

贾文雄,王洁,张禹舜,等.祁连山南坡灌丛草甸生物量变化与水热因子的关系研究[J].地理科学,2016,36(8):1243-1251.[Jia Wenxiong, Wang Jie, Zhang Yushun et al. Biomass Variation of Shrubbery Meadow and Relation with Humidity and Heat Facts in the Southren Slop of the Qilian Mountains. Scientia Geographica Sinica, 2016,36(8):1243-1251.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2016.08.016

祁连山南坡灌丛草甸生物量变化与水热因子的关系研究

贾文雄,王洁,张禹舜,刘亚荣

(西北师范大学地理与环境科学学院,甘肃兰州730070)

摘要:通过野外调研和室内实验,研究了祁连山南坡灌丛草甸地上生物量的生长季变化,并对地上生物量与水热因子的关系进行了探讨。结果表明:在不同区域群落结构有所不同,覆盖度越低,上层和下层的植物高度越低,丰富度和多样性越小。但均匀度还受草场退化阶段的影响,群落结构相对稳定,植物的均匀度越高;地上生物量的年内变化是单峰曲线,乌鞘岭和门源的地上生物量在7月份最大,祁连和野牛沟的地上生物量在9月份最大;地上生物量的积累与前1月和前2月的气温和降水正相关,与前4月的气温也正相关,并且对气温变化的敏感性大于降水,但与地温和土壤水分的相关性不明显,前1月表层地温较高对地上生物量的积累有积极作用;对于地上生物量积累,日气温、日相对湿度、降水量有直接正向作用,而日最高气温、日最低气温、日水汽压有直接负向作用,5 cm、20 cm地温和0~10 cm、20~30 cm土壤水分也有直接正向作用,而10 cm地温和10~20 cm土壤水分也有直接负向作用。

关键词:灌丛草甸;地上生物量;水热因子;交互作用;祁连山

中图分类号: P935.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2016)08-1243-09

草地生态系统是陆地生态系统的重要组成部分^[1],具有调节气候、维持与更新土壤肥力、保护与提高生物多样性等的生态服务功能。草地生物量是群落结构和功能的综合体现^[2],是生态系统研究的重要组成部分^[3]。气候、土壤、生物等自然要素对草地生态系统的结构和功能有重要影响,草地生态系统与环境因子关系是草地生态学研究的热点和重要内容之一^[4]。水热条件是影响牧草高度和地上生物量的主要因子^[5],土壤是植物生存的基质,决定着生态系统的结构、功能和生产力水平^[6]。相关研究表明不同气候因子在植物生长的不同阶段对植物生长产生不同影响^[7];土壤水分对不同高寒草地的影响大于气温,相对湿度和地温对生物量的影响不显著^[4],7~8月平均相对湿度对群落总的地上生物量影响较大,平均气温是决定禾本科和莎草科功能群地上生物量的主导因子^[6];土壤养分的高低直接影响着群落生产力^[6],土壤水分对高寒草地物种丰富度和地上生物量显著影响^[4];

不同牧压强度下土壤水分和养分有一定的改变,进而影响草地生物量的积累^[8-16]。可见气候和土壤对天然草地生物量的积累有重要影响,在全球气候变暖背景下研究它们之间的关系也是必要的。

祁连山是西北地区重要的自然地理区和生态屏障,关于此地区草地多样性和生物量方面的研究发现:祁连山北坡草地生物量与土壤含水量呈显著正相关^[17]。疏勒河上游地区0~40 cm深度土壤中养分使植被群落盖度升高和生物量增加^[18]。祁连山北坡山地草甸草原和山地草原的根冠比与上月潜在蒸散量均呈显著负相关^[19]。研究主要在祁连山北坡开展,而南坡的相关研究很少,并且以往研究主要涉及同一流域或同一区域不同草地类型的对比研究。祁连山的灌丛草甸是亚高山地带的典型植被,主要分布在中东部,面积约8 375 km²,它不仅是重要的放牧区,而且是重要的水源涵养带。故本研究以祁连山南坡的灌丛草甸草原为对象,对同一植被类型从东到西选择不同样地,旨在

收稿日期: 2015-10-23; **修订日期:** 2016-01-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41161017)资助。[Foundation: National Natural Science Foundation of China(41161017).]

作者简介: 贾文雄(1974-),男,甘肃渭源人,副教授,硕士生导师,主要从事气候变化与生态水文研究。E-mail: wxjiaxy@163.com

研究同一植被类型在空间上的群落结构差异、生长季生物量变化及其与水热因子的关系,进而为生态环境保护和可持续利用草地资源提供依据。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

祁连山位于青藏高原东北边缘,由一系列西北—东南走向的平行山脉和谷地组成,大部分山地平均海拔在4 000 m以上。祁连山水热条件差异大,降水东多西少,具有典型的大陆性气候特征,气候的垂直地带性明显。祁连山水系多发源于高山冰川,以冰川融水补给为主,补给比重西部远大于东部。祁连山的植被从低到高依次为荒漠、山地草原、山地森林草原、亚高山灌丛草甸、高山草甸、高寒荒漠,土壤从低到高依次为棕漠土、灰钙土、栗钙土、灰褐土、草甸土、寒漠土。

