

宁夏荒漠草原 4 种典型植物群落生物量时空动态特征及其影响因素

王学琴¹, 张小菊¹, 沈艳^{1,2,3,4*}, 聂明鹤¹, 邱开阳^{1,2,3,4}

(1. 宁夏大学林业与草业学院, 宁夏 银川 750021; 2. 农业农村部饲草高效生产模式创新重点实验室, 宁夏 银川 750021; 3. 宁夏回族自治区草牧业工程技术研究中心, 宁夏 银川 750021; 4. 西北土地退化与生态恢复省部共建国家重点实验室培育基地, 宁夏 银川 750021)

摘要:【目的】探究草原植物群落生物量时空动态特征及影响因素。【方法】以宁夏荒漠草原 4 种典型植物群落: 牛枝子(*Lespedeza potaninii*)、赖草(*Leymus secalinus*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)和白草(*Pennisetum flaccidum*)群落为研究对象, 调查分析 4 种植物群落地上、地下生物量时空动态特征及其影响因素。【结果】生长季内, 各植物群落地上生物量变化呈单峰形(峰值出现在 8 月), 地下生物量变化呈双峰形(峰值分别出现在 5 月和 9 月); 地下生物量主要分布于 0~15 cm 土层, 并随土层加深地下生物量呈递减趋势。植物群落地上、地下生物量线性拟合模型表明, 牛枝子群落、短花针茅群落和白草群落地上生物量与地下生物量呈极显著正相关($P < 0.01$), 赖草群落为极显著负相关($P < 0.01$); 群落物种多样性与生物量呈二次函数模型。冗余分析表明, 生长季蒸发量(AE)、最高温度(MT)和平均气温(AT)是影响生物量变化的主要因素。随机森林模型表明, 相较于土壤理化性质, 气候因子是预测植被生物量变化的重要变量, 其中湿度影响最大。【结论】本研究为理解植物地上、地下生物量分配调控机制提供了理论基础, 对系统了解宁夏荒漠草原植物群落净初级生产力时空动态变化具有指导意义。

关键词: 荒漠草原; 地上生物量; 地下生物量; 影响因素; 时空动态

中图分类号: S812 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-5500(2024)06-0109-10

DOI: 10.13817/j.cnki.cyyep.2024.06.012



近年来, 全球气候变化与植物生物量的关系越来越受到人们的关注^[1]。土壤资源的可用性^[2]和食草动物践踏等因素通过改变土壤容重影响植物群落地下生物量^[3]。研究表明, 土壤养分和气候是驱动草原生物量变化的重要因素^[4-5], 气温和降水等气候因素会

对草原地上生物量产生重要影响^[6]。干旱、半干旱地区因植被结构和环境的独特性, 对植物群落生物量有潜在影响^[7]。宁夏荒漠草原地处干旱地区, 土壤水分和温度极大地影响了土壤有机碳含量, 改变了植物群落生物量。有研究表明, 荒漠草原生态系统生物量强烈地受到土壤碳素的驱动^[8]。通过对荒漠草原生物量时空动态特征的研究, 探讨影响宁夏荒漠草原的因素, 对环境保护和资源利用具有一定的参考价值。

植被生物量作为生态系统生产力的重要组成部分, 是反映生态系统功能的综合指标^[9-10]。不同植被类型其生物量的形成、积累和分解速率不同^[11]。目前, 测量生物量的方法主要是模型和估算法, 但存在一定的缺点, 如利用近红外波光谱法估算得出的生产力偏高^[12], 气象数据易获取但模型参数精度不高^[7]。

收稿日期: 2023-11-14; **修回日期:** 2024-03-04

基金资助: 宁夏自然科学基金项目(2023AAC03043); 中科院“西部之光”青年学者项目(2020); 宁夏重点研发计划项目(2020BBF02003); 宁夏高等学校一流学科建设(草学)项目(NXYLXK2017A01); 宁夏大学大学生创新创业训练计划项目(S202210749078)

作者简介: 王学琴(2000-), 女, 回族, 宁夏西吉人, 本科生。

E-mail: 2621156477@qq.com

*通信作者。E-mail: nxshenyan@163.com

此外,草地地下生物量观测难度较大,常采用地上地下生物量之比进行估算。因此,采用野外实测法测定荒漠草原植物群落地上、地下生物量对于研究植物群落相对生长模式以及资源分配格局具有重要意义。因此,本研究采用样方法实地观测地上和地下生物量,并研究宁夏荒漠草原生长季内不同植物群落地上、地下生物量时空变化、生物量特征及影响因素,为进一步掌握荒漠草原植物群落生态过程以及荒漠植物响应环境变化的机制提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏回族自治区东部的盐池县,处于毛乌素沙地南缘,属陕西、甘肃、宁夏、内蒙古省(区)交界地带,地理坐标为37°27′~37°58′ N、106°52′~107°33′ E,海拔1 312.9~1 529.1 m,属温带大陆性、季风性一半干旱气候。年蒸发量1 223.8~2 087.6 mm,年均降水量298 mm。月均最高气温20.63℃,月均最低气温-5.13℃,年均温9.98℃,年均无霜期165 d(图1)。研究区土壤以灰钙土为主,伴有黑垆土和风沙土,土壤结构松散、肥力较低。植物以赖草(*Leymus secalinus*)、白草(*Pennisetum flaccidum*)、牛枝子(*Lespedeza potaninii*)和短花针茅(*Stipa breviflora*)等多年生草本植物及早生小灌木为主。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 根据前期对研究区植物群落类型分布、物种组成等基本情况进行分析,选择分布较广泛的4种典型植物群落:白草群落、牛枝子群落、短花针茅群落和赖草群落作为研究对象,进行植被、土壤特征观测,样地基本信息见表1和表2。

