

高山草甸群落生物量在融雪梯度上的变化*

陈文年^{1,2} 吴彦¹ 吴宁^{1**} 罗鹏¹

(¹中国科学院成都生物研究所 生态恢复重点实验室 成都 610041)

(²内江师范学院化生系化学与生命科学学院 内江 641112)

摘要 在青藏高原东部的一个高山雪床,沿融雪从早到晚的顺序设置3个融雪梯度部位,并对每个梯度部位的环境因子和该部位上的地上与地下生物量进行了测量和比较。3个梯度部位间的融雪时间、土壤含水量和温度日较差有显著不同,而土壤营养成分及pH无明显变化。从早融部位到晚融部位,地上生物量增加,地下生物量降低,地上与地下总生物量降低,地下生物量与地上生物量的比值增大。与晚融部位相比,早融部位的地上生物量主要集中于地上0~10 cm范围内,表明在早融部位植物地上部分有变矮的趋势;早融部位的地下生物量在土壤各深度分布相对较均一,而晚融部位地下生物量则主要集中于地下0~10 cm范围内。雪场中各部位的土壤水分含量及地表温度差异对生物量的变化有较大的影响。图5 表2 参33

关键词 融雪梯度;生物量;土壤含水量;温度日较差;青藏高原

CLC Q948.15 (27)

Changes in Community Biomass along Snow-melting Gradient in Alpine Meadow*

CHEN Wennian^{1,2}, WU Yan¹, WU Ning^{1**} & LUO Peng¹

(¹ECORES Lab, Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

(²Department of Chemistry and Life Sciences, Neijiang Normal University, Neijiang 641112, Sichuan, China)

Abstract In an alpine snowfield on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau, three sites were chosen along snow-melting gradient for this study, and the environmental factors and biomass of these sites were measured and compared. The result indicated that the snow melting time, soil water content and amplitude of diurnal temperature variance at soil surface were significantly different in the three sites, while no significant differences in soil nutrient contents (total N, total P, total K, soluble N, soluble P) and pH were found. From early- to late-melting sites, aboveground biomass, total biomass and ratio of below- to aboveground biomass increased, but underground biomass decreased. Comparison with late-melting site, the aboveground biomass in early-melting site largely distributed in a range of 0~10 cm above ground, indicating that plants in the early-melting site were shorter than those in the late-melting site. Unlike the aboveground biomass, the underground biomass in the early-melting site almost distributed evenly in soil at different depths. Underground biomass in the late-melting site mainly distributed in a layer of 0~10 cm below ground. All the results suggested that the changing trend of biomass was principally affected by soil water content and diurnal soil surface temperature variance in each site. Fig 5, Tab 2, Ref 33

Keywords snowmelt gradient; biomass; soil water content; diurnal temperature variance; Qinghai-Tibetan Plateau

CLC Q948.15 (27)

在高山地区,由于风和地形的相互作用,在较短的距离内往往存在着明显的季节性积雪厚度梯度^[1-2],与此相联系,不同位点的融雪时间也有明显的不同。融雪时间不仅影响着植物生长季的长度^[3-4],而且在很大程度上还能改变雪下的环境条件,比如土壤理化特征^[5-6]、土壤水分含量^[7],以及雪下的微生物活动^[8-10]等。植物长期生长在这种异质的生境中,必然会改变自身个体生长和繁殖的特性以适应由积雪引起

的资源变化。如生长在雪床中早融部位的植物,其株高会变矮以适应强风的环境^[11];另外,雪床中深雪部位的植物会增加它们的单株叶数以获得更多的同化产物^[12]。植物个体自身的生长最终都会反映到群落特征上,而生物量是植物群落特性的一个重要方面,它可以反映植物群落在特定环境中利用太阳光能和积累有机质的状况。

在青藏高原东部存在着广阔的高山草甸区域,季节性积雪现象明显^[13],在该区关于雪被与植被相互关系的研究仅见少量的报道^[14-15]。本文旨在通过对不同融雪部位上草甸群落生物量的研究,提示不同的积雪厚度及融雪时间对高山地区草甸群落特征的影响,为保护青藏高原东部广阔的草地植被以及解释该区的植被分布格局提供一些理论依据。

