

DOI: 10.5846/stxb202106111552

侯东杰, 乔鲜果, 郭柯. 内蒙古围封草原枯落物累积对大针茅和羊草生长发育的影响. 生态学报, 2022, 42(15): 6175-6183.

Hou D J, Qiao X G, Guo K. Effects of litter accumulation on growth of *Stipa grandis* and *Leymus chinensis* in a fenced typical steppe in Inner Mongolia. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(15): 6175-6183.

# 内蒙古围封草原枯落物累积对大针茅和羊草生长发育的影响

侯东杰<sup>1</sup>, 乔鲜果<sup>2</sup>, 郭柯<sup>2,\*</sup>

1 内蒙古农业大学, 草原与资源环境学院, 呼和浩特 010019

2 中国科学院植物研究所, 植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093

**摘要:** 围封草原枯落物累积通过改变水分和热量的再分配影响植物的生长发育。为探究不同植物种群对枯落物累积的适应性, 2015—2017 年在内蒙古围封典型草原设置了枯落物去除实验, 对土壤温度和水分进行了原位监测, 也对群落优势物种大针茅 (*Stipa grandis*) 和亚优势物种羊草 (*Leymus chinensis*) 种群的生长发育过程及种群数量特征进行了测定。结果表明: 枯落物累积显著降低生长季表层和深层土壤温度 (1.3—4.6℃ 和 1.5—3.2℃), 并提高表层和深层土壤水分 (1.4%—10.4% 和 1.0%—5.0%)。枯落物累积对大针茅种群返青时间的延迟 (16.9—24.2 d) 显著高于羊草种群的 (5.2—6.7 d), 但对大针茅和羊草种群的营养生长期无显著影响。枯落物累积显著提高大针茅种群的高度但显著降低其盖度和地上生物量, 引起大针茅种群的重要值显著降低 (0.38→0.22)。枯落物累积显著提高羊草种群的高度、盖度和地上生物量, 进而显著提高其重要值 (0.16→0.28)。大针茅和羊草种群重要值排序的更替驱动围封草原植物群落演替。本研究从植物种群的角度为阐明围封草原群落结构与功能改变提供新视角, 也为科学合理制定围封政策提供理论依据。

**关键词:** 围封; 典型草原; 土壤温度; 土壤水分; 群落演替

## Effects of litter accumulation on growth of *Stipa grandis* and *Leymus chinensis* in a fenced typical steppe in Inner Mongolia

HOU Dongjie<sup>1</sup>, QIAO Xianguo<sup>2</sup>, GUO Ke<sup>2,\*</sup>

1 College of Grassland, Resource and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China

2 State Key Laboratory of Vegetation and Environment Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

**Abstract:** Litter accumulation affects growth of plant species by redistributing hydrothermal condition in fenced steppe ecosystems. To explore the ecological adaptations of different plant species with diverse morphological and ecological characteristics to litter accumulation, we conducted a litter removal experiment in a fenced typical steppe in Inner Mongolia during 2015—2017. Soil temperature and moisture were continuously monitored *in situ*. The growth and quantitative characteristic of the dominant and subdominant species (*Stipa grandis* and *Leymus chinensis*) were measured. The results were as follows. Litter accumulation significantly decreased surface and deep soil temperature (1.3—4.6 °C in surface soil and 1.5—3.2 °C in deep soil) but remarkably increased surface and deep soil moisture (1.4%—10.4% in surface soil and 1.0%—5.0% in deep soil). Litter accumulation delayed the returning greening day of *S. grandis* (16.9—24.2 days) more than that of *L. chinensis* (5.2—6.7 days) but had no significant effects on their vegetative period. Litter accumulation significantly increased the height of *S. grandis* but decreased its cover and aboveground biomass, which remarkably reduced the important value of *S. grandis* (0.38→0.22). Conversely, litter accumulation significantly increased the height, cover,

基金项目: 内蒙古自治区重大科技专项 (ZDZX2018020); 内蒙古自治区科技成果转化项目 (2020CG0013)

收稿日期: 2021-06-11; 网络出版日期: 2022-04-07

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: guoke@ibcas.ac.cn

and aboveground biomass of *L. chinensis*, which remarkably increased its important value (0.16→0.28). Comprehensively, the order change of important value in *S. grandis* and *L. chinensis* drove community succession in the fenced steppe. This study elucidates the changes of community structure and function in fenced steppe ecosystems from the perspective of plant population and provides the theoretical basis for scientific and rational formulation of enclosing policy.

**Key Words:** fence; typical steppe; soil temperature; soil moisture; community succession

内蒙古草原生态系统是中国北方地区重要的生态安全屏障,具有重要的生态功能和经济价值<sup>[1]</sup>,同时也是中国草原生态系统的主要组成部分。由于气候变化和人类活动的加剧,内蒙古草原生态系统出现了不同程度的退化,导致其生态服务功能和经济价值显著降低<sup>[2]</sup>。“退牧还草”和“天然草原保护”等国家级生态修复工程先后在内蒙古草原地区实施。围封作为生态修复工程中常用的措施,具有低成本、高效且易操作的特点<sup>[2-4]</sup>。围封不仅显著提高土壤全碳、全氮、全磷等养分含量<sup>[5-7]</sup>,同时也提高植物群落高度、盖度、地上生物量、物种丰富度等特征<sup>[8-10]</sup>,使得植被和土壤得到有效的恢复。然而,近些年有研究表明长期连续的围封会引起草原生态系统枯落物的过量累积,显著改变群落微环境特征和群落结构与功能<sup>[11-14]</sup>。

