

任亦君, 席璐璐, 缙倩倩, 等. 单次小降雨(≤ 5 mm)事件对4种典型荒漠一年生草本植物生长和繁殖的影响[J]. 中国沙漠, 2021, 41(4): 87-99.

单次小降雨(≤ 5 mm)事件对4种典型荒漠一年生草本植物生长和繁殖的影响

任亦君¹, 席璐璐¹, 缙倩倩^{1,2a}, 宋冰¹, 王国华^{1,2ab}

(1. 山西师范大学地理科学学院, 山西 临汾 041000; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院 a. 沙漠与沙漠化重点实验室, b. 临泽内陆河流域研究站, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 选取河西走廊荒漠绿洲过渡带典型一年生植物禾本科狗尾草(*Setaria viridis*)、虎尾草(*Chloris virgata*)和藜科雾冰藜(*Bassia dasyphylla*)、刺蓬(*Salsola ruthenica*)为研究对象, 分别在拔节期/展叶期、开花期和果熟期模拟小降雨事件减少, 分析单次小降雨对一年生草本植物生长和繁殖的影响。结果表明: (1) 拔节期/展叶期单次小降雨减少导致4种一年生草本植物根系生长发生显著变化, 主要表现为根长显著减小, 纵向生长受到抑制, 而地下生物量显著增加, 以侧根生长为主。(2) 不同生长阶段单次小降雨减少, 4种一年生草本植物叶片数和地上生物量减少但未达到显著水平, 仅在拔节期/展叶期减少小降雨时, 株高降低显著。(3) 不同生长阶段单次小降雨减少, 根冠比增加, 但根冠比的值依然较低(0.196—0.506), 地下生物量依然远小于地上生物量的分配, 说明一年生草本植物将更多的生物量用于地上部分的生长。(4) 拔节期/展叶期单次小降雨减少会导致拔节期/展叶期延长, 开花期和果熟期推迟且持续时间缩短, 并最终导致一年生草本植物种子生物量减少。

关键词: 一年生草本植物; 不同生长阶段; 小降雨事件; 生长; 繁殖

文章编号: 1000-694X(2021)04-087-13

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00035

中图分类号: Q948.11

文献标志码: A

0 引言

一年生草本植物作为干旱半干旱荒漠生态系统植物区系的恒有层片^[1], 具有生活史短暂、繁殖力强的特点, 对于干旱半干旱地区减少近地表风蚀、防止水土流失和植被恢复方面发挥着重要作用^[2-3]。这类植物能够高度顺应荒漠生态系统中的降水波动, 对小降雨的利用效率很高, 且对小降雨高度敏感, 5 mm有效降水就能基本完成生活史^[4]。一年生禾本科和藜科植物是干旱荒漠区常见的一年生草本植物, 会在流动、半流动沙丘上形成一层较密集的植被覆盖层, 具有一定的防风固沙作用。另外, 一年生植物层片的根系分解后回归土壤, 对荒漠生态系统提高土壤肥力、增加土壤碳库、改善土壤结构等具有一定的贡献, 且对干旱荒漠地区的植被恢

复具有直接和间接作用。在干旱半干旱荒漠生态系统, 降水稀少, 蒸发强烈, 降水是最重要限制因素。因此, 降水对荒漠地区一年生草本植物的影响一直是干旱荒漠地区研究领域关注的重点问题。

在干旱半干旱荒漠生态系统, 多见小降水事件(≤ 5 mm), 发生时间、持续时间、降水强度等特征都具有较大的变异性^[5-7]。在全球气候变化的大背景下, 未来20—100年北半球干旱半干旱地区降水波动将更加明显^[8-9], 具体表现为夏季间隔时间延长的大降水事件增多, 而时间间隔缩短的小降水事件减少^[10-12]。在降水稀少、生态环境脆弱的干旱半干旱荒漠生态系统, 生长期短且根系较浅的一年生草本植物比根系深的多年生草本植物对降水格局变化更加敏感。近年来, 关于全球气候变化背景下降水

收稿日期: 2020-11-30; 改回日期: 2021-03-25

资助项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41701045, 41807518); 中国科学院沙漠与沙漠化重点实验室开放基金项目(KLDD-2020-05); 山西省自然科学基金项目(201801D221336)

作者简介: 任亦君(1993—), 女, 山西忻州人, 硕士研究生, 研究方向为干旱区生态水文。E-mail: junjun3938@163.com

通信作者: 王国华(E-mail: gimi123@126.com)

格局发生变化对一年生草本植物产生的影响开展了大量的研究。李秋艳等^[13]发现,荒漠植物幼苗通过调整生长高度、生物量等生长策略表现出对不同降雨量变化的响应格局。闫建成等^[4]对荒漠地区一年生植物猪毛菜(*Salsola collina*)的研究表明,生长季降水减少使得其繁殖比重降低,猪毛菜以减少结实量为代价加速种子成熟以适应降水的不足。吴玉等^[14]对荒漠草本植物研究发现,植株在低降雨量条件下总生物量和根生物量显著降低。目前很多学者认为小降水事件只能影响对水分快速响应的土壤表层微生物或植被的生理活动^[15-16],而植物生长、繁殖需要持续时间长的大降水事件来激发^[17]。大降水事件下水分可以渗透更深的土层,可补充更深土层含水量,小降水只能补充浅层土壤水分,且浅层土壤受蒸发影响很强烈,生物有效性低^[18-19]。而对一年生草本植物而言,通常小降水事件能够补给浅层土壤水,一年生草本植物大多发育浅根系^[20],能够利用由小降水补给的浅层土壤水分,其整个生活史包括生长和繁殖均受小降水事件的控制^[21-22]。然而,目前关于小降水对一年生草本植物有效性以及小降水对不同生长阶段一年生草本植物影响研究还相对较少。

河西走廊北接巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠,农田绿洲分布其中,为荒漠和绿洲的过渡地带,是中国生态系统最为脆弱的地区之一,随着气候变化和人类活动加剧,区域水文和生态环境发生重大变化,天然植被退化加剧,土地荒漠化更加严重。近几十年来,为了保持绿洲生态环境稳定,该区在荒漠绿洲过渡带建立人工固沙植被,经过多年人工固沙植被的建立以及环境演变和自然选择,一年生草本植物入侵并定居,并成为人工固沙植被群落中草本层片的优势植物层片^[23-25],其具有生长发育快、生活史短、对环境变化响应敏感的特点^[26-28],可以在高温缺水的荒漠及流动、半流动沙丘环境中成功生长及繁殖,并起到防风固沙的作用,有利于荒漠生态系统的恢复和发展,在荒漠生态系统中具有重要的生态价值^[29]。由于一年生草本植物根系分布在浅层,且该区降水匮乏,蒸发强烈,年际降水量波动大,年内降水分布极度不均匀,小降水成为该区影响一年生草本植物最关键的因素。近年来有研究发现,该地区年降水总量减少,降水事件不稳定和不确定性增加^[30],因此,小降水减少对该地区一年生草本植物生长、繁殖等过程必然产生更大的

影响。

本文以河西走廊荒漠绿洲过渡带典型一年生植物禾本科狗尾草(*Setaria viridis*)、虎尾草(*Chloris virgata*)和藜科雾冰藜(*Bassia dasyphylla*)、刺蓬(*Salsola ruthenica*)为研究对象,通过模拟降水试验,研究不同生长阶段单次小降水减少对4种一年生草本植物生长、繁殖的影响,探讨单次小降水减少一年生草本植物地上生物量和地下生物量之间的关系及其繁殖分配,以期揭示干旱半干旱荒漠生态系统一年生草本植物对降水格局变化的生长策略,进而为荒漠生态系统的科学管理提供理论支撑。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省张掖市临泽县北部的中国科学院西北生态环境资源研究院临泽内陆河流域研究站(39°21'N, 100°07'E),平均海拔约1380 m,地处巴丹吉林沙漠和张掖绿洲的交汇处,属于冲积扇和风蚀堆积平原,是中国典型的荒漠区。气候属于典型的温带荒漠气候,夏季炎热干燥,冬季寒冷漫长。多年平均降水量118.4 mm,集中在5—9月,约占全年降水总量的70%,年蒸发量高达2400 mm,年日照时间约3100 h,年均气温约8.2 °C,夏季最高气温可达39 °C,冬季最低气温可达-26 °C;常年盛行西风,风沙活动强烈年平均风速3 m·s⁻¹,风速最大可达21 m·s⁻¹^[31],8级以上的大风年平均约15 d;季节性冻土约110—120 mm,无霜期150—160 d^[32]。

