

青藏高原高寒灌丛暖季 CO₂ 地 - 气交换特征

徐世晓,赵亮,李英年,古松,赵新全* (中国科学院西北高原生物研究所,高原生物适应与进化重点实验室,青海 西宁 810001)

摘要: 利用涡度相关技术对青藏高原高寒灌丛 CO₂ 通量进行连续观测,并以 2003 年 7、8 月份为例,对高寒灌丛暖季 CO₂ 通量变化模式及其主要气候影响因子进行了分析.结果表明,7、8 月青藏高原高寒灌丛日平均净生态系统 CO₂ 交换(NEE)分别为 -7.17、-7.26g/(m²·d);最高日 NEE 分别为 -11.00、-12.09g/(m²·d).暖季高寒灌丛生态系统 NEE 日变化波动极为明显,8:00~19:00 为 CO₂ 净吸收阶段,峰值一般出现在 12:00 左右,最大值为 -1.72g/(m²·h)(7 月份)、-1.63g/(m²·h)(8 月份).19:00~次日 8:00 为 CO₂ 净释放,最大值为 0.69g/(m²·h)(7 月份)、0.86g/(m²·h)(8 月份).在主要气候因子中,光合有效辐射(PAR)与 NEE 变化呈显著正相关,但 PAR 达到 1000μmol/(m²·s)以后,随着 PAR 进一步升高,NEE 有下降趋势.就温度而言,白昼(7:00~20:00)NEE 变化与温度无显著关联,而夜间(21:00~次日 6:00)温度与 NEE 变化呈显著正相关.

关键词: 高寒灌丛; CO₂ 通量; 温度; 光合有效辐射

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2007)04-0433-04

Characteristics of carbon dioxide exchange between atmosphere and alpine shrub on the Qinghai-Tibet Plateau.

XU Shi-xiao, ZHAO Liang, LI Ying-nian, GU Song, ZHAO Xin-quan* (Key Laboratory of Adaptation and Evolution of Plateau Biota, Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China). *China Environmental Science*, 2007,27(4):433~436

Abstract: Utilizing the eddy covariance technique, CO₂ fluxes in alpine shrub of the Qinghai-Tibet Plateau was observed continuously; and taking July and August in 2003 as example, the change model of CO₂ fluxes in warm season of alpine shrub and its main climate influence factors were analyzed. The average daily net ecosystem CO₂ exchange (NEE) of alpine shrub of Qinghai-Tibet Plateau in July and August were -7.17, -7.26 g/(m²·d) respectively with the highest daily NEE of -11.00, -12.09 g/(m²·d). The daily change fluctuation of warm season alpine shrub ecosystem NEE was very obvious. 08:00~19:00 hours was the net absorption stage, the net absorption peak value appearing generally about 12:00 hour with the greatest value of -1.72 g/(m²·h) (July) and -1.63 g/(m²·h) (August), respectively. The CO₂ net release was in 19:00~8:00 next day, with the greatest values of 0.69 g/(m²·h)(July) and 0.86 g/(m²·h) (August). In main climate factors, the photosynthetically active radiation(PAR) appeared remarked positive relation with NEE change, but after PAR reached 1000 μmol/(m²·s), NEE tended to declined with farther increasing of PAR. As for temperature, NEE change was not correlated markedly with the temperature in the daytime (07:00~20:00); but in the night time (21:00~06:00 next day), the temperature and NEE change appeared marked positive relation.

Key words: alpine shrub; carbon dioxide flux; temperature; photosynthetically active radiation (PAR)

对草地生态系统碳循环过程及其影响因素的研究,是认识全球碳循环的关键之一^[1-2].青藏高原是我国天然草地分布面积最大的一个区域.受高海拔环境条件的影响,青藏高原年气候变化无明显的四季之分,呈现显著的冷、暖两季差异^[3].冷季寒冷漫长,而暖季相对气温较高、降水充足,水热同期的典型特征,非常有利于牧草营养物质合成与积累^[4].青藏高原草地生态系统不仅在区域生态系统碳动态中起着极为重要的作用,而且

对区域甚至全球水平的植被和大气界面间的 CO₂ 交换有显著贡献^[5].