1.2 研究方法

1.2.1 样方调查与取样

在祁连山南坡从东到西选择了乌鞘岭(102°52'55"E,37°11'59"N,海拔3 144 m)、门源(101°39'37"E,37°27'36"N,海拔3 292 m)、祁连(100°16'48"E,38°13'34"N,海拔3 269 m)、野牛沟(99°30'40"E,38°26'30"N,海拔3 295 m)4个亚高山灌丛草甸群落样地。由于在整个生长季牲畜进入高山草甸采食,因而没有采取围栏措施,采样时间为2013年5~9月,每个月的20号左右。在每个样地设置3 m×3 m的样方,在样方四角和中心设置5个1 m×1 m的小样方,采用针刺法统计物种的盖度,用卷尺测量物种的高度(每个物种测量15次),用圆圈法统计物种的频度(每个样地抛掷30次),统计样方中出现的物种数,按不同物种贴地面剪取植物的地上部分,装入密封塑料袋中带回。此外,随机选取3个小样方,挖掘30 cm深的土壤剖面,用环刀分别在0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm之间取样,装入铝盒密封带回,在其它2个样方中插入地温计,读取地下5 cm、10 cm、15 cm、20 cm、25 cm处的地温。

1.2.2 地上生物量与土壤水分测定

实验室内将草样在恒温65℃的烘箱内连续烘干至恒重,称量干重。将土样先称湿重,再在恒温105℃的烘箱内连续烘干至恒重,称量干重。土壤水分计算公式:

$$R = \frac{M_{\text{湿}} - M_{\text{干}}}{M_{\text{湿}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: R 为土壤水分, $M_{\text{湿}}$ 为土壤的湿重, $M_{\text{干}}$ 为土壤的干重。

1.2.3 物种多样性的计算

选取 α 多样性指数中的Margalef指数反映丰富度,Shannon-Wiener指数反映多样性,Pielou指数反映均匀度。

$$\text{Margalef指数: } D = (S - 1) / \ln N \quad (2)$$

式中, S 为样方中物种总数; N 为样方中各个种的重要值之和。

$$\text{Shannon-Wiener指数: } H' = - \sum P_i \ln P_i \quad (3)$$

式中, i 为第 i 个物种; P_i 为第 i 种的相对重要值。

$$\text{Pielou指数: } J = H' / \ln S \quad (4)$$

$$\text{重要值} = (\text{相对盖度} + \text{相对高度} + \text{相对频度}) / 3 \quad (5)$$

1.2.4 相关性及通径分析

收集了日最高气温、日最低气温、日均温、日水汽压、日相对湿度、降水量资料(来源于国家气象数据共享网<http://cdc.cma.gov.cn>),再加上实测的地温和土壤水分数据,利用SPSS13.0软件分析了研究区水热因子与灌丛草甸群落地上生物量积累的相关性,并利用通径分析^[20]研究了各水热因子对灌丛草甸群落地上生物量积累的交互作用。

2 结果分析

2.1 生物群落结构特征

2.1.1 生物群落的种群结构

祁连山南坡各灌丛草甸群落的种群结构有所不同,表1为8月份的物种组成及重要值。乌鞘岭有15个物种,隶属莎草科(Cyperaceae)、禾本科(Gramineae)、蔷薇科(Rosaceae)、豆科(Leguminosae)、菊科(Asteraceae)、毛茛科(Ranunculaceae)、龙胆科(Gentianaceae)、车前科(Plantaginaceae)、蓼科(Polygonaceae)、玄参科(Scrophulariaceae)10个科,14个属,优势种是矮嵩草(*Kobresia humilis*)、紫花针茅(*Stipa purpurea*)、珠芽蓼(*Polygonum viviparum*),主要伴生种是垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、甘肃棘豆(*Oxytropis kansuensis*)、翻白萎陵菜(*Potentilla discolor*)等。门源有13个物种,隶属莎草科、禾本科、蔷薇科、豆科、菊科、毛茛科、车前科、蓼科、玄参科9个科,12个属,优势种是垂穗披碱草、矮嵩草、珠芽蓼,主要伴生种是鹅绒萎陵菜(*Potentilla anserina*)、甘肃棘豆、老鹳草(*Geranium wilfordii*)等。祁连有17个物种,隶属莎草科、

表1 祁连山南坡灌丛草甸物种组成及重要值

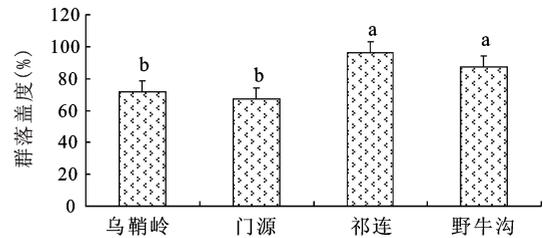
Table 1 Species composition and major value of shrubby meadow in the south slop of the Qilian Mountains

