

DOI: 10.5846/stxb201803140509

杨红玲, 李玉霖, 宁志英, 张子谦. 添加混合凋落物对沙丘草地土壤有机碳矿化的影响. 生态学报, 2019, 39(7): - .

Yang H L, Li Y L, Ning Z Y, Zhang Z Q. Effects of mixed litter on organic carbon mineralization in a dune grassland. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(7): - .

## 添加混合凋落物对沙丘草地土壤有机碳矿化的影响

杨红玲<sup>1,2</sup>, 李玉霖<sup>1,\*</sup>, 宁志英<sup>1,2</sup>, 张子谦<sup>1,2</sup>

1 中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 730000

2 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:** 土壤有机碳矿化是调节温室气体排放、土壤有机质形成以及土壤生物和植物营养供应的重要过程, 植物残体分解释放 CO<sub>2</sub> 对土壤有机碳矿化有着重要影响。本文通过对科尔沁沙地沙丘草地 4 种优势植物叶凋落物的混合培养试验, 测定了凋落物培养过程中 CO<sub>2</sub> 释放速率及其累积释放量, 比较了混合凋落物 CO<sub>2</sub> 释放量实测值与预测值的差异, 分析了凋落物化学成分和物种多样性(包括物种丰富度和物种组成)与土壤有机碳矿化的相关关系, 以期解释添加混合凋落物对土壤有机碳矿化的影响。结果表明, 混合凋落物物种丰富度对土壤有机碳矿化的影响不显著, 而凋落物一些化学性质与土壤有机碳矿化紧密相关; 所有混合组合处理中, 80% 的凋落物组合处理对土壤有机碳矿化产生显著 ( $P < 0.05$ ) 的非加和效应; 氮含量较高的豆科植物达乌里胡枝子凋落物与禾本科植物凋落物混合后土壤有机碳矿化表现极显著 ( $P < 0.001$ ) 的协同非加和效应, 而禾本科植物凋落物交互混合后土壤有机碳矿化产生显著拮抗非加和效应, 这可能是凋落物化学成分相似或凋落物叶片的空间异质性引起的。

**关键词:** 外源有机物; 凋落物化学成分; 物种多样性; 非加和效应

## Effects of mixed litter on organic carbon mineralization in a dune grassland

YANG Hongling<sup>1,2</sup>, LI Yulin<sup>1,\*</sup>, NING Zhiying<sup>1,2</sup>, ZHANG Ziqian<sup>1,2</sup>

1 Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** The mineralization of organic carbon in soil is an important process that regulates greenhouse gas emissions, soil organic matter formation, and nutrient availability for soil biota and plants. The decomposition and release of CO<sub>2</sub> from plant residue are important processes that affect soil organic carbon mineralization, and many studies have explored the changes in soil organic carbon following litter addition; however, these studies focus on the effects of single type of litter addition and failed to consider the effects of mixed litter. In both natural and managed ecosystems, plant litter, with different chemical compositions, generally become mixed by the influence of wind, water, or humans, and animals influence the degradation process of organic matter in the soil. Hence, examining the effects of the chemical traits of litter mixtures and litter species diversity on the mineralization of soil organic carbon is of considerable importance. In this study, litters of typical plants *Setaria viridis*, *Phragmites communis* Trin, *Cleistogenes squarrosa*, *Lespedeza davurica*, and sandy soil from the Horqin dune grassland was collected and incubated in a laboratory for 95 days. In order to explain the effects of mixed-species litter on soil organic carbon mineralization, four single litter species and their mixtures, consisting of all possible 2-, 3- and 4-species combinations, were added to soil in jars. We described the dynamics of organic carbon mineralization rates and calculated the cumulative release of CO<sub>2</sub> for all treatments and the difference between measured and predicted effects for the litter mixture. We also explored the effects of chemical traits and species diversity on soil organic carbon mineralization. The

基金项目: 国家自然科学基金(41471083); 国家重点研发计划(2016YFC0500907)

收稿日期: 2018-03-14; 网络出版日期: 2018-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liyl@lzb.ac.cn

results showed that soil organic carbon mineralization was not influenced by the richness of the litter mixture but was closely related to the litter chemical properties, such as N, C/N, lignin/N, and LOM I contents. This suggests that compared with litter mixture with few species, mixed litter with higher species diversity might have functional redundancy. In most instances, species mixing produced no-additive effect on soil organic carbon mineralization, and synergistic non-additive effects were more common than antagonistic non-additive effects, with 7 vs. 2. When the *Lespedeza davurica* litter was mixed with the gramineous plant litter, soil organic carbon mineralization showed synergistic effects. When the gramineous plant litter was mixed, soil organic carbon mineralization was antagonistic. This might be in part attributed to the similarity of litter chemical composition between the two litter types or from the spatial heterogeneity of the leaf litter.

**Key Words:** exogenous organic matter; litter chemical composition; species diversity; non-additive effect

土壤有机碳泛指各种形式和状态存在于土壤中的含碳化合物,主要是土壤腐殖质、动植物残体和微生物体中碳的总和。据估计,全球每年因土壤有机碳矿化释放的  $\text{CO}_2$  占碳年流通量的 70% 以上<sup>[1]</sup>。其中,植物残体分解释放  $\text{CO}_2$  和向土壤中输入碳是影响土壤有机碳矿化的重要过程和因素,这是因为陆地生态系统植被生物量最终都以凋落物的形式输入到土壤<sup>[2-3]</sup>。但是,自然生态系统中凋落物主要以多种植物残体混合物的形式存在。不同来源凋落物的他感作用、凋落物对微生物群体的特化作用都会影响土壤微生物结构和活性<sup>[4-5]</sup>,进而影响土壤有机碳的矿化作用。

很多研究证实添加混合凋落物对土壤有机碳矿化速率产生显著影响,既添加混合凋落物的实际土壤有机碳矿化速率偏离于基于单种凋落物计算的预期矿化速率<sup>[6-8]</sup>。混合凋落物对土壤有机碳矿化的影响与凋落物的化学性质之间存在密切关系<sup>[9]</sup>。有研究发现混合凋落物中不同物种相互影响使得营养物质释放及有机化合物降解发生变化,导致土壤微生物生长及其活性改变,进而对土壤有机碳矿化作用产生影响<sup>[10-12]</sup>。也有研究发现混合凋落物对土壤碳矿化的显著效应与凋落物化学成分多样性有关,凋落物中加入氮含量高的豆科类植物能促进土壤碳矿化作用<sup>[13]</sup>。但是,关于凋落物化学组成和多样性对土壤有机碳矿化的作用目前仍存在较大的争议。有学者认为凋落物混合对土壤有机碳矿化没有显著的影响(即为加和效应)<sup>[14]</sup>。然而,Bing Mao 在内蒙古地区的混合凋落物添加试验中观测到土壤有机碳矿化显著的非加和效应,但是这种非加和效应不受混合凋落物化学多样性和化学组成的影响<sup>[7]</sup>。此外,也有研究发现低质量的白桦凋落物与低质量的小干松混合时土壤有机碳矿化速率减慢<sup>[15]</sup>。因此,有必要针对不同类型的陆地生态系统,研究混合凋落物对土壤有机碳矿化作用的影响,这对于综合分析不同类型生态系统对全球气候变化的贡献以及全球尺度碳收支平衡具有重要意义。

