

山西亚高山草甸植被生物量的地理空间分布

马丽^{1,2} 徐满厚^{1*} 周华坤² 贾燕燕¹ 王孝贤¹ 席文涛¹

(¹太原师范学院地理科学学院, 山西晋中 030619; ²中国科学院西北高原生物研究所, 青海省寒区恢复生态学重点实验室, 西宁 810008)

摘要 以山西省境内分布的典型亚高山草甸为对象, 采用收获法获取植被生物量数据, 结合经度、纬度和海拔 3 个地理因子, 分析总生物量(TB)、地上生物量(AGB)、地下生物量(BGB)及根冠比(R/S)沿不同地理梯度的变化规律, 从群落水平上探究山西亚高山草甸植被生物量的地理空间分布特征。结果表明: (1) TB、AGB、BGB 在地域上表现较大变异。AGB 变异最大, 在 32.50~756.00 g·m⁻²; BGB 次之, 变化范围为 140.50~1586.50 g·m⁻²; TB 波动最小, 在 248.25~2342.50 g·m⁻²。(2) TB 随海拔升高显著减小($P<0.05$), 随经度增加缓慢增大($P>0.05$), 随纬度增加略微减小($P>0.05$), 在 1700~1800 m、113.4°E—113.85°E、35°N—35.5°N 处最大(平均为 896 g·m⁻²)。(3) AGB 随纬度增加、海拔升高显著减小($P<0.001$), 随经度增加逐渐增大($P<0.05$), 在 1700~1800 m、112.05°E—112.5°E、35°N—35.5°N 处最大(平均为 366.06 g·m⁻²)。(4) BGB 随纬度增加呈“降低-升高-降低”的变化趋势, 整体略有增大($P>0.05$), 随经度增加也略有增大($P>0.05$), 而随海拔升高显著增大($P<0.05$), 在 3000~3100 m、113.4°E—113.85°E、35°N—35.5°N 处最大(平均为 745.63 g·m⁻²)。(5) R/S 随纬度增加、海拔升高显著增大($P<0.05$), 随经度增加略有增大($P>0.05$); 与纬度、海拔呈显著的幂指数函数关系($P<0.05$), 且表现为等速增长(幂指数平均为 1.025)。RDA 分析结果表明, 在一定范围内, 对亚高山草甸植被不同生物量特征影响较大的为纬度和海拔因子, 最小影响因子是经度, 地上生物量与经纬度和海拔均呈显著的负相关, 生物量更多地分配到地下部分。

关键词 亚高山草甸; 生物量; 纬度; 经度; 海拔

Geographical distribution of vegetation biomass of subalpine meadow in Shanxi Province.

MA Li^{1,2}, XU Man-hou^{1*}, ZHOU Hua-kun², JIA Yan-yan¹, WANG Xiao-xian¹, Xi Wen-tao¹
(¹ Institute of Geographical Science, Taiyuan Normal University, Jinzhong 030619, Shanxi, China; ² Key Laboratory of Restoration Ecology of Cold Area in Qinghai Province, Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China).

Abstract: In this study, we selected typical subalpine meadow distributed in Shanxi Province to explore the geographical distribution of vegetation biomass of subalpine meadow at the community level. After biomass was harvested, the variation of total biomass (TB), above-ground biomass (AGB), below-ground biomass (BGB) and root: shoot ratio (R/S) were analyzed at different geographical gradients (longitude, latitude, and altitude). The results showed that TB, AGB, and BGB substantially varied across the region. The variation was the largest for the AGB with a range of 32.50–756.00 g·m⁻², followed by the BGB with a range of 140.50–1586.50 g·m⁻². The variation in TB was the smallest with a range of 248.25–2342.50 g·m⁻². The TB decreased significantly with altitude ($P<0.05$), whereas increased slowly with longitude ($P>0.05$), and slightly decreased with latitude ($P>0.05$). The largest TB was found at 1700–1800 m, 113.4–113.85°E, 35–35.5°N (with an average of 896 g·m⁻²). The AGB decreased significantly with

国家自然科学基金项目(41501219)、山西省应用基础研究计划项目(2016021136)、山西省高等学校科技创新项目(晋教科[2016]4号)、山西省高等学校重点学科建设项目(晋教研函[2016]4号)和青海省创新平台建设专项(2017-ZJ-Y20)资助。

收稿日期: 2017-11-01 接受日期: 2018-06-05

* 通讯作者 E-mail: xumanhou@163.com

increasing latitude and altitude ($P < 0.001$), and gradually increased with longitude ($P < 0.05$). The largest AGB was found at 1700–1800 m, 112.05–112.5°E, 35–35.5°N (with an average of 366.06 g · m⁻²). The BGB showed a trend of “decrease-increase-decrease” as the latitude increased, but increased slightly overall ($P > 0.05$), slightly increased with longitude ($P > 0.05$), and increased significantly with the increases of altitude ($P < 0.05$). The maximum BGB was found at 3000–3100 m, 113.4–113.85°E, 35–35.5°N (with an average 745.63 g · m⁻²). The R/S increased significantly with increasing latitude and altitude ($P < 0.05$), slightly increased with longitude ($P > 0.05$), and showed a significant exponential function with latitude and altitude ($P < 0.05$), characterized by isometric growth (average power exponent of 1.025). Results from redundancy analysis showed that latitude and altitude had greater impacts on the biomass of subalpine meadow, while longitude had less impact. The AGB was negatively correlated with longitude, latitude, and altitude. Subalpine meadow allocated more biomass to belowground parts.

Key words: subalpine meadow; biomass; latitude; longitude; altitude.

植物群落生物量是研究植被净初级生产力的基础,是植被碳库的度量,体现了生态系统结构与功能的综合性数量特征(Zheng *et al.*, 2004)。植物群落地上-地下生物量及其分配的微小变化,会引起不同碳库之间的碳周转,影响陆地生态系统碳循环,进而调节全球的气候变化(乔宇鑫等, 2016),从而使得生物量的估算和动态变化成为碳循环以及现代生态学的重要内容(Schimel *et al.*, 1997)。

