

DOI: 10.5846/stxb202008302255

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.

A W, Lü W W, Zhou Y, Sun J P, Zhang S R, Xia L, Li B W, Liu P P, Hong H, Wang Q, Zhang L R, Su A L, Jiang L L, Tsechoe Dorji, Zhang Z H, Luo C Y, Wang S P. Effects of temperature and moisture on litter decomposition in an alpine meadow. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(17): 6846-6853.

## 温度和湿度对高寒草甸凋落物分解的影响

阿旺<sup>1,5</sup>, 吕汪汪<sup>1,5</sup>, 周阳<sup>1,5</sup>, 孙建平<sup>1,5</sup>, 张苏人<sup>1,5</sup>, 夏露<sup>4</sup>, 李博文<sup>1,5</sup>, 刘培培<sup>1,5</sup>, 洪欢<sup>1,5</sup>, 王奇<sup>1,5</sup>, 张立荣<sup>1</sup>, 苏爱玲<sup>2</sup>, 姜丽丽<sup>1</sup>, 斯确多吉<sup>1,3</sup>, 张振华<sup>2</sup>, 罗彩云<sup>2</sup>, 汪诗平<sup>1,3,\*</sup>

1 中国科学院青藏高原研究所高寒生态重点实验室, 北京 100101

2 中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810008

3 中国科学院青藏高原地球科学卓越中心, 北京 100101

4 西藏大学理学院, 拉萨 850000

5 中国科学院大学, 北京 100094

**摘要:**多数研究发现增温增湿加快了凋落物失重率,但对如何影响凋落物分解过程中 CO<sub>2</sub>和可溶性有机碳(DOC)释放的影响研究较少。通过室内培养设置四个温度梯度(0, 5, 10 和 20℃)和两个湿度梯度(25%和40%)对高寒草甸凋落物分解进行了 96 d 的培养试验。结果表明,总体上高寒草甸凋落物分解速率随着温度和湿度的增加而加快;高湿度条件下凋落物分解释放 CO<sub>2</sub>总量的敏感性是低湿度的 2.3 倍左右;湿度变化对 DOC 淋溶的温度敏感性影响较小。在 25%和 40%的湿度培养下,CO<sub>2</sub>总排放量的温度敏感性分别是 DOC 总淋溶量的温度敏感性的 10 和 20 倍左右,表明未来气候变化情境下凋落物中的有机质分解更多的是以 CO<sub>2</sub>形式排放到大气中。因此,未来需要更系统的研究不同气候变化情境下凋落物积累与分解、DOC 淋溶和土壤碳库的动态变化,从而更好的理解这些生态系统碳循环过程的变化及其对气候变化产生的反馈作用和机制。

**关键词:**温度,湿度,凋落物失重率,CO<sub>2</sub>呼吸,可溶性有机碳,温度敏感性,高寒草甸,青藏高原

## Effects of temperature and moisture on litter decomposition in an alpine meadow

A Wang<sup>1,5</sup>, Lü Wangwang<sup>1,5</sup>, ZHOU Yang<sup>1,5</sup>, SUN Jianping<sup>1,5</sup>, ZHANG Suren<sup>1,5</sup>, XIA Lu<sup>4</sup>, LI Bowen<sup>1,5</sup>, LIU Peipei<sup>1,5</sup>, HONG Huan<sup>1,5</sup>, WANG Qi<sup>1,5</sup>, ZHANG Lirong<sup>1</sup>, SU Ailing<sup>2</sup>, JIANG Lili<sup>1</sup>, TSECHOE Dorji<sup>1,3</sup>, ZHANG Zhenhua<sup>2</sup>, LUO Caiyun<sup>2</sup>, WANG Shiping<sup>1,3,\*</sup>

1 Key Laboratory of Alpine Ecology, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 Northwestern Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China

3 Chinese Academy of Sciences Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Science, Beijing 100101, China

4 College of Science, Tibet University, Lhasa 850000, China

5 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

**Abstract:** Many studies focus on effects of temperature and moisture on litter mass loss rate, however, how they affect CO<sub>2</sub> emission rate and leaching of dissolved organic carbon (DOC) during the litter decomposition is unclear. We conducted an incubation experiment with four temperature gradients (0, 5, 10 and 20°C) and two moistures (25% and 40%) using litter of alpine meadow for 96 incubation days. Our results showed that litter mass loss rate only increased with increases in

**基金项目:**国家基金委重点基金项目(41731175);中国科学院专项 A(XDA20050101, XDA2005010405);国家重点研发项目(2016YFC0501802)

**收稿日期:**2020-08-30; **修订日期:**2021-03-01

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangsp@itpcas.ac.cn

temperature under high moisture. The temperature sensitivity of CO<sub>2</sub> emission rate was 2.3 times under high moisture as that of low moisture. The effect of moisture on temperature sensitivity of DOC leaching was small. The temperature sensitivities of CO<sub>2</sub> emission rate were about 10 and 20 times compared with that of DOC leaching under 25% and 40% moistures, respectively, suggesting that more CO<sub>2</sub> could be emitted relative to DOC leaching under future climate change. Therefore, more studies are needed to explore how climate change affects CO<sub>2</sub> emission and DOC leaching through litter decomposition and their underlying mechanisms in the future.