近几十年来,科尔沁沙地发生了比较严重的土地沙漠化。强烈的风蚀带走了土壤中大量有机物和养分,不仅造成土壤粗质化和贫瘠化,而且造成地表凋落物在局地的二次混合。但是关于该区域凋落物混合对土壤有机碳矿化影响的报道非常有限。本研究以科尔沁沙地优势植物叶凋落物为材料,通过添加不同物种组合的凋落物,研究科尔沁沙地沙丘草地土壤有机碳矿化的变化特征及其与物种多样性和化学特性的关系,并比较添加混合凋落物的实际土壤有机碳矿化速率与基于添加单种凋落物计算的预期矿化速率之间的差异,以期为深入认识区域陆地碳循环全球气候变化的贡献以及区域尺度碳收支平衡提供科学依据。

## 1 研究区概况和研究方法

### 1.1 研究区概括

研究区位于内蒙古东部科尔沁沙地南缘的奈曼旗境内,地处  $120^{\circ}19'40''$ — $121^{\circ}35'40''\text{E}$ ,  $42^{\circ}14'40''$ — $43^{\circ}32'20''\text{N}$ 。气候属于北温带大陆性季风干旱气候。年平均气温  $6.0$ — $6.5^{\circ}\text{C}$ 。平均降水量  $366\text{ mm}$ 。无霜期平均  $150\text{ d}$  左右。冬季多西北风,春季多西南风,年平均风速  $3.6$ — $4.1\text{ m/s}$ 。受沙漠化的影响,大部分土壤为风沙土。沙地植被由旱生和沙生植物物种构成,主要植物物种有小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、芦苇

(*Phragmites communis Trin*)、差巴嘎蒿 (*Artemisia halodendron*)、黄蒿 (*Artemisia scoparia*)、黄柳 (*Salix gordejvii*)、糙隐子草 (*Cleistogenes squarrosa*)、狗尾草 (*Setaria viridis*)、达乌里胡枝子 (*Lespedeza davurica*) 和白草 (*Pennisetum centrasiaticum*) 等。由于生境恶化,植物种类减少,结构趋于简单,植被发育不良,群落的覆盖度只有 10%—40%,产草量 300—3000 kg/hm<sup>2</sup>。

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 样品采集和处理

以科尔沁沙地中南部奈曼旗境内沙丘草地的 4 种优势植物:狗尾草、达乌里胡枝子、芦苇及糙隐子草的叶凋落物为研究对象。秋季(9 月到 10 月初)采集每种植物尚未脱落的新鲜叶凋落物或地面立枯物带回实验室,在 85℃ 下烘干 24 h。将 4 种凋落物剪成 0.5 cm 长的碎屑后进行单一、两两、三三及 4 种等质量混合组合处理(表 1),并保证总质量为 1 g(1 种凋落物处理为 1 g,2 种凋落物处理为各 0.5 g,3 种凋落物处理为各 0.333 g,4 种凋落物处理为各 0.25 g),以备有机碳矿化培养实验之用。

实验通过随机取样的方法,在相应的沙丘草地上用土钻采集固定沙丘 0—10 cm 土壤,带回实验室后过 2 mm 土筛,取少部分土样风干后进行土壤理化性质测定,其余土样保存在 4℃ 冰箱里以备有机碳矿化培养实验之用。供试土壤沙粒含量较高,极细砂和中粗砂含量之和为 90.9%,粘粉粒含量为 9.1%。土壤有机碳和全氮含量分别为 1.86 g/kg 和 0.27 g/kg,田间最大持水量为 17.2%,土壤容重为 1.56 g/cm<sup>3</sup>。

表 1 凋落物物种组成及各物种比例

Table 1 Litter composition and its ratio in different treatments

| 物种组成比例<br>Ratio of composition | 物种组成<br>Litter composition |          |          |          |       |       |
|--------------------------------|----------------------------|----------|----------|----------|-------|-------|
| 1                              | CS                         | LD       | SV       | PA       |       |       |
| 1:1                            | CS+LD                      | CS+SV    | CS+PA    | LD+SV    | LD+PA | SV+PA |
| 1:1:1                          | CS+LD+SV                   | CS+LD+PA | CS+SV+PA | LD+SV+PA |       |       |
| 1:1:1:1                        | CS+LD+SV+PA                |          |          |          |       |       |

CS: 糙隐子草, *Cleistogenes squarrosa*; LD: 达乌里胡枝子, *Lespedeza davurica*; PA: 芦苇, *Phragmites communis Trin*; SV: 狗尾草, *Setaria viridis*

### 1.2.2 矿化培养

实验采用室内培养的方法,准确称取 200 g 新鲜供试土壤干土(通过土壤含水量计算),均匀平铺在 500 mL 广口瓶瓶底,用蒸馏水将土壤含水量调节至田间最大持水量的 60%。本实验共设置 16 个处理,其中 1 个对照(CK)处理,4 个添加单种凋落物处理,6 个添加两种凋落物处理,4 个添加 3 种凋落物处理和 1 个添加 4 种凋落物处理,每个处理 5 个重复。精确称取 1 g 凋落物样品,放置于上述广口瓶内土壤表面,对照(CK)不放置凋落物。将培养样品放置在培养箱中,于 22—25℃ 培养 103 d。培养期间通过称重法人工补充广口瓶水分,保证整个实验过程中广口瓶内土壤湿度始终为田间最大持水量的 60% 左右。培养期间盖上透气不透水膜以保证足够的氧气输入并防止水分损失过快。

### 1.2.3 CO<sub>2</sub>释放速率测定

培养广口瓶采用 Li-Cor 840A CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 分析仪闭路系统测定 CO<sub>2</sub>释放速率,培养前 30 d,每 3 d 测定一次 CO<sub>2</sub>释放速率,30—65 d 期间,每 7 d 测定一次 CO<sub>2</sub>释放速率,65—103 d 期间,每 15 d 测定一次 CO<sub>2</sub>释放速率,103 d 内共计测定 18 次。每个样品瓶测定时间为 3 min,每 1 s 采集 1 个数据,取中间 100 s 的数据分析,用一元线性斜率法计算样品瓶中 CO<sub>2</sub>增加速率,并计算培养期间 CO<sub>2</sub>释放量。