植物群落作为一个有规律的自然综合实体,其生产力必然具有空间格局上的变化特点(李博, 1993),地理位置信息(经度、纬度、海拔)可直接反映出群落属性的空间分布格局以及环境因子的梯度状况(焦翠翠等, 2016)。研究表明,植物群落生物量具有明显的纬度和海拔梯度变化(Gaston, 2000; 焦翠翠等, 2016)。然而,韩彬等(2006)对内蒙古地区草地研究发现,海拔对生物量的影响并不显著;沙威等(2016)研究也发现阿尔金山植物群落生物量并未表现出明显的纬度、经度和海拔梯度变化。可见,关于植物群落生物量地理空间分布的研究结论尚存在很大不确定性。其中,关于植物群落生物量随海拔梯度的变化规律主要有3种:生物量与海拔呈负相关(刘哲等, 2015)、正相关(刘国华等, 2003)、“单峰”曲线关系(柳妍妍等, 2013)。但是,有关区域尺度上植物群落生物量水平空间分布规律的研究相对较少。现有研究多是借助遥感降尺度估算、GIS空间插值和空间统计方法等进行模拟分析(王晓莉等, 2014),研究区域多集中在内蒙古草原(马文红等, 2006; 乔宇鑫等, 2016; 赵鸣飞等, 2016)、西北荒漠草地(王敏等, 2013; 杨昊天等, 2013; 党晓宏等, 2017)、青藏高原高寒草甸(杨兆平等, 2010; 杨秀静等, 2013; 徐满厚等, 2016)等中国北

方和西部草地,而对位于中国中部地区的山西亚高山草甸,其植被群落生物量随经纬度和海拔的空间分布研究还很薄弱,已见报道的多集中在吕梁山(李素清等, 2007; 李晋鹏等, 2008; 卢爱英等, 2011; 罗永开等, 2017),对山西境内其他具有亚高山草甸的山脉尚未深入探讨。

山西分布的亚高山草甸不仅是优良的天然牧场,同时还是著名的生态旅游景观,如被誉为“高原翡翠”的荷叶坪、“华北九寨沟”的舜王坪、“华北屋脊”的五台山等(马子清, 2001)。近些年来,随着旅游业和放牧业的高度发展,吕梁山(卢爱英等, 2011)、五台山(章异平等, 2011)、中条山(陈娇, 2012)等山脉分布的亚高山草甸受人类破坏逐渐增强,其生态环境日益敏感、脆弱。因此,本研究以山西分布的典型亚高山草甸为研究对象,从经度、纬度、海拔3种地理因子出发,揭示草甸植被群落地上、地下生物量及根冠比的水平、垂直空间分布特征,从而为探讨退化草地生态系统的恢复与重建提供理论依据,对均衡当地经济发展与生态环境质量的关系具有重要的社会应用价值。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

山西省(110°14′E—114°33′E, 34°34′N—40°43′N)属于温带大陆性季风气候,年平均气温4~14℃,夏季平均气温22~27℃,冬季平均气温-12~-2℃范围,年降水量为400~600 mm,全年无霜期4~7个月(秦浩等, 2015)。该省地处黄土高原东部,位于我国第二级阶梯,地形复杂多变,东为太行山,西为吕梁山,南、北两端有中条山和恒山,中部是南北走向的一系列盆地,由北至南依次为大同盆

地、太原盆地、临汾盆地、运城盆地,而山地和丘陵面积占全省总面积的80%以上,海拔大都在1000 m以上。在复杂的地貌特征、水热组合条件下,形成以温带植被为主的植被类型(全莉棉等,2016)。在全省较大的山系中,几乎都有亚高山草甸类草地的分布(约530万亩),其分布位置主要在太岳、吕梁、五台、云中、中条、恒山等山系林线以上的高海拔地带(一般在海拔1700 m以上)。草甸植被组成主要以中生耐寒的多年生草本为主(陈安仁,1983),植物群落生长茂密,覆盖度大,是山西各大山地顶部的优势植被,常见的有苔草属、嵩草属、菊科、豆科、莎草科等科属植物(马子清,2001)。草甸分布区内的土壤为亚高山草甸土,有机质含量丰富,枯草层较厚。

1.2 样地设置

首先,于2016年7—8月进行实验样地的踏查与选取工作,选择人为干扰少、地势平坦、植被分布均匀的典型亚高山草甸作为生物量数据采集样地。在整个山西境内,从北到南依次选取了五台山山系的东台和北台,恒山山系的甸顶山,吕梁山山系的荷叶坪、马仑草原、云中山和云顶山,中条山山系的舜王坪和圣王坪共9个亚高山草甸样点(图1)。然后,每个样点随机设置6个面积为1 m²(1 m×1 m)的样方进行群落多样性调查,记录每个物种的高度、

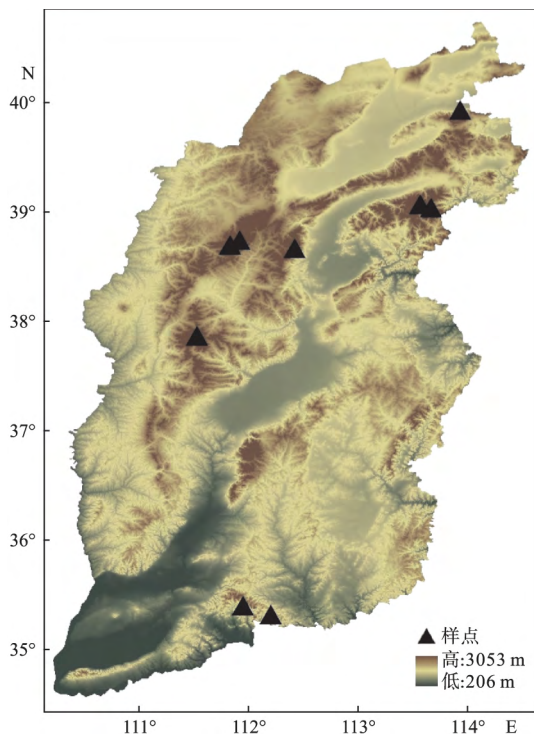


图1 研究区样点分布图

Fig.1 Sampling sites distribution map of study area

表1 研究区样点详细信息

Table 1 Detail information of sampling sites

采样区	采样点	纬度(°N)	经度(°E)	海拔 m
恒山	甸顶山	39.94	113.94	2265
五台山	北台	39.08	113.57	3045
五台山	东台	39.05	113.67	2565
吕梁山	马仑草原	38.75	111.93	2710
吕梁山	荷叶坪	38.71	111.84	2745
吕梁山	云中山	38.68	112.43	2260
吕梁山	云顶山	37.88	111.54	2690
中条山	舜王坪	35.42	111.96	2250
中条山	圣王坪	35.34	112.21	1720

多度、盖度和频度;调查完毕之后,随机选取5个多样性调查样方,在其内部中间位置再次设置面积为0.04 m²(0.2 m×0.2 m)的小样方进行生物量测量。最后,用GPS记录每个样点的经度、纬度和海拔(表1)。

1.3 调查方法

随机选取5个多样性调查样方,在其内部植被分布均匀处设置面积为0.2 m×0.2 m的小样方,采用齐地刈割法获取植物地上生物量。之后,采用挖土块法获取整个0.2 m×0.2 m面积内的植物地下生物量,挖取深度为0.2 m。将获取的植物地上部分和体积为0.2 m×0.2 m×0.2 m的土块,密封带回实验室进行后期处理。

