

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2013.05.006

## 施肥和增雨雪对矮嵩草草甸 4 种典型植物凋落物分解的影响

魏 晴<sup>1,2</sup>, 周华坤<sup>2\*</sup>, 姚步青<sup>2</sup>, 刘泽华<sup>1</sup>, 田林卫<sup>1</sup>, 王文颖<sup>1</sup>, 赵新全<sup>2</sup>

(1. 青海师范大学, 青海 西宁 810008; 2. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810001)

**摘要:** 设 9 个试验处理(夏季增雨、冬季增雪、施 N 肥、施 N 肥与夏季增雨交互作用、施 N 肥与冬季增雪交互作用、施 P 肥、施 P 肥与夏季增雨交互作用、施 P 肥与冬季增雪交互作用和对照)研究增施氮磷肥及水分对海北站矮嵩草(*Kobresia humilis*)草甸中垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、矮嵩草、甘肃棘豆(*Oxytropis kansuensis*)与麻花苳(*Gentiana straminea*) 4 种典型植物地上部分凋落物分解速率的影响。结果表明:凋落物分解速率为甘肃棘豆>麻花苳>矮嵩草>垂穗披碱草,甘肃棘豆地上部分分解最快,垂穗披碱草的分解最慢,不同植物功能类群间差异显著。4 种植物地上部分分解最快的时间都在降水充足的夏季。分解第 185 d 和 262 d 时,垂穗披碱草的质量残留率均极显著高于其他 3 种( $P<0.01$ ),麻花苳质量残留率极显著低于矮嵩草( $P<0.01$ );分解 362 d 时,甘肃棘豆的分解速率显著高于垂穗披碱草和矮嵩草,但棘豆与麻花苳间差异并不显著,这与不同牧草的适口性、氮磷含量等属性有关。在 N 处理下,棘豆地上部分分解最快,分解其质量的 95% 所需时间为 649.5 d,比对照缩短 286.7 d。在没有增雨雪的基础上增施氮磷肥则对矮嵩草地上部分的分解起抑制作用,但影响不显著,水肥效应加以耦合会加速凋落物的分解。

**关键词:** 高寒草甸植物; 增雨; 增雪; 施肥; 凋落物分解

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 1007-0435(2013)05-0875-06

## Effects of Fertilizer and Water Additions on the Litter Decomposition of Four Typical Plants in *Kobresia humilis* Meadow

WEI Qing<sup>1,2</sup>, ZHOU Hua-kun<sup>2\*</sup>, YAO Bu-qing<sup>2</sup>, LIU Ze-hua<sup>1</sup>,  
TIAN Lin-wei<sup>1</sup>, WANG Wen-yin<sup>1</sup>, ZHAO Xin-quan<sup>2</sup>

(1. Qinghai Normal University, Xining, Qinghai Province 810008, China;

2. Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Science, Xining, Qinghai Province 81000, China)

**Abstract:** The effects of fertilizer and water addition on the aboveground litter decomposition of four typical plants in the alpine meadow of Haibei station in Qinghai province. Nine treatments were designed. Results showed that the litter decomposition rates of tested plants were ordered as *O. kansuensis*>*G. straminea*>*K. humilis*>*E. nutans*. There was significant difference between plant functional groups. The litters in summer decomposed the fastest. The quality residual rates of *E. nutans* after 185 days and 262 days decomposition were significantly higher than that of other tested species ( $P<0.01$ ). The quality residual rate of *G. straminea* was significantly lower than that of *K. humilis* ( $P<0.01$ ), whereas the decomposition rate of *O. kansuensis* was significantly higher than that of *E. nutans* and *K. humilis* after 362 days decomposition. The difference between *O. kansuensis* and *G. straminea* was not significant that was related to the palatability, the nitrogen and phosphorus contents of tested grasses. The litter of *O. kansuensis* decomposed the fastest under the N treatment. It took 649.5 days to decompose the 95% quality of *O. kansuensis* litter, and that was 286.7 days shorter than CK treatment. The aboveground litter decomposition of *K. humilis* was inhibited after applied fertilizer without water. However, there was no significant difference among treatments. The interaction between water and fertilizer would accelerate the litter

