

DOI: 10.11686/cyxb2025420

<http://cyxb.magtech.com.cn>

罗欢, 蒋玉奇, 牛得草, 等. 土壤水分对黄土高原温性草原凋落物分解及土壤有机碳形成的影响. 草业学报, 2026, 35(8): 14—21.

LUO Huan, JIANG Yu-qi, NIU De-cai, *et al.* The impact of soil moisture on litter decomposition and soil organic carbon deposition in the temperate grasslands of the Loess Plateau. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(8): 14—21.

土壤水分对黄土高原温性草原凋落物分解及土壤有机碳形成的影响

罗欢¹, 蒋玉奇², 牛得草², 郭丁², 李旭东^{2*}

(1. 甘肃农业职业技术学院, 甘肃 兰州 730030; 2. 草种创新与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, 甘肃 兰州 730020)

摘要:凋落物分解是影响土壤有机碳(SOC)形成的重要过程,而土壤水分条件会对这一过程产生重要影响。研究土壤水分变化对草地凋落物分解及其对土壤有机碳形成的影响,有助于阐明气候变化背景下土壤碳库的动态变化及其稳定机制。本研究以黄土高原温性草原优势物种长芒草为对象,通过将其叶片(SL)和根系(SR)在不同水分条件下[W₁:土壤年平均含水量(质量含水量为7.16%);W₂:土壤田间持水量的50%(质量含水量为23.55%)]与土壤共同培养3年,分析不同水分条件下凋落物的分解特征以及土壤有机碳和团聚体有机碳的变化。结果表明:与W₁相比,W₂条件下SL和SR处理的土壤微生物量碳显著增加了25.2%和40.7%,进而显著提高了凋落物的分解速率,同时也显著增加了SOC含量($P<0.05$)。另外,土壤水分的增加显著提高了<0.053 mm团聚体的新碳形成效率,SL和SR处理在W₂条件下的新碳形成效率较W₁分别显著增加6.5%和8.0%($P<0.05$)。说明在半干旱区温性草原,土壤水分的增加可促进凋落物的分解,并使凋落物碳分解后更多地向<0.053 mm团聚体中分配,进而促进了矿质结合态有机碳的形成。

关键词:土壤水分;凋落物;分解速率;土壤团聚体;碳稳定性

The impact of soil moisture on litter decomposition and soil organic carbon deposition in the temperate grasslands of the Loess Plateau

LUO Huan¹, JIANG Yu-qi², NIU De-cai², GUO Ding², LI Xu-dong^{2*}

1. Gansu Vocational College of Agriculture, Lanzhou 730030, China; 2. State Key Laboratory of Herbage Improvement and Grassland Agro-ecosystems, College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China

Abstract: Litter decomposition is a key process affecting the formation of soil organic carbon (SOC), and soil moisture conditions exert a significant influence on this process. Investigating the effects of soil moisture changes on grassland litter decomposition and its role in soil organic carbon formation is conducive to clarifying the dynamic changes in soil carbon pools and their stabilization mechanisms in the context of climate change. In this study, *Stipa bungeana*, a dominant species in the temperate grasslands of the Loess Plateau—was selected for study. *S. bungeana* leaves (SL) and *S. bungeana* roots (SR) were co-cultured with soil for 3 years under different moisture conditions [W₁: annual average soil moisture content (gravimetric water content of 7.16%); W₂: 50% of soil field capacity (gravimetric water content of 23.55%)]. The decomposition characteristics of litter and the changes in soil

收稿日期:2025-10-18;改回日期:2025-11-12

基金项目:甘肃省科技计划(甘肃省自然科学基金重点项目,22JR5RA400),甘肃省林业和草原局甘肃省草原监测评价科技支撑项目(HT-GSZYTC-ZCJC-21009)和甘肃省林业和草原局甘肃省草原监测评价项目(GSZYTC-ZCJC-21010)资助。

作者简介:罗欢(1982—),女,甘肃两当人,硕士。E-mail: 42442746@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: lixudong@lzu.edu.cn

organic carbon and organic carbon in soil aggregates under the different moisture conditions were analyzed. It was found that, compared with W_1 , the soil microbial biomass carbon in the SL and SR treatments in the W_2 treatment increased ($P < 0.05$) by 25.2% and 40.7%, respectively. The W_2 treatment not only significantly accelerated the litter decomposition rate but also significantly increased the SOC content ($P < 0.05$). In addition, adequate moisture conditions facilitate the formation of mineral-associated organic carbon in soils of semi-arid regions. Specifically, in the W_2 treatment, the new carbon formation efficiency of the SL and SR treatments increased significantly by 6.5% and 8.0% respectively compared with W_1 ($P < 0.05$). These findings indicate that in the temperate grasslands of semi-arid regions, an increase in soil moisture can not only promote litter decomposition, but also promote a greater allocation of litter carbon to soil aggregates < 0.053 mm, thereby facilitating the formation of mineral-associated organic carbon.

