

DOI: 10.11686/cyxb2024126

http://cyxb.magtech.com.cn

骆欣怡, 邱开阳, 金涛, 等. 碳、氮、钾添加对荒漠草原凋落物分解特征的影响. 草业学报, 2025, 34(2): 41-53.

LUO Xin-yi, QIU Kai-yang, JIN Tao, *et al.* The effects of carbon, nitrogen, and potassium addition on the decomposition characteristics of litter in desert grasslands. *Acta Prataculturae Sinica*, 2025, 34(2): 41-53.

## 碳、氮、钾添加对荒漠草原凋落物分解特征的影响

骆欣怡<sup>1,2,3,4</sup>, 邱开阳<sup>1,2,3,4\*</sup>, 金涛<sup>5</sup>, 鲍平安<sup>1,2,3,4</sup>, 黄业芸<sup>1,2,3,4</sup>, 何毅<sup>1,2,3,4</sup>, 谢应忠<sup>1,2,3,4</sup>

(1. 宁夏大学林业与草业学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏畜牧业工程技术研究中心, 宁夏 银川 750021; 3. 农业农村部饲草高效生产模式创新重点实验室, 宁夏 银川 750021; 4. 盐池北部荒漠草原宁夏野外科学观测研究站, 宁夏 银川 750021; 5. 宁夏贺兰山国家级自然保护区管理局, 宁夏 银川 750021)

**摘要:**凋落物分解是草地生态系统能量流动和物质循环的重要过程, 而荒漠草原凋落物分解如何响应碳(C)、氮(N)、钾(K)添加尚不清楚, 揭示这一关系对深入理解荒漠草原养分循环过程具有重要意义。本研究选用网袋分解法, 进行随机区组设计, 在试验样地分别设置C<sub>1</sub> (0 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)、C<sub>2</sub> (52.54 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)、C<sub>3</sub> (705.09 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>); N<sub>1</sub> (0 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)、N<sub>2</sub> (5 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)、N<sub>3</sub> (20 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>); K<sub>1</sub> (0 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)、K<sub>2</sub> (9.0 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)、K<sub>3</sub> (18.0 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>) 3个C、N、K浓度梯度, 研究外源C、N、K添加对宁夏荒漠草原优势种短花针茅和赖草凋落物分解特征的影响。结果表明: 1) C、N、K添加对荒漠草原两个物种凋落物分解的影响具有显著差异(P<0.05), 短花针茅和赖草凋落物分解速率进程不同, 分别在分解至120和240 d时, 分解速率开始减缓; 2) 不同物种对C、N、K养分添加的响应不同。K<sub>3</sub>、K<sub>3</sub>+N<sub>3</sub>+C<sub>2</sub>处理下赖草凋落物分解速率较快, 但CK、K<sub>2</sub>+N<sub>2</sub>处理下短花针茅凋落物分解速率较快。依据指数衰减模型预测分解速率结果为: 赖草>短花针茅; 3) 短花针茅和赖草凋落物均在秋季分解较快。综上, 同一生境不同物种凋落物分解速率存在差异, 高添加量的K、N和低添加量的C相较于其他养分添加梯度, 对凋落物分解速率的促进作用更明显。

**关键词:**荒漠草原; 凋落物; 分解特征; 养分添加

## The effects of carbon, nitrogen, and potassium addition on the decomposition characteristics of litter in desert grasslands

LUO Xin-yi<sup>1,2,3,4</sup>, QIU Kai-yang<sup>1,2,3,4\*</sup>, JIN Tao<sup>5</sup>, BAO Ping-an<sup>1,2,3,4</sup>, HUANG Ye-yun<sup>1,2,3,4</sup>, HE Yi<sup>1,2,3,4</sup>, XIE Ying-zhong<sup>1,2,3,4</sup>

1. College of Forestry and Grassland, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Ningxia Grassland and Animal Husbandry Engineering Technology Research Center, Yinchuan 750021, China; 3. Key Laboratory of Innovation in Efficient Grass Production Models of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yinchuan 750021, China; 4. Ningxia Field Scientific Observation and Research Station on Desert Grassland in the North of Yanchi, Yinchuan 750021, China; 5. Ningxia Helan Mountains National Nature Reserve Administration, Yinchuan 750021, China

**Abstract:** Decomposition of litter is an important component process of energy flow and material cycling in grassland ecosystems. However it is not clear how litter decomposition in desert grasslands responds to the addition of carbon (C), nitrogen (N), and potassium (K). Clarification of this relationship is needed to improve our understanding of

收稿日期: 2024-04-18; 改回日期: 2024-06-05

基金项目: 中国科学院“西部之光”人才培养计划项目和中国人力资源和社会保障部高层次留学人才回国资助项目(人社厅函[2019]160号)资助。

作者简介: 骆欣怡(2000—), 女, 甘肃天水人, 在读硕士。E-mail: 873956269@qq.com

\* 通信作者 Corresponding author. E-mail: kaiyangqiu@nxu.edu.cn

the nutrient cycling process in desert grasslands. In this study, the mesh bag decomposition method was used in a randomized block design, to study the effects of exogenous C, N, and K addition on the litter decomposition characteristics of the dominant species *Stipa breviflora* and *Leymus secalinus* in Ningxia desert grassland. Litter decomposition was tested in soils fertilized with one of three rates of C (vermicompost, 30% C), N (urea, 46% N) or K (KCl, 60% K) as follows: C<sub>1</sub> (0 g·m<sup>-2</sup>·yr<sup>-1</sup>), C<sub>2</sub> (52.54 g·m<sup>-2</sup>·yr<sup>-1</sup>) and C<sub>3</sub> (705.09 g·m<sup>-2</sup>·yr<sup>-1</sup>) set at the experimental site; along with nutrient addition treatments. N<sub>1</sub> (0 g·m<sup>-2</sup>·yr<sup>-1</sup>), N<sub>2</sub> (5 g·m<sup>-2</sup>·yr<sup>-1</sup>) and N<sub>3</sub> (20 g·m<sup>-2</sup>·yr<sup>-1</sup>), three C, N, and K concentration gradients, K<sub>1</sub> (0 g·m<sup>-2</sup>·yr<sup>-1</sup>), K<sub>2</sub> (9.0 g·m<sup>-2</sup>·yr<sup>-1</sup>) and K<sub>3</sub> (18.0 g·m<sup>-2</sup>·yr<sup>-1</sup>). It was found that significant differences in the effects of C, N, and K addition on litter decomposition and different decomposition rates of litter from *S. breviflora* and *L. secalinus* ( $P < 0.05$ ). Half-lives for *L. secalinus* decay ranged from 4.93 to 17.54 months and for *S. breviflora* from 10.76 to 20.51 months. The decomposition rates of litter from *S. breviflora* and *L. secalinus* began to slow down at 120 and 240 days, respectively. Leaves of the two grass species displayed different responses to the addition of C, N, and K nutrients. Under the K<sub>3</sub> and K<sub>3</sub>+N<sub>3</sub>+C<sub>2</sub> treatments, the decomposition rate of *L. secalinus* litter was faster, while under the CK and K<sub>2</sub>+N<sub>2</sub> treatments, the decomposition rate of *S. breviflora* litter was faster. According to the exponential decay model, the predicted decomposition rate for *L. secalinus* litter is greater than for *S. breviflora* litter. The litter of both *L. secalinus* and *S. breviflora* decomposed quickly in autumn. In summary, there were differences in litter decomposition rates of the two grass species in the same habitat, and high additions of K and N and low additions of C promoted litter decomposition rates more strongly than other nutrient addition combinations.