1 材料与与方法

1.1 研究地点

研究地点位于地处青藏高原东部的四川省松潘县章腊

收稿日期: 2008-12-01 接受日期: 2009-03-02

*国家自然科学基金项目 (Nos. 40671181, 30870396)、中国科学院知识创新项目 (Nos. KZCX2-YW-418, KZCX2-XB2-02) 和国家科技攻关项目 (Nos. 2006BAC01A15, 2006BAC01A11) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 40671181, 30870396), the Knowledge Innovation Program of the Chinese Academy of Sciences (Nos. KZCX2-YW-418, KZCX2-XB2-02), and the National Key Sci & Tech Program of China (Nos. 2006BAC01A15, 2006BAC01A11)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: wuning@cib.ac.cn)

乡卡卡山 (32°59' N, 103°40' E), 海拔3 980 m, 该区是岷山山脉的一部分, 距松潘县城及九寨沟风景区近40 km. 根据文献[16], 该区年均温2.8 °C, 1月均温-7.6 °C, 7月均温9.7 °C, 无绝对无霜期, 年均太阳辐射时数1 827.5 h, 10 °C以上的年积温为428.6 °C, 年降雨量为634.8 mm, 其中72%发生在6~8月的夏季. 土壤类型为黑毡土. 研究区域为全国降雪最多的地区之一, 传统放牧是该区主要的人为干扰方式. 在卡卡山北坡靠近山脊处, 有一个天然的低洼雪床生境, 选该雪床作为研究样地. 从样地的上端 (靠近山脊处) 到下端长近60 m, 宽近30 m, 样地的坡度变化在8°~15°之间. 从雪床的上端到末端, 雪厚度自然增加, 融雪时间逐渐推迟, 形成了一个自然的融雪梯度.

1.2 野外方法

在这个天然雪床的上部 (靠近山脊的积雪早融部分)、中部和下部 (远离山脊的积雪晚融部分) 分别设置2条长30 m、宽1 m的与山脊平行的样带, 共有这样的平行样带6条. 相邻部位间的间距是25 m, 每个部位内两条样带间的距离是1 m. 在每条样带上每隔1 m设置一个1 m×1 m的样方, 每条样带包含15个这样的样方. 每个部位包含两条样带共有1 m×1 m的样方30个.

在2006和2007年两年的3月上旬到5月中旬, 对每个样方中的融雪情况进行观察, 记录每个样方中的积雪融化完的日期, 并进一步换算成儒略日 (Julian day).

在2006和2007年两年的5月中旬 (此时雪已融化完和冻土已经解冻) 开始到8月底, 用便携式水份测量仪 (Mpkit-B, 杭州浙江托普有限公司) 测量每个样方中的土壤含水量, 每周一次. 每个部位30个样方在两年内的平均值作为这一部位的代表值.

从2006和2007年两年的10月上旬到次年的5月中旬, 在每个融雪部位的地表处, 各放置1个自动温度记录仪 (ZDR-01, 杭州浙江大学电气设备厂), 以测定地表温度的变化, 设定为每小时自动记录一次.

于2007年7月进行土壤的取样. 移开凋落物, 取地表下10~15 cm的土样, 每个样方中取2个土样, 每个部位取60个土样, 样地3个部位共取180个土样, 带回实验室自然风干, 供测量土壤总氮、总磷、总钾、速效氮、水溶性磷、水溶性钾和pH.

在上述环境因子测量的基础之上, 于2007年8月底 (此

时, 样地中的植物都已充分生长并接近生长末期) 开始用收割法测量地上生物量. 在早、中、晚3个融雪部位的每一个1 m×1 m的样方中取1个0.5 m×0.5 m的小样方, 在每一个小样方中按地面上0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm和30~40 cm共4个高度层收割所有植物的地上部份 (包含茎叶果种), 并小心收集其地上的凋落物, 作为这个1 m×1 m样方的地上及各部分生物量的代表值. 地下生物量的测定采用土柱法, 用一个人工定制的内径14 cm、长度50 cm的圆铁筒来测定地下根系生物量, 圆铁筒外面有刻度, 朝上的一端焊有长的铁把手便于圆筒打入土中后转动圆筒和拔出圆筒. 将圆铁筒垂直打入地面, 深度为40 cm, 然后将圆铁筒内的圆柱形土块取出 (去除地上茎叶部分), 分成地面下0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm共4个部分, 然后分别放在细筛子中用清水洗净并拣出其中的石砾, 即可得植物地下各个深度的生物量, 4个部分相加即可得地下总的生物量. 在每个1 m×1 m的样方中, 用圆铁筒随机取3次, 作为这个样方的地下及各深度生物量的代表值. 将地上茎叶部分与地下根系部分带回实验室在65 °C恒温下烘48 h, 然后用电子天平 (PB303-E, 上海梅特勒-托利多公司) 称量.

