

黄土高原 4 种植被带草本群落特征 及其对降水变化的响应

姜基春¹, 王国强¹, 郭 宁^{2,3}, 焦 峰^{1,2*}

(1 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨陵 712100; 2 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨陵 712100; 3 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:以黄土高原草本群落为研究对象, 选取陕西省榆林市榆阳区至延安市富县的 4 种植被带, 测定草本群落物种多样性和生物量, 结合研究区近 20 年的气象数据资料, 分析 4 种植被带草本群落物种多样性和生物量的分布特征以及它们对降水变化的响应规律, 以为黄土高原植被恢复和水土保持生态建设提供参考。结果表明: (1) 4 种植被带草本群落 Margalef 指数、Pielou 指数以及 Shannon-Wiener 指数均为草原-荒漠带数值最小, 森林带数值最大, 且都随着年均降水量的增加呈先增大后减小的变化趋势, 最大值都出现在森林-草原带。(2) 地上、地下和总生物量的大小顺序均为草原-荒漠带 < 森林带 < 草原带 < 森林-草原带, 它们随着年均降水量的增加呈“单峰曲线”的变化趋势, 曲线的拐点都出现在森林-草原带; 地下/地上生物量与年均降水量之间存在显著正相关关系。

关键词:草本群落; 物种多样性; 生物量; 降水变化

中图分类号: Q948.112

文献标志码: A

Herbaceous Community Characteristics of Four Vegetation Belts and Their Responses to Precipitation Changes in the Loess Plateau

JIANG Jichun¹, WANG Guoqiang¹, GUO Ning^{2,3}, JIAO Feng^{1,2*}

(1 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In this paper, herbaceous communities in the Loess Plateau were taken as research object, four vegetation belts from Yuyang, Yulin, Shaanxi to Fuxian, Yan'an, Shaanxi were selected to measure species diversity and biomass of herbaceous communities, combined with the meteorological data of the last 20 years in the study area. The distribution characteristics of species diversity and biomass of herbaceous communities in the four vegetation belts and their response rules to precipitation changes were analyzed, so as to provide references for vegetation restoration and ecological construction of soil and water conservation in the Loess Plateau. The results showed that: (1) Margalef index, Pielou index and Shannon-Wiener index of herbaceous communities in the four vegetation belts were the smallest values in the grass-desert belt and the largest values in the forest belt. The values increased first and then decreased with the increase of annual average precipitation, and the maximum values all appeared in the forest-grass belt. (2) The order

收稿日期: 2019-07-05; 修改稿收到日期: 2019-09-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFA0600801)和科技基础性工作专项(2014FY210130)

作者简介: 姜基春(1996-), 男, 在读硕士研究生, 研究方向为水土保持效益评价。E-mail: 2466769192@qq.com

* 通信作者: 焦 峰, 副教授, 主要从事水土保持效益评价研究。E-mail: Jiaof@ms. iswc. ac. cn

of aboveground, underground and total biomass is grass-desert belt < forest belt < grass belt < forest-grass belt. With the increase of annual average precipitation, they showed a trend of "single peak curve", and the inflection points of the curves all appeared in forest-grass belt. There is a significantly positive correlation between underground/aboveground biomass and annual average precipitation.

Key words: herbaceous community; species diversity; biomass; precipitation changes

气候变化与人类活动引起的植被覆盖率降低是黄土高原水土流失的重要原因^[1]。近年来,随着国家对生态文明建设的重视以及相关法律法规的颁布落实,过度农垦放牧等破坏植被的现象已明显减少,植被恢复取得很大进展,黄土高原的水土流失与自然生态状况不断改善^[2-4]。但以降水格局改变为标志的气候变化仍是黄土高原地区植被恢复的一大威胁,研究气候变化对植被的影响也是当前黄土高原水土流失治理的热点^[5]。

物种多样性与生物量是群落特征的重要组成部分。群落的物种多样性是指群落在物种组成、分布格局和种间关系等方面所表现出的差异^[6],物种多样性的变化对群落的抵抗力和恢复力有明显影响^[7],而生物量既能直观反映群落的质量特征,又能准确地评价植物群落的初级生产力^[8]。草地是黄土高原干旱和半干旱地区的植被主体,而且草本群落又是其中的优势群落^[9],同时水分是草本群落生长发育阶段的主要限制因子,因此降水变化势必会影响到物种的生长性状、物候、种间关系等因素,进而对草本群落特征造成影响^[10-11]。研究草本群落物种多样性和生物量对降水变化的响应有利于预测气候变化背景下黄土高原植被生长发育情况、掌握区域间植被变化动态。

