

DOI: 10.5846/stxb201606301320

鲍雅静,曹明,李政海,郭鹏,张靖,秦洁.羊草与大针茅根系构型对水分梯度响应的比较研究.生态学报,2019,39(3): - .

Bao Y J, Cao M, Li Z H, Guo P, Zhang J, Qin J. A comparative study of the response of *Leymus chinensis* and *Stipa grandis* root characteristics to moisture gradients. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(3): - .

## 羊草与大针茅根系构型对水分梯度响应的比较研究

鲍雅静<sup>1,\*</sup>, 曹 明<sup>1,2</sup>, 李政海<sup>1</sup>, 郭 鹏<sup>1</sup>, 张 靖<sup>1</sup>, 秦 洁<sup>3</sup>

1 大连民族大学环境与资源学院, 大连 116600

2 东北师范大学生命科学学院, 长春 130000

3 内蒙古农业大学草原与资源环境学院, 呼和浩特 010021

**摘要:**羊草(*Leymus chinensis*)与大针茅(*Stipa grandis*)是内蒙古锡林郭勒典型草原的两大建群种,也是内蒙古草原的重要优良牧草。选取锡林郭勒草原以大针茅和羊草为优势种的围封草场为研究样地,通过原状土柱移栽,进行了两年的水分梯度控制实验(150、300、450、600 mm),分别模拟当地年降雨量由于旱年到是湿润年的变化情况,分析比较羊草种群和大针茅种群地上高度和根系构型对水分梯度的响应情况。结果表明:相比大针茅种群,羊草种群对水分梯度的响应更敏感,随着水分梯度的增加,羊草地上高度和根系直径显著增加,根系长度和根系深度显著减少;而大针茅的地上高度和根系特征各项指标均没有显出与水分梯度的相关性,显然大针茅比羊草更能适应干旱生境。在干旱条件(模拟年降雨量 150 mm 处理)下,大针茅种群地上高度达到峰值,生长状况良好;羊草种群则采用地上个体小型化,地下主根变细,分叉,向土壤深层扩展的生长策略。因此,在气候变化背景下,干旱化的气候将导致大针茅种群在群落中的优势地位逐渐增加,反之羊草种群则会随着气候湿润化而占据更大的优势。

**关键词:**羊草;大针茅;根系特征;水分梯度

## A comparative study of the response of *Leymus chinensis* and *Stipa grandis* root characteristics to moisture gradients

BAO Yajing<sup>1,\*</sup>, CAO Ming<sup>1,2</sup>, LI Zhenghai<sup>1</sup>, GUO Peng<sup>1</sup>, ZHANG Jing<sup>1</sup>, QIN Jie<sup>3</sup>

1 College of Environmental & Resource Sciences, Dalian Nationalities University, Dalian 116600, China

2 College of Life Science, Northeast Normal University, Changchun 130000, China

3 College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010021, China

**Abstract:** *Leymus chinensis* and *Stipa grandis* are two of the main species of typical grasslands of Xilingol, Inner Mongolia, and are important forage grasses. An enclosed grassland, with *L. chinensis* and *S. grandis* as the dominant species, in Xilingol was selected as the research area, and moisture gradient control experiments (150, 300, 450, 600 mm) were carried out over two years by transplanting the original soil column, to simulate changes of local annual rainfall from drought to wet years, and the response of plant height and root architecture of *L. chinensis* and *S. grandis* populations were analyzed and compared under the different moisture gradients. The results showed that the response of *L. chinensis* populations was more sensitive to moisture gradients than that of *S. grandis*. With increasing moisture gradients, the plant height and root diameter of *L. chinensis* increased, whereas the root length and depth decreased significantly ( $P < 0.05$ ). However, for *S. grandis*, the indicators of root architecture and plant height showed no correlation with the moisture gradient. Therefore, *S. grandis* could adapt to arid habitats more effectively than *L. chinensis*, and under drought conditions (simulated rainfall of 150 mm) the plant height of *S. grandis* populations reached a peak value and grew efficiently, whereas *L. chinensis*

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0500707,2016YFC050050302);中央高校基本科研业务费专项资金(0113-20000101)

收稿日期:2016-06-30; 网络出版日期:2018-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: byj@dlnu.edu.cn

populations adopted a growth strategy of individual miniaturization, with thinner taproots and bifurcation to extend to the deep soil. Therefore, with climate change, a drying climate will result in increased *S. grandis* populations as the dominant species in the community, and *L. chinensis* populations will have a greater advantage in wetter climates.