**Key Words:** temperature; moisture; litter mass loss rate; CO<sub>2</sub> emission; dissolved organic carbon; temperature sensitivity; alpine meadow; Tibetan Plateau

陆地生态系统植物凋落物的分解调节着碳和养分的转移和运输,对土壤库的物质平衡起着重要的调节作用,是土壤—植物亚系统物质循环中的重要环节,同时也是一个向大气排放 CO<sub>2</sub> 重要的源<sup>[1-9]</sup>。Raich 和 Schlesinger<sup>[10]</sup>估计,全球因凋落物分解释放的 CO<sub>2</sub>量为 68 Gt C/a,约占全球年碳总通量的 70%。凋落物分解过程主要受气候、凋落物质量和土壤生物群落的综合调控<sup>[11-13]</sup>,并且 Levelle 等<sup>[11]</sup>认为这三者作用大小依次为:气候>凋落物质量>土壤生物,由此可见,气候变化对陆地生态系统凋落物分解产生强烈的影响。

对凋落物分解影响较大的气候因素包括温度和湿度(降水量)。水热条件直接影响凋落物分解过程中的淋溶作用和微生物活性,从而对凋落物分解动态产生显著影响。大量研究表明,增温增加了凋落物的分解速率<sup>[5, 7, 9, 14-16]</sup>。凋落物的含水量强烈影响着其分解速率,含水量低则降低其分解速率<sup>[17]</sup>;同时,降水对凋落物的分解有着重要影响,一方面可制约凋落物化学成分淋溶的物理过程,另一方面还通过影响分解者的活性来间接影响凋落物的分解<sup>[18-19]</sup>。

青藏高原增温幅度是全球平均增温幅度的 3 倍左右,且伴随着降水变化<sup>[20]</sup>。以往的多数研究均是在野外利用分解袋法探讨凋落物失重率对气候变化的响应<sup>[5, 7, 9]</sup>。实际上凋落物分解过程包括以 CO<sub>2</sub>释放和可溶性有机碳(DOC)淋溶等有机质分解过程,进而对生态系统碳循环过程产生重要影响<sup>[21]</sup>。然而,很少有人探讨上述过程对气候变化的响应。为此,本研究利用室内培养试验,探讨:(1)温度和湿度对凋落物分解特征(如失重率、CO<sub>2</sub>释放和 DOC 淋溶等)的影响;以及(2)它们的温度敏感性如何随湿度而变化。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验地点和样品采集

2009 年 7 月中旬在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位研究站围栏样地内采集所需要的凋落物样品。该高寒草甸为矮嵩草(*Kobresia humilis*)草甸,主要包括矮嵩草、羊茅(*Festuca ovina*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、小嵩草(*K. pygmaea*)、早熟禾(*Poa* spp.)、洽草(*Koeleria cristata*)、藏异燕麦(*Helictotrichon tibeticum*)、苔草(*Carex* spp.)、二柱头蘆草(*Scirpus distigmaticus*)、线叶龙胆(*Gentiana farre*)等植物组成。利用 5 个 50 cm × 50 cm 样方法齐地面刈割获得群落的立枯样品,在 60℃烘干、剪成 2 cm 的碎段、混匀,随机抽取 4 个分样,过 1 mm 筛粉碎用于化学成分的分析。

### 1.2 试验设计

该试验共设计 4 个温度梯度(0、5、10 和 20℃)和 2 个水分含量(重量百分比 25%和 40%)共 8 种处理,每处理 4 个重复,共计 32 个培养瓶,培养瓶的容积 575 mL。将 5 g 凋落物样品(干物质)装入瓶中,按干物质重量百分比分别按照 25%和 40%湿度、利用吸管添加所需的无离子水,混合摇匀,于 7 月 18 日早晨放置到设定的不同温度培养箱中,培养 96 d。不抽气体样品时培养瓶口是敞开的,每天称量培养瓶,必要时添加损失的无离子水以保持培养瓶重量相对不变,从而保证试验过程中凋落物水分含量基本保持不变。

### 1.3 气体样品分析和 CO<sub>2</sub> 释放速率计算

抽气开始前培养瓶口是敞开的,在培养后的第 1、3、7、12、24、48、96 天上午 10—12 点,在每个培养瓶瓶口安置一个三通阀,利用注射器抽取每个培养瓶中的 20 mL 气体样品,然后马上关闭三通阀,2 h 后再抽取该瓶中气体样品。所有气体样品利用美国惠普公司生产的 HP5890 II plus 型号气相色谱仪分析 CO<sub>2</sub> 浓度,所有气体分析均在采后 24 h 内完成。

利用公式(1)和(2)计算单位时间单位质量凋落物 CO<sub>2</sub> 气体的释放速率:

$$P = AS \cdot C_0 / A_0 \quad (1)$$

式中, $P$  为所测样品 CO<sub>2</sub> 气体浓度 (cm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>); $C_0$ : 标气浓度; $AS$ : 所测样品 CO<sub>2</sub> 气体峰面积; $A_0$ : 标气峰面积;