植物种群的生长发育与数量特征是草原生态学研究中的热点,也是进一步揭示草原植物群落形成、维持与演替过程的关键环节<sup>[15]</sup>。草原围封后枯落物在地表处的过量累积形成了物理阻隔层,显著改变群落光照、热量和水分的分配格局,影响土壤温度和土壤水分<sup>[14,16-17]</sup>。有研究表明生长季内枯落物累积对土壤温度和土壤水分的影响逐渐减弱<sup>[14]</sup>。植物的物候和生长发育等生理过程对土壤温度和水分的变化具有极强的敏感性。因此,枯落物累积将通过影响土壤温度和水分间接对植物种群的生长发育产生影响。植物种群对枯落物累积具有不同的敏感性并通过植株、茎和叶等功能性状的调整适应围封草原新的微环境<sup>[16,18]</sup>。此过程也将对植物种群的生长发育过程产生强烈的影响。然而,围封草原群落微环境的变化和枯落物累积所造成的机械阻碍作用将如何影响植物种群的生长发育过程,目前缺乏准确的认知。与此同时,也有研究发现草原围封后群落物种的优势度排序发生显著改变,这种现象在内蒙古、宁夏和新疆等地区的草原中表现尤为典型<sup>[19-21]</sup>。然而引起这种现象产生的驱动机制目前仅从群落微环境的角度有过报道<sup>[14]</sup>。阐明枯落物累积对不同植物种群的生长发育的影响也有利于从植物种群的角度揭示围封草原群落结构与功能改变的驱动机制。

典型草原是内蒙古草原中分布范围广泛且具有代表性的草原类型<sup>[22]</sup>,也是内蒙古地区实施围封措施主要的区域。大针茅(*Stipa grandis*)和羊草(*Leymus chinensis*)是内蒙古典型草原中广泛分布的物种,也是群落中的优势种或亚优势种,对维持群落结构与功能具有重要作用。由于大针茅和羊草在生物学特性和生态适应性等方面具有截然不同的特性<sup>[23-24]</sup>,这两种植物成为探究围封草原枯落物累积对植物种群生长发育过程影响的理想材料。因此,本研究以内蒙古围封典型草原为对象,探究大针茅和羊草种群的生长发育过程对枯落物累积的动态响应特征,以期从植物种群的角度为阐明围封草原群落结构与功能改变提供新思路和新视角,也为科学合理制定围封政策提供理论依据和数据支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古锡林浩特市白音锡勒牧场内的中国科学院内蒙古草原生态系统研究定位站(43°33'37"N, 116°40'12"E; 1244 m)。该区域气候类型为温带大陆性季风气候,年平均气温为 0.3℃,最冷月平均气温为-21.6℃,最热月平均气温为 19.0℃;年平均降水量为 351.0 mm,其中 80%的降水集中在生长季。研究区植被类型为大针茅(*Stipa grandis*)典型草原,主要伴生种包括:羊草(*Leymus chinensis*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、羽茅(*Achnatherum sibiricum*)、冰草(*Agropyron cristatum*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)、菊叶委陵菜(*Potentilla tanacetifolia*)、山韭(*Allium senescens*)和砂韭(*Allium bidentatum*)等。依照中国土壤分类系统划分,研究区土壤类型为栗钙土。该区域于 2009 年开始围封,到 2014 年为止,共围封 5 年,植被得到了有效

的恢复且枯落物在群落地表大量堆积。

## 1.2 实验设计

实验采用随机区组设计,2014 年生长季结束后,在围封的大针茅草原中选取地势开阔、平坦且植被均匀的位置分别建立 3 个独立的实验区组(22 m×50 m)。将每个区组分成两个小区(10 m×50 m)并随机设置枯落物累积小区和枯落物去除小区。各区组内两小区间留有 2 m 的缓冲区。在 2014—2016 年生长季结束后,将枯落物去除小区地表处的枯落物(地表上枯死的、未分解或部分分解的植物茎、叶、花和果实的残体)全部去除;2015—2017 年对枯落物累积小区中的枯落物不做任何处理。

## 1.3 样品采集

使用 EM50 数据采集器和 ECH<sub>2</sub>O 5TE 传感器(METER 公司,美国)对两种处理不同深度的土壤温度和土壤水分进行连续、原位监测。在样地中随机选取一个区组,随后将 ECH<sub>2</sub>O 5TE 传感器安装在地势开阔、平坦的位置,其中 ECH<sub>2</sub>O 5TE 传感器分别安装在土壤深度 2.5 cm 和 12.5 cm 处,以表示枯落物影响下土壤表层和深层的土壤温度和土壤水分。随后将土壤回填并将土壤表面修理平整。土壤温度和土壤水分的测量时间间隔为 1 h,土壤温度和土壤水分的监测从 2015 年 5 月 1 日开始到 2017 年 9 月 1 日结束。

在各小区中选取大针茅(优势种)和羊草(亚优势种)作为研究对象,利用定株观测法研究植物种群的生长发育过程。在 2015—2017 年生长季开始前,在两种处理下的各小区中随机设置 5 个 1 m×1 m 的固定样方,在每个样方内随机选取 3 株大针茅和羊草,并使用插地牌标记。从 2015—2017 年的 4 月 10 日开始,至 9 月 2 日结束,记录标记植株个体的生长动态,观测期内每隔 5—7 天对标记的植物个体的营养高度进行测量。每种处理下各物种共 45 次重复(3 株/样方/小区×5 个样方/小区×3 个小区)

2015—2017 年的 8 月 1 日,使用 1 m×1 m 的样方法对两种处理下的各小区的植物种群数量特征进行调查。首先记录样方的物种组成和总盖度,随后对各物种随机选取 3 株测量其营养高度和生殖高度,再记录各物种的分盖度和密度,最后使用齐地面刈割法收获各物种的地上部分并装入信封袋。总盖度和分盖度使用目测法进行测量,每个小区设置 3 次重复。将植物样品带回实验室后置于烘箱内,在 65℃ 的条件下烘至恒重并称重。