有关群落特征与降水之间的关系已有众多学者相继开展了研究^[12-17],但大部分的实验设计都是通过人为控制实验来模拟降水的变化,缺乏自然条件下的相关研究。黄土高原地区的降水大体呈现自东南向西北递减的趋势,因此本研究利用该天然降水梯度由北至南选取黄土高原部分地区(榆林市的榆阳区、横山县、靖边县和延安市安塞县、甘泉县、富县)的4种植被带的草本群落为研究对象,探讨4种植被带的草本群落特征以及它们对降水变化的响应规律,旨在为黄土高原地区以后的植被恢复和水土保持生态建设提供参考。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

本实验研究区域地处 35.95°~38.36°N、

107.97°~109.87°E,植被类型从中温带荒漠草原向暖温带森林过渡。根据不同纬度结合植被类型的变化将研究区划分为4种植被带(表1):森林带(35.95°~36.79°N)、森林-草原带(36.79°~37.27°N)、草原带(37.27°~37.83°N)和草原-荒漠带(37.83°~38.36°N)。区域海拔为1015~1600 m,年平均降水量332~633 mm,年平均气温为6.12~9.11℃,土壤类型主要为黄绵土,主要土地利用方式为耕地、草地和林地。研究区主要草本植物类型为旱生根茎类,优势种有达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集和处理 在2012年8月沿制定的调查路线出发,在不同的纬度下依次选取15个样地,每一个样地的生境条件相差不大。试验中在每个样地布设1 m×1 m大小的样方,重复4次,记录样地内草本植物的种类、多度、高度和盖度,同时利用收获法获取4个样方内所有草本植物的地上部分,编号后装入信封。地下部分利用土钻法取样,土钻内径7.0 cm,在各个样地随机选择10个点,按0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm分层钻取,编号后装入自封袋。

1.2.2 生物量测定 将采集的植物样品带回实验室后,地上部分在烘箱中于105℃下烘10 min进行杀青,然后在70℃下烘至恒重后进行称重。地下部分用筛孔为0.1 mm筛子在流水下反复冲洗到没有可见泥土,晾干后再置于烘箱内在70℃下烘至恒重后进行称重。每个样地的地下生物量通过下列公式计算:

地下生物量($g \cdot m^{-2}$) = 样地所有土芯的平均细根重(g) / $\{\pi \times [0.07 (m) / 2]^2\}$

1.2.3 物种多样性计算 本文选用 Margalef 物种丰富度指数, Pielou 物种均匀度指数和 Shannon-Wiener 物种多样性指数3个指标来表征草本群落的物种多样性^[6]。4种植被带的3个指标的取值对应样地内各个样方的平均值。

计算公式如下:

表 1 采样点基本概况
Table 1 Basic situation of sampling points

植被带 Vegetation belt	样地 Site	纬度 Latitude /°	海拔 Altitude /m	物种数 Species number	主要草本植物类型 Main herbaceous plant type
森林带 Forest belt	A	35.95	1 100	13	长芒草、蒲公英、茜草 <i>Stipa bungeana</i> , <i>Taraxacum mongolicum</i> , <i>Rubia cordifolia</i>
	B	36.22	1 105	11	长芒草、芦苇、败酱 <i>Stipa bungeana</i> , <i>Phragmites australis</i> , <i>Patrinia scabiosaeifolia</i>
	C	36.35	1 015	12	长芒草、蒲公英、达乌里胡枝子 <i>Stipa bungeana</i> , <i>Taraxacum mongolicum</i> , <i>Lespedeza davurica</i>
	D	36.72	1 100	10	长芒草、芦苇、蒲公英 <i>Stipa bungeana</i> , <i>Phragmites australis</i> , <i>Taraxacum mongolicum</i>
森林-草原带 Forest-grass belt	E	36.88	1 300	9	长芒草、铁杆蒿、黄花草木樨 <i>Stipa bungeana</i> , <i>Artemisia gmelinii</i> , <i>Melilotus officinalis</i>
	F	36.89	1 330	7	长芒草、风毛菊、草木樨状黄芪 <i>Stipa bungeana</i> , <i>Saussurea japonica</i> , <i>Astragalus melilotoides</i>
	G	37.03	1 300	11	达乌里胡枝子、鬼针草、铁杆蒿 <i>Lespedeza davurica</i> , <i>Bidens pilosa</i> , <i>Artemisia gmelinii</i>
	H	37.20	1 277	8	铁杆蒿、芦苇、阿尔泰狗娃花 <i>Artemisia gmelinii</i> , <i>Phragmites australis</i> , <i>Heteropappus altaicus</i>
草原带 Grass belt	I	37.33	1 500	13	长芒草、茵陈蒿、香青兰 <i>Stipa bungeana</i> , <i>Artemisia capillaris</i> , <i>Dracocephalum moldavica</i>
	J	37.46	1 500	7	长芒草、沙蒿、达乌里胡枝子 <i>Stipa bungeana</i> , <i>Artemisia desertorum</i> , <i>Lespedeza davurica</i>
	K	37.67	1 600	7	远志、牻牛儿苗、香青兰 <i>Polygala tenuifolia</i> , <i>Erodium stephanianum</i> , <i>Dracocephalum moldavica</i>
	L	37.79	1 400	12	黑沙蒿、长芒草、猪毛蒿 <i>Artemisia ordosica</i> , <i>Stipa bungeana</i> , <i>Artemisia scoparia</i>
草原-荒漠带 Grass-desert belt	M	37.95	1 100	6	沙蒿、猪毛蒿、阿尔泰狗娃花 <i>Artemisia desertorum</i> , <i>Artemisia scoparia</i> , <i>Heteropappus altaicus</i>
	N	38.13	1 148	6	沙蒿、猪毛蒿、沙打旺 <i>Artemisia desertorum</i> , <i>Artemisia scoparia</i> , <i>Astragalus adsurgens</i>
	O	38.36	1 205	6	沙蒿、猪毛蒿、达乌里胡枝子 <i>Artemisia desertorum</i> , <i>Artemisia scoparia</i> , <i>Lespedeza davurica</i>

Margalef 物种丰富度指数: $D = (S - 1) / \ln N$

Pielou 物种均匀度指数: $E = H / \ln S$

Shannon-Wiener 物种多样性指数: $H =$

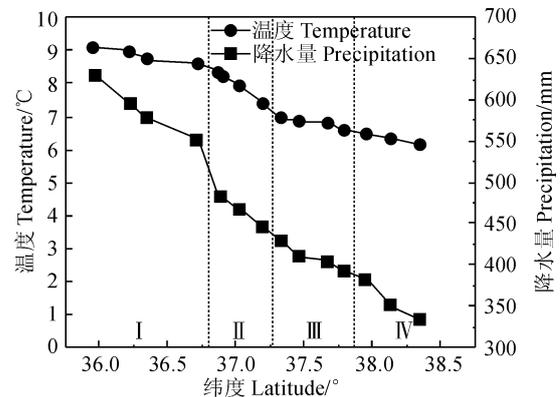
$$-\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$

式中: S 表示样方中出现的物种数, N 表示样方中所有物种的数量, P_i 表示物种 i 的相对优势度。

1.2.4 地形和气象数据的收集 各个样地的经度、纬度、海拔全部通过 GPS 仪获取,气象数据则依据陕西省各县 1990 至 2010 年的气象资料,采用克里格(Kriging)插值法^[18],通过 ArcGIS 软件获取各个样地的年平均气温、年降水量,取 20 年平均值以供使用(图 1)。

1.3 数据处理

在进行数据分析之前先对所有数据进行单个样本 K-S 检验,由于比值数据不符合正态分布,在对地下/地上生物量进行方差分析前需要先取自然对



I. 森林带; II. 森林-草原带; III. 草原带; IV. 草原-荒漠带,下同
图 1 4 种植被带年均温与降水变化

I. Forest belt; II. Forest-grass belt; III. Grass belt; IV. Grass-desert belt; The same as below

Fig. 1 Annual average temperature and precipitation change of four vegetation belts

