

# 黄土高原不同植物凋落物的分解特性 \*

李 云<sup>1,2</sup> 周建斌<sup>1</sup> 董燕捷<sup>1</sup> 夏志敏<sup>1</sup> 陈竹君<sup>1\*\*</sup>

(<sup>1</sup>西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; <sup>2</sup>四川农业大学资源环境学院, 成都 611130)

**摘要** 以黄土高原区典型植物刺槐、小叶杨、沙棘、沙柳、苜蓿和长芒草的凋落物为对象, 采用网袋法研究了半干旱区(神木)分解过程中, 单种、两种及3种凋落物等质量配比混合后其质量、碳和氮的动态变化。结果表明: 在整个分解过程中, 不同处理凋落物的质量损失率, 全碳、全氮的释放速率以及可溶性有机碳和可溶性总氮的含量均表现为前期大于后期。经过412 d的分解, 3种凋落物混合后的平均质量损失率高于两种混合凋落物, 单种凋落物最低。到分解试验结束时, 不同处理凋落物的全碳、全氮平均释放率均表现为单种>两种混合>3种混合; 而不同处理的可溶性有机碳平均含量表现为两种混合>单种>3种混合, 但未达到显著水平; 可溶性总氮含量则为3种混合>两种混合>单种, 达到显著水平。凋落物的质量损失率与可溶性有机物, 特别是可溶性有机碳具有一定的相关性。从质量损失率来看, 小叶杨、沙棘与苜蓿凋落物的组合为最佳组合。建议在黄土高原区退耕还林还草工程建设中, 合理增加植物种类多样性, 促进土壤改善养分状况。

**关键词** 黄土高原 混合凋落物 可溶性有机碳 可溶性总氮

**文章编号** 1001-9332(2012)12-3309-08 **中图分类号** S154.4 **文献标识码** A

**Decomposition of different plant litters in Loess Plateau of Northwest China.** LI Yun<sup>1,2</sup>, ZHOU Jian-bin<sup>1</sup>, DONG Yan-jie<sup>1</sup>, XIA Zhi-min<sup>1</sup>, CHEN Zhu-jun<sup>1</sup> (<sup>1</sup>College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; <sup>2</sup>College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2012, 23(12): 3309–3316.

**Abstract:** Taking the litters of species *Hippophae rhamnoides*, *Medicago sativa*, *Populus simonii*, *Robinia pseudoacaci*, *Salix psammophila*, and *Stipa bungeana* in the Loess Plateau of Northeast China as test objects, and by using mesh bags, this paper studied the dynamic changes of the litters mass, carbon, and nitrogen during decomposition after buried in the field in semiarid region. The litters buried were from one, two, or three of the plant species, and mixed thoroughly with equal proportion of masses. During decomposition, the mass loss rate, total carbon and nitrogen release rates, and total soluble carbon and nitrogen contents of different litters were higher at the early than at the later decomposition stage. After 412 d decomposition, the average mass loss rate of the litters was in the order of mixed litters of three plant species > mixed litters of two plant species > one plant species litter. By the end of this experiment, the average release rates of the litter total carbon and nitrogen ranked as one plant species litter > mixed litters of two plant species > mixed litters of three plant species, the litter soluble organic carbon content was mixed litters of two plant species > mixed litters of three plant species > one plant species litter, while the litter soluble total nitrogen content was mixed litters of three plant species > mixed litters of two plant species > one plant species litter. Correlation analysis showed that the litter mass loss rate had definite correlation with the litter soluble organic matter, especially soluble organic carbon. From the viewpoint of mass loss rate, the mixture of the litters of *P. simonii*, *H. rhamnoide*, and *M. sativa* was the optimum. It was suggested that in the process of returning farmland into forestland and grassland in the gully and valley region of Loess Plateau, it would be required to rationally increase plant species diversity to improve soil fertility.

**Key words:** Loess Plateau, mixed litter, soluble organic carbon, soluble total nitrogen.

\* “十一五”国家科技支撑计划项目(2007BAD89B02)、国家自然科学基金项目(40571087)、西北农林科技大学拔尖人才支持计划项目(2006)和四川农业大学博士专项(01470404)资助。

\*\* 通讯作者. E-mail: zjchen@nwafu.edu.cn

2012-04-19 收稿, 2012-09-11 接受。

凋落物是植被生长发育过程中新陈代谢的产物,是植被和土壤之间的一个重要通量。凋落物在维持土壤肥力、保证植物再生长养分的可利用性中起着重要作用<sup>[1-2]</sup>。凋落物的分解在维持林地生态系统生产力、净碳储量、土壤有机质的形成以及群落演替等方面具有不可替代的作用<sup>[3-4]</sup>,也是生态系统物质循环和能量转换的主要途径<sup>[5-6]</sup>。前人对凋落物凋落和分解已经进行了大量的研究<sup>[7-11]</sup>,但对黄土高原退耕还林还草区的研究尚少见报道。

黄土高原丘陵区是我国乃至世界上水土流失最为严重的地区之一。从2002年起,国家在这一地区实施了以退耕还林还草为主的生态建设,迄今植被覆盖率已由12%上升至33.2%,环境得到改善的区域占黄土高原总面积的42.8%。目前有关黄土高原区退耕还林还草后生态系统的化研究报道,大多集中于退耕后对减少径流泥沙及养分流失<sup>[12]</sup>、土壤有机质<sup>[13]</sup>和土壤微生物生物量的变化<sup>[14-15]</sup>等方面,而关于退耕还林还草后不同种类凋落物及配比后的凋落物分解及其营养元素的变化尚缺乏研究。

