

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2013-0528



放牧强度对青藏高原高寒草甸净生态系统交换量的影响

李 冰^{1,2}, 葛世栋^{1,2}, 徐田伟^{1,2}, 徐世晓^{1,3}, 李善龙⁴

(1. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院高原生物适应与进化重点实验室, 青海 西宁 810008;

4. 青海省贵南草业开发有限责任公司, 青海 海南藏族自治州 813100)

摘要:放牧是青藏高原主要的土地利用方式之一。放牧强度不同,对青藏高原高寒草甸生态系统 NEE 的影响也不同。为揭示不同放牧强度下高寒草甸生态系统气体交换的变化规律,同时为生态系统碳收支核算提供基本数据,本研究于 2012 年 5—10 月采用 Li-6400 便携式光合仪和密闭式箱法,对青藏高原高寒草甸生态系统不同放牧强度下的气体交换进行分析测定。结果表明,1)净生态系统交换量(NEE)、生态系统呼吸量(R_{eco})和生态系统初级生产力(GPP)均表现出明显的季节变化,NEE 在整个生长季的变化趋势呈“U”型, R_{eco} 和 GPP 为单峰型变化趋势;2)从 5 月中旬到 9 月中旬,NEE 为负值,表明高寒草甸生态系统为 CO_2 净吸收;3)在放牧率为 50% 的中度放牧强度下,高寒草甸的 NEE 和 GPP 具有最大值,表明中度放牧生态系统具有较高的碳汇水平。

关键词:放牧强度;生态系统净交换量;生态系统呼吸;生态系统总初级生产力

中图分类号:S812.8

文献标识码:A

文章编号:1001-0629(2014)07-1203-08*

Effects of grazing intensity on net ecosystem exchange of alpine meadow

LI Bing^{1,2}, GE Shi-dong^{1,2}, XU Tian-wei^{1,2}, XU Shi-xiao¹, LI Shan-long⁴

(1. Northwest Plateau Institute of Biology, CAS, Xining 810008, China;

2. University of Chinese Academic of Science, Beijing 100049, China;

3. Key Laboratory of Adaptation and Evolution of Plateau Biota, CAS, Xining 810008, China;

4. Guinan grass industry development co., Ltd of Qinghai Province,
Hainan Tibetan Autonomous Prefecture 813100, China)

Abstract: Grazing played a significant role in the land usage and management of the Tibetan plateau. With the change in global climate, the impacts of different grazing intensity on net ecosystem exchange (NEE) of alpine meadow ecosystems in Qinghai-tibet plateau were different. In order to reveal the variations of gas exchange under different grazing intensities and provide the basic data for the carbon balance calculation of ecosystem, gas exchange under different grazing intensities were measured by infrared analyzer (Li-6400) with a transparent and closed chamber. With respect to NEE, the obvious seasonal changes were observed for ecosystem total respiration (R_{eco}) and gross primary production (GPP). The varying curve of NEE performed as U-shaped and the varying curves of both Reco and GPP performed as single peak value wave. Values of NEE were negative from mid-May to mid-Sep, which indicated that alpine meadow ecosystem was carbon sink area at this stage. With 50% grazing intensity, NEE and GPP had the highest val-

* 收稿日期:2013-09-09 接受日期:2014-03-05

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(XDA05070200);中国科学院西部行动项目(KZCX2-XB3-05);国家科技支撑项目(2011BAC09B06、2014BAC05B04)

第一作者:李冰(1986-),男,山东聊城人,在读硕士生,研究方向为草地碳循环。E-mail:hlylibing@163.com

通信作者:徐世晓(1973-),男,青海乐都人,研究员,博士,研究方向为草地生态学。E-mail:xushixiaoqh@126.com

ue which showed that moderate grazing was optimal to maintain higher level of carbon sinks for the Qinghai-Tibet plateau alpine meadow ecosystem.

Key words: grazing intensity; net ecology exchange; respiration of ecosystem; gross primary productivity

Corresponding author: XU Shi-xiao E-mail: xushixiaoqh@126.com

政府间气候变化专门委员会(IPCC)报告(2007)中指出,全球正发生着以气候变暖为主要特征的变化,全球变暖已成为不争的事实^[1]。影响全球变暖的主要因素是人类活动将大量的温室气体排放进大气中,它们可以让太阳短波辐射自由通过,同时又能吸收地表发出的长波辐射。这些气体有二氧化碳、甲烷、氟氯化碳、臭氧、氮的氧化物和水蒸气等,而其中二氧化碳的贡献居首位^[2]。