Key words: soil moisture; litter; decomposition rate; soil aggregates; carbon stability

草地覆盖了全球陆地面积的 40%, 是陆地生态系统最大的碳(carbon, C)库之一^[1]。凋落物是土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)的主要来源, 其分解过程调控着草地生态系统 C 的周转以及养分的有效性^[2]; 同时, 凋落物分解和转化对土壤 C 库及其稳定性具有深远的影响, 进而影响土壤的“C 源”“C 汇”性质^[3-4]。凋落物分解过程受到一系列生物和环境因素的控制, 其中, 土壤水分是控制其分解的最重要环境因子之一^[5]。通常, 土壤水分条件会通过改变土壤中的资源可利用性来影响土壤微生物量和微生物群落组成, 进而影响凋落物的分解过程^[6]。

凋落物分解对土壤 C 库的影响一方面取决于其分解后 C 进入土壤 C 库的数量; 另一方面, 凋落物 C 进入土壤后在不同粒径团聚体中的分配也会直接影响土壤 C 库的稳定性。这是因为土壤团聚体是土壤 C 固存的主要场所, 不同粒径土壤团聚体中 C 的稳定性有很大的差异。然而, 目前的研究多集中于凋落物分解对环境因子的响应^[7-9]以及养分的释放^[10-11], 少有研究将凋落物的分解与土壤团聚体 C 的形成联系起来。

黄土高原地处半干旱区域, 土壤水分是影响该区域植物生长和凋落物分解的关键性生态因子。气候变化背景下降水格局的变化会显著影响土壤的水分条件^[12], 这些变化会直接影响该区域草地生态系统凋落物的分解过程, 进而对土壤团聚体 C 的形成产生影响。本研究选取黄土高原温性草原主要物种长芒草(*Stipa bungeana*)为材料, 在不同水分条件下将凋落物与土壤共同培养, 以期了解: 1) 土壤水分对凋落物分解过程的影响; 2) 土壤水分变化对凋落物分解后不同粒径团聚体 C 形成的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省兰州市榆中县夏官营镇, 地理坐标为北纬 $35^{\circ}57'$, 东经 $104^{\circ}09'$, 海拔 1965.8 m, 年均气温 6.7°C , 属大陆性半干旱气候, 年降水量 380 mm。植被类型为温性典型草原, 土壤类型为灰钙土, 主要植物种有长芒草、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)、黄花蒿(*Artemisia annua*)、赖草(*Leymus secalinus*)等。

1.2 样品的采集与分析

1.2.1 凋落物样品的采集与分析 2020 年 10 月, 在研究区域的草地多点收集长芒草叶片(齐地面剪除)以及用根钻采集长芒草根系, 混合后带回实验室洗净后风干, 清除其中的杂物。随后将长芒草叶片和根系剪成 1 cm 的小段备用。取部分凋落物样品粉碎后分析可溶性成分、半纤维素、纤维素和木质素含量^[13]; 取部分粉碎样品进一步用球磨仪(JOSVOK, 天津)粉碎, 用元素分析仪(Elementar Vario ELIII, 德国)分析 C 含量。

1.2.2 土壤样品的采集 于 2020 年 10 月在研究区多点采集土壤样品, 取土深度为 0~10 cm, 多点采集的土样混合均匀, 带回实验室风干。去除砾石、植物残体等杂物, 过 2 mm 筛后用于凋落物的培养。取部分土样进一步过 0.149 mm 筛, 用于 SOC 含量的测定。

1.2.3 土壤样品的分析 用元素分析仪(Elementar Vario ELIII, 德国)测定土壤有机碳含量; 采用氯仿熏蒸法测定土壤微生物量碳含量^[14]; 另取 50.00 g 过 2 mm 筛的风干土样, 采用湿筛法将土壤团聚体筛分为 3 个粒级:

0.250~2.000 mm、0.053~0.250 mm 和 <0.053 mm^[15],用元素分析仪(Elementar Vario ELⅢ,德国)测定不同粒级团聚体的土壤有机碳含量。