植物种类	乌鞘岭	门源	祁连	野牛沟	植物种类	乌鞘岭	门源	祁连	野牛沟
矮嵩草 <i>Kobresia humilis</i>	18.74	11.04	2.93	3.36	火绒草 <i>Leontopodium leontopodioides</i>	5.14	6.72	0	6.56
黑褐苔草 <i>Carex atrofusca</i>	0	0	9.39	0	阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i>	0	0	4.11	0
高山嵩草 <i>Kobresia pygmaea</i>	0	0	0	9.87	刺儿菜 <i>Cirsium setosum</i>	0	0	9.05	0
垂穗披碱草 <i>Elymus nutans</i>	9.58	15.35	4.49	11.85	狮牙风毛菊 <i>Saussurea leontodontoides</i>	0	0	0	4.19
紫花针茅 <i>Stipa purpurea</i>	13.58	0	9.26	10.62	无茎黄鹌菜 <i>Youngia simulatrix</i>	2.64	0	0	0
早熟禾 <i>Poa annua</i>	0	0	8.09	7.34	高山唐松草 <i>Thalictrum alpinum</i>	5.97	3.83	1.58	5.29
洽草 <i>Koeleria cristata</i>	0	0	5.83	2.79	高原毛茛 <i>Ranunculus tanguticus</i>	0	0	6.99	0
赖草 <i>Leymus secalinus</i>	0	0	0	6.86	银莲花 <i>Anemone cathayensis</i>	2.32	0	0	0
翻白萎陵菜 <i>Potentilla discolor</i>	6.91	6.23	9.16	6.68	刺芒龙胆 <i>Gentiana aristata</i>	0	0	1.55	2.19
多裂萎陵菜 <i>Potentilla mulatifida</i>	4.01	0	9.22	0	鳞叶龙胆 <i>Gentiana squarrosa</i>	4.24	0	0	0
二列萎陵菜 <i>Potentilla bifurca</i>	0	0	0	2.89	车前 <i>Plantago depressa</i>	2.11	6.51	0	0
鹅绒萎陵菜 <i>Potentilla anserina</i>	0	7.24	0	0	兰石草 <i>Lancea tibetica</i>	0	4.33	0	0
甘肃棘豆 <i>Oxytropis kansuensis</i>	7.79	7.87	0	0	珠芽蓼 <i>Polygonum viviparum</i>	11.54	10.15	0	0
黄花棘豆 <i>Oxytropis ochrocephala</i>	0	0	9.69	10.10	老鹳草 <i>Geranium wilfordii</i>	0	7.14	0	0
米口袋 <i>Gueldenstaedtia verna</i>	0	0	0	2.99	堇菜 <i>Viola verecunda</i>	1.67	0	0	0
蒲公英 <i>Taraxacum mongolicum</i>	4.43	5.41	3.69	1.47	狼毒 <i>Stellera chamaejasme</i>	0	0	2.97	0
美丽风毛菊 <i>Saussurea pulchra</i>	0	6.76	4.46	5.11					

禾本科、蔷薇科、豆科、菊科、毛茛科、龙胆科、玄参科 8 个科, 16 个属, 优势种是黄花棘豆 (*Oxytropis ochrocephala*)、黑褐苔草 (*Carex atrofusca*)、紫花针茅, 主要伴生种有翻白萎陵菜、多裂萎陵菜 (*Potentilla mulatifida*)、刺儿菜 (*Cirsium setosum*) 等。野牛沟有 17 个物种, 隶属莎草科、禾本科、蔷薇科、豆科、菊科、毛茛科、龙胆科 7 个科, 14 个属, 优势种是垂穗披碱草、紫花针茅、黄花棘豆, 主要伴生种有高山嵩草 (*Kobresia pygmaea*)、赖草 (*Leymus secalinus*)、翻白萎陵菜等。祁连山南坡灌丛草甸群落大多数科、属是相同的, 因为它们属于同一种植被类型, 而在种上表现出较大的差异, 这主要是不同生境下植物种不同。

2.1.2 生物群落的外部结构

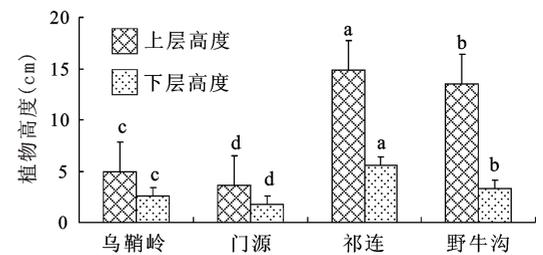
祁连山南坡各灌丛草甸的群落外貌特征也不同(图1、图2)。乌鞘岭、门源、祁连、野牛沟在8月份的盖度分别为72%±3.29%、65%±5.31%、96%±1.69%、87%±4.78%, 其中祁连的覆盖度最高, 门源的最低。Duncan 多重检验表明 ($P < 0.05, n = 20$), 祁连和野牛沟的盖度差异不显著, 乌鞘岭和门源的盖度差异也不显著, 但前两者的盖度显著高于后两者。乌鞘岭、门源、祁连、野牛沟在8月份上层植物的平均高度分别为 11.51±0.76、7.01±0.66、



注: 不同字母表示存在显著性差异

图1 祁连山南坡灌丛草甸群落盖度

Fig.1 Vegetation coverage of shrubby meadow communities in the south slop of the Qilian Mountains



注: 不同字母表示存在显著性差异

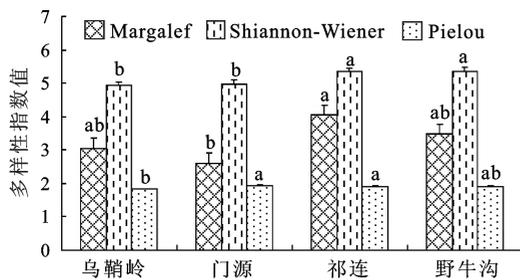
图2 祁连山南坡灌丛草甸群落植物高度

Fig.2 Vegetation height of shrubby meadow communities in the south slop of the Qilian Mountains

16.35±0.46、15.45±0.25 cm, 下层植物的平均高度分别为 3.17±0.06、2.29±0.08、6.22±0.23、3.44±0.07

cm,其中祁连的上、下层植物平均高度最高,门源的最低,这与群落的盖度是一致的。Duncan多重检验表明,祁连山南坡不同灌丛草甸群落植被上、下层高度存在显著差异。可见,祁连山南坡灌丛草甸群落的盖度越高,土壤水分和养分条件越好,因而植被的高度也越高。

