

# 模拟降水变化下黄土丘陵区草地群落特征及其物候期响应

盛翰苑<sup>1</sup>, 翟林博<sup>1</sup>, 曹家仪<sup>1</sup>, 焦峰<sup>1,2</sup>

(1.西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:**在全球气候变化背景下,黄土高原降水格局呈现出季节波动增强和极端降水事件增加趋势,降水格局变化势必会引起草地群落特征和物候期发生重要改变。为研究黄土丘陵区草地生态系统对降水改变的响应,选取黄土丘陵区退耕草地为研究对象,连续定位观测自然恢复小区不同降雨梯度下(0,  $\pm 20\%$ ,  $\pm 40\%$ ,  $\pm 60\%$ )物候动态变化,探究了物候期和群落结构对降水变化的响应状况。结果表明:(1)不同降水条件下群落物种组成及丰度存在明显差异,与对照组相比,增雨与减雨均提高了物种的种类。增雨 60%群落种类最多,为 18 种。(2)降水梯度递增处理下,群落盖度呈先增加后降低趋势,地上生物量随呈单峰趋势。增雨 20%处理和减雨 20%处理均能够显著提高群落植被盖度和地上生物量,地上生物量在增雨处理下明显高于减雨处理。(3)丰富度和 Shannon-Wiener 指数总体上都呈增加趋势,减雨 20%, 40%, 60%均使 Pielou 均匀度指数降低。(4)不同降水条件对物种物候期的影响显著( $p < 0.05$ ),群落返青期、繁殖期和和枯黄期在减雨处理下显著提前,而增雨处理则使其繁殖期和枯黄期发生推迟。综上,群落物种组成、植被盖度和地上生物量在不同降水处理下表现出显著差异,而物种多样性对降水变化响应不敏感。

**关键词:**降水变化;物候期响应;草地群落;黄土丘陵区

中图分类号:P426; Q948

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)06-0146-08

## Characteristics of Grassland Community and Its Ethnological Response in Loess Hilly Regions Under Simulated Precipitation Change

SHENG Hanyuan<sup>1</sup>, ZHAI Linbo<sup>1</sup>, CAO Jiayi<sup>1</sup>, JIAO Feng<sup>1,2</sup>

(1.College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Under the background of global climate change, the precipitation pattern of the Loess Plateau shows a trend of increasing seasonal fluctuations and increasing extreme precipitation events. The change of precipitation patterns are bound to cause important changes in the grassland community characteristics and phenology period. In order to study the response of the grassland ecosystem in the Loess hilly area, the grassland in the hilly area of the Loess Plateau were selected as the research object. the study observed the dynamic change of phenology (0,  $\pm 20\%$ ,  $\pm 40\%$ ,  $\pm 60\%$ ) in the natural recovery community, and explored the response of phenology and precipitation to community structure. The results showed that: (1) Different species composition and abundance under different precipitation conditions, and improved species composition compared with control groups. Species in communities with 60% rain were the largest of 18 species. (2) Precipitation gradient treatment, along with the community cover increased first before decreasing, and the aboveground biomass followed by unimodal trend. Both 20% precipitation treatment and 20% precipitation treatment groups can significantly improve community vegetation cover and aboveground biomass, where aboveground biomass was significantly higher than that under rain reduction treatment. (3) Both the richness and the Shannon-Wiener index showed an overall upward trend, with rain losses of 20%, 40%, and 60% all reducing the Pielou uniformity index. (4) Different precipitation conditions have significant effects on

收稿日期:2021-08-17

修回日期:2021-09-19

资助项目:西北农林科技大学大学生创新创业训练计划项目“黄土丘陵区降水变化下的草地群落物候反应”(X202010712357)

第一作者:盛翰苑(2000—),男,青海海东人,本科,研究方向为水土保持。E-mail: Hanyuan15809726609@163.com

通信作者:焦峰(1967—),男,陕西三原县人,博士,副研究员,主要从事水土保持环境效应评价研究。E-mail: Jiaof@ms.iswc.ac.cn

the species phenological period ( $p < 0.001$ ) and the community rejuvenation period. Breeding and dry yellow periods were significantly advanced under rain reduction treatment, while rain increase treatment delayed the breeding and dry yellow periods. The results of this study are expected to provide reference for vegetation restoration and grassland resources development and utilisation in the Loess Plateau. In this paper, the results showed that the community species composition, vegetation cover and aboveground biomass showed significant differences under different precipitation treatments, while species diversity was insensitive to precipitation change responses.

**Keywords:** precipitation change; ethnological response; grassland community; Less Hilly Area

黄土丘陵区的生态环境比较脆弱,长期以来由于自然和人为因素,导致该区的植被遭到严重破坏,水土流失严重,对人民的生活与生产建设造成了严重的影响<sup>[1]</sup>。因此,该区的植被恢复与重建问题变得尤为迫切。土壤水分作为制约干旱、半干旱黄土丘陵区植物生长的重要因素<sup>[2]</sup>,是黄土丘陵区植被恢复与重建的关键所在。大气降水是黄土丘陵区土壤水分的主要来源,亦是驱动该地区植物物候期和群落特征改变的重要因子之一。在全球气候变暖背景下,我国黄土高原降水格局呈现出季节波动增强和极端降水事件增加趋势,而降水格局变化势必会引起草地群落特征和物候期发生重要改变。特别对于生态脆弱的黄土高原地区来说,植被对降水的变化响应较为敏感,降水格局改变会显著影响植物物候、群落分布格局以及生理生态特征,进而影响到生态系统的功能和稳定性<sup>[3-4]</sup>。