地上生物量样品的后期处理,要剔除掺杂着的土块、石块、枯草等,仅保留当年植物活体。地下生物量样品的后期处理,首先用40目标准土壤筛(0.42 mm孔径)去除土壤中的石块等粗质杂物,再用80目标准土壤筛(0.18 mm孔径)筛分出直径≥0.18 mm的根系,并根据根的颜色、柔韧性及是否附着毛根辨别出活根。最后,将植物地上枝叶和地下活根样品放进80℃的烘箱内烘干至恒重,用精度为0.01 g的电子天平称重以获得植物地上、地下生物量数值。

1.4 数据处理

本研究中生物量调查样点在地理空间分布上具有不均匀性,为了降低空间分布不均匀可能给空间格局分析带来的不确定性,根据所调查样点的实际地理位置,做如下处理:

经向上以0.45°为间隔,自西向东将9个样点划分成5个经度梯度范围(111.15°E—111.6°E、111.6°E—112.05°E、112.05°E—112.5°E、113.4°E—113.85°E、113.85°E—114.3°E);纬向上以0.5°为间

隔,自南向北将9个样点划分成5个纬度梯度范围(35°N—35.5°N、37.5°N—38°N、38.5°N—39°N、39°N—39.5°N、39.5°N—40°N);海拔上以100m为间隔,从低到高将9个样点划分成6个海拔梯度范围(1700~1800、2200~2300、2500~2600、2600~2700、2700~2800、3000~3100m)。对属于同一地理梯度范围的不同样点,进行平均取值。

在群落水平上,将植物地下根系生物量(BGB)与地上部分生物量(AGB)之和作为总生物量(TB),将二者之比作为根冠比(R/S)。地上-地下生物量及根冠比随经度、纬度、海拔变化的显著性检验由SPSS 16.0软件进行方差分析得到,变化趋势及回归关系图由Origin 8.0软件绘制完成,用Canoco 4.5软件对植被指标与经度、纬度和海拔的关系进行排序分析。

2 结果与分析

2.1 亚高山草甸生物量特征

亚高山草甸植物群落生物量数据较为离散(表2)。TB变化范围为248.25~2342.5 g·m⁻²,AGB介于32.5~756 g·m⁻²,BGB范围在140.5~1586.5

表2 亚高山草甸植被群落地上-地下生物量

Table 2 Community above- and belowground biomass of subalpine meadow

生物量	样本量	最大值 (g·m ⁻²)	最小值 (g·m ⁻²)	平均值 (g·m ⁻²)	中值 (g·m ⁻²)	变异系数 (%)
AGB	44	756.00	32.50	175.61	122.25	88
BGB	44	1586.50	140.50	521.60	407.25	61
TB	44	2342.50	248.25	697.21	569.75	56

g·m⁻²,AGB、BGB和TB均表现出较大的数值变异。其中,AGB变异系数最大,BGB次之,TB波动最小,表明不同区域的亚高山草甸生物量差异较大,且地上植被生物量对寒冷气候响应更为敏感。BGB平均521.60 g·m⁻²约为AGB(175.61 g·m⁻²)的3倍,几乎占到TB(697.21 g·m⁻²)的75%,表明在寒冷气候影响下,草甸生物量分配趋于地下部分,导致BGB大于AGB,R/S达3.33。

2.2 总生物量的空间分布特征

TB随经度增加缓慢增大(P>0.05);随纬度增加略微减小(P>0.05);随海拔升高先减小后增大,但整体上显著减小(P<0.05)(图2)。具体来看,TB在111.15°E—111.6°E、37.5°N—38°N、2600~2700m处最小,平均为402.31 g·m⁻²;在113.85°E—

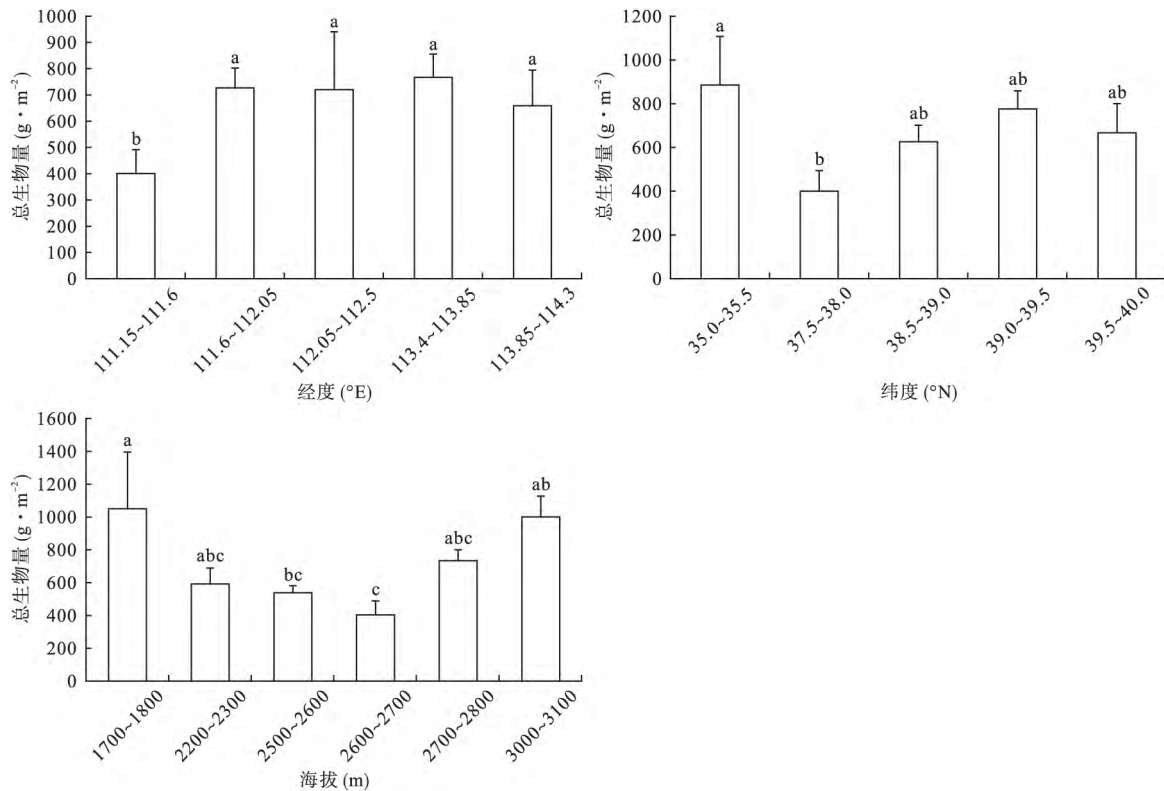


图2 亚高山草甸总生物量随经度、纬度和海拔的变化

Fig.2 Variations of total biomass of subalpine meadow with latitude, longitude and altitude

