

文章编号: 1008-2786-(2013)1-46-09

高寒杂草类草甸牧压梯度下 植被碳密度季节动态及分配特征

吴启华^{1 3} 李英年^{1 2*} 刘晓琴^{1 3} 李红琴^{1 2} 毛绍娟^{1 3}

(中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810001;

2. 中国科学院高原生物适应与进化重点实验室, 青海 西宁 810001; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 比较分析了祁连山北坡高寒杂草类草甸夏季牧场牧压梯度下植被生物量季节动态及净初级生产碳量、现存碳量和地上地下碳量的分配关系。结果表明, 牧压梯度下: 1. 地上生物量有一定的季节变化, 但随放牧强度的增加季节变化幅度降低; 枯落物量从生长期开始逐渐下降, 生长末期有所增加, 其中重牧和中牧条件下随时间进程比轻牧和封育措施下的减少量明显; 地下生物量有不甚明显的季节变化; 半腐殖质层生物量从生长季初期到放牧中期变化平稳, 7 月下旬开始有所下降, 说明良好的水热条件影响下半腐殖质层生物量归还土壤碳的能力增大。2. 净初级生产碳量大小依次是轻牧、中牧、重牧和封育, 表明适当放牧对植被净初级生产碳量的提高有利, 从其地下分配来看, 封育所占比例小于 80%, 轻牧、重牧、中牧在 80% 以上。9 月底测定结果表明, 植被现存总碳量随放牧强度的降低而增大, 轻牧和封育条件下植被的储碳能力强, 利于土壤固碳能力的提高。

关键词: 高寒杂草类夏季放牧草甸; 牧压梯度; 生物量; 季节动态; 植被生物碳量

中图分类号: Q948

文献标志码: A

生物量是生态系统最直观的数量特征, 是生态系统物质交换和能量流动的基础。在我国, 对于草地植被生物量研究较多^[1-8]。有研究证明, 放牧对草地生态系统的生物量和生产力影响明显, 主要表现在适度的放牧可以增加草地地上部分净初级生产力, 过度放牧则会使地上部分净初级生产力明显降低, 随着放牧强度的增加地上生物量明显下降^[9-12]。然而, 因地区间自然条件的差异以及放牧强度等不同, 其影响效应和影响强度存在很大差异性^[13]。

高寒草甸作为草地生态系统的重要组成部分, 其独特的地理环境和气候条件使其生态系统非常脆

弱, 不论是放牧强度的改变还是气候环境条件的扰动均可较大程度地影响到植被生物量提高, 表现出高寒草甸植被生物量与放牧之间的关系复杂而有较大的不确定性。就目前来看, 有关高寒草甸生物量的研究虽有不少报道, 且多集中于冬季高寒矮蒿草草甸自然放牧或封育状况下地上生物量的研究^[14-18], 对牧压梯度下植被生物量的研究也有报道^[19-20], 但较少涉及夏季放牧的高寒杂草类草甸生物量季节动态及地上地下分配, 更少涉及夏季牧压梯度下高寒杂草类草甸的有关枯落物生物量、半腐殖质层(这里指地表表面枯落物等多年长期累积成的碎屑物)和地下生物量的比较研究。

收稿日期(Received date): 2012-08-02; 改回日期(Accepted): 2012-12-19。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(31070437); 中国科学院战略性先导科技专项: 应对气候变化的碳收支认证及相关问题(XDA05050601; XDA05050404); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB833501-01-13)资助。[National Natural Science Foundation Project(31070437); Chinese Academy of Sciences of strategic pilot science and technology projects: the carbon budget certification to address climate change and related issues(XDA05050601; XDA05050404); National Key Basic Research Development Program(973) Project(2010CB833501-01-13) funded.]

作者简介(Biography): 吴启华(1987-), 女(汉), 湖北咸宁人, 硕士研究生, 主要从事全球变化生态学研究。[Wu Qihua, female, born in Xian-ning, Hubei Province in 1987, mainly engaged in Global change ecology.] E-mail: wqh5859@126.com, tel: 13139092498。

* 通讯作者(Author for correspondence): Li Yingnian, E-mail: yinli@nwipb.cas.cn

在放牧地由于植被的地上生物量大部分被放牧家畜觅食利用,而枯落物生物量、半腐殖质层以及植被的地下生物量大多最终要转换到土壤碳库中,而且,这种转换在牧压梯度下有显著的差异。为此,进行牧压梯度下植被地上生物量、枯落物量、半腐殖质层量、地下生物量以及地上地下分配关系的比较研究,对定量分析牧压梯度下植被/土壤固碳能力具有重要的基础作用。本研究选择祁连山冷龙岭南麓夏季高寒杂草类草甸放牧草场为研究对象,探讨牧压梯度下植被生物(碳)量的形成规律和季节动态变化特征,植被生物碳密度分配关系,为定量描述植被固碳及归还土壤碳能力的研究提供科学依据。

1 研究材料与自然概况

1.1 自然概况

研究在青海海北高寒草甸生态系统国家野外科学观测研究站(海北站)进行。海北站地处青藏高原东北隅祁连山北支冷龙岭东段南麓坡地的大通河河谷,地理位置 $37^{\circ}29' \sim 37^{\circ}45'N$, $101^{\circ}12' \sim 101^{\circ}23'E$,海拔3 200~3 600 m。该区位于亚洲大陆腹地,具有明显的高原大陆性气候,东南季风及西南季风微弱。受高海拔条件制约,气温极低,无明显四季之分,仅有冷暖季之别,干湿季分明。年平均气温 $-1.7^{\circ}C$,降水量约560 mm,降水分配不均,主要集中于植物生长季的5—9月,约占年降水量的80%,年平均日照2 462.7 h^[21]。

