤含水量呈现缓慢下降的趋势;春季随着积雪融化和降雨事件土壤含水量有所升高,生长季内随降雨事件和干燥期而上下波动,10 cm 土层较 30 cm 变化更为剧烈;减雨处理样地的土壤含水量始终低于对照样地,浅层(10 cm)差异更为明显(图 1)。

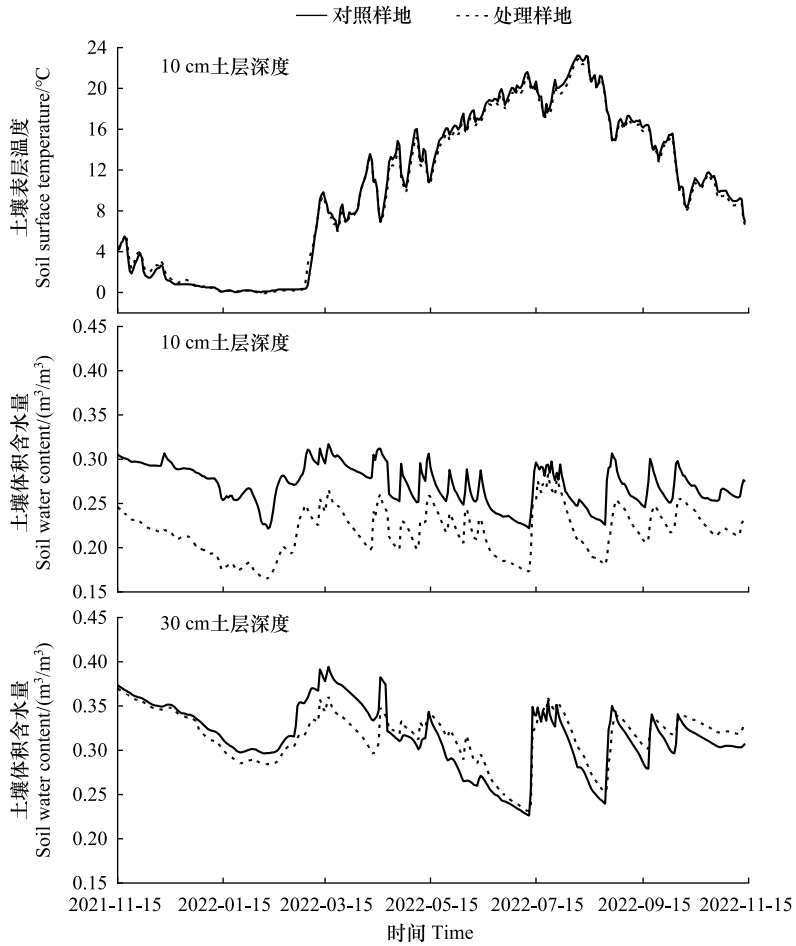


**图 1　对照和减雨处理样地 10 cm 土层深度的土壤温度以及 10 cm 和 30 cm 深度的土壤体积含水量**(SWC, $m^3/m^3$)**的年内动态变化**

**Fig.1　Annual dynamics of soil temperature at 10 cm depth and soil water content** (SWC, $m^3/m^3$) **at 10 and 30 cm depths in control and treatment plot**

Mann-Whitney U 检验结果表明,对照样地和处理样地的土壤表层温度无显著差异($P>0.05$),但 10 cm 的土壤水分差异显著($P<0.001$);而 30 cm 土壤水分差异不显著($P>0.05$)

## 2.2　不同处理条件下凋落叶分解动态

各处理小区的凋落叶分解质量损失率变化趋势基本一致(图 2)。分解初期(0—60 d)凋落叶分解速率较快,60—120 d 分解速率减缓,120 d 后分解速率再次加快。从图 2 中还可以看出,减雨处理区(PT-NR,PT-WR)的分解速率较对照区(PC-NR,PC-WR)均有所减缓;细根移除区(PT-NR,PC-NR)的分解速率较未移除区(PT-WR,PC-WR)均有所减缓。分解 150 天以后,前者的差异(减雨处理 vs.对照)较后者(细根移除 vs.未移除)更为明显。截止实验结束(分解 255 天),对照样地内 PC-NR 和 PC-WR 的累计凋落叶质量损失率分别为 42.5%和 43.6%,而减雨处理样地内 PT-NR 和 PT-WR 的累计凋落叶质量损失率为 39.0%和 39.3%。说明

