

长期降水量变化下荒漠草原植物生物量、多样性的变化及其影响因素

王晓悦¹ 许艺馨² 李春环² 余海龙² 黄菊莹^{1*}

¹西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 宁夏大学生态环境学院, 银川 750021; ²宁夏大学地理科学与规划学院, 银川 750021

摘要 植物多样性是植物群落维持生态系统稳定的基础。虽然荒漠草原植被稀少, 但其在防风固沙等方面仍发挥着不可替代的生态服务功能, 然而对荒漠植物多样性如何响应长期极端降水量变化尚缺乏深入理解。该研究依托2014年在宁夏荒漠草原设立的降水量变化(减少50%、减少30%、自然、增加30%和增加50%)的野外实验样地, 研究了2020年5–10月植物生物量和物种多样性的变化特征, 分析了二者与土壤性质的关系。随着生长季推移, 植物群落生物量、Patrick丰富度指数和Shannon-Wiener多样性指数呈先增加后降低的时间动态, Pielou均匀度指数和Simpson优势度指数无明显的变化规律。与自然降水量相比, 降水量减少对植物生物量和多样性影响较小, 尤其是降水量减少30%的处理下; 多数情况下, 降水量增加刺激了苦豆子(*Sophora alopecuroides*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)、白草(*Pennisetum centrasaticum*)等物种生长, 提高了植物生物量, 但亦未明显改变植物多样性(尤其是降水量增加30%的处理下)。对植物生物量影响显著的土壤因子包括脲酶活性、温度、含水量、pH、磷酸酶活性和蔗糖酶活性, 对植物多样性影响显著的土壤因子包括含水量、电导率和脲酶活性。该研究结果意味着, 连续7年降水量变化下, 研究区植物对适度甚至极端干旱有强的适应性; 降水量适度增加提高了土壤水分有效性, 增强了离子移动性, 刺激了酶活性, 促进了植物生长。然而, 降水量持续增加导致植物生物量增加, 植物耗水增大, 使得生长季后期土壤水分不足, 导致部分植物提前完成生命周期。

关键词 降水格局改变; 干旱半干旱区; 生态系统结构; 生态系统功能; 土壤环境

王晓悦, 许艺馨, 李春环, 余海龙, 黄菊莹 (2023). 长期降水量变化下荒漠草原植物生物量、多样性的变化及其影响因素. 植物生态学报, 47, 479-490. DOI: 10.17521/cjpe.2022.0211

Changes of plant biomass, species diversity, and their influencing factors in a desert steppe of northwestern China under long-term changing precipitation

WANG Xiao-Yue¹, XU Yi-Xin², LI Chun-Huan², YU Hai-Long², and HUANG Ju-Ying^{1*}

¹Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwestern China, Key Laboratory of Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystems in Northwestern China of Ministry of Education, School of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; and ²School of Geography and Planning, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

Abstract

Aims Plant diversity is the basis for plant communities to maintain ecosystem stability. Despite the scarcity of vegetation, desert steppes play an irreplaceable ecological service function in terms of wind-break and sand-fixation, etc. However, how plant diversity in desert steppes responds to long-term extreme precipitation changes still remains poorly understood.

Methods Based on a long-term field experiment involving five precipitation treatments (50% reduction, 30% reduction, natural, 30% increase, and 50% increase) conducted in a desert steppe in Ningxia since 2014, the changing characteristics of plant biomass, species diversity and their relationships with soil properties were studied from May to October in 2020.

Important findings During the growing season, plant community biomass, Patrick richness index and Shannon-Wiener diversity index tended to increase first and then decrease, whereas no obvious regularities in Pielou evenness index and Simpson dominance index. Compared with the natural precipitation, the decreased

收稿日期Received: 2022-05-23 接受日期Accepted: 2022-08-06

基金项目: 宁夏自然科学基金(2022AAC02012)、国家自然科学基金(32160277)和中国科学院“西部青年学者”项目(XAB2019AW03)。Supported by the Natural Science Foundation of Ningxia (2022AAC02012), the National Natural Science Foundation of China (32160277), and the Chinese Academy of Sciences “Young Western Scholars” (XAB2019AW03).

* 通信作者Corresponding author (juyinghuang@163.com)

precipitation had less effect on plant biomass and diversity, especially the 30% reduction in precipitation. In most cases, the increased precipitation stimulated the growth of *Sophora alopecuroides*, *Stipa breviflora* and *Pennisetum centrasiatum*, and thus increasing plant biomass. However, it did not significantly change plant diversity when precipitation increased, especially the 30% increase of precipitation. Plant biomass was significantly affected by soil urease activity, temperature, water content, pH, phosphatase activity and sucrase activity, while plant diversity was significantly affected by soil water content, electrical conductivity, and urease activity. In general, the results indicated that plants have high adaptability to moderate or even extreme drought in the research area under seven consecutive years of changing precipitation; moderately increasing precipitation increased soil water availability, enhanced exchangeable ion mobility, and stimulated enzyme activity, thereby promoting plant growth. However, the continuous increase of precipitation led to the increase of plant biomass and plant water consumption, resulting in the lack of soil water in the late growth season and then the early completion of the life cycle of some plants.

Key words changing precipitation pattern; arid and semi-arid region; ecosystem structure; ecosystem function; soil environment

Wang XY, Xu YX, Li CH, Yu HL, Huang JY (2023). Changes of plant biomass, species diversity, and their influencing factors in a desert steppe of northwestern China under long-term changing precipitation. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 47, 479-490. DOI: 10.17521/cjpe.2022.0211

IPCC第六次评估报告指出, 全球平均气温在过去的100多年间明显上升(IPCC, 2021)。全球变暖引起大气持水能力增加、水循环加速, 从而导致降水分布格局发生显著变化(Spinoni *et al.*, 2018)。具体表现为, 降水的总量增加、不确定性增大、极端性增强、时间分配变得更加波动(IPCC, 2021; Zhang *et al.*, 2021b)。据报道, 近几十年来中国亦表现出年降水量增加、极端降水事件增多的趋势(卢珊等, 2020), 且区域差异明显(杜懿等, 2020; 刘凯, 2020)。就中国西北地区而言, 极端降水和短时对流降水事件增多是降水量增加的主要形式(王澄海等, 2021), 且其东部降水量增加速率超过同时期的西部(姚旭阳等, 2022)。降水驱动西北干旱半干旱区植物生长的主导因子(Bai *et al.*, 2021)。降水格局改变会导致土壤水分有效性发生变化, 从而影响土壤-植物养分动态、改变植物群落结构(杨崇曜等, 2017), 对荒漠草原的影响尤为明显(Elser *et al.*, 2010)。植物多样性是反映生态系统稳定性的重要指标(Hautier *et al.*, 2015)。因此, 研究降水量对荒漠草原植物多样性的影响, 可为科学评估降水格局改变下西北干旱半干旱区脆弱生态系统稳定性提供数据支撑。

植物多样性是植物群落维持生态系统结构和功能的基础(何远政等, 2021), 尤其干旱半干旱生态系统(程磊磊等, 2013)。研究表明, 干旱导致美国荒漠草原(Gherardi & Sala, 2015)、内蒙古典型草原和荒漠草原(王悦骅等, 2018; Zhong *et al.*, 2019)、新疆荒漠(胡冬等, 2021) Patrick 丰富度指数和Shannon-

Wiener多样性指数下降; 降水量增加提高了加拿大旱地草原(Zhang *et al.*, 2021a)和陕西黄土区(井光花等, 2021)物种多样性。但也有研究发现, 极端干旱降低了典型草原植物物种多样性(Zhong *et al.*, 2019), 降水量适度减少影响了荒漠草原植物生长, 但未改变其多样性(胡冬等, 2021); 降水量增加提高了草原植物物种多样性, 但降水量减少未显著改变其多样性(Zuo *et al.*, 2020), 证实草原植物生长对干旱具有高的适应性, 至少在短期尺度上其多样性不会受到极端干旱的影响(Copeland *et al.*, 2016)。这些研究表明, 降水量对干旱半干旱草原植物多样性的影响依赖于降水强度和时长(Niu *et al.*, 2008)。然而, 通过梳理近年来国内针对草原如何响应长期极端降水量变化的研究成果, 发现这些研究主要集中在草甸草原和典型草原, 尚缺乏针对荒漠草原的研究, 尤其是宁夏荒漠草原。

