Chinese Journal of Applied Ecology, Jan. 2020, 31(1): 9-16 DOI: 10.13287/j.1001-9332.202001.004

降水增加对古尔班通古特沙漠两种短命植物生长的影响

张 岚[1] 张玲卫[1*] 刘会良[2,3,4] 陈艳锋[2]

([1]新疆农业大学草业与环境科学学院, 乌鲁木齐 830052; [2]中国科学院新疆生态与地理研究所, 中国科学院干旱区生物地理与生物资源重点实验室, 乌鲁木齐 830011; [3]中国科学院吐鲁番沙漠植物园, 新疆吐鲁番 838008; [4]新疆生态与地理研究所伊犁植物园, 新疆新源 835800)

摘 要 短命植物是荒漠生态系统中的重要组成部分,发挥着重要的生态功能,对其不同生长阶段形态特征及生物量积累与分配进行研究,有助于深入了解荒漠短命植物的功能特征及生存策略。本研究选取古尔班通古特沙漠2种短命植物——毛穗旱麦草和小花荆芥为对象,通过野外增水30%、50%,分析降水增加对二者不同生长阶段形态、生物量特征的影响。结果表明:增水30%、50%均促进毛穗旱麦草植株生长,增水处理下叶面积增幅为14.2%~188.5%,繁殖器官生物量最大增幅为55.9%。增水对小花荆芥植株影响存在生长阶段的差异性,展叶期增水对小花荆芥植株生长均有促进作用,而果熟期增水50%小花荆芥叶面积、株高、繁殖器官生物量分别降低54.9%、20.5%、43.2%。两种短命植物对降水增加的响应具有物种特异性,未来降水增加可能会改变二者生存策略,进而对群落组成与结构产生影响。

关键词 短命植物; 降水增加; 生物量分配; 古尔班通古特沙漠

Effects of increased precipitation on growth of two ephemeral plants in the Gurbantunggut Desert, China. ZHANG Lan[1], ZHANG Ling-wei[1*], LIU Hui-liang[2,3,4], CHEN Yan-feng[2] ([1]*College of Grassland and Environment Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi* 830052, *China*; [2]*Key Laboratory of Biogeography and Bioresource in Arid Land, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi* 830011, *China*; [3]*Turpan Eremophytes Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Turpan* 838008, *Xinjiang, China*; [4]*Yili Botanical Garden, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Xinyuan* 835800, *Xinjiang, China*).

Abstract: Ephemeral plants are a major component of biodiversity in the deserts of Northwest China, with important ecological functions. Information on plant morphological characteristics and biomass accumulation and allocation during different growth stages could enhance our understanding of the functional features and survival strategy of ephemeral plants. We examined the effects of increased precipitation on ephemeral species *Eremopyrum distans* and *Nepeta micrantha* in the Gurbantunggut Desert. Changes in morphological characteristics and biomass accumulation and allocation were analyzed under increasing precipitation 30% and 50% treatments. The results showed that increased precipitation 30% and 50% treatments promoted the growth of *E. distans*, with leaf area and reproductive organ biomass being increased by 14.2%-188.5% and 55.9%, respectively. The effects of increased precipitation on the growth of *N. micrantha* varied across different growth stages. At leaf expansion stage, increased precipitation promoted growth of *N. micrantha*, while at fruit ripening stage, increased precipitation 50% treatment reduced leaf area, plant height, and reproduction biomass by 54.9%, 20.5%, 43.2%, respectively. Thus, the responses of the two species

本文由国家自然科学基金项目(31971428, 31660162, 31570529)和中国科学院创新促进会项目(2018477)资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (31971428, 31660162, 31570529) and the Youth Innovation Promotion Association of Chinese Academy of Sciences (2018477).

2019-09-18 Received, 2019-11-11 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zlwlz@163.com

to increased precipitation was species-specific. Increased precipitation would change the survival strategies of the two species, with consequence on the species composition and structure of desert community.

Key words: ephemeral plant; increased precipitation; biomass allocation; Gurbantunggut Desert.

由人类活动(如化石燃料燃烧、化学肥料使用等)引发的全球气温升高、氮沉降增加、降水变化等气候变化加剧,将会对陆地生态系统产生巨大而深远的影响[1]。植物是陆地生态系统的重要组成部分,并发挥着重要的调控作用。因此,气候变化对不同陆地生态系统中植物生长节律与繁殖分配已经产生显著影响[2]。大量研究表明,降水量增加与植物生长及物种多样性呈显著正相关[3],但在干旱地区的生态系统中,降水量增加,优势物种生长旺盛,反而会抑制其他物种的生长,导致物种多样性降低[4]。总之,气候变化不仅对植物形态特征、物候特征、生物量积累与分配特征等产生显著影响[5],而且不同生态系统中植物对气候变化的响应也存在差异[6]。

在干旱半干旱地区,水分是植物生长的重要限制因素,降水格局的变化可能对植物产生较大影响[7]。据报道,我国西北地区近年来的降水量呈逐年增加趋势[8],并且在未来一段时间内仍可能持续增加[9]。降水增加显著缩短了毛乌素沙漠一些种子的萌发时间[10]。在植物快速生长阶段,降水增加不仅促进了腾格里沙漠一年生植物新叶和枝的生长[11],而且增加了生物量积累[12]。孙羽等[4]发现,降水增加提高了某些荒漠植物的密度、盖度、初级生产力等,进而可能加剧物种之间的竞争[13],一些物种的密度会随着降水量的增加显著降低[14]。可见,降水增加对西北地区荒漠草本植物产生了显著影响,而且不同物种对降水增加表现出不同的反应。然而,目前对于荒漠草本植物不同发育阶段生态特性如何响应降水增加还不明确。