CO<sub>2</sub> 气体的呼吸速率计算采用如下公式:

$$V = [(p_2 - p_1) \cdot v + 2p_1 \cdot v_1] / (t \cdot m) \quad (2)$$

式中: $V$  为 CO<sub>2</sub> 气体的呼吸速率; $p_1$  为第一次抽气测定的 CO<sub>2</sub> 浓度 (cm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>); $p_2$  为第二次抽气(即关闭三通阀 2 h 后)测定的 CO<sub>2</sub> 浓度 (cm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>); $v$  为瓶子体积 (575 mL); $v_1$  为抽取的气体体积 (20 mL); $t$  为两次抽气的时间间隔 (120 min); $m$  为瓶内枯落物质量 (5 g)。

由于利用公式(1)算出来的 CO<sub>2</sub> 气体浓度单位为 cm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>,在计算过程中需要转换为质量-体积浓度,转换关系为:

$$1 \text{ (cm}^3/\text{m}^3) = M/22.4 \text{ (mg/m}^3) \quad (3)$$

式中, $M$  为 CO<sub>2</sub> 气体的分子量;22.4 为在标准状况下,1 摩尔任何理想气体所占的体积。

### 1.4 凋落物浸提物可溶性有机碳(DOC)含量

自然条件下凋落物分解过程中,在分解释放 CO<sub>2</sub> 的同时,降水还会同时淋溶其中的 DOC 等物质,为了监测不同处理凋落物分解过程中 DOC 的淋溶量,在培养的第 0、3、12、48、96 天,在抽过气体样品之后,利用 50 mL 无离子水浸提枯落物样品(10:1 比例)24 h,用 0.45—0.7 μm 的滤纸过滤后,利用 TOC 仪(岛津 5000A)测定滤液中的 DOC 含量。浸提后所有凋落物样品在 30℃ 左右条件下烘干后(模拟自然降水后被晒干的情景),继续用于培养试验,直到试验结束。

### 1.5 凋落物分解特征

在试验前、结束后将所有凋落物样品置于 60℃ 下烘干 24 h 至恒重,利用分解前、后有机质重量的差值计算培养期间的失重率;利用 AOAC (1984) 的方法分析试验前、后凋落物总有机碳(OTC)含量,用于计算培养期间总 OTC 损失量,试验前凋落物 OTC 含量为 29%;同时,利用培养期间平均 CO<sub>2</sub> 释放速率和平均 DOC 含量,计算培养期间 96 dCO<sub>2</sub> 总释放量、以及 DOC 总淋溶量。所有指标均以干物质作为基础进行计算。利用失重率、CO<sub>2</sub> 总释放量及 DOC 总淋溶量与培养温度间的简单回归方程的斜率作为其温度敏感性,计算它们不同培养湿度下的温度敏感性。

### 1.6 统计分析

利用线性混合模型分析处理温度、湿度以及它们的互作效应对凋落物失重率、总 CO<sub>2</sub> 释放量和总 DOC 淋溶量的显著影响;同时,以取样日期为处理间随机因子,利用线性混合模型重复分析模型处理温度、湿度和取样日期以及它们的互作效应对凋落物 CO<sub>2</sub> 释放速率和 DOC 淋溶量动态变化的影响。当方差分析显著时再进行多重比较(LSD)分析。所有差异检验均为 0.05 水平上是否显著。

## 2 结果

### 2.1 凋落物失重率

总体上,温度、湿度及其互作均对凋落物 96 d 的失重率有显著影响(表 1)。进一步分析发现,在 25% 的湿度培养时,所有培养温度间的凋落物失重率均没有显著差异,平均失重率为 25% 左右;在 40% 的湿度培养下,与其它培养温度相比,只有 20℃ 培养下显著提高了凋落物失重率 21%—31%;且在 20℃ 培养下,与 25% 的

湿度相比,40%的湿度显著提高了凋落物的失重率 21%(图 1)。

表 1 温度和湿度对凋落物失重率影响的方差分析

Table 1 Analysis of variance on mass loss rate under different temperatures and moistures

变异来源 Sources	分子自由度 Numerator <i>df</i>	分母自由度 Denominator <i>df</i>	<i>F</i>	显著性 Sig.
温度(T) Temperature	3	24	7.149	0.001
湿度(M) Moisture	1	24	6.023	0.022
T×M	3	24	3.918	0.021