祁连山南坡灌丛草甸群落的物种多样性也有所不同(图3)。乌鞘岭、门源、祁连、野牛沟在8月份的Margalef指数分别为 3.03 ± 0.00 、 2.61 ± 0.00 、 3.46 ± 0.57 、 3.47 ± 0.00 ,Shiannon-Wiener指数分别为 2.49 ± 0.06 、 2.67 ± 0.02 、 2.71 ± 0.04 、 2.69 ± 0.07 ,Pielou指数分别为 0.92 ± 0.02 、 0.96 ± 0.01 、 0.96 ± 0.01 、 0.95 ± 0.03 。乌鞘岭的物种丰富度较低,多样性最低,均匀度也最低;门源的物种丰富度最低,多样性较低,但物种均匀度最高;祁连的物种丰富度较高,多样性最高,均匀度较高;野牛沟的丰富度最高,多样性较高,均匀度较低。Duncan多重检验表明,祁连和门源的丰富度差异显著,而乌鞘岭和野牛沟的丰富度处于它们之间;祁连和野牛沟的多样性差异不显著,乌鞘岭和门源的多样性也差异不显著,但前两者与后两者存在显著差异;门源和祁连与乌鞘岭的均匀度差异显著,而野牛沟的均匀度与它们差异不显著。可见,祁连山南坡灌丛草甸的多样性与物种丰富度相关,物种丰富度越低,群落的多样性越低,但均匀度不仅与物种丰富度有关,还与群落的演替阶段有关。



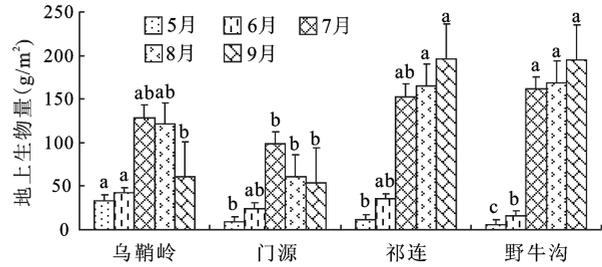
注:不同字母表示存在显著性差异

图3 祁连山南坡灌丛草甸群落多样性

Fig.3 Species diversities of shrubbery meadow communities in the south slope of the Qilian Mountains

2.2 生长季生物量的变化

祁连山南坡各灌丛草甸群落地上生物量的年内变化是单峰曲线,但生长季地上生物量的变化略有不同(图4)。在5~9月份,乌鞘岭的地上生物



注:不同字母表示存在显著性差异。

图4 祁连山南坡灌丛草甸地上生物量变化

Fig.4 Variations of above ground biomass for shrubbery meadow in the south slope of the Qilian Mountains

量分别为 33.39 ± 1.79 、 42.66 ± 6.51 、 128.86 ± 1.51 、 121.13 ± 2.01 、 60.71 ± 4.25 g/m^2 ,门源的地上生物量分别为 8.95 ± 1.08 、 24.54 ± 3.42 、 98.18 ± 16.08 、 61.02 ± 2.33 、 54.17 ± 2.03 g/m^2 ,祁连的地上生物量分别为 11.34 ± 1.21 、 35.51 ± 1.77 、 153.04 ± 19.37 、 164.96 ± 16.9 、 196.15 ± 4.51 g/m^2 ,野牛沟的地上生物量分别为 5.65 ± 1.19 、 15.85 ± 1.14 、 161.66 ± 5.42 、 168.47 ± 25.43 、 194.69 ± 4.73 g/m^2 。乌鞘岭和门源的地上生物量变化一致,7月份地上生物量最大,5~7月逐渐增加,7月份之后逐渐减少,祁连和野牛沟的地上生物量变化也一致,9月份地上生物量最大,自5月份以来一直呈增加趋势。Duncan多重检验表明,5月份,乌鞘岭的地上生物量最大,野牛沟的地上生物量最小,门源与祁连的地上生物量处于它们之间;6月份,乌鞘岭与野牛沟的地上生物量差异仍显著,门源和祁连的地上生物量与它们差异不显著;7月份,野牛沟的地上生物量较大,而门源的地上生物量较小,乌鞘岭和祁连的地上生物量处于它们之间;8月份,祁连和野牛沟与门源的地上生物量差异显著,而乌鞘岭的地上生物量与它们差异不显著;9月份,祁连和野牛沟的地上生物量较大,它们之间差异不显著,而乌鞘岭和门源的地上生物量较小,它们之间差异也不显著,但前两者与后两者之间存在显著差异。可见,祁连山各灌丛草甸群落在各月份地上生物量存在区域差异。

2.3 地上生物量与水热因子的关系

2.3.1 地上生物量与气候水热因子的关系

祁连山南坡各灌丛草甸群落地上生物量与各气候因子均相关,但相关性有所不同(表2)。以前月为基准月,乌鞘岭的地上生物量与前1月各气候因子均明显正相关,与前2月的气温因子和日相

表2 祁连山南坡灌丛草甸地上生物量与气候水热因子的相关性

Table 2 Correlations between above ground biomass with climatic humidity and heat factors of shrubbery meadow in the south slop of the Qilian Mountains

样地	相关月份	日最高气温	日最低气温	日均温	日水汽压	日相对湿度	降水量
乌鞘岭	前1月	0.931*	0.919*	0.929*	0.933*	0.908*	0.925*
	前2月	0.918*	0.920*	0.922*	0.855	0.888*	0.838
	前3月	0.820	0.820	0.833	0.745	0.582	0.756
	前4月	0.942*	0.919*	0.923*	0.693	0.030	0.559
门源	前1月	0.950*	0.930*	0.953*	0.923*	0.846	0.670
	前2月	0.853	0.899*	0.889*	0.846	0.928*	0.940*
	前3月	0.839	0.850	0.854	0.723	0.712	0.707
	前4月	0.936*	0.857	0.896*	0.641	0.118	0.496
祁连	前1月	0.990**	0.931*	0.960**	0.949*	0.872	0.885*
	前2月	0.925*	0.966*	0.956*	0.941*	0.988**	0.970*
	前3月	0.910*	0.941*	0.937*	0.830	0.661	0.784
	前4月	0.992**	0.955*	0.977**	0.767	0.321	0.597
野牛沟	前1月	0.998**	0.964*	0.987**	0.977**	0.918*	0.776
	前2月	0.929*	0.980**	0.968**	0.924*	0.971**	0.858
	前3月	0.952*	0.931*	0.948*	0.801	0.701	0.717
	前4月	0.986**	0.920*	0.960**	0.736	0.491	0.567