114.3° E、35° N—35.5° N、1700~1800 m 处最大,达到 896 g · m⁻²。经度梯度方面, TB 在 111.15° E—111.6° E 显著低于 111.6° E—112.05° E、112.05° E—112.5° E、113.4° E—113.85° E ($P < 0.05$) ,在 111.6° E—114.3° E 未达到显著差异 ($P > 0.05$) ,呈现出中高经度高值的分布格局; 纬度梯度方面, TB 从 35° N—35.5° N 到 37.5° N—38° N 显著减小 ($P < 0.05$) ,从 37.5° N—38° N 到 39.5° N—40° N 逐渐增大 ($P > 0.05$) ,呈现出中等纬度低值的分布格局; 在海拔梯度方面, TB 从 1700~1800 m 到 2600~2700 m 显著减小 ($P < 0.05$) ,从 2600~2700 m 到 3000~3100 m 显著增大 ($P < 0.05$) ,呈现出中等海拔低值的分布格局。亚高山草甸空间分布的不均匀性对其总生物量的空间格局产生一定的影响。

2.3 地上-地下生物量的空间分布特征

如图 3 所示, AGB 随纬度增加、海拔升高显著减小 ($P < 0.001$) 随经度增加先增大后减小, 整体逐渐增大 ($P < 0.05$) 。具体来看, AGB 在 111.15° E—111.6° E、37.5° N—38° N、2600~2700 m 处最小, 平均为 55.56 g · m⁻²; 在 112.05° E—112.5° E、35° N—35.5° N、1700~1800 m 处最大, 达到 366.06

g · m⁻²。经度梯度方面, AGB 从 111.15° E—111.6° E 到 112.05° E—112.5° E 显著增大 ($P < 0.05$) ,从 112.05° E—112.5° E 到 113.85° E—114.3° E 显著减小 ($P < 0.05$) ,呈现出中等经度高值的分布格局; 纬度梯度方面, AGB 从 35° N—35.5° N 到 37.5° N—38° N 显著减小 ($P < 0.05$) ,在 37.5° N—40° N 未达到显著差异 ($P > 0.05$) ,呈现出中高纬度低值的分布格局; 海拔梯度方面, AGB 从 1700~1800 m 到 2200~2300 m 显著减小, 在 2500~2600、2600~2700、2700~2800、3000~3100 m 未达到显著差异 ($P > 0.05$) ,呈现出中高海拔低值的分布格局。

BGB 随纬度增加呈“降低-升高-降低”的变化趋势, 整体略有增大 ($P > 0.05$) ,随经度增加也略有增大 ($P > 0.05$) ,但随海拔升高显著增大 ($P < 0.05$) 。具体来看, BGB 在 111.15° E—111.6° E、37.5° N—38° N、2600~2700 m 处的云顶山亚高山草甸样点最小, 平均为 310.05 g · m⁻²; 在 113.4° E—113.85° E、39° N—39.5° N、3000~3100 m 处最大, 达到 745.63 g · m⁻²。经度和纬度梯度方面, 在 111.15° E—114.3° E、35° N—35.5° N 到 37.5° N—40° N 均未达到显著差异 ($P > 0.05$) ,呈现出中高经度、中高纬度

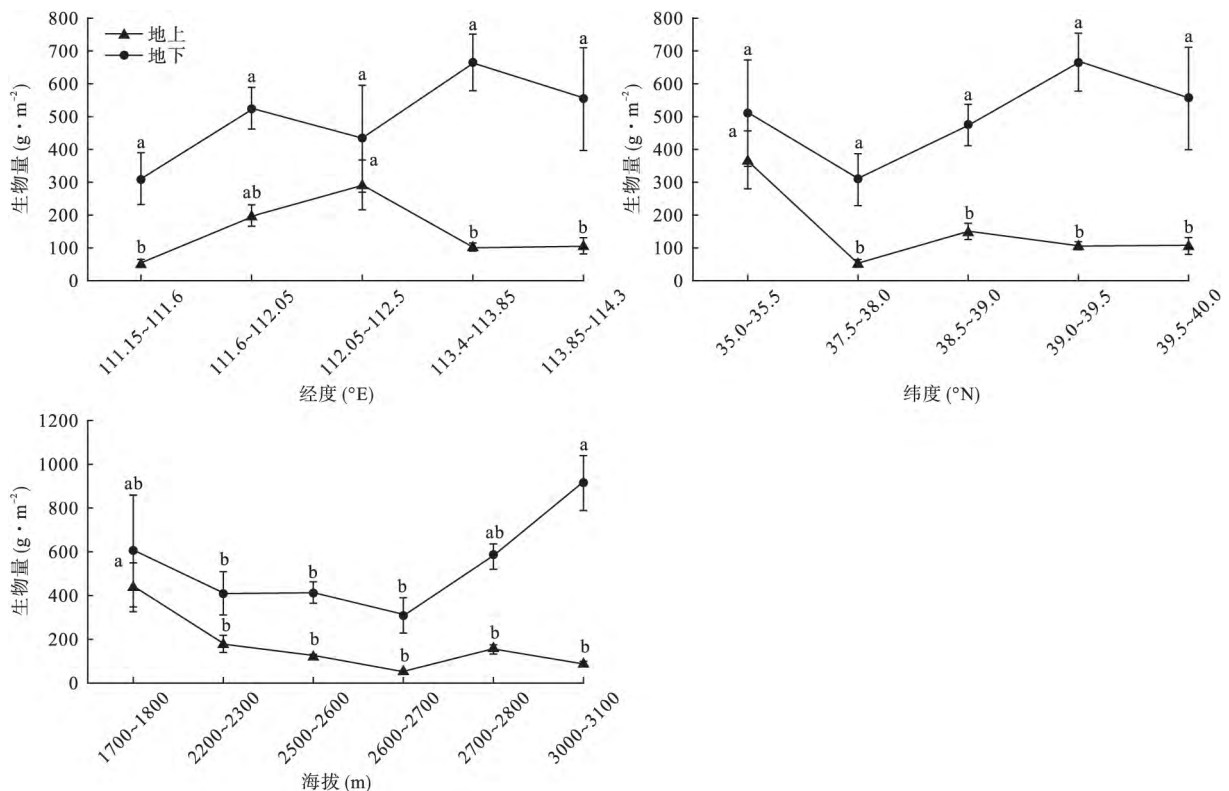


图 3 亚高山草甸地上-地下生物量随经度、纬度和海拔的变化
 Fig.3 Variations of above- and belowground biomass of subalpine meadow with latitude , longitude and altitude