植物物候是植物受其内因和所处环境(如气候、水文、地形等)影响产生的以年为周期的自然现象<sup>[5]</sup>,是植物长期适应环境的季节性变化而形成的生长发育节律<sup>[6]</sup>。有研究表明,干旱处理能使某些植物花期提前<sup>[7]</sup>。也有研究表明年降水减少可延迟灌木植物的开花和衰老的开始时间<sup>[8]</sup>。不同物种开花时间、峰值期和开花持续时间等过程也会对群落多样性、结构和功能产生影响<sup>[9]</sup>。有学者研究一年生植物 *Brassica lapa* (芜菁)在持续干旱的环境中的物候特征,发现植物的生命周期缩短,干旱促使植物开花提前,更早期进入繁殖物候,从而在资源匮乏的环境中完成生活史<sup>[10]</sup>。我国对草本植物物候动态变化及其对气候变化的响应、不同物候期与环境因子(包括温度、光周期、土壤水分、CO<sub>2</sub>及冬天的寒冷程度等)的相互关系研究颇多。不论是长期观测研究还是试验研究,大多结果表明,草地群落物种物候期与降水量的存在不确定性<sup>[11-12]</sup>。草地是干旱半干旱地区黄土高原植被组成的主体,而草本植物作为草地生态系统的优势群落,在黄土高原恢复植被和水土保持建设方面存在着不可替代的优势,是研究物种多样性和土壤水分相互作用机制的理想对象和区域<sup>[13]</sup>。鉴于此,为揭示植

物物候期和群落特征对降水变化的响应规律,需要开展定点观测降水控制试验方面的研究。本研究选择黄土丘陵区退耕草地为研究对象,设置野外定点观测试验站,利用遮雨棚装置模拟不同降水梯度处理,通过连续观测植物物候变化特征和群落结构变化,以揭示植物物候和群落特征对降水变化的响应规律,以期应对未来全球气候变化下黄土丘陵区植被恢复和重建提供理论依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于中国科学院安塞水土保持综合试验站山地试验场(109°19′23″E, 36°51′30″N),系典型的黄土高原丘陵沟壑区。气候类型为暖温带半干旱气候。海拔 1 068~1 309 m,年平均气温 8.8℃,气温日较差较大;年平均降水量 505.3 mm,平均相对变率为 16.3%,最多为 645 mm,降水分布不平衡,多集中在 6—9 月份。主要土壤类型为黄绵土,土质绵软,结构疏松,属极强度侵蚀区。

### 1.2 研究方法

1.2.1 样地布设 选择退耕草地为研究对象,2015 年对样地进行前期整地和除杂处理,在样地四周布设围栏保护试验不受人类和动物的干扰。样地内主要的植物物种为达乌里胡枝子(*Salespeople caricature*)、狗尾草(*Secretariats*)、早熟禾(*Boa amea* L.)、茵陈蒿(*Arterial Spillane* Thumb.)、铁杆蒿(*Arterial sacrilegious*)等。

本实验设置 7 个降雨梯度分别为 DP<sub>60</sub>(-60%), DP<sub>40</sub>(-40%), DP<sub>20</sub>(-20%), CK(0%), IP<sub>20</sub>(+20%), IP<sub>40</sub>(+40%), IP<sub>60</sub>(+60%),每个降水梯度设置 5 个重复,共 35 个实验小区,每个试验小区面积为 3 m×3 m,各试验小区间设 2 m 的间隔缓冲区域。通过搭建遮雨棚装置来模拟降水梯度变化,该装置由 3 部分组成:支撑钢结构、透明挡雨 V 型槽(透光率>92%的有机玻璃,厚 2 mm,长 1.8 m,V 型口处宽 0.1 m,与水平面夹角 20°)、集水塑料桶(图 1)。根据减少降雨

的梯度对挡雨 V 型槽的数量进行增减,在雨后将集水塑料桶中集水均匀的喷洒在对应增雨的实验小区内。为了保证实验小区免受边际效应、坡位地形、气象因子等扰动,所有实验小区均位于距其它类型的土地利用类型 50 m 以上的同等地形下。降水实验自实验小区布设的第一年起连续进行。

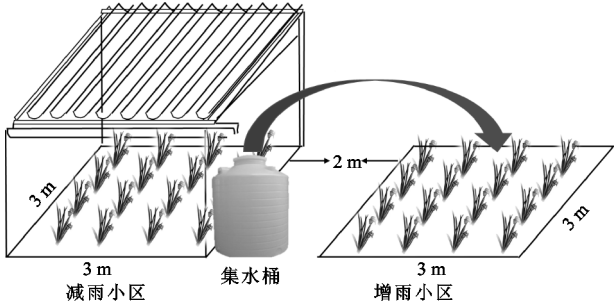


图 1 降雨控制试验装置示意图

1.2.2 物候观测 物候观测于 2019 年 4 月初—10 月中旬进行,每次隔 7 d 观测 1 次,在植物生长关键期增加观测次数。调查方法是在试验小区中心划分出 1 m×1 m 调查样方,记录样方内的每种植物的物候期,每次调查时样方的位置保持不变。为了方便数据处理,本文利用儒略历计数法(即 1 月 1 日至该日期的日数)得到各物候期的时间序列进行统计分析。物候期划分方法:植物物候期包括返青期、蕾期(抽穗期)、始花期、花末期、初果期、果熟期、果后营养期、枯黄期。