**Key words:** desert grassland; litter; decompose features; nutrient addition

凋落物是连接荒漠草原生态系统植被与土壤物质交换的中间环节<sup>[1]</sup>,参与生态系统养分循环并且对提升土壤质量保持和维持生产力具有不可或缺的作用,是土壤有机质的重要来源<sup>[2]</sup>。凋落物分解过程是陆地生态系统中碳循环(carbon cycle)和养分循环的关键驱动因素<sup>[3]</sup>,具有推动土壤有机质矿化分解和营养元素循环转化以及连接土壤和植物之间物质循环与能量流动等重要功能<sup>[4]</sup>,因此凋落物分解对全球C循环过程具有不可忽视的影响<sup>[5-6]</sup>。凋落物的分解速率也影响着各种养分元素、有机与无机物质在地表积累的速度,氮(N)、磷(P)、钾(K)等营养元素循环的速率及其他物质向土壤的返还速率也受到其制约<sup>[7]</sup>。在多样化的草地生态系统中,植物凋落物分解动态被认为是影响生态系统功能的重要因素之一<sup>[8]</sup>,且在特定时间内,草地生态系统中的土壤有机碳水平由以凋落物为主的碳输入和以土壤有机碳矿化为主的碳输出共同控制<sup>[9-10]</sup>。

众多研究表明,养分添加是植物养分保护的重要手段之一,也是促进退化草地恢复和提高退化草地净初级生产力的有效手段之一<sup>[11-13]</sup>。木质素和纤维素都是凋落物的主要成分,它们的降解是维持碳平衡的基本过程,此外,凋落物分解的过程和速度极大地影响了植物和微生物利用与吸收C、N、P及其他营养物质的方式<sup>[14]</sup>。同时,钾(K)、钙(Ca)和镁(Mg)是植物能量代谢、光合作用和膜运输的关键常量营养元素。其中K不仅可以提高氮素的吸收和利用,还可以增强植物的抗性<sup>[15]</sup>,有研究表明K在限制植物生物多样性和植物生产中都具有重要作用<sup>[16]</sup>,虽然K不是所有植物的关键营养元素,但它对动物和凋落物分解也至关重要,Szlachcic等<sup>[17]</sup>的研究结果表明,在环境温度为14℃时K添加会降低以呼吸作用测量的凋落物分解。

N添加试验的一些研究结果显示,氮添加可以通过增加土壤氮有效性来缓解分解者对氮的限制,从而提高凋落物分解速率<sup>[18-19]</sup>,而有些研究结果则认为外源氮添加增加了质量损失<sup>[20]</sup>,具有中性作用<sup>[21]</sup>,并抑制分解速率<sup>[22-24]</sup>,或是无显著影响<sup>[25]</sup>。综合而言,施肥浓度、凋落物物理化学性质的不同及试验区域生境差异是产生不同影响结果的重要原因<sup>[26]</sup>。荒漠草原是干旱半干旱区主要的草地生态系统之一<sup>[27]</sup>,其生境干旱严酷,植被覆盖程度较低且群落结构简单,生态环境敏感脆弱<sup>[28]</sup>。因此,为厘清C、N、K养分添加对荒漠草原不同凋落物分解特征的影响程度,本研究依托盐池北部荒漠草原宁夏野外科学观测研究站,以宁夏荒漠草原优势种短花针茅(*Stipa breviflora*)、赖草(*Leymus secalinus*)的凋落物为研究对象,探究添加不同浓度梯度C、N、K的单独作用及其交互作

用对两种凋落物分解特征的影响,以期促进干旱半干旱区荒漠草原生态系统的管理以及为区域环境的可持续发展提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于盐池北部荒漠草原宁夏野外科学观测研究站(107°16'27" E, 37°45'24" N,海拔1380~1600 m),该地区具有典型的温带大陆性气候,平均年降水量为250~350 mm,降水主要集中在5—9月,年均气温7.7℃,蒸发量2897 mm。土壤类型以灰钙土为主,土壤理化性质如表1所示。草地类型为荒漠草原,植被组成以禾本科和豆科为主,研究区优势种有短花针茅、赖草、蒙古冰草(*Agropyron mongolicum*)、牛枝子(*Lespedeza potaninii*),伴生种有草木樨状黄芪(*Astragalus melilotoides*)、远志(*Polygala tenuifolia*)等。

表1 研究区土壤理化性质

Table 1 Physicochemical properties of soil in the study area

pH	含水量 Moisture content (%)	有机碳 Organic carbon (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total nitrogen (g·kg <sup>-1</sup> )	全磷 Total phosphorus (g·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮 Alkaline nitrogen (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效磷 Available phosphorus (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾 Available potassium (mg·kg <sup>-1</sup> )
8.53	8.10	2.93	0.59	0.20	21.69	9.73	63.62

### 1.2 试验设计

本试验中凋落物分解采用网袋法<sup>[29]</sup>。基于前期对研究区的植被调查,依据植物物种重要值,选取多年生禾草短花针茅与赖草的凋落物为研究对象。研究采用随机区组设计,试验开始前样地已进行为期两年的C、N、K养分添加处理。C、N、K添加各设置3个梯度,C添加梯度分别为C<sub>1</sub>:0 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>、C<sub>2</sub>:52.54 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>、C<sub>3</sub>:705.09 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>;N添加梯度分别为N<sub>1</sub>:0 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>、N<sub>2</sub>:5 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>、N<sub>3</sub>:20 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>;K添加梯度分别为K<sub>1</sub>:0 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>、K<sub>2</sub>:9.0 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>、K<sub>3</sub>:18.0 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup><sup>[16]</sup>。每个试验小区随机选取一个C添加水平、一个N添加水平和一个K添加水平进行组合形成一个处理,每个区组共27个不同的处理,设3个区组,共计81个试验小区。试验小区面积为3 m×4 m,间隔为1 m。本试验所施C肥为蚯蚓粪(30%),N肥为尿素(CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>O,46%),K肥为氯化钾(KCl,60%)。分别于每年6、7月月初降水前施肥,具体步骤为:先将不同浓度蚯蚓粪均匀撒施在各小区中,后将不同浓度尿素和氯化钾溶于10 L水中,使用喷雾器在各个小区中均匀喷洒,对照组喷洒与其他试验小区等量的水。

### 1.3 样品采集、处理及测定

2021年6月,生长季结束后采集试验小区周围新鲜凋落物,带回实验室烘干至恒重后称取10.0 g与有编码的标签一起装入孔径为1 mm,大小为15 cm×25 cm的尼龙网袋中,并做好记录。于2021年6月末分别将2种凋落物的分解网袋放置于各试验小区地表,每个小区每种凋落物各放置4袋,四角固定平铺并保证其与土壤充分接触。分别于放置凋落物后30、120、240、360 d收回凋落物分解网袋,每个物种每次各取1袋,取回的样品洗净表面附着的泥沙及其他杂质后转至信封袋中,置于65℃烘箱中烘至恒重,记录凋落物样品的剩余干重。

### 1.4 数据处理

分解速率采用改进的Olson指数衰减模型<sup>[30]</sup>拟合后估算:

$$y = ae^{-kt}$$

式中:y为凋落物分解t年后的质量残余率(%),a为修正参数,k为分解指数(g·g<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>),t为分解时间(d)。

计算凋落物分解50%需要的时间为半衰期(T<sub>0.5</sub>),公式为:

$$T_{0.5} = \ln 0.5 / (-k)$$

凋落物分解95%所需要的时间为分解周转期(T<sub>0.95</sub>),计算公式为:

$$T_{0.95} = \ln 0.05 / (-k)$$

凋落物质量残余率是指放置一定时间后凋落物残留的干质量与放置前凋落物的干质量之间的比值。凋落物

质量残余率计算公式:

$$D(\%)=(X/X_i)\times 100$$

式中: $D$ 为凋落物质量残余率(%), $X$ 为凋落物分解后残余质量(g), $X_i$ 为凋落物分解前的初始质量(g)。

用Excel进行数据整理,使用IBM SPSS Statistics 27.0进行多因素方差分析,凋落物分解模型采用Origin 2022拟合,并预测凋落物分解50%和95%所需的时间。使用GraphPad Prism 9.2.0绘图,并使用Adobe Illustrator 2020进行图片的组合与整理。

## 2 结果与分析

### 2.1 凋落物分解指数衰减模型

拟合的凋落物分解模型预测结果显示(表2和表3),各凋落物对C、N、K添加及其交互作用的响应不同,赖草与短花针茅凋落物的分解过程均表现出前期分解较快,后期分解较慢的趋势。对照组( $K_1+N_1+C_1$ ),两种凋落物在自然状态下分解50%所需要的时间不同,赖草需9.85个月,短花针茅需要10.76个月;赖草凋落物分解95%需要45.39个月,而短花针茅则需要49.52个月。 $K_2+N_1+C_2$ 、 $K_3+N_1+C_1$ 、 $K_3+N_1+C_2$ 、 $K_3+N_1+C_3$ 处理可使赖草凋落物分解50%的时间依次缩短3.45%、2.13%、1.62%、49.95%; $K_2+N_1+C_2$ 、 $K_3+N_1+C_1$ 、 $K_3+N_1+C_3$ 处理可使赖草凋落物分解95%的时间缩短0.77%、1.54%、48.49%。对于赖草凋落物,K单独添加及C、K共同添加会促进凋落物的分解,且随着K浓度的升高赖草凋落物的分解时间明显缩短。

