

DOI: 10.5846/stxb201802080341

赵雅洁, 张静, 宋海燕, 李周, 李素慧, 陶建平, 刘锦春. 不同土壤厚度、水分和种植方式对喀斯特两种草本凋落物分解质量损失和化学计量特征的影响. 生态学报, 2018, 38(18): - .

Zhao Y J, Zhang J, Song H Y, Li Z, Li S H, Tao J P, Liu J C. Effects of different soil thickness, water and planting patterns on the litter mass loss and stoichiometry characteristics of two herbs in the karst regions. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(18): - .

不同土壤厚度、水分和种植方式对喀斯特两种草本凋落物分解质量损失和化学计量特征的影响

赵雅洁, 张 静, 宋海燕, 李 周, 李素慧, 陶建平, 刘锦春*

三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆市三峡库区植物生态与资源重点实验室, 西南大学生命科学学院, 重庆 400715

摘要:为了探究生长期间不同土壤厚度、水分及种植方式处理对草本植物凋落物分解质量损失和化学计量特征的影响, 采用分解袋法, 在露天分解床上分解经过生长期 2 种土壤厚度(对照土壤厚度和浅土处理)、2 种水分(正常灌水处理和干旱处理)和 2 种植方式(单种和混种)处理的苇状羊茅(*Festuca arundinacea* Schreb.) 和黑麦草(*Lolium perenne* L.) 凋落物, 研究生长期间土壤厚度和水分减少及不同的种植方式是否通过改变两物种初始凋落物质量、产量和组分来影响自身凋落物分解。结果发现:(1) 与对照组(CK)相比, 在干旱组(D)和浅土+干旱组(SD), 两物种地上、根系和总的凋落物质量损失率、初始 N 和 P 含量均显著增加, 凋落物产量、C/N 和 C/P 显著降低, 凋落物地上组占比大体上无显著变化; 而不同的种植方式处理对各组分质量损失率、元素含量、计量比、凋落物产量和组占比大体上无显著影响;(2) 两物种地上、根系和总凋落物的质量损失率分别与地上、根系和总 N 含量呈显著正相关, 与 C/N 呈显著负相关, 与凋落量呈显著负相关, 而总凋落物质量损失率与地上凋落物组占比呈显著正相关。结果表明, 生长期干旱和浅土+干旱处理能够通过影响苇状羊茅和黑麦草的初始凋落物质量、产量和组占比来加快地上、根系和总凋落物分解, 其中凋落物 N 含量和 C/N 是影响两物种凋落物分解快慢的主要原因。

关键词:土壤浅薄; 岩溶干旱; 种植方式; 凋落物分解; 凋落物质量和产量

Effects of different soil thickness, water and planting patterns on the litter mass loss and stoichiometry characteristics of two herbs in the karst regions

ZHAO Yajie, ZHANG Jing, SONG Haiyan, LI Zhou, LI Suhui, TAO Jianping, LIU Jinchun*

Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region (Ministry of Education), Chongqing Key Laboratory of Plant Ecology and Resources Research in Three Gorges Reservoir Region, School of Life Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: Litter and its decomposition are crucial to terrestrial ecosystem functioning, and are responsible for carbon and nutrient cycles. Litter quality and quantity vary greatly with the changes of climate, soil parent materials, species distributions etc. Plants can regulate their physical and chemical properties to adapt and respond to karst habitats, i.e., shallow soil and drought, thereby produce litter with different quality, quantity and components, thus influence the litter decomposition. Previous studies have shown that the effects of water (or precipitation) and nutrient addition on litter decomposition during the decomposition period. However, the effects of soil thickness, water, and planting patterns during the growing period of plant on litter decomposition are less known. Our aim was to determine whether the decline of soil thickness and water, and different planting patterns during the growing period of two herbs would have effects on litter decomposition that affected by the initial litter quality, quantity, and components. Two perennial graminaceous grass

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31500399); 教育部第 49 批留学回国人员科研启动基金资助项目

收稿日期:2018-02-08; **修订日期:**2018-07-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jinchun@swu.edu.cn

species, *Festuca arundinacea* Schreb. (deep-rooted) and *Lolium perenne* L. (shallow-rooted) were chosen as the experimental materials. These two species are often chosen as pioneer plants in karst revegetation schemes. We manipulated three factors, soil thickness (control soil thickness: 15 cm, and shallow soil: 5 cm), water (normal irrigation: 120 mL/3 d and drought treatment: 36 mL/3 d), and planting pattern (monoculture and mixture) in a full three-way randomized block design. We collected aboveground and root litter of the plants, and placed these litters in litterbags to decompose in outdoor incubation beds for seven months. The results showed that: (1) compared with the control group (CK), the aboveground, root, and total mass loss rates, initial N and P contents of *F. arundinacea* and *L. perenne* increased in drought group (D) and shallow soil plus drought group (SD), and litter production, C/N, and C/P decreased significantly, whereas the aboveground component ratio of both species was not changed. All the above traits were not affected by the planting patterns; (2) the aboveground, root, and total mass loss rates of both species were positively correlated with the aboveground, root and total N contents, negatively correlated with C/N and litter production. The total mass loss rate was positively correlated with the aboveground component ratio for both species. The results indicated that drought and shallow soil plus drought could accelerate the litter mass loss rates of *F. arundinacea* and *L. perenne* by changing the initial litter quality, quantity, and components. Moreover, litter N content and C/N were the main factors that influenced the litter decomposition of the two species.

Key Words: shallow soil; karst drought; planting pattern; litter decomposition; litter production and quality

凋落物分解是控制植被结构和生态系统功能的一个复杂而重要的因素,它不仅影响着土壤理化性质和生物性质、水土保持功能和植被更新演替等,也是陆地生态系统正常物质循环和能量流动过程中的重要环节^[1-2]。凋落物质量和产量、组分随着外界气候、季候、土壤母质、地形和物种分布的变化而不断变化^[3]。在凋落物质量指标中^[4],其中凋落物的 C、N、P 养分元素及其化学计量比不仅反映凋落物分解速率,同时也是养分循环的重要环节之一,它们在分解过程中起着重要的作用^[5-6]。研究认为,凋落物初始元素含量及其计量比与凋落物分解速率有显著的相关关系,凋落物中 N 和 P 的含量越高、C/N 和 C/P 比越低,凋落物分解速率越快^[7-9]。而有关凋落物数量对自身分解影响的研究中发现,凋落物输入量的增加能够改变凋落物分解速率,提高环境中 CO₂水平,影响着植被与土壤之间的 C 循环^[3,10-11]。同时,同种植物各器官形成和发育特征不同,导致其各组分凋落物分解速率差异较大^[12-13],且随着生境不同各组分所占的比值也发生变化。