1.2.3 群落特征调查 群落特征调查与物候期观测的样方大小及位置一致,每间隔 15 d 左右调查 1 次样方内草本植物的物种、株数、株高、覆盖度和地上生物量。其中物种、株数、株高通过人工调查方式获取;覆盖度采取垂直拍摄样方照片,用 Image-J 软件进行灰度处理,计算面积获取;为避免对试验小区内植物生长的扰动,地上生物量采取估算法进行获得,具体步骤如下:根据样方调查的物种的株高分布,选取 3 个有代表性的株高在试验外的小区找对应株高的植物,从地表剪下,按照物种和株高对分别装入不同的信封,带回室内在 75℃ 下烘干 48 h 至恒重(0.01 g),然后计算出单物种的地上生物量,样方内各物种的生物量之和为地上生物量。

本文采用物种丰富度、物种均匀度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数共同表征多样性,计算方法如下:

① 物种重要值:

$$P_i = (a + b + c) / 3 \quad (1)$$

② 物种丰富度:

$$M = (S - 1) / \ln N \quad (2)$$

③ Shannon-Wiener 多样性指数:

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \cdot \ln P_i \quad (3)$$

④ Pielou 均匀度指数:

$$J = H / \lg S \quad (4)$$

式中: $P_i$  为物种的重要值; $a$  为相对频度; $b$  为相对盖度; $c$  为相对密度; $M$  为 Margalef 指数; $S$  为样方内总物种数; $N$  为所有物种的个体总数。

1.2.4 数据处理 运用 WPS 2019 对数据进行简单预处理,用 SPSS 23.0 进行单因素方差分析(one-way ANOVA)与 Dunces test 多重比较,分析不同降水梯度下物种物候期、繁殖期和生长季长度和群落结构特征(物种组成、重要值、群落盖度、地上生物量、多样性)参数差异。在进行数据分析之前对各类数据进行正态分布和方差齐性检验。采用 Origin 2021 绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 降水改变对自然恢复草地群落物种组成的影响

半干旱黄土丘陵区草地群落生长季为 4—10 月,8 月是植物生长达到高峰的时期,8 月物种重要值变化可以较好地反映草地群落的物种组成与结构状况的变化情况。故以 8 月物种重要值为依据,对草地群落落在不同降水梯度下物种组成差异进行分析。由表 1 可知,群落中共出现 24 个物种,一年生草本 6 种,多年生草本 18 种。24 个物种分属 9 科 20 属,其中以豆科(7 种)和菊科(7 种)为主,以及禾本科(4 种)、藜科、大戟科、紫葳科、牻牛儿苗科、堇菜科和唇形科。群落中达乌里胡枝子、茵陈蒿、狗尾草和早熟禾等为主要优势物种,黄鹌菜、草木樨状黄耆、披针叶黄华、猪毛菜和苣荬菜等为主要伴生物种。不同降水处理下群落物种组成存在较明显差异。从表 1 可以看出,增雨处理和减雨处理均使群落物种种类增加,其中增雨 60% 和减雨 60% 时使群落物种种类增加最多,均为 18 种。增雨处理与减雨处理时增加群落物种种类无明显差异。与对照相比,减雨 20%,40%,60% 处理均使达乌里胡枝子的重要值明显增加,早熟禾、茵陈蒿、早芦苇、蒙古蒿和猪毛菜等物种的重要值明显降低,且部分物种重要值呈随减雨程度增加而增加的趋势。其中牻牛儿苗和沙打旺等旱中生物种为减雨处理中所特有物种,表明减雨环境一定程度上会促进耐干旱植物生长。与对照相比,增雨 20%,40%,60% 处理均使茵陈蒿的重要值明显降低,达乌里胡枝子、蒙古蒿和猪毛菜等物种重要值亦有不同程度的降低,增雨 20% 和 40% 使狗尾草重要值明显增加。增雨 20%~60% 处理时,苦豆子、野豌豆、苣荬菜和铁杆蒿等物种重要值均随着增雨程度增加而降低,表明增雨量过多在一定程度上降低了物种的生长优势。