因此,本试验选取黄土高原地区6种典型植物凋落物作为研究对象,采用网袋法研究了陕西神木不同种类凋落物及配比后的分解过程中全碳、全氮、可溶性有机碳及可溶性总氮含量的变化,旨在为该区的生态恢复与重建提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 凋落物的收集

供试凋落物于2009年3月采自位于陕西省神木县城以西14 km处的六道沟流域的中国科学院水利部水土保持研究所神木侵蚀与环境试验站(38°46'—38°51' N, 110°21'—110°23' E),海拔1094~1274 m。该地区属典型的半干旱气候,年均气温8.4℃,极端最高气温38.9℃,极端最低气温-28.1℃。多年平均降水量为437.4 mm,其中6—9月降水量

占年降水量的70%左右,平均干燥度1.8,无霜期169 d。

采集当地分布较为广泛的同一林地主要植被类型的植物凋落物。其中,乔木为刺槐(*Robinia pseudoacacia*)和小叶杨(*Populus simonii*),灌木为沙棘(*Hippophae rhamnoides*)和沙柳(*Salix psammophila*),草本植物为苜蓿(*Medicago sativa*)和长芒草(*Stipa bungeana*)。采样时,乔、灌木均收集地面当年凋落的叶片,草本植物刈割其整个地上部分。每一样品的采集均采用“S”型多点取样法,每个点收集约0.5 kg,每种样品的采样量约32 kg。采回后置60℃烘箱内烘至恒量。将烘干的植物凋落物取部分粉碎过筛(0.5~1.0 mm)后,测定植物体碳、氮及可溶性碳、氮含量(表1)。

### 1.2 试验设计

采用网袋法进行凋落物田间分解试验。所用尼龙网袋大小为20 cm×15 cm,网孔约为1 mm×1 mm。分别将上述乔木、灌木和草本植物3类6种不同种类凋落物按单种、乔木与灌木、乔木与草本植物、灌木与草本植物分别按照质量分数的1:1混合,乔木、灌木与草本植物间按照质量分数的1:1:1混合,称取12 g(烘干基)装入尼龙网袋中,共组成26个处理。每个处理重复15次。于2009年6月25日埋入神木试验站(38°47'36" N, 110°21'46" E, 海拔1217 m)农田土壤15 cm深处<sup>[16]</sup>,尼龙袋之间相隔10 cm,在尼龙袋的里外均用塑料标签进行编号;同时,在试验地点土层15 cm深处理入全密封袖珍温度记录仪(TBI32-20+50),定期测定试验期间土壤温度(图1)。

2009年8月25日、10月25日和2010年8月11日分别取出埋入土中的尼龙网袋,每个处理3个重复,小心去掉泥土和新长入的细根,装入塑料袋中带回实验室,置60℃烘箱中烘至恒量后,称量,粉碎,测定残留凋落物的全碳、全氮含量。

表1 植物凋落物的主要化学成分

Table 1 Main chemical properties of the plant litters (means±SD, n=5)

林型 Forest type	编号 No.	凋落物 Plant litter	全碳 TC (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮 TN (g·kg <sup>-1</sup> )	可溶性有机碳 SOC (g·kg <sup>-1</sup> )	可溶性总氮 STN (g·kg <sup>-1</sup> )	C/N
乔木	A	刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>	396.26±12.15	14.64±0.07	49.70±0.10	0.822±0.003	27.07
Tree	B	小叶杨 <i>P. simonii</i>	384.31±5.56	6.96±0.02	72.52±0.05	1.068±0.023	55.22
灌木	C	沙棘 <i>H. rhamnoides</i>	326.41±1.17	18.63±0.10	24.39±0.03	0.386±0.002	17.52
Shrub	D	沙柳 <i>S. psammophila</i>	379.12±1.84	13.67±0.30	43.71±0.59	0.908±0.016	27.73
草本	E	苜蓿 <i>M. sativa</i>	424.23±0.93	11.29±0.13	14.43±0.20	0.681±0.026	37.57
Grass	F	长芒草 <i>S. bungeana</i>	402.13±0.65	7.05±0.09	12.20±0.02	0.360±0.005	57.04

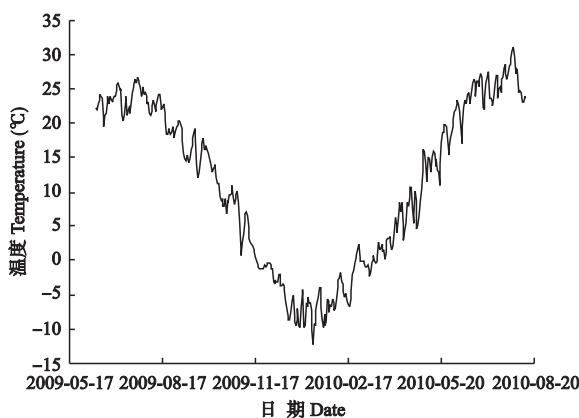


图 1 2009—2010 年试验期间试验点的日平均土壤温度

Fig. 1 Averaged dayly temperature during 2009 and 2010.