1.3 凋落物的培养

凋落物于室内恒温培养。称取 80.00 g 土样置于小烧杯中,另称取相当于 2.00 g C 的长芒草叶片(*S. bungeana* leave, SL)和长芒草根系(*S. bungeana* root, SR)样品置于小烧杯内的土壤表层,将小烧杯于梅森罐中于黑暗的恒温室内进行培养,培养温度为 15℃。设置 2 个土壤水分处理, W_1 :土壤年平均含水量(质量含水量为 7.16%), W_2 :土壤田间持水量的 50%(质量含水量为 23.55%);设置 3 个凋落物处理:SL、SR 和 CK(对照,无凋落物),共计 6 个处理,每个处理 3 个重复,培养时间为 3 年。培养期间定期开盖通风,并通过称重补充烧杯内水分^[16]。

1.4 指标计算

根据每次取样时凋落物的剩余质量和培养前质量计算凋落物的干物质残留率^[16];根据土壤及某一碳库组分中 SOC 增加的数量与凋落物碳的损失量计算新碳形成效率(单位凋落物碳损失量转化为土壤有机碳的百分数)^[17]。

1.5 统计分析

用 SPSS 26.0 的独立样本 *T* 检验、单因素方差分析(One-way ANOVA, LSD)对试验数据进行差异显著性分析($P<0.05$)。用 Origin 2021 作图。

2 结果与分析

2.1 不同水分处理下调落物化学组分的变化

经过 3 年的分解后,凋落物化学组分变化显著(表 1),与初始值相比,两种凋落物可溶性成分和木质素均显著增加($P<0.05$),SL 半纤维素和纤维素含量显著降低,SR 仅纤维素含量较初始值显著降低($P<0.05$)。

表 1 不同水分处理下调落物化学组分的变化

Table 1 Changes in the chemical composition of litter under different moisture treatments ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

凋落物 Litter	培养时间 Co-culture time (a)	处理 Treatment	可溶性成分 Soluble components	半纤维素 Hemicellulose	纤维素 Cellulose	木质素 Lignin
叶片 Leave (SL)	0	W_0	$0.135 \pm 0.001\text{b}$	$0.163 \pm 0.001\text{a}$	$0.147 \pm 0.000\text{a}$	$0.055 \pm 0.000\text{b}$
	3	W_1	$0.204 \pm 0.003\text{a}$	$0.114 \pm 0.010\text{b}$	$0.036 \pm 0.011\text{b}$	$0.090 \pm 0.010\text{a}$
	3	W_2	$0.210 \pm 0.006\text{a}$	$0.113 \pm 0.009\text{b}$	$0.026 \pm 0.007\text{b}$	$0.108 \pm 0.017\text{a}$
根 Root (SR)	0	W_0	$0.101 \pm 0.000\text{b}$	$0.126 \pm 0.001\text{a}$	$0.165 \pm 0.001\text{a}$	$0.061 \pm 0.000\text{b}$
	3	W_1	$0.148 \pm 0.025\text{ab}$	$0.117 \pm 0.016\text{a}$	$0.069 \pm 0.010\text{b}$	$0.144 \pm 0.007\text{a}$
	3	W_2	$0.195 \pm 0.042\text{a}$	$0.109 \pm 0.006\text{a}$	$0.050 \pm 0.009\text{b}$	$0.166 \pm 0.020\text{a}$

W_0 : 初始值 Initial value; W_1 , W_2 : 土壤质量含水量分别为 7.16% 和 23.55% The soil mass water contents which are 7.16% and 23.55%, respectively; 下同 The same below; 同列不同小写字母表示不同水分处理和初始值之间差异显著(平均值 $\pm$ 标准误, $P<0.05$) Different lowercase letters within the same column indicate significant differences among different moisture treatments and the initial value [mean $\pm$ standard error (SE), $P<0.05$].

2.2 不同水分处理对凋落物干物质残留率的影响

分解 3 年后,SL 和 SR 的干物质残留率在 W_2 处理下分别为 34.8% 和 36.8%,显著低于 W_1 处理(40.0% 和 40.1%)($P<0.05$,图 1),说明较高的土壤水分含量促进了凋落物的分解。

2.3 不同水分处理对凋落物碳含量的影响

分解 3 年后,两种凋落物的 C 含量与初始值(W_0)相比均呈显著降低的趋势($P<0.05$,图 2)。SL 中 C 含量在 W_2 处理下为 24.3%,较 W_1 处理(28.3%)降低了 14.1%($P<0.05$)。SR 碳含量在 W_2 处理下(21.4%)较 W_1 处理(26.2%)降低了 18.3%($P<0.05$)。

2.4 不同水分处理对土壤有机碳含量的影响

分解 3 年后, W_1 处理下,SL 和 SR 处理的 SOC 含量分别为 5.85 和 5.71 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; W_2 处理下分别为 6.12 和 5.96