1.2.2 植被调查和样品采集 分别于2019年8月和2022年5—9月进行取样和调查,在不同群落类型的典

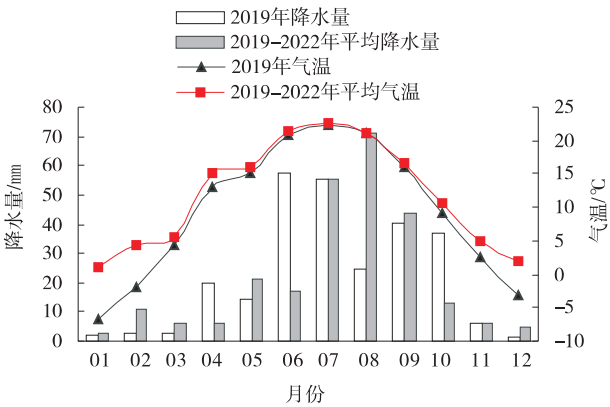


图1 研究区气温与降水情况

Fig. 1 Temperature and precipitation in the study area

型地段设置调查样地,其中牛枝子群落13个,短花针茅群落12个,白草群落15个,赖草群落9个。按照高度、坡度、坡向等相对一致的原则,每个样地设置3个1 m×1 m样方,共147个样方,观测样方内草地植物物种的高度、密度、频度、盖度及地上生物量。采用收获法,将植物地上部齐地刈割装入牛皮纸袋内编号,测定植物地上生物量,采用挖掘法,移除样方内枯落物,分别取深度0~5、5~15和15~40 cm土层,面积20 cm×20 cm的土壤根系,并过1 mm筛挑拣出石块及杂物,装入牛皮纸袋进行编号,测定植物地下生物量,取回的样品带回实验室于65℃烘箱内烘干至恒重。土壤取样点与植物取样点一一对应,在样方内0~5、5~5和15~40 cm土层剖面取原状土,并将采集的每个样方同层土壤样品混匀、去杂、风干,研磨过2、1和0.15 mm筛后备用。

1.2.3 土壤理化性质测定 土壤全氮(soil total nitrogen, STN)含量采用全自动凯氏定氮仪(K-360, BUCHI LabortechnikAG, Switzerland)测定;速效氮(available nitrogen, AN)含量采用碱解扩散法;全磷(total phosphorus, TP)含量采用HClO₄-H₂SO₄消煮—钼锑抗比色法(UV-1600);速效磷(available phos-

表1 样地基本情况
Table 1 Basic information of the plot

群落类型	优势物种	平均海拔高度/m	平均草群高度/cm	平均盖度/%	平均地上生物量/(g·m ⁻²)	平均物种数
牛枝子群落	牛枝子	1 407	19.4	68.7	104.5	8.7
短花针茅群落	短花针茅	1 464	16.8	67.1	84.4	8.8
赖草群落	赖草	1 522	32.0	76.6	85.8	7.4
	狗尾草					
白草群落	白草	1 420	17.2	72.0	62.7	6.1

phorus, AP) 含量采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法 (UV—1600); 全钾 (total potassium, TK) 含量采用 NaOH 熔融, 火焰光度法 (HP6410); 速效钾 (available potassium, AK) 含量采用 NH₄OAc 浸提—火焰光度法 (HP6410)^[13]; 土壤总有机碳 (soil total organic carbon, TOC) 含量采用重铬酸钾外加热法测定; 土壤容重 (soil bulk density, BD) 采用环刀法、pH 值用酸度计 (PHST—5) 测定^[14]; 利用德国产剖面土壤水分测定系统 TDR (time domain reflectometry) 测定土壤水分 (soil moisture, SM)、温度 (soil temperature, ST) 及电导率 (soil electric conductivity, SEC)^[15]。

1.2.4 气象数据获取 气象资料由调查点所在县 (乡) 气象站提供, 包括 2019—2022 年每年 5—9 月的月平均地温 (°C)、月蒸发量 (mm)、月相对湿度 (%)、月平均气温 (°C)、月最高温度 (°C)、月降水量 (mm)、以及 2019—2022 年的降水量 (mm)、蒸发量 (mm)、平均地温 (°C)、相对湿度 (%)、平均气温 (°C) 和最高温度 (°C), 共 12 种气象要素。

1.3 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2010 录入原始数据, 通过 SPSS 17.0 对植物群落地上、地下生物量时空动态特征进行 One—way ANOVA 单因素方差分析, 利用

CANOCO 软件进行冗余分析 (Redundancy analysis, RDA), 用于分析土壤和气候因子与生物量之间的关系。根据 RDA 筛选出的解释率高的因素, 再利用 R 语言软件进行随机森林分析 (Random Forest, RF), 进一步综合分析影响生物量的因素。试验指标计算公式如下:

相对高度 = (某种植物的平均高度 / 样地内所有植物种的平均高度之和) × 100%

相对盖度 = (某种植物的盖度 / 所有植物种的盖度之和) × 100%

相对频度 = (某种植物的频度 / 所有植物种的频度之和) × 100%

相对地上生物量 = (某种植物的干重 / 所有植物种干重之和) × 100%

物种多样性指数: $H = -\sum_{i=1}^s P_i \ln(P_i)$

优势度指数: $D = 1 - \sum(P_i)^2$

均匀度指数: $E = -\sum P_i \ln(P_i) / \ln(S)$

生态优势度指数: $C = \sum_{i=1}^n (P_i/P)^2$

式中: S 为群落物种数目; P_i 为样方中第 i 个物种的相对密度; P 为样方内所有物种相对密度之和; n 为样方内物种数。

表 2 样方内土壤理化因子和植物多样性指数

Table 2 Soil physical and chemical factors and species diversity indexes of the sample

指标	类型	平均值±标准误
土壤理化因子	pH 值	8.66±0.61
	土壤速效磷含量 (AP)/(mg·kg ⁻¹)	12.94±0.01
	土壤全氮含量 (TN)/(mg·kg ⁻¹)	0.67±0.23
	土壤总有机碳含量 (TOC)/(mg·kg ⁻¹)	10.01±0.52
	土壤容重含量 (BD)/(mg·kg ⁻¹)	1.40±0.09
	土壤全磷含量 (TP)/(mg·kg ⁻¹)	0.06±0.48
	全钾含量 (TK)/(mg·kg ⁻¹)	16.33±0.28
	土壤速效氮含量 (AN)/(mg·kg ⁻¹)	12.31±0.13
	土壤速效钾含量 (AK)/(mg·kg ⁻¹)	87.62±0.99
	土壤水分含量 (SM)/(mg·kg ⁻¹)	26.31±0.19
	土壤温度 (ST)/°C	26.78±0.92
	土壤电导率 (SEC)/(μS·cm ⁻¹)	23.36±0.89
多样性指数	生态优势度指数 (C)	0.38±0.01
	优势度指数 (D)	0.59±0.07
	多样性指数 (H)	1.47±0.13
	均匀度指数 (E)	0.77±0.10

2 结果与分析

2.1 植物群落地上、地下生物量时间动态

生长季5—9月,荒漠草原植物群落地上生物量总体呈现出先增长后下降的趋势,5月最低,为18.83~42.35 g/m²,8月最高,为87.94~120.93 g/m²;地上生物量在不同群落中表现为生长初期(5月)和生长盛期(8月)无显著差异,6、7和9月差异性显著($P < 0.05$)。同一植物群落不同月份地上生物量均差异显著($P < 0.05$),牛枝子植物群落8月地上生物量最高,为

120.93 g/m²;白草植物群落5月地上生物量最低,为18.83 g/m²(图2)。

生长季内,荒漠草原植物群落地下生物量总体呈现先降低后升高的趋势,两个峰值分别在生长初期的5月(75.29~139.26 g/m²)和生长末期的9月(39.15~92.97 g/m²),最低在7月,为34.41~66.89 g/m²;不同植物群落地下生物量5月和8月差异不显著($P > 0.05$),而6、7和9月间差异显著($P < 0.05$)。除9月外,牛枝子群落月地下生物量最低(图2)。

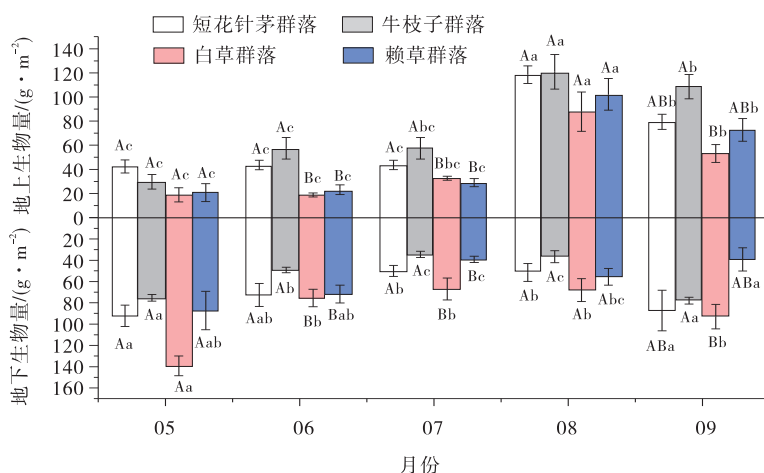


图2 不同植物群落生长季地上、地下生物量动态变化

Fig. 2 Dynamic changes in aboveground and underground biomass of different plant communities during the growing season

注:不同大写字母表示不同植物群落同一月份地上、地下生物量具有显著性差异;不同小写字母表示同一植物群落不同月份地上、地下生物量具有显著性差异,显著水平为0.05。

2.2 植物群落地下生物量空间动态

生长季5—9月,各植物群落地下生物量主要分布在0~15 cm的土层,而15~40 cm的土层分布较少,且各植物群落地下生物量的数量也随土层的加深而减少。

0~5 cm土层除7月外,其他各月群落间地下生物量均差异显著($P < 0.05$),5—7月白草、短花针茅和白草群落地下生物量最高,分别为67.03、67.59和29.75 g/m²,牛枝子群落均最低,分别为18.80、20.86和18.14 g/m²;而8月牛枝子群落最高,为49.14 g/m²,赖草群落最低,为24.28 g/m²;9月短花针茅群落最高,为57.16 g/m²,白草群落最低,为19.3 g/m²。生长季内,牛枝子和赖草群落0~5 cm土层地下生物量呈现“V”型,白草和短花针茅群落呈现“N”型(图3-A)。

