

# 封育措施下荒漠草原不同枯落物分解特征

蒙仲举<sup>1,2</sup>, 万芳<sup>1</sup>

(1.内蒙古农业大学沙漠治理学院,呼和浩特 010018;2.中央与地方共建风沙物理重点实验室,呼和浩特 010018)

**摘要:**以荒漠草原优势植物羊草(*Leymus chinensis*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)及羊草+短花针茅(*Leymus chinensis* + *Stipa breviflora*)枯落物为研究对象,通过模拟试验,采用分解袋法,测定不同枯落物在分解过程中残留率的变化,分析枯落物元素释放规律及分解过程中对土壤性质的影响。结果表明:(1)在整个试验期内,不同枯落物残留率和质量损失率呈慢—快趋势,分解速率表现为羊草+短花针茅>短花针茅>羊草;试验区枯落物分解可以较好地拟合为 Olson 模型,不同枯落物分解 50%和 95%分别需要 2.79~3.15,12.05~13.62 年;(2)经过 360 天的分解,不同枯落物的全 C、N、P 均表现为释放的状态(NAI<100%),其中全 C 呈现波动释放的变化特征,释放比例为 47.88%~54.54%;全 N、全 P 呈释放—富集—释放的变化特征,其释放比例分别为 36.34%~47.87%,57.08%~74.71%。(3)不同枯落物的分解均提高土壤有机 C、N、P 含量,均比初始值分别增加 1.41~1.50,1.27~1.40,0.14~0.15 g/kg。研究结果为草地生态系统元素循环过程提供理论依据。

**关键词:**荒漠草原;分解速率;养分释放;土壤养分

中图分类号:S157.9

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)01-0319-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.01.046

## Decomposition Characteristics of Different Litters in the Desert Steppe Under Enclosure Measures

MENG Zhongju<sup>1,2</sup>, WAN Fang<sup>1</sup>

(1.Desert Science and Engineering College, Inner Mongolia Agricultural

University, Hohhot 010018; 2.Wind Erosion Key Laboratory of Central and Government, Hohot 010018)

**Abstract:** Withered Litters from *Leymus chinensis*, *Stipa breviflora* and *Leymus chinensis* + *Stipa breviflora* were taken as the research object. The decomposition bag method was used to measure the residual rates of different litters through a simulation experiment, and to analyze the release law of litter elements and the influence on soil properties during the decomposition process. The results showed that: (1) During the whole test period, the residual rates and mass loss rate of different litters showed a slow-fast trend, and the decomposition rates showed *Leymus chinensis* + *Stipa breviflora* > *Stipa breviflora* > *Leymus chinensis*. The litter decomposition in the test area could be well fitted by Olson model. Decomposing 50% and 95% of different litters needed 2.79~3.15 and 12.05~13.62 years, respectively. (2) After 360 days of decomposition, the total C, N and P of different litters all showed the state of release (NAI<100%), and the total C showed the characteristic of fluctuating release, with the release ratio ranging from 47.88% to 54.54%. Total N and P showed the characteristics of release-enrichment-release, with the release ratios of 36.34%~47.87% and 57.08%~74.71%, respectively. (3) Decomposition of different litters increased the contents of soil organic C, N and P, which increased by 1.41~1.50 g/kg, 1.27~1.40 g/kg and 0.14~0.15 g/kg respectively compared with the initial values. These research results could provide theoretical basis for the element circulation process of grassland ecosystem.

**Keywords:** desert steppe; decomposition rate; nutrient release; soil nutrients

枯落物是连接植物与土壤养分循环的纽带,也是维持土壤肥力的基础<sup>[1-2]</sup>,在生态系统中有着重要作用。

目前,关于枯落物的研究<sup>[3-4]</sup>从枯落物的蓄积量、分解过程中元素的释放特征、影响枯落物分解因子等方面,深

收稿日期:2020-08-27

资助项目:国家自然科学基金项目(51769019)

第一作者:蒙仲举(1980—),男,博士生导师,教授,主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail:mengzhongju@126.com

入到枯落物分解对土壤性质、植物生长、群落演替,以及植被生产力等生态功能的研究,主要集中在森林<sup>[5]</sup>、湿地<sup>[6]</sup>、典型草地<sup>[7]</sup>等生态系统。荒漠草原是草原的重要组成部分,属于草原向荒漠过渡的草原类型,是我国重要的生态屏障<sup>[8]</sup>。荒漠草原生态系统脆弱,对气候变化和人类活动干扰较为敏感,草地退化问题突出<sup>[9]</sup>。围栏封育是退化草地生态修复的有效措施<sup>[10]</sup>,关于封育对草地生态系统的影响,主要集中在对草地生产力<sup>[11]</sup>、群落多样性<sup>[12]</sup>、种子库<sup>[13]</sup>、土壤理化性质<sup>[14]</sup>等方面的研究,对封育措施下枯落物的分解研究鲜有报道。在荒漠草原生态系统中,枯落物分解是草地“自肥”机制和物质循环的重要过程,成为土壤养分循环链的重要环节<sup>[15]</sup>。枯落物分解可以加速土壤养分循环过程,有利于退化草地生态系统结构功能的有效恢复<sup>[16]</sup>。