**Key Words:** *Leymus chinensis*; *Stipa grandis*; root characteristics; moisture gradient

草原是地球上重要陆地生态系统类型之一,世界草原总面积约为陆地总面积的 1/6。据统计,我国草地面积约为 4 亿  $\text{hm}^2$ ,约占国土总面积的 41.7%。20 世纪 90 年代初期,退化面积约为 51%;目前退化草地面积已达 3867 万  $\text{hm}^2$ ,占可利用草原的 60%。草原是我国西北部地区的主要植被,其中内蒙古草原是我国最大的草场和天然牧场,是我国重要的畜牧业生产基地。而草原生态系统的日益恶化给人们的生活、生产造成不同程度损失,草原保护已成为国家生态建设的重要问题之一<sup>[1]</sup>。

根系是植物适应陆生生活,吸收水分、养分的重要器官,将植物固着在土壤中,起支持作用。根系的分布格局与土壤条件状况又是分不开的,与气温、土壤水分养分状况以及植物组成等因素都有关<sup>[2]</sup>。迄今为止,我国对于草地地上部分研究众多,而由于地下生物量的测定过程复杂,工作量大,地下部分研究较地上部分相对薄弱。但是,我国已有学者在逐渐地展开地下部分的工作,并取得了一定的进展与成果。自 20 世纪 80 年代初,我国开始有学者进行草地的地下研究<sup>[3]</sup>。姜恕、陈佐忠、李博等先后对内蒙古草原羊草群落结构、大针茅群落草地生产力及地下生产力、地上地下生物量的分配、根系空间分布以及与环境因子的关系等进行了研究<sup>[4-6]</sup>。显然,地下部分的研究越来越重要,已成为草地研究中必不可少的环节<sup>[7-10]</sup>。

在空间尺度上,降水被认为是影响干旱半干旱区草原生态系统生物量变化的主要因素,充足的降水是生物量大量积累的必要条件<sup>[11-14]</sup>,王义凤、姜恕等人研究指出,在一定范围内,降水越多,草原生产力越高。而且,当土壤中的水分缺乏时,植物地上部分生长受限,地下生物量比值升高<sup>[15]</sup>。陈佐忠等对地下生物量与降水量的关系进行了分析,发现无论是羊草草原还是大针茅草原,两者之间均呈直线回归关系,但羊草草原地下生物量随单位数量降雨量的增加速度要比大针茅草原的快<sup>[16]</sup>。Wang 等研究表明,随着降水的增加或土壤含水量的增加,羊草群落地下生物量所占比例均减小<sup>[17]</sup>。

自从 20 世纪 30 年代,美国 J.E. Weaver 以十多种作物根系为对象开始研究,根系构型的研究日益受到重视<sup>[18-22]</sup>。我国有王旭峰等曾对内蒙古草地丛生型植物根系构型的研究<sup>[23]</sup>;梁金华等对内蒙古草地轴根型植物根系构型参数的研究<sup>[24]</sup>;毛齐正在研究过程中,也提出了“构建理想根构型”的展望<sup>[25]</sup>。目前,根系研究已成为一个极具潜力的基础性科研课题。草地优势植物根系对于各种影响因子如何具体响应、根系构型如何改变是当今草地研究与草原保护的重要问题,而且不同种草地植物的根系构型对土壤水分的变化会做出如何反应、各项根系指标之间如何权衡与协同作用都是需要进一步研究的重点<sup>[26-27]</sup>。

羊草 (*Leymus chinensis*) 与大针茅种群 (*Stipa grandis*) 是内蒙古中部地区分布广、面积大的地带性草原类型的建群种,是优良的天然牧草。羊草属多年生根茎禾草,一直以来,众多学者对羊草的生物生态学特性进行了大量研究工作,如种群密度、生物量、繁殖特征、以及环境条件对羊草种群的影响等<sup>[28-29]</sup>。属旱生丛生禾草,是亚洲中部草原亚区特有的蒙古草原种,以其为建群种或优势种的草原群落是我国典型草原的代表群系,对其种群生态生物学特性也有较多的研究<sup>[6]</sup>。但目前为止,针对羊草和大针茅等优势种根系构型的研究很少,优势种根系构型对水分因子响应的研究更是寥寥无几<sup>[30-32]</sup>。基于此,本研究在内蒙古典型草原选取羊草与大针茅两大建群种,通过水分梯度控制实验,分析其根系特征对模拟降雨量梯度的响应情况,比较这两个种群水分利用对策的差异,进一步揭示气候变化背景下草原植物群落生长变化的总体趋势,为实现草原的保护和退化草原的恢复提供科学依据。为草原地区的生态环境保护、草原的可持续发展提供基础信息。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区自然状况

研究区位于内蒙古锡林郭勒盟典型草原区,锡林浩特市 (43°93'N, 116°07'E) 白音锡勒牧场 (锡林浩特市

郊南 52 km) 境内。平均海拔 1200 m 左右,属于温带半干旱大陆性气候;冬季受蒙古高压控制,寒冷干燥,夏季受海洋性季风的影响,较为温和湿润。3—5 月常有大风,月平均风速达 4.9 m/s。年均温为 0.6℃,1 和 7 月平均气温分别为 -21.3℃ 和 18.6℃,无霜期 91 d。草原植物生长期约 150 d。多年平均降水量约为 350 mm,降雨量年际变化较大,变化幅度常在 30% 以上,最高年份达到 645 mm,而最低年份不过 182 mm。另外,降雨量月际间差异很大,其中 60%—80% 的降水量集中在 5—8 月。