高寒灌丛是由耐寒的中生或旱生灌木为优势种形成的一类植被,是青藏高原植被类型的重要组

收稿日期: 2006-12-01

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-432-1);国家自然科学基金资助项目(30500080);中国科学院“百人计划”项目(0429091211);中国科学院西部行动计划(KZCX2-XB2-06)资助

* 责任作者, 研究员, xqzhao@nwipb.ac.cn

成部分,也是当地的优势植被之一,分布于高山和高原林线之上、向高寒植被过渡的地带.我国高寒灌丛的面积约有 116400km²,居世界之最^[6].7、8 月份是青藏高原草地生态系统在整个暖季中,通过光合作用来固定 CO₂ 的主要时段.本研究以 2003 年 7、8 月份为例,对青藏高原高寒灌丛暖季 CO₂ 通量特征及其主要气候影响因素进行分析.

1 研究区域概况与方法

1.1 区域概况

CO₂ 通量观测样地设在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站(海北站)试验区,地处青藏高原东北隅,祁连山北支冷龙岭东段南麓的大通河河谷(37°37'N、101°19'E),海拔 3200m.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(11 月~次年 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℃、-14.8℃.年均降水量约 580mm,主要集中于 5~9 月,约占年总降水量的 80%^[3].主要植被类型为高寒灌丛和高寒草甸,在滩地、山地阳坡分布着嵩草草甸,在山地阴坡、偏阴坡广泛分布高寒灌丛.

1.2 研究方法

观测植被以金露梅(*Potentilla fruticosa*)为主要建群种,草本以线叶嵩草(*Kobresia capillifolia*)、矮嵩草(*Kobresia humilis*)、美丽风毛菊(*Saussurea superba*)等为主.地表通常具有较厚的苔鲜层和枯枝落叶层.对选定的青藏高原高寒灌丛 CO₂ 通量进行连续观测,并利用式(1)计算高寒灌丛 CO₂ 通量:

$$F_{CO_2} = \overline{w's'} = \frac{1}{T} \int_0^T w s dt \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w' s' \quad (1)$$

式中: F_{CO_2} 为生态系统 CO₂ 通量; w' 为空气瞬时垂直速度脉动量,用三维超声风速计(CSAT3,CSI,USA)测定; s' 为空气 CO₂ 的脉动量,用红外线分析仪(Li-7500,Li-Cor,USA)测定.上横线表示在某一时间段的平均^[7].三维超声风速计和红外线分析仪传感器高度距地面 2.20m, $T = 30\text{min}$,数据采样频率为 10Hz.同时对光合有效辐射(Li-190SB, Li-Cor,USA),土壤温度(105T,CSI,USA)等进行连

续监测.所有数据由 CR5000 数据采集器(CSI)采集并计算.用摩擦速度阈值 $u^* > 0.2\text{m/s}$ 的通量值(F_{CO_2})与 5cm 土壤温度(T_{soil})拟合得到的指数方程来插补夜间 $u^* < 0.2\text{m/s}$ 时段和缺失的通量数据:

$$F_{CO_2} = b_0 \exp(b_1 T_{soil}) \quad (2)$$

白天的缺失通量数据利用通量(F_{CO_2})与光合有效辐射(PAR)拟合得到的方程来插补:

$$F_{CO_2} = a_1 \cdot PAR / (a_2 + PAR) + a_0 \quad (3)$$

2 结果与讨论

2.1 高寒灌丛日 CO₂ 通量

根据连续观测结果,分别计算出 2003 年 7、8 月份青藏高原高寒灌丛生态系统每天净生态系统 CO₂ 交换值(NEE).由图 1 可见,7、8 月份青藏高原高寒灌丛生态系统日平均 NEE 分别为 -7.17、-7.26g/(m²·d),最大日 NEE 值分别为 -11.00、-12.09g/(m²·d).