土壤水分和细根及其交互作用会加速凋落叶的分解。

对各处理条件下凋落叶分解残重率和分解时间进行 Olson 衰减模型拟合表明,4 种分解条件下的拟合方程决定系数为 0.95—0.97(表 1),说明 Olson 指数模型能够较好地解释不同条件下凋落叶的分解过程。分解系数 $k$ 值排序为 PC-WR(0.78)>PC-NR(0.76)>PT-WR(0.67)>PT-NR(0.65),其中对照样地和减雨处理样地之间的差异达到了显著水平($P<0.05$),表明减雨处理显著降低了林内凋落叶的分解速率。在研究期间细根对凋落叶分解的影响未达到显著水平。

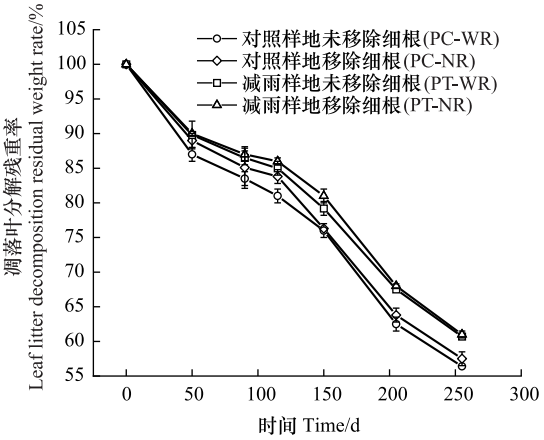


**图 2 不同处理条件下凋落叶分解残重率动态变化**(平均值±标准差,N=3)

**Fig.2 Dynamics changes in decomposition residual weight rate of fallen leaves under different processing conditions** (mean ± standard deviation, N=3)

PC-WR: 对照样地未移除细根 Control plot with fine roots; PC-NR: 对照样地移除细根 Control plot no fine roots; PT-WR: 减雨样地未移除细根 Treatment plot with fine roots; PT-NR: 减雨样地移除细根 Treatment plot no fine roots

## 2.3 不同处理条件下凋落叶分解过程中土壤酶活性

对凋落叶分解过程中土壤酶活性的测定结果显示,有细根区的蔗糖酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶活性普遍高于移除细根区(图 3)。此外,酶活性存在明显的季节变异,应该与土壤有机质和气候等环境因子的变化有关;在初期(90 天至 150 天)较高且差异较为明显。脲酶活性在不同采样时期变化较大,不同处理之间的差异无明显规律(图 3)。多酚氧化酶活性在不同处理间的相对大小表现出与其它酶活性不同的规律,在移除细根区甚至高于未移除区(图 3)。随减雨处理土壤水分条件的改变对酶活性的影响因酶种类和采样期而异,但多数样品组的结果显示减雨处理样地(PT-WR 和 PT-NR)的酶活性低于对照样地。

**表 1 不同处理条件下刺槐人工林凋落叶质量衰减动态模型**

**Table 1 Dynamic model of leaf litter mass attenuation in a *R. pseudoacacia* plantation under different treatment conditions**

| 不同处理条件 Different treatments | | 分解方程 Decomposition model | 分解系数 $k$ Decomposition coefficient | 决定系数 $R^2$ Coefficient of determination | 分解 50%时间/a decomposition 50% of the time | 分解 95%时间/a decomposition 95% of the time |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 对照样地 | 未移除细根(PC-WR) | $y=100.36e^{-0.78t}$ | 0.78a | 0.97 | 0.89 | 3.85 |
| Control plot | 移除细根(PC-NR) | $y=101.27e^{-0.76t}$ | 0.76a | 0.97 | 0.91 | 3.95 |
| 处理样地 | 未移除细根(PT-WR) | $y=100.97e^{-0.67t}$ | 0.67b | 0.96 | 1.04 | 4.48 |
| Treatment plot | 移除细根(PT-NR) | $y=101.17e^{-0.65t}$ | 0.65b | 0.95 | 1.08 | 4.62 |