2.2 凋落物分解 CO<sub>2</sub> 释放速率和释放量

凋落物分解 CO<sub>2</sub> 释放速率受培养时间、培养温度和湿度及其交互效应的显著影响(表 2)。随着培养时间的延长,所有处理凋落物分解 CO<sub>2</sub> 释放速率均快速下降,特别是培养温度在 20℃ 和培养湿度为 40% 时,其 CO<sub>2</sub> 释放速率远远高于其它处理,培养温度 20℃ 和湿度 25%、以及培养温度 10℃ 和湿度 40% 的处理次之,均在培养 7 d 后其下降的幅度最大;其它处理的差异及随培养时间下降的速率相对较小(图 2)。总体上,在所有培养温度下,与 25% 的培养湿度相比,培养湿度 40% 的凋落物分解累计释放 CO<sub>2</sub> 量平均提高 80% 左右;除培养温度 5℃ 外,在 0、10 和 20℃ 培养下,培养湿度 40% 比 25% 凋落物分解累计释放 CO<sub>2</sub> 量分别显著提高了 70%、81% 和 108% 左右(图 3)。无论培养湿度如何,培养 0 和 5℃ 累计 CO<sub>2</sub> 释放量均没有显著差异;只有培养湿度为 40% 时培养 10℃ 才显著比 0 和 5℃ 下释放更多的 CO<sub>2</sub>; 无论培养湿度如何,与 0、5 和 10℃ 相比,培养温度 20℃ 均显著释放更多的 CO<sub>2</sub>; 培养温度 20℃ 和湿度 40% 下培养 96 d 累计总 CO<sub>2</sub> 释放量为 357 mg/g 凋落物,相当于释放了 97 mg C/g 凋落物(图 3)。

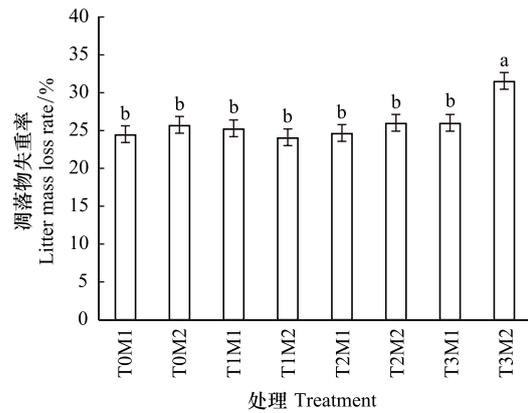


图 1 温度和湿度对凋落物失重率的影响

Fig.1 Effects of different incubation temperatures and moistures on litter mass loss rate

不同小写字母表示不同温度和湿度下凋落物失重率差异显著( $P < 0.05$ ); T0、T1、T2 和 T3: 培养温度为 0、5、10 和 20℃; M1 和 M2: 培养湿度为 25 和 40% 湿度

表 2 培养天数和温度及湿度对凋落物分解 CO<sub>2</sub> 释放速率影响的方差分析

Table 2 Analysis of variance on CO<sub>2</sub> emission of litter decomposition under different incubating days, temperatures and moistures

变异来源 Sources	分子自由度 Numerator <i>df</i>	分母自由度 Denominator <i>df</i>	<i>F</i>	显著性 Sig.
天数(D) Day	6	168	124.574	0.000
温度(T) Temperature	3	168	211.043	0.000
湿度(M) Moisture	1	168	134.836	0.000
D×T	18	168	35.043	0.000
D×M	6	168	22.577	0.000
T×M	3	168	37.003	0.000
D×T×M	18	168	12.15	0.000

2.3 可溶性有机碳(DOC)淋溶速率和累计淋溶量

不同培养天数、温度和湿度均对凋落物浸提液中 DOC 含量有显著影响,且存在交互效应(表 4)。随着培养时间的延长,所有处理浸提液中 DOC 含量均线性下降(图 4)。在培养温度为 0 和 5℃ 时,与 25% 的培养湿度相比,40% 的湿度显著降低了浸提液中 DOC 含量,而培养温度 10 和 20℃ 时培养湿度的影响不显著(图 5);

总体上随着培养温度的增加浸提液中 DOC 含量相应增加,但培养湿度为 25% 时 5℃ 的浸提液中 DOC 平均含量反而显著高于 10℃ 的含量(图 5)。

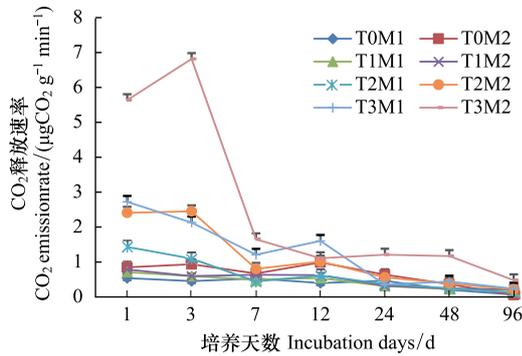


图 2 培养天数和温度及湿度对凋落物分解 CO<sub>2</sub> 释放速率的影响

Fig.2 Effects of incubating days and temperature and moisture on CO<sub>2</sub> emission rate of litter decomposition

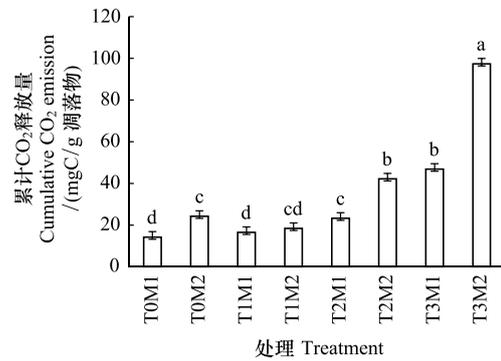


图 3 培养温度和湿度对累计凋落物分解 CO<sub>2</sub> 释放量的影响

Fig.3 Effects of incubation temperature and moisture on cumulative CO<sub>2</sub> emission during the period of litter decomposition

