



引用格式: 朱远忠, 黄文达, 何远政, 等. 短期增温和降水减少对半干旱沙质草地群落特征的影响[J]. 西北植物学报, 2024, 44(3): 0470-0478.
[ZHU Y Z, HUANG W D, HE Y Z, et al. Effects of short-term warming and precipitation reduction on community characteristics in semi-arid sandy grassland[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2024, 44(3): 0470-0478.] DOI: 10.7606/j.issn.1000-4025.20230380

短期增温和降水减少对半干旱沙质草地群落特征的影响

朱远忠^{1,2}, 黄文达^{1*}, 何远政^{1,2}, 王怀海^{1,2}

(1 中国科学院 西北生态环境资源研究院 奈曼沙漠化研究站, 兰州 730000; 2 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100049)

摘要 【目的】为探究短期增温和降水减少对沙质草地植物群落物种多样性、功能性状及生产力的影响, 进一步揭示沙质草地植物群落特征对气候变化的响应。【方法】以科尔沁沙质草地植物群落为研究对象, 利用开顶式生长室(OTC)模拟增温, 研究降水减少 0%、20%、40% 和 60% 与增温的交互作用对沙质草地群落组成、物种多样性和功能性状的影响及群落特征与环境因子关系。【结果】(1) 短期增温和降水减少使沙质草地植物群落组成和物种优势度发生变化, 其中优势物种猪毛蒿和达乌里胡枝子重要值显著降低, 植物群落盖度和地上生物量显著降低。(2) 短期增温显著降低 Margalef 丰富度指数、Simpson 优势度指数、Shannon 多样性指数和 Pielou 均匀度指数; 短期降水减少对沙质草地物种多样性指标均无显著影响。(3) 短期增温显著提高植物群落高度和叶干物质含量, 显著降低叶片厚度; 短期降水减少显著提高叶干物质含量和叶片厚度, 显著降低植株高度和比叶面积。(4) 短期增温是影响沙质草地物种多样性和功能性状的主要环境因素。【结论】短期增温和降水减少改变沙质草地群落特征, 而且温度是影响沙质草地群落特征的主要环境因子。

关键词 增温; 降水减少; 沙质草地; 物种多样性; 植物功能性状

中图分类号 Q145

文献标志码 A

Effects of short-term warming and precipitation reduction on community characteristics in semi-arid sandy grassland

ZHU Yuanzhong^{1,2}, HUANG Wenda^{1*}, HE Yuanzheng^{1,2}, WANG Huaihai^{1,2}

(1 Northwest Institute of Eco-environment and Resources, Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000, China; 2 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract [Objective] The aim of this study is to study the effects of short-term warming and precipitation reduction on the species diversity, functional traits, and productivity, and to reveal the response of community characteristics to climate change in sandy grassland. [Methods] The authors investigated the combined effects of precipitation reduction (0%, 20%, 40% and 60%) and warming on plant community composition, species diversity, and functional trait, as well as relationship between community characteristics and environmental factors using open-top chambers (OTCs) to investigate the characteristics in semi-arid sandy grassland of Horqin. [Results] (1) Short-term warming and precipitation reduction led to changes in

收稿日期: 2023-06-13; 修改稿收到日期: 2023-11-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971144); 国家重点研发计划项目(2017FY100205)

作者简介: 朱远忠(1998-), 男, 在读硕士研究生, 主要从事沙地植被生态学研究。E-mail: 3089758664@qq.com

* 通信作者: 黄文达, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事沙地植被生态学研究。E-mail: huangwenda2008@163.com

the plant community composition, community coverage, and aboveground biomass were significantly reduced and species dominance of sandy grassland, such as dominant species of *Artemisia scoparia*, *Lespedeza davurica*. (2) Short-term warming reduced Margalef richness index, Simpson index, Shannon index, and Pielou index, but short-term precipitation reduction had no effect on species diversities. (3) Short-term warming increased the height and leaf dry matter content, and reduced leaf thickness, while short-term precipitation reduction increased leaf dry matter content and leaf thickness, and reduced the height, leaf area ratio of plant community. (4) Short-term warming was the main environmental factor affecting the species diversity and functional traits in sandy grassland. [Conclusion] Short-term warming and precipitation reduction change community characteristics, but the temperature is the main environmental factor affecting community characteristics in sandy grassland.

Key words warming; precipitation reduction; sandy grassland; species diversity; plant functional trait

近百年来,气候变暖、降水格局改变和大气氮沉降等一系列问题突出。IPCC 报告指出,在全球气候变暖的背景下,干旱半干旱地区降水事件发生的频率、强度和持续时间将会显著增加^[1]。草原具有重要的生态服务价值,气候变暖和降水格局差异深刻制约着草原生态系统的组成、结构和功能^[2]。未来气候变化将对草地生态系统植物群落特征产生深远影响。截至目前,有关草地生态系统与气候变化关系的研究较多,但因草原类型、植物群落和分布格局存在差异^[3-4]。物种多样性是评价植物群落结构和功能的重要指标^[5],植物功能性状能够反映植物对环境变化的适应。在干旱半干旱地区,植物群落的物种多样性和生产力水平对维持生态系统的功能稳定性和区域生态环境改善具有重要作用^[6]。而气候因子尤其是降水和温度被认定是性状筛选的过滤器^[7]。多年的模拟气候变化实验数据指出,高寒草甸植物物种多样性对气候变暖不敏感^[8]。降雨量增加或减少均能导致荒漠草原物种的改变,使物种多样性发生变化^[9]。沿着干旱-湿润的环境梯度,植物叶片会由小变大、氮和磷含量增加、碳氮比下降、同化速率升高等^[10];而随着温度增加,西藏紫花针茅叶片厚度增加、比叶面积变化不显著^[11]。因此,开展气候变化对植物群落特征影响的研究有利于探究其对全球变化的响应与适应性机理。