### 1.3 测定方法

植物凋落物中的碳含量采用重铬酸钾容量法-外加热(油浴加热)法测定;氮含量用  $H_2SO_4-H_2O_2$  消煮后,凯氏法测定<sup>[17]</sup>。凋落物中可溶性有机碳、氮的提取方法:称取粉碎后的植物样品 2 g 于 150 mL 三角瓶中,然后加入 60 mL 蒸馏水,在往复振荡机上振荡 0.5 h,静置,取上清液在 -0.08 MPa 下过孔径为 0.45  $\mu m$  滤膜(使用前首先要用蒸馏水淋洗滤膜,以淋洗滤膜可能残留的有机组分)过滤,即获得植物凋落物提取液,测定其中可溶性有机碳(soluble organic carbon, SOC)、可溶性总氮(soluble total nitrogen, STN)的含量。可溶性总氮采用过硫酸钾氧化法测定<sup>[18]</sup>;可溶性有机碳采用 TOC 分析仪(Phoenix 8000)测定。

### 1.4 数据处理

凋落物质量损失率( $D_{mi}$ ):

$$D_{mi} = (\Delta M/M_0) \times 100\%$$

式中: $\Delta M$  为所取样品的质量损失量(g); $M_0$  为起始时分解袋内样品质量(g)。

凋落物养分释放率( $E_i$ ):

$$E_i = [(e_0 - e_i)/e_0] \times 100\%$$

式中: $E_i$  为第  $i$  个月养分释放率(%); $e_i$  为第  $i$  个月所取样品养分残留量(g); $e_0$  为凋落物初始养分含量(g); $\Delta e_i$  为正时,养分元素表现为净释放,为负时表现为净富集。

所有数据均采用 Excel 2003 和 SAS 8.0 软件进行处理,采用平均值±标准差( $n=3$ )表示。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较不同处理间的差异,显著性水平设定为  $\alpha=0.05$ 。

表 2 不同凋落物损失率随时间的变化

Table 2 Temporal variation of decomposition rate of different litters (%)

处理 Treatment	2009-08-25	2009-10-25	2010-08-11
A	28.4±0.5ef	33.3±0.4ef	42.1±0.1f
B	19.4±1.0k	20.0±0.8m	31.7±0.6n
C	18.3±0.1k	25.3±0.7l	26.4±0.2o
D	34.5±1.3b	38.1±0.9a	44.9±0.1c
E	28.2±0.1fg	35.0±0.8cd	38.9±0.7hi
F	36.5±1.2a	36.8±0.9ab	38.2±0.1j
平均 Average	27.6±3.06	31.4±2.9	37.1±2.8
A+C	25.7±0.4h	29.5±1.2i	33.8±0.5m
A+D	28.8±0.8ef	33.8±0.6def	41.7±0.5f
B+C	21.0±1.6j	24.1±0.7l	38.5±0.3ij
B+D	28.7±0.7ef	32.5±1.2fgh	38.7±0.3ij
A+E	27.9±0.9fg	31.3±0.8h	43.1±0.3e
A+F	31.1±0.2d	33.4±0.5ef	46.3±0.4a
B+E	24.0±0.1i	31.7±0.5gh	35.4±0.4l
B+F	21.0±0.8j	26.8±0.1k	37.5±0.1k
C+E	24.2±0.8i	28.7±0.1i	38.6±0.4ij
C+F	24.8±0.1hi	28.3±1.2ij	39.5±0.3gh
D+E	32.8±0.9c	34.5±0.4de	44.0±0.5d
D+F	29.8±0.5e	33.5±0.3ef	39.4±0.3gh
平均 Average	26.6±1.2	30.7±0.9	39.7±1.0
A+C+E	28.3±0.5fg	31.2±1.0h	39.7±0.4g
A+C+F	28.9±0.9ef	33.1±0.6efg	42.0±0.4f
A+D+E	28.1±0.4fg	36.0±0.7bc	45.8±0.2ab
A+D+F	27.0±0.4g	33.1±0.8efg	38.9±0.2hi
B+C+E	24.1±0.6i	29.5±1.8i	45.5±0.4b
B+C+F	23.6±0.1i	27.3±0.2jk	42.7±0.3e
B+D+E	24.1±1.4i	34.0±0.1def	38.2±0.3j
B+D+F	24.8±0.4hi	26.7±0.1k	45.4±0.2bc
平均 Average	26.0±0.8	31.4±1.2	42.3±1.1

同列数据不同字母表示显著差异( $P<0.05$ ) Values with different letters in the same column meant significant difference at 0.05 level. 下同 The same below.

## 2 结果与分析

### 2.1 不同植物凋落物质量的月变化

由表 2 可以看出,从试验开始至 2009 年 10 月 25 日的 4 个月中,凋落物的质量明显减少,平均质量损失率达 31.2%。而从 2009 年 10 月 25 日至 2010 年 8 月 11 日,凋落物损失率仅减少约 10%。

不同时期各单种凋落物质量损失率的变化不同。其中,不同单种凋落物损失率最大差异出现在 2010 年 8 月 11 日,高出最低质量损失率约 18.5%。在整个试验过程中,小叶杨和沙棘凋落物的质量损失率显著低于其他 4 种凋落物。到试验结束时,沙棘凋落物的质量损失率最低,而沙柳凋落物的质量损失率最高( $P<0.05, n=3$ )。在整个试验期间内,草本植物凋落物的平均质量损失率显著高于乔木和灌木( $n=6$ )。

到试验结束时,两种凋落物混合后的质量平均损失率高于单种凋落物,但是未达到显著水平。从试验开始至2009年10月25日,小叶杨与沙棘、小叶杨与长芒草混合凋落物的质量损失率均低于其他两种凋落物的混合物;而刺槐与长芒草、沙柳与苜蓿、沙柳与长芒草混合凋落物的质量损失率最高。到试验结束时,小叶杨与沙棘、刺槐与苜蓿、刺槐与长芒草、沙棘与长芒草混合凋落物的质量损失率均高于任一单种凋落物。