1.2 研究对象

为了防止风沙侵袭及恢复绿洲边缘生态环境,在当地种植梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)等人工固沙植被,在人工林内雾冰藜、刺蓬、虎尾草和狗尾草等一年生草本植物不断侵入,成为人工固沙植被草本层的优势植物种。狗尾草、虎尾草属于一年生禾本科植物,雾冰藜和刺蓬属于一年生藜科植物,具有生长繁殖速度快、生活史周期短、耐旱的特点。在河西走廊荒漠区分布范围广,常见于荒漠区荒漠绿洲过渡带中,对环境的适应性强,能够在荒漠区各类型沙地上生长繁殖,在雨季迅速侵占生存空间,产生大量的种子,有利于

荒漠区的防风固沙,同时也是优良的牧草,在荒漠区生态环境中具有重要的生态学价值。

1.3 试验设计

1.3.1 降水特征

该区降水集中在5—9月,占全年降水量的63.64%(图1)。多年平均降水量为118.4 mm,降水

量多在0—5 mm。 ≤ 5 mm的降水量占年降水量的44.57%,降水事件占年降水事件的72.97%,且随降水量级的增大,所占比率呈减小趋势。对年降水日数贡献最大为 <5 mm的降水事件(占84.91%), ≥ 10 mm的降水事件占5.09%。小降雨是该区对降水贡献最稳定和对总降水量贡献值最多的降水,具有重要的生态学价值,是该区不可或缺的降水。

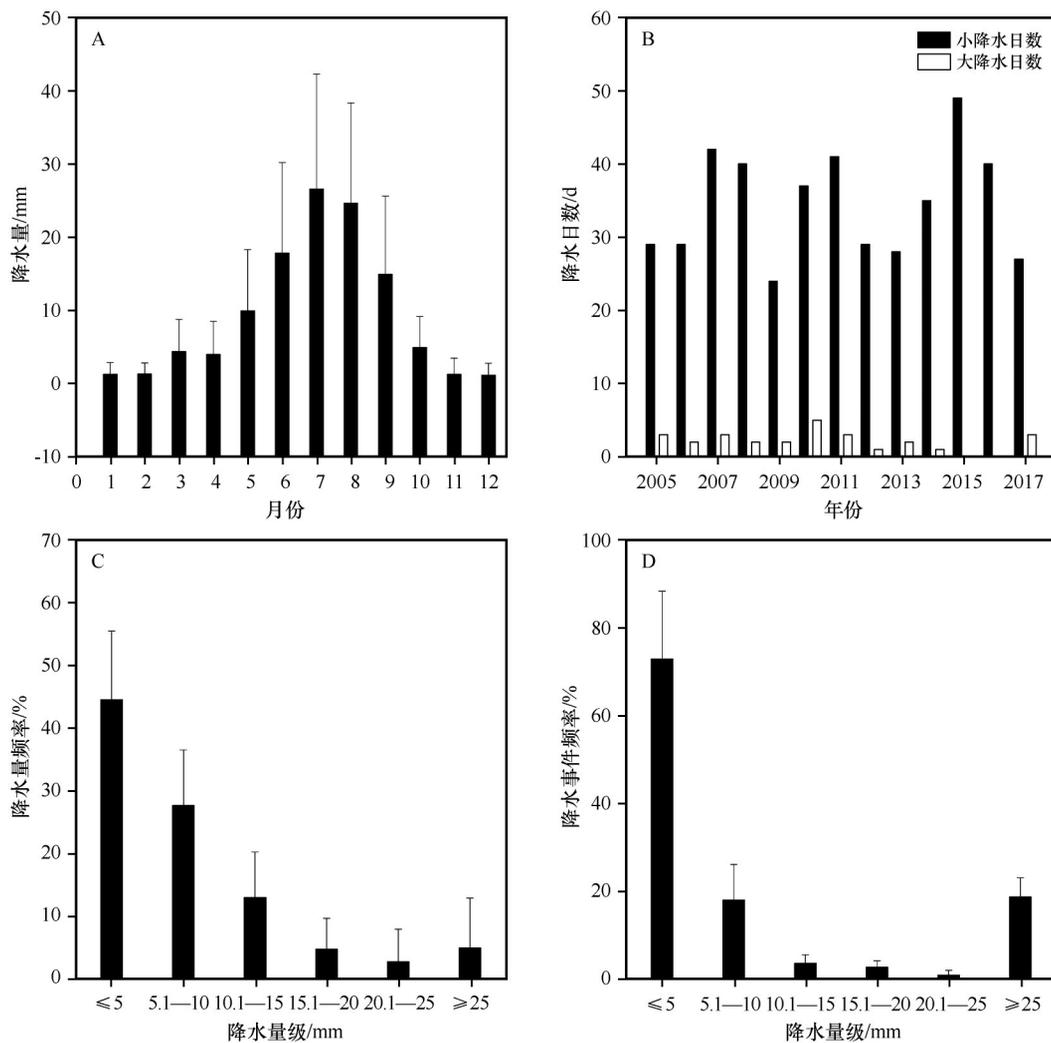


图1 研究区降水特征

Fig.1 Characteristics of precipitation in the research area

1.3.2 试验方法与指标测定

于2018年9—10月在河西走廊临泽内陆河流域研究站附近采集种子,同一物种的种子在20个植株上收集,自然风干并充分混合。室内盆栽试验于临泽内陆河流域研究站温室内完成,试验时间为2019年5—10月。花盆内径为30 cm,深20 cm,每盆装等量沙子(为防止土壤种子库影响,沙子在研究区附近1 m深处采集并过筛),距盆口2 cm处,将

纱布铺在花盆底部,阻止沙子漏出,同时可保持通气。选取子粒饱满、大小基本一致且无病虫的4种一年生草本植物种子,每种单独播种于花盆内,每盆播种50粒,行距3 cm,播深2 cm,为了防止系统误差,花盆随机摆放,并在每盆上用标签纸进行标号。控制实验室温度为15/25 °C,以保证种子顺利出苗。本研究通过野外植被调查发现,该区一年生草本层植物空间格局呈聚集分布,密度较大,且集中在丘

间低地或者人工林下,密度较大地区可以达到164株·m⁻²,因此本试验待植物生长出3片真叶时,按照自然状况下的密度,每盆留10株长势良好、生长情况相近的植物。

本试验根据该区降水量频率和降水事件频率特征,模拟在4种一年生草本植物生长季按照植物的不同生长阶段进行小降雨减少试验,并分别在拔节期(其中藜科植物为展叶期)、开花期和果熟期降雨处理前,进行一次降水,用称重法,使各处理保持土壤含水量一致;开始降雨处理后,分别在拔节期(藜科植物为展叶期)、开花期、繁殖期减少单次小降雨(5 mm),并设置对照组(各时期均不减少小降雨)共4组。每种植物每组设5个重复进行测量,共80盆。每盆随机选5株植物标记作为一个样本,共400株。每天记录叶片数量,每7天用直尺(精确到0.01 cm)测量并记录1次植株高度。生长季结束后,将所有植物从花盆中完整取出,将每株植物分为地上部分与地下部分,地上部分收集全部种子,同时地下部分将花盆中的根用水将盆土充分浸泡,用流水冲洗,并直接用直尺测量主根根长,将地上、地下两部分分别包好、编号、标记,于80℃条件下烘干24 h至恒重,取出称量其干重。根据“根冠比=地下部分干重/地上部分干重”计算根冠比^[33]。将每盆植物种子自然风干至恒重,称量种子质量(单位:g)。