### 1.2.4 凋落物质量测定方法

凋落物 C 和 N 含量分别采用凯氏定氮法和重铬酸钾氧化-外加热法测定;凋落物木质素含量通过溶解后采用紫外分光光度法测定;凋落物极易分解有机物(LOM I)、中易分解有机物(LOM II)、难分解有机物(RP)采用溶解后的质量差法测定。LOM I 通过 2.5 mol/LH<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液 105℃ 热水解样品 30 min 获得,过滤后的残渣

经过 13 mol/LH<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 静置过夜后稀释成 1 mol/LH<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液,于 105℃ 热水解 3 h,过滤、烘干称重,获得中易分解有机物 LOM II,剩余部分为难分解有机物 RP。

### 1.2.5 数据分析

采用 One-way ANOVON 分析单种凋落物及混合凋落物等 15 个处理之间 CO<sub>2</sub> 累计释放量与凋落物化学成分的差异;培养过程中不同处理 CO<sub>2</sub> 释放速率的差异采用 repeated-measures ANOVA 进行分析;采用 Pearson 相关分析分析凋落物化学成分和土壤有机碳矿化量之间的关系;凋落物质量 PCA 排序用 Canoco 4.5 完成;添加混合凋落物培养样品 CO<sub>2</sub> 释放量与根据其组成凋落物单独分解预测值之间的差异采用 One-way ANOVON 完成。添加混合凋落物土壤有机碳矿化的预测值  $Y_{pre}$  通过下式计算:

$$Y_{pre} = \frac{X_1 + X_2 + \cdots + X_n}{n}$$

式中, $X_n$  表示第  $n$  种凋落物 C 矿化量, $n$  表示凋落物种类数量。

## 2 结果分析

### 2.1 供试凋落物质量

由表 2 可以看出,4 种植物叶凋落物 C 含量比较接近,LD 叶凋落物 N 含量较大,L 含量较低,所以 C/N 和 L/N 较小;PA 叶凋落物 N 含量较小,L 含量较高,相应的 C/N 和 L/N 较大。4 种凋落物中,LOM I 含量最小值为 35%(CS),最大值为 50.67%(SV),中易分解有机物的变化范围在 15.18%(LD)—29.43%(CS)之间,难分解有机物含量在 30.9%(SV)—37%(LD)之间。

混合凋落物中,CS+PA 的 L 含量、C/N、L/N、LOM II 和 RP 含量最高,N 含量和 LOM I 含量最低;SV+LD 的 N 含量和 LOM I 含量最高,C/N 比值和 L/N 比值最低。混合凋落物的 C 含量、N 含量、L 含量、C/N、L/N、LOM I、LOM II 和 RP 的变化范围均在单个凋落物相应指标的范围之内,说明混合凋落物的化学性质直接受混合前单个凋落物化学成分的影响(表 2)。

表 2 供试凋落物初始化学性质

Table 2 Initial litter chemical traits of all treatments

| 化学指标<br>Chemical index            | CS    | LD    | PA    | SV    | SV+PA | SV+LD | LD+PA | CS+SV | CS+PA | CS+LD | CS+LD+PA | CS+SV+LD | SV+LD+PA | CS+SV+PA | CS+SV+LD+PA |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|-------------|
| 碳含量<br>Carbon content             | 44.27 | 44.17 | 45.40 | 43.04 | 44.22 | 44.27 | 45.12 | 44.99 | 44.84 | 44.89 | 43.95    | 43.83    | 44.54    | 44.9     | 43.89       |
| 氮含量<br>Nitrogen content           | 1.00  | 1.74  | 1.09  | 1.21  | 1.16  | 1.51  | 1.41  | 1.14  | 1.05  | 1.44  | 1.29     | 1.35     | 1.38     | 1.10     | 1.29        |
| 木质素含量<br>Lignin content           | 13.50 | 10.09 | 13.93 | 10.77 | 12.35 | 11.43 | 11.34 | 12.13 | 13.71 | 12.80 | 13.17    | 11.45    | 12.26    | 13.40    | 13.07       |
| 碳含量/氮含量<br>Carbon:Nitrogen        | 44.24 | 25.38 | 41.90 | 35.76 | 38.25 | 29.46 | 31.94 | 39.69 | 42.99 | 31.32 | 34.19    | 32.70    | 32.34    | 40.92    | 33.97       |
| 木质素/氮含量<br>Lignin:Nitrogen        | 13.45 | 5.79  | 12.85 | 8.92  | 10.68 | 7.60  | 8.06  | 10.71 | 13.13 | 9.00  | 10.24    | 8.52     | 8.87     | 12.18    | 10.14       |
| 极易分解有机物<br>Labile organic matter  | 35.00 | 47.82 | 45.83 | 50.67 | 48.58 | 49.24 | 47.49 | 44.17 | 41.08 | 42.41 | 43.55    | 44.50    | 48.77    | 44.50    | 44.50       |
| 中易分解有机物<br>Medium organic matter  | 29.43 | 15.18 | 19.25 | 18.43 | 18.84 | 18.14 | 17.88 | 23.27 | 23.34 | 22.97 | 22.29    | 22.02    | 18.62    | 22.37    | 21.24       |
| 难分解有机物<br>Stubborn organic matter | 35.57 | 37.00 | 34.91 | 30.90 | 32.57 | 32.61 | 34.62 | 32.57 | 35.57 | 34.61 | 34.16    | 33.49    | 32.60    | 33.13    | 34.26       |

凋落物化学成分的主成分分析(PCA)(图 1)显示,4 种凋落物的化学成分界限明显,而且混合凋落物主要分布在对应单个凋落物的周围,说明混合凋落物化学成分与对应物种凋落物化学成分关系密切。PCA 分析的前两轴可以解释凋落物化学成分 94.6% 的变异。其中第一轴主要反应了凋落物 N 含量、L 含量、L/N、C/