海北地区的土壤类型主要为草毡寒冻锥形土(滩地、山地阳坡)和暗沃寒冻锥形土(山地阴坡),土壤发育年轻,土层浅薄,有机质含量丰富^[22]。植被类型主要有金露梅(*Potentilla fruticosa*)灌丛、高寒矮嵩草(*Kobresia humilis*)草甸、草原化小嵩草(*Kobresia pygmaea*)草甸、沼泽化藏嵩草(*Kobresia tibetica*)草甸等^[23]。本文涉及的夏季牧压梯度实验样地位于海北站东北9 km处祁连山冷龙岭南麓坡地,系金露梅灌丛草甸上沿的高寒杂草类草甸,优势种及伴生种有垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、异针茅(*Stipa aliena*)、青藏苔草(*Carex moorcroftii*)、金露梅、矮火绒(*Leontopodium nanum*)草等。土壤类型为暗沃寒冻锥形土。

而本研究试验样地设在海北站海拔相对较高的夏季高寒杂草类放牧草甸草场,气温略比海北站低 $0.4^{\circ}C$,降水基本一致,土壤类型雷同,只是夏季放牧

草场放牧强度较大。区域草地退化较重。

1.2 研究材料与方法

实验地地势开阔,坡度约为 5° ,中心点地理坐标为 $37^{\circ}41'N$ 、 $101^{\circ}21'E$ 、海拔3 545 m。参考以往研究放牧强度经验^[24],牧压梯度设置为轻度放牧(4.5只羊/ hm^2)、中度放牧(7.5只羊/ hm^2)、重度放牧(15只羊/ hm^2)和封育对照(禁牧)4个管理方式。试验地用围栏围封,试验羊为当地藏系羯羊。放牧按当地放牧方式在每年的6月1日—9月15日期间进行,即每年放牧时间3个半月,105 d。本实验资料系2011年开始进行牧压梯度实验的第一年观测值。2011年6月上旬至9月中旬约每隔15 d对轻度放牧区、中度放牧区、重度放牧区、以及封育草地进行植被生物量监测。监测时分别在牧压梯度试验区随机选取5个50 cm×50 cm样方,先将样方内的凋落物收集装入纸袋,再将植物活体齐地面剪下后装袋,然后用手刮的方式收集半腐殖质层生物量装袋,最后再在收集地上生物量的样方内用直径8 cm的根钻,按0~10 cm、10~20 cm和20~40 cm分层取样装入自封塑料袋。样品带回实验室后对所收集的根系在清水中清洗干净置入纸袋。而后将收集的所有样品装入纸袋在恒温 $65^{\circ}C$ 的烘干箱烘至恒重,并称重。

数据分析时利用相关数学统计(Analyst Application of SAS V9.2)方法和Excel作图软件对观测数据进行统计和分析。单因子方差分析(ANOVA)和最小显著差数法(LSD)用于牧压梯度下各指标间的比较和差异显著性检验($\alpha=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 牧压梯度下植被地上生物量季节动态

因夏季放牧草场多处在冬季积雪深厚、气温较低、海拔较高的山麓坡地,区域植物返青期将比海拔较低的冬季放牧草场晚。一般在5月上旬中期日均气温 $\geq 0^{\circ}C$ 开始时植物陆续返青,地上生物量有所累计,但不甚明显。以后随气温逐渐升高、降水量增加地上生物量累计逐步增加^[25]。但夏季草场属公共放牧地,放牧强度大,植物在整个生长期放牧觅食消耗明显,到9月中旬地表植物基本被啃食殆尽,加之9月初开始日均气温 $\geq 3^{\circ}C$ 结束,日最低气温可下降到 $-10^{\circ}C$ 以下,家畜受外界环境干扰胴体体重有所下降。为此,夏季放牧时间一般保持在6月1日到

9月15日期间,也可视为植物生长期。

在植物生长期,由于牧压梯度的草地受到动物的采食、践踏破坏以及粪便等物质输入的影响程度不同,其干物质积累过程不尽相同。封育和轻牧状况下地上生物量保持较高的水平且季节变化明显。重牧和中牧家畜觅食量大,季节变化显得平稳些(图1)。这是因为夏季放牧草场的植物生育期内当植物生长到一定高度时随时被家畜啃食,抑制了植被地上生物量的提高。而封育措施下表现出在生长季初期逐渐增长,在7—8月达最大,以后随气温下降,降雨量减少,植被光合作用减弱,植物体逐渐衰老而枯黄,营养物质向地下转移,导致地上生物量下降。图1看到,除轻牧草地地上生物量高峰出现在7月底外,封育、重牧和轻牧试验地地上生物量最高值均出现在8月下旬,这种差异很大程度受控于放牧强度不同(包括封育)的影响和气象环境的改变而改变^[26-27]。方差分析显示,牧压梯度之间群落地上生物量差异显著,以封育为对照,中牧和重牧强度下的生物量均与对照达到极显著差异($P < 0.01$),轻牧与封育的生物量没有显著差异,表明生物量累计量与放牧强度相关联,从大到小依次为轻牧、封育草地、中牧草地、重牧草地,对应最大值分别为 $245.51 \pm 7.96 \text{ g/m}^2$ 、 $228.41 \pm 7.30 \text{ g/m}^2$ 、 $176.36 \pm 8.62 \text{ g/m}^2$ 、 $150.28 \pm 24.41 \text{ g/m}^2$ 。

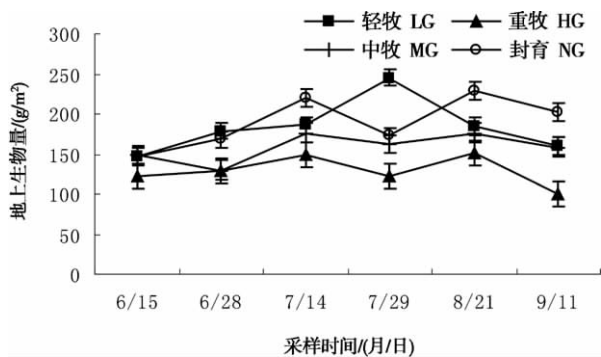


图1 海北高寒杂草类夏季放牧草甸牧压梯度下地上生物量季节动态

Fig.1 The seasonal dynamic of the aboveground biomass in summer pasture of alpine weeds meadow to the northern shore of Qinghai Lake under grazing gradient