1.4 数据分析

采用SPSS 21.0进行单因素方差分析和Duncan's多重比较分析同一植物不同物候期小降雨降水量减少各个参数的差异显著性(P<0.05)。利用Origin 2018作图软件完成图形绘制。

采用非线性方程建立4种一年生草本植物地上-地下生物量异速生长模型。

$$Y = \beta_0 X_1^{\beta_1} X_2^{\beta_2} \cdots X_j^{\beta_j} + e \quad (1)$$

式中:Y为整体或某一部分的生物量;X_j为植株的形态特征变量;β为模型参数;e为误差项。公式的最简单形式是一元非线性方程(幂函数形式),本研究根据地上-地下生物量进行Y=bX^a异速生长模型的幂函数建立,Y代表地上生物量,X为地下生物量,b为异速生长常数,a为异速生长指数。地上和地下生物量之间的异速生长关系存在3种形式:a=1.0时,为等速生长,即地上-地下生物量积累速率相等;若a>1.0,即地下生物量的累积速率高于地上;若a<1.0,则地下生物量累积速率低于地上生物量。由

原始数据拟合得到的异速生长关系经过统计学检验得到拟合优度参数R²,它可以直接反映地上-地下生物量的相关程度^[34],并通过显著性检验和F测验对模型进行校验。

2 结果与分析

2.1 不同生长期小降雨对一年草本植物形态的影响

2.1.1 根长

不同生长阶段单次小降雨减少导致植物根长缩短(图2)。拔节期/展叶期单次小降雨减少使根长显著降低(P<0.05),狗尾草、虎尾草、雾冰藜、刺蓬根长分别减小5%、45.1%、12%、31.5%;开花期小降雨减少,根长分别减小3%、20.4%、6%、2%;果熟期小降雨减少,根长减少4%、4%、5%、3%,开花期和果熟期小降雨减少对根长影响较小,均未达到显著水平。

2.1.2 株高

不同生长阶段单次小降雨减少导致植物株高降低(图3)。拔节期/展叶期单次小降雨减少使狗尾草、虎尾草、雾冰藜、刺蓬株高显著降低(P<0.05),株高分别降低23.2%、44%、20.6%、35%;开花期小降雨减少,株高分别降低11.6%、20%、5.9%、4.2%;果熟期小降雨减少,株高分别降低6%、4%、4.4%、1.4%。开花期和果熟期小降雨减少对株高影响较小,均未达到显著水平。

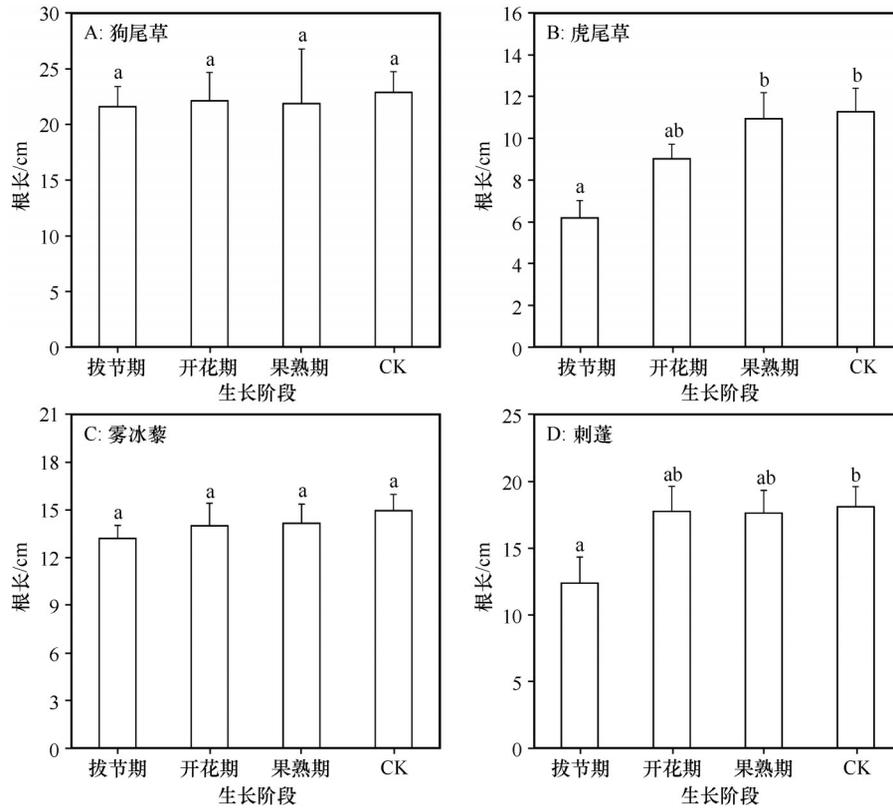
2.1.3 叶数

不同生长阶段单次小降雨减少导致植物叶片数量减少(图4)。拔节期/展叶期小降雨减少对叶片数量影响最大,狗尾草、虎尾草、雾冰藜、刺蓬分别减少17%、12.8%、17.4%、16.2%;开花期小降雨减少,叶片数量分别减少17%、5%、8%、9%;果熟期小降雨减少,叶片数量分别减少7%、2%、8%、6%。不同阶段单次小降雨减少对叶片数量影响均未达到显著水平。

2.2 不同生长期小降雨对一年草本植物生长的影响

2.2.1 地下生物量

不同生长阶段单次小降雨减少导致植物地下生物量显著增加(P<0.05,图5)。拔节期/展叶期小降雨减少,狗尾草、虎尾草、雾冰藜、刺蓬地下生物量分别增加6.24%、31%、24.07%、19.88%;开花期小降雨减少,地下生物量分别增加1.92%、16.55%、7.41%、10.79%;果熟期小降雨减少,地下生物量分



不同字母代表同种植物不同干旱胁迫处理差异显著 ($P < 0.05$), 相同字母代表同种植物不同干旱胁迫处理差异不显著 ($P > 0.05$)

图 2 小降雨减少对 4 种一年生草本植物根长的影响

Fig.2 The effect of reduced small rainfall on the root length of four annual herbaceous plants

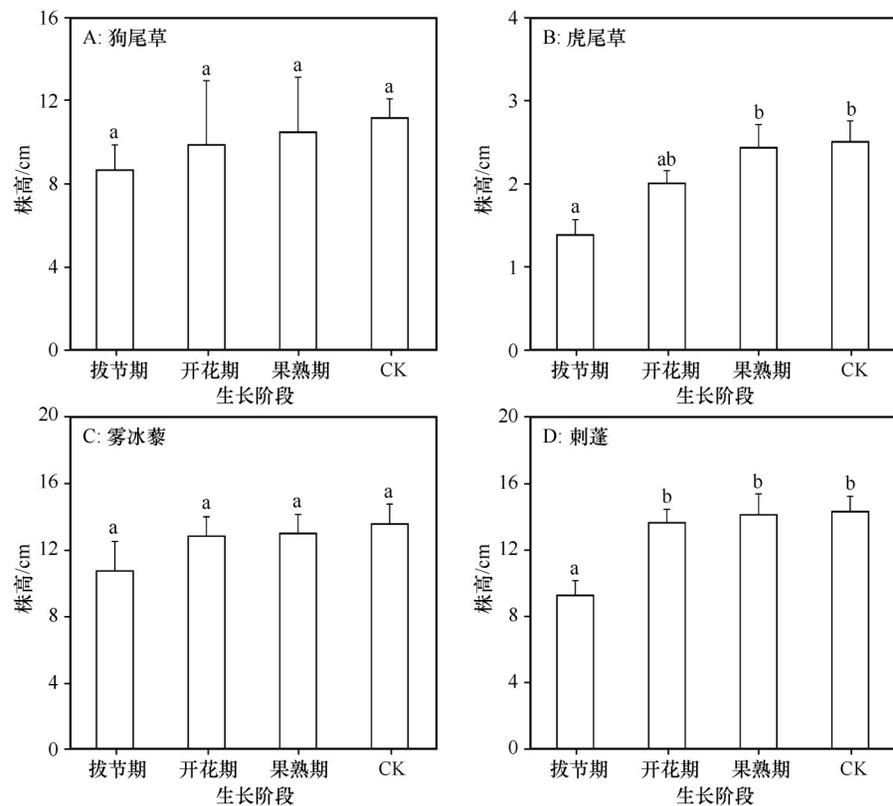


图 3 小降雨减少对 4 种一年生草本植物株高的影响

Fig.3 The effect of reduced small rainfall on the plant height of four annual herbaceous plants