表2 赖草凋落物分解模型

Table 2 *L. secalinus* litter decomposition model

处理 Treatment	分解模型 Decomposition model	$R^2$	$T_{0.5}$ (Month)	$T_{0.95}$ (Month)	处理 Treatment	分解模型 Decomposition model	$R^2$	$T_{0.5}$ (Month)	$T_{0.95}$ (Month)
$K_1+N_1+C_1$	$y=0.94710e^{-0.00216t}$	0.876	9.85	45.39	$K_2+N_2+C_3$	$y=0.91837e^{-0.00191t}$	0.821	10.61	50.80
$K_1+N_1+C_2$	$y=0.92219e^{-0.00135t}$	0.802	15.12	71.97	$K_2+N_3+C_1$	$y=0.94643e^{-0.00197t}$	0.845	10.80	49.76
$K_1+N_1+C_3$	$y=0.93659e^{-0.00210t}$	0.882	9.96	46.51	$K_2+N_3+C_2$	$y=0.92422e^{-0.00197t}$	0.855	10.40	49.36
$K_1+N_2+C_1$	$y=0.98703e^{-0.00207t}$	0.910	10.95	48.03	$K_2+N_3+C_3$	$y=0.96869e^{-0.00181t}$	0.856	12.18	54.58
$K_1+N_2+C_2$	$y=0.92993e^{-0.00191t}$	0.792	10.83	51.01	$K_3+N_1+C_1$	$y=0.94194e^{-0.00219t}$	0.874	9.64	44.69
$K_1+N_2+C_3$	$y=0.90056e^{-0.00177t}$	0.881	11.08	54.44	$K_3+N_1+C_2$	$y=0.91022e^{-0.00206t}$	0.818	9.69	46.95
$K_1+N_3+C_1$	$y=0.91858e^{-0.00116t}$	0.701	17.54	83.93	$K_3+N_1+C_3$	$y=0.92522e^{-0.00416t}$	0.847	4.93	23.38
$K_1+N_3+C_2$	$y=0.92294e^{-0.00179t}$	0.882	11.41	54.29	$K_3+N_2+C_1$	$y=0.97824e^{-0.00200t}$	0.896	11.19	49.56
$K_1+N_3+C_3$	$y=0.93670e^{-0.00166t}$	0.780	12.61	58.84	$K_3+N_2+C_2$	$y=0.93927e^{-0.00206t}$	0.846	10.20	47.46
$K_2+N_1+C_1$	$y=0.94759e^{-0.00199t}$	0.916	10.71	49.28	$K_3+N_2+C_3$	$y=0.96153e^{-0.00217t}$	0.833	10.04	45.41
$K_2+N_1+C_2$	$y=0.92587e^{-0.00216t}$	0.808	9.51	45.04	$K_3+N_3+C_1$	$y=0.99318e^{-0.00191t}$	0.699	11.98	52.16
$K_2+N_1+C_3$	$y=0.87007e^{-0.00163t}$	0.718	11.33	58.42	$K_3+N_3+C_2$	$y=1.00549e^{-0.00220t}$	0.919	10.59	45.47
$K_2+N_2+C_1$	$y=0.96601e^{-0.00202t}$	0.891	10.87	48.86	$K_3+N_3+C_3$	$y=0.91724e^{-0.00166t}$	0.781	12.18	58.42
$K_2+N_2+C_2$	$y=0.93898e^{-0.00202t}$	0.850	10.40	48.40					

注: $T_{0.5}$ 表示凋落物分解50%的时间; $T_{0.95}$ 表示凋落物分解95%的时间。 $R^2$ 表示相关系数。下同。

Note:  $T_{0.5}$  indicates the time it takes for the litter to decompose 50%;  $T_{0.95}$  indicates the time it takes for the litter to decompose 95%.  $R^2$ : Correlation coefficient. The same below.

### 2.2 C、N、K添加对凋落物质量残余率的影响

**2.2.1 C、N、K单一添加对凋落物质量残余率的影响** 随着分解时间的增加,凋落物质量残余率均呈逐渐降低的趋势(图1)。经过360d的分解,在单一施用C、N、K各处理下,两种凋落物质量残余率展现出不同的差异,赖草质量残余率为44.77%~48.86%,短花针茅则为55.1%~64.5%。其中赖草凋落物的质量残余率在 $K_3$ 水平

表 3 短花针茅凋落物分解模型

Table 3 *S. breviflora* litter decomposition model

处理 Treatment	分解模型 Decomposition model	$R^2$	$T_{0.5}$ (Month)	$T_{0.95}$ (Month)	处理 Treatment	分解模型 Decomposition model	$R^2$	$T_{0.5}$ (Month)	$T_{0.95}$ (Month)
$K_1+N_1+C_1$	$y=0.94715e^{-0.00198t}$	0.876	10.76	49.52	$K_2+N_2+C_3$	$y=0.95998e^{-0.00149t}$	0.670	14.59	66.11
$K_1+N_1+C_2$	$y=0.94188e^{-0.00135t}$	0.711	15.64	72.49	$K_2+N_3+C_1$	$y=0.92832e^{-0.00103t}$	0.835	20.03	94.54
$K_1+N_1+C_3$	$y=0.95050e^{-0.00136t}$	0.850	15.78	72.18	$K_2+N_3+C_2$	$y=0.93147e^{-0.00132t}$	0.695	15.71	73.86
$K_1+N_2+C_1$	$y=0.91925e^{-0.00126t}$	0.802	16.11	77.02	$K_2+N_3+C_3$	$y=0.92818e^{-0.00140t}$	0.738	14.73	69.55
$K_1+N_2+C_2$	$y=0.91790e^{-0.00120t}$	0.740	16.87	80.84	$K_3+N_1+C_1$	$y=0.93901e^{-0.00120t}$	0.808	17.51	81.47
$K_1+N_2+C_3$	$y=0.91020e^{-0.00119t}$	0.623	16.78	81.28	$K_3+N_1+C_2$	$y=0.91293e^{-0.00148t}$	0.666	13.56	65.42
$K_1+N_3+C_1$	$y=0.89790e^{-0.00110t}$	0.724	17.74	87.52	$K_3+N_1+C_3$	$y=0.91028e^{-0.00131t}$	0.672	15.25	73.84
$K_1+N_3+C_2$	$y=0.94508e^{-0.00139t}$	0.870	15.27	70.49	$K_3+N_2+C_1$	$y=0.92698e^{-0.00110t}$	0.795	18.71	88.48
$K_1+N_3+C_3$	$y=0.90856e^{-0.00114t}$	0.595	17.46	84.79	$K_3+N_2+C_2$	$y=0.92766e^{-0.00113t}$	0.826	18.23	86.15
$K_2+N_1+C_1$	$y=0.92441e^{-0.00110t}$	0.711	18.62	88.40	$K_3+N_2+C_3$	$y=0.93520e^{-0.00121t}$	0.773	17.25	80.68
$K_2+N_1+C_2$	$y=0.91706e^{-0.00128t}$	0.725	15.80	75.76	$K_3+N_3+C_1$	$y=0.96269e^{-0.00121t}$	0.613	18.05	81.48
$K_2+N_1+C_3$	$y=0.92413e^{-0.00132t}$	0.822	15.51	73.66	$K_3+N_3+C_2$	$y=0.92374e^{-0.00119t}$	0.759	17.19	81.69
$K_2+N_2+C_1$	$y=0.89925e^{-0.00095t}$	0.741	20.51	101.06	$K_3+N_3+C_3$	$y=0.93029e^{-0.00107t}$	0.773	19.34	91.07
$K_2+N_2+C_2$	$y=0.93599e^{-0.00128t}$	0.735	16.33	76.29					

达到最低,为 44.77%; $N_3$ 水平虽在分解初期促进凋落物的分解,但最终质量残余率最高,为 51.1%;在 C 单独添加时, $C_2$ 和  $C_3$ 处理均促进赖草凋落物的分解,其质量残余率明显降低。 $N_2$ 、 $N_3$ 和  $K_3$ 处理在分解初期均促进短花针茅凋落物的分解,其初期质量残余率均低于对照组,但是 C、N、K 单一添加在分解至 360 d 时均抑制凋落物分解,其质量残余率明显高于对照组。