N 的变化梯度,能够解释 83.4%的变异,第二轴主要反应了 RP 的变化梯度,能够解释 11.2%的变异。

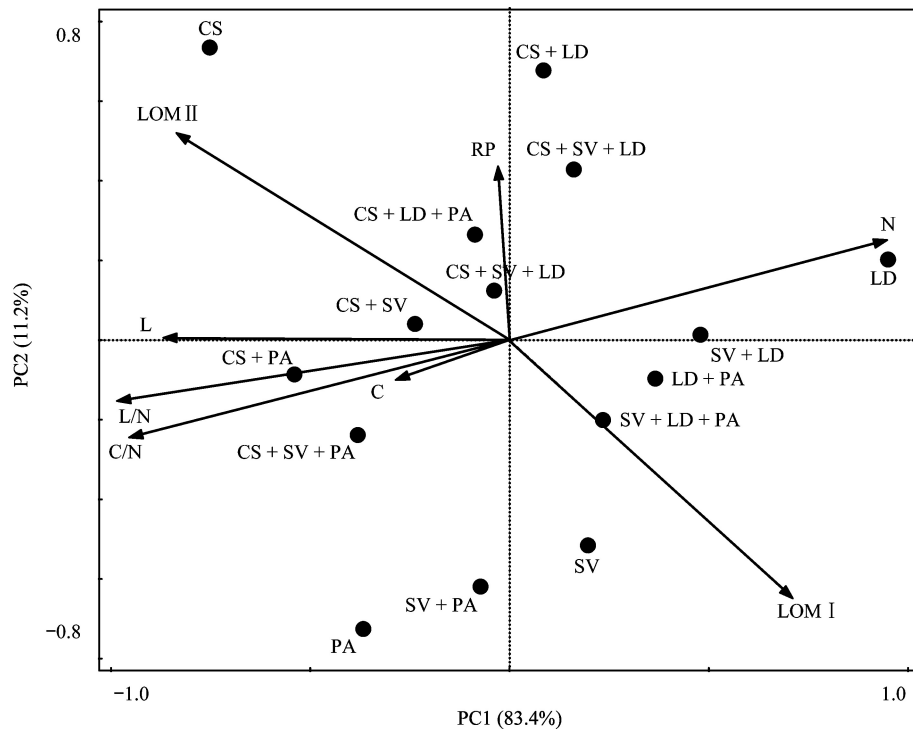


图 1 凋落物化学成分的主成分分析

Fig.1 Principal component plot of litter chemical traits of all species

## 2.2 土壤有机碳矿化速率和累积碳矿化量

添加单种凋落物和混合凋落物,其培养样品有机碳矿化速率趋势大致都相同(图 2),包含两个过程:快速分解过程和缓慢分解过程,快速分解过程持续时间短但有机碳矿化速率快,缓慢分解过程虽然有机碳矿化速率慢但持续时间长。在为期 103 天的培养过程中,添加 4 种单一凋落物培养样品有机碳矿化总量分别是 SV ( $(9.09 \pm 0.95)$  mg/g 干土) > LD ( $(6.27 \pm 0.92)$  mg/g 干土) > PA ( $(6.22 \pm 1.34)$  mg/g 干土) > CS ( $(4.93 \pm 0.42)$  mg/g 干土),其中添加 SV 凋落物培养样品累积  $\text{CO}_2$  释放量显著大于其他三种凋落物。混合凋落物中,PA+CS、SV+PA、SV+PA+CS 的累计  $\text{CO}_2$  释放量较小,分别为  $(5.09 \pm 1.11)$  mg/g 干土、 $(5.55 \pm 0.53)$  mg/g 干土和  $(6.18 \pm 1.03)$  mg/g 干土,累计  $\text{CO}_2$  释放量较大的混合凋落物组合是 SV+LD、PA+LD,分别为  $(9.55 \pm 0.61)$  mg/g 干土和  $(9.65 \pm 0.66)$  mg/g 干土。总体来讲,整个培养过程中,15 种添加凋落物培养样品的累计  $\text{CO}_2$  释放量差异显著 ( $P < 0.001$ )。

## 2.3 土壤有机碳矿化与凋落物物种多样性及化学成分的关系

由图 3 可以看出,禾本科植物如 SV、PA 和 CS 的混合凋落物在培养过程中累计  $\text{CO}_2$  释放量比较小(如 SV+PA、CS+SV、CS+PA、CS+SV+PA 处理),而禾本科植物与豆科植物达乌里胡枝子的混合凋落物累计释放  $\text{CO}_2$  量比较大(如 SV+LD、PA+LD、CS+LD、SV+PA+LD、SV+PA+CS+LD 及 SV+PA+CS+LD 处理),说明所添加的凋落物物种组成对土壤碳矿化量有一定的影响。进一步研究发现达乌里胡枝子凋落物的多度(相对

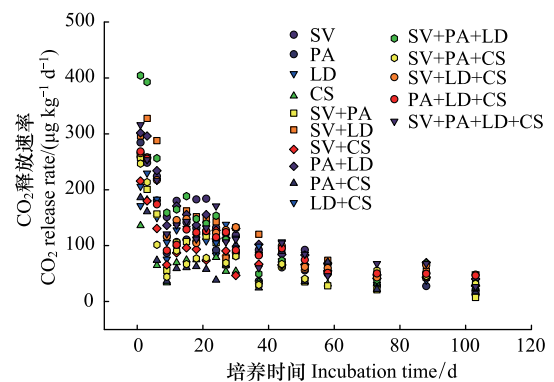


图 2 培养样品有机碳矿化速率曲线图

Fig.2 Dynamics of organic C mineralization rates of soil sample during incubation period

含量)与累积 CO<sub>2</sub> 释放量表现极显著的正相关关系 ( $P=0.0006$ ),而糙隐子草、狗尾草和芦苇草的多度与累积 CO<sub>2</sub> 释放量没有显著的相关性(图 4),表明凋落物中达乌里胡枝子多度决定土壤有机碳矿化量。

相关分析结果显示,15 种凋落物组合处理培养过程中矿化有机碳总量与凋落物的 N 含量、C/N、木质素/N、LOM I 和 PCA1 等指标之间存在显著的相关性 ( $P<0.05$ ),说明本研究中所添加凋落物的 N 含量、C/N、木质素/N 对土壤有机碳矿化量有显著的影响。其中 C/N、木质素/N 指标对土壤碳矿化量产生负效应 ( $P<0.01$ )。此外,土壤碳矿化量与凋落物的 C 含量、木质素含量、LOM II 含量、RP 含量和 PCA2 之间无显著相关关系(表 3)。