我国的西南喀斯特地区,土壤浅薄化和岩溶干旱是限制该地区植物生长、发育和繁殖的关键因子^[14]。植物在生长期能够通过改变自身的理化性状以适应和响应喀斯特生境^[15-16]。研究发现,土壤厚度的减少和/或干旱胁迫可以降低植物各部分生物量的积累,植物也会适应性的改变地上和地下部分分配比例来提高自身土壤资源的利用效率^[17-18]。同时,在干旱环境下,由于植物吸收和运输养分能力降低,植物 N、P 等营养元素含量显著降低,C/N、C/P 等元素计量比也发生变化^[19-20],并且能够通过增加木质素的含量来提高自身抵抗外界胁迫的能力^[21]。我们前期研究也发现,生长期土壤资源和水分的减少限制了芨状羊茅(*Festuca arundinacea* Schreb.)和黑麦草(*Lolium perenne* L.)生物量积累和根系生长,且在混种条件下,芨状羊茅能够减少根系生长和根生物量的投资以减缓两者加剧的竞争,而黑麦草则保持相对恒定的生物量分配策略来保持其在竞争中的优势地位^[17]。那么,植物在生长期适应和响应外界环境变化的过程中,是否会形成不同凋落物质量、产量和组分,从而间接影响凋落物分解,最终影响营养元素的归还?

目前研究者主要关注分解期间水分处理、养分添加等对凋落物分解的研究,而对生长期不同土壤厚度、水分及种植方式处理对凋落物分解的研究较少,而在喀斯特地区的研究更为少见。那么在以土壤浅薄化和岩溶干旱为限制因子的喀斯特地区,生长期不同土壤厚度、水分和种植方式对凋落物分解有何影响?植物是否通过改变其自身凋落物初始营养元素含量、计量比、产量和组分来影响其分解?芨状羊茅和黑麦草均为禾本科多年生草本植物,秆成疏丛,叶线型或条形,具有较浅的肉质根系,主要利用地表覆盖的土壤进行斑块生

长,相对于乔木,更容易受到喀斯特土壤厚度变化的影响^[22]。再者,两者耐旱耐瘠薄,适应性强,在喀斯特地区作为石漠化草地治理的草种,能够有效的改善当地生态环境,减轻农村贫困问题^[23-24]。由此,本研究在前期研究的基础上,继续以苇状羊茅和黑麦草为研究对象,通过分解袋法,探究:1) 生长期间不同土壤厚度、水分和种植方式对苇状羊茅和黑麦草凋落物质量损失率的影响;2) 凋落物营养元素含量、计量比、产量和组分与质量损失率的相关关系。期望研究结果有助于更好的理解日趋严重的干旱和土壤贫瘠对喀斯特地区养分循环的影响,为喀斯特地区植被的恢复和石漠化治理提供参考。

1 材料和方法

1.1 植物种植

以苇状羊茅和黑麦草为试验材料,试验土壤为重庆中梁镇海石公园黄色石灰土,土壤的基本理化性状:pH 为 7.4 ± 0.14 ,有机质为 $(0.34 \pm 0.02)\%$,全氮为 $(0.28 \pm 0.03) \text{ g/kg}$,全磷为 $(0.39 \pm 0.02) \text{ g/kg}$,全钾为 $(23.7 \pm 3.22) \text{ g/kg}$,田间持水量为 $(39.8 \pm 2.23)\%$ ^[14]。于 2015 年 4 月 4 日,选取大小均匀一致的植物移栽到容器中,同时将所有的容器置于西南大学生态试验园透明遮雨棚下(海拔 249 m)进行相同条件的适应生长。

于 2015 年 4 月 14 日进行试验处理,试验采用土壤厚度、水分和种植方式的 3 因素随机区组设计。其中,土壤厚度包括对照土壤厚度(15 cm)和浅土处理(5 cm),以自制的长方体栽培容器实现,底面积均为 100 cm^2 ,高度分别为 15 cm(装入 1500 g 干土)和 5 cm(装入 500 g 干土)。水分处理包括正常灌水处理(120 mL/3d)和干旱处理(36 mL/3d),正常灌水量是根据重庆地区 1981—2011 这 30 年间 4—6 月降雨量,计算出每 100 cm^2 每日平均降雨量为 40 mL,以 40 mL 作为对照,干旱处理在对照的水平上减少 70%,每 3 天浇水 1 次。以上土壤厚度和水分处理的设置是根据前期预实验和野外实地考察设计。其中对照组(CK)为对照土壤厚度和正常灌水量,浅土组(S)为浅土处理和正常灌水量,干旱组(D)为对照土壤厚度和干旱处理,浅土+干旱组(SD)为浅土和干旱处理。种植方式包括单种(M_0 , monoculture)和混种(M_1 , mixture),每盆 2 株。实验共设置 3 个因素,每个因素 2 个水平,每个物种共计 8 个处理,每个处理 10 个重复,其中 5 个重复用于植物营养元素的测定,另 5 个重复用于凋落物分解(详细实验设计图见赵雅洁等^[14])。

1.2 试验设计

由于浅土、干旱和浅土+干旱处理下的植物比正常处理下的植物凋落的时间更早,为采集植物自然状态的凋落物,本研究于 2015 年 8 月至 2015 年 9 月期间采集植物地上部分和根系凋落物。所有样品自然风干后,称量植物地上和根系凋落物的风干重,整株装入大小为 $10 \text{ cm} \times 12 \text{ cm}$,网孔为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的尼龙网布分解袋中。每一物种同一处理制作 5 个分解袋,2 个物种共计 80 袋。另取凋落物样品烘干至恒重用于测定含水率,通过换算得出分解样品的烘干重。

2016 年在西南大学生态试验园内布置 5 个 $2 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ (深度为 0.6 m)的露天分解床,相邻分解床之间缓冲带的距离大于 1 m,且用木板和砖块隔开以避免相互影响。挖除分解床内原有的土壤基质,填入从重庆海石公园带回的黄色石灰土。于 2016 年 7 月 21 日将分解袋随机置于分解床上(分解袋平铺且不重叠放置),然后在分解床上罩上铁丝网以防止鸟类、老鼠等动物进入。试验处理期间,分解材料均处于相同自然降雨、温度等环境条件下进行分解,主要环境因子见图 1。

