

DOI:10.11686/cyxb2025177

http://cyxb.magtech.com.cn

蒋玉奇, 郭鑫, 姜佳昌, 等. 土壤碳饱和度对黄土高原温性草原凋落物分解及土壤碳固存的影响. 草业学报, 2026, 35(3): 43—51.

JIANG Yu-qi, GUO Xin, JIANG Jia-chang, et al. Impact of grassland soil carbon saturation on litter decomposition and soil carbon sequestration. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(3): 43—51.

土壤碳饱和度对黄土高原温性草原凋落物分解及土壤碳固存的影响

蒋玉奇¹, 郭鑫², 姜佳昌³, 刘兴明³, 梁春燕⁴, 文海燕¹, 牛得草¹, 李旭东^{1*}

(1. 草种创新与草地农业生态系统全国重点实验室, 兰州大学草地农业科技学院, 甘肃 兰州 730020; 2. 甘肃省兰州生态环境监测中心, 甘肃 兰州 730000; 3. 甘肃省草原技术推广总站, 甘肃 兰州 730010; 4. 甘肃省兰草新生态科技有限公司, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 植物凋落物是土壤有机碳(SOC)的重要来源, SOC的形成及其稳定性不仅与植物碳输入直接相关, 同时也受到土壤碳饱和度的影响。本研究选取黄土高原温性草原优势物种长芒草的叶片和根系为凋落物材料, 将其与不同碳饱和度的土壤(SOC含量分别为9.02, 5.28和2.64 g·kg⁻¹)在室内共同培养3年, 通过分析不同碳饱和度条件下凋落物的分解速率以及全土和各粒径土壤团聚体中SOC的变化, 以明确土壤碳饱和度对凋落物分解以及SOC固存的影响。结果表明: 随着土壤碳饱和度的降低, 土壤微生物量碳逐渐增加, 凋落物分解速率显著升高, 全土及各粒径团聚体中的新碳形成效率也逐渐升高, SOC含量显著增加。说明碳饱和度较低的土壤对外源有机碳具有更高的固存效率。在0.25~2.00 mm、0.053~0.250 mm和<0.053 mm这3个粒径土壤团聚体组分中, 随着土壤碳饱和度的降低, 凋落物碳分解后更多地向<0.053 mm的团聚体分配, 进而有利于生成稳定性高的矿物结合态SOC。

关键词: 凋落物; 土壤碳饱和度; 土壤团聚体; 土壤碳稳定性

Impact of grassland soil carbon saturation on litter decomposition and soil carbon sequestration

JIANG Yu-qi¹, GUO Xin², JIANG Jia-chang³, LIU Xing-ming³, LIANG Chun-yan⁴, WEN Hai-yan¹, NIU De-cai¹, LI Xu-dong^{1*}

1. State Key Laboratory of Herbage Improvement and Grassland Agro-ecosystems, College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China; 2. Lanzhou Monitoring Center of Ecology and Environment of Gansu Province, Lanzhou 730000, China; 3. Gansu Grassland Technology Promotion Station, Lanzhou 730010, China; 4. Gansu Lancao New Ecological Technology Corporation, Lanzhou 730050, China

Abstract: Plant litter is an important source of soil organic carbon (SOC). The formation and stability of SOC are not only directly related to plant carbon input but also affected by soil carbon saturation. In this study, leaves and roots of *Stipa bungeana*, a dominant species in the temperate grassland of the Loess Plateau, were selected as litter materials. They were co-cultured in the laboratory for 3 years with soils of different carbon saturation levels (with SOC contents of 9.02, 5.28, and 2.64 g·kg⁻¹, respectively). The aim was to clarify the impact of soil carbon

收稿日期: 2025-05-07; 改回日期: 2025-07-10

基金项目: 甘肃省自然科学基金重点项目(22JR5RA400), 甘肃省自然科学基金项目(22JR5RA464), 2023年提前批中央财政林业改革发展资金草原科技支撑项目“河西走廊脆弱生态区草原生态健康评估”和甘肃省林业和草原局甘肃省草原监测评价科技支撑项目((2021)794号)资助。

作者简介: 蒋玉奇(2001—), 男, 山东泰安人, 在读硕士。E-mail: jiangyq2023@lzu.edu.cn

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

saturation on litter decomposition and SOC sequestration by analyzing the decomposition rate of litter and the changes in SOC in bulk soil and soil aggregates of various particle sizes under different carbon saturation conditions. The results showed that with decrease in soil carbon saturation, soil microbial biomass carbon gradually increased, while the litter decomposition rate significantly increased, the new carbon formation efficiency (NCE) in the bulk soil and the proportions of aggregates of all particle sizes also gradually increased, and the SOC content significantly increased. This indicates that soils with lower carbon saturation have a higher sequestration efficiency for exogenous organic carbon. Among the three soil aggregate fractions of decreasing size, 0.25–2.00 mm, 0.053–0.25 mm, and <0.053 mm, as soil carbon saturation decreased, more decomposed litter carbon was allocated to the <0.053 mm aggregates, which is conducive to the formation of mineral-associated organic carbon with high stability.