5~15 cm土层除9月外,其他各月群落间地下生物量均差异显著($P < 0.05$),具体表现为5—8月白草

群落地下生物量均最高,分别为34.61、35.15、23.34和38.11 g/m²,牛枝子、赖草、短花针茅群落最低,分别为13.27、32.34、12.34和13.73 g/m²;而9月赖草群落最高,为34.89 g/m²,短花针茅群落最低,为17.39 g/m²。长季内5~15 cm土层地下生物量除短花针茅外,其他植物群落地下生物量均差异显著($P < 0.05$),短花针茅、牛枝子和赖草群落地下生物量呈现“N”型,白草群落呈现“V”型(图3-B)。

15~40 cm土层除9月外,其他月各群落间地下生物量均差异显著($P < 0.05$),具体表现为5—6月白草和赖草群落地下生物量最高,分别为37.62、31.17 g/m²,牛枝子和短花针茅群落最低,分别为2.34 g/m²和4.16 g/m²。生长季内15~40 cm土层地下生物量除短花针茅群落外,其他植物群落地下生物量均存在显著差异($P < 0.05$),短花针茅和牛枝子群落地下生物量呈现“N”型,白草和赖草群落呈现“V”型(图3-C)。

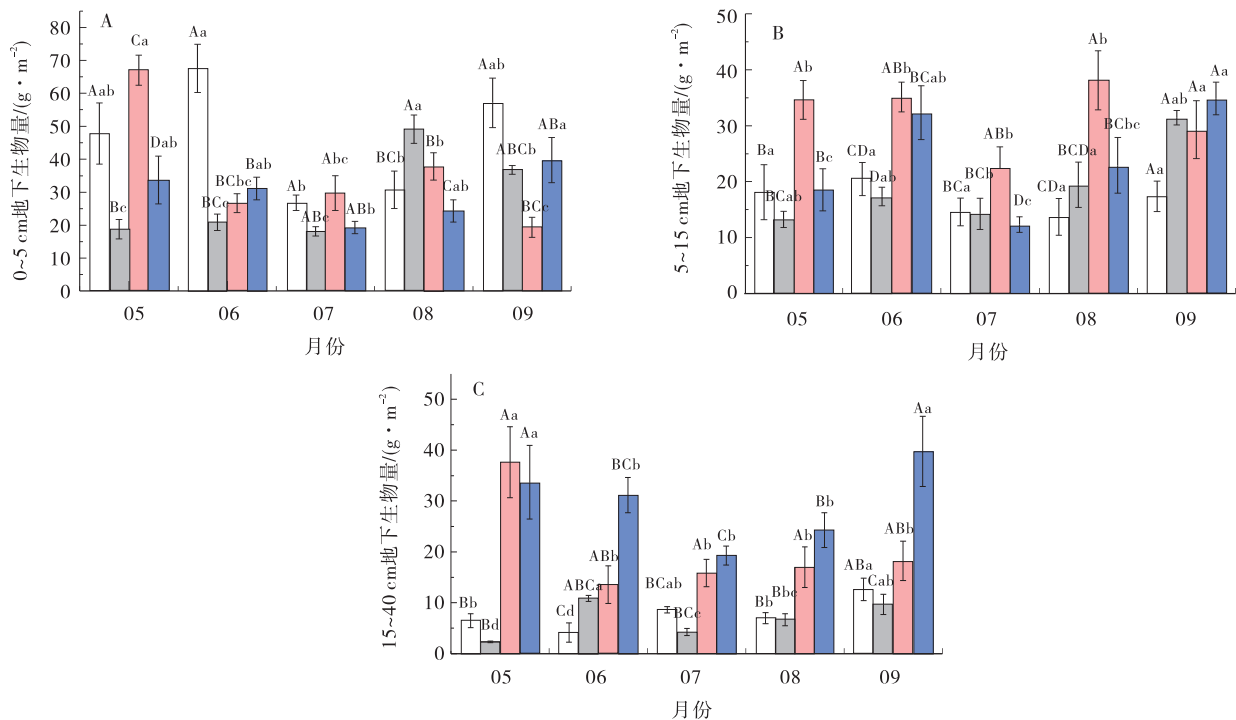


图3 植物群落地下生物量垂直分布格局

Fig. 3 Vertical distribution pattern of belowground biomass in different vegetation communities

2.3 植物群落地上与地下生物量之间的关系

逐步多元回归方法可以表达不同植物群落地上与地下生物量对生物量的贡献,得出各植物群落地上(AGB)与地下生物量(BGB)之间的最优线性拟合模型(表3)。研究发现,牛枝子、白草和短花针茅群落地上与地下生物量之间呈极显著正相关($P<0.001$),相关系数分别为0.853 1、0.862 7和0.879 9,而赖草群落地上与地下生物量之间呈极显著负相关($P<0.001$),相关系数为0.765 6。

为探究宁夏盐池荒漠草原生物量与植物群落多样性之间的关系,本研究将植物群落物种生态优势度指数、优势度指数、多样性指数和均匀度指数与生物量进行回归拟合(图4)。研究发现植物群落生物量和生态优势度指数、优势度指数、多样性指数和均匀度指数均呈负二次函数关系。

表3 不同植物群落地上与地下生物量的关系

Table 3 Relationship between aboveground and below-ground biomass

群落类型	回归方程	相关系数	<i>P</i>
牛枝子	$y=1.339\ 0x-7.620\ 8$	0.853 1	0.001
赖草	$y=-1.067\ 9x+13.204\ 0$	0.765 6	0.001
白草	$y=0.963\ 4x+30.499\ 0$	0.862 7	0.001
短花针茅	$y=0.823\ 1x+16.095\ 0$	0.879 9	0.001