科尔沁沙地是中国四大沙地之一,地处内蒙古东部,是中国北方生态脆弱区,也是中国北方农牧交错带沙漠化最为严重的地区之一。近 58 年来,科尔沁沙地年平均气温呈显著上升趋势^[12],多年平均降水量较低,且总体呈现降水逐年减少的趋势^[13]。目前,大部分研究集中在温度、降水、氮添加等单因素对沙质草地生态系统植物群落组成和结构、物种多样性、功能性状及生产力的影响^[14-16],有关增温和降水减少交互作用对半干旱沙质草地物种多样性、

功能性状及生产力影响方面的综合研究鲜见报道。因此,本研究以科尔沁沙质草地植物群落为对象,通过野外模拟控制试验,探究短期增温和降水减少对沙质草地植物群落物种多样性、功能性状及生产力的影响,旨在揭示沙质草地植物群落特征对短期增温和降水减少的响应,从而为半干旱沙质草地生态系统退化植被的恢复及其可持续管理提供理论基础。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国科学院奈曼沙漠化研究站(120°43'E, 42°58'N),地处于中国农牧交错带东段的科尔沁沙地。该地气候属于典型的温带半干旱大陆性气候,多年平均气温为 6℃左右,月平均气温 1 月最低为 -12.9℃,7 月最高为 24.4℃,年均降水量为 343~451 mm,其中 80% 的降水集中在每年的 5—8 月份,年均蒸发量为 1 500~2 500 mm,干燥系数为 1.0~1.8。土壤多为沙质土,易受风蚀影响。研究区植物群落组成主要以达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)和差不嘎蒿(*Artemisia halodendron*)为优势灌木,以糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)为优势草本植物。

1.2 试验设计

2019 年 9 月将试验布设于中国科学院奈曼沙漠化研究站长期围封样地内。采用气温和降水双因子随机区组设计,温度设置自然温度(T_0)和增温(T) 2 个水平,降水梯度设置为降水减少 0%(W_0)、20%(W_{20})、40%(W_{40})和 60%(W_{60}) 4 个水平,共组成 8 个处理组合,即 $T_0/T \times W_0$ 、 $T_0/T \times W_{20}$ 、 $T_0/T \times W_{40}$ 和 $T_0/T \times W_{60}$,每个处理 6 个重复,共 48 个样方。各样方间设置有 2 m 宽的缓冲带以避免干

扰。全年增温处理:利用开顶式生长室(OTC)作为增温设施(生长季大气温度平均升高约 2.1 ℃)(图 1,A),OTC 为正六边形圆台结构,底部直径 2.0 m,顶部直径 1.8 m,高 0.5 m,材料为白钢骨架和高透光性、低泛黄度指数、高 UV 穿透的透明丙烯酸塑料板。无增温设施利用与增温 OTC 一样的白钢骨架和不锈钢窗纱制作另外一种 OTC,无增温效果,属于自然温度处理。降水减少处理:利用奈曼站自

主研发的减雨装置(专利号:ZL 201220126834.3)进行降水减少处理,该装置长×宽×高为 2.5 m×2.5 m×1.5 m,由支撑架和截雨槽两部分构成,顶部倾斜 15°,该减雨装置的截雨槽用高透明的厚 5 mm 有机玻璃板压成直角角槽,其透光率可达 95%,不影响植物生长(图 1,B)。每个降水减少装置减雨面积为 2.5 m×2.5 m,正中放置增温或者无增温 OTC,OTC 中央 2 m² 的区域作为主要研究区域(图 1,C)。



A. 增温装置;B. 降水减少装置;C. 增温×降水减少装置;D. 样地图。

图 1 模拟气候变化装置

A. Warming apparatus. B. Precipitation reduction apparatus. C. Warming and precipitation reduction apparatus. D. Sample plot map.

Fig. 1 The experimental apparatuses for simulating climate changes

1.3 植被群落特征测定

于 2020 年 8 月上旬植被生长季盛期进行调查取样,采用收获法测定每个样方的地上生物量。在每个样方的核心区内选取 1 m×1 m 的样方用于植被调查,统计每个样方内植物的物种数、个体数、高度和盖度等指标,将所有植物齐地面刈割,带回实验室,在 65 ℃ 条件下烘干至恒重,用于计算地上生物量。选择每个样方中的优势物种,参照 Cornelissen 等^[17]的《植物功能性状标准测定手册》测定并计算每个样方内优势物种的株高(H)、叶片厚度(LT)、比叶面积(SLA)和叶干物质含量(LDMC)。其中,比叶面积=叶面积/叶干质量、叶干物质含量=叶干质量/叶鲜质量。

群落水平植物功能性状值使用植物群落功能性状(C_{WM})表示,计算公式为:

$$C_{WM} = \sum_{i=1}^S P_i \times t_i \tag{1}$$

式中: P_i 为物种 i 在群落内的相对生物量; t_i 为物种 i 的性状值。

1.4 物种多样性计算方法

所选用的物种多样性指标包括重要值(I)、Margalef 丰富度指数(R)、Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Simpson 优势度指数(D)和 Pielou 均匀度指数(E),其计算公式为:

$$I = (\text{相对密度} + \text{相对高度} + \text{相对生物量}) / 3 \tag{2}$$

$$R = (S - 1) / \ln N \tag{3}$$

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

(4)

$$D=1-\sum_{i=1}^SP_i^2$$

(5)

$$E=H'/\ln S$$

(6)