## 1.4 数据分析

使用 5 月—8 月土壤温度和土壤水分的月平均值表示生长季土壤温度和土壤水分动态。使用相同处理下各物种营养高度的平均值表示植物生长状态。本研究中植物的返青时间以植物第一叶片萌发时间为依据;植物从返青到最大营养高度的时间差值表示植物的营养生长期,其中返青时间和植物营养生长期均使用侏略日表示。使用重要值综合表示植物种群数量特征,计算公式如下:

$$\text{重要值} = \frac{\text{相对高度} + \text{相对盖度} + \text{相对地上生物量}}{3}$$

其中相对高度为物种的平均高度与样方所有物种的平均高度总和的比值;相对盖度为物种的平均盖度与样方所有物种盖度总和的比值;相对地上生物量为物种的平均地上生物量与样方所有物种地上生物量总和的比值。

使用独立样本 T 检验比较两种处理下相同深度的土壤温度和土壤水分间的差异。使用一般线性模型(GLM)比较两种处理间植物的返青时间、营养生长期以及重要值间的差异,将处理因子和区组因子作为固定效应检验主效应。数据表示方式为平均值±标准误,差异显著性水平  $P=0.05$ ,数据的统计分析在 IBM SPSS 26.0 中进行,图表的绘制在 SigmaPlot 12.5 中进行。

## 2 研究结果

### 2.1 枯落物累积对土壤温度和土壤水分的影响

2015—2017 年生长季内,枯落物累积显著降低不同深度的土壤温度(图 1; $P<0.05$ )。在土壤深度 2.5 cm

处,2015—2017 年生长季枯落物累积分别降低土壤温度 1.3—2.8℃、2.2—2.5℃和 2.2—4.6℃。在土壤深度 12.5 cm 处,实验期间枯落物累积分别降低土壤温度 1.5—3.2℃、2.1—2.4℃和 2.2—2.7℃。

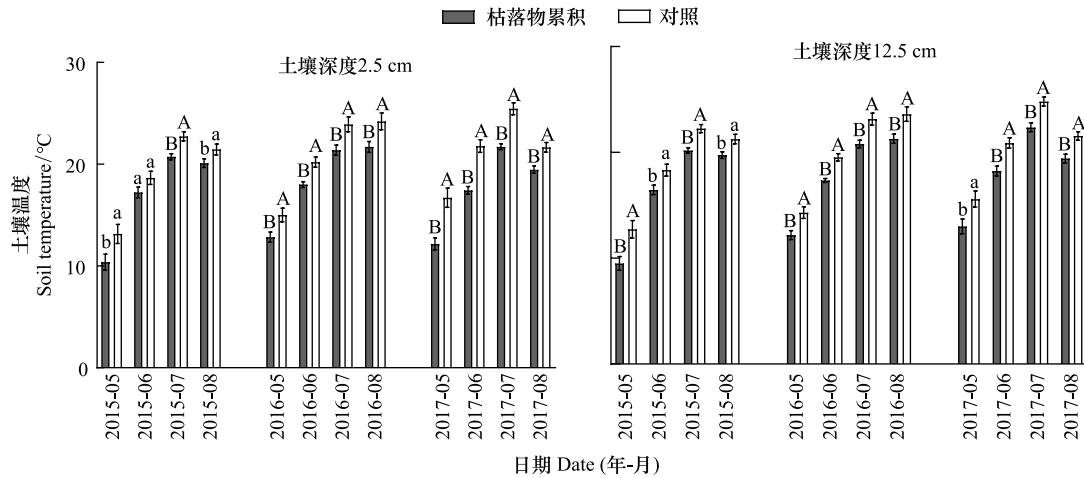


图 1 生长季土壤温度的动态特征

Fig.1 Dynamic characteristics of soil temperature in the growing season

LA: 枯落物累积处理, Litter accumulation treatment; CK: 对照处理, Control treatment; 不同小写和大写字母分别表示在 0.05 和 0.01 水平下两种处理间存在显著差异

2015—2017 年生长季内, 枯落物累积显著提高不同深度的土壤水分 ( $P < 0.05$ ), 且对 2.5 cm 处的土壤水分影响更大(图 2)。在土壤深度 2.5 cm 处, 2015—2017 年枯落物累积分别提高土壤水分 1.4%—4.3%、1.4%—6.3%和 1.8%—10.4%。在土壤深度 12.5 cm 处, 实验期间枯落物累积分别提高土壤水分 1.0%—3.7%、1.6%—5.0%和 1.9%—3.4%。此外, 与生长季中期(7 月和 8 月)相比, 枯落物累积在生长季早期(5 月和 6 月)对土壤水分的提高更加明显。例如, 在 2017 年 5 月, 枯落物累积分别提高土壤深度 2.5 cm 和 12.5 cm 处土壤水分 10.4%和 3.5%; 在同年 8 月枯落物累积对土壤深度 2.5 cm 和 12.5 cm 处土壤水分的提高仅为 2.2%和 2.0%。