荒漠草原是我国主要的脆弱生态系统。虽然该生态系统植被稀少, 但仍蕴藏着大量特有物种, 在生物多样性维持和固碳释氧等方面提供着不容忽视的生态服务功能(宁夏农业勘查设计院等, 1988)。目前, 已有较多国内学者关注了降水量对荒漠草原植物多样性的影响, 但极端降水条件下相关研究的缺乏, 限制了对降水格局改变下荒漠草原结构维持机制的深入理解。此外, 降水量对荒漠草原植物的影响易受到气候年际波动的影响, 基于长期观测数据可能会得出与短期实验截然不同的结论, 然而相关报道仍多为5年以下的短期研究。那么, 长期降水量

变化下荒漠草原植物群落结构会发生怎样的改变? 极端干旱是否会抑制荒漠草原植物生长, 导致物种丧失等问题值得我们深入关注。鉴于此, 本研究基于2014年设立于宁夏荒漠草原的降水量变化的野外模拟实验样地, 探讨了连续7年降水量变化下植物生物量和多样性的时间动态及其影响因素, 以期为进一步理解降水格局改变下干旱半干旱区脆弱生态系统结构的维持机理提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 实验地概况

降水量变化的野外模拟实验样地设立于宁夏吴忠市盐池县柳杨堡乡杨寨子村围封草地内。该围封草地于1998年开始围封, 期间无牛、羊等大型动物踩踏和啃食, 也未进行刈割等人为处理。研究区地理位置为37.80° N、107.45° E, 海拔为1 367 m, 位于毛乌素沙地西南边缘, 向南为黄土丘陵区, 向北为鄂尔多斯缓坡丘陵。该地区干旱少雨、蒸发量大、风沙天气频繁, 属于典型的温带大陆性季风气候: 多年平均气温为9.3 °C, 1月和7月平均气温分别为-5.7 °C和23.7 °C。2014–2020年平均气温为9.6 °C (图1), 多年平均蒸发量为2 131.8 mm, 多年平均降水量为289.4 mm。2014–2020年平均降水量为337.6 mm。降水量年内变化大, 分配极不均匀, 主要集中在5–8月。2014–2020年平均风速为2.2 m·s⁻¹。

实验地土壤贫瘠、植被稀少。土壤类型为灰钙土, 普遍沙化, 保水保肥能力差。土壤富含CaCO₃, pH高, 为中度盐碱土。植被区划属于亚欧草原区亚洲中部亚区-中部草原区的过渡带(王黎黎等, 2016)。经过多年封育, 围栏内植被恢复良好, 但群落组成

依然单一, 优势种为草木樨状黄耆(*Astragalus melilotoides*)和牛枝子(*Lespedeza potaninii*), 常见种包括猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、苦豆子(*Sophora alopecuroides*)、披针叶野决明(*Thermopsis lanceolata*)、乳浆大戟(*Euphorbia esula*)和阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)等一年生或多年生草本(黄菊莹等, 2018; 朱湾湾等, 2021)。

1.2 研究方法

1.2.1 实验设计

于2014年4月, 在围栏草地内选择地势平坦且植被分布均匀的代表性区域(面积为30 m × 50 m)作为降水量变化的野外模拟实验样地。降水变化量以近几十年来我国西北地区降水的空间格局为主要依据(商沙沙等, 2018), 同时参考了国内同类研究的处理方法(张腊梅等, 2014; 李长斌等, 2016)。按照随机区组实验设计, 设置了5个降水量处理: 减少50% (极端减少, W1)、减少30% (适度减少, W2)、自然(对照, W3)、增加30% (适度增加, W4)和增加50% (极端增加, W5)。每个处理3次重复, 共计15个8 m × 8 m的小区。各小区四周垂直插入彩钢板, 彩钢板内侧填埋塑料布, 小区之间设置2 m宽的缓冲带, 以减少小区间地表径流和地下渗漏干扰。

降水量减少处理(W1和W2)中, 2014–2017年采用高1.5–1.6 m的遮雨棚进行人工遮雨, 遮雨时间为每年的5–8月(降水丰沛期), 野外处理方法见黄菊莹等(2018); 2018年1月以来, 项目组对处理方法进行了改进, 即在每个小区安装1个U形减雨架(最高点离地约1.8 m), 在每个减雨架上方搭建分别相当于50%和30%遮雨面的透明PVC板实现降水量的全年减少, 野外处理方法见朱湾湾等(2021)。2014年以

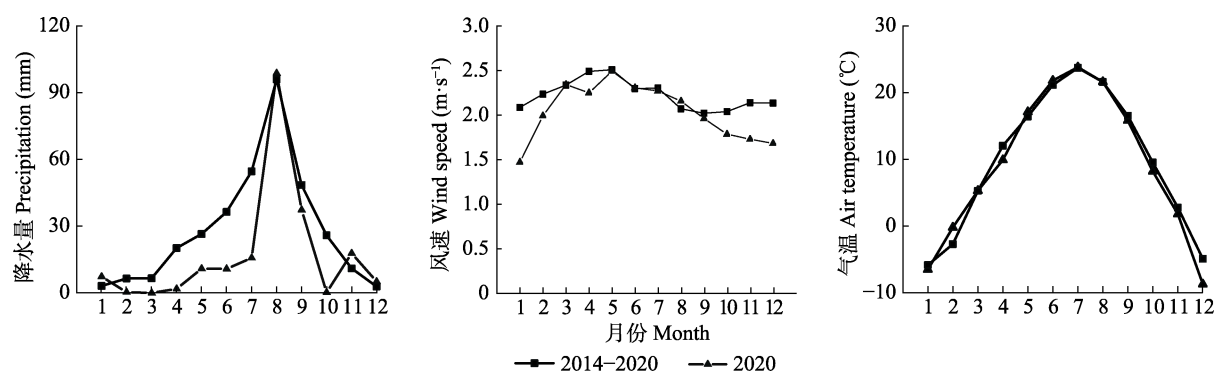


图1 2014–2020年与2020年研究区月降水量、平均风速和气温。气象数据来源于中国气象数据网(<https://data.cma.cn/>), 气象站点为盐池站点(52723)。

Fig. 1 Monthly average precipitation, wind speed and air temperature in the research area from 2014 to 2020 and in 2020. Meteorological data are from China Meteorological Data Network (<https://data.cma.cn/>), the weather station is Yanchi station (52723).

来, 降水量增加处理(W4和W5)采用可控制流量(依靠精度为0.001 m³的水表实现)的喷灌装置结合孔径为1.2 mm的微喷带实现。实验处理时, 将实验区多年平均降水量(289.4 mm)的30% (86.8 mm)和50% (144.7 mm)作为两个处理的增水量。考虑到野外实验的可操作性和研究区降水分布的丰沛期, 将两个处理需要补给的降水量换算成喷水量, 于5-8月每两周均匀喷水一次。详细的处理方法见黄菊莹等(2018)。

1.2.2 样品采集与分析

于2020年生长季5-10月份每月下旬, 在每个小区内随机选取1个1 m × 1 m的样方进行植被群落调查, 记录样方内物种名录、物种数、物种高度、物种个体数等。受疫情和降雨等不可控外力影响时, 取样时间适当延后。植被调查结束后, 用剪刀齐平地剪下各物种的地上部分, 分别装入牛皮信封袋中带回实验室, 在65 °C的条件下烘48 h至恒质量, 以获得种群生物量。将所有植物样品按照牛枝子、草木樨状黄耆、苦豆子、短花针茅(*Stipa breviflora*)、猪毛蒿、阿尔泰狗娃花、白草(*Pennisetum centras-iaticum*)和其他物种(主要为偶见种)归类, 以获得8类种群生物量。8类种群生物量之和为群落生物量。植物物种多样性采用 Patrick 丰富度指数、Shannon-Wiener多样性指数、Simpson优势度指数和Pielou均匀度指数表征。