选取白音锡勒牧场境内的大针茅和羊草占优势的典型草原群落为研究样地,该样地位于中科院内蒙古草原生态系统定位研究站的常年监测样地附近,围封前为当地牧民的打草场,每年秋季打草一次,于 2008 年年年初围封作为实验样地。

## 1.2 样地植被与土壤概况

于 2008 年进行试验前土壤植被基础调查,样地土壤养分、水分条件优越,土壤结构性良好,可以为植物生长提供优良的环境条件。主要植被有:大针茅,羊草,糙隐子草 (*Cleistogenes squarrosa*),黄囊苔草 (*Carex korshinskyi*),羽茅 (*Achnatherum sibiricum*),猪毛菜 (*Salsola collina*),米氏冰草 (*Agropyron michnoi*) 等(表 1)。其中,大针茅(72.46%)、羊草(17.95%)、糙隐子草(3.69%) 的相对生物量偏高,以大针茅所占比重最大,为样地优势种。

表 1 样地植被特征与 0—10 cm 土壤概况

Table 1 Vegetation characteristics and 0—10 cm soil condition of sample plot

植物名称及土壤因子 Plant species names and soil parameters	数量值 Value	植物名称及土壤因子 Plant species names and soil parameters	数量值 Value
主要物种 Main species	相对生物量 Relative biomass	土壤概况 Soil condition of sample plot	相对生物量 Relative biomass
大针茅 <i>Stipa grandis</i>	72.46%	有机碳 Soil organic carbon /%	2.44
羊草 <i>Leymus chinensis</i>	17.95%	全氮 Soil total nitrogen/ (g/kg)	3.16
糙隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i>	3.69%	含水量 Soil water content/ (g/kg)	6.96
黄囊苔草 <i>Carex korshinskyi</i>	3.22%	土壤容重 Soil bulk density/ (g/m <sup>3</sup> )	1.15
羽茅 <i>Achnatherum sibiricum</i>	3.15%	地上生物量 Above ground biomass/ (g/m <sup>2</sup> )	95.26±14.01
猪毛菜 <i>Salsola collina</i>	1.40%	地下生物量 Underground biomass/ (g/m <sup>2</sup> )	698.16±93.41

## 1.3 取样方法

在选取的围封样地(100 m×100 m)挖取带有植物地上部分及根系的原状土柱 20 份(长 45 cm×宽 30 cm×高 38cm),将其移入大小合适的栽培箱内进行水分梯度实验,设计 150、300、450、600 mm 的 4 个梯度来模拟从干旱年份到湿润年份的年降雨量变化,每个水分梯度进行 5 个重复。从 2009 年 6 月 1 日至 9 月 30 日定期进行水分处理,每隔 5 d 浇一次水,4 个梯度的浇水量为 0.5、1.0、1.5、2.0 L/5d。实验开始到结束每年模拟降水 25 次,依据 6—9 月份降水占年降水 60% 的比例,每次模拟降水在 45 cm×30 cm 样方内,折合计算得出 0.5 L/5d 的降水实验模拟最早年 150 mm 年降水量、1.0 L/5d 实验模拟正常年份 300 mm 年降水、1.5 L/5d 实验模拟降水丰富年份达 450 mm、2 L/5d 实验模拟最高降雨量年份 600 mm。每当遇到雨水天气,用塑料膜遮盖栽培箱,使其不接受天然降雨,雨停后揭开塑料膜,以达到与自然环境相一致的光照等条件。降水实验连续两年后,在 2010 年 8 月下旬试验结束。在羊草与大针茅生长旺盛期时期(8 月下旬),在样地上的每个处理中分别随机选取 3 个重复处理,取出栽培桶内的土方,放置沙袋中冲洗掉泥土。再在每个处理中分别随机选取 10 株完整的羊草与大针茅植株,观察和测量地上部分高度和根系深度,然后使用 Delta-T SCA 根系扫描仪对植株根系进行扫描,样品图像扫描后输送到计算机中,利用根系分析仪系统中图像分析软件分析两个种群根系的长度、直径、面积、体积等根系构型特征。根系直径为系统对所有根系各个部位的直径进行的自动平均,根系长度为所有根长度总和,根系表面积为该软件通过各个部分不同的根系直径和长度计算得出的总和,根系体积通过软件各个部分根系长度直径计算体积的总和。

## 1.4 数据统计分析

实验数据用 Excel 软件整理,最后利用 SPSS-statistics 20.0 对数据进行统计分析,采用单因素方差分析 (one-way ANOVAs) 分析水分梯度对根系特征及地上高度的影响, Duncan 假定方差齐性检验用于不同处理之间根系特征的多重比较,采用 Pearson Correlation 相关分析检测根系特征与地上高度和水分梯度之间的关系。