净生态系统交换量(Net Ecology Exchange, NEE)是指生态系统光合同化作用与呼吸作用之间的平衡,它表征陆地生态系统吸收大气CO₂能力的高低。在不考虑人为因素与动物活动影响的情况下,陆地与大气之间的净生态系统交换量相当于植物光合作用固定的碳通量与生态系统呼吸释放的碳通量的差值^[3]。

青藏高原是世界上海拔最高、面积最大、形成最晚的高原,也是中国天然草地分布面积最大的一个区域^[4]。其特殊的地理单元,不仅发育了丰富多样的生态系统,而且也是气候变化最为敏感的地区之一,表现出气候变化具有一定的超前性^[5]。青藏高原生态系统NEE的研究,对于全球气候变化背景下温室气体变化的研究具有重要的意义。关于青藏高原生态系统NEE的研究,主要集中在源汇关系的探讨上^[6-14],而关于放牧强度对青藏高原生态系统NEE的研究则很少。放牧活动是高寒草甸的主要利用方式之一,能改变草地生态系统的地上生产力和生物多样性^[15],进而影响高寒草甸生态系统的气体交换。本研究利用2012年观测数据,对不同放牧强度处理下的高寒草甸NEE进行比较研究,旨在揭示不同放牧强度下NEE的变化规律,为全球气候变化背景下生态系统碳收支核算提供基本数据,对进一步控制合理放牧、发展畜牧业提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区自然概况

样地选择在中国科学院海北高寒草甸生态系统研究站(海北站)试验区,位于青藏高原东北隅的祁连山谷地(37°29′ 37°45′ N, 101°12′ 101°23′ E),海拔3 200~3 600 m。气候以东南季风和西伯利亚高压为主,属于大陆性季风气候,无明显的四季之分,冷季寒冷漫长(10月 翌年4月),暖季短暂凉爽(5 9月)。年平均气温-1.7℃,极端高温27.6℃,极端低温-37.1℃;最暖(7月)和最冷(1月)月平均气温分别为9.8和-14.8℃。年均降水量580 mm,主要集中于5 9月,约占年总降水量的80%,10月至翌年4月仅为年降水量的20%左右^[14]。年平均太阳辐射2 462.7 h,占太阳总辐射的60.1%。

1.2 试验设计和研究方法

本研究选择海北站附近典型的高寒矮嵩草甸生态系统作为研究对象,其植物群落以矮嵩草(*Kobresia humilis*)、羊茅(*Festuca ovina*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、小嵩草(*Kobresia pygmaea*)、早熟禾(*Poa annua*)、苔草(*Carex*)、美丽风毛菊(*Saussurea superba*)、麻花苳(*Gentiana straminea*)等为优势种,植被覆盖度在95%以上。样地设置3个处理和1个对照,分别为封育禁牧对照(CK)、轻度放牧(LG)、中度放牧(MG)和重度放牧(HG)。2010年5月开始在样地进行试验,CK样地设置4个小区,轻度放牧、中度放牧和重度放牧样地各设置6个小区,每个小区随机选择3个点进行测定。各个小区用围栏进行隔离,并可以防止家畜进入。放牧梯度分别为样地取食比例的0、30%、50%和70%,以放牧前的地上现存量为标准。选取大约2岁的体格健康、大小相近、习性相似的藏系羯羊,体质量为(40±2.5)kg,进行随机分组。CK组和LG、MG、

HG组的绵羊只数分别为0、3只、5只、7只。共进行3次放牧,起始时间分别为6月11日、7月9日、9月14日,每次放牧3d。

采用Li-6400便携式光合仪和密闭箱式法分别对不同放牧强度样地进行测量。选择晴朗的天气,往所有样地的钢板底座的槽里加满水,增强生态系统NEE测量的密闭性。首先测定净生态系统交换量,将透明的同化箱置于槽中,保持透光且密封的状态,开启Li-6400进行测定。同化箱内安装两个小风扇,用以搅拌箱内空气,使箱内气体均匀。然后,在同化箱上再扣上一个两层遮光布封上的顶箱,测定出在无光封闭环境下箱内的生态系统呼吸量(Respiration of Ecosystem, R_{eco})。

试验从2012年5月8日至10月24日,共测定20次。每次的测定时间为9:00—11:00,测量周期设定为每星期测定一次。由于海北站夏季雨量充沛,下雨和阴天影响生态系统气体交换的测量,测量周期进行了适当调整。每个点测定时间为2min,测定NEE时,同化箱完全透光,Li-6400自动测量时间为1min,每10s自动记录1个 CO_2 变化的数值,每个指标可记录5~6个数值;然后用遮光布顶箱扣上同化箱,在黑暗的环境中测定生态系统呼吸数值,测量时间同样为1min,每个指标自动记录5~6个数值。将Li-6400测定的NEE和 R_{eco} 数值保存在光合仪中,传输数据到计算机中,进行初步处理和分析,得到NEE、 R_{eco} ,生态系统初级生产力