2.4 土壤理化性质和气候因素对植物群落生物量的影响

采用冗余分析(RDA)分析土壤因子(12个)和气象因子(12个)对宁夏荒漠草原地上生物量、地下生物量和总生物量的影响。RDA分析结果表明,土壤理化和气候因子能够解释87.1%的生物量的变化(表4),其中蒸发量(AE)、最高温度(MT)和平均气温(AT)的解释率最高,AK与地下生物量显著相关,相对湿度(RH)与地上生物量显著相关,表明相较于土壤理化性质,气候因素更能够驱动生物量的变化(图5)。

根据RDA分析,将筛选出的对生物量影响较高的因子(表4),进行RF模型分析(图6),进一步综合研究影响生物量的因素。结果表明,RH、AE、AT、MT、TP和pH是预测地上生物量变化的重要变量($P<0.05$),其中RH和AE的MSE%值高于其他变量,表明变量相对更重要;MT、AT、MGT和MP是预测地下生物量变化的重要变量($P<0.05$),其中MT和AT的MSE%值高于其他变量;RH、AT和AE是预测总生物量的重要变量($P<0.01$),其中RH的MSE%值高于其他变量。各指标MSE%值表明,相较于土壤理化指标,生长季气象因素是预测生物量变化的重要因素,其中RH影响较大。

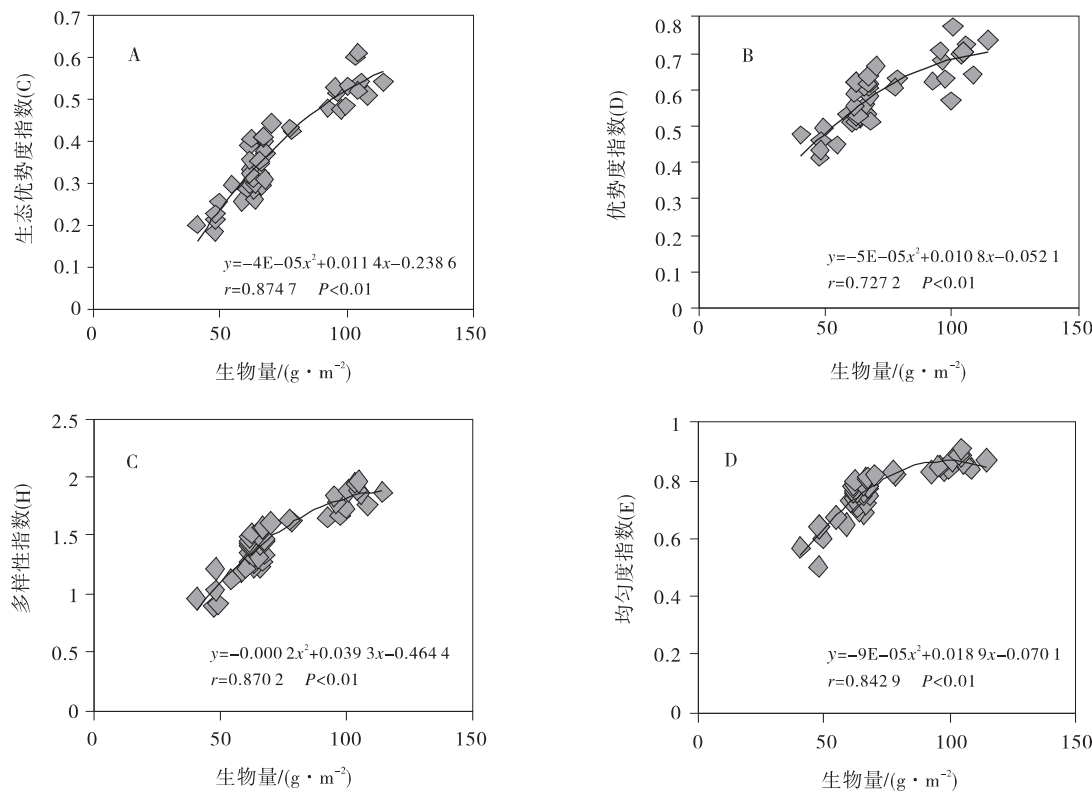


图4 荒漠草原植物物种多样性与生物量的关系

Fig. 4 Relationship between the diversity of different plant communities and biomass

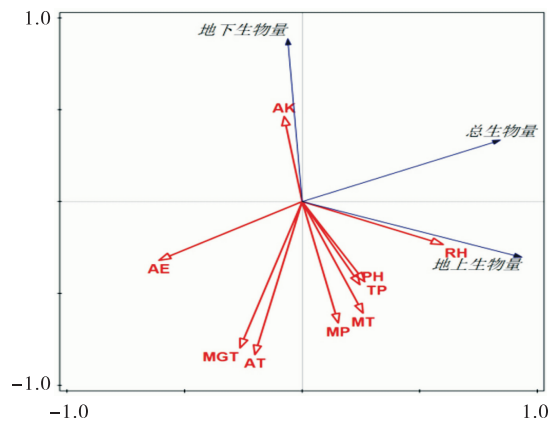


图5 土壤和生长季(5-9月)气候因子与植物群落地上、地下和总生物量的相关性

Fig. 5 Correlation between soil and climate factors during the growing season (May September) and aboveground, underground and total biomass of plant communities