## 2 结果与分析

### 2.1 羊草与大针茅根系构型特征对水分梯度的响应

本研究选取了 4 个根系构型指标,分别为根系直径、根系长度、根系面积和根系体积,研究羊草和大针茅种群根系特征随水分梯度的变化规律,结果表明:

羊草根系直径在不同水分梯度之间无显著差异 (图 1),但是相关分析表明,羊草根系直径与水分梯度呈显著正相关 ( $r=0.35, P<0.05$ ) (表 2),即随着水分的增加根系直径逐渐增大;与羊草不同的是,大针茅根系直径在不同水分梯度之间差异性显著 ( $P<0.05$ ): 450 mm 水分处理时根系直径达到最大值,显著高于 600 mm 水分处理 (图 1),但与水分梯度无显著相关性 (表 3)。

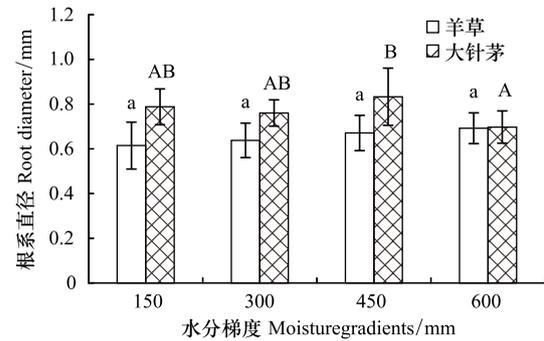


图 1 羊草与大针茅根系直径对水分梯度的响应

Fig.1 The response of *Leymus chinensis* and *Stipa grandis* root diameter to moisture gradients

同一种植物中字母不同者表示数值间差异显著 ( $P<0.05$ )

表 2 羊草根系特征与水分梯度的相关性分析

Table 2 Correlation analysis between *Leymus chinensis* root characteristics and water gradients

相关系数 Correlation coefficient	根系长度 Root length	根系直径 Root diameter	根系面积 Root area	根系体积 Root volume	根系深度 Root depth	地上高度 Plant height
根系长度 Root length	1					
根系直径 Root diameter	-0.174	1				
根系面积 Root area	0.907 **	0.192	1			
根系体积 Root volume	0.617 **	0.457 **	0.846 **	1		
根系深度 Root depth	0.23	0.032	0.186	0.073	1	
地上高度 Plant height	0.13	0.318	0.309	0.212	-0.063	1
水分梯度 Moisture gradients	-0.429 **	0.350 *	-0.211	-0.028	-0.485 **	0.454 **

\* 表示在 0.05 水平上显著相关 \*\* 表示在 0.01 水平上显著相关

表 3 大针茅根系特征与水分梯度的相关性分析

Table 3 Correlation analysis between *Stipa grandis* root characteristics and moisture gradients

相关系数 Correlation coefficient	根系长度 Root length	根系直径 Root diameter	根系面积 Root area	根系体积 Root volume	根系深度 Root depth	地上高度 Plant height
根系长度 Root length	1					
根系直径 Root diameter	-0.091	1				
根系面积 Root area	0.872 **	0.349 *	1			
根系体积 Root volume	0.568 **	0.582 **	0.84 **	1		
根系深度 Root depth	-0.191	0.067	-0.203	-0.075	1	
地上高度 Plant height	0.231	-0.015	0.17	0.037	-0.157	1
水分梯度 Moisture gradients	-0.191	-0.23	-0.239	-0.11	-0.193	-0.277

\* 表示在 0.05 水平上显著相关, \*\* 表示在 0.01 水平上显著相关

单因素方差分析显示样地中羊草根系长度在不同水分梯度之间差异显著 ( $P<0.05$ ) (图 2): 在 150 mm 水

分处理下羊草根系长度达到最大值,显著高于 300 mm 和 600 mm 两个水分处理,而与 450 mm 水分处理差异不显著,并且羊草根系长度与水分梯度呈极显著负相关( $r = -0.429, P < 0.01$ ) (表 2); 而大针茅根系长度在 4 个水分梯度下无显著差异(图 2),且根系长度与水分梯度无显著相关关系(表 3)。

羊草根系面积不同水分梯度之间无显著差异(图 3),且与水分梯度无显著相关关系;而大针茅根系面积在不同水分梯度之间有显著差异( $P < 0.05$ ):在 600 mm 水分处理下最小(图 3),且显著低于 150 mm 和 450 mm 两个水分处理,但根系面积此指标与水分梯度无显著相关性。根据大针茅根系特征的相关性分析(表 3),可以看出大针茅根系面积与根系直径呈显著正相关( $r = 0.349, P < 0.05$ ),根系面积随着根系直径的变化改变,而羊草的根系面积与根系直径没有相关性。