$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,均显著高于CK(5.21%和5.20%)($P<0.05$,图3)。SL和SR在 W_2 处理下的SOC含量分别显著高出 W_1 处理(4.6%和4.4%)($P<0.05$)。

2.5 不同水分处理对土壤团聚体土壤有机碳含量的影响

不同水分处理下,凋落物分解3年导致各粒径土壤团聚体SOC含量均呈净增加的趋势(图4)。 W_2 水分条件下,SL处理下的0.250~2.000 mm、0.053~0.250 mm和<0.053 mm的土壤团聚体SOC净增加量分别为1.01、1.03和1.88 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,显著高于 W_1 处理(0.19、0.22和0.33 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)($P<0.05$);而 W_2 水分条件下,SR处理的3个粒径团聚体SOC净增加量分别为0.73、0.15和1.60 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,显著高于 W_1 处理(0.07、0.05和0.36 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)($P<0.05$)。另外,两种凋落物处理下<0.053 mm的土壤团聚体在 W_2 条件下的SOC净增加量显著高于其他两个粒径团聚体($P<0.05$)。

2.6 不同水分处理对土壤团聚体新碳形成效率的影响

分解3年后,SL和SR处理在 W_1 和 W_2 条件下的新碳形成效率均以<0.053 mm团聚体最高,且显著高于0.250~2.000 mm和0.053~0.250 mm粒径团聚体(图5, $P<0.05$)。SR处理下,0.250~2.000 mm和0.053~0.250 mm团聚体的新碳形成效率在 W_2 条件下较 W_1 分别显著增加5.2%和5.8%($P<0.05$)。<0.053 mm团聚体中,SL和SR处理在 W_2 条件下的新碳形成效率较 W_1 分别显著增加6.5%和8.0%($P<0.05$)。

2.7 不同水分处理对土壤微生物量碳含量的影响

分解3年后,SL和SR在 W_2 处理下土壤微生物量C含量分别为37.3和24.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,显著高出 W_1 处理(29.8和17.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)25.2%和40.7%($P<0.05$,图6),且均显著高于CK。说明较高的土壤水分含量显著增加了土壤微生物量碳含量($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 土壤水分对凋落物分解过程的影响

凋落物分解是土壤有机质形成和更新的主要过程^[9],而水分是影响凋落物分解的重要因素之一,其主要通过影响土壤中分解者的活动、凋落物的破碎以及分解产物的淋溶而影响凋落物的分解和养分释放^[18]。本研究区域地处半干旱区,植物的生长以及凋落物的分解常受到水分不足的限制。研究结果显示,分解3年后,较高

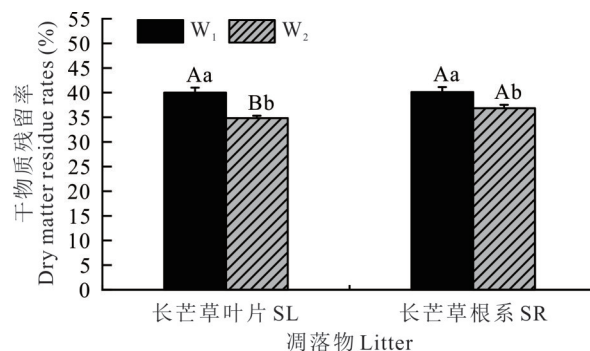


图1 不同水分处理下的凋落物干物质残留率

Fig. 1 Dry matter residue rates of litters under different moisture treatments

不同大写字母表示不同凋落物处理间差异显著,不同小写字母表示不同水分处理间差异显著(平均值±标准误, $P<0.05$)。下同。Different capital letters indicate significant differences between different litter treatments, while different lowercase letters indicate significant differences between different moisture treatments [mean±standard error (SE), $P<0.05$]. The same below.