1.3 初始营养元素的测定和凋落物样品的收获

凋落物初始营养元素的测定:(1) C 和 N 元素:采用元素分析仪(Vario EL cube, Elementar, GER)测定 C 和 N 元素含量(mg/g);(2) P 元素:使用微波消解仪(SeepWave MWS-4, Berghof, GER)和 iCAP6300 电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES, Thermo Fisher, UK)测定 P 元素含量(mg/g)。

于 2017 年 2 月 16 日将分解袋 1 次全部取回,分解时间为 210 d(7 月)。材料取回后小心冲洗去除混入的杂草根系和泥土等杂物,于 60°C 下烘干至恒重,用于测量质量损失率。

1.4 数据分析及处理

凋落物地上组比分 = 地上部分凋落量 / 总凋落量; 总凋落量 = 地上部分凋落量 + 根凋落量

凋落物质量损失: $\text{Mass loss ratio}(\%) = (M_0 - M_t) / M_0 \times 100\%$, $M_0 = M \times \text{含水率}$

式中, M_0 为凋落物的初始干重; M_t 为分解 210 d 后凋落物的残留干重; M 为分解袋内装入的凋落物初始风干重; 含水率是每一物种同一处理下烘干至恒重后的重量与该样品风干重的比值, 以平均值表示。

用 Microsoft Office Excel 2013 软件整理数据, 用 SPSS 22.0 软件分析数据。利用 Two-way ANOVA 分析土壤厚度和种植方式、水分和种植方式、土壤厚度+水分和种植方式对两物种质量损失的影响。采用 Independent-samples *T* test 分析相同土壤厚度和水分处理下同一物种各个指标在单种和混种处理下的差异显著性。两物种凋落物产量、组分比和营养元素指标与凋落物质量损失率的关系采用 Pearson 相关性分析。用 Origin 8.6 软件作图。

2 结果和分析

2.1 凋落物初始营养元素特征和产量

总体来说, 苇状羊茅和黑麦草凋落物地上、根系和总 N、P 元素含量及计量比随着资源和种植方式不同变化趋势一致, 以总元素指标为例。在单种和混种下, 与对照组 (CK) 相比, 两物种总 N 含量在浅土组 (S) 显著降低, 而在干旱组 (D) 和浅土+干旱组 (SD) 显著或接近显著增加。两物种的 P 含量在 3 种低资源水平下 (S、D、SD) 与对照相比呈降低或不不变的趋势, 且两物种的 N 和 P 含量在单种和混种间均无显著差异 (表 1)。

无论在单种还是混种下, 两物种的总 C/N 在浅土组相比于对照显著的增加, 而在干旱和浅土+干旱组显著降低或不不变。与对照相比, 两物种的 C/P 在 3 种低资源水平下 (S、D、SD) 显著增加或不不变。除了在浅土和干旱组, 混种后苇状羊茅的 C/N 和 C/P 显著低于单种, 混种后黑麦草的 C/P 显著高于单种, 其他资源水平下, 两物种 C/N 和 C/P 在单、混种下均无显著差异 (表 1)。

表 1 不同土壤厚度、水分和种植方式下苇状羊茅和黑麦草凋落物的营养元素指标 (平均值±标准误)

Table 1 Litter nutrient traits of *F. arundinacea* and *L. perenne* under different soil depth, water, and planting patterns ($M \pm SE$)

物种 Species	资源水平 Resources level	氮含量 N content		磷含量 P content		碳氮比 C:N ratio		碳磷比 C:P ratio	
		单种 M_0	混种 M_1	单种 M_0	混种 M_1	单种 M_0	混种 M_1	单种 M_0	混种 M_1
		Monoculture	Mixture	Monoculture	Mixture	Monoculture	Mixture	Monoculture	Mixture
<i>F. arundinacea</i>	CK	16.37±1.35C/ns	14.27±0.52C/ns	0.53±0.04A/ns	0.55±0.05A/ns	29.63±1.92B/ns	34.79±1.92B/ns	1383.01±72.91C/ns	1153.32±72.75B/ns
	S	9.96±0.43B/ns	11.42±0.39B/ns	0.36±0.04B/ns	0.38±0.01B/ns	49.94±0.85A/*	43.13±2.08A/*	2089.18±97.10AB/*	1394.02±55.24AB/*
	D	18.39±0.46AB/ns	19.82±1.09A/ns	0.36±0.04B/ns	0.37±0.04B/ns	28.26±0.39B/ns	28.92±1.07C/ns	2468.84±174.31A/*	1670.14±173.73A/*
	SD	20.53±0.73A/ns	20.56±1.11A/ns	0.36±0.04B/ns	0.39±0.04B/ns	26.36±0.96B/ns	27.78±0.34C/ns	1996.01±79.08B/ns	1701.12±165.25A/ns
<i>L. perenne</i>	CK	16.31±0.83B/ns	15.38±0.51B/ns	0.76±0.07A/ns	0.69±0.08A/ns	32.48±1.29B/ns	35.29±1.47A/ns	1663.81±72.18C/ns	1861.95±135.07B/ns
	S	12.18±0.23C/ns	13.39±0.66B/ns	0.50±0.06B/ns	0.57±0.04A/ns	43.78±2.18A/ns	39.02±1.42A/ns	2699.49±321.43AB/ns	2305.90±119.83B/ns
	D	19.42±0.70A/ns	20.14±0.90A/ns	0.52±0.07B/ns	0.58±0.10A/ns	28.64±1.04BC/ns	29.94±0.85B/ns	2119.92±301.74BC/ns	2077.75±193.96B/ns
	SD	21.83±1.17A/ns	20.83±1.98A/ns	0.64±0.07AB/ns	0.56±0.05A/ns	26.28±0.78C/ns	28.71±2.01B/ns	3132.09±94.26A/*	3582.28±194.18A/*

CK: 对照组, Control group; S: 浅土组, Shallow soil group; D: 干旱组, Drought group; SD: 浅土+干旱组, Shallow soil+drought group; 不同大写字母表示同一组分下不同资源水平间差异显著 ($P < 0.05$); ns/*, 同一资源水平下单种和混种间差异显著性 (ns, $P > 0.05$; *, $P < 0.05$)

在单种和混种下, 与对照组相比, 苇状羊茅和黑麦草的地上、根系和总凋落量在 3 种低资源水平下显著降低, 且在各资源水平下, 单种和混种之间均无显著差异 (表 2)。