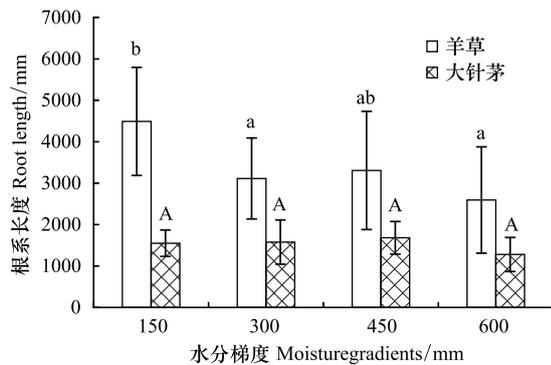


图 2 羊草与大针茅根系长度对不同水分梯度处理的响应

Fig.2 The response of *Leymus chinensis* and *Stipa grandis* root length to moisture gradients

同一种植物中字母不同者表示数值间差异显著( $P < 0.05$ )

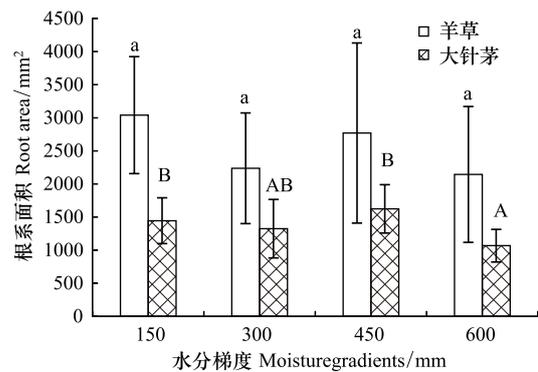


图 3 羊草与大针茅根系面积对水分梯度的响应

Fig.3 The response of *Leymus chinensis* and *Stipa grandis* root area to moisture gradients

同一种植物中字母不同者表示数值间差异显著( $P < 0.05$ )

羊草根系体积在不同水分梯度之间无显著差异(图 4),且与水分梯度无显著相关性(表 2);大针茅根系体积在不同水分梯度之间差异显著( $P < 0.05$ ):在 450 mm 水分处理下显著高于 300 mm 和 600 mm 两个水分处理,而与 150 mm 水分处理无显著差异,但根系体积与水分梯度无显著相关性(表 2,3)。根系特征之间的相关分析显示,羊草( $r = 0.846, P < 0.01$ )与大针茅( $r = 0.84, P < 0.01$ )的根系体积与根系面积均呈极显著正相关(表 2,3)。

## 2.2 羊草与大针茅地上高度与根系深度对水分梯度的响应

羊草地上高度在不同水分处理之间差异显著( $P < 0.05$ ) (图 5):在 600 mm 水分处理下达到峰值,与 300、450 mm 两个水分处理差异不显著,而显著高于 150 mm 处理,且羊草地上高度与水分梯度呈极显著正相关关系( $r = 0.454, P < 0.01$ );大针茅地上高度在不同水分梯度之间无显著差异,且与水分梯度无显著相关性(表 2,3)。

单因素方差分析显示,羊草根系深度在不同水分梯度之间差异显著( $P < 0.05$ ):在 150 mm 水分处理下达到最大值,与 300、450 mm 两个水分处理无显著差异,而显著大于 600 mm 水分处理(图 6),且羊草根系深度与水分梯度呈极显著负相关( $r = -0.485, P < 0.01$ );大针茅根系深度在不同水分梯度之间无显著差异,且与水分梯度无显著相关性(表 2,3)。

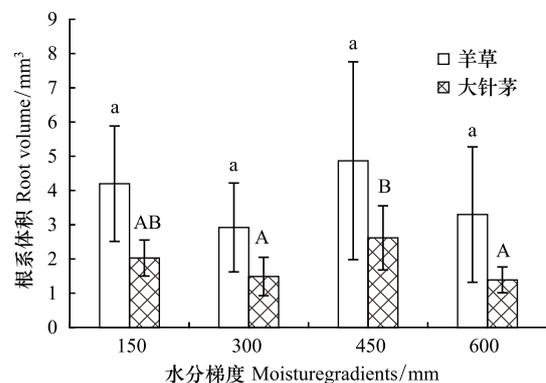


图 4 羊草与大针茅根系体积对水分梯度的响应

Fig.4 The response of *Leymus chinensis* and *Stipa grandis* root volume to moisture gradients

同一种植物中字母不同者表示数值间差异显著( $P < 0.05$ )

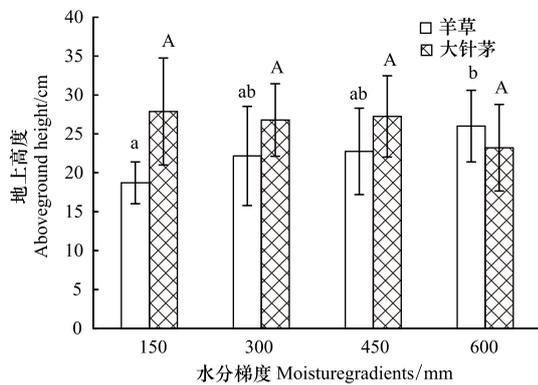


图5 羊草与大针茅地上高度对水分梯度的响应

Fig.5 The response of *Leymus chinensis* and *Stipa grandis* above ground height to moisture gradients