2.2 牧压梯度下枯落物生物量的季节动态

草地的枯落物积累主要来源于枯死的叶片和植株。一般情况下在植被返青后,随着植物的不断生长发育,老的叶片开始衰老死亡,枯落物积累增

加^[28]。但在放牧干扰下,由于家畜对牧草叶片的采食和践踏,使其叶量下降,随放牧强度增加由叶片枯死而形成的枯落物积累也逐渐下降^[29]。由图2看出,牧压梯度试验地的枯落物量,因有前一年枯落物的残存,在刚开始测定期的6月15日最大。到7月中旬受良好的水热环境条件影响,微生物活动加强,枯落物分解后达最低^[30-31]。但在7月后期植物旺盛生长,家畜在觅食过程中对植物践踏导致枯落物增多。进入8月植物生长减缓,家畜因放牧强度大可觅食地上掉落物而下降。9月中旬以后,家畜迁移到冬春草场,环境温度下降,植物枯黄,掉落物略有上升。表现出在7月到9月波动性较大。

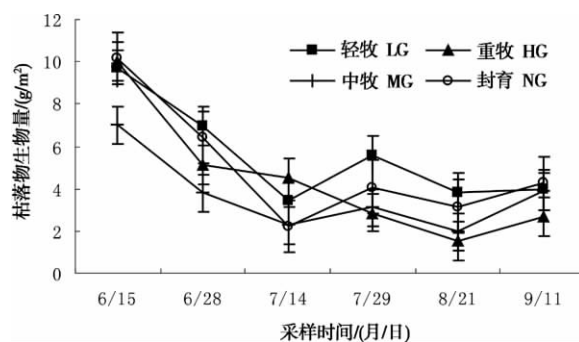


图2 海北高寒杂草类夏季放牧草甸牧压梯度下枯落物生物量季节动态

Fig.2 The seasonal dynamic of the litter biomass in summer pasture of alpine weeds meadow to the northern shore of Qinghai Lake under grazing gradient

同时还可以看出,重牧和中牧条件下枯落物量随时间进程比轻牧和封育措施下的减少量更为明显。以封育为对照,方差分析显示,中牧和重牧强度下的枯落物生物量与对照达到显著差异($P < 0.05$),轻牧枯落物生物量则与封育的生物量没有显著差异。

2.3 牧压梯度下半腐殖质层生物量的季节动态

半腐殖质层多属未分解或半分解的枯落物(也有部分家畜排泄物)转换成的碎屑物,它不同于枯落物,将直接参与到归还土壤碳库的重要的有机物质。为此,讨论半腐殖质层生物量意义重大。图3给出了牧压梯度下半腐殖质层生物量的季节动态变化状况。由图3看到,牧压梯度下半腐殖质层生物量从生长季初期逐渐积累,生长季旺期达到峰值,此后逐步减少。即7月下旬前均较高,且变化幅度较低,基本保持在 $12 \sim 22 \text{ g/m}^2$ 间。8月初开始下降迅速,8月底至9月初达最低。说明随良好的水热

条件影响下,半腐殖质层生物量在进入8月后归还土壤碳的能力增大。

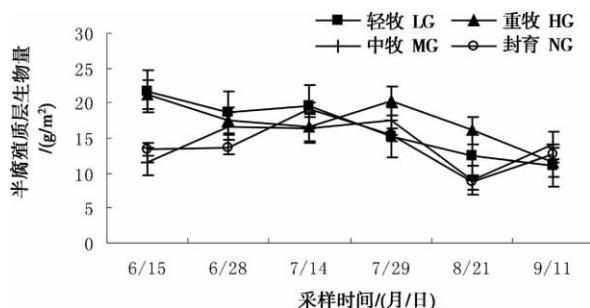


图3 海北高寒杂草类夏季放牧草甸牧压梯度下半腐殖质层生物量季节动态

Fig. 3 The seasonal dynamic of the residues biomass in summer pasture of alpine weeds meadow to the northern shore of Qinghai Lake under grazing gradient

从牧压梯度半腐殖质层生物量来看,其季节动态变化趋势基本一致,相互之间存在一定的差异。以封育为对照经方差分析表明,重牧的半腐殖质层生物量与对照达到显著差异($P < 0.05$),轻牧和中牧强度下半腐殖质层生物量与封育的半腐殖质层生物量没有显著差异。

半腐殖质层生物量的多少与动物践踏、地势平整性、植物生长的丛生性等有很大的联系。我们选择的实验样地地表不是绝对水平,明显出现高低不平,进而受吹风等自然条件影响地表低洼处半腐殖质层生物量大,而地势稍高地带半腐殖质层生物量低。这样也将会导致半腐殖质层生物量出现较大的波动或不确定性。为此,对于半腐殖质层生物量需要长时间的观测方能得到满意的效果。但从目前半腐殖质层生物量季节性变化的观测结果来看,对于土壤碳的补给是重要的。

2.4 牧压梯度下地下生物量的季节动态

放牧对地下生物量积累的影响也是通过影响地上生物量来实现的,即随放牧强度增加,地上生物量减少,地下生物量也逐渐下降^[32]。但是地下生物量与地上生物量相比,不仅在量值上差别很大,而且其季节动态规律亦不相同(图4)。在植物生长季的5—9月,牧压梯度下的地下生物量变化波动明显。图4可看到,轻牧与封育变化规律相同,说明轻牧可以刺激植物生长。而中、重牧有所相同,重牧和中牧在刚放牧的6月开始时,加剧了觅食程度,植物得不到有利生长,植物在生长过程中需要地下生物能量