1.3 室内数据分析

融雪早迟对环境因子的影响是否显著以及对群落生物量的影响是否显著, 由单因素资料的方差分析 (ANOVA) 来考察, 在不同梯度之间进行多重比较.

2 结果与分析

2.1 环境因子在样地不同部位间的比较

根据两年观察的结果, 同一样方的融雪时间在年际间虽有一定的差异, 但融雪总是从上部 (浅雪的早融部位) 到下部 (深雪的晚融部位), 融雪顺序在每一年都是一致的. 雪床3个部位的雪融化时间 (Julian day)、土壤特征和地表温差如表1和表2所示. 从表1可以看出, 不同部位之间的积雪消融日期有显著的不同 ($N=60, P<0.05$). 从浅雪的早融部位到深雪的晚融部位, 随着雪厚度的增加, 积雪融化完的日期逐渐推迟. 与雪床的早融部位相比, 雪床晚融部位的融雪期推迟了将近30 d. 另外, 土壤水份含量也有明显的不同 ($N=840, P<0.05$), 从早融到晚融, 水份含量增加了54.3%. 但是, 土壤的营养成份却变化不大, 3个部位的总氮、总磷、总钾以及土壤pH皆无明显的差异; 速效氮和水溶性磷也无大的差别 (表

表1 青藏高原3个部位环境因子 ($\bar{x}\pm s$) 的比较

Table 1 Comparison of environmental factors ($\bar{x}\pm s$) among three sites of the snowfields on the Qinghai-Tibetan Plateau

样地部位 Site	融雪时间 Snow melting time (t/d)	土壤水分含量 Soil water content (w%)	总氮 Total N (w/g kg ⁻¹)	总磷 Total P (w/g kg ⁻¹)	总钾 Total K (w/g kg ⁻¹)	速效氮 Available N (w/mg kg ⁻¹)	水溶性磷 Soluble P (w/mg kg ⁻¹)	水溶性钾 Soluble K (w/mg kg ⁻¹)	pH
早融部位 Early-melting site	99.5±9.1 ^c	41.5±6.2 ^c	4.2±0.5 ^a	1.1±0.3 ^a	18.5±3.3 ^a	19.2±2.6 ^a	0	6.7±0.9 ^a	5.3 ^a
中间部位 Intermediate site	116.8±11.2 ^b	48.5±5.7 ^b	4.0±0.8 ^a	1.0±0.2 ^a	19.5±2.1 ^a	17.4±2.2 ^a	0	3.6±0.7 ^b	5.0 ^a
晚融部位 Late-melting site	130.7±10.9 ^a	61.4±8.1 ^a	4.1±0.7 ^a	0.9±0.3 ^a	17.9±3.8 ^a	16.9±1.9 ^a	0	4.3±0.4 ^b	5.4 ^a

积雪融化完日期的观察数 $N=60$ (2006年, 2007年), 土壤水分含量的观测数 $N=840$ (2006年, 2007年), 其他指标的取样数 $N=30$. 不同的小写字母a、b、c表示部位间有显著差异 ($P<0.05$)

The number of observations for snow to have thawed were 60 ($N=60$, 2006, 2007), 840 ($N=840$) for soil water content (2006, 2007), and 30 ($N=30$) for the other indices. Different letters in table indicate significant difference among sites ($P<0.05$). The same below

表2 2006与2007两年中3个部位的地表每日最高与最低温度 ($\theta/^\circ\text{C}$, $\bar{x}\pm s$) (3月、4月和5月)
Table 2 Daily highest and lowest soil surface temperature ($\theta/^\circ\text{C}$, $\bar{x}\pm s$) at three sites of the snowfield in March, April and May of 2006 and 2007