(Gross Primary Productivity, GPP)由测得的NEE和 R_{eco} 的差值计算得出。NEE计算公式为:

$$NEE = A_{slope} \times 0.6 \times P \times 293 / [22.4 \times 0.001 \times 101.325 \times (273 + T)] / 10$$

式中, A_{slope} 为每组 CO_2 通量数据计算所得斜率, P 为大气压, T 为大气温度。NEE为正值表明是碳释放(碳源),NEE为负值表示碳吸收(碳汇)。

1.3 数据统计与分析

本研究采用Excel 2010对试验数据进行初步处理和分析,得到NEE、 R_{eco} 和GPP。利用SPSS 17.0对数据进行统计分析处理,采用重复测量数据方差分析,NEE、 R_{eco} 和GPP分别作为因变量,自变量为不同放牧强度处理,时间作为重复测量变量,并采用LSD方法进行多重比较,所有数据显著性分析水平均为 $\alpha \leq 0.05$ 。然后,使用Origin 8.0作图。

2 结果与分析

2.1 不同放牧强度处理下NEE生长季变化

整个生长季,对照组NEE变化趋势呈“U”型(图1)。NEE从5月8日的 $2.3 \mu mol \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$ 开始逐渐增大,至8月18日达到最大值,为 $-12.1 \mu mol \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$ 。之后,9、10月份逐渐降低,10月11日降低到 $1.7 \mu mol \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$,之后基本保持不变。由于天气变化的原因,7月20日测量的数值与之前的数值相比有所降低。

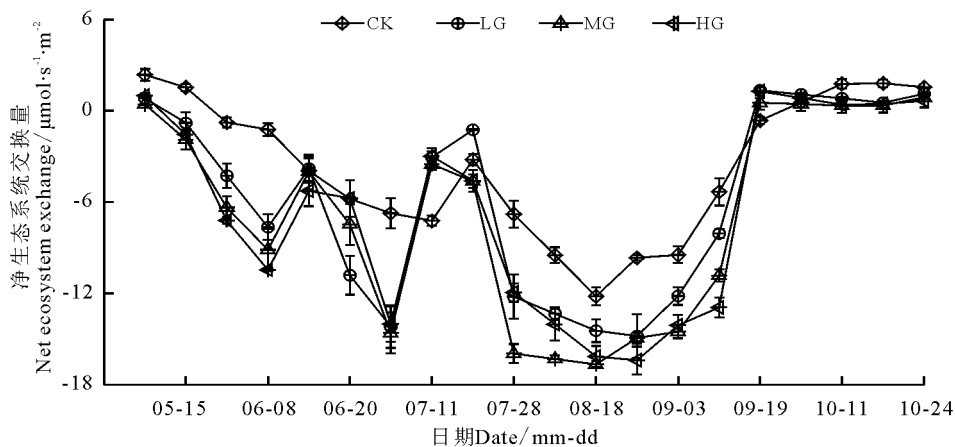


图1 不同放牧强度处理下NEE的生长季变化

Fig. 1 Variations of NEE under different grazing intensities

注:数据为均值±标准误。CK,对照;LG,轻度放牧;MG,中度放牧;HG,重度放牧。下图同。

Note: Values are mean±standard error. CK, Control; LG, Light grazing; MG, Moderate grazing; HG, Heavy grazing. The same below.

不同放牧强度处理的 NEE 生长季变化过程与对照组走势基本相同,从 5 月份开始增加,到 8 月份达到最大值,然后逐渐开始降低。但是,6 月份和 7 月份的放牧对放牧强度处理的各组影响明显,两次放牧后,3 种处理的 NEE 显著下降。9 月份的放牧对不同放牧强度处理的各组影响不明显。6 月份放牧强度处理后,对照组 NEE 增加了 2.1 倍,不同放牧强度处理对各组生态系统有明显的减弱作用。轻度放牧、中度放牧和重度放牧 NEE 分别比放牧前减少了 47.9%、48.8%、64.4%。7 月份放牧强度处理后,对照组 NEE 增加了 7.68%,轻度放牧、中度放牧和重度放牧 NEE 分别比放牧前减少了 78.4%、72.8%和 77.6%(图 2)。