收稿日期: 2013-03-09; 修回日期: 2013-08-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41030105)(31172247); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)课题(2009CB421102); 国家自然科学基金青年基金项目(31201836); 中科院战略性先导科技专项子课题(XDA05070202); 国家科技支撑课题专题(2011BAC09B06-02); 青海省重点实验室发展专项资金计划(2012-Z-Y03)资助

作者简介: 魏晴(1987-), 女, 河南永城人, 硕士研究生, 主要从事草地生态学研究, E-mail: 876033894@qq.com; \* 通信作者 Author for correspondence, E-mail: qzhkhk1974@yahoo.com.cn

decomposition.

**Key words:** Alpine meadow plants; Increased rain; Increased snow; Fertilizer application; Litter decomposition

草地凋落物分解是草地生态系统中有机质残体分解转化的基本过程,是系统养分循环的关键环节,对调节土壤养分的可利用性和维持草地生产力具有重要作用。草地凋落物不但可以提高地表的覆被率,降低雨滴对地表的直接击溅侵蚀和降雨产流后径流对地表的冲蚀;而且可以促使土壤水分下渗,改善土壤生态环境<sup>[1-4,19]</sup>。而高寒草甸又是在高寒条件下发育的一种特殊的草地类型,近年来对于青藏高原高寒草甸凋落物分解的报道较多<sup>[5-7]</sup>,涉及紫外线辐射、氮沉降、放牧等对凋落物分解的影响,而对增雨、增雪及增肥影响凋落物分解的报道很少,所以本文就针对在增雨、增雪、增施 N 肥与 P 肥条件下对凋落物分解的影响进行初步研究,以期揭示高寒草地凋落物、凋落物分解释放养分、土壤有机质形成、促进植物生长等物质循环对不同干扰的响应规律提供科学依据和参数。

垂穗披碱草(*Elymus nutans* Griseb.)、矮嵩草(*Kobresia humilis*)、甘肃棘豆(*Oxytropis kansuensis* Falcatae)与麻花苳(*Gentiana straminea* Maxim.)是中科院海北定位站地区 4 种典型的天然高寒草甸植物,分属禾本科、莎草科、豆科和龙胆科,它们的分解速率研究对揭示本地区土壤养分和维持草地生产力具有非常重要的作用,因此本文就这 4 种植物的地上部分凋落物分解对对照(CK)、夏季增雨(W1)、冬季增雪(W2)、施 N 肥(N)、施 N 肥与夏季增雨交互作用(NW1)、施 N 肥与冬季增雪交互作用(NW2)、施 P 肥(P)、施 P 肥与夏季增雨交互作用(PW1)、施 P 肥与冬季增雪交互作用(PW2)这 9 个处理的响应进行初步研究。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 海北站概况

研究地点位于中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站,地处青藏高原东北隅,祁连山北支冷龙岭东段南麓的大通河河谷,海拔 3200 m。平均气温很低,多年均温为  $-1.7^{\circ}\text{C}$ ;年降水量较高,约 580 mm,多集中在 5—9 月份(占全年降水量的 80%)。该区地带性植被多为高寒矮嵩草草甸、金露梅(*Potentilla fruticosa*)草甸和藏嵩草(*Kobresia tibeti-*