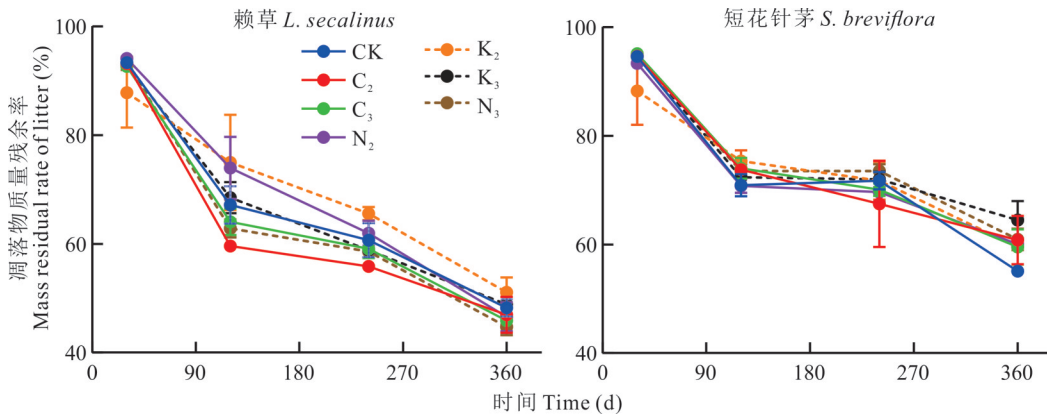


图 1 C、N、K 单一添加处理对凋落物质量残余率的影响

Fig. 1 Effect of single addition treatment of C, N and K on litter mass residual rate

**2.2.2 C、N、K 混合添加对凋落物质量残余率的影响**  $N+C$  处理结果表明(图 2),分解至 360 d,赖草凋落物质量残余率在  $N_2+C_2$  水平最低,为 48.0%,且随着浓度梯度的增加,凋落物质量残余率呈上升趋势,并在  $N_3+C_3$  水平达到最高值,为 53.87%。短花针茅凋落物经过 360 d 的分解,对照组质量残余率最低,但在分解初期, $N+C$  添加处理对凋落物分解有促进作用,在  $N_2+C_2$  水平质量残余率最低,为 92.34%,在  $N_3+C_2$  水平最高,为 94.74%。 $K+N$ 、 $K+C$  处理结果表明(图 2),两种凋落物质量残余率均呈持续下降的趋势, $K+C$  各浓度梯度质量残余率均低于  $K+N$  各浓度梯度,其中赖草凋落物在  $K_2+C_2$  水平凋落物质量残余率最低,为 44.73%。短花针

茅凋落物质量残余率在分解前期受养分添加的影响,在分解至 30 d 时,仅  $K_3+C_2$  和  $K_3+C_3$  处理对凋落物分解产生抑制作用,其他处理下凋落物质量残余率均低于对照组,其中  $K_2+N_2$  处理下凋落物质量残余率最低,为 89.91%。在分解 120~240 d 时,凋落物质量残余率变化较缓慢,C 的添加会使凋落物质量残余率降低。

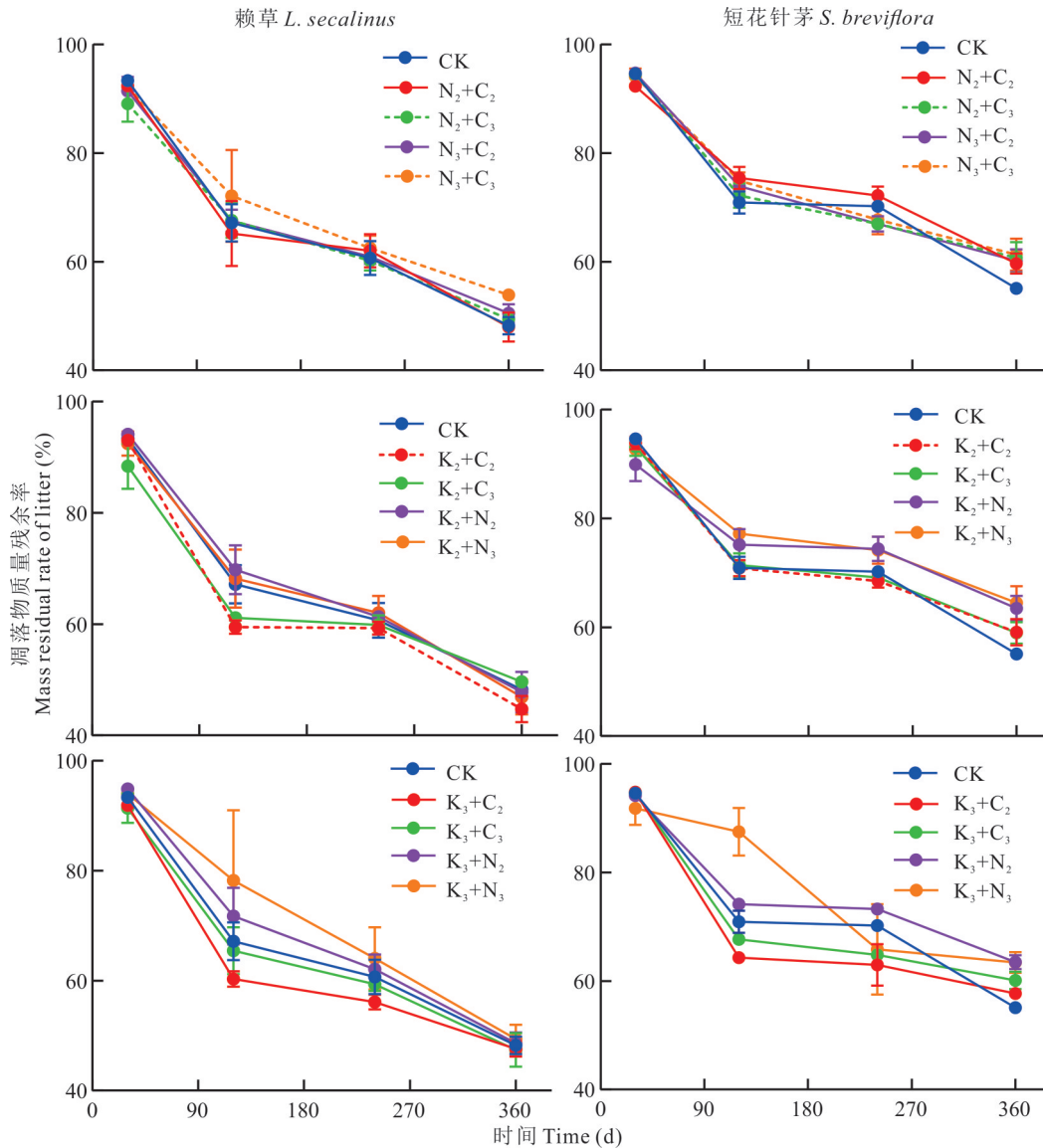


图2 C、N、K混合添加处理对凋落物质量残余率的影响

Fig. 2 Effects of mixed addition of C, N and K on litter mass residual rate

在凋落物分解过程中,凋落物重量变化可衡量凋落物分解速度快慢。C、N、K添加对两种凋落物质量残余率的影响有差异(图3)。高浓度的N添加会抑制赖草凋落物分解,使其凋落物质量残余率升高,这种抑制在30~360 d作用明显,分解至360 d时,所有处理的质量残余率相近, $K_3+N_3+C_2$ 水平凋落物质量残余率最低,为45.17%,高浓度的C、N、K添加,其交互作用会使赖草凋落物在120~360 d的质量残余率较高,抑制其分解。对于短花针茅凋落物,C、N、K添加在分解前期(0~120 d),对凋落物质量残余率有抑制作用;在分解120~240 d时,低浓度的K、C添加对凋落物分解无明显影响,而高钾与低碳或高碳与低钾的交互添加方式,均明显促进凋落物分解,其质量残余率降低;高浓度的K、C添加会对凋落物的分解产生抑制作用,N的浓度在C、N、K同时添加时对凋落物分解无明显影响。在分解240~360 d时,C、K、N同时添加会抑制凋落物分解,各养分浓度越高,抑制作用越明显。