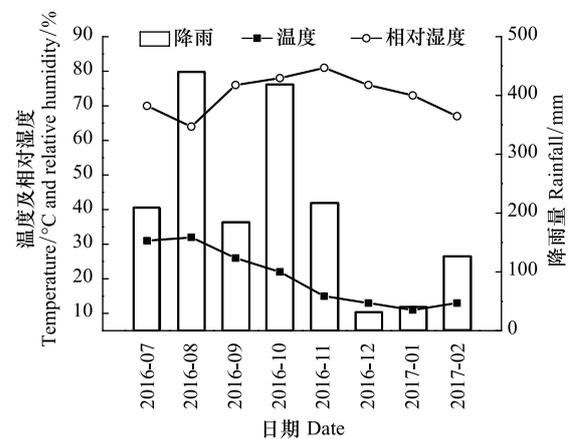


图 1 分解期间降雨量、温度和相对湿度月变化

Fig. 1 Monthly changes of rainfall, temperature and relative humidity during the decomposition

与对照组相比,在单种下,苇状羊茅凋落物的地上组份比在浅土组显著降低,在浅土+干旱组显著增加,而在干旱组无显著变化;而在混种下,苇状羊茅的地上组份比在3种低资源水平下与对照相比均无显著差异,且在各资源水平下(CK,S,D,SD)单种和混种间无显著差异。对于黑麦草而言,随着资源减少和种植方式的不同,其凋落物地上组份比均无显著差异(表2)。

表2 不同土壤厚度、水分和种植方式下苇状羊茅和黑麦草凋落物产量和组份比(平均值±标准误)

Table 2 Litter production and component ratio of *F. arundinacea* and *L. perenne* under different soil depth, water, and planting patterns (M±SE)

物种 Species	资源水平 Resources level	凋落物产量 Litter production						凋落物组份 Litter components	
		地上部分 Aboveground part		根系 Root		整株 Whole plant		地上组份比 Aboveground component ratio	
		单种 M ₀	混种 M ₁	单种 M ₀	混种 M ₁	单种 M ₀	混种 M ₁	单种 M ₀	混种 M ₁
		Monoculture	Mixture	Monoculture	Mixture	Monoculture	Mixture	Monoculture	Mixture
苇状羊茅 <i>F. arundinacea</i>	CK	1.60±0.29A/ns	2.02±0.24A/ns	0.42±0.09A/ns	0.51±0.11A/ns	2.02±0.38A/ns	2.52±0.30A/ns	0.80±0.01B/ns	0.80±0.03AB/ns
	S	0.56±0.06B/ns	0.61±0.11B/ns	0.27±0.04AB/ns	0.28±0.05B/ns	0.83±0.09BC/ns	0.89±0.13B/ns	0.67±0.02C/ns	0.68±0.04B/ns
	D	0.93±0.03BC/ns	0.59±0.16B/ns	0.22±0.02B/ns	0.16±0.04BC/ns	1.15±0.04B/ns	0.75±0.19B/ns	0.81±0.01B/ns	0.77±0.04AB/ns
	SD	0.27±0.01C/ns	0.24±0.05B/ns	0.05±0.01C/ns	0.04±0.01C/ns	0.31±0.09C/ns	0.31±0.05B/ns	0.85±0.02A/ns	0.87±0.02A/ns
黑麦草 <i>L. perenne</i>	CK	1.02±0.19A/ns	0.80±0.17A/ns	0.33±0.08A/ns	0.33±0.04A/ns	1.35±0.24A/ns	1.13±0.19A/ns	0.76±0.04A/ns	0.73±0.02AB/ns
	S	0.45±0.07B/ns	0.45±0.08BC/ns	0.17±0.04BC/ns	0.19±0.02B/ns	0.62±0.10BC/ns	0.64±0.09B/ns	0.74±0.02A/ns	0.69±0.03B/ns
	D	0.80±0.12A/ns	0.63±0.10AB/ns	0.21±0.03AB/ns	0.18±0.04B/ns	1.00±0.14AB/ns	0.81±0.13AB/ns	0.79±0.02A/ns	0.78±0.03A/ns
	SD	0.17±0.03B/ns	0.15±0.02C/ns	0.04±0.00C/ns	0.04±0.01C/ns	0.21±0.03C/ns	0.19±0.02C/ns	0.78±0.03A/ns	0.77±0.01A/ns

不同大写字母表示同一组分下不同资源水平间差异显著($P<0.05$); ns/* ,同一资源水平下单种和混种间差异显著性(ns, $P>0.05$; *, $P<0.05$)

2.2 凋落物质量损失率

无论是单种还是混种,苇状羊茅在浅土组的地上、根和总质量损失率与对照组相比无显著差异,而干旱组和浅土+干旱组相比于对照显著或接近显著增加。在各资源水平下,苇状羊茅的各部分质量损失率在单种和混种之间均无显著差异(图2)。

在单种和混种下,与对照相比,黑麦草在浅土组的地上和总的质量损失率无显著变化,在干旱组和浅土+干旱组显著增加,而其根质量损失率在3种低资源水平下相比于对照均无显著差异。在各资源水平下,黑麦草的各部分质量损失率在单种和混种间均无显著差异(图2)。

两因素方差分析表明,苇状羊茅和黑麦草的地上、根和总质量损失率在土壤厚度和种植方式、水分和种植方式、土壤厚度+水分和种植方式的交互作用下均无显著差异(表3)。

表3 苇状羊茅和黑麦草凋落物质量损失率的双因素方差分析

Table 3 Results of Two-way ANOVA test for the effects of soil thickness and planting patterns, water and planting patterns, soil thickness plus water and planting patterns on litter mass rate of *F. arundinacea* and *L. perenne*

方差来源 Source of variation	分子自由度 ndf numerator degrees of freedom	F					
		苇状羊茅 <i>F. arundinacea</i>			黑麦草 <i>L. perenne</i>		
		地上部分质 量损失率 Aboveground mass loss rate	根质量 损失率 Root mass loss rate	总质量 损失率 Total mass loss rate	地上部分质 量损失率 Aboveground mass loss rate	根质量 损失率 Root mass loss rate	总质量 损失率 Total mass loss rate
土壤厚度 T Soil thickness	1	0.11ns	0.06ns	3.58+	0.07ns	0.01ns	0.00ns
种植方式 P Planting patterns	1	0.94ns	0.48ns	0.78ns	1.22ns	0.04ns	2.22ns
土壤厚度×种植方式 T×P	1	0.19ns	0.00ns	0.03ns	0.50ns	0.21ns	0.31ns
水分 W Water	1	2.53ns	4.36*	3.20+	5.20*	0.17ns	5.83*
种植方式 P	1	0.59ns	0.00ns	0.24ns	1.87ns	0.50ns	1.46ns

