



# 切根对羊草营养生长期内植物功能性状的影响

代景忠<sup>1</sup> 白玉婷<sup>2</sup> 卫智军<sup>3</sup> 张 楚<sup>4</sup> 闫瑞瑞<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>铜仁学院农林工程与规划学院, 贵州铜仁 554300; <sup>2</sup>滨州学院山东省黄河三角洲生态环境重点实验室, 山东滨州 256603; <sup>3</sup>内蒙古农业大学草原与资源环境学院, 呼和浩特 010019; <sup>4</sup>中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081

**摘 要** 该研究以呼伦贝尔羊草(*Leymus chinensis*)草甸草原割草场为研究对象, 通过对羊草营养生长期内功能性状变化的观测, 研究切根对羊草叶、茎、植株功能性状的影响, 为干扰状态下羊草植株的响应机制和天然割草场植被的恢复提供参考。运用9QP-830型草地破土切根机对草地进行切根处理, 分期测定羊草单株高度、叶长、自然叶宽、展开叶宽、茎粗、茎长、叶质量、茎质量、单株质量等多个功能性状, 通过统计分析切根前后性状的差异, 拟合其变化方程, 探索影响羊草产量的表型性状和质量性状的驱动因子。研究结果显示: (1)切根显著降低了羊草的比叶面积、总叶质量、茎长/茎粗、茎干物质含量, 显著提高了平均叶长和叶面积, 整体上提高了单株质量、株高和植株干物质含量。(2)对照和切根羊草叶、茎功能性状均呈二次曲线变化, 拟合效果达显著或极显著水平。除叶干物质含量、茎干物质含量和茎长/茎粗外, 其余叶、茎功能性状均呈先升高后降低的变化趋势。(3)除叶片数外, 羊草各表型性状之间均呈极显著的正相关关系, 叶质量、茎质量、单株质量之间呈极显著的正相关关系, 比叶面积与质量性状关系不显著。(4)总叶长和总叶质量分别是羊草单株质量表型性状和质量性状之中的最大驱动因子。羊草功能性状间存在协同变化的关系, 切根一定程度上使羊草地上植株的生活史提前。

**关键词** 切根; 羊草; 功能性状; 营养生长期; 驱动因子; 生活史

代景忠, 白玉婷, 卫智军, 张楚, 闫瑞瑞 (2021). 切根对羊草营养生长期内植物功能性状的影响. 植物生态学报, 45, 1292-1302. DOI: 10.17521/cjpe.2021.0230

## Effects of root-cutting in the vegetative phase on plant functional traits of *Leymus chinensis*

DAI Jing-Zhong<sup>1</sup>, BAI Yu-Ting<sup>2</sup>, WEI Zhi-Jun<sup>3</sup>, ZHANG Chu<sup>4</sup>, and YAN Rui-Rui<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>College of Agriculture and Forestry Engineering and Planning, Tongren University, Tongren, Guizhou 554300, China; <sup>2</sup>Shandong Key Laboratory of Eco-Environmental Science for Yellow River Delta, Binzhou University, Binzhou, Shandong 256603, China; <sup>3</sup>College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China; and <sup>4</sup>Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

### Abstract

**Aims** We investigated root-cutting impacts on functional traits of leaves and stems of *Leymus chinensis* in the vegetative phase in a meadow in Hulun Buir. The aims are to understand the response mechanism of *L. chinensis* under the disturbance and to provide a references for the restoration of natural mowing grasslands.

**Methods** A ground intrusive root-cutting machine (9QP-830) was used to cut roots of *L. chinensis* in May 2014. Since July 2015, we took plants to measure single plant height, leaf length, natural leaf width, spread leaf width, stem diameter, stem length, leaf mass and stem mass at an interval of 15 days until the end of August. Then statistical analysis was applied for the impacts of the treatment on the traits and driving factors to affect phenotypic and qualitative traits of the plant.

**Important findings** (1) Root-cutting significantly decreased specific leaf area, total leaf mass, stem length/stem diameter, stem dry matter fraction, and significantly increased average leaf length and leaf area. Therefore, it increased individual plant mass, dry matter fraction and height. (2) Dynamics of the traits for both control and treatment followed a quadratic curve. (3) All the phenotypic traits except for the number of leaves in a plant were significantly positively correlated with each other. Leaf mass, stem mass and individual plant mass were

收稿日期Received: 2021-06-21 接受日期Accepted: 2021-07-25

基金项目: 国家重点研发项目(2021YFF0703904)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y2020YJ19和1610132021016)和国家农业科技创新联盟建设-农业基础性长期性科技工作(NAES037SQ18)。Supported by the National Key R&D Program of China (2021YFF0703904), the Fundamental Research Funds for Central Non-profit Scientific Institution (Y2020YJ19 and 1610132021016), and the Construction of Agricultural Science and Technology Innovation Alliance-Agriculture Basic Long-Term Scientific and Technological Work (NAES037SQ18).

\* 通信作者Corresponding author (yanrui@caas.cn)

significantly positively correlated with each other, whilst specific leaf area was not significantly correlated with the rest of the quantitative traits. (4) Total leaf length and total leaf mass were the greatest driving factors for aboveground biomass among the phenotypic and quantitative traits, respectively. Root-cutting can advance the life history of plant aboveground to some extent.

**Key words** root-cutting; *Leymus chinensis*; functional traits; vegetative phase; driving factor; life history

Dai JZ, Bai YT, Wei ZJ, Zhang C, Yan RR (2021). Effects of root-cutting in the vegetative phase on plant functional traits of *Leymus chinensis*. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 45, 1292-1302. DOI: 10.17521/cjpe.2021.0230

植物功能性状一直是国内外学者广泛关注和研究的热点(张增可等, 2020)。它被定义为植物在个体水平上通过影响生长、繁殖和存活能力从而间接地影响其适合度的形态、生理以及生活史特征(Violle *et al.*, 2007)。各个功能性状之间相互联系、相互作用, 将环境、植物个体和生态系统结构、过程与功能有效地结合起来, 并在植物功能生态学研究发挥重要作用(周道玮, 2009; 王平等, 2010)。随着研究的深入, 学者们发现许多生态学问题能够从植物功能性状角度得到较好的解释(王晶等, 2019), 而且功能性状容易测定且相对稳定(Flynn *et al.*, 2011), 利用其表征生态系统功能的指示作用(雷羚洁等, 2016)及各因子间相互关系在各植物种群和群落中所具有的相似格局, 很容易将微小尺度上的研究结果扩展到群落、区域乃至全球尺度(Donovan *et al.*, 2011)。因此, 相比大多数基于植物分类和数量的研究, 植物功能性状在种群、群落和生态系统尺度上逐渐成为解决重要生态学问题的可靠途径(孟婷婷等, 2007; 韩涛涛等, 2021)。

切根作为羊草(*Leymus chinensis*)草地一种有效的改良方式在生产实践中得到广泛应用, 它主要是利用机械等手段切断羊草地下根茎, 达到刺激根系生长和更新的目的(董鸣, 2011)。近几年, 关于草地切根的研究逐渐增多, 研究范围也涉及多方面, 如切根对羊草种群和群落多样性的影响(乌仁其其格等, 2011; 高若凡等, 2019), 对羊草根、茎、叶营养元素和光合特性的影响(曹杰, 2014; 王欢等, 2018; 齐丽雪, 2019), 对土壤理化性质和矿化速率的影响(高志成等, 2017; 秦燕等, 2019), 对土壤微生物量及酶活性的影响(代景忠, 2016)等。虽然, 切根可以促进植物根茎分蘖和繁殖(Crowley *et al.*, 2005), 提高植株数量(张佳良等, 2017), 进而提升羊草群落初级生产力的观点已基本得到认同, 但切根可能通过影响羊草单株叶、茎等功能性状而使个体质量发生改变的研究还鲜有涉及, 尤其是切根后羊草叶、茎