表 1 不同降水处理下草地群落物种组成及其重要值

物种	科目	降雨梯度						
		DP <sub>60</sub>	DP <sub>40</sub>	DP <sub>20</sub>	CK	IP <sub>20</sub>	IP <sub>40</sub>	IP <sub>60</sub>
达乌里胡枝子( <i>Lespedeza davurica</i> )	豆科	5.07	4.85	5.91	4.44	4.24	4.12	3.32
草木樨状黄芪( <i>Astragalus melilotoides</i> Pall.)	豆科	2.33	4.19	2.98	—	4.82	5.20	4.91
披针叶黄华( <i>Thermopsis lanceolala</i> R. Br.)	豆科	4.53	6.03	6.35	—	—	7.87	8.23
苦豆子( <i>Sophora alopecuroides</i> L.)	豆科	—	—	5.06	—	7.04	6.16	4.65
野豌豆( <i>Vicia sepium</i> L.)	豆科	—	3.07	—	7.21	7.69	—	3.65
甘草( <i>Glycyrrhiza uralensis</i> Fisch.)	豆科	4.76	3.63	—	—	—	—	4.12
沙打旺( <i>Astragalus adsurgens</i> Pall.)	豆科	10.82	10.94	12.21	—	—	—	—
狗尾草( <i>Setaria viridis</i> L. Beauv.)	禾本科	8.30	3.93	7.54	8.02	17.01	15.17	7.64
早熟禾( <i>Poa annua</i> L.)	禾本科	—	4.60	4.47	7.60	7.63	7.79	9.30
鹅观草( <i>Roegneria kamoji</i> Ohwi.)	禾本科	—	4.29	5.31	—	—	4.32	3.12
旱芦苇( <i>Phragmites australis</i> )	禾本科	6.42	—	—	19.24	—	—	3.45
紫花地丁( <i>Viola philippica</i> Cav.)	堇菜科	—	1.64	—	—	—	1.46	2.39
茵陈蒿( <i>Artemisia capillaris</i> Thunb.)	菊科	11.31	11.85	11.17	23.93	8.28	11.99	14.41
黄鹌菜( <i>Youngia japonica</i> )	菊科	2.65	3.88	2.78	—	4.43	4.82	3.12
苣荬菜( <i>Sonchus wightianus</i> DC.)	菊科	5.52	4.85	—	—	12.78	11.30	9.63
铁杆蒿( <i>Artemisia sacrorum</i> Ledeb)	菊科	10.10	—	2.73	—	6.39	4.00	3.72
猪毛蒿( <i>Artemisia scoparia</i> )	菊科	5.21	—	3.67	—	4.17	9.71	3.98
阿尔泰狗娃花( <i>Heteropappus altaicus</i> )	菊科	3.59	2.35	—	—	—	3.24	1.73
蒙古蒿( <i>Artemisia mongolica</i> )	菊科	—	16.86	14.79	18.67	4.37	—	—
猪毛菜( <i>Salsola collina</i> Pall.)	藜科	7.85	5.62	4.37	8.69	3.85	—	3.05
牻牛儿苗( <i>Erodium stephanianum</i> Willd.)	牻苗科	2.38	7.41	7.69	—	—	—	—
角蒿( <i>Incarvillea sinensis</i> Lam.)	紫葳科	6.69	—	—	—	3.59	—	5.58
香青兰( <i>Dracocephalum moldavica</i> L.)	唇形科	2.47	—	—	—	3.72	—	—
地锦( <i>Euphorbia humifusa</i> Willd.)	大戟科	—	—	3.67	2.22	—	2.86	—

注:“—”表示未找到该物种。

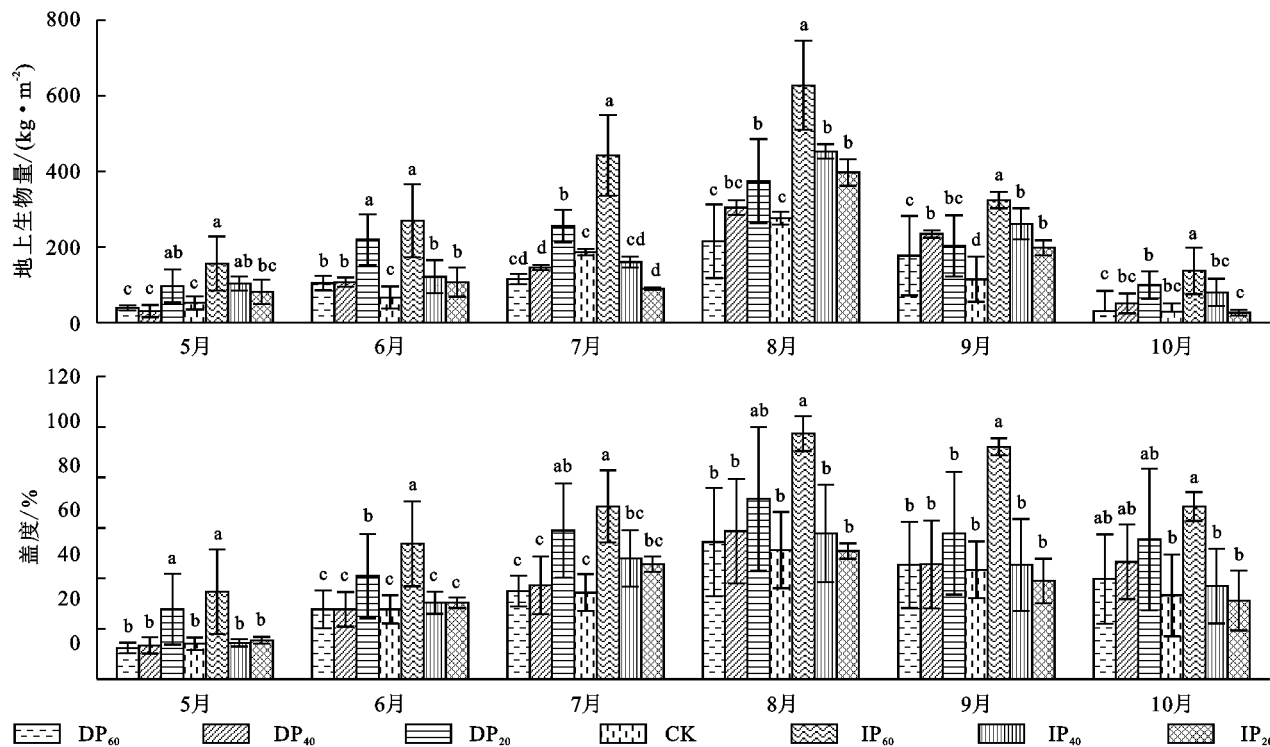
2.2 降水改变对草地群落结构的影响

图 2 为草地群落在 7 个不同降水梯度处理下群落盖度和地上生物量 5—10 月动态变化情况。总体上,群落地上生物量呈先增后减的趋势,8 月达到最大值,9—10 月又逐渐降低。增雨处理明显高于减雨处理,对照组地上生物量在 5—8 月均显著低于减雨 20%、减雨 40%、增雨 20%、增雨 40%和增雨 60%,减雨 20%在 5—8 月显著高于减雨 40%,60%,5—10 月增雨 20%处理明显高于其他各组。出现这种结果的原因可能是,8 月之后降雨减少,多数 1 年生草本植物完成生活史,生命周期仅有教短的 40~60 d,导致群落地上生物量大幅减小。原因可能为,当降水不断增加,水分胁迫现象得以缓解,草本群落生物量随之增加;但当降水增加植物可以利用的水分上限时,反而会抑制植被呼吸等生理生化反应,导致植被生物量出现下降趋势。群落盖度呈先增加后降低趋势,这与植物生理生长规律相一致。增雨 20%处理下,5—