数,其他各类数据均服从正态分布。然后使用 SPSS 22 对 4 种植被带的草本群落物种多样性和生物量进行方差分析,4 种植被带的草本群落物种多样性

与生物量和年均降水之间依次进行相关分析和回归分析。

2 结果与分析

2.1 4种植被带草本群落特征

森林-草原带和草原带的 Margalef 指数以及 Shannon-Wiener 指数差异不显著(表 2), 森林带和草原-荒漠带与其他植被带的 Margalef 指数以及 Shannon-Wiener 指数均存在显著差异 ($P < 0.05$)。就 Pielou 指数而言, 森林带、森林-草原带和草原带三者相互之间差异不显著, 但三者与草原-荒漠带差异显著 ($P < 0.05$)。Pielou 指数与 Shannon-Wiener 指数的大小顺序均为: 草原-荒漠带 < 草原带 < 森林-草原带 < 森林带, Margalef 指数的大小顺序为: 草原-荒漠带 < 森林-草原带 < 草原带 < 森林带, 总的来说, 4种植带带的草本植物 Margalef 指数、Pielou 指数以及 Shannon-Wiener 指数都是草原-荒漠带数值最小, 森林带数值最大。

4种植带带草本群落地上、地下和总生物量的大小顺序都是草原-荒漠带 < 森林带 < 草原带 < 森林-草原带, 地下/地上生物量大小范围为 0.93 ~ 4.49 (表 3)。其中, 对地上生物量而言, 森林带和森林-草原带间差异显著 ($P < 0.05$), 二者与草原带之间差异不显著, 草原-荒漠带与其他植被带之间差

异均比较显著 ($P < 0.05$); 对地下生物量和总生物量而言, 森林带和草原带差异不显著, 二者与森林-草原带和草原-荒漠带均差异显著 ($P < 0.05$); 对地下/地上生物量而言, 森林带和森林-草原带没有显著差异, 草原带和草原-荒漠带与其他植被带之间差异显著 ($P < 0.05$)。

2.2 4种植带带草本群落物种多样性对降水变化的响应

4种植带带的年均降水量从 332 mm 增加到 633 mm, 呈现从北到南逐渐增加的趋势, 植被带的 Margalef 指数 ($R^2 = 0.699, P < 0.01$)、Pielou 指数 ($R^2 = 0.664, P < 0.01$) 以及 Shannon-Wiener 指数 ($R^2 = 0.628, P < 0.05$) 受年均降水量影响显著, 随着年均降水量的增加大致呈现先增大后减小的变化趋势, 最大值都出现在森林-草原带(图 2)。

2.3 4种植带带草本群落生物量对降水变化的响应

草本群落地上、地下以及总生物量与年均降水量之间存在极显著的相关关系 ($P < 0.001$) (图 3)。随着年均降水量的增加, 草本群落地上、地下以及总生物量呈现“单峰曲线”的变化趋势, 曲线的拐点均出现在森林-草原带。草本群落地下/地上生物量与年均降水量之间存在显著正相关关系 ($R^2 = 0.506, P < 0.05$)。

表 2 4种植带带草本群落物种多样性比较

Table 2 Comparison of species diversity of herbaceous communities in four vegetation belts

植被带 Vegetation belt	Margalef 指数 Margalef index	Pielou 指数 Pielou index	Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index
森林带 Forest belt	3.48 ± 0.43a	0.87 ± 0.02a	2.71 ± 0.21a
森林-草原带 Forest-grass belt	3.41 ± 0.51b	0.76 ± 0.03a	2.47 ± 0.14b
草原带 Grass belt	3.44 ± 0.34b	0.74 ± 0.05a	2.43 ± 0.16b
草原-荒漠带 Grass-desert belt	2.89 ± 0.46c	0.54 ± 0.11b	2.23 ± 0.25c

注: 同列数据之间的不同小写字母代表不同植被带在 0.05 水平下差异显著; 下同

Note: Different lowercase letters of data in the same column mean that different vegetation belts are significantly different at 0.05 level; The same as below

