

DOI:10.12171/j.1000-1522.20190092

毛乌素沙地油蒿枯落物分解对增温的响应

牟钰^{1,2} 贾昕^{1,2,3} 郑甲佳^{1,2} 黄松宇^{1,2}
原媛^{1,2} 白宇轩^{1,2} 秦树高^{1,2,3}

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 宁夏盐池毛乌素沙地生态系统国家定位观测研究站, 北京 100083;
3. 北京林业大学水土保持国家林业和草原局重点实验室, 北京 100083)

摘要:【目的】明确油蒿枯落物分解速率对增温的响应, 有助于理解和预测气候变化背景下毛乌素沙地典型灌丛生态系统的碳循环和养分循环。【方法】应用开顶箱模拟增温, 以自然状态为对照, 结合分解袋法, 研究增温对毛乌素沙地油蒿枯落物分解的影响。【结果】模拟增温降低了枯落物分解速率。(1)自2017年5月起至2017年10月实验结束时, 增温处理下, 油蒿枝条和叶片枯落物质量残余率分别为91.07%和71.73%, 而对照处理下, 分别为86.08%和60.74%; (2)不同时段不同处理条件下不同种类的枯落物分解速率不同, 各影响因子之间存在交互作用; (3)Olson 负指数模型结果表明, 在模拟增温条件下, 油蒿枝、叶枯落物的分解系数 k 均显著低于对照处理; (4)增温对枯落物细菌多样性和群落结构没有影响。【结论】增温可能减缓干旱半干旱区植物枯落物分解, 并且温度对枯落物分解的抑制作用与分解时间和枯落物类型有关。

关键词: 毛乌素沙地; 油蒿; 凋落物; 细菌群落; 开顶箱; 升温

中图分类号: S717.19⁺3; S718.51⁺2 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2020)06-0134-08

引文格式: 牟钰, 贾昕, 郑甲佳, 等. 毛乌素沙地油蒿枯落物分解对增温的响应 [J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(6): 134-141. Mu Yu, Jia Xin, Zheng Jiajia, et al. Response of litter decomposition to warming of *Artemisia ordosica* in Mu Us Desert of northwestern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(6): 134-141.

Response of litter decomposition to warming of *Artemisia ordosica* in Mu Us Desert of northwestern China

Mu Yu^{1,2} Jia Xin^{1,2,3} Zheng Jiajia^{1,2} Huang Songyu^{1,2}
Yuan Yuan^{1,2} Bai Yuxuan^{1,2} Qin Shugao^{1,2,3}

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Yanchi Ecology Research Station of Mu Us Desert, Beijing 100083, China;
3. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] The response of litter decomposition rate of *Artemisia ordosica* to warming is helpful to understand and predict the carbon cycle and nutrient cycling of the Mu Us Desert of northwestern China under the background of climate change. [Method] The Open Top Chamber (OTC) was used to simulate the warming, and plant decomposition was put into the mesh bags to explore the effects of warming on the decomposition of *Artemisia ordosica* litter. [Result] The residual rate of litter quality of each part under the warming treatment was higher than that of control, simulated warming reduced the rate of litter decomposition. (1) From May to October in 2017, under the warming treatment, the residual rates of the twig and letters were 91.07% and 71.73%, respectively, but under control, the two indicators were 86.08% and 60.74%; (2) different types of litter decomposition rates were different under varied treatment conditions at different time periods, and there were significant interactive effects between each influencing factor; (3) the

收稿日期: 2019-02-27 修回日期: 2019-05-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(31670708、31670710), 中央高校基本科研业务费专项(2015ZCQ-SB-02)。

第一作者: 牟钰。主要研究方向: 干旱半干旱生态系统枯落物分解。Email: muyucathy@126.com 地址: 100083 北京市海淀区清华东路35号北京林业大学水土保持学院。

责任作者: 贾昕, 博士, 博士生导师。主要研究方向: 干旱半干旱生态系统碳水循环。Email: xinjia@bjfu.edu.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

Olson negative index model showed that under the warming treatment, the decomposition coefficient k of the twigs and leaves of *Artemisia ordosica* litter was lower than that of control. (4) Warming didn't affect the bacterial diversity and structure of litter. [Conclusion] Warming may slow down the decomposition of plant litter in arid and semi-arid areas, and the inhibition of warming on litter decomposition is related to decomposition time and litter types.

Key words: the Mu Us Desert; *Artemisia ordosica*; litter; bacterial community; open top chamber; warming

全球变暖持续影响着陆地生态系统的结构与功能^[1]。据 IPCC 报道,由温室气体的排放造成的气候变暖现象,会使得全球气温平均升高 1.8~4.0 °C,而且这种趋势在未来将持续存在并有扩大的可能^[2]。枯落物分解是土壤有机质的一个重要来源,其对陆地生态系统物质循环有着深远的意义^[3-5]。