式中: i 为样方框内的植物物种; S 为 $1\text{ m}\times1\text{ m}$ 样方内出现的物种数; P_i 为第 i 种个体数占个体总数的比例; N 为群落中所有物种的个体总数。

1.5 数据处理

采用 Excel 2016 进行数据整理,用 SPSS 21.0 进行统计分析,并用 Origin 2021 软件绘图。采用单因素方差分析分别检验增温和降水减少梯度对群落盖度、地上生物量、物种多样性和功能性状的显著性差异,用 Duncan 法进行多重比较,差异显著性水平为 $\alpha=0.05$ 。采用双因素方差分析检验增温和降水减少的交互作用对群落盖度、地上生物量、物种多样性和功能性状的差异显著性,差异显著性水平为 $\alpha=0.05$ 。选取 Margalef 指数(R)、Simpson 指数(D)、Shannon-Wiener(H')指数、Pieluo 指数(E)和群落高度(H)、叶片厚度(LT)、比叶面积(SLA)、叶干物质含量($LDMC$)等相对独立的环境变量,用 Canoco 5 软件的 RDA 分析探讨沙质草地群落物种

多样性、功能性状与温度和降水之间的关系。用蒙特卡罗(Monte Carlo)对 RDA 结果进行显著性分析检验($P>0.05$ 为差异不显著, $0.01<P<0.05$ 为差异显著, $P<0.01$ 为差异极显著),并筛选出主要影响因子,制作二维排序图。文中数据均为平均值±标准误差。

2 结果与分析

2.1 短期增温和降水减少条件下群落物种组成和重要值

如表 1 所示,短期增温和降水减少处理后,沙质草地群落物种组成及其重要值发生变化,但无论增温与否,不同梯度的降水减少处理下,群落优势种未发生变化。群落优势种为猪毛蒿、达乌里胡枝子、糙隐子草和砂蓝刺头(*Echinops gmelini*)。与对照(T_0W_0)相比,降雨减少后,出现的物种有小画眉草(*Eragrostis minor*)、大花飞燕草(*Delphinium grandiflorum*)和冷蒿(*A. frigida*);温度增加后,出现的物种有狗尾草(*Setaria viridis*)、差不嘎蒿。这表明短期增温和降水减少都会导致沙质草地群落物种组成发生变化。

表 1 短期增温和降水减少对沙质草地群落物种组成及重要值的影响

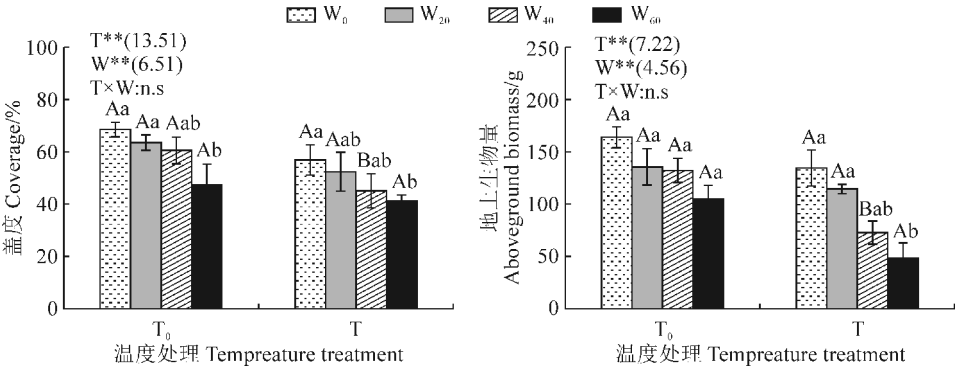
植物种类 Plant species	重要值 Important value							
	T_0				T			
	W_0	W_{20}	W_{40}	W_{60}	W_0	W_{20}	W_{40}	W_{60}
达乌里胡枝子 <i>L. davurica</i>	0.130	0.130	0.106	0.095	0.111	0.066	0.072	0.063
猪毛蒿 <i>A. scoparia</i>	0.520	0.489	0.513	0.510	0.450	0.449	0.440	0.421
糙隐子草 <i>C. squarrosa</i>	0.091	0.087	0.064	0.120	0.108	0.074	0.135	0.098
尖头叶藜 <i>Chenopodium acuminatum</i>	0.003	0	0	0	0.014	0.026	0.020	0.042
白草 <i>Pennisetum flaccidum</i>	0.051	0.043	0.056	0.038	0.051	0.051	0.051	0.123
狗尾草 <i>S. viridis</i>	0	0	0	0.010	0.005	0.002	0	0
猪毛菜 <i>Salsola collina</i>	0.004	0.006	0.017	0.040	0.039	0.030	0.020	0.008
虫实 <i>Corispermum macrocarpum</i>	0.002	0	0	0.004	0.006	0	0.002	0.003
五星蒿 <i>Bassia dasyphylla</i>	0.008	0.021	0.044	0.049	0.024	0.031	0.018	0.018
砂蓝刺头 <i>E. gmelini</i>	0.110	0.095	0.102	0.091	0.086	0.098	0.073	0.065
芦苇 <i>Phragmites communis</i>	0.007	0	0.028	0.019	0.007	0	0	0.031
艾蒿 <i>Artemisia argyi</i>	0.014	0	0	0	0.055	0.115	0.050	0.059
蒙古韭 <i>Allium mongolicum</i>	0.019	0.012	0	0	0	0	0	0.044
小画眉草 <i>E. minor</i>	0	0	0.164	0	0	0	0	0
大花飞燕草 <i>D. grandiflorum</i>	0	0.037	0	0	0	0	0	0
牻牛儿苗 <i>Erodium stephanianum</i>	0	0.031	0.029	0.025	0.007	0.019	0.020	0.015
差不嘎蒿 <i>A. halodendron</i>	0	0	0	0	0	0	0.040	0
防风 <i>Saposhnikovia divaricata</i>	0	0.038	0.017	0	0.034	0.016	0.024	0
地稍瓜 <i>Cynanchum thesiodes</i>	0.013	0	0	0	0.005	0.021	0.009	0
冷蒿 <i>A. frigida</i>	0	0.024	0	0	0	0	0	0
物种数 Number of species	13	12	11	11	15	13	14	13