试验结束时3种凋落物混合后的质量平均损失率显著高于两种混合凋落物,且3种凋落物混合后的质量损失率差异较小。与单种凋落物的质量损失率相比,刺槐、沙柳与苜蓿,小叶杨、沙棘与苜蓿,小叶杨、沙棘与长芒草,小叶杨、沙柳与苜蓿混合凋落物的质量损失率均高于任一单种凋落物。

## 2.2 不同凋落物全碳、全氮的释放特性

**2.2.1 凋落物全碳的变化** 由表3可以看出,不同凋落物分解过程中全碳的阶段释放率均是2009年

6月25日至8月25日最高,8月25日至10月25日其次,随后缓慢释放。

单种凋落物分解过程中全碳的释放率差异显著。在整个分解过程中,沙棘凋落物的全碳释放率在试验开始的两个月内和试验结束时均显著低于其他单种凋落物,而刺槐凋落物的全碳释放率一直显著高于其他单种凋落物( $n=3$ )。在2009年10月25日以后的分解过程中,乔木类凋落物平均全碳释放率显著高于草本植物,灌木类凋落物最低( $n=6$ )。

试验前期两种凋落物混合后的全碳平均释放率高于单种凋落物,后期低于单种凋落物( $P<0.05$ )。在分解试验过程中,沙棘与苜蓿、沙棘与长芒草混合凋落物全碳释放率明显低于其他两种凋落物混合处理,而刺槐与长芒草混合凋落物全碳释放率一直较高。到分解试验结束时,小叶杨与长芒草和沙棘与长芒草混合凋落物全碳释放率均显著高于任一单种凋落物。

在整个试验过程中,3种凋落物混合后各处理的全碳释放率差异减小,且小叶杨、沙棘与长芒草的混合凋落物全碳释放率一直较低,而小叶杨、沙柳与苜蓿混合凋落物的全碳释放率一直最高。到试验结束时,不同混合凋落物的全碳释放率的趋势表现为:单种>两种混合>3种混合。

**2.2.2 凋落物全氮释放的变化** 由表4可以看出,从试验开始至2009年10月25日的4个月内,单种、两种混合及3种混合后凋落物的全氮释放率均最高;而后凋落物的全氮缓慢释放。

单种凋落物分解过程中的全氮释放率差异显著。在整个试验过程中,沙棘和沙柳凋落物全氮释放率均较低,以沙柳最低;草本类植物凋落物平均全氮释放率高于乔木,灌木类凋落物最低。

两种凋落物混合后各处理全氮释放率差异显著。在整个试验过程中,刺槐与沙棘、沙棘与苜蓿和沙棘与长芒草混合凋落物全氮释放率均较低;沙柳与苜蓿混合凋落物的全氮释放率较高,且在2009年10月25日显著高于其他两种凋落物混合处理。至试验结束时,与单种相比,刺槐与沙棘、刺槐与长芒草、小叶杨与长芒草、沙棘与苜蓿和沙棘与长芒草凋落物混合后抑制了全氮的释放;而沙柳与苜蓿凋落物混合后促进了全氮的释放。

在整个试验过程中,刺槐、沙柳与苜蓿混合凋落物的全氮释放率显著高于其他3种混合凋落物;而小叶杨、沙棘与长芒草混合凋落物的全氮释放率最低,且达到显著水平。试验结束时,与单种相比,刺

表3 不同凋落物全碳释放率随时间的变化

Table 3 Temporal variation of carbon release rate of different litters (%)

处理 Treatment	2009-08-25	2009-10-25	2010-08-11
A	33.9±0.4b	44.2±0.2b	55.6±1.0a
B	19.0±0.4m	28.0±0.3q	44.4±2.1de
C	16.8±0.2o	23.6±0.2u	31.6±0.8n
D	31.5±0.9c	42.0±0.2c	51.7±0.2b
E	23.8±0.1j	36.8±0.1h	44.7±1.0de
F	26.0±0.3h	16.5±0.1v	33.8±0.5lm
平均 Average	25.2±2.7	31.8±4.5	43.6±3.9
A+C	26.5±0.3h	35.4±0.2j	36.0±1.4jk
A+D	28.1±0.3f	39.8±0.1f	42.1±1.2fg
B+C	18.0±0.4n	25.2±0.2r	37.0±0.2ij
B+D	28.3±0.2f	35.9±0.2i	42.3±0.6f
A+E	27.6±0.2g	41.6±0.2d	46.0±0.3d
A+F	31.5±0.4c	40.3±0.1e	48.6±0.2c
B+E	29.5±0.4e	36.6±0.2h	39.2±1.4h
B+F	18.5±0.2mn	30.2±0.1o	42.6±1.3f
C+E	14.8±0.1p	24.8±0.1s	31.9±0.9n
C+F	14.6±0.4p	24.2±0.2t	33.4±0.9lmn
D+E	24.2±0.3ij	31.9±0.1l	38.7±0.4hi
D+F	18.2±0.2n	29.9±0.2p	33.9±0.6lm
平均 Average	23.3±1.8	33.0±1.8	39.3±1.5
A+C+E	21.7±0.11	31.4±0.1m	35.2±1.0kl
A+C+F	30.1±0.5d	40.2±0.1e	40.4±1.7gh
A+D+E	24.5±0.4i	37.6±0.2g	42.2±0.4fg
A+D+F	21.3±0.2l	31.0±0.1n	32.5±0.8mn
B+C+E	23.2±0.1k	34.4±0.1k	43.3±0.9ef
B+C+F	12.8±0.2q	24.9±0.1s	31.9±0.2n
B+D+E	38.5±0.3a	47.2±0.1a	49.2±2.0c
B+D+F	13.1±0.3q	23.8±0.1u	37.0±0.8ij
平均 Average	23.2±3.0	33.8±2.8	39.0±2.1