短命植物是指利用早春或夏初相对充足的水分在较短的时间迅速完成其生活史的一类特殊植物,仅分布于我国新疆北部的准噶尔盆地,是准噶尔荒漠早春的优势植物层片,也是我国荒漠植物区系中重要而独特的组成部分[15]。这些短命植物生活在蒸发量巨大、降水却极其缺乏的沙漠地区,其不仅对水分资源利用效率很高,而且对水分变化十分敏感[16]。短命植物层片结构主要由尖喙牻牛儿苗(*Erodium oxyrhynchum*)、囊果苔草(*Carex physodes*)和齿稃草(*Schismus arabicus*)等优势种及小花荆芥(*Nepeta micrantha*)、毛穗旱麦草(*Eremopyrum distans*)和条叶庭芥(*Alyssum linifolium*)等伴生种构成,这两种类型植物依据其优势类型和所在环境的特征发挥着不同的生态功能[15]。有大量研究表明,降水增加显著影响一些荒漠短命植物优势种的物候特征[17]、生物量积累与分配以及植物的多样性[12,18]。目前,仅有个别研究发现,降水增加对这些伴生种的形态及生物量特征产生了显著影响,但其研究也仅限于生长阶段中的某个时期[19],尤其是缺乏不同发育阶段对降水增加的响应特性的研究。同时,由于伴生种的环境响应策略与优势种存在一定差异,那么是否气候变化也影响伴生种的结构特征和生态功能,从而影响短命植物未来的分布格局等科学问题还不明确。

因此,本研究选取 2 种荒漠短命植物毛穗旱麦草(*Eremopyrum distans*)和小花荆芥(*Nepeta micrantha*)为对象,通过野外增水试验,探讨降水增加对 2 种伴生短命植物不同发育阶段的形态变化特征和生物量积累与分配的影响,有助于进一步分析荒漠草本植物的生存策略和功能特征,认识气候变化背景下荒漠生态系统变化过程。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

古尔班通古特沙漠位于 44°11′—46°20′ N、84°31′— 90°00′ E之间,面积约为 4.88 万 km^2,是中国第二大沙漠,也是最大的固定和半固定沙漠。该地区年均蒸发量>2000 mm,而年均降水量不超过 150 mm,沙漠腹地仅有 70~100 mm,冬春有着 20 cm 以上的稳定积雪,为典型的内陆干旱气候。该沙漠遍及梭梭群系,主要由白梭梭(*Haloxylon persicum*)、梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、蛇麻黄(*Ephedra distachya*)等沙生植物构成的小半乔木、灌木和小半灌木群落构成,在沙丘表面的覆盖度可达 15%~50%[15]。

该沙漠的降水分布以春季、夏季好于秋季、冬季,这种水热配置条件为大量短命植物生长提供了良好的条件,这些短命植物主要由优势种和伴生种构成,优势种主要为尖喙牻牛儿苗、齿稃草、囊果苔

草等，伴生种主要有小花荆芥、卷果涩荠（*Malcolmia africana*）、毛穗旱麦草等，在生长旺季短命植物的盖度可达 40%以上[18]。毛穗旱麦草、小花荆芥是荒漠植物群落中 2 种主要伴生种，对环境变化十分敏感。同时，二者的存在及其形成的片层或群聚，对于增加荒漠地表的粗糙度、防沙固沙等方面具有一定的生态价值[20]。

1.2　试验设计

试验地点位于古尔班通古特沙漠南缘，试验区（44°44.47′ N，87°90.39′ E）处于丘间平地，海拔 400 m。2015 年开始设置样方。有研究指出，未来 30 年我国西北地区降水量将增加 30%，极端降水年份降水量波动可能达到 50%[21]。为此，本研究设置了增水 30%、50%处理，在每次降雨后进行增水，自然降水为对照。每个处理设置 3 个 10 m×10 m 的小区，小区间隔 2 m，小区间布设 1 m 深的隔水层；在每个小区内设置 9 个 1 m×1 m 的小样方，每个小样方间隔 50 cm。2016 年 10 月，在每个小样方中分别播撒旱麦草、小花荆芥种子 150 粒，以保证不同时期采样。由于自然条件下 2 种植物植株密度不一致，为减小种内竞争对试验的影响，待出苗后将密度较大区域的幼苗进行间苗，行距 15 cm，株距 10 cm。在 2 种植物展叶期、始花期、盛花期、果熟期和枯萎期进行采集，每个处理在 3 个小区各采集 10 株。采集时根系带少量土壤，保证植株的完整性。

1.3　植物形态和生物量测定

采集的植物样用清水洗净，测量株高、主根长、叶片数，测量完成后装入信封袋中带回实验室，将各器官分离（根、茎、叶、繁殖器官），并测量叶面积。将植物样放置在烘箱内 105 ℃下杀青 30 min，在 75 ℃下烘干至恒重，用天平称量各器官生物量（0.1 mg）。

1.4　数据处理

在 SPSS 24.0 软件中进行单因素（one-way ANOVA）分析差异（$\alpha=0.05$），使用 Origin 2017 软件作图。图表中数据为平均值±标准差。