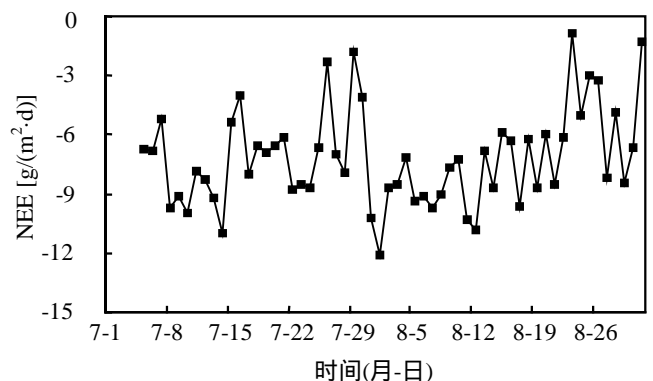


图 1 高寒灌丛日平均净生态系统 CO₂ 交换
Fig.1 Daily net ecosystem CO₂ exchange in the alpine shrub

同一地区矮嵩草草甸生态系统 2001 年 8 月 9~31 日平均净 CO₂ 吸收为 -8.8g/(m²·d),最大值为 -15.9g/(m²·d)^[5];而高寒灌丛 2003 年同时段平均净 CO₂ 吸收为 -6.5g/(m²·d),最大值为 -10.8g/(m²·d).该时段金露梅灌丛的 CO₂ 净吸收能力略低于群落初级生产力相对较高的矮嵩草草甸.7、8 月份海北地区高寒灌丛水分充足、气温较高,非常有利于牧草营养物质合成,同时,青藏高原昼夜温差大,夜间低温可以抑制土壤呼吸作用,又有利于牧草营养物质的积累^[8-9];由于较高的光能利用率以

及较低的自养和异养呼吸导致青藏高原高寒灌丛相对较高的净光合作用,从而达到较高的 CO₂ 固定能力.

2.2 CO₂ 通量时变化特征

2003 年 7、8 月份海北地区高寒灌丛 NEE 交换日变化振幅较大,白昼(08:00~19:00 时左右)为 CO₂ 吸收,最大 NEE 一般出现在 12:00 时左右,7、8 月份 NEE 最大值分别为 1.72,1.63g/(m²·h);而夜间(20:00~23:00 时、00:00~07:00 时)为 CO₂ 净释放时段,NEE 值大多稳定在 0.6~0.8g/(m²·h) (图 2).

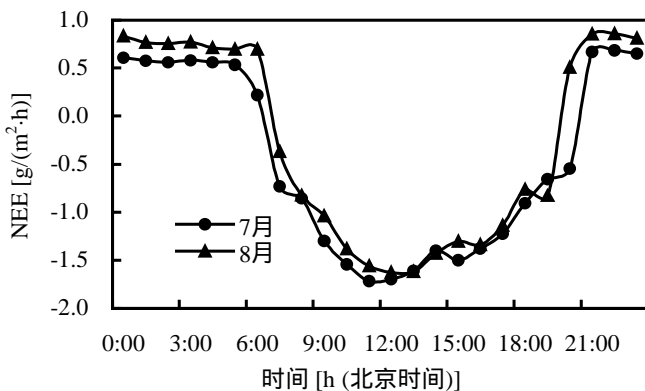


图 2 高寒灌丛净生态系统 CO₂ 交换日动态

Fig.2 Diurnal variation of net CO₂ ecosystem exchange in the alpine shrub

从 NEE 变化模式看,内蒙羊草草地 7 月 NEE 的日变化规律表现为 09:00 时以后开始逐步增加,12:00 时达到峰值,然后逐渐减小,而夜间较为稳定^[10].青藏高原高寒灌丛生长季也呈现类似的变化规律:凌晨 00:00~08:00 时,高寒灌丛生长季 NEE 稳定在 0.50g/(m²·h)左右的净释放,08:00 时以后,随着光合有效辐射的增加,灌丛 NEE 逐步从净释放(正值)转变为净吸收(负值),12:00 时左右达到最大净吸收值,之后逐步回落,19:00 时之后又从净吸收(负值)转变为净释放(正值),在 20:00~23:00 时 NEE 值又在 0.50g/(m²·h)左右波动.在生长季青藏高原白昼日照充足、温度适宜,植物光合作用吸收的 CO₂ 量明显高于土壤和植物呼吸释放的 CO₂ 量,高寒灌丛生态系统表现为显著的 CO₂ 净吸收;而夜间主要是土壤和植物呼吸释放 CO₂.