表 3 4种植带带草本群落生物量比较

Table 3 Comparison of biomass of herbaceous communities in four vegetation belts

植被带 Vegetation belt	地上生物量 Aboveground biomass ($g \cdot m^{-2}$)	地下生物量 Underground biomass ($g \cdot m^{-2}$)	总生物量 Total biomass ($g \cdot m^{-2}$)	地下/地上生物量 Underground /Aboveground biomass
森林带 Forest belt	144.86 ± 10.4b	496.43 ± 22.4b	641.29 ± 32.4b	3.48 ± 0.098a
森林-草原带 Forest-grass belt	191.21 ± 13.5a	672.65 ± 39.3a	863.86 ± 39.3a	3.55 ± 0.044a
草原带 Grass belt	178.80 ± 14.7ab	497.99 ± 23.9b	676.80 ± 33.9b	2.78 ± 0.036b
草原-荒漠带 Grass-desert belt	98.35 ± 9.5c	123.28 ± 10.8c	221.63 ± 11.8c	1.40 ± 0.029c

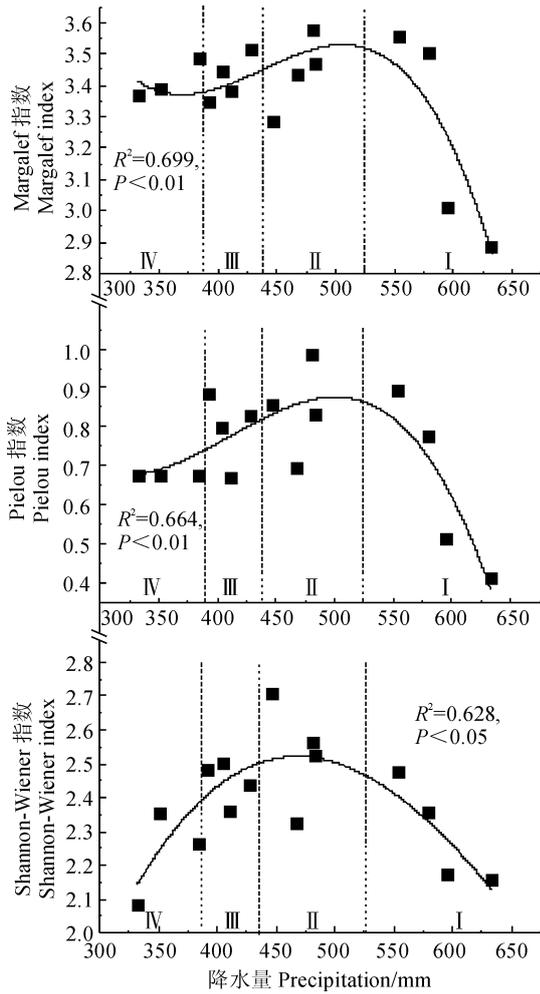


图 2 4 种植带草本群落物种多样性随年均降水量的变化规律

Fig. 2 Variation of species diversity of herbaceous communities in four vegetation belts with average annual precipitation

3 讨论

3.1 4 种植带草本群落物种多样性与生物量分布特征

物种多样性的变化与降水条件密切相关,从森林带到草原-荒漠带由于降水减少,草本植物的生长受到限制,致使 Margalef 指数、Pielou 指数和 Shannon-Wiener 指数在草原-荒漠带数值最小,森林带数值最大。但是本研究中森林-草原带和草原带的 Margalef 指数以及 Shannon-Wiener 指数的数值存在交替变化不同于张钦弟等研究中的线性递减趋势^[19],这可能是因为本实验重点研究了陕西境内的 4 种植带,空间尺度略显不足使得草原带和森林-草原带的物种多样性变化规律存在偏差。