2　结果与分析

2.1　降水增加对植物形态特征的影响

由图 1 可以看出，降水增加促进毛穗旱麦草各生长阶段的植株生长，株高、叶面积和叶片数增幅分别为 17.4%～46.4%、14.2%～188.5%和 2.8%～74.1%，根长在盛花期、果熟期和枯萎期均显著降低，降幅为 17.8%～19.2%、13.5%～14.4%和 9.0%～16.3%。不同增水处理间也存在差异性，增水 50%处理显著增加各生长阶段的株高、叶面积和叶片数。增水 30%处理对展叶期株高、叶面积和叶片数无显著影响，但增加了其他生长阶段的株高。增水 30%处理叶面积仅在盛花期、果熟期和枯萎期显著增加。

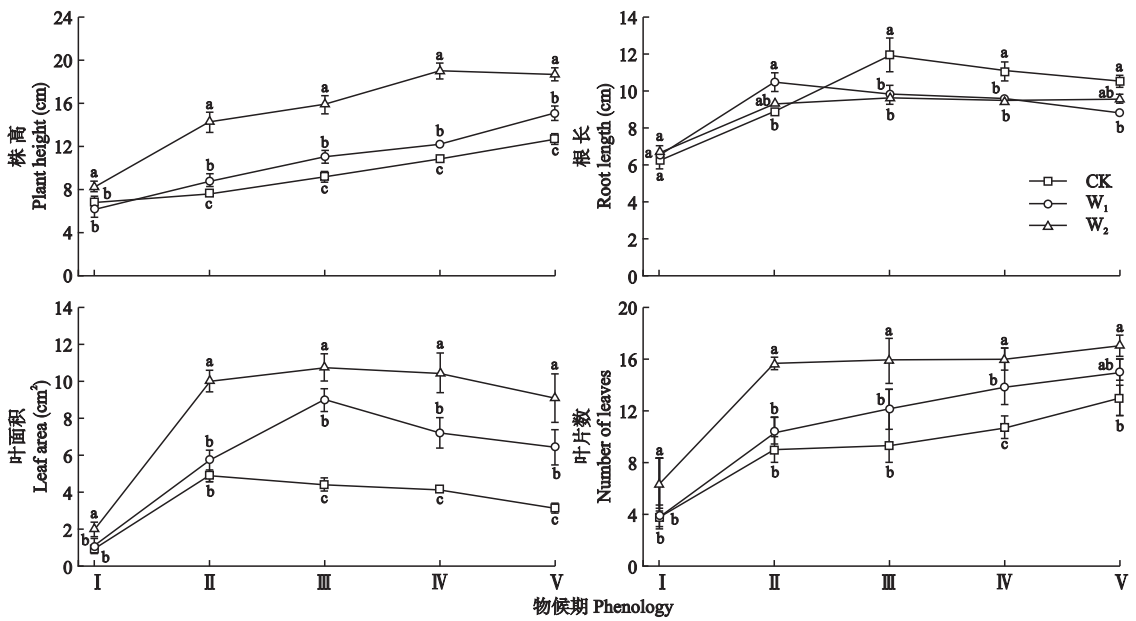


图 1　不同增水处理毛穗旱麦草的形态特征

Fig.1　Plant morphological characteristics of *Eremopyrum distans* under different treatments.

CK：对照 Control；W_1：增水 30% Increasing water 30%；W_2：增水 50% Increasing water 50%. Ⅰ：展叶期 Leaf expansion stage；Ⅱ：始花期 Early flowering stage；Ⅲ：盛花期 Full-bloom stage；Ⅳ：果熟期 Fruit ripening stage；Ⅴ：枯萎期 Wilt stage. 不同字母表示处理间差异显著（$P<0.05$）Different letters indicated significant difference among treatments at 0.05 level. 下同 The same below.

由图 2 可以看出,降水增加对小花荆芥植株生长的影响存在生长阶段差异性。在展叶期,增水 50%处理小花荆芥株高和叶面积显著高于对照,根长则显著低于对照,增水 30%处理对小花荆芥叶面积、株高和叶片数无显著影响,但根长显著降低。增水 30%和 50%处理显著增加了始花期的株高,但始花期的叶片数显著降低。增水 50%处理显著降低了果熟期和枯萎期的叶面积和株高,叶面积和株高最大降幅分别为 54.9%、20.5%。

2.2 降水增加对生物量积累及分配的影响

2.2.1 生物量积累 降水增加显著促进了毛穗旱麦草各器官的生物量积累(图 3),并且在不同生长阶段影响不同。增水 50%处理显著增加各生长阶段旱麦草的叶、茎生物量,但对展叶期根生物量无显著影响。增水 30%处理对各生长阶段茎生物量无显著影响,但增加了叶和根生物量。增水对繁殖器官生物量存在显著影响。增水 50%处理显著增加繁殖器官生物量的积累,尤其在枯萎期,其增幅最大为