等功能性状的持续响应及生长期内功能性状对羊草个体质量影响的研究还未见报道。因此, 本研究以呼伦贝尔草甸草原优势种羊草为对象, 对切根后羊草地上植株各功能性状进行研究, 进而解决以下问题: (1)羊草叶、茎等功能性状对切根处理的差异化响应; (2)羊草营养生长期内叶、茎等功能性状的变化规律及彼此联系; (3)功能性状中影响个体质量的主要驱动因子; 从而为干扰状态下羊草功能性状的动态响应研究及天然割草场羊草种群的恢复提供理论参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区域概况

试验地位于中国农业科学院呼伦贝尔草原生态系统国家野外科学观测研究站附近(49.39° N, 120.05° E, 海拔627–635 m)。该地区属于中温带半干旱大陆性气候, 年平均气温-2.4 °C, 最高、最低气温分别为36.17和-48.5 °C, 年积温1 580–1 800 °C, 无霜期110天; 年降水量约350 mm, 多集中在7–9月且变率较大。土壤为暗栗钙土, 植被为羊草草甸草原, 主要建群种和优势种为羊草, 亚优势种为狼针草(*Stipa baicalensis*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*), 伴生种有寸草(*Carex duriuscula*)、山野豌豆(*Vicia amoena*)、细叶白头翁(*Pulsatilla turczaninowii*)等。

### 1.2 试验设计和数据获取

选取割草利用超过20年的固定草场作为试验场地, 于2013年8月进行围封并划分试验小区。采用随机区组设计, 于2014年5月1日使用9QP-830型草地破土切根机对部分试验小区进行切根处理, 切根深度15 cm, 切根面积为30 cm × 30 cm, 呈网格状(其他详见代景忠, 2016)。根据研究目的, 采样时间定在羊草主要营养生长期(王仁忠和祖元刚, 2001)。于2015年7月1日起至8月30日, 每隔15天采集1次对照区(CK)和切根区(CR)共6个小区内的羊草地上数

据,共采集5次。数据收集方式具体如下:根据小区长宽,在每个小区均匀地选取15株羊草样品,齐地面刈割,放入冰盒带回实验室。每次收集羊草样本90株(2种处理×3次重复×15株/区)。用分析天平称取每株羊草鲜质量( $PFM$ , g),用直尺测量株高( $PH$ , cm)。随后用剪刀将羊草分解,记录每株羊草叶片数( $LN$ ),用直尺测量每株羊草所有叶片长度之和,然后取平均值,即平均叶长( $LL$ , cm),用电子游标卡尺测量自然叶宽(最宽部位,  $NLW$ , mm)、展开叶宽(最宽部位,  $ALW$ , mm)、茎粗(茎最粗和最细部位的平均值,  $SW$ , mm)。然后用直尺测量茎长(剪下所有叶片之后茎的长度,  $SL$ , cm),称取叶鲜质量( $LFM$ , g)、茎鲜质量( $SFM$ , g)。最后将茎、叶分株整理放入65℃下烘干至恒质量,测定单叶质量( $LWM$ , g)、茎质量( $SM$ , g)。

羊草其他功能性状指标:总叶长( $LTL$ , cm) =  $LL \times LN$ ; 展开叶面积,简称“展叶面积”( $LA$ ,  $\text{cm}^2$ ) =  $ALW \times LL \times 6.555$  (李亚军等, 2009)、叶长/自然叶宽( $NLR = LL/NLW$ )、叶长/展开叶宽( $ALR = LL/ALW$ )、茎长/茎粗( $SLWR = SL/SW$ )、总叶质量( $TLM = LWM \times LN$ , g)、展开叶宽与自然叶宽差,简称“展自叶差”( $AMN = ALW - NLW$ , cm)、茎质量/总

叶质量( $SLR = SM/TLM$ )、单株质量,即地上生物量( $AB = TLM + SM$ , g)、叶干物质含量( $LDMC = LWM/LFM$ ,  $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )、茎干物质含量( $SDMC = SM/SFM$ ,  $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )、单株干物质含量( $PDMC = AB/PFM$ ,  $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )、比叶面积( $SLA = LA/LWM$ ,  $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )。

### 1.3 数据处理

采用SPSS 26对数据进行分析。运用独立样本 $t$ 检验方法比较切根前后羊草功能性状的差异显著性,数据以平均值±标准误表示;利用Pearson相关法分析各功能性状之间的相关性,在0.05水平进行双尾检验;用回归分析中曲线估算拟合羊草功能性状的生长方程,标注拟合度,并在0.05水平进行显著性检验;运用偏最小二乘回归(PLSR)方法计算投影中各功能性状变量的重要性( $VIP$ ),并用各变量 $VIP$ 的百分比表示变量权重(Weight),即自变量对因变量的影响程度。采用Excel 2019进行数据整理和绘图。

## 2 结果和分析

### 2.1 羊草功能性状营养生长期内的差异和变化

#### 2.1.1 叶功能性状

切根对羊草叶功能性状作用明显(图1)。7月1

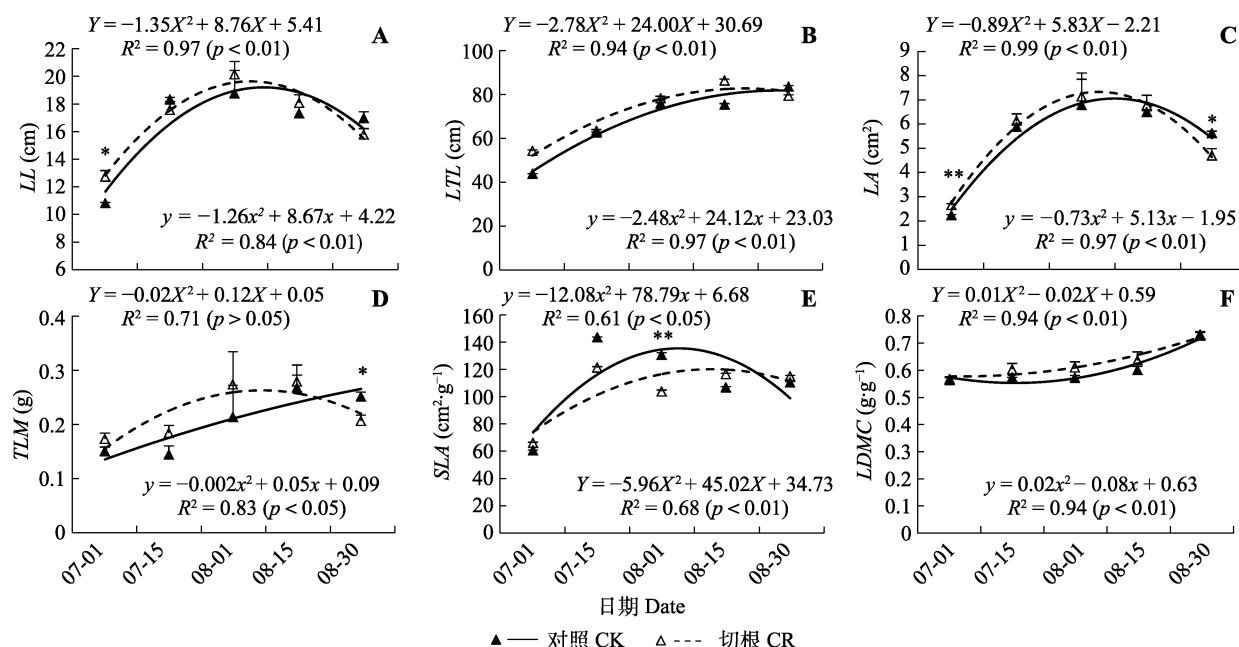


图1 羊草叶功能性状的差异和变化趋势(平均值±标准误)。LA, 展叶面积; LDMC, 叶干物质含量; LL, 平均叶长; LTL, 总叶长; SLA, 比叶面积; TLM, 总叶质量。y, 二次曲线拟合方程(对照); Y, 二次曲线拟合方程(切根)。\*\*、\*表示分别在0.01、0.05水平上差异显著(双尾检测)。

**Fig. 1** Dynamics of different leaf functional traits of *Leymus chinensis* without (CK) and with root-cutting (CR)(mean ± SE). LA, leaf area; LDMC, leaf dry matter fraction; LL, average leaf length; LTL, total leaf length; SLA, specific leaf area; TLM, total leaf mass. y, the quadratic curve fitting equation for CK; Y, the quadratic curve fitting equation for root-cutting. \*\* and \* indicate differences at the 0.01 and 0.05 level, respectively.