样地部位 Site	3月 March		4月 April		5月 May	
	DHT	DLT	DHT	DLT	DHT	DLT
早融部位 Early-melting site	5.4±1.9 ^a	-2.1±0.7 ^a	16.8±3.8 ^a	-4.2±1.5 ^a	24.3±5.2 ^a	2.0±0.5 ^b
中间部位 Intermediate site	4.1±1.6 ^a	-1.7±0.7 ^a	11.6±3.2 ^b	-2.1±0.7 ^b	18.6±4.5 ^b	1.8±0.4 ^c
晚融部位 Late-melting site	1.5±0.8 ^b	-0.5±0.3 ^b	6.8±1.9 ^c	-0.2±0.1 ^c	12.3±3.1 ^c	2.2±0.7 ^a

DHT代表地表日最高温度, DLT代表地表日最低温度, 两年观察数 $N=60$. 不同的字母a、b、c代表部位间差异的显著性 ($P<0.05$)

DHT represents daily highest temperature at soil surface; DLT represents daily lowest temperature at soil surface. The number of observations in two years were 60 ($N=60$)

1). 另外, 地表温度的日较差有明显的不同 ($N=150$, $P<0.05$)

(表2), 从早融部位到晚融部位都呈降低的趋势. 其中3月份地表温差下降了5.5 $^\circ\text{C}$, 4月份下降了14 $^\circ\text{C}$, 五月份下降了11.8 $^\circ\text{C}$. 这表明在积雪早融的浅雪处, 昼夜温差变化剧烈, 冻融交替明显, 植物夜间受霜冻的可能性大大增加; 而在深雪的晚融部位, 昼夜温差变化和冻融交替相对较弱, 植物夜间受霜冻的可能性相对较小.

2.2 样地各部位地上生物量的空间分布

早、中、晚3个融雪梯度的地上生物量在各个高度层次的空间分布如图1所示. 在地面上0~10 cm的高度内, 早融部位的生物量最高, 占约82%, 中间部位次之, 晚融部位最低, 只占52%. 与晚融部位和中间部位相比, 早融部位在30 cm以上的高度没有生物量分布, 地上生物量主要集中于0~10 cm的范围内. 虽然在晚融部位也是靠近地面的生物量多一些, 但在每一个高度级别内都有生物量的分布, 甚至在40 cm以上都有分布.

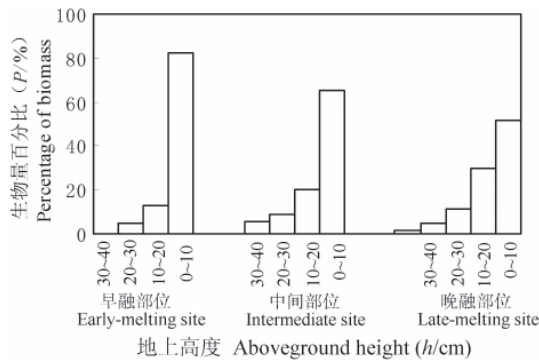


图1 地上生物量在不同高度上的分布百分比

Fig. 1 Distribution percentage of biomass at different heights above ground in each site

2.3 样地各部位地下生物量的空间分布

早、中、晚3个融雪梯度的地下生物量在各个土壤深度层次的空间分布如图2所示. 在早融部位, 地下生物量在各深度层次都有较大比例的分布, 这一点与其地上生物量在地上各高度层次的分布不同; 而在晚融部位, 地下生物量的分布则主要集中在靠近地面的0~10 cm范围内, 仅0~10 cm范围就占67.3%, 而在较深的深度上则分布较少. 可以看出, 在早融部位根系在各个深度层次上都有分布, 而在晚融部位, 根系则主要集中在靠近地面的浅层.

2.4 地上生物量在样地不同部位间的变化

地上生物量在各样地间的变化趋势如图3-A所示. 可以看出, 从样地的早融部位到晚融部位, 地上生物量呈现出逐

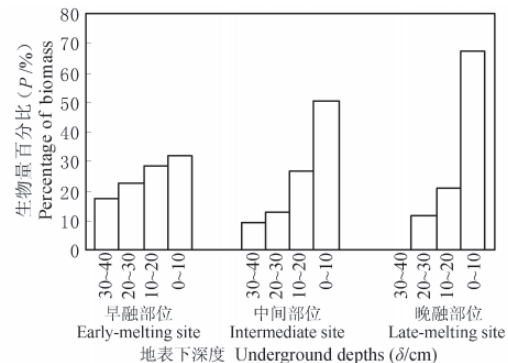


图2 地下生物量在不同地表下深度的分布百分比

Fig. 2 Distribution percentage of belowground biomass at different depths belowground in each site

渐增加的趋势. 从早融部位的(108.4±14.7) g m^{-2} 到晚融部位的(195.6±23.8) g m^{-2} , 地上生物量增加了80.4%, 且各部位之间的差异达到了显著的程度 ($N=30$, $P<0.05$).