10 月的群落地上生物量均显著高于其他各处理。相比于对照,增雨 20%、增雨 40%均使盖度显著增大,减雨 60%、减雨 40%、减雨 20%、对照、增雨 40%和增雨 60%处理下盖度均显著低于增雨 20%处理。7—10 月群落盖度对降水变化敏感,不同降水处理之间盖度差异不断加大,而 5 月和 6 月组间差异较小。

2.3 降雨改变对草地群落物种多样性的影响

由表 2 可知,群落物种 Shannon-Wiener 指数和 Pielou 均匀度指数在不同降雨处理下的存在显著差异。单因素方差分析结果不同降水处理下群落物种丰富度无显著差异。与对照相比,丰富度和 Shannon-Wiener 指数总体上都呈增加趋势,减雨 20%,40%,60%均使 Pielou 均匀度指数降低。群落中增雨 60%处理时物种丰富度最大(2.07±0.33);减雨 40%处理时群落 Shannon-Wiener指数最大(2.16±0.04),减雨 20%最小(1.75±0.02);减雨 40%处理时群落 Pielou 均匀度指数最大(1.21±0.04),增雨 40%时最小(0.91±0.04)。



注:不用字母表示不同降雨梯度之间的差异显著( $p<0.05$ ),下同。

图 2 不同降水处理下草地群落盖度和地上生物量差异

表 2 不同降水处理下群落物种丰富度和多样性指数

降雨 梯度	物种多样性		
	丰富度	Shannon-Wiener 指数	Pielou 均匀度指数
DP <sub>60</sub>	1.86±0.11	1.88±0.04cd	1.21±0.04a
DP <sub>40</sub>	2.00±0.78	2.16±0.04a	1.08±0.14ab
DP <sub>20</sub>	2.07±0.33	1.75±0.02d	0.98±0.10bc
CK	1.74±0.01	1.80±0.01d	1.09±0.01ab
IP <sub>20</sub>	1.90±0.17	1.96±0.04c	1.01±0.02bc
IP <sub>40</sub>	1.85±0.39	1.99±0.01abc	0.91±0.04dc
IP <sub>60</sub>	2.30±0.50	2.11±0.10a	0.95±0.12bc

注:不同字母表示不同降雨梯度之间的差异显著( $p<0.05$ )。

2.4 草地群落物种物候期对降水改变的响应

综合不同降雨处理对群落各物种的生长优势的影响,分析群落中茵陈蒿、早熟禾、达乌里胡枝子和狗尾草的物候期差异,发现植物返青期、繁殖期和枯黄

期具有明显的物种间差异,不同降水条件也会改变植物的物候期,且具有显著的影响( $p<0.05$ )。由图 3 可知,与对照相比,增雨 20%,40%,60%处理均使达乌里胡枝子和茵陈蒿的返青期、蕾期、果期和果后营养期有所提前。增雨处理使达乌里胡枝子返青期提前 2~3 d,蕾期提前 2~3 d,果期提前 1~2 d,果后营养期提前 2~3 d,枯黄期提前 2~4 d。减雨处理使达乌里胡枝子返青期提前 5~7 d,枯黄期显著提前 3~5 d,说明减雨对促进其返青期提前更加显著。增雨和减雨处理使早熟禾返青期推迟 2~3 d,对蕾期无影响,增雨各处理使黄枯期提前 1~3 d。茵陈蒿返青期在增雨和减雨各处理下均发生提前,减雨提前 4~5 d,增雨提前 2~3 d。而狗尾草在各降雨处理下的返青期差异表现并不显著。

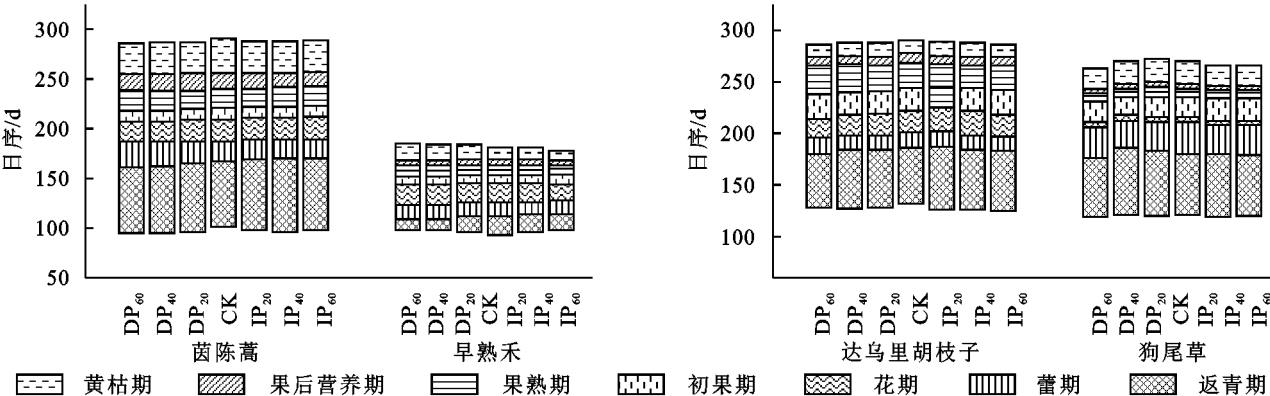


图 3 不同降水处理下草地群落各物种物候期

由图 4 可知,减雨 20%,40%,60%处理分别显著提前达乌里胡枝子繁殖期 7,6,5 d,增雨 60%使其繁殖期显著延迟 3 d,增雨 20%,40%与对照无显著差异。减雨对早熟禾和茵陈蒿的繁殖期无显著影响,增雨 20%,40%显著提前早熟禾繁殖期 5 d,增雨 60%使茵陈蒿繁殖期显著延迟 7 d。减雨各处理、增