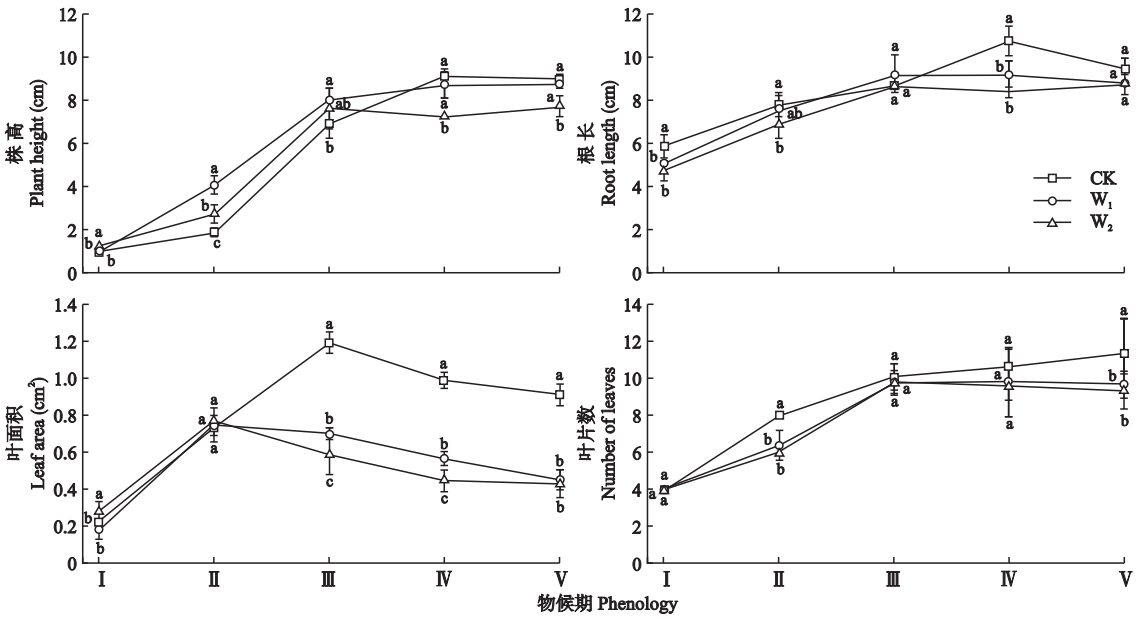


图 2 不同增水处理小花荆芥的形态特征

Fig.2 Plant morphological characteristics of *Nepeta micrantha* under different treatments.

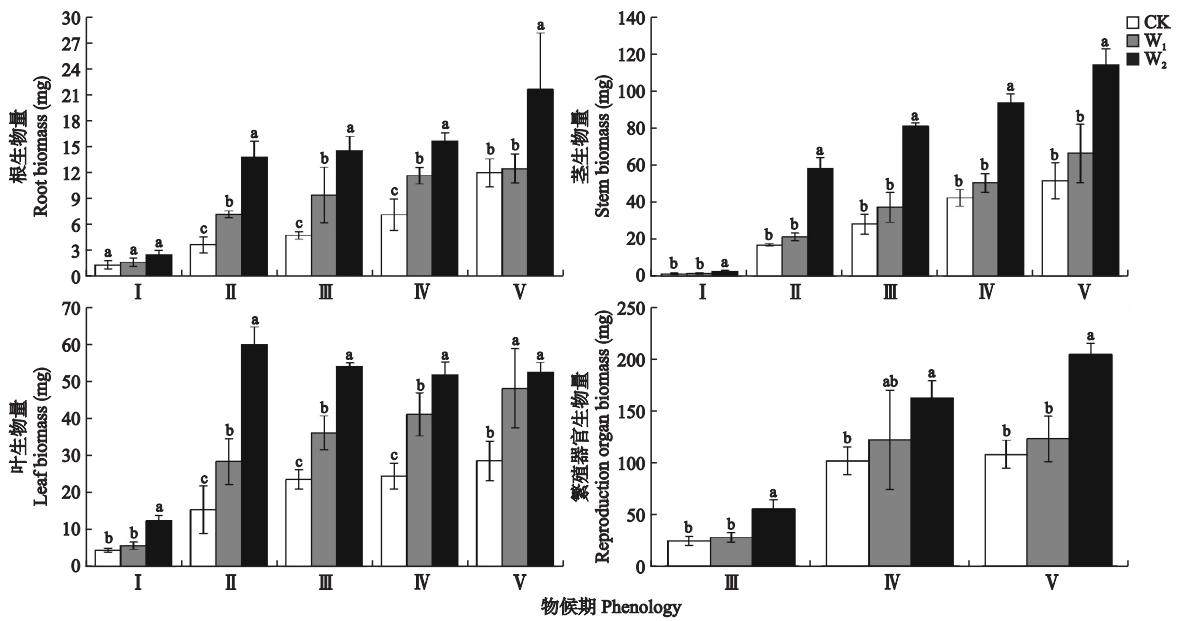


图 3 不同增水处理毛穗旱麦草各器官生物量积累

Fig.3 Biomass accumulation of *Eremopyrum distans* under different treatments.

55.9%，但增水 30%处理对繁殖器官生物量无显著影响。

由图 4 可以看出，小花荆芥展叶期的各器官生物量积累在不同处理间无显著差异，但是在始花期，增水 50%处理显著降低了茎生物量积累。盛花期、果熟期和枯萎期的叶、根生物量在增水 50%处理也显著降低。增水 50%处理对盛花期繁殖器官生物量无显著影响，但显著降低了果熟期和枯萎期繁殖器官生物量，降幅分别为 17.9%和 43.2%。增水 30%处理则对各生长阶段叶和茎生物量无显著影响，但显著增加了始花期的根生物量。

2.2.2 生物量分配　由图 5 可以看出，不同生长阶段毛穗旱麦草根、茎、叶、繁殖器官生物量分配比例存在差异。其叶片、根系生物量在展叶期所占比例均最大，随着植物不断生长，叶和根生物量所占比例不断降低。增水30%处理和增水50%处理对展叶