于2020年7月份下旬, 采用地温计测定各小区土壤温度, 采用土钻法收集各小区0-20 cm土壤样品。收集时, 在每个小区随机取3钻土样, 混匀后从中取出10 g左右测定土壤含水量(在烘箱中105 °C下烘8 h)。剩余部分过2 mm标准筛后再分成两部分。一部分置于冰箱中4 °C下冷藏保存, 用于pH (便携式酸度计法)、电导率(便携式电导率仪法)、无机氮(N)浓度(氨态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N), 连续流动分析仪)、速效磷(P)浓度(0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃法)、微生物生物量碳(C)含量(氯仿熏蒸-K₂SO₄浸提-碳分析仪器法)、微生物生物量N含量(氯仿熏蒸-K₂SO₄提取-流动注射氮分析仪器法)、微生物生物量P含量(氯仿熏蒸-K₂SO₄提取-正磷酸盐态无机磷测定-外加正磷酸盐态无机磷矫正法)、蔗糖酶活性(3,5-二硝基水杨酸比色法)、脲酶活性(苯酚钠-次氯酸钠比色法)、磷酸酶活性(对硝基苯磷酸盐法)的测定。另一部分自然风干后, 用于有机C (重铬酸钾容量法-外加加热法)、全N (凯氏定氮法)和全P (钼锑抗比色法)

含量的测定。

1.3 数据分析

1.3.1 数据计算

依据植被群落调查结果, 计算物种多样性指数。计算公式如下:

$$p_i = (\text{相对生物量} + \text{相对高度} + \text{相对密度})/3 \quad (1)$$

$$\text{Patrick 丰富度指数}(R) = S \quad (2)$$

$$\text{Shannon-Wiener 多样性指数}(H') = -\sum_{i=1}^S p_i \ln p_i \quad (3)$$

$$\text{Simpson 优势度指数}(D) = 1 - \sum_{i=1}^S p_i^2 \quad (4)$$

$$\text{Pielou 均匀度指数}(E) = H'/\ln S \quad (5)$$

式中, p_i 为物种*i*的重要值, S 为样方内物种总数。

1.3.2 统计分析

通过Excel 2016软件对数据进行初步整理。运用IBM SPSS Statistics 26对数据进行统计分析: 采用两因素方差分析研究降水量、月份及其交互作用对植物群落生物量和多样性的影响; 采用单因素方差分析比较植物生物量(群落和种群)和多样性在降水量处理间的差异。如果方差为齐性, 采用最小显著性差异(LSD)法进行多重比较。反之, 则采用Games-Howell法。通过OriginPro 2021绘制各指标柱状图(数据点为平均值±标准误, $n = 3$)。采用Canoco 5进行植物生物量和多样性与土壤因子对应关系的冗余分析(RDA)。分析时, 先将所有数据用 $\log(x + 1)$ 转换, 分别以植物生物量和多样性为响应变量, 以所有土壤因子为解释变量, 依据解释变量前项选择, 剔除影响力较小的解释变量后进行RDA, 并通过蒙特卡洛置换检验得出每个环境因子的条件效应(朱湾湾等, 2021)。

2 结果和分析

2.1 降水量对植物生物量的影响

降水量和月份均对植物群落生物量有极显著影响, 二者对植物群落生物量没有显著的交互作用(表1)。

整个生长季, 植物群落生物量呈先增加后降低的时间动态(图2)。与W3相比, W1显著降低了8月份群落生物量, W2对各月份群落生物量无显著影响, 增加降水量显著提高了5月份(W4和W5)、6月份(W5)、7月份(W4和W5)、8月份(W4和W5)、9月份

表1 降水量变化对荒漠草原植物群落生物量的两因素方差分析
Table 1 Two-way ANOVA of plant community biomass in the studied desert steppe under long-term changing precipitation

变异来源 Sources of variation	自由度 Degree of freedom	F
降水量 Precipitation (α)	4	38.988**
月份 Month (β)	5	5.608**
降水量×月份 Interaction of α and β	20	0.951

** $p < 0.01$.

(W4和W5)群落生物量。

降水量对7月份植物种群生物量的影响程度随物种不同而异(图3)。随降水量增加,牛枝子、草木樨状黄耆、猪毛蒿、阿尔泰狗娃花生物量先增加后降低,白草生物量呈增加趋势,其他物种生物量无明显的变化规律。与W3相比,W1、W2、W4和W5对牛枝子、草木樨状黄耆、猪毛蒿、阿尔泰狗娃花、其他物种生物量无显著影响,W1和W5显著提高了苦豆子生物量,W4显著提高了短花针茅生物量,W5显著提高了白草生物量。

2.2 降水量对植物多样性的影响

降水量对Patrick丰富度指数和Pielou均匀度指

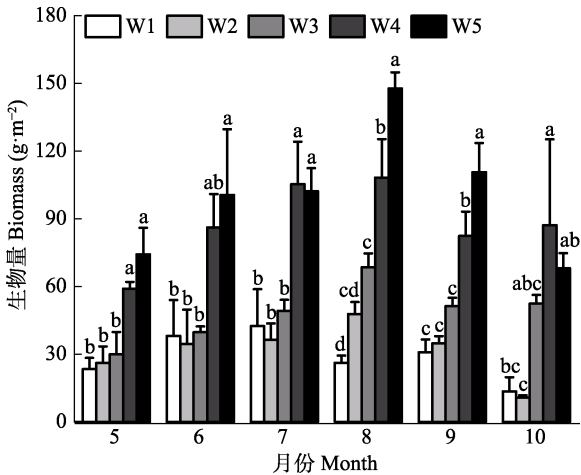


图2 降水量变化对荒漠草原5-10月份植物群落生物量的影响(平均值±标准误, $n = 3$)。不同小写字母表示相同月份下植物群落生物量在降水量处理间的差异显著($p < 0.05$)。W1, 降水量减少50%; W2, 降水量减少30%; W3, 自然降水量; W4, 降水量增加30%; W5, 降水量增加50%。

Fig. 2 Effects of long-term changing precipitation on plant community biomass from May to October in the studied desert steppe (mean \pm SE, $n = 3$). Different lowercase letters indicate significant differences in plant community biomass between the precipitation treatments under the same month ($p < 0.05$). W1, 50% reduction in precipitation; W2, 30% reduction in precipitation; W3, natural precipitation; W4, 30% increase in precipitation; W5, 50% increase in precipitation.

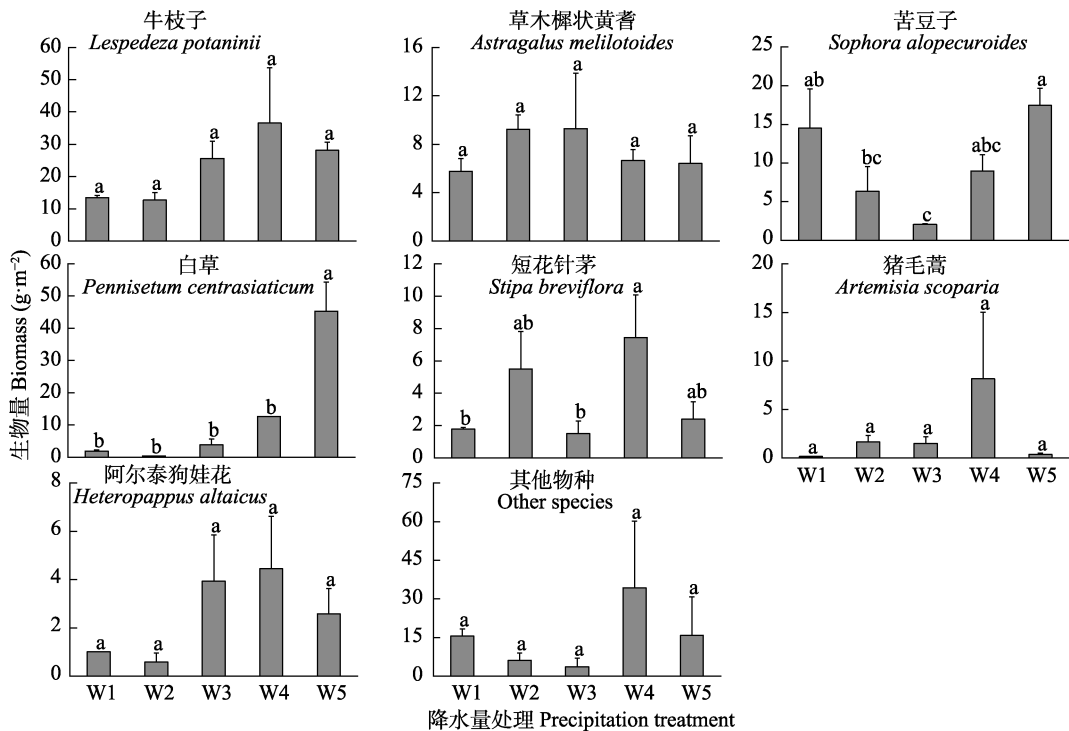


图3 降水量变化对荒漠草原7月份植物种群生物量的影响(平均值±标准误, $n = 3$)。不同小写字母表示植物种群生物量在降水量处理间的差异显著($p < 0.05$)。W1, 降水量减少50%; W2, 降水量减少30%; W3, 自然降水量; W4, 降水量增加30%; W5, 降水量增加50%。

Fig. 3 Effects of long-term changing precipitation on plant population biomass in July in the studied desert steppe (mean \pm SE, $n = 3$). Different lowercase letters indicate significant differences in plant population biomass between the precipitation treatments ($p < 0.05$). W1, 50% reduction in precipitation; W2, 30% reduction in precipitation; W3, natural precipitation; W4, 30% increase in precipitation; W5, 50% increase in precipitation.