目前,学界通过控制实验和模型模拟的方式均发现,温度升高会影响枯落物的分解,但对其影响的方向(促进或抑制)与强度则存在很大的争议^[6]。一部分研究认为,增温能够促进枯落物分解^[7-10]。也有研究表明,增温对于混合物种的枯落物分解总量没有显著的影响,却对不同物种枯落物的分解速率产生了分化式影响^[11]。还有研究认为,增温对于枯落物分解有抑制作用^[12-14]。可以看出,增温处理对枯落物分解的影响不同(如:促进、抑制和无作用),这可能是由于所处生态系统的不同及受分解的枯落物组分(含有 C、N、P 养分元素的易分解组分和木质素、纤维素等难分解有机组分)差异所导致。有研究表明,增温对不同器官(如:茎和叶)的分解促进作用确实存在差异^[15],说明枯落物自身基质质量在一定条件下(外界条件基本一致的情况下)起着主导作用。研究发现,C/N 和 N 含量是预测分解的最好指标^[16]。综上所述,枯落物分解对于增温的响应具有分化性,并且主要受环境因子和枯落物基质质量的综合调控。

此外,温度的变化也可以通过影响微生物量、微生物活性以及群落结构进而影响枯落物的分解过程^[17-19],但温度升高在枯落物分解过程中对微生物的影响仍不明晰。一部分研究认为温度的升高通过提高微生物的酶活性促进枯落物的分解速率,另一部分研究认为增温使得微生物酶失活从而抑制枯落物的分解。因此,增温对枯落物分解影响的规律和机制仍不明确,是需要探索的重要科学问题。

我国已有的关于探究增温对枯落物分解速率影响的研究多针对森林、草地和湿地等生态系统,并且增温对于枯落物分解的影响缺乏一致的结果。关于干旱半干旱地区沙生灌丛生态系统枯落物分解对气候变暖响应的研究较少^[13-14],尤其增温将如何影响沙生物种枯落物不同构件的分解仍不清楚,这制约着荒漠生态系统碳循环理论体系的完善,降低了气

候变化背景下对于干旱半干旱生态系统碳收支预测的准确性。毛乌素沙地是我国北方重要的生态屏障,该地区在植被恢复过程中形成了以油蒿为优势物种的灌丛群落。研究增温对毛乌素沙地油蒿枯落物分解的影响,对于揭示该地区枯落物分解与温度的关系、预测未来气候变暖对生态系统内物质循环的影响有着重要意义。

1 研究区概况

研究区位于宁夏盐池毛乌素沙地生态系统国家定位观测研究站(37°42'31"N, 107°13'37"E, 海拔 1 530 m),该沙生灌丛生态系统可以代表毛乌素沙地广泛分布的生态系统类型。该地属于中温带大陆性气候,年平均气温为 8.3 °C,年平均降水为 292 mm,远低于年均潜在蒸散量 2 024 mm(1954—2014 年,盐池气象站)。另外,降雨有明显的季节变异(80%的降雨集中在 6—9 月)和年际变异(年降水量从 145 mm 到 587 mm)。灌木优势种为油蒿(*Artemisia ordosica*)、杨柴(*Hedysarum mongolicum*)、沙柳(*Salix cheilophila*)和花棒(*Hedysarum scoparium*)。灌丛中草本植物主要是赖草(*Leymus secalinus*)、白草(*Pennisetum centrasiticum*)和沙生针茅(*Stipa glareosa*)。土壤以风沙土为主^[20]。

2 研究方法

2.1 试验设计

油蒿是北方沙区典型沙生灌丛生态系统优势物种,在生态系统恢复重建和促进群落演替中发挥着极其重要的作用。本研究以油蒿为研究对象,采用开顶箱和分解袋相结合的方法,检验模拟增温对油蒿枯落物不同器官(枝、叶)分解速率的影响。

实验采用完全随机区组设计,在油蒿群落取 9 块地势平坦、植被均一、植物生长良好的样地,样地之间相距约 5 m,每块样地内分别设置增温组和对照组。样地周围布设围栏,防止动物践踏破坏。具体实验布设情况如图 1 所示。

实验于 2017 年 5—10 月进行。采用有机玻璃制成的开顶箱(OTC)进行增温。枯落物采集于 2017 年生长季前期,收集实验样地内的油蒿的枝条和叶片



红色圆点表示增温组;黄色圆点表示对照组。Red points represent warming treatment; yellow points represent control.

图1 实验布设图

Fig. 1 Experimental layout

的立枯物,自然风干后,将收集好的枯落物过筛,去除表面土壤、土壤动物和其他杂质。将油蒿的枝叶分开,并且把油蒿枝剪成3~4 cm的小段,每一种枯落物混合均匀后,装入规格为50目、大小为10 cm × 10 cm的尼龙网袋中,其中油蒿叶每袋放入(1 ± 0.005) g,油蒿枝每袋放入(2 ± 0.005) g。2017年5月17日,将分解袋分别贴地面布置在各个样地内,每个OTC内2种枯落物各放5袋,对照组内放置同样的分解袋。随后于6月18日、7月17日、8月23日以及10月16日将分解袋内的枯落物回收。取样时分别从9个样地内每种枯落物各取一袋带回实验室,清除表面杂质,清水漂洗后风干,将风干后的枯落物恒温75 °C烘至恒质量(48 h)并称质量。

为测定枯落物上的微生物群落的多样性和群落组成,于2017年9月10日将实验样地内的枯落物回收,取样时每个OTC内每种枯落物取一袋,对照组取同样的枯落物,共36袋。将取出的枯落物放置在塑封袋内编号,回到实验室后去除表面杂质后放置在-80 °C的冰箱内保存。