高值的分布格局; 海拔梯度方面, 2600~2700 m 显著低于 3000~3100 m ($P>0.05$), 在 1700~1800、2200~2300、2500~2600、2600~2700、2700~2800 m 未达到显著差异 ($P>0.05$), 呈现出中低海拔低值的分布格局。从 112.05° E—112.5° E、38.5° N—39° N、2700~2800 m 处开始, AGB 和 BGB 随经纬度增加和海拔升高呈现相反的变化趋势。

2.4 根冠比 (R/S) 的空间分布特征

由图 4 可知, R/S 随纬度增加、海拔升高显著增大 ($P<0.05$), 与纬度和海拔呈显著的幂指数函数关系 ($P<0.05$), 且表现为等速增长; 随经度增加先减小后增大, 整体略有增大 ($P>0.05$), 与经度呈幂指数函数关系, 但并不显著 ($P>0.05$)。具体来看, R/S 在 112.05° E—112.5° E、35° N—35.5° N、1700~1800 m 处最小, 平均为 1.48; 在 113.85° E—114.3° E、39.5° N—40° N、3000~3100 m 处最大, 达到 9.33。经度梯度方面, R/S 在 112.05° E—112.5° E 处显著低于 111.15° E—111.6° E 和 113.85° E—114.3° E, 呈现出中等经度低值的分布格局; 纬度梯度方面, R/S 在 39.5° N—40° N 处显著高于 35° N—35.5° N ($P<0.05$), 与 35° N—35.5° N 处相比, R/S 在

37.5° N—40° N 未达到显著差异 ($P>0.05$), 呈现出中高纬度高值的分布格局; 海拔梯度方面, R/S 在 1700~1800 m 处显著低于 3000~3100 m, 在 2200~2300、2500~2600、2600~2700、2700~2800 m 处未达到显著差异 ($P>0.05$), 呈现出中低海拔低值的分布格局。

2.5 植被特征与经纬度、海拔因子的关系

在前面空间分析基础上, 采用 DCA、RDA 排序分析对植被特征(地上-地下生物量、总生物量和根冠比)与经度、纬度和海拔因子的关系进行整体研究。为确定排序所采用的模型, 对植被数据进行 DCA 排序, 得到 4 个排序轴的梯度长度(轴 1 为 0.43, 轴 2 为 0.36, 轴 3 为 0.17, 轴 4 为 0.00), 其中最大值为 0.43<3, 说明线性模型较为适合。选择 RDA 进行排序, 得到排序轴的特征值和累积解释量(表 3)。3 个环境因子(经度、纬度和海拔)共解释了 33.60% 物种变化信息, 前两轴累计解释了 33.6% 物种变化信息和 99.80% 物种环境关系信息, 排序结果可以解释植被-环境关系的全部信息。

第一轴为经度变化轴, 与轴呈负相关(表 4), 相关系数绝对值为 0.55, 与地上生物量呈显著的负相

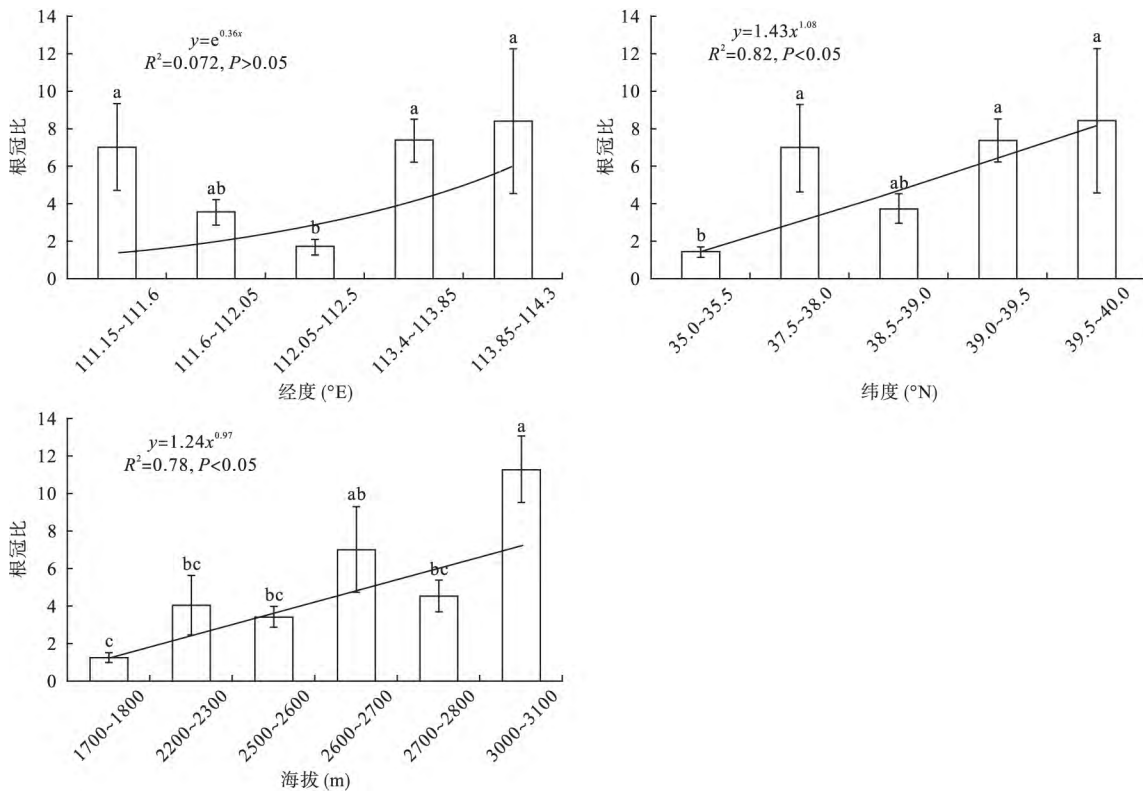


图 4 山西亚高山草甸根冠比 (R/S) 随经度、纬度和海拔的变化

Fig.4 Variations of root-shoot ratios (R/S) of subalpine meadow with latitude, longitude and altitude

表3 RDA 排序的特征值及累积解释量

Table 3 Eigenvalues and cumulative percentage variances of RDA ordination

轴	特征值	物种-环境 相关性	累积百分比变化率(%)		总典范 特征值 %
			物种	物种-环境 相关性	
1	0.25	0.57	25.20	75.00	33.60
2	0.08	0.62	33.60	99.80	
3	0.00	0.27	33.60	99.80	
4	0.65	0.00	98.90	0.00	

