

冬季放牧对高寒草甸生长季 NEE 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 813000)

摘要: 本研究于 2011 年冬季对青藏高原高寒矮高草甸进行不同放牧强度处理, 并于 2012 年 5 月到 10 月之间采用 Li-6400 便携式光合仪和密闭式箱法, 对其生长季 NEE 、 R_{eco} 和 GPP 进行分析测定。结果表明, ① NEE 、 R_{eco} 和 GPP 均表现明显的月际变化, 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 放牧活动对 NEE 、 R_{eco} 和 GPP 均产生影响, 放牧能够促进 NEE 提早达到最大值; ③ 在中度放牧强度下, 高寒草甸的 NEE 和 GPP 具有最大值, 有利于维持高寒草甸生态系统较高的碳汇水平。

关键词: 冬季放牧; 生态系统净交换量; 生态系统呼吸; 生态系统初级生产力

中图分类号: S181 文献标识码: A

Effects of Winter 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-xiao^{1,3*}, LI Shan-long⁴

(1. Northwest Plateau Institute of Biology, CAS, Qinghai Xining 810008, China; 2. University of Chinese Academic of Science, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Adaptation and Evolution of Plateau Biota, CAS, Qinghai Xining 810008, China; 4. Guinan Grass Industry Development Co., Ltd of Qinghai Province Hainan Tibetan Autonomous Prefecture, Qinghai Hainan 813000, China)

Abstract: In winter of 2011 *Kobresia humilis* meadow was dealt under different grazing intensity on the Qinghai-Tibet plateau. From May to October in 2012, this study used infrared analyzer (Li-6400) with a transparent chamber to measure NEE , R_{eco} and GPP under different grazing intensity. The results showed that (i) NEE , R_{eco} and GPP had obvious inter-monthly variation. The varying curve of NEE looked as U-shaped, varying curve of R_{eco} and GPP acted as a single peak value wave. (ii) Grazing had great impact on NEE , R_{eco} and GPP , NEE was promoted to reach maximum value in advance by grazing. (iii) Under moderate grazing treatment, NEE and GPP had the highest value, which was the most suitable choice to absorb more carbon dioxide for alpine meadow ecosystem on the Qinghai-Tibet plateau.

Key words: Winter grazing intensity; Net ecosystem exchange; Respiration of ecosystem; Gross primary productivity

近几十年来观测结果表明,全球气候变暖已经是不争的事实。工业革命以来,人类活动引起的温室气体(CO_2 , CH_4 , N_2O 等)向大气中持续排放,已经导致过去 100 年间全球平均气温上升了 $0.6\text{ }^\circ\text{C}$ 左右^[1-2], 到 21 世纪末还将升高 $2\sim 6\text{ }^\circ\text{C}$ 左右。人为因素引起的温室效应约占全球总温室效应的 70% 以上,而其中 CO_2 的贡献位居首位^[3]。

青藏高原占中国国土面积 1/4, 海拔 3000 m 以

上。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^[4]。青藏高原草地面积占高原陆地面积的 48% 以上,高寒草甸是青藏高原最主要的植被类型之一,在高原生态系统和畜牧业发展中占据重要的位置^[5]。此外,高寒草甸对大气与地面之间的能量平衡、水汽交换以及生物地球化学循环产生极其重要的作用^[6]。

近年来,许多专家学者对青藏高原高寒草甸碳收支进行了大量的研究报道^[7-14],表明高寒草甸生态系统为微弱碳汇。但是,关于不同放牧强度,尤其是冬季放牧强度处理对高寒草甸生态系统碳收支影响的研究报道甚少。为此,本研究于 2011 年冬季对试验地进行不同放牧强度处理,通过 2012 年 5-10

收稿日期: 2014-02-12

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)

作者简介: 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, * 为通讯作者。

月对生长季高寒草甸 NEE 数据的观测, 对其进行比较研究, 旨在揭示冬季不同放牧强度下 NEE 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 研究区概况