分解方程 $y=a\times e^{-kt}$ 中 $y$ 为凋落叶分解残重率(%),参数 $k$ 为凋落叶分解系数. 使用 *Wald* 检验评估不同处理之间分解系数(k)的显著性差异. 不同小写字母表示不同处理间分解系数的差异显著($P<0.05$)

## 2.4 凋落叶分解速率、土壤酶活性及土壤养分之间的关联性

如前所述,减雨处理和细根移除对刺槐凋落叶分解速率和土壤酶活性均有一定影响,为了揭示各处理之间凋落叶分解速率差异是否通过土壤酶活性或土壤养分介导,我们对全部处理条件下各小区凋落叶分解速率与土壤酶活性及主要养分指标(土壤有机碳、全氮和全磷等)进行相关性分析 (表 2)。结果显示,尽管大多数指标与凋落叶分解速率呈现出正相关关系,但各项指标间关系均未达到显著水平($P>0.05$)。说明本研究中不同处理间的差异性及重复小区间的变异性在本质上并非由于某项土壤养分指标和某种土壤酶的活性所导致。

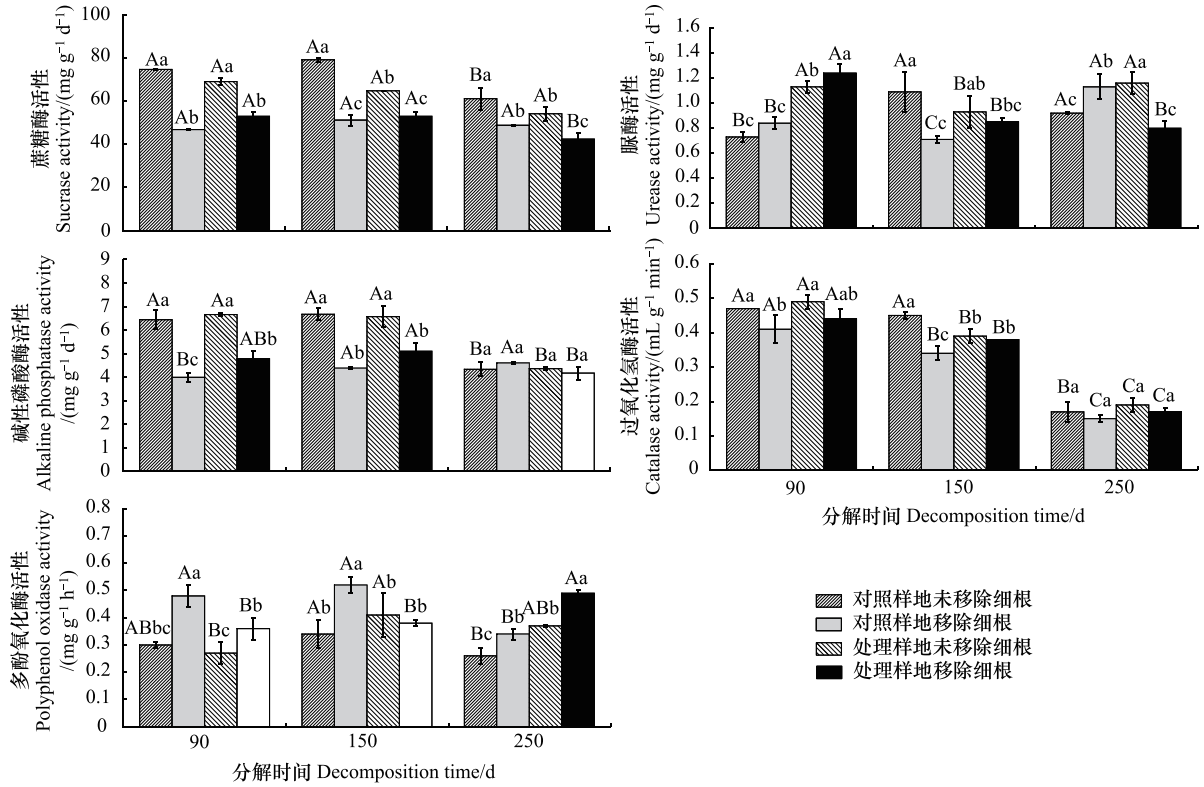


**图 3　凋落叶分解过程中 5 种土壤酶活性变化**

**Fig.3　Changes in five soil enzyme activities during the leaf litter decomposition process**

最小显著差异法(LSD)用于分析土壤酶活性在整个分解过程中的显著差异($P$<0.05). 不同大写字母表示分解阶段间土壤酶活性差异显著,不同小写字母表示不同处理间土壤酶活性差异显著($P$<0.05). 数据以平均值±标准差表示

**表 2　凋落叶分解速率与土壤酶活性、土壤养分含量的相关性分析**

**Table 2 Correlation coefficients between leaf litter decomposition rate and soil enzyme activity, soil nutrient content**

| 指标 Index | 4 处理×3 重复 ($n$=12) 4 treatments×3 replicates ($n$=12) | | 采用各处理平均值 ($n$=4) Using the average value of each treatment ($n$=4) | |
|---|---|---|---|---|
| | Correlation coefficient (r) | Significance ($P$) | Correlation coefficient (r) | Significance ($P$) |