注:*表示相关性明显($P < 0.05$);**表示相关性显著($P < 0.01$)。

对湿度明显正相关,与前4月气温因子也明显正相关。门源的地上生物量与前1月气温因子和日水汽压明显正相关,与前2月的气温因子、相对湿度和降水量明显正相关,与前4月的气温因子明显正相关。除日相对湿度外,祁连的地上生物量与前1月各气候因子明显或显著正相关,与前2月各气候因子明显或显著正相关,与前3月气温因子明显正相关,与前4月气温因子显著正相关。除降水量外,野牛沟的地上生物量与前1月各气候因子显著或明显正相关,与前2月各气候因子也显著或明显正相关,与前3月气温因子明显正相关,与前4月气温因子显著正相关。总体上,祁连山南坡灌丛草甸地上生物量积累与前1月和前2月的气温和降水明显正相关,与前4月的气温也明显正相关,但对气温变化的敏感性大于降水。

气候水热因子对祁连山南坡灌丛草甸地上生物量积累有一定交互影响。通径分析的因变量是地上生物量(Y),各因子分别是:日最高气温(X_1)、日最低气温(X_2)、日均温(X_3)、日水汽压(X_4)、日相对湿度(X_5)、降水量(X_6)。拟合的线性回归方程分别为:

$$Y_{前1月} = -164.478 - 1.54X_1 - 3.819X_2 + 14.634X_3 - 10.498X_4 + 3.204X_5 + 0.517X_6, R^2 = 0.6872, \quad (6)$$

$$P = 0.009;$$

$$Y_{前2月} = 17.266 - 57.283X_1 - 75.674X_2 + 145.297X_3 - 27.166X_4 + 1.45X_5 + 0.692X_6, R^2 = 0.6708, \quad (7)$$

$$P = 0.012;$$

$$Y_{前3月} = -166.29 - 8.238X_1 - 22.365X_2 + 46.709X_3 - 50.904X_4 + 6.49X_5 + 0.4X_6, R^2 = 0.7413, \quad (8)$$

$$P = 0.003;$$

$$Y_{前4月} = 39.313 - 14.374X_1 - 31.887X_2 + 68.606X_3 - 92.6X_4 + 5.634X_5 - 0.195X_6, R^2 = 0.7691, \quad (9)$$

$$P = 0.001。$$

从对 Y 的直接作用来看, X_3 、 X_5 、 X_6 为正向影响, X_1 、 X_2 、 X_4 为负向影响,其中前1月 X_3 和 X_5 正向直接影响较大,前2月、前3月、前4月 X_3 正向和 X_2 负向直接影响较大。

2.3.2 地上生物量与土壤水热因子的关系

祁连山南坡各灌丛草甸地上生物量与土壤水热因子也相关,相关性也有差异(表3)。乌鞘岭的地上生物量与当前月各土壤水热因子弱正相关,以当前月为基准月,与前1月5 cm处地温明显正相关,与其它土壤水热因子弱正相关,与10~30 cm

表3 祁连山南坡灌丛草甸地上生物量与土壤水热因子的相关性

Table 3 Correlations between above ground biomass with soil humidity and heat factors of shrubbery meadow in the south slop of the Qilian Mountains

样地	相关月份	地温					土壤水分		
		5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm
乌鞘岭	当前月	0.289	0.052	0.121	0.279	0.686	0.689	0.453	0.236
	前1月	0.972*	0.901	0.892	0.850	0.795	0.191	-0.183	-0.366
门源	当前月	0.744	0.649	0.124	-0.050	-0.336	0.327	0.576	0.552
	前1月	0.853	0.880	0.673	0.503	0.239	-0.273	0.074	0.090
祁连	当前月	0.678	0.677	0.424	0.333	0.212	0.049	0.097	0.304
	前1月	0.987*	0.994**	0.754	0.601	0.430	0.036	0.268	0.377
野牛沟	当前月	0.560	0.505	-0.073	-0.028	-0.401	0.330	0.106	0.707
	前1月	0.937*	0.956*	0.645	0.636	0.156	-0.098	-0.218	0.464

注:*表示相关性明显($P < 0.05$);**表示相关性极显著($P < 0.01$)。

土壤水分弱负相关。门源的地上生物量与当前月20~25 cm处地温和前1月0~10 cm土壤水分弱负相关,与当前月和前1月其它土壤水热因子弱正相关。祁连的地上生物量与前1月5 cm处地温明显正相关,与10 cm处地温显著正相关,与当前月和前1月其它土壤水热因子弱正相关。野牛沟的地上生物量与当前月15~25 cm处地温弱负相关外,与其它土壤水热因子弱正相关,与前1月0~20 cm土壤水分弱负相关外,与5~10 cm处地温明显正相关,与其它土壤水热因子弱正相关。总体来看,祁连山南坡灌丛草甸地上生物量积累与土壤水热因子相关性不明显,但前1月表层地温与地上生物量积累明显正相关。