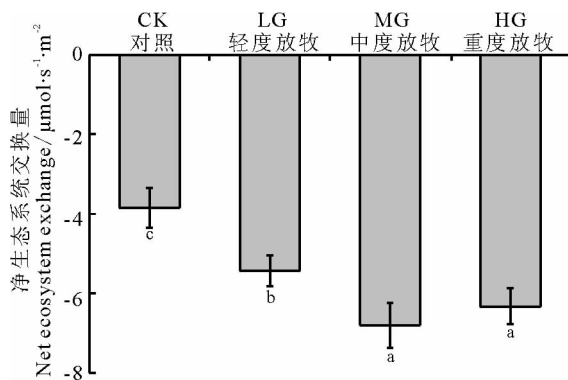


图 2 不同放牧强度处理下 NEE 的生长季平均值

Fig. 2 Average value of NEE under different grazing intensities

注:不同小写字母表示放牧强度处理间差异显著($P \leq 0.05$)。下同。
Note: Different lower case letters indicate significant difference among different grazing intensities at 0.05 level. The same below.

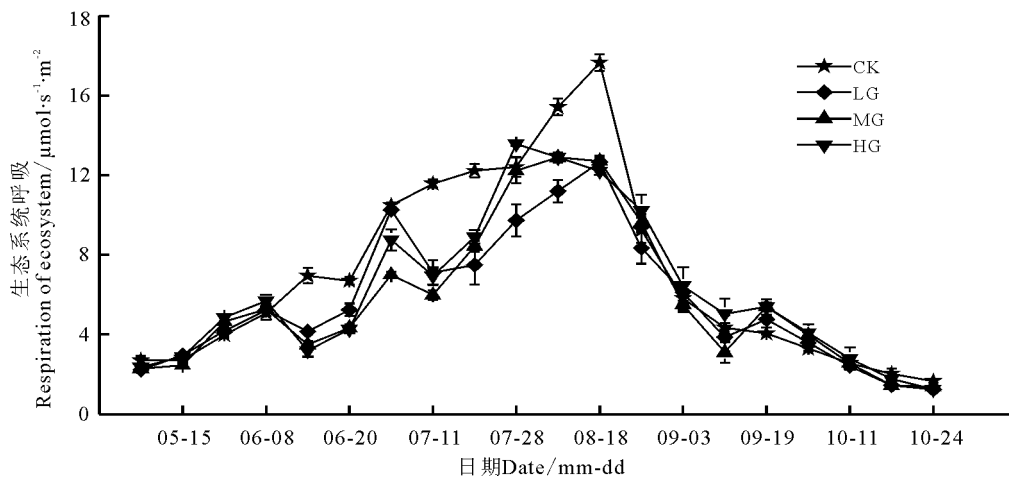


图 3 不同放牧强度处理下 R_{eco} 的生长季变化

Fig. 3 Variations of R_{eco} under different grazing intensities

方差分析结果显示,对照组与轻度放牧、中度放牧、重度放牧之间差异显著($P \leq 0.05$),轻度放牧与中度、重度放牧差异显著($P \leq 0.05$),中度放牧与重度放牧差异不显著($P > 0.05$)。这说明放牧活动对高寒草甸生长季的 NEE 产生了影响。高寒草甸整个生长季的 NEE 表现为中度放牧 > 重度放牧 > 轻度放牧 > 对照(图 2)。

2.2 不同放牧强度处理下 R_{eco} 的生长季变化

对照组的生态系统呼吸的生长季变化趋势总体呈单峰形状(图 3)。对照组生长季的 R_{eco} 从 5 月份的 $2.7 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 开始增加,至 8 月份达到最大值 $17.6 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 。9 月、10 月份开始下降。

在 6 月份放牧之前,不同放牧强度处理的各组之间与对照组的 R_{eco} 值基本相同、增长趋势一致。6 月份放牧之后,对照组增加了 37.1%,而轻度放牧、中度放牧和重度放牧分别降低了 20.7%、33.9%和 43.8%。至 7 月份放牧之前,对照组与不同放牧强度处理各组的 R_{eco} 值开始增加,对照组增加为 $10.5 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$,轻度放牧组、中度放牧组和重度放牧组分别增加到 10.3 、 7.0 和 $8.8 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 。7 月份放牧之后,对照组增加了 10.4%,轻度放牧组、中度放牧组和重度放牧组分别减少了 30.7%、14.5%和 20.7%。之后,不同放牧强度处理各组的 R_{eco} 值继续增加,重度放牧在 7 月底达到最大值 $13.6 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 。中度放牧组和对照组、轻度放牧组先后于 8 月初和 8 月 18 日达到最大值。9、10 月份, R_{eco} 值逐渐降低,对照组与不同放牧强度处理之间差异不大。

方差分析结果显示,对照组与不同放牧强度处理的各组之间具有显著差异($P \leq 0.05$),重度放牧组与轻度放牧组、中度放牧组具有显著差异($P \leq 0.05$)。这说明放牧活动对高寒草甸生长季的 R_{eco} 产生影响。就整个生长季来看, R_{eco} 表现为对照组 > 重度处理 > 中度处理 > 轻度处理(图 4)。