2.2 短期增温和降水减少条件下植被盖度和地上生物量

短期增温和降水减少对群落盖度、地上生物量的响应情况如图 2。短期增温和降水减少对植被盖度和地上生物量均有极显著影响($P<0.01$)。无论增温与否,沙质草地群落盖度均随水分胁迫加剧而降低,在重度水分胁迫时($T_0/T\times W_{60}$)均显著最低,差异分别达 19.82%和 27.42%。在增温条件下,地上生物量随着水分胁迫的加剧而降低,并在中度以上水分胁迫时均显著低于对照,差异分别达到 61.9%($T\times W_{40}$ vs $T\times W_0$)和 64.1%($T\times W_{60}$ vs $T\times W_0$)。相同降水条件下,增温使植被盖度和地上生物量显著降低,并在中度水分胁迫时差异最大(T_0W_{40} vs TW_{40})。

2.3 短期增温和降水减少条件下群落物种多样性

沙质草地植物群落物种多样性对增温和降水减少的响应存在差异(图 3)。短期增温对 Margalef 指数有显著影响($P<0.05$),对 Shannon 指数、Simpson 指数、Pielou 指数有极显著影响($P<0.01$),而短期降水减少及增温和降水减少的交互作用对各多样性指标均无显著影响。无论增温与否,Margalef 指数呈现出随水分胁迫加剧而减小的趋势,并在重度水分胁迫时($T_0\times W_{60}$)显著低于对照($T_0\times W_0$) 30.1%。相同降水条件下,短期增温使得植物群落 Simpson 指数、Peilou 指数和 Shannon 指数显著降低,并在轻度和中度水分胁迫时差异最达($T_0\times W_{20/40}$ vs $T\times W_{20/40}$)。



不同小写字母表示同一温度条件下降水处理之间差异显著($P<0.05$);不同大写字母表示同一降水条件下温度处理之间差异显著($P<0.05$)。括号内数字为不同处理下的 F 值; * 和 ** 分别表示 $P<0.05$ 和 $P<0.01$; n.s. 表示无显著差异。下同。

图 2 短期增温和降水减少对植被盖度和地上生物量的影响

Bars labeled with different lowercase letters represent significant difference among precipitation reduction treatments ($P<0.05$). Bars labeled with different capital letters indicate significant difference between temperature treatments ($P<0.05$). The numbers in brackets are F values under different treatments.

* and ** indicate significant difference at 0.05 and 0.01 levels. n.s. indicates no significant difference. The same as below.

Fig. 2 Effects of short-term warming and precipitation reduction on vegetation coverage and aboveground biomass

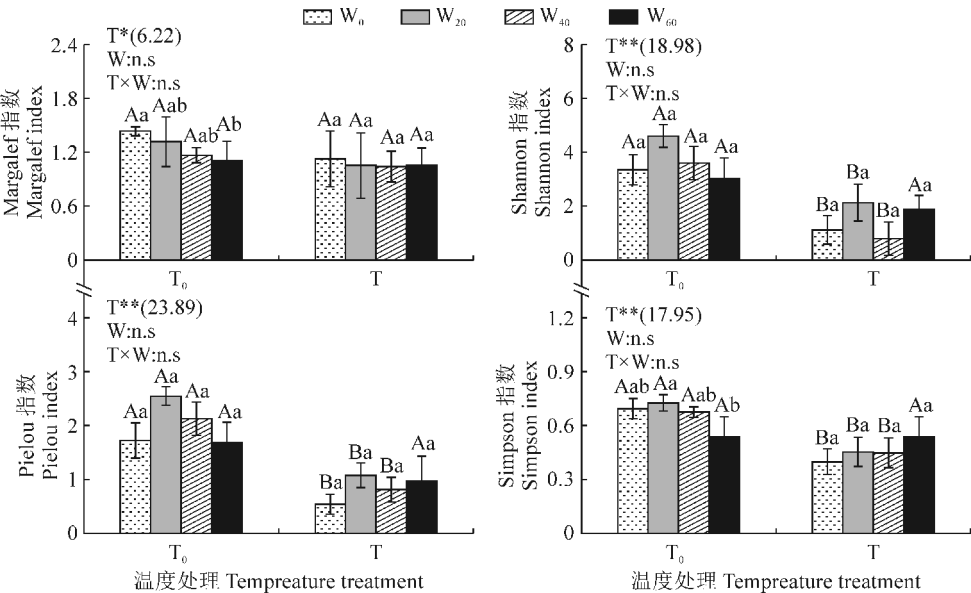


图 3 短期增温和降水减少对沙质草地群落物种多样性的影响

Fig. 3 Effects of short-term warming and precipitation reduction on community species diversity in sandy grassland