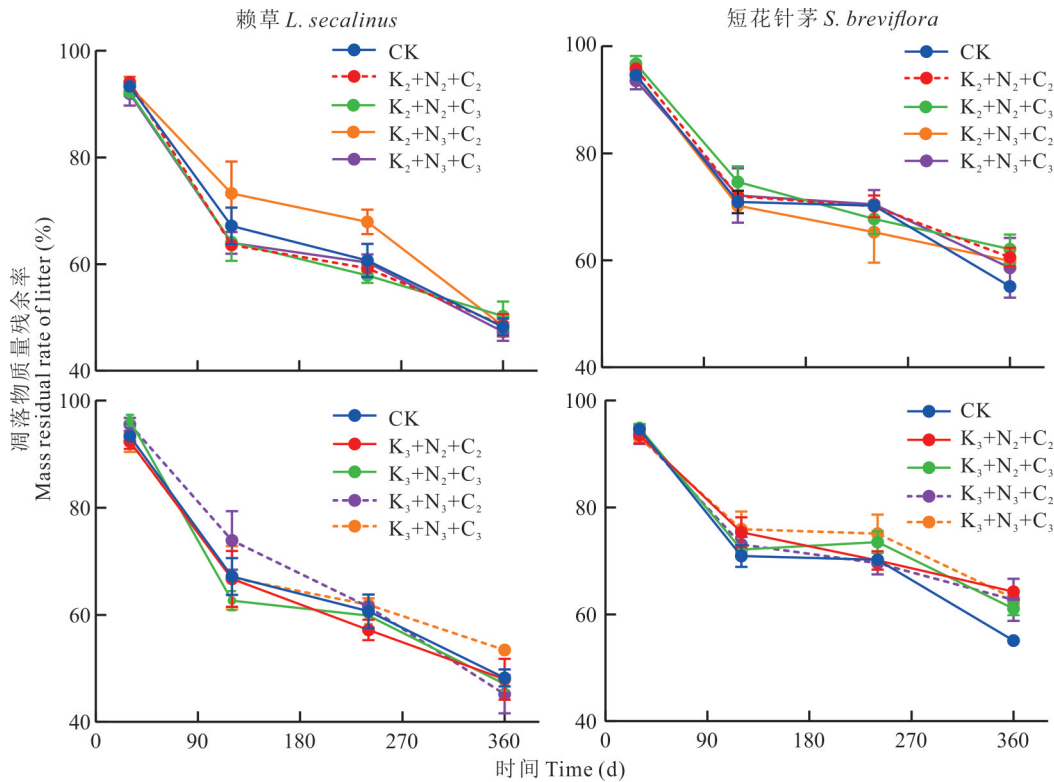


图3 C、N、K共同添加处理对凋落物质量残余率的影响

Fig. 3 Effects of C, N and K addition treatments on litter mass residual rate

由多因素方差分析可知(表4),凋落物分解过程由多种因素共同调节。氮添加、时间、物种、碳添加、氮添加 $\times$ 时间、碳添加 $\times$ 时间、时间 $\times$ 物种对两种凋落物质量残余率均有极显著影响( $P < 0.01$ )。氮添加对凋落物分解的影响作用大于碳添加,且凋落物种类也是影响凋落物质量残余率的重要因素。不同养分添加与分解时间的交互效应具有差异,氮添加、碳添加与时间的交互效应显著,钾添加与时间的交互效应不显著。

### 2.3 季节对凋落物分解的影响

赖草和短花针茅两种凋落物的分解率均在秋季达到最大值(图4),且除 $N_2+C_3$ 、 $K_3+C_3$ 处理,赖草凋落物的秋季分解率均分别高于短花针茅。在 $K_3+N_2+C_3$ 施肥处理下,赖草秋季分解率达到最大值,为33.71%,在 $K_2+N_2+C_2$ 施肥处理下,短花针茅秋季分解率最高,为25.74%。通过单因素方差分析可知,秋季与其他季节的分解率差异显著,夏季和冬季的分解率相较于春、秋两季更低。

## 3 讨论

### 3.1 荒漠草原凋落物的分解特征

本研究中,两种凋落物的分解速率呈显著差异,分解模式也不同。多数研究证实,同一环境中不同物种间的分解速率具有一定差异<sup>[31-32]</sup>,这是由于凋落物自身性质差异及其生态学特性不同所导致的<sup>[33]</sup>。在干旱半干旱地区,植物生活型和凋落物品质的差异也是影响其分解速率的重要因素。有研究发现,高品质凋落物通常具有高养分、低木质素的特征,其分解速率明显高于低品质凋落物<sup>[34-35]</sup>。凋落物在不同分解时期其分解速率也不同<sup>[36]</sup>,本研究结果中,短花针茅和赖草凋落物呈不同的分解模式。赖草分解模式分为2个阶段,为快速分解阶段(0~240 d)和缓慢分解阶段(240~360 d)。短花针茅分解模式包括3个阶段,分别为快速分解阶段(0~120 d)、分解速率减缓阶段(120~240 d)和分解速率加快阶段(240~360 d)。在凋落物分解的早期阶段,由于高水平的营养物质(如N、P)刺激,一些较易分解的水溶性物质和非木质化纤维素与半纤维素被浸出和分解<sup>[37]</sup>,从而促进凋落物分解,因此在分解早期C、N、K高浓度添加下的凋落物质量残余率低于不施肥的对照处理。随着分解时间的增加,凋落物

主要保留木质化物质,凋落物降解以木质素质量损失为主,由于木质素不易分解,导致凋落物分解速率减缓,甚至发生停滞<sup>[38]</sup>。本研究中凋落物的分解时间由改进后的Olson指数衰减模型拟合并预测,赖草凋落物分解50%和95%所用时间为0.41~1.46 a和1.95~6.99 a;短花针茅凋落物分解所用时间为0.90~1.71 a和4.13~8.42 a,预测显示赖草凋落物分解时间均短于短花针茅,且赖草凋落物更晚进入缓慢分解阶段。两种凋落物初始养分含量的不同可能是造成这一结果的原因之一,有研究发现凋落物初始养分含量越高,C/N和木质素含量越低,其越容易被微生物分解,凋落物分解速率更快<sup>[39-40]</sup>,也验证了这一推断。

### 3.2 C、N、K不同浓度梯度的单独作用及交互作用对两种凋落物分解特征的影响

有研究指出,N元素的增加是引发凋落物分解速率改变的最主要因素之一<sup>[41]</sup>,首先,增加外部氮源的供给会使植物衰老组织中N含量上升,凋落物N含量与凋落物的分解质量存在正向关联,进而加快了凋落物的分解速度<sup>[42]</sup>;其次,N元素能够通过调控微生物的降解和合成过程的中间产物,产生非生物效应,从而减缓凋落物的分解速度<sup>[43]</sup>。也有研究结果表明,研究地点的土壤营养状况影响了N添加对凋落物分解的作用,例如Aerts等<sup>[44]</sup>认为,在N含量较少的泥炭地中,N添加对凋落物的N吸收量,C/N以及凋落物的潜在分解速率没有显著影响。N的可利用性对不同生态系统凋落物分解具有不同的物种特异性影响<sup>[45]</sup>。本研究以宁夏荒漠草原优势种短花针茅和赖草为研究对象,荒漠草原降水量少且蒸发量大,区域氮沉降临界负荷值和可接受的氮沉降总量低,这可能是施氮对短花针茅凋落物分解影响不大的原因之一。另一原因可能是参与分解的短花针茅凋落物本身并不缺N,所以N添加不会对其分解产生显著影响。有研究表明,凋落物总氮或总磷含量越高,无机氮肥添加对凋落物分解过程的影响越小<sup>[23]</sup>,而过量添加N,致使其与木质素在降解时结合产生更难分解的复合中间产物,导致其分解速率减慢<sup>[46-47]</sup>。此外,在土壤表面喷洒(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液,由于风或太阳辐射的作用,溶液挥发可能导致添加的N含量损失,并可能降低N添加的效果。施氮前、施氮期间和施氮后降水的缺失也可能间接或直接影响凋落物的分解速率<sup>[48]</sup>。本研究结果显示,K<sub>3</sub>、K<sub>2</sub>+C<sub>2</sub>、K<sub>3</sub>+N<sub>3</sub>+C<sub>2</sub>处理下赖草凋落物质量残余率较低,CK和K<sub>2</sub>+N<sub>2</sub>处理下短花针茅凋落物质量残余率较低,可能是因为K的添加促进了N的利用效率,且K很容易因地表径流和叶面浸出而流失<sup>[49]</sup>,而试验中K肥的施用弥补了这部分损失,促进生态系统循环<sup>[50]</sup>,进而促进凋落物的分解。

表4 C、N、K添加对两种凋落物质量残余率影响的多因素方差分析

Table 4 Multivariate ANOVA for the effects of C, N, and K additions on the mass residue rates of the two litters