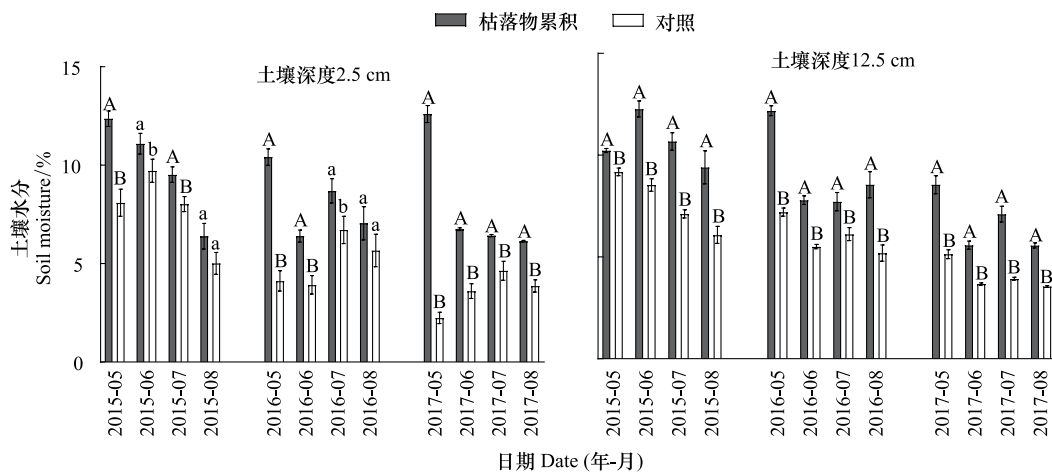


图 2 生长季土壤水分的动态特征

Fig.2 Dynamic characteristics of soil moisture in the growing season

## 2.2 枯落物累积对大针茅和羊草种群生长发育的影响

大针茅和羊草种群的返青时间对枯落物累积具有一致的响应。2015—2017 年枯落物累积显著延迟大针



茅和羊草种群的返青时间(图 3; $P<0.05$ )。与羊草种群相比,大针茅种群在返青过程中受到更严重的消极影响。例如,实验期间枯落物累积延迟大针茅返种群青时间高达 16.9—24.2 d,而对羊草种群返青时间的延迟仅为 5.2—6.7 d(图 3)。

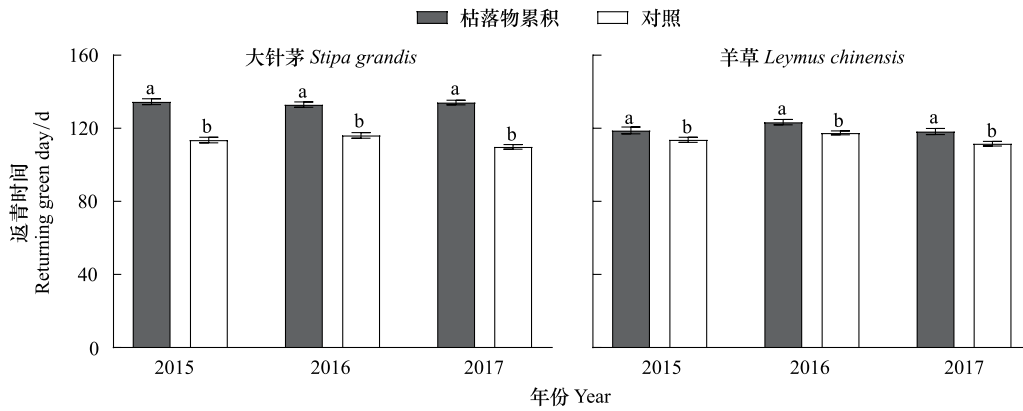


图 3 大针茅和羊草种群返青时间特征

Fig.3 Characteristics of returning green time of *S. grandis* and *L. chinensis*

枯落物累积改变大针茅和羊草种群的的生长发育过程。2015—2017 年生长季早期,在枯落物累积影响下大针茅和羊草种群的植株高度低于对照处理中的;在生长季中期,枯落物累积影响下大针茅和羊草种群的植株高度高于对照处理中的(图 4)。例如,在 2015 年 5 月 17 日,枯落物累积影响下大针茅种群的植株高度仅为 2.9 cm,对照处理中大针茅种群的植株高度高达 15.7 cm。在 2015 年 7 月 26 日,枯落物累积下羊草种群的植株高度为 51.5 cm,对照处理中羊草种群的植株高度仅为 30.6 cm。与对照处理相比,枯落物累积影响下大针茅和羊草种群在返青后具有更快的生长速率。例如,在 2016 年 5 月 9 日—5 月 17 日,枯落累积下大针茅种群的植株高度的生长速率高达 1.72 cm/d,在对照处理中的仅为 0.71 cm/d。