鉴于此,本研究以荒漠草原(希拉穆仁)封育修复措施下羊草(*Leymus chinensis*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)及羊草+短花针茅(*Leymus chinensis* + *Stipa breviflora*)枯落物为研究对象,采用野外分解袋法模拟枯落物分解进程,分析枯落物在分解过程中枯落物残留率变化及基质质量的变化规律,研究枯落物分解过程中 C、N、P 元素释放/富集特征,并结合土壤 C、N、P 元素的变化特征,探讨枯落物在其分解过程中对土壤养分的影响,促进草地生态系统中物质循环,为草地生态系统生物地球元素循环过程提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古达茂旗希拉穆仁草原(42°20′—42°40′N,109°16′—111°25′E),属于温带大陆性季风气候,年平均降水量约为 280 mm,主要集中在 7—8 月,年平均气温 3.4 °C,最高气温 32 °C,最低气温 -31 °C,无霜期 106 天,蒸发量大,年均蒸发量 2 227 mm;地带性土壤为栗钙土,质地粗糙,土壤养分含量较低。由于旅游业的发展和过度放牧等人为干扰,造成土壤养分的损失,生物多样性减少,使得草原退化严重。自 2002 年围栏封育,经过人为封禁(围封年限 18 年),围封面积 133 hm<sup>2</sup>,排除了放牧及人为干扰后,草地生态系统得到恢复。研究区植物耐旱、耐贫瘠、适应性强,主要建群植物有羊草(*Leymus chinensis*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)、克氏针茅(*Stipa krylovii*)、芨芨草(*Achnatherum splendens*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)等,银灰旋花(*Convolvulus ammammii*)、赖草(*Leymus secalinus*)等分布也较为广泛,植被类型为典型荒漠草原特征。

### 1.2 研究方法

1.2.1 样地设置与样品采集 样地选择水利部草地水土保持生态研究中心 2002 年围封区域,于 2018 年

9 月采用样线与样方结合的方法(选择地势平坦、群落分布一致的区域),沿南北方向布设 1 条 140 m 的样线,间距 10 m,进行样方布设,共布设 1 m×1 m 的草本样方 14 个。在已布设好的样方内采集所有羊草与短花针茅枯落物并装入信封袋做相应的标记。对野外采集的枯落物进行预处理,用刷子刷掉附着在枯落物表面的土壤和去除表面的杂质,并把羊草与短花针茅的枯落物用剪刀剪成 5 cm 的小段,将处理好的羊草与短花针茅枯落物分别装进信封袋中,放入烘箱,在 65 °C 下烘干至恒重后将枯落物取出,分别从每个信封袋中称取羊草、短花针茅各 100 g,每种枯落物共计 500 g 作为单一枯落物样品,然后在从每个信封袋中分别称取羊草(250 g)+短花针茅(250 g)作为混合枯落物样品并混合均匀。将单一枯落物与混合枯落物分别称取 15 g 装进分解袋(分解袋的网眼大小为 60 目,规格为 20 cm×15 cm)。剩余烘干的枯落物样品用于室内试验,与野外称取分解袋样品的质量相同从每个信封袋中各取 15 g,用粉碎机粉碎并且过 0.15 mm 的筛,进行枯落物养分初始值的测定。

1.2.2 野外分解试验 在已经布设好的样方里放置分解袋,将所采集枯落物置于野外自然降解,为了反映客观情况,放置样品前,清除样方周边杂质等,沿对角线的方向将分解袋埋入距地表 10 cm 处,同时将分解袋周围土壤(10 cm)装入塑封袋作为基底值,分别在每个样点放置 2 个分解袋,自 2019 年 3 月开始,每月 18 日分别收集 2 个样方内的羊草、短花针茅及羊草+短花针茅分解袋(4 个重复),同时采集枯落物周边的土壤(深度 10 cm)。将收取回来的分解袋去除杂质,放入烘箱 65 °C 下烘干至恒重,进行质量损失的测定用于计算枯落物的分解速率。

1.2.3 枯落物及土壤化学含量的测定 将上述烘干的枯落物用粉碎机粉碎并过 0.15 mm 的筛磨成粉末后测定其 C、N、P 的含量;野外采集的土壤样品自然风干后测定其养分含量。枯落物及土壤的 C 用重铬酸钾—外加加热法测定;N、P 采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>—H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮,将消煮液分别用凯氏法测定 N,钼钼黄比色法测定 P;土壤 N 采用半微量开氏法测定,P 采用 NaOH 熔融—钼锑抗比色法<sup>[17]</sup>测定。

### 1.3 数据处理

(1)采用 Olson<sup>[18]</sup>指数衰减模型,对分解残留率数据进行自然对数转换后,拟合得到分解速率常数  $K$  值,并由此推算出枯落物分解 50%,95%需要的时间。

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

式中: $X_0$ 为枯落物初始含量(g); $X_t$ 为经过  $t$  时间后枯落物的残留量(g); $k$  为分解系数; $t$  为分解时间(d)。

(2)采用养分积累指数(NAI)<sup>[19]</sup>表示枯落物分解过程中营养元素的积累或释放。

$$NAI = \frac{M_t \times C_t}{M_0 \times C_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $M_t$ 为  $t$  时刻的枯落物干重(g); $C_t$ 为  $t$  时刻枯落物中的元素浓度(g/kg); $M_0$ 为枯落物的初始干重(g); $C_0$ 为枯落物中元素的初始浓度(g/kg)。若  $NAI > 100\%$  说明枯落物在分解过程中元素发生了净积累, $NAI < 100\%$ ,说明枯落物在分解过程中发生了净释放。