表4 各个指标对于生物量变化的RDA分析

Table 4 RDA analysis of biomass changes for various indicators

影响因子	解释率/%	贡献率/%	F值	P值
AE	25.8	29.6	6.2	0.004
MT	22.0	25.3	7.2	0.002
AT	17.4	19.9	8.0	0.004
TP	13.0	15.0	8.9	0.002
MGT	5.7	6.5	4.9	0.016
AK	2.6	3.0	2.5	0.106
RH	0.5	0.5	0.4	0.606
MP	0.1	0.1	0.1	0.860
pH	<0.1	<0.1	<0.1	0.982

青,随着温度升高与降水增多,地上生物量开始积累并在8月达到最大值,随着生长季结束、气温降低、光合作用减弱使得地上生物量降低^[17]。质比假说认为:与植物群落多样性相比,优势种因其生物量占比大而影响草地生态系统的生产力^[18]。本研究中,各群落优势种不同,其生长发育和生物学特性不同,在生物量方面表现出明显不同,如牛枝子是轴根型半灌木豆科植物,根系深,侧根相对少,生物量高;白草是须根型禾本科植物,根系浅且无明显主根,生物量低。

3 讨论

3.1 荒漠草原地上、地下生物量时空动态

在时间序列上研究植物地上、地下生物量对于了解不同植物群落特征具有重要意义^[16]。本研究发现,生长季宁夏荒漠草原各植物群落地上生物量变化呈单峰形(峰值出现在8月),5月各草地物种开始陆续返

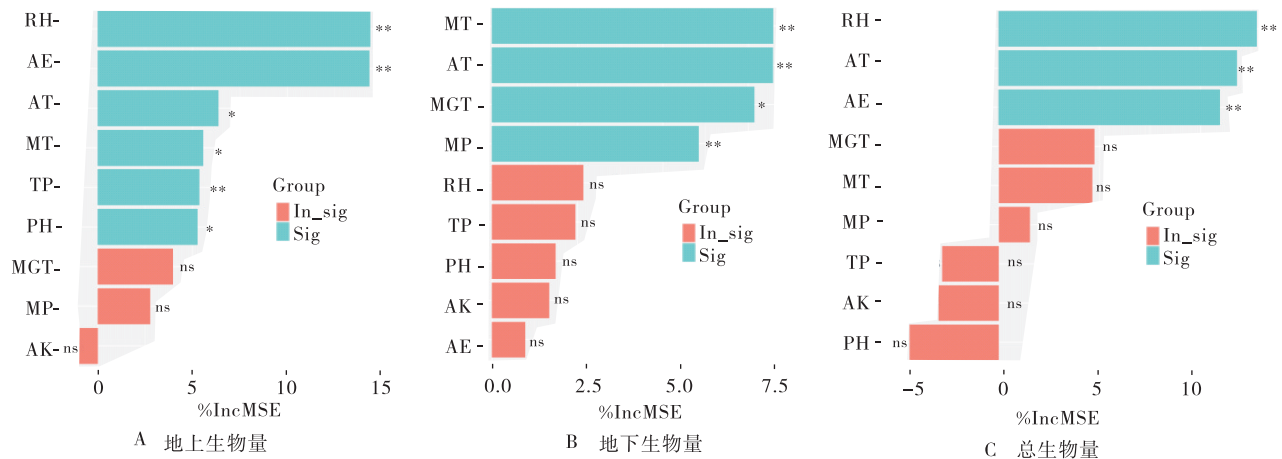


图 6 土壤和气候因子对地上生物量(A)、地下生物量(B)和总生物量(C)的随机森林分析

Fig. 6 Random forest analysis of soil and climate factors on aboveground biomass (A), underground biomass (B) and total biomass (C)

注: *表示 $P < 0.05$, **表示 $P < 0.01$ 。

植物群落地上地下生物量配比不仅反映草原生产能力的大小,而且为光合产物在植物不同部位的分配提供理论依据^[19]。本研究发现,生长季内4种典型植物群落地下生物量在不同土层主要呈现两种典型趋势:1)“V”型,与内蒙古典型草原植物地下生物量分布规律相似^[20];2)“N”型,与祁连山高寒草甸植物地下生物量的季节变化规律相似^[21]。有研究表明,“N”型变化规律与研究区气候条件下植物群落的根系分蘖类型及营养储存有关^[22]。生长初期,气温较低、降水少及植物返青地上部不发达,使地下部植物根系积累较多营养物质,从而出现第1次波峰;生长末期,各植物群落完成繁殖,将更多的养分储存于植物根系,致使出现第2次波峰^[23]。相反,在生长季地上生长消耗的营养物质高于地下的营养储存,从而使地下生物量减少。8月后随着生长季末期的到来,地下储存的营养物质大于地上生长消耗,地下生物量增大,致使只出现一次波峰,呈现“V”变化趋势。

此外,植物群落地下生物量主要分布于0~15 cm土层。因该土层更易积累有机质、凋落物和腐殖质等土壤养分,使植物能更有效吸收养分并转化^[22]。研究发现,宁夏荒漠草原牛枝子、白草和短花针茅群落地上地下生物量之间呈极显著正相关($P < 0.01$),而赖草群落地上地下生物量之间呈极显著负相关关系($P < 0.01$),与郭茹茹等^[24]研究结论一致。目前,众多研究表明,线性回归结果与植物群落在一定时间内对生态系统中的光、水分和土壤养分等资源的竞争程度