本研究在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站(海北站)进行, 地处青藏高原东北隅, 祁连山北支龙岭东段南麓的大通河河谷($N37^{\circ}37'$, $E101^{\circ}19'$), 海拔 3200 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月至翌年4月), 暖季短暂凉爽(5-9月)。年平均气温 -1.7°C , 极端高温 27.6°C , 极端低温 -37.1°C [15]。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 [7]。土壤为高山草甸土, 植被为矮嵩草草甸, 群落种类成分较为丰富, 多属一些寒冷中生或冷旱中生植物, 优势种是中亚高山成分的矮嵩草; 次优势种以异针茅、紫羊茅为主; 伴生种有耐寒中生的禾草如早熟禾、藏异燕麦、垂穗披碱草等 [16]。

1.2 实验设计和研究方法

本研究选择海北站附近典型的高寒矮嵩草草甸生态系统作为研究对象。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 (WLG)、中度放牧 (WNG) 和重度放牧 (WHG)。对照样地、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。2010 年 5 月开始在样地进行试验, 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 2 岁的体格健康、大小相近、习性相识的藏系羯羊, 进行随机分组。对照、轻度放牧、中度放牧和重度放牧羯羊只数分别为 0、3、5、7 只。

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 (NEE), 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 2 个小风扇, 用来搅拌箱内空气, 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 (R_{eco})。

试验从 2012 年 5 月 8 日至 10 月 24 日, 一共测定 18 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。每个样点测定时间为 2 min, 测定 NEE 时, 同化箱完全透光, Li-6400 自动测量时间为 1 min, 每 10 s 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 1 min, 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} , 通过换算得到 GPP 的数据。 NEE 计算公式为:

$$NEE = Slope \times 0.6 \times P \times 293 / (22.4 \times 0.001 \times 101.325 \times (273 + T)) / 10$$

式中, $Slope$ 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)。

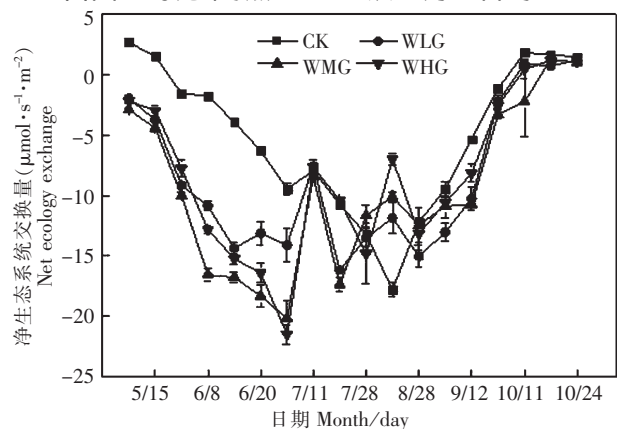
1.3 数据统计与分析

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 , 使用 Origin 8.0 进行作图, 利用 SPSS17.0 对数据进行统计分析处理, 将不同处理间每次观测到的 NEE 采用重复测量数据的方差分析, 并用最小显著差数法 (LSD) 对各测定数据进行多重比较, 所有数据显著性分析水平均为 $\alpha \leq 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 冬季放牧强度对高寒草甸 NEE 影响

由图 1 可见, 对照组 NEE 从 5 月 8 日的 2.69



数据为均值 ± 标准误。下同

Values are mean ± standard error. The same as below

图 1 不同放牧强度下 NEE 生长季变化

Fig. 1 Variations of NEE under different grazing intensity

$\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 开始逐渐增大,至8月18日达到最大值 $-17.79 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 。*NEE* 达到最大值之后,9、10月份逐渐降低,10月11日降低到 $1.83 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$,接下来基本保持不变。其中,由于天气变化的原因,7月11日测量的数值与以前的数值相比,发生降低。

在不考虑7月11日的天气原因的情况下,经过冬季不同放牧强度处理的高寒草甸 *NEE* 生长季变化趋势与对照组相同,表现为“U”型。即 *NEE* 从5月份开始增加,到7月份达到最大值,然后逐渐下降,至10月份保持不变。从整个生长季来看,对照组在8月18日达到 *NEE* 最大值 $-17.79 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$;轻度放牧处理在7月20日达到最大值 $-16.16 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$;中度放牧和重度放牧处理在7月4日达到最大值,分别为 -20.16 和 $-21.49 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 。可见在不同的冬季放牧强度处理下,放牧活动对高寒草甸 *NEE* 达到最大值的时间产生影响。