表4 不同凋落物全氮释放率随时间的变化

Table 4 Temporal variation of nitrogen release rate of different litters (%)

处理 Treatment	2009-08-25	2009-10-25	2010-08-11
A	19.6±0.5g	23.3±0.2l	32.7±0.3h
B	21.8±0.7f	35.1±0.1c	40.6±0.2b
C	19.3±0.3g	19.9±0.2n	23.5±0.2o
D	15.9±0.9i	17.3±0.2o	20.6±0.2q
E	30.8±0.9b	32.9±0.2e	34.8±0.2f
F	26.8±0.9d	37.3±0.6a	43.5±0.1a
平均 Average	22.4±2.2	27.6±3.5	32.6±3.7
A+C	15.6±0.1i	16.1±0.1p	17.5±0.8s
A+D	16.2±0.2i	20.1±0.2n	24.0±0.1o
B+C	6.9±0.6l	15.8±0.2q	26.8±0.5l
B+D	17.8±0.3h	22.8±0.1m	33.8±0.4g
A+E	21.4±0.3f	27.0±0.2h	28.4±0.3j
A+F	19.4±0.4g	26.4±0.1i	27.5±0.1k
B+E	22.9±0.6e	23.8±0.1k	33.3±0.1g
B+F	8.5±0.3k	32.0±0.1f	39.1±0.3c
C+E	5.4±0.1m	15.6±0.1q	20.1±0.7q
C+F	9.1±0.1k	12.9±0.1s	17.1±0.2s
D+E	23.7±0.8e	33.5±0.1d	35.3±0.3e
D+F	19.2±0.6g	24.6±0.2j	27.5±0.2k
平均 Average	15.5±2.1	22.5±2.4	27.5±2.7
A+C+E	17.2±0.8h	19.9±0.1n	24.9±0.3n
A+C+F	28.8±0.1c	29.9±0.2g	32.4±0.1h
A+D+E	33.2±0.3a	35.4±0.1b	37.4±0.1d
A+D+F	19.2±0.1g	20.0±0.2n	22.3±0.1p
B+C+E	23.0±0.4e	26.5±0.2i	27.1±0.3k
B+C+F	13.9±0.3j	14.6±0.1r	18.4±0.4r
B+D+E	19.7±0.6g	23.3±0.3l	25.7±0.2m
B+D+F	17.4±0.9h	27.1±0.1h	30.5±0.5i
平均 Average	21.6±2.3	24.6±2.3	27.3±2.1

槐、沙柳与苜蓿凋落物相混合促进了全氮的释放,而小叶杨、沙棘与长芒草凋落物相混合显著抑制了全氮的释放。

### 2.3 不同凋落物残留物中可溶性有机碳、可溶性总氮含量的变化

**2.3.1 可溶性有机碳含量** 由表5可以看出,随着试验的进行,不同处理凋落物的可溶性有机碳含量呈下降趋势;且从试验开始至2009年8月25日下降幅度最大,而后缓慢下降。

不同单种凋落物可溶性有机碳在分解过程中差异显著。从2009年8月25日至试验结束,刺槐凋落物可溶性有机碳含量一直显著低于其他5种凋落物;而沙柳和长芒草凋落物可溶性有机碳含量较高。草本类植物凋落物可溶性有机碳含量高于灌木类,乔木类可溶性有机碳含量最低。

两种凋落物混合后,在分解过程中可溶性有机碳的含量差异显著。从2009年8月25日至试验结

表5 凋落物分解过程中可溶性有机碳含量的变化

Table 5 Dynamics of soluble organic carbon (g·kg<sup>-1</sup>) during litter decomposition

处理 Treatment	2009-06-25	2009-08-25	2009-10-25	2010-08-11
A	49.70	13.62±0.56o	5.90±0.57q	1.95±0.56n
B	72.52	22.05±0.32f	14.41±0.33k	10.38±0.32g
C	24.39	19.14±0.32i	12.12±0.33mn	7.46±0.32j
D	43.71	24.00±0.32d	16.38±0.33gh	12.32±0.32cd
E	14.43	19.95±0.49h	12.28±0.49mn	8.43±0.32hi
F	12.20	27.57±0.32c	19.98±0.33c	12.00±0.32def
平均 Average	36.16±9.57	21.05±1.93	13.51±1.93	8.76±1.57
A+C	37.05	31.78±0.32b	31.12±0.33b	27.57±0.32b
A+D	46.70	20.92±0.49g	13.27±0.49l	9.08±0.32h
B+C	48.46	24.00±0.32d	16.05±0.66hi	12.32±0.32cd
B+D	58.11	48.16±0.49a	40.62±0.33a	36.49±0.49a
A+E	32.07	18.39±0.05j	15.46±0.69ij	8.50±0.31hi
A+F	30.95	24.00±0.32d	16.21±0.49hi	12.16±0.49de
B+E	43.48	24.65±0.32d	17.03±0.33fg	12.97±0.32c
B+F	42.36	21.08±0.32g	16.70±0.03gh	11.35±0.65f
C+E	19.41	22.96±0.33e	17.30±0.57ef	11.49±0.33ef
C+F	18.30	13.71±0.33o	11.04±0.33o	4.60±0.33l
D+E	29.07	17.68±0.33k	15.00±0.33jk	7.88±0.57ij
D+F	27.95	22.30±0.57f	17.96±0.33e	12.15±0.87de
平均 Average	36.16±3.48	24.14±2.53	18.98±2.41	13.88±2.60
A+C+E	29.51	12.06±0.66p	9.06±0.66p	2.30±0.33n
A+C+F	28.76	15.69±0.33m	12.69±0.33lm	6.24±0.33k
A+D+E	35.95	11.73±0.33p	8.73±0.33p	2.30±0.33n
A+D+F	35.20	15.69±0.33m	13.35±0.57l	6.24±0.33k
B+C+E	37.12	15.03±0.33n	11.70±0.66no	5.25±0.66l
B+C+F	36.37	21.97±0.33f	18.79±0.49d	12.48±0.33cd
B+D+E	43.55	9.42±0.01q	6.43±0.01q	3.28±0.33m
B+D+F	42.81	17.02±0.33l	15.00±0.66jk	8.21±0.33i
平均 Average	36.16±1.89	14.83±1.36	11.97±1.39	5.79±1.21