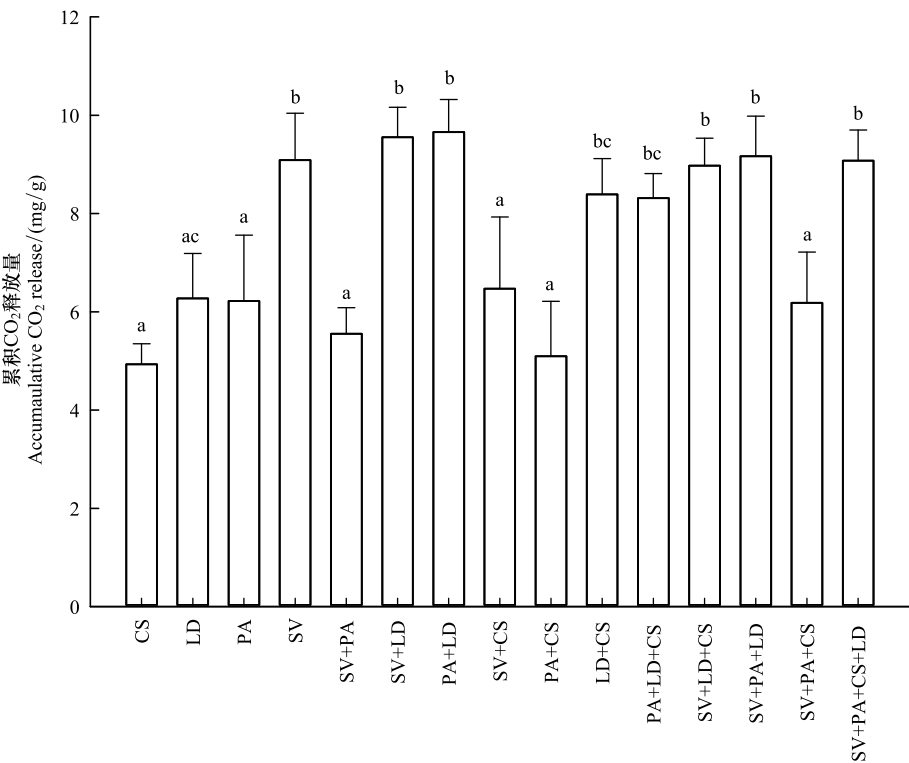


图 3 培养样品有机碳矿化量  
Fig.3 Cumulative release of CO<sub>2</sub> in soil sample during incubation period

表 3 培养样品有机碳矿化量与凋落物化学成分的相互关系  
Table 3 Correlation of soil organic C mineralization with litter chemical traits

| 化学指标<br>Chemical index         | CO <sub>2</sub> 累计释放量<br>Accumulative CO <sub>2</sub> release | P 值<br>P Value |
|--------------------------------|---------------------------------------------------------------|----------------|
| 碳含量 Carbon content             | -0.324                                                        | 0.239          |
| 氮含量 Nitrogen content           | 0.543                                                         | 0.037          |
| 木质素 Lignin content             | -0.446                                                        | 0.096          |
| 碳/氮 Carbon: Nitrogen           | -0.671                                                        | 0.006          |
| 木质素/氮 Lignin: Nitrogen         | -0.653                                                        | 0.008          |
| 极易分解有机物 Labile organic matter  | 0.515                                                         | 0.049          |
| 中易分解有机物 Medium organic matter  | -0.408                                                        | 0.132          |
| 难分解有机物 Stubborn organic matter | -0.412                                                        | 0.127          |
| 主成分 1 PCA1                     | 0.579                                                         | 0.024          |
| 主成分 2 PCA2                     | 0.075                                                         | 0.79           |

2.4 土壤有机碳矿化的非加和效应

在 11 种添加混合凋落物试验中,除了 SV+PA+CS 和 SV+CS 2 种之外,其他 9 种组合培养样品 CO<sub>2</sub> 释放量

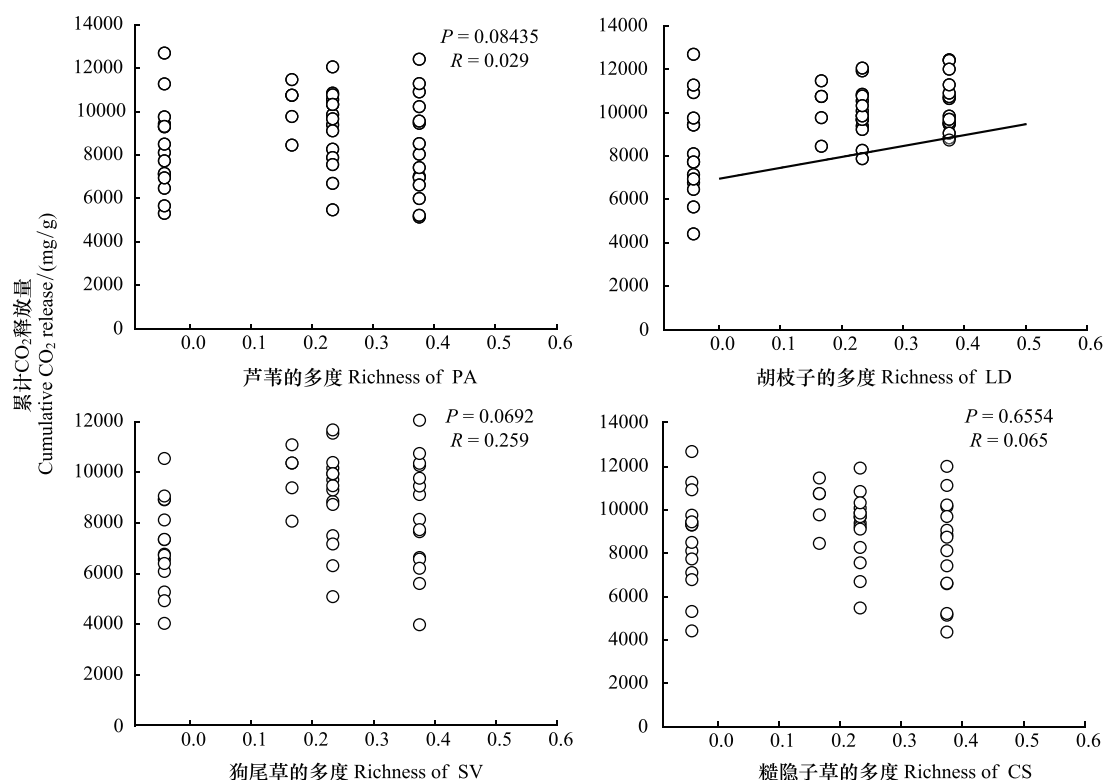


图4 土壤碳矿化与混合物中各物种多度的相关性

Fig.4 Soil organic C mineralization responses to the richness of single-species in litter mixture

都呈现显著的非加和效应( $P < 0.05$ )。其中 SV+PA 和 PA+CS 两种组合 CO<sub>2</sub> 释放量表现为拮抗非加和效应,其余都是协同非加和效应。此外,3 种禾本科草凋落物混合处理的 CO<sub>2</sub> 释放速率和累计释放量实测值比预测值分别平均下降了 49% 和 37% (SV+PA)、24% 和 9% (SV+PA+CS)、14% 和 8% (SV+CS) 及 28% 和 9% (PA+CS),说明禾本科草凋落物的混合在一定程度上抑制了凋落物有机碳矿化分解。但是,所有包含达乌里胡枝子凋落物的混合处理(图 5)中,CO<sub>2</sub> 释放速率和累计释放量的实测值比预测值分别提高了 28%—60% 和 24%—54%,表明在禾本科草凋落物中混入达乌里胡枝子凋落物可以促进混合凋落物整体的有机碳矿化分解。