*ca*)沼泽化草甸为主要建群种的植被类型<sup>[8]</sup>。本研究选择矮嵩草高寒草甸中的典型植物,即多年生的垂穗披碱草、矮嵩草、甘肃棘豆、麻花苳等。

### 1.2 试验设计

2011 年 10 月在海北站水肥控制试验样地(属于典型的高寒矮嵩草典型草甸)建立 36 个  $3\text{ m}\times 6\text{ m}$  的小样方,每个小样方中间有大于 3 m 隔离带,以防止分解过程中相互干扰和边际效应;并分为 9 个处理(试验处理与重复数如表 1 所示)。该区域由于常年低温,所以有机质含量丰富。而氮磷肥与水分又是陆生植物生长的限制因子,所以本试验采用水肥结合的方法。人工增雨在每年的 7 月、8 月和 9 月各 1 次,增雨量共计  $150\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ ;增雪在每年的 1 月、2 月和 3 月,人工增雪共计  $50\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 。增施氮肥是以  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  形式,纯 N 的施加量为  $10\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ;增施磷肥是以 TSP 形式(重过磷酸钙),纯 P 的施加量也为  $10\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,每年 5 月下旬增施氮磷肥。从 2009 年 5 月水肥控制试验样地建立后,试验每年进行增雨雪和施肥。在 2011 年 8 月下旬地面凋落物高峰期时在海北站综合试验样地收集垂穗披碱草、矮嵩草、棘豆、麻花苳 4 种凋落物的地上部分,称重(大约 3~5 g),分别装入 0.21 mm 孔径(贴地面)和 1 mm 孔径(离地面)的尼龙网分解袋中,于 2011 年 10 月 22 日和 23 日将装有凋落物的尼龙网分解袋置于 36 个样方的土壤表面,并用细铁钉固定,让凋落物在 36 个样方内自然分解。

### 1.3 样品采集

由于海北站气温较低,分解速率较慢,所以凋落物分解袋在植物生长初期、生长盛期与末期各取 1 次,时间间隔为 3 个月左右,具体取样时间为 2012 年 4 月 25 日、7 月 11 日和 10 月 19 日,对应凋落物的分解时间是 185 d,262 d 和 362 d。分解袋取回后在清水下冲洗,然后让其自然风干,风干后装入信封袋中,在  $65^{\circ}\text{C}$  下烘 48 h,烘完后进行样品的处理及数据分析。

### 1.4 数据处理

$$\text{质量残留率}(\%) = M_t / M_0 \quad (1)$$

表1 样地的试验处理及代码

Table 1 The experiment treatments and its codes

试验处理 Experiment treatments	试验处理代码 Experiment treatment codes	重复数 Number of repetitions
对照 Contrast	CK	6
夏季增雨 Increased rain in summer	W1	6
冬季增雪 Increased snow in winter	W2	6
氮肥 Applied N fertilizer	N	3
氮肥与夏季增雨交互作用 N fertilizer application and increased rain in summer	NW1	3
氮肥与冬季增雪交互作用 Applied N fertilizer and increased winter snow	NW2	3
磷肥 Applied P fertilizer	P	3
磷肥与夏季增雨交互作用 P fertilizer application and increased rain in summer	PW1	3
磷肥与冬季增雪交互作用 Applied P fertilizer and increased winter snow	PW2	3

式中: $M_0$ 为初始凋落物质量; $M_t$ 为 $t$ 时刻凋落物质量。

用改进的 Olson 负指数衰减模型<sup>[7-13,20]</sup>对凋落物质量损失进行拟合:

$$y = ae^{-kt} \quad (2)$$

式中: $y$ 为质量残留率(%); $a$ 为拟合参数; $k$ 为日分解系数( $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ); $t$ 为时间(d)。

利用 SPSS 17.0 软件进行 One-way ANOVA 统计分析,并以 LSD 多重检验法检验不同处理下质量残留率差异显著性;并用 Excel 2003 计算出 4 种植物各组分不同处理下的回归模型。