Key words: litter; soil carbon saturation; soil aggregates; soil carbon stability

土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)是评价土壤质量的关键指标,对调节土壤养分循环和土壤功能起着重要的作用^[1]。凋落物是生态系统生产力的重要组成部分,也是SOC的重要来源,其降解及养分释放是生态系统生物地球化学循环的重要环节,同时对陆地生态系统碳平衡产生重要影响^[2–3]。凋落物的分解速率主要取决于其化学组成以及水、热等环境因素,另外,土壤碳饱和度可能会影响凋落物的分解过程^[4]。土壤中碳贮量的渐进增加或随着碳输入的增加而碳贮量没有增加,这种现象被定义为土壤碳饱和^[4]。在不同的土壤碳饱和度条件下,凋落物的分解速率及其特征可能会有所不同,但目前关于凋落物分解的研究多聚焦于环境因素^[5]、生物因素^[6]、凋落物品质^[2]对其分解速率、养分释放的影响等方面,少有研究关注不同土壤碳饱和度对凋落物分解的影响。

土壤团聚体是土壤固碳功能的重要载体^[7]。不同粒径团聚体对SOC的保护机制不同,大团聚体中的SOC主要受物理保护,周转速率较快;而小团聚体中SOC以化学保护为主,周转速率较慢,能够在土壤中长期保存^[8–9]。然而,SOC在不同粒径土壤团聚体中的固存会受到土壤碳饱和度的影响。通常,增加外源碳的输入会促使土壤中SOC的固存量增加^[10–11]。然而,随着SOC的增加,土壤碳趋于饱和,土壤碳库对外源碳输入的响应会逐渐减缓^[12],即土壤团聚体在保护SOC方面的能力可能会逐渐降低,从而限制了土壤固存更多SOC的能力。然而,关于草地土壤碳饱和度对土壤固碳能力影响的研究还较少。

本研究以陇中黄土高原温性草原优势物种长芒草(*Stipa bungeana*)作为对象,选取长芒草叶片与根系作为试验材料,与不同碳饱和度的土壤共同培养3年,以期明确:1)不同土壤碳饱和度对凋落物分解的影响;2)不同土壤碳饱和度下,凋落物分解后对土壤SOC以及不同团聚体组分SOC的影响,进而阐明土壤碳饱和度对SOC固存的影响及其机制。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于兰州大学半干旱气候与环境观测站(Semi-Arid Climate and Environment Observatory of Lanzhou University, SACOL),地理坐标为35°57' N, 104°09' E,海拔1965 m。年平均气温6.7 °C,年降水量382 mm。植被类型为温性草原,土壤为灰钙土。主要物种包括长芒草、苦豆子(*Sophora alopecuroides*)和赖草(*Leymus secalinus*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 凋落物培养 于2020年秋季植物枯黄时期(10月中旬),多点采集研究区优势植物长芒草叶片(*S. bungeana* leaves, SL)和根系(*S. bungeana* roots, SR)。样品洗净、风干后,剪成1 cm长段作为凋落物材料备用。取部分凋落物样品用球磨机(LPB-2L, 中国)粉碎,然后用元素分析仪(Elementar Vario ELIII, Elementar, 德国)测定碳(carbon, C)、全氮(total nitrogen, TN)含量。根据前期大面积详细的土壤调查和分析结果^[13],于同一平整的草地范围内(半径小于100 m)采集多个0~10 cm土层土壤样品(每个土壤样品为多点采集的混合土样),将采

集的土样剔除杂物后风干并过 2 mm 筛,取部分样品过 0.149 mm 筛,分析 SOC 含量。依据分析结果,选取 3 个不同 SOC 含量的土壤样品作为本研究高、中、低碳饱和度处理的样品,并用于本研究中凋落物的培养:高饱和度(C_1 ,SOC 含量为 $9.02 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,为分析中出现的 SOC 含量最高值)、中饱和度(C_2 ,SOC 含量为 $5.28 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)和低饱和度(C_3 ,SOC 含量为 $2.64 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,为分析中出现的 SOC 含量最低值)。分析结果表明,3 种不同碳饱和度土壤中的土壤团聚体组成无显著差异。

将两种凋落物材料分别与 3 种不同 C 饱和度的土壤共同培养。称取 80.00 g 过 2 mm 筛的土样放入小烧杯中,加蒸馏水将土壤水分含量调节至研究区年平均土壤含水量(质量含水量为 7.16%)。根据不同凋落物碳含量分析结果,称取一定量的 SL 和 SR 样品(相当于 2.00 g 碳)置于烧杯中的土壤表层,将烧杯放入培养瓶中,于 25 °C 的黑暗条件下培养 3 年。为减少水分损失造成的影响,对烧杯每周称重一次,依据重量损失添加水分。培养试验共有 9 个处理:SL- C_1 、SL- C_2 、SL- C_3 、SR- C_1 、SR- C_2 、SR- C_3 、CK- C_1 、CK- C_2 、CK- C_3 ,其中 CK(无凋落物添加)为对照。每个处理设置 12 个重复(培养期间共进行破坏性取样 4 次,每次取 3 个重复)。培养期间定期打开培养瓶盖通气以降低瓶内 CO_2 浓度。

1.2.2 样品分析 于培养的第 60、365、730 和 1095 天将小烧杯中的残留凋落物全部取出,将黏附在凋落物上的土粒小心清除干净,在烘箱中于 65 °C 烘至恒重并称重。取部分样品用球磨仪粉碎,用元素分析仪(Elementar Vario ELIII, Elementar, 德国)测定其碳、全氮(TN)含量。烧杯中的土壤混匀后取部分分析土壤微生物量碳含量(氯仿熏蒸法)^[14]。其余土样风干后,用湿筛法^[15]将土壤筛分为 3 个团聚体粒级:0.25~2.00 mm、0.053~0.250 mm 和 <0.053 mm,各粒径土壤团聚体样品用元素分析仪分析其 SOC 和 TN 含量。

1.2.3 CO_2 释放速率测定 培养过程中,每隔 7 d(第 1 月)、15 d(第 2~3 月)、30 d(第 3~10 月)和 60 d(第 10~36 月)用土壤碳通量测量系统(EGM-5, 美国)测量培养瓶中的 CO_2 释放速率。