土壤水热因子对祁连山南坡灌丛草甸地上生物量积累也有一定的交互作用。通径分析的因变量是地上生物量(Y),各因子分别是:5 cm地温(X_1)、10 cm地温(X_2)、15 cm地温(X_3)、20 cm地温(X_4)、25 cm地温(X_5)、0~10 cm土壤水分(X_6)、10~20 cm土壤水分(X_7)、20~30 cm土壤水分(X_8)。拟合的线性回归方程分别为:

$$Y_{\text{当前月}} = -172.206 + 18.472X_1 - 17.03X_2 - 6.23X_3 + 15.665X_4 + 0.53X_5 + 15.805X_6 - 21.15X_7 + 9.443X_8, R^2 = 0.6889, P = 0.045; \quad (10)$$

$$Y_{\text{前1月}} = -60.103 + 14.46X_1 - 10.137X_2 + 5.997X_3 + 1.782X_4 - 4.345X_5 + 0.161X_6 - 0.986X_7 + 0.31X_8, R^2 = 0.6547, P = 0.049. \quad (11)$$

从对 Y 的直接作用来看,当前月的 X_1 、 X_4 、 X_5 、 X_6 、 X_8 为正向影响, X_2 、 X_3 、 X_7 为负向影响,前1月的

X_1 、 X_3 、 X_4 、 X_6 、 X_8 为正向影响, X_2 、 X_5 、 X_7 为负向影响,其中当前月 X_7 负向和 X_1 正向直接影响较大,前1月 X_1 正向和 X_2 负向直接影响较大。

3 讨论

尽管祁连山南坡不同区域灌丛草甸群落的结构有差异,但莎草科、禾本科、蔷薇科、豆科、菊科、毛茛科植物在各群落中都有出现,构成了同一植被类型。同一植被类型的群落结构呈现出一定差异,这与生境有直接关系^[21],但放牧会导致主要物种的优势地位发生显著变化^[22]。乌鞘岭和门源均为严重退化草场,但前者比后者退化程度略轻,喜阴湿的莎草科植物矮嵩草在前一群落中优势最大,而较耐旱的禾本科植物垂穗披碱草在后一群落中优势最大。祁连是轻度退化草地,莎草科植物黑褐苔草在群落中优势较大,但草场出现了退化,豆科植物黄花棘豆成为群落中最大优势种。野牛沟是中度退化草地,较耐旱的禾本科植物垂穗披碱草和紫花针茅是优势种,豆科植物黄花棘豆也是优势种,而喜阴湿的莎草科植物高山嵩草仅为伴生种。

放牧强度对祁连山南坡灌丛草甸群落的外貌特征有很大影响,退化程度是门源>乌鞘岭>野牛沟>祁连,植被覆盖度和植物上、下层高度是门源<乌鞘岭<野牛沟<祁连,可见放牧强度越大,草场退化程度越重,群落覆盖度和植物高度越低^[8]。不同干扰类型对草地植物的多样性有影响^[21],物种丰富度是门源<乌鞘岭<祁连<野牛沟,多样性是乌鞘岭

<门源<野牛沟<祁连,均匀度是乌鞘岭<野牛沟<祁连<门源,可见放牧强度越小,草场退化程度越轻,物种丰富度越高,多样性越好。祁连山南坡灌丛草甸群落的均匀度与草地退化阶段有关,门源为严重退化草地,低植被覆盖度为植被生长提供了充足空间,因而物种均匀度较高,而祁连为轻度退化草地,群落结构相对稳定,物种均匀度也较高,乌鞘岭和野牛沟是中度退化草地,物种之间竞争激烈,导致均匀度较低。

祁连山南坡灌丛草甸地上生物量的年内变化为单峰曲线,乌鞘岭和门源在7月份最大,而祁连和野牛沟在9月份最大,这是由于前者在7月份水热组合最好,因而地上生物量的积累最大,8月份以后随着优势种珠芽蓼开始枯萎,导致地上生物量下降,而后者由于气温回升较慢,植被萌发迟缓,导致地上生物量一直处于积累过程,9月份之后随着气温降低,植物开始大量枯萎,导致地上生物量下降。坡向对祁连山南坡灌丛草甸地上生物量的积累有影响,这在生长季早期表现较为明显,采样点位于阳坡的乌鞘岭和祁连在5月份生物量积累较高,这与阳坡气温较高和回升较快有关,气温较高有利于植物萌发,进而导致生物量较高。此外,放牧干扰对地上生物量的积累也有一定影响^[8,20],乌鞘岭和门源由于过渡放牧导致土壤紧实度增加,影响植物对土壤水分和养分的利用,进而影响地上生物量的积累,而祁连和野牛沟的情况与此相反。

前1月和前2月的气候水热因子对祁连山南坡灌丛草甸地上生物量积累有一定影响,并且气温的影响大于降水,这是由于灌丛草甸对热量的需求比水分更大,李凯辉等指出7~8月的气温是决定禾本科和莎草科功能群地上生物量的主导因子^[6]。此外,前4月的气温对地上生物量积累也有一定影响,因为冬季气温较高有利于植物安全过冬,春季气温较高有利于植物萌发。对地上生物量积累来说,日气温、日相对湿度、降水量有直接正向作用,而日最高气温、日最低气温、日水汽压有直接负向作用,可见适宜的气温、湿度、降水对植物的生长有利,而温度过高或过低、水汽压过大会抑制植物生长。

4 结论

1) 祁连山南坡灌丛草甸群落的内部结构有

所不同,这不仅反映了生境差异,而且与放牧导致的草场退化程度有直接关系。放牧强度越大,植被的覆盖度越低,植物高度也越低,丰富度和多样性也越小,但均匀度还受草场退化阶段的影响。

2) 祁连山南坡灌丛草甸地上生物量的年内变化是单峰曲线,但乌鞘岭和门源的地上生物量在7月份最大,祁连和野牛沟的地上生物量在9月份最大,这与群落的植物类型和物候期始期有一定关系。此外,坡向和放牧强度对地上生物量的积累有一定影响。