束,小叶杨与沙柳混合凋落物可溶性有机碳含量显著高于其他两种混合凋落物处理,其次是刺槐与沙棘混合凋落物;沙棘与长芒草混合凋落物可溶性有机碳含量最低,且达显著水平。至试验结束时,刺槐与沙棘、小叶杨与沙棘、小叶杨与沙柳、小叶杨与苜蓿和沙棘与苜蓿凋落物混合后均提高了可溶性有机碳的含量;而沙棘与长芒草和沙柳与苜蓿凋落物混合后则降低了可溶性有机碳的含量。

在分解试验过程中,不同处理3种混合凋落物的可溶性有机碳含量差异较小,但部分处理仍存在显著性差异。从2009年8月25日至试验结束时,小叶杨、沙棘与长芒草混合凋落物的可溶性有机碳含量显著高于其他3种混合凋落物,其次是小叶杨、沙柳与长芒草混合凋落物;而小叶杨、沙柳与苜蓿混合凋落物的可溶性有机碳含量较低。试验结束,小叶杨、沙棘与长芒草凋落物混合后提高了可溶性有机碳的含量;而小叶杨、沙棘与苜蓿,小叶杨、沙柳与苜

蓿和小叶杨、沙柳与长芒草凋落物混合后降低了可溶性有机碳的含量。

**2.3.2 可溶性总氮含量** 由表6可知,凋落物可溶性总氮含量在2009年8月25日达到最高,而后缓慢下降。

不同单种凋落物可溶性总氮含量在分解过程中差异显著。从2009年8月25日至试验结束,沙棘和苜蓿凋落物可溶性总氮含量均高于其他单种凋落物;而小叶杨凋落物可溶性总氮含量显著低于其他5种凋落物。从平均值来看,从2009年10月25日至试验结束,草本类植物凋落物可溶性总氮含量高于灌木类,乔木类凋落物可溶性总氮含量最低。

两种凋落物混合后可溶性总氮含量差异显著。刺槐与沙棘、刺槐与苜蓿、刺槐与长芒草、沙棘与苜蓿、沙棘与长芒草和沙柳与苜蓿在2009年8月25日上升后逐渐下降,而其他两种凋落物混合处理的

可溶性总氮含量在整个试验过程中均呈下降趋势。从2009年8月25日至2009年10月25日,小叶杨与沙柳混合凋落物的可溶性总氮含量显著低于其他两种凋落物混合处理;而沙棘与苜蓿混合凋落物的可溶性总氮含量最高,但未达显著水平。试验结束时,与单种凋落物相比,除小叶杨与苜蓿、沙棘与苜蓿和沙柳与苜蓿凋落物混合处理外,其他两种凋落物混合处理均提高了可溶性总氮的含量。

在分解过程中,3种凋落物混合后各处理间的可溶性总氮含量差异显著。从2009年8月25日至2009年10月25日,小叶杨、沙柳与长芒草混合凋落物的可溶性有机碳含量最低。除刺槐、沙柳与苜蓿,小叶杨、沙柳与苜蓿和小叶杨、沙柳与长芒草凋落物混合后可溶性总氮含量在试验期间呈下降趋势外,其余3种凋落物混合的5个处理可溶性总氮含量在2009年8月25日升高后逐渐降低。试验结束时,与单种凋落物相比,除小叶杨、沙棘与苜蓿,小叶杨、沙柳与苜蓿和小叶杨、沙柳与长芒草混合凋落物外,其余3种凋落物混合处理均提高了可溶性总氮的含量。

### 3 讨 论

#### 3.1 不同处理凋落物分解过程中质量损失率的变化

本研究表明,从分解试验开始至2009年8月25日的2个月内,不同处理凋落物的质量损失率平均为26.4%;从2009年8月25日至2010年8月11日,不同处理凋落物的质量损失率平均为12.9%。这是由于该地区6—8月是全年中温度最高的,且降水也基本集中于这一时间段,有利于土壤微生物的生长和活动,从而促进了凋落物的分解<sup>[19]</sup>。这与前人的研究结果相一致<sup>[20-21]</sup>。

从试验结束时不同凋落物的质量损失率来看,3种凋落物混合的质量损失率高于两种凋落物混合,单种凋落物的质量损失率最低( $P<0.05$ )。说明将凋落物混合后对凋落物分解具有促进作用。这可能是由于凋落物混合后增加了资源的异质性,改变了分解者的丰富度<sup>[22-23]</sup>。

#### 3.2 不同处理凋落物分解过程中碳、氮的变化

有研究表明,凋落物分解过程中养分的动态释放模式一般有下面几种方式:淋溶→富集→释放模式,富集→释放模式及直接释放模式等<sup>[24-25]</sup>。本试验结果表明,从试验开始至2009年10月25日的前4个月内,不同处理凋落物全碳、全氮的释放率分别