续表

方差来源 Source of variation	分子自由度 ndf numerator degrees of freedom	F					
		苇状羊茅 <i>F. arundinacea</i>			黑麦草 <i>L. perenne</i>		
		地上部分质 量损失率 Aboveground mass loss rate	根质量 损失率 Root mass loss rate	总质量 损失率 Total mass loss rate	地上部分质 量损失率 Aboveground mass loss rate	根质量 损失率 Root mass loss rate	总质量 损失率 Total mass loss rate
水分×种植方式 W × P	1	0.68ns	0.36ns	0.32ns	0.61ns	0.02ns	0.85ns
土壤厚度+水分 T+W	1	12.26 **	10.75 **	17.01 ***	83.17 ***	1.48ns	52.04 ***
种植方式 P	1	0.43ns	0.00ns	0.05ns	4.59 *	0.12ns	3.57+
(土壤厚度+水分)× 种植方式 (T+W) × P	1	0.77ns	0.24ns	0.54ns	0.15ns	0.08ns	0.18ns
分母自由度 ddf denominator degrees of freedom		17	17	17	18	18	18

ns 未达到显著水平 ($P > 0.1$); + ($0.05 < P < 0.1$); * 显著水平 ($P < 0.05$); ** ($P < 0.01$) 和 *** ($P < 0.001$) 极显著水平

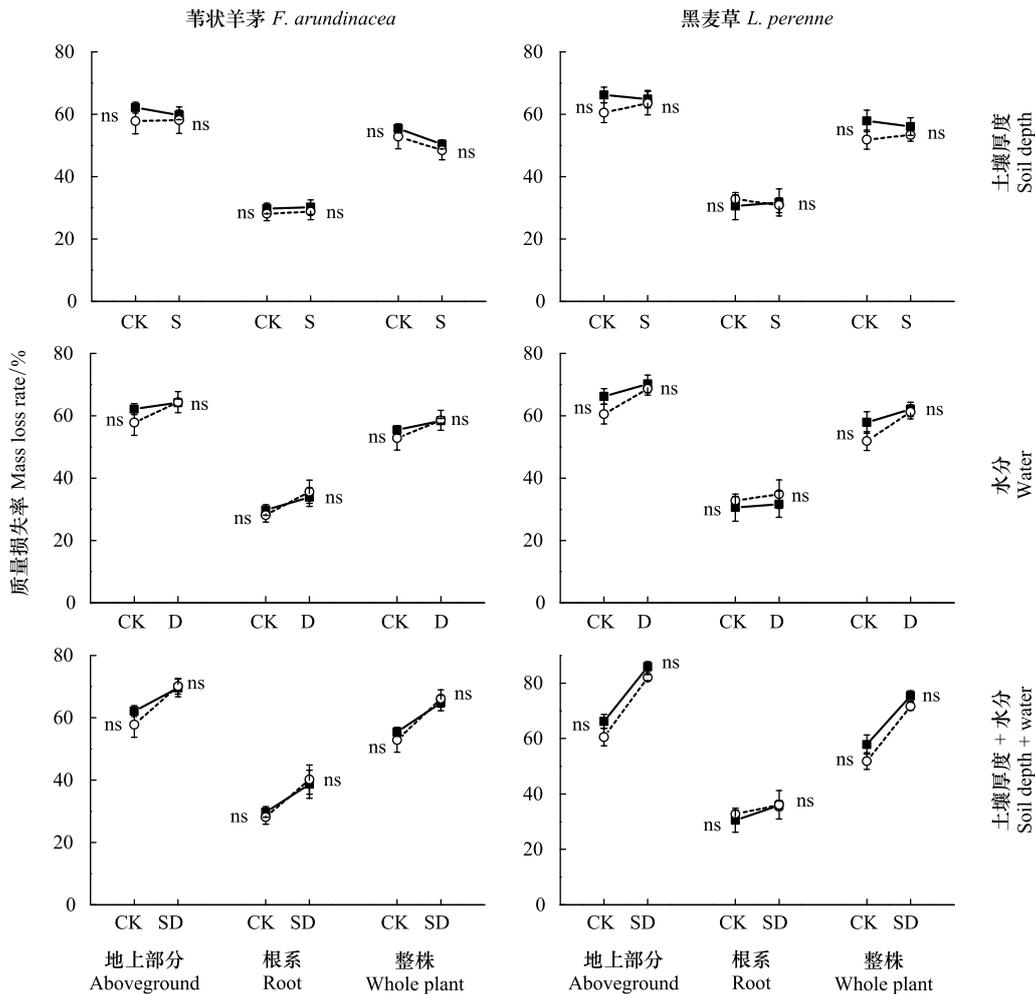


图2 生长期间不同土壤厚度、水分和种植方式对苇状羊茅和黑麦草凋落物质量损失率的影响(平均值±标准误)

Fig.2 Effect of soil thickness, water and planting pattern on litter mass loss rate of *F. arundinacea* and *L. perenne* during growing ($M \pm SE$)

ns/ *, 同一资源水平下单种和混种间差异显著性 (ns, $P > 0.05$; *, $P < 0.05$)

2.3 凋落物初始营养元素特征与质量损失率的相关关系

无论是单种还是混种, 苇状羊茅和黑麦草地上质量损失率与地上初始 N 含量显著正相关, 与地上 C/N 显

著负相关,而与地上 P 含量和 C/P 无显著相关关系(表 4)。

总体上来说,两物种的根系质量损失率与根系 N 含量和 C/N 有相关性,但均无显著性,而与根系 P 含量和 C/P 均无显著差异(苇状羊茅混种除外)(表 4)。

两物种总质量损失率与总 N 含量呈显著正相关,与总 C/N 显著相关,而与总 P 含量和总 C/P 无显著相关关系(表 4)。

表 4 苇状羊茅和黑麦草凋落物营养元素指标与质量损失率的关系

Table 4 Correlations of litter nutrient traits with total mass loss rate in *F. arundinacea* and *L. perenne*