3) 祁连山南坡灌丛草甸地上生物量积累与前1月和前2月的气温和降水均正相关,与前4月的气温也正相关,对气温变化的敏感性大于降水。对于地上生物量积累,日气温、日相对湿度、降水量有直接正向作用,而日最高气温、日最低气温、日水汽压有直接负向作用。

4) 祁连山南坡灌丛草甸地上生物量积累与地温和土壤水分的相关性不明显。对于地上生物量积累,5 cm、20 cm地温和0~10 cm、20~30 cm土壤水分有一定直接正向作用,而10 cm地温和10~20 cm土壤水分有一定直接负向作用。

参考文献(References):

- [1] 杨元合,饶胜,胡会峰,等. 青藏高原高寒草地植物物种丰富度及其与环境因子和生物量的关系[J]. 生物多样性, 2004, 12(1): 200-205. [Yang Yuange, Rao Sheng, Hu Huifeng et al. Plant species richness of alpine grasslands in relation to environmental factors and biomass on the Tibetan Plateau. Biodiversity Science, 2004, 12(1): 200-205.]
- [2] 郑晓翻,赵家明,张玉刚,等. 呼伦贝尔草原生物量变化及其与环境因子的关系[J]. 生态学杂志, 2007, 26(4): 533-538. [Zheng Xiaoxuan, Zhao Jiaming, Zhang Yugang et al. Variation of grassland biomass and its relationships with environmental factors in Hulunbeier, Inner Mongolia. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(4): 533-538.]
- [3] 蔡学彩,李镇清,陈佐忠,等. 内蒙古草原大针茅群落地上生物量与降水量的关系[J]. 生态学报, 2005, 25(7): 1657-1662. [Cai Xuecai, Li Zhenqing, Chen Zuozhong et al. The relationship between aboveground biomass and precipitation on *Stipa grandis* steppe in Inner Mongolia. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(7): 1657-1662.]
- [4] 陈生云,赵林,秦大河,等. 青藏高原多年冻土区高寒草地生物量与环境因子关系的初步分析[J]. 冰川冻土, 2010, 32(2): 405-413. [Chen Shengyun, Zhao Lin, Qin Dahe et al. A preliminary study of the relationships between alpine grassland biomass and environmental factors in the permafrost regions of the Tibetan Plateau. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010,