应用 Excel 2013 对测定数据进行整理和分析,所有统计数据以平均值表示,最后利用 Origin 2017 软件进行数据作图分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同枯落物分解进程及模型预测

#### 2.1.1 不同枯落物分解残留率及质量损失率变化

由图 1 可知,随着分解时间的推进,封育措施下羊草、短花针茅及羊草+短花针茅残留率呈递减的趋势。在整个分解过程中下不同枯落物的残留率并非直线

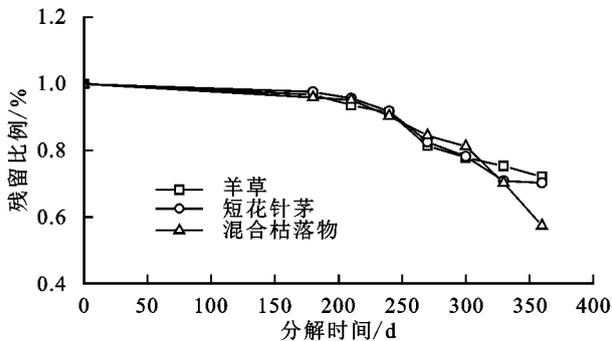
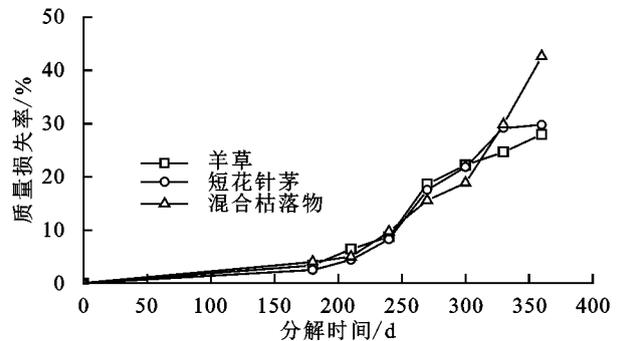


图 1 不同枯落物残留比例变化和质量损失率的变化

下降,根据不同枯落物的在整个分解过程中,将整个分解过程分为 2 个阶段:缓慢阶段(0~180 天),在这个阶段残留率变化较小,说明不同枯落物在这个阶段分解较慢;快速阶段(180~360 天),在分解末期羊草、短花针茅及羊草+短花针茅均达到到最小值分别为 72.07%,70.22%,57.32%。整体残留率表现为羊草+短花针茅<短花针茅<羊草,表明混合枯落物在分解过程中快于 2 种单一枯落物。

封育措施下不同枯落物质量损失率随分解时间的延长质量损失率呈上升的趋势。不同枯落物分解的质量损失率不与时间呈线性相关,由于不同的时间内质量损失量增加的快慢有所不同。质量损失率的变化和残留率变化趋势相同,在分解前期(0~180 天)质量损失率变化较平稳,羊草、短花针茅及羊草+短花针茅分别为 3.33%,2.47%,4.01%,后期随着温度上升,微生物活动增强,分解速度加快,致使质量损失率加快,分解末期达到最大值分别为 27.93%,29.78%,42.68%,质量损失率越大,说明分解越快。



2.1.2 不同枯落物分解速率及模型预测 枯落物分解是一个动态过程,用于描述枯落物分解速率常用的模型有单指数衰减模型、双指数衰减模型和多指数衰减模型<sup>[18,20-21]</sup>,荒漠草原采用哪种模型要根据具体情况而定。根据表 1 分解模型的决定系数  $R^2$  可知,Olson 指数衰减模型拟合效果较好。拟合结果表明,Olson 模型能够很好地表征不同枯落物的分解规律。从分解指数  $K$  可以

表 1 利用 Olson 模型研究封育措施下不同枯落物残留率与分解时间的关系

枯落物类型	回归方程	分解系数 $K$	决定系数 $R^2$	$T_{0.5}/a$	$T_{0.95}/a$
羊草	$Y = 0.95519e^{-0.01832t}$	0.01832	0.96260	3.15	13.62
短花针茅	$Y = 0.95986e^{-0.01833t}$	0.01833	0.96655	3.15	13.61
羊草+短花针茅	$Y = 0.90001e^{-0.02073t}$	0.02073	0.91668	2.79	12.05

注:Y 为残留率(%);t 为分解时间(a)。

### 2.2 封育措施下不同枯落物分解养分释放特征

由图 2 可知,野外模拟分解过程中,随着分解的进行,不同枯落物全 C 含量整体表现为下降—上升波动变化的趋势,在分解末期羊草、短花针茅及羊草+短花针茅达到最小值,较初始值分别减少 98.06, 103.86,84.58 g/kg,短花针茅释放的 C 含量最多。

看出,混合枯落物(0.020 73)>短花针茅(0.018 33)>羊草(0.018 32),分解指数  $K$  越大,表明分解速率越快,且混合枯落物的分解快于 2 种单一枯落物。通过 Olson 模型模拟预测,得到封育措施下不同枯落物分解 50%和 95%所需要的时间,羊草、短花针茅及羊草+短花针茅枯落物分解 50%分别需要 3.15,3.15,2.79 年,分解 95%分别需要 13.62,13.61,12.05 年。