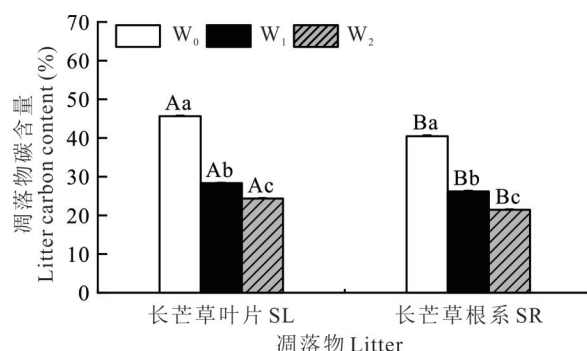


图2 不同水分处理下凋落物碳含量的变化

Fig. 2 Changes in the litter carbon contents under different moisture treatments

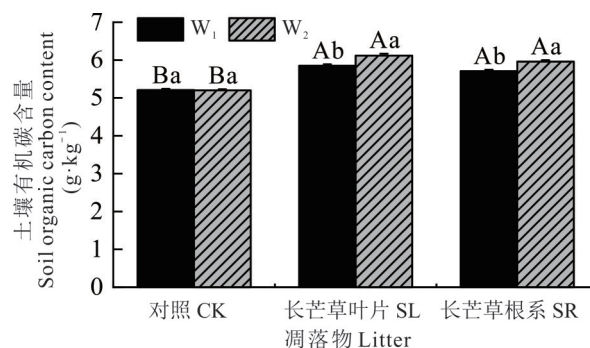


图3 不同水分处理下土壤有机碳含量的变化

Fig. 3 Changes in the soil organic carbon content under different moisture treatments

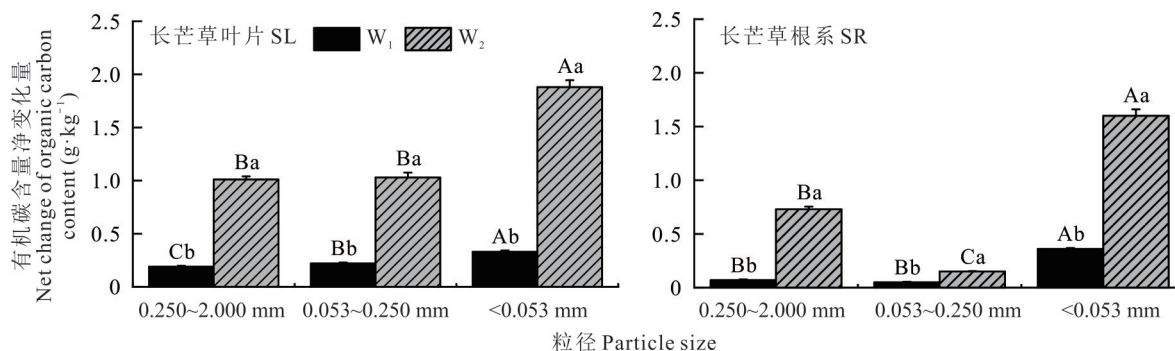


图4 不同水分处理下各粒径土壤团聚体有机碳含量净变化量

Fig.4 Net changes in the organic carbon content of soil aggregates with different particle sizes under different moisture treatments

不同大写字母表示不同粒径团聚体之间差异显著,不同小写字母表示不同水分处理间差异显著(平均值±标准误, $P < 0.05$)。下同。Different capital letters indicate significant differences among aggregates of different particle sizes, while different lowercase letters indicate significant differences between different moisture treatments [mean±standard error(SE), $P < 0.05$]. The same below.

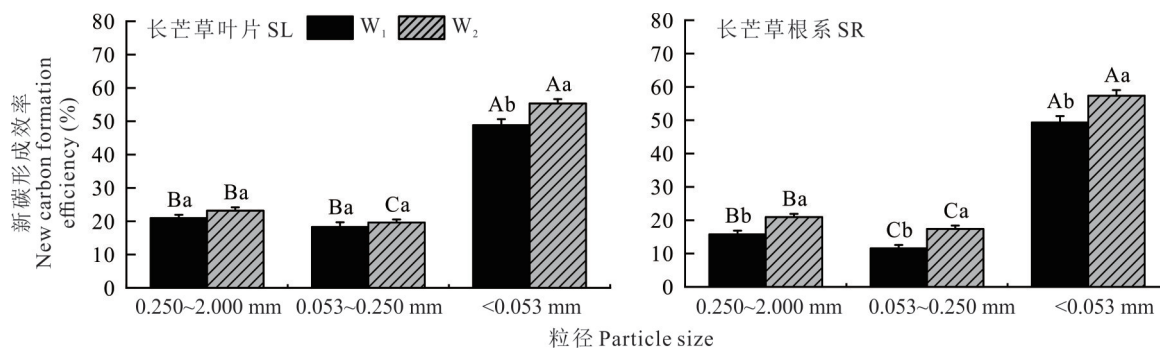


图5 不同水分处理下土壤各粒级团聚体的新碳形成效率

Fig.5 New carbon formation efficiency in soil aggregates of various particle sizes under different moisture treatments

的土壤水分含量显著提高了土壤微生物量碳含量,提高了微生物对植物碳源的利用率,并显著促进了凋落物的分解^[19-20]。此外,较高的土壤水分含量还可能促进凋落物中易溶物质的淋溶,进而加快凋落物碳进入土壤的速率^[21]。