- 32(2): 405-413.]
- [5] 康晓甫, 伏洋, 颜亮东, 等. 环青海湖北岸草甸化草原植物群落与气候因子的关系[J]. 草业科学, 2010, 27(10): 1-9. [Kang Xiaofu, Fu Yang, Yan Liangdong et al. The relationship between plant communities of meadow grassland and climatic factors around North Qinghai Lake. *Pratacultural Science*, 2010, 27(10): 1-9.]
- [6] 李凯辉, 胡玉昆, 王鑫, 等. 不同海拔梯度高寒草甸地上生物量与环境因子关系[J]. 应用生态学报, 2007, 18(9): 2019-2024. [Li Kaihui, Hu Yukun, Wang Xin et al. Relationships between aboveground biomass and environmental factors along an altitude gradient of alpine grassland. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(9): 2019-2024.]
- [7] 黄富祥, 高琼, 傅德山, 等. 内蒙古鄂尔多斯高原典型草原百里香-本氏针茅草地地上生物量对气候响应动态回归分析[J]. 生态学报, 2001, 21(8): 1338-1339. [Huang Fuxiang, Gao Qiong, Fu Deshan et al. Relation between climate variables and the aboveground biomass of *Thymus mongolicus*-*Stipa bungeana* community in steppe of Ordos Plateau, Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(8): 1338-1339.]
- [8] 张伟华, 关世英, 李跃进. 不同牧压强度对草原土壤水分、养分及其地上生物量的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2000, 14(4): 61-64. [Zhang Weihua, Guan Shiyong, Li Yuejin. Effect of graxing capacity on water content, nutrient and biomass of steppe Soil. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2000, 14(4): 61-64.]
- [9] 王向涛, 张世虎, 陈懂懂, 等. 不同放牧强度下高寒草甸植被特征和土壤养分变化研究[J]. 草地学报, 2010, 18(4): 510-516. [Wang Xiangtao, Zhang Shihu, Chen Dongdong et al. The effects of natural grazing intensity on plant community and soil nutrients in alpine meadow. *Acta Agrestia Sinica*, 2010, 18(4): 510-516.]
- [10] 佟乌云, 陈有君, 李绍良, 等. 放牧破坏地表植被对典型草原地区土壤湿度的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2000, 14(4): 55-60. [Tong Wuyun, Chen Youjun, Li Shaoliang et al. Effect of vegetation destruction by pasturing on soil moisture of typical grassland. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2000, 14(4): 55-60.]
- [11] 王玉辉, 何兴元, 周广胜. 放牧强度对羊草草原的影响[J]. 草地学报, 2002, 10(2): 45-49. [Wang Yuhui, He Xingyuan, Zhou Guangsheng. Study on the responses of *Leymus chinensis* steppe to grazing in Songnen plain. *Acta Agrestia Sinica*, 2002, 10(2): 45-49.]
- [12] 伍星, 李辉霞, 傅伯杰, 等. 三江源地区高寒草地不同退化程度土壤特征研究[J]. 中国草地学报, 2013, 35(3): 77-84. [Wu Xing, Li Huixia, Fu Bojie et al. Study on soil characteristics of alpine grassland in different degradation levels in Headwater regions of three rivers in China. *Chinese Journal of Grassland*, 2013, 35(3): 77-84.]
- [13] 邵新庆, 石永红, 韩建国, 等. 典型草原自然演替过程中土壤理化性质动态变化[J]. 草地学报, 2008, 16(6): 566-571. [Shao Xinqing, Shi Yonghong, Han Jianguo et al. Dynamics of soil physicochemical properties during the natural restoration and succession of typical steppe in Inner Mongolia autonomous region. *Acta Agrestia Sinica*, 2008, 16(6): 566-571.]
- [14] 赵彬彬, 牛克昌, 杜国祯. 放牧对青藏高原东缘高寒草甸群落27种植物地上生物量分配的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1596-1606. [Zhao binbin, Niu Kechang, Du Guozhen. The effect of grazing on above-ground biomass allocation of 27 plant species in an alpine meadow plant community in Qianghai-Tibetan plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(3): 1596-1606.]
- [15] 荀其蕾, 安沙舟, 孙宗玖, 等. 不同放牧压力下伊犁绢蒿构件生物量分配的变化[J]. 草地学报, 2015, 23(2): 258-263. [Xun Qilei, An Shazhou, Sun Zongjiu et al. Effects of different grazing intensities on the distribution of *Seriphidium transiliense* Modular biomass. *Acta Agrestia Sinica*, 2015, 23(2): 258-263.]
- [16] 干友明, 李志丹, 泽柏, 等. 川西北亚高山草地不同退化梯度土壤养分变化[J]. 草业学报, 2005, 14(2): 38-42. [Gan Youmin, Li Zhidan, Ze Bai et al. The changes of grassland soil nutrition at different degradation subalpine meadow of north-west in Sichuan. *Acta Prataculturae Sinica*, 2005, 14(2): 38-42.]
- [17] 黄德青, 于兰, 张耀生, 等. 祁连山北坡草地生物量及其与气象因子的关系[J]. 草业科学, 2011, 28(8): 1495-1501. [Huang Deqing, Yu Lan, Zhang Yaosheng et al. A study on grassland biomass and their relationships with meteorological factors in the northern slopes of the Mountains Qilian. *Pratacultural Science*, 2011, 28(8): 1495-1501.]
- [18] 陈生云, 刘文杰, 叶柏生, 等. 疏勒河上游地区植被物种多样性和生物量及其与环境因子的关系[J]. 草业学报, 2011, 20(3): 70-83. [Chen Shengyun, Liu Wenjie, Ye Baisheng et al. Species diversity of vegetation in relation to biomass and environmental factors in the upper area of the Shule River. *Acta Prataculturae Sinica*, 2011, 20(3): 70-83.]
- [19] 黄德青, 于兰, 张耀生, 等. 祁连山北坡天然草地根冠比与气候因子的关系[J]. 干旱区研究, 2011, 28(6): 1025-1030. [Huang Deqing, Yu Lan, Zhang Yaosheng et al. Study on root-shoot ratios of natural grasslands and their relationships with climatic factors in the northern slopes of the Qilian Mountains. *Arid Zone Research*, 2011, 28(6): 1025-1030.]
- [20] 杜家菊, 陈志伟. 使用SPSS线性回归实现路径分析的方法[J]. 生物学通报, 2010, 45(2): 4-6. [Du Jiaju, Chen Zhiwei. Method of path analysis with SPSS linear regression. *Bulletin of Biology*, 2010, 45(2): 4-6.]
- [21] 范永刚, 胡玉昆, 李凯辉, 等. 不同干扰对高寒草原群落物种多样性和生物量的影响[J]. 干旱区研究, 2008, 25(4): 531-536. [Fan Yonggang, Hu Yukun, Li Kaihui et al. Effects of different disturbances on the diversity and biomass of the phyto-biocoenoses in alpine steppes. *Arid Zone Research*, 2008, 25(4): 531-536.]
- [22] 单贵莲, 徐柱, 宁发. 典型草原不同演替阶段群落结构与物种多样性变化[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(2): 163-169. [Shan Guilian, Xu Zhu, Ning Fa. The changes of community

structure and species diversity in different succes-sion stage in typical steppe. Journal of Arid Land Resources and Environ-

ment, 2010, 24(2): 163-169.]

Biomass Variation of Shrubbery Meadow and Relation with Humidity and Heat Facts in the Southren Slop of the Qilian Mountains

Jia Wenxiong, Wang Jie, Zhang Yushun, Liu Yarong

(College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: Based on field investigation and laboratory analysis, the biomass of shrubbery meadows and the relation with water and heat factors during growing season were studied in the southern slope of the Qilian Mountains. The result indicated that community structures of shrubbery meadows exhibited obviously regional differences. The plant height, community richness and species diversity are lower owing to the lower community coverage, whiles plant evenness degree is correlated with the different stages of degeneration. However, the higher plant evenness degree was owing to the steadier of community structure. The annual variations of above ground biomass for shrubbery meadow communities showed the hump line pattern, and its highest values in Wushaoling and Menyuan happened on July but this occured on September in Qilian and Yeniugou station. The above ground biomass increments of shrubbery meadow communities had the positive correlation with temperature and precipitation before one and two monthes as well as temperature before four monthes, and its sensitivity to temperature was larger than to precipitation. The correlations with soil humidity and temperature were not obvious, but topsoil temperature before one month is conductive to the increment of above ground biomass. Daily temperature, relative humidity and precipitation displayed the directly positive effect on above ground biomass, but this is contrary to daily maximum temperature, daily minimum temperature and water vapor pressure. Soil temperature underground 5 cm and 20 cm and soil humidity underground 0-10 cm and 20-30 cm have directly positive effect on above ground biomass, whiles this is opposite to soil temperature underground 10 cm and soil humidity underground 10-20 cm.

Key words: shrubbery meadow; above ground biomass; humidity and temperature factor; interaction; the Qilian Mountains