表6 凋落物分解过程中可溶性总氮含量的变化

Table 6 Dynamics of the soluble total nitrogen ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) during litter decomposition

处理 Treatment	2009-06-25	2009-08-25	2009-10-25	2010-08-11
A	0.822	0.548±0.004s	0.371±0.001t	0.257±0.004o
B	1.068	0.456±0.004t	0.171±0.004u	0.075±0.004q
C	0.386	1.243±0.004a	0.803±0.003e	0.364±0.005k
D	0.908	0.695±0.004n	0.562±0.005o	0.205±0.004p
E	0.681	1.122±0.006c	0.897±0.004c	0.508±0.004g
F	0.360	0.637±0.004o	0.572±0.007m	0.258±0.003o
平均 Average	0.704±0.117	0.783±0.131	0.563±0.109	0.278±0.060
A+C	0.604	0.918±0.001g	0.874±0.006d	0.598±0.003a
A+D	0.865	0.844±0.003i	0.718±0.002g	0.553±0.008d
B+C	0.727	0.691±0.008n	0.572±0.002m	0.521±0.003f
B+D	0.988	0.461±0.006t	0.400±0.005s	0.309±0.004n
A+E	0.751	1.040±0.004e	0.781±0.003f	0.520±0.004f
A+F	0.591	0.619±0.002q	0.509±0.002p	0.330±0.001m
B+E	0.874	0.579±0.003r	0.484±0.005r	0.256±0.006o
B+F	0.714	0.613±0.006q	0.516±0.005o	0.429±0.001i
C+E	0.533	1.220±0.007b	1.094±0.005a	0.406±0.003j
C+F	0.373	1.052±0.004d	0.978±0.005b	0.520±0.001f
D+E	0.794	0.628±0.004p	0.570±0.002m	0.403±0.002j
D+F	0.634	0.751±0.001k	0.692±0.005i	0.548±0.006d
平均 Average	0.704±0.049	0.785±0.067	0.682±0.062	0.450±0.032
A+C+E	0.630	0.998±0.004f	0.704±0.005h	0.540±0.004e
A+C+F	0.523	0.767±0.006j	0.650±0.0011	0.566±0.003c
A+D+E	0.803	0.739±0.006l	0.672±0.003j	0.589±0.005b
A+D+F	0.697	0.878±0.002h	0.664±0.001k	0.598±0.004a
B+C+E	0.712	0.744±0.006lk	0.675±0.002j	0.496±0.003h
B+C+F	0.605	0.771±0.003j	0.648±0.004l	0.504±0.003g
B+D+E	0.886	0.704±0.002m	0.490±0.003qr	0.345±0.005l
B+D+F	0.779	0.583±0.003r	0.491±0.004q	0.330±0.001m
平均 Average	0.704±0.042	0.773±0.043	0.624±0.030	0.496±0.037

为 $16.8\sim44.2\%$ 和 $12.8\sim37.3\%$ ;在随后的近12个月内,不同处理凋落物全碳、全氮的释放率平均为7.7%和4.2%。这表明不同处理凋落物的全碳、全氮含量基本均呈现出直接释放的模式,与前人的研究结果不一致<sup>[5]</sup>。这可能与采样时间和气候条件等有关。

本试验发现,不同处理凋落物的可溶性有机碳含量呈降低趋势,且在试验开始的前4个月内平均降低 $21.34\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,之后的10个月内平均降低了 $5.34\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。这是由于该地区6—10月水热条件充足,有利于可溶性有机碳的淋溶损失及微生物的利用。这与凋落物分解过程中质量损失的规律相一致。说明凋落物分解过程中质量的损失与可溶性有机碳密切相关。相关分析表明,凋落物的质量损失率与可溶性有机物,特别是可溶性有机碳有一定的相关性( $P=0.05, n=26$ )。这与Tietema和Wessel<sup>[26]</sup>的观点相一致:在凋落物分解前期,以可溶性有机成分和无机盐类分解为主。

从2009年8月25日至试验结束期间,不同凋落物处理的可溶性总氮含量呈下降趋势;且在试验结束时,可溶性总氮含量表现为:3种混合>两种混合>单种( $P<0.05$ ),表明多种凋落物混合能促进可溶性总氮的释放。这可能是由于质地不同的凋落物混合在一起,增加了组分的多样性,为分解者提供了更为有利的微环境<sup>[27]</sup>。Talyor等<sup>[28]</sup>研究发现,由于混合凋落物的水分吸附作用,从而改善混合凋落物的湿度环境。

本试验表明,将不同种类凋落物混合后,在促进其分解的同时,也促进了可溶性有机碳、可溶性总氮含量的增加。说明混合凋落物促进了其营养物质含量的增加,提高土壤肥力水平,从而有利于养分的再利用,加快植被恢复进程。因此,在黄土高原区进行植被恢复重建时,应该考虑不同种类植物的混交造林,人为合理地增加生物多样性,促进植被恢复。这对于黄土高原区生态恢复和重建具有重要的意义。