数有显著影响, 月份对 Patrick 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数有极显著影响, 二者对植物多样性指数没有显著的交互作用(表2)。

整个生长季, Patrick 丰富度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数先增加后降低, Pielou 均匀度指数和 Simpson 优势度指数无明显的时间动态(图4)。与 W3 相比, W1 显著降低了6月份 Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数, W5 显著提高了8月份

Patrick 丰富度指数、显著降低了10月份 Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数, 其他情况下减少和增加降水量对三者无显著影响; W1、W2、W4 和 W5 对6个月份 Simpson 优势度指数均无显著影响。

2.3 植物生物量和多样性与土壤因子的关系

植物生物量与土壤因子的 RDA 结果显示(图5), 两个典范轴累计方差解释率为 77.56%。对植物生物量影响显著的土壤因子包括脲酶活性、温度、含水

表2 降水量变化对荒漠草原植物多样性的两因素方差分析

Table 2 Two-way ANOVA of plant diversity in a desert steppe under long-term changing precipitation

变异来源 Sources of variation	自由度 Degree of freedom	<i>F</i> (<i>R</i>)	<i>F</i> (<i>H'</i>)	<i>F</i> (<i>D</i>)	<i>F</i> (<i>E</i>)
降水量 Precipitation (α)	4	2.705*	1.617	1.810	2.807*
月份 Month (β)	5	5.700**	18.841**	1.888	22.071**
降水量×月份 Interaction of α and β	20	0.532	0.632	0.714	0.918

D, Simpson 优势度指数; *E*, Pielou 均匀度指数; *H'*, Shannon-Wiener 多样性指数; *R*, Patrick 丰富度指数。*, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$ 。
D, Simpson dominance index; *E*, Pielou evenness index; *H'*, Shannon-Wiener diversity index; *R*, Patrick richness index. *, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$.

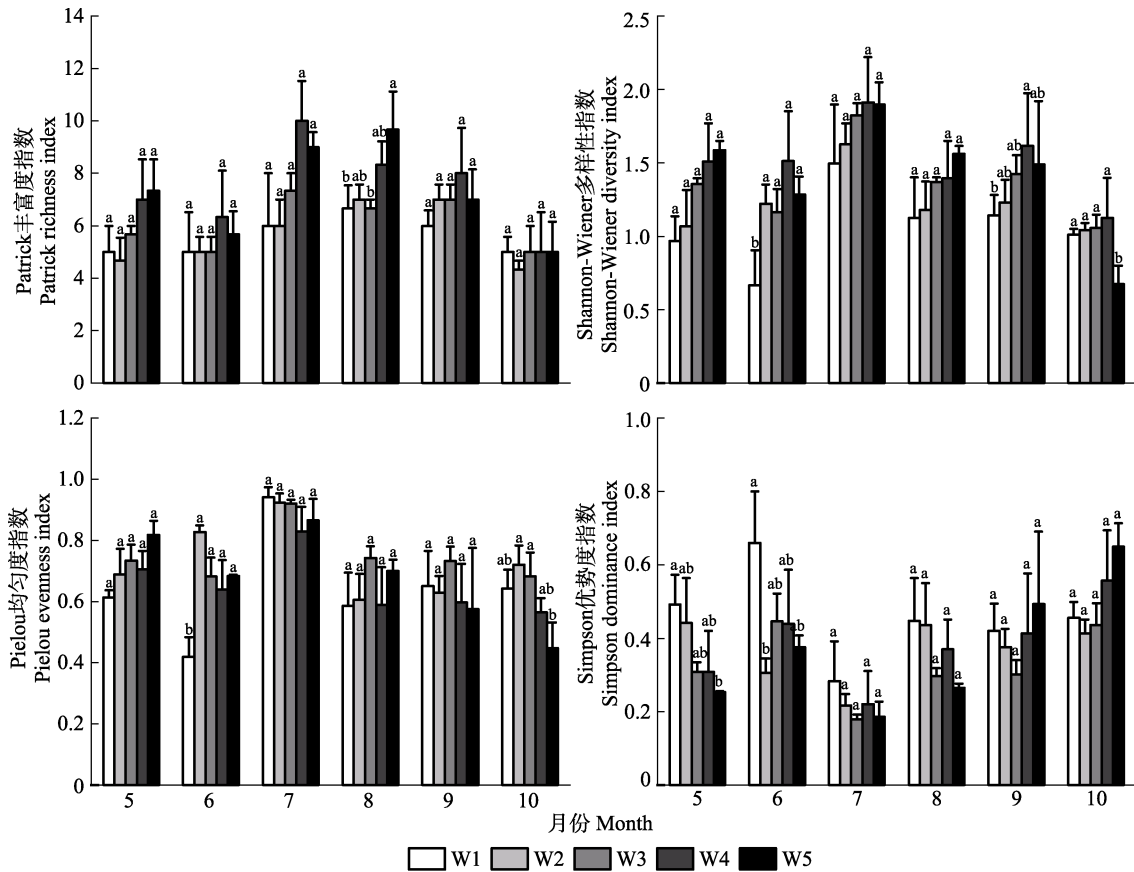


图4 降水量变化对荒漠草原5-10月份植物多样性的影响(平均值±标准误, $n = 3$)。不同小写字母表示相同月份下植物多样性在降水量处理间的差异显著($p < 0.05$)。W1, 降水量减少50%; W2, 降水量减少30%; W3, 自然降水量; W4, 降水量增加30%; W5, 降水量增加50%。

Fig. 4 Effects of long-term changing precipitation on plant diversity from May to October in the studied desert steppe (mean \pm SE, $n = 3$). Different lowercase letters indicate significant differences in plant diversity between the precipitation treatments under the same month ($p < 0.05$). W1, 50% reduction in precipitation; W2, 30% reduction in precipitation; W3, natural precipitation; W4, 30% increase in precipitation; W5, 50% increase in precipitation.

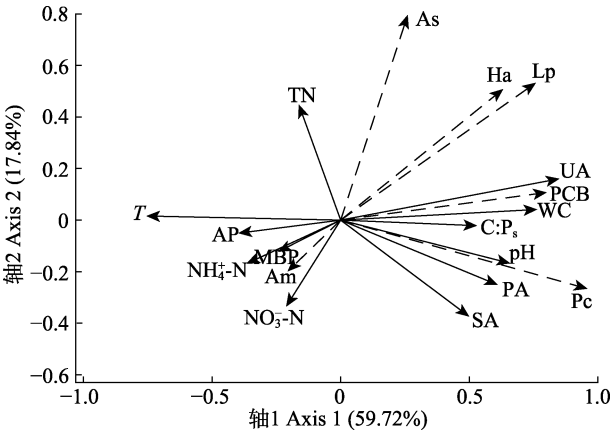


图5 降水量变化下荒漠草原植物生物量与土壤因子的冗余分析。Am, 草木樨状黄耆种群生物量; As, 猪毛蒿种群生物量; Ha, 阿尔泰狗娃花种群生物量; Lp, 牛枝子种群生物量; Pc, 白草种群生物量; PCB, 植物群落生物量。AP, 速效磷含量; C:P_s, 土壤碳含量:磷含量; MBP, 微生物生物量磷含量; NH₄⁺-N, 铵态氮含量; NO₃⁻-N, 硝态氮含量; PA, 磷酸酶活性; SA, 蔗糖酶活性; T, 温度; TN, 全氮含量; UA, 脲酶活性; WC, 含水量。

Fig. 5 Redundancy analysis of plant biomass and soil factor in the studied desert steppe under long-term changing precipitation. Am, *Astragalus melilotoides* population biomass; As, *Artemisia scoparia* population biomass; Ha, *Heteropappus altaicus* population biomass; Lp, *Lespedeza potaninii* population biomass; Pc, *Pennisetum centrasiaticum* population biomass; PCB, plant community biomass. AP, available phosphorus content; C:P_s, soil carbon content: phosphorus content; MBP, microbial biomass phosphorus content; NH₄⁺-N, ammonium nitrogen content; NO₃⁻-N, nitrate nitrogen content; PA, phosphatase activity; SA, sucrase activity; T, temperature; TN, total nitrogen content; UA, urease activity; WC, water content.