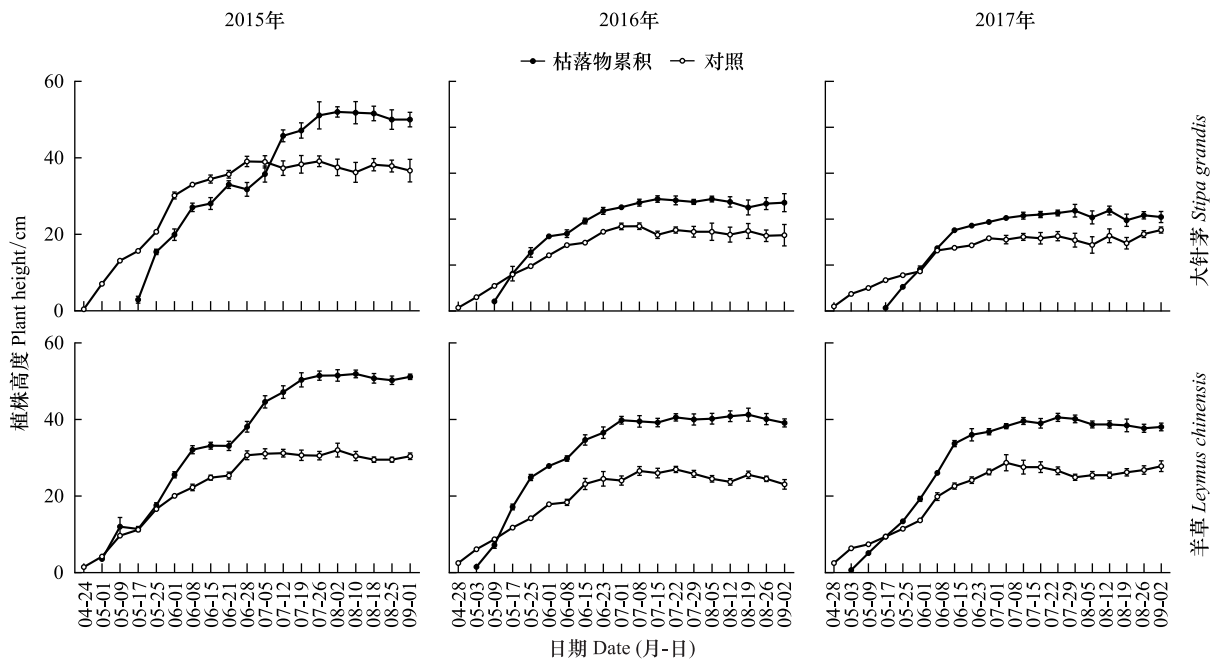


图 4 大针茅和羊草种群植株高度的动态特征

Fig.4 Dynamic characteristics of plant heights of *S. grandis* and *L. chinensis*

与返青时间表现不同,枯落物累积对大针茅和羊草种群的营养生长期无显著影响(图5)。例如,实验期间枯落物累积下大针茅和羊草种群的营养生长期为67—76 d和71—80 d,在对照处理中大针茅和羊草种群的营养生长期为64—78 d和65—78 d。

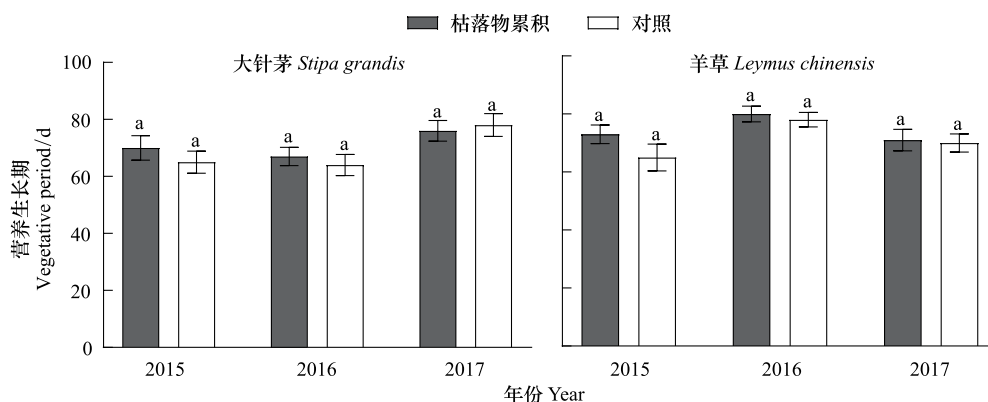


图5 大针茅和羊草种群营养生长期特征

Fig.5 Characteristics of vegetative period of *S. grandis* and *L. chinensis*

### 2.3 枯落物累积对大针茅和羊草种群数量特征的影响

大针茅和羊草种群数量特征对枯落物累积具有不一致的响应。枯落物累积显著提高大针茅和羊草种群的高度(图6;  $P < 0.05$ )。枯落物累积显著降低大针茅种群的盖度和地上生物量,但显著提高羊草种群的盖度和地上生物量(除2016年羊草地上生物量外)(图6;  $P < 0.05$ )。例如,实验期间枯落物累积降低大针茅种群的盖度25.4%—55.2%,但提高羊草种群的盖度达到160.9%—369.2%。由于大针茅和羊草种群的高度、盖度和地上生物量的改变,进而导致大针茅和羊草种群的优势度发生更替。枯落物累积显著降低大针茅种群的重要值,但显著提高羊草种群的重要值(图6;  $P < 0.05$ )。例如,实验期间枯落物累积下大针茅和羊草种群在群落中的重要值分别为0.21—0.23和0.27—0.29,在对照处理中大针茅和羊草种群的重要值为0.34—0.40和0.13—0.19。

## 3 讨论

### 3.1 枯落物累积对群落微环境的影响

围封草原枯落物累积引起群落热量和水分的重新分配,综合改变群落微环境特征。枯落物累积显著降低土壤温度并提高土壤水分,与前人的研究结果一致<sup>[25–26]</sup>。枯落物位于土壤与大气间,具有强烈的物理阻隔作用,直接阻碍空气与土壤间的热量交换。有研究表明在白天枯落物累积强烈降低土壤热量的吸收,显著降低土壤温度;在夜晚枯落物累积可以有效减少土壤热量的散失,提高土壤温度<sup>[27]</sup>。由于内蒙古草原在生长季具有强烈的太阳辐射和较大的昼夜温差,因此枯落物累积综合导致生长季土壤温度的降低。枯落物的遮阴效应可以有效减少土壤水分的蒸发,直接提高土壤水分<sup>[16]</sup>。此外,土壤温度和土壤水分具有强烈的耦合效应,土壤温度的降低也将减少土壤水分的蒸发,间接提高土壤水分。在内蒙古高原的春季时期,具有气温迅速回升且降水稀少的特征,同时此阶段也是植物返青后生长过程中对水分需求最重要的阶段。生长季早期枯落物累积后土壤更加湿润,表明枯落物累积对植物返青后的生长具有积极效应,也为在枯落物累积影响下大针茅和羊草种群返青后具有较快的生长速率提供了解释。在长时间尺度,由于枯落物累积对土壤温度和土壤水分的影响具有累积效应,围封草原群落微环境将趋于中生代<sup>[14]</sup>。群落微环境的中生代也进一步通过影响植物功能性状、种群生长发育及其适应性等方面,最终驱动围封草原植物群落结构与功能变化<sup>[13,18]</sup>。