日, 平均叶长和展叶面积差异分别达显著和极显著水平(图1A、1C)。8月1日, 比叶面积差异显著(图1E)。8月30日, 展叶面积和总叶质量差异显著(图1C、1D), 整体上看, 切根对羊草比叶面积影响较大。

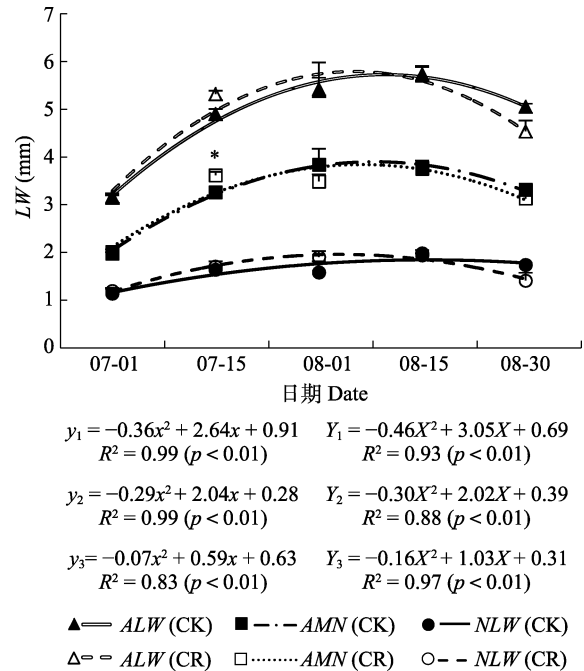
对照和切根处理羊草叶功能性状拟合效果明显, 除切根处理总叶质量外, 对照和切根处理平均叶长、总叶长、展叶面积、比叶面积、叶干物质含量均呈明显的二次曲线变化。其中, 对照总叶质量、比叶面积拟合达显著水平, 其余指标拟合均达极显著水平。通过对比, 切根处理平均叶长、叶面积、总叶质量普遍高于对照, 而比叶面积恰好与它们相反, 切根处理比叶面积普遍低于对照。营养生长期, 切根处理的总叶长和叶干物质含量始终高于对照区。

从变化趋势上看, 对照和切根处理平均叶长、展叶面积、总叶质量、比叶面积均呈现先增后减的趋势, 其中, 切根处理峰值出现在8月1日左右, 对照峰值出现在8月7日左右(图1A、1C–1E)。对照和切根处理总叶长一直处于增长趋势, 前期增长较快, 后期增长缓慢, 在8月30日左右达到高峰(图1B)。相反, 对照和切根处理叶干物质含量前期增长缓慢, 后期增长加快, 到8月30日, 叶干物质含量依然有增加的趋势(图1F)。

羊草营养生长期, 对照和切根处理“展自叶差”较大(图2), 展开叶宽是自然叶宽的2.66–3.43倍。整体看, 切根对羊草叶宽影响较小, 仅7月15日差异显著。同时, 对照和切根处理自然叶宽、展开叶宽、“展自叶差”曲线拟合均达极显著水平( $p < 0.01$ )。所有叶宽性状均呈现先增后减的变化趋势, 对照峰值均出现在8月10日左右, 切根处理峰值均在8月1日左右。8月15日以前, 切根处理自然叶宽、展开叶宽普遍高于对照处理。

### 2.1.2 茎功能性状

切根处理对茎功能性状影响明显(图3)。7月15日和8月1日, 茎长/茎粗、茎干物质含量差异分别达显著和极显著水平(图3C、3D), 茎长、茎粗差异不显著(图3A、3B)。除对照羊草茎长/茎粗外(图3C), 其余羊草茎功能性状均呈显著的二次曲线变化, 其中, 对照和切根处理茎长(图3A)和对照茎干物质含量(图3D)拟合达显著性水平( $p < 0.05$ ), 其余指标曲线拟合均达极显著性水平( $p < 0.01$ )。从变化趋势看, 对照和切根处理所有茎功能性状变化基本相



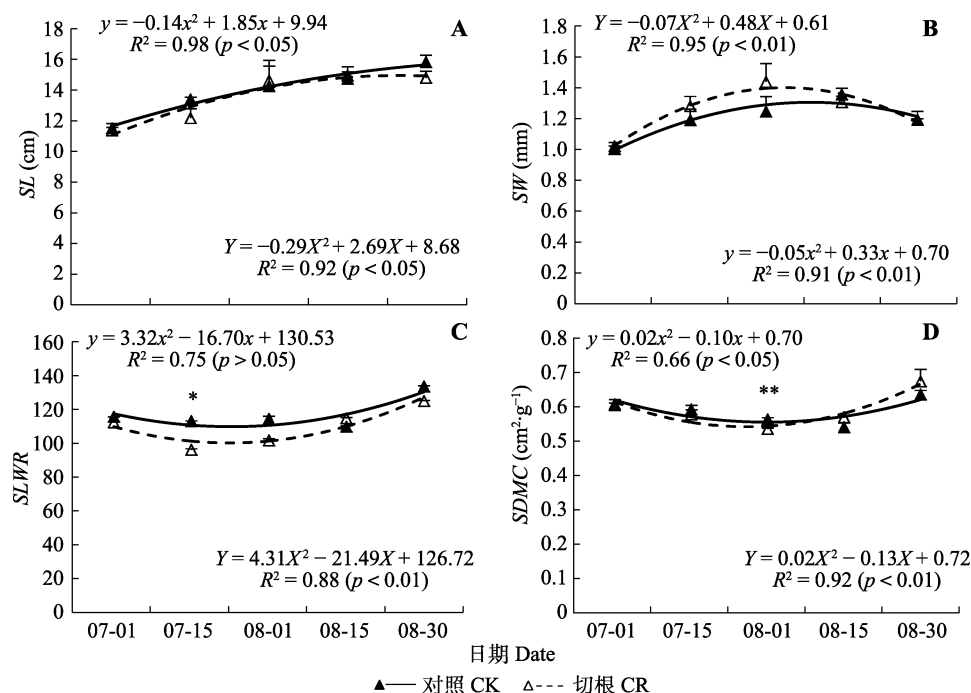
**图2** 羊草叶宽的差异及变化趋势(平均值±标准误)。ALW, 展开叶宽; AMN, 展自叶差; LW, 叶宽; NLW, 自然叶宽。y, 二次曲线拟合方程(对照, CK):  $y_1$ , 展开叶宽;  $y_2$ , 展自叶差;  $y_3$ , 自然叶宽。Y, 二次曲线拟合方程(切根, CR):  $Y_1$ , 展开叶宽;  $Y_2$ , 展自叶差;  $Y_3$ , 自然叶宽。\*表示在0.05水平上差异显著(双尾检测)。

**Fig. 2** Dynamics of leaf width of *Leymus chinensis* (mean ± SE). ALW, spread leaf width; AMN, difference between spread leaf width and natural leaf width; LW, leaf width. NLW, natural leaf width. y, the quadratic curve fitting equation for control (CK):  $y_1$ , spread leaf width;  $y_2$ , difference between spread leaf width and natural leaf width;  $y_3$ , natural leaf width. Y, the quadratic curve fitting equation for root-cutting (CR):  $Y_1$ , spread leaf width;  $Y_2$ , difference between spread leaf width and natural leaf width;  $Y_3$ , natural leaf width. \* indicate differences at the 0.05 level.