在整个分解过程中 C 累积指数的变化与 C 含量变化的规律相同,整体表现为释放的状态。其中 0~180 天羊草、短花针茅及羊草+短花针茅全 C 含量分别释放 14.78%,15.92%,9.62%,180~300 天 C 波动释放,300~360 天开始快速释放,在 360 天 C 含量积

累指数达到最小值分别为 52.12%, 51.34%, 45.46%, 从

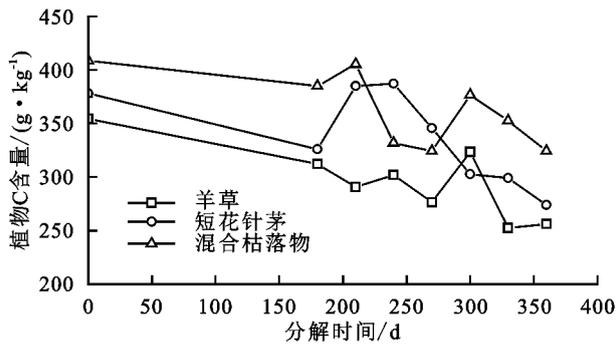


图 2 不同枯落物全 C 含量变化特征和全 C 累积指数

由图 3 可知,封育措施下不同枯落物随着时间的推进分解过程中全 N 含量基本呈现下降—上升—下降的趋势,具体为羊草、短花针茅分解前期 0~180 天全 N 含量一直减小,达到最小值分别为 12.70, 10.81 g/kg, 180~240 天羊草、短花针茅全 N 含量呈现上升的趋势, 240 天达到最大值后开始下降,分别为 20.65, 18.92 g/kg; 而混合枯落物与单一枯落物变化有所不同, 0~180 天下降,

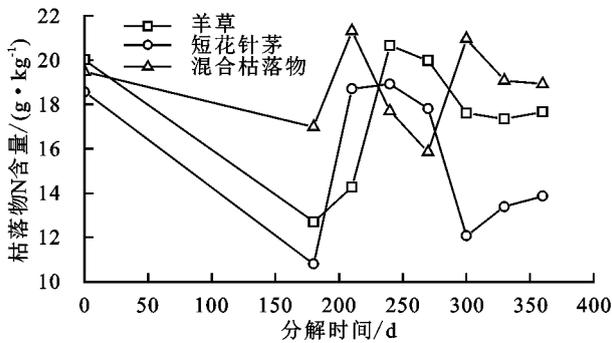


图 3 不同枯落物全 N 含量变化特征和全 N 累积指数

由图 4 可知,在整个试验期内,封育措施下的全 P 含量表现为分解前期 0~180 天为减少的趋势,羊草、短花针茅及羊草+短花针茅较初始值减少 0.28, 0.18, 0.23 g/kg, 分解中期表现为 P 含量有所上升, 分解末期 270~360 天表现为下降的趋势, 分解末期 P 含量较初始分别减少 0.67, 0.49, 0.95 g/kg, 从减少量可以得出,混合枯落物 P 含量释放快于单

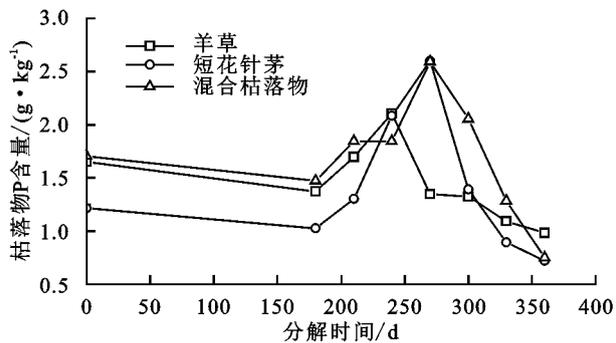
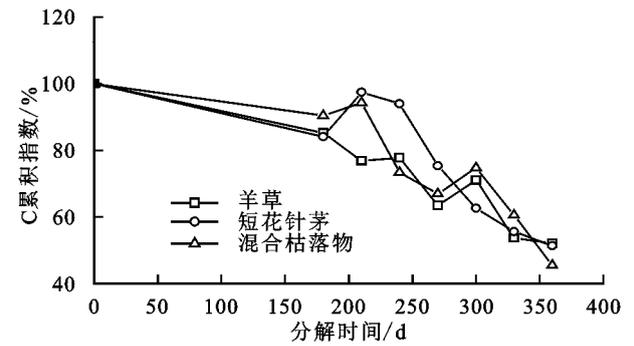