影响因子 Influence factor	F	P
钾添加 K addition (K)	0.300	0.741
氮添加 N addition (N)	12.630	<0.001**
碳添加 C addition (C)	7.348	<0.001**
时间 Time (T)	1853.805	<0.001**
物种 Species (S)	378.788	<0.001**
钾添加×氮添加 K×N	1.356	0.249
钾添加×碳添加 K×C	0.474	0.755
钾添加×时间 K×T	0.435	0.856
钾添加×物种 K×S	1.565	0.210
钾添加×氮添加×碳添加 K×N×C	0.141	0.997
钾添加×氮添加×时间 K×N×T	0.780	0.671
钾添加×氮添加×物种 K×N×S	0.726	0.575
钾添加×氮添加×碳添加×时间 K×N×C×T	0.824	0.757
钾添加×氮添加×碳添加×物种 K×N×C×S	1.278	0.228
钾添加×氮添加×碳添加×时间×物种 K×N×C×T×S	1.029	0.423
氮添加×碳添加 N×C	0.912	0.457
氮添加×时间 N×T	3.569	0.002**
氮添加×物种 N×S	2.249	0.107
氮添加×碳添加×时间 N×C×T	0.623	0.823
氮添加×碳添加×物种 N×C×S	1.173	0.322
氮添加×碳添加×时间×物种 N×C×T×S	0.855	0.634
碳添加×时间 C×T	3.080	0.006**
碳添加×物种 C×S	0.707	0.494
碳添加×时间×物种 C×T×S	0.931	0.472
时间×物种 T×S	43.677	<0.001**

注: F为组间与组内的离差平方和与自由度的比值;P为显著性;\*表示显著性水平为P<0.05,\*\*表示显著性水平为P<0.01;"×"表示其交互作用。

Note: F is the ratio of the sum of squares of the dispersion between and within groups to the degrees of freedom, P is the significance, \* indicates the significant level of P<0.05, \*\* indicates the significant level of P<0.01, and "×" indicates the interaction.

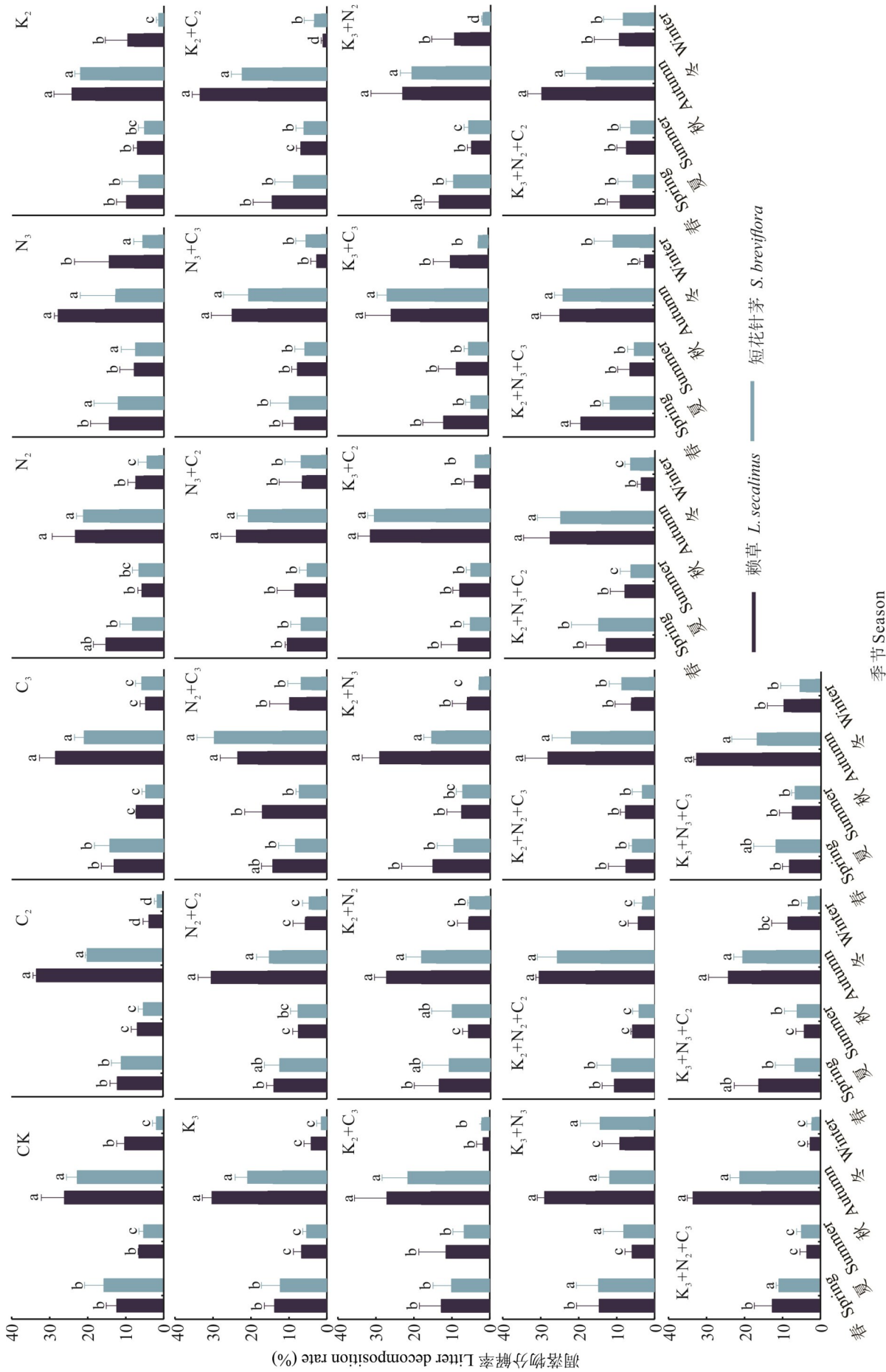


图 4 养分添加与季节变化下的凋落物分解率

Fig. 4 Nutrient addition and litter decomposition rate under seasonal variation

不同小写字母表示同一物种同一处理下不同季节的凋落物分解率在  $P < 0.05$  水平上差异显著。Different lowercase letters indicate significant differences in litter decomposition rates in different seasons of the same species under the same treatment at the  $P < 0.05$  level.

本研究中,C、N、K不同浓度的添加对两种凋落物分解产生了不同的影响,具体为:单施C、N、K可以促进短花针茅凋落物前期(0~30 d)的分解速率,但会抑制其中期(30~120 d)、后期(240~360 d)的分解;在C、N、K共同添加时,N添加对短花针茅凋落物的分解无显著影响。而单施N对赖草凋落物的影响表现为低浓度(N<sub>2</sub>)促进,高浓度(N<sub>3</sub>)抑制;在C、N、K共同添加时,高浓度氮、钾(N<sub>3</sub>、K<sub>3</sub>)和低浓度碳(C<sub>2</sub>)组合施用下可显著促进赖草凋落物分解。同时,本研究发现,短花针茅凋落物与赖草凋落物的分解在同一分解时期对同一N添加浓度下表现出不同的分解速率,即,在养分添加过程中,凋落物的物种也是影响分解速率的重要因素之一。

### 3.3 凋落物分解率对季节变化的响应

气候的复杂变化是影响脆弱敏感生境凋落物分解速度的重要因素,这在干旱半干旱地区更为明显<sup>[51]</sup>。在气候因素中,水分和温度决定了凋落物分解的速度<sup>[52]</sup>。降水可以通过物理浸出直接影响凋落物的分解,凋落物分解存在最适降水量<sup>[53]</sup>,有研究表明,降水量在一定的范围内,水分越充足,凋落物分解越快<sup>[54]</sup>。而土壤温度可以直接影响凋落物的分解速率<sup>[55]</sup>。

本研究发现,短花针茅和赖草凋落物均在秋季的分解率最高,夏季分解率较低。两种凋落物在秋季表现出更高的分解率可能是因为研究区雨季集中在每年6—9月,分布在夏、秋两季,在该时间段内降水和温度均为凋落物分解的最适值域,适宜的温度使土壤微生物活性增强,土壤酶的含量升高,从而加快了凋落物分解<sup>[56]</sup>。而两种凋落物在高降水量的夏季分解率较低,考虑是因为夏季高温及过多的水分抑制了土壤微生物活动。这与Zhang等<sup>[57]</sup>研究表明的更适宜微生物生存,促进凋落物分解的条件一致。春季气温低,降水少,凋落物分解减缓,而本研究结果显示春季两种凋落物分解率均较高,其原因可能是春季发生了土壤冻融,该现象会使被土壤覆盖的凋落物发生物理破碎和浸出等变化,导致微生物更易分解,从而加速分解速率<sup>[58]</sup>。本研究结果发现赖草凋落物春季分解率大于短花针茅,而Ruhland等<sup>[59]</sup>研究表明初始木质素含量较低的凋落物在春季受冻融的影响更为明显,质量损失率显著增加,验证了这一发现。