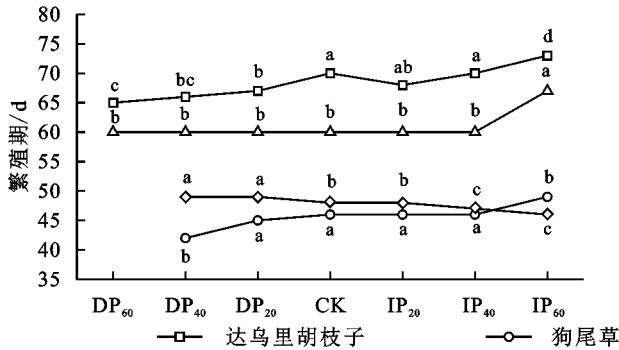


图 4 不同降水处理下草地群落各物种繁殖期和生长季长度

### 3 讨论

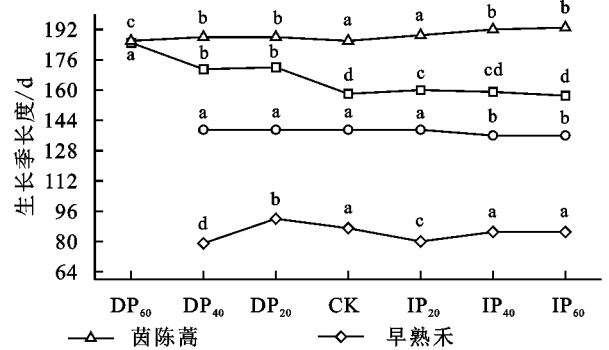
#### 3.1 降水变化对草地群落物种组成的影响

本研究发现,群落物种组成在不同降水梯度中的响应规律存在明显差异。群落中达乌里胡枝子、茵陈蒿、狗尾草和早熟禾等为主要优势物种,减雨使达乌里胡枝子、牦牛儿苗和沙打旺等的重要值增加,增雨增加了狗尾草和苜蓿菜的重要值,这表明降水变化不仅影响群落物种组成而且能够改变群落优势物种,群落中多年生草本物种在面对干旱环境时更能体现出优势,这与多年生物种较发达的根系以及保守型资源获取策略有关<sup>[14]</sup>。降水增加时,生长迅速的一年生物种根系较浅,生长快,高度依赖降水,因此增雨反而利于这些进攻型资源获取植物生长<sup>[15]</sup>。增雨条件下,植物生长不再受水分的限制,此时群落中所有植物均开始迅速吸收水分以促进其生长,导致物种间竞争加剧,物种生态位不断扩展重合,大部分优势物种和多年生物种重要值因此而降低。相比于降水增加,降水减少对荒漠草原植物群落生长特征的负面影响更为显著。在黄土丘陵区,草本植物的种类、多度和高度会受到降水格局的影响,从而影响植物群落的分布与结构。

#### 3.2 降水变化对草地群落结构的影响

地上生物量是植物地上部分光合同化产物的质量,是植物当年净初级生产力的重要指标,对预示群落功能和稳定性具有重要作用<sup>[16]</sup>。本研究发现,群落增雨处理下的地上生物量均明显高于减雨处理,说明降水增多促进植物地上部分有机质积累,与过往研究结果一致<sup>[17-18]</sup>。降水增多对草地生产力具有显著的正向促

雨 20%和增雨 40%均使达乌里胡枝子的生长季长度显著增加;减雨各处理、增雨 40%和增雨 60%均使茵陈蒿的生长季长度显著增加;增雨 40%和 60%使狗尾草生长季长度降低,其他处理均与对照无异;减雨 40%和增雨 20%显著降低早熟禾生长季长度,减雨 20%显著提高其生长季长度。



进作用,降水增加提高了土壤水分含量,植物不再受到水分限制,竞争由地下转为地上竞争,促进植物地上部分生物量的积累<sup>[19]</sup>。群落地上生物量随减雨和增雨梯度增加而逐渐降低,而增雨 20%和减雨 20%能够明显提高群落生产力,这与群落盖度规律相一致。极端降水会导致土壤水分过饱和,根系呼吸作用和吸收作用均受到抑制,对植物生产力产生明显的负向效应。

群落盖度反映了植被覆盖地表的范围,是植物利于光能的重要指标,控制着群落生产力基本状况。5—8 月,增雨 20%处理下群落盖度均显著提高群落盖度,减雨 20%处理仅次于增雨 20%,而对照组群落盖度却始终较低或最低,这表明轻度干旱和适当增加降雨能够显著提高群落盖度<sup>[20]</sup>。降水增加超过 20%以及干旱程度超过 20%将会降低群落盖度,这与孙一梅等<sup>[21-22]</sup>的研究结果相一致,表明草地群落对降水的响应存在一定的阈值,重度干旱和过度降水都不利于植物生长。重度干旱对植物生理过程产生明显的抑制作用,减少叶片面积来减少蒸发,降低光合速率,在群落层面表现为群落盖度减少,草地生产力大大降低<sup>[23]</sup>。过度降水可能引起土壤水分过饱和,抑制植物根系的有氧呼吸,植物养分吸收和光合能力受限,涝害严重将导致植物萎蔫或死亡<sup>[24]</sup>。