2.2 土壤温度和水分含量测定

每块样地中放置EM50自计数据采集器(Decagon, USA)各一套,土壤温度(0 cm和5 cm)和体积含水量(5 cm)通过布设在样地内的5TE土壤湿度探头(Decagon Devices, Pullman, WA, USA)测定,每30 min记录一次数据。

2.3 样品分析

2.3.1 枯落物质量残余率的测定

枯落物质量残余率是指放置一段时间后枯落物

剩余的干物质质量占放置前枯落物的干物质质量的百分比。

$$D = (W_t/W_0) \times 100\% \quad (1)$$

式中: D 为枯落物质量残余率(%), W_t 为样品分解 t 时间后剩余的质量(g), W_0 为样品的初始质量(g)。

2.3.2 枯落物含水率的测定

枯落物含水率计算公式为:

$$SWC = (W_w - W_d) \times 100\% \quad (2)$$

式中:SWC表示土壤体积含水量, W_w 表示枯落物湿质量, W_d 表示枯落物干质量。

2.3.3 枯落物细菌群落多样性和群落结构的测定

采用16S rDNA扩增子测序技术测定细菌群落多样性和群落结构。使用 α 多样性指数中的Shannon指数和ACE指数评估物种的多样性和丰富度。其中,Shannon指数是群落分布多样性指数,该指数越大,表明样品细菌群落多样性越高,ACE指数可以表明群落丰富度,该指数越大,表明样品细菌群落丰富度越高;使用单因子相似性分析检验群落结构的变化情况, R 值的范围为-1到1, R 值越接近1表示组间差异越大于组内差异, R 值越小则表示组内和组间没有明显差异。

2.3.4 枯落物分解系数 k 的计算

本研究采用Olson负指数衰减模型对枯落物分解过程进行拟合^[21]:

$$y = ae^{-kt} \quad (3)$$

式中: y 为枯落物残余率(%), a 为拟合参数, k 为分解指数(g/(g·a)), t 为分解时间(年)。其中分解系数

k 值可用来表示枯落物分解速率的快慢, k 值越大分解速率越快。

2.3.5 分析方法

采用配对 t 检验检验增温对环境变量(土壤温度、土壤含水率)的影响, 采用 t 检验检验枯落物细菌群落多样性和丰富度对增温的响应, 采用 t 检验检验每次取样时增温对枯落物含水率的影响, 采用三因素方差分析(three-way ANOVA)检验分解时间、增温处理、枯落物类型对枯落物分解的影响, 显著性水平均为 $\alpha = 0.05$; 采用非线性回归分析得到不同条件下不同类型枯落物的分解系数(k); 采用单因子相似性分析(one-way ANOSIM)检验增温对枯落物细菌群落结构的影响。本文中数据分析和做图均使用

R 软件 3.4.2。

3 结果与分析

3.1 OTC 的增温效果

本研究以观测期间土壤表层和 5 cm 深处温度以及湿度的天平均值计算增温幅度(图 2)。观测期间, 实验样地内增温组(warming)的温度较对照组(control)有不同程度的升高, 其中表层土壤平均增温幅度为 1.83 °C, 土壤 5 cm 处平均增温幅度为 1.17 °C (土壤表层增温幅度最大值为 10.47 °C, 土壤 5 cm 处增温幅度最大值为 3.17 °C); 另外, 增温显著提高了土壤含水率。结果表明, OTC 增温效果明显, 实验期间对土壤温湿度均有显著的影响(表 1)。

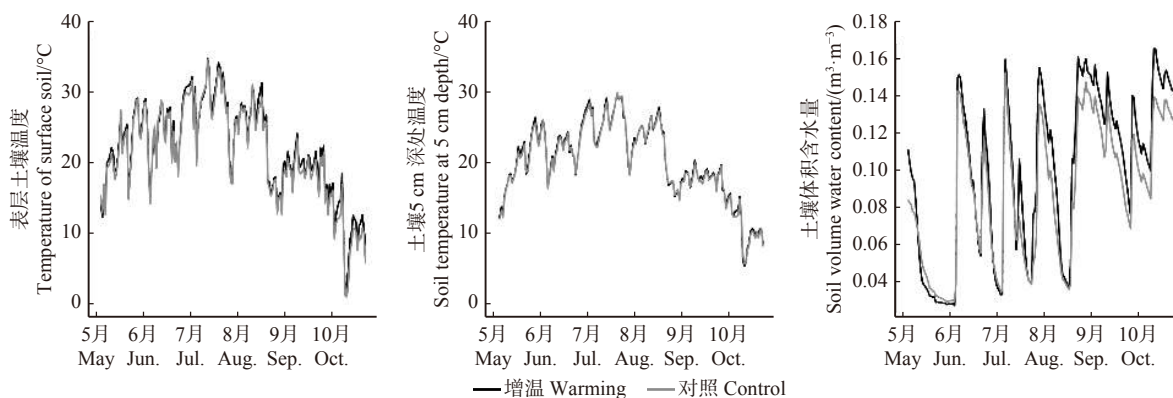


图 2 研究区试验期间增温组和对照组地表温度、土壤温度和土壤体积含水量的日变化

Fig. 2 Daily changes of soil surface temperature, soil temperature at 5 cm depth and soil volume water content at different sample plots of warming treatment and control from May to October in 2017 in the study area