量、pH、磷酸酶活性和蔗糖酶活性(表3)。其中, 植物群落生物量与土壤脲酶活性、含水量和pH呈较强的正相关关系, 与土壤温度、全N和NO₃⁻-N含量呈较强的负相关关系; 牛枝子、猪毛蒿和阿尔泰狗娃花种群生物量与土壤脲酶活性、含水量和全N含量呈较强的正相关关系, 与土壤温度、NH₄⁺-N和NO₃⁻-N含量呈较强的负相关关系; 白草种群生物量与土壤脲酶活性、含水量和磷酸酶活性呈较强的正相关关系, 与土壤温度、全N和NH₄⁺-N含量呈较强的负相关关系; 草木樨状黄耆种群生物量与土壤温度、NH₄⁺-N和NO₃⁻-N含量呈较强的正相关关系, 与土壤脲酶活性、含水量和pH呈较强的负相关关系。

植物多样性与土壤因子的RDA结果(图6)显示, 两个典范轴累计方差解释率为95.61%。对植物多样性影响显著的因子包括土壤含水量、电导率和脲酶活性(表4)。其中, Shannon-Wiener多样性指数和Patrick丰富度指数与土壤含水量、电导率和脲酶活性呈较强的正相关关系, 与土壤NH₄⁺-N、NO₃⁻-N和微生物生物量P含量呈较强的负相关关系; Simpson优势度指数与土壤NH₄⁺-N、NO₃⁻-N和微生物生物量P含量呈较强的正相关关系, 与土壤含水量、脲酶活性和电导率呈较强的负相关关系; Pielou均匀度指数与土壤温度、速效P含量和微生物生物量C:N呈较强的正相关关系, 与pH、蔗糖酶活性和NO₃⁻-N含量呈较强的负相关关系。

表3 降水量变化下荒漠草原植物生物量与土壤因子冗余分析中各土壤因子的条件效应

Table 3 Conditional effects of soil factors in redundancy analysis of plant biomass with soil factors in the studied desert steppe under long-term changing precipitation

指标 Index	UA	T	WC	pH	PA	SA	C:P _s	AP	NH ₄ ⁺ -N	MBP	TN	NO ₃ ⁻ -N
F	10.1	6.9	6.9	4.7	4.1	3.0	2.7	1.4	1.2	1.0	0.9	0.7
p	0.002	0.004	0.006	0.006	0.014	0.048	0.076	0.264	0.270	0.368	0.444	0.518

AP, 速效磷含量; C:P_s, 土壤碳含量:磷含量; MBP, 微生物生物量磷含量; NH₄⁺-N, 铵态氮含量; NO₃⁻-N, 硝态氮含量; PA, 磷酸酶活性; SA, 蔗糖酶活性; T, 温度; TN, 全氮含量; UA, 脲酶活性; WC, 含水量。

AP, available phosphorus content; C:P_s, soil carbon content: phosphorus content; MBP, microbial biomass phosphorus content; NH₄⁺-N, ammonium nitrogen content; NO₃⁻-N, nitrate nitrogen content; PA, phosphatase activity; SA, sucrase activity; T, temperature; TN, total nitrogen content; UA, urease activity; WC, water content.

表4 降水量变化下荒漠草原植物多样性与土壤因子的冗余分析中各土壤因子的条件效应

Table 4 Conditional effects of soil factors in redundancy analysis of plant diversity and soil factors in the studied desert steppe under long-term changing precipitation

指标 Index	WC	EC	UA	T	NH ₄ ⁺ -N	pH	MBP	NO ₃ ⁻ -N	AP	C:N _m	SA	N:P _m
F	8.0	6.7	6.0	3.8	3.7	3.7	1.7	1.5	1.5	0.4	0.4	0.3
p	0.008	0.028	0.028	0.058	0.068	0.086	0.212	0.248	0.252	0.548	0.562	0.578

AP, 速效磷含量; C:N_m, 微生物生物量碳含量:氮含量; EC, 电导率; MBP, 微生物生物量磷含量; NH₄⁺-N, 铵态氮含量; NO₃⁻-N, 硝态氮含量; N:P_m, 微生物生物量氮含量:磷含量; SA, 蔗糖酶活性; T, 温度; UA, 脲酶活性; WC, 含水量。

AP, available phosphorus content; C:N_m, microbial biomass carbon content: nitrogen content; EC, electrical conductivity; MBP, microbial biomass phosphorus content; NH₄⁺-N, ammonium nitrogen content; NO₃⁻-N, nitrate nitrogen content; N:P_m, microbial biomass nitrogen content: phosphorus content; SA, sucrase activity; T, temperature; UA, urease activity; WC, water content.

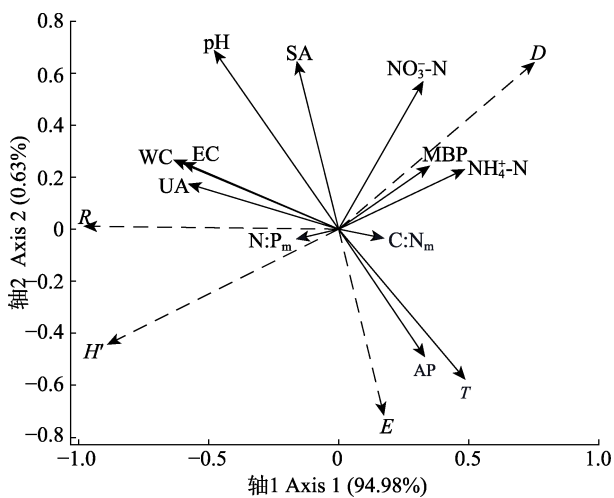


图6 降水量变化下荒漠草原植物多样性与土壤因子的冗余分析。D, Simpson优势度指数; H', Shannon-Wiener多样性指数; R, Patrick丰富度指数; E, Pielou均匀度指数。AP, 速效磷含量; C:N_m, 微生物生物量碳含量:氮含量; EC, 电导率; MBP, 微生物生物量磷含量; NH₄-N, 铵态氮含量; NO₃-N, 硝态氮含量; N:P_m, 微生物生物量氮含量:磷含量; SA, 蔗糖酶活性; T, 温度; UA, 脲酶活性; WC, 含水量。

Fig. 6 Redundancy analysis of plant diversity and soil factors in the studied desert steppe under long-term changing precipitation. D, Simpson dominance index; H', Shannon-Wiener diversity index; R, Patrick richness index; E, Pielou evenness index. AP, available phosphorus content; C:N_m, microbial biomass carbon content:nitrogen content; EC, electrical conductivity; MBP, microbial biomass phosphorus content; NH₄-N, ammonium nitrogen content; NO₃-N, nitrate nitrogen content; N:P_m, microbial biomass nitrogen content:phosphorus content; SA, sucrose activity; T, temperature; UA, urease activity; WC, water content.