的弥补才能让才能满足植物地上生长的要求,不仅导致地上生物量很低,也使地下生物量得不到提高。

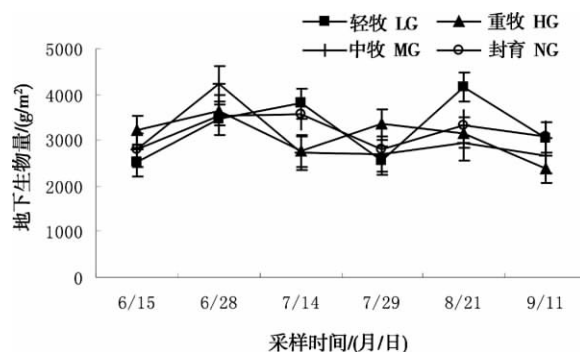


图4 海北高寒杂草类夏季放牧草甸牧压梯度下地下生物量季节动态

fig.4 The seasonal dynamic of the below-ground biomass in summer pasture of alpine weeds meadow to the northern shore of Qinghai Lake under grazing gradient

方差分析显示,不同放牧强度下草地地下生物量差异不显著,地下生物量最大值依次分别为轻度($4164.83 \pm 603.35 \text{ g/m}^2$)、重度($3641.9 \pm 288.01 \text{ g/m}^2$)、中度($4224.0 \pm 1075.69 \text{ g/m}^2$)和封育($3565.12 \pm 460.08 \text{ g/m}^2$)。由图4可以看出,依轻牧、封育、重牧、中牧阶段地下生物量逐渐下降。随放牧强度增加,地下生物量变化季节变化也逐渐平缓。

整个生长季来看,草地地下生物量的变化曲线大致呈“M”型,第一个较大值出现在6月下旬到7月上旬,可能因为前一年的地下生物量有宿存的结果,植物经过返青之后的3个月的生长,草地的地上和地下生物量都会有较快增长。从7月中旬到8月中旬,地下生物量出现小幅下降趋势,这一时期草地植物进入生殖阶段,为了满足生殖生长的需要,地上部利用地下部贮存的营养物质,引起地下生物量的下降。8月下旬到9月中旬地下生物量出现第二个较大值,此时草地地上部分茎和叶的生长也基本达到最大值,植物体光合作用生成的有机物质除了满足地上部分的需求以外,其余的均向地下转移(植物体枯死前营养物质向地下转移),故地下生物量出现峰值^[33]。

2.5 牧压梯度下植被碳量及地上地下分配关系

植物生物体碳量是生态系统碳循环的基本组分,因此估算区域植被碳密度分布,将为碳循环及植被补给土壤碳能力提供依据。以当年地上部活体生

物量的最大值为地上净初级生产量,以相同放牧强度当年地下生物量最大值与最小值之差来表示地下净初级生产量^[34],并以植被含碳量^[35-36](地上部分为45%,地下部分为40%)计算得到海北高寒杂草类夏季放牧草甸牧压梯度下植被净初级生产碳量(图5(a))。为了比较,图5(b)给出了9月11日监测的地上地下植被现存碳量,现存碳量包括了地上生物碳量、枯落物碳量、半腐殖质层碳量、地下生物碳量。

由图5(a)看出,海北高寒杂草类夏季放牧草甸牧压梯度下植被净初级生产碳量大小则依次是轻牧、中牧、重牧和封育。表明适当放牧对植被净初级生产碳量的提高有利,家畜适当采食不仅刺激植物的生长,对地下生物量的提高起到促进作用,进而提高了植被的固碳能力。而封育条件下,植被净初级生产碳量最低,虽然有较高的地上生物量(见图1),但地下净初级生产量相对放牧地低,导致地上地下植被碳量最低。这种现象的存在可能与禁牧条件下植被地上生长较好,植被盖度大,植被冠面的作用致使本身较低温度的夏季放牧草场其土壤热量条件更趋不足,抑制了植物根系的生长,植物地下根系能量向地上转移而使地下净初级生产量下降明显,终究

导致净初级生产碳量的提高。当然本次试验均为牧压梯度实验设计的第一年观测分析值,长期的结果还有待进一步观测和验证。

从海北高寒杂草类夏季放牧草甸牧压梯度下净初级生产碳量的地上地下分配来看(表1),地下部分生物碳量占有很大的比例,除封育所占比例小于80%外,轻牧、重牧、中牧的地下植被净初级生产碳量占地上净初级生产碳量均在80%以上,重牧和中牧条件下这种比例更高。重牧和中牧条件因受家畜对地上植物觅食强度大,生物量累计与家畜觅食同时进行,植物为了生存会将更多物质和能量转移至地下,这是植被适应放牧胁迫的有效策略^[37],导致地上部分得不到及时恢复,相反,过度的牧事活动在抑制植物地上生长的同时,地表盖度下降,土壤更易吸收因太阳短波辐射照射地表后转换的热量,物质更易转移到地下,促使植物根系得到良好的生长而提高地下年净初级生产碳量。封育状况下植物地上部分生长条件较好,而较高的植被盖度使地表以下的土壤变得更为“阴冷”,其结果促使植物地下能量向地上转移而地下生长受到影响后净初级生产碳量下降明显。这也说明了地上和地下净初级生产之间有着相互依赖、相互制约的关系^[38]。

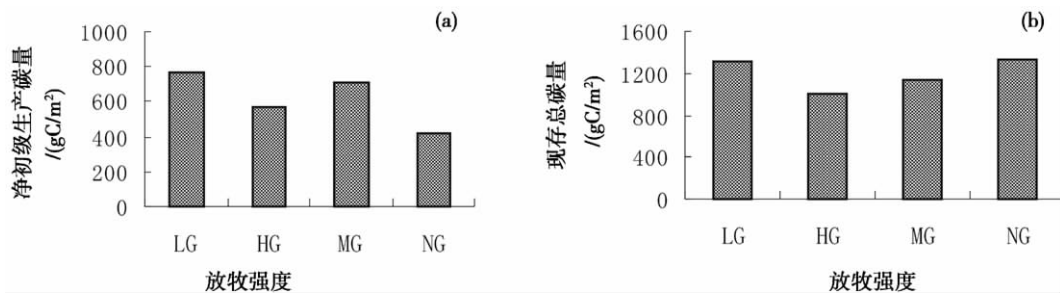


图5 海北高寒杂草类夏季放牧草甸牧压梯度下植被净初级生产碳量(a)和现存碳量(b)