表 1 实验期表层土壤平均温度 (T_0)、土壤 5 cm 深处平均温度 (T_5) 及土壤体积含水量 (SWC)

Tab. 1 Average temperature of surface soil (T_0), average soil temperature at 5 cm depth (T_5) and average soil volume water content (SWC) during the experimental period

处理 Treatment	$T_0/^\circ\text{C}$	$T_5/^\circ\text{C}$	SWC/($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)
增温 Warming	21.99 ± 0.51a	20.16 ± 0.41a	0.098 ± 0.003a
对照 Control	20.16 ± 0.53b	18.99 ± 0.41b	0.088 ± 0.003b

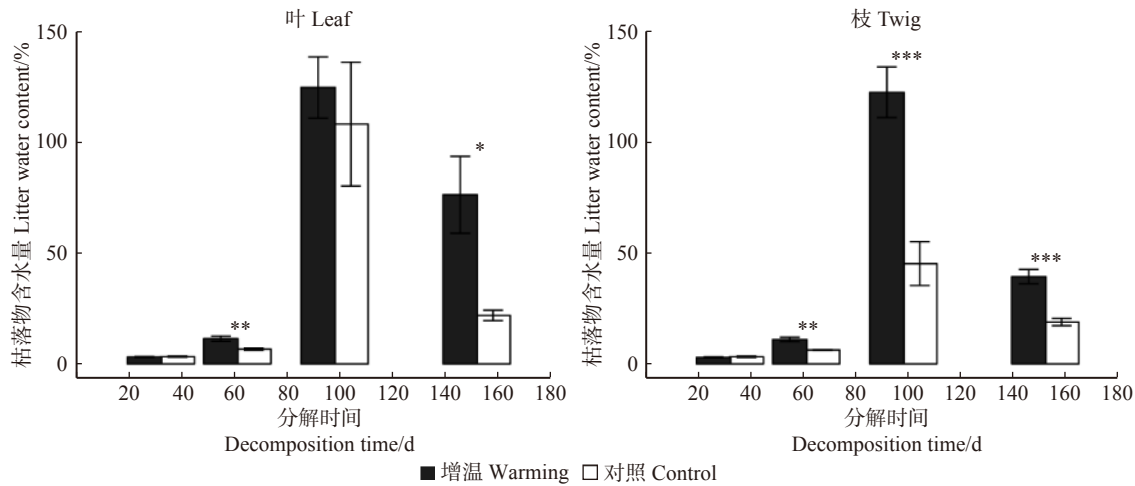
注: 同列不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。下同。Notes: different lowercase letters in the same column indicate significant differences at 0.05 level. The same below.

本研究以观测期间增温组和对照组枯落物含水率的差异表征增温对近地表空气湿度的影响。观测期间, 增温提高了油蒿不同构件枯落物含水率, 其中油蒿叶枯落物含水量的变化幅度范围在 0.17% 到 54.42% 之间, 油蒿枝枯落物含水量变化幅度范围在 0.25% 到 77.35% 之间(图 3)。t 检验结果显示, 增温显著提高了分解 61 d 和 152 d 后油蒿叶的含水量, 以及分解 61 d、98 d 和 152 d 后油蒿枝的含水量。

3.2 增温对枯落物分解的影响

经过 181 d 的野外控制实验得到了油蒿枯落物

枝和叶在增温组和对照组的枯落物质量残余率的动态变化(图 4)。研究结果显示, 实验结束时, 无论在增温组还是对照组, 油蒿枝的质量残余率均大于油蒿叶(增温条件下油蒿枝、叶枯落物质量残余率分别为 91.07% 和 71.73%, 对照条件下, 此两项指标分别为 86.08% 和 60.74%), 表明油蒿枝的分解率小于油蒿叶, 枯落物种类显著影响了枯落物的质量残余率 ($df = 1, F = 520.43, P < 0.01$); 且在不同的时段和不同处理条件下, 油蒿枝、叶枯落物的分解速率呈现出不同的趋势(数据未展示), 表明分解时间($df = 3, F = 136.82, P < 0.01$)、以及分解时间和枯落物种类、分解时间和处理之间的交互作用($df = 3, F = 42.25, P < 0.01$; $df = 3, F = 3.96, P < 0.01$)同样显著影响着枯落物的分解。除此之外, 各种枯落物的质量残余率在增温条件下均高于对照条件, 观测期截止时, 增温组油蒿叶的质量残余率高于对照组 10.99%, 油蒿枝为 4.99%, 说明增温抑制了枯落物分解, 处理显著影响了枯落物的分解($df = 1, F = 52.78, P < 0.01$)。综上所述, 处理(增温和对照)对枯落物分解的影响均



*表示 $P < 0.05$, **表示 $0.01 < P < 0.05$, ***表示 $P < 0.01$. 下同。* represents $P < 0.05$, ** represents $0.01 < P < 0.05$, *** represents $P < 0.01$. The same below.