表4 环境因子与排序轴的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between environmental factors and ordination axes of RDA

轴	纬度	经度	海拔
1	0.16	-0.55	0.19
2	0.31	-0.07	0.23
3	0.37	-0.11	-0.40

表5 植被指标与环境因子的相关分析

Table 5 Correlation analysis between vegetation indexes and environmental factors

	地上生物量	地下生物量	总生物量	根冠比
经度	-0.78*	0.26	-0.09	0.51
纬度	-0.26	0.35	0.20	0.30
海拔	-0.71*	0.47	0.12	0.81**

关($P < 0.05$), 相关系数绝对值为 0.78(表 5), 体现经度的变化对地上生物量的影响。第二轴为纬度变化轴, 与轴呈正相关(表 4), 相关系数绝对值为 0.31, 与地下生物量和根冠比呈正相关但并不显著($P > 0.05$), 相关系数评价为 0.33(表 5)。第三轴为海拔变化轴, 与轴呈负相关(表 4), 相关系数绝对值为 0.40, 与地上生物量呈显著的负相关($P < 0.05$), 与根冠比呈极显著的正相关($P < 0.01$), 相关系数绝对值分别为 0.71 和 0.81(表 5)。如图 5 所

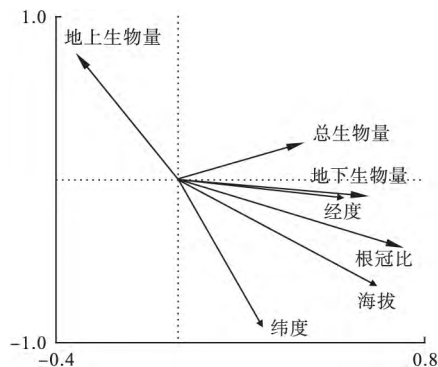


图5 植被特征(实线)与环境因子(虚线)的 RDA 排序图
Fig.5 RDA ordination diagram among vegetation characteristics (solid line) and environmental factors (dotted line)

示 3 个环境因子中, 对不同生物量植被特征影响较大的为纬度和海拔因子, 最小的影响因子是经度, 地上生物量与 3 个环境因子均呈现显著的负相关($P < 0.05$), 海拔因子对根冠比呈现极显著的负效应($P < 0.01$), 说明在一定范围内, 纬度对生物量影响最大, 经度影响最小; 地上生物量经纬度的增加和海拔的升高显著减少, 根冠比随海拔的升高则显著增大, 生物量更多地分配到地下根系。

3 讨论

3.1 亚高山草甸生物量特征

生物量作为植被生态系统的主要功能之一, 是了解植物群落特征和性质的基础(王蕾等, 2012), 研究其累积与环境因子的空间关系是生态学研究的热点和重要内容之一(陈生云等, 2011)。方精云等(2010)研究认为中国草地 TB 平均为 $479.56 \sim 773.56 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 本研究得到山西境内亚高山草甸植被群落生物量平均为 $697.21 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 但马安娜等(2014)综合多个研究数据得出高寒草甸 TB 为 $1101.6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 远大于本研究结果。这些不同的研究结果表明我国草地植被生物量的估测存在不确定性(朴世龙等, 2004), 可见, 研究区域不同温度和水分组合对草地/草甸不同植被特征产生不同且主要的影响。此外, 方精云等(2010)在研究中国草地生态系统植被生物量碳库变化中, 主要基于中国温带和高寒草地大范围实地调查取样获取数据; 马安娜等(2014)研究综合了 6 年相关论文数据, 筛选出覆盖全国的代表性样点来分析中国草地生物量关系; 本研究的实地调查区域主要在山西境内亚高山草甸植被分布区, 与前两者研究相比, 在研究面积和研究尺度方面相对较小, 认为数据来源以及研究尺度的不同可能是引起各研究之间高寒草甸总生物量差异的主要原因。

3.2 地上-地下生物量随经纬度、海拔分布特征

山西境内亚高山草甸植被分布经纬度跨越较大, 从 $111^\circ \text{ E} \sim 113^\circ \text{ E}$ 跨 3 个经度, 从 $35^\circ \text{ N} \sim 39^\circ \text{ N}$ 跨 5 个纬度, 其群落生物量的空间格局呈现出复杂的水平地带性分布规律。从纬度来看, 本研究表明 AGB 随纬度增加显著减小; 焦翠翠等(2016)通过对欧亚大陆草原研究则发现, AGB 随纬度的升高呈开口向下的抛物线变化趋势。从经度来看, 本研究得到 AGB 随经度增加逐渐增大; 朱桂丽等(2017)对西藏高寒草甸的研究也发现, AGB 自西向东呈幂指

数递增。结合经度、纬度来看,从西部低纬度向东部高纬度,内蒙古草地植物群落生物量呈递增趋势(韩彬等,2006),阿尔金山植物群落生物量研究发现并未表现出明显的纬度、经度梯度变化(沙威等,2016)。尽管各研究结论不尽相同,我国草地地上生物量受降水影响较为显著(Bai *et al.*, 2004),草地植被单位面积地上生物量空间分布与水热条件的分布趋势基本是一致的(朴世龙等,2004),随着纬度的增大和经度的减小,在热量和水分条件变弱的情况下,地上生物量逐渐减少。BGB 是理解生态系统中碳分配与存储的关键,也是土壤有机碳库主要的输入来源(Litton *et al.*, 2007)。降水量和积温对地下生物量的形成是十分重要的(王亮等,2010)。杨秀静等(2013)研究表明,草地 BGB 与土壤含水量有显著的正相关性,认为水分对草地 BGB 的控制作用较强,而经度变化一定程度上代表着潜在水分条件的变化,因此,随着经度增加 BGB 有增大趋势,与本研究得到的结论相一致。但是,由于水分季节性变化和植物生理需水量的季节性差异,使得降水量的季节分配对 BGB 的积累和分布也产生影响,导致不同季节 BGB 的测定出现较大差异。

海拔的变化综合了温度、湿度和光照等多种环境要素,是影响山地植物分布生长的重要因子(柳妍妍等,2013),一定程度上能够显著影响植物种群及生产力的空间分布格局(Gaston, 2000)。对青海地区高寒草甸的研究发现,随着海拔升高,TB 增大(刘庆,2000),AGB 逐渐减小(王长庭等,2004);在天山南坡随着海拔的升高(2340~4618 m),高寒草原、高寒草原化草甸和高寒草甸的地下生物量逐渐增大,二者呈极显著正相关(李凯辉等,2008);但是在海拔 2460~2760 m 处研究发现群落生物量与海拔呈“单峰”曲线关系(柳妍妍等,2013),即中海拔生物量最大,可以看出,在高寒草地生态系统中,生物量随海拔的变化表现出不同的规律。本研究得到随海拔升高 AGB 显著减小,BGB 显著增加,此结论与王长庭等(2004)和李凯辉等(2008)研究相一致。另外,高寒草甸是一种发育在高原或高山寒冷环境下的植被类型,随着海拔升高,温度下降较快,植物体则把更多的生物量分配到地下部分,这表明寒冷气候影响下有利于高寒草甸地下部分生物量的积累,因此 AGB 和 BGB 随海拔升高表现出相反的变化趋势。尽管草地植被地上-地下生物量受温度和降水显著影响,当降水和温度对生物量的影响排除