Fig. 5 The net primary production of carbon content (a) and the existing carbon content (b) in summer pasture of alpine weeds meadow to the northern shore of Qinghai Lake under grazing gradient

表1 海北高寒杂草类夏季放牧草甸牧压梯度下净初级生产碳量各组分之间的分配关系

Table 1 The relations of distribution of above and below ground net primary production of carbon content in summer pasture of alpine weeds meadow to the northern shore of Qinghai Lake under grazing gradient

放牧强度	总的净初级生产碳量 /(gC/m ²)	地上净初级生产碳量 /(gC/m ²)	地下净初级生产碳量 /(gC/m ²)	地上碳量比例 /%	地下碳量比例 /%	地下/地上
轻牧	766.65	110.48	656.17	14.41	85.59	5.94
重牧	570.36	67.63	502.73	11.86	88.14	7.43
中牧	707.76	79.36	628.40	11.21	88.79	7.92
封育	416.29	102.78	313.51	24.69	75.31	3.05

表 2 海北高寒杂草类夏季放牧草甸牧压梯度下生物现存总碳量各组分之间的分配关系
Table 2 The relations of distribution of above and below ground vegetation existing total carbon content in summer pasture of alpine weeds meadow to the northern shore of Qinghai Lake under grazing gradient

放牧强度	生物现存总碳量 / (gC/m ²)	地上部分碳量 / (gC/m ²)	地下部分碳量 / (gC/m ²)	地上碳量比例 / %	地下碳量比 例 / %	地下/地上
轻牧	1 302.38	78.81	1 223.57	6.05	93.95	15.53
重牧	1 005.45	51.44	954.01	5.12	94.88	18.55
中牧	1 140.66	79.45	1 061.21	6.97	93.03	13.36
封育	1 332.83	98.73	1 234.10	7.41	92.59	12.50

从 9 月初观测到的植被地上地下现存碳量来看 (图 5(b)) ,生物现存总碳量随着放牧强度的减轻而增大 ,依次为重牧、中牧、轻牧和封育。表明在轻牧和封育条件下植被的储碳能力强 ,利于土壤固碳能力的提高 ,但联系净初级生产碳量(图 5(a) ,表 1) 分析 ,封育后对植被碳量的提高及给予土壤固碳能力尚待进一步研究证实。

在植被生物现存总碳量中 ,地下碳量占据较高的比例 ,均在 90% 以上 ,这种比例在重牧条件下更高 ,封育措施下最低。而从地下部分植被碳储量与地上部分植物碳储量比值来看 ,依次为重牧、轻牧、中牧和封育(表 2) ,重牧条件下比值更为明显 ,封育措施下最低。重牧条件下家畜在觅食强度大的同时 ,为填饱肚子家畜甚至觅食枯落物或半腐殖质层碎屑物 ,虽然地下根系当年净初级生产量低(见表 1) ,且多年累积的生物量与其他放牧强度条件具有相同水平时植被地下现存碳储量仍占有较高的比例。

3 结论与讨论

1. 在整个植物生长期内 ,不同放牧处理下的地上生物量都有明显的季节动态变化 ,生物量均在生长季初期开始增长 ,达到峰值后呈减少的趋势 ,大致表现为单峰趋势 ,这与其他研究有相同结论^[39-41]。草地枯落物的变化趋势大体是先较少后增多 ,在放牧干扰下 ,随放牧强度增加由叶片枯死而形成的枯落物积累逐渐下降^[42]。放牧对地下生物量积累的影响也是通过影响地上地上生物量来实现的 ,即随放牧强度增加 ,地上生物量减少 ,地下生物量也逐渐减少^[43]。

2. 整个生长季中 ,牧压梯度草地的半腐殖质层生物量都是从生长季初期逐渐积累 ,生长季旺期达

到峰值 ,此后逐步减少。此外 ,半腐殖质层生物量的多少与动物践踏、地势平整性、植物生长的丛生性等有很大的联系 ,这样也将会导致半腐殖质层生物量出现较大的波动或不确定性。为此 ,对于半腐殖质层生物量需要长时间的观测方能得到满意的效果。但从目前半腐殖质层生物量季节性变化的观测结果来看 ,对于土壤碳的补给是重要的。目前对于草地半腐殖质层生物量的研究还较少 ,本研究将对今后的类似研究有一定参考作用。

3. 净初级生产碳量大小依次是轻牧、中牧、重牧和封育 ,表明适当放牧对植被净初级生产碳量的提高有利 ,封育则不利于植物净初级生产碳量的积累 ,随着放牧强度的加大 ,植物的净初级生产碳量逐步降低。净初级生产碳量的地上地下分配来看 ,地下部分生物碳量占有很大的比例 ,除封育所占比例小于 80% 外 ,轻牧、重牧、中牧的地下植被净初级生产碳量占地上净初级生产碳量均在 80% 以上 ,在重牧和中牧条件下这种比例更高。

4. 生物现存总碳量随着放牧强度的减小而增大 ,依次为重牧、中牧、轻牧和封育。表明在轻牧和封育条件下植被的储碳能力强 ,利于土壤固碳能力的提高 ,但联系净初级生产碳量分析 ,封育后对植被碳量的提高及给予土壤固碳能力尚待进一步研究证实。在植被生物现存总碳量中 ,地下部分植被碳储量与地上部分植物碳储量比值依次为重牧、轻牧、中牧和封育 ,在重牧条件下比值更为明显。

参考文献(References)