2.5 地下生物量在样地不同部位间的变化

地下生物量的变化和地上生物量相反, 呈逐渐减少的趋势(图3-B). 从早融部位的(4 600.2±976.6) g m^{-2} 到晚融部位的

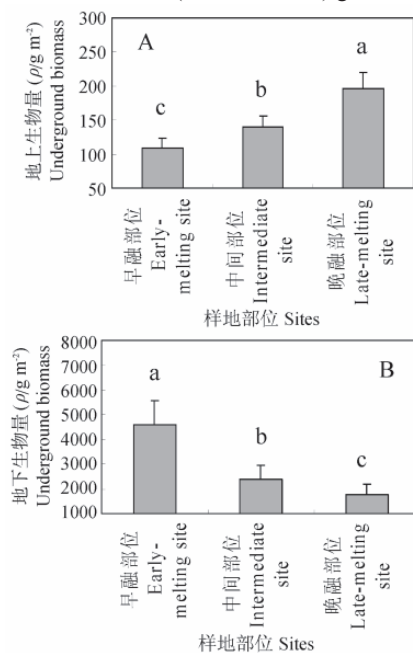


图3 地上生物量和地下生物量在各样地部位间的变化 ($N=30$)

Fig. 3 Variance of aboveground and underground biomass among the sites in snowfield ($N=30$)

(1 762.5±426.7) g m⁻², 减少了61.7%, 且各部位之间的差异也达到了显著的程度 ($N=30, P<0.05$).

2.6 地上与地下总生物量在样地不同部位间的变化

地上地下总生物量的变化趋势如图4所示. 可以看出, 总生物量的变化趋势与地下生物量的变化趋势一致. 从样地早融部位的(4 708.4±601.3) g m⁻²到晚融部位的(1 958.1±388.9) g m⁻², 降低了58.4%, 且各部位之间的差异也达到了显著的程度 ($N=30, P<0.05$) (图4).

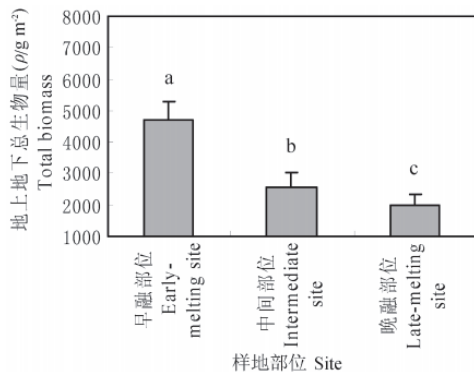


图4 地上和地下的总生物量在样地不同部位间的变化 (观察数 $N=30$)

Fig. 4 Difference in total biomass among the sites in snow field (The number of observations $N=30$)

2.7 地下生物量与地上生物量之比在各部位间的变化

地下生物量与地上生物量之比如图5所示, 其变化趋势与地上生物量及总生物量的变化趋势相近, 各部位间的差异也达到了显著的程度 ($N=30, P<0.05$). 在样地的早融部位, 比值达到40以上, 而在晚融的部位却不到10, 比值缩小了将近4倍. 这表明在早融的浅雪部位, 地下生物量比地上生物量大得多; 而在晚融的深雪部位, 虽然地下根系部分还是超过了地上的茎叶部分, 但与早融部位相比, 根系却不如早融部位发达.