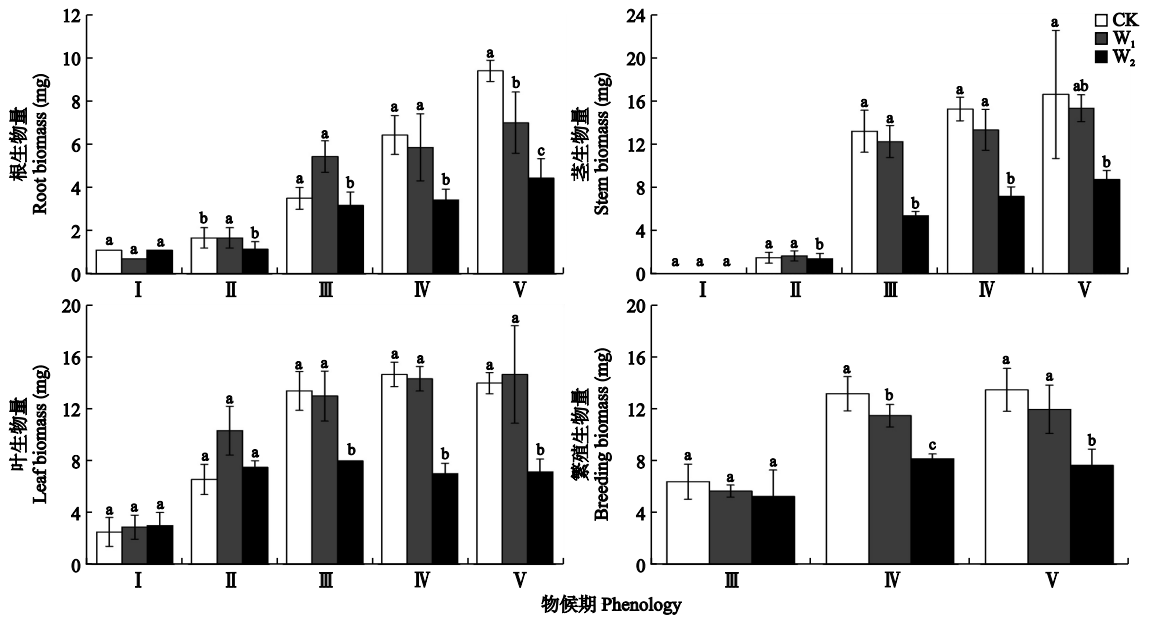


图 4　不同增水处理小花荆芥各器官生物量积累

Fig.4　Biomass accumulation of *Nepeta micrantha* under different treatments.

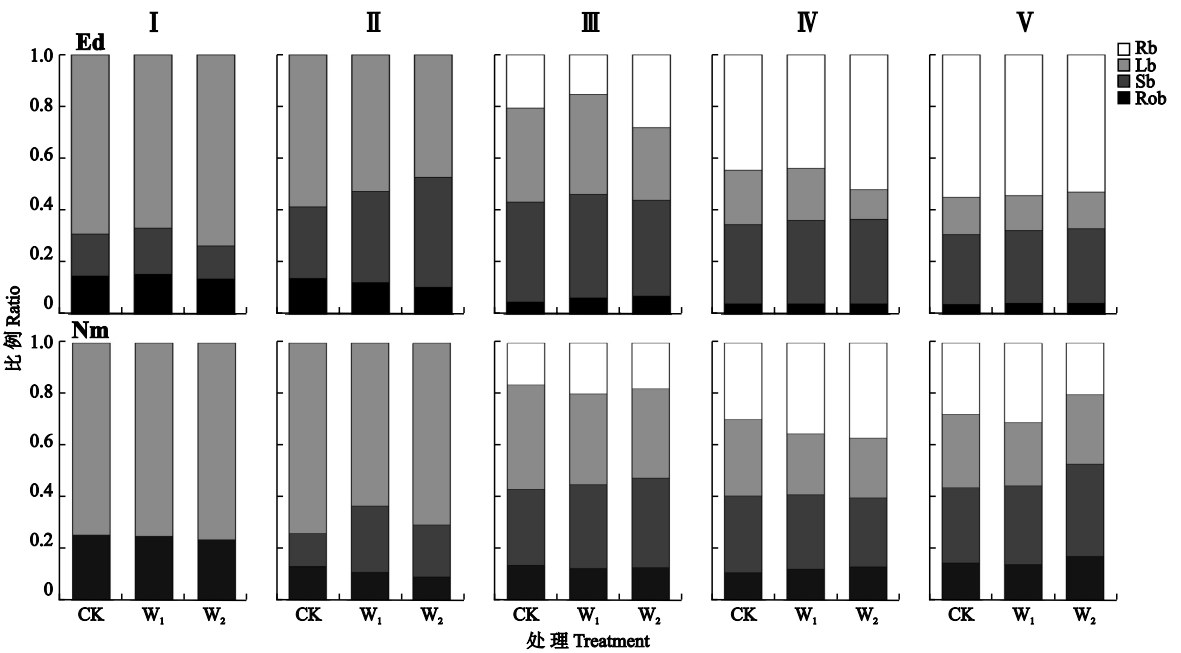


图 5　不同增水处理毛穗旱麦草(Ed)和小花荆芥(Nm)的生物量分配

Fig.5　Biomass allocation of *Eremopyrum distans* (Ed) and *Nepeta micrantha* (Nm) under different treatments.

Rb：繁殖器官生物量 Reproductive organ biomass；Lb：叶生物量 Leaf biomass；Sb：茎生物量 Stem biomass；Rob：根生物量 Root biomass.