图3 各种类型枯落物的含水率
Fig. 3 Water content of various types of litter

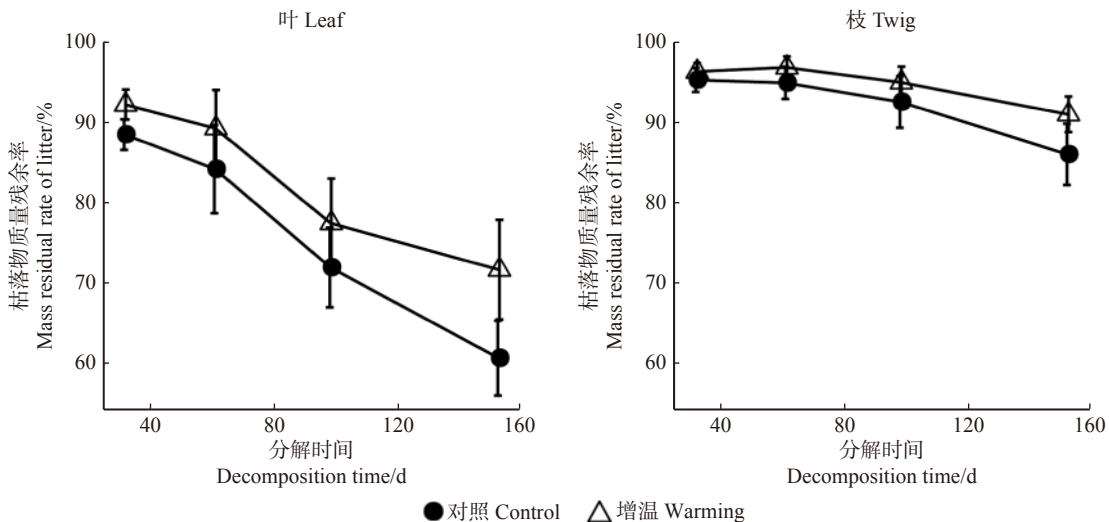


图4 各种类型枯落物在不同处理条件下质量残余率的变换过程

Fig. 4 Dynamic changing process of mass residual rates of various types of litter under different treatments

表现为显著,即同一种枯落物在不同的温度条件下呈现不同的分解动态过程;分解时间也是影响枯落物分解的主要因素,随着时间的推移,枯落物质量残余率也呈现出不同的状态;枯落物种类即基质性质也是质量残余率呈现差异的原因之一,具体体现为同种环境条件下不同的枯落物质量残余率之间差异性显著。除此之外,分解时间、枯落物种类和处理之间存在显著的交互效应,表明增温对枯落物分解的抑制作用与枯落物的种类和分解时间有关(表2)。

为了更加形象直观地描述枯落物分解的复杂过程,本研究采用 Olson 负指数衰减模型对同样地内不同处理下的油蒿枝和油蒿叶枯落物的质量残余率进行非线性拟合,得到质量残余率随时间变化的指数方程(表3),分解系数 k 值越大表示枯落物分解得越快。经计算得,油蒿叶枯落物系数 k 均大于油蒿

枝,且对照组的 k 值大于增温组(增温组油蒿叶 k 值为 0.824,对照组油蒿叶 k 值为 1.176;增温组油蒿枝 k 值为 0.181,对照组 k 值为 0.313)。再次说明了增温抑制了枯落物分解,并且增温对于油蒿枯落物不同器官的分解影响存在差异性。

3.3 增温对细菌群落丰富度和多样性的影响

增温组和对照组油蒿枝和油蒿叶枯落物细菌群落在 OUT 水平上的 Shannon 指数和 ACE 指数如图5所示。增温条件油蒿枝枯落物 Shannon 指数和 ACE 指数分别为 6.44 和 438.56,对照组这两项指标分别为 6.14 和 451.37,温度升高油蒿枝枯落物细菌群落的多样性和丰富度没有影响(ACE 指数: $P = 0.71$; Shannon 指数: $P = 0.48$);增温条件下油蒿叶枯落物 Shannon 指数和 ACE 指数分别为 5.41 和 417.79,对照组这两项指标分别为 5.48 和 470.93,温度升高

表 2 枯落物质量残余率的 ANOVA 分析结果

Tab. 2 ANOVA analysis results of mass residual rates of litter

影响因素 Influencing factor	df	F	P
分解时间 Decomposition time	3	136.82	< 0.01
枯落物种类 Litter type	1	520.43	< 0.01
处理 Treatment	1	52.78	< 0.01
分解时间 × 枯落物种类 Decomposition time × litter type	3	42.25	< 0.01
分解时间 × 处理 Decomposition time × treatment	3	3.96	< 0.01
处理 × 枯落物种类 Treatment × litter type	1	9.24	< 0.01
分解时间 × 枯落物种类 × 处理 Decomposition time × litter type × treatment	3	0.39	0.76

注: $P < 0.01$ 表示极显著相关; $P < 0.05$ 表示显著相关; $P > 0.05$ 表示不相关。Notes: $P < 0.01$ indicates extremely significant correlation; $P < 0.05$ indicates significant correlation; $P > 0.05$ indicates no correlation.