| 蔗糖酶 Sucrase | 0.446 | 0.15 | 0.559 | 0.44 |
| 脲酶 Urease | 0.211 | 0.51 | 0.360 | 0.64 |
| 碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase | 0.066 | 0.84 | 0.127 | 0.87 |
| 过氧化氢酶 Catalase | 0.316 | 0.32 | 0.448 | 0.55 |
| 多酚氧化酶 Polyphenol oxidase | 0.209 | 0.51 | −0.027 | 0.97 |
| 有机碳 SOC | 0.228 | 0.48 | 0.943 | 0.057 |
| 全氮 TN | 0.232 | 0.47 | 0.943 | 0.057 |
| 全磷 TP | 0.176 | 0.58 | 0.943 | 0.057 |
| 碳氮比 C/N | 0.164 | 0.61 | 0.943 | 0.057 |
| 碳磷比 C/P | 0.212 | 0.51 | 0.943 | 0.057 |
| 氮磷比 N/P | 0.217 | 0.5 | 0.943 | 0.057 |

土壤养分指标为实验初期样品测定值;土壤酶活性为生长季中期(8 月)测定值;SOC: 有机碳 Soil organic carbon;TN: 全氮 Total Nitrogen;TP: 全磷 Total phosphorus

## 3　讨论

### 3.1　降雨减少和细根移除对凋落叶分解的影响

减雨处理显著降低了刺槐人工林中凋落叶的分解速率,这与以往的研究结果一致[5,35]。造成这种影响的

主要原因可以归结为减雨处理所导致的土壤水分减少。土壤水分状况会直接影响分解环境,可能改变土壤微生物群落结构和活性以及土壤酶活性,进而导致减雨处理区分解速率的相对降低。特别是在干旱、半干旱及半湿润区,以及季节性干旱期间,土壤表层的生物化学过程对于水分因子十分敏感。此外,减雨处理还会减弱凋落物层的淋滤作用,影响林下有机质的周转过程,也可能是减雨处理区凋落叶分解相对缓慢的原因之一。本研究中减雨处理对 5 种土壤酶活性的影响未呈现出一致的规律性,部分土壤酶的活性在部分测定期未表现出随减雨处理的降低趋势,显示其它因素可能对土壤酶活性产生重要影响,例如土壤水热条件等环境因子的季节变异。关于土壤微生物群落的研究已经初步显示,减雨处理对细菌和真菌的群落结构具有显著影响[31]。因此,作为温带半湿润气候区,本研究中土壤水分条件的变化对林地凋落叶分解的影响符合一般性规律。