2.4 短期增温和降水减少条件下群落功能性状

如图 4 所示,短期增温对群落高度有显著影响 ($P<0.05$),对群落叶片厚度和叶干物质含量有极显著影响 ($P<0.01$),短期降水减少对群落高度、叶片厚度、叶干物质含量有极显著影响 ($P<0.01$),短期增温和降水减少的交互作用对叶干物质含量有显著影响 ($P<0.05$)。无论增温与否,群落高度随水分胁迫加剧而降低,而叶片厚度和叶干物质含量随水分胁迫加剧而升高,比叶面积随水分胁迫加剧呈降低趋势。相同降水条件下,增温使得群落高度、叶干物质含量显著升高,叶片厚度降低。其中,群落高度在重度水分胁迫时差异最大 (T_0W_{60} vs TW_{60}),叶干物质含量在轻度和重度水分胁迫时差异最大

($T_0W_{20/60}$ vs $TW_{20/60}$)。

2.5 群落特征与温度和降水之间的相互关系

将 Margalef 指数、Simpson 指数、Shannon 指数和 Pielou 指数与植物群落高度、叶片厚度、比叶面积、叶干物质含量作为响应变量,与环境变量(温度、降水)进行 RDA 排序。结果(表 2)显示,RDA 前两轴分别解释了物种多样性和群落功能性状 40.8%、42.9% 的方差总变异。温度(T)对半干旱沙质草地物种多样性和群落功能性状变化的解释率分别为 39.6%、40.9%,均达到极显著水平 ($P<0.01$)(图 5)。因此,相较于降水,温度是影响半干旱沙质草地植物群落物种多样性和功能性状的主要因素。

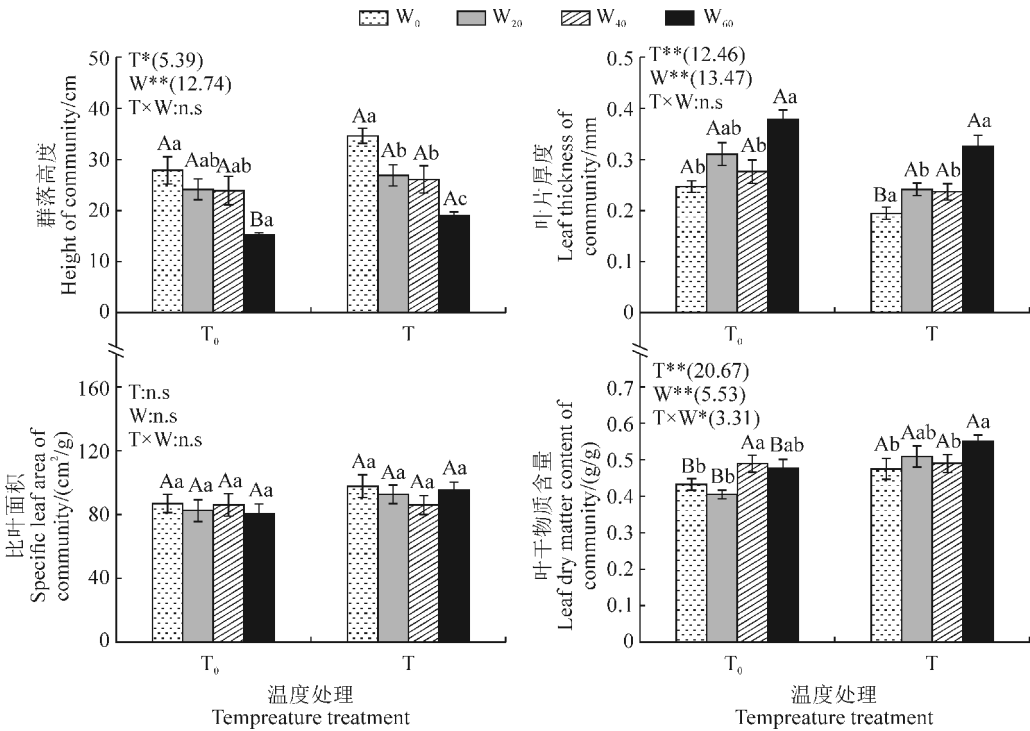
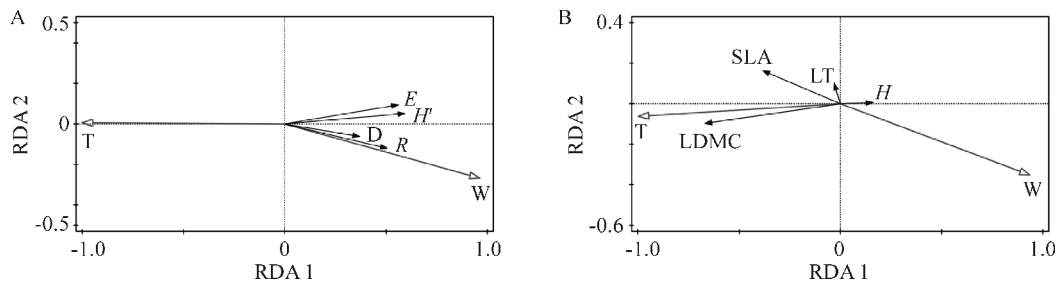


图 4 短期增温和降水减少对沙质草地群落功能性状的影响

Fig. 4 Effects of short-term warming and precipitation reduction on functional traits in sandy grassland