### 3.2 枯落物累积对植物种群生长发育的影响

植物在适应环境变化的过程中通过改变物候过程,综合调节其生长发育过程。围封草原枯落物累积显著

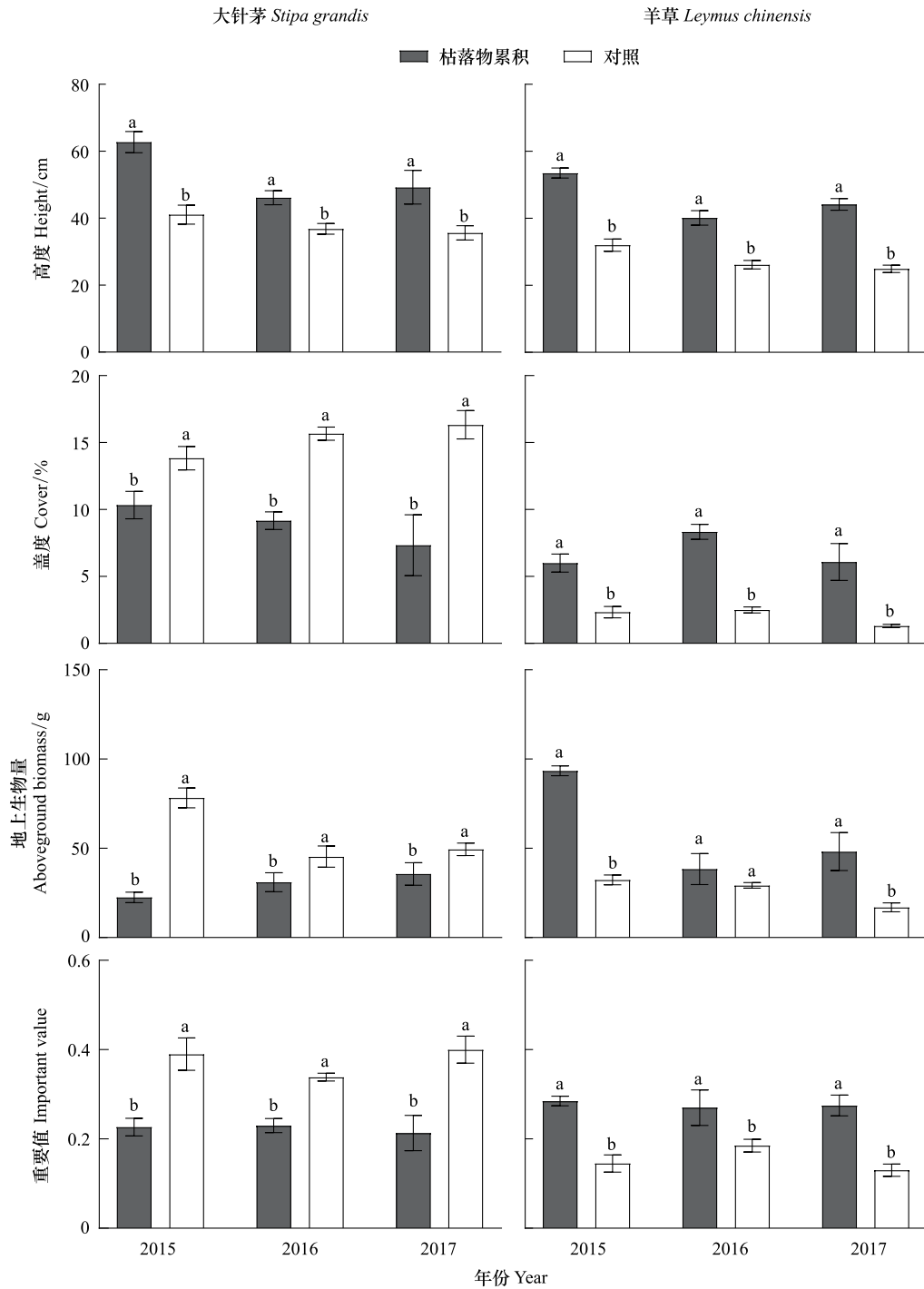


图 6 大针茅和羊草种群数量特征

Fig.6 Characteristics of population characteristics of *S. grandis* and *L. chinensis*

延迟植物种群的返青时间。有研究表明温度是影响内蒙古温带草原植物物候重要的生态因子且植物在返青过程中需要达到一定的积温<sup>[28]</sup>。因此,内蒙古围封草原枯落物累积引起的土壤温度降低是导致植物种群返青时间延迟的主要原因。然而,Zhu 等人在青藏高原围封高寒草原研究中发现,枯落物累积显著提前高山嵩草(*Kobresia pygmaea*), 钉柱委陵菜(*Potentilla saundersiana*)和楔叶委陵菜(*Potentilla cuneata*)的返青时间<sup>[29]</sup>。青藏高原草原地区的海拔远高于内蒙古草原地区,因此在气候方面形成了与内蒙古温带草原气候截然不同的特征。常年低温、强烈的太阳辐射和干旱是青藏高原草原地区主要的气候特征<sup>[30]</sup>。植物在长期适应低温后,

对温度变化的敏感性降低。因此,Zhu 等人认为青藏高原高寒草原围封后表层土壤水分的提高是导致这些植物返青时间提前的主要因子<sup>[29]</sup>。这些研究结果的差异也表明不同生态区域内的围封草原植物的物候过程在受区域气候的影响下,同时也易受到群落微环境内不同生态因子(温度和水分)的调控。