## 2 结果与分析

### 2.1 比较 4 种植物凋落物分解速率

由图 1 可知,在 4 种植物及各组分凋落物的分解过程中,棘豆及麻花苻的地上部分分解较快,其次是垂穗披碱草和矮嵩草。分解 362 d 时(即 2012 年 10 月 19 日采样),棘豆的分解速率极显著高于垂穗披碱草与矮嵩草( $P < 0.01$ ),但棘豆与麻花苻之间的差异并不显著。它们的分解速率为:棘豆 > 麻花苻 > 矮嵩草 > 垂穗披碱草,质量残留率分别为:42.2%,44.7%,54.7%和 59.9%。分解 185 d 时(2012 年 4 月 25 日采样),矮嵩草、棘豆与麻花苻的质量残留率均极显著低于垂穗披碱草( $P < 0.01$ ),麻花苻质量残留率也极显著低于矮嵩草( $P < 0.01$ );分解 262 d 时(即 2012 年 7 月 11 日采样),4 种植物的质量残留率差异显著性与分解 185 d 时一样。根据 Olson 负指数衰减模型得出,棘豆地上部分在夏季增雨并施氮肥处理下(NW1)的日分解率最高为 0.006,其质量分解 95% 时所需要的时间为 561.3 d(表 1)。

### 2.2 不同处理对 4 种植物凋落物分解的影响

由图 1 可知,在垂穗披碱草凋落物的地上部分分解过程中,分解 262 d 时,其他处理均极显著高于 NW1 处理( $P < 0.01$ );其余分解时期,各处理之间差异不显著。表 2 中各处理的日分解系数: $\text{NW1} = \text{PW1} > \text{PW2} > \text{W1} = \text{W2} = \text{NW2} > \text{CK} = \text{N} = \text{P}$ ,分解最快的是 NW1 与 PW1 处理,分解其质量 95% 所需时间分别为 1177.3 d 和 1205.8 d,分别比 CK 缩短 182.5 d 和 154 d,所以施肥并夏季增雨在一定程度上促进了垂穗披碱草地上部分的分解。

凋落物矮嵩草的地上部分分解中,分解 262 d 时,W1 处理与 W2,N,P 和 PW1 处理间差异极显著( $P < 0.01$ ),与 CK 和 NW2 处理间差异显著( $P < 0.05$ ),其余各处理之间差异均不显著;到分解 362 d 时,PW1 处理与 W1,W2,N 和 NW2 处理间差异显著( $P < 0.05$ ),与 CK 和 NW2 处理间差异极显著( $P < 0.01$ )。从回归模型中也可以看出,日分解系数  $\text{PW1} > \text{PW2} > \text{W1} = \text{W2} > \text{P} > \text{NW2} > \text{CK} > \text{N} > \text{NW1}$ ,分解最快的是 PW1 处理,其分解质量的 95% 所需要的时间为 885.6 d。

甘肃棘豆地上部分凋落物分解中,分解 185 d 时,W1 处理与 NW2 处理差异显著( $P < 0.05$ );分解 262 d 时,P 处理与 CK,W1,W2,N 和 NW1 处理间差异显著( $P < 0.05$ ),NW1 与 PW1 和 PW2 处理间差异显著( $P < 0.05$ );分解 362 d 时,棘豆地上部分的 CK 处理与 W1 和 NW2 处理间差异显著( $P < 0.05$ ),与 P 和 PW1 处理间差异极显著( $P < 0.01$ ),N 处理与 P 处理间差异极显著( $P < 0.01$ )(图 1)。日分解系数  $\text{N} > \text{P} > \text{PW1} > \text{NW2} > \text{NW1} > \text{W1} > \text{PW2} > \text{W2} = \text{CK}$ ,分解最快的为 N 处理,分解 95% 凋落物质量所需要的时间为 649.5 d,比 CK 处理时间缩短 286.7 d,所以施 N 肥有利于促进棘豆地上部分凋落物的分解。

麻花苳地上部分分解中,分解 185 d 时,P 处理与 W1 和 PW1 处理差异显著( $P < 0.05$ ),各时期各处理分解速率差异均不显著。日分解系数  $NW2 >$

$P > PW2 > N = NW1 = PW1 > W1 > CK > W2$ ,  $NW2$  处理的分解速度最快,分解其质量 95% 所需要的时间为 819.6 d。