表 2 植物群落物种多样性和功能性状与温度和降水关系的方差解释率

Table 2 The variance correlative explanation rate between species diversity/functional traits and temperature/precipitation							
植被特征 Vegetation characteristics	解释方差 Explained variance	因子 Factor	解释率 Explained rate/%	F	P	RDA1/%	RDA2/%
物种多样性 Species diversity	解释方差 Explained variance	T	39.6	16.5	0.002	39.66	1.11
	解释方差(累积) Explained variance (accumulation)	W	1.1	0.5	0.650	39.66	40.79
功能性状 Functional trait	解释方差 Explained variance	T	40.9	8.2	0.002	41.42	1.52
	解释方差(累积) Explained variance (accumulation)	W	2.1	0.4	0.780	41.42	42.94



H', Shannon 多样性指数; R, Margalef 丰富度指数; E, Pielou 均匀度指数; D, Simpson 优势度指数;
 H, 群落高度; LT, 厚度; SLA, 比叶面积; LDMC, 叶干物质含量。

图 5 沙质草地物种多样性(A)、群落功能性状(B)与短期增温和降水减少的相关关系

H', Shannon-wiener diversity index. R, Margalef abundance index. E, Pielou evenness index.

D, Simpson dominance index. H, height. LT, leaf thickness. SLA, specific leaf area. LDMC, leaf dry matter content.

Fig. 5 The correlation between species diversity (A), community functional traits (B) and temperature and precipitation

3 讨 论

3.1 沙质草地群落组成、植被盖度和地上生物量对短期增温和降水减少的响应

气候变化尤其是温度和降水是影响陆地生态系统植被类型的主要因素,决定植物群落的组成和结构。Alward 等^[18]研究发现,在全球变暖的背景下,物种对温度的敏感性增强,种间的竞争关系脆弱,从而引起群落组成发生改变。与此同时,增温也伴随着降雨格局的改变,降水可以调控植物的水分利用率,从而影响植物生长。本研究发现,短期增温和降水减少改变沙质草地群落组成和物种优势度。一方面是因为 OTC 增温作用改变群落的小气候,在一定程度上满足植物生长发育对热量的需求^[14],另一方面是因为增温和降水减少均直接或间接降低土壤水分含量,水分胁迫使群落组成和生产力受到限制^[19]。研究表明,沙质草地群落盖度和地上生物量随温度升高和降水减少而降低,这是因为短期增温和降水减少后引起的土壤含水量降低阻碍了根系生长^[20],增强了植物呼吸作用^[21],限制根际微生物活性间接影响植物对养分的吸收、运输和利用^[22-23],从而导致群落盖度和地上生物量降低。

3.2 沙质草地群落物种多样性对短期增温和降水减少的响应

气候变化直接影响群落生物多样性水平。研究发现,Margalef 指数随水分胁迫加剧而降低,这可能是因为降水减少直接降低土壤水分含量,而较低的土壤水分含量抑制土壤潜在种子库中种子的萌发^[24]。已有研究表明,物种多样性与年平均气温和干燥度呈负相关,即随着热量和干燥度的增加,草地植物群落的物种多样性会逐渐降低^[25]。本研究也

得出了相似的结果,即沙质草地群落物种多样性在高温环境中更低,这是因为增温处理后对增温适应性强的物种优势度逐渐变大,物种趋向于单一化,物种多样性下降^[26]。在本研究中,群落物种多样性不随降水减少而变化。一方面可能是因为研究区以 1 年生植物为主,而沙质草地群落 1 年生植物的多样性与降水的相关性很低^[27];另一方面也可能是因为短期降水减少处理对沙质草地群落的多样性还未产生深远影响。增温和降水减少的交互作用对沙质草地物种多样性无显著影响,究其原因可能是新物种的定居、繁殖建立种群会受时间累积效应的影响^[28]。

3.3 沙质草地群落功能性状对短期增温和降水减少的响应

植物功能性状与气候因素密切相关,气候差异直接影响植物功能性状及其分布范围^[29]。在本研究中,沙质草地植物群落通过增加叶干物质含量,降低叶片厚度来适应高温环境,因为较高的叶干物质含量对高温环境的耐胁迫性越强^[30]。已有研究表明,随水分胁迫加剧,植物一方面会增加叶片厚度或密度以及叶干物质含量,从而增大叶内部水分向表面扩散的距离和阻力,并通过减小叶面积和降低比叶面积来减弱蒸腾作用^[31];另一方面还会通过限制细胞的分裂和生长,致使其生长速度变慢,植株变得较矮小^[32]。本研究也发现,沙质草地植物群落通过增加叶厚度和叶干物质含量,降低高度和比叶面积来适应水分胁迫环境。温度和降水作为植物生长重要的影响因子,它们的协同作用会改变植物群落功能性状^[33]。本试验结果表明,短期增温和降水减少的交互作用对叶干物质含量影响显著,而对群落高度、比叶面积和叶片厚度影响不显著,这与相关研究结果^[34]不一致,可能是因为研究区域、尺度和群落

类型等差异造成的。

3.4 沙质草地群落特征与水热因子的相关关系

水热因子是影响植物生长发育的重要环境因子,直接决定植物群落结构和功能。冗余分析结果表明,温度(T)和降水(W)对沙质草地群落特征方差总变异的解释率均低于50%,表明除了温度和降水以外的生物和非生物因素也对沙质草地群落特征产生一定影响。本研究发现,温度是影响沙质草地群落特征的主要环境因素,可能是因为短期的温度升高加快沙质草地土壤水分蒸发和植物的蒸腾速率,改变了土壤和植物的水分平衡^[35],使得群落组