已有研究表明,根系的存在能够提高凋落物分解速率以及养分释放率[36]。细根向土壤释放的分泌物不仅直接影响土壤养分动态,还能调节土壤酶活性,且细根与土壤微生物群落形成复杂的互作网络,共同参与凋落物分解过程[1]。本实验中细根移除单项因子对分解速率的影响未达到显著水平,可能原因是细根移除区与对照区未形成显著的生物和非生物因素差异,或者由于实验时间较短尚未对分解速率产生明显的影响。细根被阻断后,原有根际环境被改变,根系分泌物、根际微生物及根系周转物应该少于对照区,但这种响应可能存在滞后效应,在较短的时间内可能不会体现出来,这与 Luizão 等[37]的研究发现相吻合。本研究的减雨处理样地无细根区凋落叶分解速率最低,分解系数(0.65)显著低于对照样地有细根区(0.78)。在减雨处理和对照样地内细根移除的影响虽未达到显著水平,但土壤水分和细根的叠加作用十分明显,因此并不排除细根分泌物及其共生真菌等潜在因素对凋落叶分解的促进作用。在今后研究中对凋落物分解与细根及其分泌物、共生真菌的相互关系有待进一步深入探讨。

**3.2** 不同处理区土壤酶活性的变化及其与凋落叶分解的关联性

如前所述,土壤水分不仅对土壤微生物群落结构和多样性具有重要影响,还会直接影响土壤微生物的生长繁殖以及土壤酶的分泌,进而对凋落叶分解过程产生重要影响。不同酶类对土壤水分的适应性存在差异,这种差异会导致酶活性随水分条件变化而呈现不同的响应模式[38]。本研究中 5 种土壤酶的活性呈现出明显的季节性变异,应该与土壤水热状况有关。减雨处理样地的土壤蔗糖酶活性在所有分解阶段均显著低于对照样地,而脲酶活性在减雨与对照间未呈现明显规律,碱性磷酸酶活性则未达到显著差异水平。这些结果说明降雨减少显著抑制了蔗糖酶活性,对脲酶活性的影响更受季节变化的调控,土壤水分并非导致碱性磷酸酶变化的主要驱动因子。这些发现与多项研究结果一致,例如在荒漠草原隔离降雨 50%会显著降低蔗糖酶活性,而 30%的隔离降雨对蔗糖酶、脲酶、磷酸酶活性均无显著影响[39];在亚热带米槠天然林的研究也证实,降水减少会抑制土壤胞外酶活性[40]。关于氧化酶活性的研究发现,在有细根区,两样地的过氧化氢酶活性随凋落物分解进程显著降低,而多酚氧化酶活性则呈现先升高后降低的趋势。土壤水分的季节性变化对两种氧化酶活性均产生显著影响。然而,两样地的过氧化氢酶和多酚氧化酶活性差异未达到显著水平,说明土壤水分降低对这两种氧化酶的影响相对较小。在中亚热带杉木幼中的研究发现降雨隔离虽未显著影响多酚氧化酶和过氧化物酶活性,但显著降低了磷酸酶活性[41]。土壤酶活性不仅受降雨量影响,还受到季节变化以及降雨强度、频率及持续时间的综合影响。

细根对水解酶活性的影响在不同处理小区间的差异性未呈现出一致的规律性,但总体上受细根移除的影响较减雨处理的影响更为明显。阻止细根进入凋落物层会显著降低蔗糖酶活性和碱性磷酸酶活性,同时对脲酶活性也有显著影响。有细根区的过氧化氢酶活性均高于无细根区,而多酚氧化酶活性则呈现相反趋势。