枯落物累积通过改变群落微环境特征影响植物种群的生长发育过程。围封草原枯落物累积后植物在返青后具有更快的生长速率。土壤水分是限制温带干旱—半干旱地区草原生态系统植物生长发育的关键因子。在植物返青后围封草原枯落物累积通过提高土壤水分,加速植物生长<sup>[25,31]</sup>。此阶段植物的高度较低,枯落物累积也通过物理阻隔作用降低群落光照强度,提高植物对光照的竞争,进而提高围封草原植物的生长速率<sup>[14,17]</sup>。在生长季中期,随着植株高度的增加,在围封草原中光照对植物生长的影响逐渐减弱,土壤水分成为主导植物生长发育的关键因子。植物种群的返青时间和生长发育过程对围封草原枯落物累积具有敏感响应,因此该指标可作为围封草原管理中植物生长状态的监测指标。此外,枯落物累积对植物的营养生长期无显著影响(图5),表明与返青时间和植株高度动态等指标相比,其对围封草原群落微环境变化具有不敏感响应。这也可能由于植物的营养生长期主要受自身生物学特性的调控,温度和水分等环境因子的变化对其影响微弱。围封草原植物种群生长发育过程的变化,进一步改变不同植物种群对光照和水分等资源的竞争能力,最终改变植物种群数量特征。

围封草原枯落物累积的影响下,大针茅种群具有更晚的返青时间,表明与羊草种群相比,枯落物累积对大针茅种群的具有更明显的消极影响。物种生物学特性及生态适应性差异是导致大针茅和羊草种群对枯落物累积响应差异的主要原因<sup>[32-33]</sup>。在根系分布方面,与大针茅根系分布(0—30 cm)相比,羊草种群的根系分布(0—10 cm)相对较浅<sup>[34]</sup>。因此,在生长季早期羊草种群在返青过程中受到较小的影响。我们在野外也观察到羊草为根茎禾草且其枯落物呈立枯状态,对羊草种群的返青过程产生较小的影响;大针茅为丛生禾草其枯落物常常堆积于植株上,严重抑制大针茅种群的返青过程。在水分适应方面,与羊草种群相比,羊草种群更加适应相对湿润环境<sup>[23]</sup>。因此,围封草原枯落物累积引起土壤水分的提高更加有利于羊草种群的生长发育过程,导致大针茅种群的盖度、地上生物量和重要值的显著降低和羊草种群盖度、地上生物量和重要值的显著增加。大针茅和羊草种群重要值排序的更替表明围封草原植物群落发生演替。因此,本研究也从植物种群的角度为典型草原围封后群落由丛生禾草草原向根茎禾草草原演替的观点提供进一步的支持<sup>[14]</sup>。

#### 4 结论

围封草原枯落物累积通过改变群落热量和水分等环境因子的重新分配,对不同植物种群的生长发育过程产生非对称影响。枯落物累积降低土壤温度并提高土壤水分,导致群落微环境趋于阴凉和湿润。与大针茅种群相比,羊草种群在物候和生长过程等方面对枯落物累积后相对湿润的微环境更加适应,进而提高其对资源的竞争能力。大针茅和羊草种群生长发育过程的改变综合引起两种植物种群数量特征的变化,导致其重要值发生更替,最终驱动围封草原植物群落演替。本研究从植物种群的角度为阐明围封草原群落结构与功能改变提供新视角。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 沈海花, 朱言坤, 赵霞, 耿晓庆, 高树琴, 方精云. 中国草地资源的现状分析. 科学通报, 2016, 61(2): 139-154.
- [ 2 ] 潘庆民, 薛建国, 陶金, 徐明月, 张文浩. 中国北方草原退化现状与恢复技术. 科学通报, 2018, 63(17): 1642-1650.
- [ 3 ] Sun J, Liu M, Fu B J, Kemp D, Zhao W W, Liu G H, Han G D, Wilkes A, Lu X Y, Chen Y C, Cheng G W, Zhou T C, Hou G, Zhan T Y, Peng F, Shang H, Xu M, Shi P L, He Y T, Li M, Wang J N, Tsunekawa A, Zhou H K, Liu Y, Li Y R, Liu S L. Reconsidering the efficiency of grazing exclusion using fences on the Tibetan Plateau. Science Bulletin, 2020, 65(16): 1405-1414.
- [ 4 ] Liu J H, Wu J J, Su H B, Gao Z H, Wu Z T. Effects of grazing exclusion in Xilin Gol grassland differ between regions. Ecological Engineering, 2017, 99: 271-281.
- [ 5 ] Liu J K, Bian Z, Zhang K B, Ahmad B, Khan A. Effects of different fencing regimes on community structure of degraded desert grasslands on Mu Us desert, China. Ecology and Evolution, 2019, 9(6): 3367-3377.