## 参考文献

- [1] Song X-Z (宋新章), Jiang H (江洪), Zhang H-L (张慧玲), et al. A review on the effects of global environment change on litter decomposition. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(9): 4414–4423 (in Chinese)
- [2] Aerts R. The freezer defrosting global warming and litter decomposition rates in cold biomes. *Journal of Ecology*, 2006, **94**: 713–724
- [3] Yang W-Q (杨万勤), Wang K-Y (王开运). Advances in forest soil enzymology. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2004, **40**(2): 152–159 (in Chinese)
- [4] Zheng YS, Ding YX. Effects of mixed forests of Chinese fir and Tsoongs tree on soil properties. *Pedosphere*, 1998, **8**: 161–168
- [5] Berg B, Mcclaugher C. Plant litter: Decomposition, Humus formation, Carbon sequestration. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008: 12–13
- [6] Liski J, Nissinen A, Erhard M, et al. Climatic effects on litter decomposition from arctic tundra to tropical rainforest. *Global Change Biology*, 2003, **9**: 575–584
- [7] Yang W-Q (杨万勤). Forest Soil Ecology. Chengdu: Sichuan Science & Technology Press, 2006 (in Chinese)
- [8] Yang WQ, Wang KY, Kellomäki S, et al. Litter dynamics of three subalpine forests in the western Sichuan. *Pedosphere*, 2005, **15**: 653–659
- [9] Yang WQ, Wang KY, Kellomäki S, et al. Annual and monthly variations in litter macronutrients of three subalpine forests in western China. *Pedosphere*, 2006, **16**: 788–798
- [10] Yang Y-S (杨玉盛), Guo J-F (郭剑芬), Chen Y-X (陈银秀), et al. Comparative study on litter decomposition and nutrient dynamics between plantations of *Fokienia hodginsii* and *Cunninghamia lanceolata*. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2004, **40**(3): 19–25 (in Chinese)
- [11] Guo Z-L (郭忠玲), Zhen J-P (郑金萍), Ma Y-D (马元丹), et al. Researches on litterfall decomposition rates and model simulating of main species in various forest vegetations of Changbai Mountains, China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2006, **26**(4): 1037–1046 (in Chinese)
- [12] Zhang B, Yang YS, Zepp H. Effect of vegetation restoration on soil and water erosion and nutrient losses of a severely eroded clayey Plinthudult in southeastern China. *Catena*, 2004, **57**: 77–90
- [13] Xie J-S (谢锦升), Yang Y-S (杨玉盛), Yang Z-J (杨智杰), et al. Seasonal variation of light fraction organic matter in degraded red soil after vegetation restoration. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(3): 557–563 (in Chinese)
- [14] Hu C-J (胡婵娟), Fu B-J (傅伯杰), Jin T-T (靳甜甜), et al. Effects of vegetation restoration on soil microbial biomass carbon and nitrogen in hilly areas of Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, **20**(1): 45–50 (in Chinese)
- [15] Harris JA. Measurements of the soil microbial community for estimating the success of restoration. *European Journal of Soil Science*, 2003, **54**: 801–808
- [16] Paulus R, Römbke J, Ruf A, et al. A comparison of the litter bag mini container and bait-lamina-methods in an eco-toxicological field experiment with diflubenzuron and btk. *Pedobiologia*, 1999, **43**: 120–133
- [17] Bao S-D (鲍士旦). Agricultural Soil Analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2010 (in Chinese)
- [18] Zhou J-B (周建斌), Li S-X (李生秀). Choosing of a

- proper oxidizer for alkaline persulfate oxidation to determining total nitrogen in solution. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 1998, **4** (3): 299–304 (in Chinese)
- [19] Perry DA. *Forest Ecosystems*. Baltimore: The Johns Hopkins University Press, 1994
- [20] Singh KP, Singh PK, Tripathi SK. Litterfall, litter decomposition and nutrient release patterns in four native tree species raised on coal mine spoil at Singrauli, India. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, **29**: 371–378
- [21] Guo J-F (郭剑芬), Yang Y-S (杨玉盛), Chen G-S (陈光水), et al. A review on litter decomposition in forest ecosystem. *Scientia, Silvae Sinicae* (林业科学), 2006, **42**(4): 93–100 (in Chinese)
- [22] Chen F-L (陈法霖), Zheng H (郑 华), Yang B-S (阳柏苏), et al. The decomposition of coniferous and broadleaf mixed litters significantly changes the carbon metabolism diversity of soil microbial communities in subtropical area, southern China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2011, **31**(11): 3027–3035 (in Chinese)
- [23] Yang Y-H (杨玉海), Zheng L (郑 路), Duan Y-Z (段永照). Leaf litter decomposition and nutrient release of different stand types in a shelter belt in Xinjiang arid area. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(6): 1389–1394 (in Chinese)
- [24] Berg B. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils. *Forest Ecology and Management*, 2000, **133**: 13–22
- [25] Mo J-M (莫江明), Bu L (布 朗), Kong G-H (孔国辉), et al. Litter decomposition and its nutrient dynamics of a pine forest in hudingshan biosphere reserve. *Acta Phytoecologica Sinica* (植物生态学报), 1996, **20**(6): 534–542 (in Chinese)
- [26] Tietema A, Wessel WW. Microbial activity and leaching during initial oak leaf litter decomposition. *Biology and Fertility of Soils*, 1994, **18**: 49–54
- [27] Rustad LE, Cronan CS. Element loss and retention during litter decay in a red spruce stand in Maine. *Canadian Journal of Forest Research*, 1988, **18**: 947–953
- [28] Talyor BR, Parsons WFJ, Parkisons D. Decomposition of *Populus tremuloides* leaf litter accelerated by addition of *Alnus crispa* litter. *Canadian Journal of Forest Research*, 1989, **19**: 674–679

---

**作者简介** 李云,女,1980年生,博士,讲师。主要从事土壤植物营养学研究。E-mail: wya313@yahoo.com.cn

**责任编辑** 李凤琴

---