使用 SPSS 对不同放牧强度处理的 *NEE* 进行重复测量数据的方差分析,对照组与轻度放牧、中度放牧、重度放牧之间差异显著,中度放牧与轻度、重

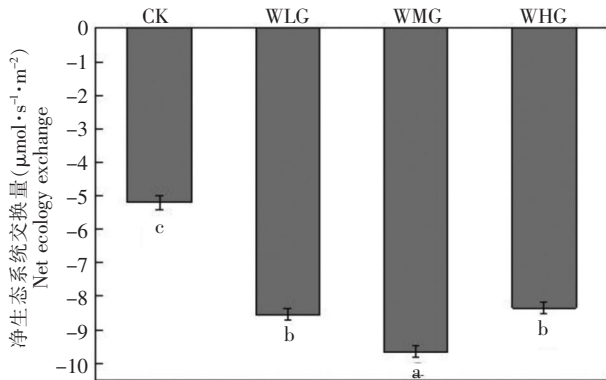


图2 不同放牧强度处理下 *NEE* 的生长季平均值

Fig.2 Average value of *NEE* under different grazing intensity

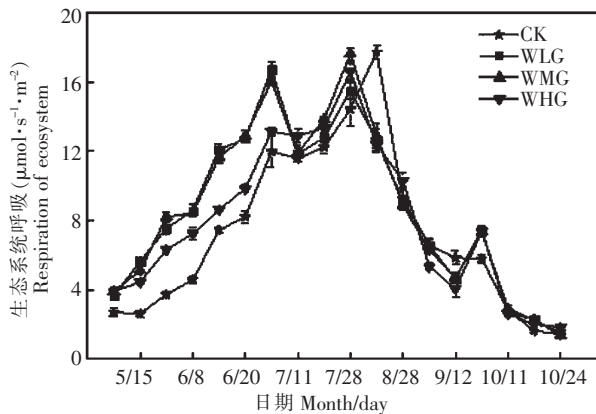


图3 不同放牧强度处理下 *R_{eco}* 的生长季变化

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

放牧差异显著,轻度放牧与重度放牧差异不显著。这说明冬季放牧活动对高寒草甸生长季的 *NEE* 产生了影响。就高寒草甸整个生长季的 *NEE* 均值来看,中度放牧 > 轻度放牧 > 重度放牧 > 对照(图2)。

2.2 冬季放牧强度对高寒草甸 *R_{eco}* 影响

图3是冬季不同放牧强度处理下 *R_{eco}* 的生长季变化情况。从整个生长季来看,对照组和3种放牧强度处理的高寒草甸生态系统呼吸的变化趋势总体呈单峰形状。对照组 *R_{eco}* 从5月份的 $2.70 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 开始增加,至8月份达到最大值 $17.72 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 。达到最大值后, *R_{eco}* 逐渐下降,到10月16日,降为 $1.62 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$,接下来总体保持不变。在不同放牧强度处理下,5月8日的 *R_{eco}* 数值均在 $3.8 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右,然后逐渐增大,轻度放牧和重度放牧处理增加最快。至7月4日,轻度放牧和重度放牧处理增大到 $16 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右,重度放牧处理为 $13.1 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 。由于7月11日的天气因素的影响,三种放牧强度处理的 *R_{eco}* 数值都发生了下降。之后,不同放牧强度处理的 *R_{eco}* 数值继续增加,到7月28日达到最大值,轻度、中度和重度放牧处理分别为 15.5 、