3 讨论

3.1 降水量对植物生物量和多样性的影响

降水是制约荒漠草原植物生长发育最主要的生态因子(陈敏玲等, 2016), 决定着生态系统结构与功能(Wu *et al.*, 2011)。本研究发现, 降水量减少对生长季植物群落生物量影响较小, 仅降水量减少50%在8月份显著降低了群落生物量(图2), 与针对英国高地草原(Eze *et al.*, 2018)和内蒙古典型草原(Zhong *et al.*, 2019)的研究结果一致, 证实干旱半干旱区植物群落对适度甚至极端干旱有强的适应性(胡小文等, 2004; Copeland *et al.*, 2016; Zuo *et al.*, 2020)。8月份为植物生长旺盛期。极端干旱条件下植物生长受水分限制严重, 依据最优分配假说, 此时植物会将生物量优先分配给地下部分, 使得地上生物量减少。相比之下, 降水量增加的影响较大, 即除10月份外, 降水量增加均提高了群落生物量, 尤其是降水

量增加50%的处理。在干旱半干旱区, 降水量增加缓解了土壤水分限制, 促进了植物生长和生物量积累(崔夺等, 2011)。但降水量持续增加导致土壤含水量达到饱和、土壤通透性变差, 使牛枝子、短花针茅、猪毛蒿、阿尔泰狗娃花等物种地下部分氧气缺乏, 造成这些物种生物量减少(图3)。也有研究表明, 过量的降水量对沙质土壤具有淋溶作用, 使土壤养分淋溶损失增加(王霖娇等, 2018), 进而对植物生物量积累造成不利影响。

降水量变化下, 植物种的不同反应导致群落结构的改变。本研究中, 降水量减少对4个多样性指数的影响较小, 仅降水量减少50%在6月份显著降低了Shannon-Wiener多样性指数和Pielou均匀度指数。在极端干旱条件下植物生长发育受到干旱胁迫, 对干旱忍耐性弱的物种(如牛枝子、短花针茅、猪毛蒿、阿尔泰狗娃花等)被逐渐从群落中排除, 导致群落多样性降低(朱国栋等, 2021)。研究表明, 在水分为主要限制因子的地区, 降水量适度增加一方面会改善植物生存环境、减少植物群落种内和种间竞争(车力木格等, 2020), 另一方面会使物种间出现生态位互补效应、物种共存概率增大(Bunting *et al.*, 2017), 从而增加群落多样性(孙小丽等, 2015)。本研究发现, 整个生长季降水量增加虽有助于提高Patrick丰富度指数和Shannon-Wiener多样性指数, 但绝大多数情况下未达到显著水平, 表明降水量适度增加促进了植物生长, 但未改变其多样性, 与其他研究结果(孙岩等, 2018; Jia *et al.*, 2020)一致。随着降水量的进一步增加(W5), 植物生物量增加、植物耗水增多(李红琴等, 2013), 许多植物提前完成生命周期(图2), 导致Shannon-Wiener多样性指数和Pielou均匀度指数在10月份显著下降, 与高寒矮生嵩草(*Carex alatauensis*)草甸群落的研究结果(王长庭等, 2003)一致。

3.2 降水量变化下植物生物量和多样性变化的影响因素分析

降水的增加或减少会导致土壤含水量发生变化, 改变土壤微环境, 从而对植物生长发育产生重要影响(Wu *et al.*, 2011)。本研究中, 植物群落及多数植物种群生物量与土壤脲酶活性、含水量、pH、磷酸酶活性和蔗糖酶活性显著正相关, 与土壤温度显著负相关(表3; 图5)。其可能原因, 一方面在于降水量增加提高了土壤水分有效性(杨阳等, 2021), 刺激了

土壤酶分泌和酶活性(朱湾湾等, 2021), 加快了植物地下部分资源获取并输送给地上部分, 从而促进了植物地上生物量积累(崔夺等, 2011)。较高的地上植被覆盖度减少了土壤地表裸露面积, 削弱了太阳直射, 降低了土壤温度(梁玲等, 2006); 另一方面, 降水量增加促进了植物生长, 同时加剧了土壤酸性离子淋溶流失、提高了土壤pH(脱云飞等, 2021), 使得植物生物量与土壤pH表现出正相关关系(Bai *et al.*, 2021)。此外, 降水量变化下草本樺状黄耆(豆科)种群生物量与土壤脲酶和磷酸酶活性负相关, 证实豆科植物与根瘤菌的共生作用使其在适度干旱环境下仍能保持高的生长水平(图3), 这一过程不仅消耗了土壤养分, 而且增加了植物-微生物间N和P竞争(Zhang *et al.*, 2021a), 抑制了微生物活性以及微生物酶分泌(朱湾湾等, 2021)。

荒漠草原植物多样性的显著变化是水分等环境因素长期作用的结果(孙岩等, 2018)。本研究中, Shannon-Wiener多样性指数和Patrick丰富度指数与土壤含水量、电导率和脲酶活性显著正相关(表4; 图6)。可能是由于降水量增加缓解了土壤水分和养分限制, 提高了土壤含水量(陈敏玲等, 2016)和交换性离子的可移动性。随着土壤中导电离子增加, 电导率也随之增大(安富博等, 2019)。同时, 随着土壤水分限制性降低, 土壤酶的分泌增多(朱湾湾等, 2021), 促进了大多数植物生长, 提高了群落多样性(Bai *et al.*, 2021)。然而随着植物种进一步生长, 植物对速效N和P消耗增多, 植物与微生物养分竞争增强(高江平等, 2021), Patrick丰富度指数和Shannon-Wiener多样性指数表现出与土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、速效P、微生物生物量P含量和微生物生物量C:N负相关关系(图6)。针对内蒙古温带草原的研究表明, Patrick丰富度指数和Shannon-Wiener多样性指数与土壤pH负相关(Bai *et al.*, 2021)。本研究中, Shannon-Wiener多样性指数与土壤pH的相关性较弱, Patrick丰富度指数与土壤pH呈较强的正相关关系, 这可能与降水量增加引起土壤酸性离子淋失有关(魏金明等, 2011), 有待进一步深入研究。

4 结论

综上, 整个生长季植物群落生物量、Patrick丰富度指数和Shannon-Wiener多样性指数呈先增加后降低的变化趋势, Pielou均匀度指数和Simpson优势

度指数无明显的时间动态; 与自然降水量相比, 降水量减少(尤其适度减少)对植物生物量和多样性影响较小, 反映了研究区植物强的干旱适应性; 降水量适度增加可通过提高土壤水分有效性、增强交换性离子移动性、刺激酶活性等途径, 促进部分植物生长, 但亦未明显改变植物多样性。降水量持续增加导致植物生物量增加, 植物耗水增多, 因而后期土壤水分不足, 部分植物提前完成生命周期, 造成植物多样性在生长季后期有所降低。此外, 受实验小区面积限制, 本研究的植被调查采用 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 方法进行。因荒漠草原植被稀疏, 空间异质性大, 在今后的研究中还需加大样方面积, 通过长期的实验观测深入理解降水量变化下荒漠草原植物多样性的影响机制。

致谢 感谢宁夏大学研究生创新项目(CXXM202233)的支持。

参考文献

- An FB, Zhang DK, Zhao JM, Chai CW, Zhao YL, Sun T (2019). Soil physical and chemical properties of different types of Gobi deserts in Hexi Corridor. *Soil and Water Conservation in China*, (6), 42-47. [安富博, 张德魁, 赵锦梅, 柴成武, 赵艳丽, 孙涛 (2019). 河西走廊不同类型戈壁土壤理化性质分析. *中国水土保持*, (6), 42-47.]
- Bai XH, Zhao WW, Wang J, Ferreira CSS (2021). Precipitation drives the floristic composition and diversity of temperate grasslands in China. *Global Ecology and Conservation*, 32, e01933. DOI: 10.1016/j.gecco.2021.e01933.
- Bunting EL, Munson SM, Villarreal ML (2017). Climate legacy and lag effects on dryland plant communities in the southwestern US. *Ecological Indicators*, 74, 216-229.
- Chelmeg, Liu XP, He YH, Sun SS, Wang MM (2020). Response of herbaceous plant community characteristics to short-term precipitation change in semi-arid sandy land. *Acta Prataculturae Sinica*, 29(4), 19-28. [车力木格, 刘新平, 何玉惠, 孙姗姗, 王明明 (2020). 半干旱沙地草本植物群落特征对短期降水变化的响应. *草业学报*, 29(4), 19-28.]
- Chen ML, Zhang BW, Ren TT, Wang SS, Chen SP (2016). Responses of soil moisture to precipitation pattern change in semiarid grasslands in Nei Mongol, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40, 658-668. [陈敏玲, 张兵伟, 任婷婷, 王姗姗, 陈世苹 (2016). 内蒙古半干旱草原土壤水分对降水格局变化的响应. *植物生态学报*, 40, 658-668.]
- Cheng LL, Guo H, Lu Q (2013). Review on the valuation of desert ecosystem service values. *Journal of Desert*