后,生物量随海拔的变化受土壤质地和草地类型的影响反而较弱(Bai *et al.*, 2007)。

3.3 根冠比(R/S)的空间分布特征

在植物生物量的分配中,草地植被生物量多分配于植物地下部分(赵鸣飞等,2016),其空间分布表现为 T 字形趋势下的锯齿状分布(宇万太等,2001)。根冠比大小不仅反映了植物地下部分与地上部分的相关性,还是众多地球化学循环模型中估算地下碳蓄积的重要参数(杨婷婷等,2013)。地下地上生物量比随着水热配比关系的变化也会呈现出不同的变化规律(龙毅等,2015),在干旱胁迫条件下,地下生物量和地上生物量之比即根冠比(R/S)增大,同时地下生物量也增大(Molyneux *et al.*, 1983)。有研究证明 R/S 的空间分布受水分因子的限制更大(黄玫等,2006),相比经纬度,海拔的变化对亚高山草甸土壤水分的影响更明显,而高海拔区 BGB 的形成对土壤含水量有更高的要求(Gallagher *et al.*, 1979),本研究发现 R/S 与经纬度和海拔呈正相关,尤其是海拔对根冠比起到显著的正效应,与黄玫等(2006)研究相一致。但是,也有研究发现 R/S 与温度、降水和土壤含水率之间没有显著相关关系(马文红等,2006),中国草地植物无论是从个体水平还是群落水平根冠比均与温度无关(Wang *et al.*, 2010),而且 R/S 不受草地类型改变的影响,认为植物生长所需的地上资源和地下资源之间具有比较稳定的比例,植物的地上和地下部分生长存在一种平衡,受环境条件变化的影响相对较小,表现为等速生长(Brouwer, 1983)。但大部分研究认为,生物量的分配受温度和降水调节,在全球尺度上草地的 R/S 受温度、降水的影响出现显著变化(Mokany *et al.*, 2006)。由于地下生态过程的研究受到技术和方法上的局限,生物量分配模式及地下生物量在土壤中的垂直分布格局对环境因子的响应机制并不清楚,需要加深这方面研究。

4 结 论

通过分析山西境内亚高山草甸植被群落生物量的地理空间分布特征,得到其生物量的水平和垂直地带性分布规律:(1)山西亚高山草甸植被群落 TB、AGB、BGB 在地域上表现出较大的数值变异,AGB 波动最大,BGB 次之,TB 波动最小,空间分布不均匀。(2)TB 随海拔升高、纬度增加而减小,随经度增加而增大;AGB 与 TB 的空间分布基本一致,

呈现出中经度、低纬度、低海拔高值的分布格局; BGB 随经纬度增加略有增大,但随海拔升高显著增大,呈现出高经度、高纬度、高海拔的空间分布格局。(3) R/S 随纬度增加、海拔升高而增大,随经度增加略有增大;与纬度、海拔呈幂指数函数关系,表现为等速增长。(4) 在一定范围内,3 个环境因子中,对不同生物量特征影响较大的为纬度和海拔因子,最小的影响因子是经度,地上生物量经纬度的增加和海拔的升高显著减少,根冠比随海拔的升高则显著增大,生物量更多地分配到地下根系。

生物量的形成与积累是一个复杂的生理机制过程,其地理空间分布特征是多因素综合作用的结果,不仅与经度、纬度和海拔地理因子密切相关,同时还与土壤类型、地形条件、地貌特征、采集样地的微气候等有关。下一步将结合气象因子数据继续研究,以揭示影响山西亚高山草甸植被生物量地理空间分布特征的主导因素。