### 3 讨论

#### 3.1 凋落物化学成分和物种多样性对土壤有机碳矿化的影响

一般而言,凋落物化学成分多样性越高,其中包含对凋落物矿化分解过程有强烈作用化合物的可能性就越大,不同化合物之间发生反应并激发微生物活性的可能性也越大<sup>[8,16-18]</sup>。本研究,氮含量较高的豆科植物达乌里胡枝子在混合凋落物中的多度与土壤有机碳矿化极显著相关( $P < 0.001$ );相反,氮含量较低的各种禾本科草凋落物的多度对土壤有机碳矿化的影响比较小。混合凋落物物种组成对土壤有机碳矿化的影响主要来源于混合凋落物的化学成分多样性,具有较高化学异质性的物种混合后,土壤有机碳矿化速率会加快。试验中三种禾本科植物凋落物质量相差不大,凋落物化学成分没有互补作用,因此混合凋落物中豆科植物胡枝子的多度决定土壤有机碳矿化量。本研究结果也证实了 Hättenschwiler 提出的假设:高质量凋落物与低质量凋落物混合后,分解者优先利用混合物中的易分解有机物,使混合物中可利用营养物质含量升高,并传送到低质量凋落物中,进而加快土壤碳矿化速率<sup>[10]</sup>。此外,添加狗尾草凋落物培养样品有机碳矿化量显著高于添加其他 3 种凋落物,这可能与狗尾草凋落物中极易分解有机物含量比较高有关,凋落物分解过程中狗尾草凋落物中的易分解组分迅速被土壤微生物分解利用,使得土壤有机碳矿化量显著增大。可见,土壤有机碳矿化与所添加凋落物的化学成分紧密相关,而且凋落物物种化学异质性越高,对土壤有机碳矿化的影响越大。

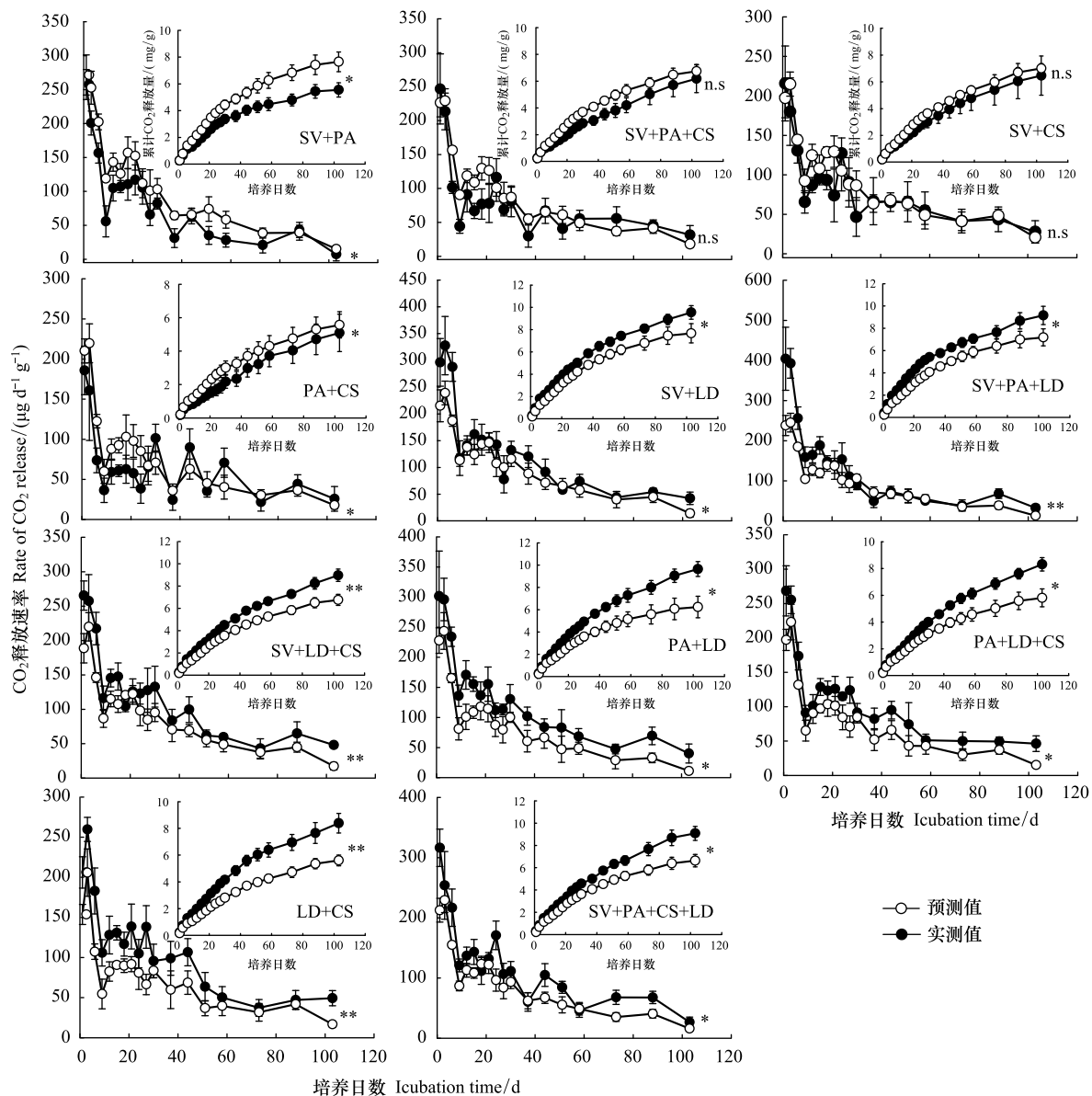


图5 培养样品  $\text{CO}_2$  释放量实测值和预测值比较

Fig.5 Comparison of measured and predicted  $\text{CO}_2$  release in soil sample