表 4 培养天数和温度及湿度对凋落物浸提液中可溶性有机碳含量影响的方差分析

Table 4 Analysis of variance on content of dissolved organic carbon of extracted from litter under different incubating days (D), temperatures (T) and moistures (M)

变异来源 Sources	分子自由度 Numerator <i>df</i>	分母自由度 Denominator <i>df</i>	<i>F</i>	显著性 Sig.
天数(D) Day	3	96	15907.844	0.000
温度(T) Temperature	3	96	489.806	0.000
湿度(M) Moisture	1	96	42.372	0.000
D×T	9	96	44.096	0.000
D×M	3	96	3.533	0.018
T×M	3	96	3.642	0.015
D×T×M	9	96	2.496	0.013

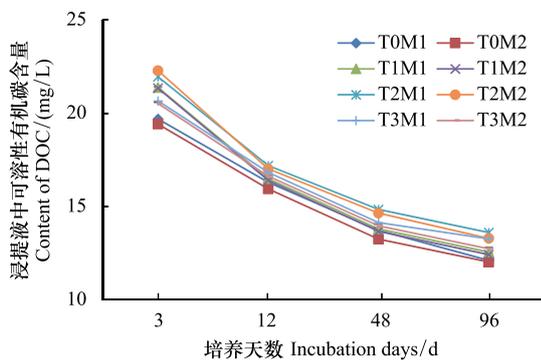


图 4 培养天数和温度及湿度对不同类型枯落物浸提液中可溶性有机碳含量的影响

Fig.4 Effects of incubating day and temperature and moisture on content of dissolved organic carbon from extracted from different standing death and litter

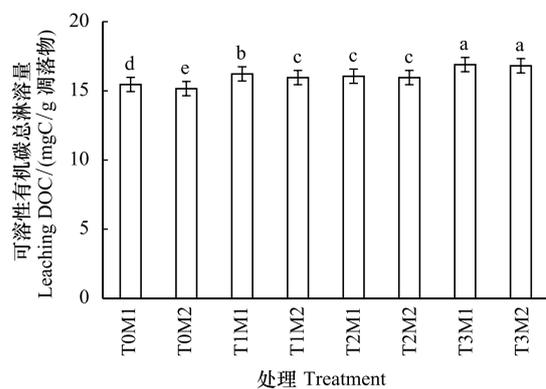


图 5 培养期间凋落物分解过程中温度和湿度对可溶性有机碳淋溶量的影响

Fig.5 Effects of incubation temperature and moisture on dissolved organic carbon (DOC) leaching during the period of litter decomposition

## 2.4 凋落物失重率和 CO<sub>2</sub> 总释放量及 DOC 总淋溶量的温度敏感性

在培养湿度 25% 时, 凋落物分解的失重率随培养温度变化不显著, 但温度每增加 1°C 凋落物 CO<sub>2</sub> 总释放量和 DOC 总淋溶量分别增加 6.2 和 0.06 mg/g 凋落物; 在 40% 的培养湿度下, 温度每增加 1°C 凋落物失重率、CO<sub>2</sub> 总释放量和 DOC 总淋溶量分别提高 0.34%、14.5 及 0.07 mg/g 凋落物 (图 6)。

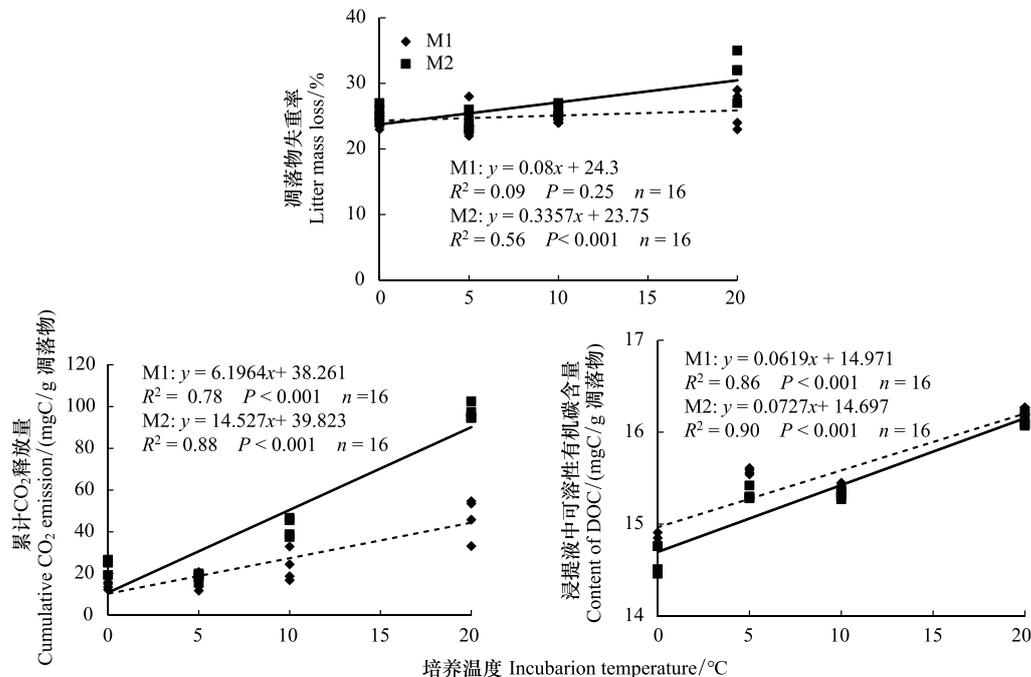


图 6 不同培养湿度下凋落物平均失重率和累计释放 CO<sub>2</sub> 量及可溶性有机碳淋溶量与培养温度的关系

Fig.6 Relationships between mean mass loss and cumulative CO<sub>2</sub> emission and dissolved organic carbon leaching (C) and incubation temperature under different incubation moistures