同。其中, 茎长一直处于增长的趋势, 对照峰值出现在8月30日以后, 切根处理峰值出现在8月15日左右(图3A); 茎粗呈现先升后降的趋势, 对照峰值出现在8月15日左右, 切根处理峰值出现在8月1日左右, 切根处理数值普遍高于对照(图3B); 茎长/茎粗呈先降后升的趋势, 对照和切根处理谷值均出现在7月20日左右(图3C); 茎干物质含量呈先降后升的趋势, 对照谷值出现在8月7日左右, 切根处理谷值出现在8月1日左右(图3D)。

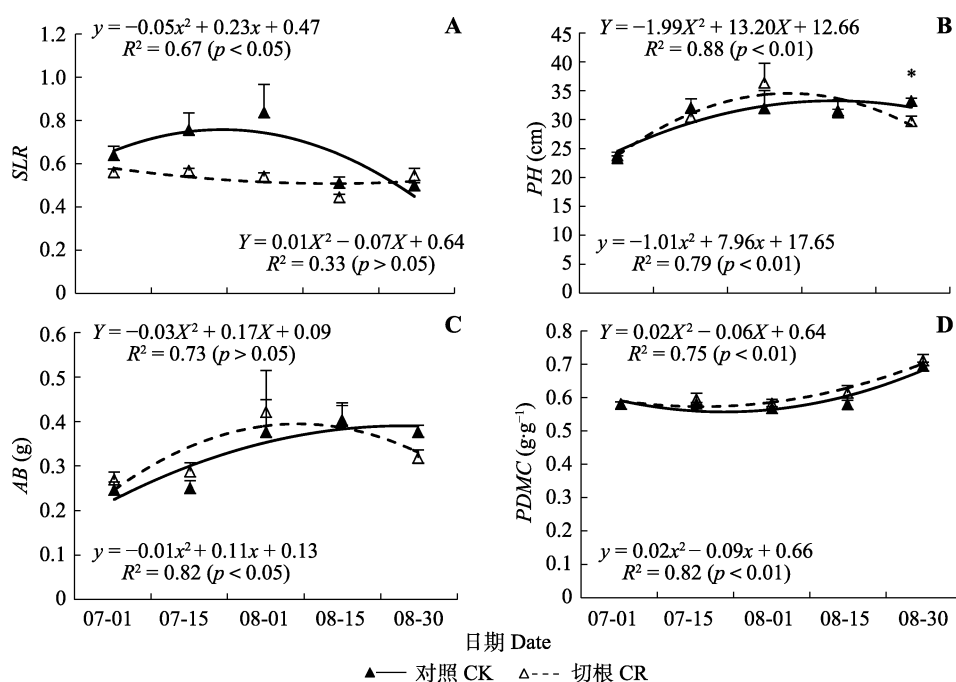
### 2.1.3 植株功能性状

切根对茎质量/总叶质量、单株质量、单株干物质含量影响不显著(图4A、4C、4D), 对8月30日羊草株高产生了显著的影响(图4B)。从曲线拟合看, 对照和切根处理株高和单株干物质含量均显著地呈



**图3** 羊草茎功能性状的差异及变化趋势(平均值 $\pm$ 标准误)。SDMC, 茎干物质含量; SL, 茎长; SLWR, 茎长/茎粗; SW, 茎粗。y, 二次曲线拟合方程(对照); Y, 二次曲线拟合方程(切根)。\*\*、\*表示分别在0.01、0.05水平上差异显著(双尾检测)。

**Fig. 3** Dynamics of different stem functional traits of *Leymus chinensis* (mean  $\pm$  SE). SDMC, stem dry matter fraction; SL, stem length; SLWR, stem length/stem diameter; SW, stem diameter. y, the quadratic curve fitting equation for control (CK); Y, the quadratic curve fitting equation for root-cutting (CR). \*\* and \* indicate differences at the 0.01 and 0.05 level, respectively.



**图4** 羊草植株功能性状的差异及变化趋势(平均值 $\pm$ 标准误)。AB, 单株质量; PDMC, 单株干物质含量; PH, 株高; SLR, 茎质量/总叶质量。y, 二次曲线拟合方程(对照); Y, 二次曲线拟合方程(切根)。\*表示在0.05水平上差异显著。

**Fig. 4** Dynamics of plant functional traits of *Leymus chinensis* (mean  $\pm$  SE). AB, aboveground biomass; PDMC, aboveground dry matter fraction; PH, plant height; SLR, stem mass/total leaf mass. y, the quadratic curve fitting equation for control (CK); Y, the quadratic curve fitting equation for root-cutting (CR). \* indicate significant correlation at the 0.05 level.

二次曲线变化( $p < 0.01$ )(图4B、4D)。同时, 对照茎质量/总叶质量、单株质量曲线拟合达显著性水平

( $p < 0.05$ )(图4A、4C)。从变化趋势看, 除茎质量/总叶质量外, 羊草株高、单株质量、单株干物质含量

的变化趋势相似(图4)。对照茎质量/总叶质量呈先增后减的趋势, 切根处理茎质量/总叶质量一直呈下降的趋势(图4A); 高度呈先增后减的趋势, 对照峰值出现在8月15日左右, 切根处理峰值出现在8月1日左右(图4B); 单株质量呈先升后降的趋势, 对照峰值出现在8月30日左右, 切根处理峰值出现在8月10日左右(图4C); 单株干物质含量均呈先降后升的趋势, 且8月30日以后仍有增长趋势, 对照谷值出现在7月20日左右, 切根处理谷值出现在7月15日左右(图4D)。

## 2.2 羊草表型性状和质量性状的关系

羊草营养生长过程中, 表型性状之间存在明显协同变化的关系(表1), 除叶片数外, 所有表型性状间均呈显著的正相关关系( $p < 0.01$ )。同时, 羊草叶、茎、植株的生物量性状之间同样存在协同变化的关系(表2), 单叶质量、总叶质量、茎质量、单株质量之间相互关系极显著( $p < 0.01$ )。叶干物质含量、茎

干物质含量、单株干物质含量之间相互关系均达显著性水平( $p < 0.05$ )。其中, 茎干物质含量与单叶质量呈极显著负相关关系( $p < 0.01$ )。羊草的比叶面积相对独立, 它与所有质量性状之间的相关系数均未达显著性水平( $p > 0.05$ )。

## 2.3 表型性状和质量性状对羊草单株质量的影响

通过PLSR分析各性状因子变量在第一潜在因子的VIP来判断各表型性状因子对羊草单株质量影响的程度。结果显示, 羊草营养生长过程中, 对照和切根处理的总叶长、自然叶宽、展叶面积、茎粗、茎长、株高的VIP均大于1, 表明它们是表型性状中羊草单株质量的主要驱动因子。其中, 总叶长对羊草单株质量影响最大(图5A)。同理可知, 对照和切根处理的茎质量、总叶质量、单叶质量的VIP均大于1, 而且远高于其他质量性状, 表明它们是质量性状中影响羊草单株质量的主要驱动因子。其中, 总叶质量对羊草单株质量影响最大(图5B)。

表1 羊草叶、茎表型性状之间的协同变化关系

Table 1 Regression coefficients between phenotypic traits of *Leymus chinensis*

	LN	LL	LTL	NLW	ALW	AMN	LA	SW	SL	PH
LN	1									
LL	0.01	1								
LTL	0.21	0.72**	1							
NLW	0.01	0.79**	0.72**	1						
ALW	-0.01	0.88**	0.76**	0.91**	1					
AMN	-0.02	0.88**	0.74**	0.82**	0.98**	1				
LA	-0.03	0.96**	0.77**	0.89**	0.97**	0.95**	1			
SW	0.11	0.80**	0.73**	0.84**	0.83**	0.78**	0.85**	1		
SL	0.14	0.63**	0.89**	0.61**	0.63**	0.60**	0.66**	0.68**	1	
PH	0.12	0.90**	0.81**	0.79**	0.82**	0.78**	0.89**	0.87**	0.81**	1

ALW, 展开叶宽; AMN, 展自叶差; LA, 展叶面积; LL, 平均叶长; LN, 叶片数; LTL, 总叶长; NLW, 自然叶宽; PH, 株高; SL, 茎长; SW, 茎粗。\*\*表示在0.01水平上相关性显著(双尾检测)。

ALW, spread leaf width; AMN, difference between spread leaf width and natural leaf width; LA, spread leaf area; LL, average leaf length; LN, leaf number; LTL, total leaf length; NLW, natural leaf width; PH, plant height; SL, stem length; SW, stem diameter. \*\* indicate significant correlation at the 0.01 level (two-tailed test).