图 4 不同枯落物全 P 含量变化特征和全 P 累积指数

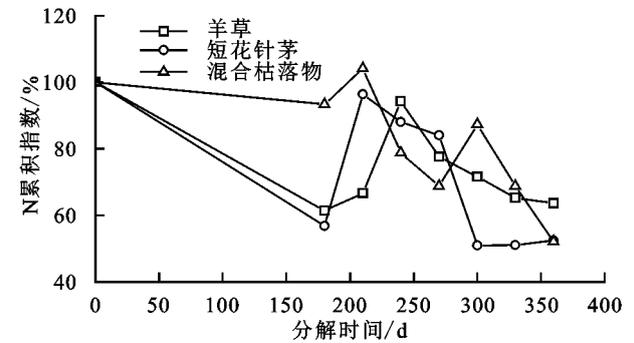
### 2.3 不同枯落物分解过程中化学计量特征的变化

由图 5 可知,不同枯落物在分解过程中 C/N 整体表现为先升高后降低的趋势。羊草、短花针茅、羊草+短花

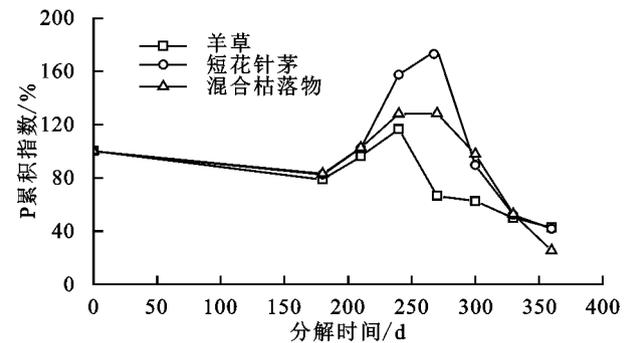
积累指数可知,短花针茅 C 释放最快。



180~300 天波动变化, 300 天以后开始下降, 其中在 270 天达到最小值 15.85 g/kg。不同枯落物全 N 积累指数随着分解时间的推进呈现波动降低的趋势, 整体为释放状态, 其中, 分解 0~180 天不同枯落物均表现为释放, 羊草、短花针茅在 210~240 天均表现为小幅度的富集, 240 天后开始释放, 而混合枯落物在 180~210 天内富集, 210 天后开始释放。



一枯落物。全 P 含量表现为释放—富集—释放的过程, 不同枯落物在分解 0~180 天全 P 含量处于释放状态, 从 180 天开始富集, 其中不同枯落物在分解 240 天时 P 积累指数达到最大值为 116.68%, 157.56%, 128.02%, 分别富集 16.68%, 57.56%, 28.02%, 到分解末期达到最小值, 不同枯落物分别释放 57.08%, 58.26%, 74.71%。



针茅 C/N 分别 13.84~24.59, 19.4~30.14, 17.13~22.66。在分解 0~180 天 C/N 呈升高趋势, 在后期 C/N 值呈波动降低趋势。在整个分解过程中, 不同枯落物 C/P 的变化整

体趋势为先降低再上升的过程,其中 0~240 天 C/P 呈下降趋势,分解 240 天以后,呈现上升趋势,不同枯落物在整

个分解过程中 N/P 呈先降低再上升趋势,在分解 0~270 天 N/P 呈波动下降趋势,270 天以后呈上升的趋势。

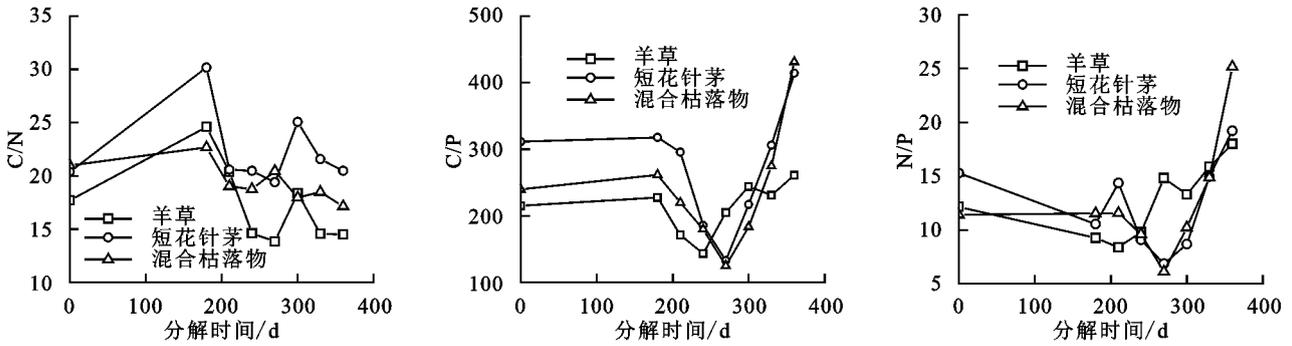


图 5 不同枯落物分解化学计量特征变化

### 2.4 封育措施下不同枯落物分解对土壤 C、N、P 的影响

由图 6 可知,不同枯落物在分解过程中土壤 C 含量的变化呈波动下降与上升交替变化的特征。羊草、短花针茅、羊草+短花针茅分解过程中土壤 C 含量变化范围分别为 13.14~15.70, 13.78~16.75, 13.73~15.76 g/kg。在整个分解过程中,枯落物 C 含量释放时,土壤 C 含量有所增加;在分解末期,羊草、短花针茅、羊草+短花针茅较初始值分别增加 1.41, 1.50, 1.47 g/kg。不同枯落物分解对土壤全 N 的影响随着分解的进行,土壤全 N 含量呈上升趋势。羊草、短花针茅、羊草+短花针茅分解过程中土壤 N 含量变化范围为 2.17~3.57, 2.17~3.52, 2.17~3.44 g/kg,较初值增加 1.41, 1.35, 1.27 g/kg。随着分解的进行,土壤全 P 含量呈现上升一下降平稳的变化趋势。羊草、短花针茅、羊草+短花针茅分解过程中土壤 P 含量变化范围为 0.36~0.56, 0.36~0.57, 0.36~0.53 g/kg,较初值增加 0.14~0.15 g/kg,由于植物含 P 量较小,致使枯落物在分解过程中土壤积累的 P 含量较少。