期各器官生物量分配比例均无显著影响,但降低了始花期毛穗旱麦草的根系、叶片分配比例,茎的分配比例则明显增加。进入盛花期,增水 50%处理提高了根和繁殖器官生物量的分配比例,降低了叶片分配比例。在枯萎期,增水 30%和 50%处理对各器官的生物量分配比例均无显著差异。

增水 30%和 50%处理对小花荆芥展叶期各器官生物量分配无显著影响,始花期茎生物量分配比例有所增加,同时根、叶片的分配比例降低。随着植物生长,进入果熟期和枯萎期,增水对根、茎的分配比例影响不显著。枯萎期繁殖器官生物量在增水 50%处理下被降低。

3 讨 论

3.1 增水对植物形态特征的影响

植物形态特征可塑性是植物行为中的重要特性,植物通过形态上的调整来影响其适合度,在资源充足的环境下会尽可能大地增加适合度,在受到资源胁迫时仍然维持其必要的生理功能,确保一定的生存适合度[22],降水的变化势必会对植物的形态特征产生一定影响。本研究表明,降水增加后,在盛花期、果熟期、枯萎期,毛穗旱麦草和小花荆芥的根长均显著小于对照,表明降水增加使上层土壤剖面中的水分含量增加,满足了植物需水,因此植物根系停止向更深的土层生长。对内蒙古荒漠草原的研究也发现,植物根长与土壤剖面中的水位存在显著正相关关系,当土壤水位较高时,表层根系较发达,根系停止向更深的土层生长,当水位较低时,根系长度则显著增长[23]。也有研究认为,根系形态的可塑性与植物生长及资源利用能力有密切关系,植物形态特征对降水增加的响应可能与根系形态有关[24]。本研究发现,毛穗旱麦草具有须根系统,并且存在包裹着毛根的根套组织,这不仅扩大了根系与土壤的接触面积,对保水和养分吸收也十分有利[25]。而小花荆芥根系由一个主根和少量须根组成,相比于须根系统,这种直根系统吸收养分和水分的能力较弱[26]。由于沙土保肥保水能力较差,大量降水易将土壤中养分淋洗至更深土层,上层土壤养分不能满足植物快速生长所需,因此小花荆芥生长受到限制。而毛穗旱麦草须根发达,在水分淋洗作用加剧条件下,根系能够快速在表层土壤中生长并吸收更多的养分[27]。

植物在不同生长阶段对体内能量分配及环境变化的响应存在差异。植物在幼苗阶段更多地受到种子内储存的营养物质的影响,而后期随着生长,植物主要受到外界环境条件的影响[28]。因此,植物在其不同生长阶段会采取不同的生存策略。本研究中,降水增加显著促进展叶期毛穗旱麦草和小花荆芥叶片数量、叶面积及根系生长,而随后各生长阶段旱麦草不同处理形态变化均不显著。有研究发现,某些荒漠地区的植物在营养生长阶段提供有限的降水,而生殖生长阶段不再进行供水也可以完成生活史[29]。生长前期,植物在养分、水分充足条件下,会将更多的能量分配给地上部分,而在水分缺乏时,植物会降低对地上部分的投入[30]。因此,这可能是降水增加对 2 种短命植物不同生长阶段的形态特征影响存在显著差异的原因之一。本研究发现,降水增加 50%降低了小花荆芥盛花期、果熟期、枯萎期的叶面积,繁殖器官生物量在果熟期、枯萎期也显著降低,这可能是小花荆芥对水分的响应存在一定阈值,当水分含量高于这一阈值时植物生长会受到明显影响[31]。2 种植物形态特征在降水增加的背景下发生了显著变化,这种变化是否会改变其在群落中的竞争能力,进而对群落结构产生影响还有待深入研究。

3.2 增水对生物量积累与分配的影响

植物在长期的进化过程中形成了对环境变化复杂和多样的适应机制,在不同的环境与生长压力下表现出不同的生长特性与物质积累、分配规律,生物量是植物积累能量的主要体现[32]。Cheng 等[23]发现,某些短命植物生物量与植物形态特征存在显著正相关关系。本研究中,增水条件下,各生长阶段毛穗旱麦草根、茎、叶生物量均高于对照,其形态特征也显著大于对照,然而果熟期、枯萎期小花荆芥在增水 50%处理下各器官生物量积累均小于对照,其繁殖体生物量也显著低于对照。即降水增加促进了毛穗旱麦草各器官生物量积累,增水 50%不仅明显抑制小花荆芥各器官生物量积累,对后代繁殖也有着明显的抑制作用。有研究发现,根系生物量与植物吸收土壤中养分的能力有密切关系,草本植物因具有较大的根生物量,其与土壤的接触面积也相对较大,其对养分的吸收利用效率也更强[33]。本研究中,各生长阶段毛穗旱麦草根生物量均显著高于对照,而小花荆芥根系生物量在增水 50%条件下显著降低,因此,2 种短命植物对增水的响应差异可能与其根系生物量变化有密切联系。