\* :  $P < 0.05$ ; \*\* :  $P < 0.01$ ; ns :  $P > 0.05$

研究表明,凋落物物种丰富度越大,土壤有机碳矿化速率越快。例如王希华等观测到混合凋落物的物种个数在2—8之间时,物种多样性越高越有利于土壤有机碳矿化,且多样性越高作用越为显著<sup>[19]</sup>。也有研究发现,凋落物物种组成而不是物种丰富度对土壤有机碳矿化产生显著影响<sup>[20]</sup>。由于不同物种混合使凋落物化学成分多样性增加,各种成分通过淋溶作用在不同凋落物间转移,缓和了低养分含量凋落物对微生物的限制<sup>[12,21]</sup>,从而加快整体土壤有机碳矿化速率。本试验结果表明,混合凋落物物种丰富度与土壤有机碳矿化量之间没有显著的相关性。添加两种、3种和4种凋落物,培养样品累积  $\text{CO}_2$  释放量没有明显规律变化。同样地,也有研究发现土壤有机碳矿化量与所添加凋落物物种的丰富度(从两种到五种)无关<sup>[20,22]</sup>。可见,混合凋落物的化学特性并不一定与其物种丰富度有关,与所含物种较少的混合凋落物相比,物种丰富的混合凋落物可能存在功能冗余<sup>[8,23-24]</sup>。

### 3.2 混合凋落物对土壤有机碳矿化的非加和效应

本研究中,添加混合凋落物对土壤有机碳矿化产生显著的非加和效应,在11种混合凋落物组合处理中,9



种组合土壤有机碳矿化都呈现显著的非加和效应( $P<0.05$ ),这与国内外大多数学者的研究结果一致。有研究发现 77.3%的凋落物混合组合对土壤有机碳矿化产生显著的非加和效应<sup>[7,25]</sup>。例如 Hansen 和 Coleman 将 3 种落叶凋落物等比例混合培养 2 年,整个培养过程中土壤有机碳矿化都表现明显的非加和效应<sup>[26]</sup>。然而,一项在内蒙古地区的研究发现除糙叶黄芪和星毛委陵菜混合外,克氏针茅、羊草、糙叶黄芪、星毛委陵菜等相互组合混合后并没有产生明显的非加和效应,N 和 P 等营养元素的释放却明显加快<sup>[27]</sup>。此外,也有研究报道凋落物混合并不影响混合凋落物的分解速率<sup>[28]</sup>。但是,据 Gartner 的统计,在 30 多篇关于混合凋落物的试验研究中,超过 60%的混合凋落物对其分解速率及土壤有机碳矿化产生非加和效应<sup>[6]</sup>。

有研究报道将 4 种功能群 32 种物种的叶凋落物进行混合分解实验后发现低质量的白桦凋落物与低质量的小干松混合时质量损失减慢<sup>[15]</sup>。之后,也有研究发现质量相似的凋落物混合产生显著的拮抗非加和效应等<sup>[29]</sup>。本研究中,氮含量较低的禾本科植物凋落物相互混合后土壤碳矿化量表现为一定程度的拮抗非加和效应,而禾本科植物凋落物与氮含量较高的豆科植物达乌里胡枝子凋落物混合后土壤碳矿化表现明显的协同非加和效应。一般地,凋落物氮含量是凋落物分解及土壤有机碳矿化最重要的指示因子,但是当凋落物氮含量差异不大时,土壤有机碳矿化可能会受到凋落物叶片物理性质的影响<sup>[7]</sup>。此外,有学者提出混合凋落物之间营养物质的传输会促进土壤有机碳矿化,而混合凋落物中某种凋落物释放抑制其他凋落物分解的特殊物质会导致土壤有机碳矿化减少<sup>[30]</sup>。因此在本研究中,这种拮抗非加和效应可能是质量相似的禾本科植物凋落物叶的空间异质性造成的,叶片的空间异质性在一定程度上阻碍了解某些特定组分的土壤群落子集的建立,导致混合凋落物袋中细菌和真菌数量下降,从而产生土壤有机碳矿化的拮抗非加和效应。这与 Blair 的研究结果一致,混合凋落物袋中细菌和真菌的丰度小于或者等于单个凋落物袋<sup>[28]</sup>。同时,这种拮抗非加和效应也可能是由于质量差异不大的禾本科植物凋落物之间营养物质不传输不互补导致的。本研究中添加芦苇草+狗尾草和芦苇草+糙隐子草凋落物时,混合凋落物土壤碳矿化量表现出显著的拮抗非加和效应,但是当三者混合时(芦苇草+糙隐子草+狗尾草),土壤有机碳矿化的拮抗非加和效应却消失了,这可能与芦苇草凋落物中木质素及其含量有关,因为混合凋落物中芦苇草凋落物占总质量的比例有所下降,且相对于其他两种物种,芦苇草凋落物含有较高的木质素含量。此外,也有学者认为土壤碳矿化的非加和效应是由激发效应引起的<sup>[31-32]</sup>。激发效应是指新鲜的外源物加入土壤后土壤有机碳转化短期的强烈变化。Broadbent 和 Norman 将标记的苏丹草施入土壤中,发现原有腐殖质的矿化增加了 4—11 倍<sup>[33]</sup>。因此,混合凋落物对土壤有机碳矿化的非加和效应及其机理仍然需要进一步探索研究,这对于深入认识草地生态系统土壤碳循环及生态系统管理具有重要意义。

#### 4 结论

科尔沁沙地植被覆盖率低,土壤退化严重,土壤有机质和养分含量低。凋落物分解释放的养分对于改善土壤质量至关重要,而自然状况下凋落物往往以混合物的形式存在。因此,明确混合凋落物添加对土壤有机碳矿化的影响对于区域尺度碳收支平衡具有重要意义。本研究得出以下主要结论:

(1) 土壤有机碳矿化与混合凋落物物种丰富度没有显著的相关性,这是因为物种丰富的混合凋落物可能存在功能冗余;土壤有机碳矿化与混合凋落物化学成分密切相关,凋落物氮含量、木质素含量以及极易分解有机物含量都对土壤有机碳矿化产生显著的影响。

(2) 在 11 种混合凋落物组合处理中,9 种组合土壤有机碳矿化都呈现显著的非加和效应,其中添加 SV+PA 和 PA+CS 组合凋落物的土壤有机碳矿化表现拮抗非加和效应,其余都表现显著的协同非加和效应。

(3) 添加含高氮豆科植物的混合凋落物后,土壤有机碳矿化表现出明显的协同非加和效应,氮含量比较低的禾本科植物凋落物混合后产生显著的拮抗非加和效应,可能是质量差异不大的凋落物叶片的空间异质性或营养物质不传输引起的。