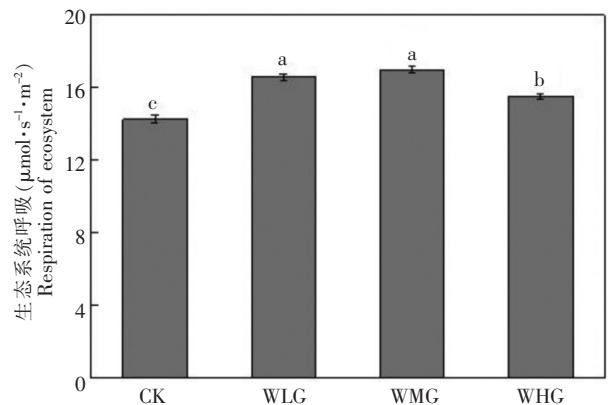


图4 不同放牧强度处理下 *R_{eco}* 生长季平均值

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

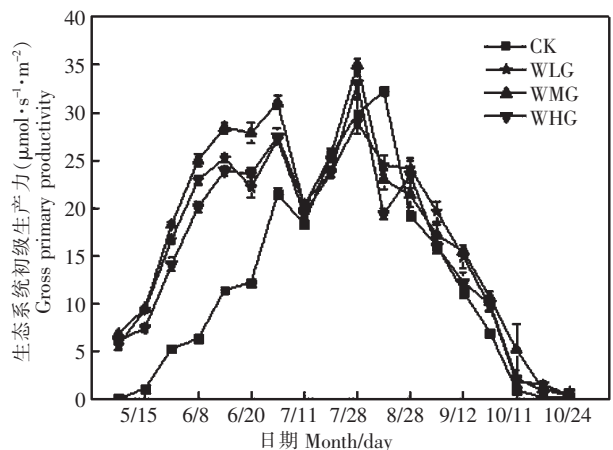


图5 不同放牧强度处理下 *GPP* 生长季变化

Fig.5 Variations of *GPP* under different grazing intensity

17.6 和 16.6 $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 。达到最大值以后 3 种放牧处理的 R_{eco} 全部开始下降,到 10 月中旬降为最小值, R_{eco} 均在 2 $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右。

使用 SPSS 对不同放牧强度处理的 R_{eco} 数值进行重复测量数据的方差分析,对照组与不同放牧强度处理的各组之间具有显著性差异,重度放牧与轻度放牧、中度放牧具有显著性差异,轻度放牧与中度放牧差异不显著。这说明冬季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} 平均值大小为:中度放牧 > 轻度放牧 > 重度放牧 > 对照组(图 4)。

2.3 冬季放牧强度对高寒草甸 GPP 影响

生态系统初级生产力 GPP 由测得的 R_{eco} 和 NEE 的差值计算得出。图 5 是冬季不同放牧强度处理下,高寒草甸生长季 GPP 的变化情况。由图 5 可见,对照组生态系统总初级生产力 GPP 变化趋势基本为单峰型。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 32.2 $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 。达到最大值后,其在 9、10 月份逐渐降低。由于天气原因,7 月 11 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,总体表现为单峰型。即 GPP 从 5 月份开始增加,到 7 月 28 日达到最大值,然后逐渐下降。3 种放牧强度处理的 GPP 在 5 月 8 日均为 6 $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右,之后逐渐增加。重度放牧处理增加最快,至 7 月 4 日,其 GPP 为 31 $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$,轻度放牧和重度放牧处理增加幅度相近。7 月 11 日,由于天气原因,放牧处理的各组均出现下降。接下来 GPP 继续增加,7 月 28 日达到最大值。达到最大值之后,各组 GPP 全部下降,到 10 月中旬基本保持不变。