#### 3.3 降雨变化对草地群落物种多样性的影响

植物物种多样性研究是生物多样性研究中植物适应特定环境最直接和最适合的表达层次。本研究发现,丰富度和 Shannon-Wiener 指数总体上都呈增加趋势,减雨 20%,40%,60%均使 Pielou 均匀度指数降低。结果出现的原因可能是,随着降水量的增

加,植物可以利用的水分增加,物种间出现生态位互补效应,种间竞争呈现积极相互作用,使物种共存概率增大,群落物种多样性随之增加。而降水量的减少导致样地水分资源的紧缺,尤其是干旱程度严重时,物种生态位重叠程度加大,物种间的竞争加剧,弱勢物种生长受到较大抑制,甚至被淘汰。

### 3.4 不同物种物候期对降水变化的响应

由于不同物种的植物功能性状及其对生长环境的响应和适应不同,不同植物物候期对环境变化的响应存在明显的差异<sup>[25]</sup>。本研究观测了4种主要物种(分别为达乌里胡枝子、狗尾草、早熟禾、茵陈蒿)物候期,发现达乌里胡枝子返青期对降水变化比其他4种植物更为敏感。降水变化对物候的影响的可能原因有两个:①降水增加或减少使得土壤含水量也随着升高或减少,提前或推迟达到植物特定物候所需的水分条件,从而造成草地植物特定植物物候的提前或推迟。②降水变化导致土壤水分发生改变,影响植物生长发育过程中与水分相关的一系列生理生化反应,从而间接影响植物物候<sup>[26]</sup>。因此对于温度变化而言,植物物候期对降水变化更为敏感,这与在青藏高原高寒草甸的研究结果一致<sup>[27]</sup>。

在物候的观测记录中仅发现降水变化对黄土丘陵区自然恢复群落中的达乌里胡枝子物候产生显著影响。大量研究表明,影响植物物候期的主要环境因素是气温、降雨和日照时间<sup>[28]</sup>。对于光照充足的干旱-半干旱黄土丘陵区,气温和降水量的变化是影响植物物候期的重要因素<sup>[29]</sup>。在本研究中,在植物生长季的前期,降水量较少,植物物候前期对降水量的改变较为敏感,雨季较多的降水量而且降水强度较大,不利于植物生长旺盛期物候的发生,而且生长季末期降水量的增多对植物枯黄期的影响也不显著。但是在其他不同地区的研究结果表明,植物的返青和枯黄等物候期与前期的温度和降水显著相关<sup>[30]</sup>。本研究发现不同植物物种对不同降雨水平的响应是存在差异的,产生这种差异的原因是由于植物物种本身在繁殖期的适应机制和生存策略不同,这是一个复杂的过程<sup>[31]</sup>。

## 4 结论

(1)自然恢复群落达乌里胡枝子的返青期、繁殖期和枯黄期在减雨处理下显著提前,而增雨处理则推迟了其返青期和繁殖期。增雨和减雨处理显著推迟狗尾草和茵陈蒿的繁殖期,但对其他物种无显著影响。不同降水处理使自然恢复群落物种枯黄期发生

延迟,从而延长了各物种生长季长度。

(2)自然恢复群落物种组成、植被盖度和地上生物量在不同降水处理下表现出显著差异,而物种多样性对降水变化响应不敏感。增雨和减雨处理对物种组成影响主要体现在物种重要值上,减雨处理提高了群落中多年生优势物种重要值,而增雨处理提高了1、2年生生物种重要值。草地群落植被盖度和地上生物量对降水变化的响应规律相似,5—8月生长季对降水变化较为敏感,而生长季末期对降水变化不敏感,增雨20%处理下群落盖度和地上生物量最大,过度增雨或减雨均会引起草地群落盖度和地上生物量降低。

### 参考文献:

- [1] 梁超,郝文芳,袁丁.黄土丘陵区不同植被群落土壤水分研究[J].水土保持研究,2011,18(2):103-111.
- [2] 文治,邵明安.黄土高原土壤水分研究[M].北京:科学出版社,2000.
- [3] 左璐,王焕炯,刘荣高,等.基于不同光谱指数的植被物候期遥感监测差异[J].应用生态学报,2018,29(2):599-606.
- [4] 刘海威.黄土丘陵区草地群落生物学及生态化学计量学特征对降水改变的响应分析评价[D].北京:中国科学院大学,2018.
- [5] Wang X Y, Yi S H, Qin Y, et al. Effects of warming on the phenomena of meadows in the source region of Sunless River[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2014, 50(6):864-870.
- [6] Fu Y, Pan X B. Research advances in herbage plant phenology and ethnological model of grassland [J]. Chinese Journal of Meteorologic, 2011, 32(3):319-325.
- [7] 徐广平.高寒草甸植物和植物群落对增温和放牧的响应与适应研究[D].北京:中国科学院大学,2010.
- [8] Llorens L, Peñuelas J. Experimental evidence of future drier and warmer conditions affecting flowering of two co-occurring Mediterranean shrubs [J]. International Journal of Plant Sciences, 2005, 166(2):235-245.
- [9] 刘志民,闫巧玲,马君玲,等.生殖物候与草甸草地多年生植物的消长[J].生态学报,2006,26(3):773-779.
- [10] Steven J F, Sheina S, Arthur E W. Rapid evolution of flowering time by an annual plant in response to a climate fluctuation[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2006, 104(4):1278-1282.
- [11] Zhang Y J, Yang X C, Guo J, et al. Ethnological variation and its relationship with meteorological factors in Hun Boor grasslands[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(1):144-153.
- [12] Ma X F, Chen S Y, Deng J, et al. Vegetation phenology