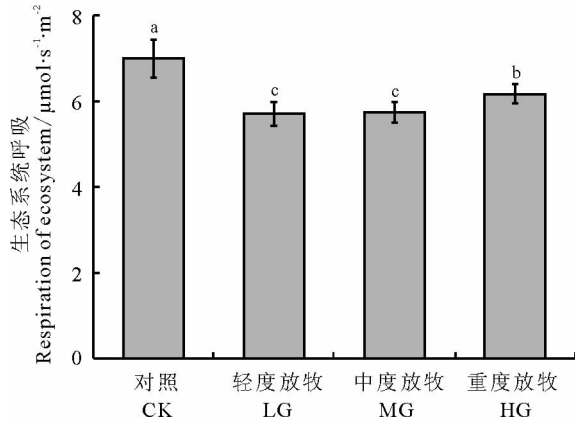


图 4 不同放牧强度处理下 R_{eco} 生长季平均值

Fig. 4 Average value of R_{eco} under different grazing intensities

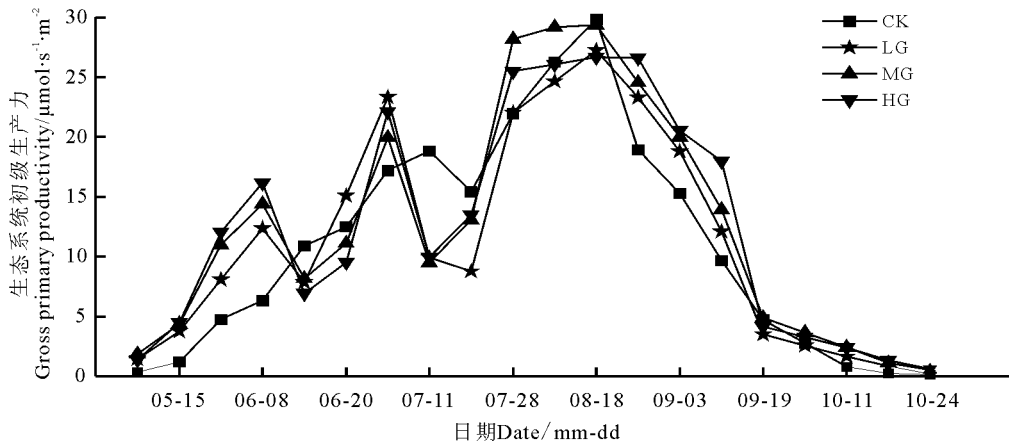


图 5 不同放牧强度处理下 GPP 生长季变化

Fig. 5 Variations of GPP under different grazing intensities

方差分析结果显示,对照组与中度放牧、中度放牧具有显著差异($P \leq 0.05$),轻度放牧组与中度放牧组、重度放牧组间也有显著差异($P \leq 0.05$)。这说明放牧活动对高寒草甸生长季的 GPP 产生影响。就整个生长季来看,3 个放牧处理和对照的 GPP 表现为中度放牧 > 重度放牧 > 轻度放牧 > 对照(图 6)。

2.3 不同放牧强度处理下 GPP 生长季变化

对照组生态系统总初级生产力 GPP 变化趋势基本为单峰型(图 5)。生态系统初级生产力从 5 月份开始增加,到 8 月 18 日达到最大值 $29.8 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ 。之后,9、10 月份逐渐降低。由于天气原因,6 月 20 日出现了一个下降的拐点。

不同放牧强度处理的各组的 GPP 变化趋势与对照组基本一致。从 5 月份开始增加,到 8 月份达到最大值,9、10 月份逐渐下降。6、7 月的放牧对轻度放牧、中度放牧和重度放牧的影响明显,9 月份的放牧对 3 种处理没有明显的影响。在 6 月放牧之前,4 种处理的 GPP 都在逐渐增加,重度处理增加最快。经过放牧强度处理之后,对照组 GPP 增加了 72.6%,轻度放牧、中度放牧和重度放牧分别减少了 36.4%、43.3%和 57.1%。在 7 月份放牧之前,4 种处理的 GPP 同时增加,达到放牧前的最大值,轻度 > 重度 > 中度 > 对照。经过放牧强度处理,对照组 GPP 增加了 9.4%,轻度放牧、中度放牧和重度放牧分别减少了 57.5%、52.4%和 55.1%。

3 讨论

3.1 放牧对净生态系统交换量和总初级生产力的影响

从 5 月中旬到 9 月中旬,NEE 表现为负值。这是由于青藏高原年气候变化无明显四季之分,非生长季寒冷漫长,而生长季具有相对气温较高、降水充足、水热同期的典型特征^[4],有利于植被营养物