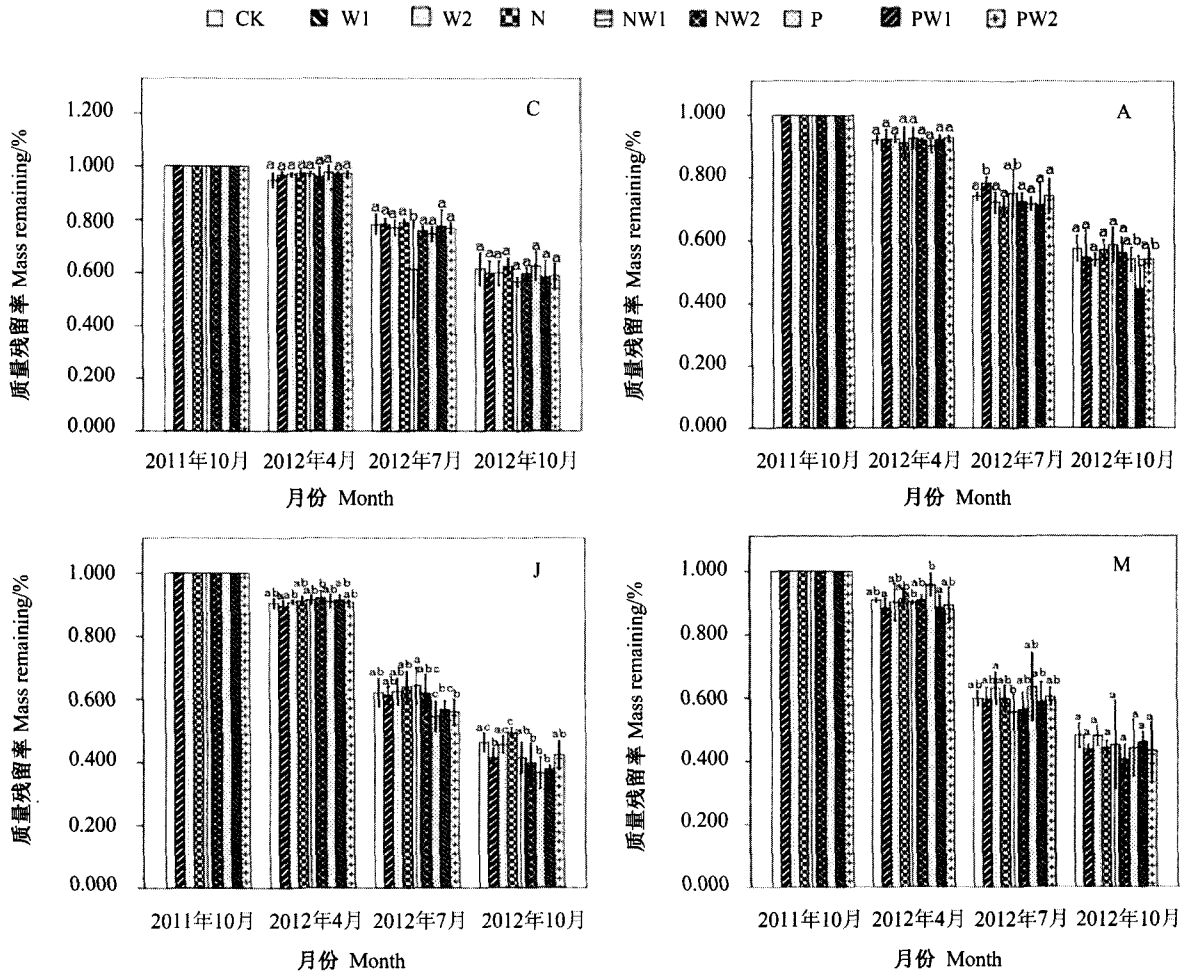


图 1 不同处理下垂穗披碱草(C)、矮蒿草(A)、甘肃棘豆(J)与麻花苳(M)4种植物的地上部分分解动态变化图

Fig. 1 Dynamics of mass remained of the plant species *E. nutans* (C), *K. humilis* (A), *O. kansuensis* (J) and *G. straminea* (M)