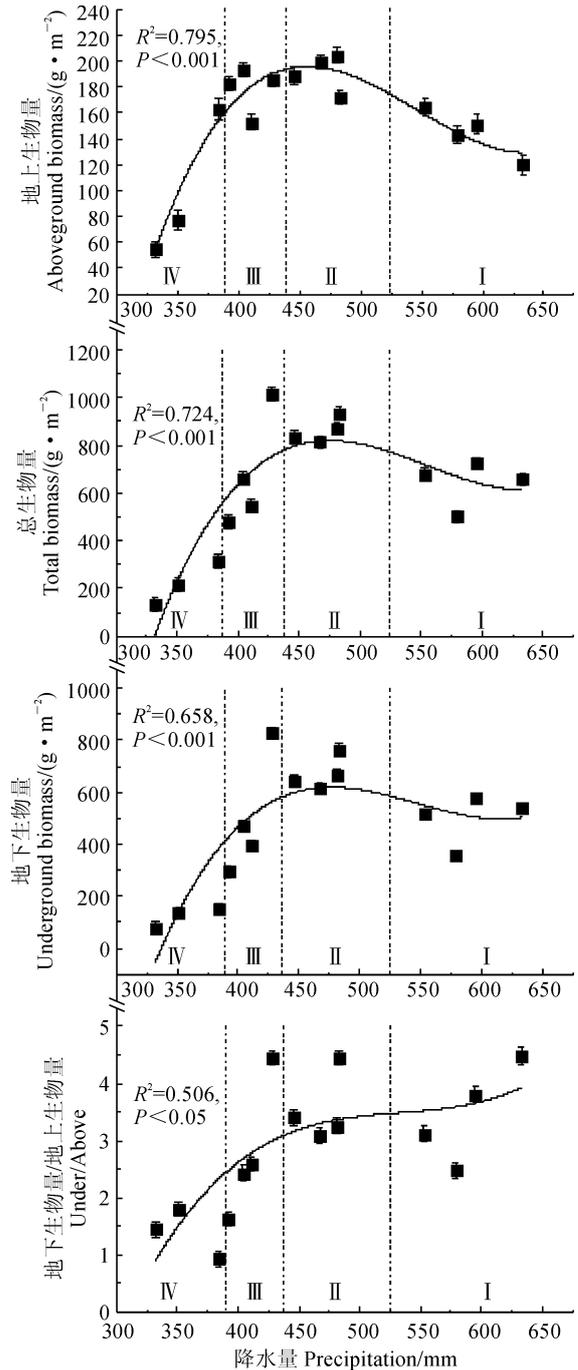


图 3 4 种植带草本群落生物量随年均降水量的变化规律

Fig. 3 Variation of biomass of herbaceous communities in four vegetation belts with average annual precipitation

已有很多研究表明,植物生物量在纬度梯度上的分布具有明显的空间变异性,由于纬度变化引起的水热梯度变化直接影响草本群落的生长发育,其中水分更是影响陕西天然草地生物量大小的关键因素^[20],本研究中 4 种植带草本群落生物量大致符合纬度梯度上由南到北递减的趋势,但森林带的草

本群落生物量低于森林-草原带和草原带,这应该是由于本研究只考虑草本群落生物量而没有算入乔木和灌木的生物量,物种结构的不同会给草本群落生物量的比较带来影响。

3.2 4种植被带草本群落物种多样性对降水变化的响应规律

本研究中4种植被带草本群落物种多样性随着年均降水量的增加呈现先增大后减小的变化趋势,这与白永飞等研究中草本群落物种多样性与年均降水量呈正相关的结论并不一致。这可能是由于草本群落在水分梯度上的物种多样性也会受优势种和次生优势种竞争的影响^[21]。随着降水量的增多,植物可以利用的水分增加,种群之间对于资源的竞争较弱,草本群落物种多样性随之增加,但当物种数增加到一定程度时,种间与种内的竞争都变得激烈,种内弱小个体生长被抑制,种间弱势种被淘汰。本研究中物种多样性降低区域正处于森林-草原带和森林带,乔木与灌木的出现更是加重了草本群落之间的竞争,最终导致草本群落物种多样性降低。

3.3 4种植被带草本群落生物量对降水变化的响应规律

本研究中4种植被带草本群落生物量随年均降水增加呈“单峰曲线”的变化趋势也不同于张志南等研究中草本群落生物量与水分呈正相关的发现^[22],这是因为在草原-荒漠带时降水稀少,草本植物的生长发育由于水分胁迫受到限制。当降水不断增加,

水分胁迫现象得以缓解,草本群落生物量随之增加;但当降水增加到草本植物可以利用的水分上限时,反而会抑制植被呼吸等生理生化反应,使得植被高度、盖度和密度下降,最终导致植被生物量出现下降趋势。也有可能是森林-草原带和森林带乔木与灌木的出现,对草本植物生长所需水分产生大量掠夺,致使草本群落生物量减少。