同一种植物中字母不同者表示数值间差异显著 ( $P < 0.05$ )

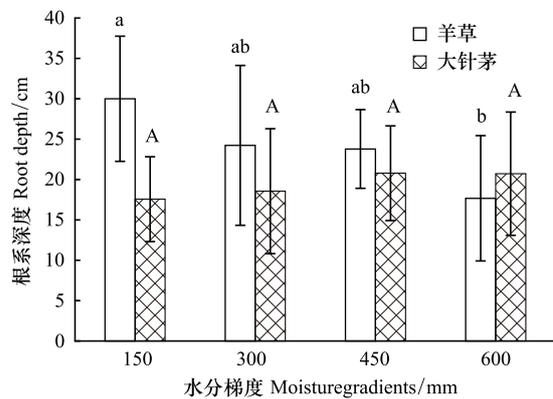


图6 羊草与大针茅根系深度对水分梯度的响应

Fig.6 The response of *Leymus chinensis* and *Stipa grandis* root depth to moisture gradients

同一种植物中字母不同者表示数值间差异显著 ( $P < 0.05$ )

### 3 讨论

相比大针茅种群,羊草种群地上高度对水分梯度的响应更敏感,随着水分梯度的增加,羊草地上高度显著增加;而大针茅的地上高度没有显出与水分梯度的相关性。许多研究表明,羊草和大针茅种群的其他生物学特征,如生物量对于降水量的响应显示出相似的变化规律,如李德新等对羊草种群地上生物量进行研究发现,降水量的年度变化及其分配直接导致羊草种群地上生物量的年度波动<sup>[33]</sup>。蔡学彩、杨理等人的研究结果表明,年度降水变化、月降水和关键时期降水的变化与大针茅种群地上生物量之间没有显著的相关性<sup>[34]</sup>。赵育民等人对内蒙古温带典型草原羊草与大针茅群落结构特征的研究表明,大针茅群落较羊草群落更适应干旱气候条件<sup>[35]</sup>。本研究结果也显示,在模拟降雨量 150 mm 处理下,大针茅地上高度值大于羊草,其耐旱能力高于羊草;但当水分条件非常优越(模拟降雨量 600 mm 处理)时,大针茅地上高度值小于羊草,其增产潜力不如羊草。

羊草根系特征对水分梯度的响应程度较大针茅也更为显著。羊草根系直径与水分梯度呈显著正相关关系,在模拟降雨量 150 mm 处理下最小,根系长度和根系深度与水分梯度呈显著负相关关系。说明面对干旱条件时,羊草根系向下加深,采用主根变细、分叉,须根增多,增大根系面积且纵向扩展以吸收水分的策略。王云龙等人的研究结果也表明,在干旱条件下,羊草通过增加根部的比重来提高抗旱性。<sup>[36]</sup>

相比羊草,大针茅根系对水分梯度的响应并不显著。研究发现大针茅根系直径和根系体积均在降水 450 mm 处理下最高,其他根系指标均没有显著响应。崔骁勇认为大针茅适应较为干旱的条件不是通过调整根系而提高水分的利用效率,而是通过提高水分竞争能力、降低蒸腾耗水实现的<sup>[37]</sup>。这与王旭峰的研究结果相一致<sup>[23]</sup>,大针茅在干旱条件下增加根分叉数产生新的侧根来吸收周围水分。

大多数情况下,水分是典型草原区最重要的限制性资源,典型草原生物量随降水量的波动性较强,但其生产力能够长期维持相对稳定性,是依赖于群落中的植物种类之间的补偿作用<sup>[38]</sup>。通过这些种间的补偿性,可以看出优势种与亚优势种、优势种与其他非优势种、非优势种之间均存在着补偿性。在内蒙古锡林河流域,多年生根茎禾草与多年生丛生禾草和多年生杂类草之间,生物量的年度变化就具有补偿作用<sup>[39-40]</sup>。本研究中的羊草与大针茅的种间关系,也更多的体现出补偿作用而非竞争关系,是优势种与亚优势种之间的补偿作用。作为根茎禾草优势种羊草和丛生禾草大针茅,这两个种在典型草原分布较为广泛,是典型草原的建群种,所以大针茅和羊草对降水的响应在整个典型草原研究中具有重要意义。羊草和大针茅对于水分的响应是不同的,在地下空间中具有各自的生态位,羊草对于干旱主要是通过根系向深层土壤扩展来获取更多的水分,而大针