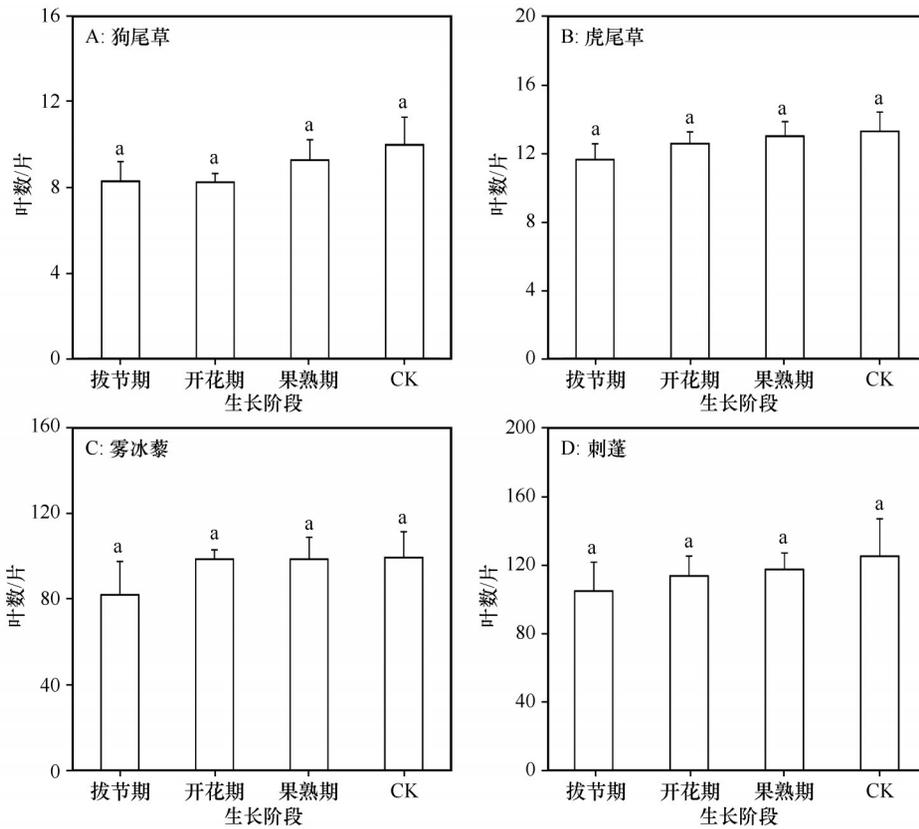


图4 小降雨减少对4种一年生草本植物叶数的影响

Fig.4 The effect of reduced small rainfall on the leaf number of four annual herbaceous plants

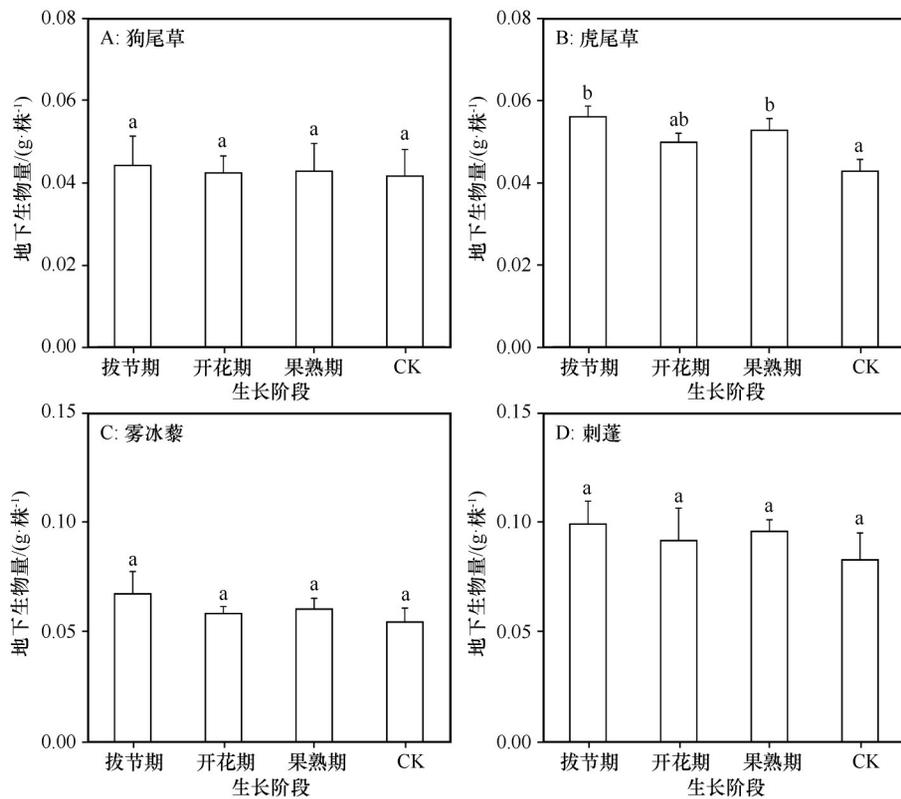


图5 小降雨减少对4种一年生草本植物地下生物量的影响

Fig.5 The impact of reduced small rainfall on the underground biomass of four annual herbaceous plants

别增加2.88%、23.31%、11.11%、15.88%。拔节期/展叶期小降雨减少对地下生物量影响最大,开花期和果熟期小降雨减少对地下生物量的影响较小。

2.2.2 地上生物量

不同生长阶段单次小降雨减少导致植物地上生物量减少(图6),但未达到显著水平。拔节期/展叶期小降雨减少,狗尾草、虎尾草、雾冰藜、刺蓬地

上生物量分别减少29.02%、16.56%、15.52%、18.39%;开花期小降雨减少,地上生物量分别减少17.18%、11.26%、9.85%、5.66%;果熟期小降雨减少,地上生物量减少14.11%、2.65%、5.37%、4.44%。拔节期/展叶期单次小降雨减少对地上生物量的影响较大,开花期和果熟期单次小降雨减少对地上生物量的影响较小。

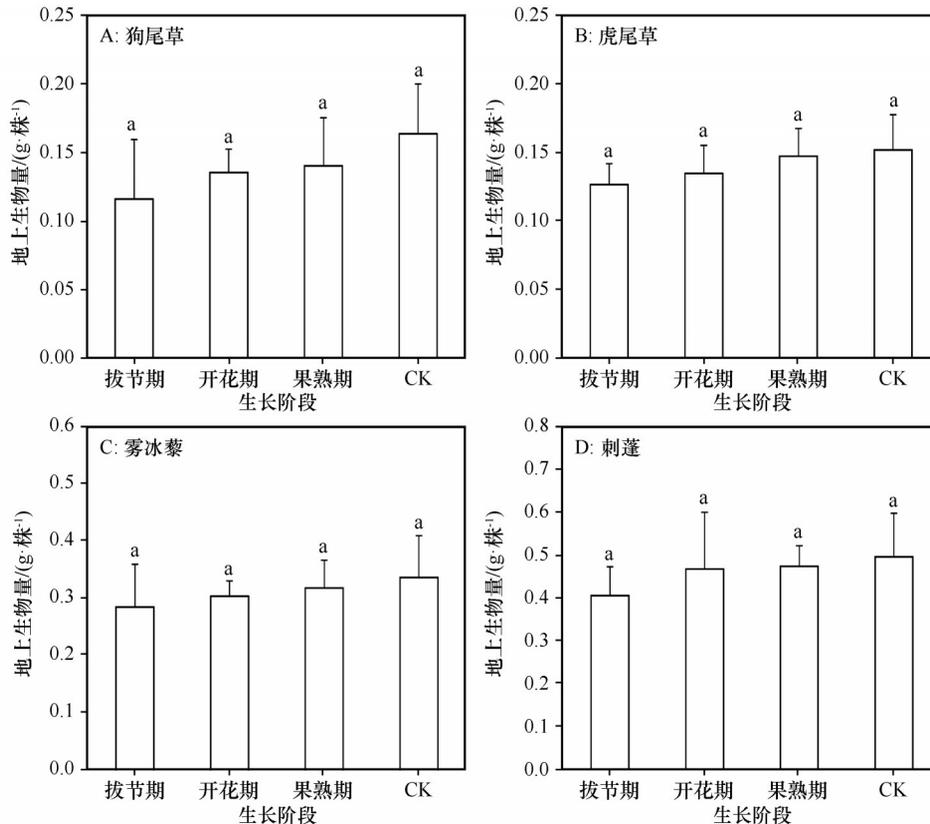


图6 小降雨减少对4种一年生草本植物地上生物量的影响

Fig.6 The effect of reduced small rainfall on the aboveground biomass of four annual herbaceous plants