成和功能受到潜在影响。

4 结 论

通过对科尔沁沙质草地群落的研究发现,短期增温和降水减少使沙质草地群落组成和物种优势度发生变化,降低群落盖度和地上生物量。短期增温显著降低物种多样性,显著提高群落高度和叶干物质含量。短期降水减少显著提高叶干物质含量和叶片厚度,降低群落高度和比叶面积。短期增温是影响沙质草地物种多样性和功能性状的主要环境因素。

参考文献:

[1] IPCC. Climate change. The physical and science basis. Summary for the policy makers, technical summary and frequently asked questions. Part of the I contribution to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [C]. Geneva, Switzerland: IPCC, 2021.

[2] 姜炎彬, 范苗, 张扬建. 短期增温对藏北高寒草甸植物群落特征的影响[J]. 生态学杂志, 2017, 36(3): 616-622.

JIANG Y B, FAN M, ZHANG Y J. Effect of short-term warming on plant community features of alpine meadow in Northern Tibet[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(3): 616-622.

[3] ADLER P B, LEVINE J M. Contrasting relationships between precipitation and species richness in space and time[J]. *Oikos*, 2007, 116(2): 221-232.

[4] CLELAND E E, COLLINS S L, DICKSON T L, et al. Sensitivity of grassland plant community composition to spatial vs. temporal variation in precipitation[J]. *Ecology*, 2013, 94(8): 1687-1696.

[5] 杨祥祥, 李梦琦, 何兴东, 等. 沙地土壤 C:N:P 比对早期植物群落物种多样性的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56(1): 242-249.

YANG X X, LI M Q, HE X D, et al. Effects of soil C:N:P ratio on species diversity of preliminary plant communities on sandy land[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(1): 242-249.

[6] 何明珠, 张志山, 李小军, 等. 阿拉善高原荒漠植被组成分布特征及其环境解释: I. 典型荒漠植被分布格局的环境解释[J]. 中国沙漠, 2010, 30(1): 46-56.

HE M Z, ZHANG Z S, LI X J, et al. Environmental effects on distribution and composition of desert vegetations in Alxa Plateau: I. Environmental effects on the distribution patterns of vegetation in Alxa Plateau[J]. *Journal of Desert Research*, 2010, 30(1): 46-56.

[7] DIAZ S, CABIDO M, CASANOVES F. Plant functional traits and environmental filters at a regional scale[J]. *Journal of Vegetation Science*, 1998, 9(1): 113-122.

[8] XU Z W, LI M H, ZIMMERMANN N E, et al. Plant functional diversity modulates global environmental change effects

on grassland productivity[J]. *Journal of Ecology*, 2018, 106(5): 1941-1951.

[9] GHERARDI L A, SALA O E. Enhanced precipitation variability decreases grass- and increases shrub-productivity[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(41): 12735-12740.

[10] WRIGHT I J, REICH P B, WESTOBY M. Strategy shifts in leaf physiology, structure and nutrient content between species of high- and low-rainfall and high- and low-nutrient habitats[J]. *Functional Ecology*, 2001, 15(4): 423-434.

[11] 胡梦瑶, 张林, 罗天祥, 等. 西藏紫花针茅叶功能性状沿降水梯度的变化[J]. 植物生态学报, 2012, 36(2): 136-143.

HU M Y, ZHANG L, LUO T X, et al. Variations in leaf functional traits of *Stipa purpurea* along a rainfall gradient in Xizang, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2012, 36(2): 136-143.

[12] 李思慧. 1961—2018 年科尔沁沙地气候变化特征[J]. 内蒙古气象, 2019(5): 8-10.

LI S H. Characteristics of climate change in Horqin sandy land from 1961 to 2018[J]. *Meteorology Journal of Inner Mongolia*, 2019(5): 8-10.

[13] 刘新平, 何玉惠, 赵学勇, 等. 科尔沁沙地奈曼地区降水变化特征分析[J]. 水土保持研究, 2011, 18(2): 155-158.

LIU X P, HE Y H, ZHAO X Y, et al. Characteristics of precipitation in Naiman region of Horqin sandy land[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2011, 18(2): 155-158.

[14] 王晨晨, 王珍, 张新杰, 等. 增温对荒漠草原植物群落组成及物种多样性的影响[J]. 生态环境学报, 2014, 23(1): 43-49.

WANG C C, WANG Z, ZHANG X J, et al. Effect of warming on plant community composition and plant species diversity in the desert steppe[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(1): 43-49.

[15] 张腊梅, 刘新平, 赵学勇, 等. 科尔沁固定沙地植被特征对降雨变化的响应[J]. 生态学报, 2014, 34(10): 2737-2745.

ZHANG L M, LIU X P, ZHAO X Y, et al. Response of sandy vegetation characteristics to precipitation change in

Horqin sandy land[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(10): 2737-2745.

[16] 孙一梅, 田青, 吕朋, 等. 极端干旱与氮添加对半干旱沙质草地物种多样性、叶性状和生产力的影响[J]. 干旱区研究, 2020, 37(6): 1569-1579.

SUN Y M, TIAN Q, LÜ P, *et al.* Effects of extreme drought and nitrogen addition on species diversity, leaf trait, and productivity in a semiarid sandy grassland[J]. *Arid Zone Research*, 2020, 37(6): 1569-1579.