表 3 不同种类枯落物质量残余率 (Y) 随时间 (t) 的负指数回归方程

Tab. 3 Negative exponential regression equations of mass residual rates with time (t) for different types of litter

枯落物种类 Litter type	处理 Treatment	模型 Model	k	R ²
叶 Leaf	对照 Control	$Y = 0.997e^{-1.176t}$	1.176	0.987
	增温 Warming	$Y = 0.999e^{-0.824t}$	0.824	0.949
枝 Twig	对照 Control	$Y = 0.992e^{-0.313t}$	0.313	0.918
	增温 Warming	$Y = 0.989e^{-0.181t}$	0.181	0.865

对油蒿叶枯落物细菌群落的多样性和丰富度同样没有影响(ACE 指数: $P = 0.36$, Shannon 指数: $P = 1$)。此外, 单因子相似性分析结果表明, 增温对油蒿叶和油蒿枝枯落物细菌群落组成没有影响(表 4)。

4 讨论与结论

研究增温对优势物种油蒿的不同构件枯落物分解的影响, 对于揭示枯落物的分解与温度和基质质量的关系, 预测未来气候变暖对生态系统内物质循环的影响有着重要意义。

气候因素(温度、水分)是枯落物分解的首要影响因素^[22-23]。以往的增温实验结果表明, 增温通常会引起环境中水分含量的变化, 有研究表明温度的升高会导致土壤水分含水量的下降^[17], 相反也有研究表明增温显著增加了土壤含水量^[18]。本研究中, 实验期间增温显著提高了土壤水分以及部分时间段内的枯落物含水量, 这可能是由于 OTC 内温度的升高引起的深层土壤水分加速蒸发导致的, 土壤中的水汽被地表枯落物吸收, 导致枯落物含水量上升。本研究中, 增温处理条件下枯落物质量残余量大, 增温抑制枯落物分解。增温对于枯落物分解的抑制作用, 可以从下两个方面解释。首先, 增温导致的地面蒸散增加使得土壤水分含量降低, 由于受到水分条件的限制, 温度的升高使得枯落物分解速率降低。结合以往的研究, 发现增温对于气候条件较好的森林、湿地以及草原生态系统的枯落物分解起到促进作用^[1,11,24-25], 而对于水分条件受到限制的地区, 温度升高减缓了枯落物的分解速率^[13,26-27]。并且有研究证实了在土壤湿度较高的条件下温度升高才能够促进枯落物的分解^[28]。水分是限制干旱半干旱地区生态系统物质循环的重要因子, 变暖引起的土壤水分的降低可能抵消了部分温度对干旱多发地区的直接影响, 进而削弱了碳循环对增温的积极反馈^[23]。本研究发现增温并没有降低土壤水分和枯落物含水量, 因此排除增温通过降低土壤水分和枯落物含水

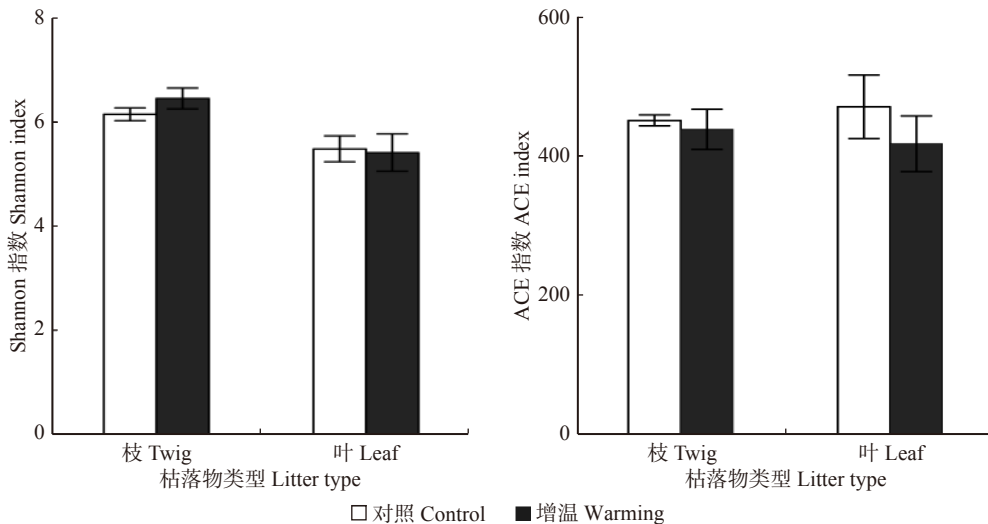


图 5 细菌群落丰富度和多样性

Fig. 5 Richness and diversity of bacterial community

表4 对照和增温条件下不同类型枯落物细菌群落结构的单因子相似性分析 (one-way ANOSIM)

Tab. 4 Results of one-way ANOSIM tests for differences in bacterial communities of different litter types under control and warming treatment

组别 Group	R	P
对照组叶vs增温组叶 Leaf of control vs leaf of warming	0.07	0.3
对照组枝vs增温组枝 Twig of control vs twig of warming	-0.30	0.9