2.2.3 根冠比

不同生长阶段单次小降雨减少导致植物根冠比显著增加($P < 0.05$)。拔节期/展叶期小降雨减少,狗尾草、虎尾草、雾冰藜、刺蓬根冠比分别为0.488、0.506、0.301、0.283;开花期小降雨减少,根冠比分别为0.337、0.409、0.196、0.238;果熟期小降雨减少,根冠比分别为0.375、0.391、0.214、0.21。拔节期/展叶期单次小降雨减少对根冠比影响最明显,开花期和果熟期单次小降雨减少对根冠比影响较小(图7)。

2.3 小降雨减少对一年生草本植物繁殖的影响

不同生长阶段单次小降雨减少导致植物种子生物量减少。拔节期/展叶期单次小降雨减少对种子生物量影响最大,狗尾草、虎尾草、雾冰藜、刺蓬

分别减少30.59%、10.88%、11.36%、15.97%;开花期小降雨减少,种子生物量分别减少18.82%、10.75%、8.18%、12.16%;果熟期小降雨减少,种子生物量分别减少17.65%、1.75%、5.91%、3.04%。不同生长阶段单次小降雨减少对种子生物量影响均未达到显著水平(图8)。

3 讨论

3.1 单次小降雨减少对4种一年草本植物地下生长的影响

本研究发现,4种一年生草本植物在不同生长阶段单次小降雨减少时,根长均减小,而地下生物量增加,尤其是在拔节期/展叶期单次小降雨作用最

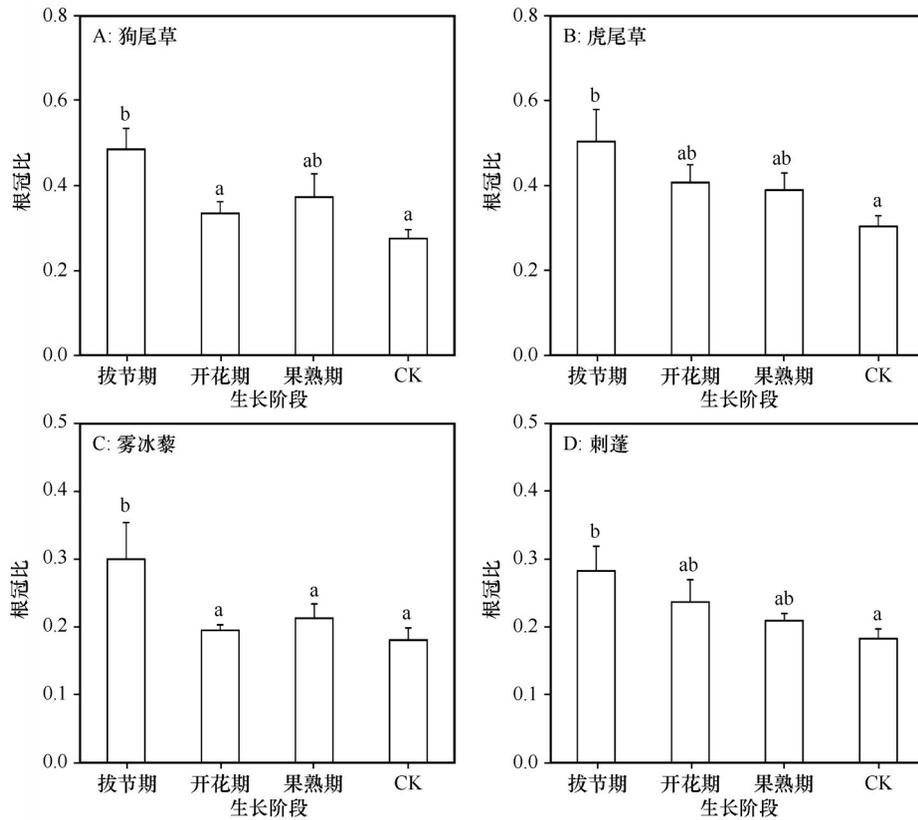


图7 小降雨减少对4种一年生草本植物根冠比的影响

Fig.7 The effect of reduced small rainfall on the root to shoot ratio of four annual herbaceous plants

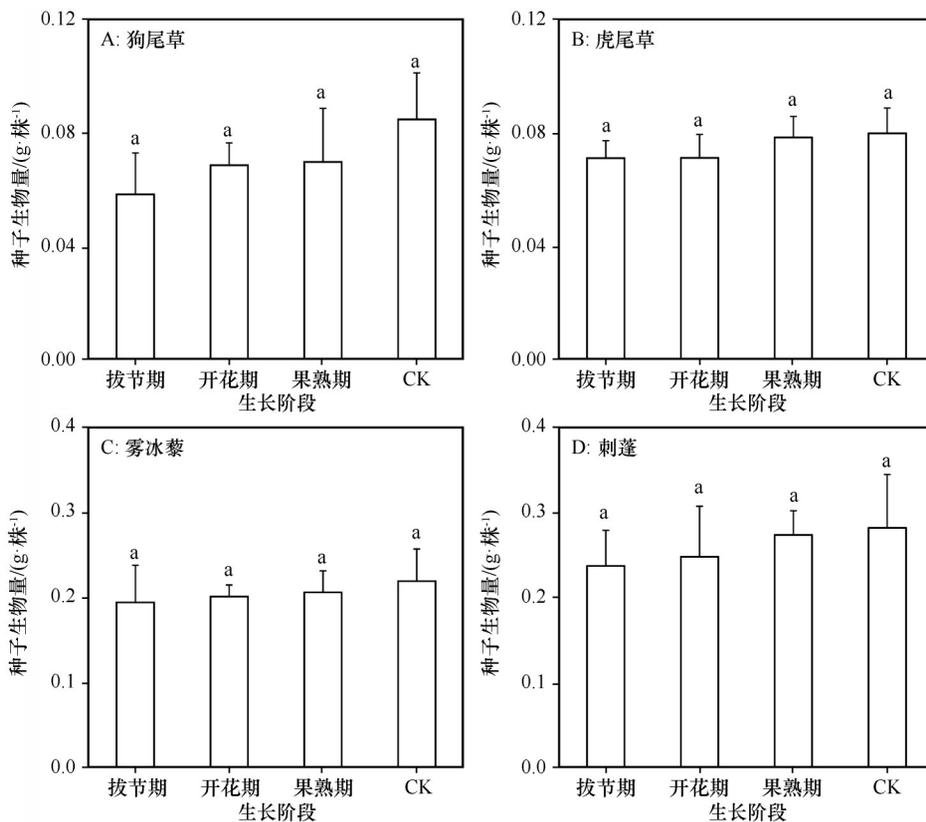


图8 小降雨减少对4种一年生草本植物种子生物量的影响

Fig.8 The effect of reduced small rainfall on seed biomass of four annual herbaceous plants

为显著。这是由于一年生草本植物作为浅根系植物^[20],根系主要分布在0—20 cm,在降雨减少的情况下,地下生物量增加,但根系生长主要趋于浅层^[35],即以侧根生长为主。同时,本研究中拔节期单