物种 Species	相关系数 Correlation coefficient (R)	地上部分 Aboveground part		根系 Root		整株 Whole plant	
		单种 M _o	混种 M _i	单种 M _o	混种 M _i	单种 M _o	混种 M _i
		Monoculture	Mixture	Monoculture	Mixture	Monoculture	Mixture
苇状羊茅 <i>F. arundinacea</i>	质量损失率-氮含量	0.53 *	0.61 **	0.31ns	0.24ns	0.77 ***	0.76 ***
	质量损失率-磷含量	-0.22ns	0.01ns	0.02ns	-0.62 *	-0.18ns	0.07ns
	质量损失率-碳氮比	-0.52 *	-0.58 *	-0.08ns	-0.32ns	-0.77 ***	-0.73 ***
	质量损失率-碳磷比	0.26ns	-0.14ns	0.02ns	0.57 *	0.04ns	0.09ns
黑麦草 <i>L. perenne</i>	质量损失率-氮含量	0.68 **	0.48 **	0.18ns	0.21ns	0.70 **	0.68 **
	质量损失率-磷含量	0.18ns	0.06ns	-0.19ns	0.15ns	-0.01ns	0.05ns
	质量损失率-碳氮比	-0.65 **	-0.37ns	-0.06ns	-0.24ns	-0.59 **	-0.69 **
	质量损失率-碳磷比	-0.31ns	-0.03ns	0.18ns	0.02ns	0.30ns	0.67 **

ns 未达到显著水平($P > 0.1$);+($0.05 < P < 0.1$);* 显著水平($P < 0.05$);**($P < 0.01$)和***($P < 0.001$)极显著水平

2.4 凋落物产量、组分与质量损失率的相关关系

苇状羊茅地上、根系和总质量损失率在单种和混种下分别与地上凋落量、根凋落量和总凋落量呈负相关,但仅地上和总质量损失率在单种时,根质量损失率在混种时与对应的凋落量呈显著或稍显著负相关关系(表 5)。对于黑麦草而言,无论在单种还是混种下,其地上、根系和总的的质量损失率分别与地上凋落量、根凋落量和总凋落量呈显著负相关关系(表 5)。

无论单种还是混种,苇状羊茅凋落物总质量损失率与地上组分比显著正相关,地上质量损失率仅在单种时与地上组分比显著正相关,根质量损失率与根组分比无显著相关性(表 5)。

黑麦草总质量损失率与地上组分比呈正相关性,但仅在混种时有显著差异。无论单种还是混种,黑麦草地上质量损失率与地上组分比,根质量损失率与根组分比均无显著相关性(表 5)。

表 5 苇状羊茅和黑麦草凋落物量和组分比与质量损失率的关系

Table 5 Correlations of litter production and component ratio with mass loss rate in *F. arundinacea* and *L. perenne*

相关系数 Correlation coefficient (R)	苇状羊茅 <i>F. arundinacea</i>		黑麦草 <i>L. perenne</i>	
	单种 M _o	混种 M _i	单种 M _o	混种 M _i
	Monoculture	Mixture	Monoculture	Mixture
地上质量损失率-地上凋落物量 Aboveground mass loss rate-Aboveground litter production	-0.44+	-0.40ns	-0.57 *	-0.61 **
根质量损失率-根凋落物量 Root mass loss rate-Root litter production	-0.36ns	-0.44+	-0.51 *	-0.53 *
总质量损失率-总凋落物量 Total mass loss rate-Total litter production	-0.51 *	-0.40ns	-0.57 *	-0.58 **
总质量损失率-地上组分比 Total mass loss rate-Aboveground component ratio	0.71 ***	0.62 **	0.37ns	0.48 *
地上质量损失率-地上组分比 Aboveground mass loss rate-Aboveground component ratio	0.51 *	0.36ns	0.22ns	0.26ns
根质量损失率-根组分比 Root mass loss rate-Root component ratio	-0.30ns	-0.14ns	0.14ns	0.17ns

ns 未达到显著水平($P > 0.1$);+($0.05 < P < 0.1$);* 显著水平($P < 0.05$);**($P < 0.01$)和***($P < 0.001$)极显著水平

3 讨论

凋落物的元素含量及其化学计量比是影响凋落物分解的重要指标之一,能够很好的预测凋落物分解的快慢^[25-26]。有些研究发现,凋落物初始 N 含量与凋落物分解速率呈正相关,与 P 含量无相关性^[27-28]。而有研究认为,凋落物分解速率与 P 含量相关,而与 N 含量没有相关性^[29-30]。另有研究发现,凋落物分解速率与 N 和 P 含量均呈正相关^[26,31]。对于元素计量比的研究发现,凋落物分解速率可能仅与 C/N^[27-28,32],或 C/N 和 C/P^[33]呈负相关关系。本研究中,两物种凋落物的地上质量损失率与初始地上 N 含量呈显著正相关,与 C/N 呈显著负相关,与 P 和 C/P 无显著相关性,且总质量损失率与地上质量损失率类似。这表明两物种凋落物分解主要受初始 N 含量和 C/N 的影响,凋落物 N 含量越高,C/N 越低,分解越快,这也与前人的研究一致^[27-28]。然而,在本研究中,两物种凋落物的根质量损失率与初始元素含量和计量比值无显著差异。这可能是由于两物种根系分解较慢,经过 7 个月分解,两物种的质量损失率为 30% 左右,导致根系元素指标与根系凋落物分解没有显著相关性。

研究发现,凋落物输入量(产量)的增加,相当于更大的不稳定 C 组分和可利用养分的输入增加,可能刺激微生物活动,进而加快凋落物分解速率^[3,10,34]。本研究中,在单种和混种下,苇状羊茅和黑麦草的初始地上凋落量与地上质量损失率,根凋落量与根质量损失率,总凋落量与总质量损失率均呈负相关关系,这表明两物种各组分初始凋落物量越小,其质量损失率越大,分解越快,这与前人的研究相反^[10,34]。我们发现前人研究中,所使用试验材料中凋落物质量一样,仅其凋落物数量(产量)增加,进而提高微生物活动,导致分解速率的增加^[10,34];而在本研究中,水分和土壤厚度+水分资源减少(浅土组和浅土+干旱组)时,两种植物的各组分凋落量减少,但是其 N 含量显著增加,C/N 显著降低,这可能是导致其分解加快的重要原因之一。另一方面也说明,相比与凋落物的数量,凋落物的质量(如元素含量和计量比)更是影响凋落物分解快慢的决定因素。