表2 羊草质量性状之间的协同变化关系

Table 2 Regression coefficients between quantitative traits of *Leymus chinensis*

	LWM	TLM	SM	AB	LDMC	SDMC	PDMC	SLA
LWM	1							
TLM	0.87**	1						
SM	0.73**	0.76**	1					
AB	0.87**	0.98**	0.88**	1				
LDMC	0.01	0.27	-0.01	0.19	1			
SDMC	-0.48**	-0.23	-0.30	-0.27	0.594*	1		
PDMC	-0.14	0.14	-0.11	0.07	0.97**	0.78**	1	
SLA	0.09	0.04	0.22	0.10	0.20	-0.09	0.13	1

AB, 单株质量; LDMC, 叶干物质含量; LWM, 单叶质量; PDMC, 单株干物质含量; SDMC, 茎干物质含量; SLA, 比叶面积; SM, 茎质量; TLM, 总叶质量。\*、\*\*表示分别在0.01、0.05水平上相关性显著(双尾检测)。

AB, aboveground biomass; LDMC, leaf dry matter content; LWM, average leaf mass; PDMC, plant dry matter content; SDMC, stem dry matter content; SLA, specific leaf area; SM, stem mass; TLM, total leaf mass. \*\* and \* indicate significant correlation at the 0.01 and 0.05 level, respectively (two-tailed test).

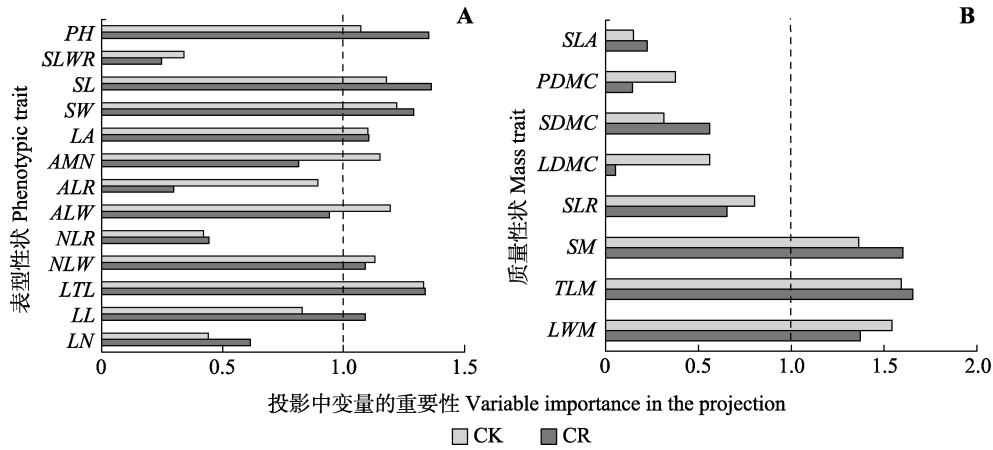


图5 羊草表型性状和质量性状对单株质量大小的影响。CK, 对照; CR, 切根。ALR, 叶长/展开叶宽; ALW, 展开叶宽; AMN, 展自叶差; LA, 展叶面积; LDMC, 叶干物质含量; LL, 平均叶长; LN, 叶片数; LTL, 总叶长; LWM, 单叶质量; NLR, 叶长/自然叶宽; NLW, 自然叶宽; PDMC, 单株干物质含量; PH, 株高; SDMC, 茎干物质含量; SL, 茎长; SLA, 比叶面积; SLR, 茎质量/总叶质量; SLWR, 茎长/茎粗; SM, 茎质量; SW, 茎粗; TLM, 总叶质量。

Fig. 5 Effects of phenotypic and mass traits of *Leymus chinensis*. CK, control; CR, root-cutting. ALR, LL/ALW; ALW, spread leaf width; AMN, difference between spread leaf width and natural leaf width; LA, spread leaf area; LDMC, leaf dry matter fraction; LL, average leaf length; LN, leaf number; LTL, total leaf length; LWM, average leaf mass; NLR, LL/NLW; NLW, natural leaf width; PDMC, plant dry matter fraction; PH, plant height; SDMC, stem dry matter fraction; SL, stem length; SLA, specific leaf area; SLR, SM/TLM; SLWR, SL/SW; SM, stem mass; SW, stem diameter; TLM, total leaf mass.

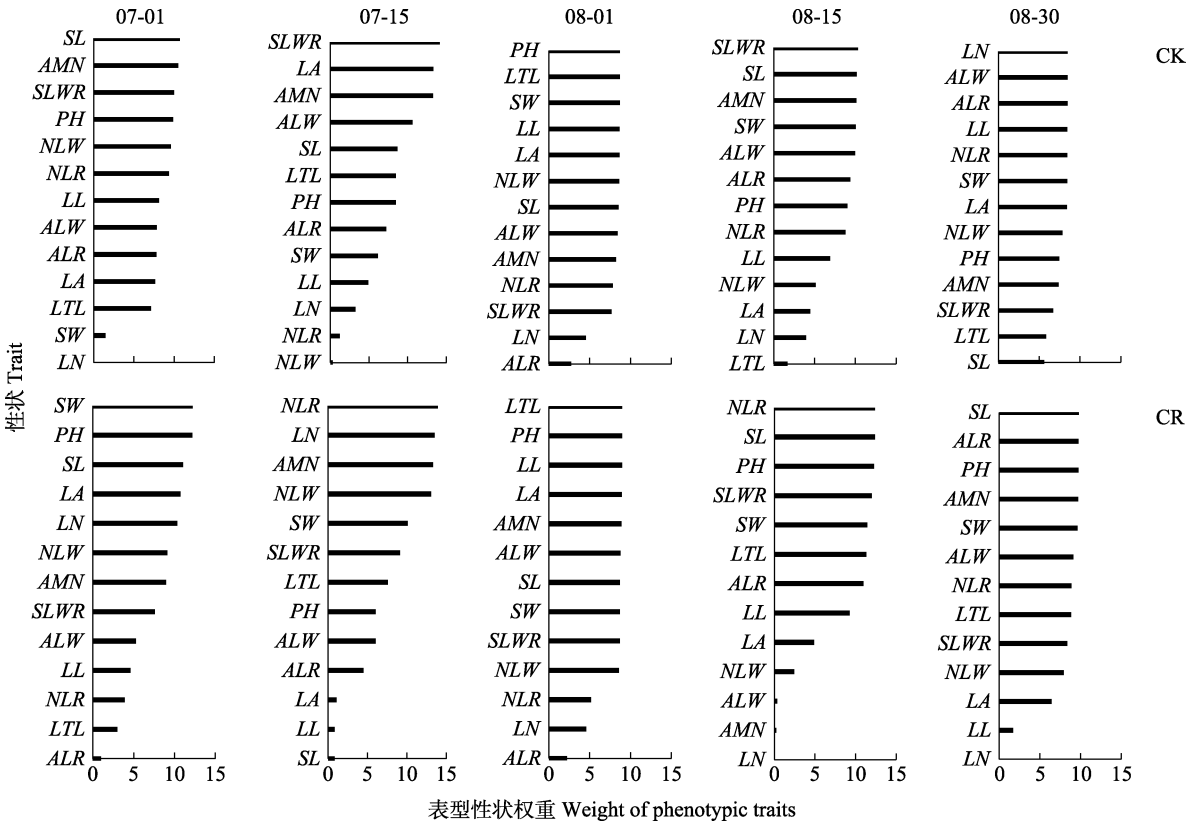


图6 不同生育期内羊草表型功能性状对单株质量的贡献率。CK, 对照; CR, 切根。ALR, 叶长/展开叶宽; ALW, 展开叶宽; AMN, 展自叶差; LA, 展叶面积; LL, 平均叶长; LN, 叶片数; LTL, 总叶长; NLR, 叶长/自然叶宽; NLW, 自然叶宽; PH, 株高; SL, 茎长; SLWR, 茎长/茎粗; SW, 茎粗。

Fig. 6 Weighting factors of phenotypic functional traits to plant mass of *Leymus chinensis* on different measurement dates. CK, control; CR, root-cutting. ALR, LL/ALW; ALW, spread leaf width; AMN, difference between spread leaf width and natural leaf width; LA, spread leaf area; LL, average leaf length; LN, leaf number; LTL, total leaf length; NLR, LL/NLW; NLW, natural leaf width; PH, plant height; SL, stem length; SLWR, stem length/stem diameter; SW, stem diameter.