- dynamics and its response to climate change on the Tibetan Plateau[J]. *Ac Ta Acculturation Silica*, 2016, 25(1):13-21.
- [13] 李志,赵西宁.1961—2009 年黄土高原气象要素的时空变化分析[J].*自然资源学报*,2013,28(2):287-299.
- [14] Zhang J, Zuo X A, Zhao X Y, et al. Effects of rainfall manipulation and nitrogen addition on plant biomass allocation in a semiarid sandy grassland[J].*Reports*, 2020,10(1):14962.
- [15] Li J Z, Lin San, Taube F, et al. Above and below ground net primary productivity of grassland influenced by supplemental water and nitrogen in Inner Mongolia [J].*Dinette and Soil*,2011,340:253-264.
- [16] Sun Y F, Yang Y H, Zhao X, et al. Global patterns and climatic drivers of above- and belowground net primary productivity in grasslands[J].*Science China: Life Sciences*,64(5):739-751.
- [17] 李晓刚,朱志红,周晓松,等.刈割、施肥和浇水对高寒草甸物种多样性、功能多样性与初级生产力关系的影响[J].*植物生态学报*,2011,35(11):1136-1147.
- [18] 车力木格,刘新平,何玉惠,等.半干旱沙地草本植物群落特征对短期降水变化的响应[J].*草业学报*,2020,29(4):19-28.
- [19] Hoover D L, Lauenroth W K, Milchunas D G, et al. Sensitivity of productivity to precipitation amount and pattern varies by topographic position in a semiarid grassland[J]. *Biosphere*,2021,12(2):e03376.
- [20] Robinson T M P, Pierre K J L, Concordance M A, et al. Seasonal, not annual precipitation drives community productivity across ecosystems[J].*Oikos*,2013,122:727-738.
- [21] 孙一梅,田青,郭爱霞,等.水、氮施用量对科尔沁沙地植被特征和叶性状的影响[J].*中国沙漠*,2020,40(6):223-232.
- [22] 孙一梅,田青,吕朋,等.科尔沁沙地沙质草地与固定沙丘植物群落结构对极端干旱的响应[J].*中国沙漠*,2021,41(1):129-136.
- [23] Eziz A, Yan Z B, Di T, et al. Drought effect on plant biomass allocation: A meta-analysis[J]. *Ecology and Evolution*, 2017,7(24):11002-11010.
- [24] 张彬,朱建军,刘华民,等.极端降水和极端干旱事件对草原生态系统的影响[J].*植物生态学报*,2014,38(9):1008-1018.
- [25] 高亚敏.气候变化对通辽草甸草原草本植物物候期的影响[J].*草业科学*,2018,35(2):423-433.
- [26] Zhou J T, Zhang Y J, Li Y J. Effects of short-term grazing exclusion on plant phenology and reproductive succession in a Tibetan alpine meadow[J]. *Scientific Reports*, 2016,6:27781.
- [27] 阿舍小虎.模拟增温与降水改变对川西北高寒草甸植物物候及初级生产力的影响[D].成都:成都理工大学,2013.
- [28] 范广洲,刘雅星,赖欣.中国木本植物物候变化特征分析[J].*气象科学*,2012,32(1):68-73.
- [29] Landholder H W. Growing season changes in the last-century [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006,137(1/2):1-14.
- [30] 陈效述,李惊.内蒙古草原羊草物候与气象因子的关系[J].*生态学报*,2009,29(10):5280-5290.
- [31] 叶鑫,周华坤,刘国华,等.高寒矮生嵩草草甸主要植物物候特征对养分和水分添加的响应[J].*植物生态学报*,2014,38(2):147-158

~~~~~

(上接第 145 页)

- [18] 宋戈,王越,雷国平.松嫩高平原黑土区耕地利用系统安全影响因子作用机理研究:以黑龙江省巴彦县为例[J].*自然资源学报*,2014,29(1):13-26.
- [19] 文高辉,袁泉,赵懿,等.2007—2017 年洞庭湖平原耕地生态安全评价及障碍因子诊断[J].*水土保持通报*,2021,41(2):178-187.
- [20] 袁零,杨庆媛.基于 PSR 框架的甘肃省环县耕地生态安全评价[J].*西南师范大学学报:自然科学版*,2019,44(6):60-68.
- [21] 张加磊.恩施州耕地生态安全评价及障碍因子研究[D].武汉:华中师范大学,2020.
- [22] 陈先鹏,方恺,吴次芳,等.2009—2015 年中国耕地资源利用时空格局变化研究:基于粮食安全与生态安全双重视角[J].*水土保持通报*,2019,39(3):291-296.
- [23] 凡哲,付伟,张旭杰,等.基于生态足迹模型的云南省生态安全评价[J].*西南林业大学学报:社会科学*,2021,5(4):104-110.
- [24] Chen Z, Ma L, Guo F, et al. Internet of things technology in ecological security assessment system of intelligent land[J]. *Ieee Access*, 2020,8:99772-99782.
- [25] 张锐,郑华伟,刘友兆.基于 PSR 模型的耕地生态安全物元分析评价[J].*生态学报*,2013,33(16):5090-5100.
- [26] 刘舒馨,唐祥云,张燧,等.基于熵权和变异系数组合赋权法的耕地质量评价实证研究[J].*国土与自然资源研究*,2016(4):45-50.