2.3 高寒灌丛 CO₂ 通量与主要气候因子

2.3.1 光合有效辐射与 CO₂ 通量

青藏高原高寒灌丛生态系统净生态系统 CO₂ 交换随着光合有效辐射(PAR)的增加而逐渐增大,通常在 PAR 为 1000 μ mol/(m²·s)时达到最大值,然后,随着 PAR 的继续升高,NEE 反而下降(图 3).其原因可能是高原地区太阳辐射强烈,土壤温度在中午左右急剧升高,涨幅最高可达 10 $^{\circ}$ C 以上,土壤呼吸也随之急剧加大,更多地抵消了光合作用所吸收的 CO₂ 量.此外,强太阳辐射可能会对植物产生光抑制,影响光合作用过程[海北地区矮嵩草草甸群落光饱和点为 800 μ mol/(m²·s)左右],从而对高寒灌丛生态系统 NEE 产生一定影响.高原地区太阳辐射强,白天植物光合作用的光合有效辐射常在 1000 μ mol/(m²·s)以上,最高可达 2000 μ mol/(m²·s),远高于一般植物光合作用的饱和光强.当植物叶片光合机构吸收的光能大于其进行光合作用的量时,便可发生光合作用的光抑制现象^[11].

2.3.2 温度与 CO₂ 通量

将 7、8 月份每天每小时的 NEE 值求平均,同时,将相应时段的 5cm 土壤温度值做同样处理;然后,就白昼(7:00~20:00)和夜间(21:00~次日 6:00)NEE 与土壤温度变化进行相关关联分析.7 月份白昼 ($P>0.5$, $R=0.3308$)NEE 与土壤温度变化的关联没有达到显著水平,而夜间($P<0.5$, $R=0.7513$)NEE 与土壤温度变化的正相关达到显著水平;同样,8 月份白昼($P>0.5$, $R=0.2120$)NEE 与土壤温度变化的关联没有达到显著水平,而夜间($P<0.01$, $R=0.9499$)NEE 与土壤温度变化的正相关达到极显著水平(图 4).暖季白昼草地生态系统 CO₂ 通量主要由通过光合作用固定 CO₂ 的吸收过程和生态系统呼吸释放 CO₂ 的过程共同构成,NEE 就是这 2 个相反的生态过程的动态平衡.白昼青藏高原气温较高($>20^{\circ}$ C),降水也多集中在 5~9 月,通过光合作用固定的 CO₂ 量明显超过呼吸排放的 CO₂ 量,高寒灌丛草地生态系统呈现为明显的 CO₂ 净吸收.相对于土壤温度而言,在这一时段影响光合作用的主导因子^[4],然而,夜间没有光合作用,草地生态系统 CO₂ 通量主要由生态系统呼吸释放 CO₂ 的过

程构成,生态系统呈现为净 CO₂ 排放;夜间生态系统呼吸主要受温度因素的影响,土壤温度升高有利于促进包括土壤呼吸在内的生态系统呼吸过程释放 CO₂.土壤温度成为影响夜间高寒灌丛生态系统 CO₂ 通量的主要因素.

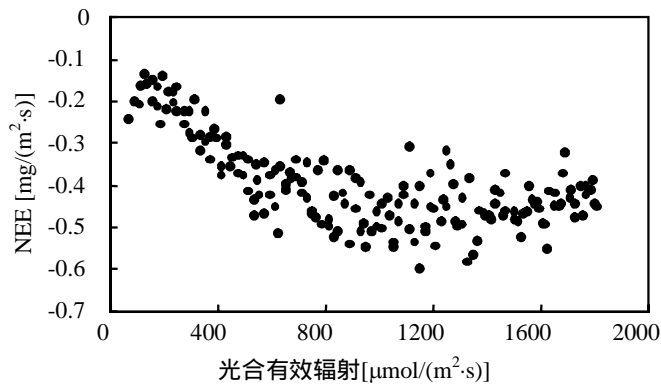


图3 高寒灌丛生态系统光合有效辐射与净生态系统 CO₂ 交换

Fig.3 Net ecosystem CO₂ exchange and photosynthetically active radiation in the alpine shrub ecosystem