次小降雨减少时,植物根长生长时间增加,而繁殖时间减少,这是导致地下生物量和根冠比显著增加的另一原因(图9)。这说明在荒漠地区,一年生草本植物根系对小降雨事件具有高度敏感性。

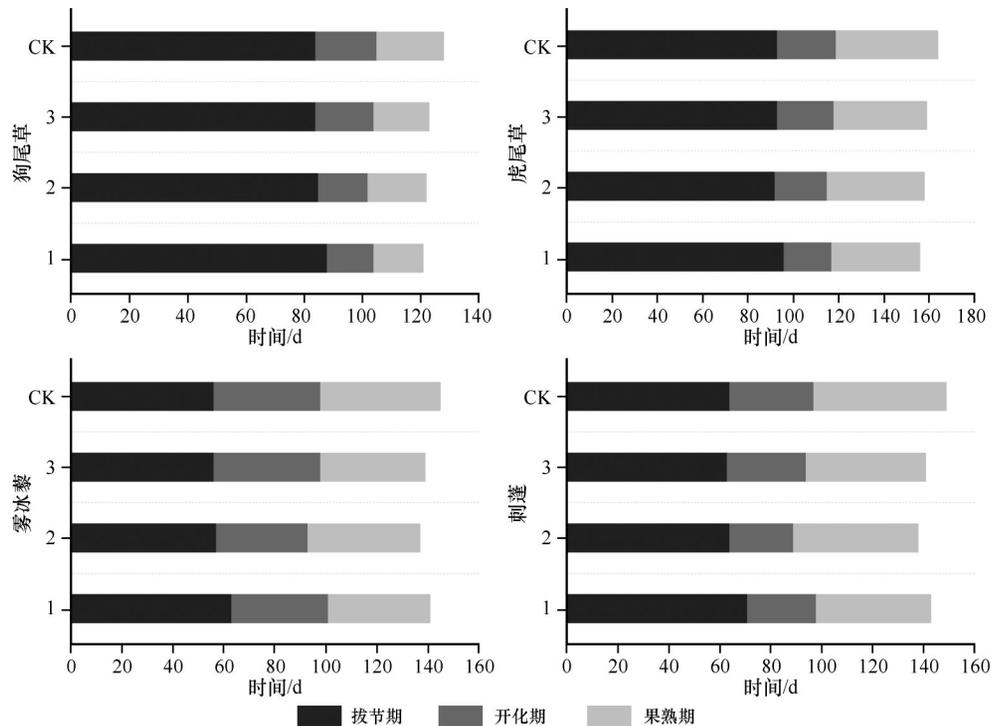


图9 小降雨减少对4种一年生草本植物不同生长阶段持续时间的影响

Fig.9 The effect of reduced rainfall on the duration of different growth stages of four annual herbaceous plants

生物量分配及生长速率的差异可反映一年生草本植物不同生长阶段的生存和适应策略。本研究发现,不同生长阶段减少小降雨异速生长指数均小于1(图10),而根冠比0.196—0.506,意味着虽然地下生物量累积速率大于地上生物量,但地下生物量远小于地上生物量的分配,这与对荒漠短命植物的研究结果一致,对科尔沁沙地草本植物个体生物量的研究表明,大部分一年生草本植物以地上生物量为主^[36-37]。这是由于一年生草本植物均是当年死亡,其根系每年基本都是新生,不需要在地下根系储存能量物质,而主要将能力用于地上部分的营养和繁殖生长^[38-39]。因此,通过增加地下生物量来抑制地上生物量减少是一年生草本植物应对小降雨减少的策略,一年生草本植物仍然将更多的生物量用于地上部分的生长。

3.2 小降雨减少对4种一年草本植物地上生长的影响

本研究发现,4种一年生草本植物在不同生长阶段单次小降雨减少时,叶数、地上生物量减少均

不显著,仅在拔节期/展叶期单次小降雨减少时,株高显著降低。拔节期是植物茎的节间迅速向上生长的关键时期,对水分需求迫切^[40],本研究小降雨减少直接降低了土壤中的可利用水分的含量,使一年生草本植物在拔节期生长时,水分供应不足,进而影响植物养分的吸收和运输,使一年生草本植物株高显著降低。这与已有干旱荒漠区降水减少对一年生草本植物的株高研究结果一致^[41]。在植物遇到缺水条件时,叶片作为水分消耗的重要器官^[42],通过减少叶片数量降低植物的蒸腾速率,来维持植物体内的含水量,表现了植物面对干旱的“节流”措施^[43]。但有研究表明,不同降雨条件下,叶片会反映出不同的适应策略。当干旱程度较小时,叶片数几乎不受影响^[44],本研究中不同生长阶段单次减少小降雨,叶片数下降不显著,是由于单次小降雨减少造成的土壤干旱不足以引起叶数的改变,而叶片能够为一年生草本植物提供光合作用场所^[42],从而使一年生草本植物进行的稳定的光合作用,并使地上生物量含量维持较高。

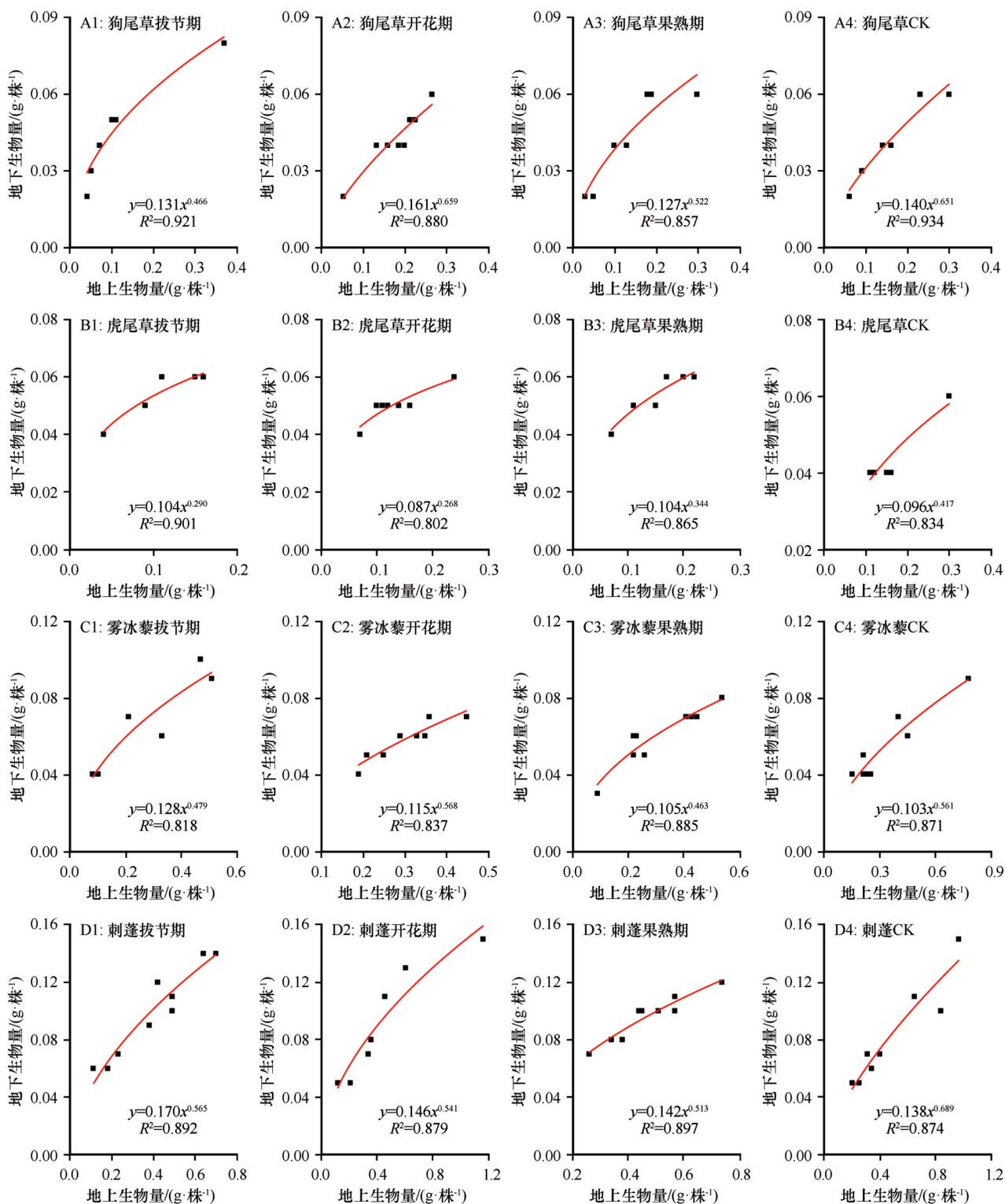


图10 小降雨减少对4种一年生草本植物异速生长的影响

Fig.10 The effect of reduced small rainfall on the allometric growth of four annual herbaceous plants