## 参考文献 (References):

- [ 1 ] 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.
- [ 2 ] 莫江明, 薛璟花, 方运霆. 鼎湖山主要森林植物凋落物分解及其对 N 沉降的响应. *生态学报*, 2004, 24(7): 1413-1420.
- [ 3 ] 史学军, 潘剑君, 陈锦盈, 杨志强, 张黎明, 孙波, 李忠佩. 不同类型凋落物对土壤有机碳矿化的影响. *环境科学*, 2009, 30(6): 1832-1837.
- [ 4 ] Ayres E, Steltzer H, Simmons B L, Simpson R T, Steinweg J M, Wallenstein M D, Mellor N, Parton W J, Moore J C, Wall D H. Home-field advantage accelerates leaf litter decomposition in forests. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(3): 606-610.
- [ 5 ] Giebelmann U C, Martins K G, Brändle M, Schädler M, Marques R, Brandl R. Lack of home-field advantage in the decomposition of leaf litter in the Atlantic Rainforest of Brazil. *Applied Soil Ecology*, 2011, 49: 5-10.
- [ 6 ] Gartner T B, Cardon Z G. Decomposition dynamics in mixed-species leaf litter. *Oikos*, 2004, 104(2): 230-246.
- [ 7 ] Mao B, Mao R, Zeng D H. Species diversity and chemical properties of litter influence non-additive effects of litter mixtures on soil carbon and nitrogen cycling. *PLoS One*, 2017, 12(7): e0180422.
- [ 8 ] Meier C L, Bowman W D. Links between plant litter chemistry, species diversity, and below-ground ecosystem function. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(50): 19780-19785.
- [ 9 ] Li Y L, Ning Z Y, Cui D, Mao W, Bi J D, Zhao X Y. Litter decomposition in a semiarid dune grassland: neutral effect of water supply and inhibitory effect of nitrogen addition. *PLoS One*, 2016, 11(9): e0162663.
- [ 10 ] Hättenschwiler S, Gasser P. Soil animals alter plant litter diversity effects on decomposition. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2005, 102(5): 1519-1524.
- [ 11 ] Berglund S L, Ågren G I, Ekblad A. Carbon and nitrogen transfer in leaf litter mixtures. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 57: 341-348.
- [ 12 ] Hoorens B, Aerts R, Stroetenga M. Does initial litter chemistry explain litter mixture effects on decomposition? *Oecologia*, 2003, 137(4): 578-586.
- [ 13 ] Scherer-Lorenzen M, Bonilla J L, Potvin C. Tree species richness affects litter production and decomposition rates in a tropical biodiversity experiment. *Oikos*, 2007, 116(12): 2108-2124.
- [ 14 ] Meier C L, Bowman W D. Chemical composition and diversity influence non-additive effects of litter mixtures on soil carbon and nitrogen cycling: implications for plant species loss. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(9): 1447-1454.
- [ 15 ] Wardle D A, Bonner K I, Nicholson K S. Biodiversity and plant litter: experimental evidence which does not support the view that enhanced species richness improves ecosystem function. *Oikos*, 1997, 79(2): 247-258.
- [ 16 ] Meier C L, Suding K N, Bowman W D. Carbon flux from plants to soil: roots are a below-ground source of phenolic secondary compounds in an alpine ecosystem. *Journal of Ecology*, 2010, 96(3): 421-430.
- [ 17 ] Wang Q K, Wang S L, He T X, Liu L, Wu J B. Response of organic carbon mineralization and microbial community to leaf litter and nutrient additions in subtropical forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 71: 13-20.
- [ 18 ] McIntyre R E S, Adams M A, Ford D J, Grierson P F. Rewetting and litter addition influence mineralisation and microbial communities in soils from a semi-arid intermittent stream. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(1): 92-101.
- [ 19 ] 王希华, 黄建军, 闫恩荣. 天童国家森林公园常见植物凋落叶分解的研究. *植物生态学报*, 2004, 28(4): 457-467.
- [ 20 ] Coq S, Weigel J, Butenschoten O, Bonal D, Hättenschwiler S. Litter composition rather than plant presence affects decomposition of tropical litter mixtures. *Plant and Soil*, 2011, 343(1/2): 273-286.
- [ 21 ] Liu P, Huang J H, Han X G, Sun O J. Litter decomposition in semiarid grassland of inner mongolia, China. *Rangeland Ecology & Management*, 2009, 62(4): 305-313.
- [ 22 ] Jiang J, Li Y K, Wang M Z, Zhou C P, Cao G M, Shi P L, Song M H. Litter species traits, but not richness, contribute to carbon and nitrogen dynamics in an alpine meadow on the Tibetan Plateau. *Plant and Soil*, 2013, 373(1/2): 931-941.
- [ 23 ] Berglund S L, Ågren G I. When will litter mixtures decompose faster or slower than individual litters? A model for two litters. *Oikos*, 2012, 121(7): 1112-1120.
- [ 24 ] Scheibe A, Gleixner G. Influence of litter diversity on dissolved organic matter release and soil carbon formation in a mixed beech forest. *PLoS One*, 2014, 9(12): e114040.
- [ 25 ] 李宜浓, 周晓梅, 张乃莉, 马克平. 陆地生态系统混合凋落物分解研究进展. *生态学报*, 2016, 36(16): 4977-4987.
- [ 26 ] Hansen R A, Coleman D C. Litter complexity and composition are determinants of the diversity and species composition of oribatid mites (Acari:

- Oribatida) in litterbags. *Applied Soil Ecology*, 1998, 9(1/3): 17-23.
- [27] 陈瑾, 李扬, 黄建辉. 内蒙古典型草原 4 种优势植物凋落物的混合分解研究. *植物生态学报*, 2011, 35(1): 9-16.
- [28] Blair J M, Parmelee R W, Beare M H. Decay rates, nitrogen fluxes, and decomposer communities of single- and mixed-species foliar litter. *Ecology*, 1990, 71(5): 1976-1985.
- [29] Smith V C, Bradford M A. Do non-additive effects on decomposition in litter-mix experiments result from differences in resource quality between litters? *Oikos*, 2003, 102(2): 235-242.
- [30] Chapman K, Whittaker J B, Heal O W. Metabolic and faunal activity in litters of tree mixtures compared with pure stands. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1988, 24(1/3): 33-40.
- [31] 王若梦, 董宽虎, 何念鹏, 朱剑兴, 代景忠, 施侃侃. 围封对内蒙古大针茅草地土壤碳矿化及其激发效应的影响. *生态学报*, 2013, 33(12): 3622-3629.
- [32] Xiao C W, Guenet B, Zhou Y, Su J Q, Janssens I A. Priming of soil organic matter decomposition scales linearly with microbial biomass response to litter input in steppe vegetation. *Oikos*, 2015, 124(5): 649-657.
- [33] Broadbent F E, Norman A G. Some factors affecting the availability of the organic nitrogen in soil—a preliminary report. *Soil Science Society of America Journal*, 1947, 11: 264-267.