1.3 结果计算

根据每次取样时剩余凋落物干重和培养前凋落物干重计算凋落物干物质残留率;用 Olson 公式计算凋落物分解系数^[16]:

$$\frac{X_t}{X_0} = a \cdot e^{-kt} \quad (1)$$

式中: X_t 表示凋落物在分解 t 时间后的质量(g), X_0 表示凋落物样品培养前的质量(g), a 为常数, k 为分解系数。根据土壤及某碳库组分中 SOC 增加的数量与凋落物碳的损失量计算新碳形成效率(new carbon formation efficiency, NCE, 指单位凋落物分解后损失的碳被转化为 SOC 的百分数)。

1.4 数据处理

用 SPSS 26.0 软件进行单因素方差分析,采用 LSD 方法检验不同碳饱和度处理间差异的显著性($P < 0.05$),采用 SigmaPlot 14.0 绘图。

2 结果与分析

2.1 凋落物干物质残留率

在同一土壤碳饱和度处理下,凋落物干物质残留率均随培养时间的增加显著下降($P < 0.05$, 图 1)。培养 1095 d 后,干物质残留率随土壤碳饱和度降低而显著降低($P < 0.05$)。SL 的干物质残留率在 C_1 、 C_2 和 C_3 处理下分别为 33.80%、29.29%、24.17%(图 1A),SR 的干物质残留率分别为 43.66%、37.86%、32.60%(图 1B)。

2.2 凋落物分解速率

分解 1095 d 后,不同碳饱和度下 SL 和 SR 的分解系数 k 值变幅分别为 0.020~0.032 和 0.019~0.027,且均随土壤碳饱和度的降低而逐渐升高(表 1)。

2.3 土壤 C、N 含量

C_1 饱和度下,SL 和 SR 处理的 SOC 含量在培养过程中无显著变化($P > 0.05$)(图 2A); C_2 和 C_3 饱和度下,随培养时间的增加,两种凋落物处理的 SOC 含量则显著增加($P < 0.05$)(图 2C 和图 2E)。培养过程中,3 种碳饱和度下 CK 处理的 SOC 含量均无显著变化($P > 0.05$)。培养 1095 d 后, C_2 饱和度下 SL 和 SR 处理的 SOC 含量分别较

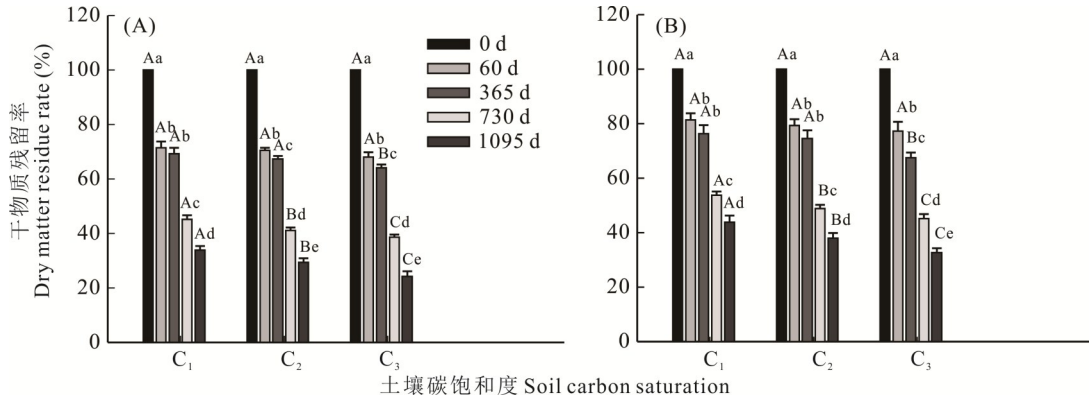


图1 凋落物干物质残留率

Fig. 1 Dry matter residue rates of litter

图A和图B分别为长芒草叶片和根系在不同土壤碳饱和度下的干物质残留率。不同大写字母表示同一培养时间不同碳饱和度间差异显著,不同小写字母表示同一碳饱和度下不同培养时间之间差异显著(平均值±标准误, $P < 0.05$)。Fig. A and Fig. B show the dry matter residue rates of *S. bungeana* leaves and *S. bungeana* roots under different soil carbon saturations, respectively. Different capital letters indicate significant differences among different carbon saturations at the same incubation time, and different lowercase letters indicate significant differences among different incubation times under the same carbon saturation level [mean±standard error (SE), $P < 0.05$].

表1 凋落物分解系数

Table 1 Litter decomposition coefficient

分解时间 Decomposition time (d)	凋落物 Litter	土壤碳饱和度 Soil carbon saturation	Olson 拟合方程 Olson fitting equation	分解系数 Decomposition coefficient (k)	P 值 P value
1095	SL	C ₁	$y = 4.5816e^{-0.0201t}$	$0.0201 \pm 0.004c$	< 0.05
		C ₂	$y = 4.5816e^{-0.0287t}$	$0.0287 \pm 0.008b$	< 0.05
		C ₃	$y = 4.5816e^{-0.0319t}$	$0.0319 \pm 0.002a$	< 0.05
	SR	C ₁	$y = 4.0804e^{-0.0191t}$	$0.0191 \pm 0.003c$	< 0.05
		C ₂	$y = 4.0804e^{-0.0222t}$	$0.0222 \pm 0.005b$	< 0.05
		C ₃	$y = 4.0804e^{-0.0270t}$	$0.0270 \pm 0.007a$	< 0.05

注:不同小写字母表示同一凋落物下不同碳饱和度间差异显著(平均值±标准误, $P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among different carbon saturation levels under the same litter [mean±standard error (SE), $P < 0.05$].