注:CK;对照;W1;夏季增雨;W2;冬季增雪;N;施氮肥;NW1;施氮肥与夏季增雨交互作用;NW2;施氮肥与冬季增雪交互作用;P;施磷肥;PW1;施磷肥与夏季增雨交互作用;PW2;施磷肥与冬季增雪交互作用。不同小写字母间表示差异显著( $P < 0.05$ )

Note: CK; Contrast; W1; Increased rain in summer; W2; Increased snow in winter; N; Applied N fertilizer; NW1; N fertilizer application and increased rain in summer; NW2; Applied N fertilizer and increased winter snow; P; Applied P fertilizer; PW1; P fertilizer application and increased rain in summer; PW2; Applied P fertilizer and increased winter snow. Different small letters mean significant difference at 0.05 level

### 3 讨论与结论

#### 3.1 4种凋落物分解速率及其影响因素

这4种典型高寒草甸植物地上部分的分解速率中,棘豆>麻花苳>矮蒿草>垂穗披碱草,凋落物的分解速率与不同植物的纤维素、木质素含量及较易分解碳氮磷含量等物种自身的特性密切相关。草地植物中木质素与纤维素含量高的凋落物含有大量难

分解的物质以及一小部分相对容易分解的可溶性化合物,因此其分解速率相对较慢<sup>[15-16]</sup>。正是由于矮蒿草和垂穗披碱草的上述含量高于棘豆和麻花苳<sup>[17]</sup>,导致棘豆和麻花苳的分解快于矮蒿草和垂穗披碱草。

#### 3.2 水分与施肥及其耦合对凋落物分解的影响

在草原凋落物分解中,水、热因素是相互作用

表 2 不同处理凋落物物种分解质量残留率随时间变化的回归模型

Table 2 Regression equations of litter decomposition rate with time under different treatments

凋落物物种 Litter species	处理 Treatments	回归方程 Regression equation	复相关系数 Multiple coefficient(R)	日分解系数 Decomposition coefficient of day K /kg · kg <sup>-1</sup> · d <sup>-1</sup>	分解 95% 所需要的时间 Time of 95% decomposition/d
垂穗披碱草 <i>Elymus nutans</i>	CK	$y=1.4975e^{-0.0025t}$	0.9362	0.0025	1359.8
	W1	$y=1.605e^{-0.0027t}$	0.9741	0.0027	1284.8
	W2	$y=1.5894e^{-0.0027t}$	0.9673	0.0027	1281.1
	N	$y=1.5380e^{-0.0025t}$	0.9896	0.0025	1370.4
	NW1	$y=1.5198e^{-0.0029t}$	0.8160	0.0029	1177.3
	NW2	$y=1.5538e^{-0.0027t}$	0.9816	0.0027	1272.8
	P	$y=1.5078e^{-0.0025t}$	0.9527	0.0025	1362.6
	PW1	$y=1.6505e^{-0.0029t}$	0.9693	0.0029	1205.8
	PW2	$y=1.6319e^{-0.0028t}$	0.9852	0.0028	1244.8
矮嵩草 <i>Kobresia humilis</i>	CK	$y=1.4991e^{-0.0027t}$	0.9749	0.0027	1259.5
	W1	$y=1.6138e^{-0.003t}$	0.9182	0.0030	1158.1
	W2	$y=1.6094e^{-0.003t}$	0.9815	0.0030	1157.2
	N	$y=1.4407e^{-0.0026t}$	0.9643	0.0026	1292.6
	NW1	$y=1.4899e^{-0.0026t}$	0.9721	0.0026	1305.5
	NW2	$y=1.5275e^{-0.0028t}$	0.9782	0.0028	1221.2
	P	$y=1.5293e^{-0.0029t}$	0.9877	0.0029	1179.5
	PW1	$y=2.0623e^{-0.0042t}$	0.9768	0.0042	885.6
	PW2	$y=1.6428e^{-0.0031t}$	0.9859	0.0031	1126.5
甘肃棘豆 <i>Oxytropis kansuensis</i>	CK	$y=1.7537e^{-0.0038t}$	0.9537	0.0038	936.2
	W1	$y=1.9829e^{-0.0044t}$	0.9743	0.0044	936.4
	W2	$y=1.7885e^{-0.0038t}$	0.9587	0.0038	941.3
	N	$y=1.6681e^{-0.0054t}$	0.9618	0.0054	649.5
	NW1	$y=2.1033e^{-0.0045t}$	0.9814	0.0045	830.9
	NW2	$y=2.2043e^{-0.0048t}$	0.9726	0.0048	788.7
	P	$y=2.2513e^{-0.0051t}$	0.9560	0.0051	746.5
	PW1	$y=2.2080e^{-0.005t}$	0.9687	0.0050	757.6
	PW2	$y=1.8855e^{-0.0043t}$	0.9422	0.0043	844.2
麻花苣 <i>Gentiana straminea</i>	CK	$y=1.6660e^{-0.0036t}$	0.9340	0.0036	973.9
	W1	$y=1.7673e^{-0.0039t}$	0.9557	0.0039	914.2
	W2	$y=1.6784e^{-0.0035t}$	0.9287	0.0035	1003.9
	N	$y=1.8513e^{-0.004t}$	0.9579	0.0040	902.0
	NW1	$y=1.7605e^{-0.004t}$	0.8862	0.0040	890.3
	NW2	$y=1.9983e^{-0.0045t}$	0.9494	0.0045	819.6
	P	$y=2.0939e^{-0.0044t}$	0.9412	0.0044	848.8
	PW1	$y=1.8996e^{-0.004t}$	0.9282	0.0040	909.3
	PW2	$y=1.8619e^{-0.0041t}$	0.9491	0.0041	882.3