质合成和积累,极大地促进了光合作用,NEE 显著增加,生态系统处于净碳吸收阶段。其中,8月中旬达到最大值,表明碳吸收最大。NEE 和 GPP 存在明显的季节变化,这与植被状况密切相关。矮嵩草草甸植物群落在 5 月中下旬开始随着降水的增多以及温度的升高,植物生长速度加快,到 7 月下旬达最高,之后逐渐降低^[16]。

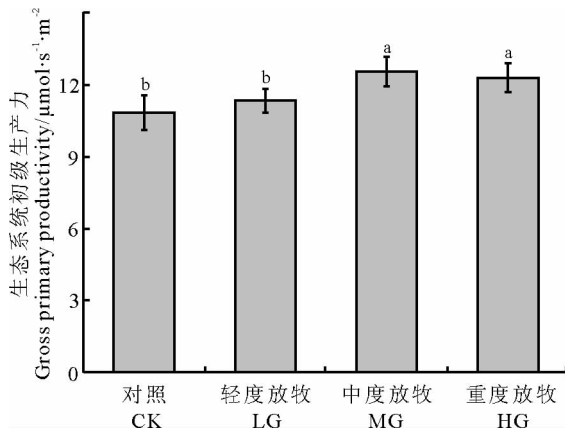


图 6 不同放牧强度处理下 GPP 生长季平均值

Fig. 6 Average value of GPP under different Vgrazing intensities

放牧后较短时间内,不同放牧强度处理的各组 NEE 和 GPP 数值全部降低。生态系统光合能力与叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)呈显著的正相关, LAI 高的生态系统具有较高的 CO₂ 吸收速率和光合能力。在放牧条件下,植物的光合器官通过家畜的采食被移除,植物冠层叶面积指数大大减小,使植物光合作用能力快速下降^[17]。研究表明, LAI 与 NEE 呈显著正相关, LAI 高的生态系统具有较高的碳汇能力^[18-19]。由于植物的光合器官通过家畜的采食被移除,植被群落的 LAI 减小, NEE 数值减小。Haferkamp 和 MacNeil^[20]的研究也表明短期高强度放牧后较短时间内,植被 LAI 极大降低, NEE 也显著降低。

在不同放牧强度处理下,高寒草甸生长季 NEE 和 GPP 均值结果表现为中度放牧 > 重度放牧 > 轻度放牧 > 对照。放牧有利于提高净生态系统 CO₂ 交换量和生态系统总初级生产力。这与 Klein 等^[21]的研究结果一致,适度放牧可以刺激植物生长从而增加植物生长力,适度放牧可以使植物产生补偿性生长从而提高植物生产力。在不放牧条件下,

地上残留了大量的枯落物,枯落物抑制了植物对光和空间资源的利用能力以及植物再生和幼苗的形成^[22],从而影响植物的生长,减少了植物光合作用面积,导致营养物质生产和积累下降。放牧可以降低牧草因枯萎和凋落造成的损失,有利于草地植物更新、再生生长和草地高生产力的保持^[22]。放牧能提高现有和再生叶片的光合能力,并且加快叶片的生长速度,以恢复整株的光合能力^[23],光合作用增强,对高寒草甸碳汇的影响是正面的。在重度放牧的情况下,放牧绵羊过度采食植物地上生物量(特别是叶生物量及叶面积),导致植物冠层叶面积迅速减少,光合作用下降。虽然植物存在补偿性生长,但是不能弥补放牧绵羊采食对植物光合能力造成的影响,地上植物量不能及时更新,减缓再生生长^[24],导致植物 NEE 和 GPP 下降。

3.2 放牧对生态系统呼吸的影响

在不考虑 6 月份和 7 月份放牧的影响的情况下,不同放牧强度处理的生态系统呼吸的生长季变化呈单峰形状。生态系统呼吸包括土壤呼吸和植被的冠层呼吸。由于植物在生长季快速生长,地上生物量增加,使植物冠层呼吸作用增强,导致生态系统呼吸增大。同时,温度和降水是影响生态系统土壤呼吸最主要的因素^[25],生长季气温较高,降水充足,土壤呼吸增加。8 月份以后,气温下降,降水减少,以及植物地上生物量开始逐渐减少,生态系统呼吸降低。这与吴琴等^[26]对矮嵩草土壤呼吸不同组分的研究结果一致。