在凋落物分解过程中,其自身的化学组成也发生了显著变化。分解3年后,在W₁和W₂水分处理下,两种凋落物的纤维素和半纤维素含量均显著降低($P < 0.05$)。与之相反,两个处理下调落物可溶性成分和木质素含量在W₂处理下均显著增加。纤维素和半纤维素的分解可能是可溶性成分增加的主要原因,而木质素的增加一方面是由于其难分解的特性,另一方面可能是由于水分的增加增强了木质素合成酶的活性,进而促进了微生物代谢并形成类木质素物质^[22],最终导致木质素的合成量大于分解损失量,使得木质素含量短期内升高^[23]。

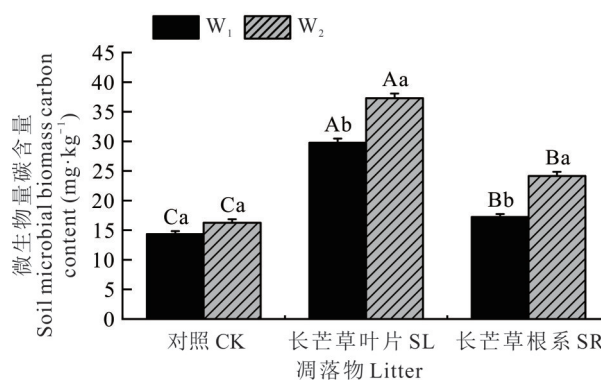


图6 不同水分处理下的土壤微生物量碳含量

Fig. 6 Soil microbial biomass carbon content under different moisture treatments

不同大写字母表示不同凋落物间差异显著,不同小写字母表示不同水分处理间差异显著(平均值±标准误, $P < 0.05$)。Different capital letters indicate significant differences among different litters, while different lowercase letters indicate significant differences between different moisture treatments (mean±SE, $P < 0.05$).

3.2 土壤水分对 SOC 和团聚体 C 的影响

SOC 含量及其变化主要受到外源新 C 输入和 SOC 分解之间动态平衡的调控^[24],而更多的植物源碳和微生物代谢产物可以促进 SOC 的形成^[25]。两种凋落物在不同水分条件下培养分解 3 年后,各处理的 SOC 含量均较对照显著增加,且 W_2 处理下的 SOC 含量显著高于 W_1 处理,这可能是因为较好的土壤水分条件提高了微生物的活性,加快了凋落物的分解,进而加快了微生物代谢产物转化为 SOC 的速率,使得 SOC 含量显著提高^[26]。对照组中因为没有外源碳的输入,微生物对原有 SOC 的持续分解导致其含量逐渐降低,且随着水分条件的增加,其分解损失量增加。

分解 3 年后,各粒径土壤团聚体的比例没有显著差异。两种凋落物处理下,在 0.250~2.000 mm、0.053~0.250 mm 和 <0.053 mm 三个粒径土壤团聚体中均呈 W_2 处理下 SOC 的净增加量显著高于 W_1 的趋势,其中 <0.053 mm 团聚体中的 SOC 净增加量最高(图 4),较高的水分条件下土壤新碳形成效率的提高也证实了这一点,另外,相同水分条件下各粒径团聚体的新碳形成效率也以 <0.053 mm 团聚体为最高。<0.053 mm 的土壤团聚体 SOC 主要是通过凋落物经微生物分解利用后的残基产物与土壤矿物以化学键相结合,形成了稳定的矿质结合态有机 C(mineral-associated organic carbon, MAOC)^[25]。本研究,较好的土壤水分条件促进了凋落物的分解,微生物活性的增加导致微生物代谢产物以及微生物残体碳增加^[27];另一方面,与大团聚体相比,较好的水分条件下更多的植物残体淋溶物等可溶性成分在长期尺度上更有利于促进微团聚体中 MAOC 的形成^[28],尤其是当土壤碳含量尚未达到饱和时,凋落物分解后的碳则更容易进入土壤而形成 MAOC^[29],进而使其能够更长久地保存于土壤中。有研究表明:在降水量增加的情况下,土壤碳可能优先被储存在 MAOC 中,进而促进了稳定 SOC 的形成^[30-31];其次,水分的增加还可能使土壤中更多的阳离子进入土壤溶液,这些阳离子可能通过将带负电荷的黏粒表面和有机化合物之间进行“桥接”,进而形成更多的 MAOC^[32]。另有研究发现,可溶性成分含量较高的凋落物以及分解过程中较高的微生物量会导致其分解后形成更多的 MAOC^[33]。本研究中,SL 处理下 <0.053 mm 团聚体在 W_2 条件下的 SOC 净增加量高于 SR 处理,与该研究结果一致,说明同等条件下,易分解凋落物可能较难分解凋落物更容易形成 MAOC。