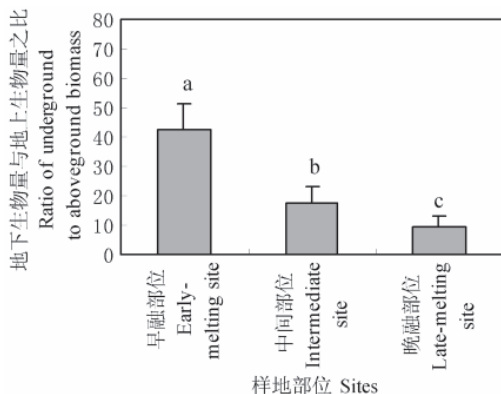


图5 各样地部位的地下生物量与地上生物量之比 ($N=30$)

Fig. 5 Ratio of underground biomass to aboveground biomass in each site in snow field ($N=30$)

3 讨论

对高寒草甸群落的研究表明, 群落的生物量与降水量有明显的关系, 由降水增加而引起的土壤含水量增加往往能使植物地下生物量减少而使地上生物量增加^[17-18], 干旱往往能

使地下生物量增加^[19], 认为这是由于水分充足时地上部分的生长加快引起地下部分有机质的消费减少而造成的. 在干旱的环境中, 植物为了应对水分的胁迫, 势必减少地上部分的生长从而有效降低水分的散失^[20]. Walker等的研究^[21]也证实, 增加的雪厚和延迟的融雪期会使高山植物的地上部分生长增加, 认为雪厚度的增加导致生长季中土壤湿度的增加是其原因之一. 在本研究中, 从早融部位到晚融部位, 土壤含水量呈现出增加的趋势, 同时, 群落的地上生物量逐渐增加而地下生物量逐渐降低. 可以看出, 水分对群落地上及地下生物量的影响具有一定的规律性, 上述学者与本研究都得出了相似的结果.

在高山季节性积雪覆盖地区, 春季和早夏的融雪季昼夜温差很大, 夜间气温会降得很低, 在融雪期由于失去了积雪层的保护作用, 低温往往是植物生长的另一个限制因子. 高寒草地群落生物量的季节性动态研究表明, 地上生物量的季节变化曲线与气温的变化吻合^[22], 而地下生物量与气温有负相关的关系^[23], 认为原因主要是温度升高有利于地上部分的生长, 而地上部分的生长会更快地消费地下部分的能量从而导致地下生物量相对较小. Molau的研究^[24]也发现, 在浅雪样地中, 由于积雪的早融, 常绿垫状灌木 *Diapensia laponica* 的地上生物量由于霜冻而降低了22%. 在本研究中, 样地的早融部位由于积雪的早融, 夜间气温会降到很低的水平, 并且早融部位相对于旱, 这些都不利于植物地上部分的生长, 因此有更多的能量积聚于地下部分; 而晚融部位则相反, 等积雪融化完植物开始生长时, 气温已升得较高, 这时的夜晚温度也不会降得太低, 且晚融部位土壤含水量相对较大, 因此地上部分的生长较快使得地下部分生长减弱, 故而表现出沿着融雪梯度地上部分逐渐增加而地下部分逐渐减小的结果.

本研究中早融部位的地上生物量主要分布在地上0~10 cm范围内, 10 cm以上分布相对较少, 很明显, 早融部位的植物有矮化的趋势, 这可能与风的影响还有一定的关系. 根据文献记载, 3、4、5月松潘最大风速分别可达12、10、10 m/s^[16], 而且风速可随海拔的升高而加大^[25]. 我们在研究样地的考察中也发现, 样地所在山脊处盛行西北风, 尤其是午后风力加大. 长期的风力不仅影响植物的形态生长, 而且还会使春季早融部位温度下降, 抑制植物生长. Kudo的研究^[12]也得出了类似的结论. 早融部位中植物的矮化可能是导致植物地上生物量减小的主要原因之一.

在本研究中, 大多数的雪床植物单株叶数和单叶面积是随融雪时间的推迟而增加的 (另文发表), 而单株叶数和单叶面积的增加也有利于地上生物量增加, 这可能是晚融部位地上生物量较高的原因之一. 其他学者的研究也得出了类似的结论^[11]. 同时, 从雪床样地的各个部位来看, 地下生物量都大于地上生物量, 表明在高山草甸区域发达的根系对于植物维持生命活动是很重要的.