为了进一步研究羊草不同生育期内各表型性状对单株质量的影响, 运用PLSR分析得到的因子权重表示表型性状因子对单株质量影响的大小, 并按权重从大到小进行排序。从图6可以看出, 各时期内, 对照和切根处理的表型性状对羊草单株质量影响的程度均有不同。7月1日, 对照茎长(10.72%)权重最大, 叶片数(<0.01%)最小, 切根处理茎粗(12.22%)权重最大, 叶长/展开叶宽(1.00%)最小; 7月15日, 对照茎长/茎粗(14.18%)权重最大, 自然叶宽(0.29%)最小, 切根处理叶长/自然叶宽(13.91%)权重最大, 茎长(0.82%)最小; 8月1日, 对照株高(8.69%)权重最大, 叶长/展开叶宽(2.72%)最小, 切根处理总叶长(8.95%)权重最大, 叶长/展开叶宽(2.21%)最小; 8月15日, 对照茎长/茎粗(10.31%)权重最大, 总叶长(1.68%)最小, 切根处理叶长/自然叶宽(12.42%)权重最大, 叶片数(<0.01%)最小; 8月30日, 对照叶片数(8.48%)权重最大, 茎长(5.64%)最小, 切根处理茎长(9.81%)权重最大, 叶片数(<0.01%)最小。其中, 8月1日, 对照和切根处理各表型性状对羊草单株质量影响大小相近, 而且总叶长和株高影响程度最大。

### 3 讨论

#### 3.1 羊草植株功能性状对切根的反应

在自然生态系统中, 植物通过改变其功能性状如高度、叶面积、叶质量等来适应外界环境条件的改变(Lienin & Kleyer, 2012)。其中, 比叶面积反映了植物资源获取能力, 常作为植物功能性状研究的一个重要分析指标(王常顺和汪诗平, 2015)。本研究中, 比叶面积对切根响应敏感, 而且切根后羊草比叶面积明显降低, 这与孙佳慧等(2020)的研究结果相似。分析其原因可能有两个方面, 一是源自羊草内部基因表达, 克隆植物在完成生命周期的漫长过程中会在环境因素影响下对资源进行合理分配来完成生长、繁育和防御等各种功能(陈莹婷和许振柱, 2014; 郭茱萸和孙淑英, 2016)。许多实验表明, 切根后羊草根茎寿命和地下生物量均有显著的增加(Bai *et al.*, 2010; 王欢等, 2018), 根据“生物量分配”假说, 植物对某一器官的生物量分配的减少, 必然会以另一器官生物量分配的减少为代价(Craine *et al.*, 2001)。羊草可能要通过降低地上部分功能性状的适合度来适应资源的向下分配, 将获得的资源更多地用于根系生长和繁殖, 以此达到资源的最优配置。

二是来自外部环境影响, 切根后很长一段时期内地面均会留有宽约1 cm的刀缝, 虽然适当的缝隙可以增加土壤透气性, 但同样会加速土壤表层水分蒸发, 造成土壤干旱等不利环境, 而羊草根茎对土壤水分的要求较高(侯琼等, 2010), 且在干旱胁迫下, 羊草会以提高根茎分配比例(王云龙等, 2004), 降低叶片面积(岳喜元等, 2018)等方式来适应不利环境。本研究中, 羊草主要生长期降水量普遍偏低而且气温较高(代景忠, 2016), 羊草可能会通过降低叶面积等方式来减少蒸腾作用(林祥磊等, 2008), 适应水分减少(王鑫等, 2020), 确保生存。

#### 3.2 切根后羊草植株功能性状的关系及变化过程

植物生长过程中对环境的适应不是通过单一性状的改变来完成的, 而是根、茎、叶多种性状在资源利用上相互权衡和补偿的结果(何芸雨等, 2019)。本研究中, 除叶片数外, 羊草茎、叶表型性状间均呈高度的正相关关系, 具有明显的协同变化关系, 这与杨柳(2018)的研究基本一致。但羊草比叶面积并未与羊草质量性状一起协同变化, 鉴于它与植物的光合速率密切相关(靳莎等, 2019), 比叶面积更适合解释与叶面积有关的指标。纵观羊草主要生长过程发现, 切根处理对羊草变化趋势影响较小, 却明显地加快了羊草地上植株的生活史进程。因为, 从各功能性状拟合曲线的峰值和谷值出现时间可以看出, 切根后几乎所有主要功能性状的峰值和谷值均有提前。究其原因, 可能是逆境中羊草为满足自身繁殖需求对资源进行了重新分配。因为, 有研究表明, 在羊草整个生长季中, 根茎和营养枝生物量分配比例一直存在显著的拮抗关系(王仁忠和祖元刚, 2001), 而单株羊草的地下与地上生物量间又存在幂函数关系(平晓燕等, 2007), 即随羊草生长进程的增加, 单株羊草对根茎的分配率要远高于地上部分, 那么, 切根在提高羊草根茎资源分配比例(王欢等, 2018)的同时必将减少地上部分的投入, 结合植物功能性状间的权衡关系(Stearns, 1989; 刘晓娟和马克平, 2015)可以推测, 受到切根影响, 羊草为满足根系恢复和繁殖增加的刺激需求, 可能会通过缩短地上植株生活史的方式来延长地下部分生存时间, 通过调节同化资源的配置来提高整体适合度。

#### 3.3 切根干扰下羊草单株质量的驱动因子

草原生产力的形成机制一直是草原研究的重要问题, 植株生物量的研究有助于理解生态系统净初



级生产力和营养循环的发展和变化(杨冬梅等, 2012)。李晓峰等(2003)的研究显示, 茎高、叶宽、叶片数是影响羊草单株产量的主要因子。胡静等(2016)研究表明, 叶长和叶长宽积(叶面积)是衡量羊草叶生物量的主要指标, 而李西良等(2014)认为, 株高和叶长是主要调控因子, 叶宽、茎粗贡献较小。其实, 在一个物种内各性状都会沿着时间进程显示不同的属性, 不同时期各功能性状对单株质量的贡献均不相同。本研究表明, 在羊草营养生长期, 叶、茎功能性状对羊草单株质量贡献均有较大变化, 如生长前期, 叶面积、“展自叶差”、茎长、茎粗贡献较大, 到了中期, 株高、总叶长占主导, 而生长后期, 茎长、茎粗比、叶片数、展开叶宽为主要贡献因子。切根对羊草单株质量驱动因子的影响主要体现在前期和后期, 虽然各时期驱动因子均有不同, 但主要驱动因子基本与对照一致。可见, 研究羊草各功能性状对单株质量的影响需充分了解各植物功能性状的关系及其动态变化, 只有对羊草地上与地下的权衡关系或整个生活史的繁殖策略进行综合分析, 才能更深入地了解其作用机制。

另外, 值得关注的是, 本研究中羊草叶宽对单株质量的影响一直伴随其主要生长时期, 结果显示, 自然叶宽要远小于展开叶宽, 但自然叶宽或“展自叶差”所占的权重却整体高于展开叶宽, 由于较小的叶面积对应较低的光合速率(Du & Yang, 1988), 那么在用叶宽指标进行光合评价或模型估算时, 自然叶宽(有效叶宽)可能比展开叶宽(实际叶宽)更具代表性。

#### 4 结论

在营养生长期, 无论自然生长还是切根处理, 羊草的叶长、叶宽、茎长、茎宽、株高、干物质含量、比叶面积等功能性状均呈现二次曲线变化规律, 曲线拟合效果显著( $p < 0.05$ ), 且各表型性状之间协同变化关系明显。同时, 切根处理不仅对不同时期羊草功能性状有差异化影响, 而且还对羊草地上植株的生活史进程有一定的促进作用。在影响羊草单株质量的驱动因子中, 总叶质量、单叶质量、茎质量在质量性状中占有较高权重, 远大于其他质量性状因子, 而总叶长、自然叶宽、展叶面积、茎长、茎粗、株高则是影响羊草单株质量的主要表型性状