的,分解速率取决于两者的数量关系<sup>[18]</sup>。由图 1 可以看出 4 种牧草分解速率最快的时间都在降水较多的夏季,而 2011 年 10 月到 2012 年 4 月这段时间分解速度减慢。其原因可能是在分解初期,由于降雨对凋落物水溶性化合物的淋溶,造成凋落物质量损失大;而另一个分解高峰期出现在夏季,则是因为海北地区夏季降雨充足、凋落物及草地土壤湿润,温度相对较高,最适合土壤动物和微生物的繁殖和生长,从而加速了凋落物的分解<sup>[7,14]</sup>;而相反冬季天气寒冷,地表面温度较低,凋落物难以分解。而单纯的增雨雪则对它们的分解影响并不显著,因为海

北站的降雨量比较充足(年降雨量约 580 mm),水分条件不限制它们的分解<sup>[16]</sup>。

氮磷含量也是影响凋落物分解的重要变量<sup>[18]</sup>。由图 1 与表 2 中可以看出,各处理都影响棘豆地上部分的分解,都使得分解时间比对照短,但施氮肥最有利于棘豆地上部分的分解;施氮肥与夏秋季增雨交互作用对垂穗披碱草地上部分分解有一定作用;施氮肥并冬季增雪有利于垂穗披碱草地上部分、麻花苣地上部分凋落物的分解;施磷肥有利于垂穗披碱草地上部分凋落物的分解;施磷肥并夏季增雨有利于矮嵩草地上部分凋落物的分解。这可能是因为

含氮磷量低的植物人工施氮磷肥会加速它的分解,而含氮磷量相对高的植物增施氮磷肥,反而会抑制它的分解<sup>[21]</sup>,还要增加水分,使得水肥效应加以耦合才对其凋落物的分解有促进作用<sup>[7]</sup>,比如矮嵩草的地上部分。