减雨处理和细根移除对凋落叶分解的影响机制应该是多途径的。土壤养分状况可能作为生物化学过程的载体发挥一定作用,细根及其周转物、分泌物也是土壤微生物及土壤酶的重要载体,这些因素均介导各处理间凋落叶分解的差异。相关分析表明,本研究中 5 种土壤酶的活性和 C、N、P 等土壤养分指标均未与分解速率表现出直接关系,说明单一因素的影响不具有主导作用,不同处理间产生差异的原因应该是综合性的。有研究表明,减雨处理对土壤微生物群落的影响随处理年限和减雨强度而明显不同,在半湿润区减雨 30%处理

3 年未对土壤微生物群落产生影响,而减雨 50%处理 5 年的样地内可检测出明显的差异[31,42]。需强调的是,土壤表层酶活性对凋落物分解的贡献率受多因子协同调控,包括土壤水分状况、细根分布特征、林分结构参数以及土壤养分水平等,其中土壤酶活性对环境因子的响应可能通过改变分解微环境间接作用于凋落物分解过程。总之,本实验虽未明确土壤养分指标和几种土壤酶在凋落叶分解中的作用和相对贡献,但明确揭示了减雨处理及土壤水分条件对于凋落叶分解的重要作用,同时也支持细根在凋落叶分解中的潜在作用。可以确定,随着减雨处理时间的延长,处理区内土壤水分动态及其在垂直剖面上的分布特征会发生明显改变;而随着细根移除处理的延长,移除细根小区内的生物环境也会不断变化,这些变化都会改变凋落物周围的微生物活动,从而影响凋落叶分解过程及林地各类养分的循环。

### 3.3　研究不确定性及展望

本研究考虑到 Olson 指数模型的适用性,未将分解袋设置初期的冬季低温期纳入拟合模型;但是,尽管该期间内凋落叶质量损失可忽略不计,冻融作用和春季融雪也可能导致微量的质量损失和淋溶,若在温度回升后存在激发效应,初期分解速率可能被高估。此外,以初始土壤养分与生长季中期酶活性代表全年状况,虽符合“养分年间稳定、酶活性季节高峰”的共识,但也可能掩盖不同水分-根系处理下养分与酶动态的异步性。因此,未来需延长观测周期、增加采样频次,将时序养分-酶活数据与分解阶段动态耦合,引入冻融激发与阶段差异的机理模型,以降低因缺失冬季过程与静态指标带来的不确定性。

## 4　结论

研究发现,减雨处理显著降低了凋落叶分解速率,而细根移除的影响未达显著水平,表明减雨处理和土壤水分条件对凋落叶分解有重要调控作用。土壤酶活性存在明显季节变化,其受减雨和细根移除的影响因采样时间而异。减雨处理显著降低了蔗糖酶和过氧化氢酶的活性,但对碱性磷酸酶活性无显著影响;细根移除显著降低了蔗糖酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶的活性,却使多酚氧化酶活性有所升高。然而,凋落叶分解速率与土壤酶活性和主要土壤养分指标无显著相关性。这些结果支持细根在凋落叶分解中的潜在作用,并表明土壤水分和细根可能通过影响土壤微生物活性和分泌物来调控凋落物分解及林地养分循环。鉴于本研究周期仅 1 年,且未深入探究土壤微生物群落结构变化,可能无法完全反映长期环境变化对凋落叶分解的累积效应及微生物群落对减雨处理和细根移除处理及其交互作用的响应。因此,未来研究应关注长期减雨处理和细根移除对凋落叶分解的持续影响,以更好地理解生态系统对环境变化的长期响应。

**参考文献(References):**


[1] 郭剑芬, 杨玉盛, 陈光水, 林鹏, 谢锦升. 森林凋落物分解研究进展. 林业科学, 2006, 42(4): 93-100.

[2] 贾丙瑞. 凋落物分解及其影响机制. 植物生态学报, 2019, 43(8): 648-657.

[3] Bradford M A, Berg B, Maynard D S, Wieder W R, Wood S A. Understanding the dominant controls on litter decomposition. Journal of Ecology, 2016, 104(1): 229-238.

[4] Sala O E, Parton W J, Joyce L A, Lauenroth W K. Primary production of the central grassland region of the United States. Ecology, 1988, 69(1): 40-45.