荒漠植物在不同生长阶段如何调整各器官能量的分配以适应不断变化的环境,是研究荒漠植物生存策略的重要内容[34],生物量的分配反映植物对环

境的响应。本研究中，2 种一年生短命植物地下生物量仅在展叶期分配比例较大，随后在各生长阶段所占比例均呈不断下降趋势。这可能是由于植物生长前期将更多的能量分配给根系，以促进水分和营养物质的吸收，在后期将更多的营养分配至繁殖器官，以维持繁殖体数量。张涛等[35]对 2 种沙漠短命植物的研究也得出类似结论。本研究中，降水增加，2 种植物均在始花期表现出茎生物量增加、叶生物量降低的趋势，且仅在这一时期的生物量分配对降水增加有明显响应，其他时期降水增加对生物量分配均无显著影响。这进一步说明营养生长向繁殖生长过渡时期可能也是 2 种短命植物生长的敏感期。

参考文献

[1] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2013

[2] Husen A, Iqbal M, Aref I. Plant growth and foliar characteristics of faba bean (*Vicia faba* L.) as affected by indole-acetic acid under water-sufficient and water-deficient conditions. *Journal of Environmental Biology*, 2017, **38**: 179-186

[3] 王长庭, 王启基, 沈振西, 等. 模拟降水对高寒矮嵩草草甸群落影响的初步研究. 草业学报, 2003, **12**(2): 25-29 [Wang C-T, Wang Q-J, Shen Z-X, *et al*. A preliminary study of the effect of simulated precipitation on an alpine *Kobresia humilis* meadow. *Acta Prataculturae Sinica*, 2003, **12**(2): 25-29]

[4] 孙羽, 张涛, 田长彦, 等. 增加降水对荒漠短命植物当年牧草生长及群落结构的影响. 生态学报, 2009, **29**(4): 1859-1868 [Sun Y, Zhang T, Tian C-Y, *et al*. Response of grass growth and productivity to enhanced water input in ephemeral desert grassland in Gurbantunggut desert. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, **29**(4): 1859-1868]

[5] 肖迪, 王晓洁, 张凯, 等. 氮添加对山西太岳山天然油松林主要植物叶片性状的影响. 植物生态学报, 2016, **40**(7): 686-701 [Xiao D, Wang X-J, Zhang K, *et al*. Effects of nitrogen addition on leaf traits of common species in natural *Pinus tabuliformis* forests in Taiyue Mountain, Shanxi Province, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2016, **40**(7): 686-701]

[6] Lu JJ, Tan DY, Baskin JM, *et al*. Germination season and watering regime, but not seed morph, affect life history traits in a cold desert diaspore-heteromorphic annual. *PLoS One*, 2014, **9**(7): e102018

[7] Flannigan MD, Wotton BM, Marshall GA, *et al*. Fuel moisture sensitivity to temperature and precipitation: Climate change implications. *Climate Change*, 2016, **134**: 59-71

[8] 胡汝骥, 马虹, 樊自立, 等. 新疆水资源对气候变化的响应. 自然资源学报, 2002, **17**(1): 22-27 [Hu R-J, Ma H, Fan Z-L, *et al*. Response of water resources to climate change in Xinjiang. *Journal of Natural Resources*, 2002, **17**(1): 22-27]

[9] 赵宗慈, 丁一汇, 徐影, 等. 人类活动对 20 世纪中国西北地区气候变化影响检测和 21 世纪预测. 气候与环境研究, 2003, **8**(1): 26-34 [Zhao Z-C, Ding Y-H, Xu Y, *et al*. Detection and prediction of climate change for the 20th and 21st century due to human activity in northwest China. *Climatic and Environmental Research*, 2003, **8**(1): 26-34]

[10] Zheng YR, Xie ZX, Yu Y, *et al*. Effects of burial in sand and water supply regime on seedling emergence of six species. *Annals of Botany*, 2005, **95**: 1237-1245

[11] 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. 生态学杂志, 2015, **34**(7): 1847-1853 [Zhang H, Wang X-P, Zhang Y-F, *et al*. Responses of plant growth of different life forms to rainfall amount changes in an arid desert area. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, **34**(7): 1847-1853]

[12] Shemtov S, Gutterman Y. Influence of water regime and photoperiod treatments on resource allocation and reproductive successes of two annuals occurring in the Negev Desert of Israel. *Journal of Arid Environments*, 2003, **55**: 123-142

[13] Zavaleta ES, Shaw MR, Chiariello NR, *et al*. Grassland responses to three years of elevated temperature, CO_2, precipitation and N deposition. *Ecological Monographs*, 2003, **73**: 585-604

[14] 孙岩, 何明珠, 王立. 降水控制对荒漠植物群落物种多样性和生物量的影响. 生态学报, 2018, **38**(7): 2425-2433 [Sun Y, He M-Z, Wang L. Effects of precipitation control on plant diversity and biomass in a desert region. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(7): 2425-2433]

[15] 毛祖美, 张佃民. 新疆北部早春短命植物区系纲要. 干旱区研究, 1994, **11**(3): 1-26 [Mao Z-M, Zhang D-M. The conspectus of ephemeral flora in northern Xinjiang. *Arid Zone Research*, 1994, **11**(3): 1-26]

[16] 张丽华, 陈亚宁, 赵锐锋, 等. 温带荒漠中温度和土壤水分对土壤呼吸的影响. 植物生态学报, 2009, **33**(5): 936-949 [Zhang L-H, Chen Y-N, Zhao R-F, *et al*. Impact of temperature and soil water content on soil respiration temperate deserts. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, **33**(5): 936-949]

[17] 张学涛, 谭敦炎. 10 种菊科短命植物的物候与主要气象因子的关系. 干旱区研究, 2007, **24**(4): 470-475 [Zhang X-T, Tan D-Y. Phenology of 10 ephemeral species of Asteraceae in relation to the main meteorological factors. *Arid Zone Research*, 2007, **24**(4): 470-475]