## 4 结论

综上所述,经过为期两年的不同浓度C、N、K养分添加试验以及12个月的凋落物分解试验,主要得出以下结论:1)C、N、K添加对荒漠草原两个物种凋落物分解的影响差异显著( $P < 0.05$ ),两种凋落物分解模式不同,赖草分解过程分为快速和缓慢2个分解阶段;短花针茅分解过程包括3个阶段:快速分解、分解速率减缓和分解速率加快阶段。2)不同物种对C、N、K添加的响应不同。K<sub>3</sub>、K<sub>2</sub>+C<sub>2</sub>、K<sub>3</sub>+N<sub>3</sub>+C<sub>2</sub>处理下赖草凋落物质量残余率较低,分解速率较快;而在CK和K<sub>2</sub>+N<sub>2</sub>处理下短花针茅凋落物质量残余率较低。指数衰减模型预测的分解速率表现为:赖草>短花针茅。3)短花针茅和赖草凋落物在秋季分解最快,春季分解率也较高且赖草快于短花针茅。综合而言在宁夏干旱半干旱区高添加量的K对赖草凋落物的分解速率具有较好的促进作用,低添加量的K、N对短花针茅凋落物的分解速率促进效果较好。本研究中凋落物分解试验仅开展一年,未能探究两种凋落物春季分解速率较快的原因,可以进一步对凋落物分解前后的化学性质进行深入探究。

## 参考文献 References:

- [1] Ye R H, Shan Y M, Zhang P J, *et al.* Effects of nitrogen and water addition on litter decomposition in desert grassland under different grazing intensities. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(8): 2775—2783.  
晔蕾罕, 单玉梅, 张璞进, 等. 荒漠草原不同放牧强度背景下添加氨水对凋落物分解的影响. *生态学报*, 2020, 40(8): 2775—2783.
- [2] Huo L X, Hong M, Zhao B Y N M L, *et al.* Effects of increased nitrogen deposition and changing rainfall patterns on litter decomposition in a desert grassland. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(6): 2139—2146.  
霍利霞, 红梅, 赵巴音那木拉, 等. 氮沉降和降雨变化对荒漠草原凋落物分解的影响. *生态学报*, 2019, 39(6): 2139—2146.
- [3] Fan B, Gong Z, Xin X, *et al.* Both evenness and dominant species identity have effects on litter decomposition. *Ecology and Evolution*, 2024, 14(2): e11052.
- [4] Du P C, Pan Y Z, Hou S L, *et al.* Effects of nitrogen and phosphorus addition on litter decomposition in Hulunber steppe. *Acta*

- Prataculturae Sinica, 2023, 32(2): 44–53.
- 杜鹏冲, 潘昱臻, 侯双利, 等. 氮磷添加对呼伦贝尔草地凋落物分解的影响. 草业学报, 2023, 32(2): 44–53.
- [5] Wang Z H, Wang Z R, Li T P, *et al.* N and P fertilization enhanced carbon decomposition function by shifting microbes towards an r-selected community in meadow grassland soils. *Ecological Indicators*, 2021, 132: 108306.
- [6] Garibaldi L A, Semmartin M, Chaneton E J. Grazing-induced changes in plant composition affect litter quality and nutrient cycling in flooding Pampa grasslands. *Oecologia*, 2007, 151(4): 650–662.
- [7] Zhang J F, Zhou J G, Lambers H, *et al.* Nitrogen and phosphorus addition exerted different influences on litter and soil carbon release in a tropical forest. *Science of the total Environment*, 2022, 832: 155049.
- [8] Ma Z W, Wu J, Li L, *et al.* Litter-induced reduction in ecosystem multifunctionality is mediated by plant diversity and cover in an alpine meadow. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 773804.
- [9] Guo X, Luo H, Xu X M, *et al.* Effects of litter decomposition with different qualities on soil organic carbon content and its stability in grassland on the Loess Plateau. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(5): 83–93.
- 郭鑫, 罗欢, 许雪梅, 等. 不同品质凋落物分解对黄土高原草地土壤有机碳及其稳定性的影响. 草业学报, 2023, 32(5): 83–93.
- [10] Chen Z H, Shen Y, Tan B, *et al.* Decreased soil organic carbon under litter input in three subalpine forests. *Forests*, 2021, 12(11): 1479.
- [11] Shi B, Ling X, Cui H, *et al.* Response of nutrient resorption of *Leymus chinensis* to nitrogen and phosphorus addition in a meadow steppe of northeast China. *Plant Biology*, 2020, 22(6): 1123–1132.
- [12] Zhang Y H, Feng J C, Isbell F, *et al.* Productivity depends more on the rate than the frequency of N addition in a temperate grassland. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 12558.
- [13] Bharath S, Borer E T, Biederman L A, *et al.* Nutrient addition increases grassland sensitivity to droughts. *Ecology*, 2020, 101(5): e02981.
- [14] Lin C F, Peng J Q, Hong H B, *et al.* Effect of nitrogen and phosphorus availability on forest litter decomposition. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(1): 54–62.
- 林成芳, 彭建勤, 洪慧滨, 等. 氮、磷养分有效性对森林凋落物分解的影响研究进展. 生态学报, 2017, 37(1): 54–62.
- [15] Guo X X, Zuo X A, Yue P, *et al.* Direct and indirect effects of precipitation change and nutrients addition on desert steppe productivity in Inner Mongolia, northern China. *Plant and Soil*, 2022, 471(1): 527–540.
- [16] Qiu K Y, Xie Y Z, Xu D M, *et al.* Ecosystem functions including soil organic carbon, total nitrogen and available potassium are crucial for vegetation recovery. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 7607.
- [17] Szlachcic E, Rozen A. Nutrients (N, P, K, Na) and warming affect heterotrophic respiration in temperate forest litter. *European Journal of Forest Research*, 2023, 142(1): 117–127.
- [18] Hobbie S E. Contrasting effects of substrate and fertilizer nitrogen on the early stages of litter decomposition. *Ecosystems*, 2005, 8(6): 644–656.
- [19] Liu P, Huang J H, Han X G, *et al.* Differential responses of litter decomposition to increased soil nutrients and water between two contrasting grassland plant species of Inner Mongolia, China. *Applied Soil Ecology*, 2006, 34(2): 266–275.
- [20] Su Y, Le J J, Han W X, *et al.* Long-term nitrogen addition consistently decreased litter decomposition rates in an alpine grassland. *Plant and Soil*, 2022, 479(1): 495–509.
- [21] Xia M X, Talhelm A F, Pregitzer K S. Long-term simulated atmospheric nitrogen deposition alters leaf and fine root decomposition. *Ecosystems*, 2018, 21(1): 1–14.
- [22] Wang W B, Zhang Q, Sun X M, *et al.* Effects of mixed-species litter on bacterial and fungal lignocellulose degradation functions during litter decomposition. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 141(1): 107690.
- [23] Xie P, Liu G D, Sun J F, *et al.* Effects of simulated warming on litter decomposition and bacteria communities of wetland plants. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(24): 10308–10319.
- 谢鹏, 刘国栋, 孙晋芳, 等. 模拟增温对湿地植物凋落物分解及细菌群落的影响. 生态学报, 2023, 43(24): 10308–10319.
- [24] Wu J J, Zhang H, Cheng X L, *et al.* Nitrogen addition stimulates litter decomposition rate: From the perspective of the combined effect of soil environment and litter quality. *Soil Biology and Biochemistry*, 2023, 179: 108992.
- [25] Bebbler D P, Watkinson S C, Boddy L, *et al.* Simulated nitrogen deposition affects wood decomposition by cord-forming fungi. *Oecologia*, 2011, 167(4): 1177–1184.
- [26] Matos P S, Fonte S J, Lima S S, *et al.* Linkages among soil properties and litter quality in agroforestry systems of southeastern