地下/地上生物量的变化可以体现植物的生长策略^[23]。王妮等^[24]通过分析相关数据发现中国北方天然草地的地下/地上生物量随年均降水增加而显著降低,而马文红等在内蒙古温带草原的研究中发现草本群落地下/地上生物量与年均降水间没有显著相关关系^[25]。本研究中发现年均降水和地下/地上生物量之间基本呈正相关,这是因为地下/地上生物量的大小取决于植物光合产物的分配模式。随着降水的减少,草本植物之间对于水分的竞争变得激烈,为了物种的生存与延续,更多的光合产物被分配到地上部分以保证植株正常的生长发育与繁殖^[26-27],从而导致地下/地上生物量数值减小。由于地下根系采集困难,同时缺乏统一的采集标准,不同的采集方法与不同采样区域的选择对地下/地上生物量都有影响,这是造成许多相关研究结果各异的重要原因。有关地下/地上生物量随降水变化的规律和原因还需要日后更加科学统一的测量方法与更加长期系统的研究进行揭示。

参考文献:

- [1] 谢宝妮. 黄土高原近30年植被覆盖变化及其对气候变化的响应[D]. 陕西杨陵:西北农林科技大学,2016.
- [2] 邓景成,高鹏,穆兴民,等. 黄土高原退耕还林工程对生态环境的影响及对策建议[J]. 水土保持研究,2017,24(5): 63-68. DENG J C, GAO P, MU X M, et al. Impacts and advice of the grain for green project to ecological environment on the Loess Plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(5): 63-68.
- [3] 冯舒,赵文武,陈利顶,等. 2010年来黄土高原景观生态研究进展[J]. 生态学报,2017,37(12): 3 957-3 966. FENG S, ZHAO W W, CHEN L D, et al. Advances in landscape ecology in the Loess Plateau since 2010 in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(12): 3 957-3 966.
- [4] 赵安周,张安兵,刘海新,等. 退耕还林(草)工程实施前后黄土高原植被覆盖时空变化分析[J]. 自然资源学报,2017,32(3): 449-460. ZHAO A Z, ZHANG A B, LIU H X, et al. Spatiotemporal variation of vegetation coverage before and after implementation of grain for green project in the Loess Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(3): 449-460.
- [5] 薛梅. 基于文献计量学的我国黄土高原水土流失治理发展特点及前景[D]. 陕西杨陵:西北农林科技大学,2018.
- [6] 马克平,黄建辉,于顺利,等. 北京东灵山山区植物群落多样性的研究: II. 丰富度、均匀度和物种多样性指数[J]. 生态学报, 1995, (3): 268-277. MA K P, HUANG J H, YU S L, et al. Plant community diversity in Dongling Mountain, Beijing, China; II. Species richness, evenness and species diversities[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, (3): 268-277.
- [7] TILMAN D, HADDI A. Drought and biodiversity in grasslands[J]. *Oecologia*, 1992, 89(2): 257-264.
- [8] 张建设,王刚. 植物生物量研究综述[J]. 四川林业科技, 2014, 35(1): 44-48. ZHANG J S, WANG G. A review of researches on plant biomass[J]. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 2014, 35(1): 44-48.
- [9] 方昭,张少康,刘海威,等. 黄土丘陵区草本群落生物量空间