[18] 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. 草业学报, 2014, **23**(2): 38-48 [Tao Y, Zhang Y-M. Biomass allocation patterns and allometric relationships of six ephemeroid species in Junggar Basin, China. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, **23**(2): 38-48]

[19] Chen YF, Zhang LW, Shi X, *et al*. Life history responses of two ephemeral plant species to increased precipitation and nitrogen in the Gurbantunggut Desert. *PeerJ*,

2019, **7**(14): e6158
[20] 吕玲, 谭敦炎. 旱麦草属 4 种短命植物的结实特性及生殖包装. 新疆农业大学学报, 2005, **28**(3): 21-25 [Lyu L, Tan D-Y. The characteristics of fruit set and reproductive package in four species of ephemeral plants in *Eremopyrum* (Poaceae). *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2005, **28**(3): 21-25]
[21] Liu Y, Li X, Zhang Q, *et al*. Simulation of regional temperature and precipitation in the past 50 years and the next 30 years over China. *Quaternary International*, 2010, **212**: 57-63
[22] 姜春明, 于贵瑞. 陆生植物对全球环境变化的适应. 中国生态农业学报, 2010, **18**(1): 215-222 [Jiang C-M, Yu G-R. A review on terrestrial plant acclimation to global environment change. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, **18**(1): 215-222]
[23] Cheng XL, An SQ, Li B, *et al*. Summer rain pulse size and rainwater uptake by three dominant in a desertified grassland ecosystem in northwestern China. *Plant Ecology*, 2006, **184**: 1-12
[24] 王艺霖, 周玫, 李苹, 等. 根系形态可塑性决定黄芦幼苗在瘠薄土壤中的适应对策. 北京林业大学学报, 2017, **39**(6): 60-69 [Wang Y-L, Zhou M, Li P, *et al*. Root morphological plasticity determing the adaptive strategies of *Cotinus coggygria* seedlings in barren soil environment. *Journal of Beijing Forestry University*, 2017, **39**(6): 60-69]
[25] 王瑾, 王堃. 植物根系沙套的生态功能及其形成影响因素研究进展. 草原与草坪, 2009(2): 88-92 [Wang J, Wang K. A review: The ecological function and forming mechanism of rhizosheath. *Grassland & Turf*, 2009(2): 88-92]
[26] Dunbabin V, Diggle ZRJ. Simulating form and function of root systems: Efficiency of nitrate uptake is dependent on root system architecture and the spatial and temporal variability of nitrate supply. *Functional Ecology*, 2004, **18**: 204-211
[27] 廖红, 戈振扬, 严小龙, 等. 水磷耦合胁迫下植物磷吸收的理想根构型: 模拟与应用. 科学通报, 2001, **46**(8): 641-646 [Liao H, Ge Z-Y, Yan X-L, *et al*. Ideal root configurations of phosphorus uptake in plants under water-phosphorus coupling stress: Simulation and application. *Chinese Science Bulletin*, 2001, **46**(8): 641-646]
[28] Bhatt AK, Bhalla TC, Agrawal HO, *et al*. Effect of seed size on protein and lipid contents, germination and imbibition in true potato seeds. *Potato Research*, 1989, **32**: 477-481
[29] Franks SJ, Weis AE. A change in climate causes rapid evolution of multiple life-history traits and their interactions in an annual plant. *Journal of Evolutionary Biology*, 2008, **21**: 1324-1334
[30] 崔婉莹, 刘思佳, 魏亚伟, 等. 氮添加和水分胁迫对红松、水曲柳幼苗生物量分配的影响. 应用生态学报, 2019, **30**(5): 1454-1462 [Cui W-Y, Liu S-J, Wei Y-W, *et al*. Effects of nitrogen addition on biomass allocation of *Pinus koraiensis* and *Fraxinus mandshurica* seedlings under water stress. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(5): 1454-1462]
[31] 许振柱, 周广胜, 王玉辉. 植物的水分阈值与全球变化. 水土保持学报, 2003, **17**(3): 155-158 [Xu Z-Z, Zhou G-S, Wang Y-H. Water threshold of plant and global change. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, **17**(3): 155-158]
[32] Sherry RA, Weng E, Iii JAA, *et al*. Lagged effects of experimental warming and doubled precipitation on annual and seasonal aboveground biomass production in a tallgrass prairie. *Global Change Biology*, 2010, **14**: 2923-2936
[33] Liao M, Fillery IRP, Palta JA. Early vigorous growth is a major factor influencing nitrogen uptake in wheat. *Functional Plant Biology*, 2004, **31**: 121
[34] Daisuke S, Mikiko K, Hitoshi S. Phytohormonal regulation of biomass allocation and morphological and physiological traits of leaves in response to environmental changes in *Polygonum cuspidatum*. *Frontiers in Plant Science*, 2016, **7**: 1189
[35] 张涛, 田长彦, 孙羽. 两种短命植物春萌秋萌个体生态生物学特征比较. 植物生态学报, 2007, **31**(6): 1174-1180 [Zhang T, Tian C-Y, Sun Y. Ecological and biological differences between spring and autumn plants of two desert ephemerals. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2007, **31**(6): 1174-1180]

作者简介 张 岚, 男, 1995 年生, 硕士研究生。主要从事全球变化生态学研究。E-mail: 1767770149@qq.com

责任编辑 孙 菊
开放科学(资源服务)标识码(OSID):