与李学斌等<sup>[10]</sup>预测围封条件下荒漠草原枯落物分解 50%所需要的时间约为 2~5 年、分解 95%需要 8~24 年结果相一致。

## 3 讨论

### 3.1 不同枯落物分解特征

枯落物分解是一个复杂的过程,受多种因素制约<sup>[22]</sup>。本研究表明,经过 1 年的分解发现不同枯落物质量损失率为羊草(27.91%)<短花针茅(29.78%)<羊草+短花针茅(42.68%),均未达到 50%,一方面与枯落物初始的化学性质有关<sup>[10]</sup>,另一方面研究区干旱少雨,限制枯落物的分解<sup>[22]</sup>。枯落物分解是一个动态过程,利用模型对分解速率进行模拟和预测是非常重要的研究手段<sup>[23]</sup>。已有研究<sup>[22]</sup>表明,Olson 模型可以很好地预测荒漠草原枯落物分解所需的时间。本研究采用 Olson 分解模型模拟了 3 种枯落物的分解过程,根据判定系数  $R^2$  得知,不同枯落物决定系数  $R^2$  均较高( $R^2 > 0.9$ ),说明 Olson 模型可以应用到本试验中。通过 Olson 模型预测不同枯落物分解 50%, 95% 分别需要 2.79~3.15, 12.05~13.62 年,这

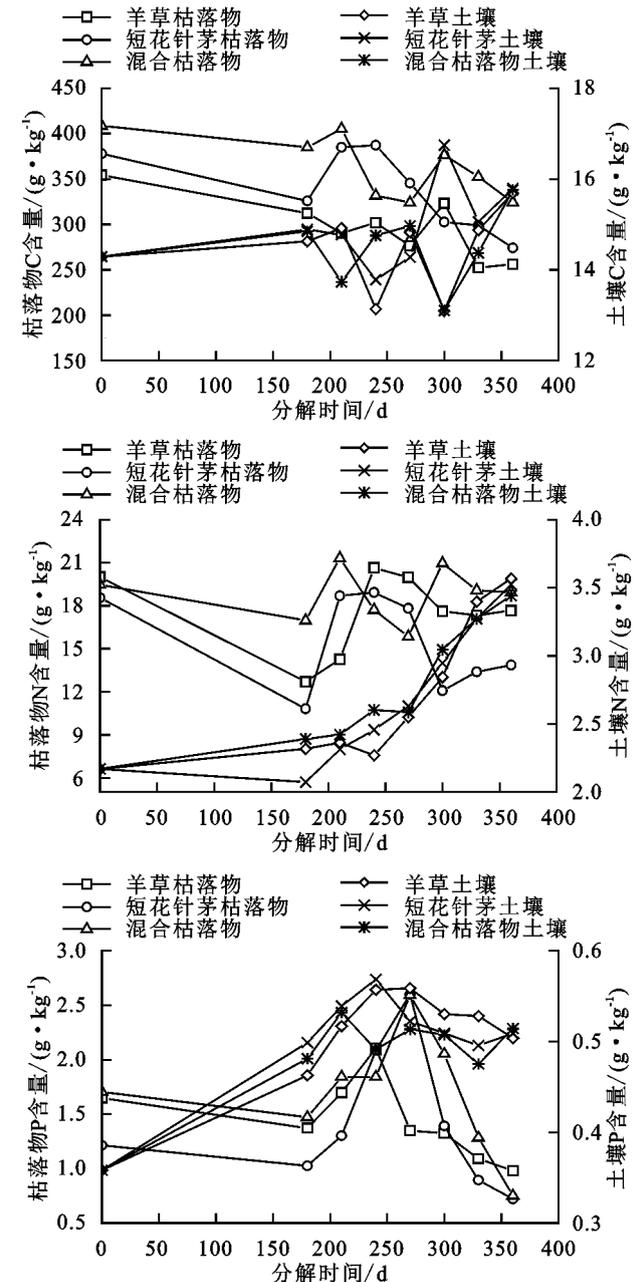


图 6 不同枯落物分解过程中土壤 C、N、P 变化特征

### 3.2 不同枯落物分解养分释放特征

枯落物分解伴随着元素的变化,这些元素的释放/富集在循环过程中起着重要作用,对退化草地植被恢复有重要的意义<sup>[24]</sup>。本研究表明,不同枯落物分解过程中全 C、N、P 均表现出释放的变化特征,这是由枯落物分解及元素自身特性所决定的<sup>[25]</sup>。其中全 C 表现为释放的变化特征<sup>[26-27]</sup>,由于枯落物在分解过程中主要以 C 为主导的物质循环模式,可溶性物质的淋失和易分解碳水化合物化合物的分解都会引起枯落物 C 的释放<sup>[28]</sup>。全 N 呈现为快速释放—小幅度富集—释放的变化特点,180~240 天 N 含量出现富集现象,由于水热条件的改善,土壤温湿度的改变,微生物繁殖发育需要大量的外源 N, N 元素会现富集的现象<sup>[29]</sup>。全 P 与全 N 的释放特征基本相同,由于 P 元素属于易被淋溶的元素,主要是以磷酸根或者化合物的形态存在,因此枯落物腐解 P 元素释放较快<sup>[30-31]</sup>。