- 分布格局及其影响因素[J]. 草业学报,2018,27(2): 26-35.
FANG Z,ZHANG S K,LIU H W,*et al.* Distribution of herbaceous community biomass and its relationship with influencing factors in the Loess Hilly Region[J]. *Acta Prataculturae Sinica*,2018,27(2): 26-35.
- [10] 牛书丽,万师强,马克平. 陆地生态系统及生物多样性对气候变化的适应与减缓[J]. 中国科学院院刊,2009,24(4): 421-427.
NIU S L,WAN S Q,MA K P. Acclimation and mitigation of terrestrial ecosystem and biodiversity to climate change[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*,2009,24(4): 421-427.
- [11] WELTZIN J F,LOIK M E,SCHWINNING S,*et al.* Assessing the response of terrestrial ecosystems to potential changes in precipitation[J]. *Bioscience*,2003,53(10): 941-952.
- [12] 周双喜,吴冬秀,张琳,等. 降雨格局变化对内蒙古典型草原优势种大针茅幼苗的影响[J]. 植物生态学报,2010,34(10): 1 155-1 164.
ZHOU S X,WU D X,ZHANG L,*et al.* Effects of changing precipitation patterns on seedlings of *Stipa grandis*, a dominant plant of typical grassland of Inner Mongolia, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*,2010,34(10): 1 155-1 164.
- [13] 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): 2 737-2 745.
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): 2 737-2 745.
- [14] WHITNEY M,DANA M B,KARIE C,*et al.* Climatic controls of aboveground net primary production in semi-arid grasslands along a latitudinal gradient portend low sensitivity to warming[J]. *Oecologia*,2015,177(4): 959-969.
- [15] LAMARQUE P,LAVOREL S,MOUCHET M,*et al.* Plant trait-based models identify direct and indirect effects of climate change on bundles of grassland ecosystem services[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*,2014,111(38): 13 751-13 756.
- [16] 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[J]. 生态学报,2018,38(7): 2 425-2 433.
SUN Y,HE M Z,WANG L. Effects of precipitation control on plant diversity and biomass in a desert region[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2018,38(7): 2 425-2 433.
- [17] 李长斌,彭云峰,赵殿智,等. 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[J]. 水土保持研究,2016,23(6): 185-191.
LI C B,PENG Y F,ZHAO D Z,*et al.* Effects of precipitation change and nitrogen addition on community structure and plant diversity in an alpine steppe on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*,2016,23(6): 185-191.
- [18] 王艳妮,谢金梅,郭祥. ArcGIS 中的地统计克里格插值法及其应用[J]. 软件导刊,2008,7(12): 36-38.
WANG Y N,XIE J M,GUO X. Application of Geostatistical interpolation method in ArcGIS[J]. *Software Guide*,2008,7(12): 36-38.
- [19] 张钦弟,卫伟,陈利顶,等. 黄土高原草地土壤水分和物种多样性沿降水梯度的分布格局[J]. 自然资源学报,2018,33(8): 1 351-1 362.
ZHANG Q D,WEI W,CHEN L D,*et al.* Spatial variation of soil moisture and species diversity patterns along a precipitation gradient in the grasslands of the Loess Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*,2018,33(8): 1 351-1 362.
- [20] 邓蕾,上官周平. 陕西省天然草地生物量空间分布格局及其影响因素[J]. 草地学报,2012,20(5): 825-835.
DENG L,SHANGGUAN Z P. Distribution of natural grassland biomass and its relationship with influencing factors in Shaanxi[J]. *Acta Agrestia Sinica*,2012,20(5): 825-835.
- [21] WU G L,REN G H,WANG D,*et al.* Above- and below-ground response to soil water change in an alpine wetland ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau, China [J]. *Journal of Hydrology*,2013,476:120-127.
- [22] 张志南,武高林,王冬,等. 黄土高原半干旱区天然草地群落结构与土壤水分关系[J]. 草业学报,2014,23(6) 313-319.
ZHANG Z N,WU G L,WANG D,*et al.* Plant community structure and soil moisture in the semi-arid natural grassland of the Loess Plateau[J]. *Acta Prataculturae Sinica*,2014,23(6): 313-319.
- [23] WANG L,NIU K C,YANG Y H,*et al.* Patterns of above- and belowground biomass allocation in China's grasslands: evidence from individual-level observations[J]. *Sci China: Life Sci*,2010,53:851-857.
- [24] 王妮,彭书时,方精云. 中国北方天然草地的生物量分配及其对气候的响应[J]. 干旱区研究,2008,(1): 90-97.
WANG W,PENG S S,FANG J Y. Biomass distribution of natural grasslands and its response to climate change in North China[J]. *Arid Zone Research*,2008,(1): 90-97.
- [25] 马文红,方精云. 内蒙古温带草原的根冠比及其影响因素[J]. 北京大学学报(自然科学版),2006,(6): 774-778.
MA W H,FANG J Y. RBS ratios of temperate steppe and the environmental controls in Inner Mongolia[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*,2006,(6): 774-778.
- [26] 唐庄生,安慧,上官周平. 荒漠草原沙漠化对土壤养分与植被根冠比的影响[J]. 草地学报,2015,23(3): 463-468.
TANG Z S,AN H,SHANGGUAN Z P. Effects of desertification on soil nutrients and root-shoot ratio in desert steppe [J]. *Acta Agrestia Sinica*,2015,23(3): 463-468.
- [27] 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.
LI X H,LI X L,JIANG D M,*et al.* A comparative study of the individual biomass and modular biomass of 70 herbaceous species found in the Horqin sandy land[J]. *Arid Zone Research*,2009,26(2): 200-205.

(编辑:潘新社)