4 结论

半干旱区温性草原较高的土壤水分含量使土壤微生物量增加,促进了凋落物的分解,同时也有利于分解后的凋落物碳向土壤团聚体,尤其是 <0.053 mm 土壤团聚体中分配,从而形成更多的稳定性 MAOC,有利于草地 SOC 的固存,并提高 SOC 的稳定性。

参考文献 References:

- [1] Bontti E E, Decant J P, Munson S M, *et al.* Litter decomposition in grasslands of central North America (US Great Plains). *Global Change Biology*, 2009, 15(5): 1356—1363.
- [2] Chen Y C, Ma S Q, Lu X Y. Litter decomposition and nutrient dynamics of typical plant species in an alpine steppe ecosystem in northern Tibet. *Pratacultural Science*, 2019, 36(4): 1066—1073.
陈有超, 马书琴, 鲁旭阳. 藏北高寒草原典型物种凋落物分解与养分动态. *草业科学*, 2019, 36(4): 1066—1073.
- [3] Zhang G S, Huang G B. Soil organic carbon sequestration potential in cropland. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(2): 351—357.
张国盛, 黄高宝. 农田土壤有机碳固定潜力研究进展. *生态学报*, 2005, 25(2): 351—357.
- [4] Jin X X, Wang J K, Sun L J, *et al.* Progress of carbon cycle in farmland and sequestration in soil aggregates revealed by stable ¹³C isotope. *Soils*, 2017, 49(2): 217—224.
金鑫鑫, 汪景宽, 孙良杰, 等. 稳定 ¹³C 同位素示踪技术在农田土壤碳循环和团聚体固碳研究中的应用进展. *土壤*, 2017, 49(2): 217—224.
- [5] Epstein H E, Burke I C, Lauenroth W K. Regional patterns of decomposition and primary production rates in the US Great Plains. *Ecology*, 2002, 83(2): 320—327.
- [6] Wang M M, Hou F J. Influence of main factors on grass litter decomposition. *Pratacultural Science*, 2012, 29(10): 1631—1637.