和适应策略有关^[25]。

3.2 荒漠草原植物多样性与生物量的关系

植物多样性与生产力的关系在时间及空间尺度上受群落环境条件影响表现为正相关关系、负相关关系、无显著关系、U型关系和单峰曲线关系^[16]。宁夏盐池县荒漠草原群落生态优势度指数、优势度指数、多样性指数和均匀度指数与生物量拟合呈显著负二次函数关系,该研究结果与中等生产力水平物种多样性最高的理论一致^[26]。本研究中不同植物群落地上、地下生物量间产生的相关性,对提高植物群落和生态系统的生产力均具有重要意义^[3]。

3.3 荒漠草原生物量的影响因素

气候条件和土壤养分是驱动草地生态系统中植物生长的重要因素^[27-28]。研究发现土壤中TOC是驱动荒漠草原植物生物量的关键因子^[29-30],此外,植物在干旱和营养贫乏胁迫下会分配给根部更多生物量来获得深层土壤水分和养分^[31]。气候变暖^[9]和干旱^[32]同样能够增加植物地下生物量,这降低了干旱对植物的胁迫,促进植物更好适应特殊环境。因此,了解植物群落生物量的变化机制及其驱动因素对探索植物群落的稳定性至关重要。在本研究中,RDA分析发现,AE、MT和AT是生物量变化的重要限制因子且AK与地下生物量显著相关,RH与地上生物量显著相关,RF模型发现,RH和AE是预测地上生物量变化的重要指标,MT和AT是预测地下生物量变化的重要指标,RH是预测总生物量变化的重要指标。这些结

果表明,相较于土壤理化性质,气候因素与生物量密切相关,更能够驱动荒漠草原植物群落生物量的变化。这可能主要因为宁夏荒漠草原生态系统十分脆弱,局部退化严重,相较于土壤理化性质,气候因素更能调控植物群落生长状况和固碳能力等,是生物量变化的限制因素,尤其是RH。

4 结论

不同生长季,宁夏荒漠草原植物群落地上生物量变化不同。生长季内,植物群落地上生物量变化呈单峰形,地下生物量变化呈双峰形,地下生物量在不同土层主要呈现“V”型与“N”型的变化规律,并主要分布于0~15 cm土层。不同植物群落地上、地下生物量线性拟合模型发现,牛枝子群落、短花针茅群落和白草群落地上生物量与地下生物量呈极显著正相关,赖草群落则为极显著负相关。RDA和RF模型分析表明,相较于土壤理化性质,气候因子更能影响植物群落生物量变化。

参考文献:

- [1] Zhang M, Lal R, Zhao Y, *et al.* Spatial and temporal variability in the net primary production of grassland in China and its relation to climate factors[J]. *Plant Ecology*, 2017, 218(9):1117—1133.
- [2] Fay P A, Prober S M, Harpole W S, *et al.* Grassland productivity limited by multiple nutrients[J]. *Nature plants*, 2015, 1(7):15—80.
- [3] Yahdjian L, Gherardi L, Sala O. Nitrogen limitation in arid—subhumid ecosystems: A meta—analysis of fertilization studies[J]. *Journal of Arid Environments*, 2011, 75(8):675—680.
- [4] Cugeri F, Bauert M. Growth and reproduction of *Polygonum riparium* show weak responses to experimentally increased temperature at a Swiss Alpine site[J]. *Botanica Helvetica*, 2001, 111:169—180.
- [5] 周富斐,王宏,张飞宇,等. 玛曲县高寒草甸鼠害地治理措施效果评价[J]. *草原与草坪*, 2020, 40(4):80—87.
- [6] 李小锋,倪兆春,刘秀梅. 天山北坡温性荒漠草原主要植物生物量对气候变化的响应[J]. *草食家畜*, 2023, (2): 42—48.
- [7] 王子龙,胡斌,包维楷,等. 西南干旱河谷植物群落组分生物量的纬度格局及其影响因素[J]. *植物生态学报*, 2022, 46(5):539—551.
- [8] 王松,耿元波,母悦. 典型草原生物量对气候变化响应的模拟[J]. *草业学报*, 2016, 25(12):4—13.
- [9] 邢彬彬,安慧,刘姝萱,等. 降水变化对荒漠草原植物群落生物量及其权衡关系的影响[J]. *草地学报*, 2023, 31(10):3103—3113.
- [10] James FJ, Graff J R, Behrenfeld M J, *et al.* An absorption-based approach to improved estimates of phytoplankton biomass and net primary production[J]. *Limnology and Oceanography Letters*, 2022, 7(5):419—426.
- [11] 高军. 天山北坡植被净初级生产力时空分布特征及影响因素分析[D]. 石河子:石河子大学, 2020.
- [12] Mueller K E, LeCain D R, McCormack M L, *et al.* Root responses to elevated CO₂, warming and irrigation in semi-arid grassland; integrating biomass, length and life span in a 5-year field experiment[J]. *Journal of Ecology*, 2018, 106(6):2176—2189.
- [13] 李明哲,王城坤. 土壤理化性质分析及精量施肥技术推广[J]. *农业与技术*, 2022, 42(19):28—31.
- [14] 丁咸庆,柏菁,项文化,等. 不同浸提剂处理森林土壤溶解性有机碳含量比较[J]. *土壤*, 2020, 52(3):518—524.
- [15] 解迎革,王国栋,薛绪掌,等. 土壤进气值和发泡点测定方法的研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2005, 33(9):108—112.
- [16] 杨雪,昕辉,李美慧,等. 时间尺度上草地物种多样性和地上生产力的关系[J]. *草地学报*, 2022, 30(2): 259—268.
- [17] 马维伟,王辉,李广,等. 甘南尕斯库勒湿地退化过程中植被生物量变化及其季节动态[J]. *生态学报*, 2017, 37(15): 5091—5101.
- [18] 张飞,马玉荣,梁瑞泽,等. 季节性放牧对补播改良荒漠草原植物群落地上生物量及物种多样性的影响[J]. *安徽农业科学*, 2023, 51(8):53—57.
- [19] Collier C J, Langlois L M, McMahon K M, *et al.* What lies beneath: Predicting seagrass below-ground biomass from above-ground biomass, environmental conditions and seagrass community composition[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 121:107156.
- [20] 吴婷,宋乃平,陈晓莹,等. 围栏封育和放牧对盐池荒漠草原植物群落特征的影响[J]. *草地学报*. 2019, 27(3): 651—660.
- [21] 黄德青,于兰,张耀生,等. 祁连山北坡天然草地地下生物量及其与环境因子的关系[J]. *草业学报*, 2011, 20