参考文献

- 陈 娇. 2012. 生态恢复工程对历山舜王坪亚高山草甸植被的影响研究(硕士学位论文). 太原: 山西大学.
- 陈安仁. 1983. 山西省的牧草资源及草地类型分析. 自然资源, (3): 54-61.
- 陈生云, 刘文杰, 叶柏生, 等. 2011. 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. 草业学报, 20(3): 70-83.
- 党晓宏, 高 永, 蒙仲举, 等. 2017. 西鄂尔多斯地区 5 种荒漠优势灌丛生物量分配格局及预测模型. 中国沙漠, 37(1): 100-108.
- 方精云, 杨元合, 马文红, 等. 2010. 中国草地生态系统碳库及其变化. 中国科学: 生命科学, 40(7): 566-576.
- 韩 彬, 樊江文, 钟华平. 2006. 内蒙古草地样带植物群落生物量的梯度研究. 植物生态学报, 30(4): 553-562.
- 黄 玫, 季劲钧, 曹明奎, 等. 2006. 中国区域植被地上与地下生物量模拟. 生态学报, 26(12): 4156-4163.
- 焦翠翠, 于贵瑞, 何念鹏, 等. 2016. 欧亚大陆草原地上生物量的空间格局及其与环境因子的关系. 地理学报, 71(5): 781-796.
- 李 博. 1993. 普通生态学. 呼和浩特: 内蒙古大学出版社.
- 李晋鹏, 郭东罡, 张秋华, 等. 2008. 山西吕梁山南段植物群落的生态梯度. 生态学杂志, 27(11): 1841-1846.
- 李凯辉, 王万林, 胡玉昆, 等. 2008. 不同海拔梯度高寒草地地下生物量与环境因子的关系. 应用生态学报, 19(11): 2364-2368.
- 李素清, 张金屯. 2007. 山西云顶山亚高山草甸群落生态分析. 地理研究, 26(1): 83-90.
- 刘 庆. 2000. 青海湖北岸环境梯度上植物群落的生物量与物种多样性及其相互关系. 西北植物学报, 20(2): 259-267.
- 刘 哲, 李 奇, 陈懂懂. 2015. 青藏高原高寒草甸物种多样性的海拔梯度分布格局及对地上生物量的影响. 生物多样性, 23(4): 451-462.
- 刘国华, 张洁瑜, 张育新, 等. 2003. 岷江干旱河谷三种主要灌丛地上生物量的分布规律. 山地学报, 21(1): 24-32.
- 柳妍妍, 胡玉昆, 王 鑫, 等. 2013. 天山南坡中段高寒草地物种多样性与生物量的垂直分异特征. 生态学杂志, 32(2): 311-318.
- 龙 毅, 孟凡栋, 王常顺, 等. 2015. 高寒草甸主要植物地上地下生物量分布及退化对根冠比和根系表面积的影响. 广西植物, 35(4): 532-538.
- 卢爱英, 张先平, 王世裕, 等. 2011. 干扰对云顶山亚高山草甸群落物种多样性的影响. 植物研究, 31(1): 73-78.
- 罗永开, 方精云, 胡会峰. 2017. 山西芦芽山 14 种常见灌木生物量模型及生物量分配. 植物生态学报, 41(1): 115-125.
- 马安娜, 于贵瑞, 何念鹏, 等. 2014. 中国草地植被地上和地下生物量的关系分析. 第四纪研究, 34(4): 769-776.
- 马文红, 方精云. 2006. 内蒙古温带草原的根冠比及其影响因素. 北京大学学报: 自然科学版, 42(6): 774-778.
- 马子清. 2001. 山西植被. 北京: 中国科学技术出版社.
- 朴世龙, 方精云, 贺金生, 等. 2004. 中国草地植被生物量及其空间分布格局. 植物生态学报, 28(4): 491-498.
- 乔宇鑫, 朱华忠, 钟华平, 等. 2016. 内蒙古草地地下生物量空间格局分析. 草业学报, 25(6): 1-12.
- 秦 浩, 董 刚, 张 峰. 2015. 山西植物功能型划分及其空间格局. 生态学报, 35(2): 396-408.
- 沙 威, 董世魁, 刘世梁, 等. 2016. 阿尔金山自然保护区植物群落生物量和物种多样性的空间格局及其影响因素. 生态学杂志, 35(2): 330-337.
- 仝莉棉, 曾 彪, 王 鑫. 2016. 2000—2012 年山西省不同植被类型物候变化及其对气候变化的响应. 水土保持研究, 23(2): 194-200.
- 王 蕾, 许冬梅, 张晶晶. 2012. 封育对荒漠草原植物群落组成和物种多样性的影响. 草业科学, 29(10): 1512-1516.
- 王 亮, 牛克昌, 杨元合, 等. 2010. 中国草地生物量地上—地下分配格局: 基于个体水平的研究. 中国科学: 生命科学, 40(7): 642-649.
- 王 敏, 苏永中, 杨 荣, 等. 2013. 黑河中游荒漠草地地上和地下生物量的分配格局. 植物生态学报, 37(3): 209-219.
- 王晓莉, 常 禹, 陈宏伟, 等. 2014. 黑龙江省大兴安岭森林生物量空间格局及其影响因素. 应用生态学报, 25(4): 974-982.
- 王长庭, 王启基, 龙瑞军, 等. 2004. 高寒草甸群落植物多样性和初级生产力沿海拔梯度变化的研究. 植物生态学报, 28(2): 240-245.
- 徐满厚, 刘 敏, 翟大彤, 等. 2016. 青藏高原高寒草甸生物量动态变化及与环境因子的关系—基于模拟增温实验. 生态学报, 36(18): 5759-5767.
- 杨昊天, 李新荣, 刘立超, 等. 2013. 荒漠草地 4 种灌木生物量分配特征. 中国沙漠, 33(5): 1340-1348.

- 杨婷婷,高永,吴新宏,等. 2013. 小针茅草原植被地下与地上生物量季节动态及根冠比变化规律. 干旱区研究, **30**(1): 109-114.
- 杨秀静,黄玫,王军邦,等. 2013. 青藏高原草地地下生物量与环境因子的关系. 生态学报, **33**(7): 2032-2042.
- 杨兆平,欧阳华,宋明华,等. 2010. 青藏高原多年冻土区高寒植被物种多样性和地上生物量. 生态学杂志, **29**(4): 617-623.
- 宇万太,于永强. 2001. 植物地下生物量研究进展. 应用生态学报, **12**(6): 927-932.
- 章异平,江源,刘全儒,等. 2011. 放牧对五台山高山、亚高山草甸牧草品质的影响. 生态学报, **31**(13): 3659-3667.
- 赵鸣飞,王宇航,左婉怡,等. 2016. 内蒙古草原生物量和地下生产力空间格局及其关键影响因子. 生态学杂志, **35**(1): 95-103.
- 朱桂丽,李杰,魏学红,等. 2017. 青藏高寒草地植被生产力与生物多样性的经度格局. 自然资源学报, **32**(2): 210-222.
- Bai YF, Han XG, Wu JG, et al. 2004. Ecosystem stability and compensatory effects in the Inner Mongolia grassland. *Nature*, **431**: 181-184.
- Bai YF, Wu JG, Pan QM, et al. 2007. Positive linear relationship between productivity and diversity: Evidence from the Eurasian steppe. *Journal of Applied Ecology*, **44**: 1023-1034.
- Brouwer R. 1983. Functional equilibrium: Sense or nonsense? *Netherlands Journal of Agricultural Science*, **31**: 335-348.
- Gallagher JL, Plumley FG. 1979. Underground biomass profiles and productivity in Atlantic coastal marshes. *American Journal of Botany*, **66**: 156-161.
- Gaston KJ. 2000. Global patterns in biodiversity. *Nature*, **405**: 220-226.
- Litton CM, Raich JW, Ryan MG. 2007. Carbon allocation in forest ecosystem. *Global Change Biology*, **13**: 2089-2109.
- Mokany K, Raison RJ, Prokushkin AS. 2006. Critical analysis of root: shoot ratios in terrestrial biomes. *Global Change Biology*, **12**: 84-96.
- Molyneux DE, Davies WJ. 1983. Rooting pattern and water relations of three pasture grasses growing in drying soil. *Oecologia*, **58**: 220-224.
- Schimel DS, Participants Vemap, Braswell BH. 1997. Continental scale variability in ecosystem processes: Models, data, and the role of disturbance. *Ecological Monographs*, **67**: 251-271.
- Wang L, Niu CK, Yang YH, et al. 2010. Patterns of above- and belowground biomass allocation in China's grassland: Evidence from individual-level observation. *Science China (Life Science)*, **53**: 851-857.
- Zheng DL, Rademacher J, Chen JQ, et al. 2004. Estimating aboveground biomass using Landsat 7 ETM+ data across a managed landscape in northern Wisconsin, USA. *Remote Sensing of Environment*, **93**: 402-411.

作者简介 马丽,女,1992年生,硕士研究生,主要从事区域气候变化及其影响,发表论文2篇。E-mail: tysfxymali@163.com
责任编辑 张敏