- [ 6 ] Zhu G Y, Deng L, Zhang X B, Shangguan Z P. Effects of grazing exclusion on plant community and soil physicochemical properties in a desert steppe on the Loess Plateau, China. *Ecological Engineering*, 2016, 90: 372-381.
- [ 7 ] Wang K B, Deng L, Ren Z P, Li J P, Shangguan Z P. Grazing exclusion significantly improves grassland ecosystem C and N pools in a desert steppe of Northwest China. *Catena*, 2016, 137: 441-448.
- [ 8 ] Bi X, Li B, Fu Q, Fan Y, Ma L X, Yang Z H, Nan B, Dai X H, Zhang X S. Effects of grazing exclusion on the grassland ecosystems of mountain meadows and temperate typical steppe in a mountain-basin system in Central Asia's arid regions, China. *Science of the Total Environment*, 2018, 630: 254-263.
- [ 9 ] Li W, Cao W X, Wang J L, Li X L, Xu C L, Shi S L. Effects of grazing regime on vegetation structure, productivity, soil quality, carbon and nitrogen storage of alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Ecological Engineering*, 2017, 98: 123-133.
- [ 10 ] Spooner P, Lunt I, Robinson W. Is fencing enough? The short-term effects of stock exclusion in remnant grassy woodlands in southern NSW. *Ecological Management & Restoration*, 2002, 3(2): 117-126.
- [ 11 ] 赵凌平, 谭世图, 白欣, 王占彬. 封育年限对云雾山典型草原植物繁殖与植被更新的影响. *草业学报*, 2017, 26(10): 1-9.
- [ 12 ] Merriam K E, Markwith S H, Coppoletta M. Livestock exclusion alters plant species composition in fen meadows. *Applied Vegetation Science*, 2018, 21(1): 3-11.
- [ 13 ] Hou D J, Liu C C, Qiao X G, Guo K. Asymmetric effects of litter accumulation on soil temperature and dominant plant species in fenced grasslands. *Ecosphere*, 2020, 11(11): e03289.
- [ 14 ] Hou D J, He W M, Liu C C, Qiao X G, Guo K. Litter accumulation alters the abiotic environment and drives community successional changes in two fenced grasslands in Inner Mongolia. *Ecology and Evolution*, 2019, 9(16): 9214-9224.
- [ 15 ] 张扬建, 朱军涛, 沈若楠, 王荔. 放牧对草地生态系统影响的研究进展. *植物生态学报*, 2020, 44(5): 553-564.
- [ 16 ] Facelli J M, Pickett S T A. Plant litter: its dynamics and effects on plant community structure. *The Botanical Review*, 1991, 57(1): 1-32.
- [ 17 ] Facelli J M, Pickett S T A. Plant litter: light interception and effects on an old - field plant community. *Ecology*, 1991, 72(3): 1024-1031.
- [ 18 ] 侯东杰, 陆帅志, 王静, 郭柯. 典型草原围封后羊草地上功能性状对枯落物累积的响应. *生态学报*, 2020, 40(18): 6522-6531.
- [ 19 ] 胡玉昆, 高国刚, 李凯辉, 公延明, 尹伟, 王吉云, 陈爱莲. 巴音布鲁克草原不同围封年限高寒草地植物群落演替分析. *冰川冻土*, 2009, 31(6): 1186-1194.
- [ 20 ] Jing Z B, Cheng J M, Chen A. Assessment of vegetative ecological characteristics and the succession process during three decades of grazing exclusion in a continental steppe grassland. *Ecological Engineering*, 2013, 57: 162-169.
- [ 21 ] 单贵莲, 薛世明, 陈功, 匡崇义, 刘钟龄, 初晓辉. 季节性围封对内蒙古典型草原植被恢复的影响. *草地学报*, 2012, 20(5): 812-818.
- [ 22 ] Li F Y, Jäschke Y, Guo K, Wesche K. Grasslands of China//Goldstein M I, DellaSala D A, eds. *Encyclopedia of the World's Biomes*. Amsterdam: Elsevier, 2020: 773-784.
- [ 23 ] Bai W M, Sun X Q, Wang Z W, Li L H. Nitrogen addition and rhizome severing modify clonal growth and reproductive modes of *Leymus chinensis* population. *Plant Ecology*, 2009, 205(1): 13-21.
- [ 24 ] Chen S P, Bai Y F, Zhang L X, Han X G. Comparing physiological responses of two dominant grass species to nitrogen addition in Xilin River Basin of China. *Environmental and Experimental Botany*, 2005, 53(1): 65-75.
- [ 25 ] Deutsch E S, Bork E W, Willms W D. Soil moisture and plant growth responses to litter and defoliation impacts in Parkland grasslands. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 135(1/2): 1-9.
- [ 26 ] Sagar R, Li G Y, Singh J S, Wan S Q. Carbon fluxes and species diversity in grazed and fenced typical steppe grassland of Inner Mongolia, China. *Journal of Plant Ecology*, 2019, 12(1): 10-22.
- [ 27 ] Song Y T, Li L L, Li Q, Wuyunna, Zhou D W. Plant litter effects inversely on air and soil temperatures in *Leymus chinensis* grassland, Northeast China. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, 146: 012005.
- [ 28 ] 白永飞, 徐志信. 典型草原 9 种牧草生长发育规律的研究. *中国草地*, 1994, (6): 21-27.
- [ 29 ] Zhu J T, Zhang Y J, Liu Y J. Effects of short-term grazing exclusion on plant phenology and reproductive succession in a Tibetan alpine meadow. *Scientific Reports*, 2016, 6: 27781.
- [ 30 ] 中国科学院青藏高原综合科学考察队. *西藏草原*. 北京: 科学出版社, 1992.
- [ 31 ] Deutsch E S, Bork E W, Willms W D. Separation of grassland litter and ecosite influences on seasonal soil moisture and plant growth dynamics. *Plant Ecology*, 2010, 209(1): 135-145.
- [ 32 ] Wang R Z, Gao Q, Chen Q S. Effects of climatic change on biomass and biomass allocation in *Leymus chinensis* (*Poaceae*) along the North-east China Transect (NECT). *Journal of Arid Environments*, 2003, 54(4): 653-665.
- [ 33 ] Song X L, Wang Y H, Lv X M. Responses of plant biomass, photosynthesis and lipid peroxidation to warming and precipitation change in two dominant species (*Stipa grandis* and *Leymus chinensis*) from north China grasslands. *Ecology and Evolution*, 2016, 6(6): 1871-1882.
- [ 34 ] 陈世鑽, 张昊, 王立群, 占布拉, 赵萌莉. *中国北方草地植物根系*. 长春: 吉林大学出版社, 2001.