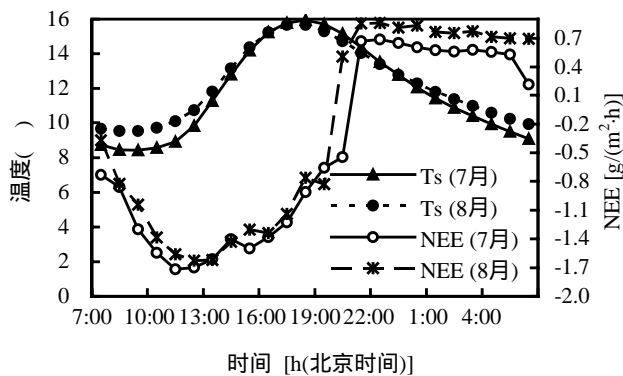


图4 高寒灌丛小时平均净生态系统 CO₂ 交换与 5cm 土壤温度

Fig.4 Diurnal variation of mean net CO₂ ecosystem exchange with 5cm soil temperature over the alpine shrub

3 结论

3.1 青藏高原高寒灌丛生态系统 2003 年 7 月和 8 月日平均 NEE 分别为 -7.17, -7.26g/(m²·d),日净 CO₂ 吸收值略低于处于同一地区的高寒草甸生态系统.

3.2 暖季青藏高原高寒灌丛生态系统白昼 CO₂ 净吸收值波动幅度较大,峰值一般出现在午时,而夜间是较为稳定的 CO₂ 净释放过程;暖季白昼

CO₂ 净吸收量明显超过夜间 CO₂ 净释放.

3.3 与温度相比,光合有效辐射更是影响暖季青藏高原高寒灌丛白昼 NEE 变化的主导气候因子,NEE 随着光合有效辐射的增加而逐渐增大;而夜间主要受土壤温度的影响.

参考文献:

- [1] 于贵瑞.全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积 [M]. 北京:气象出版社, 2003.
- [2] Flanagan L B, Wever A, Carlson P J. Seasonal and interannual variation in dioxide exchange and carbon balance in a northern temperature grassland [J]. *Global Change Biology*, 2002,8(7): 599-615.
- [3] 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(8):642-647.
- [4] Xu S X, Zhao X Q, Fu Y L, *et al.* Characterizing CO₂ fluxes for growing and non-growing seasons in a shrub ecosystem on the Qinghai-Tibet plateau [J]. *Science in China Series D: Earth Science*, 2005,48(supple.D):133-140.
- [5] Gu S, Tang Y H, Du M Y, *et al.* Short-term variation of CO₂ flux in relation to environmental controls in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan plateau [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004,108:4670-4679.
- [6] 于应文,胡自治,徐长林,等.东祁连山高寒灌丛植被类型与分布特征 [J]. *甘肃农业大学学报*, 1999,34(1):12-17.
- [7] 朱治林,孙晓敏,张仁华,等.内蒙古半干旱草原能量物质交换的微气象方法估算 [J]. *气候与环境变化研究*, 2002,7(3): 351-358.
- [8] Xu S X, Zhao X Q, Sun P, *et al.* A simulative study on effects of climate warming on nutrient contents and in vitro digestibility of herbage grown in Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Acta Botanica Sinica*, 2002,44 (11):1357-1364.
- [9] Zhao L, Li Y N, Gu 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(3):271-282.
- [10] 董云社,章 申,齐玉春,等.内蒙古典型草地 CO₂, N₂O, CH₄ 通量的同时观测及其日变化 [J]. *科学通报*, 2000,45(3):318-322.
- [11] 师生波,韩 发,李红彦.高寒草甸麻花苣和美利风毛菊的光合速率午间降低现象 [J]. *植物生理学报*, 2001,27(2):123-128.

作者简介:徐世晓(1973-),男,青海乐都县人,博士,主要从事草地生态学研究.发表论文 23 篇.