另外,由于本试验中分解时间只有1年,尚处于分解初期阶段,所以后期分解的实际情况可能与本试验推理的结果存在一定差距。因为凋落物分解速率受多方面影响:比如前期分解速率可能受到紫外线照射的影响不大,而随着时间推移,这种影响会越来越明显,但这种影响并不贯穿整个分解过程,可能是由于紫外线照射只影响某一时期土壤微生物群落的变化进而影响凋落物自身的质量;还有氮沉降以及全球变暖温度升高等影响因素。垂穗披碱草、矮嵩草、棘豆与麻花苻这4种植物的氮磷含量、木质素、C/N比等诸多指标有待进一步测定,以验证本试验的结论。

#### 参考文献

- [1] 张建利,张文,毕玉芬. 山地草地凋落物分解与凋落物水文功能[J]. 生态环境, 2008, 17(5): 1986-1990
- [2] 刘忠宽,汪诗平,韩建国,等. 内蒙古温带典型草原植物凋落物和根系的分解及养分动态的研究[J]. 草业学报, 2005, 14(1): 24-30
- [3] 李学斌,陈摇林,张硕新,等. 围封条件下荒漠草原4种典型植物群落枯落物枯落量及其蓄积动态[J]. 生态学报, 2012, 32(20): 6575-6583
- [4] 潘开文,何静,吴宁. 森林凋落物对林地微生境的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(1): 153-1581
- [5] 李传龙. 青藏高原东部高寒草甸垂穗披碱草凋落物分解对UV-B的响应[D]. 兰州: 兰州大学, 2010: 13-22
- [6] 张艳博,罗鹏,孙庚,等. 放牧对青藏高原东部两种典型高寒草地类型凋落物分解的影响[J]. 生态学报, 2012, 31(15): 4605-4614
- [7] 李仁洪,胡庭兴,涂利华,等. 模拟氮沉降对华西雨屏区慈竹林凋落物分解的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(11): 2588-2593
- [8] 王启兰,曹广民,姜文波,等. 高寒湿地植物残体降解的动态分析[J]. 草业学报, 2004, 13(4): 39-44
- [9] 黄锦学,黄李梅,林智超,等. 中国森林凋落物分解速率影响因素分析[J]. 亚热带资源与环境学报, 2010, 5(3): 56-63
- [10] 王丽,殷秀琴,宋博,等. 羊草草原主要凋落物分解及土壤动物的作用[J]. 草业学报, 2011, 20(6): 143-149
- [11] 张芸香,张晋明,郭晋平. 文峪河上游河岸林凋落物及其分解过程研究[J]. 林业科学研究, 2011, 24(5): 634-640
- [12] 陈法霖,江波,张凯,等. 退化红壤丘陵区森林凋落物初始化学组成与分解速率的关系[J]. 应用生态学报, 2011, 22(3): 565-570
- [13] 洪江华,江洪,马元丹,等. 模拟酸雨对亚热带典型树种叶凋落物分解的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(10): 5246-5251
- [14] 曲浩,赵学勇,赵哈林,等. 陆地生态系统凋落物分解研究进展[J]. 草业科学, 2010, 27(8): 44-51
- [15] 林巧燕,徐广平,苏爱玲,等. 增温对高寒草甸群落凋落物质量动态变化的影响[J]. 广西植物, 2011, 31(6): 770-774
- [16] 王启兰,姜文波. 青藏高原金露梅灌丛与矮嵩草草甸枯枝落叶的分解作用[J]. 草地学报, 2001, 9(2): 128-132
- [17] 周兴民. 中国嵩草草甸[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 147-216
- [18] 王苗苗,侯扶江. 草地凋落物分解的影响因素[J]. 草业科学, 2012, 29(10): 1631-1637
- [19] Aerts R, De Caluwe H. Nutritional and plant-mediated controls on leaf litter decomposition of *Carex* species [J]. Ecology, 1997, 78(1): 244-260
- [20] Olson J S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems [J]. Ecology, 1963, 44(2): 322-331
- [21] Mo J M, Brown S, Peng S L, et al. Nitrogen availability in disturbed, rehabilitated and mature forests of tropical China [J]. Forest Ecology and Management, 2003, 175(1/3): 573-583

(责任编辑 李美娟)