[5] 王文秀, 栾军伟, 王一, 杨怀, 赵阳, 李丝雨, 梁昌强, 孔祥河, 刘世荣. 模拟干旱和磷添加对热带低地雨林叶凋落物分解的影响. 生态学报, 2022, 42(15): 6160-6174.

[6] Vitousek P M, Turner D R, Parton W J, Sanford R L. Litter decomposition on the Mauna loa environmental matrix, hawai′i: patterns, mechanisms, and models. Ecology, 1994, 75(2): 418-429.

[7] 尹承军, 黄德华, 陈佐忠. 内蒙古典型草原 4 种植物凋落物分解速率与气候因子之间的定量关系. 生态学报, 1994, 14(2): 149-154.

[8] 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.

[9] 高海燕, 红梅, 霍利霞, 叶贺, 赵巴音那木拉, 德海山. 外源氮输入和水分变化对荒漠草原凋落物分解的影响. 应用生态学报, 2018, 29(10): 3167-3174.

[10] 向元彬, 周世兴, 肖永翔, 胡庭兴, 涂利华, 黄从德, 高保丹. 模拟氮沉降和降雨对华西雨屏区常绿阔叶林凋落物分解的影响. 生态学报, 2017, 37(2): 455-463.

[11] Chen H. Root decomposition in three coniferous forests: Effects of substrate quality, temperature, and moisture. Corvallis: Oregon State