本研究所处的青藏高原东部是良好的冬牧场^[14], 畜牧业是当地的支柱产业. 在春季和早夏积雪融化的季节, 牧草极度缺乏, 早融部位成为牲畜首先啃食的区域. 尽管在本研究开始时, 在样地周围设置了围栏以避免牲畜的干扰, 但在本研究开始以前的很多年中, 在青藏高原东部广阔的高山草甸区是没有避免牲畜啃食与践踏的. 较多的啃食与践踏可能会对早融部位地上部分产生更多直接的影响; 也会使早融

部位土壤含水量相应地减少^[26-27],而土壤含水量的减少也不利于地上生物量的提高^[17-19]。并且,本研究所所在的区域最大积雪厚度为1 m左右,与欧洲^[28-29]、北美^[30-32]等高纬地区的积雪相比,青藏高原东部的季节性积雪厚度相对较薄,融雪时间相对较早,早融与晚融部位的植物基本上都能完成生活周期。因此,早融和晚融部位生物量的差别可能主要不是由于与融雪时间相联的生长季长度的差别造成的,而可能主要受表土低温及土壤水分的影响。这些可能是本研究与高纬地区不完全相同的地方。

随着全球变暖,高山地区季节性积雪的融化会加快和提前^[33]。根据本研究,提前融雪导致高山草甸群落的地上、地下生物量的空间结构发生变化。在积雪早融的情况下,高山草甸的地上生物量可能会相应地减小,而地下部分可能会相应地增加。在青藏高原东部的高山地区,畜牧业是当地的支柱产业,而高山草甸的地上部分产量又是畜牧业赖以存在的基础。地上生物量的大面积减小可能会给当地的畜牧业带来一定的影响,这在今后高山生态学的研究中值得注意。