放牧后较短时间内,不同放牧强度处理的各组生态系统呼吸全部降低。放牧绵羊以地上植物为食,导致植物地上生物量显著减少。地上绿色生物量的减少伴随着植被呼吸器官的减少,植被冠层呼吸作用的大小与地上绿色生物量成正相关关系^[27]。由于植被冠层呼吸迅速下降,致使生态系统呼吸降低。

在不同放牧强度处理下,高寒草甸生长季 R_{eco} 平均值大小表现为对照 > 重度放牧 > 中度放牧 > 轻度放牧。植被冠层呼吸和土壤呼吸共同组成了生态系统呼吸,植物通过自养呼吸释放的 CO₂ 大约可以达到植物光合作用固定 CO₂ 的 50%^[27]。不放牧条件下,由于地上现存量,植物冠层呼吸旺盛。此外,凋落物作为土壤有机质输入的主要来源,是真菌

或微生物进行生命活动的物质基础,凋落物的蓄积会导致土壤呼吸释放的 CO_2 量增加^[28],所以对照组生态系统呼吸最大。在3个放牧强度处理下,放牧会使土壤微生物生物量以及微生物活动增强,并且家畜排泄物向土壤输送的养分,也能使微生物生物量增加、活动增强^[29],导致土壤呼吸升高。温度是通过影响土壤生物新陈代谢率而影响土壤 CO_2 的释放,是影响土壤 CO_2 释放强度最主要的因素^[30-31]。研究表明,植物根系与土壤微生物呼吸速率均与5 cm 土壤温度呈极显著的正相关关系^[26]。重度放牧处理下,绵羊将部分地上生物量移除,植被冠层叶面积减少,使土壤温度升高,提高了土壤微生物和酶的活性,促使地下根系和土壤微生物的呼吸增加^[32]。

4 结论

高寒草甸生态系统 NEE、 R_{eco} 和 GPP 均表现明显的季节变化,NEE 在整个生长季的变化趋势呈“U”型, R_{eco} 和 GPP 为单峰型变化趋势。从5月中旬到9月中旬,NEE 数值为负值,高寒草甸表现为明显的碳汇,其中,8月中旬达到最大值,表明高寒草甸生态系统碳吸收最大。放牧可以增加生态系统碳吸收和初级生产力,降低生态系统呼吸,在中度放牧处理下,高寒草甸 NEE 和 GPP 具有最大值。从生态系统净交换量、生态系统呼吸和生态系统总初级生产力3个方面考虑,中度放牧可能较利于维持青藏高原高寒草甸较高的碳汇水平。

参考文献

- [1] Schneider S H. The greenhouse effect: Science and policy[J]. Science, 1989, 243: 771-781.
- [2] Lashof D A, Ahuja D R. Relative contributions of greenhouse gas emissions to global warming[J]. Nature, 1990, 344: 529-531.
- [3] 张晴,李力. 我国净生态系统碳交换量(NEE)的时空变化特征研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37: 3108-3109.
- [4] 徐世晓,赵亮,赵新全,李英年,古松. 青藏高原高寒灌丛非生长季节 CO_2 通量特征[J]. 西北植物学报, 2006, 26: 2528-2532.
- [5] 冯松,汤懋苍. 青藏高原是我国气候变化启动区的新证据[J]. 科学通报, 1998, 43: 633-636.
- [6] Zhao X Q, Zhou X M. Ecological basis of alpine meadow ecosystem management in Tibet: Haibei alpine meadow ecosystem research station[J]. Ambio, 1999, 28: 642-647.
- [7] Gu S, Tang Y H, Du M Y, Kato T, Li Y N, Cui X, Zhao X Q. Short-term variation of CO_2 flux in relation to environmental controls in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2003, 108(21): 4670.
- [8] 徐世晓,赵新全,李英年,赵亮,曹广民,唐艳鸿,古松,王勤学,杜明远. 青藏高原高寒灌丛生长季和非生长季 CO_2 通量分析[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 2004, 34: 118-124.
- [9] Zhao L, Li Y N, Gu S, Zhao X Q, Xu S X, Yu G R. Carbon dioxide exchange between the atmosphere and an alpine shrubland meadow during the growing season on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2005, 47: 271-282.
- [10] 徐玲玲,张宪洲,石培礼,于贵瑞,孙晓敏. 青藏高原高寒草甸生态系统净二氧化碳交换量特征[J]. 生态学报, 2005, 25: 1948-1952.
- [11] 徐世晓,赵新全,李英年,赵亮,于贵瑞,孙晓敏,曹广民. 青藏高原高寒灌丛 CO_2 通量日和月变化特征[J]. 科学通报, 2005, 50: 481-485.
- [12] 赵亮,李英年,赵新全,徐世晓,唐艳鸿,于贵瑞,古松,杜明远,王勤学. 青藏高原3种植被类型净生态系统 CO_2 交换量的比较[J]. 科学通报, 2005, 50: 926-932.
- [13] Kato T, Tang Y, Gu S, Hirota M, Du M Y, Li Y N, Zhao X Q. Temperature and biomass influences on interannual changes in CO_2 exchange in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Global Change Biology, 2006, 12: 1285-