量抑制枯落物分解可能;并且较高水分条件下温度的升高降低了枯落物的分解速率,可能是因为水分含量的变化对小范围升温影响枯落物分解起到了抑制作用^[11]。其次,有研究发现温度可以通过影响微生物量以及群落组成和结构进而调控枯落物分解过程^[17-19]。本研究发现,增温对枯落物上细菌的多样性和群落结构没有影响,进而说明增温对枯落物分解的抑制作用不是通过影响细菌群落多样性和群落结构实现的。有研究表明,微生物群落对增温的响应存在滞后性^[29],本研究增温时间较短可能不足以引起细菌群落多样性和丰富度的变化。此外,枯落物的分解过程可能是由土壤中微生物的相关酶来驱动的^[30],由于受到水分条件的限制,干旱半干旱地区的土壤微生物的酶活性较低,而增温又对酶的活性存在一定程度的抑制作用^[11],进而表现出增温抑制枯落物分解的规律。因此,未来的研究应更多的结合酶活性以及相关功能的微生物(如具有碳分解功能的微生物)的变化规律,以期更加深入的探究气候变化对枯落物分解的影响机制。

枯落物质量也是影响枯落物分解的重要因素^[31]。本实验结果显示,油蒿叶枯落物的分解速率大于油蒿枝枯落物的分解速率。此外,增温对于油蒿枝枯落物分解的抑制作用要强于油蒿叶枯落物。这可能是由于油蒿叶枯落物含有较高的N含量,和较低的C/N,较高的基质质量(表5)。许多研究表明,枯落物C/N与分解速率在物种内和物种间均呈负相关^[32]。气候变化可能改变植被的分布格局以及群落的组成和结构^[33],已有研究表明,增温导致草地生态系统地上生物量增加,同时也增加了植物中的C含量^[34],而碳浓度相对升高将会导致分解速率的降低。未来研究全球变化(CO₂含量上升、温度升高、降水格局的改变、氮沉降等)导致生物量分配和植物组织化学构成变化,进行改变群落水平枯落物质量,也是预测气候变化背景下枯落物分解的重要方向。

本文研究了毛乌素沙地典型灌丛生态系统中优势物种油蒿的枯落物分解速率对增温的响应,结果

表5 不同枯落物种类C、N含量及C/N的比较

Tab. 5 Comparison of carbon, nitrogen content and the C/N ratio of different litter types

枯落物种类 Litter type	全氮 Total nitrogen (N)/%	有机碳 Organic carbon (C)/%	C/N
叶 Leaf	1.42 ± 0.08a	42.73 ± 0.75a	30.41 ± 1.56a
枝 Twig	1.09 ± 0.08b	43.96 ± 0.69a	41.41 ± 3.51b

表明,增温抑制枯落物分解并且这种抑制作用随着时间和枯落物种类的变化而变化,该研究有助于了解沙生灌丛生态系统的物质循环对气候变化的响应。在今后的研究中可结合温度升高条件下微生物量和群落结构的变化情况,从而更加系统的了解和认识沙生灌丛生态系统物质循环对气候变化的响应。

参 考 文 献

- [1] 刘瑞鹏, 毛子军, 李兴欢, 等. 模拟增温和不同凋落物基质质量对凋落物分解速率的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5661-5667.
Liu R P, Mao Z J. Effects of simulated temperature increase and vary little quality on litter decomposition[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(18): 5661-5667.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate change in 2007: the physical science basis[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [3] Li L J, Zeng D H, Yu Z Y, et al. Impact of litter quality and soil nutrient availability on leaf decomposition rate in a semi-arid grassland of northeast China[J]. Journal of Arid Environments, 2011, 75(9): 787-792.
- [4] Austin A T, Vivanco L. Plant litter decomposition in a semi-arid ecosystem controlled by photodegradation[J]. Nature, 2006, 442: 555-558.
- [5] Zhao Q Q, Bai J H, Liu P P, et al. Decomposition and carbon and nitrogen dynamics of *Phragmites australis* litter as affected by flooding periods in coastal wetlands[J]. CLEAN: Soil Air Water, 2015, 43: 441-445.
- [6] 宋飘, 张乃莉, 马克平, 等. 全球气候变暖对凋落物分解的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(6): 1327-1339.
Song P, Zhang N L, Ma K P, et al. Impacts of global warming on litter decomposition[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(6): 1327-1339.
- [7] 王其兵, 李凌浩, 白永飞, 等. 模拟气候变化对3种草原植物群落混合凋落物分解的影响[J]. 植物生态学报, 2000, 24(6): 674-679.
Wang Q B, Li L H, Bai Y F, et al. Effects of simulated climate change on the decomposition of mixed litter in three steppe communities[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2000, 24(6): 674-679.
- [8] 葛晓改, 曾立雄, 黄志霖, 等. 土壤温度和水分含量对三峡库区马尾松凋落物叶分解的影响[J]. 林业科学, 2013, 49(9): 153-157.
Ge X G, Zeng L X, Huang Z L, et al. Effects of soil temperature and soil water content to needle litter leaf decomposition of *Pinus massoniana* plantations in Three Gorges Reservoir Area[J]. Scientia Silvae Science, 2013, 49(9): 153-157.