[1] Chen Zuozhong , Wang Shiping. Chinese typical steppe ecosystem [M]. Beijing: Science Press ,2000: 55 - 117 [陈佐忠 ,汪诗平. 中国典型草原生态系统 [M]. 北京: 科学出版社 ,2000: 55 - 117]
[2] Chen Zuozhong , Huang Dehua , Lijishang. A preliminary study on the biomass dynamics of the stipa breviflora steppe in Wulanchabu

- League of Inner Mongolia [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 1988, (2): 65–72 [陈佐忠, 黄德华, 李济尚. 内蒙古乌兰察布短花针茅草原生物量动态的初步分析[J]. 干旱区资源与环境, 1988, (2): 65–72]
- [3] Yang Futun, Wang Qiji, Shi Shunhai. Kobresia humilis meadow seasonal dynamics of biomass and annual dynamic [C]// International Symposium of Alpine Meadow Ecosystem, Beijing: Science Press, 1988: 61–71 [杨福囤, 王启基, 史顺海. 矮嵩草草甸生物量季节动态与年间动态[C]. 高寒草甸生态系统国际学术讨论会论文集, 北京: 科学出版社, 1988: 61–71]
- [4] Zhou Xingmin. China meadow [M]. Beijing: Science Press, 2001: 146–150 [周兴民. 中国嵩草草甸[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 146–150]
- [5] Zhang Na, Liang Yimin. Studies on the below-ground/above-ground biomass ratio of natural grassland in loess hilly region [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2002, 11(2): 72–78 [张娜, 梁一民. 黄土丘陵区天然草地地下/地上生物量的研究[J]. 草业学报, 2002, 11(2): 72–78]
- [6] Liu Ai, Liu Defu. Overview of China's grassland biomass [J]. Inner Mongolia Prataculture, 2005, 17(1): 7–11 [刘艾, 刘德福. 我国草地生物量研究概述[J]. 内蒙古草业, 2005, 17(1): 7–11]
- [7] Ma Wenhong, Yang Yuanhe, He Jinsheng, et al. Inner Mongolia temperate grassland biomass and its relationship with environmental factors [J]. Science in China Series C: Life Sciences, 2008, 38(1): 84–92 [马文红, 杨元合, 贺金生, 等. 内蒙古温带草地生物量及其与环境因子的关系[J]. 中国科学 C 辑: 生命科学, 2008, 38(1): 84–92]
- [8] Xin Xiaoping, Zhang Baohui, Li Gang, et al. Change of China grassland biomass spatial and temporal pattern from 1982 to 2003 [J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(9): 1582–1592 [辛晓平, 张保辉, 李刚, 等. 1982–2003 年中国草地生物量时空格局变化研究[J]. 自然资源学报, 2009, 24(9): 1582–1592]
- [9] Wang Shiping, Wang Yanfen, Chen Zuozhong. Effect of climate change and grazing on population of cleistogenes squarrosa in Inner Mongolia steppe [J]. Journal of Plant Ecology, 2003, 27(3): 337–343 [汪诗平, 王艳芬, 陈佐忠. 气候变化和放牧活动对糙隐子草种群的影响[J]. 植物生态学报, 2003, 27(3): 337–343]
- [10] Liu Jianjun, Urano Tadaaki, Mariko Shigeru, et al. Influence of grazing pressures on belowground productivity and biomass in Mongolia steppe [J]. Acta Botanica Boreali – Occidentalia Sinica, 2005, 25(1): 88–93 [刘建军, 浦野忠朗, 鞠子茂, 等. 放牧对草原生态系统地下生产力及生物量的影响[J]. 西北植物学报, 2005, 25(1): 88–93]
- [11] Zhou Guoying, Chen Guichen, Xu Wenhua. Influences of enclosure to Achnatherum splendens steppes biomass in the Qinghai Lake [J]. Area Arid Land Geography, 2010, 33(3): 434–441 [周国英, 陈桂琛, 徐文华, 等. 围栏封育对青海湖地区芨芨草草原生物量的影响[J]. 干旱区地理, 2010, 33(3): 434–441]
- [12] Zuo Wanqing, Wang Yuhui, Wang Fengyu, et al. Effects of enclosure on the community characteristics of Leymus chinensis in de-generated steppe [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2009, 18(3): 12–19 [左万庆, 王玉辉, 王凤玉, 等. 围栏封育措施对退化羊草草原植物群落特征影响研究[J]. 草业学报, 2009, 18(3): 12–19]
- [13] Mcnaughton S J, Banyikwa F F, Mcnaughton M M. Root biomass and productivity in a Grazing ecosystem: the Serengeti [J]. Ecology, 1998, 78(2): 587–592
- [14] Wang Qiji, Wang Wenying, Deng Zifa. The dynamics of biomass and the allocation of energy in alpine Kobresia meadow communities, Haibei region of Qinghai province [J]. Journal of Plant Ecology, 1998, 22(3): 222–230 [王启基, 王文颖, 邓自发. 青海海北地区高山嵩草草甸植物群落生物量动态及能量分配[J]. 植物生态学报, 1998, 22(3): 222–230]
- [15] Li Haiying, Peng Hongchun, Wang Qiji. Study on the aboveground biomass of plant communities among the stages of regressive succession in alpine Kobresia humilis meadow [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2004, 13(5): 26–32 [李海英, 彭红春, 王启基. 高寒矮嵩草草甸不同退化演替阶段植物群落地上生物量分析[J]. 草业学报, 2004, 13(5): 26–32]
- [16] Liu Wenhui, Zhou Qingping, Yan Hongbo, et al. Study on dynamics of aboveground biomass of Poa pratensis var. anceps Gaud. cv. Qinghai [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2009, 18(2): 18–24 [刘文辉, 周青平, 颜红波, 等. 青海扁茎早熟禾种群地上生物量积累动态[J]. 草业学报, 2009, 18(2): 18–24]
- [17] Zhang Fawei, Li Hongqin, Li Yingnian, et al. Cycle change characteristics of the primary productivity of alpine meadow of temperature, precipitation and ground [J]. Journal of Applied Ecology, 2009, 20(3): 525–530 [张法伟, 李红琴, 李英年, 等. 青藏高原高寒草甸气温、降水和地上初级生产力变化的周期特征[J]. 应用生态学报, 2009, 20(3): 525–530]
- [18] Li Yingnian, Zhao Liang, Wang Qinxue, et al. Estimation of biomass and annual turnover Quantities of Potentilla Froticosa Shrub [J]. Acta Agrestia Sinica, 2006, 14(1): 72–76 [李英年, 赵亮, 王勤学, 等. 高寒金露梅灌丛生物量及年周转量[J]. 草地学报, 2006, 14(1): 72–76]
- [19] Sheng Haiyan, Cao Guangming, Li Guorong, et al. Effect of grazing disturbance on plant community of alpine meadow dominated by Potentilla froticosa shrub on Qilian Mountain [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(1): 235–241 [盛海彦, 曹广民, 李国荣, 等. 放牧干扰对祁连山高寒金露梅灌丛草甸群落的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(1): 235–241]
- [20] Gao Yongheng, Chen Huai, Luo Peng, et al. Effect of grazing Intensity on biomass of alpine meadow and its allocation in the north-western Sichuan [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2008, 24(3): 26–32 [高永恒, 陈槐, 罗鹏, 等. 放牧强度对川西北高寒草甸植物生物量及其分配的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2008, 24(3): 26–32]
- [21] Li Yingnian, Zhao Xinquan, Cao Guangmin. Analyses on climates and vegetation productivity background at Haibei alpine meadow ecosystem research station [J]. Plateau Meteorology, 2004, 23