无论是单种还是混种,苇状羊茅和黑麦草凋落物的地上组分比与总质量损失率呈极显著正相关关系,这表明地上凋落物产量越多,两物种凋落物的总质量损失率越大,分解越快。我们发现两物种地上部分凋落物质量损失率是根系的 2—3 倍,地上凋落物比根系凋落物分解快,导致地上部分凋落物量越多,总质量损失越大。有研究表明,草本植物地上凋落物比根系凋落物分解快^[35-36],也有些研究发现,草本植物根系凋落物要比地上凋落物分解快^[37]。而本研究中导致两物种地上凋落物分解快于根系的原因可能有两个方面:首先,两物种的地上凋落物 N 含量是根系的 2—3 倍,而 C/N 显著低于根系,地上部分凋落物含有高的 N 含量和较低 C/N 导致其分解速率高于根系(数据未给出)。其次,有研究发现,植物根系中酸不溶物(如木质素、角质等)和多酚类物质高于叶片,导致根系分解较慢^[36,38]。本研究中,两物种在单种和混种下地上质量损失率与地上组分比(苇状羊茅单种除外),根质量损失率与根组分比无显著相关性。这表明地上或根系凋落物组分比对地上或根系分解无显著影响。我们发现,两物种的地上组分比(苇状羊茅单种除外)和根组分比随着所有资源的减少大体上无显著变化,这可能是导致地上和根系质量损失率与对应的凋落量无显著关系的主要原因。

与对照组相比,苇状羊茅和黑麦草凋落物的地上、根系和总质量损失率在浅土组无显著变化,而两物种的地上、根系和总质量损失在干旱组和浅土+干旱组显著或稍增加。这表明生长期间干旱和浅土+干旱处理加快落物分解,且双重胁迫比两者单独胁迫更能加快两物种各组分凋落物的分解。另一方面,在各资源水平下(CK、S、D、SD),两物种的地上、根系和总的凋落物质量损失率在单种和混种间无显著差异。这表明生长期间不同种植方式处理对两物种的各组分凋落物分解没有显著影响。而两物种各组分凋落物的元素含量、计量比、产量和组分比以及它们与质量损失率的相关系数在单种和混种下大体上也无显著差异,导致两物种凋落物质量损失率在单种和混种间无显著差异。Aerts 和 Heil^[39]研究发现,在荷兰石楠灌丛中,生长在低养分环境中的杜鹃科植物 *Erica tetralix* 和欧石楠 (*Calluna vulgaris*) 被能产生更多凋落物,且分解快、养分释放多的禾本科植物酸沼草 (*Molinia caerulea*) 和曲芒发草 (*Deschampsia flexuosa*) 替代。本实验中,我们发现苇状羊茅凋

落物产量和元素积累量显著的高于黑麦草,但其总质量损失率显著低于黑麦草。从长远来看,两物种均有可能获胜或共存。有研究发现,容易分解的凋落物(如小檗属植物)可以相对快速增加土壤养分的可利用性,能够通过将地下竞争转移到地上竞争来影响植物间的竞争^[40-41]。我们前期研究发现,土壤厚度和水分资源减少时,混种苇状羊茅和黑麦草使得两物间的根竞争加剧,而地上竞争无影响^[39]。因此,本研究中,黑麦草的凋落物分解快于苇状羊茅,可能导致未来两物种间的竞争由地下竞争转移到地上竞争。

4 结论

生长期间干旱和浅土+干旱处理能够通过影响苇状羊茅和黑麦草的初始凋落物质量、产量、组比分加快地上、根系和总凋落物分解,而不同种植方式因未显著改变两物种凋落物的质量、产量和组比分对其分解无显著影响,其中,凋落物 N 含量和 C/N 是影响两物种凋落物分解快慢的主要原因。未来随着我国西南地区降雨的减少和喀斯特石漠化的加剧,优先考虑苇状羊茅和黑麦草的种植,可能有利于当地养分循环,维持土力稳定。

参考文献 (References):

- [1] 韩学勇, 赵凤霞, 李文友. 森林凋落物研究综述. 林业科技情报, 2007, 39(3): 12-13, 16-16.
- [2] Xiong S J, Nilsson C. The effects of plant litter on vegetation: a meta-analysis. *Journal of Ecology*, 1999, 87(6): 984-994.
- [3] Sayer E J. Using experimental manipulation to assess the roles of leaf litter in the functioning of forest ecosystems. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 2006, 81(1): 1-31.
- [4] 曲浩, 赵学勇, 赵哈林, 王少昆. 陆地生态系统凋落物分解研究进展. 草业科学, 2010, 27(8): 44-51.
- [5] Enríquez S, Duarte C M, Sand-Jensen K. Patterns in decomposition rates among photosynthetic organisms: the importance of detritus C:N:P content. *Oecologia*, 1993, 94(4): 457-471.
- [6] 刘文丹. 两种土壤基质中木本植物凋落物分解特性比较[D]. 重庆: 西南大学, 2014.
- [7] Bohlen P J, Parmelee R W, McCartney D A, Edwards C A. Earthworm effects on carbon and nitrogen dynamics of surface litter in corn agroecosystems. *Ecological Applications*, 1997, 7(4): 1341-1349.
- [8] 李海涛, 于贵瑞, 李家永, 梁涛, 陈永瑞. 井冈山森林凋落物分解动态及磷、钾释放速率. 应用生态学报, 2007, 18(2): 233-240.
- [9] Zhang D Q, Hui D F, Luo Y Q, Zhou G Y. Rates of litter decomposition in terrestrial ecosystems: global patterns and controlling factors. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 1(2): 85-93.
- [10] Fang X, Zhao L, Zhou G Y, Huang W J, Liu J X. Increased litter input increases litter decomposition and soil respiration but has minor effects on soil organic carbon in subtropical forests. *Plant and Soil*, 2015, 392(1/2): 139-153.
- [11] Zak D R, Holmes W E, Finzi A C, Norby R J, Schlesinger W H. Soil nitrogen cycling under elevated CO₂: a synthesis of forest face experiments. *Ecological Applications*, 2003, 13(6): 1508-1514.
- [12] 于雯超, 赵建宁, 李刚, 修伟明, 张贵龙, 杨殿林. 内蒙古贝加尔针茅草原 3 种主要植物凋落物分解特征. 草地学报, 2014, 22(3): 502-510.
- [13] 马祥庆, 刘爱琴, 何智英. 杉木幼林生态系统凋落物及其分解作用研究. 植物生态学报, 1997, 21(6): 564-570.
- [14] 赵雅洁, 李周, 宋海燕, 张静, 梁千慧, 刘锦春. 喀斯特地区土壤厚度降低和水分减少对两种草本植物混种后光合的影响. 草业科学, 2017, 34(7): 1475-1486.
- [15] 刘长成, 刘玉国, 郭柯. 四种不同生活型植物幼苗对喀斯特生境干旱的生理生态适应性. 植物生态学报, 2011, 35(10): 1070-1082.
- [16] 张中峰, 尤业明, 黄玉清, 李先琨, 张金池, 张德楠, 何成新. 模拟喀斯特生境条件下干旱胁迫对青冈栎苗木的影响. 生态学报, 2012, 32(20): 6318-6325.
- [17] Zhao Y J, Li Z, Zhang J, Song H Y, Liang Q H, Tao J P, Cornelissen J H C, Liu J C. Do shallow soil, low water availability, or their combination increase the competition between grasses with different root systems in karst soil? *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(11): 10640-10651.
- [18] Li Z, Liu J C, Zhao Y J, Song H Y, Liang Q H, Tao J P. Adaption of two grasses to soil thickness variation under different water treatments in a karst region. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(5): 298-306.
- [19] He M Z, Dijkstra F A. Drought effect on plant nitrogen and phosphorus: a meta-analysis. *New Phytologist*, 2014, 204(4): 924-931.
- [20] Sánchez-Rodríguez E, del Mar Rubio-Wilhelmi M, Cervilla L M, Blasco B, Ríos J J, Leyva R, Romero L, Ruiz J M. Study of the ionome and