- [9] Fierer N, Craine J M, Schimel M L P. Litter quality and the temperature sensitivity of decomposition[J]. *Ecology*, 2005, 86(2): 320–326.
- [10] Kang H, Freeman C. Soil enzyme analysis for leaf litter decomposition in global wetlands[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2009, 40(21/22): 3323–3334.
- [11] Cheng X, Luo Y, Su B, et al. Experimental warming and clipping altered litter carbon and nitrogen dynamics in a tallgrass prairie[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2010, 138(3): 206–213.
- [12] Sjögersten S, Wookey P A. Decomposition of mountain birch leaf litter at the forest-tundra ecotone in the Fennoscandian Mountains in relation to climate and soil conditions[J]. *Plant and Soil*, 2004, 262(1/2): 215–227.
- [13] 淡沐春, 杨劼, 侯虹, 等. 模拟增温增水对克氏针茅草原主要物种及群落凋落物分解的影响[J]. *中国农业气象*, 2015, 36(6): 746–754.
Dan M C, Yang J, Hou H, et al. Effects of simulated warming and precipitation enhancement on litter decomposition of *Stipa krylovii* steppe[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2015, 36(6): 746–754.
- [14] 王新源, 赵学勇, 李玉霖, 等. 环境因素对干旱半干旱区凋落物分解的影响研究进展[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(11): 3300–3310.
Wang X Y, Zhao X Y, Li Y L, et al. Effects of environmental factors on litter decomposition in arid and semi-arid regions: a review[J]. *China Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(11): 3300–3310.
- [15] 关阅章, 刘安田, 仲启钺, 等. 滨海围垦湿地芦苇凋落物分解对模拟增温的响应[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2013(5): 27–34.
Guan Y Z, Liu A T, Zhong Q Y, et al. Responses of decomposition of *Phragmites australis* litters to simulated temperature enhancement in the reclaimed coastal wetland[J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2013(5): 27–34.
- [16] 李学斌, 马林, 陈林, 等. 草地枯落物分解研究进展及展望[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(9): 2260–2264.
Li X B, Ma L, Chen L, et al. Research progress and the prospect of grassland litters decomposition[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(9): 2260–2264.
- [17] 王军, 王冠钦, 李飞, 等. 短期增温对紫花针茅草原土壤微生物群落的影响[J]. *植物生态学报*, 2018, 42(1): 116–125.
Wang J, Wang G Q, Li F, et al. Effects of short-term experimental warming on soil microbes in a typical alpine steppe[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2018, 42(1): 116–125.
- [18] 郑海峰, 陈亚梅, 杨林, 等. 高山林线土壤微生物群落结构对模拟增温的响应[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(9): 2840–2848.
Zheng H F, Chen Y M, Yang L, et al. Responses of soil microbial community structure to simulated warming in alpine timberline in western Sichuan, China[J]. *China Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(9): 2840–2848.
- [19] Castro H F, Classen A T, Austin E E, et al. Soil microbial community responses to multiple experimental climate change drivers[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2010, 76: 999–1007.
- [20] Jia X, Zha T S, Wu B, et al. Biophysical controls on net ecosystem CO₂ exchange over a semiarid shrubland in northwest China[J]. *Biogeosciences*, 2014, 11: 4679–4693.
- [21] Olson J S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems[J]. *Ecology*, 1963, 44(2): 322–331.
- [22] 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[J]. *Global Change Biology*, 2007, 13(10): 2193–2205.
- [23] Boyero L, Pearson R G, Gessner M O, et al. A global experiment suggests climate warming will not accelerate litter decomposition in streams but might reduce carbon sequestration[J]. *Ecology Letter*, 2011, 14(3): 289–294.
- [24] Ferreira V, Chauvet E. Future increase in temperature more than decrease in litter quality can affect microbial litter decomposition in streams[J]. *Oecologia*, 2011, 167(1): 279–291.
- [25] Song C L, Yang D, Song G, et al. Effect of nitrogen addition on decomposition of *Calamagrostis angustifolia* litters from freshwater marshes of Northeast China[J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(10): 1578–1582.
- [26] Aerts R. The freezer defrosting: global warming and litter decomposition rates in cold biomes[J]. *Journal of Ecology*, 2006, 94(4): 713–724.
- [27] Epstein H E, Burke I C, Lauenroth W K. Regional patterns of decomposition and primary production rates in the U.S. Great Plains[J]. *Ecology*, 2002, 83(2): 320–327.
- [28] Butenschoen O, Scheu S, Eisenhauer N. Interactive effects of warming, soil humidity and plant diversity on litter decomposition and microbial activity[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(9): 1902–1907.
- [29] Weedon J T, Kowalchuk G A, Aerts R, et al. Summer warming accelerates sub-arctic peatland nitrogen cycling without changing enzyme pools or microbial community structure[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18: 138–150.
- [30] Xu Z F, Yin H J, Zhao C Z, et al. A review of responses of litter decomposition in terrestrial ecosystems to global warming[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(6): 1208–1219.
- [31] Berg B, Johansson M B, Meentemeyer V. Litter decomposition in a transect of Norway spruce forests: substrate quality and climate control[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2000, 30(7): 1136–1147.
- [32] Sariyildiz T, Anderson J M. Interactions between litter quality, decomposition and soil fertility: a laboratory study[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(3): 391–399.
- [33] Yang W Q, Deng R J, Zhang J. Forest litter decomposition and its responses to global climate change[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(12): 2889–2895.
- [34] Day T A, Ruhland C T, Xiong F S. Warming increases aboveground plant biomass and C stocks in vascular plant dominated Antarctic tundra[J]. *Global Change Biology*, 2008, 14(8): 1827–1843.

(责任编辑 范娟
责任编辑 杨晓晖)