因子, 且在不同生长时期, 各表型性状对羊草单株质量的影响程度也均有不同。

**致谢** 感谢铜仁学院博士启动基金项目(trxyDH1706)资助。

#### 参考文献

- Bai WM, Xun F, Li Y, Zhang WH, Li LH (2010). Rhizome severing increases root lifespan of *Leymus chinensis* in a typical steppe of Inner Mongolia. *PLOS ONE*, 5, e12125. DOI: 10.1371/journal.pone.0012125.
- Cao J (2014). *The Effects of Vertical Cutting Roots on Community Characteristics, Photosynthetic Characteristics and Rhizome Nutrient of Leymus chinensis*. Master degree dissertation, Jilin Agricultural University, Changchun. [曹杰 (2014). 垂直切根对羊草草地群落特征、羊草光合特性及根茎养分的影响. 硕士学位论文, 吉林农业大学, 长春.]
- Chen YT, Xu ZZ (2014). Review on research of leaf economics spectrum. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 38, 1135-1153. [陈莹婷, 许振柱 (2014). 植物叶经济谱的研究进展. 植物生态学报, 38, 1135-1153.]
- Craine JM, Froehle J, Tilman DG, Wedin DA, Chapin III FS (2001). The relationships among root and leaf traits of 76 grassland species and relative abundance along fertility and disturbance gradients. *Oikos*, 93, 274-285.
- Crowley PH, Stieha CR, McLetchie DN (2005). Overgrowth competition, fragmentation and sex-ratio dynamics: a spatially explicit, sub-individual-based model. *Journal of Theoretical Biology*, 233, 25-42.
- Dai JZ (2016). *Effects of Root-cutting and Fertilization on Vegetation and Soil in Mowing Pasture of Lymus chinensis Meadow Steppe*. PhD dissertation, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot. [代景忠 (2016). 切根与施肥对羊草草甸草原割草场植被与土壤的影响. 博士学位论文, 内蒙古农业大学, 呼和浩特.]
- Dong M (2011). *Clonal Plant Ecology*. Science Press, Beijing. [董鸣 (2011). 克隆植物生态学. 科学出版社, 北京.]
- Donovan LA, Maherali H, Caruso CM, Huber H, de Kroon H (2011). The evolution of the worldwide leaf economics spectrum. *Trends in Ecology & Evolution*, 26, 88-95.
- Du ZC, Yang ZG (1988). A preliminary study on light-photosynthetic characteristic in the leaves at various age for *Aneurolepidium chinense*. *Journal of Integrative Plant Biology*, 30, 196-206.
- Flynn DFB, Mirotchnick N, Jain M, Palmer MI, Naeem S (2011). Functional and phylogenetic diversity as predictors of biodiversity-ecosystem-function relationships. *Ecology*, 92, 1573-1581.
- Gao RF, Zhang TY, Bai Y, Cui H, Liu ZY (2019). Effects of different improvement measures on species diversity and

- community productivity of degraded mowing grassland. *Chinese Journal of Grassland*, 41, 98-104. [高若凡, 张天宇, 白杨, 崔浩, 刘志英 (2019). 不同改良措施对退化割草场物种多样性及群落生产力的影响. *中国草地学报*, 41, 98-104.]
- Gao ZC, Tian JN, Huo YS, Shu K, Bao Y (2017). Effects of root pruning and shallow plowing on soil properties and plant communities in deteriorated steppe. *Acta Ecologica Sinica*, 37, 3824-3829. [高志成, 田佳妮, 霍艳双, 舒锴, 宝音陶格涛 (2017). 切根和浅耕翻措施对退化草地生长季土壤性质及植物群落的影响. *生态学报*, 37, 3824-3829.]
- Guo MR, Sun SY (2016). Review of plant reproductive allocation and environmental adaptation strategies. *Journal of Northern Agriculture*, 44, 99-103. [郭荣苒, 孙淑英 (2016). 植物生殖分配及其适应环境策略研究进展. *北方农业学报*, 44, 99-103.]
- Han TT, Tang X, Ren H, Wang J, Liu N, Guo QF (2021). Community/Ecosystem functional diversity: measurements and development. *Acta Ecologica Sinica*, 41, 3286-3295. [韩涛涛, 唐玄, 任海, 王俊, 刘楠, 郭勤峰 (2021). 群落/生态系统功能多样性研究方法及展望. *生态学报*, 41, 3286-3295.]
- He YY, Guo SL, Wang Z (2019). Research progress of trade-off relationships of plant functional traits. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 43, 1021-1035. [何芸雨, 郭水良, 王喆 (2019). 植物功能性状权衡关系的研究进展. *植物生态学报*, 43, 1021-1035.]
- Hou Q, Wang YS, Shi GH, Yang ZL (2010). Grass growing characters and major ecological factors analysis for typical steppe in Xilinguole. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 26, 1-7. [侯琼, 王英舜, 师桂花, 杨泽龙 (2010). 锡林郭勒典型草原牧草生长特性与主要生态因子分析. *中国农学通报*, 26, 1-7.]
- Hu J, Hou XY, Ding Y, Bai J (2016). The relationship between individual above-ground biomass and morphological characteristics of leaf and stem of *Leymus chinensis*. *Journal of Inner Mongolia University (Natural Science Edition)*, 47, 609-616. [胡静, 侯向阳, 丁勇, 白金 (2016). 羊草地上生物量与其茎、叶形态特征参数关系的研究. *内蒙古大学学报(自然科学版)*, 47, 609-616.]
- Jin S, Yan SJ, Huang LJ, Chen Y, Ma WW, Wang YX, Wang Z (2019). Research progress in trade-offs among leaf functional traits. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 40, 96-103. [靳莎, 闫淑君, 黄柳菁, 陈莹, 马雯雯, 王云霄, 王喆 (2019). 植物叶功能性状间的权衡研究进展. *四川林业科技*, 40, 96-103.]
- Lei LJ, Kong DL, Li XM, Zhou ZX, Li GY (2016). Plant functional traits, functional diversity, and ecosystem functioning: current knowledge and perspectives. *Biodiversity Science*, 24, 922-931. [雷羚洁, 孔德良, 李晓明, 周振兴, 李国勇 (2016). 植物功能性状、功能多样性与生态系统功能: 进展与展望. *生物多样性*, 24, 922-931.]
- Li XF, Liu J, Liu GS (2003). Correlation and path analysis on quantitative characters of *Leymus chinensis*. *Acta Agrestia Sinica*, 11, 42-47. [李晓峰, 刘杰, 刘公社 (2003). 羊草若干数量性状的相关性及通径分析. *草地学报*, 11, 42-47.]
- Li XL, Hou XY, Wu XH, Sa RL, Ji L, Chen HJ, Liu ZY, Ding Y (2014). Plastic responses of stem and leaf functional traits in *Leymus chinensis* to long-term grazing in a meadow steppe. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 38, 440-451. [李西良, 侯向阳, 吴新宏, 萨茹拉, 纪磊, 陈海军, 刘志英, 丁勇 (2014). 草甸草原羊草茎叶功能性状对长期过度放牧的可塑性响应. *植物生态学报*, 38, 440-451.]
- Li YJ, Ji SQ, Zhang SW, Chen CC (2009). The determination method of leaf area on *Leymus chinensis*. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 37, 6819. [李亚军, 纪澜琴, 张守伟, 陈成成 (2009). 羊草叶面积的测定方法. *安徽农业科学*, 37, 6819.]
- Lienin P, Kleyer M (2012). Plant trait responses to the environment and effects on ecosystem properties. *Basic and Applied Ecology*, 13, 301-311.
- Lin XL, Xu ZZ, Wang YH, Zhou GS (2008). Modeling the responses of leaf photosynthetic parameters of *Leymus chinensis* to drought and rewatering. *Acta Ecologica Sinica*, 28, 4718-4724. [林祥磊, 许振柱, 王玉辉, 周广胜 (2008). 羊草(*Leymus chinensis*)叶片光合参数对干旱与复水的响应机理与模拟. *生态学报*, 28, 4718-4724.]
- Liu XJ, Ma KP (2015). Plant functional traits-concepts, applications and future directions. *Scientia Sinica (Vitae)*, 45, 325-339. [刘晓娟, 马克平 (2015). 植物功能性状研究进展. *中国科学: 生命科学*, 45, 325-339.]
- Meng TT, Ni J, Wang GH (2007). Plant functional traits, environments and ecosystem functioning. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 31, 150-165. [孟婷婷, 倪健, 王国宏 (2007). 植物功能性状与环境 and 生态系统功能. *植物生态学报*, 31, 150-165.]
- Ping XY, Jia BR, Yuan WP, Wang FY, Wang YH, Zhou L, Xu ZZ, Zhou GS (2007). Biomass allocation of *Leymus chinensis* population: a dynamic simulation study. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 18, 2699-2704. [平晓燕, 贾丙瑞, 袁文平, 王凤玉, 王玉辉, 周莉, 许振柱, 周广胜 (2007). 羊草种群生物量分配动态模拟. *应用生态学报*, 18, 2699-2704.]
- Qi LX (2019). *Effects of Different Recovery and Improvement Measures on Degraded Leymus chinensis Steppe Community and Plant Functional Traits*. Master degree dissertation, Inner Mongolia University, Hohhot. [齐丽雪 (2019). 不同恢复改良措施对退化羊草草原群落及植物功能性状的影响. 硕士学位论文, 内蒙古大学, 呼和浩特.]
- Qin Y, Liu WH, He F, Tong ZY, Li XL (2019). Influence of fertilization and root cutting on soil physicochemical