- 1298.
- [14] 李英年,孙晓敏,赵新全,赵亮,徐世晓,古松,张法伟,于贵瑞. 青藏高原金露梅灌丛草甸净生态系统 CO₂ 交换量的季节变异及其环境控制机制[J]. 中国科学(D辑:地球科学),2006,36:163-173.
- [15] 王长庭,龙瑞军,王启兰,曹广民,施建军,杜岩功. 放牧扰动下高寒草甸植物多样性、生产力对土壤养分条件变化的响应[J]. 生态学报,2008,28:9-15.
- [16] 李英年,王勤学,古松,伏玉玲,杜明远,赵亮,赵新全,于贵瑞. 高寒植被类型及其植物生产力的监测[J]. 地理学报,2004,59:40-48.
- [17] Dudley S A, Schmitt J. Testing the adaptive plasticity hypothesis: density-dependent selection on manipulated stem length in *Impatiens capensis*[J]. American Naturalist,1996:445-465.
- [18] LeCain D R, Morgan J A, Schuman G E, Reeder J D, Hart R H. Carbon exchange and species composition of grazed pastures and exclosures in the shortgrass steppe of Colorado[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment,2002,93:421-435.
- [19] 张文丽,陈世苹,苗海霞,林光辉. 开垦对克氏针茅草地生态系统碳通量的影响[J]. 植物生态学报,2008,32:1301-1311.
- [20] Haferkamp M R, MacNeil M D. Grazing effects on carbon dynamics in the northern mixed-grass prairie[J]. Environmental Management,2004,33:462-474.
- [21] Klein J A, Harte J, Zhao X Q. Experimental warming causes large and rapid species loss, dampened by simulated grazing, on the Tibetan Plateau[J]. Ecology Letters,2004,7:1170-1179.
- [22] 苏爱玲,张振华,汪诗平,段吉闯,常小峰,杨晓霞,罗彩云,徐广平,胡宜刚. 不同季节放牧对矮嵩草草甸植物叶面积指数的影响[J]. 草原与草坪,2010,30:50-55.
- [23] 汪诗平,王艳芬,李永宏,陈佐忠. 不同放牧率对草原牧草再生性能和地上净初级生产力的影响[J]. 草地学报,1998,6(4):275-81.
- [24] Smith S E. Variation in response to defoliation between populations of *Bouteloua curtipendula* var. *caespitosa* (Poaceae) with different livestock grazing histories[J]. American Journal of Botany,1998,85:1266-1272.
- [25] Bahn M, Rodeghiero M, Anderson-Dunn M, Dore S, Gimeno C, Drösler M, Williams M, Ammann C, Berninger F, Flechard C, Jones S, Balzarolo M, Kumar S, Newsely C, Priwitzer T, Raschi A, Siegwolf R, Susiluoto S. Soil respiration in European grasslands in relation to climate and assimilate supply[J]. Ecosystems,2008,11:1352-1367.
- [26] 吴琴,曹广民,胡启武,李东,王跃思,李月梅. 矮嵩草草甸植被—土壤系统 CO₂ 的释放特征[J]. 资源科学,2005,27:96-102.
- [27] 朱玲玲,戎郁萍,王伟光,马磊. 放牧对草地生态系统 CO₂ 净气体交换影响研究概述[J]. 草地学报,2013,21(1):3-10.
- [28] 郭明英,卫智军,运向军,吴艳玲,刘红梅,李耀,辛晓平. 放牧对草原土壤呼吸的影响[J]. 草业科学,2011,28(5):729-736.
- [29] Guitian R, Bardgett R D. Plant and soil microbial responses to defoliation in temperate semi-natural grassland[J]. Plant and Soil,2000,220:271-277.
- [30] 曹广民,李英年,张金霞,赵新全. 环境因子对暗沃寒冻锥形土土壤 CO₂ 释放速率的影响[J]. 草地学报,2001,9(4):307-312.
- [31] 裴志永,欧阳华,周才平. 青藏高原高寒草原碳排放及其迁移过程研究[J]. 生态学报,2003,23:231-236.
- [32] Cao G M, Tang Y H, Mo W H, Wang Y S, Li Y N, Zhao X Q. Grazing intensity alters soil respiration in an alpine meadow on the Tibetan plateau[J]. Soil Biology and Biochemistry,2004,36:237-243.

(责任编辑 王芳)