- (4): 558–567 [李英年,赵新全,曹广民,等. 海北高寒草甸生态系统定位站气候、植被生产力背景的分析[J]. 高原气象, 2004, 23(4): 558–567]
- [22] Le Yanzhou, Zuo Kecheng, Zhang Jinxia, et al. Alpine meadow ecosystem research Station of the soil type and its basic characteristics [C]// Alpine meadow ecosystem. Lanzhou: Gansu People's Press, 1982: 19–32 [乐炎舟, 左克成, 张金霞, 等. 海北高寒草甸生态系统定位站的土壤类型及其基本特点 [C]// 高寒草甸生态系统. 兰州: 甘肃人民出版社, 1982: 19–32]
- [23] Zhou Xingmin, Wu Zhenlan. Alpine Meadow Ecosystem Research Station, Chinese Academy of Sciences of vegetation and plant keys [M]. Xining: Qinghai People's Press, 2006: 31–39 [周兴民, 吴珍兰. 中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站植被与植物检索表 [M]. 西宁: 青海人民出版社, 2006: 31–39]
- [24] Zhao Xinquan. The alpine meadow ecosystem and global change [M]. Beijing: Science Press, 2009: 56–62 [赵新全. 高寒草甸生态系统与全球变化 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 56–62]
- [25] Huang Deqing, Zhang Yaosheng, Zhao Xinquan, et al. Above-ground biomass and its relationship to soil moisture of natural grassland in the northern slopes of the Qilian Mountains [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2011, 20(3): 20–27 [黄德青, 张耀生, 赵新全, 等. 祁连山北坡天然草地地上生物量及其与土壤水分关系的比较研究 [J]. 草业学报, 2011, 20(3): 20–27]
- [26] Yang Xiaohui, Zhang Kebin, Hou Ruiping, et al. Impacts of exclusion on vegetative features and aboveground biomass in semi-arid degraded rangeland [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2005, 14(5): 730–734 [杨晓晖, 张克斌, 侯瑞萍, 等. 封育措施对半干旱草场植被群落特征及地上生物量的影响 [J]. 生态环境, 2005, 14(5): 730–734]
- [27] Wang Fengyu, Zhou Guangsheng, Jia Bingrui, et al. Effects of heat and water factors on soil respiration of restoring leymus Chinensis steppe in degraded land [J]. Journal of Plant Ecology, 2003, 27(5): 644–649 [王凤玉, 周广胜, 贾丙瑞, 等. 水热因子对退化草原羊草恢复演替群落土壤呼吸的影响 [J]. 植物生态学报, 2003, 27(5): 644–649]
- [28] Li Xuebin, Ma Lin, Chen Lin, et al. Research progress and the prospect of grassland litters decomposition [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(9): 2260–2264 [李学斌, 马林, 陈林, 等. 草地枯落物分解研究进展及展望 [J]. 环境科学学报, 2010, 19(9): 2260–2264]
- [29] Wang Wei, Guo Jixun, Zhang Baotian, et al. Seasonal dynamics of environmental factors and decomposition rate of litter in *Leymus chinensis* community in Songnen grassland in northeast China [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2003, 12(1): 47–52 [王妮, 郭继勋, 张保田, 等. 东北松嫩草地羊草群落环境因素与凋落物分解季节动态 [J]. 草业学报, 2003, 12(1): 47–52]
- [30] Wu Haitao, Lü Xianguo, Yang Qing, et al. The early-stage litter decomposition and its influencing factors in the wetland of the Sanjiang Plain, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(10): 4028–4035 [武海涛, 吕宪国, 杨青, 等. 三江平原典型湿地枯落物早期分解过程及影响因素 [J]. 生态学报, 2007, 27(10): 4028–4035]
- [31] Sun Zhigao, Liu Jingshuang. Development in study of wetland litter decomposition and its responses to global change [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(4): 1607–1618 [孙志高, 刘景双. 湿地枯落物分解及其对全球变化的响应 [J]. 生态学报, 2007, 27(4): 1607–1618]
- [32] Yu Wantai, Yu Yongqiang. Advances in the research of underground biomass [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(6): 927–932 [宇万太, 于永强. 植物地下生物量研究进展 [J]. 应用生态学报, 2001, 12(6): 927–932]
- [33] Yan Yan, Zhang Jianguo, Zhang Jinhua, et al. The belowground biomass in alpine grassland in Nakchu Prefecture of Tibet [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(11): 2818–2823 [颜燕, 张建国, 张锦华, 等. 西藏那曲地区高寒草地地下生物量 [J]. 生态学报, 2005, 25(11): 2818–2823]
- [34] Li Yingnian. The relationship of alpine meadow plant underground biomass with weather conditions and the turnover value [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 1998, 19(2): 36–38 [李英年. 高寒草甸植物地下生物量与气象条件关系及周转值分析 [J]. 中国农业气象, 1998, 19(2): 36–38]
- [35] Li Jiazao, Zhu Guiru, Yang Tao. The study of alpine meadow plant cellulose, roots and litter decomposition [C]// Plateau Biology Bulletin. 1984, 2: 107–113 [李家藻, 朱桂如, 杨涛. 高寒草甸植物的纤维素、根和枯枝落叶分解作用的研究 [C]// 高原生物学集刊. 1984, 2: 107–113]
- [36] Ma Wenhong, Han Mei, Lin Xin, et al. Carbon storage in vegetation of grasslands in Inner Mongolia [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006, 20(003): 192–195 [马文红, 韩梅, 林鑫, 等. 内蒙古温带草地植被的碳储量 [J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(003): 192–195]
- [37] Wang Qiji, Yang Futun, Shi Shunhai. Preliminary studies of alpine *Kobresia* meadow below-ground biomass formation [C]// International Symposium of Alpine Meadow Ecosystem. Beijing: Science Press, 1988: 73–81 [王启基, 杨福囤, 史顺海. 高寒矮嵩草草甸地下生物量形成规律的初步研究 [C]// 高寒草甸生态系统国际学术讨论会论文集. 北京: 科学出版社, 1988: 73–81]
- [38] Yang Yongxing, Wang Shiyun, He Tairong, et al. Study on plant biomass and its seasonal dynamics of typical wetland ecosystem in the Sanjiang Plain [J]. Grassland of China, 2002, 24(1): 1–7 [杨永兴, 王世岩, 何太蓉, 等. 三江平原典型湿地生态系统生物量及其季节动态研究 [J]. 中国草地, 2002, 24(1): 1–7]
- [39] Jiao Shuying, Han Guodong, Li Yongqiang, et al. Effects of different stocking rates on the structures and functional group productivity of the communities in desert steppe [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2006, 26(3): 564–571 [焦树英, 韩国栋, 李永强, 等. 不同载畜率对荒漠草原群落结构和功能群生产力的影响 [J]. 西北植物学报, 2006, 26(3): 564–571]
- [40] Yan Yuchun, Tang Haiping. Effects of enclosure on typical steppe community properties in Inner Mongolia [J]. Boreali-Occidentalia Sinica, 2007, 27(6): 1225–1232 [闫玉春, 唐海萍. 围栏禁牧对内蒙古典型草原群落特征的影响 [J]. 西北植物学报,