使用 SPSS 对不同放牧强度处理下的 GPP 数值进行重复测量数据的方差分析,对照组与轻度放牧、

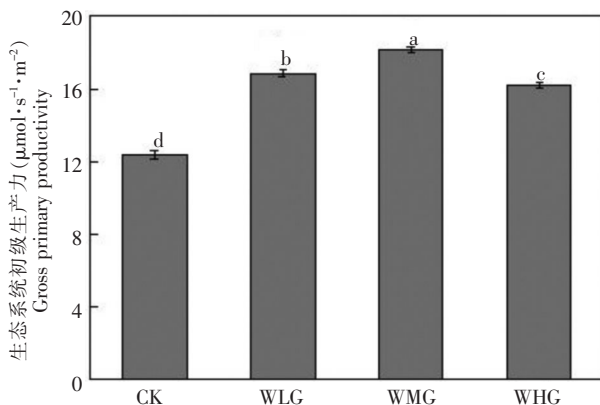


图 6 不同放牧强度处理下 GPP 生长季平均值

Fig. 6 Average value of GPP under different grazing intensity

中度放牧和重度放牧处理均具有显著性差异,三种不同放牧强度处理之间也具有显著性差异。这说明冬季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 种处理和对照组的 GPP 平均值大小为:中度放牧 > 轻度放牧 > 重度放牧 > 对照(图 6)。

3 讨论与结论

3.1 放牧对净生态系统交换量的影响

从整个生长季来看,对照组和不同放牧强度处理的 NEE 变化趋势呈“U”型。从 5 月下旬到 9 月中旬,对照组 NEE 表现为负值,说明高寒草甸生态系统处于净碳吸收的状态。其中 8 月份 NEE 达到最大值,即生态系统碳汇能力最强。这是由于生长季青藏高原白昼气温较高,光合辐射较强,降水多集中于 5-9 月的生长季,高寒草甸在水热同期的有利条件下,通过光合作用固定的 CO_2 量明显超过生态系统呼吸排放的 CO_2 量,高寒草甸生态系统处于明显的净碳吸收阶段^[9]。

在不同放牧强度的处理下,高寒草甸 NEE 生长季达到最大值的时间均有所不同,中度放牧和重度放牧处理最早达到最大值,轻度放牧处理也比对照组较早达到最大值。可见放牧能够促进 NEE 提早达到生长季最大值,即放牧处理使最大净初级生产力出现的时间提前,这与汪诗平^[17]等人的研究结果一致。

在不同放牧强度的处理下,各组 NEE 生长季的平均值各不相同,中度放牧 > 轻度放牧 > 重度放牧 > 对照。由此可见,放牧活动对高寒草甸生长季 NEE 起到了促进作用。研究表明,叶面积指数(LAI)与 NEE 大小成显著的正相关,LAI 高的生态系统具有较高的碳汇能力^[18]。不放牧条件下,地上残留了大量的枯落物,上层叶片不断老化,下层叶片处于遮荫状态,对光的利用效率降低,光合能力下降,呼吸消耗增强,使得 NEE 数值降低。在放牧处理下,可以提高现有和再生叶片的光合能力,并且可以加快叶片的生长速度,光合能力增强^[19],对草地碳汇的影响是正面的。在重度放牧的情况下,植物地上生物量减少,从而使植被 LAI 降低,同时,植物的再生能力降低,地上生物量不能及时更新,叶生物量及叶数下降^[20],导致生态系统 NEE 降低。

3.2 放牧对生态系统呼吸的影响

不同放牧强度处理和对照组的生态系统呼吸的生长季变化呈单峰形状。各组的生态系统呼吸从 5 月份开始增加,7 月底或 8 月份达到最大值,然后逐渐下降,最后在 10 月中旬保持基本不变。由于植物

在生长季快速生长,地上生物量和地下根系增加,使植物呼吸作用增强,生态系统呼吸增大。同时,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,以及植物折损减少,生态系统呼吸降低。这与吴琴等^[21]对矮嵩草土壤呼吸不同组分的研究结果一致。

在不同放牧强度处理下,各组 R_{eco} 生长季平均值大小为: 中度放牧 > 轻度放牧 > 重度放牧 > 对照组。 R_{eco} 代表整个生态系统的 CO_2 总释放量,包括植被冠层呼吸和土壤呼吸,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^[22]。在不放牧条件下,地上残留了大量的枯落物,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形成,影响了植物的繁殖和更新,使得绿色生物量降低^[20]。在夏季放牧条件下,放牧绵羊以地上植物为食,导致植物地上生物量显著减少,牧草现存量小,牧草再生所需的物质和能量不能及时得到供应,影响牧草的再生速率。由于植被地上生物量的下降,致使放牧处理得生态系统呼吸降低。本试验是冬季放牧,经过一个夏季的休牧,植被逐渐恢复,牧草得到及时更新和生长。而且,高寒草甸在放牧条件下存在补偿性生长。所以,放牧处理的生态系统呼吸大于对照组。在三种放牧强度处理条件下,Derner等^[23]研究发现适度放牧有利于植被多样性和绿色生物量的增加,导致植被冠层呼吸增加。适度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^[24],导致土壤呼吸升高。