## 3 讨论

结果表明, 在培养温度低于 10°C 时, 凋落物培养湿度不是其失重率的制约因子, 只有高温 (20°C) 时增加凋落物的湿度才显著提高其失重率。总体上增温和增加湿度均显著提高凋落物分解时 CO<sub>2</sub> 和 DOC 的释放量, 在 25 和 40% 培养湿度下 CO<sub>2</sub> 总释放量的温度敏感性分别是 DOC 总淋溶量的 10 和 20 倍左右, 说明未来增温特别是同时增温增湿情境下凋落物中的有机碳更多地会以 CO<sub>2</sub> 气体的形式排放到大气中。尤其是研究表明, 以往仅仅利用失重率探讨气候变化对凋落物分解影响的研究难以全面理解气候变化对凋落物分解过程中有关碳循环的影响。

特别是以往大多数研究或者利用凋落物袋技术<sup>[1, 5-7, 9]</sup>或者利用将凋落物与土壤进行混合后进行室内培养的方法<sup>[22]</sup>开展温度和湿度对凋落物失重率影响的研究。事实上, 在凋落物有机质分解过程中主要以 CO<sub>2</sub> 释放大气以及以 DOC 淋溶到土壤<sup>[23-25]</sup>, 然而, 由于研究方法的制约, 以往的相关研究均不能区分这两个过程对凋落物有机质分解的相对贡献。尽管首次利用纯凋落物室内分解试验方法与野外条件差异很大, 如野外条件下部分凋落物与土壤表面相接触, 但由于该高寒草甸群落盖度在 90% 以上<sup>[26]</sup>, 且多数立枯在第二年仍然保持直立状态, 与地面直接接触的比例较小。特别是以前在同一个试验地点利用凋落物袋技术的研究发现, 年均凋落物失重率为 31%—40%<sup>[9]</sup>, 而本研究结果表明培养 96d 凋落物的失重率平均为 25%—31% (图 1)。因此, 这些结果表明研究方法是可行的, 并且可以有效区分凋落物有机质分解过程中 CO<sub>2</sub> 排放和 DOC 淋溶的相对贡献。

有很多研究表明,增温导致凋落物失重加快、进而加快向大气中排放更多的碳<sup>[27, 28]</sup>,特别是在寒冷的地区由于低温限制了凋落物的分解,因而增温的刺激作用更明显<sup>[3, 9, 12, 29-31]</sup>。本研究结果支持了上述结论;同时也发现,即使在 0 和 5℃ 下培养 96d,凋落物失重率仍然达到 25% 左右,且在低于 10℃ 时凋落物失重率对温度和湿度变化不敏感,说明微生物通过长期低温环境的进化,在 0℃ 左右仍然具有较高的活性,此时凋落物湿度不是限制因子;而当温度高于 10℃ 时,凋落物失重率随其湿度增加而增大,说明在较高的温度下低湿度会限制微生物的活性。凋落物的含水量强烈影响着凋落物的分解,Willcock 等<sup>[17]</sup>研究发现,水分不足会降低凋落物的分解速率,大于 20℃ 以及高湿度可以提高分解者的活动。因此,在生长季未来增温增雨的背景下,青藏高原高寒草甸凋落物的分解将大大加快。

随着培养时间的延长,CO<sub>2</sub> 释放的速率快速降低,特别是在高温高湿的条件下,其下降速率更大(图 2),这主要是因为高温高湿导致了凋落物中可利用养分快速分解,凋落物中 C 素含量及 C/N 比迅速降低,且难分解物质相对增加,分解速率变缓<sup>[12, 32]</sup>。值得注意的是,以往多数研究均以气候变化对凋落物失重率的影响推测对 CO<sub>2</sub> 释放的影响<sup>[5, 9, 22, 27, 29-31, 33, 34]</sup>。然而,我们发现,这两者对气候变化的响应过程不完全相同(图 1 和 3),凋落物呼吸释放 CO<sub>2</sub> 速率的温度敏感性显著更大(图 6)。因此,增温增湿诱导的凋落物分解速率加快进而导致释放更多的 CO<sub>2</sub>,将对全球气温增加产生正反馈作用。