University, 1999.
[12] Griffiths B S, Philippot L. Insights into the resistance and resilience of the soil microbial community. FEMS Microbiology Reviews, 2013, 37(2): 112-129.
[13] Moser G, Schuldt B, Hertel D, Horna V, Coners H, Barus H, Leuschner C. Replicated throughfall exclusion experiment in an Indonesian perhumid rainforest: wood production, litter fall and fine root growth under simulated drought. Global Change Biology, 2014, 20(5): 1481-1497.
[14] 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.
[15] Burns R G, DeForest J L, Marxsen J, Sinsabaugh R L, Stromberger M E, Wallenstein M D, Weintraub M N, Zoppini A. Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 58: 216-234.
[16] Schmidt M W I, Torn M S, Abiven S, Dittmar T, Guggenberger G, Janssens I A, Kleber M, Kögel-Knabner I, Lehmann J, Manning D A C, Nannipieri P, Rasse D P, Weiner S, Trumbore S E. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. Nature, 2011, 478(7367): 49-56.
[17] Dong L L, Berg B, Luo Y Q, Zou H T, Sun T. Time-varying associations between absorptive fine roots and leaf litter decomposition across 23 plant species. Soil Biology and Biochemistry, 2025, 204: 109751.
[18] 王微, 胡凯, 党成强, 陶建平. 凋落物分解与细根生长的相互作用. 林业科学, 2016, 52(4): 100-109.
[19] 马承恩, 孔德良, 陈正侠, 郭俊飞. 根系在凋落物层中的生长及其对凋落物分解的影响. 植物生态学报, 2012, 36(11): 1197-1204.
[20] Li Y G, Dong X X, Yao W X, Han C, Sun S, Zhao C M. C, N, P, K stoichiometric characteristics of the "leaf-root-litter-soil" system in dryland plantations. Ecological Indicators, 2022, 143: 109371.
[21] 龚世豪, 查同刚, 张晓霞, 张恒硕, 高连炜, 于洋. 晋西黄土区典型林分凋落物-土壤养分对降雨再分配变化的响应. 生态学报, 2024, 44(17): 7748-7759.
[22] 王国梁, 刘国彬, 常欣, 许明祥. 黄土丘陵区小流域植被建设的土壤水文效应. 自然资源学报, 2002, 17(3): 339-344.
[23] Wang L, Wang Q J, Wei S P, Shao M A, Li Y. Soil desiccation for Loess soils on natural and regrown areas. Forest Ecology and Management, 2008, 255(7): 2467-2477.
[24] IPCC. Climate Change 2023: Long-term climate and development futures. Cambridge: Cambridge University Press, 2023.
[25] Huang J P, Yu H P, Guan X D, Wang G Y, Guo R X. Accelerated dryland expansion under climate change. Nature Climate Change, 2016, 6(2): 166-171.
[26] 马柱国. 我国北方干湿演变规律及其与区域增暖的可能联系. 地球物理学报, 2005, 48(5): 1011-1018.
[27] He Q Y, Yan M J, Miyazawa Y, Chen Q W, Cheng R R, Otsuki K, Yamanaka N, Du S. Sap flow changes and climatic responses over multiple-year treatment of rainfall exclusion in a sub-humid black locust plantation. Forest Ecology and Management, 2020, 457: 117730.
[28] Liu M J, Chang L, Chen Q W, Guan J H, Li G Q, Du S. Black locust under long-term rainfall exclusion treatment changed its drought-resistance strategy to an adventurous pattern that potentially raised the risk of hydraulic damage. Forest Ecosystems, 2025, 14: 100380.
[29] Guo H N, Wang Y R, Li G Q, Du S. Effects of rainfall exclusion treatment on photosynthetic characteristics of black locust in the sub-humid region of the Loess Plateau, China. Plants, 2024, 13(5): 704.
[30] Liu M J, Chang L, Chen Q W, Li G Q, Du S. Soil water consumption along the profile in response to soil water content variations in a black locust plantation with a rainfall exclusion in Loess Plateau. Journal of Hydrology, 2024, 640: 131721.
[31] 罗伶书, 王一佩, 杜盛. 模拟降雨减少对刺槐人工林土壤养分和微生物群落的影响. 生态学报, 2023, 43(14): 5916-5925.
[32] Sun T, Hobbie S E, Berg B, Zhang H, Wang Q, Wang Z, Hattenschwiler S. Contrasting dynamics and trait controls in first-order root compared with leaf litter decomposition. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115: 10392-10397.
[33] Saiya-Cork K R, Sinsabaugh R L, Zak D R. The effects of long term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an *Acer saccharum* forest soil. Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34(9): 1309-1315.
[34] Olson J S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. Ecology, 1963, 44(2): 322-331.
[35] 程春香, 郭鲲, 毛子军, 孙鹏飞, 马宏达, 王程. 土壤湿度对东北 3 种主要树种凋落物分解的影响. 应用生态学报, 2018, 29(7): 2251-2258.
[36] Wang F C, Fang X M, Ding Z Q, Wan S Z, Chen F S. Effects of understory plant root growth into the litter layer on the leaf litter decomposition of two woody species in a subtropical forest. Forest Ecology and Management, 2016, 364: 39-45.
[37] Luizão R C C, Luizão F J, Proctor J. Fine root growth and nutrient release in decomposing leaf litter in three contrasting vegetation types in central *Amazonia*. Plant Ecology, 2007, 192(2): 225-236.
[38] 向元彬, 周世兴, 肖永翔, 胡庭兴, 涂利华, 黄从德. 降雨量改变对常绿阔叶林干旱和湿润季节土壤呼吸的影响. 生态学报, 2017, 37(14): 4734-4742.
[39] 许艺馨, 余海龙, 李春环, 韩翠, 王晓悦, 黄菊莹. 模拟降水量变化对荒漠草原土壤酶活性的影响及其相关因素分析. 西北植物学报, 2021, 41(11): 1912-1923.
[40] 曹平丽, 孙思怡, 卢胜旭, 张锦新, 刘小飞, 郭剑芬. 亚热带米槠天然林不同深度土壤胞外酶活性对隔离降雨的响应. 水土保持学报, 2022, 36(1): 205-211.
[41] 江森华, 倪梦颖, 周嘉聪, 陈岳民, 杨玉盛. 增温和降雨减少对杉木幼林土壤酶活性的影响. 生态学杂志, 2018, 37(11): 3210-3219.
[42] 王一佩. 半湿润黄土区刺槐人工林生产力和土壤微生物群落对降雨减少的响应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.