- Research*, 33(1), 281-287. [程磊磊, 郭浩, 卢琦 (2013). 荒漠生态系统服务价值评估研究进展. 中国沙漠, 33(1), 281-287.]
- Copeland SM, Harrison SP, Latimer AM, Damschen EI, Eskelinen AM, Fernandez-Going B, Spasojevic MJ, Anacker BL, Thorne JH (2016). Ecological effects of extreme drought on Californian herbaceous plant communities. *Ecological Monographs*, 86, 295-311.
- Cui D, Li YL, Wang XY, Zhao XY, Zhang TH (2011). Spatial distribution of aboveground biomass of grassland in desert and desertified regions in Northern China. *Journal of Desert Research*, 31, 868-872. [崔夺, 李玉霖, 王新源, 赵学勇, 张铜会 (2011). 北方荒漠及荒漠化地区草地上生物量空间分布特征. 中国沙漠, 31, 868-872.]
- Du Y, Wang DY, Ruan YL, Mo CX, Wang DG (2020). Study on temporal and spatial variation characteristics of precipitation structure in China in recent 40 years. *Water Power*, 46(8), 19-23. [杜懿, 王大洋, 阮俞理, 莫崇勋, 王大刚 (2020). 中国地区近40年降水结构时空变化特征研究. 水力发电, 46(8), 19-23.]
- Elser JJ, Fagan WF, Kerkhoff AJ, Swenson NG, Enquist BJ (2010). Biological stoichiometry of plant production: metabolism, scaling and ecological response to global change. *New Phytologist*, 186, 593-608.
- Eze S, Palmer SM, Chapman PJ (2018). Negative effects of climate change on upland grassland productivity and carbon fluxes are not attenuated by nitrogen status. *Science of the Total Environment*, 637-638, 398-407.
- Gao JP, Zhao RF, Zhang LH, Wang JF, Xie ZK (2021). Effects of precipitation changes on plant community diversity and soil C:N:P ecological stoichiometric characteristics in a desert steppe of China. *Environmental Science*, 42, 977-987. [高江平, 赵锐锋, 张丽华, 王军锋, 谢忠奎 (2021). 降雨变化对荒漠草原植物群落多样性与土壤C:N:P生态化学计量特征的影响. 环境科学, 42, 977-987.]
- Gherardi LA, Sala OE (2015). Enhanced precipitation variability decreases grass- and increases shrub-productivity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112, 12735-12740.
- Hautier Y, Tilman D, Isbell F, Seabloom EW, Borer ET, Reich PB (2015). Anthropogenic environmental changes affect ecosystem stability via biodiversity. *Science*, 348, 336-340.
- He YZ, Huang WD, Zhao X, Lv P, Wang HH (2021). Review on the impact of climate change on plant diversity. *Journal of Desert Research*, 41(1), 59-66. [何远政, 黄文达, 赵昕, 吕朋, 王怀海 (2021). 气候变化对植物多样性的影响研究综述. 中国沙漠, 41(1), 59-66.]
- Hu D, Lü GH, Wang HF, Yang Q, Cai Y (2021). Response of desert plant diversity and stability to soil factors based on water gradient. *Acta Ecologica Sinica*, 41, 6738-6748. [胡冬, 吕光辉, 王恒方, 杨启, 蔡艳 (2021). 水分梯度下荒漠植物多样性与稳定性对土壤因子的响应. 生态学报, 41, 6738-6748.]
- Hu XW, Wang YR, Wu YP (2004). Research progress on eco-physiological responses of desert grassland plants to drought conditions. *Acta Prataculturae Sinica*, 13(3), 9-15. [胡小文, 王彦荣, 武艳培 (2004). 荒漠草原植物抗旱生理生态学研究进展. 草业学报, 13(3), 9-15.]
- Huang JY, Yu HL, Liu JL, Ma F, Han L (2018). Effects of precipitation levels on the C:N:P stoichiometry in plants, microbes, and soils in a desert steppe in China. *Acta Ecologica Sinica*, 38, 5362-5373. [黄菊莹, 余海龙, 刘吉利, 马飞, 韩磊 (2018). 控雨对荒漠草原植物、微生物和土壤C、N、P化学计量特征的影响. 生态学报, 38, 5362-5373.]
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2021). *Climate Change: the Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Jia YY, Sun Y, Zhang T, Shi ZY, Maimaitaili B, Tian CY, Feng G (2020). Elevated precipitation alters the community structure of spring ephemerals by changing dominant species density in Central Asia. *Ecology and Evolution*, 10, 2196-2212.
- Jing GH, Chen ZK, Lu QQ, Zhang Z, Zhao N, He LY, Mao ZX, Li W (2021). Response of grassland community structure to short-term nitrogen addition and water addition with different management practices in the semi-arid loess region. *Acta Ecologica Sinica*, 41, 8192-8201. [井光花, 陈智坤, 路强强, 张昭, 赵宁, 贺丽燕, 毛祝新, 李伟 (2021). 半干旱黄土区不同管理措施下草地群落结构对短期氮、水添加的响应. 生态学报, 41, 8192-8201.]
- Li CB, Peng YF, Zhao DZ, Ning Y, Zhou GY (2016). Effects of precipitation change and nitrogen addition on community structure and plant diversity in an alpine steppe on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Research of Soil and Water Conservation*, 23(6), 185-191. [李长斌, 彭云峰, 赵殿智, 宁祎, 周国英 (2016). 降水变化和氮素添加对青藏高原高寒草原群落结构和物种多样性的影响. 水土保持研究, 23(6), 185-191.]
- Li HQ, Li YN, Zhang FW, Liu XQ, Wu QH, Mao SJ (2013). Water consumption of alpine meadow and the influence of the meteorological factors on the vegetation biomass accumulation. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 27(9), 176-181. [李红琴, 李英年, 张法伟, 刘晓琴, 吴启华, 毛绍娟 (2013). 高寒草甸植被耗水量及生物量积累与气象因子的关系. 干旱区资源与环境, 27(9), 176-181.]
- Liang L, Lü SH, Liu YP (2006). Numerical simulation of effect of vegetation changes of Loess Plateau on environment. *Plateau Meteorology*, 25, 575-582. [梁玲, 吕世华, 柳媛普 (2006). 黄土高原植被变化对环境影响的数值模拟.