3.3 放牧对生态系统初级生产力的影响

对照组和不同放牧强度处理的生态系统初级生产力的生长季变化趋势总体呈单峰形状。对照组的 GPP 从5月份开始增加,在8月中旬达到最大值,说明光合能力最强。达到最大值之后, GPP 逐渐降低,10月底基本保持不变。这是由青藏高原高寒季节性气候变化特征决定的,海北站年降水量的80%集中于生长季节,期间水分充足、气温较高,水热同期,同时,夜间低温可以抑制土壤呼吸作用,非常有利于牧草营养物质的积累^[12]。

在不同放牧强度处理下,高寒草甸生长季 GPP 均值结果为中度放牧 > 轻度放牧 > 重度放牧 > 对照。可以看出,放牧处理有利于提高生态系统总初级生产力。这与 Klein 等^[19]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,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。放牧可以降低牧草枯萎、凋落损失,有利于草地植物更新、再生生长和草地高生产力的保持^[20]。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和能力造成的影响,地上植物量不能及时更新,再生生长。

参考文献:

- [1] Schneider S H. The greenhouse effect: science and policy [J]. Science, 1989, 243: 771 - 81.
- [2] Parker D, Jones P, Folland C, Bevan A. Interdecadal changes of surface temperature since the late nineteenth century [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984 - 2012) 1994, 99: 14373 - 99.
- [3] Lashof D A, Ahuja D R. Relative contributions of greenhouse gas emissions to global warming [C]. 1990.
- [4] 李英年, 孙晓敏, 赵新全, 等. 青藏高原金露梅灌丛草甸净生态系统 CO_2 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, 1.
- [5] 李英年, 赵新全, 唐艳鸿. 三江源地区人工草地的生态系统 CO_2 净交换, 总初级生产力及其影响因子 [J]. 植物生态学报, 2010, 34: 770 - 80.
- [6] 张金鑫, 曹广民. 放牧强度对高寒灌丛草甸土壤 CO_2 释速率的影响 [J]. 草地学报, 2001(9): 183 - 90.
- [7] 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 - 7.
- [8] Gu S, Tang Y, Du M, et al. 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, (1984 - 2012) 2003: 108.
- [9] 徐世晓, 赵新全, 李英年, 等. 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, 2004, 34: 118 - 24.
- [10] ZHAO L, LI Y N, G U S, et al. 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 - 82.
- [11] 徐玲玲, 张宪洲, 石培礼, 等. 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 - 52.
- [12] 徐世晓, 赵新全, 李英年, 等. 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 - 5.
- [13] 赵 亮, 李英年, 赵新全, 等. 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 - 32.
- [14] Kato T, Tang Y, Gu S, et al. 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 - 98.
- [15] 张法伟, 李英年, 李红琴, 等. 青藏高原 3 种主要植被类型的表现量子效率和最大光合速率的比较 [J]. 草地学报, 2007, 15: 442 - 8.
- [16] 周兴民. 中国嵩草草甸 [J]. 北京: 科学出版社, 2001.

- [17]汪诗平,王艳芬,李永宏,等.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):275-281.
- [18]张文丽,陈世,苗海霞,等.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.
- [19]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.
- [20]苏爱玲,张振华,汪诗平,等.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.
- [21]吴琴,曹广民,胡启武,等.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.
- [22]朱玲玲,戎郁萍,王伟光,等.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(1):5.
- [23]Derner J D, Boutton T W, Briske D D. Grazing and ecosystem carbon storage in the North American Great Plains[J]. Plant and Soil, 2006, 280:77-90.
- [24]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.

(责任编辑 李洁)