- Brazil. *Sustainability*, 2020, 12(22): 9752.
- [27] Rong H, He J L, Zhang X, *et al.* Ecological benefits of soil and water conservation in different vegetation restoration patterns on desert steppe. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(5): 295–300.  
荣浩, 何京丽, 张欣, 等. 荒漠草原不同植被恢复模式的水土保持生态效益. *水土保持通报*, 2019, 39(5): 295–300.
- [28] Zhang C Y, Zhao H M, Liu H, *et al.* Effects of exogenous nitrogen addition on litter decomposition and nutrient release in a temperate desert. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(11): 3631–3638.  
张彩云, 赵红梅, 刘辉, 等. 外源氮添加对温带荒漠地表凋落物分解及养分释放的影响. *应用生态学报*, 2020, 31(11): 3631–3638.
- [29] Yin R, Eisenhauer N, Auge H, *et al.* Additive effects of experimental climate change and land use on faunal contribution to litter decomposition. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 131: 141–148.
- [30] Olson J S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology*, 1963, 44(2): 322–331.
- [31] Li Y, Zhou J B, Dong Y J, *et al.* Decomposition of different plant litters in Loess Plateau of Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(12): 3309–3316.  
李云, 周建斌, 董燕捷, 等. 黄土高原不同植物凋落物的分解特性. *应用生态学报*, 2012, 23(12): 3309–3316.
- [32] Zhao H M, Yang W J, Cheng J H, *et al.* The effects of N-addition on litter mixture effects depend on decomposition time: A case from mixed-litter decomposition in the Gurbantunggut Desert. *Ecology and Evolution*, 2023, 13(8): e10377.
- [33] Zhang H H, Bai Y Y, Zhang Y J, *et al.* Response of chemical composition and ecological stoichiometric characteristics of three types of litter to simulated nitrogen deposition in the Changbai Mountain tundra. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(21): 8795–8808.  
张慧慧, 白云玉, 张英洁, 等. 长白山苔原带凋落物生态化学计量特征及其对模拟氮沉降的响应. *生态学报*, 2022, 42(21): 8795–8808.
- [34] Bao P A, Qiu K Y, Huang Y Y, *et al.* Effects of nitrogen and phosphorus additions on litter decomposition characteristics of two grass species in *Stipa breviflora* desert steppe. *Chinese Journal of Grassland*, 2023, 45(9): 66–76.  
鲍平安, 邱开阳, 黄业芸, 等. 氮磷添加对短花针茅荒漠草原两种禾草凋落物分解特征的影响. *中国草地学报*, 2023, 45(9): 66–76.
- [35] Steffensen J P, Andersen K K, Bigler M, *et al.* High-resolution greenland ice core data show abrupt climate change happens in few years. *Science*, 2008, 321(5889): 680–684.
- [36] Ibrahima A, Joffre R, Gillon D. Changes in litter during the initial leaching phase: An experiment on the leaf litter of Mediterranean species. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, 27(7): 931–939.
- [37] Aguilar-Cruz Y, García-Franco J G, Zotz G. Microsites and early litter decomposition patterns in the soil and forest canopy at regional scale. *Biogeochemistry*, 2020, 151(1): 15–30.
- [38] Xiang Y B, Zhou S X, Xiao Y X, *et al.* Effects of simulated nitrogen deposition and precipitation changes on litter decomposition in an evergreen broad-leaved forest in the rainy area of western China. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(2): 455–463.  
向元彬, 周世兴, 肖永翔, 等. 模拟氮沉降和降雨对华西雨屏区常绿阔叶林凋落物分解的影响. *生态学报*, 2017, 37(2): 455–463.
- [39] Zhang L L, Li J W, Wang Z L, *et al.* Litter mixing promoted decomposition and altered microbial community in common bean root litter. *BMC Microbiology*, 2023, 23(1): 148.
- [40] Li X B, Chen L, Wu X L, *et al.* Litter decomposition rates and influencing factors of four typical plant communities in desert steppe. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(12): 4105–4114.  
李学斌, 陈林, 吴秀玲, 等. 荒漠草原4种典型植物群落枯落物分解速率及影响因素. *生态学报*, 2015, 35(12): 4105–4114.
- [41] Hou S L, Hättenschwiler S, Yang J J, *et al.* Increasing rates of long-term nitrogen deposition consistently increased litter decomposition in a semi-arid grassland. *New Phytologist*, 2021, 229(1): 296–307.
- [42] Chen F S, Wang G G, Fang X M, *et al.* Nitrogen deposition effect on forest litter decomposition is interactively regulated by endogenous litter quality and exogenous resource supply. *Plant and Soil*, 2019, 437(1): 413–426.
- [43] Wang J, Ge Y, Cornelissen J H C, *et al.* Litter nitrogen concentration changes mediate effects of drought and plant species richness on litter decomposition. *Oecologia*, 2022, 198(2): 507–518.

- [44] Aerts R, van Logtestijn R, van Staaldin M, *et al.* Nitrogen supply effects on productivity and potential leaf litter decay of *Carex* species from peatlands differing in nutrient limitation. *Oecologia*, 1995, 104(4): 447–453.
- [45] Kong B S, Zhou J L, Qi L G, *et al.* Effects of nitrogen deposition on leaf litter decomposition and soil organic carbon density in arid and barren rocky mountainous regions: A case study of Yimeng Mountain. *Forests*, 2023, 14(7): 1351.
- [46] Zhang Y J, Jin Y H, Xu J W, *et al.* Effects of exogenous N and endogenous nutrients on alpine tundra litter decomposition in an area of high nitrogen deposition. *Science of the Total Environment*, 2022, 805: 150388.
- [47] Gong J R, Dong X D, Li X B, *et al.* Phosphorus fertilization affects litter quality and enzyme activity in a semiarid grassland. *Plant and Soil*, 2023, 492(1): 91–108.
- [48] Zhang C H, Li S G, Zhang L M, *et al.* Effects of species and low dose nitrogen addition on litter decomposition of three dominant grasses in Hulun Buir meadow steppe. *Journal of Resources and Ecology*, 2013, 4(1): 20–26.  
张彩虹, 李胜功, 张雷明, 等. 物种和低剂量氮添加对呼伦贝尔草甸草原三种主要优势种凋落物分解的影响. *资源与生态学*, 2013, 4(1): 20–26.
- [49] Sardans J, Peñuelas J. Potassium: A neglected nutrient in global change. *Global Ecology and Biogeography*, 2015, 24(3): 261–275.
- [50] Maestre F T, Quero J L, Gotelli N J, *et al.* Plant species richness and ecosystem multifunctionality in global drylands. *Science*, 2012, 335(6065): 214–218.
- [51] 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. *Global Change Biology*, 2007, 13(10): 2193–2205.
- [52] Kamezcyc J, Dyderski M K, Horodecki P, *et al.* Temperature and precipitation affect seasonal changes in mite communities (Acari: Mesostigmata) in decomposing litter of broadleaved and coniferous temperate tree species. *Annals of Forest Science*, 2022, 79(1): 12.
- [53] Li X F, Han S J, Zhang Y. Indirect effects of precipitation on litter decomposition of *Quercus mongolica*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(2): 261–266.  
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.
- [54] Lu W J, Qi J Y, Wu C, *et al.* Effects of mixed litter with different degrees of decomposition on the decomposition characteristics of semi-arid grassland in northern Shanxi. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(12): 47–57.  
路文杰, 齐晋云, 吴聪, 等. 晋北半干旱草地不同分解程度凋落物混合对分解特征的影响. *草业学报*, 2023, 32(12): 47–57.
- [55] Saj S, Nijmeijer A, Nieboukaho J D E, *et al.* Litterfall seasonal dynamics and leaf-litter turnover in cocoa agroforests established on past forest lands or savannah. *Agroforestry Systems*, 2021, 95(4): 583–597.
- [56] Ye H, Hong M, Liang Z W, *et al.* Effects of precipitation and nitrogen deposition on litter decomposition of two perennial grasses in a desert steppe. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(7): 2910–2920.  
叶贺, 红梅, 梁志伟, 等. 降水变化和氮沉降对荒漠草原两种多年生禾草凋落物分解的影响. *生态学报*, 2022, 42(7): 2910–2920.
- [57] Zhang C F, de Pasquale S, Hartman K, *et al.* The microbial contribution to litter decomposition and plant growth. *Environmental Microbiology Reports*, 2024, 16(1): e13205.
- [58] Di Sabatino A, Cicolani B, Miccoli F P, *et al.* Plant detritus origin and microbial-detritivore interactions affect leaf litter breakdown in a Central Apennine (Italy) cold spring. *Aquatic Ecology*, 2020, 54(2): 495–504.
- [59] Ruhland C T, Remund A J, Tiry C M, *et al.* Litter decomposition of three lignin-deficient mutants of *Sorghum bicolor* during spring thaw. *Acta Oecologica*, 2018, 91: 16–21.