- 高原气象, 25, 575-582.]
- Liu K, Nie GG, Zhang S (2020). Study on the spatiotemporal evolution of temperature and precipitation in China from 1951 to 2018. *Advances in Earth Science*, 35, 1113-1126. [刘凯, 聂格格, 张森 (2020). 中国1951-2018年气温和降水的时空演变特征研究. 地球科学进展, 35, 1113-1126.]
- Lu S, Hu ZY, Wang BP, Qin P, Wang L (2020). Spatio-temporal patterns of extreme precipitation events over China in recent 56 years. *Plateau Meteorology*, 39, 683-693. [卢珊, 胡泽勇, 王百朋, 秦佩, 王丽 (2020). 近56年中国极端降水事件的时空变化格局. 高原气象, 39, 683-693.]
- Ningxia Agricultural Exploration and Design Institute, Ningxia Animal Husbandry Bureau, Ningxia Agricultural College (1988). *Ningxia Vegetation*. Ningxia People's Publishing House, Yinchuan. [宁夏农业勘察设计院, 宁夏畜牧局, 宁夏农学院 (1988). 宁夏植被. 宁夏人民出版社, 银川.]
- Niu SL, Wu MY, Han Y, Xia JY, Li LH, Wan SQ (2008). Water-mediated responses of ecosystem carbon fluxes to climatic change in a temperate steppe. *New Phytologist*, 177, 209-219.
- Shang SS, Lian LS, Ma T, Zhang K, Han T (2018). Spatiotemporal variation of temperature and precipitation in northwest China in recent 54 years. *Arid Zone Research*, 35, 68-76. [商沙沙, 廉丽妹, 马婷, 张琨, 韩拓 (2018). 近54 a中国西北地区气温和降水的时空变化特征. 干旱区研究, 35, 68-76.]
- Spinoni J, Vogt JV, Naumann G, Barbosa P, Dosio A (2018). Will drought events become more frequent and severe in Europe? *International Journal of Climatology*, 38, 1718-1736.
- Sun XL, Kang S, Zhang Q, Chang CM, Ma WJ, Niu JM (2015). Relationship between species diversity, productivity, climatic factors and soil nutrients in the desert steppe. *Acta Prataculturae Sinica*, 24(12), 10-19. [孙小丽, 康萨如拉, 张庆, 常昌明, 马文静, 牛建明 (2015). 荒漠草原物种多样性、生产力与气候因子和土壤养分之间关系的研究. 草业学报, 24(12), 10-19.]
- Sun Y, He MZ, Wang L (2018). Effects of precipitation control on plant diversity and biomass in a desert region. *Acta Ecologica Sinica*, 38, 2425-2433. [孙岩, 何明珠, 王立 (2018). 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, 38, 2425-2433.]
- Tuo YF, Shen FY, Yang CP, Ma JM, Guo SN, Zhang D, Wu YZ (2020). Effects of rainfall on phosphorus, organic matter and pH in different land use types in middle Yunnan Plateau. *Ecology and Environmental Sciences*, 29, 942-950. [脱云飞, 沈方圆, 杨翠萍, 马继敏, 郭锁娜, 张岛, 吴耀中 (2020). 滇中高原降雨对不同地类土壤磷素、有机质和pH变化的影响. 生态环境学报, 29, 942-950.]
- Wang CH, Zhang SN, Zhang FM, Li KC, Yang K (2021). On the increase of precipitation in the Northwestern China under the global warming. *Advances in Earth Science*, 36, 980-989. [王澄海, 张晟宁, 张飞民, 李课臣, 杨凯 (2021). 论全球变暖背景下中国西北地区降水增加问题. 地球科学进展, 36, 980-989.]
- Wang CT, Wang QJ, Shen ZX, Peng HC, Li HY (2003). A preliminary study of the effect of simulated precipitation on an alpine *Kobresia humilis* meadow. *Acta Prataculturae Sinica*, 12(2), 25-29. [王长庭, 王启基, 沈振西, 彭红春, 李海英 (2003). 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, 12(2), 25-29.]
- Wang LJ, Wang P, Sheng MY (2018). Stoichiometric characteristics of soil nutrient elements and its influencing factors in typical karst rocky desertification ecosystems, Southwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 38, 6580-6593. [王霖娇, 汪攀, 盛茂银 (2018). 西南喀斯特典型石漠化生态系统土壤养分生态化学计量特征及其影响因素. 生态学报, 38, 6580-6593.]
- Wang LL (2016). *Dynamic of Ecological Environment of Fenced Grassland and Its Management in Yanchi County*. PhD dissertation, Beijing Forestry University, Beijing. [王黎黎 (2016). 盐池县封育条件下草地生态环境演变态势及草场管理. 博士学位论文, 北京林业大学, 北京.]
- Wang YH, Wang ZW, Pan ZL, Yan BL, Han MQ, Kang J, Han GD (2018). Effects of stocking rate and simulated precipitation on the plant diversity of desert steppe. *Chinese Journal of Grassland*, 40(2), 89-94. [王悦骅, 王忠武, 潘占磊, 闫宝龙, 韩梦琪, 康静, 韩国栋 (2018). 载畜率和模拟降水对荒漠草原植物物种多样性的影响. 中国草地学报, 40(2), 89-94.]
- Wei JM, Jiang Y, Fu MM, Zhang YG, Xu ZW (2011). Effects of water addition and fertilization on soil nutrient contents and pH value of typical grassland in Inner Mongolia. *Chinese Journal of Ecology*, 30, 1642-1646. [魏金明, 姜勇, 符明明, 张玉革, 徐柱文 (2011). 水、肥添加对内蒙古典型草原土壤碳、氮、磷及pH的影响. 生态学杂志, 30, 1642-1646.]
- Wu ZT, Dijkstra P, Koch GW, Peñuelas J, Hungate BA (2011). Responses of terrestrial ecosystems to temperature and precipitation change: a meta-analysis of experimental manipulation. *Global Change Biology*, 17, 927-942.
- Yang CY, Li EG, Chen HY, Zhang JH, Huang YM (2017). Biodiversity of natural vegetation and influencing factors in western Inner Mongolia. *Biodiversity Science*, 25, 1303-1312. [杨崇曜, 李恩贵, 陈慧颖, 张景慧, 黄永梅 (2017). 内蒙古西部自然植被的物种多样性及其影响因素. 生物多样性, 25, 1303-1312.]
- Yang Y, Zhang N, Jiang LL, Chen KL (2021). Effects of simulated precipitation on soil edaphic physicochemical factors and microbial community characteristics in Bird Island of Qinghai Lake on the Tibetan Plateau. *Acta*

- Agrestia Sinica*, 29, 1043-1052. [杨阳, 章妮, 蒋莉莉, 陈克龙 (2021). 青海湖高寒草地土壤理化性质及微生物群落特征对模拟降水的响应. *草地学报*, 29, 1043-1052.]
- Yao XY, Zhang MJ, Zhang Y, Wang JX, Xiao HY (2022). New understanding of climate transition in northwest China. *Arid Land Geography*, 45, 671-683. [姚旭阳, 张明军, 张宇, 王家鑫, 肖涵余 (2022). 中国西北地区气候转型的新认识. *干旱区地理*, 45, 671-683.]
- Zhang LM, Liu XP, Zhao XY, Zhang TH, Yue XF, Yun JY (2014). Response of sandy vegetation characteristics to precipitation change in Horqin Sandy Land. *Acta Ecologica Sinica*, 34, 2737-2745. [张腊梅, 刘新平, 赵学勇, 张铜会, 岳祥飞, 云建英 (2014). 科尔沁固定沙地植被特征对降雨变化的响应. *生态学报*, 34, 2737-2745.]
- Zhang RY, Schellenberg MP, Tian DS, Ma FF, Zhang TY, Wang H, Wu Q, Bai YT, Han GD, Niu SL (2021a). Shifting community composition determines the biodiversity-productivity relationship under increasing precipitation and N deposition. *Journal of Vegetation Science*, 32, e12998. DOI: 10.1111/jvs12998.
- Zhang Y, Xie YZ, Ma HB, Zhang J, Jing L, Wang YT, Li JP (2021b). The influence of climate warming and humidity on plant diversity and soil bacteria and fungi diversity in desert grassland. *Plants*, 10, 2580. DOI: 10.3390/plants10122580.
- Zhong MX, Song J, Zhou ZX, Ru JY, Zheng MM, Li Y, Hui DF, Wan SQ (2019). Asymmetric responses of plant community structure and composition to precipitation variabilities in a semi-arid steppe. *Oecologia*, 191, 697-708.
- Zhu GD, Guo N, Han YJ, Lv GY, Wang ZY, Wang CJ (2021). Effects of extreme drought on plant diversity and soil properties of Inner Mongolian desert steppe. *Chinese Journal of Grassland*, 43(3), 52-59. [朱国栋, 郭娜, 韩勇军, 吕广一, 王占义, 王成杰 (2021). 极端干旱对内蒙古荒漠草原植物群落物种多样性和土壤性质的影响. *中国草地学报*, 43(3), 52-59.]
- Zhu WW, Wang P, Xu YX, Li CH, Yu HL, Huang JY (2021). Soil enzyme activities and their influencing factors in a desert steppe of northwestern China under changing precipitation regimes and nitrogen addition. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 45, 309-320. [朱湾湾, 王攀, 许艺馨, 李春环, 余海龙, 黄菊莹 (2021). 降水量变化与氮添加下荒漠草原土壤酶活性及其影响因素. *植物生态学报*, 45, 309-320.]
- Zuo XA, Cheng H, Zhao SL, Yue P, Liu XP, Wang SK, Liu LX, Xu C, Luo WT, Knops JMH, Medina-Roldán E (2020). Observational and experimental evidence for the effect of altered precipitation on desert and steppe communities. *Global Ecology and Conservation*, 21, e00864. DOI: 10.1016/j.gecco.2019.e00864.

责任编辑: 张元明 责任编辑: 乔鲜果