- 2007, 27(6): 1225 – 1232]
- [41] Han Wenjun, Chun Liang, Hou Xiangyang, et al. Species composition of a *Leymus chinensis* + forbs community and standing biomass under over-grazed environment [J]. Pratacultural Science, 2009, 26(9): 195 – 199 [韩文军, 春亮, 侯向阳, 等. 过度放牧对羊草杂类草群落种的构成和现存生物量的影响[J]. 草业科学, 2009, 26(9): 195 – 199]
- [42] Guo Jixun, Zhu Tingcheng. Study on litter decomposition in *leymus chinensis* grassland-relation of litter decompositon to ecological environment [J]. Acta Ecologica Sinica, 1992, 34(7): 529 – 534 [郭继勋, 祝廷成. 东北地区羊草草原主要群落立枯 – 凋落物动态的比较研究[J]. 植物学报, 1992, 34(7): 529 – 534]
- [43] Wang Liang, Niu Kechang, Yang Yuanhe, et al. Grass biomass of the above ground-below ground distribution pattern: based on the individual level [J]. Science in China: Life Sciences, 2010, 40(7): 642 – 649 [王亮, 牛克昌, 杨元合, 等. 中国草地生物量地上 – 地下分配格局: 基于个体水平的研究[J]. 中国科学: 生命科学 2010, 40(7): 642 – 649]

Seasonal Dynamics of Vegetation Carbon Density and Distribution Characteristics in Alpine Weeds Meadow under Different Grazing Intensity

WU Qihua^{1 3}, LI Yingnian^{1 2}, LIU Xiaoqin^{1 3}, LI Hongqin^{1 2}, MAO Shaojuan^{1 3}

(1. Northwest Institute of Plateau Biology, the Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China;

2. Key Laboratory of Adaptation and Evolution of Plateau Biota, the Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Seasonal dynamics of vegetation biomass, net primary carbon production, current carbon content, and the ratio of above and below ground carbon content of the summer alpine weeds meadow pasture lying in the north slope of Qilian Mountain under different grazing intensity were analyzed. The results showed that: (1) there was an obvious seasonal variation of the aboveground biomass, but the amplitude of variation was lower with the increase of grazing intensity; litter began to decline from the beginning of the growing season and rise a little in the late growing season, in which the decline in the heavy grazing (HG) and moderate grazing (MG) was more evident than in the light grazing (LG) and no grazing (NG); the seasonal variation of below-ground biomass was not obvious; biomass in the humus layer varied smoothly from the beginning of the growing season to middle stage and begin to decline in late July indicating that the biomass in the humus layer returned to the soil well in the favorable water and heat conditions. (2) net primary carbon production had the order of LG > MG > HG > NG, showing that appropriate grazing was beneficial to improve the net primary carbon production; its distribution in the below ground was less than 80% in NG, while it was more than 80% in LG, HG and MG. The investigation in the late September showed that the current total carbon content in vegetation increased with the decrease of the grazing intensity. The capacity of vegetation carbon storage under LG and NG was large and it was conducive to improve the carbon sequestration in soil.

Key words: summer pasture of alpine weeds meadow; grazing gradient; biomass; seasonal dynamics; vegetation carbon