随着分解的进行,枯落物中不同元素发生积累或释放,导致不同枯落物的化学计量特征出现不同的变化趋势<sup>[32]</sup>。本研究表明,不同植物枯落物分解过程中 C/N 均表现为整体下降趋势,C/P、N/P 则表现为先下降后上升的波动变化趋势。其 C/N 的变化与 C 含量变化不大,N 含量是调节枯落物分解过程中 C/N 变化的关键因子<sup>[33]</sup>。C/P 与 N/P 的变化过程中,P 含量的变化起着重要的作用,若 C/P 与 N/P 的值较小,易于枯落物的分解。

### 3.3 不同枯落物分解对土壤性质的影响

枯落物分解过程中释放的 C、N、P 参与物质循环,并将养分归还到土壤,显著影响土壤的理化性质<sup>[34-35]</sup>。枯落物分解的越快,对土壤的理化性质产生的影响越大,对土壤的改善会越明显。本研究表明,不同枯落物分解均可提高土壤有机 C 含量,这与程曼<sup>[36]</sup>、胡宁等<sup>[37]</sup>对荒漠生态系统的研究结果相一致。枯落物分解过程中释放的 N、P 元素是土壤 N、P 的重要来源,决定着土壤养分的有效性<sup>[38]</sup>,不同枯落物分解中 N 含量不断上升,P 含量小幅度的上升,是由于土壤中的 P 元素主要以有机 P 为主,波动较小<sup>[39]</sup>。

## 4 结论

(1) 试验期内,不同枯落物分解均可明显分为前期缓慢,后期快速分解 2 个阶段,通过 Olson 模型的拟合发现该模型可以很好地预测荒漠草原枯落物分解周转时间。

(2) 经过 360 天的分解,不同枯落物的全 C、N、P 均表现为释放状态(NAI<100%),其中全 C 呈现波动释放特征,全 N 和全 P 分解中会出现小幅度的富集状态。

(3) 枯落物和土壤间的 C、N、P 之间存在明显的

迁移过程,枯落物的分解均提高了土壤有机 C、N 和 P 含量。

### 参考文献:

- [1] 郭剑芬,杨玉盛,陈光水,等.森林凋落物分解研究进展[J].林业科学,2006,42(4):93-100.
- [2] 周存宇.凋落物在森林生态系统中的作用及其研究进展[J].湖北农学院学报,2003,23(2):140-145.
- [3] Fang C, Moncrieff J. The dependence of soil CO<sub>2</sub> efflux on temperature[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, 33(2):155-165.
- [4] 王清奎,汪思龙,于小军,等.杉木与阔叶树叶凋落物混合分解对土壤活性有机质的影响[J].应用生态学报,2007,18(6):1203-1207.
- [5] 施妍,陈芳清.大老岭自然保护区日本落叶松林凋落物分解及养分释放研究[J].林业科学研究,2016,29(3):430-435.
- [6] 魏晓凤.松嫩草地不同放牧强度下植物物种枯落物分解的变化规律研究[D].长春:东北师范大学,2013.
- [7] 郝敏,李毛毛,陈婷,等.胶州湾滨海湿地枯落物分解过程中枯落物—土壤养分动态[J].生态学报,2019,38(4):1022-1030.
- [8] 安钰,安慧,李生兵.放牧对荒漠草原土壤和优势植物生态化学计量特征的影响[J].草业学报,2018,27(12):94-102.
- [9] 牛钰杰,杨思维,王贵珍,等.放牧干扰下高寒草甸物种多样性指数评价与选择[J].应用生态学报,2017,28(6):1824-1832.
- [10] 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[J].生态学报,2015,35(12):4105-4114.
- [12] 陈芙蓉,程积民,于鲁宁,等.封育和放牧对黄土高原典型草原生物量的影响[J].草业科学,2011,28(6):1079-1084.
- [12] 贾晓妮,程积民,万惠娥.封育对云雾山本氏针茅草地群落的影响[J].草地学报,2008,16(3):272-277.
- [13] 赵凌平,程积民,万惠娥,等.黄土高原草地封育与放牧条件下土壤种子库特征[J].草业科学,2008,25(10):78-83.
- [14] 程杰,高亚军.云雾山封育草地土壤养分变化特征[J].草地学报,2007,15(3):273-277.
- [15] 章广琦,张萍,陈云明,等.黄土丘陵区刺槐与油松人工林生态系统生态化学计量特征[J].生态学报,2018,38(4):1328-1336.
- [16] 赵娟,刘佳楠,常海涛,等.宁夏荒漠草原优势植物枯落物分解特征及其影响因素[J].草地学报,2019,27(1):80-87.
- [17] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2000.
- [18] Olson J S. Energy storage and the balance of producers and decomposition in ecological systems[J]. Ecology, 1963,44(2):332-34.
- [19] 文海燕,傅华,郭丁.黄土高原典型草原优势植物凋落物分解及养分释放对氮添加的响应[J].生态学报,2017,37(6):2014-2022.
- [20] Minderman G. Addition, decomposition and accumula-

tion of organic matter in forest[J]. The Journal of Ecology, 1968, 6(2): 355-362.