[17] CORNELISSEN J H C, LAVOREL S, GARNIER E, *et al.* A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide[J]. *Australian Journal of Botany*, 2003, 51(4): 335-380.

[18] ALWARD R D, DETLING J K, MILCHUNAS D G. Grassland vegetation changes and nocturnal global warming[J]. *Science*, 1999, 283(5399): 229-231.

[19] 李娜, 王根绪, 杨燕, 等. 短期增温对青藏高原高寒草甸植物群落结构和生物量的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(4): 895-905.

LI N, WANG G X, YANG Y, *et al.* Short-term effects of temperature enhancement on community structure and biomass of alpine meadow in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(4): 895-905.

[20] 王悦骅, 宋晓辉, 王占文, 等. 短花针茅荒漠草原植物地上地下生物量对载畜率和降水的响应[J]. 西北植物学报, 2018, 38(8): 1526-1533.

WANG Y H, SONG X H, WANG Z W, *et al.* Responses of plant above and underground productivity of *Stipa breviflora* desert steppe to stocking rates and precipitation[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2018, 38(8): 1526-1533.

[21] MELILLO J M, MCGUIRE A D, KICKLIGHTER D W, *et al.* Global climate change and terrestrial net primary production[J]. *Nature*, 1993, 363(6426): 234-240.

[22] WARDLE D A, GRIME J P. Biodiversity and stability of grassland ecosystem functioning[J]. *Oikos*, 2003, 100(3): 622-623.

[23] 王长庭, 龙瑞军, 丁路明, 等. 草地生态系统中物种多样性、群落稳定性和生态系统功能的关系[J]. 草业科学, 2005, 22(6): 1-7.

WANG C T, LONG R J, DING L M, *et al.* Species diversity, community stability and ecosystem function: Extension of the continuous views[J]. *Pratacultural Science*, 2005, 22(6): 1-7.

[24] 朱凡, 刘任涛, 贺达汉. 模拟增雨条件下沙质草地地表植被和节肢动物群落变化特征[J]. 草业科学, 2014, 31(12): 2333-2341.

ZHU F, LIU R T, HE D H. Variations of ground vegetation and arthropod communities under simulating precipitation in sandy grassland[J]. *Pratacultural Science*, 2014, 31(12): 2333-2341.

[25] 白永飞, 张丽霞, 张焱, 等. 内蒙古锡林河流域草原群落植物功能群组成沿水热梯度变化的样带研究[J]. 植物生态学报, 2002, 26(3): 308-316.

BAI Y F, ZHANG L X, ZHANG Y, *et al.* Changes in plant functional composition along gradients of precipitation and temperature in the Xilin River Basin, Inner Mongolia[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(3): 308-316.

[26] YANG Y, WANG G X, KLANDERUD K, *et al.* Plant community responses to five years of simulated climate warming in an alpine Fen of the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Plant Ecology & Diversity*, 2015, 8(2): 211-218.

[27] 赵哈林, 大黑俊哉, 李玉霖, 等. 人类放牧活动与气候变化对科尔沁沙质草地植物多样性的影响[J]. 草业学报, 2008, 17(5): 1-8.

ZHAO H L, OKURO T, LI Y L, *et al.* Effects of human activities and climate changes on plant diversity in Horqin sandy grassland, Inner Mongolia[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2008, 17(5): 1-8.

[28] 王明明, 刘新平, 何玉惠, 等. 科尔沁沙地封育恢复过程中植物群落特征变化及影响因素[J]. 植物生态学报, 2019, 43(8): 672-684.

WANG M M, LIU X P, HE Y H, *et al.* How enclosure influences restored plant community changes of different initial types in Horqin sandy land[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2019, 43(8): 672-684.

[29] 王常顺, 汪诗平. 植物叶片性状对气候变化的响应研究进展[J]. 植物生态学报, 2015, 39(2): 206-216.

WANG C S, WANG S P. A review of research on responses of leaf traits to climate change[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(2): 206-216.

[30] 杨继鸿, 李亚楠, 卜海燕, 等. 青藏高原东缘常见阔叶木本植物叶片性状对环境因子的响应[J]. 植物生态学报, 2019, 43(10): 863-876.

YANG J H, LI Y N, BU H Y, *et al.* Response of leaf traits of common broad-leaved woody plants to environmental factors on the eastern Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2019, 43(10): 863-876.

[31] MAHARJAN S K, POORTER L, HOLMGREN M, *et al.* Plant functional traits and the distribution of West African rain forest trees along the rainfall gradient[J]. *Biotropica*, 2011, 43(5): 552-561.

[32] 盘远方, 陈兴彬, 姜勇, 等. 桂林岩溶石山灌丛植物叶功能性状和土壤因子对坡向的响应[J]. 生态学报, 2018, 38(5): 1581-1589.

PAN Y F, CHEN X B, JIANG Y, *et al.* Changes in leaf functional traits and soil environmental factors in response to slope gradient in Karst hills of Guilin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(5): 1581-1589.

[33] YANG Y, WANG G X, YANG L D, *et al.* Effects of drought and warming on biomass, nutrient allocation, and oxidative stress in *Abies fabri* in eastern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2013, 32(2): 298-306.

[34] MÜNKEMÜLLER T, GALLIEN L, LAVERGNE S, *et al.* Scale decisions can reverse conclusions on community assembly processes[J]. *Global Ecology and Biogeography: A Journal of Macroecology*, 2014, 23(6): 620-632.

[35] 李旭. 南亚热带季风常绿阔叶林优势树种叶片功能性状对增温的响应[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2020.