- 王苗苗, 侯扶江. 草地凋落物分解的主要影响因素. 草业科学, 2012, 29(10): 1631—1637.
- [7] Thakur M P, Milcu A, Manning P, *et al.* Plant diversity drives soil microbial biomass carbon in grasslands irrespective of global environmental change factors. *Global Change Biology*, 2015, 21(11): 4076—4085.
- [8] Gao C B, Chang Z Q. Effects of water input on litter decomposition and nitrogen dynamics of desert vegetation in the Liangucheng National Nature Reserve, Gansu, China. *Journal of Desert Research*, 2021, 41(2): 145—152.
- 高承兵, 常宗强. 降水量对连古城自然保护区荒漠植被凋落物分解和氮状态的影响. 中国沙漠, 2021, 41(2): 145—152.
- [9] Chen Q, Li G, Li H D, *et al.* Soil moisture determines the consistency of organic matter decomposition in field and lab test patterns. *Catena*, 2024, 246: 108485.
- [10] Wen H Y, Fu H, Guo D. Influence of nitrogen addition on *Stipa bungeana* and *Heteropappus altaicus* litter decomposition and nutrient release in a steppe located on the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(6): 2014—2022.
- 文海燕, 傅华, 郭丁. 黄土高原典型草原优势植物凋落物分解及养分释放对氮添加的响应. 生态学报, 2017, 37(6): 2014—2022.
- [11] Lu W J, Qi J Y, Wu C, *et al.* Effects of mixed litter with different degrees of decomposition on the decomposition characteristics of semi-arid grassland in northern Shanxi. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(12): 47—57.
- 路文杰, 齐晋云, 吴聪, 等. 晋北半干旱草地不同分解程度凋落物混合对分解特征的影响. 草业学报, 2023, 32(12): 47—57.
- [12] Wang Q W, Yu D P, Dai L M, *et al.* Research progress in water use efficiency of plants under global climate change. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(12): 3255—3265.
- 王庆伟, 于大炮, 代力民, 等. 全球气候变化下植物水分利用效率研究进展. 应用生态学报, 2010, 21(12): 3255—3265.
- [13] Soong J L, Parton W J, Calderon F, *et al.* A new conceptual model on the fate and controls of fresh and pyrolyzed plant litter decomposition. *Biogeochemistry*, 2015, 124: 27—44.
- [14] Haddix M L, Paul E A, Cotrufo M F. Dual, differential isotope labeling shows the preferential movement of labile plant constituents into mineral-bonded soil organic matter. *Global Change Biology*, 2016, 22(6): 2301—2312.
- [15] Chung H, Grove J H, Six J. Indications for soil carbon saturation in a temperate agroecosystem. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(4): 1132—1139.
- [16] Guo X, Luo H, Xu X M, *et al.* Effects of litter decomposition with different qualities on soil organic carbon content and its stability in grassland on the Loess Plateau. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(5): 83—93.
- 郭鑫, 罗欢, 许雪梅, 等. 不同品质凋落物分解对黄土高原草地土壤有机碳及其稳定性的影响. 草业学报, 2023, 32(5): 83—93.
- [17] Lavalley J M, Conant R T, Paul E A, *et al.* Incorporation of shoot versus root-derived ^{13}C and ^{15}N into mineral-associated organic matter fractions: Results of a soil slurry incubation with dual-labelled plant material. *Biogeochemistry*, 2018, 137(3): 379—393.
- [18] Swift M J, Heal O W, Anderson J M. *Decomposition in terrestrial ecosystems*. Berkeley: University of California Press, 1979.
- [19] Yang L L, Gong J R, Liu M, *et al.* Advances in the effect of nitrogen deposition on grassland litter decomposition. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2017, 41(8): 894—913.
- 杨丽丽, 龚吉蕊, 刘敏, 等. 氮沉降对草地凋落物分解的影响研究进展. 植物生态学报, 2017, 41(8): 894—913.
- [20] Yan Z Q, Qi Y C, Peng Q, *et al.* Advances in the effects of simulated precipitation and nitrogen deposition on grassland biomass. *Acta Agrestia Sinica*, 2017, 25(6): 1165—1170.
- 闫钟清, 齐玉春, 彭琴, 等. 模拟降水和氮沉降增加对草地生物量影响的研究进展. 草地学报, 2017, 25(6): 1165—1170.
- [21] Dirks I, Navon Y, Kanas D. Atmospheric water vapor as driver of litter decomposition in Mediterranean shrubland and grassland during rainless seasons. *Global Change Biology*, 2010, 16(10): 2799—2812.
- [22] Brandt L A, King J Y, Hobbie S E, *et al.* The role of photodegradation in surface litter decomposition across a grassland ecosystem precipitation gradient. *Ecosystems*, 2010, 13(5): 765—781.
- [23] Brown M E, Chang M C. Exploring bacterial lignin degradation. *Current Opinion in Chemical Biology*, 2014, 19(1): 1—7.
- [24] Abiven S, Menasseri S, Chenu C. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability—A literature analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(1): 1—12.
- [25] Cotrufo M F, Wallenstein M D, Boot C M, *et al.* The microbial efficiency-matrix stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: Do labile plant inputs form stable soil organic matter. *Global Change Biology*, 2013, 19(4): 988—995.

-
- [26] Castro H F, Classen A T, Austin E E, *et al.* Soil microbial community responses to multiple experimental climate change drivers. *Applied & Environmental Microbiology*, 2010, 76(4): 999–1007.
- [27] Wang B R, An S S, Liang C, *et al.* Microbial necromass as the source of soil organic carbon in global ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 162: 108422.
- [28] Sokol N W, Bradford M A. Microbial formation of stable soil carbon is more efficient from belowground than aboveground input. *Nature Geoscience*, 2019, 12(1): 46–53.
- [29] Georgiou K, Jackson R B, Vinduková O, *et al.* Global stocks and capacity of mineral-associated soil organic carbon. *Nature Communications*, 2022, 13: 3797.
- [30] Haddix M L, Gregorich E G, Helgason B L, *et al.* Climate, carbon content, and soil texture control the independent formation and persistence of particulate and mineral-associated organic matter in soil. *Geoderma*, 2020, 363: 114160.
- [31] Katherine S R, Michael B, John M B, *et al.* Thirty years of increased precipitation modifies soil organic matter fractions but not bulk soil carbon and nitrogen in a mesic grassland. *Soil Biology and Biochemistry*, 2023, 185: 109145.
- [32] Clarholm M, Skjellberg U, Rosling A. Organic acid induced release of nutrients from metal-stabilized soil organic matter—The unbutton model. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 84: 168–176.
- [33] Laub M, Samuel S, Patma V, *et al.* Litter quality and microbes explain aggregation differences in a tropical sandy soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2022, 22(1): 848–860.