- [21] Harmon M E, Franklin J F, Swanson F J, et al. Ecology of coarse woody debris in temperate ecosystems[J]. Advances in Ecological Research, 2004, 15(1): 135-305.
- [22] 张林海, 曾从盛, 张文娟, 等. 闽江河口湿地枯落物分解及主要影响因子[J]. 应用生态学报, 2012, 23(9): 2404-2410.
- [23] 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.
- [24] Aerts R, Caluwe H D. Nutritional and plant mediated controls on leaf litter decomposition of Carex species[J]. Ecology, 1997, 78(1): 244-260.
- [25] 向云. 黄土丘陵区草地枯落物分解特征及其对土壤性质的影响[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [26] 曾全超. 黄土高原辽东栎枯落物分解的微生物作用机制[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [27] 薛志婧. 黄土丘陵区草地生态系统典型植物枯落物分解特征研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [28] 杨继松, 刘景双, 于君宝, 等. 三江平原小叶章湿地枯落物分解及主要元素变化动态[J]. 生态学杂志, 2006, 25(6): 597-602.
- [29] 武海涛, 吕宪国, 杨青, 等. 三江平原典型湿地枯落物早期分解过程及影响因素[J]. 生态学报, 2007, 27(10): 4027-4035.
- [30] 温达志, 魏平, 张佑昌, 等. 鼎湖山亚热带森林细根分解干物质损失和元素动态[J]. 生态学杂志, 1998, 17

(2): 1-6.

- [31] 李燕, 王丽卿, 张瑞雷. 淀山湖沉水植物死亡分解过程中营养物质的释放[J]. 环境污染与防治, 2008, 30(2): 45-52.
- [32] 王维奇, 曾从盛, 钟春棋, 等. 人类干扰对闽江河口湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量学特征的影响[J]. 环境科学, 2010, 31(10): 2411-2416.
- [33] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101(30): 11001-11006.
- [34] McFee W W, Stone E L. The persistence of decaying wood in humus layers of northern forests[J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, 30(4): 513-516.
- [35] 林波, 刘庆, 吴彦, 等. 森林凋落物研究进展[J]. 生态学杂志, 2004, 23(1): 60-64.
- [36] 程曼. 黄土丘陵区典型植物枯落物分解对土壤有机碳、氮转化及微生物多样性的影响[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [37] 胡宁, 马志敏, 蓝家程, 等. 石漠化区植被恢复过程凋落叶分解特征及其对土壤有机碳/氮的影响: 以重庆中梁山为例[J]. 中国岩溶, 2016, 35(5): 539-549.
- [38] 彭少麟, 刘强. 森林凋落物动态及其对全球变暖的响应[J]. 生态学报, 2002, 22(9): 1534-1543.
- [39] 罗珠珠. 不同耕作措施下黄土高原旱地土壤质量综合评价[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2008.

(上接第 318 页)

- [12] 陈艳梅, 王少丽, 高占义, 等. 基于 SALTMOD 模型的灌溉水矿化度对土壤盐分的影响[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(3): 11-16.
- [13] 成萧尧, 毛威, 朱焱, 等. 基于 SaltMod 的河套灌区节水条件下地下水动态变化分析[J]. 节水灌溉, 2020(2): 73-79.
- [12] 彭振阳, 黄介生, 伍靖伟, 等. 秋浇条件下季节性冻融土壤盐分运动规律[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 77-81.
- [14] 陈艳梅, 王少丽, 高占义, 等. 不同灌溉制度对根层土壤盐分影响的模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(3): 263-270.
- [15] 杨树青. 基于 Visual-MODFLOW 和 SWAP 耦合模型干旱区微咸水灌溉的水-土环境效应预测研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2005.
- [16] Oosterbaan R J. SALTMOD: Description of principles, user manual, and application, ILRI [M]. Netherlands: Wageningen, 2000.
- [17] 常晓敏. 河套灌区水盐动态模拟与可持续性策略研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019.
- [18] 童文杰, 刘倩, 陈阜, 等. 河套灌区小麦耐盐性及其生态适宜区[J]. 作物学报, 2012, 38(5): 909-913.
- [19] 王婧, 逢焕成, 任天志, 等. 地膜覆盖与秸秆深埋对河套

灌区盐渍土水盐运动的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(15): 52-59.

- [20] Qadir M, Schubert S. Degradation processes and nutrient constraints in sodic soils [J]. Land Degradation and Development, 2002, 13(4): 275-294.
- [21] Nassar I N, Robert H. Salinity and compaction effects on soil water evaporation and water solute distributions [J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 63(4): 752-758.
- [22] 谭军利, 王西娜, 田军仓, 等. 不同微咸水灌水量条件下覆砂措施对土壤水盐运移的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(17): 100-108.
- [23] 刘雪艳, 丁邦新, 白云岗, 等. 微咸水膜下滴灌对土壤盐分及棉花产量的影响[J]. 干旱区研究, 2020, 37(2): 410-417.
- [24] Chang X M, Gao Z Y, Wang S L, et al. Modelling long-term soil salinity dynamics using SaltMod in Hetao Irrigation District, China [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 156: 447-458.
- [25] Mao W, Yang J Z, Zhu Y, et al. Loosely coupled SaltMod for simulating groundwater and salt dynamics under well-canal conjunctive irrigation in semi-arid areas [J]. Agricultural Water Management, 2017, 192: 209-220.