CK增加了18.62%和15.33%。C₃饱和度下SL和SR处理的SOC含量分别较CK增加了78.26%和59.86%。土壤中的TN含量变化与SOC趋势相一致(图2B,D和F)。

2.4 各粒径土壤团聚体质量及其SOC含量

培养1095 d后,部分团聚体组分的质量在培养过程中发生显著变化(表2)。C₁饱和度下0.053~0.250 mm和<0.053 mm团聚体中SL和SR的SOC含量较CK无显著变化($P > 0.05$),而0.25~2.00 mm团聚体中SL和SR的SOC含量较CK显著增加($P < 0.05$)。C₂饱和度下,与CK相比,0.25~2.00 mm和<0.053 mm团聚体中,SL和SR的SOC含量显著增加($P < 0.05$)。C₃饱和度条件下,各粒径团聚体组分中SL和SR的SOC含量较CK均显著增加($P < 0.05$)。培养1095 d后,在<0.053 mm团聚体中,SL和SR处理在C₂饱和度下的SOC含量较CK分别增加44.8%和32.0%,而在C₃饱和度下的SOC含量较CK分别增加101.9%和89.1%。3种碳饱和度处理下CK中SOC含量与初始值相比无显著变化($P > 0.05$)。

2.5 土壤及各团聚体组分的新碳形成效率(NCE)

分解1095 d后,同一粒径团聚体中,C₂和C₃饱和度下的NCE显著高于C₁($P < 0.05$)(图3)。C₂和C₃处理下,<0.053 mm团聚体中的NCE显著高于其他两个团聚体组分,其中C₃处理下<0.053 mm团聚体的NCE显著高于全土($P < 0.05$)。

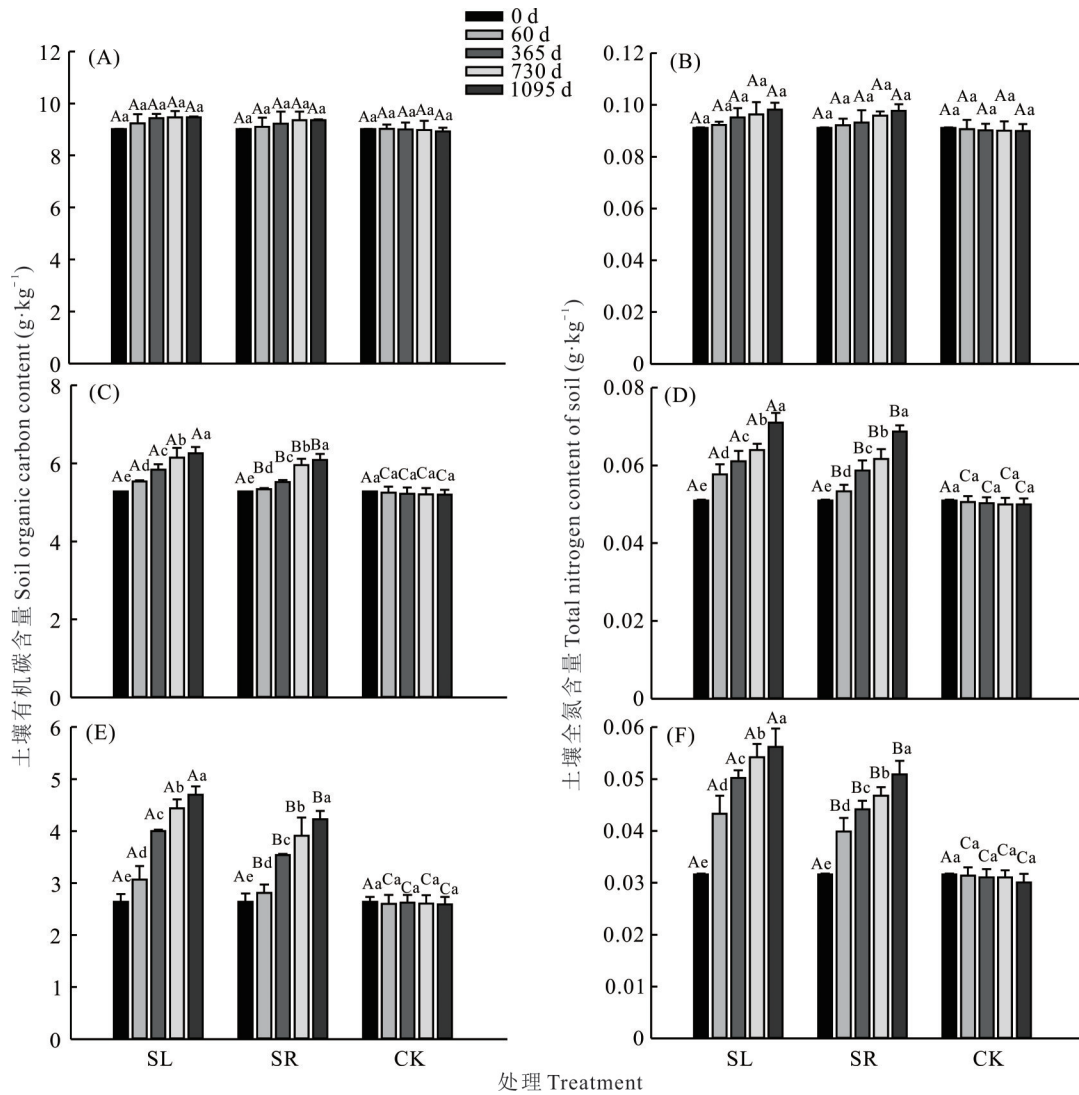


图 2 不同碳饱和度处理下土壤有机碳和土壤全氮含量变化

Fig. 2 Changes of soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN) contents under different carbon saturation treatments