降水对凋落物的分解有着重要影响,降水一方面可制约凋落物化学成分淋溶的物理过程,另一方面还通过影响分解者的活性来间接影响凋落物的分解<sup>[19]</sup>。我们发现,随着培养的温度和湿度增加,凋落物浸提液中的 DOC 含量也显著增加(图 5),但随着培养时间的延长均呈线性下降(图 4)。主要是因为凋落物质量随着分解时间延长而下降所致的<sup>[12, 32]</sup>。更重要的是,DOC 淋溶量的温度敏感性远远低于 CO<sub>2</sub> 释放的温度敏感性(图 6),表明在未来气候变化情景下凋落物中的有机碳更多地将以 CO<sub>2</sub> 气体的形式释放到大气中,而不是以 DOC 的形式更多地淋溶到土壤中。以前的研究表明,增温显著提高了植物地上生产力和凋落物生物量<sup>[9, 26]</sup>以及地下生物量<sup>[35]</sup>,同时也增加了土壤水溶液中的 DOC 含量<sup>[36]</sup>。因此,凋落物分解对全球气候变化的反馈作用主要取决于凋落物积累和分解之间的平衡<sup>[29, 37]</sup>,对土壤固碳潜力的影响也将取决于上述过程的平衡。本研究也表明,为了更好的理解气候变化对凋落物分解过程的影响及其对气候变化的反馈作用,需要更多地关注不同气候变化情境下 CO<sub>2</sub> 和 DOC 释放的温度敏感性的变化。

#### 4 结论

本研究表明,总体上高寒草甸凋落物分解速率随着温度和湿度的增加而加快;高湿度条件下凋落物有机质分解释放 CO<sub>2</sub> 的敏感性是低湿度的 2 倍以上;DOC 释放的温度敏感性随湿度变化不大;特别是 CO<sub>2</sub> 的温度敏感性是 DOC 的温度敏感性的 10—20 倍,说明未来气候变化情境下凋落物中的有机质分解时更多的以 CO<sub>2</sub> 形式排放到大气中。因此,未来需要系统的研究不同气候变化情境下凋落物积累与分解、DOC 淋溶和土壤碳库的动态变化,从而更好的理解这些生态系统碳循环过程的变化及其对气候变化产生的反馈作用和机制。

#### 参考文献 (References):

- [1] De Angelis P, Chigwerewe K S, Mugnozza G E S. Litter quality and decomposition in a CO<sub>2</sub>-enriched Mediterranean forest ecosystem. *Plant and Soil*, 2000, 224(1): 31-41.
- [2] Ogée J, Brunet Y. A forest floor model for heat and moisture including a litter layer. *Journal of Hydrology*, 2002, 255(1/4): 212-233.
- [3] Robinson C H. Controls on decomposition and soil nitrogen availability at high latitudes. *Plant and Soil*, 2002, 242(1): 65-81.
- [4] Berg B, McLaugherty C. *Plant Litter: Decomposition, Humus Formation, Carbon Sequestration*. Berlin: Springer, 2003.
- [5] Xu G P, Hu Y G, Wang S P, Zhang Z H, Chang X F, Duan J C, Luo C Y, Chao Z G, Su A L, Lin Q Y, Li Y N, Du M Y. Effects of litter quality and climate change along an elevation gradient on litter mass loss in an alpine meadow ecosystem on the Tibetan Plateau. *Plant Ecology*, 2010, 209(2): 257-268.
- [6] Christiansen C T, Haugwitz M S, Priemé A, Nielsen C S, Elberling B, Michelsen A, Grogan P, Blok D. Enhanced summer warming reduces fungal decomposer diversity and litter mass loss more strongly in dry than in wet tundra. *Global Change Biology*, 2017, 23(1): 406-420.
- [7] Lv W W, Zhang L R, Niu H S, Li B W, Wang Q, Zhou Y, Wang Y F, Jiang L L, Liu P P, Hong H, Luo C Y, Tsechoe D, Zhou H K, Wang S P. Non-linear temperature sensitivity of litter component decomposition under warming gradient with precipitation addition on the Tibetan plateau.