- uptake fluxes in cherry tomato plants under moderate water stress conditions. *Plant and Soil*, 2010, 335(1/2): 339-347.
- [21] 尹能文, 李加纳, 刘雪, 练剑平, 付春, 李威, 蒋佳怡, 薛雨飞, 王君, 柴友荣. 高温干旱下油菜的木质化应答及其在茎与根中的差异. *作物学报*, 2017, 43(11): 1689-1695.
- [22] 郭柯, 刘长成, 董鸣. 我国西南喀斯特植物生态适应性与石漠化治理. *植物生态学报*, 2011, 35(10): 991-999.
- [23] 李馨, 熊康宁, 龚进宏, 陈永毕. 人工草地在喀斯特石漠化治理中的作用及其研究现状. *草业学报*, 2011, 20(6): 279-286.
- [24] 熊先勤, 李富祥, 韩永芬, 阮培均, 尚以顺. 贵州高寒山区优良牧草引种与评价. *种子*, 2010, 29(4): 90-94.
- [25] 李英滨, 李琪, 杨俊杰, 吕晓涛, 梁文举, 韩兴国. 模拟氮沉降对温带草原凋落物质量的影响. *生态学杂志*, 2016, 35(10): 2732-2737.
- [26] 林波, 刘庆, 吴彦, 何海. 森林凋落物研究进展. *生态学杂志*, 2004, 23(1): 60-64.
- [27] 张晓宁, 刘振亚, 李丽萍, 王行, 张贇, 孙梅, 肖德荣. 大气增温对滇西北高原典型湿地湖滨带优势植物凋落物质量衰减的影响. *生态学报*, 2017, 37(23): 7811-7820.
- [28] 陆晓辉, 丁贵杰, 陆德辉. 人工调控措施下马尾松凋落叶化学质量变化及与分解速率的关系. *生态学报*, 2017, 37(7): 2325-2333.
- [29] Hoorens B, Aerts R, Stroetenga M. Does initial litter chemistry explain litter mixture effects on decomposition? *Oecologia*, 2003, 137(4): 578-586.
- [30] Xuluc-Tolosa F J, Vester H F M, Ramirez-Marcial N, Castellanos-Albores J, Lawrence D. Leaf litter decomposition of tree species in three successional phases of tropical dry secondary forest in Campeche, Mexico. *Forest Ecology and Management*, 2003, 174(1/3): 401-412.
- [31] 葛晓改, 曾立雄, 肖文发, 黄志霖, 周本智. 三峡库区森林凋落叶化学计量学性状变化及与分解速率的关系. *生态学报*, 2015, 35(3): 779-787.
- [32] Mooshammer M, Wanek W, Schneckner J, Wild B, Leitner S, Hofhansl F, Blöchl A, Hämmerle I, Frank A H, Fuchslueger L, Keiblinger K M, Zechmeister-Boltenstern S, Richter A. Stoichiometric controls of nitrogen and phosphorus cycling in decomposing beech leaf litter. *Ecology*, 2012, 93(4): 770-782.
- [33] 李雪峰, 韩士杰, 胡艳玲, 赵玉涛. 长白山次生针阔混交林叶凋落物中有机物分解与碳、氮和磷释放的关系. *应用生态学报*, 2008, 19(2): 245-251.
- [34] Liu L L, King J S, Booker F L, Giardina C P, Allen H L, Hu S J. Enhanced litter input rather than changes in litter chemistry drive soil carbon and nitrogen cycles under elevated CO₂: a microcosm study. *Global Change Biology*, 2009, 15(2): 441-453.
- [35] 李文亚, 邱璇, 白龙, 杨殿林. 氮、磷添加对贝加尔针茅草原凋落物分解的影响. *草业学报*, 2017, 26(8): 43-53.
- [36] Fujii S, Takeda H. Dominant effects of litter substrate quality on the difference between leaf and root decomposition process above- and belowground. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(12): 2224-2230.
- [37] 刘忠宽, 汪诗平, 韩建国, 陈佐忠. 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. *草业学报*, 2005, 14(1): 24-30.
- [38] Ostertag R, Hobbie S E. Early stages of root and leaf decomposition in Hawaiian forests: effects of nutrient availability. *Oecologia*, 1999, 121(4): 564-573.
- [39] Aerts R, Heil G W. *Heathlands: Patterns and Processes in a Changing Environment*. The Netherlands: Kluwer Academic Publisher, 1993.
- [40] Wilson S D, Tilman D. Component of plant competition along an experimental gradient of nitrogen availability. *Ecology*, 1991, 72(3): 1050-1065.
- [41] Elgersma K J, Yu S, Vor T, Ehrenfeld J G. Microbial-mediated feedbacks of leaf litter on invasive plant growth and interspecific competition. *Plant and Soil*, 2012, 356(1/2): 341-355.