图 A、图 C 和图 E 分别为 C₁、C₂ 和 C₃ 处理下的土壤有机碳含量变化, 图 B、图 D 和图 F 分别为 C₁、C₂ 和 C₃ 处理下的土壤全氮含量变化。不同大写字母表示同一培养时间不同凋落物处理间差异显著, 不同小写字母表示同一凋落物处理下不同培养时间之间差异显著 (平均值 ± 标准误, $P < 0.05$)。Fig. A, Fig. C and Fig. E show the changes in soil organic carbon content under the treatments of C₁, C₂, and C₃, respectively, while Fig. B, Fig. D and Fig. F show the corresponding changes in soil total nitrogen content. Different capital letters indicate significant differences among litter treatments at the same incubation time, and different lowercase letters indicate significant differences among different incubation times at the same litter treatment [mean ± standard error (SE), $P < 0.05$].

2.6 土壤微生物量碳含量

不同培养时间, 除 CK 外各凋落物处理下土壤微生物量碳含量均随土壤碳饱和度的降低而显著增加, 且显著高于 CK ($P < 0.05$, 图 4)。分解 1095 d 后, SL 在 C₁、C₂ 和 C₃ 处理下的微生物量碳含量分别为 95.2、116.1 和 133.7 mg·kg⁻¹, SR 在 C₁、C₂ 和 C₃ 处理下分别为 67.8、89.5 和 101.3 mg·kg⁻¹。

2.7 CO₂ 释放速率

分解前期 (0~148 d), SL 和 SR 的 CO₂ 释放速率均呈现出 C₁ < C₂ < C₃ 的趋势 (图 5)。C₂ 和 C₃ 处理下的 CO₂ 释放速率在前期逐渐升高, 在第 21 天前达到最高值, 然后逐渐降低。而 C₁ 处理下的 CO₂ 释放速率在分解前期即呈逐渐降低的趋势。CK 处理的 CO₂ 释放速率在整个培养期间变幅较小。238 d 后, 各处理 CO₂ 释放速率趋于一致。

表2 土壤团聚体质量及其SOC含量

Table 2 Mass and SOC content of soil aggregates

土壤碳饱和度 Soil carbon saturation	凋落物 Litter	分解时间 Decomposition time (d)	0.25~2.00 mm		0.053~0.250 mm		<0.053 mm	
			团聚体质量 Mass of soil aggregates (g)	土壤有机碳含量 Soil organic carbon ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	团聚体质量 Mass of soil aggregates (g)	土壤有机碳含量 Soil organic carbon ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	团聚体质量 Mass of soil aggregates (g)	土壤有机碳含量 Soil organic carbon ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
C ₁	BV	0	13.62±0.07a	9.06±0.10b	20.42±0.21b	9.03±0.03ab	14.84±0.11b	9.63±0.09a
	SL	1095	13.59±0.06a	9.61±0.07a	20.56±0.02b	9.22±0.07a	14.67±0.05b	9.71±0.09a
	SR	1095	13.40±0.08a	9.52±0.27a	20.33±0.15b	8.92±0.20b	15.98±0.47a	9.74±0.05a
	CK	1095	13.57±0.23a	9.01±0.16b	21.07±0.25a	9.04±0.28ab	15.33±0.24ab	9.54±0.02a
C ₂	BV	0	13.47±0.11a	5.46±0.13d	21.36±0.09a	5.41±0.20c	15.16±0.27b	5.42±0.17d
	SL	1095	13.51±0.12a	6.61±0.13c	21.10±0.12a	5.27±0.30c	14.67±0.02b	7.43±0.19b
	SR	1095	12.85±0.22b	6.32±0.25c	21.24±0.02a	5.72±0.27c	15.77±0.10a	6.77±0.11c
	CK	1095	13.81±0.21a	5.30±0.12d	20.87±0.12b	5.22±0.21c	14.59±0.04b	5.13±0.21d
C ₃	BV	0	11.27±0.09c	3.31±0.21f	20.90±0.14b	2.32±0.12f	16.88±0.09a	2.79±0.10e
	SL	1095	12.57±0.07a	5.01±0.10e	21.23±0.13ab	3.61±0.07d	15.22±0.09b	5.35±0.12d
	SR	1095	12.17±0.12b	4.87±0.12e	21.17±0.21ab	3.12±0.31e	15.92±0.15b	5.01±0.12d
	CK	1095	11.11±0.09c	3.22±0.14f	21.53±0.16a	2.27±0.23f	16.69±0.08a	2.65±0.09e

注: BV: 初始值 Value before incubation。表中数据为受试土样(50.00 g)中某团聚体组分质量和土壤有机碳含量。不同小写字母表示同一碳饱和度和不同凋落物处理及初始值间差异显著(平均值±标准误, $P<0.05$)。

Note: The data in the Table are the mass of a certain aggregate fraction and the soil organic carbon content in the tested soil sample (50.00 g). Different lowercase letters indicate significant differences among different litter treatments and the initial values under the same carbon saturation level [mean±standard error (SE), $P<0.05$].