References

- Billings WD, Bliss LC. An alpine snowbank environment and its effects on vegetation, plant development, and productivity. *Ecology*, 1959, **40**: 388-397
- Wijk S. Performance of *Salix herbacea* in an alpine snow-bed gradient. *J Ecol*, 1986, **74**: 675-684
- Molau U. Relationship between flowering phenology and life history strategies in tundra plants. *Arct Alp Res*, 1993, **25**: 391-402
- Totland Ø, Alatalo JM. Effects of temperature and date of snowmelt on growth, reproduction, and flowering phenology in the Arctic/alpine herb, *Ranunculus glacialis*. *Oecologia*, 2002, **133**: 168-175
- Rixen C, Stoeckli V, Ammann W. Does Artificial snow production affect soil and vegetation of Ski Pistes? *Perspect Plant Ecol*, 2003, **5**: 219-230
- Rixen C, Haebetli W, Stoeckli V. Ground temperature under Ski Pistes with artificial and natural snow. *Arct Antarct Alp Res*, 2004, **36**: 419-427
- Taylor RV, Seastedt TR. Short- and long-term patterns of soil moisture in alpine tundra. *Arct Alp Res*, 1994, **26**: 14-20
- Brooks PD, Williams MW, Schmidt SK. Microbial activity under alpine snowpacks, Niwot Ridge, Colorado. *Biogeochemistry*, 1996, **32**: 93-113
- Lipson DA, Schadt GW, Schmidt SK. Changes in soil microbial community structure and function in an alpine dry meadow following spring snow melt. *Microbial Ecol*, 2002, **43**: 307-314
- Uchida M, Mo W, Nakatsubo T, Tsuchiya Y, Horikoshi T, Koizumi H. Microbial activity and litter decomposition under snow cover in a cool-temperate broad-leaved deciduous forest. *Agr For Meteorol*, 2005, **134**: 102-109
- Kudo G. Performance and phenology of alpine herbs along a snow-melting gradient. *Ecol Res*, 1992, **7**: 297-304
- Kudo G. Effect of snow-free duration on leaf-span of four alpine plant species. *Can J Bot*, 1992, **70**: 1684-1688
- Zhao HL (赵哈林), Zhou RL (周瑞莲), Zhao YE (赵悦耳). Advance in snow ecology study in the world. *Adv Earth Sci* (地球科学进展), 2004, **19** (2): 296-304
- Wu N (吴宁), Liu ZG (刘照光). Probing into the causes of geographical pattern of subalpine vegetation on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Chin J Appl Environ Biol* (应用与环境生物学报), 1998, **4** (3): 290-297
- Wu Y (吴彦). Effects of seasonal snow cover on plant community. *J Mountain Res* (山地学报), 2005, **23** (5): 550-556
- Ma DL (马德隆). 松潘县志. 北京: 民族出版社, 1999. 101-148
- Li YN (李英年). Turnover analysis of belowground biomass and its relation to meteorologic conditions in alpine meadow. *Chin J Agrometeorol* (中国农业气象), 1998, **19** (1): 36-42
- Liu W (刘伟), Zhou HK (周华坤), Zhou L (周立). Biomass distribution pattern of degraded grassland in alpine meadow. *Grassl China* (中国草地). 2005, **27** (2): 9-15
- Falk JH. The primary productivity of lawns in a temperate environment. *J Appl Ecol*, 1980, **17**: 689-696
- Wang YF (王艳芬), Wang SP (汪诗平). Influence of different stocking rates on belowground biomass in Inner Mongolia steppe. *Acta Agr Sin* (草地学报), 1999, **7** (3): 198-203
- Walker MD, Ingersoll RC, Webber PJ. Effects of interannual climate variation on phenology and growth of two alpine forbs. *Ecology*, 1995, **76**: 1067-1083
- Guo CH (郭春华), Zhang J (张均), Wang KN (王康宁), Yixi DJ (意西多吉), Wu YJ (吴玉江), Suo LD (索朗达). Yearly dynamics of biomass and nutrient contents in alpine grassland. *Chin J Grassl* (中国草地学报), 2007, **29** (1): 1-5
- Zhou HK (周华坤), Zhou L (周立), Zhao XQ (赵新全), Shen ZX (沈振西), Li YN (李英年), Zhou XM (周兴民), Yan ZL (严作良), Liu W (刘伟). Study of formation pattern of belowground biomass in *Potentilla fruticosa* shrub. *Acta Pratacult Sin* (草地学报), 2002, **11** (2): 59-65
- Molau U. Climatic impacts on flowering, growth, and vigour in an arctic-alpine cushion plant, *Diapensia lapponica*, under different snow cover regimes. *Ecol Bull*, 1996, **45**: 210-219
- Li L (李林), Li WL (李卫林), Wang ZY (王振宇), Yao ZG (姚志国), Zhu XD (朱西德). Research on reckoned method of maximum wind speed on the eastern edge of Qinghai-Xizang Plateau. *Plateau Meteorol* (高原气象), 2006, **25** (6): 1028-1032
- Fan CM (范春梅), Liao CY (廖超英), Sun CZ (孙长忠), Xu XM (许喜明), Li PY (李培玉). Effects of grazing on soil physical and chemical properties of grassland and forest floor in hilly and gully regions on the Loess Plateau. *Acta Agric Bor-Occid Sin* (西北农业学报), 2006, **15** (1): 24-28
- Shi YH (石永红), Han JG (韩建国). Effects of dairy cows grazing on soil physical and chemical properties of alfalfa-grass pasture in agro-pastoral transitional zone of north China. *Chin J Grassl* (中国草地学报), 2007, **29** (1): 24-30
- Molau U, Nordenhäll U, Eriksen B. Onset of flowering and climate variability in an alpine landscape: A 10-year study from Swedish Lapland. *Am J Bot*, 2005, **92**: 422-431
- Lorenzo M, Michele S, Sebastian K, Johannes I, Angelo P. Effects of local factors on plant species richness and composition of alpine meadows. *Agric Ecosyst & Environ*, 2007, **119**: 281-288
- Walker MD, Walker DA, Welker JM, Arft AM, Bardsley T, Brooks PD, Fahnestock JT, Jones MH, Losleben M, Parsons AN, Seastedt TR, Turner PL. Long-term experimental manipulation of winter snow regime and summer temperature in arctic and alpine tundra. *Hydrol Proc*, 1999, **13**: 2315-2330
- Litaor MI, Seastedt TR, Walker DA. Spatial analysis of selected soil attributes across an alpine topographic/snow gradient. *Landscape Ecol*, 2002, **17**: 71-85
- Stanton ML, Rejmánek M, Galen C. Change in vegetation and soil fertility along a predictable snowmelt gradient in the Mosquito Range, Colorado, USA. *Arctic & Alpine Res*, 1994, **26**: 364-374
- Whetton PH, Haylock MR, Galloway R. Climate change and snow-cover duration in the Australian Alps. *Climatic Change*, 1996, **32**: 447-479