茅根系的不敏感性也说明大针茅在干旱条件下可能不是通过根系生长有效吸收水分,其内在的生理反应可能更准确说明大针茅抗旱性的原理。而在水分充足的条件下,羊草得到足够水分以后就会把能量更多的投资在高度的生长上,以获得更多的阳光,通过光合作用的增加促使有机物的积累,而大针茅的高度变化不明显可能是是因为把更多的资源分配给横向的扩展,通过占据更大面积的土壤表面从而提高光合作用,进一步增加优势度。高慧等的研究表明,丛生的大针茅在充足的水分条件下除了提高自身高度以外还会增加其丛幅从而提高繁殖能力以占据更大的空间<sup>[41]</sup>,所以有可能大针茅把更多的能力投资在丛幅的扩大上,这需要我们进一步的研究。在降水波动较大的典型草原羊草和大针茅都可以成为优势种,其应对干旱采取的不同的适应策略是其共存的原因,在降水良好的情况下通过不同的生长策略增加竞争力,正是这样的适应策略的差异性才使得草地保持稳定健康。

#### 4 结论

(1) 相比大针茅种群,羊草种群对水分梯度的响应更敏感,随着水分梯度的增加,羊草地上高度和根系直径显著增加,根系长度和根系深度显著减少;而大针茅的地上高度和根系特征各项指标均没有显出与水分梯度的相关性,显然大针茅比羊草更能适应干旱生境。

(2) 在干旱条件(模拟降雨量 150 mm 处理)下,大针茅种群地上高度达到峰值,生长状况良好;羊草种群则采用地上个体小型化,地下主根变细,分叉,向土壤深层扩展的生长策略。

(3) 在气候变化背景下,干旱化的气候将导致大针茅种群在群落中的优势地位逐渐增加,反之羊草种群则会随着气候湿润化而占据更大的优势。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] 郭月玲, 江海东, 蒋志峰. 我国草地生态环境退化的原因与对策. 畜牧与饲料科学, 2011, 32(8): 81-82.
- [ 2 ] Ingram K T, Leers G A. Software for measuring root characters from digital images. Agronomy Journal, 2001, 93(4): 918-922.
- [ 3 ] 胡中民, 樊江文, 钟华平, 韩彬. 中国草地地下生物量研究进展. 生态学杂志, 2005, 24(9): 1095-1101.
- [ 4 ] 姜恕, 戚秋慧, 孔德珍. 内蒙古羊草大针茅草地群落生物量初步研究//中国科学院内蒙古草原生态系统定位站. 草原生态系统研究. 北京: 科学出版社, 1985: 12-22.
- [ 5 ] 陈佐忠, 黄德华. 典型草原地下部分生产力与周转值. 植物学通报, 1993, (Z1): 29.
- [ 6 ] 安渊, 李博, 扬持, 徐柱, 阎志坚, 韩国栋. 内蒙古大针茅草原草地生产力及其可持续利用研究 I. 放牧系统植物地上现存量动态研究. 草业学报, 2001, 10(2): 22-27.
- [ 7 ] Gill R A, Kelly R H, Parton W J, Day K A, Jackson R B, Morgan J A, Scurlock J M O, Tieszen L L, Castle J V, Ojima D S, Zhang X S. Using simple environmental variables to estimate below-ground productivity in grasslands. Global Ecology and Biogeography, 2002, 11(1): 79-86.
- [ 8 ] Geng Y B, Luo G Q. Influencing factors and partitioning of respiration in a *Leymus chinensis* steppe in Xilin River Basin, Inner Mongolia, China. Journal of Geographical Sciences, 2011, 21(1): 163-175.
- [ 9 ] Jemai I, Aissa N B, Guirat S B, Ben-Hammouda M, Gallali T. Impact of three and seven years of no-tillage on the soil water storage, in the plant root zone, under a dry subhumid Tunisian climate. Soil and Tillage Research, 2013, 126: 26-33.
- [ 10 ] Ferrante D, Oliva G E, Fernández R J. Soil water dynamics, root systems, and plant responses in a semiarid grassland of Southern Patagonia. Journal of Arid Environments, 2014, 104: 52-58.
- [ 11 ] 王国杰, 汪诗平, 郝彦宾, 蔡学彩. 水分梯度上放牧对内蒙古主要草原群落功能群多样性与生产力关系的影响. 生态学报, 2005, 25(7): 1649-1656.
- [ 12 ] Correspondent A. Plant roots: Water transport. Nature, 1971, 233(5318): 307.
- [ 13 ] Ehlers W, Hamblin A P, Tennant D, van der Ploeg R R. Root system parameters determining water uptake of field crops. Irrigation Science, 1991, 12(3): 115-124.
- [ 14 ] Roose T, Fowler A C. A model for water uptake by plant roots. Journal of Theoretical Biology, 2004, 228(2): 155-171.
- [ 15 ] 王义凤, 姜恕. 干旱气候对大针茅草原的群落结构和地上部分生物量的影响. 植物生态学与地植物学资料, 1982, 6(4): 333-338.
- [ 16 ] 陈佐忠, 黄德华, 张鸿芳. 内蒙古锡林河流域羊草草原与大针茅草原地下生物量与降雨量关系模型探讨//中国科学院内蒙古草原生态系统定位站. 草原生态系统研究. 北京: 科学出版社, 1988: 20-25.