3 讨论

土壤中SOC的固存主要受到土壤碳输入和输出之间动态平衡的影响^[17],同时还受到土壤碳饱和度的影响^[12, 18]。本研究中将凋落物与3种不同碳饱和度的土壤培养3年后,随着碳饱和度的降低,凋落物干物质残留率逐渐降低,分解系数逐渐升高,说明在土壤碳饱和度尚有较大的空间时,凋落物具有较高的分解速率。这可能是由于在土壤碳饱和度较低时,微生物活性较低,凋落物的添加为微生物的活动提供了能源,使微生物的活性增强,进而导致凋落物分解加快^[19];相反,当土壤碳含量距离碳饱和水平越近时,其固存外源新碳的能力下降,从而降低了凋落物的分解速率。本研究结果与岳可欣等^[20]的研究结果一致。

近期研究表明,土壤碳饱和度在新的SOC形成中起着关键作用^[21]。当土壤碳含量较高时,碳输入并不会导致SOC含量显著增加^[22-23]。Paustian等^[24]的研究也显示,在有机碳含量较高的土壤中,当外源有机碳输入量成倍增加时,土壤碳含量几乎没有增加。这些研究表明,土壤固存外源新碳的能力很大程度上

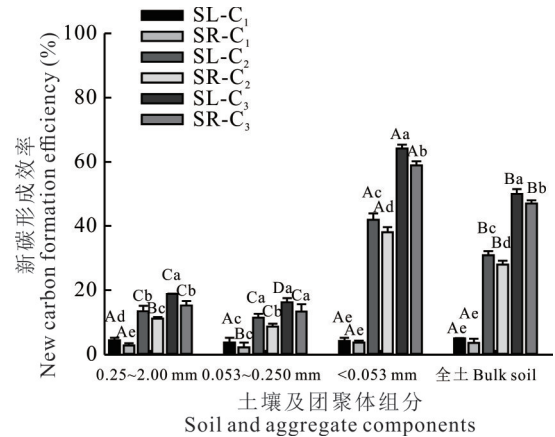


图3 土壤及各团聚体组分的新碳形成效率

Fig. 3 New carbon formation efficiency (NCE) of soil and different soil aggregate components (1095 d)

不同大写字母表示同一培养处理下不同粒径团聚体组分和全土间差异显著,不同小写字母表示同一粒径团聚体或全土不同处理间差异显著(平均值±标准误, $P<0.05$)。Different capital letters indicate significant differences among aggregate fractions of different particle sizes and the whole soil under the same treatments, and different lowercase letters indicate significant differences among different treatments under the same aggregate fractions of different particle sizes and the bulk soil [mean±standard error (SE), $P<0.05$].

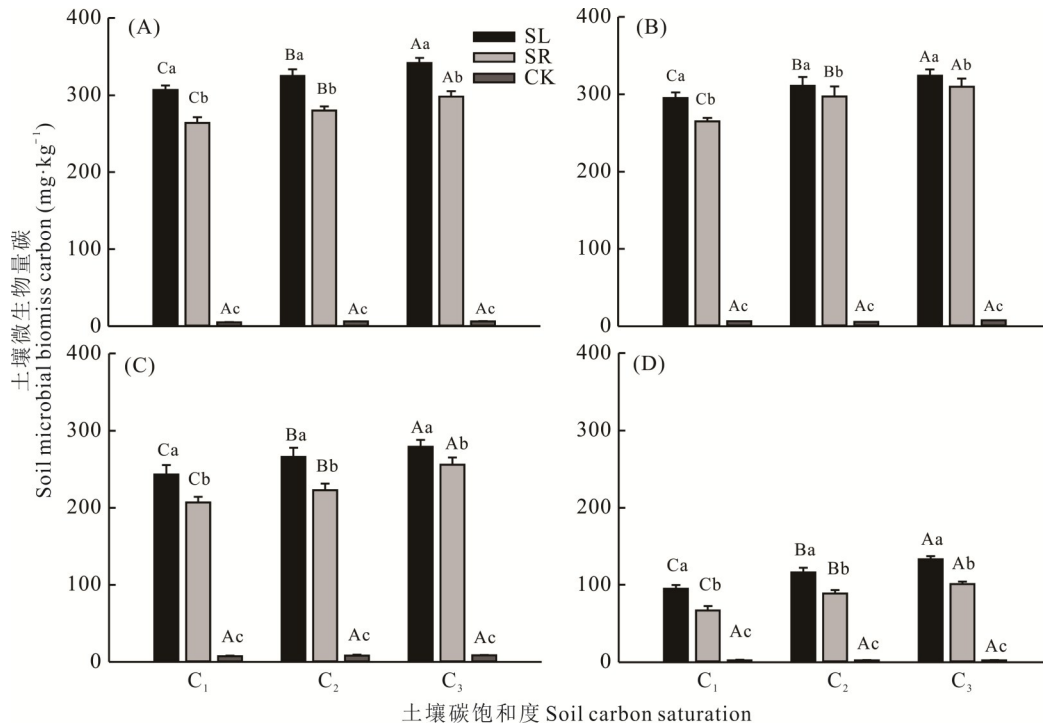


图 4 土壤微生物量碳含量

Fig. 4 Soil microbial biomass carbon content

图 A~D 分别为培养 60、365、730、1095 d 时土壤微生物量碳含量。不同大写字母表示同一凋落物处理下不同碳饱和度间差异显著,不同小写字母表示同一碳饱和度处理下不同凋落物处理间差异显著(平均值±标准误, $P < 0.05$)。Figures A~D show the soil microbial biomass carbon content at the cultivation times of 60, 365, 730, and 1095 days, respectively. Different capital letters indicate significant differences among different carbon saturation levels under the same litter treatments, and different lowercase letters indicate significant differences among different litter treatments under the same carbon saturation level [mean±standard error (SE), $P < 0.05$].