- properties and enzyme activities in a degraded *Leymus chinensis* steppe. *Acta Prataculturae Sinica*, 28, 5-14. [秦燕, 刘文辉, 何峰, 仝宗永, 李向林 (2019). 施肥与切根对退化羊草草原土壤理化性质和酶活性的影响. 草业学报, 28, 5-14.]
- Stearns SC (1989). Trade-offs in life-history evolution. *Functional Ecology*, 3, 259-268.
- Sun JH, Qi LX, Li YR, Bao Y (2020). Effects of different restoration and improvement measures on the functional traits of *Leymus chinensis* in degraded steppe. *Ecology and Environmental Sciences*, 29, 1738-1744. [孙佳慧, 齐丽雪, 李雅茹, 宝音陶格涛 (2020). 不同恢复改良措施对退化草原羊草功能性状的影响. 生态环境学报, 29, 1738-1744.]
- Violle C, Navas ML, Vile D, Kazakou E, Fortunel C, Hummel I, Garnier E (2007). Let the concept of trait be functional! *Oikos*, 116, 882-892.
- Wang CS, Wang SP (2015). A review of research on responses of leaf traits to climate change. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 39, 206-216. [王常顺, 汪诗平 (2015). 植物叶片性状对气候变化的响应研究进展. 植物生态学报, 39, 206-216.]
- Wang H, Deng B, Chen JS, Sun ZW (2018). Effect of root cutting on the components and reproductive allocation of *Leymus chinensis*. *Pratacultural Science*, 35, 2968-2977. [王欢, 邓波, 陈积山, 孙泽微 (2018). 垂直切根对当年羊草构件及繁殖资源分配的影响. 草业科学, 35, 2968-2977.]
- Wang J, Zhao WW, Liu Y, Jia LZ (2019). Effects of plant functional traits on soil conservation: a review. *Acta Ecologica Sinica*, 39, 3355-3364. [王晶, 赵文武, 刘月, 贾立志 (2019). 植物功能性状对土壤保持的影响研究述评. 生态学报, 39, 3355-3364.]
- Wang P, Sheng LX, Yan H, Zhou DW, Song YT (2010). Plant functional traits influence soil carbon sequestration in wetland ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 30, 6990-7000. [王平, 盛连喜, 燕红, 周道玮, 宋彦涛 (2010). 植物功能性状与湿地生态系统土壤碳汇功能. 生态学报, 30, 6990-7000.]
- Wang RZ, Zu YG (2001). Biomass and energy allocation in *Leymus chinensis* population. *Bulletin of Botanical Research*, 21, 299-303. [王仁忠, 祖元刚 (2001). 羊草种群生物量和能量生殖分配的研究. 植物研究, 21, 299-303.]
- Wang X, Yang L, Zhao Q, Zhang QD (2020). Response of grassland community functional traits to soil water in a typical the Loess Plateau watershed. *Acta Ecologica Sinica*, 40, 2691-2697. [王鑫, 杨磊, 赵倩, 张钦弟 (2020). 黄土高原典型小流域草地群落功能性状对土壤水分的响应. 生态学报, 40, 2691-2697.]
- Wang YL, Xu ZZ, Zhou GS (2004). Changes in biomass allocation and gas exchange characteristics of *Leymus chinensis* in response to soil water stress. *Acta Phytoecologica Sinica*, 28, 803-809. [王云龙, 许振柱, 周广胜 (2004). 水分胁迫对羊草光合产物分配及其气体交换特征的影响. 植物生态学报, 28, 803-809.]
- Wurenqige, Yan RR, Xin XP, Siqingaowa (2011). Influence of root cutting on degraded grassland *Leymus chinensis* community. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 32, 55-58. [乌仁其格, 闫瑞瑞, 辛晓平, 斯钦高娃 (2011). 切根改良对退化草地羊草群落的影响. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 32, 55-58.]
- Yang DM, Zhang JJ, Zhou D, Qian MJ, Zheng Y, Jin LM (2012). Leaf and twig functional traits of woody plants and their relationships with environmental change: a review. *Chinese Journal of Ecology*, 31, 702-713. [杨冬梅, 章佳佳, 周丹, 钱敏杰, 郑瑶, 金灵妙 (2012). 木本植物茎叶功能性状及其关系随环境变化的研究进展. 生态学杂志, 31, 702-713.]
- Yang L (2018). *Community Characteristics and Geographic Distribution of Leymus chinensis Steppe in China*. Master degree dissertation, Inner Mongolia University, Hohhot. [杨柳 (2018). 中国羊草(*Leymus chinensis*)草原植物群落特征及其地理分布. 硕士学位论文, 内蒙古大学, 呼和浩特.]
- Yue XY, Zuo XA, Yu Q, Xu C, Lv P, Zhang J (2018). Effects of precipitation and short term extreme drought on leaf traits in Inner Mongolia typical steppe. *Journal of Desert Research*, 38, 1009-1016. [岳喜元, 左小安, 庾强, 徐翀, 吕朋, 张晶 (2018). 降水量和短期极端干旱对典型草原植物群落及优势种羊草(*Leymus chinensis*)叶性状的影响. 中国沙漠, 38, 1009-1016.]
- Zhang JL, Cao J, Deng B, Chen JS, Zhang YX (2017). Root cutting can improve the growth of *Leymus chinensis* in Songnen Plain. *Pratacultural Science*, 34, 1057-1063. [张佳良, 曹杰, 邓波, 陈积山, 张月学 (2017). 垂直切根可以改善松嫩草地羊草生长. 草业科学, 34, 1057-1063.]
- Zhang ZK, Wang Q, Wu YH, Liu XZ, Huang LJ (2020). Advances in functional traits of plants based on CiteSpace. *Acta Ecologica Sinica*, 40, 1101-1112. [张增可, 王齐, 吴雅华, 刘兴诏, 黄柳菁 (2020). 基于CiteSpace植物功能性状的研究进展. 生态学报, 40, 1101-1112.]
- Zhou DW (2009). A phylogenetic approach to comparative functional plant ecology. *Acta Ecologica Sinica*, 29, 5644-5655. [周道玮 (2009). 植物功能生态学研究进展. 生态学报, 29, 5644-5655.]

责任编辑: 何维明 责任编辑: 李 敏