- (5):1—15.
- [22] 韦薇,陶冶,王东明,等. 大气 CO₂ 浓度升高和海平面上升对滨海湿地植物地下生物量的影响[J]. 土壤, 2023, 55(1):147—152.
- [23] 刘向峰,张强,郝国亮,等. 草本植物根系类型和分布对根土复合体无侧限抗压强度的影响[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(9):106—111.
- [24] 郭茹茹. 半干旱黄土小流域苜蓿地撂荒的水碳效应[D]. 太原:山西师范大学, 2020.
- [25] 张瑞. 晋西北黄土丘陵区草地植被生物多样性、功能性状和土壤因素对群落生产力的影响[D]. 太原:山西师范大学, 2020.
- [26] 张立进,杜虎,曾馥平,等. 喀斯特峰丛洼地植被恢复过程中生产力与多样性关系探讨[J]. 生态环境学报, 2023, 32(1):26—35.
- [27] Shan Y M, Chen D M, Guan X X, *et al.* Seasonally dependent impacts of grazing on soil nitrogen mineralization and linkages to ecosystem functioning in Inner Mongolia grassland [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(9):1943—1954.
- [28] 刘增辉,卢素锦,王雨欣,等. 三江源地区人工克隆植物群落生物多样性对初级生产力的影响及机制[J]. 草业学报, 2023, 32(9):27—38.
- [29] Plett D C, Ranathunge K, Melino V J, *et al.* The intersection of nitrogen nutrition and water use in plants: new paths toward improved crop productivity [J]. *Journal of experimental botany*, 2020, 71(15):4452—4468.
- [30] Harpole W S, Ngai J T, Cleland E E, *et al.* Nutrient co-limitation of primary producer communities [J]. *Ecology letters*, 2011, 14(9):852—862.
- [31] Niklas K J. A phyletic perspective on the allometry of plant biomass—partitioning patterns functionally Equivalent and organ—categories [J]. *New Phytologist*, 2006, 171(1):27—40.
- [32] Hong I T, Wang X D. Variation in carbon, nitrogen and phosphorus partitioning between above— and below-ground biomass along a precipitation gradient at Tibetan Plateau [J]. *Journal of Mountain Science*, 2016, 13(4):661—671.

Spatio-temporal pattern of biomass and its influencing factors of four typical plant communities on desert steppe in Ningxia autonomous region

WANG Xue-qin¹, ZHANG Xiao-ju¹, SHEN Yan^{1,2,3,4*}, NIE Ming-he¹,

QIU Kai-yang^{1,2,3,4}

(1. College of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Key Laboratory of Innovation of Efficient Forage Production Model, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yinchuan 750021, China; 3. Engineering Technology Research Center of Grassland and Pasture Industry, Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750021, China; 4. Cultivation Base of State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Yinchuan 750021, China)

Abstract: [Objective] Understanding the spatio-temporal patterns and influencing factors of steppe plant community biomass is essential for analyzing the ecological functions of steppe systems under global climate change. [Method] This study examines four typical plant communities in the Ningxia desert steppe: *Lespedeza potaninii*, *Leymus secalinus*, *Stipa breviflora* and *Pennisetum flaccidum*. communities. Using a sample survey method, the spatio-temporal distribution and factors influencing aboveground and underground biomass in these communities were analyzed. [Result] The results showed that during the growing season, aboveground biomass of each plant community

exhibited a single peak (in August), while underground biomass showed a double peak (in May and September, respectively); The underground biomass was primarily concentrated in the 0~15 cm soil layer, decreasing with soil depth. The linear fitting models revealed a highly significant positive correlation ($P < 0.01$) between aboveground biomass and underground biomass in the *Lespedeza potaninii*, the *Stipa breviflora*, and the White grass communities, where the *Leymus secalinus* community exhibited a highly significant negative correlation ($P < 0.01$); Community species diversity and biomass followed a quadratic relationship. Redundancy analysis identified that the amount of evaporation (AE), maximum temperature (MT) and average temperature (AT) during the growing season as the primary factors influencing biomass variation. The random forest model highlighted the importance of climate factors over soil properties in predicting vegetation biomass changes, with humidity exerting the greatest influence. **【Conclusion】** This study provides new insights into the regulatory mechanisms of aboveground and underground biomass allocation in plant communities. The findings are valuable for understanding the spatio-temporal dynamics of net primary productivity in Ningxia desert steppes and offer guidance for sustainable ecosystem management.

Key words: desert steppe; aboveground biomass; underground biomass; biomass; spatio-temporal dynamics

(责任编辑:新奇峰)