受到土壤碳饱和度的影响。在 SOC 含量丰富的土壤中,通常 SOC 含量并不随碳的输入而增加,而是稳定在某一特定水平。本研究中,培养 3 年后,高碳饱和度处理下 (C_1) 的 SOC 含量随凋落物分解时间的增加无显著变化 ($P > 0.05$),而在较低碳饱和度处理下 (C_2 和 C_3),SOC 含量随凋落物分解时间的增加均显著增加,这说明高碳饱和度土壤对外源新碳的固存效率较低,而只有土壤碳饱和度尚有较大的变化空间时,才有可能潜在地固存更多的 SOC^[12]。

土壤中 SOC 的数量及其稳定性很大程度上取决于土壤中受保护 SOC 的绝对含量及其相对比例^[25]。土壤团聚体是土壤结构的基本单元,有助于维持良好的土壤结构及其稳定性^[15]。<0.053 mm 的 SOC 是土壤最稳定的碳库,受到黏土矿物较强的物理、化学及生物化学保护作用,不易被微生物利用而固定在土壤中形成稳定的矿物结合态有机碳(mineral-associated organic carbon, MAOC)^[26-27]。MAOC 作为微团聚体的复合结构单元,是由凋落物经微生物分解后的产物与土壤矿物通过化学键结合而形成,可促进有机碳的稳定并防止微生物和酶的分解^[28]。研究表明,只有在土壤碳饱和度尚有变化空间时,土壤矿物表面才具有足够的与有机碳相互作用的结合位点^[29],随着碳输入的增加,土壤团聚体和矿物表面在保护 SOC 免受微生物分解方面的能力逐渐降低,从而

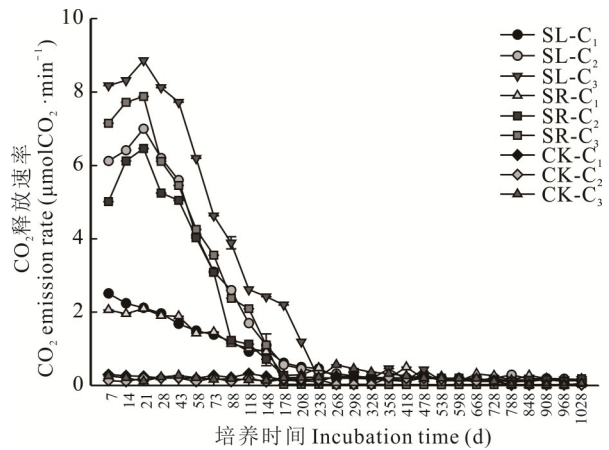


图 5 不同处理下的 CO₂ 释放速率

Fig. 5 CO₂ emission rates under different treatments

限制了土壤固存外源碳的能力^[30]。本研究结果表明,分解3年后,C₃处理下的新碳形成效率(NCE)最高,同时该处理下CO₂释放速率和微生物量碳含量也高于C₁和C₂。在C₃饱和度土壤中,<0.053 mm团聚体的NCE均显著高于其他两个粒径的团聚体组分以及全土水平($P < 0.05$),进一步说明了在SOC含量较低时,土壤具备更高的潜在固碳能力,且优先形成MAOC并贮存在微团聚体中。另外,高C饱和度处理下(C₁),0.053~0.250 mm和<0.053 mm团聚体中SOC含量随培养时间的增加无显著变化,而在0.25~2.00 mm团聚体中SOC含量随培养时间的增加均显著增加,这可能是由于随着外源碳的输入,土壤各碳库组分表现出分级饱和的现象^[31],即土壤中的不同团聚体组分存在不同的碳饱和值,通常会按照粒径由小到大的顺序逐级饱和,即随着外源碳的输入,土壤中的稳定性组分有机碳先达到“饱和”状态^[11,32]。当土壤碳逐渐增加,MAOC组分可能先行达到碳饱和状态,此时外源碳的输入继续增加可能会使其被固存在物理保护的团聚体组分中。本研究中,C₁处理下,0.053~0.250 mm和<0.053 mm团聚体中SOC含量可能已经达到或接近饱和状态,进而对外源碳的输入响应不敏感。

4 结论

土壤碳饱和度显著影响凋落物的分解速率和土壤对外源有机碳的固存。凋落物在不同碳饱和度土壤中具有不同的分解速率,随着土壤碳饱和度的降低,微生物量碳逐渐增加,凋落物分解速率逐渐升高,导致SOC含量显著增加。在0.25~2.00 mm、0.053~0.250 mm和<0.053 mm这3个土壤团聚体组分中,随着土壤碳饱和度的降低,分解后的凋落物碳更多地向<0.053 mm团聚体分配而生成矿物结合态有机碳。

参考文献 References:

- [1] Salifou T, Lamourdia T, Babou A B. Organic carbon fractional distribution and saturation in tropical soils of West African savannas with contrasting mineral composition. *Catena*, 2020, 190: 104550.
- [2] Cotrufo M F, Soong J L, Horton A J M, *et al.* Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss. *Nature Geoscience*, 2015, 8(10): 776–779.
- [3] Yu W C, Zhao J N, Li G, *et al.* Litter decompositions of three dominant plants in the *Stipa baicalensis* grassland of Inner Mongolia. *Acta Agrestia Sinica*, 2014, 22(3): 502–510.
于雯超, 赵建宁, 李刚, 等. 内蒙古贝加尔针茅草原3种主要植物凋落物分解特征. *草地学报*, 2014, 22(3): 502–510.
- [4] West T O, Six J. Considering the influence of sequestration duration and carbon saturation on estimates of soil carbon capacity. *Climatic Change*, 2007, 80(1/2): 25–41.
- [5] Yang Y, Tian L H, Tian H Q, *et al.* Effect of climate warming on decomposition of plant litter in alpine meadow pastures in Northwestern Sichuan. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(10): 35–46.
杨阳, 田莉华, 田浩琦, 等. 增温对川西北高寒草甸草场植物凋落物分解的影响. *草业学报*, 2020, 29(10): 35–46.
- [6] Li X Q, Dong W H, Song Y, *et al.* Soil mesofauna participating in driving home-field advantage differ between litter mass loss and nutrient release. *Applied Soil Ecology*, 2021, 163: 103909.
- [7] Liu D D, Ju W L, Jin X L, *et al.* Associated soil aggregate nutrients and controlling factors on aggregate stability in semiarid grassland under different grazing prohibition timeframes. *Science of the Total Environment*, 2021, 777: 146104.
- [8] Veloso M G, Angers D A, Chantigny M H, *et al.* Carbon accumulation and aggregation are mediated by fungi in a subtropical soil under conservation agriculture. *Geoderma*, 2020, 363: 114159.
- [9] Yu J, Miao S J, Qiao Y F. The stabilization mechanism of different types of soil aggregates. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(14): 89–95.
余洁, 苗淑杰, 乔云发. 不同类型土壤团聚体稳定机制的研究. *中国农学通报*, 2022, 38(14): 89–95.
- [10] Six J, Feller C, Denef K. *et al.* Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils-effects of no-tillage. *Agronomie*, 2002, 22(7): 755–775.
- [11] Gulde S, Chung H, Amelung W, *et al.* Soil carbon saturation controls labile and stable carbon pool dynamics. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(3): 605–612.
- [12] Lucas A T R, Sandro J G, Jeferson D, *et al.* Carbon saturation deficit and litter quality drive the stabilization of litter-derived C in mineral-associated organic matter in long-term no-till soil. *Catena*, 2022, 219: 106590.
- [13] Li X D, Fu H, Li X D, *et al.* Effects of land-use regimes on carbon sequestration in the Loess Plateau, northern China. *New*

- Zealand Journal of Agricultural Research, 2008, 51(1): 45–52.
- [14] Haddix M L, Paul E A, Cotrufo M F, *et al.* 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] Zhang X R, Zhang W Q, Sai X, *et al.* Grazing altered soil aggregates, nutrients and enzyme activities in a *Stipa kirschnii* steppe of Inner Mongolia. *Soil and Tillage Research*, 2022, 219: 105327.
- [16] Singh L, Thakur D, Sharma M K, *et al.* Dynamics of leaf litter decomposition in the timberline zone of western Himalaya. *Acta Oecologica*, 2021, 111: 103715.
- [17] Pan L, Peng S, Gao W S, *et al.* Aggregate stability and associated C and N in a silty loam soil as affected by organic material inputs. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(4): 774–787.
- [18] 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.
- [19] Di J Y, Xu M G, Zhang W J, *et al.* Combinations of soil properties, carbon inputs and climate control the saturation deficit dynamics of stable soil carbon over 17-year fertilization. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 12653.
- [20] Yue K X, Gong J R, Yu S Y, *et al.* Effects of litter quality and soil enzyme activity on litter decomposition rate in typical grassland subject to nitrogen addition. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(6): 71–82.
岳可欣, 龚吉蕊, 于上媛, 等. 氮添加下典型草原凋落物质量和土壤酶活性对凋落物分解速率的影响. *草业学报*, 2020, 29(6): 71–82.
- [21] 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.
- [22] Campbell C A, Zentner R P, Bowren K E, *et al.* Effect of crop rotations and fertilization on soil biochemical properties in a thick Black Chernozem. *Canadian Journal of Soil Science*, 1991, 71(3): 377–387.
- [23] Huang Z S, Yu L F, Fu Y H, *et al.* Characteristics of carbon sequestration during natural restoration of Maolan Karst forest ecosystems. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(6): 554–564.
黄宗胜, 喻理飞, 符裕红, 等. 茂兰退化喀斯特森林植被自然恢复中生态系统碳吸存特征. *植物生态学报*, 2015, 39(6): 554–564.
- [24] Paustian K, Collins H P, Paul E A. Management controls on soil carbon//Paul E A, Paustian K, Elliott E T, *et al.* Soil organic matter in temperate agroecosystems. Boca Raton, FL.: CRC Press, 1997: 15–49.
- [25] Stewart C E, Paustian K, Conant R T, *et al.* Soil carbon saturation: evaluation and corroboration by long-term incubations. *Soil Biology & Biochemistry*, 2008, 40: 1741–1750.
- [26] Feng W T, Plante A F, Six J. Improving estimates of maximal organic carbon stabilization by fine soil particles. *Biogeochemistry*, 2013, 112(1/3): 81–93.
- [27] Lucas A T, Jeferson D, Sandro G, *et al.* Carbon sequestration capacity in no-till soil decreases in the long-term due to saturation of fine silt plus clay-size fraction. *Geoderma*, 2022, 412: 115711.
- [28] Liu Y L, Wang P, Wang J K. Formation and stability mechanism of soil aggregates: progress and prospect. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(3): 627–643.
刘亚龙, 王萍, 汪景宽. 土壤团聚体的形成和稳定机制: 研究进展与展望. *土壤学报*, 2023, 60(3): 627–643.
- [29] Castellano M J, Mueller K E, Olk D C, *et al.* Integrating plant litter quality, soil organic matter stabilization, and the carbon saturation concept. *Global Change Biology*, 2015, 21(9): 3200–3209.
- [30] Rodrigo S N, Charles W R, Telmo J C, *et al.* Carbon saturation and translocation in a no-till soil under organic amendments. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2018, 264: 73–84.
- [31] Skjemstad J. Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack. *Organic Geochemistry*, 2000, 31(7/8): 697–710.
- [32] Du Z L, Wu W L, Zhang Q Z, *et al.* Long-term manure amendments enhance soil aggregation and carbon saturation of stable pools in north China Plain. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(10): 2276–2285.