- Plant and Soil, 2020, 448(1): 335-351.
- [ 8 ] Christiansen C T, Mack M C, DeMarco J, Grogan P. Decomposition of senesced leaf litter is faster in tall compared to low birch shrub tundra. *Ecosystems*, 2018, 21(8): 1564-1579.
- [ 9 ] Luo C Y, Xu G P, Chao Z G, Wang S P, Lin X W, Hu Y G, Zhang Z H, Duan J C, Chang X F, Su A L, Li Y N, Zhao X Q, Du M Y, Tang Y H, Kimball B. Effect of warming and grazing on litter mass loss and temperature sensitivity of litter and dung mass loss on the Tibetan plateau. *Global Change Biology*, 2010, 16(5): 1606-1617.
- [ 10 ] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 1992, 44(2): 81-99.
- [ 11 ] Lavelle P, Blanchart E, Martin A, Martin S, Spain A. A hierarchical model for decomposition in terrestrial ecosystems: application to soils of the humid tropics. *Biotropica*, 1993, 25(2): 130-150.
- [ 12 ] Aerts R. Climate, leaf litter chemistry and leaf litter decomposition in terrestrial ecosystems: a triangular relationship. *Oikos*, 1997, 79(3): 439-449.
- [ 13 ] Cadish G, Giller KE. *Driven by Nature: Plant Litter Quality and Decomposition*. Wallingford: CAB International, 1997: 17-20.
- [ 14 ] 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.
- [ 15 ] Hobbie S E. Temperature and plant species control over litter decomposition in alaskan tundra. *Ecological Monographs*, 1996, 66(4): 503-522.
- [ 16 ] Garcia-Pausas J, Casals P, Romanyà J. Litter decomposition and faunal activity in Mediterranean forest soils: effects of N content and the moss layer. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(6): 989-997.
- [ 17 ] Willcock J, Magan N. Impact of environmental factors on fungal respiration and dry matter losses in wheat straw. *Journal of Stored Products Research*, 2000, 37(1): 35-45.
- [ 18 ] 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.
- [ 19 ] 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.
- [ 20 ] IPCC. *Climate Change 2013: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [ 21 ] 杨万勤, 邓仁菊, 张健. 森林凋落物分解及其对全球气候变化的响应. *应用生态学报*, 2007, 18(12): 2889-2895.
- [ 22 ] Fierer N, Craine J M, McLaughlan K, Schimel J P. Litter quality and the temperature sensitivity of decomposition. *Ecology*, 2005, 86(2): 320-326.
- [ 23 ] Qualls R G, Haines B L, Swank W T. Fluxes of dissolved organic nutrients and humic substances in a deciduous forest. *Ecology*, 1991, 72(1): 254-266.
- [ 24 ] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, Michalzik B, Matzner E. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review. *Soil Science*, 2000, 165(4): 277-304.
- [ 25 ] McDowell W H. Dissolved organic matter in soils—future directions and unanswered questions. *Geoderma*, 2003, 113(3/4): 179-186.
- [ 26 ] Wang S P, Duan J C, Xu G P, Wang Y F, Zhang Z H, Rui Y C, Luo C Y, Xu B R B Y, Zhu X X, Chang X F, Cui X Y, Niu H S, Zhao X Q, Wang W Y. Effects of warming and grazing on soil N availability, species composition, and ANPP in an alpine meadow. *Ecology*, 2012, 93(11): 2365-2376.
- [ 27 ] Shaw M R, Harte J. Control of litter decomposition in a subalpine meadow-sagebrush steppe ecotone under climate change. *Ecological Applications*, 2001, 11(4): 1206-1223.
- [ 28 ] Liski J, Nissinen A, Erhard M, Taskinen O. Climatic effects on litter decomposition from Arctic tundra to tropical rainforest. *Global Change Biology*, 2003, 9(4): 575-584.
- [ 29 ] Cornelissen J H C, van Bodegom P M, Aerts R, Callaghan T V, van Logtestijn R S P, Alatalo J, Stuart Chapin F, Gerdol R, Gudmundsson J, Gwynn-Jones D, Hartley A E, Hik D S, Hofgaard A, Jónsdóttir I S, Karlsson S, Klein J A, Laundre J, Magnusson B, Michelsen A, Molau U, Onipchenko V G, Quested H M, Sandvik S M, Schmidt I K, Shaver G R, Solheim B, Soudzilovskaia N A, Stenström A, Tolvanen A, Totland Ø, Wada N, Welker J M, Zhao X Q. Global negative vegetation feedback to climate warming responses of leaf litter decomposition rates in cold biomes. *Ecology Letters*, 2007, 10(7): 619-627.
- [ 30 ] Bardgett R D, Freeman C, Ostle N J. Microbial contributions to climate change through carbon cycle feedbacks. *The ISME Journal*, 2008, 2(8): 805-814.
- [ 31 ] Craine J M, Fierer N, McLaughlan K K. Widespread coupling between the rate and temperature sensitivity of organic matter decay. *Nature Geoscience*, 2010, 3(12): 854-857.
- [ 32 ] Bohlen P J, Parmelee R W, McCartney D A, Edwards C A. Earthworm effects on carbon and nitrogen dynamics of surface litter in corn agroecosystems. *Ecological Applications*, 1997, 7(4): 1341-1349.
- [ 33 ] Aerts R. The freezer defrosting: global warming and litter decomposition rates in cold biomes. *Journal of Ecology*, 2006, 94(4): 713-724.
- [ 34 ] Ward S E, Orwin K H, Ostle N J, Briones M J I, Thomson B C, Griffiths R I, Oakley S, Quirk H, Bardgett R D. Vegetation exerts a greater control on litter decomposition than climate warming in peatlands. *Ecology*, 2015, 96(1): 113-123.
- [ 35 ] Lin X W, Zhang Z H, Wang S P, Hu Y G, Xu G P, Luo C Y, Chang X F, Duan J C, Lin Q Y, Xu B R B Y, Wang Y F, Zhao X Q, Xie Z B. Response of ecosystem respiration to warming and grazing during the growing seasons in the alpine meadow on the Tibetan plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(7): 792-802.
- [ 36 ] Luo C Y, Xu G P, Wang Y F, Wang S P, Lin X W, Hu Y G, Zhang Z H, Chang X F, Duan J C, Su A L, Zhao X Q. Effects of grazing and experimental warming on DOC concentrations in the soil solution on the Qinghai-Tibet plateau. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(12): 2493-2500.
- [ 37 ] 彭少麟, 刘强. 森林凋落物动态及其对全球变暖的响应. *生态学报*, 2002, 22(9): 1534-1544.