- [17] 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.
- [18] Schenk H J, Jackson R B. Rooting depths, lateral root spreads and below-ground/above-ground allometries of plants in water-limited ecosystems. *Journal of Ecology*, 2002, 90(3): 480-494.
- [19] Yu G R, Zhuang J, Nakayama K, Jin Y. Root water uptake and profile soil water as affected by vertical root distribution. *Plant Ecology*, 2007, 189(1): 15-30.
- [20] Camposeo S, Rubino P. Effect of irrigation frequency on root water uptake in sugar beet. *Plant and Soil*, 2003, 253(2): 301-309.
- [21] Limane A, Smail-Saadoun N, Belkebir-Boukais A, Kissoum-Hamdi K. Root architecture adaptation of *Pistacia atlantica* subsp. *atlantica* according to an increasing climatic and edaphic gradient: Case of a north-south transect in Algeria. *Turkish Journal of Botany*, 2014, 38: 536-549.
- [22] Wang G L, Fahey T J, Xue S, Liu F. Root morphology and architecture respond to N addition in *Pinus tabulaeformis*, west China. *Oecologia*, 2013, 171(2): 583-590.
- [23] 王旭峰, 王占义, 梁金华, 王立群. 内蒙古草地丛生型植物根系构型的研究. *内蒙古农业大学学报*, 2013, 34(3): 77-82.
- [24] 梁金华, 王立群, 齐智鑫, 王旭峰. 内蒙古草地常见轴根型植物根系构型参数的研究. *内蒙古农业大学学报*, 2012, 33(3): 62-66.
- [25] 毛齐正, 杨喜田, 苗蕾. 植物根系构型的生态功能及其影响因素. *河南科学*, 2008, 26(2): 172-176.
- [26] Le Marié C, Kirchgessner N, Marschall D, Walter A, Hund A. Rhizoslides: Paper-based growth system for non-destructive, high throughput phenotyping of root development by means of image analysis. *Plant Methods*, 2014, 10: 13.
- [27] Aggarwal P, Choudhary K K, Singh A K, Chakraborty D. Variation in soil strength and rooting characteristics of wheat in relation to soil management. *Geoderma*, 2006, 136(1/2): 353-363.
- [28] 刘钟龄, 王炜, 郝敦元, 梁存柱. 内蒙古草原退化与恢复演替机理的探讨. *干旱区资源与环境*, 2002, 16(1): 84-91.
- [29] 许振柱, 周广胜. 不同温度条件下土壤水分对羊草幼苗生长特性的影响. *生态学杂志*, 2005, 24(3): 256-260.
- [30] 尹承军, 陈佐忠, 黄德华. 内蒙古典型草原地下生物量的分布模型. *植物学通报*, 1993, (Z1): 30-31.
- [31] 周艳松, 王立群, 张鹏, 梁金华, 王旭峰. 大针茅根系构型对草地退化的响应. *草业科学*, 2011, 28(11): 1962-1966.
- [32] Wang R Z, Chen L, Bai Y G, Xiao C W. Seasonal dynamics in resource partitioning to growth and storage in response to drought in a perennial rhizomatous grass, *Leymus chinensis*. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2008, 27(1): 39-48.
- [33] 李德新, 赵虎生. 降水量的季节分配对羊草种群地上生物量影响的数学模型. *中国草地*, 1996, (6): 1-5, 45.
- [34] 杨理, 杨持. 水分梯度对羊草生长及无性系分化的影响. *内蒙古大学学报: 自然科学版*, 1996, 27(4): 577-584.
- [35] 赵育民, 王军邦, 张秀娟, 张波. 内蒙古温带典型草原羊草与大针茅群落结构特征比较. *安徽农业科学*, 2008, 36(30): 13093-13096.
- [36] 王云龙, 许振柱, 周广胜. 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*, 2004, 28(6): 803-809.
- [37] 崔骁勇, 陈佐忠, 杜占池. 半干旱草原主要植物光能和水利用特征的研究. *草业学报*, 2001, 10(2): 14-21.
- [38] 李素英, 刘钟龄, 常英, 任丽娟, 王冉, 武晓霞, 樊强. 内蒙古典型草原初级生产力的补偿性与稳定性. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(1): 1-8.
- [39] 白永飞, 陈佐忠. 锡林河流域羊草草原植物种群和功能群的长期变异性及其对群落稳定性的影响. *植物生态学报*, 2000, 24(6): 641-647.
- [40] Jiang S, Qi Q H, Kong D Z. A comparative study on the biomass between *Aneurolepidium chinese* and *Stipa grandis* communities//Jiang S, ed. *Research on Grassland Ecosystems*. Beijing: Science Press of China, 1985: 12-23.
- [41] 高慧, 高玉葆, 刘海英, 刘景玲. 不同坡位大针茅生长与生殖分配特征. *应用生态学报*, 2009, 20(9): 2123-2128.