3.3 小降雨减少对4种一年生草本植物繁殖产量的影响

本研究发现,不同生长阶段单次小降雨减少使一年生草本植物繁殖产量下降,但均未达到显著。

一年生草本植物根据降水量变化通过调整生殖生长期的长短的方式,减少结实量为代价加速种子成熟的方式响应降水量不足^[13]。本研究中一年生草本植物在单次小降雨减少时也能及时调整不同生

长阶段的长短,拔节期变长,开花期和果熟期变短(图 9),使一年生草本植物繁殖时间缩短,种子成熟速度加快,从而导致繁殖质量下降。但本研究中地上生物量与繁殖投入(种子生物量)相关性分析表

明,地上生物量与繁殖质量呈显著正相关, R^2 为 0.84—0.94(图 11)。单次小降雨减少主要影响地下生物量,地上生物量受小降雨减少影响不显著,从而使繁殖产量未显著下降,维持较高产量。

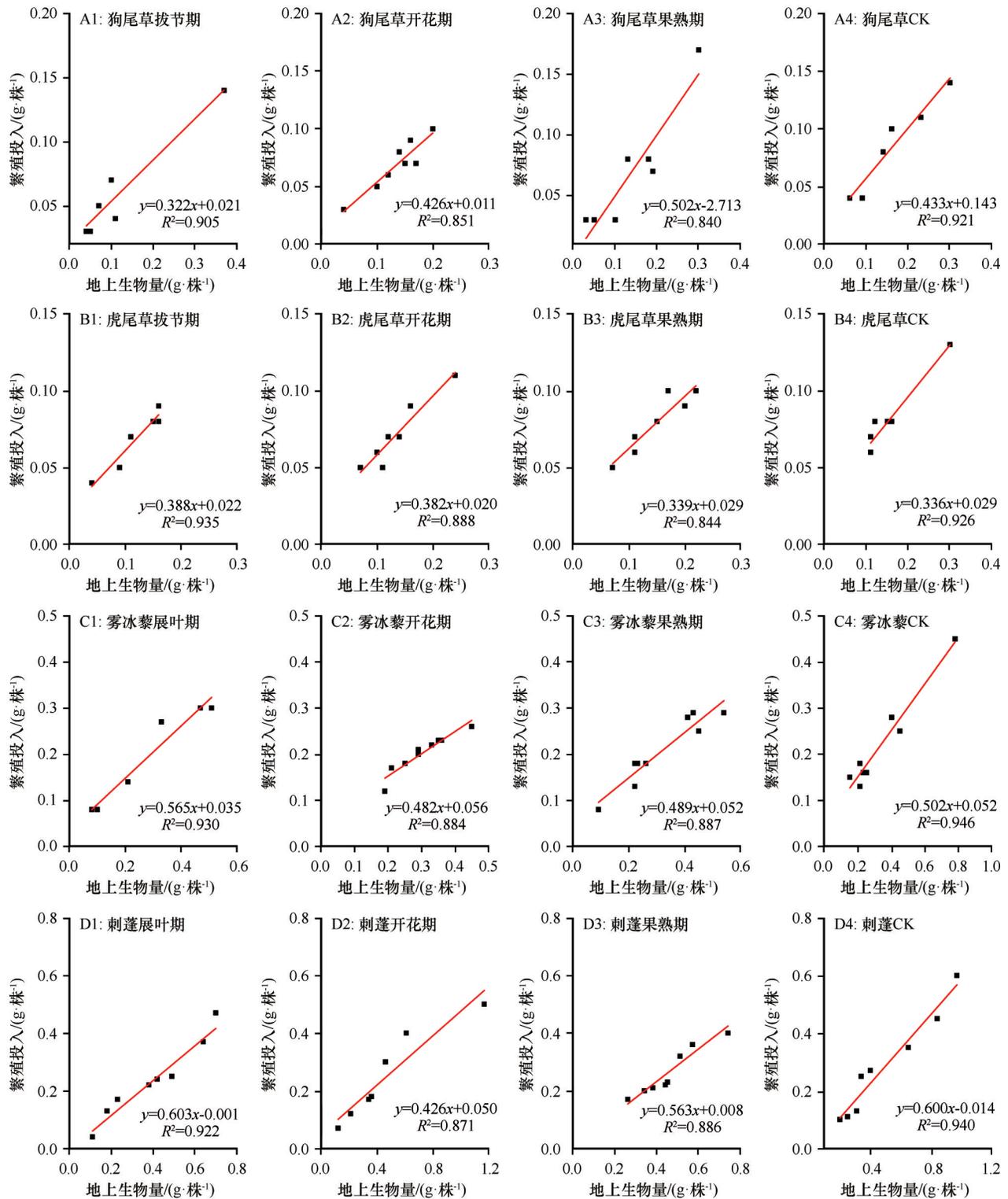


图 11 小降雨减少对 4 种一年生草本植物生物量分配的影响

Fig. 11 The effect of reduced small rainfall on the biomass allocation of four annual herbaceous plants

4 结论

一年生草本植物在荒漠地区长期处于干旱缺水的环境, 单次小降雨减少导致植物繁殖产量减少, 但影响并未达到显著水平, 从侧面反映了 ≤ 5 mm降水有利于浅根系的草本植物的生长和繁殖, 也反映了一年生草本植物对降水的响应更加敏感。因此, 在较短的生长季中, 将更高比例的生物量分配到地上生长以及繁殖, 以便产生更多适合度高的种子, 是一年生植物在不可预测极端环境中的一种适应性响应, 对于植物在多变的荒漠环境条件中存活并扩大种群具有重要的生态学意义。

参考文献:

- [1] 梁存柱, 王炜, 朱宗元, 等. 荒漠区一年生植物层片的组织格局与生态适应模式[J]. 干旱区资源与环境, 2002(1): 77-83.
- [2] 刘志民. 木岩黄芪水分关系的研究[J]. 干旱区资源与环境, 1991(3): 99-107.
- [3] 李响, 沈禹颖, 阎顺国. NaCl胁迫下5种牧草种子萌发的比较研究[J]. 草业科学, 1997(2): 51-54.
- [4] 闫建成, 梁存柱, 付晓玥, 等. 草原与荒漠一年生植物性状对降水变化的响应[J]. 草业学报, 2013, 22(1): 68-76.
- [5] Susanne S, Osvaldo E S. Hierarchy of responses to resource pulses in arid and semi-arid ecosystems [J]. *Oecologia*, 2004, 141(2): 211-220.
- [6] Michael E L, David D, Breshears W K, et al. A multi-scale perspective of water pulses in dryland ecosystems: climatology and ecohydrology of the western USA [J]. *Oecologia*, 2004, 141(2): 269-281.
- [7] Liu H, Zhao W Z, He Z B, et al. Stochastic modelling of soil moisture dynamics in a grassland of Qilian Mountain at point scale [J]. *Science China Earth Sciences*, 2007, 50(12): 1844-1856.
- [8] Hulme M, Osborn T J, Johns T C. Precipitation sensitivity to global warming: comparison of observations with HadCM2 simulations [J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25: 3379-3382.
- [9] Reynolds J F, Kemp P R, Ogle K, et al. Modifying the 'pulses-reserve' paradigm for deserts of North America: precipitation pulses, soil water, and plant responses [J]. *Oecologia*, 2004, 141(2): 194-210.
- [10] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001.
- [11] Meehl G A, Arblaster J M, Tebaldi C. Understanding future patterns of increased precipitation intensity in climate model simulations [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32, L18719.
- [12] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [13] 李秋艳, 赵文智. 5种荒漠植物幼苗对模拟降水量变化的响应 [J]. 冰川冻土, 2006(3): 414-420.
- [14] 吴玉, 郑新军, 李彦, 等. 荒漠草本植物在不同降雨模式下的光合响应和生物量分配策略 [J]. 生态学杂志, 2013, 32(10): 2583-2590.
- [15] Xiong P F, Shu J I, Zhang H J, et al. Small rainfall pulses affected leaf photosynthesis rather than biomass production of dominant species in semiarid grassland community on Loess Plateau of China [J]. *Functional Plant Biology*, 2017, 44(12): 1229.
- [16] Austin A T, Yahdjian L, John M, et al. Water pulses and biogeochemical cycles in arid and semiarid ecosystems [J]. *Oecologia*, 2004, 141(2): 221-235.
- [17] Beatley J C. Phenological events and their environmental triggers in Mojave Desert ecosystems [J]. *Ecology*, 1974, 55(4): 856-863.
- [18] Sala O E, Lauenroth W K, Parton W J. Long-term soil water dynamics in the shortgrass steppe [J]. *Ecology*, 1992, 73(4): 1175-1181.
- [19] 周海, 赵文智. 河西走廊典型荒漠区土壤水分对降水脉动响应的稳定同位素分析 [J]. 中国沙漠, 2016, 36(6): 1637-1645.
- [20] Forseth I N, Ehleringer J R, Werk K S, et al. Field Water Relations of Sonoran Desert Annuals [J]. *Journal of the Torrey Botanical Society*, 2009, 132: 38-49.
- [21] Ehleringer J R, Dawson T E. Water uptake by plants: perspectives from stable isotope composition [J]. *Plant Cell & Environment*, 2010, 15(9): 1073-1082.
- [22] Javaux M, Rothfuss Y, Vanderborght J, et al. Isotopic composition of plant water sources [J]. *Nature*, 2016, 536(7617): E1.
- [23] 王国华, 任亦君, 缙倩倩. 河西走廊荒漠绿洲过渡带封育对土壤和植被的影响 [J]. 中国沙漠, 2020, 40(2): 222-231.
- [24] 何志斌, 赵文智. 黑河流域荒漠绿洲过渡带两种优势植物种群空间格局特征 [J]. 应用生态学报, 2004, 15(6): 947-952.
- [25] 梁存柱, 刘钟龄, 朱宗元, 等. 阿拉善荒漠区一年生植物层片物种多样性及其分布特征 [J]. 应用生态学报, 2003, 41(6): 897-903.
- [26] Guo Q. Microhabitat differentiation in Chihuahuan Desert plant communities [J]. *Plant Ecology*, 1998, 139(1): 71-80.
- [27] 李雪华, 李晓兰, 蒋德明, 等. 干旱半干旱荒漠地区一年生植物研究综述 [J]. 生态学杂志, 2006, 25: 851-856.
- [28] Roberts H A, Neilson J E. Role of temperature in the seasonal dormancy of seeds of *Veronica hederifolia* L [J]. *New Phytologist*, 1982, 90: 745-749.
- [29] 燕红. 草原与荒漠区一年生植物层片的生态适应性研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2007.
- [30] 郭良才, 岳虎, 王强, 等. 河西走廊干旱区农业气候资源变化特征 [J]. 干旱地区农业研究, 2008(3): 14-22.
- [31] 李芳, 赵文智. 黑河中游荒漠生态系统归一化植被指数对降水的响应 [J]. 植物生态学报, 2016, 40(12): 1245-1256.
- [32] 刘冰. 荒漠区灌木对降水脉动响应研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2009.
- [33] 刘晓军, 洪光宇, 袁志诚, 等. 干热胁迫下两种苇状羊茅对不

- 同水肥处理的响应机理[J]. 草业学报, 2011, 20(1): 46-54.
- [34] 韩文轩, 方精云. 幂指数异速生长机制模型综述[J]. 植物生态学报, 2008(4): 951-960.
- [35] 黄刚, 赵学勇, 苏延桂. 科尔沁沙地3种草本植物根系生长动态[J]. 植物生态学报, 2007(6): 1161-1167.
- [36] 丁俊祥, 范连连, 李彦, 等. 古尔班通古特沙漠6种荒漠草本植物的生物量分配与相关生长关系[J]. 中国沙漠, 2016, 36(5): 1323-1330.
- [37] 李雪华, 李晓兰, 蒋德明, 等. 科尔沁沙地70种草本植物个体和构件生物量比较研究[J]. 干旱区研究, 2009, 26(2): 200-205.
- [38] 陶冶, 张元明. 准噶尔荒漠6种类短命植物生物量分配与异速生长关系[J]. 草业学报, 2014, 23(2): 38-48.
- [39] 邱娟, 谭敦炎, 樊大勇. 准噶尔荒漠早春短命植物的光合特性及生物量分配特点[J]. 植物生态学报, 2007, 31(5): 883-891.
- [40] 方国杰. 西北旱区不同灌溉处理对紫花苜蓿种子产量及品质的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [41] 张浩, 王新平, 张亚峰, 等. 干旱荒漠区不同生活型植物生长对降雨量变化的响应[J]. 生态学杂志, 2015, 34(7): 1847-1853.
- [42] 蔡海霞, 吴福忠, 杨万勤. 干旱胁迫对高山柳和沙棘幼苗光合生理特征的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(9): 2430-2436.
- [43] 李文娆, 张岁岐, 丁圣彦, 等. 干旱胁迫下紫花苜蓿根系形态变化及与水分利用的关系[J]. 生态学报, 2010, 30(19): 5140-5150.
- [44] 麻雪艳, 周广胜. 干旱对夏玉米苗期叶片权衡生长的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(5): 1758-1769.

Effects of single small rainfall events (≤ 5 mm) on the growth and reproduction of four typical desert annual herbaceous plants

Ren Yijun¹, Xi Lulu¹, Gou Qianqian^{1,2a}, Song Bing¹, Wang Guohua^{1,2ab}

(1. College of Geographical Sciences, Shanxi Normal University, Linfen 041000, Shanxi, China; 2. a. Key Laboratory of Desert and Desertification / b. Linze Inland River Basin Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: We selected four typically annual gramineous plant *Setaria viridis*, *Chloris virgata*, and chenopodiaceous plant *Bassia dasyphylla*, *Salsola ruthenica* as study subjects in a typical desert-oasis ecotone in the Hexi Corridor, and simulated the reduction of small rainfall events during jointing stage / leaf unfolding stage, flowering stage and fruit ripening stage, and analyzed the effects of a single small rainfall on the growth and reproduction of annual herbaceous plants. The results of the study showed that: (1) A single small rainfall reduction in the jointing stage / leaf unfolding stage led to significant changes in the root growth of four annual herbaceous plants, which were mainly manifested as the root length was reduced significantly, and the longitudinal growth was inhibited, but the underground biomass was significantly increased, and mainly due to lateral root growth. (2) A single small rainfall at different growth stages decreased, and the number of leaves and above-ground biomass of four annual herbaceous plants decreased but did not reach a significant level, only when small rainfall was reduced during the jointing stage / leaf unfolding stage, the plant height decreased significantly. (3) A single small rainfall at different growth stages decreased, and the root-shoot ratio increased, but the value of the root-shoot ratio was still in the low range of 0.196-0.506, and the distribution of underground biomass was still far less than the above-ground biomass, which indicated that annual herb plants used more biomass for the growth of above-ground. (4) A single small rainfall reduction during the jointing stage/leaf unfolding stage led to the jointing stage/ leaf unfolding stage to be prolonged, and the flowering stage and fruit ripening stage were delayed, and the duration was shortened, and led to the reduction of annual herbaceous plants seed biomass ultimately.

Key words: annual herbaceous plants; different growth stages; small rainfall events; growth; reproduction